

4

LSND, MiniBooNE e Neutrinos Estéreis: Aspectos Gerais

Neste capítulo fazemos uma análise dos resultados alcançados pelo experimento LSND e comparamos com o resultado encontrado recentemente pelo experimento MiniBooNE. Aqui estamos preocupados em analisar quantidades observáveis tais como, a massa cinemática, cuja medida é feita através de experimentos com o decaimento beta do tritium sendo que o limite atual é 2.2 eV fornecido pelos experimentos MAINZ e Troitsk. Um outro observável que estamos interessados é a massa efetiva de Majorana encontrada a partir da análise do $0\nu\beta\beta$.

4.1

O experimento LSND e suas implicações

O experimento LSND (*Liquid Scintillator Neutrino Detector*) foi realizado no acelerador LAMPF (*Los Alamos Meson Physics Facility*) em Los Alamos National Laboratory entre os anos 1993 e 1998 [34, 68]. Esse experimento estava buscando o aparecimento $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ e $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ dos produtos de píons e subsequente decaimento do múon, produzidos pelo espalhamento de prótons acelerados sobre um alvo fixo:

$$p + \text{alvo} \longrightarrow \pi^+ + X, \quad (4.1)$$

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu, \quad (4.2)$$

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu. \quad (4.3)$$

Segundo a colaboração LSND, eles encontraram um claro excesso de eventos com a assinatura $\bar{\nu}_e$, o qual foi interpretado como uma evidência para oscilação de neutrinos com probabilidade de $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 0.31\% (+0.11\% \text{ } -0.10\% \pm 0.05\%)$ [34]. É importante ressaltar também, que uma análise de oscilações do tipo $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ do decaimento (4.2) foi realizada e uma probabilidade de oscilação

de $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 0.26\%(\pm 0.1\% \pm 0.05\%)$ [68] foi encontrada, sendo consistente com os resultados obtidos na análise da transição $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$. Uma análise mais atual dos resultados do experimento LSND foi realizada, e encontraram um sinal de oscilação consistente com zero no canal de neutrino [69]. Os valores atualizados das probabilidades são: $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = (0.264 \pm 0.067 \pm 0.045)\%$ e $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = (0.10 \pm 0.16 \pm 0.04)\%$ [69]. Se combinarmos os dados do experimento LSND, comumente referido como anomalia LSND, com outros experimentos e interpretarmos em termos de oscilações de neutrinos de dois sabores, encontra-se uma diferença de massa quadrada da ordem $\Delta m^2 \sim (0.1 - 10) \text{ eV}^2$ [34, 68]. As regiões favorecidas são vinculadas pelo resultado negativo do experimento KARMEN (KARlsruhe Rutherford Medium Energy Neutrino) [70], que é similar ao LSND mas com a distância entre fonte e detector (baseline) menor¹.

4.2

O experimento MiniBooNE

O experimento MiniBooNE está localizado no Fermi National Accelerator Laboratory, em Batavia, IL, USA. Para produzir o feixe de neutrinos, inicia-se com um feixe de prótons de 8 GeV do Booster que colide com um alvo de Berílio, na colisão são produzidos mésons e o feixe de neutrinos é produzido depois do decaimento desses mesões. Os neutrinos são detectados a uma distância de 541 metros da fonte de neutrinos. O detector é um tanque aberto de óleo mineral, CH_2 , cuja visualização é fornecida por tubos fotomultiplicadores. As interações de neutrinos são detectadas primariamente via radiação Cerenkov². A figura 4.1 [71] mostra um diagrama do experimento MiniBooNE. O principal alvo do experimento MiniBooNE é confirmar ou

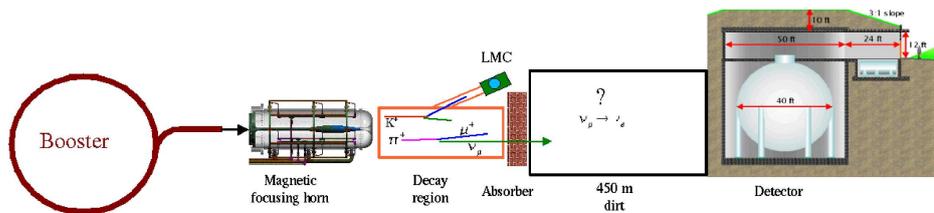


Figura 4.1: Produção e transporte do feixe de neutrinos no MiniBooNE.

refutar os resultados do experimento LSND para oscilação do tipo $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$. Isto é importante, porque os resultados encontrados pelo LSND são incompatíveis com os dados de outros experimentos envolvendo oscilação de neutrinos solares

¹Nesses experimentos os neutrinos têm energia de $E_\nu \sim (10 \div 50) \text{ MeV}$ e viajam uma distância de $L \approx 30$ metros para LSND e $L \approx 17.5$ metros para KARMEN.

