Perguntas e Respostas
sobre os raios cósmicos de energia extrema

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

Há já 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 nos chegam do Universo. Quando estas partículas 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 Pierre Auger 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 disponíveis na página do Public Event Explorer, que é actualizada diariamente.
Este guia destina-se a ser um fio condutor na vossa exploração dos dados públicos de Auger, tornando-a mais rica e completa. O trabalho está organizado nas seguintes partes:

1. O espectro dos raios cósmicos
2. Como se desenvolvem os chuveiros de raios cósmicos
3. Como se detectam os chuveiros de raios cósmicos
4. Como se medem os raios cósmicos de energia extrema
5. O que nos dizem estes dados sobre os raios cósmicos de energia extrema

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/Auger_Education
- Sobre física de partículas: http://www.particleadventure.org

1) O espectro dos raios cósmicos

O gráfico da figura 1 mostra aquilo a que chamamos o espectro de energia dos raios cósmicos – para cada intervalo de energia (no eixo dos X) temos (no eixo dos Y) o fluxo diferencial de partículas: o número médio de partículas com essa energia cinética que, no topo da atmosfera, atingem cada m^2 de área em cada intervalo de tempo de 1 segundo, e com uma direcção de chegada dentro de um dado ângulo no espaço (ângulo sólido) de 1 esterradiano (sr)[1], por GeV de energia. Repara que tanto o eixo dos X como o eixo dos Y estão em escala logarítmica[2]!

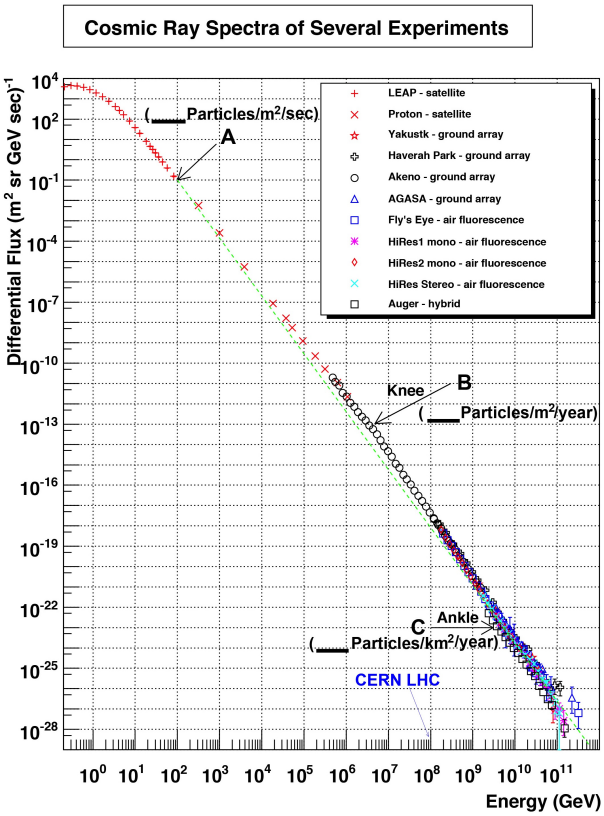
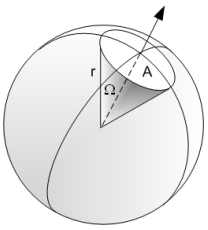


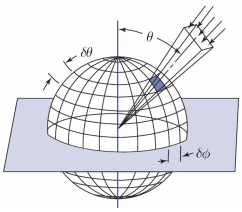
Figura 1: O espectro de energia dos raios cósmicos.

Em física de altas energias 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; 1 GeV= 10^9 eV. Como a carga do eletrão é $q_e = -e = -1.6 \times 10^{-19}$ C, temos 1 eV= 1.6×10^{-19} J, e concluímos que 1 Joule corresponde a cerca de 10^{19} eV= 10^{10} GeV.
Note-se que o fluxo F se define como o número de partículas que chegam por unidade de tempo (Δt) e por unidade de área. Neste gráfico está de facto representado o fluxo

por unidade de energia (em GeV) e por unidade de ângulo sólido (em sr): $\frac{1}{\Delta\Omega} \cdot \frac{\Delta \mathrm{F}}{\Delta \mathrm{E}}$. Para obter uma estimativa do fluxo médio é necessário multiplicar a variação de fluxo pela largura ΔE do intervalo de energias a que corresponde o valor considerado no gráfico. Para o caso presente pode-se tomar simplesmente: $\Delta E \simeq E$.
Para detectores planos como o Observatório Pierre Auger, é ainda necessário multiplicar pela aceitância angular efectiva Ω_{eff} (que é razoável tomar como 1/4 do ângulo sólido total[1]).
Neste gráfico estão reunidas medidas feitas em muitas experiências em todo o mundo ao longo de várias décadas. Os raios cósmicos com energias abaixo de cerca de 1 GeV (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 cerca de 3×10^{18} eV) pensa-se que nos chegam de fora da nossa galáxia. Voltaremos a esta questão na parte final deste guia.

