

Tese de Mestrado

Reconstrução dos eventos híbridos detectados
pelo protótipo do Observatório Pierre Auger

Daniel Pakk Selmi-Dei

Instituto de Física Gleb Wataghin
Universidade Estadual de Campinas

*Este exemplar corresponde à redação
final da Tese de Mestrado defendida
pelo aluno Daniel Pakk Selmi-Dei
e aprovada pela comissão Julgadora.
5 de maio de 2005*
Carola Dobrigkeit

Banca Examinadora:

- Profa. Dra. Carola Dobrigkeit Chinellato - IFGW/UNICAMP
(Orientadora)
- Prof. Dr. Philippe Gouffon - IF/USP
- Prof. Dr. Carlos Ourivio Escobar - IFGW/UNICAMP

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

Se49r	Selmi-Dei, Daniel Pakk Reconstrução dos eventos híbridos detectados pelo protótipo do Observatório Pierre Auger / Daniel Pakk Selmi-Dei.-- Campinas, SP : [s.n.], 2005. Orientador: Carola Dobrigkeit Chinellato. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física "Gleb Wataghin". 1. Observatório Pierre Auger. 2. Reconstrução de eventos híbridos. 3. Chuveiros de raios cósmicos. I. Chinellato, Carola Dobrigkeit. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física "Gleb Wataghin". III. Título. (vsv/ifgw)
-------	--

- **Título em inglês:** Reconstruction of the hybrid events detected by the
Pierre Auger Observatory prototype
- **Palavras-chave em inglês (Keywords):**
 - 1. Pierre Auger Observatory
 - 2. Reconstruction of hybrid events
 - 3. Extensive air showers
- **Área de concentração:** Física
- **Titulação:** Mestre em física
- **Banca examinadora:**
 - Prof^a Carola Dobrigkeit Chinellato
 - Prof. Philippe Gouffon
 - Prof. Carlos Ourívio Escobar
- **Data da defesa:** 16.02.2005



MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE Mestrado de **DANIEL PAKK SELMI-DEI – RA 962143** APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, EM 16 / 02 / 2005.

COMISSÃO JULGADORA:


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


Prof. Dr. Philippe Gouffon – IF/USP


Prof. Dr. Carlos Ourivio Escobar – DRCC/IFGW/UNICAMP

Agradecimentos

Ao longo da concepção desta tese, o apoio de diversas pessoas marcou o rumo e a maneira com a qual me dediquei ao trabalho. É inegável que o maior incentivo foi dado pelas pessoas que mais amo; desta maneira, meus mais profundos agradecimentos a meus pais e irmão.

No Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do Instituto de Física Gleb Wataghin devo muito, em primeiro lugar, ao Luiz Américo pela ajuda inicial na introdução teórica e computacional que envolve a análise de radiação cósmica. Também ao Marcelo Leigui por me incluir na Colaboração Auger através de um projeto que se tornou esta dissertação, além das horas de ensino dedicadas à programação e ao funcionamento de todas as partes do observatório. O contato de meses com essas duas pessoas foi imprescindível e evoluiu para além de uma relação apenas acadêmica.

Outros membros da colaboração com quem convivi, mesmo que pelos corredores ou nas reuniões do grupo, foram inestimáveis.

À pessoa que me guiou, orientou e por vezes tranquilizou, sempre muito calma e sorridente, ora em sua sala, ora durante os cafés, o maior agradecimento de todos: Profa. Carola. Em momento algum, aspectos como saúde, horários ou distância impediram que sua disponibilidade e explicações fossem impecáveis, gerando assim uma relação de companheirismo que ficará para sempre em minhas lembranças e que acredito nunca acabar.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), responsável pelo financiamento de meus estudos. Sem este e outros órgãos de fomento à pesquisa, uma das maiores riquezas que o país pode possuir seria praticamente inatingível: o conhecimento.

Resumo

Esta dissertação cobre a análise dos primeiros eventos detectados simultaneamente pelos tanques de superfície e telescópios de fluorescência durante a fase de prototipagem do Observatório Pierre Auger, na Argentina, entre dezembro de 2001 e abril de 2002.

Há muitos anos diversos experimentos espalhados pelo mundo, dedicados à detecção de raios cósmicos, vêm coletando e montando uma estatística bem estabelecida do fluxo, direção de chegada, energia e composição química até 10^{19} eV através do constante desenvolvimento de novas técnicas. Ficou comprovado, porém, que radiação cósmica acima de 10^{20} eV existe, uma contradição com previsões teóricas que imediatamente abriu um leque de questões, variando desde qual origem extragalática poderiam ter, até o modo como se propagam pelo espaço.

A riqueza e detalhamento que o estudo dessas partículas envolve são sintetizados em três partes neste trabalho. O primeiro capítulo aborda a radiação desde suas mais prováveis fontes geradoras e mecanismos de aceleração, os efeitos a que está sujeita durante a propagação pelo espaço e, por fim, o conjunto de processos desencadeados a partir da chegada no topo da atmosfera terrestre até o nível do solo – o chamado chuva atmosférica extenso.

Com essa motivação inicial, a segunda parte abrange a totalidade do que será o Projeto Auger em sua fase final: um observatório que emprega as duas técnicas mais bem sucedidas já utilizadas em outros experimentos de menor porte, juntamente com a física, a matemática e o embasamento computacional da análise e reconstrução das propriedades que caracterizam uma partícula primária.

No último capítulo é colocado em prática tudo o que foi discutido no anterior, com algumas restrições existentes na época em questão. A mais evidente é o funcionamento do observatório como um protótipo, quando foram operadas apenas parte de um olho (conjunto de telescópios de fluorescência) e do arranjo de solo. Outra são os códigos disponibilizados para análise pela colaboração, em constante desenvolvimento em paralelo com simulações.

Uma análise completa da reconstrução geométrica e energética de todos os eventos registrados é apresentada e depois confrontada com resultados de outros membros da colaboração, dando um panorama geral do que se propõe o projeto no futuro, quais seus principais aspectos a serem melhorados e que ferramentas de análise ainda devem ser desenvolvidas.

Abstract

This dissertation covers the analysis of the first events detected simultaneously by water tanks and fluorescence telescopes during the prototype phase of the Pierre Auger Observatory, between December 2001 and April 2002.

For years several experiments over the world dedicated to the detection of cosmic rays collected and built a well established statistics for the flux, arrival direction, energy and chemical composition up to 10^{19} eV with the constant development of new techniques. It is a fact, though, that cosmic radiation over 10^{20} eV exists, a contradiction to previous theoretical results that immediately raises questions like which extragalactic origin they could have or how they propagate through space.

The richness and level of detail involved in the study of such particles are synthesized in three parts in this work. The first chapter approaches cosmic radiation from its most likely sources and acceleration mechanisms, the effects to which it is subjected during propagation through space and, at last, the set of processes caused by the arrival at the top of the Earth's atmosphere to the ground level – the so-called extensive air shower.

After this initial motivation, the second part covers the totality of what is to be the Auger Project in its final phase: an observatory that employs the two most successful techniques ever used in other smaller-scale experiments, along with the physics, mathematics and computational basis of the analysis and reconstruction of the properties that characterize a primary particle.

Everything discussed previously is put into practice in the last chapter, with some of the restrictions at the time. The most evident is the operation of the observatory as a prototype, when only parts of one eye (set of fluorescence telescopes) and surface array were available. Another one are the codes available to analysis by the collaboration, in constant development in parallel with simulations.

A complete analysis of the geometry and energy reconstruction of all events registered is presented and cross-checked with results from other collaboration members, giving a general view of the project's proposal for the future, its main aspects to be improved and which analysis tools are still to be developed.

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
1 Introdução	1
1.1 Fontes de Radiação Cósmica	4
1.1.1 Bottom-up	6
1.1.2 Top-down	8
1.2 Propagação	9
1.3 O Chuveiro Atmosférico	12
2 O Observatório Pierre Auger	15
2.1 Tanques de Superfície	16
2.2 Telescópios de Fluorescência	22
2.3 Análise Híbrida	27
3 Primeiros resultados e conclusões	30
3.1 Três ou mais tanques com sinal	32
3.2 Menos de três tanques com sinal	38
3.3 Resultados preliminares da colaboração	43
3.4 Conclusões	47
Referências Bibliográficas	50

Lista de Figuras

1.1	Espectro diferencial de energia ($\times E^3$) combinado dos experimentos de Yakutsk, Fly's Eye, Haverah Park e Akeno. Os círculos grandes abertos representam médias dos quatro experimentos. Figura montada pela Colaboração Auger [3]. Observe a forte discordância entre os valores reconstruídos a partir de 10^{19} eV.	2
1.2	Dimensão característica e intensidade de campo magnético de possíveis aceleradores cósmicos, preparada por A. M. Hillas e publicada em [3]. Objetos abaixo das linhas diagonais não podem acelerar partículas a 10^{20} eV por ondas de choque. As linhas pontilhada e cheia correspondem a um núcleo de ferro e a um próton, respectivamente, com $\beta = 1$; a região escura é para prótons com $\beta = 1/300$	5
1.3	Energia de um próton como função da distância de propagação através da radiação de fundo do universo para várias energias iniciais. Figura por J. W. Cronin [22, 23].	10
2.1	Concepção do observatório em sua fase final de construção, como apresentada em [29]. A grade de pontos pretos corresponde aos tanques do arranjo de superfície, enquanto os quatro olhos são representados com linhas que compreendem os 30° de ângulo de abertura azimutal de cada telescópio.	16
2.2	Aspecto da média do sinal das três PMTs de um tanque a 440 m do baricentro (acima) e outro a 1485 m (abaixo). Observe o maior espalhamento das partículas da frente em relação ao eixo do chuveiro. Evento real; figura publicada em [29].	17
2.3	Representação de uma frente de partículas plana incidindo sobre as estações do detector de superfície. O vetor unitário $\hat{n}$, que define o plano, é decomposto no referencial do observatório através das coordenadas angulares θ e φ . Figura criada pelo autor deste trabalho.	18

2.4	Distribuição lateral dos sinais de um evento real em relação ao baricentro. À esquerda a seta indica o que seria o ponto de impacto da partícula primária e a projeção da direção de chegada no plano do arranjo; à direita uma função como a da equação 2.5 é ajustada aos sinais. Imagem divulgada pela Colaboração (referência [29]).	21
2.5	Campo de visão de dois telescópios de fluorescência, onde pode ser visto na câmera da direita a trajetória deixada nas PMTs por um evento real. Os círculos representam a intensidade do sinal. Figura divulgada pela Colaboração em [29].	24
2.6	Esquema extraído de [29], onde é mostrado o <i>shower-detector plane</i> e a geometria do eixo do chuveiro contida nele.	25
2.7	Função de Gaisser-Hillas (eq. 2.11) ajustada aos dados de fluorescência de um evento real. Publicado na referência [29].	26
3.1	O <i>Engineering Array</i> . Os dois campos de visão dos telescópios, ou baias (classificadas como 4 e 5), cobriam a área do céu sobre os primeiros 40 tanques do observatório. A cidade de Malargüe é vista logo à esquerda. Figura retirada da referência [29].	31
3.2	Diferença entre as reconstruções geométrica e energética dos eventos citados na tabela 3.1, usando o <i>Event Display</i> e o FLORES.	34
3.3	Comparação entre as reconstruções geométrica e energética dos 12 eventos híbridos abordados nesta seção. As linhas cheias correspondem a uma reta de 45° ; para o ângulo zenital não é mostrado o evento Hy 74 e para o baricentro foram removidos os eventos Hy 50 e 65. Dados analisados pelo FLORES Híbrido e <i>Event Display</i>	35
3.4	Partes geométrica e energética reconstruídas pelo modo fluorescência e híbrido do FLORES, para os 12 eventos da tabela 3.1. As retas cheias são de 45° para comparação; novamente não é mostrado o evento Hy 74 no gráfico de ângulos zenitais, enquanto o baricentro do evento Hy 65 foi omitido.	37
3.5	Ângulos zenital e azimutal de eventos reconstruídos unicamente através das medidas dos telescópios de fluorescência, e depois com a informação conjunta de um ou dois tanques do arranjo. A linha cheia é uma reta a 45° para comparação entre os dados; as retas pontilhadas englobam 68.3% do número total de medidas.	40
3.6	Baricentro e energia dos mesmos eventos do gráfico da figura 3.5.	41
3.7	Diferença nas variáveis geométricas e energética reconstruídas de maneira híbrida com a informação de dois tanques e depois com a retirada do tanque de menor sinal.	42
3.8	Ângulos zenital e azimutal determinados por Fick e Sommers comparados aos reconstruídos pelo autor desta dissertação. Os dados preenchidos em preto referem-se aos eventos cujos tempos dos tanques disparados foram adicionados de $100 \mu s$ pelos colaboradores.	45

3.9	Continuação da análise apresentada na figura 3.8 para a reconstrução do baricentro e da energia. Dos eventos cujos tempos dos tanques disparados foram adicionados de $100\ \mu\text{s}$, apenas três foram divulgados por Fick e Sommers no cálculo da energia.	46
-----	---	----

Lista de Tabelas

3.1	Identificação pelo SDId e Hy, número associado aos eventos híbridos em ordem cronológica. No número de tanques com sinal de cada evento, “(+1)” refere-se ao tanque desprezado na análise SD, por ser muito distante do baricentro e, ao mesmo tempo, possuir o menor sinal.	33
3.2	Eventos cujos dados são inacessíveis por erro.	38
3.3	Número de pixels com sinal dos dois telescópios em Los Leones. O “X” refere-se a um sinal detectado porém não analisado pelo interpretador do FLORES (ROOT).	38
3.4	Variação porcentual dos coeficientes de correlação iniciais após a exclusão do tanque de menor sinal. Os valores são calculados tomando $100 \times (1 - r_{1t}^2/r_{2t}^2)$, onde r_{2t}^2 é o coeficiente de correlação inicial da variável em questão, e r_{1t}^2 o valor final.	43
3.5	S_M/S_m para os 16 eventos de dois tanques disparados, onde S_M e S_m são, respectivamente, o maior e o menor sinal integrado das estações envolvidas.	43
3.6	Quantidade de eventos pré-analisados por Fick e Sommers (Colaboração Auger) nas variáveis geométricas e energética.	44
3.7	Identificação por Hy e SDId dos nove eventos sincronizados por Fick e Sommers.	44
3.8	Total dos eventos detectados pelo EA, separados entre os quais dispararam três ou mais tanques, dois e um tanques, mais os que apresentaram erro de registro.	47
3.9	Discriminação do número de eventos analisados por Fick e Sommers (FS) em relação aos analisados pelo autor desta tese (A), separados na categoria de tanques disparados por evento.	49

Capítulo 1

Introdução

Um dos grandes interesses científicos no início do século XX foi que parecia existir mais radiação no ambiente do que a fornecida por fontes naturais deste mesmo. Assim, em 1912, o físico austríaco Victor Hess [1] voou em um balão até uma altitude de 5 km e observou, com um eletroscópio de folhas de ouro, que a ionização *aumentava* com a altura. Ficou assim comprovada a existência de radiação vinda de fora da Terra, imediatamente cunhada como *radiação cósmica*.

Durante os anos que seguiram até hoje, o estudo das várias características desses raios mostraram a necessidade de contínuo desenvolvimento de detectores específicos, revelando que tais partículas:

- Possuem um espectro diferencial de energia que percorre 12 décadas (10^9 eV $\sim 10^{21}$ eV) e segue uma lei de potência aproximada $E^{-\gamma}$ ($\gamma \approx 3$) em relação à frequência com que são observadas na superfície do planeta;
- São relativísticas, portando parâmetros de velocidade β ($= v/c$) tão próximos a um que seus momentos lineares são comparáveis aos de corpos macroscópicos na escala de dimensão humana (a mais energética já registrada, com 3×10^{20} eV pelo experimento Fly's Eye, em 1991, equivale à energia cinética de uma bola de tênis a mais de 160 km/h);
- Têm composição química hadrônica em maior proporção (prótons até núcleos de ferro), mas também podem ser fótons ou neutrinos;
- Aparentemente possuem uma distribuição isotrópica de direção de chegada na Terra em energias próximas a 10^{19} eV;
- Não possuem origem conhecida, mas há uma distinção aparente entre os de origem galáctica e extragaláctica;
- A partir de 5×10^{19} eV, não apresentaram até o momento uma tendência única do fluxo com que são detectadas, visto que os dados de vários experimentos se mostram estatisticamente insuficientes para esta determinação (figura 1.1).

Essas observações podem ser explicadas através de modelos, a princípio, simples. Enrico Fermi [2], em 1949, demonstrou que partículas carregadas podem atingir altas energias através de repetidos encontros com nuvens de plasma magnetizado em movimento (ondas de choque). De acordo com a dinâmica desses gases, a variação média da energia por encontro é positiva e proporcional à própria energia da partícula, ou seja, $\Delta E = \alpha E$. Inicialmente portando uma energia E_0 , k encontros implicarão em uma energia final $E = E_0(1 + \alpha)^k$. Supondo agora P_{esc} como a probabilidade por encontro de uma partícula escapar da região de confinamento e não estar mais submetida a aceleração, o número de partículas que sobrevive por um período suficientemente longo para atingir energias maiores que um determinado E será, somando sobre k , dado por $N(>E) \propto E^{-\gamma}$, onde $\gamma \approx P_{esc}/\alpha$, desde que P_{esc} e α sejam pequenos (comparados com a unidade). Portanto, este processo¹ produz naturalmente um espectro de lei de potência de energias de partículas.

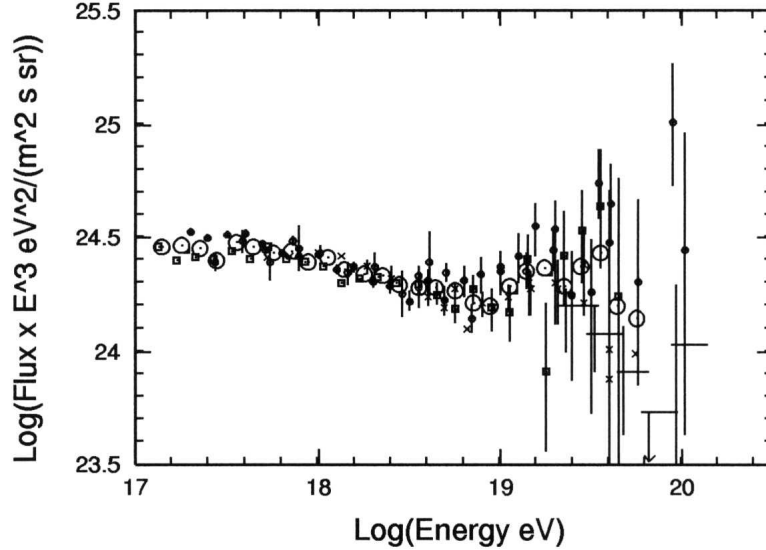


Figura 1.1: Espectro diferencial de energia ($\times E^3$) combinado dos experimentos de Yakutsk, Fly's Eye, Haverah Park e Akeno. Os círculos grandes abertos representam médias dos quatro experimentos. Figura montada pela Colaboração Auger [3]. Observe a forte discordância entre os valores reconstruídos a partir de 10^{19} eV.

