

1

Introdução

O neutrino foi pela primeira vez postulado em dezembro de 1930 por Wolfgang Pauli como uma tentativa desesperada de salvar o princípio de conservação da energia no decaimento beta nuclear. Nesse tipo de decaimento, os elétrons emitidos tinham o espectro contínuo, no entanto se esperava que os mesmos tivessem o espectro discreto que corresponderia às energias das transições nucleares. Para explicar essa discrepância, Pauli propôs a existência de uma outra partícula que seria emitida no processo junto com o elétron, com isso a soma das energias do elétron e dessa nova partícula, que inicialmente Pauli chamou de nêutron, seria constante salvando assim o princípio de conservação da energia. Além disso, essa partícula deveria ter algumas características especiais: deveria ser neutra, para conservar carga elétrica, e ter spin $\frac{1}{2}$ resguardando assim o teorema spin-estatística. Um trecho da carta de Pauli pode ser encontrado na referência [1].

Neutrinos são criados como resultado de certos tipos de decaimentos radioativos ou reações nucleares, como as que acontecem no núcleo do sol, em reatores nucleares ou quando raios cósmicos se chocam com átomos na atmosfera da Terra. Neutrinos também foram criados a menos de um segundo após o Big Bang e um grande número dessas partículas permanecem vagando pelo universo hoje, porque eles interagem muito fracamente com a matéria.

Trilhões de neutrinos passam através de nossos corpos a cada segundo, sendo a maioria deles provenientes de reações nucleares que acontecem no núcleo do sol. A produção de neutrinos não está exclusivamente confinada à nossa galáxia. Quando estrelas maciças morrem, a maioria de sua energia é liberada como neutrinos em violentas explosões de Supernovas. Embora supernovas podem aparecer com um brilho maior do que a galáxia que as contêm, quando vistas por telescópios óticos, essa luz representa apenas uma pequena fração da energia liberada [2].

O primeiro neutrino foi observado em 1956 por Frederick Reines e Clyde Cowan [3], num experimento de reator nuclear em Savannah River, Carolina do Sul, Estados Unidos, através de uma reação conhecida como decaimento beta

inverso. Neste experimento, eles detectaram o antineutrino do elétron. Em 1958 Goldhaber e colaboradores [4] determinaram a helicidade do neutrino, mostrando que o neutrino é uma partícula de mão-esquerda (left-handed). A idéia de oscilação foi proposta pela primeira vez em 1957 por Pontecorvo, que propôs que se neutrinos são partículas massivas e se o número leptônico não se conserva, então o neutrino poderia oscilar transformando-se em sua própria antipartícula, o antineutrino, como acontece no sistema de káons neutros. É importante comentar que não há comprovação experimental desse tipo de transição para os neutrinos. O segundo neutrino foi descoberto em 1962 por Lederman e colaboradores [5], que verificaram que o neutrino detectado era diferente do neutrino observado por Reines e Cowan, e assim foi descoberto o neutrino do múon.

Logo após esta descoberta, Maki, Nakagawa e Sakata sugeriram que transições entre diferentes sabores de neutrinos poderiam ocorrer se neutrinos fossem partículas massivas e se os estados com sabor definido e massa definida estivessem relacionados um ao outro por uma transformação linear semelhante à mudança de base, introduzindo assim a mistura de neutrinos [6]. Essa idéia oferecia uma chance de interpretação do déficit de neutrinos solares observados por Ray Davis e colaboradores [7] em 1968. Num artigo publicado em janeiro de 1969, Gribov e Pontecorvo [8] propõe que oscilação de neutrinos entre os dois sabores conhecidos, o neutrino do elétron e o neutrino do múon, seria um possível mecanismo capaz de explicar o déficit de neutrinos solares.

