

Perguntas e Respostas

sobre os raios cósmicos de energia extrema

– Um guia para explorar os dados públicos do Observatório Pierre Auger –

Há mais de 100 anos que sabemos que o planeta Terra é constantemente atingido por partículas que nos chegam do cosmos. Estas partículas têm energias, abundâncias e origens muito diversas, e existem ainda muitas perguntas por responder a seu respeito. Neste estudo dedicamo-nos aos raios cósmicos de energia extrema: as partículas mais raras e mais energéticas que conhecemos. Quando estes raios cósmicos atingem o topo da atmosfera, produzem um chuveiro de milhões de partículas, tantas mais quanto mais elevada for a energia da partícula inicial.

O Observatório Pierre Auger detecta estes chuveiros de partículas com o objectivo de resolver alguns dos mistérios relacionados com os raios cósmicos de energia extrema: que partículas são estas? De onde vêm? Onde são produzidas e como são aceleradas até atingirem energias tão elevadas?

O Observatório decidiu disponibilizar 1% dos dados que está a recolher desde 2004 a todos os que queiram aprender mais sobre os raios cósmicos de energia extrema. Esses dados estão numa página que é actualizada diariamente. Este guia destina-se a ser um fio condutor na vossa exploração dos dados públicos de Auger. O trabalho está organizado em duas partes:

A. Conhecer os raios cósmicos

A.1 Partículas que nos chegam do espaço

A.2 Chuveiros de raios cósmicos na atmosfera

B. O Observatório Pierre Auger

B.1 Conhecer o Observatório

B.2 Como se medem os raios cósmicos de energia extrema

B.3 O que dizem os dados sobre os raios cósmicos de energia extrema

A primeira parte do trabalho é dedicada aos raios cósmicos em geral: como são e como os observamos. A segunda parte é dedicada ao observatório Pierre Auger e à análise dos seus dados. As diferentes sub-seções do guia são autónomas, e podem optar por resolver cada uma delas apenas até onde vos parecer adequado.

Bom trabalho!

Links úteis:

- The Pierre Auger Observatory: <http://www.auger.org>
- Public Event Explorer (página dos dados públicos de Auger): <http://auger.colostate.edu/ED>
- Auger education page: <http://www.auger.org/education>
- Sobre física de partículas: <http://www.particleadventure.org>

A.1 Partículas que nos chegam do espaço

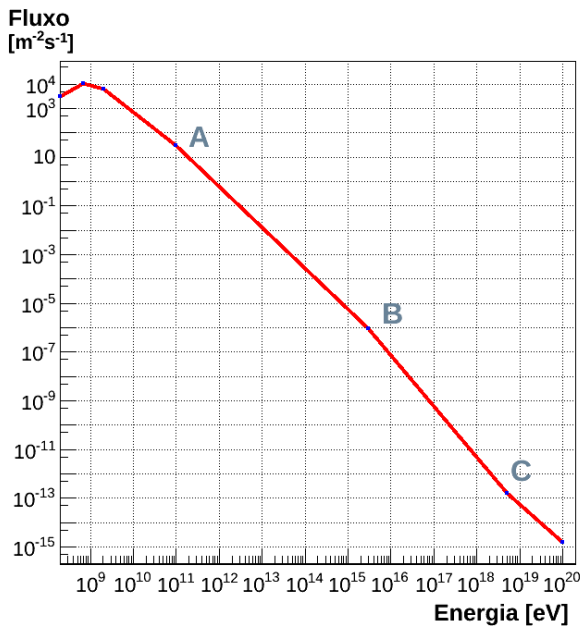


Figura 1: O espectro de energia dos raios cósmicos.

O gráfico da figura 1 mostra o espectro de energia dos raios cósmicos – para cada energia (no eixo dos X) temos (no eixo dos Y) o número de partículas com essa energia cinética que, no topo da atmosfera, atingem uma determinada área (1 m^2) num dado intervalo de tempo (1 s). Este gráfico resulta de medidas feitas em muitas experiências em todo o mundo ao longo de várias décadas. Os raios cósmicos com energias abaixo de cerca de 10^9 eV chegam-nos na sua maioria do Sol. Acima dessa energia, têm origem algures na Via Láctea, fora do sistema solar. Quanto aos raios cósmicos de mais alta energia (acima de C, cerca de 3×10^{18} eV) pensa-se que vêm de fora da nossa galáxia. Este gráfico pode ser aproximado por uma recta (apesar de uma ligeira inflexão em B, o chamado “joelho” do espectro dos raios cósmicos).

A.1.1) Em física de partículas usa-se normalmente como unidade de energia o electrão-Volt (eV), que é definido como a energia de uma partícula com carga igual à do electrão quando sujeita à diferença de potencial de 1 Volt. Como a carga do electrão é $q_e = -e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, temos $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, e concluímos que 1 Joule corresponde a cerca de 10^{19} eV.

