

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN**

**BRUNO DANIEL**

**“Impacto de estações irregulares sobre a reconstrução de eventos do Observatório Pierre Auger”**

Dissertação de mestrado apresentada  
ao Instituto de Física Gleb Wataghin da  
UNICAMP para obtenção do título de  
Mestre em Física

**ORIENTADOR: ERNESTO KEMP**  
**CO-ORIENTADOR: ANDERSON CAMPOS FAUTH**

Este exemplar corresponde à versão final  
da dissertação defendida pelo aluno  
Bruno Daniel e orientada pelo Prof.  
Dr. Ernesto Kemp



ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS, 2012**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR  
MARIA GRACIELE TREVISAN – CRB8/7450 - BIBLIOTECA DO IFGW  
UNICAMP**

D221i Daniel, Bruno, 1987-  
Impacto de estações irregulares sobre a reconstrução de eventos do Observatório Pierre Auger / Bruno Daniel. -- Campinas, SP : [s.n.], 2012.

Orientador: Ernesto Kemp.  
Co-orientador: Anderson Campos Fauth.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física “Gleb Wataghin”.

1. Observatório Pierre Auger. 2. Raios cósmicos.  
3. Detectores de partículas. 4. Chuveiros de raios cósmicos.  
I. Kemp, Ernesto, 1965- II. Fauth, Anderson Campos, 1957-  
III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física “Gleb Wataghin”. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em inglês:** Impact of irregular stations on the event reconstruction of the Pierre Auger Observatory

**Palavras-chave em inglês:**

Pierre Auger Observatory

Cosmic rays

Particle detectors

Cosmic ray showers

**Área de Concentração:** Física

**Titulação:** Mestre em Física

**Banca Examinadora:**

Ernesto Kemp [Orientador]

João Carlos Costa dos Anjos

José Augusto Chinellato


**Data da Defesa:** 07-05-2012

**Programa de Pós-Graduação em:** Física



MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE MESTRADO DE BRUNO DANIEL – R.A. 059328 APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, EM 07/05/2012.

**COMISSÃO JULGADORA:**



---

Prof. Dr. Ernesto Kemp - Orientador do Candidato  
DRCC/IFGW/UNICAMP



---

Prof. Dr. João Carlos Costa dos Anjos – CBPF



---

Prof. Dr. José Augusto Chinellato – DRCC/IFGW/UNICAMP

# Agradecimentos

Registro aqui meu agradecimento às pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Início pelo meu orientador, o Professor/General Ernesto Kemp, com quem tive o prazer de trabalhar nestes anos. Além de ter guiado meu trabalho, sempre com boas ideias e soluções para todas as dificuldades, seu otimismo, amizade e bom humor foram fatores muito importantes para me manter despreocupado e motivado.

Agradeço também ao Prof. Anderson Fauth, pelos ensinamentos e orientação, principalmente nas atividades no laboratório. Sem sua experiência com os detectores e eletrônica, jamais teria aprendido tudo que sei sobre instrumentação. Infelizmente tivemos problemas com os equipamentos, tendo o período de diversão no barracão acabado precocemente.

Outra pessoa cuja participação foi fundamental é o Lucas, com quem passei muito tempo trabalhando, num primeiro momento procurando ou enrolando cabos no laboratório e posteriormente brigando com a instalação do Offline. Um aluno bastante cuidadoso ao trabalhar, que já começou dando o sangue no barracão, e hoje é meu companheiro de sala no departamento. Com certeza, um parceiro para a vida toda.

Também é importante lembrar o companheiro de sala Rafael Surtado, sempre presente e participativo, ajudando desde a época de iniciação científica. Nunca me esquecerei de nossas viagens (principalmente as pela Argentina), dos momentos de apreciação de belezas exóticas e das discussões sobre legitimidade das greves e uso de bonés.

Ao agora Professor, Rogério Menezes de Almeida, agradeço por ter me convidado para trabalhar no grupo de pesquisa do qual faço parte hoje. Sem sua influência, poderia ter seguido um caminho completamente diferente em minha carreira. Além disso, foi uma pessoa cuja amizade guardarei para sempre.

Agradeço a todos os outros que contribuíram diretamente, como o Luís Fernando no período inicial de trabalhos no laboratório, Márcio Muller e Vanessa, por fornecerem algumas das simulações utilizadas e ajudarem com os problemas no Offline, Hendrik e Prof. Vitor de Souza pelas dicas sobre o cluster de computadores de São Carlos, Jair por fornecer seus dispositivos de tecnologia improvisada provenientes de materiais reaproveitados (gambiarras Jairlips), Fumaça e outros membros mais antigos do barracão por terem montado muitos dos instrumentos que utilizei e aos professores do DRCC.

Citando agora as pessoas que não contribuíram diretamente para o trabalho, mas sim para minha vida, começo por minha família, meus pais e irmã, responsáveis por tudo que conquistei até hoje. O incentivo e apoio que me deram foi fundamental para tomar minhas decisões e persistir numa carreira tão difícil quanto a que segui. Não há palavras que descrevam precisamente o quanto sou grato a eles.

Outra pessoa importante é minha noiva Tamires, sem a qual eu não seria

feliz de verdade. Agradeço a ela por ter entrado em minha vida e participado dela intensamente. Sua companhia nos momentos difíceis e compreensão nas situações em que estive ausente sempre serão lembrados.

Agradeço também aos meus amigos de Americana: Denis, Flávio, Gabi, Henrique, Fernanda, Sarah, Giovanni, Karen, Hell, Jana, Adriana, Roni, Lucas, Lisa, Suelen, Rodrigo e outros, que proporcionaram grandes momentos de diversão. O contato com estas pessoas, alguns amigos desde a infância, permite que eu não me isole no universo paralelo do IFGW.

Aos amigos da Unicamp ainda não citados, Douglas, Matheus, Norbas, Pedro, Baiano, Chico Balanceado, Ambrósia, Herminiane, Cássia, Artur, Bruno Miguez, Zavanin, Daniel ("O Daniel"), Gilson, Bulba, Betinho, Thays, Uóston, Últon, Giácomo, Gregory, Thiago, Xandão, Aeliton, Carlão, Sakalauskas, entre muitos outros, sou grato pelos momentos de distração em nossos cafés, churrascos, viagens de ônibus ou almoços no bandeirão, que muitas vezes levaram mais tempo que o previsto, mas certamente valeram a pena. Faço uma menção especial ao amigo Juliano Grigoletto, com quem morei durante cerca de dois anos e foi um grande companheiro em minha jornada.

Agradeço ao pessoal da CPG, DRCC e secretaria de graduação, Gilvani, Armando, Lindinalva, Clotilde, Júlia, Sandra, Nivaldo, Eliene, Cida e todos os professores, por estarem sempre dispostos a ajudar com o que foi necessário.

Por último, um agradecimento à UNICAMP e IFGW por fornecerem a estrutura e suporte para meu trabalho e estudo, e às agências de financiamento, CAPES, CNPQ e FAPESP.

Muito obrigado a todos!

# Resumo

O Observatório Pierre Auger foi desenvolvido com o objetivo de estudar os raios cósmicos de energia ultra-alta ( $> 10^{18}$  eV), cujo fluxo é extremamente baixo. Sua configuração híbrida consiste em 1600 detectores de radiação Cherenkov, produzida pela passagem de partículas dos chuviros atmosféricos na água, e 4 estações com telescópios de fluorescência, que detectam a emissão de luz que ocorre após a excitação das moléculas de nitrogênio da atmosfera. O observatório cobre uma área de cerca de  $3000$  km<sup>2</sup>.

Neste trabalho será feita uma descrição detalhada dos detectores de superfície e de seu procedimento de reconstrução de eventos, no qual são determinadas a energia e direção de chegada do raio cósmico primário. Serão mostrados alguns resultados da caracterização e teste do tanque Cherenkov de Campinas e análises realizadas sobre o procedimento de reconstrução, nas quais são estudadas as consequências da exclusão de uma estação e o impacto da utilização de tanques irregulares, com fotomultiplicadoras de ganho alterado ou desligadas. Os resultados destes estudos mostram que os procedimentos de calibração e seleção de eventos atualmente utilizados no Observatório Pierre Auger são eficientes, garantindo a qualidade dos dados, mas que algumas modificações poderiam trazer um aumento na taxa de detecção, e também que a configuração mencionada em algumas propostas de expansão do observatório, com apenas uma fotomultiplicadora por tanque, pode reduzir a confiabilidade dos eventos.

# Abstract

The Pierre Auger Observatory was designed to study the ultra-high energy ( $> 10^{18}$  eV) cosmic rays, whose flux is extremely low. Its hybrid configuration consists on 1600 detectors of Cherenkov radiation, produced by the passage of particles from the air showers by water, and 4 fluorescence telescope stations, to detect light emitted after the excitation of nitrogen molecules of the atmosphere. The observatory covers an area of  $3000 \text{ km}^2$ .

This work will give a detailed description of the surface detectors and its event reconstruction procedure, where the energy and arrival direction of the primary cosmic ray is determined. Some results of the characterization and test of the Cherenkov tank of Campinas will be showed, and also some analysis about the reconstruction, with studies of the consequences of the exclusion of a station and the impact of the use of irregular tanks, with photomultipliers operating in low gain or turned off. This studies show that the calibration and event selection procedures used at the Pierre Auger Observatory are efficient, providing high quality for the data taken, but some modifications could bring an increase of the detection rate. It is also shown that the configuration for the tanks mentioned in some proposals of expansion of the observatory, with a single photomultiplier by tank, could reduce the confiability of the events.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Raios cósmicos e chuueiros atmosféricos</b>	<b>9</b>
2.1	Raios cósmicos de energia ultra-alta . . . . .	9
2.1.1	Origem e mecanismos de aceleração . . . . .	10
2.1.2	Espectro de energia e propagação . . . . .	11
2.1.3	Composição química . . . . .	13
2.2	Chuueiros atmosféricos extensos . . . . .	14
2.2.1	Componentes de um chuueiro . . . . .	14
2.2.2	Desenvolvimento longitudinal . . . . .	15
2.2.3	Desenvolvimento lateral . . . . .	16
2.2.4	Múons atmosféricos . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Detecção de raios cósmicos e o Observatório Pierre Auger</b>	<b>18</b>
3.1	Detectores de partículas . . . . .	19
3.1.1	Detectores a gás . . . . .	20
3.1.2	Fotomultiplicadoras e cintiladores . . . . .	21
3.1.3	Detectores Cherenkov . . . . .	22
3.1.4	Detectores de semicondutores . . . . .	24
3.2	Detecção de raios cósmicos . . . . .	24
3.3	O Observatório Pierre Auger . . . . .	26
3.3.1	Detector de superfície . . . . .	26
3.3.2	Telescópios de fluorescência . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Tanques Cherenkov do Observatório Pierre Auger</b>	<b>32</b>
4.1	Desenvolvimento dos detectores . . . . .	32
4.2	Sistema de aquisição de dados . . . . .	35
4.3	Calibração . . . . .	36
4.4	O tanque Cherenkov de Campinas . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Reconstrução de eventos do detector de superfície</b>	<b>44</b>
5.1	Seleção de eventos . . . . .	44
5.1.1	<i>Trigger</i> local . . . . .	45
5.1.2	Seleção de eventos no Offline . . . . .	47



5.2	Reconstrução de eventos . . . . .	50
5.2.1	Determinação do plano do chuveiro . . . . .	50
5.2.2	A função de distribuição lateral . . . . .	51
5.2.3	Ajustes para determinação dos parâmetros do chuveiro . . . . .	52
5.2.4	Determinação da frente curva do chuveiro . . . . .	53
5.2.5	Estimativa da energia . . . . .	53
5.3	Resultados da reconstrução de eventos . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Impacto de estações irregulares na reconstrução</b>	<b>59</b>
6.1	Consequências da ausência de estações em um evento . . . . .	59
6.2	Utilização de tanques irregulares . . . . .	65
6.3	Estudo de eventos reais do Observatório Pierre Auger . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>73</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Desde sua descoberta, no início do século XIX, os raios cósmicos têm sido uma importante fonte de estudos em Física. Através deles foram realizadas inúmeras descobertas na área de partículas elementares, contribuindo para o desenvolvimento do modelo padrão. Hoje, o interesse nesta radiação se deve também à possibilidade de utilizá-la em astronomia e astrofísica. O conhecimento da origem, propagação e mecanismos de aceleração dos raios cósmicos de energia ultra-alta (superior a  $10^{18}$  eV) pode trazer novas ferramentas para observação do espaço e caracterização de objetos aos quais não se tem acesso, além de permitir o estudo de fenômenos de energia inatingível com aceleradores de partículas.

No início da década de 1990, foi idealizado um experimento que permitisse aumentar consideravelmente a estatística de eventos nestas energias, o que só seria possível através da construção de um detector que cobrisse uma área gigantesca, já que o fator limitante para o estudo destas partículas é seu baixo fluxo. Desta ideia surgiu o Observatório Pierre Auger, construído na cidade de Malargue na Argentina, cobrindo uma área de mais de  $3000$  km<sup>2</sup>. O experimento detecta chuviscos atmosféricos extensos gerados por raios cósmicos ultra-energéticos ao penetrarem na atmosfera, através de detectores de superfície e telescópios de fluorescência. A construção do primeiro sítio do observatório já foi finalizada, pelo esforço de uma colaboração internacional da qual o Brasil é um membro bastante ativo.

O detector de superfície do Observatório Pierre Auger é formado por 1600 tanques, nos quais a radiação Cherenkov emitida na água por partículas do chuvisco atmosférico é registrada por três fotomultiplicadoras. Através dos sinais das estações que registraram partículas e de suas diferenças de tempo, é possível reconstruir o chuvisco e determinar a energia e direção de chegada do raio cósmico primário. Este procedimento de reconstrução não é nada trivial, e será o assunto principal deste trabalho.

Primeiramente, será feita uma breve revisão sobre aspectos teóricos e alguns resultados conhecidos da área de raios cósmicos de energia ultra-alta, sendo este o conteúdo do capítulo 2. No capítulo 3, serão discutidas técnicas de detecção

utilizadas em Física de partículas e raios cósmicos, incluindo uma apresentação do Observatório Pierre Auger.

O capítulo 4 consiste em uma descrição detalhada dos tanques Cherenkov do observatório, discutindo sobre seu desenvolvimento, calibração e sistema de aquisição de dados. Também serão mostrados alguns resultados obtidos com o tanque Cherenkov de Campinas, que é idêntico aos do Observatório Pierre Auger.

Nos últimos capítulos será discutida a reconstrução de eventos do detector de superfície, com a descrição do procedimento padrão do observatório no capítulo 5. No capítulo 6, serão mostrados os resultados de alguns estudos, nos quais são analisadas as consequências de modificações nas estações sobre o resultado da reconstrução. As irregularidades estudadas serão a exclusão de estações e o uso de tanques com fotomultiplicadoras em menor número.

O objetivo principal do trabalho é revisar o procedimento de reconstrução e checar a validade de alguns critérios de seleção utilizados, que podem estar causando perda de eventos. Além disso, é importante testar a configuração do detector de superfície, para que numa futura expansão do observatório ele possa ser melhorado.

## Capítulo 2

# Raios cósmicos e chuveiros atmosféricos

Raios cósmicos são partículas subatômicas que se propagam no espaço sideral, com energias que podem variar de muitas ordens de grandeza, como pode ser visto no gráfico da figura 2.1, no qual é mostrado o fluxo de raios cósmicos na Terra em função de sua energia. Neste trabalho serão tratados os raios cósmicos de energia maior que  $10^{18}$  eV (UHECRs), região chamada de altíssima energia, ou de energia ultra-alta, para a qual o fluxo é extremamente baixo. Ao atingir a atmosfera, estas partículas interagem, dando origem a novas partículas, que também interagem. Este processo vai se repetindo, de forma que uma grande cascata é criada, chegando a quilômetros de extensão na superfície terrestre. Estes são os chuveiros atmosféricos extensos, que permitem a detecção de raios cósmicos de energia ultra-alta com experimentos construídos na superfície terrestre, pois sua detecção direta é praticamente impossível.

Neste capítulo serão descritos os conceitos básicos e fundamentais sobre estas partículas e os chuveiros gerados, o que permitirá o desenvolvimento do texto, servindo como base para a descrição dos métodos de detecção, entre os quais será destacado o Observatório Pierre e seu detector de superfície. Maiores detalhes sobre a radiação cósmica e os fenômenos a ela associados podem ser encontrados em [1], [2] e [3].

### 2.1 Raios cósmicos de energia ultra-alta

O estudo de raios cósmicos a energias acima de  $10^{18}$  eV, ou 1 EeV, tem como principais objetivos o entendimento das informações sobre sua origem, mecanismos de aceleração, espectro de energia, propagação e composição química. Geralmente as questões relacionadas a estas informações estão interligadas, tornando ainda mais difícil sua compreensão.

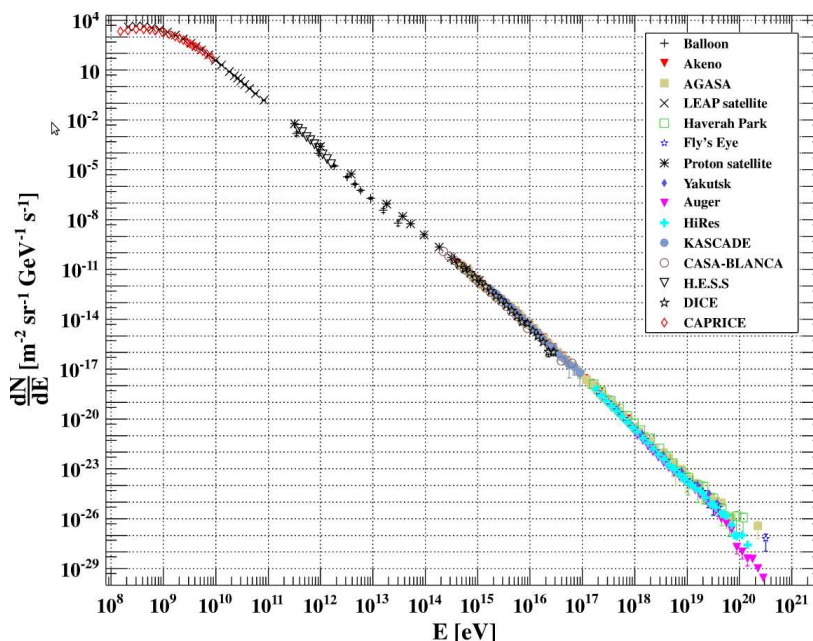


Figura 2.1: Espectro de energia dos raios c3smicos, produzido atrav3s da compila3o de resultados de diversos experimentos.

### 2.1.1 Origem e mecanismos de acelera3o

Na figura 2.2 3 apresentada o diagrama de Hillas, que mostra os objetos astrof3sicos capazes de acelerar part3culas atrav3s de campos magn3ticos at3 energias da ordem dos raios c3smicos ultra-energ3ticos. Pode-se notar que h3 poucos candidatos, j3 que a obten3o de energias t3o altas requer grandes raios e campos magn3ticos muito intensos. H3 ainda outros modelos que prop3em a acelera3o atrav3s de decaimentos de objetos ex3ticos, de origem cosmol3gica. De qualquer forma, o estudo da origem destas part3culas 3 dificultado pelo fato de serem carregadas, sujeitas 3 a3o de campos magn3ticos que desviam suas trajet3rias. Portanto, a determina3o de uma fonte n3o 3 poss3vel sem o conhecimento dos campos magn3ticos c3smicos.

Um resultado recente importante, relacionado 3 a origem dos UHECRs, foi a correla3o de eventos do Observat3rio Pierre Auger com n3cleos ativos de gal3xias (AGNs) [4]. Na figura 2.3 3 mostrado um mapa de dire3o3es de chegada de raios c3smicos, com os 27 eventos de energia maior que 57  $EeV$  representados pelos c3rculos e a dire3o3o dos AGNs distantes at3 75  $Mpc$  da Terra pelos asteriscos vermelhos. Ap3s a publica3o deste trabalho, com a detec3o de mais eventos nestas energias, foi notada uma diminui3o da correla3o com este tipo de objeto, como pode ser visto no gr3fico da figura 2.4, mas o resultado ainda mostra que estes eventos n3o podem ter sido gerados por uma distribu3o isotr3pica de dire3o3es de chegada, com 99% de confian3a [5]. Al3m disso, a regi3o

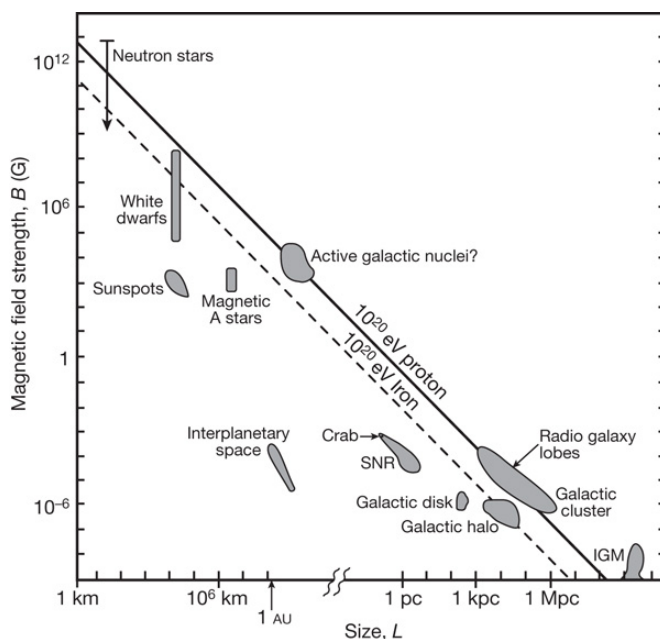


Figura 2.2: Diagrama de Hillas, mostrando as possíveis fontes de raios cósmicos de energia ultra-alta.

próxima do AGN conhecido mais próximo da Terra, Centaurus A, marcado com o asterisco branco na figura 2.3, apresenta um excesso de eventos em relação ao esperado [5], o que indica uma necessidade de estudar mais detalhadamente esta região.

## 2.1.2 Espectro de energia e propagação

Como mostrado na compilação de resultados de diversos experimentos da figura 2.1, o espectro dos raios cósmicos se estende por mais de 10 ordens de grandeza em energia e mais de 30 em fluxo. Seu comportamento é uma lei de potência, mas apresenta quebras, com mudança no índice espectral, em  $10^{15}$  eV, conhecida como o "joelho" do espectro, e em  $10^{18}$  eV, no chamado "tornozelo". Estas mudanças não são completamente compreendidas, mas os principais modelos atribuem o "joelho" a especificidades dos mecanismos de propagação [6] e o "tornozelo" a uma transição de raios cósmicos galácticos para extra-galácticos [7].

