

# CATACLISMO CÓSMICO

Colisão de estrelas de nêutrons emite ondas gravitacionais e luz e desperta uma corrida internacional para compreender evento inédito na astronomia

Ricardo Zorzetto e Igor Zolnerkevic

**O** dia 17 de agosto de 2017 entrou para a história da astronomia. Eram 5h41 daquela quinta-feira na Costa Oeste dos Estados Unidos, quando os computadores de um laboratório em Hanford registraram a passagem de mais uma onda gravitacional pela Terra. Nessa pequena localidade do estado de Washington, onde foi produzido o material radiativo da bomba atômica lançada sobre Nagasaki, no Japão, funciona um dos mais precisos equipamentos já construídos para medir variações na distância: um interferômetro a laser projetado para detectar sutis deformações no espaço-tempo causadas pelas ondas gravitacionais. Uma fração de segundo antes de a unidade de Hanford captar essa onda gravitacional, um equipamento idêntico instalado em Livingsgton, no estado de Louisiana, havia detectado o mesmo sinal. A perturbação identificada pelos laboratórios gêmeos do Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais (Ligo) também havia sido registrada quase simultaneamente por um equipamento semelhante – o interferômetro Virgo – em Pisa, na Itália.

Por 1 minuto e 40 segundos, os três detectores acompanharam os passos finais da aproximação e morte de duas estrelas quase apagadas. Atraídas pela gravidade, duas estrelas de nêutrons – as menores e mais densas conhecidas – rodopiaram uma ao redor da outra enquanto perdiam energia para o espaço na forma de ondas gravitacionais. Elas se fundiram em um evento explosivo chamado quilonova, que ocorreu a 130 milhões de anos-luz da Terra, na periferia da galáxia NGC 4993, na constelação de Hidra. As duas estrelas tinham massa um pouco maior que a do Sol e, com 12 quilômetros de diâmetro, eram invisíveis para os telescópios do planeta. Ao colidirem, liberaram uma nuvem de matéria incandescente que, por uma fração de segundo, brilhou mais que as estrelas da Via Láctea. Em seguida à detecção das ondas gravitacionais e à localização da região no espaço onde se originaram, telescópios na superfície e na órbita terrestre registraram a luz evanescente da quilonova para conhecer o destino da matéria que a explosão lançou ao espaço. “É a primeira vez que observamos as ondas gravitacionais e as ondas eletromagnéticas vindas

Representação  
artística da colisão  
de um par de  
estrelas de nêutrons,  
como a detectada  
em 17 de agosto  
deste ano





A seta indica a região da galáxia NGC 4993 em que ocorreu a colisão das estrelas de nêutrons, observada em 17 de agosto (à esq.) e em 21 de agosto

de um mesmo evento astrofísico cataclísmico”, afirmou o físico David Reitze no anúncio oficial da descoberta, feito em 16 de outubro na sede da National Science Foundation, nos Estados Unidos. Ele é o diretor-executivo do Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais (Ligo), uma colaboração científica com mais de 1.200 pesquisadores, alguns no Brasil, que opera os dois detectores em solo norte-americano.

A detecção das ondas gravitacionais e eletromagnéticas emitidas por um mesmo fenômeno inaugura, segundo Reitze, a era da astronomia multimessageira. Os dois tipos de ondas fornecem informações diferentes sobre os objetos celestes. Enquanto as ondas gravitacionais são geradas por oscilações da matéria que deformam o espaço-tempo, as eletromagnéticas são produzidas por vibrações de partículas com carga elétrica e são percebidas como luz (visível e invisível). Ambas se propagam no espaço vazio a 300 mil quilômetros por segundo e revelam características complementares do objeto que as gerou.

#### ESTADO DESCONHECIDO

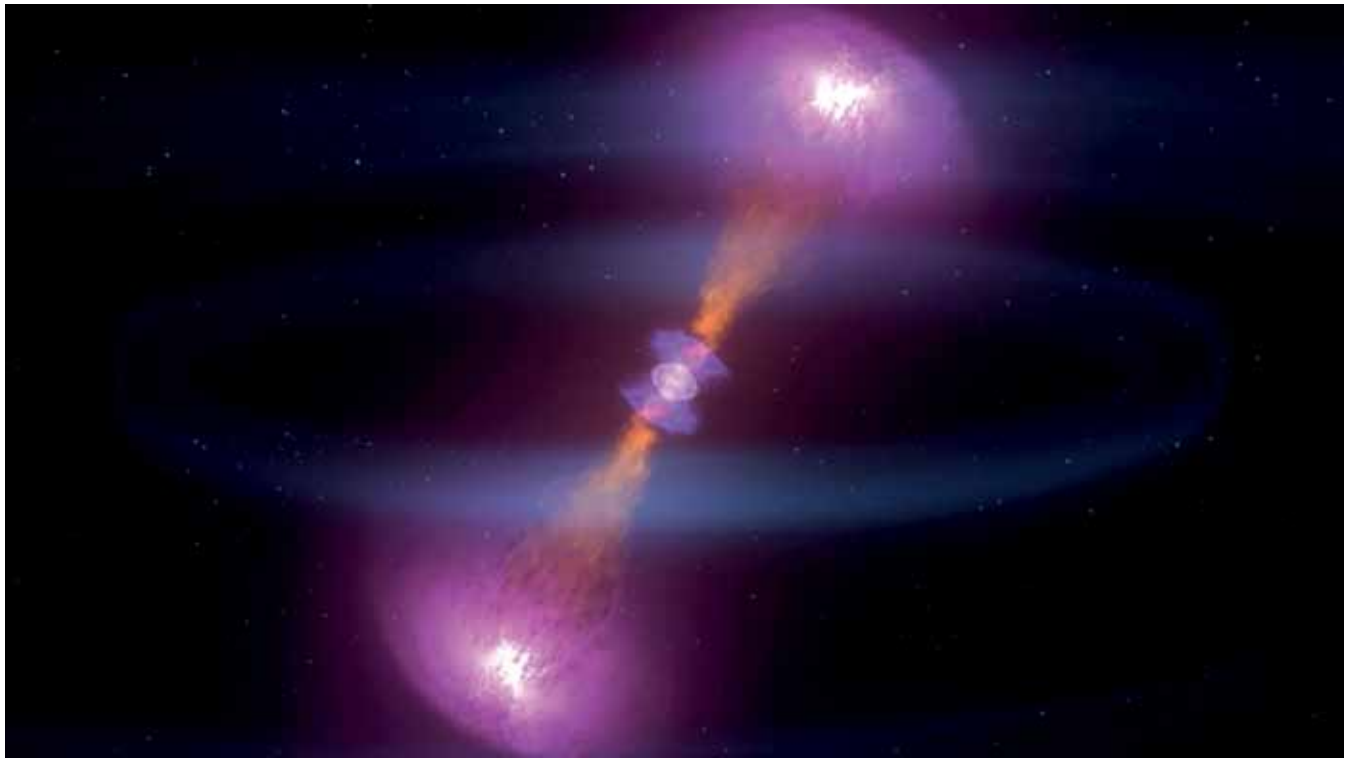
Há décadas os astrônomos observam a luz – em especial, ondas de rádio e raios X – emitida pelas camadas mais superficiais das estrelas de nêutrons. Essa luz permite ter uma ideia de como é a crosta dessas estrelas, mas revela pouco sobre seu interior. Físicos e astrofísicos imaginam que as camadas mais profundas estejam submetidas a densidades e pressões tão elevadas que, ali, a matéria assumiria um estado desconhecido. A solução para esse mistério poderia estar na investigação das ondas gravitacionais geradas no choque de duas estrelas de nêutrons. É que essas ondulações no espaço-tempo produzidas por elas dependem, em certa medida, de como a matéria no interior das estrelas se deforma e se despedaça durante a colisão.