[1] O ângulo sólido é o equivalente no espaço a 3 dimensões dos ângulos a que estamos habituados no plano. Se (ver figura) uma superfície cónica contém uma porção A da superfície de uma esfera de raio r, o ângulo sólido Ω é dado por $\Omega = A/r^2$. O ângulo sólido é medido em esterradianos. Dado que a área total da superfície de uma esfera é $A = 4\pi r^2$, o ângulo sólido total é 4π. As áreas numa esfera podem ser calculadas em coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) (ver figura) como sendo $r^2 \mathrm{sen}\theta d\theta d\phi$, em que $d\theta$ e $d\phi$ são as larguras angulares delimitadoras da área. Note-se que podemos assim escrever um dado intervalo de ângulo sólido como $d\Omega = \mathrm{sen}\theta \times d\theta \times d\phi = d(cos\theta)d\phi$. É ainda de notar que ser "isotrópico" significa ter igual probabilidade de vir de qualquer elemento de ângulo sólido.





[2] Em Física lidamos com ordens de grandeza muito diferentes, a que correspondem diferentes prefixos a juntar ao nome da unidade. Por exemplo para distâncias:
nanometer [nm] = 10^{-9} m
micrometer [μm] = 10^{-6} m
milimeter [mm] = 10^{-3} m
meter = 1 m
kilometer [km] = 10^3 m
megameter [Mm] = 10^6 m
gigameter [Gm] = 10^9 m
terameter [Tm] = 10^{12} m
petameter [Pm] = 10^{15} m
exameter [Em] = 10^{18} m
1 pc = 3.26 anos-luz
1 ano-luz= 9.46×10^{15} m

Os logaritmos são o inverso das potências: o logaritmo de base 10 de um número x, $\log_{10}(x)$, é o número a que se deve elevar 10 para obter x. Numa escala logarítmica de base 10, $\log_{10}$, medimos ordens de grandeza: cada divisão da escala corresponde a dez vezes mais que a anterior. Por exemplo, se um tracinho corresponde a $0.1 = 10^{-1}$, o seguinte será $10 = 10^0$ e o seguinte $10 = 10^1$. Podemos também usar $\log_2$ para medir potências de base 2. Mais utilizado, e chamado apenas log ou ln (nas máquinas de calcular), é o logaritmo natural, que tem como base o número de Neper, $e = 2.71828...$ A sua função inversa, a exponencial, tem inúmeras aplicações na modelação de fenómenos nos mais diversos campos da ciência. [Note that: $e^{\log 2} = 2$; $2^{1/\log 2} = e$; $\log(2^a) = a \cdot \log 2$; $\log_a b = \log(a)/\log(b)$]

Questões:

1.1) 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!
Quantos protões e neutrões haverá na maçã (número total)?
Como se compara a energia cinética média por protão/neutrão 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 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$).
1.2) Que comentário farias acerca da inclinação do espectro? Aproximando o espectro por uma recta entre**A** e **C**, qual é o seu declive?
1.3) Qual o número de partículas por unidade de área e de tempo que chega a um detector na Terra às energias dos pontos indicados pelas setas:
A) 10^{11} eV;
B) 3×10^{15} eV (região do "joelho");
C) 3×10^{18} eV ((região do "tornozelo")?
Usando os valores calculados, preenche os espaços em branco marcados no gráfico. Não são necessários valores exactos, apenas uma ordem de grandeza. **Atenção às unidades!**
Tenta representar graficamente os teus resultados em escala linear e discute a utilidade das escalas logarítmicas.
1.4) O detector de partículas AMS na Estação Espacial Internacional tem a capacidade única de caracterizar os raios cósmicos que chegam à Terra, até à energia de 1 TeV (10^{12} eV).
Considerando que o detector tem uma aceitância efectiva de 0.5 m^2 sr, estima o número de partículas à energia de 1 TeV que atravessa o detector num ano.
Tendo em conta o fluxo previsto para raios cósmicos acima de 10^{19} eV, que área deve cobrir o detector para registar cerca de 100 partículas deste tipo por ano? Repete o exercício para 10^{20} eV.
1.5) Como é que estas áreas se comparam com a dimensão do Observatório Pierre Auger? Procura a informação de que precisas na página dos dados públicos.
Usando a ferramenta lá disponível, compara a dimensão do detector Auger na Pampa Argentina com regiões do Planeta que te sejam mais familiares.
Como se podem instrumentar áreas tão grandes?
1.6) Porque é que há tão poucos dados na região do espectro entre **A** e **B**?

2) Como se desenvolvem os chuveiros de raios cósmicos

Os raios cósmicos de energia muito alta que atingem o topo da atmosfera terrestre vão interagir com as moléculas da atmosfera, produzindo chuveiros (ou cascatas) com milhões de partículas. É uma parte destes chuveiros que vamos medir nos detectores de raios cósmicos à superfície da Terra. O facto de não detectarmos a partícula inicial torna a medida das suas propriedades mais indirecta. No entanto, os chuveiros são, presentemente, a única forma de estudar os raios cósmicos de energias mais elevadas: como vimos na secção anterior, os fluxos são extremamente baixos, não sendo praticável colocar na alta atmosfera ou em órbita detectores suficientemente grandes para recolherem um número razoável de eventos. Resta-nos a possibilidade de observarmos estas partículas depois de terem interagido na atmosfera, construindo detectores que meçam as suas características tão bem quanto possível, em áreas tão grandes quanto possível.
Ter uma ideia de como se desenvolve um chuveiro, quais os tipos de partículas que o constituem e quais as suas energias é essencial para o trabalho das secções seguintes: perceber como são detectados estes chuveiros e descobrir como podemos passar das características do chuveiro que se medem às propriedades da partícula que lhe deu origem.

