



Thiago Mühlbeier

**Estudo das medidas de massas de neutrinos
através de supernovas que formam buracos
negros pelo método do tempo de vôo.**

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
maio de 2009



Thiago Mühlbeier

**Estudo das medidas de massas de neutrinos
através de supernovas que formam buracos
negros pelo método do tempo de vôo.**

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. Carla Göbel Burlamaqui de Mello

Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. Renata Zukanovich Funchal

USP

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de maio de 2009

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

Thiago Mühlbeier

Graduou-se em Licenciatura Plena e Bacharelado em Física na Universidade Estadual do Rio de Janeiro em 2006.

Ficha Catalográfica

Mühlbeier, Thiago

Estudo das medidas de massas de neutrinos através de supernovas que formam buracos negros pelo método do tempo de vôo. / Thiago Mühlbeier; orientador: Hiroshi Nunokawa. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Física, 2009.

v., 136 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. Neutrinos de Supernovas. 3. Tempo de Vôo. 4. Oscilação de Neutrinos. I. Nunokawa, Hiroshi. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 510

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Hiroshi Nunokawa, meu orientador, pela paciência em ensinar-me e as valiosas dicas de como resolver os infindáveis problemas surgidos no decorrer desta dissertação;

Aos meus pais, Ervino e Lília, por sempre terem acreditado em mim e me incentivado nos estudos;

À minha esposa, Kênia, pela paciência, carinho, incentivo e compreensão pelo pouco tempo dedicado à ela durante os últimos meses;

À minha irmã Cláudia, meu cunhado, Ivo e meu sobrinho Rafael pelo apoio e incentivo constantes;

Ao meu irmão, Marcos, minha cunhada Adriane e meus sobrinhos Matheus e Karla que, mesmo distantes, apoiaram, de uma forma ou de outra, o meu trabalho;

Aos meus parentes, sejam primos, tios ou tias pela convivência que tivemos e os ensinamentos que obtive deste contato;

Aos meus professores do ensino fundamental e médio, no Instituto Sinodal da Paz, que plantaram a semente da curiosidade em mim, em especial aos professores Blázio, Alceu, Marlise e Gisela;

Aos meus professores da graduação, na UERJ, e aos da pós-graduação, da PUC-Rio, que foram responsáveis pela minha formação acadêmica;

Aos meus amigos de graduação, pelos ótimos momentos que passamos juntos, seja estudando ou nos divertindo em algum churrasco;

Aos meus amigos e colegas de trabalho da área de neutrinos, Fábio e Alexander, pelas discussões que sanaram inúmeras dúvidas, tanto em física como em fortran ou gnuplot, evitando que eu assumisse conceitos errôneos ou cometesse erros primários;

Aos demais alunos e funcionários da Pós-Graduação do Departamento de Física da PUC-Rio, que de incontáveis formas ajudaram no andamento desta dissertação, em especial ao Jefferson, Giza, Márcia e Julinho;

Ao Sport Club Internacional, campeão de tudo, que me deu inúmeras alegrias ao longo da minha vida;

Ao Hattrick, pelos momentos de diversão proporcionados nos breves momentos de folga que obtive nos últimos meses; e

Ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio financeiro, que foi de fundamental importância.

Resumo

Mühlbeier, Thiago; Nunokawa, Hiroshi. **Estudo das medidas de massas de neutrinos através de supernovas que formam buracos negros pelo método do tempo de vôo.** Rio de Janeiro, 2009. 136p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação estudamos até que ponto podemos melhorar a sensibilidade das medidas de massa de neutrinos oriundos de uma supernova, que forma um buraco negro enquanto há emissão de neutrinos, através da observação destas partículas por um detector de água Cherenkov, como o Super-Kamiokande, assim como por um telescópio de neutrinos, como o Ice-Cube. Como neste tipo de processo há uma interrupção abrupta na emissão de neutrinos podemos detectar os efeitos devido a massa destas partículas usando a técnica do tempo de vôo, ou seja, se os neutrinos possuem massa nula, o sinal nos detectores terrestres cessariam de forma instantânea, mas se os neutrinos possuem alguma massa, eles atrasariam algum tempo e o sinal cairia de forma suave, formando uma cauda. Primeiramente, reproduzimos os resultados obtidos por Beacom, Boyd e Mezzacappa para o experimento Super-Kamiokande, que encontrou como sensibilidade $m_{\nu_e} \sim 1.8$ eV e depois ampliamos o estudo e obtivemos melhores resultados para os detectores IceCube ($m_{\nu_e} \sim 0.5$ eV), que está em funcionamento, Hiper-Kamiokande ($m_{\nu_e} \sim 0.5$ eV) e TITAND ($m_{\nu_e} \sim 0.4$ eV) que são projetos ainda não aprovados. Para todos os detectores calculamos a taxa de eventos em função do tempo de atraso, o número de eventos total em função da variação da massa do neutrino, e a sensibilidade de massa em função da distância de ocorrência da supernova. Em todos estes casos foi levado em consideração, primeiramente, a não existência de oscilações, depois havendo oscilações para a hierarquia normal de massa de neutrinos e, por último, levamos em conta a possibilidade da hierarquia de massa ser do tipo invertida, onde torna-se importante conhecer como a conversão pelo efeito MSW para anti-neutrinos ocorre, já que ele depende fortemente da densidade na região de ressonância, energia e parâmetros de mistura. Por simplicidade, consideramos a conversão adiabática para este caso.