Uma questão importante, relacionada também à propagação das partículas, é o chamado corte GZK, previsto teoricamente na década de 60, que consiste em uma supressão do fluxo a partir de  $5 \cdot 10^{19}$  eV, devida à interação com a radiação cósmica de fundo para partículas originadas a mais de  $50$  Mpc da Terra. Centenas de eventos acima deste limiar já foram registrados, mas os baixos

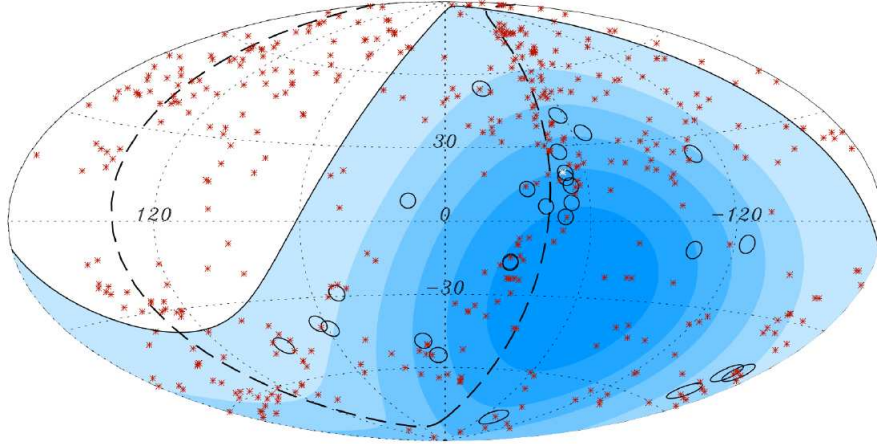


Figura 2.3: Projeção Aitoff do céu em coordenadas galácticas, mostrando as posições dos AGNs a menos de  $75 Mpc$  da Terra (asteriscos vermelhos) e os eventos do Observatório Pierre Auger com energia maior que  $57 EeV$  (círculos). As cores mais escuras representam as regiões para as quais a exposição do observatório é maior e a linha pontilhada corresponde ao plano supergaláctico.

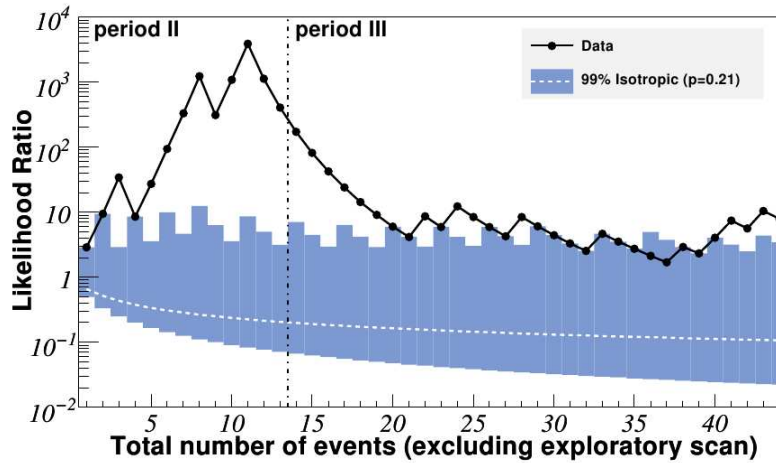


Figura 2.4: Monitoramento da correlação dos eventos de alta energia com AGNs, separando em dois períodos: antes e depois da publicação do resultado de correlação em 2007 [4].

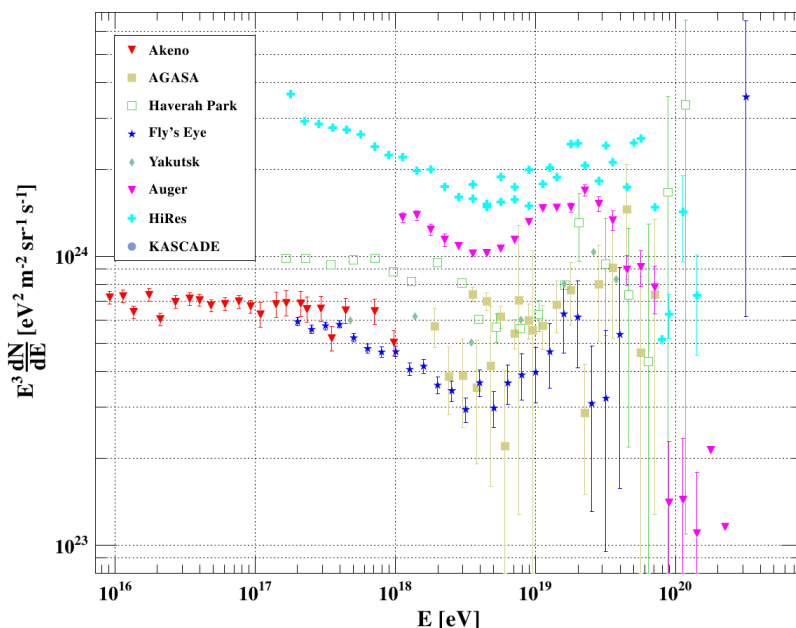


Figura 2.5: Espectro de energia dos raios cósmicos de alta energia, pesado pela energia ao cubo.

fluxos fazem com que a incerteza nas medidas seja maior, conforme pode ser visto na figura 2.5, na qual também pode ser notado que há discordância entre os experimentos. Ainda assim, pode-se dizer que de acordo com o Observatório Pierre Auger há uma supressão [8], que pode ser evidência da existência do corte GZK, como também pode ser notado nos dados do experimento HiRes [9].

### 2.1.3 Composição química

Para energias mais baixas, a composição química dos raios cósmicos é bem conhecida, sendo em sua maior parte prótons. Já para energias ultra-altas, a impossibilidade de se realizar medidas diretas dificulta seu estudo. Nos experimentos deste tipo, o que se faz é utilizar modelos de interações e simulações de Monte Carlo, fazendo uma reconstrução do raio cósmico primário. A partir de comparações com simulações, é possível estudar tendências no comportamento e checar a compatibilidade com algum tipo de partícula. Num trabalho recente do Observatório Pierre Auger [10], por exemplo, foi analisado se os eventos se aproximam mais do comportamento esperado para prótons ou por núcleos mais pesados, como o ferro. Na figura 2.6 é mostrado este resultado, que indica uma tendência de prótons para ferro a energias mais altas.

Não apenas hádrons, mas outros tipos de partículas são candidatas a primários da radiação cósmica de altas energias, como fótons ou neutrinos. De acordo



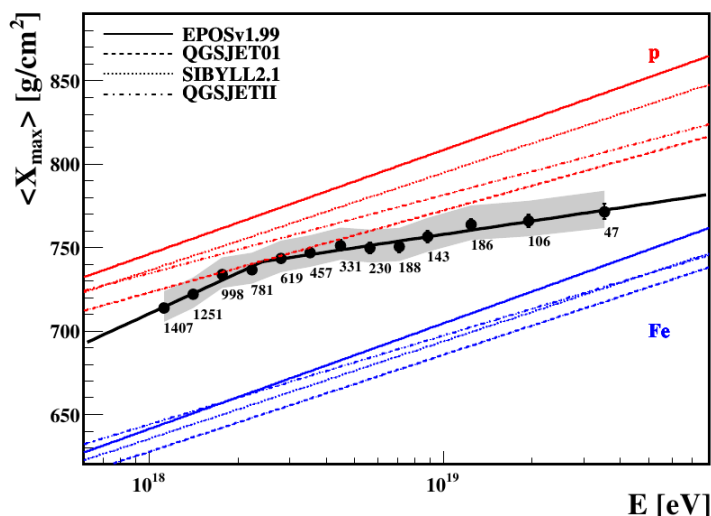


Figura 2.6: Resultado do Observatório Pierre Auger sobre a composição dos raios cósmicos de energia ultra-alta [10].

com o Observatório Pierre Auger, o limite para a fração de fótons é menor que 0,4% e 8,9% para energias maiores que 1  $EeV$  e 10  $EeV$ , respectivamente [11], resultado que permite a exclusão de diversos modelos para a geração de raios cósmicos de altíssimas energias a partir de partículas de matéria escura supermassivas, chamados modelos *top-down* [12, 13]. Na busca por neutrinos de altas energias nenhum candidato a evento foi detectado até o momento [14], mas o limite medido para o fluxo ainda não permite a exclusão de modelos astrofísicos que descrevem como estas partículas podem ser geradas.

## 2.2 Chuveiros atmosféricos extensos

Ao incidir na atmosfera, o raio cósmico interage, dando início à produção de partículas, que formam uma cascata que cresce em número de partículas até um ponto crítico, no qual cada partícula não possui energia suficiente para produzir outras, e seu número começa a diminuir. Estes chuveiros permitem a detecção indireta da partícula primária, sendo importante conhecer suas características no processo de reconstrução de um evento.

### 2.2.1 Componentes de um chuvaeiro

A figura 2.7 mostra um esquema do desenvolvimento de um chuvaeiro atmosférico. A interação da partícula primária produz píons e hádrons. Estes hádrons produzirão mais píons e outros hádrons, de forma que uma compo-

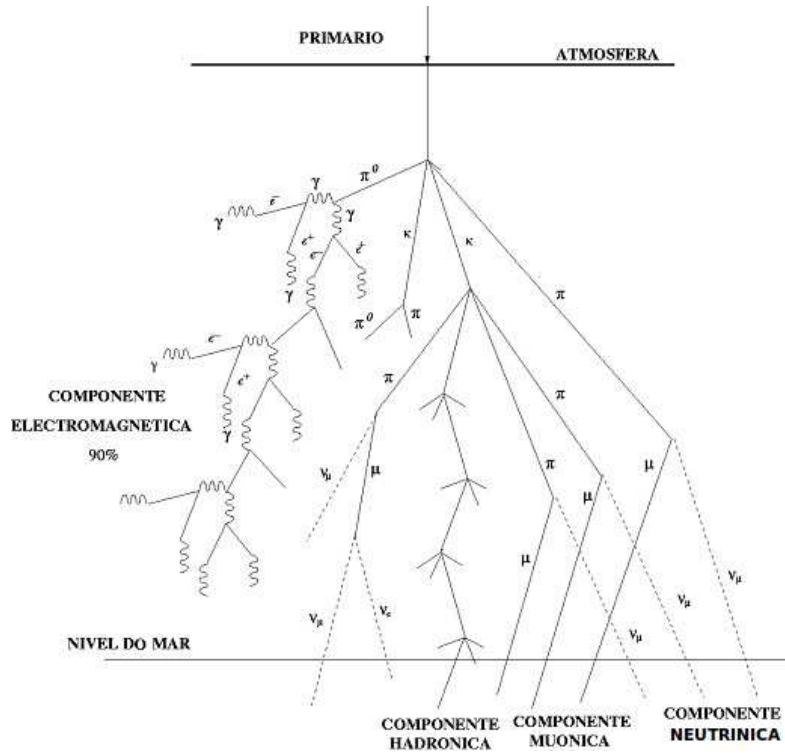


Figura 2.7: Representação das componentes de um chuveiro atmosférico.

nente hadrônica pode ser observada. Os píons carregados, caso não sofram alguma interação, decairão em múons e neutrinos, originando as componentes muônica e de neutrinos. Os múons têm um papel muito importante na detecção de raios cósmicos, pois são bastante penetrantes, e por este motivo bastante abundantes na superfície terrestre. Já os píons neutros darão origem a fótons, que por sua vez produzem pares elétron-pósitron, dando origem à componente eletromagnética do chuveiro, que corresponde à maior parte da energia total, cerca de 90% no caso de chuveiros iniciados por prótons.

### 2.2.2 Desenvolvimento longitudinal

A propagação do chuveiro na atmosfera é descrita através da quantidade de matéria atravessada, geralmente denotada por  $X$ , medido em  $g/cm^2$ . O número de partículas em função da profundidade, chamado de perfil longitudinal, pode ser descrito por uma função do tipo Gaisser-Hillas, obtida a partir de simulações de Monte Carlo, cuja forma é mostrada na figura 2.8. Partículas vão sendo produzidas, aumentando seu número, até que um máximo é atingido, relacionado a uma energia crítica, a partir da qual a absorção de partículas passa a dominar a produção, causando a diminuição do número total. O ponto onde a

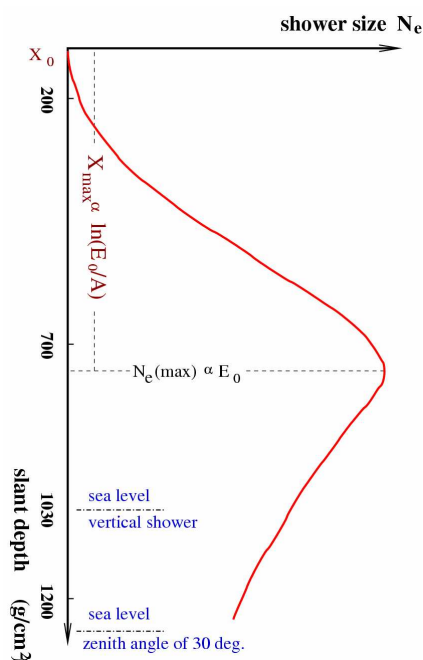


Figura 2.8: Forma do perfil longitudinal de um chuveiro atmosférico.

energia crítica é atingida é chamado de  $X_{max}$  do chuveiro, e é um parâmetro bastante importante, pois está relacionado diretamente à composição química do raio cósmico primário.

### 2.2.3 Desenvolvimento lateral

A cada interação de partículas do chuveiro, há um espalhamento cujo ângulo depende do momento transversal da partícula. Como as partículas são relativísticas, estes ângulos são bastante pequenos, mas a grande quantidade de interações faz com que o espalhamento lateral total do chuveiro seja muito grande, resultando em quilômetros de extensão. A descrição da distribuição lateral das partículas é dada por uma função, chamada de LDF (*lateral distribution function*), cuja forma mais utilizada é dada pelo modelo desenvolvido por Nishimura, Kamata e Greisen [15, 16], conhecido como função NKG. Esta equação é adaptada aos parâmetros dos experimentos, e descreve o número de partículas (ou o sinal de detectores de superfície) em função da distância ao centro do chuveiro. Ela será descrita para o caso do Observatório Pierre Auger posteriormente.

### 2.2.4 Múons atmosféricos

Como já citado, na superfície da Terra, as partículas carregadas mais abundantes são os múons. Estas partículas, produzidas no decaimento de  $\pi^\pm$  e  $K^\pm$ , possuem um alto poder de penetração na atmosfera e sua detecção pode ser realizada de maneira bastante simples. Por estes motivos, os múons são muito importantes no estudo de chuviros atmosféricos, permitindo a detecção indireta de raios cósmicos na superfície. Eles são produzidos em interações de diferentes energias, como as de raios cósmicos de energias baixas, cujo fluxo é muito alto. No estudo de UHECRs, geralmente refere-se a estes múons provenientes de eventos de baixas energias como sendo atmosféricos, e eles representam um ruído para os detectores, pois produzem sinais idênticos aos dos múons gerados por chuviros de altas energias. Por outro lado, como o espectro de energia e distribuição angular dos múons atmosféricos é bem conhecido, eles também são usados na calibração de detectores, já que são uma fonte inesgotável de partículas carregadas com comportamento conhecido.

## Capítulo 3

# Detecção de raios cósmicos e o Observatório Pierre Auger

Pode-se dizer que os experimentos em física de partículas se iniciaram no fim do século XIX, com a descoberta dos raios-X, das radiações naturais e do elétron. Neste período, em que pouco se conhecia sobre a estrutura da matéria, a detecção era realizada por meio de eletroscópios, chapas fotográficas ou câmaras de nuvens. Por meio destas técnicas e outras que começavam a ser desenvolvidas, muitos avanços foram realizados no início do século XX, época também de grande desenvolvimento de novas e importantes teorias. Uma das descobertas da época foram os raios cósmicos [17], que foram observados em experimentos em balões, nos quais Victor Hess observou um aumento na eletrização do ar com o aumento da altitude. A partir daí, os raios cósmicos foram a principal forma de estudo de partículas elementares e suas interações, até o início do desenvolvimento dos grandes aceleradores. Ainda hoje a radiação cósmica é utilizada neste tipo de estudo, já que os atuais aceleradores de partículas atingem energias menores que milionésimos da energia dos raios cósmicos ultra-energéticos.

Tanto os detectores de partículas quanto os experimentos de raios cósmicos evoluíram muito, após mais de 100 anos. Hoje a detecção é realizada através de gases, materiais cintiladores, radiação Cherenkov, semicondutores, antenas eletromagnéticas, entre outras técnicas, e os experimentos cresceram em complexidade, com vários detectores trabalhando em conjunto de forma automatizada. Um ótimo exemplo de experimento moderno desta área é o Observatório Pierre Auger de raios cósmicos, que utiliza mais de 1600 detectores de superfície, além de 4 estações com telescópios de fluorescência, cobrindo uma área maior que  $3000 \text{ km}^2$  numa região desértica na Argentina. Detalhes sobre o funcionamento deste observatório serão discutidos ao longo deste trabalho.

Neste capítulo será feita uma revisão sobre as principais técnicas de detecção de partículas e raios cósmicos, dando ênfase às mais relevantes para este trabalho. Também será descrito o Observatório Pierre Auger e aspectos gerais de seus detectores.

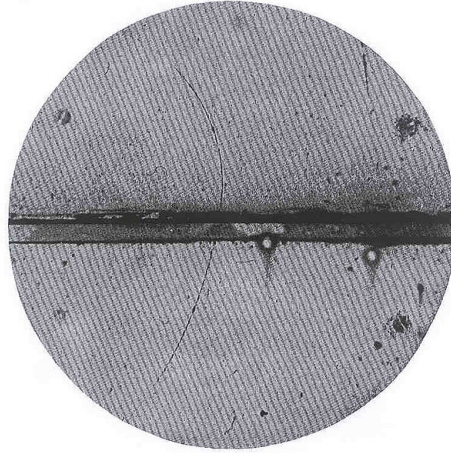


Figura 3.1: Imagem obtida com uma câmara de nuvens da primeira observação do pósitron [19].

### 3.1 Detectores de partículas

Os diversos tipos de detectores usados em Física de partículas baseiam-se nos fundamentos da interação entre radiação e matéria, identificando um fenômeno que possa ser facilmente medido. Nas primeiras técnicas utilizadas a resposta dos detectores era obtida através de fenômenos visuais, como mostrado na imagem da figura 3.1, que apresenta uma medida realizada com chapas fotográficas, que exibem manchas nos locais por onde uma partícula atravessou. Utilizando uma modificação destas chapas, com a adição de emulsões para registro de trajetória, e conhecendo a relação entre o tamanho das marcas no material e a energia da partícula, esta técnica pôde ser usada em diversas descobertas importantes, como a do méson Pi por César Lattes [18]. Nas câmaras de nuvens, ou câmaras de Wilson, utilizadas na descoberta do pósitron [19], são analisados os traços deixados em um ambiente de vapor supersaturado após sua ionização por partículas carregadas. Nos eletroscópios, utilizados na descoberta dos raios cósmicos, conforme já citado, era observada a deflexão de um material metálico devido à presença de cargas elétricas.

Após o desenvolvimento da eletrônica, a capacidade de processar pulsos elétricos possibilitou a criação de novos dispositivos para detecção. A seguir são descritos alguns deles, que consistem nos componentes básicos de detectores mais avançados, formados por versões com algumas modificações ou grandes arranjos de vários detectores, como nos *streamers*, grandes tanques Cherenkov para astrofísica de neutrinos, TPCs (*time projection chambers*), *wire-chambers*, detectores radio-químicos, novas variantes de fotomultiplicadoras, RPCs (*resistive plate chambers*), fibras cintiladoras, foto-diodos, diodos de avalanche, entre outros. Mais detalhes podem ser encontrados em [20] e [21].

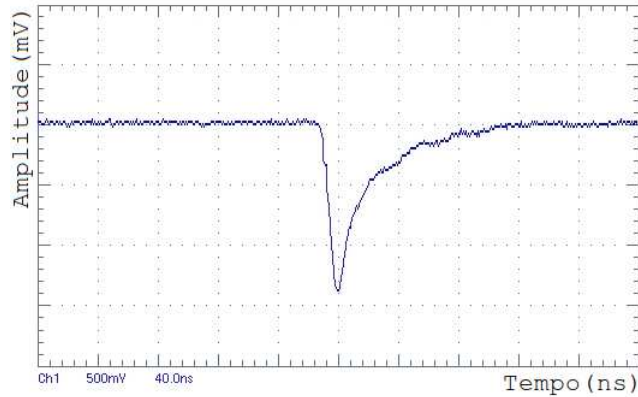


Figura 3.2: Típico sinal de um detector de partículas a gás, como mostrado na tela de um osciloscópio em função do tempo.

### 3.1.1 Detectores a gás

Os detectores de ionização a gás foram um dos primeiros a trabalhar com pulsos elétricos. Sua configuração básica consiste em um recipiente de paredes condutoras no qual é aplicado um campo elétrico através de uma diferença de potencial, que propicia o transporte dos elétrons/íons criados após a passagem de uma partícula por um gás (geralmente um gás nobre, como argônio). A carga é coletada num anodo, gerando um pulso elétrico como o da figura 3.2. Há diferentes formas de operação destes detectores, sendo uma das mais comuns os contadores Geiger-Muller, nos quais o campo elétrico aplicado é tão intenso que após a ionização do gás os íons produzidos são acelerados e causam a ionização de outros átomos, gerando uma avalanche que se propaga por todo o detector e produz um sinal saturado (de intensidade constante). A eficiência de detecção com esta técnica é bastante alta, mas só permite a contagem de partículas. Para a obtenção de sinais proporcionais ao número inicial de íons gerados, é necessário trabalhar com campos elétricos de menor amplitude, caracterizando o modo de câmara proporcional.

A vantagem destes detectores, além do fato de trabalharem com pulsos elétricos, é que o seu custo e dificuldade de construção são bastante pequenos. O uso de contadores Geiger-Muller em experimentos de balão, permitiu o estudo de raios cósmicos a altitudes muito maiores, já que não havia mais necessidade de tripulação. Nos dias de hoje, detectores a gás não são normalmente utilizados em grandes experimentos, a não ser em arranjos mais sofisticados, nos quais a informação temporal do sinal é utilizada para rastreamento de posição, nas chamadas de câmaras de projeção temporal (TPC - *time projection chambers*).

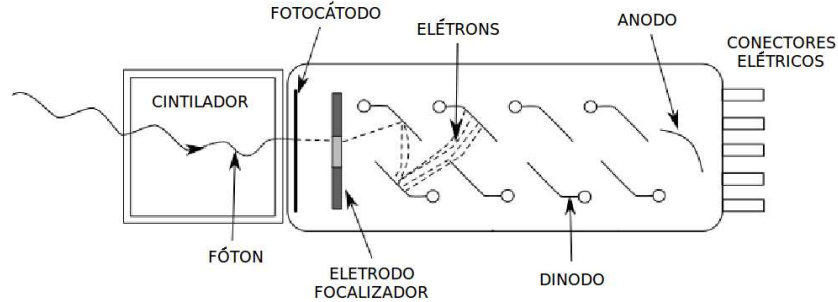


Figura 3.3: Esquema de funcionamento de uma fotomultiplicadora.

