

O Mistério dos Raios C3smicos de Alt3ssima Energia e o Observat3rio Pierre Auger

Vitor de Souza Filho

Instituto de F3sica Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 13083-970, Campinas, S3o Paulo, Brasil
e-mail: vitor@ifc.unicamp.br

Resumo

Neste artigo discutirei o enigma dos raios c3smicos de energia acima de 10^{20} eV. O problema se resume em dois processos fundamentais: a limita3o do poder energ3tico das fontes candidatas e a intera3o da part3cula com a radia3o de fundo no Universo que oferecem como previs3o o fim do espectro de energia por volta de 10^{20} eV. No entanto, atualmente existem mais de 10 eventos medidos com energia superior a energia prevista para o corte. Estes eventos de fluxo baix3ssimo (1 evento por s3culo por km^2) incentivaram a constru3o do Observat3rio Pierre Auger cujas t3cnicas e objetivos descreverei aqui e no qual est3 inserida minha tese de doutorado.

1 Introdu3o

Raios C3smicos 3 um fen3meno que vem sendo estudado desde 1912. Neste ano, Victor Hess provou a exist3ncia de uma radia3o ionizante provinda do cosmo.

Quando se mede o fluxo de radia3o ionizante, espera-se que a maior contribui3o venha do decaimento de material radioativo presente no solo. Assim, podemos deduzir que o fluxo deve diminuir a medida que nos afastamos do solo. Medidas feitas no come3o do s3culo em edif3cios, tal como a Torre Eiffel, comprovavam essa previs3o. No entanto, Victor Hess, n3o contente com o tamanho dos edif3cios da 3poca, realizou medidas em um bal3o a altitudes de at3 5 km. Suas medidas mostraram que o fluxo de radia3o medido diminu3a at3 certa altura e depois come3ava a aumentar continuamente com a altitude, contrariando portanto a previs3o inicial.

A 3nica explica3o para esses resultados foi que existia um componente da radia3o medida que vinha de fora da Terra, o que deu in3cio a 3rea de estudo denominada radia3o c3smica ou raios c3smicos.

Trinta anos mais tarde, Pierre Victor Auger deu uma importante contribui3o ao avan3o das t3cnicas de medida. Utilizando dois detectores de radia3o ionizante separados espacialmente, ele conseguiu mostrar que os detectores assinalavam a passagem de alto fluxo de part3culas c3smicas ao mesmo tempo. Esse fen3meno foi compreendido atrav3s do argumento de um chuveiro atmosf3rico extenso (ver figura 1).

Esta descoberta estendeu o leque de poss3veis detectores pois permitiu a constru3o dos mesmos no solo eliminando a limita3o de detectores com pequenas 3reas de detec3o dentro de bal3es ou no topo de edif3cios. Em detectores colocados no ch3o podem-se observar as part3culas secund3rias de um chuveiro que atrav3s de m3todos de reconstru3o permitem responder as seguintes perguntas:

- Qual a energia da part3cula prim3ria ?
- Qual a dire3o de chegada da part3cula prim3ria ?
- Qual o tipo da part3cula prim3ria (pr3ton, gama, n3cleo de ferro etc) ?

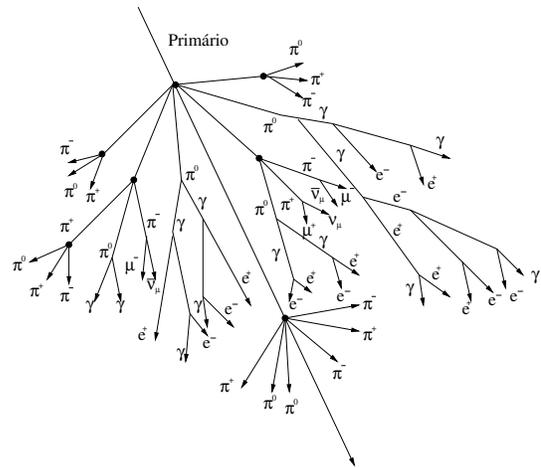


Figura 1: Esquema de um chuveiro atmosf3rico extenso

A figura 2 mostra a compila3o do fluxo de energia medido por v3rias t3cnicas e v3rios experimentos no mundo. Ela mostra de certa forma o sucesso das pessoas envolvidas em 80 anos de pesquisas que conseguiram medir 13 ordens de magnitude em energia e 32 em fluxo.

Com nome homenageando o pesquisador acima citado, o Observat3rio Pierre Auger pretende estudar os chuveiros com energia acima de 10^{19} eV e desvendar os seus mist3rios.

