

## Estudo das interações de raios cósmicos de altíssimas energias em sua propagação no meio intergaláctico

Gabriel P. Alves\*, Carola Dobrigkeit.

### Resumo

Quando considerados os efeitos de longa distância na propagação de raios cósmicos ultra-energéticos desde suas fontes até a Terra, percebe-se a interação destes raios com a radiação cósmica de fundo (RCF). Processos que aparentemente não ocorreriam devido à baixa energia dos fótons da RCF, mostram-se possíveis quando analisados a partir do referencial de repouso do raio cósmico. Interações dos raios com a RCF, tais como produção de pares elétron-pósitron e fotoprodução de píons, são observadas, além da perda de energia devido à expansão adiabática do universo.

### Palavras-chave

Raios cósmicos, propagação, Observatório Pierre Auger.

### Introdução

Raios cósmicos são partículas ultra-energéticas que são produzidas no espaço exterior e se propagam no meio galáctico e intergaláctico podendo chegar à Terra. Tipicamente possuem energia superior a  $10^9$  eV.

Em comparação às partículas de menor energia, pouco se sabe sobre a origem das partículas de altíssimas energias, até mesmo superiores a  $5 \times 10^{19}$  eV, devido à baixa frequência com que são detectadas na Terra. Uma das explicações possíveis para este fato é a de que um fluxo de raios cósmicos ultra-energéticos interagiria com a radiação cósmica de fundo (RCF) produzindo píons, via ressonância  $\Delta$ . Esta explicação é conhecida como corte GZK, previsto por Greisen e, independentemente, por Zatsepin e Kuz'min [1, 2]. A continuidade deste processo levaria a uma atenuação do fluxo de raios cósmicos, bem como criaria um horizonte além do qual partículas ultra-energéticas que percorrem distâncias superiores a 100 Mpc não poderiam chegar à Terra.

Com a construção de grandes experimentos, como o Observatório Pierre Auger, um melhor entendimento sobre questões como as que dizem respeito à composição de partículas de altíssima energia pode ser obtido [3]. Desde então, uma grande quantidade destas partículas foram observadas, o que gera aparente contradição com o corte GZK e o torna objeto de discussão na comunidade científica.

Na luz deste debate, o objetivo do presente projeto é estudar a propagação de raios cósmicos de altíssimas energias pelo meio intergaláctico e os respectivos mecanismos de perda de energia que servem de base para a formulação da hipótese do corte GKZ, dentre estes a produção de pares elétron-pósitron, a fotoprodução de píons e a expansão adiabática do Universo.

### Resultados e Discussão

Uma hipótese inicial razoável a ser feita é a de que as partículas de altíssimas energias são prótons. O processo pelo qual interagem com a RCF é explicado por um mecanismo puramente relativístico.

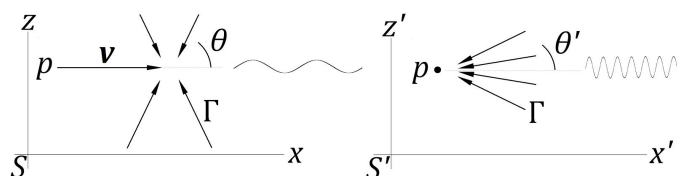
Se considerarmos como  $S$  o referencial em que a RCF é isotrópica e  $S'$  o referencial de repouso do próton, então em  $S'$ , a energia  $E'$  e o ângulo de incidência  $\theta'$  são dados pelas seguintes relações:

$$E' = \gamma E(1 + \beta \cos \theta)$$

$$\tan \theta' = \frac{\sin \theta}{\gamma(\cos \theta + \beta)},$$

onde  $\gamma$  é o fator de Lorentz,  $E$  e  $\theta$  são, respectivamente, a energia e o ângulo de incidência em  $S$  e  $\beta = v/c$ , onde  $v$  é a velocidade do próton em  $S$  e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

Dessa maneira, para um próton de altíssima energia, um fóton na faixa de micro-ondas da RCF é visto como um raio gama em seu referencial, como esquematizado na figura 1.



**Figura 1.** Representação da interação do próton  $p$  com o fóton  $\Gamma$  da RCF. No referencial  $S$  a RCF é vista como uma radiação isotrópica de micro-ondas. Em  $S'$ , os fótons  $\Gamma$  interagem quase que paralelamente à direção de propagação de  $p$ .

As interações recorrentes em  $S'$  passam a ter, portanto, energia superior ao mínimo para a produção de pares elétron-pósitron e fotoprodução de píons, processos estes cujo estudo ainda está sendo concluído pelo aluno.

### Conclusões

Uma distribuição isotrópica da RCF é vista colimada no referencial de repouso da partícula ultra-energética. A frequência da RCF é também distorcida: em  $S'$  a radiação de fundo de micro-ondas é vista como radiação gama, capaz de interagir via produção de pares e fotoprodução de píons com a partícula de energia ultra-alta. Conforme a distância de propagação do raio cósmico aumenta, a continuidade dos processos de perda de energia atenua o fluxo no intervalo de altíssimas energias.

[1] - K. Greisen, End to the Cosmic-Ray Spectrum?, Physical Review Letters 16 **1966** 748.

[2] - G. T. Zatsepin, V. A. Kuz'min, Upper limit of the spectrum of cosmic rays, Soviet Physics, JETP Letters 4 **1966** 78.

[3] - The Pierre Auger Collaboration, Depths of Maximum of Air-Shower Profiles at the Pierre Auger Observatory: Composition Implications, Physical Review D 90, 122006 **2014**.