

Tese de Doutorado

“Desenvolvimento da instrumentação e análise
de dados do Observatório Auger”

Luiz Vitor de Souza Filho

Universidade Estadual de Campinas



Banca Examinadora:

- Profa. Dra. Carola Dobrigkeit - UNICAMP (Orientadora)
- Prof. Dr. Anderson Fauth - UNICAMP
- Prof. Dr. Carlos Ourivio Escobar - UNICAMP
- Prof. Dr. Gustavo Medina Tanco - USP
- Prof. Dr. Rogério Rosenfeld - IFT

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IFGW - UNICAMP**

So89d Souza Filho, Luiz Vitor
Desenvolvimento da instrumentação e análise de
dados do Observatório Auger / Luiz Vitor de Souza
Filho. -- Campinas, SP : [s.n.], 2004.

Orientador: Carola Dobrigkeit Chinellato.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Física "Gleb Wataghin".

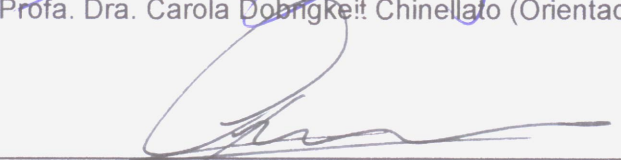
1 1. Observatório Pierre Auger. 2. Chuveiros de
2 raios cósmicos. I. Chinellato, Carola Dobrigkeit.
3 II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de
4 Física "Gleb Wataghin". III. Título.
5



MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **LUIZ VITOR DE SOUZA FILHO – RA 940665** APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, EM 12/03/2004.

COMISSÃO JULGADORA:


Prof.ª. Dra. Carola Dobrigkeit Chinellato (Orientadora do Candidato) – IFGW/UNICAMP


Prof. Dr. Gustavo Adolfo Medina Tanco – IAG/USP


Prof. Dr. Carlos Ourivio Escobar – IFGW/UNICAMP


Prof. Dr. Rogério Rosenfeld – IFT/UNESP


Prof. Dr. Anderson Campos Fauth – IFGW/UNICAMP

À minha mãe e ao meu pai.

“Desde que se use de palavras, usa-se de um instrumento ao mesmo tempo emotivo e intelectual. A palavra contém uma idéia e uma emoção. Por isso não há prosa, nem a mais rigidamente científica, que não ressuma qualquer suco emotivo. Por isso não há exclamação, nem a mais abstratamente emotiva, que não implique ao menos o esboço de uma idéia.”

Fernando Pessoa

“O *gerais* corre em volta. Esses gerais são sem tamanho. Enfim, cada um o que quer aprova, o senhor sabe: pão ou pães, é questão de opiniões... O sertão está em toda a parte.”

João Guimarães Rosa

Agradecimentos

Meus maiores agradecimentos pela realização desta tese são à minha família. A meus pais dedico este trabalho e todas as emoções que ressumem dele. Amo vocês dois e desejo que eu seja capaz de demonstrá-lo sempre e cada vez mais.

Também agradeço muito à Thana, pela companhia e carinho, que seguramente estiveram presentes e foram essenciais nestes anos, resumindo: te amo muito. Entre as pessoas que compõem minha família ainda incluo minha querida Avó Maria, meus agradecimentos a ela serão sempre insuficientes para demonstrar meu bem querer por essa figura central na minha vida.

Sinto-me muito privilegiado ao escrever estas linhas porque percebo que tenho muitas pessoas a agradecer. Felizmente, o processo de confecção desta tese não me isolou nem me afastou do contato das pessoas que mais prezo e talvez a maior demonstração disto é ter encontrado neste período a mulher com quem pretendo viver minha vida. À Daniela agradeço por esse tempo de união, desejando que esta amostra de felicidade se perpetue por toda a nossa vida.

Aos meus amigos tenho inúmeros motivos para agradecer e fica impossível separar a quais eu gostaria de agradecer por esta ou aquela razão. Alguns ajudaram-me muito profissionalmente na confecção deste trabalho, sem alguns deles esta tese não teria se concretizado. Outros não têm a menor idéia do significado do texto e gráficos desta redação mas sua contribuição pessoal foi tão ou mais importante para o término desta tese e estende-se muito além. Ainda existem aqueles que fizeram parte desta estrada de ambas as formas: profissional e pessoalmente. Assim, limito-me a listar os nomes em ordem alfabética daqueles que por um motivo ou outro julgo terem sido pessoas importantíssimas na minha vida neste período:

- Alexandre, Catalani, Doretto, Escobar, Henrique, Jager, Jeferson, Lima, Luis Prado, Marcelo Leigui, Marcus, Nivaldo, Ricardo Sato e Sandro.

I would like to thank Bruce Dawson for his advices and guidance in some of the analysis presented here. I am also very grateful to the entire group in Adelaide, specially José Alfredo Bellido, Roger Clay and Alina Donea, for the hospitality during my visit.

Meus mais sinceros agradecimentos à Carola pela sua orientação pessoal e profissional durante os vários anos que trabalhamos juntos. Sua atenção e carinho serão sempre lembrados de maneira muito especial.

Finalmente, agradeço ao povo brasileiro, que financiou meus estudos através da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo: FAPESP. Ao meu povo também dedico meu singelo trabalho, sabendo que ele pouco acrescenta à riqueza cultural inventada e acumulada pelas pessoas deste país.

Resumo

Esta tese é inteiramente dedicada à construção e ao início da análise de dados do Observatório Auger. A escolha do tema da dissertação reflete a crença nas pessoas envolvidas nesta Colaboração Internacional de 19 países e revela nosso julgamento sobre as importantes questões a serem respondidas por esse experimento.

Infelizmente, esta tese se encerra antes que o número de eventos detectados pelo Observatório, devido ao curto tempo de operação, seja suficiente para produzirmos resultados físicos significativos. Porém, esperamos mostrar até o final desta dissertação que os instrumentos de medidas foram compreendidos e as ferramentas de análise desenvolvidas e testadas de forma satisfatória durante a operação do protótipo.

No primeiro tema deste trabalho abordamos o anel corretor do telescópio de fluorescência. Faremos uma rápida descrição do processo de construção na fábrica Schwantz em Indaiatuba e mostraremos um estudo detalhado da eficiência do anel corretor baseado em fotos da estrela Vega tiradas em um dos telescópios do Observatório Auger.

Em seguida, descreveremos o programa de simulação de luz de fluorescência por nós desenvolvido a partir do programa CORSIKA. Novas rotinas foram introduzidas no CORSIKA para gerar fótons de fluorescência a partir de cada partícula carregada no chuveiro. Esta abordagem permite, pela primeira vez, uma descrição tridimensional da emissão de luz de fluorescência no chuveiro. Utilizando nosso simulador foi possível estudar a possibilidade de detectarmos a distribuição lateral de um chuveiro atmosférico com os telescópios de fluorescência do Observatório Auger. Uma estimativa da capacidade de medida será apresentada no Capítulo 4.

Por último apresentaremos a descrição de um método de reconstrução da direção de chegada do chuveiro utilizando simultaneamente dados dos tanques com água e dos telescópios de fluorescência. Esta técnica híbrida foi re-estudada a partir de novos programas de reconstrução e detalhadas simulações dos detectores.

Esta reconstrução por nós desenvolvida foi utilizada para determinar a resolução da técnica para diferentes energias, diferentes partículas primárias e diferentes suposições de descrição do chuveiro. O mesmo programa foi utilizado para produzir uma taxa de elongação preliminar com os dados do protótipo.

Abstract

This work is devoted to the construction and the beginning of the data analysis of the Auger Observatory. The choice of the subject for this thesis illustrates our belief in the people involved in this International Collaboration of 19 countries and shows our judgment about the importance of the questions to be answered by this experiment.

Unfortunately, this thesis ends before the Observatory had time to detect enough events to produce significant physical results. However, we expect to show in this essay that the instruments have been understood and the analysis tools have been developed and tested satisfactorily during the operation of the prototype.

The first subject of this work is the corrector ring of the fluorescence telescopes. We are going to quickly describe the construction of the lenses in the Schwantz Industry (Brazil) and we are going to show a detailed study of the efficiency of the ring based on pictures of the Vega star taken in one of the telescopes of the Auger Observatory.

In addition, a new program to simulate fluorescence light is going to be described. We have incorporated new routines into the CORSIKA program in order to generate fluorescence photons for each charged particle in the shower. This approach allows a tridimensional description of the emission of photons never done in the past.

As a application of this program we have determined the possibility of measuring the lateral profile of extensive air showers with the Auger Telescopes.

As last, we are going to discuss a reconstruction method of the direction of the shower using simultaneously data from the fluorescence telescopes and the water tanks. The hybrid technique has been re-studied with new reconstruction and detailed detector simulation programs.

The reconstruction program we have developed was used to determine the reconstruction resolution for various energies, different primary particles and different description of the showers. The same program was also used to produce a preliminary elongation rate for the data detected by the prototype.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	O Observatório Auger	9
2.1	Detectores de Superfície	11
2.2	Telescópios de Fluorescência	15
2.3	Potencial do Observatório Auger	17
2.3.1	Eventos do Protótipo	19
2.4	Programas disponíveis na Colaboração Auger	21
2.4.1	SDSim	22
2.4.2	FDSim	23
2.4.3	FLORES	23
3	O Anel Corretor	25
3.1	Princípio de Funcionamento	25
3.2	Construção do Anel Corretor	27
3.3	Testes do Anel Corretor	30
3.3.1	Fotos de Estrela	31
	Arranjo Experimental	31
	Análise das Fotos	33
	Resultados	35
3.3.2	Influência no anel corretor na resolução da reconstrução dos eventos	41
4	Simulação da Luz de Fluorescência	45
4.1	Motivação	46
4.2	Descrição do Programa	47
4.2.1	Algoritmo de diluição	49
4.2.2	Partículas com energia abaixo do corte	52

4.2.3	Comparação com eventos reais	55
4.3	Resultados: 1D versus 3D	58
4.3.1	Tridimensionalidade em função da distância	61
5	Reconstrução de Eventos Híbridos do Observatório Auger	67
5.1	Reconstrução de Eventos de Fluorescência	68
5.2	Reconstrução Híbrida	71
5.2.1	Detalhes da reconstrução híbrida	73
5.3	Simulação Híbrida	75
5.4	Resultados: Resolução das Reconstruções	77
5.4.1	Resolução para prótons e ferro primários	79
5.4.2	Resolução em função da energia	80
5.4.3	Comparação com o <i>Design Report</i>	81
5.4.4	Resolução para diferentes parâmetros da reconstrução	84
5.5	Taxa de Elongação	87
6	Conclusão	95
6.1	Anel Corretor	96
6.2	Simulação da Luz de Fluorescência	97
6.3	Reconstrução: Observatório Auger	99

Lista de Figuras

1.1	Ilustração de diversas técnicas de medida e o intervalo de energia de operação correspondente.	2
1.2	Espectro de raios cósmicos compilado por S. Swordy a partir de vários dados publicados pelos experimentos LEAP, Proton, Akeno, AGASA, Fly's Eye, Haverah Park e Yakutsk.	3
1.3	Imagens da Via Láctea em diferentes intervalos de energia. A primeira foto é a detecção de raios gama com energias acima de 100 MeV pelo satélite CGRO. A primeira foto à direita é a detecção de raios X com energias entre 0.25 e 1.5 keV pelos satélites GSFC e ROSAT. Na mesma seqüência temos imagens em ultravioleta pelo GSFC, visível por Axel Mellinger, infravermelho pelo COBE e rádio (408 MHz) pelo MPiFR e SkyView. Fonte [1].	5
1.4	Contribuição de quatro tipos de partículas primárias ao espectro de raios cósmicos na região do joelho. Gráfico retirado da referência [2].	6
2.1	Espectro de raios cósmicos com energia em torno de 5×10^{19} eV. A linha preta mostra a predição do espectro condizente com o corte GZK.	10
2.2	Esquema e foto do tanque utilizado pelo experimento Auger.	12
2.3	Posicionamento dos tanques no sítio do Observatório Auger em Malargüe. A figura mostra em amarelo os tanques que faltam ser instalados e em outras cores os tanques em etapas do processo de instalação e operação. Também está sinalizado o campo de visão de cada um dos telescópios de fluorescência. Esta figura foi preparada por Miguel Mustafa.	13

2.4	Sinal de um chuveiro com energia de 10^{19} eV em um tanque Čerenkov separado em suas componentes eletromagnética e muônica para quatro distâncias do eixo do chuveiro. Na coluna à esquerda a partícula primária é um próton e na coluna à direita um núcleo de ferro. Note que a escala vertical é sempre de 0 a 1 para o sinal integrado. Esta figura foi retirada da referência [3] e ilustra a diferença no tempo de chegada das componentes muônica e eletromagnética.	16
2.5	Fotos do telescópio protótipo do Observatório Auger. A foto à esquerda mostra a câmara de fotomultiplicadoras e o anel corretor. A foto à direita mostra o espelho e a câmara de fotomultiplicadoras vista por trás.	18
2.6	Exposição do Observatório Auger em função do tempo comparada com a de outros experimentos em operação. O gráfico supõe cumprido o cronograma de construção do Observatório que prevê para 2005 a entrada em operação na configuração final do sítio sul e o início da construção do sítio norte. Esta figura foi preparada pelo Dr. Arisaka para a Colaboração Auger.	20
3.1	Resultados da simulação desenvolvida pelo Sr. Ricardo Sato que ilustram o funcionamento do anel corretor em um telescópio com diafragma de raio 1.1 m. A figura da esquerda foi obtida simulando o telescópio com anel corretor e a da direita sem o anel corretor dado pela equação 3.1.	26
3.2	Máquina protótipo desenvolvida para a fabricação do anel corretor.	27
3.3	Máquina desenvolvida na Empresa Schwantz para a fabricação do anel corretor.	28
3.4	Projeto final da máquina para a fabricação do anel corretor, desenvolvida em conjunto com a Empresa Schwantz. A máquina construída tem como elementos básicos um disco desbastador e um cabeçote de movimento aleatório.	29
3.5	Componente radial da normal da superfície da lente. A figura mostra medidas de quatro segmentos medidos pelo Dr. Marcelo Leigui e pelo Sr. Ricardo Sato. As linhas cheias mostram os limites teóricos para a forma da superfície que garantem um bom funcionamento do anel.	30

3.6	Câmara CCD posicionada em frente ao espelho e alvo de papel fixado na câmara de fotomultiplicadoras.	33
3.7	Exemplo das fotos feitas da estrela VEGA. A foto à esquerda é da imagem formada apenas pelos raios que passaram através do anel corretor e a foto à direita é a imagem formada pelos raios que passaram na região interna ao anel corretor.	34
3.8	Exemplo das fotos feitas da estrela VEGA. A foto à esquerda é da imagem formada apenas pelos raios que passaram através do anel corretor e a foto à direita é a imagem formada pelos raios que passaram na região interna ao anel corretor. O eixo z mostra o sinal em cada pixel da CCD em unidades arbitrárias.	35
3.9	Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostrados os casos só anel brasileiro, só anel alemão e sem anel corretor.	37
3.10	Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostrados os casos quando a imagem era formada só pelo conjunto de espelhos tchecos, só pelo conjunto de espelhos alemães e por ambos.	38
3.11	Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostradas as curvas para a configuração final do telescópio com abertura do diafragma de 1.1 m.	39
3.12	Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostrados os casos quando a imagem era formada só pelo anel corretor alemão, só pelo anel corretor brasileiro e sem o anel corretor. As três curvas estão normalizadas pela curva correspondente ao caso sem anel corretor.	40
4.1	Medidas realizadas por Kakimoto et al. [4] que relacionam o depósito de energia de elétrons com o fator de fluorescência.	48
4.2	Fator de fluorescência no ar em função da altitude para a atmosfera padrão estadunidense. Este resultado foi determinado em [4].	49
4.3	Média do peso das partículas em 10 chuveiros iniciados por prótons com energia 10^{19} eV, inclinação 45° e fator de diluição 10^{-6}	51

4.4	Número médio de fótons emitidos por uma única partícula na direção do telescópio com diafragma de 1.1 m de raio posicionado a 15 km do eixo do chuveiro. Foram simulados 10 chuveiros iniciados por prótons com energia 10^{19} eV, inclinação 45° e fator de diluição 10^{-6}	52
4.5	Depósito de energia para elétrons em função da energia cinética. Os pontos azuis foram calculados pelo código padrão do CORSIKA, enquanto que os pontos vermelhos foram calculados pelas novas subrotinas implementadas. Este chuveiro foi rodado com corte de energia igual a 50 keV. O primeiro gráfico mostra o erro no cálculo do dE/dx que havia no código padrão e o segundo gráfico mostra o mesmo cálculo após feita a correção.	54
4.6	Perfis temporais de eventos simulados com parâmetros iguais aos eventos reais resumidos na tabela 4.1. Os gráficos correspondem respectivamente aos eventos na tabela 4.1	57
4.7	Perfil longitudinal do evento de 320 EeV detectado pelo experimento Fly's Eye. A figura mostra o perfil reconstruído pela colaboração do Fly's Eye e publicado em [5], em comparação com dez perfis reconstruídos a partir dos fótons gerados pela nossa simulação.	59
4.8	Imagem de um chuveiro na câmara de fotomultiplicadoras do Observatório Auger. A figura à esquerda é o resultado da simulação unidimensional enquanto que a da direita é o resultado da simulação tridimensional. Esse exemplo é para um chuveiro incidente a 4 km do telescópio.	60
4.9	Imagem de um chuveiro na câmara de fotomultiplicadoras do Observatório Auger após aplicação dos critérios de seleção. A figura à esquerda é o resultado da simulação unidimensional enquanto que a da direita representa o resultado da simulação tridimensional. Esse exemplo é para um chuveiro incidente a 4 km do telescópio.	61
4.10	Imagem na câmara de fotomultiplicadoras de chuveiros detectados pelos telescópios do Observatório Auger. Ambos os chuveiros tiveram energia reconstruída de 2.2 EeV. O chuveiro ilustrado à esquerda caiu a 10.5 km e o a direita a 4.5 km do telescópio.	62

4.11	Distribuição da energia reconstruída pelo FLORES para os 332 eventos detectados pelos telescópios protótipos do Observatório Auger. Nenhum corte foi aplicado.	64
4.12	Número de pixels disparados em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio.	65
4.13	Ângulo ζ_0 que maximiza a razão sinal/ruído em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio.	65
5.1	Imagem de um chuveiro na câmara de fotomultiplicadoras. A figura mostra os pixels disparados e a reconstrução do eixo principal que determina o PET. Os ângulos representam o campo de visão da baía 4 do telescópio de Los Leones.	69
5.2	Desenho esquemático da geometria de um chuveiro visto pelo telescópio de fluorescência.	70
5.3	Distribuição dos ângulos azimutais dos chuveiros detectados pelo protótipo.	71
5.4	Distribuição dos ângulos zenitais dos chuveiros detectados pelo protótipo.	72
5.5	Distribuição dos χ^2 por grau de liberdade ajustados na reconstrução dos 332 eventos detectados pelo protótipo do Observatório Auger.	75
5.6	Esquema da cadeia de simulação e reconstrução de eventos híbridos utilizando os programas da colaboração Auger.	76
5.7	Pontos de impacto simulado pelo SDSim aleatoriamente dentro do arranjo protótipo.	77
5.8	Histograma da diferença angular entre a direção reconstruída e simulada para os métodos híbridos e só com dados do DF.	78
5.9	Integral da diferença angular entre a direção reconstruída e simulada para os métodos híbridos e só com dados do DF.	79
5.10	Integral do erro do ponto de impacto reconstruído e simulado para os métodos híbridos e só com dados do DF.	80
5.11	Mediana do erro na reconstrução da direção de chegada em função da energia para métodos utilizando apenas os dados do DF e para o método híbrido implementado por nós.	83
5.12	Mediana do erro na reconstrução do ponto de impacto em função da energia para métodos utilizando apenas os dados do DF e para o método híbrido implementado por nós.	84

- 5.13 Taxa de alongação medida pelo Fly's Eye mostrada em comparação com chuviros simulados. O ajuste dos dados resultou em um coeficiente angular de 93 g/cm^2 por década de energia. A figura mostra a mudança de composição de uma componente pesada para leve. 88
- 5.14 Taxa de alongação simulada pelo CORSIKA. A figura mostra a distribuição simulada dos X_{max} versus energia e um ajuste linear para cada um dos tipos de primários: próton e ferro. . . 90
- 5.15 Taxa de alongação simulada. A figura mostra as curvas obtidas com a simulação de Monte Carlo feita pelo CORSIKA e os mesmos chuviros após feita a simulação dos telescópios pelo FDSim e a reconstrução dos chuviros pelo FLORES. 91
- 5.16 Taxa de alongação medida pelo protótipo do Observatório Auger. São mostrados valores para os chuviros medidos só pelo telescópio de fluorescência e daqueles medidos de maneira híbrida em comparação com os valores simulados. 92
- 6.1 Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostradas as curvas para a configuração final do telescópio com abertura do diafragma de 1.1 m. 96
- 6.2 Ângulo ζ_0 que maximiza a razão sinal/ruído em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio. 98

Lista de Tabelas

2.1	Número de eventos detectados pelo Observatório Auger acima da energia dada na primeira coluna em um ano. Foram computados apenas eventos com ângulo zenital menor que 60° . Só são considerados eventos detectados pelo detector de superfície que dispararam quatro tanques com pelo menos 4 VEM cada. Os números para os eventos híbridos assumem dois tanques disparados com pelo menos 4 VEM e 10 % de tempo de operação.	19
2.2	Número de eventos detectados pelo protótipo do Observatório Auger com multiplicidade dada pela coluna à esquerda. Nenhum corte para seleção de eventos foi realizado.	21
3.1	Posição da estrela VEGA nos dias em que foram tiradas as fotografias. Os campos linha e coluna referem-se às linha e coluna de fotomultiplicadoras na câmara. O campo espelho identifica qual conjunto de espelhos foi atingindo pela luz da estrela naquele instante.	32
3.2	Número de chuveiros simulados para cada uma das configurações.	41
3.3	Número de eventos simulados que dispararam o gatilho do telescópio e que foram passíveis de reconstrução.	42
3.4	Mediana no erro da reconstrução da direção de chegada da partícula primária em função da energia para as configurações A (com anel) e B (sem anel).	43

4.1	Resumo dos parâmetros reconstruídos para dois eventos híbridos selecionados. ID DS é o número de identificação para os eventos nas convenções dos detectores de fluorescência e superfície, respectivamente. $X_{Imp.}$ e $Y_{Imp.}$ determinam o ponto de impacto medido a partir da posição do telescópio. A atenuação é o comprimento horizontal de atenuação medido no sítio do Observatório na noite em que os chuviros foram detectados. Esses valores também foram utilizados na simulação do eventos.	56
5.1	Comparação na resolução da reconstrução do ponto de impacto e da direção de chegada entre os métodos híbrido e só com dados do DF. Foram reconstruídos 600 eventos simulados.	81
5.2	Comparação da resolução angular e da posição do ponto de impacto de chuviros iniciados por prótons e ferros.	81
5.3	Comparação da resolução angular entre as reconstruções híbridas e só com dados do telescópio de fluorescência (DF). . .	82
5.4	Comparação da resolução da determinação do parâmetro de impacto das reconstruções híbrida e só utilizando os dados do telescópio de fluorescência (DF).	82
5.5	Comparação da resolução angular e do parâmetro de impacto entre a reconstrução híbrida apresentada neste trabalho e o <i>Design Report</i> para chuviros com energia de 10^{19} eV.	85
5.6	Métodos de análise utilizados nesta seção para verificar a sensibilidade da reconstrução híbrida.	85
5.7	Comparação da resolução angular e do parâmetro de impacto para a reconstrução híbrida por nós desenvolvida. São mostradas as resoluções comparando os parâmetros de incertezas temporais, frente plana e curva do chuviro e número de tanques utilizados na reconstrução.	86
5.8	Comparação entre as taxas de elongação medidas pelo protótipo do Observatório Auger e pelo experimento Fly's Eye. A tabela mostra o valor ajustado e o erro estatístico.	93
6.1	Comparação da resolução angular entre as reconstruções híbridas e só com dados do telescópio de fluorescência (DF). . .	100

6.2	Comparação entre as taxas de alongação medidas pelo protótipo do Observatório Auger e pelo experimento Fly's Eye. A tabela mostra o valor ajustado e o erro estatístico.	100
-----	--	-----

Capítulo 1

Introdução

A história da pesquisa em raios cósmicos resume bem o processo de evolução do conhecimento científico humano, pois parece ser inesgotável o número de sucessivas perguntas e respostas que foram encontradas em quase 100 anos de trabalho e que permanecem na atualidade.

Em 1912, Victor Hess [6] utilizou um balão para transportar seus experimentos a grandes altitudes (≈ 5 km) e resolver o primeiro problema desta área de pesquisa que então se inaugurou. Hess mostrou que a corrente numa câmara de ionização aumentava com a altura, comprovando a existência de radiação ionizante vinda de fora da Terra, nomeando assim a área de radiação cósmica.

Trinta anos mais tarde, Pierre Victor Auger [7] deu uma importante contribuição ao avanço das técnicas de medida. Utilizando dois detectores de radiação ionizante separados espacialmente, ele conseguiu mostrar que os detectores assinalavam a passagem de alto fluxo de partículas cósmicas ao mesmo tempo. Esse fenômeno foi compreendido através do argumento de um chuveiro atmosférico extenso.

Esta descoberta estendeu o leque de possíveis detectores, pois permitiu a construção dos mesmos no solo, eliminando a limitação de detectores com pequenas áreas dentro de balões ou no topo de edifícios. Em detectores colocados no chão pode-se observar as partículas secundárias de um chuveiro, que, através de métodos de reconstrução permitem encontrar as características da partícula primária.

A figura 1.1 mostra as técnicas mais utilizadas de detecção e seus intervalos de operação em energia, que foram gradativamente sendo desenvolvidas para estudar a grande variabilidade de tipos de partículas incidentes e a im-

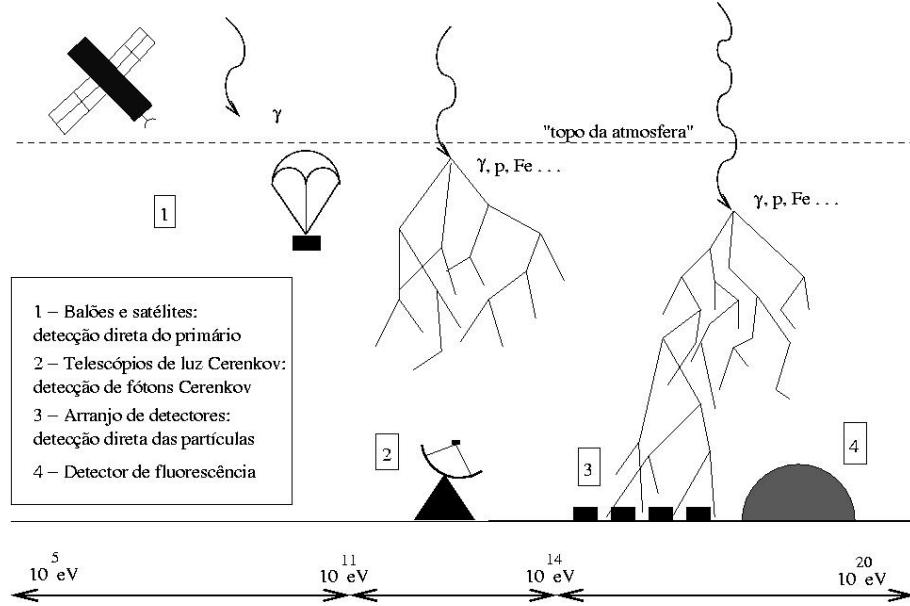


Figura 1.1: Ilustração de diversas técnicas de medida e o intervalo de energia de operação correspondente.

pressionante extensão do espectro de energia. Entre elas podemos citar os conjuntos de cintiladores e tanques de luz Čerenkov (Haverah Park, AGASA, Yakutsk etc), os detectores de fluorescência (Fly's Eye, HiRes etc), os telescópios de luz Čerenkov (Whipple, HEGRA, Crimea etc), satélites e balões. Algumas destas técnicas estão sendo re-utilizadas por uma nova geração de experimentos, tais como o Observatório Auger, e outros novos conceitos vêm sendo desenvolvidos, como por exemplo os aplicados no experimento EUSO, que será um telescópio de luz de fluorescência que será instalado em um satélite.

Surpreendentemente, para cada novo intervalo de energia que o avanço das técnicas experimentais permitiam estudar encontrou-se algum sinal proveniente do espaço. A figura 1.2 resume esta característica mostrando o espectro de raios cósmicos medido por vários experimentos espalhados pelo mundo.

Da mesma forma, a variabilidade de tipo de partícula primária estende-se sobre todo o espectro de radiação eletromagnética, abrangendo núcleos atômicos de hidrogênio a ferro e neutrinos. A figura 1.3 mostra fotos da Via Láctea em diversos intervalos de energia, ilustrando assim que, de maneira

Cosmic Ray Flux

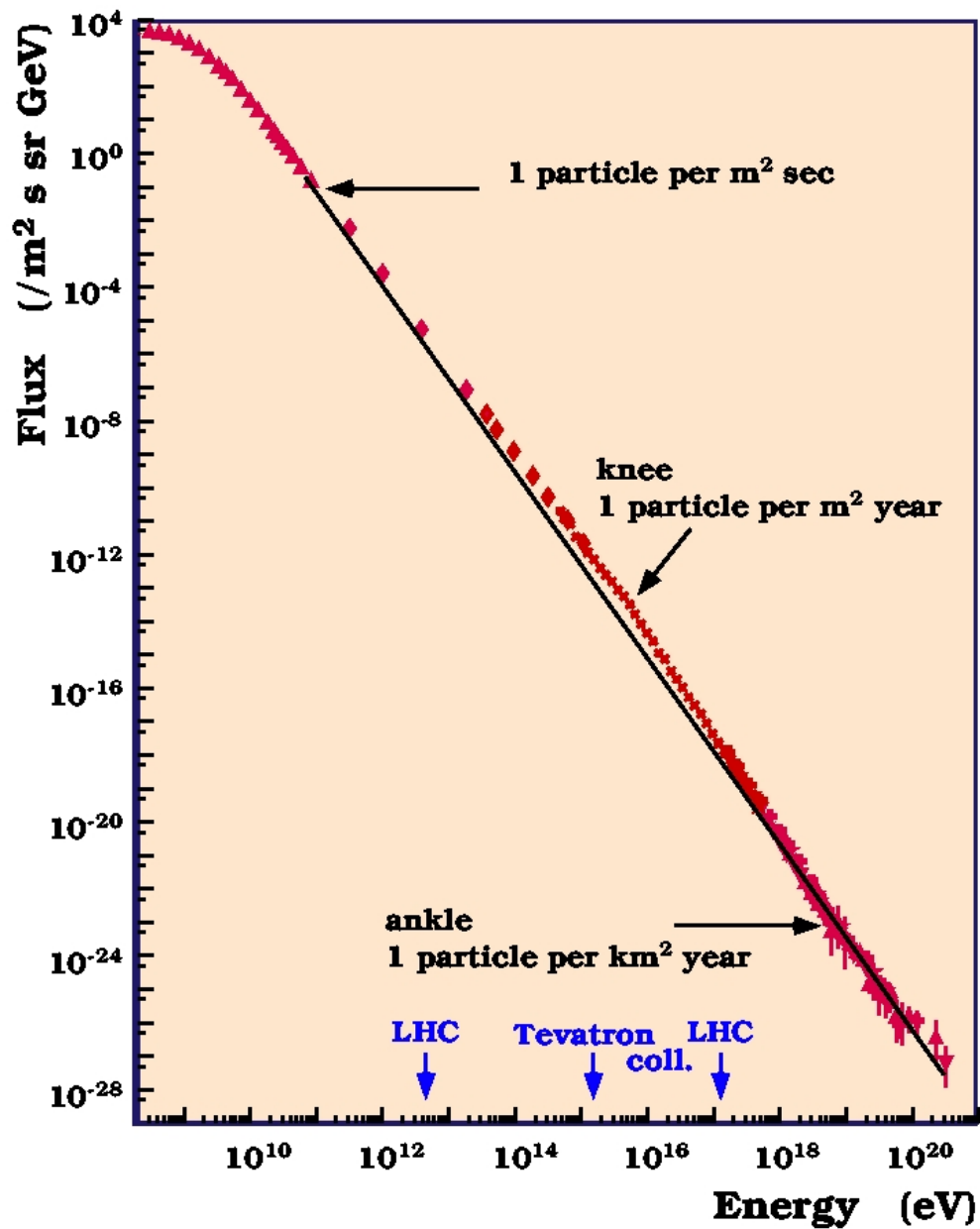


Figura 1.2: Espectro de raios cósmicos compilado por S. Swordy a partir de vários dados publicados pelos experimentos LEAP, Proton, Akeno, AGASA, Fly's Eye, Haverah Park e Yakutsk.

geral, por raios cósmicos podemos chamar toda forma de radiação que atinge a Terra.

