



Determinação de limites em parâmetros do espectro de neutrinos de colapsos gravitacionais a partir das observações do fluxo difuso de neutrinos no Super-Kamiokande

Palavras-Chave: supernovas, neutrinos, fluxo difuso

Autores:

Rafael de Lima Raiser [UNICAMP]

Prof. Dr. Ernesto Kemp (orientador) [UNICAMP]

INTRODUÇÃO:

Ao final de suas vidas, estrelas com massas superiores a 8 massas solares explodem em eventos conhecidos como supernovas. Diferentes remanescentes surgem com a explosão a depender da massa da estrela progenitora [1]: estrelas entre 8 e 25 massas solares (cerca de 91% do total) resultam em estrelas de nêutrons; aquelas com 25 a 40 massas solares (11%) produzem supernovas atenuadas com subsequente formação de buracos negros e estrelas com mais de 40 massas solares (9%) sofrem colapso direto em buracos negros.

Em todos estes cenários, há a liberação de quantidades colossais de energia da ordem de 10^{53} ergs na forma de luz, energia cinética das camadas ejetadas mas, sobretudo (cerca de 99%), em neutrinos de todos os sabores [2]. Por serem partículas extremamente leves que interagem apenas através da força fraca e da força gravitacional, os neutrinos são capazes de atravessar regiões de alta densidade de matéria, como o interior de uma estrela, com facilidade, fazendo-os excelentes mensageiros dos processos mais internos do colapso gravitacional. Sua alta fugacidade, entretanto, impõe limites na capacidade de detecção de nossos observatórios de neutrinos que, de maneira geral, só são viáveis com o uso de gigantescos volumes de cintilador.

A única observação de neutrinos de supernova já realizada ocorreu em 1987 com o colapso da chamada estrela de Sanduleak, uma supergigante azul localizada na Grande Nuvem de Magalhães a cerca de 50 kpc da Terra. Nesta ocasião, 25 eventos foram registrados pelos experimentos Kamiokande-II, IMB e Baksan; extensas análises estatísticas [3] foram realizadas sobre os dados obtidos, rendendo a confirmação dos principais aspectos da teoria dos colapsos gravitacionais mas deixando muitos, ainda, em aberto.

A raridade de supernovas próximas o suficiente da Terra para serem detectadas na janela de neutrinos (1 a 2 por século [3]), por outro lado, suscitou o interesse em outra possível fonte de informação sobre colapsos gravitacionais: é prevista a existência de um fluxo isotrópico e constante no tempo de neutrinos oriundos de todas as supernovas já ocorridas na história do universo, ao qual se dá o nome de **fluxo difuso** (*Diffuse Supernovae Neutrino Flux*, ou DSNvF). Estimativas apontam sua detecção está no limiar da capacidade de observação dos presentes experimentos [4]. Em 2011, a colaboração do Super-Kamiokande realizou uma busca em dados coletados ao longo de mais de 1300 dias mas não encontrou nenhum candidato promissor [5].

Neste trabalho, foi feita uma análise estatística sobre o resultado nulo da colaboração-SK para inferir limites nos principais parâmetros de emissão de neutrinos de supernova que resultam em estrelas de nêutrons: energia total e temperatura. Com o uso de simulações, avaliamos também as contribuições da emissão no colapso direto em buraco negro e dos neutrinos de transição de fase, oriundos do processo de resfriamento da proto-estrela de nêutrons com transformação de matéria hadrônica em matéria de quarks.

A abrangência de nossas estimativas se limita ao estudo da produção de antineutrinos eletrônicos ($\bar{\nu}_e$) e neutrinos não-eletrônicos ($\nu_x = \{\nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau\}$) no interior das supernovas. Isto ocorre pois, devido à oscilação de neutrinos em seu percurso até a Terra, apenas estes dois sabores contribuem para formar o fluxo de $\bar{\nu}_e$ no detector, que produz a grande maioria de eventos observáveis no SK.