É claro que esta descrição provê a frequência de raios cósmicos ao deixar a fonte, podendo ser demonstrado [4] que, no limite de ondas de choque fortes, o índice espectral γ do espectro de energia integral pela aceleração de Fermi é um pouco maior do que um. Considerando que as partículas sofrerão processos dependentes de suas energias durante o transporte à Terra, espera-se que o

¹Conhecido hoje como mecanismo de aceleração de Fermi.

espectro observado aqui seja mais atenuado do que na produção. De fato, medidas experimentais do espectro integrado variam entre $E^{-1.1}$ e $E^{-2.1}$, mostrando razoável relação entre dados e teoria.

Em geral, a máxima energia possível é determinada pelo período de tempo em que partículas ficam submetidas ao plasma. A própria região de aceleração pode existir apenas por um tempo limitado como é o caso de ondas de choque em supernovas, cuja dissipação ocorre depois de cerca de 10^3 anos. Por outro lado, se as perturbações plasmáticas persistem por períodos muito longos, a energia máxima passa a ser limitada pela crescente capacidade de escape já que é mais difícil confiná-las magneticamente a essa região. A modelagem simplificada [5] da aceleração de Fermi prevê uma energia máxima adquirida por um núcleo de carga Ze

$$E_{max} \approx \beta c \times Ze \times B \times L, \quad (1.1)$$

considerando L o comprimento característico da região de aceleração com campo magnético B , e βc ($= v$) a velocidade da onda de choque², onde $\beta \approx 0.01$ em supernovas. Relativisticamente, não é razoável pressupor que aceleradores astrofísicos possuam 100% de eficiência necessária para atingir energias como as previstas pela equação 1.1; é mais provável que o valor E_{max} deva ser reduzido por um fator de dez, dependendo fortemente dos detalhes do ambiente [6].

Atualmente, o Tevatron³ de 6.4 km de circunferência do Fermilab, localizado nos Estados Unidos, é responsável pela maior energia até a qual partículas foram aceleradas pelo homem [7]. Operando com um feixe de prótons circulando o anel no sentido horário e um feixe de antiprótons no sentido anti-horário, a energia máxima atingida por feixe foi de 0.98×10^{12} eV = 0.98 TeV, e em uma colisão frontal próton-antipróton, 1.8 TeV (0.9 TeV por feixe, suficiente para a descoberta do quark top). É intrigante, portanto, que partículas cujas energias excedem facilmente a ordem de teraeletronvolts atinjam a Terra com um fluxo muito superior a $1/m^2s$; uma ampla discussão em torno da origem e de outros mecanismos de aceleração de raios cósmicos será dada na próxima seção.

Experimentos de detecção direta das partículas primárias em balões e satélites, operando na faixa de energia de 10^5 eV até 10^{11} eV, mostram que a proporção com a qual são observadas é aproximadamente 90% prótons, 9% núcleos de hélio e 1% entre fótons, neutrinos, núcleos pesados e elétrons. Chaisson e McMillan [8] apontam que em torno de 1% são, de fato, elétrons. Elementos leves como lítio, berílio e boro compõem 0.25%, um excesso comparado com sua proporção média no universo de $10^{-9}\%$! Carbono, nitrogênio, oxigênio e flúor são 10 vezes mais abundantes na radiação cósmica do que em matéria comum; para núcleos pesados essa quantidade é de 100 vezes. Destas evidências é sugerido que elementos com $A \leq 11$ são subprodutos de colisões de partículas pesadas com matéria interestelar (veja seção 1.2), enquanto os de $A \geq 12$ devem ter origem em regiões do universo com abundância de elementos do meio da tabela periódica.

²Não confundir com a velocidade da partícula primária.

³Acelerador de partículas capaz de produzir energias de teraeletronvolts (TeV).

O fluxo de radiação cósmica próximo de 10^{15} eV é de apenas uma partícula a cada m^2 por *ano*, sendo necessária uma área de centenas de m^2 de detecção se desejamos fazer análise a esta energia com algumas contagens por dia, fato completamente inviável para satélites ou balões. Assim, a partir de 10^{11} eV, a determinação química de um primário deve ser indireta e para energias na faixa entre 10^{18} eV e 10^{21} eV ela será abordada na seção 1.3. Pode ser adiantado que núcleos altamente carregados são mais fáceis de acelerar do que prótons devido à sua carga, porém mais susceptíveis a fotodesintegração na fonte e durante a propagação devido à alta seção de choque; neutrinos e raios gama são potencialmente assinaturas únicas de modelos mais exóticos que serão abordados logo em seguida.

Deste ponto em diante, a partícula primária será sempre diferenciada entre um próton e um núcleo de ferro. O motivo para isto é que $A = 1$ e $A = 56$ são as configurações mais estáveis que um núcleo atômico pode ter: um próton em si já é uma partícula singular; o ferro possui a maior energia de ligação por nucleon da tabela periódica (em isótopos naturais estáveis). Mas, dada a natureza das energias que envolvem raios cósmicos, as interações a que estão sujeitos e os ambientes onde são produzidos e por onde viajam, espera-se que elementos mais leves, derivados de um núcleo de ferro, por exemplo, também sejam observados aqui na Terra.

1.1 Fontes de Radiação Cósmica

Há mais de 90 anos muita discussão vem sendo feita em torno de quais objetos cósmicos ativos estão produzindo e acelerando partículas como prótons a energias tão extremas, além de qual configuração espacial e temporal essas fontes teriam no universo de maneira a gerar o espectro de potência $E^{-\gamma}$ aqui observado. Estrelas de nêutrons, pulsares, radiogaláxias, supernovas, buracos negros e até mesmo o Big Bang foram considerados. Ondas de choque intensas em todas essas localidades compõem o mecanismo de aceleração atualmente aceito; alguns outros serão discutidos em seguida.

O corpo celeste mais próximo com intensa atividade termomagnética a contribuir para o fluxo de raios cósmicos na Terra é o Sol. As proeminências observadas em sua superfície, grandes jatos de matéria gasosa além de elétrons e prótons relativísticos, seguem linhas de campo magnético⁴ entre 10 G e 10^2 G em torno das quais as partículas carregadas seguem uma trajetória espiralada emitindo radiação eletromagnética que percorre todo o espectro até os raios X e raios gama. Através de um fenômeno de reconexão de linhas de campo [9], até mesmo esse plasma perde seu confinamento e é ejetado do Sol com grande velocidade. As manchas solares, um fenômeno com ciclo médio de 11 anos responsável pelo aparecimento de cerca de uma centena de regiões “frias” da fotosfera solar e ainda não bem compreendidas, produzem campos de até 3×10^3 G que afetam

⁴Gauss (G), unidade de intensidade de campo magnético. Um pequeno ímã gera um campo de cerca de 100 gauss; o campo magnético da Terra na superfície é de aproximadamente 1 gauss.

diretamente a emissão de radiação pela estrela e, conseqüentemente, a taxa de radiação à qual a Terra é submetida durante este período. Apesar de tudo, os raios cósmicos gerados pelo Sol atingem energias máximas entre centenas de MeV e alguns poucos GeV (previsto e verificado detalhadamente pelo modelo de aceleração por ondas de choque de Fermi, na heliosfera [10]), num total de 1% do fluxo de radiação vinda do espaço observada na superfície do planeta.

A comparação química de abundância entre partículas cósmicas e a composição relativa solar revela grande similaridade [11], porém com excesso em núcleos leves, como já foi discutido na introdução. É sugerido que esses raios devem ser produzidos na mesma proporção química que a matéria solar em sua origem, estando depois sujeitos a efeitos apresentados na seção 1.2 durante sua propagação, onde também será abordada a importante distinção entre raios cósmicos galáticos ($E < 10^{19}$ eV) e extragaláticos ($E \gtrsim 10^{19}$ eV).

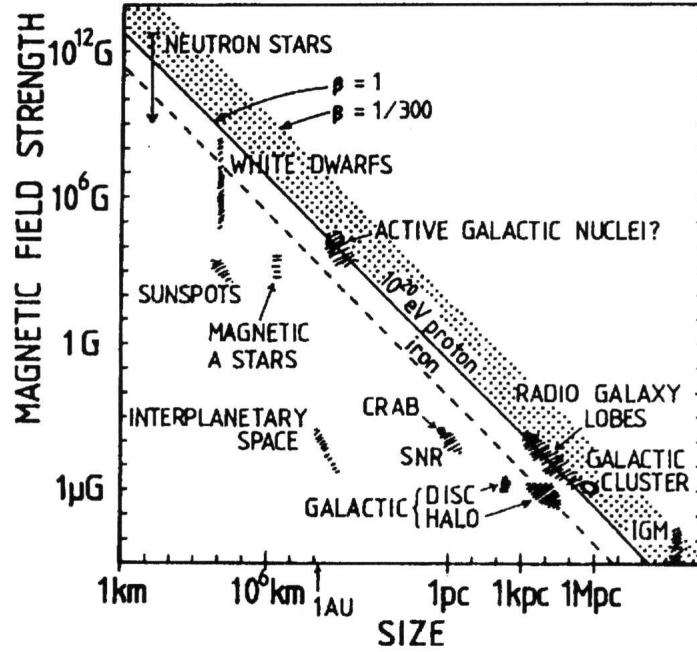


Figura 1.2: Dimensão característica e intensidade de campo magnético de possíveis aceleradores cósmicos, preparada por A. M. Hillas e publicada em [3]. Objetos abaixo das linhas diagonais não podem acelerar partículas a 10^{20} eV por ondas de choque. As linhas pontilhada e cheia correspondem a um núcleo de ferro e a um próton, respectivamente, com $\beta = 1$; a região escura é para prótons com $\beta = 1/300$.

Que candidatos são potencialmente geradores dos raios cósmicos mais energéticos? Supondo $E_{max} = 10^{20}$ eV na equação 1.1 e um limite extremo de $\beta = 1$, uma rápida análise comparativa entre as linhas $B - L$ para prótons

($Z = 1$) e núcleos de ferro ($Z = 56$) com os pares $B - L$ (regiões hachuradas da figura 1.2) medidos experimentalmente de vários objetos astronômicos pode ser feita. Como resultado, obtém-se que apenas estruturas de grande escala relacionadas a galáxias e grupos de galáxias (e até mesmo colisões entre elas, como sugerido recentemente por Cesarsky [12, 13]) possuem suficiente comprimento característico e intensidade de campo magnético para funcionarem como aceleradores além de 10^{20} eV. Intrigante é o fato de que os centros mais energéticos parecem ter um máximo exatamente onde começam a aparecer os efeitos de fotoprodução por interação de hádrons com a radiação de fundo do universo (ou corte de GZK, abordado na seção 1.2).

Todas as teorias que tratam de ondas de choque e campos magnéticos supõem que a matéria existia previamente e foi simplesmente acelerada pelo impacto. Estas são as chamadas “bottom-up”. Uma alternativa recente, as teorias “top-down”, propõem que partículas já são criadas com suas correspondentes energias diretamente através do decaimento de uma partícula-pai supermassiva. Ambas as abordagens são apresentadas a seguir.

1.1.1 Bottom-up

Devido às muitas questões ainda em aberto envolvendo raios cósmicos, é praticamente impossível trabalhar com um único modelo dentro da escala de energia envolvida; prova-se mais frutífero usar a técnica bottom-up, que significa partir de mecanismos de aceleração previamente conhecidos (próximos do que se conhece da realidade) e subir na escala de energia, considerando-os os possíveis aceleradores das partículas primárias mais energéticas. Exemplos de tais modelagens são apresentados logo abaixo; para esta subseção sugere-se que os tópicos sejam acompanhados juntamente com o gráfico da figura 1.2.

- Quasares: Objetos astronômicos compactos com intensa emissão de ondas de rádio, que aparecem como estrelas comuns em fotografias óticas devido a sua intensa luminosidade, a ponto de ofuscar qualquer estrutura próxima, mas possuem redshifts⁵ tão grandes ($z \approx 4$) que, com base na lei de Hubble⁶, faz desses corpos os mais distantes conhecidos (cerca de 10^{10} anos-luz; para efeito comparativo, o limite superior da idade do universo é em torno de 2×10^{10} anos). Observações sugerem, por muitas características espectrais comuns e de estágios de evolução de galáxias, mas não provam [15], serem Núcleos Ativos de Galáxias (ou AGNs⁷), cuja violenta atividade produz jatos relativísticos de matéria perpendiculares ao disco galático, atribuídos à existência de buracos negros nessas regiões. Mais de 1500 quasares são catalogados e sabe-se que alguns apontam seus

⁵Elongamento do comprimento de onda emitido λ_0 para um observado λ devido ao efeito Doppler, dado por $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1$.

⁶Sejam dois pontos quaisquer $\vec{r}_1$ e $\vec{r}_2$ do universo. Suas velocidades relativas são dadas por $\vec{v}_1 - \vec{v}_2 = H(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$, onde H é a chamada constante de Hubble e atualmente seu valor é conhecido como (73 ± 3) km/s/Mpc [14].

⁷Do inglês *Active Galactic Nuclei*.

jatos em direção à Terra. Alguns despendem a energia gerada pelo Sol durante toda sua vida em apenas uma hora, cobrindo um vasto intervalo de comprimentos de onda que inclui raios X e raios gama em parte não-térmicos [15], ou seja, criados pelo processo síncrotron, provavelmente devido a elétrons espiralando em intensos campos magnéticos. Possuem uma configuração $B - L$ exatamente sobre a linha de $E_{max} = 10^{20}$ eV.

- Radiogaláxias: Semelhantes aos quasares na emissão de rádio, porém com redshift e campo magnético muito menores ($z \ll 1$; $B \approx 10 \mu G$). É comum terem aparência de explosão ou expelirem jatos de matéria; suas protuberâncias são observadas na Terra como luz polarizada, forte característica de emissão de radiação síncrotron e, portanto, eficiente acelerador relativístico de partículas carregadas. O fato desta radiação ser constante ao longo dos jatos implica que os elétrons readquirem energia de alguma forma ainda não satisfatoriamente explicada. Filtros de raios-X e ondas de rádio revelam que as formações remanescentes de explosões possuem alta intensidade exatamente sobre a “casca” de material ejetado radialmente do centro, que nada mais é do que uma onda de choque, outro indicativo do mecanismo de Fermi. Seguindo a lei de Hubble e as características coincidentes com quasares, acredita-se que as radiogaláxias tenham se originado como estes e que estejam hoje sendo observadas em um estágio mais avançado de evolução. Considerando-se uma energia máxima de aceleração 10^{20} eV, sua configuração $B - L$ também ocorre sobre esta linha.
- Estrelas de Nêutrons: Um dos possíveis produtos finais de estrelas entre 1.4 e ~ 3.2 massas solares (o limite superior ainda não é bem conhecido) cuja pressão gravitacional cria densidades em torno de 10^{11} g/cm³ em seu núcleo, suficiente para que prótons e elétrons sejam combinados produzindo nêutrons (e, conseqüentemente, neutrinos) na forma de um gás degenerado. A atmosfera dessas estrelas ainda possui, livres, elétrons, prótons e átomos de ferro em sua maior parte. Apesar de terem um raio previsto próximo de 15 km, o que faz destas candidatas a geradoras de raios cósmicos é seu altíssimo campo magnético. Com 10^{12} G, as estrelas de nêutrons também caem sobre a linha $B - L$ da radiação cósmica mais energética já observada.
- Explosões de Raios Gama: Inicialmente propostas mais fontes do que o número destes eventos detectados, hoje, devido às grandes distâncias observadas, a lista de candidatos foi diminuída para duas classes principais: estrelas muito massivas e sistemas binários compostos de estrelas de nêutrons ou buracos negros. As explosões geram fótons entre keV e GeV, são de curta duração (entre 0.1 s e 100 s), intensas e ocorrem na taxa de uma por dia, isotropicamente, demonstrando provável origem extragaláctica. Acredita-se, como resultado de simulações [16], que os pulsos longos e suaves provêm de estrelas com grande massa cujo núcleo de ferro colapsa em um buraco negro, liberando energia e ejetando o material que o envolve em camadas com diferentes velocidades, durante o período de

alguns segundos. Quando uma camada rápida colide com uma mais lenta, raios gama são emitidos. A camada emergente continua viajando até que outra em maior velocidade a atinja e repita o processo, fenômeno conhecido como choques internos. Pulsos curtos provavelmente vêm de sistemas binários, onde uma enorme quantidade de energia é liberada quando, ao longo do tempo, seus constituintes descrevem órbitas espiraladas e, por fim, colidem. É interessante o fato de que a potência necessária para gerar o fluxo dos raios cósmicos mais energéticos é comparável à taxa média em que energia é emitida na forma de raios gama por estas explosões no cenário cosmológico [3], sugerindo fortemente que ambos possuem a mesma origem.

1.1.2 Top-down

É evidente que modelos bottom-up funcionam exatamente sobre o limite de energia 10^{20} eV quando se sabe que radiação acima deste valor existe. Uma maneira alternativa de abordar o problema é ignorar o que se conhece por observações e supor ambientes prováveis onde partículas possuiriam uma natureza completamente diferente por causa da escala de energia envolvida. Tal técnica é conhecida como top-down e pressupõe que partículas já são criadas com suas respectivas energias, a fim de descrever o que é medido em experimentos como o Projeto Auger.

Defeitos topológicos são configurações estáveis da matéria, formadas durante transições de fase conforme o universo primordial esfriava. Por transição de fase entende-se, cosmológicamente, a quebra espontânea de simetria implícita em algumas Teorias de Grande Unificação (ou GUTs, do inglês *Grand Unified Theories*). Com a queda da temperatura e a expansão do universo, simetrias das leis da física começaram a quebrar em diversas regiões do espaço e a se espalhar com a velocidade da luz; defeitos topológicos ocorreram onde diferentes regiões entraram em contato. A matéria nestes defeitos está na fase original de simetria, que persiste mesmo no novo ambiente assimétrico. Alguns possíveis defeitos são listados abaixo:

- Paredes de domínios: Membranas bidimensionais criadas quando uma simetria discreta é quebrada. São semelhantes às paredes das células de espumas, que dividiram o universo em células discretas;
- Cordas cósmicas: Linhas unidimensionais da quebra de simetrias axiais ou cilíndricas;
- Monopólos: Defeitos pontuais de simetrias esféricas quebradas, previstas como tendo carga magnética, tanto norte como sul, embora hoje evidências apontem que estes talvez não possam ser raios cósmicos [17];
- Texturas: Não tão localizados como os outros defeitos porém igualmente estáveis, formados quando grupos de simetria mais complicados são quebrados.

A implicação para raios cósmicos deve-se às energias envolvidas nesses fenômenos top-down. Os defeitos, apesar de estáveis, podem liberar parte de sua energia na forma de partículas supermassivas chamadas “X” se elas colapsarem ou aniquilarem. A escala típica de massa nas GUTs é da ordem de 10^{24} eV, decaindo em léptons e em quarks, formando jatos de hádrons altamente interagentes. A forma dos espectros para nucleons e raios gama produzidos em modelos top-down teoricamente independe de um cenário específico acima de 10^{20} eV, pois o comprimento de atenuação na radiação de fundo do universo (ou corte de GZK, abordado na próxima seção) é pequeno comparado com a escala de Hubble. Efeitos evolucionários cosmológicos dependentes de modelos específicos são desprezíveis. A contribuição para o fluxo de raios cósmicos por um modelo top-down seria, portanto, dominante acima de $\simeq 10^{20}$ eV e desprezível no intervalo 10^{14} eV - 10^{19} eV. Uma componente top-down muito pronunciada poderia até mesmo produzir a retomada do fluxo além da atenuação GZK, revelando uma importante assinatura do cenário primordial e colocando fortes restrições nas teorias ainda altamente dependentes de modelos.

