

**D**os 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 fugidío 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. Neste folder, pretendemos mostrar ao leitor por que essas partículas não param de nos surpreender.

*João dos Anjos*  
COORDENADOR DO PROJETO DESAFIOS DA FÍSICA

PRESIDENTE DA REPÚBLICA  
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Sergio Machado Rezende

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA  
Avílio Antônio Franco

DIRETOR DO CBPF  
Ricardo Magnus Osório Galvão

REDAÇÃO E EDIÇÃO CIENTÍFICA  
Marcelo Moraes Guzzo  
(Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas)

APOIO FINANCEIRO  
Vitae

EDIÇÃO DE TEXTO  
Cássio Leite Vieira

PROJETO GRÁFICO  
Ampersand Comunicação Gráfica  
(www.amperdesign.com.br)

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290-180 - Rio de Janeiro - RJ  
Tel: (0xx21) 2141-7100  
Fax: (0xx21) 2141-7400  
Internet: <http://www.cbpf.br>

Agradecimentos: Ernesto Kemp (Instituto de Física Gleb Wataghin/  
Universidade Estadual de Campinas)

Para receber gratuitamente pelo correio um exemplar deste folder, envie pedido com seu nome e endereço para [ncs\\_cbpf@cbpf.br](mailto:ncs_cbpf@cbpf.br). Este e outros folders da série *Desafios da Física*, bem como a revista *CBPF – Na Vanguarda da Pesquisa*, estão disponíveis em formato PDF em <http://www.cbpf.br/Publicacoes.html>

Vitae não compartilha necessariamente dos conceitos e opiniões expressos neste trabalho, que são da exclusiva responsabilidade dos autores.



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



# Neutrinos

as misteriosas  
partículas-fantasma



**CBPF**

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

2006

## Sumário

### POR TODA PARTE

**Chuva invisível**  
**A mais 'anti-social'**

### COMO TUDO COMEÇOU

**Filão perdido**  
**Pilar sagrado**  
**Senhoras e senhores radioativos...**  
**Muito 'gordo'**  
**Pequeno nêutron**  
**Três tipos**

### A PRINCIPAL FONTE

**60 bilhões por segundo**  
**Efeito Urca**  
**Chances mínimas**  
**Disparidade confirmada**  
**Explosão cósmica**

### O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES

**Teoria versus experimento**  
**Mudança de sabor**  
**No meio dos reatores**  
**Qual o mecanismo?**

### REDES DE CAPTURA

**Luz tênue**  
**Gigantesco colar de pérolas**  
**Cubo de gelo**  
**Angra dos Reis**  
**Minos**

### DESAFIOS

**Parcela da matéria escura**  
**Mesma partícula?**  
**Aonde foi a antimatéria?**

### Sugestões para leitura

**CLOSE, F.** *The cosmic onion* (American Institute of Physics, Nova York, 1983)  
**FUNCHAL, R. Z.** 'Neutrino do tau é observado pela primeira vez' in *Ciência Hoje* (vol. 28, n. 164, pp. 52-53, setembro de 2000)  
**FUNCHAL, R. Z.** 'Neutrinos: de Poltergeister a sondas do universo' in *Revista USP* n. 62 (junho-agosto de 2004)  
**GUZZO, M. e NATALE, A. A.** 'Neutrinos: as partículas fantasmas' in *Universo sem mistério – uma visão descomplicada da física contemporânea: do Big Bang às partículas* (Vieira & Lente Casa Editorial, Rio de Janeiro, 2003)

**GUZZO, M. e NATALE, A. A.** 'Neutrinos: partículas onipresentes e misteriosas' in *Ciência Hoje* (vol. 25, n. 147, março de 1999).  
**GUZZO, M. e REGGIANI, N.** 'Compreendendo o cosmo' in *Ciência Hoje* (vol. 32, n. 189, pp. 8-10, dezembro de 2002)  
**GUZZO, M.** 'Neutrinos do cosmo' in *Com Ciência* (especial Raios Cósmicos, n. 43, maio de 2003). Disponível em <http://www.comciencia.br/reportagens/framereport.htm>  
**NATALE, A. A.** 'Observatório detecta oscilação de neutrinos solares' in *Ciência Hoje* (vol. 29, n. 174, pp. 10-11, agosto de 2001)  
**SUTTON, C.** *Spaceship neutrino* (Cambridge University Press, Cambridge, 1992)  
**WEINBERG, S.** *Os três primeiros minutos* (Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980)

Neutrinos  
as misteriosas partículas-fantasma

## POR TODA PARTE

**CHUVA INVISÍVEL** • Até o final da leitura deste folder, cada um de nós terá emitido cerca de 10 milhões de neutrinos, devido a 20 mg de um elemento radioativo, o potássio 40 ( $^{40}\text{K}$ ), 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 à desintegração beta, um tipo de radioatividade emitida por certos núcleos atômicos. Notava-se algo de estranho nesse fenômeno, no qual um elétron é 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. Falta 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 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: "Caros 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 partícula X, ela seria neutra (sem carga elétrica), possivelmente sem massa e responsável pelo filão de energia faltante na desintegração beta.

**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 a desintegração 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 a desintegração 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 desintegração beta: potássio decaindo em cálcio ( $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \bar{\nu}$ ); cobre, em zinco ( $^{64}\text{Cu}_{29} \rightarrow ^{64}\text{Zn}_{30} + e + \bar{\nu}$ ); trítio em hélio ( $^3\text{H}_1 \rightarrow ^3\text{He}_2 + e + \bar{\nu}$ ).

