

3

Observatório Pierre Auger

O Observatório Pierre Auger está localizado no hemisfério Sul, na província de Mendoza na Argentina, e foi construído para o estudo dos raios cósmicos com energia $E > 10^{18}$ eV [5]. Sua área de detecção é de 3000 km² permitindo assim o acúmulo de estatística sem precedentes. Por outro lado, combina duas técnicas de medida (método híbrido), o que permite a verificação da consistência nos dados a partir de duas medidas independentes, assim como também a inter-calibração e avaliação de efeitos sistemáticos.

Está formado por 1600 tanques de efeito Cherenkov em água (detectores de superfície - SD) espalhados nesta área para a detecção das partículas secundárias, geradas pelos processos de interação do raio cósmico primário com as moléculas da atmosfera que conseguem chegar no solo. Desse modo, elétrons, fótons e múons dos EAS são monitorados na superfície aproximadamente 100% do tempo. De forma complementar, um conjunto de 24 telescópios (detectores de fluorescência - FD), posicionados na periferia do arranjo de superfície monitoram a atmosfera acima do SD. Estes detectores observam o desenvolvimento longitudinal do chuveiro e monitoram a luz fluorescente gerada quando ele interage e deposita energia na atmosfera. Porém, pelas características desta técnica de detecção, ela é usada aproximadamente 15% do tempo. A figura 3.1 apresenta a disposição dos detectores.

Os dois métodos complementares de monitoramento dos EAS, em conjunto com a grande área de detecção, convertem o Observatório no instrumento de maior poder para a reconstrução e estudo dos eventos de maior energia.

Por outro lado, adicionalmente ao arranjo usual de SD e FD, outros detectores tanto de superfície quanto de fluorescência, mas com diferentes configurações, foram colocados para introduzir melhorias que permitam, por exemplo, o estudo de uma faixa de menor energia. Sendo assim, têm-se detectores Cherenkov com espaçamentos de 750 m (*Infill*) para atingir uma faixa de menor energia, telescópios de fluorescência de maior elevação para aumentar o campo de visão superior (*HEAT*).

Nas próximas seções abordar-se-á o funcionamento, características e



Figura 3.1: Disposição dos detectores de superfície (pontos vermelhos) e dos detectores de fluorescência (Leones, Morados, Loma Amarilla e Coihueco) na periferia do arranjo SD, especificamente neste caso mostra-se também o campo de visão de cada um dos telescópios de fluorescência (linhas verdes).

processo de reconstrução de eventos medidos pelos detectores de superfície e fluorescência.

3.1

Detectores de Fluorescência

O arranjo de fluorescência no Observatório Auger foi projetado para medir o desenvolvimento dos chuviros na atmosfera. Está composto por quatro detectores (Los Leones, Los Morados, Loma Amarilla e Coihueco), onde cada um deles está formado por seis telescópios de fluorescência. Cada telescópio percorre 30° em azimute e 30° em elevação, alcançando no conjunto 180° em azimute. Na figura 3.2 apresenta-se o esquema de um dos olhos de fluorescência com o detalhe de um dos seus telescópios.

A detecção de raios cósmicos ultra-energéticos, utilizando emissão induzida de fluorescência de nitrogênio por chuviros atmosféricos extensos, foi usada anteriormente pelos experimentos Fly's Eye [40] e Hires [15]. Nesta técnica de detecção, partículas carregadas geradas quando o EAS desenvolve-se na atmosfera excitam suas moléculas de nitrogênio, e estas moléculas emitem posteriormente luz fluorescente num comprimento de onda de ~ 300 até ~ 430 nm. O número de fótons fluorescentes emitidos é proporcional à energia depositada na atmosfera, devido à perda de energia pelas partículas carregadas. Assim, por meio da análise do desenvolvimento longitudinal do chuviro, o mesmo que é uma função da quantidade de matéria atravessada ou profundidade atmosférica X ($X = \int \rho dl$ (g/cm^2), com ρ sendo a densidade do meio e l a distância atravessada), a energia do primário pode ser determinada.

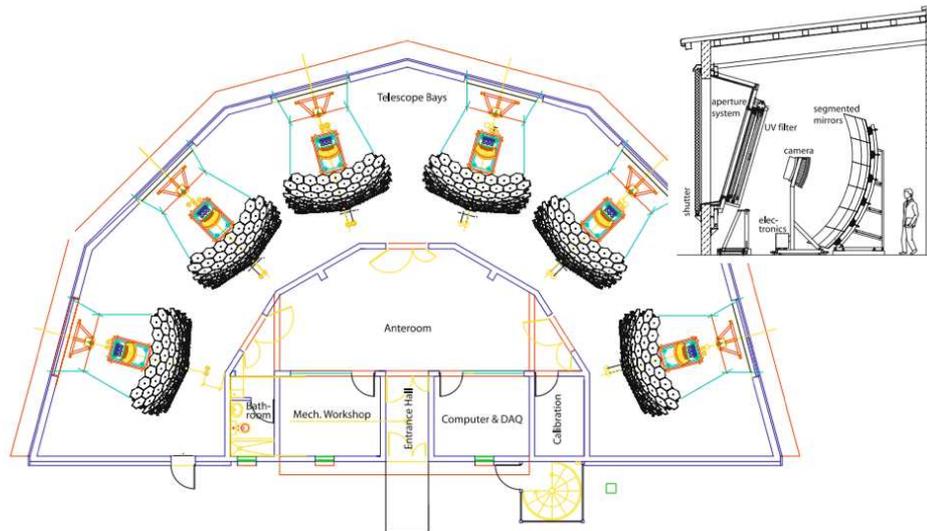


Figura 3.2: Vista esquemática de um dos olhos de fluorescência com seus 6 telescópios. *Superior direita:* um dos telescópios de fluorescência. Extraído da referência [39].

Dessa maneira, medindo a razão de emissão fluorescente como função desta profundidade atmosférica (X), um detector de fluorescência consegue medir o perfil longitudinal de desenvolvimento $dE(X)/dX$ de um chuveiro. E a integral deste perfil dá informação da energia total dissipada de forma eletromagnética, a mesma que em princípio é $\sim 90\%$ da energia total do raio cósmico primário.

Basicamente, cada telescópio possui um espelho esférico, um anel corretor, uma câmera fotomultiplicadora (20×22 PMTs¹) na superfície focal do espelho, e um filtro de transmissão ultravioleta como apresentado na figura superior direita de 3.2. Assim, no telescópio, a luz fluorescente passa através do filtro UV e do anel corretor, posteriormente é focalizada pelo espelho em direção à câmera fotomultiplicadora.

3.1.1 Reconstrução geométrica

A reconstrução de eventos utilizando informação vinda tanto do SD como do FD denomina-se híbrida. A figura 3.3 apresenta um esquema deste tipo de detecção, onde ao utilizar a informação de tempo dos pixels dos telescópios, em conjunto com a reconstrução de eventos pelo SD, a resolução na posição do ponto de impacto do chuveiro pode chegar a ~ 50 m, e a correspondente à direção de chegada do primário para 0.6° [39].