Palavras-chave

Neutrinos de Supernovas; Tempo de Vôo; Oscilação de Neutrinos;

Abstract

Mühlbeier, Thiago; Nunokawa, Hiroshi. **Measuring Neutrino Mass through Neutrinos coming from Supernovae forming a Black Hole by the Time of Flight Method.** Rio de Janeiro, 2009. 136p. MsC Dissertation — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this dissertation we studied to which extent we can improve the sensitivity of the measurement of mass of neutrinos coming from a supernova, which form a black hole during the emission of neutrinos through the observation of these particles by a water Cherenkov detector such as Super-Kamiokande as well as by a neutrino telescope such as IceCube. As there is an abrupt interruption in the emission of neutrinos, we can detect the effects due to mass of neutrinos using the technique of time of flight, i.e., if the neutrinos are massless, the signal in terrestrial detectors would be ceased instantly, but if the neutrinos have some mass there would be some time delay and the signal would fall in a smooth way, forming a tail. First we reproduce the results obtained by Beacom, Boyd and Mezzacappa for the Super-Kamiokande experiment, where we found the sensitivity $m_{\nu_e} \sim 1.8$ eV and then we extended the study and obtained better results for detector Ice Cube ($m_{\nu_e} \sim 0.5$ eV), which is in operation, and Hyper-Kamiokande ($m_{\nu_e} \sim 0.5$ eV) detector and TITAND ($m_{\nu_e} \sim 0.4$ eV) detector which are projects still not approved yet. For all detectors, we calculate the rate of events as a function of the delay time, total number of events depending on the variation of the neutrino mass and the sensitivity of mass according to the distance of the supernova event. In all these cases we estimate the sensitivity first in the absence of oscillations, then we take into account the effects of oscillations for the normal hierarchy of neutrino masses, and finally, we take into account the possibility of the mass hierarchy of neutrino to be inverted, where it is important to know how the MSW resonant conversion for antineutrinos would occur which strongly depends on the density profile in the resonance region, energy and mixing parameters. For simplicity, we consider the adiabatic conversion for this case.

Keywords

Supernovae Neutrinos; Time-of-Flight; Neutrino Oscillation;

Sumário

1	Introdução	15
2	Teoria das Supernovas	20
2.1	Um Pouco de História	20
2.2	Evolução Estelar	22
2.3	Tipos de Supernovas	28
2.4	Etapas da Explosão de uma Supernova (SN)	32
2.5	Espectro dos Neutrinos Provenientes de SN	43
2.6	SN1987A	44
3	Oscilações de Neutrinos	46
3.1	Neutrinos	46
3.2	Oscilação no Vácuo	48
3.3	Mistura para Duas Gerações	56
3.4	Oscilação de Neutrinos na Matéria	57
3.5	Evolução dos Estados de Sabor	62
3.6	Efeito MSW	64
3.7	Oscilação de Neutrinos em Supernovas	66
3.8	Probabilidade de Oscilação e Fluxo de Neutrinos em Detectores	73
3.9	Identificação do Espectro de Massa	82
4	Metodologia	84
4.1	Tempo de Vôo	84
4.2	Modelo de Supernova	85
4.3	Kamiokande, Super-Kamiokande e Hiper-Kamiokande	87
4.4	TITAND	88
4.5	IceCube	89
4.6	Cálculo para Encontrar o Número de Alvos	92
4.7	Efeito de Massa	93
5	Resultados	96
5.1	Super-Kamiokande	96
5.2	Hiper-Kamiokande	107
5.3	TITAND	116
5.4	IceCube	119
6	Conclusão	126

