



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS

DANILO NOGUEIRA ALBERGARIA PEREIRA

*Tantos sóis, tantos mundos, tantas hipóteses: a história das teorias de
formação do sistema solar e os progressos da ciência*

CAMPINAS

2020

DANILO NOGUEIRA ALBERGARIA PEREIRA

*Tantos sóis, tantos mundos, tantas hipóteses: a história das teorias de
formação do sistema solar e os progressos da ciência*

Tese apresentada ao Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Seno Chibeni

Este trabalho corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Danilo Nogueira Albergaria Pereira e orientada pelo Prof. Dr. Silvio Seno Chibeni.

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas
Cecília Maria Jorge Nicolau - CRB 8/3387

AL14t Albergaria, Danilo, 1980-
Tantos sóis, tantos mundos, tantas hipóteses : a história das teorias de formação do sistema solar e os progressos da ciência / Danilo Nogueira Albergaria Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Silvio Seno Chibeni.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas.

1. Ciência - Filosofia. 2. Ciência - História. 3. Sistema solar. 4. Astrofísica. 5. Cosmogonia. I. Chibeni, Silvio Seno, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: So many suns, so many worlds, so many hypotheses : the history of the theories of formation of the Solar System and the progress of science

Palavras-chave em inglês:

Science - Philosophy

Science - History

Solar system

Astrophysics

Cosmogony

Área de concentração: Filosofia

Titulação: Doutor em Filosofia

Banca examinadora:

Silvio Seno Chibeni [Orientador]

Oswaldo Frota Pessoa Junior

Cibelle Celestino Silva

Valter Alnis Bezerra

Rodolfo Valentim da Costa Lima

Data de defesa: 18-03-2020

Programa de Pós-Graduação: Filosofia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-4454-8337>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3390986971402979>



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS

A Comissão Julgadora dos trabalhos de Defesa de Tese de Doutorado, composta pelos Professores Doutores a seguir descritos, em sessão pública realizada em 18 de março de 2020, considerou o candidato Danilo Nogueira Albergaria Pereira aprovado.

Prof. Dr. Silvio Seno Chibeni

Prof. Dr. Osvaldo Frota Pessoa Junior

Profa. Dra. Cibelle Celestino Silva

Prof. Dr. Valter Alnis Bezerra

Prof. Dr. Rodolfo Valentim da Costa Lima

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertações/Teses e na Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Filosofia do Instituto de Filosofia e Ciências Humanas.

À Tê de Tereza, por tornar tudo possível.

Agradecimentos

Devo muito a meu orientador, Prof. Dr. Silvio Seno Chibeni, por não me deixar desistir, por me encorajar sempre, e por me ajudar tanto a compreender as questões espinhosas que encarei nesse trabalho.

Os membros da banca de qualificação, Prof. Dr. André Koch Torres Assis e Prof. Dr. Rodolfo Valentim da Costa Lima, contribuíram com valiosas críticas e sugestões, que ajudaram muito a melhorar esse trabalho e pelas quais sou muito grato. Agradeço desde já aos membros da banca de defesa da tese, por aceitarem compô-la: Prof. Dr. Osvaldo Frota Pessoa Jr., Prof. Dr. Valter Alnis Bezerra, Profa. Dra. Cibelle Celestino Silva, e novamente ao Prof. Dr. Rodolfo Valentim.

Agradeço a todos os membros da minha família, meu pai, minha mãe, meus irmãos, Tereza e Tio, a todos os meus tios e primos, por tudo. Agradeço à Vanessa Prates por ter me acompanhado durante a maior parte de realização desse trabalho. Agradeço aos meus amigos, em especial ao Duílio, ao João e à Letícia, e ao Rica, por terem me motivado tanto, fazendo com que eu acreditasse que podia escrever algo decente. Agradeço ao Valter pelas conversas antigas sobre ciência nos churrascos e a todos os membros do Tirafaca – em especial, também, ao André, que sempre me motivou a escrever. Agradeço ao Rafa, ao Tiago, ao Big, ao Pajé, ao Guilherme e à Maíra, pelo encorajamento para terminar o trabalho. Agradeço ao Sasqua, ao Luis Fernando e ao Rodolpho, por terem tantos interesses em comum comigo e por servirem de modelo para mim, cada um à sua maneira.

A Anita Benine me ajudou de todas as maneiras possíveis e imagináveis, provavelmente muito mais do que consigo compreender, durante os estágios finais de realização desse trabalho, quando muita coisa importante foi feita. Anita aturou ouvir minhas explicações e angústias, interessantíssimas exposições sobre filosofia da ciência, me dando sempre a esperança de que o que eu estava escrevendo não era em vão. Faltou pouco para Anita virar especialista em discos protoplanetários e supernovas. Vou guardar pra sempre na memória o momento em que ela entendeu por que diachos os astrônomos falam que somos poeira de estrelas.

Por fim, agradeço tanto, tanto, aos felinos Choco Chocão, Cefreida e Marechal Ronron, por me amarem e deixarem-se amar.

[N]o scientist who has lived through the last thirty years is likely to be too dogmatic either as to the future course of the stream or as to the direction in which reality lies: he knows from his own experience how the river not only for ever broadens but also repeatedly winds, and, after many disappointments, he has given up thinking at every turn that he is at last in the presence of the murmurs and scents of the infinite sea.

James Jeans (1877-1946), *The Mysterious Universe* (1930)

Os temores, as ansiedades, as angústias, os desânimos não são prerrogativas dos poetas. Frequentemente atingem também os cultores das ciências exatas e naturais.

Paolo Rossi (1923-2013), *Naufraágios Sem Espectador* (1996)

Resumo

As teorias de formação do sistema solar têm uma longa história. A partir de Descartes, passando por Kant e Laplace, vários filósofos naturais e cientistas propuseram teorias que partiam de um estado inicial primitivo e chegavam às características do sistema solar atualmente observadas. Na segunda metade do século XX, o problema passa a ser investigado por uma crescente comunidade científica especializada. Um consenso se formou no final do século XX, tornando-se ainda mais coeso no século XXI, em torno da concepção de que os planetas são subprodutos da formação do Sol e de que o processo de formação planetária se dá num disco circunstelar (protoplanetário), uma consequência natural da formação de estrelas. No entanto, apesar de muitos avanços na solução de problemas específicos, a área ainda não chegou a uma teoria consistente sobre a formação de sistemas planetários. Traço uma história desse campo de investigação científica para refletir sobre seu desenvolvimento. Essas reflexões são propostas à luz das discussões filosóficas sobre o progresso científico (se existe e, se sim, de que natureza é), das mais influentes metateorias da filosofia da ciência (como as de Thomas Kuhn, Imre Lakatos e Larry Laudan) e das contribuições filosóficas de Alan Chalmers e Susan Haack. Apesar das idas e vindas, becos-sem-saída e impermanências teóricas que marcam essa história, é possível identificar pistas de progresso científico no campo das teorias de formação do sistema solar a partir das últimas décadas do século XX. Essa avaliação do progresso científico na área é defendida em contraposição crítica à visão cética proposta em meados da década de 1990 pelo principal historiador do tema, Stephen G. Brush.

Palavras-chave: Ciência - Filosofia; Ciência - História; Sistema solar; Astrofísica; Cosmogonia.

Abstract

Theories on the Solar System formation have a long, centuries-old history. Starting with Descartes, going on to the works of Kant and Laplace, several natural philosophers and scientists have proposed theories that tried to explain the origin of the system from an initial primordial state moving forward to the features currently observed. In the second half of the 20th century the question began to be inquired by a growing specialized scientific community. A scientific consensus began to be formed in the last decades of this period, becoming even more cohesive in the 21st century, around the conception that planets are by-products of the formation of the Sun and that the process of planetary formation takes place in a circumstellar disc (protoplanetary), a natural consequence of the formation of stars. However, despite many advances in solving specific problems, the area has not yet reached a consistent theory about the formation of planetary systems. I draw philosophical reflections on the historical development of this field of scientific inquiry. Relevant philosophical takings on the problem of scientific progress are considered, mainly the classical metatheoretical proposals of Thomas Kuhn, Imre Lakatos and Larry Laudan, as well as the more recent contributions of Alan Chalmers and Susan Haack. Although the history of cosmogony is filled with theoretical dead-ends and ruptures, clues of scientific progress can be identified, especially on the last decades of the 20th century. This assessment of scientific progress in the area is formulated in opposition to the skeptical view proposed in the mid-1990s by the main historian of the topic, Stephen G. Brush.

Keywords: Science - Philosophy; Science - History; Solar System; Astrophysics; Cosmogony.

Sumário

Capítulo 1. Introdução	12
Capítulo 2. Uma questão filosófica: a ciência progride?	26
2.1. A ideia de progresso.....	26
2.2. O cumulacionismo otimista.....	29
2.3. Uma crítica pioneira e influente: Thomas Kuhn em <i>The Structure of Scientific Revolutions</i>	32
2.4. Esticando a corda kuhniana: o relativismo epistemológico e o Kuhn tardio	36
2.5. Protestos de moderados <i>down to earth</i>	45
2.5.1. Larry Laudan.....	45
2.5.2. Alan Chalmers	50
2.5.3. Susan Haack.....	53
Capítulo 3. Um exame da história das teorias sobre a formação do sistema solar	58
3.1. A cosmogonia cartesiana	63
3.2. A hipótese nebular	67
3.2.1. A cosmogonia de Kant.....	67
3.2.2. A hipótese de Laplace.....	73
3.2.3. O reinado atribulado da hipótese nebular.....	83
3.3. As hipóteses do encontro estelar.....	91
3.3.1. Precursores do encontro estelar	92
3.3.2. A hipótese planetesimal de Chamberlin e Moulton	94
3.3.3. A teoria de maré de Jeans e Jeffreys.....	102
3.3.4. O declínio das hipóteses do encontro estelar	107
3.4. Rumo a um ténue consenso: o período de transição.....	111
3.4.1. Freio magnético e captura de nebulosas	114
3.4.2. O início de uma convergência teórica	120
3.4.3. O gatilho de supernova.....	125
3.4.4. O <i>framework</i> de Safronov.....	127
3.4.5. Um consenso no dissenso.....	129

3.5.	O cenário teórico atual	133
3.5.1.	O problema dos gigantes	135
3.5.2.	Migração planetária: <i>Nice Model</i> e <i>Grand Tack</i>	139
Capítulo 4.	Zonas de acreção: o afunilamento das possibilidades teóricas	146
4.1.	Delineando condições de contorno	146
4.2.	Nebulosas e formação de estrelas	154
4.3.	Discos protoplanetários	162
4.4.	Planetas extrassolares.....	174
4.5.	Simulações computacionais.....	180
Capítulo 5.	Entre cataclismos e acreções, as planetogonias progrediram?.....	183
5.1.	Uma rota para o progresso	183
5.2.	O pêndulo de Brush	188
5.2.1.	Problemas gerados pela dicotomia monismo-dualismo.....	190
5.2.2.	Dissipação de um (pseudo)problema.....	198
5.3.	Cataclismos: as mudanças teóricas da primeira metade do século XX	203
5.3.1.	O caso e as metateorias de Kuhn e Lakatos	204
5.3.2.	O caso e a metateoria de Laudan	211
5.4.	Examinando o período de transição, da década de 1940 à de 1980.....	214
5.4.1.	Especialização, convergência teórica e pluralismo	216
5.5.	Acreção descontrolada: análise das últimas três décadas	224
5.5.1.	O estado atual da área	224
5.5.2.	Um progresso: definir e refinar problemas	229
Capítulo 6.	Conclusões	235
	Referências bibliográficas.....	247

Capítulo 1. Introdução

Quando o céu não passava dessa abóbada azul em que as estrelas estavam cravadas, o universo me parecia pequeno e estreito; sentia-me como que oprimido. Agora que demos extensão e profundidade infinitamente maiores a essa abóbada, dividindo-a em milhares e milhares de turbilhões, parece-me que respiro com mais liberdade, estou numa esfera maior e certamente o universo possui uma outra grandiosidade. A natureza não poupou nada ao criá-lo; gerou uma abundância de riquezas plenamente digna dela. Não há coisa mais bela de se imaginar do que essa quantidade prodigiosa de turbilhões, cujo centro é ocupado por um Sol que faz os planetas girarem a seu redor. Os habitantes de um planeta de um desses infinitos turbilhões veem por todos os lados os Sóis dos turbilhões que os cercam; mas não conseguem ver seus planetas, pois estes, tendo apenas uma luz débil, tomada de empréstimo a seu respectivo Sol, não a impelem para além de seu mundo.

Bernard de Fontenelle (1657-1757), *Diálogos sobre a Pluralidade dos Mundos* (1686)

O grande impacto da Revolução Copernicana na concepção do lugar da humanidade na natureza é o da descentralização: deixamos de ocupar o centro do Cosmos – um mundo fechado, cujos movimentos dos astros são efeitos de movimentos de esferas concêntricas, delimitadas pela última delas, a das estrelas fixas – e passamos a habitar um dentre vários planetas na órbita do Sol num universo infinito. Numa radical reconfiguração conceitual, os planetas deixaram de ser astros errantes e se tornaram *mundos*. Mundos, cada um com sua própria superfície, seu próprio céu, seu próprio ambiente. Quem saberia quais seriam as diferenças e as semelhanças que os outros planetas guardariam em relação à Terra? Seriam habitados? Habitáveis? Teriam vida? E, como supomos sermos nós, vida inteligente?

Outras perguntas rapidamente surgiriam. Se a Terra gira em torno do Sol, então deveríamos observar um efeito de paralaxe nas chamadas *estrelas fixas*. Mas não se observava

paralaxe alguma no tempo de Galileu. Ou mesmo no de Newton. Ou no de Herschel. A observação de paralaxe estelar que evidencia o movimento de translação da Terra veio apenas em 1838, quando ninguém mais exigia o suporte de evidências empíricas para aceitar o heliocentrismo. Mas durante a Revolução Científica, quando ainda era utilizada pelos aristotélicos como recurso retórico contra o copernicanismo, a ausência de paralaxe abria também uma rota de especulação das mais profundas: se a Terra realmente gira em torno do Sol e se não observamos paralaxe – assim poderia raciocinar o investigador do século XVII – então as estrelas devem se situar a distâncias impossivelmente grandes. E se seu brilho é visível a distâncias dessa magnitude, então devem ser outros objetos como o Sol. E se o Sol é uma estrela, e as estrelas são sóis, por que haveria de ter um sistema planetário ao redor apenas do Sol e não também em volta dos milhares de seus semelhantes? Existiriam outros sistemas planetários? O copernicanismo não apenas impulsionou as especulações sobre o novo *sistema solar*, como expandiu enormemente o escopo de possibilidades sobre a pluralidade dos mundos.

Alguns pensadores se entusiasmaram com a avenida de exploração filosófica da pluralidade dos mundos, como Giordano Bruno, para quem não apenas os sistemas planetários são infinitos, como também devem ser habitados – tudo o que, para ele, aumentava a glória de Deus. Outros, como Johannes Kepler, sentiam-se “perdidos nessa imensidão, à qual são negados limites e centro, à qual é negado por conseguinte qualquer lugar determinado” (KEPLER apud ROSSI, 2000, p. 56). Por isso o autor das três leis do movimento planetário, um dos grandes artífices do sucesso do heliocentrismo, sustenta com não pouca dose de neoplatonismo que “este sistema de planetas, num dos quais nos encontramos nós, homens, encontra-se no lugar principal do universo, ao redor do coração do universo, que é justamente o Sol”, e que nós “nos encontramos naquele globo que se destina inteiramente à criatura racional que é entre todas a mais importante e a mais nobre entre as corpóreas” (ibid.). Kepler foi decisivo para a vitória copernicana na disputa das cosmologias, mas os palpites corajosos de Bruno sobre a pluralidade dos sistemas planetários ecoam atualmente com muito mais força nas ciências naturais do que os temores existenciais keplerianos associados à possibilidade de nossa insignificância cósmica.

A ciência das duas primeiras décadas do século XXI tem produzido um crescimento vertiginoso no número de descobertas de *planetas extrassolares*, incluindo alguns *sistemas planetários*, por meio de diferentes métodos e instrumentos de observação. Tornaram-se corriqueiros no noticiário de ciências os relatos de publicação de novos estudos

que apontam para a existência de planetas de natureza muito diversificada, de “Júpiteres quentes”, “sub-Netunos” e “super-Terras” a planetas rochosos em órbita considerada habitável, ao redor de estrelas de natureza também bastante diversa (“frias” anãs vermelhas, estrelas de sequência principal como o Sol, e até mesmo objetos extremos como os pulsares). O panorama apontado pelo conjunto do que é atualmente produzido nas ciências planetárias e astrofísicas é o de um universo em que sistemas planetários são ubíquos, subprodutos inevitáveis do próprio processo de formação de estrelas (PERRYMAN, 2011, p. 217).

O avanço espetacular da astronomia planetária na segunda metade do século XX – em boa parte graças ao rápido progresso da exploração espacial a partir de Sputnik – propiciou à comunidade científica internacional um aumento exponencial da quantidade e da qualidade de dados obtidos sobre o sistema solar. Especialmente em se comparando com o que era conhecido há seis décadas (ou seja, no início da era espacial), o conhecimento que as ciências produziram sobre planetas, luas, cometas, asteroides, o próprio Sol e as incontáveis outras estrelas são ordens de magnitude mais abrangente e mais preciso do que o obtido durante toda a história anterior da tentativa humana de conhecer os fenômenos celestes.

O cenário atual é, portanto, o de uma comunidade científica munida de uma crescente quantidade de dados muito detalhados sobre os diferentes objetos do sistema solar e bastante convicta de que sistemas planetários não são raros, pelo contrário: são, muito provavelmente, um lugar comum no universo.

Ao passo em que bússola da ciência apontou como norte a rejeição da ideia de que o sistema solar é um único ou raríssimo sistema planetário do universo, e em que nosso conhecimento do sistema solar aumentou num ritmo acelerado desde o lançamento das primeiras sondas espaciais, os avanços em direção a uma teoria que explique satisfatoriamente todos os detalhes da formação do sistema solar (para não mencionar sistemas planetários de maneira geral) vêm sendo repletos de percalços, apesar de uma história que percorre mais de três séculos.

René Descartes foi o primeiro pensador de que se tem notícia a ter formulado uma explicação naturalista, dentro da cosmologia copernicana, para a origem do sistema solar. A cosmogonia¹ cartesiana concebia cada estrela como o centro de um vórtice (o Sol sendo uma delas) e os planetas e luas como objetos que inicialmente foram centros de outros vórtices destruídos, tornados parte do vórtice solar. Apesar da influência de Descartes, cosmogonias naturalistas não foram abundantes no século XVII. A decadência da física cartesiana e o sucesso da mecânica newtoniana a partir do fim do século testemunharam o filósofo natural mais influente da história, Newton, procurando deixar a explicação da origem do sistema solar a cargo da teologia.

Tentativas de explicações naturalistas para a origem do sistema solar começaram a surgir dentro do *framework* newtoniano apenas em meados do século XVIII. Filósofos como Swedenborg e Kant propuseram a imagem de uma nuvem de material primordial em colapso, com o Sol concentrando a maior parte da matéria no centro do sistema em rotação, e com os planetas surgindo em órbitas concêntricas praticamente num mesmo plano. Mas Swedenborg mobilizou argumentos mais próximos dos vórtices cartesianos do que da gravitação universal, enquanto Kant mesclou a força de atração gravitacional com o que chamou de forças de repulsão. Apenas no final do século XVIII surgiria a primeira teoria sobre a formação do sistema solar inteiramente baseada na mecânica newtoniana: a *hipótese nebular*, proposta por Laplace.

Embora não tenha lido a obra em que Kant elabora a cosmogonia de uma nuvem em colapso e rotação como origem do sistema solar, Laplace mobilizou ideias cosmogônicas suficientemente parecidas com as do filósofo de Königsberg para que sua teoria fosse posteriormente citada por muitos cientistas do século XX como “a hipótese de Kant-Laplace”.

¹ Um esclarecimento terminológico: literalmente, o termo *cosmogonia* se refere à explicação sobre a origem do mundo ou à própria origem do mundo. Em quase todas as ocasiões, utilizarei o termo como sinônimo de teoria sobre a origem do sistema solar. Os sentidos desse termo, na história que apresentarei, é revelador do próprio caminho de relevância científica e filosófica das explicações para a formação do nosso sistema planetário. No caso de Descartes e Kant, o termo se aplica em sua primeira acepção, pois suas teorias sobre a origem do sistema solar estavam inseridas num quadro mais amplo de origem cósmica. Laplace não tinha pretensões cosmológicas explícitas, nem na elaboração de sua mecânica celeste, nem na exposição de sua hipótese de formação do sistema solar. Mesmo assim, o matemático se referiu a sua hipótese como uma cosmogonia, e o termo segue sendo utilizado para qualquer teoria sobre a origem do sistema solar, embora muito menos comumente. Nesse período, passou a haver uma confusão entre cosmogonias na acepção de origem do sistema solar com teorias cosmogônicas na primeira acepção do termo, pois é um momento em que a cosmologia já vinha se constituído como um campo de estudos especializado e, com ela, surgiram cosmogonias como a teoria do *Big Bang*. Por isso, acompanho uma diferenciação utilizada por um punhado de pesquisadores mais recentes, utilizando o neologismo *planetogonia* para focar na formação do sistema planetário e não na origem do Cosmos quando me refiro às pesquisas das últimas sete décadas ou quando me refiro especificamente à formação de planetas.

Laplace postulou uma mesma “causa primordial” para a origem do Sol e dos planetas: uma nuvem de gás colapsa gravitacionalmente, entra em rotação e forma um disco de matéria do qual, aos poucos, desprendem-se anéis nas órbitas em que se formariam os planetas.

O nome pelo qual a teoria se tornaria conhecida no século XIX é fruto de uma associação entre a interpretação de Herschel sobre as nebulosas celestes como diferentes estágios de formação de estrelas e planetas, e a nuvem de gás primordial de Laplace. Ambos foram gigantes da ciência do final do século XVIII e começo do XIX. Herschel deu as maiores contribuições ao desenvolvimento da astronomia observacional do período. Laplace foi o responsável por elaborar uma dinâmica celeste newtoniana que demonstrava a estabilidade do sistema solar, algo que teve implicações filosóficas e teológicas no período.

Seja por sua capacidade de explicação de uma boa parte dos detalhes e regularidades do sistema solar, seja pelo peso dos nomes aos quais estava associada, a *hipótese nebular* se tornou a cosmogonia hegemônica na cultura científica do século XIX, emoldurando o *zeitgeist* evolucionista do período. Isso não quer dizer que não foram encontrados problemas capazes de abalar a confiança dos cientistas do período na teoria. O principal problema conhecido no século XIX era o da distribuição do momento angular no sistema. Se a origem do Sol e dos planetas tivesse sido uma mesma nuvem de gás primordial em contração e rotação, a lei de conservação do momento angular exigia que o Sol, o objeto que concentra quase toda a massa no centro do sistema, deveria ter uma velocidade de rotação muito maior do que a observada. Ao contrário disso, a maior concentração de momento angular do sistema está em Júpiter, não no Sol.

O paradoxo do momento angular foi um dos principais argumentos utilizados por um ataque coordenado à hipótese nebular na virada do século XIX para o XX, realizado por dois cientistas estadunidenses, o geólogo Thomas Chrowder Chamberlin e o físico Forest Ray Moulton, em pesquisas conjuntas. Além das críticas bem fundamentadas à centenária teoria de Laplace, em 1905 Chamberlin e Moulton propuseram uma nova teoria, batizada de *hipótese planetesimal*, em que o nosso sistema planetário seria o resultado de um improvável encontro estelar. Nessa teoria, uma estrela teria passado muito perto Sol e o resultado de sua interação gravitacional foi a ejeção de material solar. Condensado em órbitas ao seu redor, esse material teria se solidificado e formado os planetas por meio de colisões de pequenos objetos chamados de planetesimais. Uma década depois, dois pesquisadores britânicos, o geólogo e astrônomo Harold Jeffreys e o físico James Jeans, em separado, utilizaram a mesma

ideia de encontro estelar para construir uma teoria um pouco diferente, a *teoria de maré (tidal theory)*, em que os planetas se formam a partir de material solar em estado gasoso.

As novas teorias foram bem recebidas pela comunidade científica das primeiras décadas do século XX, cada uma exercendo sua hegemonia de um dos lados do Atlântico. Isso durou até meados da década de 1930, quando estudos de Henry Norris Russell e Lyman Spitzer apontaram problemas que inviabilizaram essas teorias: o encontro estelar tinha baixíssima probabilidade de acontecer e o material arrancado do Sol teria se dissipado antes de ser capaz de dar origem a um sistema planetário. A partir da década de 1940, surgiram inovações teóricas, como os conceitos de freio magnético e disco viscoso de acreção, que forneceram hipóteses para a transferência de momento angular entre o Sol e o disco protoplanetário. Isso permitiu o que é geralmente interpretado como um *revival* da hipótese nebulosa na segunda metade do século XX.

O período que vai de 1950 às primeiras descobertas de exoplanetas na década de 1990 mostrou-se fértil para a produção de diferentes hipóteses sobre a origem do sistema solar, que tentavam dar conta dos muitos detalhes conhecidos sobre o sistema. A grande maioria dessas alternativas, no entanto, trabalhavam com a ideia de que os planetas são subprodutos da formação do Sol e devem ter tido origem num disco protoplanetário ao redor da estrela, daí a ideia de *revival* da teoria de Laplace. Mas há tantas e tão profundas diferenças entre as teorias desse período e a hipótese nebulosa que parece não fazer muito sentido falar em ressurgimento da hipótese nebulosa. No entanto, é o que acontece frequentemente com materiais didáticos e de divulgação científica: a “hipótese de Kant-Laplace” com pequenas modificações é geralmente apresentada como explicação *standard* da formação do sistema solar, numa espécie de apagamento de parte importante da história e da complexidade desse campo de estudos.

O vertiginoso avanço da exploração planetária produziu uma montanha de novos dados empíricos, pequenos detalhes e grandes estranhezas, que as teorizações teriam de explicar. Esse período também testemunha o surgimento de uma comunidade científica dedicada à origem do sistema solar, algo que praticamente não existia. Até então, alguns cientistas procuraram elaborar hipóteses sobre a origem do sistema solar, mas não havia especialização nessa área, nem uma comunidade especificamente dedicada ao tema. O primeiro nódulo de comunidade científica voltada para a solução do problema foi a chamada *escola soviética de cosmogonia*, da qual surgiu o modelo de Viktor Safronov no final da década de 1960. Esse modelo, baseado num disco de acreção de planetesimais e gás, é

comumente conhecido como *solar nebula model* ou *solar nebula theory*, e acabou se tornando a partir das décadas de 1970 e 80 a principal explicação para a origem dos planetas rochosos. Mas há problemas para explicar a origem dos gigantes gasosos com essa teoria e adaptações continuam sendo propostas. Algumas dessas adaptações desembocaram nos atuais modelos de migração planetária no início da história do sistema solar.

Hoje, está bem alicerçada a convicção em torno da alta probabilidade de que sistemas planetários são comuns pelo universo afora², além do pressuposto filosófico (que é o de todas as ciências naturais) segundo o qual deve haver uma explicação naturalista para a origem desses sistemas planetários, incluindo o sistema solar. Para além disso, e descrevendo a situação em termos mais tecnicamente afeitos à filosofia da ciência, é muito difícil discernir um *paradigma* bem estabelecido no campo das teorias de formação do sistema solar. Contudo, apesar da pluralidade de hipóteses sobre os mecanismos envolvidos na formação do sistema solar, o campo apresenta um consenso em torno da concepção de que os planetas são subprodutos da formação do Sol. Mas este consenso parece estar menos baseado numa única teoria *aceita* pelos cientistas da própria área, e mais na sustentação dada pela rede de teorias e pelo *conhecimento de fundo* que envolvem esse campo de pesquisa atualmente: as teorias astrofísicas de estrutura, evolução e formação estelar; o conhecimento sobre a estrutura e a composição química de nebulosas moleculares, zonas de formação de estrelas; o conhecimento da composição química de meteoritos; e principalmente, o conhecimento da variedade de discos protoplanetários e de outros sistemas planetários.

Além de uma teoria que dê conta de abarcar e explicar todas as características do sistema solar (sem mencionar os diversificados sistemas extrassolares recém-descobertos), ainda não foram produzidas respostas conclusivas para perguntas que possuem consequências filosóficas profundas: com que frequência o processo de formação estelar produz planetas, especialmente planetas rochosos? Com que frequência os sistemas planetários apresentam planetas na chamada zona habitável de uma estrela? Com que frequência a água se faz presente na superfície um planeta em zona habitável? Essa última questão está relacionada a outra mais antiga, a que questiona as origens da água no planeta Terra e em outros objetos do sistema solar, ligando-se ainda a outras: qual a composição química dos diferentes sistemas

² Ou pelo menos assim deve ocorrer em nossa galáxia, embora não haja razões para acreditar que o processo de formação estelar e planetária seja completamente diferente em outras galáxias.

planetários? A composição química do sistema solar é típica ou rara entre os sistemas planetários?

Dependendo da resposta a cada uma dessas questões (e muitas outras derivadas da biologia), o panorama cósmico informado pela ciência será mais ou menos condutivo à prevalência da vida no universo, conforme a conhecemos. Quaisquer que sejam os resultados do progresso das pesquisas científicas da área – se o de um universo abarrotado de planetas habitáveis com água líquida em sua superfície e atmosfera, ou de um universo em que planetas com características fundamentais parecidas com as da Terra são atípicos e raros – eles servirão à extração de significados sobre a vida no universo e sobre o lugar da humanidade no oceano cósmico.

As perguntas ligadas ao amplo campo de pesquisa das ciências planetárias e astrofísicas são, portanto, parte importante da busca milenar da compreensão do lugar da vida e do próprio ser humano no universo. Os resultados das pesquisas científicas relacionadas a essas temáticas ajudam a moldar o panorama cósmico e o *conhecimento de fundo* em que e com que são realizadas algumas prospecções filosóficas acerca do que significa estar vivo, existir, num universo com essas ou aquelas características. O panorama cósmico científico pode informar reflexões desse gênero, ser incorporado em suas formulações, indicar possibilidades e interdições. Reflexões que se queiram filosoficamente relevantes não poderão se mostrar indiferentes às pesquisas empreendidas pelas ciências planetárias e astrofísicas e aos resultados que deverão ser obtidos por elas ainda neste século.

*

O interesse filosófico das teorias de formação do sistema solar não se limita a questões tão amplas e gerais como o lugar da humanidade no universo. Indagações sobre se a ciência progride ou não, ou sobre como o progresso científico ocorre e quais são as características distintivas desse progresso em relação a outras áreas de criação humana, são problemas de ordem filosófica que geralmente não preocupam muito os cientistas e o público geral. Nas discussões sobre políticas científicas e sobre o papel do conhecimento tecnocientífico desempenhado no crescimento econômico dos modernos estados-nação, há uma aceitação tácita de que as ciências progridem e são motores do que se convencionou chamar de desenvolvimento humano. O financiamento público e privado de pesquisas

científicas e a eficiência da produção de resultados tecnocientíficos em função dos recursos investidos são alguns dos principais fatores de competição entre os países industrializados. É inquestionável que a eficiência em produção de tecnociência gera vantagens competitivas, tanto a atores privados quanto públicos. Isso ocorre em parte porque, ao longo da história dos últimos quatro séculos, pelo menos, as ciências melhoraram sua capacidade de municiar os seres humanos com aparatos teóricos e empíricos que permitem um controle sem precedentes sobre o mundo natural e a predição razoavelmente confiável de uma grande variedade de fenômenos.

No caso de ciências como a astrofísica, a astronomia planetária e áreas correlatas, um rápido exame da história dos últimos dois séculos indica um crescimento acelerado da capacidade de produção de dados empíricos e da compreensão teórica sobre parcelas da natureza com as quais cientistas como Laplace e Herschel só podiam sonhar.

A astronomia planetária, uma área inaugurada na metade do século XX, progrediu espetacularmente ao longo das sete décadas de sua existência. Por exemplo: sabemos que há água em crateras da Lua, que já houve água líquida na superfície marciana, e temos informações sobre a composição química do material em superfícies de luas dos gigantes gasosos. A astrofísica, que se desenvolveu a partir do começo do século XX, construiu um corpo de conhecimento muito detalhado da estrutura e evolução de estrelas e de nuvens moleculares interestelares. Antes do surgimento dessa área específica, não havia conhecimento suficiente sequer para determinar o estado da matéria no Sol e seu mecanismo de geração de energia. Não havia conhecimento suficiente para decidir se as chamadas nebulosas espirais eram objetos intragalácticos ou outras galáxias. A astronomia atual conta com telescópios espaciais e terrestres que fornecem dados sobre galáxias há bilhões de anos-luz de distância, fornecem a possibilidade de mapear em detalhe sem precedentes a Via Láctea e galáxias relativamente próximas, além de permitirem a descoberta de milhares de planetas extrassolares. Enfim, são facilmente verificáveis os muitos e grandes avanços nessas áreas.

Há um entrelaçamento bastante profundo de teorias físicas e dados empíricos que dá legitimidade à afirmação de que sabemos mais e em maior detalhe sobre os objetos celestes do que há cem, duzentos ou trezentos anos atrás. Essa constatação, não elimina o caráter *problemático* do progresso científico. Mesmo um breve exame da história da ciência revela o fato de que grande parte das verdades estabelecidas no passado acabaram se revelando falsas. Por mais escandalosas que possam parecer numa era de veículos remotamente controlados em

Marte, questões sobre se a ciência é capaz ou não de progredir são objeto de análise filosófica há muito tempo e ocuparam o primeiro plano das discussões filosóficas durante o século XX. Inequivocamente, as ciências naturais avançaram em direção a uma maior complexidade das teorias, ao maior entrelaçamento das redes de teorias de diferentes áreas, ao aumento do nível de detalhamento das observações e da capacidade de prospecção da natureza com o uso da tecnologia. Apesar disso, o progresso científico não passou a ser trivial ou óbvio, algo que filosoficamente pode ser resolvido pela simples constatação de que há, no momento em que escrevo essas linhas num computador mundialmente interligado a outros, uma sonda robótica na superfície de um asteroide coletando amostras que serão trazidas para a Terra. Ao contrário, é possível dizer que o progresso científico se tornou um problema ainda mais complicado, tanto por conta da complexidade da tecnociência contemporânea, quanto pelo próprio desenvolvimento da filosofia da ciência nos últimos cem anos.

Após o século XIX – um período em que o *zeitgeist* ocidental apontou para um consenso tácito de aceitação não-problemática do progresso da ciência, mesmo tendo produzido alguns pensadores que se debruçaram sobre o problema, como William Whewell e Charles Sanders Peirce –, o assunto passou a ser objeto de análise e investigação no novo campo especializado da filosofia da ciência em meados do século passado, principalmente a partir de obras pioneiras como *A Lógica da Descoberta Científica*, de Karl Popper. Na segunda metade do século XX, passaram a surgir propostas de reavaliação e ressignificação do progresso científico em obras seminais da filosofia da ciência, como *A Estrutura das Revoluções Científicas* de Thomas Kuhn e *Contra o Método* de Paul Feyerabend, desembocando a partir da década de 1970 em apropriações radicais dessas teses. Essas apropriações resultaram em posicionamentos céticos quanto ao progresso da ciência, numa espécie de acordo tácito em torno do relativismo epistemológico na importante área da sociologia da ciência.

Atualmente, poucos assuntos são discutidos em meio a tanto ruído, por meio de linguagens tão díspares e com tamanha diversidade de referenciais quanto a questão de como e se a ciência progride. As teorias de formação do sistema solar fornecem farto material para que sejam consideradas questões especificamente relacionadas à compreensão de como as próprias ciências naturais funcionam, se e como elas compreendem o mundo ou produzem teorias inteligíveis sobre o mundo, se e como elas progridem. Em meio à cacofonia dos debates sobre a natureza do progresso científico, este trabalho propõe estabelecer com alguma razoabilidade o seguinte ponto: apesar das idas e vindas, becos-sem-saída e impermanências

teóricas acerca do problema da formação do sistema solar e de outros sistemas planetários, *é possível afirmar que a ciência progrediu significativamente em direção a uma imagem coerente sobre a formação de planetas ao redor de estrelas*. A partir da metade do século XX, mas especialmente nas quatro décadas desde 1980, o conhecimento sobre a formação do sistema solar se constituiu conjuntamente a um aumento na capacidade de observações astronômicas de outros sistemas planetários e de discos protoplanetários, além da sempre crescente prospecção robótica de planetas, luas e asteroides do nosso sistema. Ocorreu uma articulação cada vez maior entre o conhecimento sobre a formação de planetas, o suporte empírico sobre planetas extrassolares e discos circunstelares, e o corpo teórico sobre nebulosas moleculares e formação de estrelas. Essa articulação permitiu que a comunidade científica fizesse racionalmente a importante escolha de desenvolver hipóteses e teorias emolduradas pela concepção central de que os planetas são subprodutos da formação estelar, surgindo a partir de discos de gás e poeira que se formam naturalmente ao redor de estrelas nascentes. Foi possível que uma comunidade científica especializada no tema da formação de sistemas planetários se constituísse e que seus praticantes pudessem se dedicar a problemas específicos dentro de um *framework* tacitamente aceito. Isso ocorreu ao mesmo tempo em que teorias como as do encontro estelar (e outras que concebem a formação de sistemas planetários como resultado de acontecimentos fortuitos e raros) são consideradas extravagantes demais para que sejam desenvolvidas sistematicamente pela comunidade científica. Tudo isso constitui um progresso científico nada negligenciável.

Essas afirmações podem parecer triviais, mas até o começo da década de 1990 a história motivou interpretações céticas acerca do progresso científico da área que investiga a formação do sistema solar. O historiador da ciência Stephen G. Brush é o autor de uma obra (*A History of Modern Planetary Physics*, 3 vols.) dedicada a analisar historicamente as diversas teorias sobre a formação do sistema solar, assim como sobre a origem da Terra e da Lua, desde a concepção da hipótese nebular de Laplace até a década de 1980. Nessa obra, Brush adota uma categorização das cosmogonias baseada numa distinção entre monismo e dualismo. Trata-se de uma categorização proposta ainda no início do século XX. Em linhas gerais, monistas são as teorias que postulam um processo de evolução de um estado inicial nebular em direção ao atual sistema solar sem interferência externa; *dualistas* são as teorias que postulam a interferência de uma entidade externa na formação dos planetas independentemente da formação do Sol – isto é, nessas teorias a origem do Sol e a formação dos planetas não estão relacionadas. Um argumento central desse trabalho é o de que a

dicotomia monismo-dualismo constitui um dos mais importantes fatores para que Brush tenha representado história das teorias sobre a origem do sistema solar de maneira inadequada (seção 5.2.). Para o historiador, a área simplesmente não havia progredido até o fim da década de 1980 na direção de um consenso sobre se os planetas são subprodutos da formação do Sol. Brush recorre à imagem de um movimento pendular com período cada vez menor de oscilação para representar a história das teorias de formação do sistema solar. Neste trabalho, mostro que, se não nos aferrarmos a uma categorização anacrônica ou a-histórica – como a dicotomia monismo-dualismo – a percepção de movimento pendular se dissolve e podemos encarar esse período da história como um caminho de construção do que chamo de “consenso no dissenso”. Em suma, ao adotar uma categorização rígida acriticamente para conceber o cenário que se forma a partir das décadas de 1970 e 80, o principal historiador do tema produziu uma imagem enganosa de completa falta de progresso na área das teorias de formação do sistema solar nesse período.

*

Quanto à estrutura do texto, no capítulo 2 exponho o problema do progresso científico na filosofia da ciência. Nessa exposição, darei ênfase à influência exercida pela obra de Thomas Kuhn nos debates acerca da natureza do conhecimento científico. Analiso também como Kuhn ajudou a abrir uma via filosófica para o relativismo epistemológico das últimas décadas do século XX. Termino esse capítulo examinando as ideias de três filósofos pós-kuhnianos que questionam, cada um à sua maneira, a visão epistemologicamente relativista inspirada pela obra de Kuhn.

No capítulo 3, examino a história das teorias de formação do sistema solar, desde Descartes até os modelos atuais de migração planetária. O leitor encontrará nesse capítulo a história de como a ideia de que os planetas são subprodutos da formação do Sol predominou do século XVIII até os dias atuais, com muitos percalços, várias vozes dissonantes e um hiato muito significativo de mais ou menos cinquenta anos a partir do início do século XX. No capítulo 4, argumento que podemos identificar traços de uma forma muito específica de progresso (compreendido como sinônimo de avanço, crescimento, melhoramento) no campo das teorias de formação do sistema solar.

No quinto capítulo, as mudanças teóricas da primeira metade do século XX serão objeto de uma análise filosófica tomando como referência as metateorias clássicas de Kuhn, Lakatos (seção 5.2.1.) e Laudan (seção 5.2.2.). A seguir (seção 5.3.), procurarei demonstrar que apesar das muitas alternativas cosmogônicas propostas na segunda metade do século XX, o período foi marcado pelo desenvolvimento de um consenso que não é desprezível – o de que os planetas se formam em disco circunstelar e são subprodutos da formação do Sol – e que isso foi um dos fatores para o crescimento e fortalecimento de uma *comunidade científica* especializada dedicada ao tema, assim como pode ter sido também consequência desse fortalecimento numa relação de retroalimentação. O que é ainda mais importante, começava a haver bons motivos para que um consenso mínimo se formasse mesmo com a pluralidade de hipóteses. Os motivos para a formação de um consenso mais robusto cresceram aceleradamente desde meados da década de 1990 (seção 5.4.). Por fim, na seção 5.5. esboço uma análise filosófica do estado atual da área.

As últimas quatro décadas de desenvolvimento das várias ciências participantes deste que é um campo eminentemente interdisciplinar geraram um corpo de conhecimento que permite definir problemas muito mais específicos, engendrando uma divisão do trabalho de pesquisa sobre o tema com alto grau de especialização, ao mesmo tempo em que apresenta uma convergência para suposições básicas, a partir das quais os problemas são delineados e enfrentados pela comunidade científica. Principalmente a partir do exame desse desenvolvimento mais recente, guiado fundamentalmente pelas observações astronômicas de discos protoplanetários e pela detecção de numerosos planetas extrassolares, sustento que é insensato não reconhecer que houve progresso científico nas investigações sobre as origens do sistema solar e de outros sistemas planetários.

Comecei a me dar conta dessa imagem geral do desenvolvimento histórico da área quando me aproximei dos estágios finais da pesquisa. Ao longo dos primeiros anos, minha percepção era a de que a história da área tornava quase irresistível a conclusão de que a ciência ainda não havia feito avanços significativos para solucionar o enigma da origem do sistema solar. Antes de iniciar a pesquisa, meu conhecimento sobre o tema era o de alguém que acompanhou durante anos publicações de divulgação científica sobre planetas extrassolares e sobre a formação do sistema solar: compreensivelmente, eu tinha uma visão linear e otimista da história da área e do próprio progresso científico. Nos materiais de popularização da ciência é frequente a produção de uma imagem de progresso cumulativo e contínuo: Kant e Laplace teriam criado uma explicação que, *mutatis mutandis*, estaria em

voga até hoje. Mas a pesquisa histórica me mostrou uma multiplicidade de teorias e um grande número de hipóteses refutadas, de conceitos abandonados, de becos sem saída, de idas e vindas. Tudo isso me sugeriu que parecia impossível distinguir progressos no conhecimento científico sobre a origem do sistema solar. Contudo, quando mergulhei na literatura científica sobre discos protoplanetários, sistemas planetários extrassolares e formação estelar em nebulosas moleculares, comecei a perceber que era insensato desconsiderar que há evidência suficiente para justificar a crença de que planetas se formam ao redor de estrelas segundo processos ordinários, e assim deve ter ocorrido (embora ainda não saibamos se em maior ou menor grau) com o sistema solar. Há, além disso, um caso bastante forte para crer que desde a década de 1980 houve um progresso do conhecimento dos processos envolvidos na formação planetária. A rede de teorias sobre esses processos – algumas mais, outras menos apoiadas em suportes empíricos robustos – vem se tornando, nas últimas décadas, mais coerente, mais robusta e mais interconectada com a ampla estrutura de conhecimento empírico e teórico das ciências naturais do que em todos os outros momentos dessa história de quase quatro séculos.

Capítulo 2. Uma questão *filosófica*: a ciência progride?

An opinion which has of late years attained some vogue among men of science, [is] that we cannot expect any physical hypothesis to maintain its ground indefinitely even with modifications, but must expect that from time to time there will be a complete cataclysm that shall utterly sweep away old theories and replace them by new ones. As far as I know, this notion has no other basis than the history of science. Considering how very, very little science we have attained, and how infantile the history of science still is, it amazes me that anybody should propose to base a theory of knowledge upon the history of science alone.

Charles Sanders Peirce (1839-1914), *Collected Papers*, Volume 2, parágrafo 150.

O presente capítulo procura examinar algumas das mais influentes contribuições da filosofia da ciência para o problema do progresso da ciência e, como um motorista que em meio à tempestade procura as faixas e olhos de gato na estrada, tenta extrair delas referenciais úteis para chegar com alguma segurança ao destino: avaliar em que sentido é possível dizer que houve avanço no conhecimento científico acerca da formação do sistema solar e de outros sistemas planetários. Essa avaliação será apresentada principalmente nos capítulos 4 e 5, além do capítulo conclusivo.

2.1. A ideia de progresso

A ideia de progresso está umbilicalmente ligada à imagem da ciência moderna. Segundo o historiador das ideias e da ciência Paolo Rossi, essa imagem concebida pela Revolução Científica implica convicções sobre a capacidade de avanço do conhecimento científico e de seu caráter provisório. Os chamados *modernos* estavam convictos de “que o saber científico é algo que aumenta e cresce, que atua mediante um processo para o qual

contribuem, uma após outra, diferentes gerações” e “que esse processo, em qualquer uma de suas etapas e de seus momentos, jamais é completo: ou seja, que não necessita de sucessivos acréscimos, revisões ou integrações” (ROSSI, 2000, p. 49). A concepção moderna de um conhecimento sempre passível de incremento e reconsideração, melhorias e reformas, nasce em contraposição às visões do conhecimento dado por revelação e divina inspiração – verdade oculta e final, destinada a ser descoberta por raros indivíduos.

Até, pelo menos, o tempo das descobertas de Darwin e Maxwell, as ciências naturais se desenvolveram envolvidas por essa concepção: “dos primeiros anos do século XVII até a segunda metade do século XIX, a ideia de um crescimento, de um *avanço do saber* acompanha todos os vários e diferentes programas científicos, constituindo, por assim dizer, seu fundo comum” (ibid.). Embora o fio condutor seja universalmente reconhecido, Rossi aponta uma diferença importante entre as convicções dos artífices da Revolução Científica e a fé dos profetas e ideólogos cientificistas da segunda metade do século XIX: os primeiros estavam certos de que o saber é capaz de fazer avanços, de ser melhorado, mas não necessariamente esperavam que a capacidade de progredir da ciência fosse suficiente para garantir o progresso integral do gênero humano; já os segundos em geral acreditavam que o avanço da ciência é visto como principal motor do progresso social, moral, político, e de uma inexorável evolução cujo vetor tem a direção e o sentido voltados para o aperfeiçoamento da espécie (ROSSI, 2000, pp. 94-6).

Fazer essa distinção é fundamental na medida em que muitos pensadores influentes do final do século XX – notadamente os céticos e cínicos mais radicalmente críticos à racionalidade e hostis às ciências – acabaram por se desencantar com a tese clássica de que podem existir tais coisas como o avanço do saber e o progresso da ciência, pois essas ideias se confundiram historicamente com a fé tardo-iluminista no progresso humano. Desde que foi apropriada pelos cientificistas e positivistas do século XIX, a ideia moderna do avanço do conhecimento científico passou a ficar associada a um otimismo injustificado, a uma falta de senso crítico em relação aos produtos tecnocientíficos, a uma crença na ilimitada capacidade explanatória da ciência. Em 1883, por exemplo, o físico Henry Rowlands defendia que os cientistas – não apenas quaisquer cientistas, mas os praticantes das chamadas “ciências puras” – seriam “o mais importante elemento do progresso humano” (ROWLANDS apud DOUGLAS, 2014, p. 4).

Uma coisa é defender o cientificismo – uma deferência exagerada em relação à ciência – ou o positivismo, cujo cerne é uma espécie de lei histórica segundo a qual o

progresso impulsionado pela ciência e pela técnica aperfeiçoará a humanidade, a livrará dos vícios, a distanciará da barbárie. Outra coisa, muito diferente, é sustentar a tese consideravelmente mais modesta de que o conhecimento científico é capaz de fazer progressos, de fazer avançar o entendimento humano sobre uma determinada questão ou parcela examinada da realidade. Ainda que esse conhecimento não seja encarado, do ponto de vista epistemológico e filosófico, com o mesmo otimismo com que os pais fundadores da ciência moderna o conceberam, ainda é bastante razoável sustentar que ele pode ser melhorado ao longo do tempo.

A fé no inexorável progresso humano foi destruída junto com milhões de seres humanos nas duas guerras mundiais, com o advento da bomba atômica e do impasse MAD (*Mutually Assured Destruction*) durante a Guerra Fria. Essa lista pode ser estendida *ad nauseam*: os sinais da destruição do meio-ambiente que garante nossa existência; a sanha destrutiva e a fome voraz por recursos dos complexos-industriais militares; a subserviência da tecnociência aos interesses escusos de estados-nação imperiais e à visão de túnel das grandes corporações, que visam a satisfação do interesse de seus acionistas a qualquer preço social e ambiental. Apesar dos protestos engenhosos do linguista Steven Pinker e outros otimistas, tornou-se problemático falar em progresso humano, num sentido robusto e abrangente do termo, após o século XX – especialmente um progresso que seja impulsionado pelo progresso da ciência.

Hoje, a correta percepção das dificuldades em se defender a existência de um progresso da espécie encontra-se acoplada à convicção, provavelmente injustificada, de que não pode haver melhoria do conhecimento, à identificação do reconhecimento dos avanços tecnocientíficos a uma visão rósea e ingênua de uma linha ininterrupta de acumulação de verdades e benesses, e à suspeita de que toda defesa do progresso da ciência está eivada de reacionarismo. Como se fosse uma tentativa de erigir no século XXI um monumento às falidas certezas do século XIX com os escombros do século XX. Trata-se de uma distorção histórica. Não apenas a defesa de possibilidades de progresso da ciência não é tributária do evolucionismo oitocentista e da fé no progresso, como também é precisamente a possibilidade de avanço do saber uma das condições necessárias para que seja desconstruída e refutada essa *filosofia da história* de maneira decisiva.

As polêmicas públicas em torno de uma não-polêmica científica, como o caso das ciências das mudanças climáticas, ilustram a urgência de se fazer compreender a questão do progresso da ciência. Num artigo relativamente recente, a filósofa Heather Douglas faz uma

defesa da ideia de que as ciências podem progredir articulada com o aumento da capacidade de predição e intervenção na natureza. Voltarei a isso no capítulo 4. O interesse, aqui, é apenas o de deixar claro que não concebo o progresso da ciência como idêntico ao progresso social – não o considero nem mesmo suficiente para guiar o progresso social (se é que se deseja realmente subscrever a tal coisa chamada “progresso social”, conceito repleto de problemas).

“O fascínio do público com a aplicação da ciência que nos permite fazer coisas novas, engendrar novas capacidades (para melhor ou para pior, dentro ou fora do laboratório), é o sentido mais claro que podemos ter da natureza do progresso científico. Suspeito de que é nesse sentido de progresso que a autoridade pública geral da ciência depende em última instância.” (DOUGLAS, 2014, p. 9). Mas, segundo ela, “não devemos ter ilusões de que uma maior eficácia causal, um maior poder de intervenção, vão de fato sempre produzir uma sociedade melhor” (ibid.). Essa é uma tese com a qual concordo plenamente. O problema do progresso científico deve ser encarado de maneira autônoma – no sentido de que as ciências têm formas de funcionamento específicas e, em larga medida, distintas de outros empreendimentos humanos –, mas não está acima de preocupações extrínsecas à ciência, como a responsabilidade social dos cientistas, nem imune a questionamentos sobre os usos e abusos do conhecimento científico.

É razoável defender que as ciências podem progredir, mas estabelecer com clareza como, em que sentido e por que esse progresso pode ocorrer é um problema bastante difícil. Uma constatação preliminar a ser feita é a de que a história da ciência – se fizer justiça às limitações, falhas, erros, becos sem saída, mudanças bruscas de direção e revoluções que caracterizam a variação de seu objeto no tempo – desautoriza a visão cumulativa e linear do progresso científico, ao menos em suas versões mais cruas. A natureza extremamente complexa do progresso da ciência – na medida em que de fato exista – permite categorizar como essencialmente otimista, e talvez ingênua, toda tentativa de compreendê-lo por meio do apelo, puro e simples, à imagem da acumulação de conhecimento.

2.2. O cumulacionismo otimista

A ideia de que o progresso científico se dá por meio da acumulação de conhecimento tem uma longa história que nasce nas formulações otimistas da Ilustração,

perpassa o século XIX especialmente influenciado pelo positivismo comtiano, avança século XX adentro, e apesar de consistentemente criticada e desconstruída a partir da década de 1960, continua arraigada nas representações mais comuns da ciência. Em 1936, o historiador da ciência George Sarton sustentava que “a aquisição e a sistematização do conhecimento positivo são as únicas atividades humanas verdadeiramente cumulativas e progressivas” (SARTON apud OLIVEIRA, 2016, p. 66). Na década de 1930 essa passagem certamente era considerada correta, não-problemática, provavelmente até trivial, mas quatro décadas mais tarde e daí por diante ruborizaria qualquer plateia intelectualmente sofisticada, especialmente se a ouvisse saindo da boca de um historiador. Por outro lado, é comum que numerosos cientistas continuem esposando a mesma ideia: “uma das características da ciência é sua natureza cumulativa. Como mais descobertas são feitas e mais é aprendido, progressivamente chegamos a uma compreensão cada vez mais completa do universo físico”, escreveu um biólogo três quartos de século mais tarde, resmungando sobre a influência negativa do “pós-modernismo” na educação (ZEIGLER, 2012, p. 585). Sustentada ainda hoje com muita naturalidade por inúmeros cientistas, educadores, divulgadores e jornalistas, essa ideia pode ter sido uma das melhores armas retóricas dos pais fundadores da ciência moderna e já ter-nos rendido, indiretamente, preciosos frutos intelectuais e materiais. Mas nas áreas de estudo acadêmico rigoroso sobre o funcionamento da ciência, há um bom tempo essa visão passou a ser amplamente questionada.

A filósofa Susan Haack chama de “Velho Deferencialismo” o cientificismo e as interpretações excessivamente otimistas do desenvolvimento da ciência, que invariavelmente contêm alguma versão da ideia de progresso cumulativo do conhecimento em seus cernes. No campo da epistemologia da primeira metade do século XX, o Velho Deferencialismo está associado ao positivismo lógico (ou empirismo lógico), um movimento filosófico (mais do que um conjunto de doutrinas) unificado pela tentativa de compreender o progresso científico como a acumulação e o crescimento do conhecimento por meio da verificação das proposições. Nessa concepção, fatos que tenham sido verificados poderiam ser considerados uma base epistemológica fixa sobre a qual o conhecimento poderia seguramente se acumular com a obtenção de mais fatos verificados, e assim por diante. Uma crença comum aos positivistas lógicos – numa linha contínua ao positivismo de Auguste Comte – era o de que a ciência poderia ter um importante papel a desempenhar na reformulação da sociedade (CREATH, 2017).

Um dos críticos de primeira hora do positivismo lógico e seu verificacionismo foi Karl Popper. Quando Popper publica ainda antes da metade do século XX sua *Lógica da Descoberta Científica*, ele propõe uma visão do progresso científico próxima à da seleção natural darwiniana, atenta às grandes extinções teóricas, valorizando as refutações como fundamentais ao desenvolvimento científico, essencialmente colocando no centro do jogo a forma inferencial dedutiva do *modus tollens*. O progresso se daria por meio de uma filtragem das conjecturas menos aptas para sobreviver ao embate com o mundo, com a garantia de que jamais conseguiríamos auferir com exatidão se a bem sucedida, bem testada e jamais refutada teoria vigente é de fato verdadeira ou o quanto ela estará próxima de atingir a verdade. Assim como a evolução jamais produzirá espécies perfeitas (perfeitamente adaptadas para todas as configurações ambientais), aparentemente também a ciência jamais produzirá teorias que se possam dar como absolutamente verdadeiras e definitivas. O progresso científico não se daria, portanto, por meio de confirmações e acumulação de conhecimento, mas por meio de rupturas: a produção copiosa de conjecturas testáveis e a perseverante busca de suas refutações. O que resta desse processo de seleção teórica é o melhor que temos, mas nunca chega a ser conhecimento indubitável, assim como não podemos ter a certeza de que o processo está nos levando na direção certa (i. e. em direção à verdade).

Como o próprio Popper gostava de dizer, a ciência produz *doxa*, não *episteme*. Porém, ainda que descarte a possibilidade de verificação e confirmação das teorias científicas, Popper mantém uma certa noção de progresso da ciência. Com o falseacionismo popperiano, o processo de conjecturas e refutações, substituições das velhas teorias refutadas por novas teorias falseáveis e corroboradas por testes implacáveis e evidências empíricas, podemos aumentar o grau de verossimilhança das teorias científicas.

Reflexões filosóficas sobre a possibilidade de testes empíricos suficientes para a refutação de uma hipótese ou teoria foram formuladas por Pierre Duhem e Willard V. O. Quine. Embora tenham defendido ideias sensivelmente diferentes sobre o assunto, ambos ficaram vinculados na filosofia da ciência à chamada “tese de Duhem-Quine”. Em linhas gerais, essa tese sustenta que é impossível que uma hipótese seja testada isoladamente da rede de teorias que constituem o conhecimento de fundo da ciência. Ou seja, “nunca se pode estar certo de que uma dada teoria foi falseada [refutada] pelo experimento, em vez de uma hipótese auxiliar ou hipóteses de fundo [*background hypotheses*]” (HARDING, 1976, p. 9). Nesse sentido, a decisão do cientista sobre qual das hipóteses deve ser considerada refutada é

aparentemente arbitrária. Isso enfraquece, em boa medida, a possibilidade de progresso científico pela via do falseacionismo popperiano.

A desconfiança com a deferência exagerada e injustificada à ciência (cujo sintoma cultural é o largo uso honorífico do termo *científico*), a gradual percepção nos meios intelectuais do papel que a ciência desempenhou nos horrores e decepções práticas da modernidade, além da consciência cada vez maior dos limites da investigação científica: tudo isso ajudou na abertura de trilhas para que fossem feitas críticas legítimas e salutares à ciência. Alguns pensadores que gravitavam o pensamento popperiano no começo da segunda metade do século XX acabaram trilhando esse caminho crítico e produziram obras de impacto duradouro na filosofia da ciência, pulando para fora dela e fecundando outras áreas, como a história e a sociologia da ciência. Imre Lakatos percebeu que o falseacionismo popperiano tem limitações sérias e desenvolveu um modelo de funcionamento da ciência segundo o qual o que ele denominou *programa de pesquisa* não necessariamente é progressivo e contém um núcleo duro que é declarado não falseável por uma decisão metodológica dos cientistas, embora essa decisão possa ser revisada. Paul Feyerabend rejeitou não apenas a visão de progresso cumulativo da ciência, como a partir do exame do desenvolvimento histórico da ciência, basicamente concluiu pelo relativismo epistemológico e pelo anarquismo metodológico. Mas foi Thomas Kuhn quem produziu a crítica mais influente ao “deferencialismo”: *A Estrutura das Revoluções Científicas*.

2.3. Uma crítica pioneira e influente: Thomas Kuhn em *The Structure of Scientific Revolutions*

A Estrutura das Revoluções Científicas foi publicada pela primeira vez em 1962. As duas décadas que se seguiram testemunharam o impacto multidisciplinar do livro e sua fecundidade. Kuhn inovou ao dar papel central à história da ciência na configuração e defesa de suas teses epistemológicas e acabou, em parte por isso, produzindo uma imagem da ciência que vai no sentido contrário do “velho deferencialismo” dominante até então. Rompe com imagem usual (e também popperiana) do cientista como sujeito cognitivo essencialmente crítico, interpretando a educação científica como uma espécie de inculcação de uma certa visão de mundo e de um modelo estruturante por meio de manuais que apagam o processo histórico em favor de uma versão simplificada e triunfalista da ciência, de suas supostas

racionalidade intrínseca e plena capacidade de progresso cumulativo. O livro também forneceu munição para a mudança de rumos na sociologia da ciência na década de 1970, a partir de uma leitura epistemologicamente relativista de seus argumentos centrais pelo Programa Forte da Sociologia da Ciência, uma das mais influentes escolas de pensamento sociológico sobre o desenvolvimento das ciências naturais. Retornarei a isso na seção seguinte, 2.4.

Examinando a tese central do livro compreende-se o significado da ruptura que ele simbolizou, em especial para os intelectuais que procuraram atacar a autoridade epistêmica da ciência. A ciência não se desenvolveria por meio de aproximação da verdade, nem por verificação ou confirmação, nem mesmo por refutação e corroboração em direção à verossimilhança. Simplificadamente, na *Estrutura*, Kuhn afirma que a ciência se desenvolve historicamente pela alternância de períodos de *ciência normal* e processos revolucionários em que diferentes candidatos a *paradigmas* competem pela adesão da comunidade científica, até que um se estabeleça e passe a orientar o novo período de ciência normal. Na ciência normal, o papel desempenhado pelo cientistas é o de resolver problemas e *puzzles* dados ou possibilitados pelo próprio paradigma.

Embora Kuhn não seja inteiramente consistente acerca disso, um paradigma, na acepção kuhniana, pode ser seguramente interpretado como um conjunto conceitual que engloba a teoria, as perguntas possíveis de serem feitas, as formas legítimas de experimentação, as entidades que comporiam a realidade, os instrumentais conceituais e teóricos com os quais serão formulados os problemas, entre outros itens. Entendido dessa maneira, um paradigma quase nunca é questionado pelos cientistas, a não ser nos períodos de crise, caracterizado pelo acúmulo de *anomalias* (geralmente exemplificadas por inadequações empíricas da teoria) gerado pelas pesquisas da ciência normal. Paradigmas são também incomensuráveis: não há uma métrica comum com a qual os cientistas podem avaliar racionalmente diferentes paradigmas e decidir pelo melhor com base em critérios objetivos, como o suporte empírico e evidenciário. A incomensurabilidade dos paradigmas é uma noção que Kuhn explorou para questionar a concepção positivista do progresso científico como sucessivas acumulações de conhecimento em crescente aproximação à verdade, baseadas em padrões metodológicos e linguagem observacional neutros (OBERHEIM e HOYNINGEN-HUENE, 2018). A incomensurabilidade de paradigmas se refere principalmente a

incompatibilidades conceituais e não deve ser entendida como incomparabilidade de teorias e nem permite afirmar que a ciência é irracional (ibid.).³

Para além da famosa demonstração por Margaret Masterman da inconsistência terminológica de Kuhn em relação ao que é chamado de paradigma, a *Estrutura* não parece ter sido projetada para a repercussão que teve, o nível de influência multidisciplinar e metodológica que teve, e especialmente o nível de detalhe e esmiuçamento das leituras a que foi submetida nesses últimos cinquenta anos⁴. Por isso, assim como pela riqueza de seus *insights* e pela profundidade da análise, o livro foi interpretado não apenas de maneira diversa, mas às vezes contraditória. O que, no fim das contas, não é surpreendente. Pois embora a *Estrutura* não seja um texto polissêmico, ou uma “máquina de gerar interpretações” – para utilizar uma maneira com que Umberto Eco define o romance de ficção – o livro contém uma cota razoável de ambiguidades, idas e vindas, afirmações num sentido e depois noutro, além de ser insuficientemente claro em algumas das questões mais fundamentais que aborda. Uma delas é a questão do progresso da ciência, de particular interesse para o presente trabalho.

Como já mencionado, Kuhn desconstrói o a-historicismo formulado nos *textbooks* e inculcado nos graduandos, uma formulação que acaba gerando uma imagem completamente falsa do desenvolvimento histórico de uma ciência como mera acumulação de fatos, dados, tijolinhos no muro do conhecimento. Essa imagem chega a produzir “uma distorção drástica da percepção que o cientista possui do passado de sua disciplina ... o cientista vê esse passado como algo que se encaminha, em linha reta, para a perspectiva atual da disciplina” (KUHN, 1962/2005, p. 211). Por isso, Kuhn questiona a narrativa histórica da ciência presente nos manuais científicos, segundo os quais fatos vão sendo encontrados, observados, descobertos, e as teorias ajustam-se então a essas novidades empíricas:

Não há dúvida de que essas teorias “ajustam-se aos fatos”, mas somente transformando a informação previamente acessível em fatos que absolutamente não existiam para o paradigma precedente. Isso significa que as teorias também não evoluem gradualmente, ajustando-se a fatos que sempre estiveram à nossa

³ Feyerabend também explorou a noção de incomensurabilidade, frisando que teorias científicas podem ser conceitualmente incompatíveis. É uma concepção mais limitada do que a de Kuhn, pois se refere apenas a teorias científicas fundamentais e universais (como a mecânica newtoniana e a relatividade geral). (OBERHEIM e HOYNINGEN-HUENE, 2018).

⁴ “Kuhn ficou surpreso com a recepção do livro, bem como com o seu apelo subsequente. Ele não previu e não poderia ter antecipado o modo como seria lido pelos sociólogos e filósofos da ciência.” (WRAY, 2015, p. 167).

disposição. Em vez disso, surgem ao mesmo tempo que os fatos aos quais se ajustam, resultado de uma reformulação revolucionária da tradição científica anterior – uma tradição na qual a relação entre o cientista e a natureza, mediada pelo conhecimento, não era exatamente a mesma. (KUHN, 1962/2005, p. 181).

A forma como se produz essa visão distorcida do progresso linear e cumulativo é pintada por Kuhn com as cores e as pinceladas fortes de um libelo político, suficientemente cínico para ser concebido como uma completa fabricação histórica:

Aparentemente o progresso acompanha, na totalidade dos casos, as revoluções científicas. Por quê? Ainda uma vez poderíamos aprender muito perguntando que outro resultado uma revolução poderia ter. As revoluções terminam com a vitória total de um dos dois campos rivais. Alguma vez o grupo vencedor afirmará que o resultado de sua vitória não corresponde a um progresso autêntico? Isso equivaleria a admitir que o grupo vencedor estava errado e seus oponentes certos. Pelo menos para a facção vitoriosa, o resultado de uma revolução deve ser o progresso. Além disso, esta dispõe de uma posição excelente para assegurar que certos membros de sua futura comunidade julguem a história passada desde o mesmo ponto de vista. (KUHN, 1962/2005, p. 210-1)

Para piorar, Kuhn não vê como “totalmente inadequada” a sugestão de que “o membro de uma comunidade científica amadurecida é, como o personagem típico do livro 1984 de Orwell, a vítima de uma história reescrita pelos poderes constituídos” (KUHN, 1962/2005, p. 211).

Sem dúvida, essas passagens permitem uma leitura relativista, quiçá cínica, da *Estrutura*, mas apenas se tomadas fora de contexto. Pois, por exemplo, Kuhn é inequívoco ao diferenciar uma revolução *científica* (grifo dele) de outras formas de revolução. A diferença, para ele, é que numa revolução científica a autoridade não é o único “árbitro dos debates sobre paradigmas”. “Uma das leis mais fortes, ainda que não escrita, da vida científica é a proibição de apelar a chefes de Estado ou ao povo em geral quando está em jogo um assunto relativo à ciência” (KUHN, 1962/2005, p. 212). As decisões teóricas, as escolhas de paradigmas, são tomadas por um grupo muito peculiar, a comunidade científica, que não é “extraído ao acaso da sociedade global” mas é, antes de tudo, “um grupo profissional competente”. Este é o “árbitro exclusivo das realizações profissionais”, cujos membros “devem ser vistos como os únicos conhecedores das regras do jogo ou de algum critério equivalente para julgamentos inequívocos” (KUHN, 1962/2005, p. 212-3). Critérios e valores comuns de avaliação devem existir, para ele, pois de outra forma “seria admitir a existência de padrões incompatíveis entre si para a avaliação das realizações científicas” (KUHN, 1962/2005, p. 213). Por sua vez, o processo de revolução científica kuhniana, embora resulte

em descontinuidades inevitáveis, não veda a preservação de importantes aspectos do conhecimento científico constituído pelo paradigma antigo – por exemplo, sobrepujada pela relatividade geral, a mecânica newtoniana continua uma aproximação útil sobre a natureza física do mundo para uma série de aplicações tecnocientíficas.

Kuhn conclui sua exposição sobre o progresso da ciência sugerindo o abandono da noção “segundo a qual as mudanças de paradigma levam os cientistas e os que com eles aprendem a uma proximidade sempre maior da verdade” (KUHN, 1962/2005, p. 215). Ian Hacking, em *Representing and Intervening*, descreve muito bem esse aspecto da filosofia da ciência kuhniana:

Com cada mudança de paradigma, sugere Kuhn, chegamos a ver o mundo de maneira diferente – talvez vivamos em um mundo diferente. Também não estamos convergindo para uma imagem verdadeira do mundo, pois não há nenhuma. Não há progresso em direção à verdade, mas apenas o aumento da tecnologia e talvez progresso para “longe de” idéias que nunca mais acharemos tentadoras (HACKING, 1983, p. 66).

No lugar do progresso em direção à verdade, Kuhn apela a um processo evolutivo cujo ponto de partida é “primitivo” e que passa por “estágios sucessivos” caracterizados por “uma compreensão sempre mais refinada e detalhada da natureza” (KUHN, 1962/2005, p. 215). Isso não quer dizer, diz Kuhn, que o mesmo processo seja o de uma evolução “*em direção a algo*” (grifo dele). Ao contrário, o progresso da ciência seria análogo à evolução darwiniana, por meio de seleção natural, produzindo espécies mais adaptadas (as teorias) num processo de evolução *a partir de* e não *em direção a* um determinado objetivo (e.g., a verdade, o conhecimento indubitável etc.).

O exposto basta, no entanto, para que se compreenda a novidade das concepções kuhnianas acerca do desenvolvimento da ciência e deixa entrever para onde é que os críticos mais ferozes da ciência procuraram esticar a corda relativista inadvertidamente dada por Kuhn.

2.4. Esticando a corda kuhniana: o relativismo epistemológico e o Kuhn tardio

Ao longo de sua trajetória intelectual, Kuhn revisou e modificou sensivelmente sua explicação do desenvolvimento da ciência e sua epistemologia subjacente. Em parte, as revisões e esclarecimentos vieram em resposta às críticas direcionadas à *Estrutura* por parte de filósofos (como Popper) que não se convenceram das soluções dadas por Kuhn aos problemas postos por sua *filosofia histórica da ciência*, especialmente com relação ao problema da racionalidade da mudança teórica e ao conceito de incomensurabilidade dos paradigmas. Mas suas mais significativas reconsiderações e mudanças de posicionamento ocorreram por conta da maneira com que alguns dos elementos centrais da tese kuhniana das revoluções científicas foram apropriados pela corrente da sociologia da ciência mais entusiasmada com suas potenciais implicações céticas e epistemologicamente relativistas.

Antes de considerar as apropriações epistemologicamente relativistas da *Estrutura* por parte da sociologia da ciência a partir da década de 1970, é preciso lembrar que essa obra-chave da filosofia da ciência é precedida por uma pesquisa eminentemente historiográfica, publicada em 1957: *A Revolução Copernicana*. Nela, Kuhn faz uma defesa muito menos ambígua do progresso da ciência, mesmo diante de suas impermanências. Um exemplo claro: “A mutabilidade de seus conceitos fundamentais não é um argumento para rejeitar a ciência. Cada nova teoria preserva um núcleo duro de conhecimento fornecido por suas antecessoras e soma-se a ele. A ciência progride ao trocar velhas teorias por novas.” (KUHN, 1957/1985, p. 3). Embora não tivesse como objetivo formular uma explicação geral acerca do funcionamento da ciência, o livro de 1957 fornece uma imagem do desenvolvimento científico que contraria algumas das ideias mais bem estabelecidas na filosofia da ciência do período e antecipa alguns dos elementos mais controversos da *Estrutura*. Kuhn representa um dos mais importantes episódios de mudança teórica da história como um processo não inteiramente guiado pela racionalidade, pelo peso da evidência ou da adequação empírica. Para além disso, enxerga a Revolução Copernicana decisivamente influenciada por aspectos não racionais e geralmente considerados extracientíficos, como o apelo estético da teoria heliocêntrica e suas consonâncias com o misticismo neoplatônico. Não haveria uma base arquimediana – para usar uma expressão que Kuhn aprecia – que permitisse avaliar qual seria a melhor teoria segundo critérios completamente racionais: especialmente antes do *input* de Galileu, Kepler e Descartes, a escolha entre os modelos copernicano e o ptolomaico só poderia ter sido questão de gosto, satisfação de uma visão de mundo sobre outra. Não é difícil perceber, portanto, porque a obra de Kuhn permitiu uma leitura em chave epistemologicamente relativista. O relativismo epistemológico consiste, em linhas gerais, na

ideia de que não há uma base objetiva para avaliar qual dentre diferentes sistemas epistêmicos é superior, pois sistemas epistêmicos podem ser igualmente válidos, ainda que incompatíveis entre si.

A *Estrutura*, como já vimos, leva ideias como a de uma incompleta racionalidade da mudança teórica a um nível elevado de sofisticação e síntese. Por conta disso, teve repercussão bastante diversa, mas igualmente profunda, nas distintas áreas da filosofia da ciência e da sociologia da ciência. Em geral, entre os filósofos a obra foi inicialmente interpretada como um ataque frontal à racionalidade da ciência. “Meus críticos respondem às minhas opiniões sobre esse assunto com acusações de irracionalidade, relativismo e defesa do governo das massas (*mob rule*). Esses são todos os rótulos que eu rejeito categoricamente”, defendia-se Kuhn em 1970 (KUHN, 2000, p. 126). Alguns sociólogos, por sua vez, encontraram no livro estímulos para o avanço de teses robustas sobre a influência de fatores sociais nos próprios conteúdos produzidos pela ciência. Se fatores sociais podem ser vistos como determinantes dos conteúdos do conhecimento científico, a natureza torna-se praticamente irrelevante no processo de construção da ciência. O conteúdo teórico-empírico passa a ser visto como resultado das relações sociais, negociações e exercício de poder que envolvem a ciência. Kuhn desautorizou essas interpretações e procurou distanciar-se claramente das teses mais epistemologicamente relativistas a partir de meados da década de 1970.

Percebido como um dos pensadores que mais haviam contribuído para os alicerces de uma *epistemologia social da ciência*, Kuhn se entusiasmou com a sociologia da ciência e, inicialmente, com sua vertente mais influente nas décadas de 1970 e 80, o Programa Forte da Escola de Edimburgo. Ele fazia parte da editoria da principal publicação de pesquisas do Programa Forte, que se dizia “kuhniano”.

Uma das promessas dessa vertente da sociologia da ciência foi a de investigar e compreender o conhecimento científico por meio do que seria uma abordagem propriamente *científica*, em contraste com a filosofia da ciência pré-kuhniana (BLOOR, 1976/1991, p. 76-83). David Bloor, um dos expoentes do Programa Forte, propõe que apenas por meio de uma abordagem científica a natureza do conhecimento poderia ser investigada sem que a análise resulte em “não mais do que a projeção de nossas preocupações ideológicas” (BLOOR, 1976/1991, p. 80). Para Bloor, a projeção de uma *ideologia da ciência* sobre a *ciência realmente praticada* seria uma consequência de análises filosóficas tradicionais, não-científicas, que, por medo de que a “sacralidade do conhecimento” seja “violada”, produzem

“meramente propaganda implícita” (BLOOR, 1976/1991, p. 80). Assim, a filosofia da ciência pré-kuhniana produziria uma mistificação do conhecimento científico ao se confinar ao que seriam os aspectos “lógicos”, “a-históricos” e “transcendentes” do conhecimento científico, tornando-o “especial”, “apartado do mundo”.

Bloor contrasta o que seria a “abordagem científica” da sociologia da ciência com a alegação de que podemos investigar a ciência pela filosofia, com “acesso a alguma fonte especial de conhecimento não-empírico” (BLOOR, 1976/1991, p. 80). A alegação principal é que essa “abordagem científica” – com plena confiança na própria ciência – seria a única capaz de lançar a luz do conhecimento sobre o próprio conhecimento, sem concebê-lo como sagrado. E o foco da análise, para Bloor, deve ser aquilo que “sustenta o conhecimento”, a sociedade:

E quanto ao medo difícil de se expressar, mas obviamente muito real em algumas mentes – o de que a nossa convicção e fé em nosso conhecimento, fonte de energia e inspiração, de alguma forma evaporariam se seus mistérios centrais são investigados? (...) De fato, há verdade na convicção de que o conhecimento e a ciência dependem de algo externo à mera crença. Mas essa força externa que a sustenta não é transcendente. (...) O que é ‘externo’ ao conhecimento, que é maior do que ele, o que o sustenta é, claro, a própria sociedade. Se alguém teme por isso, então teme com razão o conhecimento. (BLOOR, 1976/1991, p. 82).

Kuhn interpretou em chave cética o foco do Programa Forte em interesses sociais como não apenas fatores importantes na constituição social do conhecimento mas também como determinantes da fabricação do conteúdo das ciências. Para o criador do conceito de ciência normal, os sociólogos do Programa Forte cometiam o erro de desconsiderar *interesses cognitivos* especificamente envolvidos na atividade científica como “amor pela verdade” e “fascínio pela resolução de problemas”. Ao conceber a estrutura social que embasa as investigações científicas como algo que essencialmente não difere de qualquer outra estrutura social humana (ao contrário de reconhecer que ela acomoda interesses cognitivos específicos e organiza-se de acordo com um conjunto distinto de valores), o Programa Forte deixaria de capturar parte fundamental do que é a ciência. Nesse quesito, Kuhn considerava o sociólogo Robert Merton (tido pelos novos iconoclastas como superado) como essencialmente correto, em contraste com o Programa Forte:

Enquanto Merton acreditava que a ciência era caracterizada por um conjunto de valores que são mais ou menos estáveis ao longo da história da ciência moderna, o

Programa Forte negou isso. Kuhn discordou dessa visão da ciência, insistindo que os valores compartilhados constitutivos da ciência desempenham um papel importante ao permitir que os cientistas realizem seus objetivos epistêmicos (WRAY, 2015, p. 175).

