



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 2: Koshiba.

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

Graduado em Física pela *Universidade de Tóquio*, em 1951, Koshiba defendeu sua Tese de Doutorado na *Universidade de Rochester*, em New York, em 1955, na qual estudou o fenômeno de energias altíssimas nos raios cósmicos (sobre estes, ver verbete nesta série). Depois de pesquisar e ensinar em várias universidades do mundo, Koshiba começou a se interessar pelo decaimento de núcleons (prótons e nêutrons), bem como pelo espalhamento de **neutrinos** por elétrons, usando para isso a **Radiação de Vavilov-Cherenkov** (RV-C) (vide verbete nesta série), segundo a qual uma partícula carregada quando atravessa um meio transparente (de índice de refração n) com uma velocidade V/n maior que a velocidade da luz no vácuo (c) ($V/n > c$), ela perde uma fração de energia na forma de RV-C. Desse modo, por volta de 1980, Koshiba e colaboradores do *Institute for Cosmic Ray Research* (ICRR) da *Universidade de Tóquio*, construíram um tanque de 3.000 toneladas de água, dotado de um detector *Imaging Water Cherenkov*, com fotomultiplicadores [estes foram construídos pela *Hamamatsu Photonics Company*, como se pode ver em: H. Kume, S. Sawaki, M. Ito, K. Arisaka, T. Kajita, A. Nishimura e A. Suzuki, *Nuclear Instruments and Methods* **205**, p. 443 (1983)], e o enterrou na mina de Mozumi, propriedade da *Kamioka Mining and Smelting Company*, na cidade de Hida (antiga Kamioka), em Gifu, no Japão, há 1.000 m de profundidade. Em vista disso, esse experimento foi denominado de KAMIOKANDE, onde NDE significa *Nucleon Decay Experiment*. Contudo, como nesse experimento foram detectados **neutrinos solares** e **estelares**, NDE passou a ser conhecido como *Neutrino Detection Experiment*. Ainda por volta de 1980, as *Universidades de Irvine, Michigan e Brookhaven*, sob a liderança do físico norte-americano Frederick Reines (1918-1998; PNF, 1995), construíram o *Nucleon Decay Detector* (IMB/NDD), no terreno da *Morton Salt Mine*, localizada em Cleveland, no estado de Ohio, nos Estados Unidos.

Antes de seguir com as experiências realizadas por essas duas colaborações, KAMIOKANDE e IMB/NDD, vamos comentar um pouco mais sobre o espalhamento de **neutrinos/antineutrinos** ($\nu_e/\bar{\nu}_e$) pelos elétrons (e^-) e por prótons (p) da água, bem como sobre o decaimento do próton. Por exemplo, no caso do espalhamento ν_e-e^- , como a massa do e^- é de 0,5 MeV e considerando que os ν_e têm energia muito mais alta (p.e.: 10 MeV), então, na colisão entre eles, o e^- recua praticamente na direção da incidência do ν_e e,

portanto, há uma relação direta entre os espectros energéticos dessas duas partículas. O tempo dessa colisão é da ordem de 10 nanosegundos (lembrar que $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). No caso do espalhamento $\bar{\nu}_e$ -p, ele decorre da reação: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, sendo o pósitron (e^+) detectado pela **Radiação de Vavilov-Cherenkov** (RV-C) (vide verbete anterior).

Segundo vimos em verbetes desta série, a proposta do decaimento do próton decorre da Teoria de Grande Unificação (TGU), proposta em 1972 pelos físicos, o indiano Jogesh C. Pati (n.1937) e o paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979) e, em 1974, pelos físicos norte-americanos Howard Mason Georgi (n.1947) e Sheldon Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979). Nessa TGU, o tempo de decaimento do próton (τ_p) é da ordem de $10^{29} \pm 1,7$ anos. Registre-se que uma proposta de experiência para detectar o decaimento do próton ($p \rightarrow e^+ + \pi^0$) foi apresentada, em 1983 (*Physical Review Letters* **51**, p. 27), por Reines e seus colaboradores: R. M. Bionta, G. Blewitt, Clyde B. Bratton, B. G. Cortez, S. Errede, G. W. Foster, W. Gajewski, Maurice Goldhaber (1911-2011), J. Greenberg, Todd J. Haines, T. W. Jones, D. Kielczewska, W. R. Kropp, John G. Learned, E. Lehmann, J. M. LoSecco, P. V. R. Murthy, H. S. Park, J. Schultz, E. Shumard, D. Sinclair, D. W. Smith, Henry W. Sobel, James L. Stone, L. R. Sulak, Robert Svoboda, J. C. van der Velde e C. Wuest. Em 1985 (*Journal of the Physical Society of Japan* **54**, p. 3213), Koshiba e seus colaboradores: Katsushi Arisaka, Takaaki Kajita, Masayuki Nakahata, Yuichi Oyama, Atsuto Suzuki, Masato Takita, Yoji Totsuka, Tadashi Kifune, Teruhiro Suda, Kasuke Takahashi e Kasumasa Miyano investigaram o decaimento de núcleon (N) (próton ou nêutron) em léptons carregados seguidos de mésons (p. e.: $p \rightarrow e^+ + \pi^0$). Nessas duas experiências, foi encontrado um limite superior para o decaimento ($\tau_N > 6,5 \times 10^{31}$ anos).

