



Fábio Alex Pereira dos Santos

**Estudo dos Efeitos de Neutrinos Estéreis em
Experimentos de Decaimento Beta**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio

Orientador: Prof. Hiroshi Nunokawa

Rio de Janeiro
março de 2008



Fábio Alex Pereira dos Santos

**Estudo dos Efeitos de Neutrinos Estéreis em
Experimentos de Decaimento Beta**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Hiroshi Nunokawa

Orientador

Departamento de Física — PUC-Rio

Prof. Ronald Cintra Shellard

Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. João Carlos Costa dos Anjos

CBPF

Prof. Carla Göbel Burlamaqui de Mello

Departamento de Física- PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de março de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fábio Alex Pereira dos Santos

Graduou-se em licenciatura Plena em física na Universidade Federal do Pará em 2004.

Ficha Catalográfica

Santos, Fábio Alex Pereira dos

Estudo dos Efeitos de Neutrinos Estéreis em Experimentos de Decaimento Beta / Fábio Alex Pereira dos Santos; orientador: Hiroshi Nunokawa. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Física, 2008.

v., 105 f.: il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Neutrino Estéril. 3. Decaimento Beta. 4. Oscilação de Neutrinos. I. Nunokawa, Hiroshi. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 510

Agradecimentos

À Deus, Criador de toda a ciência e conhecimento;

Ao Físico Wolfgang Pauli por ter postulado a existência do Neutrino;

Ao meu orientador, Prof. Hiroshi Nunokawa, pela paciência e atenção na orientação deste trabalho;

À professora Renata Zukanovich Funchal do instituto de física da Universidade de São Paulo, pelas valiosas sugestões que deram início ao trabalho apresentado nesta dissertação;

À minha mãe e meus irmãos pelo apoio incondicional dispensado em todos os momentos. Ao meu avô Almerindo pela amizade e incentivo dados durante toda a minha vida.

Ao professor José Abdalla Helayël-Neto pelas aulas de Supersimetria e Teoria de Yang-Mills. Aos amigos Diego Moraes Pantoja, Fernando José Lira Leal e Martim Lourenço pelas discussões sobre Física, Matemática e Ciência em geral.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Aos amigos de Santarém e Belém que muito contribuíram para que eu conseguisse superar alguns obstáculos e chegar até esse momento: Anderson de Oliveira Sampaio, Damião Pedro Meira Filho, Elcivan Amâncio da Silva, Francisco Ferreira de Sousa, Járlesson Gama Amazonas, Jeconias Rocha Guimarães, Leandro Santos Ribeiro, Lúcio Alan Pires da Costa, Marcelo Jorge Souza, Márcio André dos Santos, Marcos Andrey dos Santos e Suzan Vasconcelos, meu muito obrigado!

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio, que muito contribuíram na realização desse trabalho, direta ou indiretamente.

Aos amigos, Edson Vernek da Ohio University (USA) pela grande ajuda na parte computacional, Anderson Fonsêca da FAETEC-RJ e Marcelo Apel da Universidad Catolica Del Norte (Chile), pelas longas discussões sobre Física e pelas valiosas sugestões.

Ao pessoal do departamento de Física da PUC-Rio pelo constante apoio, em particular à Márcia, Giza, Majô e ao grande Julinho;

Resumo

Santos, Fábio Alex Pereira dos; Nunokawa, Hiroshi. **Estudo dos Efeitos de Neutrinos Estéreis em Experimentos de Decaimento Beta**. Rio de Janeiro, 2008. 105p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação, estudamos do ponto de vista fenomenológico, os efeitos de neutrinos estéreis para os observáveis de massas de neutrinos baseado nos dados do experimento LSND e nos resultados divulgados recentemente pela colaboração MiniBooNE. Consideramos observáveis de massa as seguintes quantidades: o parâmetro de massa cinemática cuja medida é realizada em experimentos com o decaimento beta do tritium tendo seu valor atual fornecido pelos experimentos Mainz e Troitsk; a massa efetiva de Majorana, que é uma quantidade que pode ser obtida em experimentos com o duplo decaimento beta sem neutrinos; finalmente, a soma de massas dos neutrinos, a qual é vinculada por dados cosmológicos. Nossa análise é realizada considerando os possíveis ordenamentos de massas para o caso em que temos dois neutrinos estéreis além dos três neutrinos ativos usuais, cuja adição é necessária para explicar os resultados de LSND e MiniBooNE ao mesmo tempo. Neste cenário, temos oito possíveis ordenamentos de massas, os quais dividimos em três grupos. No primeiro grupo, temos que os dois neutrinos estéreis são mais pesados que os três neutrinos ativos. No segundo grupo, os dois neutrinos estéreis são mais leves que os três neutrinos ativos. Cada um destes dois grupos tem possibilidades que dependem do ordenamento de massas dos neutrinos ativos que pode ser normal ou invertido. No terceiro e último grupo temos que um neutrino estéril é mais leve e o outro mais pesado que os três neutrinos ativos. Neste grupo, existem quatro possibilidades de ordenamento associada ao posicionamento dos neutrinos estéreis e ao ordenamento dos neutrinos do setor ativo. Investigamos os observáveis de massas em cada um destes cenários.

