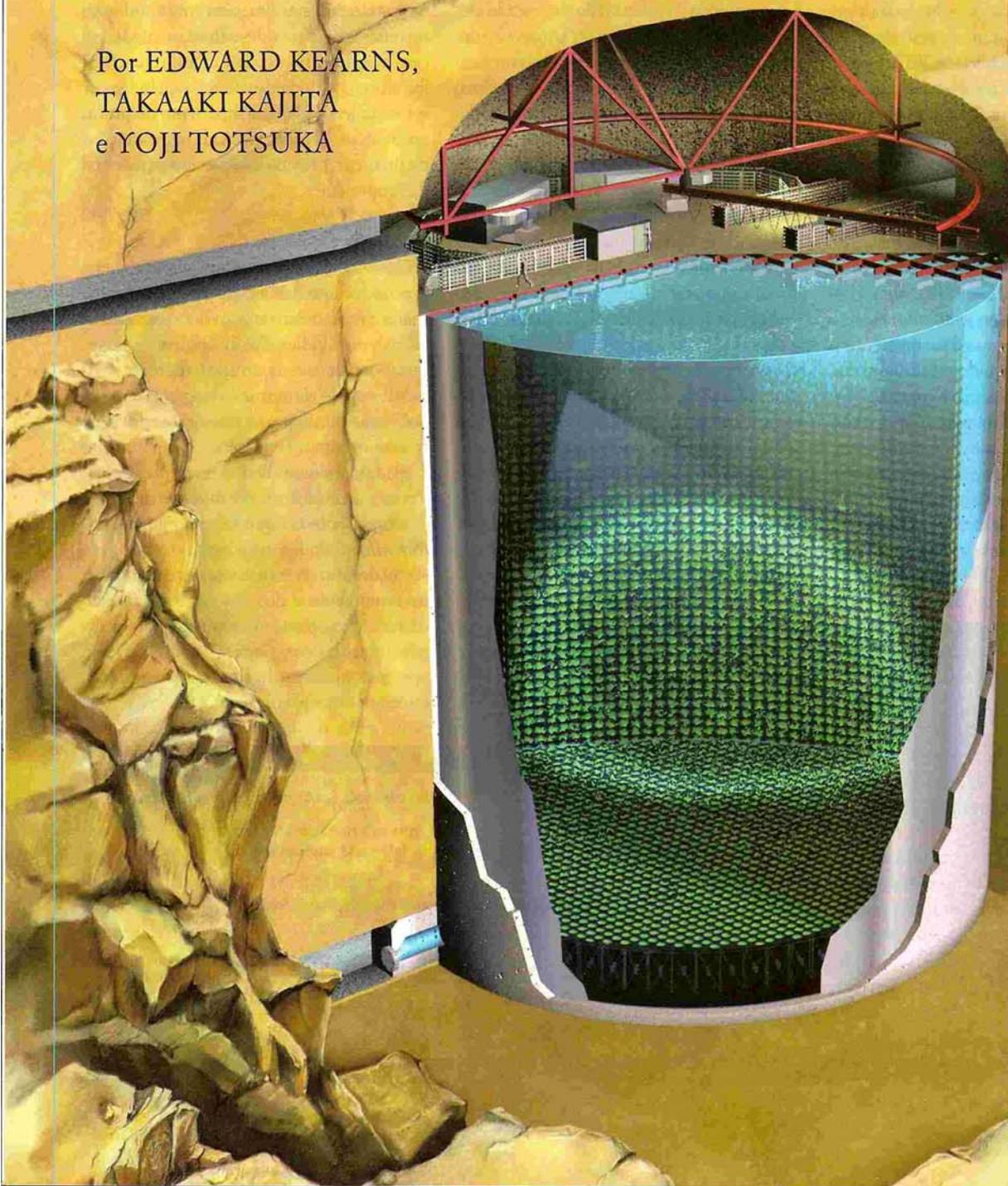
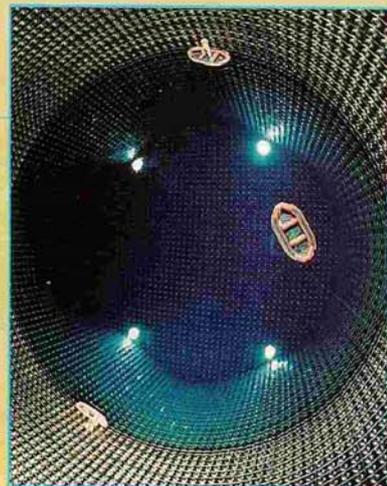