As diferenças não foram apenas de caráter sociológico-descritivo. Para os sociólogos de Edimburgo, a natureza dificilmente propicia *constraints* às nossas teorizações sobre ela. Kuhn, por sua vez, dá bastante importância à natureza no processo de construção social do conhecimento científico. Para o filósofo-historiador, a natureza não respeita os desejos de um observador e provê evidência decisiva contra uma hipótese inventada que não consiga corresponder a seu comportamento. “Kuhn acreditava que uma compreensão adequada da ciência exigia atenção ao papel que a natureza desempenha na resolução de disputas [teóricas]. É a esse respeito que Kuhn considerava sua visão fundamentalmente diferente da visão do Programa Forte” (WRAY, 2015, p. 176). Em síntese e simplificadamente, na representação do processo de resolução de disputas teóricas propagada pelo Programa Forte e pela Sociologia do Conhecimento Científico (*Sociology of Scientific Knowledge – SSK*) não apenas a natureza não tem papel decisivo como o processo é resolvido com o que é chamado de “negociações”, pelo exercício do poder e pelo jogo político.

O reconhecimento de que lógica, evidência e natureza não são os únicos fatores envolvidos nas disputas teóricas parece ser encarado pelos sociólogos epistemologicamente relativistas como motivo suficiente para que os conflitos e acomodações sociais, econômicos e políticos sejam encarados como os fatores mais relevantes (talvez os únicos capazes de serem estudados com alguma clareza) desses processos fundamentais da construção do conhecimento científico. Kuhn demonstrou consciência do problema que isso representava: “Dizer que, em questões de escolha teórica, a força da lógica e da observação não pode, em princípio, ser convincente (*compelling*) não é descartar a lógica e a observação nem sugerir que não há boas razões para favorecer uma teoria ou outra” (KUHN, 2000, p. 126). Boas razões para favorecer uma teoria ou outra, sem descartar lógica e observação; não a primazia da vontade individual ou de um grupo específico; não apenas a satisfação de interesses econômicos e políticos; não apenas exercício de poder.

Compreender o poder específico do conhecimento científico como apenas mais uma instância de manifestação da lógica do poder, tornando irrelevante sua óbvia capacidade de descoberta e de manipulação da natureza, significa ao mesmo tempo subestimá-lo e arriscar torná-lo incompreendido (pela sociedade) e incontrolável (pela sociedade). A história

do século XX é um bom exemplo de como uma ciência *unchecked* e apropriada por interesses realmente poderosos pode ser nociva à humanidade. Significa dar mais dessa espécie de poder à ciência, não menos. É justamente o oposto do que a sociologia da ciência epistemologicamente relativista declara pretender fazer, que seria questionar e minar a autoridade epistemológica da ciência (percebida como injustificada), vista como espécie de opressão de grupos privilegiados. A promessa nem sequer é vazia, pois aponta para o sentido contrário. Uma autoridade que não se compreende não pode ser eficientemente questionada. Ignorar a autoridade para que ela desapareça não apenas é inócuo como renova e enraíza mais profundamente quaisquer poderes injustificados que essa autoridade detém ou pode vir a deter. Deixar de reconhecer justificativas razoáveis para a autoridade é arriscar reconhecê-las em todo lugar e, como possível consequência, dar a autoridades ilegítimas poderes injustificados. A “controvérsia” artificialmente alimentada por poderosos interesses econômicos sobre a autoridade das ciências das mudanças climáticas atesta essa afirmação. Não foi por alguma espécie de recaída autoritária que o anarquista Paul Feyerabend acompanhou Kuhn em sua rejeição do pós-modernismo. Há algo muito mais importante em jogo nessa discussão, algo mais profundo do que encontrar qual seria a melhor caracterização do funcionamento da ciência.

Os protestos de Kuhn contra os exageros da sociologia da ciência não se encontravam apenas no nível ideológico. (Não se sabe se a motivação dessa rejeição ao pós-modernismo e ao relativismo epistemológico por parte de Kuhn teve motivação política, mas as razões filosóficas são suficientemente convincentes para cancelá-la como expressão de diferenças ideológicas importantes. Como afirmado anteriormente, o Kuhn tardio acompanha Merton ressaltando a importância de distintos valores compartilhados pela comunidade científica e que permitem-na atingir “seus objetivos epistêmicos”, para ficar num assunto bastante ilustrativo.) Havia uma diferença fundamental entre a sua concepção do que é o conhecimento e a do Programa Forte.

*

Ao analisar o processo de descoberta científica num livro dedicado a entender a influência de Kuhn nas ciências sociais, Barry Barnes, outro expoente do Programa Forte, torna irrelevante a distinção entre o nível teórico e o factual:

Por mais claras que sejam as comunicações da natureza, elas não são codificadas na linguagem: a natureza não descreve a si mesma. Somos nós que damos sentido às mensagens dela, determinando como elas devem ser ajustadas aos conceitos e crenças existentes e até que ponto nossos conceitos e crenças existentes devem ser modificados e estendidos para acomodá-las. Outra maneira de dizer isso é dizer que *não há diferença relevante entre os conceitos ‘teóricos’ e ‘factuais’ na ciência*: os dois tipos de conceito *são nossas invenções* – ‘estrela’ e ‘pulsar’ tanto quanto ‘flogisto’ e ‘oxigênio’ (BARNES, 1982, p. 44, grifos meus).

Ainda que seja necessário reconhecer o quão salutar foi a desconstrução crítica de concepções simplistas sobre a ciência – como a de que a boa ciência é essencialmente objetiva e assim sendo, o melhor conhecimento científico é aquele que “deixa a natureza falar” – há um salto injustificado entre uma constatação não problemática (“a natureza não descreve a si mesma”) e o apagamento das diferenças entre um elemento teórico e um factual. É difícil conceber como *invenções humanas* as diferenças observáveis entre uma estrela de sequência principal de tipo solar e uma estrela de nêutrons em rápida rotação. Em que pese o fato inescapável de que essas descrições contém uma grande dose de formulações teóricas, as muitas diferenças observáveis entre esses tipos de objetos astronômicos não podem ser meras invenções. Como a descoberta científica não pode ser caracterizada como um exemplo da natureza falando por si mesma, salta-se para a conclusão exagerada de que as diferenças observáveis entre objetos naturais são meramente invenções porque são acomodadas em conceitos distintos.

Ao sugerir que a noção de *descoberta* deve ser abandonada (ou colocada entre aspas⁵) para que compreendamos melhor o funcionamento da ciência, Barnes parece atacar um espantalho, uma visão simplista do processo de descoberta científica:

Dizer que algo é uma descoberta é descrevê-lo como o resultado de um procedimento que ao mesmo tempo a registra e valida. Mas também sugere que o procedimento em questão é abrangido por um único ato ou evento. Portanto, o uso

⁵ Um exemplo notável de aspas sendo utilizadas sobre o termo *descoberta* pelo próprio Barnes para questionar o significado de uma incontroversa descoberta científica se refere à história de como Netuno veio a ser conhecido (BARNES, 1982, pp. 94-101). Nesse trecho, Barnes parece confundir a dimensão bastante problemática da validação teórica por meio da observação da natureza com a dimensão muito menos problemática de que observações foram feitas e reproduzidas ao longo do tempo, indicando que um novo objeto foi descoberto. Em outras palavras, há uma confusão entre as discussões sobre se a observação de Netuno significou de fato um triunfo da física newtoniana no século XIX (“descoberta”, entre aspas), e o significado menos problemático de que Netuno havia de fato sido descoberto, sem aspas.

do termo ‘descoberta’ implica que a validação pode ser realizada como um único evento, realmente um sinal de uma teoria inadequada do conhecimento.

Não há como desemaranhar ‘descoberta’ de epistemologia ... é mais vantajoso abandonar completamente o uso sério do termo. Falar em “descoberta” é incentivar uma forma de auto-esquecimento coletivo, inofensivo e até “funcional” na própria ciência, mas desastroso se o objetivo é estudar a ciência (BARNES, 1982, p. 45, grifos meus).

Kuhn parece ter notado que a sociologia da ciência associada ao Programa Forte atacava um espantalho quando, seguindo a sugestão do filósofo Marcello Pera, aponta que há embutida em boa parte dos estudos dessa área uma aceitação tácita de uma concepção muito tradicional do conhecimento científico:

Os autores de estudos microsociológicos estão [...] presumindo demais a visão tradicional do conhecimento científico. Parecem sentir que a filosofia tradicional da ciência estava correta em sua compreensão do que o conhecimento deve ser. Os fatos devem vir primeiro, e conclusões inevitáveis, pelo menos sobre probabilidades, devem ser baseadas neles. Se a ciência não produz conhecimento nesse sentido, concluem, ela não pode estar reproduzindo o conhecimento de maneira alguma. É possível, no entanto, que a tradição estivesse errada não apenas sobre os métodos segundo os quais o conhecimento foi obtido, mas sobre a natureza do próprio conhecimento. (KUHN, 2000, p. 111)⁶

As diferenças entre a concepção de Kuhn sobre a natureza do conhecimento e a visão tradicional começam pela rejeição de uma fixa “plataforma arquimedeano fora da história, fora do tempo e do espaço” que possa escorar alguma tentativa de avaliar o quão distante as “crenças atuais” estão das “crenças verdadeiras”. Kuhn continua reservando um lugar para a verdade em sua concepção do conhecimento, mas não a concebe mais como correspondência com a realidade – ademais, ele não vê qualquer sentido na noção de realidade usualmente pervasiva na filosofia da ciência. Ou seja, nem sequer haveria uma realidade que a ciência falha em conseguir se espelhar. Kuhn rejeita, portanto, “a noção de que o objetivo, na avaliação de leis ou teorias científicas, é determinar se elas correspondem ou não a um mundo externo e independente da mente” (KUHN, 2000, p. 95). Na concepção kuhniana de conhecimento, um corpo de crenças bem estabelecidas pode e deve satisfazer a critérios

⁶ Reproduzo, aqui, a versão original dessa passagem, pois minha tradução livre pode não captar algumas importantes nuances da linguagem empregada por Kuhn: “The authors of microsociological studies are [...] taking the traditional view of scientific knowledge too much for granted. They seem, that it, to feel that traditional philosophy of science was correct in its understanding of what knowledge must be. Facts must come first, and inescapable conclusions, at least about probabilities, must be based upon them. If science doesn’t produce knowledge in that sense, they conclude, it cannot be reproducing knowledge at all. It is possible, however, that the tradition was wrong not simply about the methods by which knowledge was obtained, but about the nature of knowledge itself.”

racionais (ser mais simples, mais preciso, mais consistente, possuir maior amplitude de aplicabilidade) sem que isso constitua razões para crermos que essas crenças sejam mais verdadeiras (*truer*) – nem mesmo faria sentido falar em algo mais ou menos verdadeiro (algo é verdadeiro ou não é), mostrando que seria o caso de falar em mais ou menos provável (embora reconheça a probabilidade como um terreno espinhoso).

Em suma: o que os cientistas produzem não são crenças, mas mudanças de crenças. O que a avaliação científica procura selecionar não são crenças correspondentes a um mundo exterior, mas simplesmente melhores corpos de crença presentes aos avaliadores no momento em que seus juízos são formulados. O que substituiria “um grande mundo independente da mente” sobre o qual diziam que os cientistas poderiam descobrir a verdade é uma “variedade de nichos dentro dos quais os praticantes dessas várias especialidades praticam suas trocas” (KUHN, 2000, p. 120). Esses nichos, diz Kuhn, que são criados e criam ao mesmo tempo as ferramentas conceituais e instrumentais com que seus habitantes praticam sobre ele é tão sólido, real e resistente à mudança arbitrária quanto se dizia que o mundo externo era. Mas, ao contrário do dito mundo exterior, eles não são independentes da mente e da cultura, e eles não se somam num todo coerente e único que nós e os praticantes de todas as especialidades científicas individuais habitamos. Não quer dizer, contudo, que o mundo passa a ser concebido por Kuhn como essencialmente formulado pela ou dependente da mente (*mind-dependent*):

a metáfora de um mundo dependente da mente – como seu primo, o mundo construído ou inventado – prova-se profundamente enganosa. São os grupos e as práticas de grupo que constituem os mundos (e são constituídos por eles). E a prática-no-mundo (*practice-in-the-world*) de alguns desses grupos é a ciência. A unidade primária (*primary unit*) através da qual as ciências se desenvolvem é, como enfatizado anteriormente, o grupo e *os grupos não têm mente* (KUHN, 2000, p. 103, grifo meu).

Numa variação da “virada linguística” que marcou o estruturalismo e o pós-estruturalismo de meados do século XX em diante, Kuhn concebe o mundo e as nossas interações com o mundo como algo delimitado pela linguagem⁷. Na concepção de Kuhn, o mundo é experimentado e essa experiência é comunicada de maneira limitada pelo “léxico da comunidade que o habita”. Ao contrário de pós-modernos e pós-estruturalistas como Jacques

⁷ Os escritos de Kuhn a partir da década de 1970 refletem seu ingresso no departamento de linguística do MIT.

Derrida, por exemplo, Kuhn não compra facilmente a ideia sedutora segundo a qual o mundo é uma construção da linguagem ou da mente:

[eles] sugerem que o mundo é de alguma forma dependente da mente, talvez uma invenção ou construção das criaturas que o habitam, e nos últimos anos essas sugestões foram amplamente adotadas. Mas as metáforas da invenção, construção e dependência da mente são grosseiramente enganosas sob dois aspectos. Primeiro, o mundo não é inventado ou construído. Ao nascer, as criaturas às quais essa responsabilidade é atribuída encontram, de fato, o mundo já existente; encontram seus rudimentos e sua factualidade cada vez mais plena durante a socialização educacional, uma socialização na qual exemplos de como o mundo é desempenha um papel essencial. Além disso, esse mundo é dado experimentalmente aos novos habitantes por herança, incorporando a experiência de seus antepassados em parte diretamente, e em parte indiretamente. Como tal, esse mundo é totalmente sólido: nem um pouco respeitoso dos anseios e desejos de um observador; capaz de fornecer evidências decisivas contra hipóteses inventadas que não correspondem ao seu comportamento. As criaturas nascidas nele devem aceitá-lo como o encontram (KUNH, 2000, p. 101, tradução livre).⁸

O mundo do Kuhn tardio não é uma massa disforme em que projetamos nossa linguagem, nossa psiquê, nossos interesses e nossa vontade de poder, moldando-o de acordo com nossa vontade. Mas também não é nada parecido com o que um realista poderia se satisfazer. Vejamos como outros filósofos reagiram aos desafios lançados por Kuhn.

2.5. Protestos de moderados *down to earth*

2.5.1. Larry Laudan

Uma das novidades epistemológicas da *Estrutura* é a rejeição da ideia de que casos empíricos que contradigam uma teoria devem constituir um motivo racional e suficiente para que essa teoria seja abandonada (i. e., a teoria é considerada refutada e os cientistas

⁸ No original (que contém nuances importantes): “[they] suggest that the world is somehow mind-dependent, perhaps an invention or construction of the creatures which inhabit it, and in recent years such suggestions have been widely pursued. But the metaphors of invention, construction, and mind-dependence are in two respects grossly misleading. First, the world is not invented or constructed. The creatures to whom this responsibility is imputed, in fact, find the world already in place, its rudiments at their birth and its increasingly full actuality during their educational socialization, a socialization in which examples of the way the world is play an essential part. That world, furthermore, has been experientially given, in part to the new inhabitants directly, and in part indirectly, by inheritance, embodying the experience of their forebears. As such, it is entirely solid: not in the least respectful of an observer's wishes and desires; quite capable of providing decisive evidence against invented hypotheses which fail to match its behavior. Creatures born into it must take it as they find it.”

procuram elaborar novas hipóteses). Para Kuhn, essas *anomalias* são algo com que a *ciência normal* é capaz de conviver. Nesse ponto, a crítica de Kuhn ao falseacionismo popperiano gerou uma noção muito vaga acerca do peso das anomalias nas decisões da comunidade científica para continuar adotando ou abandonar um paradigma. Kuhn não é suficientemente claro sobre em que ponto o acúmulo de anomalias torna um paradigma inviável e ajuda a iniciar um período revolucionário. Esse é mais um dos motivos pelos quais é possível fazer uma leitura epistemologicamente relativista das descrições de Kuhn dos períodos de crise e de revolução científicas.

Em 1978, com o debate sobre o progresso da ciência já influenciado por algumas das leituras epistemologicamente relativistas da *Estrutura* – especificamente, a dos sociólogos do Programa Forte de Edimburgo – o filósofo Larry Laudan publicou *Progress and its Problems*, obra que contém influente alternativa à concepção kuhniana de desenvolvimento científico.

O análogo de Laudan para os *paradigmas* de Kuhn e os *programas de pesquisa* de Lakatos é o que ele chamou de *tradições de pesquisa*. Essa unidade de avaliação do desenvolvimento da ciência é, na definição de Laudan, “um conjunto de suposições acerca das entidades e dos processos de uma área de estudo e dos métodos adequados a serem utilizados para investigar os problemas e construir as teorias dessa área do saber” (LAUDAN, 1978/2011, p. 115).

Assim definida, a tradição de pesquisa não parece muito diferente de suas contrapartes kuhnianas e lakatosianas. As diferenças ficam mais evidentes na proposta de Laudan de critérios objetivos de avaliação da progressividade das tradições de pesquisa: a capacidade de resolução de problemas. Segundo essa proposta pragmática, é racional a mudança teórica caso a escolha esteja baseada numa avaliação do grau de sucesso da teoria na resolução de problemas. Enquanto as formulações da filosofia da ciência viam o progresso como dependente da racionalidade (i. e., haverá progresso científico se as mudanças teóricas forem racionais), Laudan propõe um modelo em que a racionalidade depende da progressividade, invertendo essa relação de dependência. A escolha pela aceitação ou desenvolvimento de uma tradição de pesquisa será racional se a tradição de pesquisa escolhida for aquela que apresenta maior efetividade na resolução de problemas – ou seja, na concepção de Laudan, a mais progressiva. O alvo de Laudan era a elaboração de uma concepção com critérios objetivos de progresso científico (evitando as armadilhas relativistas)

desvinculada da noção de progresso científico em direção à verdade (evitando as armadilhas da concepção da verdade como correspondência com o mundo).

Não me deterei nos detalhes dessa metateoria de Laudan. Considero que as formulações desse filósofo sobre o progresso da ciência são frutíferas para as análises que proporei no capítulo 5 especificamente em sua contraposição e críticas às metateorias anteriores, especialmente as de Kuhn e Lakatos. Em particular, as críticas de Laudan à filosofia da ciência que o precedeu (incluindo o falseacionismo e o positivismo lógico) são mais fecundas para a compreensão do caminho histórico trilhado pelas teorias de formação do sistema solar do que suas tentativas de formular uma normatividade epistemológica baseada numa taxa de resolução de problemas.

Um dos contrastes mais acentuados entre Laudan e Kuhn é o da possibilidade de coexistência entre diferentes tradições de pesquisa numa mesma área de investigação. Para Kuhn, há apenas um paradigma orientando as pesquisas numa determinada área e não pode haver outro. Ao aceitar o paradigma e desenvolver pesquisas que constituem a ciência normal, a comunidade científica de uma determinada área de investigação não o questiona criticamente e não desenvolve outro paradigma. Em oposição a isso, Laudan propõe uma imagem do desenvolvimento da ciência em que “a coexistência de teorias rivais é a regra, não a exceção” (LAUDAN, 1996, p. 78). Um mesmo cientista pode escolher entreter ou perseguir diferentes teorias ou tradições de pesquisa sem que isso signifique uma capitulação ao irracionalismo, um estado imaturo da ciência desenvolvida em determinada área, ou mesmo a incapacidade de avaliar a efetividade de resolução de problemas de uma tradição de pesquisa. A base para essa concepção de Laudan é a própria história da ciência e, antecipo, há alguns exemplos que a confirmam no desenvolvimento histórico do campo das teorias de formação do sistema solar.

Outro ponto relevante das concepções de Laudan sobre o desenvolvimento da ciência é a superação das dicotomias crença-descrença e aceitação-rejeição nas descrições das posturas assumidas pelos cientistas em relação às teorias. Uma teoria que ainda não se mostre digna de aceitação por parte da comunidade científica pode apresentar um progresso inicial ou provisório que justifique o empenho dos cientistas em desenvolvê-la. (Laudan não parece entreter a noção de potencial de progresso e prefere falar em progresso efetivo inicial de resolução problemas, mas a avaliação intuitiva do potencial de progresso de uma teoria não deve ser descartada como um critério válido de escolha teórica em determinados contextos históricos, como procurarei argumentar no capítulo 5). Haveria, portanto, um “espectro de

modalidades cognitivas”, que inclui entreter, perseguir, trabalhar com uma ou várias teorias ainda não estabelecidas, sem que isso necessariamente signifique uma rendição à concepção de escolha teórica como essencialmente irracional (LAUDAN, 1978/2011, p. 160). É o que Laudan chama de *exploração racional*.

Uma concepção de Laudan que diverge de maneira muito clara da noção de paradigma kuhniano e dos programas de pesquisa lakatosianos é a forma como ele encara modificações e ajustes teóricos que visem eliminar as anomalias de uma tradição de pesquisa. Essas modificações podem fazer a tradição de pesquisa efetivamente *evoluir*. Ainda que consideravelmente diferente após as modificações, trata-se da mesma tradição de pesquisa (só que melhor). Vale a pena acompanhar a exposição do livro de 1978 sobre isso:

Ao longo de seu desenvolvimento, as tradições de pesquisa e as teorias que elas patrocinam vão de encontro a muitos problemas: descobrem-se as anomalias; surgem problemas conceituais básicos. Em alguns casos, os defensores de uma tradição de pesquisa se veem na impossibilidade, modificando teorias específicas dessa tradição, de eliminar esses problemas anômalos e conceituais. Nessas circunstâncias, é comum que os partidários de uma tradição de pesquisa explorem que tipo de mudanças (mínimas) podem ser feitas na metodologia ou na ontologia profundas dessa tradição de pesquisa para eliminar as anomalias e problemas conceituais enfrentados por suas teorias constituintes. Às vezes os cientistas descobrem que nem com grande quantidade de remendos em uma ou outra suposição da tradição de pesquisa se podem eliminar suas anomalias e seus problemas conceituais. Isso se transforma em uma forte razão para abandonar a tradição de pesquisa (desde que haja uma alternativa em vista). Mas, talvez, com maior frequência, os cientistas descobram que, introduzindo uma ou duas modificações nas suposições fundamentais da tradição de pesquisa, eles tanto resolvem os importantes problemas conceituais e as anomalias, quanto podem manter intacta a parte principal das suposições da tradição de pesquisa. (LAUDAN, 1978/2011, p. 138, grifos do autor).

As hipóteses e modificações *ad hoc* são geralmente tomadas pelos filósofos da ciência como sinais de que um determinado corpo teórico se encontra estagnado, em crise, degenerado. O exemplo clássico dessa concepção é o estado do sistema aristotélico-ptolomaico no século XVI, com a proliferação de epiciclos, recursos *ad hoc* para “salvar os fenômenos” observados com crescente precisão. Outro exemplo muito conhecido é o suposto planeta Vulcano, que existiria em órbita muito próxima do Sol, conjecturado no século XIX a partir das anomalias observadas na órbita de Mercúrio. O hipotético planeta, que salvava a mecânica newtoniana da refutação, acabou sendo permanentemente descartado após a emergência da teoria da relatividade geral de Einstein. Há, de fato, vários casos na história da ciência que justificam a desconfiança de cientistas e filósofos com esse tipo de recurso teórico. Mas o que Laudan procura defender – e é também algo que explorarei no capítulo 5 –

é que mesmo que haja modificações substanciais numa tradição de pesquisa para ajustá-la às observações e aos dados empíricos anômalos (e ainda que esses ajustes tenham caráter *ad hoc*), é possível distinguir em alguns desses processos marcas do progresso científico. Para Laudan, ainda é possível falar de uma mesma (e não de uma nova e diferente) tradição de pesquisa, ainda que profundamente modificada. É o que ele chama de “evolução natural de uma tradição de pesquisa” (LAUDAN, 1978/2011, p. 139). Relacionado a essa questão, Laudan propõe algo que incorporo nas análises que desenvolvo no capítulo 5: as diversas dificuldades encontradas pelos cientistas para explicar os fenômenos por meio de uma teoria (ou adequar a teoria aos fenômenos) podem e devem levantar dúvidas quanto aos méritos dessa teoria, mas não obrigam o seu abandono nem tornam necessariamente irracional a persistência dos cientistas em continuar desenvolvendo a teoria, apesar das possíveis inadequações desta num dado momento histórico.

Por fim, há uma concepção de Laudan sobre os objetivos da ciência que, como veremos na próxima seção, ecoará em dois filósofos moderados, também críticos de Kuhn: Susan Haack e Alan Chalmers. Ao contrário de Laudan, nenhum deles propõe uma metateoria normativa do funcionamento da ciência. Ambos, porém, partiram de constatações parecidas com as de Laudan sobre os problemas do relativismo epistemológico que pode ser lido em Kuhn, assim como compartilham com Laudan a percepção de que é preciso abandonar uma suposição do positivismo lógico que parece estar tacitamente embutida (com sinal invertido) na visão daqueles que negam toda forma de progresso da ciência. Essa percepção é a de que devemos abandonar como alvo (*aim*) ou objetivo (*goal*) da ciência noções transcendentais como a verdade (e suas variantes: a aproximação assintótica da verdade, a busca por aumentar o grau de verossimilhança) ou a certeza apodítica (certeza necessária, logicamente demonstrada) (LAUDAN, 1996, p. 78). Além de provavelmente inatingíveis, esses objetivos transcendentais são geralmente interpretados como condições necessárias para que se considere que a ciência progride. Mas há vários problemas filosóficos ligados à sustentação de que a ciência é capaz de progredir rumo a esses objetivos transcendentais. Por isso, não raramente, a conclusão de que não podemos verificar se estamos nos aproximando (ou nos distanciando) da verdade motivou o apressado diagnóstico de que a ciência simplesmente não progride. Veremos na seções 2.5.2. e 2.5.3. que, além de ecoarem muito das formulações de Laudan sobre o desenvolvimento científico, Chalmers e Haack forneceram argumentos frutíferos para contornar os problemas causados por essa concepção.

*

Nas últimas duas décadas do século XX, o aumento da influência do construtivismo social nos meios acadêmicos ocidentais (principalmente nos Estados Unidos) e a estridência anticientífica do pós-modernismo geraram, previsivelmente, um *backlash* por parte de um numeroso e diversificado grupo de cientistas e intelectuais. Inicialmente discutidos e rebatidos dentro dos campos esotéricos da epistemologia, da filosofia e da sociologia da ciência, os ataques céticos ao *status* epistemológico das ciências naturais e as respostas em defesa da ciência e da racionalidade ingressaram numa arena mais ampla e reverberaram no debate público. A disputa ficou conhecida como *science wars* e foi travada num espesso *fog of war*, que alguns pensadores tentaram dissipar. Alan Chalmers e Susan Haack deram contribuições importantes para uma visão bastante moderada e sensata da ciência, mantendo distância das armadilhas localizadas nos extremos do debate.

2.5.2. Alan Chalmers

“Nos tempos modernos a ciência é muito respeitada”: essa é a frase de abertura de um livro introdutório de filosofia da ciência, *What is this thing called science?*, publicado originalmente em 1976 e que fez muito sucesso, tornando-se um *best seller*. Seu autor, Alan Chalmers, mais tarde ponderaria: “quinze anos dando aula numa faculdade de artes, bem como a inclinação para algumas formas da filosofia e sociologia contemporânea, me proporcionaram uma ideia da quantidade de ressalvas de que essa afirmativa necessita” (CHALMERS, 1994, p. 11). Chalmers escreve *Science and Its Fabrication* procurando rejeitar tanto o que chama de filosofia ortodoxa da ciência, quanto o relativismo epistemológico esposado por sociólogos radicais. Era o ano de 1990 e já se faziam ouvir os disparos das *science wars*.

O filósofo australiano reconhece que muitas das críticas à ciência produzidas pela sociologia da ciência e outros nichos de reflexão intelectual são bemvindas e mostra aguda sensibilidade quanto à necessidade de que seja discutido o papel político e socioeconômico da ciência, de maneira que objetivos como o de produzir mais conhecimento científico não sejam vistos como absolutos e necessariamente superiores a, por exemplo, o de utilizar de maneira mais justa e equitativa o conhecimento científico e suas benesses materiais. Para Chalmers, a

ciência não está de maneira alguma desconectada das influências políticas, sociais, econômicas e culturais. Mas, esclarece, nem deveria ser necessário que assim fosse para que as ciências naturais fossem bem-sucedidas na realização de suas metas. Além disso, Chalmers identifica os problemas mais espinhosos da epistemologia e reconhece neles barreiras intransponíveis para o cumprimento das exageradas expectativas da filosofia da ciência da primeira metade do século XX. Nada disso, porém, justificaria o ceticismo e o sentimento anticientífico da pós-modernidade, nem autorizaria as conclusões relativistas dos construtivistas sociais e outros críticos da ciência.

A pilastra central de *Science and Its Fabrication* é a concepção de *meta da ciência*, que Chalmers define genericamente como *produzir generalizações teóricas aplicáveis ao mundo*. Em substituição a um utópico método universal de obtenção de tais generalizações, Chalmers propõe exigências gerais razoavelmente modestas para que a ciência atinja a sua meta – a principal delas é “que as candidatas a leis e teorias científicas sejam justificadas pelo confronto rigoroso delas com o mundo, de modo a tentar estabelecer sua superioridade em relação a outras concorrentes” (CHALMERS, 1994, p. 57-8).

O confronto das teorias com o mundo é um dos problemas clássicos da epistemologia e a noção de que as observações e experimentações nunca acontecem independentemente das teorizações é uma das formulações mais influentes nas discussões filosóficas sobre a produção de conhecimento científico. O nó do problema é que o caráter teórico-dependente dos dados empíricos é geralmente interpretado pelos céticos como justificativa suficiente para encarar o processo de teorização como mera expressão de opiniões e para negar ao teste empírico um caráter racional, como se fosse possível dizer qualquer coisa sobre o funcionamento da natureza. Como Chomsky diz com muita simplicidade, *nature is tough*, e é precisamente com a consciência disso que Chalmers rejeita as formulações mais radicais do construtivismo social, que se passam por crítica da ciência ao mesmo tempo em que obliquamente propõem uma tese forte sobre o caráter do conhecimento da natureza.

“[O] experimento não implica simplesmente falar sobre o mundo, mas, na prática, agir sobre ele”, diz Chalmers (CHALMERS, 1994, p. 97). *Agir sobre o mundo* está tão distante de *inventar o mundo* quanto de *desvendar o mundo*. Embora caricaturais, ambas as expressões capturam tanto a ingenuidade do idealismo linguístico e suas variantes (o mundo é criado pela linguagem, pela cultura, pela sociedade etc.), quanto daqueles exageradamente entusiasmados com o privilégio epistemológico da ciência (e sua suposta capacidade de

deixar a natureza falar). Com muito bom senso, Chalmers não vê um *logos* na natureza, mas não deixa de reconhecer – acompanhando a tradição moderna desde a revolução científica – que podemos interrogá-la, ainda que ela não se deixe apreender facilmente. Enfim, o problema da dependência teórica da observação não apaga o mundo do processo de construção do conhecimento, nem autoriza julgá-lo pouco importante. Chalmers sintetiza esse posicionamento de forma inequívoca:

os resultados dos experimentos são antes determinados pela maneira como é o mundo, em vez de pelas teorias que informam seu projeto ou interpretação, ou pela crença do experimentador nessas teorias. Embora os detalhes de um arranjo experimental, assim como o significado associado aos resultados, dependam do julgamento do experimentador orientado pela teoria, uma vez ativada a aparelhagem, é a natureza do mundo que determina o posicionamento de um ponteiro numa escala, os cliques do contador geiger, os relâmpagos numa tela e assim por diante. [...] O fato de serem os resultados experimentais determinados pela maneira como o mundo funciona e não pelos pontos de vistas teóricos dos experimentadores é que proporciona a possibilidade de testar-se a teoria em relação ao mundo. Isso não quer dizer que se obtenha com facilidade resultados significativos, também não é uma negação de que o significado dos resultados experimentais seja às vezes ambíguo e nem uma exigência de que os resultados experimentais e as conclusões deles extraídas sejam infalíveis. (CHALMERS, 1994, p. 97-8)

Chalmers pode parecer excessivamente conservador se essa passagem for lida fora de contexto. Se de um lado há a consciência da falibilidade dos aparatos cognitivos (naturais e artificiais) dos seres humanos aplicados nas ciências, e do outro o relativismo epistemológico e outras variantes céticas, entre ambos há um caminho curto. Chalmers não trilhou esse caminho. Seu alvo, como ele mesmo diz, são as correntes que negam a capacidade científica de teste das teorias em embate com o mundo, não o falibilismo. Na visão moderada antipositivista de Chalmers, as estruturas sociais, econômicas, políticas e culturais fornecem motivações e *constraints* importantes para o que podemos e queremos dizer sobre o mundo e qual aspecto do mundo desejamos apreender e manipular. Segundo a mesma visão moderada, que também é anti-relativista, o mundo permanece um *constraint* fundamental, algo “que não respeita os desejos e anseios do observador e capaz de fornecer evidência decisiva contra hipóteses inventadas”, para lembrar a definição do próprio Kuhn, alguém que via o mundo como de alguma forma dependente da mente. Em suma, o mundo não é colocado entre aspas, assim como não é de todo removido das disputas teóricas ou do processo de justificação das teorias.

2.5.3. Susan Haack

No rescaldo sem resolução das *science wars*, uma disputa pródiga em produzir mal-entendidos e desorientação, a filósofa britânica Susan Haack fez alguns dos melhores esforços em dissipar o nevoeiro com um objetivo parecido com o de Chalmers: defender a ciência sem cancelá-la como atividade epistemologicamente privilegiada nem encará-la como algo apartado de interesses sociais, econômicos e políticos. As duas obras fundamentais nessa empreitada são *Manifesto of a Passionate Moderate* (1998) e *Defending Science – Within Reason* (2003). Os detalhes do *critical common-sensism* proposto por Haack, além do realismo e o pragmatismo embutidos nessa visão, merecem exposição mais detalhada, mas é suficiente para o propósito do presente trabalho um panorama de seus aspectos gerais.

Para Haack, as ciências naturais são extensões de nossa capacidade de inquirição e estão irmanadas a outras formas de investigação empírica, do jornalismo à investigação criminal. Todos os que desejam descobrir como as coisas são ou estão usam (na frase de Peirce, que Haack endossa) “o método da experiência e raciocínio”. As ciências só aprofundaram enormemente a capacidade experimental e a sofisticação de raciocínio. Porém, embora não sejam epistemologicamente privilegiadas, as ciências distinguem-se das investigações empíricas comuns na medida em que se desenvolvem em simbiose com um impressionante refinamento de tecnologias, de aparatos conceituais e intelectuais, de modelos matemáticos e estatísticos, entre outros. Ou seja, uma gama de avanços técnicos aumenta o alcance da inquirição humana da natureza e amplifica as tradicionais formas de investigação empírica cotidiana. Além disso, são características distintivas do conhecimento científico os esforços sistemáticos para isolar uma variável por vez, testar, projetar experimentos, desenvolver instrumentos sofisticados, e o engajamento (competitivo e cooperativo) de gerações no empreendimento científico.

Isso tudo faz das ciências naturais um ramo epistemologicamente distinto das investigações empíricas. Mas não privilegiado, e certamente não unificado por um método e por regras gerais de aceitação de uma teoria e de favorecimento de uma hipótese em relação a outra. Haack ataca a ideia de um método científico distintivo, que garantiria progresso, se bem aplicado. Concede que (mesmo) a (boa) investigação científica é muito mais caótica do que pensavam os positivistas, ressaltando que ela é também muito mais suscetível a *constraints* gerados pela natureza do que sonham os construtivistas sociais.

Semelhante ao diagnóstico de Pera utilizado por Kuhn contra o Programa Forte, um dos pilares argumentativos de Haack é o reconhecimento de que há, operando silenciosamente nas teses epistemologicamente relativistas dos construtivistas sociais, uma aceitação tácita dos pressupostos da filosofia da ciência pré-kuhniana sobre como conceber o conhecimento científico e distingui-lo de especulação metafísica sem sentido: de maneira estritamente lógica. “[A] raiz do problema”, diz Haack após examinar a visão de W. V. Quine, “está na concepção estritamente lógica da racionalidade comungada entre os Velhos Deferencialistas, tanto indutivistas quanto dedutivistas, e pelos Novos Cínicos.” (HAACK, 2003, p. 51, grifo dela). Haack chama de Velhos Deferencialistas os representantes do positivismo lógico e do cientificismo ingênuo da visão tradicional ou clássica da ciência; os Novos Cínicos são os sociólogos da ciência autoproclamados kuhnianos e as variadas vertentes de relativismo epistemológico, do construtivismo social ao idealismo linguístico esposados pelos críticos da ciência no final do século XX.

Haack astutamente percebe que tanto uns quanto outros aceitam as mesmas suposições sobre o que deveria ser a ciência: uma forma de produzir conhecimento impessoal e universal por meio da explicação de observações e fatos objetivos, logicamente justificada e sustentada por evidências. Nessa visão *standard*,

a genuína teoria científica se compõe de enunciados cujos valores-de-verdade podem ser determinados confrontando “o que se diz” com “o que se observa”. Sendo assim, a validação de uma teoria pode ser estabelecida de modo impessoal e a salvo de influências contextuais. O cognitivo é determinado apenas pela lógica e pela experiência. (OLIVA, 2007, p. 7).

Essa concepção é problemática porque nada do gênero pode ser encontrado na história da ciência – especialmente após a sofisticação da historiografia, que emergiu ainda na primeira metade do século XX rompendo com a interpretação *whig* e seu otimismo com o progresso, sua visão heroica dos cientistas como indivíduos excepcionais, e suas narrativas excessivamente deferentes em relação à ciência. Além disso, o questionamento da clássica distinção entre contexto de descoberta e contexto de justificação impulsionou análises que capturaram com algum sucesso a prática científica como ela se manifesta no mundo, com suas conexões sociais, culturais, históricas. Em resumo, a concepção tradicional não se sustentou quando confrontada com a realidade e com a história. Mas se ela não se sustenta, seria a ciência indistinguível de especulação metafísica sem sentido?

Chalmers e Haack notam, cada um à sua maneira, a proximidade e o sinal invertido das conclusões dos Novos Cínicos e Velhos Deferencialistas. Primeiro, imaginou-se que a ciência constituiria a única forma legítima de produzir conhecimento sobre o mundo e todas as outras representações e interpretações de fenômenos deixariam de fazer sentido. Depois, com a consciência de que a ciência não é capaz de produzir o que se concebia como única forma de conhecimento legítimo, veio a conclusão de que ela não se diferenciaria de outras atividades humanas dedicadas a elaborar representações da realidade e interpretações da natureza. Daí a proclamação de que os problemas espinhosos da filosofia da ciência são insuperáveis e a conclusão de que “os supostos ideais de investigação honesta, respeito pela evidência, preocupação com a verdade, é uma forma de ilusão, uma cortina de fumaça ocultando operações de poder, política e retórica” (HAACK, 2003, p. 20).

Da desilusão nasceria o cinismo, portanto. Mas um bom antídoto para o cinismo é perceber que a *heartbreak* ocorreu por conta da frustração de expectativas irrealizáveis. Haack faz justamente isso, propondo uma concepção mais modesta e mundana sobre a maneira como se produz o conhecimento científico e suas distinções epistemológicas. Essa concepção evitaria as armadilhas do positivismo lógico (e suas versões em negativo, como a de Quine e Popper) e uma consequência de sua falência, que é a via aberta para a conclusão construtivista social de que os conteúdos da ciência são estritamente produtos sociais, gerados por negociações políticas e relações de força, em que a natureza desempenha papel pouco ou nada relevante. No pragmatismo moderado de Haack, também volta à arena algo “que está faltando tanto na abordagem lógico-formal dos velhos deferentes e na abordagem histórico-sociológico-retórica dos novos cínicos” (HAACK, 2003, p. 52); algo de que Kuhn também sentiu falta ao ler criticamente o Programa Forte, e que Chalmers recoloca no centro do campo: *o mundo*.

Como Chalmers, Haack vê como aspecto fundamental da ciência a necessidade de que nossas hipóteses e teorias sejam testadas em relação ao mundo, e não subestima o sucesso das ciências naturais nesse jogo. De alguma forma que ainda não entendemos satisfatoriamente – é possível que os grandes teóricos do funcionamento da ciência sequer tenham arranhado o problema – as ciências conseguem apreender algo corretamente sobre o funcionamento da natureza. Haack define esse sucesso como a obtenção de “teorias profundas, amplas e explicativas, bem ancoradas em evidência experimental, encaixando-se surpreendentemente umas com as outras” (HAACK, 1998, p. 106). Mas a ancoragem empírica é muito mais complexa do que a visão *standard* imagina.

A ancoragem empírica para alegações e teorias científicas compõe-se de “evidência experimental e razões trabalhando juntas”, ao contrário de fatos e dados objetivos prontos para serem colhidos na realidade. A complexidade da ancoragem empírica – a subdeterminação (*underdetermination*) da teoria pela evidência e o caráter teórico-dependente das observações são questões bastante ilustrativas do problema – e a consciência de que o processo de teorização e teste não é puro, mas rotineiramente influenciado por razões externas, são alguns dos flancos pelos quais a autoridade epistêmica das ciências naturais pode ser atacada com a afirmação de que a ciência e seus conteúdos são fenômenos essencialmente sociais, ou epifenômenos das disputas políticas, econômicas, e assim por diante. Haack, obviamente, contesta essas concepções, concebendo a “ciência como social”, mas de forma semelhante aos sociólogos da ciência mertonianos. Nesse ponto, Haack introduz a distinção entre *acceptance* (aceitação) e *warrant* (justificação).

Warrant é uma noção normativa: a condição de justificação de uma proposição é uma questão de quão bem ou mal a evidência apoia a proposição, de qual é o nível em que determinada hipótese e teoria está ancorada em evidências, de qual é o peso da evidência na sustentação de uma determinada crença. *Warrant* é, em princípio, tratável de maneira objetiva. *Acceptance* é uma noção descritiva: como a proposição é encarada, aceita ou rejeitada pela comunidade. “O ideal é que as condições de aceitação (*acceptance-status*) de uma alegação variem concomitantemente com as condições de justificação (*warrant-status*)” (HAACK, 1998, p. 108). É indesejável que uma teoria tenha um nível de justificação baixo e aceitação alta, e vice-versa. Haack reconhece que isso pode ocorrer com muita frequência no nível individual. Mas o social é visto pela filósofa como um dos fatores que ajudam a manter a *acceptance* apropriadamente correlacionada com a *warrant*. Os relativistas epistemológicos, ao contrário, focam na “*acceptance* às expensas de *warrant*” como consequência de fatores sociais: alguns minimizam *warrant* e acentuam *acceptance*, outros ignoram completamente *warrant* e reconhecem apenas *acceptance* (HAACK, 1998, p. 110).

Nessas visões, os valores sociais guariam não apenas quais questões devem ser encaradas, mas também quais soluções podem ser vislumbradas – daí a travessia fácil da ponte entre Velhos Deferencialistas e Novos Cínicos, chegando à conclusão de que os conteúdos da ciência também são socialmente condicionados ou determinados. (HAACK, 1998, p. 111). A resposta de Haack a essa conclusão: embora no nível individual inevitavelmente haverá uma multiplicidade de crenças exageradas (*overbelief*) ou descrenças exageradas (*underbelief*) em relação a determinadas proposições, hipóteses ou teorias, a

variação concomitante entre o *warrant-status* e o *acceptance-status* tenderá a ser mais apropriadamente correlacionada num nível coletivo, em que podem ter papel positivo relevante determinadas características sociais como a combinação de competição com colaboração, a intersecção de competências entre os atores e o escrutínio crítico institucionalizado (idem, p. 108). Isso implica uma concepção do progresso da ciência como algo que não encontra interdição necessária na concepção da “ciência como social”, mas também não é implicada por toda e qualquer configuração social. Em resumo, se a configuração social varia, a capacidade de progredir pode ser afetada.

Nos capítulos 4, 5 e na conclusão, mobilizarei argumentos de ordem filosófica para justificar a intuição de que a ciência fez progressos substanciais rumo à compreensão de aspectos importantes da formação do sistema solar. Combinarei o falibilismo de Haack e a ênfase de Chalmers na possibilidade de que as observações podem ser consideradas objetivas com uma abordagem de inspiração laudiana baseada no aumento da capacidade de uma área em solucionar e definir problemas. Minha abordagem se distancia de concepções que identificam o progresso científico a progresso teórico (como a de Kuhn), permitindo que avanços na capacidade de observação e da produção de dados empíricos (como os que produziram o conhecimento atual sobre discos protoplanetários e planetas extrassolares) sejam compreendidos como filtros fundamentais para o trabalho de investigação e teorização. Na interpretação que proponho, o progresso científico na área das planetogonias é perceptível com uma avaliação de sua crescente ancoragem empírica em observações astronômicas de objetos análogos a sistemas planetários em formação e o adensamento das interconexões das teorias planetogônicas com o corpo de conhecimento científico de áreas mais amplas, como a astrofísica.

Capítulo 3. Um exame da história das teorias sobre a formação do sistema solar

[T]he history of science – especially physics – has in part been the tension between the natural tendency to project our everyday experience on the universe and the universe’s noncompliance with this human tendency.

Carl Sagan (1934-1996), *Varieties of Scientific Experience* (2006)

No cosmos aristotélico-ptolemaico, as teorias de origem do mundo (*cosmogonias*) não tinham lugar. Para Aristóteles, não fazia sentido teorizar sobre o começo e o fim do mundo pois o cosmos era eterno. Ele rejeitava as cosmogonias dos filósofos da tradição jônica (também chamados de pré-socráticos) baseando-se numa concepção do movimento, aspecto básico de seu mundo físico, como algo que não pode ter começo nem fim (SOLMSEN, 1958). Até o século XVII, o predomínio dessa concepção na tradição filosófica ocidental interditou o caminho para a elaboração de cosmogonias de caráter naturalista e empurrou quaisquer questionamentos acerca da origem do mundo para o campo da teologia.

A Revolução Copernicana não apenas destruiu o universo aristotélico, como lentamente reabriu o caminho para o surgimento de cosmogonias naturalistas. As primeiras décadas do século XVII são um período de agudo crescimento da adesão de filósofos da natureza ao modelo heliocêntrico. As observações astronômicas de Galileu Galilei (1564-1642) e as três leis do movimento planetário de Johannes Kepler (1571-1630) sedimentaram essa mudança profunda na cosmologia ocidental, mas não forneceram incursões no problema das origens do sistema solar a partir de processos naturais.

Outros sistemas planetários: uma consequência da concepção heliocêntrica do mundo é que a trajetória descrita pela Terra em torno do Sol deveria gerar um efeito de paralaxe na observação das chamadas “estrelas fixas”. Acontece que essa paralaxe não era observada no século XVII, o que gerava duas possibilidades auto-excludentes: ou a Terra não está girando em torno do Sol e é por isso que as paralaxes não são detectadas, ou as estrelas estão a distâncias maiores de nós do que as que seriam passíveis de produzirem paralaxe – distâncias até então inimaginavelmente grandes. A visão do tamanho da estrutura cósmica

estava prestes a se expandir numa escala gigantesca: se as estrelas são absurdamente longínquas, mas brilham no céu noturno com a intensidade que observamos, então seu brilho intrínseco deve ser comparável ao do Sol. Esses objetos devem ser sóis.

Esse impasse empírico específico não freou a vitória do copernicanismo ao longo do século XVII e sua consolidação no século XVIII. Mesmo com o progresso na construção de telescópios nesse período, a paralaxe estelar continuava eludindo os astrônomos. De fato, o fenômeno só foi inequivocamente observado em 1838 (HOFFLEIT, 1949, p. 265), quando já não havia mais qualquer traço de defesa séria do geocentrismo.

Uma consequência da aceitação do heliocentrismo foi, portanto, a conclusão (sem comprovação empírica direta) de que as estrelas estão situadas a distâncias enormes e são objetos semelhantes ao Sol. A partir da vitória do copernicanismo, hipóteses cosmogônicas passaram a ter um impacto direto e específico nas concepções sobre a pluralidade dos mundos e o lugar da humanidade na natureza. Se a hipótese sobre a formação do sistema solar concebe os planetas como subproduto da formação do Sol, se o Sol e os planetas devem sua existência a uma mesma causa primordial, então cada estrela poderia abrigar planetas. Hipóteses desse tipo povoariam o universo com incontáveis sistemas planetários. Por outro lado, se um evento incomum ou catastrófico for concebido como responsável pela formação dos planetas ao redor do Sol, se não houver na origem dos planetas e da estrela uma mesma causa primordial, se os planetas não são subprodutos da formação estelar, então por mais que as estrelas sejam objetos semelhantes ao Sol e haja bilhões (ou melhor, trilhões) delas, haveria uma grande probabilidade de que os sistemas planetários são raríssimos no universo. Hipóteses desse tipo reforçariam a visão do sistema solar como algo único – ou mesmo *o único* sistema planetário do universo. Com referência a essa dicotomia, o lado que resultava em inúmeros sistemas planetários teve forte predomínio entre as cosmogonias desde o século XVII até o início do século XX.

O primeiro exemplo de cosmogonia surgida no *framework* copernicano, naturalista e mecanicista, foi proposta por René Descartes (1596-1650). A teoria cartesiana dos vórtices marca a fundação da cosmogonia moderna (WHITROW, 1977, pp. 166-7): a abertura de uma rota em que as teorias cosmogônicas lidariam apenas com processos naturais para a explicação da origem do Sol, da Terra, dos outros planetas e satélites, bem como a de outras estrelas e sistemas planetários (seção 3.1.). No século XVIII, o caminho aberto por Descartes influenciou o surgimento de hipóteses cosmogônicas naturalistas que desembocaram na visão de um universo com inúmeros sistemas planetários.

O triunfo da mecânica newtoniana havia gerado perplexidade dada a aparente impossibilidade de que a origem do sistema solar fosse explicada por hipóteses naturalistas: a intervenção divina era vista pelo próprio Isaac Newton (1643-1727) como necessária não apenas para manter as órbitas dos planetas como estão, mas também para tê-las assim originado (WHITROW, 1977, p. 166). Em 1734, o polímata sueco Emanuel Swedenborg (1688-1772) propôs uma cosmogonia baseada numa interpretação cartesiana da teoria da gravitação (DUNER, 2013, p. 314): inspirado por ideias metafísicas sobre a perfeição do movimento espiral, Swedenborg imaginou uma nuvem primordial em contração e rotação como origem do sistema solar. Outros filósofos naturais seguiram o mesmo caminho: o jovem Immanuel Kant (1724-1804), em 1755, e Johann Heinrich Lambert (1728-1777), em 1761, propõem cosmogonias mais ou menos parecidas com as de Swedenborg (veremos a cosmogonia de Kant, muito discutida no século XX, na seção 3. 2.). A única alternativa catastrofista desse período foi proposta pelo naturalista francês Charles-Louis Leclerc, Conde de Buffon (1707-1788), que em 1749 propôs uma colisão entre o Sol e um cometa como evento gerador do sistema planetário ao redor da estrela.

As hipóteses de Swedenborg e Kant são comumente representadas em materiais didáticos e de divulgação científica como exemplos precoces da primeira cosmogonia inequivocamente ancorada na mecânica newtoniana, proposta inicialmente em 1796 por aquele que mais contribuiu para o desenvolvimento de uma mecânica celeste newtoniana no final do século XVIII: Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827) (LAPLACE, 1808 e 1824). A hipótese de Laplace ficou conhecida desde então como hipótese nebular. O nome deriva de uma analogia entre nebulosas e sistemas planetários em formação, feita pelo astrônomo britânico William Herschel (1738-1822).

A hipótese nebular foi a cosmogonia predominante durante todo o século XIX e ajudou a engendrar uma visão de mundo evolucionista e otimista quanto à pluralidade de sistemas planetários. Como veremos, a ciência oitocentista encontrou várias dificuldades para coadunar essa cosmogonia com características conhecidas do sistema solar – o mais importante foi o problema da distribuição de momento angular (seção 3.2.3.). No início do século XX, a cosmogonia laplaciana foi substituída por alternativas que postulavam um encontro entre o Sol já formado e uma segunda estrela como evento gerador do sistema solar (seção 3.3.). Nas primeiras quatro décadas desse século, as *hipóteses do encontro estelar* foram predominantes e geraram uma visão do universo em que os sistemas planetários são extremamente raros.

A partir da década de 1950, voltaram a ser favorecidas pela comunidade científica hipóteses que consideraram a formação do Sol e dos planetas como resultado de processos interconectados, e desembocaram novamente na pluralidade de sistemas planetários (seção 3.4.). Essas hipóteses possuem diferenças fundamentais com relação à hipótese nebular, guardando dela apenas reminiscências de um cenário geral em que os planetas são subproduto da formação do Sol. Por isso, não devem ser consideradas meras atualizações da cosmogonia laplaciana, como frequentemente ocorre em materiais de divulgação científica e de revisão histórica da área.

Algumas das hipóteses da segunda metade do século XX, como a do astrônomo soviético Victor Safronov (1917-1999), forneceram as bases das atuais teorias de acreção de gás e poeira em discos protoplanetários (seção 3.4.4.). Desde meados da década de 1990, as teorias atuais têm a vantagem inédita de poderem ser testadas e aprimoradas com o conhecimento de planetas e sistemas planetários extrassolares (atualmente, o número de exoplanetas de existência considerada confirmada é de quase 4 mil). Nesse contexto, a comunidade científica dedicada à compreensão da origem do sistema solar e de outros sistemas planetários convergiu para um consenso em torno da visão de que a formação dos planetas está intrinsecamente ligada à formação das estrelas (seção 3.4.5.).

No entanto, mesmo com mais de duas décadas de descobertas de planetas extrassolares, em momento algum o tratamento científico do problema da origem do sistema solar parece ter fornecido uma solução plenamente satisfatória quanto à capacidade de se chegar a alguma conclusão sobre se nosso sistema planetário é típico ou raro, comum ou incomum. Talvez o aspecto mais importante desse caminho rumo às planetogonias científicas atuais é o progressivo incremento da complexidade e do detalhamento com que o problema é tratado, assim como o crescimento exponencial dos dados empíricos disponíveis. A ancoragem empírica e a interconexão na rede de teorias astrofísicas, astronômicas, cosmológicas, químicas e geológicas das atuais teorias planetogônicas é notável. Nesse sentido, houve um progresso sensível, acentuado e inequívoco.

*

A obra seminal de história das teorias de formação do sistema solar de Stephen G. Brush, *A History of Modern Planetary Physics*, é composta de três volumes (*Nebulous Earth*,

Transmuted Past e Fruitful Encounters) que serão citados com frequência neste capítulo. Porém, essa obra não esgota o tema e a história aqui abordada também está baseada em pesquisa histórica independente, tendo como principais fontes primárias publicações científicas dos séculos XIX, XX e XXI, além de obras de filosofia natural dos séculos XVII e XVIII, com atenção um pouco mais detalhada a contribuições omitidas ou pouco exploradas por Brush. A análise de Brush termina no início da década de 1990, pouco antes das primeiras descobertas de planetas extrassolares. Apresentarei, ao final do capítulo, o estado atual das pesquisas sobre a origem do sistema solar.

Para o período que vai até a metade do século XX, adoto a categorização proposta ainda no início do século XX por Émile Belot (1857-1944), um engenheiro francês que também contribuiu para o campo das cosmogonias. Essa categorização distingue as hipóteses sobre a origem do sistema solar entre *monistas* e *dualistas*, e foi adotada numa clássica revisão histórica de 1962, pelos astrofísicos A. G. W. Cameron (1925-2005) e Dirk ter Haar (1919-2002). É também a categorização utilizada por Brush. São chamadas de *monistas* as explicações que partem de um estado inicial nebuloso ou proto-solar em direção à atual configuração apresentada pelo sistema solar sem interferência externa (e.g. a hipótese nebulosa). As explicações *dualistas* são as que apelam para a interferência de alguma entidade externa (e. g., uma outra estrela ou nebulosa) na formação dos planetas independentemente da (ou não necessárias à) formação do Sol (e. g. as hipóteses do encontro estelar). Até a década de 1940 essa distinção pode ser utilizada sem muitos problemas de adequação. Com a emergência de hipóteses de captura de material interestelar pelo Sol nessa década, a categorização das teorias de formação do sistema solar torna-se problemática. O período posterior, com os avanços do conhecimento do ambiente galáctico, torna a categorização inadequada para caracterizar as cosmogonias. Essa categorização, argumentarei, leva a uma interpretação enganosa do desenvolvimento histórico desse campo de pesquisas. Uma análise sobre a categorização dessas teorias e sua aplicabilidade no cenário atual será apresentada na seção 5.2.

O ponto de partida da obra de Brush é a *hipótese nebulosa*, a teoria de formação do sistema solar proposta por Laplace no final do século XVIII. A opção historiográfica de Brush em relação ao período inicial de elaboração das cosmogonias modernas é confinar seu relato a teorias com algum grau de desenvolvimento quantitativo e com inegável influência no estabelecimento de um paradigma a ser incrementado por outros estudiosos. Há exemplos de teorias de formação do sistema solar anteriores a Laplace que Brush aborda apenas de

passagem ou menciona muito brevemente. Embora não tenham desembocado em modelos hegemônicos, nem por isso devem ser relegadas à insignificância na história da ciência. É o caso da hoje famosa (mas pouco lida no século XVIII) teoria de base newtoniana formulada em meados do século XVIII por Kant, bem como a primeira das cosmogonias copernicanas: a de Descartes.

3.1. A cosmogonia cartesiana

O primeiro exemplo de cosmogonia naturalista proposta para o cosmos heliocêntrico é encontrado na obra *Le Monde, ou Traite de la Lumière*, de Descartes, escrito entre 1629 e 1633, não inteiramente publicado até 1677, mas cujos temas centrais vieram a lume em 1644 (em latim; tradução francesa em 1647) com a publicação de seu *Les Principes de la Philosophie*.

A cosmogonia cartesiana significou um incremento importante ao copernicanismo ao propor uma origem heliocêntrica, conjecturando um processo de causas naturais inteligíveis e uma evolução a partir de estágios iniciais. Quanto a isso, especificamente, a hipótese cartesiana contrasta radicalmente com a visão daquele que fez o copernicanismo alcançar seu maior triunfo, Newton, que não via outra possibilidade explicativa que não a criação e a manutenção divinas da ordem observada no sistema solar. Comparado a Newton, Descartes reserva um lugar mais recuado para Deus no que tange à origem do sistema solar: “Deus, tendo posto as partes da matéria em movimento de diversas maneiras, manteve-as sempre a todas da mesma maneira e com as mesmas leis que lhes atribuiu ao criá-las e conserva incessantemente nesta matéria uma quantidade igual de movimento.” (DESCARTES, 1971, parte 2, p. 36).

Quanto a isso, é necessário um *caveat* importante. A posição oficial de Descartes quanto à origem do mundo é a do Gênesis: o mundo teria sido feito por Deus como ele se apresenta a nós. Explicitamente, Descartes introduz sua cosmogonia como uma espécie de fábula útil para a compreensão do mundo. É bem provável, no entanto, que ele tenha proposto sua cosmogonia como uma hipótese a ser levada a sério, e tratada como tal. Seja como for (fábula ou conjectura a ser seriamente considerada), na cosmogonia cartesiana Deus teria criado a matéria e a dividido em partes iguais. E então:

fez com que todas tivessem começado a mover-se com igual força de duas maneiras diferentes, a saber: cada uma separadamente à volta do seu próprio centro, formando assim um corpo líquido, tal como penso que acontece com o céu; e outras em conjunto à volta de alguns centros dispostos da mesma maneira no universo, tantos quantos os atuais centros das estrelas fixas, mas cujo número foi maior, de modo que igualou o destas, somado ao dos planetas e dos cometas; e a velocidade que lhes imprimiu era média, isto é, dotou-as com tanto movimento como o que existe atualmente no mundo. (DESCARTES, 1971, parte 3, p. 46)

Com esse movimento a matéria deu origem a três elementos diferentes, cuja distinção está baseada simplesmente em quantidade de movimento e tamanho de seus corpúsculos: a matéria que originaria o Sol e as estrelas fixas (que Descartes chama de primeiro elemento), a que forma os céus (segundo), e a que forma a Terra, a Lua e os outros planetas (terceiro). Por causa das três leis naturais postuladas na primeira parte dos *Princípios de Filosofia*, esse material em movimento forma os chamados *vórtices*, em cujos centros se aglutina o elemento que forma as estrelas. Uma das consequências da Revolução Copernicana no período em que Descartes escreve sua cosmogonia foi a expansão da imagem do universo: as chamadas “estrelas fixas” deixaram de ser pontos luminosos cravejados num pano de fundo cósmico e passaram a ser interpretadas como distantes sóis. Cada estrela é o centro de um vórtice; o Sol é uma estrela e fazemos parte, na superfície terrestre, de um dentre incontáveis vórtices.

Em sua origem, a Terra, a Lua e os outros planetas eram centros de seus próprios vórtices, estrelas:

podemos pensar que os dois vórtices que nos seus centros tinham os astros que agora chamamos Júpiter e Saturno tivessem sido os maiores e que houvesse quatro menores à volta do de Júpiter, cujos astros descem para ele, sendo estes os pequenos planetas que aí vemos; como também havia outros dois à volta de Saturno, cujos astros desceram para ele da mesma maneira (pelo menos se for verdade que Saturno tem perto de si outros planetas menores, como parece). A Lua também teria descido em direção à Terra quando o vórtice que a continha foi destruído. Finalmente, quando os seis vórtices em cujos centros estavam Mercúrio, Vénus, Marte, Júpiter e Saturno foram destruídos por outro maior no meio do qual estava o Sol, todos estes astros desceram para ele e aí se dispuseram conforme nos aparecem atualmente (DESCARTES, 1971, p. 146).

Descartes explica a rotação da Terra da seguinte maneira: “Dado que consideramos que outrora foi uma estrela fixa que ocupava o centro de um vórtice particular do céu, devemos pensar que girou assim desde então e que a matéria do primeiro elemento, que permanece sempre no seu centro, continua a movê-la da mesma maneira”. (DESCARTES, 1971, p. 150) Ou, em *Le Monde*: “a matéria do céu não deve somente fazer

girar os planetas em torno do Sol, mas também em torno de seu próprio centro [...] e, ademais, ela deve compor ao redor deles pequenos céus, que se movem no mesmo sentido que o maior” (DESCARTES, 2009, p. 147).

Essas hipóteses acerca da origem dos planetas e luas em vórtices iniciais destruídos pelo vórtice solar requerem uma indagação que está no cerne daquilo que constitui um critério de classificação das teorias de formação do sistema solar: afinal, a configuração atual do Sol, de planetas e luas, cometas e asteroides, é resultado de um único processo evolutivo fechado ou é resultado de perturbação ou interferências de entidades externas? Minha avaliação é a de que a cosmogonia cartesiana não aceita uma definição peremptória nesse sentido. Mais importante é a influência indireta de Descartes na elaboração posterior das cosmogonias decididamente monistas, predominantes durante o séculos XVIII e XIX.

Embora Newton tenha reconhecido sua dívida com a filosofia cartesiana (CASINI, 1995, p. 16), ele submeteu os *Princípios de Filosofia* de Descartes a uma crítica sistemática e a publicação dos *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* em 1687 pode ser considerado um marco do início do declínio do sistema cartesiano. A mecânica newtoniana mostrou-se mais fecunda para a explicação e a predição dos fenômenos, e, no século XVIII, forneceu as bases físicas e mecânicas para a *hipótese nebular*. Mas a cosmogonia cartesiana prenuncia aspectos importantes da teoria de Laplace. Para Brush, “o sistema do mundo de Laplace pode ser visto como um estágio final da disputa entre as teorias cartesiana e newtoniana do movimento planetário, no qual o presente sistema solar newtoniano é o resultado de um estado inicial cartesiano” (BRUSH, 1996a, p. 8). A afirmação não é de todo clara, pois Brush quase nenhuma atenção dá à cosmogonia cartesiana, mas provavelmente faz referência à ideia de colisões e fricção da matéria presentes na cosmogonia de Descartes como forma de explicar a origem dos movimentos circulares dos planetas nos vórtices, e que ainda se fariam presentes, *mutatis mutandis*, na hipótese nebular.

Essa interessante hipótese ganha força à medida em que surgem, recentemente, indicações da proximidade da concepção de vórtices celestes com a teoria da origem do sistema solar publicada em 1943 por C. F. von Weizsäcker – que é geralmente interpretada historicamente como um primeiro ressurgimento da hipótese nebular após o período de predomínio de teorias alternativas dualistas que propunham um improvável (porém fisicamente possível) encontro estelar como evento originário do sistema solar. No entanto, essa importante contribuição teórica no século XX pode ser mais reminescente da cosmogonia cartesiana do que da hipótese nebular, dado que von Weizsäcker recorre à interação mecânica

da matéria presente no disco protoplanetário para explicar o problema do momento angular observado no sistema solar presente. Estudos recentes em planetogonia são mencionados por Bodenheimer como um *revival*, três séculos depois, de aspectos dos vórtices cartesianos para explicar a origem dos sistemas planetários (BODENHEIMER, 2006, p. 2).

Um contraste importante (além dos mais claros, como a mecânica completamente diferente) entre a visão de Descartes e a de Newton reside na atribuição da providência divina a determinadas regularidades e características do sistema solar, sem as quais a vida na Terra seria impossível. Para alguns newtonianos menos afeitos a teorizações que eliminassem a necessidade da ação divina para explicar fenômenos tidos como centrais para a manutenção da vida em nosso planeta, a explicação cartesiana para a constituição do sistema solar pode ter soado como uma doutrina radicalmente naturalista e pouco piedosa. No século XIX, William Whewell, seguindo um apontamento do próprio Newton, considerava o fato de o Sol nos prover luz e calor, ao mesmo tempo em que é o corpo mais massivo (e, portanto, ser o centro aproximado) do sistema, como impossível de ser consequência de qualquer lei natural, algo que só pode ser atribuído à providência divina (BRUSH, 1996a, p. 68). Em contraste, no sistema cartesiano, a luz proveniente do Sol e das estrelas fixas é resultado das leis que regem o mundo material. A própria formação do Sol e das estrelas fixas no centro de vórtices também é compreendida de acordo com leis naturais. Claro, para Descartes, essas leis seriam fruto da vontade de Deus, sua base metafísica para tudo o que existe.

Em retrospectiva, essa comparação sublinha a importância do sistema cartesiano no início do desenvolvimento de uma visão em que os fenômenos passaram a ser interpretados como resultados de interações da matéria, de como os elementos que formam o mundo interagem entre si de acordo com leis naturais, aspecto central da ciência moderna até hoje.

Embora filosoficamente ainda extremamente influente, na física do século XIX o pensamento cartesiano já tinha, há muito, deixado de ser paradigmático. O alvo de Whewell é a possível consequência ateuísta da hipótese nebular laplaciana, interpretada por ele como uma explicação baseada em causas naturais que arriscava eliminar a necessidade do desígnio divino para a explicação das regularidades do sistema solar. Mas seu recurso à visão do próprio Newton acerca da necessidade de intervenção divina (ainda que bastante localizada) para explicar a origem da luz e do calor do Sol, num claro contraste dessa visão com o pensamento de Descartes, é uma indicação dos méritos da rota naturalista aberta pela cosmogonia cartesiana.

3.2. A hipótese nebular

A explicação da formação do sistema solar que predominou durante todo o século XIX é a chamada *hipótese nebular*, proposta fundamentalmente por Pierre Simon, Marquês de Laplace, no final do século XVIII, embora o célebre matemático não lhe tenha dado qualquer nome. William Whewell foi o responsável por cunhar a expressão *nebular hypothesis* em 1833, efetivamente criando o nome pelo qual essa cosmogonia ficaria conhecida pelo restante do século XIX. Mas a hipótese nebular foi, também, muito comumente chamada no século XX de *hipótese Kant-Laplace*. A principal razão disso é que a originalmente obscura obra de filosofia natural da juventude de Kant foi redescoberta a partir da segunda metade do século XIX e recebeu muita atenção de cientistas do século XX por conta de algumas de suas antecipações espetaculares acerca das estruturas cósmicas e suas origens. A cosmogonia de Kant também antecipa em vários aspectos as ideias de Laplace e Herschel sobre as origens do sistema solar e merece ser analisada antes de mergulharmos na versão que dominou o cenário cosmogônico por mais de cem anos.

3.2.1. A cosmogonia de Kant

Brush não dedica muitas linhas à teoria de Kant, com a justificativa de que a obra rapidamente caiu na obscuridade, não foi lida por quase ninguém em seu tempo, provavelmente não influenciou a hipótese nebular de Laplace e só foi resgatada no século XIX quando sua importância não podia mais ser ligada ao desenvolvimento da área das cosmogonias, e sim à história específica do pensamento filosófico, dada a importância do trabalho ulterior de Kant (BRUSH, 1996a, p. 7). Segundo essa interpretação, a teoria de Kant não seria historicamente relevante para as cosmogonias porque sua contribuição ao problema não chegou a constituir um afluente para as ideias que alimentariam o rio caudaloso da hipótese nebular no século XIX.

Talvez essa seja uma concepção demasiado estreita do que seria relevância histórica. Ainda que a obra de filosofia natural de Kant não tenha repercutido em seu tempo como parece ter merecido, serve para ilustrar em que medida podiam ser formuladas na

atmosfera intelectual do século XVIII as ideias evolutivas segundo as quais deve ser possível explicar a geração de um sistema complexo como o sistema solar a partir um estado original caótico ou desestruturado, tomando por base a física newtoniana. Revela, sobretudo, o caminho de amadurecimento do *framework* newtoniano ao longo de mais de um século em direção à geração de teorias cosmogônicas puramente naturalistas.⁹

*

A partir da publicação dos *Principia* de Newton em 1687, por décadas o mundo intelectual europeu testemunhou um embate entre a física cartesiana e a newtoniana. Mas por volta da metade do século XVIII, Newton havia se tornado decididamente hegemônico entre os filósofos da natureza. Nesse momento, o jovem Immanuel Kant publicava suas primeiras obras. Fogo, vento, terremoto, a vida, os astros: na década de 1750, Kant debruçou-se sobre os mais variados fenômenos naturais, tendo Newton como maior referencial. Do fascínio de Kant com o céu estrelado e da física newtoniana nasceu uma obra de filosofia natural, *História Geral da Natureza e Teoria do Céu*¹⁰. Publicado em 1755, o livro propõe uma teoria de formação do sistema solar – que se estende à compreensão da formação da Via Láctea e de outras galáxias – baseada “em princípios newtonianos”¹¹.

É importante lembrar que o debate sobre se a Via Láctea é todo o universo observável ou apenas um dentre muitos “universos-ilha” (as então chamadas “nebulosas espirais”) teve resolução somente na década de 1920 a favor da hipótese de que eram outras galáxias, principalmente através das descobertas de Edwin Hubble. O primeiro caso conhecido de interpretação da Via Láctea como um disco achatado e das nebulosas espirais como outras galáxias está na obra *An original theory or new hypothesis of the Universe*, publicada por Thomas Wright em 1750. Kant leu o livro, convenceu-se da ideia, e procurou

⁹ Refiro-me a *amadurecimento* no seguinte sentido: de Newton e sua concepção de que Deus teria criado o sistema e interviria de vez em quando em sua criação para mantê-la em equilíbrio e preservar suas regularidades, à hipótese nebular, em que apenas a gravitação universal é necessária para a formação da ordem e da regularidade encontradas no sistema solar a partir de um caos primordial sem a necessidade do recurso a Deus.

¹⁰ Título original: *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels. Universal History and Theory of the Heavens*, edição estadunidense publicada em 2008 e traduzida por Ian Johnston, será a fonte primária utilizada nesse item.

¹¹ O subtítulo: “Um ensaio sobre a constituição e a origem mecânica de toda a estrutura do universo *baseadas em princípios newtonianos*” (grifo meu).

teorizar sobre a estrutura e origem desses objetos. Essa concepção de Wright e Kant pode ser considerada ao mesmo tempo espantosa e não muito mais do que um palpite certo – uma intuição afortunada, provavelmente motivada por compromissos metafísicos – sem possibilidade de confirmação ou refutação com os dados empíricos disponíveis em seu tempo.

Essa obra de filosofia natural de Kant não teve ampla circulação: a falência de sua editora é, provavelmente, um dos motivos. As ideias cosmológicas e cosmogônicas desenvolvidas por seu autor – que logo deixaria de desenvolvê-las para perseguir outros interesses filosóficos – caíram na obscuridade. A cosmologia e a cosmogonia kantianas só passaram a ser consideradas relevantes, retrospectivamente, mais de um século mais tarde, quando não mais tinham grande potencial de impacto sobre as teorizações acerca da origem do sistema solar. Porém, a maneira com que a imagem da origem dos sistemas planetários elaborada por Kant foi interpretada por cientistas da segunda metade do século XX – largamente considerada uma impressionante antecipação de aspectos centrais das mais atuais teorias sobre a formação de estrelas e planetas, bem como sobre a estrutura geral da Via Láctea e de outras galáxias – garante a necessidade de que seja aqui apresentada com algum pormenor.

*

No pensamento de Kant, Deus¹² se faz perceptível pela ordem identificável no mundo e está sempre presente, mas não como um criador que arbitrariamente decide as características da natureza, do sistema solar ou das galáxias. Para Kant, a beleza, a harmonia e a ordem observadas na natureza foram produzidas por leis universais implantadas no mundo pela inteligência divina.

Os dois principais alvos da argumentação de Kant – e de sua teoria – é tanto o atomismo (a tradição personificada por Epicuro e Lucrecio, de pendor ateu), quanto a “imediate mão de Deus”, a ideia de interferência divina direta, que Newton não conseguiu abandonar. No *rant* kantiano contra o atomismo, os “produtos da natureza” não são “efeitos da contingência e resultados de acidentes”: “Forças e leis estabelecidas e que tem como a

¹² Kant faz referência a Deus por meio de diversas expressões, como “Essência Original”, “Presença Divina”, “Mais Alta Inteligência”, “Mais Sábia Inteligência”, e assim por diante.

Mais Sábia Inteligência foram uma imutável origem daquela ordem que inevitavelmente flui da natureza, não por acaso, mas pela necessidade”, afirma Kant (KANT, 2008, pos. 1654). Apesar do papel de Deus como origem da harmonia e da ordem do mundo, a interferência divina direta como concebida por Newton não apenas é vista por Kant como desnecessária para explicar as regularidades do sistema solar (e. g. a rotação dos planetas na mesma direção de suas órbitas coplanares), como as próprias irregularidades são aceitas numa visão da natureza que inclui em sua fecundidade uma “multiplicidade de todas as possíveis mudanças” e até mesmo “a deficiência e o desvio” (idem, pos. 1866). Essa é a base metafísica da teoria de Kant, aquilo que dá sentido à sua explicação mecânica.

Inicialmente, Kant identifica uma aparente incongruência a ser resolvida: as características ordeiras do sistema solar (as órbitas dos planetas aproximadamente no mesmo plano, a mesma direção das translações e das rotações de todos os planetas e de todos os satélites conhecidos até então) sugerem *uma mesma causa natural* para todo o sistema:

[S]e considerarmos toda essa interconexão, então acreditaremos que uma causa, qualquer que seja, teve uma influência que permeou toda a extensão do sistema [solar], e que a conformidade da direção e da posição das órbitas planetárias é uma consequência do acordo coordenado que elas devem ter tido com a causa material por meio da qual foram colocadas em movimento. (KANT, 2008, pos. 557).

Entretanto, a ausência de matéria entre as órbitas dos planetas sugeria a implausibilidade da interpretação das diversas manifestações de ordem e de regularidades do sistema como efeito de uma única causa natural: “completamente vazio e privado de matéria”, falta ao espaço entre os planetas justamente aquilo que “poderia ter sujeitado esses corpos celestiais a um conjunto comum de influências e com isso produzido coordenação entre seus movimentos” (KANT, 2008, pos. 557). Isso teria levado Newton a concluir pela “mão imediata de Deus” como explicação para a conformação de ordem do sistema. Meio século depois, Kant procura por causas e forças naturais moldando a ordem do sistema solar a partir de uma condição inicial caótica.

Kant propõe uma dinâmica entre as forças de atração (a gravitação newtoniana) e de repulsão (atuante nas menores partículas, derivada por Kant da observação do comportamento da expansão dos gases), bem como a noção de que, em suas condições iniciais, o sistema solar nascente estava “cheio de matéria suficientemente capaz de conferir movimento a todos os corpos celestes ali localizados e de trazer harmonia a seus movimentos e entre si” (KANT, 2008, pos. 569). A força de atração, então, teria “unificado o mencionado

espaço e coletado toda a matéria espalhada em aglomerados de partículas” e, desde então, com a atuação conjunta de força de atração e de repulsão que explicariam os movimentos iniciais da matéria em estado desordenado, “os planetas livremente e imutavelmente continuaram o movimento orbital impresso sobre eles” (idem, pos. 569).

Kant supõe que a matéria da qual o sistema solar é composto, inicialmente dispersa em partículas elementares, teria começado a se aglutinar num ponto que primeiro exercesse uma força de atração maior do que qualquer outro. O aumento progressivo da massa do corpo gerado nesse ponto aumentaria a força de atração exercida sobre a matéria mais distante e causaria uma aceleração cada vez maior do processo de aglutinação de partículas. Haveria, então, o surgimento de um movimento lateral dessa matéria atraída pelo ponto central, pois as partículas interagiriam umas com as outras também pela força da repulsão. Desse movimento lateral gerado pela força de repulsão e a força de atração do ponto central resultariam círculos de matéria aglutinada em movimento ao redor do ponto central, embora a maior parte da matéria primordial tenha se aglutinado nele (KANT, 2008, pos. 611 - 629). Os planetas (assim como os cometas) seriam o resultado final desse processo governado pelas forças de atração e de repulsão (a aglutinação de matéria em movimento circular ao redor do ponto central).