Para reconstruir a geometria do chuveiro, como apresentado na figura 3.4, precisa-se primeiramente determinar o plano de detecção do mesmo (SDP

¹Acrônimo de Photomultiplier.

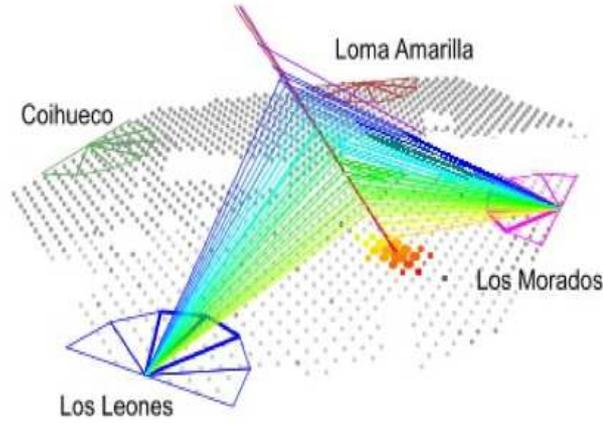


Figura 3.3: Esquema da detecção de um evento híbrido, ou seja, um evento medido simultaneamente pelos SD e FD do Observatório Auger.

- Shower Detector Plane), sendo este o plano que contém a posição do olho e a linha de eixo do chuveiro. Assim, o vetor normal ao SDP (\vec{n}_{SDP}) [41] pode ser determinado por meio da minimização da distância angular entre \vec{n}_{SDP} e o vetor de direção de cada pixel \vec{v}_i [42]:

$$S_{SDP}^2 = \sum_{pixels} \frac{[\frac{\pi}{2} - \cos^{-1}(\vec{n}_{SDP} \cdot \vec{v}_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (3-1)$$

com σ_i tendo a informação do inverso da carga de cada pixel da câmera.

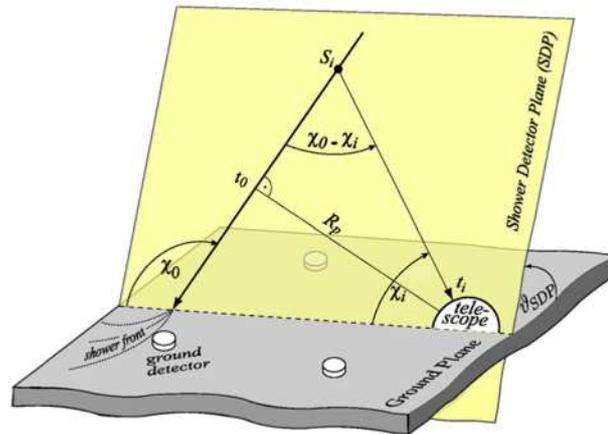


Figura 3.4: Reconstrução geométrica de um chuveiro para o FD. Extraída da referência [39].

A direção do eixo do chuveiro no SDP é dada pelo ângulo χ_o (ângulo entre o eixo e a linha horizontal do SDP) a partir da informação dos tempos nos pixels e dos tempos no detector de superfície com maior sinal. Sendo assim, χ_o , R_p (distância perpendicular entre a posição do olho e o eixo do chuveiro),

e t_o (tempo quando a frente do chuveiro sobre seu eixo passa pelo ponto R_p) são determinados por meio de uma minimização de χ^2 :

$$\chi_{eixo}^2 = \sum_i \left[\frac{t_i^{med} - t_i}{\sigma_i} \right]^2 + \left[\frac{t_{SD}^{med} - t_{SD}}{\sigma_{SD}} \right]^2. \quad (3-2)$$

O primeiro termo corresponde à informação do FD e o segundo por sua vez ao SD, sendo t_i^{med} a medida de tempo de chegada da luz ao olho, t_{SD}^{med} o tempo de disparo na estação com maior sinal, t_{SD} o tempo esperado, σ_i e σ_{SD} as incertezas nas medidas dos tempos, e t_i o tempo esperado de chegada da luz no i -ésimo pixel [39]:

$$t_i = t_o + \frac{R_p}{c} \tan[(\chi_o - \chi_i)/2] \quad (3-3)$$

3.1.2

Perfil do chuveiro e reconstrução da energia

Após a reconstrução geométrica possibilita-se a determinação do perfil longitudinal do chuveiro e finalmente da energia do primário. Sendo assim, a luz Cherenkov e de espalhamento medidas são calculadas para posteriormente isolar a contribuição correspondente à fluorescência, e por meio da determinação do perfil dela, a posterior determinação da energia depositada pela profundidade atmosférica (dE/dX) por meio de um ajuste de uma função de Gaisser-Hillas [43]:

$$\frac{dE}{dX}(X) = \left(\frac{X - X_o}{X_{max} - X_o} \right)^{\frac{X_{max} - X_o}{\lambda}} \exp \left[\frac{X_{max} - X}{\lambda} \right] \frac{dE}{dX} \Big|_{X=X_{max}}, \quad (3-4)$$

onde X_o é a profundidade atmosférica da primeira interação, X_{max} a profundidade atmosférica máxima (onde acontece o máximo desenvolvimento do chuveiro em função do número de partículas), λ o comprimento de interação, e $\frac{dE}{dX} \Big|_{X=X_{max}}$ a energia depositada como função da profundidade atmosférica. O ajuste desta função aos dados medidos é apresentada na figura 3.5.

Dessa maneira, a integral sobre o perfil longitudinal do chuveiro representa a energia calorimétrica, que representa $\sim 90\%$ da energia do raio cósmico primário, dado que existe uma porção de energia levada pelos neutrinos e múons, a mesma que não pode ser medida pelo FD. Porém, para a determinação desta contribuição e a posterior obtenção da energia final do primário são utilizadas simulações de chuveiros. Com isso, as incertezas sistemáticas na determinação final da energia são $\sim 22\%$, sendo as maiores contribuições devidas ao rendimento de fluorescência absoluto (14%), calibração absoluta do FD (9%), e o método de reconstrução do perfil longitudinal (10%) [39].

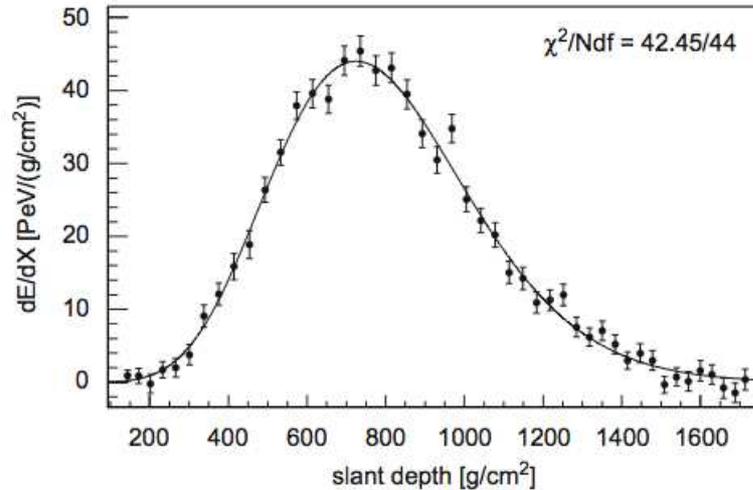


Figura 3.5: Perfil de energia reconstruído para um chuveiro de $3.0 \pm 0.2 \times 10^{19}$ eV, a linha representa o ajuste de Gaisser-Hillas. Extraída da referência [39].

