

COSMOLOGIA

Medindo o Universo

Brasileiros propõem método alternativo para calcular a taxa de expansão do Cosmo baseado na distribuição de ondas gravitacionais e galáxias

IGOR ZOLNERKEVIC

Observações astronômicas extremamente precisas confirmaram nos últimos anos que os dois principais métodos usados para medir a velocidade de expansão do Universo, conhecida como constante de Hubble, estão em desacordo. A técnica que usa as chamadas velas-padrão, baseada no estudo da variação ao longo do tempo do brilho e da distância de alguns tipos de estrelas (cefeidas e supernovas do tipo Ia), indica que o valor da constante seria de aproximadamente 73 quilômetros por segundo a cada megaparsec (km/s/megaparsec), com incerteza estimada de 1,3%. A abordagem que analisa a radiação cósmica de fundo, um resquício das ondas eletromagnéticas formadas no Cosmo há 13,8 bilhões de anos, aponta que a velocidade de expansão seria de 67 km/s/megaparsec, com margem de erro inferior a 1%. Parsec é uma unidade de distância equivalente a 3,26 anos-luz.

A diferença, da ordem de 10%, entre o valor da constante fornecido pelos dois métodos gerou um impasse. Teve início então uma busca por formas alternativas para calcular a velocidade de expansão do Universo e, assim, verificar se algum dos resultados está correto ou se essa taxa obedece a outra razão. Algumas propostas recentes para determinar a constante exploram as propriedades relativamente simples de um fenômeno observado pela primeira vez em 2015: as ondas gravitacionais, distorções no tecido do espaço-tempo, geradas na colisão de pares de buracos negros ou estrelas de nêutrons. Em 2025, uma equipe de físicos brasileiros apresentou uma nova maneira de medir a constante de Hubble a partir da distribuição no céu de ondas gravitacionais e de galáxias.

A ideia foi proposta em artigo publicado em abril no *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. “A cosmologia precisa de uma terceira

via”, afirma o físico Raul Abramo, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF-USP), um dos formuladores da proposta. “Temos uma boa chance de resolver o impasse relativo ao valor da constante de Hubble nos próximos cinco a 10 anos.” Uma primeira tentativa de empregar a nova abordagem para calcular a velocidade de expansão do Universo chegou ao valor de 67 km/s/megaparsec, similar ao encontrado pela técnica que analisa a radiação cósmica de fundo. Mas a margem de incerteza do trabalho, disponibilizado em artigo não revisado por pares no repositório de *preprints* arXiv, é muito alta ainda, de 24%.

A limitação se deve às características dos dados disponíveis sobre ondas gravitacionais para produzir o estudo. Em setembro de 2015, os detectores gêmeos da colaboração Ligo, nos estados norte-americanos de Washington e Louisiana, registraram pela primeira vez um sinal desse tipo produzido pela colisão de dois buracos negros estelares. Desde então, o Ligo, em conjunto com os detectores Virgo, na Itália, e Kagra, no Japão, registrou 219 eventos, em sua maioria colisões de pares de buracos negros, mais alguns candidatos a colisões entre um buraco negro e uma estrela de nêutrons, além de duas colisões confirmadas de estrelas de nêutrons. Os detectores da colaboração Ligo-Virgo-Kagra (LVK) medem a distância dos eventos que produzem ondas gravitacionais com um grau de incerteza entre 15% e 80%. Eles conseguem localizar a área em que o fenômeno ocorreu no céu de forma imprecisa, com margem de erro entre cinco e 1.500 luas cheias.

A expansão do Universo foi descoberta em 1929 pelo astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953). Ele observou que, quanto mais distante uma galáxia, mais avermelhada é sua luz (*ver quadro na página 56*). Chamado de *redshift*, esse desvio para o vermelho é uma medida da velocidade de afastamento das galáxias. Quanto maior

Ilustração mostra a fusão de dois buracos negros que gera ondas gravitacionais

a distância entre uma galáxia e a Via Láctea, mais espaço em expansão há entre elas e, portanto, maior sua velocidade de afastamento. A intensidade com que o *redshift* aumenta com a distância é determinada pela constante que ganhou o nome de seu descobridor. Cosmólogos concordam que um terceiro método independente, com precisão comparável aos que empregam as velas-padrão e a radiação cósmica de fundo, poderá resolver a divergência em torno do valor da taxa de expansão do Universo, conhecida como tensão de Hubble.

A formulação da nova abordagem proposta pelos físicos brasileiros começou três anos atrás. Em 2023, durante uma conferência internacional em São Paulo, patrocinada pela FAPESP, Abramo e outros colegas – Riccardo Sturani, da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Miguel Quartin, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro, e Isabela Matos, hoje na Universidade de Portsmouth, no Reino Unido – se uniram para estudar a fundo essa questão. A meta era desenvolver um método que dependesse o menos possível de premissas assumidas pelos modelos cosmológicos, que descrevem o nascimento e a evolução do Universo, e não se apoiasse no comportamento de estrelas, objetos muito complexos. Dessa forma, o grupo tentaria chegar a um valor para a constante que, segundo eles, seria menos sujeita a erros sistemáticos.