Palavras-chave

Neutrino Estéril. Decaimento Beta. Oscilação de Neutrinos.

Abstract

Santos, Fábio Alex Pereira dos; Nunokawa, Hiroshi. **Study of the Effects of Sterile Neutrinos in Beta Decay Experiments.** Rio de Janeiro, 2008. 105p. MsC Thesis — Department of Physics, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation we study, from the phenomenological point of view, the effects of sterile neutrinos for the observables related to neutrino masses based on the data of the LSND experiment and on the results released recently by the MiniBooNE collaboration. We consider the following mass related observables: the kinematic mass parameter which is obtained in tritium beta decay experiments whose current value is provided by Mainz and Troitsk experiments; the Majorana effective mass, it is a quantity that can be obtained in neutrinoless double beta decay experiments. In addition to these quantities, we also consider the sum of neutrinos masses, which is constrained by cosmological data. Our analysis is performed by considering the possible mass orderings for the cases where we have two sterile neutrinos beyond the three standard active neutrinos, whose addition is necessary to explain the results of LSND and MiniBooNE simultaneously. In this scenario there are eight possible mass orderings, which are divided into three groups. In the first group we have two sterile neutrinos which are heavier than the three active neutrinos. In the second group the two sterile neutrinos are lighter than the three active neutrinos. Each of these two groups can be further divided into 2 subgroups depending on the mass ordering of the active neutrinos that can be normal or inverted. In the third and last group we have one sterile neutrino lighter and the other heavier than the three active neutrinos. In this group there are four possibilities of ordering depending on the positioning of the sterile neutrinos with respect to the active ones and on the mass ordering of the active states. We investigate systematically the masses observable in each of these scenarios.

Keywords

Sterile Neutrino. Beta Decay. Neutrino Oscillation.

Sumário

1	Introdução	14
2	Revisão do Modelo Padrão de Partículas Elementares	19
2.1	Teorias de gauge	19
2.2	O Modelo padrão de partículas elementares	25
3	Aspectos Gerais da Física de Neutrinos	34
3.1	Neutrinos e suas representações: Weyl, Dirac e Majorana	34
3.2	Formalismo de oscilação de neutrinos	39
3.3	Buscas diretas de massa do neutrino	44
3.4	Duplo decaimento beta sem neutrinos	46
3.5	Neutrinos cosmológicos	51
4	LSND, MiniBooNE e Neutrinos Estéreis: Aspectos Gerais	53
4.1	O experimento LSND e suas implicações	53
4.2	O experimento MiniBooNE	54
4.3	Interpretações para a anomalia LSND	57
5	LSND, MiniBooNE e Neutrinos Estéreis: Resultados	60
5.1	Cenário com 5 neutrinos	60
5.2	Neutrinos estéreis mais pesados que neutrinos ativos	65
5.3	Neutrinos estéreis mais leves que neutrinos ativos	74
5.4	Um neutrino estéril mais leve e outro mais pesado que os neutrinos ativos	79
5.5	Quantidades mensuráveis	86
6	Conclusão	97

Lista de figuras

- 3.1 Termo de massa de Dirac. O X representa a ação do termo de massa. 36
- 3.2 Termo de massa de Majorana. O X representa a ação do termo de massa. 37
- 3.3 Relação entre os auto-estados de sabor do neutrino ν_e, ν_μ e ν_τ e os auto-estados de massa ν_1, ν_2 e ν_3 em termos dos ângulos de mistura $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$. 40
- 3.4 Mudança de sabor do neutrino no vácuo. O diagrama mostra a criação de um neutrino junto com um lépton carregado por uma fonte. Depois de viajar uma distância L , ele interage com um alvo e produz um segundo lépton carregado. 41
- 3.5 Gráfico de Kurie para o decaimento β do 3H . 45
- 3.6 Diagrama de Feynman para o duplo decaimento beta sem neutrinos ($0\nu\beta\beta$). 47
- 3.7 Massa efetiva do ($0\nu\beta\beta$) em função do neutrino mais leve para hierarquia normal. 48
- 3.8 Massa efetiva do ($0\nu\beta\beta$) em função do neutrino mais leve para hierarquia invertida. 49
- 3.9 Massa efetiva do ($0\nu\beta\beta$) em função do neutrino mais leve para hierarquias normal e invertida. 50
- 4.1 Produção e transporte do feixe de neutrinos no MiniBooNE. 54
- 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. 55
- 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 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$. 56
- 4.4 Os seis tipos de espectro de massas possíveis para um modelo com 4 neutrinos. 58
- 5.1 Ordenamento de massa para o modelo com dois neutrinos estéreis mais pesados que os três neutrinos ativos. 65
- 5.2 Massas individuais dos neutrinos e soma como função de massa de neutrino mais leve, m_1 , para o cenário SSN. 67

