

2

Raios Cósmicos

Os raios cósmicos de alta energia são um mistério que têm despertado os cientistas desde a sua descoberta. Eles continuam a ser uma razão para a busca e o aperfeiçoamento na área de física de partículas e astrofísica. O Observatório Pierre Auger, localizado na Argentina se dedica a a procurar respostas para um dos grandes mistérios ainda não resolvidos.

2.1

Considerações Históricas

Questões acerca da radiação tiveram início quando instrumentos de detecção foram capazes de fazer a detecção de cargas elétricas e além disso detectar a matéria eletricamente carregada (ionizada) contida e insulada no ar. Considerou-se que a radioatividade proveniente de minerais era a responsável, mas este seria o caso do efeito ter diminuído com o aumento do peso. Em 1910 (1), Theodore Wulf mediu a ionização nos pés e no topo da Torre Eiffel, que tem cerca de 300 metros de altura. Ele observou que quanto mais perto do topo, maior a quantidade de ionização, fato este causado pela radiação de fundo. Seus resultados não forneciam uma aceitação adequada, assim como os experimentos realizados por cientistas entre 1909 e 1911. Estudando acerca desses experimentos primários, o físico Victor Hess (2), da Universidade de Viena, estudando as fontes de ionização, postulou que a radiação de fundo se originava no próprio céu, e não no solo, como se pensava até então. A procura por raios cósmicos (RC) começou em 1911, quando Hess e dois assistentes voaram em um balão até uma altitude de cerca de 5000 metros a fim de medir a radiação penetrante. Eles descobriram que a ionização tende a aumentar muito rapidamente, tão logo, comece a se aumentar a altitude. Quanto mais se aumenta a altura, mais aumenta a quantidade de radiação, que é muito maior que esta radiação na superfície da Terra. Eles concluíram, portanto, que “a radiação altamente penetrante entra na nossa atmosfera por cima”. Após isto, muitos experimentos foram realizados. Em 1939, Pierre Auger (3), colocou detectores de partículas nos Alpes. Ele observou que mesmo colocando dois detectores separados entre si por muitos metros, as partículas atingiam

cada um dos detectores no mesmo tempo. Pierre Auger havia descoberto os “chuveiros extensivos de ar”, produzidos pela colisão de partículas primárias de alta energia com moléculas de nitrogênio presentes na atmosfera, criando uma cascata sub-atômica de partículas secundárias. Usando a informação obtida pelo chuveiro, ele era capaz de contar o número de partículas que atingiam o nível do solo, estimando que a energia dos primários era da ordem de 10^{15} eV, energia esta, que era maior do que a qualquer energia que pudesse ser produzida por um acelerador de partículas. Em 1953, Bassi, Glark e Rossi (4), no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), demonstraram que em um arranjo ao nível dos detectores seria possível reconstruir a direção de incidência de um chuveiro de ar mediante uma técnica relativa de “timing”. Esta técnica foi utilizada no experimento “Volcano Ranch”, no Novo Mexico, “o primeiro arranjo gigante para a detecção de chuveis extensivos de ar”. Em 1962, um chuveiro foi detectado por este experimento, cuja energia do primário excedia 10^{20} eV (5).

Em 1965, Arno Penzias e Robert Wilson detectaram a primeira radiação cósmica de fundo (CMB) em Nova Jersey, Estados Unidos (6). Esta radiação é um tipo de radiação eletromagnética que permeia o Universo. Ela tem um espectro de corpo negro da ordem de 2,7 K que atinge um pico na radiação microcósmica de fundo da ordem de frequência de 160.2 GHz, correspondente a um comprimento de onda de 1,9mm. Em 1966, Kenneth Greisen (7), Vadim Kuzmin e Georgiy Zatsepin (8), previram um limite neste espectro de raios cósmicos. Eles previram que raios cósmicos com valores de energia superiores a 5×10^{19} eV deveriam interagir com os fótons das CMB. Esse processo seria contínuo até que a energia atingisse um determinado limite. Entretanto, raios cósmicos extragalácticos provenientes de distâncias superiores a algumas centenas de Mpc da Terra, deveriam possuir energias maiores do que esses valores. Esses raios cósmicos são muito raros de serem observados na Terra. O limite é conhecido como mecanismo GZK.

2.2

Descrição

Os Raios Cósmicos (CR) são partículas com energias relativísticas, consistindo na sua maior parte de fótons de alta energia, elétrons, partículas alfa, raios gama e núcleos pesados, que viajam através de galáxias e atingem a atmosfera da Terra constantemente em todas as direções. A energia cinética dos raios cósmicos atinge grandes ordens de magnitude, com um fluxo de raios cósmicos de altíssima energia da ordem de 1 partícula por quilômetro quadrado por ano, para energias acima de 10^{18} eV. A grande variedade de

energias das partículas, reflete a extensa variedade de fontes. Raios cósmicos originados por processos energéticos de explosões solares atingem a maior parte do Universo visível. Os raios cósmicos possuem energias superiores a 10^{20} eV, valores superiores aos 10^{12} e 10^{13} eV produzidos pelos aceleradores de partículas.

