6
Conclusão

Esta dissertação teve como objetivo estudar a influência que tem os neutrinos na expansão do Universo e verificar se isso pode ser mensurável no arcabouço da emergente "cosmologia de precisão". Para alcançarmos este objetivo começamos no Capítulo 2 discutindo as propriedades e os efeitos de oscilação de sabor dos neutrinos, o qual nos proporciona uma forte evidência que o neutrino tem massa. No Capítulo 3 definimos a distância de luminosidade e o parâmetro de Hubble a partir da métrica de Robertson-Walker e da equação de Friedmann. No Capítulo 4 estudamos a densidade de energia e a pressão dos neutrinos nos regimes relativístico e não-relativístico. No Capítulo 5 analisamos a distância de luminosidade e o parâmetro de Hubble para diferentes massas dos neutrinos em diferentes desvios para o vermelho. Para essa análise fixamos a densidade de energia do Universo hoje igual a um ($\Omega_0 = 1$), com a densidade de energia do vácuo e a densidade de energia da radiação constantes, e desprezando as incertezas nas medidas que determinam a densidade de matéria, consideramos que conhecemos exatamente este valor.

A idéia central desta análise consiste em determinar qual é a porcentagem que aporta a massa do neutrino para a densidade de energia do Universo hoje. Comparando a temperatura da radiação cósmica de fundo com os limites superiores da soma das massas dos neutrinos fornecidos pela cosmologia, e com os limites inferiores proporcionados pela oscilação de neutrino, hoje sabemos que pelo menos dois neutrinos são não-relativísticos, o que implica que, além de contribuir para a densidade de energia total do Universo de uma maneira mais significativa, o neutrino muda sua equação de estado durante a expansão do Universo, passando de ser considerado radiação a ser hoje considerado como matéria. Esta mudança na sua equação de estado faz o neutrino ser diferente das outras espécies de partículas.

Observamos que, devido à contribuição da massa do neutrino, o efeito que sofre a distância de luminosidade é um aumento no seu valor. Este efeito foi verificado para diferentes valores da massa do neutrino, onde usamos um valor de até 4 eV somente por interesse acadêmico. Em todos os casos, o valor da distância de luminosidade aumentou. Se consideramos, por exemplo, o valor do neutrino com massa zero, isto é, como se fosse ainda radiação, o valor da distância de luminosidade para um desvio para o vermelho de $z = 1$ é $3.38 \times 10^3\,\mathrm{Mpc}$. Agora, para o mesmo z mas para massas de $m_\nu = 0.1\,\mathrm{eV}$ e $m_\nu = 2.0\,\mathrm{eV}$, temos $3.89 \times 10^3\,\mathrm{Mpc}$ e $3.893 \times 10^3\,\mathrm{Mpc}$ respectivamente. Analisando a diferença fracionária destes valores para quantificar a porcentagem da variação, obtivemos que, comparando a massa de $m_\nu = 0\,\mathrm{eV}$ com a massa de $m_\nu = 0.1\,\mathrm{eV}$, a variação foi de $2.6 \times 10^{-3}\,\%$. Para $m_\nu = 2.0\,\mathrm{eV}$ com respeito a $m_\nu = 0\,\mathrm{eV}$, obtivemos uma variação de $2.61 \times 10^{-3}\,\%$. Fizemos também a diferença fracionária da razão da distância de luminosidade, onde deixamos fixo z em 1090 (que é a época da recombinação), e variamos a massa e o desvio para o vermelho. Neste caso, encontrou-se para $m_\nu = 1.0\,\mathrm{eV}$ e $z = 0$ uma porcentagem de $5.1 \times 10^{-2}\,\%$. Isto nos diz que a distância de luminosidade teve um aumento de $0.5\,\%$ desde a época da recombinação até hoje.

O parâmetro de Hubble é influenciado pelo termo de massa do neutrino. Fixando o desvio para o vermelho, e comparando o parâmetro de Hubble para dois valores diferentes da massa dos neutrinos, observamos que o valor do parâmetro de Hubble diminui. Para determinar a porcentagem da correção do parâmetro de Hubble devida à massa do neutrino, fizemos a diferença fracionária entre o parâmetro de Hubble com $m_\nu = 0$ e $m_\nu \neq 0$ em função do desvio para o vermelho. Obtivemos que para uma massa de $m_\nu = 0.1\,\mathrm{eV}$ e $z = 1$ a diferença fracionária é de $-0.5 \times 10^{-4}\%$. Se observamos a curva que descreve a massa de $0.1\,\mathrm{eV}$ na Figura (5.14) vemos que em $z = 464$ temos o mínimo valor possível para esta curva -3.7×10^{-2}. Se vemos a curva da massa de $2.0\,\mathrm{eV}$ temos o mínimo valor da diferença fracionária em $z = 2105$ com valor de -3.7%. Todas as porcentagens obtidas para a distância de luminosidade assim como para o parâmetro de Hubble ainda não estão dentro da precisão da cosmologia atual, nem do alcance dos experimentos no caso de z muito grandes.

O comportamento da distância de luminosidade e do parâmetro de Hubble devida à massa dos neutrinos, o qual foi exposto anteriormente, pode ser explicado de forma mais simples analisando a equação do parâmetro de Hubble. Como dissemos anteriormente neste trabalho, hoje os neutrinos são considerados não-relativísticos e por isto contribuem para a densidade de energia do Universo Ω_0 como matéria, portanto, qualquer variação da densidade de energia do neutrino devida a sua massa, na sua primeira aproximação, será compensada pela densidade de matéria restante. Isto devido a que hoje, todas as medidas feitas acerca do conteúdo do Universo(WMAP, 2dFGRS, α-Lymann, SDSS) inferem que Ω_0 é consistente com 1, ou que o Universo é plano. Portanto, se aumentamos a massa dos neutrinos livremente (somente até 4 eV conforme explicado no Capítulo 5) para que contribuam com a densidade de energia do Universo em forma de matéria, alguma outra componente desta mesma densidade de matéria tem que diminuir, a fim de deixar sempre Ω_0

constante. Desta forma, quanto mais massa for dada aos neutrinos, menor serão as outras componentes de densidade de energia da matéria.

Se agora aumentamos o desvio para o vermelho e usamos a lógica anteriormente exposta, poderemos entender porque o valor do parâmetro de Hubble diminui em função do aumento da massa dos neutrinos. A partir deste raciocínio, podemos também explicar o comportamento da distância de luminosidade, pois, como já vimos, o parâmetro de Hubble entra no denominador desta equação.