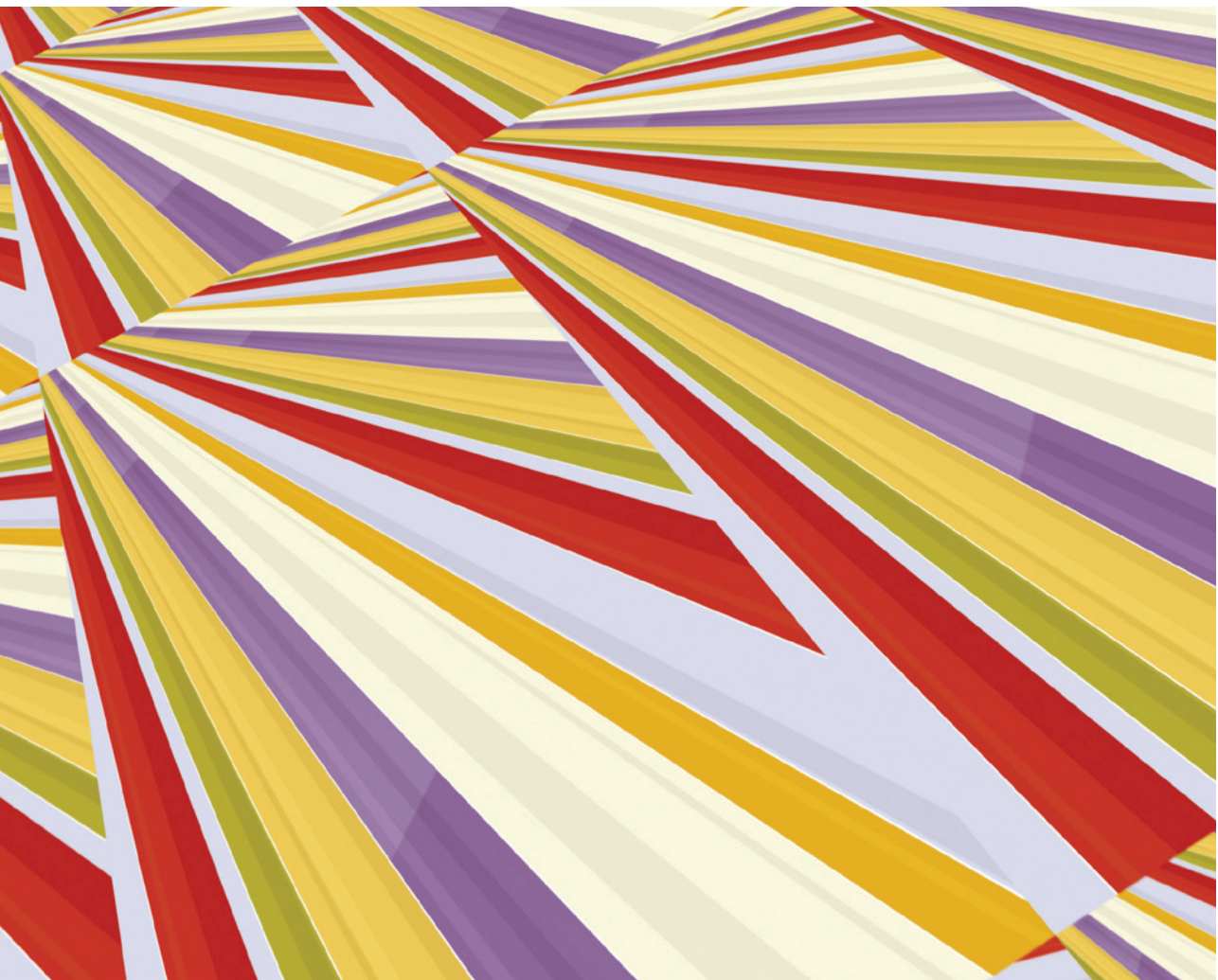




Neutrinos

As misteriosas partículas-fantasma



Dos 12 diferentes tipos de constituintes elementares

da matéria, o neutrino é, sem dúvida, o mais intrigante e enigmático. Como não tem carga elétrica e é também indiferente à força que une os núcleos atômicos, praticamente não interage com a matéria, atravessando tudo que passa por sua frente e viajando pelo espaço sem ser incomodado.

