

Métodos de Busca de Fontes Pontuais de Raios Cósmicos Ultra-Energéticos

Aluno: Rafael Alves Batista

Orientador: Ernesto Kemp

Co-orientador: Rogerio Menezes de Almeida

1 Raios Cósmicos

1.1 Introdução

A Terra é constantemente bombardeada por inúmeras partículas provenientes do cosmos. Radiação eletromagnética de várias frequências, elétrons, neutrinos, núcleos atômicos e outras partículas incidem na atmosfera em um intervalo extenso de energias.[1] Através do estudo desta radiação pode-se inferir as propriedades de ambientes astrofísicos e dos corpos celestes neles imersos. Dentre todas estas partículas aquelas que se distinguem pela energia relativamente alta (10^8 eV)¹. Estas partículas são chamadas raios cósmicos, segundo a definição de Greisen[2]. O intuito do estudo dos raios cósmicos é a compreensão de sua origem, natureza e propagação, através da busca e caracterização de fontes, composição química, propagação, e mecanismos de aceleração.

1.2 Panorama Histórico

Em 1900 Elster e Geitel, e independentemente Wilson, notaram que mesmo sem a existência de uma fonte de radiação ionizante, corpos eletrizados descarregavam-se ao entrar em contato com o ar, indicando a presença de íons livres neste. Isto motivou investigações subseqüentes, e em 1909 a possível origem extraterrestre desses íons era calorosamente debatida no meio científico. Foi proposto que a origem destes íons poderia ser o sol, ou até mesmo o manto da Terra. Para verificar esta proposta, foram conduzidos experimentos subaquáticos e em balões.[6]

Em 1912 o físico austríaco Victor Hess (figura 1) verificou que o poder de ionização aumentava com a altitude, indicando que a radiação ionizante detectada teria origem extraterrestre[5], resultado que viria a ser confirmado em 1913-1914 por W. Kolhörster[1], com experimentos em balões. Milikan, realizou o mesmo estudo na água, verificando que o poder da radiação ionizante decrescia na água, com a profundidade, e em 1925, sentiu-se seguro para afirmar que *“uma evidência indubitável da existência destes raios etérios duros de origem cósmica penetrando na atmosfera uniformemente em todas as direções.”*[7]

Por fim, em 1927, Skobeltzyn obteve um registro fotográfico da trajetória da radiação cósmica enquanto realizava um experimento com trajetórias de raios γ em uma câmara de nuvens²(figura 2).

Em 1933, Arthur Compton demonstrou que os raios cósmicos eram influenciados pela latitude magnética da Terra, demonstrando que estes poderiam ser compostos de partículas eletricamente carregadas. Em 1938, os físicos Pierre Auger e Roland Maze observaram que partículas

¹Tal corte em energia é feito a fim de excluir desta classificação as partículas geradas em reações nucleares ordinárias no interior de estrelas

²A câmara de nuvens, inventada por Wilson em 1900, permite visualizar trajetórias de partículas, que deixam um rastro ao atravessar vapor de água condensado.



Figura 1: Victor Hess no balão, em um de seus experimentos; figura extraída de [5].

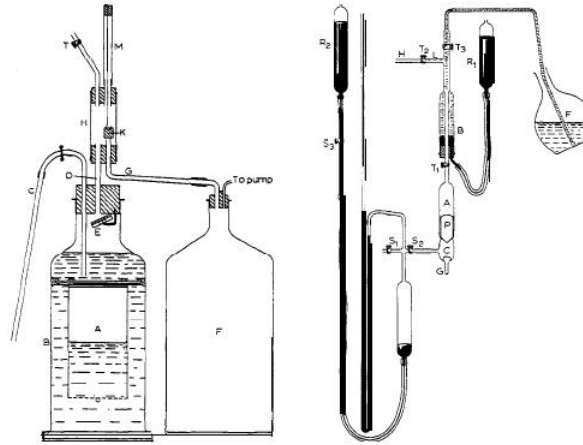


Figura 2: Montagem experimental da câmara de Wilson, ou câmara de nuvens.

de raios cósmicos separadas por até 20 metros chegavam em coincidência em contadores Geiger-Müller³, indicando que estas eram partículas secundárias de uma fonte comum. Segundo relatos de Nagano e Watson[9] tal fenômeno fora observado em 1934 por Bruno Rossi. Assim surgiu a idéia de chuviros atmosféricos extenso, ou EAS (do inglês *extensive air showers*), mostrado na figura 3.

