

Busca por anisotropias direcionais nos eventos mais energéticos do Observatório Pierre Auger

Projeto de Iniciação Científica

Resumo

A determinação da origem dos raios cósmicos de ultra-alta energia ($E > 1 \text{ EeV}$) é uma importante e difícil tarefa na Física de Astropartículas. Por um lado, a tais energias o fluxo observado na Terra é baixíssimo, sendo menor que 1 por km^2 por ano. Faz-se necessário um experimento com grande área de coleção para obtenção de uma estatística suficiente de eventos. O Observatório Pierre Auger é o maior experimento do mundo para o estudo de raios cósmicos de ultra-alta energia, com um arranjo híbrido de detectores que cobre uma área de 3.000 km^2 nos pampas argentinos. Por outro lado, mesmo a maior parte dos raios cósmicos detectados sofre ainda muitas deflexões magnéticas no decorrer de suas trajetórias — nas galáxias onde foram produzidos, no meio intergaláctico e na Via-Láctea — para embaralhar suas direções de chegada. Entretanto, para energias acima de cerca de 40 EeV , as deflexões magnéticas são suficientemente pequenas para poder-se extrair das distribuições de direções de chegada informações cruciais sobre as fontes dos raios cósmicos.

Neste trabalho de iniciação científica, utilizaremos os dados do Observatório Pierre Auger para estudar as distribuições de direções de chegada (de latitude e longitude galáctica) dos eventos com energias acima de $\sim 40 \text{ EeV}$. Faremos, então, estudos buscando por sinais de anisotropia (excessos ou déficits de eventos numa dada direção do céu) através de diferentes métodos.

Palavras-chave: Raios Cósmicos, Anisotropia, Observatório Pierre Auger.

Área e sub-área de conhecimento: Física (Física de Partículas Elementares e Campos).

I. INTRODUÇÃO

Os Raios Cósmicos de Ultra-Alta Energia (RCUAEs) são usualmente definidos como partículas de origem cósmica que atingem a atmosfera da Terra com energias maiores que 10^{18} eV , ou 1 EeV [1]. O fluxo de RCUAEs é muito baixo e cai abruptamente com a energia, por exemplo: para energias $\gtrsim 5 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ diminui por um fator de ~ 400 para cada década de energia, ou na forma de uma lei de potência: $d\Phi \sim E^{-2,6} dE$. Apenas 1 partícula por km^2 por ano chega ao topo da atmosfera com $E > 10^{18} \text{ eV}$ e o fluxo é reduzido ainda a menos de uma partícula por km^2 por século para $E > 10^{20} \text{ eV}$. Fica clara a necessidade de um observatório gigante com detectores espalhados por uma vasta área para uma bem-sucedida medida dos RCUAEs. Diferentemente de fótons ou de neutrinos, raios cósmicos são núcleos atômicos e têm carga elétrica, sendo defletidos nos campos magnéticos durante sua propagação pelo espaço intergaláctico e interestelar. No entanto, esta deflexão é inversamente proporcional à energia da partícula. Elas acarretam perdas de informação sobre a direção de chegada a baixas energias, mas abrem uma oportunidade única a energias $\gtrsim 4 \cdot 10^{19} \text{ eV}$, a de se fazer astronomia com raios cósmicos, ou seja, identificar suas fontes.

Localizado na Argentina, na cidade de Malargüe (69°W , 35°S , 1.400 m), o Observatório Pierre Auger [2] é um detector constituído por várias técnicas experimentais com a finalidade de captar os sinais produzidos pelos RCUAEs. O observatório constitui-se por um arranjo de superfície com mais de 1.660 tanques Cherenkov (vide figura 1, à esquerda) cobrindo uma área maior que 3.000 km^2 dispostos numa grade triangular de lado 1.500 m , por 27 telescópios (vide figura 1, à direita) que captam a luz de fluorescência gerada na atmosfera pela excitação e ionização das moléculas do nitrogênio, por antenas de rádio e de micro-ondas e por detectores de múons de cintiladores plásticos.

