

UNA NUOVA RICERCA DI MATERIA OSCURA CON GLI SPECCHI IN ZAFFIRO DEL RIVELATORE DI ONDE GRAVITAZIONALI KAGRA

Cos'è la **materia oscura**? Gli scienziati si sono posti questa domanda per quasi un secolo, ma essa resta un grande mistero dell'universo. Le osservazioni astrofisiche hanno rivelato che qualcosa di invisibile ma pesante – la materia oscura – svolge un ruolo fondamentale nella formazione di galassie e stelle attirando con la forza di gravità la materia visibile. Ora sappiamo che la materia oscura rappresenta l'85% di tutta la materia nel nostro universo, ma non sappiamo ancora quali siano i suoi costituenti. Ad esempio, la materia oscura potrebbe essere costituita da buchi neri primordiali, ognuno dei quali pesa fino a centinaia di masse solari, oppure potrebbe essere una nuova particella con una massa simile alle particelle elementari più pesanti conosciute, o potrebbe essere una particella bosonica più leggera degli elettroni di decine di ordini di grandezza. Finora, né esperimenti né osservazioni hanno confermato in modo convincente alcuna di queste possibilità.

LIGO, Virgo e KAGRA sono interferometri laser che rivelano le onde gravitazionali misurando le minuscole variazioni di lunghezza che esse producono quando li attraversano. Sebbene siano progettati principalmente per rivelare onde gravitazionali, questi strumenti sono sensibili anche a certi tipi di materia oscura che inducono cambiamenti di lunghezza. Un possibile costituente della materia oscura è il cosiddetto **bosone vettore**.

Proprio come nel caso delle forze elettromagnetiche esercitate sugli oggetti elettricamente carichi immersi in un campo elettromagnetico, esistono delle forze che agiscono sugli oggetti dotati di un diverso tipo di "carica", non prevista dal modello standard della fisica delle particelle, presenti in un corrispondente campo vettoriale. La **materia oscura vettoriale** associata a bosoni vettori ultraleggeri produce forze oscillatorie su qualsiasi oggetto che trasporta queste cariche non standard. Questi oggetti possono essere gli specchi in un interferometro laser. La "carica" può essere il numero barionico, che conta semplicemente il numero di protoni e neutroni in uno specchio, o la **differenza B-L**, che è uguale al numero di neutroni. Gli interferometri laser misurano le variazioni periodiche di lunghezza tra gli specchi prodotte dalle forze della materia oscura vettoriale. Nel 2021, la collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA ha utilizzato i dati del terzo periodo osservativo (O3) di Advanced LIGO e Advanced Virgo e ha posto i migliori **limiti superiori** all'intensità di tali forze.

In LIGO e Virgo, tutti gli specchi sono fatti di quarzo fuso, e tutti gli specchi si muovono in modo quasi perfettamente sincrono nel campo di materia oscura vettoriale perché il rapporto carica-massa è lo stesso per tutti gli specchi. Gli interferometri laser sono sensibili alle variazioni di distanza tra gli specchi, ma hanno una sensibilità ridotta quando gli specchi si muovono in sincronia e la distanza rimane invariata. Nel caso di LIGO e Virgo, la sensibilità alla materia oscura vettoriale è di circa cinque ordini di grandezza inferiore rispetto al caso in cui gli specchi si muovono in modo differenziale. Il rivelatore KAGRA in Giappone è l'unico ad utilizzare lo **zaffiro** per i quattro specchi che costituiscono le masse di test principali e il quarzo fuso per altri specchi ausiliari. Nel caso in cui la materia oscura sia sensibile alla differenza **B-L**, gli specchi in zaffiro si muovono leggermente di più rispetto agli specchi in silice fusa perché sono leggermente più ricchi di neutroni. Pertanto, misurando la distanza tra gli specchi di zaffiro e silice fusa, KAGRA può essere più sensibile alla materia oscura vettoriale rispetto a LIGO e Virgo, in particolare per particelle di materia oscura più leggere.

