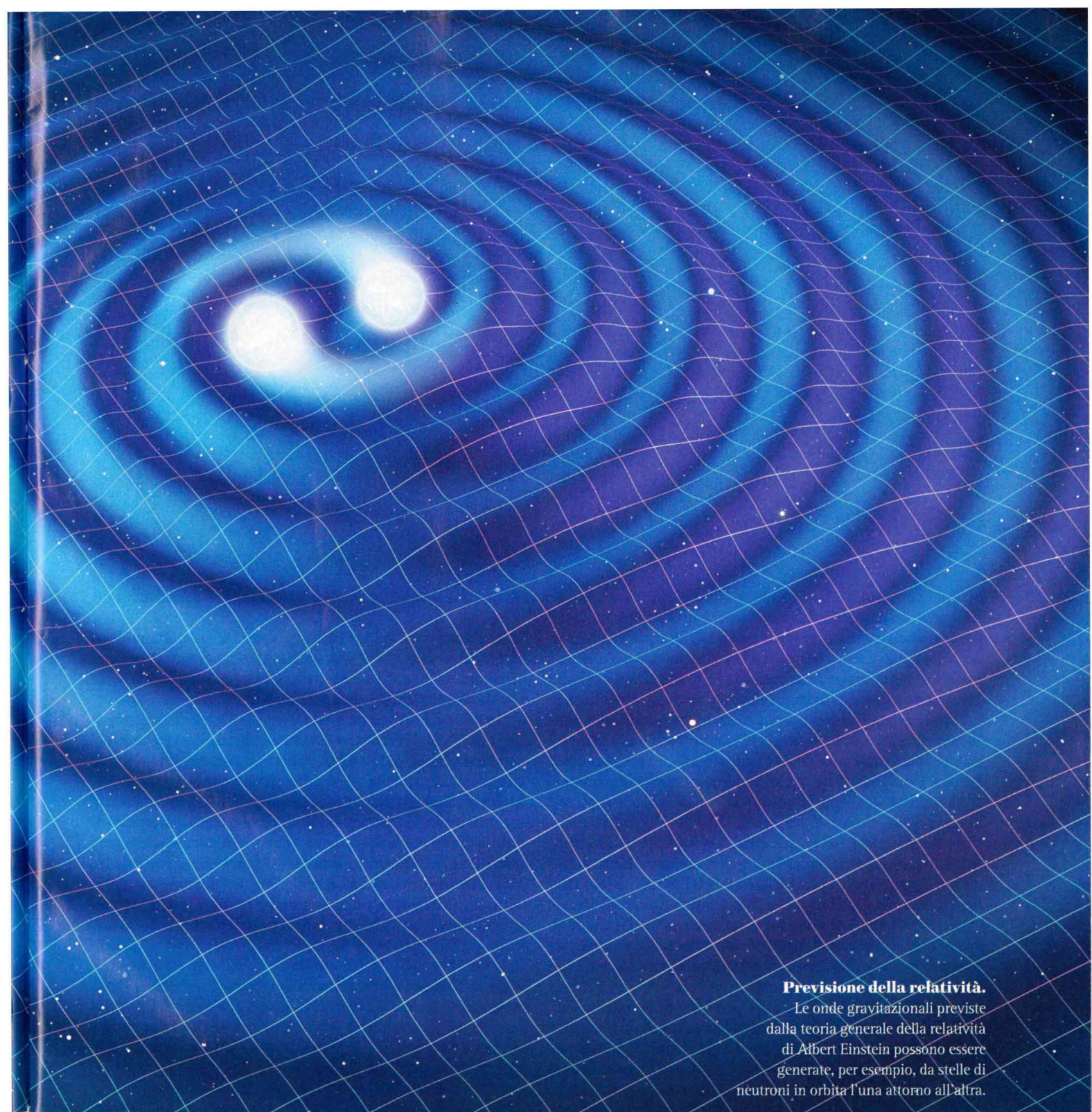


L'era delle onde gravitazionali

La prima rilevazione diretta delle increspature dello spazio-tempo previste oltre cent'anni fa da Albert Einstein ha aperto le porte a una nuova era per la conoscenza dell'universo

di Giovanni Losurdo e Fulvio Ricci

Il 1° agosto 2017, dopo sei anni di interruzione dedicati ad aggiornamenti tecnologici, l'interferometro Virgo per onde gravitazionali costruito vicino a Pisa ha iniziato di nuovo a registrare dati, unendosi ai due rivelatori statunitensi LIGO. Al termine del periodo di osservazione le due collaborazioni hanno annunciato che «alcuni promettenti candidati-eventi sono stati identificati nei dati di LIGO e Virgo nell'analisi preliminare».



Previsione della relatività.

Le onde gravitazionali previste dalla teoria generale della relatività di Albert Einstein possono essere generate, per esempio, da stelle di neutroni in orbita l'una attorno all'altra.