Durante o século XX, a pesquisa em raios cósmicos contribuiu para compreendermos a evolução e os processos de geração de energia em remanescentes de supernova, núcleos ativos de galáxias e pulsares [8]. Contribuiu também no estudo da física das partículas elementares, restringindo modelos de interação, certificando a existência de novas partículas [9] e indicando a existência de fenômenos ainda não totalmente explicados [10].

No entanto, o estudo dos raios cósmicos ainda guarda inúmeros desafios. Podemos ressaltar três regiões do espectro de energia que ainda exigem estudos aprofundados para a compreensão dos fenômenos envolvidos e que podem contribuir consideravelmente para a astrofísica e para a física como um todo.

A região de energia próxima de 10^{12} eV é formada por um alto fluxo de raios gama emitidos principalmente por núcleos ativos de galáxias e remanescentes de supernova. Os processos de emissão dos fótons nesses objetos ainda não podem ser explicados satisfatoriamente e qualquer teoria tentativa sempre acaba por influir na emissão das partículas de mais alta energia.

Telescópios instalados no chão detectam a luz Čerenkov produzida pela passagem no ar das partículas que forma um chuveiro. Métodos de reconstrução permitem separar os chuveiros iniciados por fótons dos iniciados por outras partículas que aqui são tratados como ruído. A grande vantagem do estudo de chuveiros iniciados por fótons reside no fato de que essas partículas não são desviadas pelos campos magnéticos intra e inter-galáticos, de forma que cada fonte pontual pode ser estudada detalhadamente.

A partir dessa energia (10^{12} eV) o fluxo de raios gama diminui drasticamente, impossibilitando o estudo das fontes somente a partir dessas partículas. Resta-nos então, estudar todas as partículas carregadas que atingem a Terra, aumentando assim nossa estatística e perdendo a informação precisa do posicionamento da fonte, que passa a depender dos modelos de campos eletromagnéticos no Universo.

Assim, chegamos à segunda região de grande interesse no estudo dos raios cósmicos, por volta de 10^{15} eV. Esta região é chamada de joelho do espectro de raios cósmicos e vem sendo estudada exaustivamente por alguns experimentos. O principal atrativo desta região sempre foi o enigma da quebra no espectro de energia. Apesar de estarmos longe de um consenso sobre os mecanismos de aceleração, teorias recentes [2] de morte de uma componente galáctica provinda de supernovas e nascimento de uma componente extragaláctica vêm sendo bem aceitas como explicação deste fenômeno.

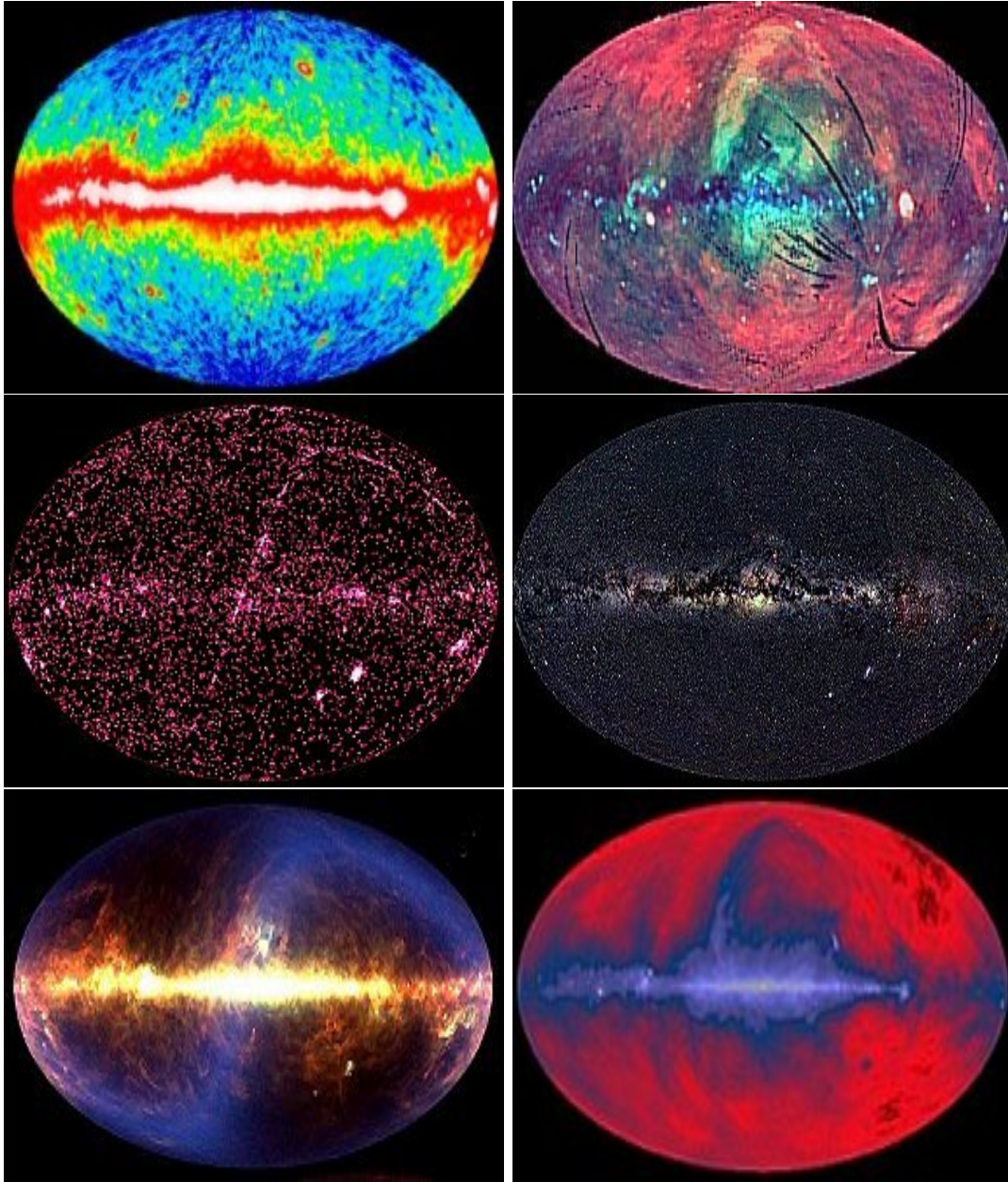


Figura 1.3: Imagens da Via Láctea em diferentes intervalos de energia. A primeira foto é a detecção de raios gama com energias acima de 100 MeV pelo satélite CGRO. A primeira foto à direita é a detecção de raios X com energias entre 0.25 e 1.5 keV pelos satélites GSFC e ROSAT. Na mesma sequência temos imagens em ultravioleta pelo GSFC, visível por Axel Melinger, infravermelho pelo COBE e rádio (408 MHz) pelo MPiR e SkyView. Fonte [1].

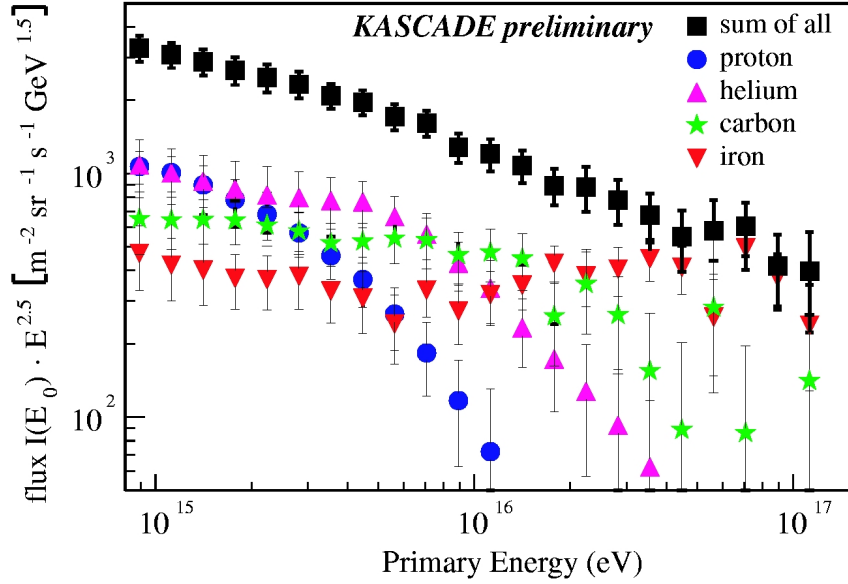


Figura 1.4: Contribuição de quatro tipos de partículas primárias ao espectro de raios cósmicos na região do joelho. Gráfico retirado da referência [2].

Todavia, o interesse nessa região do espectro não termina por aqui. Devido à rápida queda do fluxo com a energia, esta região representa o limite de possibilidade de detecção de um grande número de eventos com um experimento de tamanho reduzido (centenas de m^2) em um intervalo humano de tempo. Desta forma, as medidas realizadas nesta região pelo experimento KASCADE [2] e em um intervalo de energia um pouco acima, até aproximadamente 10^{18} eV, pelos experimentos Fly's Eye [11] e AGASA [12], permitem importantes considerações a respeito da composição química das partículas primárias. A figura 1.4 ilustra o potencial de discriminação da partícula primária do experimento KASCADE para regiões próximas ao joelho.

A terceira região de grande interesse para o estudo dos raios cósmicos é acima de 10^{19} eV e será estudada pelo Observatório Auger. Para essas energias não sabemos quase nada sobre os processos de aceleração de partículas e somos obrigados a extrapolar a aplicação das teorias de interações devido à não-existência de dados de aceleradores terrestres nesta energia.

O interesse por essa região é ainda maior devido à existência da radiação de fundo [13]. Partículas com energia acima de 5×10^{19} eV interagem com

os fótons da radiação de fundo, perdendo 20% de sua energia a cada interação. Consecutivas interações vão reduzindo a energia da partícula emitida, de maneira que para chegar à Terra com energias acima daquele valor, as partículas devem ser emitidas a uma distância máxima de 100 Mpc do nosso planeta [14]. Todavia, as direções reconstruídas para a dezena de eventos detectados acima de 5×10^{19} eV não apontam para nenhum objeto suficientemente energético neste intervalo máximo de distância, formando assim um cenário paradoxal entre a existência dessas partículas e o nosso conhecimento astrofísico das fontes e meio galático.

Este limite de energia (5×10^{19} eV) ficou conhecido como corte GZK em homenagem aos autores da descoberta deste fenômeno: Greisen [15], Zatsepin e Kuz'min [16].

O Observatório Auger está sendo construído com o intuito principal de resolver esse aparente paradoxo. Com uma grande área de detecção (3000 km^2) este experimento terá, em alguns anos, dados suficientes para levantar um mapa de distribuição da direção de chegada das fontes e determinar regiões com excesso ou escassez de eventos, identificando assim possíveis fontes. Conhecida a fonte e sua distância, novas teorias de aceleração e propagação poderão ser aventadas.

Da mesma forma, um espectro consistente para regiões acima de 5×10^{19} eV será medido pelo Observatório Auger, determinando definitivamente a existência ou não de partículas acima desta energia.

Esta tese, ao se dedicar à construção e ao início da análise de dados do Observatório Auger, tem em vista essas importantes questões que serão atacadas pela Colaboração e pretende contribuir com os esforços que levarão, em um futuro próximo, às respostas para esses enigmas.

Capítulo 2

O Observatório Auger

O Observatório Auger surgiu a partir da percepção da necessidade e sugestão da construção de um experimento de nova geração com grande área coletora para investigar a região de energia acima do corte GZK levantadas por James Cronin e Alan Watson

Em torno desta excelente proposta, rapidamente reuniram-se grandes pesquisadores da comunidade internacional. A idéia original foi especificada em um documento *Design* apresentado em uma versão definitiva em 1997, no qual se propunha a construção de dois observatórios, um em cada hemisfério terrestre, com área de coleção de aproximadamente 3000 km^2 cada, que empregasse duas técnicas de detecção, telescópio de fluorescência e tanque de água Čerenkov operando simultaneamente.

A escolha pelas duas técnicas de medida foi devido à complementaridade dos dados medidos por elas, já que os telescópios medem o desenvolvimento longitudinal do chuveiro, enquanto que os tanques medem o desenvolvimento lateral para uma certa altitude, e devido à necessidade de eliminar as controvérsias levantadas entre as colaborações Fly's Eye e AGASA a respeito do espectro e da composição química. A figura 2.1 mostra a principal divergência entre esses dois experimentos. O gráfico mostra em detalhes o espectro de raios cósmicos com energia em torno de $5 \times 10^{19} \text{ eV}$. Os dados medidos pelo experimento HIRES indicam a existência do corte GZK enquanto que os dados medidos pelo experimento AGASA não indicam a mesma queda abrupta.

Fly's Eye e AGASA utilizam telescópios de fluorescência e cintiladores no chão, respectivamente. O Observatório Auger foi proposto com uma configuração híbrida para realizar calibrações cruzadas entre as duas técnicas e

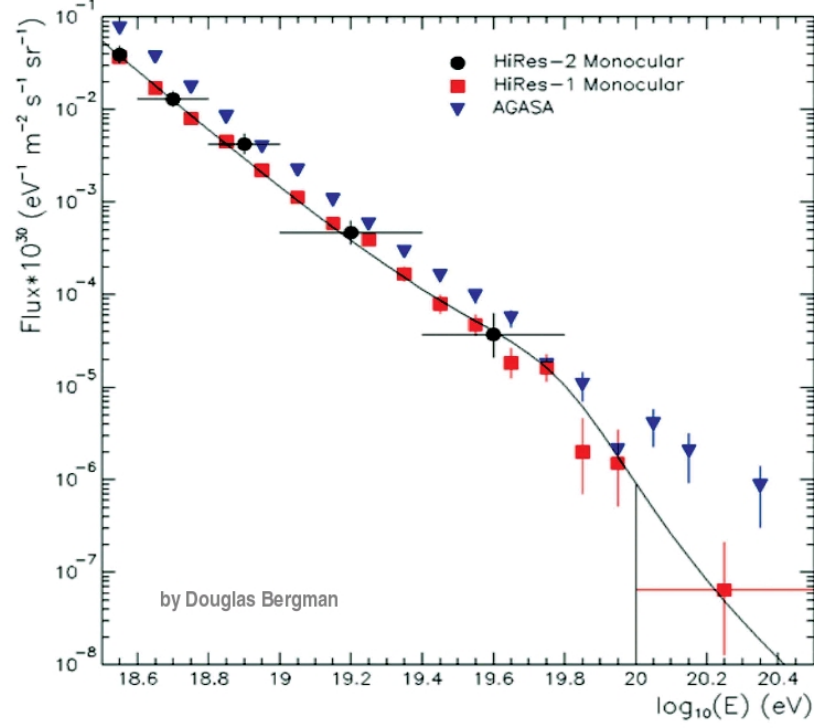


Figura 2.1: Espectro de raios cósmicos com energia em torno de 5×10^{19} eV. A linha preta mostra a predição do espectro condizente com o corte GZK.

eliminar possíveis vieses de detecção e de métodos de reconstrução.

Cada uma das técnicas de medida possui métodos de reconstrução para responder individualmente as três questões que podemos fazer a respeito da partícula que iniciou o chuveiro atmosférico:

1. Qual a direção de chegada ?
2. Qual a energia ?
3. Qual o tipo da partícula ?

Porém, o Observatório Auger pretende utilizar a complementaridade dos parâmetros medidos por cada técnica para atingir uma precisão inédita na resposta para cada uma dessas perguntas.

O sítio sul do Observatório Auger começou a ser construído em 1999 na cidade de Malargüe-Argentina (1400 m altitude) e continua em fase final de instalação no momento da escrita desta tese. Este capítulo tem como objetivo descrever o Observatório Auger em sua configuração final de operação. As etapas de elaboração e testes serão suprimidas por brevidade e podem ser consultadas no *Design Report* [17] e nas publicações internas da colaboração disponíveis em <http://www.auger.org>. Da mesma forma, as técnicas de reconstrução serão muito brevemente descritas e recomendamos a literatura [18, 19, 20] para maiores detalhes.

2.1 Detectores de Superfície

Após alguma discussão a respeito do tipo de detector de superfície a ser utilizado pela Colaboração Auger, cintiladores ou tanques de água, culminou-se para a utilização dos últimos, devido a sua grande sensibilidade a chuviscos com grande inclinação e a possibilidade de separação a componente muônica da componente eletromagnética. Além disso, tanques Čerenkov foram utilizados por muito tempo pelo experimento Haverah Park e se mostraram uma eficiente e robusta técnica de medida.

O funcionamento básico dos tanques consiste na detecção de elétrons e múons que têm energia suficiente para produzirem radiação Čerenkov na água.

Os tanques são cilindros de resina com 1.8 m de raio e 1.6 m de altura e são revestidos internamente por um material plástico com alta refletividade, de maneira que a luz Čerenkov produzida pelas partículas é difusamente refletida nas paredes e termina por ser detectada por três fotomultiplicadoras que estão posicionadas no topo dos tanques, veja a figura 2.2.

A configuração final dos 1600 tanques do Observatório Auger está representada na figura 2.3, que mostra uma grade regular com espaçamento de 1.5 km entre os tanques. As dimensões deste arranjo levaram a interessantes desenvolvimentos tecnológicos. Resumidamente, podemos ressaltar a autonomia de cada tanque, que possui um gerador de energia elétrica solar e uma bateria que alimenta as fotomultiplicadoras, e o sistema de transmissão de dados via antena de rádio. Além disso, o Observatório Auger faz um uso inédito da medida de tempo oferecida pelo sistema *GPS* (sigla em inglês para *Global Position System*) para medir o instante de disparo de cada tanque e principalmente garantir a sincronia entre os vários tanques e os telescópios.

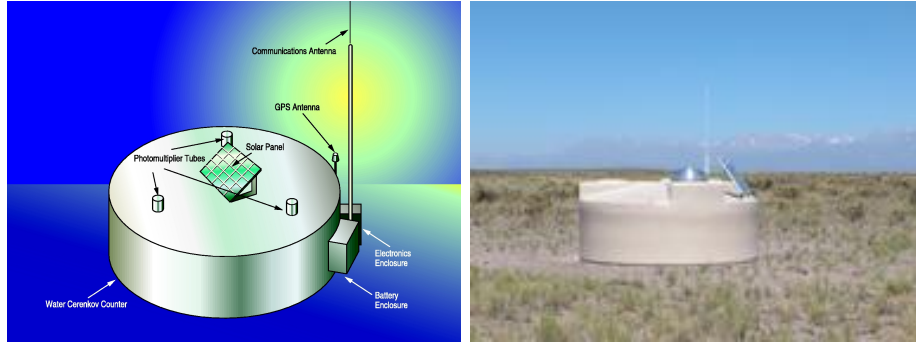


Figura 2.2: Esquema e foto do tanque utilizado pelo experimento Auger.

O dado final a ser analisado para a determinação da direção de chegada da partícula primária é o tempo de disparo de cada tanque. Aproximando a frente de propagação do chuveiro por um plano, temos as coordenadas (x_i, y_i, z_i) de intersecção deste plano nos tempos (t_i) de detecção de cada tanque.

A equação abaixo descreve a intersecção de um plano com determinados pontos (x_i, y_i, z_i) em instantes de tempo (t_i) :

$$\sum_{i=0}^m \vec{n} \cdot \vec{r}_i = c t_i - K \quad , \quad (2.1)$$

onde $\vec{r}_i$ e t_i são os pontos (x_i, y_i, z_i, t_i) de intersecção do plano de propagação do chuveiro com o plano dos detectores, ou seja, são as coordenadas de posição de cada tanque e o tempo no qual ele detectou a passagem de uma partícula. K é a distância do plano das partículas em $t = 0$, $\vec{n}$ é o vetor perpendicular ao plano de partículas, que dá a direção de chegada da partícula primária, e c é a velocidade de propagação do plano, que é a velocidade da luz.

Desta forma, podemos resolver o sistema de equações e procurar o plano que melhor se ajusta aos dados medidos. Como resultado, encontramos as incógnitas $\vec{n}$ e K . A técnica de tanques de água tem comprovado grande eficiência na determinação da direção da partícula primária no experimento onde foi utilizada (Haverah Park).

Os tanques de água também oferecem dados suficientes para respondermos à segunda pergunta feita no início deste Capítulo. Qual é a energia da partícula primária ?

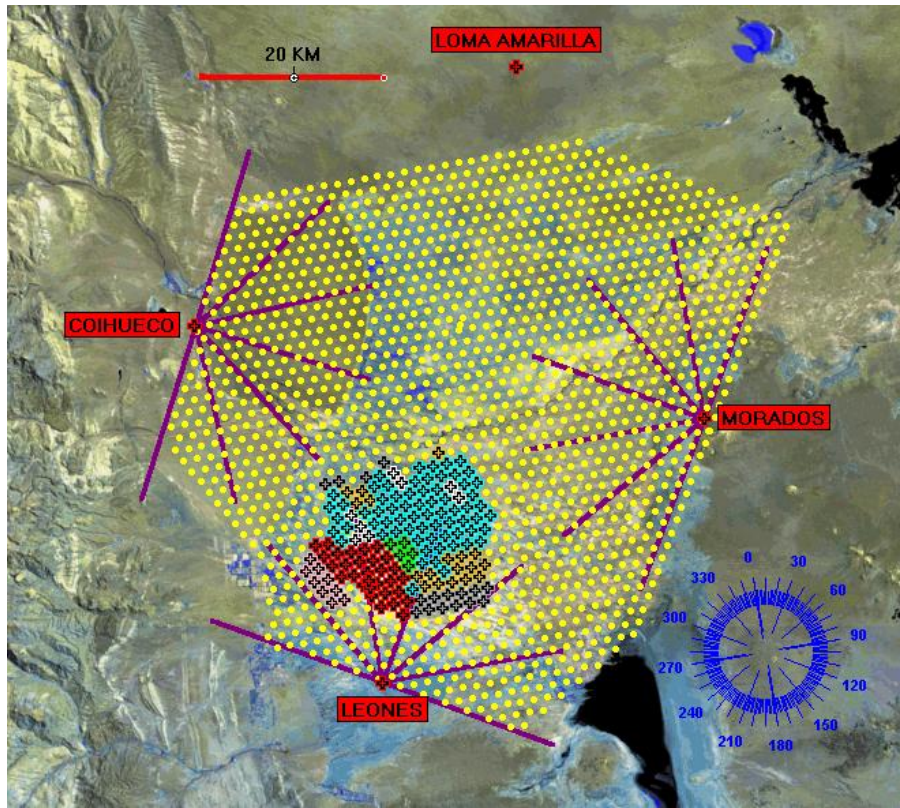


Figura 2.3: Posicionamento dos tanques no sítio do Observatório Auger em Malargüe. A figura mostra em amarelo os tanques que faltam ser instalados e em outras cores os tanques em etapas do processo de instalação e operação. Também está sinalizado o campo de visão de cada um dos telescópios de fluorescência. Esta figura foi preparada por Miguel Mustafa.

As fotomultiplicadoras produzem o sinal integrado correspondente à luz Čerenkov produzida por todas as partículas carregadas do chuva que cruzam o tanque. Este sinal é normalmente medido em unidades do sinal deixado por um múon relativístico que atravessa o tanque verticalmente, abreviadamente denominada VEM, do inglês *Vertical Equivalent Muon*.

Obviamente existe uma relação entre a energia da partícula primária e o número de partículas que cruzam os tanques. Em um modelo simples, quanto maior a energia da partícula primária, maior o número de partículas que cruzam o tanque. Porém, essa relação não é linear e depende das características

de cada chuveiro. Simulações de Monte Carlo mostraram que, na verdade, é a densidade de energia depositada nos tanques que é proporcional à energia do primário. Simulações para o experimento Haverah Park mostraram que a densidade de energia a 600 m do eixo do chuveiro oferece uma estimativa da energia que depende pouco dos parâmetros do chuveiro. A equação abaixo, retirada da referência [18], mostra a relação entre energia e densidade que é utilizada atualmente:

$$E = 7.04 \times 10^{17} \rho(600)^{1.018} \text{ eV} \quad , \quad (2.2)$$

na qual $\rho(600)$ é a densidade do sinal medido pelos tanques a 600 m do eixo do chuveiro em unidades de VEM/m^2 .

No entanto, simulações mais recentes feitas para o *Design Report* apontam para a utilização de uma equação semelhante, mas tendo como parâmetro a densidade do sinal a 1000 m do eixo do chuveiro. Este trabalho [3] mostra que as flutuações entre chuveiros da densidade do sinal a 1000 m variam pouco, causando assim um erro reduzido na estimativa da energia.

Entretanto, um estudo detalhado da distribuição lateral e de suas flutuações ainda está por ser feito e faz parte do plano de trabalho da Colaboração Auger. Por hora, estimativas da energia a partir dos dados dos tanques estão sujeitas a interpretações de simulações de Monte Carlo e de modelos de interações escolhidos arbitrariamente.

Da mesma forma, a determinação da partícula primária, utilizando dados do detector de superfície, é bastante dependente de modelos de simulação mas pode ser ainda factível dentro de um conceito probabilístico. O experimento Haverah Park publicou suas considerações a respeito da composição química baseadas na taxa de alongação [21].

A taxa de alongação relaciona a profundidade (X_{max}), onde o chuveiro possui o máximo de partículas, com a energia da partícula primária. Chuveiros iniciados por partículas primárias mais pesadas desenvolvem-se mais rápido que aqueles iniciados por partículas mais leves com a mesma energia. Detalhes sobre a taxa de alongação serão abordados no Capítulo 5.

Porém, os detectores de superfície não detectam o X_{max} do chuveiro que para energias da ordem de 10^{19} eV está, em média, a 2.5 km de altitude. No entanto, o sinal detectado pelas fotomultiplicadoras do tanque pode guardar uma relação indireta com a composição química e, conseqüentemente, com a posição do máximo do chuveiro.

A maior parte do sinal detectado pelos tanques é formado por elétrons

e múons. Múons são resultado da componente hadrônica dos chuueiros que, em média, é função direta do número de hádrons na partícula primária. Ou seja, em linhas gerais, quanto mais pesada a partícula primária, mais múons serão produzidos e atingirão os tanques.

Devido às probabilidades de interações eletromagnéticas, elétrons são mais lentos que múons, portanto, o sinal detectado pelos tanques será formado por uma componente adiantada, formada por múons e outra atrasada e mais espalhada, formada por elétrons, como pode ser visto na figura 2.4. Este gráfico foi obtido com simulações de Monte Carlo do chuueiro e simulações dos tanques, de forma que foi possível separar as duas componentes no sinal.

Medindo a velocidade de crescimento do sinal integrado no tanque obtém-se uma estimativa da razão entre o sinal deixado pela componente muônica e eletromagnética. Em [21], Watson e Walker sugerem uma relação entre a taxa de crescimento do sinal e o X_{max} , permitindo, a partir dos dados dos tanques, determinar uma taxa de elongação.

Porém, medidas tão indiretas não representam o máximo de potencialidade do Observatório Auger e novas técnicas de determinação da massa do primário também estão em desenvolvimento [22, 23].

2.2 Telescópios de Fluorescência

Diferentemente da descrição dos detectores de superfície feita acima, a física envolvida no processo de detecção e reconstrução dos chuueiros não será apresentada aqui. Restringimo-nos, nesta etapa, a uma descrição técnica do instrumento de medida e deslocamos a discussão de análise para o Capítulo 5, onde haverá a introdução para os resultados obtidos nesta área.

Lembramos apenas que a grande importância do telescópio de fluorescência reside no fato de ele detectar o desenvolvimento longitudinal do chuueiro fazendo uma medida calorimétrica das partículas ao longo da sua passagem pela atmosfera.

Métodos específicos de reconstrução também permitem responder as três perguntas sobre a partícula primária feitas no início deste Capítulo. Em particular, esta técnica de medida permite grande poder de resolução para determinar o tipo da partícula primária, já que o telescópio “enxerga” o X_{max} do chuueiro, e determinar a energia da partícula primária devido à medida calorimétrica do depósito de energia das partículas do chuueiro no ar.

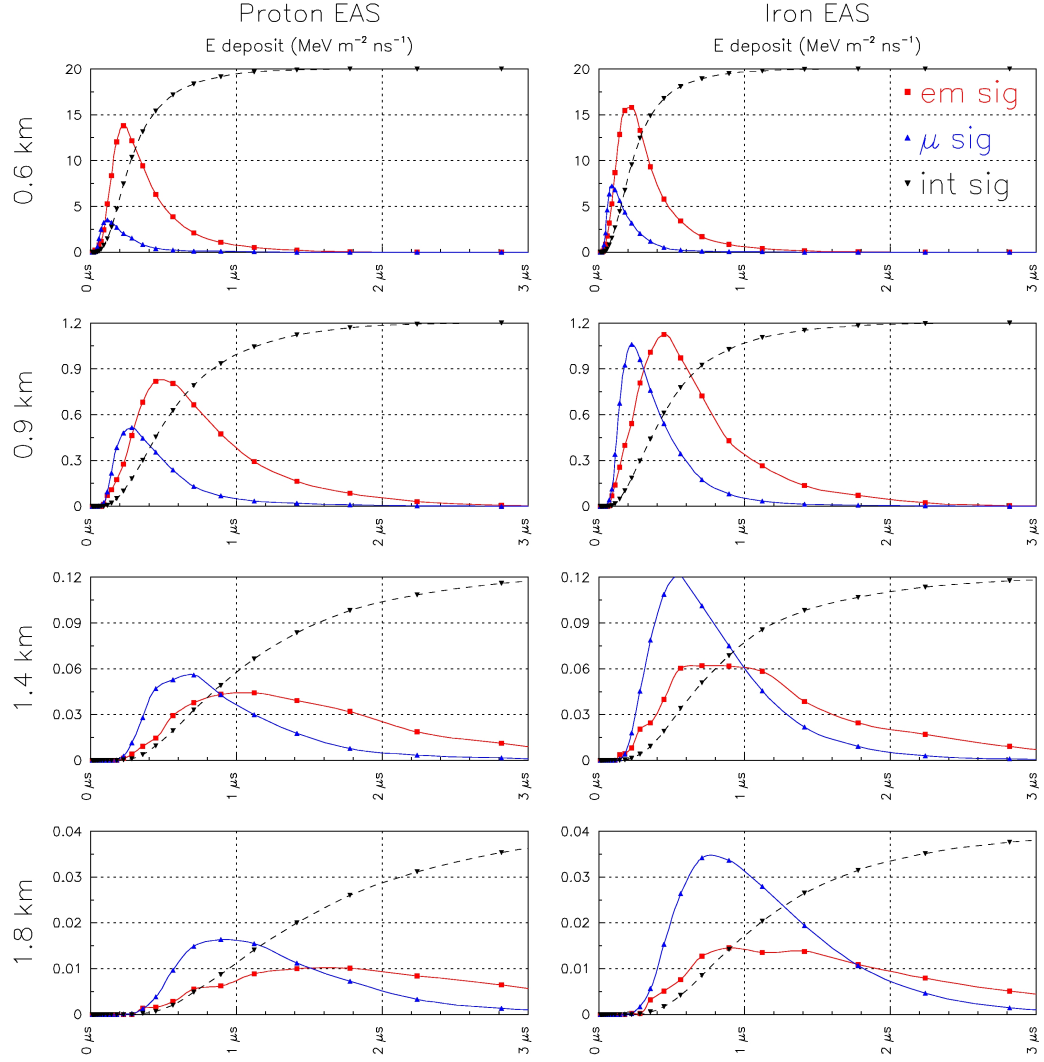


Figura 2.4: Sinal de um chuveiro com energia de 10^{19} eV em um tanque Čerenkov separado em suas componentes eletromagnética e muônica para quatro distâncias do eixo do chuveiro. Na coluna à esquerda a partícula primária é um próton e na coluna à direita um núcleo de ferro. Note que a escala vertical é sempre de 0 a 1 para o sinal integrado. Esta figura foi retirada da referência [3] e ilustra a diferença no tempo de chegada das componentes muônica e eletromagnética.