Voltemos aos trabalhos dos detectores KAMIOKANDE e IMB/NDD. Com a observação da **supernova**, ocorrida em 23 de fevereiro de 1987, na Grande Nebulosa de Magalhães, a hoje conhecida SN1987A, as duas colaborações KAMIOKANDE e IMB/NDD, passaram a detectar os **neutrinos/antineutrinos estelares** oriundos da SN1987A observando o seu espalhamento em prótons e elétrons da água. O espalhamento de $\bar{\nu}_e$ -p foi publicado, em 1987, em trabalhos independentes, de Koshiba e seus colaboradores: K. S. Hirata, Takaaki Kajita, Masayuki Nakahata, Yuichi Oyama N. Sato, Atsuto Suzuki, Masat Takita, Yoji Totsuka, Tadashi Kifune, Teruhiro Suda, Kasuke Takahashi, T. Tanimori, Kasumasa Miyano, M. Yamada, E. W. Beier, L. R. Feldscher, S. B. Kim, A. K. Mann, F. M. Newcomer, R. van Berg, W. Zhang e B. G. Cortez (*Physical Review Letters* **58**, p. 1490), e de Reines e seus colaboradores: Bionta, Blewitt, Bratton, D. Casper, A. Ciocio, R. Claus, Cortez, M. Crouch, S. T. Dye, Errede, Foster, Gajewski, K. S. Ganezer, Goldhaber, Haines, Jones, Kielczewska, Kropp, Learned, LoSecco, J. Matthews, R. Miller, M. S. Mudan, Park, L. R. Price, Schultz, S. Seidel, Shumard, Sinclair, Sobel, Stone, Sulak, Svoboda, G. Thornton, van der Velde e Wuest (*Physical Review Letters* **58**, p. 1494).

Um resultado importante encontrado no experimento KAMIOKANDE foi a descoberta da chamada Anomalia do Neutrino Atmosférico (ANA). Em verbete desta série, vimos que a existência de dois **neutrinos (eletrônico - ν_e e muônico - ν_μ)**, que haviam sido previstos, em 1947, foi confirmada experimentalmente, em 1962. Por sua vez, o terceiro **neutrino (tauônico - ν_τ)** foi descoberto em 1975. Pois bem, em 1988 (*Physics Letters* **B205**, p. 416), Koshiba e seus colaboradores: Hirata, Kajita, Nakahata, S. Ohara, Oyama, Sato, A.

Suzuki, Takita, Totsuka, Kifune, Suda, K. Nakamura, Takahashi, Tanimori, Miyano, Yamada, Beier, Feldscher, E. D. Frank, W. Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg, Zhang e Cortez anunciaram a descoberta da ANA, ao observarem que a razão entre o número de **neutrinos muônicos** [$N(\nu_\mu)$] e o de **neutrinos eletrônicos** [$N(\nu_e)$] era quatro (4) em vez de dois (2) conforme indicava o Modelo Padrão das Partículas Elementares (vide verbete nesta série).

