

Título em Português: Fontes locais de raios cósmicos ultra energéticos

Título em Inglês: Local sources of ultra high energectic cosmic rays

Autor: Guilherme Leite Bruzão

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Luiz Vitor de Souza Filho

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física das Partículas Elementares e Campos

Agência Financiadora: CNPq - PIBIC

Fontes locais de raios cósmicos ultra energéticos

Guilherme Leite Bruzão
Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho
Universidade de São Paulo
guilhermelbruzao@usp.br

Objetivos

Neste trabalho, buscamos anisotropias na direção de chegada de raios cósmicos de ultra-altas energias utilizando dados do observatório Pierre Auger e favorecendo a direção de três radiogaláxias: Centaurus A, Fornax A e Virgo A. Todas as galáxias se encontram no universo local, sendo fortes candidatas à produção de raios cósmicos pois a interação com a radiação cósmica de fundo implica um limite superior na energia de fontes distantes (GZK) [1, 2]. Além disso, as três galáxias possuem características semelhantes.

Dado então que as fontes estão presentes no universo local, a direção de chegada dos raios cósmicos de ultra-altas energias pode não ser isotrópica, favorecendo certas direções [3], especialmente a da radiogaláxia Centaurus A [4] para energias maiores que 58 EeV (10^{18} eV).

Métodos e Procedimentos

Foram utilizados os eventos medidos pelo observatório Pierre Auger tal que seus ângulos zenitais fossem menor que 60° e com energias maiores que 57 EeV. Além disso, foram feitos cortes de qualidade nos dados para garantir que os eventos medidos tivessem um erro associado pequeno.

Para comparar os eventos medidos pelo observatório com o esperado em uma distribuição isotrópica foi gerado eventos aleatórios sobre a superfície de uma esfera (esfera celeste) utilizando o algoritmo de Metropolis-Hastings. Para isso é necessário saber a função densidade de probabilidade (FDP) obedecida por uma distribuição isotrópica em nosso céu.

Para obter a FDP necessária, foi calculada a exposição relativa do observatório dada por [5]:

$$\omega_r(\delta) = \frac{1}{\pi} [\alpha_m \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \sin(\alpha_m)] \quad (1)$$

Onde a constante $1/\pi$ é uma constante de normalização para que $\omega_r \in [0; 1]$.

Além disso, temos que:

$$\alpha_m = \begin{cases} 0, & \text{caso } \xi > 1 \\ \pi, & \text{caso } \xi < -1 \\ \arccos(\xi), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

$$\xi = \frac{\cos(\theta_m) - \sin(\delta) \sin(\lambda)}{\cos(\delta) \cos(\lambda)} \quad (3)$$

Portanto, com a fórmula para a exposição e o algoritmo de Metropolis-Hastings é possível gerar céus isotrópicos para comparação com o que obtemos com os dados do observatório. Além disso, também foi estudado o método de estimativa de densidade de Kernel (KDE), utilizado principalmente para obter uma aproximação da função densidade de probabilidade de nosso céu medido pelo observatório para que pudesse ser gerada imagens para visualização.

Resultados

Utilizando então o método KDE, podemos ter uma boa noção sobre a distribuição de eventos em nosso céu. Na figura (1) temos de vermelho

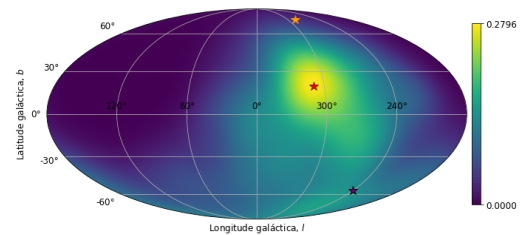


Figura 1: Densidade de eventos medidos para energia maior que 57 EeV

a direção de Centaurus A, de laranja a direção de Virgo A e de roxo a direção de Fornax A. Vemos uma grande quantidade de eventos medidos próximos da região da radiogaláxia de Centaurus A. Para fazer uma análise dessa

quantidade de eventos, geramos gráficos sobre a quantidade de eventos medidos a uma certa distância de cada uma das galáxias, e comparamos tal gráfico com o esperado para céus isotrópicos.

Para isso, simulamos 10000 céus isotrópicos para comparação e tentamos manter uma taxa de 60% de aceitação de passos do algoritmo de Metropolis-Hastings. Para Centaurus A, temos

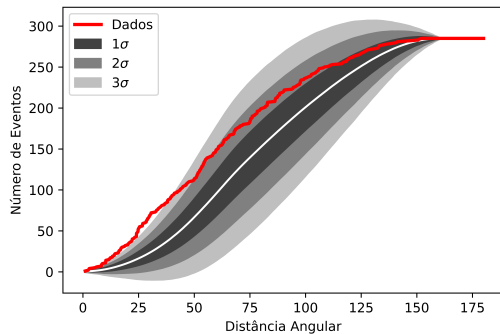


Figura 2: Eventos por distância angular de Centaurus A.

a figura (2), onde vemos uma fuga da curva 3σ para pequenos ângulos.