### 3.1.2 Fotomultiplicadoras e cintiladores

Um instrumento que permitiu a construção de novos tipos de detectores foi o tubo fotomultiplicador, ou simplesmente fotomultiplicadora (PMT - *photomultiplier tube*). Este dispositivo converte fótons em sinais elétricos, possibilitando o registro da luz proveniente de materiais cintiladores ou outras fontes, funcionando até para poucas dezenas de fótons. O esquema do funcionamento das PMTs é mostrado na figura 3.3. Guiados por algum tipo de acoplamento óptico na interface com o material observado, os fótons atingem o fotocátodo, onde ocorre efeito fotoelétrico. O número de elétrons produzidos para cada fóton (chamado de eficiência quântica) deve ser o máximo possível, o que geralmente é obtido com materiais semicondutores. A eficiência quântica depende do comprimento de onda do fóton incidente, então é importante que isto seja levado em consideração na escolha de um material. Os primeiros elétrons emitidos são atraídos até o primeiro dinodo através de um eletrodo, no qual campos elétricos são aplicados de forma a focalizar o feixe de partículas. É importante neste processo que o tempo de chegada até o dinodo seja independente da posição de entrada do elétron, melhorando a resolução temporal da PMT. No dinodo ocorre um efeito de emissão secundária, gerando mais elétrons. Entre cada um dos próximos dinodos, que podem ser dispostos em diferentes tipos de geometrias, há sempre uma diferença de potencial que atrai os elétrons, gerando cada vez mais partículas. Após o último dinodo, a carga total produzida é coletada pelo anodo, fornecendo um sinal amplificado.

A eficiência de uma fotomultiplicadora está ligada à eficiência quântica do fotocátodo e à taxa de emissão secundária nos dinodos. Geralmente, os tubos são deixados em vácuo, para evitar a ionização de gases, que geram ruídos. Outra fonte inevitável de ruídos é a emissão de elétrons livres dos metais do tubo por efeito termiônico, cuja taxa aumenta com a temperatura. O fator de amplificação total é chamado de ganho, com valores da ordem de  $10^6$ , e também é dependente da tensão aplicada entre o primeiro dinodo e o catodo. O sinal ge-



rado costuma ser bastante claro, facilmente separável do ruído. Por este motivo, as PMTs tiveram uma grande importância nos experimentos de física de partículas e, apesar de já existirem dispositivos semicondutores sensíveis a fótons, elas continuam sendo amplamente utilizadas, principalmente nos detectores que utilizam materiais cintiladores.

Os cintiladores são o tipo mais comum de detectores nos experimentos atuais. A ideia básica de seu funcionamento é registrar a luz emitida por um material após a excitação de suas moléculas ou átomos (cintilação) pela passagem de uma partícula. As vantagens desta técnica são o rápido tempo de resposta, o que reduz o tempo morto do sistema, a linearidade entre o sinal e a energia da partícula e a possibilidade de distinção entre diferentes tipos de partículas através da análise da forma do sinal registrado. Para que um material seja utilizado em um detector deste tipo, ele deve apresentar a propriedade de converter a energia cinética absorvida das partículas em luz, de forma linear, deve ser transparente ao próprio comprimento de onda emitido para facilitar a coleta da luz, ter índice de refração próximo ao do vidro, para facilitar o acoplamento com a PMT, e o tempo de decaimento da intensidade da luz emitida deve ser pequeno. Geralmente não é possível satisfazer a todos os requisitos simultaneamente, então escolhe-se um material de acordo com as necessidades do experimento e com um espectro de emissão consistente com a PMT utilizada. Os mais comuns são cintiladores plásticos, líquidos ou cristais orgânicos, cristais inorgânicos, gases e vidros.

Um exemplo peculiar de detecção de cintilação com fotomultiplicadoras são os telescópios de fluorescência utilizados em experimentos de raios cósmicos. A excitação de moléculas de nitrogênio da atmosfera após a passagem das partículas de um chuveiro causa a emissão de luz (fluorescência). Utiliza-se um espelho para focalizar esta luz em arranjos bidimensionais de várias PMTs, registrando o traço deixado.

### 3.1.3 Detectores Cherenkov

Quando uma partícula se propaga com velocidade superior à da luz no meio, é emitida a chamada radiação Cherenkov [22]. Este fenômeno é observado quando a seguinte condição é satisfeita

$$\beta n > 1, \quad (3.1)$$

onde  $\beta$  é a razão da velocidade da partícula pela velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e  $n$  é o índice de refração do meio em que ela incidiu. Com esta condição, há um limiar mínimo de energia para que o efeito ocorra, que é dado por

$$E_{min} = m_0 c^2 \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (3.2)$$

sendo  $m_0$  a massa de repouso da partícula. No caso de elétrons se propagando num cintilador plástico, este limiar é de aproximadamente 660 keV, e de 879 keV na água.

A emissão da radiação Cherenkov é um fenômeno bastante rápido, da ordem de  $10^{-12}$  segundos. Ela ocorre como em ondas de choque, conforme representado

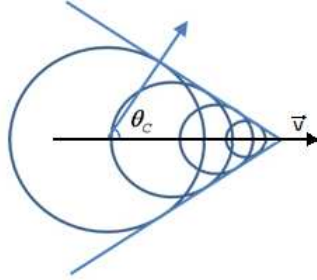


Figura 3.4: Representação da da emissão de radiação Cherenkov.

na figura 3.4, formando um cone na direção de propagação da partícula, cujo ângulo de abertura  $\theta_C$  é dado por

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (3.3)$$

possuindo um valor máximo quando a velocidade da partícula se iguala à da luz no meio. Tipicamente, os comprimentos de onda emitidos vão do ultra-violeta próximo ao visível até o azul.

A construção de detectores que utilizam a radiação Cherenkov é análoga à dos cintiladores, posicionando fotomultiplicadoras de forma a coletar a maior quantidade de fótons possível. Além de partículas carregadas, podem ser detectados raios gama, desde que sofram produção de pares ou espalhamento Compton, resultando em elétrons acima do limiar de emissão da radiação. Uma das vantagens desta técnica são os curtos intervalos de tempo de emissão, que garantem uma boa resolução temporal, geralmente limitada apenas pela resolução da PMT. A maior dificuldade é o fato do número de fótons gerados ser bastante pequeno, da ordem de centenas no caso de elétrons com energia de 1 MeV, e não serem emitidos isotropicamente. A solução é utilizar fotomultiplicadoras que cubram uma grande área na superfície interna e garantir que os fótons sejam refletidos até elas.

A escolha do material para estes detectores é feita a partir do índice de refração, de acordo com o limiar de energia que se deseja. Além disso, ele deve apresentar boas propriedades de transmissão óptica e não deve emitir luz por cintilação na mesma região de comprimento de onda. Podem ser utilizados materiais como sílica, gases a diferentes pressões, gases liquefeitos, água e até sólidos transparentes, como vidros.

Uma aplicação importante com radiação Cherenkov são os detectores RICH (*ring-imaging Cherenkov*), que utilizam o cone produzido para determinação da velocidade de partículas. Neste caso, são reconstruídos os anéis ou elipses formados pelo cone Cherenkov, não bastando apenas uma fotomultiplicadora para detecção. Este tipo de detector está presente em experimentos do LHC, como o LHCb [23], onde são utilizados para identificação entre os diferentes

tipos de partículas.

### 3.1.4 Detectores de semicondutores

O modo de funcionamento dos detectores baseados em conceitos de física do estado sólido é análogo ao dos a gás. A passagem de partículas ionizantes no material semicondutor causa a criação de pares elétron-buraco (ao invés de elétron-ion), que são coletados através da aplicação de um campo elétrico. É possível construir detectores em tamanhos bastante reduzidos e com tempos de resposta muito pequenos, sendo obtidas resoluções espaciais muito melhores, tornando esta técnica bastante eficiente em experimentos de colisões em aceleradores de partículas, nos quais deseja-se rastrear a trajetória de inúmeras partículas simultaneamente com alta precisão. A energia necessária para geração de um sinal também é menor que em outros tipos de detectores, resultando em uma alta resolução também em medidas de energia. A principal desvantagem é o alto custo, devido aos materiais utilizados (normalmente silício ou germânio), cujas estruturas cristalinas são danificadas rapidamente quando sujeitas a radiação, e à necessidade de resfriamento até temperaturas muito baixas, sendo necessário um investimento em sistemas de criogenia.

Estas técnicas de detecção tem sido amplamente exploradas em medidas de espectroscopia e rastreamento, principalmente em experimentos de física nuclear. Na área de física de altas energias, muitas vezes seu uso é inviável, já que são necessários detectores grandes ou em grandes quantidades, o que torna o custo total ainda mais alto que utilizando outras técnicas. É mais comum serem utilizados em conjunto com outros tipos de detectores, cada um satisfazendo uma necessidade diferente no experimento, como ocorre no LHC [24].

## 3.2 Detecção de raios cósmicos

Os experimentos com raios cósmicos se iniciaram com as medidas que visavam a determinação de sua origem, já que nem sequer se sabia se esta radiação observada na atmosfera era proveniente do interior da Terra ou de fora dela. Como já citado, Vitor Hess e outros realizaram medidas a altitudes cada vez maiores e notaram um aumento no fluxo de partículas, determinando que eram provenientes do cosmo. Desde então, novos experimentos foram criados e o conhecimento nesta área foi se consolidando.

Os primeiros resultados [2, 3] foram na região de energias mais baixas, até  $10^{15}$  eV, para as quais é possível realizar medidas diretas no topo da atmosfera com detectores em balões (e mais recentemente em satélites). Fenômenos como a emissão de raios gama do Sol, o efeito do campo geomagnético e a assimetria entre os fluxos do leste e oeste foram estudados. Informações importantes foram obtidas sobre o espectro dos raios cósmicos, incluindo medidas de composição e de fluxo. Também foram realizados grandes progressos em relação à interação das partículas, com a observação de duas componentes diferentes nas cascatas geradas por raios cósmicos, uma facilmente absorvida e outra mais penetrante,

fato entendido apenas anos depois, com novos experimentos e o desenvolvimento teórico da física de partículas.

Na década de 1930, estudos de Bruno Rossi e Pierre Auger [3] levaram à descoberta dos chuviros atmosféricos extensos. Logo se percebeu que estes eram gerados por raios cósmicos de energias extremamente altas, causando um grande interesse por seu estudo. Porém, seu fluxo era muito pequeno, não sendo mais viável a utilização de balões para detecção direta. O primeiro grande experimento para detecção indireta foi construído em 1959 em Volcano Ranch [1], com quase  $10 \text{ km}^2$ , e pôde detectar partículas com energia maior que  $10 \text{ EeV}$ . Desde então, foram construídos vários outros, com o objetivo de estudar estas partículas de energia ultra-alta.

A primeira técnica utilizada [1] foi a detecção dos UHECRs através de detectores na superfície, obtendo amostras do chuviro em diferentes posições e determinando a direção de chegada da partícula primária por meio de uma reconstrução geométrica. A principal dificuldade deste método é a obtenção da energia e posição de máximo do chuviro, pois são dependentes de modelos teóricos, que podem produzir erros sistemáticos nos resultados. Os principais experimentos [1] que utilizaram esta técnica foram os de Volcano Ranch (Estados Unidos), Haverah Park (Inglaterra), Yakutsk (União Soviética) e o AGASA em Akeno (Japão). Mais detalhes sobre este método serão discutidos neste texto.

Partículas carregadas do chuviro causam a excitação de moléculas de nitrogênio da atmosfera. Estas moléculas emitem fótons com a energia adquirida, gerando o efeito de fluorescência na atmosfera, que permite a observação da propagação da frente do chuviro [1]. Para isto, são necessários telescópios sensíveis a este tipo de radiação e com abertura angular suficiente. A vantagem deste método sobre a detecção na superfície é o fato da medida ser praticamente calorimétrica, obtendo de forma direta a energia do raio cósmico primário. A desvantagem vem da dificuldade em realizar-se medidas durante o dia ou em noites claras, limitando o tempo de observação e diminuindo a exposição do detector. Esta técnica foi empregada no experimento Fly's Eye e em sua melhoria, o HiRes, que observaram eventos com energias superiores a  $10^{18} \text{ eV}$  [9].

Uma outra forma de estudar estas partículas é através de efeitos de emissão de radiação Cherenkov [1], que ocorrem durante a penetração das partículas carregadas do chuviro na atmosfera. A detecção é bastante parecida com a técnica de fluorescência, mas neste caso a emissão da luz não é isotrópica, sendo necessário posicionar o telescópio na direção emitida, o que limita a abertura de observação e reduz ainda mais a exposição do detector. Este tipo de detector teve um papel muito importante no estudo da astronomia de raios-gama e raios cósmicos de energia intermediária. Já para energias ultra-altas, esta técnica foi utilizada de forma complementar aos detectores de superfície em experimentos como o de Haverah Park [25] e Yakutsk [26], para determinação de energia e informações sobre o perfil longitudinal do chuviro.

Após muitos anos, os raios cósmicos deixaram de ser o principal meio de estudo de física de partículas, sendo substituídos pelos grandes aceleradores. Mas ainda restavam questões fundamentais sobre os aspectos astrofísicos desta radi-

ação, principalmente no caso de energias ultra-altas. Os experimentos citados, construídos até a década de 1990, não satisfaziam a necessidade estatística das pesquisas sobre a origem, composição e propagação dos UHECRs. Isto só seria resolvido através da construção de experimentos que cobrissem áreas muito grandes, aumentando a taxa de detecção. Com este objetivo, foram propostos experimentos atualmente em funcionamento ou em fase planejamento, como o Observatório Pierre Auger [27], o CTA (Cherenkov Telescope Array [28]) e o JEM-EUSO [29], que são todos esforços de colaborações internacionais. Este último possui uma proposta bastante inovadora e ousada: o uso de detectores de fluorescência em uma estação espacial, observando a atmosfera de cima para baixo, ao contrário do usual.

### 3.3 O Observatório Pierre Auger

A partir de uma sugestão de Alan Watson e Jim Cronin no ano de 1992 [30], o Observatório Pierre Auger foi desenvolvido com o objetivo de estudar os raios cósmicos de energia ultra alta, cujo fluxo é muito baixo. Após uma procura por locais planos, com altitude que favorecesse a detecção do chuveiro e com noites de céu limpo e com pouca poluição luminosa, foi construído na cidade de Malargüe, na Argentina, pelo esforço de uma colaboração internacional de 18 países, incluindo o Brasil, sendo o maior experimento até o momento nesta área de pesquisa [27]. Além de cobrir uma área gigantesca, o observatório é pioneiro em utilizar uma técnica híbrida de detecção, com detectores de superfície e telescópios de fluorescência funcionando simultaneamente, conforme esquematizado na figura 3.5. O experimento toma dados desde 2004, tendo a primeira etapa de sua construção completada no ano de 2008, de acordo com o mapa da figura 3.6, no qual os pontos representam as estações do detector de superfície e os traços verdes delimitam os intervalos em azimute observados por cada telescópio de fluorescência. Era previsto um período de operação de 20 anos, mas o observatório ainda poderá ter uma expansão de sua área, a construção de um novo sítio no hemisfério norte ou a adição de outros tipos de detectores, podendo ser prolongado o tempo de funcionamento.

#### 3.3.1 Detector de superfície

Como já discutido, a detecção de raios cósmicos na superfície terrestre é possível através da reconstrução geométrica dos chuviros atmosféricos, procedimento utilizado com sucesso pelos experimentos de Akeno e Yakutsk. No Observatório Pierre Auger são utilizadas estações separadas por  $1,5 \text{ km}$ , cobrindo uma área de mais de  $3000 \text{ km}^2$ . Cada estação consiste em um tanque (figura 3.7) com 12000 litros de água e três fotomultiplicadoras para detecção da radiação Cherenkov. Os detectores também possuem um sistema de GPS, antena de comunicação, painel solar, bateria e toda a eletrônica de aquisição de dados.

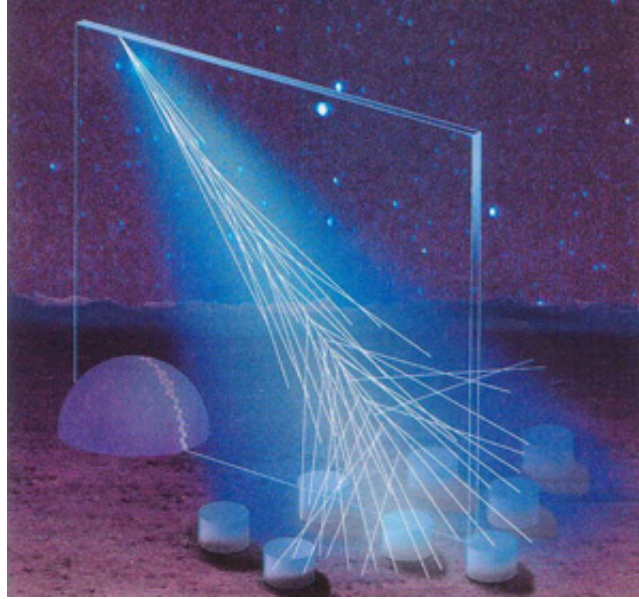


Figura 3.5: Representação da detecção híbrida de um evento.

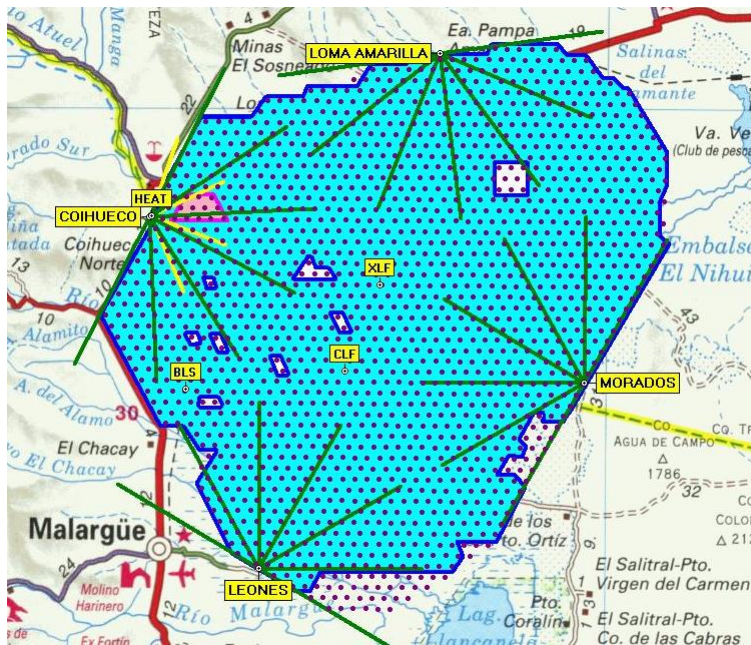


Figura 3.6: Situação do Observatório Pierre Auger em 2008.



Figura 3.7: Um dos tanques Cherenkov no Observatório Pierre Auger.

Quando são observados sinais em três ou mais estações próximas, num intervalo de tempo compatível com a ocorrência de um chuva atmosférico naquela área, os dados de cada tanque (sinais das PMTs, tempo do GPS, resultados da calibração, etc) são enviados via rádio para o prédio central do observatório, onde são armazenados e disponibilizados para o uso da colaboração. Os eventos ainda passam por outros critérios de seleção, aplicados via software, antes de ser realizada a reconstrução do chuva e obter-se a direção de chegada e energia do raio cósmico primário [31].

A eficiência destes instrumentos para o propósito do experimento foi testada e comprovada antes mesmo do período de testes do observatório [27]. O espaçamento necessário entre cada estação também foi estudado previamente, tendo como resultado uma distância que é um compromisso entre o custo e o limiar de energia, já que, dependendo da energia desejada, há uma amostragem mínima necessária para a reconstrução do chuva com qualidade, implicando em um máximo de separação entre os detectores.

O detector de superfície do Observatório Pierre Auger será o principal foco deste texto. Detalhes sobre sua estrutura, sistema de aquisição de dados e calibração serão discutidos no próximo capítulo e o procedimento de reconstrução de dados será tratado no capítulo 5.

### 3.3.2 Telescópios de fluorescência

No Observatório Pierre Auger também há o Detector de Fluorescência [32], funcionando de forma independente do detector de superfície. Ele é composto





Figura 3.8: Uma das estações do telescópio de fluorescência do Observatório Pierre Auger.

por 4 estações como a da figura 3.8, cada uma contendo 6 telescópios cuja abertura é de  $30 \times 30^\circ$  (elevação e azimute). Na estação de Coihueco também há mais dois detectores, chamados de HEAT [33], desenvolvidos para observação mais elevada do céu, com uma janela de  $60^\circ$ . Em noites com pouca claridade da lua e em condições climáticas que não exponham os instrumentos ao perigo de danos, as grandes janelas dos prédios se abrem para aquisição de dados. Como nos detectores de superfície, os dados registrados são enviados para o prédio central para processamento e disponibilização para a colaboração.

A disposição dos telescópios, conforme visto na figura 3.6, permite uma cobertura quase total da área do detector de superfície, possibilitando a detecção híbrida. As medidas de fluorescência fornecem parâmetros para calibração do detector de superfície, melhorando a precisão das reconstruções de energia e  $X_{max}$ , e o detector de superfície compensa a baixa taxa de eventos obtidas apenas com os telescópios.

Cada um dos detectores de fluorescência possui um espelho esférico de 3,4 m de curvatura com um conjunto de fotomultiplicadoras no foco, dispostas em uma matriz com  $22 \times 20$ , totalizando 440 pixeis (figura 3.9). A abertura do telescópio é esférica, com anéis corretores para eliminação de aberrações ópticas. Os fótons são refletidos para o foco do espelho, onde são registrados e o sinal é processado, gerando imagens como a da figura 3.10, que mostram o rastro da propagação do chuveiro em função dos intervalos de ângulo observados. Utilizando estes eventos é possível determinar o perfil longitudinal do chuveiro, medindo com



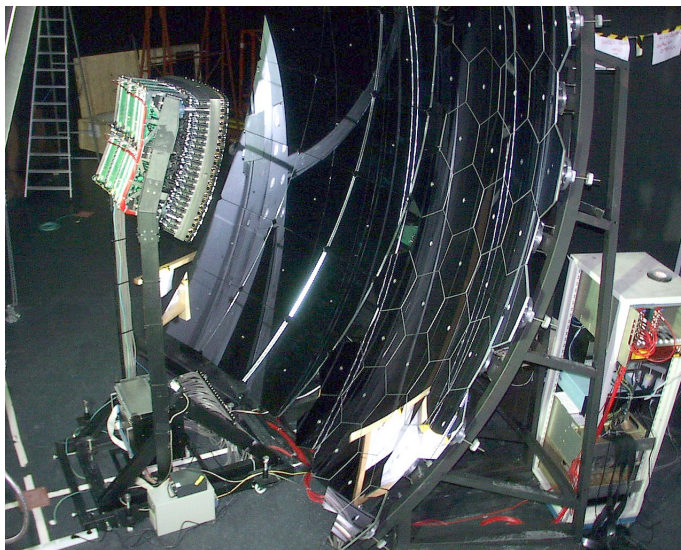


Figura 3.9: Telescópio de fluorescência com seu espelho esférico e o arranjo de fotomultiplicadoras no centro.

precisão sua energia, que é proporcional ao número de fótons coletados.

O estudo das condições climáticas é extremamente importante para o funcionamento dos telescópios, não apenas pelo fato de poderem ser danificados pelo vento ou chuva, mas por influenciarem diretamente nos dados coletados, já que variações na pressão e temperatura da atmosfera afetam a propagação das partículas e o fenômeno da fluorescência. Por isso existem estações de monitoramento da atmosfera e constantemente são realizadas medidas de calibração utilizando lasers [27].