II. METODOLOGIA

Há cerca de 10 anos, a colaboração do Observatório Pierre Auger reportou evidências de anisotropia na distribuição de direções de chegada dos RCUAEs [3] [4]. Nestes estudos, para energias acima de 55 EeV , os eventos têm possível correlação com as direções de Galáxias com Núcleos Ativos (GNAs) em nossa vizinhança cósmica — Centauro A (NGC 5128) é a radiogaláxia mais próxima, a cerca de $3,8 \text{ Mpc}$ de distância da Via-Láctea. A partir de uma busca exploratória para minimizar a probabilidade que a correlação resultasse de flutuações de um fundo isotrópico foram obtidos o limiar de energia ($E \geq 5.5 \times 10^{19} \text{ eV}$), a separação angular máxima ($\theta \leq 3,1^\circ$) e a máxima distância das GNAs ($d \leq 75 \text{ Mpc}$). E, com os eventos seguintes, estabeleceu-se com um nível de confiança de 99%, a rejeição da hipótese do fluxo ser isotrópico. Na figura 2, à esquerda, vemos o mapa, em

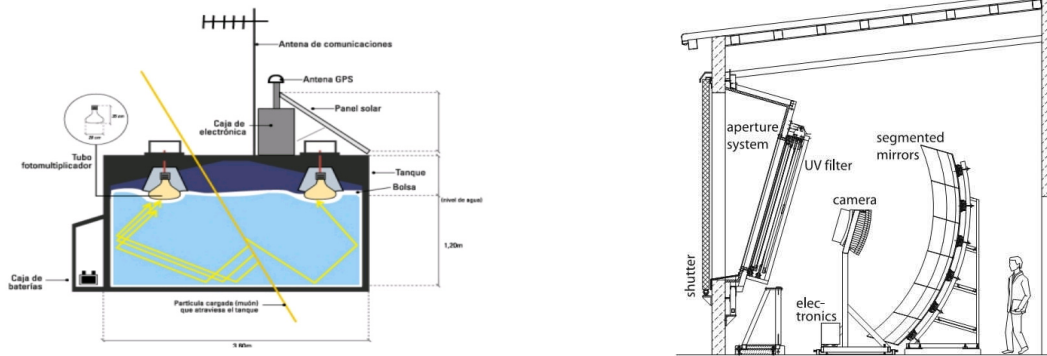


Figura 1: À esquerda: detector Cherenkov com seus componentes (uma partícula secundária junto com os fótons emitidos é representada na figura). À direita: esquema de um telescópio do detector de fluorescência com seus componentes.

coordenadas galácticas, dos eventos observados (pontos pretos) e das GNAs (círculos azuis, onde a cor mais escura indica maior exposição relativa do observatório). O maior excesso ocorre na vizinhança da radiogaláxia Centauro A (próxima às coordenadas -60° de longitude e 30° de latitude galácticas). Para este conjunto de dados, mostramos, à direita da figura 2, o número de eventos correlacionados (pontos pretos) em função do número total de eventos ordenados no tempo, as faixas coloridas correspondentes aos intervalos de confiança e o corte correspondente ao fluxo isotrópico (linha vermelha). Note que a correlação está acima do corte esperado para o fluxo isotrópico em pelo menos 95% de nível de confiança.

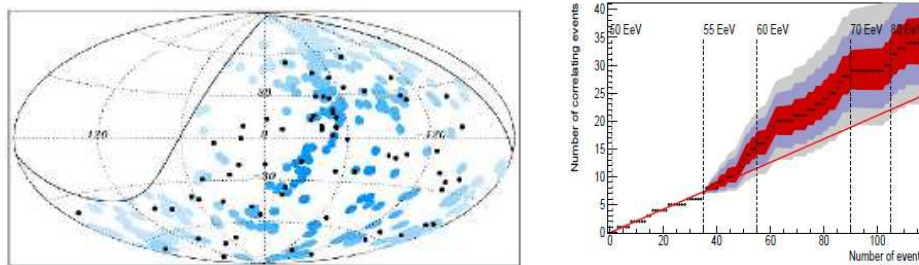


Figura 2: À esquerda: mapa, em coordenadas galácticas, da correlação dos eventos observados pelo observatório Auger e a posição dos GNAs; à direita: evolução do fator de correlação.