1 Joule é a ordem de grandeza da energia cinética de uma maçã (cerca de 100 g) que cai de uma árvore (altura da ordem de 1 metro). Um raio cósmico de 10^{19} eV é uma partícula minúscula (digamos, um protão) em que se concentra 1 Joule de energia!

a) Quantos nucleões (protões + neutrões) haverá na maçã?

b) Como se compara a energia cinética média por nucleão nos dois casos (maçã e raio cósmico)?

Pista: Considera que uma maçã é constituída exclusivamente por protões e neutrões e que a massa de um protão é muito aproximadamente igual à massa do neutrão (o número de Avogadro é $N_A = 6.022 \times 10^{23}$).

A.1.2) Repara que tanto o eixo dos X como o eixo dos Y estão em escala logarítmica. Numa escala logarítmica de base 10 medimos ordens de grandeza: cada divisão da escala corresponde a dez vezes mais que a anterior.

Escolhendo uma região entre A e C, em que o gráfico pode ser aproximado por uma recta, quando a energia sobe uma ordem de grandeza (um factor 10), quanto baixa o número de partículas? Que comentário farias acerca do declive da recta?

A.1.3) Imagina um detector com 1 m^2 de área colocado em órbita à volta da Terra num satélite. Aproximadamente quantas partículas de 1 TeV (10^{12} eV) detectaria por ano?

E que área teria de ter para detectar 1 partícula de 100 TeV por ano?

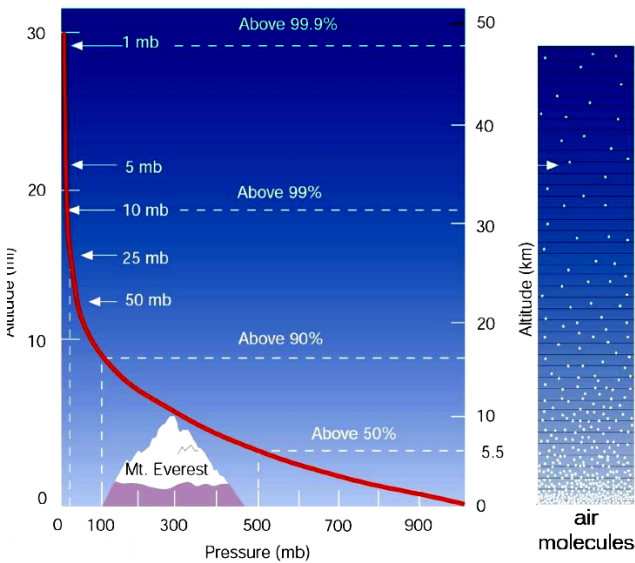
A.1.4) O Observatório Pierre Auger tem uma área de cerca de 3000 km^2 . Quantas partículas de 10^{19} eV são detectadas por ano em Auger?

Usando a ferramenta disponível na página de Auger, compara a dimensão do detector Auger na pampa Argentina com regiões do Planeta que te sejam mais familiares.

Como se podem fazer detectores que cubram áreas tão grandes?

A.2 Chuveiros de raios cósmicos na atmosfera

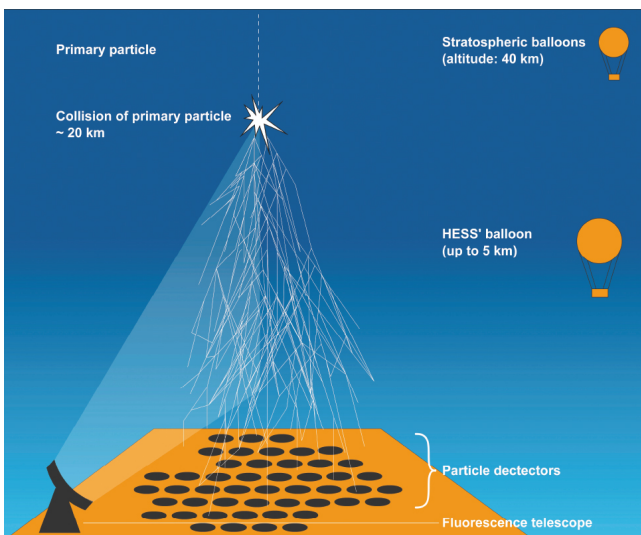
Os raios cósmicos de energia muito alta que atingem o topo da atmosfera terrestre vão interagir com as moléculas da atmosfera, produzindo chuueiros (ou cascatas) com milhões de partículas. É uma parte destes chuueiros que vamos medir nos detectores de raios cósmicos à superfície da Terra.



A2.1) Qual é o peso em kg da atmosfera por cima da tua cabeça (podes considerar uma área de $20 \times 20 \text{ cm}^2$) ao nível do mar e no cimo no monte Aconcágua (Andes, província de Mendoza, Argentina, altitude 6962 m)?

Figura 2: Perfis atmosféricos de pressão e densidade (www.nc-climate.ncsu.edu).

