

Trabalho

Título em Português: Aceleração e propagação de raios cósmicos a partir da radiogaláxia Fornax A

Título em Inglês: aceleração e propagação de raios cósmicos a partir da radiogaláxia fornax a

Autor: Isadora Parillo

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Luiz Vitor de Souza Filho

Área de Pesquisa / SubÁrea: Astrofísica Extragalactica

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

Aceleração e propagação de raios cósmicos a partir da radiogaláxia Fornax A

Isadora Parillo

Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho

Instituto de Física de São Carlos/Universidade de São Paulo

isadora.parillo@usp.br

Objetivos

Os principais objetivos desse trabalho são o estudo da física dos raios cósmicos de ultra-alta energia (UHECR, do inglês *ultra high energy cosmic rays*) – sua aceleração e efeitos de propagação –, bem como a caracterização de uma galáxia de núcleo de ativo candidata à aceleração de UHECR, Fornax A, a fim de produzir uma simulação que emule o espectro dos raios cósmicos produzidos por essa galáxia.

Métodos e Procedimentos

O primeiro passo do projeto foi a revisão da literatura da área de raios cósmicos de ultra-alta energia (UHECR), que são astropartículas que chegam a energias maiores que 10^{18} eV. Em seguida, deu-se foco à aceleração de astropartículas em ambientes astrofísicos de altas energias, tais como galáxias de núcleo ativo. Nesse sentido, foram estudados os mecanismos de aceleração de Fermi de primeira e segunda ordem – atentando-se à elaboração do mecanismo de primeira ordem, dado que é mais eficiente. Aliado a isso, estudou-se critérios para consideração de objetos astrofísicos como promissores à aceleração de raios cósmicos a mais altas energias, como o Critério de Hillas. Posteriormente, foi caracterizada a radiogaláxia Fornax A (NGC 1316): seus atributos físicos e possibilidade de aceleração de UHECR. Nesse sentido, calculou-se um limite máximo para a rigidez dos raios cósmicos acelerados em suas estruturas. Enfim, estudou-se os diferentes efeitos de perda de energia que

os raios cósmicos enfrentam ao longo de sua propagação pelo Universo. Dado esse contexto, produziu-se uma simulação computacional simplificada da propagação de raios cósmicos a partir de Fornax A, utilizando o *framework* computacional CRPropa3; de forma a gerar espectros de energia factíveis para astropartículas aceleradas nessa galáxia e que sofreram efeitos de perda energética durante sua propagação até a Via Láctea.

Resultados

É previsto que o fluxo de energia de raios cósmicos acelerados pelo mecanismo de Fermi de primeira ordem em uma fonte astrofísica seja descrito por:

$$\left. \frac{dN}{dE} \right|_0 = f_i E^{-2} e^{-E/E_{máx}} \quad (1)$$

Isto é, uma lei de potência com um corte exponencial, decorrente da perda de eficiência da aceleração, condicionada à fração f_i do elemento existente na fonte.

Associado a isso, e a partir dos procedimentos descritos anteriormente, foi possível encontrar a rigidez máxima dos raios cósmicos acelerados em Fornax A, de acordo com as características físicas de suas estruturas, chegando-se ao resultado:

$$R_{máx} = 5,4 g_{ac} \sqrt{1 - g_{cr}} \left(\frac{Q_{jato}}{10^{43} \text{ erg/s}} \right)^{1/2} \text{ EV} \\ \Rightarrow R_{máx} \simeq 2,9 \times 10^{19} \text{ V} \quad (2)$$

De acordo com a referência [1] e os dados de Fornax A encontrados em [2], onde Q_{jato} é a potência do jato, dada em erg/s , g_{ac} está relacionado ao comportamento do plasma e g_{cr} é o fator de relação entre a energia contida nos hádrons e a energia do campo magnético na região aceleradora. Nesse contexto, a energia máxima que um raio cósmico pode alcançar sendo acelerado nos jatos de Fornax A é:

$$E_{máx} = ZeR_{máx} \quad (3)$$

Em que Ze é a carga do átomo.

Com base nesse limite máximo, na distância e composição de Fornax A, foi implementada uma simulação computacional da propagação de raios cósmicos utilizando o *framework* CRPropa ([3]). A simulação, atribuiu-se diferentes efeitos de perda de energia dos UHECR ao longo da propagação: produção de pares, fotoprodução de píons, fotodesintegração de núcleos e perda adiabática devido à expansão do Universo. Os resultados estão expressos na Figura 1.

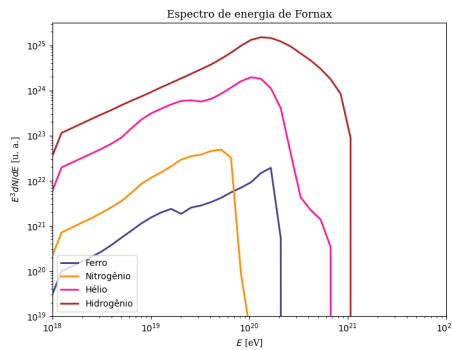


Figura 1: Espectro de raios cósmicos de Fornax A resultante da simulação com CRPropa.

Conclusões

Concluimos que Fornax A é uma importante candidata à aceleração de raios cósmicos no Universo local e pode, portanto, contribuir com o fluxo já observado na Terra por grandes experimentos, como o Observatório Pierre Auger.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão e fomento ao projeto de Iniciação Científica nº 2023/13181-5 e ao grupo de Astrofísica de Partículas do Instituto de Física de São Carlos (APO-EMA) pelo apoio.

