

VIRGO E IL SUO FUTURO

L'EVOLUZIONE DI UN POTENTE OSSERVATORIO PER SEGNALI GRAVITAZIONALI

FRANCESCO FIDECARO

Università di Pisa e INFN, Sezione di Pisa, Pisa, Italia

Questo articolo è dedicato alla memoria di Stefano Braccini, mente inquieta e appassionata che tanto ha dato per far progredire la scienza della rivelazione delle onde gravitazionali.

L'emissione di onde gravitazionali da parte di masse accelerate è tra le più importanti previsioni della relatività generale e lo studio di sistemi binari di stelle di neutroni ne ha dimostrato l'esistenza. Giungere ad ascoltare le notizie dall'Universo con "Radio Gravità" è una sfida sperimentale fuori dal comune. Obiettivo dell'antenna Virgo è registrare a terra questi segnali.

1 La Teoria Generale della Relatività

La gravitazione, la più debole tra le interazioni fondamentali, è ora descritta da una teoria molto elegante, la Teoria Generale della Relatività, formulata da Einstein nel 1916 [1]. Cardine della teoria è il Principio di Equivalenza tra sistemi di riferimento accelerati e sistemi di riferimento inerziali in presenza di un campo gravitazionale. Partendo dall'universalità della caduta dei corpi, il Principio di Equivalenza stabilisce che la forza apparente presente in un sistema di riferimento accelerato produce lo stesso effetto della forza di gravità in un sistema di riferimento inerziale. La forza di gravità si può quindi cancellare, localmente, in un riferimento con accelerazione pari a quella della gravità. Einstein completa l'enunciato del Principio di Equivalenza specificando che in tali sistemi di riferimento "in caduta libera" nei quali è assente la forza di gravità sono valide le altre leggi della fisica e in particolare la relatività ristretta. Gli effetti della gravitazione si manifestano in sistemi di riferimento accelerati rispetto a riferimenti in caduta libera, nei quali sono localmente assenti. Si può quindi dire che nascono dalla geometria dello spaziotempo unicamente, la quale determina le trasformazioni da un sistema di coordinate a un altro. La situazione è diversa nel caso dell'elettromagnetismo: comunque si scelga il sistema di riferimento non si possono azzerare simultaneamente i campi elettrici e magnetici: l'interazione elettromagnetica non è determinata solo da cambiamenti di riferimento.

Basandosi sull'invarianza della velocità della luce si possono misurare le proprietà intrinseche dello spaziotempo: la luce stabilisce la metrica di tale spazio. Si può essere in presenza di uno spazio euclideo corredato di una coordinata temporale (spazio di Minkowski) nel quale la luce percorre delle geodetiche a velocità c , oppure di uno spaziotempo curvo approssimabile a uno spazio di Minkowski su piccole distanze, dove la geometria euclidea è valida solo in prima approssimazione. La curvatura dello spaziotempo, ovvero la gravitazione, ne determina le geodetiche e quindi le traiettorie, o linee d'Universo, dei corpi in caduta libera.

Gli effetti della gravitazione sono geometrici: due raggi di luce inizialmente paralleli

che passano da una parte e dall'altra del Sole si potranno incontrare a distanza finita e in ultima analisi la rivelazione procede proprio per via geometrica.

Stabilito il legame tra gli effetti della gravitazione e la curvatura dello spaziotempo occorre chiedersi quale sia l'origine di quest'ultima. Dopo anni di gestazione Einstein è riuscito a scrivere delle equazioni che collegano la sorgente dell'interazione gravitazionale, la densità di massa-energia T_{00} , alla curvatura dello spaziotempo:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

In queste equazioni G è la costante di Newton, c è la velocità della luce, $T_{\mu\nu}$ è il tensore energia-impulso e Λ è la cosiddetta costante cosmologica. Il tensore di Einstein $G_{\mu\nu}$ è definito a partire dal tensore di Ricci

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R_{\sigma}^{\sigma} g_{\mu\nu},$$

dove $R_{\mu\nu} = R^{\sigma}_{\mu\sigma\nu}$ e $R_{\mu\nu\rho\sigma}$ è il tensore di Riemann, collegato alle deviazioni dal parallelismo provocate dalla geometria. Come si fa usualmente, indici ripetuti implicano una somma su tutti i valori dell'indice. Rendere queste equazioni coerenti con le altre leggi della fisica ha richiesto un monumentale sforzo intellettuale da parte di Hilbert e di Einstein, con l'uso di importanti risultati tra l'altro dei matematici Gregorio Ricci Curbastro e Tullio Levi-Civita¹ che è giunto a conclusione nel 1916 con la pubblicazione della Teoria Generale della Relatività. Nelle equazioni è stata inserita anche la costante cosmologica Λ , che compare come un termine aggiuntivo rispetto a quello di curvatura.

Le equazioni di Einstein sono molto difficili da risolvere, perché non lineari e accoppiate tra loro. Infatti la metrica dedotta da $G_{\mu\nu}$ entra a sua volta a determinare la forma delle equazioni. Notevoli semplificazioni si hanno nel caso di piccole deviazioni dallo spazio tempo piatto, ovvero ipotizzando che la metrica si possa scrivere come

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

dove $\eta_{\mu\nu}$ è la metrica di Minkowski, invariante per trasformazioni di Lorentz e $h_{\mu\nu} \ll 1$. Considerando solo i termini lineari le equazioni di Einstein si possono mettere nella forma

$$\nabla^2 h_{\mu\nu}^{\text{TT}} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} h_{\mu\nu}^{\text{TT}} = 16\pi \frac{G}{c^2} T_{\mu\nu}.$$

Questa è una equazione d'onda per la grandezza $h_{\mu\nu}^{\text{TT}}$ (ottenuta a partire da $h_{\mu\nu}$ con la scelta di una gauge

¹ Identità di Bianchi, Levi-Civita, Ricci.

“trasversa a traccia nulla”, TT, in modo simile a quanto si fa per l'equazione d'onda del campo elettromagnetico). Pertanto, in analogia con quanto avviene in presenza di cariche elettriche accelerate, si può avere emissione di onde gravitazionali da parte di masse accelerate.

Naturalmente ci sono differenze importanti, la carica e la corrente presente nelle equazioni di Maxwell si rappresentano come un quadrivettore, mentre la sorgente nel caso gravitazionale, che comprende densità di energia, flusso di energia e di quantità di moto, è un quadritensore. Così la grandezza che si propaga, $h_{\mu\nu}$ possiede due indici, al contrario del quadrivettore potenziale delle equazioni di Maxwell.

