

O PROBLEMA DA METALICIDADE SOLAR E MEDIDAS DO FLUXO DE NEUTRINOS DO CICLO CNO PELO EXPERIMENTO BOREXINO

Palavras-Chave: Neutrinos solares, Metalicidade solar, Ciclo CNO

Autores:

Zeno de Castro Brandão - IFGW

Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda (orientador) - IFGW

1 Introdução

Esta pesquisa se propôs a compreender as implicações do resultado publicado pelo experimento Borexino em novembro de 2020, onde reportou a detecção direta de neutrinos solares do ciclo CNO usando do *dataset* da fase-III num intervalo de exposição 1072 dias, para o chamado problema da metalicidade solar [1]. Durante a pesquisa também tornou-se interessante estudar uma segunda análise publicada pela equipe do experimento usando de um *dataset* aprimorado da fase-III devido ao uso de um intervalo de maior estabilidade na região do detector chamada *low-polonium field*, em um período de exposição de 1431 dias [2]. A partir do *dataset* aprimorado também realizou-se uma medida direta da abundância de metais do subciclo CN do ciclo CNO, prevista na literatura como unicamente posicionada para avanços em soluções alternativas do problema da metalicidade solar, que já persiste por quase duas décadas.

2 O problema da metalicidade solar

2.1 As modelagens do Sol

O problema da metalicidade solar é resultado de uma discrepância entre modelagens do Sol. Estas modelagens são feitas de duas maneiras, a chamada modelagem sísmica ou heliosismologia faz uso de modos vibracionais observados na superfície solar, os *p-modes*, para

reproduzir a estrutura interna solar através de métodos de inversão, sendo incapaz de reproduzir as regiões mais internas dado que as vibrações ocorrem em cavidades de propagação que se estendem até $(R < 0.1R_{\odot})^1$. A outra modelagem é a evolutiva, que surge da integração no espaço e no tempo dos melhores parâmetros e equações disponíveis para descrição da estrutura solar, e deve reproduzir a partir de uma estrela de $1 M_{\odot}$, o estado presente do Sol. Esta dá origem ao chamado Modelo Solar Padrão (MSP), com iterações aprimoradas ao longo dos anos, e que centralizam a concepção do Sol, um astro fundamental para o entendimento das outras estrelas do universo devido a sua proximidade a nós [3]. A heliosismologia oferece parâmetros fundamentais para a construção de um MSP e é fundamental a concordância entre as condições solares que as modelagens reproduzem, e os parâmetros que as descrevem. Essencial para essa concordância é a metalicidade, a abundância superficial no Sol relativa ao H de elementos mais pesados que H e He , os chamados metais. As abundâncias são medidas através da análise de meteoritos ou de técnicas de espectroscopia. O estado da arte da espectroscopia leva a abundâncias relativas reduzidas, aqui chamadas de AGS09-met que resultam em MSPs incapazes de reproduzir resultados obtidos pela heliosismologia, em contraste com as antigas abundâncias, GS98, de maior metalicidade [4, 5]. Este é o problema da metalicidade solar.

Dentre as várias soluções propostas estão modificações aos MSPs que tentam considerar diferentes processos do acúmulo de metais dentro do Sol, indo além das hipóteses usadas nos MSPs de que o Sol era inicialmente quimicamente homogêneo, e de que mudanças na composição ocorrem somente através dos processos de fusão nuclear [6]. Ou ainda, propostas de mudanças de parâmetros fundamentais como a profundidade da zona convectiva. Tais soluções são incapazes de restaurar concordâncias completa entre as modelagens pois afetam outros parâmetros de forma indesejada. Como a principal fonte de discordância ocorre devido a degenerescência quase completa entre metalicidade e opacidade radiativa dentro do Sol, que afetam a temperatura do núcleo solar, e portanto as reações que ocorrem no núcleo, pode-se restaurar a concordância entre modelagens com um aumento da opacidade na ordem de 15-20% na base da zona convectiva. No entanto, essa solução é inconsistente em uma restauração completa pois extrapola as incertezas permitidas para a opacidade [7].

