Neutrinos: de Poltergeister a sondas do universo

Neutrinos, they are very small
They have no charge and have no mass
And do not interact at all.
The earth is just a salty ball
To them, through which they simply pass,
Like dust maids down a drafty hall
Or photons through a sheet of glass…
*(***Cosmic Gall,** *John Updike)*

PEQUENO, MAS NOTÁVEL!

Imagine uma partícula tão pequena e leve que comparada a um elétron seria como comparar a Lua ao Sol. Imagine agora que essa partícula quase nunca interaja com as outras partículas mas possa revelar quase tudo sobre a estrutura da matéria e a evolução do universo. Parece absurdo? Mas não é! Você acabou de imaginar um neutrino, essa partícula elementar singular que nos tem fascinado desde que proposta por Wolfgang Pauli em 1930.

RENATA ZUKANOVICH FUNCHAL é professora do Instituto de Física da USP.

O neutrino está em toda parte. A cada segundo cerca de 100 trilhões de neutrinos provenientes do Sol, 1.000 neutrinos produzidos pela radiação cósmica na atmosfera terrestre, 50 bilhões de neutrinos da radioatividade natural da Terra e 100 bilhões de neutrinos de reatores nucleares passam através de nós. Dentro de cada um de nós, a cada instante, existem cerca de 10 milhões de neutrinos cosmológicos, relíquias do big-bang. Nosso corpo contém cerca de 20 mg de ^{40}K (potássio) radioativo e, em conseqüência, cada um de nós emite cerca de 340 milhões de neutrinos por dia.

Como então podemos passar nossas vidas ignorando sua presença? Como explicar que esses objetos tão abundantes só tenham sido observados pela primeira vez pouco menos de 50 anos atrás?

Apesar de possuírem o dom da ubiqüidade, neutrinos são eletricamente neutros e interagem tão fracamente, ou seja, tão raramente com a matéria usual, que por muito tempo se acreditou que jamais seriam detetados experimentalmente. Ficaram por isso conhecidos como "partículas-fantasmas".

No entanto, a construção de reatores nucleares e aceleradores de partículas permitiu a produção controlada e abundante de neutrinos pelo homem. A engenhosidade experimental e a persistência de alguns físicos possibilitaram finalmente sua deteção. A partir daí, para conseguirmos observar neutrinos produzidos em processos naturais nas estrelas, na atmosfera terrestre ou no interior da Terra, foi só uma questão de tempo.

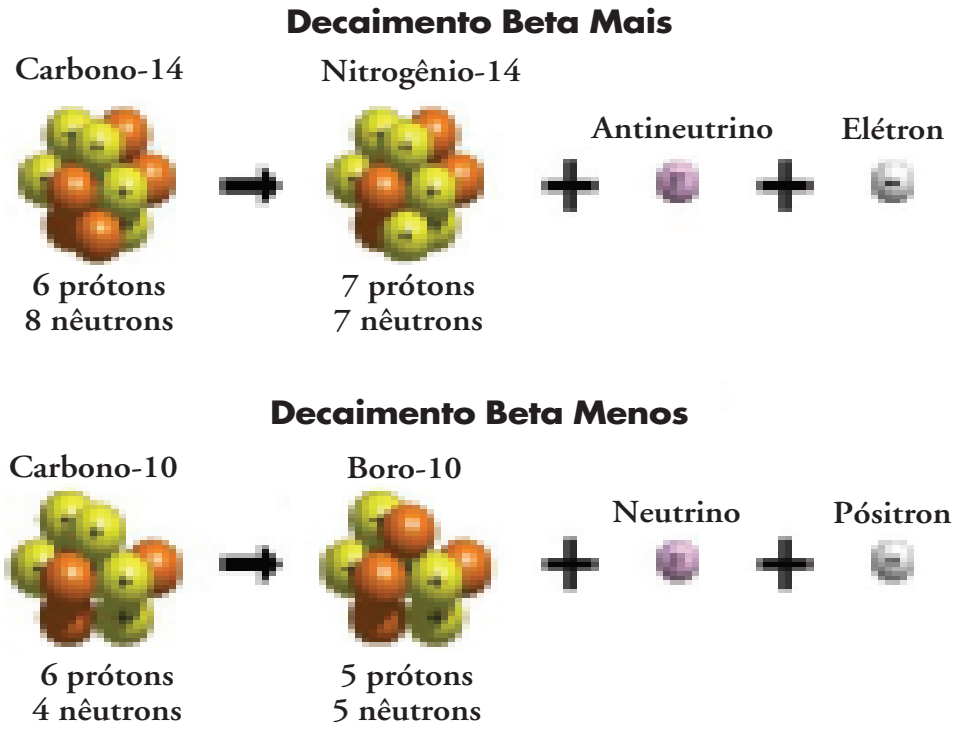
Neutrinos também tiveram direta e indiretamente um papel extremamente importante na construção do modelo que hoje explica as interações entre as partículas elementares, o chamado modelo padrão. A descoberta de quarks, por exemplo, muito deve à existência de neutrinos.

Diversas evidências experimentais, que discutiremos neste artigo, indicam que neutrinos devem ter massa, ao contrário do que se pensou durante muito tempo, e sofrer processo quântico denominado oscilação de *sabor*.

Neutrinos massivos têm diversas implicações cosmológicas não-triviais: podem constituir parte da matéria invisível do universo, afetar formação de grandes estruturas como galáxias e aglomerados de galáxias, modificar a nucleossíntese de elementos, entre outras coisas.

Discutiremos aqui como esse pequeno notável influenciou a física do século XX e como poderá ainda abrir novas janelas para o conhecimento no século XXI.

Figura 1



Exemplos de decaimento beta mais e decaimento beta menos. Já incluímos nos processos o antineutrino e o neutrino, respectivamente.

PRIMEIRO ENIGMA: O DECAIMENTO BETA VIOLA O PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA?

Da descoberta da radioatividade à invenção de Pauli

Antes de o neutrino surgir, o problema do decaimento beta precisava existir. Para que o problema do decaimento beta existisse, a radioatividade precisava ter sido descoberta. Isso aconteceu em 1896, quando Henri Becquerel descobriu uma radiação estranha vinda de sais de urânio, que ele denominou *les rayons uraniques*. Muitos cientistas se interessaram imediatamente pelo novo fenômeno e começaram a estudá-lo (1).

Em 1899, Ernest Rutherford, após estudo sistemático da absorção dos "raios de urânio", mostrou que essa radiação tinha duas componentes. A primeira componente, que ele denominou radiação alfa, era facilmente absorvida pela matéria; a segunda componente, a radiação beta, era centenas de vezes mais penetrante. Em 1900, Paul Villard apresentou evidências de um terceiro tipo de radiação, ainda mais penetrante, que chamou radiação gama.

Em 1902, Pierre e Marie Curie mediram a carga da radiação beta, Becquerel mediu a razão entre carga elétrica e massa dos raios beta e finalmente Walter Kaufmann realizou experimento decisivo mostrando que raios beta eram simplesmente elétrons ejetados de núcleos radioativos.

No decaimento beta, o elétron, que se acreditava ser a única partícula emitida, deveria ter energia fixa bem-definida, de acordo com o princípio de conservação da energia. Entretanto, após diversos experimentos controversos realizados por Lise Meitner, Otto Hahn, James Chadwick, Charles Ellis, William Wooster, entre outros, a conclusão foi que a energia dos elétrons emitidos no decaimento beta não era única, mas variava continuamente. Esse resultado parecia colocar em questão o princípio da conservação da energia na física. Muitos físicos na época, como Niels Bohr, chegaram mesmo a considerar seriamente essa possibilidade.

Em 1930, Pauli propôs solução desesperada para salvar o princípio da conservação da energia: postular a existência de uma nova partícula, de massa muito menor do que a do elétron (possivelmente nula) e de carga nula, que também seria emitida no decaimento beta.