2 Radiazione e propagazione

Già nel 1905 Poincaré capì la necessità di una velocità di propagazione finita c dell'interazione gravitazionale e ipotizzò l'esistenza di “ondes gravifiques” [2]. Nella relatività generale tale possibilità fu individuata molto presto: Einstein presentò una “formula di quadrupolo” [3] per il calcolo della radiazione emessa da masse accelerate,

$$h_{ij} = \frac{2G}{Rc^4} [\ddot{Q}_{ij}^{\text{TT}}]_{t'=t-R/c}, \quad Q_{ij} = \int \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} x_k x_k \right) d^3x,$$

risultante in un potenza irraggiata pari a

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{G}{c^5} \langle \ddot{Q}_{ij}^{\text{TT}} \ddot{Q}_{ij}^{\text{TT}} \rangle.$$

Le costanti $G/c^4 = 8,23 \times 10^{-45} \text{ N m}^2 \text{ s}^{-2}$ e $G/c^5 = 2,74 \times 10^{-53} \text{ W}^{-1}$ sono molto piccole per cui è necessario prendere in considerazione masse molto grandi. Per avere grandi accelerazioni occorrono oggetti astrofisici compatti, le cui dimensioni non possono però essere inferiori al loro raggio di Schwarzschild

$$R_S = \frac{2GM}{c^2},$$

ovvero il raggio di un buco nero avente stessa massa.

Le sorgenti si troveranno quindi a distanze astronomiche e cosmologiche. A titolo di esempio, per una coppia di stelle di neutroni (1,4 + 1,4 masse solari) orbitanti a 1000 km l'una dall'altra a una distanza di 1 Mpc, $h \approx 3 \times 10^{-23}$.

3 Interazione con la materia

La presenza di una curvatura dello spaziotempo può essere rivelata confrontando diverse geodetiche. Sperimentalmente si considerano masse che percorrono queste geodetiche e

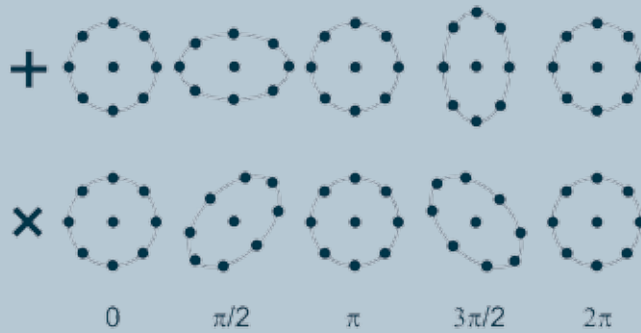


Fig. 1 Effetto del passaggio di onde gravitazionali con polarizzazione “+” e “x”.

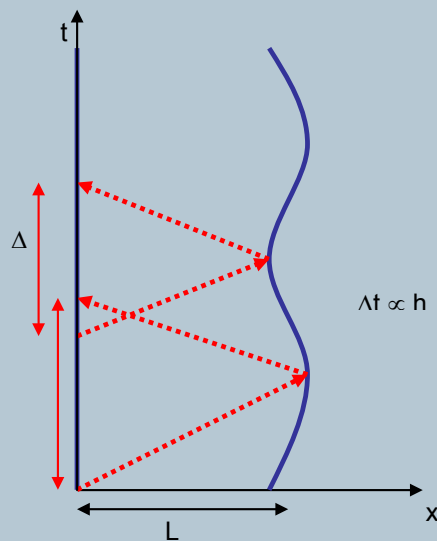


Fig. 2 Rivelazione di onde gravitazionali nel riferimento di una delle due masse.

si misura la distanza tra loro tramite il tempo di percorrenza di un raggio di luce. L'effetto del passaggio di un'onda gravitazionale su un insieme di masse libere disposte in cerchio è mostrato in fig.1.

È importante notare che il tensore metrico misura rapporti tra intervalli di spazio o di tempo. Pertanto h misura variazioni relative di queste grandezze, le variazioni assolute saranno invece proporzionali sia ad h che alla grandezza stessa.

Per aumentare il segnale occorre quindi considerare masse a grande distanza l'una dall'altra. Però la dimensione del rivelatore stabilisce la banda di frequenze che sarà possibile osservare con maggiore efficienza. Infatti se il tempo necessario alla luce per percorrere la distanza è maggiore del semiperiodo dell'onda gravitazionale, l'effetto accumulato durante la semionda positiva inizia a cancellarsi.

La misura della curvatura è stata quindi ricondotta a registrazioni del tempo di percorrenza della radiazione elettromagnetica. Il metodo preferito è quello di usare un orologio e un ripetitore in maniera da misurare il tempo di andata e ritorno. In tal caso l'antenna ottimale è lunga un quarto della lunghezza d'onda gravitazionale. Una delle masse è uno specchio e, come mostrato in fig. 2, si misurano

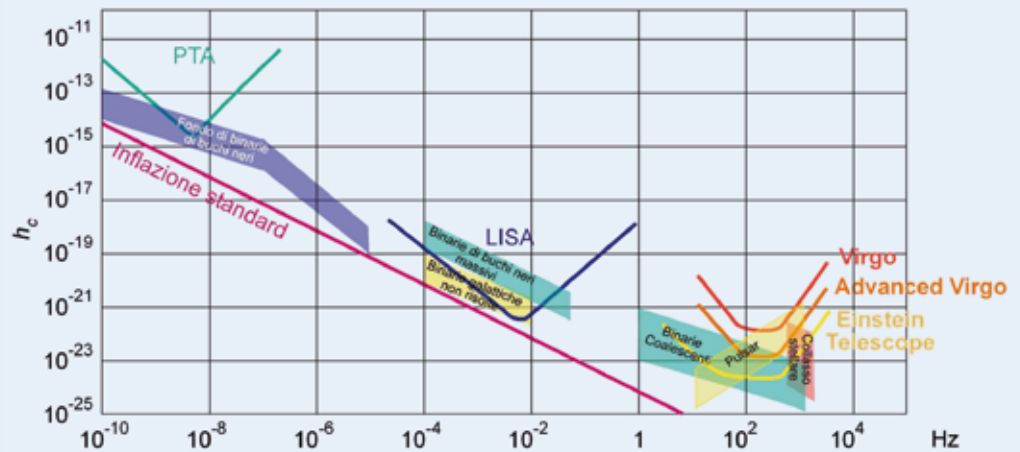
i tempi di andata e ritorno con un unico orologio. Questo è il principio di funzionamento dei rivelatori a grande banda passante a terra, come Virgo, e nello spazio (LISA) [4].

Alternativamente la misura può avvenire usando due orologi, solidali con ciascuna massa, e rilevando la durata del percorso di sola andata. Questo metodo può essere applicato tra un precisissimo orologio a terra e un satellite oppure una pulsar, dagli impulsi molto regolari. Misure di questo tipo sono state fatte con la sonda Cassini [5] e sono in corso di sviluppo progetti come European Pulsar Timing Array, Parkes Pulsar Timing Array, NANOGrav per l'uso di una rete di radiotelescopi che registri con grande precisione i segnali provenienti dalle pulsar più stabili presenti nella Galassia [6].

Se le masse non sono libere si misura invece l'energia risultante dalla compressione durante il passaggio dell'onda gravitazionale. Secondo questo principio sono stati costruiti i rivelatori risonanti Explorer, Nautilus, Auriga, Allegro e Niobe [7] che, dopo i lavori iniziali di J. Weber, hanno visto in Italia una intensa attività iniziata da Edoardo Amaldi e proseguita dai suoi collaboratori.

