

**XXX Congresso de
Iniciação Científica**
UNICAMP



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física "Gleb Wataghin"

Implicações Físicas na detecção direta do Fundo Cósmico de Neutrinos pelo experimento PTOLEMY

Palavras-Chave: [Neutrinos Relíquia],[Cosmologia],[PTOLEMY]

Aluno: Tarik Ventorini de Oliveira [IFGW]
Orientador: Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda [IFGW]

Campinas-SP
Julho-2022

1 Introdução

O início do Universo como conhecemos é mais bem descrito através do modelo do Big Bang Quente (ou "Hot Big Bang Theory"). Esta é uma teoria que explica que, nos primórdios do Universo, as partículas elementares (quarks, léptons, fótons, etc) estavam em equilíbrio térmico, resultado de temperaturas extremamente altas. Com a expansão, a temperatura começou a diminuir, e gradativamente foi tornando-se possível a formação de prótons e nêutrons, depois núcleos atômicos, até chegar ao ponto da formação de átomos leves. O restante da matéria (moléculas e átomos pesados) se originou a partir de processos posteriores, que não serão relevantes para a discussão [1].

Dentro deste contexto será destacado um fenômeno que ocorreu nos primeiros segundos do Universo: o desacoplamento dos neutrinos. Com a queda de temperatura, a ocorrência de interações fracas passou a ser menor que a taxa de expansão do universo, ocorrendo a diminuição das reações que mantêm o neutrino em equilíbrio com o plasma primordial [2]:



Com esta diminuição, os neutrinos existentes deixaram de estar em equilíbrio com o resto da matéria, e com isso, passaram a vagar pelo universo sem interagir com praticamente nada. Formou-se, desta forma, o Fundo Cósmico de Neutrino (Cosmic Neutrino Background - $C\nu B$) ou Neutrinos Relíquia.

Além do $C\nu B$, podemos mencionar também a Radiação Cósmica de Fundo (Cosmic Microwave Background - CMB), que, diferente dos neutrinos, formou-se com o desacoplamento dos fótons, aproximadamente quando o Universo tinha 350000 anos [3]. Esta radiação é importante para o $C\nu B$ pois por apresentarem certas similaridades, é esperado que os Neutrinos Relíquia apresentem propriedades próximas [4]. Isso inclusive será observado quando for feito o cálculo da densidade local de neutrinos.

O maior problema para a detecção deste fundo cósmico é a sua escala. Estima-se que a energia deste fundo esteja na ordem de décimos, ou até centésimos de eV [5]. Experimentos mais recentes, feitos no Super-Kamiokande [6], ou mais antigos, realizados pelo detector de Homestake [7] possuem uma sensibilidade de detecção na ordem de MeV. A detecção do $C\nu B$ exige um equipamento muito mais sensível do que qualquer outro detector de neutrinos desenvolvidos até hoje.

Mediante a dificuldade de se detectar neutrinos com baixas energias, foi feita uma proposta experimental: o detector PTOLEMY (Princeton Tritium Observatory for Light, Early-Universe, Massive-Neutrino Yield). Esta proposta se baseia na interação de captura do neutrino eletrônico com o trítio [5]



O grande foco desse experimento é a sensibilidade. Através do estudo do final do espectro de decaimento β , espera-se conseguir uma sensibilidade de energia do elétron de 0,05eV, tornando-se possível separar o sinal do Fundo Cósmico de Neutrinos do próprio espectro. Este objetivo vem de um planejamento feito em 2018, que esperava ser atingido entre 2021 e 2023 [5].

Com isso, esse projeto irá realizar um estudo dos possíveis resultados que o PTOLEMY poderá atingir, e quais conclusões poderão ser tiradas.

2 Metodologia

Pelo caráter teórico deste projeto, a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho consistiu no estudo de diversas referências.

2.1 Primeira metade - Introdução à Cosmologia

Na primeira metade, este estudo foi conduzido através de reuniões semanais entre o orientador e os alunos com temas de pesquisa similares, onde foram realizadas leitura e resolução de problemas (tanto analíticos

quanto numéricos) da referência [8]. Foi uma introdução à alguns conceitos de cosmologia moderna que permitiu o entendimento de cálculos que foram feitos posteriormente.

Dentre os vários tópicos que foram estudados, dois deles foram mais importantes. O primeiro foi o cálculo da idade do Universo, que possibilitou entender os conceitos importantes para o segundo tópico, densidade de energia relacionada à número de partículas por volume.