Observações da colisão desse tipo de estrela devem se tornar rotina nos próximos anos, com

## Estrelas de nêutrons concentram massa equivalente à do Sol em esferas com cerca de 20 km de diâmetro

o aperfeiçoamento dos detectores do Ligo e do Virgo, que passam por mais uma fase programada de manutenção e aprimoramento. O Ligo, por exemplo, completou o seu segundo período de tomada de dados em 25 de agosto deste ano e deve voltar a operar em outubro de 2018, com a sensibilidade aumentada. Ao mesmo tempo, os pesquisadores esperam reduzir à metade o ruído que atrapalha o funcionamento dos detectores. “Assim, devemos registrar de cinco a 10 vezes mais colisões de buracos negros e de estrelas de nêutrons”, conta o físico italiano Riccardo Sturani, do Instituto Internacional de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (IIP-UFRN), que realiza cálculos analíticos sobre as ondas gravitacionais que o Ligo pode registrar. No Brasil, além dele, Odylio Aguiar e César Costa, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), integram a equipe do Ligo que trabalha para melhorar a precisão dos detectores.

A primeira observação direta das ondas gravitacionais, em setembro de 2015, confirmou um fenômeno previsto pela teoria da relatividade geral, formulada em 1915 pelo físico Albert Einstein (1879-1955). Com essa teoria, Einstein modificou a lei da gravitação universal, proposta por Isaac Newton em 1687. Para Newton, a gravidade era uma força atrativa originada pela massa dos corpos. Einstein reformulou o entendimento sobre a força gravitacional, o espaço e o tempo na teoria



Representação artística dos jatos de matéria que teriam originado os pulsos curtos de raios gama (magenta) registrados pelo telescópio Fermi

da relatividade geral. Segundo essa teoria, tanto a massa quanto a energia de um corpo produzem força gravitacional, que se manifesta como o encurvamento do espaço e uma desaceleração da passagem do tempo ao redor do corpo. Quanto maior a massa e a energia do corpo, maior a força gravitacional e a deformação no espaço e no tempo, vistos como uma só entidade, o espaço-tempo. Uma consequência é que o movimento dos corpos produz oscilações no espaço-tempo que se propagam como ondas gravitacionais.

Deformações drásticas no espaço-tempo acontecem, por exemplo, quando uma estrela com massa algumas vezes superior à do Sol consome todo o seu combustível nuclear e o seu centro, formado por átomos de ferro, implode, gerando um buraco negro, o objeto no qual a gravidade é tão elevada que nem a luz escapa, ou uma estrela de nêutrons, as menores e mais densas conhecidas. Em ambos os casos, a curvatura do espaço-tempo é extrema, assim como a pressão e a densidade a que é submetida a matéria que restou.

Uma estrela de nêutrons tem um pouco mais que a massa do Sol, concentrada em uma esfera com cerca de 20 quilômetros de diâmetro – o astro do Sistema Solar é 70 mil vezes maior. “Uma cumbuca de feijoada contendo uma porção de matéria das estrelas de nêutrons pesaria na Terra o mesmo que os 7 bilhões de pessoas que habitam o planeta”, compara Jorge Horvath, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), estu-  
dioso dessas estrelas ultracompactas.

De acordo com Horvath, as estrelas de nêutrons possuem uma crosta com algumas centenas de metros de espessura, composta por elementos químicos pesados, como o ferro. De 800 a 900 metros abaixo da crosta, a matéria alcança uma densidade tão alta que as partículas de carga negativa (elétrons) existentes na periferia dos átomos são pressionadas contra as de carga positiva (prótons) do núcleo atômico. Como resultado, elas se anulam e originam partículas neutras: os nêutrons, que permanecem espremidos uns contra os outros. Em regiões ainda mais profundas, a densidade aumenta e os nêutrons podem se desfazer em algo desconhecido. “O caroço central de uma estrela de nêutrons é um mistério”, diz Horvath.

Vários modelos teóricos tentam prever como seria o interior dessas estrelas. Eles diferem na forma como a densidade da matéria varia sob efeito da pressão – essa relação entre densidade e pressão é definida por uma fórmula matemática chamada de equação de estado. “Obter a equação de estado das estrelas de nêutrons é um objetivo científico que certamente alcançaremos nas próximas décadas, com melhorias na observação das emissões de raios X e com a detecção de mais ondas gravitacionais”, diz a física Raissa Mendes, professora da Universidade Federal Fluminense (UFF).

#### ONDA DE DESCOBERTAS

Einstein previu a existência das ondas gravitacionais em 1916, mas só nos anos 1950 os físicos se convenceram de que, se a relatividade geral

estivesse correta, certos corpos em movimento acelerado transmitiriam parte de sua energia para o espaço vazio, na forma de ondas gravitacionais. Os cálculos mostravam, porém, que essas ondas seriam fracas. Só corpos com densidade de massa e energia muito grandes, acelerados a velocidades próximas à da luz, emitiriam ondas gravitacionais observáveis por instrumentos na Terra.

Nos anos 1970, um pequeno grupo de físicos se entusiasmou com o desafio de detectar essas ondas. Rainer Weiss, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), nos Estados Unidos, foi um dos primeiros a esboçar os detectores que originariam o Ligo. Os trabalhos teóricos de Kip Thorne, do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), e de seus colaboradores demonstraram que um detector desses poderia registrar as ondas gravitacionais emitidas na colisão de buracos negros e de estrelas de nêutrons em galáxias distantes. Coube a Barry Barish, do Caltech, organizar a colaboração científica internacional em torno do Ligo, uma vez aprovada a construção dos detectores nos anos 1990. O Prêmio Nobel de Física deste ano reconheceu o papel dos três na criação do Ligo, que entrou em operação em 2002 e, desde setembro de 2015, observou as ondas gravitacionais de quatro colisões de pares de buracos negros, eventos que não emitem luz.

O choque de estrelas de nêutrons, detectado em agosto, é diferente. Nos anos 1990, pesquisadores propuseram que esse evento poderia ser a origem das misteriosas explosões de raios gama (*gamma ray bursts* ou GRBs) de curta duração observadas por satélites desde os anos 1960.

#### PULSOS DE RAIOS GAMA

Segundo a teoria da relatividade geral, a imensa força gravitacional do objeto resultante da fusão das estrelas atrairia a matéria ao redor, formando um redemoinho. Essa matéria, girando a velocidades próximas à da luz, produziria em cada polo magnético do redemoinho em torno da estrela um jato que lançaria partículas eletricamente carregadas para muito longe. Esse jato duraria frações de segundo e geraria os pulsos curtos de raios gama detectados na Terra.