Em busca da massa dos NEUTRINOS

Por EDWARD KEARNS,
TAKAAKI KAJITA
e YOJI TOTSUKA



O DETECTOR SUPER-KAMIOKANDE fica em uma mina ativa de zinco dentro do Monte Ikenoyama. Seu tanque de aço inoxidável contém 50 mil toneladas de água ultrapura, tão transparente que a luz pode atravessar 70 metros dela antes de perder metade de sua intensidade [em uma piscina, isso aconteceria em alguns metros]. A água é monitorada por 11 mil tubos fotomultiplicadores, que cobrem as paredes, o chão e o teto. Cada tubo é um bulbo de vidro vazio de 0,5 metro de diâmetro, feito artesanalmente. Os tubos registram *flashes* cônicos de luz Cherenkov, que sinaliza as raras colisões de um neutrino de grande energia com um núcleo atômico na água. Em botes infláveis, técnicos limpam os bulbos enquanto o tanque é cheio (à direita)



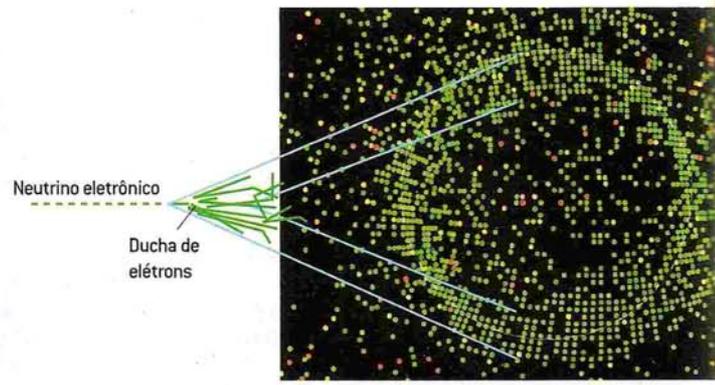
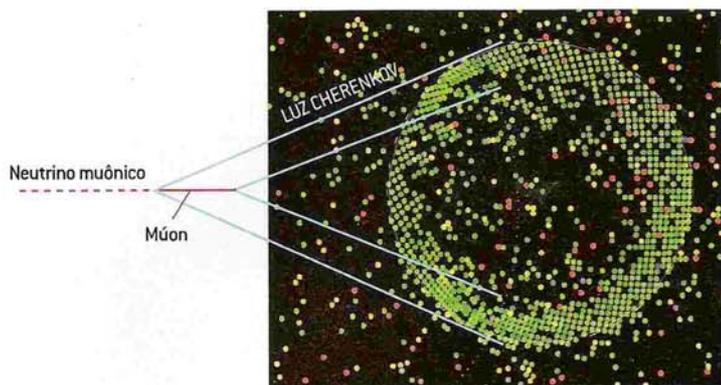
INSTITUTO DE PESQUISA DE RAIOS CÔSMICOS (ICRR), UNIVERSIDADE DE TÔQUIO

Um gigantesco detector no coração do monte Ikenoyama, no Japão, demonstrou que os neutrinos se transformam antes de atingir a Terra — forte evidência de que essas partículas-fantasma têm massa

O lixo de uns é o tesouro de outros. Para os físicos, o lixo é o “ruído” — uma reação indesejada, provavelmente causada por um processo corriqueiro e bem compreendido. O tesouro é o “sinal” — um dado capaz de revelar novas pistas sobre o funcionamento do Universo. Assim foi durante as duas últimas décadas: muitos grupos tentavam detectar a desintegração radioativa do próton, um sinal raríssimo enterrado no ruído de reações causado por partículas esquivas chamadas neutrinos. O próton, um dos principais constituintes do átomo, parece ser imortal. Sua desintegração seria um forte indício de processos descritos pelas Teorias da Grande Unificação, as quais, para muitos, estão além do atual Modelo Padrão da física das partículas. Enormes detectores de desintegração do próton foram colocados em minas ou túneis do mundo todo, para escapar da constante chuva das partículas denominadas raios cósmicos. Contudo, mesmo protegidos nas profundezas, esses equipamentos ainda estavam expostos aos neutrinos produzidos pelos raios cósmicos.

A primeira geração de detectores, que funcionou de 1980 a 1995, não achou sinais da desintegração do próton — mas os pesquisadores acabaram descobrindo que o supostamente corriqueiro ruído de neutrinos não era assim tão fácil de entender. Um desses aparelhos, o Kamiokande, ficava no Japão, em Kamioka, cidade de mineração a cerca de 250 km de Tóquio. Os cientistas desse projeto e do experimento IMB, montado em uma mina de sal perto de Cleveland, Ohio, usavam detectores para observar tanques de água ultrapura, esperando pelos *flashes* causados pela desintegração do próton.