Para calcular a idade do Universo, utilizou-se a equação de Friedmann [8]:

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \left[\rho(t) + \frac{\rho_{cr} - \rho(t_0)}{a^2(t)} \right] \quad (3)$$

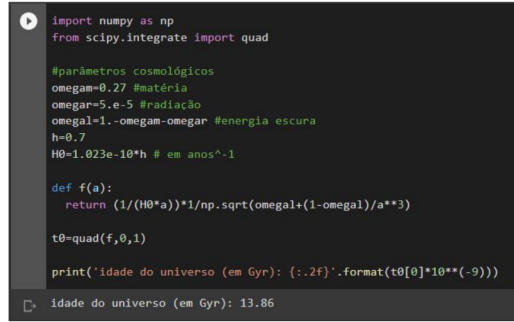
e a definição da taxa de Hubble:

$$H(t) = \frac{1}{a} \frac{da}{dt} \quad (4)$$

que após manipulações e diversas considerações sobre a natureza atual da matéria, permitiu chegar em:

$$dt = H_0^{-1} \frac{da}{a} \left[\frac{\rho_m + \rho_\Lambda}{\rho_{cr}} \right]^{-1/2} \quad (5)$$

Ao integrar numericamente pelo *Python* esta equação nos limites adequados, cujo código observa-se na Figura 1, foi possível obter um valor coerente com o que se conhece atualmente [9].



```

import numpy as np
from scipy.integrate import quad

#parâmetros cosmológicos
omegam=0.27 #matéria
omegar=5.e-5 #radiação
omegal=1.-omegam-omegar #energia escura
h=0.7
H0=1.023e-10*h # em anos^-1

def f(a):
    return (1/(H0*a))*1/np.sqrt(omegal+(1-omegal)/a**3)

t0=quad(f,0,1)

print('idade do universo (em Gyr): {:.2f}'.format(t0[0]*10**(-9)))
idade do universo (em Gyr): 13.86

```

Figura 1: Cálculo numérico da idade do Universo, executada no Python

Além disso, foi feito o cálculo do número de neutrinos por volume, desconsiderando qualquer efeito gravitacional. Após várias deduções e considerações, chegou-se em:

$$n_s = g_s \int \frac{dp^3}{(2\pi)^3} f_s(\vec{x}, \vec{p}, t) \quad (6)$$

Esta integral foi resolvida para neutrinos e fótons, de modo que foi possível relacionar a temperatura da radiação cósmica de fundo com os neutrinos relíquia através de :

$$\frac{T_{\nu_i}}{T_\gamma} = \left(\frac{4}{11} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Desta forma, usando que o valor da radiação cósmica de fundo $T_\gamma = 2,72K$ [10], que em unidades naturais fica $T_\gamma = 2,349 \times 10^{-4} eV = 11,9041 cm^{-1}$, pode-se escrever que:

$$n_{\nu_i} = \frac{1,803}{\pi^2} \frac{4}{11} T_\gamma^3 \simeq 112,06 \quad (8)$$

Este resultado está em concordância com o apresentado na referência [4].

2.2 Segunda metade - Taxa de Captura

Na segunda metade, a metodologia utilizada consistiu na leitura de vários artigos e realização de cálculos para obter alguns parâmetros importantes. Foram feitas reuniões semanais entre o aluno e o orientador, onde os resultados obtidos eram discutidos e pensados em como seriam utilizados nas etapas posteriores.

O grande foco desta etapa foi a compreensão da taxa de captura de neutrinos realizada pelo experimento. Esta taxa pode ser expressa como [11]:

$$\Gamma_{CNB} = [n_0(\nu_{h_R}) - n_0(\nu_{h_L})]N_T\bar{\sigma} \sum_{i=1}^3 |U_{ei}|^2 f_c(m_i) \quad (9)$$

onde cada termo desta expressão foi estudado individualmente.

Ao se fazer diversas considerações, a taxa de captura Γ_{CNB} gerou valores em torno de 4 neutrinos por ano para o modelo de Dirac, e em torno de 8 neutrinos por ano para o caso de Majorana.

3 Resultados e Discussão

O valor obtido para a taxa de captura esperada é muito pequeno. Isto demonstra como é difícil detectar o fundo cósmico de neutrinos. Entretanto, foi possível fazer uma análise dos resultados obtidos usando a definição de χ^2 , tanto a usual quanto a de Poisson, para estimar a diferença entre o resultado obtido e esperado.

Para isso, foi considerado que o valor teórico é:

$$N'_{th} = aN_{th} \quad (10)$$

onde a vem da aglomeração causada por efeito gravitacional e N_{th} é o valor teórico esperado do número de neutrinos detectados em um ano, considerando uma distribuição uniforme de neutrinos no universo.

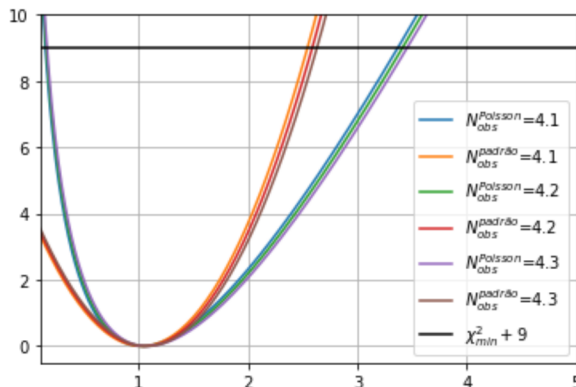


Figura 2: Gráfico de χ^2 em função do fator de aglomeração gravitacional, supondo diferentes valores observados pelo experimento, considerando o caso do neutrino de Dirac. O valor $\chi^2_{min} + 9$ é uma reta que passa pela marcação de 3σ

