



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

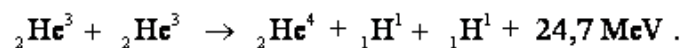
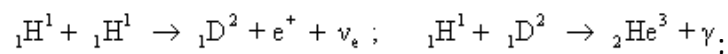
www.bassalo.com.br

Neutrinos/Antineutrinos Solares e Estelares e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2002 - Parte 1: Davis Junior.

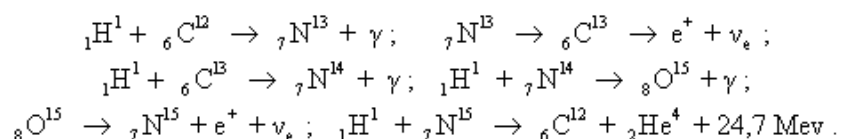
A primeira parte do PNF de 2002 foi concedida aos físicos, o norte-americano Raymond Davis Junior (1914-2006) e o japonês Masatoshi Koshiha (n.1926) por desenvolverem técnicas para a detecção de **neutrinos solares e estelares**. Neste verbete, vamos analisar os trabalhos de Davis Junior.

Conforme vimos em verbetes desta série, a ideia da partícula **neutrino** foi apresentada em 1930, pelo físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) para poder explicar a não conservação de energia no processo conhecido como **decaimento beta** (β -decay). Neste processo, um núcleo A emite uma partícula beta (β) (elétron) e se transforma no núcleo B. Contudo, o balanço energético (energia de repouso e de movimento) desses três elementos não era mantido. Para Pauli, uma partícula neutra era a responsável pela manutenção daquele balanço. Em 1934, o físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938) explicou o decaimento beta por intermédio de sua famosa Teoria da Interação Fraca, segundo a qual o **nêutron** (n) do núcleo A se transforma em próton (p) (produzindo o núcleo B), emite um elétron (e^-) acompanhado da partícula pauliana, denominada por ele de **neutrino** (ν) – “nêutron pequenino” -, ou seja: $n \rightarrow p + e^- + \nu$ (hoje, sabe-se que é o **antineutrino** - $\bar{\nu}_e$). É oportuno destacar que o e^- foi descoberto em 1897, o p, em 1919, o n, em 1932, e o ν , em 1953. A busca para a detecção dos **neutrinos** (ν_e ; ν_μ ; ν_τ) (sobre essas partículas e suas antipartículas, ver verbetes nesta série) é um dos temas deste verbete.

Agora, vejamos as teorias relacionadas com os **neutrinos estelares**. Em 1938, os físicos, o germano norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) e o norte-americano Charles Louis Critchfield (1910-1994) apresentaram o famoso **ciclo próton-próton** (${}_1\text{H}^1$ - ${}_1\text{H}^1$) (CPP) como gerador de energia das estrelas tão (ou menos) massivas quanto o Sol, obedecendo a uma **reação nuclear** do tipo (em notação atual, com e^+ representando o pósitron, descoberto em 1932):



Ainda em 1938, o físico alemão Barão Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) propôs o igualmente famoso **ciclo carbono-nitrogênio-oxigênio-carbono** (CCNOC) como gerador de energia das estrelas mais massivas do que o Sol, ciclo esse logo confirmado por Bethe, em 1939, e com a seguinte **reação nuclear** (em notação atual):



Por outro lado, em 1941, os físicos, o russo-norte-americano George Antonovich Gamow (1904-1968) e o brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) publicaram um famoso trabalho para explicar o mecanismo do **colapso estelar**. Segundo eles, quando o centro de uma estrela atinge uma densidade

muito alta, começa a haver a captura de elétrons (e^-) por parte dos prótons (p), que se transformam em nêutrons (n) e emitem **neutrinos** (ν), numa **reação nuclear** conhecida como **decaimento beta inverso** e caracterizada por: $p + e^- \rightarrow n + \nu$ (hoje, ν_e). Portanto, segundo esse **processo URCA** (veja em verbete desta série as diversas hipóteses sobre o nome URCA), é a fuga de **neutrinos** que provoca o resfriamento estelar e, conseqüentemente, o seu **colapso**.