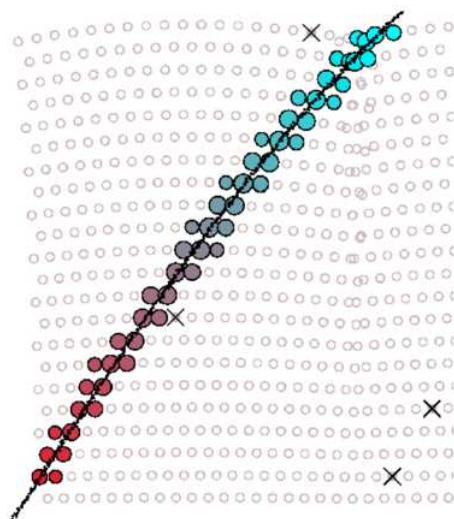


Figura 3.10: Evento obtido por um dos telescópios de fluorescência. Cada ponto representa uma janela de  $1,36 \times 1,5^\circ$  do céu.

## Capítulo 4

# Tanques Cherenkov do Observatório Pierre Auger

Como discutido anteriormente, o estudo de raios cósmicos através da detecção de chuviros atmosféricos na superfície terrestre mostrou-se não apenas possível, mas eficiente, como provado pelos experimentos de Akeno [34], Yakutsk [26] e Haverah Park [25], tendo este último comprovado a viabilidade da utilização de detectores de radiação Cherenkov na água. No Observatório Pierre Auger o detector de superfície também utiliza esta técnica.

O uso de um material barato e de fácil obtenção como a água é bastante conveniente na construção de detectores, principalmente em um experimento em que cerca de 1600 deles são necessários. A escolha desta técnica se deve também ao fato dos tanques Cherenkov poderem funcionar o tempo todo, obtendo uma exposição praticamente uniforme após um longo tempo de operação, e serem sensíveis tanto a partículas carregadas, quanto a fótons de alta energia [27]. O uso de outros tipos de detectores, como os a gás por exemplo, além de ser mais caro, poderia trazer maiores dificuldades na manutenção, já que se trata de uma área de  $3000 \text{ km}^2$ .

Neste capítulo serão discutidos detalhes sobre a estrutura e funcionamento dos tanques, além de alguns aspectos sobre a calibração dos detectores. Também serão apresentadas algumas medidas realizadas com o tanque Cherenkov do Laboratório de Léptons da UNICAMP.

### 4.1 Desenvolvimento dos detectores

O desenvolvimento dos detectores do Observatório Pierre Auger teve a participação de membros da colaboração do mundo todo. Após um planejamento e teste de protótipos, foram instaladas as primeiras unidades na cidade de Malargüe, constituindo o chamado *Engeneering Array* [27], no qual foram realizadas aquisições de dados para teste dos procedimentos de reconstrução de eventos. A seguir, serão descritos alguns detalhes sobre os tanques Cherenkov, desta-



Figura 4.1: Instalação e calibração de um dos tanques Cherenkov no sítio sul do Observatório Pierre Auger.

cando os fatores levados em consideração neste período de desenvolvimento dos instrumentos. Mais informações podem ser obtidas na referência [35].

Como já citado, cada estação do detector de superfície consiste em um tanque cilíndrico com água, como o da figura 4.1. A área de cada estação deve ser tal que a eficiência do detector atinja seu máximo em  $10^{19}$  eV à distância determinada de  $1,5$  km entre cada tanque, o que é obtido com  $10$  m<sup>2</sup>, correspondendo a  $3,6$  m de diâmetro. Já a altura do cilindro deve ser suficiente para que sejam observados sinais claros. Com  $1,2$  m de água são coletados cerca de 90 fotolétrons em cada fotomultiplicadora para múons verticais, valor suficiente para o desempenho desejado. Somando o espaço para acomodação das PMTs, cabos e outros componentes, resulta-se em um total de  $1,6$  m de altura.

A estrutura dos tanques deve ser capaz de suportar os 20 anos de operação previstos, sujeita a temperaturas entre  $-15$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , intensa incidência de radiação ultra-violeta, ventos de até  $160$  km/h, poeira, chuvas, inundações, neve, granizo e sais corrosivos do solo. Como pode ser visto na figura 4.1, a estrutura também deve ser capaz de suportar uma pessoa em seu topo e a ação de insetos e roedores, além dos grandes animais, como vacas e cabras. Para isto foi utilizado um polietileno de alta densidade (de cor bege para se camuflar no cenário do observatório), fabricado com uma técnica de moldagem rotacional que fornece uma espessura média de  $13 \pm 3$  mm, com cerca de  $530$  kg. Apesar de barato, o material apresenta boa uniformidade e é robusto o suficiente para

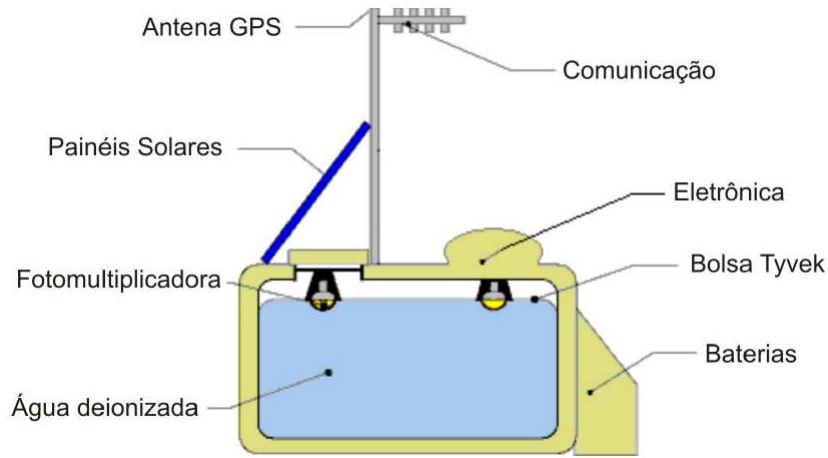


Figura 4.2: Representação dos componentes dos tanques Cherenkov do Observatório Pierre Auger.

atender os requisitos do detector. Ele possui alguns aditivos que contribuem para absorção da radiação ultra-violeta e no interior da estrutura é utilizado um pigmento preto, para garantir sua opacidade.

Os tanques já são preparados para a montagem de todos os seus componentes, com orifícios para encaixe de cada estrutura, além de já possuírem as alças para sustentação, utilizadas em seu transporte e instalação. Há três aberturas na parte superior que permitem a manipulação das fotomultiplicadoras. Estas são devidamente tampadas e vedadas, sendo que uma delas possui uma tampa maior, onde é montada a eletrônica do detector. Protegida ao lado do tanque, há uma caixa, também em polietileno, que contém a bateria que alimenta os dispositivos. Esta, desenvolvida especialmente para este tipo de aplicação, é carregada por um painel solar instalado na parte superior do tanque, apontando para o norte e a uma inclinação que maximiza a absorção de luz no inverno. O ponto de sustentação do painel solar também serve como suporte para as antenas de comunicação e do GPS, que foram preparadas para suportar os fortes ventos. A figura 4.2 representa os tanques e alguns dos componentes citados.

Ao contrário do que se pode pensar, a água no interior de cada estação não tem contato direto com a estrutura de polietileno. Ela é envolvida por uma bolsa plástica flexível (figura 4.3) que ajusta-se ao formato cilíndrico do tanque, chamada de *liner*, cuja função é isolar a água do meio externo, prevenindo a contaminação e entrada de luz, além de refletir a radiação de maneira difusa na superfície interna, garantindo que grande parte dela atinja as fotomultiplicadoras. O material utilizado é composto por 4 camadas de polietileno de baixa densidade (LDPE) e uma de *Tyvek* para garantir a refletividade na superfície interna. Além disso, o *liner* deve permitir o acesso das fotomultiplicadoras à água. Para isto há três janelas de acesso, nas quais são instaladas as PMTs com

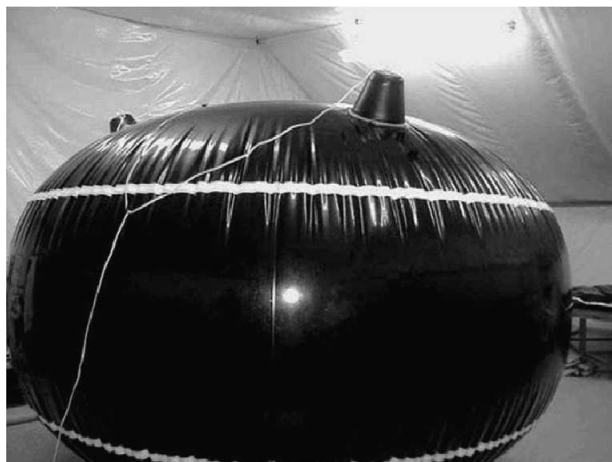


Figura 4.3: *Liner* dos tanques Cherenkov inflado com ar.

seu sistema de acoplamento óptico, que também garante proteção e a vedação contra luz

A água utilizada deve apresentar estabilidade a longo prazo e a menor atenuação possível para a radiação Cherenkov. São utilizados 12000 l de água ultra-pura, completamente deionizada e livre de microrganismos e nutrientes. O processo de purificação, que consiste em diferentes tipos de filtros, tratamento químico, eletrodeionização e desinfecção através de radiação ultravioleta, é realizado em uma estação de tratamento automatizada construída no prédio principal do observatório e resulta em uma resistividade de 15  $M\Omega cm$ . É utilizada água de um poço e da rede de abastecimento de Malargüe, armazenada em uma cisterna e em um tanque de 50000 l após a purificação. Cuidados são tomados também no transporte, que é realizado através de um caminhão com um tanque preparado para este propósito, onde são feitos testes regulares de condutividade elétrica e atividade biológica. A qualidade da água nos detectores pode ser monitorada através da forma dos sinais registrados pelas PMTs.

## 4.2 Sistema de aquisição de dados

A detecção da radiação Cherenkov nos tanques é realizada por três fotomultiplicadoras de 9" Photonis XP1805 [36] (figura 4.4), escolhidas por apresentarem o máximo de eficiência quântica (23%) em 420 nm, valor próximo do comprimento de onda da radiação Cherenkov. O sinal pode ser lido tanto no anodo, quanto no último dinodo, com amplificação de 32 vezes. O registro dos sinais é realizado por 6 FADCs (*Flash Analog to Digital Converters*) de 40 MHz, com 10 bits para leitura da tensão em função do tempo, em 768 intervalos de 25 ns [27]. Em cada evento são registrados os sinais do anodo e dinodo de todas as PMTs, sendo os primeiros importantes nos casos em que o sinal é muito in-



Figura 4.4: Fotomultiplicadora Photonis XP1805 [36].

tenso e causa saturação (medida superior ao máximo da escala do FADC), o que geralmente ocorre quando a estação está muito próxima do ponto impacto do chuvaireiro na superfície. Um sinal típico de múons registrados pelo detector é mostrado na figura 4.5, na qual a escala de medida é arbitrária. No procedimento de calibração [37] as medidas são convertidas de canais de FADC para unidades de carga de múon vertical.

Os sinais dos FADCs são enviados para dispositivos de lógica programável (PLD), nos quais são realizadas verificações para seleção ou não de eventos, de acordo com critérios estabelecidos de *trigger*, que serão discutidos posteriormente. Cada estação também possui um controlador IBM Power PC 403GCX de 40MHz, que faz a interface com os PLDs. O controlador é responsável também pelo gerenciamento de outros componentes da eletrônica, como os sistemas de comunicação e de GPS, e realiza a leitura de diversas informações de monitoramento, como as tensões e temperaturas nas PMTs e outros dispositivos.

### 4.3 Calibração

O objetivo da calibração [37] de cada estação do detector de superfície é a obtenção da carga integrada do sinal registrado na passagem de um múon vertical,  $Q_{VEM}$ . Esta grandeza é utilizada como referência para as medidas de carga, que são convertidas de unidades da eletrônica (canais do FADC) para  $Q_{VEM}$ . Desta forma os sinais de todos os tanques são padronizados. Outra grandeza da calibração, comumente utilizada quando se trabalha com níveis de discriminação de sinal, é o pico de carga do múon vertical ( $I_{VEM}$ ), definido de maneira análoga à carga  $Q_{VEM}$ , mas neste caso é considerado o máximo de amplitude do traço do FADC, e não a carga integrada. É comum se referir às unidades de  $Q_{VEM}$  e  $I_{VEM}$  simplesmente como VEM.

A partir de medidas utilizando pequenos detectores externos, montados com cintiladores, formando um telescópio, pode ser determinada a distribuição de cargas para múons verticais nos tanques Cherenkov, que é mostrada na figura

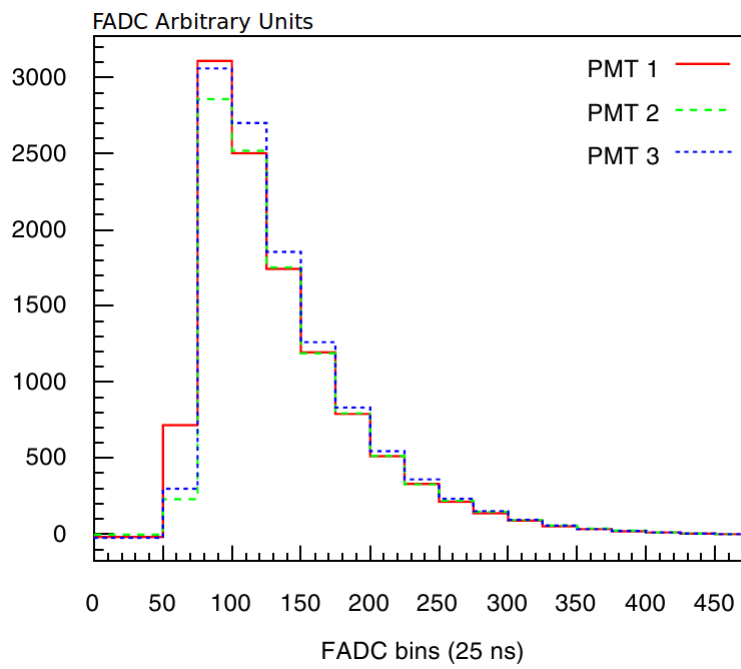


Figura 4.5: Sinal gerado por um múon num tanque Cherenkov, registrado em unidades arbitrárias do FADC [37].



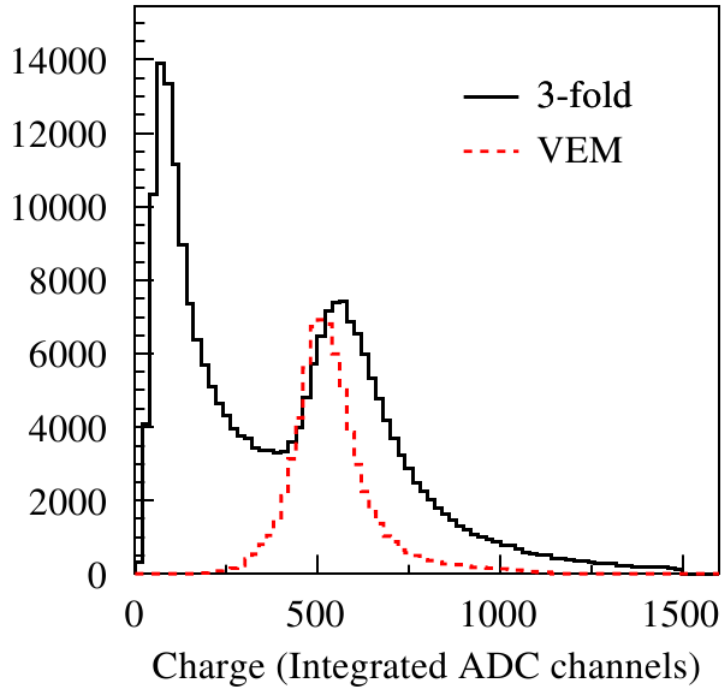


Figura 4.6: Histogramas de carga integrada para múons verticais (linha tracejada vermelha) e para coincidências triplas entre as PMTs (linha contínua preta). [37]

4.6 em comparação com a distribuição obtida apenas pela coincidência das três fotomultiplicadoras, sem seleção com detectores externos. O pico devido aos múons verticais também pode ser observado na distribuição obtida pela coincidência, localizado em  $1,03 \pm 0,02 Q_{VEM}$  em cada PMT. Conhecendo estas distribuições, é possível determinar o valor de  $I_{VEM}$  ou  $Q_{VEM}$  para qualquer tanque, sem a necessidade de utilizar um telescópio de múons.

A primeira etapa da calibração em VEM dos detectores de superfície é realizada apenas durante a instalação ou manutenção de um tanque. A tensão de cada PMT é aumentada até que sua contagem de eventos acima de um limiar de 150 canais de FADC (aproximadamente  $3I_{VEM}$ ) atinja  $100 Hz$ . Este limiar foi testado e escolhido por sua conveniência em termos de eficiência e ganho. O procedimento não pode ser realizado a distância, mas como pequenos desvios de calibração, inevitáveis devido a variações de temperatura, não afetam o desempenho do detector, são pouco frequentes as situações em que é necessário repeti-lo.

Após a instalação das estações é realizado um monitoramento da calibração, mas sem medidas diretas de carga, que aumentariam o tempo morto do detector. O que se faz é uma estimativa através de um algoritmo de convergência, no qual

são realizadas contagens para um limiar de calibração de  $2,5I_{VEM}$ , nas quais se espera obter  $70 Hz$ . Quando a contagem é diferente, não é necessário alterar as tensões das PMTs, apenas compensá-las com um aumento ou diminuição do  $I_{VEM}$  estimado. O processo é repetido, com um limiar diferente do inicial, devido à alteração em  $I_{VEM}$ , até que se obtenha a taxa esperada, completando a estimativa de  $I_{VEM}$ . No caso de serem observados desvios maiores que 20 canais em relação ao esperado ( $I_{VEM} = 50$  canais) a estação é reiniciada através da primeira etapa descrita. O monitoramento de  $Q_{VEM}$  também é realizado, seguindo o mesmo procedimento para sua estimativa.

Quando um evento satisfaz os critérios de seleção de chuviscos atmosféricos é incluído um histórico das últimas estimativas de  $I_{VEM}$  e  $Q_{VEM}$  de cada detector participante no conjunto de informações que são enviadas para a estação central. Além disso, cada tanque possui em sua eletrônica um sistema para aquisição de eventos a um limiar baixo ( $0,1I_{VEM}$ ), separado especialmente para medidas de carga com alta estatística, mas com poucos intervalos de tempo (20 ao invés dos 768 da aquisição normal). Quando a calibração é estabilizada, este sistema registra a cada 60 s histogramas de carga e amplitude de cada PMT e da linha de base de cada FADC. Estas medidas também são enviadas à estação central com cada evento, e servirão para uma determinação precisa de  $I_{VEM}$ ,  $Q_{VEM}$  e da linha de base, parâmetros de grande importância no procedimento de reconstrução do detector de superfície.

## 4.4 O tanque Cherenkov de Campinas

As instituições e pesquisadores brasileiros participam de forma bastante ativa da colaboração Pierre Auger. Também foi assim durante o desenvolvimento e construção do experimento, tendo grande parte dos tanques Cherenkov sido produzidos por indústrias brasileiras. Neste período, um detector idêntico aos utilizados no sítio sul do observatório foi enviado para a Universidade Estadual de Campinas (que conta com um grande grupo de pesquisadores envolvidos no experimento), para sua instalação no Laboratório de Léptons (figura 4.7). A montagem e teste se iniciaram no ano de 2003, com alguns resultados mais recentes de sua caracterização mostrados no trabalho de Consalter e Fauth de 2009 [38].

Algumas modificações em relação aos detectores originais foram realizadas na instalação do tanque em Campinas. A comunicação, por exemplo, não é via rádio, mas por cabos que vão até a parte interna do laboratório por tubos de PVC, portanto não há antena de comunicação. O sistema de alimentação elétrica não utiliza baterias, nem o painel solar. Também não é necessário um sistema de GPS, já que há uma única estação, sem o objetivo de detectar chuviscos atmosféricos. Na aquisição de dados é utilizada a eletrônica usual do laboratório, que consiste em osciloscópios e módulos padrão NIM e CAMAC para coincidência, contagem, discriminação, diferenças de tempo e medidas de cargas de sinais, entre outras funções.

O principal problema encontrado durante sua instalação foi a presença de



Figura 4.7: Tanque Cherenkov do Laboratório de Léptons da UNICAMP.

umidade no interior da estrutura do tanque, que poderia causar danos à eletrônica. Esta dificuldade se agravou pelo fato da tampa e vedação das aberturas ter sido improvisada. A solução encontrada foi a utilização de um produto anti-mofo de uso doméstico no espaço acima do *liner* para absorção do excesso de umidade. Também foi instalado um equipamento (termo-higrômetro) para monitoramento das condições de umidade e temperatura, com seu marcador no interior do laboratório, permitindo a avaliação da situação e evitando danos no uso do detector.

Após a preparação do detector foram feitas diversas medidas de caracterização, como a calibração das fotomultiplicadoras e obtenção de curvas de eficiência de contagem e tempo morto do sistema. Além disso, foram utilizados cintiladores plásticos para seleção de múons atravessando o tanque. Os dois detectores do telescópio de múons são independentes, podendo ser posicionados acima e abaixo do tanque através de uma estrutura construída para o elevar e deixar espaço livre embaixo. Com estas medidas foi possível estudar o espectro de carga do detector Cherenkov para múons verticais, realizando medidas em diferentes posições: distantes ou próximas das PMTs ou até passando exatamente por elas, onde é obtido um pico duplo no espectro. Também foi estudada a proporcionalidade entre a carga registrada e o tamanho do traço da partícula na água.

Feitas estas medidas, o instrumento se encontrava pronto para o uso em novos projetos. No ano de 2010, foi iniciado o trabalho desta dissertação, tendo

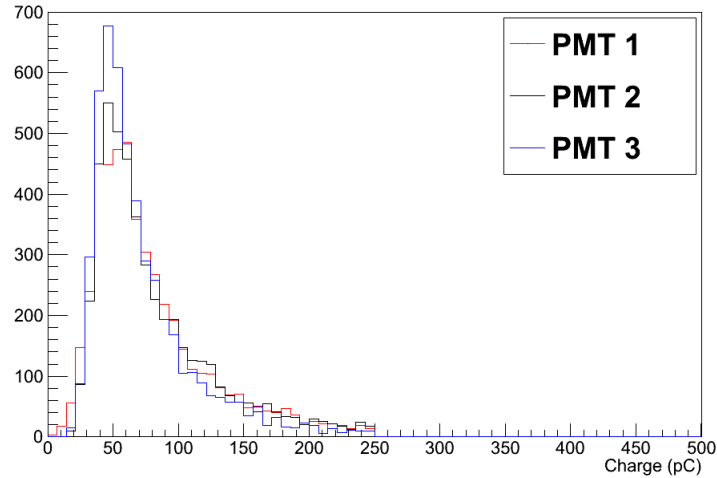


Figura 4.8: Distribuição das medidas de carga do tanque Cherenkov de Campinas realizadas durante este trabalho. São selecionados eventos de coincidência tripla entre as PMTs.

como um de seus objetivos o estudo de um tanque Cherenkov com apenas uma fotomultiplicadora. Para isto seria utilizado o detector de Campinas, aproveitando que já havia sido devidamente caracterizado, restando apenas repetir algumas medidas de teste para depois obter espectros de carga que permitissem determinar o comportamento do tanque numa configuração diferente de PMTs.