Essa exposição bastante resumida da mecânica da cosmogonia kantiana é o suficiente para tornar evidente seu caráter *monista*: o Sol, os planetas e suas luas, além dos cometas, têm origem num mesmo processo natural, sem recorrer a qualquer interferência externa, acontecimento catastrófico ou processo independente para explicar a origem dos diversos corpos que compõem o sistema solar. Kant endossa textualmente essa conclusão: “a estrutura planetária” orbitando o Sol “é inteiramente desenvolvida ... a partir dos originalmente distribuídos componentes básicos de todo o material planetário” (KANT, 2008, pos. 1254). A partir disso, Kant chega à conclusão de que “todas as estrelas fixas que o olho descobre nos profundos recônditos dos céus ... são sóis e pontos centrais de sistemas similares” (idem, pos. 1256). Essa é a extrapolação a que já me referi na parte introdutória deste capítulo: se as estrelas são sóis e se a formação do sistema solar vê os planetas como subproduto da formação do Sol, então cada estrela pode (ou deve) ser o centro de um sistema planetário.

Há exageros quanto à importância histórica de Kant no desenvolvimento do campo científico das cosmogonias/planetogonias: numa interpretação excessivamente simplificada, uma nota no verbete da Enciclopédia de Filosofia de Stanford sobre o desenvolvimento do pensamento de Kant afirma que a hipótese nebular de Laplace e até mesmo teorias do século XX derivadas dela (e que a teriam “confirmado”) seriam apenas “ligeiramente diferentes” da cosmogonia kantiana¹³. Há diferenças consideráveis entre a cosmogonia kantiana e a hipótese nebular de Laplace (MACPHERSON, 1913, p. 425), e discrepâncias ainda maiores com relação às adaptações da teoria laplaciana do século XX.

Por outro lado, a limitada concepção de Brush sobre a relevância da *História Geral da Natureza e Teoria do Céu* para a história das teorias de formação do sistema solar também desconsidera sua importância na fermentação da cultura e da cosmovisão que compuseram a paisagem do meio científico durante os dois séculos subsequentes. A cosmogonia kantiana gozou de considerável interesse a partir de fins do século XIX não apenas por parte de filósofos, mas também de cientistas. O tardio reconhecimento de seus méritos perdurou sem questionamentos sérios até o começo da década de 1980 (PALMQUIST, 1986, p. 256). Sua influência cultural sobre o meio científico teria sido reforçada, em 1900, pela tradução da obra para a língua inglesa, realizada por William Hastie (KANT e HASTIE, 1900). Segundo Palmquist, Hastie teria conseguido, por meio de uma reescrita clara do estilo obscuro do original, “reforçar a avaliação positiva da realização de Kant por parte de muitos cientistas e assegurar a ela um lugar permanente no ‘hall da fama’ das teorias filosóficas da natureza e a origem do universo” (PALMQUIST, 1986, p. 255). Uma nova tradução comentada, de Stanley Jaki, publicada em 1981, procurou desfazer a percepção da obra como uma grande realização científica (KANT e JAKI, 1981). Para Jaki, Kant não oferece muito mais do que especulações confusas e “um ou dois palpites afortunados” (PALMQUIST, 1986, p. 259).

Palmquist argumenta que não se deve insistir na defesa da anacrônica imagem de um “Kant cientista”, esclarecendo que Kant escreveu sua obra como “filósofo natural *a*

¹³ Trecho da nota 18: “A hipótese nebular de Kant de formação de estrelas e galáxias foi proposta mais uma vez, numa versão um pouco diferente, por P. S. de Laplace (1796) e foi confirmada por C.F. von Weizsäcker e J.G. Kuiper (1944)”.

priori” que propôs para a consideração dos cientistas um sistema possível. O grau de sucesso desse sistema pode ser medido pelo “significativo número de suas conjecturas [que] acabaram mostrando-se corretas” (PALMQUIST, 1986, p. 268). O mais famoso desses “acertos” (ou palpites afortunados) é, sem dúvida, a concepção das nebulosas espirais como galáxias e da Via Láctea como uma dentre muitas outras. Mas é notável que Palmquist não tenha se limitado somente a esse “acerto”, preferindo se referir ao “significativo número” desses. Como a obra basicamente se dedica à explicação da origem do sistema solar (e aplica o raciocínio à forma das galáxias), outro desses considerados “acertos” é, seguramente, a concepção da origem do sistema solar por meio de um mesmo e único processo natural, sem a necessidade de interferência externa, ocorrência catastrófica ou algum outro processo natural independente da formação do Sol para a formação dos planetas, dos cometas e dos asteroides.

3.2.2. A hipótese de Laplace

A primeira versão da explicação para a origem do sistema solar que se tornou paradigmática no século XIX surgiu na parte final de um livro de ampla circulação dedicado à síntese da mecânica celeste desenvolvida por Laplace nas últimas décadas do século XVIII, *Exposition du Système du Monde*, publicado originalmente em 1796. Embora não tenha mudado substancialmente, a cosmogonia foi atualizada e mais bem detalhada pelo matemático francês nas duas décadas subsequentes em diferentes edições do livro (LAPLACE, 1808 e 1824) e acabou se tornando a parte mais popular da obra (MERLEAU-PONTY, 1977, p. 289).

Laplace, muito provavelmente, não conheceu (ao menos, não diretamente) a obra de filosofia natural em que Kant propõe sua hipótese cosmogônica, e cita o famoso naturalista francês, Charles-Louis Leclerc, Conde de Buffon, como o único a propor uma explicação para a origem do sistema solar desde o estabelecimento da mecânica newtoniana como paradigma da física, *le vrai système du monde* nas mentes do período. Pouco surpreende, claro, que Laplace não tenha despendido energia revisando e criticando a cosmogonia cartesiana.

“Todas as desigualdades seculares [observadas no sistema solar] são periódicas”, diz Laplace no final da *Exposition* (LAPLACE, 1808, p. 392): um aspecto fundamental da importância filosófica e científica da mecânica celeste apresentada nessa obra seminal para a astronomia oitocentista foi o de resolver o problema da estabilidade do sistema solar no longo

prazo, algo que havia levado Newton à conclusão de que o sistema precisava da intervenção divina para que os planetas não caíssem em direção ao Sol (BRUSH, 1996a, p. 20). Jacques Merleau-Ponty credita ao próprio trabalho de Laplace nas últimas décadas do século XVIII a aceitação da mecânica newtoniana como o “verdadeiro sistema do mundo”. Laplace dedicou a maior parte de sua carreira à resolução dos problemas ligados às irregularidades observadas nos movimentos dos planetas e dos satélites. Seu sucesso em explicar o que era interpretado até então como desequilíbrios seculares, transformando-os em oscilações periódicas de um sistema estável, teve um peso significativo na percepção geral de que a mecânica newtoniana era verdadeira e universal (MERLEAU-PONTY, 1977, p. 287). Merleau-Ponty sugere que a própria hipótese nebular foi uma consequência dessas realizações de Laplace: “as provas de estabilidade [do sistema solar] levaram ao último passo, a saber, a construção de uma cosmogonia – no sentido limitado da formação do sistema solar – completamente deduzida a partir da observação e da teoria newtoniana” (idem, 1977, p. 287).

Quanto ao importante aspecto da relevância do pensamento teológico na cosmogonia, a hipótese nebular é inédita: explicava a origem do sistema solar sem qualquer necessidade de intervenção divina, nem recorria à metafísica procurando explicar as condições iniciais da nuvem de gás primordial. Com relação a isso, há um grande contraste com Kant, que recorre frequentemente a suposições metafísicas e postula uma inteligência suprema estabelecendo as condições iniciais que desencadeariam o processo natural de formação do sistema solar, de outros sistemas planetários e das galáxias¹⁴. A cosmogonia de Laplace também não recua a análise para aquém da suposição de uma nuvem de gás primordial, evitando procurar uma explicação para a origem da matéria e da força gravitacional. Laplace não tinha esperanças de chegar a uma compreensão sobre a causa da gravitação e a natureza de “força” em geral (MERLEAU-PONTY, p. 287).¹⁵

Na seção dedicada à apresentação de sua hipótese cosmogônica na edição expandida da *Exposition*, de 1808, Laplace alerta para o caráter conjectural de sua cosmogonia, ao mesmo tempo em que justapõe a origem do sistema solar com sua ordem subjacente, identificada em sua estabilidade e suas regularidades: “qualquer que seja a origem

¹⁴ Merleau-Ponty compara as duas cosmogonias nessa mesma linha: “o pensamento teológico ainda tem um grande lugar no trabalho de Kant, enquanto possui nenhum no de Laplace”, que “abriu o caminho para uma cosmogonia não-teológica” (MERLEAU-PONTY, 1977, p. 289).

¹⁵ Note-se que essa era também a posição a que o próprio Newton chegou, após fracassar em diversas tentativas de explicação estritamente mecânica da gravitação. Cf. CHIBENI, 2013.

do sistema planetário, que apresento com a desconfiança que deve inspirar tudo o que não é resultado de observação ou cálculo, é certo que seus elementos são ordenados de tal modo a que gozem da maior estabilidade, se as causas externas não vierem a perturbá-lo” (LAPLACE, 1808, p. 392). Na edição de 1824, à frase que inspira prudência, acima citada, há a consideração de que se trata de “uma hipótese que parece resultar de *uma alta verossimilhança (une grande vraisemblance)*” (LAPLACE, 1824, p. 390, grifos meus). De qualquer forma, tendo sido apresentada como o arremate de uma célebre obra que (junto com todo o trabalho científico de seu autor) simbolizou a resolução de muitos problemas pendentes quanto à explicação dos fenômenos celestes pela mecânica newtoniana, com extensa corroboração quantitativa e empírica, a hipótese de Laplace se tornou paradigmática no século XIX e será apresentada a seguir.

*

Laplace lista as regularidades do sistema solar conhecidas no final do século XVIII que devem incluídas qualquer tentativa de explicação sobre sua origem: os planetas se movem ao redor do Sol no mesmo sentido e aproximadamente no mesmo plano; os satélites se movem ao redor dos planetas também no mesmo sentido e aproximadamente no mesmo plano; a rotação dos planetas, dos satélites e do Sol ocorre na mesma direção de seu movimento orbital e aproximadamente no mesmo plano; as órbitas dos planetas e satélites são elipses de baixa excentricidade. (LAPLACE, 1808, p. 388-9). Esses “fenômenos extraordinários”, para Laplace, “não são o resultado do acaso e indicam uma causa geral que tenha determinado todos esses movimentos” (idem, p. 388) e “não são devidos a causas irregulares” (LAPLACE, 1824, p. 390).

Para explicar a origem dos planetas, Buffon havia proposto um cenário catastrófico e, na categorização adotada na presente pesquisa, *dualista*: o Sol e os planetas e seus satélites não têm a mesma origem. Para Buffon, os planetas e satélites teriam sido originados por uma colisão entre um cometa e o Sol. A colisão teria arrancado do Sol o material que coalesceria em órbitas ao redor da estrela e formaria os planetas. Laplace considera que a hipótese de uma colisão originária só daria conta de explicar a primeira das regularidades listadas (os mesmos sentidos e planos das órbitas dos planetas e satélites), mas não as outras.

O matemático estimava em menos de “quatro mil bilhões para um” (em 1808) e “duzentos mil bilhões para um” (em 1824) a chance de ter sido ao acaso que quarenta e dois movimentos de revolução e rotação dos planetas e de seus satélites se dessem no mesmo sentido e num mesmo plano, além de sua muito baixa inclinação em relação ao eixo de rotação do Sol. Para Laplace, da mesma maneira com que encaramos os eventos da história que estamos mais certos de haverem ocorrido, “devemos acreditar pelo menos com a mesma confiança que *uma causa primitiva* dirigiu os movimentos planetários” (LAPLACE, 1808, p. 389, grifo meu).

Às (aproximadas) regularidades já enumeradas, Laplace adiciona um elemento de irregularidade a ser explicado: os cometas têm órbitas de grande excentricidade e a inclinação de suas órbitas variam drasticamente entre si e com relação ao plano médio das órbitas dos planetas. Essas eram as regularidades e irregularidades do sistema solar conhecidas na virada do século XVIII para o XIX, excetuando-se o eixo de rotação de Urano, que exhibe inclinação quase perpendicular a seu movimento orbital, além das órbitas muito inclinadas dos satélites desse planeta. As irregularidades do sistema uraniano não foram incluídas por Laplace em sua hipótese cosmogônica, que descrevo resumidamente.

Em sua hipótese cosmogônica, Laplace imagina o estado inicial do sistema solar como uma nuvem de gás primordial. De acordo com a lei da gravitação universal, a matéria dispersa por essa nuvem teria começado a se concentrar em um ponto de maior densidade, onde se formaria o Sol. A atmosfera do Sol primitivo teria tomado toda a extensão do sistema solar, muito além da órbita de Urano (que era o mais longínquo planeta do sistema solar até a descoberta de Netuno, em 1846), mais extensa ainda “do que o periélio [das órbitas] dos cometas observáveis” (LAPLACE, 1808, p. 391).

A partir do início do processo de contração governado pela força da gravidade, esse material gasoso de alta temperatura e de “imensa extensão” teria entrado em movimento de rotação graças a pequenas diferenças de densidade e produzido um disco girando na mesma direção da rotação do Sol primitivo em seu centro. De acordo com a lei de conservação do momento angular, conforme a nuvem se contrai, aumenta a sua velocidade angular. Isso faria com que a “força centrífuga” nas partes mais externas do disco se equilibrasse com a força de atração da estrela no centro, causando a formação de “anéis de vapores” que sucessivamente teriam se separado do restante do corpo primitivo do Sol em seu plano do equador (LAPLACE, 1808, p. 390). Esse aspecto explicaria, portanto, a coincidência

aproximada entre o plano do movimento orbital dos planetas e o plano de rotação do Sol, além de sua baixa excentricidade.

Os “anéis de vapores” teriam surgido um por vez, do mais externo ao mais interno, nos limites da “atmosfera solar” em progressiva contração: “pode ser conjecturado que os planetas se formaram nos limites sucessivos desta atmosfera, pela condensação das zonas que deve ter abandonado no plano de seu equador, resfriando e condensando na superfície desta estrela” (LAPLACE, 1808, p. 391). Inicialmente quentes (como toda a nebulosa primordial), os anéis de gás ou “vapores” também teriam se resfriado e contraído, atraindo progressivamente matéria para a formação do que hoje seriam chamados de protoplanetas, embora Laplace não use essa terminologia. Laplace considera que a distribuição de matéria nesses anéis dificilmente poderia ter sido completamente uniforme. Por isso, núcleos de maior concentração de matéria teriam se formado, fazendo com que os anéis desaparecessem aos poucos, dando lugar aos planetas: “geralmente se uniram em vários globos, e quando um deles foi poderoso o suficiente para atrair os outros para si, seu encontro formou um planeta considerável” (LAPLACE, 1808, p. 392). Essas zonas de condensação dos “vapores” poderiam formar “anéis líquidos ou sólidos” em torno do corpo central protoplanetário, “mas este caso extraordinário parece ter ocorrido no sistema solar apenas em relação a Saturno” (idem, p. 392).

Os planetas teriam entrado em rotação no mesmo sentido de seu movimento orbital porque a velocidade das partículas mais externas do anel de gás protoplanetário sobrepujaria a das mais internas: “é fácil ver que as velocidades reais das partes do anel de vapores crescem com suas distâncias para o Sol; os globos produzidos por sua agregação tiveram que girar no sentido de seus movimentos de revolução” (LAPLACE, 1808, p. 392). O mesmo processo orientaria a formação dos satélites e sua órbita ao redor dos planetas. Mais uma regularidade do sistema solar poderia ser, assim, plausivelmente explicada pela via naturalista.

Em suma: esse processo de condensação dos anéis protoplanetários resultaria nos planetas e seus satélites, que se formariam de acordo com o mesmo processo de formação planetária, o que explicaria seu movimento orbital na mesma direção da rotação dos planetas; o sistema solar, com suas regularidades, seria passível de ter se originado por um mesmo e ininterrupto processo natural, uma única *causa primitiva*. Mas, e quanto aos cometas?

Os cometas, com suas órbitas “deixadas ao acaso” (LAPLACE, 1808, p. 389), elipses de alta excentricidade e inclinação em relação ao plano das órbitas dos planetas, “são

estrangeiros (étrangères) ao sistema solar” (LAPLACE, 1824, p. 414, grifo meu). não teriam se originado da nuvem de gás primordial em rotação. São, ao contrário, “pequenas nebulosas errantes de sistemas [solares] para sistemas [outros] solares, e formados pela condensação da matéria nebulosa espalhada com tanta profusão pelo universo” (idem, p. 414). Os cometas são as únicas irregularidades elencadas entre os fenômenos que devem ser explicados pela hipótese cosmogônica da *Exposition* e Laplace se satisfaz em imaginar uma origem extrassolar para esses objetos que, tendo vagado indefinidamente pelo espaço interestelar, chegaram à região onde a força de atração do Sol predomina e acabaram, por conta disso, entrando em trajetórias elípticas ou hiperbólicas de grande inclinação em relação ao plano do sistema solar.

Quando às imperfeições das regularidades observadas no sistema, como o fato de que o plano das órbitas dos planetas encontra-se inclinado aproximadamente em 7 graus com relação eixo de rotação do Sol, essas são encaradas por Laplace como desvios esperados, pois insensato imaginar que o processo que deu origem aos planetas e satélites tenha ocorrido com perfeita uniformidade de temperatura e densidade em suas diferentes regiões:

Se o sistema solar tivesse sido formado com perfeita regularidade, as órbitas dos corpos que o compõem seriam círculos cujos planos, como os dos vários equadores e anéis, teriam coincidido com o plano do equador solar. Mas podemos conceber que um sem número de variações (*variétés sans nombre*) deve ter existido sobre a temperatura e a densidade das várias partes dessas grandes massas, tendo produzido as excentricidades de suas órbitas, e os desvios de seus movimentos do plano deste equador (LAPLACE, 1824, p. 414, grifo meu).

Os pequenos desvios de regularidade que o sistema solar apresenta, portanto, não devem ser tomados como boas razões para descartar que uma mesma causa possa ser identificada em sua origem. Assim, como a cosmogonia kantiana, a teoria de Laplace é *monista*: propõe um mesmo processo de formação da estrela, dos planetas e suas luas, em conjunto. O sistema solar (exceto os cometas) seria o resultado de uma mesma *causa primitiva*. Reformulando em termos contemporâneos, pois isso é de interesse das reflexões posteriores deste trabalho, os planetas e satélites são entendidos, nessa visão, como subprodutos do próprio processo de formação estelar.

Na edição da *Exposition* publicada em 1824, Laplace faz uma afirmação sobre as características do estado inicial de formação do Sol que não aparece na edição de 1808: “No estado primitivo em que supusemos o sol, ele se parecia com as nebulosas que o telescópio nos mostra, compostas de um núcleo mais ou menos brilhante, cercado por uma nebulosidade que, condensando-se na superfície do núcleo, transforma-o em uma estrela” (LAPLACE, 1824, p. 410). Esse trecho indica que Laplace se referia principalmente às chamadas *nebulosas espirais*, que hoje sabemos ser galáxias. A partir do final do século XVIII, começou a tornar-se predominante uma interpretação sobre esses objetos: não eram os *universos-ilha* que Wright e Kant imaginaram na década de 1750, mas estrelas em estágios iniciais de formação. Abriu-se um caminho para que as estruturas difusas observadas ao redor do “núcleo mais ou menos brilhante” pudessem ser interpretadas como o material em rotação que posteriormente formaria os planetas ao redor da estrela.

A julgarmos pela forma com que Laplace continua seu raciocínio nessa versão da *Exposition*, a ideia de formação do Sol a partir de uma nebulosa primitiva se fortaleceu com essa interpretação das nebulosas – afinal, eram vistos como dados observacionais de estágios anteriores de desenvolvimento de um sistema planetário – e apontaria o caminho para a moderna concepção de formação estelar a partir da condensação de enormes nuvens de gás interestelar, como a Nebulosa de Órion. Laplace evoca uma *lei geral da natureza* para a formação de estrelas a partir de nebulosas:

Se concebermos, por analogia, que todas as estrelas se formaram dessa maneira, podemos imaginar seu estado anterior de nebulosidade, precedido por muito estados nos quais a matéria nebulosa estaria cada vez mais difusa, com o núcleo cada vez menos luminoso. Chegamos assim, voltando o mais longe possível, a uma nebulosidade tão difusa que dificilmente se poderia suspeitar que existisse.

Por muito tempo, a disposição peculiar de algumas estrelas visíveis a olho nu impactou observadores filosóficos. Mitchel já observou quão pouco é provável que as estrelas das Plêiades, por exemplo, tenham sido apertadas no espaço estreito que as encerra pela mera chance do acaso; e ele concluiu que esse grupo de estrelas e grupos semelhantes que o céu nos apresenta são os efeitos de uma causa primitiva (cause primitive) ou de uma lei geral da natureza (loi générale de la nature). Esses grupos são um resultado necessário da condensação de nebulosas de múltiplos núcleos; pois é evidente que a matéria nebulosa sendo constantemente atraída por esses vários núcleos, deve formar a longo prazo um grupo de estrelas, como o das Plêiades. A condensação de nebulosas com dois núcleos formará estrelas similarmente espaçadas, girando uma na outra, como as estrelas duplas, cujos respectivos mecanismos já foram reconhecidos. (LAPLACE, 1824, p. 411, grifos meus).

São óbvias as implicações dessas linhas para a questão da pluralidade dos sistemas planetários e sua relação com a maneira como concebemos a origem do sistema solar. Surgia uma imagem da criação do nosso endereço cósmico exclusivamente via lei natural, uma que poderia ser extrapolada para ainda outros incontáveis lugares. Como aponta Jacques Merleau-Ponty, essa extrapolação podia ser feita porque o sistema solar era visto por Laplace como paradigmático, no sentido em que “as inferências que podemos fazer sobre sua formação podem ser generalizadas para outros sistemas cósmicos que podemos supor terem sido formados pela condensação de matéria difusa em corpos discretos gravitando um ao outro praticamente num vácuo” (MERLEAU-PONTY, 1977, p. 290).

*

O maior responsável pela interpretação de muitas nebulosas como estrelas e sistemas planetários em processo inicial de formação é o célebre astrônomo William Herschel, contemporâneo de Laplace. Como afirmado no início do presente capítulo, Whewell foi o responsável por cunhar a expressão *nebular hypothesis* em seu *Tratado Bridgewater* de 1833, efetivamente dando o nome pelo qual essa cosmogonia se tornaria conhecida a partir de então. A expressão reflete o imenso impacto gerado pelos estudos observacionais de Herschel sobre as nebulosas e por suas conjecturas sobre o processo de formação estelar. Embora Herschel não tenha formulado uma hipótese cosmogônica como Laplace, com o intuito declarado de resolver o problema da origem do sistema solar, a escolha de palavras de Whewell indica quão importante foi o trabalho de Herschel para a constituição da hipótese nebular como explicação científica cosmogônica *standard* no século XIX. Brush aponta Laplace e Herschel como os dois como “pais fundadores” da hipótese nebular, embora Herschel não tenha formulado explicitamente uma cosmogonia como Laplace o fez na *Exposition*.

Inicialmente, Herschel interpretava as nebulosas de diferentes formatos e luminosidades como “coleções de estrelas distintas que não poderiam ainda ser resolvíveis simplesmente por causa de sua grande distância de nós” (BRUSH, 1996a, p. 32). Em novembro de 1790, entretanto, Herschel observou uma estrela “cercada por uma atmosfera fracamente luminosa de considerável extensão” e concluiu que a nebulosidade não deve composta de estrelas, mas de algum “fluido brilhante” (HERSCHEL apud BRUSH, 1996a, p.

32). Isso o motivou a conjecturar que as estrelas devem se formar a partir da condensação dessa matéria luminosa, que não dependeria das estrelas para existir, pelo contrário. É importante lembrar que nesse período não havia explicação satisfatória para o brilho das estrelas e a obscuridade de planetas e satélites.

O objeto descoberto por Herschel em 1790, que mudou sua concepção sobre as nebulosas, faz parte de uma classe de objetos que ele chamava de – e que ainda hoje conhecidos como – *nebulosas planetárias*¹⁶. Não se sabe ao certo quem cunhou essa expressão, mas é seguro que passou a ser utilizada para objetos desse tipo nas últimas décadas do século XVIII por conta de sugestões de diferentes astrônomos de que havia alguma semelhança entre seu formato e o de planetas. Numa seção de um artigo de 1811 dedicada a nebulosas planetárias, Herschel especula sobre se, com o passar do tempo, “essas nebulosas que já se encontram em estado de compressão podem ser ainda mais condensadas para realmente se tornarem estrelas” (HERSCHEL, 1811, p. 318). No mesmo artigo, a aproximação de nebulosas como estágios anteriores de desenvolvimento de estrelas, planetas e satélites é feita de maneira ainda mais clara:

Uma circunstância que alia essas nebulosas muito comprimidas às características de muitos de nossos mais bem conhecidos corpos celestes, como alguns dos planetas e seus satélites, o sol e todas as estrelas periódicas, é a de que muito provavelmente a maioria, se não todas elas, giram em torno de seus eixos. Sete das dez que mencionei não são perfeitamente redondas, mas um pouco elípticas. Não deveríamos atribuir esse formato à mesma causa que achatou o diâmetro polar dos planetas, a saber, um movimento rotacional? (HERSCHEL, 1811, p. 319)

As estrelas e planetas podem se formar a partir de nebulosas em rotação e isso provavelmente estava sendo observado, segundo o mais famoso astrônomo do período. Não apenas isso, Herschel sugere que “um movimento rotacional pode frequentemente ocorrer mesmo antes de o núcleo de uma nebulosa poder ter chegado a um estado de consolidação” (HERSCHEL, 1811, p. 320). De forma indireta, a cosmogonia de Laplace encontrava uma formulação parecida, com possível comprovação empírica.

¹⁶ A nebulosa leva atualmente o nome de NGC 1514, mas é também chamada de Nebulosa da Bola de Cristal. NGC é a sigla para *New General Catalogue (of Nebulae and Clusters of Stars)*, catálogo compilado em 1880 com observações de Herschel e de seu filho, John. Objetos como NGC 1514 são hoje conhecidos como os estágios finais da existência de estrelas que possuem entre 0,8 e 8 massas solares. Segundo o conhecimento atual de astrofísica, a estrutura reportada por Herschel (uma estrela no meio de uma nebulosidade fracamente luminosa) é observada quando a estrela moribunda expele as camadas exteriores de sua atmosfera e este material, ionizado, brilha fracamente.

O princípio epistemológico que corroborava as afirmações indiretamente cosmogônicas de Herschel (bem como a cosmogonia explícita de Laplace, obviamente) e que constituía o argumento central para que suas observações fossem interpretadas como um corpo de sustentação empírica da hipótese nebular é uma analogia com o mundo biológico, que o próprio Herschel desenvolveu: assim como é possível a um naturalista conhecer o desenvolvimento de uma espécie particular observando diversos espécimes em diferentes estágios de suas vidas, é possível ao astrônomo compreender a evolução de objetos celestes, de nebulosidades difusas a estrelas bem definidas, observando-as em diferentes estágios de desenvolvimento (BRUSH, 1996a, p. 33). Nesse sentido, a hipótese nebular se constituiu como o principal propulsor de uma cosmovisão evolucionista no século XIX, que será analisada no próximo item.

*

Não é exagero afirmar que a hipótese nebular constitui a teoria da origem do sistema solar mais influente desde o fim do século XVIII até hoje. Isso não quer dizer, como veremos, que essa teoria foi aceita o tempo todo pela comunidade científica, ou que continua sendo aceita como uma explicação satisfatória. Também não significa que as teorias monistas dominantes a partir da segunda metade do século XX sejam meras atualizações ou modificações da hipótese nebular. Há uma profusão de materiais de divulgação científica que creditam à hipótese nebular (ou *hipótese Kant-Laplace*, como é frequentemente encontrada) a solução básica do problema de como nosso sistema planetário veio a surgir, o que provavelmente se deve ao sucesso atual das teorias monistas de acreção em discos protoplanetários. Essas teorias guardam reminiscências importantes da hipótese nebular, mas não podem ser chamadas de meras atualizações da cosmogonia laplaciana.

Influência é um conceito bastante fugidio, que pode significar coisas muito díspares em contextos diferentes, mas não é de todo inútil. No caso da hipótese nebular, significa que, num primeiro momento, as conjecturas de Laplace foram aceitas pelo grupo social que se dedicava à astronomia no início do século XIX (evito chamar esse grupo social de comunidade científica porque a expressão só seria historicamente adequada um pouco mais

tarde). Depois, ao longo do século XIX, tornou-se um paradigma¹⁷ que se estendeu para muito além das fronteiras da astronomia profissional, cumprindo papel importante na formação do imaginário oitocentista sobre uma evolução cumulativa (e eurocêntrica) *da nebulosa ao homem* (BRUSH, 1987, p. 268). Nesse período, a visão de mundo evolucionista influenciada pela cosmogonia laplaciana emoldurou os desenvolvimentos da geologia e da biologia, embora o darwinismo tenha, em última instância, rompido com a concepção de evolução que, num sentido popular do termo, poderia se chamar de *linear* – i.e., que possui uma rota unívoca, sem retrocesso nem ramificações. Os astrônomos e físicos encontraram importantes problemas de adequação empírica da hipótese nebular, principalmente nas últimas décadas do século XIX. Nesse período, houve tentativas de adaptação que não rompiam com o caráter monista original da teoria (o filho de Charles Darwin, George, seria um dos cientistas que tentariam fazer essas adaptações).

3.2.3. O reinado atribulado da hipótese nebular

Em linhas gerais, a hipótese nebular foi aceita ao longo do século XIX como a melhor explicação para a origem do sistema solar por astrônomos e físicos, além de receber considerável atenção de filósofos considerados importantes do período. Esse consenso se formou especialmente em torno de suas características centrais, que explicam as regularidades do sistema: uma *causa primordial*, a nuvem de gás em contração, os anéis que se condensam e se desprendem do disco achatado de matéria em rotação. Porém, como veremos, nesse século houve períodos de maior e menor aceitação entre os astrônomos, passando por questionamentos acerca de discrepâncias entre a lei de conservação do momento angular e a distribuição de momento angular que deveria ser observada no sistema caso tivesse tido essa origem. Além disso, houve questionamentos sobre a principal ancoragem empírica da teoria: a interpretação das nebulosas como diferentes estágios de desenvolvimento do processo de formação de sistemas planetários. Quanto à filosofia e ao campo mais amplo da cultura, embora não tenha sido unanimidade, a hipótese nebular contribuiu decisivamente para a formação de uma visão de mundo evolucionista que permeou a cultura oitocentista e influenciou as nascentes ciências da geologia e da biologia.

¹⁷ Nesse trecho específico, a acepção de paradigma não é a de Kuhn, mas um mais amplo, que se refere a um modelo ou padrão a ser seguido.

Mesmo que inicialmente tenham surgido críticas e tenha sido geralmente encarada com certo ceticismo por volta da metade e no final do século XIX (LAWRENCE, 1977, p. 254), a hipótese nebular foi “o ponto de partida da maioria das discussões sobre a origem do sistema solar e o alvo daqueles que favoreciam alternativas” (BRUSH, 1996a, p. 37), o que indica a importância da teoria. Não houve alternativa teórica que tenha sido forte candidata a substituir a hipótese nebular no século XIX. Uma teoria de colisão estelar de raspão (seção 3.3.1.) foi proposta no final do século XIX, mas não foi seriamente considerada, a não ser por um punhado de cientistas.¹⁸

O impacto da hipótese nebular no início do século XIX não resultou na emergência de uma disciplina especialmente dedicada ao problema da origem do sistema solar. Não havia astrônomos e físicos profissionais exclusivamente dedicados ao estudo da origem do sistema solar, ou mesmo da origem das estrelas e dos planetas¹⁹. Nesse momento histórico, “a cosmogonia não era um assunto respeitável entre astrônomos profissionais” e as contribuições ao assunto no período foram feitas principalmente por amadores (BRUSH, 1996a, p. 37), o que dificulta um mapeamento preciso de como essa cosmogonia foi recebida e percebida pela comunidade científica. Outra dificuldade com relação a avaliar precisamente a extensão do consenso em torno da hipótese nebular é a de que “aqueles que propuseram rejeitar ou modificar a teoria discutiram-na em maior profundidade do que aqueles que simplesmente a aceitaram, por isso um levantamento das opiniões tende a enfatizar exageradamente as respostas negativas” (*ibid.*). É fundamental levar isso em consideração na interpretação do cenário que apresentarei panoramicamente a seguir.

*

¹⁸ As alternativas à hipótese nebular são as teorias de Bickerton e de James Croll. Em 1868, Croll propôs que o Sol teria se formado a partir da colisão de duas estrelas. Mas ele não coloca em questão o processo de formação de planetas descrito por Laplace. Como Brush explica, ao propor uma colisão de duas estrelas com metade da massa do Sol, Croll estava tentando resolver a discrepância entre a estimativa de Helmholtz-Kelvin de que o Sol não poderia estar brilhando por mais de 20 milhões de anos e a evidência geológica que indicava uma Terra muito mais antiga do que isso. A colisão teria gerado calor extra que duraria 50 milhões de anos. (BRUSH, 1996a, p. 108).

¹⁹ Analogamente, exceto pelo esforços de Herschel em lançar luz sobre a estrutura do cosmos, a própria cosmologia como disciplina científica praticamente não existiu no século XIX.

Uma suposição aparentemente plausível, porém difícil de ser verificada, sobre a repercussão da hipótese nebular é a de que a reputação científica de Laplace (na mecânica celeste) e Herschel (na astronomia observacional) teriam desempenhado papel fundamental na constituição do alto nível de consideração que os cientistas do século XIX deram a essa cosmogonia²⁰.

Muito embora seja possível afirmar que a hipótese nebular foi a única cosmogonia aceita pela ciência do século XIX, não houve um consenso pleno imediato em torno de seu mérito por parte dos astrônomos e físicos que examinaram o problema. A recepção inicial da hipótese nebular entre os astrônomos profissionais (ao menos entre os que publicaram alguma avaliação sobre a teoria) foi variada. Brush afirma que os astrônomos reagiram inicialmente à cosmogonia contida na *Exposition* com ceticismo (BRUSH, 1996a, p. 37), embora cite Friedrich Bessel, Friedrich Struve e Adolphe Quetelet, importantes astrônomos profissionais do início do século XIX, como favoráveis à hipótese nebular.

O astrônomo de maior destaque a *rejeitar* a hipótese nebular foi Heinrich Wilhem Olbers²¹, que manifestou em cartas a colegas duas objeções principais. A primeira e mais importante é que, se uma nuvem de gás em rotação tivesse dado origem aos planetas, estes deveriam girar em torno do Sol com a mesma velocidade angular, o que não coincidia com as observações já disponíveis. A segunda objeção de Olbers diz respeito à suposição de que as nebulosas são diferentes estágios de um mesmo processo natural. Olbers apontou para a enorme variação da natureza apresentada na Terra e questionou as razões para que fosse aceito que “todos os sistemas estelares são construídos de acordo com um único modelo” (BRUSH, 1996a, p. 38). Significativamente, Laplace e Olbers estiveram em lados opostos de uma disputa, surgida na primeira década do século XIX e ligada ao problema da origem do sistema solar, sobre a origem do grupo de objetos que ficou conhecido posteriormente como *cinturão de asteroides*.

Olbers foi o responsável pela descoberta dos objetos Pallas (1802) e Vesta (1807)²², hoje categorizados como planetas-anões. Esses objetos, além de Ceres e Juno, se

²⁰ “O grande prestígio de seus autores forçou os astrônomos e outros cientistas a dar [à hipótese nebular] sérias considerações” (BRUSH, 1996a, p. 14).

²¹ Olbers tem seu nome associado à formulação do paradoxo entre a escuridão do céu noturno e a suposição de que o universo é infinito e estático.

²² No início do século XIX apenas os quatro eram conhecidos. Ao longo do século XIX, especialmente a partir de 1945, o número de objetos do mesmo tipo cresceu rapidamente, chegando a mais de 400 no final do século XIX (VAN HELDEN, 1984, p. 20).

encontram justamente na órbita em que se esperaria existir um planeta caso fosse levada em consideração a correlação entre as distâncias médias dos planetas para o Sol e os resultados de uma pequena equação aplicada a uma progressão geométrica, formulada no século XVIII, conhecida como Lei de Titius-Bode²³. Duas hipóteses competiam para explicar a origem desses objetos (“pequenos planetas”, nas palavras de Laplace): Olbers propôs que eram os restos da desintegração de um planeta, enquanto Laplace preferiu sustentar que deveriam ser um planeta inacabado, remanescentes do próprio processo de formação do sistema solar. A hipótese nebular poderia se adaptar sem problemas à conjectura de que os quatro objetos são o resultado de insuficiente concentração de material que pudesse gerar atração gravitacional a ponto de formar um planeta entre Marte e Júpiter; seria, portanto, um processo intermediário entre o que daria origem a um planeta inteiro e um que resultasse em anéis “sólidos ou líquidos”, como os de Saturno²⁴ (LAPLACE, 1808, p. 413)²⁵.

A hipótese de Olbers foi a mais aceita até a metade do século, contando com a aprovação de um ilustre colega de Laplace, Lagrange (CUNNINGHAM, 2017, p. 19). A partir daí, muitos outros objetos começaram a ser descobertos nessa mesma órbita, mas espalhados por uma ampla região e de diferentes tamanhos, tornando a ideia de que haviam formado no passado um único planeta cada vez menos provável (VAN HELDEN, 1984, p. 20). Totalizando 110 em 1870 e 450 em 1900, o número desses objetos levou, na segunda metade do século XIX, à concepção de que formam um cinturão de asteroides; isso foi considerado importante evidência em favor da hipótese nebular (idem, p. 21).

*

²³ Essa é mais uma aparente e aproximada regularidade do sistema solar que à qual foi dada importância pela astronomia do início do século XIX. Sobre a Lei de Titius-Bode, cf. FAIRBRIDGE, 1997.

²⁴ Sobre a história das concepções acerca da estrutura dos anéis saturnianos e sua influência nas discussões cosmogônicas, cf. VAN HELDEN, 1984. Há também o muito informativo capítulo de *Nebulous Earth*, “Saturn’s Rings” (BRUSH, 1996a, pp. 93 – 106).

²⁵ Laplace cita a hipótese de Olbers, em contraponto à sua: “a menos que suponhamos com o Sr. Olbers, que [os quatro asteroides] originalmente formaram um único planeta que uma forte explosão dividiu em várias partes movendo-se a diferentes velocidades” (LAPLACE, 1808, p. 413). Numa carta para Gauss, Olbers afirma que em 1812, num encontro pessoal com Laplace em Paris, havia convencido o matemático dos méritos de sua hipótese (Olbers apud CUNNINGHAM, 2017, p. 17). O fato de que Laplace nunca manifestou mudança de ideia sobre a questão publicamente, e a informação de que Olbers havia tentado por quase uma década extrair de Laplace aprovação à sua hipótese sobre a origem dos asteroides, tornam justificável tomar o relato do astrônomo alemão com uma pitada de sal. Sobre essa querela e o debate acerca da origem dos asteroides, cf. CUNNINGHAM, 2017.

No mundo anglófono da primeira metade do século XIX, um dos principais apoiadores e divulgadores da hipótese nebular foi o astrônomo escocês John Pringle Nichol. Publicada em 1839, sua obra *Views of the Architecture of Heavens* popularizou a cosmogonia laplaciana entre o público letrado dos EUA. Nesse livro de ampla circulação, Nichol advoga (com cautela epistemológica) a analogia biológica de Herschel sobre as nebulosas. Além disso, vincula explicitamente o que chama de “progressão da estrutura” desses objetos (a condensação em estrelas) à cosmogonia de Laplace. Para Nichol, a hipótese nebular “deve explicar as nebulosas” (NICHOL, 1839/2010, p. 141-2) e “conectou-se com as revelações ... dos telescópios de Herschel” (idem, p. 172). Esse vínculo acabaria sendo visto como uma fragilidade da hipótese nebular apenas alguns anos depois da publicação do livro de Nichol, quando a concepção sobre as nebulosas foi alterada por observações astronômicas.

John Herschel, o polimático filho único de William, compartilhava do ceticismo de Olbers quanto à analogia com o mundo biológico, que servia de princípio epistemológico para a compreensão das nebulosas como estágios diferentes do processo de formação de estrelas e sistemas planetários. Herschel, o filho, exigia como suporte empírico *a observação de mudanças no estado de uma mesma nebulosa*, embora não acreditasse que variações nas nebulosas fossem observáveis mesmo no curso de um século. Em 1830, ele manifestou um ceticismo ainda mais abrangente, negando que a astronomia pudesse fornecer base para quaisquer inferências sobre a origem do sistema solar, que permaneceria “misteriosa” (SCHAFFER, 1989, pp. 137-8).

Pouco expressivo até 1840, o ceticismo quanto ao único suporte observacional da hipótese nebular ganhou muita força na década seguinte. Avanços técnicos na construção de telescópios – que culminaram em 1843 num refletor de 72 polegadas, construído na Irlanda para William Parsons, Conde de Rosse – permitiram a resolução de um número crescente de nebulosas como grupos de estrelas, contrariando a interpretação dominante de que eram estágios iniciais de formação estelar ou planetária. Inicialmente, as 50 nebulosas mais brilhantes do catálogo de John Herschel foram observadas por Rosse e revelaram-se conjuntos de estrelas distintas.

Rosse tinha consciência das implicações de suas observações para a sustentação da hipótese nebular²⁶. Os resultados foram publicados em 1845 e repercutiram imediatamente

²⁶ Em 1840, Rosse já manifestava privadamente a colegas um certo ceticismo com relação à hipótese nebular. Embora tenha sido prudente em não generalizar os resultados de suas observações para todas as outras

na comunidade astronômica²⁷. Foi um golpe na aceitação da teoria: as observações de Rosse passaram a justificar as principais críticas e manifestações de ceticismo entre os cientistas (LAWRENCE, 1977, p. 254; DICK, 2013, p. 75).

Dentre os críticos motivados pelas observações de Rosse, Adam Sedgwick foi o primeiro a formular uma objeção que um pouco mais tarde seria interpretada como decisiva contra a hipótese nebular. Numa publicação de 1850, o geólogo aponta uma discrepância entre o período observado de rotação do Sol (25 dias e 10 horas) e o que seria inferido pela lei de conservação do momento angular. Sedgwick argumenta, segundo a hipótese nebular, que o Sol primitivo devia girar na mesma velocidade angular do anel protoplanetário de Mercúrio quando este separou da estrela, algo próximo dos 88 dias do período orbital do planeta. Aplicada a lei de conservação do momento angular, ao se contrair, o Sol deveria girar muito mais rápido do que seu período orbital atualmente observado (BRUSH, 1996a, p. 49).

Brush aponta que essa objeção poderia ser contornada se se assumisse que a maior parte da massa solar já tivesse se concentrado perto do núcleo do Sol primitivo quando o último dos anéis protoplanetários se despreendeu (BRUSH, 1996a, p. 49-50). Apesar das críticas, Sedgwick frisava que muitos dos maiores estudiosos de mecânica celeste do momento mantinham-se favoráveis à hipótese nebular. A possível saída *ad hoc* e a própria opinião cautelosa de Sedgwick podem ter comprometido sensivelmente a repercussão de suas objeções.

A discrepância da distribuição do momento angular observada hoje no sistema solar e a que se esperaria encontrar na nebulosa primordial foi melhor elaborada pelo físico francês Jacques Babinet, numa apresentação à Academia de Paris em 1861. Levando em consideração o real período de rotação do Sol, Babinet calculou o período de rotação da nebulosa quando essa se apresentasse com o mesmo raio da órbita da Terra e de Netuno, chegando respectivamente a períodos de 3181 anos e 27000 anos – ou seja, absurdamente maiores do que os períodos orbitais apresentados pelos dois planetas (Netuno leva 165 anos para completar uma volta ao redor do Sol) (BRUSH, 1996a, p. 58).

nebulosas, em 1844 ele sublinhou o fato de que quanto mais potentes os telescópios, mais nebulosas eram compreendidas como aglomerados estelares (BRUSH, 1996a, p. 46).

²⁷ No mesmo ano, por exemplo, John Herschel manifestou publicamente um profundo ceticismo quanto à hipótese nebular, justificado pela resolução das nebulosas como estrelas distintas e James Forbes (que possuía as “mais enérgicas dúvidas” sobre a cosmogonia laplaciana) censurou Alexander von Humboldt por representar a hipótese nebular como fato estabelecido em sua obra seminal, *Cosmos* (BRUSH, 1996a, p. 48-9).

O alvo de Babinet não era a hipótese nebular em sua forma original – em que apenas a atmosfera do Sol se estendia por todo o sistema solar – mas somente a suposição, que havia se tornado comum, de que o Sol primordial tivesse densidade uniforme até a órbita de Netuno. No entanto, a suposição de que a maior parte da massa solar estaria mais concentrada no centro da nebulosa primordial tornava implausível que o sistema tivesse entrado em rotação como um sólido, algo que Laplace tinha percebido como necessário para explicar a rotação direta dos planetas. Paradoxalmente, Babinet continuou considerando a cosmogonia de Laplace uma grande descoberta, mas acabou estimulando ceticismo sobre a hipótese nebular por quase um século (BRUSH, 1996a, p. 58). Como veremos, a objeção baseada na discrepância da distribuição do momento angular no sistema seria retomada no final do século XIX e constituiria uma das principais razões para o quase completo abandono da hipótese nebular logo em seguida.

*

Apesar dos problemas, das críticas e objeções, durante o século XIX a hipótese nebular foi “a única bem conhecida tentativa de explicar as regularidades do sistema solar via processos naturalistas” (BRUSH, 1996a, p. 54). Como já afirmado anteriormente, a cosmogonia não era uma área que atraía muitos profissionais da ciência oitocentista. Nesse contexto, um dos (poucos) que se dedicaram profissionalmente a empreender uma pesquisa cosmogônica detalhada foi o estadunidense Daniel Kirkwood. O astrônomo começou a publicar artigos defendendo a cosmogonia de Laplace num dos momentos em que a confiança na teoria se encontrava em baixa – a metade do século, logo após as observações de Rosse. Kirkwood procurava avaliar como a hipótese nebular se sustentava em relação ao conhecimento do sistema solar do período. O diagnóstico a que suas pesquisas levaram nas duas décadas subsequentes – o de que havia muito mais evidências favoráveis à hipótese nebular do que contrárias a ela (KIRKWOOD, 1860) – acabou tendo sensível influência no período.

A nascente técnica da espectroscopia astronômica²⁸ também pareceu fornecer, na década de 1860, resultados alvissareiros para a sustentação da hipótese nebular. A primeira observação de um espectro de uma nebulosa foi realizada em 1864, pelo astrônomo britânico William Huggins²⁹. Esse pioneiro da espectroscopia astronômica obteve um espectro de uma única linha brilhante quando observou a nebulosa planetária na constelação do Dragão³⁰. Huggins inferiu inicialmente que a nebulosa não poderia ser um conjunto de estrelas, devendo ser composta de gás luminoso. Muitos cientistas acabaram aceitando essa inferência e estendendo-a ao espectro de outras nebulosas. Nesse período, isso acabou constituindo um contrapeso às observações de Rosse e a generalização sobre as nebulosas como conjuntos de estrelas. Décadas mais tarde, essa inferência se revelaria errada³¹. Outra interpretação de dados espectroscópicos inicialmente indicavam uma mesma composição química para o Sol, a Terra e as outras estrelas, mas que no começo do século XX também se revelaria falsa. Ambos os resultados da espectroscopia astronômica foram interpretados na segunda metade do século XIX como evidência favorável à hipótese nebular (BRUSH, 1996a, p. 61).

Nesse período, algumas modificações da hipótese nebular entraram em jogo, sem alterar seu cenário geral. As principais sugestões – ao menos se adotarmos um critério um tanto *whig* de importância histórica – foram no sentido de procurar compreender a formação dos planetas a partir de acreção de partículas ou colisões de meteoritos. Kirkwood contribuiu sugerindo que o cinturão de asteroides poderia ser um indício de que os planetas se formaram a partir de acreção de partículas sólidas, em vez de gás (KIRKWOOD, 1869). Richard Proctor, o grande divulgador de astronomia do período, defendeu a planetogonia via acreção de matéria meteorítica gerada pelo resfriamento e solidificação da nebulosa primordial (PROCTOR, 1870/1901). Na década de 1880, essas ideias foram formuladas com algum detalhe técnico, independentemente, por dois astrônomos profissionais, o francês Hervé Faye e o britânico George Darwin, filho de Charles (BRUSH, 1996a, pp. 114-7).

²⁸ A espectroscopia astronômica mudou profundamente o conhecimento astronômico, inaugurando formas de investigação de objetos celestes até então não imaginadas ou mesmo consideradas impossíveis (ver argumentos de Auguste Comte).

²⁹ Por quatro décadas, William e sua esposa Margaret Huggins se dedicaram ao desenvolvimento de espectroscópios e a observação dos céus com esses instrumentos (HARRISON, 2011, p. 10).

³⁰ A então “nebulosa planetária do Dragão” é atualmente conhecida como “Nebulosa do Olho de Gato”. No catálogo geral: NGC 6543.

³¹ “Essa inferência dependia da suposição de que as estrelas *não* são gasosas, mas líquidas ou sólidas, logo ela falhou quando as ideias sobre a estrutura estelar mudaram” (BRUSH, 1996a, p. 61).

Perto da virada do século XIX para o XX, concomitantemente às pesquisas que solaparam a confiança na ideia de uma única *causa primordial* na origem do sistema solar, o conceito de formação de planetas por acreção de partículas sólidas passou a servir à construção de uma alternativa teórica que sobrepujaria a hipótese nebular. A história do declínio e da queda da cosmogonia laplaciana e a emergência de uma teoria radicalmente diferente será contada na próxima seção.

3.3. As hipóteses do encontro estelar

Embora os astrônomos da segunda metade do século XIX estivessem cientes das dificuldades em coadunar a hipótese nebular com a distribuição do momento angular no sistema solar, a esmagadora maioria daqueles poucos cientistas que se dedicaram à cosmogonia nesse período optou por buscar adaptações que contornassem esses problemas. Aqui e ali surgiram propostas de cosmogonias alternativas apostando num tema dissonante: a colisão entre estrelas (seção 3.3.1.), mas a ciência oitocentista não produziu desvios frutíferos da rota *monista* aberta por Laplace. Isso mudaria radicalmente no começo do século XX.

Ao longo das duas primeiras décadas do século XX formaria-se, aos poucos, um consenso *dualista*: o Sol e os planetas teriam tido origens distintas; não seriam frutos de uma mesma *causa primordial*. Nesse período, a visão de uma nebulosa de gás em rotação acabaria sobrepujada por variações daquele mesmo tema dissonante: o *encontro estelar*, a grande aproximação entre o Sol e outra estrela como evento gerador dos planetas e satélites.

O momento de declínio da centenária hipótese nebular se confunde com o da emergência de uma teoria capaz de ocupar seu lugar como explicação cosmogônica dominante (seção 3.3.2.). Essa história tem como protagonistas dois cientistas estadunidenses: o geólogo Thomas Chrowder Chamberlin (1842-1928) e o físico Forest Ray Moulton (1872-1952). Ambos ajudaram a aprofundar o descrédito da hipótese nebular nos últimos anos do século XIX e desenvolveram em conjunto a chamada *hipótese planetesimal*. No início do século XX, a comunidade científica dos Estados Unidos passaria a tomá-la como a melhor cosmogonia disponível. Veremos como essa teoria combina e modifica duas ideias até então fora do comum: a quase colisão entre o Sol e outra estrela e a formação de planetas por meio de um processo relativamente “frio” de colisão de material meteorítico.

Pouco mais de uma década após o surgimento da hipótese planetesimal, emergiria na Inglaterra a chamada *teoria de maré (tidal theory)*. Proposta inicialmente pelo físico James Jeans (1877-1946) e complementada pelo geólogo Harold Jeffreys (1891-1989)³², essa teoria também se baseava numa aproximação entre o Sol e outra estrela como evento gerador, mas divergia da teoria de Chamberlin e Moulton ao sustentar a tese geológica mais usual de uma origem quente e fluida dos planetas (seção 3.3.3.).

As hipóteses do encontro estelar dominariam o cenário cosmogônico temporariamente, motivando especulações metafísicas sobre o lugar da humanidade num universo em que os sistemas planetários passaram a ser vistos como raríssimos, dada a baixa probabilidade da ocorrência de um evento como o encontro estelar. Mas esse predomínio não duraria muito: ambas cairiam em descrédito no final da década de 1930 (seção 3.3.4.).

3.3.1. Precursores do encontro estelar

A ideia de que o sistema solar poderia ter se formado a partir de um evento como a colisão de objetos celestes não era exatamente nova no alvorecer do século XX, mas nunca havia sido considerada seriamente pela maioria dos astrônomos e físicos. Buffon havia sido um precursor longínquo no século XVIII, com sua hipótese de formação dos planetas a partir de uma colisão entre o Sol e um cometa. Cem anos depois, surgiria uma ideia mais ou menos parecida.

Em 1868, o cientista escocês James Croll (1821-1890) propôs que o Sol teria se formado a partir da colisão direta, em alta velocidade, entre duas estrelas com metade da massa solar. Em sua hipótese, Croll não coloca em questão o processo de formação de planetas descrito por Laplace, apenas sugerindo como o Sol primordial poderia ter sido formado (BRUSH, 1996a, p. 108). Como Brush explica (ibid., nota 4), ao propor uma colisão de duas estrelas como origem do Sol, Croll tentava resolver a discrepância entre a estimativa de Helmholtz-Kelvin sobre a duração máxima do brilho do Sol, que não poderia ser maior do que 20 milhões de anos, e o conhecimento geológico do período, que já indicava uma Terra

³² De maneira independente, sem a colaboração que caracterizou a parceria Chamberlin-Moulton, cada um dos cientistas ingleses deu contribuições diferentes à *teoria de maré*.

muito mais antiga do que isso.³³ Não existia, no entanto, qualquer observação que fornecesse suporte à ideia de colisão estelar.

Embora análises probabilísticas sobre a chance de ocorrência de colisões estelares só fossem emergir no século XX, o evento já era considerado improvável: havia muito, a noção de que enormes distâncias separam as estrelas estava bem consolidada. Mesmo assim, não era descartada a possibilidade de estrelas se atraírem mutuamente a ponto de colidirem ou passarem muito perto umas das outras. Em 1878, o químico Alexander William Bickerton³⁴ (1842-1929) substituiu a colisão estelar direta por uma colisão de raspão (*grazing collision*) entre duas estrelas, encarada como um pouco menos improvável. Como Croll, inicialmente Bickerton não tinha foco na explicação da origem do sistema solar. Ele propunha a colisão estelar de raspão como geradora de uma terceira estrela temporária para explicar o raro fenômeno de aparição e desaparecimento de estrelas em um curto espaço de tempo.

Apesar de não mirar inicialmente na cosmogonia laplaciana, Bickerton tinha familiaridade com as dificuldades encontradas pelos astrônomos para coadunar a hipótese nebular com a distribuição de momento angular e com as irregularidades do sistema (BRUSH, 1996c, p. 23). Ele passou a defender em artigos e livros de divulgação científica que a colisão estelar de raspão (ou “colisão parcial”) também poderia ter dado origem ao sistema solar, além de explicar muitos outros fenômenos celestes.

Apesar de propor uma planetogonia baseada em colisão estelar, a assim chamada *teoria do impacto construtivo* de Bickerton não resultava num cenário em que o sistema solar seria raro ou único no universo. Naquele que talvez seja seu livro mais conhecido, *The Romance of the Heavens*, publicado em 1901, Bickerton apresentou a um público amplo sua visão das colisões parciais como um motor da “evolução de corpos estelares e sistemas”, a “lei universal controlando o cosmos” (BICKERTON, 1901, p. 12-3). Colisões de objetos de diferentes natureza (planetas, estrelas, nebulosas) alimentariam ciclos infinitos de “construção e dissipação de mundos, sistemas solares e sistemas cósmicos³⁵” (idem, p. 192-6).³⁶

³³ A energia gerada pela colisão de duas estrelas de $\frac{1}{2}$ massa solar propiciaria um brilho solar extra em 50 milhões de anos, o que no final das contas não resolveu o problema da discrepância descrita acima.

³⁴ Bickerton é hoje mais conhecido por ter sido o orientador de Ernest Rutherford, o pioneiro da física nuclear, na Nova Zelândia.

³⁵ Bickerton se mostrava favorável à interpretação kantiana das “nebulosas espirais” como “universos-ilha”.

³⁶ A ideia de violência cósmica como geradora de ciclos naturais de destruição e reconstrução não era estranha à cultura oitocentista tardia, mesmo num ambiente intelectual ainda inclinado a uma visão de mundo evolucionista unidimensional e linear. Em 1876, por exemplo, o filósofo e historiador John Fiske adaptava a hipótese nebular

Numa resenha muito desfavorável publicada na revista *Nature*, a teoria de Bickerton é sutilmente ridicularizada: “os recursos da teoria parecem ser ilimitados. Enquanto uma colisão produz uma nova estrela, outra resulta em um aglomerado de estrelas, outra explode um planeta em asteroides, e ainda outra dispersa um satélite num anel como o de Saturno” (“The Romance of the Heavens”, 1901, p. 607). O resenhista afirma que a teoria “não foi recebida com hospitalidade pelos astrônomos” e vaticina que “a exposição mais elaborada ora apresentada provavelmente não terá melhor destino” (ibid.), o que acabou por se confirmar. Brush sublinha que o ceticismo dos astrônomos era basicamente motivado pela improbabilidade do evento de colisão estelar (BRUSH, 1996c, p. 24).

Incipientes, essas teorias baseadas em colisão estelar não foram aceitas pela comunidade científica, mas indicam que ideias similares pairavam no horizonte do início do século XX. De fato, embora as *colisões estelares* fossem praticamente rejeitadas, a possibilidade de um *encontro estelar*, a aproximação entre duas estrelas vagando pelo espaço, não era impopular nesse momento. Por exemplo, a partir de 1904, o astrônomo holandês Jacobus Cornelius Kapteyn (1851-1922) publicou estudos sobre fluxos ou correntes de estrelas que se entrecruzavam em direções opostas – o que foi interpretado como um aumento da chance de ocorrerem encontros estelares.³⁷

Foi nesse contexto que surgiram as teorias *dualistas*, que explicavam a origem do sistema solar não por meio de uma colisão estelar, mas por uma aproximação entre o Sol e outra estrela.

3.3.2. A hipótese planetesimal de Chamberlin e Moulton

A pesquisa de Brush sobre a gestação, recepção e rejeição da chamada *hipótese planetesimal* está baseada numa exaustiva pesquisa documental de correspondências dos dois pesquisadores envolvidos, bem como em análise pormenorizada dos artigos publicados por

com a ideia de colisões para pintar um quadro de ciclos cósmicos criativos (FISKE, 1976, I parte). Fiske foi também um divulgador da visão de mundo evolucionista e do darwinismo, elogiado em carta pelo próprio Darwin: “nunca li um expositor tão lúcido quanto você”. (DARWIN, 1874; 2016).

³⁷ Kapteyn elaborou um modelo do universo em que a Via Láctea é composta de dois fluxos de estrelas em direção contrária, com o Sol no centro. A Via Láctea de Kapteyn era muito maior do que os modelos atuais aceitos, mas ao mesmo tempo abrangia todo o universo. Por isso, as nebulosas espirais eram interpretadas como objetos internos à Via Láctea no chamado *Universo de Kapteyn*.

ambos. É a parte mais detalhada do levantamento histórico de Brush, e o que possui mais méritos historiográficos. Nesta seção, seguirei de maneira bastante próxima a pesquisa de Brush, salientando os pontos mais importantes da hipótese planetesimal para a análise que proponho no capítulo 5.

*

Como vimos, no século XIX a cosmogonia era, em geral, um assunto de astrônomos, circunscrito a um número muito limitado deles, contando com colaborações esporádicas de um número ainda menor de físicos e matemáticos. Mas a geologia do período auxiliou indiretamente as discussões sobre a origem do sistema solar ao propor um cenário de desenvolvimento lento das características hoje observadas no planeta Terra, lidando com uma escala de tempo que seria considerada impensável até o final do século XVIII. E acabou sendo um geólogo, no fim do século XIX, o personagem a causar o maior terremoto na área da cosmogonia até então.

Segundo a interpretação geológica *uniformitarista*, proposta pelo pioneiro escocês James Hutton (1726-1797) e tornada paradigmática por seu compatriota Charles Lyell (1797-1875), as diversas características da crosta terrestre atual poderiam ser compreendidas por meio de processos lentos e graduais. Para explicar como acidentes geográficos – cadeias montanhosas inteiras, por exemplo – poderiam ter se formado lenta e gradualmente, Lyell propôs que o passado terrestre deveria ser compreendido numa escala de tempo de centenas de milhões de anos. Para os uniformitaristas, as forças que teriam moldado a crosta terrestre ao longo desse *abismo de tempo* não deviam ser substancialmente diferentes das que eram observadas em atuação no presente. Por esse princípio, não haveria necessidade de se recorrer a fenômenos geológicos catastróficos ou incomuns para que a história da Terra fosse conhecida e suas condições atuais fossem explicadas.

A concepção de um abismo de tempo que precede a humanidade aos poucos foi contaminando outras áreas da ciência. Charles Darwin, em *A Origem das Espécies* (1859), havia estimado um longo período para explicar o lento processo de evolução das espécies por meio de seleção natural. Na primeira edição do livro, Darwin supôs um passado terrestre na casa dos 300 milhões de anos.

Nesse ínterim, um debate intenso sobre a estrutura interna da Terra ocorria, com o surgimento de vários modelos divergentes. A Terra podia ser como composta de uma crosta terrestre fina (menos de 100 km de espessura) ou grossa (mais de 1000 km de espessura) com interior inteiramente líquido e quente; essa mesma estrutura de crosta sólida e interior líquido combinou-se em outros modelos, com um núcleo sólido ou com um núcleo gasoso. Além desses, o modelo de uma Terra inteiramente sólida também foi proposto, e acabou sendo defendido por uma das maiores autoridades científicas da segunda metade do século XIX, o irlandês William Thompson, ou *Lord Kelvin* (1824-1907).

Kelvin foi uma figura muito influente no debate acerca da idade da Terra e do Sol, propondo estimativas na casa de poucas dezenas de milhões de anos. A Terra teria tido uma origem quente e fluida (como postulado por Laplace), tendo se solidificado por um processo de resfriamento. As estimativas de Kelvin se chocaram tanto com a escala de tempo proposta pelos geólogos uniformitaristas quanto com o tempo necessário para que a seleção natural produzisse a diversidade da vida. No final do século XIX, a autoridade de Kelvin se confundia com a própria autoridade da física sobre a geologia nas discussões acerca da estrutura e da idade da Terra e da plausibilidade do darwinismo³⁸.

Na Chicago dos anos 1890, um geólogo que até os cinquenta anos de idade não havia conseguido grande destaque começou a encontrar motivos para ousar questionar as suposições de Kelvin sobre a Terra primitiva. Como o eminente físico irlandês, Thomas Chrowder Chamberlin também adotava o modelo de uma Terra inteiramente sólida. Mas, claro, não ignorava as evidências de estratigrafia que apontavam para um passado muito mais profundo do que as poucas dezenas de milhões de anos estimadas por Kelvin. Mas estaria Kelvin enganado ao defender a solidez atual da Terra a partir do resfriamento de um estado originalmente quente e fluido? A Terra poderia ter sido sólida desde sua formação? A disposição por enfrentar os físicos acabou levando Chamberlin a uma rota que desembocou numa nova cosmogonia.

Na última década do século XIX, a ideia de uma origem fria e sólida da Terra começou a aparecer para Chamberlin como a melhor solução para responder a questões sobre

³⁸ Em 1876, por exemplo, um físico escrevia: “Não podemos conceder aos geólogos, para suas especulações, um período mais longo que 10 milhões ou, no máximo, 15 milhões de anos. Muitos de vós, tendo conhecimento das pesquisas de Lyell e Darwin, dirão que nem mesmo 300 milhões de anos são suficientes para uma parte mesmo breve da história geológica. E eu direi: tanto pior para a geologia, assim como hoje ela é entendida por suas autoridades máximas” (TAIT apud ROSSI, 1992, p. 157).

a natureza da atmosfera terrestre primitiva. Interessado em explicar períodos de glaciação, o geólogo passou a avaliar a hipótese de queda no nível de dióxido de carbono (já conhecido como um “gás estufa”) como causa do resfriamento na superfície terrestre. Chamberlin tomou conhecimento de estudos que apontavam para uma das consequências da teoria cinética dos gases aplicada à origem da Terra: as moléculas de gases como o dióxido de carbono e o oxigênio, se sujeitas à temperatura extremamente alta postulada para o início líquido da formação da Terra, escapariam para o espaço por conta de sua velocidade de escape superar a força de atração gravitacional do planeta (BRUSH, 1996c, p. 28).

A hipótese nebular era a teoria subjacente à ideia de que a superfície da Terra primordial se encontraria a temperaturas suficientes para derreter rochas. Mas, como vimos, no fim do século XIX já haviam sido expostas tentativas de adaptar a cosmogonia laplaciana com a ideia de formação dos planetas por meio de acreção de meteoritos, um processo muito mais “frio” do que a condensação de gases quentes da atmosfera solar primordial. Chamberlin passou a considerar essas alternativas e tomou conhecimento da principal objeção a elas: se os planetas fossem formados por colisões de material sólido, isso resultaria em movimentos de rotação retrógrados, e não diretos, como observado na maioria deles (BRUSH, 1996c, p. 30). Evocando a terceira lei de Kepler, essa objeção se baseava na diferença de velocidade linear entre meteoritos de órbita mais interna e mais externa do anel protoplanetário: como a colisão se daria entre material mais veloz na órbita interna e os mais lentos na órbita mais externa, a rotação do planeta resultante se daria em sentido contrário ao seu movimento de translação. Essa objeção poderia ser superada se se recorresse a outras causas exóticas, como “fricção de maré”, mas isso não pareceu suficiente para consolidar a hipótese de acreção por meteoritos no século XIX.

Chamberlin notou uma saída para explicar a geração de rotação direta: as duas primeiras leis de Kepler. Se a órbita dos meteoritos não fosse circular, mas elíptica, e se houvesse perturbações e intersecções entre essas órbitas elípticas, a maior parte das colisões se daria nas partes mais externas dos anéis de meteoritos (onde a velocidade linear é maior), favorecendo a possibilidade de geração de um planeta com rotação direta, em vez de retrógrada. Esse argumento seria mais bem desenvolvido por Chamberlin em sua teoria cosmogônica acabada, mas o importante é que uma aparente barreira para a origem fria da Terra mostrava-se contornável. Mas para saber se a hipótese nebular poderia ser sustentada com modificações ou não, ele precisaria da colaboração de um jovem físico, Forest Ray Moulton.

*

Nos últimos anos do século XIX, também em Chicago, Moulton vinha desenvolvendo um detalhado estudo crítico à hipótese nebular, que foi publicado em março de 1900. A maioria dos argumentos de Moulton contra a cosmogonia laplaciana já eram conhecidos, mas seu artigo continha uma apresentação “excepcionalmente poderosa e abrangente” (BRUSH, 1996c, p. 39), principalmente ao analisar o principal problema: a distribuição do momento angular.

Nesse momento, Chamberlin e Moulton já haviam começado a colaborar. “Certain Recent Attempts to Test the Nebular Hypothesis”, que saiu na revista *Science* em agosto de 1900, é a primeira publicação em conjunto. Esse texto é muito representativo do trabalho de ambos e parece servir de preparação aos leitores de *Science* para a nova cosmogonia que eles vinham elaborando. O artigo ataca contundentemente a hipótese nebular ao mesmo tempo em que fornece um embrião da argumentação usada por eles cinco anos mais tarde: a ideia de encontro estelar.

Primeiro, Chamberlin e Moulton resumizam suas principais críticas à cosmogonia laplaciana: a origem da Terra não poderia ter ocorrido via condensação de uma nebulosa a altas temperaturas (ou seja, relacionada à questão da manutenção de dióxido de carbono e oxigênio na atmosfera), e a distribuição atual do momento angular é muito discrepante com a postulada origem do sistema por uma nebulosa em rotação (CHAMBERLIN e MOULTON, 1900, p. 207). Após detalharem essa última objeção, afirmam que as discrepâncias entre a distribuição de massa e de momento angular “apontam para uma distribuição de matéria e energia bastante desarmônica com um esferoide original de qualquer natureza” (CHAMBERLIN e MOULTON, 1900, p. 207). Eles então apontam que o sistema deve ter se originado de forma que a parte externa ficasse com quase todo o momento ao mesmo tempo em que possuía uma parte muito pequena da massa total (ibid.). E completam: “O Sol não tem momento rotacional residual que indique que algum dia tenha ‘lançado para fora’ quaisquer planetas de seu equador” (ibid.).

As razões de massa para momento e as discrepâncias do sistema claramente têm um alto valor na construção de uma hipótese sustentável [...] Numa tentativa de construir tal hipótese, a matéria do sistema deve ser arranjada de forma a dar à

pequena massa muito momento e uma distribuição irregular para a parte externa, e à grande massa, pouco momento e esfericidade na parte central. (CHAMBERLIN e MOULTON, 1900, p. 207)

A partir daí, esboçam uma conjectura nada usual: “a possibilidade do início do sistema por uma colisão periférica de uma nebulosa muito pequena com uma maior” (CHAMBERLIN e MOULTON, 1900, p. 207). Segundo a conjectura, a nebulosa maior (presumivelmente, a que daria origem ao sistema solar) apresentaria uma rotação inicial pequena. (ibid.). Essa ideia, reconhecem, possui a séria dificuldade de se coadunar com as órbitas aproximadamente circulares dos planetas, mas isso poderia ser o resultado de “um grande número dos constituintes [do material da nebulosa] tendo órbitas elípticas” (CHAMBERLIN e MOULTON, 1900, p. 208).

O artigo termina sugerindo que as nebulosas espirais poderiam vir a ser o melhor exemplo de um sistema de pequena massa e grande momento angular no exterior e grande massa e pequeno momento angular na região central, ainda que reconheçam não haver qualquer conhecimento acerca da dinâmica desses objetos (CHAMBERLIN e MOULTON, 1900, p. 208).

As observações de nebulosas espirais a que Chamberlin e Moulton se referem no artigo conjunto de 1900 foram feitas principalmente pelo astrônomo James Keeler (1857-1900). As observações de Keeler, nos últimos anos do século XIX, revelavam as espirais em número e detalhe até então inéditos. O astrônomo estimou o número de objetos desse tipo em não menos do que 120 mil (AITKEN, 1906, p. 117). Além disso, fez uma observação cética quanto à possibilidade de interpretados como exemplo do processo de formação do sistema solar descrito por Laplace: “as fotografias mostram que as nebulosas espirais não são, via de regra, caracterizadas pela simplicidade atribuída à massa em contração [postulada pela] hipótese nebular” (KEELER apud AITKEN, 1906, p. 118). Chamberlin interpretou a estrutura de braços espirais como, possivelmente, o resultado de colisão de nebulosas a alta velocidade. Em sua nova cosmogonia, ele abandonaria essa hipótese de colisões periféricas de nebulosas, pois gerariam órbitas planetárias excessivamente excêntricas (BRUSH, 1996c, p. 42-3).

A cosmogonia proposta por Chamberlin e Moulton foi publicada numa série de artigos em 1904 e 1905. No lugar da colisão de nebulosas, eles propuseram como origem do sistema solar uma aproximação entre o Sol primitivo e outra estrela. Em resumo, a teoria é a seguinte: uma “estrela intrusa”, mais massiva, teria passado a alta velocidade perto do Sol – uma distância parecida com o raio da órbita de Júpiter. A interação gravitacional entre as duas

estrelas teria causado uma ejeção de material solar, produzindo inicialmente dois braços espirais. A observação telescópica de “nebulosas” espirais eram principal apoio empírico da teoria. Pulsações irregulares do processo de ejeção fazem com que os braços contenham “nós” de matéria, pequenos núcleos de matéria que posteriormente formariam os planetas e satélites. O material ejetado pelo Sol se resfriaria rapidamente (via emissão de radiação) e se solidificaria em partes muito pequenas (Chamberlin chamou-as de *planetesimais*, planetas infinitesimais, daí o nome da teoria). Os planetesimais e os “nós” de matéria se movem em órbitas keplerianas, com início do processo de acreção de planetesimais nos pequenos núcleos. Esse processo obedeceria ao padrão conjecturado por Chamberlin quando ainda estava tentando adaptar a hipótese nebular pela via meteorítica. Por fim, os planetas se formam por via dessas colisões e da contração gravitacional, gerando calor lentamente e jamais chegando às altas temperaturas imaginadas pela condensação da nebulosa primordial.

A substituição da hipótese nebular pela hipótese planetesimal foi anunciada por Chamberlin com certa fanfarra numa carta ao diretor do departamento de geologia da Universidade de Chicago. Em grande medida, ao menos nos Estados Unidos, as pretensões de Chamberlin foram concretizadas. Segundo o mapeamento de Brush sobre a repercussão da hipótese planetesimal durante a primeira década de sua existência, a maioria dos astrônomos estadunidenses emitiu opinião favorável à teoria, embora muitos tenham mantido a cautela de considerar a origem do sistema solar um vasto assunto sobre o qual a ciência ainda tinha muita dificuldade de chegar a um conhecimento satisfatório (BRUSH, 1996c, p. 61-3).

Numa resenha de *The Evolution of Worlds*, livro de divulgação científica publicado em 1910 por Percival Lowell (1855-1916)³⁹, o astrônomo Charles Lane Poor (1866-1951)⁴⁰ nota que Lowell, em 1909, rejeitou a hipótese planetesimal por ser “matematicamente errada” mas, nesse livro, apresenta como explicação para a origem do sistema solar justamente a teoria de Chamberlin e Moulton – porém, sem citar seus autores (POOR, 1910, p. 506)⁴¹. Publicada na revista *Science*, essa resenha dá um exemplo de como a hipótese planetesimal vinha sendo considerada pelos astrônomos apenas cinco anos após a publicação do artigo de 1905: “ela explica muitas das dificuldades encontradas pela hipótese

³⁹ Lowell é o famoso escritor e astrônomo que ficou marcado pela infâmia de propagar a ideia espúria de que Marte tinha canais na superfície, construídos por uma civilização marciana.

⁴⁰ Poor ficou mais conhecido por se opor à teoria da relatividade (especial e geral) de Einstein em uma série de artigos na década de 1920.

⁴¹ Brush afirma que Poor (entre outros resenhistas) não percebeu uma distinção importante entre a teoria de Lowell e de Chamberlin-Moulton.

nebulas ou laplaciana e é indubitavelmente a mais satisfatória “teoria de trabalho” (*working theory*) já proposta” (BRUSH, 1996c, p. 61-3).

Opinião parecida foi emitida por Robert Aitken (1864-1951): “[a hipótese planetesimal] explica praticamente todas as relações observadas no sistema solar e não é contraditada por nenhuma” (AITKEN, 1906, p. 121). Tanto Poor quanto Aitken creditam a Chamberlin e Moulton a demonstração da insustentabilidade da hipótese nebulas. Na Europa, os autores da hipótese planetesimal também foram geralmente reconhecidos por terem “derrubado” a hipótese nebulas, mas sua teoria não foi tão amplamente aceita quanto nos EUA (BRUSH, 1996c, p. 66). James Jeans, no livro em que desenvolveu sua própria teoria do encontro estelar, cita a “teoria planetesimal” de Chamberlin e Moulton como “a mais completa forma de teoria de ação-de-maré [*tidal-action*]⁴²”, mas ressalta: “se [os processos descritos pela teoria] ocorrem ou não, isso só pode ser decidido através de uma exaustiva investigação matemática” (JEANS, 1919, p. 17).

No entanto, na década de 1920, a concepção sobre o que de fato seriam as “nebulas espirais” se sedimentou, o que solapou o principal fundamento empírico da hipótese planetesimal. A interpretação segundo a qual esses objetos poderiam ser sistemas solares em formação, ou mesmo qualquer outro tipo de objeto interno à Via Láctea, foi rejeitada em favor da concepção de que constituíam outras *galáxias*. Comentando esse ponto, Brush considera que foi um erro fatal a insistência de Chamberlin em vincular estreitamente a hipótese planetesimal à natureza intragaláctica e protoplanetária das nebulas espirais. Mas, evidentemente, essa avaliação conta com a vantagem da retrospectiva, e não diminui em nada o valor científico do trabalho de Chamberlin. Quando a resolução desse chamado “Grande Debate”⁴³ apontou que as nebulas espirais outras galáxias, a credibilidade da hipótese planetesimal foi seriamente afetada. Importante notar, antes de prosseguirmos, que essa não era uma vulnerabilidade *geral* das chamadas *tidal theories*, ou teorias de maré, como mostra o desenvolvimento de outras cosmogonias do encontro estelar no início do século XX, como veremos na próxima seção.

⁴² Por “tidal action” Jeans se referia à interação gravitacional entre duas estrelas em grande aproximação.

⁴³ O chamado “Grande Debate”, que ocorreu em 1920, opôs duas interpretações antagônicas sobre as nebulas espirais, com repercussões diretas sobre a estrutura da Via Láctea e do universo. Harlow Shapley defendeu que as nebulas espirais eram nuvens de gás intragalácticas e que o universo consistia em apenas uma única galáxia. Heber Curtis defendeu que as nebulas espirais eram outras galáxias como a nossa. O debate foi resolvido a partir das descobertas das variáveis cefeidas por Edwin Hubble em meados da década de 1920, que forneceu evidência conclusiva de que as espirais eram, de fato, outras galáxias.

3.3.3. A teoria de maré de Jeans e Jeffreys

Em 1930, um pequeno livro de divulgação científica apresentava um cenário cósmico desalentador para um leitor que pudesse nutrir esperanças de que houvesse sistemas planetários e de que a vida estivesse espalhada pelo universo: o sistema solar existe porque uma estrela passou muito próxima do Sol e arrancou dele o material que formaria posteriormente seu sistema planetário. Como as distâncias interestelares são imensas, um encontro estelar – especialmente um que fosse capaz de gerar planetas ao redor das estrelas – é um evento muito improvável. Logo, os sistemas planetários devem ser muito raros.