Implicações cosmológicas da física de neutrinos foram consideradas pela primeira vez por Alpher, Follin e Hermann [9], que mencionaram que neutrinos estariam em equilíbrio térmico no universo primordial. A possibilidade que a densidade de energia cosmológica de neutrinos possa ser maior que a densidade de energia da matéria bariônica e as consequências em cosmologia desta hipótese foram discutidas por Pontecorvo e Smorodinskii [10]. Pouco tempo depois Zeldovich e Smorodinskii encontraram o limite superior da densidade de neutrinos a partir de sua ação gravitacional ¹. Num artigo seminal em 1966, Gerstein e Zeldovich [12] derivaram o limite superior cosmológico sobre a massa do neutrino. Vale ressaltar que esse cálculo foi feito já na estrutura de cosmologia moderna [11]. Neutrinos podem ter sido importantes na formação das estruturas de grande escala (Large Scale Structure-LSS) do universo, na Nucleossíntese do Big Bang (Big Bang Nucleosynthesis-BBN), nas anisotropias da Radiação Cósmica de Fundo de Microondas (Cosmic Microwave Background Radiation-CMBR), e alguns outros fenômenos de

¹Para uma discussão mais completa e referências sugerimos [11]

natureza cosmológica [13, 14, 15, 16, 17, 18].

Neutrinos de Supernova foram detectados em 1987, quando uma estrela colapsou na galáxia LMC (Large Magellanic Cloud), a 150 mil anos-luz de distância, sendo esta galáxia mais próxima da Via Láctea. Dois colossais experimentos subterrâneos - o detector Kamiokande no Japão e o experimento IMB perto de Cleveland em Ohio, USA - detectaram neutrinos vindos da Supernova 1987A três horas antes da luz da explosão alcançar a terra [19, 20].

O experimento Kamiokande mediu um déficit no número de neutrinos do múon, que são produzidos pelas interações de raios cósmicos na atmosfera da terra [21]. Este déficit foi depois confirmado e interpretado em termos de oscilação de neutrinos do múon e neutrinos do tau pelo experimento Super-Kamiokande em 1998 [22]. Este terceiro tipo de neutrino, o neutrino do tau, foi diretamente observado somente em 2000 pelo experimento DONUT realizado no Fermilab, USA [23]. Em 2002 o experimento de acelerador K2K confirmou oscilações de neutrinos atmosféricos e mais recentemente o experimento MINOS, no Fermilab, deu mais força à essa conclusão [24].

Após a descoberta do déficit de neutrinos solares pelo experimento Homestake, a pesquisa sobre neutrinos solares continuou avançando, tanto do ponto de vista teórico quanto experimental. No final da década de 1970 e início da década de 1980, S. P. Mikheev, A. Yu. Smirnov [25] e L. Wolfenstein [26] formularam a teoria de oscilação de neutrinos na presença de matéria densa, prevendo os grandes efeitos de matéria em oscilações de neutrinos solares. No início dos anos 1980 e início dos anos 1990, os experimentos subterrâneos Kamiokande, SAGE e GALLEX confirmaram o déficit de neutrinos solares [27, 28, 29] detectando neutrinos originados em diferentes reações de fusão nuclear no sol, diferente dos neutrinos detectados no experimento Homestake. Em 2001, os experimentos Super-Kamiokande e SNO confirmaram que oscilações de neutrinos solares entre os três sabores pode ocorrer, e confirmaram também que efeitos de matéria também estão presentes em oscilações de neutrinos solares [30, 31]. Recentemente o experimento de reator KamLAND confirmou independentemente os parâmetros de oscilações que explicam os dados de neutrinos solares [32, 33].

Na década de 1990, o experimento LSND realizado em Los Alamos National Laboratory pesquisou oscilações de neutrinos do tipo, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ com um feixe de neutrinos que viaja uma curta distância ($L \sim 30$ m) da fonte ao detector, e encontraram um sinal positivo a favor deste processo [34]. Este resultado somado aos resultados obtidos pelo Super-Kamiokande e por experimentos com neutrinos solares, implicam em três regimes de parâmetros

