

IMPONDO LIMITES EM BOSÕES ULTRALEVES COM ONDAS GRAVITACIONAIS E SPINS DE BURACOS NEGROS

As ondas gravitacionais constituem uma forma poderosa de explorar os elementos fundamentais do nosso Universo que são difíceis ou impossíveis de investigar através de outras experiências. Os físicos sabem que a nossa melhor explicação sobre a forma como as partículas interagem entre si (conhecida como Modelo Padrão) está incompleta, e existem muitas teorias promissoras que propõem modificações ou extensões ao Modelo Padrão para explicar melhor as nossas observações. Neste estudo, a colaboração LIGO-Virgo-KAGRA utilizou observações de fusões de pares de buracos negros para investigar as propriedades dos bosões ultraleves: partículas que existem em algumas extensões propostas para o Modelo Padrão e que poderiam ajudar a explicar questões ainda por resolver na física de partículas e na cosmologia, incluindo a natureza da matéria escura.

Combinámos duas abordagens complementares: uma pesquisa direta de sinais de ondas gravitacionais de longa duração provenientes de nuvens de bosões vetoriais que rodeiam buracos negros recém-formados e uma pesquisa indireta baseada nos spins de buracos negros em fusão, ambas assentes num processo conhecido como superradiância de buracos negros. Embora não tenham sido encontradas provas da existência de bosões ultraleves, os nossos resultados impõem restrições mais robustas (ou seja, baseadas em menos pressupostos) e mais fortes (ou seja, com maior confiança) às massas dos bosões escalares e vetoriais, reduzindo ainda mais o espaço de parâmetros em que estas partículas poderiam existir.

O QUE É A SUPERRADIÂNCIA DE UM BURACO NEGRO?

Os [bosões](#) ultraleves são partículas hipotéticas previstas por muitas teorias que ampliam o [Modelo Padrão](#) da física de partículas. São extraordinariamente leves, muitas ordens de magnitude mais leves do que as partículas conhecidas, e estão entre os principais candidatos a constituir a [matéria escura](#). Neste estudo, consideramos tanto os bosões escalares ([spin 0](#)) como os [bosões vetoriais](#) ([spin 1](#)). Se tais partículas existirem, podem interagir com [buracos negros](#) em rotação através de um processo conhecido como [superradiância](#) de buracos negros. Neste processo, um buraco negro transfere parte da sua energia rotacional para o [campo bosónico](#), fazendo com que o campo [cresça exponencialmente](#) e forme uma nuvem de partículas em torno do buraco negro. À medida que a nuvem de bosões cresce, retira [momento angular](#) do buraco negro, fazendo com que este abrande a sua rotação, ou seja, reduza lentamente a sua velocidade de rotação. A nuvem também pode emitir [ondas gravitacionais](#) (OG) de longa duração que são quase monocromáticas (ou seja, com uma única frequência). Estes efeitos proporcionam duas formas complementares de procurar bosões ultraleves: diretamente através das OG emitidas pelas nuvens de bosões e indiretamente através de medições do spin dos buracos negros.

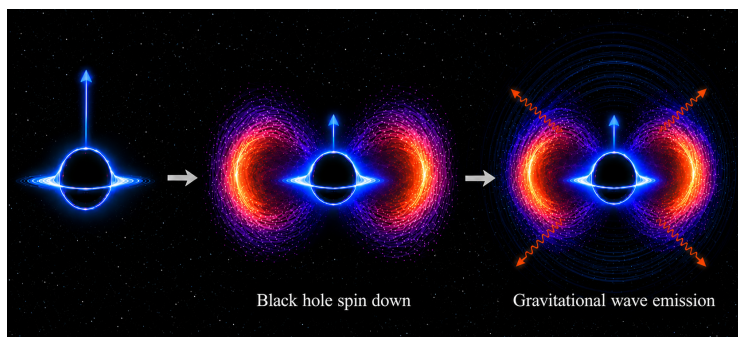


Figura 1: Representação esquemática da formação e evolução de uma nuvem de bosões em torno de um buraco negro em rotação. Na fase de crescimento, a superradiância extrai energia rotacional do buraco negro, amplificando a nuvem de bosões e diminuindo a rotação do buraco negro. Na fase subsequente de emissão de ondas gravitacionais, que é muito mais prolongada, a nuvem de bosões esgota-se lentamente através da [emissão contínua de ondas gravitacionais](#).