²Para maiores detalhes sobre o experimento sugerimos [71].

e atmosféricos, os quais são muito bem explicados no modelo com três neutrinos ativos. Na figura 4.2 [35] mostramos a região no espaço dos parâmetros de oscilação sugerida pelos dados do experimento LSND, os resultados do MiniBooNE excluem a região à direita das linhas azul e preta desfavorecendo a interpretação de oscilação de dois neutrinos dos dados do experimento LSND.

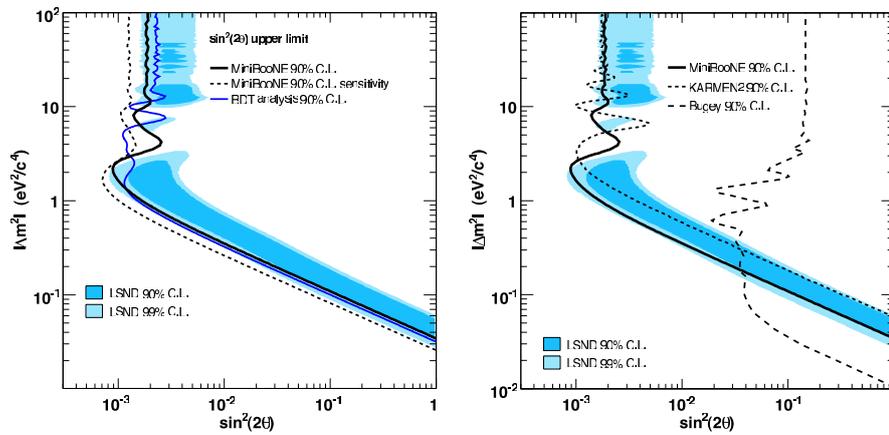


Figura 4.2: Esquerda: Limites em 90% de nível de confiança sobre os parâmetros da oscilação $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ obtidos dos dados do MiniBooNE usando o método "raster scan" unidimensional. A linha sólida preta mostra o limite, enquanto que a linha preta tracejada mostra a sensibilidade projetada. A linha azul sólida representa o limite obtido da análise BDT do mesmo conjunto de dados. Direita: Limites sobre oscilações $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ de MiniBooNE, KARMEN e Bugey.

Na figura 4.3 [65] mostramos uma coleção de resultados fornecidos pelos experimentos LSND, KARMEN, CCFR, CDHS, CHOOZ, Bugey e MiniBooNE no plano $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta)$, é possível observar a região de exclusão fornecida por cada experimento, essa região está à direita da curva que representa o experimento.