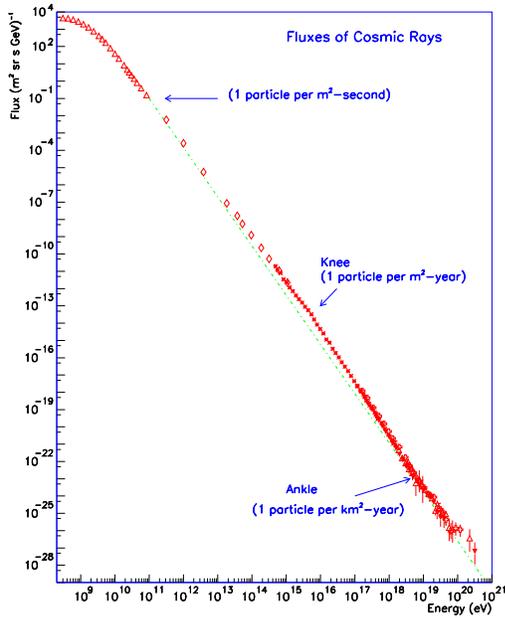


Figura 2: Fluxo medido de raios cósmicos. Este gráfico reúne dados medidos em vários experimentos espalhados pelo mundo.

2 O Problema dos Raios Cósmicos de Altas Energias

Uma vez reconstruída a direção de chegada de uma partícula cósmica procura-se encontrar sua fonte astronômica, ou seja, em qual astro esta partícula foi criada e ejetada em direção à Terra ?

Para partículas com energia até 10^{15} eV as fontes são razoavelmente conhecidas. Acredita-se que as fontes sejam galácticas e as teorias de criação e aceleração de partículas em buracos negros, super novas e estrelas de nêutrons explicam de forma satisfatória o espectro de energia medido até essa energia.

Os mecanismos de aceleração nestes astros são bastante complexos, mas todos se baseiam em sistemas de aceleração análogos aos aceleradores de partículas construídos pelo homem. Este processo foi descrito por Fermi em [1] (veja [2] para uma boa revisão) e é um sucesso nas tentativas de explicação das fontes de raios cósmicos por reproduzir um espectro de energia em forma exponencial (espectro de potência) em acordo com as medidas mostradas na figura 2.

De forma bem simplificada reviso abaixo o formalismo que descreve a aceleração de uma partícula atendo-me apenas à conhecida relação entre raio sincrotrônico e campo magnético.

¹1 parsec = 3.08×10^{16} m

Ao descrever uma partícula com carga q em um campo eletro-magnético temos:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{e} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

e encontramos a frequência de giro que esta partícula descreverá considerando a relação:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} \times \vec{\omega} \Rightarrow \vec{\omega} = \frac{q\vec{B}}{\gamma m} \quad (2)$$

ou em módulo:

$$\omega = \frac{qB}{\gamma m} = \frac{qc^2 B}{\gamma mc^2} = \frac{qc^2 B}{E} \quad (3)$$

Como temos que:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{\beta c}{r} = \frac{qc^2 B}{E} \quad (4)$$

encontramos a relação entre campo magnético e raio de giro:

$$r = \frac{E}{qBc} \quad (5)$$

que em unidades astronômicas¹ fica expressa da seguinte forma:

$$r = 1.08 \frac{E_{15}}{qB_{\mu G}} \text{ parsec} \quad (6)$$

com a energia em unidades de 10^{15} eV.

Levando em conta aproximações relativísticas que não abordarei em detalhes por não interferirem na análise e considerando que a fonte produtora de raios cósmicos tem tamanho $L = 2r$ podemos aproximar a equação anterior para a relação final entre tamanho da fonte e energia da partícula gerada em função do campo magnético:

$$\beta L \approx \frac{2E_{15}}{qB_{\mu G}} \quad (7)$$

onde β é a velocidade de propagação da onda de choque na fonte. Valores estimados de β são da ordem de 1/100.

Esta equação quando graficada em escala logarítmica em ambos os eixos ($\ln L = \ln 2E_{15}/\beta q - \ln B_{\mu G}$) revela uma relação linear entre o tamanho da fonte e o campo magnético para uma dada energia fixa.

Essa relação pode ser visualizada na figura 3 onde fixamos $E = 10^{20}$ eV, ou seja, $E_{15} = 10^5$, $\beta = 1$, valor muito improvável, e $q = 1$ (próton) e traçamos a reta correspondente à equação acima.