Esse tipo de evento estaria escondido entre outros mil *flashes* parecidos, causados pela interação dos neutrinos com os núcleos atômicos das moléculas de água.



OS CONES DE LUZ CHERENKOV são emitidos quando neutrinos altamente energéticos atingem um núcleo e produzem uma partícula carregada. Um neutrino muônico *(no alto)* cria um múon, que viaja talvez por 1 metro e projeta um anel nítido de luz nos detectores. Um elétron, produzido por

um neutrino eletrônico *(à direita)*, gera uma pequena chuva de elétrons e pósitrons, cada qual com seu próprio cone de Cherenkov, criando um anel impreciso de luz. Os pontos verdes indicam a luz detectada no mesmo intervalo curto de tempo

Embora nenhuma desintegração tenha sido observada, a análise daquelas mil reações revelou um verdadeiro tesouro: evidências de que os neutrinos eram inesperadamente volúveis, mudando de espécie durante seu vôo. Se confirmado, esse fenômeno seria tão empolgante e revolucionário quanto a desintegração do próton.

Os neutrinos são partículas invisíveis fantásticas. A cada segundo, 60 bilhões deles, a maioria proveniente do Sol, atravessam cada centímetro quadrado de seu corpo (e qualquer outra coisa). Mas, por interagirem muito pouco com outras partículas, geralmente todos os 60 bilhões o trespassam sem mover um único átomo. De fato, se um feixe desses neutrinos fosse enviado através de um bloco de chumbo com 1 ano-luz de espessura, a maioria deles emergiria ileso ao final. Um detector como o Kamiokande absorve apenas pequena fração dos neutrinos que o atravessam a cada ano.

Os neutrinos vêm em três tipos, correspondentes a seus três parceiros com carga elétrica do Modelo Padrão: o elétron e seus parentes mais pesados, o múon e o tau. Um neutrino eletrônico, ao interagir com um núcleo atômico, pode produzir um elétron; um neutrino muônico produz um múon; um neutrino tauônico, um tau. Os físicos sempre supuseram que tais partículas não têm massa. Mas, se os neutrinos podem mudar de tipo, a teoria quântica indica que eles provavelmente

têm massa. E, nesse caso, essas partículas etéreas podem pesar mais do que todas as estrelas do Universo.

Armadilha Ampliada

COMO COSTUMA ACONTECER NA FÍSICA de partículas, era preciso construir um aparelho maior para ter sucesso. O Super-Kamiokande, ou Super-K, tem o mesmo design básico do Kamiokande numa escala dez vezes maior *(ver ilustração nas páginas anteriores)*. Um grupo de detectores de luz é apontado para o centro de 50 mil toneladas de água, cujos prótons podem ser divididos ou atingidos por um neutrino. Em ambos os casos, a reação cria partículas que são observadas por meio de um *flash* azul, a chamada luz Cherenkov, descoberta por Pavel A. Cherenkov em 1934.

Assim como um avião que voa mais rápido do que a velocidade do som produz uma onda de choque sonora, uma partícula carregada eletricamente (como um elétron ou um múon) emite luz Cherenkov quando excede a velocidade da luz no meio em que se locomove. Esse movimento não viola a teoria da relatividade de Einstein, segundo a qual a maior velocidade possível no Universo é c , correspondente à da luz no vácuo. Na água, a luz se propaga 25% mais devagar do que c , mas outras partículas altamente energéticas ainda podem viajar à velocidade máxima. A luz Cherenkov é emitida em um cone ao longo do trajeto de tais partículas.

No Super-K, a partícula carregada geralmente viaja apenas alguns metros, e o cone de Cherenkov projeta um anel de luz sobre as paredes de detectores de fótons. O tamanho, a forma e a intensidade do anel revelam as propriedades da partícula carregada, que por sua vez nos dão informações sobre o neutrino que a produziu. Distinguimos os padrões de Cherenkov dos elétrons dos de múons: os primeiros geram uma chuva de partículas, criando um anel indistinto totalmente diferente do círculo nítido de um múon.

O aparelho, contudo, não identifica com facilidade os neutrinos tauônicos. Essas partículas só interagem com um núcleo se tiverem energia suficiente. O múon é cerca de 200 vezes mais pesado que o elétron; o tau, cerca de 3.500 vezes. A massa do múon está ao alcance da energia dos neutrinos atmosféricos, mas apenas uma pequena fração deles está nas energias do tau. Assim, muitos neutrinos tauônicos atravessarão o Super-K sem ser detectados.