O neutrino foi proposto em 1930 para conservar o balanço de energia (que estava faltando) numa reação. Mas, por muito tempo, pensou-se que seria impossível comprovar sua existência, tão fugidio que é. Entretanto, como é produzido em grande quantidade em reações nucleares (como as que ocorrem nas estrelas), o truque usado para detectá-lo foi fazer uma experiência próxima a um potente reator nuclear, pois neutrinos são produzidos em grande número em processos de fissão de núcleos atômicos e, vez por outra, um acaba interagindo com a matéria do detector.

Mais tarde, descobriu-se que existem três diferentes tipos de neutrinos, o último deles tendo sido descoberto em 2000. Inicialmente previstos como partículas sem massa, os neutrinos nos surpreenderam mais uma vez, quando ficou evidente que não só tinham massa, mas também se transformavam uns nos outros, mudando de “aparência” como um camaleão. Mas a estranheza dessa partícula não acaba por aí. Desconfia-se agora que os neutrinos possam ter algo a ver com o sumiço da antimatéria do universo.

Com tantas questões em aberto sobre os neutrinos, parece que o estudo dessa partícula será um dos temas mais importantes da física neste início de século.

126. | POR TODA PARTE | CHUVA INVISÍVEL | A MAIS “ANTI-SOCIAL”

127. | COMO TUDO COMEÇOU | FILÃO PERDIDO | PILAR SAGRADO
| SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS... | MUITO “GORDO”
| PEQUENO NÊUTRON | TRÊS TIPOS

130. | A PRINCIPAL FONTE | 60 BILHÕES POR SEGUNDO | EFEITO URCA
| CHANCES MÍNIMAS | DISPARIDADE CONFIRMADA | EXPLOSÃO CÓSMICA

133. | O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES | TEORIA *VERSUS*
EXPERIMENTO | MUDANÇA DE SABOR | NO MEIO DOS REATORES
| QUAL O MECANISMO?

135. | REDES DE CAPTURA | LUZ TÊNUE | GIGANTESCO COLAR
DE PÉROLAS | CUBO DE GELO | ANGRA DOS REIS | MINOS

138. | DESAFIOS | PARCELA DA MATÉRIA ESCURA | MESMA PARTÍCULA?
| AONDE FOI A ANTIMATÉRIA?

POR TODA PARTE

CHUVA INVISÍVEL

Até o final da leitura deste capítulo, cada um de nós terá emitido cerca de 10 milhões de neutrinos, devido a 20mg de um elemento radioativo, o potássio $^{40}_{19}\text{K}$, presente em nossos organismos. Além disso, num único segundo, estamos sendo atravessados por 50 bilhões dessas partículas provenientes da radioatividade natural da Terra e por outros 10 bilhões a 100 bilhões gerados em reatores nucleares pelo mundo. Completam essa chuva invisível mais cerca de 300 trilhões de neutrinos vindos do Sol.

A MAIS “ANTI-SOCIAL”

Felizmente, para nossa saúde, os neutrinos interagem muito pouco com a matéria. Por exemplo, um neutrino com energia moderada pode atravessar nosso corpo, passar incólume por todo o planeta e, de modo mais impressionante ainda, viajar através de uma parede de chumbo com 9,5 trilhões de quilômetros de espessura sem se “chocar” (ou interagir) com nada. Caso houvesse um “clube” das partículas subatômicas, certamente o neutrino seria classificado como a mais “anti-social” delas. E, por isso, “capturá-los” para estudo é tarefa árdua para os cientistas.

COMO TUDO COMEÇOU

FILÃO PERDIDO

Desde 1914, os físicos que estudavam as propriedades atômicas se deparavam com um problema relacionado ao decaimento beta, um tipo de radioatividade emitida por certos núcleos atômicos. Notava-se algo de estranho nesse fenômeno, no qual (como se observava na época) um elétron era emitido pelo núcleo. Porém, as contas do balanço energético não fechavam, ou seja, quando se somava a energia da partícula expelida com a do núcleo recém-criado, obtinha-se menos energia que aquela contida no núcleo inicial. Faltava um filão (diminuto, é verdade) de energia.