Fermi batiza a partícula de Pauli e propõe teoria para o decaimento beta

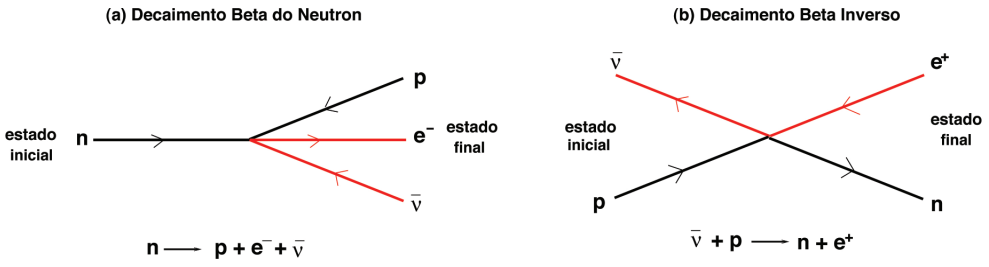
Após a descoberta do nêutron por Chadwick, em 1932, e a constatação de que o nêutron tinha uma massa muito próxima à do próton, e que portanto não poderia ser a partícula inventada por Pauli, Enrico Fermi propôs o nome *neutrino* (que em italiano significa pequeno nêutron) para a partícula imaginária de Pauli.

Em 1933, Anderson descobriu o pósitron (e^+), uma partícula com massa igual à do elétron mas com carga positiva – a primeira partícula de antimatéria observada. No mesmo ano, Frédéric e Irène Joliot-Curie descobriram a radiação beta mais (onde um pósitron é ejetado do núcleo radioativo no lugar do elétron) (Figura 1).

Entre 1933 e 34, Fermi, admitindo a hipótese do neutrino, construiu uma teoria para explicar o decaimento beta. Essa teoria de Fermi continua, até hoje, sendo excelente ferramenta para tratar o decaimento beta a baixa energia. Na teoria de Fermi todos os processos envolvendo o nêutron (n), o próton (p), o elétron (e^-) e o neutrino (ν) (e suas antipartículas) são descritos pela mesma interação básica e pela mesma intensidade de interação. Fermi supôs que os núcleos consistem apenas de partículas pe-

1 C. Sutton, *Spaceship Neutrino*, Cambridge, Cambridge University Press, 1992, Inglaterra. Um livro de divulgação muito bem escrito, recomendado a todos que quiserem saber mais sobre neutrinos.

Figura 2



(a) decaimento beta do nêutron e (b) decaimento beta inverso.

sadas – prótons e nêutrons –, e que o decaimento beta nuclear então seria uma transição de um nêutron para um próton correlacionada com a criação de um elétron e de um neutrino (2) (Figura 2a). O neutrino, diferente do nêutron, não é partícula contida no núcleo, mas criada no instante do decaimento pela própria interação.

Mas como demonstrar a existência do neutrino? As partículas são detetadas por sua interação com a matéria. Partículas eletricamente carregadas, como prótons e elétrons, ionizam a matéria por onde passam e deixam rastros visíveis e facilmente detetáveis. Partículas neutras, como nêutrons e fótons, podem ser observadas indiretamente. Fótons podem ejetar elétrons de átomos transmitindo energia aos elétrons que então podem ser facilmente observados. Nêutrons podem ejetar prótons de átomos e a ionização devida aos prótons revela a presença dos nêutrons. Poderiam neutrinos ser observados de forma análoga?

Em 1934, Hans Bethe e Rudolf Peierls consideraram que um neutrino ou antineutrino criado em um decaimento beta poderia ser absorvido por um processo inverso (Figura 2b), o núcleo capturaria o neutrino (antineutrino) e ao mesmo tempo emitiria um elétron (pósitron). Essa possibilidade era uma das implicações da teoria de Fermi, que eles usaram para calcular a probabilidade do processo ocorrer. Bethe e Peierls descobriram que a interação era muito fraca e que seriam necessários 10^{19} m (cerca de 63 milhões de vezes a distância Terra–Sol) de água para absorver um único neutrino! Bethe e Peierls concluíram que o neutrino jamais poderia ser observado assim...

Materialização de um *Poltergeist*

Apesar das previsões pessimistas de Bethe e Peierls, que julgaram que uma interação tão fraca com a matéria tornava o neutrino fadado a nunca ser observado, os esforços experimentais não cessaram. Bethe e Peierls não imaginaram que a engenhosidade humana poderia produzir verdadeiras fábricas de neutrinos: os reatores nucleares.

Após uma primeira tentativa fracassada, denominada "Projeto Poltergeist" em alusão ao carácter elusivo do neutrino, Fred Reines e Clyde Cowan impressionaram o mundo anunciando, em 1955, a primeira observação experimental do neutrino através do processo de decaimento beta inverso. O experimento ocorreu no reator de Savannah River, na Carolina do Sul, nos EUA, que produzia um fluxo de 1.013 antineutrinos por centímetro quadrado por segundo. O detetor consistia de tanques de água (que serviam de alvo de prótons) nos quais cloreto de cádmio foi dissolvido (para capturar o nêutron final). O grande fluxo de neutrinos e a grande massa do detetor, apesar da baixa probabilidade de interação do neutrino, permitiram observar a interação de uma dezena de neutrinos com o detetor. Assim a conjectura de Pauli materializou-se em partícula real!

2 De fato, como sabemos hoje, de sua antipartícula, o anti neutrino ($\bar{\nu}$). No entanto não sabemos ainda se o neutrino e o antineutrino são partículas distintas.

Os neutrinos, ou mais precisamente os antineutrinos que são produzidos pelos reatores nucleares, são do tipo eletrônico, são também chamados de antineutrinos do elétron ($\overline{\nu}_e$) pois são produzidos pelo decaimento beta em associação com um elétron.

Mas de fato são três!

Em 1962, Leon Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger e colaboradores produziram pela primeira vez um feixe de neutrinos em acelerador e evidenciaram em experimento no Laboratório Nacional de Brookhaven, em Long Island, EUA, a existência de um segundo tipo de neutrino, um neutrino associado à produção de um múon (3). Esse neutrino ficou conhecido como neutrino do múon (ν_μ).

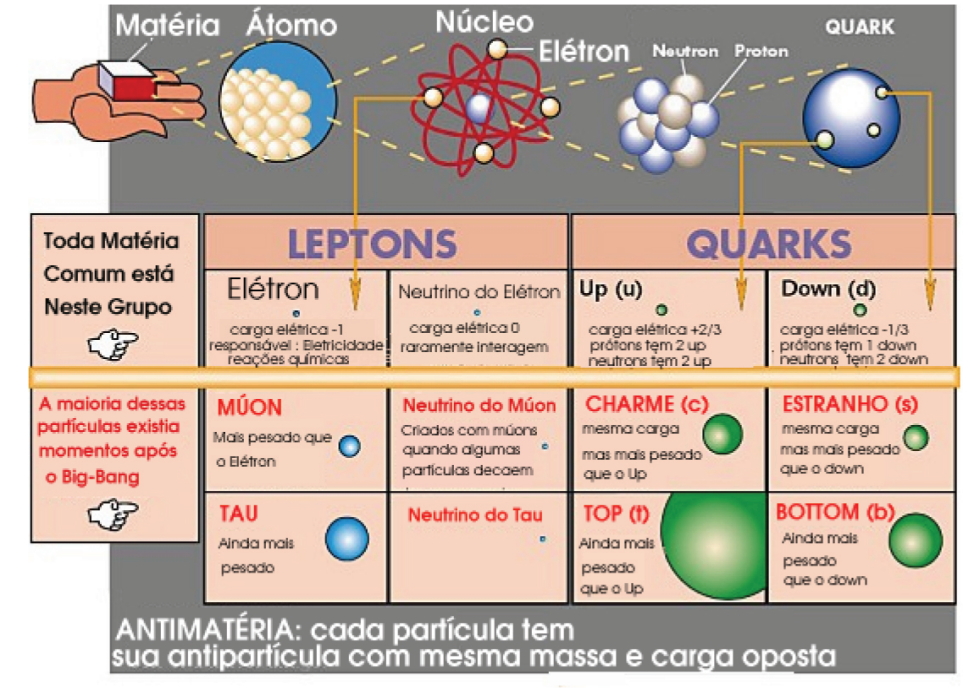
Durante os anos 60 e 70, elétrons e neutrinos de alta energia foram usados para sondar a composição de prótons e nêutrons. As evidências da existência de quarks e seu estudo experimental muito têm a agradecer aos neutrinos e à interação fraca à qual estão sujeitos. Foi descoberta com sua ajuda a primeira família de quarks, os quarks *u* (*up*) e *d* (*down*) constituintes elementares dos prótons e nêutrons.