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



COMO É QUE PROCURAMOS NUVENS DE BOSÕES?

Utilizámos duas abordagens complementares para procurar os efeitos dos bosões ultraleves nas observações de ondas gravitacionais da colaboração LIGO-Virgo-KAGRA (LVK). Em primeiro lugar, procurámos sinais de ondas gravitacionais de longa duração provenientes de nuvens de bosões vetoriais que rodeiam os remanescentes de fusões de [sistemas binários de buracos negros](#). Concentrámo-nos nos bosões vetoriais porque se espera que estes produzam sinais de ondas gravitacionais mais intensos do que os bosões escalares, tornando-os mais detetáveis pelos nossos atuais detetores de ondas gravitacionais. Espera-se que estes sinais sejam quase monocromáticos e possam persistir durante horas ou meses após a fusão de buracos negros, tornando os buracos negros recém-formados alvos promissores.

Analísamos os dados relativos aos eventos [GW250114](#) e [GW250207](#) utilizando uma técnica conhecida como [Modelo de Markov Oculto](#), concebida para detetar sinais fracos cuja frequência evolui ao longo do tempo. Estes eventos foram selecionados porque os buracos negros remanescentes são massivos, giram rapidamente e estão relativamente próximos, o que os torna hospedeiros promissores para nuvens de bosões vetoriais detetáveis através da nossa pesquisa. Além disso, foram escolhidos porque os sinais das fusões eram excepcionalmente intensos, permitindo que as suas propriedades fossem medidas com precisão suficiente para possibilitar uma modelação exata dos sinais de ondas gravitacionais esperados.

Em segundo lugar, realizámos uma análise utilizando medições de buracos negros em rotação rápida observados em fusões de sistemas binários. Se existissem bosões ultraleves com massas correspondentes às massas destes buracos negros, a superradiância extrairia eficientemente o momento angular dos buracos negros e reduziria os seus spins. A observação de buracos negros com spin elevado em fusões de sistemas binários pode, portanto, excluir a existência de bosões com massas que já deveriam ter reduzido significativamente o spin destes buracos negros. Aplicámos esta abordagem aos eventos de fusão de alto spin GW240515_005301, GW241113_163507 e GW241225_082815, o que nos permitiu estabelecer restrições complementares tanto para os bosões escalares como para os vetoriais.

O QUE DESCOBRIMOS?

Através da [pesquisa direcionada](#) de ondas gravitacionais provenientes de nuvens de bosões vetoriais em torno de buracos negros remanescentes de fusões, não encontramos qualquer indício de um sinal. Assim, identificámos o intervalo de massas de bosões vetoriais que provavelmente teriam produzido ondas gravitacionais detetáveis, mas que não foram observadas. Isto permitiu-nos excluir, com uma [confiança](#) superior a 90%, as massas de bosões vetoriais no intervalo $[2,80; 3,95] \times 10^{-13}$ eV (onde 1 eV, ou elétron-volt, corresponde a uma massa de cerca de $1,8 \times 10^{-36}$ kg). Os nossos resultados são apresentados na [Figura 2](#). Em comparação com a [primeira pesquisa direcionada do LVK para nuvens de bosões vetoriais utilizando dados da O4a](#), a nossa análise alcança restrições substancialmente mais rigorosas.