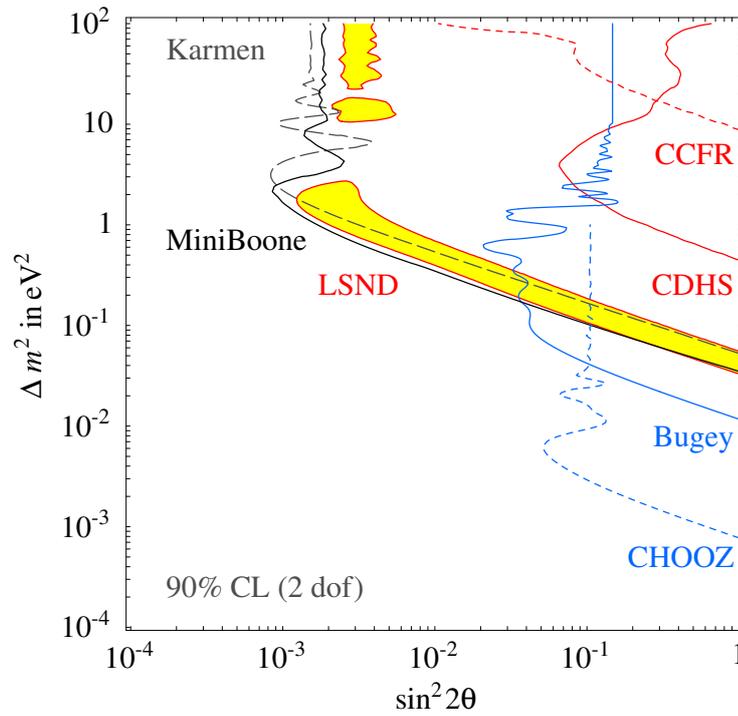


Figura 4.3: Coleção de dados dos experimentos CHOOZ, Bugey, CDHS, CCFR, LSND e MiniBooNE. O ângulo de mistura θ tem diferentes valores para cada experimento. A região sombreada representa o limite fornecido pelos experimentos MiniBooNE, LSND e KARMEN para $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$.

4.3

Interpretações para a anomalia LSND

Desde que a colaboração LSND anunciou ter encontrado evidência de oscilação no canal $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, a comunidade de física de neutrinos vem tentando explicar esse resultado e muitos modelos surgiram desde então. Nas subseções seguintes trataremos de alguns desses modelos que tentam explicar a anomalia LSND, tendo em mente o recente resultado do experimento MiniBooNE que enfraqueceu o resultado LSND.

4.3.1

Cenário com 4 neutrinos

Aqui apresentamos uma descrição do modelo que envolve 3 neutrinos ativos e um neutrino estéril. Cenários com 4 neutrinos tornaram-se populares depois dos resultados do experimento LSND reportando uma evidência para as transições $\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e$. Se interpretarmos o resultado LSND em termos de oscilação de neutrinos teremos uma escala de massa da ordem de eV^2 . Agora se juntarmos com os dados fornecidos pelos experimentos de neutrinos atmosféricos (mais K2K) e observações de neutrinos solares (mais KamLAND), os quais exigem uma escala de massa da ordem de $10^{-3}eV^2$ e $10^{-4}eV^2$, respectivamente, neste caso temos três diferentes escalas de massas.

Em termos gerais, para que todos os dados sejam acomodados de forma consistente, é necessário que um quarto neutrino seja adicionado aos três neutrinos padrões. Essa adição deve respeitar os resultados fornecidos pelo experimento LEP o qual apontou a existência de apenas três sabores de neutrinos possuindo a interação fraca padrão. Então de acordo com esse resultado, o quarto neutrino não deve ter a interação fraca padrão, ou seja, ele deve ser estéril. Para esse cenário temos dois possíveis padrões de massa ver figura 4.4 [59]:

- Classe $2 + 2$, nesta classe dois pares de neutrinos são separados um do outro pela escala de massa LSND. Existem duas possibilidades para este cenário.
- Classe $3 + 1$, nesta classe temos que um único neutrino é separado dos outros três pela escala LSND e existem quatro possibilidades neste cenário.

Este cenário foi bastante discutido na literatura [72, 73, 74], e antes mesmo dos resultados do MiniBooNE ele já havia sido fortemente desfavorecido pelos dados de outros experimentos de curto comprimento como uma opção de

explicar a anomalia LSND. É importante comentar que este tipo de declaração é baseada na análise conjunta de experimentos de curto comprimento e dados provenientes de experimentos que envolvem neutrinos solares e neutrinos atmosféricos, os quais vinculam fortemente a mistura simultânea de neutrinos estéreis com neutrinos do tipo eletrônico(ν_e) e do tipo muônico(ν_μ). Para uma discussão bastante completa dos argumentos que levam ao desfavorecimento deste modelo e de sua fenomenologia sugerimos [59].