Note-se que a probabilidade de uma partícula cósmica interagir com uma partícula da atmosfera vai depender da probabilidade de as duas chocarem, o que depende da densidade da atmosfera. E sabemos que esta está longe de ser a mesma perto do chão, a 10 km, ou a 40 km de altitude! A figura 2 mostra os perfis de pressão e densidade de matéria em função da altitude acima do nível do mar. No estudo dos raios cósmicos, o que importa de facto não é a distância que a partícula percorre, mas a “quantidade de atmosfera” que atravessa. Por esta razão se usa normalmente, em vez da altitude, a grandeza X , profundidade atmosférica, que traduz a quantidade de atmosfera atravessada, medida em g/cm^2 (ver Nota 1 na página seguinte).



A2.2) Como é que a “quantidade de atmosfera” atravessada varia com ângulo da partícula incidente com a vertical do lugar onde esta atingiria o chão? Compara o caso de uma partícula cósmica que chega ao nível do mar na direção da vertical do lugar em que atinge o chão com o de outra que venha quase paralela ao chão.

Figura 3: Representação esquemática do desenvolvimento longitudinal de um chuueiro na atmosfera (créditos da imagem: ASPERA/Novapix/L.Bret).

Numa cascata iniciada por uma partícula cósmica energética, dão-se primeiro algumas interacções de muito alta energia, das quais resultam algumas partículas que vão por sua vez interagir dando origem à cascata (ver figura 3). O que vai de facto acontecer a cada partícula da cascata depende essencialmente do tipo de partícula e da sua energia: irá decair? Ou interagir com outras partículas por meio de um dos vários processos em competição? Em ambos os casos podem ser produzidas novas partículas. Mas a multiplicação do número de partículas da cascata não continua indefinidamente: a certa altura, as suas energias começam a ser insuficientes para que dêem origem à produção de novas partículas, e acabam por ser absorvidas. O máximo da cascata ocorrerá aproximadamente quando a energia média das partículas se tornar inferior a esse valor de energia, que se designa energia crítica. Só uma pequena parte das partículas atinge o solo. Quantas? Isso vai depender do tipo de partícula incidente, da sua energia e direcção, e da altitude a que se situa o detector.

Nota 1:

Ao atravessarmos uma camada de atmosfera de espessura h suficientemente reduzida para que a densidade ρ possa ser considerada constante, a profundidade atmosférica X , “quantidade de atmosfera” atravessada, é dada por $X = \rho \cdot h$. Para uma espessura grande de atmosfera, teremos de somar todos os valores de X obtidos em pequenas sub-camadas de densidade aproximadamente constante. Como a densidade se pode exprimir em g/cm^3 e a espessura tem unidades de comprimento, X pode ser expressa em g/cm^2 . A relação entre a profundidade atmosférica na vertical e a altitude para um perfil atmosférico padrão é mostrada na figura 4.

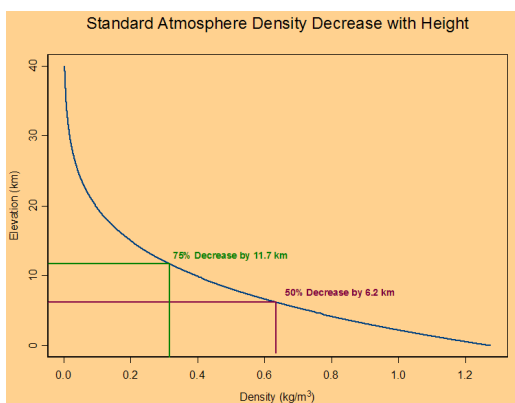


Figura 4: Relação entre a profundidade atmosférica na vertical e a altitude para um perfil atmosférico padrão (Joel Michaelsen, University of California Santa Barbara, em <http://oceanworld.tamu.edu/resources/oceanography-book/atmosphere.html>).

Mais Perguntas:

Para entender os fundamentos do desenvolvimento da cascata podemos usar modelos simplificados. Depois de responderes às várias perguntas podes pensar nos factores que complicam as coisas, provocando desvios em relação ao modelo utilizado.

A.2.3) Consideremos um modelo simples em que um chuvaireo iniciado por uma partícula com energia E_0 (por exemplo um fóton, que tem apenas um tipo de interacção, dita electromagnética) se desenvolve de acordo com o esquema da figura 5: cada partícula da cascata (fóton, electrão ou positrão, neste exemplo) interage sempre ao fim de uma determinada profundidade d , originando duas partículas, e a energia é igualmente repartida pelas duas.

a) Para um número de interacções $n = 1, 2, 3, \dots$ preenche a tabela, indicando a profundidade X a que se dá a interacção, o número N de partículas do chuvaireo e a energia E dessas partículas.

b) Consegues encontrar expressões para a profundidade X , o número de partículas e a energia de cada partícula ao fim de n interacções em função de n , d e E_0 ?