2.2 A produção de energia: a cadeia pp e o ciclo CNO

A energia solar é produzida em dois processos de fusão nuclear ou queima de hidrogênio, ambos realizam a conversão de hidrogênio em hélio com a produção de neutrinos na forma:

$$4p \rightarrow \alpha + 2\nu_e + 26.73MeV \quad (1)$$

Esses processos são a cadeia pp e o ciclo CNO. São responsáveis, respectivamente por 99% e 1% da luminosidade solar, e os neutrinos produzidos seguem uma relação da forma [8]:

$$\Phi_i \propto T_{nuc}^{\tau_i} \quad (2)$$

¹ $\odot$ indica uma grandeza solar

que foi feita explorando uma sequência de decaimentos de forma que através da detecção de ^{210}Po no detector, dentro de uma região chamada *low-polonium field*, o sinal medido na região de interesse (ROI) deixasse espaço para os $\text{CNO-}\nu$ em uma contagem de eventos como visível na figura (2), demonstrando a ocorrência destes eventos [1].

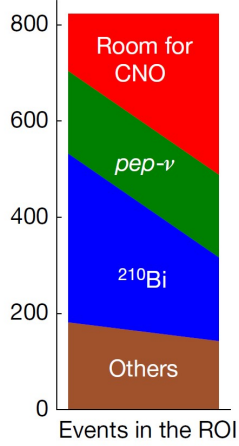


Figura 2. Contagem da detecção de neutrinos na região de interesse (ROI) do Borexino demonstrando a presença de $\text{CNO-}\nu$. Fonte: [1]

Além da primeira detecção de $\text{CNO-}\nu$ o experimento Borexino também reportou a primeira medida direta da metalicidade solar. Esta medida foi feita sobre a abundância de metais do sub-ciclo CN do ciclo CNO no núcleo solar, explorando a linearidade das taxas de reação dos ciclos, de forma que degenerescência com a opacidade pode ser removida a partir dos fluxos de $^8\text{B-}\nu$ [8]. Mais detalhadamente, em relação aos valores do modelos solar padrão B16, para um elemento do ciclo CNO como ^{15}O , se tem $\Phi_{\text{O}}/\Phi_{\text{O}}^{\text{MSP}} \propto n_{\text{CN}}/n_{\text{CN}}^{\text{MSP}} \times (T_n/T_n^{\text{MSP}})^{\tau_{\text{O}}}$, onde $n_{\text{CN}} = n_{\text{C}} + n_{\text{N}}$, N e C representam abundância no núcleo solar de nitrogênio e carbono, respectivamente. Usando então, da taxa de reação bem conhecida do ^8B , que pertence a cadeia pp, como um “termômetro” dado que o fluxo de $^8\text{B-}\nu$ é o mais sensível à temperatura do núcleo, podemos chegar na forma:

$$\frac{(\Phi_{\text{O}}/\Phi_{\text{O}}^{\text{MSP}})}{(\Phi_{\text{B}}/\Phi_{\text{B}}^{\text{MSP}})^k} \propto \frac{n_{\text{CN}}}{n_{\text{CN}}^{\text{MSP}}} \times \left(\frac{T_n}{T_n^{\text{MSP}}} \right)^{\tau_{\text{O}} - k\tau_{\text{B}}} \quad (3)$$

Considerando um k que minimize o impacto de T_n , se obtém uma expressão para determinar a abundância de $\text{C} + \text{N}$ ao se considerar contribuições não triviais de outros parâmetros na equação simplificada, e também eliminando a dependência com a opacidade e removendo a degenerescência. Finalmente, levando em conta as contribuições do fluxo de $^8\text{B-}\nu$ e $^{15}\text{O-}\nu$ obtidas pelo experimento Borexino, obtém-se $\frac{N_{\text{CN}}}{N_{\text{CN}}^{\text{MSP}}} = 1.35 \times (0.96)^{-0.769} \times [1 \pm (+0.303(\text{CNO}) \oplus 0.097(\text{nuclear}) \oplus 0.023(^8\text{B}) \oplus 0.005(\text{amb}) \oplus 0.027(\text{difusão}) \oplus 0.022(^{13}\text{N}/^{15}\text{O})]$, onde $\oplus$ indica incertezas somadas em quadratura. Isto nos leva a uma abundância fotosférica de $\text{C} + \text{N}$ como $N_{\text{CN}} = (5.78_{-1.00}^{+1.86}) \times 10^{-4}$ em boa concordância com as altas abundâncias tanto antigas (GS98) quanto mais recentes (MB22) e em tensão com baixas metalicidades (AGSS09met) segundo a análise do Borexino [2].