Os anos 70 e 80 foram ricos em descobertas de novas partículas elementares. Essas descobertas nos permitiram forjar um modelo para entender os elementos básicos da matéria e suas interações. Nesse modelo, que chamamos de modelo padrão, as partículas de matéria são divididas em dois tipos: quarks e léptons. Quarks não aparecem livres na natureza, mas formam todas as partículas que sofrem interação nuclear forte (a interação que mantém o núcleo atômico unido), como prótons, nêutrons, píons, káons, etc. Léptons aparecem livres e não sofrem interação forte. Existem três famílias de quarks e léptons, cada família com dois componentes. Cada um dos componentes da família é chamado de *sabor* (4). Na Figura 3 temos um pequeno resumo das partículas elementares conhecidas.

3 O múon é uma partícula semelhante ao elétron porém cerca de 200 vezes mais pesada.

4 Assim, por exemplo, elétron, múon e tau são *sabores* dos léptons carregados, e neutrino do elétron, do múon e do tau, *sabores* dos léptons neutros.

Figura 3



Quadro das partículas elementares de matéria: quarks e léptons. Cada família ocupa uma linha da tabela.

As interações no modelo padrão são também mediadas (transmitidas) por partículas elementares (veja Figura 4). Em particular, sabemos hoje que existem dois tipos de interação fraca: interação fraca carregada (responsável, por exemplo, pelo decaimento beta) e interação fraca neutra.

A interação fraca carregada é mediada pelo bóson *W*. Como o próton é constituído por 2 quarks *u* e 1 quark *d* e o nêutron por 2 quarks *d* e 1 quark *u*, o decaimento beta pode agora ser compreendido em termos da transformação de um quark *d* em *u* (mudando um neutro em próton), produzindo um bóson *W* intermediário, que por sua vez decai, criando um elétron e um antineutrino do elétron (Figura 5).

Nesse tipo de interação um neutrino é sempre produzido ao mesmo tempo que seu lépton carregado associado. Todos os neutrinos foram descobertos através desse tipo de interação. De fato, o terceiro neutrino, associado à produção do lépton tau (5), o neutrino do tau (ν_τ), foi finalmente observado apenas em 2000 pelo experimento Donut do Fermilab.

A interação fraca neutra, descoberta apenas em 1973, é mediada pelo bóson Z^0. Nesse tipo de interação não há mudança de *sabor* entre as partículas.

5 O tau é uma espécie de elétron pouco mais de 3.500 vezes mais pesado.

Existiriam outros *sabores* de neutrinos? Os experimentos realizados no acelerador LEP (Large Electron-Positron Collider) do Cern, em Genebra, na Suíça, na década de 90, contaram o número de tipos de neutrinos em decaimentos do bóson neutro fraco Z^0 indicando que não devem existir mais do que três neutrinos leves (ninguém sabe por quê...).

SEGUNDO ENIGMA: NEUTRINOS SOLARES DESAPARECEM

A luz solar, responsável pela manutenção da vida na Terra, que leva cerca de 8 minutos para percorrer os 150 milhões de quilômetros que nos separa da superfície do Sol, carrega para a Terra energia que foi produzida no interior do Sol há cerca de 1 milhão de anos. Essa energia, carregada por fótons, é absorvida e reemitida inúmeras vezes em uma miríade de interações no interior do Sol até finalmente chegar a sua superfície. Assim a luz que chega até nós está apenas remotamente associada com os processos termonucleares que acontecem no núcleo solar.

Figura 4

INTERAÇÕES	PARTÍCULAS INTERMEDIÁRIAS
ELETROMAGNÉTICA *todas as partículas carregadas sofrem essa interação (léptons e quarks)*	**FOTÓN (γ):** carga nula, massa nula, move-se com velocidade da luz
FRACA *todas as partículas carregadas ou neutras sofrem essa interação (léptons e quarks)*	**BÓSONS W+,W− e Z^0:** carga positiva e negativa (W) e neutra (Z) responsáveis pela interação carregada (W) e neutra (Z) cerca de 160-180 mil vezes mais pesados que o elétron
FORTE *apenas os quarks e partículas formadas por quarks (prótons, neutrons, etc.) sofrem essa interação*	**GLÚONS (g):** carga e massa nula, movem-se com velocidade da luz

Quadro das partículas elementares responsáveis pelas interações.

A produção de energia no Sol só pode ser explicada como mediada por processos que envolvem a interação fraca. Assim, neutrinos são também produzidos abundantemente nas reações que produzem energia luminosa no Sol. Sendo o Sol transparente para os neutrinos, estes chegam até nós alguns minutos depois de serem produzidos, trazendo assim informação atual do interior do Sol.

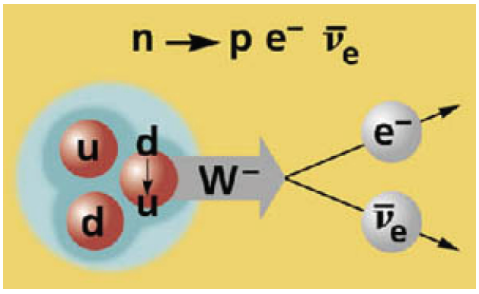
O Sol queima fundindo 4 núcleos de hidrogênio para formar um núcleo de hélio, liberando nesse processo 25 MeV (25 milhões de elétron-volts) (6) de energia carregada por fótons, dois pósitrons e dois neutrinos. Por razões energéticas no Sol só são produzidos neutrinos do elétron.

Mesmo queimando relativamente devagar devido à baixa probabilidade de a interação fraca ocorrer, é fácil estimar o número astronômico de neutrinos que deve deixar o núcleo solar a cada segundo. Sabemos que o Sol libera cerca de 3,86 x 10^{26} J (386 trilhões de trilhões de *joules*) de energia por segundo e que 4 x 10^{-12} J (25 MeV) são liberados na formação de cada núcleo de hélio. Assim, estimamos que 10^{38} (100 trilhões de trilhões de trilhões) dessas reações ocorram produzindo um total de 2 x 10^{38} (200 trilhões de trilhões de trilhões) neutrinos por segundo. Uma pequena fração, 35 em cada 100 bilhões, atinge a Terra, ou seja, estima-se que 7 x 10^{28} (70 mil trilhões de trilhões) neutrinos provenientes do interior do Sol atingem a cada segundo a superfície da Terra virada para o Sol, atravessam para o outro lado e saem impunemente.

Seria possível medir esses neutrinos e usá-los para enxergar o interior do Sol? Essa foi a idéia que motivou o primeiro experimento para medir neutrinos solares (7).