2.2.1

Fontes

Conforme foi mencionado anteriormente, uma das questões principais consiste em como os raios cósmicos ultra energéticos são produzidos. Muitas teorias propuseram a construção de modelos para a energia dos raios cósmicos. Esses modelos podem ser divididos no seguinte:

Bottom-up Propõem o uso de modelos de aceleração para arquivar os raios cósmicos mais energéticos (valores acima de 10^{18} eV). Alguns desses modelos são descritos no seguinte:

Aceleração em campos Fortes Estes modelos são baseados na existência de campos eletromagnéticos fortes causados por objetos tais como estrelas de nêutrons ou discos de acreção de buracos negros remanescentes. Em ambos os cenários os campos magnéticos fortes estão presentes. Este campo magnéticos não é constante no tempo, por outro lado, o potencial elétrico forte se desenvolve como consequência da aceleração das partículas. O campo magnético afeta o movimento das partículas, confinadas na direção das ondas, portanto, as partículas são continuamente aceleradas. A limitação na energia é determinada pelo termo de reação na radiação, o qual passa a desempenhar um papel muito importante. A princípio, todas as partículas podem atingir altíssimas energias, não fica claro como pode ser obtida uma lei de potência para o espectro mediante esse mecanismo (seção 2.2.2).

Aceleracao de colisao difusa Em 1949, Fermi (9) desenvolveu um modelo onde partículas atingiam energias extremamente elevadas às custas da energia cinética de colisão com o material. O mecanismo para a aceleração se dá através de espalhamentos sucessivos de partículas através da região de escape do material. Ele demonstrou que a mudança de energia média por contador é positiva e proporcional a energia da partícula. $\Delta E \approx \alpha E$. Após k contagens uma partícula com energia inicial E_0 atingirá uma energia da ordem $E = E_0(1 + \alpha)^k$

Se P_{esc} for a probabilidade por contagem que uma partícula escape, então o número de partículas que sobreviverão com essa energia E será dado por $(N > E) \propto E^{-\gamma}$ onde $\gamma \approx P_{esc}/\alpha$, de forma que tanto P_{esc} quanto α são pequenos.

O índice espectral γ é insensível á geometria do sistema, sendo assim, a aceleração de fermi prevê uma lei de potência para o espectro da energia das partículas (seção 2.2.2). Com este processo de aceleração difusa, nós encontraremos.

Aceleração em eventos catastróficos

Tem como maior exemplo de eventos catastróficos os Gamma Ray Bursts (GRB), que são fontes de luz extremamente brilhantes, emissores de raios gama principalmente durante um curto período de tempo (0.1 - 10 s). Durante este período, eles são os objetos mais brilhantes do Universo. Considerando o fato que muitos deles têm sido observados, sua origem e natureza têm sido objetos de grande especulação. Acredita-se que estes GRB são geradores das colisões que aceleram as partículas, tal como no mecanismo de Fermi.

Top-down Neste caso, os raios cósmicos são também originados com altíssimas energias (acima de 10^{18} eV).

Fontes Exóticas Novas idéias têm sido discutidas para explicar as fontes dos raios cósmicos ultra-energéticos. Neste caso, os raios cósmicos são produzidos com energias iniciais extremamente elevadas. Existem dois possíveis cenários para este modelo. O primeiro, propõem que os raios cósmicos sejam produzidos mediante o decaimento ou aniquilação de partículas supermassivas originadas de um universo primordial. O segundo cenário fornece uma idéia de que existem alguns defeitos topológicos formados durante as transições de fases de um Universo primordial, tal como a produção de uma quebra espontnea de simetria implícita nas Teorias de Grande Unificação (GUT) (10) (11).

2.2.2

Espectro de Energia

A medida do fluxo dos raios cósmicos fornece acima de 11 ordens de magnitude na energia, oscilando com valores entre 10^9 eV e 10^{20} eV. Este fluxo foi determinado por vários experimentos que podem ser muito bem descritos

por uma lei inversa de potência, dada por:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-(\gamma+1)}$$

