

5

Experimento Típico para Sondagem de Neutrinos Estéreis

Discutiremos agora a idealização de um experimento de oscilação, baseado em um reator nuclear como fonte de antineutrinos, que possa fornecer informações sobre a existência de um quarto neutrino, chamado estéril, e seus parâmetros de mistura com os demais neutrinos ativos. Uma tal configuração assemelha-se à atual proposta de Angra (44) para determinar um valor para θ_{13} . Devemos considerar os atuais limites de exclusão para estimarmos a sensibilidade necessária para o experimento. A partir dessa informação podemos determinar quais as características que o experimento precisa possuir para atingir seu objetivo. Ou seja, dada a região do espaço dos parâmetros de oscilação que se deseja alcançar, aliada ao conhecimento do espectro de energia dos antineutrinos, pode-se determinar toda a informação pertinente à redução dos erros sistemáticos, quais serão as técnicas empregadas para a detecção dos antineutrinos, tamanho e posição dos detectores, estimativa e medida do ruído, sistemas de blindagem, etc. Nesse sentido, a Figura 5.1 apresenta o limites para os parâmetros de oscilação considerando um Δm^2 elevado, dentro da escala determinada por LSND. Pode-se concluir imediatamente que, para alcançar o intervalo favorecido por LSND, que se reflete até agora como a única indicação de existência de um auto-estado de massa da ordem de 1 eV^2 , o experimento tem que ser sensível a um ângulo de mistura θ , tal que $\sin^2 2\theta < 0.04$.

5.1

Características Estruturais Gerais

O modelo de experimento que foi idealizado, baseia-se em uma configuração proposta para utilização do complexo nuclear de Angra (Angra dos Reis, Brasil). De acordo com essa proposta o reator nuclear Angra-II, com uma potência térmica média de 4.5 GW_{th} , será a fonte de antineutrinos. Dois detectores farão o monitoramento do espectro de antineutrinos. O primeiro (detector 1) será posicionado a 66 metros do reator, enquanto o segundo (detector 2) ficará a 1500 metros do núcleo. Dessa forma, o experimento fica habilitado a investigar tanto os parâmetros de oscilação que estão dentro da escala do LSND, quanto à escala atmosférica. O detector mais próximo do núcleo é constituído

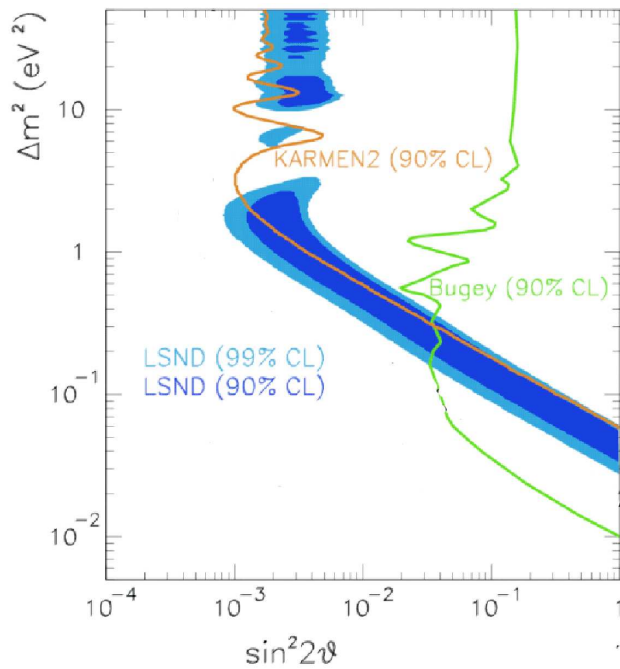


Figura 5.1: Regiões do espaço de parâmetros de oscilação permitidas por LSND. Superpostas a elas estão os contornos de exclusão proporcionados por KARMEN 2 e Bugey. Adaptado de (36)