Observando a Figura 2, foi possível perceber que para valores abaixo de três desvios padrão (a reta $\chi^2_{min} + 9$), que garante um bom nível de confiança nos resultados experimentais, a abordagem usando o χ^2 comum fornece um intervalo de valores possíveis para a menor que a abordagem de Poisson. Entretanto, ela não exclui a ausência dos neutrinos relíquia ($a = 0$), o que implica na impossibilidade de se afirmar com certeza que eles foram detectados. Isto não é o melhor resultado, mas faz sentido, uma vez que já se sabe que um sinal positivo de detecção de neutrinos relíquia é um desafio experimental, e um resultado negativo em experimentos como o PTOLEMY é uma possibilidade real.

Porém o χ^2 comum só fornece uma interpretação confiável quando temos muitos dados, o que não é o caso. Desta forma, o mais adequado é usar a estatística de Poisson. Nessa análise a não existência de

neutrinos relíquia poderia ser descartada com um nível de confiança superior a 3σ , caso sejam detectados alguns eventos compatíveis com a previsão teórica. O grande problema é distinguir se o evento é de fato um neutrino relíquia, ou apenas ruído decorrente do espectro do decaimento beta.

4 Conclusão

Com toda a análise feita, é possível tirar algumas conclusões. A primeira é a de que o fundo cósmico de neutrinos é definitivamente difícil de se detectar. A baixa quantidade eventos previstos faz com que seja quase inviável de separar ruído do aparelho (causado por estar operando em um extremo de baixa energia) e do espectro do decaimento beta de um evento real. Isto abre espaço para o aprimoramento das técnicas atuais, ou até desenvolvimento de novas ideias, que permitam aumentar esta taxa de eventos.

Como observado na equação 9, existem vários parâmetros que fazem com que o valor da taxa de captura seja tão baixo. Dentre eles, a seção de choque $\bar{\sigma}$ e o número de alvos N_T são aqueles em que há um controle, que dependem diretamente das condições do experimento. Desenvolver o aparato de modo a aumentar estes valores irá permitir uma maior taxa de captura, e assim, será possível distinguir os neutrinos relíquia do ruído experimental.

Esta detecção, quando conseguir efetivamente ser feita, permitirá ter uma ideia melhor sobre o modelo mais adequado para o neutrino (Dirac ou Majorana) [11], testar a possibilidade de um neutrino estéril [4], e muitas outras conclusões. Ela trará várias respostas e abrirá espaço para novas perguntas e novas pesquisas, que aprimorarão o entendimento da natureza deste lépton e do funcionamento do Universo.

Referências

- [1] C. Sutton, *Spaceship neutrino*. Cambridge University Press, 1992.
- [2] C. Giunti and C. W. Kim, *Fundamentals of neutrino physics and astrophysics*. Oxford university press, 2007.
- [3] A. Liddle, *An introduction to modern cosmology*. John Wiley & Sons, 2015.
- [4] M. Betti, M. Biasotti, A. Boscá, F. Calle, N. Canci, G. Cavoto, C. Chang, A. Cocco, A. Colijn, J. Conrad, *et al.*, “Neutrino physics with the ptolemy project: active neutrino properties and the light sterile case,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2019, no. 07, p. 047, 2019.
- [5] E. Baracchini, M. Betti, M. Biasotti, A. Bosca, F. Calle, J. Carabe-Lopez, G. Cavoto, C. Chang, A. Cocco, A. Colijn, *et al.*, “Ptolemy: A proposal for thermal relic detection of massive neutrinos and directional detection of mev dark matter,” *arXiv preprint arXiv:1808.01892*, 2018.
- [6] K. Abe, Y. Hayato, T. Iida, M. Ikeda, C. Ishihara, K. Iyogi, J. Kameda, K. Kobayashi, Y. Koshio, Y. Kozuma, *et al.*, “Solar neutrino results in super-kamiokande-iii,” *Physical Review D*, vol. 83, no. 5, p. 052010, 2011.
- [7] B. T. Cleveland, T. Daily, R. Davis Jr, J. R. Distel, K. Lande, C. Lee, P. S. Wildenhain, and J. Ullman, “Measurement of the solar electron neutrino flux with the homestake chlorine detector,” *The Astrophysical Journal*, vol. 496, no. 1, p. 505, 1998.
- [8] S. Dodelson, *Modern cosmology*. Elsevier, 2003.
- [9] B. Chaboyer, “The age of the universe,” *Physics Reports*, vol. 307, no. 1-4, pp. 23–30, 1998.
- [10] D. Fixsen, “The temperature of the cosmic microwave background,” *The Astrophysical Journal*, vol. 707, no. 2, p. 916, 2009.
- [11] P. De Salas, S. Gariazzo, J. Lesgourgues, and S. Pastor, “Calculation of the local density of relic neutrinos,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2017, no. 09, p. 034, 2017.