de oscilação muito diferentes, exigindo a existência de pelo menos um novo tipo de neutrino, que entra em conflito com os três neutrinos do modelo padrão. Novos experimentos foram realizados e evidências de oscilações de neutrinos solares e atmosféricos foram encontrados, enquanto que o resultado LSND permaneceu não verificado. Recentes observações experimentais de oscilação de neutrinos solares, atmosféricos e de acelerador, estabeleceram conclusivamente que neutrinos são partículas massivas. Com o intuito de tratar a anomalia LSND, como ficou conhecido, o experimento MiniBooNE no Fermilab realizou uma busca por oscilações do tipo $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ na mesma região de parâmetros de oscilação de neutrinos consistente com o observado pela colaboração LSND. Os primeiros resultados do MiniBooNE [35] apontaram uma não-observação na região LSND, implicando numa incompatibilidade entre os dois resultados. Uma das maneiras de compatibilizar os dois resultados, assumindo violação de CP, é através da adição de dois neutrinos que não possuem a interação fraca padrão aos três neutrinos ativos usuais do modelo padrão [36].

Nesta dissertação, analisamos os possíveis efeitos de 2 neutrinos estéreis adicionados aos 3 neutrinos usuais em observáveis relacionados as massas, estendendo os trabalhos da Ref. [37]. Estamos considerando como quantidades observáveis a massa cinemática medida a partir do decaimento beta do tritium, a massa efetiva de Majorana que pode ser determinada por experimentos com o duplo decaimento beta sem neutrinos, cuja incerteza está associada ao cálculo do elemento de matriz nuclear associado a este tipo de decaimento. Um outro observável que também estamos considerando, é a soma de massas de neutrinos que é vinculada por dados cosmológicos, seu valor possui uma incerteza muito grande, pois depende dos conjuntos de dados utilizados, do número de espécies de neutrinos e de como essa massa está distribuída entre as diferentes espécies de neutrinos. Veja Ref. [38] para o caso de apenas 3 neutrinos ativos.

A dissertação se divide da seguinte maneira. O capítulo 2 dedica-se a uma breve revisão do modelo padrão de partículas elementares. Neste capítulo damos uma ênfase especial ao setor leptônico. Iniciamos com uma revisão de teorias de gauge abeliana e não-abeliana, em seguida apresentamos uma breve discussão do modelo padrão de partículas elementares, sempre olhando para o setor eletrofraco da teoria. Terminamos o capítulo discutindo alguns pontos sobre o setor leptônico da teoria eletrofraca.

No capítulo 3 fazemos uma abordagem geral sobre a física de neutrinos. Iniciamos o capítulo discutindo sobre as representações dos neutrinos, Weyl, Dirac e Majorana. Em seguida, introduzimos o formalismo de oscilação de neutrinos, damos uma ênfase especial às oscilações no vácuo. Ainda neste

capítulo apresentamos uma breve discussão sobre os experimentos cinemáticos que visam buscar a massa absoluta do neutrino através de experimentos com decaimento beta do trítio, mostramos os resultados atuais e o valor esperado para a próxima geração de experimentos cinemáticos.

No capítulo 4 apresentamos o problema. Começamos falando dos experimentos LSND e MiniBooNE e sobre suas implicações em física de oscilação de neutrinos. Em seguida, fazemos uma breve discussão sobre alguns modelos que tentam explicar a anomalia LSND e damos uma ênfase especial ao modelo com apenas um neutrino estéril.

No capítulo 5 apresentamos os nossos resultados. Neste capítulo estudamos os efeitos de dois neutrinos estéreis sobre observáveis de massa. Baseado em [37], apresentamos os possíveis ordenamentos de massas neste cenário, fazemos uma análise dos observáveis de massa nos esquemas possíveis. Para este fim, lançamos mão dos resultados recentes do experimento MiniBooNE que vincula os parâmetros associados aos neutrinos estéreis tais como as diferenças de massas quadradas e os elementos de matriz relevantes. Utilizamos também resultados de outros experimentos que vinculam os parâmetros de oscilação padrão, que são: as diferenças de massas quadradas solar e atmosférica, assim como os ângulos de mistura solar e atmosférico e o limite fornecido pelo experimento CHOOZ sobre o ângulo θ_{13} . Mostramos que em alguns casos é muito difícil distinguir entre os diferentes esquemas de massas, complementando o resultado apresentado em [37].