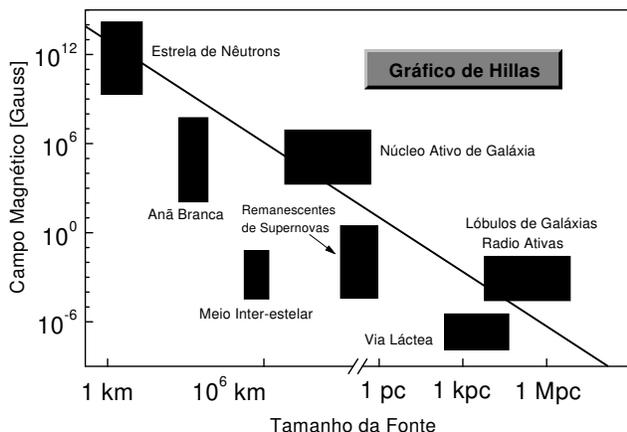


Figura 3: Gráfico de Hillas [14]. Neste gráfico os astros est3o posicionados de acordo com o seu campo magn3tico e tamanho estimados. Objetos abaixo da linha diagonal n3o podem acelerar part3culas a 10^{20} eV.

Nesta figura vemos delimitadas as regi3es ocupadas por tipos de objetos celestes. As regi3es foram demarcadas utilizando o campo magn3tico e tamanho estimados de cada classe de objeto. A linha que cruza a figura seleciona os astros que possivelmente t3em campo magn3tico e tamanho para acelerarem uma part3cula at3 10^{20} eV. Assim podemos ver que para acelerar uma part3cula a energias superiores a 10^{20} eV utilizando um Mecanismo de Fermi temos poucos astros candidatos: estrelas de n3utron, n3cleos ativos de gal3xias e l3bulos de gal3xias r3dio ativas.

Outro fator a ser considerado 3 o corte GZK. Em 1965, Penzias e Wilson [3] descobriram a radia33o c3smica de fundo. Eles mostraram que o Universo 3 permeado por f3tons remanescentes da grande explos3o primordial. Esses f3tons, com energia equivalente a 2.7 K, representam uma barreira 3 propaga33o de part3culas com energia de 10^{20} eV.

Supondo que os raios c3smicos s3o pr3tons, para t3o altas energias as rea33es:

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0 \quad (8)$$

ou

$$p + \gamma \rightarrow n + \pi^+ \quad (9)$$

onde γ 3 um f3ton da radia33o de fundo, t3em livre caminho m3dio de 5 Mparsec a 10^{20} eV. Para outras part3culas com carga maior ou com energias maiores o livre caminho m3dio 3 ainda menor.

Nesta intera33o o pr3ton ou n3utron filho carrega 80% da energia do antecessor de forma que podemos dizer que a intensidade em energia do feixe de part3culas produzido em uma fonte qualquer diminui em 80% a cada 5 Mparsec.

Estendendo esse racioc3nio, podemos, supondo que um feixe de part3culas seja produzido com energia 10^{20} eV, determinar sua energia em fun33o da dist3ncia da fonte. Isto est3 mostrado na figura 4. Quanto maior for a energia que a part3cula deixa a fonte maior ser3 a se33o de choque da intera33o com os f3tons e mais r3pido ser3 o processo de diminui33o da energia da part3cula. Assim vemos que independente da energia que as part3culas forem produzidas na fonte depois de percorrerem aproximadamente 100 Mparsec a energia do feixe ser3 menor que 10^{20} eV. Esse valor m3ximo 3 chamado de corte GZK (Greisen [4], Zatsepin e Kuz'min [5]) e se aplica para qualquer valor imagin3vel de energia j3 que quanto maior a energia maior ser3 a intera33o da part3cula com a radia33o de fundo.

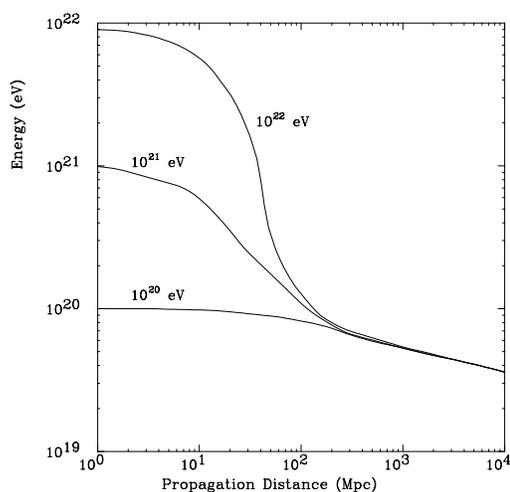


Figura 4: Energia da part3cula em fun33o da dist3ncia da fonte. A diminui33o da energia 3 devido 3 intera33o com os f3tons da radia33o de fundo. Cada linha na figura sup3e a emiss3o na fonte com as energias 10^{20} eV, 10^{21} eV e 10^{22} eV e vemos que para dist3ncias de 100 Mpc a energia 3 menor que 10^{20} nos tr3s casos analisados.