METODOLOGIA:

A determinação da janela de parâmetros de emissão condizente com o resultado nulo foi realizada através da imposição de um limite no número de eventos máximo de 2,3 durante o período de observação, que representa um nível de confiança de 90% segundo a estatística de Poisson. O cálculo do número de eventos foi realizado utilizando os *thresholds*, funções de eficiência e características do detector especificados pela colaboração-SK [5]. Apenas eventos do decaimento beta inverso, reação de maior relevância, foram considerados. Informações sobre a seção de choque foram consultadas em [6].

Caracterizamos a emissão de neutrinos em supernovas com formação de estrelas de nêutrons através do espectro de Fermi-Dirac (Eq. 1) utilizando dois parâmetros: temperatura (T) e energia total emitida por sabor (E_{tot}).

$$\frac{dN}{dE} = \frac{120}{7\pi^4} \frac{E_{tot}}{T^4} \frac{1}{1 + \exp(E/T)} \quad (\text{Eq. 1})$$

As simulações da emissão de colapsos diretos (BH) [7] [8] e transição de fase na proto-estrela de nêutrons (PT) [9], por outro lado, foram representadas segundo um espectro (Eq. 2) com três parâmetros livres: energia total por sabor (E_{tot}), energia média (E_0) e parâmetro de *pinching* (α).

$$\frac{dN}{dE} = \frac{(1 + \alpha)^{1+\alpha} E_{tot}}{E_0^2 \Gamma(1 + \alpha)} \left(\frac{E}{E_0} \right)^\alpha \exp \left[-(1 + \alpha) \frac{E}{E_0} \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

Os parâmetros calculados a partir destas simulações estão na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros das simulações de colapsos diretos (BH) e transição de fase (PT) para anti-neutrinos eletrônicos (índice e) e neutrinos não-eletrônicos (índice x).

Simulação	$E_{tot,e}$ (10^{52} ergs)	$E_{tot,x}$ (10^{52} ergs)	E_{0e} (MeV)	E_{0x} (MeV)	α_e	α_x
BH	8,1	4	21,7	23,4	1,7	1
PT	1,6	1,6	20,4	20,7	2,3	2,3

A oscilação de neutrinos foi parametrizada para os cenários de hierarquia normal (NH) e invertida (IH) de massas considerando propagação dos autoestados de massa totalmente adiabática ao longo de todo o envelope estelar e parâmetros de oscilação correspondentes à solução LMA [10]. Utilizando o método descrito em [11], incluímos em nossos cálculos também o efeito de oscilação na matéria da Terra.

O cálculo do fluxo difuso foi feito pela integração em *redshift* conforme [4] e utilizando a taxa de colapsos gravitacionais fornecida por [12], com taxa local fixa em $R_{cc}(0) = 0.75 \cdot 10^{-4} \text{ mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os resultados para as simulações BH e PT indicaram número de eventos mais altos que nosso limite estatístico de 2,3, porém menores que 4,6, em todos os cenários possíveis (fração de colapso direto de 9%; fração de colapsos com subsequente transição de fase da proto-estrela de nêutrons de 80% e 91%). Este resultado não deve ser interpretado como irregular; na verdade, o fato do número de eventos permanecer na casa de algumas unidades demonstra que estes processos podem estar ocultos na ignorância imposta pelas limitações de nossos observatórios de neutrinos atuais e não podem ser descartados. Uma análise estatística idêntica utilizando nível de confiança mais alto facilmente abrangeria estes resultados, por exemplo.

Por entendermos que o resultado nulo constatado em apenas um experimento de neutrinos pode não ser elucidativo o suficiente para abranger a emissão de neutrinos nestes dois fenômenos paralelos, optamos por não inclui-los na investigação da janela de parâmetros permitida para neutrinos de supernova com formação de estrela de nêutrons, que estima-se ser a componente majoritária do fluxo difuso.

Nas figuras 1 e 2, apresentamos *plots* do espaço de parâmetros permitido para os sabores estudados. Por simplificação, consideramos o parâmetro de energia como a energia total emitida pela supernova, igualmente dividida entre os seis sabores de neutrinos.