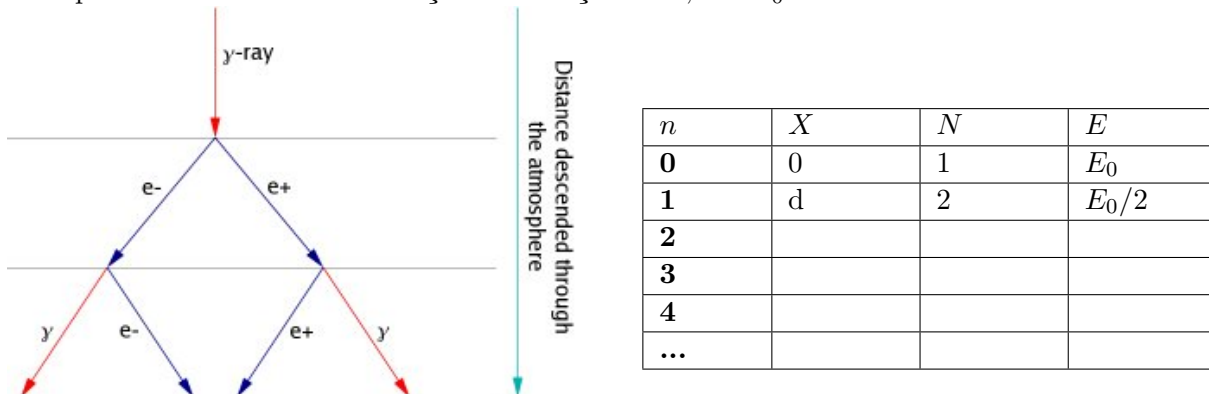


Figura 5: Modelo de Heitler do desenvolvimento de chuvaireos.

A.2.4) Mas o chuvaireo não se desenvolve indefinidamente! Abaixo de uma energia crítica E_c tornam-se dominantes processos de interacção com a atmosfera que não contribuem com novas partículas para a cascata.

a) Usando os resultados da alínea anterior escreve, para a profundidade na atmosfera em que o chuvaireo atinge o máximo, X_{max} , expressões para a energia das partículas E e o número de partículas N_{max} .

b) Obtém uma estimativa do valor de N_{max} para um chuvaireo de 10^{19} eV, usando $E_c = 85$ MeV.

c) Um chuvaireo desta energia atinge o máximo a uma profundidade média de cerca de 930 g/cm^2 . Sabendo que Auger se situa a uma altitude de cerca de 1400 m acima do nível do mar e usando os perfis da figura 4, onde se situa este máximo em relação ao chão? De que forma isso depende da inclinação do chuvaireo?

A.2.5) Consideremos por último a distribuição lateral das partículas do chuvaireo no chão. As partículas do chuvaireo não seguem todas exactamente a direcção da partícula primária, embora a grande maioria tenha direcções próximas desta.

Na página dos dados públicos podes ver a “pegada” no chão de cada chuvaireo e o seu perfil lateral. Estima o tamanho de chuvaireos quase verticais a energias mais baixas e mais altas. Calcula qual teria que ser o ângulo em relação ao eixo do chuvaireo para que um muão produzido 10 km acima do chão fosse detectado a estas distâncias do ponto de impacto no chão.

B.1 Conhecer o Observatório

O Observatório Pierre Auger utiliza duas técnicas independentes para detectar e caracterizar os chuueiros de raios cósmicos: um detector de superfície, que recolhe informação das partículas carregadas do chuueiro que atingem o solo, e um detector de luz de fluorescência – luz produzida na atmosfera pela passagem das partículas do chuueiro. O detector de superfície está continuamente em operação, enquanto o detector de fluorescência só recolhe dados em noites sem lua. Neste guia concentramo-nos no detector de superfície, a que correspondem os dados públicos disponibilizados pelo Observatório.

O detector de superfície de Auger é constituído por mais de 1600 tanques de água (representados na figura 6) colocados a cerca de 1.5 km uns dos outros e que vão fazer uma amostragem das partículas carregadas do chuueiro na sua chegada ao chão.