3.2

Detectores de Superfície

O arranjo de superfície mede a densidade de sinal e seus tempos de chegada quando os chuviros atingem o solo. A luz Cherenkov monitorada nestes detectores é medida em unidades do sinal médio produzido por um múon vertical e central atravessando o detector ou *Vertical-Equivalent Muon* (VEM) [44]. Está composto por aproximadamente 1600 detectores distribuídos numa grade triangular equilátera com espaçamento de 1.5 km. Cada detector é basicamente um tanque cilíndrico de 10 m^2 de área de base e 1.2 m de altitude, contendo 12000 litros de água ultra-pura. No topo de cada tanque estão localizadas 3 fotomultiplicadoras (PMTs) distribuídas simetricamente a uma distância de 1.2 m do seu centro. Além disso, cada detector de superfície é mantido por meio de um sistema próprio de painéis solares e baterias, os quais provêem em média 10 Watts para as PMTs e a eletrônica do detector (processador, GPS, painel de controle, etc.) [45]. A figura 3.6 apresenta os componentes principais de um detector de superfície.

Cada PMT fornece dois sinais, os quais são digitalizados por conversores analógico-digital ou FADC (Flash Analog to Digital Converters) numa frequência de 40 MHz. A amplitude do sinal é codificado em 10 bits. Um dos sinais é extraído do anodo e o outro do último dinodo (que é amplificado por um fator 32), os quais são utilizados para produzir um intervalo dinâmico suficiente para abranger, com boa precisão, a informação dos detectores perto e longe do ponto de impacto do chuveiro (aproximadamente 1000 partículas e 1 partícula por μs respectivamente). Cada FADC bin corresponde a 25 ns [47]. Assim, os sinais obtidos pelas PMTs serão enviados ao sistema central de aquisição de

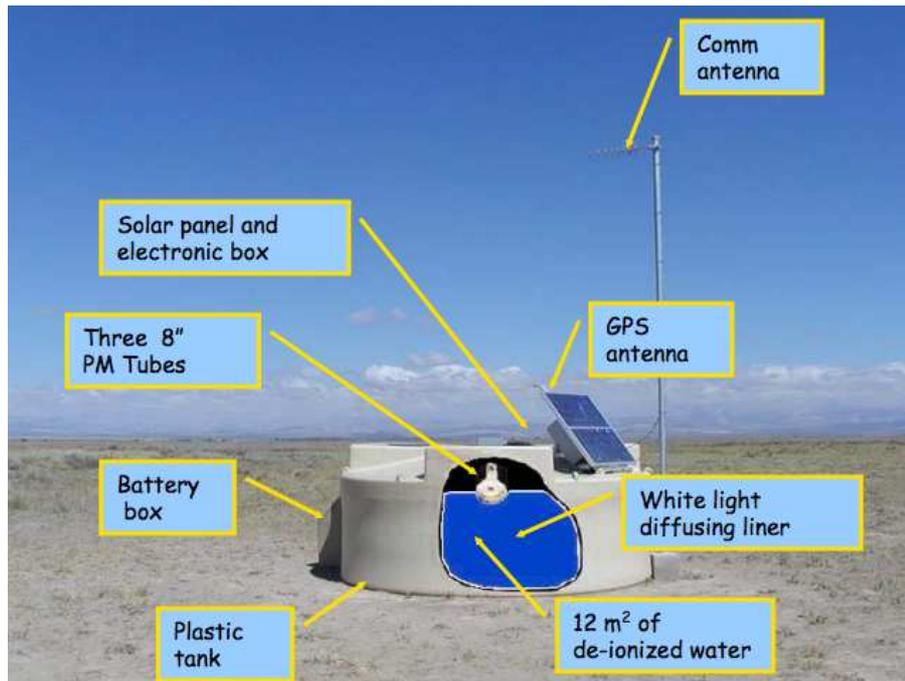


Figura 3.6: Detector de superfície do Observatório Auger e seus componentes principais: tanque plástico com 12 toneladas de água, bateria, fotomultiplicadoras, painéis solares, GPS, antena de comunicação e eletrônica do tanque. Extraído da referência [46].

dados *CDAS* (Central Data Acquisition System), uma vez que um possível chuveiro dispare o arranjo de superfície. Para isso, é necessária uma hierarquia de gatilhos para identificar possíveis chuveiros gerados por raios cósmicos, até a seleção final de eventos reais.

3.2.1

Sistema de Gatilho dos detectores de superfície

O sistema de gatilho dos detectores de superfície tem cinco níveis de hierarquia.

Os primeiros níveis (T1 e T2) são formados em cada detector, a combinação espacial e temporal de T2 levam ao gatilho do arranjo ou T3, o T3 inicia a aquisição e armazenamento de dados. A lógica destes três primeiros níveis de gatilho é apresentada na figura 3.7.

Gatilho T1: é um dos dois tipos de gatilho local da estação. Tem-se dois tipos independentes de T1 trabalhando de forma complementar para a detecção das componentes muônica e eletromagnética do chuveiro. O primeiro T1 é conhecido como gatilho limiar (TH - Threshold Trigger), onde exige-se a coincidência das 3 PMTs acima de um valor nominal de 1.75 VEM. O TH-T1 é usado para selecionar sinais curtos em tempo, gerados basicamente pelos

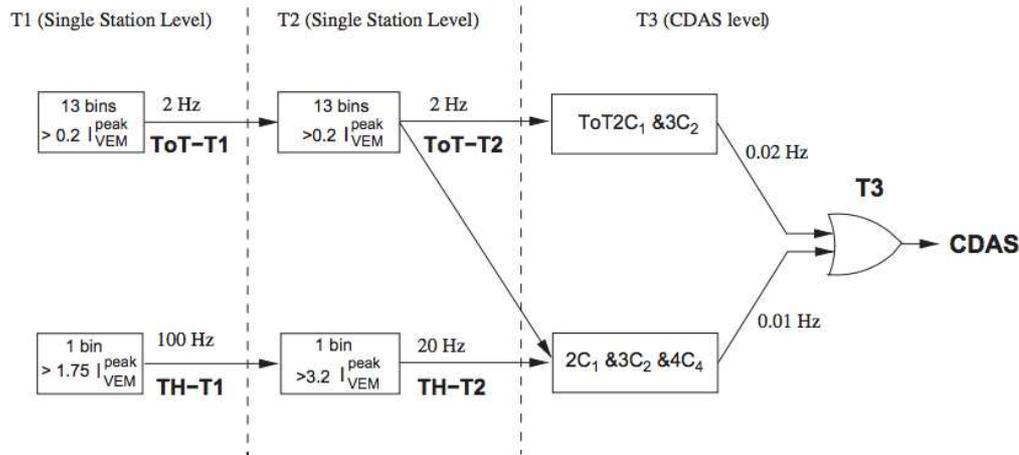


Figura 3.7: Esquema da hierarquia de disparo do detector de superfície do Observatório Auger. Extraída da referência [47].

múons que têm um livre caminho médio muito longo na atmosfera, assim, chegam no detector sem muita dispersão temporal devido a colisões múltiplas na atmosfera. O segundo T1 denomina-se gatilho de tempo sobre o limiar (ToT - Time-over-Threshold Trigger), requer no mínimo que 13 (≥ 325 ns) dentro 120 bins de tempo estejam acima do limiar de 0.2 VEM em coincidência de 2 das 3 PMTs. Este modo de disparo ou gatilho é utilizado para detectar preferencialmente elétrons e fótons que chegam aos detectores espalhados no tempo. O ToT é ótimo para chuviscos de baixa energia, dominados principalmente pela componente eletromagnética, ou para eventos de altas energias onde há estações disparadas muito longe do ponto de impacto do chuvisco no solo.