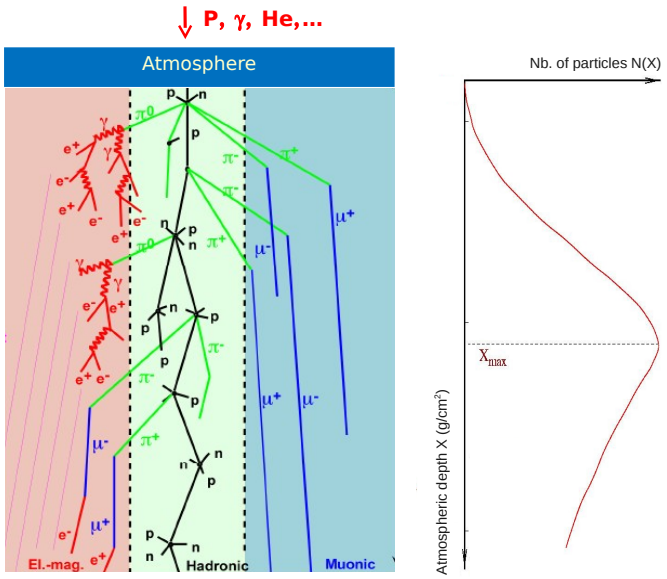


Figura 2: Representação esquemática do desenvolvimento longitudinal de um chuveiro na atmosfera. Nota que as 3 regiões diferentes estão na realidade sobrepostas no espaço e que se desenvolvem simultaneamente.

Numa cascata iniciada por um protão ou núcleo, começamos por ter algumas interacções

de muito alta energia, das quais resulta um conjunto de partículas que vai dar origem às 3 componentes essenciais da cascata (ver figura 2):

- Os fragmentos nucleares, protões, neutrões e outros hadrões[3] continuam uma série de interacções em que domina a força forte e vão constituir o essencial da cascata hadrónica, que se desenvolve na região central, próximo do eixo do chuveiro;
- Os piões neutros (π^0) vão decair quase instantaneamente num par de fotões, cada um dos quais se pode posteriormente converter num par electrão-positrão, que por sua vez vai radiar fotões, e assim sucessivamente, dando origem à componente electromagnética do chuveiro;
- Os piões carregados ($\pi^{\pm}$) que, se interagirem com a atmosfera, vão contribuir para a componente hadrónica da cascata, podem também decair, originando neutrinos (que não são detectados neste tipo de observatório) e muões, que têm uma probabili-dade de interacção suficientemente pequena e um tempo de vida suficientemente grande para poderem chegar ao chão.

Numa cascata iniciada por um electrão, positrão ou fotão (partículas só com interacção electromagnética), a componente electromagnética vai ser largamente dominante.
O que vai de facto acontecer a cada partícula da cascata (irá decair? Ou interagir por meio de um dos processos em competição?) depende essencialmente do tipo de partícula e da sua energia. A história em 3 componentes contada acima é resultado de sabermos qual o "destino" mais provável dos tipos mais abundantes de partículas às energias envolvidas.

Mas a multiplicação do número de partículas da cascata não continua indefinidamente: a certa altura a sua energia começa a ser insuficiente 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 torna 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.
O desenvolvimento dos chuveiros é um processo complexo, e o seu estudo envolve simulações em computador muito demoradas, ou a resolução de equações complicadas. Existem no entanto modelos simples que, sendo capazes de fazer previsões realistas para algumas das grandezas mais importantes, são extremamente úteis: permitem aos físicos de raios cósmicos ter uma ideia rápida e intuitiva dos resultados esperados em experiências ou cálculos mais complexos, tornando claros os aspectos essenciais da física envolvida. É o caso do modelo de Heitler para chuveiros electromagnéticos e de algumas suas generalizações para chuveiros iniciados por protões ou núcleos.

Muitas das análises dos dados actualmente feitas em Auger têm por objectivo determinar a natureza das partículas primárias. São protões? São núcleos de Ferro? Ou uma

mistura de várias espécies? Entre as variáveis do chuveiro que podem ajudar a distinguir os diferentes tipos encontram-se a profundidade a que o chuveiro atinge o máximo número de partículas e o número de muões que atingem o solo. Veremos agora que, com estes modelos simples, conseguimos fazer previsões importantes e realistas para o comportamento destas grandezas!

Comecemos por notar que a probabilidade de uma partícula interagir com uma molécula 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! 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 [4]).

Questões:

2.1) Qual é o peso em kg da atmosfera por cima da tua cabeça (podes assumir uma área de 20×20 cm^2) ao nível do mar e no cimo no monte Aconcágua (Andes, província de Mendoza, Argentina, altitude 6962 m)?

A "quantidade de atmosfera" atravessada por uma partícula cósmica depende, evidentemente, da densidade atmosférica em função da altitude (perfil de densidade) que pode variar no tempo e no espaço. E o que acontece se a partícula vier quase na horizontal (quase paralela ao chão)? Como é que a "quantidade de atmosfera" atravessada varia com ângulo da partícula incidente com a vertical do lugar onde esta atingiria o chão?

2.2) Consideremos para começar que o nosso chuveiro foi iniciado por um protão - uma partícula que tem apenas interacção electromagnética. Seja E_0 a energia da partícula inicial. Consideremos que os electrões, positrões e fotões da cascata interagem sempre ao fim de uma determinada profundidade d e que a energia é sempre igualmente repartida pelas duas partículas. Nestas condições podemos representar esquematicamente a cascata como na figura 3(a).