Para completar o paradoxo, acrescentemos a detec33o de part3culas com energia acima de 10^{20} eV por v3rios detectores no mundo (Volcano Ranch [6], Haverah Park [7], AGASA [8] e Fly's Eye [9]). A maior energia medida foi um chuvaire detectado pelo experimento AGASA com valor de 3.4×10^{20} eV (≈ 55 Joules !!). Segundo o corte GZK essa part3cula foi produzida em um astro com dist3ncia m3xima de 100 Mparsec da Terra porque se fosse produzida mais longe j3 teria perdido sua energia interagindo com a radia33o de fundo.

Por outro lado, o gr3fico de Hillas nos diz que esse astro tem que ser uma estrela de n3utron, um n3cleo ativo de gal3xia ou um l3bulo de gal3xias r3dio ativas. Usando a dire33o de chegada reconstru3da por esses experimentos

podemos traçar o caminho que essa partícula fez da fonte até a Terra. E finalmente entendemos o mistério dos raios cósmicos de energia acima de 10^{20} eV. Para todos os raios cósmicos detectados acima dessa energia não existe nenhuma fonte na sua direção de propagação que esteja a menos de 100 Mparsec da Terra e que seja uma estrela de nêutron, um núcleo ativo de galáxias ou um lóbulo de galáxias rádio ativas em acordo com o corte GZK e com o gráfico de Hillas.

No entanto, as suposições que fizemos para chegarmos à conclusão expressa no parágrafo acima são princípios bem estabelecidos em física e astrofísica, por isso, justifica-se a tentativa de explicação dos fenômenos que culminou na construção do Observatório Auger.

Outros possíveis métodos de aceleração e propagação das partículas vêm sendo elaborados (uma boa revisão desses métodos alternativos pode ser encontrada em [10]), no entanto, nenhum deles conseguiu reproduzir o espectro de potência medido e são totalmente carentes de confirmações experimentais.

3 O Observatório Pierre Auger

O Observatório Pierre Auger será o maior detector de raios cósmicos já construído. Seu projeto contempla a construção em dois sítios, um no hemisfério sul (Malargüe-Argentina) e outro no hemisfério norte (Utah-EUA). Os dois sítios foram escolhidos devido às condições climáticas (atmosfera limpa e pouca chuva) e são localizados em hemisférios distintos para permitirem o estudo de todos os objetos celestes, já que o céu visível no hemisfério sul é diferente do visível no norte.

O primeiro a ser construído é o do hemisfério sul, cuja fase de protótipo já está em operação. O Observatório conta com duas técnicas de medida: tanques de água e telescópios de fluorescência. O arranjo final de detectores contará com 1500 tanques com água espaçados 1.5 km entre si e espalhados por uma área de 3000 km^2 sobre os quais estarão apontados quatro telescópios de fluorescência.

As dimensões do Observatório nos levam a interessantes soluções tecnológicas, tais como, comunicação e fonte de energia dos tanques. A fonte de energia de cada tanque é um painel solar que alimenta as fotomultiplicadoras e o sistema de comunicação. O sistema de comunicação é via telefonia celular. Cada tanque possui uma antena que se comunica com uma central de aquisição de dados eliminando assim qualquer conexão via fio fazendo com que cada tanque seja autônomo.

Os mesmos tipos de problema são enfrentados pelos telescópios de fluorescência que, como exemplo, cito a necessidade de instrumentos resistirem a ventos de 200 km/h e temperaturas variando entre -20 e 40 graus Celsius.

3.1 Desenvolvimento de um chuveiro e sua detecção com os tanques de água

Ao penetrar na atmosfera uma partícula cósmica colide com os átomos do ar resultando, tal como em um acelerador de partículas, na criação de várias partículas filhas (ver figura 1). Esta interação dá início a um processo em cadeia que multiplica o número de partículas enquanto o chuveiro se desenvolve. A cada nova geração formada as partículas carregam uma menor porção da energia da partícula primária. Quando a energia individual de cada partícula no chuveiro atinge um valor próximo a 80 MeV a probabilidade de interação da partícula com moléculas do ar se iguala à probabilidade de absorção da partícula por átomos ionizados do ar, o que faz com que o chuveiro comece a morrer.

Ao passar pelo tanque as partículas do chuveiro, principalmente elétrons e múons, têm energia suficiente para produzir radiação Čerenkov na água. Radiação Čerenkov é a luz produzida por uma partícula com velocidade maior que a da luz no meio de propagação [11].