Infine lo studio dettagliato della radiazione cosmica di fondo e in particolare della sua polarizzazione promette

Fig. 3 Spettro in frequenza delle principali sorgenti di onde gravitazionali.



di mettere in evidenza una componente tensoriale delle fluttuazioni di temperatura e quindi l'esistenza di onde gravitazionali primordiali. Questo è stato l'obiettivo del volo in pallone di BOOMERanG-03 [8] ed è ora quello della missione Planck [9], lanciata nel 2009.

È con soddisfazione che si può osservare che per tutte queste linee di ricerca vi è un cospicuo contributo della fisica e dell'astrofisica italiana.

4 Lo spettro delle sorgenti

La ricerca di onde gravitazionali si estende su un ampissimo spettro di frequenze e coinvolge quindi le tecniche di rivelazione più varie. La fig. 3 mostra lo spettro delle possibili sorgenti di onde gravitazionali nella massima estensione immaginabile: lo spettro spazia da frequenze corrispondenti a migliaia di anni fino alle centinaia di kHz.

La frequenza del segnale è collegata alle dimensioni della sorgente e quindi anche alla sua massa, e ciò limita l'ampiezza della radiazione che potrà essere emessa. Ad esempio segnali oltre il kHz, se di provenienza astrofisica, avranno ampiezza molto bassa, mentre a frequenza bassissima saranno rivelabili segnali originati dall'evoluzione dell'Universo. In particolare sistemi binari di varie masse emettono con la massima ampiezza in intervalli di frequenza diversi.

4.1 Sistemi binari

Il sistema "da manuale" per lo studio della radiazione gravitazionale è un sistema composto da due oggetti astrofisici compatti, stelle di neutroni o buchi neri, percorrenti un'orbita molto stretta. In prima approssimazione i calcoli relativi alla radiazione non sono troppo complessi e la forma del segnale è definita da un piccolo numero di parametri. Parecchi sistemi binari in orbita stretta sono stati osservati

dai radiotelescopi [10]; nessuno di questi giungerà in tempi brevi alla fase finale dell'orbita: al sistema più famoso, quello scoperto da Hulse e Taylor, occorreranno circa 100 milioni di anni prima di giungere alla fase in cui le due stelle di neutroni sono talmente vicine da distruggersi a vicenda per i gradienti gravitazionali presenti o per contatto.

Si ritiene che a tali eventi catastrofici siano associati alcuni degli eventi più energetici osservati, i Short Gamma Ray Bursts, fiotti di fotoni di alta energia prodotti in un breve intervallo di tempo.

L'osservazione congiunta di onde gravitazionali dalla coalescenza di sistemi binari e di emissione transiente di energia elettromagnetica rappresenta uno degli obiettivi più interessanti della ricerca di onde gravitazionali, per la possibilità di conoscere in maggiore dettaglio questi violenti fenomeni. Il sistema binario costituisce una "candela" standard (o meglio una sirena standard, date le frequenze in gioco), per la quale si può calcolare l'ampiezza di emissione con notevole sicurezza. Con l'identificazione della galassia che ospitava il sistema sarà possibile misurare lo spostamento verso il rosso e confrontarlo con l'ampiezza attesa, studiando così in modo indipendente la legge di Hubble. La forma del segnale consentirà il confronto con le previsioni della relatività generale che sarà così messa alla prova in condizioni estreme di curvatura. Infine con sufficiente statistica si potrà studiare la distribuzione di materia in modo indipendente da quanto viene fatto con la radiazione elettromagnetica.

Ulteriore interesse nasce se i sistemi osservati sono di grande massa, quindi verosimilmente formati da buchi neri. L'ampiezza è maggiore e anche se si prevede che i sistemi siano più rari, le sorgenti potranno essere rivelate a distanze maggiori. Anche in questo caso il confronto tra esperimento e teoria sarà di grande interesse, infatti la forma del segnale, anche se molto complicata, scaturisce dai pochi parametri che identificano lo stato del buco nero.

La formazione di sistemi binari di oggetti compatti richiede una successione di eventi tale da risultare complessivamente un fenomeno raro. Per essere di interesse come sorgente di onde gravitazionali devono anche avere orbite molto strette. Le stime più recenti prevedono un evento all'anno entro una distanza di una settantina di Mpc. Gli strumenti attuali sono in grado di raccogliere segnali provenienti al più da 20 Mpc per cui la probabilità di rivelare un evento in un anno è di qualche per cento [11], con una incertezza di $-2/+1$ ordini di grandezza.

4.2 Stelle di neutroni in rotazione

I più recenti elenchi di pulsar, sorgenti di impulsi elettromagnetici emessi con grande regolarità, contano ormai più di duemila oggetti. Dopo la loro scoperta, le pulsar furono rapidamente spiegate in termini di stelle di neutroni, prodotte del collasso gravitazionale del nucleo di una stella nel quale si formano neutroni con emissione di neutrini, attraverso la cattura dell'elettrone da parte del protone, che è favorita energeticamente dalla gravitazione. L'oggetto risultante, di densità altissima, ha un raggio dell'ordine di 10 km ed è in rapida rotazione (fino a molte centinaia di Hz), dovuta al momento angolare iniziale del progenitore. In diversi casi la stabilità della frequenza di rotazione risulta migliore di quella dei più perfezionati orologi atomici.

Sono possibili piccole asimmetrie nella distribuzione della massa che danno origine a un momento di quadrupolo e quindi ad emissione di onde gravitazionali. Queste asimmetrie, "montagne" sulla crosta della stella di neutroni, possono resistere al proprio peso solo se hanno un'altezza di pochi millimetri. Il momento di quadrupolo risultante è piccolo e l'ampiezza delle onde gravitazionali molto ridotta rispetto ai sistemi binari, ma la frequenza di emissione è molto ben definita. Il segnale può essere "ascoltato" su un lungo periodo, riducendo le fluttuazioni del rumore fino a rendere rivelabili segnali molto piccoli. L'osservazione di onde gravitazionali da pulsar, ma anche i limiti superiori che si possono mettere all'ampiezza di emissione, sono da confrontarsi con i valori di ellitticità permessi dalle varie equazioni di stato nucleari proposte per descrivere lo stato della materia ad altissima densità.

4.3 Collassi stellari

Quando la pressione in una stella non è più in grado di contrastare l'attrazione gravitazionale si ha un collasso della parte centrale, che avviene in tempi dell'ordine del millisecondo. Si ha emissione di onde gravitazionali per lo spostamento, non isotropo, di grandi quantità di materia. La banda di frequenza del segnale risultante si estende fino al kHz, ed è proprio a questa frequenza che sono sensibili i rivelatori di onde gravitazionali a barra risonante. Con l'affinamento dei modelli e la disponibilità di simulazioni del collasso stellare sempre più dettagliate si è visto che

la quantità di energia che si trasforma in irraggiamento gravitazionale è più bassa di quanto si pensasse inizialmente, per cui la rivelazione di un collasso stellare (in media uno ogni 30-40 anni nella nostra Galassia) probabilmente necessita di una sensibilità del rivelatore molto più elevata di quelle ottenute finora.