O Observatório Auger será composto por 24 telescópios de fluorescência construídos em quatro edifícios posicionados em extremos do arranjo de tanques, como pode ser visto na figura 2.3. Cada telescópio possui $30^\circ \times 30^\circ$ de campo de visão, de forma que cada conjunto de seis telescópios vê uma região azimutal de 180° sobre o arranjo de tanques.

Cada telescópio foi construído com óptica de Schmidt com espelho refletor de 3.4 m de raio de curvatura e câmara de fotomultiplicadoras posicionada a 1.7 m do espelho. A câmara de fotomultiplicadoras é formada por 440 tubos do tipo *Photonis XP3062* com 1.5° de abertura cada.

Os espelhos esféricos possuem duas configurações. No *design* da colaboração alemã o espelho é formado por segmentos retangulares de alumínio polido, enquanto que na configuração proposta pela colaboração tcheca o espelho é formado por segmentos hexagonais de vidro. Os telescópios do Observatório serão equipados com ambas as configurações em número igual.

Os telescópios em sua configuração final têm 1.1 m de abertura do diafragma e contam com um anel corretor para minimizar aberrações. O anel corretor ocupa a região entre 0.85 m e 1.1 m da abertura e será descrito e analisado no Capítulo 3.

Na frente da abertura do telescópio fica posicionado um filtro passa faixa ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$) responsável por minimizar os ruídos provenientes de outros comprimentos de onda fora do intervalo conhecido de emissão de fluorescência do nitrogênio.

As fotos na figura 2.5 mostram os telescópios protótipo do Observatório com todos os seus equipamentos finais de operação instalados.

2.3 Potencial do Observatório Auger

O Observatório Auger está sendo construído para resolver o enigma dos raios cósmicos com energia acima de 5×10^{19} eV e para tal, muitos pontos foram cuidadosamente estudados em sua configuração para garantir o sucesso do experimento. Por outro lado, ao se construir um experimento dessas proporções procura-se otimizar as configurações dos instrumentos para abranger o maior número de fenômenos possível dentro do seu universo de medidas.

Seguindo este preceito, chegou-se à configuração híbrida apresentada acima, na qual combina-se uma técnica cara (fluorescência) com outra relativamente barata (tanques), levando em conta os tempos de operação, já que os telescópios só operam em noites sem nuvem e sem lua, aproximadamente



Figura 2.5: Fotos do telescópio protótipo do Observatório Auger. A foto à esquerda mostra a câmara de fotomultiplicadoras e o anel corretor. A foto à direita mostra o espelho e a câmara de fotomultiplicadoras vista por trás.

10% do tempo de operação dos tanques, que operam durante todo o dia em qualquer condição climática. Assim, ganha-se um instrumento excelente para medidas da energia e do X_{max} , que leva a boas estimativas do tipo de partícula primária, e outro de medida contínua, que detectará em um curto intervalo de tempo um grande número de eventos para respondermos às questões de isotropia e do espectro de energia.

Para atingir seus objetivos o Observatório Auger foi projetado para ter resolução angular de 0.3° na direção de chegada, erro em energia menor que 10 % e erro no X_{max} menor que 20 g/cm^2 . Felizmente, o tempo de operação do protótipo, que operou com 40 tanques e 2 telescópios, o trabalho contido na referência [24] e as simulações apresentadas no Capítulo 5 mostram que as escolhas das configurações e dos instrumentos foram acertadas.

A figura 2.6 mostra a exposição do Observatório Auger em função do tempo e a tabela 2.1 mostra o número de eventos a ser detectado por ano. A figura supõe cumprido o cronograma de construção dos dois sítios do Observatório Auger, sendo que o no hemisfério norte começará a ser construído em 2005. A tabela mostra números para um sítio com 3000 km^2 .

Na figura 2.6 podemos observar que, a partir de 2005, o Observatório Auger será o experimento de maior exposição para o estudos dos raios cósmicos de altas energias. Ainda mais impressionante é analisar a tabela 2.1 e observar que em um ano de operação o Observatório Auger com apenas um sítio detectará 49 eventos híbridos e 490 eventos no total com energia acima

Número de eventos por sítio do Observatório Auger		
Energia (eV)	Detec. Superfície	Híbridos
6×10^{17}	0	45000
10^{18}	0	30000
3×10^{18}	1500	4700
10^{19}	5150	515
2×10^{19}	1590	159
5×10^{19}	490	49
10^{20}	103	10
2×10^{20}	32	3
5×10^{20}	10	1

Tabela 2.1: Número de eventos detectados pelo Observatório Auger acima da energia dada na primeira coluna em um ano. Foram computados apenas eventos com ângulo zenital menor que 60° . Só são considerados eventos detectados pelo detector de superfície que dispararam quatro tanques com pelo menos 4 VEM cada. Os números para os eventos híbridos assumem dois tanques disparados com pelo menos 4 VEM e 10 % de tempo de operação.

do corte GZK ($5 \times 10^{19} \text{ eV}$) o que significa mais que oito vezes o número de eventos detectados pelo experimento AGASA nesta região de energia.

2.3.1 Eventos do Protótipo

O intuito da operação do protótipo do Observatório foi testar as configurações dos instrumentos, métodos de aquisição e transmissão de dados e programas de reconstrução. O protótipo funcionou entre dezembro de 2001 e abril de 2002 com 40 tanques e dois telescópios operando no telescópio chamado de Los Leones.

Depois dos primeiros testes da eletrônica e da mecânica dos instrumentos, os detectores operaram em ritmo normal de operação para acumular um número suficiente de eventos que permitisse a verificação da funcionalidade dos equipamentos em ciclo normal de trabalho.

Durante esse período foram detectados aproximadamente 1000 eventos com os telescópios de fluorescência, 43794 eventos com pelo menos 3 tanques disparados (veja tabela 2.2) e 73 eventos híbridos.

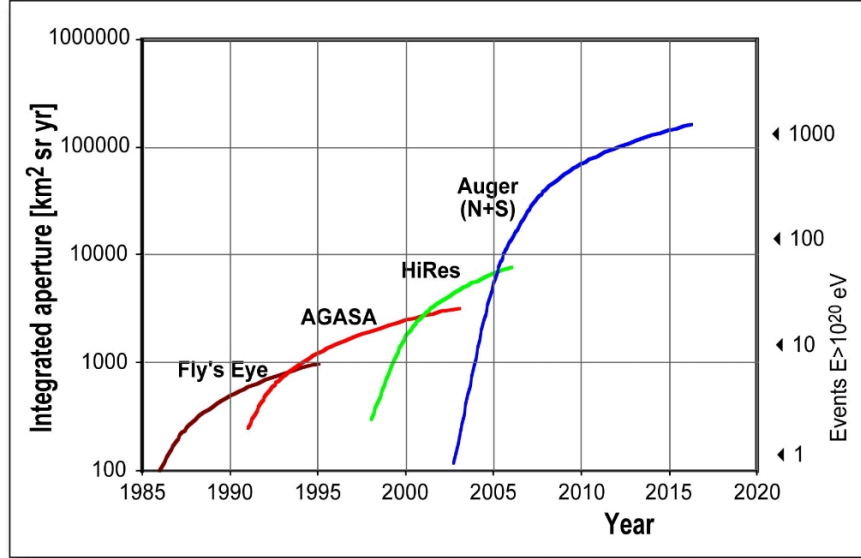


Figura 2.6: Exposição do Observatório Auger em função do tempo comparada com a de outros experimentos em operação. O gráfico supõe cumprido o cronograma de construção do Observatório que prevê para 2005 a entrada em operação na configuração final do sítio sul e o início da construção do sítio norte. Esta figura foi preparada pelo Dr. Arisaka para a Colaboração Auger.

Dos eventos detectados pelo telescópio de fluorescência foram feitos dois conjuntos de dados com objetivos diferentes. O colaborador Adrian Rovero disponibilizou uma compilação de todos os 995 eventos que dispararam o gatilho de segundo nível¹ dos telescópios de fluorescência do protótipo em um único arquivo para a colaboração. Estes eventos devem ser usados principalmente em estudos de eficiência de detecção e vieses de detecção. Em particular, usaremos esta seleção para ilustrar os vieses de detecção no Capítulo 5.

Um segundo conjunto de dados com 332 eventos foi formado pelo colaborador Stefano Argirò. Nesta seleção só foram incluídos eventos com pelo menos oito pixels disparados. Esta seleção será usada ao longo desta tese

¹O gatilho de segundo nível testa se pelo menos 4 pixels com sinal maior que a média mais 4σ formam um arranjo que corresponde a um chuveiro de raios cósmicos.

Número de eventos detectados pelo protótipo	
Condição	Número de Eventos
Menos que 3 tanques	56630
Pelo menos 3 tanques	43794
Pelo menos 4 tanques	4081
Pelo menos 5 tanques	2115
Mais que 5 tanques	1514

Tabela 2.2: Número de eventos detectados pelo protótipo do Observatório Auger com multiplicidade dada pela coluna à esquerda. Nenhum corte para seleção de eventos foi realizado.

como sendo os eventos de boa qualidade detectados pelo protótipo do Observatório.

Os eventos detectados só pelo detector de superfície não serão utilizados neste trabalho, exceto aqueles que fazem parte de eventos híbridos. Neste período, para todos os eventos detectados pelos telescópios, era enviado um sinal ao controlador da seleção de eventos dos tanques solicitando que qualquer tanque que medisse um sinal dentro de uma janela de aproximadamente 300 ns com valor acima de 2 VEM tivesse sua leitura armazenada. Nenhuma correspondência entre posição do chuveiro foi exigida, já que o arranjo protótipo de tanques tinha dimensões restritas. Entretanto, mesmo assim, existe uma probabilidade de que alguns eventos registrados como híbridos sejam na verdade um chuveiro detectado pelo telescópio somado a um disparo acidental de um tanque. Este eventos híbridos serão utilizados no Capítulo 5.

2.4 Programas disponíveis na Colaboração Auger

A Colaboração Auger estruturou dentro do seu organograma grupos de elaborações de programas de computadores para as diversas funções dentro do experimento. Especificamente podemos citar os principais programas como sendo os simuladores Monte Carlo dos chuveiros, os simuladores dos dois detectores, sistemas de aquisição de dados e programas de reconstrução.

Nesta seção faremos uma breve descrição dos programas elaborados para

uso da Colaboração Auger que serão utilizados nesta tese. Sobre os simuladores de Monte Carlo do chuveiro não há muito a dizer exceto que os dois principais programas AIRES [25] e CORSIKA [26] são utilizados na Colaboração, mas por familiaridade optamos por utilizar o CORSIKA, cujos detalhes relevantes serão descritos no Capítulo 4.

2.4.1 SDSim

O programa simulador dos tanques foi elaborado pela Dra. Sylvie Dagoret-Campagne e pelo Dr. Pierre Billoir e é denominado por SDSim [27] do inglês *Surface Detector Simulation*. Este programa é capaz de ler as partículas que atingem o chão em simulações feitas por um programa de Monte Carlo e seleccionar as que caíram dentro de um arranjo de tanques pré-definidos pelo usuário.

Para cada partícula que incide sobre um tanque, a luz Čerenkov correspondente é calculada de acordo com as teorias de emissão. Em seguida, esses fótons são propagados, refletidos no material que recobre internamente o tanque e finalmente detectados nas fotomultiplicadoras.

O ponto mais delicado desta simulação está no tratamento das partículas que adquirem um peso devido ao processo de diluição adotado pelo simulador de Monte Carlo cujo detalhe do funcionamento pode ser visto na seção 4.2.1. Uma partícula com peso muito alto (pesos típicos podem ser da ordem de 10^4) não pode produzir o sinal proporcional à passagem de um número de partículas igual ao peso. Isto não corresponde à realidade e facilmente todos os tanques atingiriam seu limiar máximo de detecção.

Para corrigir esse artifício, o SDSim distribui as partículas com peso sobre uma região ao redor de cada tanque. Este procedimento é feito dividindo a energia da partícula com peso P entre P outras partículas que são espalhadas ao longo de uma área ao redor do tanque com tempo de chegada sorteado aleatoriamente. Mais detalhes do processo de “desdiluição” podem ser vistos em [28].

Apesar do processo de tratamento das partículas com peso ainda ser um assunto em discussão, o SDSim tem se mostrado bastante confiável a respeito do sinal produzido nos tanques Čerenkov quando comparado com o sinal de eventos reais detectados pelo protótipo.

Este programa será utilizado no Capítulo 5 para simular o sinal dos detectores de superfície de eventos híbridos.

2.4.2 FDSim

O programa FDSim [29] do inglês *Fluorescence Detector Simulation* foi inicialmente desenvolvido pelo Dr. Ronald Shellard e pela Dra. Márcia Amaral e hoje está sob a coordenação do Dr. Luis Prado Júnior.

Este programa faz a simulação do detector de fluorescência em todos os seus detalhes, desde a entrada da luz pelo diafragma e sua passagem através do filtro UV, o desvio dos fótons no anel corretor, a propagação óptica até o espelho, sua reflexão e detecção final na câmara de fotomultiplicadoras.

Acoplado a este programa existe um outro módulo denominado FDTriggerSim [24], que simula a eletrônica das fotomultiplicadoras, incluindo ruídos e pedestais, e aplica os padrões de gatilho especificados pela Colaboração.

Historicamente, o FDSim usa o perfil longitudinal das partículas carregadas no chuveiro para gerar os fótons de fluorescência correspondentes e fazer sua propagação até o telescópio. A este procedimento, foi adicionado um segundo método de leitura de uma lista de fótons e propagação desses através da óptica do telescópio. Este aplicativo será utilizado no Capítulo 4 para testar o novo método de simulação de luz fluorescente que será implementado aqui.

Detalhes de absorção atmosférica e produção de luz Čerenkov no ar correspondente ao número de partículas no chuveiros também são simulados, o que torna o FDSim um dos programas mais completos da Colaboração Auger.

2.4.3 FLORES

O programa FLORES [30] do inglês *FLuorescence detector Offline Reconstruction System* é um programa de reconstrução da geometria e da energia escrito pelo Dr. Stefano Argirò que foi exaustivamente testado por outros colaboradores e acabou por ganhar o status de programa oficial de reconstrução dos eventos detectados pelo telescópio de fluorescência.

As técnicas de reconstrução da geometria utilizadas no FLORES serão abordadas em detalhes no Capítulo 5 e as de reconstrução da energia podem ser estudadas em [31].

Este programa será utilizado como plataforma de desenvolvimento para a reconstrução híbrida desenvolvida no Capítulo 5 e como ferramenta de análise de eventos detectados só pelo telescópio de fluorescência ao longo de toda a tese.

Capítulo 3

O Anel Corretor

3.1 Princípio de Funcionamento

O anel corretor é um instrumento que faz parte da óptica de um telescópio tradicional de Schmidt. Sua utilidade é a de aumentar a área coletora sem piorar a resolução do aparelho.

Para um sistema óptico ideal, no qual todos os raios incidem com ângulos pequenos em relação ao eixo do refletor, podemos, em primeira aproximação, desprezar os efeitos da aberração esférica e coma. Porém, isso não é verdade para o caso dos telescópios do Observatório Auger, onde o campo de visão é de 30° . Nestes sistemas com grandes ângulos de incidência, as distâncias focais de diferentes zonas da abertura dependem da distância ao eixo do telescópio.

Para corrigir esse efeito, Schmidt propôs a utilização de uma placa corretora que diminuísse a inclinação de raios incidentes a grandes distâncias do eixo do telescópio, minimizando as distorções causadas pela aberração esférica. Uma boa revisão sobre a teoria de aberração esférica e da câmara de Schmidt pode ser encontrada em [32] e [33].

Baseando-se neste princípio, o Sr. Ricardo Sato e colaboradores [34] desenvolveram um sistema de simulação da óptica do telescópio para testar e otimizar os parâmetros do anel corretor que melhor se ajustassem às necessidades do Observatório Auger.

O anel corretor por ele projetado permite aumentar a abertura do telescópio de 85 cm para 110 cm sem diminuir significativamente a qualidade óptica do sistema. Esse aumento na abertura resulta em uma área de coleção

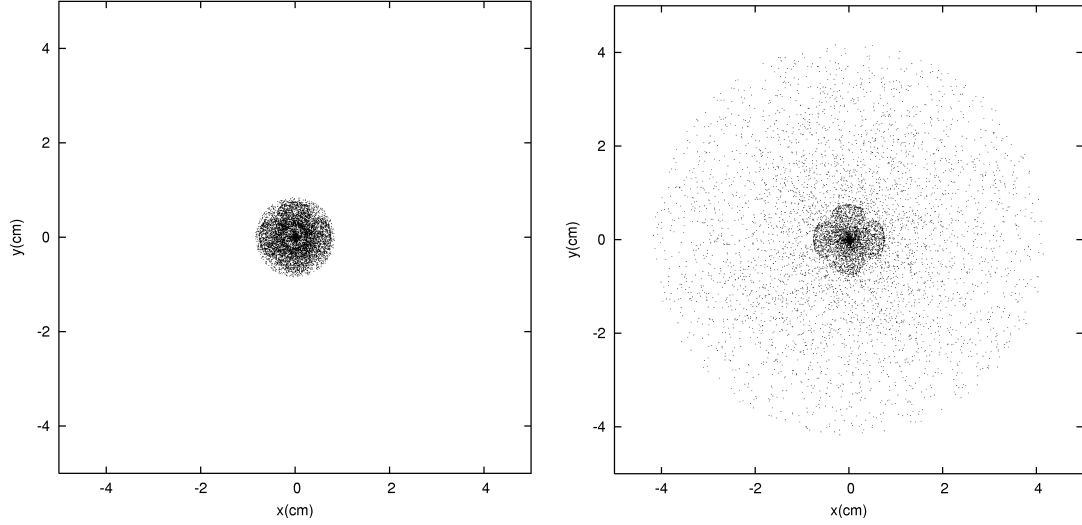


Figura 3.1: Resultados da simulação desenvolvida pelo Sr. Ricardo Sato que ilustram o funcionamento do anel corretor em um telescópio com diafragma de raio 1.1 m. A figura da esquerda foi obtida simulando o telescópio com anel corretor e a da direita sem o anel corretor dado pela equação 3.1.

aproximadamente 67% maior, o que efetivamente significa aproximadamente 100% mais eventos detectados de acordo com os cálculos feitos em [35].

O acréscimo percentual no número de eventos é maior que o aumento da área coletora devido a uma série de fatores. Entre eles o principal é o fato de que o sinal no telescópio é proporcional à área, mas o ruído é proporcional à raiz quadrada da área. Somando esse efeito às sombras provocadas pela câmara de fotomultiplicadoras, encontra-se o valor de aproximadamente 100% de acréscimo no número de eventos detectados.

A figura 3.1 ilustra o funcionamento do anel. Nestas figuras, vemos uma amostra do espalhamento do ponto de impacto de alguns raios na câmara de fotomultiplicadoras para um telescópio com diafragma de 1.1 m de abertura, operando com e sem anel corretor. A figura da esquerda apresenta uma concentração maior dos raios em uma região mais próxima do centro da imagem.

Após um extenso trabalho desenvolvido pelo Sr. Ricardo Sato, encontrou-se a configuração teórica final de um anel corretor com perfil vertical descrito pela equação:

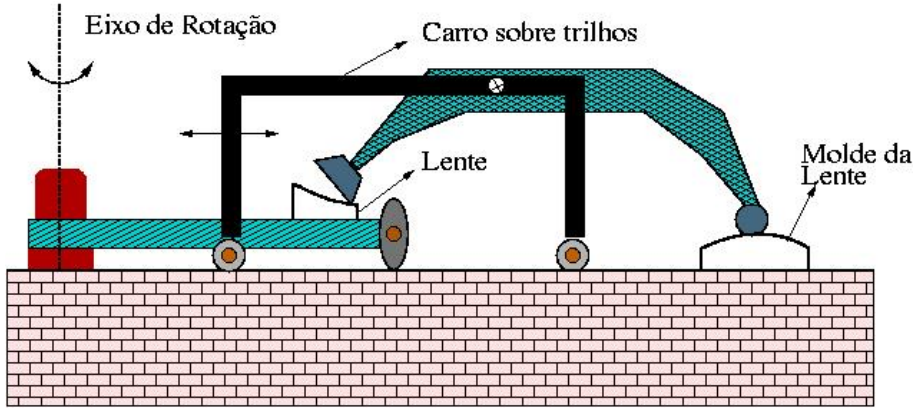


Figura 3.2: Máquina protótipo desenvolvida para a fabricação do anel corretor.

$$Z = Ar^2 + Br^4 + Cr^6 \quad , \quad (3.1)$$

onde Z é a altura da superfície (em mm) e r (em mm) é a distância radial com $A = -1.24 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$, $B = 8.64 \times 10^{-12} \text{ mm}^{-3}$ e $C = 2.03 \times 10^{-18} \text{ mm}^{-5}$.

3.2 Construção do Anel Corretor

O método de construção do anel corretor foi desenvolvido por um grupo de trabalho formado no Grupo de Campinas na Colaboração Auger e contou com a colaboração do Prof. Carlos Escobar, do Sr. Ricardo Sato, do Dr. Hugo Reis, do Sr. Rogério Marcon e minha.

Nossos esforços culminaram no projeto da máquina protótipo ilustrada na figura 3.2 que copiaria a forma de um molde em 24 segmentos de 15° de abertura cada que seriam montados lado a lado para formar o anel corretor.

Em seguida o Dr. Hugo Reis e eu encontramos a Empresa Schwantz, situada em Indaiatuba, dirigida pelo Engenheiro Emerson Schwantz, que aceitou o desafio da construção de uma máquina capaz de fabricar nossas lentes. Concomitantemente, decidiu-se pela utilização do vidro denominado por BK7 por possuir uma boa transmitância na região UV desejada e facilidade de moldagem.



Figura 3.3: Máquina desenvolvida na Empresa Schwantz para a fabricação do anel corretor.

Como era de se esperar, a visão prática do Eng. Emerson Schwantz modificou de forma significativa o protótipo por nós apresentado e elaborou a máquina esquematizada na figura 3.4.

O processo de aprimoramento da máquina passou por vários estágios de testes com diferentes superfícies polidoras, diferentes tamanhos de pastilhas desgastadoras, tempo de desbaste, materiais de fixação, e um grande número de detalhes técnicos foram superados para que chegássemos à configuração final da máquina ilustrada nas fotos na figura 3.3.

A máquina de fabricação das lentes possui um disco diamantado que, ao girar, desbasta lentamente a superfície do vidro em contato com ele. A mesa onde as lentes estão fixadas gira com velocidade constante de forma a uniformizar o desgaste de todos os segmentos. A inclinação do eixo do disco diamantado determina a forma da superfície do anel corretor.

Após os primeiros testes, notamos que apesar dos segmentos terem a forma desejada, o giro do disco diamantado imprimia sulcos em padrões circulares nas lentes. Tais imperfeições foram removidas com a introdução de um segundo cabeçote que realiza um polimento superficial com movimento aleatório, apagando assim os padrões circulares marcados no processo de desbaste.

Após aproximadamente um ano de trabalho, produzimos o primeiro anel corretor, que foi transportado e instalado no telescópio protótipo do Observatório Auger em Malargüe.

Neste estágio de construção do Observatório Auger, o grupo alemão do *Forschungszentrum Karlsruhe* também fabricou um anel corretor utilizando a técnica de moldagem de acrílico. Em seguida, mostrarei uma comparação

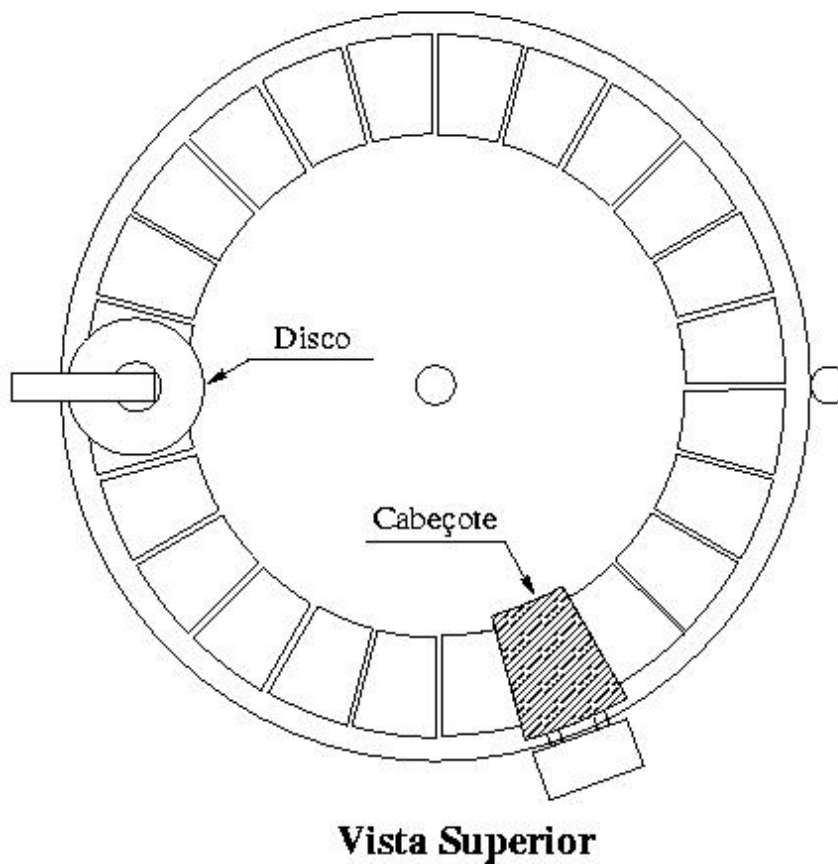
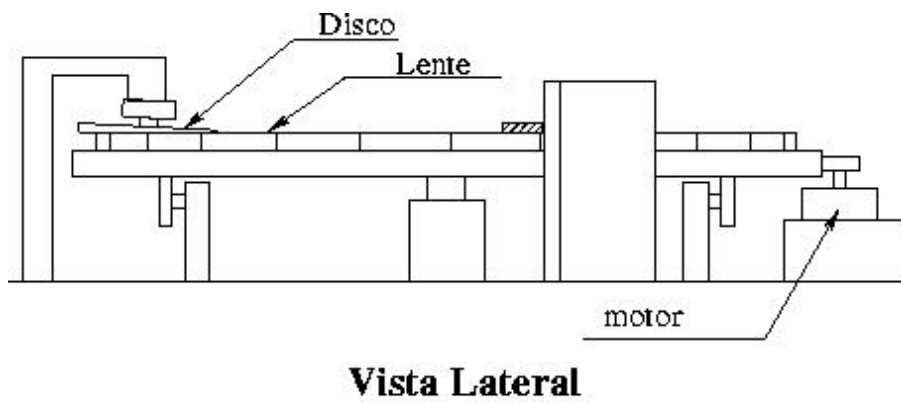


Figura 3.4: Projeto final da máquina para a fabricação do anel corretor, desenvolvida em conjunto com a Empresa Schwantz. A máquina construída tem como elementos básicos um disco desbastador e um cabeçote de movimento aleatório.

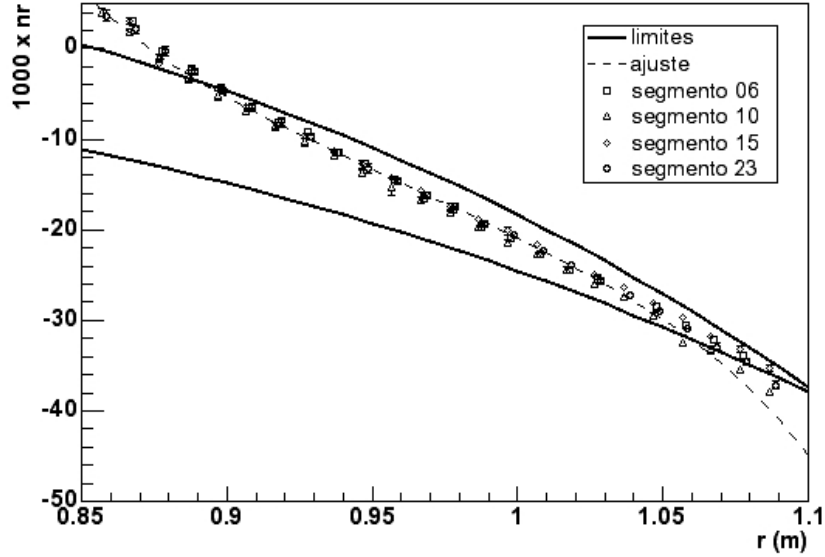


Figura 3.5: Componente radial da normal da superfície da lente. A figura mostra medidas de quatro segmentos medidos pelo Dr. Marcelo Leigui e pelo Sr. Ricardo Sato. As linhas cheias mostram os limites teóricos para a forma da superfície que garantem um bom funcionamento do anel.

do desempenho do anel alemão com o anel por nós fabricado.

3.3 Testes do Anel Corretor

O anel corretor foi testado seguindo duas abordagens. A primeira foi conduzida pelo Sr. Ricardo Sato e o Dr. Marcelo Leigui, que fizeram a varredura da superfície curva da lente determinando sua forma através da componente radial da normal à superfície em função do raio. O gráfico 3.5 mostra os dados medidos para um conjunto de quatro segmentos de lente e os limites aceitáveis para que, segundo as simulações, o tamanho da imagem na câmara fosse menor que um terço do tamanho do fototubo. Essa condição do tamanho máximo da imagem foi determinada pela Colaboração Auger para garantir a uniformidade do sinal no fotocátodo e minimizar as perdas de sinal nas intersecções de fototubos.

Maiores detalhes sobre a técnica por eles desenvolvida podem ser encon-

trados em [36]. Atenho-me aqui à descrição da segunda abordagem de testes que eu efetuei com o anel corretor utilizando fotos de estrelas com o telescópio do Observatório.

3.3.1 Fotos de Estrela

Esta análise do anel corretor tem como objetivo medir a distribuição de luz da imagem de uma estrela na câmara de fotomultiplicadoras. Considerando a estrela como uma fonte pontual, podemos medir a dispersão máxima provocada por aberrações inerentes ao nosso sistema.

Uma das importâncias desse teste é a de ser o único a verificar a configuração total do telescópio. Neste teste, o espalhamento da luz que forma a imagem na câmara é provocado por todos os instrumentos ópticos que serão utilizados durante a tomada de dados de chuveiros atmosféricos. Outra grande importância deste procedimento é o fato de ser o único a testar o desempenho do anel corretor como um todo ao invés de inspecionar cada um dos segmentos separadamente.

A primeira tarefa foi selecionar uma estrela candidata e a época do ano em que ela está no campo de visão do nosso telescópio. Para esse teste foi utilizada a baía 4 do telescópio de Los Leones, que estava equipada com um espelho refletor que tinha cada metade formada por segmentos de espelhos tchecos e alemães.

A estrela escolhida foi VEGA (Alpha de Lyrae) da classe espectral A0Va e magnitude 0.03 que possui emissão UV, permitindo assim realizar as fotos com o filtro do telescópio em posição. Ela estava no campo de visão da baía 4 nos dias de 25, 26 e 27 de Abril de 2002 quando as fotos foram feitas sob a supervisão do Prof. Hans Klages (*Forschungszentrum Karlsruhe*). A tabela 3.1 mostra a posição da estrela no céu, o conjunto de espelhos iluminado por ela e a posição da imagem na câmara para alguns horários nos dias em que as fotos foram realizadas.

Arranjo Experimental

O arranjo experimental constituiu-se no posicionamento de um alvo de papel na frente da câmara de fotomultiplicadora onde a imagem da estrela seria formada. O alvo deve ser de um material refletor que transforme a luz UV captada pelo telescópio em luz visível. Felizmente, papel branco possui essa característica graças aos alvejantes ópticos derivados do ácido estilbeno di,

Posição de VEGA			
Qui 25/04/02	6:02h	4:47h	3:24h
Sex 26/04/02	5:58h	4:43h	3:20h
Sab 27/04/02	5:54h	4:39h	3:16h
Azimute	0°	15°	30°
Altitude	15.7°	13.7°	7.2°
espelho	alemão	ambos	tcheco
coluna	3	10	20
linha	12	10	5

Tabela 3.1: Posição da estrela VEGA nos dias em que foram tiradas as fotografias. Os campos linha e coluna referem-se às linha e coluna de fotomultiplicadoras na câmara. O campo espelho identifica qual conjunto de espelhos foi atingindo pela luz da estrela naquele instante.

tetra ou hexa sulfonado que são acrescentados ao papel comercial para converter luz UV em visível, causando um efeito visual de alvura do papel.