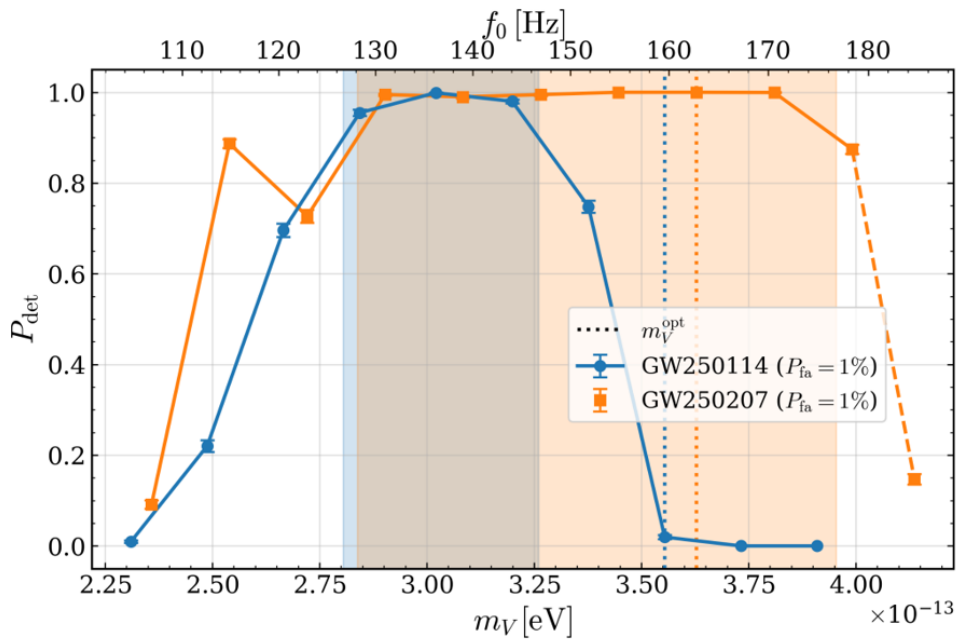


Figura 2 (Figura 3 do nosso artigo): A confiança estimada (P_{det}) com que podemos descartar a existência dos bosões vetoriais com uma massa dada pelo valor no eixo horizontal inferior, tendo em conta que as pesquisas centradas nos buracos negros remanescentes dos eventos GW250114 (azul) e GW250207 (laranja) não detetaram qualquer emissão de ondas gravitacionais. O eixo horizontal superior mostra a frequência correspondente na qual cada massa de bosão emitiria ondas gravitacionais. A região sombreada indica o intervalo de massas dos bosões vetoriais descartadas com 90% de confiança.

Essas restrições mais rigorosas devem-se, em grande parte, às propriedades dos eventos de fusão analisados neste estudo. As fusões de buracos negros GW250114 e GW250207 ocorreram ambas relativamente perto e foram detetadas com elevadas [relações sinal-ruído](#), tornando-as alvos particularmente favoráveis para esta pesquisa. Em conjunto, estes fatores melhoraram a nossa capacidade de detetar a emissão de ondas gravitacionais provenientes de nuvens de bosões vetoriais e, consequentemente, permitiram exclusões com um nível de confiança significativamente mais elevado das massas dos bosões vetoriais, com base na não deteção de emissão de ondas gravitacionais.

As nossas medições de spin da LVK constituem uma análise independente dos bósons ultraleves. Constatámos que os spins elevados observados em GW240515_005301, GW241113_163507 e GW241225_082815 são incompatíveis com uma redução de spin superradiante eficiente para determinadas massas de bósons. Assumindo tempos de vida conservativos dos buracos negros de, pelo menos, 100 000 anos, os spins medidos permitem-nos excluir massas de bósons escalares no intervalo $[1,39; 6,94] \times 10^{-13}$ eV e massas de bósons vetoriais no intervalo $[0,32; 14,4] \times 10^{-13}$ eV com um nível de confiança de 90% (ver **Figura 3**). Estas exclusões abrangem um intervalo de massas mais amplo do que a pesquisa direcionada e constituem um teste complementar da hipótese dos bósons ultraleves.

PORQUE É QUE ISTO É IMPORTANTE?

A ausência de um sinal detetado não significa que os bósons ultraleves não existam. Em vez disso, os nossos resultados mostram que é cada vez menos provável que estas partículas existam dentro de intervalos de massa específicos que teriam produzido efeitos observáveis nos nossos dados de ondas gravitacionais. Ao combinar uma pesquisa direta de ondas gravitacionais provenientes de nuvens de bósons vetoriais com restrições independentes provenientes de buracos negros em rotação elevada, este estudo estabelece alguns dos limites mais rigorosos até à data, baseados em ondas gravitacionais, para os bósons vetoriais ultraleves.

À medida que os detetores de OG se tornam mais sensíveis e o número de fusões de buracos negros observadas continua a aumentar, as futuras pesquisas irão explorar uma fração ainda maior do espaço de parâmetros dos bósons ultraleves. Estas observações poderão, eventualmente, revelar um indício direto da existência de novas partículas, ou poderão continuar a restringir o leque de teorias viáveis. Qualquer um destes resultados proporcionaria informações valiosas sobre a natureza fundamental da matéria escura.

De um modo mais geral, este trabalho demonstra como os buracos negros e as observações de ondas gravitacionais podem ser utilizados como laboratórios poderosos para a física de partículas, permitindo-nos testar ideias que são difíceis ou impossíveis de estudar em experiências terrestres.