Uma investigação recente por Kephart e Weiler [18], considerando monopólos magnéticos, aponta que o fluxo de radiação cósmica acima de 10^{20} eV é similar ao fluxo máximo permitido para que essas relíquias top-down não destruam o campo magnético interestelar, além de que as intensidades e comprimentos de coerência de campos no universo podem acelerar uma “carga” magnética muito além de 10^{20} eV. Uma consequência observacional é que os monopólos chegariam à Terra distribuídos preferencialmente em direções do campo magnético galático local; porém, ainda não foi detalhada uma modelagem para determinar se um chuveiro iniciado por um primário desta natureza seria diferente de um simples primário hadrônico [3].

1.2 Propagação

A radiação de fundo do universo, observada pela primeira vez por Penzias e Wilson [19] e hoje entendida como remanescente do Big Bang, é composta por um espectro de ondas eletromagnéticas com energia térmica de corpo negro equivalente a 2.735 K (determinada pelo satélite COBE, lançado em 1989) que permeia todo o espaço interestelar. Logo após esta descoberta, Greisen [20], Zatsepin e Kuz'min [21], independentemente, apontaram que, no referencial de um próton com suficiente energia (i.e. um raio cósmico), esses fótons são vistos, via efeito Doppler⁸, como raios gama com energia suficiente para fotoprodução de um pión. Como consequência, o próton perde, em média, 20% de sua energia inicial por interação.

Sucessivos espalhamentos por este processo degradam a energia do próton de maneira que, independente da energia com a qual deixa a fonte (acima de 10^{20} eV), uma evidente atenuação (figura 1.3) é observada a partir de uma distância⁹ de 50 Mpc e a energia altamente reduzida se a partícula viajou mais

⁸Ou *blueshift*, que significa “desvio para o azul”.

⁹Parsec (pc), de *parallax second*, definido pela distância em que o raio médio da órbita

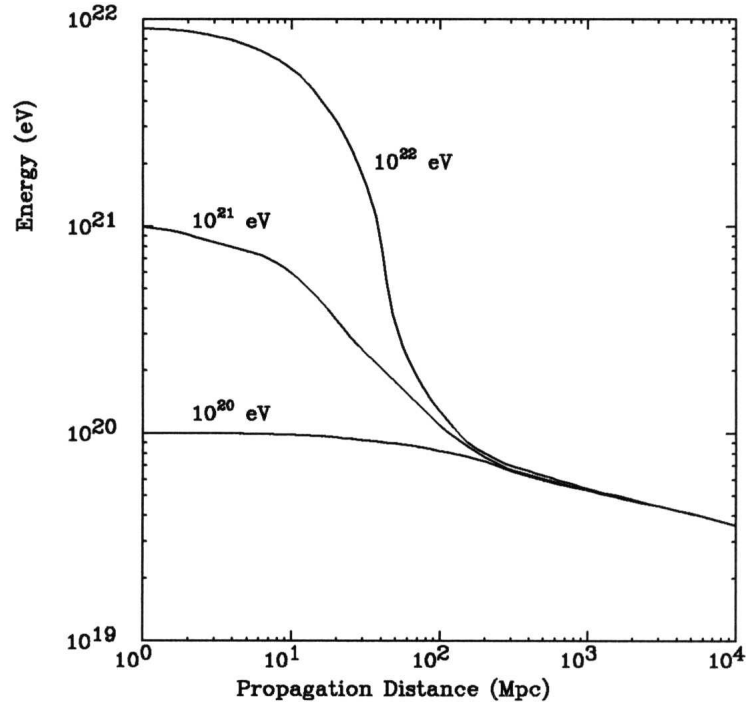


Figura 1.3: Energia de um próton como função da distância de propagação através da radiação de fundo do universo para várias energias iniciais. Figura por J. W. Cronin [22, 23].

do que 100 Mpc. O resultado é que a forma do espectro de energia observado na Terra depende fortemente da distribuição espacial e temporal das fontes, assim como do espectro inicial das partículas, devendo apresentar uma redução drástica no fluxo da radiação cósmica em torno da energia de 6×10^{19} eV – o chamado corte de GZK.

Sendo esta interação um fenômeno de ressonância (hadrônica, Δ^+), outra consequência é a de que uma leve recuperação no fluxo deve aparecer no espectro entre energias de 10^{21} eV e 10^{22} eV. A maior parte dos modelos de aceleradores cósmicos não é capaz de gerar partículas a essas energias (veja seção 1.1), porém alguns cenários exóticos predizem a possível detecção de tal fenômeno em experimentos suficientemente grandes como o Observatório Auger. Detalhes sobre as dimensões do projeto serão discutidos no capítulo 2.

Os raios cósmicos estão sujeitos a vários outros tipos de interação durante a propagação pelo espaço, como simples espalhamento por poeira e gás [11], mas o

terrestre subtende um ângulo de um segundo de arco. Usado como unidade em medidas astronômicas, equivale aproximadamente a 3.26 anos-luz. A distância do Sistema Solar ao centro da Via Láctea é de 10^4 parsecs.

efeito mais relevante para prótons e núcleos pesados (i.e. partículas portadoras de carga elétrica) é a deflexão por campos magnéticos. São muitas as fontes, porém devido à velocidade de propagação de um raio cósmico, apenas objetos que mantêm esses campos por extensões da ordem de alguns kpc são capazes de produzir desvios significantes em sua trajetória [3]. Um simples cálculo do raio de Larmor¹⁰ nessas condições é expresso por

$$R_{kpc} \approx \frac{E_{18}}{ZB_{\mu G}}, \quad (1.2)$$

onde E_{18} é a energia da partícula em unidades de 10^{18} eV, Z o número atômico do núcleo e B o campo magnético em μG . Uma média do campo magnético entre os três braços espirais da Via Láctea (Sagitário, Perseu e Scutum) resulta em uma componente uniforme de $3 \mu G$ [24], e sabendo que aquela possui um raio aproximado de 7 kpc, a energia máxima com a qual um núcleo atinge a Terra, se originado no ponto mais distante possível dentro do disco será em torno de 10^{19} eV. Por isso, é razoável pressupor que partículas cujas energias são menores do que 10^{19} eV devem ter origem predominantemente galáctica, enquanto 10^{19} eV ou mais implica em radiação unicamente extragaláctica.

Quando se fala de partículas com energias da ordem de 10^{20} eV sujeitas ao corte de GZK, automaticamente são consideradas distâncias entre 50 Mpc e 100 Mpc. Como foi discutido, uma galáxia típica possui um diâmetro de algumas dezenas de kpc e, no aglomerado do qual a Via Láctea faz parte, a distância média entre uma galáxia e outra é de cerca de 30 Mpc. Isso demonstra que primários com essas características são submetidos a mais de uma deflexão magnética entre a fonte e o alvo (a Terra, no caso). Seja l_{kpc} o comprimento de coerência de um campo magnético galático em kpc, então a simples substituição $l_{kpc} = R_{kpc}\theta$ na equação 1.2 resulta em

$$\theta \approx 0.3^\circ \frac{l_{kpc} Z B_{\mu G}}{E_{20}} = 0.3^\circ \frac{l_{Mpc} Z B_{nG}}{E_{20}}$$

se a deflexão é razoavelmente pequena ($\sin \theta \approx \theta$). A parte da direita da equação avalia o desvio no meio extragalático, onde o comprimento de coerência de um campo típico da ordem de 1 nG é aproximadamente 1 Mpc. A média total dos desvios angulares por múltiplo espalhamento da direção de chegada em relação à linha de visão da fonte pode ser aproximadamente calculada como $\theta \times \sqrt{L_{Mpc}}$ para uma fonte à distância L_{Mpc} . Tomando o início do efeito da fotoprodução de píons, este modelo prevê $0.3^\circ \times \sqrt{50} = 2.1^\circ$ de dispersão para um próton, e, portanto, deseja-se que um detector de eventos extragaláticos com energia 10^{20} eV tenha uma resolução angular em torno de 2° ou menos. Estima-se que prótons sejam desviados em 0.7° por comprimento de coerência no meio extragalático a 4×10^{19} eV, e, como menos sujeito ao corte GZK, a indeterminação de sua fonte, digamos, a 200 Mpc, seria de $0.7^\circ \times \sqrt{200} = 10^\circ$. Se os candidatos a fontes não forem muitos em certa região do céu, então

¹⁰Raio da órbita de uma partícula carregada quando submetida a um campo magnético.

aglomerados de fontes individuais devem ser evidentes e o erro na localização será $10^\circ/\sqrt{N}$ para N eventos medidos.

Um último aspecto relevante do desvio por sucessivos espalhamentos magnéticos é que as partículas sofrem um atraso temporal em relação aos fótons emitidos simultaneamente pela fonte, dado algum acontecimento catastrófico como os descritos na seção 1.1. A princípio, a observação e compreensão de tal ocorrência poderia prever a chegada de raios cósmicos de direções já conhecidas, e, assim, alavancar o estudo dos campos magnéticos galáticos e extragaláticos, ainda não completamente estabelecidos [3]. Suponha um próton entre 10^{20} eV e 10^{21} eV. Caso ele viaje pelo meio galático (0.5 kpc e $2 \mu\text{G}$), o atraso em relação à luz deve variar entre 30 horas, para o de menor energia, e 53 minutos, para o de maior. Passando para o meio extragalático (30 Mpc e 1 nG), os respectivos valores agora são 3162 anos e 32 anos, impraticáveis para um observatório.

1.3 O Chuveiro Atmosférico

Cerca de 30 anos após a descoberta da radiação cósmica, um experimento em solo utilizando duas câmaras de Wilson separadas a distâncias graduais até 300 m apontou que grandes quantidades de partículas as atravessavam simultaneamente. Foi assim que Pierre Victor Auger [25] demonstrou a existência do que é conhecido como chuva atmosférica extenso: uma cascata de partículas que se propaga pela atmosfera com velocidade próxima à da luz, iniciada pela colisão de um raio cósmico com moléculas do topo da atmosfera terrestre, cujos subprodutos desencadeiam colisões secundárias e assim por diante.

O número de partículas ao longo do seu eixo (chamado desenvolvimento longitudinal) cresce violentamente até atingir um máximo, devido à transferência de energia entre partículas nas colisões subseqüentes, e, por fim, é atenuado. Já a difusão transversal destas em relação ao eixo é sempre crescente, conhecido como desenvolvimento lateral do chuva (figuras dessas duas distribuições são apresentadas na parte de instrumentação do observatório, no capítulo 2). O que atinge o solo é uma frente, em forma de disco, com leve curvatura (geralmente aproximada por um plano), perpendicular à trajetória do primário, variando em alguns quilômetros de raio e cerca de poucos metros de espessura.

Se a partícula primária é um núcleo ou um nucleon, então a cascata é iniciada por uma interação hadrônica. Próximos ao eixo se concentram nucleons com pequeno ângulo de espalhamento, enquanto em volta predominam mésons π^+ e π^- . Também são gerados mésons π^0 , que decaem rapidamente em gamas e elétrons, com grande espalhamento, formando assim a componente que mais se distancia do eixo do chuva. Aproximadamente 30% da energia da frente é transferida para a componente eletromagnética a cada geração; a mesma carga, no fim de todo o processo, em torno de 90% da energia inicial do primário. A energia restante se encontra em múons e neutrinos gerados no decaimento dos píons carregados.

Fica claro, portanto, que o número total de partículas eletromagnéticas de baixa energia da cascata é, com boa aproximação, proporcional à energia do chu-

veiro. Porém, a quantidade de múons que atingem o solo cresce mais lentamente com a energia da partícula primária, com variação prevista por simulações [26] em $E^{0.85}$ para um chuva iniciado por um próton. É importante considerar aqui que um núcleo pesado se comporta de maneira muito semelhante com a superposição de seus nucleons constituintes¹¹. Vendo um núcleo de número atômico A como um agregado de nucleons de energia E/A , o número de múons em um chuva iniciado por este e em um gerado por um próton de mesma energia se relacionam por

$$N_{\mu}^A = A \left(\frac{E}{A} \right)^{0.85} \times \frac{N_{\mu}^p}{E^{0.85}} = A^{0.15} N_{\mu}^p.$$

Assim, um chuva de ferro ($A = 56$) produzirá 83% mais múons do que um de próton com a mesma energia, demonstrando que a componente muônica é um forte indicador para a determinação química da partícula primária.

Outra consequência importante do modelo de superposição está relacionada à profundidade de máximo de um chuva, isto é, o local na atmosfera onde ele desenvolveu o maior número de partículas. X_{max} , como é chamado, depende fortemente da energia total e da massa do núcleo primário, sendo que em cascatas iniciadas por prótons ele cresce em pelo menos 55 g/cm^2 para cada década de energia. Considerando, então, um único chuva atmosférico de ferro como 56 chuvas de prótons cujas energias são $1/56$ da energia inicial desse núcleo, o valor esperado para X_{max} decai em aproximadamente $\log(56) \times 55 \text{ g/cm}^2 \approx 100 \text{ g/cm}^2$. Portanto, um chuva de ferro tem um valor esperado de X_{max} em torno de 100 g/cm^2 menor do que X_{max} esperado para um chuva de próton à mesma energia, mais um forte indicador da natureza da partícula primária.

O raio de curvatura da frente de uma cascata é um indicativo da idade do chuva, podendo também evidenciar a composição química do raio cósmico que o desencadeou. Como descrito acima, as partes nucleônica e muônica se concentram próximas do eixo e possuem velocidade de penetração atmosférica maior do que a eletromagnética, afastada do centro. Ao longo do desenvolvimento o que se observa é uma frente cujo raio de curvatura diminui com o tempo, alongando-se. É possível, assim, estimar a profundidade atmosférica em que ocorreu a primeira colisão.

Diferentes detectores operam em diferentes intervalos de medida de energia; como apresentado anteriormente na introdução, frequência de observação de radiação cósmica na Terra e área de detecção estão fortemente ligadas. Balões e satélites trabalham na detecção direta da partícula primária entre 10^5 eV e 10^{11} eV enquanto, até 10^{14} eV , telescópios específicos medem a intensidade de luz Cerenkov produzida durante o desenvolvimento de chuvas atmosféricas. A partir de 10^{15} eV é utilizada a técnica de arranjo de detectores de solo espalhados por áreas de centenas de metros quadrados para que a quantidade de dados seja estatisticamente analisável. Por volta de 10^{19} eV , a frente de uma cascata pode conter 10^{10} partículas carregadas que se estendem por áreas de 20 km^2 ou mais

¹¹Chamado modelo de superposição.

(dependendo da inclinação de seu eixo), fazendo necessários arranjos com áreas de, no mínimo, a mesma ordem de grandeza. Esta última energia primária é tão alta que mesmo dividida entre os subprodutos resultantes de colisões no chuveiro é capaz de, praticamente por toda sua extensão, produzir luz de fluorescência pela excitação do N_2 atmosférico. Este fenômeno abriu a possibilidade para uma nova classe de detectores: os telescópios de fluorescência. Detalhes sobre os detectores empregados no Observatório Auger e seus respectivos funcionamentos são apresentados no capítulo 2.

Capítulo 2

O Observatório Pierre Auger

Atualmente em fase de construção, o Observatório Auger (do Hemisfério Sul) foi concebido com a participação de 18 países como um detector *híbrido* empregando duas técnicas complementares para a observação de chuviros atmosféricos extensos. Um arranjo gigante de 1600 contadores de partículas separados de 1.5 km de distância, cobrindo cerca de 3000 km² de área, medirá as distribuições lateral e temporal de chuviros de partículas ao nível da superfície terrestre. Quatro “olhos”, conjuntos de seis telescópios óticos de fluorescência do ar, medirão o desenvolvimento das mesmas cascatas na atmosfera logo acima do arranjo, apontados para o mesmo. Operando juntos, eles caracterizarão chuviros com um grau de precisão maior do que essas duas técnicas já conseguiram isoladamente, como mostrado na figura 2.1. Ambos os métodos são bem estabelecidos por experimentos passados: o arranjo de superfície foi utilizado com sucesso pelo grupo de Haverah Park [27] por mais de vinte anos (em escala muito menor); o equipamento ótico de fluorescência é resultado de uma pesquisa pioneira desenvolvida pela Universidade de Utah, o Fly’s Eye [28]. Esta última medida só é possível em noites limpas e escuras, o que indica que aproximadamente 10% de todos os chuviros no observatório serão detectados simultaneamente pelas duas técnicas.

O projeto faz necessárias locações planas com grande acessibilidade e, ao mesmo tempo, pouco povoadas, onde o céu deve ser astronomicamente limpo. Além dos atributos climáticos e geográficos, o critério de seleção incluiu apoio científico e manutenção da infraestrutura. A região de Pampa Amarilla (35.1°-35.5° S, 69.0°-69.6° W, entre 1300 e 1400 m acima do nível do mar) está localizada ao sul da Província de Mendoza, Argentina, e foi selecionada como a locação sul do Observatório Auger em novembro de 1995.

Os tanques de superfície possuem tipicamente uma resolução na reconstrução angular de menos de 1.5° que, no modo híbrido, gira em torno de 0.3° para eventos próximos de 10²⁰ eV. Como todos detectores, os do observatório operam sob limiares bem definidos. Mais uma vantagem da operação conjunta do projeto é que mesmo com sinal registrado em apenas dois detectores de solo (e em diversos casos até mesmo um), o disparo do modo de operação híbrido permitirá

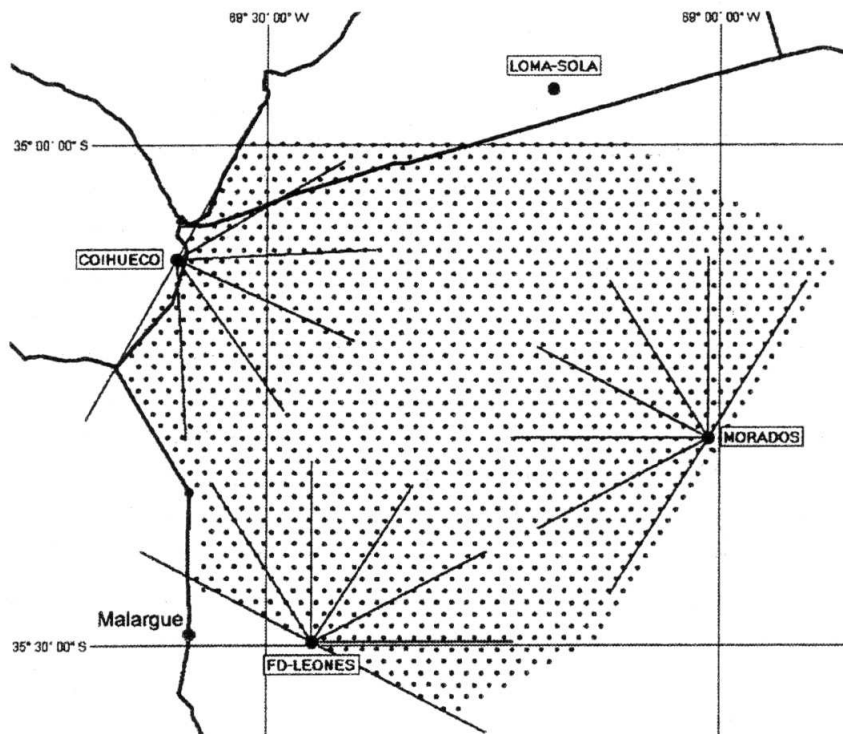


Figura 2.1: Concepção do observatório em sua fase final de construção, como apresentada em [29]. A grade de pontos pretos corresponde aos tanques do arranjo de superfície, enquanto os quatro olhos são representados com linhas que compreendem os 30° de ângulo de abertura azimutal de cada telescópio.

um “sub-limiar” do arranjo de superfície, desde que o detector de fluorescência também reporte seu próprio disparo dentro de uma janela de tempo a fim de evitar coincidências de eventos diferentes.