O físico Ray Davis construiu na mina de ouro de Homestake, sob 3.000 metros de terra e pedras (Figura 6), um experimento radioquímico, ao mesmo tempo complicado e tremendamente engenhoso, para detetar uns poucos neutrinos solares por ano. Esse experimento, que operou de 1968 a 1995 monitorando a chegada de neutrinos do Sol quase que continuamente, utilizava um detetor muito grande formado por 600 toneladas de um solvente industrial baseado em cloro. A reação utilizada para medida dos neutrinos foi o decaimento beta inverso: $\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-$, que ocorre apenas para neutrinos eletrônicos. O primeiro resultado de Davis, confirmado ao longo dos diversos anos de operação, foi absolutamente surpreendente. Acima do limiar de energia de cerca de 1 MeV (energia mínima que o neutrino solar deveria ter para ser detetado no experimento de Davis), o Sol

Figura 5



Decaimento beta segundo nosso entendimento atual.

Figura 6

O primeiro experimento de neutrinos solares. Construído na mina de ouro de Homestake no estado da Dakota do Sul, EUA.

6 O elétron-volt (eV) é a unidade conveniente para expressar energias em física nuclear e de partículas. Um elétron-volt é a energia que um elétron ganha ao atravessar os terminais de uma bateria de 1 V. A unidade de energia usual é o *joule* (J), e 1 eV = 1,6 x 10^{-19} J. Costuma-se também usar as abreviações: MeV (milhões de elétron-volts), GeV (bilhões de elétron-volts).

7 The Ultimate Neutrino Page: http: //cupp.oulu.fi/neutrino/. Uma página na internet com muita informação sobre neutrinos; The Neutrino Oscillation Industry: http: // neutrinooscillation.org/. Uma página na internet com todos os experimentos de neutrinos. Você também pode encontrar informações sobre neutrinos na página do nosso grupo, http: / /pontecorvo.if.usp.br.

emite três vezes mais neutrinos do que chegam à Terra.

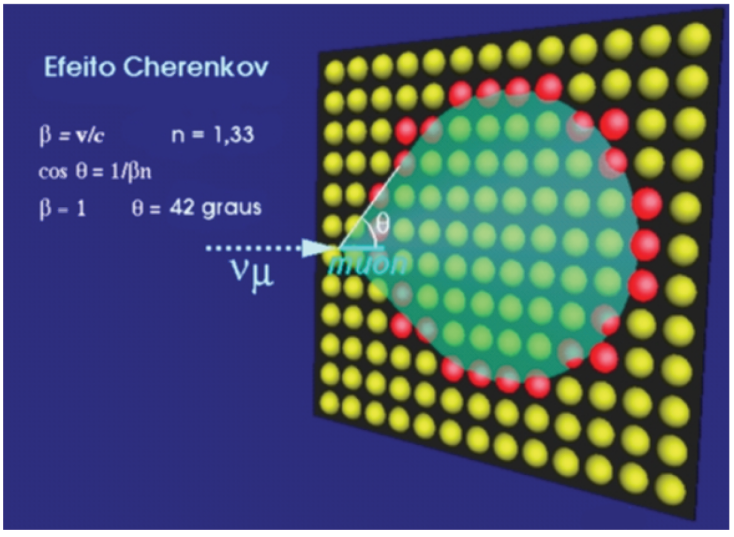
Haveria algum problema com os cálculos astrofísicos? O experimento de Davis parecia tão impossível que durante vários anos seus resultados foram vistos com muita desconfiança pela comunidade de físicos e pela maioria dos astrofísicos.

Nos anos 80 e 90 novos experimentos radioquímicos (Gallex, GNO e Sage), com um limiar de energia mais baixo (~ 0,25 MeV), baseados no decaimento beta inverso que transforma gálio em germânio ($\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$), foram realizados. Uma nova técnica revolucionária, baseada no espalhamento elástico do neutrino com elétrons da água ($\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$) produzindo luz Cherenkov (8) (Figura 7), foi introduzida pelo experimento japonês Kamiokande e utilizada pelo seu sucessor Super-Kamiokande. Esses experimentos observaram que apenas cerca de 50% dos neutrinos produzidos no Sol pareciam estar chegando até a Terra.

8 Trata-se de uma espécie de onda de choque luminosa provocada pela passagem de uma partícula carregada, no caso o elétron, com velocidade superior à velocidade da luz no meio (água). Esse fenômeno leva o nome do físico russo que o descobriu.

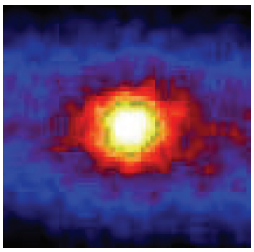
9 C. Sutton, op. cit.

Figura 7



Formação do anel azul Cherenkov produzido pela passagem de uma partícula carregada (múon) com velocidade maior do que a da luz na água. A luz emitida ilumina as fotomultiplicadoras do detetor (bolinhas amarelas) e é coletada por elas.

Figura 8



Uma fotografia do Sol feita por neutrinos observados em Super-Kamiokande.

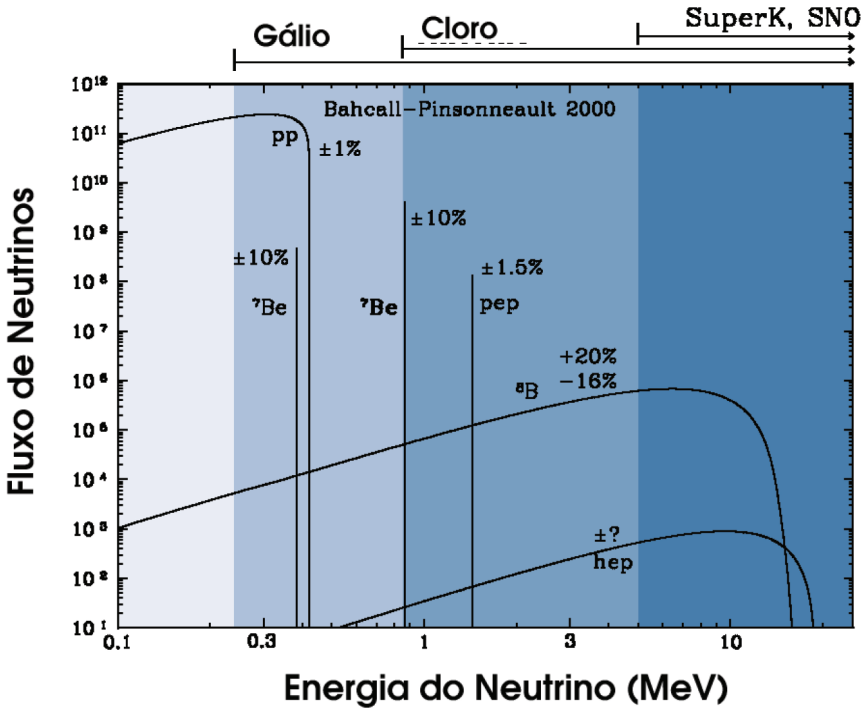
Assim, todos os experimentos detetaram um déficit de neutrinos solares. Não havia mais dúvida: os neutrinos solares estavam mesmo desaparecendo.

Como o espalhamento elástico do neutrino na água, em Super-Kamiokande, produz um elétron que tem praticamente a mesma direção do neutrino solar, os neutrinos observados apontam para o Sol de forma que é possível produzir uma impressionante imagem do Sol em neutrinos utilizando os dados coletados pelo detetor (Figura 8). Veja uma explicação mais detalhada desse detetor mais adiante.

Teoricamente, experimentos diferentes (reações de deteção e limiares de energia distintos) não devem detetar a mesma quantidade de neutrinos. Para dar uma idéia dessa diferença, na Figura 9, mostramos a distribuição dos diversos componentes do fluxo de neutrinos solares em função da energia do neutrino indicando o limiar de cada experimento (9).

Em 2001 um experimento definitivo entrou em operação, o experimento SNO (Sudbury Neutrino Observatory), na mina de Sudbury, no Canadá (Figura 10). Esse experimento, utilizando também a técnica Cherenkov mas com água pesada, pode detetar neutrinos solares também através de dois outros tipos de reações:

Figura 9



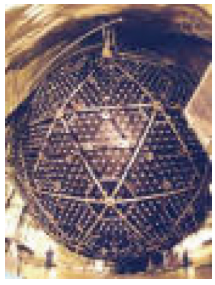
Fluxo de neutrinos para diversas reações solares em função da energia do neutrino.

