

Nesta montagem de imagens do Sol com cores falsas, as regiões que aparecem em branco, amarelo e laranja são, nessa ordem, as que mais emitiram raios gama no pico do último ciclo solar

ENERGIA CONCENTRADA

Em seu último período de atividade máxima, o Sol emitiu um excesso inesperado de raios gama de alta energia em seus polos

Marcos Pivetta

Por sua proximidade e importância para a manutenção da vida na Terra, o Sol é a estrela mais pesquisada pelos astrofísicos. Esse *status* de objeto de estudo preferencial não significa que há pouco a se descobrir sobre o astro. Ao contrário. Alguns tipos de pesquisa, como as de longo prazo, só podem ser realizados porque nosso planeta está, sempre, nas vizinhanças do Sol. Assim, é possível observá-lo de forma contínua e perceber detalhes que não podem ser conferidos em estrelas mais distantes.

Foi justamente essa particularidade que permitiu um achado recente. Artigo publicado pelo brasileiro Bruno Arsoli e a italiana Elena Orlando em fevereiro deste ano no *Astrophysical Journal*

relata que o Sol emitiu um excesso inesperado de raios gama de alta energia em seus polos. A maior concentração de radiação ocorreu durante seu último período mais ativo, o chamado máximo solar, em junho de 2014. Como a Terra, o Sol gira em torno de um eixo, cujas extremidades definem os polos. A rotação gera o campo magnético, de forma que os polos magnéticos coincidem com as pontas do eixo de rotação.

Segundo os autores do trabalho, o esperado era que, quando houvesse variações no nível das emissões de raios gama, tais flutuações se manifestassem com a mesma intensidade em todas as áreas do Sol, de forma mais ou menos homogênea – em vez de se concentrarem exageradamente nas zonas de alta latitude.

“Essa maior concentração de emissões de raios gama foi observada no momento em que ocorreu a inversão dos polos magnéticos do Sol”, explica Arsioli, autor principal do estudo. “Por isso, suspeitamos que a reconfiguração magnética esteja relacionada com a produção excessiva de radiação gama nos polos.” A troca faz com que o polo magnético do sul migre para o norte do disco solar e vice-versa. Tal inversão ocorre em média a cada onze anos, durante o máximo solar. Atualmente, Arsioli é pesquisador no Instituto de Astrofísica e Ciências Espaciais da Universidade de Lisboa, em Portugal, com financiamento do programa europeu Marie Curie.

Segundo Elena Orlando, da Universidade de Trieste, não há, por ora, uma explicação detalhada sobre como a inversão do polo magnético levaria ao excesso de emissão de raios gama nos extremos do disco solar. “Achamos que o campo magnético da estrela está de alguma forma envolvido nessa anomalia, mas não temos ainda uma explicação física para isso”, comenta Orlando, em entrevista a *Pesquisa FAPESP*. Arsioli iniciou o estudo com dados do Fermi em 2021, quando passou um ano associado ao grupo da italiana na Universidade de Trieste.

Inédito, o resultado foi obtido a partir da análise de dados referentes a 13 anos e meio de observação do Sol, entre agosto de 2008 e janeiro de 2022, pelo telescópio espacial Fermi. Operado pela Nasa (a agência espacial norte-americana), em colaboração com o Departamento de Energia dos Estados Unidos e parceiros europeus, o Fermi é dedicado a registrar emissões em frequências da radiação gama, a porção mais energética do espectro eletromagnético. Recentemente foi usado também para estudar uma misteriosa explosão de raios gama, a segunda mais intensa que se observou no espaço, ocasionada provavelmente pela rara fusão de duas estrelas de nêutrons (*ver reportagem na página 62*).

O trabalho de análise das emissões do Sol foi feito em etapas. Primeiramente, Arsioli e Orlando dividiram os dados de quase 14 anos de observa-