Anche in questo caso è di grande interesse l'osservazione simultanea di radiazione elettromagnetica a varie lunghezze d'onda e la rivelazione dei neutrini emessi. La forma del segnale gravitazionale, la sequenza temporale, le intensità osservate possono concorrere ad una comprensione molto dettagliata di quanto avviene al momento del collasso stellare.

4.4 Fondo stocastico

I modelli cosmologici prevedono la presenza di un fondo stocastico di onde gravitazionali, in analogia con quanto osservato per la radiazione di fondo elettromagnetica. Tale fondo è rivelabile come eccesso di rumore, con una certa dipendenza dalla frequenza. Il modello standard di inflazione prevede un livello molto basso per tale fondo, per misure fatte a frequenze dell'ordine dell'Hz. A frequenze molto più basse il fondo può essere più elevato, come mostrato in fig. 3.

Onde gravitazionali con periodi dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni possono essere studiate attraverso la radiazione elettromagnetica di fondo. Una rivelazione di un fondo stocastico di origine cosmologica avrebbe importantissime conseguenze sulla nostra comprensione dell'Universo. Se poi questa avvenisse a frequenze alte, come ipotizzato in alcuni modelli, si aprirebbe un affascinante capitolo di nuova fisica.

5 Rivelazione interferometrica con larga banda passante

Come detto sopra è dal tempo di percorrenza di un raggio di luce da una massa libera a un'altra che si deduce la curvatura dello spaziotempo. La precisione della misura dipende da quanto il moto delle masse è disturbato, dalla stabilità dell'orologio utilizzato e dalla precisione nel determinare i momenti di partenza e di arrivo. Nel caso di esperimenti da condurre sulla Terra si usano masse sospese, praticamente libere in direzione orizzontale, e tecniche di interferometria ottica.

Gli interferometri per onde gravitazionali come Virgo devono misurare tempi con precisione relativa dell'ordine di 10^{-21} , usando la fase dell'onda luminosa, ma, allo stato attuale, non vi sono sorgenti in grado di soddisfare questo requisito. Fortunatamente la richiesta può essere ridotta attraverso una misura differenziale nella quale si confrontano le fasi dei campi elettromagnetici lungo percorsi in direzioni diverse. La relatività ci viene in aiuto: supponendo di avere

l'effetto massimo nella direzione x , si avrà effetto massimo ma con segno opposto nella direzione y (fig. 1). Risulta così naturale costruire un interferometro alla Michelson-Morley, dove si confrontano tempi di percorrenza lungo due bracci perpendicolari.

L'interferometro Virgo è stato costruito secondo questo principio, cercando di anticipare per quanto possibile eventuali problemi. Trattandosi di uno strumento di prima generazione, mentre la natura dei disturbi attesi era nota, quantificare il loro effetto avrebbe richiesto di avere lo strumento completamente in funzione. In seguito descriveremo i principali rumori e le soluzioni adottate da Virgo.

5.1 Rumore in posizione

Per interferometri a terra non è il caso di considerare masse in caduta libera (!). Ciò nonostante è possibile rendere tali masse il più possibile libere da influenze locali. Il più importante disturbo della posizione di uno specchio proviene dalle vibrazioni sismiche, che generano spostamenti dell'ordine di 10^{-9} m su scale di tempo del decimo di secondo. Tali movimenti superano di dodici ordini di grandezza l'effetto che si vuole misurare. L'isolamento sismico è quindi un componente essenziale di un rivelatore di onde gravitazionali. Un disturbo di carattere fondamentale presente su gran parte della banda di rivelazione è il cosiddetto rumore termico, risultante dalle fluttuazioni termodinamiche del sistema accoppiato all'ambiente. Il rumore Johnson presente in un elemento dissipativo elettrico come un resistore ne è un esempio. Per uno specchio sospeso in ultra alto vuoto si possono avere diverse fonti di disturbo legate alle fluttuazioni termodinamiche: fluttuazioni della pressione residua, fluttuazioni della pressione di radiazione termica, che sono trascurabili, e infine fluttuazioni dello stato del filo di sospensione. Queste ultime si traducono in sforzi microscopici casuali che muovono lo specchio sospeso in maniera confrontabile con il segnale atteso. L'ampiezza del rumore risultante sarà determinata dalla risposta meccanica del sistema agli sforzi generati nel filo di sospensione e lo spettro di rumore per la posizione dello specchio avrà la tipica forma della curva di risonanza dell'oscillatore armonico. A frequenze molto maggiori della frequenza di risonanza il rumore termico è tanto minore quanto è stretta la risonanza meccanica, essendo fissato dall'equipartizione di energia il rumore osservato sull'intera banda di frequenza. L'abbassamento del rumore termico, a temperatura fissata, passa quindi attraverso l'uso di materiali e interfacce con bassissima dissipazione. Tra questi, la silice consente di raggiungere fattori di merito per il pendolo di oltre 10^8 , ovvero tempi di decadimento di diversi anni! Sfortunatamente in altre parti dell'interferometro è necessario usare per altre funzioni materiali con elevato attrito interno. Di tale natura sono gli strati depositati sugli

specchi per ottenere l'esatto grado di riflettività richiesto dallo schema ottico adottato.

Un altro rumore a carattere fondamentale proviene dalle fluttuazioni del campo gravitazionale generato dal moto delle masse locali. I piccoli spostamenti e le fluttuazioni di densità nella crosta terrestre dovuti al passaggio di onde sismiche, le fluttuazioni di densità dell'atmosfera possono esercitare forze variabili, indistinguibili dall'effetto di un'onda gravitazionale. Per le perturbazioni di origine sismica, proporzionali al rumore sismico medesimo, l'effetto può essere ridotto posizionando l'interferometro sotto terra, dove le vibrazioni sono ridotte. L'effetto aumenta man mano che diminuisce la frequenza per cui rivelare onde gravitazionali con periodo maggiore del secondo richiede di posizionare il rivelatore nello spazio.

Infine l'uso della luce per la misura di posizione introduce un ulteriore rumore di posizione, dovuto alle fluttuazioni della pressione di radiazione generate dalla distribuzione statistica dei fotoni. Si possono ridurre gli effetti della pressione di radiazione aumentando la massa degli specchi, arrivando a diverse decine di chilogrammi.

5.2 Rumore di lettura

La differenza di fase fra i due percorsi della luce in un interferometro di Michelson viene rivelata misurando l'intensità della luce risultante dall'interferenza. L'espressione per lo sfasamento è

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi L}{\lambda} h,$$

dove L è la lunghezza del braccio, λ è la lunghezza d'onda della luce e h è l'ampiezza dell'onda. Per $h \sim 10^{-23}$ e bracci di 3 km la differenza di cammino ottico è di 6×10^{-20} m, usando $\lambda = 1 \mu\text{m}$, si ottiene una differenza di fase di 4×10^{-13} rad. Questa può essere rivelata contando i fotoni; con statistica di Poisson ne occorrono 10^{25} ovvero la potenza della sorgente luminosa deve essere di circa 2,5 MW per un tempo di misura di un secondo. Si tratta di una potenza difficile da ottenere in continua con la necessaria stabilità. Per ovviare a questa difficoltà si aumenta la distanza percorsa dalla luce attraverso riflessioni multiple. La tecnica usata è quella di avere al posto dei bracci delle cavità ottiche risonanti di tipo Fabry-Perot, nelle quali si è deciso di moltiplicare della distanza percorsa per un fattore dell'ordine di 100, e questo porta a una riduzione della potenza richiesta di un fattore 10000. Una maggiore precisione sulla fase richiede una maggiore potenza della sorgente, che però non può aumentare indefinitamente perché aumenta la pressione di radiazione. Questa è una manifestazione su masse di diversi chilogrammi, del principio di indeterminazione di Heisenberg.