Com o objetivo de realizar novas observações dos **neutrinos** da SN1987A, em 1988 (*Physical Review D* **38**, p. 448), Koshiba e seus colaboradores: Hirata, Kajita, Nakahata, Oyama, Sato, A. Suzuki, Takita, Totsuka, Kifune, Suda, Takahashi, Tanimori, Miyano, Yamada, Beier, Feldscher, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg, Zhang e Cortez descreveram a construção de um detector constituído de um grande reservatório de água enterrado no terreno da *Morton Salt Mine*. Com tal detector, eles procuraram medir o decaimento dos prótons da água, observando a colisão dos **neutrinos estelares** da SN1987A com a água do detector. Também, em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, p. 2522), Reines e seus colaboradores: Seidel, Bionta, Blewitt, Bratton, Casper, Ciocio, Claus, Dye, Errede, Foster, Gajewski, Ganezer, Goldhaber, Haines, Jones, Kielczewska, Kropp, Learned, LoSecco, Matthews, Park, Price, Schultz, Shumard, Sinclair, Sobel, Stone, Sulak, Svoboda, Thornton, van der Velde e Wuest mediram a vida média (τ_p) do decaimento do próton, decorrente da passagem de **neutrinos solares** por toneladas de água, e encontraram que: $\tau_p > 10^{32}$ anos. Este mesmo valor e com esse mesmo tipo de experiência, foi observado, em 1989 (*Physics Letters B* **220**, p. 308), por Koshiba e seus colaboradores: Hirata, Kajita, Kifune, K. Kihara, Nakahata, Nakamura, Ohara, Oyama, Sato, Y. Suzuki, Totsuka, Y. Yaginuma, M. Mori, Suda, A. Suzuki, Takahashi, Yamada, Suda, Miyano, H. Miyata, H. Takei, K. Kaneyuki, Yorikiyo Nagashima, Y. Suzuki, Beier, Feldscher, Frank, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg, Zhang e Cortez.

O espalhamento dos **neutrinos solares** por elétrons da água foi observado, pela primeira vez, em 1989 (*Physical Review Letters* **63**, p. 16), pela colaboração KAMIKANDE/IMB. Nesta, participaram os físicos: os japoneses comandados por Koshiba: Hirata, Kajita, Kifune, Kihara, Nakahata, Nakamura, Ohara, Oyama, Sato, Takita, Totsuka, Yaginuma, Mori, A. Suzuki, Suda, Takahashi, Yamada, Suda, Miyano, Miyata, Takei, Kaneyuki, H. Nagashima, Y. Suzuki, e os norte-americanos Beier, Feldscher, Frank, Frati, Kim, Mann, Newcomer, van Berg e Zhang; o espalhamento referido acima foi confirmado em 1990 (*Physical Review Letters* **65**, p. 1297), por Koshiba e seus colaboradores: Hirata, K. Inoue, Kajita, Kifune, Kihara, Nakahata, Nakamura, Ohara, Sato, Y. Suzuki, Totsuka, Yaginuma, Mori, A. Suzuki, Takahashi, Yamada, Suda, T. Tajima, Miyano, Miyata, Takei, Y. Fukuda, E. Koderá, Kaneyuki, H. Nagashima, Takita, Tanimori, Beier, Feldscher, Frank, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg e Zhang

Em dezembro de 1990, Koshiba preparou um artigo no qual apresentou um projeto para ampliar o KAMIKANDE. Desta vez, o SUPER-KAMIKANDE, como ficou conhecido, teria um tanque de água pura de 50.000 toneladas e seria rodeado por cerca de 11.200 fotomultiplicadores, conforme descrição feita, em 1992, por Totsuka (*Reports on Progress in Physics* **55**, p. 377) e por Koshiba (*Physics Reports* **220**, p. 229). Enquanto esse super detector não foi concluído (o que só aconteceu em 1996), o KAMIKANDE juntou-se com alguns físicos do IMB e continuaram a busca pelos **neutrinos solares** e suas oscilações, usando a RV-C e o *Standard Solar Model* (SSM), formulado pelo astrofísico norte-americano John Norris Bahcall