Em 1965, Penzias e Wilson observaram a existência da radiação cósmica de fundo em microondas. No ano seguinte Greisen, Zatsepin e Kuz'min estudaram o possível efeito da radiação cósmica na propagação de raios cósmicos ultra-energéticos⁴. Para energias superiores a 10^{19} eV, a interação dos raios cósmicos com os fótons da radiação cósmica de fundo induziria a uma perda de energia. A reação para fotoprodução de píons é dada por:



³Um contador Geiger-Müller é um tipo de detector de partículas que mede radiação ionizante.

⁴Entende-se por raios cósmicos ultra-energéticos (UHECRs) partículas com energia superior a 10^{18} eV.

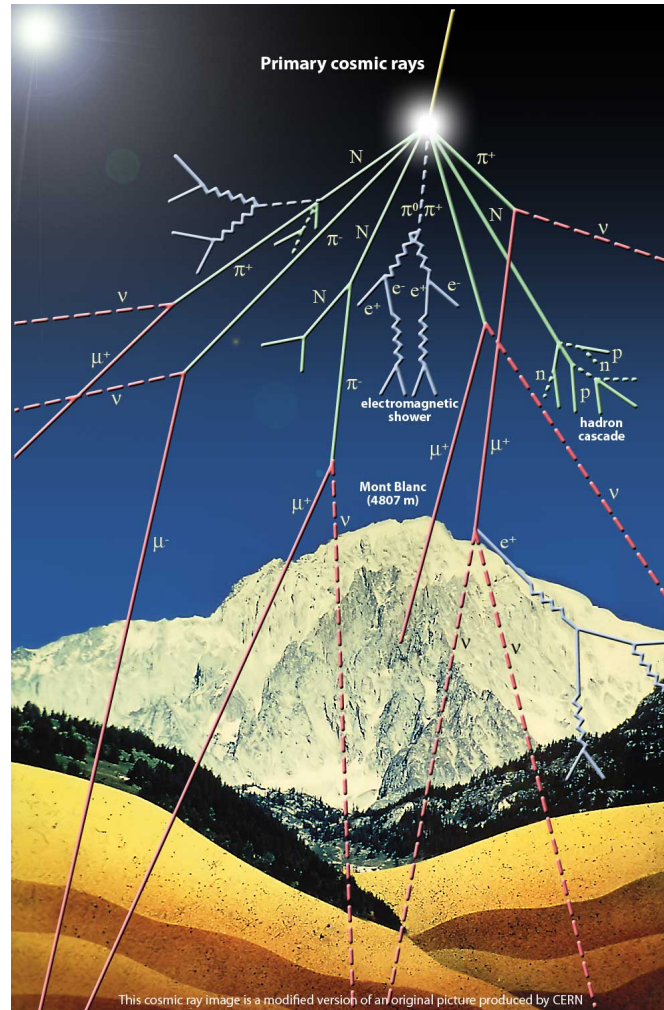


Figura 3: EAS, gerado pela interação de um raio cósmico com a atmosfera terrestre.

Isto impôs um corte no espectro de energia, de tal forma que partículas com energia superior a 6×10^{19} eV não seriam capazes de atingir a Terra. Entretanto, o experimento de Volcano Ranch, em 1962, detectou um evento com energia de 1×10^{20} , superior à energia prevista pelo corte GZK. Mais de 40 anos depois da previsão do corte GZK, já foram detectadas mais de 4 dezenas de eventos acima de 6×10^{19} .

1.3 Espectro de Energia

A Figura 4 mostra o espectro de energias da radiação cósmica, com seus respectivos fluxos (número de partículas por unidade de área, por unidade de tempo).