Com essas preliminares sobre os **neutrinos estelares**, passemos aos trabalhos de Davis Junior, que graduou-se em Química na *Universidade de Maryland*, em 1938, e doutorou-se em Físico-Química, na *Universidade de Ohio*, em 1942, trabalhando com ionização e solubilidade do dióxido de carbono (CO_2). Ainda em 1942, ele foi para o Exército como oficial da reserva e, até o final da *Segunda Guerra Mundial* (1939-1945), na *Dugway Proving Ground*, em Utah, ele trabalhou no esforço de guerra norte-americano observando as reações químicas envolvidas nos testes de armamentos. Terminada a Guerra, ainda em 1945, Davis Junior foi trabalhar no *Laboratório Mound* da *Monsanto Chemical Company*, em Ohio, em pesquisas de rádioquímica que haviam sido contratadas pela *Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos* (CEA/US), criada em 1946.

Objetivando usar o átomo para fins pacíficos em todas as áreas das ciências puras e aplicadas, o governo norte-americano criou, em 1947, o *Brookhaven National Laboratory* (BNL), localizado em Upton, New York. Na primavera de 1948, Davis Junior foi trabalhar no *Departamento de Química* desse Laboratório e, ao se apresentar ao seu Diretor, o químico norte-americano Richard W. Dodson (1915-2002), perguntou-lhe o que esperava de seu apresentador. Para sua surpresa, Dodson mandou que Davis Junior fosse à Biblioteca e procurasse um tema de pesquisa. Assim, encontrou o artigo do físico norte-americano Horace Richard Crane (1907-2007), escrito ainda em 1948 (*Reviews of Modern Physics* **28**, p. 278), o qual tratava do **decaimento beta** e da busca do **neutrino** (ν) dele decorrente. A leitura do artigo-revisão de Crane fez Davis Junior decidir-se pela **Física dos Neutrinos**, que era um assunto pouco conhecido.

Ao ler o artigo de Crane, Davis Junior tomou conhecimento de que uma possível detecção do hipotético **neutrino** poderia ocorrer em experiências envolvendo a **captura de neutrinos por nêutrons**: $\nu + n \rightarrow p + e^-$, conforme fora sugerido pelo físico ítalo-inglês-russo Bruno M. Pontecorvo (1913-1993), em 1946 (*Chalk River Laboratory Report* **PD-205**). Assim, segundo Pontecorvo, a captação de ν (solares ou de reações de fissão nuclear ocorrida em reatores) pelo cloro (${}_{17}\text{Cl}^{37}$) produziria o argônio (${}_{18}\text{Ar}^{37}$), com a emissão da β (e^-), acompanhado de um recuo do Cl . Logo depois, em 1947 (*Physical Review* **72**, p. 246), Pontecorvo propôs um novo tipo de **captura de neutrinos por nêutrons**, com produção de “elétrons pesados” (hoje, **múons** – μ^-), descobertos em 1937 (vide verbete nesta série): $\nu + n \rightarrow p + \mu^- \rightarrow p + e^- + \gamma$. Contudo, em 1948 (*Physical Review* **73**, p. 257), Pontecorvo e E. P. Hincks não confirmaram o decaimento $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$, como foi proposto por Pontecorvo. É oportuno destacar que, ainda em 1948 (*Centennial Meeting of the American Association for Advancement of Science*) e, em 1949 (*Reviews of Modern Physics* **21**, p. 144; 153), os físicos, o norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008) e o brasileiro Jayme Tiomno (1920-2011) demonstraram que o decaimento do μ^- envolve dois neutrinos, isto é: $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_1 + \nu_2$. Note-se que esses **neutrinos** foram, em 1953, reconhecidos como $\bar{\nu}_e$ e ν_μ , respectivamente (ver verbete nesta série).