Um dos resultados obtidos é apresentado na figura 4.8. Foram realizadas medidas de carga, selecionando eventos em que havia coincidência temporal de sinal em todas as fotomultiplicadoras, aceitando partículas de todas as direções. A comparação do espectro com simulações (figura 4.9) mostra que sua forma está de acordo com o esperado. Mas ao comparar com as medidas da figura 4.10, apresentadas em [38], nota-se um deslocamento do pico de carga, de cerca de 30  $pC$ . Este é um indicativo de perda de ganho (mais de 25% de perda), o que pode ser devido a problemas na eletrônica ou até contaminação da água. Após uma abertura do tanque para testes de cabos e tensões de entrada e saída, não foram constatados problemas. Concluiu-se que a perda de ganho não inviabilizaria as medidas que se desejava realizar.

Durante a realização de novas medidas com um telescópio de múons, foi notado um sério problema com ruídos e aterramento na eletrônica do laboratório, afetando seriamente a qualidade das medidas. No intervalo de tempo (algumas semanas) até a solução destes problemas notou-se que o detector Cherenkov começava a apresentar sinais de degradação: a umidade havia aumentado, tensões de controle da eletrônica estavam abaixo do previsto e, o mais preocupante, a estrutura de madeira que sustentava o tanque estava cedendo, impossibilitando

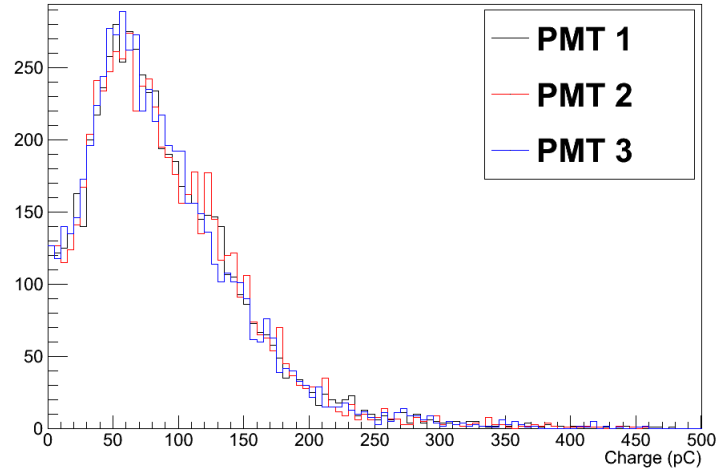


Figura 4.9: Espectro de cargas de cada PMT de um tanque Cherenkov simulado no software GEANT4 [39].

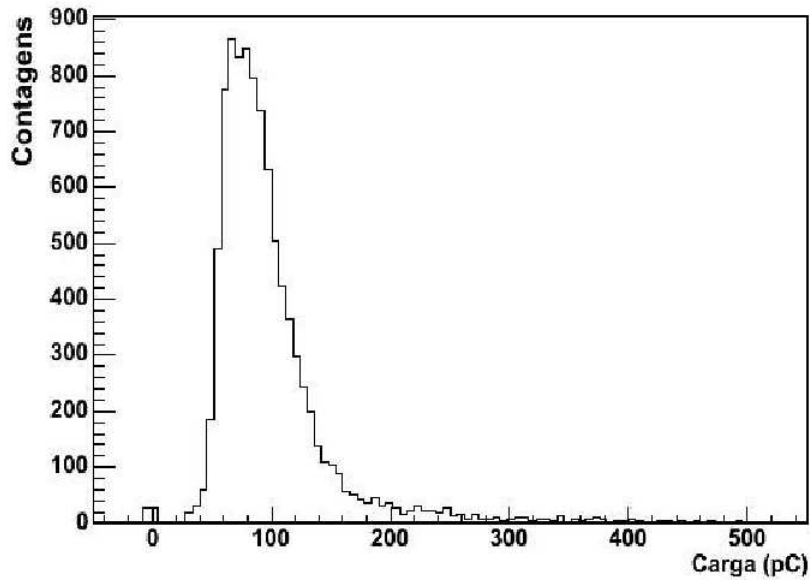


Figura 4.10: Distribuição de cargas de uma das PMTs do tanque Cherenkov de Campinas. Medidas realizadas por Consalter e Fauth [38].

que se subisse no detector para posicionar um telescópio de múons ou abrir a tampa de proteção da eletrônica. Como não havia previsão para o retorno à normalidade no laboratório, optou-se por utilizar uma abordagem diferente no trabalho, utilizando simulações e dados de tanques do Observatório Pierre Auger. Desta forma também seria possível estudar eventos gerados por raios cósmicos de energia ultra-alta, e não apenas múons atmosféricos provenientes de chuviros de baixa energia.

## Capítulo 5

# Reconstrução de eventos do detector de superfície

A reconstrução de eventos do detector de superfície, ou seja, a determinação da direção de chegada e energia do raio cósmico primário, é realizada através dos sinais de tanques próximos que registraram partículas e de suas diferenças de tempo, que permitem estimar a direção de propagação do chuveiro atmosférico e sua função de distribuição lateral. Após a seleção dos eventos, são efetuados diversos ajustes e minimizações nos dados, seguindo diversas etapas, que serão descritas neste capítulo.

### 5.1 Seleção de eventos

Nas estações do detector de superfície são observados sinais provenientes de diferentes origens, ocorrendo a uma taxa bastante alta. Deseja-se identificar quais destes podem ter sido gerados por chuveiros atmosféricos. Para isso, são aplicados alguns critérios de seleção, determinados no período de planejamento do experimento [40] e testados experimentalmente [27] antes do início da coleta de dados oficial. O procedimento de seleção se inicia na eletrônica de cada estação, passa por condições de coincidência temporal de várias estações, impostas no sistema central de aquisição de dados, e segue até o software de reconstrução *Offline*. Cada um destes critérios será descrito a seguir.

A partir deste ponto do texto, a palavra "evento" será utilizada apenas para detecções de chuveiros atmosféricos. Quando o texto referir-se a outros tipos de sinais nos detectores, como os gerados por múons atmosféricos, ou mesmo sinais desconhecidos, que poderão ser parte de um evento, será utilizada a palavra "ocorrência".

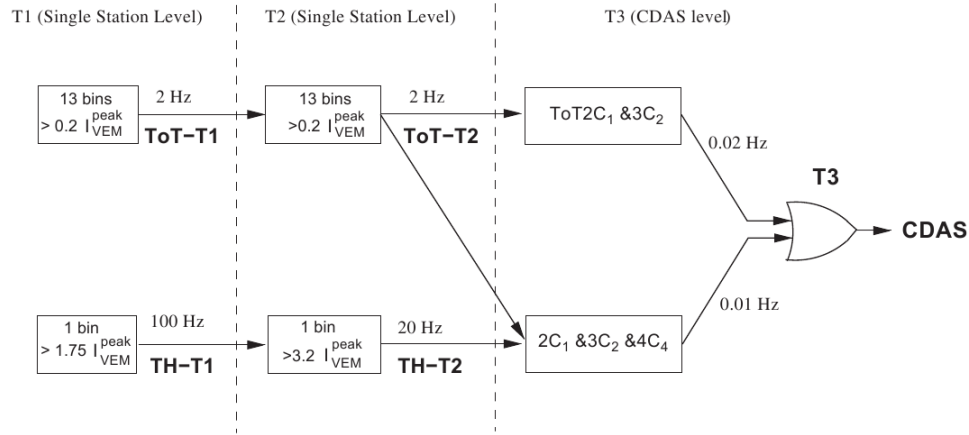


Figura 5.1: Esquema do trigger local do detector de superfície [41].

### 5.1.1 Trigger local

A identificação de um evento requer a separação entre sinais gerados acidentalmente (múons atmosféricos ou ruídos nos FADCs) e devidos a raios cósmicos de alta energia. Os três primeiros níveis de *trigger*, realizados localmente, conforme o esquema da figura 5.1, têm como objetivo realizar esta separação.

No critério **T1** há dois modos diferentes. O primeiro (*threshold - TH*) requer a coincidência tripla entre as fotomultiplicadoras, todas com sinal acima de  $1,75 VEM$ , selecionando sinais curtos e de alta amplitude, como os gerados por chuviros horizontais, a uma taxa próxima de  $100Hz$ . No outro modo (*time over threshold - ToT*) são selecionadas coincidências entre pelo menos duas PMTs, com sinais acima de  $0,2 VEM$  em pelo menos 13 intervalos do FADC, ou seja, com largura maior que  $325 ns$ . Estes sinais mais largos em tempo podem ser devidos a chuviros próximos com energias menores, ou aos de alta energia, mas com o centro mais afastado da estação [42], e ocorrem a taxas próximas de  $2 Hz$ . Nas figuras 5.2 e 5.3 são mostrados exemplos de sinais do tipo **TH-T1** e **TH-ToT** respectivamente.

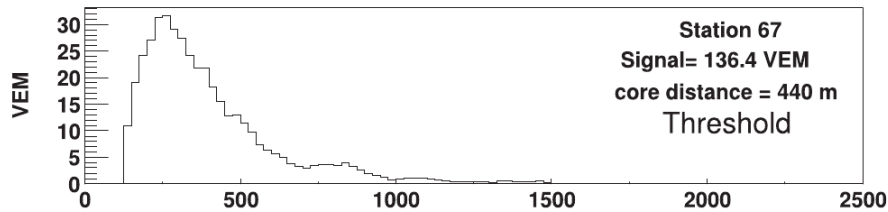


Figura 5.2: Exemplo de sinal do tipo TH-T1.



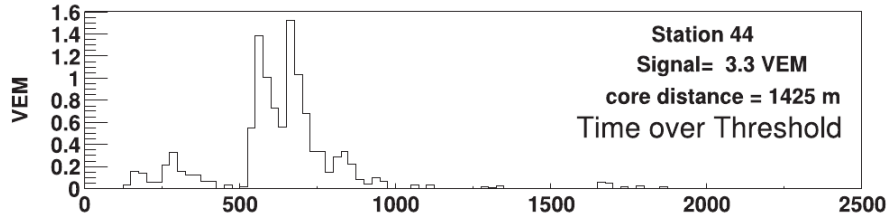


Figura 5.3: Exemplo de sinal do tipo TH-ToT.

No controlador do tanque, as ocorrências **TH-T1** têm seu limiar aumentado para  $3,2 \text{ VEM}$ , com coincidência tripla entre as PMTs, caracterizando o *trigger* **TH-T2**, enquanto os **ToT-T1** são diretamente promovidos a **ToT-T2**. Desta forma, no nível **T2** as taxas são reduzidas a  $20 \text{ Hz}$ , valor compatível com os limites do sistema de comunicação com a central de aquisição de dados (CDAS).

Ainda realizado localmente, mas pelo CDAS, o *trigger* **T3** tem como objetivo selecionar eventos devidos a chuviros atmosféricos que podem ser reconstruídos, ou seja, que foram detectados simultaneamente por vários tanques vizinhos. Neste caso também há dois modos. Um requer coincidência temporal de cerca de  $10 \mu\text{s}$  entre três ocorrências de **ToT-T2**, estando uma delas entre os tanques vizinhos mais próximos e a segunda no próximo nível de vizinhos, como mostrado na figura 5.4 à esquerda. Desta forma, são detectados cerca de 1600 candidatos a eventos por dia, com apenas 10% causados por falsas coincidências na janela de tempo considerada. O outro modo requer a coincidência entre quatro ocorrências de qualquer **T2**, sendo um entre os vizinhos mais próximos, um no segundo nível de vizinhos e o outro no quarto nível, como representado à direita na figura 5.4. Neste caso, 90% dos 1200 candidatos detectados são acidentais, sendo a eficiência maior para chuviros horizontais.

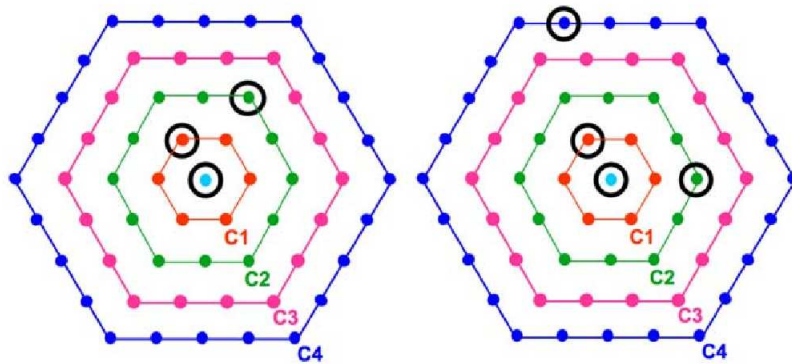


Figura 5.4: Representação dos dois modos do *trigger* **T3**.

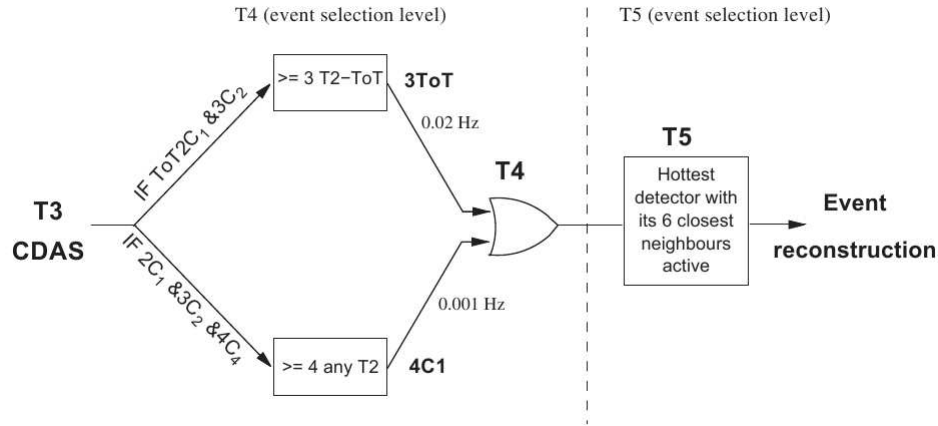


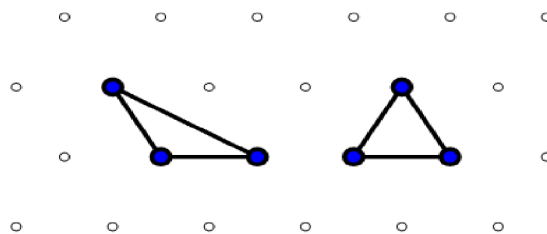
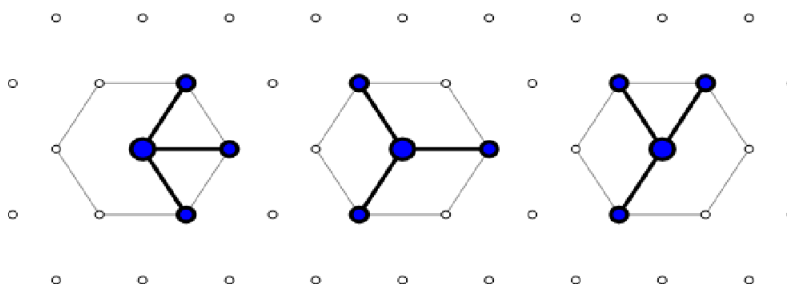
Figura 5.5: Esquema da seleção de eventos do detector de superfície para reconstrução [41].

### 5.1.2 Seleção de eventos no Offline

O *Offline* [43, 44] é um pacote de *software* que foi desenvolvido pela própria colaboração Pierre Auger, com intuito de fornecer o suporte necessário para diferentes tarefas computacionais. Entre elas, as principais são o processamento e reconstrução de eventos dos detectores de superfície, fluorescência e híbridos, além das ferramentas para simulação. O código é escrito em C++, com blocos de funções comuns, que podem ser organizadas na ordem desejada, com as configurações necessárias sendo alteradas apenas em arquivos de entrada, sendo desnecessário um conhecimento avançado da linguagem de programação. O programa foi desenvolvido de forma robusta o suficiente para permitir alterações realizadas por qualquer usuário e a implementação de novos métodos utilizados no processamento e aquisição de dados do observatório.

Sempre que a condição de *trigger* **T3** é satisfeita, os dados de todos os tanques participantes da detecção são gravados. A partir daí, a reconstrução é realizada no *Offline*, de forma independente da aquisição. Este procedimento se inicia com a seleção dos eventos com os critérios **T4** e **T5**, como esquematizado na figura 5.5.

O primeiro modo de **T4**, **3ToT**, requer ocorrências de **ToT-T2** em três tanques vizinhos, formando um padrão triangular, e o segundo, **4C1**, permite a passagem de qualquer **T2**, mas em quatro estações vizinhas. Em ambos os casos, os tempos dos sinais devem ser compatíveis com uma frente plana de chuva se movendo na velocidade da luz, sendo classificados como acidentais os disparos de outros tanques vizinhos que não satisfaçam esta condição. Com a exigência destes critérios, cujas geometrias possíveis são mostradas nas figuras 5.6 e 5.7, é obtida uma eficiência de 100% para eventos de ângulo zenital menor que 60°. A distribuição em ângulo zenital é mostrada na figura 5.8 para os

Figura 5.6: Exemplos de configurações do critério **3ToT**.Figura 5.7: Exemplos de configurações do critério **4C1**.

eventos destes dois modos de **T4**, mostrando sua complementaridade, com o **4C1** favorecendo chuveiros mais inclinados.

Mesmo com a alta eficiência obtida com **T4**, é necessário estabelecer um critério para correção de efeitos devidos às bordas do detector de superfície, que podem causar perdas de informação no processo de reconstrução, resultando em estimativas incorretas para o eixo do chuveiro e energia [45]. No *trigger* **T5** são selecionados apenas os eventos em que o tanque de maior sinal tem todos os seus vizinhos mais próximos funcionando no momento da detecção, como representado na figura 5.9, à esquerda. Isto exclui não apenas eventos ocorridos nas bordas do detector, mas também em regiões onde há estações com problemas.

O uso de **T5** é realizado de forma independente do processo de reconstrução. Ele garante que os eventos utilizados foram observados por um número de estações suficiente para a reconstrução. Porém, dependendo do tipo de estudo em questão, seu uso também causa uma perda significativa de bons eventos, que podem ser recuperados utilizando o chamado *T5 posterior*, no qual a condição de *trigger* é reduzida a cinco tanques em funcionamento ao redor do de maior sinal. Além disso, é exigido que o centro do chuveiro esteja contido em um triângulo equilátero de estações que foram disparadas, como mostrado também na figura 5.9, à direita, na qual a área cinza escuro é permitida de acordo com o *T5 posterior*. A eficiência deste critério foi estudada em [45] e atualmente faz parte do procedimento oficial de seleção de eventos.

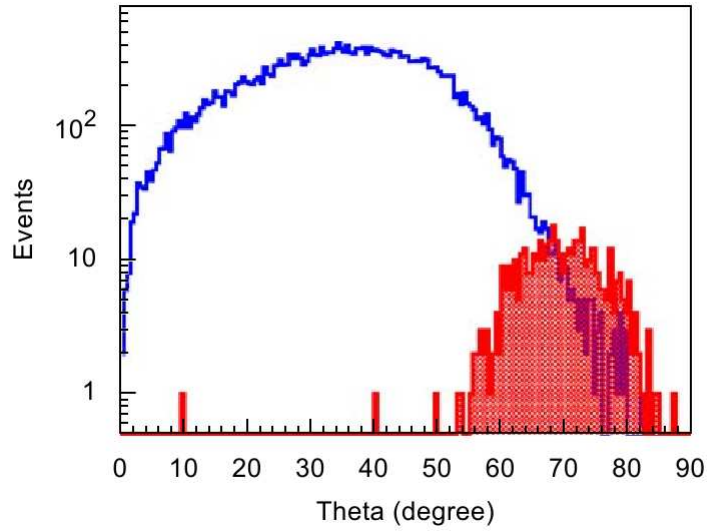


Figura 5.8: Distribuição dos eventos de **3ToT** (em azul e sem preenchimento) e **4C1** (em vermelho) em função do ângulo zenital [41].

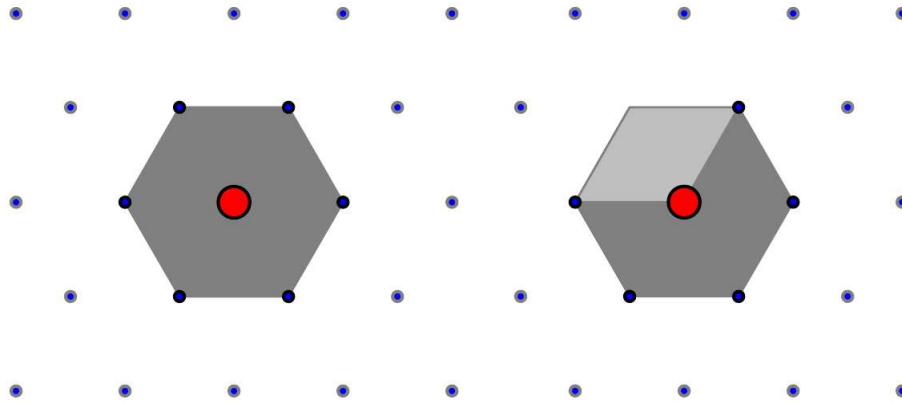


Figura 5.9: Critérios de seleção **T5** (à esquerda) e **T5 posterior** (à direita). A cor cinza mais escura representa a área onde os requisitos são satisfeitos

## 5.2 Reconstrução de eventos

Após a seleção de um evento, é iniciada sua reconstrução, que consiste em várias etapas de ajustes de funções, com estimativas cada vez mais precisas dos parâmetros do chuveiro.

### 5.2.1 Determinação do plano do chuveiro

Uma primeira estimativa do eixo do chuveiro é realizada através da aproximação de sua frente por um plano. É definida a origem do sistema de coordenadas através do baricentro calculado com as posições de cada estação, pesando com as amplitudes dos sinais. Também é definido o instante inicial  $t_0$  como a média dos tempos de início dos sinais, pesando da mesma forma. Considerando o chuveiro como um ponto em  $\vec{x}(t)$  se propagando à velocidade da luz na direção de um vetor unitário  $\vec{a}$  (apontado para sua fonte), com o ponto de impacto na origem numa primeira aproximação, temos

$$\vec{x}(t) = -c(t - t_0)\vec{a}. \quad (5.1)$$

O plano do chuveiro é perpendicular a  $\vec{a}$ , e o instante  $t(\vec{x})$  em que ele passa por um ponto é dado por sua projeção no eixo:

$$ct(\vec{x}) = ct_0 - \vec{x}\vec{a} \quad (5.2)$$

Um esquema com as grandezas definidas é mostrado na figura 5.10. Assumindo que as posições de cada tanque ( $\vec{x}_i$ ) são conhecidas com absoluta precisão, os desvios envolvidos se devem às incertezas ( $\sigma_t$ ) nas medidas do tempo de início do sinal ( $t_i$ ) em cada estação, de forma que a seguinte função deve ser minimizada:

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma_t^2} \sum_i [t_i - t(\vec{x})]^2 = \frac{1}{c^2 \sigma_t^2} \sum_i [ct_i - ct_0 + \vec{x}_i \vec{a}]^2. \quad (5.3)$$

Escrevendo o vetor do eixo como  $\vec{a} = (u, v, w)$ ,  $\vec{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$  e definindo  $c\sigma_t = \sigma$ , temos

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_i [ct_i - ct_0 + x_i u + y_i v + z_i w]^2, \quad (5.4)$$

com  $u^2 + v^2 + w^2 = 1$ . Esta condição torna o problema não-linear. Mas a solução pode ser aproximada, considerando que os tanques envolvidos no evento estão contidos em um plano, ou seja,  $z_i \ll x_i, y_i$ , o que é bem próximo da realidade, pois as diferenças de altitude são sempre menores que 20 metros. Desta forma é possível resolver o sistema de equações originado no procedimento de minimização de  $\chi^2$ , conforme mostrado em detalhes em [43], determinando as componentes do vetor do eixo do chuveiro e seus desvios. A solução só falha nos casos em que há dependência linear entre as posições das estações, como quando estão alinhadas, o que raramente ocorre para eventos de maiores multiplicidades.