onde γ é o índice espectral e E é a energia total. Para uma primeira aproximação, o espectro aparece como uma lei de potência com $\gamma \sim 2,0$, mas com uma visão mais restrita, o número de transições aumenta. Na figura 2.1 é mostrado o espectro de energia dos raios cósmicos. A lei de potência torna-se bastante suave para valores de 10^{10} eV e acima de 5×10^{15} eV, onde a região da curva compreendida mostrada na figura é conhecida como “joelho” (knee). A aparência do joelho é descrita como sendo uma mudança na composição do raio cósmico. Alguns experimentos, como o JACEE (19) mostram uma pequena mudança na luz para núcleos pesados, tais como o ferro, em torno dessa região. Uma grande variedade de modelos têm sido propostos para explicar este efeito, o mais popular é chamado de “leaky box”. Neste modelo, assume-se que as partículas ficam livremente permitidas para a difusão no volume galáctico. Quando eles chegam na borda da galáxia, alguns deles apresentam uma probabilidade finita de escape da energia de forma dependente. Isto irá produzir uma mudança na característica na forma do espectro e deve afetar de forma definitiva a sua composição (12). A existência de um joelho pode ser explicada pelo fato de se acreditar que existem diferentes fontes de raios cósmicos na galáxia, tais como a os GRB (13), os quais deveriam incluir uma dependência de massa na posição do joelho. Um segundo joelho aparece em torno da região de 10^{17} eV e supõe-se que ele seja causado por uma aceleração de segunda ordem de Fermi, o qual assume aceleração de raios cósmicos através das interações com remanescentes de supernovas múltiplas (14). Esta extensão de processo de aceleração é capaz de acelerar partículas até energias superiores a ordem de 10^{18} eV, onde este limite pode ser explicado pelo segundo joelho. Um endurecimento do espectro para valores da energia acima da energia de 10^{18} eV é chamado “tornozelo” (“ankle”). Neste, assume-se que a região do tornozelo é onde os raios cósmicos extragalácticos começam a dominar (modelo proposto por Hillas (15)).

Acredita-se que os raios cósmicos com energias superiores a 10^{18} eV que atingem a Terra são produzidos na nossa galáxia (Via Láctea), provavelmente em supernovas remanescentes. Mas, ainda não existem conhecimentos suficientes acerca das fontes exatas dos raios cósmicos ultra-energéticos. Estes raios cósmicos ultra energéticos, correspondem aos raios cósmicos da região do tornozelo, conforme mostrado na figura 2.2. Existe uma controvérsia nesta faixa do espectro e ela está relacionada com a radiação microcósmica de fundo

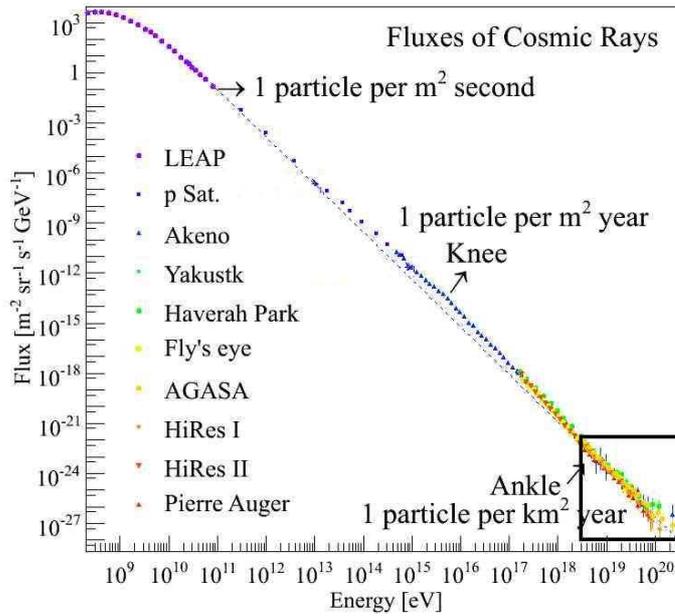


Figura 2.1: O espectro dos raios cósmicos é mostrado não-dependente da temperatura como uma lei de potência. É apresentado um resumo das medidas obtidas por diferentes experimentos. A energia na região destacada é a região de interesse para o Auger. Agradeço a Miguel Mostafá por ter fornecido este gráfico.

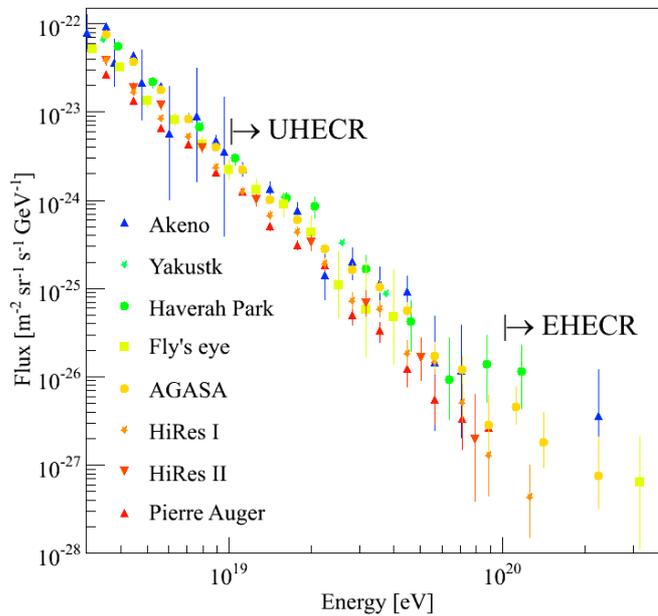


Figura 2.2: O espectro de raios cósmicos acima de 10^{18} . Correspondente a região destacada na figura 2.1. Os raios cósmicos com energias acima de 10^{20} são conhecidos como raios cósmicos extremamente energéticos (EHECR).