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

Consegues encontrar expressões analíticas para o número de partículas e a energia de cada partícula à profundidade X em função de X, d e E_0?

[3] Hadrões são partículas constituídas por quarks e/ou anti-quarks e por isso sujeitas à força nuclear forte. Para saber um pouco mais de física de partículas segue os links sugeridos no princípio deste guia.

[4] De notar que ao atravessarmos uma camada de atmosfera de espessura δ suficientemente reduzida para que a densidade ρ possa ser considerada constante, a profundidade atmosférica X, "quantidade de atmosfera" atravessada, é dada por $X = \rho \times \delta$. Para uma espessura grande de atmosfera, teremos que somar todos os valores de X obtidos em pequenas sub-camadas de densidade aproximadamente constante (no limite de camadas de espessura infinitesimal, trata-se de uma integração!) Assim sendo, e tendo em conta que a densidade se pode exprimir em g/cm^3 e a espessura tem unidades de comprimento, X pode ser expressa em g/cm^2.

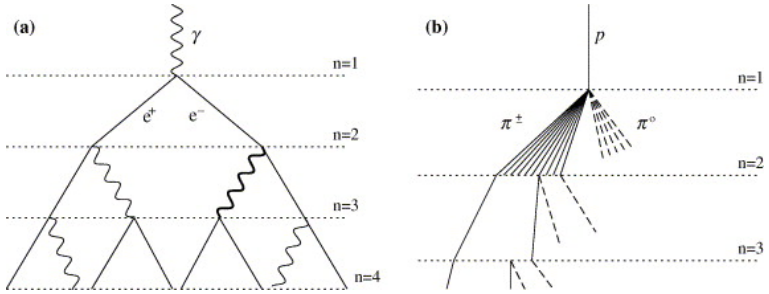


Figura 3: Representação esquemática de modelos tipo Heitler para o desenvolvimento longitudinal de chuveiros electromagnéticos (a) e hadrónicos (b).

n	X	N	E
0	0	1	E_0
1	d	2	$E_0/2$
2	2d	4	$E_0/4$
3			
4			
...			

2.3) Mas o chuveiro 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.
Usando os resultados da alínea anterior escreve, para a profundidade na atmosfera em que o chuveiro atinge o máximo, X_{max}, expressões para:
(i) a energia das partículas E,
(ii) o número de partículas N_{max},
(iii) a profundidade atmosférica X_{max},
em funcção de E_0, E_c and $\lambda = d/(ln2)$ (ver nota [2]).
Comenta o modo (mais lento ou mais rápido) como N_{max} e X_{max} variam com a energia da partícula primária.
2.4) Obtém agora uma estimativa para os valores de X_{max} e N_{max} para um chuveiro de 10^{19} eV, usando $E_c = 85$ MeV e $\lambda = 36.7$ g/cm^2.
Sabemos que em Auger um chuveiro vertical desta energia atinge o máximo muito perto (ou já depois!) do chão. Descobre qual o X correspondente ao Observatório e verifica deste modo se a tua previsão está aproximadamente correcta.
2.5) Procura enumerar factores que possam complicar as coisas, provocando desvios em relação a este modelo simplista.
2.6) Consideremos agora um chuveiro iniciado por um protão de energia E_0. Vamos descrevê-lo com o modelo simples da figura 3(b): ao fim de cada profundidade d é produzido igual número de cada um dos 3 tipos de piões: π^0, π^+, π^- (consideremos $n_\pi = 10$). Os piões neutros decaem em fotões e a sua energia é transferida para o

chuveiro electromagnético. Só os piões carregados vão alimentar a cascata hadrónica. Consideramos que a cascata termina quando estas partículas decaem ao atingirem uma determinada energia E_{dec}, ao fim de n interacções, dando origem a um mião (e a um neutrino não detectado).
Para um número de interacções $n = 1, 2, 3, ...$ preenche a tabela, indicando o número total de partículas do chuveiro N_{tot}, o número de partículas carregadas N_{ch}, a energia de cada partícula E, e a soma das energias de todas as partículas carregadas E_{ch}.
Quando atingem a energia E_{dec} os piões carregados decaem originando muões e neutrinos. Ao fim de quantas interacções é que isso acontece? No quadro deste modelo, obtém uma previsão para o número de muões produzidos na cascata N_μ em função de E_0 e E_{dec}.

n	N_{tot}	N_{ch}	E	E_{ch}
0	1	1	E_0	E_0
1	30	20	$E_0/30$	$2E_0/3$
2				
3				
4				
...				

2.7) Estima a percentagem da energia total transferida para o chuveiro electromagnético para $E_0 = 10^{19}$ eV sabendo que $E_{dec} \simeq 20$ GeV.
2.8) Finalmente, consideremos um chuveiro iniciado por um núcleo de ferro (número de massa $A = 56$). Vamos considerar que se aplica o princípio da sobreposição, segundo o qual um núcleo de número de massa A e energia E_0 se comporta como A nucleões de energia E_0/A.
Deriva expressões para:
i) o número de partículas no máximo do chuveiro,
ii) a profundidade a que é atingido esse máximo,
iii) o número de muões produzidos no chuveiro,
e relaciona-as com as expressões correspondentes obtidas para chuveiros iniciados por protões. Como variam estas grandezas?
2.9) Consideremos por último a distribuição lateral das partículas do chuveiro no chão. As partículas do chuveiro não seguem todas exactamente a direcção da partícula primária, embora a grande maioria tenha direcções próximas desta.
Olhando para o perfil lateral do chuveiro da figura 4 (um chuveiro quase vertical disponível na página dos dados públicos) estima o tamanho no chão destes chuveiros de energia mais alta. Calcula qual teria que ser o ângulo em relação ao eixo do chuveiro para que um mião produzido 10 km acima do chão fosse detectado a esta distância do ponto de impacto no chão.
2.10) Na realidade, o desenvolvimento lateral da cascata é originado sobretudo por sucessivos processos de dispersão de partículas carregadas no campo elcétrico dos núcleos presentes na atmosfera. Um parâmetro útil para cara-cterizar o desenvolvimento lateral de forma independente do material é o raio de Molière: $r_M = E_s \times \lambda/E_c$, com $E_s \sim$