2.1 Tanques de Superfície

Apesar de nenhuma partícula ser capaz de viajar mais rápido do que a luz no vácuo, é possível ela o fazer em um *meio*. Mais especificamente, se este meio é água, então uma partícula eletricamente carregada que por ali passa tende a polarizar as moléculas na direção perpendicular ao seu caminho. Após essa passagem, os momentos de dipolo elétrico retornam à sua distribuição aleatória de orientação, emitindo um pulso de radiação eletromagnética na forma de uma tênue luz azul. Quando a velocidade da partícula carregada é menor do que a da luz no meio, esses pulsos se cancelam por interferência destrutiva de ondas; porém, sendo maior, os pulsos são amplificados por interferência construtiva.

Este efeito passou a ser chamado radiação Cerenkov, depois dos extensos estudos realizados pelo físico russo Pavel Cerenkov [30] entre 1934 e 1938.

Os tanques (ou estações) do observatório possuem um volume de água deionizada de 10 m^2 de superfície por 1.2 m de altura e, no topo de cada um, três fotomultiplicadoras (abreviadas como PMTs) apontadas para baixo registram independentemente o *signal* e o *tempo* em que um pulso de radiação Cerenkov é gerado quando partículas carregadas que formam um chuveiro atravessam a água. Esses fótons são detectados tanto diretamente, quanto por reflexão difusa no revestimento aplicado na parte interna das estações. Devido à espessura da frente, o sinal, convencionado em VEM¹, é dividido em canais que descrevem uma curva de crescimento abrupto, passando por um máximo e decaindo até zero (figura 2.2). Cabe a códigos de programas de análise, como o do CDAS (*Central Data Acquisition System*), decidir que filtros usar na ponderação entre os sinais de cada canal dos três fototubos para obter o sinal total de uma estação. É comum, por exemplo, o aparecimento de picos que fogem do comportamento de uma curva, sendo assim substituídos pela média local do valor da função. Após este processo, os sinais integrados de cada tanque possuem uma relação direta com a energia total depositada no solo por um chuveiro e, conseqüentemente, com a energia da partícula primária, como será discutido adiante ainda nesta seção.

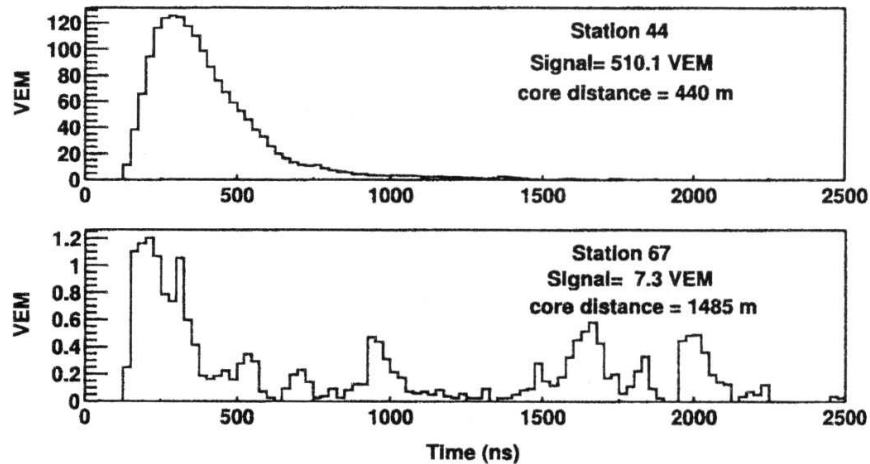


Figura 2.2: Aspecto da média do sinal das três PMTs de um tanque a 440 m do baricentro (acima) e outro a 1485 m (abaixo). Observe o maior espalhamento das partículas da frente em relação ao eixo do chuveiro. Evento real; figura publicada em [29].

Sendo a separação mínima entre dois tanques de 1.5 km no arranjo do obser-

¹Do inglês *Vertical Equivalent Muon*, medida do pico de carga produzida por um único múon atravessando verticalmente um volume de água. Depende da geometria e composição do detector; no Observatório Auger, 1 VEM nos tanques corresponde a $2.3 \times 10^7 e$.

vatório e dada a velocidade de propagação da frente de um chuveiro, é necessária considerável precisão na medida dos tempos relativos em que uma seqüência de pulsos Cerenkov é detectada pelas estações. Para isso é utilizado o sistema de 24 satélites de período orbital de 12 horas amplamente conhecido hoje como GPS, ou *Global Positioning System*. Cada um destes emite um sinal pseudo-aleatório digital com a informação de tempo dos relógios atômicos que porta, sendo capazes de localizar, por triangulação, qualquer ponto na superfície do planeta.

Dadas as geometrias discutidas previamente sobre o chuveiro no início da seção 1.3 e sobre o arranjo dos detectores na seção 2, as informações da posição e do tempo de disparo de cada tanque atravessado pela cascata permitem que se obtenha de imediato uma estimativa da direção de chegada do primário pelo simples ajuste de um plano à frente de partículas.

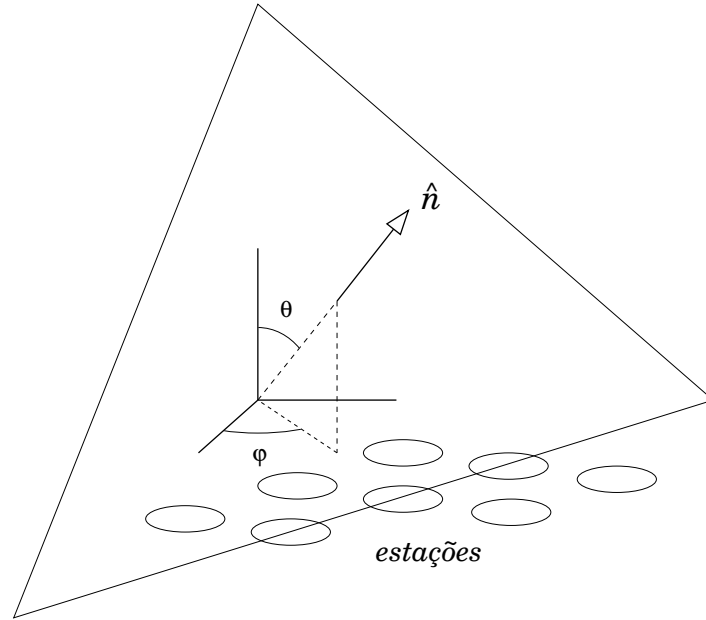


Figura 2.3: Representação de uma frente de partículas plana incidindo sobre as estações do detector de superfície. O vetor unitário $\hat{n}$, que define o plano, é decomposto no referencial do observatório através das coordenadas angulares θ e φ . Figura criada pelo autor deste trabalho.

Considere os eixos do referencial do Observatório Auger como $(x, y, z = 0)$. Matematicamente, um plano em três dimensões é uma superfície definida por $f(x, y, z) = 0$, ou de forma mais precisa $f(x, y) = 0$ já que os tanques possuem altitudes próximas ($z_{ref} = 0$). Os coeficientes relacionados a x e y determinam a inclinação do plano; em outras palavras, se esses coeficientes são escritos como u

e v , então $\hat{n} = (u, v)$ é exatamente um vetor² normal ao plano. A decomposição em coordenadas polares de $\hat{n}$ resulta no sistema de equações

$$\begin{cases} u = \sin \theta \cos \varphi \\ v = \sin \theta \sin \varphi \end{cases},$$

onde θ e φ são os ângulos zenital e azimutal, respectivamente, considerados os dois primeiros parâmetros mais importantes da reconstrução geométrica de um chuveiro (veja figura 2.3). As grandezas u e v são chamados cossenos diretores.

Sejam agora as posições de cada um desses tanques $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$ e T_0 o instante do impacto da partícula primária no solo caso ela não houvesse interagido com a atmosfera terrestre. O tempo em que o plano deve passar pela i -ésima estação será

$$t_i^{pl} = T_0 - \frac{\hat{n} \cdot \vec{r}_i}{c} = T_0 - \frac{ux_i + vy_i}{c}. \quad (2.1)$$

Ajustar da melhor maneira t_i^{pl} aos tempos de chegada t_i^{exp} experimentais medidos nas estações significa definir uma função do tipo chi-quadrado

$$\chi^2 = \sum_i w_i \left(t_i^{pl} - t_i^{exp} \right)^2 \quad (2.2)$$

e minimizá-la nas variáveis (u, v, T_0) que se deseja obter através da operação $\nabla \chi^2 = 0$. O “peso” w_i pode ser tomado como um, mas é utilizado muitas vezes como um medidor da qualidade do sinal detectado em uma estação com valor $w_i = 1/\sigma_i^2$, onde σ_i é a medida do erro em t_i^{exp} , como proposto por Pierre Billoir [31]. O resultado é o sistema linear 3×3

$$\begin{pmatrix} \sum w_i & \sum w_i x_i & \sum w_i y_i \\ \sum w_i x_i & \sum w_i x_i^2 & \sum w_i x_i y_i \\ \sum w_i y_i & \sum w_i x_i y_i & \sum w_i y_i^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ -u/c \\ -v/c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum w_i t_i^{exp} \\ \sum w_i x_i t_i^{exp} \\ \sum w_i y_i t_i^{exp} \end{pmatrix},$$

facilmente inversível pela regra de Cramer desde que três ou mais estações tenham sido disparadas (o que é o mínimo para se definir um plano) e não estejam todas sobre uma mesma linha.

O segundo parâmetro geométrico mais importante é o chamado baricentro, ou o local onde a partícula primária atingiria o solo caso chegasse intacta até ele. A média aritmética entre os três sinais integrados no tempo detectados pelas três fotomultiplicadoras de um tanque é definido como o sinal S_i do tanque. Assim, o baricentro é obtido através da simples ponderação das posições $\vec{r}_i$ dos tanques pelos sinais integrados de cada um, ou

$$\vec{r}_B = (x_B, y_B) = \frac{\sum S_i \vec{r}_i}{\sum S_i}. \quad (2.3)$$

Uma vez com o ponto de impacto do centro do chuveiro no solo e a orientação geométrica do seu eixo, o próximo fator de maior importância é a determinação

²Normalizado por convenção.

da energia da partícula primária. Simulações demonstraram que esta depende fortemente da maneira como as partículas se espalham em torno do eixo da cascata durante sua evolução, ou seja, do seu desenvolvimento lateral, medido pelo observatório justamente como o sinal integrado em cada tanque em torno de $\vec{r}_B$. Mais do que isso, a distribuição de sinais deve ser considerada no plano do chuveiro, com distâncias d_i em relação ao eixo dadas por

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2 - (u(x_i - x_B) + v(y_i - y_B))^2}. \quad (2.4)$$

Neste ponto adota-se uma forma simplificada com parâmetros ajustados a partir de resultados de Haverah Park e de estudos de simulações para a chamada função de distribuição lateral de um chuveiro, dada por

$$f(d) = S_{ref} \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^{-\beta}, \quad (2.5)$$

onde d_{ref} é a distância ao baricentro (≈ 1000 m) onde é medido S_{ref} , um sinal de referência aproximadamente proporcional à energia da partícula primária e, portanto, de importante determinação. O parâmetro de forma β é, na verdade, uma função de θ que corrige a transição eletromagnética para a muônica de acordo com inclinação zenital em torno de 60° . O procedimento para encontrar S_{ref} é idêntico ao do ajuste do plano à frente de partículas: dentro de um modelo gaussiano, minimiza-se uma função tipo chi-quadrado que leva em conta a diferença entre os sinais esperados $S_i^{fit} (= f(d))$ em cada estação e os sinais medidos nas mesmas, ou

$$\chi^2 = \sum_i w_i \left(S_i^{fit} - S_i^{exp} \right)^2, \quad (2.6)$$

sendo w_i novamente um “peso” que considera a qualidade do i -ésimo sinal experimental. Porém, aqui um detalhe de grande importância deve ser observado. A função de distribuição lateral é muito sensível a que ponto do plano do chuveiro é tomado como o baricentro; nem sempre $f(d)$ pode ser comparada aos sinais medidos radialmente em torno de $\vec{r}_B$ pela maneira aproximada com que este é calculado. A solução, portanto, é minimizar a equação 2.6 em relação não apenas à variável S_{ref} , como também em x_B e y_B (note que $S_i^{fit} = S_i^{fit}(d_i)$, e $d_i = d_i(x_B, y_B)$). Sendo χ^2 altamente não-linear nessas variáveis de posição, emprega-se um método numérico para a obtenção do mínimo onde são usados como valores iniciais justamente (x_B, y_B) previamente determinados pela equação 2.3. O resultado final é como o apresentado na figura 2.4.

Por fim, a relação entre a energia da partícula primária em EeV e S_{ref} , medido em VEM e mais comumente chamado de $S(1000)$, é adotada hoje como

$$E = 0.12 \left(S(1000) \sqrt{1 + 11.8 (\sec \theta - 1)^2} \right)^{1.05} \quad (2.7)$$

e possui um erro estimado em torno de 20%, resultante dos algoritmos de diluição (ou *thinning*) utilizados em programas de simulação. Este procedimento diminui o número de partículas seguidas detalhadamente em uma simulação, a fim de tornar praticável o tempo de execução de chuveiros iniciados por primários com energia acima de 10^{15} eV. A energia é conservada atribuindo-se um peso às partículas consideradas, mas ainda não está suficientemente claro como devem ser tratadas as que penetram os tanques de água do Observatório Auger [32].

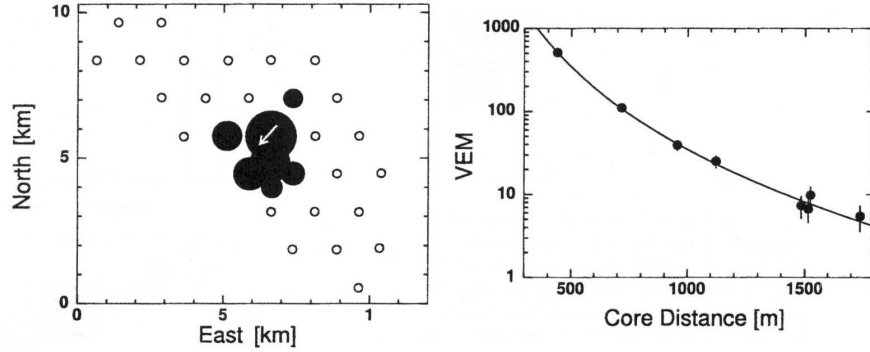


Figura 2.4: Distribuição lateral dos sinais de um evento real em relação ao baricentro. À esquerda a seta indica o que seria o ponto de impacto da partícula primária e a projeção da direção de chegada no plano do arranjo; à direita uma função como a da equação 2.5 é ajustada aos sinais. Imagem divulgada pela Colaboração (referência [29]).

Existem, ainda, correções geométricas que podem ser feitas para refinar os valores de u , v e T_0 . A primeira e mais simples delas leva em consideração as pequenas diferenças de altitude do terreno sobre o qual os tanques estão dispostos. A segunda é um resultado de simulações onde, dentro de um raio de 2 km em relação ao eixo do chuveiro, a frente de partículas pode ser aproximada não por um plano, mas sim por uma calota esférica centrada na região onde a maior parte dos múons é originada. Em ambos os casos, um termo de atraso de tempo δt_i , dependente de u e v , é acrescentado a t_i^{exp} , já que as diferenças temporais ocorrem no referencial do chuveiro. A consequência imediata é que a distribuição χ^2 na equação 2.2 se torna não-linear nas variáveis a serem minimizadas, sendo necessário o emprego de uma ferramenta numérica para a resolução do sistema 3×3 . Como valores iniciais de aproximação para o método utilizam-se justamente os parâmetros encontrados através do ajuste plano, e para o raio de curvatura são tomados valores iniciais conhecidos de simulações. Em testes preliminares no Observatório Auger, este processo iterativo apresentou rápida convergência (apenas uma iteração, em média [31]).

Por outro lado, se a abordagem ao problema considera, desde o princípio, que as partículas se propagam formando uma superfície curva, é possível acrescentar um termo de atraso em relação ao baricentro logo no início aos tempos esperados

de disparo das estações

$$t_i^{curv} = t_i^{pl} + \frac{\gamma d_i^2}{c}$$

onde as quantidades t_i^{pl} e d_i já foram, respectivamente, definidas nas equações 2.1 e 2.4, e $\gamma = 1/(2R)$ é o termo de curvatura da frente com raio R . O novo χ^2 é minimizado agora em uma variável a mais, γ , resultando em um sistema 4×4 que, devido ao termo d_i ser não-linear em u e v , produz uma matriz dependente desses termos. O modo de invertê-la é semelhante ao feito nas correções: ajusta-se um plano à frente, supõe-se como valores iniciais estes cossenos diretores apenas na matriz principal e calculam-se novos u e v . Repetindo o processo iterativamente, a convergência foi atingida no observatório em apenas dois *loops*. Detalhes sobre essas correções podem ser encontradas em [31].

Por fim, o arranjo de superfície terá as seguintes propriedades:

- Resposta altamente independente de condições meteorológicas;
- Sensibilidade a chuueiros chegando em grandes ângulos zenitais;
- 100% de ciclo de operação;
- Abertura independente da energia acima de 10^{19} eV;
- Cobertura uniforme do céu;
- Medida da estrutura temporal dos sinais, um indicativo da massa primária;
- Qualidade dos dados de cada evento melhorará com a energia.

2.2 Telescópios de Fluorescência

Como previamente discutido na seção 1.3, a repentina entrada de um raio cósmico no topo de atmosfera desencadeia uma série de colisões que distribuem a energia inicial da partícula primária entre seus subprodutos gerando, assim, uma grande cascata. Essas interações ocorrem entre partículas que estão não apenas a uma velocidade muito próxima à da luz, mas maiores do que c no meio atmosférico, gerando, da mesma maneira como apresentado na seção 2.1, radiação Cerenkov. O ar, porém, possui um índice de refração aproximadamente 25% menor do que a água; o efeito dominante durante o processo de formação de um chuveiro é a ionização por excitação de moléculas da atmosfera terrestre.