(a) $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$ - decaimento beta inverso no qual o neutrino do elétron é absorvido pelo deutério. Essa reação ocorre apenas para neutrinos do elétron;

(b) $\nu_x + d \rightarrow n + p + n$ - reação que ocorre através de corrente neutra entre um neutrino de qualquer *sabor* ($x = e, \mu, \tau$) e o deutério, com a mesma intensidade independentemente do *sabor* do neutrino.

A reação (a) permite contar apenas neutrinos do elétron, enquanto a reação (b) permite contar todos os neutrinos que chegam do Sol. Os resultados do SNO resolveram finalmente em 2002 a questão dos neutrinos desaparecidos. O SNO descobriu que todos os neutrinos eletrônicos produzidos pelo Sol chegam à Terra, só que parte deles como eletrônicos e parte deles como neutrinos de outro *sabor*. De alguma forma os neutrinos mudaram de *sabor* em seu caminho do interior do Sol até nós!

Figura 10

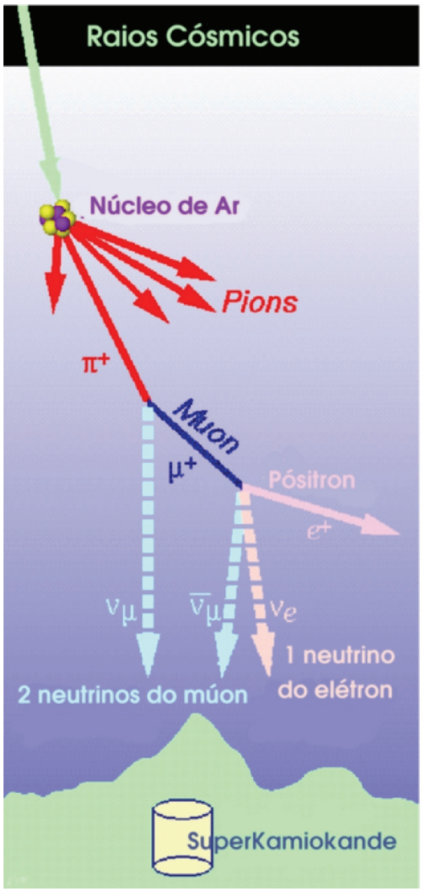


O experimento definitivo: SNO na mina de Sudbury no Canadá.

TERCEIRO ENIGMA: NEUTRINOS ATMOSFÉRICOS TAMBÉM DESAPARECEM

Neutrinos são também produzidos pela colisão de raios cósmicos (sobretudo prótons e núcleos de hélio provenientes do cosmos) com a atmosfera terrestre e a subseqüente produção de píons que decaem por interação fraca produzindo neutrinos (Figura 11).

Figura 11



Produção de neutrinos na atmosfera. As partículas cósmicas interagem com núcleos na atmosfera produzindo uma série de partículas, dentre elas píons. Os píons decaem por interação fraca produzindo múons e neutrinos do múon. Cada múon pode também decair antes de atingir o solo produzindo mais dois neutrinos.

Com base em cálculos que utilizam todo nosso conhecimento sobre as interações na atmosfera e sobre as taxas de decaimento das partículas, estimou-se que um número duas vezes maior de neutrinos do múon que neutrinos do elétron deveria chegar à Terra para uma energia em torno de 1 GeV (1 bilhão de elétron-volts).

Para surpresa de todos, quando as primeiras medidas de neutrinos atmosféricos foram realizadas por detetores em minas subterrâneas em 1985 (IMB, em Ohio, nos EUA e, mais tarde, Kamiokande, no Japão), as taxas de neutrinos do múon e neutrinos do elétron encontradas eram comparáveis.

O advento, em 1996, do detetor japonês Super-Kamiokande revolucionou não só o estudo experimental de neutrinos solares bem como o de neutrinos atmosféricos. Esse detetor espetacular consiste de um cilindro de 50 mil toneladas de água pura. Quando um neutrino interage com a água, um cone de luz é gerado pelo elétron ou múon resultante da interação (Figura 7). O cilindro é instrumentado com cerca de mais de 11 mil fotomultiplicadoras que registram a passagem do sinal luminoso (Figuras 12 e 13). O padrão espacial e temporal da intensidade da luz registrada permite identificar a partícula carregada que produziu o sinal (elétron ou múon), determinar a energia e a direção da partícula.

Quase imediatamente os primeiros dados de Super-Kamiokande confirmaram que a razão entre neutrinos do múon e neutrinos do elétron atmosféricos era mais baixa do que se esperava. No entanto, a grande novidade desse experimento foi a medida da dependência do fluxo de neutrinos em função do ângulo zenital, o ângulo formado pela direção vertical e a direção do neutrino que chega ao detetor (Figura 14). Descobriu-se que a razão do fluxo de neutrinos medido pelo fluxo teórico esperado era independente desse ângulo para os neutrinos do elétron, mas para neutrinos do múon a razão dependia do ângulo zenital, ou seja, da distância percorrida pelo neutrino. Neutrinos do múon estão desaparecendo e esse desaparecimento depende da distância que o neutrino percorre entre seu ponto de

produção na atmosfera e o detetor. O que explica esse desaparecimento? Estarão esses neutrinos mudando de *sabor* como os neutrinos solares?

NEUTRINOS OSCILAM?

Mas, onde é bobice a qualquer resposta, é aí que a pergunta se pergunta (Guimarães Rosa).

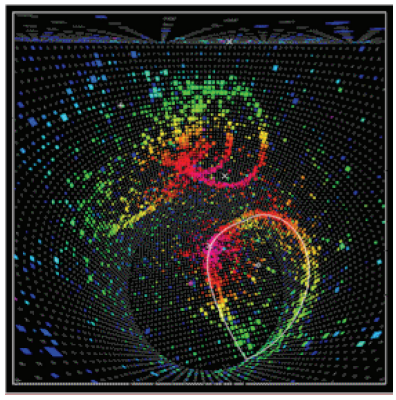
Por muitas décadas a questão se neutrinos teriam ou não uma massa não-nula ficou em aberto. Na ausência de evidências experimentais ou de razões teóricas que indicassem massa para o neutrino, o modelo padrão da física de partículas foi formulado assumindo massa nula para todos os neutrinos.

Experimentos delicados, cuja precisão tem melhorado ao longo dos anos, têm sido realizados para determinar ou colocar limites nas massas dos neutrinos. Os experimentos mais recentes que tentaram medir a massa do neutrino do elétron, usando o decaimento beta do trítio, foram realizados em Mainz na Alemanha e em Troitsk na Rússia. Eles encontram um limite superior para a massa do neutrino do elétron de 3 eV/c^2 (10). Para se ter uma idéia, a massa do elétron na mesma unidade é 511.000 eV/c^2! Limites experimentais muito menos restritivos existem para as massas dos neutrinos do múon e do tau: $m_{\nu_\mu} <$ 0,19 MeV/c^2 e $m_{\nu_\tau} <$ 18,2 MeV/c^2.

Os resultados dos experimentos com neutrinos solares e atmosféricos descritos acima, que indicam que uma mudança de *sabor* está ocorrendo no caminho dos neutrinos entre seu ponto de produção no Sol ou na atmosfera e seu ponto de observação no detetor, parecem estar associados com um fenômeno que pode ocorrer se os neutrinos tiverem massa: neutrinos podem sofrer oscilação de *sabor*.