Con l'ingresso di Virgo hanno preso il via le operazioni della rete mondiale di tre rivelatori di onde gravitazionali di seconda generazione in grado di localizzare nel cielo le sorgenti di queste perturbazioni del campo gravitazionale. Questa informazione, trasferita prontamente agli osservatori astronomici a Terra e ai satelliti nello spazio, permette di studiare i fenomeni cosmici in un modo nuovo; nasce dunque un'astronomia basata sull'osservazione della stessa sorgente attraverso messaggeri differenti e complementari: onde elettromagnetiche, onde gravitazionali e

neutrini, particelle elementari che interagiscono debolmente con la materia. Se il 2015 è ricordato come l'anno della prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali e della nascita dell'astronomia gravitazionale, il 2017 è l'anno di inizio della astronomia multimessaggera.

Stiamo dunque vivendo un'epoca paragonabile a quella di Galileo Galilei, che per primo osservò il cielo con il cannocchiale. È un momento storico, che giunge quattro secoli dopo il *Sidereus Nuncius* galileiano, un secolo dopo la previsione di Albert

Einstein dell'esistenza delle onde gravitazionali, dieci anni dopo l'accordo tra i due interferometri statunitensi LIGO e Virgo, che ha posto le basi per la creazione di una rete mondiale.

In questo articolo ripercorriamo le tappe principali di una straordinaria avventura scientifica che si è svolta per decenni tra lo scetticismo generale e che l'11 febbraio 2016, con l'annuncio della prima rivelazione, ha avuto un grande impatto nell'immaginario collettivo.

Il lungo cammino verso la scoperta

L'ipotesi secondo cui l'interazione gravitazionale possa propagarsi con una velocità finita è antica. Risalendo nel tempo fino al 1776, troviamo in *Sur le Principe de la Gravitation Universelle* del francese Pierre-Simon Laplace l'idea che il campo gravitazionale potesse essere rappresentato come un fluido velocissimo emesso dal centro di gravità. Tuttavia la derivazione matematica dell'esistenza delle onde gravitazionali, conseguente all'enunciato di una teoria completa della gravità, è frutto del lavoro di Einstein presentato nel 1915 alla Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften e pubblicato a Berlino il 22 giugno 1916. Ma solo alla fine degli anni cinquanta è diventato chiaro che l'onda gravitazionale non è solo il risultato di un artificio matematico senza alcuna rispondenza con la realtà fisica.

In questo nuovo quadro teorico è nata l'idea del fisico statunitense Joe Weber di usare un cilindro metallico (o «barra») come rivelatore di onde gravitazionali. Weber aveva pubblicato lavori grazie ai quali era stata inaugurata la fase di sperimentazione con l'obiettivo di osservare segnali brevi, circa un millisecondo, emessi in collassi di supernove; aveva annunciato la rilevazione di segnali in coincidenza tra due antenne lontane, ma i suoi risultati erano stati poi confutati da altri gruppi che avevano applicato lo stesso metodo sperimentale. Poiché il rivelatore a barra è limitato dal rumore termico, all'inizio degli anni settanta il fisico statunitense William Fairbank, della Stanford University, aveva realizzato una barra raffreddata a temperatura ultrabassa (10 millikelvin, poco al di sopra dello zero assoluto), o criogenica. Tempo dopo Bill Hamilton in Louisiana, ed Edoardo Amaldi e Guido Pizzella in Italia, avevano costruito altre antenne criogeniche: Allegro, installata negli Stati Uniti, ed Explorer, installata al CERN di Ginevra. Nel 1989 le tre antenne avevano operato per la prima volta in coincidenza, costituendo il primo esempio di rete internazionale per la rilevazione delle onde gravitazionali. In Italia saranno poi realizzate altre due antenne criogeniche: Nautilus a Frascati, vicino a Roma, e Auriga a Legnaro, vicino a Padova.

In quegli stessi anni l'idea della rilevanza delle onde gravitazionali si era consolidata definitivamente grazie all'osservazione nelle onde radio del decadimento orbitale della prima pulsar binaria scoperta, nota come PSR B1913+16; le pulsar sono stelle compatte che emettono onde radio con una variabilità regolare, un sistema binario è composto da due pulsar che ruotano assai vicine una attorno all'altra. La scoperta di PSR B1913+16, avvenuta nel

Giovanni Losurdo è primo ricercatore dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN), sezione di Pisa. Ha guidato il progetto Advanced Virgo dalla sua approvazione, nel 2009, fino alla conclusione, il 1° agosto 2017, con l'inizio della presa dati di Virgo.

Fulvio Ricci è professore alla «Sapienza» Università di Roma e ricercatore dell'INFN, sezione di Roma. Dal 1995 è nella collaborazione internazionale Virgo, di cui è stato portavoce dal 2014 al 2017.



Dall'alto. L'interferometro Virgo, costruito nella campagna toscana nel Comune di Cascina, vicino a Pisa, con i due caratteristici bracci azzurri, lunghi tre chilometri ciascuno.

1974, era poi valsa nel 1993 il Nobel per la fisica agli statunitensi Russell Hulse e Joseph Taylor, anche perché aveva «aperto nuove possibilità nello studio della gravitazione», come recitava la motivazione del premio.

Sempre negli anni settanta era emerso un approccio alternativo ai cilindri di Weber: usare la luce attraverso l'interferometria, ovvero i fenomeni di interferenza della luce, per monitorare il movimento relativo di specchi in caduta libera (*si veda il box a p. 35*); in questo modo era possibile realizzare un rivelatore interferometrico a larga banda, in grado cioè di rilevare non solo i segnali di brevissima durata delle supernove, ma anche i segnali di sorgenti periodiche, come le stelle di neutroni rotanti, quasi-periodiche, come due stelle di neutroni o buchi neri legati in un sistema binario che finiscono per coalescere, o fondersi tra loro, e sorgenti «stocastiche», come il fondo cosmologico di onde gravitazionali, un'eco del big bang.