Tal fluxo, em função da energia, segue uma lei de potência, dada por:

$$\frac{dI}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (2)$$

onde I é o número de partículas, E é a energia e α é uma quantidade conhecida como índice espectral. O valor do índice espectral α não é constante, mudando de -2.7 para -3.1 à energia

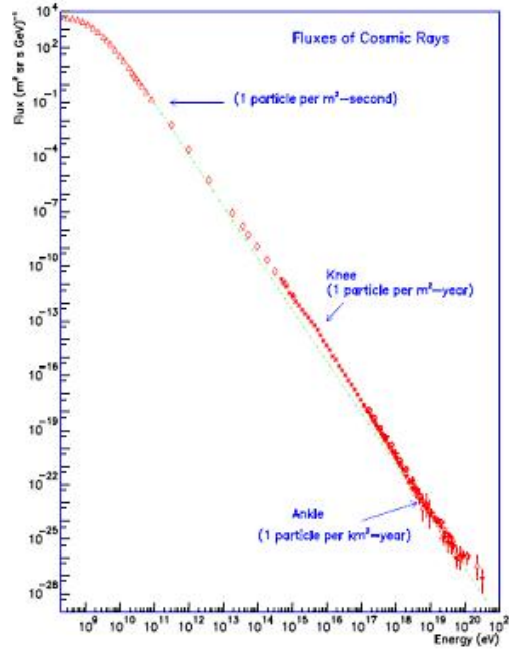


Figura 4: Espectro de energia dos raios cósmicos a partir de uma compilação de Gaisser, Cronin e Swordy [3]; figura extraída de [4].

de $E \approx 3 \times 10^{15}$ eV, região que é conhecida como *joelho*. O índice espectral retorna ao valor inicial (-2.7), numa região conhecida como *tornozelo*, que ocorre a $E \approx 3 \times 10^{18}$ eV.[5]

1.4 Aceleração

A aceleração de partículas com energias acima de 10^{12} eV e abaixo da região do “joelho” (3×10^{15}) está supostamente associada a explosões de supernovas. Após a explosão de uma supernova, a onda de choque gerada se difunde pelo meio interestelar como uma onda comprimida. Se a frente de onda tiver velocidade U , as partículas que se movem pelo meio interestelar a altas velocidades podem cruzar a frente de onda e serem aceleradas. No referencial do meio interestelar, o meio perturbado pela onda de choque ganha uma velocidade $3/4 U$. As partículas cruzando a frente de onda interagem com as irregularidades do campo magnético e são desviadas, ganhando energia, conforme mostrado na figura 5.

Este processo é conhecido como mecanismo de Fermi de primeira ordem[5]. O ganho de energia é dado por:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4 \Delta v}{3 c} = \frac{4 \frac{3}{4} U}{3 c} = \frac{U}{c} \quad (3)$$

Se a partícula passar por este processo várias vezes ela pode escapar da frente de onda e alcançar as energias medidas.

Objetos astrofísicos que podem ser considerados potenciais candidatos a fontes extragalácticas de UHECRs devem satisfazer algumas condições, apresentadas no trabalho de Berezhinsky[10]. A primeira destas condições, relacionada à energia dos raios cósmicos produzidos, faz com que núcleos galácticos ativos (AGN, do inglês *active galactic nuclei*) e *gamma-ray bursts* (GRBs)

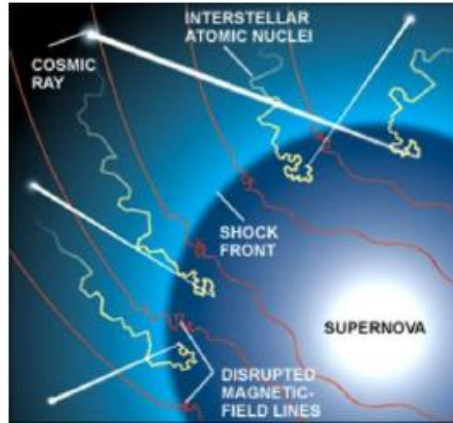


Figura 5: Um possível processo de aceleração de raios cósmicos se dá através de ondas de choque de supernova.

sejam considerados potenciais fontes. A aceleração de partículas por ondas de choque relativísticas em AGNs e GRBs são processos plausíveis para a aceleração de raios cósmicos a altíssimas energias.

