O QUE NOSSAS ÚLTIMAS BUSCAS POR UM FUNDO DE ONDAS GRAVITACIONAIS IMPLICA PARA A COSMOLOGIA E A FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS?

Introdução

Apesar do sucesso extraordinário dos Modelos Padrão de Física de Partícula e Cosmologia, nossa compreensão dos aspectos básicos da física fundamental é ainda incompleta. A natureza da matéria escura e energia escura, a origem da assimetria matéria/anti-matéria, a explicação da massa do neutrino, e a realidade da inflação cósmica permanecem questões importantes em aberto. Para resolver esses problemas, cenários envolvendo física além do Modelo Padrão estão sendo investigados e sob escrutínio em experimentos de física de astroparticulas, desde colisores até telescópios. Muitos desses cenários "Além do Modelo Padrão" também implicam a existência de novos fenômenos nos estágios iniciais do Universo, potencialmente deixando pegadas que podemos ver na forma de um fundo de ondas gravitacionais.

Os dados de LIGO/Virgo/KAGRA (LVK) permitem procurar por sinais de ondas gravitacionais de fundo que poderiam ter sido gerados por esses mecanismos no início do Universo, como uma transição de fase de primeira ordem, cordas cósmicas, paredes de domínios, uma equação de estado rigída, inflação axiônica, pertubações escalares de segunda ordem, buracos negros primordiais, e violação de paridade. Nós discutimos brevemente cada um desses fenômenos abaixo.

TRANSIÇÃO DE FASE, CORDAS CÓSMICAS E PAREDES DE DOMÍNIOS

Desde o início, o Universo tem se expandido e esfriado constantemente e, nos tempos antigos, o Universo sofreu mudanças no estado fundamental - análogo ao que acontece quando a água líquida torna-se gelo. Quando a temperatura do universo cai, ele sofre uma série de transições de fases, entrando em estados com menos simetria, ou seja, onde a uniformidade inicial das forças da natureza se fragmentou em características distintas e específicas. Nesse processo, *defeitos topológicos*, como cordas cósmicas e paredes de domínio, podem aparecer. Uma corda cósmica é um objeto unidimensional, cuja energia é concentrada em uma linha. Isso é análogo às rachaduras que podem aparecer no gelo à medida que a água congela.

A **Figura 1** mostra uma cúspide e uma dobra em uma corda cósmica. Quando cúspide e dobras são formadas e aceleradas nas cordas cósmicas, ondas gravitacionais são emitidas. A colisão das dobras também cria ondas gravitacionais. Uma parede de domínio é um objeto bidimensional, um limite que separa dois domínios. Ou seja, um lugar onde as propriedades fundamentais do universo tiveram que transitar de um estado estável para outro.



Figura 1: ilustração simbólica das colisões que formam cúspides, dobras ou dupla-dobra, que dominam a produção de ondas gravitacionais por cordas cósmicas em altas frequências. [Crédito da imagem: Long, Hyde and Vachaspati]

UMA EQUAÇÃO DE ESTADO "RÍGIDA"

No modelo cosmológico padrão, o Universo foi dominado primeiro por partículas relativísticas (ou seja, partículas que se movem em velocidades próximas à velocidade da luz), depois entrando em uma era dominada pela matéria, na qual a densidade de energia do Universo se tornou dominada pelos movimentos das partículas em velocidades mais lentas. Alguns modelos físicos de alta energia implicam que essas diferentes eras podem ter sido precedidas por uma sequência não convencional de épocas, durante as quais a relação entre a pressão e a densidade da energia do Universo (conhecida como sua "equação de estado") era altamente incomum, com a pressão do fluido cósmico tão alta quanto a sua densidade da energia: esse cenário é chamado de uma equação de estado "rígida".

INFLAÇÃO AXIÔNICA

Para resolver alguns enigmas e questões sem respostas associadas ao modelo cosmológico do Big Bang, foi proposto que o universo passou por um período curto de rápida expansão, conhecido como inflação cósmica, durante o qual o Universo cresceu exponencialmente rápido. Entre os vários modelos inflacionários que têm sido considerados, a chamada inflamação axiônica é uma expansão exponencial criada por uma partícula hipotética chamada axion, que foi motivada por ideias de física de partículas de alta energia. Axions também são candidatos para matéria escura fria, sendo extremamente leves, eletricamente neutros e interagindo muito fracamente com a matéria normal.

SAIBA MAIS:

Visite nossos websites:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

PERTUBAÇÕES DE SEGUNDA ORDEM

O Universo em larga escala é homogêneo e isotrópico, em conformidade com o que é conhecido como o Princípio Cosmológico. No entanto, em pequenas escalas, o Universo não é assim tão regular: há *perturbações* — variações tanto na geometria quanto no conteúdo de matéria do Universo — que se acredita terem levado à existência de estruturas (ou seja, galáxias e aglomerados de galáxias) e vazios. Há diferentes tipos de perturbações cosmológicas. Flutuações na densidade e pressão do fluido cósmico são chamadas de perturbações escalares, enquanto ondas no próprio espaço-tempo são perturbações tensoriais, também conhecidas como ondas gravitacionais. Na Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, a gravidade é *não linear*. Matéria cria gravidade, mas a gravidade — por também conter energia — gera ainda mais gravidade. Como resultado disso, duas perturbações cosmológicas expressas em suas formas matemáticas mais simples podem interagir entre si para produzir uma perturbação mais complicada, conhecida como segunda-ordem.