Em frente aos espelhos e mirando o papel branco, foi instalada uma câmara CCD¹ da marca SensiCam PCO com resolução de 640 por 480 pixels. Assim, a luz da estrela entra no sistema óptico passando pelo filtro UV, reflete nos espelhos e sua imagem é formada no papel branco sobre a câmara de fotomultiplicadoras. Desta imagem é tirada uma foto com a CCD, que será analisada para determinar a distribuição de luz em função do raio. A figura 3.6 mostra detalhes do arranjo experimental.

Com o intuito de isolar o efeito dos raios que passam pelo anel corretor do efeito dos raios que passam pela parte interna do diafragma, realizamos fotos com duas configurações. Para a configuração denominada “sem anel corretor” as fotos foram tiradas com uma cobertura que impedia a passagem da luz pelo anel corretor. Esta configuração limita o raio coletor do telescópio a 85 cm. Para a configuração denominada “só anel corretor” as fotos foram feitas com uma cobertura na parte interior da abertura, de forma que a imagem é formada apenas por raios que passaram através do anel corretor. A figura 3.7 mostra exemplos das fotos tiradas na configuração “só anel corretor” e “sem anel corretor”.

Na tomada de dados foram feitas 32 fotos com 8 segundos de exposição

¹Abreviação do inglês *Charged Coupled Device*.

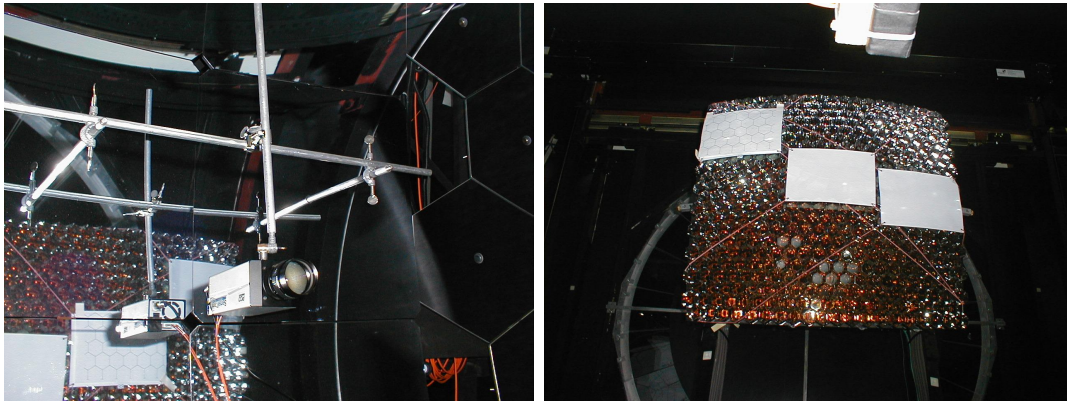


Figura 3.6: Câmera CCD posicionada em frente ao espelho e alvo de papel fixado na câmara de fotomultiplicadoras.

com 1 segundo de intervalo entre uma e outra para todas as configurações da tabela 3.1 . O tempo de exposição tem que ser limitado para minimizar o efeito de rotação da Terra que desloca a imagem da estrela na câmara de fototubos.

Análise das Fotos

O objetivo final desta análise é obter a integral da intensidade da luz na câmara de fotomultiplicadoras em função do raio medido em relação ao centro da imagem. Para tal finalidade várias etapas técnicas e computacionais tiveram que ser cumpridas:

1. Converter as figuras do formato b16 da câmara de CCD para o formato “fits” padrão da NASA;
2. Ler o formato “fits” com bibliotecas da NASA para uma matriz em C/C++;
3. Encontrar a estrela na imagem, visto que a área da foto é muito maior que o tamanho da imagem da estrela;
4. Definir o ruído da imagem;
5. Determinar o centro da estrela;
6. Somar as 32 fotos para aumentar a razão sinal/ruído;

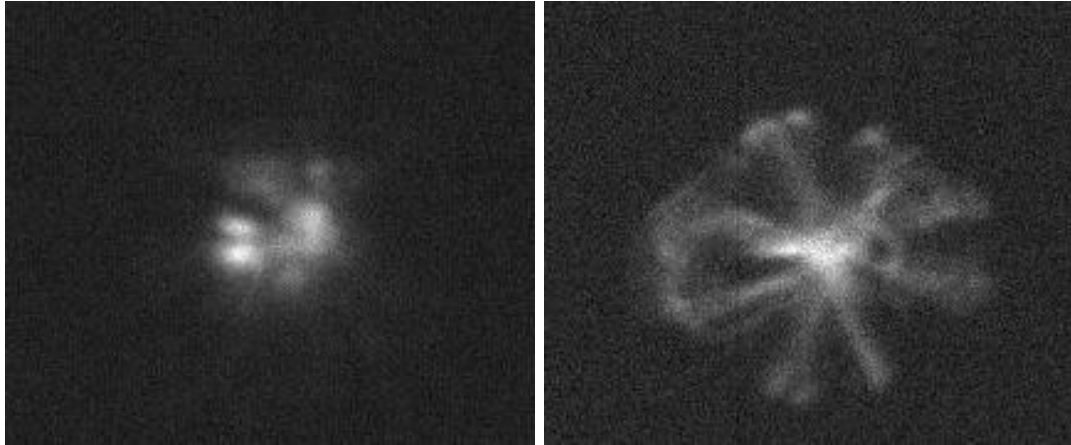


Figura 3.7: Exemplo das fotos feitas da estrela VEGA. A foto à esquerda é da imagem formada apenas pelos raios que passaram através do anel corretor e a foto à direita é a imagem formada pelos raios que passaram na região interna ao anel corretor.

7. Encontrar a conversão de pixel na câmara CCD para centímetro na câmara de fotomultiplicadoras;
8. E finalmente medir a concentração de luz em função do raio.

Deste procedimento, vale destacar que a estrela foi encontrada por uma varredura da imagem que procurava por cinco pixels consecutivos com sinal excedendo a média por mais de três desvios padrão. Uma vez satisfeita essa condição, a estrela era definida por um quadrado de 200x200 pixels que era suficientemente maior que a imagem da estrela. Da mesma forma, tomamos como ruído uma região de mesmo tamanho da mesma foto porém simetricamente oposta em relação ao centro da foto.

O centro da estrela foi encontrado através de um argumento de centro de massa, e com referência no centro individual de cada foto, as 32 exposições foram somadas. A conversão de pixel na câmara de CCD para centímetro na câmara de fotomultiplicadora foi obtida utilizando uma foto do alvo, onde foi fixada uma escala em centímetros.

A figura 3.8 mostra as mesmas fotos da figura 3.7 com a intensidade de cada pixel graficada em função da distância ao centro da imagem em centímetros.

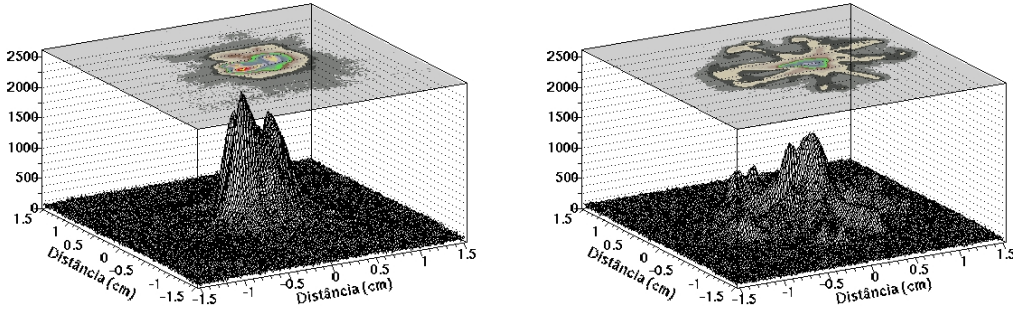


Figura 3.8: Exemplo das fotos feitas da estrela VEGA. A foto à esquerda é da imagem formada apenas pelos raios que passaram através do anel corretor e a foto à direita é a imagem formada pelos raios que passaram na região interna ao anel corretor. O eixo z mostra o sinal em cada pixel da CCD em unidades arbitrárias.

Desta forma, a distribuição integral da luz em função do raio pode ser determinada somando a intensidade registrada por cada pixel da CCD. Todos os resultados apresentados seguiram esse procedimento e portanto a medida final da concentração da luz foi feita com a soma de 32 fotos.

Resultados

O critério de qualidade exigido pela Colaboração Auger determina que o tamanho máximo da dispersão do sinal na câmara seja um terço do tamanho do fototubo. Os fototubos escolhidos têm um diâmetro de aproximadamente 4.5 cm, ou seja, a máxima dispersão da luz de uma fonte pontual deve ter 1.5 cm de diâmetro. Porém, como a imagem de uma estrela apresenta uma distribuição contínua de luz, sem um final exato, escolheu-se como parâmetro de referência o diâmetro no qual 90% da luz da estrela está contida. Este diâmetro deve ser nominalmente menor que 1.5 cm.

Ao determinar a concentração da luz em função do centro da imagem, quatro estudos foram possíveis:

1. comparação dos resultados obtidos entre as configurações só anel brasileiro e alemão e sem anel corretor;
2. comparação dos resultados obtidos entre os espelhos tchecos e alemães;

3. determinação final da dispersão de luz do telescópio;
4. medida do aumento na área efetiva de coleção do telescópio devido à utilização do anel corretor.

Comparação entre as configurações “só anel” e “sem anel corretor”

A figura 3.9 mostra a comparação da integral da luz na imagem de uma estrela formada pela combinação dos espelhos tchecos e alemães. Como explicado acima, a denominação só anel representa a imagem formada somente pelos raios que passaram pelo anel corretor, enquanto que a denominação sem anel representa a imagem formada pela luz que passou na parte interna do diafragma (raio menor que 0.85 m) onde não existe anel corretor.

A figura mostra quantitativamente o que pode ser visto de forma qualitativa na figura 3.7. Os raios que atravessam o anel corretor são concentrados em um região pequena na superfície das fotomultiplicadoras. As curvas correspondentes aos anéis corretores atingem o valor de 90% da concentração da luz em torno de 0.65 cm de raio, enquanto que os raios que passaram pela região interna do diafragma são mais espalhados e atingem 90% da integral em aproximadamente 0.9 cm de raio.

A figura mostra uma ligeira vantagem do anel corretor alemão quando comparado com o anel brasileiro no que se refere à capacidade de concentrar a luz. No entanto, a comparação da concentração da luz de ambos os anéis corretores com aquela obtida quando os raios passam na parte interior do diafragma mostra que os anéis corretores cumprem seu papel de corrigir a aberração esférica para grandes distâncias do eixo do telescópio. Os raios que passam a distâncias maiores que 0.85 m do eixo do telescópio deveriam, em um telescópio sem anel corretor, contribuir para a formação da parte mais externa da imagem na câmara de fotomultiplicadoras, como ilustrado na figura 3.1. Todavia, a figura 3.9 mostra que esses raios são concentrados na parte interna da imagem devido ao efeito corretivo dos anéis.

Comparação entre os espelhos tchecos e alemães

Como mostra a tabela 3.1, a posição da estrela no céu em determinado instante era visível por apenas uma das metades do espelho coletor da baía 4 do telescópio protótipo de Los Leones. Desta forma, foi possível medir a

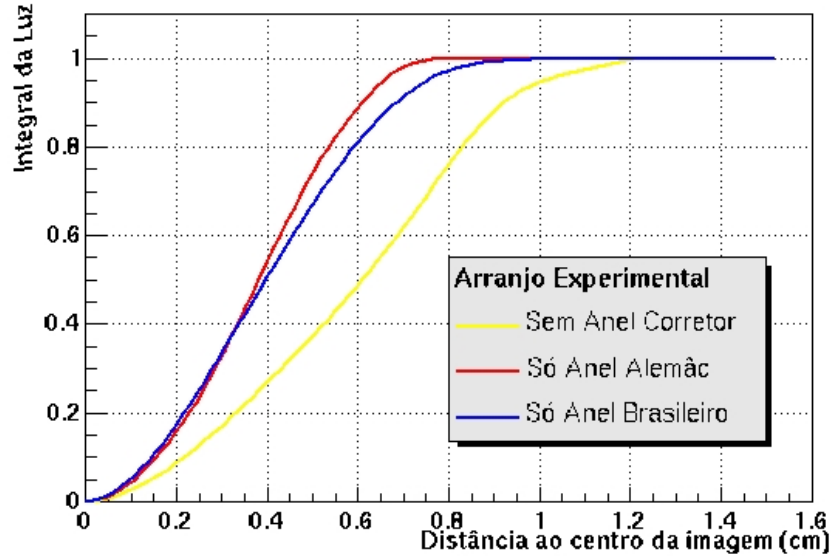


Figura 3.9: Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostrados os casos só anel brasileiro, só anel alemão e sem anel corretor.

dispersão da luz resultante de cada conjunto de espelhos separadamente e compará-las entre si.

A figura 3.10 mostra a concentração da luz em função da distância ao centro da imagem para os conjuntos de espelhos tchecos e alemão separadamente, bem como a concentração para o instante em que a estrela iluminava simultaneamente ambos os conjuntos.

A figura mostra uma clara vantagem dos espelhos tchecos em comparação com os espelhos alemães. A comparação foi feita sem o anel corretor para isolar o feito do mesmo.

Dispersão de luz: Configuração de Operação do Telescópio

A configuração de operação dos telescópios do Observatório Auger tem um diafragma com abertura de 1.1 m de raio com um anel corretor cobrindo a região entre 0.85 e 1.1 m de raio. Nenhuma foto de estrela foi feita nesta configuração mas podemos considerar que ela pode ser representada pela sobreposição dos casos “só anel” e “sem anel corretor”.

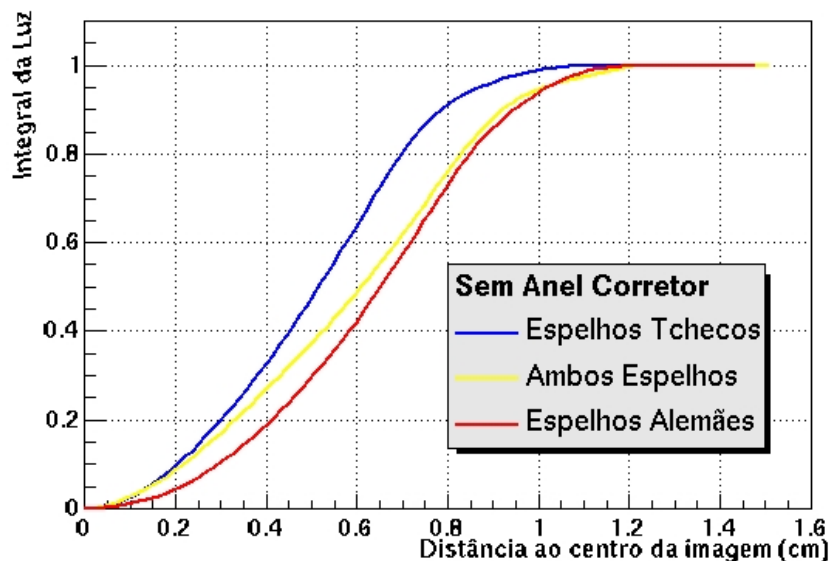


Figura 3.10: Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostrados os casos quando a imagem era formada só pelo conjunto de espelhos tchecos, só pelo conjunto de espelhos alemães e por ambos.

A análise foi feita com a estrela iluminando ambos os espelhos para minimizar as particularidades de cada conjunto de refletores.

A figura 3.11 mostra a concentração da luz obtida através da análise da soma de 64 fotos para cada curva: 32 do caso só anel e 32 do caso sem anel.

Esta figura mostra, em acordo com a figura 3.9, que a dispersão de luz é dominada pelos raios que passam na parte interna do diafragma, de forma que o anel corretor contribui muito pouco para o tamanho total da dispersão. Fica também evidente por esta figura que os anéis corretores brasileiro e alemão são indistinguíveis na sua qualidade quando operando na configuração final do telescópio.

Medida do aumento na área efetiva de coleção do telescópio

O objetivo da utilização do anel corretor é aumentar a área efetiva de coleção do telescópio. Alcança-se esse objetivo aumentando o raio de abertura do diafragma e fazendo uso do anel corretor para minimizar os efeitos

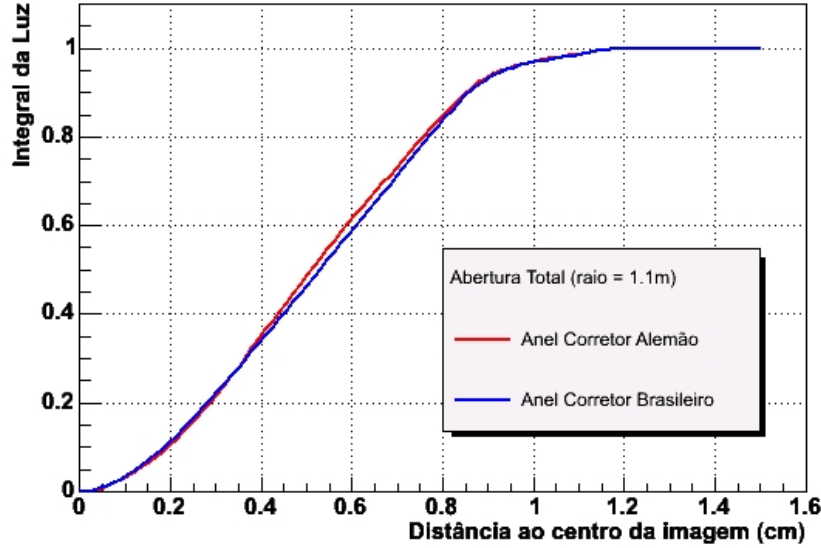


Figura 3.11: Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostradas as curvas para a configuração final do telescópio com abertura do diafragma de 1.1 m.

de aberração.

O aumento do raio de 0.85 m para 1.1 m significa um aumento de 67% na área coletora. Supondo que a taxa de luz incidente na abertura do telescópio foi a mesma nos dias em que foram realizadas as fotos com e sem o anel corretor, podemos determinar o aumento efetivo da quantidade de luz detectada. Porém, como não temos medidas das condições atmosféricas para as noites em que foram realizadas as fotos, não podemos garantir que a intensidade de luz que atingia a abertura do diafragma era a mesma nas três noites, pois a absorção da luz na atmosfera pode ter mudado consideravelmente neste período. Desta forma, ressaltamos que os resultados apresentados nesta seção não são conclusivos mas somente indicativos do aumento efetivo de área coletora.

A figura 3.12 mostra a integral da luz na imagem em função do raio ao centro da imagem para os casos sem anel corretor e com anel corretor brasileiro e alemão. As três curvas foram normalizadas pela curva determinada para o caso sem anel corretor. Observando as curvas dos casos só anel corre-

tor, podemos notar que a luz total que passa só pelos anéis corretores é 62% para o anel brasileiro e 57% para o anel alemão do total de luz que passa na região interna do diafragma.

Ou seja, a operação do telescópio em sua configuração final, quando são somadas as contribuições sem anel e só anel para formar a abertura de 1.1 m, aumenta a área efetiva de coleção em 62% utilizando o anel brasileiro e 57% utilizando o anel alemão. Esse resultado, apesar de não ser conclusivo, concorda muito bem com o aumento numérico da área (67%), pois falta reduzir deste número a absorção da luz pelo vidro e as imperfeições inerentes ao anel, tais como sua segmentação e possíveis defeitos de fabricação.

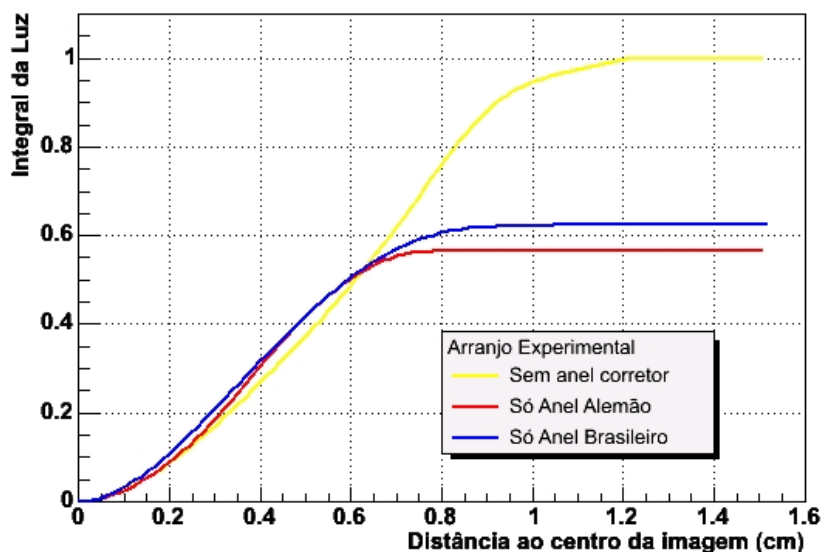


Figura 3.12: Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostrados os casos quando a imagem era formada só pelo anel corretor alemão, só pelo anel corretor brasileiro e sem o anel corretor. As três curvas estão normalizadas pela curva correspondente ao caso sem anel corretor.

Energia (eV)	Próton	Ferro
10^{18}	100	100
10^{19}	100	100
10^{20}	100	100

Tabela 3.2: Número de chuviros simulados para cada uma das configurações.

3.3.2 Influência no anel corretor na resolução da reconstrução dos eventos

Os resultados acima apresentados caracterizam e demonstram a importância do anel corretor na óptica do telescópio. Porém, o telescópio do Observatório Auger não se diferencia pela sua qualidade óptica mas pela capacidade de detectar e permitir a reconstrução de chuviros atmosféricos extensos.

Por isso, realizamos simulações de chuviros atmosféricos extensos com o intuito de determinar a importância do anel corretor na reconstrução da direção de chegada da partícula primária. Este trabalho foi realizado em colaboração com o Dr. Luís Prado Júnior e publicados para a Colaboração Auger na referência [37].

Simulamos o perfil longitudinal de 600 chuviros com o programa CORSIKA nas condições dadas pela tabela 3.2. O ângulo de incidência variava isotropicamente entre 0 e 60°.

O perfil longitudinal de partículas carregadas do CORSIKA foi utilizado no programa FDSim [29] para gerar a luz de fluorescência correspondente. Os fótons de fluorescência gerados no chuviros foram traçados dentro da óptica do telescópio e o programa FDTriggerSim, da Colaboração Auger, foi utilizado para simular o gatilho do detector.

O resultado final da cadeia de simulação gera dados com formato idêntico aos eventos reais detectados pelo telescópio, de maneira que podemos reconstruí-los utilizando os nossos programas de análise de dados reais. O programa oficial da colaboração, de nome FLORES, [30] foi utilizado para a reconstrução dos 600 eventos. Os eventos foram distribuídos uniformemente dentro de um círculo de 8 km de raio centrado a 15 km de distância ao longo do eixo do telescópio.

A simulação dos telescópios foi feita seguindo duas configurações que chamamos de **A** e **B**. A configuração **A** é a determinada pelo *Design Report* da Colaboração Auger que possui um diafragma com abertura de 1.1 m de

Energia (eV)	Simulados		Disparam Gatilho		Reconstruídos	
	A	B	A	B	A	B
10^{18}	200	200	94	84	85	72
10^{19}	200	200	109	107	101	101
10^{20}	200	200	109	109	109	109

Tabela 3.3: Número de eventos simulados que dispararam o gatilho do telescópio e que foram passíveis de reconstrução.

raio, inclui filtro UV, anel corretor, espelhos e câmara de fotomultiplicadoras posicionada no centro focal do espelho. A configuração **B** representa o mesmo sistema sem o anel corretor, ou seja, manteve-se a abertura de 1.1 m, o filtro UV e os espelhos como planejado no *Design Report*. No entanto, o anel corretor foi retirado e a câmara de fotomultiplicadoras foi movida em 2.5 cm na direção dos espelhos ao longo do eixo do telescópio. A nova posição da câmara foi determinada como sendo a que minimiza a dispersão da luz no telescópio sem o anel corretor no trabalho [38].

A tabela 3.3 mostra a evolução do número de eventos sobreviventes em cada passo do ramo de simulação e reconstrução. Os eventos que dispararam o “*trigger*” de segundo nível do telescópio são classificados como aqueles que dispararam o gatilho do detector.

Estes resultados mostram que para baixas energias (10^{18} eV), a configuração **B** (sem anel corretor) é menos sensível, pois menos chuveiros foram capazes de disparar o gatilho do telescópio do que na configuração **A**. Da mesma forma, o número de eventos que foram efetivamente reconstruídos é bastante menor para baixas energias na configuração sem anel corretor. Por outro lado, para energias acima de 10^{19} eV, nenhuma diferença é notada entre o número de eventos detectados e reconstruídos para as duas configurações.

Feita a análise de cada evento, é possível determinar qual a diferença angular entre a direção simulada e a reconstruída. A tabela 3.4 mostra a mediana do erro na reconstrução da direção de chegada da partícula primária em função da energia. Para maiores detalhes sobre a forma de determinação da resolução da reconstrução veja o Capítulo 5.

A comparação da resolução na reconstrução dos eventos para as configurações **A** e **B** mostra que a operação do telescópio com abertura 1.1 m sem o anel corretor é altamente desfavorável, pois piora muito a reconstrução da direção de chegada do chuveiro.

Energia (eV)	Mediana Dir. Chegada	
	A (com anel)	B (sem anel)
10^{18}	4.68°	5.26°
10^{19}	1.25°	2.24°
10^{20}	1.25°	1.97°

Tabela 3.4: Mediana no erro da reconstrução da direção de chegada da partícula primária em função da energia para as configurações **A** (com anel) e **B** (sem anel).

Capítulo 4

Simulação da Luz de Fluorescência

Simulações de Monte Carlo têm sido amplamente utilizadas pela comunidade internacional de raios cósmicos para otimizar os detectores em desenvolvimento e para encontrar métodos de reconstrução ¹. Um dos programas mais popular é o CORSIKA [26], que tem sido exaustivamente testado contra dados experimentais pelo seus desenvolvedores e usuários, como pode ser visto em [39]. O CORSIKA simula o desenvolvimento das partículas em um chuveiro com alto nível de sofisticação, incluindo transporte tridimensional de partículas, interações eletromagnéticas, decaimento de partículas instáveis, espalhamento múltiplo, deflexão no campo magnético terrestre e alguns modelos de interação hadrônica.

Em contraste com as simulações das partículas no chuveiro, a simulação da luz de fluorescência produzida pela passagem das partículas no ar tem sido feita com pouco detalhe. Cálculos feitos até então são baseados em comportamento médio de chuveiros dado por funções de Gaisser-Hillas [40] ou, no máximo, consideram uma distribuição lateral analítica do tipo NKG [41]. Aparentemente, o tratamento sem detalhes da luz de fluorescência tem se justificado pela falta de resolução óptica e eletrônica dos telescópios em operação. No entanto, esta justificativa não será válida para a nova geração de detectores de fluorescência em construção, em particular para o Observatório Auger.

¹Todas as simulações realizadas nesta tese foram feitas nos computadores do Departamento de Raios Cósmicos financiados pela FAPESP.

4.1 Motivação

A principal motivação deste trabalho é a existência de duas técnicas de detecção no Observatório Auger: tanques e telescópios de fluorescência. Apesar da existência deste Observatório, não existia até o momento nenhuma simulação de Monte Carlo que produzia ao mesmo tempo partículas no chão e fótons de fluorescência atingindo um conjunto de telescópios.

Com esse intuito desenvolvemos um método de simulação de luz de fluorescência, baseado no programa CORSIKA, totalmente tridimensional e com alto grau de detalhamento. Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o Sr. Henrique Barbosa e foi publicado para a Colaboração Auger na referência [42] e em [43]. A base do funcionamento deste método consiste em produzirmos a luz de fluorescência para cada uma das partículas simuladas no chuveiro.

Neste procedimento, ao contrário de antigas abordagens de simulação, outros fatores importantes, além da tridimensionalidade do chuveiro, podem ser abordados. Primeiramente, ressaltamos que, utilizando uma simulação de Monte Carlo, garantimos uma melhor descrição das flutuações estatísticas entre chuveiros com as mesmas condições iniciais, bem como uma total independência entre diferentes tipos de partículas primárias.

Flutuações entre partículas são levadas em consideração, já que todos os parâmetros físicos relevantes, tais como depósito de energia e caminho percorrido, são calculados individualmente para cada partícula.

O resultado final da simulação por nós desenvolvida oferece ao usuário a direção e o tempo de chegada de todos os fótons de fluorescência que atingem os telescópios. Com a informação de cada fóton, a simulação da óptica e eletrônica do telescópio pode ser feita com um detalhamento inédito.

Como será explicado adiante, a geração de fótons de fluorescência supõe a proporcionalidade entre fator de fluorescência e o depósito de energia sugerida por Kakimoto et al. em [4]. No entanto, esse resultado é considerado controverso e limitado por vários pesquisadores na comunidade internacional. Por isso, novas medidas do fator de fluorescência em função da energia da partícula indutora, temperatura, pressão e composição dos gases no ambiente, diferentes partículas etc, estão sendo realizadas, veja as referências [44, 45].

Portanto, tudo leva a crer que, dentro em breve, entenderemos melhor o processos de emissão de luz de fluorescência em função de diversas variáveis. Talvez a única maneira de aproveitar as novas informações sobre os processos

de emissão de fótons fluorescentes para melhor compreender os chuueiros atmosféricos extensos seja numa abordagem de simulação de Monte Carlo, como a desenvolvida por nós.

4.2 Descrição do Programa

A geração de luz de fluorescência em chuueiros atmosféricos extensos acontece devido à passagem de uma partícula carregada no ar. Medidas realizadas por Bunner [46], Kakimoto [4] e Nagano [47] relacionam o número de fótons emitidos por um elétron com a energia depositada por ele via processo de ionização, veja figura 4.1. Ou seja, o número médio de fótons (N_{em}) emitidos devido à passagem de um elétron e a energia depositada pelo elétron por ionização (dE/dx) são proporcionais: $N_{em} \propto \frac{dE}{dx}$.

Na atmosfera, as partículas do chuueiro excitam as moléculas de nitrogênio que ao desexcitarem emitem luz de fluorescência. Neste processo, as moléculas de oxigênio no ar funcionam como um absorvedor da energia de excitação adquirida pelos moléculas de nitrogênio e um inibidor da emissão de luz. Considerando-se as concentrações de nitrogênio e oxigênio em função da altitude, encontramos a conclusão expressa em [4] de que o número de fótons de fluorescência emitido por um elétron atravessando a atmosfera adotada como padrão estadunidense (*US Standard Atmosphere*) pode ser considerado aproximadamente constante, valendo cinco fótons por metro de caminho andado pela partícula, como pode ser visto na figura 4.2. Chamaremos esse número de fator de fluorescência (Fator Fluor.).

Neste mesmo artigo, encontramos a expressão do fator de fluorescência em função da quantidade de energia depositada pela partícula ($\frac{dE}{dx}$):

$$Fator\ Fluor. = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{1.4MeV}} \times \rho \left[\frac{A_1}{1 + \rho B_1 \sqrt{t}} + \frac{A_2}{1 + \rho B_2 \sqrt{t}} \right] \quad , \quad (4.1)$$

onde ρ é a densidade do ar, t é a temperatura do ar, $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{1.4MeV} = 1.658 \text{ Mev/g/cm}^2$ é o depósito de energia calculado em $E = 1.4 \text{ MeV}$ ² e A_1 , B_1 , A_2 e B_2 são constantes com valor $89 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$, $55 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$, $1.85 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{K}^{0.5}$ e $6.5 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{K}^{0.5}$, respectivamente. Como dito acima, este resultado está atualmente sendo verificado por várias colaborações.

²Número conseguido na referência [48].