Os físicos acreditam ter concebido um método promissor ao comparar os registros de ondas gravitacionais e a distribuição da matéria no Cosmo observável, algo tecnicamente denominado estru-

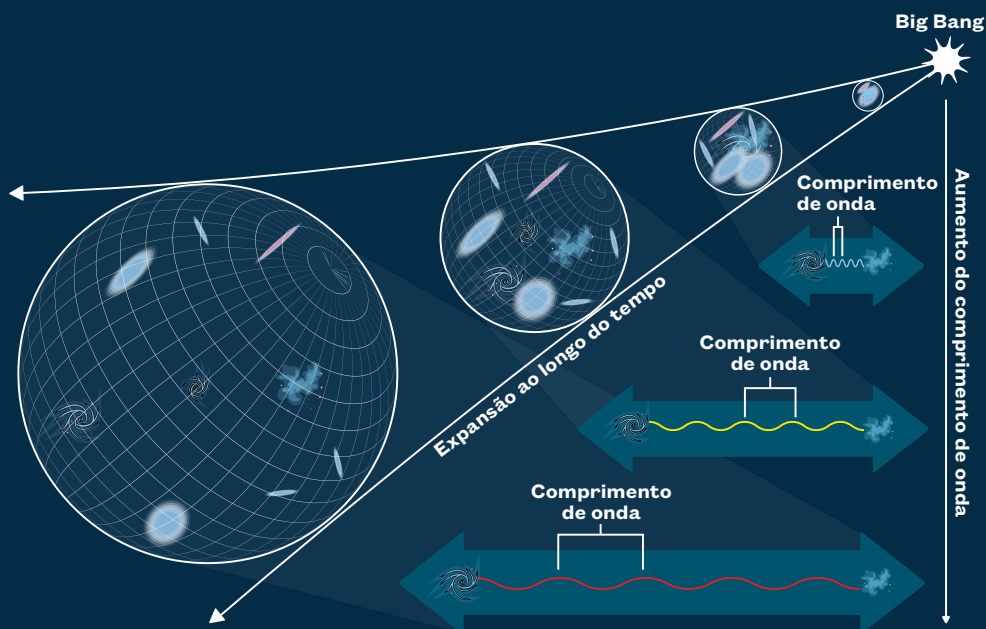
tura em grande escala do Universo. As galáxias não se distribuem de maneira aleatória. Elas se aglomeram de tal forma que, quando há uma no céu, é muito provável que existam outras em sua vizinhança. Essa probabilidade diminui à medida que as galáxias se afastam umas das outras. Há décadas, astrônomos mensuram essa distribuição espacial. Como as ondas gravitacionais são produzidas no interior de galáxias, sua distribuição no céu tenderia a ocorrer em regiões onde haveria o máximo possível de galáxias ao seu redor. Essa constatação permitiria combinar as distâncias das ondas gravitacionais com o *redshift* de suas galáxias vizinhas para calcular a constante de Hubble.

Outros pesquisadores já haviam notado essa possibilidade, mas foi a equipe brasileira que demonstrou como fazer na prática. O problema de sobrepor um mapa tridimensional das galáxias a outro de ondas gravitacionais é que a velocidade de afastamento desses enormes conjuntos de estrelas (seu *redshift*) é conhecida, mas não a distância exata. Sabe-se apenas que quanto maior o *redshift*, maior a distância, e ambas as quantidades são relacionadas pela constante de Hubble. O jeito então é procurar, por métodos indiretos, o valor para a constante. A nova abordagem equivale a esticar ou contrair a escala do mapa das galáxias até atingir a melhor combinação com o mapa das ondas gravitacionais. “Os dois mapeamentos das galáxias, com luz (*redshift*) e ondas gravitacionais (distância), sobrepõem-se quando a constante de Hubble está correta”, explica Sturani.

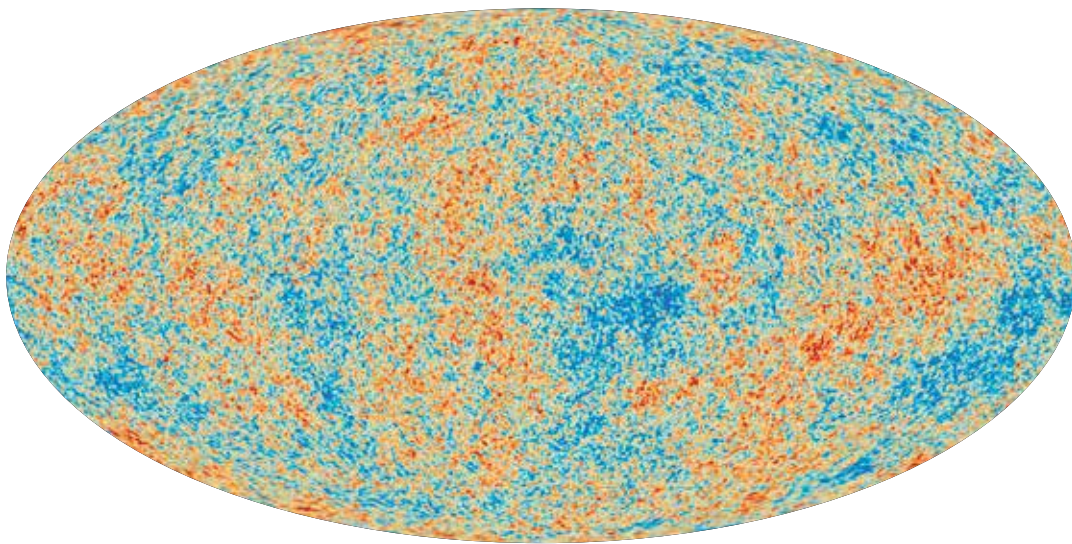
Abramo colocou seus alunos de doutorado João Ferri e Ian Tashiro para realizarem centenas de milhares de simulações computacionais da estrutura espacial das galáxias e das ondas gravitacio-