Il significativo salto di qualità nella definizione della strategia di rilevazione è dovuto al fisico statunitense Rainer Weiss che propose, in un articolo pubblicato nel 1972 su una rivista del Massachusetts Institute of Technology, uno schema di rivelatore interferometrico e ne discusse i principali limiti alla sensibilità. Weiss sarà poi uno dei co-fondatori dell'esperimento LIGO.

Alla fine degli anni settanta e negli anni ottanta, eleganti idee per migliorare la sensibilità degli interferometri erano state sviluppate da Ronald Drever e Brian Meers del gruppo Glasgow in

IN BREVE

Poco più di cent'anni fa Albert Einstein nella sua teoria generale della relatività aveva previsto increspature nel tessuto dello spazio-tempo chiamate onde gravitazionali. Ma solo alla fine degli

anni cinquanta è stato chiaro che le onde gravitazionali non erano un artificio matematico. **Le soluzioni** adottate nei decenni successivi per rilevare queste increspature hanno portato a

interferometri come Virgo, in Italia, e LIGO, negli Stati Uniti. **La prima rilevazione** diretta delle onde gravitazionali è avvenuta nel settembre 2015, a opera delle collaborazioni LIGO-Virgo. In seguito

sono state rilevati altri eventi simili. **In futuro l'osservazione congiunta** di segnali elettromagnetici e gravitazionali porterà all'astronomia multimessaggera, un potente strumento di indagine del cosmo.



Scozia, da Roland Schilling, Lise Schnupp, Albrecht Ruediger del gruppo di Garching, in Germania, da Alain Brillet e Jean-Yves Vinet a Orsay, in Francia.

Negli anni ottanta, in Italia, Adalberto Giazotto aveva sottolineato l'importanza di mettere a punto un rivelatore sensibile nella gamma delle basse frequenze (10-100 hertz). In questa regione di frequenze, dove è più grande il contributo di segnali da coalescenza di sistemi binari di buchi neri di massa stellare, la limitazione principale è data dal rumore sismico. Fin da subito Giazotto aveva portato avanti l'idea di costruire un dispositivo chiamato «superattenuatore» per ridurre il moto microsismico di un fattore di 10^{-15} alla frequenza di 10 hertz. Parallelamente, Brillet aveva contribuito a ottimizzare il progetto ottico dell'interferometro perorando l'uso di laser a stato solido, che sfruttano un cristallo anziché un gas come mezzo attivo per produrre luce coerente.

Sulla base di questi numerosi contributi, negli anni novanta la caccia alle onde si è concretizzata in pochi progetti principali: LIGO – un sistema di due interferometri, ciascuno con due bracci perpendicolari tra loro e paralleli al terreno, ognuno lungo quattro chilometri – costruiti a Hanford, nello Stato di Washington, e a Livingston, in Louisiana, gestiti da California Institute of Technology e Massachusetts Institute of Technology; Virgo, approvato nel 1994 dall'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e dal francese Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), un interferometro con due bracci da 3 chilometri ciascuno, costruito a Cascina, vicino a Pisa e gestito dal 2000 dall'European Gravitational Observatory (EGO); GEO600, con bracci di 600 metri ad Hannover, in Germania, frutto di una collaborazione britannico-tedesca; TAMA, con bracci di 300 metri, in Giappone.

Nel primo decennio di questo secolo LIGO e Virgo hanno firmato un accordo storico per lo scambio e l'analisi congiunta dei dati, e la pubblicazione dei risultati a firma delle due collaborazioni; pur non rilevando le onde gravitazionali, hanno raggiunto le sensibilità di progetto e hanno dimostrato di poter osservare

con un elevato ciclo di lavoro. In questo modo, esperimenti nati in competizione uniscono le forze in una scelta strategica ricca di conseguenze: la rete di tre interferometri chilometrici permette di aumentare la credibilità degli eventi rilevati, estendere la copertura del cielo e, soprattutto, localizzare la sorgente. Così si realizza quello che Giazotto aveva già proposto nel 2001: sfruttare i rivelatori come se fossero un'unica macchina, analizzando i dati in modo coerente.

Lo sviluppo dei rivelatori

Nell'aprile 2008 la statunitense National Science Foundation ha approvato il progetto Advanced LIGO, per un budget di oltre 200 milioni di dollari, più i contributi costituiti da parti di apparato fornite da Germania, Regno Unito e Australia. Quasi due anni dopo, nel dicembre 2009, viene approvato Advanced Virgo. Entrambi i progetti hanno l'obiettivo di migliorare la sensibilità dei rivelatori di prima generazione di un fattore dieci e, di conseguenza, consentire l'esplorazione di un volume di cosmo 1000 volte maggiore. LIGO inizia questa fase di costruzione nel 2010 e dopo cinque anni, a settembre 2015, gli interferometri di Hanford e Livingston ricominciano a registrare dati. La sensibilità dei rivelatori nel primo periodo osservativo della seconda generazione migliora quella del 2010 di quasi quattro volte.