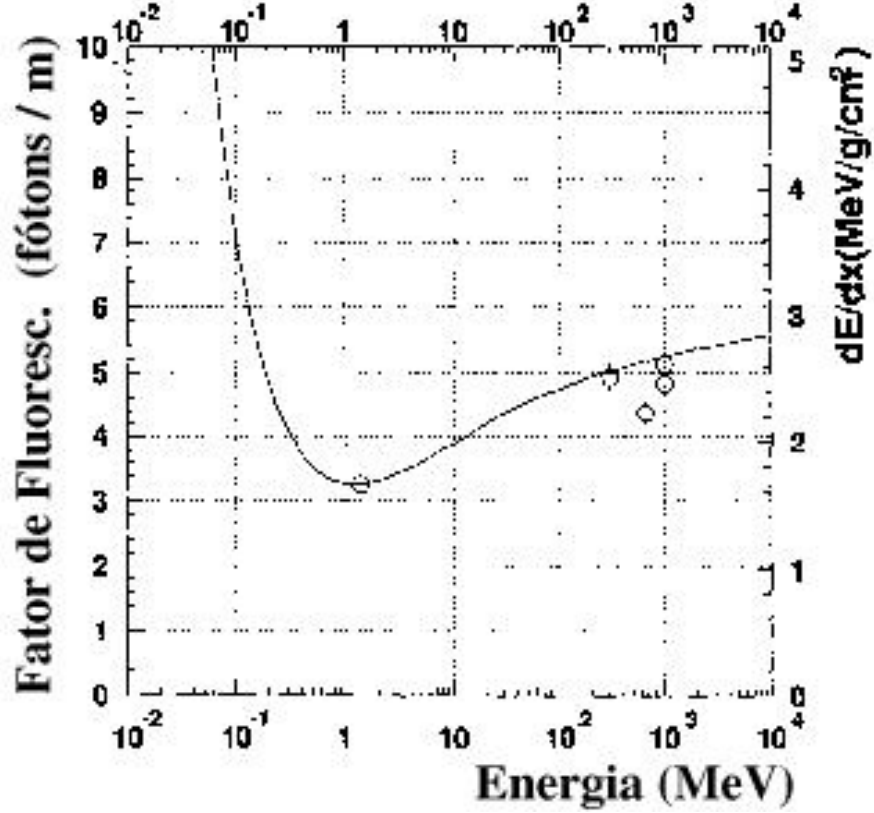


Figura 4.1: Medidas realizadas por Kakimoto et al. [4] que relacionam o depósito de energia de elétrons com o fator de fluorescência.

A simulação de Monte Carlo padrão oferece a posição $(\vec{x}_i, \vec{x}_f)$ e energia (E_i, E_f) de criação e “morte” de todas as partículas no chuveiro. De posse desses dados para cada uma das partículas no chuveiro, podemos calcular a temperatura e pressão atmosférica para um ponto médio do caminho da partícula e a perda de energia $(dE = E_f - E_i)$ desta partícula ao percorrer o caminho $dx = |\vec{x}_f - \vec{x}_i|$. Desta forma, o fator de fluorescência para cada partícula pode ser determinado pela equação 4.1 e, conseqüentemente, o número de fótons emitidos por cada partícula (N_{em}) pode ser expresso por $N_{em} = \text{Fator Fluor.} \times dx$.

No entanto, como a emissão de luz fluorescente é isotrópica, somente uma pequena parte dos fótons são emitidos na direção dos telescópios. Uma vez

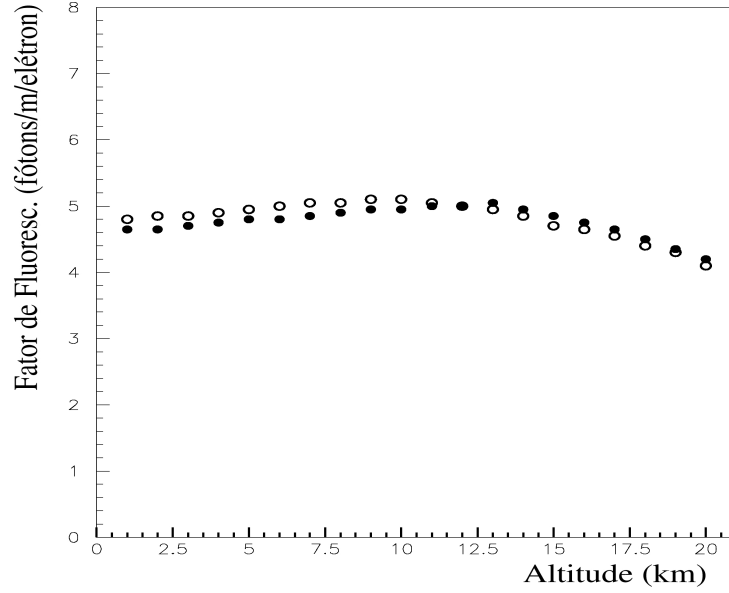


Figura 4.2: Fator de fluorescência no ar em função da altitude para a atmosfera padrão estadunidense. Este resultado foi determinado em [4].

definidos pelo usuário a posição $(X_{tel}, Y_{tel}, Z_{tel})$ e raio (R_{tel}) dos telescópios a serem considerados na simulação, podemos determinar o número de fótons incidindo em cada telescópio (N_{inc}) como sendo:

$$N_{inc} = N_{em} \times \frac{d\Omega}{4\pi} \quad , \quad (4.2)$$

onde $d\Omega$ é o ângulo sólido delimitado por cada telescópio.

4.2.1 Algoritmo de diluição

Algoritmos de diluição foram introduzidos por M. Hillas em [49] e desde então vêm sendo utilizados em programas de simulação para reduzir a números praticáveis o tempo de execução de chuviros iniciados por partículas com energia acima de 10^{15} eV. Mais recentemente, o conceito de diluição ótima foi introduzido por M. Kobal em [50].

Como explicado naqueles dois artigos, o algoritmo funciona distribuindo a energia de toda partícula que esteja abaixo de um limite determinado pelo

usuário entre outras partículas do chuveiro, proporcionando assim uma diminuição do número de partículas que devem ser seguidas detalhadamente.

Este é o caso, por exemplo, quando duas partículas são geradas com energias (E_1 e E_2) abaixo da energia de diluição (E_{dil}). Uma delas será descartada e a outra receberá um peso (P). Supondo que a partícula com energia E_2 tenha sido descartada, a partícula com energia E_1 receberá um peso igual a $P = \frac{E_1+E_2}{E_1}$, conservando dessa forma a energia total no chuveiro. Este fator “*peso*” passa a ser uma característica da partícula.

A atribuição de um peso a cada partícula gera sérios problemas na interpretação dos dados simulados e na sua comparação com eventos reais. Ainda não está suficientemente claro como deve ser tratada uma partícula com um peso P ao penetrar em um detector como os tanques de água do Observatório Auger. Técnicas de “desdiluição” vêm sendo testadas mas não existe um estudo definitivo sobre sua eficiência.

Ao emitir um fóton gerado pela passagem de uma partícula com peso P temos o impulso de atribuir esse mesmo peso ao fóton, seguindo, de certa forma, o mesmo raciocínio do mecanismo de simulação diluída para partículas. Porém, este procedimento também levaria a problemas fatais tais como no caso das partículas no chuveiro. O peso atribuído a essas partículas pode tipicamente chegar a 10^7 , veja a figura 4.3. Um fóton com peso 10^7 chegando em uma fotomultiplicadora do telescópio de fluorescência saturaria sozinho o limiar de detecção do telescópio.

Para resolver esse problema incluímos o peso da partícula no cálculo do número médio de fótons produzidos, de forma que uma partícula com peso P emite, em média, P vezes mais fótons, ao invés de emitir um único fóton com peso P . Dessa maneira, evitamos a necessidade de aplicação de métodos de “desdiluição”.

Finalmente, de acordo com a física dos processos de emissão via excitação atômica, sabemos que o número de fótons emitidos, na verdade, segue uma distribuição de Poisson. Portanto, o número de fótons emitidos por uma partícula e detectados por um telescópio (N_{final}) é sorteado de acordo com uma distribuição Poissoniana com média N , mostrado pela figura 4.4 e determinado pela equação abaixo:

$$N = Fator\ Fluor. \times dx \times \frac{d\Omega}{4\pi} \times P \quad , \quad (4.3)$$

que pode ser explicitamente escrito como função apenas do depósito de energia (dE), da temperatura t , da densidade (ρ) em kg/m^3 , do ângulo de

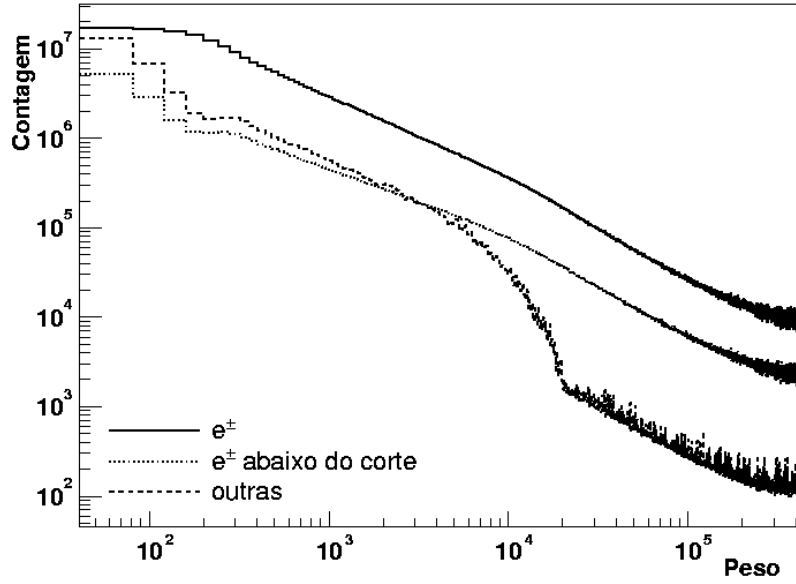


Figura 4.3: Média do peso das partículas em 10 chuveiros iniciados por prótons com energia 10^{19} eV, inclinação 45° e fator de diluição 10^{-6} .

visão ($d\Omega$) do telescópio e do peso (P), da seguinte forma:

$$N = \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{1.4MeV}} \times \rho \left[\frac{A_1}{1 + \rho B_1 \sqrt{t}} + \frac{A_2}{1 + \rho B_2 \sqrt{t}} \right] \times \frac{d\Omega}{4\pi} \times P \quad . \quad (4.4)$$

Uma vez determinado o número de fótons emitidos devido à passagem da partícula, sua trajetória é dividida em N_{final} intervalos e um fóton é emitido do centro de cada intervalo. O ponto de emissão é o centro do intervalo e a direção é sorteada dentro do ângulo sólido delimitado por um dos telescópios. Desta maneira, podemos calcular a intersecção da trajetória do fóton com a esfera que define um detector. Se tal intersecção existe, o ponto de emissão, a direção de propagação, o tempo de chegada e o comprimento de onda dos fótons que atingiram o telescópio são armazenados em um arquivo de saída. O comprimento de onda associado ao fóton é sorteado de acordo com o espectro de fluorescência determinado em [46].

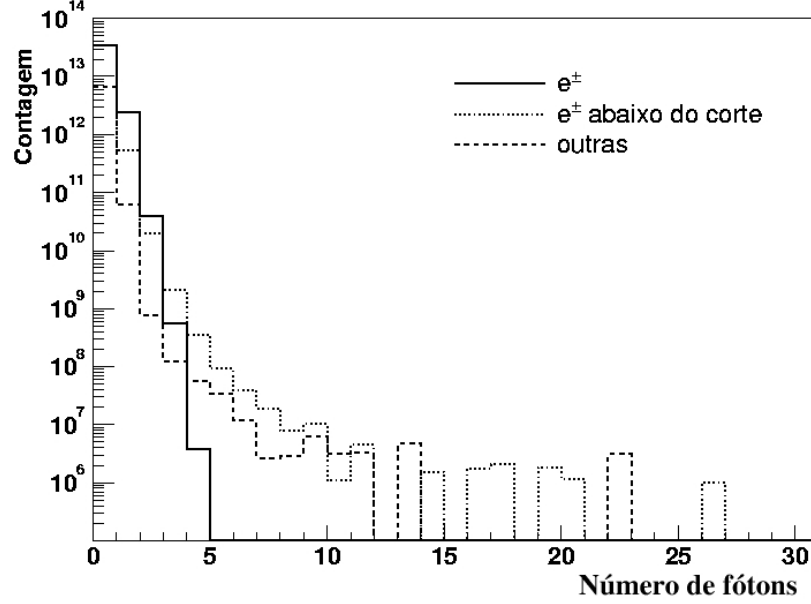


Figura 4.4: Número médio de fótons emitidos por uma única partícula na direção do telescópio com diafragma de 1.1 m de raio posicionado a 15 km do eixo do chuva. Foram simulados 10 chuveiros iniciados por prótons com energia 10^{19} eV, inclinação 45° e fator de diluição 10^{-6}

4.2.2 Partículas com energia abaixo do corte

Partículas abaixo de um valor de energia E_{corte} determinado pelo usuário são descartadas pelo programa de simulação por motivos históricos. O CORSIKA foi desenvolvido pela colaboração do experimento KASCADE [51], que é um detector das partículas que atingem o chão, composto por cintiladores plásticos e calorímetros. Toda técnica de detecção possui limiares de sensibilidade. Os tanques do Observatório Auger, por exemplo, não são sensíveis a elétrons com energia abaixo de aproximadamente 250 keV e múons com energia abaixo de 73 MeV, ou seja, as partículas com energia abaixo destes valores não produzem nenhum sinal nos detectores.

Devido às limitações das técnicas experimentais, os autores do CORSIKA impuseram um limite mínimo de energia, que pode ser ajustado pelo usuário, para que as partículas geradas no chuva fossem seguidas. Partículas criadas com energia abaixo deste valor (E_{corte}) são imediatamente descartadas

pela simulação.

Sobretudo, como o número de partículas em um chuva cresce rapidamente, já que a energia da partícula primária vai sendo dividida em inúmeras partículas com energia menor, seria impraticável seguir todas as partículas até um limite inferior menor que aproximadamente dezenas de keV.

Porém, a contribuição esperada destas partículas na produção de luz de fluorescência é significativa, já que elas são numerosas no chuva e principalmente porque se acredita que o número de fótons produzidos por uma partícula seja proporcional ao depósito de energia por caminho andado (dE/dx) da mesma. Para partículas com energia abaixo do mínimo de ionização (para elétrons $E_{min-ion} = 1.4$ MeV), o depósito de energia por caminho percorrido cresce abruptamente com a energia decrescendo, conforme figura 4.1, de forma que o número de fótons produzidos por caminho percorrido por um elétron com energia de 50 keV é muito maior do que para um elétron com energia de 1.4 MeV.

Em um trabalho feito por Song et al. [52], baseado no depósito de energia na atmosfera, estimou-se em aproximadamente 10% a contribuição das partículas com energia abaixo do corte para o cômputo total de fótons de fluorescência produzidos em um chuva. No trabalho por eles realizado, o limiar de energia ajustado nas simulações foi de 100 keV para elétrons e múons.

Basicamente, ao produzirmos fótons de fluorescência para as partículas abaixo do corte, temos que atribuir a elas um depósito de energia (dE).

Como primeira abordagem, calculamos a taxa de depósito de energia (dE/dx) em função da energia da partícula usando a teoria de Bethe-Bloch (veja [53]), supondo que toda a energia da partícula é depositada na atmosfera em processos de ionização.

Toda vez que um elétron com energia $E_{el} < E_{corte}$ no ponto $\vec{R}_i$ é descartado pelo CORSIKA, nós o transferimos para uma subrotina e atribuímos a ele um dE . Para elétrons acima do corte, o código padrão do CORSIKA já nos oferece o dE/dx para cada elétron, pois esse é um cálculo primordial no processo de propagação da partícula. Ao implementarmos uma nova subrotina para calcular o dE/dx para partículas de energia abaixo do corte, nós nos defrontamos com uma incongruência: o cálculo do CORSIKA não concordava com aqueles da nossa nova subrotina. Como pode ser visto no primeiro gráfico da figura 4.5, para baixas energias o valor do dE/dx calculado pelo CORSIKA apresentava um platô. O gráfico mostra uma saturação com a diminuição da energia e, para valores próximos a 50 keV, a curva

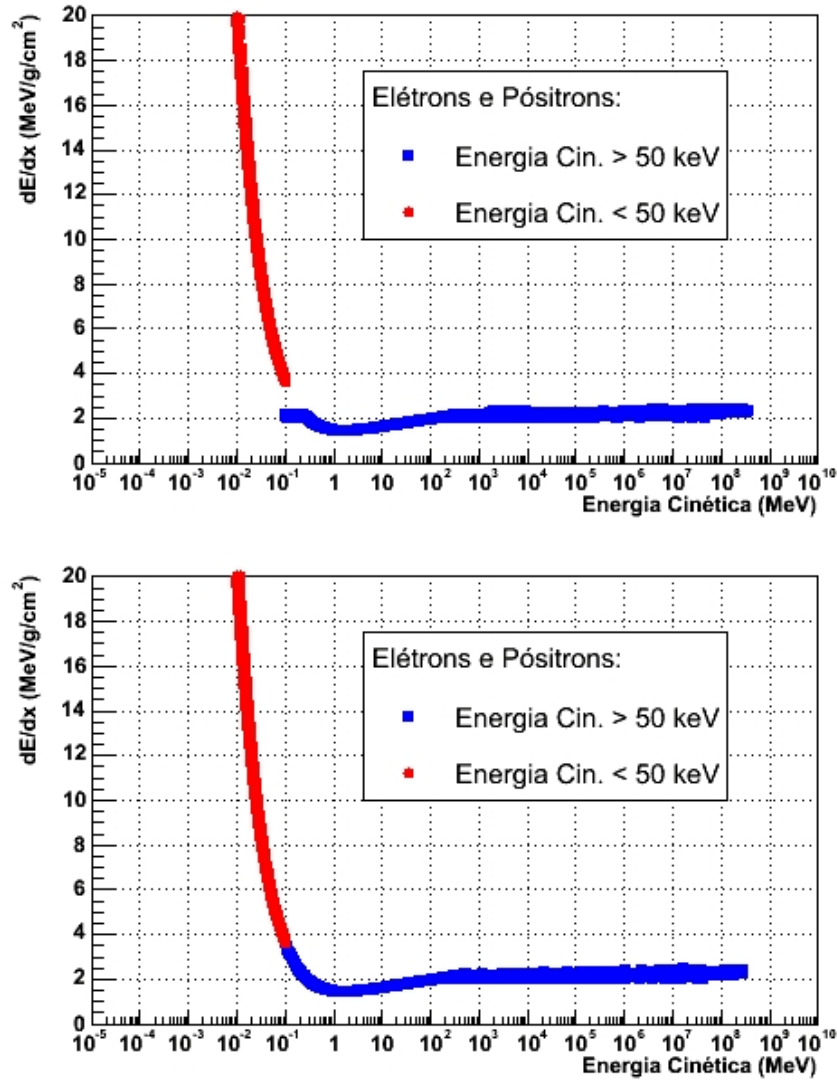


Figura 4.5: Depósito de energia para elétrons em função da energia cinética. Os pontos azuis foram calculados pelo código padrão do CORSIKA, enquanto que os pontos vermelhos foram calculados pelas novas subrotinas implementadas. Este chuva foi rodado com corte de energia igual a 50 keV. O primeiro gráfico mostra o erro no cálculo do dE/dx que havia no código padrão e o segundo gráfico mostra o mesmo cálculo após feita a correção.

de dE/dx não se mostrava contínua com o comportamento esperado para energias abaixo de 50 keV. Notificamos esta descoberta aos autores do CORSIKA, que reconheceram um erro na determinação do dE/dx para elétrons. Eles estavam continuando a aplicação da correção de Sternheimer, devida ao efeito da densidade, para baixas energias, enquanto que, na verdade, esse fenômeno só é significativo para energias acima de 100 MeV. Corrigido esse problema no código oficial do CORSIKA, o dE/dx calculado passou a concordar com nossas contas, como pode ser visto no segundo gráfico da figura 4.5, que mostra a continuidade do comportamento acima e abaixo de 50 keV.

Feita a correção no cálculo do depósito de energia, fomos capazes de implementar a produção de luz de fluorescência para as partículas de energia abaixo do corte supondo que a partícula perde toda a sua energia imediatamente por ionização. Uma vez considerado que toda a energia da partícula é depositada na atmosfera, ou seja, $dE = E_{el}$, podemos usar a equação 4.4 para calcular o número de fótons emitidos por cada partícula. A posição de emissão dos fótons é o ponto $\vec{R}_i$ em que a partícula foi eliminada pelo corte.

Essas aproximações são bastante razoáveis, já que um elétron com energia 50 keV tem uma probabilidade desprezível de realizar qualquer tipo de interação no ar, exceto ionização, e percorre no máximo $4.92 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$.

4.2.3 Comparação com eventos reais

A melhor maneira de atestar o funcionamento de um programa de simulação é confrontá-lo com eventos reais medidos por algum detector. Em especial, podemos comparar nossas simulações com os dados do Observatório Auger de uma maneira bastante igualitária já que temos acesso aos dados brutos dos telescópios e possuímos uma simulação muito detalhada dos detectores.

Como primeira etapa de verificação, selecionamos dois eventos híbridos detectados pelo Observatório Auger, e reconstruímos seus parâmetros primários: energia, direção de chegada e ponto de impacto. Tomamos eventos híbridos para garantir melhor resolução na reconstrução. Os eventos selecionados estão descritos na tabela 4.1.

Simulamos os fótons de fluorescência para 10 eventos iniciados por prótons e 10 eventos iniciados por ferro com os valores dados pela tabela 4.1 para cada um dos eventos. A passagem dos fótons pelo telescópio foi simulada utilizando o programa FDSim.

A figura 4.6 mostra a comparação do perfil temporal dos dois eventos mencionados acima detectados pelos telescópios de Los Leones e o perfil temporal

Eventos Híbridos Seleccionados					
ID DS	Ang. Zen.	Ang. Azim.	$X_{Imp.}$ (m)	$Y_{Imp.}$ (m)	Atenuação
90173	26.3°	195.7°	2821	10781	12.7 km
170067	37.0°	137.2°	-255	11997	11.7 km

Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros reconstruídos para dois eventos híbridos seleccionados. ID DS é o número de identificação para os eventos nas convenções dos detectores de fluorescência e superfície, respectivamente. $X_{Imp.}$ e $Y_{Imp.}$ determinam o ponto de impacto medido a partir da posição do telescópio. A atenuação é o comprimento horizontal de atenuação medido no sítio do Observatório na noite em que os chuviros foram detectados. Esses valores também foram utilizados na simulação do eventos.

dos 20 chuviros por nós simulados. As curvas foram artificialmente deslocadas para que o tempo inicial coincidisse. Isto foi necessário pois o tempo de chegada dos fótons na simulação é arbitrariamente medido em relação a uma origem fictícia. Observando os gráficos vemos uma boa concordância entre os perfis temporais medidos e simulados. Porém, nota-se um pequeno atraso no tempo de chegada dos fótons simulados em relação aos dados medidos, o que pode ser atribuído à dificuldade de determinar o tempo inicial do pulso.

O procedimento de determinação do início do pulso consiste em uma varredura dos dados medidos procurando por um sinal acima da média. Este procedimento é bastante influenciado pela suavidade da curva. Note que na figura 4.6 as curvas para os eventos reais variam mais rápido que a dos eventos simulados. Isto aponta para uma deficiência na simulação da óptica do telescópio em particular dos coletores de luz adjacentes às fotomultiplicadoras que são refletores que dirigem um fóton que atingiria o intervalo entre dois fototubos para a região sensível dos mesmos. Aparentemente a má simulação deste componente pode explicar a pequena diferença na determinação do tempo inicial.

Da mesma forma, fizemos um teste nas nossas rotinas de geração de luz de fluorescência, simulando o famoso evento de 320 EeV detectado pelo experimento Fly's Eye. A detecção desse evento foi relatada em [5] juntamente com um estudo da sua reconstrução.

De acordo com as reconstruções da Colaboração Fly's Eye, o chuviro tinha inclinação de 43.9° e caiu a 13.6 km de distância do telescópio. Naquele

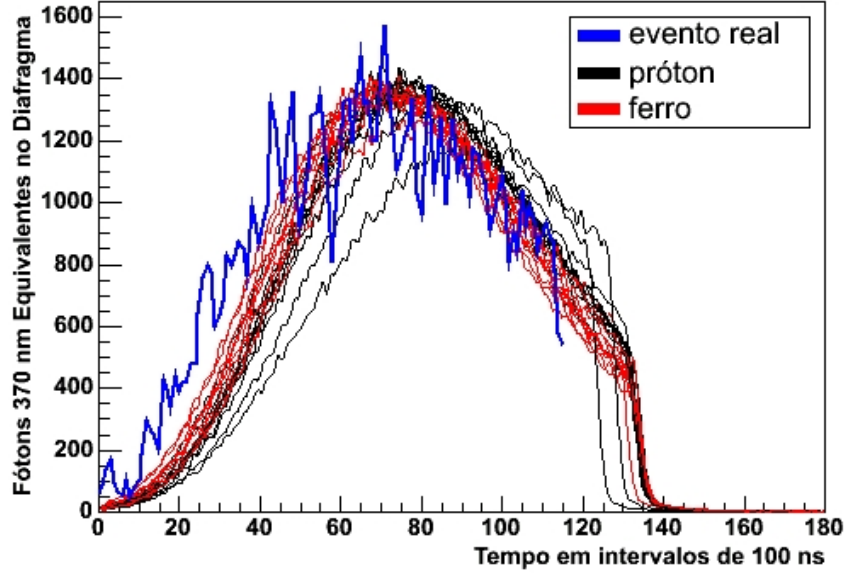
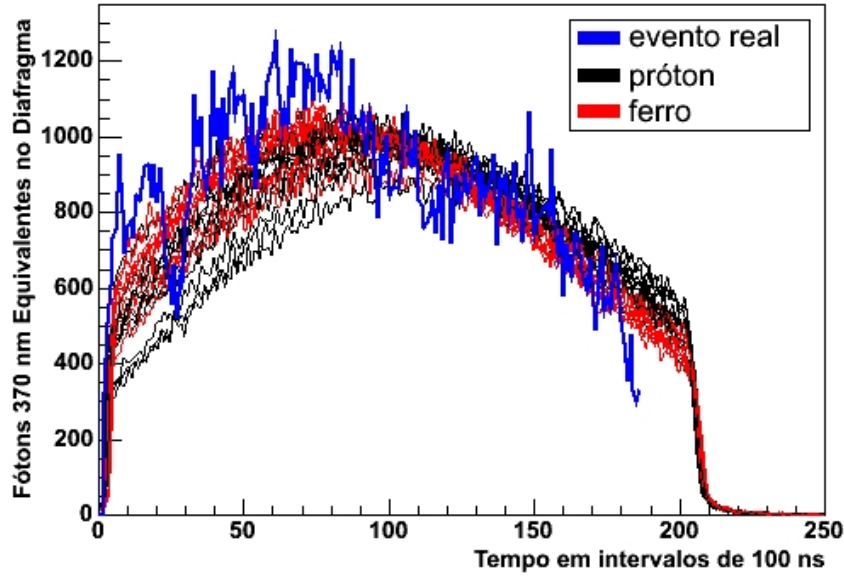


Figura 4.6: Perfis temporais de eventos simulados com parâmetros iguais aos eventos reais resumidos na tabela 4.1. Os gráficos correspondem respectivamente aos eventos na tabela 4.1

artigo também encontra-se publicado o perfil longitudinal das partículas carregadas reconstruído pelo grupo do Fly's Eye.

Numa tentativa de certificar nosso programa, simulamos a luz de fluorescência de cinco chuveiros iniciados por prótons e cinco iniciados por núcleos de ferro com parâmetros iniciais iguais aos reconstruídos para o evento de 320 EeV.

Propagamos os fótons gerados por nosso programa pela óptica e eletrônica dos telescópios do Observatório Auger utilizando o programa FDSim [29]. Reconstruímos o perfil longitudinal desses dez chuveiros a partir dos fótons de fluorescência detectados com o programa FLORES [30]. A figura 4.7 mostra a comparação do perfil longitudinal reconstruído para as nossas simulações e para o evento real. Acreditamos ser possível, analisando a figura 4.7, certificar que nenhum erro elementar foi feito no desenvolvimento do nosso programa de simulação, nem tampouco na reconstrução do evento pela Colaboração do Fly's Eye.

4.3 Resultados: 1D versus 3D

Uma possível aplicação do programa por nós desenvolvido é a determinação da capacidade de medirmos a distribuição lateral de um chuveiro com telescópios de fluorescência.

A capacidade de medir a distribuição lateral do chuveiro com telescópios de fluorescência foi sugerida por Sommers em [54] e baseia-se em cálculos analíticos do tamanho da imagem na câmara de fotomultiplicadoras em um intervalo de tempo de 100 ns.

Fótons que atingem simultaneamente o telescópio de fluorescência podem ter sido emitidos em posições diferentes do chuveiro. Em particular, Sommers mostrou que existe uma relação entre a dispersão do sinal na câmara e a diferença de caminho percorrido por fótons emitidos nos extremos opostos da extensão lateral do chuveiro.

Os dados essenciais para a realização deste estudo de forma definitiva são o tempo de chegada de fótons no telescópio, gerados a partir de uma simulação de Monte Carlo tridimensional que permita acoplamento a uma simulação de detectores. Todos esses requisitos são preenchidos pelo programa por nós desenvolvido e esses estudos estão sendo feitos no período em que esta tese está sendo escrita.

Por hora, apresentaremos aqui de forma qualitativa a diferença do sinal

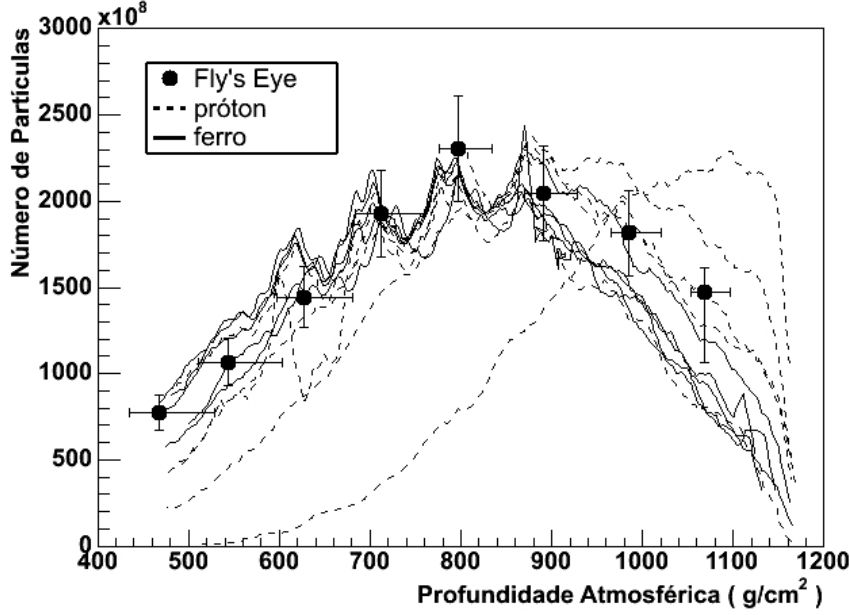


Figura 4.7: Perfil longitudinal do evento de 320 EeV detectado pelo experimento Fly's Eye. A figura mostra o perfil reconstruído pela colaboração do Fly's Eye e publicado em [5], em comparação com dez perfis reconstruídos a partir dos fótons gerados pela nossa simulação.

na câmara e quantificaremos a dispersão do sinal e o número de pixels disparados para chuviscos tratados unidimensionalmente e tridimensionalmente em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio. Os resultados são comparados com eventos reais detectados pelos telescópios protótipos do Auger.

Para tal, simulações tridimensionais da luz de fluorescência foram geradas utilizando o nosso programa e serão chamadas de 3D. O perfil longitudinal das partículas carregadas gerado pelo CORSIKA durante o desenvolvimento do chuvisco foi armazenado e utilizado pelo programa FDSim para gerar, em uma abordagem unidimensional, o número de fótons de fluorescência atingindo os mesmos telescópios e será rotulada por 1D. A simulação da óptica do telescópio foi feita pelo FDSim para ambos os casos.

