

# O Experimento SNO e o Problema do Neutrino Solar

Pedro C. de Holanda<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil*

<sup>2</sup>*Internation Centre for Theoretical Physics, 34100 Trieste, Itália*  
*e-mail: holanda@ifi.unicamp.br*

## Resumo

O Problema do Neutrino Solar, que completa três décadas sem solução definitiva, é caracterizado por um déficit nos neutrinos solares detectados em cinco montagens experimentais independentes. Recentemente, o Sudbury Neutrino Observatory, um novo experimento de detecção, apresentou seus dados. Localizado em Sudbury, Canadá, é sensível aos neutrinos solares de mais alta energia através de três canais diferentes de detecção, e seus dados foram recebidos com entusiasmo pela comunidade científica. Apresentaremos aqui tais dados, e faremos uma breve discussão da sua importância na caracterização do Problema do Neutrino Solar. Em seguida analisaremos o seu reflexo em uma das atuais possíveis soluções ao problema, a solução via conversão de sabor induzida pela matéria solar.

## 1 O experimento SNO

O experimento SNO (Sudbury Neutrino Observatory) [1] vem se juntar às outras cinco montagens experimentais [2, 3, 4, 5, 6] que detectam neutrinos solares. Em todas estas montagens, um fluxo de neutrinos menor que aquele previsto por modelos de geração de energia no Sol [7] foi detectado, o que caracteriza o Problema dos Neutrinos Solares<sup>1</sup>. Como ainda não se possui uma solução definitiva para tal problema, várias novas montagens experimentais estão sendo propostas, de modo a fornecer novas informações sobre as características deste déficit de neutrinos. Entre estas propostas encontrava-se o experimento SNO, que publicou seus primeiros dados em junho de 2001.

SNO [1] é capaz de detectar neutrinos solares através de três canais distintos:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad (\text{CC})$$

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \quad (\text{NC})$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (\text{ES})$$

Enquanto o terceiro canal de detecção, o espalhamento elástico do neutrino com elétrons do detector (ES), já vem sendo utilizado por Super-Kamiokande [6], SNO obtém seus dados através de dois novos canais. O primeiro detecta o neutrino através de corrente carregada (CC) (através da troca de um  $W^\pm$ ), e é sensível somente aos neutrinos eletrônicos. O segundo utiliza corrente neutra (NC) (através da troca de um  $Z^0$ ), sendo igualmente sensível a todos os sabores de neutrinos. Como ocorre no espalhamento elástico do elétron, este canal não pode distinguir qual o sabor do neutrino que induziu a reação.

A detecção através destes dois novos canais se tornou possível graças ao uso de água pesada como alvo, em vez da água comum usada por Super-Kamiokande, possibilitando a interação do neutrino com o nêutron presente nos átomos de deuterium. Cabe aqui salientar que devido a baixas temperaturas presentes no interior solar apenas neutrinos eletrônicos são produzidos, e portanto qualquer dos canais utilizados para a detecção dos neutrinos solares deveria fornecer o mesmo valor para o fluxo destes neutrinos.

Os primeiros dados disponibilizados referem-se aos canais CC e ES, sendo que a detecção via corrente neutra está prevista para uma fase futura de operação. Estes dois canais utilizam a radiação Cherenkov produzida pela interação do elétron com o meio, e apresentam o mesmo limiar de energia, de 6.75 MeV para a energia cinética do elétron. Com esse limiar, somente os neutrinos solares de mais alta energia, produzidos na reação solar de decaimento beta do Boro, e por isso chamados de neutrinos do Boro, são detectados.

Apresento a seguir os primeiros resultados obtidos por SNO para o fluxo total de neutrinos do Boro. Como o canal de detecção via corrente carregada (CC) não permite distinguir se o evento foi induzido por um neutrino eletrônico ou um neutrino de outro sabor, é feita a suposição de que todo o fluxo que chega ao detector é formado por neutrinos eletrônicos. Os valores medidos para o fluxo de neutrinos solares são:

$$\phi_{\text{SNO}}^{\text{CC}}(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07 (\text{stat.})_{-0.11}^{+0.12} (\text{sys.}) \pm 0.05 (\text{theor.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

$$\phi_{\text{SNO}}^{\text{ES}}(\nu_x) = 2.39 \pm 0.34 (\text{stat.})_{-0.14}^{+0.16} (\text{sys.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

<sup>1</sup>Para uma descrição detalhada do Modelo Padrão da física de partículas elementares com ênfase particular em neutrinos, ver [8]. Uma ampla discussão sobre os mecanismos de produção de neutrinos solares pode ser encontrada em [9].

Primeiramente convém observar a excelente concordância entre a taxa de detecção obtida por espalhamento elástico com o resultado de Super-Kamiokande [6], que fornece:

$$\phi_{\text{SK}}^{\text{ES}}(\nu_x) = 2.32 \pm 0.03 \text{ (stat.)}_{-0.07}^{+0.08} \text{ (sys.)} \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Porém, os resultados obtidos através dos dois canais distintos utilizados por SNO são incompatíveis entre si. A incompatibilidade entre estes dois resultados constitui uma evidência direta de que uma boa fração do fluxo de neutrinos solares que chega à Terra é formada por neutrinos não eletrônicos. Estes neutrinos são sentidos pelo espalhamento elástico, e portanto contribuem para a taxa total de detecção neste canal. O canal de detecção via corrente carregada, porém, não sente a parte não-eletrônica do fluxo, e portanto deverá indicar uma taxa de detecção menor.

