

FÍSICA



# O mistério da superpartícula

## Pesquisadores debatem se um buraco negro primordial pode ter produzido o neutrino mais energético detectado na Terra

IGOR ZOLNERKEVIC

**N**a noite de 13 de fevereiro de 2023, vindo do espaço, um neutrino, uma partícula subatômica sem carga elétrica e extremamente leve, chegou à Terra em um voo rasante e mergulhou no mar Mediterrâneo. Viajando quase à velocidade da luz, ele seguiu em linha reta até colidir com um núcleo atômico da água do mar. O choque produziu um múon – partícula semelhante a um elétron mais pesado – que atravessou um dos dois conjuntos de detectores submarinos do Cubic Kilometer Neutrino Telescope (KM<sub>3</sub>NeT), localizado a 3.450 metros (m) de profundidade, próximo à ilha da Sicília, no sul da Itália. Em menos de 2 microssegundos, a passagem do múon provocou um rastro de luz tão intenso que ativou mais de um quarto dos 12 mil sensores do instrumento.

Após um longo processo de análise, a colaboração internacional de pesquisadores do KM<sub>3</sub>NeT publicou, dois anos depois, em fevereiro de 2025, um artigo na revista científica *Nature* com suas conclusões: o neutrino atingira a energia mais alta já observada nesse tipo de partícula, algo entre 72 petaeletronvolts (PeV, equivalente a  $10^{15}$  elétron-volts) e 6,2 exaeletronvolts (EeV,  $10^{18}$  elétron-volts). O valor se situa entre cerca de 100 mil e 1 milhão de trilhões de vezes a energia de uma partícula de luz (fóton) no comprimento de onda visível.

A origem desse superneutrino, batizado de KM<sub>3</sub>-230213A, permanece um total mistério. Recentemente, alguns pesquisadores levantaram a possibilidade de que a explosão final de pequenos buracos negros primordiais, nascidos no início do Universo e vagando pelo Sistema Solar, poderia ser a fonte desse e de outros neutrinos ultrae-

nergéticos. A hipótese ganhou destaque em um artigo assinado por físicos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), dos Estados Unidos, no segundo semestre do ano passado na principal revista científica de física, a *Physical Review Letters* (PRL). Mas, no início deste ano, uma equipe liderada pela física Renata Zukanovich Funchal, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP), argumentou no mesmo periódico que a proposta é muito improvável, ao menos para o caso específico do KM<sub>3</sub>-230213A. “Diante dos limites impostos pelos dados do experimento, é muito improvável que o neutrino do KM<sub>3</sub>NeT tenha vindo de um buraco negro primordial”, afirma Funchal, especialista nesse tipo de partícula e estudiosa de fenômenos além da física padrão, teoria dominante que descreve as interações entre as partículas e as forças fundamentais, com exceção da gravidade.

Um dos principais motivos para a construção do KM<sub>3</sub>NeT e do IceCube Neutrino Observatory – outro telescópio de neutrinos, com uma rede de 5.160 detectores instalados sob 1 bilhão de toneladas de gelo, próxima ao polo Sul, na Antártida – foi a busca pelos chamados neutrinos cosmogênicos. São os neutrinos criados quando prótons acelerados por jatos emitidos por buracos negros gigantes em galáxias distantes colidem com os fótons da radiação cósmica de fundo, um resquício da explosão que deu origem ao Universo, o Big Bang. De acordo com os modelos teóricos, essas partículas deveriam chegar à Terra, vindas de todas as partes do céu, com energias em torno de 100 PeV a 1 EeV. Entretanto, ao longo de 10 anos de operação do IceCube e 3 anos do KM<sub>3</sub>NeT, nenhum sinal de neutrino cosmogênico foi registrado.

Os 10 neutrinos mais energéticos detectados pelo IceCube chegaram no máximo a energias entre 1 PeV e 10 PeV. O KM3NeT não detectou absolutamente nada próximo disso – até o registro do extraordinário KM3-230213A.

**F**oi nesse contexto que o físico David Kaiser, do MIT, e sua aluna de doutorado Alexandra Klipfel propuseram que a existência de buracos negros primordiais poderia explicar o neutrino extremamente energético observado pelo KM3NeT. Buracos negros são corpos celestes de força gravitacional tão intensa que nem a luz consegue escapar.