In questo studio, abbiamo utilizzato i dati del primo periodo osservativo congiunto di KAGRA insieme al rivelatore **GEO600** in Germania (**O3GK**). Abbiamo sviluppato una nuova pipeline per la ricerca di variazioni periodiche di lunghezza. Poiché la massa della materia oscura vettoriale ultraleggera determina la frequenza di queste oscillazioni, possiamo cercare particelle di materia oscura con masse diverse cercando variazioni di lunghezza a frequenze diverse. Le fluttuazioni statistiche delle particelle di materia oscura ultraleggera, fanno sì che l'intensità di tali variazioni di lunghezza fluttui su una scala temporale chiamata tempo di coerenza. Pertanto, nella nostra ricerca abbiamo tenuto attentamente conto della

FIGURE TRATTE DALL'ARTICOLO

Per ulteriori informazioni su queste figure e su come sono state prodotte, si veda il [preprint](#) disponibile gratuitamente.

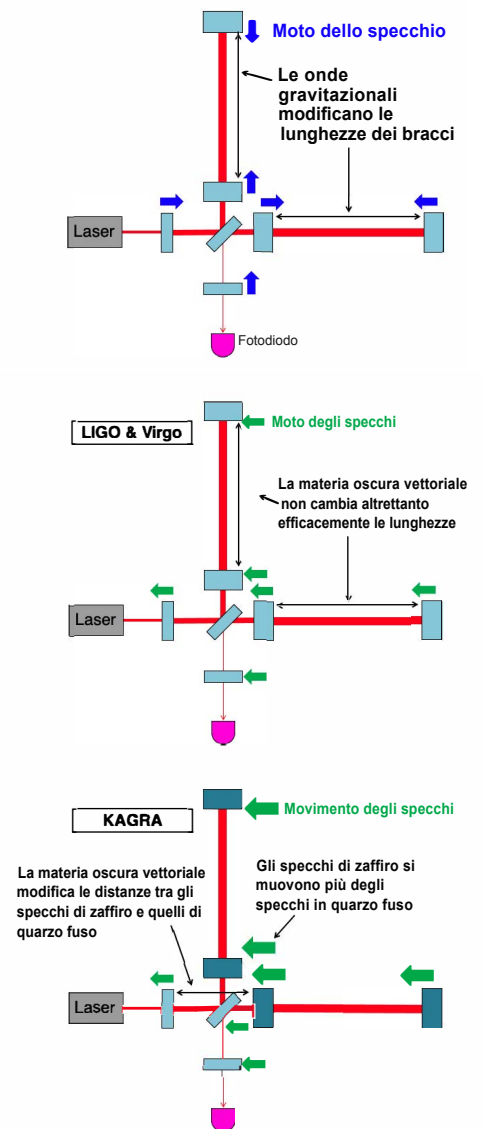


Figura 1: Infografica che illustra la risposta dell'interferometro laser alle onde gravitazionali (in alto), alla materia oscura vettoriale nel caso di LIGO e Virgo (al centro) e alla materia oscura vettoriale con i sensori di distanza di KAGRA, che registrano le distanze tra gli specchi di zaffiro e di quarzo fuso (in basso).

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org/

www.virgo-gw.eu/

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



natura stocastica dei segnali provenienti dalla materia oscura ultraleggera. Durante O3GK, KAGRA ha preso dati dai canali ausiliari che registrano le variazioni di distanza tra le masse di prova dello zaffiro e gli specchi ausiliari in quarzo fuso. Abbiamo analizzato più di 100 ore di dati, ma non abbiamo trovato alcun segnale di materia oscura e quindi abbiamo fissato limiti superiori all'intensità della forze prodotte dalla materia oscura vettoriale $B-L$.