No dia 17 de agosto, menos de dois segundos após as observações do Ligo e do Virgo, o telescópio espacial Fermi, da Nasa, registrou uma explosão de raios gama de curta duração proveniente da região do céu de onde vieram as ondas

gravitacionais, comprovando a proposição (*ver reportagem na página 26*).

Horas depois, telescópios em terra e no espaço vasculharam a região e identificaram o surgimento de uma fonte de luz e de outras ondas eletromagnéticas na periferia da galáxia NGC 4993. Os pesquisadores propõem que esse brilho tenha sido emitido por uma porção da matéria das estrelas que, em vez de ser sugada, foi lançada ao espaço. Essa violenta explosão, chamada de quilonova, gerou elementos químicos mais pesados que o ferro (*ver reportagem na página 23*). Nos dias seguintes, os observatórios viram o brilho da quilonova diminuir e mudar de cor, emitindo luz visível, infravermelha e ultravioleta.

“As emissões de rádio vindas da fusão dessas estrelas continuam a ser observadas”, explica Jessica McIver, física do Caltech que coordena uma equipe do Ligo. “A observação coincidente das ondas gravitacionais com o surto de raios gama confirma a hipótese proposta décadas atrás de que as GRB de curta duração são produzidas na fusão de estrelas de nêutrons. As ondas gravitacionais, a GRB de curta duração e a quilonova nos contam a história completa da matéria ejetada durante a colisão e a fusão das estrelas de nêutrons.”


Os pesquisadores do Ligo também usaram as ondas gravitacionais registradas em agosto para obter informação sobre a relação entre densidade e pressão no interior das estrelas de nêutrons. Essa informação pode ser aprimorada por futuras observações que podem detectar a colisão de um buraco negro com uma estrela de nêutrons. “O buraco negro exercerá uma deformação muito maior, o que deverá revelar mais sobre o interior das estrelas de nêutrons”, prevê Jessica. Observações adicionais devem ajudar a entender quão uniforme é a composição das estrelas de nêutrons e a calcular a quantidade de elementos químicos pesados ejetada para o espaço. “Assim”, ela explica, “será possível descobrir quão próximo de uma fusão de estrelas de nêutrons o Sistema Solar teria de estar para explicar a quantidade de ouro e de outros elementos observada na Terra”. ■

## Ondas gravitacionais devem ajudar a conhecer o comportamento da matéria no interior das estrelas de nêutrons

---

#### Artigos científicos

ABBOTT, B. P. *et al.* Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *The Astrophysical Journal Letters*. v. 848, n. 2, 16 out. 2017.  
ABBOTT, B. P. *et al.* Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*. v. 119, 161101, 16 out. 2017.



Representação artística da quilonova observada em 17 de agosto, que lançou ao espaço uma nuvem de matéria com a massa de 21,5 mil planetas como a Terra

# FONTE DE OURO E **RÉGUA DO UNIVERSO**

Choque de astros produz elementos químicos pesados e permite medir a taxa de expansão do Cosmo

A colisão de estrelas de nêutrons registrada em 17 de agosto terminou em uma explosão chamada quilonova. O evento lançou ao espaço uma quantidade colossal de matéria incandescente que brilhou por dias. Mudanças no brilho e na cor da quilonova proporcionaram as evidências mais robustas de que a matéria e a energia liberadas em choques de estrelas de nêutrons produzem boa parte dos elementos químicos mais pesados do Universo. Não se sabe com precisão quais elementos foram gerados nem quanto deles foi forjado na explosão, mas é quase certo que houve uma grande produção de urânio, ouro e outros metais raros, como a platina.

“O estudo da radiação emitida pela quilonova permitirá ter uma ideia de quais elementos foram sintetizados”, conta o físico nuclear Valdir Guimarães, professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP). Ele não participou das observações, mas acompanhou a publicação dos resultados. “Alguns trabalhos sugerem que o evento tenha produzido uma quantidade de ouro igual a massa da Terra.” Além de ouro e platina, estima-se que tenham se formado outros 60 elementos que constam da tabela periódica e, somados, correspondem a menos de 1% da matéria visível do Universo.

“Esse evento forneceu um indício muito forte de que uma parte importante dos elementos químicos pesados encontrados na natureza é produzida em explosões do tipo quilonova”, conta o astrofísico brasileiro Vinicius Placco, professor na Universidade de Notre Dame, nos Estados Unidos. Ele estuda a abundância de elementos químicos em estrelas pobres em metais da Via Láctea e compara esses padrões com previsões teóricas para um fenômeno mais energético chamado supernova, a morte explosiva de estrelas com massa dezenas de vezes superior à do Sol, que também produz elementos pesados. Com outros brasileiros, Placco integrou o grupo que observou a quilonova de agosto com o telescópio T 80 Sul, instalado no Chile (*ver reportagem na página 26*). Ele explica por que ainda não é possível conhecer tudo o que foi produzido no evento. “Como o brilho na faixa da luz visível diminuiu 360 vezes em 10 dias, é difícil fazer medições detalhadas da abundância dos elementos químicos formados”, relata. “Será necessário observar mais eventos de quilonova para obter essas estimativas.”

#### 21,5 MIL TERRAS

A quilonova de 17 agosto não foi a primeira a ser descoberta. Em 2013, uma outra havia sido registrada pelo grupo do astrofísico Nial Tanvir, da Universidade de Leicester, no Reino Unido, com os telescópios espaciais Swift e Hubble. Mas o brilho era fraco e não havia informações sobre a causa da explosão – se o choque havia sido de duas estrelas de nêutrons ou de uma estrela de nêutrons e um buraco negro. Já o evento de agosto é um dos mais bem documentados pela astronomia nos últimos anos. Houve registro de sua luz em todas as faixas do espectro eletromagnético, e a análise das ondas gravitacionais emitidas na aproximação final das estrelas permitiu saber que uma tinha 30% e outra 60% mais massa que o Sol.

O anúncio da detecção da quilonova ocorreu em 16 de outubro e nos dias seguintes uma enxurrada de artigos científicos detalhou o fenômeno. Depois de duas semanas, pesquisadores de quatro universidades norte-americanas consolidaram a primeira síntese das observações da quilonova e a tornaram disponível nos ArXiv, um repositório de artigos científicos. Medições feitas por 38 telescópios durante até um mês sugerem que o choque das estrelas lançou ao espaço matéria correspondente à massa de 21,5 mil planetas como a Terra.

Da explosão, restou um buraco negro, um objeto escuro e extremamente denso, do qual nem a luz escapa. A energia do choque produziu em

## A energia liberada na explosão produziu toda uma gama de elementos químicos pesados

menos de um segundo toda uma gama de elementos químicos pesados ao pressionar as partículas sem carga elétrica (nêutrons) liberadas pelas estrelas contra os núcleos de elementos químicos mais leves lançados ao espaço na explosão. Esse mecanismo, a captura rápida de nêutrons ou processo r, produz elementos tão pesados quanto o urânio, que contém em seu núcleo 92 prótons (partículas de carga elétrica positiva) e 146 nêutrons. Elementos mais pesados podem surgir, mas são instáveis e se desfazem rapidamente, liberando outras partículas e energia na forma de radiação eletromagnética – em especial, raios gama, uma luz invisível ao olho humano.