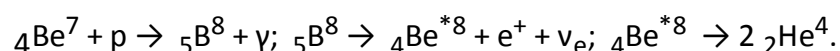
Tendo em vista a possibilidade de “detectar” ν por intermédio da reação $\text{Cl} - \text{Ar}$, em 1951, Davis Junior passou a usar os “**neutrinos**” do reator do BNL enviando-os para um tanque de 3.800 litros contendo tetracloreto de carbono [${}_{6}\text{C}^{35} / {}_{17}\text{Cl}^{37}_{(4)}$ (CCl_4)]. Contudo, não houve produção de argônio como era esperado, pois, conforme foi visto depois (1956), os reatores emitem **antineutrinos** e não **neutrinos**, que são partículas diferentes. Em 1952 (*Physical Review* **86**, p. 976), Davis Junior usou a proposta de Pontecorvo sobre o recuo de um núcleo ao receber o ν , porém, trabalhou com a reação lítio-berílio: ${}_{3}\text{Li}^7 + \nu \leftrightarrow {}_{4}\text{Be}^7 + e^-$ (lembrar que: $\nu + n \leftrightarrow p + e^-$), na qual um feixe de ν com a energia de 0,862 MeV provoca um recuo do Li com a energia característica de 57 eV. Note-se que essa reação também pode ser interpretada como a **captura de elétrons** pelo Be, produzindo o Li e um feixe de ν

com a energia de 0,862 MeV, conforme Davis Junior considerou. É interessante destacar que P. B. Smith e J. S. Allen já haviam realizado uma experiência desse tipo, antes, em 1951 (*Physical Review* **81**, p. 381).

Segundo vimos em verbete desta série, em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 830), um outro tipo de experiência para detectar o ν foi realizado pelos físicos norte-americanos Frederick Reines (1918-1998; PNF, 1995) e Clyde Lorrain Cowan Junior (1919-1974). Com efeito, desde 1947, Reines tentava observar o ν , porém, sem êxito. Contudo, a partir de 1951, juntamente com Cowan, começaram sua caça ao ν . Inicialmente, eles consideraram a hipótese de usar os testes de bombas atômicas como fonte de ν (na realidade, $\bar{\nu}$, segundo vimos acima), mas logo decidiram usar esse tipo de partícula produzido pelo reator nuclear do *Hanford Engineering Works*, situado em Washington, colidindo com prótons (p) de um cintilador líquido, em uma reação do tipo (na notação atual): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. Note-se que Cowan, Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse e A. D. McGuire, em 1956 (*Science* **124**, p. 103), confirmaram o resultado de 1953, obtido por Reines e Cowan, desta vez usando o feixe de $\bar{\nu}$ do *Savannah River Nuclear Reactor*, situado na Carolina do Sul, que possuía uma fonte mais intensa de $\bar{\nu}$. É oportuno observar que, enquanto Reines e Cowan confirmaram a existência do $\bar{\nu}_e$, Davis Junior confirmou a existência do ν , mostrando que esses dois **neutrinos** são diferentes.

Voltemos aos trabalhos de Davis Junior. Como, em 1952, ele observara que o reator *Brookhaven Graphite Research Reactor*, do BNL, não era uma forte fonte de $\bar{\nu}$ para realizar a reação $Cl - Ar$, e considerando o sucesso de Reines e Cowan com o reator do *Hanford Engineering Works*, em 1954, Davis Junior pensou em utilizar o *Savannah River Nuclear Reactor*, que, naquele momento, era a fonte mais intensa de $\bar{\nu}$, segundo vimos acima. Desse modo, na base deste reator, ele voltou a usar o tanque de 3.800 litros contendo CCl_4 , e, como no caso da experiência realizada no BNL, Davis Junior não conseguiu mostrar a identidade **neutrino-antineutrino**, pois encontrou que as taxas de captura de ν_e de $\bar{\nu}$ por parte do Cl , eram diferentes, numa relação de 1/5. Em vista disso, em 1955 (*Physical Review* **97**, p. 766), Davis publicou um artigo no qual discutiu apenas a possibilidade de detectar **antineutrinos** oriundos de reatores por intermédio da reação $Cl - Ar$. Note-se que, em 1958 (*UNESCO Conference, Paris* **1**, p. 728), Davis Junior voltou a usar o *Savannah River Nuclear Reactor*, usando um tanque de 11.400 litros contendo CCl_4 , e, desta vez, encontrou uma relação de 1/20 entre as taxas de **neutrino/antineutrino**.