Moléculas excitadas de nitrogênio (N_2) produzem fluorescência com linhas espectrais próximas ao ultravioleta (entre 300 nm e 450 nm) a uma eficiência em torno de apenas 5×10^{-5} , definida como a energia radiada dividida pela perda de energia observada no meio. Mas cerca de 10^{10} partículas com carga elétrica estão envolvidas em um chuveiro de 10^{19} eV, fazendo significativo esta fonte de radiação. Mais do que isso, a luz de fluorescência é emitida isotropicamente, com uma intensidade proporcional ao número N_e de partículas carregadas do

chuveiro. Se estas atravessam uma distância dl , então o número de fótons produzidos é simplesmente

$$\frac{dN_\gamma}{dl} = N_f N_e, \quad (2.8)$$

onde N_f é a razão de fluorescência, aproximadamente constante na maior parte das situações observadas. O aumento da pressão e temperatura da atmosfera implicam em uma excitação maior do nitrogênio molecular, mas também na maior probabilidade de desexcitação colisional com moléculas de oxigênio. Os dois processos se balanceiam, de modo que a variação de N_f como função da altitude é muito pequena, cerca de apenas 12% para elétrons de 80 MeV em um intervalo efetivo de 20 km de altitude [33]. O índice e em N_e não é por acaso: na prática, esta quantidade expressa a quantidade de elétrons e pósitrons, já que eles dominam o número de partículas carregadas em um chuveiro.

No observatório, quatro dos chamados “olhos” estarão distribuídos em torno do arranjo de detectores de superfície na fase final do projeto. Cada olho é composto por seis telescópios com campo de visão de 30° azimutal por 28.6° zenital, munidos de filtros de transmissão de luz ultravioleta instalados na abertura de 1.7 m de diâmetro do diafragma. Logo após o filtro encontra-se um anel corretor de Schmidt, cuja utilidade é aumentar a área coletora sem piorar a resolução do aparelho [32] devido à aberração esférica, já que a luz incidente sobre o telescópio não possui apenas pequenos ângulos em relação ao eixo do mesmo. A luz é focada por um grande espelho de $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ em uma câmera composta por 440 fotomultiplicadoras, aqui chamadas de pixels, em um arranjo praticamente quadrado (22×20). Cada PMT é responsável por um campo de visão de $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ e, levando em conta a retirada da sombra da câmera, a área de coleção efetiva de luz por cada telescópio é de 1.5 m^2 . Evidentemente, os telescópios operam apenas em noites escuras e sem Lua, durante as quais até mesmo os posicionamentos de estrelas são monitorados a fim de minimizar ruído nos sinais de luz captados pelas câmeras.

O desenvolvimento de um chuveiro dentro do campo de visão de um ou mais telescópios (figura 2.5) causa o disparo em série das PMTs sobre as quais incide luz, de maneira semelhante à observação de um risco luminoso deixado no céu. Tipicamente, esta linha tem a largura de apenas um pixel e os eventuais disparos fora dela são descartados como ruído. Novamente, e de modo quase idêntico ao detector de superfície, as medidas de tempo de chegada da luz de fluorescência e de sinal (número de fótons) registrados em cada pixel permitem que sejam feitas as reconstruções geométrica e energética de um chuveiro, apresentadas a seguir.

Considere que a cada pixel i corresponde uma direção $\vec{r}_i$ no céu. Como primeiro passo, o objeto geométrico de maior importância na análise de fluorescência é o plano definido pelo eixo do chuveiro e o telescópio que o observa, ou SDP (do inglês *shower-detector plane*). Seja então $\hat{n}_{SDP}$ o vetor que o define; é claro que a quantidade $\hat{n}_{SDP} \cdot \vec{r}_i$ deve ser teoricamente zero, ou, experimentalmente, mínima através da distribuição

$$\chi^2 = \sum_i w_i (\hat{n}_{SDP} \cdot \vec{r}_i)^2,$$

lembrando que w_i possui aqui o mesmo papel que nas funções χ^2 para os detectores de superfície, ou seja, um peso que avalia a qualidade do i -ésimo sinal detectado. Uma vez que este plano é obtido, passa a ser a referência de onde todo o resto da geometria de fluorescência será derivada.

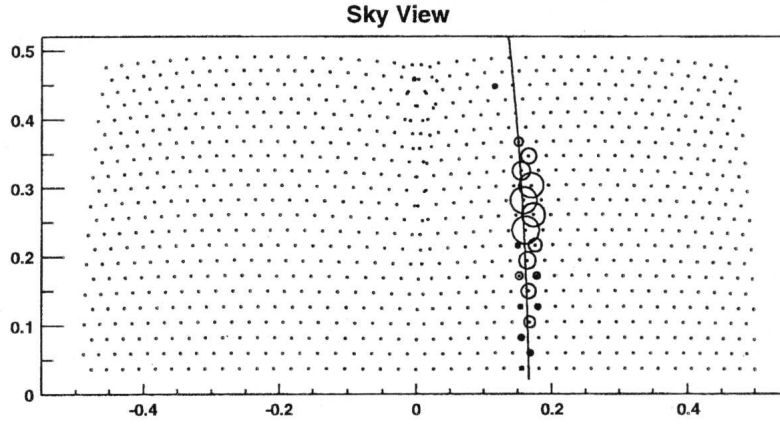


Figura 2.5: Campo de visão de dois telescópios de fluorescência, onde pode ser visto na câmera da direita a trajetória deixada nas PMTs por um evento real. Os círculos representam a intensidade do sinal. Figura divulgada pela Colaboração em [29].

O segundo estágio da reconstrução direcional compreende determinar a orientação e posição do eixo do chuveiro dentro do SDP, o que significa encontrar R_p e χ_0 , como definidos na figura 2.6. R_p é chamado de parâmetro de impacto entre o detector ótico e o chuveiro, e χ_0 é o ângulo que o eixo do chuveiro faz com a horizontal. No SDP, o tempo de chegada da luz do chuveiro com velocidade c em cada PMT disparada é dado por

$$t_i^{eixo} = T_0 + \frac{R_p}{c} \tan \left(\frac{\chi_0 - \chi_i}{2} \right), \quad (2.9)$$

onde T_0 é o tempo em que a frente do chuveiro passa mais próxima do olho (portanto à distância R_p) e χ_i é o ângulo de elevação da i -ésima PMT com sinal. Os parâmetros desejados são achados minimizando-se

$$\chi^2 = \sum_i w_i (t_i^{eixo} - t_i^{exp})^2 \quad (2.10)$$

nas variáveis (R_p, χ_0, T_0) , como feito antes na análise dos tanques. O resultado

também é um sistema 3×3 de fácil solução e fica assim determinada a direção de chegada da partícula primária por este detector.

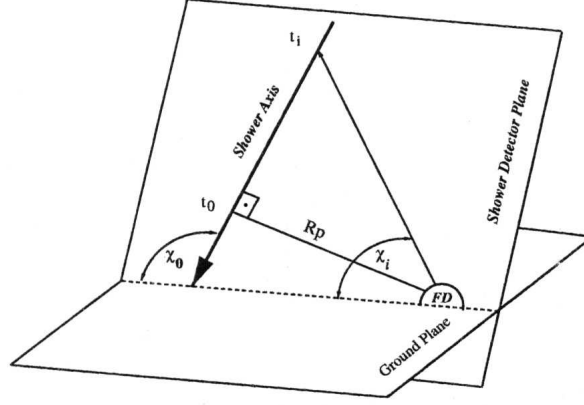


Figura 2.6: Esquema extraído de [29], onde é mostrado o *shower-detector plane* e a geometria do eixo do chuvaireto contida nele.

Uma das grandes vantagens da técnica de fluorescência é que ela permite que o desenvolvimento longitudinal de um chuvaireto atmosférico seja medido passo a passo e, finalmente, a integração desse perfil leva à energia do primário. Como apresentado na seção 1.3, a energia total depositada na atmosfera ocorre quase inteiramente (90%) através da componente eletromagnética de uma cascata. Ela é estimada em

$$E_{em} = \frac{E_c}{\lambda_r} \int N_e(X) dX,$$

E_c/λ_r sendo a razão entre a energia crítica dos elétrons³ pelo comprimento de radiação⁴ e $N_e(X)$ é o número de elétrons estimado do chuvaireto como uma função da profundidade atmosférica X . Também já foi discutido que $N_e(X)$ possui um máximo; à profundidade atmosférica em que isso ocorre atribui-se a variável X_{max} . Sua importância é irrefutável: funciona como um forte indicador da composição da massa da partícula primária. Assim, uma expressão analítica para o desenvolvimento longitudinal baseada em simulações de Monte Carlo e em boa concordância com os dados de Fly's Eye [11] é conhecida como formulação de Gaisser-Hillas [34], expressa por

$$N_e(X) = N_{max} \left(\frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{\frac{X_{max} - X_0}{\lambda}} e^{\frac{X_{max} - X}{\lambda}}, \quad (2.11)$$

³Quando as taxas de perda de energia de elétrons, atravessando matéria, por bremsstrahlung e por ionização, são iguais.

⁴Distância média ao longo da qual um elétron de alta energia perde $(1 - 1/e) \approx 63\%$ de sua energia por bremsstrahlung.

onde N_{max} é o número de partículas do chuveiro em seu máximo, X_0 a profundidade onde ocorreu a primeira interação primário-atmosfera e λ um parâmetro tomado como 70 g/cm^2 . É apresentada graficamente na figura 2.7.

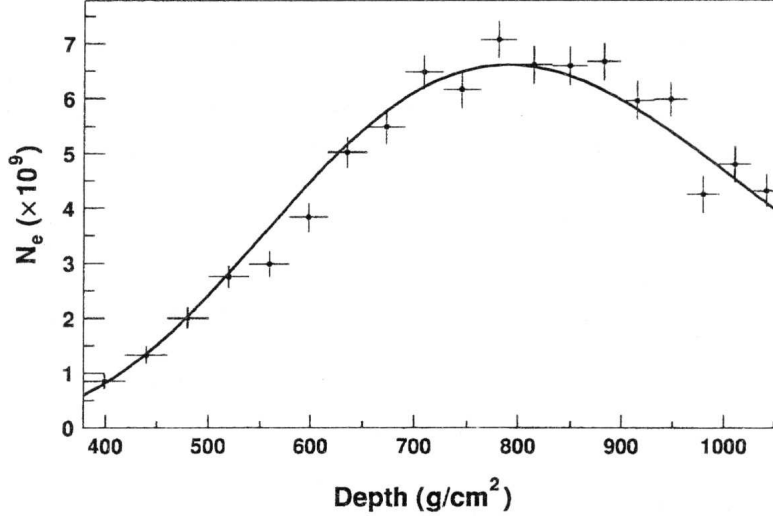


Figura 2.7: Função de Gaisser-Hillas (eq. 2.11) ajustada aos dados de fluorescência de um evento real. Publicado na referência [29].

Esta expressão é ajustada aos dados, primeiramente, transformando o número de fótons detectados pelo telescópio (pixel a pixel) no número de fótons emitidos pelo chuveiro

$$N_\gamma = N_{detec} \frac{4\pi}{A} \frac{r^2}{T(r)}$$

e por fim relacionando N_γ e N_e pela equação 2.8. T é a transmissividade da atmosfera (e portanto função de r), A a área de abertura do telescópio e r a distância dos pontos de emissão até o telescópio, ou seja, junto à variável dl , a energia estimada da partícula primária também depende da reconstrução geométrica do eixo da cascata.

Sob as condições de noites limpas e sem Lua, os telescópios de fluorescência terão as características:

- Perfil do desenvolvimento longitudinal medido diretamente;
- Coincidência do sinal de um único tanque com o sinal em um único telescópio restringirá a geometria do chuveiro de modo tão preciso quanto um detector estéreo de fluorescência;
- 100% dos eventos acima de 10^{19} eV registrados por pelo menos um detector; 60% deles por dois ou mais;

- Energia da partícula primária medida de maneira um pouco mais direta.

2.3 Análise Híbrida

É evidente que, apesar das duas técnicas utilizadas pelo observatório envolverem detecção de fenômenos físicos tão diferentes, as naturezas química, geométrica e energética de um chuva são sempre únicas e devem resultar, dentro de desvios controlados, em valores compatíveis quando analisados separadamente os tempos e os sinais dos tanques Cerenkov e dos telescópios de fluorescência.

Isto de fato ocorre, porém o poder de um projeto como o Auger está na minimização de erros e aumento da resolução como consequência da utilização de ambas as técnicas simultaneamente, isto é, de maneira *híbrida*. Matematicamente, como proposto pela colaboração do observatório em [3], o ajuste híbrido da direção de chegada de uma partícula primária é feito minimizando a função combinada

$$\chi^2 = \chi_{SD}^2 + \chi_{FD}^2 \quad (2.12)$$

com χ_{SD}^2 e χ_{FD}^2 já definidas nas equações 2.2 e 2.10, respectivamente. O índice “*SD*” refere-se a *Surface Detector*, enquanto “*FD*” a *Fluorescence Detector*. Note agora que três não é mais o número mínimo de estações necessárias com sinal, dados de um ou dois tanques também podem contribuir para a reconstrução.

Na análise descrita até aqui, uma série de cuidados devem necessariamente ser tomados. Detalhes delicados como o referencial geográfico projetivo em que os olhos e os tanques são considerados, definido para o Projeto Auger nas unidades UTM (*Universal Transverse Mercator*⁵), é usado para descrever o posicionamento *no* observatório com precisão de centímetros e essencial para a reconstrução geométrica vinculada dos dois tipos de detectores. Além disso, descreve a posição *do* observatório na superfície Terra: uma vez que um evento é reconstruído no referencial UTM do laboratório, a região do universo onde ele se originou, em coordenadas galáticas⁶, pode ser determinada por uma transformação de sistemas através da data e horário do registro do evento pelo sistema GPS, cuja precisão é de nanossegundos.

Outro detalhe é o modo como as distribuições χ_i^2 ($i=SD$ ou FD) são pesadas na equação 2.12, atual objeto de estudo de diversos colaboradores. Uma proposta feita pelo Dr. Luis Vitor de Souza Filho em sua implementação do FLORES Híbrido (discutido no capítulo 3, referência [32]) consiste em considerar, inicialmente, os pesos $w_i = P_i^{SD}/\sigma_i^{SD}$ e $w_i = P_i^{FD}/\sigma_i^{FD}$ nas respectivas

⁵Projeção radial de pontos na superfície da Terra sobre um cilindro, tangente a algum dos meridianos que separam as 60 zonas que cobrem a superfície do planeta a cada 6° de longitude. Tem como vantagem o uso do sistema métrico ao invés de graus/minutos/segundos, além de minimizar distorções, pois qualquer ponto é suficientemente próximo do meridiano central de sua zona.

⁶Sistema baseado no disco da Via Láctea, a partir do qual latitude e longitude galáticas são definidas. A origem é definida como o eixo que liga o centro da galáxia à constelação de Sagitário.

equações 2.2 e 2.10, onde P_i^{SD} é igual ao sinal medido pelo i -ésimo tanque e, de modo análogo, P_i^{FD} recebe o valor do sinal detectado pelo i -ésimo pixel de um telescópio. Por fim, o vínculo entre os dois tipos de detectores é estabelecido quando

$$\chi^2 = \frac{\chi_{SD}^2}{\sum_i P_i^{SD}} + \frac{\chi_{FD}^2}{\sum_i P_i^{FD}} \quad (2.13)$$

é minimizada em todas as variáveis que descrevem a geometria do eixo do chuveiro (u, v, R_p, χ_0, T_0), agora com parâmetros de ponderação que medem o peso da contribuição de cada detector na reconstrução híbrida, de acordo com a maneira como mediram as propriedades de um mesmo evento.

É importante ressaltar que, quando os dados fornecidos pelos dois tipos de detectores são analisados separadamente, a geometria de um chuveiro tem uma reconstrução SD mais confiável, ao passo que, em termos de energia, a determinação FD sobressai com vantagens.

Na seção 3.2, será discutido que um grande número de tanques do detector de superfície responderá a um evento de 10^{19} eV caindo sobre qualquer região (a menos das bordas) do arranjo na fase final do projeto, permitindo que a parte angular seja sempre determinada com base em um grande número de dados. No caso dos telescópios, um problema conhecido há muito tempo ocorre quando chuveiros distantes deixam um traço curto na câmera de PMTs, de modo que os ângulos χ_i são insuficientes para produzir significante curvatura na função tangente da equação 2.9. Em outras palavras, o chuveiro parece passar pelo campo de visão com velocidade angular constante, gerando ambigüidade no ajuste e duas famílias possíveis de valores (R_p, χ_0) ao redor do seu verdadeiro eixo. O problema é resolvido utilizando o parâmetro T_0 do arranjo de superfície, desde que os tempos no observatório estejam sincronizados. O capítulo 3 abordará justamente os efeitos causados pela dessincronia dos relógios dos dois tipos de detectores.

Já a energia, determinada diretamente através da integração do perfil longitudinal do chuveiro pelos dados dos telescópios de fluorescência, i.e. através do depósito direto da energia cinética de partículas carregadas na atmosfera, é apenas aproximada de simulações de Monte Carlo no caso SD pela equação 2.7, que carrega o efeito de *thinning* (previamente discutido na seção 2.1) e o problema da distribuição lateral dos sinais dos tanques em torno do baricentro, parâmetro nem sempre determinado com precisão.

Como a capacidade do detector de fluorescência em determinar precisamente o perfil longitudinal de um chuveiro depende criticamente da reconstrução geométrica, esta, em particular, é determinada de maneira híbrida. Características da atmosfera local, como a estrutura de aerossol, monitoradas com o uso de *lasers* (similar ao que é feito no experimento HiRes), também devem ser consideradas. O procedimento para a determinação da energia é, por fim, realizado de maneira idêntica à descrita na seção 2.2: integra-se o perfil longitudinal do chuveiro com as devidas conversões, mas agora com a informação adicional implícita dos tanques de superfície. Observe que essa energia não carrega informação alguma dos

sinais dos tanques de superfície disparados. Detalhes e desempenho do método de análise híbrida serão exhaustivamente testados no próximo capítulo.

Capítulo 3

Primeiros resultados e conclusões

Antes de proceder na construção completa do observatório, uma parte dele, chamada de *Engineering Array* (EA), foi construída e operada entre dezembro de 2001 e abril de 2002. Faziam parte dois telescópios de fluorescência localizados em Cerro Los Leones e 40 unidades do detector de superfície colocadas no campo de visão dos dois telescópios (figura 3.1). Para o arranjo de solo, esta fase de protótipo permitiu o teste de tanques (materiais, revestimentos, painéis solares, fiação, etc), de qualidade e produção da água, de fotomultiplicadoras, da parte eletrônica e limiares, da programação e aquisição de dados, de telecomunicações e monitoramento, assim como a estratégia de entrega e instalação dos equipamentos. Na parte relacionada aos telescópios, foi possível avaliar a performance da abertura, do anel corretor, do filtro passa-UV, de espelhos, câmeras e fototubos, da parte eletrônica analógica e digital, da aquisição de dados e do *shutter*.

Dos tanques instalados, 32 possuíam a instrumentação completa. O disparo local gerado por uma estação é classificado como T2 (*second level trigger*) desde que a duração do pulso de sinal ocorra acima de um limiar de tempo¹. A central de processamento do EA registra um evento SD desde que estações estejam agrupadas no espaço e no tempo para formar um T3, ou *trigger* de nível três. Isto é feito centrando uma janela de $\pm 25 \mu s$ nas estações com T2 e impondo que estações vizinhas estejam dentro de hexágonos em torno de uma estação T2 escolhida como centro da janela de tempo. Se três registraram sinal, então os dois primeiros hexágonos são considerados; no caso de quatro com sinal, o quarto hexágono é o limite. Uma vez com as condições espaciais satisfeitas, um último critério temporal é imposto: cada T2 deve estar dentro de $(6 + 5n) \mu s$ da central, onde n representa o número hexagonal.

