

Trabalho

Título em Português: Aceleração e propagação de astropartículas no Universo local

Título em Inglês: acceleration and propagation of astroparticles in the local universe

Autor: Andressa Colaço

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: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

ACELERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ASTROPARTÍCULAS NO UNIVERSO LOCAL

Autora: Andressa Colaço

Orientador: Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho

Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo

andressacolaco@usp.br

Objetivos

Este trabalho busca investigar os processos de aceleração e propagação de raios cósmicos de ultra alta energia (UHECR) a partir da radiogaláxia M87 (Virgo A), utilizando simulações de Monte Carlo para estimar os fluxos de astropartículas esperadas na Terra.

A produção de partículas muito energéticas no universo ainda é pouco compreendida. Nota-se a necessidade de fontes locais para explicar os eventos mais energéticos, sendo núcleos ativos de galáxias (AGNs) objetos com características que conseguem explicar aceleração até energias da ordem de 10^{21} eV.

M87 é uma das AGNs mais próximas, a 16,4 Mpc da Terra. Esta radiogaláxia apresenta múltiplas regiões candidatas a aceleração, como nós de disrupção no jato relativístico e lóbulos de rádio de dimensões de kiloparsecs que atendem ao Critério de Hillas para os limites mencionados. A possibilidade de gerar UHECR nestas regiões e sua proximidade justificam seu estudo, uma vez que partículas de alta energia sofrem processos de perda energética durante sua propagação até a Terra, tais como interações com campos de fótons, decaimentos nucleares e perdas devido a expansão do universo, que são mais relevantes com o aumento do caminho percorrido.

As partículas carregadas também são defletidas pelos campos magnéticos extragalático e galático, alterando seus

caminhos originais. Desta maneira, as direções de chegada dos raios cósmicos não correspondem aos mapas de objetos astronômicos de radiação eletromagnética, fato que torna o estudo de fontes de UHECR mais desafiador. A identificação inequívoca de uma fonte é capaz de elucidar diversas questões em aberto na atualidade. Visando compreender melhor a classe de fontes definida pelas AGNs, este trabalho tem o objetivo de utilizar parâmetros físicos da candidata M87 para restringir o fluxo esperado para esta radiogaláxia, visando comparar com o fluxo total que pode ser obtido experimentalmente por observatórios de raios cósmicos como o Observatório Pierre Auger.

Métodos e Procedimentos

A simulação é realizada a partir do *framework* CRPropa3 [1], que utiliza métodos de Monte Carlo em sua implementação. É simulado um espectro de energia com índice espectral -1, para garantir confiabilidade estatística, no intervalo de 1 a 10^4 EeV, com igual composição de núcleos primários ^1H , ^4He , ^{14}N , ^{28}Si e ^{56}Fe , através dos módulos de simulação unidimensional. Os eventos simulados são propagados até a Terra, sendo que os efeitos de fotoprodução de pares, fotoprodução de píons, perda adiabática de energia e decaimento nuclear são implementados pelo código fonte a partir das seções de choque dos processos e das informações sobre os campos

de fótons extragalático e radiação cósmica de fundo em micro-ondas. Para esta etapa, são gerados $N_{simu}=10^6$ eventos e a deflexão por campos magnéticos não é incluída. A simulação da propagação é então ponderada para cada evento de acordo com parâmetros físicos da fonte, dada a rigidez $R=E/Z$:

$$w = \frac{f_z Q_{CR}}{N_{simu}} 4\pi D^2 \frac{(dN/dR)_{fonte}}{(dN/dR)_{simu}} \frac{\int_{R_{min}}^{R_{max}} (dN/dR)_{simu} dR}{\int_{R_{min}}^{R_{max}} R (dN/dR)_{fonte} dR} \quad (1)$$

onde Q_{CR} é a potência da fonte para raios cósmicos, D é a distância da fonte, f_z é a fração do núcleo primário do evento na composição de injeção e os termos das integrais são normalizações sobre os espectros simulado e da fonte. Para o espectro da fonte, utiliza-se uma lei de potência com corte exponencial:

$$\left(\frac{dN}{dR}\right)_{fonte} = R^{-\alpha} e^{R/R_{max}} \quad (2)$$

onde R_{max} representa a capacidade máxima de aceleração da fonte e α é o índice espectral, que depende do modelo de aceleração adotado e no Mecanismo de Fermi de 1ª Ordem, um dos modelos mais aceitos, tem valor 2. A fração de cada elemento injetado é dependente da composição do ambiente de aceleração, acerca do qual se tem amplas incertezas. É desta forma testada a abundância de elementos na Via Láctea como uma estimativa inicial. Visa-se também utilizar outras composições como a abundância de elementos no sistema solar e no meio interestelar de M87 para verificar a contribuição de núcleos mais pesados no espectro.