OS AUTORES

EDWARD KEARNS, TAKAAKI KAJITA e YOJI TOTSUKA são membros do projeto Super-Kamiokande. Kearns, professor de física da Universidade de Boston, e Kajita, professor de física da Universidade de Tóquio, lideram a equipe que estuda a desintegração do próton e os neutrinos atmosféricos a partir dos dados do detector. Totsuka foi nomeado diretor do KEK, laboratório nacional de física de partículas do Japão, depois de atuar como porta-voz do Super-K desde a concepção do projeto.

INSTITUTO DE PESQUISA DE RAIOS CÔSMICOS (ICRR), UNIVERSIDADE DE TÓQUIO.

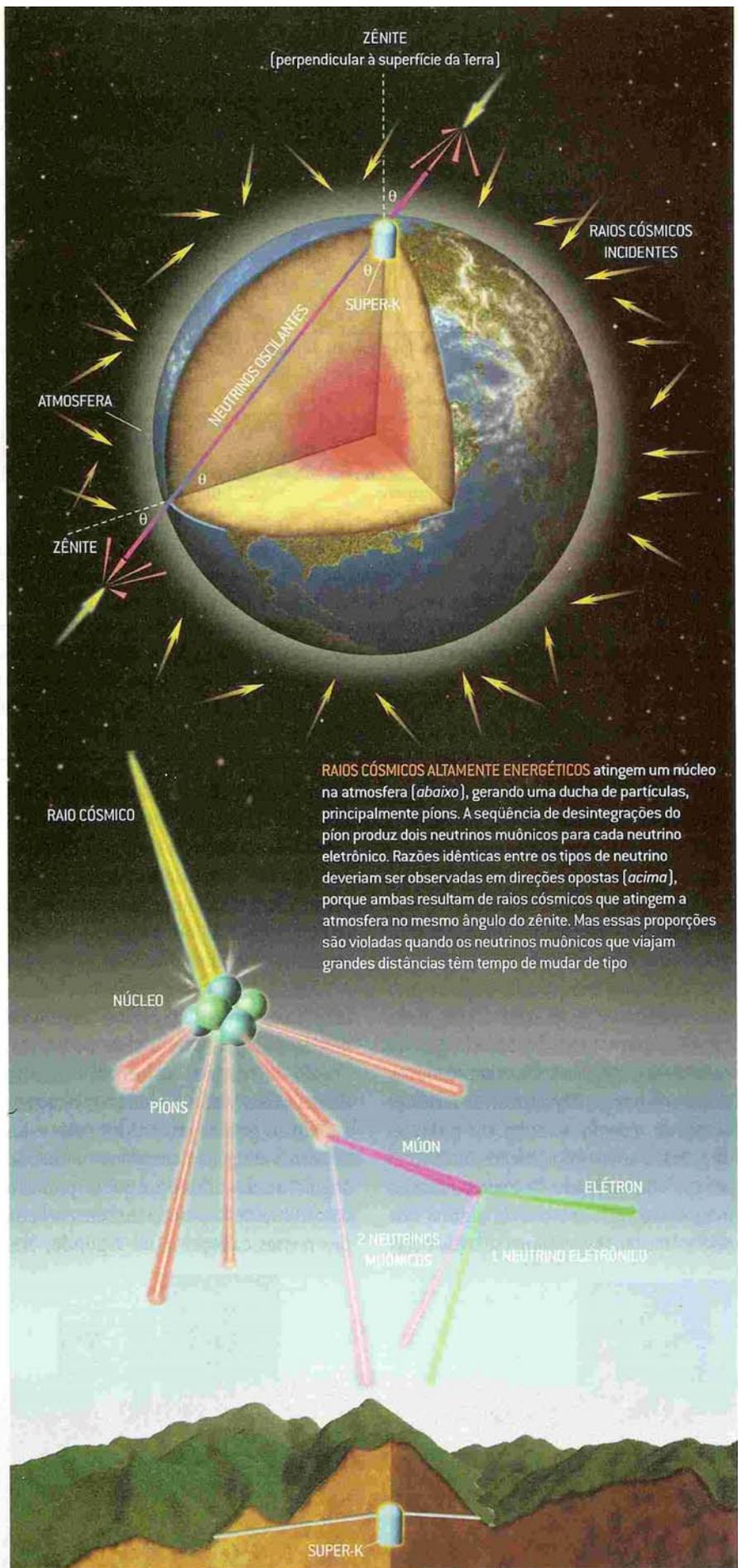
Uma das perguntas mais básicas que os pesquisadores tentam responder é: "Quantos?". Construímos um belo detector para estudar neutrinos, e a primeira tarefa é simplesmente contar quantos deles vemos. A pergunta seguinte é: "Quantos esperávamos?". Para respondê-la, precisamos entender como os neutrinos são produzidos.