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

Na fase de protótipo o Observatório Auger contará com 40 tanques de água espalhados em uma região que é “vista” pelos dois telescópios protótipos de fluorescência. Atualmente, membros da colaboração de Campinas estão trabalhando na instalação desses tanques que são totalmente fabricados no Brasil.

O dado final a ser analisado é o tempo de detecção de cada tanque. Aproximando a frente de propagação do chuveiro por um plano temos as coordenadas (x_i, y_i, z_i) de intersecção deste plano nos tempos (t_i) de detecção. Todos os dados de posição e tempo são fornecidos por um sistema de GPS (*Global Position System*).

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

$$\sum_{i=0}^m \vec{n} \cdot \vec{r}_i = ct_i - K \quad (10)$$

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

Desta forma podemos resolver o sistema de equações e procurar o plano que melhor se ajusta aos dados medidos. Como resultado encontramos as incógnitas \vec{n} e K . A técnica de tanques de água tem comprovado grande eficiência na determinação da direção da partícula primária no experimento onde foi utilizada (Haverah Park). O Observatório Auger explorará seus tanques de água principalmente neste sentido para responder a uma das três grandes perguntas que é a direção de chegada dessas partículas.

Os tanques de água também podem ajudar na resposta da primeira pergunta deste artigo. Qual é a energia dessas partículas ?

As fotomultiplicadoras produzem o sinal integrado correspondente à luz Čerenkov produzida por todas as partículas do chuveiro que cruzam o tanque. Obviamente existe uma relação entre a energia da partícula primária e o número de partículas que cruzam os tanques, num modelo simples, quanto maior a energia da partícula primária maior o número de partículas que cruzam o tanque. Porém, essa relação não é linear e depende das características de cada chuveiros. Simulações de Monte Carlo mostraram que a densidade de energia depositada nos tanques a 600 m do eixo do chuveiro oferece uma estimativa da energia que depende pouco dos parâmetros do chuveiro. A equação abaixo mostra a relação entre energia e densidade que é utilizada atualmente:

$$E = 7.04 \times 10^{17} \rho(600)^{1,018} \text{ eV} \quad (11)$$

na qual $\rho(600)$ é o sinal medido pelos tanques a 600 m do eixo do chuveiro. No entanto, essa é uma pergunta que pode ser melhor respondida pelos telescópios de fluorescência como ficará demonstrado na seção seguinte.

3.2 Telescópios de Fluorescência

Os telescópios de fluorescência do Observatório Auger serão os instrumentos mais sensíveis já construídos que utilizam essa técnica.

Os telescópios são construídos dentro de prédios semicirculares que ficam nas extremidades do arranjo de tanques. Os prédios são chamados de olhos-de-mosca devido à semelhança de representação dos dados com o mosaico de um olho de mosca (ver figura 5). Cada olho possui 6 telescópios. Os telescópios possuem um ângulo de visão que vai de 2° a 32° em zênite e 30° em azimute, de forma que cada olho vê 180° dentro do arranjo de tanques.

Cada telescópio propriamente dito é composto por um espelho esférico de distância focal 3.4 m, uma câmara de fotomultiplicadoras (440 fototubos em um arranjo de 22x20) disposta no foco do espelho (1.7 m do centro do espelho), um filtro passa faixa e uma lente corretora.

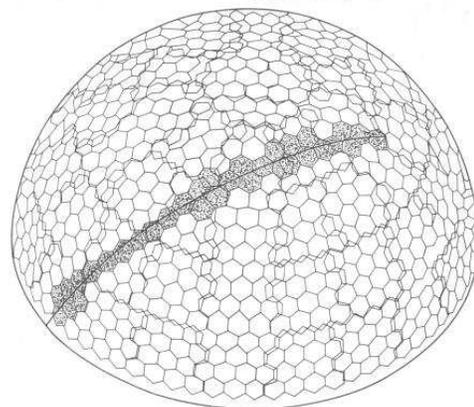


Figura 5: Exemplo da representação de um chuveiro visto por um telescópio de fluorescência. O domo representa a abóboda celeste sobre o telescópio. Cada hexágono representa o campo de visão aproximado de um fototubo. Os fototubos mais escuros mostram o sinal detectado na passagem de um chuveiro. A ilustração permite visualizar muito bem a direção de chegada do chuveiro e sua propagação.

