

Sistema de acionamento e abertura do arranjo de detectores de superfície do Observatório Pierre Auger

Vitor Rocha Ribeiro

April 18, 2024

1. Introdução

Os principais objetivos do Observatório Pierre Auger são medir o **fluxo**, a **distribuição das direções de chegada** e a **composição mássica** de raios cósmicos (RCs) desde $\approx 10^{18}$ eV até mais altas energias.

Como o fluxo de RCs dessas ordens de energia é baixo, seu estudo é feito via chuveiros atmosféricos extensos (*EAS*) formados na atmosfera.

1. Introdução

A detecção é feita de duas formas independentes e complementares, pelos arranjos

- ▶ de detectores de superfície (*SDs*), sendo 1600 detectores espaçados em 1.5 km triangularmente, cobrindo uma área de aproximadamente 3000 km², que detecta partículas secundárias, fornecendo sua distribuição lateral.
- ▶ pelos detectores de fluorescência (*FDs*), sendo 24 telescópios distribuídos em 4 diferentes locais, que medem a luz de fluorescência emitida pelo caminho dos chuueiros atmosféricos, fornecendo seu desenvolvimento longitudinal.

1. Introdução

Chuveiros detectados por ambos os tipos de detectores são chamados de **eventos híbridos**, e são caracterizados mais precisamente com relação à direção e energia do que utilizando-se apenas uma das técnicas de detecção.

Entretanto, detectores de fluorescência têm tempo de funcionamento de apenas $\approx 13\%$, fazendo com que o maior volume de dados seja obtido pelos detectores de superfície, que têm quase 100% de tempo de funcionamento.

Assim, estudar o sistema de acionamento (*trigger*) para aquisição de dados e determinar a abertura dos SDs é essencial para os objetivos do Observatório.

2. Detectores de Superfície

Cada detector do arranjo de SDs tem 10 m^2 de área superficial de água, com 1.2 m de profundidade, contendo 3 fotomultiplicadoras (*PMTs*) de 9 polegadas (22.86 cm).

Cada um deles funciona autonomamente, com sua própria eletrônica e sistema de comunicação. Cada *PMT* fornece dois sinais, que são digitalizados pelos conversores analógico digital flash, *FADCs*, dos quais cada armazenamento (*bin*) corresponde a 25 ns.

Um sinal é obtido diretamente do anodo da *PMT*, e o outro, pelo último dínodo, amplificado e invertido pela eletrônica da *PMT* para um sinal nominalmente 32x o sinal do anodo.

Assim, tem-se boa precisão dos sinais tanto para detectores próximos ao eixo do chuveiro (≈ 1000 partículas/ μs), quanto para detectores distantes do eixo (≈ 1 partícula / μs).

2. Detectores de Superfície

Os sinais das 3 PMTs são enviados para o sistema central de aquisição de dados (*CDAS*) logo que um candidato a chuveiro aciona o arranjo de SDs.

A largura de banda total disponível para transmissão de dados dos detectores para o *CDAS* é de 1200 bits/s, com possibilidade de calibração remota. Já a calibração de cada um dos SDs é feita local e automaticamente.

Esta última calibração se baseia na média da carga coletada pelas PMTs das medidas da luz Cherenkov produzida por um múon vertical e com direção de chegada central, Q_{VEM} .

2. Detectores de Superfície

Mesmo que os SDs não consigam selecionar somente este tipo de evento, a distribuição da luz gerada pelos múons atmosféricos produz um pico na distribuição de carga Q_{VEM}^{peak} , bem como um pico na altura do pulso, I_{VEM}^{peak} , ambos sendo proporcionais àqueles produzidos pelos múons verticais.

Os parâmetros de calibração são determinados com 2% de acurácia a cada 60 s e retornam ao CDAS a cada evento. Devido à banda limitada, os triggers de primeiro nível também são feitos localmente.

Estes triggers são definidos em unidades eletrônicas (canais), com unidade de referência sendo I_{VEM}^{peak} .

2. Detectores de Superfície

Na reconstrução dos chuveiros, os sinais gravados pelos detectores são convertidos para unidades de Q_{VEM} . Os quais são ajustados com a medição da Função de Distribuição Lateral (*LDF*), que descreve $S(r)$, representando o sinal como função da distância r do eixo do chuveiro, a fim de determinar o sinal a 1000 m, $S(1000)$.