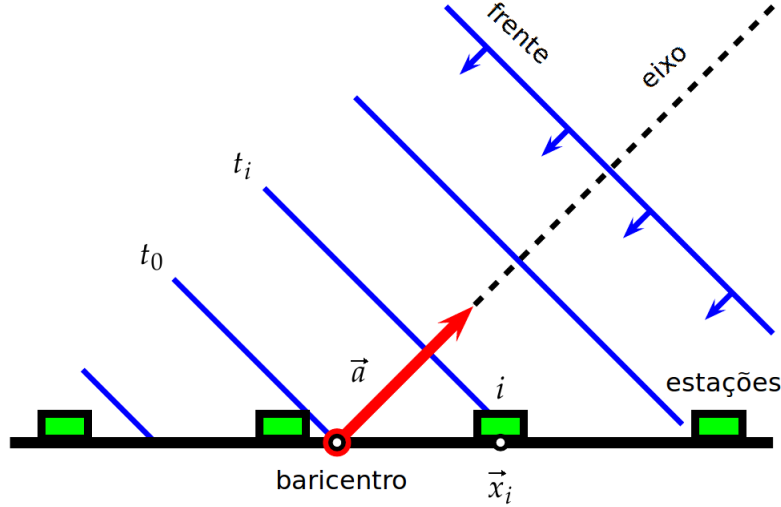


Figura 5.10: Aproximação da frente do chuveiro por um plano.

O ponto de impacto do chuveiro, inicialmente estimado como o baricentro das posições dos tanques pesadas com seus sinais, pode ser redefinido a partir do eixo do chuveiro determinado. Adota-se o ponto pertencente a este eixo, na posição onde intercepta o plano tangente à superfície da Terra que contém o baricentro das estações.

### 5.2.2 A função de distribuição lateral

O desenvolvimento lateral do chuveiro atmosférico geralmente é descrito por uma função que fornece a densidade de partículas num plano perpendicular ao eixo do chuveiro, em função da distância a este eixo. Uma das funções mais comumente utilizadas para esta descrição é a de Nishimura-Kamata-Greisen (NKG) [15, 16], que consiste em uma multiplicação de duas exponenciais com expoentes dependentes um parâmetro de "idade" do chuveiro, que está relacionado ao desenvolvimento longitudinal. No caso do Observatório Pierre Auger, a LDF (*lateral distribution function*) é escrita utilizando a amplitude do sinal nos tanques, e não a densidade de partículas, na seguinte forma:

$$S(r) = S_{1000} f_{LDF}(r), \quad (5.5)$$

na qual  $S_{1000}$  é o sinal a mil metros e  $f_{LDF}(r)$  é uma função normalizada, tal que  $f_{LDF}(1000) = 1$ . Diferentes formas foram testadas para a LDF [46], sendo a função do tipo NKG uma das que melhor descrevem os dados. Ela é escrita da seguinte forma:

$$f_{LDF}(r) = \left(\frac{r}{1000}\right)^\beta \left(\frac{r+700}{1000+700}\right)^{\beta+\gamma}, \quad (5.6)$$

onde  $r$  é dado em metros. O parâmetro  $\beta$ , relacionado à idade do chuva, é dependente do ângulo zenital ( $\theta$ ), podendo ser determinado através de uma parametrização conhecida, ou usado como parâmetro livre nos ajustes e minimizações realizados, assim como é feito com  $\gamma$ , com a escolha dependendo da etapa em que a reconstrução se encontra. Estes expoentes determinarão a forma da LDF nos ajustes, e o parâmetro multiplicativo  $S_{1000}$  será utilizado na determinação da energia do evento.

### 5.2.3 Ajustes para determinação dos parâmetros do chuva

Há duas formas distintas para determinação dos parâmetros que caracterizam o chuva (direção, ponto de impacto,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $S_{1000}$ ). Uma consiste em uma minimização de  $\chi^2$  e a outra num método de máxima verossimilhança.

Utilizando o  $\chi^2$ , escreve-se sua expressão utilizando os sinais medidos de cada estação ( $S_i$ ) e os teóricos em função da distância ao ponto de impacto ( $\rho_i$ ):

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[S_i - S(\rho_i)]^2}{S(\rho_i)}. \quad (5.7)$$

A minimização desta função permite a obtenção dos parâmetros desejados.

No método da máxima verossimilhança, o sinal é convertido em número de partículas e tratado através de modelos estatísticos. A conversão é dada por

$$n = \begin{cases} S \cdot f_S(\theta)^{-2}, & \text{se } f_S(\theta) > 1 \\ S, & \text{se } f_S(\theta) \leq 1 \end{cases}, \quad (5.8)$$

sendo  $f_S(\theta) = 0,32 + 0,42/\cos\theta$ . A função de verossimilhança leva em consideração as contribuições de cada tipo de estação, utilizando suas densidades de probabilidade e os números de partículas medidos por cada estação ( $n_i$ ) ou esperados de acordo com a expressão teórica da LDF ( $\mu_i$ ). Os casos possíveis são descritos a seguir.

**Sinais pequenos:** Representam uma pequena quantidade de partículas, então são modelados com estatística Poissoniana:

$$f_P(n_i, \mu_i) = \frac{\mu_i^{n_i} e^{-\mu_i}}{n_i!}. \quad (5.9)$$

**Sinais grandes:** No caso de um grande número de partículas, é possível utilizar uma aproximação Gaussiana:

$$f_G(n_i, \mu_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(n_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right]. \quad (5.10)$$

**Sinais saturados:** O tratamento de sinais acima do limite possível é realizado integrando  $f_G$  para todos os valores acima de  $n_i$ :

$$F_{sat}(n_i, \mu_i) = \int_{n_i}^{\infty} f_G(n, \mu_i) dn. \quad (5.11)$$

**Estações sem sinal:** Em estações abaixo do valor mínimo de partículas ( $n_{min}$ ) é necessário somar as probabilidades Poissonianas sobre todas as possibilidades:

$$F_{zero}(n_{min}, \mu_i) = \sum_{n=0}^{n_{min}} f_P(n, \mu_i). \quad (5.12)$$

A expressão total é dada por

$$L = \prod_i f_P(n_i, \mu_i) \prod_i f_G(n_i, \mu_i) \prod_i F_{sat}(n_i, \mu_i) \prod_i F_{zero}(n_i, \mu_i). \quad (5.13)$$

O logaritmo desta função é maximizado por métodos numéricos, fornecendo os parâmetros desejados, como no método do  $\chi^2$ .

#### 5.2.4 Determinação da frente curva do chuveiro

Após os primeiros ajustes para determinação do eixo do chuveiro, é possível passar para um modelo mais real de sua frente de propagação, no qual sua forma é parabólica, como mostrado na figura 5.11. Para isto, basta adicionar um termo à equação 5.2, que leve em consideração este raio de curvatura,  $R_c$ , resultando em

$$ct(\vec{x}) = ct_0 - \vec{x}\vec{a} + \frac{\rho(\vec{x})^2}{2R_c}, \quad (5.14)$$

onde  $\rho(\vec{x})^2 = x^2 - (\vec{a}\vec{x})^2$ . Reescrevendo a função  $\chi^2$  a ser minimizada, obtém-se:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[ct_i - ct_0 - |R_c\vec{a} - \vec{x}_i|^2]^2}{c^2\sigma_{t_i}^2}. \quad (5.15)$$

#### 5.2.5 Estimativa da energia

A descrição do chuveiro atmosférico através de modelos está sujeita a imprecisões devidas a flutuações estatísticas. No caso do desenvolvimento lateral, há uma posição na qual estas flutuações são mínimas [45], que corresponde a aproximadamente 1000 metros de distância ao eixo do chuveiro, no intervalo de energias e altitude do Observatório Pierre Auger. Por este motivo, inclui-se o parâmetro  $S_{1000}$  na parametrização da LDF e ele é utilizado na estimativa da energia do evento. Conforme será mostrado posteriormente, em cada reconstrução este ponto de menor flutuação no chuveiro é estimado de maneira mais precisa, já que ele também varia para cada evento.

A relação entre  $S_{1000}$  e a energia dos eventos do detector de superfície não é tão direta, pois a inclinação do chuveiro também tem influência no sinal gerado nos tanques. Na figura 5.12 é mostrado o resultado de uma análise com cortes de intensidade constante (CIC) [47], na qual obtém-se a curva de atenuação de  $S_{1000}$ , denotada por  $CIC(\theta)$ . Escolhendo um ângulo de referência de  $38^\circ$  (valor médio das inclinações), pode-se realizar a conversão  $S_{38^\circ} = S_{1000}/CIC(\theta)$ , que



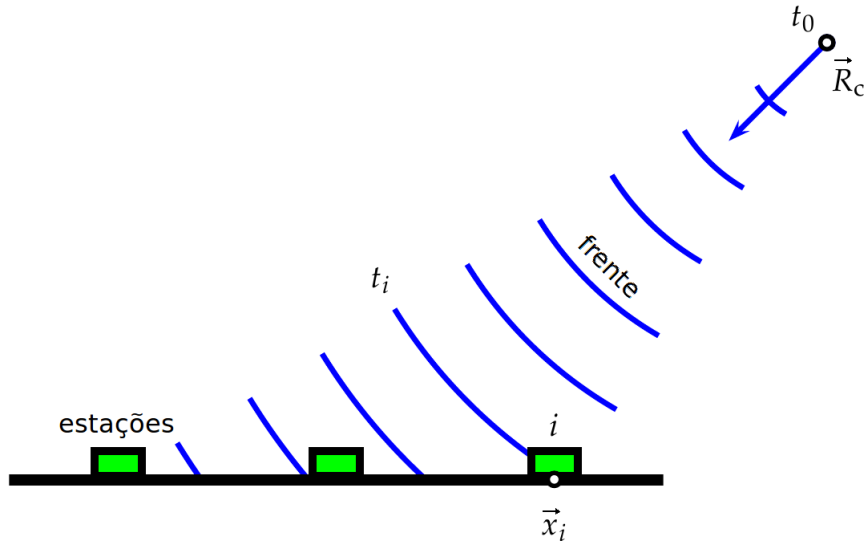


Figura 5.11: Propagação do chuveiro com frente parabólica.

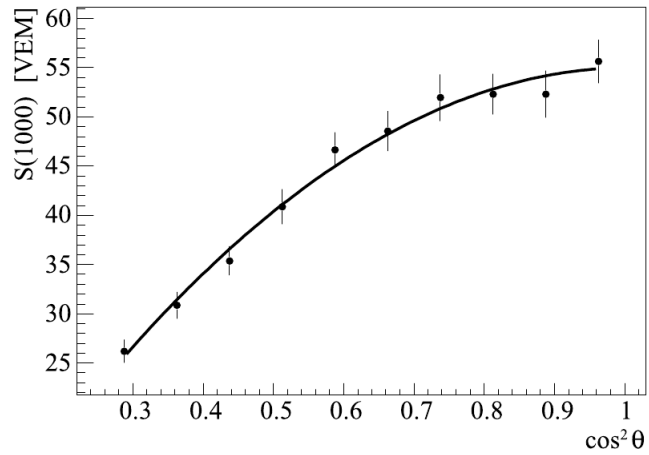


Figura 5.12: Curva de atenuação,  $CIC(\theta)$ , relacionando  $S_{1000}$  com a inclinação dos eventos.

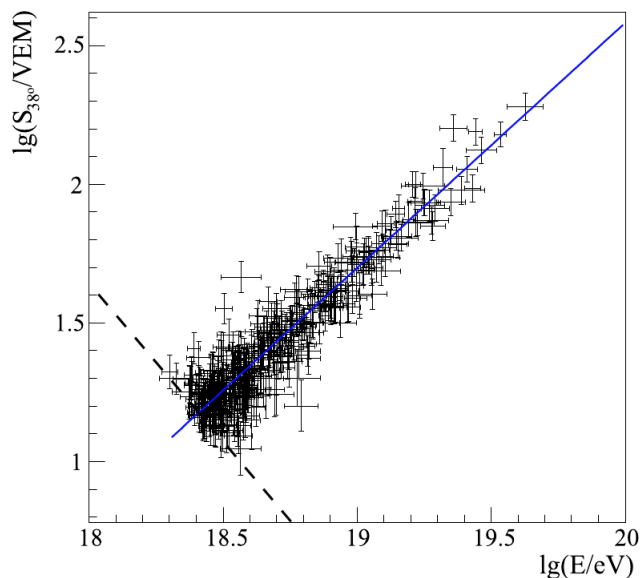


Figura 5.13: Relação entre o parâmetro  $S_{380}$  e a energia determinada pelo detector de fluorescência [47].

fornece um valor correspondente ao sinal observado a mil metros caso o evento tivesse uma inclinação de  $38^\circ$ .

Utilizando eventos híbridos obtém-se a relação entre  $S_{380}$ , determinado na reconstrução do detector de superfície como mostrado, e a energia medida de maneira direta pelos telescópios de fluorescência. O resultado desta análise para um grande conjunto de eventos é mostrado na figura 5.13, e fornece a seguinte relação:

$$E = 0,149(S_{380})^{1,078} EeV. \quad (5.16)$$

### 5.3 Resultados da reconstrução de eventos

Ao final da reconstrução de um evento, o *Offline* gera um arquivo que contém um resumo dos resultados obtidos, apresentado separadamente nas figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17. Uma descrição mais detalhada dos gráficos pode ser obtida em [44].

Nos mapas da reconstrução são representadas as estações próximas ao ponto de impacto do chuveiro. Estações que participaram da detecção aparecem com suas identificações marcadas e círculos coloridos, cujo diâmetro é proporcional à carga registrada. Estações de sinal saturado são mostradas como círculos pretos sem preenchimento. Os pequenos círculos sem identificação representam as estações que não foram disparadas. Além dos tanques, é mostrado um triângulo

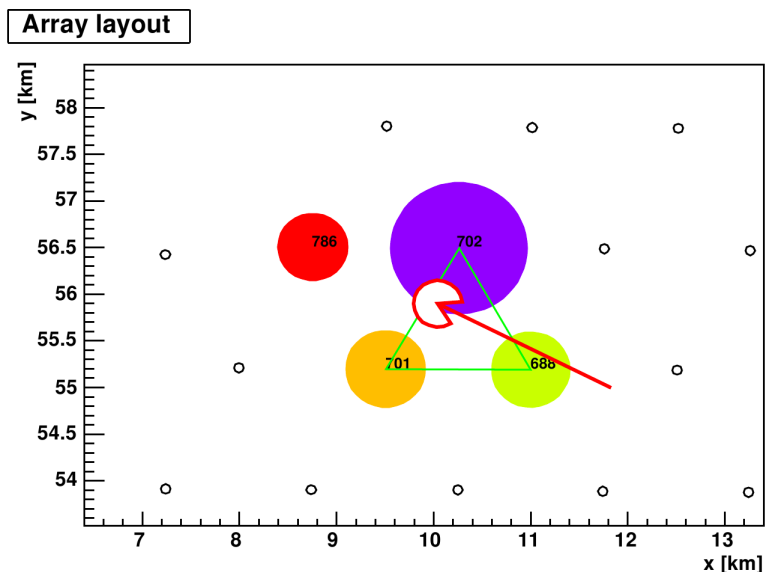


Figura 5.14: Exemplo de mapa da reconstrução de um evento.

verde, que corresponde ao conjunto das estações com maior sinal, utilizado na reconstrução geométrica do evento. A seta representa a direção de chegada e o círculo em seu final mostra o ponto de impacto do chuveiro.

O gráfico da função de distribuição lateral (figura 5.15) mostra o sinal (em VEM) em função da distância ao centro, sendo cada ponto o sinal de uma estação. A linha verde é o resultado final do ajuste da função, e é acompanhada por uma área cinza que mostra a região de  $1\sigma$  de confiança.

No gráfico com o ajuste temporal, os triângulos pretos representam o tempo de início do sinal de cada estação e as barras cinzas mostram sua duração. Os círculos verdes são o tempo de acordo com o esperado pelo ajuste, e os dois casos extremos de afastamento definem as linhas tracejadas marcadas.

Por último, é mostrada uma tabela com as grandezas obtidas na reconstrução (figura 5.17). Entre elas estão a identificação do evento, instante em que ocorreu, tempo marcado pelo GPS, critérios de seleção pelos quais passou, nível de ajustes utilizados, ponto de impacto, direção de chegada, raio de curvatura,  $S_{1000}$ ,  $\beta$  e energia. Um outro parâmetro presente na tabela é o  $r_{opt}$  (marcado também como um asterisco no gráfico da LDF), que consiste na distância para a qual se tem maior confiança no sinal, com valor geralmente próximo de 1000 metros.

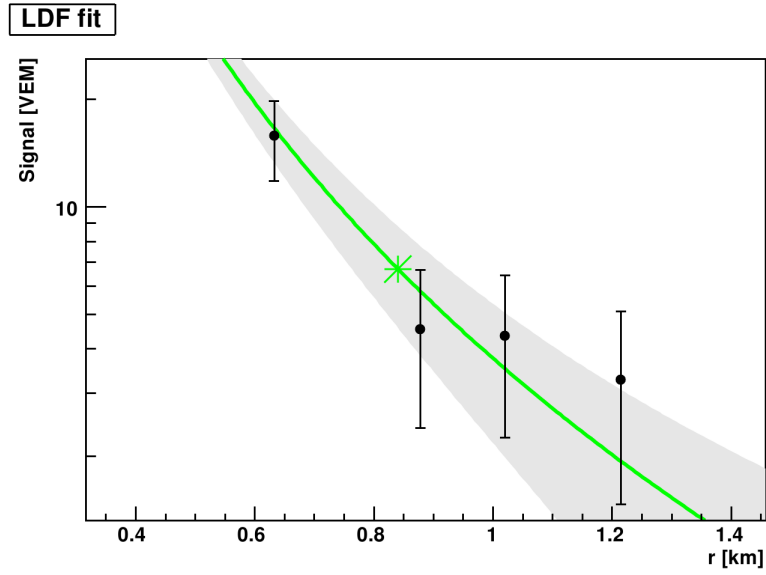


Figura 5.15: Ajuste da LDF na reconstrução de um evento.

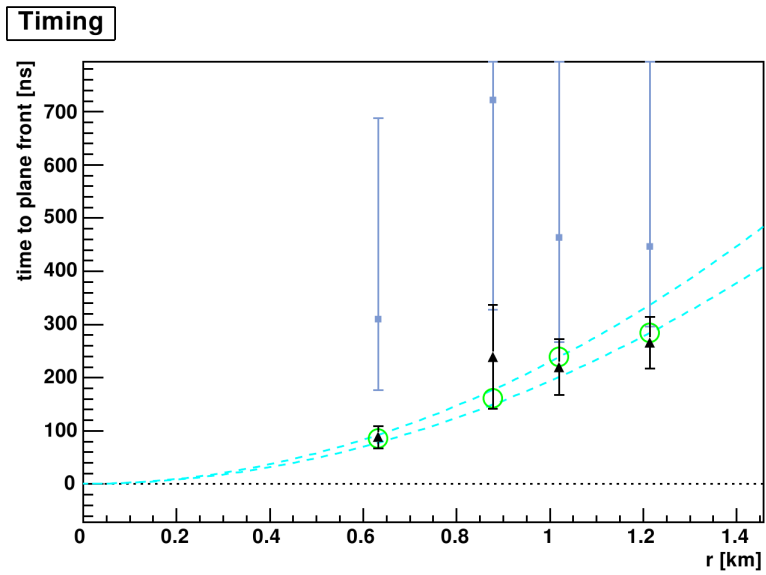


Figura 5.16: Ajuste do tempo de chegada na reconstrução de um evento.

**Event: sd\_1911499\_sd\_1911499**  
**Time: 2006-01-05T10:11:49.699747000Z**  
**GPS Time: 820491123 s, 699747000 ns**  
**T4: 3TOT+4C1 T5: Prior+Posterior**  
**Reconstruction stage: 4.5**  
**Easting: 449665.03 ± 171 [m]**  
**Northing: 6115928.12 ± 89.3 [m]**  
 **$\theta$ : 31.83 ± 1.3 [°]  $\phi$ : -26.763 ± 1.5 [°]**  
 **$R_c$ : 7.877 ± 0.097 [km]**  
**S1000: 3.76 ± 0.8 (±0.35 sys)  $r_{opt}$ : 840.64 [m]**  
 **$\beta$ : -2.13 ± 0 (±0.34 sys)**  
**Energy: 0.5734 ± 0.13 [EeV]**

Figura 5.17: Resumo dos resultados da reconstrução de um evento.

## Capítulo 6

# Impacto de estações irregulares na reconstrução

Neste capítulo serão apresentados os resultados de alguns estudos sobre a reconstrução de eventos do detector de superfície do Observatório Pierre em situações irregulares, por exemplo, com estações fora de funcionamento ou com uma ou duas fotomultiplicadoras desligadas.

### 6.1 Consequências da ausência de estações em um evento

Uma questão importante sobre a reconstrução de eventos do detector de superfície é a influência de uma estação em particular sobre o resultado final e as consequências de sua exclusão. A ocorrência de um evento próximo às bordas do observatório ou numa região onde um ou mais tanques estão fora de funcionamento, pode aumentar a imprecisão das grandezas determinadas. Para evitar estes problemas são utilizados os critérios de seleção **T5**, previamente descritos neste texto, que mostraram-se eficientes, conforme discutido em [45], mas podem acabar por excluir alguns eventos que seriam reconstruídos com precisão. Para confirmar esta hipótese é importante conhecer o efeito da ausência de estações em uma detecção.

Para estudar este problema, foram realizadas simulações de eventos, excluindo algum tanque no processo de reconstrução. As estações escolhidas foram a principal (de maior sinal, ou seja, mais próxima do ponto de impacto do chuveiro), uma de sinal intermediário, vizinha da principal, e uma mais distante. As distâncias de cada uma delas, estimadas no procedimento de reconstrução, são mostradas no gráfico da figura 6.1, no qual foram realizadas 5000 simulações. O chuveiro atmosférico utilizado foi gerado por prótons de  $10^{19}$  eV, com ângulo zenital de  $32,4^\circ$ . Na figura 6.2 é mostrado o diagrama representando as estações disparadas em uma das reconstruções deste evento, realizada sem

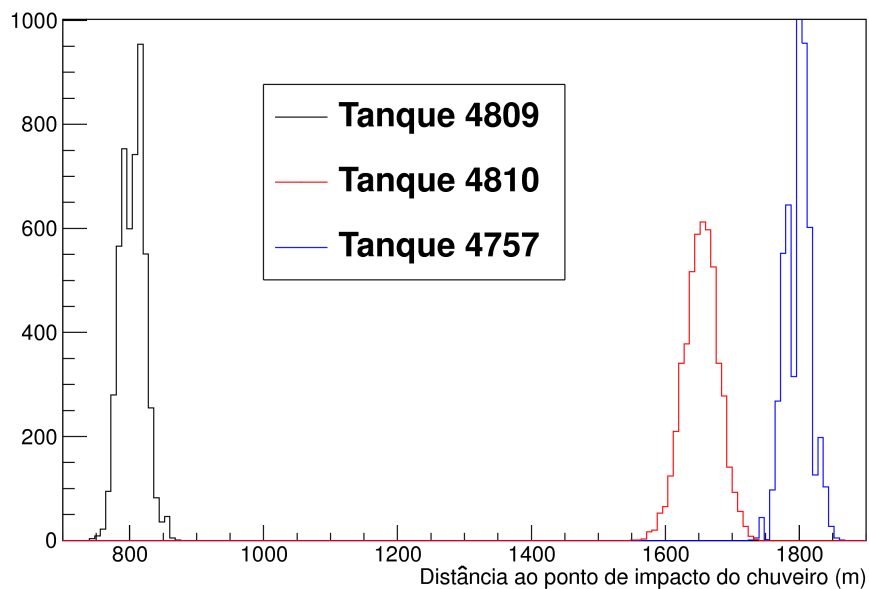


Figura 6.1: Distância reconstruída das estações ao centro do chuveiro na superfície.

qualquer modificação no detector. No mapa é possível notar que das estações escolhidas, uma (4810) está contida no primeiro hexágono ao redor da principal (4809) e a outra (4757) no segundo hexágono.