por uma massa fiducial de 1 ton de líquido cintilador rico em prótons (8.5×10^{28} prótons livres/ton) que pode receber alguma taxa de gadolínio (^{157}Gd) para aumentar a seção de choque de captura de nêutrons. O detector localizado a 1500 metros possui 0.5 kton de massa fiducial do mesmo líquido cintilador. A detecção ocorre via decaimento beta inverso, através da usual técnica de atraso de coincidência entre o sinal do e^+ (emissão de dois raios gama após a sua aniquilação) e o sinal característico de captura do nêutron (um raio gama de 2.2 MeV). Considerou-se uma eficiência de detecção absoluta de $\bar{\nu}_e$ de 80% comum para ambos detectores. As seções de choque foram calculadas com base na Eq.(3-5) e seu resultado é mostrado na Figura 5.2.

O espectro de energia do pósitron esperado, pode ser calculado com base na mesma metodologia apresentada no Capítulo 2 e já utilizada por Gösgen, Bugey e Chooz. Como já foi mencionado anteriormente, para a correta determinação desse espectro, é fundamental o conhecimento de uma série de parâmetros diretamente relacionados com o reator, tais como a composição do combustível e sua potência, bem como as variações dos mesmos ao longo do período de tomada de dados.

Para o cálculo da distribuição de energia do pósitron nessa simulação, consideramos:

1. as taxas de fissão de cada isótopo divulgadas pelo experimento KamLAND (14): $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} : ^{239}\text{Pu} : ^{241}\text{Pu} = 0.563 : 0.079 : 0.301 : 0.057$.

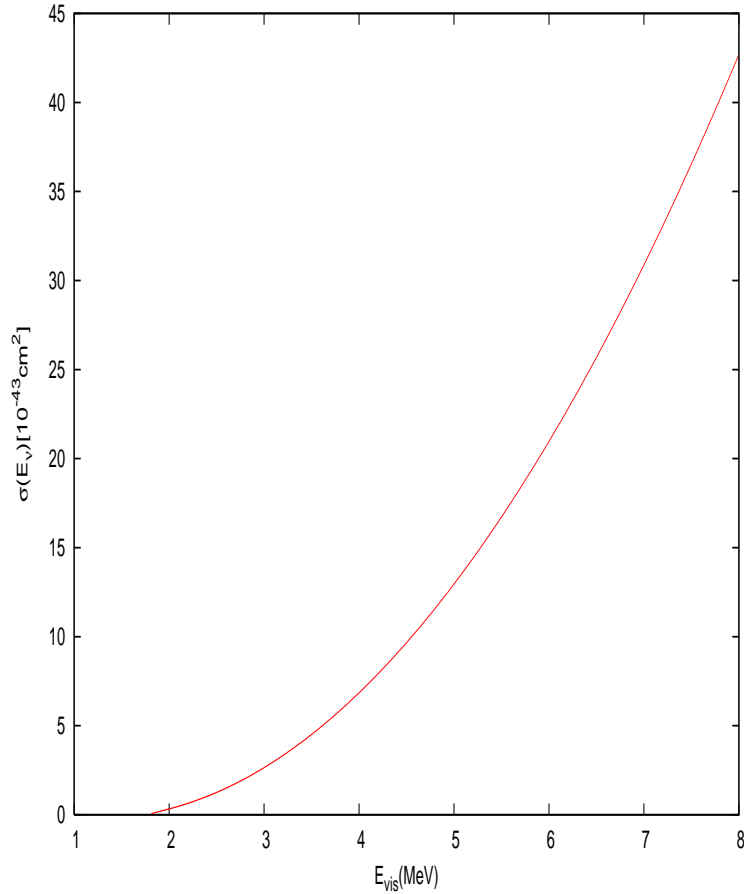


Figura 5.2: Seção de choque do decaimento beta inverso.

2. o tempo de exposição de 2 anos.
3. o intervalo de energia visível do pósitron, de $1 \leq E \leq 8$ MeV.
4. a resolução de energia σ , modelada como

$$\sigma/E(\text{MeV}) = \frac{5\%}{\sqrt{E(\text{MeV})}}. \quad (5-1)$$

onde E corresponde à energia visível, $E = E_{\bar{\nu}_e} - 0.8$ MeV.