A energia emitida pela conversão de elementos pesados e instáveis em outros mais leves e estáveis faz a cor da quilonova mudar. Nos primeiros dias, os telescópios captaram uma luz azulada, produzida por uma nuvem com massa de 5,3 mil Terras, rica em elementos mais leves que o lantânio (57 prótons e 139 nêutrons), que se afastava do local da colisão a 81 mil quilômetros por segundo, segundo o artigo, submetido para publicação na *Astrophysical Journal Letters*. À medida que esse material se expandia e esfriava, a região central da quilonova tornou-se primeiro púrpura e depois avermelhada. “A mudança de cor é consequência do decaimento radiativo dos elementos químicos mais pesados, com massa mais elevada que a do lantânio, concentrados em uma região da nuvem de matéria que se deslocava mais lentamente”, explica Placco.

Estima-se que a colisão de estrelas de nêutrons seja rara no Universo – ocorreria uma a cada milhão de anos em nossa galáxia. Os astrofísicos esperam, porém, que o aumento da sensibilidade dos observatórios Ligo e Virgo torne a detecção desses eventos corriqueira. Essa perspectiva anima astrofísicos e cosmólogos. É que a observação conjunta das ondas gravitacionais e da luz produzidas na colisão de estrelas de nêutrons pode ajudar a resolver uma disputa na cosmologia: conhecer o valor da constante de Hubble, um número que indica a taxa de expansão do Universo e, por consequência, sua idade e composição.

#### MAIS LONGE, MAIS RÁPIDO

Desde que medições feitas pelo astrônomo norte-americano Edwin Hubble confirmaram em 1929 que o Universo estava em expansão, vários grupos tentam calcular com precisão esse ritmo, que cresce com a distância. O próprio Hubble teria calculado que a velocidade de afastamento dos objetos celestes aumentava 500 quilômetros por segundo a cada megaparsec (3,3 milhões de anos-luz). Hoje se sabe que esse valor, medido por duas estratégias, é bem mais baixo.

Um dos métodos consiste em estimar as distâncias a partir da luminosidade de cefeidas, estrelas

# ORIGEM CÓSMICA

Explosões estelares geraram os elementos químicos mais pesados da natureza

O hidrogênio (H) e a maior parte do hélio (He), os elementos mais abundantes da natureza, formaram-se pelo resfriamento do Universo logo após o Big Bang

A fusão de hidrogênio e hélio no interior de estrelas gera lítio (Li), carbono (C) e nitrogênio (N). Estrelas com massa maior que a do Sol formam ainda bário (Ba) e tântalo (Ta)

1 H																	2 He															
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne									
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar									
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr															
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe															
55 Cs	56 Ba																	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																															
										57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu								
										89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																			

Raios cósmicos fragmentam os núcleos maiores em lítio (Li), berílio (Be) e boro (B)

Em estrelas com até 10 massas solares, a fusão de hidrogênio, hélio e núcleos mais pesados pode produzir ferro (Fe), níquel (Ni) e zinco (Zn)

Explosões decorrentes da fusão de estrelas de nêutrons produzem boa parte dos elementos químicos pesados, do ouro (Au) ao urânio (U)

Novas e supernovas, explosões de estrelas com massa mais de 10 vezes superior à do Sol, geram elementos químicos ainda mais pesados, como o gálio (Ga), o selênio (Se) e o rubídio (Rb)

FONTE LIGO E VALDIR GUIMARÃES / USP

que pulsam com regularidade e têm brilho bem conhecido. Com essa técnica, obtém-se o valor de 73 quilômetros por segundo por megaparsec para a constante. Mas há problemas. “A técnica das cefeidas exige uma calibração do brilho dessas estrelas”, explica o astrofísico Luis Raul Abramo, professor do IF-USP. “Essa calibração é empírica, apesar de os modelos do interior dessas estrelas serem bastante sofisticados.”

A outra forma de estimar o valor da constante é usando as medições que satélites na órbita terrestre fizeram da radiação cósmica de fundo, uma forma de luz invisível (na faixa de micro-ondas) que permeou o Universo 380 mil anos após o Big Bang. Essa luz estava distribuída segundo certo padrão naquela época, quando o Cosmo era mais denso. Conhecendo como variou a densidade e a geometria desse padrão, os físicos calculam a constante de Hubble – o resultado é 67 quilômetros por segundo por megaparsec. Essa forma também é indireta e pode gerar variações, pois depende do modelo usado para explicar o Universo – o mais aceito é que ele seja plano, formado por matéria comum, matéria escura e energia escura, e que se encontre em expansão acelerada.

A diferença entre os dois valores para a constante de Hubble é pequena (10%), mas incomoda os cosmólogos. “Ou as medições feitas com as cefeidas precisam ser corrigidas ou há proble-

mas com o modelo cosmológico mais aceito, o que teria consequências teóricas importantes na cosmologia”, afirma o astrofísico Jailson Alcaniz, do Observatório Nacional, no Rio de Janeiro.

A expectativa é de que a disputa seja resolvida com mais medições de distância por meio das ondas gravitacionais emitidas em colisões de estrelas de nêutrons. A medição de agosto resultou em um valor intermediário da constante: 70 quilômetros por segundo por megaparsec, segundo artigo publicado na *Nature*. A imprecisão, nesse caso, ainda é grande. “As ondas gravitacionais permitem fazer uma medição mais direta dessas grandes distâncias, que, no caso das estrelas de nêutrons, podem ser associadas à análise da luz para verificar a velocidade de afastamento”, conta Abramo. “Na minha opinião, esse dilema será resolvido com mais observações de ondas gravitacionais.” ■

Ricardo Zorzetto

## Artigos científicos

ASHLEY VILLAR, V. *et al.* The complete ultraviolet, optical, and near-infrared light curves of the kilonova associated with the binary neutron star merger GW170817: Homogenized data set, analytic models, and physical implications. *ArXiv*. On-line. 31 out. 2017 (submetido para publicação à revista *The Astrophysical Journal Letters*).

THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION. *et al.* A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. *Nature*. v. 551, p. 85-8. 2 nov. 2017. On-line. 16 out. 2017.