Virgo invece prende dati anche nel 2011 e inizia i lavori di installazione di Advanced Virgo nel 2012. Anche per Virgo, come per LIGO, sono stati necessari cinque anni tra l'inizio della costruzione e quello della presa dati.

Le modifiche riguardano quasi tutti gli aspetti dei rivelatori. A cominciare dal disegno ottico dell'interferometro, in cui è stata introdotta una cavità di ricircolo di segnale, in grado di modificare la risposta in frequenza del rivelatore. Inoltre la dimensione del fascio laser che interroga le masse di test è più grande che in passato, permettendo di ridurre l'effetto del rumore termico degli specchi sulla sensibilità.



In Advanced LIGO è stato installato un nuovo sistema di isolamento sismico per gli specchi che permette di estendere la banda di funzionamento verso le basse frequenze. Advanced Virgo invece continua a usare, con alcune modifiche, i superattenuatori già sperimentati con successo in Virgo.

Un salto in avanti cruciale è stato fatto sulla qualità degli specchi. Rispetto alla prima generazione è ulteriormente migliorata la qualità del materiale usato per le ottiche (che deve avere proprietà estreme di purezza e omogeneità per limitare al massimo l'assorbimento della luce che lo attraversa e le aberrazioni ottiche); ma soprattutto è migliorata la capacità di lavorare le superfici: con le nuove tecniche di levigatura si ottiene una rugosità residua a livello di 0,2 nanometri (paragonabile alle dimensioni di un atomo), quasi un fattore 10 meglio di quello che si sapeva fare quando sono stati prodotti gli specchi di LIGO e Virgo. Sono state migliorate anche qualità e uniformità su larga scala dei *coating*, le «pellicole» che rendono riflettenti i substrati di quarzo sintetico con cui sono stati realizzati gli specchi. Questo permette di usare fasci luminosi più larghi, riducendo il rumore termico e migliorando la sensibilità nella zona centrale della banda, e di ridurre in modo importante la quantità di luce diffusa e l'entità delle aberrazioni introdotte.

I rivelatori *advanced* hanno iniziato le operazioni usando una potenza del laser paragonabile a quella di Virgo e LIGO. È però previsto un incremento progressivo di questa potenza per ridurre la fluttuazione del numero di fotoni che compongono il fascio laser, che limita la sensibilità alle alte frequenze. Per questo Advanced LIGO è stato dotato da subito di un laser a stato solido da 200 watt, mentre Advanced Virgo prevede di installare nei prossimi mesi un laser di potenza maggiore dell'attuale.

La gestione di una potenza luminosa maggiore non è semplice. Innanzitutto introduce un maggior rumore di pressione di radiazione, cioè la pressione sperimentata da un corpo quando è colpito da radiazione elettromagnetica (che si gestisce realizzando specchi più pesanti: le masse di test di Advanced LIGO/Virgo pesano circa 40 chilogrammi, il doppio rispetto alla prima generazione). Ma il problema più complesso riguarda le aberrazioni dovute al riscaldamento degli specchi. Per gestirle è stato progettato un sofisticato sistema attivo di compensazione termica di queste aberrazioni, che usa molteplici sensori ottici e attuatori termici. Lo

Da dentro. Uno dei bracci dell'interferometro Virgo, che corre in un tunnel. All'interno della struttura cilindrica orizzontale passa un fascio laser.

sviluppo di questo sistema è stato particolarmente curato in Virgo, che ha un disegno ottico delle cavità di ricircolo che lo rende maggiormente sensibile alle aberrazioni rispetto a LIGO. Entrambi gli esperimenti stanno progettando l'installazione di un banco che produce luce «compressa» (*squeezed*), cioè un sistema ottico in grado di ridurre il livello di rumore di quantizzazione della luce anche a parità di potenza del laser. Una particolare cura è stata messa nel mitigare il rischio di luce diffusa, isolando sismicamente e acusticamente tutti i fotodiodi e usando diaframmi assorbitori. In Advanced Virgo è stato anche migliorato il sistema di vuoto, introducendo trappole criogeniche alle estremità dei tubi.

I due interferometri LIGO, nella configurazione avanzata, sono tornati in funzione a settembre 2015 e finalmente il 14 settembre il primo segnale di onda gravitazionale è osservato con un'altissima significatività statistica. Altri due segnali sono stati poi rivelati in seguito, aprendo in via definitiva la nuova era dell'astronomia gravitazionale. Nel prossimo futuro l'accuratezza nella localizzazione degli eventi nel cielo crescerà insieme alla sensibilità dei rivelatori e a nuovi interferometri: KAGRA, in fase di costruzione in Giappone, e il terzo LIGO, in India.

Scoperte recenti

Alla prima osservazione del 14 settembre 2015, dovuta al collasso di un sistema binario di buchi neri, ne sono seguite altre. Nei due cicli di presa dati, durante l'ultimo dei quali si è aggiunto Virgo, il tempo in cui gli interferometri hanno osservato il cielo allo stesso momento è stato di sei mesi e gli eventi finora identificati sono relativi a coalescenza di buchi neri (*si veda il box a p. 36*).