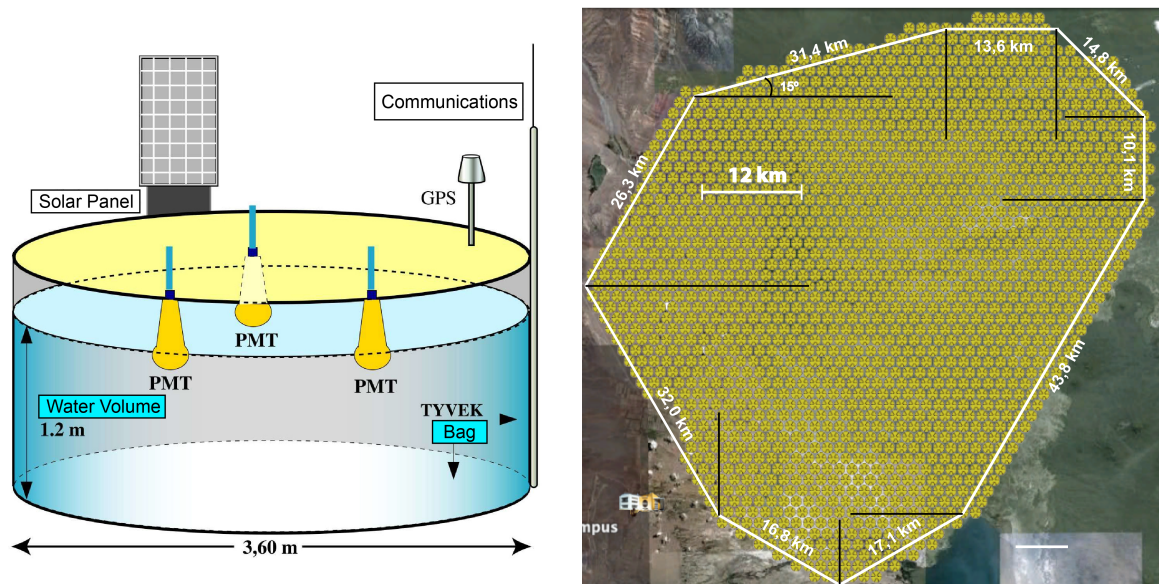


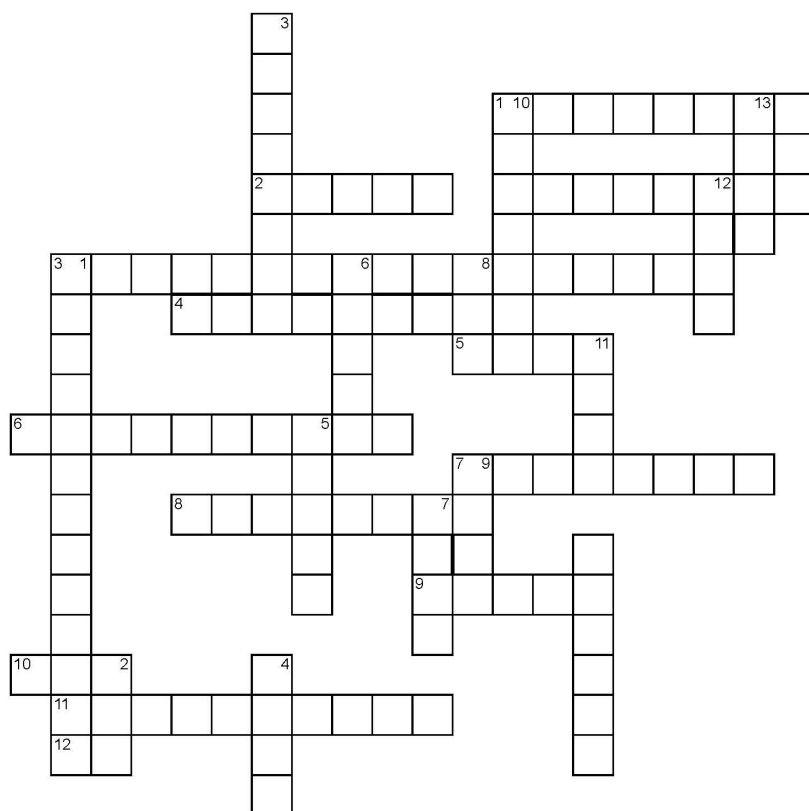
Figura 6: Esquema de um tanque de água (esquerda) e distribuição dos tanques (direita) no Observatório Pierre Auger.

As partículas carregadas do chuueiro que chegam ao solo são detectadas nos tanques devido ao efeito Cherenkov: quando uma partícula carregada se move a uma velocidade superior à velocidade da luz no meio (água no interior do tanque) – algo que não é possível no vácuo (porquê?) – vai emitir radiação de Cherenkov. Esta luz vai ser detectada por três fotomultiplicadores (detectores de luz, PMT). Os fótons são emitidos pela partícula enquanto atravessa o tanque (ou até ser absorvida pela água do tanque), e muitos deles vão rapidamente parar aos fotomultiplicadores, que os convertem, por efeito fotoelétrico, numa corrente eléctrica mensurável. O sinal eléctrico recolhido é proporcional ao número de partículas carregadas que atravessa o tanque, e pode assim ser usado para reconstruir a densidade de partículas no ponto onde está o tanque (ver figura 6 para a área do tanque).

Quanto mais energético for o chuueiro, mais partículas teremos a chegar ao solo. O número de partículas por m^2 (densidade de partículas) em cada tanque é também função da distância ao ponto de impacto ou centro do chuueiro (o ponto no solo onde passaria o raio cósmico primário se não interagisse, produzindo um chuueiro). Usando a densidade de partículas em cada tanque podemos estimar a posição do ponto de impacto e a energia total do chuueiro – e do raio cósmico primário. Finalmente, os tempos de chegada das partículas aos diferentes tanques dependem da direcção de chegada do chuueiro. Os sinais recolhidos nos tanques permitem, pois, estimar a direcção de chegada e a energia do raio cósmico primário.