O espectro de neutrinos esperado na ausência de oscilações, nos detectores 1 e 2, em função da energia visível, é apresentado nas Figuras 5.3 e 5.4.

5.2

Resultados e análise

Nesta seção, analisaremos a perturbação provocada no espectro de antineutrinos pela presença de um auto-estado de massa elevado. Procuramos investigar se um experimento baseado em um reator nuclear seria capaz de determinar algum efeito dessa escala de massa. Nesse sentido, foram realizadas duas análises (35). A primeira baseou-se em uma hipótese conservadora

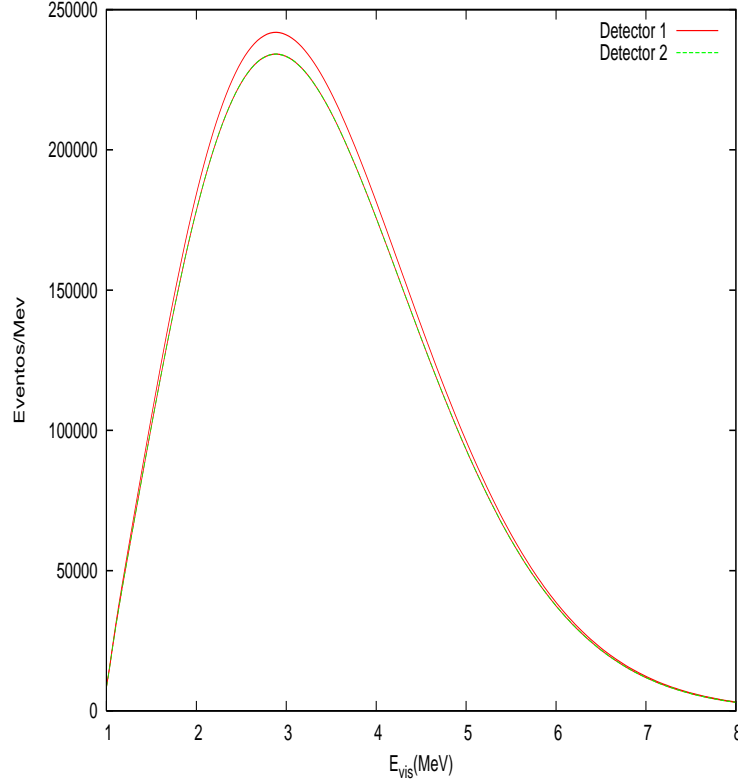


Figura 5.3: Distribuição de eventos nos detectores 1 (linha contínua) e 2 (linha tracejada), em função da energia visível para um tempo de exposição de 2 anos.

a respeito dos valores dos erros sistemáticos que afetam o experimento. A segunda considera valores substancialmente menores para esses erros e muito difíceis de serem alcançados. Contudo, por ser bastante otimista, essa hipótese permite estabelecer os limites superiores para se encontrar qualquer interferência de auto-estados de massa elevados com base no modelo adotado. Em ambos os casos, foram determinadas as curvas de sensibilidade do experimento. As curvas de sensibilidade foram encontradas a partir do cálculo da função $\Delta\chi^2$ definida como (26)

$$\Delta\chi_{\text{reator}}^2 \equiv \min_{\alpha^{\text{'s}}} \sum_{a=f,n} \left[\sum_{i=1}^{20} \left\{ \frac{(N_{ai} - (1 + \alpha_i + \alpha_a + \alpha)N_{ai}^{\text{teste}})^2}{N_{ai}^{\text{teste}} + \sigma_{\text{db}}^2 (N_{ai}^{\text{teste}})^2} + \frac{\alpha_i^2}{\sigma_{\text{Db}}^2} \right\} + \frac{\alpha_a^2}{\sigma_{\text{dB}}^2} \right] + \frac{\alpha^2}{\sigma_{\text{DB}}^2}. \quad (5-2)$$