No entanto, resultados mais recentes da colaboração, com uma estatística maior de eventos, não vieram a confirmar a hipótese de anisotropia [5]. A análise efetivada é a da correlação cruzada e consiste em contar dentro de uma determinada separação angular o número de pares formados entre eventos de raios cósmicos e objetos de um catálogo de fontes. Para encontrar um excesso, compara-se o número de pares com a expectativa de uma simulação com distribuição isotrópica. Foram analisados vários limiares de energia ($40 \text{ EeV} \leq E_{lim} \leq 80 \text{ EeV}$) e escalas angulares ($1^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$). Para as fontes dos catálogos pesquisados [6] [7] [8] foram impostos cortes de distância máxima, podendo variar de 10 Mpc até 200 Mpc em passos de 10 Mpc. Alguns destes resultados estão apresentados na figura 3. Note que, para o gráfico da direita, os dados de separação angular até Centauro A (histograma em preto) se desviam muito pouco, em geral com um nível de confiança menor que 2σ , da distribuição esperada para isotropia.

Desta forma, mais estudos explorando-se esta e outras técnicas são necessários. A partir de uma base de dados¹ de eventos com reconstrução completa dos chuviscos atmosféricos, selecionaremos os parâmetros de interesse, tais como: a energia do primário e a direção de chegada em coordenadas (latitude e longitude) galácticas. Faremos, então, mapas de eventos com energias acima de dados limiares em coordenadas galácticas, como os mapas ilustrados nas figuras 2 e 3. Em seguida, selecionaremos os eventos dentro de dadas janelas angulares centradas nas GNAs mais próximas e contaremos o número de eventos ali encontrados. Finalmente, simularemos vários mapas de eventos com distribuição isotrópica e contaremos quantos destes mapas possuem um número de eventos menores que o obtido experimentalmente — esta quantidade é um indicador da anisotropia.

Outra técnica que vamos explorar é a da contagem das áreas obtidas a partir de trincas de eventos que formam triângulos

¹Os dados da colaboração Auger estão disponíveis aos seus membros, como é o caso do orientador do projeto.

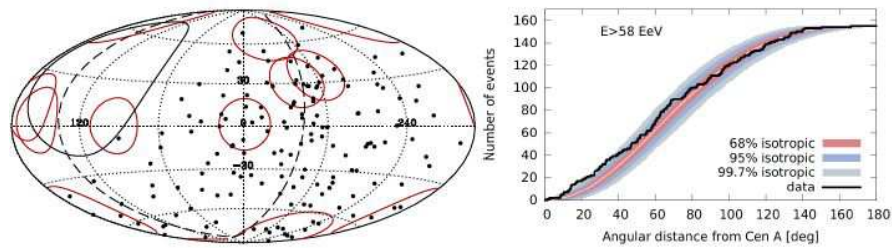


Figura 3: À esquerda: mapa em coordenadas galácticas mostrando os eventos (pontos pretos) com $E > 58$ EeV juntamente com as GNAs mais brilhantes ($> 10^{44}$ erg/s) e mais próximas que 130 Mpc (centradas nos círculos vermelhos de 18° de raio). À direita: número acumulado de eventos ao redor da rádiogaláxia Centauro A, para o limiar de energia $E_{lim} = 58$ EeV, explorando toda a faixa angular indicada no gráfico.

na esfera galáctica. A partir dos mapas simulados anteriormente, faremos as distribuições das áreas dos triângulos simulados e dos obtidos experimentalmente. Caso uma região do céu contenha um excesso de eventos, eles estarão mais próximos e produzirão triângulos de áreas menores.

III. OBJETIVOS E METAS

A atividade principal do projeto será a leitura e a análise de dados do Observatório Pierre Auger com o objetivo de realizarem-se buscas por sinais de anisotropias direcionais. Para atingir este objetivo, as metas a seguir deverão ser alcançadas pelo estudante:

1. Estudar Linux e programação em C e C++ neste sistema operacional;
2. Instalar e aprender a utilizar o pacote de análise de dados ROOT [9];
3. Ler os dados do Observatório Pierre Auger, obtendo parâmetros como as energias e as direções de chegada dos eventos;
4. Montar os mapas, em coordenadas galácticas, de eventos com energias acima de dados limiares para a comparação com a direção das GNAs mais próximas;
5. Estudar o método de Monte Carlo e simular diversos mapas de eventos em conformidade com a distribuição isotrópica (esperada a partir da exposição do observatório);
6. Contar os mapas simulados cujo número de eventos dentro das janelas angulares é menor que o obtido experimentalmente;
7. Aprender a calcular áreas na superfície esférica e desenvolver o método para as combinações de trincas de eventos.
8. Aplicar testes estatísticos para verificar a hipótese de isotopia ou de anisotropia;