Utiliza-se, para estimar a energia dos eventos de forma independente de θ , S_{38} , que representa $S(1000)$ para EAS com ângulo zenital de chegada mediano de 38° . A energia correspondente a cada S_{38} é obtida via calibração com o FD baseado em um subconjunto de eventos híbridos de alta qualidade.

3. Sistema de Trigger da Aquisição de Dados

O acionamento do arranjo de SD é **hierárquico**. Dois níveis de trigger, **T1** e **T2**, são formados em cada detector. Os T2 são combinados com os de outros detectores e examinados para correlações espaciais e temporais, sendo conduzidos para o trigger do arranjo, **T3**. Este, por sua vez, inicia a aquisição de dados e seu armazenamento.

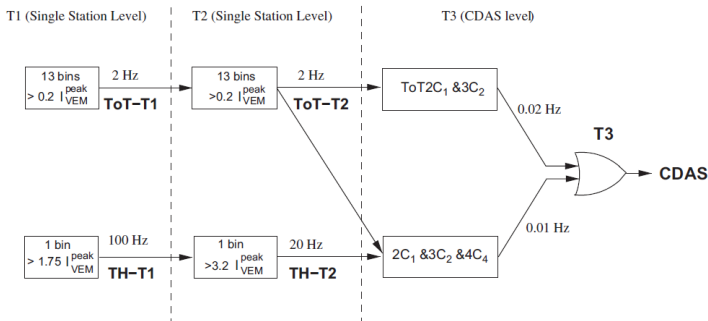


Fig. 1. Schematics of the hierarchy of the trigger system of the Auger surface detector.

3.1. Triggers de Detectores Individuais

O trigger **T1** aciona a aquisição de dados em cada SD, fazendo com que os dados sejam armazenados no disco local por 10 s, à espera de um possível T3.

Dois modos independentes de trigger são implementados em T1 para detectar, de maneira complementar, as componentes eletromagnética e muônica dos EAS.

O **primeiro** é um trigger de limiar (TH) que requer coincidência das 3 PMTs, cada uma delas acima de $1.75 I_{VEM}^{peak}$. É utilizado para selecionar sinais "grandes" que não são necessariamente espaçados no tempo. Sendo útil para a detecção de chuviscos **muito inclinados** e **predominantemente muônicos**, reduzindo a taxa devido a múons atmosféricos de ≈ 3 kHz para ≈ 100 Hz.

3.1. Triggers de Detectores Individuais

O **segundo** modo utiliza-se do fato de que, exceto para chuviros muito inclinados ou para sinais de chuviros mais verticais e próximos ao eixo, a chegada de partículas e fótons nos SDs é temporalmente dispersa.

A este trigger "*Time-over-Threshold*" (*ToT*), impõe-se que ao menos 13 *bins* (> 325 ns) em 120 FADCs numa janela de $3 \mu\text{s}$ estejam acima do limiar de $0.2 I_{VEM}^{peak}$ em coincidência em 2 das 3 PMTs.

Seleciona sequências de sinais menos intensos espalhados no tempo. Sendo assim otimizado para detecção de chuviros **próximos** e de **baixa energia**, dominados pela componente EM, ou para chuviros de **altas energias** cujo eixo está **distante**. Devido à janela mínima de 325 ns, é eficiente para eliminar o ruído de múons atmosféricos.

3.1. Triggers de Detectores Individuais

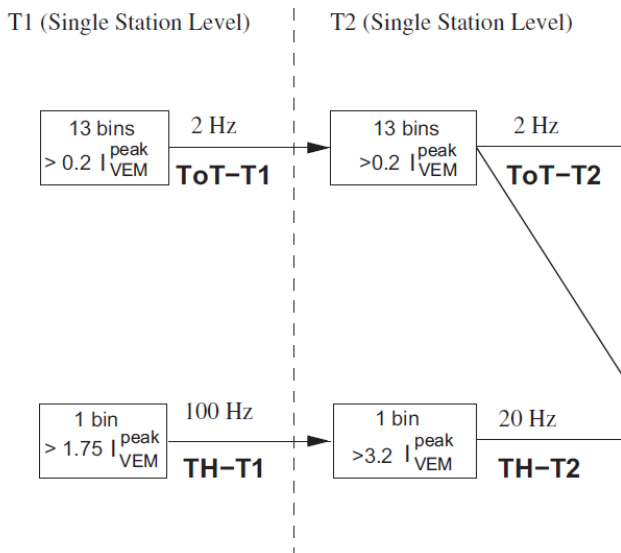
T2 é aplicado na estação de controle para reduzir para cerca de 20 Hz a taxa de eventos por detector.