La fig. 4 mostra i principali contributi al rumore di un interferometro e la banda di frequenza di interesse.

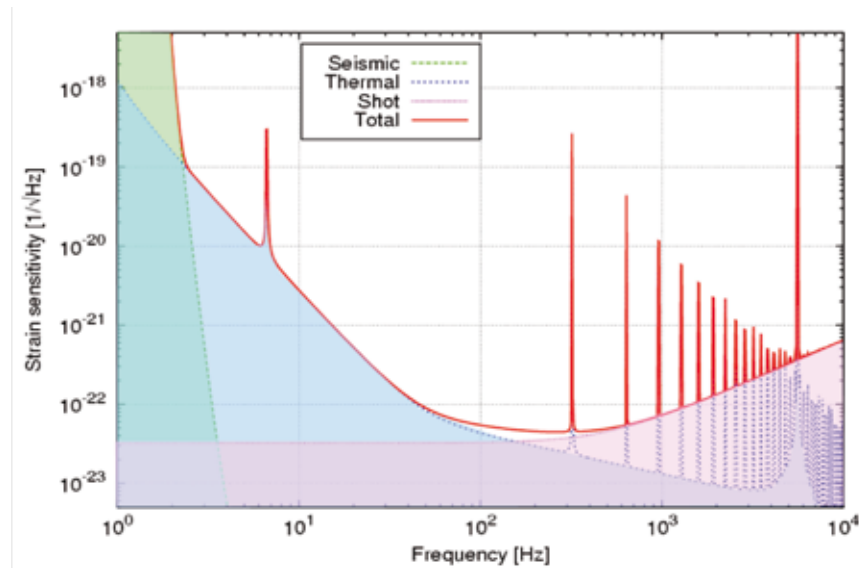


Fig. 4 I principali rumori per un rivelatore interferometrico.



Fig. 5 Veduta aerea dell'interferometro Virgo.

6 L'Interferometro Virgo

L'interferometro Virgo ha origine dall'incontro negli anni '80 tra Adalberto Giazotto, della Sezione INFN di Pisa e Alain Brillet, dell'allora Laboratoire de l'Horloge Atomique. Entrambi si occupavano di metodi sperimentali di altissima precisione con obiettivo la costruzione di un rivelatore per onde gravitazionali. Alain Brillet è un ottico finissimo mentre Adalberto Giazotto aveva iniziato un ampio programma di ricerca per consentire la rivelazione a bassa frequenza, osservando la grande quantità di pulsar che possono potenzialmente emettere onde gravitazionali con frequenza intorno a 10 Hz e intuendo che le sorgenti, composte da grandi masse in movimento, sarebbero state più numerose a bassa frequenza. Tale ricerca ha portato allo sviluppo del "Superattenuatore", una soluzione in grado di soddisfare i requisiti presenti e futuri di interferometri terrestri e un elemento fondamentale di Virgo.

Su questa base fu costituita nel 1992 la Collaborazione

Virgo² che ha concepito l'intero interferometro e lo ha messo in funzione. Nel 2000, per la gestione dello strumento e del sito (fig. 5) fu creato l'European Gravitational Observatory (EGO), consorzio partecipato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e dal Centre National de la Recherche Scientifique francese.

Il principio del Superattenuatore è quello di usare oscillatori armonici meccanici in cascata, che riducono l'ampiezza di oscillazione per frequenze significativamente maggiori della loro frequenza di risonanza. La necessità di operare in tutti i gradi di libertà, di non reintrodurre rumore attraverso controlli attivi, la realizzazione di sistemi con la necessaria

² La Collaborazione Virgo è ora composta dalle sezioni INFN di Genova, Firenze-Urbino, Napoli, Padova-Trento, Perugia, Pisa, Roma La Sapienza e Roma Tor Vergata, mentre dal lato francese ci sono i laboratori del CNRS-IN2P3 di Annecy, Lione, Nizza, Orsay, Parigi 7. Sono inoltre presenti il laboratorio olandese di Nikhef, l'Accademia delle Scienze polacca e quella ungherese.

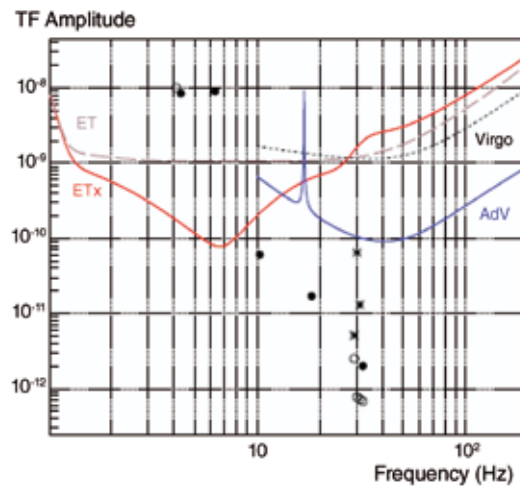


Fig. 6 Requisiti di attenuazione sismica per Virgo, Advanced Virgo ed Einstein Telescope (ET). I punti rappresentano misure o limiti superiori sperimentali.

robustezza strutturale ma con frequenze di risonanza molto basse è durata più di un decennio e ha condotto a un sistema utilizzabile anche per una seconda generazione di rivelatori e, con alcuni cambiamenti di scala, anche per la terza generazione. La [fig. 6](#) mostra le caratteristiche di attenuazione confrontate con i requisiti per le varie generazioni di interferometri (Virgo, Advanced Virgo, Einstein Telescope).

Dal lato ottico è stato adottato uno schema che comprende nei bracci delle cavità Fabry-Perot, con “finesse” 150, corrispondente ad un allungamento del cammino ottico di circa 100. La massima precisione (viene usato il termine sensibilità) prevede che l’interferometro lavori in condizioni di frangia scura, quindi i due fasci interferiscono distruttivamente e il fotodiodo, in assenza di segnale, non riceve luce. La luce che interferisce costruttivamente viene rimandata in direzione della sorgente e andrebbe persa. Viene introdotto sul percorso un ulteriore specchio semiriflettente che consente di far ricircolare la luce nell’interferometro, aumentando così la potenza disponibile di un fattore che è risultato essere oltre 30. Lo schema ottico dell’interferometro è mostrato in [fig. 7](#).