O fato de que o fluxo medido por este canal é menor que aquele medido via espalhamento elástico indica que a suposição inicial de que o fluxo de neutrinos solares é puramente eletrônico não é válida. O cálculo do fluxo total realizado utilizando os dados do espalhamento elástico deve ser refeito levando em consideração também a porção não-eletrônica do fluxo de neutrinos. Para realizar tal cálculo, devemos levar em conta a seção de choque para o espalhamento elástico dos neutrinos não-eletrônicos (muônicos ou tauônicos), que difere da seção de choque para neutrinos eletrônicos por um fator  $\sim 6$ . Consideramos então que o resultado fornecido pelo canal CC nos fornece diretamente a porção eletrônica do fluxo de neutrinos. E a diferença entre os resultados obtidos nos diferentes canais se deve à porção não-eletrônica, que foi erroneamente considerada como um fluxo de neutrinos eletrônicos. Dessa forma, temos:

$$\phi(\nu_e) = \phi_{\text{SNO}}^{\text{CC}}(\nu_e) = 1.75 \pm 0.15 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1},$$

onde os erros foram somados em quadratura.

A diferença entre este valor e o valor obtido através do espalhamento elástico origina-se puramente dos neutrinos não-eletrônicos que chegam ao detector. Porém, para calcular a porção não eletrônica do fluxo, devemos levar em consideração a diferença entre as seções de choque dos neutrinos eletrônicos e não eletrônicos:

$$\begin{aligned} \phi(\nu_{ne}) &= \frac{\sigma(\nu_e)}{\sigma(\nu_{ne})} \times [\phi_{\text{SNO}}^{\text{ES}}(\nu_e) - \phi_{\text{SNO}}^{\text{CC}}(\nu_e)] \\ &\sim 6 \times (2.39 - 1.75) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \\ &\sim 3.84 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}, \end{aligned}$$

onde o índice *ne* refere-se à porção não-eletrônica do fluxo.

Somando-se as duas contribuições, eletrônica e não-eletrônica, temos o fluxo total de neutrinos chegando no detector:

$$\begin{aligned} \Phi_T &= \phi(\nu_e) + \phi(\nu_{ne}) \\ &\sim 5.59 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Um cálculo mais cuidadoso pode ser encontrado em [1], onde em vez de utilizar o resultado da taxa obtida por espalhamento elástico em SNO, utiliza-se o resultado de Super-Kamiokande, que devido ao longo tempo de coleta de dados, apresenta um erro estatístico bem menor. Obtém-se assim:

$$\Phi_T = 5.44 \pm 0.99 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}, \quad (4)$$

o que está em ótima concordância com as previsões teóricas [10], que prevêm:

$$\Phi_T^{\text{teor.}} = 5.93 \pm 0.9 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}. \quad (5)$$

O experimento SNO possibilita então, pela primeira vez, a medição do fluxo total dos neutrinos provenientes do Sol, independente da distribuição de sabor neste fluxo. E o resultado praticamente reproduz as previsões teóricas, o que é um feito extraordinário para o campo da física de neutrinos.

## 2 Soluções ao PNS

Todos os cálculos feitos até aqui são completamente independentes do mecanismo pelo qual a conversão de neutrinos ocorre. Vamos agora avaliar o efeito dos resultados de SNO em um mecanismo particular de conversão que fornece uma solução ao problema do neutrino solar, as oscilações via efeito MSW [11] (tal sigla se refere às iniciais do autor que descreveu este efeito, Wolfenstein, e daqueles que sugeriram pela primeira vez utilizar este efeito para solucionar o Problema do Neutrino Solar, Mikheyev e Smirnov). Neste mecanismo, os neutrinos devem ter uma massa não nula (a rigor, uma diferença da massa ao quadrado entre os auto-estados físicos não nula) e um ângulo de mistura ligando as diferentes famílias, parâmetros que são nulos no modelo padrão de física de partículas.

Podemos caracterizar a conversão de neutrinos solares como uma probabilidade de sobrevivência de neutrinos eletrônicos, uma vez que todos os neutrinos são criados como neutrinos eletrônicos, mas somente uma fração destes chega ao detector sem trocar de sabor. Definimos então uma probabilidade de sobrevivência do neutrino como:

$$P(\nu_e \nu_e) = \frac{\phi(\nu_e)}{\Phi_T^{\text{teor.}}} = 0.313 ,$$

onde o resultado numérico foi obtido substituindo-se os resultados da seção anterior.