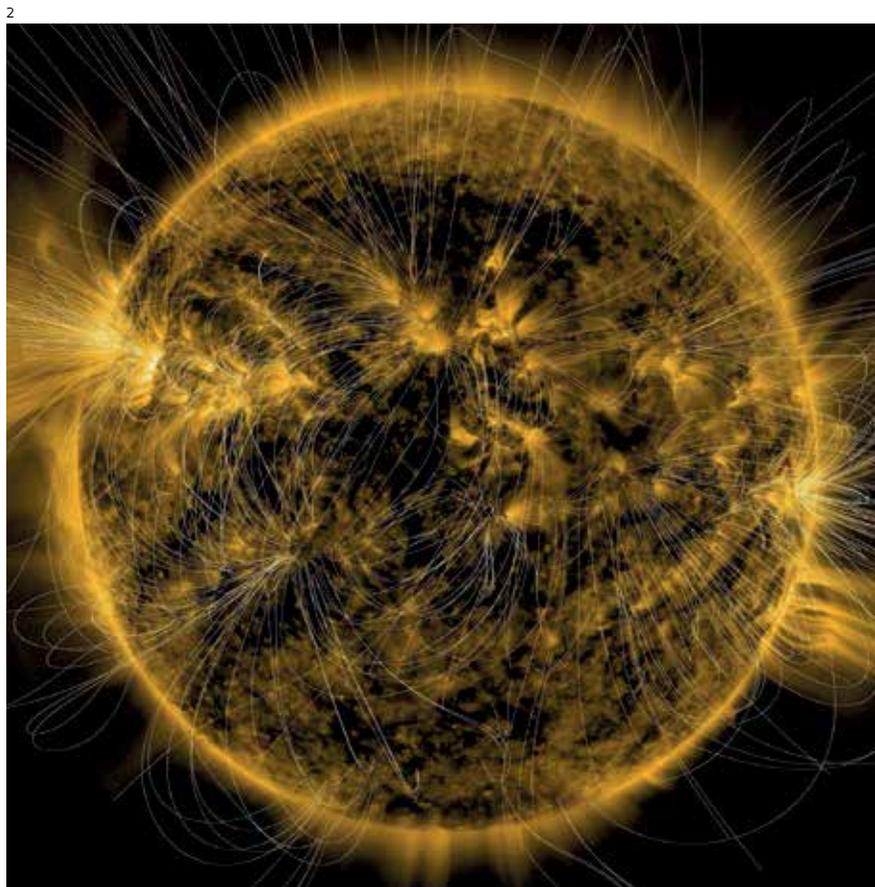
ção, que abrangeram um ciclo solar inteiro, em intervalos menores, de 400 a 700 dias. Em seguida, com o emprego de ferramentas de análise de dados por eles desenvolvidas, compararam as emissões de raios gama com energia acima de 5 gigaelétron-volt (GeV) de cada subperíodo em todas as regiões do disco solar. Dessa forma, notaram a concentração de produção de emissões de altas energias nas zonas polares durante o máximo solar. A constatação é amparada por testes estatísticos, descritos no trabalho, que indicam a relevância dos sinais observados.

Considerado um astro comum entre as mais de 100 bilhões de estrelas da Via Láctea, o Sol se formou há cerca de 4,5 bilhões de anos. Diferente da Terra e da Lua, ele não é um corpo sólido.

É uma bola de plasma quente (matéria ionizada, com partículas carregadas eletricamente), constituída pelos gases hidrogênio e hélio. O nível de atividade solar (produção de energia) varia ao longo do tempo de forma mais ou menos regular, em ciclos. Ora a estrela está menos ativa, ora mais. A duração média de um ciclo solar é de 11 anos, mas pode variar entre 9 e 14 anos.

A formação de manchas solares, pontos pretos associadas a áreas mais frias na superfície, é um termômetro da atividade solar. Ocasionalmente, as maiores manchas são visíveis da Terra sem a necessidade de recorrer a telescópios. Mais manchas sinalizam que o astro está funcionan-

Ilustração sobre imagem real mostra as linhas do complexo campo magnético na superfície do Sol



do em ritmo acelerado. A dinâmica energética do Sol também está associada a outros fenômenos, como a ocorrência de *flares* (erupções) e ejeções de massa.

Entre o momento de maior e o de menor atividade, a diferença de brilho – ou seja, de produção de energia – do Sol é muito pequena, de no máximo 0,1%. Por isso, os climatologistas descartam que variações na atividade solar possam influir de forma significativa no aumento do aquecimento global.

Segundo cálculos da Nasa, ao longo dos dois últimos séculos, o peso acumulado das emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades humanas sobre a temperatura média da Terra é pelo menos 270 vezes maior do que a possível influência de qualquer alteração de luminosidade do Sol. Ainda assim, as alterações em seu regime de funcionamento produzem impactos evidentes na aparência e no comportamento da estrela.