Nos telescópios, *triggers* locais também são gerados em cada câmera, mas

¹Ainda existem os *triggers* T0, que ocorre quando uma PMT registra uma tensão acima de um certo valor, e T1, registrado quando duas PMTs estão em coincidência temporal.

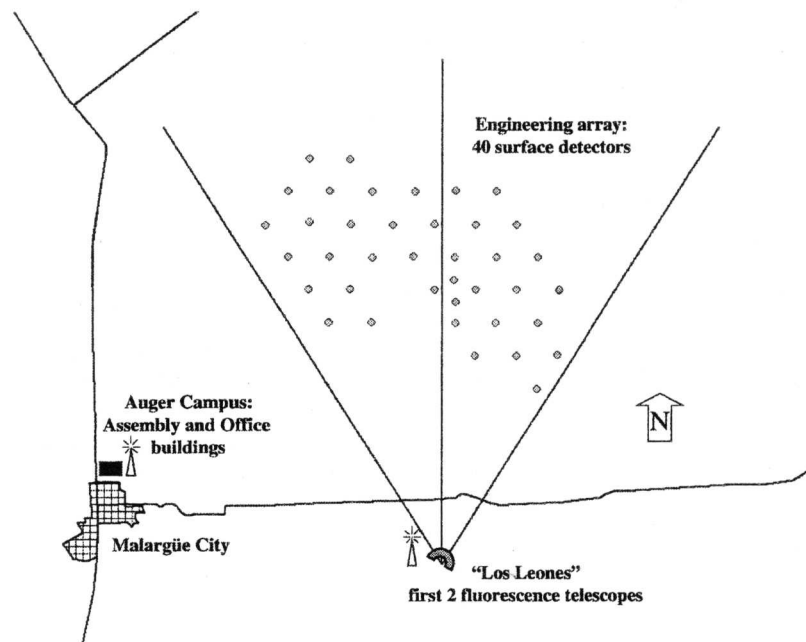


Figura 3.1: O *Engineering Array*. Os dois campos de visão dos telescópios, ou baias (classificadas como 4 e 5), cobriam a área do céu sobre os primeiros 40 tanques do observatório. A cidade de Malargüe é vista logo à esquerda. Figura retirada da referência [29].

um T3 de fluorescência é registrado apenas se a trajetória de um chuva puder ser determinada.

Para que um evento seja registrado como híbrido, a informação geométrica FD é primeiramente transmitida para o CDAS, sistema desenvolvido para gerenciar *triggers* do arranjo de detectores de superfície, onde é usada para a computação do tempo de impacto do chuva na posição do solo sobre a região das estações. Um evento T3 SD correspondente é construído e então comparado com um T3 SD real, e ambos devem estar dentro de uma janela de tempo de $20 \mu s$. A calibração cruzada dos relógios dos dois tipos de detectores é feita através de um tiro de laser para o céu e, ao mesmo tempo, da injeção de parte desse sinal luminoso em um dos tanques por meio de uma fibra ótica.

Durante a fase de operação do EA, 78 eventos foram detectados de maneira híbrida e divididos em dois grupos: os que dispararam três ou mais tanques, cuja reconstrução apenas pelos dados do detector de superfície é possível, e os em que menos de três tanques foram disparados, para os quais as estações não provêm informação suficiente no ajuste plano. Tratando apenas com dados dos telescópios ou hibridamente, como apresentado na seção 2.3, todos eles podem ser reconstruídos.

A análise a seguir foi realizada no período de setembro de 2003 a junho de 2004, quando estavam disponíveis três programas de reconstrução geométrica e energética de eventos detectados pelo EA. São eles:

- *Event Display* (v2r2): Desenvolvido pela colaboração para análise de dados do CDAS e amplamente implementado por Pierre Billoir. Trabalha na reconstrução geométrica e energética de eventos detectados apenas pelo arranjo de tanques de superfície da maneira exata como descrito na seção 2.1, incluindo correções de curvatura da frente, retirada de estações problemáticas da análise e toda uma parte gráfica que mostra, entre outros, mapas galáticos e uma animação da direção de chegada da partícula primária;
- FLORES (v3r3): De *Fluorescence Detector Offline Reconstruction System*, escrito pelo Dr. Stefano Argiró, Dr. Andrea de Capoa e Dr. Luis Prado Jr. Reconstrói completamente a geometria do eixo de um chuveiro pelo traço registrado nas câmeras dos telescópios e, além disso, estima a energia através dos sinais detectados por cada fototubo. Utiliza toda a matemática descrita na seção 2.2 e acabou por ganhar status de programa oficial de análise de dados dos telescópios de fluorescência depois de testado à exaustão por outros colaboradores;
- FLORES Híbrido: Variação do FLORES original que contém um programa de reconstrução híbrida implementado pelo Dr. Luiz Vitor de Souza Filho e Dr. Bruce Dawson. Acessando diretamente os dados brutos dos telescópios e dos tanques, utiliza o procedimento descrito na seção 2.3 (com o cálculo de χ^2 pela equação 2.13) para realizar toda a reconstrução geométrica e energética do chuveiro.

É importante ressaltar que cada evento é registrado com um código diferente para cada detector. Por exemplo, o 46º evento híbrido possui o identificador SD (ou SDId) 135446, enquanto seu identificador FD (ou FDId) é B4R371E1985. Por convenção, utiliza-se muitas vezes apenas o SDId e é exatamente isso que será feito ao longo do texto a partir deste ponto. Todas as medidas de ângulo zenital serão consideradas na escala de cosseno já que o ângulo sólido diferencial de coleção do observatório é maior em θ próximo de 90°, e as medidas de energia, por percorrerem várias décadas, serão tomadas na escala logarítmica. A reconstrução geométrica compreenderá a determinação do ângulo zenital (θ), ângulo azimutal (φ) e o baricentro (R , no referencial do olho de Los Leones, veja figura 3.1). Na reconstrução energética, simplesmente o cálculo da energia (E) será efetuado.

3.1 Três ou mais tanques com sinal

Nesta primeira etapa, 12 eventos foram classificados e são apresentados na tabela 3.1.

Nenhum erro foi encontrado nos arquivos de registro destes chuveiros. Sendo a reconstrução possível usando-se apenas os dados do arranjo de superfície, segue, primeiramente, uma análise comparativa da reconstrução total destes eventos feita de maneira independente para cada detector pelos programas apresentados na introdução deste capítulo.

Primeiros eventos do EA disparando três ou mais tanques						
	1	2	3	4	5	6
Hy	39	48	50	56	60	61
SDId	106032	137028	143716	154891	162204	163712
$n_{tanques}$	4	3	4 (+1)	3	11	5
	7	8	9	10	11	12
Hy	65	70	72	73	74	76
SDId	164941	170021	170059	170067	170637	171231
$n_{tanques}$	5 (+1)	3	3	5	3 (+1)	3

Tabela 3.1: Identificação pelo SDId e Hy, número associado aos eventos híbridos em ordem cronológica. No número de tanques com sinal de cada evento, “(+1)” refere-se ao tanque desprezado na análise SD, por ser muito distante do baricentro e, ao mesmo tempo, possuir o menor sinal.

Observe a figura 3.2. Quatro eventos foram os de reconstrução total mais próxima e dentro das barras de erro pelos dois métodos, sendo eles os Hy 39, 50, 73 e 76. Como em ambos a determinação da energia depende da resolução completa da parte geométrica, e esta nem sempre é garantida (por conta de flutuações nos tempos e sinais, por exemplo), um erro médio estimado $\sim 20\%$ ocorreu em todas as medidas energéticas pelos dois tipos de detectores. Também é importante ressaltar que, como observado pelo Dr. Luis Prado Jr. durante a Reunião Nacional do Observatório Pierre Auger (25 a 27 de junho de 2004, Poços de Caldas, MG, Brasil), membro da colaboração e um dos autores do FLORES, nem sempre a rotina responsável pelo ajuste dos pontos que descrevem o perfil longitudinal de um chuveiro à função de Gaisser-Hillas é efetiva: em alguns casos os sinais oscilam de maneira ruidosa e o ajuste não é o melhor possível. Geometricamente, grandes flutuações no cálculo do baricentro pelos dados SD podem ocorrer. Isto é explicado pela área efetiva do arranjo de superfície durante a fase de *Engineering Array*, onde fica claro (veja figura 3.1) que um evento detectado por, no mínimo, três tanques tenha atingido uma grande área do deserto onde nenhum tanque estava instalado. Este efeito de borda pode causar discrepância entre os dados de fluorescência, mais confiáveis nesse aspecto, e os de superfície.

Na figura 3.3 é apresentada a primeira comparação entre uma reconstrução genuinamente híbrida e a pelos dados do arranjo. As partes azimutal e do baricentro apresentam mais pontos sobre a linha de comparação dentro dos erros nas medidas, mas ao mesmo tempo alguns problemas se tornam evidentes. O evento Hy 74 apresentou um ângulo zenital de 149.2° na reconstrução híbrida e foi descartado do primeiro gráfico. Seu baricentro é o ponto que mais destoa

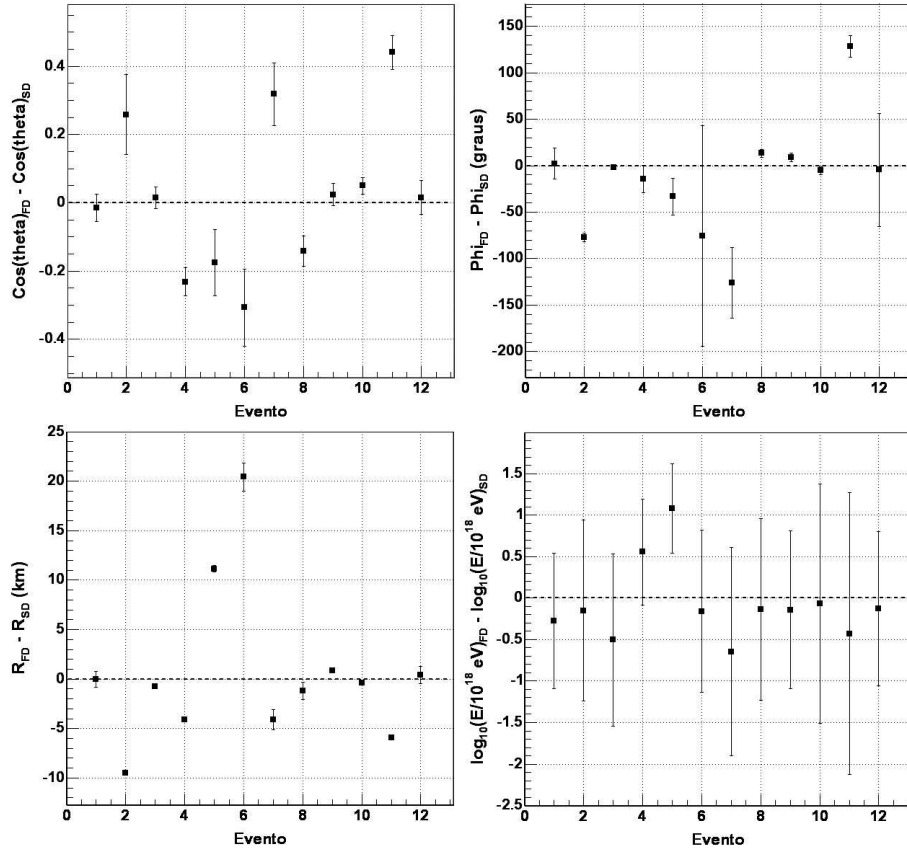


Figura 3.2: Diferença entre as reconstruções geométrica e energética dos eventos citados na tabela 3.1, usando o *Event Display* e o FLORES.

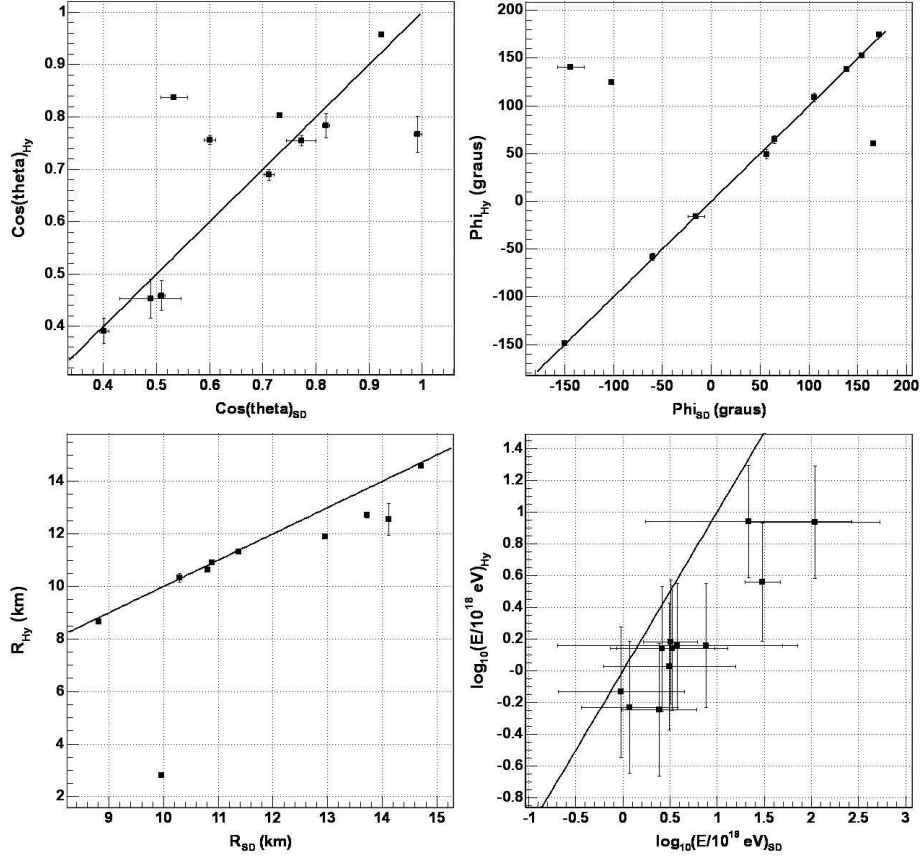


Figura 3.3: Comparação entre as reconstruções geométrica e energética dos 12 eventos híbridos abordados nesta seção. As linhas cheias correspondem a uma reta de 45°; para o ângulo zenital não é mostrado o evento Hy 74 e para o baricentro foram removidos os eventos Hy 50 e 65. Dados analisados pelo FLORES Híbrido e *Event Display*.

no terceiro gráfico da figura. Ainda com respeito ao baricentro, apresentaram grandes inconsistências os resultados calculados no modo híbrido para os eventos Hy 50 e 65 (4.4×10^4 m e 3.7×10^6 m, incompatíveis com as dimensões do EA). Observe que Hy 50, 65 e 74 (tabela 3.1) possuíam uma estação disparada longe do agrupamento de maior sinal, não desprezada na análise híbrida. É importante ressaltar, porém, que essas estações de menor sinal foram pesadas com $1/\sigma_i^2$ nas minimizações (ver exemplo da figura 2.2; o erro σ_i no sinal cresce claramente quando estações estão afastadas do baricentro), o que não faz deste o motivo para reconstruções tão discrepantes. Sendo o evento Hy 50 de boa concordância na análise pela diferença FD-SD, é mais provável que a informação dos tanques na minimização conjunta com os dados de fluorescência pode “piorar” uma reconstrução se ambos os detectores não estiverem em perfeita sincronia temporal. Este é um problema familiar na colaboração e em diversas análises é sugerido que algumas centenas de μ s sejam adicionadas aos tempos das estações. Há também a sugestão de se desconsiderar estações com pequeno sinal e muito distantes da primeira aproximação do baricentro, por serem meras coincidências ou efeitos secundários do chuva.

O problema mais claro aparece na reconstrução energética pelo modo híbrido. A probabilidade de todos os pontos caírem abaixo da reta de 45° é de $0.5^{12} \approx 0.025\%$, e, portanto, um erro sistemático deve estar ocorrendo. Existem controvérsias em relação a que valores devem possuir as constantes da equação 2.7, assim como existe o problema já mencionado de que nem sempre a função de Gaisser-Hillas é ajustada corretamente aos dados. Não é possível apontar qual método apresenta o resultado mais próximo do real, portanto estudos ainda estão sendo desenvolvidos nesta área como o uso da integração da curva de distribuição lateral de um chuva (equação 2.5) em um certo intervalo para substituir o valor $S(1000)$ na formulação energética SD.

A última comparação a ser abordada é entre os dados analisados pelo FLORES em seu modo único de fluorescência e o híbrido para estes eventos, como segue na figura 3.4. O mesmo evento Hy 74 foi omitido da análise zenital, assim como o baricentro do Hy 65, claros erros de reconstrução. O baricentro do evento Hy 50 agora é mostrado como o ponto mais afastado da reta, resultado da informação do disparo de quatro tanques e um quinto com pequeno sinal afastado dos demais. Cerca de $2/3$ das energias estão dentro dos erros esperados para as duas metodologias de análise, porém a parte geométrica volta a contar com apenas quatro eventos *por gráfico* com valores satisfatórios, i.e. uma boa concordância zenital, por exemplo, não implica em uma boa concordância azimutal ou de baricentro.

O evento Hy 39 foi o único a apresentar ótima correlação em todas as variáveis que caracterizam um chuva calculadas através dos três métodos pelo qual foi analisado.

É evidente que ainda não é possível realizar uma estatística satisfatória com tão poucos dados, mas o objetivo de uma análise preliminar é a imediata identificação de erros sistemáticos, refinamento de limiares (usados no desprezo de estações distantes do baricentro), sincronia dos tempos dos telescópios e das estações do arranjo, novas simulações e formulações para determinação da ener-

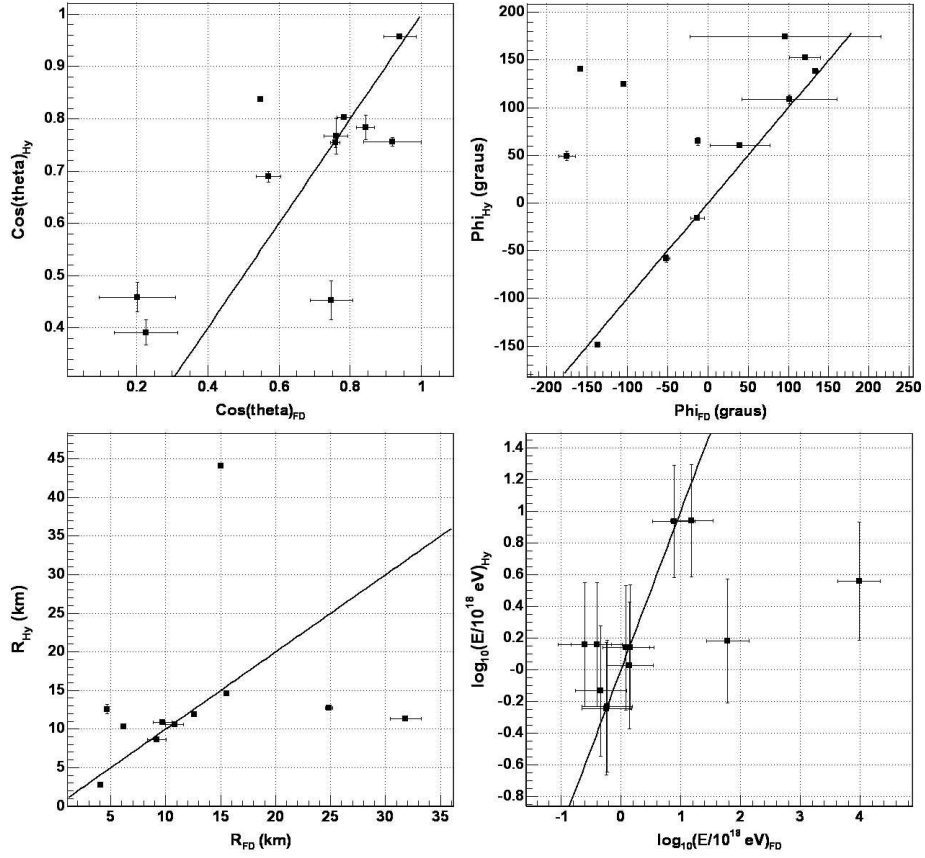


Figura 3.4: Partes geométrica e energética reconstruídas pelo modo fluorescência e híbrido do FLORES, para os 12 eventos da tabela 3.1. As retas cheias são de 45° para comparação; novamente não é mostrado o evento Hy 74 no gráfico de ângulos zenitais, enquanto o baricentro do evento Hy 65 foi omitido.

gia da partícula primária, etc. O *Engineering Array* e os programas de análise disponibilizados pela colaboração possuem este exato propósito; muitos dos problemas aqui apresentados já foram compreendidos e estão em pesquisa para sua resolução.