**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 ( $\mu$ ) e o tau ( $\tau$ ). Em 1956, foi detectado o primeiro tipo, o chamado neutrino do elétron ( $\nu_e$ ), 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 ( $\nu_\mu$ ). 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 ( $\nu_\tau$ ).

## A PRINCIPAL FONTE

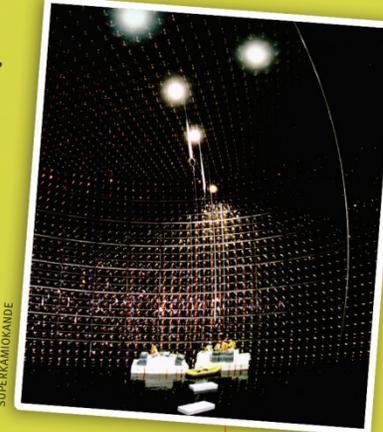
**60 BILHÕES POR SEGUNDO** • A maior parte dos neutrinos que nos atinge provém do Sol. A reação nuclear que produz esses neutrinos é a mesma que produz luz e calor nas estrelas, baseada principalmente na fusão de núcleos de hidrogênio para gerar os de hélio. Para cada dois neutrinos produzidos no Sol, 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 atravessado, 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 através 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 supermassivas 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 neutrinos 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 615 toneladas de moléculas cuja composição contém cloro ( $\text{C}_2\text{Cl}_2$ ). 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 ocorrer essas reações eram mínimas, mas não nulas. Foi nisso que Davis apostou. Ao longo dos 30 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, um experimento semelhante foi construído por Koshiba e sua 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 tan-



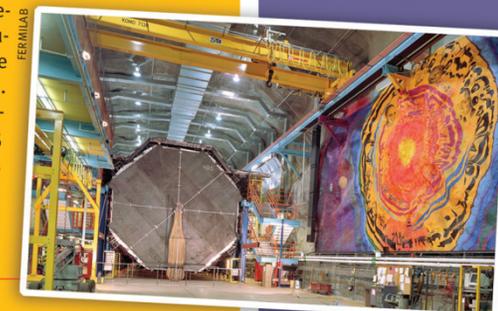
SUPERMAMONDE

**EXPLOÇÃO CÓSMICA** • O Kamiokande (sigla, em inglês, para Experimento Kamioka de Decaimento de Núcleons) inesperadamente conseguiu um feito espetacular. Em 23 de fevereiro de 1987, capturou os neutrinos emitidos por uma supernova, tipo de estrela com pelo menos oito vezes a massa do Sol que explode no final da vida. 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 anos-luz equivale a 9,5 trilhões de km), tenha emitido um número astronômico de neutrinos ( $10^{38}$ , ou seja, 1 seguido de 38 zeros), sendo que dez 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.



**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. 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 nas últimas três décadas 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, bem como daqueles gerados em reatores nucleares, poderá completar esse conhecimento. Além disso, experimentos como o Angra v e o Minos poderão indiretamente ajudar a responder um dos maiores mistérios da ciência: se matéria e antimatéria foram criadas na mesma proporção no início do universo, então por que esta última é tão rara hoje em dia?



FERMILAB

## O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES

**TEORIA VERSUS EXPERIMENTO** • Cálculos indicavam quantos neutrinos deveriam chegar à Terra vindos do Sol. Mas, por cerca de 30 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.

**MUDANÇA DE SABOR** • Experimentos anteriores haviam capturado 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 conversão) 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 20 reatores nucleares a aproximadamente 180 km 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; 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 outras, que produzem uma luz muito tênue. Esta, quando captada por sensores (fotomultiplicadoras, cintiladores etc.), revela que tipo de reação ocorreu.

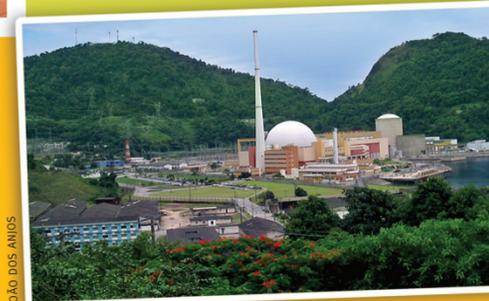
**GIGANTESCO COLAR DE PÉROLAS** • Alguns neutrinos com altas energias que chegam à Terra estão sendo observados em detectores como o Amanda (sigla, em inglês, para Rede de Detectores

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 1,5 km e 2 km, 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.

**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 80 cabos com cerca de 60 sensores cada. Total: 4,8 mil fotomultiplicadoras enterradas no gelo, ocupando um volume subterrâ-



AMANDA



JOÃO DOS ANJOS

no 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 v (lê-se 'Angra Ni') vai medir o fluxo de neutrinos nas proximidades dos reatores e compará-lo com o fluxo a cerca de 1,5 km 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 aventura da descoberta das propriedades dessa partícula fascinante. Assim como o Angra v, vários outros experimentos semelhantes estão sendo projetados e construídos ao redor do mundo.

**MINOS** • O Brasil também tem participação no Minos (sigla, em inglês, para Busca pela Oscilação de Neutrinos com o Injetor Principal), cujo obje-

tivo 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 Sudan, 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.