Astrônomos já observaram dois tipos deles: os de massa estelar, criados pelo colapso gravitacional de estrelas gigantes, e os supermassivos no centro das galáxias, cuja origem ainda é debatida. Buracos negros primordiais seriam uma terceira categoria, formada por flutuações de densidade logo após o Big Bang. Até agora, nenhuma observação astronômica confirmou sua existência, mas também não a descartou.

Assim como todos os buracos negros, os primordiais deveriam encolher lentamente ao longo de bilhões de anos. Emitiriam partículas elementares de todos os tipos, incluindo prótons, fótons e neutrinos – um efeito previsto pelo físico britânico Stephen Hawking (1942-2018), em 1974. Para buracos negros estelares ou maiores, essa emissão é muito tênue e impossível de ser observada por telescópios. No entanto, a chamada radiação Hawking aumenta cada vez mais à medida que a massa do buraco negro diminui. Quando ela cai para cerca de 6 mil toneladas, o processo se torna extremamente violento: pro-

duz partículas cada vez mais energéticas até o buraco negro desaparecer em uma explosão final que dura 100 segundos.

Em seu artigo na *PRL*, Kaiser e Klipfel argumentaram que, se esses buracos negros primordiais constituírem grande parte da matéria escura, a maioria teria massas grandes demais para produzir sinais observáveis. Porém uma pequena subpopulação deles teria massas abaixo da média e estaria próxima de explodir. Segundo os cálculos da dupla, a distribuição esperada desses buracos negros menores na Via Láctea poderia fazer com que alguns deles atravessassem a nuvem de Oort – a região mais afastada do Sistema Solar, composta de cometas e outros corpos gelados –, onde sua explosão emitiria neutrinos como os observados pelo KM3NeT e IceCube. Eles também calcularam que, para um único neutrino com a energia do KM3-230213A atingir qualquer parte da Terra, um buraco negro primordial precisaria explodir no mínimo na porção mais interna da nuvem de Oort, a cerca de 2 mil unidades astronômicas (UA). A distância média entre a Terra e o Sol equivale a uma UA. A chance de tal explosão ocorrer uma vez a cada 14 anos seria de 8%, de acordo com o estudo.

A hipótese levantada pelos pesquisadores do MIT não é consensual. “Quando li o trabalho, logo vi que esse não deveria ser o caso do KM3-230213A”, conta Funchal. Ela resolveu examinar a fundo a questão com o auxílio de um time de colaboradores. Recrutou primeiramente a física Lua Airoidi, aluna de mestrado sob sua orientação, que estuda sinais de buracos negros primordiais em detectores de neutrinos. Como buracos negros primordiais não são o seu forte, Funchal convidou um especialista no assunto, seu ex-aluno