Os triggers T2, com informações de data/hora e o tipo de T2, são enviados para o CDAS para a formação do trigger do arranjo.

Todos os triggers ToT-T1 são promovidos ao nível T2, enquanto os TH-T1 devem passar por um outro limiar, agora de $3.2 I_{VEM}^{peak}$, em coincidência entre as 3 PMTs.

As taxas de acionamento TH-T2 são relativamente uniformes no arranjo. Já as ToT-T2 são menos uniformes, pois ToT é sensível à forma do sinal.

3.1. Triggers de Detectores Individuais



3.2. Trigger do Arranjo de Superfície

O trigger de terceiro nível, **T3**, inicia a central de aquisição de dados do arranjo. É formado no CDAS e se baseia na combinação **espacial** e **temporal** de T2.

Quando um T3 é formado, todos os sinais dos FADCs que passam T2 são enviados ao CDAS, bem como aqueles que passam T1 mas não T2, desde que estejam dentro de 30 μ s de T3.

O trigger do arranjo é acionado em **dois modos**.

3.2. Trigger do Arranjo de Superfície

O **primeiro modo** T3 requer coincidência de ao menos 3 detectores que passaram a condição ToT e que satisfazem o critério mínimo de compacidade.

Isto é, um dos detectores deve ter um de seus vizinhos mais próximos e um de seus segundos vizinhos mais próximos acionados. É chamado " $ToT2C_1 \& 3C_2$ "

Uma vez que a condição espacial é verificada, impõe-se o critério temporal: cada T2 deve estar dentro de $(6 + 5C_n)\mu s$ do primeiro.

Este modo seleciona predominantemente eventos físicos. Com cerca de 1600 eventos por dia, sendo $\approx 90\%$ chuviscos reais.

3.2. Trigger do Arranjo de Superfície

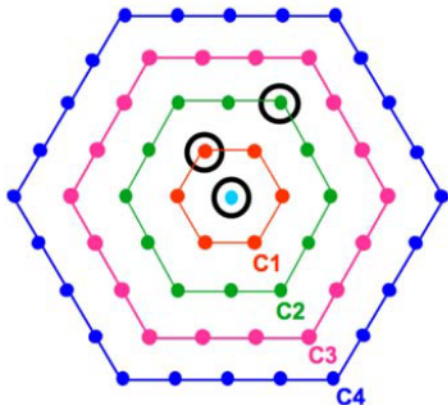


Figure: Exemplo da configuração de T3: modo T3 com 3 camadas, $ToT2C_1\&3C_2$. C1, C2, C3, C4 indicam primeiro, segundo, terceiro e quarto conjuntos de vizinhos.

3.2. Trigger do Arranjo de Superfície

O **segundo modo** T3 é mais permissivo. Ele requer 4 camadas de coincidência de qualquer T2 com compacidade moderada, e o critério temporal é o mesmo de $T_0T_2C_1\&3C_2$.

Mais especificamente, dentre os 4 detectores disparados, ao menos um precisa estar no primeiro conjunto de vizinhos, outro deve estar no segundo conjunto, e o último pode distar até o quarto conjunto. É denominado $2C_1\&3C_2\&4C_4$.

Este modo é eficiente para detectar chuviros **horizontais**, que por serem ricos em múons, geram sinais com pequena distância temporal, apresentando, no solo, um padrão mais espalhado.

São selecionados cerca de 1200 eventos por dia, dos quais $\approx 10\%$ são chuviros reais.

3.2. Trigger do Arranjo de Superfície

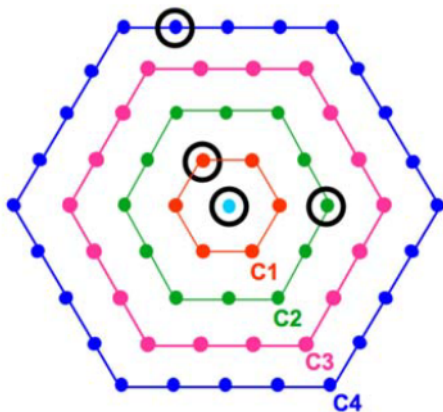


Figure: Exemplo da configuração de T3: modo T3 com 4 camadas, $2C_1 \& 3C_2 \& 4C_4$. C1, C2, C3, C4 indicam primeiro, segundo, terceiro e quarto conjuntos de vizinhos.