Resultados

Como resultados preliminares, obteve-se o espectro apresentado na Figura 1 para os valores $Q_{CR}=2 \cdot 10^{42} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ [2], $D=16.4 \text{ Mpc}$, $\alpha=2$, $R_{max}=20 \text{ EeV}$ e frações de núcleos 0.75277, 0.24447, 0.00098, 0.00066 e 0.001103 para ^1H , ^4He , ^{14}N , ^{28}Si e ^{56}Fe , respectivamente.

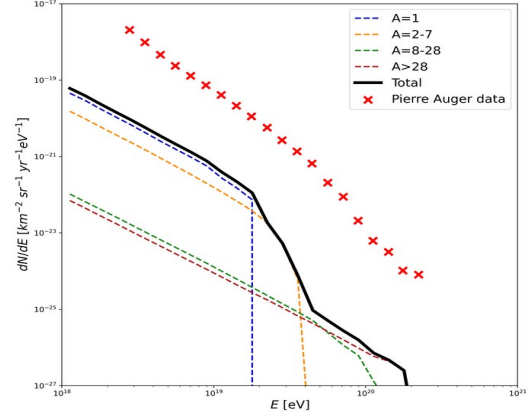


Figura 1: Espectro de UHECR esperado para M87 segundo os parâmetros descritos, com dados experimentais do espectro total de UHECR do Observatório Pierre Auger [3].

Conclusões

Como conclusões preliminares, podemos observar que para estes parâmetros, M87 contribui para o espectro de UHECR, mas não o domina, uma vez que outras fontes similares também compõem o espectro. Visa-se a partir deste resultado parcial alterar a composição, índice espectral e rigidez máxima a fim de realizar uma análise mais detalhada sobre a influência da incerteza destes no espectro final.

Agradecimentos

Agradecemos à FAPESP (Processos 2023/13790-1 e 2021/01089-1) pelo financiamento e ao Grupo de Astrofísica de Partículas do IFSC (APOEMA) pelo apoio.

Referências

- [1] R. Alves Batista *et al.* CRPropa 3.2 — an advanced framework for high-energy particle propagation in extragalactic and galactic spaces. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2022(09):035, September 2022.
- [2] Giroletti, M. *et al.* The kinematic of HST-1 in the jet of M87. *AA*, 538:L10, 2012.
- [3] A. Aab *et al.* Measurement of the cosmic-ray energy spectrum above $2 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ using the Pierre Auger Observatory. *Physical Review D*, 102(6), September 2020.

ACCELERATION AND PROPAGATION OF ASTROPARTICLES IN THE LOCAL UNIVERSE

Author: Andressa Colaço

Supervisor: Dr. Luiz Vitor de Souza Filho

Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo

andressacolaco@usp.br

Objectives

This work aims to investigate the acceleration and propagation processes of ultra-high-energy cosmic rays (UHECR) from the radio galaxy M87 (Virgo A), using Monte Carlo simulations to estimate the expected astroparticle fluxes on Earth.

The production of very energetic particles in the universe is still poorly understood. Local sources are needed to explain the most energetic events, with active galactic nuclei (AGNs) being objects with characteristics that can explain acceleration up to energies of the order of 10^{21} eV.

M87 is one of the closest AGNs, at 16.4 Mpc from Earth. This radio galaxy has multiple candidate regions for acceleration, such as disruption nodes in the relativistic jet and radio lobes of kiloparsec dimensions that meet the Hillas Criterion for the aforementioned limits. The possibility of generating UHECR in these regions and their proximity justify their study, since high-energy particles undergo energy loss processes during their propagation to Earth, such as interactions with photon fields, nuclear decays and losses due to the expansion of the universe, which are more relevant as the path traveled increases.

Charged particles are also deflected by extragalactic and galactic magnetic fields, altering their original paths. Thus, the directions of arrival of cosmic rays do not correspond to

the maps of astronomical objects of electromagnetic radiation, a fact that makes the study of UHECR sources more challenging. The unequivocal identification of a source is capable of elucidating several open questions today. Aiming to better understand the class of sources defined by AGNs, this work intends to use physical parameters of the candidate M87 to restrict the expected flux for this radio galaxy, in order to compare it with the total flux that can be obtained experimentally by cosmic ray observatories such as the Pierre Auger Observatory.