O Super-K monitora os neutrinos atmosféricos, que nascem no jato de partículas criadas quando um raio cósmico atinge o alto de nossa atmosfera. As descargas que chegam (os chamados raios cósmicos primários) são geralmente prótons, com alguns núcleos pesados como hélio ou ferro. Cada colisão gera uma chuva de partículas secundárias, geralmente píons e múons, cuja desintegração durante seus curtos vôos pelo ar cria neutrinos. Sabemos quantos raios cósmicos aproximadamente atingem a atmosfera a cada segundo, e também quantos píons e múons são produzidos em cada colisão. Assim, sabemos quantos neutrinos esperar.

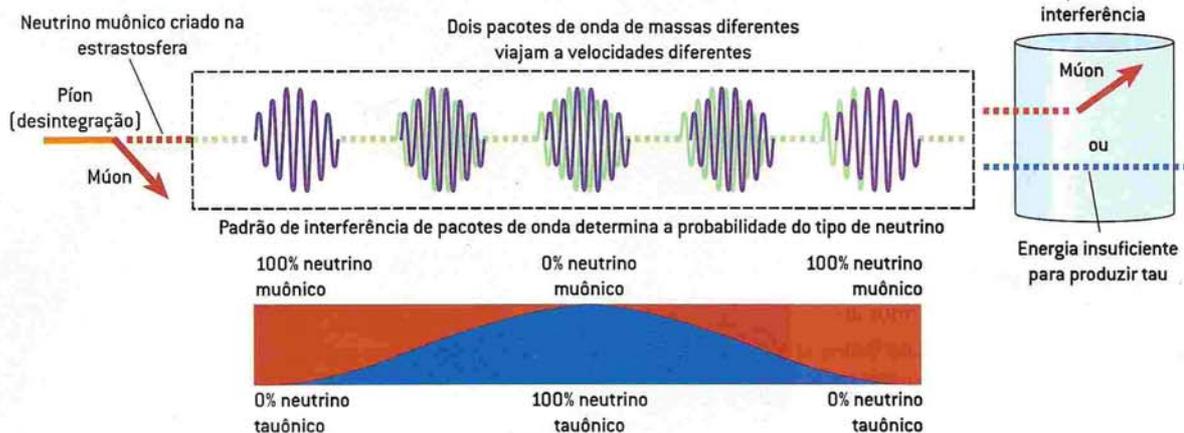
Truques com Razões

INFELIZMENTE, ESSA ESTIMATIVA tem só 75% de exatidão. Por isso, lançamos mão de um truque simples: freqüentemente a razão entre duas quantidades pode ser melhor determinada do que qualquer quantidade isolada. Para o Super-K, a chave é a desintegração seqüencial de um pión em um múon e um neutrino muônico, seguida pela do múon em um elétron, um neutrino eletrônico e outro neutrino muônico. Independentemente de quantos raios cósmicos atinjam a atmosfera da Terra, ou quantos píons eles produzam, deve haver cerca de dois neutrinos muônicos para cada neutrino eletrônico. O cálculo é mais complicado do que isso, mas a razão final prevista tem precisão de 95%.

Depois de contar neutrinos por mais de dois anos, a equipe do Super-K descobriu que a proporção entre neutrinos muônicos e neutrinos eletrônicos é de cerca de 1,3 para 1, em vez do esperado 2 para 1. Mesmo se forçarmos ao extremo nossas hipóteses



COMO AS ONDAS QUÂNTICAS FAZEM UM NEUTRINO OSCILAR



QUANDO UM PÍON SE DESINTEGRA (acima, à esquerda), um neutrino é produzido. Descrito pela mecânica quântica, o neutrino é aparentemente uma superposição de dois pacotes de onda de massas diferentes (roxo e verde). Os pacotes se propagam com diferentes velocidades, sendo que o mais leve passa à frente do mais pesado. Enquanto isso a onda interfere e o padrão de interferência controla qual tipo de neutrino – múon (vermelho) ou tau (azul) – é mais detectável em qualquer ponto do caminho (abaixo). Como acontece com todos os efeitos quânticos, este é um jogo de azar,

em que as chances favorecem mais claramente um neutrino muônico perto de onde ele é produzido. Mas as probabilidades oscilam aqui e ali, favorecendo o neutrino tauônico a uma certa distância e retomando ao neutrino muônico um pouco mais adiante. Quando os neutrinos finalmente interagem no detector (acima, à direita), o dado quântico é jogado. Se o resultado é um neutrino muônico, um múon é produzido. Se o acaso favorecer o neutrino tauônico e ele não tiver energia suficiente para criar uma partícula tau, o Super-K não detecta nada. —E.K., T.K. e Y.T.