A seguir são apresentadas as distribuições normalizadas das grandezas da reconstrução dos eventos, nas figuras 6.3, 6.4, 6.5, mostrando a energia, ângulo zenital ( $\theta$ ) e ângulo azimutal ( $\phi$ ), respectivamente. Com uma simples comparação visual entre os resultados para o caso de cada estação excluída, fica claro que a não utilização da estação principal influencia muito. No caso da exclusão de estações mais distantes, a distribuição tem a forma muito parecida em todos os casos, assemelhando-se à daquele em que nenhuma estação foi removida da reconstrução. Na tabela 6.1 são mostradas as médias e desvios obtidos, resumindo o resultado dos histogramas.

Tabela 6.1: Resultados da exclusão de estações na reconstrução de eventos.

Estação excluída	Energia (EeV)	$\theta$ (graus)	$\phi$ (graus)
Nenhuma	$5,562 \pm 0,005$	$32,735 \pm 0,007$	$50,85 \pm 0,01$
4809	$3,148 \pm 0,005$	$34,79 \pm 0,03$	$53,12 \pm 0,04$
4810	$5,356 \pm 0,007$	$32,76 \pm 0,01$	$50,77 \pm 0,02$
4757	$5,478 \pm 0,007$	$32,77 \pm 0,01$	$50,93 \pm 0,02$

Utilizando desvios relativos, em relação aos valores obtidos sem a exclusão de

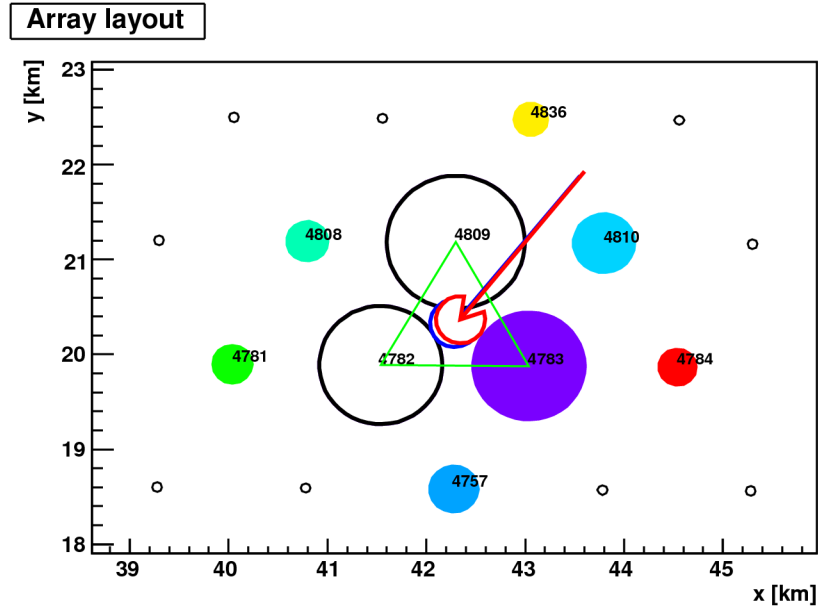


Figura 6.2: Mapa da reconstrução de um evento simulado.

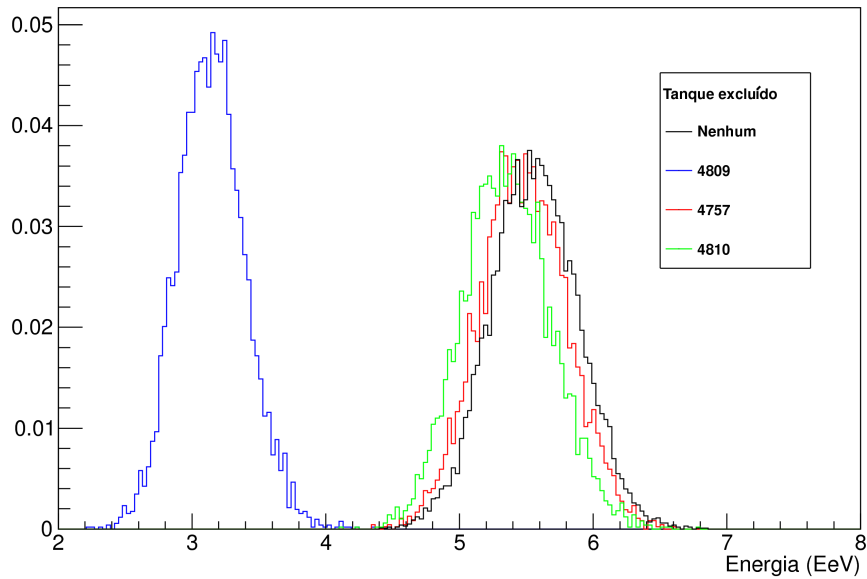


Figura 6.3: Distribuição da energia para eventos simulados.



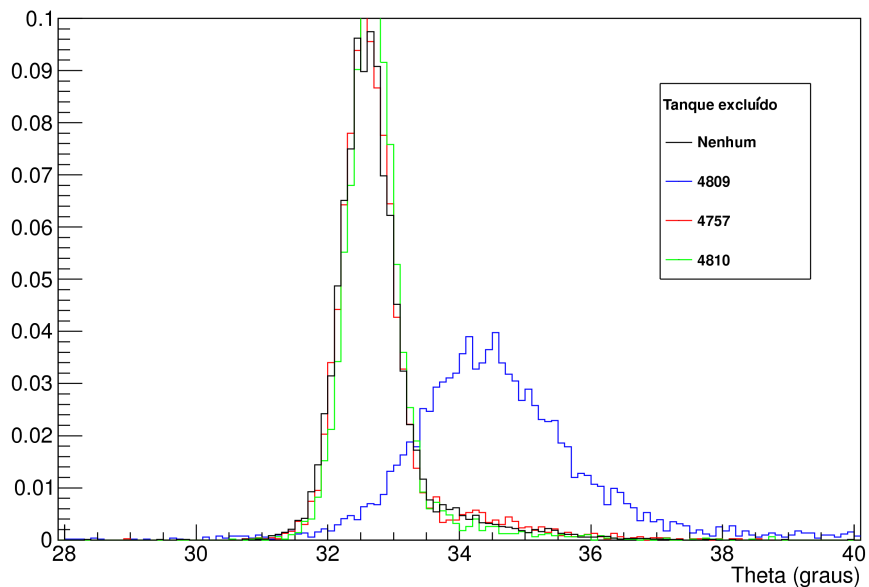


Figura 6.4: Distribuição do ângulo zenital para eventos simulados.

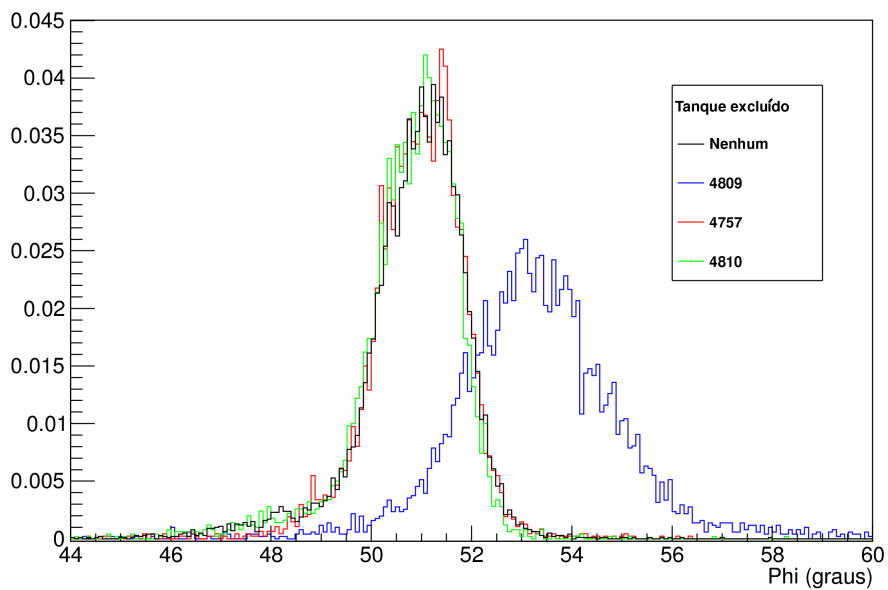


Figura 6.5: Distribuição do ângulo azimutal para eventos simulados.

estações, é possível quantificar os resultados. Na tabela 6.2 são mostrados estes desvios, nos quais fica claro que a exclusão da estação principal traz consequências praticamente desastrosas ao procedimento de reconstrução, causando um desvio de mais de 40% na energia. Já as outras estações, parecem influenciar menos na energia, e praticamente nada na direção de chegada do evento.

Tabela 6.2: Módulo do desvio percentual das grandezas em relação ao caso em que nenhuma estação foi excluída.

Estação excluída	$\Delta E$ (%)	$\Delta \theta$ (%)	$\Delta \phi$ (%)
4809	43,4	6,3	4,5
4810	3,7	0,1	0,2
4757	1,5	0,1	0,2

A influência de cada estação pode ser melhor compreendida olhando-se para um gráfico de ajuste da LDF (figura 6.6). Estações mais próximas do centro do chuveiro determinam a forma da LDF na região próxima aos 1000  $m$ , portanto, seus sinais estão diretamente ligados ao parâmetro  $S_{1000}$ , utilizado na determinação da energia. Estações mais distantes causarão mudanças nesta forma, mas para valores maiores que 1500  $m$ , afetando menos na energia. No caso da direção de chegada, o fato da estação principal ter uma influência maior, se deve à reconstrução geométrica realizada, na qual são utilizadas as estações de maior sinal, marcadas pelo triângulo verde no mapa da reconstrução. Como pode ser notado comparando o mapa da reconstrução original (figura 6.2) com o da exclusão da estação principal (figura 6.7), a exclusão de uma estação próxima ao centro do chuveiro causa a mudança deste triângulo, resultando em alterações na estimativa inicial do eixo do chuveiro. As demais estações influenciam apenas nos ajustes realizados em etapas posteriores, para refinamento da reconstrução, então sua ausência não produz grandes efeitos.

Os resultados desta análise indicam a necessidade de aplicar o critério de seleção de eventos **T5**, como se tem feito atualmente, pois a reconstrução de um evento na ausência de estações próximas ao centro do chuveiro é imprecisa, resulta em eventos cuja energia e direção de chegada determinadas não são confiáveis. Além de necessária, a aplicação de **T5** parece suficiente para garantir a qualidade da reconstrução, já que foi mostrado que estações distantes da central, no segundo hexágono ou depois, causam um impacto pequeno nos parâmetros reconstruídos.

É importante ressaltar que a confirmação das conclusões realizadas só será possível com um estudo mais detalhado, com eventos de outras energias e principalmente outros ângulos zenitais, já que a reconstrução de chuveiros mais inclinados apresenta algumas diferenças. Também é importante realizar testes com eventos reais do Observatório Pierre Auger, nos quais se está sujeito a vieses não introduzidos nas simulações.

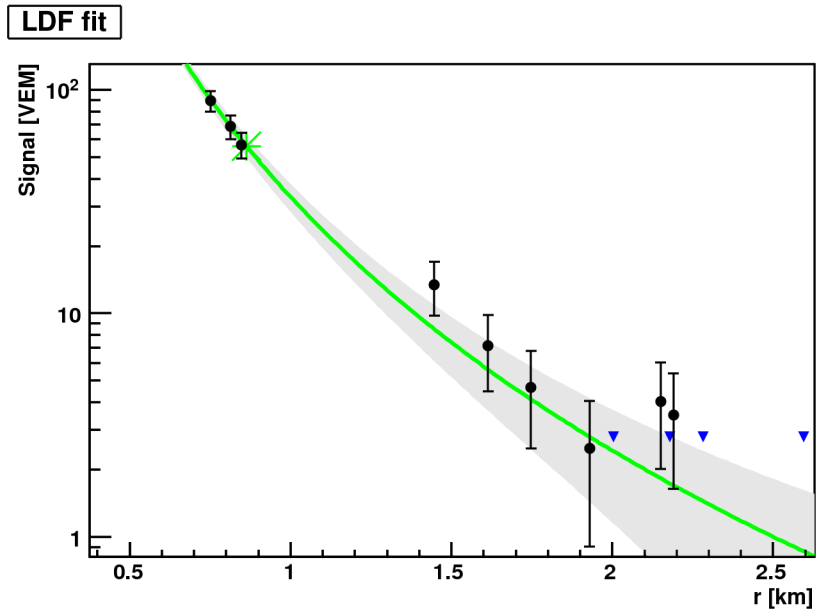


Figura 6.6: Ajuste da função de distribuição lateral para um evento simulado.

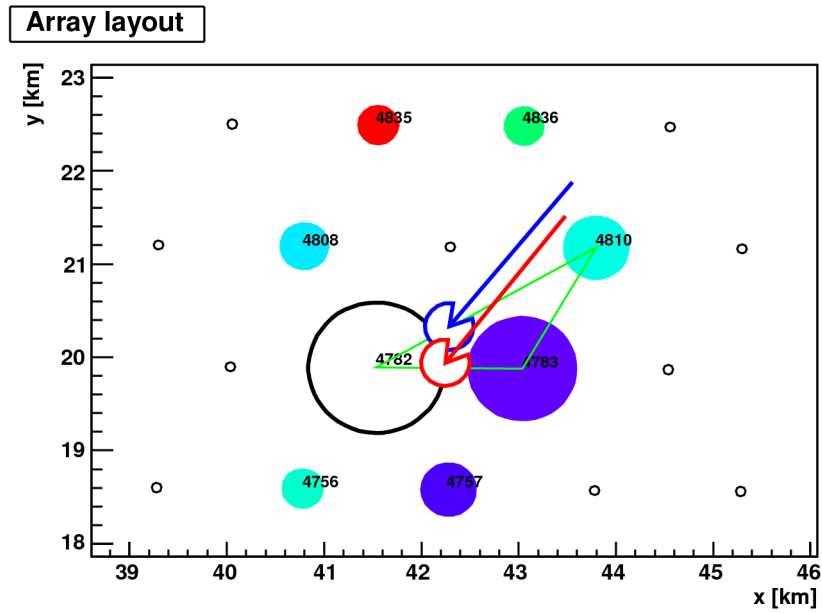


Figura 6.7: Mapa da reconstrução de um evento simulado, excluindo a estação principal.

## 6.2 Utilização de tanques irregulares

A manutenção de um experimento como o Observatório Pierre Auger, cuja área ultrapassa os  $3000 \text{ km}^2$ , requer um grande esforço em termos de substituição e reparo dos detectores de superfície, devido às longas distâncias entre as estações e a dificuldade de acesso a algumas delas. Uma forma de lidar com problemas na eletrônica é o desligamento do tanque, que pode ser parcial, excluindo apenas uma ou duas de suas fotomultiplicadoras. O procedimento usual no caso destas estações irregulares é marcá-las como defeituosas, excluindo-as da reconstrução de eventos até que sejam reparadas. Como discutido na seção anterior, a exclusão de estações influencia nos resultados da reconstrução de um evento, sendo este excluído pelo critério de seleção **T5**. Porém, pode ser possível utilizar este sinal, evitando a perda de eventos que poderiam ser reconstruídos com precisão.

Foi realizado um estudo deste tipo de situação, na qual um tanque participa de um evento com apenas uma ou duas de suas PMTs funcionando. Foram utilizadas simulações, realizadas da mesma forma que nas análises anteriores, inclusive partindo do mesmo chuva simulado. O tanque principal, como já discutido, é o que mais contribui para o procedimento de reconstrução, então foi o utilizado nesta análise, tendo uma e depois duas de suas fotomultiplicadoras desligadas. Simulando a detecção nestas configurações e reconstruindo os eventos, foram obtidas as distribuições de energia, ângulo zenital e ângulo azimutal, apresentadas nas figuras 6.8, 6.9 e 6.10. Com 2 ou 3 PMTs os histogramas são bastante parecidos, mas no caso com apenas uma é possível notar diferenças, que podem ser entendidas ao olhar a distribuição da carga total da estação principal (figura 6.11), onde também há diferenças. As variações produzidas na carga do tanque se refletem em alterações nas grandezas reconstruídas.

Na tabela 6.3 são mostrados os desvios relativos da média de cada distribuição apresentada em relação à reconstrução com o tanque completo, com 3 PMTs. De acordo com estes resultados, a utilização de um número menor que 3 fotomultiplicadoras não teria grandes consequências sobre as grandezas reconstruídas, podendo o sinal destas estações ser utilizado na reconstrução de eventos do observatório.

Tabela 6.3: Desvio das grandezas em relação ao caso dos tanques regulares.

Número de PMTs	$\Delta E$ (%)	$\Delta \theta$ (%)	$\Delta \phi$ (%)
2	0,2	0,1	0,1
1	1,1	0,3	0,3

Em detectores reais há um problema que não foi considerado nesta análise: a ocorrência de eventos ao acaso. Um dos motivos para o uso de 3 fotomultiplicadoras nos tanques Cherenkov é a eliminação de pulsos aleatórios, gerados por múons atmosféricos ou ruído nas PMTs, realizando a coincidência temporal do sinal das 3. Com apenas uma fotomultiplicadora, a chance de detecção de um destes falsos eventos é maior, o que torna a eficiência destes tanques menor.

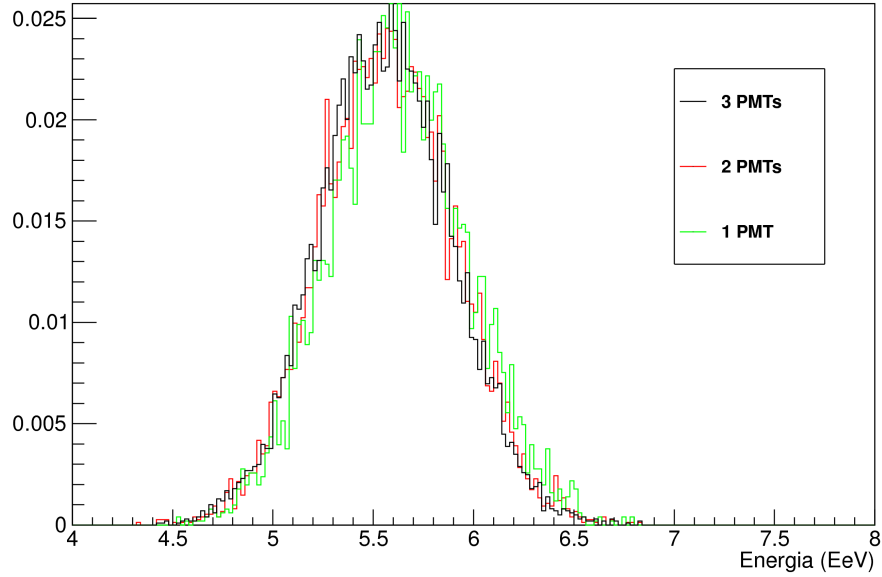


Figura 6.8: Distribuição da energia para eventos simulados nos casos de estações irregulares.

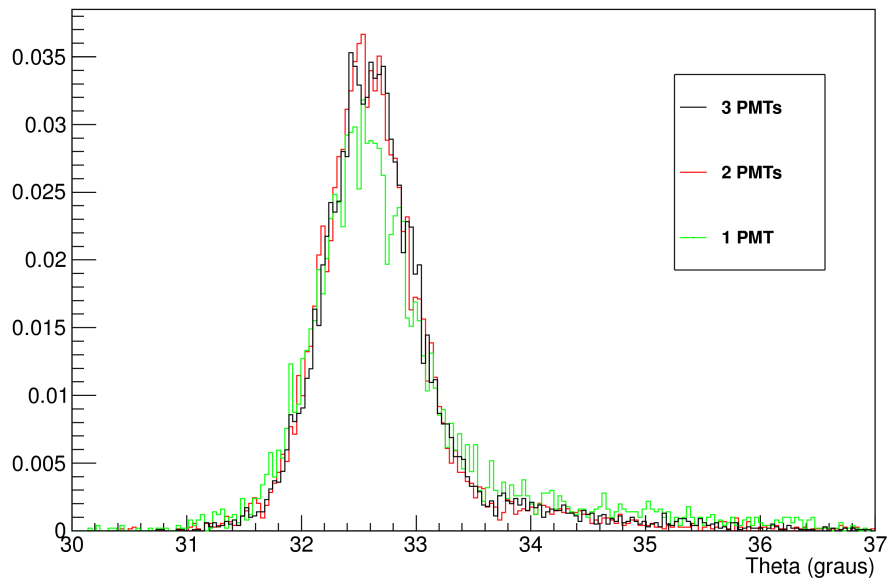


Figura 6.9: Distribuição do ângulo zenital para eventos simulados nos casos de estações irregulares.

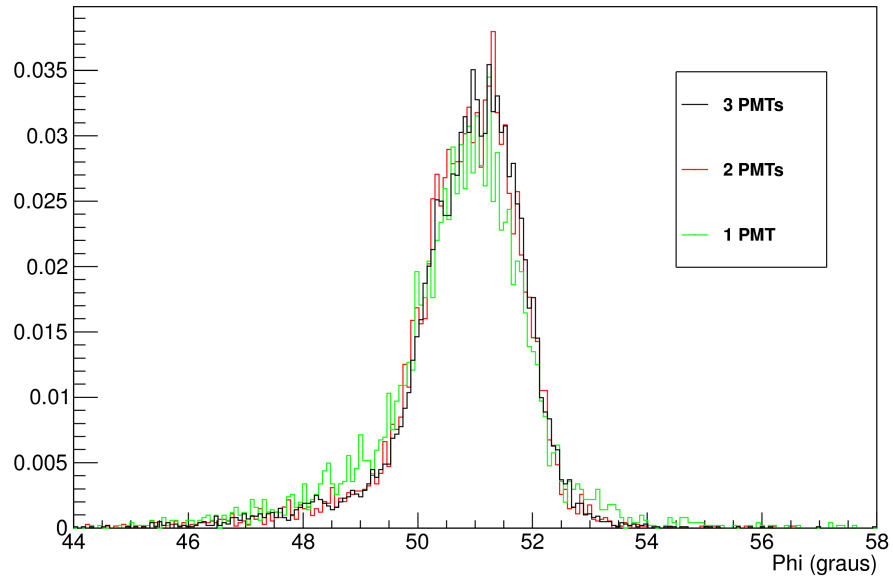


Figura 6.10: Distribuição do ângulo azimutal para eventos simulados nos casos de estações irregulares.