Negli ultimi istanti della fusione le velocità dei due corpi stellari sono prossime a quelle della luce e a fronte di segnali di deformazione degli interferometri così deboli – una variazione relativa di lunghezza dei bracci dell'interferometro pari a 10^{-21} – le energie irradiate in questi processi sono dell'ordine di una massa solare.

L'osservazione di onde gravitazionali di questo tipo conferma le previsioni teoriche che indicavano l'esistenza di buchi neri con

Dentro Advanced Virgo

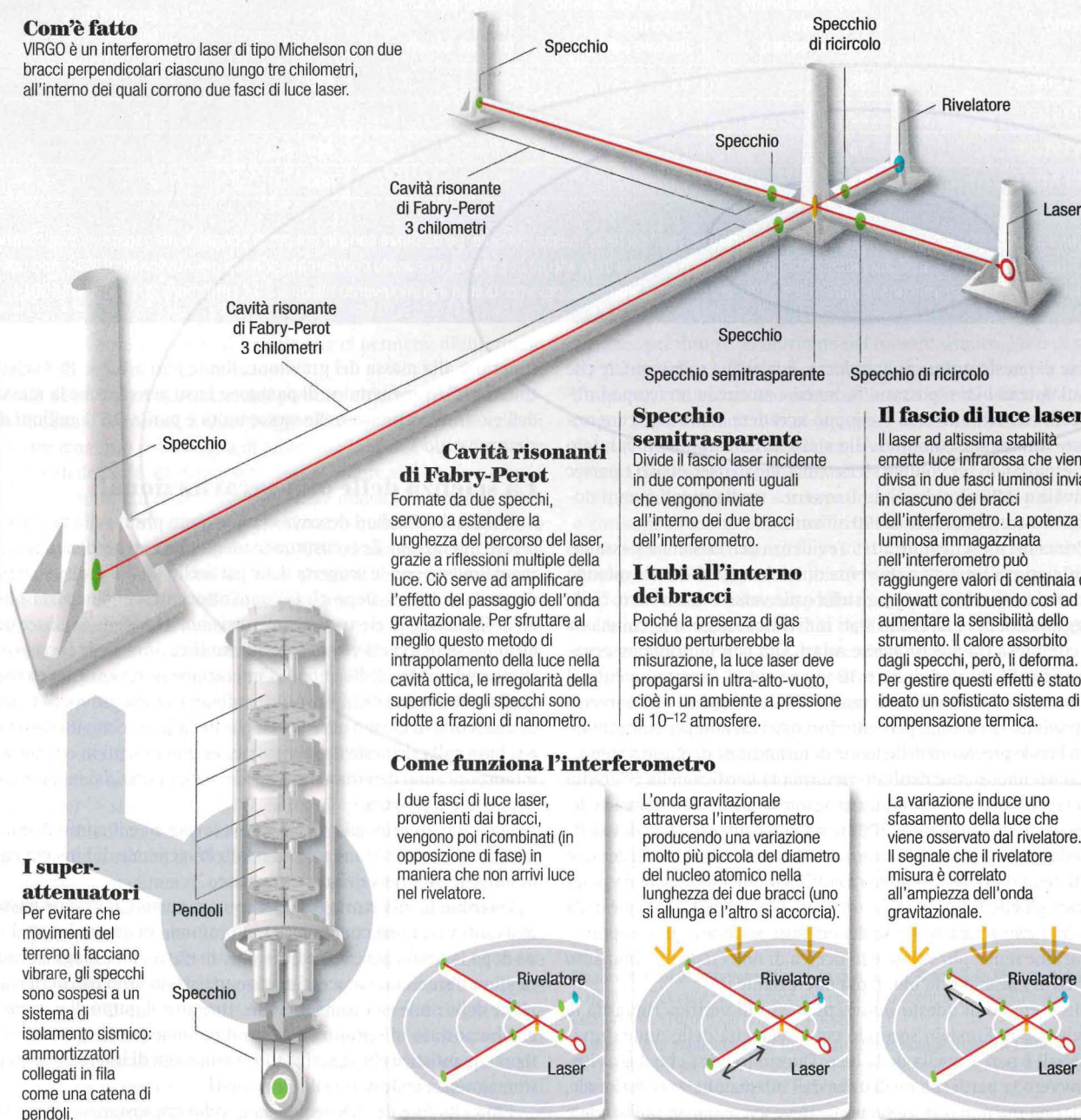
Nel 1994 la costruzione di Virgo (l'interferometro per rivelare onde gravitazionali realizzato a Cascina, in provincia di Pisa) è approvata dall'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e dal francese Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). A dicembre 2009 è stato approvato Advanced Virgo, un progetto per aggiornare le tecnologie di Virgo e renderlo così un interferometro di seconda generazione, in grado di aumentare di circa 1000 volte il volume di universo osservato.