3.3. Eficiência do trigger de detector individual

Para determinar a eficiência do acionamento do arranjo de SDs, define-se a probabilidade de acionamento de um único detector como função do sinal, $\mathcal{P}(S)$.

A eficiência de T1 *versus* o sinal no detector, $\mathcal{P}(S)$, é determinada utilizando-se estatística de $\approx 10^6$ EAS registrados pelo arranjo de SDs.

Para cada EAS detectado e para cada detector acionado, mede-se $\mathcal{P}(S)$ como a razão $N_T(S)/N_{ON}(S)$, em diferentes valores armazenados de θ e $S(1000)$, do número de estações acionadas N_T com o número total de estações ativas, N_{ON} .

3.3. Eficiência do trigger de detector individual

Limitando a análise para chuveiros com $S_{38} > 16$ VEM (correspondendo a $\approx 3 \times 10^{18}$ eV), $\mathcal{P}(S)$ é obtida pela média de todos os *bins* em θ e $S(1000)$. Com isso, $\mathcal{P}(S) > 0.95$ para $S \approx 10$ VEM.

O arranjo de superfície tem sete posições em que três detectores, chamados tripletos, foram posicionados a 11 m um do outro.

Em cada tripleto, apenas um detector envia T2 ao CDAS, enquanto os outros dois são independentemente registrados cada vez que um T3 é gerado e se eles passam por T1. Para cada um deles, $\mathcal{P}(S)$ é a razão entre o n^o de eventos em que ambos foram acionados e o n^o de eventos em que apenas um foi acionado.

3.3. Eficiência do trigger de detector individual

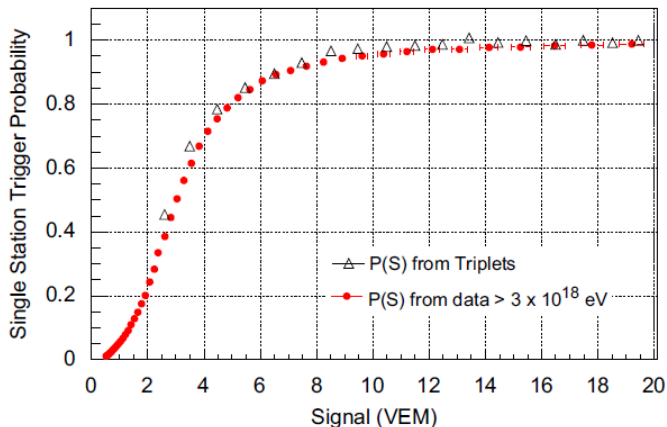


Figure: $\mathcal{P}(S)$ obtida de dados dos triplets (triângulos) e de dados de chuveis com $E > 3 \times 10^{18}$ eV (círculos).

4. Seleção de eventos no arranjo de SDs para chuveiros com $\theta < 60^\circ$

É feita uma seleção de eventos físicos e de detectores relacionados a cada evento após a aquisição dos dados. Dois níveis sucessivos de seleção são implementados.

O primeiro, **trigger físico**, se baseia nas configurações espacial e temporal dos detectores, bem como no tipo de acionamento. O segundo, **trigger fiduciário**, requer que o chuveiro selecionado esteja contido nos contornos do arranjo.

4. Seleção de eventos no arranjo de SDs para chuveiros com $\theta < 60^\circ$

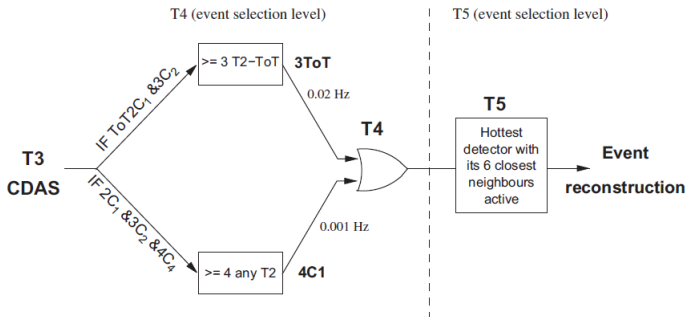


Figure: Esquematização da hierarquia da seleção de eventos.

4.1. Trigger Físico

Necessário para selecionar chuveiros reais do conjunto de dados T3 armazenados. Dois critérios são definidos.

O **primeiro critério T4**, chamado 3ToT, requer que três estações próximas, que passaram T2-ToT, estejam em configuração triangular.

Requer também que os tempos dos sinais nas três estações estejam de acordo com a frente plana de um chuveiro viajando à velocidade da luz.

Devido à compacidade, esta seleção é altamente eficiente, maior que 98%.

4.1. Trigger Físico

O **segundo critério T4**, chamado 4C1, requer quatro estações próximas, sem condições do tipo T2. Também requer o mesmo critério temporal do primeiro.

Este critério chega a $\approx 100\%$ de eficiência para chuveiros com $\theta < 60^\circ$.

4.1. Trigger Físico

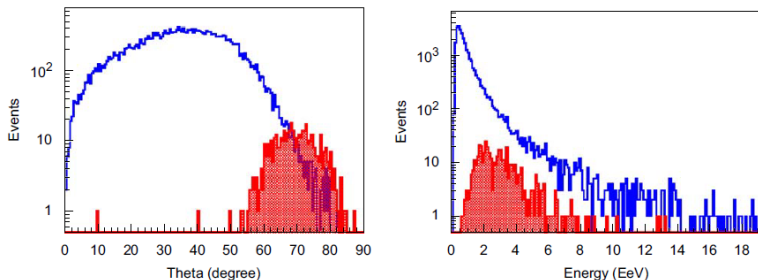


Figure: Distribuições angulares (esquerda) e de energia (direita) de eventos selecionados pelos triggers T4: 3ToT (histograma não preenchido) e 4C1, não ToT (histograma preenchido).

Nota-se que 4C1 favorece a seleção de eventos com altos valores de θ . As medianas das energias são 6×10^{17} eV para 3ToT e 3×10^{18} eV para 4C1.

4.1. Trigger Físico

Para rejeitar detectores acidentais, define-se uma "fonte" composta por três detectores vizinhos não alinhados. Se há mais de um triângulo de estações, a fonte com maior sinal total é escolhida.

Se T_4 é $3T_{ToT}$, apenas detectores ToT definem a fonte. Se é $4C1$, inclui-se também detectores TH . Com o triângulo determinado, estima-se a direção de chegada e então se examina os outros detectores.

Eles são considerados acidentais se o intervalo de tempo com relação à frente do plano está fora da janela temporal de $[-2 \mu s; +1 \mu s]$. Detectores sem vizinhos acionados dentro de 3 km são sempre removidos.

4.2. Trigger Fiduciário

O trigger fiduciário, **T5**, é necessário principalmente por eventos que chegam próximo à borda do arranjo, nos quais parte do chuveiro pode estar faltando.

Tais eventos podem levar a posições erradas do eixo do chuveiro, e conseqüentemente a energias incorretas.

Assim, sua função principal é de selecionar eventos bem contidos no arranjo, de maneira que a reconstrução do eixo do chuveiro seja propriamente feita.

4.2. Trigger Fiduciário

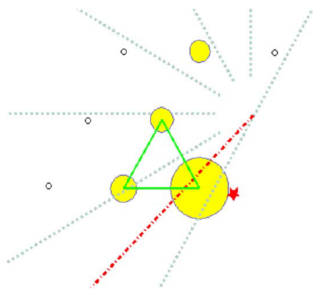


Figure: Exemplo de evento híbrido não T5: o evento atinge a borda do arranjo de SDs, acionando apenas 4 detectores. Círculos preenchidos indicam os acionados, círculos abertos indicam SDs ativos não acionados. As dimensões dos círculos preenchidos são proporcionais ao sinal medido. O plano do chuveiro reconstruído pelo FD (linha tracejada) indica que o eixo está dentro do triângulo de detectores. A reconstrução pelos SDs o coloca fora do arranjo (cruz), artificialmente aumentando a energia do evento.

4.2. Trigger Fiduciário

O critério T5 adotado requer que o detector com maior sinal tenha todos seus 6 vizinhos mais próximos funcionais no momento do evento. Com esta condição, a incerteza máxima na reconstrução de $S(1000)$ é de $\approx 3\%$.