Dal momento che KAGRA non aveva ancora raggiunto la sensibilità pianificata durante O3GK, i nostri limiti sono ordini di grandezza meno stringenti di quelli degli esperimenti precedenti. Tuttavia, il nostro studio ha dimostrato la fattibilità dell'utilizzo dei canali ausiliari che differenze di distanze nei rivelatori di onde gravitazionali come KAGRA per realizzare osservazioni astrofisiche. Durante il periodo osservativo O3GK, nel 2020, questi canali ausiliari non erano in alcun modo considerati utili per misure scientifiche. Il **fotodiodo** che registra l'effetto del passaggio delle onde gravitazionali è sensibile alle variazioni di distanza tra gli specchi di zaffiro mentre i canali ausiliari sono solitamente utilizzati solo per controllare che il fotodiodo funzioni in condizioni ottimali. Riducendo ulteriormente il rumore in questi canali ausiliari durante i futuri periodi osservativi, KAGRA potrà aiutarci a capire cosa sia la materia oscura.

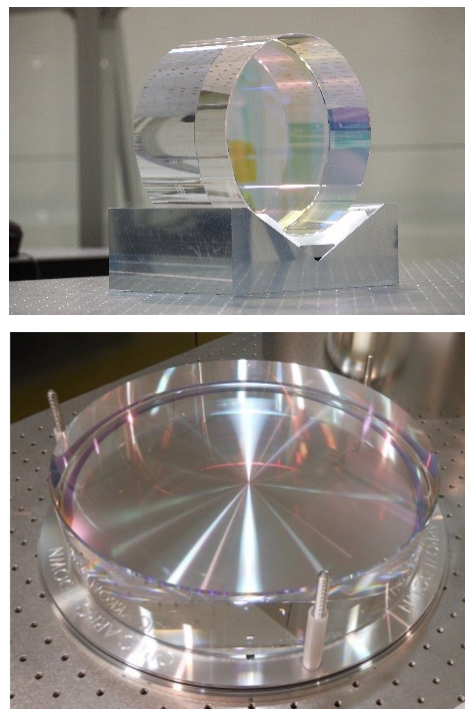


Figura 2: Per l'interferometro KAGRA sono stati utilizzati uno specchio in zaffiro (in alto) e uno specchio in quarzo fuso (in basso). Sebbene entrambi appaiano trasparenti e simili ai nostri occhi, lo specchio di zaffiro è leggermente più ricco di neutroni, muovendosi più degli specchi di quarzo fuso quando interagisce con la materia oscura vettoriale $B-L$.

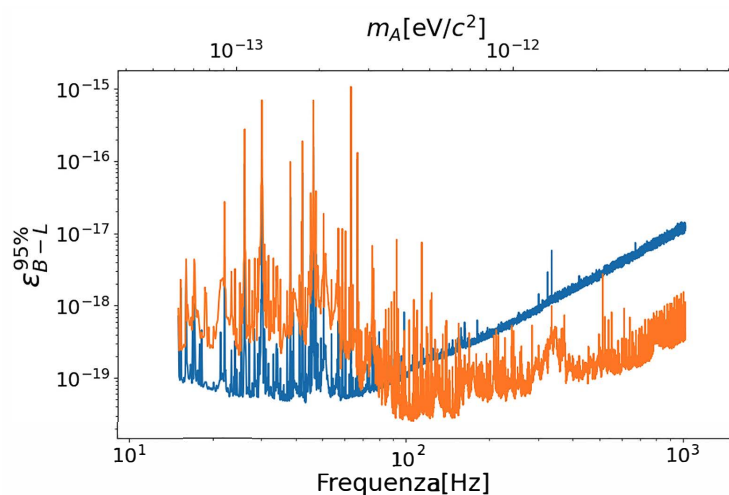


Figura 3: Limiti superiori sull'intensità delle forze della materia oscura vettoriale $B-L$ dai dati KAGRA. Le due curve provengono da canali ausiliari diversi che misurano la distanza tra specchi. La forza è espressa in termini di frazione della forza elettromagnetica. Per maggiori informazioni su questa figura e su come è stata prodotta, si veda il [preprint](#) disponibile gratuitamente.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

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

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo [qui](#) o [su arXiv.org](#).