È qui il caso di sottolineare un aspetto operativo che ha un ruolo fondamentale nella sensibilità dello strumento. Gli specchi sospesi sono liberi di muoversi e quindi deve essere utilizzato un sistema di controllo per mantenere tutto l’interferometro in condizioni di massima sensibilità. Questo richiede che le due cavità Fabry-Perot siano in risonanza, che la luce dai due bracci interferisca distruttivamente e che lo specchio di ricircolo si trovi nella corretta posizione per ricircolare la luce con la stessa fase della luce entrante. I segnali di errore per il sistema di controllo non possono essere misurati da terra, ciò equivarrebbe a inchiodare gli specchi al suolo. Si usano i vari fasci di luce circolanti nell’interferometro che, attraverso varie interferenze, misurano le distanze relative tra gli specchi. Vi sono vari segnali utilizzabili e la scelta dei migliori richiede un lungo studio sperimentale.

Ma forse il problema più grande è rappresentato

dall’estensione dinamica delle forze che occorre esercitare: si deve essere in grado di correggere il sisma, dell’ordine del μm su tempi di un secondo, e altresì non introdurre rumore a livello di 10^{-20} m, ovvero il sistema deve consentire una dinamica di 10^{14} su tempi dell’ordine del secondo.

Tale dinamica non si può ottenere con un singolo dispositivo ma occorre agire in cascata, “raffreddando” gradualmente il moto degli specchi e usando segnali di errore sempre più precisi. Il sistema compie alcune decine di transizioni prima di giungere al punto di lavoro chiamato “Science mode”.

Virgo e i suoi omologhi statunitensi del progetto LIGO rappresentano la prima generazione di tali strumenti e tutto quello che è stato descritto nei paragrafi precedenti è stato concepito e realizzato dai fisici sperimentali passo passo, scoprendo le peculiarità e le idiosincrasie dello strumento che avevano costruito. Il progresso fatto nella sensibilità è mostrato in [fig. 8](#) dove si vedono le varie curve di sensibilità alle onde gravitazionali man mano che progrediscono i lavori, su un periodo, dopo la costruzione, che si estende su ben sei anni.

7 Astronomia gravitazionale

Gli interferometri per onde gravitazionali si sono mostrati, dopo anni di sviluppo, strumenti affidabili: negli anni 2009-2010 si sono svolte campagne di raccolta dati 24 ore su 24 con tempi morti minori del 20%. Questo ha consentito ai tre grandi interferometri terrestri (oltre che Virgo i due interferometri del progetto LIGO, a Hanford nello stato di Washington e a Livingston, nella Louisiana, di mettere in piedi una analisi in linea che consenta di riconoscere con piccoli tempi di latenza eventi in coincidenza. Si tratta di una analisi complessa: con strumenti orientati diversamente la forma del segnale non è la stessa per la presenza di due polarizzazioni dell’onda, e le coincidenze devono comprendere una finestra temporale di alcuni centesimi di secondo, per tenere conto dei diversi tempi di arrivo. Quest’ultima informazione è

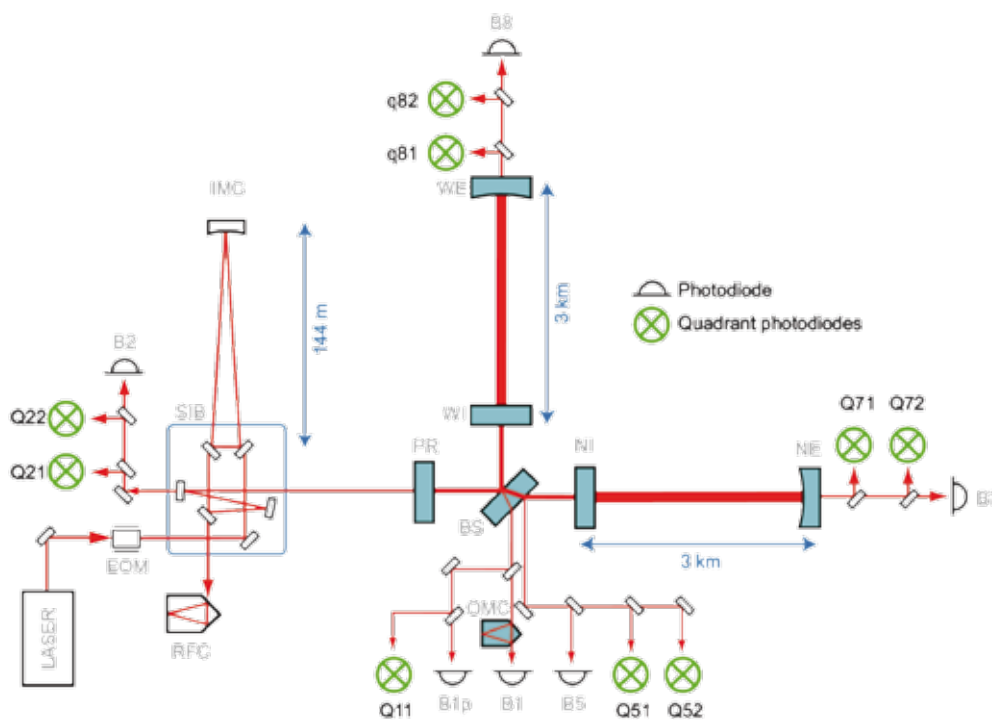


Fig. 7 Schema ottico di Virgo. Gli specchi principali sono BS (beam splitter), NI e WI (North e West Input), NE e WE (North e West End), PR (power recycling). Il segnale è registrato dal fotodiode B1. IMC e OMC sono rispettivamente l'Input e l'Output Mode Cleaner, cavità ottiche triangolari che agiscono da filtro nei confronti di modi diversi dal modo fondamentale TEM₀₀.

