

1 Introdução

1.1 Aspectos históricos da física de Neutrinos

Em 1930 Wolfgang Pauli postulou a existência dos neutrinos a fim de conciliar os dados do decaimento radioativo do núcleo com a conservação de energia. No decaimento radioativo beta, o número atômico muda quando o nêutron é transformado num próton com a emissão de um elétron:



Se não houvesse o neutrino, as energias do elétron mais a do próton teria que ser iguais a do nêutron. Neste caso cada elétron seria mono-energético enquanto os experimentos indicam que os elétrons têm espectro de energia contínua. Este espectro observado corresponde exatamente ao do decaimento de três corpos no estado final como na reação (1-1). Portanto houve a necessidade de se postular o neutrino, onde este não teria carga elétrica e para todos os propósitos práticos, interage muito fracamente com a matéria, servindo basicamente como um agente balanceador de energia e momento da (1-1).

Como neutrinos interagem muito fracamente¹, Pauli teve que esperar por 25 anos, quando Fred Reines e Clyde Cowan Jr (1) observaram os neutrinos produzidos por um reator nuclear, pela reação inversa do decaimento beta:



Experimentalmente, a detecção dos neutrinos ocorrem quando, expõe-se um material rico em prótons a um feixe de neutrinos e simplesmente, procura-se o aparecimento coincidentemente de um pósitron e de um nêutron.

Em 1962, Lederman e seus colaboradores (2) descobriram o segundo tipo de neutrino, o muônico, que é diferente daquele detectado por Cowan e Reines. Os feixes deste tipo de neutrinos, ν_{μ} (ou $\bar{\nu}_{\mu}$), vindos de decaimentos

¹Por exemplo, o livre caminho médio de neutrino com energia ~ 10 MeV (energia típica de neutrinos solares) corresponde uma distância equivalente a ~ 1 ano-luz ($9,5 \times 10^{12}$ km) na matéria de ~ 5 g/cm³, densidade típica da Terra.

de píons, passaram a ser uma das ferramentas mais importantes para estudar física de neutrinos. Em 2000, o terceiro tipo de neutrino, o tauônico ν_τ , que foi detetado (3).

Neutrinos são também produzidos por fontes naturais. No início dos anos 60, neutrinos produzidos no Sol foram observados (4) e foi mostrado um déficit de fluxo de neutrino comparado com o que era esperado no modelo padrão solar (5). Em meados dos anos 60, neutrinos produzidos na atmosfera foram observados (6, 7).

As propriedades dos neutrinos e a questão particular de sua massa têm intrigado a mente de muitos teóricos desde que foram propostos. Em 1957, Bruno Pontecorvo (8) propôs que a existência da massa dos neutrinos implica na possibilidade da oscilação dos neutrinos. Esse fenômeno é similar ao que acontece no sistema de bósons neutros, a oscilação de $K^0 - \bar{K}^0$, embora esse tipo de oscilação ainda não foi observado. Em 1962, Maki, Nakagawa e Sakata (9) propuseram que a mistura dos sabores de neutrinos como a causa da sua oscilação. Depois deste trabalho, Pontecorvo formulou oscilação dos sabores dos neutrinos no vácuo devido a massas e mistura (10).

Em 1978, Wolfenstein (11) discutiu pela primeira vez os efeitos de matéria na propagação de neutrino. Nos anos 80, Mikheev e Smirnov (12), mostraram que a presença de matéria pode modificar significativamente os efeitos de oscilação de neutrinos. Em homenagem a esses físicos, este fenômeno foi chamado o efeito MSW.

Nos anos 80, também houve desenvolvimentos experimentais importantes, onde vários experimentos de neutrinos começaram a produzir resultados relevantes em termos de qualidade e quantidade. Nova geração de experimento de neutrinos solares, Kamiokande começou a tomar a dados (13). Em 1987, as observações de neutrinos vindos de supernova, SN1987A, na Grande Névens de Magalhães, estabeleceram a astrofísica de neutrinos (14).

No final de anos 80, o experimento Kamiokande observou um déficit de neutrinos muônicos produzidos na atmosfera (15). Este déficit foi confirmado pelo seu sucessor Super-Kamiokande, SK (16) e eventualmente levou ao descobrimento de oscilação de neutrinos devido a massas e mistura (17). Este resultado é consistente com a oscilação de neutrinos muônicos para tauônicos, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ e $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ e foi apoiado pelo outro experimento de neutrinos atmosféricos como Soudan II (18) e verificado pelos novos dados de próprio SK (19). Recentemente, as oscilações de neutrinos atmosféricos foram verificado pelos experimentos baseados em aceleradores, K2K (20) e MINOS (21) usando os feixes de neutrinos artificiais. Esses experimentos encontraram uma região permitida dos parâmetros de oscilação relacionado

ao ângulo de mistura entre a segunda e a terceira geração dos neutrinos.

Por outro lado, nos anos 90 os experimentos de neutrinos solares (22, 23, 24, 25) confirmaram o déficit que foi observado pelo experimento de Homestake (4, 26) que pode ser explicado pela oscilação de neutrinos ou pela modificação de modelo padrão solar (5). O experimento SNO (27) resolveu esse impasse baseado na medida de corrente neutra que claramente apontou a oscilação ou transformação de sabores de neutrinos, $\nu_e \rightarrow \nu_\mu/\nu_\tau$, como origem de déficit. Porém, o SNO não pôde determinar conclusivamente o mecanismo de oscilação que pode ser devido a massas e mistura ou algum outro mecanismo mais exótico. O experimento de reator KamLAND (28) conseguiu identificar o mecanismo da transformação de sabores de neutrinos solares como sendo oscilação devido a massas e mistura. O resultado de KamLAND, combinado com os dados de neutrinos solares, escolheu uma região de parâmetros de oscilação que corresponde ao grande ângulo de mistura entre primeira e segunda geração de neutrinos.