LAURIE GRACE

sobre o fluxo de neutrinos, como eles interagem com os núcleos e como os detectores respondem, não temos como explicar essa razão – a menos que os neutrinos estejam mudando de um tipo para outro.

Podemos brincar novamente com o truque das razões novamente para testar essa conclusão inesperada. A pista para nossa segunda proporção é perguntar quantos neutrinos devem chegar de cada direção possível. Os raios cósmicos primários atingem a atmosfera terrestre quase da mesma maneira em todas as direções, e apenas dois efeitos interferem em sua uniformidade. Primeiro, o campo magnético terrestre desvia alguns dos raios cósmicos, especialmente os de baixa

energia, alterando o padrão das direções de chegada. Depois, os raios cósmicos que deslizam pela tangente da Terra produzem uma chuva de neutrinos que não penetra profundamente na atmosfera, e eles podem se desenvolver de forma diferente dos que mergulham diretamente nela.

Mas a geometria nos salva: ao “olharmos” para o céu em algum ângulo da vertical e depois para o chão no mesmo ângulo, deveríamos “ver” o mesmo número de neutrinos vindo de todas as direções. Ambos os grupos produzidos pelos raios cósmicos atingem a atmosfera no mesmo ângulo; a única diferença é que no primeiro caso as colisões aconteceram bem em cima das nossas cabeças e, no segundo, elas

ocorreram do outro lado do mundo. Para nos aproveitarmos desse fato, selecionamos neutrinos com energia suficientemente alta (de forma que seus raios cósmicos não tenham sido desviados pelo campo magnético terrestre) e então dividimos o número de neutrinos que sobem pelo número dos que descem. Essa razão deve ser exatamente 1 se nenhum dos neutrinos mudar de tipo.

Observamos números iguais de neutrinos eletrônicos altamente energéticos subindo e descendo, como esperado, mas os neutrinos muônicos ascendentes correspondem a apenas metade dos descendentes. Essa descoberta é a segunda indicação de que os neutrinos mudam de identidade. Além disso, o fato nos dá uma pista sobre a

1930



Wolfgang Pauli reabilita a conservação da energia ao propor que uma partícula invisível rouba a energia que sobra de algumas desintegrações radioativas

1933

Enrico Fermi formula a teoria da desintegração beta incorporando a partícula Pauli, agora chamada de neutrino

1956



Frederick Reines (centro) e Clyde Cowen detectam neutrinos pela primeira vez, usando o reator nuclear do rio Savannah

1962

Em Brookhaven, o primeiro acelerador de feixe de neutrinos prova a distinção entre neutrinos eletrônicos e neutrinos muônicos

1966



Raymond Davis Jr. é o primeiro a medir neutrinos do Sol, usando 600 toneladas de líquido de limpeza em uma mina de Homestake, Dakota do Sul



Os neutrinos podem ter massa aproximadamente igual à de todas as estrelas juntas

somente metade deles pode ser detectada como muônica. A outra metade atravessa o Super-K como os indetectáveis neutrinos tauônicos.

Essa descrição é apenas uma imagem aproximada, mas os argumentos baseados na razão entre os tipos e na taxa de ocorrência sobe/desce é tão convincente que a oscilação dos neutrinos é agora amplamente aceita como a mais provável explicação de nossos dados. Temos também estudos mais detalhados sobre como o número de neutrinos muônicos varia de acordo com a energia do neutrino e o ângulo de chegada. Comparamos o número medido com o que é esperado para uma ampla gama de possíveis cenários de oscilação (incluindo não-oscilações).

Com cerca de 5 mil ocorrências em nossos dois anos de experimentos, somos capazes de eliminar qualquer possibilidade de que os números irregulares de neutrinos atmosféricos se devam apenas ao acaso. Mas ainda é importante confirmar o efeito tentando observar a mesma oscilação por outros experimentos ou técnicas.

Evidência Adicional

OUTRAS CONFIRMAÇÕES VIERAM com o estudo das colisões dos neutrinos atmosféricos com núcleos na rocha perto de nosso detector. De novo, os neutrinos eletrônicos produzem elétrons e duchas de partículas, mas eles são absorvidos pela rocha e nunca atingem a caverna do Super-K. Os neutrinos muônicos altamente energéticos produzem múons também energéticos, que atravessam muitos metros de rocha e entram em nosso detector. Contamos cada múon dos neutrinos que sobem — os que descem são mascarados pelo ruído de múons de raios cósmicos que penetram no monte Ikenoyama.