A disputa por descobrir a origem do fenômeno envolveu 70 observatórios e foi vencida por um velho e pequeno telescópio



# EM BUSCA DA LUZ DAS ESTRELAS DE NÊUTRONS

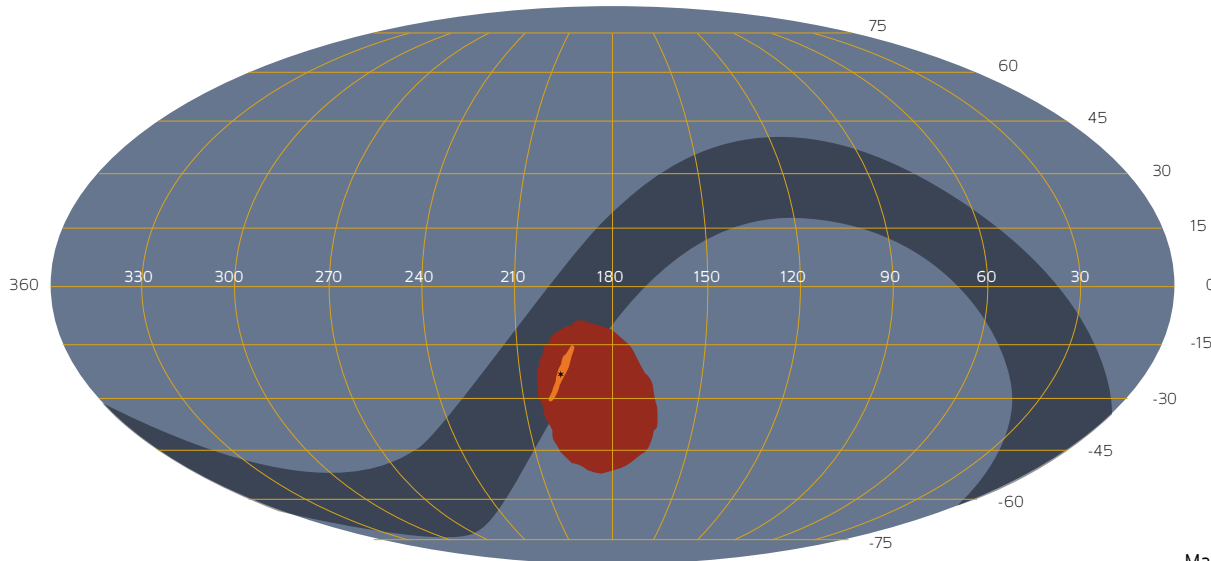
Marcos Pivetta

**A**o longo dos últimos 10 anos, grupos de astrofísicos de todo o mundo ligados a observatórios baseados em terra e no espaço, como satélites e telescópios de diferentes tipos, assinaram acordos com a colaboração científica Ligo-Virgo, os três grandes detectores de ondas gravitacionais em funcionamento na Terra. Assim que fosse registrado um sinal com boas chances de serem ondas gravitacionais, a rede de parceiros seria informada, via uma circular, da massa e luminosidade estimadas dos objetos celestes que poderiam ser a fonte do evento e receberia um mapa do céu com a provável localização do fenômeno. Sua missão seria procurar no espaço uma emissão de radiação eletromagnética, alguma forma de luz, liberada pelo mesmo evento cósmico que originou as ondas gravitacionais.

Até meados de agosto deste ano, quatro registros de ondas gravitacionais haviam sido confirmados. Todos foram provenientes de fusões de pares de buracos negros, um tipo de fenômeno que não deve produzir qualquer forma de luz. Em nenhum deles, como se suspeitava, a rede de parceiros do Ligo-Virgo observou a geração de radiação eletromagnética. O evento do dia 17 de agosto foi diferente dos precedentes. Teve características únicas, que favoreceram a sua detecção, localização e observação detalhada. Pela primeira vez, os astrofísicos registraram assinaturas cósmicas provocadas pela colisão e fusão de um par de estrelas de nêutrons.

Segundo a teoria, esse fenômeno deveria produzir, e realmente produziu, dois tipos de emissão quase simultâneas: as tão procuradas ondas gravitacionais seguidas de uma explosão energética

Telescópio Swope, que tem um espelho de 1 metro de diâmetro e funciona desde 1971 no Chile, foi o primeiro a encontrar a galáxia em que o evento ocorreu



FONTE NASA / ESO

Mapa do céu mostrando a provável área em que ocorreu a colisão de estrelas, segundo os dados dos satélites de raios gama Integral (cinza escuro) e Fermi (vermelho) e dos detectores Ligo-Virgo (em laranja). A estrela dentro da área laranja representa a galáxia NGC 4993

visível na faixa dos raios gama. “Era esperado que fossem registradas as ondas gravitacionais antes da explosão de raios gama”, explicou o físico Salvatore Vitale, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), um dos pesquisadores do Ligo, no material de divulgação da descoberta. “Primeiro, as estrelas de nêutrons são esmagadas juntas, depois o material é aquecido e então surge a radiação.” Após a explosão de raios gama, primeiro tipo de luz que escapa do fenômeno, outras formas de radiação eletromagnética também deveriam ser produzidas, como luz visível, ultravioleta e ondas de rádio. Mas para flagrar essas outras manifestações de radiação era preciso antes localizar a origem do fenômeno no espaço.

A pista inicial de que tinha havido uma colisão de estrelas de nêutrons em algum canto do Cosmo chegou à Terra às 12 horas, 41 minutos e 4 segundos de 17 de agosto, pelo fuso horário padrão internacional, que então se situava quatro horas à frente de Brasília. Os três detectores da cooperação Ligo-Virgo, dois localizados nos Estados Unidos e um na Europa, registraram um forte candidato a ser um sinal de ondas gravitacionais que aparentava ter sido originado pelo processo de fusão de duas estrelas de nêutrons. Situado nos arredores de Pisa, na Itália, o Virgo, que tinha acabado de passar por um processo de atualização e estava funcionando havia pouco mais de duas semanas, foi o primeiro a captar a anomalia, de forma muito fraca. Vinte e dois milissegundos depois, o detector do Ligo em Livingston, no estado da Luisiana, também registrou as ondas gravitacionais e, 3 milissegundos mais tarde, foi a vez do segundo detector-gêmeo do Ligo, em Hanford, no estado de Washington, flagrar a emissão. O observatório de Hanford, o

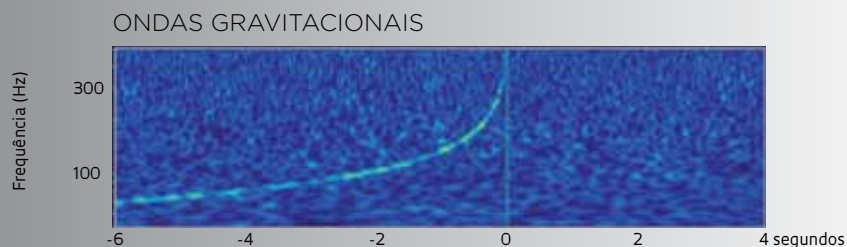
último a registrar o fenômeno, foi o que obteve o sinal de forma mais intensa e soltou o primeiro aviso automático de que um evento candidato a produzir ondas gravitacionais tinha sido flagrado.

