

1

Introdução

Atualmente as observações astrofísicas e cosmológicas nos proporcionam dados indiretos do valor absoluto da soma das massas dos neutrinos, os quais são competitivos com os dados fornecidos pelos experimentos em laboratórios (KamLAND nos proporciona uma diferença do quadrado das massas $\Delta m_{12}^2 = (7.9_{-0.8}^{+1.0}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ e MINOS nos proporciona $\Delta m_{23}^2 = 1.9 - 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ com o qual podemos inferir um limite inferior do valor das massas dos neutrinos). Isto graças à alta precisão com que são obtidos os dados provenientes das estruturas a grandes escalas (LSS em inglês), os quais são extraídos de galáxias localizadas em altos desvios para o vermelho, pelos experimentos 2 degree field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) [1], o Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [2], da radiação cósmica de fundo (CMB) a qual neste momento é analisada com maior precisão pelo WMAP [3, 4], e com informação adicional dada pelo *Lyman- α* forest [5].

Uma pergunta importante que pode ser respondida pelo modelo padrão da cosmologia é: qual é a contribuição da densidade de energia dos neutrinos no Universo? Pois os neutrinos são como qualquer outra partícula e contribuem para a densidade de energia total do Universo. Na atualidade, a densidade de energia dos neutrinos está relacionada com a soma absoluta das massas dos neutrinos [6] na forma (ver capítulo 2 seção 2.4.2)

$$\Omega_\nu h^2 = \frac{\sum_i m_\nu}{94 \text{ eV}},$$

onde $h = 0.73(3)$ [7] é a taxa atual de expansão do Universo em unidades de $100 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

O principal efeito dos neutrinos na cosmologia é quando eles se tornam não-relativísticos, e como consequência neutrinos com alguns elétron-volts (eV) de massa produzirão efeitos na expansão do Universo [8]. Com este efeito pode-se colocar limites na massa dos neutrinos, comparando-se os dados

cosmológicos mais recentes com as previsões teóricas. É pertinente dizer que embora hoje os melhores limites na massa dos neutrinos sejam os obtidos pela análise estatística de dados cosmológicos, estes limites dependem muito do modelo cosmológico adotado, causando grandes imprecisões [9]. Como um exemplo disto podemos citar a análise estatística do CMB, que consegue impor limites na massa dos neutrinos de $2-3$ eV, enquanto que com CMB e 2 dFGRS obtém-se $0.9-1.7$ eV. Se nesta última análise inclui-se também SDSS e *Lyman- α* forest chega-se a um limite de $0.3-0.9$ eV; em [10] foi obtido um limite na soma das massas de $0.17-2.0$ eV.

Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito dos neutrinos na expansão do Universo, usando os limites superiores de massa de $0.17-2.0$ eV obtidos em [10]. Veremos como a massa dos neutrinos afeta algumas quantidades observáveis, tais como a distância de luminosidade e o parâmetro de Hubble. Embora espera-se que o impacto seja pequeno, ainda não sabemos se é suficientemente pequeno para desprezá-lo, pois estamos em uma época na qual trabalha-se com uma grande precisão na cosmologia, com experimentos como WMAP, 2 dFGRS, *Lyman- α* . E no futuro, experimentos como Planck [11], DARK ENERGY Survey(DES) [12], SDSS-III, LSST [13], SNAP [14], EUCLID [15], nos proporcionarão dados com uma precisão sem precedentes. Essa era de precisão nos motiva a estudar os efeitos na dinâmica do Universo devido à massa dos neutrinos. Para ver a magnitude do efeito da massa dos neutrinos na expansão do Universo, estudamos a densidade de energia dos neutrinos em função da temperatura. Em particular temos dois regimes extremos: quando os neutrinos são relativísticos, isto é, quando a temperatura do fóton é consideravelmente maior que a massa dos neutrinos $T_\gamma \gg m_\nu$, e quando os neutrinos tornam-se não-relativísticos devido ao desvio para o vermelho que sofre a temperatura (processo no qual o Universo se esfria, fazendo que sua temperatura fique cada vez menor até $T_\gamma \ll m_\nu$). Com a equação de Friedmann se constrói a expressão para a distância de luminosidade e o parâmetro de Hubble, avaliando estas duas expressões para diferentes massas dos neutrinos e fazendo uma diferença fracional entre os diferentes valores das massas em consideração, determina-se quanto variam as expressões da distância de luminosidade e o parâmetro de Hubble.

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos da seguinte forma: no capítulo 2 apresentamos uma breve história dos neutrinos, desde quando sua existência foi postulada por Pauli como uma forma de salvar a conservação da

energia, passando pelos experimentos que os detectaram até os experimentos que existem hoje para medir sua massa. Depois discutiremos as propriedades dos neutrinos, o efeito de oscilação de sabor que eles sofrem, onde nos focaremos na oscilação no vácuo. Para finalizar o capítulo veremos como foi determinado o limite de massa Gerstein-Zeldovich. O capítulo 3 está dividido em duas partes: na primeira, definimos a métrica de Robertson-Walker, a partir da qual determinamos o desvio para o vermelho e a distância de luminosidade. Na segunda parte estudamos a função de distribuição dos neutrinos em duas épocas, quando os neutrinos estavam em equilíbrio térmico com as outras espécies de partículas no plasma primordial, e quando o neutrino sofre o desacoplamento. No capítulo 4 estudamos a densidade de energia e a pressão dos neutrinos em função da massa, a temperatura e o desvio para o vermelho. Nos regimes relativísticos e não-relativísticos obtemos expansões em série que usaremos para evitar erros de arredondamento. No capítulo 5 apresentamos os resultados deste trabalho, onde analisamos a distância de luminosidade e o parâmetro de Hubble para diferentes massas dos neutrinos. Para finalizar, apresentamos no capítulo 6 as conclusões desta dissertação.