Nessa equação N_{ai} representa o número de eventos previstos teoricamente no detector a em um bin i , enquanto N_{ai}^{teste} é o número de eventos do sinal, calculado com base nos melhores resultados experimentais. Os índices n e f , representam os detectores próximo e distante. São considerados quatro tipos de erros sistemáticos: σ_{DB} , σ_{Db} , σ_{dB} , e σ_{db} . Os índices D(d) representam a

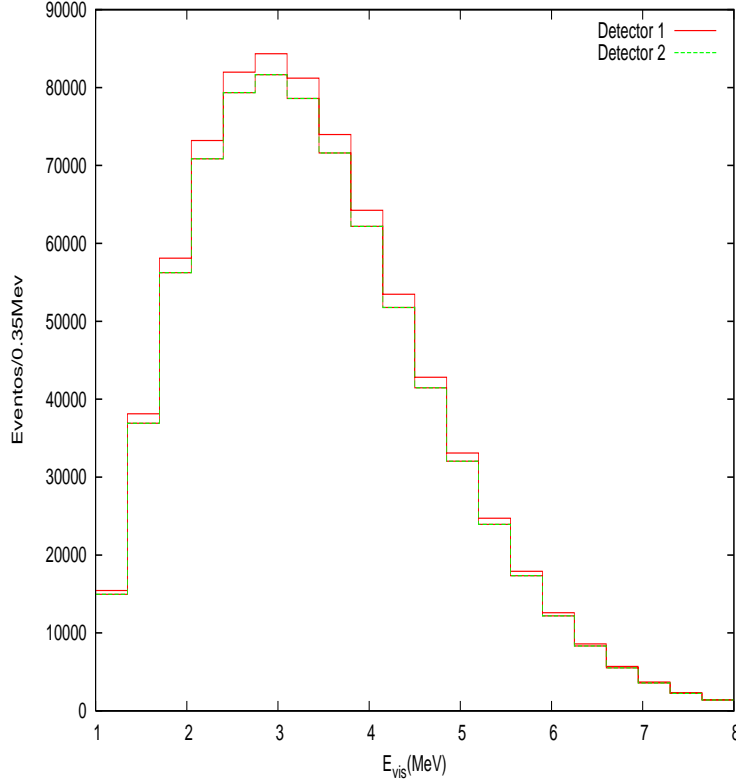


Figura 5.4: Histograma da distribuição de eventos nos detectores 1 (linha contínua) e 2 (linha tracejada), em função da energia visível.

correlação (ou não correlação) entre os detectores. Os índices $B(b)$ representam a correlação (ou não correlação) entre bins. Os coeficientes α são parâmetros livres. Da minimização da Eq.(5-2), como mostram Minakata e Sugiyama (26), se obtém

$$\Delta\chi_{\text{reator}}^2 = (\vec{x}^\top, \vec{y}^\top) V^{-1} \begin{pmatrix} \vec{x} \\ \vec{y} \end{pmatrix}, \quad (5-3)$$

$$\vec{x}^\top \equiv \left(\frac{N_{f1} - N_{f1}^{\text{teste}}}{N_{f1}^{\text{teste}}}, \dots \right), \quad \vec{y}^\top \equiv \left(\frac{N_{n1} - N_{n1}^{\text{teste}}}{N_{n1}^{\text{teste}}}, \dots \right), \quad (5-4)$$

$$V \equiv \text{diag} \left(\frac{1}{N_{f1}^{\text{teste}}}, \dots, \frac{1}{N_{n1}^{\text{teste}}}, \dots \right) + \sigma_{\text{db}}^2 I_{40} + \sigma_{\text{dB}}^2 \begin{pmatrix} H_{20} & 0 \\ 0 & H_{20} \end{pmatrix} + \sigma_{\text{Db}}^2 \begin{pmatrix} I_{20} & I_{20} \\ I_{20} & I_{20} \end{pmatrix} + \sigma_{\text{DB}}^2 H_{40}, \quad (5-5)$$

onde I_n refere-se à matriz identidade de dimensão $n \times n$ e H_n representa as matrizes $n \times n$ cujos elementos são todos unitários. Em nossa análise, admitimos para a hipótese conservadora, os erros sistemáticos $\sigma_{\text{DB}} = \sigma_{\text{Db}} = 2.0 \%$ e $\sigma_{\text{dB}} = \sigma_{\text{db}} = 0.5 \%$, enquanto que para a otimista, $\sigma_{\text{DB}} = \sigma_{\text{Db}} = 1.0 \%$ e $\sigma_{\text{dB}} = \sigma_{\text{db}} = 0.2 \%$ (35).

