

Anderson José da Fonseca

**Procura por Neutrinos Estéreis
através de Experimentos com
Reatores Nucleares**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE FÍSICA
Programa de Pós-graduação em Física

Rio de Janeiro
Abril de 2006



Anderson José da Fonseca

**Procura por Neutrinos Estéreis através de
Experimentos com Reatores Nucleares**

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
Abril de 2006



Anderson José da Fonseca

**Procura por Neutrinos Estéreis
através de Experimentos com Reatores Nucleares**

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

Profa. Carla Göbel Burlamaqui de Mello

Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. João Carlos Costa dos Anjos

CBPF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de abril de 2006.

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

Anderson José da Fonseca

Graduou-se em Licenciatura em Física pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) em 1998.

Ficha Catalográfica

Fonseca, Anderson José da

Procura por Neutrinos Estéreis através de Experimentos com Reatores Nucleares / Anderson José da Fonseca; orientador: Hiroshi Nunokawa. — Rio de Janeiro : PUC–RIO, Departamento de Física, 2006.

v., 65 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Tese. 2. Neutrino. 3. Oscilação de Neutrinos. 4. Mudança de Sabor. 5. Massa do Neutrino. 6. Neutrinos Estéreis. 7. Neutrinos de Reator. 8. Mistura Leptônica. I. Nunokawa, Hiroshi. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 510

A minha esposa Isabelle.
Aos meus pais, José Carlos e Mercedes.
Ao meu irmão Alexandre.

Agradecimentos

A Deus, que me conforta nos momentos difíceis;

Ao Prof. Hiroshi Nunokawa, pela sua valiosa orientação, sua paciência e compreensão, sem os quais esse trabalho não seria possível;

Aos professores Claudio Maia Porto e Jorge Carvalho de Mello, pela contribuição fundamental a minha formação e pelo incentivo;

Aos meus grandes e verdadeiros amigos Rogério, Maicon, Eduardo e Odair;

À direção e aos colegas da equipe de Física da Escola Técnica Estadual Juscelino Kubitschek, pela confiança e compreensão;

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo apoio financeiro através da bolsa concedida;

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Resumo

Fonseca, Anderson José da; Nunokawa, Hiroshi. **Procura por Neutrinos Estéreis através de Experimentos com Reatores Nucleares**. Rio de Janeiro, 2006. 65p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nessa dissertação realizamos, em princípio, um estudo fenomenológico de alguns experimentos prévios com neutrinos, que buscaram evidências de distorção espectral que corroborassem o mecanismo de conversão de sabor, utilizando reatores nucleares como fonte. Reunimos suficiente informação sobre a metodologia empregada para a detecção e análise do espectro de neutrinos de reatores, bem como os limites impostos por esses experimentos sobre os parâmetros de oscilação. A partir desse estudo, investigamos a possibilidade de se explorar uma região do espaço de parâmetros de oscilação, caracterizada por um pequeno ângulo de mistura e elevado auto-estado de massa, ainda não excluída pelos resultados experimentais, mas incompatível com as atuais diferenças de massas quadradas extraídas dos experimentos com neutrinos solares, atmosféricos, de aceleradores (excetuando-se o experimento LSND) e de reatores. Para essa investigação, assumimos a extensão mais simples do modelo de oscilação padrão, incorporando um novo auto-estado responsável pela escala de massa mais elevada. Por fim, discutimos uma configuração experimental, baseada em um reator nuclear, que apresente a sensibilidade necessária para atingir esse conjunto de parâmetros.

Palavras-chave

Neutrino. Oscilação de Neutrinos. Mudança de Sabor. Massa do Neutrino. Neutrinos Estéreis. Neutrinos de Reator. Mistura Leptônica.