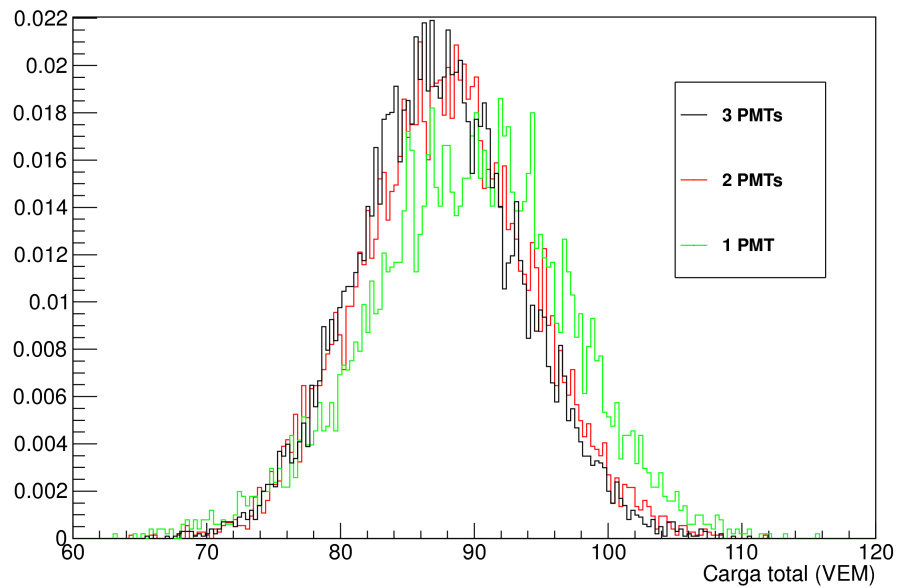


Figura 6.11: Distribuição da carga da estação principal para eventos simulados nos casos de estações irregulares.

Ainda assim, é possível aproveitar o sinal destas estações, pois o critério de seleção T3 deve ser suficiente para eliminar este tipo de ruído.

Em algumas das propostas de expansão do Observatório Pierre Auger, que sugerem a construção de um novo sítio no hemisfério norte [48], os tanques Cherenkov aparecem em uma nova configuração, com apenas uma fotomultiplicadora. A análise apresentada mostra que é possível reconstruir os eventos com o sinal fornecido por apenas uma PMT, mas os problemas relacionados a pulsos falsos não poderiam ser eliminados sem a coincidência. Desta forma, é necessário utilizar uma PMT cuja eficiência não coloque em risco a qualidade dos sinais registrados. O uso desta configuração ainda traz a desvantagem de não permitir a operação da estação após a ocorrência de algum problema na PMT, causando a exclusão deste tanque da aquisição de dados.

Novamente, é importante lembrar que mais testes devem ser realizados para que uma conclusão confiável seja obtida sobre o uso das estações irregulares. Apenas um estudo utilizando eventos reais pode confirmar este tipo de resultado. No caso dos tanques Cherenkov com apenas uma PMT, é necessário realizar testes através de protótipos destes detectores, e não tirar conclusões a partir apenas dos tanques atuais.

## 6.3 Estudo de eventos reais do Observatório Pierre Auger

O uso de simulações no estudo da reconstrução de eventos do Observatório Pierre Auger permite a análise de uma grande quantidade de dados gerados a partir de uma mesma situação física, sujeita apenas às flutuações estatísticas do procedimento utilizado. Porém, as informações geradas podem conter vieses, devidos a fenômenos desconhecidos não presentes nos modelos teóricos, ou devido a peculiaridades dos detectores utilizados. Por isso, é importante que as hipóteses obtidas sobre o comportamento do procedimento de reconstrução sejam testadas com eventos reais registrados pelo observatório. Para isto não é necessário que uma intervenção direta seja realizada nos tanques Cherenkov, basta introduzir mudanças durante a reconstrução, fazendo com que a carga de uma fotomultiplicadora de uma determinada estação seja zerada, por exemplo, produzindo um resultado equivalente ao desligamento da PMT.

Uma primeira irregularidade estudada foi a ausência da estação principal em um evento. Foram utilizados cerca de 3 mil eventos, com energia acima de  $3EeV$  e ângulo zenital menor que  $60^\circ$ , ou seja, dentro das condições necessárias para uma reconstrução eficiente. O resultado obtido após a exclusão desta estação foi um desvio médio nas grandezas reconstruídas de aproximadamente 14% para a energia e 3% para os ângulos zenital e azimutal, valores um pouco acima dos esperados pelo erro sistemático do procedimento de reconstrução, mas também menor que os obtidos através dos eventos simulados. Porém, a maior influência da estação principal é sobre os critérios de seleção: foi observada uma perda de 23% dos eventos, já que alguns nem puderam ser reconstruídos sem o tanque

principal, e 62% dos eventos deixaram de satisfazer o critério T5.

Também é interessante olhar estes resultados separando os eventos por intervalos de energia ou inclinação. Nas figuras 6.12 e 6.13 são mostrados os desvios causados na energia e direção de chegada em função dos intervalos de energia ou de ângulo zenital selecionados. As frações de eventos que não puderam ser reconstruídos ou deixaram de satisfazer T5 também são mostradas em função da energia e ângulo zenital, nas figuras 6.14 e 6.15. Na maioria destes gráficos é possível notar um comportamento claramente decrescente, que pode ser explicado pelo fato do número de estações disparadas em um evento aumentar com a energia e inclinação, fazendo com que a influência de uma única estação seja menor e permitindo a reconstrução com maior precisão, sem que tantos eventos sejam perdidos. No caso de energias maiores que  $30 \text{ EeV}$ , por exemplo, não houveram eventos que não puderam ser reconstruídos, apesar da fração dos que deixaram de satisfazer T5 ter sido bastante alta. A exclusão da estação principal causa uma mudança no hexágono utilizado no teste de T5, que passa a conter em quase todos os casos a estação que foi desligada. Por isso a taxa de eventos que deixam de satisfazer este critério é tão alta em todos os casos.

Os resultados são consistentes com as hipóteses obtidas a partir das simulações. A perda de uma estação causa alterações nas grandezas reconstruídas, que são pequenas nos casos em que há um número grande delas, e traz sérios problemas para a eficiência do experimento, já que muitos eventos são perdidos por não poderem ser reconstruídos ou por não satisfazerem o critério de seleção T5, que garante a qualidade da reconstrução.



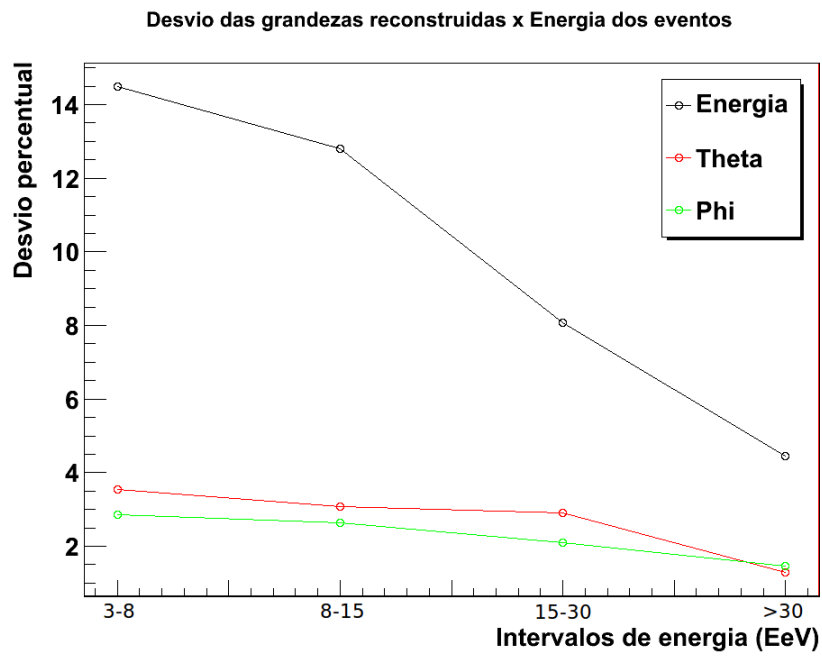


Figura 6.12: Desvios relativos das grandezas reconstruídas em função dos intervalos de energia dos eventos.

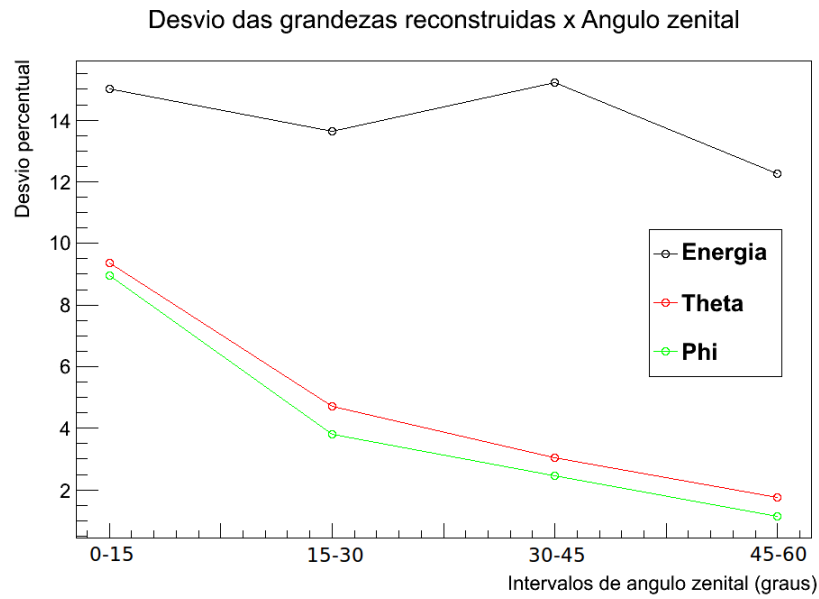


Figura 6.13: Desvios relativos das grandezas reconstruídas em função dos intervalos de ângulo zenital dos eventos.

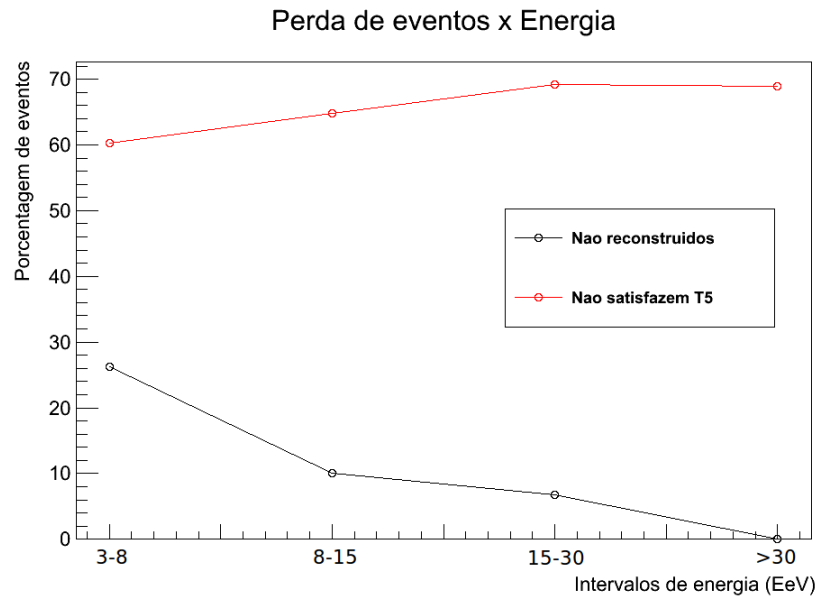


Figura 6.14: Fração de eventos com alterações em suas condições de seleção em função da energia.

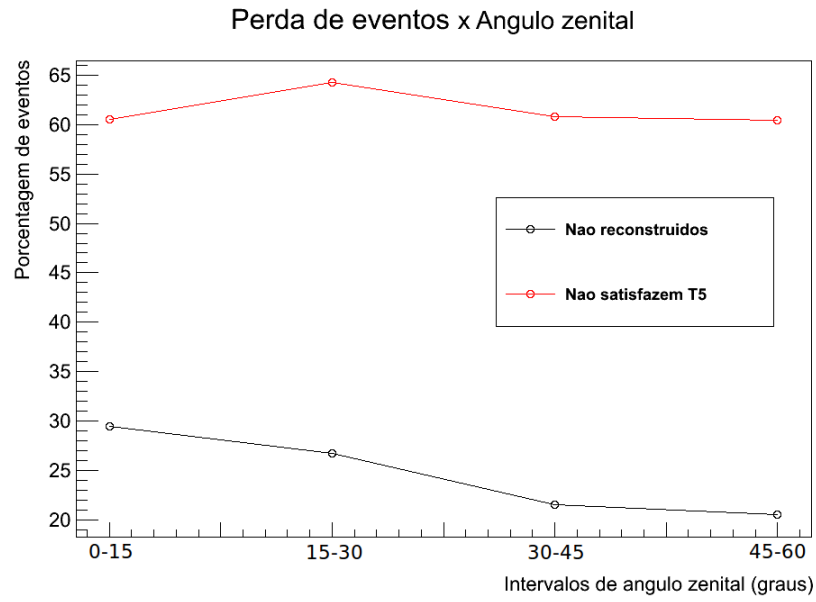


Figura 6.15: Fração de eventos com alterações em suas condições de seleção em função do ângulo zenital.

## Capítulo 7

# Conclusão

Neste trabalho foi realizada uma revisão detalhada sobre o detector de superfície do Observatório Pierre Auger, discutindo sobre a instrumentação dos tanques Cherenkov e sobre o procedimento de reconstrução de eventos, realizado no software *Offline*. Foram apresentadas medidas de carga realizadas com o detector de Campinas, que apresentaram algumas diferenças em relação a medidas anteriores. Problemas de eletrônica impediram a continuidade dos testes com o tanque.

Utilizando simulações de eventos no *Offline*, foi realizado um estudo sobre as consequências da exclusão de estações na reconstrução. Foi mostrado que a reconstrução deixa de ser confiável quando uma estação próxima ao centro do chuveiro é excluída, causando um desvio relativo de mais de 40% na energia do evento em relação ao caso em que todas as estações são utilizadas. A exclusão de estações mais distantes, no primeiro ou segundo hexágono em torno da principal, também influencia nas grandezas reconstruídas, mas os efeitos são muito menores, não sendo sua participação totalmente necessária para garantir a qualidade da reconstrução. Desta forma, confirma-se a necessidade de usar o critério de corte **T5**, de forma a evitar situações em que a reconstrução não produz resultados confiáveis.

Em uma outra análise, foram simulados eventos sendo detectados por uma estação central que teve seu número de fotomultiplicadoras reduzido para duas e depois apenas uma. Reconstruindo estes eventos, notou-se um impacto muito pequeno na energia e direção de chegada, devido a esta alteração no tanque. Portanto, conclui-se que é possível utilizar apenas uma PMT nos detectores, mas medidas reais devem ser realizadas para confirmar este fato, pois problemas relacionados ao *trigger* podem surgir, já que normalmente é utilizada a coincidência tripla dos sinais em cada tanque. Além disso, em uma estação com apenas uma fotomultiplicadora, qualquer problema técnico inutilizaria o detector, até que fosse realizada uma manutenção, o que nem sempre ocorre nos tanques com três PMTs, que podem continuar operando com um número inferior até que uma intervenção seja realizada. Como já discutido, a perda de uma estação pode impedir a reconstrução de um evento ocorrido em suas

proximidades, sendo algo indesejável.

Analisando eventos reais do Observatório Pierre Auger foi possível confirmar alguns resultados anteriores, mostrando que a estação principal tem grande importância na reconstrução, principalmente quando poucas estações participaram da detecção. Um fato importante a se destacar, é que a exclusão da estação principal causa uma grande perda de eventos, já que eles deixam de satisfazer as condições mínimas para reconstrução ou simplesmente não satisfazem o critério **T5**, provando a necessidade de se manter as estações sempre em funcionamento, afim de evitar uma perda de eficiência no experimento.

Mais uma vez, é importante lembrar que as análises realizadas não tiveram uma sistematização muito complexa, sendo necessário repeti-las para diferentes casos, com mais eventos e a outras energias e inclinações.

# Referências Bibliográficas

- [1] P. Sokolsky, Introduction to ultrahigh energy cosmic ray physics. Westview Press, 1989.
- [2] T. Stanev, High energy cosmic rays. Springer, 2nd ed., 2004.
- [3] M. V. S. Rao, B. V. Sreekantan, Extensive air showers. World Scientific, 1998.
- [4] Pierre Auger Collaboration, “Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic objects,” Science, vol. 318, pp. 938–943, 2007.
- [5] Pierre Auger Collaboration, “Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic objects in Pierre Auger Observatory data,” Proceedings of 31st ICRC, 2009.
- [6] T. K. Gaisser, “Cosmic rays at the knee,” Energy Budget in the High Energy Universe, p. 45–55, 2007.
- [7] D. Allard, E. Parizot, A. V. Olinto, “On the transition from galactic to extragalactic cosmic-rays: Spectral and composition features from two opposite scenarios,” Astroparticle Physics, vol. 27, pp. 61–75, 2007.
- [8] Pierre Auger Collaboration, “Update on the measurement of the CR energy spectrum above  $10^{18}$  eV made using the Pierre Auger Observatory,” Proceedings of 32nd ICRC, 2011.
- [9] C. Song, Z. Cao, B. R. Dawson, B. E. Fick, P. Sokolsky, X. Zhang, “Energy estimation of UHE cosmic rays using the atmospheric fluorescence technique,” Astroparticle Physics, vol. 14, pp. 7–13, 2000.
- [10] Pierre Auger Collaboration, “The distribution of shower maxima of UHECR air showers,” Proceedings of 32nd ICRC, 2011.
- [11] Pierre Auger Collaboration, “An update on a search for ultra-high energy photons using the Pierre Auger Observatory,” Proceedings of 32nd ICRC, 2011.

- [12] Pierre Auger Collaboration, “An upper limit to the photon fraction in cosmic rays above  $10^{19}$  eV from the Pierre Auger Observatory,” Astroparticle Physics, vol. 27, pp. 155–168, 2007.
- [13] Pierre Auger Collaboration, “Upper limit on the cosmic-ray photon fraction at EeV energies from the Pierre Auger Observatory,” Astroparticle Physics, vol. 31, pp. 399–406, 2009.
- [14] Pierre Auger Collaboration, “The Pierre Auger Observatory and ultra-high energy neutrinos: upper limits to the diffuse and point source fluxes,” Proceedings of 32nd ICRC, 2011.
- [15] K. Greisen Progress in Cosmic Ray Physics, vol. 3, 1956.
- [16] Nishimura, K. Kamata J. Prog. Theoret. Phys. Suppl., vol. 6, 1958.
- [17] “Nobel Prize in Physics 1936 - Presentation Speech,” nobelprize.org.
- [18] C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell, “Processes involving charged mesons,” Nature, vol. 159, pp. 694–697, 1947.
- [19] C. D. Anderson, “The positive electron,” Physical Review, vol. 43, pp. 491–494, 1933.
- [20] W. R. Leo, Techniques for nuclear and particle physics experiments. Springer-Verlag, 2nd ed., 1994.
- [21] G. F. Knoll, Radiation detection and measurement. John Wiley and Sons, 3rd ed., 1999.
- [22] P. R. C. Leroy, Principles of radiation interaction in matter and detection. World Scientific, 2004.
- [23] S. Eisenhardt, “First results of the ring imaging Cherenkov detectors of the LHCb experiment,” Proceedings of the 12th IPRD, vol. 43, pp. 128–133, 2010.
- [24] Alison Wright, Richard Webb, “The Large Hadron Collider,” Nature, vol. 448, p. 269, 2007.
- [25] R. M. Tennent, “The Haverah Park extensive air shower array,” Proceedings of the Physical Society, no. 92, 622-631, 1967.
- [26] T.A. Egorov et al, “The Yakutsk EAS complex array,” Proceedings of the 12th ICRC, no. 6, 2059, 1971.
- [27] Pierre Auger Collaboration, “Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, no. 523, 50-95, 2004.
- [28] M.Martinez et al, “CTA: Where do we stand and where do we go?,” Proceedings of 32nd ICRC, 2011.

- [29] M.Teshima et al, “EUSO (The Extreme Universe Space Observatory) - Scientific Objective,” Proceedings of 28th ICRC, 2003.
- [30] “Auger Observatory - A new astrophysics facility rises from the pampa,” <http://www.auger.org/>, vol. 21/03/2012.
- [31] Pierre Auger Collaboration, “The surface detector of the Pierre Auger Observatory,” Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), vol. 165, pp. 45–49, 2007.
- [32] Pierre Auger Collaboration, “The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 620, pp. 227–251, 2010.
- [33] Pierre Auger Collaboration, “The HEAT telescopes of the Pierre Auger Observatory,” Proceedings of 32nd ICRC, 2011.
- [34] M. Teshima et al, “Expanded array for giant air shower observation at Akeno,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, no. 247, 399-411, 1986.
- [35] Pierre Auger Collaboration, “The surface detector system of the Pierre Auger Observatory,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, no. 586, 409-420, 2008.
- [36] Photonis, “Photonis XP1805 photomultiplier manual,”
- [37] X. Bertou et al, “Calibraion of the surface array of the Pierre Auger Observatory,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, no. 568, 839-846, 2006.
- [38] D. M. Consalter, A. C. Fauth, “Estudo de raios cósmicos com  $E > 10^{18}$  eV do detector de superfície do Observatório Pierre Auger,” Dissertação de mestrado, IFGW - UNICAMP, 2009.
- [39] S. Agostinelli et al, “Geant4 - a simulation toolkit,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, no. 506, pp. 250–303, 2003.
- [40] Pierre Auger Collaboration, “The Pierre Auger Observatory design report,” <http://www.auger.org/>, vol. Second Edition, 14/03/1997.
- [41] Pierre Auger Collaboration, “Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, no. 613, 29-39, 2010.
- [42] J. Linsley, L. Scarsi, “Arrival times of air shower particles at large distances from the axis,” Physical Review, vol. 128, 6, 2384, 1962.
- [43] M. Roth, D. Veberic, et al, “The offline framework of the pierre auger observatory,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 580, pp. 1485–1496, 2007.



- [44] M. Roth, D. Veberic, “Offline reference manual,” Pierre Auger Collaboration Gap Notes, vol. 035, 2005.
- [45] Pierre Auger Collaboration, “Statistical and systematic uncertainties in the event reconstruction and  $S(1000)$  determination by the Pierre Auger surface detector,” Proceedings of 29th ICRC, 2005.
- [46] Pierre Auger Collaboration, “Measurement of the lateral distribution function of UHECR air showers with the Auger Observatory,” Proceedings of the 29th ICRC, 2005.
- [47] Pierre Auger Collaboration, “Measurement of the UHECR energy spectrum using data from the surface detector of the Pierre Auger Observatory,” Proceedings of 30th ICRC, 2007.
- [48] Pierre Auger Collaboration, “Progress with the northern part of the Pierre Auger Observatory,” Proceedings of 31st ICRC, 2009.