PILAR SAGRADO

Ao longo da década de 1920, esse fenômeno resistiu a todas as tentativas de explicação. Primeiramente, achou-se que um raio gama (partícula de luz energética) estava sendo emitido juntamente com o elétron. Mas experimentos feitos em 1927 e em 1930 desbancaram essa hipótese. Frente a esse problema, grandes físicos da época reagiram de modo muito diferente. Niels Bohr (1885-1962), num ato de desespero, se mostrou pronto a abandonar a lei da conservação da energia, um pilar sagrado da física. Quando soube da proposta de seu colega dinamarquês, o inglês Paul Dirac (1902-1984) respondeu: “Somente por cima do meu cadáver [a lei da conservação da energia será abandonada]”.

SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS...

Em 4 de dezembro de 1930, o físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) escreveu, de Zurique (Suíça), uma carta para sua colega e compatriota Lisa Meitner (1878-1968). Aquela uma página, que deveria ser lida para os participantes de uma conferência em Tübingen (Alemanha), começava assim: “Ca-

ros senhoras e senhores radioativos...”. Nos parágrafos seguintes, escreveu Pauli, “uma nova partícula pode estar sendo emitida juntamente com o elétron, carregando a energia que falta”. Batizada provisoriamente por Pauli de partícula X, ela seria neutra (sem carga elétrica), possivelmente sem massa e responsável pelo filão de energia faltante no decaimento beta.



CERN

MUITO “GORDO”

Dois anos depois, o físico inglês James Chadwick (1891-1974) – por sinal, um dos primeiros a desconfiar de que havia algo de estranho com o decaimento beta – descobriu o nêutron (também sem carga e companheiro do próton no núcleo atômico). Inicialmente, achou-se que se tratava da nova partícula, mas logo se percebeu que sua massa era “enorme”, praticamente igual à do próton. Enfim, o nêutron era muito “gordo” para desempenhar o papel atribuído por Pauli à misteriosa partícula X.

PEQUENO NÊUTRON

Em 1933, o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) incorporou o neutrino (por sinal, nome dado por ele, para designar, em italiano, o “pequeno nêutron”) a uma teoria elegante, desenvolvida por ele, para explicar o decaimento beta, que passou a ser o seguinte: um nêutron decai (se transforma) em próton dentro do núcleo, emitindo um elétron e um neutrino (na verdade, um antineutrino), sendo que este carrega a misteriosa energia que faltava. Assim, um novo núcleo é formado. Nele, há um próton a mais e, portanto, o número atômico (Z) fica aumentado de uma unidade. Exemplos de decaimento beta: potássio decaindo em cálcio ($^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \text{anti-}\nu$); cobre, em zinco ($^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{64}\text{Zn} + e^- + \text{anti-}\nu$); trítio em hélio ($^3_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + e^- + \text{anti-}\nu$).

TRÊS TIPOS

Sabe-se atualmente que existem três tipos de neutrinos, associados a outros integrantes da família dos léptons, que inclui, além do elétron, outros dois parentes deste, porém mais pesados: o múon (μ) e o tau (τ). Em 1956, foi detectado o primeiro tipo, o chamado neutrino do elétron (ν_e), pelos norte-americanos Clyde Cowan (1919-1974) e Frederick Reines (1918-1998). Em 1962, os físicos norte-americanos Melvin Schwartz, Leon Lederman e Jack Steinberger descobriram o neutrino do múon (ν_μ). Finalmente, em 2000, uma colaboração internacional, a Donut (sigla, em inglês, para Observação Direta do Neutrino do Tau), cujos experimentos foram realizados no acelerador de partículas Fermilab (Estados Unidos), apresentou ao mundo evidências do último deles: o neutrino do tau (ν_τ).