(1934-2005), em 1963 (vide verbete anterior). Assim, essa colaboração, ainda com o nome de KAMIKANDE, divulgou novos resultados, publicados em 1991, por Hirata, Inoue, T. Ishida, Kajita, Kihara, Nakahata, Nakamura, Ohara, Sato, Y. Suzuki, Totsuka, Yaginuma, Mori, Oyama, A. Suzuki, Takahashi, Yamada, Koshiba, K. Nishijima, Suda, T. Tajima, Miyano, Miyata, Takei, Y. Fukuda, Koder, Y. Nagashima, Takita, Kaneyuki, Tanimori, Beier, Feldscher, Frank, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg e Zhang (*Physical Review* **D44**, p. 2241) e por Hirata, Inoue, Kajita, Kifune, Kihara, Nakahata, Nakamura, Ohara, Sato, Y. Suzuki, Mori, Oyama, A. Suzuki, Takahashi, Yamada, Koshiba, Suda, T. Tajima, Miyano, Miyata, Takei, Y. Fukuda, Koder, Y. Nagashima, Takita, Kaneyuki, Tanimori, Beier, Feldscher, Frank, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer e van Berg (*Physical Review Letters* **65**, p. 1297); em 1992 (*Physical Review* **D45**, p. 2170), por Hirata, Inoue, Ishida, Kajita, Kihara, Nakahata, Nakamura, Ohara, Sato, Y. Suzuki, Totsuka, Yaginuma, Mori, Oyama, A. Suzuki, Takahashi, Yamada, Koshiba, K. Nishijima, Suda, T. Tajima, Miyano, Miyata, Takei, Y. Fukuda, Koder, Y. Nagashima, Takita, H. Yokoyama, Kaneyuki, Y. Takeuchi, Tanimori, Beier, Feldscher, Frank, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg e Zhang; em 1994 (*Physics Letters* **B335**, p. 237), por Y. Fukuda, T. Hayakawa, Inoue, Ishida, S. Joukou, Kajita, S. Kasuga, Y. Koshio, T. Kumita, K. Matsumoto, Nakahata, Nakamura, A. Sakai, M. Shiozawa, J. Suzuki, Y. Suzuki, Totsuka, Hirata, K. Khiara, Mori, Oyama, A. Suzuki, Yamada, Koshiba, Nishijima, T. Kajimura, Suda, A. T. Suzuki, T. Ishizuka, M. Koga, Miyano, Miyata, H. Akazawa, Takei, T. Hara, N. Kishi, Nagashima, Takita, Yokoyama, Y. Hayato, Kaneyuki, Y. Takeuchi, Tanimori, S. Tasaka, K. Nishikawa, Beier, Frank, Frati, S. B. Kim, Mann, Newcomer, van Berg e Zhang; em 1996 (*Physical Review Letters* **77**, p. 1683), por Y. Fukuda, Hayakawa, Inoue, K. Ishihara, H. Ishino, Joukou, Kajita, Kasuga, Koshio, Kumita, Matsumoto, Nakahata, Nakamura, K. Okumura, Sakai, Shiozawa, J. Suzuki, Y. Suzuki, T. Tomoeda, Totsuka, Hirata, Khiara, Oyama, Koshiba, Nishijima, T. Horiuchi, K. Fugita, S. Hatakeyama, T. Maruyama, A. Suzuki, Mori, Kajimura, Suda, A. T. Suzuki, Ishizuka, Miyano, H. Okazawa, Hara, Nagashima, T. Yamaguchi, Hayato, Kaneyuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, Tanimori, Tasaka, E. Ichihara, S. Miyamoto e Nishikawa.

Em 1998, a **oscilação de neutrinos** foi novamente observada pela colaboração KAMIKANDE/IMB nos artigos assinados por Y. Fukuda, Hayakawa, Ishihara, Ishino, Y. Itow, Kajita, J. Kameda, Kasuga, K. Kobayashi, Y. Kobayashi, Koshio, M. Miura, Nakahata, S. Nakayama, A. Okada, K. Okumura, N. Sakurai, Shiozawa, Y. Suzuki, Y. Takeuchi, Totsuka, Hirata, S. Yamada, M. Earl, A. Habig, E. Kearns, Messier, Scholberg, Stone, Sulak, C. W. Walter, Goldhaber, T. Barszczak, D. Casper, W. Gajewski, P. G. Halverson, J. Hsu, Kropp, Price, Reines, M. Smy, Sobel, M. R. Vagins, Ganezer, W. E. Keig, R. W. Ellsworth, S. Tasaka, J. W. Flanagan, A. Kibayashi, Learned, S. Matsumo, V. J. Stenger, D. Takemori, T. Ishii, J. Kanzaki, T. Kobayashi, S. Mine, Nakamura, K. Nishikawa, Oyama, A. Sakai, M. Sakuda, O. Sasaki, S. Echigo, M. Kohama, A. T. Suzuki, T. J. Haines, E. Blaufuss, B. K. Kim, R. Sanford, Svoboda, M. L. Chen, Z. Conner, J. A. Goodman, G. W. Sullivan, J. Hill, C. K. Jung, K. Martens, C. Mauer, C. McGrew, E. Sharkey, B. Viren, C. Yanagisawa, W. Doki, Miyano, Okazawa, C. Sagi, M. Takahata, Nagashima, Takita, Yamaguchi, M. Yoshida, S. B. Kim, M. Etoh, Fujita, A. Hasegawa, Hatakeyama, T. Iwamoto, Koga, Maruyama, H. Ogawa, J. Shirai, A. Suzuki, F. Tsushima, Koshiba, M. Nemoto, Nishijima, T. Futagami, Y. Hayato, Y. Kanaya, Kaneyuki, Y. Watanabe, D. Kielczewska, R. A. Doyle, J. S. George, A. L. Stachyra, L. L. Wai, R. J. Wilkes e K. K. Young (*Physical Review Letters* **81**, p. 1562), e por Hatakeyama, Hara, Y. Fukuda, Hayakawa, Inoue, Ishihara, Ishino, Joukou, Kajita, Kasuga, Koshio, Kumita, Matsumoto, Nakahata, Nakamura,