Esse livro, *The Mysterious Universe*, era a segunda obra de divulgação do físico e matemático inglês James Jeans⁴⁴, o autor de uma teoria cosmogônica que postulava um encontro estelar para a formação de planetas. De forma prosaica, Jeans descreve sua *teoria de maré*⁴⁵, o processo físico que teria originado o sistema solar:

uma segunda estrela vagando erratically pelo espaço chegou a uma distância muito próxima do Sol. Assim como o Sol e a Lua produzem marés na Terra, esta segunda estrela deve ter produzido marés na superfície do Sol. Mas essas seriam muito diferentes das marés insignificantes que a pequena massa da Lua produz nos nossos oceanos; um enorme maremoto deve ter viajado pela superfície do Sol, formando uma montanha de altura prodigiosa, que se elevaria cada vez mais enquanto a causa da perturbação chegava cada vez mais perto. E, antes que a segunda estrela começasse a se distanciar, sua força de maré se tornaria tão poderosa que esta montanha se despedaçou e lançou para longe seus pequenos fragmentos, assim como a crista de uma onda projeta um spray. Esses pequenos fragmentos estão circulando em torno do Sol desde então. São os planetas, grandes e pequenos, um dos quais é a nossa Terra (JEANS, 1930, p. 2).

Assim como a hipótese planetesimal, um dos objetivos da teoria de maré era contornar o problema da distribuição do momento angular, tentando explicar como o Sol pode

⁴⁴ Reconhecido por contribuições em diversos campos, como a mecânica quântica e a teoria da radiação, James Jeans foi uma espécie de “celebridade da ciência” na era do rádio. Em 1929, ele começou a publicar livros de divulgação científica que tiveram grande circulação, efetivamente abandonando a carreira de pesquisador e se tornando um famoso escritor e popularizador da ciência. Seus escritos revelam uma preocupação filosófica profunda com a natureza da realidade, flertando com uma visão idealista, em que a matéria derivaria da consciência. Para se ter uma ideia da influência de Jeans como divulgador de ciência, *The Mysterious Universe* teve quinze edições e está numa lista de 13 melhores livros de ciência para o público geral, elaborada pelo também divulgador e físico laureado com Prêmio Nobel, Steven Weinberg (2015).

⁴⁵ A expressão “tidal theory” utilizada por Jeans não deve ser confundida com a teoria homônima da década de 1960 sobre a atmosfera terrestre.

ter conservado tão pouco momento tendo mais de 99,8% da massa do sistema todo. Como Moulton, Jeans estudou algumas das inconsistências da hipótese nebular no começo do século XX, embora tenha se concentrado em outras áreas da física (ver nota 49). Suas pesquisas sobre a hipótese nebular, publicadas em 1902 e 1905, não chegaram a uma conclusão definitiva sobre a validade da teoria, porém, em 1917 Jeans publicou um artigo que examina o problema do comportamento de massas em rotação, sugerindo a possibilidade de um encontro estelar ter produzido uma maré na superfície do Sol capaz de arrancar um filamento de gás que produziria os planetas.⁴⁶ Jeans expandiu esse trabalho e o publicou como o livro *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics*, em 1919.⁴⁷

Em contraste com o método de “múltiplas hipóteses de trabalho” (*multiple working hypotheses*) de Chamberlin, a abordagem de Jeans é calcada no que considera ser o “método mais científico” de “limitar a investigação ao problema abstrato do comportamento de massas de matéria astronômica sob variadas forças dinâmicas” (JEANS, 1919, p. 17). Essa abordagem matemático-dedutiva de Jeans estava inserida na tradição da mecânica celeste clássica, que orientava a astronomia profissional no início do século XX (STANLEY, 2007, p. 56).⁴⁸

Na parte inicial do livro, em que faz uma revisão das teorias cosmogônicas, Jeans divide a hipótese nebular em duas partes essenciais que, segundo ele, haviam sobrevivido até o começo do século XX: “a suposição de que o sistema solar se originou de uma massa nebulosa de gás”, que Jeans chama de “teoria da origem nebulosa”, e “a suposição de que a mudança do estágio primitivo para o presente estágio foi produzida principalmente pela agência de uma crescente rotação”, chamada por ele de “teoria rotacional” (JEANS, 1919, p. 12).⁴⁹

⁴⁶ Esse artigo, *The motion of tidally distorted masses, with special reference to theories of cosmogony*, recebeu o prêmio Adams da Universidade de Cambridge.

⁴⁷ Ao contrário de sua análise pormenorizada das pesquisas de Chamberlin e Moulton, em *Fruitful Encounters* Brush não analisa essa obra de Jeans. Apenas sumariza as ideias centrais da teoria de maré, sem dar qualquer atenção detalhada às obras cosmogônicas do físico inglês.

⁴⁸ “A mecânica celeste se apoiava num modelo matemático da verdade em que o conhecimento válido vinha de deduções rigorosas baseadas em premissas certas (isto é, indubitáveis).” (STANLEY, 2007, p. 56)

⁴⁹ Essa é uma distinção importante pois evita o perigo de que, considerada como uma só explicação, a teoria fosse inviabilizada por conta dos eventuais resultados obtidos pelas pesquisas sobre as nebulosas e sobre a estrutura das estrelas. Essa foi uma vulnerabilidade da hipótese planetesimal, calcada nas espirais como suporte empírico de que sistemas solares se formam via encontro estelar.

Sobre a chamada “teoria rotacional”, a análise de Jeans parte da famosa crítica de Babinet, de 1861: a distribuição do momento angular não corresponde à que o sistema solar deveria apresentar caso tivesse sido originado de uma nuvem de matéria em rotação; o total agregado do momento angular do sistema é pequeno demais para que anéis de matéria tivessem se desprendido da nuvem (JEANS, 1919, p. 15). Em outras palavras, a nuvem primordial em contração deveria ter girado a uma velocidade muito maior para que sua rotação sobrepujasse a força gravitacional e fizesse desprender em suas periferias, ao longo de seu processo de contração, os anéis que formariam os planetas. Após extensa análise, Jeans conclui que a objeção de Babinet não constitui evidência conclusiva contra a “teoria rotacional”, mas considera que é altamente provável que o sistema solar tenha se formado de outra forma (JEANS, 1919, p. 275). O motivo para essa conclusão é o resultado de sua análise sobre os possíveis caminhos de evolução de uma nebulosa em rotação.

Jeans considera que até seria possível a formação de planetas através de uma massa de gás em rotação. Porém, após essa formação de planetas, o próximo passo de evolução de uma nebulosa em rotação que tivesse massa comparável ao Sol seria a divisão de sua massa central em duas estrelas, formando um sistema binário, ou mesmo múltiplo (JEANS, 1919, p. 269)⁵⁰. Seus cálculos sobre a fissão ou divisão de nuvens de gás em rotação levaram-no a conjecturar que objetos como estrelas binárias, múltiplas, aglomerados e nebulosas espirais são formados via rotação, compondo uma “cadeia de evolução rotacional”. O mesmo não deveria ser dito em relação a um sistema planetário orbitando uma estrela única: “parece não haver lugar nessa cadeia para sistemas como o nosso”, pois “fomos incapazes de descobrir qualquer processo de fissão rotacional que pudesse levar a uma formação final semelhante nosso sistema solar” (ibid.).

A interação gravitacional entre duas “massas”, entretanto, poderia produzir o desprendimento de várias “massas separadas” a partir da “massa primária” (JEANS, 1919, p. 276). Nessa hipótese, o Sol teria se formado a partir da rotação de uma nebulosa, mas os planetas seriam originados a partir das várias massas arrancadas do Sol primitivo pela interação gravitacional deste com uma segunda estrela. Jeans calcula a massa da segunda estrela, a distância e a velocidade do encontro, concluindo que não seriam necessárias nem uma estrela com massa muito acima da média, nem velocidades relativas inusuais (e. g.

⁵⁰ Para corroborar empiricamente seu argumento, Jeans cita pesquisas em astronomia que indicavam que a maior parte das estrelas são binárias ou múltiplas, em vez de solitárias como o Sol.

maiores do que as observadas), e muito menos colisões de raspão para que um sistema planetário fosse formado por um encontro estelar (idem, p. 276-8).

Essa hipótese apresenta diversas vantagens relativamente às anteriores, a começar pela concepção da formação dos planetas como independente da formação do Sol, pois isso explicaria a concentração do momento angular nos gigantes gasosos. A distribuição de massa entre os planetas poderia ser explicada pela teoria: conforme a segunda estrela fosse se aproximando do Sol, “a ejeção de matéria seria devagar”, mas aumentaria ao máximo quando a estrela errante estivesse em sua maior aproximação. “O resultado deve ser um filamento de matéria em que a densidade seria zero em cada ponta e aumentaria ao máximo perto do meio” (JEANS, 1919, p. 283). Isso explicaria, portanto, porque Júpiter e Saturno concentram a maior parte da massa planetária do sistema.

O encontro estelar também contornaria uma conhecida irregularidade do sistema solar: a inclinação do eixo de rotação do Sol num ângulo de aproximadamente 7° com relação ao plano das órbitas dos planetas. Jeans afirma que um sistema em rotação deve ter um plano invariavelmente perpendicular ao eixo de rotação da massa central, o que claramente não é o caso do sistema solar. “A teoria de maré explica isso muito naturalmente”, Jeans argumenta, “supondo que o plano invariável presente preserva o plano de passagem da massa geradora da maré, enquanto o presente plano da rotação do Sol coincide aproximadamente com a da rotação da massa original” (JEANS, 1919, p. 276). A inclinação do eixo do rotação do Sol em relação ao plano invariável do nosso sistema planetário seria um resquício – e portanto evidência - do evento gerador dos planetas.

Contudo, Jeans sabia que havia um problema sério a ser encarado: a improbabilidade do encontro estelar.

Talvez a mais óbvia crítica que possa ser feita contra essa e outras teorias de maré é que elas precisam de uma grande aproximação (close approach) de grandes corpos astronômicos, e que essas grandes aproximações são eventos muito raros. Cálculos [apresentados nessa obra] parecem mostrar que essa consideração deve levar ao abandono de todas as teorias de maré, incluindo a planetesimal, como explicações de processos cosmogônicos normais. (JEANS, 1919, p. 17)

A geração de sistemas planetários por meio de encontro estelar deveria ser considerada um processo *anormal*, atípico, aplicável apenas a “uma pequena proporção das estrelas do universo” (JEANS, 1919, p. 17). A conclusão de Jeans sobre a probabilidade de ocorrência dos encontros estelares – raros, mas não improváveis ao ponto de ser insensato

basear-se neles para elaborar uma teoria da formação dos planetas – está baseada numa suposição acerca do universo primordial.

Jeans reconhece que, com as presentes distâncias interestelares, um encontro estelar capaz de ter gerado os planetas seria muito improvável, na ordem de um a cada 30 bilhões de anos (JEANS, 1919, p. 279). Fosse assim, o encontro estelar como evento cosmogônico teria de ser descartado (até mesmo à luz das estimativas atuais sobre a idade do universo, maiores do que as do começo do século XX). Jeans recorre, então, a uma hipótese cosmológica corrente no período: nos estágios iniciais do universo, as estrelas estavam muito mais próximas umas das outras do que o observado atualmente. Nesse cenário primordial, encontros capazes de produzir destacamento de massa de uma estrela ocorreriam a cada três milhões de anos (ibid.). Raros encontros, portanto, mas não improváveis a ponto de invalidar a teoria. O que a ideia, se aceita naquele momento, passaria a invalidar, é o cenário de incontáveis sistemas solares que tinham povoado a imaginação ocidental desde o período de amadurecimento da Revolução Copernicana. Mais tarde, Jeans faria novos cálculos probabilísticos sobre o encontro estelar e sustentaria, em 1943, que uma em cada seis estrelas podia estar acompanhada de planetas (JEANS, 1943, p. 721), o que dissiparia as consequências mais antipluralistas de sua cosmogonia.⁵¹

Por fim, no livro de 1919, Jeans reconheceu o status provisório da teoria, projetando uma enorme quantidade de pesquisa matemática até que pudesse ser defendida com confiança, embora afirme que sua proposta seja mais aceitável do que qualquer outra teoria (JEANS, 1919, p. 285).

*

Em 1916, Harold Jeffreys levantou uma objeção à acreção de planetesimais, central na teoria de Chamberlin e Moulton: os embriões de planetas perturbariam a órbita dos planetesimais a ponto de fazê-los mudar de órbita. Em pouco tempo (mais ou menos 100 mil anos), os planetesimais se moveriam em todas as direções, o que geraria colisões muito mais energéticas do que Chamberlin e Moulton haviam previsto. Muitas dessas colisões liberariam

⁵¹ As estimativas probabilísticas de Jeans variaram bastante. Em 1941, Jeans havia estimado que apenas uma em cada 500 milhões de estrelas com mais de 2 bilhões de anos de existência poderiam ter planetas (DICK, 1998, p. 79).

energia suficiente para vaporizar os planetesimais. Por isso, Jeffreys propôs abandonar a ideia de formação de planetas via acreção de planetesimais. Brush afirma que a força dessa objeção fez com que os astrônomos do período abandonassem a ideia de acreção de planetesimais, mas não dá referências sobre isso (idem, p. 75).

Jeffreys concebia as cadeias de montanhas como resultado da contração da crosta terrestre e, remando contra a corrente em seu campo, propôs a hipótese de uma Terra em resfriamento progressivo, originalmente em estado fluido e muito quente. Alguns anos mais tarde, após a publicação do livro de Jeans, o geólogo inglês acabou combinando suas próprias convicções de geofísica sobre a origem fluida e quente da Terra com a concepção de que os planetas são fruto da condensação de um filamento de material solar arrancado a altas temperaturas e arremessado ao redor do Sol pela passagem próxima de outra estrela.

Para Brush, a “potente” combinação dos cálculos de Jeans sobre as marés gravitacionais geradas pelo encontro estelar com os argumentos geofísicos e de dinâmica de Jeffreys teria tornado a teoria de maré irresistível nesse período, não fosse pela tenacidade dos geólogos inspirados por Chamberlin a resistirem às investidas da física em seu campo (BRUSH, 1996c, p. 75). O historiador também afirma que, na década de 1920, a teoria de maré de Jeans era geralmente reconhecida entre os astrônomos como a melhor explicação cosmogônica do que a hipótese planetesimal. A teoria de Chamberlin e Moulton passou a ser interpretada como uma versão mais crua da teoria gerada pelo método matemático-dedutivo de Jeans e complementada pela geofísica de Jeffreys.⁵²

3.3.4. O declínio das hipóteses do encontro estelar

⁵² Numa espécie de pitoresca nota de rodapé à história da velha *disputa do Novo Mundo* contada por Antonello Gerbi, houve um breve período de acusações mútuas sobre a precedência das duas teorias. Em 1928, Moulton acusou publicamente os britânicos de chauvinismo nacionalista por supostamente não darem o devido crédito a ele e a Chamberlin, que tinha falecido naquele ano. Jeffreys se defendeu dizendo que havia manifestado suficiente reconhecimento pelo trabalho de Chamberlin e Moulton, embora tenha reclamado de que o geólogo estadunidense teria contribuído para o preconceito entre geólogos contra a geofísica dele, Jeffreys. O geólogo inglês também sugeriu que a ideia de encontro estelar não era nova, citando predecessores como Bickerton e Buffon. Jeans se defendeu afirmando que bem antes de 1905 já havia sugerido a possibilidade de um encontro estelar dar origem ao sistema solar (Brush diz que há apenas vagas menções a isso nos trabalhos a que Jeans faz alusão). (BRUSH, 1996c, p. 74). Jeans dá o devido crédito a Chamberlin e Moulton em seu livro de 1919 (“a mais completa forma de teoria de ação de maré”) e não alega precedência sobre os estadunidenses em relação à ideia de encontro estelar, mas também não os reconhece como pioneiros. (JEANS, 1919, p. 18).

Apesar de terem sido as cosmogonias predominantes nas comunidades científicas dos dois lados do Atlântico, a partir de meados da década de 1920 as teorias do encontro estelar encontraram objeções e críticas. O mais consistente entre seus críticos foi o astrônomo estadunidense Henry Norris Russell (1877-1957). Embora tenha inicialmente aceitado a hipótese planetesimal, já em 1925 Russell expressou reservas quanto a detalhes da teoria diretamente a Moulton (BRUSH, 1996c, p. 78).⁵³ Suas críticas às teorias do encontro estelar, principalmente comunicadas em cartas a outros pesquisadores, foram condensadas e publicadas no capítulo final de *The Solar System And Its Origin*, livro publicado em 1935, um marco do rápido declínio dessas cosmogonias dualistas.

A primeira crítica de Russell é de dinâmica e conclui que o filamento de matéria arrancado do Sol por uma estrela de passagem não poderia ter produzido a distribuição de momento angular por tonelada apresentada pelo sistema, que é de ordem crescente a partir de Mercúrio até Netuno (RUSSELL, 1935, p. 113-4)⁵⁴. Para produzir o momento angular por tonelada de Netuno, a velocidade com que a matéria teria sido ejetada do Sol teria produzido uma trajetória hiperbólica e escapado da gravitação do Sol para o espaço interestelar. O cenário mais plausível para um encontro estelar produzindo planetas, segundo Russell, seria o de planetas maiores mais próximos do Sol, e os menores, mais longe (RUSSELL, 1935, p. 115-6).

A outra crítica de Russell está relacionada à emergência da astrofísica. Na década de 1910 e 20, a astrofísica estava em franco desenvolvimento e teria um papel importante na composição de uma das duas críticas fundamentais elaboradas por Russell.

⁵³ Um sintoma da instabilidade do solo em que as teorias do encontro estelar estavam alicerçadas já no final da década de 1920 é o abandono da ideia de aproximação entre estrelas como evento gerador do nosso sistema planetário por um dos próprios proponentes da teoria de maré, Jeffreys. Em 1929, no lugar do encontro estelar, Jeffreys ressuscitou a ideia de Bickerton (uma colisão estelar de raspão) para explicar a rotação dos gigantes gasosos. (BRUSH, 1996c, p. 77). Que o próprio Russell tenha aceitado essa teoria de colisão por um curto espaço de tempo no começo da década de 1930 é ainda mais sintomático da situação de instabilidade do campo das cosmogonias nesse momento.

⁵⁴ A maior parte do momento angular do sistema, se o critério for meramente os objetos celestes, está concentrada em Júpiter. Mas se a distribuição do momento angular for analisada pela quantidade de massa, então a matéria que mais possui momento angular no sistema é a que compõe Netuno, em ordem crescente a partir de Mercúrio, obedecendo o tamanho dos raios das órbitas dos planetas. Assim as partículas de Marte têm mais momento angular do que as partículas que compõem a Terra, embora como planeta a Terra tenha conservado mais momento angular do que Marte.

O próprio James Jeans foi uma figura muito importante no desenvolvimento da astrofísica⁵⁵ e se envolveu numa célebre disputa teórica com seu compatriota Arthur Eddington (1882-1944)⁵⁶. A disputa, que durou anos, era sobre a estrutura das estrelas, principalmente com relação a sua fonte de energia. Jeans rejeitava especulações sobre ainda desconhecidas fontes de energia e defendia a contração gravitacional como produtora da energia as estrelas (STANLEY, 2007, p. 62-5). Eddington, motivado pela possível relação entre massa e luminosidade nas estrelas, explorava possibilidades de “aniquilação subatômica” e “transmutação de elementos” (idem, p. 72-3). Em 1920, Eddington efetivamente propôs que nas estrelas ocorre um processo de fusão nuclear que transforma hidrogênio em hélio e libera uma enorme quantidade de energia. Essa é, basicamente, a concepção atual sobre o funcionamento da imensa maioria das estrelas.

A consequência da resolução desse debate para a discussão cosmogônica é que o material que compõe as estrelas se encontra a temperaturas muito mais elevadas do que se pensava antes que a fusão nuclear fosse estabelecida como fonte de energia estelar. À luz da nova estrutura das estrelas, Russell estimou que o filamento de matéria que teria sido arrancado do Sol pela estrela passageira deveria se encontrar a uma temperatura média de “mais de um milhão de graus” (RUSSELL, 1935, p. 111). Era uma diferença enorme para as estimativas de Jeans e Jeffreys, segundo as quais a temperatura do material não ultrapassaria alguns poucos milhares de graus.

Essa discrepância se deveu a outra contribuição da astrofísica: em 1919, como ainda se sabia muito pouco sobre a estrutura das estrelas, a *teoria de maré* foi elaborada com a permissão de se pudesse imaginar o Sol primitivo com vinte vezes ou mais o tamanho do Sol atual. Nesse cenário, o material que formaria Júpiter (ou seja, a maior parte da matéria que forma os planetas) poderia ter sido arrancado da fotosfera do Sol. Em 1935, o conhecimento de astrofísica apontava para a conclusão de que o Sol primordial tinha praticamente o mesmo tamanho do Sol atual. Isso obrigatoriamente fazia com que a quantidade de matéria necessária para formar Júpiter deve ter vindo de camadas muito mais internas do Sol – logo, a temperaturas muito mais altas.

⁵⁵ Jeans é creditado por muitos como o autor do primeiro livro de astrofísica teórica, *Astronomy and Cosmogony*, de 1928 (SCHULZ, 2012, p. 17).

⁵⁶ Matthew Stanley (2007) sustenta que a divergência entre Jeans e Eddington era ainda mais profunda: subjacente à discussão sobre a estrutura das estrelas estavam duas concepções antagônicas acerca da metodologia da pesquisa científica. Eddington esposava uma abordagem fenomenológica e especulativa, enquanto Jeans defendia um método dedutivo em busca de certeza e completude.

A temperaturas como a estimada por Russell, quase todo material arrancado do Sol se dissiparia antes de poder se condensar e formar os planetas: “a um milhão de graus, átomos de hidrogênio têm uma velocidade média de quase mil milhas por segundo. A atração da massa ejetada não seria capaz de mantê-los por perto. Eles simplesmente se dissipariam no vácuo do espaço interplanetário quase como se não houvesse força que restringisse sua fuga” (RUSSELL, 1935, p. 112). Em 1939, esse argumento foi incrementado quantitativamente pelo físico e astrônomo Lyman Spitzer Jr. (1914-1997), um aluno de Russell, chegando basicamente à mesma conclusão: “é improvável que qualquer parte do filamento possa permanecer [evitando dissipação] depois que a maior parte dele foi ejetada para o espaço” (SPITZER, 1939, p. 687).

Brush afirma que as críticas de Russell foram rapidamente aceitas como “fatais para todas as cosmogonias dualistas” (BRUSH, 1996c, p. 80), mas a única evidência que ele apresenta disso é o fato de que Jeffreys admitiu não conseguir responder às críticas. O fato de que Spitzer dedicou um artigo para analisar a plausibilidade das teorias de encontro (e de colisão) estelar em 1939 mostra que a rejeição de uma classe de teorias não se deu de maneira imediata e por causa de uma única publicação. O mesmo ocorreu com a hipótese nebular no início do século XX: grande parte do livro de Jeans dedicado às cosmogonias ocupa-se da avaliação da sustentabilidade matemática e abstrata do que o físico chama de “teoria rotacional”, a parte laplaciana da hipótese nebular; isso, num trabalho publicado em 1919. O fato de que Jeans a percebe como insustentável para explicar a formação do sistema solar e propõe uma teoria alternativa no lugar não afeta o significado do esforço que ele faz para refutar a hipótese nebular já com duas décadas de século XX. Se a hipótese nebular tivesse simplesmente sido refutada por Chamberlin e Moulton, não seria necessária uma análise de dinâmica de um dos mais eminentes matemáticos e físicos do período para tentar demonstrar sua insustentabilidade.

Em vez de adotar uma simplificação histórica que apontaria para mudanças teóricas relativamente rápidas e em bloco (da hipótese nebular ao encontro estelar e de volta a hipóteses aparentadas ao que já era chamado de hipótese de Kant-Laplace), prefiro caracterizar as seis décadas entre o final do século XIX e a metade do século XX como um período de crise das teorias de formação do sistema solar. Esse período foi marcado por várias mudanças nas teorias tomadas como balizas e limites para que conjecturas cosmogônicas fossem feitas. Algumas dessas mudanças tiveram consequência direta na avaliação, proposição e rejeição de cosmogonias; outras, indiretas; mas todas elas influenciaram,

mudaram e, em certa medida, embaralharam a própria visão de mundo influenciada pela ciência. Houve uma transformação profunda na física teórica, com a emergência da relatividade e da física quântica. Houve também o surgimento do conhecimento sobre radioatividade (que impactou teorias sobre a estrutura do interior da Terra). A constituição da astrofísica como campo de saber especializado gerou o avanço enorme no conhecimento da estrutura das estrelas e seu mecanismo de produção de energia. Também houve avanços fundamentais na espectroscopia, com progresso no conhecimento da composição química das estrelas e dos planetas.

Seria esperar demais que se mantivesse estável uma área do conhecimento que depende quase completamente das balizas dadas por uma rede de teorias de diferentes áreas do conhecimento científico, cada uma das quais em processo de rápida e profunda transformação. De qualquer forma, as teorias do encontro estelar não tiveram qualquer sobrevida significativa a partir da década de 1940⁵⁷. Porém, como é frequente na história da ciência, nem tudo nessas teorias foi abandonado pelos *textbooks* e migrou somente para os livros de história: a ideia de *acrecção de planetesimais* acabou sendo ressuscitada no século XX pelas tradições de pesquisa que se desenvolveram até hoje para constituir as mais frutíferas teorizações sobre a formação do sistema solar.

3.4. Rumo a um tênue consenso: o período de transição

Em 22 de outubro de 1949, uma matéria jornalística na seção de astronomia do semanário *Science News Letter* (atual *Science News*) anunciava “a mais nova teoria sobre a origem da Terra e do restante dos planetas”:

Três bilhões de anos atrás havia uma gigante nuvem de gás e poeira girando em torno do Sol. Uns poucos milhares de anos se passaram e uma fina panqueca se formou, um anel gigante, no plano dos planetas atuais. Redemoinhos de matéria surgiram. Estes se encolheram e finalmente se condensaram nos planetas e seus satélites (“New Birth of Earth Theory”, 1949)⁵⁸.

⁵⁷ Em 1943, Jeans ainda sustentava sua *tidal theory* contra críticas motivadas pela suposta descoberta de dois planetas extrassolares (hoje consideradas espúrias).

⁵⁸ A matéria não é assinada e não pude encontrar informações sobre a autoria.

Seu proponente era o astrônomo neerlandês-estadunidense Gerard Kuiper (1905-1973), uma das figuras mais importantes no desenvolvimento da astronomia planetária no século XX⁵⁹. A matéria apresentava a “nova teoria” como “uma versão moderna da mais antiga proposta em 1755 pelo alemão Immanuel Kant” (“New Birth of Earth Theory”, 1949). O leitor que estivesse minimamente familiarizado com a história das cosmogonias encontraria nas últimas linhas desse artigo outra ideia bem conhecida: “a Terra e a Lua foram formadas de matéria sólida, que teria se precipitado de acordo com a maneira descrita pela anterior hipótese Chamberlin-Moulton sobre a origem da Terra” (ibid.).

Na década de 1950, Kuiper desenvolveria sua cosmogonia em detalhes, propondo a ideia de protoplanetas gigantes gasosos no início da formação do sistema solar. A partir da década de 1950, várias outras hipóteses monistas substancialmente diferentes umas das outras foram surgindo. Conceitos como *freio magnético* e *disco de acreção viscoso* forneceram caminhos para a elaboração de hipóteses sobre como o Sol pode ter transferido momento angular para os planetas em formação, principalmente Júpiter.

Um consenso tênue começou a se formar. As diversas teorias variavam bastante em relação aos mecanismos utilizados para explicar a formação dos planetas e apresentavam diferentes inadequações para explicar em detalhes a origem do sistema solar atualmente observado. As teorias que se revelaram mais frutíferas em orientar pesquisas posteriores propuseram cenários em que a formação de planetas ao redor das estrelas não deve ser um processo incomum ou raro, pelo contrário: deve ser frequente.

Enquanto as expressões “hipótese nebular” ou “teoria de Kant-Laplace” são frequentemente utilizadas⁶⁰ para identificar essas novas cosmogonias, deve-se ter claro que a explicação original laplaciana – a formação dos planetas por condensação de gases da nuvem primordial e desprendimento de anéis concêntricos a partir da rotação dessa nuvem – foi abandonada em favor um conjunto de processos muito diferentes. Por isso, quando um expoente da história da astronomia como Steven J. Dick fala em “ressurreição da hipótese nebular” (DICK, 2013, p. 109) na segunda metade do século XX, é preciso ter em mente que trata-se de uma referência à imagem geral extraída das teorias: planetas e Sol com origem

⁵⁹ A estrutura atualmente aceita do sistema solar exterior inclui uma miríade de objetos transnetunianos que leva o nome de Cinturão de Kuiper.

⁶⁰ Há muitos exemplos de materiais de divulgação sobre isso. Um exemplo clássico: Sagan usa “teoria Kant-Laplace” e descreve a origem do sistema solar em termos bem laplacianos em *Bilhões e Bilhões*, de 1997, creditando a explicação oferecida como a teoria então aceita sobre o assunto.

intimamente relacionada; planetas como subprodutos da formação do Sol; consequências positivas para a hipótese da pluralidade de mundos habitáveis, etc.

*

Após as críticas de Russell e Spitzer às teorias do encontro estelar, possibilidades de origem dos planetas pela ejeção de material estelar via colisão ou encontro de estrelas foram ainda brevemente exploradas no início da década de 1940. O próprio Russell, autor das mais contundentes objeções às teorias do encontro estelar, propôs uma hipótese em que o Sol teria originalmente uma estrela companheira (constituindo um sistema binário) e essa estrela teria passado perto de uma terceira estrela. A perturbação do sistema binário causaria a lançamento de um filamento gasoso na órbita do Sol, que daria origem aos planetas (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 14).

Numa linha parecida, o astrônomo britânico Raymond Lyttleton (1911-1995) elaborou uma hipótese baseada em sistema estelar triplo: o Sol seria a terceira estrela, orbitando outras duas estrelas em maior aproximação uma da outra. Essas duas estrelas teriam colidido, se fundido brevemente, e se separado de forma que ambas teriam sido expulsas da vizinhança do Sol. O material remanescente desse processo de fusão-fissão estelar teria, então, formando os planetas ao redor do Sol (CAMERON e TER HAAR, 1962, pp. 14-5). Logo ficou claro que essas alternativas não sobreviveriam às mesmas objeções feitas por Spitzer, poucos anos antes, às teorias do encontro estelar (i. e., o problema da condensação de gases em alta temperatura). Uma descoberta que ajudou a sepultar as teorias que envolvem a ejeção de material do Sol (ou de outra estrela) foi a descoberta de quantidades significativas de lítio, berílio e boro na composição química da Terra. Isso era tido como evidência de que o material do planeta não poderia ter sido originado da própria estrela, pois a reação nuclear os destruiria (BRUSH, 1996c, p. 15).

Contudo, o principal dos obstáculos para as teorias reminiscetes da hipótese nebular, o paradoxo da distribuição do momento angular, permanecia sendo percebido como quase intransponível. Por isso, no início da década de 1940 foram propostas duas teorias dualistas que envolviam a captura de nuvens interestelares pelo Sol. Essas teorias, que veremos a seguir, propunham ideias sobre mecanismos envolvidos na planetogonia que se mostraram fecundos para o desenvolvimento posterior do campo.

3.4.1. Freio magnético e captura de nebulosas

O conceito de freio magnético é um exemplo de como o desenvolvimento da física no século XX fecundou o campo da cosmogonia. A partir da década de 1940, o freio magnético constituiu um argumento plausível para a resolução do paradoxo da distribuição do momento angular nas teorias de formação do sistema solar. Ainda hoje, o conceito é explorado como um possível mecanismo de transferência de momento angular de uma estrela em estágios iniciais de formação para a nuvem protoplanetária. Mas seu proponente, o físico sueco Hannes Alfvén (1908-1995), não o utilizou para defender uma variação da hipótese nebular. Em vez disso, Alfvén propôs uma teoria dualista em que um Sol já formado teria capturado nebulosas interestelares, dessa interação nascendo os planetas e satélites.

O caráter não-uniforme da rotação do Sol havia sido descoberto no século XIX pela observação das diferenças de velocidade entre as manchas solares mais próximas do equador solar e as de latitude mais elevadas: a velocidade angular é maior quanto mais próxima do equador solar. Em 1937, o físico ítalo-britânico Vincenzo Ferraro (1907-1974)⁶¹ publicou um estudo sugerindo “que o campo magnético [solar] é provavelmente um importante fator em qualquer consideração sobre a rotação não-uniforme do Sol” (FERRARO, 1937, p. 472). Ferraro havia contribuído indiretamente para o desenvolvimento da magneto-hidrodinâmica, pelo qual Alfvén recebeu o Prêmio Nobel de 1970. Um aspecto geralmente negligenciado sobre o surgimento da magneto-hidrodinâmica foi o interesse de Alfvén na aplicação de seus resultados na elaboração de uma nova teoria da formação do sistema solar.

Em 1942, Alfvén publicou um artigo em que explica como reagiria uma nuvem de íons em repouso ao circundar um corpo magnetizado em rotação: “um sistema de correntes é produzido, o qual acelera as partículas e retarda a rotação do corpo [central], assim equalizando suas velocidades angulares” (ALFVÉN, 1942a, p. 9). Em outras palavras, há uma transferência de momento angular, do corpo central em rotação para nuvem ionizada. Nascia o conceito de freio magnético. Nesse artigo, Alfvén utiliza o estudo da esfera magnetizada em rotação e envolta por uma nuvem ionizada para explicar a rotação não-uniforme do Sol. Ao

⁶¹ Ferraro contribuiu também para o conhecimento da magnetosfera terrestre e do vento solar. Nas décadas de 1950 e 60, seu grupo de pesquisa estudou a frenagem magnética do Sol causada pelo vento solar.

final, especula que “um processo desse tipo ... talvez esteja em conexão com a gênese do sistema planetário” (ibid.).

Alfvén não demoraria a propor uma hipótese cosmogônica aplicando esse novo processo. Alguns meses depois, seria publicado o artigo “On the Cosmogony of the Solar System”. Esse artigo se refere explicitamente à resolução do problema da distribuição do momento angular como uma “dificuldade crucial de todas as cosmogonias de tipo laplaciano” (ALFVÉN, 1942b, p. 3). Mas essa dificuldade seria “removida se forças eletromagnéticas fossem aplicadas à teoria” (ibid.). Alfvén desenvolve o mesmo argumento do artigo que lida abstratamente com uma nuvem ionizada envolvendo uma esfera magnetizada em rotação, mas não propõe uma adaptação da hipótese nebular. Em vez disso, elabora uma nova teoria, em que “a formação dos planetas é atribuída à passagem do Sol através de uma nuvem de gás interestelar” (ibid.). Na verdade, veremos que Alfvén não postula que o Sol teria encontrado apenas uma, mas *duas* nuvens interestelares: uma de “gás” e outra de “poeira”. Isso se deve, em parte, à bem conhecida diferença de densidade entre os planetas internos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte), mais densos, e os externos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Mas também está relacionado ao processo planetogônico conjecturado pelo físico sueco, que apresento abaixo de maneira resumida e simplificada.

Alfvén primeiro calcula que os efeitos do campo magnético solar são 60 mil vezes mais fortes numa partícula ionizada, numa distância como a da órbita de Plutão, do que a força gravitacional da estrela (ALFVÉN, 1942b, p. 5). Então, supõe o encontro entre o Sol e uma nuvem de gás. O campo magnético do Sol tornaria impossível que átomos ionizados chegassem à distância de formação de planetas, mas os átomos neutros não seriam magneticamente afetados e continuariam a cair em direção à estrela (por isso a nuvem não pode conter apenas íons). Com suas trajetórias e velocidades “distribuídas ao acaso”, esses átomos que compõem a nuvem capturada pelo Sol colidem entre si, num processo que aquece o gás. A temperatura do gás aumenta também quanto mais próximas suas partículas chegam do Sol, até uma distância em que o calor da estrela as ioniza. Isso as torna suscetíveis ao campo magnético. Essa nuvem conteria os elementos mais abundantes do universo (hidrogênio, hélio, carbono, oxigênio, nitrogênio, cálcio, magnésio e silício), com diferentes potenciais de ionização (idem, p. 9). Alfvén calcula uma média de massa atômica para essa nuvem e chega a um resultado aproximado que indica que a maior parte do gás (agora ionizado) teria se concentrado a uma distância do Sol parecida com as das órbitas de Júpiter e Saturno.

Durante esse processo, principalmente a partir da concentração de matéria nas órbitas dos dois maiores planetas, ocorreria a transferência de momento angular do Sol para os gigantes gasosos. A origem dos satélites maiores dos planetas externos e dos anéis de Saturno teria a mesma explicação. A formação dos planetas internos aconteceria por meio de um processo um pouco diferente. Assim como o Sol deve ter encontrado uma nuvem de gás em seu deslocamento pela galáxia, também deve ter passado por uma nuvem de “poeira meteorítica”. Esse material de “pequenas partículas sólidas” capturadas pelo Sol explicaria a alta densidade dos planetas terrestres (em comparação com a baixa densidade dos planetas externos). Alfvén reconhece que esse é um problema mais difícil, mas supõe que esse material teria se volatilizado em sua aproximação do Sol. A partir daí, obedeceria a um processo de formação parecido com o que teria dado origem aos gigantes gasosos. A ideia de captura de nuvens de gás e poeira é justificada pela observação de várias nuvens desse tipo (ALFVÉN, 1942b, p. 19).

Alfvén não fornece, nesse estudo, um motivo explícito para não ter tentado ressuscitar a hipótese nebular com a aplicação do freio magnético. Apenas se refere a isso quando rejeita a possibilidade de que os planetas rochosos tivessem se originado de material expelido pelo Sol: “uma teoria nessa linha encontraria todas as dificuldades encontradas por aquelas que tentaram explicar o sistema planetário inteiro por essa via” (ALFVÉN, 1942b, p. 17). Suspeito que sua rejeição da hipótese nebular esteja baseada na dificuldade de explicar como a maior parte da massa do sistema (excluindo, claro, o Sol) pode ter se concentrado em Júpiter e Saturno por meio de interações eletromagnéticas se se supuser que o Sol e o disco protoplanetário tiveram uma mesma origem.

No artigo de 1942, parte dessa cosmogonia é apresentada de forma bastante conjectural (a formação dos planetas terrestres, por exemplo), e parte como hipótese mais madura (como a formação dos gigantes gasosos). Nas décadas seguintes, Alfvén a modificou em detalhes sensíveis. Uma modificação importante veio em 1960, quando Alfvén propôs que as nuvens que teriam dado origem aos planetas seriam “fragmentos deixados na periferia de uma nuvem da qual o Sol se formou” (BRUSH, 1996c, p. 162).

A cosmogonia proposta por Alfvén em 1942 não entra na questão da formação do Sol, e não considera algum estágio de evolução inicial ou intermediário em que suas características pudessem ser diferentes das atuais. O sistema planetário é visto como fruto de um processo separado da formação da estrela. É uma cosmogonia dualista, portanto, mas não uma que resulta necessariamente num cenário cósmico de sistemas planetários muito raros.

Afinal, as nuvens interestelares são abundantes na galáxia. Não seria difícil imaginar processos parecidos (encontro com nuvens de gás e poeira) tendo ocorrido com outras estrelas. Mesmo a já referida modificação de sua cosmogonia, que liga indiretamente a origem dos planetas à formação do Sol, não altera fundamentalmente esse cenário.

Em 1950, uma descoberta sugeriu a ideia de que algum processo universal poderia estar envolvido na perda de momento angular das estrelas ao longo de sua evolução. Utilizando medições de efeito Doppler nas linhas espectrais de estrelas, o astrônomo russo-americano Otto Struve (1897-1963) percebeu que as estrelas em estágios mais avançados de evolução tendem a girar em velocidades muito menores, comparadas às estrelas mais jovens. Embora ainda não seja conclusivo que o freio magnético é o único mecanismo por trás disso, o conceito se revelou mais frutífero do que a teoria planetogônica para a qual foi engendrado – como ocorreu com a ideia acreção por planetesimais. Teóricos da origem do sistema solar (Kuiper e Hoyle, por exemplo) utilizaram a hipótese de transferência de momento angular via magnetismo, mas descartaram o restante da teoria de Alfvén. O ostracismo das planetogonias do cientista sueco, especialmente da década de 1970 em diante, contrasta com a alta estatura de suas contribuições à magneto-hidrodinâmica e à física de plasmas (BRUSH, 1996c, p. 171). Em 1962, por exemplo, uma revisão histórica realizada por cientistas dedicados à cosmogonia descartava a teoria de Alfvén, afirmando que o mecanismo de colisão dos átomos da nuvem de gás capturada pelo Sol e sua ionização na maneira proposta pelo físico sueco “é impossível” (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 21). Ainda assim, o conceito de freio magnético ainda é bastante explorado atualmente, especialmente na física de formação de estrelas e discos circunstelares.

*

A possibilidade de origem dos planetas através da captura de uma nuvem interestelar pelo Sol parecia pairar na atmosfera do início da década de 1940. Em 1944, o matemático e astrônomo russo Otto Schmidt (1891-1956) também propôs uma cosmogonia em que o Sol, ao se deslocar pela galáxia, teria encontrado e capturado uma nuvem interestelar de pequenos corpos sólidos (em versões posteriores dessa hipótese, a nuvem é composta de corpos sólidos e gás).

O processo de formação dos planetas a partir da colisão de pequenos corpos, nessa cosmogonia, é parecido com o de acreção de planetesimais, proposto por Chamberlin e Moulton. No final da década de 1930, já se sabia que as objeções a essa ideia (i. e., as colisões vaporizariam os planetesimais) não eram válidas: colisões parcialmente inelásticas entre os planetesimais, inicialmente em órbitas excêntricas e de grande inclinação, tendem a fazê-los se moverem com velocidades parecidas e em órbitas aproximadamente circulares. Assim, a acreção que formaria os planetas ocorreria a velocidades relativamente baixas, e os planetesimais não seriam vaporizados.⁶²

Na cosmogonia de Schmidt, os núcleos planetários se formariam por esse processo “frio” de acreção de corpos sólidos. Núcleos protoplanetários se formariam inicialmente próximos uns aos outros e se afastariam por um processo de migração planetária causado pela própria natureza da acreção: “o crescimento do núcleo mais próximo do Sol dependeria principalmente da captura de material nas órbitas mais internas do Sol, o que faria o núcleo se mover para uma órbita menor” e o inverso aconteceria com um corpo mais externo (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 30). Seguindo esse raciocínio, a lei de Titius-Bode pode ser interpretada como resultado de uma “competição entre centros de massa se acumulando” (ibid.). Na versão modificada que inclui uma nuvem de gás e poeira, o processo de acreção inclui colisões que resultam “em combinações e, às vezes, em fragmentações de corpos do tamanho de asteroides” (idem, p. 31).

A principal razão de Schmidt para recorrer à ideia de captura de nebulosa é (nesse caso, explicitamente) o problema da distribuição do momento angular. Schmidt afirma que, nas diferentes variações da cosmogonia laplaciana, “não existe mecanismo permitindo que a maior parte da massa se agregue no corpo central enquanto a maior parte do momento permanece concentrada na periferia” (SCHMIDT, 1949/2001, p. 82). Como Alfvén, o astrônomo russo considera a origem do Sol um problema à parte da formação dos planetas. A ideia de que a matéria restante da formação do Sol começaria a girar em torno da estrela o intriga: “por que [o material] começaria a girar? De onde tirou seu momento angular?” (idem, p. 97). Apenas um “estado inicial hipotético e ainda desconhecido” poderia explicar um processo como o da hipótese nebular (ibid.).

⁶² O cientista responsável pelas pesquisas que na década de 1930 superaram as objeções feitas por Jeffreys à acreção de planetesimais foi o astrônomo sueco Bertil Lindblat (1895-1965), que Schmidt cita nominalmente.

Contudo, diferentemente de Alfvén, que postula uma nuvem de gás em repouso adquirindo momento angular pela interação com o campo magnético do Sol, Schmidt conjectura que a nuvem capturada deve ter “um total de momento angular diferente de zero” (SCHMIDT, 1949/2001, p. 93). Esse momento angular seria resultado da própria rotação da Via Láctea: “o momento seria o resultado da redistribuição do momento angular da Galáxia; parte do momento angular possuído originalmente pela nuvem em relação à passagem do Sol seria conservado pela parte da nuvem capturada pelo Sol” (idem, p. 84).

Schmidt afirma que a “natureza irregular das nuvens interestelares” ajudaria a explicar como o material capturado pelo Sol poderia formar os planetas. Se o Sol passou por uma “área com densidade irregularmente distribuída”, deve ter capturado “mais partículas de um lado do que de outro, fazendo a nuvem capturada rodar numa direção dominante”, com momento angular considerável (SCHMIDT, 1949/2001, p. 94). A questão da frequência desse tipo de captura também é considerada:

sob as condições presentes do ambiente galáctico, a probabilidade de captura é muito remota. Mas em seu deslocamento pela galáxia, o Sol passou por condições muito diferentes, entre elas a passagem através de nuvens de grande densidade; nos estágios iniciais de sua evolução, o Sol teve maiores oportunidades de encontrar tal ambiente (SCHMIDT, 1949/2001, p. 94).

A expressão “ambiente galáctico” revela as motivações filosóficas subjacentes à cosmogonia de Schmidt. Uma visão cosmológica em que tudo está conectado orienta sua opção por não se limitar a uma planetogonia que lidasse apenas com “fatores internos”, pois isso seria uma postura “não-científica”:

não há justificativa para uma teoria que limita a si mesma às forças internas de um sistema que está tão fortemente amarrado ao seu ambiente quanto o Sol está à galáxia (...) Pelo contrário, o ambiente em que o Sol gira deve ser levado em consideração. Aquilo que antes não estava claro no sistema solar agora pode ser explicado simplesmente se nos voltarmos à galáxia e ao movimento do Sol através dela” (SCHMIDT, 1949/2001, p. 84).

Segundo Schmidt, essa visão cosmológica seguia, por sua vez, a própria orientação filosófica oficial da União Soviética, o materialismo dialético: “o conceito da interconexão geral de todos os fenômenos é um dos conceitos dialéticos básicos e bem conhecidos entre todos nós. O problema da relação existente entre o interno e o externo é resolvida concretamente pela dialética materialista em que tudo o que está associado e um

dado fenômeno é levado em consideração” (SCHMIDT, 1949/2001, p. 84). Esses aspectos, somados à necessidade de contornar o paradoxo do momento angular, tornavam a hipótese de captura de nebulosa algo muito tentador – apesar das dificuldades que Schmidt reconhecia haver nessa conjectura, apresentada como prospecção das possibilidades de formação do sistema solar. “Hoje ainda não temos dados suficientes” para decidir entre uma ou outra hipótese, afirma Schmidt, que pretendia provar apenas que o sistema solar “*poderia* ter se originado por captura”. Isso, para ele, constitui um avanço científico nada desprezível (SCHMIDT, 1949/2001, p. 96).

Schmidt escrevia essas linhas no auge do poder de Stalin. É difícil distinguir precisamente, nesse caso, o que é convicção filosófica e política do autor do que seria meramente uma deferência explícita à ideologia oficial do totalitarismo estalinista. Por outro lado, não há nada que permita supor a insinceridade de sua defesa do materialismo dialético: ele havia participado ativamente da revolução de outubro de 1917 em São Petersburgo e foi nomeado professor de matemática da Universidade de Moscou em 1929. Durante a Segunda Guerra Mundial, por algum motivo nebuloso, Schmidt foi afastado da burocracia soviética e voltou suas atenções à ciência. A estatura de suas pesquisas capturou do meio acadêmico uma série de estudiosos interessados no tema da origem do sistema solar. No pós-guerra, seu grupo passaria a ser conhecido como *escola russa de cosmogonia*.

Na década de 1960, a partir de pesquisas empreendidas por um dos cientistas pertencentes a essa escola de pensamento, surgiria o chamado *solar nebular disk model*, que é um conjunto das planetogonias mais frutíferas de 1970 em diante (seção 3.4.4.). A teoria de Schmidt só seria conhecida pelos cientistas ocidentais bem mais tarde (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 30), especialmente quando outros pesquisadores russos já tinham desenvolvido as ideias iniciais de Schmidt em direções diferentes da ideia de captura.

3.4.2. O início de uma convergência teórica

As teorias de captura de nebulosa não foram as únicas planetogonias propostas no início da década de 1940 que chamaram a atenção dos cientistas interessados no problema da origem do sistema solar. Em 1944, o físico e filósofo alemão Carl von Weizsäcker propôs uma teoria que “ressuscitava ideias das teorias de Descartes e Kant” (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 22). Não é difícil perceber por que a teoria pode ser assim definida. Von

Weizsäcker postulou uma nuvem de gás circundando o Sol, associada à sua formação, que rapidamente se tornaria um disco protoplanetário. O disco se transformaria, via colisão de partículas, numa sucessão de vórtices produzidos por correntes de convecção turbulentas. Os planetas se formariam, ao final, em regiões de maior concentração de matéria, onde os vórtices adjacentes teriam entrado em contato (BRUSH, 1996c, p. 14).

A teoria de von Weizsäcker recebeu grande atenção de cientistas eminentes do período, como George Gamow (1910-1968) e Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995). Ao longo da década de 1940, o desenvolvimento da teoria de turbulência indicou a inviabilidade do processo de formação planetária pela interação de vórtices (BRUSH, 1996c, p. 14). Brush afirma que a cosmogonia de von Weizsäcker “serviu à importante função de mover os planetogonistas para longe das hipóteses dualistas dominantes no primeiro terço do século XX em direção a modelos monistas” (idem, p. 15). É uma afirmação um tanto genérica e que só faz algum sentido com a vantagem da retrospectiva. Mas é bastante significativo que, da década de 1940 em diante, o campo das cosmogonias tenha pendido para hipóteses que sugeriam muito mais fortemente um cenário em que os planetas são subprodutos da formação do Sol. Por conta disso, como já afirmado anteriormente, a maioria dos modelos desenvolvidos na segunda metade do século XX permitiam a extrapolação pluralista de que a formação de planetas ao redor de estrelas deve ser resultado de um processo comum, razoavelmente frequente.

Atraído pelas ideias de von Weizsäcker, Gerard Kuiper substituiu a turbulência dos vórtices por instabilidades gravitacionais para explicar a formação dos gigantes gasosos conjuntamente à formação do Sol. Anunciada por uma breve nota jornalística em 1949 e publicada em 1951, a teoria de Kuiper propõe que uma instabilidade gravitacional na nuvem de gás circundando o Sol geraria uma crescente aglutinação de gás em regiões com estado inicial gravitacionalmente estável: “essas nuvens estáveis existem por tempo suficiente para que o processo de condensação siga seu curso e para que se formem grandes massas em vez de bilhões de pequenas gotas ou flocos sem ligação” (KUIPER, 1951, p. 7). Uma vez iniciada a instabilidade gravitacional dessas nuvens, elas começam a formar os protoplanetas gasosos gigantes. Quando se contraem, as grandes massas protoplanetárias se dividem: a maior parte se agregaria no centro, formando o planeta, e o restante formaria os seus satélites regulares.

Significativamente – pois é uma consequência de sua planetogonia –, Kuiper termina o artigo de 1951 com uma estimativa do número total de sistemas planetários na galáxia: um bilhão (KUIPER, 1951, p. 14). E arremata com uma frase sobre como podemos

apenas especular sobre as formas de vida que podem existir “nesses muitos mundos desconhecidos” (ibid.).

A instabilidade gravitacional como processo de formação dos planetas foi largamente discutida nos anos subsequentes, mas terminou a década de 1950 abandonada pela maior parte dos teóricos (BRUSH, 1996c, p. 131). A principal objeção à teoria de Kuiper é a de que a Terra deveria conter muito mais gases nobres pesados em sua atmosfera (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 29). Embora tenha tido um curto período de atenção da comunidade científica durante os anos 1950, o conceito de instabilidade gravitacional foi retomado por Cameron no final da década de 1970 e, mais importante, por Alan Boss em 1997 (MAYER et al, 2010). Veremos na seção 3.5.1. que essa hipótese ainda é considerada como uma das explicações possíveis para a formação de Júpiter e Saturno (assim como muitos dos exoplanetas gigantes). A alternativa à formação dos protoplanetas por instabilidade gravitacional é um processo mais lento e gradual: a acreção de materiais sólidos num disco protoplanetário de gás e poeira (no caso dos gigantes gasosos, primeiro formaria-se um núcleo rochoso que, posteriormente, atrairia a grande massa de gás ainda presente em sua região do disco). Veremos na seção 3.4.4. que o conceito de acreção de planetesimais seria explorado eficientemente por um dos pesquisadores da *escola russa de cosmogonia* e formaria o núcleo das teorizações mais difundidas atualmente.

*

Nesse mesmo período, outras hipóteses surgiram. Um dos primeiros exemplos do uso do conceito de freio magnético na elaboração de uma teoria de formação de planetas em disco protoplanetário foi proposto pelo astrônomo britânico Fred Hoyle (1915-2001)⁶³. Ao longo de sua carreira e em conjunto com outros cientistas, Hoyle propôs hipóteses muito diferentes para a origem do sistema solar, algumas delas bastante extravagantes. A maioria delas usa o conhecimento de magneto-hidrodinâmica para explicar a transferência de momento angular do Sol primitivo para o disco protoplanetário. A principal diferença entre essas hipóteses estava na origem do material que formou os planetas. Por exemplo: uma das primeiras propostas de Hoyle, de 1946, foi a de que o material protoplanetário seria oriundo

⁶³ Hoyle também foi um talentoso escritor e popularizador da ciência, e disseminou algumas de suas especulações cosmogônicas entre o público geral num livro de 1955, *Frontiers of Astronomy*.

de uma *supernova*, a explosão de uma estrela com a qual o Sol teria formado um sistema binário no começo de sua história (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 21). Já em 1960, Hoyle e um de seus colaboradores, o astrofísico austro-americano Thomas Gold (1920-2004), propuseram que os planetas teriam se originado a partir da ejeção das partes externas de um Sol em formação, ao mesmo tempo em que ganhariam momento angular pela interação com o campo magnético solar (BRUSH, 1996c, p. 106).

Essas diferentes hipóteses de Hoyle sublinham o estado incipiente do campo nesse período, com ainda poucos *constraints* para as conjecturas produzidas pelas mentes científicas mais criativas. Nas décadas de 1950 e 60, esses *constraints* começaram a ser produzidos com a obtenção de dados empíricos sobre a composição química de meteoritos. Esses dados tiveram impacto considerável nas planetogonias, pois além de fornecerem *constraints*, constituíram pistas sobre o estado inicial da nebulosa solar.

O químico Harold Urey (1893-1981) foi um dos primeiros a explorar a possibilidade de conhecer os estados iniciais da formação dos planetas através da composição química de meteoritos. Dados como a presença de diamantes em meteoritos fizeram Urey modificar a teoria de Kuiper para uma versão baseada em acreção via colisão de corpos sólidos – principalmente, para encaixar a origem dos planetas terrestres com a formação de diamantes a pressões muito altas (BRUSH, 1996c, p. 146). Como os meteoritos são restos de asteroides que “deixaram de ser geoquimicamente ativos logo após a sua formação há 4,5 bilhões de anos atrás”, na década de 1960 passaram a ser interpretados como “um registro muito melhor preservado dos primeiros eventos da formação do sistema planetário do que a Terra” (ANDERS, 1962, p. 95). A análise de composição química de meteoritos foi um dos motivos para o surgimento de uma hipótese que tornou obsoleta a própria dicotomia monismo-dualismo: o gatilho de supernova (seção 3.4.3).

*

Um dos proponentes do gatilho de supernova como evento iniciador da formação do sistema solar foi o astrofísico canadense Alastair G. W. Cameron (1925-2005), um dos cientistas que mais contribuíram para o campo das planetogonias na segunda metade do século XX. Mas antes e depois de adaptar sua teoria com o gatilho de supernova, Cameron propôs diversas variações da ideia de formação de planetas via acreção em disco

protoplanetário. Segundo Brush, no mundo anglófono da década de 1960 as teorias mais populares foram as versões “monistas” de Hoyle e de Cameron (BRUSH, 1996c, p. 113). Ambos tentaram mostrar que a formação da “nebulosa solar” (i. e., a nuvem da qual se forma o disco protoplanetário) deve ser uma consequência inevitável da formação do Sol, mas os processos sugeridos são muito diferentes e as nebulosas solares postuladas têm pouco em comum (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 35).

Cameron era um especialista em estrutura estelar e formação de estrelas. Em 1957, havia proposto uma teoria da produção de elementos químicos no interior das estrelas e efetivamente colaborou com Hoyle no desenvolvimento da astrofísica nuclear. A partir de 1960, passou a se dedicar à cosmogonia. O *background* astrofísico de Cameron explica um dos pressupostos de suas hipóteses cosmogônicas: “o estágio inicial do colapso de uma nebulosa solar deve ser consistente com um modelo plausível de formação de uma estrela com massa solar a partir do meio interestelar sob condições observáveis no presente” (BRUSH, 1996c, p. 113).

A primeira versão da hipótese cosmogônica de Cameron, o momento angular da nebulosa solar correspondia ao da sua rotação ao redor do centro da Via Láctea (idem, p. 114) – uma ideia um tanto parecida com a de Schmidt com relação à ligação da formação do sistema solar com seu “ambiente galáctico”. Mais tarde, durante a década de 1970, Cameron passou a explicar o paradoxo da distribuição do momento angular utilizando o conceito de viscosidade do disco protoplanetário. Se a “nebulosa solar” em estágios iniciais for concebida como um *disco de acreção viscoso*, a transferência de momento angular da estrela para o disco protoplanetário poderia ser explicada pela dinâmica de fluidos. Os discos de acreção tinham se tornado, nesse momento, uma ideia ubíqua, utilizada para explicar uma grande quantidade de fenômenos astronômicos. Em astrofísica, ainda hoje há um debate intenso sobre como a distribuição e transferência de momento angular em discos de acreção ocorrem, se por meio de interações magnéticas, de viscosidade turbulenta ou via vento solar.

Como Cameron e ter Haar lembram em sua revisão histórica das cosmogonias, na raiz da enorme multiplicidade de teorias estava a falta de um desenvolvimento quantitativo satisfatório das hipóteses. Uma das principais inovações trazidas por Cameron às cosmogonias é a utilização de simulações computacionais para “testar” as hipóteses e dar a elas tratamento quantitativo até então sem precedentes. Esse caminho inaugurado por Cameron é hoje parte fundamental na elaboração de teorias cosmogônicas.

Cameron tinha como objetivo adequar suas planetogonias à física de discos de acreção e às teorias astrofísicas de formação e evolução estelar. Isso é um sintoma do novo rumo tomado pela área na segunda metade do século XX: as teorias astrofísicas passaram a influenciar decisivamente os rumos das teorias de formação de planetas. Junto com novos dados empíricos da composição química de meteoritos, o desenvolvimento da astrofísica gerou ondas de choque nas planetogonias, como o que ocorreu com a hipótese de *gatilho de supernova*.

3.4.3. O gatilho de supernova

A primeira encarnação da hipótese de que uma supernova estaria envolvida na origem da nuvem protoplanetária foi proposta por Hoyle na década de 1950, com a ideia de que uma companheira do Sol (num sistema binário original) havia explodido e expelido o material que depois formaria os planetas⁶⁴ (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 21). Essa hipótese não foi levada muito a sério, mas uma versão modificada, publicada por Cameron e pelo astrofísico James W. Truran em 1976, foi uma das planetogonias mais discutidas e aceitas do período, com grande número de citações (BRUSH, 1996c, p. 124). Além disso, o gatilho de supernova acabou se tornando uma das ideias cosmogônicas difundidas na cultura popular no século XX, especialmente durante a década de 1980, por conta de sua inserção em publicações jornalísticas e em materiais de divulgação científica de grande circulação.

A ideia central é a de que uma supernova seria necessária para perturbar a nuvem de gás e poeira, de forma que esta colapsasse, dando início à formação do Sol e de seu sistema planetário. Segundo essa hipótese, a supernova seria necessária para explicar a presença de isótopos encontrados em meteoritos, como o de magnésio (^{26}Mg). Esse isótopo de magnésio, por exemplo, é resultado do decaimento radioativo de um isótopo de alumínio, ^{26}Al . A astrofísica do período apontava que esses materiais só poderiam ter sido produzidos no processo de explosão de uma estrela muito massiva. (Obviamente, essa é uma versão simplificada da questão, mas considero suficiente para os propósitos dessa exposição).

⁶⁴ Essa é outra das várias hipóteses propostas por este prolífico e provocativo criador de “alternativas ultrajantes”, como Carl Sagan o qualificou (SAGAN, 1997, p. 256).

À primeira vista, trata-se de uma cosmogonia dualista, pois requer a ação de um agente externo para a formação do sistema solar. Mas, à parte a questão de explicar as anomalias isotópicas, o gatilho de supernova não afeta o cenário em que os planetas são subprodutos da formação do Sol e se formam por meio de um processo contínuo, que deve ter se reproduzido frequentemente ao redor de muitas outras estrelas: a acreção em discos protoplanetários. Também é significativo que o gatilho de supernova não tenha alterado substancialmente o cenário de pluralidade de sistemas planetários, embora seja um dos fatores que tornaram cada vez mais complexa a possível categorização do sistema solar como algo *normal* no universo (veremos que o conhecimento atual de sistemas planetários vem sugerindo o contrário disso em alguns aspectos importantes).

A hipótese do gatilho de supernova foi forjada dentro de uma nova visão, que se transformou em conhecimento tácito da astronomia e da astrofísica da segunda metade do século XX, que leva em conta a interconexão entre planetas, estrelas, nebulosas e a galáxia. Por isso, a distinção rígida das cosmogonias entre monistas e dualistas passou a deixar de fazer sentido (isso tem repercussões nas interpretações do desenvolvimento histórico das planetogonias; tratarei disso especificamente na seção 5.2.). Numa espécie de vitória do conceito de interconexão cósmica de Otto Schmidt, o conhecimento do “ambiente galáctico” atual aponta para o seguinte cenário: as nebulosas moleculares (nuvens interestelares de gás e poeira), em que estrelas e sistemas planetários se formam, são afetadas não apenas por eventos cataclísmicos como supernovas, mas interagem também com estrelas de grande massa e com outras nebulosas. Por exemplo, o vento solar de estrelas de grande massa é hoje a interpretação mais aceita da causa de formações que parecem casulos envolvendo estrelas jovens com discos protoplanetários na Nebulosa de Órion, a região de formação estelar mais próxima do sistema solar. Além disso, pelo fato de essas nebulosas se encontrarem imersas na galáxia, elas possuem uma quantidade não-negligenciável de momento angular.

O gatilho de supernova perdeu força ao longo da década de 1980 porque outros processos foram considerados bem sucedidos em explicar a origem dos isótopos detectados em meteoritos, como a produção desses materiais em estrelas gigantes (sem que se tornem supernovas), além da detecção de grandes quantidades do isótopo radioativo do alumínio (^{26}Al) em meio à galáxia (o que gera questionamentos sobre a capacidade de geração de todo esse volume de material apenas por supernovas) (BRUSH, 1996c, pp.126-8). Atualmente, porém, o gatilho de supernova ainda é considerado como um dos possíveis pontapés iniciais

do colapso gravitacional das nebulosas moleculares – pré-requisito fundamental para o início da formação de estrelas.

3.4.4. O *framework* de Safronov

Um dos pesquisadores da *escola russa de cosmogonia* iniciada por Schmidt foi também um dos primeiros cientistas que podem ser chamados de especialistas em cosmogonia (na acepção referente à formação do sistema solar). Ao longo da década de 1960, Viktor Safronov (1917-1999) desenvolveu quantitativamente o aspecto dinâmico e termal do modelo de colisão e acreção de partículas sólidas para a origem dos planetas. As pesquisas de Safronov nesse período foram condensadas num livro, publicado na União Soviética em 1969. Nos Estados Unidos, a obra foi publicada em 1972 e recebeu o nome de *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets*. A planetogonia proposta por Safronov é a maior contribuição pioneira ao estabelecimento do núcleo teórico utilizado nos modelos atuais de acreção de planetesimais em disco protoplanetário. Para Peter Bodenheimer, um dos mais influentes planetogonistas atuais, Safronov foi o primeiro a elaborar uma “teoria fundamental e útil para a acreção de objetos sólidos” (BODENHEIMER, 2006, p. 6), efetivamente operando e sofisticando o conceito de planetesimais criado por Chamberlin para um cenário planetogônico muito diferente.

Safronov não adota a ideia de captura de nebulosa, de Schmidt. Para o cosmogonista, as teorias de captura falham ao tentar explicar “por que a rotação do Sol e [o movimento de] revolução dos planetas se dão no mesmo sentido” (SAFRONOV, 1972, p. 5). O modelo de Safronov apenas *favorece* a ideia da formação da nuvem protoplanetária conjuntamente com a formação do Sol: “a ideia de uma formação comum é muito mais promissora do que a de captura” (idem, p. 8), mas reconhece que ainda é necessário muito progresso para que uma solução da origem da nuvem protoplanetária seja encontrada. Por isso, Safronov *não busca explicar essa origem*: “os estágios da evolução da nuvem protoplanetária ainda são muito obscuros devido à ausência de qualquer ideia definida sobre o mecanismo de formação da nuvem” (idem, p. 2). O modelo se aplica, portanto, apenas à formação dos planetas a partir do disco protoplanetário. A origem do Sol não cumpre papel algum no modelo: como Schmidt, Safronov não se estende até a formação do Sol e do disco protoplanetário a partir de um estado primordial simples. Voltarei adiante a esse aspecto de separação dos problemas, uma importante novidade de caráter metodológico.

A teoria de Safronov começa com uma nuvem de gás e poeira circundando o Sol. Das partículas de poeira, pequenos corpos sólidos – os planetesimais – se formam por um processo de coagulação iniciado por em regiões de pequena instabilidade gravitacional, gerada por discretas flutuações na densidade da nuvem. Esse material se concentra aos poucos num disco ao redor da estrela. Colisões parcialmente inelásticas entre esses corpos sólidos produzem mais combinações do que fragmentações. Um processo de crescimento acelerado desses corpos sólidos se dá em diferentes zonas concêntricas de acreção. Cada zona acaba sendo dominada por um desses corpos cada vez maiores, que finalmente atrai quase toda a matéria de sua “zona de alimentação” em sua órbita. Impactos muito energéticos, de alta velocidade, explicariam a estrutura interna da Terra (sabia-se que o interior da Terra deveria ser muito quente), num processo que começa “frio” e termina “quente”.

Por esse processo, a Terra se formaria em mais ou menos 100 milhões de anos. O principal problema do processo de acreção descrito por Safronov surgiu quando as equações utilizadas para a formação dos planetas rochosos foram aplicadas para a formação dos planetas externos: isso resultava num tempo de formação na ordem de 100 *bilhões* de anos (BRUSH, 1996c, p. 134), obviamente em contradição com as estimativas que se estabeleceram na segunda metade do século XX sobre a idade do Sol, da Terra e do próprio universo. Outro problema era o de que, nesse cenário, Júpiter não teria crescido suficientemente rápido para ser capaz de atrair matéria suficiente, “roubando” o material de regiões mais internas, de forma a fazer de Marte um planeta bem menos massivo do que a Terra e Vênus (ibid.).

O reconhecimento das pesquisas de Safronov no mundo ocidental ocorreu apenas a partir da publicação do livro de 1972. Segundo Brush, o modelo de Safronov se tornou a explicação mais popular⁶⁵ para a formação de planetas terrestres (BRUSH, 1996c, p. 133), e teve papel importante no desenvolvimento de outros modelos sobre os planetas gigantes. Quase todos os estudos publicados nos EUA da década de 1970 que abordaram a teoria de Safronov continham “comentários favoráveis mesmo quando discordam de pontos técnicos específicos” (ibid.).

⁶⁵ Esse termo usado por Brush é um pouco nebuloso: popular pode se referir a várias coisas, desde a teoria servir de principal referência e ponto de partida, até ser difundida na cultura popular como a melhor explicação, ou a explicação preferida pelo público etc. Brush quase sempre se refere à primeira aceção e apenas uma vez à segunda, mas não é esse o caso.

Antes de 1970, houve poucas tentativas de modelos físicos quantitativos do processo de acreção de planetesimais. Em 1976, o astrônomo e geofísico estadunidense George Wetherill (1925-2006) utilizou simulações computacionais do modelo de Safronov e confirmou muitos dos resultados de sua teoria, embora tenha havido problemas com relação à formação da Terra e de Vênus, que não pode ser reproduzida.

Wetherill se tornou um dos principais defensores do modelo de acreção de planetesimais em disco protoplanetário nos Estados Unidos. No artigo em que apresenta os resultados das simulações, ele se refere ao modelo de Safronov como um *framework* de acreção de material sólido e gás em disco protoplanetários (WETHERILL, 1976, p. 3254). Dentro desse *framework* podem ser propostas “cadeias de eventos alternativas” (como o próprio Wetherill descreveu as suas variações do modelo de Safronov), o que pode ser entendido como alterações nas suposições sobre o estado primitivo do disco protoplanetário. Essas alternativas poderiam, então, ser avaliadas por meio de simulações computacionais e cotejadas com o conhecimento empírico do sistema solar, como a composição química de asteroides e as crateras em Marte e, principalmente, na Lua.

O modelo de Safronov “foi bem-sucedido em construir um corpo de teoria básica que se tornou útil como um ponto de partida para outros cosmogonistas” (BRUSH, 1996c, p. 135). As concepções de *framework teórico* e *ponto de partida* – interpretação exemplificada pelo própria postura de Wetherill em relação à teoria de Safronov – revelam algo muito frequente nas investigações científicas, que não é capturado pela dicotomia *aceitação-rejeição* teórica (muito comum nas discussões sobre o progresso da ciência): cientistas não apenas aceitam ou rejeitam uma teoria, mas com frequência escolhem perseguir, entreter ou desenvolver uma (ou mais de uma) teoria.

3.4.5. Um consenso no dissenso

A partir da década de 1970 se formou um tênue consenso no campo das planetogonias, ainda que houvesse muitas discordâncias quanto aos diferentes estágios e processos de formação de estrelas e planetas. O rumo tomado pelo campo é simbolizado pelo título de uma conferência dedicada ao tema, a primeira *Protostars and Planets*, que ocorreu em 1978. Mais do que isso, no compêndio dos trabalhos apresentados, encontra-se uma sucinta avaliação do estado em que se encontrava a ciência da formação do sistema solar:

Ainda não existe uma teoria moderna unificada e bem aceita de formação de planetas, mas um corpo de trabalho em andamento que se move em uma determinada direção. Ele sugere que poeira e gás formam universalmente nebulosas circunstanciais em torno de novas estrelas. Parte da poeira pode sobreviver intacta de origem anterior em supernovas ou outros processos de ejeção estelar. De qualquer forma, é provável que o material seja afetado isotopicamente por supernovas próximas. É quase certo que novas poeiras se condensem na nebulosa circunstellar em resfriamento. O problema do desenvolvimento planetário é o problema da evolução adicional dos componentes de poeira e gás da nebulosa. (HARTMANN, 1978, p. 58).

A conferência tinha o objetivo de colocar em contato pesquisadores de formação e evolução de estrelas com planetogonistas⁶⁶. Ainda não havia evidências da existência de discos circunstellares (um invólucro esférico de poeira era considerado uma alternativa plausível para a explicação do excesso de emissão de infravermelho ao redor de protoestrelas). Além disso, ainda nenhuma alegação de descoberta de exoplanetas havia sobrevivido ao exame crítico da comunidade. Não havia meios de testar a hipótese de que a formação de estrelas implicava a formação de planetas. Por isso, pode parecer um contrassenso, diante da ausência de evidências do próprio objeto (a conexão observacional entre a formação de estrelas e a de planetas), que a conferência tenha sido realizada. Penso, no entanto, que era justamente pela carência de dados observacionais que foi considerada necessária uma integração do conhecimento de astrofísica com o da astronomia planetária, na busca por entender se e como a formação de estrelas e a de planetas poderiam estar relacionadas. E por um motivo simples: a *ausência de evidência* sobre exoplanetas e discos circunstellares no final da década de 1970 não era interpretada como um bom motivo para considerar a situação como um todo uma *evidência de ausência* desses objetos. Em vez disso, havia fortes motivos teóricos e técnicos para considerar que discos circunstellares e exoplanetas existiam, só não havia tecnologia disponível para detectá-los.

Naquele momento, apesar de uma substancial indefinição teórica sobre os processos envolvidos na origem do sistema solar, haviam surgido campos inteiros de investigação científica baseados em extrapolações da hipótese de pluralidade de sistemas planetários: a astrobiologia e a SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*). Como

⁶⁶ Nas palavras do editor do compêndio da primeira *Protostars and Planets*, “a fertilização cruzada de informações e conhecimento ocorrerá quando os pesquisadores familiarizados com as fases estelar e interestelar se encontrarem com aqueles que estudam as fases iniciais da formação do sistema solar.” (GEHRELS apud BEUTHER, et al, 2014, p. XVI).

sabemos, a base da calibragem da hipótese de vida extraterrestre, antes da detecção de exoplanetas, dependia de concepções cosmogônicas. O *zeitgeist* do período, personificado em figuras públicas da ciência como Frank Drake e Carl Sagan (proponentes e entusiastas da SETI e da astrobiologia), apontava para uma confiança razoável da comunidade científica em torno de suposições planetogônicas basilares, como a de que os planetas devem ser subprodutos da formação do Sol, formados a partir de um disco de poeira e gás ao redor da estrela. É claro que a imagem de um universo abarrotado de mundos habitados quase sempre foi sedutora, mas isso não explica a direção tomada por parte muito representativa do pensamento científico do período com relação a esse tema específico. Especialmente se levarmos em consideração que apenas quatro décadas haviam transcorrido desde o período de domínio das teorias do encontro estelar, quando a confiança na existência de vida extraterrestre provavelmente se encontrava na maior baixa de sua história. A meu ver, a direção tomada pela comunidade científica voltada à compreensão da formação de estrelas e planetas foi fundamental para a formação desse *zeitgeist*.

Rapidamente, nas edições seguintes de *Protostar and Planets*, a concepção de formação de planetas como subproduto da formação estelar, via processos de acreção de planetesimais num disco circunestelar de gás e poeira, deixou de ser apenas uma tendência e se transformou num panorama teórico dominante. O cenário teórico do período parece ser um amálgama de conceitos propostos por alguns dos mais influentes teóricos de formação de planetas no momento Safronov e Wetherill (acreção de planetesimais), Alfvén (magneto-hidrodinâmica) e Cameron (supernova e turbulência em disco). Até mesmo por isso, é possível afirmar que o consenso não se formou porque havia ocorrido a aceitação ampla de uma teoria paradigmática, mas, principalmente, porque houve um grande avanço nas observações astronômicas.

Em 1984, a detecção de emissões no infravermelho características de discos de poeira e gás ao redor de estrelas relativamente próximas do sistema solar foi interpretada como a primeira evidência observacional de sistemas planetários em processo de formação. Dois anos depois, um disco de características parecidas foi observado ao redor da estrela *HL Tauri* (uma *T Tauri*, estrela jovem de tipo solar)⁶⁷. Essas observações inéditas, embora ainda

⁶⁷ Essa estrela foi observada novamente em 2014 por meio do ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*). Pela primeira vez na história, os astrônomos conseguiram observar o que é interpretado como as linhas de acreção em disco protoplanetário. A imagem detalhada do disco de *HL Tauri*, produzida com o ALMA, pode ser acessada no site oficial do *European Southern Observatory* (ESO): <https://www.eso.org/public/brazil/images/eso1436a/> Acessado em 03/02/2020.

não constituíssem evidência inequívoca de sistemas planetários em formação, reforçaram o apelo das teorias que concebiam a formação de planetas pela acreção de poeira e gás num disco protoplanetário compreendido como subproduto da formação do Sol. Em parte por conta disso, na segunda *Protostars and Planets*, ocorrida 1985, emergiu o seguinte quadro:

Hoje, a formação simultânea de uma estrela e um sistema planetário é entendida como consequência natural e combinada do colapso de uma nuvem interestelar de gás molecular e poeira. As ideias propostas para explicar a existência do sistema solar parecem geralmente aplicáveis à formação de estrelas em todo o universo. Se esse é realmente o caso, os sistemas planetários devem estar presentes em grande número por todo o universo. Até as características estruturais gerais do sistema planetário no sistema solar parecem ser o resultado de processos quase determinísticos, e não o resultado do acaso; muitos sistemas planetários em todo o universo podem se assemelhar a ele (LEVY, 1985, p. 3).

É uma avaliação um tanto otimista. O consenso planetogônico forjado nas décadas de 1970 e 80 é *tênue*. É o que chamo de *consenso no dissenso*: embora houvesse um acordo em torno da ideia de que os planetas se formam em um disco de acreção que por sua vez é um subproduto da formação estelar⁶⁸, havia também um profundo desacordo sobre os variados processos de formação planetária.

É importante frisar a fragilidade desse consenso: não houve acordo duradouro sobre a causa do colapso gravitacional da nebulosa solar. Não se sabia quais eram os processos mais importantes na transferência de momento angular da estrela para o disco. Não havia consenso sobre a formação dos gigantes gelados: no cenário de acreção de planetesimais de Safronov, Netuno demoraria um tempo maior do que o da existência do próprio sistema solar para se formar, a não ser que determinadas suposições sobre o estado inicial da nebulosa solar fossem adicionadas arbitrariamente aos modelos testados em simulações computacionais, como realizado por Wetherill.