Expansão do espaço muda a luz para o vermelho

Desde o Big Bang, o espaço físico do Universo tem se ampliado. O tamanho de estrelas e galáxias não muda, mas a distância entre elas aumenta. Ao viajar pelo Cosmo em expansão, o comprimento da onda da luz se torna cada vez maior e mais avermelhado. É o que se chama de desvio para o vermelho (*redshift*)



Mapa do céu com as flutuações de temperatura associadas à radiação cósmica de fundo



nais, de modo a quantificar suas coincidências ou correlações estatísticas. As simulações demonstraram a viabilidade do método, que Quartin batizou de pico das sirenes. O nome faz alusão às ondas gravitacionais produzidas pelas colisões de buracos negros, que são chamadas de sirenes-padrão, numa analogia com o som cuja intensidade revela a distância da fonte, e ao pico máximo que mede a coincidência espacial entre a distribuição das galáxias e das fontes de ondas (sirenes). Desde a publicação do método em 2025, três grupos de pesquisadores independentes, na Alemanha, na França e nos Estados Unidos, usaram a nova técnica em outros trabalhos. “Eles fizeram outros conjuntos de simulações e conseguiram reproduzir nossos resultados”, conta Quartin.

O passo seguinte foi testar o pico das sirenes com dados reais. Matos liderou o estudo, em parceria com o físico Charles Dalang, da Escola Normal Superior de Paris, na França, e a coordenadora de cosmologia da colaboração LVK, a física Tessa Baker, da Universidade de Portsmouth, junto com Abramo, Ferri e Quartin. A equipe analisou o catálogo GLADE+, usado para testar diferentes métodos de análise de ondas gravitacionais. É uma compilação de observações de vários telescópios cobrindo o céu inteiro, com 22 milhões de galáxias relativamente próximas, a menos de 424 milhões de anos-luz de distância. As galáxias foram comparadas com 90 sirenes-padrão, observadas até março de 2020 pelo Ligo e o Virgo (o Kagra só se juntou à rede em 2021). Devido à alta incerteza nos parâmetros da maioria das sirenes, os pesquisadores acabaram utilizando os dados de apenas duas delas para calcular a constante de Hubble, chegando ao valor de 67 km/s/megaparsec, que consta do *preprint* disponível no arXiv.

No momento, a equipe está trabalhando com catálogos de galáxias mais distantes e com os dados mais recentes da colaboração LVK, obtidos entre 2023 e 2025. A grande expectativa, porém, é para depois de 2027. As simulações sugerem que a próxima campanha da LVK reduzirá a incerteza sobre a localização das ondas gravitacionais de pico para 5% ou menos. Com os futuros detectores, o erro deverá cair para menos de 1%. “Quando chegarmos por volta de 3%, já poderemos ajudar a resolver a tensão de Hubble”, garante Abramo.

As simulações também indicam que, com dados de galáxias mais distantes, as sirenes de pico poderão medir não apenas a velocidade atual de expansão do Universo, mas também sua aceleração ao longo de bilhões de anos, causada pela energia escura. De natureza desconhecida, a energia escura constitui cerca de 68% do Universo. Seu principal efeito é se contrapor à força da gravidade e acelerar a velocidade de expansão do Cosmo. “Nosso método é promissor para testar as propriedades da energia escura”, diz Quartin.

As incertezas da técnica das sirenes de pico devem diminuir após o início da próxima campanha de observações da colaboração LVK, prevista para o final de 2027, se não houver alteração nos planos. Nessa nova fase, o projeto espera detectar centenas de eventos com ondas gravitacionais por ano. Um refinamento ainda mais preciso da técnica poderá ocorrer na próxima década, quando deverão começar a ser construídos dois detectores mais sensíveis: o subterrâneo Einstein Telescope (ET), na Europa, e uma versão 10 vezes maior que os detectores do Ligo, o Cosmic Explorer (CE), nos Estados Unidos. Essa próxima geração de detectores trabalha com a expectativa de registrar centenas de milhares de eventos por ano, com incertezas na distância menores que 2% e localizações reduzidas a áreas de até uma meia lua. ●