Referências

- [1] Cainã de Oliveira and Vitor de Souza. Magnetically induced anisotropies in the arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays from nearby radio galaxies. *The Astrophysical Journal*, 925(1):42, 2022.
- [2] FM Maccagni et al. The flickering nuclear activity of fornax a. *Astronomy & Astrophysics*, 634:A9, 2020.
- [3] Rafael Alves Batista et al. Crpropa 3—a public astrophysical simulation framework for propagating extraterrestrial ultra-high energy particles. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(05):038, 2016.

Acceleration and propagation of cosmic rays from the radio galaxy Fornax A

Isadora Parillo

Prof. Dr. Luiz Vitor de Souza Filho

São Carlos Institute of Physics/University of São Paulo

isadora.parillo@usp.br

Objectives

The main objectives of this work are the study of ultra-high-energy cosmic rays (UHECR) physics — their acceleration and propagation effects — as well as the characterization of an active galactic nucleus (AGN) candidate for UHECR acceleration, Fornax A, in order to produce a simulation that emulates the cosmic ray spectrum produced by this galaxy.

Methods and Procedures

The first step of the project was to review the literature on ultra-high-energy cosmic rays (UHECR), which are astroparticles that reach energies above 10^{18} eV. Then, the focus shifted to the acceleration of astroparticles in high-energy astrophysical environments, such as active galactic nuclei (AGN). In this context, first and second-order Fermi acceleration mechanisms were studied, with special attention to the first-order mechanism due to its greater efficiency. Additionally, criteria for considering astrophysical objects as promising candidates for accelerating cosmic rays to the highest energies, such as the Hillas Criterion, were studied. Subsequently, the radio galaxy Fornax A (NGC 1316) was characterized: its physical attributes and potential for UHECR acceleration. In this regard, a maximum limit for the rigidity of cosmic rays accelerated in its structures was calculated. Finally, the different energy loss effects that cosmic rays face as they propagate through the Universe were studied. In this context, a simplified com-

putational simulation of cosmic ray propagation from Fornax A was produced using the computational framework CRPropa3; generating plausible energy spectra for astroparticles accelerated in this galaxy and experiencing energy losses during their propagation to the Milky Way.

Results

It is expected that the energy flux of cosmic rays accelerated by the first-order Fermi mechanism in an astrophysical source is described by:

$$\left. \frac{dN}{dE} \right|_0 = f_i E^{-2} e^{-E/E_{máx}} \quad (1)$$

That is, a power-law with an exponential cutoff, due to the loss of acceleration efficiency, conditioned to the fraction f_i of the element present in the source.

Associated with this, and based on the previously described procedures, it was possible to find the maximum rigidity of cosmic rays accelerated in Fornax A, according to the physical characteristics of its structures, yielding the result:

$$R_{máx} = 5,4 g_{ac} \sqrt{1 - g_{cr}} \left(\frac{Q_{jato}}{10^{43} \text{ erg/s}} \right)^{1/2} \text{ EV} \\ \Rightarrow R_{máx} \simeq 2,9 \times 10^{19} \text{ V} \quad (2)$$

According to the reference [1] and the Fornax A data found in [2], where Q_{jato} is the jet power in erg/s , g_{ac} is related to the plasma behavior, and g_{cr} is the ratio of the energy contained in hadrons to the energy of the magnetic field in the accel-

eration region. In this context, the maximum energy that a cosmic ray can reach being accelerated in Fornax A jets is:

$$E_{max} = ZeR_{max} \quad (3)$$

Where Ze is the charge of the atom.

Based on this maximum limit, the distance and composition of Fornax A, a computational simulation of cosmic ray propagation was implemented using the framework CRPropa ([3]). In the simulation, different energy loss effects for UHE-CRs during propagation were considered: pair production, photopion production, photodisintegration of nuclei, and adiabatic loss due to the expansion of the Universe. The results are expressed in Figure 1.

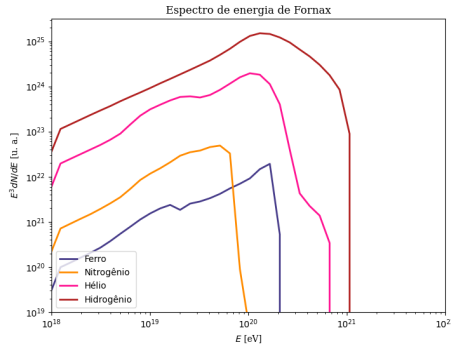


Figure 1: Cosmic ray spectrum of Fornax A resulting from the CRPropa simulation.

Conclusions

We conclude that Fornax A is an important candidate for cosmic ray acceleration in the local Universe and therefore can contribute to the flux observed on Earth by major experiments such as the Pierre Auger Observatory.

Acknowledgments

I would like to thank the São Paulo Research Foundation (FAPESP) for granting and funding the undergraduate research project nº 2023/13181-5 and the Particle Astrophysics group of the São Carlos Institute of Physics (APOEMA) for their support.

References

- [1] Cainã de Oliveira and Vitor de Souza. Magnetically induced anisotropies in the arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays from nearby radio galaxies. *The Astrophysical Journal*, 925(1):42, 2022.
- [2] FM Maccagni et al. The flickering nuclear activity of fornax a. *Astronomy & Astrophysics*, 634:A9, 2020.
- [3] Rafael Alves Batista et al. Crpropa 3—a public astrophysical simulation framework for propagating extraterrestrial ultra-high energy particles. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(05):038, 2016.