Okumura, Sakai, Shiozawa, J. Suzuki, Y. Suzuki, Tomoeda, Totsuka, Hirata, Khiara, Oyama, Koshiba, Nishijima, Horiuchi, Fujita, Koga, Maruyama, A. Suzuki, Mori, Suda, A. T. Suzuki, Ishizuka, Miyano, Okazawa, Nagashima, Takita, Yamaguchi, Hayato, Kaneyuki, T. Suzuki, Y. Takeuchi, Tanimori, Tasaka, Ichihara, Miyamoto e Nishikawa (*Physical Review Letters* **81**, p. 2016).

Segundo registramos acima, o SUPER-KAMIKANDE começou a funcionar em 1996 e, com ele, nasceu a **Astrofísica do Neutrino/Antineutrino**, na qual foram usados métodos estatísticos constituindo o chamado **gráfico do neutrino** (*neutrino graph*). Seu primeiro grande resultado foi publicado em 1999 (*Physical Review Letters* **82**, p. 1810), por Y. Fukuda, Hayakawa, Ichihara, Inoue, Ishihara, Ishino, Itow, Kajita, Kameda, Kasuga, K. Kobayashi, Y. Kobayashi, Koshio, Miura, Nakahata, Nakayama, Okada, Okumura, Sakurai, Shiozawa, Y. Suzuki, Y. Takeuchi, Totsuka, S. Yamada, Earl, Habig, Kearns, Messier, Scholberg, Stone, Sulak, Walter, Goldhaber, Barszczak, Casper, Gajewski, Halverson, Hsu, Kropp, Price, Reines, Smy, Sobel, Vagins, Ganezer, Keig, Ellsworth, Tasaka, Flanagan, Kibayashi, Learned, Matsumo, Stenger, Takemori, T. Ishii, Kanzaki, T. Kobayashi, Mine, Nakamura, Nishikawa, Oyama, Sakai, Sakuda, Sasaki, Echigo, Kohama, A. T. Suzuki, Haines, Blaufuss, B. K. Kim, Sanford, Svoboda, Chen, Conner, Goodman, Sullivan, Hill, Jung, Martens, Mauger, McGrew, Sharkey, Viren, Yanagisawa, Doki, Miyano, Okazawa, Sagi, Takahata, Nagashima, Takita, Yamaguchi, Yoshida, S. B. Kim, Etoh, Fujita, Hasegawa, Hatakeyana, Iwamoto, Koga, Maruyama, H. Ogawa, Shirai, A. Suzuki, Tsushima, Koshiba, Nemoto, Nishijima, Futagami, Hayato, Kanaya, Kaneyuki, Y. Watanabe, Kielczewska, Doyle, George, Stachyra, Wai, Wilkes e Young. Neste artigo, foi observado um fluxo de **neutrinos solares** muito menor do que o previsto pelo SSM. Essa mesma discrepância foi encontrada pelo *Gallium Neutrino Observatory* (GNO) (vide verbete anterior), em 2000 (*Physics Letters* **B490**, p. 15), em artigo assinado por Altmann, Balata, Belli, Bellotti, Bernabei, Burkert, Cattadori, Cerichelli, Chiarini, Cribier, d'Angelo, Del Re, Ebert, von Feilitzsch, Ferrari, Hampel, Handt, Henrich, Heusser, Kiko, Kirsten, Lachenmaier, Lanfranchi, Laubenstein, Motta, Rau, Richter, Wänninger, Wojcik e Zanotti.