Lista de figuras

1.1	Primeiro experimento para detectar neutrinos, em 1953.	17
2.1	Distribuição anual das supernovas descobertas entre 1934 e 1999.	21
2.2	Diagrama Hertsprung-Russell. A Sequência Principal é a linha diagonal(na verdade, uma faixa) onde as estrelas permanecem o maior tempo de sua evolução, durante a queima de hidrogênio.	23
2.3	Diagrama H-R. A Sequência Principal é a faixa onde as estrelas permanecem maior tempo de sua evolução, durante a transformação do hidrogênio em hélio. Elas ingressam sempre pela parte inferior da faixa. Estrelas de pequena massa na parte inferior, as de massa intermediária na parte central e as de grande massa na parte superior da sequência principal.	24
2.4	Camadas da queima nuclear de uma estrela muito massiva ao final de sua evolução. Figura de Mafalda Martins, ESO.	28
2.5	Curva de luz de supernovas dos Tipos I e II.	29
2.6	Quadro de classificação de Supernovas.	32
2.7	Tipos de SN de estrelas massivas em função da massa e metalicidade iniciais.	33
2.8	Estrutura de uma estrela antes de colapsar.	34
2.9	Velocidade de queda e velocidade do som em função do raio com densidade central de $10^{12} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ e massa do progenitor em $15M_{\odot}$. O ponto onde as velocidades se encontram marca o limite entre os dois tipos de colapso que ocorrem no centro da estrela. Este ponto é chamado de ponto sônico.	40
3.1	Ilustração representativa da helicidade dos neutrinos.	47
3.2	Ilustração representativa da hierarquia de massa dos neutrinos.	49
3.3	Relação entre os auto-estados de sabor dos neutrinos 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 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$.	50
3.4	Diagramas de Feynman representando processos de espalhamento elástico coerente que geram os potenciais V_{CC} , através da troca de um bóson W, e V_{NC} , pela troca de um bóson Z.	59
3.5	Ilustração que mostra a ressonância para dois sabores em um meio inhomogêneo. As linhas pontilhadas mostram os auto-estados de massa efetiva quando não há mistura, e as linhas contínuas indicam a massa efetiva dos auto-estados de sabor, quando existe o efeito de mistura. Note que a menor diferença de massa quadrada efetiva se dá quando a ressonância tem o seu valor mínimo.	70

3.6	Diagramas dos níveis de cruzamento para as hierarquias a) normal e b) invertida. As linhas sólidas mostram a evolução da Hamiltoniana efetiva como função da densidade eletrônica enquanto que as linhas pontilhadas correspondem aos sabores. Densidade negativa é referente ao caso dos antineutrinos.	74
4.1	Ilustração da estrutura do detector Super-Kamiokande disponível na página oficial do projeto.	87
4.2	Ilustração do possível formato do detector Hiper-Kamiokande, tendo em vista a otimização da fração V_{Fid}/V_{Tot} .	89
4.3	Ilustração do detector subaquático TITAND com destaque para os fotomultiplicadores que cobririam 20% da superfície interna do detector. O experimento poderia emergir para troca de água ou reparos e depois ser submergido novamente, também seria possível deslocá-lo para outras regiões conforme a necessidade.	90
4.4	Ilustração do detector antártico IceCube. O cilindro mostra o volume ocupado pelo detector AMANDA.	91
5.1	Assumindo uma distância de 10 kpc e reações do antineutrino eletrônico com prótons que ocorrem no Super-Kamiokande, podemos obter a taxa de eventos pelo tempo. O ponto onde $t - t_{BH}$ se anula é o instante em que é formado o buraco negro e vemos que somente a partir deste instante é que contamos o número de eventos e estes decaem rapidamente.	97
5.2	Relação entre o número de eventos atrasados pela massa do neutrino eletrônico para o experimento Super-Kamiokande. Lembremos que, embora haja uma queda suave para pequenos valores de massa, o limite inferior de sensibilidade do Super-K é de 1.8 eV, que indica 7.7 eventos.	98
5.3	A linha sólida representa sensibilidade de massa para o neutrino do elétron como função da distância da supernova possível de ser mensurada no Super-Kamiokande. A linha pontilhada nos mostra o limite superior para m_{ν_e} obtida em laboratório via decaimento beta do tritium. Obtemos que a sensibilidade de massa para uma supernova localizada em distância típica (10 kpc) é 1.8 eV.	100
5.4	Mesmo que Fig. 5.1, mas levando em conta a ocorrência de oscilações para o caso de Hierarquia Normal.	101
5.5	Mesmo que Fig. 5.2, para hierarquia normal com a existência de oscilações.	102
5.6	Igual ao da Fig. 5.3, mas considerando hierarquia normal com efeito de oscilação.	102
5.7	Mesmo da Fig. 5.1, mas para o caso de hierarquia invertida e oscilações em regiões adiabáticas.	104
5.8	Idem a Fig. 5.2 considerando oscilações em regiões adiabáticas e hierarquia invertida.	104