É importante ressaltar que o aluno entrou em contato com o orientador e já vem trabalhando há vários meses no futuro projeto de PDPD. Várias das metas citadas acima ele já cumpriu de forma eficiente e rápida, demonstrando a sua aptidão em realizar as atividades do projeto.

E ademais das atividades de pesquisa já citadas, o aluno participará de reuniões periódicas do Grupo de Raios Cósmicos (GRC) com o orientador e outros alunos do grupo em que serão discutidos aspectos técnicos (teóricos ou experimentais) das pesquisas em Física de Astropartículas. Temos também como metas as apresentações de seus resultados em encontros nacionais e/ou internacionais da área, bem como no Simpósio de Iniciação Científica da UFABC.

IV. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

O cronograma para 10 meses de atividades a serem realizadas no decorrer do presente projeto resume-se às seguintes etapas:

- Instalação e utilização do sistema operacional Linux, da linguagem de programação C++ e do software ROOT (1 mês);
- Análises de dados de energia e de parâmetros angulares: produção de histogramas e ajustes de funções (1 mês);

- Estudos do método de Monte Carlo e acerca da exposição do Observatório Pierre Auger (1 mês);
- Simulação de vários conjuntos de eventos ($\sim 10^3$ mapas) com distribuição isotrópica (1 mês);
- Elaboração do relatório parcial (1 mês);
- Estudo e seleção de fontes nos catálogos de GNAs (1 mês);
- Aplicação de métodos estatísticos para a comparação dos dados simulados com os experimentais (1 mês);
- Método das áreas e comparação com os dados experimentais (2 meses);
- Elaboração do relatório final (1 mês).

V. CONCLUSÃO

Os RCUAEs constituem um dos grandes problemas científicos da atualidade: sua existência e seus mecanismos de produção permanecem como mistérios a serem elucidados. São importantes fontes de informação para a astrofísica e para a física de partículas, permitindo testar modelos físicos em condições extremas, muito além das que pode-se reproduzir em laboratório.

Neste projeto de iniciação científica, apresentamos, como proposta de atividades de pesquisa, o estudo de anisotropias direcionais nos dados de RCUAEs obtidos pelo Observatório Pierre Auger. Investigaremos as possíveis correlações entre as direções dos eventos e as GNAs (ou outros objetos astrofísicos) nas proximidades da Via-Láctea.

Estes estudos fornecerão a base adequada para o estudante interessado em prosseguir as pesquisas na área. Aproveitando-nos dos vários anos de experiência profissional do orientador nesta área de pesquisa, bem como de sua participação no Observatório Pierre Auger, temos plena capacidade de realizar com êxito a orientação proposta no âmbito do programa Pesquisando Desde o Primeiro Dia (PDPD) da UFABC.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] M. Nagano and A. A. Watson, *Rev. of Modern Phys.*, **Vol. 72**, No. 3, July (2000) 689.
- [2] The Pierre Auger Collaboration, *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. **A 798** (2015) 172-213.
- [3] J. Abraham *et al.*[Pierre Auger Collaboration], *Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects*, *Science* **318** 5852 (2007) 938.
- [4] J. Abraham *et al.*[Pierre Auger Collaboration], *Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei*, *Astropart. Phys.* **29**(2008) 188.
- [5] J. Aublin for the Pierre Auger Collaboration, *Arrival directions of the highest-energy cosmic rays detected with the Pierre Auger Observatory*, Proc. of 34th ICRC (2015); arXiv:1509.03732v1 [astro-ph.HE]
- [6] W.H. Baumgartner *et al.*, *Astrophys. J. Supp.* **207** (2013) 19.
- [7] J.P. Huchra *et al.*, *Astrophys. J. Supp.* **199** (2012) 26.
- [8] S. van Velzen *et al.*, *Astron. Astrophys.* **544** (2012) A18.
- [9] <http://root.cern.ch/root>