3.2 Menos de três tanques com sinal

66 foram os chuveiros que dispararam dois ou um tanques. Destes, seis foram registrados em arquivos que, em algum ponto, sofreram um truncamento, impossibilitando a análise dos eventos correspondentes. São eles os apresentados na tabela 3.2.

Arquivos truncados de dados de fluorescência						
Hy	01	02	09	32	34	67
SDId	088019	088038	090224	105523	105534	169320

Tabela 3.2: Eventos cujos dados são inacessíveis por erro.

Dos 60 arquivos restantes, cinco foram vistos simultaneamente pelas duas baias (4 e 5) do olho de Los Leones.

Pixels disparados					
Hy	12	42	49	58	75
Baia 4	28	10	32	X	7
Baia 5	18	X	30	22	19

Tabela 3.3: Número de pixels com sinal dos dois telescópios em Los Leones. O “X” refere-se a um sinal detectado porém não analisado pelo interpretador do FLORES (ROOT).

Neste trabalho, o procedimento tomado para os casos apresentados na tabela 3.3 foi simplesmente reconstruir os eventos de fluorescência e híbridos em cada baia separadamente, e depois tomar a média das variáveis geométricas e energética ponderada pelo número de pixels disparados

$$\bar{\theta}_i = \frac{\theta_4^i N_4^{pix} + \theta_5^i N_5^{pix}}{N_4^{pix} + N_5^{pix}}, \dots$$

onde os eventos com Hy 42 e Hy 58 acabaram sendo considerados como de baia única.

Dois eventos reconstruídos no modo de fluorescência (Hy 52, SDId 144004; Hy 63, SDId 163981) apresentaram, em primeira análise, $\theta > 90^\circ$. O código do FLORES (e do FLORES Híbrido) permite que uma bandeira seja mudada para a reconstrução de *laser shots*, tiros de luz utilizados na calibração dos telescópios e relógios dos detectores. Esses tiros são disparados do nível do chão para o céu,

resultando em valores de θ impossíveis para chuviros reais. Suspeitando que os arquivos referentes a esses eventos foram registrados erroneamente com uma bandeira de *laser shot*, sua mudança durante a análise transformou os valores de θ para menores de 90° e assim ficaram definidos.

Algo semelhante ocorreu com outros quatro eventos: Hy 24, SDId 099925; Hy 40, SDId 106283; Hy 63, SDId 163981 e Hy 64, SDId 164749, na reconstrução híbrida. A mesma mudança de bandeira foi realizada, porém apenas o Hy 63 (note que este é um dos chuviros que também apresentou problema na análise da parte de fluorescência) resultou em um valor zenital aceitável. Isso é um forte indicativo de que a informação dos tempos dos tanques, algumas vezes, piora os dados de fluorescência por causa da dessincronia dos relógios dos dois tipos de detectores. É comum na colaboração a introdução manual de algumas centenas de μs nos tempos dos tanques; aqui os três outros eventos em questão foram descartados.

A análise prossegue, portanto, com 57 eventos reconstruídos tanto pelos dados de fluorescência, quanto pelos do detector de superfície. 16 dispararam dois tanques e 41 dispararam apenas um tanque do arranjo. Esta quantidade permite que alguma estatística seja aplicada aos resultados: os gráficos das figuras 3.5 e 3.6 cobrem as partes geométrica e energética onde foram dispostas as dispersões (linhas pontilhadas) de $\pm\sigma$ dos pontos em torno da reta de valores esperados (linha cheia). $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$ corresponderiam, respectivamente, a 68.3%, 95.4% e 99.7% do número total de medidas, pressupondo que obedecessem a uma distribuição gaussiana; um tratamento simples de exclusão de *outliers*² consiste em desprezar pontos que estejam tão ou mais afastados do que 3σ da média (i.e. o valor esperado). Felizmente, grande parte das variáveis reconstruídas dispersaram em menos de 2σ em torno da reta de 45° ; para todas elas, porém, evidentes *outliers* apareceram. Os motivos mais prováveis são os mesmos apresentados na seção 3.1: até a informação de um único tanque defasado no tempo pode alterar drasticamente a reconstrução conjunta com os dados de fluorescência.

Qual seria, então, o efeito da retirada do tanque de menor sinal na análise feita acima, para os 16 eventos cujos tanques com sinal foram dois? A figura 3.7 ilustra o resultado. Alguns poucos pontos na parte geométrica saíram totalmente de seus valores esperados nas barras de erro; mesmo assim, observe como os limites das escalas possuem uma ordem de grandeza a menos do que os limites dos valores que as variáveis podem assumir. Em termos de energia, nenhum dos eventos apresentou um deslocamento significativo aparente por causa da escala. A tabela 3.4 apresenta como mudou o coeficiente de correlação³ utilizando a informação apenas do tanque mais próximo do baricentro (i.e. o de maior sinal). Note agora como a energia foi, na verdade, a variável mais sensível à retirada do tanque de menor sinal, seguida pelo ângulo zenital θ .

É importante ressaltar que todas as estações destes 16 eventos eram vizinhas

²Observação que desvia tanto das outras observações levantando a suspeita de que foi gerado por um mecanismo diferente.

³Fração dos dados que representa o modelo assumido. $r^2 = 1$ significa todos os pontos sobre a reta, enquanto $r^2 < 1$ implica em pontos mais dispersos. Como aqui a análise é comparativa, espera-se que os pontos caiam sobre a reta de 45° .

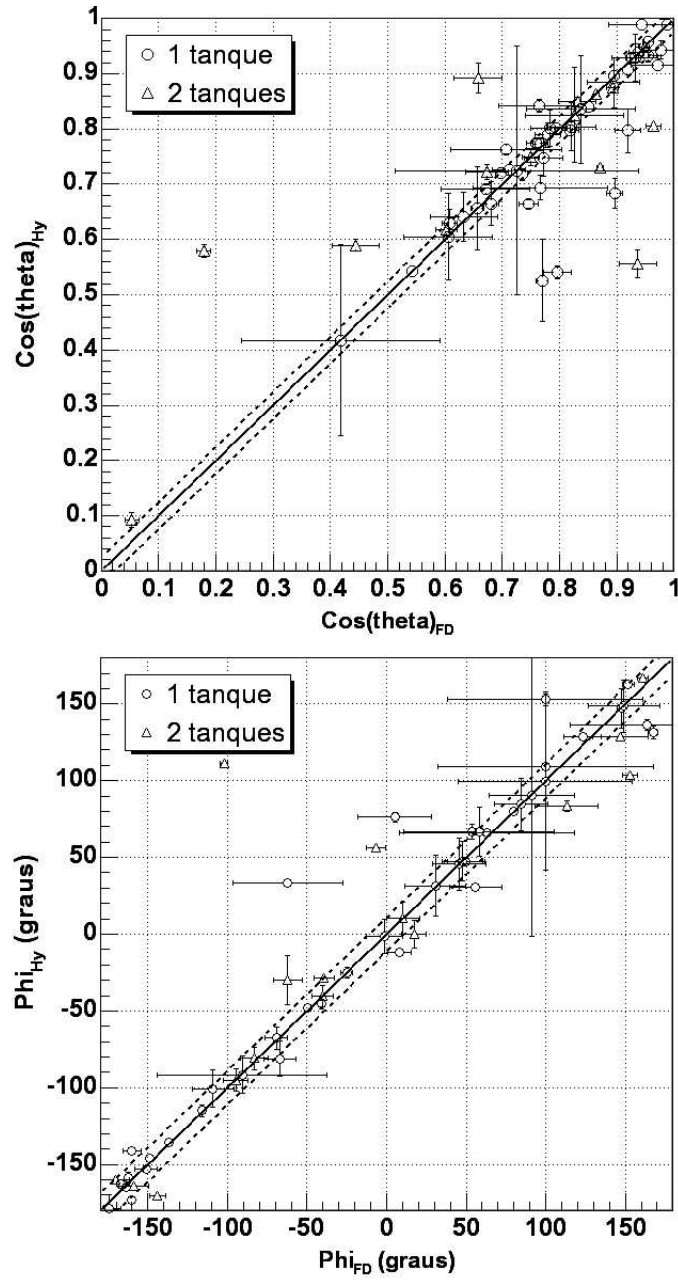


Figura 3.5: Ângulos zenital e azimutal de eventos reconstruídos unicamente através das medidas dos telescópios de fluorescência, e depois com a informação conjunta de um ou dois tanques do arranjo. A linha cheia é uma reta a 45° para comparação entre os dados; as retas pontilhadas englobam 68.3% do número total de medidas.

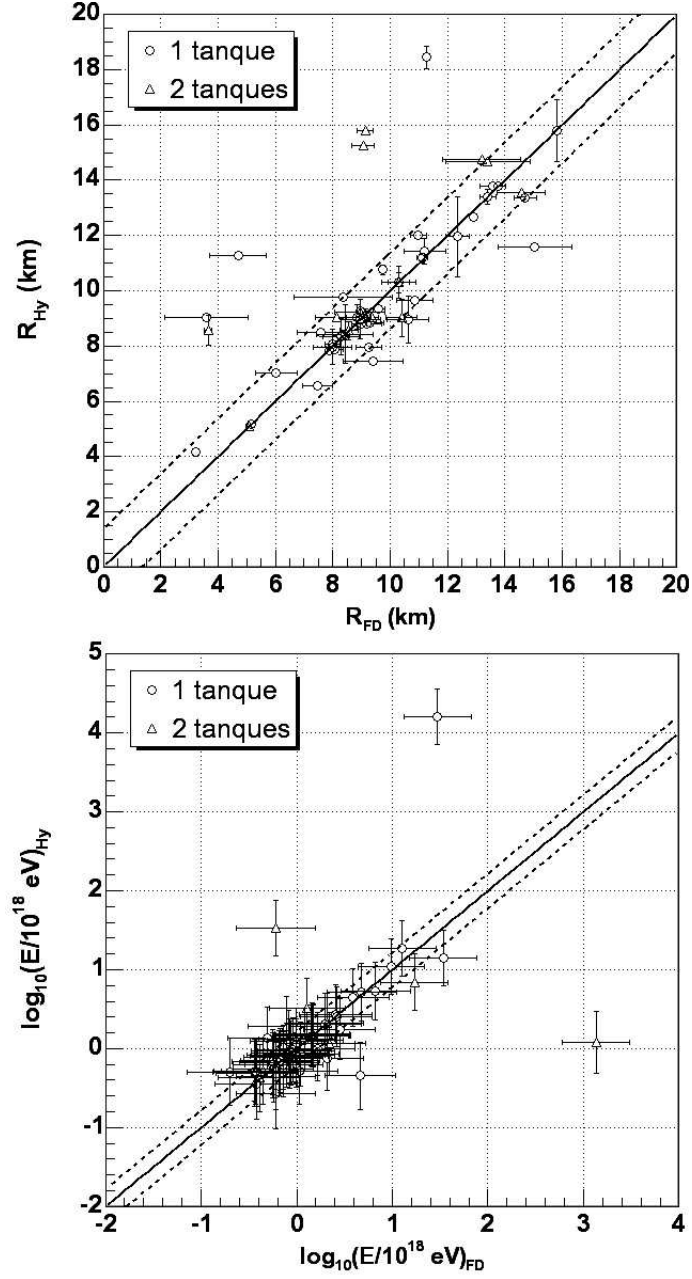


Figura 3.6: Baricentro e energia dos mesmos eventos do gráfico da figura 3.5.

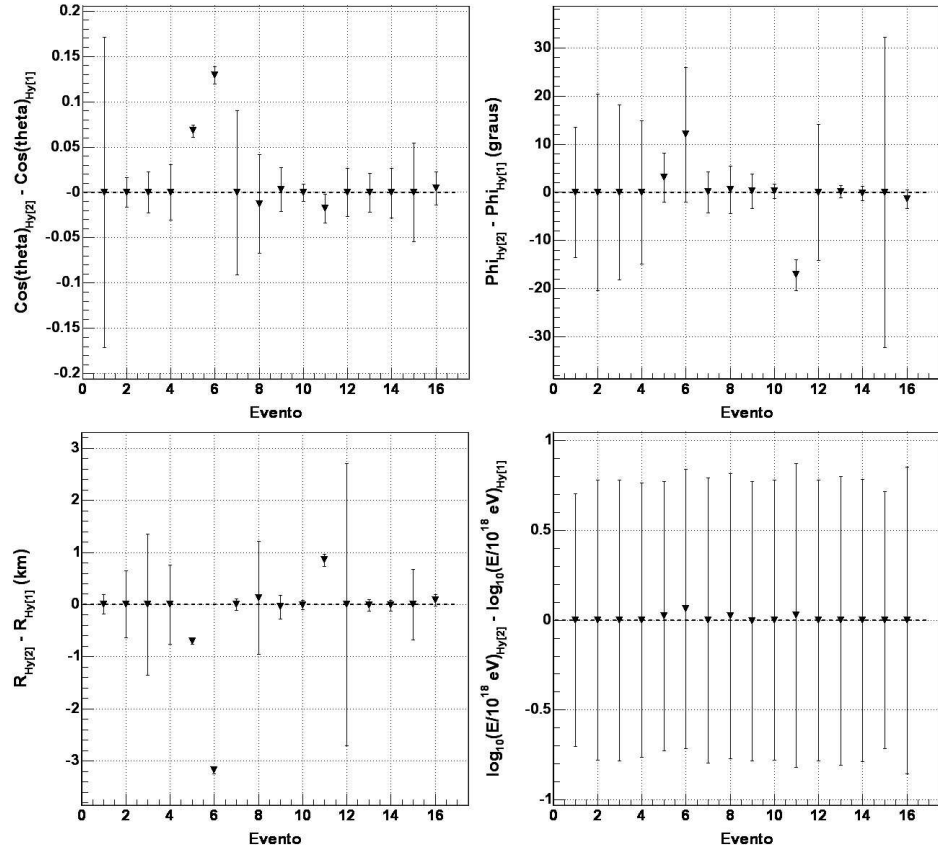


Figura 3.7: Diferença nas variáveis geométricas e energética reconstruídas de maneira híbrida com a informação de dois tanques e depois com a retirada do tanque de menor sinal.

Variação das correlações			
θ	φ	R	E
9.9%	0.5%	1.1%	26.2%

Tabela 3.4: Variação percentual dos coeficientes de correlação iniciais após a exclusão do tanque de menor sinal. Os valores são calculados tomando $100 \times (1 - r_{1t}^2/r_{2t}^2)$, onde r_{2t}^2 é o coeficiente de correlação inicial da variável em questão, e r_{1t}^2 o valor final.

(1.5 km de separação), portanto uma investigação dos sinais é interessante. A tabela 3.5 apresenta quanto é maior o sinal integrado da estação mais próxima ao baricentro em relação à mais distante. Valores próximos de um colocam as estações em igualdade; caso contrário, a contribuição praticamente única é a de que contou mais luz Cerenkov. Casos dissonantes como os eventos Hy 30, 38 e 57 (5, 6 e 11 no gráfico da figura 3.7) apresentaram evidentes mudanças em todas as variáveis geométricas, porém as razões entre seus sinais não sobressaem dos outros eventos da tabela. Extremos como os Hy 04 e 53 (equivalentes a 1 e 10 na figura 3.7) comportam-se da mesma maneira.

Razões entre os sinais							
1	2	3	4	5	6	7	8
16.8	1.4	1.8	18	4.5	1.9	1.9	1.9
9	10	11	12	13	14	15	16
1.3	1.1	1.3	1.6	1.2	2.4	3.7	6.4

Tabela 3.5: S_M/S_m para os 16 eventos de dois tanques disparados, onde S_M e S_m são, respectivamente, o maior e o menor sinal integrado das estações envolvidas.

O fato dos coeficientes de correlação na análise híbrida com um único tanque serem menores do que os coeficientes na análise com a informação de duas estações mostra que, apesar de pequena contribuição, uma quantidade maior de estações refina os resultados. Isto é exatamente a que o observatório se propõe: na totalidade do arranjo de superfície, a frente de um evento típico de 10^{19} eV poderá se alastrar por até 20 km^2 , disparando, no máximo, 20 estações (um tanque Cerenkov equivale a $\sim 1 \text{ km}^2$ de área do detector).

3.3 Resultados preliminares da colaboração

Recentemente (agosto de 2004) foram divulgados resultados preliminares em reconstrução híbrida de parte dos eventos analisados nesta dissertação. Os membros da colaboração Brian Fick e Paul Sommers [35] construíram um código que utiliza as seguintes rotinas para reconstrução de um chuvaire:

1. Determinação do plano que contém o olho e o eixo do chuvaire, i.e. o

shower-detector plane (SDP);

2. Cálculo da geometria através da posição do eixo do chuveiro dentro do SDP, usando a informação dos tempos dos tanques disparados em adição aos tempos dos pixels disparados nos telescópios do olho;
3. Estimativa da energia da partícula primária pela integração de um perfil Gaisser-Hillas (que traz implícita a parte geométrica) ajustado aos dados, como desenvolvido pelo Dr. Luis Prado Jr. e Dr. Bruce Dawson (FLORES, veja capítulo 3).

A parte geométrica conta com 65 eventos, enquanto a energética com apenas 34 entre os que dispararam um, dois e três ou mais tanques. As discriminações são dadas na tabela 3.6.

Colaboração				
	≥ 3	2	1	total
θ	11	14	40	65
φ	11	14	40	65
R	11	14	40	65
E	8	8	18	34

Tabela 3.6: Quantidade de eventos pré-analisados por Fick e Sommers (Colaboração Auger) nas variáveis geométricas e energética.