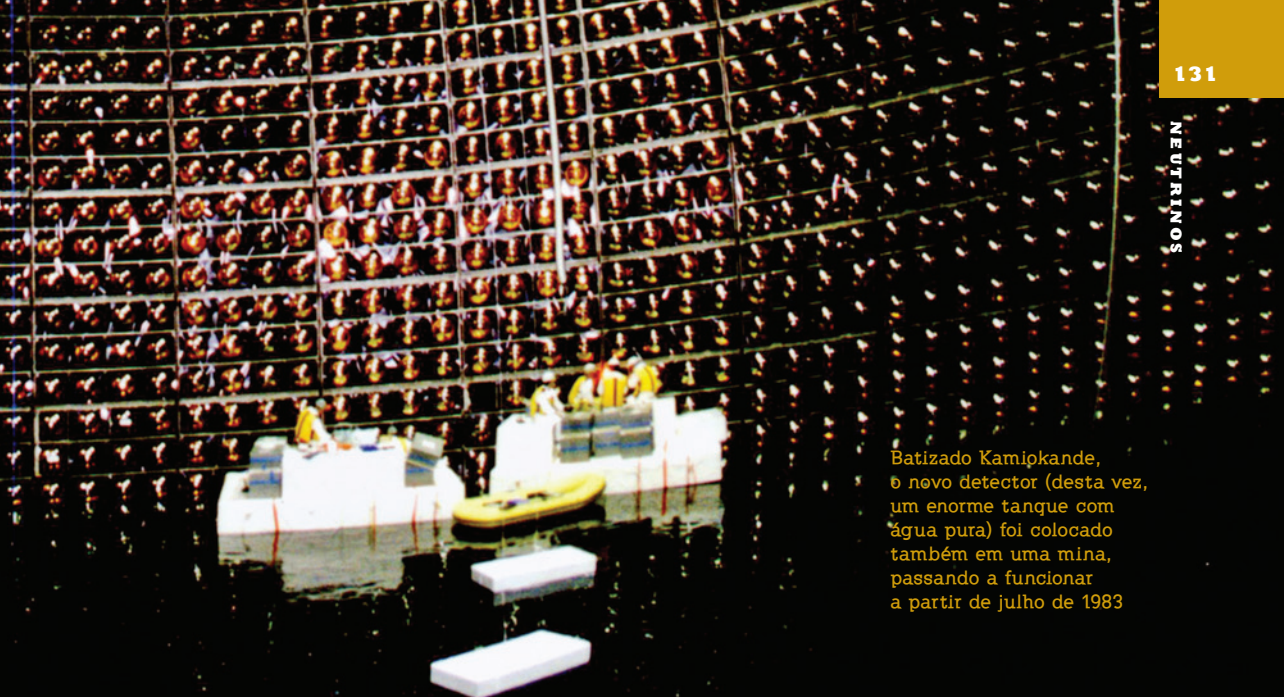
A PRINCIPAL FONTE

60 BILHÕES POR SEGUNDO

A maior parte dos neutrinos que nos atinge provém do Sol. A reação nuclear que produz esses neutrinos é a mesma que produz luz e calor nas estrelas, baseada principalmente na fusão de núcleos de hidrogênio para gerar os de hélio. Para cada dois neutrinos produzidos no Sol, uma diminuta parcela de energia (cerca de 25 milhões de elétrons-volt, sendo o elétron-volt uma unidade de energia muito pequena) é liberada. Lembrando que a distância da Terra ao Sol é da ordem de 150 milhões de quilômetros, pode-se estimar o fluxo de neutrinos solares que chega à Terra: cada centímetro quadrado da atmosfera terrestre é perfurado, por segundo, por cerca de 60 bilhões de neutrinos solares.

EFEITO URCA

Por interagir muito pouco com a matéria, os neutrinos escapam rapidamente do interior das estrelas, drenando parte da energia produzida nas reações nucleares. Uma das formas de perda de energia pelas estrelas por meio da produção de neutrinos foi proposta na década de 1940 numa colaboração entre o físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) e o russo George Gamow (1904-1968). Eles propuseram que núcleos do interior de estrelas supermassiva absorveriam elétrons e, com isso, gerariam neutrinos. Em seguida, esses núcleos “cuspiriam” de volta a partícula absorvida, juntamente com um antineutrino. Esse processo acabou ganhando o nome efeito Urca, porque os neu-



Batizado Kamikande, o novo detector (desta vez, um enorme tanque com água pura) foi colocado também em uma mina, passando a funcionar a partir de julho de 1983

trinos sumiam com a energia estelar, assim como o dinheiro sumia, na época, das mãos dos apostadores no famoso cassino da Urca, na cidade do Rio de Janeiro.

CHANCES MÍNIMAS

Observações pioneiras de neutrinos solares receberam o prêmio Nobel de Física 2002, dado ao norte-americano Raymond Davis Jr. e ao japonês Masatoshi Koshiba. O primeiro deles idealizou e construiu o experimento Homestake, que funcionou, entre 1970 e 2000, numa mina no estado de Dakota do Sul (Estados Unidos). Davis usou um tanque gigantesco, contendo 615t de moléculas cuja composição continha cloro (C^{35}Cl). Ao todo, no tanque, havia 10^{30} (o número 1 seguido de 30 zeros!) átomos de cloro. Com o choque de um neutrino energético, um desses átomos de cloro se transforma em argônio radioativo, que, com muito esforço e sutileza técnica, poderia ser detectado. As chances de ocorrerem essas reações eram mínimas, mas não nulas. Foi nisso que Davis apostou. Ao longo dos trinta anos que o experimento funcionou, Davis capturou cerca de 2 mil átomos de argônio. Pelas suas contas, deveriam ser, pelo menos, sete mil. O que estaria acontecendo?