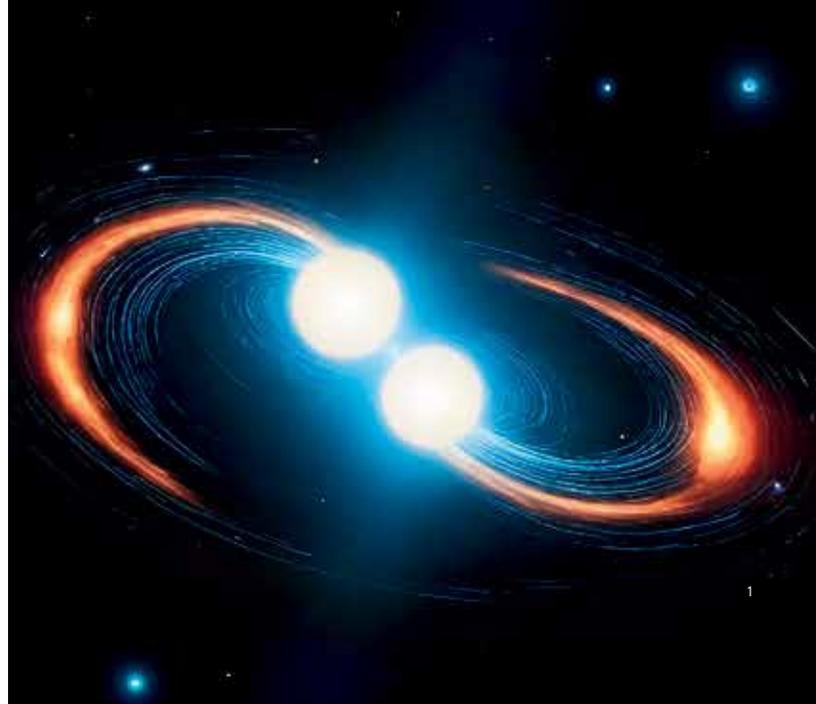
DISTÚRBIOS EM GPS

Além de gerar conhecimento básico sobre a física estelar, os estudos sobre a atividade solar são úteis para entender os impactos reais que o astro pode ter sobre diferentes aspectos da vida cotidiana na Terra. Ao emitir mais radiação e matéria na direção do Sistema Solar, a estrela pode afetar os sistemas de navegação terrestre, como o GPS, e as telecomunicações no planeta.

Para o astrofísico Rodrigo Nemmen, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), que não participou do artigo, os dados do artigo de Arsioli e Orlando são importantes para melhorar o entendimento sobre o funcionamento da superfície do Sol. “A principal fonte de raios gama que o Fermi observa é o Sol”, diz Nemmen, que usa dados do satélite da Nasa para estudar emissões desse tipo de radiação nos jatos de matéria produzidos pelos buracos negros. “Alguns grupos de pesquisa já tentaram usar o Fermi para estudar de forma sistemática emissões de outras estrelas, mas não tiveram sucesso.”

Um dos desafios de Arsioli e Orlando é tentar observar novamente o pico de emissão de raios gama nas regiões polares do Sol durante o próximo máximo solar, que deve ocorrer em 2025. Se a estrela se comportar novamente como em junho de 2014, a ideia de que a produção excessiva de raios gama decorre da inversão periódica dos polos magnéticos se torna mais robusta. “Não há outra estrela similar e tão próxima quanto o Sol em que possamos testar nossa hipótese”, diz Arsioli. “Temos de repetir as observações nele mesmo.” ■

O artigo científico consultado para esta reportagem está listado na versão on-line.



UMA FÁBRICA DE TERRAS-RARAS

Fusão de duas estrelas de nêutrons gera segunda maior explosão de raios gama e produz no espaço metais do grupo dos lantanídeos

Marcos Pivetta

Artigo na revista *Nature* em 21 de fevereiro deste ano, com a participação de brasileiros, fornece mais evidências de que uma explosão de raios gama observada em março de 2023 deve ser decorrente de um evento cósmico raro: a fusão de duas estrelas de nêutrons ou de uma estrela dessa classe e de um buraco negro. A colisão e posterior união de objetos celestes tão densos são denominadas kilonova. Considerada a segunda explosão de raios gama mais luminosa e energética já registrada, a



GRB 230307A
kilonova

Esta imagem do telescópio James Webb mostra a kilonova que gerou a explosão de raios gama GRB 230307A e a galáxia-mãe da qual migraram as duas estrelas de nêutrons que se fundiram nesse processo. Ao lado, ilustração retrata a colisão das estrelas

Galáxia vizinha da qual duas estrelas de nêutrons migraram

2

ocorrência do ano passado tinha sido alvo de um trabalho anterior, também publicado na *Nature*, mas feito por outro grupo de astrofísicos, que apresentou resultados similares aos do mais recente estudo.