2 O Observatório Pierre Auger

O Observatório de Raios Cósmicos Pierre Auger, concebido com o objetivo de estudar os raios cósmicos de altíssimas energias, coleta dados estavelmente desde janeiro de 2004, e seu propósito é aumentar significativamente a estatística de eventos de altíssimas energias, cujo fluxo é da ordem de 1 partícula por quilômetro quadrado por século. O baixo fluxo de partículas nesta faixa de energia explica as dimensões do observatório, que cobre uma área de aproximadamente 3000 km^2 . Os detectores de superfície consistem em 1600 tanques, igualmente espaçados em uma rede de triângulos equiláteros de 1,5 km de lado. Cada um dos tanques, mostrado na figura 2 são detectores Cherenkov, preenchidos por aproximadamente 12000 litros de água ultra-pura, demineralizada, com 3 fotomultiplicadoras na parte superior, que registram a luz produzida pela radiação Cherenkov⁵. Quando vários tanques disparam aproximadamente simultaneamente, indicando a passagem de um EAS, cada tanque envia dados via ondas de rádio para uma central onde é obtida a geometria do chuveiro através da diferença de tempo entre o disparo de cada tanque. Assim, é possível reconstruir o chuveiro e inferir a energia da partícula primária geradora do chuveiro. Os 4 detectores de fluorescência são compostos por 6 telescópios cada, com espelhos esféricos com fotomultiplicadoras em sua superfície focal, como mostrado na figura 2, cobrindo uma área de 180° em elevação e 30° em azimute. Quando as partículas de raios cósmicos interagem com o nitrogênio da atmosfera, ocorre a de-excitação⁶ do nitrogênio, gerando luz de fluorescência, capturadas pelos detectores de fluorescência [4]. A figura 7 mostra o mapa do sítio sul do PAO, com os detectores de fluorescência e superfície.

⁵Quando a luz atravessa um meio com velocidade superior à velocidade da luz neste meio, é emitida radiação Cherenkov.

⁶As moléculas de nitrogênio sofrem de-excitação tanto por colisões com outras moléculas como por emissão de fótons (que compõem a luz de fluorescência).



Figura 6: Um dos 1600 detectores de superfície (à esquerda) e um dos espelhos do detector de fluorescência (à direita).

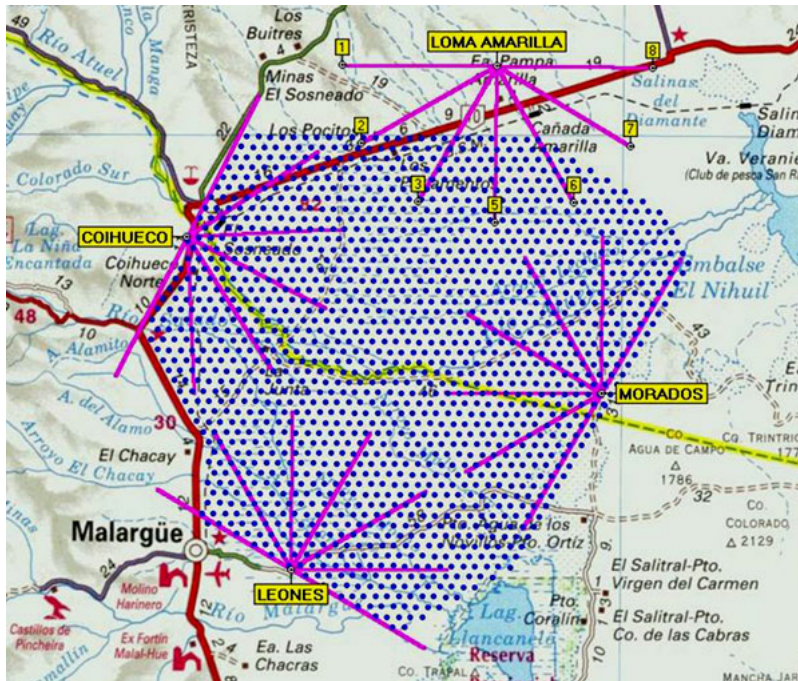


Figura 7: Região na Argentina ocupada pelo conjunto de detectores do Observatório Pierre Auger; os pontos azuis representam as posições ocupadas pelos detectores Cherenkov, e as linhas violetas indicam o ângulo de observação de cada telescópio de fluorescência.