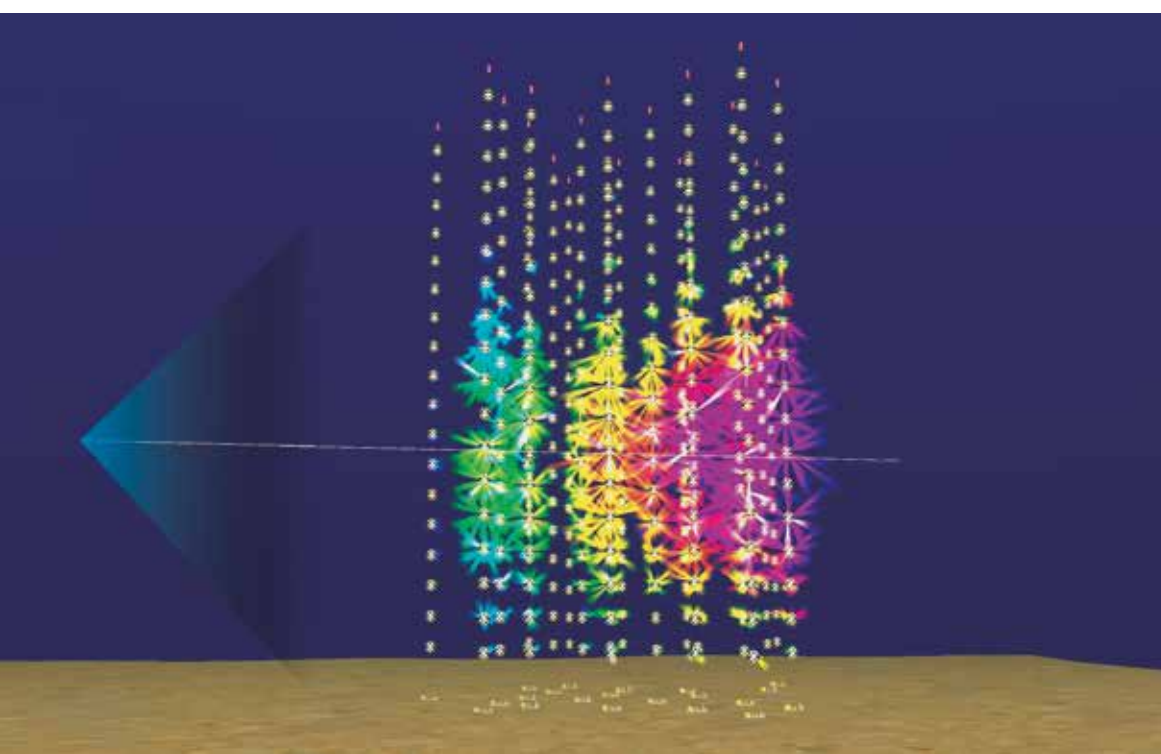


Figura mostra o caminho do neutrino superenergético, da direita para a esquerda, ao ser detectado pelos módulos do KM3NeT



de doutorado, o físico Yuber Perez-Gonzalez, da Universidade de Madri, Espanha, para coorientar Airoidi. Em seguida, mais dois pesquisadores se interessaram pelo projeto: seu ex-aluno de doutorado, o físico Gustavo Alves, atualmente no Fermilab, nos Estados Unidos, e o físico Gabriel Salla, hoje no Deutsches Elektronen-Synchrotron (Desy), na Alemanha.

**D**iferentemente do estudo do MIT, a equipe de Funchal não analisou a probabilidade de um neutrino atingir a Terra como um todo, mas de ele chegar e ser detectado em um ponto específico do planeta, no caso, os detectores do KM<sub>3</sub>NeT. Para que isso pudesse ocorrer, o time de físicos concluiu que o buraco negro teria de estar muito mais próximo da Terra, a uma distância entre 2 e 12 UA, antes de Júpiter e um pouco além da órbita de Saturno. Também teria de ter emitido uma grande quantidade de neutrinos menos energéticos, fótons, raios gama e raios cósmicos em 12 fevereiro de 2023, véspera do dia em que o detector perto da costa da Sicília registrou o superneutrino. De acordo com esse cenário, o KM<sub>3</sub>NeT deveria ter registrado cerca de 150 neutrinos com energias um pouco mais baixas, horas antes da detecção do KM<sub>3</sub>-230213A, e o IceCube deveria ter observado cerca de 300 neutrinos no instante da explosão final. Nessa data, porém, não houve registros inesperados de fótons e raios cósmicos em qualquer observatório do planeta. Para Funchal e colaboradores, todas essas ausências de detecção descartariam a hipótese de que o superneutrino tenha sido produzido por um buraco negro primordial.

“O trabalho deles e o nosso abordam questões distintas, porém complementares”, comenta Kaiser, do MIT, em entrevista a *Pesquisa FAPESP* por e-mail. “Como eles mostraram, se restringirmos a análise apenas ao detector KM<sub>3</sub>NeT, infere-se uma distância relativamente pequena entre o buraco negro que explodiu e a Terra. No entanto, se considerarmos a Terra inteira como a região-alvo do neutrino, a distância do buraco negro seria maior, na nuvem de Oort. Mas a probabilidade de detectar na Terra fótons energéticos produzidos em uma explosão ocorrida nessa região é muito pequena.”

Para o físico Orlando Peres, da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), que não participou de nenhum dos dois artigos, o trabalho dos brasileiros é mais amplo do que o dos colegas dos Estados Unidos por ter investigado a possibilidade de detecção de raios gama e outras partículas, além de neutrinos. Suas conclusões seriam, portanto, mais prováveis. “Observatórios de raios gama são muito mais precisos que os de neutrinos”, explica. “Se tivesse havido um sinal como previsto no artigo de Funchal, esse tipo de detector teria registrado.” Por enquanto, a única certeza é que o KM<sub>3</sub>-230213A foi produzido em um algum evento astrofísico transiente, em que partículas são emitidas por um breve período. De acordo com Peres, tanto o KM<sub>3</sub>NeT quanto o IceCube estão instalando novos detectores para medirem sinais ultraenergéticos com mais eficiência, na esperança de registrarem outro evento nos próximos anos parecido ao observado em 2023 na costa da Sicília. ●

O projeto e os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.