A figura 4.8 mostra um exemplo dos pixels na câmara de fotomultiplicadoras que receberam algum sinal para um chuvisco simulado. Nota-se uma

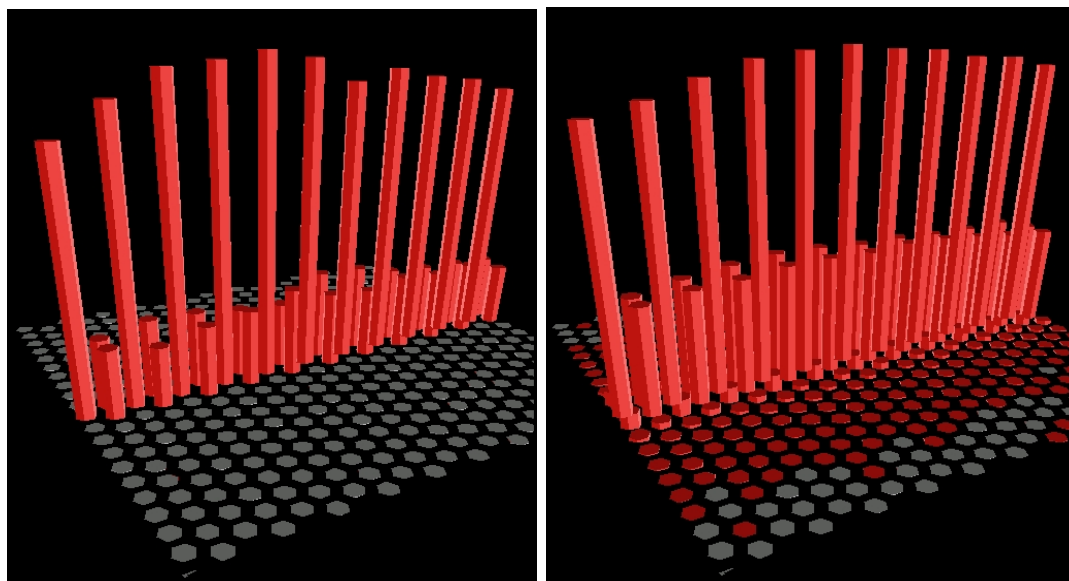


Figura 4.8: Imagem de um chuvaire na câmara de fotomultiplicadoras do Observatório Auger. A figura à esquerda é o resultado da simulação unidimensional enquanto que a da direita é o resultado da simulação tridimensional. Esse exemplo é para um chuvaire incidente a 4 km do telescópio.

grande faixa lateral ao eixo principal de pixels que recebe algum sinal para o caso 3D à direita. No caso 1D, à esquerda, apenas uma estreita faixa de pixels recebe todos os fótons produzidos pelo chuvaire.

Porém, não são todos os pixels com qualquer sinal que são lidos pela eletrônica do detector. O telescópio considera os pixels que possuem sinal acima da média mais 4σ como aqueles que dispararam o gatilho de primeiro nível da detecção. Para o evento ser armazenado ele ainda precisa sobreviver a um segundo critério de seleção denominado gatilho de segundo nível. O gatilho de segundo nível dispara se pelo menos quatro dos pixels que dispararam o gatilho de primeiro nível estiverem alinhados temporalmente, com a possibilidade de no máximo um pixel de intervalo entre eles.

Finalmente, se o evento disparou o gatilho de segundo nível, são armazenados todos os pixels vizinhos e segundos vizinhos dos pixels que dispararam o gatilho de primeiro nível.

O programa FDTriggerSim [24] simula a seleção de eventos e pixels implementada nos telescópios do Auger. A câmara de fotomultiplicadoras foi

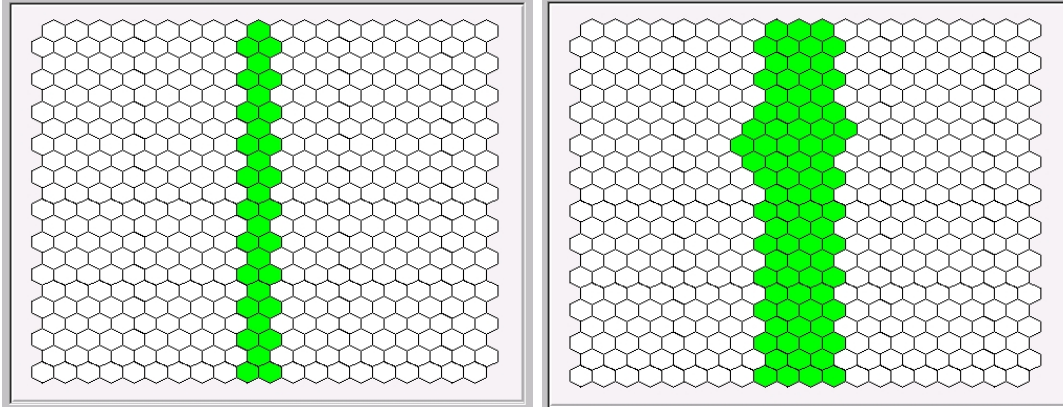


Figura 4.9: Imagem de um chuvaire na câmara de fotomultiplicadoras do Observatório Auger após aplicação dos critérios de seleção. A figura à esquerda é o resultado da simulação unidimensional enquanto que a da direita representa o resultado da simulação tridimensional. Esse exemplo é para um chuvaire incidente a 4 km do telescópio.

simulada pelo FDTriggerSim para os casos 1D e 3D da figura 4.8. A figura 4.9 mostra a imagem da câmara de fotomultiplicadoras após a seleção de pixels pelos gatilhos de primeiro e segundo níveis. Vê-se claramente uma faixa maior de pixels disparados no caso 3D quando comparado ao caso 1D, no entanto, como era de se esperar, a diferença é menor do que a expressa na figura 4.8.

Como comparação, mostramos na figura 4.10 dois eventos medidos pelos telescópios protótipos do Observatório Auger, onde fica evidente a capacidade de distinção da componente lateral do chuvaire. Os dois chuvaire foram reconstruídos pelo FLORES e tiveram energia associada de 2.2 EeV. O chuvaire representado na figura à esquerda caiu a 10.5 km do telescópio e o à direita a 4.5 km do telescópio.

4.3.1 Tridimensionalidade em função da distância

As imagens na figura 4.10 sugerem que o telescópio de fluorescência do Observatório Auger é capaz de detectar a distribuição lateral dos chuvaire mesmo a baixas energias. Porém, é de se esperar que essa capacidade de distinção seja função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio e da energia da partícula primária.

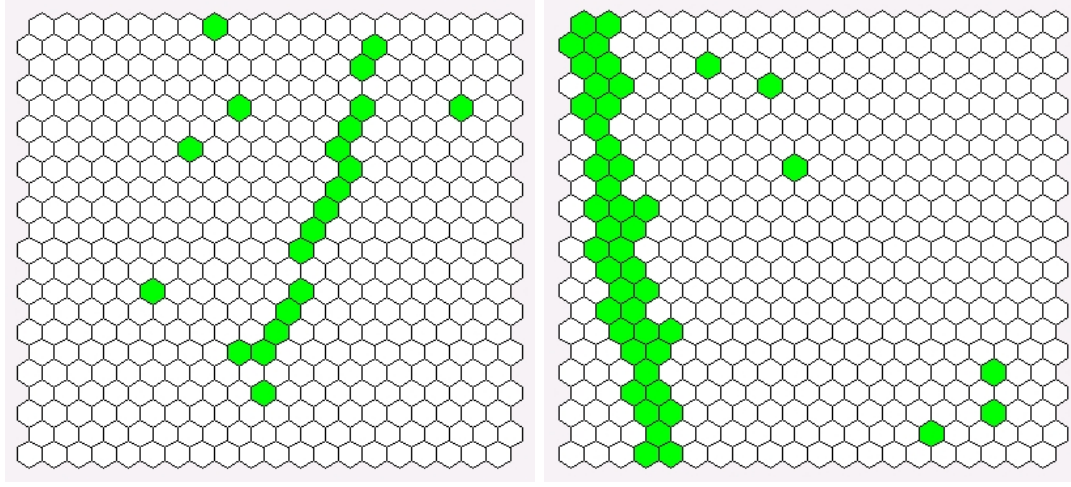


Figura 4.10: Imagem na câmara de fotomultiplicadoras de chuviros detectados pelos telescópios do Observatório Auger. Ambos os chuviros tiveram energia reconstruída de 2.2 EeV. O chuviro ilustrado à esquerda caiu a 10.5 km e o a direita a 4.5 km do telescópio.

Apesar desta tese não apresentar os resultados finais sobre um método de medir a distribuição lateral com telescópio de fluorescência, incluímos aqui o estudo da capacidade de medida da distribuição lateral em função da distância. Para tal, simulamos tridimensionalmente a luz de fluorescência de 100 chuviros verticais iniciados por prótons com energia 10^{19} eV e posicionamos 10 telescópios com abertura de 1.1 m a cada 2 quilômetros do eixo do chuviro. Utilizando o perfil longitudinal do CORSIKA, simulamos com o FDSim o equivalente unidimensional do mesmo chuviro. Os fótons registrados no diafragma foram simulados pela óptica e eletrônica do telescópio pelos programas FDSim e FDTriggerSim, respectivamente, como explicado acima.

Dois parâmetros foram escolhidos para determinação da capacidade de distinção entre chuviros simulados 1D e 3D: número de pixels que sobrevivem à seleção explicada acima e ângulo que maximiza a razão sinal/ruído.

O número de pixels que sobrevivem aos critérios de seleção é umas das maneiras de compararmos as duas simulações. Porém, ele nos oferece uma informação incompleta a respeito da dispersão do sinal na câmara, pois o sinal em cada pixel não é comparado.

Por outro lado, o ângulo (ζ_0) que maximiza a razão sinal/ruído é determi-

nado por uma varredura sobre a câmara de fotomultiplicadoras e representa uma medida quantitativa da distribuição do sinal entre os pixels disparados. O procedimento para medida do ângulo (ζ_0) inicia-se pela reconstrução do eixo principal do sinal que determina o plano entre o ponto de impacto e o telescópio. Em seguida, soma-se o sinal dos pixels que estão dentro de um círculo de raio ζ centrado no eixo principal do sinal ao longo de toda a câmara. A razão do sinal que está contido no raio ζ pelo que está fora dele é definida como razão sinal/ruído. O ângulo ζ_0 é aquele que maximiza a razão sinal/ruído na busca feita varrendo todos os possíveis valores de ζ .

A figura 4.12 mostra o número de pixels que dispararam o gatilho dos 10 telescópios posicionados a cada 2 km de distância do eixo do chuveiro. Na mesma figura estão colocados os pontos referentes à reconstrução de 332 eventos detectados pelos telescópios protótipo do Observatório Auger.

Os 332 eventos passaram pela seleção explicada na seção 2.3.1 e foram reconstruídos pelo programa FLORES e filtrados por um critério de seleção que exigiu:

- X_{max} dentro do campo de visão do telescópio;
- Erro estatístico na reconstrução do ponto de impacto menor que 1 km;
- Energia reconstruída entre 10^{18} e 5×10^{19} eV.

Dos 332 apenas 73 eventos sobreviveram a este critério de seleção. Os dois primeiros cortes são necessários apenas para garantir uma reconstrução razoável dos eventos, enquanto que o último só é necessário para validar a comparação com os eventos simulados a 10^{19} eV. Seria desejável estreitar os limites do corte em energia mais perto dos da simulação, porém isso não é possível sem reduzir significativamente o número de eventos que sobrevivem aos cortes. No entanto, a maioria dos 332 eventos detectados são de energias inferiores a 10^{19} eV, veja a figura 4.11, de forma que em comparação com a simulação 3D, os eventos detectados deveriam parecer um pouco mais estreitos.

Entretanto, mesmo com esse viés na energia é possível verificar que os chuveiros medidos pelo Auger seguem a curva da simulação 3D e se distanciam da simulação 1D para pequenas distâncias entre o ponto de impacto e o telescópio.

Analisando a figura 4.12 vemos que para distâncias maiores que 8 km as curvas das simulações 1D e 3D são indistinguíveis. O mesmo efeito é visto

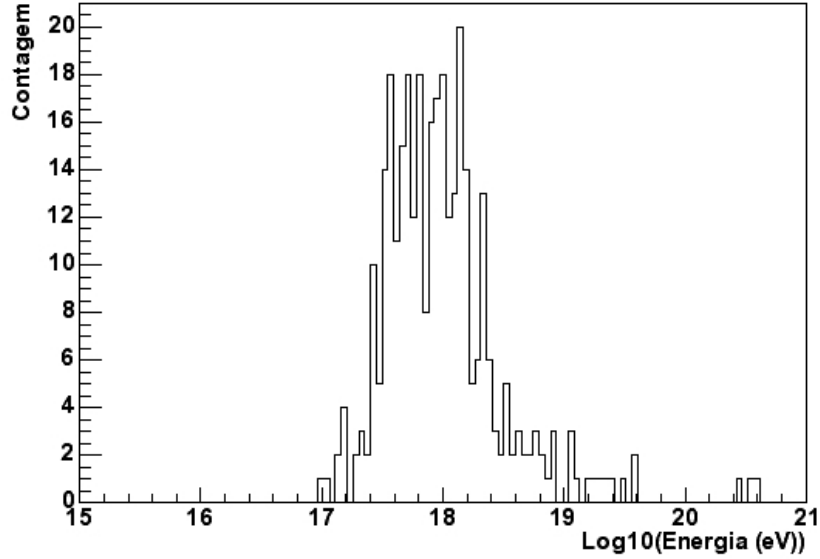


Figura 4.11: Distribuição da energia reconstruída pelo FLORES para os 332 eventos detectados pelos telescópios protótipos do Observatório Auger. Nenhum corte foi aplicado.

na figura 4.13, na qual mostramos o ângulo ζ_0 em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio para as simulações 1D, 3D e para os eventos reais detectados pelo Auger.

Note que, nesta figura, o ângulo ζ_0 aumenta para distâncias menores que 8 km mesmo na simulação 1D. Este efeito é devido à simulação da luz Čerenkov espalhada, que é mais intensa para menores distâncias.

Também é possível ver novamente nesta figura que os dados do Auger são melhor descritos pela simulação tridimensional implantada por nós no CORSIKA. Também é possível verificar que a distinção da componente lateral do chuveiro só é possível, para energia da partícula primária de 10^{19} eV, para chuveiros que incidirem a distâncias menores que 8 km do telescópio.

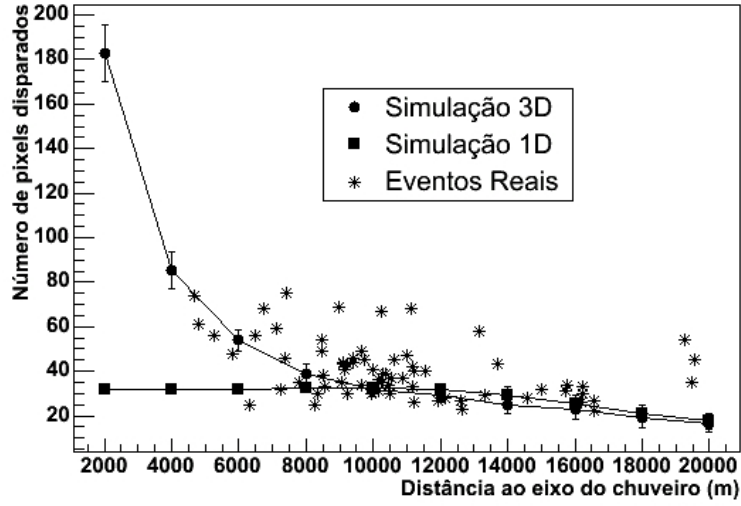


Figura 4.12: Número de pixels disparados em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio.

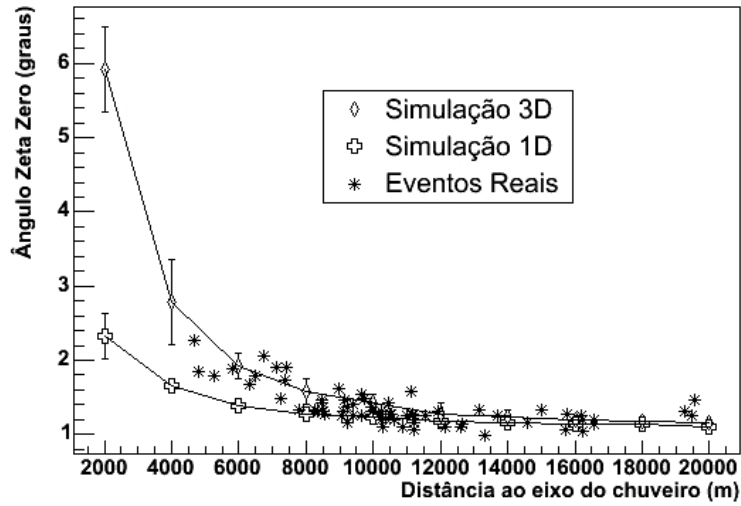


Figura 4.13: Ângulo ζ_0 que maximiza a razão sinal/ruído em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio.

Capítulo 5

Reconstrução de Eventos Híbridos do Observatório Auger

Neste capítulo mostraremos o desenvolvimento de um programa de reconstrução híbrida para a Colaboração Auger e reconstruções de eventos híbridos e só de fluorescência detectados pelos protótipos do Observatório Auger. Este trabalho foi realizado em colaboração com o Dr. Bruce Dawson da Universidade de Adelaide e foi publicado na Colaboração Auger na referência [55].

A motivação deste trabalho deve-se ao fato de que não existe no presente momento nenhum programa de reconstrução de eventos híbridos disponível para a Colaboração Auger. Também tivemos a intenção de reavaliar os erros estatísticos das técnicas de reconstrução híbrida quando comparadas com a técnica de fluorescência. Tal comparação foi feita no *Design Report* da Colaboração Auger com programas de simulação dos detectores que superestimavam a capacidade de medida dos equipamentos reais e por isso, julgamos ser necessário reproduzir aqueles resultados de posse de simulações muito mais precisas dos detectores de superfície e dos telescópios.

Por último, utilizamos nosso programa de reconstrução híbrida para produzir um estudo preliminar da taxa de elongação dos eventos detectados pelo protótipo. Este estudo está apresentado aqui como ilustração da ferramenta de trabalho por nós desenvolvida, já que a taxa de elongação produzida tem baixo significado estatístico.

5.1 Reconstrução de Eventos de Fluorescência

As técnicas de reconstrução de eventos detectados só pelos telescópios de fluorescência inicia-se por uma seleção de pixels que devem ser incluídos nos processos de reconstrução. A maioria das seleções limita-se a excluir pixels com sinal muito abaixo da média ou pixels muito longe do traço principal. Porém, o número de possíveis critérios de seleção é muito grande e eles podem chegar ao detalhamento de verificar a diferença temporal entre cada par de pixels e testar se esta é compatível com a velocidade aceitável para um chuvaire.

Uma vez selecionados os pixels que definitivamente são considerados pertencentes a um chuvaire, procede-se a reconstrução, encontrando, através do ajuste de uma reta, o caminho principal de pixels disparados na câmara de fotomultiplicadoras. A figura 5.1 mostra a reconstrução do eixo principal em um evento detectado por um telescópio em Los Leones. Como cada pixel corresponde a uma direção no espaço, o eixo principal representa o plano determinado pelo eixo do chuvaire e o telescópio. Chamaremos esse plano de PET (Plano Eixo Telescópio), que está ilustrado na figura 5.2 juntamente com outras variáveis que definem a geometria do chuvaire.

Note que para a reconstrução do PET só é necessário o sinal medido por cada pixel na câmara de fotomultiplicadoras.

Em seguida, procuramos dentro do PET o eixo que melhor ajusta o tempo de disparo de cada uma das fotomultiplicadoras. Para cada eixo tentativo podemos calcular o valor teórico do tempo em que cada pixel deverá disparar e compará-lo com o valor medido pelo detector. Durante o seu desenvolvimento, o chuvaire passa pelo arco (χ) visto pelo pixel (i) e o ativa. A equação que dá o tempo (t_i^{teo}) em que cada pixel dispara é:

$$t_i^{teo} = T_0 + \frac{R_p}{c} \tan \left(\frac{\chi_0 - \chi_i}{2} \right) \quad , \quad (5.1)$$

onde c é a velocidade da luz. As três variáveis T_0 , R_p e χ_0 definem a geometria do chuvaire como pode ser visto na figura 5.2. Estes parâmetros são utilizados por facilitar a descrição da geometria do chuvaire em relação ao telescópio e podem ser transformados para obter, por exemplo, o ponto de impacto e o ângulo zenital e azimutal da direção de chegada da partícula primária.

Usando a equação 5.1 pode-se fazer um ajuste em 3 variáveis (T_0 , R_p e χ_0) para determinar a direção de chegada do chuvaire. O ajuste é feito variando

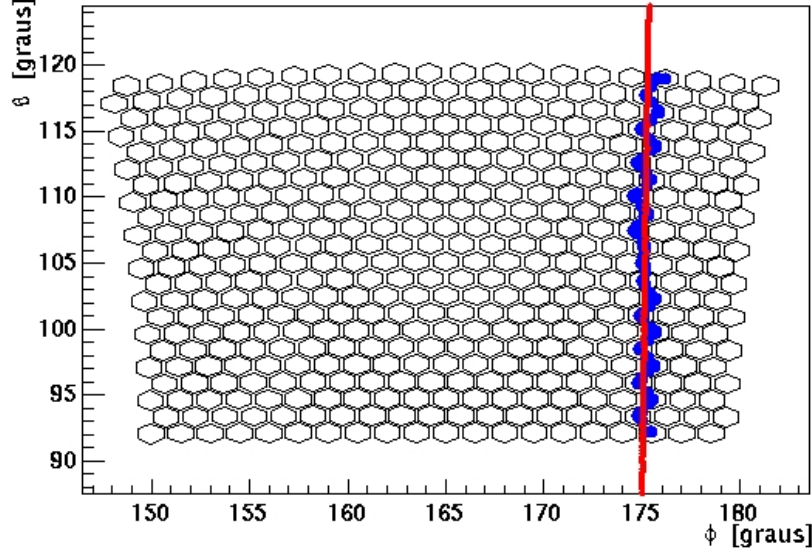


Figura 5.1: Imagem de um chuveiro na câmara de fotomultiplicadoras. A figura mostra os pixels disparados e a reconstrução do eixo principal que determina o PET. Os ângulos representam o campo de visão da baía 4 do telescópio de Los Leones.

$(T_0, R_p \text{ e } \chi_0)$ de forma a minimizar a função χ^2 abaixo:

$$\chi_{df}^2 = \sum_{i=0}^{N_{pmt}} \frac{(t_i^{\text{medido}} - t_i^{\text{teo}})^2}{\sigma_{df}^2} \times P_{df}^i, \quad (5.2)$$

onde σ_{df} é um erro associado à medida de tempo e P_{df}^i é um peso atribuído a cada pixel, que geralmente é igual ao sinal detectado por ele. N_{pmt} é o número de fotomultiplicadoras que disparam no evento e o índice df refere a Detector de Fluorescência.

Uma vez reconstruída a geometria do chuveiro, prossegue-se a determinação do perfil longitudinal utilizando o sinal detectado em cada pixel. De posse do perfil longitudinal de partículas no chuveiro estima-se a energia do chuveiro tal como pode ser visto em [52], já que aqui eu me atenho à reconstrução da geometria.

Usando esse método de análise reconstruímos os 955 eventos selecionados pelo Dr. Adrian Rovero e detectados pelo protótipo do Observatório Auger

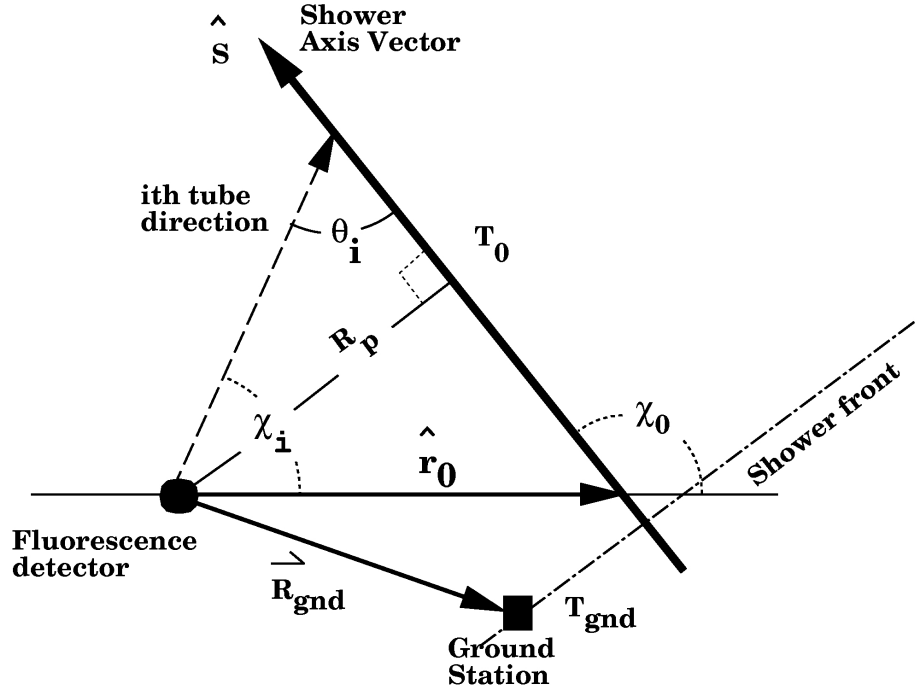


Figura 5.2: Desenho esquemático da geometria de um chuveiro visto pelo telescópio de fluorescência.

(veja seção 2.3.1 para explicação da seleção de eventos). Os gráficos 5.3 e 5.4 mostram as distribuições dos ângulos zenitais e azimutais reconstruídos de todos os chuveiros detectados pelo protótipo.

As figuras 5.3 e 5.4 mostram resultados bastante coerentes. A distribuição em ângulo zenital mostra um excesso de eventos para ângulos entre 20 e 45 graus, o que coincide com a inclinação de maior eficiência dos telescópios de fluorescência. Eventos mais inclinados percorrem um caminho mais longo na atmosfera, se desenvolvendo antes e sendo mais absorvidos, de forma que têm menor probabilidade de serem detectados. Por outro lado, chuveiros mais verticais têm um caminho pequeno de intersecção com o campo de visão do telescópio, o que também os torna menos prováveis de serem vistos.

Já a distribuição para ângulos azimutais mostra um excesso de eventos para ângulos entre 50 e 130 graus, o que coincide com o campo de visão dos dois telescópios em operação. O olho de Los Leones esteve medindo com dois telescópios montados nas baías 4 e 5. A baía 4 tem campo de visão em

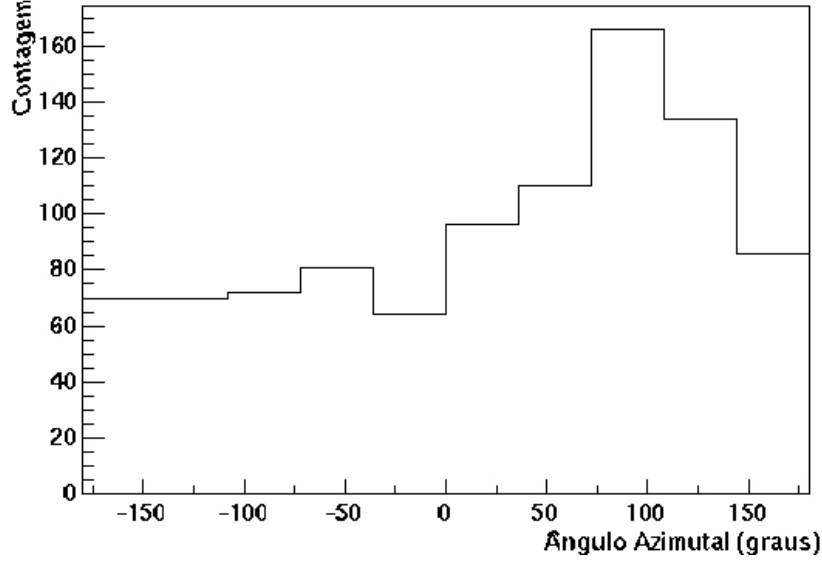


Figura 5.3: Distribuição dos ângulos azimutais dos chuveis detectados pelo protótipo.

azimute que vai de 60 a 90 graus enquanto a baía 5 vê a região compreendida entre 90 e 120 graus.

5.2 Reconstrução Híbrida

O Observatório Auger possui dois instrumentos de medida: telescópios de fluorescência e tanques Čerenkov. Chuveiros vistos pelos dois instrumentos concomitantemente permitirão uma resolução inédita na reconstrução. Esses eventos devem ser reconstruídos de forma híbrida, ou seja, utilizando os dados de ambos os detectores.

Seguindo o esquema acima, para cada conjunto tentativo de variáveis (T_0 , R_p e χ_0), determina-se a geometria do chuveiro e permite-se, através da equação 5.1, calcular o tempo de disparo teórico para cada pixel. Da mesma forma, supondo que a frente do chuveiro pode ser descrita por um plano propagando-se com velocidade da luz, pode-se, utilizando a equação 5.3, determinar o tempo teórico em que cada tanque (i) deverá ter sinal.

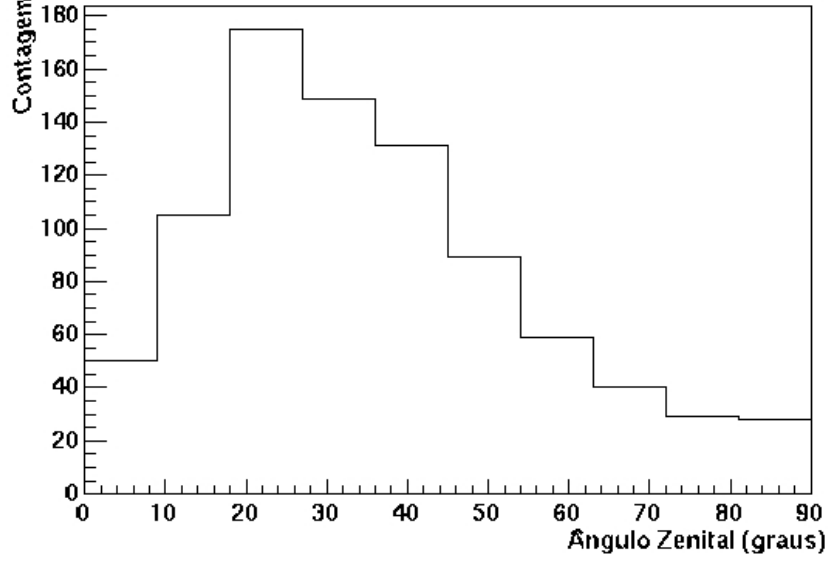


Figura 5.4: Distribuição dos ângulos zenitais dos chuveis detectados pelo protótipo.

$$\vec{n} \cdot \vec{r}_i = ct_i^{teo} - K \quad , \quad (5.3)$$

onde as componentes de $\vec{n}$ são os cossenos diretores do vetor que dá o eixo do chuveiro e podem ser calculadas em função de $(T_0, R_p$ e $\chi_0)$. t_i^{teo} é o tempo calculado para cada tanque, $\vec{r}$ é a posição do tanque (i) e K é a distância do plano do chuveiro à origem de coordenadas em $t = 0$.

Ou seja, para cada conjunto de $(T_0, R_p$ e $\chi_0)$ pode-se calcular o tempo t_i^{teo} em que cada tanque (i) deverá ter sinal e compará-lo com o tempo real medido, definindo assim uma segunda função χ^2 dada por:

$$\chi_{ds}^2 = \sum_{i=0}^{N_{ta}} \frac{(t_i^{medido} - t_i^{teo})^2}{\sigma_{ds}^2} \times P_{ds}^i \quad . \quad (5.4)$$

O índice ds refere-se a Detector de Superfície. P_{ds}^i é um peso associado a cada tanque que normalmente é igual ao sinal medido pelo tanque em VEM. σ_{ds} é um erro associado à medida do tempo pelo tanque e N_{ta} é o número de tanques que disparam no evento.

O ajuste híbrido da direção de chegada é feito minimizando a função χ^2 combinada:

$$\chi^2 = \frac{\chi_{ds}^2}{\sum P_{ds}} + \frac{\chi_{df}^2}{\sum P_{df}} \quad . \quad (5.5)$$

Seguindo este esquema básico de reconstrução, implementamos um programa de reconstrução híbrida dentro do FLORES. Utilizamos o protocolo de acesso de dados e a reconstrução do PET já disponível no FLORES e acrescentamos o procedimento de reconstrução híbrida da geometria.

Este novo programa tem como primeira tarefa acessar os dados brutos do telescópio de fluorescência e dos tanques e a partir do sinal e do tempo de disparo de cada detector, reconstruir, seguindo a receita acima explicada, a direção de chegada da partícula primária.

A construção de tal código exigiu um conhecimento computacional e um trabalho longo e árduo de entendimento das estruturas de dados e maneiras de intercambiá-las. A dificuldade maior consistiu em fazer as saídas de um módulo serem lidas como entrada do próximo módulo na cadeia da reconstrução. No entanto, chegamos a uma versão final do programa cuja verificação será mostrada nas seções seguintes.

5.2.1 Detalhes da reconstrução híbrida

Durante o processo de elaboração do programa de reconstrução várias tentativas de configurações foram feitas e nos limitamos a relatar aqui o programa na sua forma final. Em particular, três parâmetros mereceram maior atenção: incerteza temporal na medida dos telescópios, incerteza temporal na medida dos tanques e frente curva do chuveiro.

Esses três parâmetros são objeto de estudo da Colaboração Auger e coubermos apenas utilizar o melhor resultado disponível para a versão final do nosso programa. Na seção 5.4, a influência de cada variável será testada em detalhes.