Gatilho T2: aplica-se para obter uma redução na frequência para ~ 20 Hz da razão de eventos por detector. Todos os ToT-T1 passam para T2, mas no caso dos TH-T1 exige-se a coincidência dos 3 PMTs acima de um valor de 3.2 VEM. Os ToT-T2 possuem menor uniformidade que os TH-T2, já que os ToT são bastante sensíveis à forma do sinal, porém a falta de uniformidade neste tipo de gatilho no arranjo não afeta a seleção e posterior reconstrução de eventos. Os T2 são enviados ao CDAS para a formação de um gatilho T3.

Gatilho T3: está baseado na combinação espacial e temporal dos T2. O gatilho T3 será executado em dois modos, como apresentado na figura 3.8:

1. O primeiro T3 ($ToT2C_1 \& 3C_2$) precisa da coincidência de pelo menos três detectores, os que deveriam ter passado o ToT, e possuir um requerimento mínimo de compactação. O $ToT2C_1 \& 3C_2$ seleciona predominantemente

eventos físicos, assim, 90% dos eventos selecionados por meio dele são reais (eventos gerados por um raio cósmico), além de ser eficiente abaixo de 60° [47].

- O segundo modo T3 ($2C_1 \& 3C_2 \& 4C_4$) requer quatro coincidências de T2 com compactação moderada. Neste caso, pelo menos um dos detectores disparados deveria ficar na primeira coroa (C_1), outro na segunda (C_2) e o último na quarta (C_4). Este gatilho é eficiente para detectar chuvereiros inclinados, ou seja, aqueles dominados pela componente muônica.

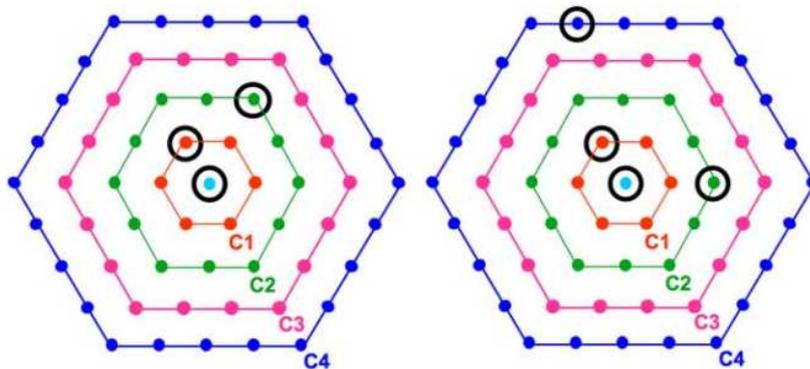


Figura 3.8: Gatilhos T3. *Esquerda:* $ToT2C_1 \& 3C_2$. *Direita:* $2C_1 \& 3C_2 \& 4C_4$. C1 até C4 correspondem da primeira até quarta coroa, com distâncias de 1.5, 3, 4.5, e 6 km em relação a um determinado detector. Extraída da referência [47].

Após a aquisição dos dados, e considerando os níveis de gatilho, precisa-se realizar a seleção de eventos físicos. Sendo assim, dois níveis de seleção foram implementados, o *Gatilho Físico* (T4) e o *Gatilho de Qualidade* (T5). A lógica destes gatilhos apresenta-se na figura 3.9.

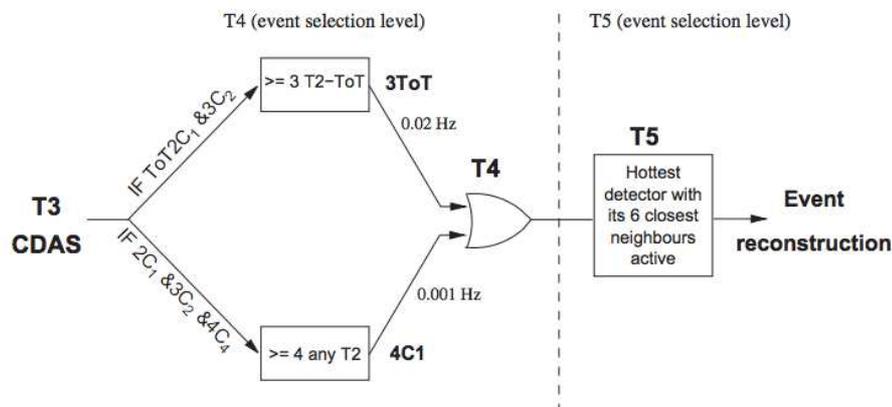


Figura 3.9: Esquema da hierarquia de seleção de eventos do detector de superfície do Observatório Auger. Extraída da referência [47].

Gatilho Físico ou T4: usado para procurar chuviros reais do conjunto de dados fornecidos pelo gatilho T3. Dois critérios são considerados:

1. $3ToT$: precisa de 3 estações uma perto da outra, as quais tenham passado o critério T2-ToT em um padrão triangular (figura 3.10a). Aqui, os tempos dos sinais nas estações devem ser compatíveis com uma frente de chuviro plana se propagando à velocidade da luz. Neste caso, eventos com ângulos zenitais abaixo de 60° são escolhidos com alta eficiência $> 98\%$.
2. $4C_1$: requer 4 estações próximas, como apresentado na figura 3.10b. Igual ao $3ToT$, o tempo dos sinais nas estações tem que ser compatível com uma frente de chuviro plana se propagando à velocidade da luz. Com este tipo de disparo, a eficiência de eventos com ângulos zenitais menores a 60° chega para $\sim 100\%$.

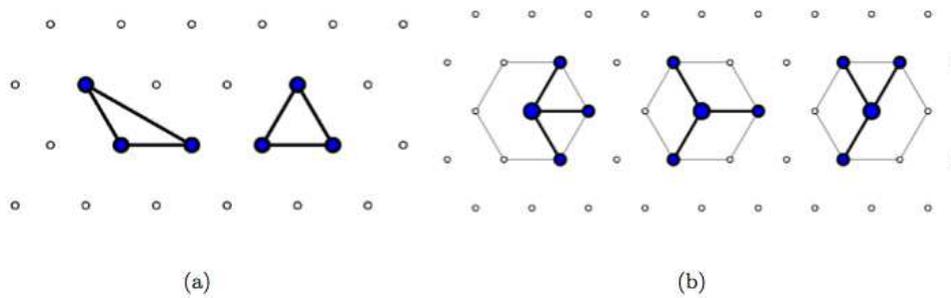


Figura 3.10: (a) Duas possíveis configurações de $3ToT$. (b) Três configurações mínimas de $4C_1$. Extraída da referência [48].