#### UMA BREVE EXPLOSÃO DE RAIOS GAMA

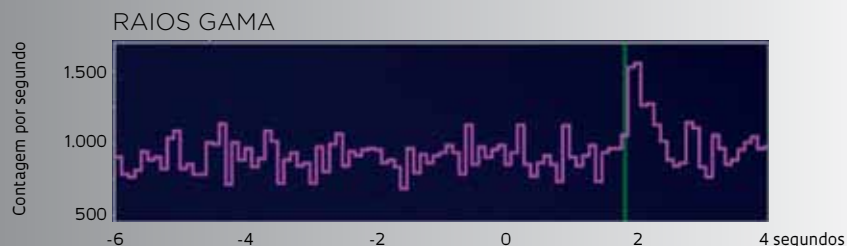
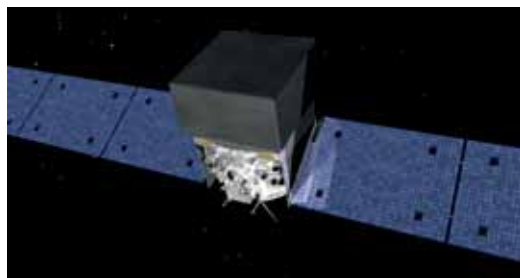
Enquanto os detectores de ondas gravitacionais processavam o sinal vindo do espaço, dois satélites especializados em registrar explosões de raios gama captaram um pequeno evento desse tipo. O Fermi, um telescópio espacial da Nasa que mapeia todo o céu a cada três horas, registrou uma explosão de raios gama 1,7 segundo após os detectores do Ligo-Virgo terem flagrado as ondas gravitacionais. Um alerta automático da medição foi expedido. Todo ano o Fermi detecta cerca de 240 explosões de raios gama, das quais 40 são de curta duração (menos de 2 segundos), como a de 17 de agosto. Essa breve explosão foi a mais próxima da Terra registrada por esse instrumento de observação. Igualmente dedicado a acompanhar esse tipo de evento energético, o satélite Integral, projeto da Agência Espacial Europeia (ESA) com norte-americanos e russos, também confirmou a explosão vista pelo Fermi. A quase concomitância dos dois tipos de registros obtidos, o das ondas gravitacionais e o da explosão de raios gama, deixava poucas dúvidas de que provavelmente ambos tinham sido originados pelo mesmo evento.

Às 13h21, 40 minutos depois das detecções automáticas, uma circular postada em nome da colaboração Ligo-Virgo informou a comunidade de astrofísicos de que uma provável emissão de ondas gravitacionais tinha sido flagrada. O texto ainda fazia alusão à explosão de raios gama registrada pelo satélite Fermi. Esse era o aviso que os parceiros do Ligo-Virgo esperavam para iniciar

# LIGO-VIRGO



# FERMI



O detector do Ligo em Hanford identificou o sinal das ondas gravitacionais dois segundos antes de o satélite Fermi flagrar a explosão de raios gama

a busca pelo lugar no Cosmo onde houve a fusão estelar. Ao longo das próximas horas, várias circulares atualizaram dados sobre o fenômeno.

## AJUDA DO PONTO CEGO

Mas, inicialmente, apenas com os dados dos satélites Fermi e Integral, a área do céu em que o evento teria ocorrido era enorme, um obstáculo para determinar sua localização exata. Quando as medições do Ligo-Virgo foram refinadas, a provável área de origem do fenômeno foi restringida a 28 graus quadrados, equivalente a 140 luas cheias vistas da Terra. A distância em que a colisão estelar ocorrera também se tornou rapidamente conhecida, cerca de 130 milhões de anos-luz.

Apesar de ter registrado um sinal bastante fraco das ondas gravitacionais, o Virgo foi importante para estabelecer a porção do céu do hemisfério Sul em que o evento aconteceu. Com suas informações e as dos outros dois detectores, foi possível usar a técnica da triangulação para delimitar o local de origem do fenômeno. “A amplitude e o momento em que registramos o sinal foram usados para localizar sua fonte”, comenta o físico holandês Jo van den Brand, da Universidade Livre de Amsterdã, porta-voz do Virgo. As ondas gravitacionais foram captadas de forma tênue pelo detector europeu porque a fusão das estrelas de nêutrons ocorreu em um lugar que é um dos seus quatro pontos cegos. Essa também foi uma pista importante para se chegar à área final. “No momento, não sabemos dizer qual foi nossa contribuição mais importante, mas, sem o Virgo, teria sido mais difícil descobrir o local de origem das ondas”, destaca o holandês.

Com as melhores coordenadas possíveis para descobrir a fonte das ondas gravitacionais e da explosão de raios gama, os grupos de astrofísicos com acesso a telescópios no hemisfério Sul saíram à caça da origem do fenômeno. A corrida foi vencida pela equipe da colaboração One-Meter Two-Hemispheres (1M2H), coordenada pelo astrofísico Ryan Foley, da Universidade da Califórnia em Santa Cruz. A equipe, da qual 17 pessoas participaram da descoberta, é especializada em estudar a luz proveniente de supernovas, explosões de estrelas com muita massa. Menos de 11 horas depois da detecção das ondas gravitacionais, Foley e sua equipe fizeram a imagem de um novo ponto luminoso na periferia da galáxia NGC 4993, situada na constelação de Hidra. “Tínhamos uma estratégia bem definida: olhar apenas para onde há galáxias, pois é nelas que ficam as estrelas”, conta Foley. “A sorte favorece os preparados e nós estávamos prontos.” Havia cerca de 50 galáxias na área a ser vasculhada.

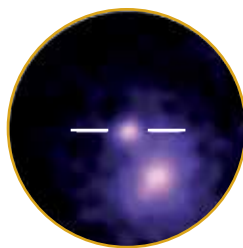
O flagra foi obtido com o Swope, um pequeno e antigo telescópio óptico mantido pela Carnegie Institution, dos Estados Unidos, no Observatório Las Campanas, situado cerca de 600 quilômetros ao norte de Santiago, no Chile. Localizado no topo de uma montanha com quase 2.400 metros de altitude, o Swope foi inaugurado em 1971 e tem um espelho de 1 metro de diâmetro. O campo de visão de sua câmera, no entanto, é relativamente grande. Permite ver uma porção do céu equivalente a 0,25 grau quadrado, pouco mais do que uma lua cheia vista da Terra. “Não tinha como não ver [o ponto]. Era como se colocassem um dedo na frente do seu olho”, exagera Foley. Usando um telescópio

# UMA EMISSÃO VISTA EM DIFERENTES CORES

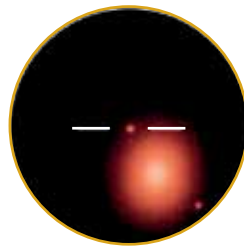
A radiação eletromagnética decorrente da colisão das estrelas de nêutrons foi observada ao longo de duas semanas por dezenas de observatórios e telescópios



1  
Imagens do fenômeno na luz visível foram as primeiras a ser captadas



O satélite Swift, da Nasa, registrou a luz ultravioleta provocada pela explosão



O telescópio sul do Observatório Gemini, no Chile, fez medições no infravermelho



As emissões de rádio foram as últimas a ser flagradas, 16 dias após o evento

bem mais potente, o Blanco, instalado em Cerro Tololo, no Chile, a equipe coordenada pela física brasileira Marcelle Soares-Santos, da Universidade Brandeis, demorou 10 minutos a mais do que o grupo IM2H para encontrar o ponto luminoso na galáxia NGC 4993 (ver entrevista na página 30).

Entre os cerca de 70 instrumentos terrestres e espaciais que conseguiram observar por duas semanas a emissão de radiação eletromagnética decorrente da fusão das estrelas de nêutrons em diferentes comprimentos de onda, outro pequeno telescópio, igualmente instalado no Cerro Tololo, contou com a participação de brasileiros. Trata-se do T80 Sul, que tem um espelho de 0,8 metro, mas uma câmera com campo de visão oito vezes maior do que a do Swope. Isso o torna ideal para varrer vastas áreas do céu em pouco tempo. “Obtivemos os dados como parte de uma rede de pequenos telescópios, a colaboração Toros, que tenta localizar emissões eletromagnéticas associadas a eventos que produzem ondas gravitacionais”, explica a astrofísica Claudia Mendes de Oliveira, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), idealizadora do T80 Sul.