Na conversão via efeito MSW esta probabilidade de conversão surge da interação dos neutrinos com a matéria solar. Para reproduzir os dados experimentais devemos calcular esta probabilidade de conversão, e incluí-la no cálculo das taxas totais de detecção dos diversos experimentos, onde as características específicas de cada montagem experimental, como limiar de energia e seção diferencial de choque, são levadas em consideração. Em seguida, utilizamos o método estatístico de  $\chi^2$  mínimo para avaliar se os resultados obtidos estão de acordo com os dados experimentais. Uma explicação detalhada de cada ponto deste cálculo pode ser encontrada em [12].

Três regiões distintas no espaço de parâmetros do neutrino fornecem uma probabilidade de conversão que reproduz os resultados de todos os experimentos de detecção de neutrinos solares existentes [12].

Veremos agora como estas soluções se comportam frente aos novos resultados de SNO. Também foram incluídos nesses cálculos atualizações recentes das previsões teóricas do fluxo de neutrinos solares [10], resultado que não foi in-

cluído nos cálculos pré-SNO (uma discussão a respeito deste ponto pode ser encontrada em [13]).

Na tabela 1 apresento os níveis de confiança para as regiões de parâmetros que fornecem uma solução ao Problema do Neutrino Solar, calculados a partir do método de  $\chi^2$  mínimo. As três regiões presentes são denotadas por SMA (Small Mixing Angle), LMA (Large Mixing Angle) e LOW (referindo-se ao baixo valor de  $\Delta m^2$  em comparação com as outras regiões).

Podemos ver por esta tabela que a região de grande ângulo de mistura (LMA), que já se encontrava favorecida frente às outras soluções, melhora ainda mais o seu ajuste. A região de pequeno ângulo de mistura (SMA), por sua vez, não reproduz bem os dados de SNO, e seu ajuste aos dados experimentais piora. A região LOW também tem seu ajuste piorado em relação ao panorama experimental pré-SNO. Neste ajuste consideramos somente os dados de corrente carregada, uma vez que o canal de espalhamento elástico já está sendo considerado por Super-Kamiokande.

Tabela 1: Pontos no espaço de parâmetros do neutrino que fornecem uma solução ao Problema do Neutrino Solar, juntamente com o nível de confiança de cada uma dessas soluções, antes e após a publicação dos dados de SNO.

Caso	SMA	LMA	LOW
$\Delta m^2 (eV^2)$	$4.9 \times 10^{-6}$	$6.1 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-7}$
$tg^2\theta$	$4.4 \times 10^{-4}$	0.35	0.78
nível de confiança (pré-SNO)	32%	74%	45%
nível de confiança (pós-SNO)	6.3%	75%	38%

### 3 Conclusão

Os primeiros dados do experimento SNO tiveram um impacto significativo na área de pesquisa em física de neutrinos. Pela primeira vez temos uma evidência direta de conversão de sabor de neutrinos solares.

Além disso, também pela primeira vez, é possível utilizar os resultados experimentais de neutrinos solares para fazer uma previsão a respeito do modelo solar: o fluxo total de neutrinos do Boro produzido no Sol. Tal fato retoma os objetivos iniciais do primeiro experimento de detecção de neutrinos solares, o de pesquisar os parâmetros solares através do estudo dos neutrinos produzidos no Sol e detectados na Terra.

### Referências

- [1] SNO Collaboration, Phys. Rev. Lett. **87** 2001, 071301.
- [2] T.B. Cleveland *et al.* (Homestake Collaboration), Astrophys. J. **496**, 505 (1998).
- [3] W. Hampel *et al.* (GALLEX Collaboration), Phys. Lett. **B 447**, 127 (1999).
- [4] J.N. Abdurashitov *et al.* (SAGE Collaboration), Phys. Rev. **C 60**, 055801 (1999).
- [5] Y. Fukuda *et al.* (Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett. **77**, 1683 (1996).

- [6] Y. Fukuda et al. (SuperKamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett. **82**, 1810 (1999).
- [7] J. N. Bahcall, S. Basu and M.H. Pinsonneault, Phys. Lett. B **433**, 1 (1998);  
J.N. Bahcall, S. Basu and M.H. Pinsonneault, Phys. Lett. **B 433**, 1 (1998); veja também J.N. Bahcall's home page, <http://www.sns.ias.edu/~jnb>.
- [8] Chung Wook Kim and Aihud Pevsner, *Neutrino in Physics and Astrophysics*, Harwood Academic Publs., Chur, Switzerland, 1993.
- [9] John N. Bahcall, *Neutrino Astrophysics*, Cambridge University Press, New York (1989).
- [10] J. N. Bahcall, M. C. Gonzalez-Garcia and C. Peña-Garay, hep-ph/0111150.
- [11] L. Wolfenstein, Phys. Rev. **D17**, 2369 (1978);  
S.P. Mikheyev and A. Yu. Smirnov, Sov. J. Nucl. Phys. **42**, 913 (1985); Nuovo Cimento **C9**, 17 (1986).
- [12] M.C. Gonzalez-Garcia, P.C. de Holanda, C. Peña-Garay and J.W.F. Valle, Nucl. Phys. **B 573** (2000) 3.
- [13] A. M. Gago, M. M. Guzzo, P. C. de Holanda, H. Nunokawa, O. L. G. Peres, V. Pleitez and R. Zukanovich Funchal, hep-ph/0112060.