Também no artigo publicado em 1955, Davis Junior examinou a possibilidade de construir detectores para medir o fluxo de **neutrinos solares** liberados nos ciclos CPP e CCNOC, vistos acima. Mais tarde, em 1958 (*Physical Review* **113**, p. 1556), H. D. Holmgren e R. L. Johnston investigaram a produção de **neutrinos** em reações nucleares do tipo: $2He^3 + 2He^4 \rightarrow 4Be^7 + \gamma$ e $e^- + 4Be^7 \rightarrow 3Li^7 + \nu_e$. Ainda em 1958, em trabalhos independentes, os físicos norte-americanos Alastair Graham Walter Cameron (1925-2005) (*Bulletin of the American Physical Society* **3**, p. 227; *Annual Review of Nuclear Science* **8**, p. 299) e William Alfred Fowler (1911-1995; PNF, 1983) (*Astrophysical Journal* **127**, p. 551) conjecturaram que o processo de geração de energia nas estrelas do tipo do Sol deve-se a reações do tipo:



Como nesses artigos havia a possibilidade de usar os ν_e para produzir a reação $Cl - Ar$, Davis Junior construiu um tanque de 3.800 litros de percloroetileno [${}_{(2)}^{35}Cl / {}_{(3)}^{37}Cl / {}_{(1)}^{36}Cl$ (C_2Cl_4)] na *Barberton Limestone Mine*, em Ohio. Contudo, não houve nenhum sinal de ν produzido pelo Ar. A taxa de captura de prótons (p) pelo Be-7 também foi discutida por R. W. Kavanagh, em 1960 (*Nuclear Physics* **15**, p. 411). Por sua vez, em 1962 (*Physical Review* **128**, p. 1297), o astrofísico norte-americano John Norris Bahcall (1934-2005) calculou a taxa de captura de elétrons (e^-) por parte do berílio-7 ($4Be^7$).

O primeiro modelo teórico (*Standard Solar Model- SSM*) sobre o fluxo de **neutrinos solares** foi proposto por J. H. Bahcall, em 1963, ao demonstrar que a taxa de emissão de ν_e pelo boro-8 (${}^8\text{B}$) era 20 vezes mais alta do que o valor previamente esperado, com energia máxima de 14,06 MeV. Em vista disso, Davis Junior planejou uma experiência do tipo $\text{Cl}-\text{Ar}$ e, depois de trocas de cartas com J. N. Bahcall, resolveram publicar seus resultados, teórico e experimental, respectivamente, em 1964 (*Physical Review Letters* **12**, p. 300; 303). Contudo, para que a experiência tivesse sucesso, era necessário que o tanque de percloroetileno fosse bem enterrado.