O telescópio localizou a emissão óptica produzida pela fusão das estrelas de nêutrons apenas na segunda noite, após a equipe receber as

coordenadas do objeto por meio de várias circulares, cerca de 35 horas depois do primeiro aviso do Ligo-Virgo. “Tivemos má sorte. Na primeira noite, olhamos quase metade dessa área, mas começamos pelo lado oposto em que ficava a galáxia NGC 4993”, conta Claudia. Ainda assim, o T80 Sul realizou medições importantes e seus dados aparecem em dois artigos científicos publicados sobre as emissões eletromagnéticas produzidas pela colisão das estrelas de nêutrons.

O T80 Sul funciona de forma robotizada e seu controle pode ser feito remotamente, a partir de qualquer lugar do planeta. O equipamento começou a funcionar regularmente há seis meses, custou pouco mais de US\$ 2 milhões e foi financiado pela FAPESP e pelo Observatório Nacional (ON). Sua função principal é fazer um levantamento de objetos celestes presentes no hemisfério Sul em 12 bandas espectrais distintas, mas pode ser empregado igualmente para outros fins ou alvos de ocasião, como ocorreu na procura pela luz proveniente da colisão das estrelas de nêutrons. No segundo semestre de 2018, quando os três detectores de ondas gravitacionais, que no momento não estão funcionando, voltarem a operar, o T80 Sul e os demais parceiros do Ligo-Virgo poderão ter uma nova chance de encontrar a radiação eletromagnética produzida por eventos explosivos ocorridos em algum canto do Universo. ■



2  
Telescópio T80 Sul, um projeto brasileiro instalado no Chile, também registrou o fenômeno

## Projeto

EMU: Aquisição de um telescópio robótico para a comunidade astronômica brasileira (nº 09/54202-8); Modalidade Auxílio à Pesquisa – Programa Equipamentos Multiusuários; Pesquisadora responsável Claudia Mendes de Oliveira; Investimento R\$ 5.075.402,98.

## Artigo científico

DÍAZ, M. C. *et al.* Observations of the first electromagnetic counterpart to a gravitational-wave source by the TOROS Collaboration. *Astrophysical Journal Letters*. v. 848, n. 2. 16 out. 2017.

# CAÇADORA DE COLISÕES

Física brasileira coordena grupo que procura emissões luminosas associadas à produção de ondas gravitacionais

**N**a manhã de 16 de outubro, a física Marcelle Soares-Santos era a única brasileira entre os 16 líderes de grupos de pesquisa que anunciaram em uma entrevista na sede da National Science Foundation, nos Estados Unidos, a observação de um fenômeno que pode transformar o que se conhece sobre o Universo.

Aos 36 anos, Marcelle é professora na Universidade Brandeis e pesquisadora no Fermi National Accelerator Laboratory, o Fermilab, um dos mais importantes laboratórios de física de partículas do mundo, ambos nos Estados Unidos. Nascida em Vitória, Marcelle graduou-se em física na Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) e fez mestrado e doutorado em astronomia na Universidade de São Paulo (USP). Chegou ao Fermilab em 2010 para um estágio de pós-doutorado e auxiliou na construção de um dos maiores detectores de luz já construídos: uma câmera de 570 megapixels que está instalada em um telescópio no Chile para mapear 300 milhões de galáxias no projeto Dark Energy Survey (DES). Hoje, ela coordena no DES uma equipe que busca a luz emitida por eventos que geram ondas gravitacionais.

A seguir, ela fala sobre o fenômeno detectado e o potencial uso das ondas gravitacionais para calcular a taxa de expansão do Universo.

## **Qual foi seu papel nas observações ligadas à colisão de estrelas de nêutrons?**

Começou com minha participação no DES, que tem como objetivo observar 300 milhões de galáxias e estimar a contribuição da energia escura para a arquitetura do Universo. Entrei na fase de construção da câmera usada nas observações e ganhei a confiança dos meus colegas pelo trabalho, que era testar cada componente da câmera. Em setembro de 2012, quando a construção da câmera terminou, o DES começou a acumular a amostra de milhões de galáxias. Usei minha experiência em análise de dados e o conhecimento da câmera para fazer estudos sobre aglomerados de galáxias e rapidamente alcancei uma posição de liderança. Em julho de 2013, quando a colaboração que opera o Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais, o Ligo, fez uma chamada para astrônomos, vi a oportunidade de nosso grupo do DES ter uma atuação importante.

## **Onde estava quando os observatórios Ligo e Virgo informaram ter detectado a colisão das estrelas de nêutrons?**

No apartamento onde morava em Chicago. O evento foi detectado em 17 de agosto, no dia em que o caminhão de mudanças chegou para levar minhas coisas para Waltham, no estado de Massachusetts, onde fica a Universidade Brandeis, para

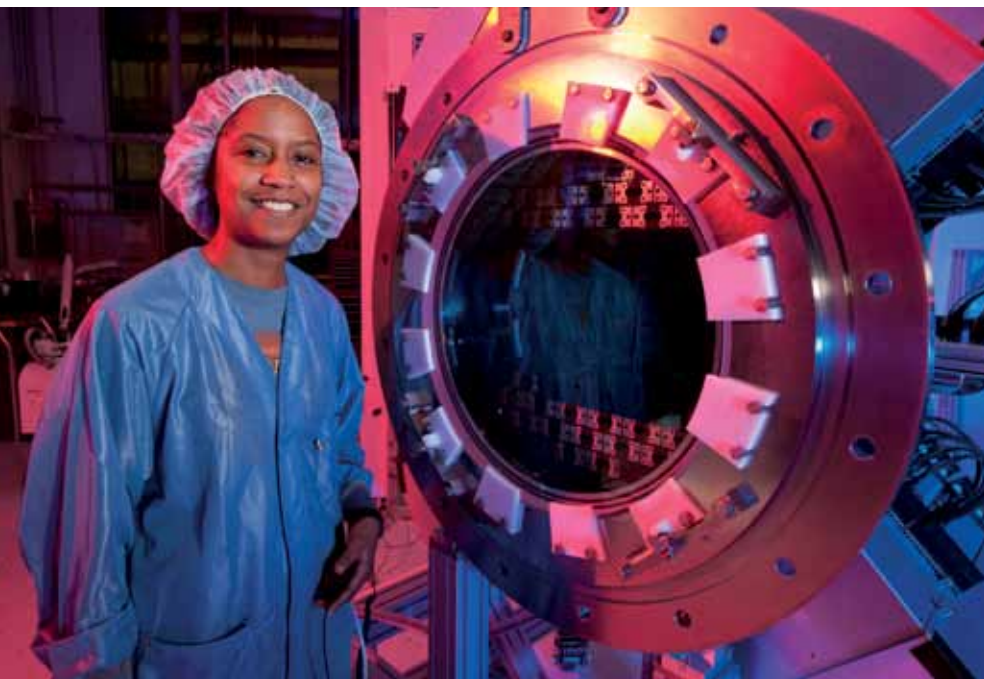
onde eu estava me transferindo. Eu tinha acabado de me deitar quando o telefone tocou por volta de 7h40 da manhã com o alerta automático do Ligo. Tinha passado a noite trabalhando, porque havia ocorrido uma colisão de buracos negros em 14 de agosto. Pensei que algo tivesse dado errado nas análises desse evento. Não imaginava que fosse um novo. Pulei da cama para o computador e, com meus colegas, iniciamos o planejamento para as observações no Chile após o pôr do sol. Havia um grupo no telescópio e outro no Fermilab. Nas horas seguintes meu apartamento ficou vazio. As últimas coisas que restaram foi meu laptop, uma cadeira e o roteador da internet.