Com esta informação e outra que podes encontrar na internet (em particular no sítio do Observatório Pierre Auger) propomos-te que preenchas a grelha da página seguinte com as palavras adequadas ¹.

¹Ainda sem a aplicação do acordo ortográfico, e ignorando acentos e cedilhas.



Horizontais - Linhas (n° no canto superior esquerdo)

1. Propriedade reconstruída com os tempos medidos nos tanques
2. Objecto de estudo no Observatório Pierre Auger (2 palavras)
3. Nome do aparelho PMT
4. Efeito que permite a detecção da partícula carregada no tanque
5. Número de telescópios num "olho" do Detector de Fluorescência (FD)
6. Número aproximado de tanques à superfície, subtraído de mil
7. Local de um dos "olhos" do Detector de Fluorescência (FD)
8. Nome do conjunto de partículas criadas por um raio cósmico de energia extrema que atinge a atmosfera
9. Tipo de ondas electromagnéticas com as quais os dados dos tanques são comunicados à estação central
10. Sigla do laboratório português que é membro da colaboração Pierre Auger
11. Todas estas partículas são detectadas nos tanques
12. Aquilo que se faz depois de acabado mais um dia de trabalho com os dados públicos de Auger

Verticais - Colunas (n° no canto superior direito)

1. Efeito que está na base no funcionamento do PMT
2. Siglas do Observatório Pierre Auger
3. Localidade onde fica o Observatório Pierre Auger
4. Meio no interior do tanque que permite detectar as partículas carregadas
5. Substância que reveste a parede interior do tanque
6. Medida mais importante obtida com o GPS
7. Adjectivo que se pode aplicar a um raio cósmico de energia muito elevada
8. Fonte de energia dos tanques (invertida)
9. Estado em que se fica após este jogo
10. Aquilo que é muito acentuado no espectro de energia dos raios cósmicos
11. Nome de um importante pioneiro no estudo dos raios cósmicos (2 palavras, invertido)
12. Ponto de impacto do chuveiro no chão (inglês)
13. Primeira palavra do local de um dos "olhos" do FD (invertida)

Mais Perguntas:

B.1.2) A área do Observatório Pierre Auger é da ordem de 3000 km^2 .

a) Com a geometria poligonal simples da figura 6, calcula esta área. Nota que o tamanho e a direcção das fronteiras estão aproximadas para facilitar o cálculo e, claro, o tamanho dos tanques não está à escala.

Todos os ângulos entre as linhas pretas (horizontais e verticais) e as arestas brancas do polígono são de 30° , 45° , 60° , 90° ou 120° (excepto num caso em que o ângulo é de 15°).

b) As partículas carregadas que chegam ao chão só são detectadas se passarem pelos tanques. Calcula a área de um tanque e, com o número aproximado de tanques do Observatório dado neste manual, calcula a área total coberta por tanques.

c) Em face da grande diferença dos resultados das duas alíneas anteriores, porque é que se pode afirmar que a área efectiva do Observatório é da ordem de 3000 km^2 ?

B.1.3) O número de tanques no Observatório é determinado pelo custo total do projecto face aos objectivos científicos (contabilizando o custo dos tanques). Para aumentar a área do Observatório sem custos significativos, podia-se pensar em aumentar a distância entre tanques... Que efeito teria duplicar a distância entre tanques? Qual seria a nova área do Observatório e quantos acontecimentos a 10^{20} eV poderíamos esperar num ano?

B.1.4) No caso da pergunta anterior, o que é que aconteceria aos chuveiros de energias mais baixas? O que é que determina a energia mínima que um observatório é capaz de detectar?

B.1.5) Se o ponto de impacto de um chuveiro estiver fora da área coberta pelo Observatório, os tanques mais próximos desse ponto de impacto podem ainda detectar bastantes partículas. Mas esses dados não são aproveitados. Porquê?

B.2 Como se medem os raios cósmicos de energia extrema

Nesta parte do trabalho vamos utilizar a informação directamente medida pelos detectores de superfície (tanques ou estações) de Auger, que é dada na página dos dados públicos individualmente para cada chuva. Pretende-se compreender como é que, partindo desta informação (obtida detectando ao nível do chão uma ínfima fracção das partículas do chuva) podemos chegar às características da partícula primária que interagiu no topo da atmosfera, dando origem ao chuva. Concretamente, vamos tentar descobrir como podemos, a partir das medições feitas por cada tanque, estimar a energia e a direcção de chegada da partícula primária.

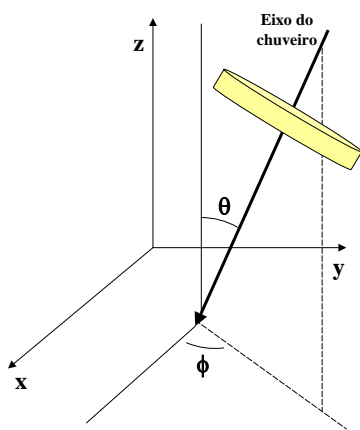


Figura 7: Esquema do desenvolvimento de um chuva num dado instante, com definição das coordenadas usuais.