Com essa ideia em mente e com o suporte do BNL e da CEA/US, Davis Junior iniciou, em 1965, o planejamento de uma experiência do tipo $\text{Cl}-\text{Ar}$, usando um tanque de 378.000 litros de C_2Cl_4 e que foi enterrado na *Homestake Gold Mine*, em Lead, Dakota do Sul, a uma profundidade de 1.478 m; este experimento se tornou operacional em 1967. Os primeiros resultados dessa experiência foram publicados em 1968 (*Physical Review Letters* **20**, 1205), no artigo assinado por Davis Junior, D. S. Harmer e K. C. Koffman. Eles relataram que haviam encontrado um limite superior para o fluxo de ν_e bem abaixo do previsto, ou seja: 3 SNU (1 *Solar Neutrino Unit* = 10-36 capturas por segundo e por núcleo absorvedor), uma vez que, ainda em 1968 (*Physical Review Letters* **20**, 1209), J. N. Bahcall, Nata A. Bahcall e G. Shaviv demonstraram, usando o SSM, que aquele limite era de: $(7,5 \pm 3)$ SNU. É interessante registrar que, em 1973 (*Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **163**, p. 331), A. J. R. Prentice explicou que os **neutrinos solares** (NS) eram devidos às inhomogeneidades da composição do Sol; por exemplo, enquanto o hidrogênio (H) era queimado em suas partes mais externas, o caroço solar era composto de hélio (He). Por sua vez, também, em 1973 (*Nature* **246**, p. 33), P. Demarque, J. G. Mengel e A. V. Sweigart sugeriram que os NS estavam relacionados com o fato de que o interior do Sol gira mais rápido que o seu exterior.

Em 1984, Davis Junior deixou o BNL e transferiu o experimento *Homestake* para a *Universidade da Pensilvânia*, e continuou a realizar trabalhos, com novos colaboradores. Assim, em 1987, Davis Junior organizou uma colaboração com físicos soviéticos, conhecida como *Soviet-American Gallium Experiment* (SAGE), com o objetivo da medição rádioquímica do fluxo de **neutrino eletrônico solar** baseada na seguinte reação $\nu_e + {}_{31}\text{Ga}^{71} \rightarrow e^- + {}_{32}\text{Ge}^{71}$ (lembrar que: $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$), na qual a presença do **neutrino eletrônico solar** (ν_e) é evidenciada pelo decaimento do germânio radioativo (${}_{32}\text{Ge}^{71}$), que tem uma vida média de 11,43 dias. O alvo para essa reação é um tanque contendo 50-57 toneladas do líquido metálico de gálio (Ga) enterrado no *Baksan Neutrino Observatory* (BNO), nas montanhas do Cáucaso, na Rússia. Desse modo, em 1991 (*Physical Review Letters* **67**, p. 3332), Davis Junior e seus colaboradores do SAGE (A. I. Abazov, O. L. Anosov, E. L. Faizov, Vladimir N. Gravin, A. V. Kalikhov, T. V. Knodel, I. I. Knyshenko, V. N. Kornoukhov, S. A. Mezentseva, I. N. Mirmov, A. V. Ostrinsky, A. M. Pshukov, N. E. Revzin, A. A. Shikhin, P. V. Timofeyev, E. P. Veretenkin, V. M. Vermul, Georgiy T. Zatsepin, T. J. Bowles, Bruce T. Cleveland, Steve R. Elliott, H. A. O'Brien, D. L. Wark, J. F. Wilkerson, Kenneth Lande, M. L. Cherry e R. T. Kouzes) apresentaram seus primeiros resultados. Novos resultados foram publicados, em 1999 (*Physical Review Letters* **83**, p. 4686), por Davis Junior e seus colaboradores (J. N. Abdurashitov, Bowles, Cherry, Cleveland, Elliot, Gravin, S. V. Girin, V. V. Gorbachev, T. V. Ibragimova, Kalikhov, N. G. Khairnasov, Knodel, Lande, Mirmov, J. S. Nico, Shikhin, W. A. Teasdale, Veretenkin, Vermul, Wark, Wildenhain, Wilkerson, V. E. Yants e Zatsepin). Desde que o SAGE funcionou, de janeiro de 1990 até dezembro de 2007, foram realizados 168 experimentos, cujos resultados apresentavam a mesma discrepância (cerca de 1/3) entre os valores medidos do fluxo de ν_e e os previstos pelo SSM desenvolvido por J. N. Bahcall, desde 1962 (como vimos), e refinado nos seguintes trabalhos: Bahcall, Nicola Cabibbo (1935-2010), e A. Yahil, *Physical Review Letters* **28**, p. 316 (1972); Bahcall, W. F. Huebner, S. H. Lubow, P. D. Parker e R. K. Ulrich, *Reviews of Modern Physics* **54**, p. 767 (1982); Bahcall e Sheldon Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979), *Nature* **326**, p. 476 (1987); Bahcall, W. D. Arnett, R. P. Kirshner e S. E. Woosley, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **27**; p. 629 (1989); Bahcall, **Neutrino Astrophysics** (World Scientific, 1989); Bahcall, Lande, R. E. Lanou, J. G. Learned, R. G. H. Robertson e Lincoln Wolfenstein, *Nature* **375**, p. 29 (1995); Bahcall, M. H. Pinsonneault, S. Basu e J.