O experimento CHOOZ (29) não fornece nenhum sinal positivo de oscilação dos neutrinos, no entanto, fornece informação muito importante sobre limite superior do ângulo de mistura entre a primeira e a terceira geração.

Existem alguns experimentos de neutrinos que obtiveram resultados que ainda são controversos. Um deles é o experimento LSND (30), que apontou oscilações de neutrinos $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ e $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ com os parâmetros de oscilações incompatíveis com os dados de neutrinos solares e atmosféricos. Para explicar este resultado, é necessário supor a presença de um quarto neutrino que não deveria ter interação fraca e por isso é chamado de neutrino *estéril*. Recentemente o experimento MiniBOONE (31) apresentou o resultado que desfavorece o sinal de LSND. Porém, ainda existem algumas possibilidades de que esses resultados possam ser reconciliados (32).

Outro resultado experimental controverso é encontrado na Ref. (33) onde foi mostrado sinal positivo de duplo decaimento beta sem neutrinos. Se este resultado é confirmado implica que os neutrinos são partículas de Majorana (a ser discutido no próximo capítulo).

Recentemente foram observados neutrinos vindos do interior da Terra, o que abre as portas para mais um campo de estudo sobre este assunto: a Geofísica de Neutrinos (35).

1.2

Motivação e Objetivo

Até o presente, todos os dados de experimentos de oscilação de neutrinos, com exceção do LSND (30), podem ser explicados perfeitamente pelo

mecanismo de oscilação de neutrinos devido a massas e mistura. De fato, os parâmetros de oscilação associados com neutrinos solares e atmosféricos foram bem determinados. Porém ainda existem as seguintes propriedades fundamentais de neutrinos a serem determinadas: 1) Neutrinos são partículas de Dirac ou Majorana? 2) Quais são valores absolutos de massas de neutrinos? 3) Qual é o valor de ângulo de mistura entre a primeira e a terceira geração? 4) Existe violação de CP no setor de neutrinos?

Segundo o consenso da comunidade de física de neutrinos, a meta principal nos próximos anos é responder estas questões e também melhorar as precisões de medidas de parâmetros de neutrinos que foram medidos.

Além das propriedades mencionadas, existe a possibilidade de que os neutrinos possam ter algumas propriedades não padrão ou exóticas que manifesta física além de modelo padrão de partículas elementares (além de massas e misturas), tais como decaimentos de neutrinos (36), momento magnético de neutrinos (37), violação de invariância de Lorentz (38), interação não padrão de neutrinos com matéria (11, 39, 40, 41, 42), etc.

Nesta tese vamos estudar um desses mecanismos exóticos, o efeito de interação não padrão dos neutrinos² (NSI) com a matéria, isto é, além daquela prevista pelo Modelo Padrão. O NSI foi pela primeira vez discutido por Wolfenstein em 1978 em seu mais famoso artigo (11), onde propôs a possibilidades dos neutrinos terem interação extra com a matéria além da interação fraca. Após Wolfenstein, o NSI foi estudado por vários autores (39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54), com aplicação para neutrinos vindos de supernova, sol, atmosfera e aceleradores. Sabemos que tal efeito não pode explicar os dados de neutrinos solares e atmosféricos como mecanismo principal, portanto esse efeito deve ser subdominate ao mecanismo de oscilação.

Neste trabalho, estudamos as possibilidades de vincular ou descobrir NSI nos futuros experimentos de oscilação de neutrinos com grandes comprimentos que usam os feixes de neutrinos vindos de aceleradores. Primeiramente, discutimos sobre os resultados do estudo feito usando os feixes de neutrinos convencionais vindos de decaimentos de píons com dois detetores idênticos com distâncias diferentes entre eles e a fonte (53). Em seguida, discutimos sobre os resultados do estudo feito usando os feixes de neutrinos não convencionais vindos de decaimentos de múons armazenados num anel também, com 2 detetores idênticos com distâncias diferentes entre eles e a fonte (54).

A orgnização desta tese é a seguinte. O capítulo 2 fornece alguns conhecimentos básicos dos neutrinos. No capítulo 3 discutiremos o mecanismo

²Nesta tese vamos chamar assim com as iniciais em inglês: *Non Standard Interactions*.

de oscilação de neutrinos devido a massas e misturas. No capítulo 4 faremos uma revisão dos principais resultados dos neutrinos solares, atmosféricos, de reator e de acelerador. No capítulo 5, descrevemos qualitativamente como o efeito de NSI pode afetar os experimentos de neutrinos e discutiremos os vínculos obtidos até o presente. No capítulo 6 descrevemos dois experimentos futuros de grande comprimentos em que baseamos para sondar NSI. Um deles usa feixe de neutrinos convencionais (T2KK) e outro não convencionais (Fábrica de Neutrinos). No capítulo 7 discutiremos os resultados de estudos de sensibilidades de NSI baseado em dois detetores idênticos localizados em distâncias diferentes para o experimento T2KK. No capítulo 8 discutiremos os resultados de estudos também baseado em dois detetores idênticos localizados em distâncias diferentes para Fábrica de Neutrinos. Por último descrevemos as conclusões e as previsões para o futuro.