(CMB). Por causa desta interação, os raios cósmicos com energias superiores às determinadas pelo mecanismo GZK raramente podem ser observados na Terra. Tanto o experimento Hilles (16) quanto o AGASA (17) prevêem uma continuação de um espectro mais suave. Espera-se que o Observatório Pierre Auger seja capaz de resolver essa controvérsia.

2.2.3

Composição Química

Uma das mudanças nos espectros dos raios cósmicos é a medida da composição da massa do seu primário. A composição química dos raios cósmicos é função da energia. Para baixas energias dos raios cósmicos, a composição química tem sido medida usando balões e satélites. Medidas têm mostrado que os elementos abundantes nos raios cósmicos são comparados a aqueles que aparecem no Sistema Solar em diferentes formas. Os dados coletados sugerem que se aproxime da região do joelho do espectro de energia dos raios cósmicos, tal como mostrado na figura 2.1, a composição é dominada por partículas pesadas, tais como o ferro, enquanto outros elementos aparecem em diferentes taxas de mudança da composição. Alguns experimentos, tais como o RUNJOB (18), mostra algumas composições na faixa de energia compreendida entre 10^{13} e 10^{15} eV. Jacee (19), por outro lado, sugere um aumento considerável na composição partindo de valores desde 10^{14} eV. Devido ao baixo fluxo de raios cósmicos ultra-energéticos, as observações diretas do primário são impossíveis na faixa de 10^{14} eV, enquanto a informação obtida no nível mais fundamental, usa parâmetros de partículas secundárias de raios cósmicos que atingem a Terra. Tal fato, será mostrado com mais detalhes no Capítulo 3. Estes parâmetros podem ser divididos em duas categorias. O primeiro deles está relacionado a constituição de múons no chuveiro em conjunção com uma segunda componente, que pode ser um elétron ou um fluxo de luz Cherenkov (20). O outro método atenta para o fato de se inferir a informação através da profundidade máxima do chuveiro (X_{max}), que fornece um valor do peso em unidade de densidade (21),(22), usando a propagação lateral ou transversal do chuveiro (23), (24), (25). Para ambos os métodos, a acurácia da massa da partícula primária está submetida a muitas incertezas devido às flutuações chuveiro-a-chuveiro, modelos hadrônicos e outros fatores.

Muitos experimentos têm usado esses métodos para medir a composição química dos raios cósmicos de alta energia. Na figura 2.3 e mostrado o X_{max} em função da energia. Estes dados sugerem que para energias acima de 10^{17} eV, a composição muda progressivamente do núcleo mais pesado para o mais leve. Por outro lado, existe um consenso sobre o fato da transição dos elementos mais

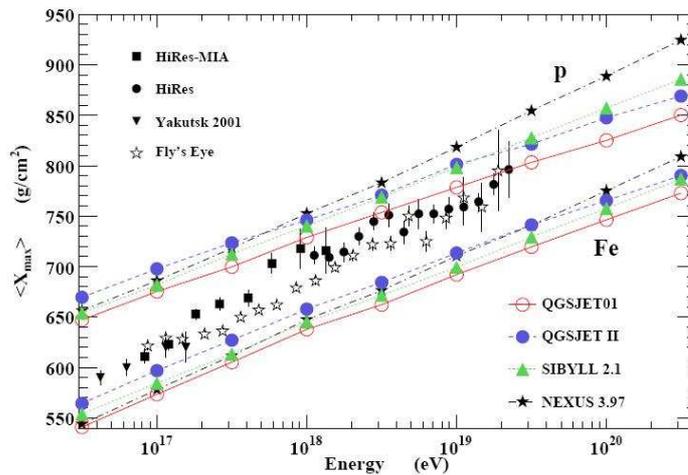


Figura 2.3: X_{max} como função da energia obtido a partir de diferentes experimentos. As linhas indicam as previsões para modelos hadrônicos de alta energia QGSJET01, Sibyll 2.1 e Nexus 3.97 (26)

pesados para os mais leves ocorrer em todos os experimentos, eles discordam na faixa e na velocidade dessa transição.

É certo que existe uma grande incerteza acerca do conhecimento da composição química dos raios cósmicos para energias superiores a 10^{18} eV. Esta ausência de conhecimento impõe várias limitações no desenvolvimento de modelos teóricos que possam explicar essa origem. O Observatório Pierre Auger nos permitirá realizar esse tipo de análise na busca por algumas respostas.