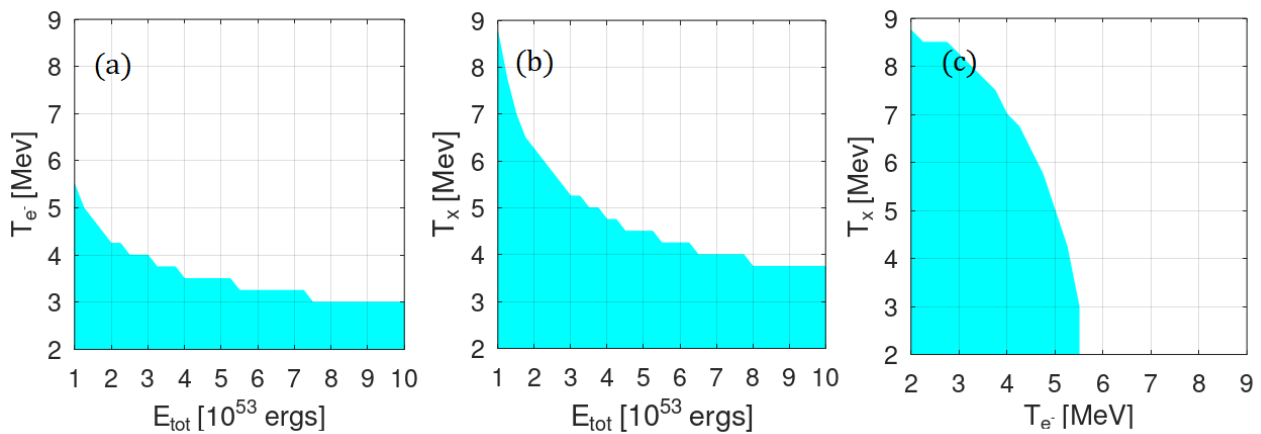


Figura 1: Espaço permitido de parâmetros para a emissão de supernovas com formação de estrela de nêutrons para hierarquia normal de massas; (a) temperatura dos antineutrinos-eletrônicos vs energia total da supernova; (b) temperatura dos neutrinos não-eletrônicos vs energia total da supernova; (c) temperatura dos antineutrinos eletrônicos vs neutrinos não-eletrônicos.

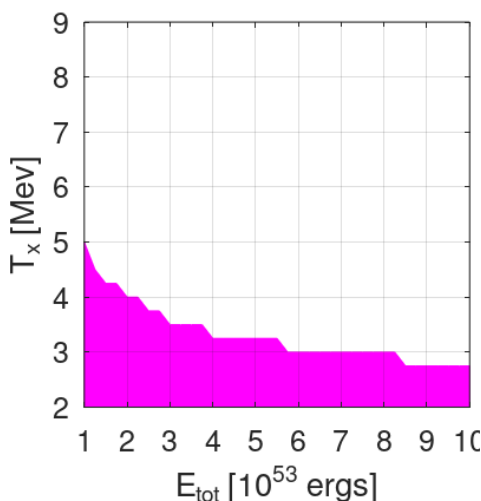


Figura 2: Espaço permitido de parâmetros para a emissão de neutrinos não-eletrônicos em supernovas com formação de estrela de nêutrons para hierarquia invertida de massas.

Em primeiro lugar, é preciso salientar que a presença de apenas um gráfico para o cenário de hierarquia invertida, correspondente aos ν_x , ocorre pois os neutrinos observados, neste caso, são integralmente compostos de neutrinos produzidos como não-eletrônicos.

Para ambientar nossa discussão, convém introduzirmos um resultado paralelo: num estudo de produção de elementos leves a partir de processos envolvendo neutrinos de supernova, [13] foram capazes de estabelecer um intervalo para T_x de **4,8 - 6,6 MeV** considerando energia total da supernova em $2,4 \cdot 10^{53} - 3,5 \cdot 10^{53}$ ergs. Fixando $T_e > 0,5 T_x$, uma hipótese conservadora com base em simulações [14], podemos estabelecer para T_e o intervalo **2,4 - 6,6 MeV**.

Embora nossos resultados não sejam capazes de prever valores mínimos de temperatura, os valores máximos são condizentes com [13] e, em alguns casos, mais restritivos.

