

1

Introdução

Há cerca de 75 anos, o físico austríaco Wolfgang Pauli previu a existência do neutrino, como forma de explicar a distribuição contínua de energia do elétron no decaimento β nuclear. Devido às minúsculas seções de choque dessas partículas ($11 \pm 2.6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$), tornou-se imediatamente claro que seria quase impossível observá-las. Apesar de tamanha dificuldade, a lendária série de experimentos realizados em 1953-59 por Reines e Cowan foi capaz de provar convincentemente, há 50 anos, que os antineutrinos eletrônicos oriundos de reatores nucleares causavam o decaimento β inverso do nêutron¹. Pouco depois, em 1962, Schwartz descobriu o neutrino muônico, previsto no mesmo ano por Danby. A descoberta do lépton tau, em 1975, implicava na existência de um terceiro neutrino (o neutrino tauônico) cuja observação direta é recente (DONUT, 2001). Medidas precisas da largura de decaimento do bóson Z^0 , realizadas desde 1989 no LEP², mostravam que apenas três sabores de neutrinos (2.994 ± 0.0012), com massas menores que $1/2M_{Z^0}$ ³, participam das interações fracas. Tais neutrinos são normalmente intitulados neutrinos ativos. Aqueles que não reconhecem a interação fraca são denominados neutrinos estéreis.

Grande parte do progresso alcançado na física de neutrinos deve-se principalmente, ao grande número de experimentos projetados para encontrar evidências da massa dessas partículas. Essa busca pode ser justificada, em parte, pelo fato de que não há qualquer exigência, seja por invariância de gauge ou qualquer outro princípio de simetria, de que os neutrinos não tenham massa.

A conclusão de que os neutrinos são massivos tem sido proporcionada pela interpretação dos resultados das medidas de distorção espectral, realizadas em experimentos com neutrinos atmosféricos, solares, originários de reatores e de aceleradores, como indício do fenômeno de oscilação de neutrinos. De acordo com esse fenômeno (2, 5), um neutrino de determinado sabor pode transformar-se em um outro de sabor diferente ao longo de sua propagação.

¹O decaimento β inverso do nêutron é: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$.

²Large Electron-Positron Collider. Acelerador de partículas localizado no CERN.

³ $M_{Z^0} = (91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV})$. Usaremos o sistema de unidades onde $\hbar = c = 1$.

Tal metamorfose só é possível se o comportamento dos neutrinos for análogo ao dos quarks, isto é, se os auto-estados de sabor puderem ser representados como superposições coerentes dos auto-estados de massa. A escala de massa obtida a partir desse modelo, revela que os neutrinos são muito mais leves que os seus correspondentes léptons carregados e que os quarks. Essa pode ser uma indicação de alguma nova física além do bem sucedido Modelo Padrão.

Neutrinos de reator desempenharam um papel decisivo no início da história das oscilações de neutrinos (14, 15, 16, 21, 22, 23). Nas décadas de 80 e 90, vários experimentos foram realizados colocando-se o detector a poucas dezenas de metros do núcleo do reator: ILL Grenoble (França, 1981), Rovno (Rússia, 1986), Savannah River (EUA, 1986), Gösgen (Suíça, 1986), Krasnoyarsk (Rússia, 1990) e Bugey (França, 1995). Como o conhecimento da fonte de neutrinos não era melhor que 10%, para aumentar a sensibilidade do experimento, as taxas de neutrinos eram comparadas em diferentes distâncias. Nenhum destes testes observou qualquer evidência de oscilação. Desta geração, os melhores limites sobre os parâmetros de oscilação foram obtidos em Bugey (23, 27, 28).

No final da década de 90, dois experimentos utilizaram neutrinos de reator para sondar a região de parâmetros de oscilação, relacionada aos experimentos com neutrinos atmosféricos: Chooz (França, 1997) e Palo Verde (EUA, 1998). Nem Chooz ou Palo Verde encontraram sinais positivos de oscilação. Apesar disso, o melhor limite para o ângulo de mistura θ_{13} foi proporcionado pelo experimento Chooz.

Com um '*baseline*'⁴ médio de 180 km, o experimento KamLAND (Japão, 2002) foi projetado para ser sensível à solução do grande ângulo de mistura de oscilação ('*Large Mixing Angle*' - *LMA*) associado ao problema do déficit de neutrinos solares. Até agora, KamLAND foi o único experimento que, utilizando neutrinos originários de reatores nucleares, encontrou um sinal positivo de oscilação de antineutrinos eletrônicos.

Nos últimos anos, uma atenção especial foi dispensada para a possibilidade de se determinar um valor para θ_{13} (ou seu novo limite), a partir de um experimento que use reatores nucleares como fonte de neutrinos. Vários sítios têm sido considerados para abrigarem um experimento dessa natureza (38): Angra dos Reis (Brasil); Braidwood, Byron, La Salle, Diablo Canyon, Wolf Creek, Limerick e Peach Bottom (EUA); Chooz, Cruas e Penly (França); Krasnoyarsky (Rússia); Daya Bay (China); Kashiwazaki-Kariwa (Japão); Kuo-Sheng (Taiwan). Aproveitando a configuração de um experimento com este objetivo, há possibilidade de se explorar outros aspectos da física de neutrinos,

⁴O termo '*baseline*' refere-se à distância entre a fonte e o detector.

como neutrinos estéreis. O conceito de neutrinos estéreis foi originalmente introduzido por Pontecorvo em 1967, e uma idéia de como procurá-los em um experimento com reator, juntamente com θ_{13} , foi proposta pelo *Russian Research Centre 'Kurchatov Institute'*, em 1998 (30).