3 Mapas de cobertura

No estudo de anisotropias é importante determinar a maneira como o observatório detecta os raios cósmicos, isto é, determinar a aceitação do detector. A probabilidade de detecção de partículas varia de acordo com suas direções de chegada, existindo, portanto, regiões “privilegiadas” do céu onde se detecta mais partículas. O mapa de cobertura é o mapa mais isotrópico possível levando em conta a aceitação do detector. Para determinar o fundo existem duas técnicas amplamente utilizadas: a *shuffling* e o semi-analítico.

3.1 Shuffling

O *shuffling* baseia-se no embaralhamento de algumas variáveis dos eventos, de forma a preservar algumas distribuições. Por exemplo, pode-se dividir os eventos em intervalos de ângulo zenital ϕ e embaralhar independentemente os UTC (Universal Time Coordinates) e JD (Julian Day) dentro destes intervalos, de modo que a distribuição em ϕ seja preservada.[11]

3.2 Semi-Analítico

O método semi-analítico baseia-se em um ajuste da distribuição em ângulo zenital θ dos dados reais. O mapa de cobertura é então obtido a partir de integrações numéricas incluindo considerações acerca da aceitação, tais como variações sazonais, etc. A integração numérica efetuada é:

$$C(\delta) = \int_0^{24h} a_{tot}(\alpha, \delta) d\alpha \quad (4)$$

onde $a_{tot}(\alpha, \delta)$ é a cobertura em função da ascensão reta α e declinação δ , e $C(\delta)$ é a cobertura em função da declinação.

4 Resultados Atingidos

A primeira etapa do projeto consistiu em um estudo teórico de física de raios cósmicos e técnicas de detecção empregadas pelo observatório Pierre Auger. Além disso, o aluno iniciou o desenvolvimento de programas computacionais para familiarização com alguns recursos, tais como o *software* científico “ROOT”, produzido pelo CERN.[12] O aluno também está utilizando o *software* “Coverage & Anisotropy Toolkit”, desenvolvido por membros da colaboração do PAO, para estudo de anisotropias.

5 Próximos Passos

Uma vez que o aluno esteja familiarizado com as ferramentas computacionais necessárias, ele iniciará o desenvolvimento de programas para simular alguns padrões de anisotropias, e buscar por um possível excesso de UHECRs. Posteriormente, ele utilizará tais ferramentas em dados coletados pelo PAO, estimando significância estatística do possível excesso de raios cósmicos, e estimando um limite superior para o fluxo de UHECRs.

Referências

- [1] W.M. Mello Jr., *A Observação e a Distribuição Lateral de Chuveiros Atmosféricos Extensos Pelo Detector de Fluorescência*. Dissertação de Mestrado. 2003.
- [2] Greisen, *Cosmic ray showers*, Ann. Rev. Nucl. Sci. 10, 63 (1960).
- [3] J.W. Cronin, T.K. Gaisser e S.P. Swordy, Scientific American, 276 (1997) 32.

- [4] The Pierre Auger Collaboration, *The Pierre Auger Observatory Design Report*, 2nd ed., (1997). <http://www.auger.org/>
- [5] D. Borla Tridon, *Study of Anisotropies in Arrival Directions of High Energy Cosmic Rays*. Dissertação de mestrado. 2006.
- [6] V. Cirkel-Bartelt, *History of Astroparticle Physics and its Components*, Living Rev. Relativity, 11, (2008).
- [7] R.A. Millikan & G.H. Cameron, *High Frequency Rays of Cosmic Origin III. Measurements in Snow-Fed Lakes at High Altitudes*, Phys. Rev., 28, 851868, (1926).
- [8] J.W. Cronin, *Cosmic rays: the most energetic particles in the universe*, Reviews of Modern Physics, Vol. 71, No. 2, Centenary 1999.
- [9] M. Nagano & A. Watson, *Observations and implications of the ultrahigh-energy cosmic rays*, Rev. Mod. Phys. 72, 689 (2000).
- [10] V. Berezhinsky et al. 2006 Phys. Rev. D 74 043005
- [11] B. R. Orfeuill, J. Hamilton, B. Revenu. *Comparison of the Coverage Estimation Methods in the Presence of Anisotropies and Acceptance Effects*. GAP Note 2005-083.
- [12] root.cern.ch
- [13] P. Sokolsky. *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [14] The Pierre Auger Collaboration, *Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory*. Nucl. Instrum. Meth. 2004.