Conseguimos contar os múons ascendentes em trajetórias que variam de vertical a quase horizontal. Esses caminhos

correspondem às distâncias viajadas pelos neutrinos (de sua produção na atmosfera à criação do múon perto do Super-K) e podem variar de 500 km (a distância até as fronteiras da atmosfera, quanto observada horizontalmente) a 13 mil km (o diâmetro da Terra). Descobrimos que o número de neutrinos muônicos de baixa energia que viajam grandes distâncias é menor do que o dos altamente energéticos que atravessam distâncias curtas. Esse comportamento é exatamente o que esperamos das oscilações, e análises cuidadosas produzem parâmetros similares aos de nosso primeiro estudo.

Se considerarmos apenas os três neutrinos conhecidos, nossos dados mostram que os neutrinos muônicos estão se transformando em tauônicos. A teoria quântica diz que a oscilação quase certamente acontece porque essas partículas têm massa — embora essa idéia tenha sido descartada por mais de 70 anos (*ver quadro na pág. 75*).

Infelizmente, a teoria quântica também limita nosso experimento a medir apenas a diferença em massa ao quadrado entre os dois componentes dos neutrinos, porque é isso o que determina a oscilação do comprimento de onda. Os dados do Super-K dão uma diferença de massa ao quadrado entre 0,001 e 0,01 elétron-volt (eV) ao quadrado. Dado o padrão de massas das outras partículas conhecidas, é provável que um neutrino seja muito mais leve do que o outro, o que significaria que a massa do neutrino mais pesado está na escala de 0,03 a 0,1 eV. Quais são as implicações disso?

Em primeiro lugar, dar massa aos

neutrinos não destrói o Modelo Padrão. A diferença entre os estados das massas que produzem cada neutrino requer a introdução de um conjunto dos chamados parâmetros de mistura. Uma pequena quantidade de tal mistura tem sido observada entre os quarks, mas nossos dados sugerem que os neutrinos precisam de um grau muito maior de mistura — uma informação importante, que qualquer nova teoria bem-sucedida deve acomodar.

Em segundo lugar, 0,05 eV ainda está muito perto de zero quando o valor é comparado com o de outras partículas (a mais leve de todas é o elétron, com massa de 511 mil eV). Então, a crença em neutrinos sem massa, sustentada por tanto tempo, é compreensível. Mas os teóricos que querem construir uma Teoria da Grande Unificação, capaz de combinar todas as forças, exceto a gravidade, também perceberam essa relativa leveza dos neu-



EXPERIMENTOS NOS EUA e no Japão pretendem detectar feixes de neutrinos, lançados de aceleradores de partículas, a centenas de quilômetros de sua fonte. Os experimentos devem confirmar o fenômeno da oscilação e medir precisamente as constantes da Natureza que o controlam

trinos. Frequentemente eles empregam um dispositivo matemático chamado de mecanismo-balança, que prevê que um neutrino levíssimo, mas não de massa nula, é natural.

Outra implicação desses dados é que os neutrinos devem ser considerados na contabilidade da massa do Universo. Já faz algum tempo que os astrônomos tentam tabular quanta massa corresponde à matéria luminosa, como as estrelas, e à matéria comum de difícil visibilidade, como as anãs marrons ou o gás difuso. Essa massa também pode ser medida indiretamente, por meio do movimento orbital das galáxias e da taxa de expansão do Universo. A contagem direta é menor do que as medições indiretas por um fator de 20. A massa dos neutrinos sugerida por nossos resultados é muito pequena para resolver o mistério sozinha. Entretanto, os neutrinos criados durante o Big Bang permeiam o espaço e podem ter uma massa aproximadamente igual à de todas as estrelas. Eles seriam capazes de afetar a formação das grandes estruturas astronômicas, como os grupos de galáxias.

Finalmente, nossos dados têm implicações imediatas em dois novos experimentos. Baseados em indicações anteriores de detectores menores, muitos físicos decidiram parar de usar apenas os gratuitos, porém incontáveis, neutrinos dos raios cósmicos, e agora os estão criando com a ajuda de aceleradores de partículas altamente energéticos. Mesmo assim, os neutrinos devem viajar distâncias enormes para que o efeito da oscilação seja observado. Para conseguir isso, os feixes de neutrinos são apontados para um detector a centenas de quilômetros dos aceleradores. Um desses detectores, Minos, está sendo construído em uma mina em Soudan, estado de Minnesota, para estudar neutrinos enviados do acelerador do Fermilab, perto de Batavia, Illinois, para os arredores de Chicago, a 730 km de distância (ver mapa na pág. ao lado).