Em 2002, novas observações sobre **neutrinos solares** foram apresentadas pelo *Soviet-American Gallium Experiment* (SAGE) (ver verbete anterior) (J. N. Abdurashitov, E. P. Veretenkin, V. M. Vermul, Wladimir N. Gravin, S. V. Girin, V. V. Gorbachev, P. P. Gurkina, Georgiy T. Zatsepin, T. V. Ibragimova, A. V. Kalikhov, T. V. Knodel, I. N. Mirmov, N. G. Khairnasov, A. A. Shikhin, V. E. Yants, T. J. Bowles, W. A. Teasdale, J. S. Nico, J. F. Wilkerson, Bruce T. Cleveland e Steve R. Elliott: *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **95**, p. 181) e GNO (Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen, J. D. Anglin, J. C. Barton, E. W. Beier, M. Bercovitch, J. Bigu, S. D. Biller, R. A. Black, I. Blevis, R. J. Boardman, J. Boger, E. Bonvin, M. G. Boulay, M. G. Bowler, Bowles, S. J. Brice, M. C. Browne, T. V. Bullard, G. Buhler, J. Cameron, Y. D. Chan, H. H. Chen, M. Chen, X. Chen, Cleveland, E. T. H. Clifford, J. H. M. Cowan, D. F. Cowen, G. A. Cox, X. Dai, F. Dalnoki-Veress, W. F. Davidson, P. J. Doe, G. Doucas, M. R. Dragowsky, C. A. Duba, F. A. Duncan, M. Dunford, J. A. Dunmore, E. D. Earle, Elliott, H. C. Evans, G. T. Ewan, J. Farine, H. Fergani, A. P. Ferraris, R. J. Ford, J. A. Formaggio, M. M. Fowler, K. Frame, Frank, Frati, N. Gagnon, J. V. Germani, S. Gil, K. Graham, D. R. Grant, Hahn, A. L. Hallin, E. D. Hallman, A. S. Hamer, A. A. Hamian, W. B. Handler, R. U. Haq, C. K. Hargrove, P. J. Harvey, R. Hazama, K. M. Heeger, W. J. Heintzelman, J. Heise, R. L. Helmer, J. D. Hepburn, H. Heron, J. Hewett, A. Hime, M. Howe, J. G. Hykawy, M. C. P. Isaac, P. Jagam, N. A. Jelley, C. Jillings, G. Jonkmans, K. Kazkaz, P. T. Keener, J. R. Klein, A. B. Knox, R. J. Komar, Kouzes, T.

Kutter, C. C. M. Kyba, J. Law, I. T. Lawson, M. Lay, H. W. Lee, K. T. Lesko, J. R. Leslie, I. Levine, W. Locke, S. Luoma, J. Lyon, S. Majerus, H. B. Mak, J. Maneira, J. Manor, A. D. Marino, N. McCauley, A. B. McDonald, D. S. McDonald, K. McFarlane, G. McGregor, R. M. Drees, C. Mifflin, G. G. Miller, G. Milton, B. A. Moffat, M. Moorhead, C. W. Nally, M. S. Neubauer, Newcomer, H. S. Ng, A. J. Noble, E. B. Norman, V. M. Novikov, M. O'Neill, C. E. Okada, R. W. Ollerhead, M. Omori, J. L. Orrell, S. M. Oser, A. W. P. Poon, T. J. Radcliffe, A. Roberge, B. C. Robertson, R. G. H. Robertson, S. S. E. Rosendahl, J. K. Rowley, V. L. Rusu, E. Saettler, K. K. Schaffer, M. H. Schwendener, A. Schulke, H. Seifert, M. Shatkay, J. J. Simpson, C. J. Sims, Sinclair, P. Skensved, A. R. Smith, M. W. E. Smith, T. Spreitzer, N. Starinsky, T. D. Steiger, R. G. Stokstad, L. C. Stonehill, R. S. Storey, B. Sur, R. Tafirout, N. Tagg, N. W. Tanner, R. K. Taplin, M. Thorman, P. M. Tornewell, P. T. Trent, Y. I. Tsenkovnyak, van Berg, R. G. van de Water, C. J. Virtue, C. E. Waltham, Jun Xian Wang, D. L. Wark, N. West, J. B. Wilhelmy, Wilkerson, J. R. Wilson, P. Wittich, J. M. Wouters e M. Yeh, *Physical Review Letters* **89**, no. 011301). Mais detalhes sobre a vida e o trabalho de Koshiba, ver seu *Curriculum Vitae* e *Nobel Lecture: Birth of Neutrino Astrophysics* (08 de Dezembro de 2002; *e-Nobel Museum*).