Os dois critérios ($3ToT$ e $4C_1$) são complementares, no entanto o $4C_1$ favorece a seleção de eventos inclinados. Após a seleção, 99.9% dos eventos selecionados são reconstruídos, ou seja, determina-se para eles seus parâmetros inerentes, como por exemplo direção de chegada e energia.

Gatilho de Qualidade ou T5: este critério procura por chuviros bem contidos no arranjo, assegurando assim a boa reconstrução do ponto de impacto da cascata. O gatilho de qualidade pede que a estação com maior sinal possua seis vizinhos (um hexágono) ativos no momento do disparo. A aplicação deste critério reduz a área efetiva do detector em $\sim 10\%$. Adicionalmente, o T5 garante uma exposição total do detector de superfície para a posterior determinação do espectro e das anisotropias na direção de chegada.

3.2.2

Seleção de estações

A seleção de estações para eventos com ângulo zenital menor a 60° , eventos de interesse neste trabalho, denomina-se *Seleção Bottom-Up*. Esta seleção é utilizada para desconsiderar estações acidentais em eventos reais, ou seja, estações onde seus sinais estão por casualidade em coincidência temporal com as outras estações porém que não são parte do evento. Para isso, são consideradas as chamadas sementes definidas como um triângulo elementar, que é a configuração de uma estação com dois vizinhos não alinhados. Se existe mais de um triângulo de estações, a semente com o maior sinal total é escolhida. Esta seleção procura basicamente pela configuração de gatilhos T4. Se o T4 é do tipo 3ToT, para a definição da semente são só consideradas estações com disparos ToT, no caso de 4C1, as estações com disparo TH também são consideradas. Assim que o triângulo seja determinado, a direção de chegada do chuveiro é estimada ajustando o tempo de chegada do sinal para uma frente de chuveiro plana. Na sequência, todas as estações do evento são testadas, e são definidas como acidentais se seus tempos de retardo em relação à frente de chuveiro estão fora de uma janela de tempo de $[-2 \mu\text{s}; +1 \mu\text{s}]$. Estações sem vizinhos disparados dentro de 3 km são removidas do ajuste [47].

3.2.3

Reconstrução de eventos

A medida dos tempos de chegada do sinal e a densidade de sinal depositada nos detectores de superfície participantes num evento, possibilitam sua posterior reconstrução. Assim, define-se a reconstrução como a determinação das características próprias do evento, como a determinação do ponto de impacto no solo e do estimador de energia S1000 (sinal a 1000 m do eixo do chuveiro).

De forma geral, o processo de reconstrução de eventos medidos pelo SD começa pela seleção das estações participantes. Após do qual, a reconstrução geométrica (ver próxima seção) do chuveiro começa estimando o ponto de impacto do chuveiro no solo (x_c, y_c) e a direção de chegada (por meio dos cossenos diretores u e v [$u = \cos \theta \sin \phi$ e $v = \sin \theta \sin \phi$]). Neste ponto, os parâmetros da chamada Função de Distribuição Lateral ou LDF (ver próximas seções), que dependem do ângulo zenital θ , são estimados. Neste estágio, o estimador de energia (S1000), a posição do ponto de impacto do chuveiro, e o parâmetro de inclinação dessa LDF (β) são ajustados por meio de uma minimização de um pseudo- χ^2 . Finalmente, a energia do primário determina-se pela calibração do S1000 com a energia medida com o FD, por meio do

parâmetro S_{38} (fator de correção do sinal a 1000 m, devido a atenuação do chuveiro pela atmosfera).

Reconstrução geométrica

A determinação da direção de chegada do chuveiro é feita mediante o ajuste de um modelo de frente de chuveiro, movimentando-se à velocidade da luz c , aos tempos de chegada das partículas aos detectores de superfície. Uma primeira aproximação da direção é realizada com um modelo de frente plana, o que fornece valores iniciais para reconstruir o ponto de impacto e outros parâmetros do chuveiro. Posteriormente, a reconstrução geométrica é melhorada utilizando-se um modelo mais realístico de frente esférica.

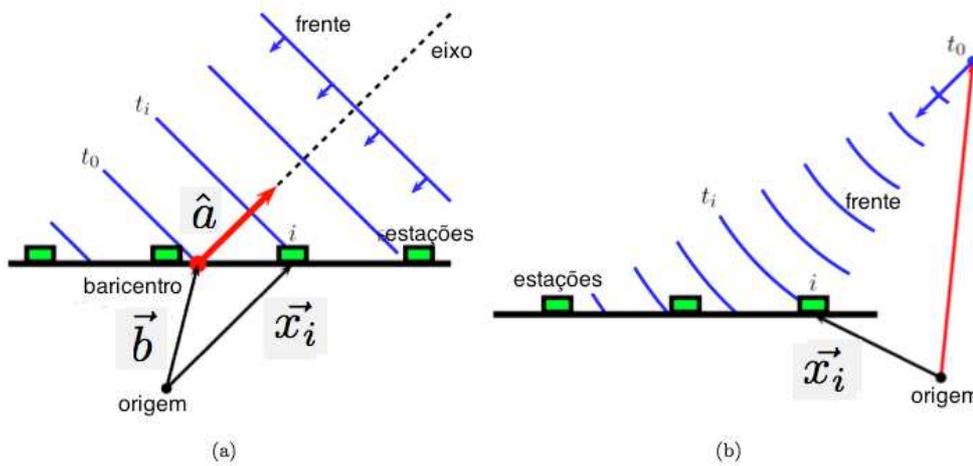


Figura 3.11: (a) Esquema de direção de chegada com frente plana. (b) Esquema de direção de chegada com frente esférica. Extraído da referência [48].

Pela figura 3.11(a), vemos que para uma frente de chuveiro plana propagando-se à velocidade da luz c na direção e sentido $-\vec{a}$, a distância percorrida entre os instantes t_i (em que um tanque na posição \vec{x}_i é disparado) e o chamado tempo da origem t_o (instante de impacto no solo) deve satisfazer:

$$c(t_o - t) = (\vec{x}(t) - \vec{b}) \cdot \hat{a}, \quad (3-5)$$

onde a origem \vec{b} , a partir de onde todas as distâncias são medidas é tomada inicialmente considerando o baricentro como a média das coordenadas de todas as estações. Assim, o tempo de chegada neste ponto denomina-se tempo da origem t_o . O ponto de impacto inicial no solo é utilizado como valor inicial na minimização. O plano do chuveiro é um plano perpendicular ao eixo do mesmo, movimentando-se com a mesma velocidade e contendo a frente do chuveiro.