Para Virgo A e Fornax A podemos fazer o mesmo. Obtemos então os gráficos (3) e (4)

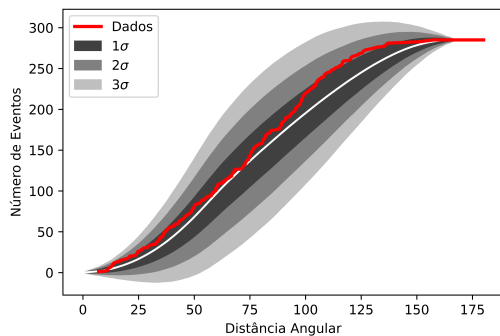


Figura 3: Eventos por distância angular de Fornax A.

respectivamente para as radiogaláxias de Fornax A e Virgo A.

Não vemos em nenhuma das duas uma fuga da isotropia.

Conclusões

Vemos então que, como esperado, a radiogaláxia de Centaurus A possui uma anisotropia na região de pequena abertura angular em

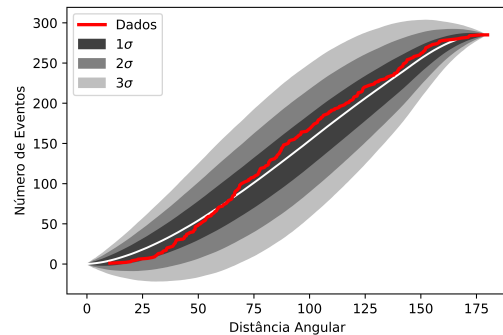


Figura 4: Eventos por distância angular de Virgo A.

relação a sua posição no céu, fugindo da curva 3σ .

Já para as radiogaláxias de Virgo A e Fornax A não vemos nenhuma fuga da anisotropia.

Porém, é importante termos um número de eventos maiores para podermos determinar a anisotropia com mais certeza. Além disso, é importante a aplicação de testes estatísticos como o teste de Kolmogorov-Smirnov para confirmar a hipótese de anisotropia.

Referências Bibliográficas

- [1] Kenneth Greisen. End to the cosmic-ray spectrum? *Phys. Rev. Lett.*, 16:748–750, Apr 1966.
- [2] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 4:78, August 1966.
- [3] A. Aab et al. An indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources. *The Astrophysical Journal*, 853(2):L29, feb 2018.
- [4] Peter L. Biermann and Vitor de Souza. CENTAURUS a: THE EXTRAGALACTIC SOURCE OF COSMIC RAYS WITH ENERGIES ABOVE THE KNEE. *The Astrophysical Journal*, 746(1):72, jan 2012.
- [5] Paul Sommers. Cosmic ray anisotropy analysis with a full-sky observatory. *Astroparticle Physics*, 14(4):271–286, jan 2001.

Local sources of ultra high energetic cosmic rays

Guilherme Leite Bruzão
Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho
Universidade de São Paulo
guilhermelbruzao@usp.br

Objectives

In this work, we search for anisotropies in the arrival direction of ultra high energies cosmic rays using data from the Pierre Auger observatory favoring the direction of three radiogalaxies: Centaurus A, Fornax A and Virgo A. All galaxies are in the local universe, being strong candidates to produce those cosmic rays due to the interaction with the microwave background radiation, which implies a superior limit in the energy of distant sources (GZK) [1, 2]. The three galaxies also have similar characteristics.

Given that the sources are in the local universe, the arrival direction of the cosmic rays of ultra high energies can be anisotropic, favoring certain directions [3], specially from the radiogalaxy Centaurus A [4] for energies above 58 EeV (10^{18} eV).

Materials and Methods

We used events from the Pierre Auger observatory with a zenithal angle smaller than 60° and with energies higher than 57 EeV. Furthermore, there were quality cuts in the data to assure that the measured events had an small associated error.

To compare the events measured by the observatory with those who are expected from an isotropic distribution, we generated random events in the surface of a sphere (celestial sphere) using the Metropolis-Hastings algorithm. To do it, it is necessary to know the probability density function (PDF) that generates an isotropic distribution in our sky.

To obtain the necessary PDF, we calculate the relative exposure of the observatory given by [5]:

$$\omega_r(\delta) = \frac{1}{\pi} [\alpha_m \sin(\lambda) \sin(\delta) + \cos(\lambda) \cos(\delta) \sin(\alpha_m)] \quad (1)$$

Where the constant $1/\pi$ is to normalize and guarantee that $\omega_r \in [0; 1]$.