Abstract

Fonseca, Anderson José da; Nunokawa, Hiroshi. **Search for Sterile Neutrinos by Experiments at Nuclear Reactors**. Rio de Janeiro, 2006. 65p. MsC Thesis — Department of Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation we have done, at first, a phenomenological study of some previous neutrino experiments, that had searched evidences of spectral distortion that corroborated the mechanism of flavor conversion, using nuclear reactors as source. We collected enough information about the methodology used for detection and analysis of neutrino spectrum of reactors, as well as the constraints on oscillation parameters provided by that experiments. Starting from this study, we investigated the possibility to explore a region of the space of parameters, characterized by a small mixing angle and high mass eigenstate, that not yet have been excluded by experimental results, but incompatible with the extracted current mass scale of the experiments with solar, atmospheric, accelerator (except for the LSND experiment) and reactor neutrinos. For this inquiry, we assume the simplest extension of the standard oscillation model, incorporating a new eigenstate responsible for the higher scale mass. Finally, we discuss a experimental configuration, based on nuclear reactor, which presents the sensitivity required to reach this set of parameters.

Keywords

Neutrino. Neutrino Oscillations. Flavor Change. Neutrino Mass. Sterile Neutrinos. Reactor Neutrinos. Leptonic Mixing.

Sumário

1	Introdução	12
2	Abordagem Geral da Física de Neutrinos	16
2.1	Breve revisão da história dos neutrinos	17
2.2	Neutrinos de acordo com o Modelo Padrão	19
2.3	As representações de Weyl, Dirac e Majorana	20
2.4	Experimentos Cinemáticos	22
2.5	Duplo decaimento beta sem neutrinos	22
2.6	O modelo de oscilação	23
2.7	Experimentos de Oscilação de Neutrinos	28
3	Experimentos com Reatores Nucleares e seus Resultados	37
3.1	Bugey	40
3.2	Chooz	41
3.3	KamLAND	43
4	Modelo de Oscilação de Neutrinos em (3+1) Gerações	45
4.1	Matriz de Mistura Leptônica Estendida	46
4.2	Impacto do modelo sobre experimentos com reatores nucleares	47
5	Experimento Típico para Sondagem de Neutrinos Estéreis	51
5.1	Características Estruturais Gerais	51
5.2	Resultados e análise	53
6	Conclusões e Perspectivas	61

Lista de figuras

2.1	Duplo decaimento beta sem neutrinos	23
2.2	Espectro de energia dos neutrinos solares observados na Terra (46).	32
3.1	Contornos de exclusão com 90 % N.C. obtidos das razões dos espectros do pósitron medidos em 40 /15 m e 95/15 m. Adaptado de (23).	41
3.2	Contornos de exclusão com 90 % N.C. obtidos das razões dos espectros do pósitron medidos em 15, 40 e 95 m. Adaptado de (23).	42
3.3	Contornos de exclusão em 90 % N.C. para os parâmetros de oscilação obtidos a partir das análises A , B e C em Chooz. Superpostas no mesmo gráfico estão as regiões permitidas por Kamiokande. Adaptado de (22)	43
3.4	Regiões permitidas no espaço de parâmetros de oscilação por KamLAND e experimentos solares. Adaptado de (15).	44
4.1	Composição de sabor dos auto-estados de massa do neutrino no esquema (3 + 1).	46
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)	52
5.2	Seção de choque do decaimento beta inverso.	53
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.	54
5.4	Histograma da distribuição de eventos nos detectores 1 (linha contínua) e 2 (linha tracejada), em função da energia visível.	55
5.5	Região excluída com 90 %, 95 % e 99% de N.C. na ausência de metamorfose de sabor, considerando a hipótese conservadora.	57
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.	58
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.	59
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 <i>input</i> está indicado na figura.	60

Lista de tabelas

- | | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Resultados experimentais da razão $R_{\text{Obs}/\text{MC}}$. Essa tabela foi adaptada de (3). | 31 |
| 2.2 | Resultados de experimentos com neutrinos solares. Essa tabela foi obtida de (3). | 34 |
| 3.1 | Coeficientes de cada isótopo i para o cálculo do espectro Eq.(3-6) (18). | 38 |
| 3.2 | Número total de $\bar{\nu}_e$ e energia emitida por fissão, acima do limiar de 1.806 MeV (13). | 39 |

*"... the most tiny quantity of reality ever
imagined by a human being."*

Frederick Reines