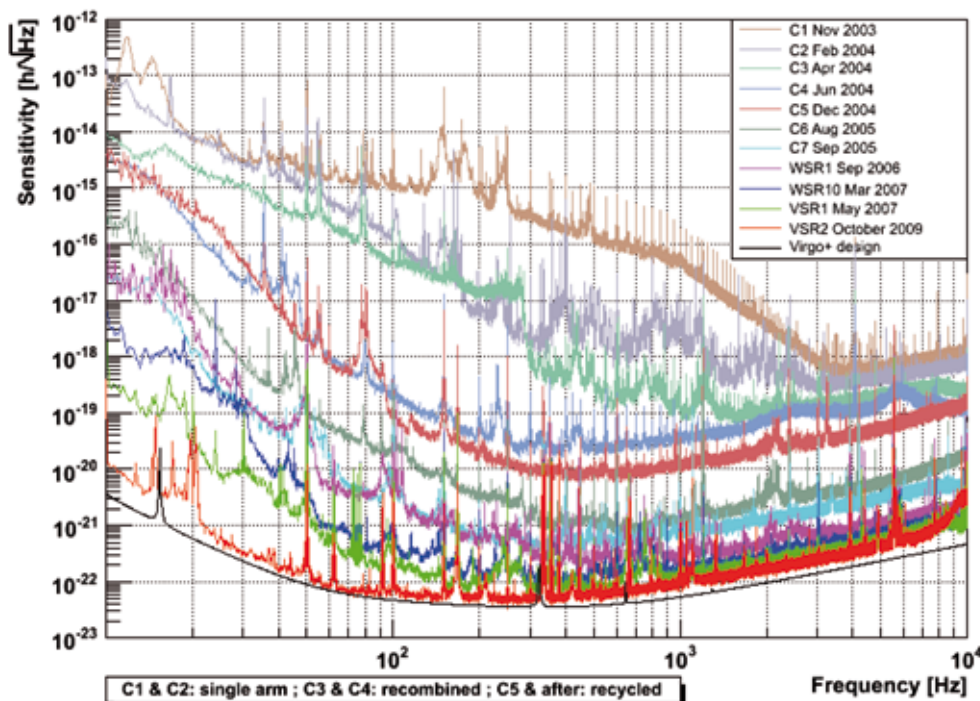
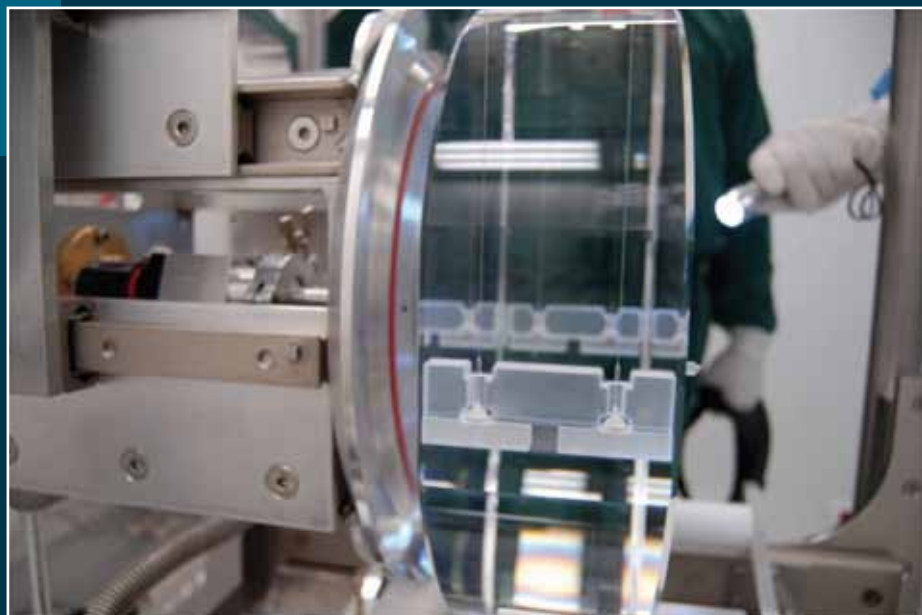


Fig. 8 Progresso della sensibilità di Virgo.



Fig. 9 La rete mondiale di interferometri.

Fig. 10 Specchio di Virgo sospeso con fibre di silice.



importantissima in quanto permette di ricostruire, entro qualche grado, la direzione di provenienza dell'onda gravitazionale. La rete di interferometri (fig. 9), in grado di ascoltare segnali da qualsiasi direzione, può segnalare così a telescopi e radiotelescopi dove puntare i loro strumenti. Ciò consente di fare osservazioni di eventi transitori e ottenere informazione sui meccanismi che governano i fenomeni più energetici presenti nell'Universo, raccogliendo la successione temporale delle varie forme di radiazione osservata: gravitazionale, di neutrini, elettromagnetica di varia energia.

Le procedure di analisi sono state collaudate in questo periodo e, anche se la sensibilità complessiva della rete era ancora bassa per assicurare una rivelazione, tutto sarà pronto per l'entrata in funzione intorno al 2015 della seconda generazione di interferometri, progettati per essere dieci volte più sensibili.

Per segnali periodici la rete di interferometri può essere sostituita da un singolo strumento che registra un segnale mentre la Terra si trova in diverse posizioni. Si misura la fase dell'onda in momenti diversi lungo l'orbita terrestre per poi riportare queste osservazioni ad uno stesso istante e ricostruire la direzione di provenienza dell'onda gravitazionale. Di nuovo, questo avviene usando uno strumento che è sensibile a segnali proveniente praticamente da qualsiasi direzione, ma in questo caso il tempo di elaborazione dei dati può risultare proibitivo.

8 La seconda generazione: Advanced Virgo

Il patrimonio di conoscenze e pratica sperimentale ha consentito l'elaborazione di un disegno di seconda generazione, chiamato "Advanced Virgo", con l'ambizioso obiettivo di migliorare di un ordine di grandezza la sensibilità dello strumento e quindi di esplorare un volume di Universo mille volte più elevato, grazie al fatto che il campo h decresce come l'inverso della distanza (al contrario i flussi di particelle decrescono come l'inverso della distanza al quadrato). Secondo stime riviste ora con grande attenzione un aumento del tasso di conteggio di sorgenti binarie coalescenti di un fattore 1000 dovrebbe portare alla rivelazione di diverse decine, se non centinaia, di eventi all'anno.

La prima generazione era in grado, fosse stata la Natura meno avara di sorgenti, di ottenere i primi segnali di onde gravitazionali. Certamente è stata in grado di dimostrare l'affidabilità degli strumenti messi in opera in vista di un funzionamento continuo, in regime di osservazione.

Mentre si svolgeva la messa a punto degli interferometri attuali, diversi programmi di ricerca e sviluppo hanno consentito di proporre soluzioni da adottare nella seconda generazione. Tra queste l'idea di sospendere gli specchi non usando fili di acciaio armonico, con basso attrito interno, ma usando fibre di silice, un materiale dalle qualità meccaniche

decisamente migliori. Dopo un lungo sviluppo reso difficile dalla fragilità del materiale si è riusciti a sospendere con successo specchi di 20 kg con quattro fibre di 200 μm di diametro (fig. 10), che sono stati installati l'anno scorso in Virgo, introducendo uno dei primi elementi del rivelatore di seconda generazione.

Altri miglioramenti riguardano la potenza del laser, che può arrivare a 200 W, contro gli attuali 60, e lo studio di configurazioni ottiche ottimizzate.

La costruzione di questi rivelatori è iniziata e si prevede che possano entrare in funzione nel 2015 per riprendere le campagne di presa dati per le quali è essenziale la presenza simultanea di almeno tre interferometri. Si conta così svolgere buona parte del programma scientifico delineato all'inizio, e in particolare poter svolgere studi dettagliati degli eventi dovuti ai sistemi binari.

9 Prospettive

Lo sviluppo delle tecniche di rivelazione sta continuando, confortato dalla comprensione degli strumenti ottenuta dalla prima generazione. È della fine dell'anno scorso la notizia dell'approvazione della costruzione in Giappone di un interferometro di 3 km, sotterraneo (sotto il monte Kamioka, ben noto ai fisici delle particelle) e operante a bassa temperatura: LCGT (Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope). Sono previste sospensioni che sfruttano gli stessi principi del Superattenuatore per cui potrebbe risultare essere il primo strumento in grado di estendere la sua banda di rivelazione ben sotto 10 Hz. Il guadagno ottenuto dal funzionamento a bassa temperatura può consentire di raggiungere livelli di sensibilità unici. Si tratta di un programma che prevede periodi di osservazione nel 2016 o nel 2017 completando la rete di interferometri già esistenti.