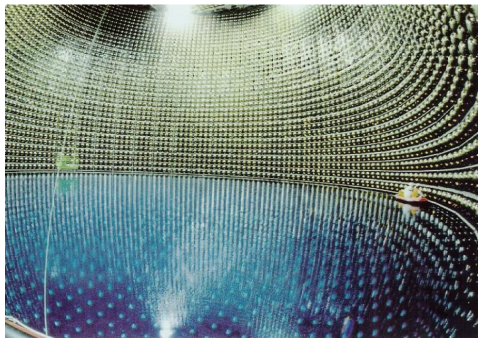
A idéia de oscilação de *sabor* de neutrinos foi proposta, em 1962, pelos físicos japoneses Maki, Nakagawa e Sakata e, em 1968, pelo italiano Bruno Pontecorvo.

Figura 12



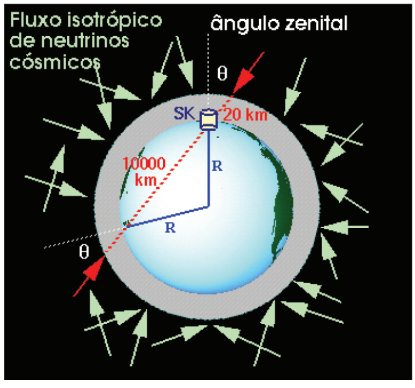
Três anéis de luz Cherenkov registrando a passagem de partículas relativísticas no detetor Super-Kamiokande.

Figura 13



Vista interna do experimento Super-Kamiokande durante seu preenchimento com água. Podemos ver as fotomultiplicadoras cobrindo as paredes do cilindro.

Figura 14



Chegada dos neutrinos cósmicos em função do ângulo zenital.

10 Devido à relação de Einstein entre massa e energia, $E=mc^2$, podemos usar como unidade de massa unidade de energia (eV) por c^2.

A causa dessa oscilação é que os neutrinos que são estados quânticos de *sabor* bem-definido (ν_e, ν_μ, ν_τ) são superposições lineares (misturas) dos neutrinos que são estados quânticos de massa bem-definida. Inversamente um neutrino de massa bem definida é uma mistura de *sabores*.

Se designarmos os três estados de massa como ν_1, ν_2 e ν_3, com massa m_1, m_2 e m_3, então, para um caso simples de mistura de dois neutrinos, os *sabores* ν_μ e ν_τ estão relacionados com os estados ν_2 e ν_3 por

$$\nu_\mu = \nu_2 \cos\theta - \nu_3 \operatorname{sen}\theta,$$

$$\nu_t = \nu_2 \operatorname{sen}\theta + \nu_3 \cos\theta,$$

onde θ é o ângulo de mistura, uma constante da natureza.

Os estados de massa ν_2 e ν_3, entretanto, evoluem no tempo a uma taxa que depende de suas massas, se $m_2 \neq m_3$ os estados de massa evoluem com taxas distintas. Assim um neutrino que nasceu ν_μ não permanecerá sempre ν_μ, de fato ele evoluirá para uma mistura de ν_μ e ν_τ. A probabilidade de que, após percorrer uma distância L, o neutrino que nasceu ν_μ transformou-se em ν_τ é dada pela fórmula

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \operatorname{sen}^2 2\theta \operatorname{sen}^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

onde E é a energia do neutrino e $\Delta m^2 = m_3^2 - m_2^2$, a diferença das massas quadradas dos estados ν_3 e ν_2. A probabilidade de que um ν_μ permaneça ν_μ é claramente $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$.

Assim, essas probabilidades de *sabor* oscilam com a distância percorrida pelo neutrino, a uma taxa proporcional a $\Delta m^2/E$, e com uma amplitude que depende do ângulo de mistura θ. Essas oscilações estão ilustradas nas Figuras 15 e 16. Note que, se todos os neutrinos tiverem massa nula, o termo Δm^2 será nulo e não haverá oscilação de *sabor*.

Esse fenômeno pode explicar perfeitamente todos os dados de neutrinos solares assim como todos os dados de neutrinos atmosféricos se assumirmos $\Delta m^2_{\text{solar}} \approx 7 \times 10^{-5}$ eV$^2/c^2$ e $\Delta m^2_{\text{atm}} \approx 2 \times 10^{-3}$ eV$^2/c^2$.

Recentemente, em 2002, o experimento japonês KamLAND, realizado com neutrinos de reatores de 16 complexos nucleares, observou pela primeira vez o desaparecimento de antineutrinos do elétron, confirmando de forma independente dos experimentos solares a mudança de *sabor* dos neutrinos. Esse detetor poderá também, em breve, medir pela primeira vez geoneutrinos, neutrinos produzidos por decaimentos radioativos de urânio e tório que ocorrem no interior de nosso planeta.

UMA NOVA ERA DE TELESCÓPIOS ESTELARES

O evento de uma vida

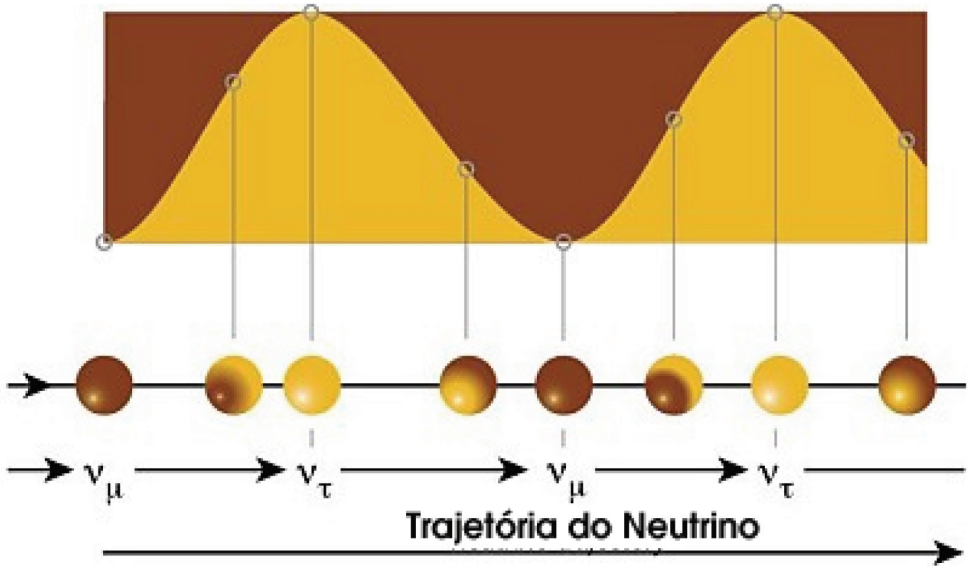
A astronomia de neutrinos nasceu no dia 23 de fevereiro de 1987 com a observação fortuita de neutrinos provenientes da explosão de uma supernova, denominada SN1987A, nas vizinhanças de nossa galáxia, a apenas 170 mil anos-luz da Terra (Figura 17).

A estrela que explodiu gloriosamente produzindo a supernova mais brilhante desde a invenção dos telescópios foi reconhecida pelos astrônomos como sendo a estrela Sandulek 69°202, uma gigante azul com massa 20 vezes a massa do Sol e 50 vezes o raio solar, localizada na região da Nebulosa da Tarântula na periferia da Grande Nuvem de Magalhães.

Estrelas como a Sandulek são fadadas a morrer em um piscar de olhos emitindo em sua explosão espetacular uma quantidade enorme de energia, equivalente à energia liberada por 100 sóis durante 10 bilhões de anos. Nós sabemos que 99% da energia do colapso estelar não aparece em forma da energia visível, mas em forma de neutrinos que são projetados em todas as direções através do espaço intergaláctico.