Mesmo que os estudos com neutrinos solares, atmosféricos, de aceleradores ou reatores necessitem apenas de três neutrinos ativos para serem compreendidos dentro do cenário de oscilação, uma mistura adicional com neutrinos estéreis não está descartada. Um possível indício dessa interferência vem da observação de transições $(\bar{\nu})_{\mu} \rightarrow (\bar{\nu})_e$ pela Colaboração LSND (6, 7).

Já existe o consenso de que para melhorar os resultados de Chooz com experimentos com reatores nucleares, dois (ou mais) detectores próximos à estação nuclear são necessários. O primeiro detector seria posicionado a poucas dezenas (ou centenas) de metros do núcleo do reator, com a função de monitorar o espectro de $\bar{\nu}_e$ antes que as oscilações, induzidas pelas diferenças de massa dentro das escalas atmosférica ou solar, possam ocorrer. O segundo detector, posicionado entre 1 e 2 km, seria responsável por monitorar o comportamento de $1/L^2$ do espectro de $\bar{\nu}_e$. Na procura por neutrinos estéreis com reatores nucleares, o detector de maior interesse é o primeiro, pois estaria habilitado a medir uma redução no fluxo de neutrinos, associada às oscilações induzidas por uma escala de massa da mesma ordem de grandeza daquela apontada pela Colaboração LSND.

Dentro deste cenário, portanto, o fenômeno de oscilação de neutrinos ocupa um lugar de destaque, abrindo grandes perspectivas para alguma nova física além do Modelo Padrão.

Nossa motivação para desenvolver esse trabalho surgiu da possibilidade de se explorar a região permitida pelo LSND com um experimento utilizando neutrinos de reator. Atualmente, existem diversos projetos cujo objetivo é determinar um valor para o ângulo de mistura θ_{13} (28, 38). Em todos esses projetos discute-se a utilização de dois ou mais detectores, sendo que um deles deverá ser colocado próximo ao reator. Aproveitando uma tal configuração, se o primeiro detector for colocado a uma distância inferior a 100 m da fonte, pode-se habilitar uma busca de um Δm^2 dentro do intervalo 0.1 - 1.0 eV².

Nosso objetivo consiste em investigar, fenomenologicamente, o acoplamento de um quarto neutrino estéril efetivo aos três sabores conhecidos, determinando sua interferência sobre a probabilidade de desaparecimento de anti-neutrinos eletrônicos e verificando qual a possibilidade de se encontrar alguma evidência dessa nova mistura, a partir da análise da distorção do espectro de neutrinos oriundos de reatores nucleares.

A investigação fenomenológica desenvolvida nesse trabalho dividiu-se em

três etapas:

- (i) Estudar os experimentos que mediram a distorção no espectro de neutrinos produzidos em reatores nucleares;
- (ii) Estender o formalismo de oscilação padrão, com três neutrinos ativos, considerando um esquema acrescido de um neutrino estéril;
- (iii) Estabelecer as condições necessárias para que um experimento usando um reator nuclear, tenha sensibilidade suficiente para procurar por uma quarta geração de neutrinos.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. Nos Capítulos 1 e 2, apresentaremos alguns aspectos teóricos diretamente ligados à física de neutrinos massivos, tais como as representações de Weyl, Dirac e Majorana para o neutrino, e o mecanismo de transição de sabor. A metodologia básica de investigação do fenômeno de oscilação também será discutida, assim como são apresentados os principais resultados experimentais.

O Capítulo 3 abordará um estudo sobre três experimentos com reatores nucleares: Bugey (23), Chooz (21, 22) e KamLAND (14, 15). Os experimentos Bugey e Chooz foram escolhidos por apresentarem limites sobre os parâmetros de oscilação ainda não excluídos, apesar de não terem encontrado indícios de conversão de sabor. Quanto a KamLAND, a escolha deve-se ao fato de ser ele o único experimento com neutrinos de reator que encontrou um sinal positivo de desaparecimento.

No Capítulo 4, desenvolveremos o formalismo em (3+1) gerações. Ele será utilizado posteriormente, para investigar se a interferência de um auto-estado de massa mais elevado pode resolver a controvérsia gerada pelos resultados do LSND.

No Capítulo 5, discutiremos uma configuração experimental baseada em um reator nuclear, capaz de procurar por distorções no espectro de neutrinos causadas pela interferência de uma diferença de massa quadrada dentro do intervalo favorecido pelo LSND.

No último capítulo, apresentaremos nossas conclusões e discutiremos as perspectivas futuras, tendo em vista a possibilidade de se procurar por neutrinos estéreis com a nova geração de experimentos que tentarão medir θ_{13} , baseados em neutrinos de reator.