Un altro sviluppo di grandissimo interesse è quello relativo all'uso di stati di luce o di vuoto non standard, nei quali le osservabili fase e numero di fotoni (che non commutano) hanno dispersioni rispettivamente minore e maggiore che nei fasci di luce standard. I dispositivi sviluppati, finora oggetto di studio in laboratorio, sono in fase di sperimentazione nei grandi interferometri. Il vantaggio previsto è notevole: ridurre il rumore in fase di un fattore 4 con metodi tradizionali richiede di aumentare la potenza di una sorgente di luce standard di un fattore 16. La stessa riduzione si ottiene già a parità di potenza della sorgente confortevolmente in laboratorio con l'uso di stati non standard [12].

Rimane aperta la questione dell'attrito interno degli strati depositati sugli specchi. Il rumore termico rappresenta attualmente la limitazione maggiore, ma è sperabile che qualche sviluppo riguardante i materiali possa far progredire anche questa area.

10 La terza generazione

In base alle conoscenze attuali la seconda generazione di interferometri dovrebbe registrare decine se non centinaia di eventi di binarie coalescenti in un anno, fino a distanze di alcune centinaia di Mpc. Ciò consentirà uno studio sistematico dei sistemi astrofisici, una maggiore comprensione degli eventi violenti presenti nelle galassie, uno studio dinamico della relatività generale in condizioni di campo forte e, forse, la scoperta di qualche fenomeno sconosciuto.

Nel periodo in cui opereranno gli interferometri si prevede che le tecniche sperimentali si affinino ulteriormente, e in particolare che si possano diminuire ancora di più i rumori provenienti da fenomeni fondamentali quali il rumore termico e il rumore di conteggio dei fotoni. In tal senso è in corso uno studio per un possibile progetto di un osservatorio gravitazionale, chiamato Einstein Telescope [13]. Si conta di aumentare di nuovo di un fattore 10 la distanza di rivelazione delle sorgenti, e inoltre di abbassare il limite in frequenza per accedere a sistemi di massa più elevata oppure che vedano la frequenza dell'onda gravitazionale spostata verso il rosso per la grande distanza.

Si punta ad un interferometro posto sotto terra in una zona con basso microsisma, per ridurre il più possibile le fluttuazioni della gravità locale. Si ritiene che i bracci possano avere una lunghezza di una decina di chilometri e che gli specchi possano essere portati alla temperatura di qualche decina di gradi kelvin. Infine già oggi è possibile aggirare il limite dettato dal principio di indeterminazione di Heisenberg, aumentando le fluttuazioni sul numero di fotoni e diminuendo di conseguenza quelle sulla fase.

L'insieme di questi miglioramenti porterà ad uno strumento con straordinarie capacità di osservazione, in grado di scandagliare le parti più remote dell'Universo, con un occhio completamente nuovo rispetto a quanto è stato fatto finora.

Ringraziamenti

Il lavoro qui descritto è frutto dell'impegno di numerosi fisici che hanno contribuito, con il loro ingegno, a far diventare realtà la misura di quantità piccole fino all'inverosimile. Arrivare fin qui non sarebbe stato possibile senza la fiducia e il sostegno finanziario da parte dell'INFN, del CNRS, e di tutti coloro che hanno voluto credere in questa impresa.

Bibliografia

- [1] A. Einstein, "Sitzungsberichte" (Preußische Akademie der Wissenschaften) 1916, p. 688.
- [2] H. Poincaré, *Comptes Rendus Ac. Sci. Paris*, 140 (1905) 1504, anche in *Oeuvres*, vol. 9 (Gauthier-Villars, Paris) p. 489; "Sur la dynamique de l'électron", *Rend. Circolo Mat. Palermo*, 21 (1906) 129, anche in *Oeuvres*, vol. 9 (Gauthier-Villars, Paris), p. 494.
- [3] A. Einstein, "Sitzungsberichte" (Preußische Akademie der Wissenschaften) 1918, p. 154.
- [4] Virgo Collaboration (F. Acernese *et al.*), *Class. Quantum Gravit.*, 25 (2008) 184001; LIGO Collaboration (B. Abbott *et al.*), *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 517 (2004) 154; GEO600 Collaboration (B. Willke *et al.*) *Class. Quantum Gravit.*, 24 (2007) S389; TAMA Collaboration (R. Takahashi *et al.*) *Class. Quantum Gravit.*, 25 (2008) 114036; LCGT Collaboration (K. Kuroda *et al.*) *Int. J. Mod. Phys. D*, 5 (1999) 557; ALIGO Collaboration (futuro) (D. G. Blair *et al.*) *J. Phys.: Conf. Ser.*, 122 (2008) 012001; LISA Collaboration (H. Araújo *et al.*) *J. Phys.: Conf. Ser.*, 66 (2007) 012003.
- [5] J. W. Armstrong *et al.*, *Astrophys. J.*, 599 (2003) 806.
- [6] EPTA Collaboration (R. van Haasteren *et al.*) *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 395 (2009) 1005; PPTA Collaboration (G. B. Hobbs *et al.*) *Class. Quantum Gravit.*, 27, 084013; NANOGrav Collaboration, arXiv:0909.1058v1 (2009) <http://arxiv.org/abs/0909.1058>
- [7] E. Amaldi *et al.*, *Astron. Astrophys.*, 216 (1989) 325; I. S. Heng *et al.*, *Phys. Lett. A*, 218 (1996) 190; L. Baggio *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 94 (2005) 241101; E. Mauceli, Z. K. Geng, W. O. Hamilton *et al.*, *Phys. Rev. D*, 54 (1996) 1264 2; D. Blair e L. Ju, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 283 (1996) 648 1.
- [8] S. Masi *et al.*, *Astron. Astrophys.*, 458 (2006), 687, astro-ph/0507509.
- [9] The Planck Collaboration, "The Scientific Program of Planck", scaricabile in <http://www.rssd.esa.int/Planck>.
- [10] Un estensivo catalogo di pulsar si trova su www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/
- [11] J. Abadie *et al.*, *Class. Quantum Gravit.*, 27 (2010) 173001.
- [12] H. Vahlbruch *et al.*, *Class. Quantum Gravit.*, 27 (2010) 084027.
- [13] M. Punturo *et al.*, *Class. Quantum Gravit.*, 27 (2010) 194002.

Francesco Fidecaro

Francesco Fidecaro è Spokesperson della Collaborazione Virgo e Direttore Scientifico del Consorzio EGO. Nel campo delle onde gravitazionali si è dedicato allo sviluppo della rivelazione a bassa frequenza, lavorando al sistema di isolamento sismico e allo studio dei disturbi ambientali presenti nello strumento. In precedenza ha svolto esperimenti di fisica della particelle, studiando i mesoni con charm con l'esperimento FRAMM, successivamente ha partecipato allo sviluppo e alla realizzazione della Time Projection Chamber dell'esperimento Aleph. Si è laureato nel 1978, allievo della Scuola Normale; insegna Fisica Generale all'Università di Pisa. Si interessa di Acustica Ambientale e del trasferimento tecnologico dei risultati della ricerca.