A aproximação usual envolvendo apenas duas gerações efetivas Eqs.(2-31) e (2-33) será empregada. Estamos supondo, portanto, um sistema com uma escala de massa dominante. Para um caso particular de oscilação que queiramos testar, o número de eventos esperados será calculado por

$$N_{ai} = n_p T \int dE_{\bar{\nu}_e} \sigma(E_{\bar{\nu}_e}) \sum_k \frac{S(k, E_{\bar{\nu}_e})}{4\pi L_k^2} \epsilon(E) R_\ell(E, E') P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \quad (5-6)$$

e

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \text{sen}^2 2\theta \text{sen}^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right). \quad (5-7)$$

As grandezas envolvidas nas Eq.(5-6) e (5-7) foram oportunamente esclarecidas quando as duas equações apareceram originalmente nesse texto. Uma hipótese qualquer de oscilação ou de não-oscilação será testada comparando-se o número de eventos calculado com a Eq.(5-6) com aquele calculado com o sinal de entrada.

Com base nas características do experimento expostas na seção anterior, e de posse do número de eventos previstos, na ausência de oscilações, determinamos a sensibilidade do experimento, de acordo com as duas hipóteses, através da minimização da função $\Delta\chi^2$. Nesse caso, N_{ai}^{teste} corresponde ao número de eventos detectados na ausência de distorção espectral. Os resultados, para os casos conservador e otimista, são mostrados nas Figuras 5.5 e 5.6, respectivamente. Os gráficos foram construídos a partir da análise com um grau de liberdade (1 d.o.f.) e mostram as regiões excluídas com 90%, 95 % e 99 % de N.C.¹.

Assim que foi determinada a região de sensibilidade do experimento, modificamos o sinal de entrada N_{ai}^{teste} (*input*). Isso equivale a dizer que o sinal de entrada passa a depender de um conjunto de parâmetros de oscilação que queremos verificar se o experimento tem alguma possibilidade de explorá-los. Da Figura 5.1, podemos extrair os parâmetros que queremos testar dentro da sensibilidade do experimento. Eles se encontram sobre a longa faixa favorecida por LSND, mas sofrem a influência direta dos limites negativos impostos por KARMEN 2 e Bugey, e também pela sensibilidade do nosso experimento. Nosso interesse abrange apenas o pequeno intervalo correspondente a

$$0.1 \text{ eV}^2 < \Delta m^2 < 0.5 \text{ eV}^2. \quad (5-8)$$

Para cada proposta (otimista e conservadora) os parâmetros escolhidos para o *input* foram:

¹Nível de Confiança (N.C.).