Assumindo que a posição das estações é fornecida com precisão absoluta, a única flutuação é gerada pelas incertezas no tempo σ_i de disparo da estação. Além disso, considerando que o referencial esteja centrado no ponto de impacto no solo, que as componentes do eixo do chuveiro (cossenos diretores) sejam $\hat{a} = (u, v, w)$, com $w = \cos \theta$, que a posição das diferentes estações esteja definida pelo vetor $\vec{x}_i = (x_i, y_i, z_i)$, e a incerteza do tempo (descritas por o modelo de variância de tempo [49]), σ_i , a função a minimizar será [48, 50]:

$$\chi_{plano}^2 = \sum_{i \text{ triggered}} \frac{[ct_i - ct_o + x_i u + y_i v + z_i w]^2}{\sigma_i^2}, \quad (3-6)$$

com a condição sobre os cossenos diretores: $u^2 + v^2 = \sin^2 \theta \in [0, 1] \equiv 0 \leq u^2 + v^2 \leq 1$, e uma solução aproximada pode ser obtida considerando que as estações estão todas sobre um plano horizontal, ou seja, $z_i \ll x_i, y_i$.

Assim, a expressão (3-6) gera um sistema linear simples [51]:

$$\begin{pmatrix} \sum \frac{1}{\sigma_i^2} & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} y_i \\ \sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i^2 & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i y_i \\ \sum \frac{1}{\sigma_i^2} y_i & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i y_i & \sum \frac{1}{\sigma_i^2} y_i^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_o \\ -u/c \\ -v/c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \frac{t_i}{\sigma_i^2} \\ \sum \frac{x_i t_i}{\sigma_i^2} \\ \sum \frac{y_i t_i}{\sigma_i^2} \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

que possui solução única no caso em que a matriz for não-singular ($\text{Det} \neq 0$), o qual equivale geometricamente aos casos em que as estações disparadas não estão completamente alinhadas.

No entanto, um modelo mais real de frente de chuveiro deve introduzir o efeito de curvatura, figura 3.11(b).

No modelo de frente esférica de raio R_c , os tempos de chegada num ponto \vec{x}_i dependem da distância ao centro da esfera:

$$ct(\vec{x}_i) = ct_o - |\vec{x}_i - \vec{R}_c| \quad (3-8)$$

Utilizando este modelo, o raio da esfera R_c pode ser determinado independentemente da posição do ponto de impacto do chuveiro, simplesmente usando a informação dos tempos de chegada das partículas às estações, por meio da minimização:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{ct_i + ct_o - |\vec{R}_c - \vec{x}_i|}{c^2 \sigma_i^2}, \quad (3-9)$$

onde a minimização da eq. 3-9, com a aproximação de arranjo de detectores plano, melhora a estimativa da direção em cerca de 0.5° [52]. Posteriormente, uma minimização com $z_i \neq 0$ muda a estimativa de R_c em poucos metros.

Função de Distribuição Lateral

Uma quantidade essencial a ser determinada pelos dados medidos pelo SD é a Função de Distribuição Lateral, que descreve a variação da densidade de sinal ao longo da direção perpendicular ao eixo do chuveiro (sinal medido nos detectores participantes do evento) como função da distância a esse eixo (figura 3.12).

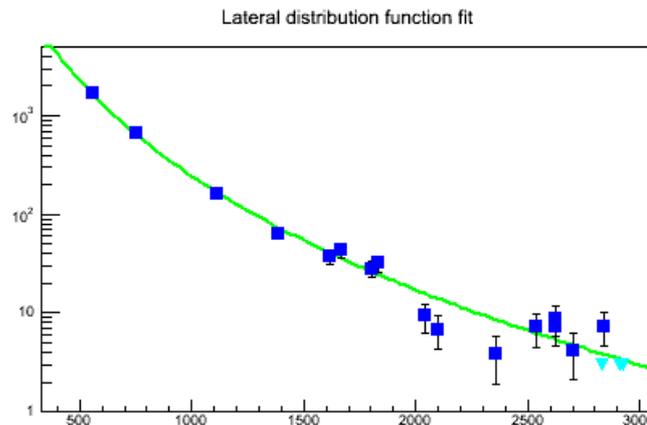


Figura 3.12: Função de Distribuição Lateral (LDF), a qual descreve a variação do sinal medido nos detectores de superfície participantes de um evento, como função da distância a seu eixo. Pontos azuis representam o sinal medido nos diferentes detectores que dispararam no evento, e a linha verde o ajuste da LDF para uma dada parametrização. Evento com energia de 51.5 EeV e ângulo zenital de $\sim 36^\circ$. Extraído da referência [53].

Seu conhecimento detalhado é importantíssimo na reconstrução do ponto de impacto do evento e do parâmetro S1000. Sendo este último o sinal medido a 1000 m do eixo do chuveiro, lugar onde a flutuação na densidade de sinal é mínima. Então, por meio dele, pode ter-se uma boa estimativa da energia do raio cósmico primário. Além disso, uma boa determinação do ponto de impacto permite reajustar a direção de chegada (u, v).

Basicamente, a dependência lateral do sinal medido nos detectores se descreve por meio de:

$$S(r) = S1000 \times f_{LDF}(r), \quad (3-10)$$

onde $f_{LDF}(r)$ é uma dada parametrização da LDF, normalizada com o sinal medido a 1000 m.

Ajuste da LDF O ajuste da LDF considera todas as estações ativas no evento: estações disparadas e estações silenciosas (Apêndice A). Após a seleção de estações, o ajuste da LDF (num dos dois códigos utilizados dentro da Colaboração Pierre Auger para a reconstrução de eventos medidos pelo

detector de superfície [53]) começa com uma estimativa dos seus parâmetros $(x_c, y_c, S1000, \beta)$: ponto de impacto no solo, sinal a 1000 m desse eixo, e inclinação da LDF. No caso do ponto de impacto no solo, estima-se considerando o baricentro como a média das coordenadas de todas as estações no evento, onde é atribuído um peso diferente para cada uma delas, dependente do RMS do sinal. Para o S1000, sua estimativa é encontrada pelo sinal na estação mais perto de 1000 m, e no caso do parâmetro de inclinação é usada uma parametrização dependente do ângulo zenital (inspirada em simulações de chuveiros). Em seguida, estes parâmetros e seus erros associados são encontrados por meio de uma minimização de um pseudo- χ^2 , que tem duas contribuições:

$$\chi^2 = \sum_{\text{gatilhadas}} \left(\frac{S_i - S[(x_c, y_c, S1000, \beta), r_i]}{\sigma_{S_i}} \right)^2 + \sum_{\text{silenciosas}} \frac{S[(x_c, y_c, S1000, \beta), r_i]}{S_{\text{limiar}}}, \quad (3-11)$$

onde o primeiro termo corresponde ao χ^2 da contribuição das estações disparadas, tendo dependência no sinal medido em cada detector participante do evento (S_i), o valor correspondente à parametrização da LDF utilizada na reconstrução para uma determinada distância ao ponto de impacto r_i ($S[(x_c, y_c, S1000, \beta), r_i]$), e o erro na determinação do sinal medido σ_{S_i} [54]. O segundo termo considera a contribuição das estações silenciosas no ajuste, termo baseado na probabilidade de não acontecer disparo (*probabilidade de silêncio*) para um comportamento de probabilidade exponencial ($P_{\text{silent}} = \exp(-S/S_{\text{limiar}})$) [51]. Dessa forma, esta contribuição para o χ^2 resulta finalmente numa relação entre o valor obtido pela parametrização da LDF para uma certa distância e o sinal limiar (S_{limiar}), definido como um limiar eficaz no gatilho local T1, que no caso presente corresponde a 3 VEM [51]. Mas, a soma sobre estas estações deve ser restrita às vizinhanças da região de estações gatilhadas, já que o sinal obtido pela parametrização fica desprezível muito longe do ponto de impacto².