Um chuva desenvolve-se em torno de um eixo (correspondente à direcção da partícula inicial) e é formado por partículas com velocidades próximas da velocidade da luz. Assim, o chuva propaga-se como uma espécie de disco de partículas (a frente do chuva) movendo-se na atmosfera quase à velocidade da luz no vazio. O ponto de impacto do chuva é a posição em que a partícula primária atingiria o chão se não houvesse desenvolvimento de um chuva (é, pois, a intersecção do eixo do chuva com o chão). A direcção de chegada dos chuvas é usualmente descrita em coordenadas esféricas. Os ângulos relevantes são θ , o ângulo do eixo do chuva com a vertical no ponto de impacto no chão, e ϕ , o ângulo entre a projecção horizontal do eixo do chuva e uma direcção de referência no chão.

B.2.1) Que quantidades são directamente medidas por cada um dos tanques de Cherenkov que participa na detecção de um chuva? Que outras informações são dadas a respeito destes tanques?
Nota: Depois de escolhido um acontecimento, segue até ao final da página em que a informação desse acontecimento é mostrada e encontrarás o link “Download ASCII data for event”. São estes os dados de que necessitas nesta secção.

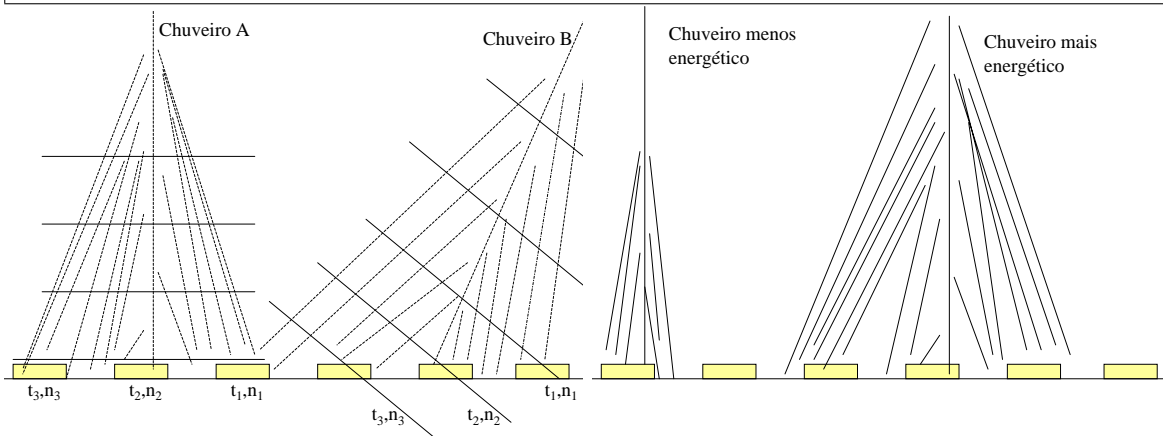


Figura 8: Representação esquemática de chuvas com inclinações diferentes (esquerda) e energias diferentes (direita) atingindo os tanques de Auger.

Mais Perguntas:

B.2.2) Usando as quantidades medidas por cada tanque e as suas coordenadas de posição (o “Northing” e o “Easting” dados nos ficheiros são as coordenadas cartesianas em metros que dão o avanço para Norte e para Este, respectivamente, em relação a um determinado ponto de referência) constrói variáveis que permitam estimar as coordenadas Norte e Este do ponto de impacto do centro destes chuveiros no chão.

B.2.3)

a) Olhando para a representação esquemática da chegada de chuveiros com direcções diferentes ao detector (figura 8), qual das quantidades medidas te parece conter informação sobre a inclinação do chuveiro? Começa por comparar chuveiros bastante inclinados com chuveiros quase verticais (θ próximo de 0).

Com um pouco de trigonometria, podemos escrever uma expressão simples para a relação entre o ângulo θ e as quantidades medidas nos tanques. Descobre qual.

b) Faz as contas para os seguintes chuveiros, escolhidos por terem apenas 3 tanques e uma quantidade significativa de partículas detectadas em todas elas. Usa os dois tanques (ID1 e ID2) com tempos de chegada mais distantes (primeiro e último tempo). Para cada tanque, necessitas da informação de tempo e posição. Nota que a frente do chuveiro se move praticamente à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s ou $c = 0.3$ m/ns). Preenche a tabela de resultados.

| Chuveiro | ID1 | ID2 | Δt (ns) | Dist (m) | $\theta_{\text{calc}}(^{\circ})$ |
|----------|-----|-----|-----------------|----------|----------------------------------|
| 8677500 | | | | | |
| 4796100 | | | | | |

B.2.4) Compara, para ambos os chuveiros, os resultados que obtiveste para o ponto de impacto e a inclinação com os valores dados na página dos dados públicos. Verifica como o teu modelo simples pode dar resultados próximos dos calculados com métodos mais complexos. Qual seria a diferença se fosse utilizada uma diferente combinação de tanques? De que variável além do tempo depende o cálculo do ângulo θ ?