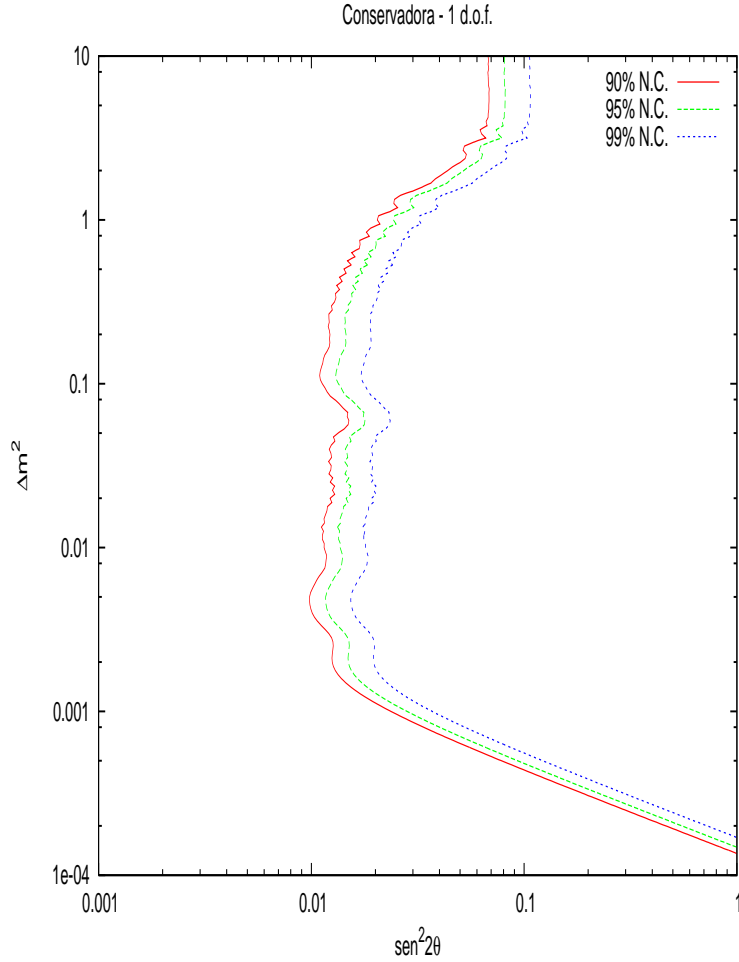


Figura 5.5: Região excluída com 90 %, 95 % e 99% de N.C. na ausência de metamorfose de sabor, considerando a hipótese conservadora.

$$\text{sen}^2 2\theta = 0.03, \left\{ \begin{array}{l} \Delta m^2 = 0.1 \text{ eV}^2 \\ \Delta m^2 = 0.3 \text{ eV}^2 \\ \Delta m^2 = 0.5 \text{ eV}^2 \end{array} \right\}, \quad (5-9)$$

Percebe-se de imediato que o valor mínimo (na verdade, identicamente igual a zero) de $\Delta\chi^2$, corresponde ao ponto $(\text{sen}^2 2\theta, \Delta m^2)$ do espaço de parâmetros utilizado para calcular o *input* na Eq.(5-6). Entretanto, o que realmente importa saber nesse caso, é se o ponto de melhor ajuste encontra-se dentro ou fora da região delimitada pela curva de exclusão na ausência de oscilações. Se afirmativo, podemos ter esperança de que um provável experimento, com características semelhantes às aqui descritas, possa confirmar a existência de auto-estados de massa do neutrino em uma escala muito superior a dos três neutrinos ativos conhecidos.

O que aparece nesse tipo de representação são contornos em torno do ponto onde $\Delta\chi^2$ é mínimo. Essas ilhas correspondem a uma região daquele