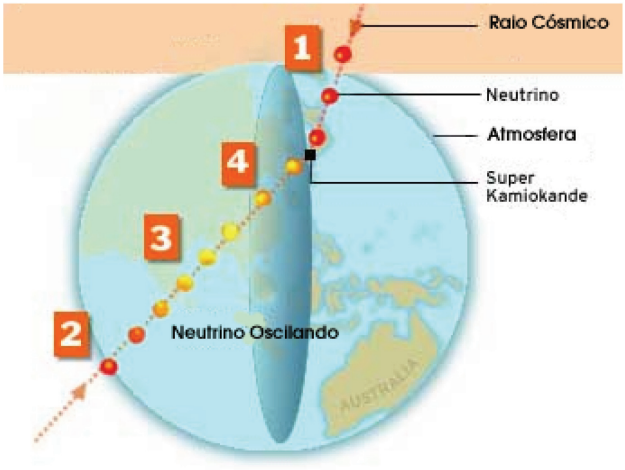
Pode-se calcular que o número de neutrinos que atingiram a Terra foi fenomenal: cerca de 50 bilhões por centímetro

Figura 15



Representação pictórica da oscilação de sabor.

Figura 16



Reperesentação pictórica dos neutrinos atmosféricos atravessando a Terra. Em (1) o raio cósmico interage com a atmosfera produzindo o neutrino, em (2) o neutrino está entrando na Terra vindo de baixo, em (3) e (4) o neutrino está mudando de* sabor *(mudando de cor na figura) antes de atingir o detetor.

Figura 17

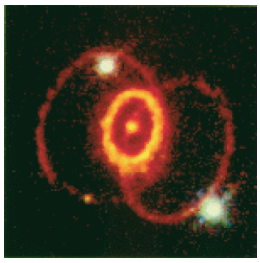


Imagem da supernova 1987A feita pelo Hubble Space Telescope.

quadrado, entrando pelo hemisfério sul e escapando pelo norte quase que impunemente. Alguns poucos, cerca de 20, não conseguiram cumprir sua jornada, foram pegos por detetores de neutrinos subterrâneos (Kamiokande e IMB).

O experimento japonês Kamiokande teve muita sorte. A chegada dos neutrinos

Figura 18

Pesquisadores no Pólo Sul durante a perfuração do gelo para colocar as fotomultiplicadoras do telescópio Amanda.

ocorreu apenas alguns minutos após calibração rotineira do detetor que teria impedido completamente qualquer observação. Eles registraram 11 eventos, que ocorreram em cerca de 10 segundos, que puderam ser correlacionados temporalmente com a explosão. O detetor IMB nos EUA também observou uma dezena de eventos que estariam temporalmente correlacionados com a supernova.

De acordo com estimativas, 2 ou 3 supernovas ocorrem em nossa galáxia por século, a maioria próxima ao centro da galáxia e obscurecida pela poeira estelar. Por isso, em 1.000 anos, apenas seis supernovas foram detetadas. Os grandes detetores de neutrinos atuais e futuros, uma vez que a poeira é transparente a neutrinos, estarão preparados para observar a próxima dessas explosões.

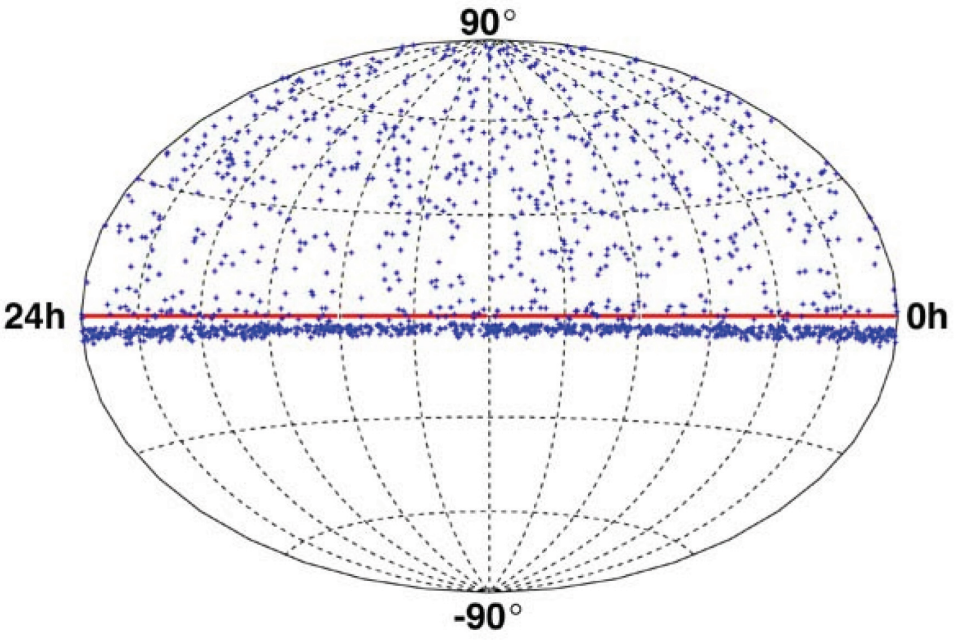
Neutrinos apontando para o céu

A alta atmosfera da Terra é constantemente bombardeada por partículas cósmicas muito energéticas, sobretudo prótons que, como já discutimos, podem colidir com núcleos atômicos de ar produzindo partículas carregadas que podem decair em neutrinos. A origem dessas partículas cósmicas primárias ainda continua incerta. A direção original das partículas carregadas provenientes do espaço sideral perde-se ao atravessarem campos magnéticos galácticos, sofrendo desvios diversos de forma que em média chegam à Terra uniformemente de todas as direções.

Além de fracamente interagentes, neutrinos têm carga elétrica nula e logo não são afetados pelos campos magnéticos do espaço intergaláctico. Essa é outra propriedade que os torna particularmente interessantes como sondas astrofísicas.

Os objetos astrofísicos que podem estar produzindo as partículas cósmicas carregadas devem também estar produzindo neutrinos, que não sofrem qualquer desvio em sua rota até a Terra e podem apontar diretamente para a fonte.

Figura 19



Primeiro mapa do céu em neutrinos. Produzido por Amanda em 2003.

Os telescópios de neutrinos possuem pouca semelhança com os telescópios óticos convencionais. Em vez de olhar diretamente para o céu, eles monitoram uma grande quantidade de material (gelo ou água) na Terra, onde ocorre a interação do neutrino com produção de partículas carregadas que produzem (por efeito Cherenkov) um sinal luminoso que pode ser registrado pelas fotomultiplicadoras do telescópio.

O maior telescópio de neutrinos em operação atualmente é o detetor Amanda, construído no Pólo Sul. Amanda (Figura 18) opera de forma semelhante ao detetor Super-Kamiokande, pelo efeito Cherenkov, mas usando o gelo no lugar de água. As fotomultiplicadoras são colocadas no gelo espaçadas umas das outras por centenas de metros. Já podemos nos encantar com o primeiro mapa do céu em neutrinos produzido por Amanda em 2003 (Figura 19).

O objetivo principal desse e de outros telescópios de neutrinos ainda maiores propostos para o futuro (Ice Cube – Figura 20 – Nestor, Antares) é buscar fontes de neutrinos de altíssima energia que possam nos ajudar a desvendar o mistério da origem dos raios cósmicos.

RELÍQUIAS DA INFÂNCIA DO UNIVERSO

O tempo é que é a matéria do entendimento (Guimarães Rosa).

Pelo que conhecemos hoje, neutrinos foram produzidos pela primeira vez há cerca de 14 bilhões de anos, logo após o nascimento de nosso universo. Desde então, nosso universo tem continuamente se expandido e esfriado carregando com ele os neutrinos.

O universo inicialmente foi dominado pela radiação comportando-se como um gás de fótons e outras partículas relativísticas

em equilíbrio térmico. Nessa época, os neutrinos estavam em equilíbrio com as demais partículas, aparecendo e desaparecendo continuamente, ora absorvidos por prótons, ora emitidos por nêutrons. Quando o universo esfriou suficientemente, cerca de um segundo após o big-bang (11), chegando a uma temperatura de aproximadamente 10 bilhões de graus, prótons passaram a ter uma probabilidade muito pequena de absorver um neutrino (a taxa da interação fraca ficou menor do que a taxa com que o universo estava se expandindo). Os neutrinos então saíram do equilíbrio com as outras partículas e desacoplaram, escapando livremente e dando origem a uma radiação cósmica de fundo cuja temperatura é hoje 1,9 K (-271,2ºC).