São duas as diferenças mais importantes na análise por Fick e Sommers em relação a este trabalho. A primeira é a utilização da rotina AMOEBA para a minimização de funções χ^2 , desenvolvida por Brian Newport para análise de dados do CASA-MIA (Chicago Air Shower Array - Michigan Muon Array). Mas a de maior relevância é a segunda, onde nove destes eventos tiveram $100 \mu s$ (quantidade empírica) adicionados aos tempos dos tanques com sinal, para sincronia com os relógios dos telescópios (tabela 3.7). Apenas no cálculo do baricentro os colaboradores apresentaram os erros nas medidas; uma análise comparativa segue nos gráficos das figuras 3.8 e 3.9.

Eventos sincronizados					
03	088087	13	092972	30	104681
05	088331	15	093631	38	105594
11	091826	19	094250	52	144004

Tabela 3.7: Identificação por Hy e SDId dos nove eventos sincronizados por Fick e Sommers.

Na geometria, é interessante observar que exatamente metade dos eventos sincronizados manualmente por Fick e Sommers (pontos pretos cheios) encontram-se dentro de $\pm\sigma$, ao passo que $\sim 30\%$ deles são *outliers*! Foi checado, para cada evento, que um *outlier* em uma variável corresponde a um *outlier*

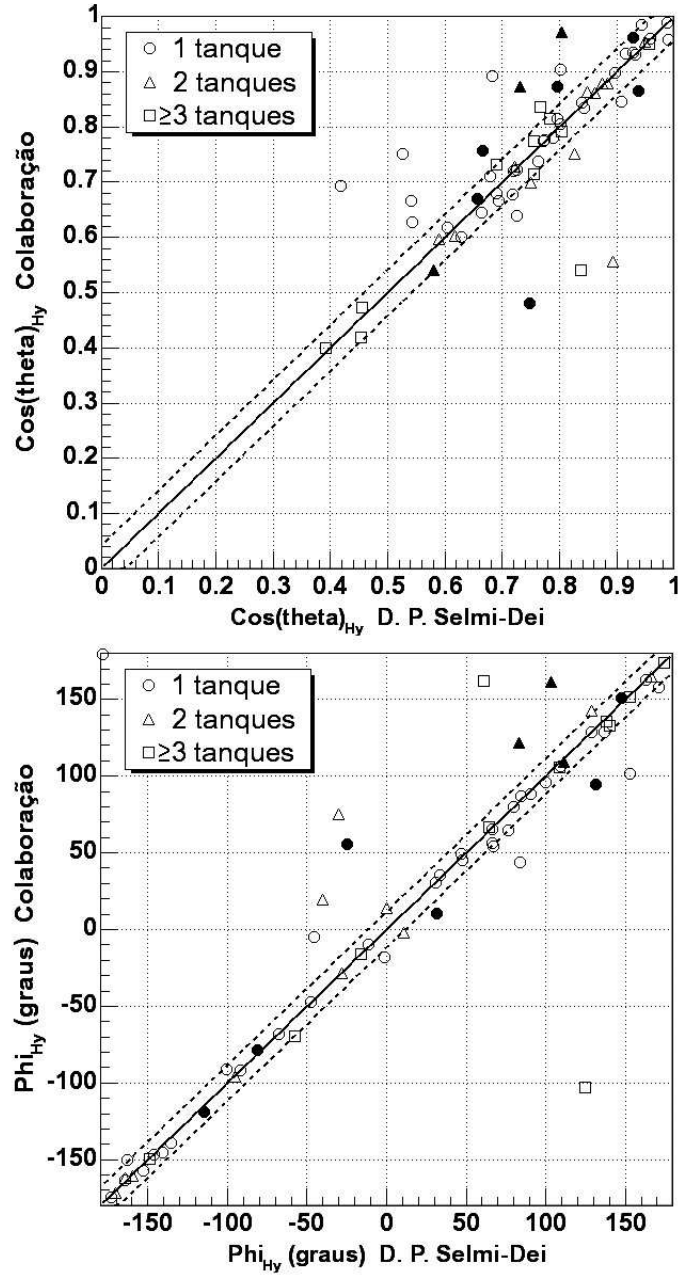


Figura 3.8: Ângulos zenital e azimutal determinados por Fick e Sommers comparados aos reconstruídos pelo autor desta dissertação. Os dados preenchidos em preto referem-se aos eventos cujos tempos dos tanques disparados foram adicionados de $100 \mu\text{s}$ pelos colaboradores.

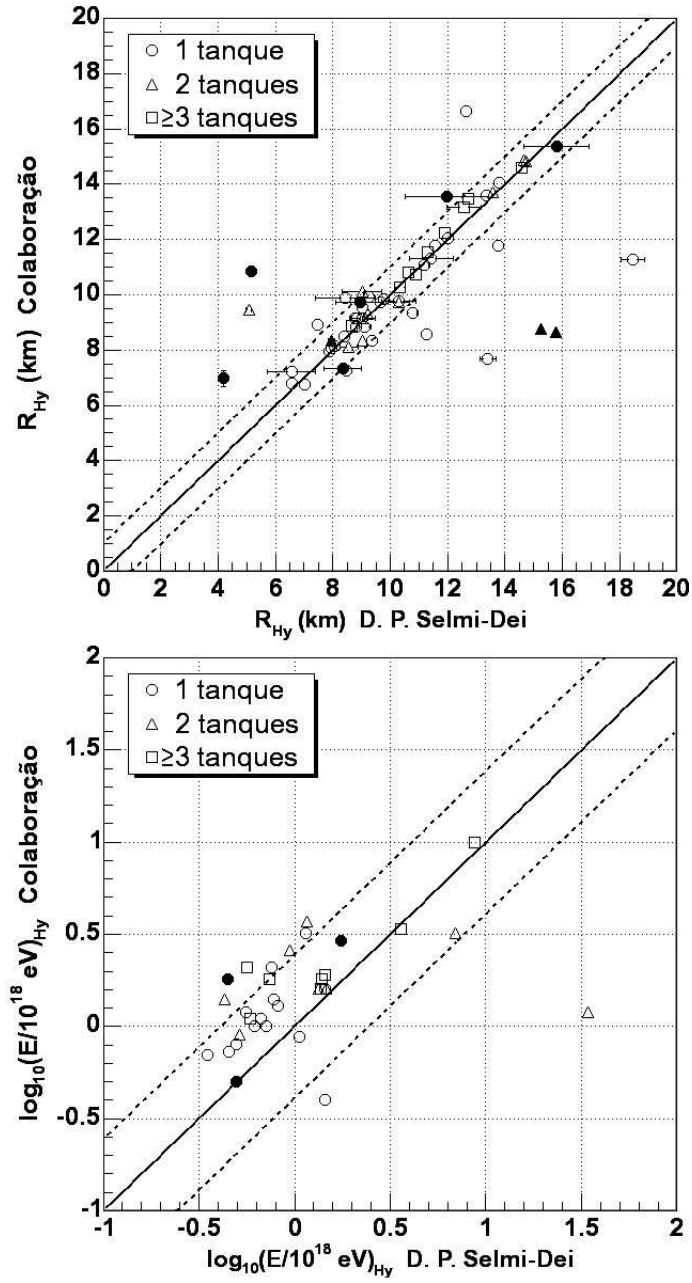


Figura 3.9: Continuação da análise apresentada na figura 3.8 para a reconstrução do baricentro e da energia. Dos eventos cujos tempos dos tanques disparados foram adicionados de $100 \mu s$, apenas três foram divulgados por Fick e Sommers no cálculo da energia.

em todas as outras variáveis. Nove medidas é um número estatisticamente pequeno para qualquer resultado conclusivo, mas o fato de vários destes caírem exatamente sobre a linha comparativa enquanto outros extrapolam coloca em questão a sincronia manual. Análises de reconstrução de *laser shots* já estão sendo realizadas com o intuito de resolver este problema.

Para os demais eventos, a dispersão gaussiana é observada. Tanto o código desenvolvido pelos colaboradores, quanto os utilizados nesta dissertação são baseados em rotinas parecidas e a quantidade de valores dentro do desvio padrão demonstra coerência nos ideais dentro da colaboração. Novamente, *outliers* são provavelmente resultados de descalibração dos equipamentos durante a fase de testes, assim como as implicações do problema dimensional do EA sobre o cálculo do baricentro. A parte angular depende totalmente da sincronia dos relógios dos telescópios com os do arranjo de solo, até esta data ainda não completamente resolvida, e a energia espera por mais estudos com simulações como discutido anteriormente na seção 3.1.

3.4 Conclusões

O trabalho apresentado nesta tese cobriu a análise dos primeiros eventos detectados simultaneamente pelos tanques de superfície e telescópios de fluorescência durante a fase de prototipagem do Observatório Pierre Auger, na Argentina, entre dezembro de 2001 e abril de 2002. Todos os resultados aqui apresentados carregam o empenho de inúmeros pesquisadores da colaboração, seja na construção do observatório, seja nos códigos dos programas de análise, seja nas simulações.

O *Engineering Array*, nome dado ao projeto na fase em questão, contou com 40 unidades do detector de superfície, em Cerro Los Leones, dispostos sob o campo de visão de dois telescópios de fluorescência. Foram registrados 78 eventos cósmicos de maneira híbrida, permitindo testes de performance de materiais, calibrações, programas de análise e mais uma gama de fatores relacionados à construção e operação do observatório.

Número de eventos detectados na fase do EA					
tanques	≥ 3	2	1	falhas	total
eventos	12	16	41	9	78

Tabela 3.8: Total dos eventos detectados pelo EA, separados entre os quais dispararam três ou mais tanques, dois e um tanques, mais os que apresentaram erro de registro.

As reconstruções da geometria e da energia pelo FLORES e FLORES Híbrido dependeram fortemente de colaboradores brasileiros, com os quais o convívio direto possibilitou uma profunda compreensão de como dados brutos são tratados. Através de publicações, *GAP Notes*⁴ e de seu código fonte, a metodo-

⁴De *Giant Array Project Notes*, notas técnicas e científicas sobre o Projeto Pierre Auger.

logia matemática e computacional do *Event Display* foi inteiramente estudada. Todos esses programas possuem vantagens e falhas que vêm ao conhecimento justamente durante as análises, e, portanto, são constantemente modificados através de propostas apresentadas nos congressos e reuniões da Colaboração Auger.

Na seção 3.1 foram apresentados os resultados da análise pelo autor deste trabalho sobre os eventos que dispararam três ou mais tanques durante a operação do Engineering Array. Estes eventos são diferenciados dos demais por serem de possível reconstrução utilizando-se apenas os dados experimentais do detector de superfície. Aproximadamente 1/3 deles apresentou ótima concordância em todos os parâmetros que caracterizam um evento cósmico quando comparados com a reconstrução única pelos dados de fluorescência. Especificamente na reconstrução da energia, todos os casos apresentaram um erro médio estimado de $\sim 20\%$, já previsto na seção 2.1. As falhas possivelmente envolvem flutuações nos tempos e sinais dos detectores, assim como as aproximações tomadas de simulações na parte matemática dos programas. Vale lembrar que o FLORES nem sempre ajusta da melhor maneira a função de Gaisser-Hillas a sinais ruidosos (aliás, muito freqüentes), como apontado por um de seus criadores. O problema mais evidente na geometria foi a reconstrução do baricentro pelos dados do arranjo, devido às dimensões do EA. Efeitos de borda foram responsáveis por grandes desvios, fazendo com que este parâmetro seja mais confiável quando determinado pelos dados de fluorescência.

Quando analisados pelo FLORES Híbrido, os mesmos 12 eventos foram confrontados com a análise apenas pelos dados dos tanques de superfície e, depois, apenas pelos dos telescópios de fluorescência. Aqui surgem as primeiras dificuldades de minimizar simultaneamente dados de detectores diferentes. No primeiro caso, um evento apresentou $\theta > 90^\circ$ e outros dois tiveram seus baricentros reconstruídos com erro (distâncias incompatíveis com as dimensões do EA). Um problema ainda maior apareceu na comparação entre energias: elas são sistematicamente desviadas em uma única direção dos valores esperados, possivelmente pela atual controvérsia entre colaboradores em relação às constantes da equação que determina a energia da partícula primária quando analisada apenas pelos dados do detector de superfície. No segundo caso, comparando resultados de reconstrução híbrida com os de fluorescência, esse problema das energias não é observado, distribuindo-se igualmente em torno da reta de valores esperados e 2/3 delas dentro das barras de erro. Na geometria, 1/3 dos eventos apresentam resultados satisfatórios *por variável*, ou seja, uma boa concordância azimutal não implica, por exemplo, em uma boa concordância do baricentro ou zenital.

Apesar desses poucos dados não representarem um peso estatístico significativo, o objetivo de uma análise preliminar é identificar de imediato erros sistemáticos nas medidas, refinar limiares e, principalmente, verificar a sincronia dos tempos dos dois tipos de detectores, já que sinais de estações afastadas do baricentro mostraram-se pouco influentes na determinação da função de distribuição lateral.

A seção 3.2 abordou eventos que dispararam dois ou um tanques do EA, ou seja, cuja reconstrução só é possível através dos dados dos telescópios ou

com esses mesmos dados, adicionados aos tempos e sinais das poucas estações disparadas. Desprezando arquivos com erro e tratando à parte cascatas observadas simultaneamente por dois telescópios, 57 eventos tiveram suas reconstruções energética e geométrica dispersadas de maneira gaussiana em torno do esperado. O motivo mais provável para grandes desvios é o mesmo dos eventos de três ou mais tanques disparados: a informação de um único tanque com sinal, porém dessincronizado com o relógio dos telescópios, pode alterar significativamente a reconstrução híbrida junto aos dados de fluorescência. A análise prosseguiu com a retirada do tanque de menor sinal nos 16 eventos listados na tabela 3.8. Como resultado, foi observada uma piora significativa nas determinações da energia e do ângulo zenital. As estações em questão eram sempre vizinhas e a razão entre seus sinais não demonstrou nenhum tipo de preferência nessas alterações. Fica claro que uma quantidade maior de tanques implica em dados mais refinados, exatamente ao que se propõe o Observatório Auger.

Por fim, Fick e Sommers (seção 3.3), membros da colaboração e portadores de seus próprios códigos de análise, divulgaram recentemente resultados parciais de análise híbrida de todos os eventos reconstruídos pelo autor desta dissertação (veja tabela 3.9). As rotinas são as mesmas, porém utilizando um método numérico diferente e adicionando manualmente $100 \mu s$ aos tempos dos tanques de nove eventos, como tentativa de solução para o problema da sincronia dos relógios dos diferentes detectores. Esta última etapa não foi realizada pelo autor desta tese, mas quando os resultados são comparados com os de Fick e Sommers nenhuma conclusão pôde ser tirada devido a discrepâncias: ao passo que 50% dos eventos sincronizados não apresentam desvio significativo dos dados brutos, cerca de 1/3 deles resultaram em *outliers*. Os demais distribuíram-se de modo gaussiano em torno do valor esperado, com relativa concordância.

Fick e Sommers, e resultados deste trabalho								
	≥ 3		2		1		total	
	FS	A	FS	A	FS	A	FS	A
geometria	11	12	14	16	40	41	65	69
energia	8	12	8	16	18	41	34	69

Tabela 3.9: Discriminação do número de eventos analisados por Fick e Sommers (FS) em relação aos analisados pelo autor desta tese (A), separados na categoria de tanques disparados por evento.

Em todos os casos desta seção, *outliers* são resultados de prováveis descalibrações durante a fase de testes do EA. O sucesso do cálculo do baricentro está fortemente ligado às dimensões do arranjo de superfície, assim como futuros resultados de simulações refinarão a determinação da energia. A sincronia dos relógios resolverá a parte angular e é atualmente linha de pesquisa com *laser shots* no observatório.

Referências Bibliográficas

- [1] V. Hess. *Physik. Zeitschr.*, 13:1804, 1912.
- [2] E. Fermi. *Physics Review*, 75:1169, 1949.
- [3] The Auger Collaboration. The Pierre Auger Observatory Design Report. Technical Report, 1997.
- [4] R. J. Protheroe. *preprint astro-ph/9612212*, 1997.
- [5] P. O. Lagage and C. J. Cesarsky. *Astron. Astrophys.*, 118:223, 1983.
- [6] L. O'C. Drury. *Contemp. Phys.*, 35:231, 1994.
- [7] What is the highest beam energy Fermilab can achieve? <http://www.fnal.gov/pub/about/faqs>, 2004.
- [8] E. Chaisson and S. McMillan. *Astronomy Today*. Prentice-Hall, 2nd edition, 1997.
- [9] P. Moore and G. Hunt. *The Atlas of the Solar System*. 2nd edition, 1990.
- [10] C. F. Kennel. *Journal of Geophysics Res.*, 91:917, 1986.
- [11] P. Sokolsky. *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*. 1st edition, 1989.
- [12] C. J. Cesarsky. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 28B:51, 1992.
- [13] C. J. Cesarsky and V. Ptuskin. *Proc. 23rd ICRC (Calgary)*, 2:341, 1993.
- [14] S. Eidelman et al. *Phys. Lett. B*, 592:1, 2004.
- [15] Michael Zeilik. *ASTRONOMY: The Evolving Universe*. 3rd edition, 1982.
- [16] Edo Berger. Is there a relation between the progenitor of the gamma ray burst and the type of gamma ray burst? <http://www.astro.caltech.edu/~ejb/faq.html>, 2001.
- [17] C. O. Escobar and R. A. Vazquez. Are high energy cosmic rays magnetic monopoles? *Astroparticle Physics*, 10:197–202, 1999.

- [18] T. W. Kephart and T. J. Weiler. *Astropart. Phys.*, 4:271, 1996.
- [19] A. A. Penzias and R. Wilson. *Applied Journal*, 142:419, 1965.
- [20] K. Greisen. *Physics Review Letters*, 16:748, 1966.
- [21] G. Zatsepin and V. Kuz'min. *ZhETF Pis'ma*, 4:114, 1966.
- [22] J. W. Cronin. *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)*, 28B:213, 1992.
- [23] F. A. Aharonian and J. W. Cronin. *Phys. Rev.*, D50:1892, 1994.
- [24] J. P. Vallee. Effects of interstellar magnetic bubbles and of galactic tides on galactic magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics*, 136:373–377, 1984.
- [25] P. Auger. *Reviews of Modern Physics*, 11:288, 1939.
- [26] Auger project technical note. GAP-95-025, 1995.
- [27] R. J. O. Reid, M. A. Lawrence and A. A. Watson. *J. Phys.*, G17:733, 1991.
- [28] R. M. Baltrusaitis. A240:410, 1985.
- [29] The Auger Collaboration. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004.
- [30] J. V. Jelley. *Cerenkov Radiation and its Applications*. Pergamon Press, 1958.
- [31] Pierre Billoir. Reconstruction of first year EA events from the surface detector. GAP Note 2002-044, 2002.
- [32] Luiz Vitor de Souza Filho. *Desenvolvimento da instrumentação e análise de dados do Observatório Auger*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [33] F. Kakimoto. *Proc. 24th ICRC (Rome)*, 1:1047, 1995.
- [34] T. K. Gaisser and A. M. Hillas. *Proc. 15th ICRC*, 8:353, 1977.
- [35] Brian Fick and Paul Sommers. Some preliminary results on hybrid reconstruction. <http://www.auger.org.ar/CDAS/hybrid>, 2004.