Este critério também descarta eventos que atingem regiões próximas a detectores fora de funcionamento. Espera-se que cerca de 1% dos detectores não funcionem a qualquer momento.

Assim, T5 reduz a área efetiva em aproximadamente 10% com relação à área nominal do arranjo.

5. Abertura e exposição do arranjo de SDs para chuveiros com $\theta < 60^\circ$

A abertura do arranjo de SDs é dada pela área efetiva integrada sobre o ângulo sólido.

Quando os triggers e a seleção de eventos têm máxima eficiência, ou seja, quando a aceitação não depende da natureza da partícula primária, de sua energia ou direção de chegada, a área efetiva coincide com a área geométrica.

5.1. Determinação da energia de saturação de aceitação

I. **Dos dados dos SDs:** Partindo de chuviros detectados, eventos falsos são simulados flutuando a amplitude dos sinais registrados em cada detector e seu tempo de chegada. Tais flutuações são medidas por dois detectores idênticos distando 11 m um do outro.

Para cada evento, todos os triggers e a cadeia de seleção são aplicados. A eficiência dos triggers é obtida como função da energia por meio da razão do número de eventos que geraram acionamentos pelo número de eventos simulados.

5.1. Determinação da energia de saturação de aceitação

II. **De dados híbridos:** Estes apresentam menor limiar de energia do que aqueles dos SDs puramente. Para cada *bin* na energia, de comprimento 0.2 em $\log_{10}(E)$, o n^o de eventos que passa pelos triggers dos SDs do n^o total de eventos são contados.

5.1. Determinação da energia de saturação de aceitação

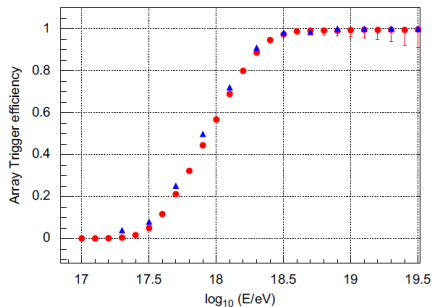


Figure: Eficiência dos triggers como função da energia, obtida via dados dos SDs (triângulos) e via dados híbridos (círculos).

Nota-se que a probabilidade de acionamento satura ($> 97\%$) para $E \approx 3 \times 10^{18}$ eV para ambos os métodos (I e II), mostrando que estão em concordância.

5.1. Determinação da energia de saturação de aceitação

III. **Verificação cruzada com simulações:** São feitas simulações completas de chuveiros e da detecção.

Consistindo de 5000 chuveiros simulados de prótons, 5000 de fótons e 3000 de ferro, utilizando o *CORSIKA*, distribuídos seguindo $\sin\theta\cos\theta$ ($\theta < 60^\circ$). E energias entre 10^{17} e $10^{19.5}$ eV, em passos de 0.25 (0.5 para fótons) na escala $\log_{10}(E)$.

A resposta do arranjo de SDs é simulada utilizando o *Geant4*.

5.1. Determinação da energia de saturação de aceitação

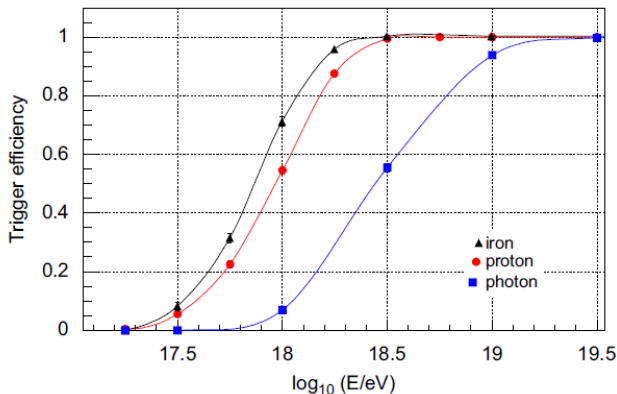


Figure: Eficiência de acionamento dos SDs como função da energia E pelo método Monte Carlo para primários sendo prótons, ferro e fótons, com θ integrado até 60° .

5.2. Cálculo da exposição integrada

Acima de 3×10^{18} eV, o cálculo da exposição se baseia somente na determinação da abertura geométrica e do tempo de observação. A abertura do arranjo é obtida como um múltiplo da abertura de uma célula hexagonal elementar, a_{cell} , definida como qualquer detector ativo com seis vizinhos ativos.