Na conclusão deste verbete, vejamos novos aspectos da **Astrofísica dos Neutrinos/Antineutrinos**, depois de 2002. Com o objetivo de detectar **antineutrinos eletrônicos** ($\bar{\nu}_e$), foi construído um novo detector – o *Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector* (KamLAND) – localizado na *Kamioka Mining*. Ele foi preparado para detectar $\bar{\nu}_e$ emitidos por reatores nucleares, bem como detectar **neutrinos/antineutrinos solares** e **neutrinos/antineutrinos geológicos** - estes provenientes do decaimento radioativo do tório (Th) e do urânio (U) da crosta e do manto terrestres - , assim como a sua oscilação. Esse detector é constituído de um balão esférico de aço inoxidável, de 18 m de diâmetro, e contendo em seu interior 1.879 fotomultiplicadores. No interior dessa esfera existe um balão de nylon, de 13 m de diâmetro, cheio de um líquido cintilador composto de 1.000 toneladas métricas de óleo mineral, benzeno e fluorescentes químicos. Por sua vez, o balão de aço inoxidável é envolvido por um **detector Vavilov-Cherenkov**, cuja finalidade é a de filtrar os **neutrinos muônicos** (ν_μ), e de proporcionar blindagem contra a radioatividade das rochas. (en.wikipedia.org/wiki/KamLand).

A *Colaboração* KamLAND começou a funcionar em janeiro de 2002 e, logo depois, em 17 de janeiro de 2003 (*Physical Review Letters* **90**, no. 021802), Kei Eguchi, S. Enomoto, K. Furuno, J. Goldman, H. Hanada, H. Ikeda, K. Ikeda, Inoue, Ishihara, W. Itoh, Iwamoto, T. Kawaguchi, T. Kawashima, H. Kinoshita, Y. Kishimoto, Koga, Y. Koseki, T. Maeda, T. Mitsui, M. Motoki, K. Nakajima, T. Nakajima, H. Ogawa, K. Owada, T. Sakabe, I. Shimizu, Shirai, F. Suekane, A. Suzuki, K. Tada, O. Tajima, T. Takayama, K. Tamae, H. Watanabe, J. Busenitz, Z. Djurcic, K. McKinny, D. M. Mei, A. Piepke, E. Yakushev, B. E. Berger, Chan, M. P. Decowski, D. A. Dwyer, S. J. Freedman, Y. Fu, B. K. Fujikawa, Heeger, Lesko, K. B. Luk, H. Murayama, D. R. Nygren, C. E. Okada, A. W. P. Poon, H. M. Steiner, L. A. Winslow, G. A. Horton-Smith, R. D. McKeown, J. Ritter, B. Tipton, P. Vogel, C. E. Lane, T. Miletic, P. W. Gorham, G. Guillian, J. G. Learned, J. Maricic, S. Matsuno, S. Pakvasa, S. Dazeley, S. Hatakeyama, M. Murakami, Svoboda, B. D. Diertele, M. DiMauro, J. Detwiler, G. Gratta, K. Ishii, N. Tolich, Y. Uchida, M. Batygov, W. Bugg, H. Cohn, Y. Efremenko, Y. Kamyshev, A. Kozlov, Y. Nakamura, L. De Braekeleer, C. R. Gould, H. J. Karwowski, D. M. Markoff, J. A. Messimore, K. Nakamura, R. M. Rohm, W. Tornow, A. R. Young e Y. F. Wang anunciaram que haviam detectado um fluxo de

$\bar{\nu}_e$, com energia $> 3,4$ MeV, oriundos de reatores nucleares que se localizavam em uma faixa de 180 km.

Um novo resultado da *Colaboração KamLAND* foi publicado, em 2004 (*Physical Review Letters* **92**, no. 071301), por Eguchi, Enomoto, Furuno, H. Ikeda, K. Ikeda, Inoue, Ishihara, Iwamoto, Kawashima, Kishimoto, Koga, Koseki, Maeda, Mitsui, Motoki, K. Nakajima, H. Ogawa, Owada, F. Piquemal, I. Shimizu, Shirai, Suekane, A. Suzuki, Tada, O. Tajima, Takayama, Tamae, H. Watanabe, J. Busenitz, Djurcic, McKinny, Mei, Piepke, Yakushev, Berger, Chan, Decowski, Dwyer, Freedman, Fu, Fujikawa, Goldman, Heeger, Lesko, Luk, Murayama, Nygren, Okada, Poon, Steiner, Winslow, Horton-Smith, C. Mauger, McKeown, Tipton, Vogel, Lane, Miletic, Gorham, Guillian, Learned, Maricic, Matsuno, Pakvasa, Dazeley, Hatakeyama, Svoboda, Diertele, DiMauro, Detwiler, Gratta, K. Ishii, Tolich, Uchida, Batygov, Bugg, Efremenko, Kamyshev, Kozlov, Nakamura, Gould, Karwowski, Markoff, Messimore, K. Nakamura, Rohm, Tornow, Young, M. J. Chen e Y. F. Wang. Nesse trabalho, foi encontrado um limite superior do fluxo de **antineutrinos solares**, dado por: $3,7 \times 10^2 /(\text{cm}^2.\text{s})$.