Christensen-Dalsgaard, *Physical Review Letters* **78**, p. 171 (1997); Bahcall, *Physical Review* **C56**, p. 3391 (1997); Bahcall, Plamen I. Krastev e Alexei Yu. Smirnov, *Physical Review* **D58**, n. 096016 (1998); Bahcall, Krastev e Smirnov, *Physical Review* **D60**, n. 093001 (1999); Bahcall, Pinsonneault e Basu, *Astrophysical Journal* **555**, p. 990 (2001).

É interessante destacar que, além do Ga, o SAGE usou também o cromo (^{51}Cr) como fonte de **neutrinos**, cuja energia do fluxo é similar a dos **neutrinos solares** do berílio (^7Be). Os resultados dessas experiências, realizadas entre 2002-2007, podem ser vistos nos artigos publicados em 2009: *Physical Review* **C80**, n. 015807; *arXiv*: 0901.2200 (en.wikipedia.org/wiki/SAGE).

Paralelamente a esse trabalho no SAGE, Davis Junior continuou com suas experiências no *Homestake*. Com efeito, em 1998 (*Astrophysical Journal* **201**, p. 505), Davis Junior e colaboradores (Cleveland, T. Daily, J. R. Distel, Lande, C. K. Lee, Paul S. Wildenhain e Jack Ullman) mediram o fluxo de **neutrinos solares** usando o detector de percloroetileno (reação $\text{Cl} - \text{Ar}$). Mais detalhes sobre a vida e o trabalho de Davis Junior, ver sua Autobiografia e *Nobel Lecture: A Half-Century with Solar Neutrinos* (08 de Dezembro de 2002; *e-Nobel Museum*).

A discrepância de 1/3, entre os valores medidos de fluxos de ν_e e os previstos pelo SSM, também foi encontrada em experiências realizadas pelo *Gallium Experiment* (GALLEX) e pelo seu sucessor *Gallium Neutrino Observatory* (GNO). Esses experimentos foram idealizados pelo *Laboratori Nazionali del Gran Sasso* (LNGS) e localizados na montanha de San Grasso, de 2.912 metros de altura, na província de Abruzzo, Itália. Para detectar **neutrinos solares** de baixa energia (com um limite superior de 233,2 keV), essa colaboração internacional usou um tanque de 54 m³ cheio de 101 toneladas de uma solução ácida de triclorido-hidroclórico (Cl_3HCl), contendo 30,3 toneladas de Ga. Nesses experimentos, também foi possível detectar **neutrinos solares** do ciclo CPP (p-p), proposto por Bethe, conforme vimos anteriormente, com um limite superior de 420 keV.