B.2.5) Olhando para a representação esquemática da chegada de chuveiros ao detector (figura 8) quais são as duas características do chuveiro que afectam o número de tanques com sinal? Seleccionado pares de chuveiros que difiram numa só dessas características, discute de que modo a variação de cada uma delas em separado altera o número de tanques com sinal. Como pode a forma da “pegada” ajudar a distinguir as duas situações?

B.2.6) Consideremos agora a distribuição lateral da cascata, tal como vimos em A.2.5. Para os três chuveiros de maior energia disponíveis na página, qual a distância máxima ao centro da cascata de um tanque com sinal? E qual a razão entre o sinal no tanque mais distante e o sinal no tanque com maior sinal?

Confere estas respostas usando os gráficos da distribuição lateral dos chuveiros dados na página. Olhando para estes gráficos e para o esquema da configuração dos chuveiros no chão (também mostrado na página), procura estimar o limiar de detecção dos tanques (sinal mínimo que é registado) e o tamanho aproximado da cascata no chão.

B.3 O que dizem os dados sobre os raios cósmicos de energia extrema

Nesta parte final do trabalho vamos considerar algumas perguntas genéricas sobre os raios cósmicos de energia extrema medidos por Auger. Vais usar o ficheiro ASCII com informação sobre todos os chuueiros, disponível na página dos dados públicos, para fazer os gráficos que te pareçam mais adequados para responder a estas perguntas.

B.3.1) De que direcções vêm os raios cósmicos detectados por Auger? Que direcções são essas no céu? O que é que determina (e limita) as direcções no céu vistas pelo Observatório Pierre Auger na Argentina? Encontra o gráfico publicado por Auger e compara com os teus resultados.

Pista: Pensa no significado diferente das coordenadas locais e galácticas. Para passar de coordenadas locais a coordenadas galácticas, temos que usar também a informação temporal. Consulta a informação dada na página de educação de Auger.

B.3.2) Que energias têm estes raios cósmicos? Compara com o espectro de energia dos raios cósmicos que já conheces (ver figura 1) e discute o que observas.

a) Na zona intermédia, obténs resultados compatíveis com as conclusões da parte A?

b) Às energias mais baixas, como explicas a descida do número de chuueiros detectados quando a energia baixa?

c) Multiplica o espectro por E^3 . Encontra o gráfico publicado por Auger e compara com os teus resultados.

B.3.3) Mas na nossa galáxia, e no Universo, existem campos magnéticos, e uma partícula carregada movendo-se num campo magnético vai curvar! A sua trajetória projecta-se no plano perpendicular ao campo magnético como um círculo cujo raio é aproximadamente dado por $R = E/(Z.B)$ em que E é a energia da partícula, Z a sua carga (em unidades de carga do electrão) e B o campo magnético. Considerando que o campo numa galáxia é da ordem de $1 \mu\text{Gauss}$, calcula o raio de curvatura para um protão de 10 PeV e para um protão de 10 EeV. E qual a diferença para núcleos de Ferro das mesmas energias?

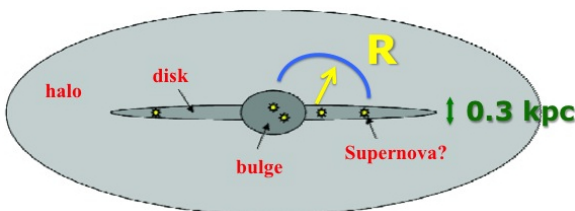


Figura 9: Representação esquemática da nossa galáxia.

B.3.4) Tendo em conta a pergunta anterior (e a figura 9), parece-te que os raios cósmicos detectados em Auger têm origem galáctica, extragaláctica, ou ambas?

Consegues identificar nos dados um valor de energia em que se possa dar essa transição?

B.3.5) Para um raio cósmico que atravesse o espaço intergaláctico, já não se pode considerar em todo o percurso um campo magnético constante e coerente (mantendo sempre a mesma direcção). O desvio total é o resultado de muitos pequenos desvios em direcções diferentes (provocados por campos magnéticos muito mais fracos). Embora o Observatório Pierre Auger consiga reconstruir as direcções de chegada com uma incerteza inferior a 1° , as direcções de raios cósmicos originários de uma mesma fonte seriam reconstruídos com desvios maiores do que 1° .

Procura os resultados publicados pelo Observatório Pierre Auger para as direcções dos chuueiros de mais alta energia – que não estão nos dados públicos – e observa a concentração na vizinhança da direcção da Galáxia com Núcleo Activo (AGN) mais próxima de nós (Centaurus A, a cerca de 14×10^6 anos-luz).