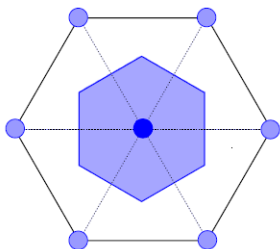


Figure: Esquematização de um hexágono de detectores: a célula hexagonal elementar, a_{cell} , é a área sombreada ao redor do detector central.

5.2. Cálculo da exposição integrada

O número de células não é constante e é monitorado segundo a segundo, com incerteza de $\approx 1.5\%$.

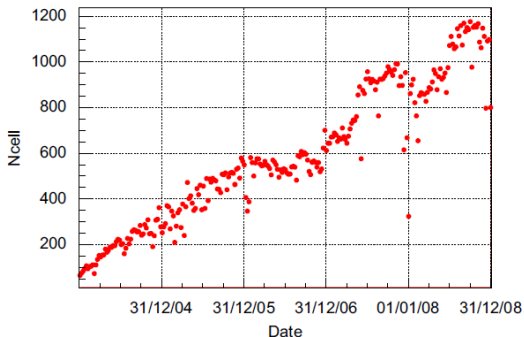


Figure: Evolução do nº de células hexagonais entre 01/01/2004 até 31/12/2008.

5.2. Cálculo da exposição integrada

Tem-se tanto a abertura $a_{cell} \times N_{cell}(t)$ do arranjo quanto o tempo de observação. A exposição integrada pode ser obtida pela integração da abertura sobre o tempo de funcionamento.

Há uma taxa fixa λ de eventos T5 por hexágono, $\lambda \approx 1.4 \times 10^{-5}$ eventos por hexágono por segundo. A probabilidade P de que o intervalo de tempo T entre dois eventos T5 consecutivos seja maior que T é $P(T) = e^{-\lambda T}$.

Intervalos de não funcionamento ocorrem para $P(T) < 10^{-5}$, considerando que eles seguem uma distribuição de Poisson. Estes intervalos reduzem o tempo de funcionamento de 96% para 87%.

5.2. Cálculo da exposição integrada

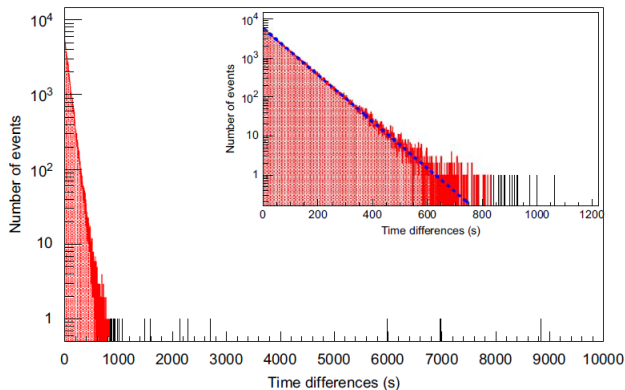


Figure: Distribuição das diferenças temporais entre eventos em 2008. Pontos fora da área preenchida mostram os tempos de não funcionamento. O ajuste exponencial é mostrado como a linha tracejada no histograma com *zoom*, com $T = 72.4s$.

6. Conclusões

Toda a cadeia hierárquica de triggers e seleção de eventos consegue reduzir a taxa de contagem de um único detector de ≈ 3 kHz para até $\approx 3 \times 10^{-5}$ Hz. Sendo esta última taxa devido aos EAS, dos quais mais de 99% passam pela cadeia de reconstrução.

O trigger ToT, de alta pureza, permite ao trigger principal ser mantido em 3 camadas de coincidência. Permitindo, assim, aquisição e reconstrução de cerca de um chuveiro por minuto, com mediana de energia em torno de 6×10^{17} eV.

O arranjo de SDs é totalmente eficiente para CRs de energia maior que 3×10^{18} eV. Em combinação com os FDs, é possível reconstruir eventos de 10^{18} eV.

Acima de 3×10^{18} eV, o cálculo da exposição é puramente geométrico, sendo a integração da abertura geométrica sobre o tempo de observação, com incerteza < 3 %.

Referências

Apresentação baseada no artigo:

Abraham, Jiju, et al. "Trigger and aperture of the surface detector array of the Pierre Auger Observatory." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 613.1 (2010): 29-39.