PARA SABER MAIS:

Visita as

nossas www.ligo.org
páginas www.virgo-gw.eu
web: gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Lê uma pré-impressão gratuita do artigo científico completo:

<https://dcc.ligo.org/P2600218/public/>
ou no arxiv: <https://arxiv.org/abs/2608.11620>

Lê este resumo científico sobre a nossa pesquisa anterior (O3) sobre nuvens de bósons escalares em torno de buracos negros em rotação: <https://ligo.org/science-summaries/O3BosonClouds/>

Traduzido para o português por Inês Rainho e revisto por Tiago Fernandes a partir da versão original em inglês disponível [aqui](#).

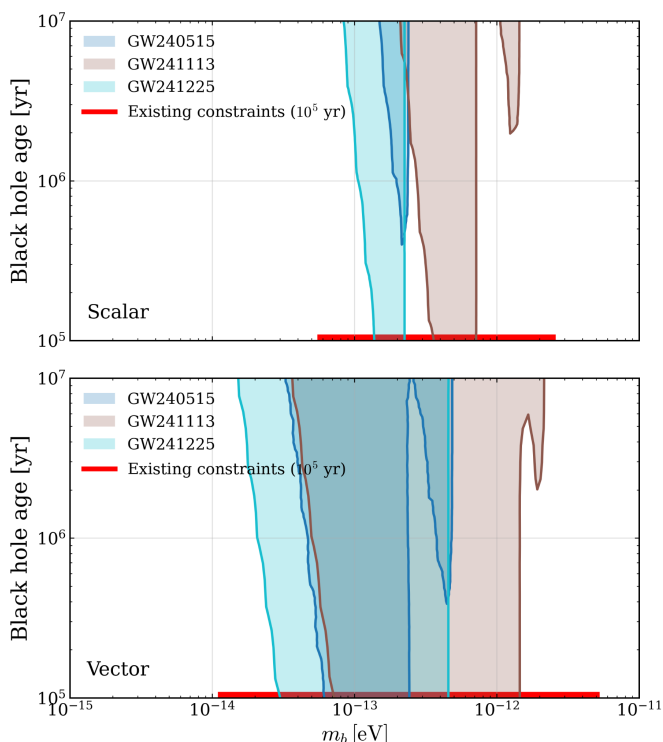


Figura 3 (Figura 4 do nosso artigo): Regiões de massas de bósons escalares ultraleves (painel superior) e vetoriais (painel inferior) excluídas pelas observações dos buracos negros em rotação rápida detetados nos eventos de ondas gravitacionais GW240515_005301, GW241113_163507 e GW241225_082815. As áreas sombreadas indicam massas de bósons que são incompatíveis, com um nível de confiança de 90%, com os spins dos buracos negros observados para uma determinada idade que assumimos do buraco negro.

GLOSSÁRIO

Bósons – Classe de partículas elementares. Os bósons não obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, ao qual obedecem os férmions (outra classe de partículas elementares, como os eletrões). Esta propriedade permite que muitos bósons ocupem o mesmo estado quântico ao mesmo tempo e formem objetos macroscópicos, como as nuvens de bósons que estamos a analisar.

eV – A abreviatura de eletrão-volt, uma unidade de energia frequentemente utilizada na física atómica e de partículas. Devido à relação entre energia e massa estabelecida por Einstein, $E = mc^2$, as massas das partículas podem ser expressas em unidades de energia divididas pelo quadrado da velocidade da luz, ou seja, eV/c². Por exemplo, a massa do eletrão é de $5,11 \times 10^5$ eV/c², enquanto a massa do neutrino, a partícula com massa mais leve atualmente conhecida, é inferior a 0,120 eV/c². Quando se utiliza o sistema de unidades naturais (que define $c = 1$), as massas são expressas em eV.

Superradiância – Um processo no qual as partículas extraem energia rotacional de um objeto massivo em rotação. No caso das nuvens de bósons, um campo bosónico nas proximidades de um buraco negro em rotação pode ser amplificado através da dispersão superradiante.

Bosão vetorial – Uma classe de partículas que possui um spin igual a 1. Por exemplo, um fóton é um bosão vetorial e transmite a força eletromagnética. Aqui, consideramos um bosão vetorial e a sua força, que não estão incluídos no modelo padrão da física de partículas.