2.2.4 Propagação

Os raios cósmicos não viajam aleatoriamente através do espaço, eles estão sujeitos a várias interações e suas trajetórias podem ser curvadas por campos magnéticos ou afetados pela radiação cósmica de fundo, entre outros fenômenos. O resultados desses efeitos irá caracterizar a observação do espectro de energia e as direções de chegada na Terra. As consequências dessa observação podem ser enumeradas como:

- Considera-se que as fontes dos raios cósmicos de alta energia seja extragalácticas, portanto, suas trajetórias serão defletidas por campos magnéticos extragalácticos, logo o espectro de energia observado na Terra exhibe o corte do mecanismo GZK. O fluxo de partículas que será observado acima da energia correspondente ao limite para a interação com a radiação cósmica de fundo é muito baixo. Esta interação deveria

implicar em uma distância limite para fontes de partículas extremamente energéticas na ordem de 100 Mpc pela Terra.

- Por outro lado, se as fontes dos raios cósmicos ultra-energéticos estiverem próximas, então as partículas carregadas irão atravessar os campos magnéticos do meio interestrelar sem grandes deflexões. Sendo assim, isto pode fazer com que suas fontes sejam comparadas com a exata localização de objetos conhecidos no céu, através da região de chegada dos raios cósmicos, embora não exista um conhecimento exato acerca das fontes nessa faixa de distância.

2.3

Medindo Raios Cósmicos

A faixa de energia coberta pelos raios cósmicos é bastante extensa, sendo assim, as diferentes técnicas devem ser implementadas para fazer as medidas corretamente. Elas, normalmente, estão separadas em duas categorias dependente do fluxo: medida direta e indireta. Nas seções seguintes estas técnicas serão explicadas.

2.3.1

Medida Direta

Abaixo de 10^{14} eV, o fluxo de raios cósmicos é alto o suficiente para se realizar a medição pelo método direto. As técnicas aqui implementadas são similares às técnicas usadas nos experimentos de altas energias. Normalmente, estes detectores são enviados a atmosfera em balões atmosféricos ou colocados em órbita por satélites. O mais importante experimento de balões atmosféricos é o JACEE (Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment) (1990) (27). Ele mediu o espectro de raios cósmicos com energias acima de 10^{12} eV além das interações nucleon-nucleon. A idéia principal foi medir a partícula primária carregada e o número total de energia detectada pelo calorímetro, usando detectores do tipo câmara de emulsão ou contadores Cherenkov.

Uma das conclusões relevantes desse tipo de experimento foi as correções que são necessárias realizar para as interações atmosféricas. Para resolver esses problemas, alguns experimentos foram realizados fora da atmosfera. Um desses experimentos foi o “Chicago Egg” (1985) (28). Ele consistiu em um detector Cherenkov disposto em um espaço aleatório. Um outro experimento foi o “Ultra Heavy Nuclei Experiment” (UHN, 1988), que foi colocado em voo no satélite HEAO-3 (High Energy Astronomy Observatory) (29).

Para valores acima de 10^{15} eV, o fluxo dos raios cósmicos decresce consideravelmente, tornando impossível a medida de forma direta, por esta razão outras técnicas são implementadas.

2.3.2

Medidas Indiretas

Devido ao baixo fluxo, raios cósmicos de alta energia são difíceis de serem medidos. Por isso, partículas secundárias produzidas pela interação dos raios cósmicos com a terra são usadas para detectá-los. Estas cascatas de partículas são “panquecas” de partículas carregadas, que se estendem a centenas de metros de alcance, e se movem pela atmosfera próximas a velocidade da luz por muitos quilômetros.

Duas técnicas podem ser usadas para medir as cascatas. A primeira faz uso de um grande arranjo, detectando partículas diretamente pela medida do número de partículas secundárias do chuveiro que chegam ao solo. Este arranjo pode usar um contador cintilador ou detectores de água Cherenkov (WCD). O segundo método é baseado na emissão de luz atmosférica. Enquanto os chuveiros de ar atravessam a atmosfera, eles ionizam as partículas de Nitrogênio do ar através do caminho de luz produzido de duas formas distintas: radiação Cherenkov e cintiladores de Nitrogênio. A luz é capturada por telescópios que apontam para o céu em noites claras.

Pierre Auger e seu grupo foram os primeiros a usar o o tempo de coincidência nos circuitos em um arranjo de contadores, os quais fornecem informações sobre o chuveiro, mas não estão aptos a fornecer a direção do chuveiro. Esta limitação foi resolvida quando o grupo do MIT (1953) (4) criou um método para reconstruir a direção de chegada através da medida dos tempos de chegada nos cintiladores separados por alguns metros. Mais tarde, Harvard Agassiz Station (1954-1957) (60) usaram um arranjo de cintiladores para fazer a medida do espectro. Desde então, detectores de superfície têm sido usados em experimentos de todo o mundo, tais como: Volcano Ranch (EUA) (5), Haverah Park (Reino Unido) (30) e AGASA (Japão) (31) e se tornaram bastante importantes.