As partículas de um chuveiro atmosférico interagem com os átomos de nitrogênio do ar excitando seus elétrons que, ao voltarem ao estado desexcitado, emitem luz de fluorescência com espectro entre 300 e 450 nm. O filtro óptico que vai na abertura do telescópio serve para barrar luz fora dessa faixa de comprimento de onda e aumentar a razão sinal/ruído.

A luz emitida na atmosfera entra pela abertura do telescópio, é refletida pelos espelhos e finalmente detectada na câmara de fotomultiplicadoras. Os fótons incidentes na área da câmara que tem um fototubo serão transformados em um sinal elétrico.

A luz incidente nos espelhos é invertida devido à geometria do telescópio, de forma que os fótons vindos da parte inicial do chuveiro (acima do eixo óptico do telescópio) são detectados na parte inferior da câmara, a mesma inversão ocorrendo nas direções direita e esquerda do eixo óptico. Além disso, a geometria escolhida estabelece uma relação unívoca entre uma direção de incidência e um ponto na câmara de fotomultiplicadoras.

Cada fototubo possui uma abertura angular fixa determinada pelo seu diâmetro. Analisando o desenvolvimento longitudinal do chuveiro temos que para cada intervalo de comprimento do chuveiro, os fótons emitidos têm aproximadamente a mesma direção e portanto incidem sobre o mesmo fototubo. De forma que cada fototubo “vê” uma abertura angular que pode ser relacionada com a altitude de emissão do fótons.

O sinal final causado pelo desenvolvimento do chuveiro é um traço na câmara. Utilizando as relações de equivalência entre sinal elétrico e número de partículas conseguimos reconstruir de forma contínua o número de partículas no chuveiro em função da altitude (ver figura 6, os pontos na figura

são o número de partículas medidos para determinados intervalos em altitude).

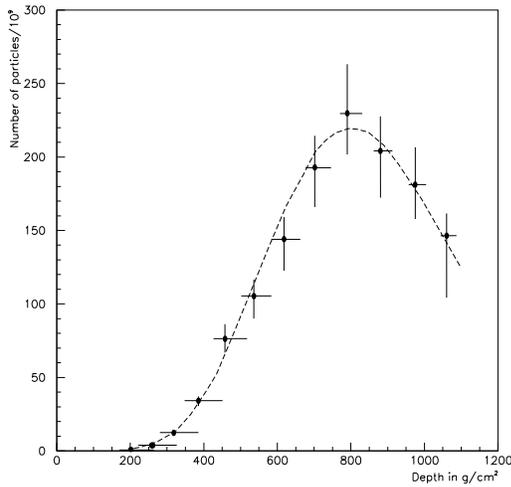


Figura 6: Desenvolvimento longitudinal do evento de maior energia detectado pelo experimento Fly's Eye (3.2×10^{20} eV). O gráfico mostra o número de partículas detectadas em função da profundidade atmosférica. Os pontos são os dados medidos e a linha tracejada é o ajuste da equação 12 que permite determinar a energia do chuveiro. A unidade de profundidade atmosférica utilizada é g/cm^2 que representa a quantidade de massa atravessada ao invés de uma medida simples de comprimento.

O número de partículas em um chuveiro em função da altura também pode ser bem descrito pela equação abaixo:

$$N = N_{max} \left(\frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{\frac{X_{max} - X_0}{70}} \exp \frac{X_{max} - X_0}{70} \quad (12)$$

Originalmente esta equação foi estabelecida com base em dados de simulação por T. Gaisser e M. Hillas [12] e vem sendo testada e aperfeiçoada através de comparações com dados medidos. Ela fornece uma relação entre o número de partículas (N) e a altitude do chuveiro (X) em função dos parâmetros N_{max} , X_{max} e X_0 . N_{max} é o máximo número de partículas no chuveiro e X_{max} é a altitude em que tínhamos o máximo no número de partículas. X_0 é um parâmetro livre de ajuste.

Ajustando essa equação aos dados medidos conseguimos determinar os parâmetros N_{max} , X_{max} e X_0 que quando substituídos na equação 12 oferecem a expressão final do número de partículas em um chuveiro em função da altitude (X) (ver figura 6, nela a linha tracejada é o ajuste da equação 12 aos dados medidos).

Utilizando o dado experimental de que cada elétron perde 2.2 MeV a cada g/cm^2 de material atravessado, ou seja,

$\frac{dE}{dX} = 2.2 \frac{MeV}{g/cm^2}$ podemos encontrar a energia total liberada pelo chuveiro multiplicando a taxa de transferência de energia pelo número de partículas $N(X)$:

$$\frac{dE_t}{dX} = 2.2 \frac{MeV}{g/cm^2} N(X) \Rightarrow E_t = 2.2 \int N(X) dX \text{ MeV} \quad (13)$$

onde E_t é a energia total do chuveiro, ou seja, a energia da partícula primária.