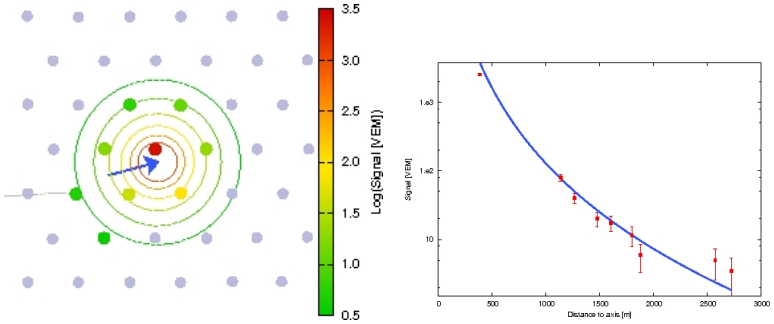


Figura 4: Perfil lateral e densidade de partículas no chão do chuveiro 10998100.

21 MeV. Cerca de 90% das partículas da cascata encontram-se dentro de um cilindro em redor do eixo da cascata cujo raio é o raio de Molière (definido em g/cm^2).
Calcula o raio de Molière em Auger usando os valores dados neste guia. Usando a densidade atmosférica correspondente à altitude do Observatório (ver figura 5) converte esse valor para unidades de distância.

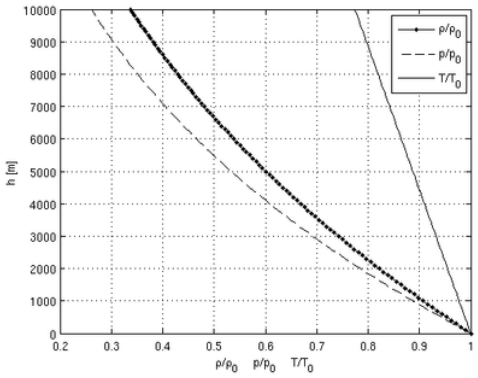


Figura 5: Perfis atmosféricos. Valores de referência: $T_0 = 20°$ C, $p_0 = 1$ atm $= 101300$ Pa, $\rho^0 = 1.2$ kg/m^3.

3) Como se detectam os chuveiros de raios cósmicos

O Observatório Pierre Auger utiliza duas técnicas independentes para detectar e caracterizar os chuveiros de raios cósmicos: uma baseada num detector de superfície, que recolhe informação das partículas carregadas do chuveiro que atingem o solo, e outra baseada num detector de luz de fluorescência – luz produzida na atmosfera pela passagem das partículas do chuveiro. O detector de superfície está continuamente em operação, enquanto o detector de fluorescência só recolhe dados em noites sem Lua. Neste guia concentramo-nos nos detectores 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 chuveiro na sua chegada ao chão.