Materials and Methods

The simulation is performed using the CRPropa3 framework [1], that uses a Monte Carlo approach, using one-dimensional simulation modules. An energy spectrum with spectral index -1 is simulated, to ensure statistical reliability, in the range of 1 to 10^4 EeV, with the same composition of primary nuclei ^1H , ^4He , ^{14}N , ^{28}Si and ^{56}Fe . The simulated events are propagated to Earth, and the effects of pair photoproduction, pion photoproduction, adiabatic energy loss and nuclear decay are implemented by the source code from the cross sections of the processes and information about the extragalactic photon fields and cosmic microwave background radiation. For this step, $N_{\text{simu}}=10^6$ events are generated and deflection by magnetic fields is not included. The propagation simulation is then reweighted for

each event according to physical parameters of the source, given the rigidity $R = E/Z$:

$$w = \frac{f_z Q_{CR}}{N_{simu}} 4\pi D^2 \frac{\left(\frac{dN}{dR}\right)_{fonte}}{\left(\frac{dN}{dR}\right)_{simu}} \frac{\int_{R_{min}}^{R_{max}} \left(\frac{dN}{dR}\right)_{simu} dR}{\int_{R_{min}}^{\infty} R \left(\frac{dN}{dR}\right)_{fonte} dR} \quad (1)$$

where Q_{CR} is the cosmic rays power from the source, D is the distance from the source, f_z is the fraction of the primary nucleus of the event in the injection composition and the integral terms are normalizations over the simulated and source spectra. For the source spectrum, a power law with exponential cutoff is used:

$$\left(\frac{dN}{dR}\right)_{fonte} = R^{-\alpha} e^{R/R_{max}} \quad (2)$$

where R_{max} represents the maximum acceleration from the source and α is the spectral index, which depends on the acceleration model adopted and, according to the 1st Order Fermi Mechanism, one of the most accepted models, has a value of 2. The fraction of each element injected depends on the composition of the acceleration environment, about which there are wide uncertainties. In this way, the abundance of elements in the Milky Way is used as an initial estimate. It is intended to use other compositions such as the abundance of elements in the solar system and in the interstellar medium of M87 to verify the contribution of heavier nuclei in the shape of the spectrum.

Results

As preliminary results, it was obtained the spectrum presented in Figure 1 for the following parameters: $Q_{CR} = 2 \cdot 10^{42} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ [2], $D = 16.4 \text{ Mpc}$, $\alpha = 2$, $R_{max} = 20 \text{ EeV}$ and nuclei fraction 0.75277, 0.24447, 0.00098, 0.00066 and 0.001103 for ^1H , ^4He , ^{14}N , ^{28}Si and ^{56}Fe , respectively.

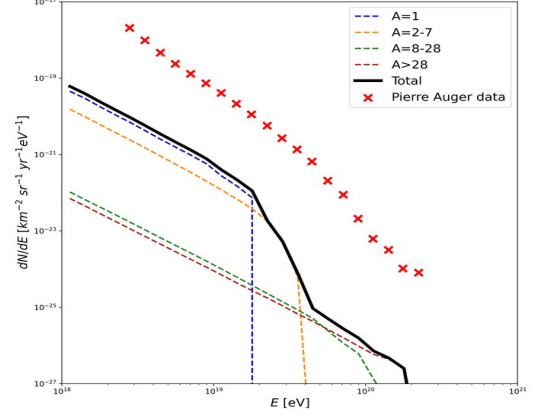


Figure 1: Expected UHECR spectrum for M87 according to the described parameters, with experimental data from the full UHECR spectrum of the Pierre Auger Observatory [3].

Conclusions

As preliminary conclusions, we can observe that for these parameters, M87 contributes to the UHECR spectrum, but does not dominate it, since other similar sources also compose the spectrum. Based on this partial result, we aim to change the composition, spectral index and maximum stiffness in order to perform a more detailed analysis on the influence of their uncertainty on the final spectrum.

Acknowledgements

We acknowledge FAPESP (Processes 2023/13790-1 and 2021/01089-1) for the funding and the IFSC Astroparticle Physics Group (APOEMA) for the support.

References

- [1] R. Alves Batista *et al.* CRPropa 3.2 — an advanced framework for high-energy particle propagation in extragalactic and galactic spaces. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2022(09):035, September 2022.
- [2] Giroletti, M. *et al.* The kinematic of HST-1 in the jet of M87. *AA*, 538:L10, 2012.
- [3] A. Aab *et al.* Measurement of the cosmic-ray energy spectrum above $2 \cdot 10^{18} \text{ eV}$ using the Pierre Auger Observatory. *Physical Review D*, 102(6), September 2020.