É importante ressaltar que vários dos problemas presentes na década de 1980 perduram ainda hoje, com maior ou menor grau de indefinição, embora a tendência de convergência teórica tenha se acentuado. A diferença entre o consenso desse período com o atualmente apresentado é que as formulações teóricas atuais estão ancoradas em um profusão

⁶⁸ Todo acordo ou consenso científico tem seus “outsiders” e “mavericks”. O consenso mínimo formado nesse período têm como exceção honrosa o cientista australiano Michael Woolfson. Desde meados da década de 1960, Woolfson propôs a chamada de *Teoria de Captura*, postulando um encontro primordial entre o Sol e uma protoestrela difusa. Essa teoria tem interesse muito circunscrito e quase nenhuma aceitação. Em revisões sobre a ciência da formação do sistema solar deste século (exceto as escritas pelo próprio Woolfson), a teoria sequer é mencionada. Woolfson chama os modelos formulados por Safronov e Wetherill de Solar Nebula Theory (SNT) e afirma que a SNT constitui um *paradigma* na área das planetogonias (WOOLFSON, 2014).

de dados observacionais sobre objetos cuja existência no início dos anos 1980 era controversa (discos protoplanetários), incerta (exoplanetas) ou especulada (o cinturão de Kuiper). De lá para cá, também houve um refinamento do conhecimento de cosmoquímica sobre composição de meteoritos e asteroides, além do aumento das informações coletadas por sondas robóticas sobre o solo marciano, asteroides, cometas e objetos transnetunianos. As planetogonias continuam se desenvolvendo em articulação com teorias astrofísicas sobre estrutura, formação e evolução de estrelas e nebulosas moleculares. Em certo sentido, houve o que chamo de afunilamento das possibilidades teóricas e uma melhor definição dos problemas considerados centrais (assunto que será abordado nos próximos capítulos). Na próxima seção, apresento o cenário atual.

3.5. O cenário teórico atual

As últimas três décadas de produção científica relacionada à formação do sistema solar foram marcadas por aportes muito significativos de dados observacionais, algo sem precedentes. As observações de discos circunstelares e a detecção de milhares de exoplanetas motivaram o aprofundamento da convergência teórica iniciada nos anos 1970 e 80, constituindo um dos principais pilares da formação de um consenso em torno de concepções fundamentais, a partir das quais problemas muito específicos são formulados. As investigações de Safronov, Wetherill, Alfvén e Cameron tiveram um peso palpável no estabelecimento de um acordo explícito em torno da concepção de que a formação de planetas ocorre por meio da acreção de planetesimais num disco protoplanetário formado a partir do nascimento de uma estrela.

O amálgama teórico atualmente mais desenvolvido pelos planetogonistas é geralmente denominado *modelo da nebulosa solar* (*solar nebula model*, ou variações, como *solar nebula disk model* ou *solar nebula theory*, que se referem ao mesmo modelo). Esse conjunto de teorias, cujo núcleo foi introduzido por Safronov, é frequentemente caracterizado como um *paradigma* (e.g. WOOLFSON, 2014; PERRYMAN, 2011, p. 224). Mesmo Woolfson – um raríssimo caso de cientista que continua propondo uma alternativa de captura, com virtualmente nenhuma repercussão – reconhece seu caráter amplamente dominante. A meu ver, há algumas limitações filosóficas para a classificação dessas teorias como constituintes de um paradigma científico – analisarei isso no capítulo 5. Com frequência, esse

conjunto teórico é interpretado como a própria *hipótese nebular* rediviva. A narrativa histórica construída até aqui neste capítulo mostra que há problemas óbvios com essa livre associação entre a teoria de Laplace e o atual modelo da nebulosa solar.

Hoje, há estimativas mais precisas da massa mínima da nebulosa proto-solar e dos mecanismos envolvidos na dissipação do gás (que deve constituir 99% da massa do disco circunstelar logo após a formação da estrela). As observações astronômicas atuais apontam para uma alta incidência de discos circunstelares em objetos estelares jovens e estrelas *T Tauri*, variando com o tempo: quanto mais jovem a estrela ou protoestrela, mais discos são observados. As observações de um grande número desses discos permite a inferência do tempo típico de sua duração: geralmente, duram tipicamente até 10 milhões de anos. Embora o período usual de existência desses discos seja incomodamente próximo do limite máximo do tempo para a formação de Júpiter por meio da acreção de planetesimais em um núcleo planetário, esse conjunto de observações é compatível com o tempo tipicamente considerado necessário para a formação de gigantes gasosos por meio da acreção de núcleo.

O conhecimento de migração planetária tornou possível contornar um dos problemas da teoria: a quantidade de tempo muito grande para a formação dos planetas gigantes gelados. No entanto, o problema da distribuição do momento angular ainda não está plenamente explicado. Apesar de ser um dos problemas mais antigos sobre a origem do sistemas solar, seu caráter anômalo não é considerado tão grave e incompatível com as formulações teóricas. Simplificadamente, o paradoxo do momento angular incomoda menos atualmente do que (para ficarmos em exemplos extremos), quando Babinet o formulou pela primeira vez ou no começo do século XX. São conhecidos alguns mecanismos não necessariamente auto-excludentes que provavelmente estão envolvidos na transferência do momento angular da estrela para o disco protoplanetário. O principal desses mecanismos é baseado nas interações de magneto-hidrodinâmica da protoestrela com o material ao seu redor (o freio magnético). Turbulências num disco de acreção viscoso também entram em jogo, não apenas na transferência do momento angular entre regiões do disco, mas também para a formação de planetesimais. Por fim, um mecanismo pelo qual se sabe com segurança que uma estrela pode desacelerar sua rotação é o do vento solar. Mesmo estrelas maduras como o Sol continuam perdendo velocidade de rotação ao ejetar massa por meio desse processo. Há uma relação conhecida entre a idade de uma estrela e sua rotação (estrelas jovens giram muito mais rápido do que estrelas maduras).

Grosso modo, o complicado processo de acreção de planetesimais é o único cenário de formação de planetas terrestres desenvolvido atualmente. Embora alguns problemas fundamentais não estejam resolvidos – como a superação da barreira de metro no processo de colisão de planetesimais, algo que afeta toda a teoria de acreção de núcleo, tanto para gigantes quanto para terrestres – a formação dos terrestres é um processo considerado melhor conhecido e, em linhas gerais, coincide com a formação dos gigantes gasosos nos modelos de acreção de planetesimais. Contudo, Júpiter e Saturno podem ter tido uma origem completamente diferente da gradual formação de um núcleo planetário rochoso com posterior acreção de um grande invólucro de gás: os gigantes gasosos podem ter se formado muito mais rapidamente por meio de instabilidades gravitacionais no disco protoplanetário.

O problema dos gigantes será apresentado na próxima seção. Para resolvê-lo, dois processos distintos foram propostos e vêm sendo objeto de uma contenda científica. Quanto a isso, é importante frisar: ambos os processos são concebidos dentro de um mesmo cenário geral, ocorrendo num disco protoplanetário composto de gás e poeira.

3.5.1. O problema dos gigantes

A formação dos gigantes gasosos ainda é um problema em aberto, embora exista um modelo considerado padrão, ou ao menos mais favorecido, denominado *acreção de núcleo* (*core accretion*). A hipótese alternativa é chamada de *instabilidade de disco* (*disk instability*). O modelo de acreção de núcleo foi proposto em 1986 pelos astrofísicos Peter Bodenheimer e James Pollack (1938-1994) (BODENHEIMER e POLLACK, 1986). O artigo mais importante, em que essa teoria aparece mais bem desenvolvida com o uso de simulações computacionais, foi publicado dez anos depois (POLLACK et al, 1996). O modelo de instabilidade de disco tomado como referência atualmente foi proposto logo depois por Alan Boss (BOSS, 1997).

Ambos os modelos são desenvolvimentos de hipóteses previamente elaboradas por outros planetogonistas. Cameron já havia proposto um processo de formação de gigantes gasosos com o que chamou de *instabilidade gravitacional* (*gravitational instability*) nos anos 1970, uma hipótese que, *mutatis mutandis*, remonta à teoria de Kuiper do começo dos anos 1950. A hipótese foi modificada por Boss, resultando num tempo de formação mais rápido e em gigantes gasosos sem núcleo rochoso. A teoria de acreção de núcleo, por sua vez, pode ser

caracterizada como um refinamento da teoria de acreção de planetesimais de Safronov aplicada aos gigantes gasosos. Esse modelo foi originalmente chamado de *instabilidade de núcleo* (*core instability*) por seus próprios autores.⁶⁹ Uma revisão abrangente desses dois modelos, assim como dos principais trabalhos que contribuíram para seu desenvolvimento, pode ser encontrada no artigo *Giant Planet Formation* (D'ANGELO, 2010). Aqui, apresento uma versão simplificada dessa discussão teórica.

Pollack e Bodenheimer desenvolveram a formação dos gigantes gasosos segundo um processo gradual “de baixo para cima”, típico da teoria de acreção de planetesimais. Simplificando, essa formulação teórica propõe que o processo começa com a formação de minúsculos corpos sólidos, passa pela formação de um núcleo planetário rochoso a partir da acreção desse material sólido (daí o nome do modelo, acreção de núcleo), até que o protoplaneta (de aproximadamente dez massas terrestres) passa a ter massa suficiente para atrair o gás (hidrogênio e hélio, a maior parte da composição dos gigantes gasosos) presente em sua zona de influência gravitacional no disco protoplanetário. É um processo relativamente lento: dependendo dos parâmetros considerados para a densidade do disco na área de formação do planeta, o processo pode durar entre 3 e 8 milhões de anos para Júpiter, e entre 3,5 e 10 milhões de anos para Saturno (POLLACK et al, 1996, p. 83-4). Na década de 1980, as estimativas de acreção do material rochoso de Júpiter resultavam em períodos de entre 10 e 100 milhões de anos (BODENHEIMER e POLLACK, 1986, p. 405).

Em comparação com a acreção de núcleo, a instabilidade de disco é um processo muito mais rápido e direto de formação de planetas, “de cima para baixo”. Simplificando a formulação teórica de Boss, o gás e a poeira do disco se contraem gravitacionalmente e formam conjuntamente o gigante gasoso num período de apenas alguns milhares de anos, sem a necessidade de formação de um núcleo rochoso muito massivo e bem definido. Esse processo precisa de um disco protoplanetário com muito mais massa do que o modelo de acreção de núcleo. O motivo: para que a instabilidade gravitacional ocorra em algum ponto, a gravidade do próprio material presente no disco deve sobrepujar os efeitos da pressão do gás e da velocidade de rotação de suas partículas no disco. Se isso ocorrer, um planeta como Júpiter se forma em pouco tempo e sem um núcleo rochoso muito bem definido, dado que os materiais sólidos e gasosos serão atraídos para o planeta simultaneamente.

⁶⁹ Obviamente, algumas confusões podem emergir com o uso dos nomes originais, que repetem o termo instabilidade. Optei pelas denominações que são as mais utilizadas atualmente na literatura científica (e.g. D'ANGELO, 2010) e evitam confusões.

Um aspecto muito importante dessa disputa teórica é o fato de que ambas as alternativas fazem previsões razoavelmente específicas sobre a estrutura interna dos gigantes gasosos. O modelo de acreção de núcleo prevê que Júpiter e Saturno devem ter um núcleo rochoso. Esse seria o corpo que, logo depois de formado, exerceria atração gravitacional suficiente para capturar o gás que perfaz a maior parte da massa desses planetas. O modelo de instabilidade de disco, ao contrário, resulta num gigante sem um núcleo rochoso ou metálico – ao menos, não um núcleo bem definido e delimitado. De maneira coloquial, em ambos os modelos o planeta resultante teria a mesma composição química, mas a estrutura interna varia: se formado pela instabilidade gravitacional, o material rochoso e metálico se encontraria de certa forma difuso no interior do planeta junto com o hidrogênio e o hélio. Mas, no estado atual das pesquisas, não há suficiente conhecimento da estrutura interna dos gigantes gasosos para que sirva como uma instância de teste das planetogonias. Ainda há muita incerteza sobre se Júpiter e Saturno possuem um núcleo bem definido composto de elementos pesados (na seção 5.4. haverá um exemplo de interação entre formulações teóricas planetogônicas e inferências sobre a estrutura interna dos gigantes gasosos).

Acompanhando as discussões sobre a contenda, percebo que há alguns motivos persuasivos, mas não decisivos, para que o modelo de acreção de núcleo seja em geral considerado mais promissor e frequentemente caracterizado como *standard* ou paradigmático (e.g. ALIBERT et al, 2004). O primeiro é o de que ele não postula processos essencialmente diferentes para a formação dos planetas rochosos, dos gasosos e dos gelados – ao menos não nos estágios iniciais de formação dos quatro planetas gigantes. A acreção gradual de planetesimais se aplicaria, portanto, a todos os planetas do sistema solar. A instabilidade de disco, por sua vez, concebe a formação dos gigantes gasosos de forma muito diferente da formação dos rochosos.

Outro fator que aparentemente dá vantagem ao modelo de acreção de núcleo está relacionado à massa mínima da nebulosa solar. A formação dos gigantes gasosos pode ocorrer via acreção de núcleo num disco com massa entre 1-2% da massa total na nebulosa solar primitiva, enquanto essa porcentagem deve estar em torno de 10% para que o disco protoplanetário possa ter instabilidades gravitacionais do tipo que podem produzir gigantes gasosos. Um disco assim tão massivo daria origem a muitos outros gigantes gasosos que precisariam ser expulsos posteriormente para que o sistema solar chegasse à estrutura planetária atual. O disco necessário para o processo de acreção de núcleo ocorrer é compatível

com as estimativas atualmente consideradas mais seguras da massa mínima da nebulosa solar (*minimum-mass solar nebula*).

Isso não quer dizer que o modelo de acreção de núcleo não tenha seus próprios problemas. Um recém-detectado planeta gigante orbitando uma estrela anã vermelha foi interpretado como um desafio ao modelo de acreção de núcleo e reavivou o interesse na teoria de Boss. Sublinho o fato de que Pollack e seus colaboradores alertaram que seus resultados podem não se aplicar para outros planetas gigantes além do sistema solar (POLLACK et al, 1996, p. 62). Mas, como sabemos, o objetivo do campo deixou de ser apenas explicar a formação do sistema solar e passou a englobar os outros sistemas planetários descobertos de meados dos anos 1990 em diante.

Outra questão importante, que pode vir a favorecer o modelo de instabilidade de disco, está relacionada à escala de tempo necessária para formação de gigantes. A formação de grandes núcleos rochosos (de aproximadamente 10 massas terrestres) deve durar seguramente mais de 1 milhão de anos, mas uma fração considerável das estrelas jovens pré-sequência principal têm seu disco circunstelar dissipado antes de chegarem a 1 milhão de anos de idade. Isso não chega a constituir uma incompatibilidade da acreção de núcleo com os dados sobre discos circunstelares, mas o modelo de instabilidade de disco não esbarra nesse desconforto com a escala de tempo de dissipação dos discos.

É possível que ambos os processos estejam envolvidos na formação de planetas e possam ocorrer dependendo da densidade e da assimetria da distribuição de massa nos discos protoplanetários. Independentemente de qual dos dois processos seria o responsável pela formação de gigantes gasosos, existe um consenso de que o começo da história dos planetas gigantes (tanto os gasosos quanto os gelados) deve ter tido grande influência na dinâmica dos planetesimais, na origem da água na Terra e no *late heavy bombardment*. Também pode ter exercido influência considerável na formação dos planetas terrestres (GARGAUD, 2011, p. 2733), principalmente com relação ao problema da formação de Marte, que é muito menos massivo do que a Terra e Vênus. O modelo de acreção de planetesimais esbarra numa dificuldade importante: o quarto planeta rochoso deveria ter massa mais ou menos parecida com seus dois vizinhos mais internos. Isso levantou uma questão sobre o que pode ter impedido Marte de ter tanta massa quanto deveria, de acordo com a teoria. Atualmente, as explicações mais promissoras para responder a essa questão recorrem ao processo de migração planetária, uma das maiores novidades das planetogonias atuais em relação a toda a história anterior.

3.5.2. Migração planetária: *Nice Model* e *Grand Tack*

Um dos motivos para que mecanismos de migração planetária tenham entrado decisivamente no jogo das planetogonias foi a detecção de planetas gigantes em órbita extremamente próxima de estrelas parecidas com o Sol, a partir de 1995. (O leitor poderá encontrar considerações sobre o impacto da detecção de exoplanetas nas planetogonias na seção 4.3.) Os modelos planetogônicos mais desenvolvidos (variações da teoria de Safronov) não previam que planetas tão massivos pudessem ter se formado originalmente muito próximos de sua estrela. A principal razão disso é que não haveria matéria suficiente para a formação desses planetas *in situ*, nas distâncias orbitais em que vinham sendo observados: a matéria protoplanetária simplesmente teria sido atraída pela estrela nos estágios iniciais de sua formação. Isso sugeriu que os Júpiteres quentes descobertos no final do século XX teriam se formado inicialmente muito mais distantes da estrela e teriam migrado, ao longo de sua evolução, para órbitas mais internas.

A ideia de migração planetária não era exatamente nova. Foi aventada pela primeira vez por Schmidt, na década de 1940. Em 1980, um estudo sugeriu que as interações entre Júpiter e o disco protoplanetário poderia não apenas ter causado rápidas alterações na órbita do planeta, como poderia ser responsável por boa parte da transferência do momento angular do disco para o gigante gasoso (GOLDREICH e TREMAINE, 1980). A existência de Júpiteres quentes sugeriu que a migração planetária poderia ser um processo bastante comum. Antes das detecções de Júpiteres quentes, embora houvesse teorizações sobre o hipotético fenômeno de migração planetária nos anos 1980, o tema não parecia relevante para as planetogonias porque entendia-se que não havia a necessidade de utilizar o conceito para explicar a formação do sistema solar. A partir da expansão do interesse no tema, o conhecimento de migração planetária se sofisticou rapidamente. No início do século XXI, três mecanismos principais foram distinguidos: a migração motivada pela interação entre o planeta recém-formado e o gás ainda presente no disco protoplanetário; por interações gravitacionais

do planeta com os planetesimais que restaram; e via interações entre planetas (PERRYMAN, 2011, p. 238).⁷⁰

A provável migração de planetas gigantes para órbitas tão próximas de suas estrelas começou a constituir uma possível indicação de que os jovens Júpiter e Saturno teriam tido um papel fundamental no início da formação do sistema solar, esculpindo o nosso sistema planetário e, talvez, permitindo que a vida surgisse. Por exemplo, se esses planetas tivessem migrado para órbitas muito mais próximas do Sol, invadindo o sistema solar interno, a formação de planetas rochosos na chamada *zona habitável*⁷¹ teria sido impossível. Uma das chaves, portanto, para entender a estrutura atual do sistema solar passou a ser a migração dos planetas gigantes nos estágios iniciais de formação planetária.

Numa revisão das pesquisas do campo das últimas duas décadas, o processo de acreção de planetesimais para a formação de planetas terrestres é concebido como *dependente* da “arquitetura orbital dos planetas gigantes e sua evolução” (MORBIDELLI et al, 2012). É dado como certo que os gigantes gasosos se formaram antes dos planetas rochosos. Nos modelos atuais, a migração orbital de Júpiter e Saturno, principalmente, é vista como decisiva para esculpir o sistema solar interno, incluindo o cinturão de asteroides (com populações de objetos quimicamente diversos) e a relativamente pequena massa de Marte (comparada com a da Terra e de Vênus).

A seguir, apresentarei dois influentes desenvolvimentos teóricos do século XXI que lidam especificamente com a questão da migração dos gigantes gasosos para explicar muitas das características atualmente observadas no sistema solar. Ambos são calcados em simulações computacionais, um recurso utilizado pioneiramente por Wetherill e Cameron, atualmente central na elaboração e seleção de hipóteses sobre a formação de planetas.

*

⁷⁰ Há outras subcategorias, além três tipos diferentes de migração causada pela interação planeta-gás em disco protoplanetário. Para um sumário razoavelmente abrangente e acessível sobre o tema, cf. seção 10.8, “Orbital Migration”, pp. 237-244, do *The Exoplanet Handbook* (PERRYMAN, 2011). Para uma revisão mais técnica do impacto do conceito de migração planetária nas planetogonias, cf. CHAMBERS, 2009.

⁷¹ A zona habitável é a faixa de distância orbital em que um planeta deve se situar para que tenha temperatura de superfície compatível com a água líquida. A zona habitável varia de estrela para estrela, de acordo com sua energia da emissão de radiação eletromagnética e temperatura. Anãs vermelhas (estrelas menos massivas e mais frias do que o Sol) têm zona habitável em órbitas muito mais próximas do que as anãs amarelas (como Sol), e assim por diante.

Em 2005, três artigos publicados na revista *Nature* propuseram um modelo de migração dos gigantes gasosos nas primeiras centenas de milhões de anos de existência do sistema solar (MORBIDELLI et al, 2005; GOMES et al, 2005; TSIGANIS et al, 2005). Apelidado de *Nice Model*⁷², o modelo explica características diversas tanto do sistema solar interno (e.g. a existência de um cinturão de asteroides e crateras de impacto na Lua e Mercúrio), quanto do externo (e.g. a existência de objetos transnetunianos).

O principal objetivo da construção do modelo era o de resolver o problema da excentricidade das órbitas de Júpiter (~0.048) e Saturno (~0.055), excessivamente altas em comparação com o que seria esperado pela teoria de acreção em disco protoplanetário de gás e poeira. Nessa teoria, a interação entre os protoplanetas e os planetesimais é o processo responsável por atenuar a excentricidade das órbitas dos quatro planetas externos. Mas havia uma discrepância entre a relativamente elevada excentricidade observada na órbita de Júpiter e Saturno com a esperada pelo modelo de acreção (BROWN, 2016). Apresento abaixo um resumo do processo descrito pelo modelo.

O cinturão de Kuiper ocupa a faixa orbital que vai desde 30 UA (unidades astronômicas)⁷³ – coincidente com a órbita atual de Netuno – até 55 UA. No cenário proposto pelo *Nice Model*, o cinturão de Kuiper era muito mais denso, mais compacto e mais próximo do Sol, com milhões de planetesimais. O limite *externo* do cinturão ficava a 30 UA. As órbitas dos gigantes gasosos foi mudando aos poucos pela interação com o grande número de planetesimais. Segundo o modelo, os quatro planetas gigantes teriam se formado em órbitas muito mais próximas do Sol do que as atualmente observadas. Um detalhe importante é que isso ajuda a resolver o já mencionado problema da formação de Urano e Netuno presente na cosmogonia original de Safronov. Como vimos, nessa teoria, se Netuno tivesse se formado *in situ* (30 UA) o processo de acreção para a formação do planeta teria demorado mais do que a idade estimada do Sol.

⁷² Alessandro Morbidelli, um dos autores, é pesquisador do *Observatoire de la Côte d'Azur*, em Nice, França. Daí, o apelido do modelo.

⁷³ Uma unidade astronômica equivale à distância média da Terra para o Sol, ou 149.597.870 km.

Entre 500 e 600 milhões de anos de história do sistema solar, Júpiter e Saturno teriam se encontrado numa ressonância⁷⁴ orbital de 2:1 (dois períodos orbitais completos de Júpiter para um de Saturno). A interação gravitacional gerada por essa ressonância teria gerado um aumento da excentricidade das órbitas dos dois gigantes gasosos. Com o aumento da excentricidade de suas órbitas, ambos se aproximaram periodicamente de Urano e Netuno, desestabilizando as órbitas dos gigantes gelados. Netuno teria invertido sua órbita com a de Urano e mergulhado no cinturão denso de planetesimais mais externos. Isso torna o modelo consistente com a ideia de que a massa do disco protoplanetário diminuiria com o aumento da distância para o Sol a partir de um determinado ponto – talvez, a órbita original de formação de Júpiter. A interação entre Urano e Netuno com os planetesimais externos teria causado a deflexão de uma enorme quantidade de planetesimais para órbitas internas, ao mesmo tempo em que os planetas foram se distanciando, aumentando suas órbitas.

Em seu caminho para órbitas mais internas, os planetesimais também teriam interagido com Saturno, causando o aumento do raio da órbita desse planeta via interação gravitacional – enquanto Saturno é puxado para fora, os planetesimais mergulham para dentro do sistema. Então, esses objetos teriam se encontrado com Júpiter. A grande gravidade de Júpiter teria jogado os planetesimais para órbitas elípticas muito excêntricas. Uma parte dos planetesimais teria mergulhado no sistema solar interno, bombardeando os planetas rochosos por volta de 600 milhões de anos da história do sistema solar. Isso explicaria as crateras lunares e mercurianas associadas à hipótese do *late heavy bombardment*, criada na década de 1970 para explicar as idades estimadas de material lunar (trazido pelas missões Apollo) semelhante a rochas produzidas em impactos meteoríticos.

O cenário de deflexão gravitacional entre os planetas gigantes e os planetesimais explicaria a configuração atual dos objetos transnetunianos, especialmente a pequena massa do total desses objetos. Na interação com Júpiter, boa parte dos planetesimais teria sido ejetada do sistema solar. Segundo o modelo, os planetas internos não devem ter migrado significativamente, mantendo órbitas estáveis depois do período de impactos do *late heavy bombardment*. Por fim, a ressonância de 2:1 entre Júpiter e Saturno no começo da história do sistema solar explicaria por que as órbitas de ambos apresentam uma excentricidade relativamente elevada em comparação com os modelos de suavização da excentricidade das órbitas dos planetas via interação gravitacional com planetesimais.

⁷⁴ A importância de ressonâncias orbitais para reconstruir a evolução da estrutura atual do sistema solar já era reconhecida por Alfvén pelo menos desde 1970 (ALFVÉN, 1970, p. 313).

*

Um dos problemas não resolvidos pelo *Nice Model* é a quantidade de massa de Marte, pouco mais de 10% da massa da Terra. Simulações computacionais após a publicação do *Nice Model* sugeriram que os modelos de acreção de planetesimais e gás no sistema solar interno não eram consistentes com a massa de Marte. Os resultados das simulações geravam planetas com massa similar à da Terra e de Vênus em suas respectivas órbitas, mas resultavam em objetos com muito mais massa na órbita de Marte. É o chamado *problema da pouca massa de Marte*, ou simplesmente *problema de Marte*.

Procurando resolver o problema, um estudo publicado na *Nature*, em 2012, propôs um cenário *prévio* à dinâmica descrita pelo *Nice Model*. Nesse cenário, Júpiter teria migrado para dentro do disco de gás e poeira, chegando a ocupar uma órbita de 1,5 UA (WALSH et al, 2012) – muito mais próximo do que a atual média de aproximadamente 5,2 UA. “O aspecto-chave que faltava nos modelos prévios de formação de planetas terrestres é uma migração interna, e depois externa, de Júpiter”, afirmam os autores do estudo. A proposta, apelidada de *Grand Tack*, aparentemente soluciona o problema da formação de Marte. Segundo o artigo, as condições para que o disco protoplanetário do sistema solar interno tenha formado os planetas rochosos com a configuração de massa atual são reproduzidas com a migração inicial de Júpiter para a órbita de 1,5 UA.

A dinâmica proposta pelo *Grand Tack* propõe que, num determinado momento da evolução do sistema, a porção interna do disco protoplanetário confinou-se, a uma faixa orbital entre 0,7 e 1 UA (as órbitas de Vênus e da Terra) (WALSH et al, 2011). Nesse cenário, Júpiter teria se formado mais internamente do que sua órbita atual. O gigante gasoso teria, então, migrado ainda mais para dentro por meio de um processo parecido com o bastante utilizado para explicar a migração de Júpiteres quentes para órbitas muito internas: após atrair o gás em sua faixa orbital, Júpiter teria sofrido influência do material gasoso, ainda abundante no disco. O torque produzido pelo disco mais externo sobrepujaria o do mais interno e empurraria Júpiter gradativamente para órbitas mais internas. A consequência da aproximação do gigante gasoso da órbita a 1,5 UA é a de confinar o disco protoplanetário interno a até 1 UA. Por isso, muito mais massa estaria disponível para a formação de Vênus e da Terra do que para a formação de Marte – esta já teria se iniciado, mas fora do disco interno confinado

por Júpiter até a órbita da Terra. Esse processo todo se daria numa escala de apenas centenas de milhares de anos.

O estudo conclui que o comportamento dos gigantes gasosos no sistema solar “é mais parecido ao [comportamento] inferido para planetas extrassolares do que antes pensado” (WALSH et al, 2011) e que “a migração substancial [de Júpiter e Saturno no início da formação do sistema solar] também aponta para similaridades com os sistemas planetários extrassolares para os quais a migração parece ubíqua com planetas gigantes comumente encontrados à distância aproximada de 1,5 UA” (ibid.). Essas afirmações constituem indícios da influência que o conhecimento de planetas extrassolares está produzindo na construção de modelos sobre a formação do nosso sistema solar. Planetas análogos a Júpiter (em tamanho e massa) vêm sendo descobertos em órbitas bem mais distantes do que as dos Júpiteres quentes, embora a probabilidade de detecção de planetas com período orbital longo como os de Júpiter seja baixa.

O modelo ainda é considerado com certa cautela pelos astrônomos planetários, recebendo o status de “não confirmado” (CHAMBERS e HALLIDAY, 2014, p. 45). Por “não confirmado”, nesse caso, talvez seja melhor entender “não testado”. Teste, nesse caso, significaria que alguma característica atualmente observável do sistema solar deve ser uma consequência extraída dedutivamente do modelo; se a característica é observada, então um “teste” terá ocorrido. Essa característica pode já ser conhecida, mas se for algo que ainda não se conhece e o modelo prevê, eis uma oportunidade de teste importante. Uma das diferenças da estatura do *Nice Model* (bem estabelecido) e do *Grand Tack* (visto como uma possível solução “não-confirmada” para o problema de Marte) é que o primeiro tem como consequência um influxo muito grande de planetesimais no sistema solar interior num período compatível com o do *late heavy bombardment* e também prevê a existência dos asteroides troianos (que acompanham Júpiter em sua órbita) originados pela interação dos gigantes gelados com objetos do cinturão de Kuiper. Se uma missão espacial for lançada para examinar esses asteroides e sua composição química for semelhante à dos objetos do Cinturão de Kuiper, então mais uma instância de teste terá sido realizada e mais corroboração o modelo terá (se não, será preciso modificá-lo, ou elaborar outra hipóteses para a existência dos asteroides troianos). A questão é que ainda não se sabe como testar o *Grand Tack*. Uma das razões pode estar ligada ao fato de que o modelo descreve a migração de Júpiter e Saturno num estágio ainda bastante inicial da formação do sistema solar. O modelo de fato dá uma boa explicação para que a formação de um quarto planeta rochoso muito mais massivo do que

Marte não tenha acontecido. Mas a formação de um quarto planeta rochoso de pouca massa, como Marte, não está descartada sem o auxílio do *Grand Tack*: o resultado final de formação de um sistema planetário (i.e. as massas, densidades, estrutura interna e configuração orbital dos planetas) é estocástico e pode não ter ocorrido como o modelo prevê, com Júpiter e Saturno migrando para órbitas bem mais internas (Júpiter em 2 UAs), esvaziando o disco protoplanetário de material na zona de formação de Marte.

Apesar de o *Grand Tack* não ser testado além das simulações, o artigo em que é originalmente proposto possui um número relativamente elevado de citações (653, de acordo com o *Google Scholar*) e tem se tornado presença constante em materiais de divulgação científica e cursos online com cientistas planetários (e.g. BROWN, 2016). Será interessante acompanhar como o conceito de migração planetária e os modelos que recorrem a isso para explicar como se esculpem os sistemas planetários se sairão no longo prazo, num campo que se desenvolve rapidamente, concomitantemente à produção de novas tecnologias de observação. O conhecimento sobre a diversidade dos sistemas planetários extrassolares e as observações detalhadas de discos circunstelares são algumas das áreas que mais estão produzindo avanços significativos e rápidos nas ciências astronômicas.

Capítulo 4. Zonas de acreção: o afunilamento das possibilidades teóricas

History of the natural sciences is now almost always written as a history of theory. Philosophy of science has so much become philosophy of theory that the very existence of pre-theoretical observations or experiments has been denied.

Ian Hacking, *Representing and Intervening* (1983)

4.1. Delineando condições de contorno

O fato de que ainda não há uma teoria plenamente satisfatória, consistente, sobre a formação do sistema solar ou de sistemas planetários (que englobe todas as principais características do sistema solar e dos sistemas planetários já descobertos) não implica sua impossibilidade, tampouco significa que não tenha havido qualquer progresso na área das planetogonias. A falta de um modelo completo e consistente apenas atesta as dificuldades inerentes a uma ciência que ainda engatinha. Mas essa ciência já mostra sinais de que pode dar passos firmes em direção a *breakthroughs* teóricos que permitam o surgimento de uma explicação consistente para um conjunto de fenômenos desconcertantemente desafiadores. O desenvolvimento dos referenciais empíricos e da rede de teorias dentro dos quais a atual área das planetogonias se desenvolveu ajudou a afunilar o campo das possibilidades teóricas.

O processo de filtragem das possibilidades teóricas não explica, por si só, por que o campo lentamente convergiu para teorias que propõem a formação dos planetas num disco protoplanetário, em processo contínuo à formação da estrela. Também não tem o propósito de formular qualquer explicação forte sobre o desenvolvimento da ciência baseada numa suposta determinação das teorias pelo suporte empírico. Aspectos sociais, econômicos e culturais podem e devem ter desempenhado papel relevante nessa lenta convergência. Mas este não é o

escopo da minha investigação. Pretendo mostrar, apenas, que seria insensato descartar os impactos dos avanços da produção de suportes empíricos e de referenciais teóricos de áreas distintas da ciência na emergência do atual consenso em torno de um aspecto fundamental: a formação de planetas em discos de poeira e gás ao redor de estrelas recém-nascidas. O quanto essa hipótese fundamental está justificada é a preocupação de fundo, pois é a partir dela que ainda são feitas extrapolações teóricas, filosóficas e até mesmo metafísicas sobre o lugar da humanidade no universo.

Não pretendo, neste capítulo, enfrentar a *tese Duhem-Quine* ou o problema da subdeterminação das teorias pelas evidências. Filosoficamente, a elaboração de teorias não pode ser entendida como *determinada* por dados empíricos, muito menos pela relação das possíveis teorias com o conhecimento científico vigente em campos adjacentes. O *campo do possível* é aqui proposto como a base que torna factível a elaboração, num dado momento histórico, de teorias planetogônicas que tenham o potencial de ser avaliadas criticamente em suas relações com o suporte empírico e com a rede de teorias que as envolvem. É nesse sentido amplo que falo em afunilamento das possibilidades teóricas, não no sentido estrito ligado à infinidade de formulações teóricas a partir de um conjunto finito de dados, envolvido por espinhosas questões lógicas e filosóficas.

A filtragem das possibilidades teóricas também não deve ser entendida como um processo que leva *necessariamente* à convergência para um cenário dominado por uma teoria paradigmática da formação dos sistemas planetários, mas como algo mais modesto. Foi, de fato, um processo suficiente para levar à convergência em torno das concepções fundamentais de que: a) o sistema solar é um subproduto da formação do Sol; b) os sistemas planetários são um subproduto da formação de estrelas; c) os planetas são produzidos em discos protoplanetários que circundam estrelas jovens; d) a formação de planetas é algo corriqueiro, não depende de processos raros ou extraordinários (como um encontro estelar, por exemplo), mas a configuração madura de um sistema planetário é estocástica.

O *conhecimento de fundo* que envolve as teorias de formação do sistema solar mudou radicalmente ao longo dos últimos cem anos. O afunilamento das possibilidades teóricas se deu tanto no nível teórico quanto no nível empírico. No caso dos referenciais empíricos, as principais contribuições para o progresso das planetogonias foram a sofisticação do conhecimento das nebulosas, o conhecimento da composição química de meteoritos e das crateras de impacto em outros planetas e na Lua, a observação de discos protoplanetários e a detecção de milhares de exoplanetas. A utilização de simulações computacionais também

forneceu oportunidades de sofisticação e filtragem dos modelos teóricos propostos. É essa dimensão do desenvolvimento histórico das planetogonias que abordo agora. A exposição do incremento do *conhecimento de fundo* das planetogonias é fundamental para a construção da argumentação filosófica contida no capítulo 5, em que defendo que houve uma forma de progresso científico na área, especialmente distinguível da década de 1970 em diante.

*

A produção intelectual em filosofia da ciência no século XX colocou muita ênfase nas formulações teóricas, mas deu pouca atenção a aspectos não-teóricos que também são parte fundamental da investigação científica. Mais precisamente, as análises mais influentes (como a de Kuhn) conceberam o progresso científico essencialmente como progresso teórico. Ao direcionar as análises ao progresso teórico, a filosofia da ciência se colocou num labirinto. A dificuldade de capturar e caracterizar o progresso teórico levou a interpretações do progresso científico que o dissociaram do objetivo da maioria das investigações empíricas, das quais as ciências naturais são parte: produzir e melhorar o conhecimento sobre o mundo. O fio que pode indicar a saída do labirinto consiste em direcionar o olhar filosófico também para outros aspectos constituintes do conhecimento científico, como o conhecimento empírico, não menos importante do que a formulação de teorias. Como afirma Chalmers, “as características importantes da ciência, mesma da ciência contemporânea ‘pura’, se perdem se nos fixamos demais num quadro da ciência como busca de generalizações teóricas” (CHALMERS, 1994, p. 43).

Afirmar que as observações são carregadas de teoria tornou-se moeda corrente em filosofia a partir da publicação de *Patterns of Discovery*, de Norwood Russell Hanson, em 1959 (embora já houvesse algum conhecimento disso antes). De fato, é difícil conceber como as observações astronômicas podem ser produzidas independentemente das teorias, dado que a construção dos telescópios e o processamento de imagens depende de um conhecimento teórico muito robusto. O desenvolvimento de técnicas e aparatos de experimentação e de observação ocorre concomitantemente, numa relação de interdependência, ao desenvolvimento do conhecimento teórico. A meu ver, Hacking é preciso ao descrever aonde isso leva:

Se houvesse uma distinção nítida entre teoria e observação, então talvez pudéssemos interpretar o que é observado como real, enquanto teorias, que meramente representam, são ideais. Mas quando os filósofos começam a ensinar que toda observação é carregada de teoria, parecemos completamente presos à representação e daí, em alguma versão do idealismo (HACKING, 1983, p. 130).

Ainda que se reconheça a importância do problema do caráter teórico-dependente da observação, e embora teorias guiem a produção de instrumentos e técnicas de observação, aquilo que se convencionou chamar de conhecimento empírico também impacta a constituição do corpo do conhecimento científico. As explicações teóricas não são criadas isoladamente dos desenvolvimentos tecnocientíficos que frequentemente melhoram a capacidade de obtenção de conhecimento empírico. Os dados observacionais são capazes de motivar a modificação das teorias. Técnicas e tecnologias de observação são frequentemente concebidas para testar as previsões teóricas e solucionar os problemas formulados pelas teorias.

Qualquer avaliação do progresso de uma área de investigação científica não poderá ignorar a interdependência das formulações teóricas e dos conteúdos empíricos, assim como não deve esquecer que a área especificamente estudada está interrelacionada com outras áreas de investigação, que também têm conteúdo teórico e empírico. Trata-se de uma rede de conhecimento científico. Mas como filósofos como Hacking e Chalmers convincentemente mostraram, o conhecimento empírico pode ter ao menos algum grau de independência em relação ao conhecimento teórico.

A filósofa Heather Douglas defende uma definição do progresso científico em termos de aumento da capacidade de previsão, controle, manipulação e intervenção da natureza. “Enquanto a mudança de paradigma pode criar perdas de compreensão ou perdas na unificação explanatória assim que claras estruturas conceituais são descartadas, o que não é perdido é a habilidade de predizer fenômenos e/ou a habilidade de controlar certos aspectos do mundo” (DOUGLAS, 2014, p. 8). A filósofa atribui à distinção rígida entre ciência pura e ciência aplicada boa parte das dificuldades de Kuhn em elaborar uma explicação do progresso da ciência que desse conta (ou ao menos ressaltasse a relevância) daquilo que “fica” e não somente daquilo que é “jogado fora” numa revolução científica. Ainda assim, como ela nota, algumas áreas que não incluem a intervenção e a manipulação da natureza também podem progredir pois sua concepção de progresso inclui o aumento da capacidade de fazer previsões e de obter conteúdo empírico. “A astronomia ganhou uma crescente capacidade preditiva

(junto com a crescente capacidade tecnológica de enxergar mais profundamente no cosmos).”
(*ibid.*)

Douglas admite que, segundo essa caracterização, o progresso não é facilmente quantificável. “Seria difícil determinar se uma intervenção ou capacidade preditiva deveria contar mais do que outra”, ela diz, mas ressalta que Kuhn teve dificuldades até mesmo em definir o progresso científico de maneira *qualitativa*. “O progresso surge não apenas de novos artefatos, mas de novas compreensões que permitem nosso engajamento mais bem-sucedido com o mundo, para predizer seu comportamento mesmo quando não intervimos nele” (DOUGLAS, 2014, p. 8).

Elaborar avaliações do progresso de uma área de investigação científica apenas olhando para o aspecto teórico parece ser um erro. Se a ciência for entendida essencialmente como uma atividade de elaboração de teorias, então não há fio que conduza à saída do labirinto. Afinal, seria possível falar em progresso *teórico*? Teorias progredem? Ainda que fosse possível fazer qualquer contribuição que fizesse sentido tentando responder a essa pergunta, penso que não seria uma avaliação suficientemente abrangente do que é, de fato, o progresso científico – o progresso das investigações científicas sobre um determinado problema ou enigma.

O fio que indica a saída do labirinto, a chave para compreender se as investigações sobre a formação do sistema solar fizeram algum progresso não serão encontrados fazendo apelo a metateorias do funcionamento da ciência que privilegiam as formulações teóricas. O fio e a chave, penso, são as observações de discos protoplanetários e as detecções de exoplanetas.

*

Em 1994, num livro introdutório às teorias sobre a origem e a evolução do universo, o historiador da ciência Roberto Martins caracterizava de maneira prosaica a situação das teorias de formação do sistema solar:

[A] cada teoria nova, o seu autor pensa que chegou, enfim, à resposta final: como dizem Haar e Cameron, cada teoria pretende ter resolvido o problema. Mas nenhuma delas resistiu muito tempo: em dez ou vinte anos, são arrasadas pela crítica ou simplesmente nem despertam atenção e acabam esquecidas.

Por isso, não devemos ficar muito impressionados se lermos em alguma revista ou jornal que determinado cientista Fulano acaba de descobrir a origem do sistema solar. Esse tipo de notícia sempre aparece e, pouco depois, é esquecida e substituída por uma nova notícia: o cientista Sicrano acaba de descobrir a origem do sistema solar. É claro que nosso conhecimento vai sempre aumentando: as naves espaciais nos transmitiram um volume imenso de informações sobre os planetas e suas luas. Mas isso não torna o problema mais simples. Pelo contrário: é cada vez mais difícil explicar aquilo que já se conhece.

Todos esses fracassos não indicam que o problema não possa ser resolvido. Indicam apenas que o problema é muito complicado. É difícil imaginar alguma coisa que ainda não tenha sido sugerida ou tentada. Talvez não surja uma proposta totalmente nova; mas deve haver algum modo de modificar as hipóteses que já surgiram até hoje, e conseguir explicar pelo menos os fenômenos principais do sistema solar. E quem fizer isso terá dado um passo importantíssimo para nossa compreensão do universo. (MARTINS, 1994, pp. 107-8, grifos meus)

O bem-humorado diagnóstico de Martins opera com uma distinção clássica entre os dados empíricos coletados sobre o sistema solar e as teorizações sobre sua origem. O aumento dos dados empíricos não tornaria o problema *mais simples*, mas *mais difícil*. Sua ideia central parece essencialmente correta: nenhuma das teorias dava conta de explicar de maneira consistente todas as principais características conhecidas do sistema solar e o aumento dos dados empíricos sobre os planetas e seus satélites fazia crescer a quantidade de fatos a serem explicados pelas teorias.

Há, implícita nesse diagnóstico de Martins, a concepção de que os teóricos tinham que tentar formular uma explicação que desse conta de todas as principais características conhecidas do sistema solar para que a teoria contasse como “a descoberta da origem do sistema solar”. Como veremos no capítulo 5, uma diferença importante entre o cenário teórico até a década de 1970 e o que emerge a partir daí (e que foi se aprofundando até hoje) está na estratégia de ataque à questão central. A busca por uma teoria que explique todas as principais características do sistema solar e todos os processos envolvidos na formação planetária não mais ocorre no sentido de elaborar uma teoria global de uma tacada só (i.e. uma explicação desde a origem da contração da nebulosa ao estado atual do sistema), mas de desenvolver e testar hipóteses para resolver problemas mais bem definidos (e.g. o processo de migração dos gigantes gasosos, o crescimento de planetesimais a partir de um determinado ponto). A meta de obtenção de uma teoria consistente não foi abandonada, mas assumindo-se que se trata de um objetivo ainda muito difícil de ser alcançado, o foco passou a ser o de fazer pequenos avanços em áreas bem delimitadas. Os resultados indicam que a abordagem vem sendo frutífera. E isso é possível, em parte, porque nosso conhecimento foi aumentando, para usar o vocabulário empregado por Martins.

Refletindo sobre a torrente de dados empíricos produzidos a partir da aurora da exploração robótica do sistema solar, Cameron e ter Haar argumentavam mais ou menos no mesmo sentido adotado por Martins, mas empregam uma expressão reveladora: “para conseguir aceitação, novas teorias da origem do sistema solar precisam satisfazer um número tremendo de *condições de contorno* (*boundary conditions*)” (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 35, grifo meu).

Um aspecto que parece ter sido esquecido nessas discussões é que o crescimento do volume de dados empíricos tem várias dimensões. Por um lado, de fato torna mais complexa a busca por uma teoria consistente (i.e., uma teoria que não apresente contradição em todos os seus detalhes, em todas as suas conexões com o suporte empírico e com a malha teórica mais geral). Por outro, fornece novos *insights* e novas oportunidades de investigação. Cameron e ter Haar estavam certos ao apontar que o incremento da capacidade de produzir dados empíricos fornece *condições de contorno* (ao menos num sentido pragmático, evitando por ora o problema da dependência teórica das observações). Isso, porém, não necessariamente torna mais difícil a elaboração de explicações. Os teóricos podem desenvolver suas hipóteses com balizas mais claras; metaforicamente, as margens da estrada teórica podem ganhar contornos mais visíveis. Por isso não parece apropriado dizer que o problema se torna sempre mais difícil quanto mais sabemos sobre aquilo que queremos explicar.

Numa relação complexa de interdependência e retroalimentação, as teorias indicam rotas de desenvolvimento de técnicas e tecnologias de observação ao mesmo tempo em que o aumento do conhecimento empírico impacta a dimensão teórica. As *condições de contorno* compõem um corpo de conhecimento científico (entendido, agora, sem uma separação nítida entre o nível teórico e o empírico) que fornece melhores condições e oportunidades de investigação. Problemas fundamentais podem ser desmembrados e melhor definidos, redefinidos e modificados de forma a aumentar o potencial heurístico da investigação. Problemas que pareciam ser importantes podem ser vistos como questões mal colocadas. Podem ser propostas soluções que não poderiam ser imaginadas antes da produção do novo conhecimento proporcionado pelo aumento da capacidade de observação do universo.

As sondas espaciais e a missão humana para a Lua de fato geraram uma montanha de dados que adicionaram complexidades ao trabalho dos teóricos em busca de uma explicação satisfatória para a origem do sistema solar. Mas a avaliação de Martins ainda não

havia incorporado o aporte de campos do conhecimento científico ainda novos em 1994. O primeiro foi produzido pela cosmoquímica, com a análise da composição química de meteoritos, que impactou as formulações teóricas de década de 1970 em diante. O segundo se refere à observação de objetos externos ao sistema solar, como o estudo de discos circunstelares de poeira e gás, inaugurado na década de 1980. Em meados da década de 1990 ainda não estava suficientemente sedimentada a interpretação dos discos circunstelares como protoplanetários, mas essa já era uma ideia corrente entre planetogonistas.

Martins escrevia um ano antes da primeira detecção não-espúria de um exoplaneta orbitando uma estrela de características ordinárias. O historiador não poderia ter previsto o impacto disso nos desenvolvimentos ulteriores das planetogonias. As detecções de exoplanetas e o estudo dos discos protoplanetários transformaram substancialmente o campo. O estudo desses objetos externos ao sistema solar forneceram rotas de investigação que não existiram durante quase toda a história examinada até aqui. Principalmente, abriu-se a possibilidade de conjecturar sobre a formação de planetas com base em observações desse processo em estágios diferentes de evolução. Em última instância, a combinação do estudo de exoplanetas e de discos protoplanetários é o principal motivo para o consenso atual em torno da concepção de que os planetas são subprodutos da formação de estrelas.

A existência de milhares de exoplanetas com natureza muito diversa poderia sugerir o seguinte cenário: se, no final da década de 1980, os planetogonistas ainda não davam conta de explicar as características principais do sistema solar por meio de um único modelo consistente, o desafio teria aumentado exponencialmente no século XXI: agora é preciso explicar não apenas a origem do sistema solar, mas a *dos sistemas planetários* – partindo da grande diversidade entre eles e do fato de que ainda não se descobriu um sequer com configuração aproximadamente semelhante à do sistema solar (embora a prescrição de cautela de Sagan deva sempre ser lembrada nesses casos: *ausência de evidência não é evidência de ausência*). Na verdade, é possível dizer que o contrário aconteceu: o conhecimento sobre sistemas planetários extrassolares e discos protoplanetários vem abrindo oportunidades de comparação entre teorias e observações e análises estatísticas de dados observacionais.

Antes de entrar nessa questão, é preciso ressaltar que houve o início da investigação da composição química de meteoritos e experimentos laboratoriais com materiais em condições extremas que simulam a estrutura interna dos planetas e as condições iniciais da formação planetária. A geoquímica e a cosmoquímica foram importantes para delinear as primeiras condições de contorno sobre o problema da origem do sistema solar no

século XX, produzindo descobertas sobre a abundância de isótopos de magnésio em meteoritos e em levantamentos da abundância de isótopos em nebulosas moleculares. Outras condições de contorno foram produzidas pela observação de crateras em Mercúrio, em 1974, pela sonda *Mariner 10*, e pela análise de amostras de rochas lunares trazidas pela missão Apollo. Esses suportes empíricos indicavam a idade dos traços de impacto meteorítico na Lua e em Mercúrio em aproximadamente 700 milhões de anos após a formação do Sol. Isso consolidou a noção de que teria havido o chamado *late heavy bombardment*. Esse *bombardeio tardio* é uma das características do jovem sistema solar aceitas atualmente pela comunidade científica e era um dos referenciais empíricos utilizados por Wetherill em suas variações do modelo de formação de planetas proposto por Safronov. O bombardeio tardio também é um dos elementos de comprovação do *Nice Model*.

4.2. Nebulosas e formação de estrelas

A astrofísica exerceu forte influência sobre as planetogonias na segunda metade do século XX. Em muitos aspectos, o conhecimento das nebulosas moleculares e da estrutura, evolução e formação das estrelas está entrelaçado com o conhecimento sobre a origem do sistema solar. Nesta seção, apresento apenas um resumo das principais articulações entre essas áreas.

*

O esclarecimento da natureza das nebulosas desempenhou um papel muito importante na história das cosmogonias. Quando o astrônomo francês Charles Messier começou a catalogar objetos difusos no céu na década de 1760, seu intuito era fazer um levantamento para que essas “nuvens” não fossem confundidas com cometas. O catálogo de Messier inclui objetos que hoje são divididos em muitas categorias: galáxias, nebulosas

planetárias, aglomerados de estrelas (abertos e globulares), restos de supernovas⁷⁵ e – os objetos de interesse dessa seção – as nebulosas moleculares⁷⁶.

O impacto mais marcante e conhecido dos avanços da compreensão das nebulosas na história das teorias de formação do sistema solar foi causado pelo conhecimento da natureza das nebulosas espirais. Em 1891, um artigo publicado na revista *Science* descartava a ideia de que as espirais eram outras galáxias, como a Via Láctea, com um tom bastante pessimista quanto à melhoria dos aparatos tecnológicos de observação astronômica:

Há não muito tempo era geralmente pensado que as nebulosas eram galáxias de estrelas mais ou menos similares à Via Láctea que nos envolve, mas tão inconcebivelmente remotas que quando observadas com os maiores telescópios pareciam pequenos pontos nos céus. Essa teoria se adequava ao gosto popular e resistiu duramente. Ela envolvia a suposição de que o homem pode explorar com os instrumentos à sua disposição um espaço tão imenso que os espaços interestelares que podemos medir ou sobre os quais especulamos são reduzidos a pontos ... (RANYARD, 1891, p. 86).

No final do século XIX, o velho palpite de Kant sobre a natureza desses objetos parecia fadado a compor a longa lista de ideias altamente imaginativas que acabaram sendo refutadas pelo progresso da ciência. Apenas três décadas após a publicação desse artigo, Edwin Hubble (1889-1953) utilizaria a observação de uma estrela variável cefeida, que Henrietta Leavitt (1868-1921) havia descoberto serem referenciais seguros para calcular distâncias cósmicas muito grandes, para resolver o Grande Debate: a nebulosa de Andrômeda era um objeto extragaláctico análogo à Via Láctea – uma outra galáxia, assim como todas as nebulosas espirais deveriam ser, também, outras galáxias.

As nebulosas espirais, vistas como resultados de encontros estelares e sistemas planetários em formação, eram consideradas pelos próprios pais da hipótese planetesimal

⁷⁵ Objetos como a Nebulosa do Olho de Gato mantiveram a sua alcunha tradicional, *nebulosa planetária*, mas são atualmente conhecidos como estrelas de tipo solar nos estágios finais de sua existência (não eram nem uma coisa, nem outra, portanto). Os restos de supernovas, como a Nebulosa do Caranguejo, foram compreendidos a partir do desenvolvimento do conhecimento da estrutura estelar e dos processos envolvidos no final violento de uma estrela com muitas vezes a massa do Sol.

⁷⁶ A categorização atual dessas nebulosas contém sobreposições. Nebulosas de emissão, por definição, são nuvens de gás ionizado. Mas essas nuvens podem ser tanto zonas de formação estelar, quanto nebulosas planetárias. Nebulosas de reflexão são nuvens de poeira que apenas refletem a luz das estrelas próximas. Algumas das nebulosas de reflexão são zonas de formação estelar; outras, não. Há também as nebulosas escuras, estruturas opacas formadas de poeira, mais densas que as nebulosas de reflexão. O nome vem do fato de que as nebulosas escuras obscurecem a luz de nebulosas de emissão ou reflexão que estão atrás delas em nosso campo de visão.

como pilares empíricos de sua teoria. De fato, essa planetogonia também era frequentemente chamada de “hipótese da nebulosa espiral”, nome que o próprio Moulton chegou a usar (MOULTON, 1909, p. 115). Quando ficou claro que as espirais eram galáxias e não poderiam ser interpretadas como objetos intragalácticos, a hipótese planetesimal começou a perder muito de seu crédito.

Com William Herschel, no final do século XVIII, houve um primeiro avanço de distinção: alguns dos objetos difusos catalogados por Messier foram revelados como aglomerados de estrelas. Mas a maioria dos outros permaneceu uma enorme incógnita. A analogia com o mundo biológico havido sugerido a possibilidade de que as nebulosas poderiam ser interpretadas como estágios diferentes de desenvolvimento de uma mesma espécie: estrelas e seus sistemas planetários em formação. Assim como ocorreu com a hipótese planetesimal, muito do apelo da hipótese nebular no começo do século XIX estava baseado na possibilidade de se afirmar que uma nuvem de matéria difusa poderia ser observada em estágio de formação de sistema planetário. Quando, na década de 1840, William Parsons (conde de Rosse) imaginou ter evidências de que a grande nebulosa de Órion era um aglomerado de estrelas e não um amontoado de material gasoso, a hipótese nebular também foi parcialmente desacreditada, pois os resultados observacionais pareciam justificar uma indução: por um breve período, todas as nebulosas passaram a ser interpretadas como aglomerados de estrelas e não como estágios primitivos de uma grande cadeia evolutiva que desembocaria na formação de sistemas solares.

Resultados observacionais como os obtidos por Rosse sugerem que a relação entre observação e interpretação não é direta e simples, como se a observação apenas corrigisse interpretações errôneas. Novas observações podem ser interpretadas num sentido que desencoraja determinadas formulações teóricas que, mais tarde, podem se revelar mais profícuas.

As pioneiras observações espectroscópicas da Nebulosa do Olho de Gato, feitas por William Huggins nos anos 1860, começaram a reorientar a visão dos astrônomos para concepção de que pelo menos algumas das nebulosidades celestes eram compostas de gás. Huggins observou que essa nebulosa exibia linhas de absorção características do hidrogênio, hélio, carbono nitrogênio e oxigênio, embora não fosse possível saber a abundância relativa desses elementos (DICK, 2013, p. 77). Logo depois, outras observações de Huggins sugeriram que muitas outras nebulosas não eram aglomerados de estrelas e tinham natureza gasosa.

Nas primeiras décadas do século XX foram distinguidas nebulosas que não eram nem compostas de estrelas e nem de gás luminoso (nebulosas de emissão), mas de “poeira”. Algumas refletiam a luz das estrelas próximas (daí o nome utilizado a partir da década de 1930, nebulosas de reflexão). Outras, regiões escuras que pareciam vazias de estrelas, foram reinterpretadas como nebulosas de poeira que obscurecem as estrelas ao fundo. Mas, retrospectivamente, a principal descoberta sobre nebulosas para as planetogonias veio no início da década de 1920, quando foi compreendido que nebulosas de emissão e de reflexão podem coexistir (é o caso da nebulosa de Órion) e que a radiação de estrelas gigantes pode ionizar o gás das nebulosas de emissão (DICK, 2013, pp. 81-3), abrindo caminho para que o conhecimento de magneto-hidrodinâmica fosse posteriormente aplicado para compreender a dinâmica das nebulosas moleculares (um exemplo disso é o conhecimento condensado no clássico *textbook* de Spitzer sobre matéria interestelar, publicado pela primeira vez em 1978 – esse texto voltará à narrativa mais adiante).

O impacto do conhecimento de nebulosas para as teorias de formação do sistema solar após a resolução do Grande Debate é fundamental. A compreensão que se formou no século XX sobre natureza das nebulosas moleculares é a de que são zonas de formação de estrelas – “berçários estelares”, como são chamados esses objetos em materiais de divulgação científica. O conhecimento dessas nuvens interestelares influenciou não apenas as teorias de formação e evolução estelar, mas as próprias planetogonias. As observações espectroscópicas permitiram um conhecimento empírico sem precedentes sobre a estrutura e a composição química das nebulosas moleculares, fecundando o trabalho teórico sobre sua relação com os processos de formação de estrelas e sua conexão com o restante do ambiente galáctico.

No fim dos anos 1930, havia sido proposta a possibilidade de existência de moléculas no meio interestelar, como oxigênio molecular e monóxido de carbono, e em 1940, surgiram algumas indicações de linhas de absorção características de compostos de carbono com nitrogênio e hidrogênio no espaço interestelar (DICK, 2013, pp. 86-7). Isso fortaleceu um palpite dos astrônomos do período, o de que existia hidrogênio em vastas quantidades no espaço entre as estrelas (especialmente depois da descoberta de que as estrelas são compostas principalmente por esse elemento). No entanto, foi apenas a partir da década de 1960 – com os avanços técnicos da radioastronomia – que surgiram as primeiras evidências observacionais de moléculas no espaço interestelar (*idem*, p. 87). Nos anos 1970, foram descobertas emissões de monóxido de carbono (que permitiram a inferência de existência de hidrogênio molecular no meio interestelar) e de compostos orgânicos complexos na década de

1980 nas nuvens moleculares (ibid.). O conhecimento da composição química das nebulosas moleculares afeta a elaboração de hipóteses de formação de estrelas, entre outras coisas, porque informa as estimativas sobre as abundâncias de elementos nos discos protoplanetários.

Hoje, por exemplo, o mais recente desenvolvimento dessa área de investigação desvelou um enorme complexo em formato ondulado de grandes nuvens moleculares a uma distância de aproximadamente 500 anos-luz do Sol, chamada de *Radcliffe Wave*, com observações feitas com o telescópio espacial Gaia (ALVES et al, 2020). Estima-se que existam mais de 3000 grandes nuvens moleculares, zonas de formação de estrelas, na Via Láctea. Apesar de novos aparatos observacionais terem impacto no conhecimento da estrutura da galáxia, por exemplo, a concepção das nebulosas moleculares como zonas de formação de estrelas ricas em hidrogênio molecular (também compostas de elementos químicos pesados) é uma das mais bem alicerçadas no conhecimento astrofísico e cosmológico atual.

A história da observação e do conhecimento das nebulosas inspira cautela aos céticos que podem insistir num pessimismo apriorístico quanto à capacidade humana de aumentar seu poder de observação da natureza. Essa história também indica que observações astronômicas podem ser mal interpretadas (e também corrigidas), e que a produção de dados observacionais não ocorre independentemente da sofisticação teórica.

*

Um assunto um pouco menos ancorado em dados observacionais – se comparado com o conhecimento das nebulosas – é a formação de estrelas. Apresento a seguir uma breve história desse campo que obviamente impacta as planetogonias.

Como já abordado (seção 3.3.2.), nas últimas décadas do século XIX a física e a evolução darwiniana entraram em rota de colisão. Havia uma grande diferença entre as estimativas máximas da escala Kelvin-Helmholtz sobre o passado do Sol e as centenas de milhões de anos imaginadas por Darwin para que o processo de seleção natural produzisse a diversidade da vida atualmente observada. A emissão de energia do Sol era interpretada no final do século XIX como um efeito da contração gravitacional do material solar. A energia produzida pela contração gravitacional garantiria à estrela apenas algumas poucas dezenas de milhões de anos de brilho. A escala Kelvin-Helmholtz é ainda hoje útil para compreender, por exemplo, como uma protoestrela produz energia via colapso gravitacional até atingir o estágio

de sequência principal⁷⁷. Mas a compreensão da estrutura e da evolução das estrelas mudou radicalmente nas primeiras décadas do século XX.

Com o desenvolvimento da física nuclear, foi possível compreender o processo de nucleossíntese, que gera a energia emitida pelas estrelas e produz os elementos químicos mais pesados que o hidrogênio. Na década de 1930, principalmente com a pesquisa de Cecilia Payne, o conhecimento da composição química das estrelas sofreu uma mudança decisiva. Até então, o Sol e os planetas não eram vistos como essencialmente diferentes em composição química – as estrelas, pensava-se, eram compostas de metais. Desde então, sabe-se que as estrelas são formadas principalmente por hidrogênio e hélio. Os planetas terrestres têm composição química muito diferente: são predominantemente feitos de ferro e outros elementos relativamente pesados (oxigênio, silício, magnésio etc.).

Nesse período, ao passo em que a morte de estrelas passava a ser melhor compreendida (ao menos no caso das mais massivas, que explodem no fim de sua existência), o conhecimento sobre o nascimento de estrelas ainda estava na primeira infância. Iniciadas no final da década de 1930, as primeiras incursões conjuntas de Hermann Bondi (1919-2005), Hoyle e Lyttleton na teorização da acreção de gás por um ponto de massa são geralmente creditadas como um aporte teórico fundamental para o nascimento da física de formação de estrelas. A partir daí, em menos de três décadas, a astrofísica havia produzido uma primeira versão da teoria de formação estelar via colapso gravitacional. De meados do século XX em diante também se formou a consciência de que o processo de formação de estrelas envolve fenômenos cujas escalas variam em até 12 ordens de magnitude, tanto em massa quanto em escala linear (SHU et al, 1987, p. 23). Em outras palavras, a ciência da formação de estrelas lida com processos que afetam desde um décimo da massa solar a massas de escala galáctica.

Apesar dos notáveis avanços na compreensão da estrutura das estrelas e da articulação desse conhecimento com o diagrama Hertzsprung-Russell, ainda não é possível afirmar que os astrofísicos chegaram a um consenso em torno de uma teoria completa de

⁷⁷ Estrelas em sequência principal são os objetos estelares que fazem fusão nuclear de hidrogênio em seu núcleo e encontram-se em estado de equilíbrio hidrostático – um equilíbrio entre a pressão de fora para dentro produzida pela atração gravitacional e a pressão de dentro para fora gerada pelas reações nucleares. Estrelas em sequência principal são classificadas de acordo com seus tipos espectrais, e variam em cor, temperatura, luminosidade e massa, das mais quentes (gigantes azuis) às mais frias (anãs vermelhas), passando por estrelas de temperatura e massa intermediárias, como Sol (anã amarela). No diagrama Hertzsprung-Russell, o brilho intrínseco das estrelas é plotado contra seu tipo espectral. O diagrama pode ser acessado no site oficial do *European Southern Observatory* (ESO): <https://www.eso.org/public/brazil/images/eso0728c/> Acessado em 03/02/2020.

formação de estrelas. Mas, de forma parecida com o campo das planetogonias, as investigações sobre formação de estrelas também estão marcadas nos últimos cinquenta anos por um processo de especialização, articulação com outras áreas de investigação e produção volumosa de dados observacionais, de tal forma que é possível falar pelo menos em emergência de uma imagem coerente sobre quais processos devem estar envolvidos na origem das estrelas.

Uma revisão clássica da área, publicada em 1971, começava com a seguinte frase: “Uma teoria bem definida sobre formação estelar ainda não existe” (MCNALLY, 1971, p. 71). Nesse período, os dados observacionais das zonas de formação de estrelas ainda eram bastante incipientes – apenas as protoestrelas *T Tauri* eram conhecidas – “a observação tem pouco a contribuir para o problema complexo de formação de estrelas” (ibid.). Mas já havia um preferência pela teoria do colapso gravitacional, dado que seu “*framework* conceitual” era “mais bem definido do que o das outras. E é também mais capaz de investigação específica posterior” (ibid.).

Spitzer, no já mencionado *textbook* de 1978, avaliava o tópico de formação estelar como complexo e incerto, e já havia enfrentado o paradoxo do momento angular das estrelas pelo menos dez anos antes (RAY, 2012, p. 20). Se se imaginasse um processo de formação estelar por meio de colapso gravitacional de uma nuvem de gás com algum momento angular inicial, uma estrela única não deveria nem sequer existir: “se uma estrela se forma a partir de material numa nuvem interestelar, o momento angular é quase inevitavelmente muito maior do que o que é consistente com uma estrela única com raio normal” (SPITZER, 1978/2004, p. 291). No entanto, elas existiam, e giravam muito mais devagar do que o esperado. Para Spitzer, a transferência de momento angular podia acontecer de duas formas: a fissão da massa original em um sistema binário (transformando o momento angular da rotação em movimento orbital) e a transferência da “condensação em rotação” (i.e. a protoestrela) para o gás interestelar ao redor por meio de freio magnético (idem, p. 292).

Ainda em 1956, Spitzer havia colaborado com Leon Mestel (1927-2017) num artigo que analisava a transferência de momento angular de uma nebulosa para o material ao redor dela por meio de freio magnético (BODENHEIMER, 1978, p. 488). De fato, todo o núcleo de formação de estrelas numa nebulosa deve perder momento angular de uma maneira ou de outra, e o freio magnético há muito é reconhecido como uma boa explicação para isso (LIZANO e SHU, 1987, p. 177). Mestel dedicou sua carreira aos problemas do magnetismo aplicado às estrelas e nebulosas e havia proposto, em dois artigos largamente considerados

fundamentais publicados em 1965, formas de explicar a grande perda de velocidade de rotação das estrelas com o mecanismo do freio magnético (RAY, 2012, p. 20). Essas contribuições delinearão o problema e ofereceram algumas soluções plausíveis. A questão continua motivando uma acesa discussão na astrofísica, em parte porque a transferência de momento angular via magnetismo precisa que a matéria ao redor da estrela esteja ionizada, o que exige determinadas condições físicas que nem sempre se reproduzem.

Como afirma outra clássica revisão, mais recente, os campos magnéticos continuam sendo vistos como fenômenos que “desempenham um papel decisivo na resolução do clássico problema do momento angular por meio do freio magnético” (MCKEE e OSTRICKER, 2007, p. 631). A diferença, após décadas de pesquisa sobre formação de estrelas, é que vem se consolidando a noção de que diferentes processos complementares devem ser responsáveis por frear a rotação das estrelas, como a interação entre o campo magnético e a emissão de partículas pelo vento solar – fortes jatos e fluxos de partículas vêm sendo observados em estrelas jovens (MCKEE e OSTRICKER, 2007, pp. 648-9).

Em contraste com a revisão de 1971, na revisão publicada em 2007 há a afirmação de que há um “paradigma dominante” na área, denominado *colapso gravitacional* (MCKEE e OSTRICKER, 2007, p. 633): “aglomerados moleculares formadores de estrelas, tipicamente com centenas de milhares de massas solares, se fragmentam em núcleos gasosos que subsequentemente colapsam para formar estrelas individuais ou pequenos sistemas [estelares] múltiplos” (KRUMHOLZ et al, 2005). Na teoria rival, denominada *acréção competitiva*, “estrelas são formadas primariamente pela captura e subsequente acréção de matéria que se encontra inicialmente não atrelada à estrela” (MCKEE e OSTRICKER, 2007, p. 633). Essa teoria “sugere que, ao nascer, todas as estrelas são muito menores do que a massa estelar típica (aproximada 0,5 massa solar)” (KRUMHOLZ et al, 2005) e as protoestrelas “competem pelo gás em um mesmo reservatório” (MCKEE e OSTRICKER, 2007, p. 633). Invariante em ambas as teorias está a concepção de que “uma vez formada a protoestrela pelo colapso gravitacional de um núcleo, ela pode continuar a crescer pela acréção gravitacional do material presente no ambiente [*ambient medium*]” (idem, p. 632) – a diferença entre elas, nesse aspecto específico, é de grau: a teoria de acréção competitiva começa com protoestrelas com muito menos massa, que competem para coletar do material da nebulosa o restante de sua massa, enquanto na teoria de colapso gravitacional o núcleo protoestelar já possui quase toda a massa que comporá a futura estrela.

A revisão de 2007 afirma que a controvérsia poderia ser decidida com a nova geração de telescópios. Não encontrei exemplos de dados observacionais produzidos nos últimos anos considerados decisivos com relação a essa contenda em artigos revisados por pares. No campo de desenvolvimento essencialmente teórico, há um exemplo recente de que ambos os processos podem estar envolvidos na formação de estrelas – em maior ou menor grau, variando de acordo com a massa da estrela e sua posição na nebulosa (BONNELL et al, 2018).

A existência de duas teorias rivais para o processo de formação de estrelas poderia sugerir que há divergências profundas quanto a questões fundamentais num dos pilares das planetogonias. No entanto, há bons motivos para descartar essa visão. Por trás dessa divergência teórica há um substancial acordo quanto à formação e evolução de estrelas. Tanto a teoria de colapso gravitacional quanto a de acreção competitiva resultam no seguinte cenário: as estrelas se formam a partir da condensação do gás e poeira nas nuvens moleculares; são uma consequência natural da evolução desses complexos de material interestelar; as protoestrelas formam muito comumente discos circunstelares; boa parte da acreção de matéria nas protoestrelas ocorre por meio de um disco. A variação que as alternativas teóricas produzem e que impacta as planetogonias é sobre o tamanho do disco circunstellar (TAN et al, 2014, p. 155), que pode ser encurtado em até 40 UA (BATE, 2012, p. 3131) – algo substancial, mas que não impede a continuidade do disco, dado que discos circunstelares observados ao redor das T Tauri têm em média 200 UA (MCKEE e OSTRIKER, 2007, p. 639).

Ou seja, a divergência teórica não produz grande variação quanto a algo fundamental: os discos que podem evoluir para a formação de sistemas planetários são, em geral, subprodutos da formação de estrelas. De fato, a própria presença de discos de acreção ou discos circunstelares é um dos elementos importantes para compreender como as estrelas se formam e como elas perdem momento angular (sabe-se que há transferência, por meios ainda não totalmente conhecidos, de momento angular para o disco). Chegamos então, à principal conexão entre a física de formação de estrelas e as planetogonias.

4.3. Discos protoplanetários

Há nomes diferentes para sucessivos estágios de evolução dos discos de acreção envolvidos na formação de estrelas e sistemas planetários⁷⁸. *Disco circumstelar* é o nome usado para qualquer disco de gás e/ou poeira em torno de uma estrela e sua existência é considerada uma “consequência inevitável da conservação do momento angular durante a formação de uma estrela” (CIEZA e WILLIAMS, 2011, p. 68). É chamado de *protoestelar* o disco que circunda e alimenta, via acreção, o embrião estelar. O disco é chamado de *protoplanetário* quando, envolvendo a protoestrela, já se encontra em processo de formação de planetas, ou tem potencial para isso. Mas a distinção entre disco protoestelar e protoplanetário é um tanto arbitrária, pois não está bem definido quando um disco deixa de ser um para tornar-se outro⁷⁹. O disco circumstelar é chamado de *disco de detritos* (*debris disk*) quando planetesimais e protoplanetas já se formaram e passam à fase de atrito e colisões (PERRYMAN, 2011, p. 218). O conhecimento teórico e observacional desses objetos é o mais importante

No final da década de 1970, observações no infravermelho distante sugeriam a existência de nuvens de gás frio e poeira nas regiões de formação estelar em nebulosas moleculares, mas ainda havia um intenso debate sobre a possível existência de discos de poeira e gás ao redor de estrelas jovens de tipo solar. Em 1978, quando ocorreu a primeira conferência *Protostars and Planets*, a maioria dos pesquisadores pendia para a hipótese de que estrelas jovens deviam estar cercadas por um invólucro esférico de material, diferente do que se imaginava ter sido o disco a partir do qual se formou o sistema solar (MEYER et al, 2007, p. 573). Um cenário de formação de estrelas analisado por Spitzer em 1978 era o do “colapso gravitacional de uma esfera”, segundo o qual “um núcleo estelar se desenvolve no centro de uma nuvem e cresce em massa por meio de acreção esférica” (SPITZER, 1978/2004, p. 288). Apenas um ano depois, surgiram indícios convincentes de que discos de poeira e gás existiam ao redor de estrelas jovens ou pré-sequência principal (HARVEY et al, 1979, p. 115).

⁷⁸ Para um levantamento recente sobre os muitos nomes e categorias de discos em astrofísica, vulgo *Diskionary*, cf. EVANS et al, 2009/2018.

⁷⁹ “Não há (...) um ponto específico a partir do qual um disco se torna inequivocamente ‘protoplanetário’ e a distinção entre discos protoestelares e protoplanetários é, portanto, um tanto arbitrária. Bem mais tarde no processo de formação planetária, depois que planetesimais e protoplanetas se formaram e começaram uma nova fase de atrito colisional, os discos circumstelares resultantes são chamados de discos de detritos” (PERRYMAN, 2011, p. 218).

O cenário seria transformado a partir do lançamento do *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS) pelos Estados Unidos em janeiro de 1983. No ano seguinte, a partir dos dados observacionais coletados pelo satélite, evidências inequívocas de discos circunstelares de gás e poeira foram anunciadas pela primeira vez, em torno de quatro estrelas próximas (entre 10 e 53 anos-luz de distância) do sistema solar: *Vega*, *Beta Pictoris*, *Formalhaut* e *Epsilon Eridani*.

Embora o corpo de evidências ainda fosse bastante limitado, na segunda conferência *Protostars and Planets*, em 1985, um consenso havia sido formado em torno da ideia de que as estrelas jovens devem possuir discos circunstelares (MEYER et al, 2007, p. 573). Em 1990, um levantamento de discos circunstelares em estrelas *T Tauri* indicou que “discos com mais massa do que a massa mínima do sistema solar primitivo acompanham comumente o nascimento de estrelas de massa solar e sugere que sistemas planetários são comuns na galáxia” (BECKWITH et al, 1990, p. 924). A ramificação conceitual de discos circunstelares para discos protoplanetários (e outras categorias) não demorou a ocorrer. Em 1993, na terceira *Protostars and Planets*, “foi bem estabelecido que muitas estrelas nascem com discos circunstelares de acreção” (MEYER et al, 2007, p. 573), e, na quarta conferência dedicada ao tema, em 2000, “foi reconhecido que muitos desses discos *devem dar origem a sistemas planetários*” (*ibid.*, grifo meu).

Apesar de que as formulações teóricas sobre a formação de estrelas e planetas certamente cumpriram um papel importante no direcionamento da pesquisa, o principal motor do rumo interpretativa tomada pela comunidade astronômica no final do século XX – muitos dos discos circunstelares passaram a ser interpretados como protoplanetários – foi o avanço tecnológico dos instrumentos de observação astronômica, cujo ápice nesse período foi o lançamento do telescópio espacial Hubble. Em 1992, observações da Nebulosa de Órion pelo Hubble mostraram discos de poeira em torno de estrelas recém-formadas na faixa visível do espectro eletromagnético, algo sem precedentes (discos circunstelares emitem radiação fundamentalmente no infravermelho). Esses objetos foram apelidados de *proplyds*⁸⁰ (uma abreviação de *protoplanetary disks*) e são observáveis na faixa visível do espectro porque são

⁸⁰ Dick (2013, p. 272) relata que um dos astrônomos envolvidos na realização das observações do telescópio Hubble, Robert O’Dell, foi o responsável por cunhar o termo *proplyd*. O termo é geralmente usado de maneira coloquial, em materiais de divulgação e enciclopédias, frequentemente como sinônimo de disco protoplanetário – é o que ocorre, por exemplo, no verbete *Protoplanetary Disk* da *Encyclopedia of Astrobiology* (HOGERHEIJDE, 2015, p. 2045). Segundo o atlas de discos protoplanetários da Nebulosa de Órion, os *proplyds* são “discos protoplanetários externamente ionizados” (RICCI et al, 2008). O termo não aparece no *Diskionary*.

externamente ionizados ou iluminados (podem ser iluminados por estrelas próximas ou o brilho da matéria interestelar ionizada ao fundo permite observá-los em contraste).

