

# CÁLCULO DO FLUXO DE NEUTRINOS DE GZK, E DE SUA TAXA DE DETECÇÃO EM ICE-CUBE

Henrique Evangelista de Oliveira<sup>1</sup>; Pedro Cunha de Holanda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, UNICAMP 13083-970 CAMPINAS SP, BRASIL

Financiado pelo PIBIC/CNPq

## 1- Introdução

Devido à presença da radiação cósmica de fundo, que permeia todo o espaço, espera-se um corte no espectro de raios cósmicos para partículas ultra-energéticas, o corte GZK [1]. A partir de certa energia, a produção de píons através da ressonância  $\Delta$ , resultado da interação de raios cósmicos com os fótons da radiação cósmica de fundo, impede que raios cósmicos de energia acima de  $\sim 10^{19}$  eV cheguem ao nosso planeta vindos de fontes extra-galácticas.

Como resultado deste processo, neutrinos ultra-energéticos são produzidos [2]. Espera-se, portanto que estes neutrinos estejam chegando à Terra em um fluxo regular. Tais neutrinos ainda não foram detectados experimentalmente, mas propostas experimentais em andamento, os telescópios de neutrinos, serão sensíveis a este fluxo.

Este projeto estudou o corte GZK e procurou por limites no fluxo de neutrinos.

## 2- O corte GZK e a fotoprodução de píons

Em 1966, Greisen e Zatsepin/Kuzmin previram que o fluxo de raios cósmicos seria severamente atenuado devido às perdas de energia em interações com os fótons da Radiação Cósmica de Fundo, cuja energia é  $2,58 \times 10^{-4}$  eV, havendo produção de pares elétron-pósitron, e principalmente, fotoprodução de píons. Essa queda no fluxo de raios cósmicos para energia maior que  $\sim 10^{19}$  eV ficou conhecida como corte GZK.

Prótons que se propagam no meio interestelar podem interagir com fótons da radiação cósmica de fundo, segundo a seguinte equação:



Onde: p = próton,

$\gamma$  = fóton

Porém, há uma outra possibilidade: o próton pode ser convertido em um pión, através da ressonância  $\Delta$ , segundo a equação:



ou



onde:  $\pi^+$  e  $\pi^0$  = píons;

n = nêutron;

$\Delta$  = ressonância

O  $\Delta$  tem massa maior que o próton. Devido a isso, existe um certo limiar de energia que o próton deve ter para que essa reação ocorra. A energia do próton deve estar abaixo de  $\sim 10^{19}$ .

Para energias acima de  $\sim 10^{19}$  eV, os prótons começam a desaparecer. Esse é o chamado efeito, ou limite de energia, GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin). Prótons com essas energias são muito difíceis de serem detectados: a taxa de detecção aqui na Terra é de 1 a cada 10 km<sup>2</sup> por ano.

Esse processo é chamado de fotoprodução de píons e é o mais importante na determinação do corte GZK.

Precisamos determinar, no referencial de repouso do próton, a energia mínima que um fóton precisa ter para que ocorra a reação.

Fazendo-se essas contas, chegamos a uma equação que nos dá um gráfico da atenuação do próton em função da energia, mostrado na Figura 1.

Na Figura 1 podemos ver que para energias acima de  $\sim 10^{19}$  eV a atenuação do próton aumenta muito, o que impede que raios cósmicos acima dessa energia cheguem ao nosso planeta.

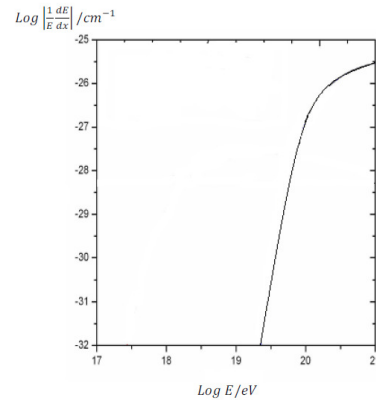
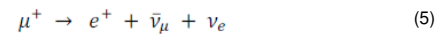


Figura 1: Gráfico da atenuação do próton em função da energia

## 3 - Limite no fluxo de neutrinos

A produção de neutrinos vem das seguintes equações:



onde:  $\mu^+$  = múon

$\nu_\mu$  e  $\nu_e$  = neutrinos

$\bar{\nu}_\mu$  e  $\bar{\nu}_e$  = antineutrinos

$e^+$  = pósitron

$e^-$  = elétron

Esses neutrinos são conhecidos como neutrinos GZK e possuem altíssima energia.

Esses neutrinos ultra-energéticos ainda não foram observados, mas há uma série de esforços, atualmente, para que se consiga detectá-los.

O limite mais alto, já publicado, do fluxo de neutrinos na região de energia de 50 TeV à 6 PeV é de  $8,6 \times 10^{-7}$  GeV s<sup>-1</sup> sr<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>. [3]

Esse limite seria reproduzido na segunda parte do projeto.

## 4- Conclusão

Pelo gráfico da Figura 1, podemos evidenciar o corte GZK e com o resultado da seção 3 podemos constatar que é possível estabelecer um limite para o fluxo de neutrinos ultra-energéticos que chegam ao nosso planeta resultando desse processo.

A continuação do projeto seria calcular o fluxo de neutrinos para certas energias, o que não será feito devido a uma necessidade do cancelamento da bolsa, sendo este documento o relatório final de atividades.

## 5 - Agradecimentos

Agradeço ao PIBIC/CNPq que financiou esse projeto e ao meu orientador que sempre esteve disposto a me auxiliar.

## 6 - Referências

[1] K. Greisen, Physical Review Letters 16 (1966), 748; G. T. Zatsepin, V.

A. Kuz'min, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters 4

[2] S. Yoshida, M. Teshima, Prog.Theor.Phys. 89 (1993), 833.

[3] F. Halzen, D. Hooper, astro-ph/0605103v2 (2006).