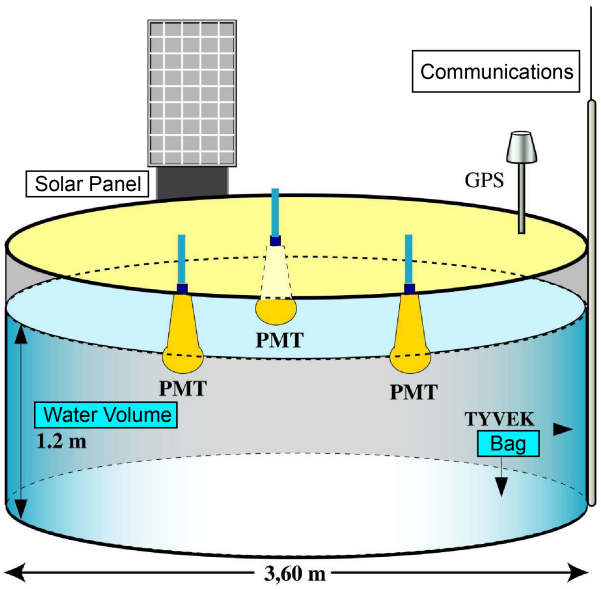
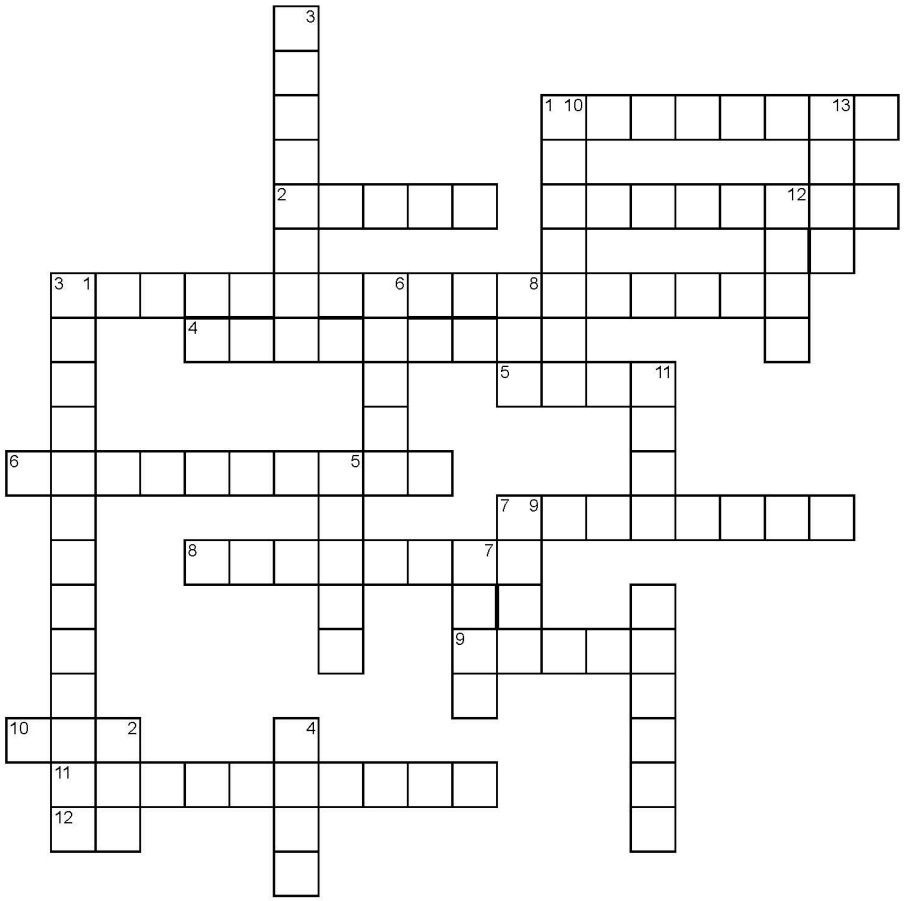


Figura 6: Representação esquemática de um tanque de água do Observatório Pierre Auger.

As partículas carregadas do chuveiro 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 vazio (porquê?) – vai emitir radiação de Cherenkov. Esta luz vai ser detectada por 3 fotomultiplicadores (detectores de luz, PMT). Os fotões 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, através

do efeito fotoeléctrico, 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 chuveiro, 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 chuveiro (o ponto no solo onde passaria o raio cósmico primário se não interagisse, produzindo um chuveiro). Usando a densidade de partículas em cada tanque podemos estimar a posição do ponto de impacto e a energia total do chuveiro - e do raio cósmico primário. Finalmente, os tempos de chegada das partículas aos diferentes tanques dependem da direcção de chegada do chuveiro. 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 com as palavras adequadas [5]:



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
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)

[5] Ainda sem a aplicação do acordo ortográfico, e ignorando acentos e cedilhas, quando necessário.

Questões:

3.1) A área coberta pelo Observatório Pierre Auger é da ordem de 3000 km^2. Assumindo a geometria poligonal simples da figura 7, calcula a área. Todos os ângulos entre as linhas pretas (horizontais e verticais) e as arestas brancas do polígono são 30°, 45°, 60°, 90° ou 120° (excepto num caso em que o ângulo é de 15°).