Os neutrinos da radiação cósmica de fundo devem ter uma energia minúscula (por volta de 0,0004 eV) e ainda não foram detetados. Trata-se de mais um desafio experimental fabuloso, uma vez que sua probabilidade de interação diminui ainda mais com a energia. Podemos, entretanto, estimar teoricamente sua densidade no universo atual como sendo da ordem de 330 milhões de neutrinos por metro cúbico. Isso é bastante espantoso. Para comparar encontramos em média 0,5 próton e 1 bilhão de fótons por metro cúbico de universo. Vemos que os neutrinos do big-bang são praticamente tão numerosos quanto os fótons e que a matéria usual na Terra (prótons, nêutrons, elétrons) parece insignificante no âmbito do universo...

Há algumas dezenas de anos um problema aflige os astrofísicos. As medidas das velocidades orbitais de estrelas de muitas galáxias fornecem resultados surpreendentes. As estrelas exteriores das galáxias estão orbitando com velocidades maiores do que o esperado. Ninguém até hoje conseguiu fornecer uma explicação simples para essas altas velocidades. Uma possibilidade aventada é a existência de matéria escura, invisível, permeando as galáxias, apenas observável através de seus efeitos gravitacionais (12).

Devido a sua alta densidade no universo, neutrinos sendo massivos poderiam ser um candidato natural para explicar a matéria escura. No entanto, devido ao fato de que os dados experimentais atuais evidenciam que oscilações de neutrinos ocorrem para diferenças de massas muito pequenas, indiretamente indicando que os neutrinos devem ser leves, os neutrinos não podem resolver o problema da matéria escura sozinhos. Apesar disso, eles ainda podem constituir parte significativa da matéria invisível do universo.

Surpreendentemente, a cosmologia observacional apresenta hoje uma alternativa promissora para aprendermos mais sobre a massa dos neutrinos. Enquanto experimentos de oscilação são sensíveis apenas às diferenças de massa dos neutrinos (de fato às diferenças das massas quadradas), que, como já vimos, parecem ser muito pequenas, as medidas cosmológicas podem fornecer idéia do valor das massas dos neutrinos propriamente ditas, que podem ser de fato bem maiores. Sendo massivos, os neutrinos podem, por um lado, contribuir como já observamos, para a densidade de matéria do universo, e, por outro, afetar a estrutura de larga escala das galáxias. Simulações computacionais mostram que a quantidade de aglomerados de galáxias presentes hoje no universo seria muito menor do que o que é observado se neutrinos tivessem uma massa significativa. As medidas da anisotropia da radiação cósmica de fundo realizadas pelo WMAP (Wilkson Microwave Anisotropy Probe) combinadas com os primeiros resultados do Sloan Digital Sky Survey, que observou mais de 200 mil galáxias, fornecem hoje um limite superior para a massa total dos neutrinos de 1,7 eV/c^2. Novos satélites, previstos para o futuro próximo, poderão melhorar ainda mais esse limite ou, quem sabe, até fornecer um valor para a massa total dos neutrinos.

Neutrinos poderão ainda ter um papel importante para desvendar a origem do excesso de matéria sobre antimatéria no universo (o que aconteceu com a antimatéria produzida no início do universo? por que não a observamos hoje?) ou ainda influenciar nosso entendimento da nucleossíntese

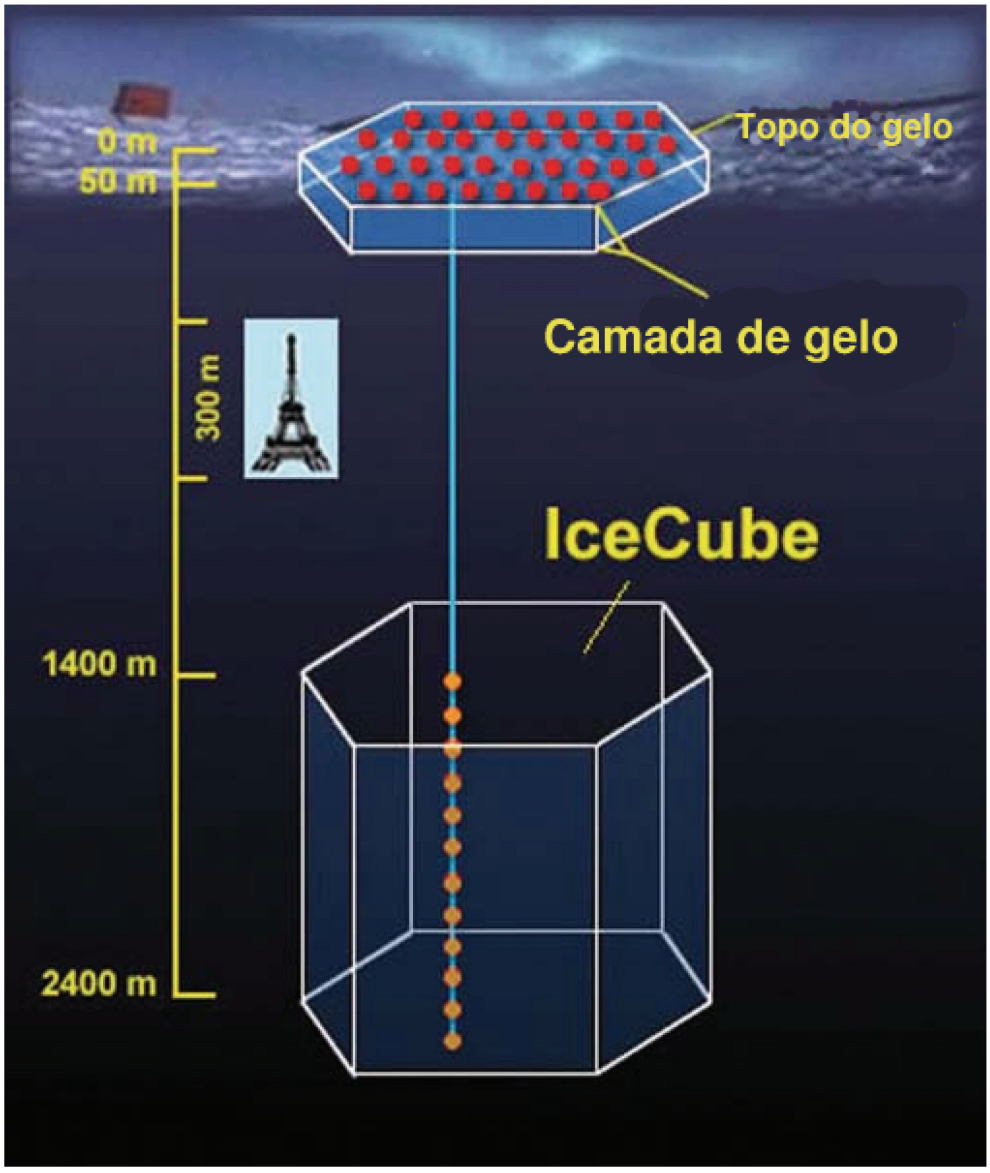
11 Para mais informações sobre a teoria do big-bang ver o artigo de L. R. Abramo neste dossiê.

12 Para mais informações sobre matéria escura ver o artigo de R. Rosenfeld neste dossiê.

primordial de elementos leves.

Sabemos hoje que a "partícula-fantasma" de Pauli é sem sombra de dúvida uma componente profundamente importante do universo em que vivemos. Não podemos deixar de nos maravilhar com o que ela já nos ensinou e ansiar pelo que ainda nos apresentará no futuro.

Figura 20



Projeto para o telescópio Ice Cube no Pólo Sul. As fotomultiplicadoras serão colocadas dentro do gelo formando um cubo de gelo instrumentado gigantesco de 1 km³.