Il progetto ha coinvolto le agenzie che avevano finanziato Virgo (CNRS e INFN) per 21,8 milioni di euro di investimenti, il laboratorio olandese Nikhef, con un contributo in parti dell'apparato, il consorzio polacco

POLGRAW, l'istituto ungherese RMKI, l'Università di Valencia. Complessivamente vi sono stati coinvolti 21 laboratori in sei paesi europei, per un totale di circa 280 persone, compreso EGO, il consorzio cofinanziato da INFN e CNRS che gestisce il sito di Cascina. In Italia sono nove i laboratori dell'INFN che hanno partecipato: Firenze/Urbino, Genova, Napoli, Padova, Perugia, Pisa, Roma, Tor Vergata, Trento (TIFPA). I laboratori INFN hanno ricoperto responsabilità rilevanti occupandosi in particolare di: superattenuatori, payload (stadio finale di sospensione e controllo dello specchio), sospensioni di quarzo fuso per le masse di test, sistema di compensazione termica delle aberrazioni, criogenia, sistema di monitoraggio ambientale.

Com'è fatto

VIRGO è un interferometro laser di tipo Michelson con due bracci perpendicolari ciascuno lungo tre chilometri, all'interno dei quali corrono due fasci di luce laser.



Cavità risonante di Fabry-Perot 3 chilometri

Cavità risonante di Fabry-Perot 3 chilometri

Specchio

Specchio

Specchio di ricircolo

Rivelatore

Laser

Specchio

Specchio

Specchio semitrasparente

Specchio di ricircolo

Cavità risonanti di Fabry-Perot

Formate da due specchi, servono a estendere la lunghezza del percorso del laser, grazie a riflessioni multiple della luce. Ciò serve ad amplificare l'effetto del passaggio dell'onda gravitazionale. Per sfruttare al meglio questo metodo di intrappolamento della luce nella cavità ottica, le irregolarità della superficie degli specchi sono ridotte a frazioni di nanometro.

Specchio semitrasparente

Divide il fascio laser incidente in due componenti uguali che vengono inviate all'interno dei due bracci dell'interferometro.

I tubi all'interno dei bracci

Poiché la presenza di gas residuo perturberebbe la misurazione, la luce laser deve propagarsi in ultra-alto-vuoto, cioè in un ambiente a pressione di 10^{-12} atmosfere.

Il fascio di luce laser

Il laser ad altissima stabilità emette luce infrarossa che viene divisa in due fasci luminosi inviati in ciascuno dei bracci dell'interferometro. La potenza luminosa immagazzinata nell'interferometro può raggiungere valori di centinaia di chilowatt contribuendo così ad aumentare la sensibilità dello strumento. Il calore assorbito dagli specchi, però, li deforma. Per gestire questi effetti è stato ideato un sofisticato sistema di compensazione termica.

I superattenuatori

Per evitare che movimenti del terreno li facciano vibrare, gli specchi sono sospesi a un sistema di isolamento sismico: ammortizzatori collegati in fila come una catena di pendoli.

Pendoli

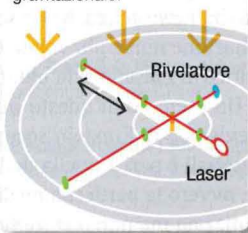
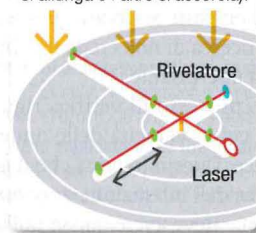
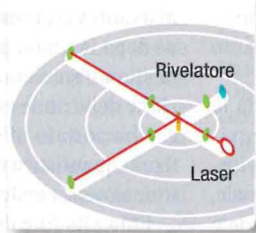
Specchio

Come funziona l'interferometro

I due fasci di luce laser, provenienti dai bracci, vengono poi ricombinati (in opposizione di fase) in maniera che non arrivi luce nel rivelatore.

L'onda gravitazionale attraversa l'interferometro producendo una variazione molto più piccola del diametro del nucleo atomico nella lunghezza dei due bracci (uno si allunga e l'altro si accorcia).

La variazione induce uno sfasamento della luce che viene osservato dal rivelatore. Il segnale che il rivelatore misura è correlato all'ampiezza dell'onda gravitazionale.



Incrispature dello spazio-tempo

Secondo la teoria generale della relatività di Albert Einstein, cataclismi cosmici come collisioni di buchi neri o stelle rotanti producono increspature nello spazio-tempo che si propagano nel cosmo alla velocità della luce: le onde gravitazionali. La forza gravitazionale è la più debole dell'universo, quindi è difficilissimo «vederla». Finora sono state rilevate solo onde generate dalla fusione di due buchi neri, come mostra la tabella qui sotto.

Evento	Massa del primo buco nero (masse solari)	Massa del secondo buco nero (masse solari)	Massa del buco nero finale (masse solari)	Distanza (megaparsec)	Energia irradiata (masse solari)
GW150914	36	29	62	420	3
LVT151012	23	13	35	1000	1,5
GW151226	14	7,5	21	440	1
GW170104	31	19	49	880	2

Masse dei buchi neri ed energie irradiate sono riportate in multipli della massa del Sole. Le distanze sono in milioni di parsec, o megaparsec. Ricordiamo che 1 parsec equivale a 3,26 anni luce. I codici nella prima colonna indicano se si tratta di un evento conclamato di onda gravitazionale (GW) o non confermato (LVT). I numeri indicano la data dell'evento, nel formato: anno/mese/giorno. Quindi il primo evento rilevato, il 14 settembre 2015, è: GW150914.

masse di questo ordine di grandezza. È la prova sperimentale che questi sistemi binari possono formarsi e morire in un tempo inferiore all'età dell'universo e ciò può accadere con una frequenza niente affatto trascurabile. Allo stato attuale abbiamo valutato che, esplorando un volume sferico di 1 gigaparsec cubo (1 parsec equivale a 3,26 anni luce), la frequenza media di tali eventi dovrebbe essere dell'ordine di 100 all'anno.