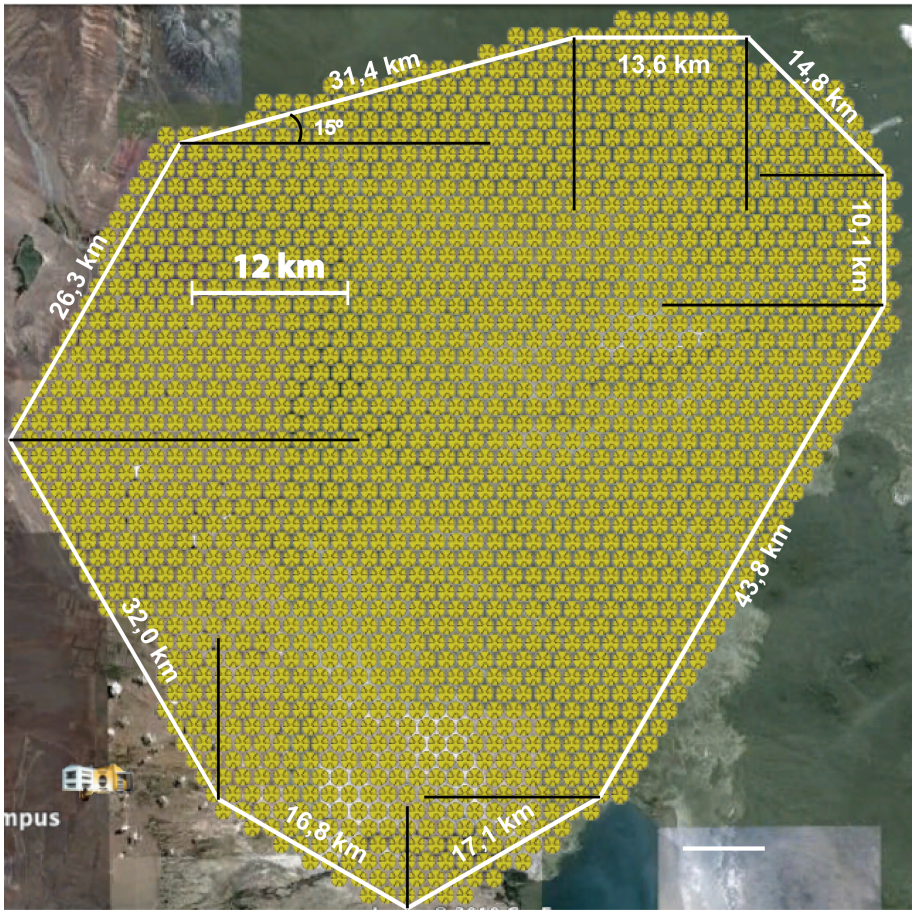


Figura 7: Representação simplificada da distribuição dos tanques no Observatório Pierre Auger. O tamanho e a direcção das fronteiras estão aproximadas para facilitar o cálculo. O tamanho dos tanques não está à escala.

3.2) 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.

3.3) 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?

3.4) 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?
3.5) No caso da alínea anterior, o que é que aconteceria aos acontecimentos de energia mais baixa? O que é que determina a energia mínima que um observatório é capaz de detectar?
3.6) 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?

4) 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 chuveiro. [Depois de escolhido um acontecimento, seguindo até ao final da página em que a informação desse acontecimento é mostrada, encontras o link "Download ASCII data for event". São estes os dados de que necessitas nesta secção].
Pretende-se compreender como é que, partindo desta informação (obtida detectando ao nível do chão uma ínfima fracção das partículas do chuveiro) podemos chegar às características da partícula primária que interagiu no topo da atmosfera, dando origem ao chuveiro. Concretamente, vamos tentar descobrir como podemos, a partir das medições feitas por cada tanque, estimar a energia e a direcção da partícula primária.
Um chuveiro 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 chuveiro propaga-se como uma espécie de disco de partículas (a frente do chuveiro) movendo-se na atmosfera quase à velocidade da luz no vazio. O ponto de impacto do chuveiro é a posição em que a partícula primária atingiria o chão se não houvesse desenvolvimento de um chuveiro (é, pois, a intersecção do eixo do chuveiro com o chão). A direcção de chegada dos chuveiros é usualmente descrita em coordenadas esféricas. Os ângulos relevantes são θ, o ângulo do eixo do chuveiro com a vertical no ponto de impacto no chão, e ϕ, o ângulo entre a projecção horizontal do eixo do chuveiro e uma direcção de referência. Esquematicamente:

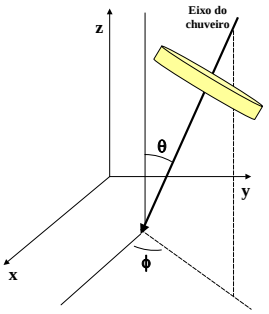


Figura 8: Esquema do desenvolvimento de um chuveiro num dado instante, com definição das coordenadas usuais.

Questões:

4.1) Que quantidades são directamente medidas por cada um dos tanques de Cherenkov que participa na detecção de um chuveiro? Que outras informações são dadas a respeito destes tanques?
[**Nota:** utiliza os ficheiros ASCII acessíveis a partir da página dos dados públicos do modo acima indicado]
4.2) Olhando para a representação esquemática da chegada de chuveiros com direcções diferentes ao detector (figura 9), qual das quantidades medidas contém informação sobre a inclinação do chuveiro? Usando a ferramenta de selecção de chuveiros existente na página, podes começar por comparar chuveiros bastante inclinados com chuveiros quase verticais (θ próximo de 0).

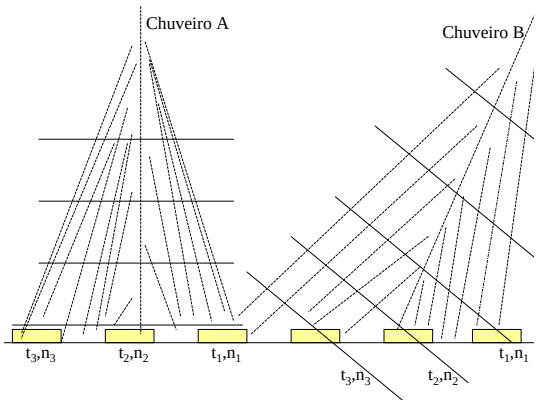


Figura 9: Representação esquemática de chuveiros com inclinações diferentes atingindo os tanques de Auger.

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.
Faz as contas para os seguintes eventos, 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. Compara com o ângulo θ que é dado na página dos dados públicos.

Evento	ID1	ID2	Δt (ns)	Dist (m)	$\theta_{\text{calc}}(^\circ)$	$\theta_{\text{dado}}(^\circ)$
8677500						
4796100						

4.3) Para os dois eventos usados acima, faz agora as contas usando as combinações de tanques sugeridas na tabela seguinte. Preenche a tabela. Analisando a imagem que

dá a configuração dos chuveiros no chão (ver página dos dados públicos) comenta os resultados obtidos.
De que outra variável além do tempo depende o cálculo do ângulo θ?

Evento	ID1	ID2	Δt (ns)	Dist (m)	$\theta_{\text{calc}}(^\circ)$	$\theta_{\text{dado}}(^\circ)$
8677500	411	413				
4796100	508	543				

4.4) 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 cho.
Compara os resultados obtidos com os dados na página quantos metros se desviam?
4.5) Olhando para a representação esquemática da chegada de chuveiros ao detector (figuras 9 e 10) quais são as duas características do chuveiro que afectam o número de tanques com sinal no evento. Discute de que modo a variação de cada uma destas características em separado altera o número de tanques com sinal.