Moreover, we have:

$$\alpha_m = \begin{cases} 0, & \text{if } \xi > 1 \\ \pi, & \text{if } \xi < -1 \\ \arccos(\xi), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Where:

$$\xi = \frac{\cos(\theta_m) - \sin(\delta) \sin(\lambda)}{\cos(\delta) \cos(\lambda)} \quad (3)$$

So, with the equation to the exposure and the Metropolis-Hastings algorithm, it is possible to generate isotropic skies to compare with what we have from the observatory.

Beside that, it was studied the kernel density estimation (KDE) method, that was used to obtain an approximate probability density function of our sky measured by the observatory so we could generate graphs to visualize the data.

Results

Using the KDE method, we can have a good notion about the distribution of events in our sky. In the figure (1) we have in red, the direction of

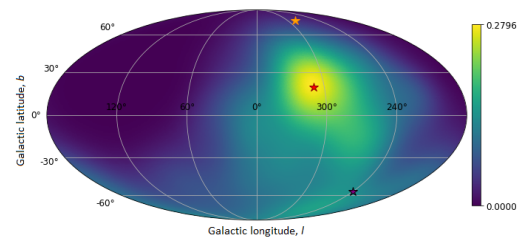


Figure 1: Density of measured events for energies higher than 57 EeV

Centaurus A, in orange, the direction of Virgo A and in purple, the direction of Fornax A.

We see a lot of events measured near the radiogalaxy of Centaurus A. To analyze those events, we generate graphs about the quantity of measured events from a certain distance to each of the galaxies, and we compare those events with

those expected from an isotropic sky. To do it, we simulate 10000 isotropic skies to compare, and we try to maintain an 60% acceptance ratio of steps in the Metropolis-Hastings algorithm.

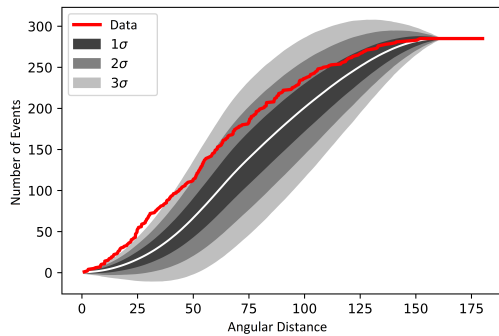


Figure 2: Events per angular distance from Centaurus A.

For Centaurus A, we have the figure (2), where we see an anisotropic part, for smaller angles, where the curve of measured events leaves the 3σ region. To Virgo A and Fornax A we can do the same.

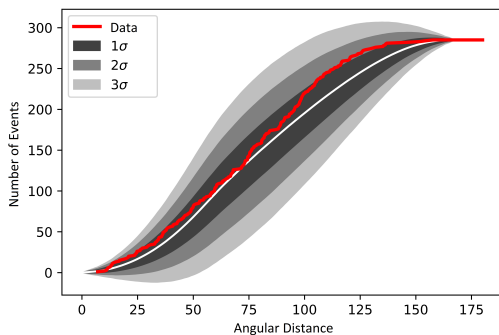


Figure 3: Events per angular distance from Fornax A.

We obtain the graphs (3) and (4) respectively to the radiogalaxies of Fornax A and Virgo A. We do not see any indication of isotropy in those two.

Conclusions

So, we see that, as expected, the radiogalaxy of Centaurus A has an anisotropy in the region of small angular aperture in relation to it is position in the sky, leaving the 3σ region. In the Virgo A and Fornax A radiogalaxies graph

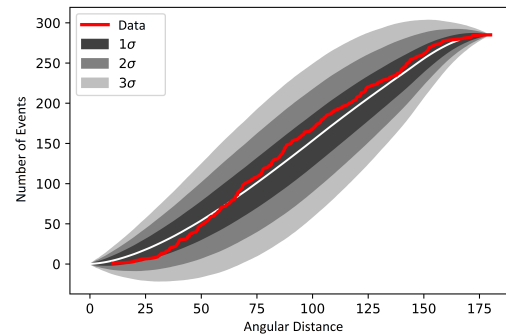


Figure 4: Events per angular distance from Virgo A.

we do not see any anisotropy.

Before we can say with certainty about the anisotropy, it is needed have a big number of events. Furthermore, it is important to do some statistical tests like the Kolmogorov-Smirnov test to confirm the anisotropy hypothesis.

References

- [1] Kenneth Greisen. End to the cosmic-ray spectrum? *Phys. Rev. Lett.*, 16:748–750, Apr 1966.
- [2] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 4:78, August 1966.
- [3] A. Aab et al. An indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources. *The Astrophysical Journal*, 853(2):L29, feb 2018.
- [4] Peter L. Biermann and Vitor de Souza. CENTAURUS a: THE EXTRAGALACTIC SOURCE OF COSMIC RAYS WITH ENERGIES ABOVE THE KNEE. *The Astrophysical Journal*, 746(1):72, jan 2012.
- [5] Paul Sommers. Cosmic ray anisotropy analysis with a full-sky observatory. *Astroparticle Physics*, 14(4):271–286, jan 2001.