## **Fazia tempo que esperava observar a colisão de estrelas de nêutrons?**

Desde que o Ligo entrou em sua segunda fase de operação em 2015, a expectativa era de que os primeiros eventos fossem colisões de estrelas de nêutrons, e não de buracos negros. Na natureza se espera que os sistemas de massas menores, como os de estrelas de nêutrons, existam em maior quantidade. Seria, portanto, mais fácil observá-los. Foi uma surpresa verificar que buracos negros com massa de 10 a 30 vezes superior à do Sol são tão comuns [Rainer Weiss, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), e Kip Thorne e Barry Barish, do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), receberam o Nobel de Física de 2017 pela detecção de ondas gravitacionais emitidas pela fusão de buracos negros].

## **Quais foram os passos seguintes ao alerta do dia 17?**

Por conta das buscas que fizemos após a detecção das colisões de buracos negros, já tínhamos exercitado o procedimento três ou quatro vezes. Primeiro, fizemos um mapa do céu e identificamos a região em que o evento provavelmente ocorreu. Com base na posição do telescópio no Chile e no número de horas que conseguimos observar por noite, calculamos a área a ser coberta e como varrer o máximo dela. Nesse evento, a distância era pequena e fizemos uma lista de galáxias. Toda vez que uma delas aparecia no campo observado, um grupo olhava as imagens antes de serem processadas por computador em busca de sinais de emissão luminosa. Fomos um dos primeiros grupos a detectar a luz da fonte de ondas gravitacionais. Logo depois de observar a



Marcelle e a câmera que ajudou a construir, usada no projeto Dark Energy Survey

fonte, enviamos um e-mail comunicando o achado aos parceiros do Ligo e verificamos que outro grupo havia identificado a mesma fonte 10 minutos antes.

#### ***Foi na primeira bateria de observação?***

Na primeira noite. As observações duraram cerca de uma hora. Depois de achar o candidato mais plausível, mudamos a estratégia para a noite seguinte. Focamos as observações nesse objeto para obter o máximo de informação sobre ele e monitorar sua evolução. Também fizemos uma segunda varredura na região em busca de outras possíveis fontes. A área indicada pelo Ligo e pelo Virgo tinha 30 graus quadrados [área ocupada no céu por 150 luas cheias]. Observamos 70 graus quadrados porque a experiência com os eventos anteriores mostrou que, após o mapeamento inicial, o Ligo faz uma análise mais refinada, o que pode mudar a posição do objeto no céu.

#### ***Havia muitos objetos na área indicada?***

Os dados sugeriam que a colisão teria ocorrido a 40 megaparsecs ou 130 milhões de anos-luz. No volume formado por 30 graus quadrados e 40 megaparsecs, existem umas 50 galáxias. Em uma análise ignorando a distância, encontramos 1.500 possíveis fontes. Só uma passou pelos três critérios estabelecidos para excluir falsos candidatos.

#### ***Por que é importante associar a emissão de luz à da onda gravitacional?***

No caso de agosto, as ondas gravitacionais permitiram saber que eram duas estrelas de nêutrons, e não dois buracos negros, e que estavam a 40 megaparsecs. Mas não dá para saber se o resultado da colisão foi um buraco negro ou uma estrela de nêutrons. Nem se a colisão gerou elementos químicos pesados, se houve perturbação do ambiente ao redor ou se esse ambiente era diferente do encontrado com frequência nas galáxias. Só é possível conhecer isso com a combinação das ondas gravitacionais com a contrapartida óptica.

#### ***Você estudou ondas gravitacionais no mestrado e estrelas de nêutrons no doutorado. Era uma preparação para observar um evento como esse?***

Eu planejava trabalhar em cosmologia. Na iniciação científica e no mestrado, fiz cálculos de como seria o espectro de ondas gravitacionais primordiais, que existiriam desde o início do Universo, e não dessas geradas em colisões. Um detector futuro como o Lisa, liderado pela ESA [Agência Espacial Europeia], para registrar ondas gravitacionais a partir do espaço, talvez tenha sensibilidade para observá-las. Era tudo muito teórico e sentia falta de algo observacional. No doutorado, fui trabalhar com aglomerados de galáxias, as maiores estruturas

do Universo. A taxa de formação desses aglomerados depende da cosmologia. Se existir muita energia escura, a taxa de formação é menor. Desenvolvi algoritmos para encontrar os aglomerados nos dados do Sloan Digital Sky Survey, que varreu um terço do céu e observou 500 milhões de objetos. No pós-doutorado, continuei estudando os aglomerados. Voltei a me interessar pelas ondas gravitacionais quando o Ligo anunciou que iria iniciar uma nova rodada de observações.

#### ***O que as ondas gravitacionais podem revelar sobre a energia escura?***

Eventos como as colisões de estrelas de nêutrons podem ser usados em cosmologia de forma análoga às supernovas. Supernovas são explosões de estrelas com massa elevada. Elas são chamadas de velas-padrão porque emitem uma luminosidade conhecida, o que permite estimar a que distância estão de nós. Já as colisões de estrelas de nêutrons são conhecidas como sirenes-padrão, porque sua detecção é semelhante à de ondas sonoras [embora ondas gravitacionais sejam diferentes de ondas de som]. A intensidade das ondas gravitacionais detectadas na Terra depende da massa das estrelas, que pode ser calculada a partir do formato da onda detectada. Após identificar vários eventos como o de agosto, será possível medir distâncias em escala cosmológica. O evento de agosto permitiu calcular a taxa de expansão do Universo, a chamada constante de Hubble, com uma incerteza de 15%. É alta, mas, com mais eventos, deve diminuir. Isso é importante porque há uma dúvida: as supernovas são mesmo velas-padrão ou poderia haver variações entre elas que afetariam as medições? Medidas usando a radiação cósmica de fundo [radiação em micro-ondas emitida quando o Universo tinha 380 mil anos] dão valores discrepantes dos obtidos com as supernovas. As ondas gravitacionais podem ser uma alternativa para essas medições.

#### ***Quais seus planos futuros?***

Usar as ondas gravitacionais para saber quanto há de energia escura no Cosmo. Queremos melhorar a detecção da luz de mais eventos, pois o número deve aumentar na próxima rodada de observações do Ligo-Virgo. E pretendo desenvolver uma estratégia de uso da próxima geração de câmeras e telescópios para o mapeamento de galáxias. ■ Ricardo Zorretto