A **oscilação de neutrinos** foi estudada pela *Colaboração KamLAND*, em 4 de março de 2005 (*Physical Review Letters* **94**, no. 081801), por T. Araki, Eguchi, Enomoto, Furuno, K. Ichimura, H. Ikeda, Inoue, Ishihara, Iwamoto, Kawashima, Kishimoto, Koga, Koseki, Maeda, Mitsui, Motoki, K. Nakajima, H. Ogawa, Owada, J. S. Ricol, I. Shimizu, Shirai, Suekane, A. Suzuki, Tada, Tajima, Tamae, Y. Tsuda, H. Watanabe, Busenitz, T. Classen, Djurcic, G. Keefer, McKinny, Mei, Piepke, Yakushev, Berger, Chan, Decowski, Dwyer, Freedman, Fu, Fujikawa, Goldman, F. Gray, Heeger, Lesko, Luk, Murayama, Poon, Steiner, Winslow, Horton-Smith, Mauger, McKeown, Vogel, Lane, Miletic, Gorham, Guillian, Learned, Maricic, Matsuno, Pakvasa, Dazeley, Hatakeyama, A. Rojas, Svoboda, Diertele, Detwiler, Gratta, K. Ishii, Tolich, Uchida, Batygov, Bugg, Efremenko, Kamyshev, Kozlov, Y. Nakamura, Gould, Karwowski, Markoff, Messimore, K. Nakamura, Rohm, Tornow, R. Wendell, Young, M. J. Chen, Wang e Piquemal; e, em 2008 (*Physical Review Letters* **100**, no. 221803), por S. Abe, T. Ebihara, Enomoto, Furuno, Y. Gando, Ichimura, H. Ikeda, Inoue, Y. Kibe, Kishimoto, Koga, Kozlov, Y. Minekawa, Mitsui, Nakajima, K. Nakamura, M. Nakamura, Owada, I. Shimizu, Y. Shimizu, Shirai, Suekane, A. Suzuki, Y. Takemoto, Tamae, A. Terashima, H. Watanabe, E. Yonezawa, S. Yoshida, Busenitz, Classen, C. Grant, Keefer, D. S. Leonard, D. McKee, Piepke, Decowski, J. A. Detwiler, Freedman, Fujikawa, Gray, E. Guardincerri, L. Hsu, R. Kadel, C. Lendvai, Luk, Murayama, T. O'Donnell, Steiner, Winslow, Dwyer, C. Jillings, Mauger, McKeown, Vogel, C. Zhang, Berger, Lane, Maricic, Miletic, Batygov, Learned, Matsuno, Pakvasa, J. Foster, Horton-Smith, A. Tang, Dazeley, K. E. Downum, Gratta, Tolich, Bugg, Efremenko, Kamyshev, O. Perevozchikov, Karwowski, Markoff, Tornow, Heeger, Piquemal e Ricol.

A *Colaboração KamLAND*, composta dos físicos Araki, Enomoto, Furuno, Gando, Ichimura, H. Ikeda, Inoue, Kishimoto, Koga, Koseki, Maeda, Mitsui, Motoki, K. Nakajima, H. Ogawa, M. Ogawa, Owada, Ricol, I. Shimizu, Shirai, Suekane, A. Suzuki, Tada, S. Takeuchi, Tamae, Tsuda, H. Watanabe, Busenitz, Classen, Djurcic, Keefer, Leonard, Piepke, Yakushev, Berger, Chan, Decowski, Dwyer, Freedman, Fujikawa, Goldman, Gray, Heeger, Hsu, Lesko, Luk, Murayama, O'Donnell, Poon, Steiner, Winslow, Mauger, McKeown, Vogel, Lane, Miletic, Guillian, Learned, Maricic, Matsuno, Pakvasa, Horton-Smith, Dazeley, Hatakeyama, Rojas, Svoboda, Diertele, Detwiler, Gratta, K. Ishii, Tolich, Uchida, Batygov, Bugg, Efremenko, Kamyshev, Kozlov, Y. Nakamura, Karwowski, Markoff, K. Nakamura, Rohm, Tornow, R.

Wendell, M. J. Chen, Wang e Piquemal apresentou, em 28 de julho de 2005 (*Nature* **436**, p. 499), o resultado de sua investigação experimental sobre os **antineutrinos** geológicos.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)