Descrevemos aqui os valores padrão adotados no nosso programa. Para a imprecisão da medida temporal nos tanques utilizamos um estudo realizado pela Colaboração Auger e publicado em [56]. Neste artigo é feito um estudo da incerteza na determinação do tempo de chegada a partir de reconstruções feitas utilizando apenas os dados dos tanques e determinou-se:

$$\sigma_{ds} = 22 + 0.03 \times r \quad , \quad (5.6)$$

onde r é a distância do tanque ao eixo do chuveiro em metros para que σ_{ds} seja em nanosegundos.

Por sua vez, a imprecisão da medida temporal nas fotomultiplicadoras dos telescópios de fluorescência foi sugerida através de um estudo semelhante feito pelo Dr. Stefano Argirò e pode ser descrito pelo algoritmo esquematizado abaixo:

```

if (duração  $\leq$  200 ns)  $\rightarrow \sigma_{df} = 200$  ns
if (200 ns  $<$  duração  $<$  500 ns)  $\rightarrow \sigma_{df} = 100$  ns
if (duração  $\geq$  500 ns)  $\rightarrow \sigma_{df} = 50$  ns
if (sinal / duração / ruído  $>$  5)  $\rightarrow \sigma_{df} = \sigma_{df} \times 0.5$ 
if (sinal / duração / ruído  $<$  2)  $\rightarrow \sigma_{df} = \sigma_{df} \times 2$ 

```

onde duração refere-se à largura temporal do sinal em cada pixel. Sinal é a soma do sinal neste intervalo temporal e o ruído é determinado analisando o traço temporal num intervalo anterior ao começo do sinal.

Este esquema de determinação da incerteza temporal pretende privilegiar pulsos largos, pouco ruidosos e com sinal acima da média e se mostrou eficaz por resultar numa distribuição de χ^2 com média próxima de 1 na reconstrução dos 332 (veja seção 2.3.1 para explicação da seleção de eventos) eventos detectados pelos telescópios protótipos do Observatório Auger, como pode ser visto na figura 5.5.

O terceiro detalhe incorporado na reconstrução foi a não-planicidade da frente do chuveiro. Existem vários estudos analíticos, de simulação e medidos para determinar qual é o atraso das partículas na frente de um chuveiro em relação à frente plana que se propaga com velocidade da luz. Entre as opções disponíveis escolhemos um estudo realizado pelo Dr. Pierre Birloir da Colaboração Auger e publicado em [28].

Esta análise estabelece que o atraso com que um tanque, distante r metros do eixo do chuveiro, dispara em relação à frente plana hipotética do chuveiro pode ser dado pela equação:

$$Atraso = 7 \times 10^{-5} \cos \theta \frac{r^2}{c} \quad , \quad (5.7)$$

onde c é a velocidade da luz em m/ns, r é a distância do tanque ao eixo do chuveiro em metros, θ é o ângulo zenital do eixo do chuveiro e o atraso é dado em nanosegundos.

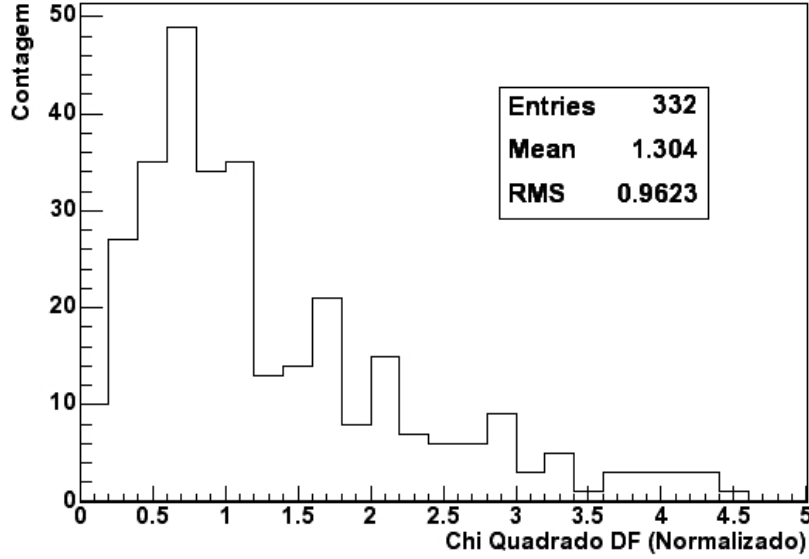


Figura 5.5: Distribuição dos χ^2 por grau de liberdade ajustados na reconstrução dos 332 eventos detectados pelo protótipo do Observatório Auger.

5.3 Simulação Híbrida

Talvez a única maneira confiável de se testar um método de reconstrução seja utilizando simulações de Monte Carlo. Infelizmente, devido ao desenvolvimento simultâneo dos dois trabalhos, não foi possível utilizar a simulação híbrida por nós desenvolvida e explicada no Capítulo 4. No entanto, para o intuito desse estudo, que é a verificação do programa de reconstrução híbrida e a determinação da resolução da reconstrução, simulações mais simples da luz de fluorescência são suficientemente boas.

Dessa forma, utilizamos o programa CORSIKA para gerar o desenvolvimento do chuveiro na atmosfera. Armazenamos como saída do CORSIKA o perfil longitudinal e as partículas que atingiram o nível de detecção ajustado para 1400 m acima do nível do mar. Utilizando o perfil longitudinal como entrada do FDSim, fomos capaz de gerar o sinal na câmara de fotomultiplicadoras do telescópio para em seguida aplicar as condições de disparo implementadas no programa FDTriggerSim. A saída do FDTriggerSim tem o mesmo formato dos dados reais medidos pelo Observatório, de forma que

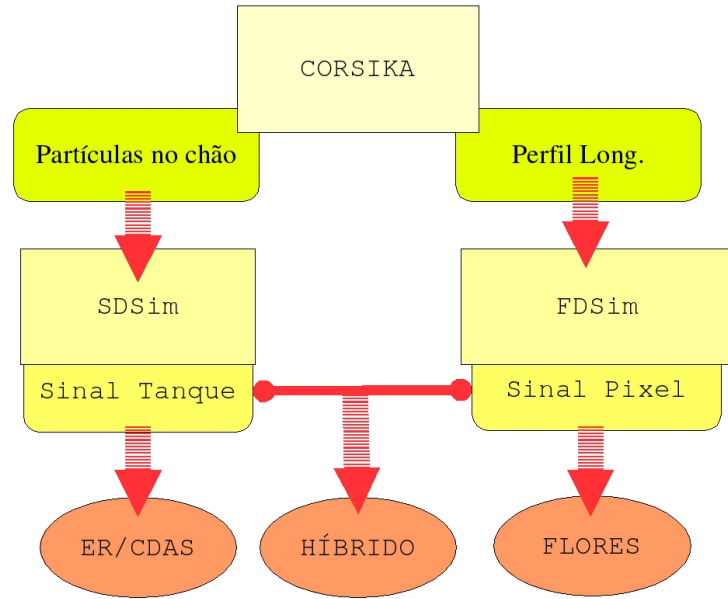


Figura 5.6: Esquema da cadeia de simulação e reconstrução de eventos híbridos utilizando os programas da colaboração Auger.

podemos analisá-los com os mesmos programas.

As partículas produzidas pelo CORSIKA no nível de detecção também foram simuladas através dos tanques do Observatório Auger pelo programa SDSim. A saída final do SDSim também imita os dados reais do Observatório que podem ser automaticamente lidos pelo programa híbrido por nós desenvolvido.

A cadeia de simulação e reconstrução está representada no esquema 5.6. A configuração final da cadeia utilizada neste estudo foi resultado de muito trabalho realizado por nós para casar todos os parâmetros dos ramos de simulações de fluorescência e dos tanques para que o resultado fosse um único chuveiro com as mesmas convenções de tempo, distância e posicionamento dos detectores.

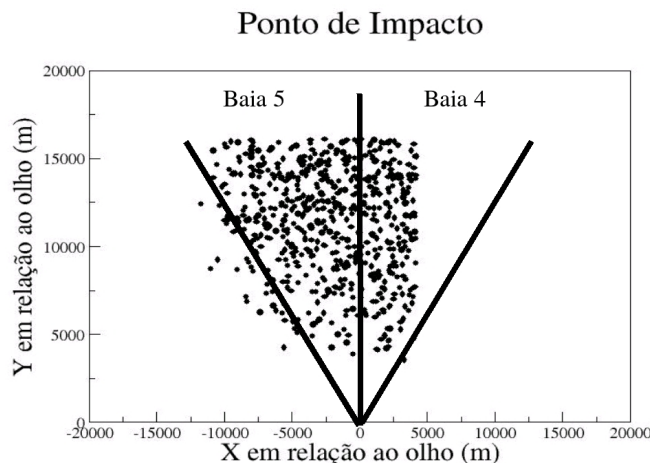


Figura 5.7: Pontos de impacto simulado pelo SDSim aleatoriamente dentro do arranjo protótipo.

5.4 Resultados: Resolução das Reconstruções

Para determinar a resolução das reconstruções foram simulados 600 chuveiros seguindo a cadeia de simulação da figura 5.6. Os chuveiros foram simulados em subconjuntos de 100 para prótons e ferros primários com energia 10^{18} , 10^{19} e 10^{20} eV. O fator de diluição utilizado nestas simulações foi do tipo ótimo de 10^{-4} , com peso máximo para a componente eletromagnética de 10^6 e 10^4 para a componente hadrônica. O perfil longitudinal foi amostrado em intervalos de 10 g/cm^2 e os cortes das partículas foram ajustados a 50 MeV, 50 MeV, 0.3 MeV e 0.3 MeV, para hádrons, múons, elétrons e fótons, respectivamente. O ângulo zenital das partículas primárias variava entre 0 e 60 graus e o ponto de impacto foi sorteado aleatoriamente dentro da área delimitada pelo arranjo protótipo do detector de superfície como mostrado na figura 5.7.

Foram simulados 43 tanques representando um arranjo protótipo estendido. Para o processo de “desdiluição” na simulação dos tanques ajustamos os parâmetros $\delta = 0.15$ e $\alpha = 15^\circ$. As baias 4 e 5 de Los Leones foram simuladas em sua configuração final de operação com abertura de 1.1 m e

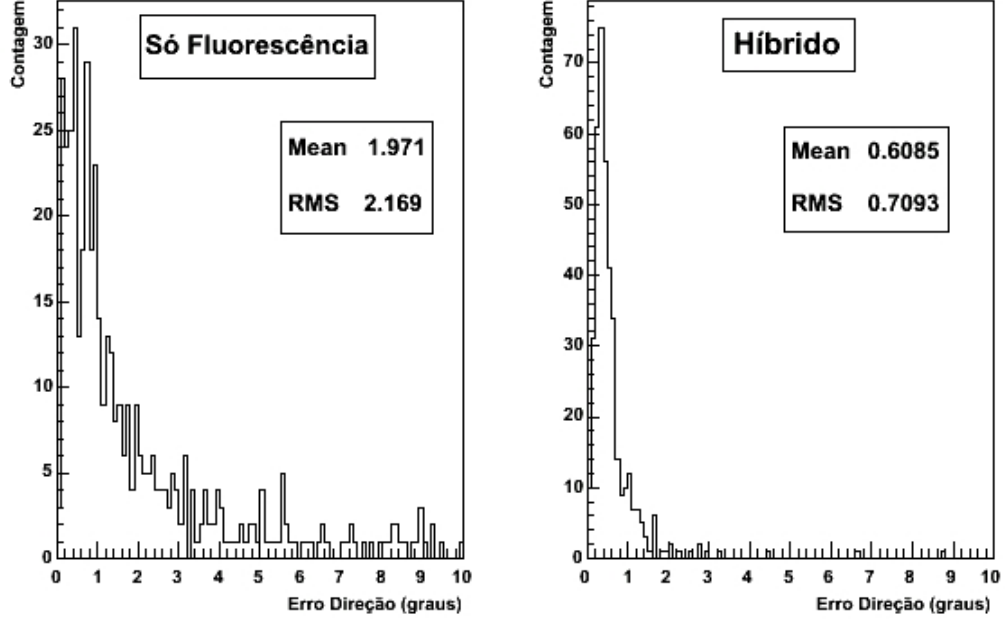


Figura 5.8: Histograma da diferença angular entre a direção reconstruída e simulada para os métodos híbridos e só com dados do DF.

anel corretor. Cada baía foi simulada independentemente, de forma que, se um chuveiro cruza o limite entre as baías, ele é tratado como dois chuveiros separados. Foram considerados apenas tanques com sinal maior de 2.0 VEM.

Após feitos todos os passos da simulação, tínhamos 600 chuveiros híbridos simulados no formato padrão da Colaboração Auger. Esses chuveiros foram reconstruídos pelo FLORES usando os dados do telescópio de fluorescência e pelo nosso programa de reconstrução híbrida usando os dados de ambos os detectores. Para a análise, apenas um corte foi aplicado, exigindo que os chuveiros formassem uma imagem de pelo menos 10° na câmara de fotomultiplicadoras para evitar a tentativa de reconstrução de eventos quase impossíveis de serem reconstruídos.

A figura 5.8 mostra o histograma da diferença angular entre a direção reconstruída e simulada para os métodos híbridos e só com dados do DF.

Porém, como a média desta distribuição pode ser afetada por uma longa cauda, escolheu-se comparar os dois métodos através da integral dos histo-

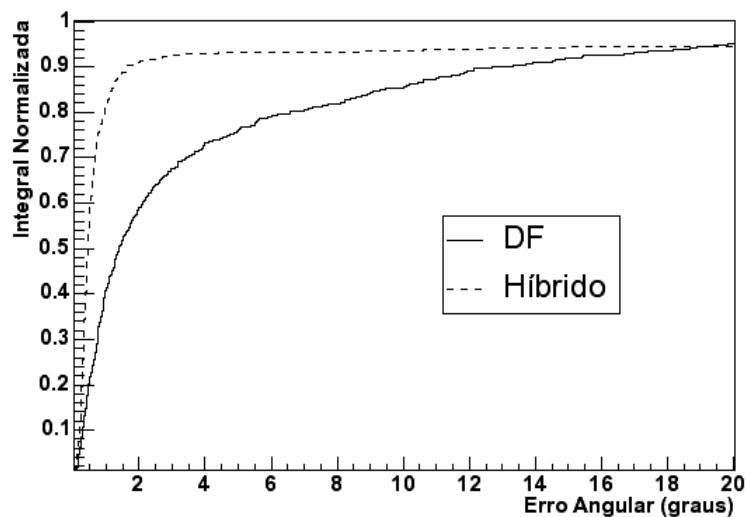


Figura 5.9: Integral da diferença angular entre a direção reconstruída e simulada para os métodos híbridos e só com dados do DF.

gramas da figura 5.8, mostrada na figura 5.9, de onde podemos retirar o valor do erro a 50% e a 90% da integral como parâmetros de comparação. O valor a 50% corresponde à mediana da distribuição da figura 5.8.

O mesmo procedimento pode ser feito para a posição do ponto de impacto reconstruído pelos dois métodos, veja figura 5.10. O resumo dos resultados obtidos através da análise das figuras 5.9 e 5.10 e está mostrado na tabela 5.1.

5.4.1 Resolução para prótons e ferro primários

As mesmas análises de erro através da integral da diferença entre os valores reconstruídos e simulados foram feitas separadamente para os chuveiros iniciados por próton e ferro. Muitas são as diferenças entre os dois tipos de chuveiros que poderiam influenciar na resolução da reconstrução. Entre elas, a principal talvez seja o valor do X_{max} do chuveiro.

Chuveiros iniciados por ferro desenvolvem-se mais rápido na atmosfera e têm X_{max} menores do que os chuveiros iniciados por prótons. Isso faz com que, nas energias de interesse do Observatório Auger, muitos chuveiros iniciados por prótons tenham X_{max} abaixo do nível de observação (1400 m acima

do nível do mar). Esses chuveiros poderiam ter sua reconstrução prejudicada, já que é sabido que a precisão da reconstrução depende se o telescópio viu ou não o X_{max} .

Assim, separamos os chuveiros simulados de acordo com sua partícula primária independentemente da energia. A tabela 5.2 mostra o resultado da análise, na qual observamos que não há diferença significativa para as reconstruções de chuveiros iniciados por prótons ou ferro.

5.4.2 Resolução em função da energia

Usando o mesmo procedimento de análise determinamos a resolução angular e do parâmetro de impacto em função da energia. Tal estudo foi feito separando os eventos simulados em três conjuntos de energia 10^{18} , 10^{19} e 10^{20} eV independentemente da partícula primária.

Os gráficos 5.11 e 5.12 mostram a evolução da reconstrução em função da energia para a reconstrução feita só com dados do DF e com dados híbridos. Nesta figura fica clara a melhoria proporcionada pela reconstrução híbrida, bem como a diferença de sensibilidade à redução da energia. Os valores graficados estão mostrados nas tabelas 5.3 e 5.4.

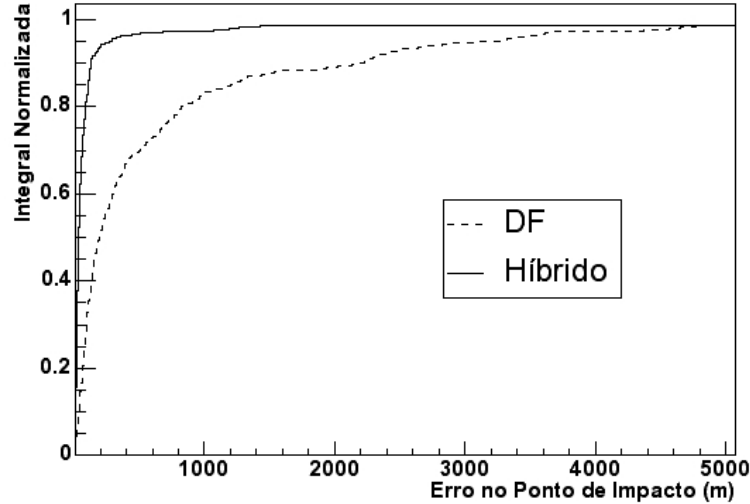


Figura 5.10: Integral do erro do ponto de impacto reconstruído e simulado para os métodos híbridos e só com dados do DF.

Erro na Reconstrução: Comparação DF <i>versus</i> Híbrido			
		DF	Híbrido
Erro na Direção	50%	1.39°	0.46°
	90%	13.02°	1.65°
Erro no Ponto de Impacto	50%	201 m	36 m
	90%	2150 m	130 m

Tabela 5.1: Comparação na resolução da reconstrução do ponto de impacto e da direção de chegada entre os métodos híbrido e só com dados do DF. Foram reconstruídos 600 eventos simulados.

Error na Reconstrução: Próton <i>versus</i> Ferro					
		Direção		Ponto de Impacto (m)	
		Próton	Ferro	Próton	Ferro
Híbrido	50%	0.43°	0.49°	34	40
	90%	1.94°	1.59°	123	131
DF	50%	1.38°	1.48°	220	184
	90%	12.13°	13.88°	2271	2133

Tabela 5.2: Comparação da resolução angular e da posição do ponto de impacto de chuviros iniciados por prótons e ferros.

Melhor dizendo, a reconstrução que utiliza apenas dados dos DF tem sua resolução afetada para baixas energia enquanto que a reconstrução híbrida praticamente não altera seu poder de resolução na faixa de energia entre 10^{18} e 10^{20} .

5.4.3 Comparação com o *Design Report*

Em virtude da construção do Observatório Auger, foi preparado um documento de proposta do projeto que ficou conhecido por *Design Report*. Neste documento encontra-se a estimativa da resolução das reconstruções utilizando os dados dos telescópios de fluorescência e híbridos. No entanto, como já mencionado acima, esses resultados foram obtidos com simulações precárias dos detectores.

As simulações dos tanques praticamente não existiam. Obteve-se o sinal

Error na Direção de Chegada				
		10^{18} eV	10^{19} eV	10^{20} eV
Híbrido	50%	0.52°	0.41°	0.46°
	90%	2.09°	1.67°	1.40°
DF	50%	2.85°	1.04°	0.99°
	90%	18.87°	8.41°	13.73°

Tabela 5.3: Comparação da resolução angular entre as reconstruções híbridas e só com dados do telescópio de fluorescência (DF).

Error no Parâmetro de Impacto (m)				
		10^{18} eV	10^{19} eV	10^{20} eV
Híbrido	50%	48	32	33
	90%	205	122	126
DF	50%	376	151	145
	90%	2871	1460	1271

Tabela 5.4: Comparação da resolução da determinação do parâmetro de impacto das reconstruções híbrida e só utilizando os dados do telescópio de fluorescência (DF).

em cada tanque a partir de um cálculo médio baseado no número de múons e no depósito de energia de elétrons. Todas as partículas que atingiram o chão foram utilizadas na reconstrução, o que é bastante distinto da medida por amostragem feita pelos tanques.

Nas simulações utilizadas por nós apenas as partículas que atingiram um tanque são tratadas pelo programa SDSim da maneira explicada na seção 2.4.1. Abreviadamente, lembramos que estas partículas são traçadas dentro do tanque e a luz Čerenkov correspondente é produzida ao longo do caminho. Os fótons Čerenkov são refletidos na parte interna do tanque e toda a geometria é simulada até sua detecção final pelas fotomultiplicadoras.

Da mesma forma, as simulações dos telescópios disponíveis na etapa de elaboração do *Design Report* não possuíam o detalhamento do FDSim. Entretanto, os telescópios de fluorescência foram simulados muito mais realisticamente que os tanques. Para o *Design Report* foi considerada a abertura finita dos espelhos e a detecção dos fótons em uma câmara de fotomulti-

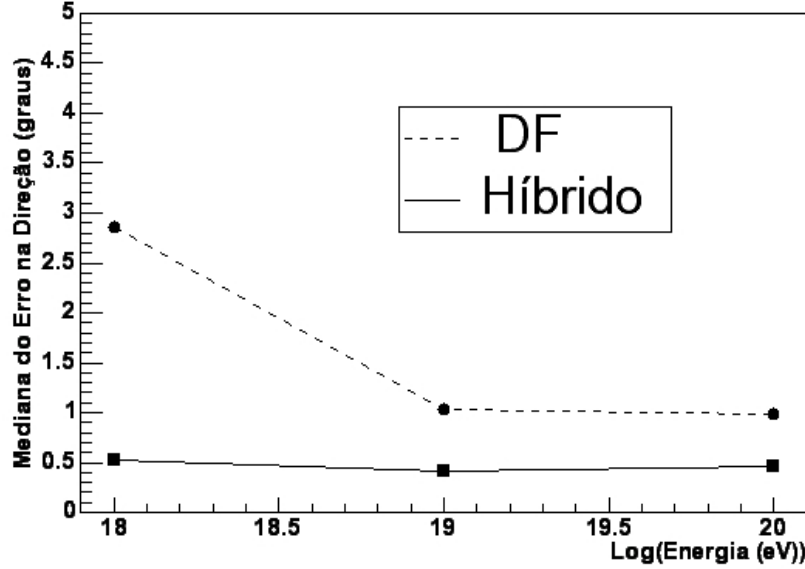


Figura 5.11: Mediana do erro na reconstrução da direção de chegada em função da energia para métodos utilizando apenas os dados do DF e para o método híbrido implementado por nós.

plicadoras. No entanto, nenhum detalhe da óptica de Schmidt foi simulado nem tampouco as particularidades do detector do Auger, tais como segmentação dos espelhos, anel corretor, filtro, sombra da câmara e coletores de luz. Neste estudo utilizamos o FDSim que, por sua vez, leva em conta todos estes efeitos.

A tabela 5.5 mostra um resumo da comparação dos resultados obtidos por nós e aqueles apresentados no *Design Report* para chuviros com energia de 10^{19} eV. Os resultados para os outros conjuntos de energia mostram a mesma relação deste exemplo.

Podemos concluir por essa tabela que os números apresentados no *Design Report* são uma estimativa otimista da resolução das técnicas de reconstrução.

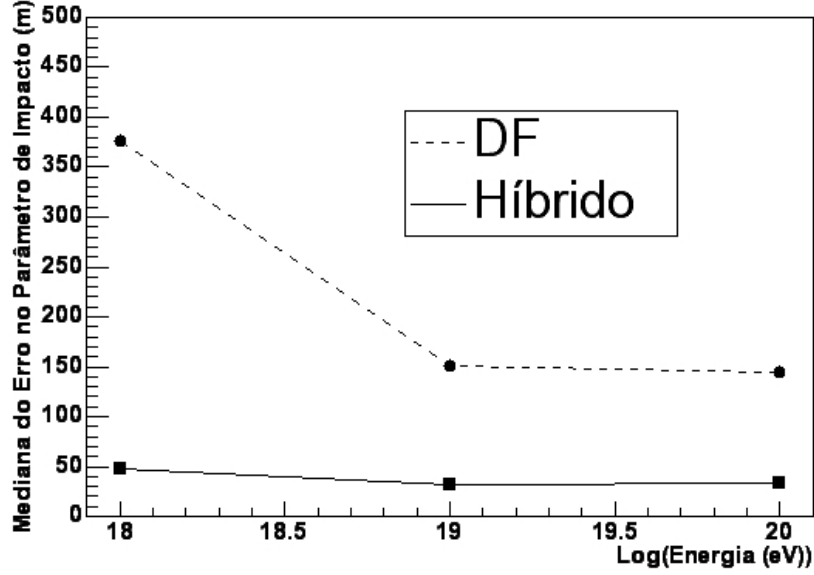


Figura 5.12: Mediana do erro na reconstrução do ponto de impacto em função da energia para métodos utilizando apenas os dados do DF e para o método híbrido implementado por nós.

5.4.4 Resolução para diferentes parâmetros da reconstrução

Na implementação da reconstrução híbrida três parâmetros foram utilizados: erro na medida do tempo no detector de superfície, erro na medida do tempo no detector de fluorescência e atraso das partículas em relação à frente plana do chuveiro.

Neste seção apresentamos testes da influência desses três parâmetros na resolução da reconstrução híbrida. Para tal, realizamos mudanças sucessivas nos parâmetros de forma a simplificá-los ao máximo e para cada alteração determinamos a resolução para a nova configuração. As análises foram realizadas usando os 200 chuveiros simulados com energia 10^{19} eV.

A tabela 5.6 resume os métodos de análise utilizados nesta seção. O método *a* refere-se à configuração padrão da reconstrução com frente curva, utilizando todos os tanques e incertezas temporais explicadas na seção 5.2.1.

Primeiramente, modificamos a definição da incerteza temporal. Ao invés

Erro na Reconstrução: Este trabalho <i>versus</i> <i>Design Report</i>				
	Direção (graus)		Parâmetro de Impacto (m)	
	50%	90%	50%	90%
Este Trabalho	0.41	1.67	32	122
<i>Design Report</i>	0.35	1.03	29	98

Tabela 5.5: Comparação da resolução angular e do parâmetro de impacto entre a reconstrução híbrida apresentada neste trabalho e o *Design Report* para chuveiros com energia de 10^{19} eV.

Métodos de análise			
Método	Incertezas	Frente do Chuveiro	Número de Tanques
<i>a</i>	Variadas (seção 5.2.1)	Curva	Todos
<i>b</i>	Fixo (35 e 50 ns)	Curva	Todos
<i>c</i>	Fixo (35 e 50 ns)	Plana	Todos
<i>d</i>	Fixo (35 e 50 ns)	Plana	Só o de maior sinal

Tabela 5.6: Métodos de análise utilizados nesta seção para verificar a sensibilidade da reconstrução híbrida.

de utilizarmos as definições da seção 5.2.1, nós reconstruímos os chuveiros com incertezas nas medidas temporais fixas: $\sigma_{ds} = 35$ ns e $\sigma_{df} = 50$ ns. Esta análise é referida por método *b*.

Em seguida, reconstruímos os chuveiros com as incertezas temporais fixas e sem considerar o atraso das partículas em relação a uma frente plana. Ou seja, aproximamos a frente do chuveiro por um plano. Esta análise é referida por método *c*.

Por último, reconstruímos os chuveiros com as incertezas temporais fixas, considerando frente plana do chuveiro e apenas um tanque. Utilizamos apenas o tanque com maior sinal na reconstrução da direção de chegada. Chamamos este método de *d*.

A tabela 5.6 mostra um resumo das configurações utilizadas para cada método proposto acima.

A tabela 5.7 mostra que a reconstrução híbrida é sensível aos parâmetros de incerteza temporal, como pode ser visto na piora na resolução entre os métodos *a* e *b*. Da mesma forma, vemos que a inclusão de um atraso em

Resolução na Reconstrução: Diferentes Parâmetros				
Método	Direção (graus)		Ponto de Impacto (m)	
	50%	90%	50%	90%
a	0.41	1.67	32	122
b	0.46	1.59	38	126
c	0.49	2.13	67	226
d	0.46	2.03	50	135

Tabela 5.7: Comparação da resolução angular e do parâmetro de impacto para a reconstrução híbrida por nós desenvolvida. São mostradas as resoluções comparando os parâmetros de incertezas temporais, frente plana e curva do chuveiro e número de tanques utilizados na reconstrução.

relação à frente plana é importante na resolução da reconstrução, já que o método c apresenta uma piora significativa em relação aos métodos a e b .

O método d mostra uma melhora na resolução em relação ao método c . No método d foi usado apenas o tanque com maior sinal enquanto que no método c foram utilizados todos os tanques. Ressaltamos que em ambos os métodos foi considerada uma frente plana do chuveiro. Concluimos a partir desse resultado que se não se pode utilizar uma forma confiável para frente curva do chuveiro é melhor utilizar apenas o tanque com maior sinal do chuveiro e uma frente plana para o ajuste. Este tanque sempre está a uma pequena distância do eixo do chuveiro, e por isso a influência da curvatura da frente do chuveiro sobre ele é pequena.

A melhora na resolução da reconstrução dos método c para o d mostra de forma indireta que uma frente plana não ajusta o tempo de disparo dos tanques longe do eixo do chuveiro e que a inclusão dos mesmos em um ajuste da direção de chegada do primário piora os resultados.

Ainda é possível observar que mesmo para o caso de utilização de apenas um tanque, a resolução da direção de chegada da reconstrução híbrida (0.46°) é muito melhor que a resolução da reconstrução utilizando apenas dados do telescópio de fluorescência (1.04°), conforme mostrado na tabela 5.3.

5.5 Taxa de Elongação

A determinação da partícula primária é o maior desafio em raios cósmicos de altíssimas energias. Nenhum dos observatórios em funcionamento no passado conseguiu analisar seus dados a ponto de extrair a informação da identidade da partícula primária em um evento.

Devido a essa impossibilidade, os estudos de determinação da massa da partícula primária concentraram-se na tentativa de determinar se a composição é leve ou pesada e como a razão entre essas componentes varia em função da energia da partícula primária.

A técnica chamada de taxa de alongação analisa a variação da profundidade do máximo do chuveiro em função da energia do chuveiro. Chuveiros iniciados por núcleos atômicos pesados tendem, em média, a se desenvolverem mais rápido na atmosfera, atingindo o número máximo de partículas no chuveiro em profundidades atmosféricas menores. Assim, a variável que dá a altitude onde o chuveiro atingiu o número máximo de partículas (X_{max}) guarda uma relação indireta com a massa do primário.

Telescópios de fluorescência, por enxergarem o desenvolvimento longitudinal do chuveiro, podem medir o X_{max} diretamente. Detectores de superfície, tais como os tanques do Auger, fazem uso de relações baseadas em simulações que possibilitam determinar o X_{max} a partir da velocidade temporal de crescimento do sinal no tanque. O artigo [21] mostra a relação obtida entre a taxa de crescimento do sinal no tanque e o X_{max} determinado para o experimento Haverah Park.

Comparando a taxa de alongação medida com a determinada por simulações para diferentes partículas primárias encontra-se a tendência de variação da massa do primário em função da energia.