DISPARIDADE CONFIRMADA

No Japão, experimento semelhante foi construído por Koshiba e equipe. Batizado Kamiokande, o novo detector (desta vez, um enorme tanque com água pura) foi colocado também em uma mina, passando a funcionar a partir de julho de 1983. Caso um elétron desse tanque de água fosse atingido por um neutrino, ele produziria uma luz tênue, que seria captada por fotomultiplicadoras (sensores de luz que lembram lâmpadas caseiras no formato, mas com dimensões maiores). Koshiba pôde comprovar os resultados de Davis: havia uma disparidade entre o número previsto e o capturado de neutrinos solares. O Kamiokande, que era sensível à direção de chegada dessas partículas, mostrou, pela primeira vez, que os neutrinos vinham realmente do Sol.

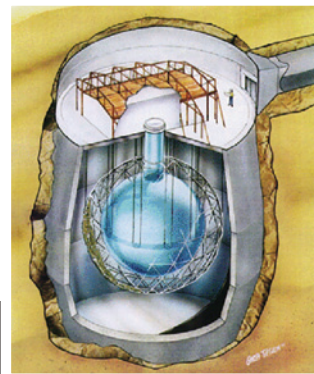
EXPLOSÃO CÓSMICA

O Kamiokande (sigla, em inglês, para Experimento Kamio-ka de Decaimento de Núcleons) inesperadamente conseguiu um feito espetacular. Em 23 de fevereiro de 1987, capturou os neutrinos emitidos pela explosão de uma estrela maciça que chegou ao final da vida (essa explosão cósmica é denominada supernova). Estima-se que a supernova 1987A, que explodiu numa galáxia vizinha, a Grande Nuvem de Magalhães, a cerca de 170 mil anos-luz da Terra (cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km), tenha emitido um número astronômico de neutrinos (10^{58} , ou seja, 1 seguido de 58 zeros), sendo que 10 mil trilhões (10^{16}) deles passaram pelo tanque de água do experimento. Total de neutrinos capturados: 12, o que dá uma idéia de quão fugidia é essa partícula, merecidamente denominada fantasma.

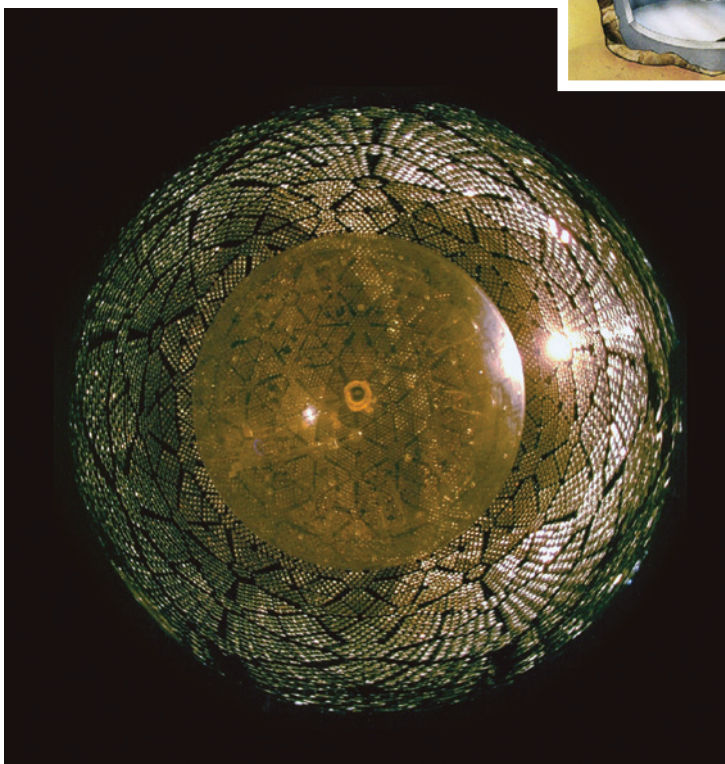
O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES

TEORIA VERSUS EXPERIMENTO

Cálculos indicavam quantos neutrinos deveriam chegar à Terra vindos do Sol. Mas, por cerca de trinta anos, resultados de experimentos indicavam que apenas cerca da metade deles era capturada, em franco desacordo com a teoria. A resposta para esse intrigante mistério só veio há poucos anos, principalmente com o resultado de um experimento: o SNO (sigla, em inglês, para Observatório de Neutrino de Sudbury), no Canadá.