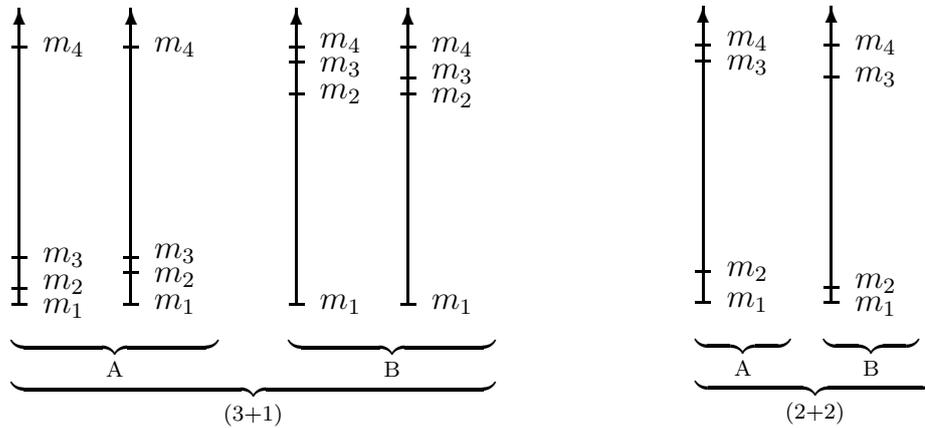


Figura 4.4: Os seis tipos de espectro de massas possíveis para um modelo com 4 neutrinos.

4.3.2

Um neutrino estéril mais violação de CPT

Neste modelo, consegue-se um ajuste global satisfatório adicionando um neutrino estéril e permitindo que neutrinos e antineutrinos tenham massas e misturas diferentes, ou seja, assumindo violação de CPT. Pode-se ajustar a anomalia LSND em antineutrinos sem introduzir qualquer tipo de efeito sobre neutrinos, evitando assim vínculos de MiniBooNE e de outros experimentos realizados com neutrinos [75, 76].

4.3.3

Decaimento anômalo do múon

Uma outra maneira de explicar o resultado LSND seria através do decaimento do múon violando o número leptônico. O decaimento do múon $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_i$, onde $i = e, \mu, \tau$, se permitido pela teoria, fornece o excesso de eventos em $\bar{\nu}_e$ detectados pelo experimento LSND. Este tipo de decaimento é obtido adicionando dois novos operadores efetivos no modelo padrão, e a

escala de energia de nova física é da ordem de $\Lambda \leq 500$ GeV, para maiores detalhes sugerimos [77, 78]. Esta interpretação implica num resultado nulo do experimento MiniBooNE, pois o feixe de neutrino é gerado por decaimentos de pós não de múons, desfavorecendo este modelo.

4.3.4

Um neutrino estéril tomando atalho em dimensões extras

Neste modelo assume-se que as partículas do modelo padrão estão confinadas sobre uma brana flutuando em dimensões extras planas, ou sobre uma brana numa dimensão extra entortada assimetricamente, e que um neutrino estéril extra pode viajar livremente nas dimensões extras. Do ponto de vista de um observador localizado na brana, o fato de um neutrino estéril poder tomar atalhos em dimensões extras manifesta-se com uma velocidade aparente diferente da velocidade da luz, mesmo que o neutrino tenha massa nula. Na presença de um neutrino estéril massivo e de mistura com os neutrinos ativos, as oscilações são descritas por uma Hamiltoniana efetiva mais um termo extra que é proporcional a energia. O novo termo pode dar uma ressonância tipo MSW numa dada energia, que se escolhida ~ 400 MeV pode acomodar os resultados do LSND e MiniBooNE sem entrar em conflito com experimentos de desaparecimento [79].

4.3.5

Um neutrino estéril interagindo com um fluido cosmológico

Neste modelo adiciona-se ao modelo padrão um neutrino estéril, com espectro de massa do tipo $3 + 1$, e uma partícula leve neutra que interage com o neutrino estéril e que tem uma densidade cosmológica um pouco menor que os fótons. Fazendo ajustes nos parâmetros do modelo de tal forma que o neutrino estéril sinta um potencial de matéria, A_s , 10^3 vezes maior que o potencial ativo usual, é possível acomodar os resultados de LSND e MiniBooNE de uma maneira similar ao modelo discutido na subseção anterior. Este tipo de cenário ainda foi pouco discutido na literatura, uma lista completa de referências pode ser encontrada em [65].

Na literatura existe uma quantidade muito grande de modelos que tratam de física além do modelo padrão, para uma discussão bastante completa de modelos que envolvem física de neutrinos e nova física sugerimos [80].