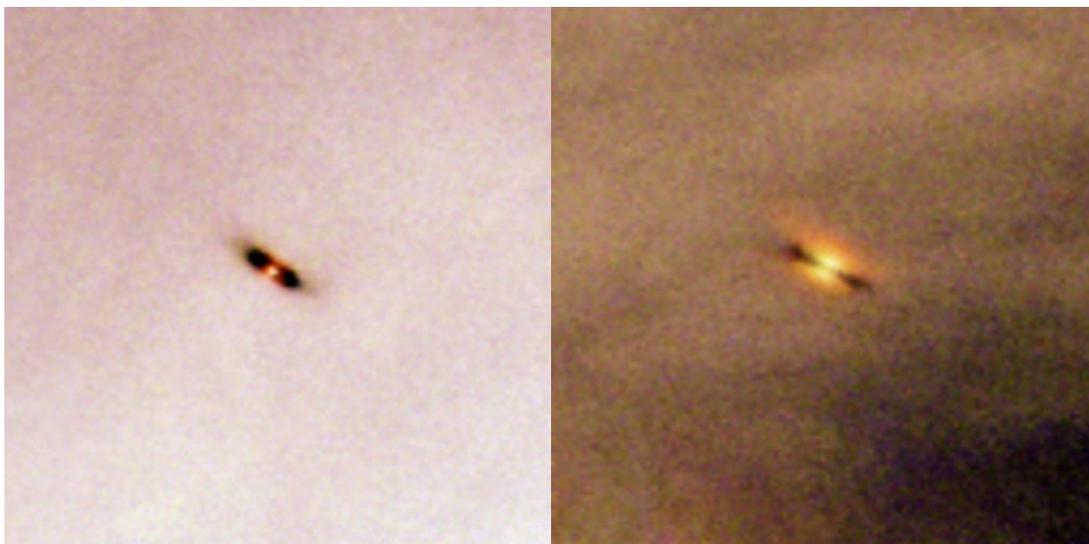


Fig. 1: Os *proplyds* 132-1832 (à esquerda) e 473-245 (à direita), na Nebulosa de Órion, observados pelo telescópio espacial Hubble.⁸¹

Segundo Dick, os discos protoplanetários foram uma das novas categorias de objetos astronômicos introduzidas a partir das observações do telescópio Hubble (DICK, 2013, p. 288), mas esses objetos já eram teorizados muito antes disso sem categorização específica.

No espaço de pouco mais de uma década, a astronomia havia deixado um estado em que discos circunstelares eram uma inferência a partir das emissões excessivas no infravermelho de estrelas jovens, para a observação dos próprios discos de poeira em faixas diferentes do espectro eletromagnético e por meio de diferentes instrumentos de observação. Nesse caso, o progresso foi rápido, embora não sem uma dose de erros. O disco ao redor de *Beta Pictoris*, por exemplo, foi inicialmente interpretado como protoplanetário (DICK, 2013, p. 301), mas sabe-se hoje que é um disco de detritos: um sistema planetário em estágio avançado de formação, no qual dois planetas foram detectados (um em 2009, outro em 2019) – o primeiro deles é um dos poucos exoplanetas dos quais foram produzidas imagens diretas (ROUAN e HAGHIGHIPOUR, 2015, p. 255).

⁸¹ Imagens em alta resolução dos muitos *proplyds* da Nebulosa de Órion podem ser acessadas no site oficial do telescópio espacial Hubble: <https://www.spacetelescope.org/images/heic0917aa/> Acessado em 03/02/2020.

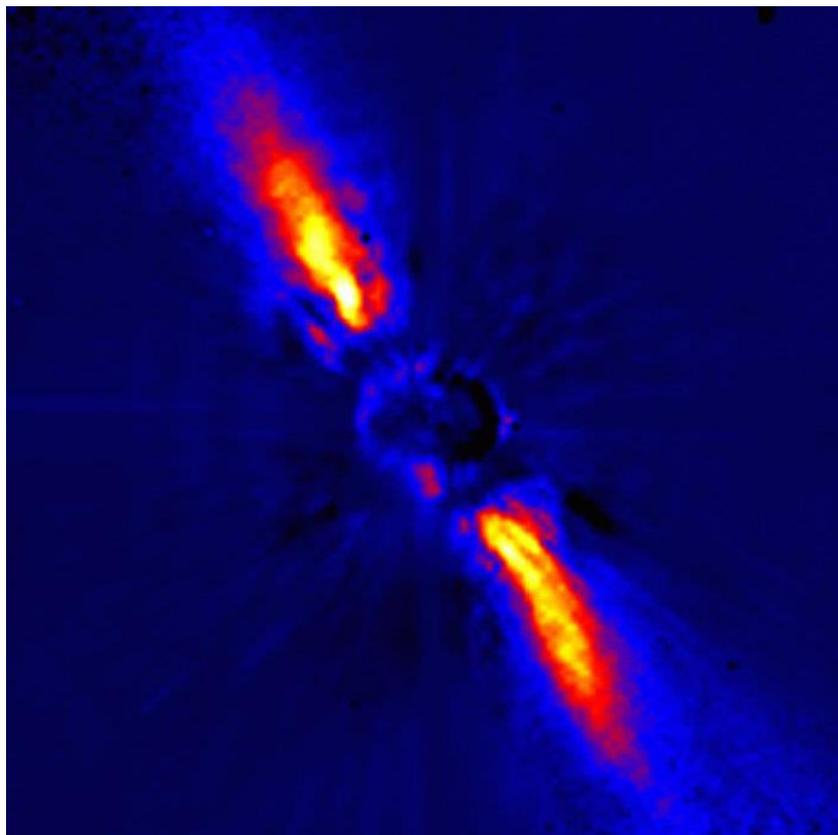


Fig. 2: O disco de detritos de *Beta Pictoris*. A estrela encontra-se ocultada no centro da imagem.⁸²

Beta Pictoris não é uma protoestrela nem, a rigor, um objeto estelar jovem, pois já entrou em fase de sequência principal (estima-se que tenha aproximadamente 20 milhões de anos). Estrelas de tipo solar em sequência principal, como ela, apresentam com frequência discos de detritos ao seu redor, consistentes com a existência de planetas e asteroides (BRYDEN et al, 2006). Os discos protoplanetários, especificamente, são encontrados ao redor de estrelas ainda em estágio pré-sequência principal, como as *T Tauri* (que são objetos intermediários entre protoestrelas e estrelas de sequência principal de tipo solar). Num importante caso retroalimentação entre teoria e observação, ainda em 1974 – ou seja, quase vinte anos antes das observações de discos protoplanetários pelo telescópio Hubble – os astrofísicos britânicos Donald Lynden-Bell (1935-2018) e James Pringle (1949-) haviam criado um modelo de explicação do comportamento das *T Tauri* baseado na relação dessas

⁸² A imagem está disponível no site oficial do European Southern Observatory (ESO): <https://www.eso.org/public/brazil/images/eso9714a/?lang> Acessado em 03/02/2020.

estrelas com os discos de acreção ao seu redor. Eles notaram que, se a sua hipótese estivesse correta, sistemas planetários seriam comuns e o estudo das *T Tauri* forneceria “novas e importantes evidências sobre as condições sob as quais os planetas do sistema solar se formaram” (LYNDEN-BELL e PRINGLE, 1974, p. 604) – sabemos hoje que estavam certos. Simplificando, discos que formam planetas foram necessários para a elaboração de uma teoria que se mostrou bem-sucedida ao explicar o comportamento de uma classe de objetos estelares; a teoria, por sua vez, foi corroborada pelas observações de discos protoplanetários em torno desses objetos, quase duas décadas depois.

Nesse período anterior à descoberta dos discos circunstelares, há vários outros exemplos de teorias planetogônicas que descreveram processos de formação de planetas em discos protoplanetários que, grosso modo, compõem até hoje os mais sofisticados modelos e simulações computacionais sobre o problema. A teoria de acreção de planetesimais de Safronov lançou uma imagem geral que outros cientistas do final dos anos 1970 e começo dos 1980 usaram para modelar a estrutura de discos protoplanetários, antes de sua observação, propondo estimativas de razoável precisão sobre sua massa mínima e variação de densidade em função de seu raio.

Algo que ilustra os enormes avanços das observações e do conhecimento astronômico dos últimos quarenta anos, o tempo de duração de um disco protoplanetário vem sendo estudado em detalhe por meio de observações no infravermelho. Discos existem por um período de até 10 milhões de anos ao redor de estrelas jovens, mas a maior parte deles é detectada ao redor de estrelas de até 3 milhões de anos de existência – metade dos discos desaparece até essa marca (DURISEN, 2007, p. 619), com uma parte significativa se dissipando em até 1 milhão de anos (CIEZA, 2007, p. 327). Isso impacta as planetogonias. Por exemplo, se um planeta for detectado ao redor de estrelas com menos de 1 milhão de anos sem disco protoplanetário detectável, será difícil não interpretar como um sinal de que a instabilidade de disco é um processo pelo qual gigantes gasosos podem ser formados.

Outro exemplo de como o campo está avançando nas últimas décadas é o conhecimento de *discos circumbinários*. A maioria das estrelas em regiões de formação estelar compõem sistemas binários ou múltiplos (de fato, estrelas binárias são mais comuns do que estrelas solitárias no universo). Se a formação de planetas ao redor desses sistemas binários ou múltiplos fosse algo raro ou extremamente difícil de ocorrer, as estimativas sobre o número de sistemas planetários na galáxia teriam que ser revisadas para baixo. Nas últimas duas décadas, contudo, o conhecimento astronômico vem indicando que a formação de

planetas nessas condições está longe de ser um processo raro. Não apenas exoplanetas ao redor de estrelas binárias vêm sendo detectados, como discos circumbinários também têm sido objetos de estudos recentes.

“A formação de um sistema binário cercado por discos é o resultado mais comum da formação estelar” (MONIN et al, 2006, p. 395): essa é a frase de abertura de um trabalho apresentado na quinta conferência *Protostars and Planets*, de 2006, dedicado à evolução de discos circumbinários (assim como os discos circunstelares ao redor das estrelas que compõem o sistema binário; duas coisas distintas). No início da década seguinte, a existência de gigantes gasosos ao redor de sistemas binários já era considerada algo comum. Também há indicações de que discos circumbinários ao redor de estrelas binárias que orbitam próximas umas das outras duram mais tempo do que discos semelhantes ao redor de estrelas únicas – embora binárias separadas por mais de 10 UA têm vida mais curta (ALEXANDER, 2012, p. 4). Isso indica que a formação de planetas em boa parte dos discos circumbinários – portanto, ao redor do resultado mais comum de formação de estrelas, as binárias – também deve ser algo comum.

As observações mais recentes e significativas para a ciência de formação planetária são produzidas atualmente com o instrumento mais sensível disponível para o estudo de objetos astronômicos no infravermelho, o *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)*, um interferômetro composto de 66 antenas construído no Chile por um consórcio europeu, norte-americano e asiático. Imagens de discos com uma série de anéis e lacunas anulares concêntricos ao redor de estrelas *T Tauri* vêm sendo produzidas por meio do instrumento desde 2014. A primeira a ser observada foi a estrela *HL Tau*:

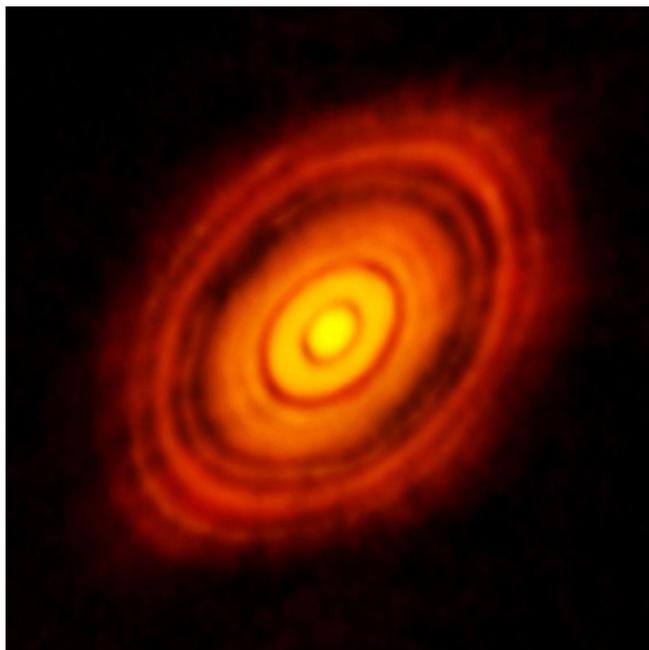


Fig. 3: O disco em torno da estrela *HL Tau*, observado com o ALMA.⁸³

Em dezembro de 2018 foram divulgados os primeiros resultados do *Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP)*, um projeto de observação detalhada de estruturas de discos protoplanetários que tem o objetivo declarado de fornecer *constraints* empíricos para as teorias de formação de sistemas planetários (ANDREWS et al, 2018). As imagens produzidas pelo ALMA de 20 discos circunstelares são marcadas por anéis e lacunas anulares concêntricas, similares à imagem do disco da *HL Tau*:

⁸³ A imagem pode ser obtida em alta resolução no site oficial do ALMA:
<https://www.almaobservatory.org/en/press-release/revolutionary-alma-image-reveals-planetary-genesis/>
Acessado em 03/02/2020.

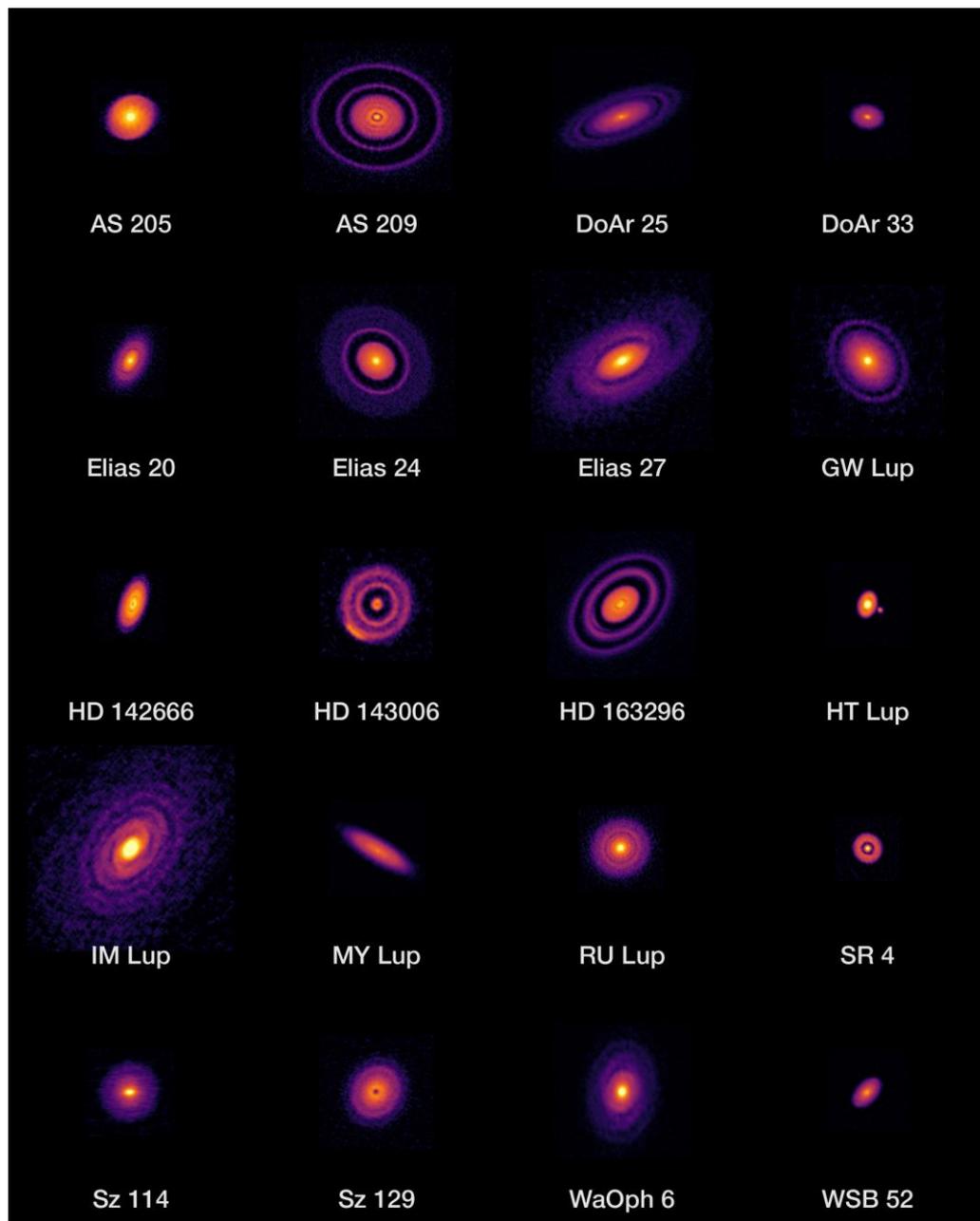


Fig. 4: Imagens de 20 discos protoplanetários obtidas com o ALMA.⁸⁴

As lacunas nos discos observados pelo ALMA são geralmente associadas a planetas recém-formados, interpretadas como regiões orbitais em que a matéria (gás e poeira) foi atraída pelo planeta recém-formado. Também há outros possíveis mecanismos envolvidos na formação dessas estruturas concêntricas, como a formação de uma “zona morta” magnética

⁸⁴ A imagem pode ser acessada em alta resolução no site oficial do ALMA: <https://www.almaobservatory.org/en/press-release/revolutionary-alma-image-reveals-planetary-genesis/> Acessado em 03/02/2020.

(onde o campo magnético da estrela jovem não interage com o disco) ou “linhas de neve”, em que a temperatura é baixa o suficiente para congelar voláteis como a água. Esses mecanismos estão relacionados, de uma forma ou de outra, à formação de sistemas planetários. Por fim, em 2019, foi anunciada observação feita pelo ALMA do que provavelmente é um disco circumplanetário, a partir do qual se formarão satélites ao redor do recém-formado exoplaneta *PDS 70 c* (ISELLA et al, 2019). Estruturas semelhantes às observadas pelo ALMA, “incluindo os efeitos prováveis de planetas ainda no processo de formação”⁸⁵, estão presentes nas imagens de discos protoplanetários produzidas em 2018 com observações no infravermelho com o sistema *SPHERE* (*Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch*), montado no *Very Large Telescope* no complexo do *European Southern Observatory*:

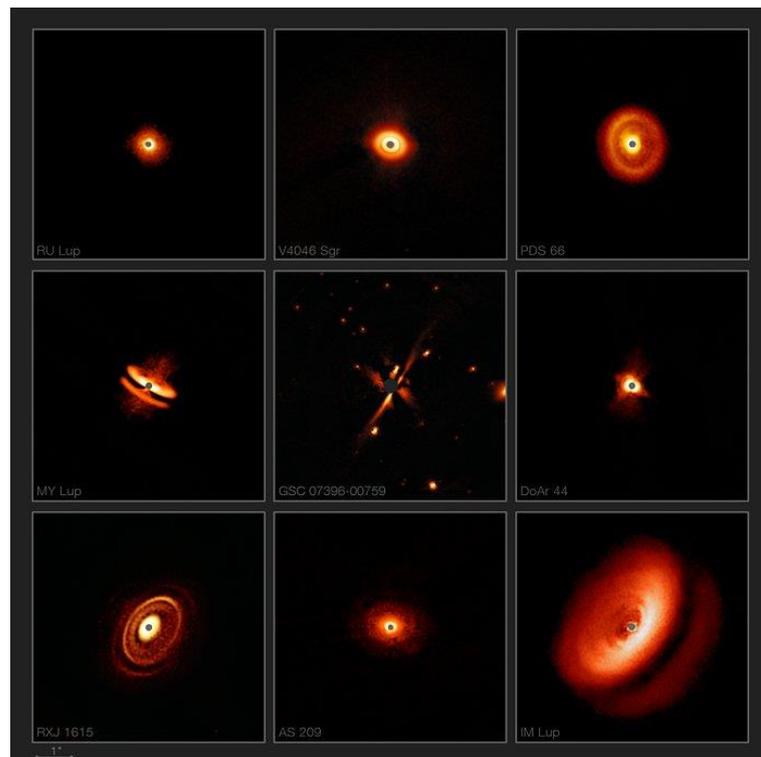


Fig. 5. Discos protoplanetários observados pelo VLT-SPHERE.⁸⁶

⁸⁵ Passagem extraída da descrição da imagem no site oficial do European Southern Observatory (ESO), disponível em: <https://www.eso.org/public/brazil/images/eso1811a/> 03/02/2020.

⁸⁶ A imagem pode ser acessada em alta resolução no site oficial do VLT: <https://www.eso.org/public/brazil/news/eso1811/> Acessado em 03/02/2020.

Em que medida os discos protoplanetários podem ser considerados evidências decisivas, “canos fumegantes” do cenário de formação de planetas como subproduto da formação de estrelas? Em que medida eles podem ser considerados suportes empíricos seguros para as teorias de formação de sistemas planetários dominantes atualmente, que formaram o consenso na década de 1980 e continuam sendo consideradas as melhores candidatas para explicar a origem do sistema solar? O próprio nome das conferências *Protostars and Planets* é um indicativo de que um consenso estava se formando em torno da concepção geral de que planetas são subprodutos da formação de estrelas. Nenhum exoplaneta havia sido descoberto até o ano da primeira edição da conferência (1978) e ainda não havia evidências da existência de discos circunstelares. É possível entrever a expectativa de que a ponte entre formação de planetas e formação de estrelas fosse construída com esses eventos. Mas as observações de discos protoplanetários não constituem um caso de viés de confirmação, a meu ver, porque havia a possibilidade, igualmente consistente com as teorias astrofísicas em voga nesse período, de que estrelas jovens não tivessem discos circunstelares, mas material em formato esférico ao seu redor.

Como Hacking disse num contexto parecido, não desejo com essa interpretação “desconsiderar o fato levantado por N.R. Hanson de que alguém possa ver ou notar um fenômeno somente se alguém tiver uma teoria que faça sentido” (HACKING, 1983, p. 179). Obviamente, o conceito de *disco protoplanetário* possui uma teoria de formação planetária embutida – algo sugerido pelo próprio nome. Em relação a *disco circunstellar*, ao contrário, isso não ocorre – ou, pelo menos, a carga teórica é muito menor, e não se trata de uma teoria planetogônica. Mas penso que as interpretações correntes de que muitos dos discos circunstelares são de fato protoplanetários estão atualmente bastante justificadas (na década de 1980, o caso era muito mais complicado). *Discos* podem ser observados como tais a partir de ângulos diferentes – no sentido de que cada um deles se apresenta a nós num ângulo de inclinação diferente, não que podemos mudar o ângulo de observação, bem entendido. Sua composição química pode ser inferida por análise espectroscópica. O tempo de duração médio desses discos pode ser inferido pela frequência com que são observados em torno de estrelas jovens de diferentes idades e é compatível com os melhores modelos de formação planetária.

Além disso, o impressionante caso de detecção por imagem direta do planeta *Beta Pictoris b* em meio ao disco de detritos de sua estrela hospedeira me parece ser um caso validado pelo “argumento da continuidade controlada” da observação elaborado por Anthony

Quinton, cuja importância para a filosofia da ciência foi resgatada pelo filósofo Silvio Chibeni:

Quinton percebeu que, com uma escolha adequada de instrumentos e espécimes, é possível controlar cada passo da série [de observações] em relação à confiabilidade do suposto instrumento de ampliação. Esse controle resulta da *sobreposição* dos padrões visuais que ocorrem em qualquer par de instrumentos sucessivos: o que é visto com (ou, de maneira mais neutra, *num*) instrumento *n*, em seus níveis superiores de magnificação, também é observado, *em um padrão exatamente semelhante*, no instrumento *n + 1*, em seus níveis mais baixos de ampliação. Na página seguinte, o próprio Quinton se refere a uma "continuidade confirmatória" na situação estudada. O novo argumento poderia, portanto, ser chamado de "argumento da continuidade controlada" (CHIBENI, 2006, p. 396).

No caso de *Beta Pictoris* e seu planeta, temos que a estrela é visível a olho nu; o disco é observado pelo IRAS no infravermelho com uma técnica que ofusca o brilho da estrela; depois, o disco é observado na faixa visível do espectro eletromagnético com o telescópio espacial Hubble; posteriormente, o planeta também é observado, em diferentes comprimentos de onda; essas observações vêm se repetindo ao longo dos anos e se mostram consistentes com uma órbita que se completa a cada 17 anos; as características observadas no disco mostram-se consistentes com uma interação entre o material sólido presente no disco e a órbita do planeta. Dada a relativa proximidade entre *Beta Pictoris* e o sistema solar, o disco pode ser observado por diferentes telescópios, com variado poder de magnificação. Há uma continuidade aparentemente controlada das observações, feitas com o olho humano e por meio de diferentes telescópios e radiotelescópios, em comprimentos de onda diversos.

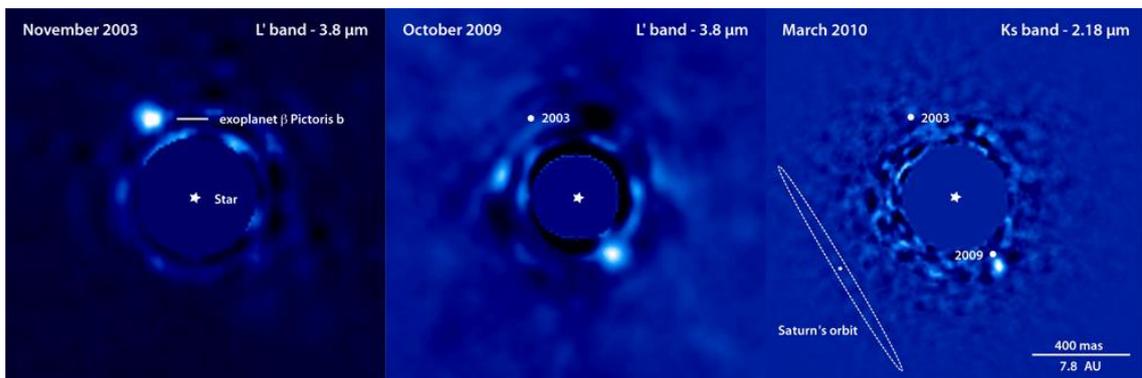


Fig. 6: O planeta *Beta Pictoris b*, observado por imagem direta em diferentes pontos de sua órbita.⁸⁷

⁸⁷ A imagem pode ser acessada com melhor resolução em: <https://phys.org/news/2011-03-giant-planet-orbiting-beta-pictoris.html> Acessado em 03/02/2020.

O planeta *Beta Pictoris b*, por sinal, nos lembra que é preciso compreender os impactos gerados pelo conhecimento de exoplanetas no cenário teórico das planetogonias.

4.4. Planetas extrassolares

A tentativa de descoberta de planetas orbitando outras estrelas tem uma história que remonta ao século XIX, com algumas alegações críveis (que depois foram reveladas espúrias) tendo surgido do começo do século XX em diante.⁸⁸ O primeiro caso de detecção consolidada de exoplaneta ocorreu em 1992. A alegação gerou perplexidade naquele momento, pois o planeta foi descoberto ao redor de um *pulsar* – uma estrela de nêutrons em rápida rotação, remanescente ultradenso de uma supernova. Os pulsares têm períodos de rotação muito precisos, e a existência do exoplaneta foi confirmada através de análise de minúsculas variações no período de rotação da estrela. Não se imaginava que planetas pudessem orbitar um objeto estelar de características tão extremas, por isso a descoberta encorajou a visão de que planetas existem ao redor de estrelas comuns, parecidas com o Sol.

A primeira detecção de um exoplaneta orbitando uma estrela de sequência principal ocorreu em 1995⁸⁹. O anúncio também gerou grande surpresa – nesse caso, por conta de algo relacionado às planetogonias: *51 Pegasi b* é um planeta gigante (possui o equivalente a 150 massas terrestres, ou seja, aproximadamente metade da massa de Júpiter) e orbita muito próximo de sua estrela hospedeira. Como a temperatura na “superfície” desse planeta gigante é muito alta (calculada em mais de 1000 K), ele se tornou um primeiro exemplo de uma classe de planetas que não existe no sistema solar: os chamados Júpiteres quentes (*hot Jupiters*). Esses planetas são relativamente raros – estima-se atualmente que 1%

⁸⁸ Para uma narrativa sucinta mas suficientemente abrangente dessa história, cf. o capítulo “Solar Systems Beyond” em *Life on Other Worlds* (1998), do historiador Steven J. Dick. Nesta seção, me concentrarei em mostrar as articulações entre a ciência de sistemas planetários e as planetogonias.

⁸⁹ O método utilizado para a detecção desse planeta foi a de medição da velocidade radial da estrela, a partir da observação de efeito Doppler nas linhas de absorção da radiação eletromagnética emitida pela estrela. De maneira simplificada, o efeito Doppler observado permite a detecção de variações minúsculas na velocidade radial da estrela, compatíveis com a existência de uma massa planetária ao seu redor. O puxão gravitacional do planeta pode ser inferido, assim como sua massa, período orbital e distância para a estrela. O primeiro sucesso desse método de detecção de exoplanetas deu início, nos anos finais do século XX, a uma série de descobertas de exoplanetas (principalmente de período orbital curto e muito massivos).

das estrelas parecidas com o Sol hospedem um deles (DAWSON e JOHNSON, 2018, p. 177) – mas nos últimos anos do século XX eram os mais comumente detectados.

A literatura científica usa o termo confirmado para se referir aos exoplanetas que constituem a única explicação plausível para os fenômenos observados em suas estrelas hospedeiras (sejam variações na luminosidade de uma estrela, sejam movimentos radiais detectados via efeito Doppler em suas linhas espectrais). Alguns exoplanetas já foram observados por imagem direta, mas a esmagadora maioria é inferida por meio de dados coletados por vários métodos diferentes. A observação de um mesmo exoplaneta por dois ou mais métodos diferentes é um dos elementos que tornam quase inequívoca a sua existência e justificam a confiança nos métodos de detecção. Por exemplo, em 2015, o próprio *51 Pegasi b* foi diretamente observado por sua reflexão da luz da estrela hospedeira, *51 Pegasi* (MARTINS et al, 2015).

A existência dos Júpiteres quentes se tornou um *puzzle* para a astrofísica na virada do milênio, pois não se previa que um planeta com grande massa e período orbital tão curto pudesse existir.⁹⁰ Nesse momento, como a formação *in situ* de um planeta tão massivo e próximo de sua estrela não parecia plausível, o conceito de migração planetária passou a ser incluído no esforço de desenvolvimento da teoria de acreção de planetesimais. O resultado desse desenvolvimento teórico desencadeado pelos Júpiteres quentes é que a migração planetária se revelou um conceito fundamental para compreender a própria origem do sistema solar – principalmente, a dinâmica de formação da configuração atual das órbitas dos gigantes gasosos e gelados, as crateras de impacto na Lua e o cinturão de Kuiper (vide o bem estabelecido *Nice Model* e a hipótese do *Grand Tack*).

A busca pelos exoplanetas avançou rapidamente no século XXI, especialmente a partir do lançamento do telescópio espacial Kepler, em 2007, que possibilitou a detecção de mais de dois mil planetas extrassolares. Nas últimas duas décadas, com a aceleração das

⁹⁰ Na década de 1950, contudo, Otto Struve já havia sugerido que objetos desse tipo poderiam existir e ser detectados via *Doppler shift*, pois não via impedimentos teóricos para a existência de planetas muito massivos com órbita muito próxima de sua estrela hospedeira. “De fato, não é exatamente verdade que *ninguém* esperava [a existência] de Júpiteres quentes. Em 1956, Otto Struve escreveu um curto artigo indicando que a precisão das medições de [efeito] Doppler havia se tornado boa o suficiente para detectar grandes planetas, mas apenas se existissem em órbitas minúsculas. Deixando de lado a questão de como um tal planeta poderia ter se formado, ele percebeu que não há lei da física que proíbe tais planetas de existirem. Seu artigo poderia ter iniciado toda uma nova área da astronomia, mas ao invés disso definiu na obscuridade” (WINN, 2019, grifo do autor). Como já mencionado no capítulo 3, foi Struve quem primeiro estabeleceu a correlação entre a idade e a velocidade de rotação das estrelas – uma descoberta-chave para que o paradoxo do momento angular não fosse concebido como uma característica extraordinária do sistema solar, abrindo caminho para a convicção de que *algum* mecanismo certamente está envolvido na transferência de momento angular do Sol para o disco protoplanetário.

descobertas, vem havendo um entrelaçamento do conhecimento sobre os exoplanetas e as planetogonias. É um processo de articulação entre o que se sabe sobre o sistema solar e outros sistemas planetários e as teorias planetogônicas, num processo de aprofundamento da interconexão da rede de teorias e dados observacionais. Como afirma o autor de um amplo *handbook* sobre exoplanetas, “as observações do sistema solar fornecem *constraints* importantes para teorias e propriedades da formação e evolução dos exoplanetas, ao mesmo tempo em que desenvolvimentos sobre formação e evolução de exoplanetas, principalmente a migração planetária, vêm oferecendo *insights* sobre a arquitetura presente e a evolução do sistema solar” (PERRYMAN, 2011, p. 5).

Embora já existissem estimativas sobre a prevalência de sistemas planetários e planetas terrestres em função do número de estrelas antes das detecções de exoplanetas (e.g. POLLARD, 1979), a torrente de descobertas de exoplanetas vem permitindo análises estatísticas com parâmetros melhor definidos graças aos dados observacionais das pesquisas sobre exoplanetas. É digno de nota que muitas das estimativas anteriores à era de detecção de exoplanetas colocavam na base de sua cadeia argumentativa (implícita ou explicitamente) a teoria de formação planetária assumida como correta. Qualquer alteração na planetogonia podia gerar uma variação em ordens de magnitude no resultado final da estimativa (cf. o quadro de estimativas de frequência de sistemas planetários em DICK, 1998, p. 87; o levantamento de Pollard, citado acima, aceita tacitamente uma origem via colapso gravitacional do proto-Sol e formação planetária num “disco de nebulosa solar”; POLLARD, 1979, p. 654-5).

Agora, as estimativas são geralmente baseadas em análise estatística dos dados observacionais sobre os exoplanetas e podem (devem) produzir impactos nas teorias de formação de sistemas planetários. Um levantamento de 2015, por exemplo, apontou que deve haver em média 2,5 planetas para cada estrela anã vermelha. Anãs vermelhas são estrelas menos massivas e menos quentes do que o Sol. São também as mais comuns: há aproximadamente cem bilhões delas na galáxia. Esse estudo também apontou para a ocorrência de, em média, um planeta na zona habitável por estrela (DRESSING e CHARBONNEAU, 2015).

Além dos Júpiteres quentes, a população de exoplanetas descoberta nos últimos dez anos exhibe uma alta frequência de planetas para os quais também não existem análogos no sistema solar: os chamados super-Terras (os que possuem mais de 1 massa terrestre) e sub-Netunos (aqueles com até 10 massas terrestres – ainda não há fronteira clara entre as duas

categorias). Dentre os mais de quatro mil exoplanetas descobertos atualmente, esses dois tipos são os mais comuns, embora também existam indicativos de uma população considerável de planetas de tipo terrestre (FRESSIN et al, 2013) – os métodos de detecção ainda não são favoráveis à detecção de planetas de menos de uma massa terrestre. Inevitavelmente, isso levanta uma questão sobre o motivo da inexistência de super-Terras ou sub-Netunos no sistema solar, gerando um problema razoavelmente bem definido para as planetogonias.

Outro resultado que pode tornar-se bastante significativo para a elaboração de modelos de formação de sistemas planetários foi publicado em 2017: há uma escassez significativa de planetas entre 1,5 e 2 diâmetros terrestres. Super-Terras e sub-Netunos tendem a existir em duas modalidades: em torno de 1,3 ou 2,4 diâmetros terrestres (FULTON et al, 2017). Essa bimodalidade é mais um problema a ser explicado pelos modelos teóricos. A aparente abundância de sub-Netunos e super-Terras pode ser um indício de que o sistema solar está longe de ser típico, o que pode implicar uma origem repleta de particularidades (embora a prevalência de planetas de massa igual ou menor do que a da Terra ainda dependa da sofisticação dos métodos e aparelhos de detecção de exoplanetas). Apesar disso, a existência de planetas análogos à Terra (planetas de entre 0.75 e 1.5 diâmetros terrestres com período orbital compatível com a chamada zona habitável) parece ser algo relativamente comum: aproximadamente 27% das estrelas F, G e K (ou seja, estrelas na fase de sequência principal de sua evolução) contém um planeta desse tipo (HSU et al, 2019).

No quesito de novidades observacionais que geram problemas para as planetogonias, o resultado mais desconcertante entre os levantamentos estatísticos recentes foi publicado em 2018. Os planetas existentes nos sistemas multiplanetários (com três ou mais planetas) detectados pelo telescópio Kepler são *similares em tamanho*. Isso levou à conclusão de que “é mais provável que cada planeta tenha o tamanho de seu vizinho do que um tamanho extraído aleatoriamente da distribuição de tamanhos de planetas observados” (WEISS et al, 2018). Além disso, os planetas se encontram espaçados com uma regularidade relacionada a seu tamanho. Isto é, quanto menores os planetas, menor é o espaço entre suas órbitas (ibid.). A pista dada pelos modelos de migração de Júpiter e Saturno sugere que a procura por planetas gigantes com grande período orbital nesses mesmo sistemas planetários analisados pode ser significativa para a compreensão da origem do sistema solar. Uma hipótese é a de que esses sistemas simplesmente não possuem gigantes gasosos. Outra, a de que os gigantes não migraram substancialmente para órbitas mais internas durante a formação planetária, pois essa migração pode alterar o espaçamento da órbitas planetárias, bem como a massa e o

tamanho dos planetas internos. Por sua própria natureza, a detecção de planetas com período orbital muito longo é muito mais rara, o que dificulta o teste dessas hipóteses.

Esses estudos recentes sugerem que a integração entre observação de exoplanetas, levantamentos estatísticos e elaboração de modelos teóricos tornou-se mais sofisticada nos últimos anos. Essa integração vem se desenhando como um potente aparato científico para que calibremos a resposta à questão sobre se o sistema solar é típico ou atípico, bem como saber quais processos de formação planetária se aplicam especificamente ao nosso sistema e quais podem ser generalizados. O aumento da articulação entre teorias de formação do sistema solar e a ciência de sistemas planetários – que ainda tem um potencial enorme de progresso na produção de novos dados observacionais – é um dos aspectos mais significativos do cenário teórico atual. Um exemplo claro dessa articulação é o que se pode inferir a partir da observação de alguns exoplanetas pelo método de produção de imagem direta. Essas observações mostraram que a órbitas de planetas conhecidos em discos de detritos (como o *Beta Pictoris b*) não desviam substancialmente do plano do disco. Também foi observada a coplanaridade entre planetas de um mesmo sistema e seu disco de detritos. Essas observações são indícios bastante sugestivos de que esses planetas se formaram a partir (e dentro) do disco protoplanetário, seja pela acreção de núcleo ou por instabilidade de disco (NIELSEN et al, 2019, p. 22).

Descobertas de exoplanetas motivaram a necessidade de desenvolver uma hipótese que já existia na década de 1980, a migração planetária. Por sua vez, a migração planetária fecundou as adaptações teóricas atuais para explicar diferentes estágios da formação do sistema solar, como o *Nice Model* e o *Grand Tack* (este último é especificamente direcionado a explicar o problema da pouca massa de Marte). A diversidade de exoplanetas impactou as planetogonias principalmente “ao identificar uma fase durante a qual a migração planetária é parte comum e inevitável dos estágios tardios de sua formação hierárquica. Por sua vez, a migração causada pelos planetesimais, quando aplicada ao sistema solar, parece nitidamente explicar certos detalhes de sua arquitetura atual e outras características” (PERRYMAN, 2012, p. 288).

Brush finalizou sua trilogia sobre as cosmogonias no limiar da era de descoberta de planetas extrassolares. O historiador estava consciente de que a detecção de exoplanetas provavelmente mudaria alguns dos contornos em que planetogonias se desenvolvem. Até então, as maiores contribuições de definição de *conhecimento de fundo*, condições de contorno e *constraints* estava no campo da astrofísica e da cosmoquímica. Essas áreas vinham

condicionando as teorizações sobre os processos de formação de planetas com o conhecimento da evolução de estrelas, da natureza das nebulosas moleculares, das supernovas, da composição química de meteoritos e suas anomalias isotópicas. Diante desse cenário do início da década de 1990, Brush escrevia que “a ‘evidência’ astronômica [dos exoplanetas] poderá se tornar mais importante na avaliação das teorias – contanto que essas teorias tenham sido desenvolvidas o suficiente para fornecer deduções sobre as órbitas e tamanhos observáveis dos planetas” (BRUSH, 1996c, p. 174). Isso motiva uma pergunta importante: em que medida as teorias atuais produzem essas deduções? Como elas estão se saindo com relação a isso?

A ciência ainda está engatinhando rumo ao mapeamento dos sistemas planetários da Via Láctea. Embora já tenham começado a surgir análises estatísticas sobre a abundância de planetas em função de seu tamanho, massa e período orbital (e.g. HSU et al, 2019), ainda estamos longe de ter dados empíricos suficientes para tirar conclusões seguras sobre quais configurações de sistemas planetários são comuns e quais são raras. Ou, em termos mais significativos para a questão proposta: ainda não é factível avaliar com clareza a abundância relativa de sistemas planetários “normais” (cuja existência pode ser prevista ou explicada por uma dada teoria) e “anômalos” (que são possíveis instâncias de refutação de teorias ou contraexemplos a serem explicados por hipóteses *ad hoc* e modificações teóricas).

A possibilidade de teste de teorias de formação planetária frente aos dados estatísticos e observacionais de sistemas planetários ainda está no começo de seu desenvolvimento, em parte porque os próprios métodos e tecnologias de detecção de exoplanetas ainda estão em franco processo de aprimoramento. Seu estado atual produz um viés observacional que dificulta a tarefa de desembaraçar as abundâncias típicas dos planetas existentes e a dos que apenas podem ser observados – especialmente com relação a planetas de massa menor do que a da Terra e com período orbital relativamente longo. Mas dado o número de estrelas na galáxia e sua variedade, não é descabido concluir provisoriamente que a fauna de exoplanetas e sistemas planetários deve ser constituída com uma grande diversidade de espécies. Os levantamentos atuais já sugerem uma diversidade significativa, ao passo em que o sistema solar vem sendo visto como possuindo uma configuração muito peculiar. O fato é que simplesmente ainda não temos meio seguro de calibrar nossos juízos sobre se o sistema solar é típico ou atípico. Mas isso pode mudar muito em breve com os resultados da missão TESS (a serem anunciados por completo em meados de 2020) e de outros projetos em curso.

Mesmo diante de tudo isso, algo pode ser dito sobre o teste de teorias a partir das deduções que elas produzem e dos sistemas planetários que vêm sendo descobertos. Uma das consequências dedutíveis do modelo de acreção de núcleo é que o processo de formação de Júpiter e Saturno duraria entre 1 e 8 milhões de anos. O artigo de 1996 em que a acreção de núcleo foi proposta deixa claro que essas estimativas resultam das propriedades do sistema solar e “não necessariamente se aplicam a planetas gigantes em outros sistemas planetários” (POLLACK et al, 1996, p. 62). Como vimos, o problema é que o tempo da formação de gigantes gasosos segundo esse processo é desconfortavelmente compatível com um dado empírico e estatístico sobre discos protoplanetários: em geral, eles duram no máximo 10 milhões de anos, com metade deles se dissipando em até 3 milhões de anos. Isso gera um incômodo com a teoria, embora não seja motivo suficiente para descartá-la ou mesmo modificá-la. Por outro lado, a descoberta de um gigante gasoso ao redor de uma anã vermelha (MORALES et al, 2019) lançou dúvidas sobre a hipótese de acreção de núcleo e reavivou o interesse da comunidade científica pela instabilidade de disco como o processo responsável pela formação de gigantes gasosos.

Outra dedução extraída do modelo de acreção de núcleo é a escassez de planetas gigantes de massa intermediária. Mas há um número relativamente alto de planetas gigantes de massa intermediária, inferido a partir de detecções via *microlente gravitacional*. “Essa tensão indica que a formação de gigantes gasosos pode envolver processos que até agora podem ter sido ignorados pelos modelos existentes de acreção de núcleo ou que o ambiente de formação da planetas varia consideravelmente em função da massa da estrela hospedeira” (SUZUKI et al, 2018).

4.5. Simulações computacionais

O uso de simulações na produção de novo conhecimento científico gerou, como esperado, a necessidade de uma nova epistemologia que desse conta de explicar e problematizar o peso epistêmico desses aparatos cognitivos na filtragem de teorias. Trata-se de um recurso cada vez mais utilizado como “teste” das hipóteses planetogônicas. Porém, não entrarei na questão da epistemologia das simulações computacionais. Há um debate intenso atualmente sobre a natureza do suporte que as simulações dão às teorias: seriam idênticas ao suporte empírico? Podem mesmo ser consideradas elementos de avaliação de teorizações?

Isso constitui assunto para pesquisas ulteriores, mas é preciso notar que, ao lado dos experimentos e da análise teórico-conceitual, as simulações computacionais se tornaram um importante auxílio epistêmico das ciências naturais nos últimos cinquenta anos. Atualmente, as simulações são aparatos cognitivos fundamentais para o desenvolvimento de áreas da astrofísica e da cosmologia. Esse cenário não é diferente no campo das teorias de formação de sistemas planetários.

Um dos primeiros cientistas a utilizar simulações computacionais para testar e filtrar as hipóteses de formação do sistema solar foi Cameron, ainda na década de 1960. As simulações também tiveram um papel importante nas escolhas dos cientistas, no sentido de buscar desenvolver a planetogonia de Safronov, especialmente por boa parte da comunidade científica estadunidense. Na década de 1970, após a publicação da tradução para o inglês do livro de 1969, foram realizados pelo menos dois estudos importantes baseados em simulação computacional de variações do modelo de acreção de planetesimais. O primeiro foi publicado em 1976, por Wetherill. O estudo foi baseado em simulações computacionais alimentadas pelas suposições do modelo de Safronov, como a existência de abundante material sólido no disco protoplanetário e a acreção descontrolada (*runaway accretion*) de embriões planetários.

Nesse momento, havia a recente sugestão de que as crateras de Mercúrio detectadas pela *Mariner 10*, assim como a maioria das crateras da Lua, indicavam a existência de um *late heavy bombardment*. As simulações de Wetherill coincidiram com a maioria dos resultados previstos pelo modelo de Safronov. Apesar disso, Wetherill não foi capaz de reproduzir especificamente a formação da Terra e de Vênus. As simulações mostraram que a acreção de planetesimais na região dos dois planetas devia ser mais problemática do que o modelo de Safronov original havia descrito (WETHERILL, 1976).

No final da década de 1970, outras pesquisas baseadas em simulações computacionais sugeriram um cenário semelhante ao da teoria de Safronov, com pequenas modificações. Essas modificações resultaram em simulações para a formação de Urano e Netuno em tempo mais ou menos compatível com a formação do Sol. Como vimos na seção 3.4.4., um dos problemas da teoria de Safronov era o tempo necessário para a formação dos planetas mais externos, muito acima das estimativas da idade do Sol. A abertura dada pela teoria de Safronov às simulações computacionais foi sublinhada por um importante cientista planetário, Stuart Weidenschilling: “as questões de dinâmica [da teoria] são acessíveis ao poder computacional rapidamente crescente; isso em si manteve o modelo de Safronov

dinâmico” (WEIDENSCHILLING apud BRUSH, 1996c, p. 172). Sem computadores, diz o cientista planetário, a teoria teria entrado num beco sem saída na década de 1970.

Esses sucessos parciais, mas significativos, nas simulações computacionais, foram importantes na preferência por modelos de acreção de planetesimais em disco protoplanetário como o núcleo teórico a ser desenvolvido pela comunidade científica nas últimas décadas do século XX. As variações teóricas do *Grand Tack* e do *Nice Model*, por exemplo, basearam-se em simulações extensivas, tanto na elaboração, quanto na avaliação dos modelos, em curso até hoje. Um último e mais recente exemplo é a utilização de simulações computacionais com a hipótese subjacente de formação de sistema planetário em disco ao redor de estrelas com características iguais às observadas pelo projeto DSHARP/ALMA. Os resultados das simulações são comparados com as observações de discos protoplanetários e utilizados para calibrar o grau de confiança na hipótese de que as estruturas anulares do disco são causadas por planetas recém-formados (ZHANG et al, 2018).

Capítulo 5. Entre cataclismos e acreções, as planetogonias progrediram?

[O] que tornam razoáveis as esperanças são apenas conjecturas; elas não são garantidas por nenhuma fé no caminho da história.

Paolo Rossi (1923-2013), *Naufrações Sem Espectador* (1996)

5.1. Uma rota para o progresso

Justificar o progresso científico é tarefa filosoficamente árdua, mesmo nos casos em que a ciência produziu uma explicação consistente e estável sobre uma determinada classe de fenômenos, uma que ainda não tenha sido refutada. Mais complicado, ainda, é elaborar uma justificativa para a intuição de que uma determinada área ainda carece de uma teoria dessa natureza está progredindo. Como julgar que os rumos tomados pela ciência nessa área são os melhores? Pode ser impossível dizer que esse ou aquele rumo é o melhor (e isso também vale para as áreas da ciência que produziram teorias estáveis, robustas, consistentes). Mas não é impossível sopesar o que foi feito numa determinada área até aqui e adotar um ponto de vista relativo: é possível argumentar que o rumo tomado é melhor do que outros já trilhados e diagnosticados como becos sem saída.

Em que sentido, então, seria possível sustentar a intuição de progresso das ciências dedicadas à compreensão de formação de sistemas planetários? O conceito de correspondência ou de aproximação à verdade, especialmente nesses casos que envolvem muitos insucessos teóricos, contém armadilhas. Também é bastante difícil se essa argumentação partir na direção de sustentar que a área caminha na direção de acúmulo de conhecimento. Na minha interpretação, há uma combinação de falibilismo e de uma abordagem sobre o progresso científico centrada na capacidade de definição e solução de problemas. Essa combinação tem a vantagem de escapar das armadilhas da necessidade de comprovar o aumento da verossimilhança e justificar o progresso epistêmico (i.e. progresso

pelo acúmulos de conhecimento). A abordagem baseada na capacidade de uma área em solucionar problemas adotada aqui é de inspiração laudaniana, mas Laudan não basta: é preciso adicionar à ideia de solução de problemas o aumento da capacidade de formulação dos problemas, como proposto por Shan. As ciências de formação de planetas progrediram não apenas porque hoje soluciona alguns problemas, mas também porque hoje distingue e define muito melhor os seus problemas, permitindo que diversas áreas especializadas contribuam para a elucidação de parcelas da questão central sem que se exija a elaboração de uma explicação global e consistente que dê conta de todas as características do sistema solar. Os cientistas dos últimos trinta anos não tentaram superar uma barra tão alta. Os objetivos tenderam a ser mais modestos: formular e solucionar problemas específicos.

A abordagem falibilista que adoto em conjunto com a interpretação funcional do progresso é a de Haack, com sua metáfora de palavras-cruzadas (que não é perfeita, mas é um mapa interessante), incorporando as noções de conhecimento de fundo, de *acceptance-status* e *warrant-status* de alegações teóricas basilares, como a de que os planetas são subprodutos da formação de estrelas. Metaforicamente falando, as observações de discos protoplanetários, de exoplanetas e de nebulosas moleculares permitiram que algumas das respostas horizontais que cruzam as planetogonias nas palavras-cruzadas da investigação empírica científica fossem obtidas e sugerissem o caminho para que seja completada a resposta do eixo vertical.

Ian Hacking, em *Representing and Intervening*, mostrou satisfatoriamente que o lado empírico das investigações científicas têm certa autonomia, ao contrário das interpretações mais centradas em compreender o progresso científico pela avaliação das formulações teóricas, como as de Lakatos e Kuhn. Chalmers também contribuiu para mostrar que, em certa medida, as observações podem ser consideradas objetivas. Não é exagero afirmar, portanto, que o lado empírico, observacional, tem orientado boa parte das teorias de formação de sistemas planetários com seus dados observacionais sobre estrelas jovens, discos protoplanetários e exoplanetas.

O falseacionismo popperiano, sem que seja tomado como critério para definição de quê precisamente consiste o conhecimento científico, serve satisfatoriamente para que seja possível perceber que aprendemos algo sobre o mundo quando determinadas formulações teóricas são refutadas. Conjecturas robustas é o que os melhores filósofos e cientistas vêm fazendo desde que decidiram encarar o problema da origem do sistema solar, num esforço que remonta a Descartes. Na maior parte do tempo, esses pensadores e investigadores do mundo natural não puderam cotejar suas formulações cosmogônicas com dados observacionais

externos ao sistema solar. Mas, agora, podem. E o resultado disso é que a comunidade científica tomou um rumo definido: considerar que os planetas são consequências naturais da formação de estrelas.

A pluralidade de teorias é articulada por Valter Bezerra como algo que pode ser desejável e formando um sistema coerente, ainda que inconsistente. Essas formulações são próximas da ideia de consenso no dissenso (concordamos em discordar em muitos detalhes, mas concordamos que há uma base a partir da qual os problemas passam a ser tratáveis, atacáveis de ângulos diferentes, com abordagens diferentes), que avalio ter ocorrido entre as planetogonias na segunda metade do século XX. É impressionante como as teorias derivadas das várias áreas envolvidas na explicação da formação de sistemas planetários coincidem em suas formulações basilares mesmo partindo de ângulos diferentes (cosmoquímica, astrofísica, astronomia planetária, etc.), ao passo em que o campo preserva uma capacidade muito grande de produzir explicações alternativas para detalhes diversos em problemas específicos.

A intuição de que houve algum progresso nas planetogonias, para quem as acompanha desde as primeiras descobertas de planetas extra-solares, não está desencaminhada por uma ideologia científicista, portanto. Ela só é difícil ser apreendida e justificada. Mas as avaliações céticas do progresso na área, motivadas pela história da ciência e pela indução pessimista, não têm boa sustentação. Penso que há uma justificação não inteiramente formalizável mas plausível, intuitiva, de que está havendo progressos nas ciências de formação planetária.

*

Estaríamos em posição melhor, em 2020, em comparação com os cientistas do passado – digamos, os do final do século XIX – quanto à compreensão de aspectos fundamentais do problema da formação do sistema solar? Em meados da década de 1990, Brush respondia a essa questão com um decidido *não*. Hoje, 2020, com imagens de *proplyds* (Hubble), discos protoplanetários (DSHARP/ALMA), e mais de quatro mil exoplanetas detectados por diferentes métodos e instrumentos, me parece difícil não intuir que as ciências envolvidas na investigação e na compreensão da formação de sistemas planetários progrediram sensivelmente. O problema é como justificar filosoficamente essa intuição, especialmente se levarmos em consideração que ainda não foi atingido o principal objetivo da

área: produzir uma teoria que ligue consistentemente todos os pontos da cadeia causal – de nebulosa molecular ao sistema planetário.

Neste capítulo, sustento duas teses distintas. A primeira é a de que *a resposta negativa de Brush não estava plenamente justificada em 1996 e certamente não se encontraria nem um pouco justificada hoje* (arrisco dizer que o próprio Brush não as sustentaria dado o contexto atual). O ceticismo do historiador parece depender de uma caracterização inadequada das oscilações teóricas do campo, motivada por uma categorização das teorias planetogônicas que, aos poucos, deixou de fazer sentido durante a segunda metade do século XX. Brush usa a metáfora de um pêndulo para justificar seu posicionamento cético: teria havido, segundo o historiador, um vai e vem teórico com período de oscilação cada vez mais curto. A tônica da história das planetogonias no século XX, até mesmo durante e após a era de exploração espacial, seria a incapacidade de responder à questão mais elementar do problema. Argumento que a metáfora pendular é enganosa e dificulta uma precisa avaliação do progresso na área. A razão disso é que essa representação está baseada numa categorização (a distinção entre monismo e dualismo) que funciona relativamente bem até a metade do século XX, mas que se torna inapropriada para o cenário teórico constituído a partir daí.

A segunda tese é a de que no final da segunda década do século XXI, em comparação com todo o período anterior à década de 1980, *é possível sustentar que estamos em posição melhor para compreender o problema da formação do sistema solar e de outros sistemas planetários*. Após duas décadas e meia de detecções de exoplanetas e quase quatro décadas de observações de discos circunstelares, seria insensato concluir que não estamos em posição melhor do que os cientistas do final do século XIX para compreender a origem dos planetas do nosso sistema e sua relação com a origem do Sol, ou para entender as possíveis relações entre as origens do sistema solar e a dos numerosos outros sistemas planetários, com os quais os cientistas oitocentistas e novecentistas só podiam sonhar. Em linhas gerais, com o aporte empírico das observações astronômicas os cientistas de hoje não precisam se preocupar em elaborar, sofisticar e testar modelos de formação de sistemas planetários que dependa de condições e processos extraordinários, incomuns, para que planetas se formem ao redor de estrelas. De fato, é isso o que observamos na área: a comunidade científica está envolvida na elucidação de problemas ligados à formação de conjuntos estrela-planetários a partir de processos contínuos. Não é nada surpreendente que isso tenha ocorrido.

Na verdade, não precisamos ir tão longe no passado para perceber o progresso das investigações na área: graças a avanços tecnológicos e um adensamento da rede teórica,

conhece-se muito mais sobre a formação de planetas hoje do que em meados da década de 1970, quando o jovem Alan Boss destrinchou a obra seminal de Victor Safronov e decidiu que contribuiria para saber se a planetogonia do cientista russo estava realmente certa ao estudar um dos aspectos mais nebulosos da área: a física de formação de estrelas (BOSS, 2019, p. 125-6).

*

Não defendo a aplicação unívoca desta ou daquela metateoria da ciência na análise filosófica da história das planetogonias, mas é possível fazer aproximações. É possível definir algumas balizas em relação às quais são frutíferas tanto as aproximações quanto os contrastes. Por exemplo: podemos falar em *crise*, no sentido kuhniano, das planetogonias do final do século XIX até a década de 1960, sem que com que isso eu me comprometa com a metateoria da ciência contida na *Estrutura* – a ideia de incomensurabilidade, por exemplo, é pouco fértil para gerar qualquer *insight* significativo sobre esse período. De fato, não identifiquei qualquer existência de incomensurabilidade na história das cosmogonias desde Laplace, muito provavelmente porque as teorias de formação do sistema solar *não* são paradigmas em sentido kuhniano.

Seguindo um uso mais livre das metateorias da ciência, é possível aproximar as escolhas teóricas da comunidade científica do período entre a publicação das pesquisas de Safronov até hoje com a ideia de progressividade das tradições de pesquisa de Laudan, sem que com isso se deva subscrever à necessidade de comparação entre as diferentes tradições com relação às suas taxas de solução de problemas, algo que considero objetivamente intratável, ao menos nesse caso específico das planetogonias. O falseacionismo popperiano, por sua vez, vem bem a calhar para explicar o abandono das teorias de encontro estelar, mas não ao restante da história.

Hoje, a formação de planetas em órbita de suas estrelas hospedeiras é vista como parte de uma mesma cadeia de eventos que ocorre naturalmente e ordinariamente. Vários estágios dessa cadeia são mais bem conhecidos e mais seguramente ancorados em dados empíricos. Sobre alguns outros detalhes, há pluralidade de hipóteses. De qualquer forma, continuando o exposto no capítulo 4, compo uma imagem do desenvolvimento do campo

que apresenta justificativas plausíveis para a intuição de que houve uma forma de progresso científico na busca pela compreensão da formação do sistema solar e de sistemas planetários.

5.2. O pêndulo de Brush

Um aspecto que pode moldar a avaliação do progresso de um campo de investigação científica é a natureza da pergunta feita ao passado. Se um filósofo ou um historiador interroga o passado do campo orientado por categorias inadequadas ou anacrônicas, corre o risco de produzir descrições distorcidas de seu desenvolvimento histórico. É o que, sustento, ocorreu com a análise de Brush num aspecto bastante específico.

Na abertura de *Nebulous Earth*, num breve resumo que sublinha a impermanência das diversas teorias de formação do sistema solar nos últimos dois séculos, Brush recorre à dicotomia monismo-dualismo para representar a história desse campo de investigação com um movimento pendular. Num momento, uma explicação monista é aceita; noutro, uma dualista. “A escala de tempo para reversão da resposta [sobre como o sistema solar se formou] fica cada vez mais curta quando chegamos mais perto do presente, dando-nos muito pouco motivo para pensar que a resposta de hoje ainda será considerada correta amanhã” (BRUSH, 1996a, p. 4). “É *por isso* que afirmei que o problema não está resolvido” (ibid., grifo meu), conclui o historiador. Em *Fruitful Encounters*, também encontramos a ideia de oscilação pendular, baseada na dicotomia monismo-dualismo, para caracterizar a história das cosmogonias no século XX: “um pêndulo oscilando com um período cada vez menor” (BRUSH, 1996c, p. 82).

Embora Brush afirme apenas notar uma ausência de progresso *cumulativo* na área das cosmogonias (deixando em aberto, portanto, a possibilidade de que alguma forma de progresso tenha sido feita, embora não especifique que forma de progresso seria essa), sua conclusão é cética quanto aos avanços da ciência produzida sobre as origens do sistema solar no século XX: “os astrônomos não estão mais certos em 1995 do que estavam em 1895 de que o princípio monista está correto, ainda que o conhecimento de cada aspecto do sistema solar tenha aumentado em várias ordens de magnitude” (BRUSH, 1996c, p. 82).

Uma das consequências da adoção da distinção entre teorias monistas e dualistas, antes da detecção de exoplanetas, é a de que as teorias de formação do sistema solar eram a única maneira de calibrar as possíveis respostas à questão da pluralidade de sistemas

planetários – tendo, portanto, repercussões importantes para questões sobre a possibilidade de vida extraterrestre. Assim, se a resposta pendesse para o lado monista, motivaria um entusiasmo com a ideia de pluralidade de mundos habitados; se pendesse para o lado dualista, conclusões mais céticas quanto à possibilidade de vida extraterrestre poderiam ser avançadas com justificativa ancorada na ciência.⁹¹ Isso ilustra uma das razões para que a categorização de teorias fosse considerada importante nesse período anterior ao conhecimento de discos protoplanetários e planetas extrassolares.

Brush escreveu suas conclusões céticas no início da década de 1990, no limiar da era de detecção de exoplanetas. Sua percepção de aceleração do movimento pendular entre hipóteses monistas e dualistas fez com que minimizasse o que os próprios cientistas da área lhe disseram: “na última vez em que consultei os *experts*, eles estavam bem convencidos de que a origem do sistema solar é monista” (BRUSH, 1996a, p. 3). Ele não esclarece se realmente formulou perguntas aos cientistas nos termos da dicotomia ou se apenas perguntou se eles pensavam que a formação dos planetas estava intimamente ligada à formação do Sol. Como ficará claro durante dessa exposição, essa sutileza é muito importante.

O movimento pendular com período de oscilação acelerado é o resultado de uma ilusão causada pela utilização da própria dicotomia monismo-dualismo para caracterizar um período em que essa distinção passou a deixar de fazer sentido: a história das planetogonias a partir da década de 1940. A distinção das teorias entre monistas e dualistas gerou uma percepção exagerada de instabilidade das planetogonias quanto a um aspecto considerado central (sua capacidade de calibrar a possibilidade de pluralidade dos sistemas planetários), em detrimento dos indícios de que a ciência avançou de maneira sensível nessa questão pelo menos desde a década de 1970. Embora essa dicotomia seja útil para a descrição da história até o abandono das teorias do encontro estelar, o cenário se tornou muito mais complexo a partir dos anos 1940, das teorias de Alfvén e Schmidt adiante. O conhecimento de astronomia e astrofísica desenvolvido ao longo do século XX gerou a noção de que a formação de estrelas e planetas deveriam ser compreendidos no contexto de sistemas muito maiores, as nebulosas moleculares e, em última instância, as galáxias. Na década de 1970, o desenvolvimento de hipóteses planetogônicas respondeu a isso.

⁹¹ Essa associação não era assim tão linear, contudo. Por exemplo: em 1943, Jeans sustentava que sua *tidal theory* não estava em contradição com a ideia de pluralidade de sistemas planetários porque sua análise estatística mais recente dos encontros estelares indicavam que podiam ser relativamente frequentes, ainda que os sistemas planetários resultantes fossem bem mais raros do que os resultantes da hipótese nebular (JEANS, 1943).

Em suma, se essa dicotomia for aplicada a toda a história das planetogonias com o objetivo de avaliar seus progressos, a imagem do desenvolvimento histórico da área parecerá pendular. A categorização é central na elaboração dessa imagem de oscilação teórica porque ela molda a avaliação do historiador sobre a estabilidade ou instabilidade de toda uma área. Por utilizar uma categorização inadequada para as teorias da segunda metade do século XX, Brush concluiu pela ausência de progresso da compreensão científica sobre as origens do sistema solar. Vejamos como isso ocorreu.

5.2.1. Problemas gerados pela dicotomia monismo-dualismo

A categorização das teorias de formação do sistema solar utilizada por Brush (e em boa parte do meu exame histórico do tema, onde julguei ser adequada para a narrativa histórica, i.e. até a década de 1940) é uma versão crua da distinção adotada por Cameron e ter Haar em sua revisão histórica de 1962. Nesse artigo, a distinção entre teorias monistas e dualistas é atribuída ao engenheiro francês Émile Belot (1857-1944). Belot propôs, nas primeiras décadas do século XX, uma hipótese sobre a formação do sistema solar que ele próprio chamou de *dualista* pois envolve a interação entre duas entidades distintas como evento gerador dos planetas: uma nebulosa em repouso e um turbilhão ou vórtice em tubo (*tube-turbillon*)⁹². Belot apresentou sua hipótese em contraposição ao que chama de teorias *monistas*: aquelas em que sistemas planetários formam-se por si mesmos sem a necessidade de interação com uma entidade externa.

Cameron e ter Haar sobrepuseram à categorização de Belot a importante distinção entre *sistemas fechados* e *abertos*. Nos sistemas abertos, afirmam, “a interação entre o Sol e algum corpo externo deve ter sido o primeiro passo nos desenvolvimentos que resultaram no sistema planetário.” Nos fechados, “[o sistema planetário] é um desenvolvimento do Sol e possivelmente de um invólucro solar, que começa com um proto-Sol no lugar do próprio Sol” (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 2). Apesar de servir a uma caracterização retrospectiva (que se pode aplicar à descrição histórica para distinguir teorias do passado), essa distinção reelaborada por Cameron e ter Haar servia para delinear *abordagens* distintas sobre o

⁹² É interessante como algumas ideias que remontam a Descartes aparecem na história muito posteriormente. Depois da teoria de Belot, a teoria incomparavelmente mais famosa de von Weizsäcker, de 1943, também recorreu à ideia de vórtices (em disco turbulento) para explicar a formação dos planetas.

problema da origem do sistema solar. Para esses cientistas, “é imediatamente claro que há mais liberdade nas teorias dualistas” (i.e. nos sistemas abertos) (ibid.). Essa é uma nuance que não deve ser negligenciada.

A categorização adotada por Brush não contém explicitamente a distinção entre sistemas abertos e fechados. Apesar de creditar a categorização a Cameron e ter Haar e mostrar-se ciente de que se trata de uma distinção atribuída por ambos a Belot, o historiador usa como critério a própria distinção de Belot e não a versão reelaborada, sem maiores esclarecimentos.⁹³ Isso é fundamental: se a distinção entre sistemas abertos e fechados tivesse sido utilizada por Brush para avaliar o desenvolvimento histórico da ciência do século XX, ficaria claro que houve uma tendência, sem movimento pendular, em direção à concepção da origem do sistema solar como um sistema *aberto*. Isso pode parecer contraditório frente à afirmação de Brush sobre a convicção dos cientistas do início da década de 1990, de que a origem do sistema solar era *monista*. Mas não: apenas revela que a dicotomia monismo-dualismo é inadequada para entender o desenvolvimento histórico da área. O consenso que emergiu ao longo da segunda metade do século XX foi o de que o sistema solar não se formou isoladamente do *ambiente*, a nebulosa molecular e sua inserção na galáxia. Ao final do século XX, mantinham-se muito incertos o grau e a natureza específica dessa interação entre o nosso sistema planetário embrionário e o ambiente, mas era certo que essas interações haviam ocorrido. Logo, a origem do sistema solar deveria ser compreendida como um sistema aberto. Seguindo a apropriação de Belot por Cameron e ter Haar, teríamos então um consenso *dualista*. Mas isso não quer dizer que se deva concluir que houve consenso em torno do dualismo, especialmente aquele concebido por Belot e adotado por Brush e Woolfson.

As hipóteses sobre os processos de formação do sistema solar que constituíram o consenso das últimas décadas do século XX são muito mais próximas das ideias de Kant e Laplace do que das de Chamberlin ou Jeans. A concepção da origem dos planetas em disco protoplanetário, entendido como um subproduto natural da formação da estrela, constituiu o bojo desse consenso. Isso *não* quer dizer que os modelos atuais sejam exemplares de uma linhagem que remonta a Kant e Laplace. Mas se apresentam em contraste com explicações um tanto extravagantes e que aparentam grande dose de arbitrariedade, como a explosão de uma

⁹³ A categorização continua sendo adotada acriticamente. Woolfson estabelece uma relação de filiação no campo monista entre a teoria original de Laplace e o que chama de *Solar Nebula Theory*, a teoria de Safronov, Wetherill e suas variações. No campo dualista, a *tidal theory* de Jeans aparece como introdutora de uma ideia que o próprio Woolfson adaptaria para elaborar a sua *capture theory* (WOOLFSON, 2000; 2015). Perryman também afirma que a atual *Solar Nebula Theory* é “monista” (PERRYMAN, 2011, p. 224).

hipotética companheira do Sol em sistema binário original (uma das teorias de Hoyle) ou a captura de uma protoestrela pelo Sol já formado (a teoria de Woolfson). A partir das teorias do encontro estelar do começo do século XX, as mais frequentes hipóteses que poderiam ser classificadas como dualistas foram variações como essas, em que a formação de planetas depende de um gatilho um tanto fortuito e raro.

É por isso – por conceberem a formação dos planetas em disco protoplanetário, um subproduto da formação das estrelas – que os cientistas da área responderam a Brush que estavam convencidos de uma origem “monista”. Não porque rejeitassem que a origem do sistema solar deveria ser compreendida como um sistema aberto, mas porque rejeitavam que os planetas precisam de um evento inicial externo incomum para se formar. Um dos motivos usados por Brush para minimizar esse consenso é o de que o gatilho de supernova foi considerado importante para compreender o estado inicial da nebulosa solar entre 1976 e 1984, rejeitado depois disso e reavivado na década de 1990 (BRUSH, 1996a, p. 4). O gatilho de supernova pode enriquecer a nebulosa molecular com materiais pesados e causar a instabilidade gravitacional que resulta no início da formação de estrelas, mas não constitui o processo que determina se uma estrela terá disco protoplanetário e, posteriormente, um sistema planetário. Esse aspecto específico não foi alterado pelo gatilho de supernova, por isso as teorias de acreção em disco protoplanetário continuaram sendo desenvolvidas sem maiores perturbações mesmo quando o gatilho de supernova foi aceito por grande parte da comunidade científica. Isso constitui mais um motivo para compreender por que os cientistas do início da década de 1990 mostravam-se convencidos de uma origem monista, no sentido de que “planetas são subprodutos da formação do Sol”, não de um “sistema fechado”.

Além dessa confusão, a dicotomia monismo-dualismo causa a injustificada percepção de que os períodos de “aceitação” e “rejeição” do gatilho de supernova gerou um vai e vem entre concepções monistas e dualistas, i.e. uma instabilidade quanto a questões fundamentais. É, claramente, uma avaliação distorcida da história da formação de consenso na área, que caminhou tanto na direção de se conceber a origem do sistema solar como um sistema aberto, quanto na direção de se conceber os planetas como subprodutos da formação do Sol.

Em suma, a confusão – o consenso parece ser ao mesmo tempo monista e dualista, o que é um contrassenso – ocorre por conta da utilização não muito rigorosa de um critério anacrônico de distinção teórica. Darei exemplos, adiante, de outras categorizações elaboradas no século XX. Elas servem para ilustrar o fato de que havia formas um pouco menos

problemáticas de categorizar as planetogonias e que não produziram a confusão e a distorção histórica causadas pelo uso da distinção monismo-dualismo.

*

A distinção entre monismo e dualismo não foi a única categorização existente no século XX. Em 1968, numa revisão de algumas das mais conhecidas teorias de formação do sistema solar até então, o astrônomo Tibor Herczeg distinguia três classes de teorias, baseadas em um critério cronológico: A) quando os planetas se formaram, o Sol já era uma estrela de sequência principal estável com estrutura similar à apresentada atualmente; B) durante a formação dos planetas, o Sol estava em fase final de contração, um pouco antes de entrar na fase de sequência principal; C) a evolução dos planetas começou quando o (proto-)Sol ainda estava em fase inicial de formação, provavelmente muito extenso, sem que houvesse ainda forte condensação central, ou talvez até antes disso (HERCZEG, 1968, p. 186). Herczeg classifica as teorias de captura (como a hipótese inicial de Alfvén e a de Schmidt) e as de encontro estelar como teorias de classe A. A teoria de Laplace é categorizada por Herczeg como de classe B, e a de Kant, como de classe C.⁹⁴

Schmidt, na edição de 1958 de suas *Four Lectures*, também propôs uma categorização para organizar sua revisão das teorias até então. O critério adotado pelo fundador da escola russa de cosmogonia baseia-se em “de onde o material para os planetas é tirado”. Schmidt também distingue três classes: na primeira, “o Sol e os planetas vieram a existir aproximadamente ao mesmo tempo e de uma única massa” (na qual Schmidt inclui Laplace-Kant, von Weizsäcker, Kuiper, Urey); na segunda classe, “[teorias] que tomam o material para os planetas de um Sol já existente” (aqui entram as teorias do encontro estelar de Jeans, Jeffreys e Chamberlin-Moulton); na terceira, “aquelas que tomam o material para os planetas de matéria interestelar logo após a formação do Sol” (nessa categoria encontra-se a primeira teoria de Alfvén, e segundo Schmidt, a dele próprio) (SCHMIDT, 1958/2001, p. 80). “Está claro que nenhuma classificação pode ser exaustiva”, diz Schmidt, apontando que há tipos intermediários [de teorias]: esse seria o caso de uma das teorias de Hoyle (a versão que

⁹⁴ Essa categorização das teorias de Kant e Laplace é anacrônica (o critério é baseado na evolução do Sol, de protoestrela a sequência principal, e isso poderia ser plenamente aplicável a teorias a partir da década de 1930, quando as pesquisas revolucionárias de Eddington sobre evolução estelar já tinham vindo à tona).

postula a explosão de uma hipotética estrela companheira do Sol num sistema originalmente binário) (ibid.). Em consonância com o conhecimento científico estabelecido naquele momento histórico, Schmidt considera que nenhuma das teorias das primeiras duas classes dão conta de explicar o paradoxo do momento angular (idem, p. 81).

Herczeg, Schmidt, Cameron e ter Haar não utilizam suas categorias para justificarem qualquer avaliação sobre se e como a área das planetogonias progrediu.⁹⁵ Essencialmente, a categorização de teorias cumpre um papel de sistematização que serve a propósitos eminentemente descritivos, facilitando a tarefa de distinguir características importantes das teorias por parte de um cientista que recorre à história do campo para propor novas ideias, à luz do que havia sido considerado ultrapassado ou desacreditado. Ajudado pelo mapa da categorização, um cientista poderia extrair consequências sobre questões relacionadas à universalidade ou às particularidades do processo de formação do sistema solar em relação às outras estrelas e sistemas planetários (e.g., teorias monistas teriam apelo mais universalizante enquanto teorias dualistas enfatizariam a raridade ou a atipicidade do sistema solar). No caso da análise de Herczeg, suas categorias foram utilizadas para facilitar a escolha por um caminho teórico considerado mais profícuo para a pesquisa. Herczeg escolheu desenvolver um conjunto de “*working hypotheses*” de classe B por razões práticas: era mais difícil avaliar a adequação das hipóteses de classe C pois a astrofísica da época ainda não tinha uma teoria bem estabelecida sobre os estágios iniciais de formação de uma protoestrela, enquanto havia avançado bastante na compreensão do comportamento de estrelas jovens, já formadas mas em estágio anterior à sequência principal (HERCZEG, 1968, p. 186).

Nesse sentido, a categorização serve a um propósito científico prático. Em contraste, como já dito, quando aplicada para compreender o desenvolvimento histórico de toda uma área de investigação científica, a adoção de uma categorização rígida pode gerar distorções e desorientar o olhar do historiador ou do filósofo. Essa distorção pode até mesmo tornar relevantes determinados aspectos de menor importância e diminuir a importância de recursos teóricos, conceituais e empíricos que se mostraram frutíferos. Proponho um breve estudo de caso para sustentar essas afirmações.

A primeira hipótese cosmogônica de Alfvén, publicada em 1942, pressupõe a captura de diferentes nebulosas (de gás e de poeira) pelo Sol – encaixa-se, portanto, na

⁹⁵ Há outras propostas de categorização, mas o foco desta seção não é esgotá-las nem buscar adotar uma delas; trata-se, apenas, de mostrar que a categorização mais comum – a dicotomia monismo-dualismo – produz distorções históricas se aplicadas à história das planetogonias a partir da metade do século XX.

categoria dualista. Um ano depois, o cientista sueco propôs que os planetas seriam formados a partir de “matéria interestelar invasiva” (ALFVÉN, 1943). Na década de 1970, junto com Svante Arrhenius, Alfvén adotou um caminho diferente: “não nos baseamos em quaisquer suposições iniciais acerca do Sol primitivo ou sua história, exceto que durante a era *hetegônica* ele existia e estava cercado por plasma” (ALFVÉN e ARRHENIUS, 1976, p. 8, grifo meu). Apesar de Alfvén e Arrhenius não recuarem para um estado inicial da matéria que teria formado o Sol e os planetas, o uso do termo *hetegônico* é revelador: significa “geração de companhia” e foi usado pela primeira vez por Alfvén em sua *lecture* de aceitação do Prêmio Nobel em 1970. O contexto revela mais do que a razão da escolha pelo termo:

O estudo da sequência de processos pelos quais o sistema solar se originou tem sido frequentemente chamado de cosmogonia, um termo que, entretanto, é usado com muitas outras conexões. Como a origem do sistema solar é essencialmente uma questão de formação repetida de corpos secundários ao redor de um corpo primário, o termo *hetegonia* foi sugerido. (ALFVÉN, 1970, p. 310, grifos meus)

No mesmo discurso, além de obviamente considerar a física de plasma algo central para entender os primeiros estágios de desenvolvimento do disco protoplanetário, Alfvén mostrava o quão incorporada ao *framework* planetogônico setentista estava a concepção de acreção de planetesimais via colisões mais ou menos inelásticas (ALFVÉN, 1970, p. 312), algo que Safronov havia reintroduzido com sucesso para não mais deixar o horizonte dos cientistas debruçados sobre o problema.