Prima del 14 settembre 2015 l'evidenza dell'esistenza stessa dei buchi neri era limitata a osservazioni dei raggi X emessi quando la materia risucchiata da una stella cade verso il buco nero. Nella maggioranza dei casi erano stati individuati oggetti la cui massa era compresa tra 5 e 10 masse solari. Già con la prima osservazione, due buchi neri di 29 e 36 masse solari rispettivamente, il quadro della distribuzione di massa di questi oggetti nell'universo è sconvolto. Occorrono però ulteriori osservazioni per confrontare i dati con le previsioni delle teorie di formazione di questi sistemi.

L'altro importante risultato riguarda la verifica della relatività generale nel suo aspetto finora inesplorato, ovvero la dinamica dei corpi in campi gravitazionali estremamente intensi. I test di validità della teoria di Einstein erano stati dedotti osservando sistemi in cui il campo gravitazionale era sufficientemente debole da poter trattare gli effetti relativistici come una piccola perturbazione della gravità newtoniana. Nel caso dei processi osservati, questa approssimazione non è più valida e la ricerca di una crepa nell'impianto teorico di Einstein si fa molto più interessante.

Un esempio di questo nuovo processo di verifica riguarda la previsione di Einstein secondo cui la velocità delle onde gravitazionali è pari a quella della luce. Questo implica che il gravitone, ovvero la particella mediatrice dell'interazione gravitazionale, ipotizzata ma non ancora scoperta, deve avere massa nulla, come il fotone. Da queste prime osservazioni si è già posto un limite

superiore alla massa del gravitone, limite pari a $7,7 \times 10^{-23}$ elettronvolt/ c^2 (come termine di paragone basti pensare che la massa dell'elettrone espressa nelle stesse unità è pari a 0,511 milioni di elettronvolt/ c^2).

La scienza delle onde gravitazionali

Il modello standard descrive i componenti primi della materia e le loro interazioni. Esso costituisce un quadro ben verificato sperimentalmente con le scoperte delle particelle W, Z e recentemente di quella di Higgs. Dopo gli sviluppi ottocenteschi che portarono all'unificazione di elettricità e magnetismo, il modello sancisce un altro passo in avanti verso la grande unificazione delle forze: costituisce il quadro unificante dell'interazione elettromagnetica con quella debole, responsabile del decadimento radioattivo. Si tratta di una teoria di campo quantistica che include la relatività ristretta e si basa sulla richiesta che il risultato di esperimenti in cui queste interazioni sono determinanti, non deve dipendere dal luogo e dal tempo in cui si opera.

Questo è un principio di simmetria locale ed è il punto di contatto tra il modello standard e la relatività generale di Einstein che descrive le proprietà della gravitazione.

Guardando alla storia dell'elettromagnetismo, il grande passo in avanti verso una conoscenza più profonda di questa interazione dopo la prima grande unificazione tra elettricità e magnetismo, raggiunta studiando processi stazionari, è stato fatto con la rilevazione delle onde elettromagnetiche. Questo è il punto di partenza che ha portato in seguito all'elettrodinamica quantistica, cioè la teoria quantistica che descrive tutti i fenomeni di interazione elettromagnetica delle particelle elementari.

Fino alla fine del XX secolo, la gravità era sostanzialmente limitata allo studio di campi gravitazionali stazionari. Oggi possia-

mo affermare che il nuovo capitolo della gravitodinamica, ovvero lo studio dei campi gravitazionali velocemente variabili nel tempo, è stato aperto con la prima osservazione diretta di un segnale di onda gravitazionale.

Nonostante i numerosi sforzi teorici, gravità e meccanica quantistica non trovano ancora una solida base di unificazione suffragata da osservazioni sperimentali: in futuro la fisica delle onde gravitazionali potrebbe rappresentare il banco di prova cruciale di questa sfida scientifica.

Finora i segnali rilevati da LIGO corrispondono a coalescenze di buchi neri. Nel caso di un analogo processo che vedrebbe coinvolti un buco nero e una stella di neutroni, o due stelle di neutroni, il segnale gravitazionale potrebbe essere accompagnato da emissioni di raggi gamma. Una rivelazione simultanea di onde gravitazionali e raggi gamma sarebbe uno splendido esempio di astronomia multimessaggera. Le osservazioni congiunte di segnali elettromagnetici e gravitazionali vanno coordinate in maniera efficiente con ritardi ridotti il più possibile nella trasmissione delle informazioni tra osservatori di diverso tipo.

Il sistema evolve formando un nuovo oggetto compatto in cui la materia raggiunge livelli di compressione impossibili da realizzare in laboratorio, e i segnali gravitazionali trasportano informazioni uniche sulle proprietà della materia e dell'interazione gravitazionale in condizioni così estreme. Le deformazioni che si innescano in questi processi condizionano la forma dei segnali emessi, e sono il tramite che ci permette di inferire lo stato della materia nella stella.