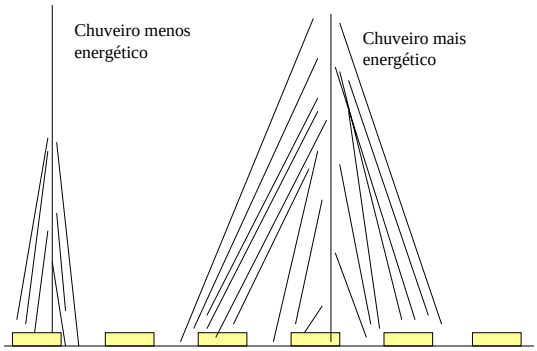


Figura 10: Representação esquemática de chuveiros com energias diferentes e direcções semelhantes atingindo os tanques de Auger.

4.6) Para os 3 chuveiros de maior energia disponíveis na página, vamos agora olhar um pouco para a distribuição lateral da cascata.
Para estes eventos, 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 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.

5) O que nos dizem estes dados sobre os raios cósmicos de energia extrema

Nesta parte final do trabalho vais tentar responder a algumas perguntas genéricas sobre os raios cósmicos de energia extrema medidos por Auger. Vais usar o ficheiro ASCII com informação sobre todos os chuveiros, disponível na página dos dados públicos, para fazer os gráficos que te pareçam mais adequados para responder a essas perguntas.
Em alguns casos estes gráficos vão ser histogramas ou gráficos de frequência de váriáveis: o que fazemos é dividir os valores possíveis de uma variável em intervalos e depois ver quantos acontecimentos "caem" em cada intervalo. Na página de educação de Auger existem instruções detalhadas de como fazer um histograma da energia. Se o conceito não te for familiar, basta seguir o link "How to make an energy histogram".

Questões:

5.1) Considera todos os chuveiros com energias superiores a 3 EeV. De que direcções vêm estes raios cósmicos? São isotrópicos, ou seja, têm a mesma probabilidade de vir de qualquer direcção? Representa graficamente as variáveis θ, $\cos\theta$ e ϕ (número de acontecimentos para cada intervalo de valores da variável).
5.2) Que direcções são essas no céu? Vêm do Sol? Para estudar se vêm do Sol, podes comparar quantos chegam de dia e de noite. 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:** Para passar de coordenadas locais a coordenadas galácitcas, temos que usar também a informaçao temporal. Consulta o texto explicativo na página de educação de Auger.]
5.3) Faz um gráfico com todos os chuveiros para comprovar a relação entre o número de tanques e a energia do chuveiro. Divide a amostra em duas ou três regiões de $\cos\theta$.
5.4) Que energias têm estes raios cósmicos? Faz um histograma da energia. Compara com o espectro de energia dos raios cósmicos que já conheces (ver figura 1) e discute o que observas.
Na zona intermédia, obténs resultados compatíveis com as conclusões da secção 1?
Às energias mais baixas, como explicas a descida do número de eventos detectados quando a energia baixa?
Multiplica o espectro por E^3. Encontra o gráfico publicado por Auger e compara com os teus resultados.
5.5) Considera uma partícula de energia E e carga Z, descrevendo uma trajectória sob acção de um campo magnético B. Esta trajectória projecta-se no plano perpendicular a B como um círculo de raio R. Considerando as forças a que está sujeita a partícula, relaciona estas grandezas [**Nota:** $E^2 = mc^2 + p^2c$, mas como $E >> mc^2$ temos $p \sim E/c$].
Considerando que o campo numa galáxia é da ordem de 1 μGauss, calcula o raio de curvatura para um protão de 10 PeV e para um protão de 10 EeV. E para núcleos de Ferro das mesmas energias?

5.6) Tendo em conta a alínea anterior (e a figura 11), parece-te que os que raios cósmicos detectados em Auger têm origem galáctica, extra-galáctica, ou ambas? No último caso, consegues identificar nos dados um valor de energia em que se possa dar essa transição?

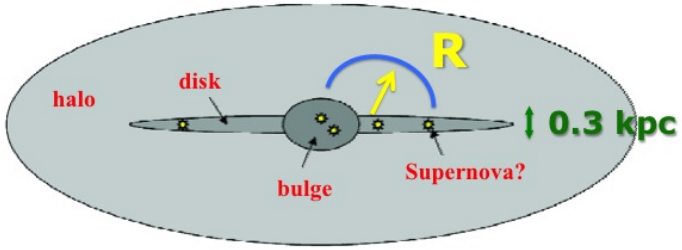


Figura 11: Representação esquemática da nossa galáxia.

5.7) Para um raio cósmico que atravesse o espaço intergaláctico, já não se pode assumir 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 direções 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°.
Assumindo que protões de 10^{20} eV sofrem desvios da ordem de 3° desde a sua Galáxia até à Terra, qual será o desvio sofrido no mesmo percurso por núcleos de ferro da mesma energia? E que energia teriam de ter os núcleos de ferro para que o desvio não fosse superior a 3°?
Procura os resultados publicados pelo Observatório Pierre Auger para as direcções dos chuveiros de mais alta energia – que não se estão nos dados públicos - e observa a concentração na vizinhança da direcção da Galáxia com o Núcleo Activo (AGN) mais próxima de nós (Centaurus A, a cerca de 14×10^6 anos-luz).