Essa determinação da energia é bastante precisa pois se baseia no desenvolvimento do chuveiro como um todo ao invés de uma amostra temporal, como é a medida feita pelos tanques. O telescópio de fluorescência oferece uma medida calorimétrica da energia do chuveiro onde o calorímetro é a atmosfera.

A partícula primária também pode ser estimada através da reconstrução dos dados de fluorescência. As partículas candidatas mais aceitas são prótons. No entanto, se a partícula primária for um núcleo de ferro, por exemplo, a seção de choque com os núcleos de átomos constituintes do ar aumenta quando comparada a seção de choque de um próton. Isso resultará em um desenvolvimento mais rápido dos chuviros iniciados por ferro do que os chuviros iniciados por prótons que pode ser detectado pelos telescópios e oferecer um indício do tipo da partícula primária. Importante salientar que a determinação do tipo de partícula primária é a pergunta mais difícil de se responder dentre as três questões propostas no início do artigo e consequentemente a que demandará maior esforço da Colaboração Auger.

Existem também técnicas para determinar a direção de chegada da partícula primária através dos dados de fluorescência, porém, essa determinação é menos precisa do que a conseguida com os tanques. Isto mostra o caráter complementar das técnicas usadas pelo Observatório Auger e o poder de resolução que ele terá devido às verificações duplas possíveis com as duas técnicas.

3.2.1 O Funcionamento do Protótipo do Observatório Auger

A Colaboração Auger resolveu montar dois telescópios de fluorescência como protótipo para testar a melhor configuração da óptica. A configuração escolhida constitui o arranjo básico de uma Câmara de Schmidt [13].

Atualmente vários testes de eletrônica, calibração e óptica estão sendo realizados. Os testes de óptica se limitam a estudar a forma e tamanho da imagem produzida na câmara de fotomultiplicadoras.

Durante a fase de elaboração da configuração do telescópio, simulações detalhadas determinaram, de acordo

com a resolução desejada e financeiramente viável, o número e tamanho dos fototubos, o tamanho do espelho e a abertura do telescópio. Esses são alguns fatores que determinam a resolução óptica do telescópio além da geometria esférica e das imprecisões de posicionamento na montagem e imperfeições na fabricação dos instrumentos.

Somando as perdas em resolução inerentes à configuração do projeto (zonas mortas) e as devido às imperfeições dos instrumentos (lentes + espelhos) devemos ter uma situação extrema tal que a imagem de um ponto sobre o eixo do chuveiro não seja maior que um fototubo da câmara de fotomultiplicadoras. Essa exigência é coerente já que, se o sinal de um ponto no céu for maior que um fototubo teremos luz incidindo sobre regiões mortas da câmara (entre os fototubos) o que significa perda de sinal.

A verificação do requisito de qualidade óptica pode ser feita utilizando como fonte de luz uma estrela. Concentrando a luz de uma estrela no plano focal (câmara de fototubos) podemos medir o tamanho da imagem formada e determinar a resolução óptica do telescópio.

A figura 7 mostra a imagem analisada da estrela Vega na câmara de fotomultiplicadoras que foi conseguida utilizando uma foto retirada com uma câmara CCD². Através dessa figura podemos medir a intensidade de luz em função da distância ao centro da imagem. O resultado está mostrado na figura 8.

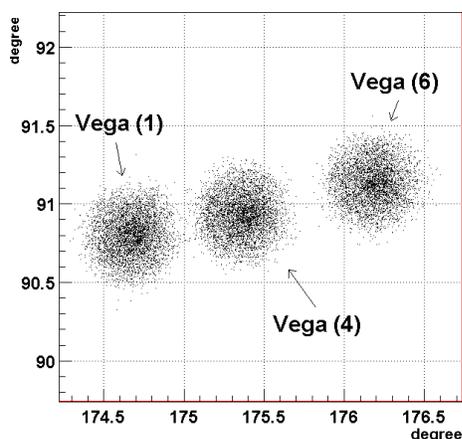


Figura 7: Imagem na câmara de fotomultiplicadoras da estrela Vega. A imagem foi conseguida retirando uma foto com uma CCD. A figura mostra o sinal na câmara de três fotos tiradas uma poucos segundos após a outra enquanto a estrela se movia no campo de visão do telescópio. Os eixos são as coordenadas da câmara em graus.