Detectores de Superfície

Um das principais características dos chuveiros extensivos de ar é que eles produzem uma enorme quantidade de partículas quando atingem o solo. Para se beneficiar dessas vantagens, os grandes arranjos que foram criados para detectar essas partículas, usam cintiladores ou contadores Cherenkov sobre essas grandes áreas. A área necessária para esses grandes arranjos é

inversamente proporcional ao fluxo dos raios cósmicos, isto é, quanto menor o fluxo, maior será a área necessária. Para raios cósmicos ultra-energéticos (UHECR), o arranjo deve cobrir muitas centenas de quilômetros quadrados. Com esses arranjos é possível estimar a direção de chegada dos chuueiros e a energia do raio cósmico primário. Medindo a função de distribuição lateral dos chuueiros pela simples amostra das componentes das partículas carregadas que atingem o solo. A função de distribuição lateral é consideravelmente ampla, por isso os detectores podem ser dispostos longe um do outro. Por outro lado, a acurácia da determinação angular é compromissada entre o espaçamento dos detectores e uma necessidade de mostrar o chuueiro de frente para a região de chegada da distribuição temporal.

Outra característica importante é levar em consideração localização do arranjo, por causa que o mínimo da energia é uma função da profundidade atmosférica do arranjo, desde que chuueiros com baixa energia não consigam penetrar na atmosfera. A profundidade máxima do chuueiro é da ordem de $X_{max} \sim 800g/cm^2$ ao nível do mar. Isto serve para garantir que a localização do arranjo deve atender a profundidade do chuueiro.

Este tipo de arranjo é barato, de baixo custo, estável, e não depende fortemente das condições climáticas e atende a largos períodos de tempo, com 100% de aproveitamento de ciclo útil. Entretanto, depende de modelos hadrônicos para estimar a energia do chuueiro e outras características.

Detectores de Fluorescência

Outra característica dos chuueiros extensivos de ar é quando partículas entram na atmosfera da Terra com a velocidade da luz excitando as moléculas de nitrogênio contidas no ar, ionizando as partículas que irão emitir “luz atmosférica” na forma de fótons de fluorescência. Por outro lado, o rendimento de fluorescência por partícula é pequeno, para chuueiros com energia do primário acima de 10^{18} eV, um número suficiente de fótons no máximo do chuueiro é produzido, enquanto é capturado pelos detectores. A luz é emitida isotropicamente ao longo da trajetória do chuueiro e é coletada por detectores em uma sequencia temporal. Com essa sequencia é possível determinar a distância para o eixo do chuueiro e o detector. Uma vez determinada a geometria, o número de fótons recebidos pode ser calculado. Usando técnicas de reconstrução, a energia e a direção do chuueiro podem ser obtidas.

A vantagem desse tipo de detector é que eles não precisam de grandes áreas, tais como os SD, mas ao contrário, são bem mais sensíveis às condições climáticas e ao ruído. O ruído é produzido por luz de fundo que chega através da luz espalhada, radiação difusa pela galáxia, luz espalhada pelo sol por matéria

interplanetária, luz atmosférica fotoquímica, relâmpagos e poluição feita pelo homem. Sendo assim, a tomada de dados, fica sujeita a noites claras.

2.3.3

Arranjos Gigantes de Chuveiros Extensivos de Ar

O primeiro arranjo gigante foi *Volcano Ranch* no Novo Mexico em 1961 (?). Consistia em 19 cintiladores plásticos, cada um deles contendo uma PMT. Estava instalado em uma área de $8,1 \text{ km}^2$. Sua primeira unidade havia sido desenvolvida para fazer a medida da densidade de muons. *Volcano Ranch* forneceu a primeira medida do espectro de energia acima de 10^{18} eV e fez as primeiras previsões da distribuição da direção de chegada. Mediu o primeiro raio cósmicos com energia acima de 10^{20} eV .

O experimento *Haverah Park* no Reino Unido (30) (1977), era um arranjo com detectores de água Cherenkov, que cobria uma área de 12 km^2 , distribuído em quatro detectores centrais e seis sub-arranjos sobre 2 km do centro. Eles observaram as maiores e melhores medidas de eventos com o primário acima de 10^{20} eV .

Sidney university Ground Air-Shower Recorder (SUGAR) (32) operou próximo a cidade de Narrabi, no nordeste de New South Vales, na Austrália, por mais de uma década entre 1968 e 1979, tão logo, se transformou no gigante do hemisfério sul¹. Ele continha 54 estações dispostas em 60 km^2 . Cada estação consistia de um par de cintiladores capaz de medir muons com $E \sim 0,75 \text{ sec } \theta \text{ GeV}$. O tempo relativo de chegada em cada detector foi obtido por um sinal de um feixe que atingiu o arranjo. Infelizmente, o espaçamento entre os detectores precisava ser muito grande, logo, as estatísticas eram pequenas.

O detector *Fly's Eye* em Utah, EUA (1999) (33), foi atualmente o primeiro experimento a usar a técnica de fluorescência. Ele consistia de dois detectores FEI e FEII separados por uma distância de $3,4 \text{ km}$. FEI consistia em 67 espelhos de $1,6 \text{ metros}$ de diâmetro com 880 PMT voltadas para o céu. FEII consistia de 36 espelhos e 464 PMT voltadas para metade do céu na direção de FEI.

O *Fly's Eye* traçava o desenvolvimento das cascatas na atmosfera mediante a observação da intensidade e da sequência da luz de fluorescência emitida pelo chuveiro. Este arranjo forneceu importantes resultados para o estudo dos raios cósmicos. Seu sucessor *HiRes* (1998) teve dez vezes mais sensibilidade para observar e investigar a região de 10^{19} eV . Consistiu em duas localidades distintas para a instalação dos detectores dispostos entre si a uma distância de $12,5 \text{ km}$, mas implementou uma redução na abertura de cada PMT, contando

¹antes do Observatório Pierre Auger

e interagindo no diâmetro dos espelhos, resultando num aumento de uma área de detecção efetiva, dando mais sensibilidade.

O *Akeno Giant Air Shower Array* (AGASA) (31). O maior arranjo já construído antes do Observatório Pierre Auger. Cobrindo uma área de 100 km² localizado em Akeno, no Japão (1990). Consistia de 111 cintiladores de detecção, cada um ocupando uma área de 2,2 metros quadrados, com um espaçamento entre detectores de 1 km. Detectores de muons de variados tamanhos foram instalados nos 27 detectores. Cada detector grava um tempo de chegada e a densidade de todos os sinais incidentes e monitoram a performance do detector. A seção de choque da colisão inelástica próton-ar, o espectro de energia e o espectro da energia de muons dos chuviscos de ar horizontais de 3×10^{14} a 3×10^{18} eV foram medidos por esse arranjo.

2.3.4

Questões em Aberto

As fontes de raios cósmicos ultra energéticos, processos de aceleração e propagação, assim como composição da massa, são incertos ainda. Aqui, algumas limitações dos diferentes aspectos dos raios cósmicos são apresentados. Vamos começar com os processos de aceleração e fontes de energia. Conforme foi mencionado na seção anterior, uma energia deve ser suficientemente grande para ser capaz de acelerar partículas acima de 10²⁰ eV e os campos magnéticos de propagação têm que ser suficientemente fracos para que as perdas de síncrotron não representem ganhos de energia. Acredita-se que raios cósmicos com energias de 10¹⁵ eV sejam energizados por mecanismos de colisões difusas de aceleração, como remanescentes de supernovas em muitos sítios. A altíssimas energias, acredita-se que as partículas sejam aceleradas por interações com múltiplas supernovas, tais como aquelas que se movem através do meio interestrelar. Entretanto, não existe evidência direta desse fenômeno. Mostrou-se que o máximo da energia é dado por:

$$E = kZBR\beta$$

onde B é o campo magnético necessário para manter as partículas na região de aceleração, R é o tamanho da região de aceleração, $\beta = v/c$ é a velocidade da colisão e Z é a carga da partícula. Outras opções para este fenômeno foram propostas, tais como os núcleos de galáxias ativas (AGN) ou os gamma ray burst (GRB) (13). Mas nesta procura, nós nos depararemos com um outro problema, a distância. Após o descobrimento da radiação microcósmica de fundo, Greisen (7), Zatsepin e Kuz'min (8) preveram a existência de um

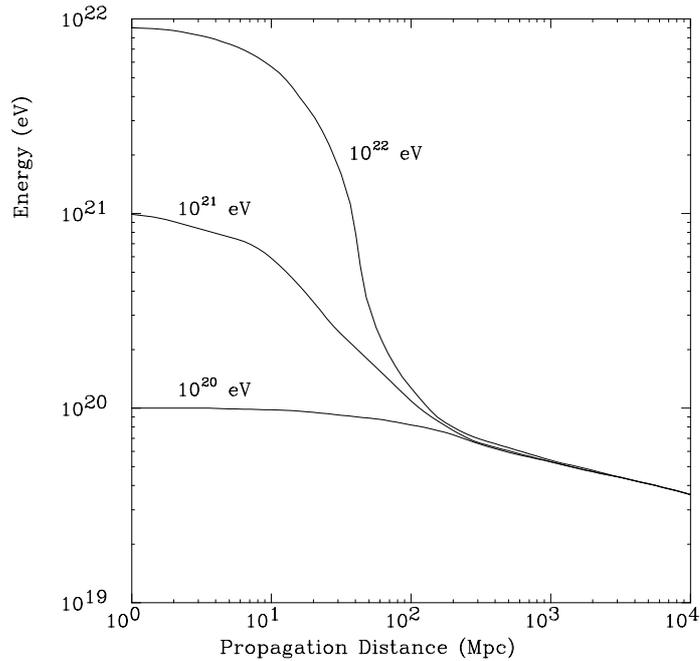
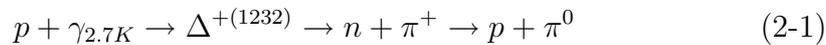


Figura 2.4: Perda de energia de um próton através da interação com a radiação cósmica de fundo para diferentes valores iniciais da energia (35).