Várias parametrizações da LDF têm sido investigadas dentro da Colaboração Pierre Auger [55–57]. Assim, duas abordagens foram implementadas ao considerá-las as melhores candidatas para a reconstrução de eventos medidos pelo SD [53]: uma descrição utilizando uma função de lei de potências (Log-Parabola) e uma modificação da função Nishimura-Kamata-Greisen (NKG) [58, 59].

²No ajuste considera-se estações silenciosas até uma distância de 5000 m.

Função Modificada Nishimura-Kamata-Greisen Esta função está baseada nos trabalhos teóricos de Nishimura, Kamata e Greisen. No modelo original tem-se a descrição de chuviros puramente eletromagnéticos, assim em princípio não poderia ser aplicada para chuviros gerados por partículas hadrônicas, contudo, ao adicionar a parte muônica pode obter-se uma boa aproximação de desenvolvimento lateral dos EAS.

A dependência funcional da LDF-NKG usada pela Colaboração Pierre Auger é:

$$f_{LDF}(r) = \left(\frac{r}{1000}\right)^\beta \left(\frac{r+700}{1700}\right)^\beta, \quad (3-12)$$

com o parâmetro de inclinação β seguindo a parametrização:

$$\beta = -3.24 - 0.195 \log E + 0.98 \sec \theta, \quad (3-13)$$

sendo E a energia do primário calculada por meio do estimador da energia S1000, assim:

$$E = a(S1000)^b, \quad (3-14)$$

com a energia medida em EeV e os parâmetros: $a = 0.37 - 0.51 \sec \theta + 0.30 \sec^2 \theta$ e $b = 1.27 - 0.27 \sec \theta + 0.08 \sec^2 \theta$ [53].

Função Log-Parabola A função Lei de Potências (Log-Parabola) foi elaborada especificamente para a reconstrução de eventos medidos pelo Observatório Auger. Está baseada nos resultados obtidos por meio de simulações de Monte Carlo, e tem mostrado êxito na descrição de eventos reais [60]. Sua dependência funcional é dada por:

$$f_{LDF}(r) = \begin{cases} \left(\frac{r}{r_1}\right)^{\beta+\gamma \log(\frac{r}{r_1})}, & r > 300 \text{ m} \\ \left(\frac{r}{r_2}\right)^{\beta+2\gamma \log(\frac{r_2}{r_1})} \times \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{\beta+\gamma \log(\frac{r_2}{r_1})}, & r < 300 \text{ m} \end{cases} \quad (3-15)$$

com $r_1 = 1000$ m e $r_2 = 300$ m, e parametrizações para β e γ dependentes do ângulo zenital θ :

$$\beta = \begin{cases} -4.80 + 1.27 \sec(\theta) - 0.0717 \sec^2(\theta) & \theta < 58^\circ \\ -3.38 + 0.412 \sec(\theta) & \theta > 58^\circ \end{cases} \quad (3-16)$$

$$\gamma = \begin{cases} -0.536 + 0.559 \sec(\theta) - 0.231 \sec^2(\theta) & \theta < 58^\circ \\ -0.28 - 0.0287 \sec(\theta) & \theta > 58^\circ \end{cases} \quad (3-17)$$

Parâmetro de Inclinação: a inclinação da LDF é descrita pelo parâmetro β , e para qualquer parametrização escolhida para reconstruir um evento, a inclinação do chuveiro vai depender basicamente do ângulo zenital. Assim, chuveiros de maior inclinação terão que atravessar uma porção maior da atmosfera que os verticais, obtendo-se como resultado um perfil lateral mais plano. Por outro lado, primários de maior massa interagirão mais alto na atmosfera, assim o desenvolvimento dos chuveiros será diferente que no caso de primários leves.

A determinação do β tem relação direta com a estimativa da posição do ponto de impacto (x_c, y_c) , do S1000, e assim na obtenção do valor final da energia do primário (e seu erro sistemático associado). Dessa maneira, o β pode ser determinado de duas formas diferentes: pela dependência funcional com o ângulo zenital, equação (3-16), (resultado baseado em simulações para obter dita dependência), ou obtido a partir de um ajuste dos dados para cada evento. No primeiro caso chamaremos LDF tipo *Log*, enquanto no outro chamaremos de LDF tipo *LogXmax*. A condição para o ajuste do β (LDF *LogXmax*) é dada basicamente pela topologia das estações participantes do evento, entre distâncias que vão de 400 m a 1600 m do ponto de impacto no solo, e devem satisfazer um dos seguintes critérios:

- Pelo menos duas estações entre 400 e 1600 m, com no mínimo uma distância de separação de 900 m entre elas.
- Pelo menos três estações entre 400 e 1600 m, com no mínimo uma distância de separação de 800 m entre duas delas.
- Pelo menos quatro estações entre 400 e 1600 m, com no mínimo uma distância de separação de 700 m entre duas delas.

Calibração de Energia

Uma das principais vantagens de se ter um detector híbrido é a possibilidade da determinação da energia pelo SD independentemente de simulações de chuveiros. Sendo assim, é possível relacionar a energia calorimétrica medida pelo FD com a variável utilizada nesta determinação no SD, ou seja, com o S1000. Por outro lado, é sabido que para um chuveiro da mesma energia, o SD medirá diferentes valores de densidades dependendo do ângulo zenital. Assim, faz-se necessário corrigir este efeito introduzido pela atenuação das partículas na atmosfera, sendo que ele quantificam-se aplicando um método de corte de intensidade constante (CIC - Constant Intensity Cut), o mesmo que assume um fluxo isotrópico de raios cósmicos para todas as energias

no topo da atmosfera (fluxo de raios cósmicos uniformemente distribuído em $\cos^2 \theta$) [28, 61].

Assim, uma dada curva de atenuação, obtida a partir dos dados, fornecerá para um determinado θ o fator de correção a ser aplicado no S1000, sendo que esta curva tem a forma: $CIC(\theta) = 1 + ax + bx^2$, com $x = \cos^2 \theta - \cos^2 38^\circ$ ($a = 0.94 \pm 0.06$ e $b = -1.21 \pm 0.27$) [61]. Dessa maneira, um estimador de energia para cada evento, independente do θ , é o S_{38} (S1000 que um chuveiro deveria produzir chegando com um ângulo zenital de 38°), e considerando este ângulo como referência na conversão de S1000 no S_{38} tem-se:

$$S1000 = S_{38}CIC(\theta) \quad (3-18)$$

Dessa forma, para obter o valor de energia, precisa-se finalmente encontrar a relação entre S_{38} e a energia medida pelo FD. Dos dados, é obtida uma relação linear para este efeito [61]:

$$\log E_{FD} = A + B \log S_{38}, \quad (3-19)$$

porém para evitar viés neste ajuste, eventos com energias menores à de saturação (3 EeV) não foram considerados. Assim, a incerteza estatística na energia obtida para o SD é de $\sim 5\%$ para energias até 10^{20} eV. A correlação do S_{38} com a energia medida pelo FD (E_{FD}) apresenta-se na figura 3.13.