CONCLUSÃO

As restrições que impusemos sobre temperatura e energia total na emissão de neutrinos mostraram-se comparáveis a um resultado paralelo, indicando que o resultado nulo da colaboração-SK tem um poder de restrição considerável e que pode ser futuramente comparado, por exemplo, com dados de uma observação direta de supernova galáctica como a SN1987A. Nossas estimativas sobre a contribuição de colapsos diretos em buracos negros e transição de

fase da proto-estrela de nêutrons indicam que as simulações utilizadas produzem números de eventos compatíveis ao nosso atual limiar de detecção. Entretanto, avaliamos que o resultado nulo não é sensível o suficiente para discernir entre os diferentes mecanismos que contribuem para o fluxo difuso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Klaes MØller et al. “Measuring the supernova unknowns at the next-generation neutrino telescopes through the diffuse neutrino background”. Em: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2018.05 (mai. de 2018), pp. 066–066. ISSN: 1475-7516. DOI: 10.1088/1475-7516/2018/05/066. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2018/05/066>.
- [2] A. BURROWS. “Neutrinos From Supernova Explosions”. Em: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 40 (1990), pp. 181–212. DOI: 10.1146/annurev.ns.40.120190.001145.
- [3] H. T. JANKA e W. HILLEBRANDT. “Neutrino emission from type II supernovae: an analysis of the spectra”. Em: *Astron. Astrophysics* 224 (1989), pp. 49–56
- [4] C. LUNARDINI. “The diffuse supernova neutrino flux, supernova rate and SN1987A”. Em: *Astropart.Phys.* 26 (2006), pp. 190–201. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2006.06.008
- [5] K. BAYS et al. “Supernova relic neutrino search at super-Kamiokande”. Em: *Physical Review D* 85.5 (2012). DOI: 10.1103/physrevd.85.052007. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.052007>.
- [6] E. KEMP. “Caracterização da Emissão de Neutrinos de Colapsos Estelares com o Experimento LVD”. Tese de doutoramento. Universidade Estadual de Campinas, 2000.
- [7] Ken'ichiro Nakazato et al. “SUPERNOVA NEUTRINO LIGHT CURVES AND SPECTRA FOR VARIOUS PROGENITOR STARS: FROM CORE COLLAPSE TO PROTO-NEUTRON STAR COOLING”. em: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 205.1 (fev. de 2013), p. 2. ISSN: 1538-4365. DOI: 10.1088/0067-0049/205/1/2. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/205/1/2>.
- [8] H. Shen et al. “Relativistic equation of state of nuclear matter for supernova and neutron star”. Em: *Nuclear Physics A* 637.3 (jul. de 1998), pp. 435–450. ISSN: 0375-9474. DOI: 10.1016/s0375-9474(98)00236-x. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474\(98\)00236-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474(98)00236-X)
- [9] J. A. ROSERO GIL. “Luminosity of neutrino emission due to hadron-quark phase transition within a neutron star”. Tese de doutoramento. Universidade Estadual de Campinas, 2020
- [10] M. TABANASHI e et al. “2019 Review of Particle Physics”. Em: *Phys. Rev. D* 98.030001 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001.
- [11] A S Dighe et al. “Signatures of supernova neutrino oscillations in the Earth mantle and core”. Em: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2004.01 (jan. de 2004), pp. 004–004. ISSN: 1475-7516. DOI: 10.1088/1475-7516/2004/01/004. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2004/01/004>.
- [12] Hasan Yuksel et al. “Revealing the High-Redshift Star Formation Rate with Gamma-Ray Bursts”. Em: *The Astrophysical Journal* 683.1 (jul. de 2008), pp. L5–L8. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.1086/591449. URL: <http://dx.doi.org/10.1086/591449>
- [13] T. YOSHIDA et al. Constraining the Spectrum of Supernova Neutrinos from Neutrino-Process-Induced Light-Element Synthesis. *Phys.Rev.Lett.* 94 (2005) 231101. Disponível em <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0505043>.
- [14] M. T. KEIL. “Supernova Neutrino Spectra and Applications to Flavor Oscillations”(2003). URL: arXiv:astro-ph/0308228.