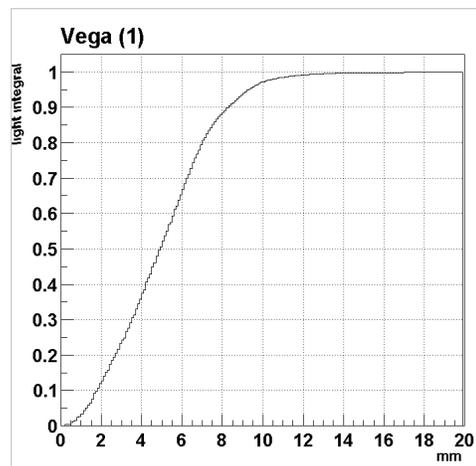


Figura 8: Integral da luz depositada na foto Vega1 em função da distância ao centro da imagem. Como podemos observar aproximadamente 85% da luz detectada caiu dentro de um raio de 7.5 mm.

A Colaboração Auger escolheu, em acordo com um compromisso entre custo e resolução, fototubos com diâmetro 1.5 cm. Ou seja, o limite mínimo aceitável de qualidade da óptica seria quando grande parte da luz de um ponto (estrela) tivesse sua imagem distribuída sobre 0.75 cm (=7.5 mm) de raio na câmara de fotomultiplicadoras. Como mostra a figura 8 aproximadamente 85 % da luz da estrela Vega se distribuiu em um raio de 7.5 mm o que se enquadra nas especificações de qualidade da colaboração e aprova o projeto, a construção e instalação da óptica do telescópio.

4 Conclusão

O Observatório Pierre Auger já é uma realidade. Um Observatório gigantesco que tem como objetivo responder questões que estão pendentes há mais de 80 anos sobre os raios cósmicos. O uso das duas técnicas de detecção explicadas acima permitirá reconstruções muito precisas.

Novos métodos de reconstrução híbrida estão em desenvolvimento para extrair as melhores informações de cada técnica. Isto constitui outro campo de meu interesse, além da montagem e operação do telescópio, no qual estou trabalhando e pretendo ter resultados em breve que farão parte da minha tese de doutorado

O Observatório Auger detectará aproximadamente 30 partículas com energia acima do corte GZK em um ano. Isso é três vezes o número atual de chuviscos medidos acima dessa energia detectados em 50 anos de buscas. O que nos deixa ansiosos pelas medidas e pela expectativa das possíveis descobertas a serem feitas.

²CCD - Charged Coupled Device: câmara digital altamente sensível baseada em semicondutores

5 Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos editores e às editoras da Revista *Physicæ* por trabalharem neste valioso projeto oferecendo-me assim a oportunidade de divulgar meu trabalho.

Agradeço também ao povo brasileiro, que cada vez mais forma a base da minha personalidade, por financiar os meus estudos através da agência de fomento à pesquisa FAPESP.

Resta-me ainda agradecer à Daniela Maurizio, colaboradora do Observatório Auger do grupo de Turin/Itália, que coordenou as atividades de testes ópticos.

Finalmente, desculpo-me pelos gráficos com legendas e escritos em inglês. Muitos deles eu não tenho acesso às fontes o que dificultou a mudança dos escritos que só é possível aceitando uma grande redução na qualidade das figuras.

Referências

- [1] E. Fermi, *Phys. Rev.* **75**, 1169 (1949);
- [2] T. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, página 149, Editora Cambridge University; Cambridge, 1990;
- [3] A.A. Penzias e R.W. Wilson, *Ap.J.* **142**, 419 (1965);
- [4] K. Greisen, *Phys. Rev. Letters* **16**, 748(1966);
- [5] G.T. Zatsepin e V.A. Kuz'min, *JETP Letters* **4**, 78 (1966);
- [6] J. Linsley, *Phys. Rev. Letters* **10**, 146 (1963);
- [7] M.A. Lawrence, R.J.O. Reid, A.A. Watson, *J. Phys. G* **17**, 733 (1991);
- [8] N. Hayashida et al., *Phys. Rev. Letters* **73**, 3491 (1994);
- [9] D.J. Bird et al., *Astrophys. J.* **441**, 144 (1995);
- [10] A.V. Olinto, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* **97** 66 (2001);
- [11] Luiz Vitor de Souza Filho, *A distinção da partícula primária em chuviscos atmosféricos extensos utilizando o tempo de chegada de fótons Čerenkov* Tese de Mestrado -IFGW - UNICAMP;
- [12] T. Gaisser e M. Hillas, *Proceedings of the International Cosmic Rays Conference*, **8**, 353 (1977);
- [13] M. Born e E. Wolf, *Principles of Optics*, Capítulo 6, Pergamon Press, Oxford, 1987;
- [14] M. Hillas, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **22**, 425 (1984).