SNO



Vista inferior do detector do SNO. No destaque, concepção artística do experimento

MUDANÇA DE SABOR

Experimentos anteriores só haviam captado predominantemente neutrinos do elétron. Porém, em 2002, o SNO comprovou uma hipótese que havia sido apresentada no final da década de 1960 pelo físico italiano Bruno Pontecorvo (1913-1993), então trabalhando na União Soviética: os neutrinos podem mudar de tipo, ou seja, um neutrino do elétron, por exemplo, em seu caminho do Sol à Terra, pode se transformar em um dos outros dois tipos, fenômeno que os físicos denominam mudança (ou oscilação) de sabor.

NO MEIO DOS REATORES

O SNO mostrou que realmente os neutrinos solares mudavam de sabor, mas restava descobrir que misterioso mecanismo possibilitava essa conversão. A resposta veio com os resultados do experimento KamLAND (sigla, em inglês, para Detector Kamioka de Antineutrinos à base de Cintilador Líquido). O experimento está localizado estrategicamente no centro da ilha de Honshu, a principal do Japão, recebendo um fluxo de neutrinos produzidos nas reações que ocorrem em cerca de vinte reatores nucleares a aproximadamente 180km de distância.

QUAL O MECANISMO?

Várias hipóteses concorriam para explicar a mudança de sabor. A mais forte delas era uma implicação direta desse fenômeno: os neutrinos, tidos até então como partículas sem massa, deveriam ser maciços. Porém, havia ainda a possibilidade de a conversão de sabor estar ocorrendo i) pela interação de propriedades do neutrino com campos magnéticos intensos; ii) por alguma interação do neutrino ainda desconhecida; e iii) pelo efeito de campos gravitacionais também intensos. O KamLAND descartou todas estas três, deixando apenas a possibilidade de as oscilações de um tipo em outro ocorrerem porque os neutrinos são maciços.

REDES DE CAPTURA

LUZ TÊNUE

Juntamente com as partículas de luz (fótons), os neutrinos são os fragmentos de matéria mais abundantes do universo: há cerca de 100 deles por centímetro cúbico do espaço interestelar (para os fótons, esse número é de aproximadamente 400). Parte desses neutrinos pode ser detectada. E a física por trás desses experimentos é basicamente essa: um neutrino interage com uma partícula, gerando outro neutrino, bem como uma luz muito tênue, que, quando captada por sensores (fotomultiplicadoras, cintiladores etc.), revela que reação descrita ocorreu.

GIGANTESCO COLAR DE PÉROLAS

Alguns neutrinos com altas energias que chegam à Terra estão sendo observados em detectores como o Amanda (sigla, em inglês, para Rede de Detectores de Múons e Neutrinos da Antártida). Como o nome indica, esse experimento opera no pólo Sul e detecta neutrinos que provêm do hemisfério Norte celeste, depois de terem atravessado a Terra. Ele é formado por 19 cabos com comprimento entre 1,5km e 2km, cada um contendo 700 fotomultiplicadoras, como se formassem um gigantesco colar de pérolas. Cada sensor está acondicionado num invólucro plástico transparente, para agüentar a pressão das profundidades geladas.

Amanda (sigla, em inglês, para Rede de Detectores de Múons e Neutrinos da Antártida)

AMANDA



CUBO DE GELO

O sucessor do Amanda será o IceCube (Cubo de Gelo), cujas dimensões impressionam. Previsto para entrar em operação em 2010, será formado por oitenta cabos com cerca de sessenta sensores cada. Total: 4,8 mil fotomultiplicadoras enterradas no gelo, ocupando um volume subterrâneo de um quilômetro cúbico. Para os próximos anos, mais outros experimentos do gênero devem entrar em funcionamento: o Nestor e o Antares. Porém, dessa vez, os sensores estarão submersos nas águas da costa da Grécia e da França, respectivamente.