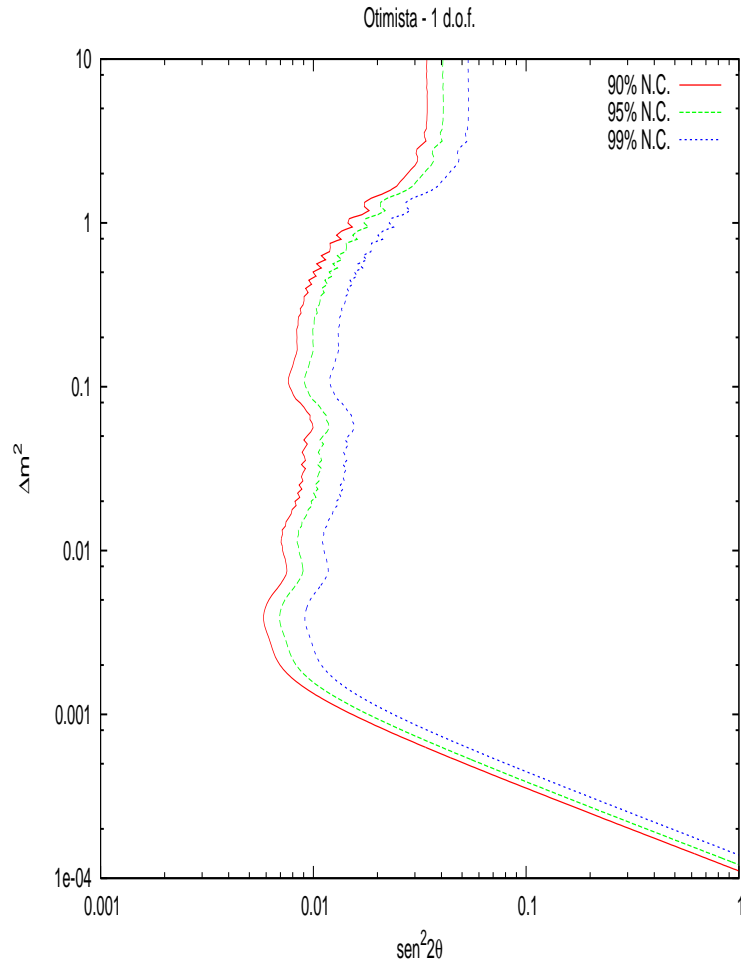


Figura 5.6: Região de exclusão com 90 %, 95 % e 99% de N.C. na ausência de desaparecimento de $\bar{\nu}_e$ encontrada com a hipótese otimista.

espaço na qual há uma probabilidade definida de se ajustar os dados. No caso em discussão, reflete com que nível de confiança podemos confirmar ou excluir oscilações.

Portanto, com o objetivo de explorar a sensibilidade do experimento proposto até aqui, investigamos sua eficácia para ajustar cada *input* apresentado em [Eq.(5-9)]. O resultado é mostrado nas Figuras 5.7 e 5.8.

A partir das Figuras 5.7 e 5.8, nota-se que a configuração experimental apresentada nesse trabalho pode fornecer alguma informação, dentro dos limites considerados, a respeito de uma mistura caracterizada por um ângulo tal que, $0.02 < \text{sen}^2 2\theta$, reduzindo muito com o aumento de Δm^2 . A Figura 5.8 mostra que mesmo com uma redução dos erros sistemáticos até os limites determinados pela hipótese otimista, é pouco provável que um experimento deste tipo possa informar qualquer perturbação de uma mistura caracterizada por $\text{sen}^2 2\theta < 0.02$. Convém destacar que a sensibilidade do experimento no intervalo $1.5 < \Delta m^2 < 5.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ permite avançar sobre o atual limite de