Durante o período (1971-1997) que o GALLEX funcionou, seu detector mediu uma taxa total de 77,5 SNU, com um decaimento médio diário de 0,75. Das experiências realizadas por essa colaboração de físicos internacionais, destaquemos as de 1992 (*Physics Letters* **B285**, p. 376), realizadas por P. Anselmann, W. Hampel, G. Heusser, J. Kiko, T. Kirsten, E. Pernicka, R. Plaga, U. Ronn, M. Sann, C. Schlosser, R. Wink, M. Wojcik, R. von Ammon, K. H. Ebert, T. Fritsch, K. Hellriegel, E. Henrich, L. Stielglitz, F. Weirich, M. Balata, E. Bellotti, N. Ferrari, H. Lalla, T. Stolarczyk, C. Cattadori, O. Cremonesi, E. Fiorini, S. Pezzoni, L. Zanolli, F. von Feilitzsch, Rudolf Ludwig Mössbauer (n.1929; PNF, 1961), U. Schanda, G. Berthomieu, E. Schatzman, I. Carmi, I. Dostrovsky, C. Bacci, P. Belli, R. Bernabei, S. d'Angelo, L. Paoluzi, S. Charbit, M. Cribier, G. Dupont, L. Gosset, J. Rich, M. Spiro, C. Tao, D. Vignaud, R. L. Hahn, F. X. Hartmann, J. K. Rowley, R. W. Stoenner e J. Weneser; e o de 1999 (*Physics Letters* **B447**, p. 127), conduzidas por Hampel, J. Handt, Heusser, Kiko, Kirsten, M. Laubenstein, Pernicka, W. Rau, Wojcik, Y. Zakharov, von Ammon, Ebert, Fritsch, D. Heidt, Henrich, Stielglitz, Weirich, Balata, Saan, Hartmann, Bellotti, Cattadori, Cremonesi, Ferrari, Fiorini, Zanolli, M. Altmann, von Feilitzsch, Mossbauer, S. Wäaninger, Berthomieu, Schatzman, Carmi, Dostrovsky, Bacci, Belli, Bernabei, d'Angelo, Paoluzi, Cribier, Rich, Spiro, Tao, Vignaud, J. Boger, Hahn, Rowley, Stoenner e Weneser. Esses experimentos e mais o realizado pela colaboração internacional SUPER-KAMIOKANDE, colaboração essa coordenada por Toshiba (ver verbete seguinte), também apresentou o mesmo resultado dos realizados pela SAGE e GALLEX, qual seja, discordância entre os valores experimentais e os valores previstos pelos SSM (en.wikipedia.org/wiki/GALLEX).

Em abril de 1998, começou o experimento GNO (com 30 toneladas de Ga e tendo ainda o Ge como fonte de ν_e), também liderado pelo LSGS. No período de seu funcionamento, maio de 1998-janeiro de 2002, seus resultados foram apresentados em 2000 (*Physics Letters* **B447**, p. 16), por Hampel, Handt, Heusser, Kiko, Kirsten, Laubenstein, Rau, Wojcik, Ebert, Henrich, Altmann, Balata, Bellotti, Cattadori, Zanolli, von Feilitzsch, Wäaninger, Belli, Bernabei, E. Burkert, G. Cerichelli, M. Chiarini, d'Angelo, G. Del Re, Cribier, Ferrari, T. Lachenmaier, J. Lanfranchi, D. Motta e H. Richter; e na *Neutrino 2002 Conference*, realizada em Munique, na Alemanha. Em resumo, nas experiências realizadas pelas colaborações GALLEX/GNO, os valores encontrados foram (www.lngs.it):

GALLEX: $77,5 \pm 62$ (estatístico) $+4,3/-4.7$ (sistemático) SNU,

GNO: $65,2 \pm 6,2$ (estatístico) ± 3.0 (sistemático) SNU,

para um valor teórico de 138 SNU calculado pelos modelos SSM desenvolvidos por Bahcall e colaboradores, segundo vimos anteriormente. Registre-se que essa discrepância foi resolvida com novos experimentos no *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), localizado na *Inco Nickel Mine*, em Sudbury (Ontário, Canadá) levando em conta a **oscilação de neutrinos**. Registre-se, também, que em 1969 (*Physics Letters* **B28**, p. 493), o físico russo Vladimir Naumovich Gribov (1930-1997) e Pontecorvo analisaram a possibilidade de os **neutrinos solares** sofrerem oscilações no vácuo. Estas oscilações haviam sido previstas pelos físicos russos S. P. Mihkeev e A. Y. Smirnov, em 1985 (*Yadernaya Fizika* **42**, p. 1441), em 1986 (*Nuovo Cimento* **C9**, p. 17) e, em 1987 (*Uspekhi Fizika Nauk* **153**, p. 3).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)