ANGRA DOS REIS

Se os neutrinos oscilam, necessariamente eles apresentam propriedades que ainda precisam ser investigadas. Em particular, não se conhecem ainda detalhes sobre como os neutrinos do elétron se transformam em neutrinos do tau. Essa dúvida poderá ser esclarecida por um experimento proposto para ser executado em Angra dos Reis (RJ), utilizando os neutrinos eletrônicos (na verdade, antineutrinos) produzidos nos reatores das usinas nucleares de Angra I e Angra II. O projeto Angra ν (lê-se “Angra Ni”) vai medir o fluxo de neutrinos nas proximidades dos reatores e compará-lo com o fluxo a cerca de 1,5km de distância dali, num grande detector construído embaixo da serra do Mar. Uma diferença entre o fluxo medido e o fluxo calculado com base na teoria permitirá determinar em que proporção os neutrinos do elétron mudam de sabor. Esse experimento colocaria o Brasil na

FOTO JOÃO DOS ANJOS

Usina nuclear em
Angra dos Reis (RJ)





MINOS

aventura da descoberta das propriedades dessa partícula fascinante. Assim como o Angra v, três experimentos semelhantes estão sendo projetados e construídos ao redor do mundo (França, China e Coréia do Sul) .

MINOS

O Brasil também tem participação no Minos (sigla, em inglês, para Busca pela Oscilação de Neutrinos com o Injetor Principal), cujo objetivo é também estudar as oscilações dos neutrinos do múon. A diferença, nesse caso, é que a fonte dessas partículas é o acelerador (mais especificamente, o injetor principal) do Fermilab. O Minos trabalha com o feixe mais intenso de neutrinos criado pelo homem. Os detectores são formados por cerca de 6 mil toneladas de ferro e sensores (cintiladores). O primeiro deles fica a 290 metros da saída do feixe. O segundo está localizado numa velha mina de ferro em Soudan, no norte do estado de Minnesota, a 730 km dali. O K2K, no Japão, usou recurso semelhante. Em 4,5 anos de funcionamento, detectou 107 neutrinos, 44 a menos do que o esperado caso não houvesse a oscilação de sabor.

DESAFIOS

PARCELA DA MATÉRIA ESCURA

Descobrir que os neutrinos têm massa representa apenas a resolução de uma das propriedades das partículas-fantasma. Porém, há outras questões sem resposta. Não se sabe ainda o valor exato da massa dos neutrinos, e isso já é objeto de novas pesquisas. O fato de os neutrinos terem massa tem também implicações profundas para a composição e o destino do universo. Acredita-se que essas partículas devam compor uma pequena parcela da chamada matéria escura, que só pode ser detectada por sua ação gravitacional e representa cerca de 25% da composição atual do universo.

MESMA PARTÍCULA?

Além disso, não se sabe até hoje se os neutrinos e suas antipartículas, os antineutrinos, são ou não a mesma partícula. Por exemplo, um nêutron pode ser diferenciado de um antinêutron. Já um fóton, também sem carga elétrica, é sua própria antipartícula, ou seja, não é possível nem faz sentido distingui-los. Em 1937, pouco antes de desaparecer misteriosamente, o físico italiano **Ettore Majorana** (1906-1938) propôs que neutrinos e antineutrinos seriam a mesma partícula, ou seja, seria impossível diferenciar um do outro. Experimentos tecnicamente complicados tentam hoje testar essa hipótese. Se ela for verdadeira, os físicos terão que tornar ainda mais complexa a teoria que vêm empregando desde a década 1970 para estudar o mundo subatômico. E aí uma nova era estaria começando para a física das partículas elementares.





AONDE FOI A ANTIMATÉRIA?

Pesquisas com os neutrinos solares e com aqueles produzidos pela colisão de raios cósmicos contra núcleos atmosféricos revelaram detalhes importantes sobre a oscilação dessas partículas. Agora, o estudo dos neutrinos produzidos em aceleradores e daqueles gerados em reatores nucleares poderá completar esse conhecimento. Além disso, experimentos como o Angra ν e o Minos poderão indiretamente ajudar a responder um dos maiores mistérios da ciência: por que a antimatéria é tão rara no universo, já que, acredita-se, ela foi criada na mesma proporção que a matéria no Big Bang?