- 5.3 Massa cinemática e soma de massas dos neutrinos em função do neutrino de menor massa para o cenário SSN. Na região em azul claro estamos variando os parâmetros de oscilação dentro dos valores permitidos, os quais são mostrados nas equações (5.3) e (5.7). Mostramos também a curva de melhor ajuste e limite futuro para massa cinemática que é 0.3 eV. A curva referente à soma Σ também é mostrada. 68
- 5.4 Massa efetiva de Majorana para o cenário SSN. A região mais escura representa os valores centrais das equações (5.3) e (5.7) com as fases variando livremente no intervalo $[0, 2\pi]$. Na região mais clara estamos variando os parâmetros de oscilação dentro dos valores permitidos, os quais são mostrados nas equações (5.3) e (5.7). Mostramos também os limites atual e futuro para massa efetiva que são 1 eV e 0.04 eV, respectivamente. 69
- 5.5 Massas individuais dos neutrinos para o cenário SSI. 71
- 5.6 Massa cinemática e soma de massas de neutrinos em função do neutrino de menor massa para o cenário SSI. Na região em azul claro estamos variando os parâmetros de oscilação dentro dos valores permitidos, os quais são mostrados nas equações (5.3) e (5.7). Mostramos também a curva de melhor ajuste e limite futuro para massa cinemática que é 0.3 eV. A curva referente à soma Σ , em azul claro, também é mostrada. 72
- 5.7 Massa efetiva de Majorana para o cenário SSI. A região mais escura representa os valores centrais das equações (5.3) e (5.7) com as fases variando livremente no intervalo $[0, 2\pi]$. Na região mais clara estamos variando os parâmetros de oscilação dentro dos valores permitidos, os quais são mostrados nas equações (5.3) e (5.7). Mostramos também os limites atual e futuro para massa efetiva que são 1 eV e 0.04 eV, respectivamente. 73
- 5.8 Ordenamento de massa para o modelo com dois neutrinos estéreis mais leves que os três neutrinos ativos. 74
- 5.9 Massas individuais dos neutrinos no cenário NSS. 75
- 5.10 Massa cinemática e soma de massas dos neutrinos (Σ) em função do neutrino de menor massa para o cenário NSS. Na figura mostramos o melhor ajuste para m_β , também mostramos o valor de sensibilidade esperado para o KATRIM 0.3 eV. 76
- 5.11 Massa efetiva ($m_{\beta\beta}$) em função da massa do neutrino mais leve para o cenário NSS. A região em magenta representa os valores centrais dos parâmetros de oscilação assumidos nesta dissertação, equações 5.3 e 5.7, e as fases de Majorana variam livremente no intervalo $[0, 2\pi]$. Na região em verde estamos variando os parâmetros referentes ao setor estéril, ou seja, variamos segundo a equação 5.7. Mostramos também os limites atual (1 eV) e futuro (0.04 eV) para massa efetiva de Majorana. 77
- 5.12 Ordenamento de massa para o modelo com dois neutrinos estéreis, onde um estéril é mais leve e o outro é mais pesado que os três neutrinos ativos. 79