GLOSSARIO

Bosone vettore: Classe di particelle con spin 1. Ad esempio, un fotone è un bosone vettore e trasporta la forza elettromagnetica. Qui consideriamo un tipo di bosone vettore con una forza associata che non sono inclusi nel modello standard della fisica delle particelle.

Differenza $B-L$: I barioni e i leptoni sono classi di particelle. La quantità $B-L$, è uguale al numero di barioni meno il numero di leptoni. Protoni e neutroni sono barioni e gli elettroni sono leptoni. Poiché il numero di protoni ed elettroni è lo stesso per gli atomi neutri, $B-L$ è uguale al numero di neutroni. Proprio come la carica elettrica è conservata, anche $B-L$ è conservata nel modello standard della fisica delle particelle. Quindi, il barione meno il numero leptonico può essere un nuovo tipo di carica per una nuova forza che ancora non conosciamo.

Fotodiodo: sensore a stato solido che produce una corrente proporzionale alla intensità luminosa che lo investe. I fotodiodi utilizzati negli interferometri gravitazionali sono caratterizzati da un bassissimo livello di rumore elettrico.

GE0600: Un rivelatore di onde gravitazionali situato ad Hannover, in Germania. Si tratta di un interferometro laser con bracci lunghi 600 m. Il raggio laser viaggia attraverso ciascun braccio due volte, fornendo una lunghezza del braccio ottico di 1,2 km.

KAGRA: Un rivelatore sotterraneo di onde gravitazionali situato a Kamioka nella prefettura di Gifu, in Giappone. Si tratta di un interferometro laser con bracci lunghi 3 km e specchi di massa di prova in zaffiro raffreddati criogenicamente.

LIGO: Il Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory (LIGO) è una coppia di rivelatori di onde gravitazionali con sede negli Stati Uniti. Uno di essi si trova vicino a Livingston, in Louisiana, e l'altro vicino a Hanford, nello stato di Washington. Entrambi i rivelatori sono interferometri laser con due bracci perpendicolari lunghi 4 km.

Limite superiore: Il valore massimo che una certa quantità può avere nel caso in cui lo strumento non sia stato capace di misurarla. In questo caso, usiamo il concetto per vincolare l'intensità delle forze dovute alla materia oscura vettoriale $B-L$ per diversi valori di massa o frequenza. Per definire il limite superiore usiamo un livello di credibilità del 95%, ovvero, con i nostri dati c'è una probabilità del 95% che la quantità sia inferiore a questo limite.

Materia oscura: Materia invisibile che rappresenta l'85% della materia dell'universo. Sappiamo solo che interagisce gravitazionalmente con la materia ordinaria che conosciamo.

Materia oscura vettoriale: Un tipo di materia oscura costituita da bosoni vettori, così chiamati perché il campo che li descrive si comporta come una quantità vettoriale. In seguito a quanto previsto dal teorema spin-statistica, ci aspettiamo che le particelle vettoriali abbiano spin 1. Anche i fotoni, che sono associati al comune campo elettromagnetico, sono un tipo di bosoni vettori.

Quarzo fuso: Un materiale comune per il vetro. Quarzo fuso estremamente puro, o biossido di silicio, è il materiale utilizzato per gli specchi delle masse di test in LIGO e Virgo, e per gli specchi ausiliari in KAGRA.

Virgo: Un rivelatore di onde gravitazionali situato vicino a Pisa, in Italia. Si tratta di un interferometro laser con bracci lunghi 3 km.

Zaffiro: KAGRA utilizza zaffiro artificiale per gli specchi che costituiscono le masse di test. Gli zaffiri naturali sono blu a causa delle impurità, ma quelli artificiali sono ossido di alluminio puro e sono incolori. Gli specchi in zaffiro hanno eccellenti proprietà ottiche e termiche a temperature criogeniche.