Seguindo esse receituário, os experimentos Fly's Eye [11] e AGASA [12] publicaram seus estudos de composição da radiação cósmica baseados na taxa de alongação do X_{max} em função da energia e apresentam resultados discrepantes. A figura 5.13 mostra o resultado final obtido pela Colaboração Fly's Eye no qual observamos uma mudança acentuada da composição química de uma composição predominantemente pesada para uma predominantemente leve. O valor da taxa de alongação encontrado por eles foi de 93 g/cm^2 por década de energia. A Colaboração AGASA não publicou um gráfico semelhante mas no artigo citado acima diz explicitamente que o resultado do Fly's Eye não pode ser verificado nos dados detectados pelo experimento AGASA, que por sua vez sugerem uma taxa de alongação bem menor para o mesmo

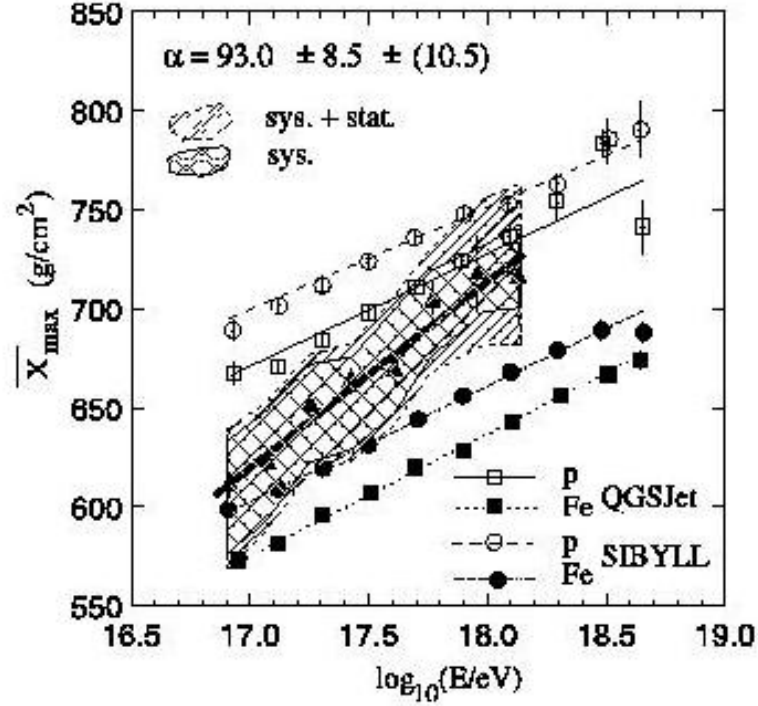


Figura 5.13: Taxa de alongação medida pelo Fly's Eye mostrada em comparação com chuviros simulados. O ajuste dos dados resultou em um coeficiente angular de 93 g/cm^2 por década de energia. A figura mostra a mudança de composição de uma componente pesada para leve.

intervalo de energia.

Recentemente, novos estudos bastante promissores têm sido feitos com redes neurais para a determinação da massa do primário em uma abordagem individual dos eventos [22, 23]. Esta abordagem apresenta a vantagem de determinação da massa de um único chuviro, o que poderia oferecer grandes limitações aos modelos astrofísicos de aceleração das partículas nas fontes.

Porém, cremos que, por hora e para comparação com experimentos anteriores, deveríamos nos preparar para determinar a taxa de alongação medida pelo Observatório Auger. Entretanto, ressaltamos desde já que os dados disponíveis durante a elaboração desta tese não são suficientemente numerosos para estabelecermos uma taxa de alongação com significado estatístico.

Apresentamos aqui um estudo realizado com os dados do protótipo do

Observatório Auger, que ilustra o procedimento que deverá ser utilizado para a determinação da taxa de alongação quando o número de eventos detectados for estatisticamente significativo.

Utilizamos o programa FLORES para reconstruir os 332 eventos detectados pelos telescópios protótipos e o programa de reconstrução híbrida desenvolvido por nós para reconstruir os 75 eventos híbridos detectados pelo Observatório Auger em sua fase protótipo. Ambos os métodos de reconstrução oferecem a energia e o X_{max} do chuveiro de forma que podemos estabelecer a taxa de alongação para os dois casos.

No entanto, um cuidado extra deve ser tomado na comparação com os eventos simulados. Particularidades das técnicas de detecção e da configuração do telescópio de fluorescência podem, em princípio, alterar a taxa de alongação simulada.

Existem dois vieses a serem estudados: da detecção e da reconstrução. Como o disparo do detector não é independente do X_{max} , que é função da massa do primário, devemos esperar diferentes eficiências de detecção para diferentes massas de primário. Além disso, a reconstrução também é fortemente dependente do X_{max} .

A baixas energias (10^{18} eV), chuveiros iniciados por ferro têm X_{max} alto na atmosfera e por isso devem ser menos eficazes em disparar o detector de fluorescência. Por outro lado, para energia acima de 10^{19} eV, chuveiros iniciados por prótons podem ter X_{max} abaixo do nível de detecção, o que prejudicaria a reconstrução da energia.

A taxa de alongação é afetada por todos esses efeitos. Para minimizar esses efeitos vamos realizar a comparação dos dados medidos e simulados com alto grau de igualdade.

Para tal, utilizamos simulações de Monte Carlo realizadas no conjunto computacional da Colaboração Auger em Lyon. Copiamos 9240 chuveiros simulados com o programa CORSIKA e modelo de interação hadrônica QGSJet segundo um espectro integral de potência com expoente -2. Destes chuveiros, metade (4620) foram simulados com prótons como partículas primárias e (4620) foram simulados com ferro como partículas primárias, em ambos os casos com energia entre 10^{18} e 10^{21} eV e ângulo zenital entre 0 e 60°. A figura 5.14 mostra a taxa de alongação simulada pelo CORSIKA. O valor do X_{max} foi obtido ajustando uma função Gaisser-Hillas [40] ao perfil longitudinal simulado.

Inserindo o perfil longitudinal de partículas carregadas destes chuveiros no FDSim, fizemos a geração da luz de fluorescência correspondente e pro-

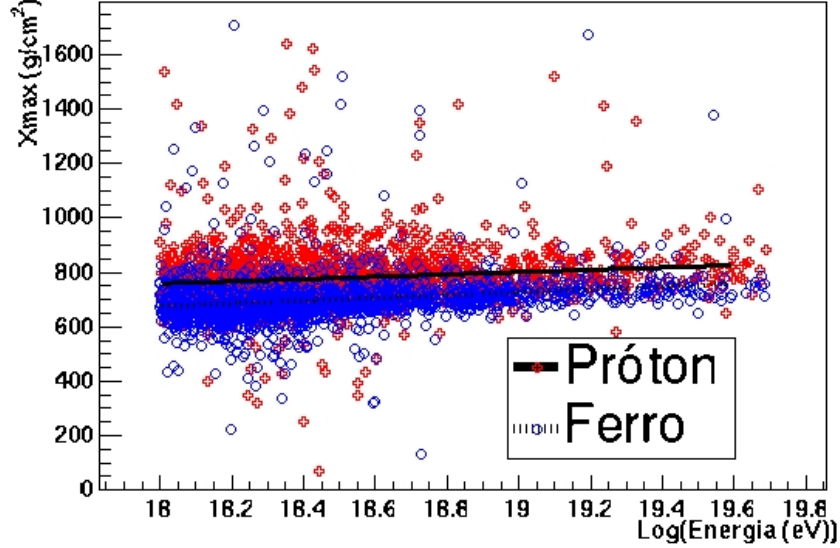


Figura 5.14: Taxa de elongação simulada pelo CORSIKA. A figura mostra a distribuição simulada dos X_{max} versus energia e um ajuste linear para cada um dos tipos de primários: próton e ferro.

pagamos os fótons dentro da óptica do telescópio. O ponto de impacto do chuveiro foi sorteado dentro de um círculo de 8 km de raio e centro 15 km distante do telescópio, de forma a imitar os dados detectados pelo protótipo do Observatório Auger.

Depois de feita a simulação do detector, reconstruímos os chuveiros simulados com o programa FLORES. A figura 5.15 mostra a mudança da taxa de elongação dos chuveiros simulados iniciados por ferro e por prótons devido à detecção e reconstrução dos eventos. Esse efeito será de extrema importância para a análise final dos dados do Observatório Auger e deverá ser estudado em maiores detalhes. Assim, não nos deteremos aqui em procurar as causas dos vieses mas apenas garantiremos a igualdade de tratamento dos dados simulados e medidos.

Alguns cortes foram aplicados nos chuveiros simulados para garantir boa resolução de reconstrução. Os cortes por nós aplicados foram pouco restritivos quando comparados aos executados normalmente por outros grupos, tal como pode ser visto em [11]. Para as nossas análises exigimos que os

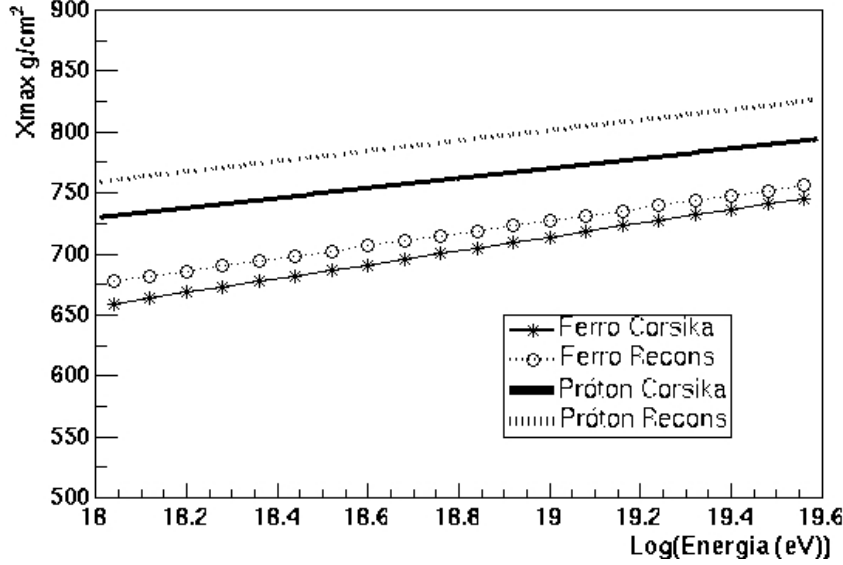


Figura 5.15: Taxa de alongação simulada. A figura mostra as curvas obtidas com a simulação de Monte Carlo feita pelo CORSIKA e os mesmos chuviros após feita a simulação dos telescópios pelo FDSim e a reconstrução dos chuviros pelo FLORES.

chuviros reconstruídos tivessem:

- X_{max} visível;
- Erro estatístico na reconstrução da energia menor que 10%;
- Diferença no ângulo entre o eixo do chuviro e o eixo principal do telescópio maior que 20° para excluir chuviros com muita contaminação de luz Čerenkov direta;
- $10^{18} < \text{Energia} < 5 \times 10^{19}$ eV para imitar a região de energia detectada pelo protótipo.

Os mesmos cortes serão aplicados aos eventos medidos analisados em seguida com o intuito de não introduzirmos nenhum viés artificial devido aos cortes.

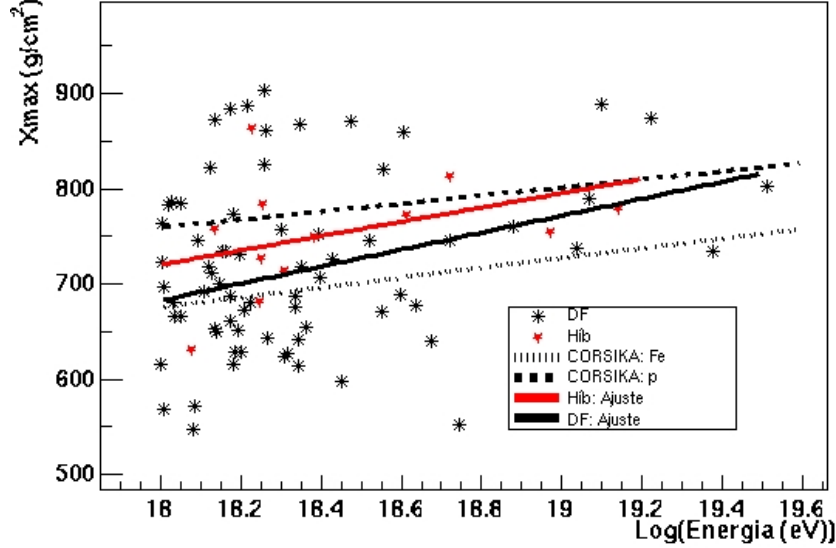


Figura 5.16: Taxa de elongação medida pelo protótipo do Observatório Auger. São mostrados valores para os chuviros medidos só pelo telescópio de fluorescência e daqueles medidos de maneira híbrida em comparação com os valores simulados.

A taxa de elongação dos chuviros iniciados por próton mudou de 40.38 g/cm^2 a cada década de energia para 42.29 g/cm^2 a cada década de energia após a simulação dos telescópios e reconstrução dos eventos. Da mesma forma, os chuviros iniciados por ferro mudaram a taxa de elongação de 56.83 para 51.59 .

Finalmente, comparamos os chuviros medidos pelo protótipo do Observatório Auger com os chuviros simulados. A figura 5.16 mostra a taxa de elongação dos 332 chuviros detectados somente pelo telescópio de fluorescência e dos 70 chuviros detectados hibridamente.

Relembramos a baixa significância estatística discutida no início desta seção, que pode ser verificada na figura 5.16. Após a aplicação dos cortes, sobreviveram 13 eventos híbridos e 73 eventos detectados só pelo telescópio de fluorescência. De qualquer forma, os dois conjuntos de dados mostram a mesma tendência de mudança na composição da massa do primário em função da energia que concorda com os resultados do Fly's Eye. A tabela 5.8 mostra a comparação final das taxas de elongação mostradas aqui. São mostrados

Taxa de Elongação	
	Taxa de Elongação (g/cm^2 por década de Energia)
Fly's Eye	93.0 ± 10.5
Auger DF	89.08 ± 53.57
Auger Híbrido	75.09 ± 53.88

Tabela 5.8: Comparação entre as taxas de alongação medidas pelo protótipo do Observatório Auger e pelo experimento Fly's Eye. A tabela mostra o valor ajustado e o erro estatístico.

também os erros estatísticos no ajuste linear feito aos dados medidos. Fica evidente a falta de significância estatística nas medidas feitas pelo protótipo do Auger ao observarmos o erro mostrado na tabela. Porém, chama atenção que as três medidas mostram a mesma tendência de mudança da composição da massa do primário.

Capítulo 6

Conclusão

A conclusão desta tese se resumirá a uma coletânea dos resultados apresentados nos Capítulos 3, 4 e 5. Como dito na Introdução, este trabalho foi inteiramente dedicado ao Observatório Auger no tocante à sua construção e métodos de análise de dados.

Desenvolvimentos sobre a instrumentação do telescópio de fluorescência, especificamente sobre a construção e teste do anel corretor, foram apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4 apresentamos a elaboração de um programa de simulação de Monte Carlo de fótons de luz de fluorescência. Este programa por nós escrito apresenta um nível de detalhamento inédito dos processos físicos envolvidos, sobretudo na característica de total tridimensionalidade do chuveiro.

A aplicação deste programa e sua comparação com simulações unidimensionais permitiram quantificar a capacidade de detecção da distribuição lateral com telescópios de fluorescência. A comparação dos nossos resultados com os dados do protótipo do Observatório Auger mostra uma concordância destacável.

No último Capítulo de resultados, apresentamos o desenvolvimento de um método de reconstrução de eventos híbridos. Abaixo abordaremos em detalhes as conclusões de cada item separadamente.

6.1 Anel Corretor

A determinação da contribuição do anel corretor para o tamanho da imagem na câmara de fotomultiplicadoras mostrou que tanto o projeto como a construção do anel corretor foram muito bem sucedidos.

O método de verificação do funcionamento do telescópio através de fotos de estrelas mostrou-se bastante eficaz e robusto. Repito que sua grande importância reside em ser o único teste que abrange todos os componentes do telescópio simultaneamente.

A comparação entre os anel corretor alemão e o brasileiro mostra que ambos são praticamente indistinguíveis e atendem às exigências da Colaboração. Por outro lado, o espelho tcheco mostrou uma superioridade significativa em relação ao espelho alemão.

O resultado final do tamanho da imagem formada na câmara de fotomultiplicadoras na configuração final de operação do telescópio com anel corretor está mostrado na figura 6.1

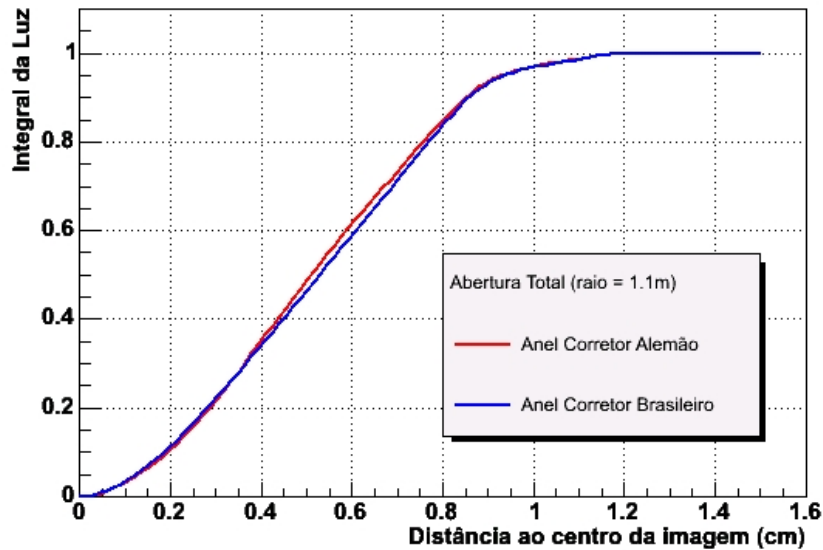


Figura 6.1: Integral da luz que forma a imagem da estrela VEGA sobre a câmara de fotomultiplicadoras. São mostradas as curvas para a configuração final do telescópio com abertura do diafragma de 1.1 m.

Observando esta figura, vemos que o limite máximo do tamanho da imagem na câmara determinado pela Colaboração não é estritamente atendido. O alvo da Colaboração era que 90% da luz estivesse contida dentro de um círculo de raio 0.75 cm, porém, encontramos que apenas 80% da luz está contida em um círculo deste tamanho. Pelo gráfico 6.1 determinamos que 90% da luz está contida em um círculo de aproximadamente 0.85 cm de raio.

Entretanto, o estudo separado das componentes “só anel” e “sem anel” que formam a imagem final, mostra que o limite externo da imagem é determinado pelos raios que passam na parte da abertura interior ao anel corretor, isentando assim o anel corretor pelo não cumprimento estrito da especificação para o tamanho da imagem.

Apesar do valor do raio ter ultrapassado a especificação por apenas 0.1 cm, o que não é drástico para a operação do telescópio, acreditamos que a responsabilidade deve ser atribuída ao desalinhamento dos espelhos, sem que, todavia, os resultados aqui apresentados possam ser considerados definitivos.

Com a análise das fotos de VEGA foi possível também estimar o aumento efetivo da área coletora com o uso do anel corretor. O valor calculado no Capítulo 3 foi de 62% para o anel brasileiro e 58% para o anel alemão. Porém, como esses valores dependem das condições atmosféricas sobre as quais não temos nenhuma informação técnica, podemos dizer que o aumento aproximado da área de coleção devido ao uso do anel corretor é de 60%. O valor teórico do aumento da área é de 67%, entretanto esse cálculo não leva em conta a absorção da luz e as imperfeições do anel, de maneira que a concordância é razoável.

Por último, testamos a resolução da reconstrução da direção de chegada se o anel corretor fosse removido e o telescópio operado com 1.1 m de raio do diafragma. As simulações mostraram que a resolução piora em média um grau para chuveiros com energia de 10^{19} eV. Concluimos assim que a operação do telescópio sem o anel corretor é altamente desfavorável.

6.2 Simulação da Luz de Fluorescência

A simulação da produção de luz de fluorescência em chuveiros atmosféricos extensos é pela primeira vez tratada com grandes detalhes nesta tese. No capítulo 4 explicamos o desenvolvimento do programa e as particularidades que o fazem inédito.

Após um exaustivo teste das rotinas, cujos resultados foram comparados

com simulações unidimensionais, com o famoso evento de 320 EeV medido pelo experimento Fly's Eye e com eventos medidos pelo protótipo do Observatório Auger, utilizamos a característica da geração tridimensional dos fótons para determinar a capacidade de medida da distribuição lateral de chuviros com telescópios de fluorescência.

Para chuviros com energia de 10^{19} eV ficou determinado que os telescópios do Observatório Auger são capazes de distinguir a distribuição lateral para eventos que incidirem a distâncias menores que 8 km do telescópio, veja 6.2.

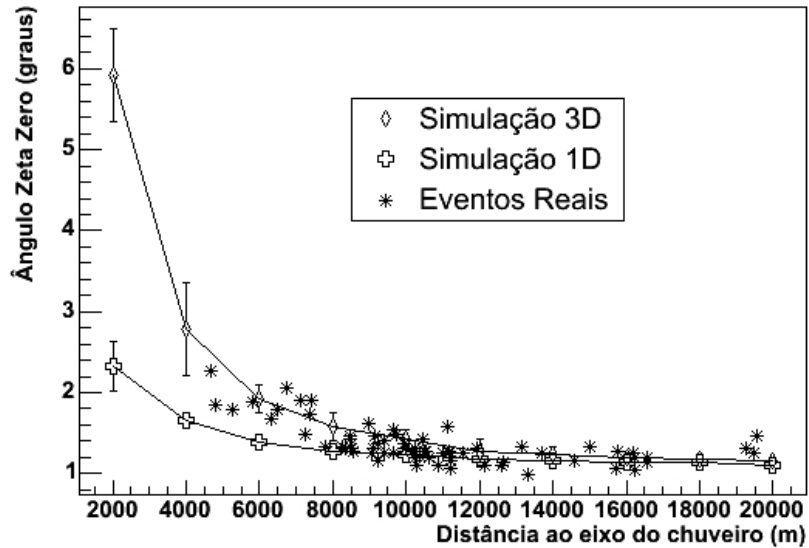


Figura 6.2: Ângulo ζ_0 que maximiza a razão sinal/ruído em função da distância entre o ponto de impacto e o telescópio.

Além desse resultado, acreditamos que a ferramenta de simulação por nós desenvolvida será de grande utilidade para o desenvolvimento de novas gerações de telescópios e para a verificação de métodos de reconstrução. Estamos em contato permanente com os autores do CORSIKA para em breve disponibilizar nosso programa para a comunidade internacional.

Em particular, um estudo complementar a esta tese está sendo desenvolvido com o intuito de encontrar um método que permita medir a distribuição lateral do chuviro com telescópios de fluorescência. O conceito básico,

apresentando pelo Dr. Paul Sommers na referência [54], fundamenta-se no tamanho do sinal na câmara em um intervalo de tempo de 100 ns. Tal estudo somente é possível com um programa de simulação tridimensional como o apresentado aqui.

6.3 Reconstrução: Observatório Auger

Esta seção dos resultados obtidos nesta tese refere-se aos métodos de reconstrução híbrida para o Observatório Auger. Um programa de reconstrução híbrida foi por nós elaborado. A técnica foi testada quanto à sua eficiência para diferentes partículas primárias, diferentes energias e diferentes parâmetros físicos. A resolução na determinação da direção de chegada da partícula primária para cada configuração foi calculada e uma comparação com as resoluções equivalentes para o caso em que os eventos são detectados apenas com os telescópios é mostrada.

Nossas análises mostraram que o método de reconstrução híbrido é independente da partícula primária e tem resolução na direção de chegada praticamente independente da energia no intervalo entre 10^{18} e 10^{20} eV. Alguns dos nossos resultados foram comparados com os cálculos feitos com simulações menos detalhadas para o *Design Report* e mostraram que ele representa um limite mínimo para a resolução do Observatório.

Ainda verificamos a variação da resolução da reconstrução em função dos parâmetros físicos do chuveiro considerados. Notamos que um conhecimento preciso sobre as incertezas de medida de tempo é necessário mas não crucial. Por outro lado, a determinação precisa da forma da frente curva do chuveiro tem maior influência sobre a resolução da reconstrução ao ponto de ser mais eficaz utilizar apenas o tanque de maior sinal ao invés de considerar uma frente plana para o chuveiro.

Chuveiros híbridos com apenas um tanque ainda podem ser reconstruídos com ótima precisão angular. A tabela 6.1 mostra, como resumo dos resultados do Capítulo 5, a resolução da reconstrução híbrida em função da energia, em comparação com a reconstrução que utiliza apenas dados do telescópio de fluorescência.

Por último, utilizamos o programa híbrido por nós desenvolvido e o programa FLORES para reconstruir todos os eventos híbridos e detectados só pelos telescópios do protótipo do Observatório Auger. Com os parâmetros reconstruídos determinamos uma taxa de alongação DF e híbrida. O pequeno

Error na Direção de Chegada				
		10^{18} eV	10^{19} eV	10^{20} eV
Híbrido	50%	0.52°	0.41°	0.46°
	90%	2.09°	1.67°	1.40°
DF	50%	2.85°	1.04°	0.99°
	90%	18.87°	8.41°	13.73°

Tabela 6.1: Comparação da resolução angular entre as reconstruções híbridas e só com dados do telescópio de fluorescência (DF).

número de eventos (13 híbridos e 73 DF) não permitem nenhuma conclusão sobre este ponto. Porém, é bastante significativo que, apesar da baixa confiabilidade estatística, os valores médios para os eventos híbridos, DF e os apresentados pela colaboração Fly's Eye concordam bastante bem, como pode ser visto na tabela 6.2.

Taxa de Elongação	
	Taxa de Elongação (g/cm^2 por década de Energia)
Fly's Eye	93.0 ± 10.5
Auger DF	89.08 ± 53.57
Auger Híbrido	75.09 ± 53.88

Tabela 6.2: Comparação entre as taxas de alongação medidas pelo protótipo do Observatório Auger e pelo experimento Fly's Eye. A tabela mostra o valor ajustado e o erro estatístico.

Bibliografia

- [1] *MultiWaveLength Astronomy*, <http://coolcosmo.ipac.caltech.edu/>
- [2] K.-H. Kampert et al., *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf.* (2001), 1
- [3] C. L. S. Pryke, *Instrumentation development and experimental design for the next generation detector of the highest energy cosmic rays*. Tese de Doutorado, University of Leeds (1996)
- [4] F. Kakimoto, E. C. Loh, M. Nagano, H. Okuno, M. Teshima e S. Ueno, *Nucl. Instr. Meth.*, **A(372)** (1996) 527–533
- [5] D. J. Bird et al., *Astrophysical Journal*, **441** (1995) 144–150
- [6] V. Hess, *Physik. Zeitschr.*, **13** (1912) 1804
- [7] P. Auger et al., *Reviews of Modern Physics*, **11** (1939) 288
- [8] M. Longair, *High Energy Astrophysics*, **2**, cap. 21. Cambridge University Press (1994), 344
- [9] C.M.G.Lattes, G.P.S.Occhialini e C.F.Powell, *Nature*, **160** (1947) 453
- [10] S. Barroso et al., *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf.*, **6** (1997), 53
- [11] T. Abu-Zayyad et al., *Astrophysical Journal*, **557** (2001) 686
- [12] N. Hayashida et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys*, **21** (1995) 1101
- [13] A.A.Penzias e R. Wilson, *Ap. J.*, **142** (1965) 419
- [14] A. Hillas, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **22** (1984) 425
- [15] K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.*, **16** (1966) 748

- [16] G. Zatsepin e V. Kuz'min, *ZhETF Pis'ma*, **4** (1966) 114
- [17] J. Cronin for the Auger Collaboration, *Design Report*. Publicação interna, <http://www.auger.org>
- [18] M. Nagano e A. Watson, *Reviews of Modern Physics*, **72**(3) (2000) 689
- [19] T. K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press (1990)
- [20] P. Sokolsky, *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*. Addison-Wesley Publishing Company (1989)
- [21] R. Walker e A. A. Watson, *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **7** (1981) 1297
- [22] G. Medina-Tanco et al., *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf.* (2001), 518
- [23] G. Medina-Tanco et al., *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, **2** (2003), 587
- [24] B. Dawson e S. Clay, *Tests of the FDSim/FDTriggerSim/Flores Simulation and Reconstruction Chain*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP2003-071
- [25] S. Sciutto, *AIRES: A minimum document*, *Auger Technical Note*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP1997-029, www.auger.org (1997)
- [26] D. Heck, J. Knapp, J. Capdevielle, G. Schatz e T. Thouw, *A Monte-Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers - Report FZKA 6019*. Forschungszentrum Karlsruhe, Publicação interna (1998)
- [27] S. Dagoret-Campagne et al., *SDSim, Surface Detector Simulation*, <http://lpnhauger.in2p3.fr/Sylvie/WWW/AUGER/DPA/index.html>
- [28] P. Billoir, *Reconstruction of showers with the ground array: status of the prototype program*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP2002-044
- [29] L. Prado Jr. et al., *Fluorescence Detector Simulation*, <http://www.ifi.unicamp.br/AUGER/>
- [30] S. Argirò et al., *The Fluorescence Detector Offline Reconstruction System*, <http://www.to.infn.it/auger/Software/Flores/>

- [31] B. Dawson, *Fluorescence Detector Techniques*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP1996-017
- [32] M. Born e E. Wolf, *Principles of Optics*. Pergamon Press (1959)
- [33] L. Levi, *Applied Optics*. John Wiley & Sons (1968)
- [34] R. Sato, J. Bellido e H. Reis, *Ray-Tracing of the Schmidt Camera with the Corrector Plate*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP1999-012 (1999)
- [35] R. Sato e H. Reis, *Improving the S/N ratio for the Auger fluorescence dectetor*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP2000-009 (2000)
- [36] M. A. L. de Oliveira, V. de Souza, H. C. Reis e R. Sato, Aceito pela Nuclear Instruments and Methods (2003)
- [37] V. de Souza e L. Prado Jr, *On the geometrical reconstruction for the Auger FD with and without the corrector ring*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP-2003-067, www.auger.org (2003)
- [38] R. Sato, H. Barbosa e L. Prado Jr, *Study of the optical spot of the Auger FD without the corrector ring*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP2003-064 (2003)
- [39] M. Nagano et al., *Astroparticle Physics*, **13** (2000) 277
- [40] T. K. Gaisser e A. M. Hillas, *Proc. 15th Int. Cosmic Ray Conf.*, Plovdiv (Bulgaria), **8** (1977), 353–356
- [41] A. A. Lagutin, A. V. Plyasheshnikov e V. V. Uchaikin, *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf.*, Kyoto (Japan), **7** (1979), 18–21
- [42] H. M. Barbosa, V. de Souza e C. Dobrigkeit, *A Monte Carlo to produce fluorescence photons*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP-2003-060, www.auger.org (2003)
- [43] H. M. J. Barbosa, V. Souza e C. Dobrigkeit, *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, Universal Academy Press, **2** (2003), 599–602
- [44] E. Kemp et al., *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, **2**, 853

- [45] F. Arciprete et al., *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, **2**, 837
- [46] A. N. Bunner. Tese de Doutorado, Cornell University (1964)
- [47] M. Nagano, K. Kobayakawa, N. Sakaki e K. Ando, *Photon yields from nitrogen gas and dry air excited by electrons*, arXiv:astro-ph/0303193v2
- [48] *Stopping Powers and Range Tables for Electrons*, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- [49] A. M. Hillas, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **52B** (1997) 29
- [50] M. Kobal for the Pierre Auger Collaboration, *Astroparticle Physics*, **15** (2001) 259
- [51] M. Bertaina et al., *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf.* (2001), 792
- [52] C. Song, Z. Cao, B. R. Dawson, B. E. Fick, P. Sokolsky e X. Zhang, *Astroparticle Physics*, **14** (2000) 7
- [53] Particle Data Group, *Physical Review D*, **66**(84) (2002)
- [54] P. Sommers, *Astroparticle Physics*, **3** (1995) 349–360
- [55] V. de Souza, C. Dobrigkeit e B. Dawson, *A hybrid reconstruction program and the hybrid resolution*. The Pierre Auger Observatory, Publicação Interna GAP-2003-072, www.auger.org (2003)
- [56] P. Privitera for the Auger Collaboration, *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, **2** (2003), 357

“O horizonte de eventos é a fronteira do buraco negro. Perdi anos pensando no que há depois da fronteira.

- Como nasce um buraco negro ?
- Aonde vai tudo que engole ?
- No que se transforma ?

Não achei respostas. Mas sacrifiquei tempo, amizades, amor...

No dia em que morreu meu pai, eu queria ir à escola. Não me deixaram. Neste dia, decidi como eu seria para sempre; que estratégias usaria para não sentir falta dele, que armadura usaria para evitar a dor. Agora vejo que olhava do lado errado do telescópio: aquela dor foi um enorme buraco negro.

Não tenho teoria para enfrentar o Mundo, sei que, se nada te toca, nada te fará feliz.”

Monólogo final do filme “Colpo di Luna” (“Uma Janela para Lua”) escrito e dirigido por Alberto Simoni.