O caminho de desenvolvimento teórico percorrido por Alfvén pode servir para ilustrar o estado incerto do conhecimento científico, mas não nos autorizaria a interpretar sua história como essencialmente oscilante em relação a questões fundamentais e, por isso, como não tendo feito qualquer progresso. Mais importante do que essa oscilação entre diferentes suposições sobre o estado inicial do processo de formação do sistema planetário é o desenvolvimento contínuo do argumento central de Alfvén para a explicação do paradoxo do momento angular: o mecanismo de freio magnético. Aplicado pelo cientista sueco às hipóteses cosmogônicas, o conhecimento sobre magneto-hidrodinâmica foi um dos mais importantes aportes teóricos na tentativa de solução do paradoxo da distribuição do momento angular, e continua sendo um dos processos considerados pela comunidade científica como provavelmente responsáveis pela correlação entre alta rotação de estrelas muito jovens e a baixa rotação de estrelas mais maduras.

De maneira parecida com o que ocorreu com o conceito de planetesimais – elaborado por Chamberlin no conjunto de uma teoria abandonada no final da década de 1930, mas incorporado aos modelos atuais sobre a formação de planetas – o conceito de freio magnético foi utilizado por Alfvén no conjunto de uma teoria pouco frutífera (a captura de nebulosas) mas foi incorporado ao conhecimento atual sobre interações entre plasma e magnetismo, útil para a compreensão da evolução de estrelas e de seus discos circunstelares.

O paradoxo do momento angular também existe nos sistemas de satélites dos gigantes gasosos – Júpiter tem velocidade de rotação menor do que a esperada dado o processo de contração gravitacional da matéria que o formou. O conceito de freio magnético pode ser utilizado para explicar a transferência de momento angular dos gigantes gasosos para seus maiores satélites no período de sua formação (BATYGIN, 2018). Em 1943, Alfvén já havia sugerido sua aplicação para a formação dos satélites jovianos e saturnianos, “que devem ter sido gerados da mesma forma que os planetas” (ALFVÉN, 1943, p. 721), com papel preponderante da magneto-hidrodinâmica nos estágios iniciais. No mesmo artigo, comentando uma suposta descoberta de dois planetas extrassolares (posteriormente considerada espúria), Alfvén apresenta uma versão ligeiramente modificada de sua cosmogonia original (que supunha a captura de nebulosa). Segundo essa versão, os planetas teriam se formado por “matéria caindo em direção ao Sol a partir do espaço interestelar” (ibid.).

Segundo a dicotomia monismo-dualismo, essa matéria constituiria uma entidade externa à formação da estrela, o que faria dessa hipótese um exemplar dualista. Porém, o cenário se coaduna com o que Brush categorizaria como monista (em que os planetas se formam por si mesmos, junto com as estrelas). Na visão de Alfvén os satélites jovianos e saturnianos devem ter se formado a partir de “matéria invasiva provavelmente originada de uma nuvem de gás que deve ter circundado o Sol”. Essa “matéria invasiva”, do disco circunstelar ao redor do Sol em direção ao sistema joviano, é análoga à matéria do meio interestelar que Alfvén postula como aquilo que dá início à formação dos planetas. Em outras palavras, a matéria do disco circunstelar invadiria a região de formação dos gigantes gasosos e formaria os satélites, da mesma forma que a matéria interestelar invadiria a região ao redor do Sol e formaria os planetas. Para Alfvén, sua (modificada) teoria tornava “provável que todas as estrelas estão cercadas de sistemas planetários” (ALFVÉN, 1943, p. 721).

Um olhar direcionado pela dicotomia monismo-dualismo ressaltaria as rupturas, i. e. as mudanças das hipóteses de Alfvén com relação à origem da matéria protoplanetária: na primeira hipótese, a matéria seria capturada pelo Sol já formado; na segunda, a matéria

interestelar que “cai em direção ao Sol” é a mesma que forma os planetas; na terceira, surge a noção de planetas como corpos secundários formados repetidamente a partir da formação do corpo primário; na quarta (com Arrhenius), não se recua a uma estado inicial da matéria. Mas uma continuidade importante poderia ser negligenciada: a interação entre o campo magnético solar e a matéria ionizada no disco circunstelar. O mais importante das teorias de Alfvén é o papel do magnetismo na transferência do momento angular e na configuração da matéria ao redor do Sol, não a origem da matéria que formaria os planetas e seus satélites. Um historiador que observasse essas mudanças com os lentes da dicotomia monismo-dualismo poderia afirmar que Alfvén não melhorou seu conhecimento sobre a origem do sistema solar porque oscilou entre uma hipótese dualista e uma monista quanto a algo elementar, a origem da matéria protoplanetária.

O mesmo artigo de 1943, de Alfvén, contém ecos de algo que vinha se estabelecendo naquele momento histórico: o conceito de ambiente galáctico. Segundo esse conceito, não é inteiramente possível separar um sistema planetário embrionário do ambiente em que se forma: as grandes nebulosas moleculares, que por sua vez estão inseridas na galáxia. A partir disso, torna-se pouco significativo traçar a linha que separa “matéria interestelar” de matéria “não-interestelar” num contexto de formação estelar e planetária nas nebulosas moleculares. É possível afirmar que o consenso científico atual é o de que um sistema planetário e sua estrela hospedeira formam-se inteiramente de (na expressão usada por Alfvén) “matéria interestelar” presente nas nebulosas moleculares. Essa matéria frequentemente interage com as estrelas massivas de sua região e possui momento angular não desprezível. Talvez algum estímulo do ambiente seja necessário para a contração gravitacional inicial da nebulosa, uma perturbação pequena ou grande da nebulosa (o vento solar das estrelas mais massivas próximas ou uma supernova mais ou menos próxima). Mas *o conjunto estrela-disco circunstelar* não se forma isoladamente do ambiente nas nebulosas moleculares. Pelo contrário, o conjunto se forma *a partir* do material presente nas nebulosas moleculares, que podem conter elementos pesados produzidos por estrelas de grande massa. As próprias nebulosas moleculares também não estão isoladas do ambiente galáctico. Qual seria, então, o sentido de se perguntar se essa imagem atual é monista ou dualista?

Apenas para ilustrar como a adoção de categorizações das teorias gera poucos resultados relevantes para a avaliação do desenvolvimento histórico da área das planetogonias, é possível dizer que o consenso formado nas décadas de 1970 e 80 vão numa direção que não se encaixa em nenhuma das três classes distinguidas por Schmidt ou das três

categorias divisadas por Herczeg. Como a separação entre matéria interestelar do que seria matéria não-interestelar tem menor relevância no contexto de formação do sistema solar, não se pode decidir entre a segunda e a terceira categoria de Schmidt. Como é muito difícil traçar uma linha que ajude a determinar quando um disco de acreção circunstelar passa a ser um disco protoplanetário, é difícil dizer que a comunidade científica caminhou em direção a um consenso em torno de teorias de classe C ou de classe B, na classificação de Herczeg. No entanto, como já vimos, *há um consenso*, e ele vem sendo formado desde a década de 1970, pelo menos.

Há um sentido, porém, em que as categorizações de Schmidt e de Herczeg são úteis, sem produzir as ambiguidades e confusões causadas pela dicotomia monismo-dualismo: as teorias de classe A, ou da segunda categoria divisada por Schmidt (respectivamente: os planetas se formariam depois de completada a formação do Sol; a matéria dos planetas seria extraída de um Sol já formado) não são perseguidas pela comunidade científica há muito tempo por razões suficientemente convincentes, dado o corpo de conhecimento científico produzido desde o início da era espacial. Nesse sentido, essas categorizações não produzem as distorções e confusões causadas pela dicotomia monismo-dualismo. Pelo contrário, ajudam a perceber com clareza que a comunidade científica passou a considerar insustentável, ou ao menos pouco frutífero, todo um conjunto de hipóteses que resultam na conclusão de que os planetas não são subprodutos da formação do Sol. Isso constitui um progresso nada desprezível.

5.2.2. Dissipação de um (pseudo)problema

Não apenas a antiga distinção entre teorias monistas e dualistas perdeu relevância, mas também, o que é ainda mais importante, isso serve para mostrar que uma questão antes considerada fundamental, baseada nessa categorização, mostrou-se um pseudoproblema. É a questão formulada por Brush para que fosse avaliada a compreensão científica sobre a formação do sistema solar em 1990:

A tremenda quantidade de conhecimento empírico que agora possuímos sobre o sistema solar respondeu à questão sobre sua origem? Podemos explicar a existência e as propriedades dos planetas de alguma forma melhor do que poderíamos fazê-lo há 50 ou 100 anos? (...) Teríamos simplesmente acumulado um monte de fatos que não compreendemos?

Por “não compreendemos” quero dizer que a questão mais elementar não pode ser respondida confiantemente: um sistema solar se forma naturalmente *por si mesmo* a partir de matéria primordial, ou ele requer a assistência de uma estrela previamente existente *ou outra entidade?* (BRUSH, 1990, p. 44, grifos meus)

Para Brush, essa questão deveria ser respondida para que se considerasse que os cientistas avançaram na compreensão do problema. Sem essa resposta, é como se não compreendêssemos (ainda que parcialmente) a origem do sistema solar. A questão, no entanto, *não faz sentido*.

Ao longo do século XX disseminou-se a concepção de que a formação do sistema solar deve ter ocorrido num ambiente galáctico não *muito* diferente daquele observado atualmente (mas certamente um *pouco* diferente, dado que as sucessivas gerações de estrelas massivas que produzem supernovas devem enriquecer as nebulosas moleculares e o ambiente galáctico como um todo com elementos pesados ao longo de bilhões de anos). Isso se coadunou com a concepção de que as nebulosas moleculares, hoje identificadas como zonas de formação de estrelas, devem ser análogas (embora possam não ser idênticas) à região na qual o Sol e seu sistema planetário se formaram.

Num artigo publicado em 1964, o astrofísico e cosmólogo David Layzer propunha uma “abordagem unificada” (em contraposição à “abordagem observacional”) para solucionar problemas de cosmogonia então já vistos como interrelacionados: a origem de galáxias, nebulosas, estrelas e planetas. Essa abordagem unificada “invoca um único processo físico para explicar a existência de muitos diferentes tipos de sistemas astronômicos” (LAYZER, 1964, p. 342). Várias teorias que exemplificam a abordagem unificada são avaliadas por Layzer, incluindo a teoria dos vórtices em disco turbulento de von Weizsäcker e a teoria da instabilidade gravitacional de Jeans, ambas na base de suas próprias teorias de formação do sistema solar. Não cabe aqui mergulhar nessa análise, mas o artigo serve para ilustrar uma tendência crescente ao longo do século XX: a ideia de uma interconexão profunda entre sistemas astronômicos de diferentes ordens de magnitude, de sistemas planetários a estruturas metagalácticas⁹⁶.

A legitimação dessa interconexão não precisou ocorrer no nível da *identidade de processos* de diferentes ordens de magnitude. Bastou que os processos de formação do sistema solar fossem concebidos como relacionados ao ambiente galáctico. A relevância da

⁹⁶ O conceito de estrutura metagaláctica tem parentesco com a atual concepção de que as galáxias se agrupam em *clusters* e *superclusters*.

relação entre os processos de formação planetária e o ambiente em que ocorreram foi expressa plenamente por Schmidt, embora sinais de que a consciência dessa relevância vinha se formando possa ser encontrada nas formulações de outros autores, como Alfvén, na década de 1940. Nas *Four Lectures*, o cosmogonista russo criticou a separação rígida entre o sistema solar e o restante do ambiente galáctico do qual faz parte e ao qual provavelmente esteve mais intimamente ligado em seus estágios iniciais:

temos que rejeitar o estudo isolado do sistema solar e trazer ao nosso trabalho o todo do grande sistema conhecido como Galáxia, ou Via Láctea. Uma vez que o material galáctico é adicionado à investigação não há dificuldades ulteriores com [a distribuição do] momento [angular no sistema solar] pois tanto as estrelas como as nuvens de gás e poeira se movem dentro da Galáxia com um momento angular tremendo em relação umas com as outras e com relação ao centro de gravidade da galáxia; na distribuição desse momento não precisamos exagerar o ponto para chegar ao momento possuído pelos planetas, mesmo por aqueles mais distantes do Sol (SCHMIDT, 1958/2001, p. 82).

Ao longo do século XX consolidou-se a noção de que estrelas e sistemas planetários se formam em nuvens moleculares. Objetos chamados de *proplyds* (discos protoplanetários externamente iluminados) vêm sendo observados na nebulosa de Órion. Os *proplyds* observados nas nebulosas moleculares exibem características associadas à sua interação com o vento solar das estrelas mais massivas também formadas naquelas regiões, num claro exemplo de que a origem de sistemas planetários não pode ser entendida como um sistema fechado, como algo que se forma isoladamente por si mesmo. No entanto, uma característica fundamental dos modelos atuais é o de que os planetas se formam num disco de detritos ao redor de estrelas jovens, em processo de formação. Fundamentalmente, os discos protoplanetários são observados com alta frequência em torno dessas estrelas, indicando que se formam conjuntamente. Logo, também parece vazio de significado atualmente buscar entender os processos de formação planetária como *dependentes* de ajuda de entidade externa, como um encontro estelar ou captura de uma protoestrela. Me parece que conceber alternativas contrárias a partir dessa distinção – a formação do sistema solar por si mesmo *ou* a partir da interação com uma entidade externa – não tem mais significado importante. A seguinte passagem de um *review* recente do campo ilustra essas afirmações:

O gás nas nuvens moleculares está tipicamente em movimento. Quando um núcleo colapsa, o gás tem momento angular demais para que todo o material forme uma única estrela isolada. Em vez disso, em muitos casos um sistema estelar binário se forma. Em outros casos, uma única protoestrela se forma (chamada de estrela T

Tauri ou estrela pré-sequência principal), enquanto uma fração significativa do gás entra em órbita ao redor da estrela formando um disco que tem tipicamente 100 unidades astronômicas (UA) de diâmetro. [...] O colapso inicial de um núcleo de nuvem molecular dura aproximadamente 100 mil anos, e o material continua a cair tanto na estrela quanto no disco até que o núcleo da nuvem molecular circundante se esgote. (CHAMBERS e HALLIDAY, 2014, p. 34).

A indefinição atual sobre qual seria o gatilho para a formação do conjunto estrela-disco circunstelar, assim como a busca por compreender as especificidades da interação do proto-sol com sua nebulosa molecular, constituem problemas distintos das discussões engendradas pela distinção monismo-dualismo. Um dos principais problemas atualmente não é se os discos protoplanetários ao redor de estrelas precisam de estímulo externo para se formar (mesmo as estrelas binárias formam discos de acreção circunstelares, embora a formação de planetas nesses casos permanece algo controverso), mas se a geração de instabilidade gravitacional na nebulosa molecular (os estágios iniciais de contração gravitacional que forma as estrelas) pode precisar de estímulos externos. Além disso, o que pode ser alterado a partir de estímulo externo (e.g. uma supernova) é a composição química da estrela e do disco protoplanetário (a supernova pode enriquecer o disco com mais materiais pesados do que os já possivelmente presentes na nebulosa molecular):

A composição do Sol e do sistema solar representa o acúmulo de 8 bilhões de anos de história prévia de processos estelares nessa porção da galáxia, anteriores ao colapso da nebulosa solar. Não se sabe o quão constantes foram esses processos. Contudo, os isótopos de alguns elementos em meteoritos fornecem evidências de que a nucleossíntese estelar ainda estava ocorrendo logo antes da formação da nebulosa solar. De fato, a formação do sistema solar pode ter sido iniciada pela ejeção de material pela explosão de uma grande estrela, semeando a nebulosa solar com nuclídeos recém-sintetizados (CHAMBERS e HALLIDAY, 2014, p. 39).

Como já dito, a dicotomia monismo-dualismo (na acepção de Brush) produziu uma imagem distorcida dos progressos na área, mas mesmo a distinção entre sistemas fechados e abertos – o sentido que Cameron e ter Haar dão à categorização de Belot – se aplicada sem muito rigor à história das planetogonias, pode gerar outra distorção, em sentido oposto. A história das teorias a partir da década de 1940, sob esse prisma, seria a de uma convergência em direção às teorias que lidam com sistemas abertos. Se isso fosse tomado como parâmetro para medir o progresso, além da estabilidade ou a instabilidade de uma área, pareceria que a área como um todo progrediu cumulativamente. Correr-se-ia o risco de deixar de lado a pluralidade de hipóteses para processos distintos envolvidos na formação dos

planetas e as inconsistências no corpo teórico formado nesse período para privilegiar uma visão exagerada de estabilidade e progresso cumulativo.

Qualquer que seja o gatilho para a formação de estrelas nas nebulosas moleculares, o que está bem alicerçado e constitui conhecimento relevante sobre a formação do sistema solar e de sistemas planetários é o fato de que a formação de planetas em disco protoplanetário está intimamente ligada à formação de estrelas. Já vimos que é muito difícil traçar uma linha que separe claramente quando o disco circunstelar passa a ser protoplanetário, mas a ubiquidade de discos circunstelares e da existência de exoplanetas já constitui conhecimento que torna muito pequena a probabilidade de que a formação de planetas não seja um subproduto característico da formação de estrelas.

A resposta à questão de Brush, que motivava a ideia de que não houve progresso na compreensão do problema, é, portanto, irrelevante. É claro que chego a essa conclusão com a vantagem da retrospectiva, após duas décadas e meia de pesquisa sobre discos protoplanetários e exoplanetas, que Brush não poderia ter antecipado. Mas teria sido irrelevante, a questão, no começo da década de 1990? É possível afirmar, apenas, que a questão provavelmente estava mal formulada. Uma pergunta mais simples poderia ter sido feita aos especialistas da área: “os planetas são subprodutos da formação do Sol?”. Aplicada à interpretação histórica, essa reformulação não produziria a imagem de movimento pendular e ajudaria a perceber como as teorizações vinham sendo produzidas dentro de um consenso razoavelmente justificado. Principalmente, evitaria as armadilhas contidas na dicotomia monismo-dualismo (pois torna inaplicáveis as noções de “formar-se por si mesmo” e “ajuda de entidade externa”). Mesmo diante da incerteza sobre o gatilho do colapso gravitacional das nebulosas moleculares, com a reformulação da “questão elementar” seria mais fácil perceber que a convergência das ciências planetárias em torno de uma resposta afirmativa à questão vinha se alicerçando progressivamente num *conhecimento de fundo* constituído com cada vez melhores dados observacionais e em suposições mais bem informadas por esse suporte empírico. Para usar os termos de Haack, o *warrant-status* da concepção de que os planetas são subprodutos da formação do Sol vinha aumentando e legitimando, progressivamente, seu *acceptance-status*.

Quando avaliamos os avanços de uma área do conhecimento científico, é necessário manter as metáforas sob controle, ou descartá-las se se mostram contraproducentes. É o que devemos fazer, penso, com o pêndulo de Brush, se quisermos interpretar corretamente os avanços na área do conhecimento sobre a origem do sistema solar,

da segunda metade do século XX em diante. Há, no entanto, um período da história em que a dicotomia monismo-dualismo e a metáfora do pêndulo podem ser utilizadas sem gerar distorções: a primeira metade do século XX. Examinamos o caso das mudanças teóricas do período na próxima seção.

5.3. Cataclismos: as mudanças teóricas da primeira metade do século XX

O período da história das planetogonias em que a dicotomia monismo-dualismo é relativamente útil para a compreensão de processos de mudança teórica é também aquele em que ocorreu o mais significativo episódio de vai-e-vem teórico da história das planetogonias. Esse período começa nos últimos anos do século XIX e primeiros do século seguinte, com o abandono da hipótese nebular, até o *revival* de alguns de seus mais importantes aspectos perto da metade do século XX. Foi o momento em que um movimento pendular realmente ocorreu, com poucas zonas cinzentas. Além disso, o predomínio das hipóteses dualistas entre 1905 e 1935 abalou a confiança da comunidade científica na especulação de que o sistema solar deve ser um entre incontáveis sistemas planetários, motivando o ceticismo geral do período quanto à possibilidade de vida extraterrestre – o oposto do que vinha sendo a tônica no século XIX (DICK, 1996, pp. 162-79; DICK, 1998, pp. 71-7).

Esse é o único período desde a primeira edição da *Exposition* de Laplace, em 1796, em que uma característica fundamental da hipótese nebular (a formação dos planetas como algo intimamente ligado à formação do Sol) foi abandonada em favor de hipóteses que postulavam a formação do Sol e a dos planetas como processos completamente distintos e independentes. Tanto antes de 1905 (ano de publicação da hipótese planetesimal), quanto depois de 1939 (quando são publicadas as críticas de Spitzer), essa característica da hipótese nebular foi a mais desenvolvida pela comunidade científica. O período anterior a 1905, apesar do conhecimento do paradoxo do momento angular, é marcado pelo predomínio da hipótese nebular. Ela foi, de fato, a teoria entretida, desenvolvida por quase todos cientistas que se debruçaram sobre o problema da origem do sistema solar. Ou seja, a concepção de formação dos planetas como algo intimamente relacionado à formação do Sol era tacitamente aceita pela maioria. Embora a segunda metade do século XX tenha produzido uma várias alternativas teóricas sobre o problema, quase todas as hipóteses voltaram a aceitar tacitamente essa interpretação.

5.3.1. O caso e as metateorias de Kuhn e Lakatos

As metateorias clássicas da filosofia da ciência deram bastante atenção aos episódios de mudança teórica como forma de avaliar a racionalidade científica e questionar a concepção cumulativa do progresso científico. Essa seção examina, a partir dos materiais históricos já trabalhados nos capítulos precedentes, o processo de mudança teórica no período entre 1900 e 1940 da história das planetogonias, cotejando-o com as metateorias de Kuhn e Lakatos.

O conceito de paradigma científico, de Kuhn, permite enxergar o quadro geral em que os debates teóricos acerca da formação do sistema solar se inserem, mas explica apenas parcialmente sua dinâmica na primeira metade do século XX, especialmente nos períodos de ausência de teoria dominante (os anos imediatamente anteriores e posteriores ao domínio das hipóteses do encontro estelar). De maneira parecida, o conceito de programa de pesquisa de Lakatos não parece inteiramente adequado para entender as disputas teóricas desse período. Mesmo assim, ambos trouxeram contribuições fundamentais, que devem ser analisadas se quisermos compreender esses processos de mudanças teóricas. E, como deixo claro ao final, o anarquismo epistemológico de Feyerabend também tem algo importante a dizer sobre essa história.

*

Em que medida seria possível aproximar a concepção de *framework* (exemplificada pela postura de Wetherill quanto à teoria de Safronov) com a concepção de *paradigmas*, de Kuhn, ou a de *programas de pesquisa*, de Lakatos? Brush avalia que a metateoria lakatosiana é mais útil, em comparação com a de Kuhn, para descrever as diferentes teorias de formação do sistema solar na segunda metade do século XX. Penso que a adoção das formulações metateóricas de Lakatos sobre o funcionamento da ciência pode engessar desnecessariamente a interpretação do caminho percorrido pelas planetogonias do final do século XIX até hoje.

Brush afirma que parte do sucesso da hipótese nebular durante o século XIX se deve ao papel da cosmogonia laplaciana na constituição de um *paradigma* evolucionista para

a ciência oitocentista: uma nuvem de gás forma o sistema solar, que dá origem à vida, que dá origem à inteligência, que – corolário facilmente acoplado pelos ideólogos eurocêntricos novecentistas – chega ao ápice com o homem branco europeu (BRUSH, 1978). Isso está bem próximo de uma das três principais acepções de *paradigma kuhniano* identificadas por Margaret Masterman: paradigma metafísico, ou *metaparadigma* (MASTERMAN, 1970, p. 65). Essa aproximação também é feita em contraponto a Brush, que considera os paradigmas e revoluções de Kuhn como tendo pouca serventia para a compreensão das mudanças teóricas sobre a origem do sistema solar (BRUSH, 1996a, p. 82-3).

Em relação à aproximação da cosmogonia laplaciana com o conceito de programas de pesquisa, é possível divisar algumas de suas características como elementos fundamentais dos programas lakatosianos. A suposição de que os planetas são subproduto da própria formação estelar a partir de uma nuvem em contração e rotação corresponderia ao “núcleo duro”. O “cinturão de proteção” corresponderia a outras suposições da teoria: a nuvem primordial teria girado como um sólido em seus estágios iniciais; o disco gerado pela rotação da nuvem teria destacado anéis concêntricos de matéria e produzido órbitas planetárias coplanares, elípticas e de baixa excentricidade; a condensação de matéria nos anéis, de maneira análoga, também teria produzido rotação direta (não retrógrada) nos planetas e seus satélites; por fim, o processo de formação dos planetas por meio de um disco em rotação produziria o sistema planetário com a distribuição do momento angular observada. Como vimos ao longo da exposição histórica, essa parte da teoria estava aberta à refutação. Caso necessário, a teoria poderia ter sido reparada com modificações *ad hoc*, sem que, ao primeiro sinal de refutação, os cientistas fossem obrigados a abandoná-la. Esse é o caso das adaptações meteoríticas das últimas décadas do século XIX. Também pode ser o caso de assim interpretar o uso do conceito de freio magnético para explicar a discrepância do momento angular.

Essas são aproximações pragmáticas, instrumentais para o objetivo dessa seção, o de discutir as metateorias clássicas em face do jogo teórico da primeira metade do século XX. A rigor, é difícil identificar a hipótese nebular como estritamente paradigmática no sentido em que Kuhn escreve na maior parte do tempo. A cosmogonia laplaciana estava *inserida* num paradigma ou programa de pesquisa no campo da física: a mecânica newtoniana. Quando a hipótese nebular entra em profundo descrédito e dá lugar a alternativas hoje consideradas implausíveis, coincidentemente é o período em que estão ocorrendo revoluções no conhecimento físico do mundo. Foi nas primeiras décadas do século XX que emergiram a

mecânica quântica, a relatividade einsteiniana, a física nuclear e a astrofísica. Isso não quer dizer que a hipótese nebular foi abandonada por causa dessas revoluções, mas ressalto o fato de que a retomada de determinadas características importantes da cosmogonia laplaciana na segunda metade do século XX se deu em um contexto científico muito diferente.

A crise da hipótese nebular também coincide com a crise do pensamento evolucionista cumulativo e direcionado, no final do século XIX e início do século XX. Como já vimos, no ocidente oitocentista a hipótese nebular emoldurava formulações evolutivas com direção clara: de uma nebulosa primordial ao homem branco. Embutida nessa concepção de evolução cósmica, a ideia de progresso passou a ser questionada em diferentes esferas da cultura científica e erudita. Nas ciências da vida, por exemplo, o darwinismo já havia sido a mais significativa ruptura com as formulações evolucionistas orientadas por um objetivo específico. Na antropologia, o relativismo cultural questionou a centralidade e a primazia da civilização ocidental. Por isso, não parece ser por acaso que, embora sempre tenha convivido com problemas de adequação empírica – anomalias, no vocabulário kuhniano –, a hipótese nebular tenha caído em descrédito apenas durante um período em que a própria visão de mundo que ela justificava e encorpava cientificamente acabou sucumbindo em diversas esferas da cultura. O que poderia ser considerado como “hipótese nebular” após a década de 1940 guardava algumas reminiscências com as concepções cosmogônicas de Laplace, mas em vários sentidos fundamentais não era mais a mesma teoria.

Se a hipótese nebular pode ser entendida aproximadamente como paradigma e como programa de pesquisa, as hipóteses catastrofistas do encontro estelar constituiriam paradigmas e programas rivais, embora também estejam plasmadas ao cenário científico mais amplo, que mudou radicalmente. No campo das planetogonias, vemos uma única concepção central dominar o panorama teórico de 1905 a 1935: o encontro ou quase colisão estelar, que resulta na interpretação da formação do Sol e dos planetas como processos desconectados.

Durante todo o século XIX, mas especialmente nas últimas três décadas, a dificuldade em adequar empiricamente a hipótese nebular era bastante conhecida – principalmente, o clássico problema da distribuição do momento angular. Mas também havia outras características desconcertantes do sistema solar, como a rotação retrógrada (e a enorme inclinação do eixo de rotação) de Urano e os satélites marcianos com órbita também retrógrada. Mesmo com o acúmulo de anomalias (e o aprofundamento do conhecimento da natureza da principal dessas anomalias, o paradoxo do momento angular) na parte final do século XIX, a comunidade científica continuou tendo a hipótese nebular como única

referência teórica a orientar toda a discussão sobre a origem do sistema solar. Esses contraexemplos atingiram apenas o “cinturão de proteção” do programa de pesquisa laplaciano. Isso parece dar razão a Lakatos, mas se a adequação à história da ciência é algo fundamental na defesa das teorias do funcionamento da ciência de Kuhn e Lakatos, então elas encontram sérias dificuldades quando o assunto é examinado em maior detalhe.

Nos EUA, com as críticas influentes de Chamberlin e Moulton publicadas em 1900, a hipótese nebular começou a cair em descrédito. Isso ocorreu sem que tivesse surgido qualquer outra teoria que propusesse uma teoria substituta (Chamberlin e Moulton propõem a teoria planetesimal em 1905). Na metateoria lakatosiana, um programa de pesquisa não é abandonado até a emergência de outro programa de pesquisa, considerado melhor. A diminuição da adesão da comunidade científica estadunidense à hipótese nebular não foi causada pelo surgimento de uma alternativa plausível. O que mais se aproxima de uma razão para o declínio da hipótese nebular é a força das objeções levantadas por Chamberlin e Moulton. Essas objeções não eram inteiramente novas, mas ainda não haviam sido apresentadas de maneira organizada com o intuito de demonstrar a insustentabilidade da cosmogonia laplaciana. Mas há uma nuance importante nesse caso: as últimas décadas do século XIX foram um período de crise da hipótese nebular, em que se sabia do paradoxo do momento angular. Mesmo nessa situação, a teoria não foi considerada inviável ou refutada. Isso só aconteceu, de fato, quanto alternativas teóricas com vantagens aparentes em contornar o problema foram propostas. Naturalmente, todas essas afirmações devem ser avaliadas levando-se em consideração que o problema da origem do sistema solar não foi encarado por uma comunidade científica especializada no assunto até a segunda metade do século XX.

O problema se torna mais complicado para a teoria de Lakatos quando percebemos que as hipóteses do encontro estelar foram contundentemente criticadas por Russell e Spitzer no final da década de 1930 sem que alternativas teóricas minimamente sustentáveis e plausíveis houvessem surgido. Não foi o surgimento de uma boa teoria alternativa que causou o declínio da aceitação das hipóteses do encontro estelar por parte da comunidade científica. Apenas no final da década de 1940, com a emergência do conceito de freio magnético do Sol primitivo, e a transferência do momento angular para o disco de material ionizado circundante por meio desse processo, é que uma visão geral da formação dos planetas como subprodutos da formação do Sol passou a constituir novamente uma interpretação influente do problema da origem do sistema solar.

*

A ênfase dada à incomensurabilidade na visão proposta por Kuhn abriu caminho para a representação da competição entre teorias científicas como um processo não inteiramente orientado por critérios racionais, pela observação e por testes experimentais, mas um que pode ser governado por elementos tradicionalmente tidos como extrínsecos ao debate científico e racional, como a política e a retórica.

Teria havido incomensurabilidade entre as hipóteses do encontro estelar e a hipótese nebular (ou suas sucessoras) entre 1900 e 1950? Haveria, na primeira década do século XX, setores das comunidades científicas que negassem o mérito das hipóteses do encontro estelar com base em argumentos que fizessem ajustes *ad hoc* para salvar a hipótese nebular, ou que apelassem para argumentos de natureza mais filosófica ou metafísica pela manutenção do ponto de vista evolucionista da teoria laplaciana? Teriam ocorrido embates em que cientistas dos dois lados parecem discordar sobre aspectos fundamentais da formação dos planetas? Não há na história desse processo de mudança teórica qualquer traço dessas marcas de incomensurabilidade dos paradigmas kuhnianos. A aparente superioridade da hipótese planetesimal de Chamberlin e Moulton sobre a hipótese nebular foi reconhecida pelos cientistas americanos do período, e o mesmo aconteceu na década seguinte, quando a teoria de Jeans foi abraçada pela comunidade científica britânica. A principal vantagem dessas teorias foi a de contornar o problema da baixa velocidade de rotação do Sol. Tanto o paradoxo do momento angular quanto a inclinação de aproximadamente 7 graus do plano médio das órbitas dos planetas em relação ao eixo de rotação do Sol poderiam ser explicados por um encontro estelar na gênese do sistema solar. Ainda que o encontro estelar parecesse especialmente concebido para se encaixar com essas irregularidades do sistema solar, era, pelo menos inicialmente, uma forma de explicar a origem dos planetas sem inadequações empíricas e sem que fosse necessário reinventar teorias físicas fundamentais.

No estado do conhecimento científico do início do século XX, sem o desenvolvimento teórico de mecanismos capazes de desacelerar a rotação da estrela em formação, e sem que se soubesse da correlação do crescimento da idade de uma estrela com sua decrescente velocidade de rotação, não surpreende que o encontro estelar tenha sido considerado uma causa primordial mais plausível do que uma nuvem em colapso gravitacional. Trocando em miúdos, os motivos para a mudança da hipótese nebular para teorias de encontro estelar parecem ter sido suficientemente racionais e justificados.

Um aspecto interessante da racionalidade da mudança teórica do início do século é o fato, dado pela vantagem da retrospectiva, de que o principal argumento daquele momento para o abandono da hipótese nebular não é mais considerado suficiente para motivar o abandono da ideia central de que os planetas são subprodutos da formação do Sol. O paradoxo do momento angular, que servia para refutar qualquer explicação que concebesse o sistema planetário como subproduto da formação do Sol, pode ser contornado com três mecanismos possivelmente complementares: o freio magnético, a influência do vento solar no disco protoplanetário e a turbulência em disco de acreção viscoso. A questão é que os recursos teóricos e conceituais do início do século eram substancialmente diferentes dos de 1940 em diante. Para a ciência da primeira década do século XX, pode muito bem ter sido racional e justificado rejeitar a hipótese nebular. Deve ter parecido razoável e compreensível aos apoiadores da teoria laplaciana a força dos argumentos contra ela. Havendo sido aparentemente refutada em uma de suas consequências empiricamente testáveis, a comunidade científica a abandonou.

E quanto ao período pós-1939? Em 1941, Lyttleton escrevia que apenas quatro processos seriam concebíveis para a formação de sistemas planetários: 1. colisão do Sol com outra estrela; 2. ação de maré [gravitacional] de outra estrela; 3. explosão de uma única estrela; 4. quebra de uma única massa estelar por conta de instabilidade rotacional (LYTTLETON, 1941, p. 216). Nenhum desses processos contém a concepção central da hipótese nebular: uma nuvem de material primordial em contração e rotação. Nenhum deles contém a concepção importante de que os planetas são subprodutos ordinários da formação estelar. Mas ainda mantém a visão de que sistemas planetários não seriam raros no universo, dado que o processo escolhido como mais plausível (4) abriria a possibilidade de que uma parcela significativa das estrelas tivesse desenvolvido planetas ao seu redor.

Esse quadro do início da década de 1940 mostra uma situação de indefinição que, para ser justo, lembra o período revolucionário de Kuhn. Não há incomensurabilidade de paradigmas rivais, mas surgem alternativas teóricas (von Weizsäcker, Alfvén, Schmidt) e não há base empírica capaz de servir de solo comum para que se decida por alguma dessas alternativas. Mas, a partir do desenvolvimento do mecanismo de freio magnético por Alfvén, um dos aspectos centrais da hipótese nebular (a formação dos planetas ligada à formação do

Sol) começaria a ser novamente encarado como passível de ser a base para desenvolvimentos teóricos ulteriores.⁹⁷

Nesse ponto, ao lembrarmos como o mecanismo de “freio magnético” no Sol primitivo acabou sendo usado nas tentativas de se resolver o paradoxo do momento angular, pode ser necessário dar ouvidos a Feyerabend quando ele defende que “hipóteses *ad hoc* e aproximações *ad hoc* criam uma área experimental de contato entre os ‘fatos’ e aquelas partes de uma concepção nova que parecem capazes de explicá-los em alguma ocasião futura e após acréscimo de muitos elementos adicionais” (FEYERABEND, 2010, p. 157). Para Feyerabend, princípios do racionalismo crítico como “levar a sério os falseamentos” e “evitar hipóteses *ad hoc*” podem proporcionar “inadequada explicação do passado desenvolvimento da ciência e são suscetíveis de prejudicar o seu desenvolvimento futuro” (grifo meu) (ibid.).

Os rumos das planetogonias no século XX, com a “refutação” da hipótese nebular e a retomada alguns de seus aspectos centrais quando explicações para a transferência do momento angular começaram a surgir, sugerem que Feyerabend tem alguma razão quanto a isso.

O episódio de rejeição da hipótese nebular e predomínio das hipóteses do encontro estelar não deve ser interpretado como um atraso, um passo atrás no progresso das planetogonias. Fazê-lo significaria uma flagrante capitulação a uma interpretação *whig* da história, que julga as teorias do passado de acordo com os méritos das teorias do presente. Ao mesmo tempo, considerar o período como apenas um capítulo estranho da grande marcha do progresso científico (ainda que não cumulativo) rumo às melhores planetogonias atuais seria uma simplificação exagerada. A primeira metade do século XX foi um período de mudanças radicais que não podem ser interpretadas como possuindo uma direção clara. O desenvolvimento da hipótese de formação planetária pela acreção de planetesimais, desenvolvida por Chamberlin, é uma das mais duradouras contribuições do período à planetogonia atual. Ao mesmo tempo, com a vantagem da retrospecção, é possível perceber

⁹⁷ Uma possibilidade que não deve ser descartada é a de que, até a década de 1980, o campo das planetogonias seja caracterizado como pré-paradigmático. De fato, a produção de alternativas teóricas pelos cientistas para explicar um mesmo conjunto de dados é interpretada por Kuhn como uma característica de um estágio pré-paradigmático de uma ciência, assim como pode ocorrer nos períodos de revolução científica. Um fator complicador para essa caracterização é o fato de que o próprio conjunto de dados mudou sensivelmente ao longo do século XX, especialmente a partir do aporte empírico da exploração espacial. Porém, a variedade de alternativas teóricas ao longo do século XX parece sugerir um estado de imaturidade da ciência planetogônica nesse período, condizente com o que seria o estágio pré-paradigmático na acepção kuhniana. Agradeço ao Prof. Osvaldo Pessoa Jr. por levantar essa questão durante a defesa. Pretendo explorar esse tema em trabalhos ulteriores.

que durante décadas as planetogonias se colocaram num beco sem saída. Não há nada de *whig* nessa constatação. Fazendo uma analogia com a seleção natural darwiniana, a espécie (a hipótese do encontro estelar) não se adaptou ao ambiente (o conhecimento de fundo presente nas objeções de Russell e Spitzer) e foi extinta. Isso não é demérito algum às pesquisas de Chamberlin, Moulton, Jeans e Jeffreys. Como na aceção darwiniana da evolução, não-linear e sem direção predeterminada, é possível simplesmente interpretar (retrospectivamente) a concepção de quase colisão estelar geradora do sistema solar como uma espécie extinta – tanto por conta dos problemas intrínsecos das teorias do encontro estelar, quanto pelas observações de discos protoplanetário e exoplanetas. Todas as espécies extintas tiveram seu papel na evolução, e não há nada que indique que as espécies atualmente existentes se mantenham indefinidamente nesse planeta. Isso também vale para as teorias passadas e atuais. Mas as espécies extintas não voltam a existir, nem os becos sem saída teóricos: um universo de miríades de planetas extrassolares, dos quais nem mesmo um punhado deve ter sido fruto de encontros estelares, parece ser um caminho que não tem volta.

5.3.2. O caso e a metateoria de Laudan

Na metateoria kuhniana, o acúmulo de anomalias (não fica claro a partir de que ponto) gera o abandono de um paradigma e subsequente início do período revolucionário. Para Laudan, “a explicação dada por Kuhn não dá conta do fato histórico de que os cientistas muitas vezes abandonaram uma teoria diante de apenas umas poucas anomalias e, outras vezes, conservaram uma teoria diante de um oceano de refutações empíricas” (LAUDAN, 1978/2011, p. 53). Essa passagem é muito adequada para descrever os casos de abandono das hipóteses do encontro estelar e da hipótese nebular, respectivamente. A hipótese nebular foi conservada como a única teoria amplamente discutida no campo das cosmogonias durante toda a segunda metade do século XIX. Isso ocorreu apesar do acúmulo de inadequações empíricas ao longo desse período: o paradoxo do momento angular, a inclinação do eixo de rotação do Sol, os satélites de Marte com órbita retrógrada etc. Por sua vez, as hipóteses do encontro estelar foram abandonadas diante do surgimento de poucas anomalias: o material arrancado do Sol a altas temperaturas teria se dissipado antes de se condensar e não poderia ter adquirido o momento angular apresentado pelos planetas, além da baixíssima probabilidade do evento gerador (o encontro entre estrelas já formadas vagando pela Via Láctea).

Consequentemente, essa constatação levanta uma questão sobre o peso que cada anomalia possui para que uma teoria seja abandonada ou adotada. Isso também é descrito por Laudan: “o que conta não é tanto o *número* de anomalias geradas por uma teoria, mas sim *quão cognitivamente importantes* são essas anomalias específicas” (LAUDAN, 1978/2011, p. 53, grifos do autor). Laudan recorre à ideia de gradação da importância das anomalias empíricas ou, nas palavras dele, o “*grau de ameaça epistêmica*”. Isso ajuda a entender esse episódio de mudanças teóricas. Mesmo mais numerosas, as anomalias da hipótese nebular podiam ser tomadas no final do século XIX como detalhes que *em princípio* poderiam ser resolvidos com hipóteses *ad hoc*. É o caso das irregularidades observadas no sistema (e. g. Urano poderia ter seu eixo inclinado por conta de uma grande colisão que pouco tem a ver com sua formação original, Marte poderia ter capturado seus dois pequenos satélites). É também o caso de que poderia se supor que algum processo que não violasse a dinâmica celeste, mas ainda desconhecido, teria sido a causa da transferência do momento angular do Sol para os gigantes gasosos. Por isso, considero que as anomalias (como o paradoxo do momento angular) não pareciam ter, pelo menos para os cientistas até a última década do século XIX, um grau de ameaça epistêmica muito elevado. E é passível de discussão se as críticas de Chamberlin e Moulton em 1900 foram percebidas em seu tempo como uma genuína elevação do grau de ameaça epistêmica das anomalias ou porque foi o primeiro ataque coordenado à hipótese nebular e com vistas à proposição de uma nova teoria.

Chamberlin não procurou refutar a hipótese nebular *por causa* das dificuldades de explicar todas as características do sistema solar por meio dessa teoria. O geólogo estava envolvido num problema específico de sua área (a atmosfera terrestre primitiva). Ele procurava explicar uma consequência do conhecimento empírico e teórico do momento: a origem da Terra não poderia ter sido quente, como previsto pela teoria original de Laplace. A teoria cinética dos gases foi utilizada para estimar a velocidade de escape de determinadas partículas na atmosfera primitiva. Se a Terra tivesse tido origem “quente”, a velocidade dessas partículas teria sido superior à sua velocidade de escape. Como isso apontava para uma formação “fria” da Terra, Chamberlin conjecturou alguma maneira de o planeta ter se formado por meio de acreção de planetesimais. Como já vimos, a teoria também não poderia ser aceita por Chamberlin em sua forma original. O geólogo procurou desenvolver, então, uma explicação alternativa para a origem dos planetas. Para que sua teoria alternativa fosse abraçada pela comunidade científica, era importante também demonstrar as inadequações da hipótese nebular. Ou seja, o grau de ameaça epistêmica das anomalias da hipótese nebular não

teria sido suficientemente elevado a ponto de ter gerado, apenas por si, a necessidade do abandono da teoria. Foi a necessidade de uma nova concepção da Terra primitiva, especificamente, que se acoplou às anomalias e gerou a procura por uma cosmogonia inteiramente nova (formação “fria” com a acreção de planetesimais) e o abandono da teoria de Laplace.

No final do século XIX não havia uma hipótese *ad hoc* que em princípio pudesse salvar a hipótese nebular do paradoxo do momento angular. É por isso que essa anomalia foi reconhecida pelos cientistas do período como o maior problema da teoria de Laplace. Nesse caso, a questão do tempo de existência das discrepâncias entre dados empíricos e a teoria parece ter tido muita importância. Além das motivações específicas de Chamberlin, é plausível que a hipótese nebular tenha sido rejeitada pelo restante da comunidade científica não por conta do número de anomalias nem pelo grau de ameaça epistêmica dessas, mas pelo tempo que perduraram as principais anomalias conhecidas. “Se ... depois de repetidos esforços, a teoria permanecer incapaz de explicar a anomalia, ela passará a se revelar um incômodo epistêmico” (LAUDAN, 1978/2011, p. 56). Nesse caso, é plausível que o incômodo epistêmico do paradoxo do momento angular tenha simplesmente maturado desde a crítica de Babinet em 1861. A cosmogonia laplaciana não foi considerada refutada com as críticas de 1861, mas a partir das de 1900. Assim, o tempo que durou o incômodo epistêmico foi grande o suficiente para que sua situação começasse a ser percebida como insustentável no final do século XIX, especialmente depois das malsucedidas tentativas de adaptação de acreção de meteoritos.

A rejeição das hipóteses do encontro estelar também pode ser entendida satisfatoriamente com a noção de grau de ameaça epistêmica das anomalias. Embora pouco numerosas, suas anomalias têm um grau de ameaça epistêmica muito mais elevado, a ponto de ter motivado o abandono dessas teorias sem que qualquer alternativa (ou mesmo uma adaptação da teoria anterior) estivesse no horizonte da comunidade científica e dos próprios cientistas responsáveis pela refutação. Essa é uma diferença fundamental: os cientistas que procuraram refutar a hipótese nebular tinham uma alternativa no horizonte (no caso dos estadunidenses, ainda no prelo; no caso dos britânicos, era a própria hipótese dos americanos, depois modificada). Na década de 1930, as possíveis hipóteses *ad hoc* que poderiam, em princípio, salvar ambas as hipóteses do encontro estelar teriam que contradizer o conhecimento de dinâmica celeste, da teoria cinética dos gases e o conhecimento astrofísico sobre a estrutura estelar e as temperaturas no interior do Sol.

Contudo, a interpretação de Laudan não explica plenamente esse caso de mudança teórica. Laudan diz que “a importância de qualquer anomalia específica para uma teoria depende, em boa medida, do placar do jogo entre essa teoria e suas concorrentes. Se uma teoria for a única conhecida em determinado campo, pode haver dúzias de casos ‘de refutação’, e provavelmente nenhum deles será de importância decisiva” (LAUDAN, 1978/2011, p. 56). Enquanto essa passagem ajuda a compreender a conservação e depois a rejeição da hipótese nebular, ela não serve para entender por que as hipóteses do encontro estelar foram abandonadas. Simplesmente não havia uma alternativa teórica considerada plausível no final da década de 1930 capaz de ser favoravelmente comparada às planetogonias que estavam sendo derrubadas.⁹⁸

No caso das cosmogonias as hipóteses são criadas em meio a uma rede de teorias. Mais precisamente, são hipóteses derivadas de uma rede de teorias e de dados empíricos (as características conhecidas do sistema solar, suas regularidades e irregularidades). Mesmo assim, a rejeição das teorias de encontro foi muito rápida, comparada com a persistência da hipótese nebular no XIX e na transição rumo ao *solar nebula model* inaugurado por Safronov.

5.4. Examinando o período de transição, da década de 1940 à de 1980

Qualquer periodização carrega inevitavelmente uma interpretação histórica. Decidi, nessa análise, isolar o período que vai do início da década de 1940 até o final da década de 1980 porque, na minha interpretação, trata-se de um período de transição na história das planetogonias. Ao longo dessas décadas, avanços tecnocientíficos produzidos num ritmo sem precedentes impactaram as teorias da origem do sistema solar. A exploração dos outros mundos do nosso sistema planetário com sondas robóticas e a análise da composição química de meteoritos produziram uma quantidade enorme de dados, interpretados como pistas da origem, sinais de uma história longínqua que poderiam começar a ser decifrados. Esse conjunto de indícios não forneceu as instâncias de decisão esperadas – em outras palavras, não constituíram evidências tornariam os cientistas capazes de decidir racionalmente por essa ou aquela teoria planetogônica. Mas o aumento exponencial do

⁹⁸ Como Laudan formula essa ideia cautelosamente (“em boa medida”, “provavelmente”), esse contra-exemplo não tem tanta força. Mas esse é um dos problemas de metateorias que se pretendem ao mesmo tempo normativas e históricas: diante do caos da história, o epistemólogo contenta-se com uma formulação não muito aguda.

conhecimento empírico sobre o sistema solar, nesse período, permitiu um progresso nada desprezível nas investigações sobre a formação do sistema solar.

Pistas, indícios, sinais: esses componentes fundamentais de uma investigação não devem ser interpretados apenas como referenciais que delimitam a formulação de teorias, mas também e principalmente como os mais importantes fertilizantes da atividade criativa de teorização. É difícil, hoje, ter a real dimensão do significado das imagens produzidas pelas primeiras sondas espaciais: superfícies que nunca haviam sido observadas, tornadas visíveis pela primeira vez. As imagens de crateras de impacto em outros planetas e luas, cicatrizes ubíquas da violência cósmica que marcou o passado do sistema solar, sedimentaram a visão de que as colisões de corpos sólidos devem ter tido um papel central nos estágios primordiais de formação de planetas. Nenhum investigador – não importando a área de investigação empírica – desconsideraria a importância de se progredir na coleta de novas pistas e na capacidade de se distinguir quais são as pistas relevantes. O conhecimento obtido pelo estudo das composições químicas de meteoritos e das características detalhadas dos planetas e luas podem não ter constituído evidências decisivas, “canos fumegantes” da origem do sistema solar, mas certamente delinearam condições de contorno um pouco mais claras. Permitiram o começo da transição de um cenário marcado pela multiplicidade teórica e pouquíssimas limitações das teorizações (a década de 1940), para um contexto em que se podia trabalhar a partir de um acordo tácito em torno de suposições mínimas, construídas a partir de um crescente conjunto de indícios e de condições de contorno (o final da década de 1980).

A astrofísica foi outro importante fator do direcionamento das planetogonias rumo ao consenso do final desse período, não apenas por avanços em seus aspectos essencialmente teóricos – a formação de estrelas – mas também por aqueles em que os dados observacionais tiveram um peso importante, como o conhecimento sobre as nebulosas moleculares e sobre a rotação e a evolução de estrelas. Cameron e ter Haar terminavam sua revisão histórica de 1962 afirmando que o conhecimento de astrofísica havia mostrado “que a galáxia é muito mais velha que o sistema solar e, também, que a formação de estrelas é um processo que continua até hoje” (CAMERON e TER HAAR, 1962, p. 35). “Logo”, concluem, “os cosmogonistas modernos tendem a acreditar que *alguma forma de teoria monista* deve ser a correta, e provavelmente o Sol e o sistema planetário se formaram ou ao mesmo tempo, ou numa série de eventos relacionados” (ibid., grifo meu). Já vimos quais são os problemas dessa categorização das teorias, mas deixando de lado essa questão por um instante, é possível afirmar que havia não mais do que um palpite mais ou menos generalizado de que a origem

do Sol e dos planetas está intimamente ligada, no início dos anos 1960. No final da década de 1980, esse palpite se transformou em um acordo tácito, e a ideia de que as estrelas formam sistemas planetários deixou de ser mero palpite para se tornar a melhor explicação para um conjunto crescente de indícios: as observações de discos circunstelares.

5.4.1. Especialização, convergência teórica e pluralismo

Os cientistas desse período de transição tinham consciência de que a falta de conhecimento seguro sobre os estágios iniciais da formação de estrelas fazia com que fosse impossível eliminar o caráter parcialmente especulativo das planetogonias. Em 1976, Alfvén e Arrhenius previam que “a completude de um conjunto de modelos quantitativos, mutuamente consistentes e apoiados experimentalmente para a evolução do sistema solar ainda está num futuro remoto” (ALFVÉN e ARRHENIUS, 1976, p. 9). Essa previsão se justificava porque “precisamos de muito mais informações de dados espaciais e de investigações laboratoriais para sermos capazes de reduzir a um nível gerenciável o elemento especulativo que tais modelos ainda contêm” (ibid.). Nessa obra dedicada especificamente à aplicação da física de plasmas e da magneto-hidrodinâmica à origem do sistema solar, os autores não postulam as condições iniciais do sistema. Isso não os impede de usar o que chamam de “princípio hetegônico” – um processo de formação de corpos secundários ao redor de um corpo central via física de plasmas, a especialidade de Alfvén – teorizando sobre como a formação do Sol pode ter gerado os planetas e como a formação de planetas pode ter gerado suas luas (idem, p. 282-4).

Evitar teorizar sobre as condições iniciais do sistema solar parece ter sido a decisão padrão tomada nesse período. No final da década de 1960, Safronov já havia obtido resultados muito frutíferos com essa mesma decisão metodológica, embora seu processo gradual de acreção de planetesimais seja bastante diferente da teoria de Alfvén e Arrhenius. No mesmo período, Herczeg elaborava uma teoria em que os planetas se formam ao redor de um Sol em estágio final de contração, ainda em fase pré-sequência principal. A escolha era pragmática: o processo de formação planetas era mais capaz de ser cotejado com as teorias dos estágios finais de formação de estrelas como o Sol. O astrônomo procurava elaborar uma síntese teórica entre o modelo de Schmidt e uma das várias hipóteses cosmogônicas propostas por Hoyle. As dificuldades de se avaliar teorias que concebiam a origem do Sol e dos planetas

como processos simultâneos, segundo Herczeg, eram a de que modelos do estágio final de formação de estrela pré-sequência principal estavam bem desenvolvidos no final da década de 1960, enquanto teorias acerca dos estágios iniciais de formação de estrelas ainda eram “bem mais especulativas” (HERCZEG, 1968, p. 186).

Em 1980, Wetherill terminava uma revisão em que avaliava processos distintos de formação de planetas terrestres em disco protoplanetário (abordados na seção 3.5.1.) com um *caveat* sobre teorizações acerca das condições iniciais:

até entendermos como usar os mecanismos básicos para passar dos estados iniciais à predição de suas consequências observáveis, especulações [sobre estados iniciais] são de utilidade limitada. Em vista dessa situação, parece prematuro fazer uma defesa muito veemente de qualquer uma dessas "teorias" em particular. Este não é o momento para "grandes debates" sobre a origem do sistema solar, mas para a paciente resolução de problemas teóricos difíceis, a coleta de dados e a procura por maneiras de confrontar predições teóricas com dados observáveis (WETHERILL, 1980, p. 110).

A decisão consciente de não fazer apelo às condições iniciais do sistema solar liberou os cientistas para estudar estágios e processos intermediários da formação de planetas sem que a teoria se comprometesse com um estado inicial do sistema. Isso é uma mudança fundamental. Livres para estudar processos como a coagulação da poeira em planetesimais, a acreção de planetesimais de quilômetros de diâmetro, a formação de protoplanetas via colisão de planetesimais e assim por diante – com o detalhe importante de que não mais era exigido que a teoria voltasse ao estado inicial e se mostrasse compatível com uma nebulosa primordial (como a de Laplace, por exemplo, girando como um sólido) – os cientistas puderam lançar os alicerces da ponte que religaria a formação dos planetas com a formação de estrelas.

Essa ponte só foi reconstruída de fato na última década desse período de transição – não porque uma teoria completa e consistente havia surgido, mas porque as observações astronômicas vinha dando indícios cada vez mais fortes de que estrelas recém-formadas estavam cercadas de um disco de gás e poeira. É interessante notar que nenhuma variação teórica avaliada na revisão de Wetherill, em 1980, foge do cenário em que os planetas se formam num disco de gás e poeira provavelmente formado a partir da formação do Sol – não obstante a cautela do cientista quanto às “defesas veementes” desta ou daquela teoria. De forma reveladora, essa revisão começa com considerações acerca do caráter incerto mas promissor das observações astronômicas interpretadas como indícios de discos circunstelares.

Como vimos na seção 4.3., a década de 1980 foi marcada pelo início do conhecimento dos discos circunstelares, interpretados como protoplanetários. Não é difícil, portanto, inferir quais mudanças no conhecimento astronômico permitiam a Cameron afirmar, oito anos mais tarde, que havia um *paradigma* quanto à interpretação da formação dos planetas como intrinsecamente ligada à formação do Sol:

A origem do sistema solar tem sido reconhecida como um problema científico por mais de dois séculos, mas foi realmente apenas nas últimas duas décadas que ela foi encarada na forma de um problema científico comum. A transição foi marcada por uma aceitação generalizada, entre as comunidades científicas relevantes, de um *paradigma central* que permitiria a investigadores individuais encararem partes do problema completo. Antes desse período, o problema era tratado primariamente como um *puzzle* intelectual; um investigador tomava um pequeno número de condições de contorno (*boundary conditions*) que estavam ligadas ao problema e era esperado que produzisse uma solução completa que satisfaria essas condições limitantes.

O cenário geral vislumbrado no paradigma é o de que o Sol se formou mais ou menos como qualquer outra estrela comum, pelo colapso de uma região de gás no meio interestelar, e então uma parte desse gás formou um disco de acreção (usualmente chamado de nebulosa solar primitiva) do qual os planetas e muitos corpos menores do sistema solar se formaram. (CAMERON, 1988, p. 441).

No final da década de 1980, apesar dos diferentes mecanismos postulados para explicar os detalhes da formação de planetas, havia uma aceitação ampla de que os planetas eram subprodutos da formação do Sol. O tratamento do problema em partes distintas permitiu a sofisticação das teorizações sobre a acreção de planetesimais, as interações magnéticas entre estrela e disco circunstellar e a influência da turbulência e da viscosidade do disco na formação de planetas. A observação de discos circunstelares permitiu que a ponte entre Sol e planetas e uma origem nebular entre eles fosse reconstruída. O estabelecimento de um acordo mínimo começou a permitir um ataque comunitário especializado ao problema, composto de partes distintas que ensejam perguntas específicas, tratamentos teóricos específicos, e a busca por dados observacionais específicos. Isso constituiu um avanço, pois fez crescer uma comunidade científica profissional dedicada ao tema, composta por diferentes áreas em diferentes tradições de pesquisa. É, também, uma das marcas do progresso científico (funcional) nesse período de transição na área das planetogonias.

Foi, portanto, um período de transição não apenas do ponto de vista das concepções teóricas. Wetherill parecia captar, em 1980, os outros sentidos em que a transição ocorria:

Há não muito tempo, teorias alternativas de origem do sistema solar não eram muito mais que uma fonte de entretenimento para a maioria dos cientistas. Até certo ponto, essa visão ainda é predominante. No entanto, hoje as idéias implícitas e explícitas sobre a formação do sistema solar influenciam o contexto e o significado de uma grande parte da pesquisa planetológica e geológica atual. Pode-se esperar que, em breve, muito mais pesquisadores capazes conduzam trabalhos sérios sobre problemas da origem do sistema solar. É importante que isso não leve à Torre de Babel, mas que eles tentem entender uns aos outros e explicar o seu próprio trabalho tão bem quanto forem capazes de fazê-lo. Se isso acontecer, o crescente interesse nesse campo poderá levar a um progresso notavelmente rápido nessa questão científica antiga e fundamental (WETHERILL, 1980, p. 110-1).

Há pelo menos quatro aspectos importantes nessa descrição: a percepção de que o campo vinha se tornando mais relevante para outras ciências, o diagnóstico de crescimento do interesse da comunidade científica, a esperança de que especialistas de várias áreas diferentes contribuam para solucionar o problema e um vislumbre do progresso vindouro. Basta um exame rápido do campo nos quarenta anos desde que essas palavras foram publicadas para perceber que Wetherill estava, em linhas gerais, certo.

Até meados do século XX, nenhum dos esforços de explicação do processo de formação do sistema solar foi feito por cientistas que se considerassem especialistas no assunto. Simplesmente não era uma área especializada. Até o surgimento da *escola russa de cosmogonia*, as formulações teóricas eram quase sempre trabalhos laterais, marginais, na carreira dos cientistas envolvidos, de Laplace a Jeans. Até mesmo o exemplo daqueles que antes da metade do século XX se dedicaram com mais afinco a teorizar sobre a origem do sistema solar, Chamberlin e Moulton, ilustra isso. Chamberlin chegou à questão já na maturidade, e embora tenha vislumbrado a oportunidade de “escrever seu nome na história da ciência” ao tentar derrubar uma célebre e longeva teoria (a hipótese nebular) e propor uma alternativa, mesmo assim a cosmogonia não podia ser considerada sua especialidade. Mas, aos poucos, formou-se um campo de investigação científica especializada. Essa especialização tem dois sentidos. No primeiro sentido, a área se desenvolveu como um campo de pesquisa ao qual cientistas passaram a dedicar boa parte ou toda a sua carreira. No segundo, o campo se ramificou em várias especializações, permitindo um tratamento específico para cada problema definido e uma melhor definição dos problemas.

É digno de nota que, em 1962, Cameron e ter Haar sentissem que deveriam destacar em tom de comemoração “o fato de que conferências bem-sucedidas agora podem ser realizadas sobre o assunto da origem do sistema solar” (CAMERON e TER HAAR, 1962,

p. 35), com “bastante gente tentando fazer precisamente isso”: tentando “obter novas ideias [ao] procurar as fraquezas das antigas” (ibid.). A emergência da articulação de uma comunidade científica ocidental dedicada a solucionar o problema veio um pouco depois do surgimento da escola russa de cosmogonia, que é o primeiro exemplo de especialização e criação de comunidade científica explicitamente voltada para compreender a origem do sistema solar.

A especialização exemplificada pela escola russa existia não apenas com relação à criação de um grupo de especialistas em assuntos cosmogônicos, mas de distinguir áreas de especialização no próprio assunto da origem do sistema solar. Na década de 1940, lembra Safronov, “as leis fundamentais que governam o processo de formação estelar eram obscuras”; por isso, ao “estabelecer a *distinção entre dois ramos da cosmogonia planetária*, [a formação de planetas e a origem da própria nuvem protoplanetária], Schmidt avançou os trabalhos teóricos em quinze anos” (SAFRONOV, 1972, p. 10, grifos meus). Como já dito, o motivo desse diagnóstico de Safronov é parecido com o pragmatismo de Herczeg em optar por uma hipótese de formação dos planetas distanciada de elaborações sobre a formação do proto-Sol. É uma abordagem que permite escolher investigar aquilo de que se possui mais informação, mais dados empíricos, mais condições de contorno. Nas décadas de 1960 e 1970, sabia-se muito mais sobre os planetas do que sobre a formação de estrelas em nebulosas moleculares.

Essa é uma contribuição metodológica fundamental da escola russa de cosmogonia, que acabou se disseminando: a distinção do problema original em partes que podem ser investigadas separadamente, ao mesmo tempo em que se mantém um núcleo teórico da formação de planetas em disco protoplanetário via acreção de planetesimais. A formação dos planetas poderia ser investigada independentemente da origem da nuvem protoestelar e protoplanetária. A formação dos planetesimais e dos protoplanetas, por sua vez, poderia ser distinguida da própria história do desenvolvimento dos planetas e seus satélites depois de formados. Isso abriu caminho para uma especialização sem precedentes no campo. Em relação a todo o período anterior, é uma mudança decisiva.

Até o início do século XX, as explicações cosmogônicas encaravam o problema da origem do Sol e de todos os outros objetos que compõem o sistema solar de uma tacada só: a teoria teria que explicar todas as principais características conhecidas do sistema solar (principalmente, suas regularidades), partindo de um hipotético estado inicial da nebulosa solar, passando pela distribuição do momento angular no sistema, pela excentricidade das

órbitas dos cometas, pelos anéis de Saturno, seus satélites regulares e irregulares, e assim por diante.

As teorias do encontro estelar são uma primeira quebra com esse padrão. Essa quebra, porém, não se deu por motivos metodológicos, e sim por necessidades intrínsecas da elaboração das teorias: contornar o paradoxo do momento angular recorrendo a um evento catastrófico e estatisticamente improvável. A razão para conceber a origem dos planetas a partir de um Sol já completamente formado foi, nesses casos, de natureza teórica, não metodológica. Já a inovação da especialização contida no projeto de Safronov foi motivada por uma decisão metodológica: separar o problema da origem do sistema solar em ramos distintos, mantendo a explicação da formação dos planetas a uma distância prudente dos espinhosos problemas da origem da nebulosa solar.

De certo modo, a especialização nas pesquisas planetogônicas acompanharam uma mudança na própria organização geral do conhecimento científico, que desemboca na alta especialização da ciência contemporânea. Essa especialização, que se tornou cada vez mais pronunciada ao longo da segunda metade do século XX, impactou a produção de modelos da formação do sistema solar e é um dos aspectos que tornam muito mais complexa a categorização dos cenários planetogônicos mais atuais. Isso não quer dizer que as concepções sobre a origem da Terra ou da própria Lua, por exemplo, sejam construídas sem influência das teorias sobre os estágios anteriores (a formação do Sol, o estado inicial da nuvem protoplanetária etc.). Pelo contrário: existe hoje uma integração muito maior, mais articulada, entre o que se conhece do ambiente galáctico e dos sistemas planetários. Mas, aos poucos, os pesquisadores passaram a se dedicar a problemas distintos, ainda que interconectados. Mesmo que continuassem sendo concebidos como parte de um mesmo processo evolutivo, os diferentes estágios de formação dos muitos componentes do sistema solar começaram a ser tratados pelos cientistas como problemas que merecem tratamento específico e envolvidos por processos naturais também específicos a cada estágio de formação de planetas.

Motivado pela indução pessimista da história da ciência e pelo uso descontrolado de uma categorização inadequada, Brush deixou esses aspectos escaparem e não percebeu que o campo passava por uma transformação fundamental. Essa crítica se justifica tanto pela vantagem da retrospectiva (de fato, as décadas posteriores testemunharam uma sofisticação sem precedentes do conhecimento empírico sobre discos protoplanetários e exoplanetas), quanto porque a visão de Brush provavelmente estava obnubilada pela aplicação da

categorização monismo-dualismo a um contexto de produção científica em que não mais fazia sentido. Brush minimiza as alegações de cientistas do final deste período, sobre a existência do consenso em torno da ideia de que os planetas são subprodutos da formação do Sol, com a justificativa de que a história anterior não inspirava confiança na permanência das teorias consideradas sólidas num determinado momento histórico. Em 1988, numa carta a Brush, Weidenschilling avalia que a teoria de Safronov foi mais desenvolvida pela comunidade científica em comparação com as de Cameron (que tinham alguma adesão) e as de Alfvén (com quase nenhuma adesão) porque “fornece uma ‘*golden mean*’ com um conteúdo suficientemente estável para [gerar] trabalho significativo, mas com muitas áreas para progresso” (WEIDENSCHILLING apud BRUSH, 1996c, p. 172).

*

A pluralidade de hipóteses quanto a alguns problemas específicos da formação de planetas não é prejudicial à intuição de progresso dessa área de investigação científica. Pelo contrário: é possível que essa pluralidade tenha sido um dos motores dos avanços na área, principalmente no período de transição. A pluralidade de hipóteses não vedou a emergência de um consenso na área em torno da concepção mínima de que os planetas são subprodutos da formação de estrelas. Como afirma um dos cientistas da área, ainda que as observações de estrelas em formação não sejam decisivas para definir com precisão quais processos podem ou não ser aplicáveis para o nosso próprio Sol e seu sistema planetário, “uma *imagem coerente* emergiu acerca dos principais eventos e processos envolvidos na formação do sistema solar. Essa imagem supõe que o Sol é uma estrela típica, que se formou de forma similar a muitas das protoestrelas de pouca massa observadas hoje” (WEISSMAN, 2014, p. 22, grifos meus).

O filósofo da ciência Valter Bezerra desenvolveu uma argumentação que valoriza o pluralismo e a coerência – ainda que produzam inconsistências – na ciência e na filosofia. Bezerra reflete sobre o pluralismo em ciência como algo que adensa a rede teórica, podendo torná-la mais robusta, e não interditando o aumento de coerência da rede. É possível falar em pluralidade de hipóteses e aumento de coerência numa rede teórica (ainda que inconsistente) como algo que pode ser positivo.

A convergência teórica acerca de suposições básicas nas teorias de formação do sistema solar foi produzida a partir de um período fértil de criação de hipóteses alternativas, das décadas de 1940 à de 1980. Nesse caso, há o pluralismo contido na especialização em determinados problemas dentro da questão maior (os planetas são subprodutos da formação do Sol), que está razoavelmente respondida. Há uma pluralidade de explicações diferentes para os processos de formação de planetas a partir de disco protoplanetário, como o papel da turbulência e da viscosidade do disco, o papel da migração planetária, mecanismos de transferência de momento angular (como a freio magnético e o vento solar). Há, também, um pluralismo de ciências envolvidas, que engloba a pluralidade de abordagens sobre o problema: a cosmoquímica, a astrofísica, a astronomia planetária, a radioastronomia. É possível que toda essa pluralidade tenha sido instrumental para que as ciências planetogônicas tenham se tornado robustas e razoavelmente coerentes ao longo desse período. Bezerra concebe a robustez como

um valor cognitivo que se predica de redes ou sistemas de conhecimento — entendendo-a como a capacidade de sustentar uma prática cognitiva em andamento, mesmo diante das perturbações resultantes do acréscimo, remoção, modificação ou resignificação de elementos da rede. Sistemas coerentes de forma mais densamente conectada, e mais multidimensional, tenderão a ser menos sensíveis a alterações nas condições de contorno, heurísticamente mais férteis, com maiores recursos para construir uma interpretação de grande amplitude da realidade, possibilitando uma inteligibilidade racional mais rica (BEZERRA, 2018, p. 199).

Tomando emprestadas as concepções de Bezerra, proponho que o que emergiu no período de transição foi um sistema coerente, ainda que inconsistente, e que esse sistema começou a se tornar robusto a partir da década de 1970, quando os modelos de acreção de planetesimais e de instabilidade gravitacional em disco protoplanetário passaram a ser desenvolvidos por uma comunidade científica que vinha se aglutinando para atacar o problema da formação planetária de maneira especializada. Considerados em conjunto com o conhecimento sobre a turbulência em discos de acreção e a magneto-hidrodinâmica, esses modelos compõem um todo razoavelmente coerente de teorias, ainda que inconsistentes. Naturalmente, essa é uma avaliação ainda bastante provisória do período de transição. Com a vantagem de, na terceira década do século XXI, termos um certo distanciamento histórico da ciência planetogônica desse período (algo que Brush e Martins não podiam ter em meados da década de 1990), penso haver uma importante abertura de vias de investigação filosófica e

histórica sobre esse momento, que pode ser considerado um ponto de inflexão na história das planetogonias.

5.5. Acreção descontrolada: análise das últimas três décadas

5.5.1. O estado atual da área

Os problemas sobre a formação do sistema solar e de outros sistemas planetários são atualmente investigados com a concorrência de diferentes áreas das ciências naturais. O escopo desse campo de estudos é imenso. Pequenas mudanças ou adaptações na rede de teorias que compõem as ciências envolvidas podem gerar impactos nas teorias de formação de planetas; podem forçar a modificação de uma parte delas ou sedimentar uma interpretação de um determinado estágio de formação de planetas. Novas observações e resultados empíricos também produzem impactos. Por sua vez, as teorias de formação planetária são importantes para que seja moldada a nossa compreensão sobre a natureza e a diversidade dos sistemas planetários. Essas teorias constituem um conhecimento que ajuda a guiar as observações, na busca por discernir quais fenômenos devem ser investigados em maior profundidade, quais instrumentos serão desenvolvidos para essa investigação, quais objetos serão eleitos como prioritários, e assim por diante. Em suma, é um campo interdisciplinar que se desenvolve com retroalimentações entre uma malha teórica extensa e a tecnologia empregada na produção de dados observacionais e empíricos.

Alguns casos da história que apresentei no capítulo 3 ilustram esse quadro geral. Por exemplo: Chamberlin procurou desenvolver uma alternativa à hipótese nebular porque o conhecimento da teoria cinética dos gases, combinado com cálculos sobre a velocidade de escape de moléculas, apontou para a impossibilidade de que a Terra com origem “quente” (nebular, no sentido laplaciano) pudesse manter uma atmosfera primitiva rica em gás carbônico e vapor de água. Por sua vez, o caso do freio magnético é emblemático do fato de que obstáculos que pareciam intransponíveis (o paradoxo do momento angular) podem ser encarados com a alteração ou incremento das teorias que compõem o conhecimento de fundo das planetogonias.

Essa situação faz com que a avaliação de qualquer progresso na área tenha que ser realizada de maneira muito cuidadosa. Mas, como espero ter mostrado no capítulo 4, é possível começar a falar em progresso nas planetogonias com o que chamei de *afunilamento das possibilidades teóricas*. No começo do século XXI, sabemos *muito mais* sobre quais hipóteses ainda podem ser sustentadas e quais não se aplicam à formação do sistema solar em comparação com os três séculos anteriores. As ciências envolvidas no campo produziram um corpo de conhecimento que é suficiente para descartar as hipóteses sobre a formação de planetas que resultam apenas num cenário de raríssimos sistemas planetários. Hipóteses que levam em consideração que a formação de planetas ao redor de estrelas é algo comum, normal, consequência da formação de estrelas, naturalmente vem sendo desenvolvidas. Aquelas que exigem um acontecimento incomum, extraordinário, como gatilho para formação de planetas ao redor de estrelas, num processo em que a formação de estrelas e a formação de planetas são processos apartados e completamente independentes, também podem ser tomadas como implausíveis e insustentáveis. Enfim, as ciências envolvidas na área produziram um conhecimento nada desprezível que permite identificar determinadas rotas teóricas como becos sem saída e quais são as vias mais promissoras para que melhorem nossa compreensão do problema.

O que sabemos, no entanto, ainda é insuficiente para que seja possível elaborar uma teoria que explique consistentemente a formação de planetas em todos os seus estágios. Isso não invalida os progressos da área. É possível que essa situação mude num futuro próximo: os dados detalhados da nova geração de telescópios e radiotelescópios sobre os discos protoplanetários apenas começaram a ser produzidos e estudados. Seja como for, apesar de não haver uma teoria consistente que conecte todos os pontos da evolução de um disco de acreção circunestelar até o surgimento dos planetas, vários dos estágios de formação planetária são razoavelmente bem conhecidos, bem explicados, amarrados na rede de teorias físicas e químicas mais amplas e ancorados em dados empíricos e observacionais.

*

A questão da importância relativa do campo (ou, o quanto ele é promissor para a construção de carreiras científicas) é algo a ser considerado. Com a ciência de discos circunestelares e de exoplanetas, a área de formação planetária se tornou atualmente “nobre”.

Antes disso, era um assunto de interesse muito circunscrito – não porque não fascinasse os cientistas, mas porque não tinha a produção de suporte empírico tão grande quanto hoje, o que causava uma limitação séria na capacidade de filtragem das hipóteses. Inclusive isso explica por que o campo começou a crescer na década de 1960, justamente durante a era espacial. Voltando ainda mais no tempo, vemos que hipóteses planetogônicas só foram objeto de dedicação principal de uma carreira no caso do já maduro Chamberlin e seu parceiro Moulton (que perseguiu outros interesses científicos depois de ajudar o geólogo a formular a hipótese planetesimal). Jeans e Jeffreys tinham outros interesses considerados mais importantes. Suas planetogonias eram uma parte lateral de suas pesquisas. No século XIX, então, o cenário é ainda menos especializado e com contribuições ainda mais esparsas. As contribuições ao tema também foram obras bastante desimportantes na carreira dos cientistas destacados que lidaram com o problema nessa época. Não porque o problema fosse desinteressante, mas porque era praticamente intratável, não testável. O campo de jogo não tinha linhas claras e as regras eram vagas.

Temos, aqui, então, um exemplo de concatenação de fatores sociais, econômicos, culturais afetando a relevância da investigação – a possibilidade de destaque acadêmico, a possibilidade de receber recursos de fomento para a pesquisa – e, por conseguinte, alimentando o desenvolvimento de um campo científico. Mas esses fatores só se constituíram porque o avanço tecnológico abriu as vias necessárias para que o problema pudesse ser tratado de tal forma que permitisse a especialização, o teste de teorias, a resolução de problemas bem definidos; que permitisse a contribuição significativa de investigações de toda uma carreira científica àquilo que possui chances maiores de constituir um corpo de conhecimento científico robusto e mais perene. Cientistas não escolhem carreira apenas por motivações internas, mas também (e principalmente, dependendo do temperamento individual) por onde estão os recursos e a possibilidade de reconhecimento social, cultural e dos seus pares – o reconhecimento científico. Uma comunidade científica em crescimento provoca uma “acréção descontrolada” de cientistas mais qualificados para a investigação, o que retroalimenta o campo com maiores aportes de recursos para desenvolvimento de tecnologias de observação, e assim por diante. Há, aqui, uma abertura para futuros estudos históricos e sociológicos do campo.

Uma característica metodológica central das pesquisas sobre formação planetária atuais, que contrasta com a história das planetogonias até a metade do século XX, é o tratamento do problema da origem do sistema solar em partes distintas, embora interligadas. Durante quase toda a história, o problema da formação do sistema solar foi encarado *como um todo*. As diferentes propostas tinham como objetivo apresentar uma imagem internamente coerente, geralmente respeitando as teorias físicas em voga, e ao mesmo tempo ancorada num volumoso corpo de observações e dados empíricos acerca do sistema solar.

Talvez como sinal de avanços rumo ao estabelecimento de um paradigma científico, atualmente os pesquisadores tendem a atacar partes distintas do problema. A formação dos gigantes gasosos e sua migração, a formação dos planetas terrestres, o desenvolvimento progressivo dos planetesimais, os processos envolvidos na transferência de momento angular, e assim por diante, são problemas para os quais os pesquisadores vêm propondo soluções específicas, dentro do quadro geral de acreção de material sólido e gasoso em disco protoplanetário.