Le osservazioni gravitazionali possono chiarire quale sia la distribuzione di massa di questi oggetti compatti nell'universo. Il valore massimo della massa di una nana bianca è circa 1,4 volte la massa del Sole. Al di sopra di questo valore si forma una stella di neutroni in cui la materia raggiunge densità incredibili: circa 200 milioni di tonnellate per centimetro cubo, un regime noto come cromodinamica quantistica (QCD) ad alta densità. L'interno della stella potrebbe essere un mare di quark, le particelle elementari che costituiscono i mattoni fondamentali di protoni e neutroni. Nella materia che abbiamo studiato fino a oggi, i quark sono confinati all'interno di protoni e neutroni. Nel cuore della stella di neutroni, dove si raggiungono pressioni altissime, i quark potrebbero essere legati direttamente tra loro formando un unico gigantesco esempio di particella nucleare nello stato fondamentale. A questa ipotesi se ne affiancano altre, forse meno esotiche, ma che convergono nell'indicare come questo sistema sia un laboratorio unico per lo studio della QCD, la teoria che studia l'interazione forte, cioè la forza che si esercita tra protoni e neutroni del nucleo atomico e tra alcune particelle subnucleari.

La massa massima di una stella di neutroni è un ulteriore test della natura della materia a queste densità estremamente elevate. Secondo alcuni modelli, si aggirerebbe attorno a tre volte la massa del Sole. In realtà il valore è sconosciuto, e dovrebbe essere determinato costruendo con precisione la distribuzione statistica della massa di questi oggetti nell'universo, grazie all'osservazione di un gran numero di sistemi binari di stelle di neutroni con la futura generazione di rivelatori di onde gravitazionali. La distribuzione di massa dei buchi neri è un'altra potenziale fonte di informazione per chiarire i meccanismi di formazione stellare, e potrebbe rispondere alla domanda se queste coppie di buchi neri

siano primordiali o siano il risultato di processi di cattura. Inoltre potrebbe svelare gradite sorprese sul fronte della fisica fondamentale. Recenti sviluppi teorici hanno ipotizzato che attorno a un buco nero si formino nubi di sfuggenti particelle fondamentali, chiamate assioni, la cui esistenza è stata ipotizzata da molti anni e che oggi sono una delle ipotesi di riferimento per chiarire il mistero della materia oscura, che, secondo i modelli correnti, non emette radiazione elettromagnetica e si manifesta tramite effetti gravitazionali.

L'evoluzione futura

I rivelatori di seconda generazione funzioneranno ancora per dieci anni circa, alternando periodi di presa dati a periodi di ulteriore miglioramento della sensibilità. Altri aggiornamenti sono già allo studio o pronti alla realizzazione. Nel frattempo si pensa anche a rivelatori di terza generazione, in grado di migliorare la sensibilità di un altro ordine di grandezza ed esplorare un volume di universo un milione di volte più grande rispetto a Virgo e LIGO. Questo permetterebbe, per esempio, di rilevare segnali di coalescenza di buchi neri fino ai confini dell'universo, aprendo la via alla cosmologia con onde gravitazionali.

La proposta studiata più a fondo è l'Einstein Telescope, un progetto sviluppato da gruppi europei, il cui studio di fattibilità è stato finanziato dall'Unione Europea. Sono previste nuove soluzioni sperimentali, come la costruzione del rivelatore in gallerie sotterranee per ridurre il contributo del rumore sismico, l'uso di specchi più grandi e raffreddati a temperature criogeniche per ridurre il rumore termico, un uso esteso delle tecniche di ottica quantistica per la produzione di luce squeezed in cui si ha una riduzione del rumore di fase o di ampiezza, a seconda dell'intervallo di frequenza di rilevazione considerato.

Dato che permetterà l'osservazione di eventi molto più lontani o con segnali molto più elevati rispetto al rumore strumentale, la nuova generazione aprirà la porta a misurazioni di interesse cosmologico, all'osservazione di effetti gravitazionali forti, alle misure di precisione sullo stato della materia nelle stelle di neutroni.

L'orizzonte temporale per la realizzazione di interferometri di terza generazione è la fine del prossimo decennio.

Nei primi anni 2030 verrà inoltre lanciato LISA, l'interferometro spaziale realizzato dall'Agenzia spaziale europea con un importante contributo dell'Agenzia spaziale italiana e dell'INFN. Lo scorso anno è stata conclusa con un grande successo la missione LISA Pathfinder, che ha dimostrato la validità di tecnologie chiave per LISA. Siamo dunque a un punto di svolta nell'indagine per la comprensione del cosmo. I rivelatori attuali, e ancora di più quelli futuri, promettono scoperte straordinarie, come sempre succede quando si apre una nuova finestra sull'universo. ■

PER APPROFONDIRE

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Abbott B.P. e altri (LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration), in «Physical Review Letters», Vol. 116, n. 6, 061102, 11 febbraio 2016.

Astrophysical Implications Of The Binary Black Hole Merger GW150914. Abbott B.P. e altri (LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration), in «The Astrophysical Journal Letters», Vol. 818, n. 2, 11 febbraio 2016.

Il sito web dell'interferometro Virgo: <http://www.virgo-gw.eu>.

Il sito dello European Gravitational Observatory: <https://www.ego-gw.it>.