4 Análise e conclusão

Uma medida de neutrinos do ciclo CNO traz mais uma confirmação para as previsões teóricas feitas por Bethe de fusão nuclear, demonstrando que este processo existe e está presente no Sol. Além disso, uma medida direta do ciclo CN vem sido prevista pela literatura ao longo de toda a discussão do problema da metalicidade solar como singular em uma resoluções deste.

Medidas mais precisas são obviamente necessárias para o fluxo de $\text{CNO-}\nu$, pois impli-

cam no cálculo da metalicidade, sendo ainda insuficientes para desfavorecer completamente o uso de baixas abundâncias em MSPs. Talvez análises ainda mais aprimoradas do *dataset* da fase-III do Borexino possam ser realizadas. Mas, com o fim deste, outros experimentos devem se inspirar na alta radiopureza e técnicas utilizadas para estabelecer novas restrições e reduzir as altas incertezas relativas do fluxo de neutrinos. Uma medida direta capaz de definir altas metalicidades como as corretas não exime a necessidade de melhora no cálculo de opacidades. Resultados já mostram diferenças substanciais da opacidade prevista pelas modelagens solares e por experimentos em laboratório, uma mudança drástica da opacidade não seria inédita na astrofísica caso fosse feita necessária por uma medida da metalicidade [9]. A grande fonte de incerteza para a determinação de N_{CN} são as seções de choque das reações nucleares, sendo visivelmente dominantes no cálculo de N_{CN} . Medidas mais precisas serão compiladas na Solar Fusion III (SFIII), dado que a maioria das taxas de reações em uso tiveram poucas mudanças da compilação previa SFII. Por fim, a modelagem e a compreensão solar estão se aproximando da conclusão de mais um estágio, e um aumento da precisão levará a um melhor entendimento do funcionamento do Sol e de outras estrelas [8].

Referências

- [1] *The Borexino Collaboration*. 2020 Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun. *Nature* **587**, 7835, 577–582. (doi:[10.1038/s41586-020-2934-0](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2934-0)).
- [2] *The Borexino Collaboration*. 2022. Improved measurement of solar neutrinos from the carbon-nitrogen-oxygen cycle by borexino and its implications for the standard solar model. (doi:[10.48550/ARXIV.2205.15975](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2205.15975)).
- [3] Bahcall JN. 1989 *Neutrino Astrophysics*. Cambridge University Press.
- [4] Basu S, Antia HM. 2004 Constraining solar abundances using helioseismology. *The Astrophysical Journal* **606**, 1, L85–L88. (doi:[10.1086/421110](https://doi.org/10.1086/421110)).
- [5] Villante FL, Serenelli A. 2020. An updated discussion of the solar abundance problem. (doi:[10.48550/ARXIV.2004.06365](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2004.06365)).
- [6] Serenelli AM, Haxton WC, Peña-Garay C. 2011 SOLAR MODELS WITH ACCRETION. i. APPLICATION TO THE SOLAR ABUNDANCE PROBLEM. *The Astrophysical Journal* **743**, 1, 24. (doi:[10.1088/0004-637x/743/1/24](https://doi.org/10.1088/0004-637x/743/1/24)).
- [7] Christensen-Dalsgaard, J, Di Mauro, M P, Houdek, G, Pijpers, F. 2009 On the opacity change required to compensate for the revised solar composition. *A&A* **494**, 1, 205–208. (doi:[10.1051/0004-6361:200810170](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810170)).
- [8] Villante FL, Serenelli A. 2021 The relevance of nuclear reactions for standard solar models construction. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **7**. (doi:[10.3389/fspas.2020.618356](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.618356)).
- [9] Gann GDO, Zuber K, Bemmerer D, Serenelli A. 2021 The future of solar neutrinos. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **71**, 1, 491–528. (doi:[10.1146/annurev-nucl-011921-061243](https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-011921-061243)).