BURACO NEGRO PRIMORDIAL

Buracos Negros Primordiais são, hipoteticamente, buracos negros que poderiam ter sido formados de uma variedade de diferentes formas em um Universo jovem. Suas massas poderiam ser bastante diversas e eles poderiam formar binários, ou seja, pares de buracos negros primordiais que são gravitacionalmente ligados um ao outro. Esses objetos têm ganhado muito interesse, já que são os candidatos mais plausíveis de matéria escura.

RESULTADOS: BUSCANDO POR ASSINATURAS DE MODELOS COSMOLÓGICOS NÃO PADRÃO

Todas as fontes cosmológicas acima poderiam produzir ondas gravitacionais de fundo. Buscar por tal contexto nos dados do LVK pode restringir os parâmetros dos modelos cosmológicos em escalas de energia acima daquelas que podemos alcançar usando aceleradores de partículas.

Ademais, *violação de paridade* é a ideia de que as leis da física podem não ser as mesmas quando você olha para uma imagem espelhada de um determinado processo. Um exemplo é a violação de CP, em que o princípio da CP, ou simetria de *conjugação de carga e paridade* (que estabelece que as leis da física deveriam ser as mesmas se uma partícula for trocada pela sua antipartícula enquanto suas coordenadas espaciais são invertidas ou "espelhadas"), é violado. Alguns modelos cosmológicos motivados pela física de altas energias podem resultar na produção de ondas gravitacionais que violam a paridade. Dados de LVK podem, portanto, também ser usados para pesquisar por processos de violação de paridade no Universo primitivo.

Em nossa nova publicação, nós usamos dados das quatro primeiras corridas observacionais de LVK para pesquisar por um fundo de ondas gravitacionais para todas as fontes cosmológicas que descrevemos acima. Ao mesmo tempo, também consideramos a contribuição para o fundo de ondas gravitacionais de fontes astrofísicas fracas e distantes, como coalescências de binárias compactas — as fusões de, por exemplo, sistemas binários de buracos negros e sistemas binários de estrelas de nêutrons — por todo o Universo.

Nenhum sinal foi encontrado, mas nossa análise ainda conseguiu impor restrições nos modelos que nós testamos. Um exemplo dessas restrições, no caso dos buracos negros primordiais, é mostrado na **Figura 2** (Fig. 14 da nossa publicação).

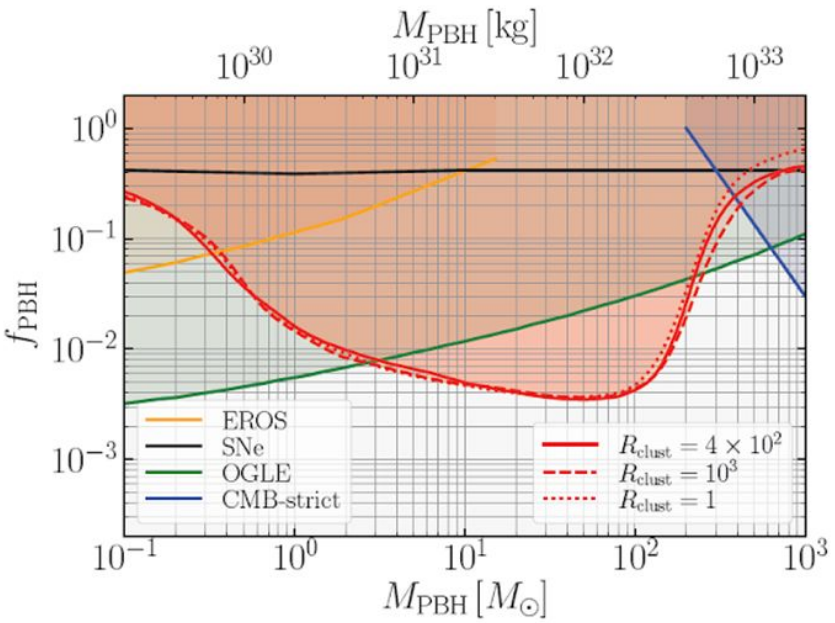


Figura 2 (Fig. 14 da nossa publicação): gráfico que mostra os vínculos obtidos nas nossas análises em $f_{\rm PBH}$, a fração hoje da matéria escura composta por buracos negros primordiais, em função da massa do buraco negro primordial $M_{\rm PBH}$ em unidades de massas Solares. A região sombreada em vermelho é excluída por nossas análises com uma probabilidade de 95%, ou seja, nós temos 95% de certeza de que a fração de matéria escura composta de buracos negros primordiais não pode ser maior do que os valores traçados pelas curvas vermelhas sólidas, tracejadas e pontilhadas — que correspondem a diferentes suposições de modelos sobre a taxa em que ocorrem fusões de buracos negros primordiais. Nós podemos ver na figura que a restrição em $f_{\rm PBH}$ para nossa análise de ondas gravitacionais é, em certos intervalos de massa, significativamente mais forte que as de outras sondagens astrofísicas, tais como censos de microlentes (EROS, OGLE), vínculos de lenteamento de supernovas (SNe) e medidas do fundo cósmico de micro-ondas (CMB-strict).

SAIBA MAIS

Visite nosso websites: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Leia uma pré-publicação gratuita do artigo científico aqui ou no arxiv.

Traduzido para o Português por Cássius de Melo e Fabiana Pinto, do grupo VirgoBR.