Apesar dos muitos detalhes ainda enigmáticos sobre a formação do sistema solar e de debates em torno de quais processos naturais específicos governaram ou foram determinantes para o surgimento dos planetas com as características hoje observadas, o *framework* inaugurado por cientistas do século XX como Safronov e Cameron, e refinado por cientistas contemporâneos como Bodenheimer e Boss, vem se mostrando metodologicamente frutífero, permitindo contribuições de pesquisa especializada em problemas muito específicos orientada por observação astronômica de sistemas planetários em diferentes estágios de evolução, algo não testemunhado até as últimas décadas do século XX.

Em parte por conta dessa especialização, as contribuições teóricas vêm sendo mais incrementais e pontuais do que globais. Há a área da astrofísica que estuda o nascimento de estrelas e a estrutura de estrelas jovens, outra que estuda as nebulosas moleculares etc. Há a pesquisa voltada especificamente à formação de planetas e a própria formação de planetesimais em disco protoplanetário. Há as pesquisas de cosmoquímica (que envolvem experimentações em laboratório) que tentam elaborar uma imagem mais detalhada das condições iniciais da nebulosa solar. Cada uma dessas subáreas contém ainda muitas outras ramificações. Mas as áreas são bem próximas e produzem impacto umas nas outras.

Esse processo de especialização vem sendo muito importante para o desenvolvimento do campo. As contribuições teóricas incrementais e pontuais que estamos testemunhando atualmente têm o objetivo de construir, não por meio de uma tacada só, mas

por muitos e muitos lances, uma teoria consistente da formação de sistemas planetários. Na maioria das vezes, esse objetivo está apenas implícito nas publicações mais atuais, mas às vezes ele surge explicitamente, como na primeira frase do primeiro artigo de análise dos dados do projeto DSHARP/ALMA, que fala em um “desejo antigo da comunidade”: chegar a uma teoria consistente de formação planetária. (ANDREWS et al, 2018). As observações de discos protoplanetários são tomadas como um ponto de partida nesse sentido. Vejamos também a formulação contida na revisão de Chambers e Halliday: “ainda não temos um modelo autoconsistente para a origem do sistema solar e de outros sistemas planetários” (CHAMBERS e HALLIDAY, 2014, p. 29). Esses cientistas afirmam, e penso que estão cobertos de razão para fazê-lo, que “os últimos dez anos [desde 2004] testemunharam um rápido progresso em quase todas as áreas da ciência planetária, e nossa compreensão da origem do sistema solar e de outros sistemas planetários melhorou enormemente como resultado disso” (ibid.).

O astrônomo britânico Michael Perryman (que liderou a concepção do projeto Gaia) sustenta que existe um *paradigma* de formação planetária em seu *textbook* sobre exoplanetas (PERRYMAN, 2011, p. 217). “A ampla consistência entre as consequências da migração [planetária] e as inúmeras facetas da arquitetura complexa do sistema solar dá mais peso ao paradigma geral da formação de planetas [*overall paradigm of planet formation*], de acordo com a hipótese da nebulosa solar, cujos fundamentos já existiam para explicar a própria existência do nosso sistema solar.” (PERRYMAN, 2012, p. 288, grifo meu). Perryman provavelmente não usa o termo *paradigma* em sentido kuhniano: logo em seguida, na mesma obra, menciona um paradigma aceito de formação estelar (instabilidades gravitacionais em nebulosas moleculares de gás e poeira) e, para estrelas muito massivas, fala em uma *alternativa* (acrecção competitiva). Sabemos que os paradigmas kuhnianos não aceitam rivais, ao menos não em um estado de ciência normal. O termo *paradigma* se tornou ubíquo e adentrou o uso mais coloquial de cientistas para significar, provavelmente, o conjunto de hipóteses coerentes (embora possam não constituir uma teoria consistente) que a comunidade científica decidiu desenvolver. Isso não quer dizer que as formulações kuhnianas de progresso sejam frutíferas para analisar o campo, especialmente se levarmos em consideração que os paradigmas kuhnianos exigem adesão acrítica e não convivem com outros paradigmas na mesma área num estágio de maturidade científica. O que mostrei ao longo deste trabalho sugere que as ciências de formação planetária não são um campo pré-científico ou imaturo.

Apesar de ter sido desconstruída a partir da década de 1960 com as contribuições de Kuhn, Lakatos e Laudan, a ideia de que o progresso científico se dá por meio da acumulação de conhecimento continua presente nas representações mais simpáticas à ciência. Entretanto, mesmo um exame superficial da história da ciência desencoraja qualquer visão cumulativa e linear do progresso científico. As limitações, falhas, erros, becos sem saída, mudanças bruscas de direção e revoluções caracterizam grande parte do desenvolvimento histórico das ciências.

Ainda há vários detalhes do sistema solar que os modelos de acreção de planetesimais desenvolvidos atualmente têm problemas para explicar de maneira completamente satisfatória. Embora existam variações e modificações, os modelos atuais são desenvolvidos a partir do conjunto teórico que emergiu com os trabalhos de planetogonistas das décadas de 1960 a 80, como Safronov e Wetherill, assim como conta com concepções desenvolvidas por alguns de seus contemporâneos que propuseram cosmogonias desde as décadas de 1940 e 1950, como Kuiper e Alfvén. O único cenário teórico desenvolvido com coerência pela comunidade científica atual concebe a formação dos planetas como dependente da (ou intimamente ligada à) formação das estrelas: os planetas se formam em discos circunstelares, ditos protoplanetários, que surgem a partir do nascimento das estrelas.

Ao contrário da situação descrita por Brush no final do século XX, há bons motivos para pensar que progressos importantes rumo a uma resposta sobre a formação de planetas na galáxia vêm sendo obtidos com o conhecimento dos discos protoplanetários e exoplanetas, e com o entrelaçamento entre esse conhecimento observacional e as teorias. As ciências planetárias e astrofísicas lidam atualmente com um grande número de planetas extrassolares já conhecidos, a partir de uma minúscula fatia da galáxia tendo sido vasculhada. Essas ciências contam, também, com dados observacionais cada vez mais detalhados sobre os discos protoplanetários. É razoável supor que o aumento do poder dos telescópios provavelmente continuará revelando em maiores detalhes uma maior quantidade desses objetos (essa, aliás, é uma das justificativas para o dispêndio de uma quantidade significativa de recursos em aparatos tecnológicos em terra, como o ALMA, e os espaciais, como o TESS).

5.5.2. Um progresso: definir e refinar problemas

Nesta seção, apresento uma amostra com três dos principais problemas que as ciências de formação de planetas encaram atualmente. Alguns deles são de longa data, outros surgiram a partir de soluções de problemas anteriores. O objetivo é mostrar que há progresso não apenas quando a solução para um problema é encontrada, mas também quando sabemos mais sobre o problema. Também há progresso quando, em relação ao estado do conhecimento científico do passado, as condições de contorno de um problema são melhor delineadas, suas questões são formuladas de maneira mais específica – ou seja, há progresso também quando a investigação é colocada numa rota mais promissora, capaz de gerar avanços pontuais e localizados.

O progresso científico no campo das planetogonias pode ser avaliado por meio de uma interpretação filosófica do progresso que enfatize a importância de definir, refinar e solucionar problemas. Essa abordagem foi inspirada por uma adaptação feita pelo filósofo Yafeng Shan para as concepções de Kuhn e Laudan sobre o progresso científico. Nessa adaptação, o progresso pode ser avaliado não apenas a partir da capacidade de resolução de *puzzles* e problemas de uma determinada área, mas também por sua capacidade de gerar problemas mais bem definidos (SHAN, 2019). Como a interpretação de Kuhn contém uma visão que considero inadequada para caracterizar a história das planetogonias – penso que é difícil caracterizar as teorias atuais como algo que perfaz um paradigma – decidi utilizar especificamente a adaptação para a metateoria de Laudan. A abordagem de Laudan não cai nas armadilhas kuhnianas de julgar que os cientistas aderem a um paradigma único sem nunca o questionar. Nessa adaptação, a capacidade de solucionar problemas não é a única medida do progresso científico: melhorias na capacidade de definir e refinar os problemas também são indicativos de que uma determinada área de investigação científica fez alguns progressos não-negligenciáveis.

Problema 1: *Como os planetesimais cresceram para além do diâmetro da escala do metro para formar objetos protoplanetários com quilômetros de diâmetro?* Ainda não se sabe como o processo de formação dos planetesimais ultrapassou o que chamado de *barreira da escala de metro (meter-sized barrier)*. Os principais motivos para que a barreira da escala de metro seja considerada um desafio para os modelos atuais é que objetos dessa escala tendem a espiralar para dentro da estrela (BOLEY et al, 2014) e também a alta velocidade relativa dos planetesimais nessa escala, o que causaria colisões muito energéticas que

destruiriam esses corpos assim que se formam, impedindo a formação de planetesimais maiores, essenciais para a acreção descontrolada que forma os protoplanetas.

Problema 2: *Como os planetas existentes sobreviveram à migração e não foram engolidos pelo Sol?* O *Nice Model* e a hipótese do *Grand Tack* sugerem que processos de migração planetária são fundamentais na modelagem da configuração atualmente exibida pelo sistema solar, mas ainda há um problema quanto à migração planetária causada pela acreção de gás: os planetas tendem a espiralar até serem engolidos pela estrela. “É possível que muitos objetos migraram totalmente para o Sol e foram, assim, perdidos, e a questão de como outros corpos sobreviveram à migração é uma das maiores questões não resolvidas da formação de planetas no presente” (CHAMBERS e HALLIDAY, 2014, p. 45).

Problema 3: *Qual processo é o responsável pela formação dos gigantes gasosos?* Como vimos na seção 3.5.1., há dois processos que podem estar envolvidos na formação de planetas gigantes: a acreção de núcleo e a instabilidade de disco (ou instabilidade gravitacional).

Uma interpretação apressada poderia concluir que essa pequena amostra de problemas revela o quanto o aumento do conhecimento empírico apenas tornou a questão original mais difícil de ser respondida. Mas os problemas estão muito melhor definidos atualmente. Em muitos dos casos em que ainda permanece uma incógnita de longa data – como os mecanismos que explicam a perda de velocidade de rotação das estrelas com o tempo e a transferência de momento angular para o disco circunestelar e seus planetas resultantes – também houve progressos significativos no entendimento da questão rumo a possíveis resoluções. Alguns dos problemas atualmente não solucionados incluem uma quantidade razoável de problemas que foram solucionados. Seria negar uma característica fundamental da investigação científica ignorar que cada resposta se ramifica em outras perguntas mais profundas, mais tecnicamente detalhadas.

Um exame do conhecimento que envolve o primeiro problema revela que os estágios anteriores e posteriores à *meter-size barrier* são relativamente bem conhecidos. Não há controvérsia quanto à noção de que as partículas de poeira presentes no disco formam planetesimais de pequena escala por coagulação de material sólido (metais, voláteis congelados) em diferentes distâncias da estrela. Também não há controvérsia quanto aos

estágios posteriores, que começa com planetesimais de diâmetro maior do que 1 km. Morbidelli sugere que a acreção de seixos⁹⁹ formou os objetos maiores do que a escala de metro (conforme a teoria de acreção de núcleo) mas com a novidade de supor que a acreção cessou em diferentes momentos da formação dos planetas, o que pode explicar a variação da composição química entre os gigantes gasosos e os planetas rochosos (MORBIDELLI, 2018, p. 451). Há uma significativa incerteza quanto ao nível de turbulência no disco protoplanetário, mas a turbulência pode ser responsável por criar muitos vórtices e concentrar matéria nas regiões entre esses vórtices, tornando possível a acreção de material da escala de metro.

Tomando emprestada a formulação de Laudan, há um grau saudável de tolerância às anomalias nessa tradição de pesquisa. A anomalia do *meter-sized barrier* não compromete (e até mesmo sublinha) a capacidade da tradição de pesquisa em progredir com uma medida satisfatória de resolução de problemas de estágios específicos da formação planetária e uma capacidade muito maior de delinear quais são as áreas problemáticas das teorias em jogo. A *barreira* foi identificada pela primeira vez no final da década de 1970 (WEIDENSCHILLING, 1977) e vem sendo objeto de adaptações teóricas recentes, compatíveis com a formação *in situ* de planetas rochosos em órbitas curtas (e.g. BOLEY et al, 2014).

O segundo problema mostra o quanto o conceito de migração planetária vem sendo frutífero para liberar as teorizações das antigas amarras da necessidade de conceber a formação dos planetas nas órbitas em que eles atualmente se apresentam. Isso é especialmente significativo para o problema do tempo de formação dos planetas mais externos, uma das principais anomalias inicialmente identificadas na teoria de acreção de planetesimais de Safronov. Na versão original desse modelo, Netuno demoraria muito mais tempo para se formar do que a idade mínima do sistema solar inferida pela datação de isótopos em meteoritos. Se Netuno se formou mais próximo do Sol e posteriormente migrou para órbitas mais externas, então é possível que o gigante gelado tenha se formado pelo processo de acreção de núcleo num espaço de tempo compatível com a duração do disco protoplanetário ao redor do Sol jovem. A migração de Júpiter e Saturno e as possíveis ressonâncias das órbitas dos dois gigantes gasosos nesse processo podem explicar como Netuno se distanciou do Sol. As órbitas dos quatro gigantes podem ter tido sua excentricidade atenuada pela

⁹⁹ Na escala de Wentworth (canônica em geologia), os seixos são os grãos de sedimentos maiores do que 4mm e menores do que 64mm (WENTWORTH, 1922).

interação com os planetesimais ainda presentes em grande número nessas regiões, e empurrado esse material tanto para dentro do sistema solar – produzindo o *late heavy bombardment* – quando para fora – gerando o cinturão de Kuiper. Essa ancoragem empírica dos modelos atuais não é nada desprezível. Além disso, esse terceiro problema apenas surgiu depois que a migração planetária foi aplicada à compreensão da evolução do sistema solar, com resultados frutíferos. Compreensivelmente, a produção de possíveis soluções para problemas anteriores gera novas perguntas mais específicas, que direcionam a pesquisa observacional e a elaboração de teorias em conjunto.

Com relação ao terceiro problema, sabemos que ambos os processos de formação de gigantes gasosos são plausíveis, com a preferência da comunidade científica pelo processo de acreção de núcleo. Tanto este processo quanto o de instabilidade de disco mostram-se compatíveis ou incompatíveis com diferentes aportes empíricos e são vistos como corroborados por diferentes observações. Darei três exemplos disso.

Um aporte empírico que pode vir a dar bases mais seguras para a escolha teórica entre a acreção de núcleo e a instabilidade de disco são os levantamentos detalhados de estrelas com alta metalicidade que possuem gigantes gasosos. Já se sabe que estrelas com planetas gigantes tendem a ter alta metalicidade (i.e. possuem mais elementos mais pesados que o hélio comparadas com a maioria das estrelas próximas ao Sol). Isso é compatível com um disco protoplanetário com grande quantidade de elementos necessários para formar um núcleo sólido de maneira gradual mas suficientemente rápida para que atraia o gás do disco antes que esse se disperse em até 10 milhões de anos. Isso corroboraria o modelo de acreção de núcleo desenvolvido a partir do *framework* de Safronov por Pollack, Bodenheimer e outros. “As correlações entre taxa de ocorrência de exoplanetas e a metalicidade da estrela pode ser usada para informar a seleção de alvos de futuros esforços de busca por planetas e são pistas valiosas sobre os processos de formação de planetas”, fornecendo “forte evidência de apoio ao modelo de acreção de núcleo” (JOHNSON et al, 2010).

O conhecimento da estrutura interna de Júpiter e Saturno está interligado com o problema de sua formação. Os dados obtidos com as missões robóticas Cassini e Juno não são conclusivos sobre a estrutura interna desses planetas. Há indícios de que Saturno possui um núcleo rochoso; pelo menos é atualmente considerada mais plausível a concepção de que sua estrutura possui uma concentração interna de materiais pesados maior do que a presente em Júpiter (HELLED, 2019). Um exemplo interessante de como o jogo teórico das planetogonias está articulado com o conhecimento empírico gerado por sondas robóticas é que os dados

extraídos da missão Juno sugerem que Júpiter tem um núcleo um tanto difuso, compatível com sua formação pelo processo rápido de instabilidade de disco. Mas isso não exige o abandono do processo de acreção de núcleo, pois é possível que um impacto gigante no começo da história do planeta tenha produzido a diluição do núcleo rochoso (LIU et al, 2019). Também é possível que a própria acreção gradual de planetesimais e posterior acreção de gás resulte num núcleo de elementos pesados não muito bem definido (HELLED e STEVENSON, 2017). A articulação das teorias com os dados observacionais pode ainda não ter fornecido instâncias de escolha teórica, mas os cientistas vêm desenvolvendo os modelos com mais dados empíricos à disposição e possuem um conhecimento um pouco mais definido sobre onde procurar pistas que possibilitem a escolha teórica.

De fato, num artigo recente, Boss desenvolveu simulações computacionais de seu modelo de instabilidade gravitacional de disco para extrair deles uma consequência preditiva importante: “se uma fração significativa de discos protoplanetários que se formam forem semelhantes aos assumidos aqui, deve haver uma população igualmente significativa de gigantes gasosos que ainda deve ser descoberta separados na ordem 15 UA de suas estrelas do tipo solar” (BOSS, 2017, p. 13). As novas missões de detecção de exoplanetas, como o TESS e o WFIRST, devem produzir as observações necessárias para que essa predição seja testada, constituindo uma importante instância de escolha teórica.

O aumento da capacidade de identificar, definir e refinar os problemas, ainda que soluções satisfatórias para os problemas específicos ainda não tenham sido produzidas, é um sinal importante de progresso científico de uma área. Se comparado com o estado das planetogonias antes da era de exploração espacial, da produção de telescópios espaciais e de grandes radiotelescópios terrestres, o estado atual apresenta claramente um progresso substancial nesse sentido. A possibilidade de que estudos especializados direcionados à solução de problemas muito específicos e o direcionamento da observação astronômica para obtenção de dados relevantes para a solução dos problemas consistem em progressos substanciais. Sinalizam, sobretudo, um maior potencial de produção de conhecimento das ciências de formação planetária e dos atuais modelos teóricos planetogônicos desenvolvidos pela comunidade científica, em comparação com a ciência produzida na área até as últimas décadas do século XX.

Capítulo 6. Conclusões

Does trying to understand the universe at all betray a lack of humility? I believe it is true that humility is the only just response in a confrontation with the universe, but not a humility that prevents us from seeking the nature of the universe we are admiring.

Carl Sagan (1934-1996), *Varieties of Scientific Experience* (2006)

Quando está em questão a formação do sistema solar, estaríamos em situação tão precária, hoje, quanto no final do século XIX, quando não havia maneira plausível de se adaptar a hipótese nebular ao paradoxo do momento angular? Ou mesmo no final da década de 1930, quando o problema da origem do sistema solar parecia não ter qualquer explicação científica satisfatória? Ou, ainda, entre as décadas de 1940 e 60, quando vários modelos competiam num contexto em que pouco se poderia fazer para testá-los? Acredito que não, e espero que a exposição até aqui tenha mostrado os motivos para essa crença.

É importante notar que, na busca por uma teoria que explique a formação do sistema solar, não se pretende dar conta de *todas* as características conhecidas do nosso sistema planetário. Se concebermos a questão dessa maneira – “procura-se a teoria que explique a origem do sistema solar de cabo a rabo, do interior do Sol aos anéis de Urano e ao cinturão de Kuiper e além” – é possível que estejamos ainda muito distantes de explicações plenamente satisfatórias. Ao contrário, o caminho pode bem ser o de diminuir as expectativas epistêmicas e buscar algo mais modesto. Uma das consequências da modéstia proposta é a de que a ausência de uma teoria consistente não deve ser interpretada como indício de falta de progresso científico.

A natureza das perguntas sobre o progresso de uma área científica impacta o próprio juízo sobre esse progresso. Afinal, progresso em relação a quê? Vimos que a própria adoção de categorias rígidas para classificar as teorias ao longo da história pode levar a conclusões demasiadamente céticas, extraídas da história da ciência, sobre o progresso

científico. Uma conclusão geralmente extraída da história da ciência, a indução pessimista é costumeiramente utilizada para sustentar que nossas atuais teorias terão o mesmo destino de todas as concepções científicas passadas: serão consideradas falsas. Mas a indução pessimista não é válida para que consideremos tudo o que sabemos sobre a natureza, hoje, como algo destinado a engrossar a longa lista de teorias e hipóteses falsas (BIRD, 2007, p. 73).

De volta à pergunta: progresso em relação a quê? Há dois níveis em que o problema deve ser encarado. Antes de impor ao desenvolvimento histórico de uma área científica um vetor de nosso desejo (a obtenção ou aproximação da verdade, por exemplo) e verificar como ela se saiu em alcançar objetivos apontados por esse vetor, deveríamos nos perguntar, primeiro, em que direção a área se desenvolveu, e se nessa direção a área se revelou frutífera: se mostrou avanços na capacidade de resolver problemas, se define e delimita melhor os seus problemas, se conduziu a um trabalho investigativo mais especializado, se motivou e se alimentou de um cada vez maior poder de produção de evidências e de aprofundamento da observação. É possível – acompanhando Bezerra – entreter formulações acerca da construção de uma rede de conhecimento mais robusta, densa e coerente, ainda que inconsistente. Nesse sentido, salta aos olhos a maneira com que a área construiu nas últimas quatro décadas uma interconexão profunda entre observações astronômicas de discos circunstelares, detecções de exoplanetas, o conhecimento de evolução estelar e de magneto-hidrodinâmica, o papel da turbulência em discos de gás e poeira, a cosmoquímica e a análise laboratorial de meteoritos.

Espero que o caminho percorrido por mim até aqui tenha mostrado que os desenvolvimentos da ciência dedicada a compreender a origem e a evolução do sistema solar foram muito frutíferos, ao mesmo tempo em que permanecem várias incógnitas e enigmas que o campo ainda tenta solucionar. Nas últimas quatro décadas muitos dos problemas foram resolvidos, mas talvez ainda mais importante do que isso, atualmente os cientistas da área encaram problemas mais bem definidos e delimitados do que os de cada um dos pontos arbitrariamente escolhidos dessa história (1960, 1900, 1850, 1800...). O trabalho investigativo encontra-se atualmente bastante especializado, mas também bastante integrado e interconectado, i.e. cada um dos conhecimentos especializados não se constituem como incompatíveis com as outras áreas. Esses desenvolvimentos ocorreram concomitantemente a um adensamento da rede de teorias e conhecimentos empíricos, numa relação de retroalimentação com o aprofundamento da capacidade de observação astronômica e da produção de evidências.

Tenho consciência de que essa abordagem, sozinha, é insuficiente para a maioria daqueles que querem saber se o que a área científica em questão está produzindo é conhecimento mais robusto e/ou uma aproximação da verdade. Incluo-me aí. Pois não vejo muito sentido falar em progresso científico apenas em função da solução de puzzles ou problemas, como Kuhn e Laudan procuraram fazer para contornar os velhos problemas das abordagens semântica (aproximação da verdade) e epistêmica (acúmulo de conhecimento) do progresso científico. Acompanho Chalmers quando afirma que “temos ... boa dose para aceitar que a exigência de certeza [das teorias] é utopia. Contudo, a exigência de que nosso conhecimento esteja sempre sendo *transformado, aperfeiçoado e ampliado* não é utopia” (CHALMERS, 1994, p. 57, grifos meus).

Imagino que a maior parte dos cientistas, ou melhor, a maior parte daqueles que se propõem a investigar algo (isso vale para todas as áreas de investigação empírica: a ciência, a história, o jornalismo etc.) tem como meta, deseja, busca chegar a alguma resposta que se aproxime da verdade sobre o mundo, ou que constitua conhecimento válido sobre como o mundo funciona. Também me incluo entre esses investigadores. É por esse motivo que não me contento em avaliar se houve progresso nas investigações científicas apenas em termos funcionais, i.e. meramente de definição e resolução de problemas. Esse constitui o segundo nível de abordagem do problema, que é sobre se teria havido progresso em direção a um melhor conhecimento sobre os processos de formação planetária, ou em direção a uma maior aproximação da verdade sobre os processos de formação planetária.

Esse segundo nível é complexo demais para ser encarado com objetivos ainda tão genéricos (“mais conhecimento” e “maior verossimilhança”), nessa área, pois englobam uma quantidade enorme de perguntas específicas sobre a natureza dos sistemas planetários. Uma estratégia mais simples, mas não desconectada desses objetivos filosóficos, é avaliar o progresso científico da área em função de perguntas específicas.

As perguntas específicas são: o corpo de conhecimento científico produzido nos últimos dois séculos progrediu em relação a esclarecer os principais parâmetros segundo os quais podemos elaborar respostas acerca da pluralidade de sistemas planetários e das condições necessárias para que se formem naturalmente? Quais são as respostas dadas pelo conjunto de conhecimento teórico e empírico que se apresentam menos instáveis no momento, em relação a essa pergunta? Se houve progresso nesse sentido, há justificativa para a crença de que essas respostas provisórias fornecem bases para que possamos delimitar o campo do possível na elaboração de hipóteses planetogônicas?

Como espero ter ficado claro até aqui, a história das planetogonias recomenda prudência na avaliação de que as atuais formulações teóricas serão duradouras. Mesmo os cientistas que dedicam toda a carreira ao problema têm consciência de que grande parte de suas hipóteses são provisórias. Prudência, no entanto, não quer dizer que se subscreva à indução pessimista extraída da história da ciência, nem que essa indução pessimista se aplique a *todos* os aspectos das planetogonias atuais – penso ser claro que a concepção de planetas como subprodutos da formação de estrelas consiste numa afirmação não-perecível, a não ser que uma revolução científica profunda mude completamente nossa forma de conceber a realidade.

Historicamente, as planetogonias mostraram-se muito sensíveis às mudanças no conhecimento de fundo, na rede de teorias dentro das quais se inserem, nos dados empíricos obtidos por técnicas e tecnologias em constante desenvolvimento. Mas isso não quer dizer que devemos considerá-las atualmente tão vulneráveis quanto as teorias do passado quanto a aspectos básicos (e.g. planetas como subprodutos da formação de estrelas). Nem mesmo devemos considerá-las apenas *vulneráveis* a essas mudanças. As teorias de acreção de planetesimais em disco protoplanetário se alimentaram das observações astronômicas. Foram, em larga medida, fortalecidas pelas observações. No capítulo 4 mostrei que algumas das mudanças na rede teórico-empírica forneceram *filtros* para as hipóteses aplicáveis à formação do sistema solar. Os filtros são compostos principalmente pelo que sabemos com segurança e pelo que podemos inferir a partir de pistas sobre discos protoplanetários, de planetas extrassolares, de nebulosas moleculares, de estrelas jovens. É possível afirmar que sabemos hoje muito mais sobre o nascimento de sistemas planetários do que há 50, 100 e 200 anos. Destaco *sistemas planetários*, no plural: sabemos que são múltiplos e que devem nascer aos borbotões. O leitor pode comparar essa situação das planetogonias atuais com toda a sua história anterior à década de 1980 – antes, portanto, da detecção de exoplanetas e da observação de discos circunstelares – e chegar a algumas conclusões por si mesmo.

Do processo de filtragem ao longo das últimas quatro décadas emergiu o cenário atual das investigações científicas sobre a formação de sistemas planetários. Embora esse cenário ainda contenha uma ampla variedade de hipóteses para problemas específicos, essas hipóteses e esses problemas específicos se definem e se desenvolvem a partir de um *consenso científico*: a formação de planetas a partir de discos protoplanetários que se formam junto com as estrelas é algo *normal* e não há indicações de que sejam necessários eventos extraordinários para que os processos que resultam em sistemas planetários ocorram.

*

Há diferentes graus de tolerância às anomalias em diferentes áreas da ciência. No caso específico das planetogonias, o grau de tolerância às anomalias deve ter sido parecido com as áreas mais “históricas” (a geologia, por exemplo) das ciências naturais até a década de 1980. A partir da era de observação de discos protoplanetários e detecção de exoplanetas o jogo epistêmico muda porque agora temos a chance de observar sistemas planetários em diferentes estágios de formação e evolução, além de haver uma maior amostragem de sistemas planetários maduros para exame à disposição. O jogo epistêmico mudou nas últimas décadas porque o campo está deixando de ser apenas baseado em reconstrução histórica. Isso se acopla à tendência atual de afunilamento das teorias em direção ao *framework* de discos de acreção de planetesimais. É um caso análogo à astrofísica: assim que se formou uma teoria sólida de evolução estelar, os astrônomos puderam trabalhar com a observação de análogos do que seria o Sol “jovem”, o Sol “maduro”, o Sol em seus estertores etc. No caso da superação parcial do caráter “histórico” das planetogonias, é como se um paleontólogo pudesse ver um embrião de dinossauro no microscópio, ou como se o geólogo pudesse examinar um análogo da Terra e analisar a composição química de sua atmosfera, ou mesmo como se um astrônomo planetário pudesse ver como Júpiter seria caso tivesse migrado para órbitas mais curtas. A frase de abertura de um artigo recente de análise estatística de 355 sistemas planetários extrassolares ilustra essa minha especulação: “sistemas de múltiplos planetas fornecem um registro fóssil da física que dirige a formação planetária” (WEISS et al, 2018).

A partir disso, a melhor explicação para que o campo das planetogonias tenha convergido para a concepção de que os planetas são subprodutos da formação estelar é a de que os cientistas tiveram motivos razoáveis, de caráter eminentemente epistemológico, para escolher *desenvolver, entreter, testar, trabalhar com* os modelos de formação planetária em discos de gás e poeira. Uma escolha racional parece estar na base da decisão de deixar de lado teorias catastrofistas como as de explosão de uma hipotética companheira solar ou de encontro estelar, que – a não ser que sejam feitas muitas modificações *ad hoc* – resultam na raridade dos sistemas planetários e discos circunstelares e estão baseadas na concepção de que planetas apenas se formam ao redor de estrelas tendo havido algum evento fora do comum, raro, difícil de ser reproduzido.

O critério subjacente e não-formalizado pelos cientistas da área pode ter sido a escolha por teorias que apresentam uma maior taxa de progresso, em consonância com a metateoria de Laudan, tornando a racionalidade uma função do progresso de resolução de problemas. Mas é mais do que isso: na minha interpretação, as *observações* tiveram peso decisivo na escolha da comunidade científica pelo desenvolvimento de teorias de nebulosa solar, embora não tenham sido o único fator.

Laudan tem razão em apontar que há uma gradação entre a aceitação e a rejeição, a crença e a descrença diante de uma teoria. Laudan chama a atenção para outras formas de relação entre cientistas e teorias, como a busca por entreter e testar uma ou mais hipóteses sem que se apresente ao cientista a necessidade de acreditar em ou aceitar como verdadeira uma teoria. Laudan também considera que o fato histórico de que muitas vezes os cientistas trabalham com teorias mais ou menos divergentes não é uma marca de irracionalidade, progresso insuficiente ou imaturidade de uma determinada área da ciência. Não há nada de irracional na postura de um cientista que propõe uma explicação para a formação de gigantes gasosos por meio de um processo hipotético enquanto entretém ao mesmo tempo a possibilidade de que outro processo incompatível esteja envolvido nisso. De fato, minha impressão é a de que a maioria dos cientistas se mostraram frequentemente abertos para que hipóteses sejam consideradas além daquela que apresentam num determinado evento ligado ao tema.

*

A existência de “Júpiteres quentes” e a grande abundância de “sub-Netunos” e “super-Terras” são peças relativamente novas que enriquecem o quebra-cabeças teórico. Além de fornecerem novos problemas, essas descobertas geram restrições empíricas específicas: qualquer que seja a explicação para a diversidade dos sistemas planetários, está além da dúvida razoável que existe um número enorme e uma variedade grande de sistemas planetários. Qualquer teoria deverá se adaptar a esse cenário. Ao mesmo tempo, as teorias cumprem papel auxiliar de direcionamento da pesquisa observacional, definindo a quantidade de recursos para o desenvolvimento de aparatos tecnológicos destinados a captar determinados tipos de fenômenos.

A possibilidade de abandonar, pragmaticamente, alternativas teóricas que concebem sistemas planetários como frutos de processos raros e extraordinários, é um sinal de progresso porque indica que as condições de contorno estão se tornando melhor delineadas. Também sugere que o conhecimento de fundo forneceu respostas satisfatórias para alguns dos termos mais importantes nas palavras-cruzadas que atravessam a nossa resposta desejada sobre a formação de sistemas planetários. Usando os conceitos de Haack, o *acceptance-status* e o *warrant-status* das principais concepções que delineiam os limites teóricos das planetogonias – discos protoplanetários, exoplanetas e nebulosas moleculares – estão fortemente correlacionados.

A forma com que os dados empíricos se coadunam entre si e são produzidos em consonância com a rede de teorias que constituem o *conhecimento de fundo* atual: o conhecimento sobre as reações termonucleares e a nucleossíntese estelar, sobre a estrutura e a evolução das estrelas, sobre a interação entre diferentes elementos químicos em condições diversas etc. Isso ilustra como “uma malha bem entrelaçada de razões bem ancorada na experiência pode ser uma indicação muito forte da verdade de uma alegação ou teoria” (HAACK, 2003, p. 53). A ancoragem empírica (*acceptance-status* e *warrant-status* fortemente correlacionados) somada à “malha bem entrelaçada” das teorias que formam a astrofísica atual constituem bons motivos para concluir que houve progressos importantes na área. Foi possível constatar que hipóteses catastrofistas são, muito provavelmente, becos sem saída teóricos. Também foi possível definir mais claramente um rumo em direção a teorizações coerentes cujo ponto de partida é a concepção de que sistemas planetários são subprodutos naturais da formação de estrelas. Isso em nada diminui a importância de influências sociais, econômicas e culturais nos rumos tomados pelo campo: a transformação das ciências planetárias em área “quente” de investigação científica não é meramente consequência de seu desenvolvimento epistemológico. A forma como a área se desenvolveu historicamente em relação com seu entorno sociocultural pode e deve ser objeto de investigações futuras, para que possamos obter uma compreensão mais completa sobre sua constituição como campo científico capaz de progredir e aglutinar um bom número de cientistas promissores.

Um problema muito diferente é discernir se houve progressos para que possamos decidir em que medida os processos envolvidos *na configuração atualmente apresentada* pelo sistema solar são universais ou particulares. Digamos que nosso objetivo seja recorrer às planetogonias e seu entorno epistêmico para saber com qual frequência planetas de massa

terrestre se encontram na zona habitável de estrelas de tipo solar. Nesse sentido, talvez seja possível entrever algum progresso na direção de uma possível solução, mas não muito mais do que isso. O *Nice Model* e o *Grand Tack* podem ser interpretados como primeiros passos para a compreensão do que deve ter sido, em detalhe, a história da interação entre os planetas recém-formados no disco de detritos e no disco protoplanetário, respectivamente. Não se sabe ao certo se as ressonâncias entre as órbitas dos planetas gigantes realmente ocorreu e em que medida ela ocorre em outros sistemas planetários. Os avanços no conhecimento sobre a estrutura detalhada dos discos protoplanetários e das zonas de acreção ao redor de estrelas jovens de tipo solar deverá fornecer o principal referencial empírico para a calibração das hipóteses sobre quais são as características que o sistema solar (e os processos envolvidos em sua evolução) compartilha com o restante dos sistemas planetários, e quais são exatamente suas particularidades. Em larga medida, o campo está num estágio em que não são as teorias planetogônicas que guiam as transformações das concepções, mas o avanço tecnológico que permite observações mais detalhadas de estrelas jovens e seus discos circunstelares.

Uma das grandes incógnitas atuais é a questão da *diversidade de configurações* dos sistemas planetários em função dos detalhes dos processos envolvidos na formação de planetas. É razoável supor que cada sistema planetário terá características únicas, que o distingue dos restantes – dado que a configuração madura de um sistema planetário é estocástica – ao mesmo tempo em que podem exibir determinados aspectos que se repetem. Além disso, as condições iniciais da formação de sistemas planetários em regiões diferentes da galáxia, dentro de uma mesma nebulosa molecular, e em momentos diferentes da história galáctica podem variar em aspectos não negligenciáveis. É nesse sentido que um especialista em exoplanetas e planetogonias afirma ser “provável que a arquitetura final de qualquer sistema planetário seja imprevisível e altamente sensível a uma infinidade de condições iniciais quase arbitrarias” (PERRYMAN, 2012, p. 283).

*

A meu ver, no centro do atual corpo de conhecimento científico sobre a formação do sistema solar estão as observações de discos protoplanetários. Como vimos no capítulo histórico, as nebulosas espirais eram consideradas por Chamberlin e Moulton como suportes observacionais de sua hipótese planetesimal, interpretadas como sistemas solares em processo

de formação. Os mesmos objetos também foram frequentemente interpretados no século XIX como evidências de que a hipótese nebular estava correta. Sabemos, no entanto, desde a década de 1920, que as nebulosas espirais não eram sistemas planetários nascentes, mas galáxias.

Hoje, as observações de discos protoplanetários são consideradas evidências de sistemas planetários em formação. Uma possível objeção filosófica a essa interpretação poderia ser derivada da história da ciência: da mesma forma que as nebulosas espirais se mostraram falsas evidências de formação planetária, nada garantiria que a interpretação de muitos dos discos circumstelares como sistemas planetários em formação se manterá no futuro. Brush parecia flertar com essa objeção quando fez a seguinte avaliação:

Da perspectiva histórica, não é surpreendente que as teorias planetogônicas sejam julgadas por critérios que não têm conexão direta com os planetas. A grande popularidade da hipótese nebular no século XIX era, em não pouca medida, graças à conexão feita entre nebulosas reais que alguém poderia ver nos céus, estrelas, e a origem do sistema solar. Sustentava a promessa (como o faz o atual modelo de colapso de núcleo) de que, se nossos telescópios pudessem ser um pouquinho mais poderosos, poderíamos realmente ver novos sistemas planetários nascendo (BRUSH, 1996c, 173-4).

Acredito que essa possível objeção pode ser respondida examinando as diferenças entre a situação epistêmica da astronomia de cem anos atrás e a atual.

Hanson, no clássico *Patterns of Discovery*, argumentou persuasivamente que há uma carga interpretativa incontornável em toda observação. Há uma dimensão teórica inegável na categorização de discos circumstelares como protoplanetários, *proplyds* e discos de detritos. Mas os discos são observados ao redor de estrelas que, não por coincidência, são aquelas que as teorias de estrutura e evolução estelar afirmam ser jovens (estrelas de tipo solar com menos de 10 milhões de anos). Nesse caso, até onde seria sensato recuar na aceitação da malha teórico-empírica que constitui o conhecimento científico sobre estrelas, planetas, nebulosas e galáxias? Um cético empedernido pode recuar até não aceitar que as estrelas são outros sóis, fazendo algum malabarismo difícil de imaginar para desconsiderar, por exemplo, a observação da paralaxe estelar – algo feito há dois séculos –, o que me parece insensato, por motivos óbvios. Mesmo assim, acredito ser sensato considerar a questão: em que diferem os discos protoplanetários de hoje e as nebulosas espirais do começo do século XX quanto a seu *status* de evidência observacional de sistemas planetários em formação?

Uma resposta pode ser extraída da própria história da ciência: o *status* das nebulosas espirais como evidência observacional de sistemas planetários em formação nunca foi considerado incontroverso e seguro pelos astrônomos até meados da década de 1920, quando finalmente foi descartado. Em contraste, não há controvérsia sobre a concepção de que muitos dos discos observados ao redor de estrelas jovens são sistemas planetários nascentes. O principal motivo para isso é o profundo e extenso entrelaçamento entre a malha teórica sobre evolução estelar e os avanços significativos na capacidade de observação astronômica.

Lembremos brevemente a história desses discos: no final da década de 1970, havia duas possibilidades sobre matéria ao redor de estrelas jovens, em formato esférico ou de disco. Em 1984, as observações de excesso no infravermelho com novo aparato tecnológico (o satélite IRAS) foram compatíveis com a existência de discos de poeira ao redor de estrelas relativamente jovens, como *Beta Pictoris*. Nas décadas seguintes, muitos discos circumstelares foram observados em diferentes comprimentos de onda, por diferentes telescópios e radiotelescópios. Observações refinadas do disco de *Beta Pictoris* mostraram se tratar de um disco pobre em gás, característico do que é chamado de disco de detritos, um estágio posterior ao protoplanetário. Posteriormente, um planeta gigante com órbita que se completa a cada 17 anos foi observado pelo método de imagem direta em meio ao disco de detritos dessa estrela (LAGRANGE et al, 2010).

Em comparação, a natureza das nebulosas espirais, até a década de 1920, era profundamente contenciosa. A concepção das nebulosas espirais como sistemas planetários em formação nunca esteve baseada em conhecimento astronômico considerado minimamente seguro, diferentemente do conhecimento sobre os variados discos circumstelares. Em 1899, por exemplo, uma análise espectroscópica da espiral de Andrômeda apontou determinadas características compatíveis com um sistema de estrelas, não com um sistema planetário em formação. O astrônomo responsável pelas observações, Julius Schneider, anunciou que as suspeitas de que a espiral de Andrômeda era um grande sistema de estrelas tinham sido elevadas ao nível de “certeza” – concepção ainda considerada muito radical para grande parte dos astrônomos da época (DICK, 2019, p. 346). “Há apenas um século”, diz Dick, “os astrônomos não conseguiam diferenciar uma estrutura de 40 unidades astronômicas em extensão (nosso sistema solar) de outra um milhão de vezes maior (as galáxias). Eles não tinham ideia da escala do universo, nem da interrelação de suas partes constituintes através da evolução cósmica” (idem, p. XXIX).

Nos termos caros a Haack, o *acceptance-status* das nebulosas espirais como evidências de sistemas planetários em formação não era o mesmo do *acceptance-status* atual sobre muitos dos discos circunstelares como protoplanetários. Além disso, de maneira ainda mais decisiva, o *warrant-status* dessas evidências é *muito diferente*: o *warrant-status* das nebulosas espirais como evidências de formação planetária era ainda mais precário do que seu *acceptance-status*. De maneira altamente contrastante com o que acontecia com as nebulosas espirais no final do século XIX, a interpretação de que são protoplanetários ou de detritos muitos dos discos circunstelares está baseada num conhecimento astronômico muito seguro: graças a medições precisas de paralaxe estelar, sabemos que objetos como *Beta Pictoris* e *Vega* são estrelas e estão em nossa vizinhança galáctica (e estão acompanhadas de disco). O mesmo vale para muitas das estrelas *T Tauri* e outros objetos estelares jovens, observados com seus discos por uma variedade de instrumentos e em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Para que a escala de magnitude desses objetos mude – e, com isso, se altere completamente a interpretação de que constituem evidências de formação planetária – é preciso uma revolução profunda da malha teórico-empírica que está na base das ciências naturais envolvidas nessas observações. Não há qualquer indício de como e quando isso poderia ocorrer.

Isso não constitui um contraponto às concepções filosóficas basilares de que há uma carga teórica inerente às observações. Tampouco avanço essa interpretação em contraponto à noção incontroversa de que o conhecimento científico e as interpretações dos dados observacionais estão sempre sujeitos a revisões. O ponto, aqui, é o de mostrar que devem ser evitados paralelismos extraídos da história da ciência que motivam ceticismo injustificado. Não há um paralelismo válido, quanto à avaliação do estatuto de evidência observacional de sistemas planetários em formação, entre as nebulosas espirais de cem anos atrás e os discos protoplanetários de hoje. Como vimos na seção 4.3., mesmo com todo o grau de interpretação e carga teórica que deve ser reconhecido haver em qualquer observação astronômica, é sensato pensar que há bons motivos para que os cientistas acreditem se tratar de discos protoplanetários os discos ao redor de estrelas jovens, evidências concretas da formação de planetas ao redor de suas estrelas hospedeiras. Análises epistemológicas das novíssimas observações detalhadas dos discos protoplanetários e sua relação com as planetogonias devem ser, penso, uma das mais importantes contribuições que a filosofia da ciência pode fornecer a essa área do conhecimento científico e à tentativa de sondarmos o lugar da humanidade no mundo natural.

A meu ver, mais do que qualquer outro fator, foi o conjunto robusto de evidências observacionais de discos circunstelares e exoplanetas que indicou a rota teórica tomada pelas ciências da formação planetária nas últimas três décadas. Talvez pela primeira vez na história das planetogonias, as observações apontaram claramente os rumos para as teorias. É muito sugestivo que as observações decisivas tenham sido justamente de objetos externos ao sistema solar: como não podemos observar a nós mesmos de fora – de fora tanto no espaço quanto no tempo – devemos poder aprender sobre nós mesmos observando a nossos semelhantes.

*

O progresso que procurei capturar, em boa medida, é o de fazer interrogações mais bem definidas e mais bem informadas sobre a natureza, mapeando com mais clareza quais são as propostas incompatíveis com o que sabemos sobre a natureza. Se uma área da ciência conseguiu fazer isso, então pelo menos nesse sentido ela fez progressos significativos. Isso não quer dizer que devemos identificar *consenso científico* a *obtenção de verdade*. Mas as ciências naturais, como um todo, capturaram algo aproximadamente verdadeiro sobre a natureza ao delimitar algumas condições de contorno fundamentais para que as explicações sobre a formação de planetas e suas narrativas sobre a evolução do sistema solar sejam cada vez mais afinadas (no sentido de *fine-tuned*). Parafraçando Jeans, a natureza começa a sussurrar que os planetas nascem umbilicalmente ligados às estrelas, compondo um cenário cósmico de produção em larga escala de incontáveis mundos ao redor de incontáveis sóis.

Referências bibliográficas

- AITKEN, R. G. “The Nebular Hypothesis”. In: *Astronomical Society of the Pacific*. pp. 111-122, 1906.
- _____. “New Nebular Theory Explaining Origin of Planets Proposed”. In: *Science*, New Series, Vol. 64, No. 1652 (Aug. 27, 1926), pp. 191-198.
- ALBARÈDE, F. “Late Veneer”. In: GARGAUD, M. et al. (eds) *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011/2015.
- ALEXANDER, R. “The Dispersal of Protoplanetary Disks Around Binary Stars”. In: *The Astrophysical Journal Letters*, 757:L29, 2012.
- ALFVÉN, H. “Remarks on the rotation of a magnetized sphere with application to solar rotation”. In: *Arkiv För Matematik, Astronomi Och Fysik*. Band 28 A. No. 6. 1942a.
- _____. “On the Cosmogony of the Solar System”. In: *Stockholms Observatoriums Annaler*, vol. 14, pp. 2.1-2.33, 1942b.
- _____. “Non-Solar Planets and the Origin of the Solar System”. In: *Nature*, 152, p. 721, 1943.
- _____. *Plasma physics, space research and the origin of the solar system*. Nobel Lecture, 1970.
- ALFVÉN, H. e ARRHENIUS, S. *Evolution of the Solar System*. National Aeronautics and Space Administration, 1976.
- ALIBERT, Y. et al. “Migration and giant planet formation”. In: *Astronomy & Astrophysics*. 417 (2004) L25-L28.
- _____. “Extrasolar planet population synthesis”. In: *Astronomy & Astrophysics*. 526, A63 (2011).
- _____. “Theoretical models of planetary system formation: mass vs semi-major axis”. In: *Astronomy & Astrophysics*. July, 2013.
- ALVES, J. et al. “A Galactic-scale gas wave in the solar neighborhood”. In: *Nature*, 2020. Versão de acesso antecipado.
- ANDERS, E. “Meteorites and the Early History of the Solar System”. In: JASTROW, R.; CAMERON, A. G. W. (orgs.). *Origin of the Solar System. Proceedings of a Conference Held at the Goddard Institute for Space Studies*, New York, January 23–24, 1962.
- ANDREWS, S. M. et al. “The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). I. Motivation, Sample, Calibration, and Overview”. In: *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 869, Number 2. December 26, 2018, pp. 1-15.
- BARNES, B. T. *S. Kuhn and Social Science*. London: MacMillan Press, 1982.
- BECKER, G. F. “A Possible Origin for Some Spiral Nebulae”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 2, No. 1 (Jan. 15, 1916), pp. 1-8.

- BECKWITH, S. V. W. et al. "A Survey for Circumstellar Disks around Young Stellar Objects". In: *Astronomical Journal* v.99, p. 924.
- BEUTHER, H. et al (eds.) *Protostars and planets VI*. Tucson: University of Arizona Press, 2014.
- BEZERRA, V. A. "Por que o pluralismo interessa à epistemologia?". In: *Revista de Filosofia Moderna e Contemporânea*, Brasília, v.6, n.1, jul. 2018, p. 187-207.
- BICKERTON, A. W. *The Romance of the Heavens*. London: Swan Sonnenschein & Co., 1901.
- BIRD, A. "What is Scientific Progress?". In: *Noûs*, Vol. 41, No. 1 (Mar., 2007), pp. 64-89.
- BLOOR, D. *Knowledge and Social Imagery*. University of Chicago Press, 1976/1991.
- BODENHEIMER, P. "Evolution of rotating interstellar clouds. III - On the formation of multiple star systems". In: *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 224, Sept. 1, 1978, p. 488-496.
- _____. "Historical notes on planet formation". In: *Planet Formation: Theory, Observations, and Experiments*. Edited by Hubert Klahr and Wolfgang Brandner. Cambridge University Press, 2006.
- BODENHEIMER, P. e POLLACK, J. "Calculations of the Accretion and Evolution of Giant Planets: The Effects of Solid Cores". In: *Icarus*, 67, 1986, pp. 391-408.
- BOLEY, A. C. et al. "Overcoming the Meter-Size Barrier in Large Protoplanetary Disks". In: *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 792, Number 2, 2014.
- BONNELL, I. A. et al. "Star formation through gravitational collapse and competitive accretion". In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 370, Issue 1, July 2006, pp. 488-494.
- BOSS, A. "Giant planet formation by gravitational instability". In: *Science*, 276, pp. 1836-1839, 1997.
- _____. "The Effect of Protoplanetary Disk Cooling Times on the Formation of Gas Giant Planets by Gravitational Instability". In: *The Astrophysical Journal*, 836:53 (15pp), 2017.
- _____. *Universal Life: An Inside Look Behind the Race to Discover Life Beyond Earth*. Oxford University Press, 2019.
- BROWN, M. *The Science of the Solar System*. Curso online oferecido pela Caltech. 2016.
- BRUSH, S. G. "A Geologist among Astronomers: The Rise and Fall of the Chamberlin-Moulton Cosmogony. Part 1". In: *Journal for the History of Astronomy*, Vol. 9, 1978.
- _____. "A Geologist among Astronomers: The Rise and Fall of the Chamberlin-Moulton Cosmogony. Part 2". In: *Journal for the History of Astronomy*, Vol. 9, 1978.
- _____. "The Nebular Hypothesis and the Evolutionary Worldview". In: *Hist. Sci.* XXV, 1987, pp. 245-278.
- _____. "Origin of the Solar System". In: *Reviews of Modern Physics*, Vol. 62, No. 1, January 1990, pp. 43-112.
- _____. *A History of Modern Planetary Physics. Volume 1: Nebulous Earth*. Cambridge University Press, 1996a.

- _____. *A History of Modern Planetary Physics. Volume 2: Transmuted Past.* Cambridge University Press, 1996b.
- _____. *A History of Modern Planetary Physics. Volume 3: Fruitful Encounters.* Cambridge University Press, 1996c.
- BRYDEN, G. et al “Frequency of Debris Disks Around Solar-Type Stars: First Results From a *Spitzer* MIPS Survey”. In: *The Astrophysical Journal*, 636:1098, 2006.
- BUTTERFIELD, H. *The Whig Interpretation of History.* W. W. Norton & Company, 1931.
- CAMERON, A. G. W. “Origin of the Solar System”. In: *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1988. 26: pp. 441-72.
- CAMERON, A. G. W. e TER HAAR, D. “Historical Review of Theories of the Origin of the Solar System”. In: JASTROW, R.; CAMERON; A. G. W. (orgs.). *Origin of the Solar System.* Proceedings of a Conference Held at the Goddard Institute for Space Studies, New York, January 23–24, 1962.
- CARUS, P. “Poincaré’s Cosmogonic Hypothesis” In: *The Monist*, Vol. 22, No. 3 (JULY, 1912), p. 480.
- CASINI, P. *Newton e a Consciência Europeia.* São Paulo: Edunesp, 1995.
- CIEZA, L. A. et al. “Imaging the water snow-line during a protostellar outburst.” In: *Nature*, volume 535, pp. 258–261 (14 July 2016).
- _____. “The *Spitzer* c2d Survey of Weak-Line T Tauri Stars. II. New Constraints on the Timescale for Planet Building.” In: *The Astrophysical Journal*, Volume 667, Number 1, 2007, pp. 308-328.
- CIEZA, L. A. e WILLIAMS, J. P. “Protoplanetary Disks and Their Evolution”. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2011, 49:1, pp. 67-117.
- CHALMERS, A. *What Is This Thing Called Science?* Hackett Publishing Co., 1976/1999.
- _____. *Science and its Fabrication.* University of Minnesota Press, 1990. Edição brasileira citada: *A Fabricação da Ciência.* São Paulo: Edunesp, 1994.
- CHAMBERLIN, T. C.; MOULTON, F. R. “Certain Recent Attempts to Test the Nebular Hypothesis”. In: *Science*, New Series, Vol. 12, No. 293 (Aug. 10, 1900), pp. 201-208.
- _____. “The Development of the Planetesimal Hypothesis”. In: *Science*, New Series, Vol. 30, No. 775 (Nov. 5, 1909), pp. 642-645.
- CHAMBERS, J. E. “Planetary Migration: What Does It Mean for Planet Formation?” In: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2009. 37:321–44.
- CHAMBERS, J. E. e HALLIDAY, A. N. “The Origin of the Solar System”. In: SPOHN, T., BREUER, D. e JOHNSON, T. (eds.). *Encyclopedia of the solar system.* Elsevier, 2014, pp. 29-54.
- CHASE, P. E. “Criteria of the Nebular Hypothesis” In: *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 17, No. 101 (Jan. - Jun., 1878), pp. 341-345.
- CHIBENI, S. S. “As posições de Newton, Locke e Berkeley sobre a natureza da gravitação.” In: *Scientiae Studia* v. 11, n. 4, 2013.
- _____. “Afirmando o consequente: Uma defesa do realismo científico (?).” In: *Scientiae Studia* 4 (2): 221-249, 2006.

- _____. “Quinton's Neglected Argument For Scientific Realism”. In: *Journal For General Philosophy Of Science*, v. 36, n. 2, p. 393 - 400, 2005.
- _____. “A Inferência Abdutiva e o Realismo Científico.” In: *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 3, 6(1): 45-73, 1996.
- CREATH, R. “Logical Empiricism”. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford University, 2017. Disponível online em: <https://plato.stanford.edu/entries/logical-empiricism/> Acessado em 23/02/2019.
- CUNNINGHAM, C. J. *Investigating the Origin of the Asteroids and Early Findings on Vesta: Historical Studies in Asteroid Research*. Springer, 2017.
- CURTIS, H. D. “A Study of Absorption Effects in the Spiral Nebulae” In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 29, No. 169 (June, 1917), pp. 145-146.
- D'ANGELO, G et al. “Giant Planet Formation”. In: SEAGER, S. (ed.) *Exoplanets*. University of Arizona Press, 2010, pp. 319-346.
- DARWIN, C. “Charles Darwin to J. Fiske. Down, December 8, 1874”. In: *Life and Letters of Charles Darwin*. Pronoum, 2016.
- DARWIN, G. H. “On the Mechanical Conditions of a Swarm of Meteorites, and on Theories of Cosmogony” In: *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 45 (1888 - 1889), pp. 3-16.
- DAWSON, R. I. e JOHNSON, J. A. “Origins of Hot Jupiters”. In: *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2018. 56:175–221.
- DESCARTES, R. *O Mundo ou Tratado da Luz – O Homem*. Campinas: Edunicamp, 2009.
- _____. *Les Principes de Philosophie*. In: C. Adam & P. Tannery (eds.) *Oeuvres de Descartes*. Tomo IX-2. Paris, Vrin, 1971. (1ª ed. latina 1644; francesa 1647.)
- DICK, S. J. *The Biological Universe: the twentieth-century extraterrestrial life debate and the limits of science*. Cambridge University Press, 1996.
- _____. “Other Worlds: The Cultural Significance of the Extraterrestrial Life Debate.” In: *Leonardo*, Vol. 29, No. 2 (1996), pp. 133-137.
- _____. *Life on Other Worlds: the 20th Century Scientific Debate*. Cambridge University Press: 1998.
- _____. *Discovery and Classification in Astronomy: Controversy and Consensus*. Cambridge University Press: 2013.
- _____. *Classifying the Cosmos: How We Can Make Sense of the Celestial Landscape*. Springer Nature Switzerland: 2019.
- DOUGLAS, H. “Pure science and the problem of progress.” In: *Studies in History and Philosophy of Science* (2014).
- DRESSING, C.; CHARBONNEAU, D. “The Occurrence of Potentially Habitable Planets Orbiting M Dwarfs Estimated from the Full Kepler Dataset and an Empirical Measurement of the Detection Sensitivity”. In: *The Astrophysical Journal*, Volume 807, Issue 1, article id. 45, 23 pp. (2015).
- DUNER, D. *The Natural philosophy of Emanuel Swedenborg: A Study in the Conceptual Metaphors of the Mechanistic World-View*. Springer, 2013.

- DURISEN, R. H. et al. “Gravitational Instabilities in Gaseous Protoplanetary Disks and Implications for Giant Planet Formation”. In: *Protostars and Planets V*. Tucson: University of Arizona Press, 2007, pp. 607-622.
- ENCRENAZ, T. et al. *The Solar System*. Springer: 2004.
- EVANS, N. et al. *The Diskionary: a glossary of terms commonly used for disks and related objects*. 2009/2018. Disponível online em: <http://www.ipac.caltech.edu/spitzer2008/talks/Diskionary.html> Acessado em 09/01/2020.
- FAIRBRIDGE, R.W. “Titius—bode law”. In: *Encyclopedia of Planetary Science. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht, 1997.
- FERRARO, V. C. A. “The non-uniform rotation of the sun and its magnetic field”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 97, pp. 458-472, 1937.
- FEYERABEND, P. *Against Method*. Verso, 2010.
- FISKE, J. *The Unseen World, and Other Essays*. E-book, Project Gutenberg. 1876/2008.
- FRESSIN, F. et al. “The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets”. In: *The Astrophysical Journal*, Volume 766, Issue 2, article id. 81, 20 pp. (2013).
- FULTON, B. et al. “The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets”. In: *The Astronomical Journal*, Volume 154, Issue 3, article id. 109, 19 pp. (2017).
- GARGAUD, M. et al. “Chronological History of Life on Earth”. In: GARGAUD, M. et al. (eds.) *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011/2015.
- GARLICK, M. A. *The Story of the Solar System*. Cambridge University Press, 2002.
- GOLDREICH, P.; TREMAINE, S. “Disk-satellite interactions”. In: *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 241, Oct. 1, 1980, p. 425-441.
- GOMES, R. et al. “Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets”. In: *Nature*, Vol 435 | 26 May 2005.
- HAACK, S. *Manifesto of a Passionate Moderate*. University of Chicago Press, 1998.
- _____. *Defending Science – Within Reason*. Prometheus Books, 2003.
- HACKING, I. *Representing and Intervening*. Cambridge University Press, 1983.
- HARDING, S. (org.). *Can Theories be Refuted?: Essays on the Duhem-Quine Thesis*. Springer, 1976.
- HARRISON, K. M. *Astronomical Spectroscopy for Amateurs*. Springer Science & Business Media, 2011.
- HARTMANN, W. K. “The Planet-Forming State: Toward a Modern Theory.” In: *Protostars and Planets*. Edited by T. Gehrels. University of Arizona Press, 1978, p. 58.
- HARVEY, P. M. et al. “Far-infrared observations of optical emission-line stars - Evidence for extensive cool dust clouds”. In: *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 231, July 1, 1979, p. 115-123.
- HELLED, R. “The Interiors of Jupiter and Saturn.” *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Disponível online em: <https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-175>. Acessado em 10/01/2020.

- HELLED, R. e STEVENSON, D. “The Fuzziness of Giant Planets’ Cores.” In: *The Astrophysical Journal*, 840, 2017.
- HERCZEG, T. “Planetary cosmogonies”. In: *Vistas in Astronomy*, vol. 10, Issue 1, pp. 175-206, 1968.
- HERSCHEL, W. “Astronomical Observations Relating to the Construction of the Heavens, Arranged for the Purpose of a Critical Examination, the Result of Which Appears to Throw Some New Light upon the Organization of the Celestial Bodies”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 101 (1811), pp. 269-336.
- HOFFLEIT, D. “The Quest for Stellar Parallax”. In: *Popular Astronomy*, Vol. 57, p. 259, 1949.
- HOGERHEIJDE, M. R. “Protoplanetary Disk”. In: GARGAUD, M. et al. (eds.) *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011/2015, pp. 2045-2056.
- HORENSTEIN, D. *A New All-sky Catalogue of Candidate Protoplanetary Disks from Aggregated Optical and Infrared Surveys*. Thesis, Georgia State University, 2017.
- HSU, D. C. et al. “Occurrence Rates of Planets Orbiting FGK Stars: Combining Kepler DR25, Gaia DR2, and Bayesian Inference.” In: *The Astronomical Journal*, Volume 158, Number 3, August 2019.
- HUMPHREYS, P. (org.). *The Oxford Handbook of Philosophy of Science*. Oxford University Press, 2016.
- ISELLA, A. et al. “Detection of Continuum Submillimeter Emission Associated with Candidate Protoplanets.” In: *The Astrophysical Journal*, 879(2), L25, 2019.
- JEANS, J. *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics*. Cambridge University Press, 1919.
- _____. *The Mysterious Universe*. Cambridge University Press, 1930.
- _____. *The Stars in Their Courses*. Pelican Books, 1931.
- _____. “Non-Solar Planetary Systems”. In: *Nature*, 152, p. 721, 1943.
- JOHNSON, J. A. et al. “Giant Planet Occurrence in the Stellar Mass-Metallicity Plane”. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 122, Number 894, 2010.
- KANT, I. *Universal History and Theory of the Heavens or An Essay on the Constitution and the Mechanical Origin of the Entire Structure of the Universe*. Richer Resources Publications, 2008. Edição do Kindle.
- KANT, I., HASTIE, W. *Kant’s Cosmogony: As in His Essay on the Retardation of the Earth, and in His Natural History and Theory of the Heavens*. Glasgow, James Maclehose & Son. 1900.
- KANT, I., JAKI, S. L. *Universal natural history and theory of the heavens*. Scottish Academic Press, 1981.
- KIRKWOOD, D. "On the Nebular Hypothesis, and the Approximate Commensurability of the Planetary Periods". In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Containing Papers, Abstracts of Papers, and Reports of the Proceedings of The Society* 29 (November 1868-June 1869): pp. 96-103.
- _____. “The Cosmogony of Laplace” In: *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 18, No. 104 (Jul. - Dec., 1879), pp. 324-326.

- KRUMHOLZ, M. R. et al. “The formation of stars by gravitational collapse rather than competitive accretion.” In: *Nature*, 438, 332–334 (2005).
- KUHN, T. *The Copernican Revolution*. Harvard University Press, 1957/1985.
- _____. *The Structure of Scientific Revolutions*. The University of Chicago Press, 1962/1996. Edição brasileira citada: *A Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1962/2005.
- _____. *The Road Since Structure*. The University of Chicago Press, 2000.
- KUIPER, G. “On the Origin of the Solar System” In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 37, No. 1, (Jan. 1951).
- LAGRANGE, A. M. et al. “A giant planet imaged in the disk of the young star beta Pictoris.” In: *Science*. 2010 Jul 2;329(5987):57-9.
- LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. (ed). *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press, 1970.
- LAPLACE, P. S. *Exposition du Système du Monde*. Paris: Chez Courcier, 1808.
- _____. *Exposition du Système du Monde*. Paris: Bachelier, 1824.
- LAUDAN, L. *Beyond Positivism and Relativism: theory, method and evidence*. Westview Press, 1996.
- _____. *O Progresso e seus Problemas: rumo a uma nova teoria do conhecimento*. São Paulo: Edunesp, 1978/2011.
- LAWRENCE, P. “Heaven and Earth - The Relation of the Nebular Hypothesis to Geology”. In: In: YOURGRAW, W.; BRECK, A. *Cosmology, History and Theology*. New York: Plenum Press, 1977, pp. 159-178.
- LAYZER, D. “The Formation of Stars and Galaxies: Unified Hypotheses”. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 2, p. 341-362, 1964.
- LE GARS, S. *L'émergence de l'astronomie physique en France (1860-1914): acteurs et pratiques*. Histoire. Université de Nantes, 2007.
- LEVIN, B. Y. *Origin of the Earth and Planets*. Moscow: Foreign Languages Publishing House, 1958.
- LEVY, E. H. “Protostars and planets: overview from a planetary perspective.” In: *Protostars and planets II*. Tucson: University of Arizona Press, 1985, pp. 3-16.
- LISSAUER, J. J. “On the Diversity of Planetary Systems”. In: CELNIKIÉ, L. M.; VAN TRAN, J. T. *Planetary Systems: The Long View*. Editions Frontières, 1998, pp. 45-50.
- LISSAUER, J. J., DAWSON, R. I., & TREMAINE, S. “Advances in exoplanet science from Kepler.” In: *Nature*, 513(7518), pp. 336–344, 2014.
- LIU, S. et al. “The formation of Jupiter’s diluted core by a giant impact.” In: *Nature*, 572, 355–357 (2019).
- LIZANO, S. e SHU, F. H. “Formation and heating of molecular cloud cores”. In: *Physical processes in interstellar clouds; Proceedings of the NATO Advanced Study Institute*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1987, p. 173-193.
- LYNDEN-BELL, D. e PRINGLE, J. E. “The Evolution of Viscous Discs and the Origin of the Nebular Variables”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 168, Issue 3, September 1974, Pages 603–637.

- LYTTLETON, R. A. “On the Origin of the Solar System”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 101, pp. 216-226, 1941.
- MACPHERSON, H., Jr. “Kant as an Astronomical Thinker” in: *Popular Astronomy*, vol. 21, pp. 424-427, 1913.
- MARTINS, R. de A. *O universo: teorias sobre sua origem e evolução*. São Paulo: Editora Moderna, 1994.
- MARTINS, J. H. C. et al. “Spectroscopic direct detection of reflected light from extra-solar planets”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 436(2) · August 2013.
- _____. “Evidence for a spectroscopic direct detection of reflected light from 51 Pegasi b”. In: *Astronomy & Astrophysics*, Volume 576, id.A134, 2015.
- MASTERMAN, M. “The Nature of a Paradigm”. In: LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. (ed). *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press, 1970, pp. 59-89.
- MCKEE, C. F. e OSTRIKER, E. C. “Theory of Star Formation”. In: *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, vol. 45, Issue 1, pp. 565-687, 2007.
- MCNALLY, D. “Theories of Star Formation”. In: *Reports on Progress in Physics*, Volume 34, Issue 1, pp. 71-108 (1971).
- MERLEAU-PONTY, J. “Laplace as a Cosmogonist”. In: Yourgrau W., Breck A.D. (eds) *Cosmology, History, and Theology*. Springer, Boston, MA, 1977.
- MEYER, M. R. et al. “Evolution of Circumstellar Disks Around Normal Stars: Placing Our Solar System in Context”. In: REIPURTH, B.; JEWITT, D.; KEIL, K. (eds.) *Protostars and Planets V*. Tucson: University of Arizona Press, 2007, pp. 573-588.
- MONIN, J.-L. et al. “Disk Evolution in Young Binaries: From Observations to Theory”. In: In: REIPURTH, B.; JEWITT, D.; KEIL, K. (eds.) *Protostars and Planets V*. Tucson: University of Arizona Press, 2007, pp. 395-409.
- MORALES, J. C. et al. “A giant exoplanet orbiting a very-low-mass star challenges planet formation models”. In: *Science*, 27 Sep 2019: Vol. 365, Issue 6460, pp. 1441-1445.
- MORBIDELLI, A. “Calcium signals in planetary embryos”. In: *Nature*, 19 March 2018, pp. 451-2.
- MORBIDELLI, A. et al. “Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System”. In: *Nature*, Vol 435 | 26 May 2005.
- _____. “Building Terrestrial Planets”. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. Vol. 40:251-275 (May 2012).
- MORROW, M. “Birth of Our Solar System” In: *The Science News-Letter*, Vol. 53, No. 17 (Apr. 24, 1948), pp. 266-267.
- MOTTE, F. et al. “The unexpectedly large proportion of high-mass star-forming cores in a Galactic mini-starburst.” In: *Nature Astronomy*, 2, 478–482 (2018).
- MOULTON, F. R. “Remarks on Recent Contributions to Cosmogony”. In: *Science*, New Series, Vol. 30, No. 760 (Jul. 23, 1909), pp. 113-117.
- “New Birth of Earth Theory”. In: “The Science News-Letter”, Vol. 56, No. 17 (Oct. 22, 1949), p. 259.

- NEWKIRK, B. L. "The Ring Nebula in Lyra" In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 16, No. 94 (February 10, 1904), pp. 13-25.
- NICHOL, J. P. *Views of the Architecture of the Heavens*. Cambridge University Press: 1839/2010.
- NIELSEN, E. L. et al. "The Gemini Planet Imager Exoplanet Survey: Giant Planet and Brown Dwarf Demographics from 10 to 100 au". In: *The Astronomical Journal*, 158:13, 2019.
- OBERHEIM, E. and HOYNINGEN-HUENE, P. "The Incommensurability of Scientific Theories". In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2018 Edition), Edward N. Zalta (ed.).
- OLIVA, A. "Existe uma só Ciência, a da Vida Social?" In: *Revista Eletrônica Informação e Cognição*, v. 6, p. 5-14, 2007.
- OLIVEIRA, A. J. "George Sarton e Thomas Kuhn: para que serve uma história da ciência". In: *Kínesis*, Vol. VIII, nº 17, Julho 2016, p.64-84.
- PALMQUIST, S. "Kant's Cosmogony Re-evaluated" in: *Studies in History and Philosophy of Science*. Vol. 18, no. 3, pp. 255 – 269, 1987.
- PERRYMAN, M. *The Exoplanet Handbook*. Cambridge University Press, 2011.
- _____. "The Origin of the Solar System." In: *European Review*, vol. 20, p. 276-290, 2012.
- POLLACK, J. et al. "Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas". In: *Icarus*, 124, 62–85 (1996).
- POLLARD, W. G. "The Prevalence of Earthlike Planets". In: *American Scientist*, Vol. 67, No. 6 (November-December 1979), pp. 653-659.
- POOR, C. L. "The Evolution of Worlds by Percival Lowell". *Science*, New Series, Vol. 31, No. 796 (Apr. 1, 1910), pp. 506-507.
- POPPER, K. *A Lógica da Descoberta Científica*. São Paulo: Cultrix, 1974.
- PROCTOR, R. *Other Worlds Than Ours*. New York: P. F. Collier and Son, 1870/1901.
- RANYARD, A. C. "The Space-Penetrating Power of Large Telescopes". In: *Science*, Vol. 18, No. 445 (Aug. 14, 1891), pp. 85-87.
- RAY, T. "Losing spin: the angular momentum problem". In: *Astronomy & Geophysics*, Volume 53, Issue 5, October 2012, Pages 5.19–5.22.
- RICCI, L. et al. "The Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys Atlas of Protoplanetary Disks in the Great Orion Nebula". In: *The Astronomical Journal*, 136:2136–2151, 2008 November.
- RIGHTER, K. et al. "Partitioning of palladium at high pressures and temperatures during core formation". In: *Nature Geoscience*, 1, 321–323 (2008).
- ROSSI, P. *Os Sinais do Tempo*. São Paulo: Cia. das Letras, 1992.
- _____. *Naufrágios sem Espectador*. São Paulo: Edunesp, 2000.
- ROUAN, D. e HAGHIGHIPOUR, N. "Beta Pictoris b". In: GARGAUD, M. et al. (eds) *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011/2015.
- RUSSELL, H. N. "Dark Nebulae" In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 8, No. 5 (May 15, 1922), pp. 115-118.

- _____. *The Solar System and Its Origin*. The Macmillan Company, 1935.
- SAFRONOV, V. *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets*. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem: Wiener Bindery Ltd., 1972.
- SAGAN, C. *Billions and Billions*. Ballantine Books: 1997.
- SALMERON, R. "The environment and physics of the early solar system". In: *Australian Journal of Earth Sciences* (2012) 59:2, pp. 237-252.
- SCHAFFER, S. "The Nebular Hypothesis and the Science of Progress". In J. R. Moore (Ed.), *History, Humanity and Evolution*. Essays for John C. Greene (pp. 131-164). Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- SCHULZ, N. S. *From Dust to Stars: Studies of the Formation and Early Evolution of Stars*. Springer, 2012.
- SCHMIDT, O. *A Theory of Earth's Origin: Four Lectures*. University Press of the Pacific, 1958/2001.
- SEE, T. J. J. "The Existence of Planets about the Fixed Stars" In: *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 49, No. 195 (Jul., 1910), pp. 222-229.
- SHAN, Y. "A New Functional Approach to Scientific Progress." In: *Philosophy of Science*, Volume 86, number 4, pp. 739-758, October 2019.
- SHAPLEY, H. "A Short Period Cepheid with Variable Spectrum" In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 2, No. 3 (Mar. 15, 1916), pp. 132-136.
- SHUSTOV, B. M. "Protostars and Planets II: review". In: *Soviet Astronomy*, Vol.31, NO. 2/MAR, P.238, 1987.
- SMITH, B. A. e TERRILE, R. J. "A Circumstellar Disk Around Beta Pictoris". In: *Science*, Vol. 226, 21 December 1984, pp. 1421-1424.
- SOLMSEN, F. "Aristotle and Presocratic Cosmogony." In: *Harvard Studies in Classical Philology*, 63, pp. 265–282, 1958.
- SPITZER Jr., L. "The Dissipation of Planetary Filaments." In: *Astrophysics Journal*, pp. 675 – 688, 1939.
- _____. *Physical Processes in the Interstellar Medium*. Weinheim: Wiley-VCH, 1978/2004.
- STANLEY, M. "So simple a thing as a star: the Eddington–Jeans debate over astrophysical phenomenology." In: *The British Journal for the History of Science*. Volume 40, Issue 1, pp. 53-82, 2017.
- SUZUKI, D. et al. "Microlensing Results Challenge the Core Accretion Runaway Growth Scenario for Gas Giants". In: *The Astrophysical Journal Letters*, 869:L34 (6pp), December 20, 2018.
- TAN, J. C. et al. "Massive star formation." In: *Protostars and Planets VI* (H. Beuther et al., eds.), pp. 149–172. University of Arizona, Tucson, 2014.
- TER HAAR, D. "Recent Theories About the Origin of the Solar System". In: *Science*, April 23, 1948, Vol. 107, pp. 405-411.
- "The Romance of the Heavens". In: *Nature*, 63, 1901, p. 607.

- TSIGANIS, K. et al. "Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System". In: *Nature*, Vol 435 | 26 May 2005.
- VAN HELDEN, A. "Rings in Astronomy and Cosmology, 1600 – 1900". In: *Planetary Rings*. University of Arizona Press, 1984, p. 12-22.
- WALSH, K. et al. "A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration". In: *Nature*, Volume 475, Issue 7355, pp. 206-209 (2011).
- WEIDENSCHILLING, S. J. "Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula". In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 180, Issue 2, September 1977, Pages 57–70.
- WEINBERG, S. "Steven Weinberg: the 13 best science books for the general reader". In: *The Guardian*, 3 April 2015.
- WEISS, L. et al. "The California-Kepler Survey V. Peas in a Pod: Planets in a Kepler Multi-planet System are Similar in Size and Regularly Spaced". In: *The Astronomical Journal*, 155:48 (12pp), 2018.
- WEISS, L. M. et al. "The California-Kepler Survey V. Peas in a Pod: Planets in a Kepler Multi-planet System are Similar in Size and Regularly Spaced". In: *The Astronomical Journal*, 155:48 (12pp), January 2018.
- WEISSMAN, P. "The Solar System and Its Place in the Galaxy". In: SPOHN, T., BREUER, D. e JOHNSON, T. (eds.). *Encyclopedia of the solar system*. Elsevier, 2014, pp. 3-28.
- WENTWORTH, C. K. "A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments." *The Journal of Geology*, 30, no. 5 (1922): 377-92.
- WETHERILL, G. W. "Late Heavy Bombardment of the Moon and Terrestrial Planets". In: *Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*, volume 6, page 866, (1975).
- _____. "The role of large bodies in the formation of the earth and moon". In: *Proc. Lunar Schi. Conf. 7th*, 1976, pp. 3245-3257.
- _____. "Formation of Terrestrial Planets". In: *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1980. 18: 77-113.
- _____. "Formation of the Earth". In: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1990. 18:205-56.
- WETTLAUFER, J. S. "Cartesian vortex theory, cosmic vortices, and the route to cosmogony." In: *Physics Today*. May 2011, pp. 66-7. Disponível online em: <http://users.math.yale.edu/users/wettlaufer/articles/CoffeeQuickStudy.pdf> Acessado em 10/02/2019.
- WINN, J. N. "Who Really Discovered the First Exoplanet?". In: *Scientific American*. November 12, 2019. Disponível online em: <https://blogs.scientificamerican.com/observations/who-really-discovered-the-first-exoplanet/> Acessado em 20/12/2019.
- WHITROW, G. J. "The Role of Time in Cosmology". In: YOURGRAW, W. e BRECK, A. (orgs.). *Cosmology, History and Theology*. New York: Plenum Press, 1977, pp. 159-178.
- WOOLFSON, M. M. "The Solar System - Origin and Evolution: a Personal View". *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 34, 101-102, 1993.

- _____. *The Origin and Evolution of the Solar System*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000.
- _____. *The formation of the solar system: theories old and new*. London: Imperial College Press, 2015.
- WRAY, K. B. “Kuhn’s Social Epistemology and the Sociology of Science”. In: DEVLIN, W.; BOKULICH, A. (orgs.). *Kuhn’s Structure of Scientific Revolutions – 50 Years On*. Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- ZEIGLER, D. “Evolution and the Cumulative Nature of Science”. In: *Evo Edu Outreach* (2012) 5: pp. 585–588.
- ZHANG, S. et al. “The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). VII. The Planet–Disk Interactions Interpretation”. In: *The Astrophysical Journal Letters*, 869:L47, 2018.