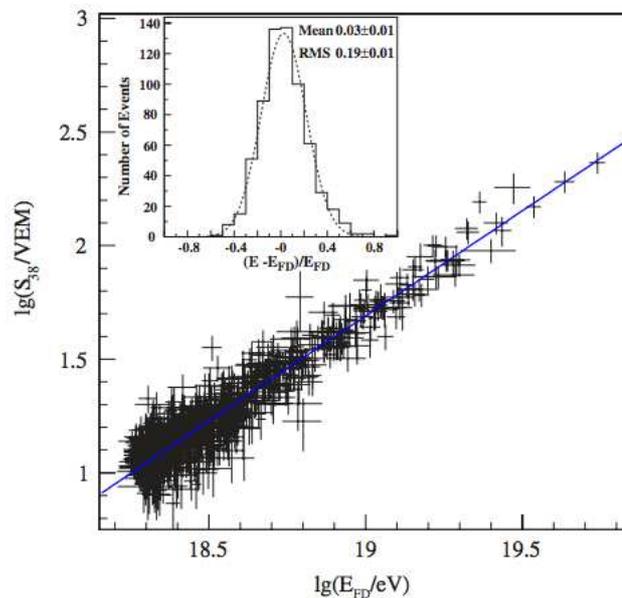


Figura 3.13: Correlação entre $\log S_{38}$ e $\log E_{FD}$ para 661 eventos híbridos. A linha azul representa o melhor ajuste dos dados. A figura superior esquerda, apresenta o histograma da diferença das energias reconstruídas pelo FD e SD destes eventos. Extraída da referência [28].

3.2.4 Tanques Especiais no Arranjo SD

Um sub-arranjo de detectores de superfície tem sido desenvolvido para estudar características específicas como as flutuações no sinal e as incertezas nos tempos de chegada das partículas ao solo.

Tanques Gêmeos

Os tanques gêmeos ou dubletos são pares de tanques separados em média por uma distância de 11 m e devido a esta pequena separação possibilita-se monitorar aproximadamente a mesma porção da frente do chuveiro, permitindo dessa maneira duas reconstruções independentes do mesmo evento, e assim a posterior determinação das incertezas nas medidas dos sinais, tempos de chegada, etc. Existem dois conjuntos de tanques gêmeos. O primeiro contem só dois pares (Dia-Noche e Moulin-Rouge) em funcionamento desde Janeiro do 2004. Enquanto o outro é um conjunto de detectores de superfície num arranjo hexagonal (denominado também de *Super-Hexágono*), composto por 12 dubletos e 7 tripletos (três tanques numa rede triangular com separação de 11 m) em operação desde Setembro do 2006. A figura 3.14 apresenta a configuração do Super-Hexágono.

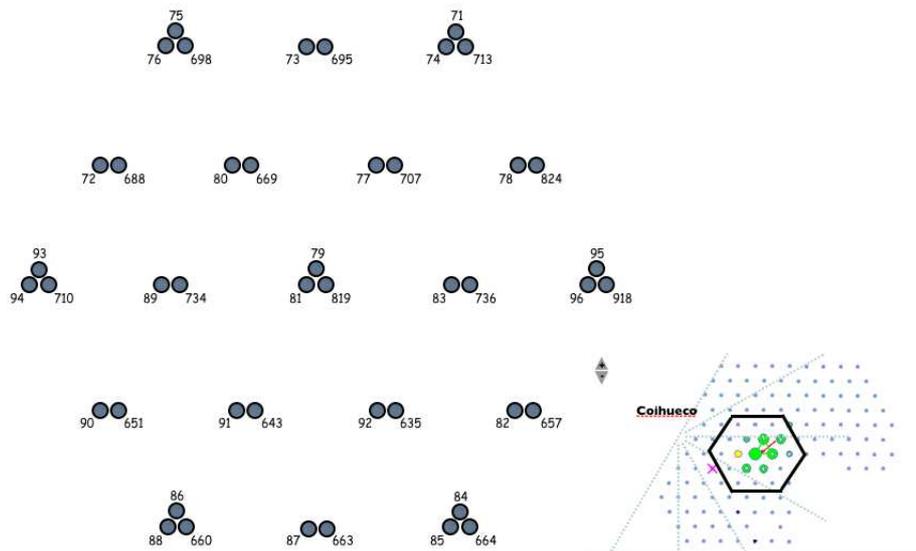


Figura 3.14: Configuração do Super-Hexágono: 12 dubletos e 7 tripletos, onde a separação entre tanques é ~ 11 m. *Inferior direita:* localização do super-hexágono no arranjo, com um evento disparando estações nele.

3.3

AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array)

AMIGA é uma combinação de detectores de superfície com menor espaçamento (*Infill*) e detectores de múons localizados abaixo do solo, como apresentado na figura 3.15 [62].

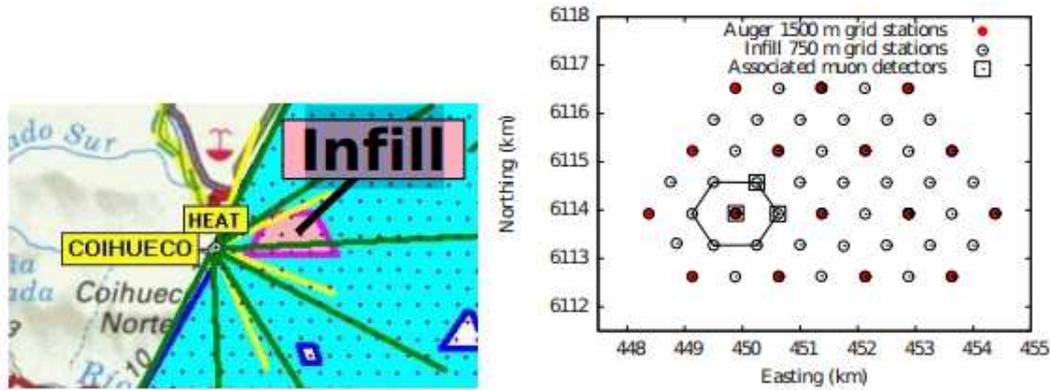


Figura 3.15: *Esquerda:* localização de AMIGA dentro de arranjo SD. *Direita:* detalhe dos detectores pertencentes a AMIGA. Extraída da referência [42].

O Infill é um arranjo de detectores de superfície com uma separação de 750 m, está composto por 61 detectores (tanques Cherenkov) cobrindo uma área de 23.5 km^2 . Foi projetado para o estudo de uma faixa de menor energia ($E \sim 10^{17} \text{ eV}$), atingindo dessa maneira a região correspondente ao segundo joelho (ver seção 2.1). Adicionalmente, um conjunto de detectores de múons (cintiladores), localizados a uma profundidade de 2.3 m, está projetado para cada estação de superfície do Infill. Neste caso, devido a sua localização, abaixo da superfície, neles a componente eletromagnética do chuveiro será fortemente suprimida.