A explosão associada a uma kilonova gera gigantescas emissões de luz, sobretudo no comprimento de onda dos raios gama, que são invisíveis ao olho humano. Outra assinatura decorrente da união de duas estrelas de nêutrons é a produção de elementos químicos do grupo das terras-raras, também denominado lantanídeos, que são mais pesados que o ferro. No espaço, apenas a explosão associada a uma kilonova seria capaz de atuar como uma fábrica de terras-raras. Os lantanídeos são forjados a partir de um processo conhecido como captura de nêutrons, que envolve decaimento radioativo e emissões de raios gama, a forma de luz (fóton) mais energética.

“Encontramos evidências de que essa kilonova teria produzido mais lantanídeos estáveis do que esperávamos inicialmente”, diz o astrofísico Clécio De Bom, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Ele é um dos três brasileiros que assinam o artigo, redigido por um grupo internacional de pesquisadores e coordenado por Eleonora Troja, da Universidade de Roma Tor Vergata. Os outros dois são Martín Makler, também do CBPF, e Felipe Navarete, astrônomo que trabalha no telescópio Soar, instrumento de observação instalado no Chile, operado pelo Brasil e por universidades norte-americanas.

Numa kilonova, as emissões de raios gama decorrentes da fusão duram segundos,

mas há liberação por dias ou semanas de um brilho residual, o chamado *afterglow*, em outros comprimentos de onda, como no óptico e infravermelho. Por isso, mesmo telescópios que não operam nas frequências de raios gama, como o Hubble e o James Webb, podem ser acionados para acompanhar o *afterglow* de eventos extremamente energéticos. “Observamos com o Soar essa kilonova em cinco épocas diferentes”, conta Navarete.

A segunda mais intensa explosão de raios gama foi primeiramente registrada em 7 de março de 2023 pelo satélite Fermi, da Nasa, dedicado a observações nessa faixa de comprimento de onda. O evento foi denominado GRB 230307A. As três primeiras letras são um acrônimo do nome do fenômeno em inglês, *gamma-ray burst* (GRB). Os números se referem ao ano (23), mês (03) e dia (07) em que o evento ocorreu. O “A” significa que foi a primeira explosão desse tipo vista naquela data.

Além de sua enorme luminosidade, o fenômeno despertou o interesse imediato na comunidade de astrofísicos devido a outras duas peculiaridades: sua duração atípica e a região do espaço de onde partiu a explosão. O forte pulso de raios gama se prolongou por cerca de 35 segundos, o que o situa, segundo a classificação da área, como uma explosão de longa duração. Os eventos desse tipo que duram menos de 2 segundos são considerados curtos; os que ultrapassam esse limite de tempo são tidos como longos.

O problema é que as kilonovas sempre foram associadas a GRB curtos, enquanto

os pulsos de raios gama mais duradouros costumam ser produzidos por supernovas. A morte de estrelas de grande massa, um processo que também gera uma forte explosão, é denominada supernova. No entanto, os astrofísicos dos dois grupos independentes que analisaram o GRB 230307A não encontraram nenhuma estrela massiva moribunda no local em que ocorreu o evento.

Essa região é praticamente vazia de objetos e dista cerca de 130 mil anos-luz da galáxia mais próxima. Tal cenário desolador levou os pesquisadores a propor uma explicação para essa incômoda situação: um par de estrelas de nêutrons teria se desgarrado da galáxia-mãe e migrado para uma área vizinha. No meio do nada, as estrelas se fundiram e geraram a espantosa explosão de raios gama de mais de meio minuto.

Segundo a astrofísica italiana Eleonora Troja, nunca se observou uma kilonova e seus desdobramentos por mais de uns poucos dias. “É preciso observar por semanas e meses [como eles fizeram] para descobrir quais metais foram forjados na explosão”, disse a pesquisadora, em comunicado à imprensa sobre o estudo. Como no lugar associado ao GRB 230307A há indícios da formação de lantanídeos, os pesquisadores defendem a ideia de que ali houve uma fusão de dois objetos muito densos e compactos, dos quais ao menos um era uma estrela de nêutrons. ■

O artigo científico consultado para esta reportagem está listado na versão on-line.