

ICECUBE
NEUTRINO OBSERVATORY

BUSCA MULTIMENSAGEIRA EXAUSTIVA DE FONTES CONJUNTAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS E NEUTRINOS DE ALTA ENERGIA

CONTEXTO

Na Terra, sondamos fenômenos cósmicos, tais como a colisão ou explosão de estrelas e núcleos galácticos que emitem jatos, através da detecção dos sinais que emitem, os chamados mensageiros. Existem três tipos distintos de mensageiros: ondas eletromagnéticas, ondas gravitacionais e partículas. A humanidade construiu detetores sensíveis que conseguem captar estes mensageiros provenientes de distâncias imensas no Universo. Na última década, tanto as ondas gravitacionais como os neutrinos astrofísicos de alta energia foram detetados de forma independente e em combinação com ondas eletromagnéticas. O que há décadas era percebido como uma visão pioneira sem esperança, transformou-se agora numa missão emblemática para as agências de financiamento. Hoje em dia, esta visão é habitualmente designada por astrofísica multimessageira.

Ao longo da última década, o campo da astrofísica multimessageira amadureceu drasticamente, com mais de duzentos eventos de ondas gravitacionais detetados até à data, abrangendo fusões de sistemas binários de buracos negros, de estrelas de neutrões e sistemas mistos de estrelas de neutrões e buracos negros; simultaneamente, durante o mesmo período, os detetores de neutrinos acumularam um conjunto de dados sem precedentes. A observação multimessageira de um sistema binário de estrelas de neutrões em fusão, que mudou o paradigma da área, estabeleceu ligações entre fontes de ondas gravitacionais e emissões em todo o espectro eletromagnético, desde os raios gama até ao rádio. O que tem faltado notoriamente neste repertório multimessageiro observado são os neutrinos de alta energia, que deveriam estar presentes mas que, até agora, permanecem por observar. Por outro lado, neutrinos e ondas gravitacionais provenientes de uma fonte cósmica comum podem chegar ao nosso canto do Universo a qualquer instante. Uma tal observação conjunta ofereceria uma compreensão profunda sobre processos cósmicos e astrofísicos.

O Detetor IceCube

O detetor de neutrinos de alta energia IceCube está posicionado aproximadamente a alguns quilómetros de profundidade sob o Polo Sul geográfico, na Antártida, utilizando um volume expansivo de um quilómetro cúbico de gelo imaculado para a sua instrumentação. A Colaboração IceCube instalou 5160 módulos óticos avançados que detetam emissões de luz resultantes de interações de neutrinos no gelo. O IceCube mantém um tempo de atividade superior a 99%, um nível de desempenho exemplar que permite a observação de neutrinos provenientes de todo o céu. IceCube observou neutrinos de diversas origens, incluindo um fluxo difuso potencialmente com fontes pontuais não resolvidas, o blazar TXS 0506+056, a galáxia ativa NGC 1068 e a Via Láctea.

Crédito da imagem: IceCube/NSF



BUSCA MULTIMENSAGEIRA

As buscas multimessageiras que incluem ondas gravitacionais foram pioneiras há mais de duas décadas e meia e conduziram a algumas das [descobertas](#) astrofísicas mais significativas dos últimos tempos. Uma vez que se espera que as fontes cósmicas emitam múltiplos tipos de mensageiros em simultâneo, é uma escolha natural combinar dados de detetores díspares e analisá-los em uníssono. Uma fonte astrofísica observada a partir da sobreposição de mapas celestes e janelas temporais é um verdadeiro tesouro cósmico. Esta é a base das [técnicas de busca multimessageira](#). As ondas gravitacionais transportam uma "impressão digital" da fonte astrofísica, uma vez que a forma da onda revela, por exemplo, as massas e os *spins* de buracos negros ou estrelas de neutrões em fusão. Por outro lado, os neutrinos transportam informação complementar sobre a fonte emissora, e inferimos a probabilidade de serem um sinal real a partir da energia que depositam no detetor. A maioria dos neutrinos detetados é ruído de fundo proveniente de processos atmosféricos e não de origem astrofísica. Semelhante ao que acontece com as ondas gravitacionais, para cada sinal forte descoberto, existem inúmeras impressões digitais fracas chamadas candidatos abaixo do limiar, que não são suficientemente fortes para que se possa reivindicar uma deteção. Tirando partido dos dados dos observatórios [LIGO](#), [Virgo](#) e [IceCube](#), realizámos uma investigação com dados de arquivo de candidatos a eventos multimessageiros. Na publicação, analisamos todos os candidatos a ondas gravitacionais, incluindo os que estão abaixo do limiar, dado que estes podem atingir o nível de deteção quando é considerada uma potencial contraparte de neutrinos.