- 5.9 Igual a Fig. 5.3 para oscilações em regiões adiabáticas e hierarquia invertida. 105
- 5.10 Comparação dos três casos estudados neste trabalho: em azul (traço e ponto) temos o caso de oscilações que ocorrem em regiões adiabáticas e hierarquia de massa invertida; em verde (pontilhado) refere-se ao caso de hierarquia normal, válido para todos os casos e; em vermelho (contínuo) é a situação em que não há qualquer alteração no fluxo original do antineutrino do elétron. Novamente, a supernova situa-se a 10 kpc da Terra e $m_{\nu_e} = 1.8$ eV. 106
- 5.11 Comportamento do número total de eventos em relação a variação de massa. Em azul (traço e ponto) temos o caso de oscilações que ocorrem em regiões adiabáticas e hierarquia de massa invertida; em verde (pontilhado) refere-se ao caso de hierarquia normal, válido para todos os casos e; em vermelho (contínuo) é a situação em que não há qualquer alteração no fluxo original do antineutrino do elétron. Supernova situada a 10 kpc da Terra e $m_{\nu_e} = 1.8$ eV. 107
- 5.12 Estudo da sensibilidade de massa dependendo da distância de ocorrência de uma supernova. Novamente, em azul (traço e ponto) temos o caso de oscilações que ocorrem em regiões adiabáticas e hierarquia de massa invertida; em verde (pontilhado) refere-se ao caso de hierarquia normal, válido para todas as regiões e; em vermelho (contínuo) é a situação em que não há qualquer alteração no fluxo original do antineutrino do elétron. 108
- 5.13 Dados para o Hiper-Kamiokande: número de eventos por segundo para os instantes iniciais após o corte do fluxo de neutrinos em uma supernova distante 10 kpc da Terra. Consideramos o caso em que não há oscilações e a massa foi fixada em $m_{\nu_e} \simeq 0.5$ eV. 109
- 5.14 Sem considerar oscilações, obtivemos o número total de eventos atrasados para variação de massa do neutrino. Distância da supernova à Terra foi fixada em 10 kpc. 109
- 5.15 Sensibilidade de massa em função da distância de ocorrência da supernova para o experimento Hiper-Kamiokande, sem levar em conta a existência de oscilações. A linha pontilhada representa o melhor valor obtido em laboratório para o decaimento beta do tritium. 110
- 5.16 Mesmo que Fig. 5.13, mas levando em conta oscilações com hierarquia de massa do tipo normal. 111
- 5.17 Igual a Fig. 5.14 considerando hierarquia normal e oscilações. 111
- 5.18 Idem a Fig. 5.15 para o caso de hierarquia normal e a ocorrência de oscilações. 112
- 5.19 Mesmo que Fig. 5.13, mas levando em conta oscilações em região adiabática e hierarquia de massa do tipo invertida. 112
- 5.20 Igual a Fig. 5.14 considerando hierarquia invertida e oscilações em região adiabática. 113

- 5.21 Idem a Fig. 5.15 para o caso de hierarquia invertida e a ocorrência de oscilações em região adiabática. 113
- 5.22 Comparação dos três casos estudados neste trabalho: em azul (traço e ponto) temos o caso de oscilações que ocorrem em regiões adiabáticas e hierarquia de massa invertida; em verde (pontilhado) refere-se ao caso de hierarquia normal, válido para todos os casos e; em vermelho (contínuo) é a situação em que não há qualquer alteração no fluxo original do antineutrino do elétron. Novamente, a supernova situa-se a 10 kpc da Terra e $m_{\nu_e} = 0.5$ eV. 114
- 5.23 Comportamento do número total de eventos em relação a variação de massa. Em azul (traço e ponto) temos o caso de oscilações que ocorrem em regiões adiabáticas e hierarquia de massa invertida; em verde (pontilhado) refere-se ao caso de hierarquia normal, válido para todos os casos e; em vermelho (contínuo) é a situação em que não há qualquer alteração no fluxo original do antineutrino do elétron. Nos três casos consideramos um supernova situada a 10 kpc da Terra. 115
- 5.24 Estudo da sensibilidade de massa dependendo da distância de ocorrência de uma supernova. Novamente, em azul (traço e ponto) temos o caso de oscilações que ocorrem em regiões adiabáticas e hierarquia de massa invertida; em verde (pontilhado) refere-se ao caso de hierarquia normal, válido para todos os casos e; em vermelho (contínuo) é a situação em que não há qualquer alteração no fluxo original do antineutrino do elétron. 116
- 5.25 Sensibilidade de massa em função da posição de afastamento da supernova para o experimento TITAND para o caso sem oscilação. 117
- 5.26 Mesmo que Fig. 5.25, mas para o caso de hierarquia normal levando em conta a existência de oscilações. 118
- 5.27 Mesmo que Fig. 5.25 para oscilações em região adiabática e hierarquia invertida. 118
- 5.28 Número de eventos atrasados em função do tempo, onde cada curva (contínua) representa o sinal para um valor de massa em intervalos de 1 décimo de eV, e a curva tracejada representa a flutuação do ruído do IceCube. O tempo zero (linha contínua vertical) indica o instante de corte do fluxo e a linha pontilhada paralela informa a incerteza de tempo na formação do buraco negro. O quadro interno representa um zoom na parte inferior esquerda do gráfico maior. 121
- 5.29 Mesmo que Fig. 5.28, mas com intervalos de massa de 1 centésimo de eV. 122

- 5.30 Forma do sinal para o número de eventos atrasados em função do tempo e massa dos neutrinos fixada em 0.40 eV. A curva tracejada representa a flutuação do ruído do IceCube, enquanto que a linha contínua vertical no ponto $t = 0$) indica o instante de corte no fluxo e a linha pontilhada paralela informa a incerteza de tempo na formação do buraco negro. 123
- 5.31 Idem a Fig. 5.30, mas com a massa dos neutrinos fixada em 0.41 eV. 123
- 5.32 Sensibilidade de massa em função da distância de acontecimento de SN para o experimento IceCube para o caso de não existir oscilações. 124
- 5.33 Mesmo que Fig. 5.32 para o caso de hierarquia normal com oscilações. 124
- 5.34 Idem a Fig. 5.32 levando em conta oscilações em região adiabática e hierarquia invertida. 125
- 5.35 Comparação entre os resultados obtidos para a sensibilidade de massa em função da distância do acontecimento de um SN para os seguintes casos: em que não há oscilação, em vermelho (linha contínua), quando temos oscilação e consideramos hierarquia normal, em verde (pontilhado), e para a situação de oscilações em regiões adiabáticas para hierarquia invertida, em azul (tracejado). 125

Lista de tabelas

- 2.1 Eventos de neutrinos detectados nos experimentos Kamiokande-II, IMB e Baksan relativos a SN1987A. A primeira coluna indica a ordem dos eventos, a segunda coluna mostra o tempo de detecção, considerando o primeiro evento como tempo zero. A terceira informa-nos a energia do neutrino incidente e a quarta coluna nos diz a incerteza para a energia e, finalmente, a última coluna fornece a taxa média de ruído para cada evento. 45
- 3.1 Tabela de Léptons 47
- 3.2 Valores de acoplamento para campos de férmions. 61
- 3.3 Tabela que mostra os dados obtidos neste capítulo para as probabilidades de sobrevivência do neutrino e antineutrino eletrônico. 82
- 4.1 Comparação das três gerações de experimentos de decaimento do próton. 88
- 5.1 Tabela que mostra como um dado número de eventos mensurados, N , determina o alcance para o número esperado de eventos μ usando estatística de Poisson. Por exemplo, na primeira linha o valor 2.3 para μ significa que este é o maior valor esperado que produz $N = 0$ ao menos 10% das vezes. Já na segunda linha, o valor de 0.1 para o número esperado de eventos μ é a menor expectativa para que tenhamos $N \geq 1$ ao menos 10% do tempo e $\mu = 3.9$, ainda na segunda linha, é o maior valor esperado para $N \leq 1$ pelo menos 10% das vezes. 99

“A science is any discipline in which the fool of this generation can go beyond the point reached by the genius of the last generation.”

Herman Max Gluckman