É claro que um bom detector de neutrinos atmosféricos é também um bom detector de neutrinos criados em acele-

OUTROS QUEBRA-CABEÇAS, OUTRAS POSSIBILIDADES

OS FÍSICOS DE PARTÍCULAS têm buscado outras evidências da massa dos neutrinos. Por mais de 30 anos, os cientistas vêm capturando neutrinos eletrônicos gerados pela fusão nuclear no interior do Sol. Esses experimentos sempre contam menos neutrinos do que o previsto pelos melhores modelos.

O Super-K também tem contado os neutrinos solares e encontrado apenas 50% do número esperado. Se essas partículas estão mudando de tipo, o déficit é compreensível, porque sob efeito de energias solares o Super-K responde ao neutrino tipo elétron e geralmente ignora os tipos múon e tau. Entretanto, o Observatório de Neutrinos de Sudbury (SNO), Canadá, que usa mil toneladas de água pesada, conseguiu comprovar essa mudança recentemente. A água pesada permite ao SNO medir o número total de neutrinos (elétron, múon e tau), assim como o número de neutrinos eletrônicos isolados, e isso mostra que o total é muito maior.

Parece que a diferença de massas associada aos neutrinos solares é muito menor que a dos neutrinos atmosféricos. Isso corrobora o cenário no qual os três tipos de neutrino são espalhados em três massas diferentes. Mas esse cenário não permite a oscilação dos neutrinos, sugerindo massas muito maiores, detectadas no Laboratório Nacional de Los Alamos. Algumas explicações exóticas esperam para ser confirmadas enquanto o Fermilab verifica essa assinatura.

Os físicos também estão testando teorias sobre a transformação dos neutrinos solares. Em uma caverna da mesma mina que abriga o Super-K, foi construído um detector que usa mil toneladas de óleo mineral, misturado a uma substância que emite luz em resposta às reações com neutrinos. Esse detector conta neutrinos eletrônicos de mais de 20 reatores nucleares japoneses, a uma distância entre 80 e 400 km dali. Os resultados são comparados com um modelo preciso de quantos neutrinos são esperados de cada reator. Esse experimento deve mostrar em detalhes a física de partículas dos neutrinos solares.

No geral, o panorama das pesquisas com neutrinos está só começando a ficar mais definido. Informações mais claras deverão vir de projetos mais ambiciosos. Até o fim desta década, o Super-K será exposto a um feixe de neutrinos de um acelerador ainda mais intenso, que está sendo construído perto da costa japonesa do Pacífico. O objetivo é verificar se os neutrinos muônicos se transformam em tauônicos e eletrônicos em uma proporção condizente com nossas novas projeções. Medições posteriores poderão também revelar o papel dos neutrinos no desequilíbrio entre matéria e antimatéria no Universo. Ou talvez encontremos outros quebra-cabeças no caminho.

—E.K., T.K. e Y.T.

radores. Assim, no Japão, temos usado o Super-K para monitorar um feixe criado no acelerador do laboratório do KEK, a 250 km de distância. Diferentemente dos neutrinos atmosféricos, esse feixe pode ser ligado e desligado e conta com energia e direção bem definidas. Mais importante ainda, instalamos um detector similar para o Super-K perto da origem do feixe, para caracterizar os neutrinos muônicos antes de eles oscilarem. Em essência, usamos

(mais uma vez) a razão entre as medições feitas nas proximidades da fonte e as realizadas longe dela para cancelar a incerteza e tomar o efeito mais confiável. Desde 1999, partículas originárias do primeiro feixe artificial de neutrinos têm passado sob as montanhas do Japão, e as 50 mil toneladas do Super-K conseguem capturar um pequeno punhado delas. O próximo capítulo dessa história é determinar exatamente quantos neutrinos estão sendo capturados. 

PARA CONHECER MAIS

The Search for Proton Decay. J. M. LoSecco, Frederick Reines e Daniel Sinclair em *Scientific American*, vol. 252, nº 6, págs. 54-62; junho de 1985.

The Elusive Neutrino: A Subatomic Detective Story. Nickolas Solomey. Scientific American Library, W. H. Freeman and Company, 1997.

Site oficial do Super-Kamiokande: www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/

Site do Experimento de Oscilação de Neutrinos a Longa Distância K2K: neutrino.kek.jp/

Super-Kamiokande no site da Universidade de Boston: hep.bu.edu/~superk