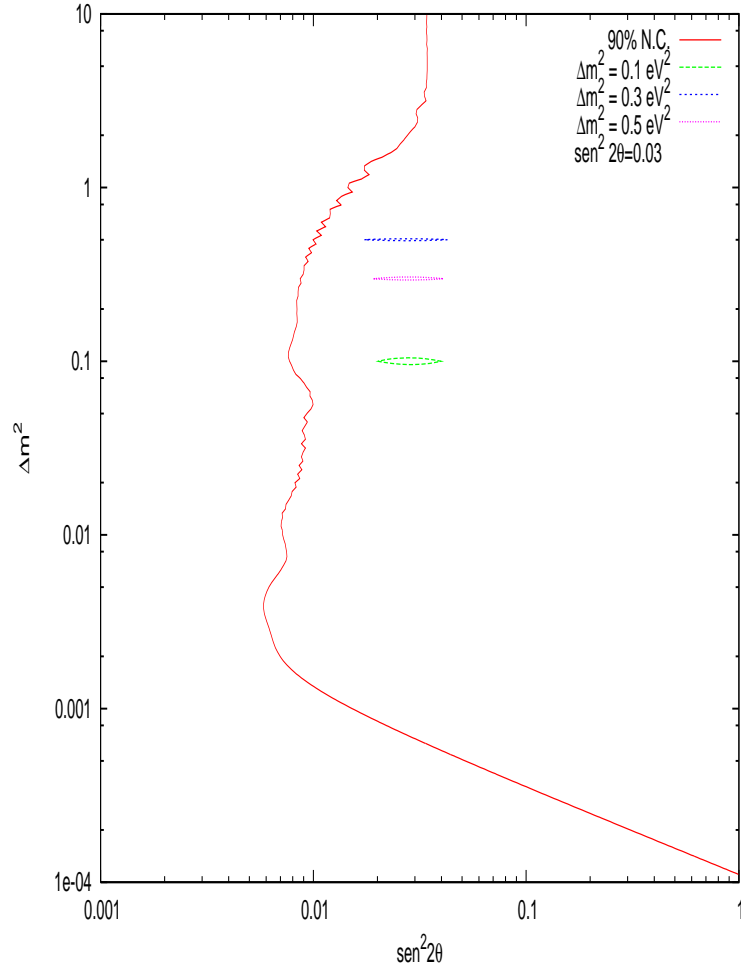


Figura 5.7: Regiões permitidas com 90 % de N.C. (1 d.o.f.) para o desaparecimento de $\bar{\nu}_e$, comparadas com a curva de sensibilidade do experimento dentro da hipótese otimista. Os parâmetros utilizados para o cálculo do sinal de entrada estão representados na figura.

exclusão proporcionado por Chooz a respeito de θ_{13} .

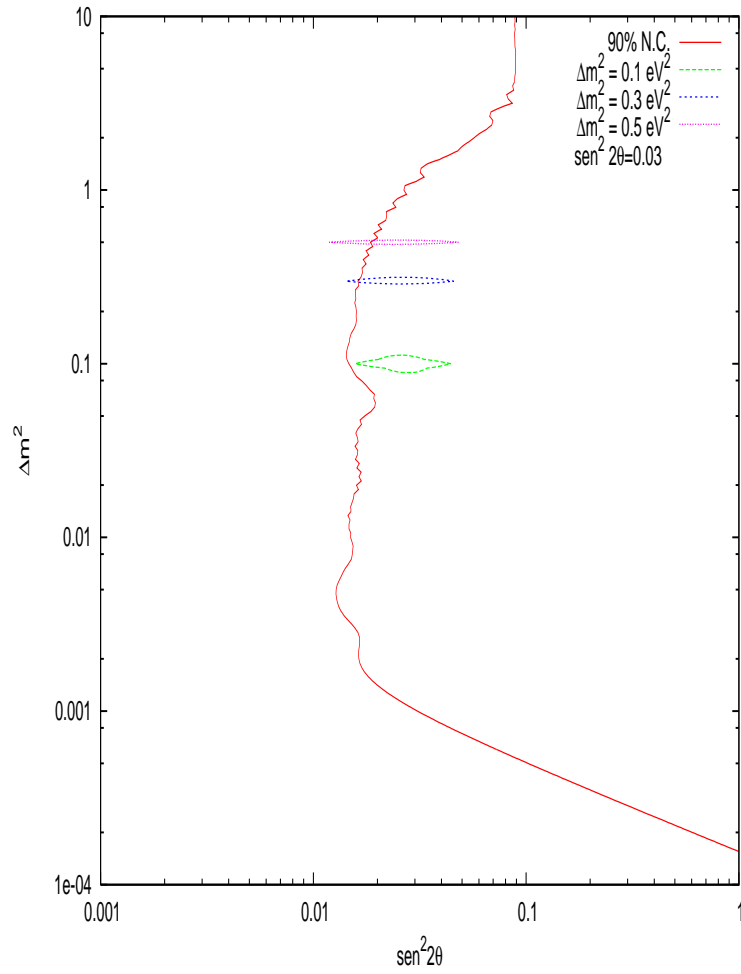


Figura 5.8: Regiões permitidas com 90 % de N.C. (1 d.o.f.) para o desaparecimento de $\bar{\nu}_e$, comparadas com a curva de sensibilidade do experimento dentro da hipótese conservadora. Cada *input* está indicado na figura.