Software de análise de dados LLAMA

A busca foi realizada utilizando o sistema multifacetado LLAMA (*Low-Latency Algorithm for Multimessenger Astrophysics*). O LLAMA, a primeira infraestrutura de análise de dados em tempo real, foi desenvolvido por investigadores da Universidade de Columbia. O conjunto de software atual é o culminar de um esforço persistente e eficiente de uma iniciativa que teve início em 2006, dedicado inicialmente à busca de fontes conjuntas de ondas gravitacionais e neutrinos de alta energia. O LLAMA baseia-se numa estrutura de estatística Bayesiana de última geração para avaliar os dados observados de todos os mensageiros em pé de igualdade. O LLAMA cria um único detetor virtual, juntando de forma otimizada observações de ondas gravitacionais, de neutrinos e eletromagnéticas. O sistema avalia a significância de os diferentes mensageiros provirem da mesma fonte astrofísica, em vez de serem uma coincidência fortuita. O LLAMA corre com dados de arquivo, como nesta publicação, mas também pode operar em [tempo real](#) e alertar os astrónomos para apontarem os seus telescópios na direção de um candidato a fonte conjunta imediatamente após a deteção de um neutrino.

RESULTADOS e PERSPETIVAS

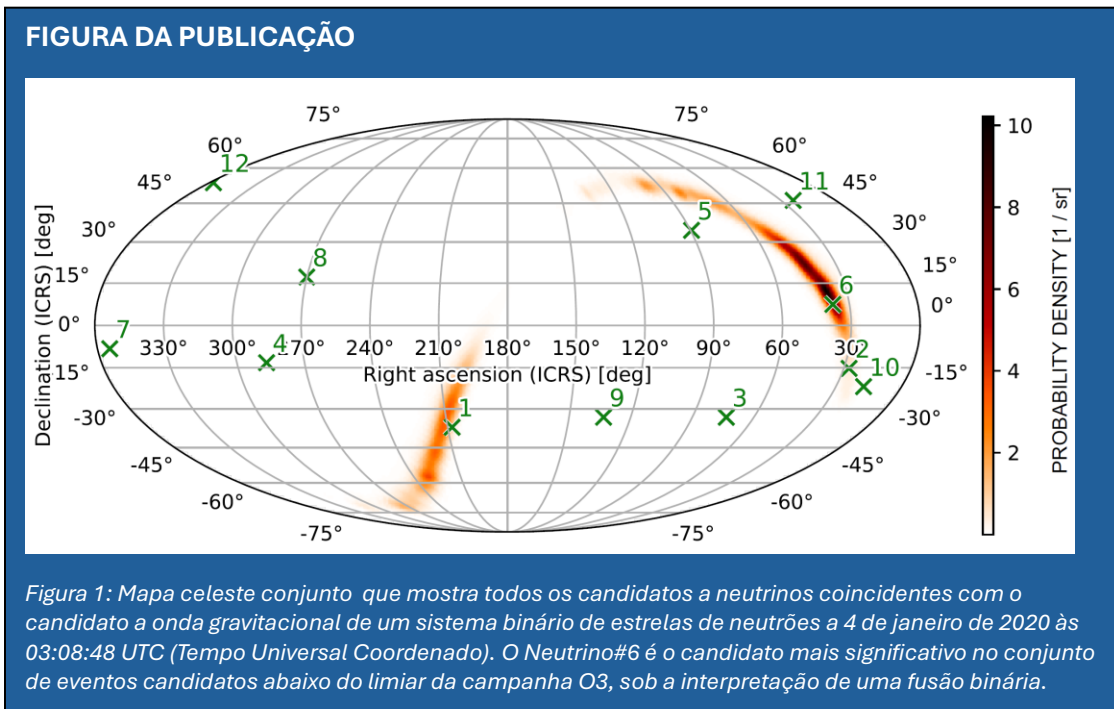
A descoberta e a observação multimessageira de fontes cósmicas que envolvem neutrinos de alta energia e ondas gravitacionais fortalece a nossa compreensão da dinâmica das fontes cósmicas, das origens dos neutrinos de energia mais elevada e dos raios cósmicos, bem como das emissões de alta energia provenientes de fontes de ondas gravitacionais. Estes conhecimentos permitirão também esforços de acompanhamento eletromagnético mais eficazes. Uma análise exaustiva dos dados do LIGO e do Virgo, juntamente com candidatos a eventos coincidentes do IceCube, expandiu significativamente o conjunto de dados disponível, permitindo uma busca mais profunda e abrangente em comparação com esforços anteriores.

