

# Raios Cósmicos

Em 1910, o físico holandês Theodor Wulf utilizando um eletroscópio no alto da torre Eiffel, notou que a radiação no alto era mais forte que no solo, mas não seguiu com outros experimentos. Entre 1911 e 1913, o balonista e físico austríaco Viktor Franz Hess, em um vôo de balão detectou através de um eletroscópio associado a um detector de ionização um aumento dos efeitos ionizantes, concluindo e propondo que esta radiação ionizante só poderia estar vindo de fora do planeta Terra. Em 1926, em uma apresentação na Universidade de Leeds, o físico estadunidense Robert Millikan usou o termo "raios cósmicos" pela primeira vez.

Hoje, após décadas de estudo sabemos que os raios cósmicos são partículas carregadas que caem na terra, elas geralmente são prótons ou núcleos pesados. Essas partículas são aceleradas pelos diversos campos magnéticos presentes no espaço e chegam aqui com energias variáveis, podendo passar até de  $10^{19}eV$ .

Quando estas partículas colidem na atmosfera do planeta, a partícula se quebra gerando partículas secundárias que por sua vez se quebram e geram mais partículas e essas partículas compartilham da energia de sua partícula primária. Esse efeito em cascata é chamado chuva atmosférica. O que é detectado são essas partículas que derivam da primária e é através da propriedade delas carregarem a sua energia que podemos entender.

Um dos desafios atuais da área é encontrar a origem dos raios cósmicos de alta energia, já que sua energia é muito alta e não temos campos magnéticos fortes suficientes para acelerá-los ou prendê-los em nossa galáxia, o que nos deixa explícito que estas partículas possuem origem extragaláticas. Atualmente existem dois modelos que tentam explicar a aceleração dos raios cósmicos, o Top-down e o Bottom-up.

O modelo Top-down diz que os raios cósmicos são gerados pelo decaimento ou pela aniquilação de partículas supermassivas.

Já o modelo Bottom-up diz que partículas de baixa energia atingem altas energias através da aceleração difusiva ou aceleração direta. Aceleração difusiva é gerada através da aceleração de Fermi que diz que as partículas ganham energia como consequência da interação com campos elétricos, induzidos pelos campos magnéticos presentes nas nuvens de gás no meio interestelar que estão em movimento. A aceleração direta é a aceleração que decorre da interação dos raios cósmicos com objetos astrofísicos que podem gerar campos magnéticos muito intensos, como buracos negros.

Sobre o espectro de energia, ele pode ser descrito pela seguinte lei de potência:

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

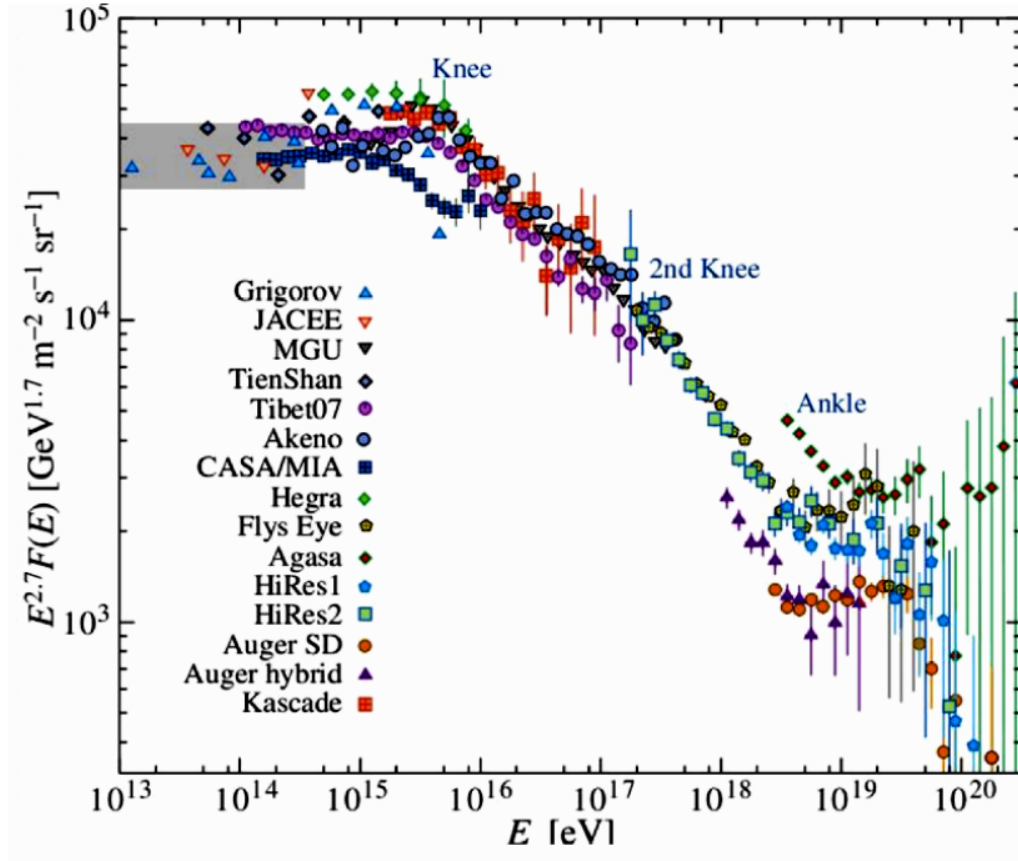


Figura 1: Espectro de energia

Observando a figura 1 pode-se notar que o  $\gamma$  sofre mudanças em algumas faixas de energia, essas mudanças são chamadas respectivamente de "primeiro joelho", "segundo joelho" e "tornozelo". Essas mudanças ainda são questões em aberto, porém, já existem algumas explicações que tentam respondê-las, para o "primeiro joelho" temos a explicação baseada no auxílio de um grupo específico de remanescentes de supernovas. Para o "segundo joelho" a explicação mais provável seria a de que o "segundo joelho" é decorrente de uma transição dos raios cósmicos da galáxia para raios cósmicos extragaláticos. "O tornozelo" seria explicado pelo modelo chamado Dip Model, este modelo descreve que prótons ao se propagarem por distâncias cosmológicas, perderiam energia devido à produção de pares e essa produção de pares é consequência da interação com radiação cósmica de fundo.

Tendo isso em vista, o estudo das direções de chegada dos raios cósmicos se torna relevante para se obter melhor entendimento de sua origem, além dos estudos do espectro de energia e composição da massa dos raios cósmicos. E para efetuar os estudos e obter resultados sobre a anisotropia de larga-escala é usado a análise de Rayleigh em ascensão reta junto a reconstrução do dipolo em três dimensões.

A análise de Rayleigh se dá por uma expansão em série de Fourier de uma coordenada angular  $\phi$  de um conjunto com  $N$  eventos:

$$\frac{dN}{d\phi} = N \left[ 1 + \sum_k a_k \cos(k\phi) + \sum_k b_k \sin(k\phi) \right] \quad (2)$$

Para a análise de Rayleigh em ascensão reta temos:

Os coeficientes harmônicos:

$$a_\alpha = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N w_i \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$b_\alpha = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N w_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

A amplitude  $r_\alpha$  e a fase  $\phi_\alpha$ :

$$r_\alpha = \sqrt{a_\alpha^2 + b_\alpha^2} \quad \tan \phi_\alpha = \frac{b_\alpha}{a_\alpha} \quad (5)$$

A incerteza estatística para esta amplitude e fase é de  $\sqrt{2/N}$  e isto corresponde a um nível de confiança de 68%.

Para a reconstrução do dipolo em três dimensões temos as componentes do dipolo e a direção nas coordenadas equatoriais( $\alpha_d, \delta_d$ ) por:

$$d_\perp \approx \frac{r_\alpha}{\langle \cos \delta \rangle} \quad d_z \approx \frac{b_\phi}{\cos \ell_{obs} \langle \sin \theta \rangle} \quad \alpha_d = \phi_\alpha \quad \tan \delta_d = \frac{d_z}{d_\perp} \quad (6)$$

Em um estudo recente da colaboração Pierre Auger, utilizando a análise de Rayleigh e as equações (6), comparando seus resultados com as previsões concluíram que as direções de anisotropia e magnitudes encontradas colaboram com a hipótese da origem extragaláctica dos raios cósmicos de mais alta energia.

## Observatório Pierre Auger

O observatório reside no oeste da Argentina e tem como foco o estudo dos raios cósmicos de grandes energias. Seu nome vem do físico de mesmo nome Pierre Auger que foi considerado como responsável pela descoberta dos chuviros atmosféricos e dedicou sua carreira a três campos da física experimental sendo eles a física atômica, física nuclear e a física de raios cósmicos.

O observatório tem como seu diferencial o detector híbrido, se trata de dois tipos de detectores independentes, temos o detector de superfície que é um tanque totalmente escuro por dentro, com capacidade de 12000L, quando as partículas energizadas passam pela água no tanque com uma velocidade maior que a da luz, as ondas de choque eletromagnéticas geram uma luz, isto é chamado de efeito Cherenkov e esta luz é medida por tubos fotomultiplicadores e esses tubos geram sinais elétricos. O observatório possui 1660 detectores de superfície espalhados em uma área de  $3000km^2$ .

Como segundo tipo de detector o observatório possui o detector de fluorescência que se baseia na interação das partículas com o nitrogênio atmosférico, esta interação gera uma luz ultravioleta e esse efeito é chamado de fluorescência. O detector enxerga a trilha de fluorescência do chuviro e com o auxílio de espelhos de foco o detector consegue observar os chuviros se desenvolvendo a uma distância de até 15km. Este método de detecção pode detectar a energia total de um chuviro que se aproxima da energia da partícula primária, porém, o detector de fluorescência funciona somente em noites claras e sem lua. Unindo os dois tipos de detecção temos dados de alta qualidade, produzindo resultados com maior precisão através de comparações entre os dois tipos de detecção.

A colaboração recentemente disponibilizou 10% de seus dados e códigos de análise usados pelos mesmos, além de, disponibilizar também 100% dos dados meteorológicos e meteorológicos espaciais coletados até 31 de dezembro de 2020. Isso tudo para fins educacionais e de pesquisa científica.