- 5.13 Massas individuais e soma de massas dos neutrinos em função da massa do neutrino mais leve para o cenário SNSa. 81
- 5.14 Massa cinemática (m_{β}) e soma de massas dos neutrinos (Σ) em função da massa do neutrino mais leve para o cenário SNSa. 82
- 5.15 Massa efetiva ($m_{\beta\beta}$) em função da massa do neutrino mais leve para o cenário SNSa. A região em magenta representa os valores centrais dos parâmetros de oscilação assumidos nesta dissertação, equações 5.3 e 5.7, e as fases de Majorana variam livremente no intervalo $[0, 2\pi]$. Na região em verde estamos variando os parâmetros referentes ao setor estéril, ou seja, variamos segundo a equação 5.7. Mostramos também os limites atual (1 eV) e futuro (0.04 eV) para massa efetiva de Majorana. 83
- 5.16 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro de massa cinemática (m_{β}). A região em azul representa os três neutrinos ativos e a região em magenta representa o cenário SSN, com dois neutrinos estéreis mais pesados que os neutrinos ativos ordenados normalmente. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e m_{β} 2.2 e 0.3 eV. 87
- 5.17 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro de massa cinemática (m_{β}). A região em azul representa os três neutrinos ativos e a região em magenta representa o cenário SSI, com dois neutrinos estéreis mais pesados que os neutrinos ativos ordenados inversamente. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e m_{β} 2.2 e 0.3 eV. 88
- 5.18 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro de massa cinemática (m_{β}). A região em azul representa os três neutrinos ativos e a região em magenta representa o cenário NSS, com dois neutrinos estéreis mais leves que os neutrinos ativos ordenados normalmente. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e m_{β} 2.2 e 0.3 eV. 89
- 5.19 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro de massa cinemática (m_{β}). A região em azul representa os três neutrinos ativos e a região em magenta representa o cenário SNSa, com um neutrino estéril mais leve e o outro mais pesado que os neutrinos ativos que estão ordenados normalmente. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e m_{β} 2.2 e 0.3 eV. 90
- 5.20 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro soma (Σ). A região em azul representa os três neutrinos ativos com hierarquia normal e região em azul claro representa a hierarquia invertida para o caso padrão. A região em magenta representa o cenário SSN, onde os dois neutrinos estéreis são mais pesados que os neutrinos do setor ativo, que por sua vez estão ordenados de forma normal. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e o limite de 0.6 eV sobre a soma de massas dos neutrinos ativos fornecidos por recentes análises do WMAP-5y combinado com os dados de BAO e SN. 92

- 5.21 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro soma (Σ). A região em azul representa os três neutrinos ativos com hierarquia normal e região em azul claro representa a hierarquia invertida para o caso padrão. A região em magenta representa o cenário SSI, onde os dois neutrinos estéreis são mais pesados que os neutrinos do setor ativo, que por sua vez estão ordenados de forma invertida. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e o limite de 0.6 eV sobre a soma de massas dos neutrinos ativos fornecidos por recentes análises do WMAP-5y combinado com os dados de BAO e SN. 93
- 5.22 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro soma (Σ). A região em azul representa os três neutrinos ativos com hierarquia normal e região em azul claro representa a hierarquia invertida para o caso padrão. A região em magenta representa o cenário NSS, onde os dois neutrinos estéreis são mais leves que os neutrinos do setor ativo, que por sua vez estão ordenados de forma normal. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e o limite de 0.6 eV sobre a soma de massas dos neutrinos ativos fornecidos por recentes análises do WMAP-5y combinado com os dados de BAO e SN. 94
- 5.23 Massa efetiva de Majorana ($m_{\beta\beta}$) em função do parâmetro soma (Σ). A região em azul representa os três neutrinos ativos com hierarquia normal e região em azul claro representa a hierarquia invertida para o caso padrão. A região em magenta representa o cenário SNSa, onde um neutrino estéril é mais leve e o outro mais pesado que os neutrinos do setor ativo, que por sua vez estão ordenados de forma normal. Mostramos os limites atuais e futuro para $m_{\beta\beta}$, 1 e 0.04 eV, respectivamente, e o limite de 0.6 eV sobre a soma de massas dos neutrinos ativos fornecidos por recentes análises do WMAP-5y combinado com os dados de BAO e SN. 95
- 5.24 Soma de massas dos neutrinos (Σ) como função da massa cinemática (m_{β}). Mostramos os cenários SSN, SSI, NSS e SNSa, o caso padrão de neutrinos ativos também é mostrado com os dois possíveis ordenamentos de massas, normal e invertido. O limite de 0.6 eV de WMAP-5y+BAO+SN para 3 neutrinos ativos também é mostrado. 96

Lista de tabelas

2.1	Contéudo de partículas no Modelo Padrão.	26
2.2	Setor leptônico do modelo padrão de partículas elementares. Aqui estamos considerando somente partículas do tipo mão-esquerda.	29
3.1	Valores característicos de L e E para várias fontes de neutrinos e experimentos, também mostramos os valores de Δm^2 onde eles são mais sensíveis.	44
3.2	Vínculos atuais em 90% (N.C.).	51
3.3	sensibilidade para futuros experimentos.	51

*"I have done a terrible thing. I have postulated
a particle than cannot be detected."*

Wolfgang Pauli