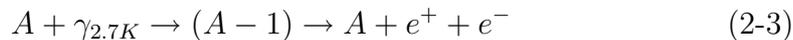
limite superior no espectro de energia do fóton na ordem de 5×10^{19} eV para a foto-produção de pión na microonda de fundo (2,7 K) através da ressonância Δ^+ , que é chamado corte GZK.



Outro perda de energia ocorre na produção de pares (Bethe-Heitler process) que causa uma perda de energia no espectro de ordem 8×10^{18} eV.



Todo núcleo pesado primeiramente sofre sucessivas desintegrações por espalhamento com a radiação de fundo de 2,7 K e os fótons infravermelhos com a subsequente produção de pares.



onde A é a massa do núcleo. A figura 2.4 mostra a perda de energia de um próton.

Isto implica que os fótons primários com energias maiores que 10^{20} eV podem atingir duramente a Terra devido a perda de energia obtida aqui (considere que a fonte esteja a pelo menos 100 Mpc da atmosfera da Terra).

Um outro problema para a detecção dos raios cósmicos envolve as suas direcções de chegada e distribuição. Prótons de altíssima energia não sofrem perda significativa de energia durante sua propagação através dos limites da

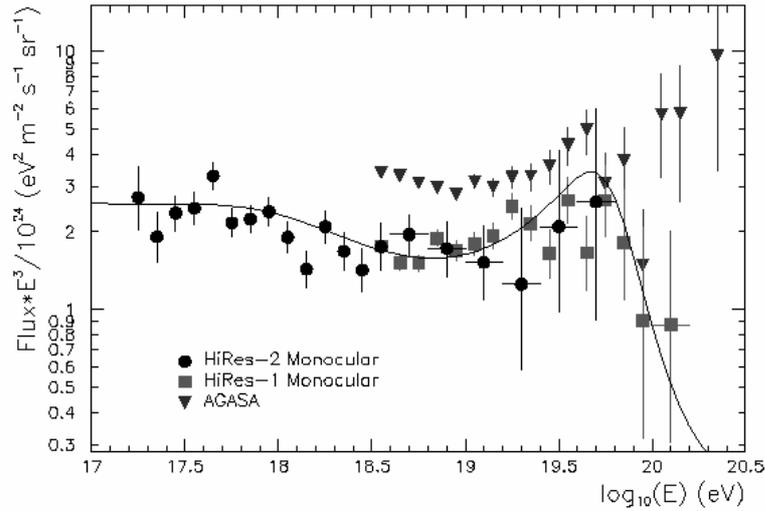


Figura 2.5: Espectro do AGASA (triângulos) e HiRes (monocular) (HiRes-1 quadrado e HiRes-2 círculos). (16).

galáxia, mas eles são defletidos pelo campo magnético da galáxia. O ângulo de deflexão é tipicamente $\alpha \approx d \times r_m$ com $r_m = E / ZeB$ sendo o raio de Larmor e d a distância entre as partículas que viajam através da galáxia, logo a anisotropia deve ser esperada nas vizinhanças das fontes da galáxia com energias superiores a 10^{18} eV, considerando que as partículas na região primária sejam prótons. Para grandes distâncias, a informação da direção será perdida.

Mas, desde que a atenuação do comprimento dos prótons e núcleos abaixo do GZK excedam valores da ordem de 1000Mpc, espera-se que a direção de chegada dos raios cósmicos seja isotrópica, desde que suas origens sejam extragalácticas. Se as energias que excedem o mecanismo de corte GZK, a distância para a fonte fica limitada a algumas centenas de Mpc e a correlação com suas direções de chegada com as fontes locais deve ser esperada, mas mesmo assim, não existe ainda um conhecimento certero acerca das fontes.

O espectro de energia dos raios cósmicos tem sido medido por muitos experimentos. O resultado mais controverso resultou da comparação entre os espectros de AGASA e HiRes. O espectro reportado por AGASA (17) mostra a não-existência do corte de GZK, enquanto o espectro obtido por HiRes (16) é consistente com os limites estabelecidos pelo mecanismo de corte GZK. A figura 2.5 mostra o fluxo de raios cósmicos como $J(E)$ por E^3 para mostrar as mudanças na forma do espectro.