A análise de dados do LLAMA, utilizando uma abordagem estatística otimizada dependente do modelo, foi aplicada a todos os eventos de ondas gravitacionais (tanto os confirmados como os que se encontram abaixo do limiar) do terceiro período de observação de LIGO-Virgo-KAGRA, e a candidatos a eventos do IceCube coincidentes no tempo. Esta análise considerou a emissão de neutrinos dentro de uma janela temporal de 1000 segundos centrada no momento da emissão das ondas gravitacionais. Embora não tenha sido detetada qualquer emissão significativa de neutrinos para eventos individuais de ondas gravitacionais, os mapas celestes conjuntos demonstraram claramente como as buscas multimessageiras podem orientar eficazmente as estratégias de observação dos observatórios eletromagnéticos.

Apesar de não ter sido feita nenhuma deteção definitiva, a análise forneceu restrições importantes sobre a população de fontes multimessageiras cósmicas que envolvem tanto ondas gravitacionais como neutrinos. Estes limites melhorados ajudam a refinar a nossa compreensão sobre a fração de fontes de ondas

gravitacionais que emitem neutrinos de alta energia, particularmente em energias muito elevadas e para emissões isotrópicas. Adicionalmente, aprendemos que a detecção conjunta de ondas gravitacionais e neutrinos de alta energia é limitada pelas capacidades atuais de detecção de neutrinos, sublinhando a necessidade da próxima geração de detetores de neutrinos.

As buscas multimessageiras do LLAMA em tempo real, que envolvem neutrinos de alta energia e ondas gravitacionais, estão a ser executadas ativamente, tanto com dados de eventos confirmados como de eventos abaixo do limiar, durante as campanhas de observação subsequentes. Esta operação bem-sucedida demonstra um desempenho superior, expandindo a gama de fusões de objetos compactos que estão a ser exploradas. O aumento da taxa de exploração oferece mais oportunidades para estudos multimessageiros e reforça as probabilidades de descobrir fontes comuns de neutrinos e ondas gravitacionais no futuro.



Os detetores de ondas gravitacionais de terceira geração estão atualmente a ser projetados para expandir o seu alcance no volume cósmico em ordens de magnitude. Simultaneamente, a próxima geração do Observatório de Neutrinos IceCube visa aumentar significativamente o seu volume instrumentado e detetar energias de neutrinos até várias centenas de PeVs (1 PeV corresponde a mil biliões de elétrons-volt). Com estes detetores futuros, antecipamos um aumento substancial tanto na frequência como na qualidade das observações, oferecendo oportunidades empolgantes para descobertas multimessageiras abrangentes com o LLAMA, envolvendo mensageiros de neutrinos, eletromagnéticos e de ondas gravitacionais.

PARA SABER MAIS

Estatística Bayesiana: Uma vez que uma busca multimessageira otimizada e independente de modelos não existe, é natural incluir informação prévia sobre a fonte astrofísica e os detetores para avaliar a relevância de coincidências observadas. Este método difere das abordagens frequentistas, que avaliam a significância através da repetição de experiências estruturadas.

O que há de novo no IceCube-Gen2? Visita <https://icecube-gen2.wisc.edu/> e conhece o futuro da detecção de neutrinos na Antártida, que moldará a astrofísica multimessageira.

Visita as nossas páginas web:

Aprende sobre ondas gravitacionais e a sua detecção: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp

Aprende sobre neutrinos e o Observatório de Neutrinos IceCube: <https://icecube.wisc.edu/>

Traduzido para o português por Tiago Fernandes e revisto por Inês Rainho a partir da versão original em inglês disponível [aqui](https://arxiv.org/abs/2001.08414).

Lê o artigo:



ou no Arxiv:



Publicação de dados:

