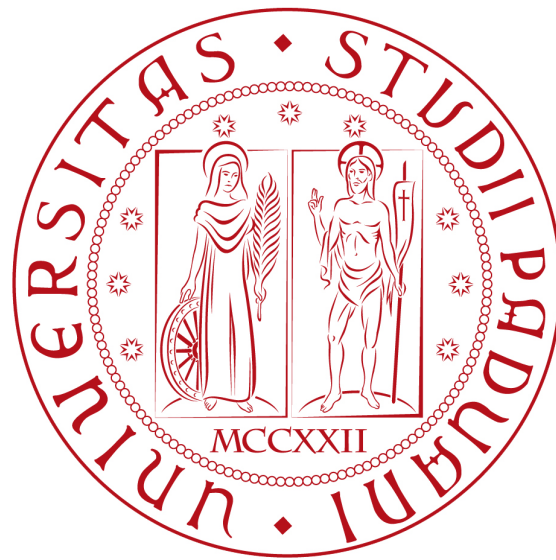


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Storia delle onde gravitazionali e dei loro rivelatori



Laureanda:
Beatrice FOFFANI

Relatore:
Prof. Giulio PERUZZI

Anno accademico 2016/2017

Indice

Introduzione	v
1 Le onde gravitazionali	1
1.1 Prima di Einstein	1
1.2 Lo sviluppo della teoria	2
1.3 La ricerca sperimentale	4
2 Sorgenti di onde gravitazionali	5
3 Antenne a massa risonante	7
3.1 Antenne criogeniche; la ricerca italiana	8
3.2 Non solo cilindri	10
4 Interferometri	11
4.1 La collaborazione Virgo	13
4.2 Interferometri avanzati	15
5 Sviluppi futuri	17
5.1 L'Einstein Telescope	17
5.2 La missione LISA	17
5.3 Conclusioni	18
Bibliografia	19

Introduzione

Le onde gravitazionali sono tra le più controverse previsioni della relatività generale. Einstein stesso ebbe più volte dei dubbi sulla loro esistenza, e ad ogni modo era convinto che fosse impossibile rilevarne gli effetti sulla materia. Mezzo secolo dopo, Joseph Weber ne annunciò la scoperta, ma era solo un falso allarme. Dopo la dimostrazione indiretta della loro esistenza da parte di Hulse e Taylor, la comunità scientifica ha dovuto aspettare più di quarant'anni prima di poter siglare l'ennesimo successo della teoria di Einstein. A rivelare le onde per la prima volta è stato Advanced LIGO, una coppia di rivelatori di ultima generazione, due interferometri situati a capi opposti degli Stati Uniti.

Nel capitolo 1 di questa tesi parleremo della storia della teoria delle onde gravitazionali, partendo dalle premesse che portarono Einstein a sviluppare la relatività generale, fino ai primi tentativi sperimentali degli anni sessanta e settanta.

Nel capitolo 2 tratteremo le possibili sorgenti di onde gravitazionali, concentrandoci sui sistemi binari coalescenti.

Nei capitoli 3 e 4 parleremo dei rivelatori a barra risonante e degli interferometri, dedicando qualche paragrafo alla ricerca padovana con AURIGA e Virgo.

Infine, nel capitolo 5 discuteremo brevemente gli sviluppi futuri della ricerca delle onde gravitazionali.

1 Le onde gravitazionali

1.1 Prima di Einstein

Alla fine dell'Ottocento, due secoli dopo la formulazione della legge di gravitazione universale di Newton, la meccanica celeste aveva ancora un grosso problema da risolvere: il perielio di Mercurio precede ogni secolo di 43 secondi in più di quanti si sarebbero dovuti osservare, anche tenendo in considerazione gli effetti gravitazionali di tutti i pianeti vicini. Inizialmente furono avanzate varie ipotesi all'interno del paradigma Newtoniano: l'astronomo francese Le Verrier, dopo aver previsto con successo l'esistenza di Nettuno per spiegare le discrepanze tra la teoria e le osservazioni dell'orbita di Urano, ebbe l'idea che anche nel caso di Mercurio potesse esserci un piccolo pianeta nascosto, Vulcano, che ne influenzasse il moto. La ricerca di questo pianeta continuò invano per tutto il diciannovesimo secolo [1]. Che l'anomala precessione di Mercurio potesse richiedere una variazione della legge di gravitazione universale è una proposta che venne avanzata verso la fine dell'Ottocento da Simon Newcomb, senza però convincere astronomi e fisici [2].

Nel 1908 Poincaré, che già nel 1905 aveva coniato il termine *onde gravifique* in un articolo in cui s'interrogava sull'analogia tra il campo elettromagnetico e quello gravitazionale [3], suggerì che delle ipotetiche onde gravitazionali potessero essere almeno in parte responsabili dell'anomalia nella precessione del perielio di Mercurio: esse, infatti, priverebbero il suo moto di abbastanza energia da modificarne l'orbita [4]. Poincaré conosceva il lavoro di Laplace, che aveva supposto che la gravità si propagasse con velocità finita (anche se, secondo i suoi calcoli, questa velocità doveva essere estremamente più grande di quella della luce); e in un periodo di sforzi nel riconciliare la meccanica classica con l'elettrodinamica di Maxwell, l'esistenza di una radiazione di gravità che si muovesse alla stessa velocità della luce sembrava accattivante.

I calcoli di Poincaré, in effetti, mostrarono che un effetto relativistico era presente, anche se più piccolo di quello osservato sperimentalmente. Si dovette aspettare la formulazione della relatività generale di Einstein per riprodurre esattamente la precessione osservata, e fu proprio questo risultato a segnare inizialmente il successo della teoria.

1.2 Lo sviluppo della teoria

Max Abraham, in un lavoro del 1912, precedette Einstein nel parlare di onde gravitazionali, anche se andò nella direzione opposta e spese le sue energie nel dimostrare che non possono esistere: Abraham, infatti, suppose (nel contesto dell'analogia tra i due campi, elettromagnetico e gravitazionale) che se il meccanismo di produzione di un'onda elettromagnetica consiste nell'accelerazione di una carica, allora con l'accelerazione di una massa si deve ottenere un'onda gravitazionale. In un dipolo elettrico oscillante, l'onda è legata al prodotto tra la carica elettrica e la sua velocità; ma nel caso di un dipolo gravitazionale, il prodotto tra la massa e la velocità è il momento, che si deve conservare, perciò un dipolo di questo tipo non può esistere. Con questo ragionamento Abraham concluse che nemmeno le onde gravitazionali possono dunque esistere, giacché nell'elettromagnetismo si ha a che fare prevalentemente con dipoli e si è presa per ipotesi l'analogia tra le due grandezze. Come sappiamo oggi, Abraham aveva tratto una conclusione sbagliata da un ragionamento corretto: non sono le onde a non esistere, ma i dipoli gravitazionali [1].

Nel 1916 Einstein fu il primo a parlare di onde gravitazionali all'interno di una teoria completa del campo gravitazionale. Già nel 1915 aveva pubblicato le sue famose dieci equazioni di campo, di cui la prima soluzione esatta fu pubblicata poco dopo da Karl Schwarzschild, che finalmente risolvevano l'annoso problema di Mercurio con un metodo perturbativo.

Dopo aver introdotto le onde gravitazionali nella sua teoria, Einstein si convinse in momenti successivi della loro inesistenza, per una serie di motivi. Innanzitutto, per l'apparente assenza di termini perturbativi non conservativi nel moto di Mercurio: come poteva dunque il pianeta, e qualunque altro oggetto, irradiare onde gravitazionali? In realtà, oggi sappiamo che questi termini non compaiono prima dell'ordine $(v/c)^5$. Einstein non si spinse così lontano nei calcoli, e comunque Mercurio, il principale oggetto di test della relatività generale dell'epoca, è troppo lento perché si riuscissero ad osservare gli effetti delle onde gravitazionali sulla precessione del suo perielio.

Un altro problema individuato da Einstein era che le sue equazioni di campo erano valide sotto la condizione $\sqrt{-g} = 1$, che non era rispettata dalla soluzione per le onde gravitazionali. Dietro suggerimento dell'olandese De

Sitter, scoprì che cambiando il sistema di coordinate riusciva a riscrivere le sue equazioni di campo in maniera da ottenere una soluzione che rappresentasse effettivamente onde gravitazionali che si muovono alla velocità della luce. Nel nuovo sistema compaiono tre tipi diversi di onde: longitudinali, trasversali e “un nuovo tipo di simmetria”, ma solo queste ultime trasportano energia. Risultò che gli altri tipi di onde sono solo un effetto apparente dovuto al sistema di coordinate, e che tornando alla condizione originale si trova un solo tipo di onda, la vera e propria onda gravitazionale. La scelta di coordinate di De Sitter fu comunque fondamentale per permettere ad Einstein di completare i suoi calcoli [1, 5].

Einstein pubblicò nel 1918 la formula di quadrupolo, confermando che non esistono dipoli gravitazionali, come previsto da Abraham. Questa formula venne poi corretta da Eddington in un lavoro del 1922, in cui aveva cercato di ricavare i risultati di Einstein senza fare alcuna assunzione sulla velocità delle onde gravitazionali. In effetti egli ricavò che, nel sistema di coordinate in cui compaiono i tre tipi di onde, per i due tipi “spuri” la velocità dipendeva dalle coordinate, da cui il suo famoso commento, *gravitational waves propagate at the speed of thought*, le onde gravitazionali si propagano alla velocità del pensiero. In seguito Eddington pubblicò altri lavori in cui esprimeva i suoi dubbi sul fatto che un sistema di stelle binarie possa perdere energia a causa dell'emissione di onde gravitazionali.

Nel 1936 Einstein (che nel frattempo si era trasferito negli Stati Uniti) inviò al Physical Review, assieme al collaboratore Rosen, un articolo in cui ritrattava le sue precedenti convinzioni sull'esistenza delle onde gravitazionali. Gli risultava infatti impossibile trovare una soluzione esatta alle equazioni di campo per le onde senza introdurre singolarità, e questo lo persuase di avere in mano una prova dell'inesistenza di queste soluzioni. L'articolo però non superò il peer review e venne quindi respinto dalla rivista; Einstein, indignato, ritirò l'articolo e lo inviò al Journal of the Franklin Institute, che invece lo accettò per la pubblicazione.

Einstein e Rosen continuarono comunque a lavorare sulla scoperta, e sembra che arrivarono indipendentemente alla conclusione di aver commesso un errore; complice forse il fatto che Infeld, il nuovo collaboratore di Einstein, si era intrattenuto in discussioni sulla materia con Robertson, professore di Princeton che guarda caso era stato anche il revisore dell'articolo inviato al

Physical Review, Einstein inviò al Franklin Institute un nuovo articolo dal titolo modificato, in cui invece di dimostrare l'inesistenza di soluzioni per onde gravitazionali piane, trovava una soluzione per onde gravitazionali cilindriche. Venne pubblicato nel 1937 [6].

Rosen e Infeld, comunque, restarono scettici sul fenomeno delle onde gravitazionali, e in particolare, come Eddington prima di loro, sul ruolo che esse avrebbero in un sistema di stelle binarie.

1.3 La ricerca sperimentale

Il primo a dedicarsi alla ricerca di un'evidenza sperimentale dell'esistenza delle onde gravitazionali fu Joseph Weber. Negli anni sessanta sviluppò il primo tipo di rivelatore, la barra di Weber, ossia un cilindro di 1400 kg di alluminio che doveva funzionare come un'antenna con frequenza di risonanza pari a 1660 Hz. Il cilindro era sospeso e isolato nel vuoto, e venivano analizzati solo i segnali rivelati da almeno due barre situate ad almeno 1000 km di distanza. Weber affermò nel 1968 di aver rivelato delle onde gravitazionali, ma esperimenti successivi non riuscirono a riprodurre i suoi risultati, e la comunità scientifica attribuì la svista sia al grande rumore a cui erano soggetti gli apparati di Weber, sia ad errori nei suoi programmi di analisi dati [7]. Il "falso allarme" di Weber svolse comunque una funzione di stimolo per il settore, e per questo motivo Weber è oggi considerato il padre della ricerca sperimentale.

Nel 1974, i fisici Russell Hulse e Joseph Taylor scoprirono un nuovo tipo di pulsar, il sistema binario PSR 1913+16, scoperta che dopo vent'anni di studi valse loro il premio Nobel per la fisica nel 1993. Taylor e i suoi collaboratori si accorsero che la velocità con cui queste due stelle orbitano l'una attorno all'altra è talmente elevata che il sistema poteva essere usato per testare le previsioni della relatività generale; e in effetti riuscirono a dimostrare che il periodo del moto orbitale diminuisce esattamente come vorrebbe la teoria di Einstein, cioè come se stesse emettendo onde gravitazionali. Di fatto, questo è stato il primo segnale (indiretto) della loro esistenza [1].

L'annuncio di Weber e la scoperta di Hulse e Taylor diedero inizio, alla fine degli anni settanta, alla corsa alla costruzione di nuovi rivelatori: ma di questo parleremo più approfonditamente nei capitoli 3 e 4.

2 Sorgenti di onde gravitazionali

Oggi i sistemi binari sono considerati le sorgenti più promettenti per la ricerca sperimentale, ed infatti proprio di questi si trattava nel caso dei segnali recentemente rivelati da LIGO. Non è però sempre stato così: fin dalla pubblicazione della formula di quadrupolo e per buona parte del ventesimo secolo, la comunità scientifica ha dibattuto prima sull'esistenza delle onde gravitazionali, e poi sull'effettiva possibilità per un sistema binario, nel quale gli elementi si muovono lungo le geodetiche, di emettere onde. A questi dubbi ha messo fine la già citata scoperta di Hulse e Taylor.

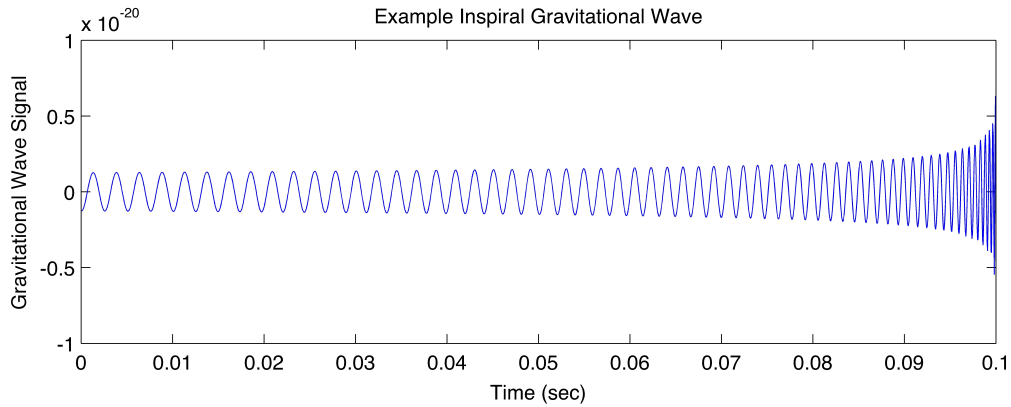
Le tecniche disponibili attualmente ci permettono di esplorare quattro bande di frequenza: la banda ad alta frequenza (HF, *high frequency*), da 10^4 a 1 Hz; la banda a bassa frequenza (LF, *low frequency*), da 1 a 10^{-4} Hz; la banda a frequenza molto bassa (VLF, *very low frequency*), da 10^{-7} a 10^{-9} Hz; e infine la banda a frequenza estremamente bassa (ELF, *extremely low frequency*), da 10^{-15} a 10^{-18} Hz.

La banda LF sarà il dominio di eLISA, *Evolved Laser Interferometer Space Antenna*, missione dell'ESA che auspicabilmente sarà operativa entro i prossimi vent'anni. Dovrebbe rivelare onde provenienti da piccoli sistemi binari nella nostra galassia; da nane bianche, stelle di neutroni o piccoli buchi neri che spiraleggiano verso buchi neri massivi in galassie lontane; e infine dalla coalescenza di buchi neri supermassivi.

In questa tesi ci concentreremo però sui rivelatori terrestri, perciò tratteremo ora più in dettaglio la banda da questi indagabile, quella ad alta frequenza. A frequenze più basse di 1 Hz, infatti, il rumore dovuto alle forze mareali, alle vibrazioni del suolo e anche all'attività umana è troppo alto e impossibile da filtrare meccanicamente, ed è proprio questo che detta il limite inferiore di questa banda di esplorazione. Il limite superiore deriva invece da considerazioni astrofisiche sulle dimensioni di un'ipotetica sorgente [8].

Come anticipato, le sorgenti più promettenti sono le compatte binarie coalescenti, sistemi composti da due stelle di neutroni (NS/NS), due buchi neri (BH/BH), o una stella di neutroni e un buco nero (NS/BH), la cui coalescenza consiste in tre fasi, l'*inspiral*, il *merger* e il *ringdown*; quella che più ci interessa è la prima.

Inizialmente, la distanza tra i due corpi è maggiore delle loro dimensioni, e l'orbita è ellittica; ma la perdita di energia e di momento angolare dovuta all'emissione di onde gravitazionali la rende circolare, avvicinando i due corpi, fino a raggiungere l'*innermost stable circular orbit* (ISCO). Durante i 15 minuti finali dell'inspiral, la frequenza delle onde emesse cresce di due ordini di grandezza, producendo un tipico *chirp* [9]:



Non potendo trovare una soluzione analitica, a partire dagli anni novanta, con l'avvento della tecnologia adatta, si è sviluppato il campo della relatività numerica. Le simulazioni condotte per una coalescenza BH/BH sono state confrontate con successo con GW150914, il primo dei segnali rivelati da LIGO [10]. Nei casi NS/NS e NS/BH le simulazioni sono più recenti; si sta tutt'oggi cercando di comprendere la struttura di questi eventi, e la forma delle onde che ne nascerebbero. Rivelare una coalescenza NS/NS sarebbe particolarmente importante per due ragioni: la prima è che si potrebbero studiare nuclei atomici in condizioni estreme, con $A \sim 10^{57}$; la seconda è che si potrebbe confermare se due stelle di neutroni coalescenti possano effettivamente causare i γ -ray bursts, come si è teorizzato [6].

3 Antenne a massa risonante

Come già ricordato, la storia della ricerca sperimentale delle onde gravitazionali iniziò con Weber negli anni sessanta. L'obiettivo dell'esperimento era di verificare direttamente l'esistenza della radiazione gravitazionale. La prima barra di Weber fu costruita alla University of Maryland, e iniziò la presa dati nel 1965; simili strumenti vennero poi replicati negli istituti di ricerca di tutto il mondo, tra cui i Bell Laboratories, la University of Rochester e il Max Planck Institute, andando così a costituire la prima generazione di barre. Essendo l'effetto delle onde quello di comprimere e dilatare la materia, l'idea generale di questi primi rivelatori è di misurare la vibrazione d'insieme della barra. Weber contemplò anche l'utilizzo di interferometri, ma la tecnologia del tempo ancora non ne consentiva lo sviluppo [11].

Il cilindro di Weber era costruito in modo da avere una frequenza di risonanza che ricadesse nell'intervallo atteso per le radiazioni emesse durante un collasso gravitazionale, intorno ai 1660 Hz; la barra era collegata a un sistema di trasduttori piezoelettrici, per convertire il movimento meccanico del cilindro in un segnale elettrico e monitorarne quindi le oscillazioni. La barra era isolata nel vuoto per limitare il più possibile il rumore esterno, che risultava comunque molto elevato [7].

Weber riuscì perfino a portare una delle sue barre sulla Luna: LSG, *Lunar Surface Gravimeter*, venne installato durante la missione Apollo 17, e ambiva a sfruttare la minore attività sismica del satellite, oltre all'assenza degli oceani e di una vera e propria atmosfera, per abbassare il rumore nella rivelazione delle onde gravitazionali [12]. A causa di un errore di produzione, e delle conseguenti riconfigurazioni apportate dall'equipaggio per verificare il funzionamento dell'apparato, LSG non ha mai potuto fornire dati utili alla ricerca delle onde; è rimasto tuttavia in uso come sismografo, essendo in grado di reagire ad eventi quali impatti di meteoriti e lunamoti sia profondi che superficiali [13].

Abbiamo già menzionato la presunta scoperta di Weber: l'affermazione di aver rivelato dei segnali provenienti dalla direzione del Centro Galattico non fu confermata da nessun altro laboratorio. A Weber va comunque riconosciuto il merito di essere stato il pioniere dell'avventura sperimentale. Alla fine degli anni settanta iniziò la ricerca per la seconda generazione di antenne,

basate sulla barra di Weber e raffreddate criogenicamente per abbassare ulteriormente il rumore.

3.1 Antenne criogeniche; la ricerca italiana

Proprio in quegli anni venne a formarsi il gruppo di Roma, guidato da Edoardo Amaldi, che diede inizio alla ricerca italiana sulla rivelazione delle onde gravitazionali. Ricevuta la proposta di William Fairbank della Stanford University per il progetto di un'antenna ultracriogenica da 5 tonnellate, il gruppo sviluppò inizialmente delle antenne più piccole, anche per studiare e testare la strumentazione.

Verificata la fattibilità di un'antenna criogenica, negli anni ottanta venne costruito EXPLORER, in collaborazione con il CERN. Quest'antenna di 2.3 tonnellate raffreddata a 2.6 K diventò operativa nel 1985, e nel 1986 prese parte a una prima run in coincidenza con ALLEGRO della Louisiana State University e con la barra costruita a Stanford. Spente dopo qualche mese per i dovuti upgrade, le tre antenne mancarono di rivelare la Supernova 1987A del 23 febbraio 1987; a Roma era comunque attivo GEOGRAV, antenna risonante a temperatura ambiente, i cui dati vennero poi confrontati con quelli di rivelatori di neutrini come quello del Monte Bianco e il Kamiokande II [11]. Sebbene si trovò una correlazione tra i segnali, GEOGRAV non era abbastanza sensibile per dare informazioni utili sull'onda [14].

Un ulteriore passo avanti per gli italiani fu la costruzione delle due antenne ultracriogeniche gemelle, NAUTILUS e AURIGA, uniche al mondo nel loro genere. Massimo Cerdonio lasciò il gruppo di Roma per guidare il nuovo gruppo padovano legato ad AURIGA (*Antenna Ultracriogenica Risonante per l'Indagine Gravitazionale Astronomica*) [14].

NAUTILUS venne costruito inizialmente al CERN, per poi essere trasferito a Frascati e iniziare le operazioni a temperature ultra basse nel 1994 [15]; AURIGA venne costruito direttamente a Legnaro e iniziò a lavorare nel 1997. I due rivelatori, raffreddati rispettivamente a 130 e 200 mK, alla fine degli anni novanta fecero parte di IGEC, *International Gravitational Event Collaboration*, assieme ad EXPLORER, al già citato ALLEGRO e al rivelatore australiano NIOBE. Le cinque barre furono orientate parallelamente per

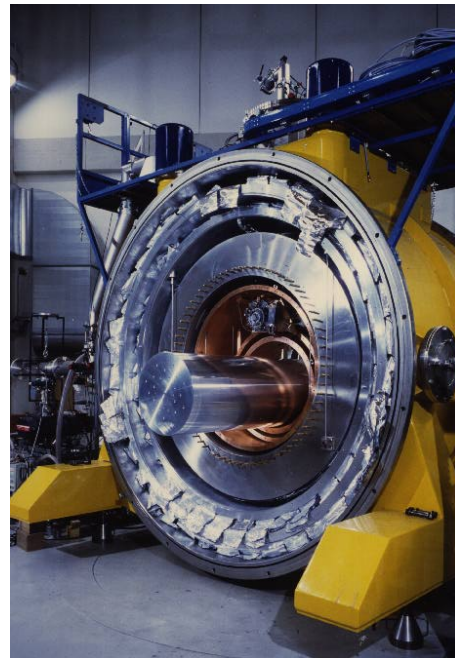
aumentare la probabilità di rilevare un evento in coincidenza, anche se non ci fu mai l'occasione di poter prendere dati da tutti e cinque i rivelatori insieme.

NIOBE cessò le attività all'inizio degli anni duemila per mancati finanziamenti; ALLEGRO continuò la presa dati fino al 2007, quando, raggiunto ormai in sensibilità dal vicino LIGO ($h \sim 10^{-21}$), lasciò attivi in IGEC2 soltanto i rivelatori italiani.

Sebbene l'idea iniziale del gruppo di Amaldi fosse quella di costruire molti apparecchi con frequenze di risonanza diverse con l'obiettivo di ricostruire interamente un possibile segnale gravitazionale, una volta disponibili le tecnologie per lo sviluppo degli interferometri i gruppi italiani iniziarono a dedicarsi alla progettazione di Virgo. NAUTILUS ed EXPLORER sono ancora operativi; AURIGA è stato spento, in vista dell'imminente entrata in funzione di Advanced Virgo [14].



Joseph Weber nel 1965 [7]



La barra di AURIGA [16]

3.2 Non solo cilindri

Nel tentativo di aumentare la sensibilità raggiunta dalle antenne, negli anni novanta si studiò la possibilità di nuovi rivelatori di forma sferica o quasi sferica, con il vantaggio quindi di essere onnidirezionali. Quasi nessuno dei progetti fu finanziato. Dei progetti europei, come l'olandese GRAIL e l'italiano OMEGA, fu finanziata soltanto una versione in scala ridotta del primo; negli Stati Uniti, TIGA (*Truncated Icosahedral Gravitational-Wave Antenna*) dovette cedere il passo al finanziamento di LIGO [11].

MiniGRAIL, antenna sferica ultracriogenica, fu costruita all'inizio degli anni duemila ed è tuttora operativa a Leiden [17]. Un'antenna simile, la Mario Schenberg, è attiva in Brasile dalla seconda metà degli anni duemila. Altre antenne sferiche vennero proposte nel corso degli anni duemila, come il progetto romano di SFERA (*Sorgente Ferroelettrica di Elettroni Robusta*). Viste le elevate sensibilità in gioco, questo tipo di antenne potrebbe essere prezioso anche nell'era degli interferometri avanzati, in particolar modo per la loro capacità di coprire completamente ogni direzione del cielo; se verrà sviluppata una nuova generazione di antenne, queste saranno molto probabilmente modellate su TIGA o sugli attuali rivelatori sferici [8].

4 Interferometri

Questi rivelatori si basano sull'interferometro di Michelson: un fascio laser viene diviso da un *beam splitter* in due fasci perpendicolari che seguono cammini ottici di uguale lunghezza, regolata da un sistema di masse sospese su supporti isolanti dalle vibrazioni meccaniche. Sulle masse sono montati degli specchi che creano delle cavità di Fabry-Pérot, in maniera da prolungare il cammino ottico di circa 200 volte. Se un'onda gravitazionale attraversa il sistema, le masse oscillano e la lunghezza dei due cammini ottici varia, formando un'interferenza che viene rilevata da un fotodiode.

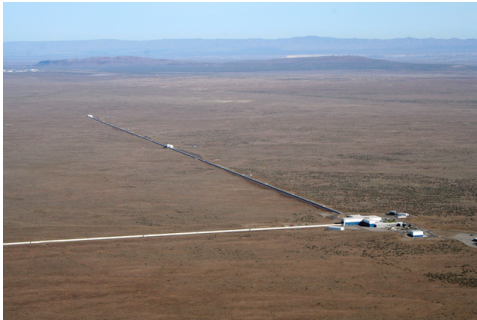
L'idea di usare un interferometro per rivelare onde gravitazionali nacque negli anni cinquanta, ma il primo vero progetto risale al 1970, quando Rainer Weiss al MIT condusse il primo studio di fattibilità. Due anni dopo, Robert Forward aveva costruito il primo prototipo agli Hughes Research Laboratories: egli aveva intuito l'importanza di questo nuovo tipo di rivelatore che era sensibile a una banda più larga di frequenze (tutta la banda HF), confrontato con le barre di Weber che erano sensibili soltanto a un intorno della loro frequenza di risonanza (da un centinaio di Hz a 1660 Hz) [18]. Alla fine degli anni settanta, mentre alcuni gruppi di ricerca preparavano la seconda generazione di barre risonanti, il gruppo di Monaco e il gruppo di Glasgow si dedicarono allo sviluppo dei primi interferometri; proprio a Glasgow, Ronald Drever disegnò il primo interferometro con cavità di Fabry-Pérot. Fu questa invenzione ad attirare l'interesse di Kip Thorne che invitò poi Drever al Caltech [18, 19].

La National Science Foundation, volendo finanziare un solo progetto sulle onde gravitazionali, richiese la collaborazione tra i due gruppi di ricerca del MIT e del Caltech. Nel 1983 questi presentarono alla NSF il celebre *Blue Book*, un rapporto sullo stato della ricerca delle onde gravitazionali e sullo sviluppo degli interferometri; l'anno seguente, LIGO era nato. Inizialmente il progetto era guidato dal triumvirato di Thorne, Drever e Weiss; la mancanza di coordinamento fra i tre rese necessaria la nomina di un unico direttore, ruolo che Rochus Vogt andò a ricoprire nel 1987. Vogt ridusse il numero di interferometri del progetto iniziale da sei a tre (di cui uno a metà lunghezza), riducendo enormemente i costi e assicurando quindi il finanziamento da parte della NSF [18]. Non senza controversie e passaggi di potere, con Barry Berish che succedette a Vogt come direttore a metà degli anni novanta, all'inizio de-

gli anni duemila LIGO era pronto, con le sue due strutture a Livingston in Louisiana e a Hanford nello Stato di Washington.



Da sinistra a destra, Kip Thorne, Ron Drever e Robbie Vogt



LIGO Hanford



LIGO Livingston

4.1 La collaborazione Virgo

A metà degli anni ottanta, Adalberto Giazotto (INFN Sezione di Pisa), impressionato dall'attività di ricerca di Weber, cominciò a interessarsi alle onde gravitazionali. Poiché le barre risonanti funzionavano con frequenze minime molto alte, con l'idea di abbassare la frequenza rivelabile egli ideò i cosiddetti superattenuatori, in grado cioè di attenuare il rumore meccanico lungo tutti e 6 i gradi di libertà di un corpo rigido, e li implementò in IRAS, *Interferometer for Seismic noise Active Reduction*. Nel 1987 le prove con i superattenuatori portarono risultati soddisfacenti, così Giazotto prese contatto con il gruppo di Monaco, che aveva già sviluppato un interferometro con bracci di 30 metri negli anni precedenti, per costruirne assieme uno più grande [20].

Venuto a conoscenza delle trattative, il francese Alain Brillet, che conosceva le idee di Drever e aveva portato avanti col suo gruppo delle ricerche sull'ottica degli interferometri, propose invece a Giazotto una collaborazione tra il gruppo di Pisa e quello di Orsay, le cui ricerche risultavano perfettamente complementari. Giazotto e Brillet stilarono quindi la proposta all'INFN e al CNRS per lo sviluppo di Virgo, il cui nome deriva dall'Ammasso della Vergine (*Virgo Cluster*), un vicino ammasso di galassie e potenziale candidato per lo studio delle onde. Dopo qualche anno di studi e verifiche, il progetto venne finalmente approvato il 27 giugno 1994, e la costruzione iniziò nel 1996 [21]. Nel mentre, i tedeschi si associarono agli inglesi per lo sviluppo di GEO600, piccolo interferometro di 600 metri sito ad Hannover.

Nel 2000 nacque EGO, l'*European Gravitational Observatory*, consorzio incaricato non solo di supervisionare lo sviluppo e l'aggiornamento di Virgo, ma anche di promuovere la collaborazione europea nella ricerca gravitazionale [22]. Virgo fu inaugurato nel 2003 e la costruzione fu portata a termine nel 2006. Fu il primo interferometro ad essere costruito con l'idea di essere molto sensibile alle basse frequenze, intorno ai 10 Hz. In questa banda, la variazione nella lunghezza dei bracci causata dal passaggio di un'onda gravitazionale è di diversi ordini di grandezza più piccola del rumore sismico; per questo motivo, gli specchi dell'interferometro sono montati sui superattenuatori sviluppati da Giazotto [23].

Virgo condusse quattro run scientifiche tra il 2007 e il 2011, di cui due in

coincidenza con i rivelatori LIGO. Tra una run e l'altra la configurazione di Virgo subì importanti upgrade; in particolare, tra il 2008 e il 2009 fu potenziato l'amplificatore laser e abbassato notevolmente il rumore dell'elettronica (configurazione Virgo+), mentre nel 2010 furono installate le sospensioni monolitiche per gli specchi (Virgo+MS). Virgo fu il primo rivelatore a utilizzare questo tipo di sospensioni, costruite nello stesso materiale degli specchi e in grado di ridurre ulteriormente il rumore termico e meccanico [24]; Advanced LIGO utilizza ora delle sospensioni simili. Gli upgrade di Virgo furono compiuti in step successivi per permettere a Virgo di partecipare alle run di LIGO e raccogliere il maggior numero di dati possibili.

Alla fine del 2011 Virgo venne spento per iniziare l'upgrade verso la seconda generazione. LIGO era già spento da un anno. Non pochi problemi portarono a un ritardo nella tabella di marcia; il più grave fu la rottura delle sospensioni degli specchi, che costrinse alla sostituzione con le vecchie sospensioni d'acciaio. Per questo motivo, Virgo nei prossimi mesi non partirà con la sensibilità di disegno, che verrà forse raggiunta nel 2018 [25]. L'inaugurazione di Advanced Virgo si è tenuta lo scorso 20 febbraio, e probabilmente il rivelatore prenderà parte agli ultimi mesi della seconda run scientifica di Advanced LIGO che si concluderà fra qualche mese [26].



Vista area del sito di Virgo, a Cascina, provincia di Pisa [27]

4.2 Interferometri avanzati

L'11 febbraio 2016, un secolo dopo la previsione di Einstein, la collaborazione LIGO-Virgo annunciò la prima evidenza diretta dell'esistenza delle onde gravitazionali [28]. Lo storico segnale, denominato GW150914, proveniva dalla coalescenza di due buchi neri di masse $\sim 30 M_{\odot}$, e fu rivelato dai due interferometri di Hanford e Livingston nei giorni immediatamente precedenti all'inizio della prima run scientifica di LIGO, che si svolse tra il settembre 2015 e il gennaio 2016 [29]. La scoperta fu seguita pochi mesi dopo da GW151226, un secondo segnale proveniente da buchi neri più piccoli, di masse $\sim 10 M_{\odot}$ [30]. La seconda run di LIGO è cominciata alla fine del 2016; inizialmente era prevista una durata di sei mesi, ma potrebbe essere estesa per permettere a Virgo di unirsi alla presa dati in coincidenza [25, 29]. Advanced LIGO è costituito da due soli interferometri: quello più piccolo di Hanford è stato rimosso con l'obiettivo di essere trasferito in India, dove nei prossimi anni verrà costruito INDIGO (o LIGO India), terzo interferometro gemello che dovrebbe essere pronto per il 2022.

La rivelazione diretta delle onde gravitazionali ha avuto alcune interessanti conseguenze. Prima tra tutte, i segnali sono compatibili con quanto previsto dalla relatività generale, dando un'ulteriore conferma della validità della teoria. In secondo luogo, si è potuto limitare la massa del gravitone, che dovrà essere $m_g \leq 1.2 \cdot 10^{-22} \text{ eV}/c^2$ [31]. Si è inoltre confermata l'esistenza di sistemi binari di buchi neri; che due buchi neri possano formarsi abbastanza in prossimità da coalescere in un tempo minore della durata dell'Universo; e che un buco nero possa avere una massa che superi le $30 M_{\odot}$ [32].

Nei prossimi mesi, quando Virgo si unirà alla run scientifica di LIGO, si avrà un osservatorio a tre interferometri di seconda generazione. Con tre interferometri si migliorerà la localizzazione della sorgente nello spazio, migliorerà il rapporto segnale/rumore, e aumenterà il livello di confidenza del segnale. Per il 2018, il Giappone dovrebbe unirsi alla ricerca con KAGRA, *Kamioka Gravitational Wave Detector*. Nel prossimo decennio avremo quindi un network di cinque interferometri di seconda generazione, con una sensibilità fino a 200 Mpc e con una stima di qualche centinaio di segnali rivelati all'anno [29].



Il futuro network di interferometri su scala chilometrica [33]

5 Sviluppi futuri

5.1 L'Einstein Telescope

Nel decennio scorso, il progetto europeo ILIAS si proponeva di riunire le strutture sotterranee di ricerca (Laboratorio Nazionale del Gran Sasso, Laboratoire Souterrain de Modane, Laboratorio Subterráneo de Canfranc e Boulby Underground Laboratory) e gli osservatori gravitazionali (Virgo, GEO600 e le antenne criogeniche) per coordinare la ricerca astrofisica e preparare assieme le infrastrutture future [34]. Da qui nacque l'idea dell'Einstein Telescope, un osservatorio europeo la cui costruzione dovrebbe iniziare nel 2018 e che diventerà operativo intorno al 2030.

L'infrastruttura sarà sotterranea in modo da limitare il rumore sismico, e sarà in grado di ospitare tre interferometri di terza generazione e i loro upgrade per qualche decennio. I tre interferometri saranno incastrati l'uno nell'altro a formare una struttura triangolare equilatera. L'osservatorio avrà una sensibilità migliorata di un fattore 10 rispetto agli interferometri di seconda generazione e un rapporto segnale/rumore elevato, e sarà in grado di indagare uno spettro di frequenze molto ampio, da 1 Hz a 10 kHz. La localizzazione delle sorgenti sarà possibile ma non molto precisa, perciò sarà comunque necessaria la partecipazione ad un network mondiale di rivelatori [35].

5.2 La missione LISA

L'idea di un rivelatore di onde gravitazionali nello spazio non è una novità; abbiamo già visto che l'Apollo 17 installò una barra di Weber sulla Luna. Negli anni successivi si cominciò a sviluppare invece il progetto per un grande interferometro spaziale: una formazione triangolare di satelliti distanti milioni di chilometri tra loro, in un'orbita eliocentrica simile a quella terrestre. Il progetto prese il nome di LISA, *Laser Interferometer Space Antenna*, fu presentato nel 1993 all'ESA e fu successivamente sviluppato in collaborazione con la NASA. L'agenzia americana ritirò il proprio sostegno nel 2011 per ragioni finanziarie e organizzative. Il progetto, ribattezzato eLISA (*evolved LISA*), venne quindi portato avanti solo dall'ESA [36].

Il progetto originale di LISA prevedeva un sistema a tre bracci simile a quello

dell'Einstein Telescope, lunghi $5 \cdot 10^6$ chilometri [37]; eLISA, pur mantenendo la configurazione a triangolo equilatero, avrà bracci più corti (10^6 chilometri) e condurrà le misure interferometriche solo su due di essi, con un veicolo “madre” e due veicoli più semplici, in modo da ridurre il peso e dunque i costi della missione. eLISA studierà le frequenze nella banda LF, tra 10^{-1} e 10^{-4} Hz. Il lancio è previsto per il 2034 e la missione dovrebbe durare tra i due e i cinque anni.

Nel dicembre 2015 è stato lanciato LISA Pathfinder, missione dell'ASI con l'obiettivo di verificare la possibilità di “mettere delle masse di prova in caduta libera nello spazio interplanetario, con la precisione senza precedenti necessaria all'osservatorio gravitazionale” [38]. Di fatto, si è verificata la possibilità di rivelare sistemi supermassivi fino a $10^7 M_{\odot}$ [39].

5.3 Conclusioni

Abbiamo passato in rassegna la storia della ricerca sulle onde gravitazionali. La loro effettiva esistenza, la possibilità di essere emesse da certi sistemi e la nostra capacità di rivelarle sono rimaste in discussione per tutto il Novecento. Molti rivelatori sono stati ideati e mai costruiti per la carenza di finanziamenti. Ma se, dopo la rivendicazione di Weber e la scoperta di Hulse e Taylor, c'è stata una crescita di interesse a finanziare la ricerca di questo tipo di radiazione, si pensa che, dopo GW150914 e GW151226, si riuscirà a portare a termine progetti da lungo tempo in cantiere, com'è appunto il caso di LISA. In effetti, pochi giorni dopo l'annuncio di GW150914 all'inizio del 2016 è arrivata l'approvazione di LIGO India. Forse, finalmente, questa branca della fisica smetterà di essere di nicchia, e assisteremo all'avvento definitivo dell'astronomia delle onde gravitazionali.

Bibliografia

- [1] D. Kennefick. *Traveling at the speed of thought*. Princeton University Press, 2007.
- [2] S. Newcomb. *Side-lights on astronomy and kindred fields of popular science; essays and addresses*. Harper New York, 1906.
- [3] H. Poincaré. Sur la dynamique de l'électron. *Académie des Sciences de Paris*, 140, 1905.
- [4] H. Poincaré. La dynamique de l'électron. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 19, 1908.
- [5] G. Weinstein. Einstein's discovery of gravitational waves 1916-1918. arXiv:1602.04040.
- [6] D. Kennefick. Controversies in the history of the radiation reaction problem in general relativity. *Humanities Working Paper*, (164), 1996. arXiv:gr-qc:9704002.
- [7] S. Boughn. Detecting gravitational waves. *Amer. Sci.*, 68(2), 1980.
- [8] K. Thorne. Gravitational waves. arXiv:gr-qc:9506086, 1995.
- [9] Inspiral gravitational waves. <http://www.ligo.org/science/GW-Inspiral.php>.
- [10] B. P. Abbott et al. Directly comparing GW150914 with numerical solutions of Einstein's equations for binary black hole coalescence. *Phys. Rev. D*, 94(16), 2016.
- [11] O. D. Aguiar. The past, present and future of the resonant-mass gravitational wave detectors. *Res. Astron. Astrophys.*, 11, 2011.
- [12] J. J. Giganti et al. Lunar Surface Gravimeter experiment. In *Apollo 17 Preliminary Science Report*, 1973.
- [13] T. Kawamura et al. Lunar Surface Gravimeter as a lunar seismometer: Investigation of a new source of seismic information on the Moon. *J. Geophys. Res. Planets*, 120, 2015.
- [14] G. Pizzella. Birth and initial developments of experiments with resonant detectors searching for gravitational waves. *Eur. Phys. J. H*, 2016.
- [15] P. Astone et al. The NAUTILUS experiment. In *First Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments*. World Scientific Publishing, 1995.
- [16] Sito web dell'esperimento AURIGA. <http://www.auriga.lnl.infn.it>.
- [17] A. de Waard et al. MiniGRAIL, the first spherical detector. *Class. Quantum Grav.*, 20, 2003.
- [18] H. Collins. *Gravity's Shadow: The Search for Gravitational Waves*. The University of Chicago Press, 2004.
- [19] K. Thorne. *Three Hundred Years of Gravitation*, capitolo Gravitational radiation. Cambridge University Press, 1987.

- [20] C. Bemporad and L. Bonolis, editors. *Storie di Uomini e Quarks*, capitolo Adalberto Giazotto. Società Italiana di Fisica, 2012.
- [21] A. Brillet and A. Giazotto. Virgo 20th anniversary. *h: The Gravitational Voice*, 2009. Special edition.
- [22] Ondes gravitationnelles: Inauguration du détecteur franco-italien VIRGO. <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/206.htm?&debut=400>.
- [23] T. Accadia et al. Status of the virgo project. *Class. Quantum Grav.*, 28, 2011.
- [24] M. Lorenzini. The monolithic suspension for the virgo interferometer. *Class. Quantum Grav.*, 27, 2010.
- [25] D. Clery. European gravitational wave detector falters. *Science*, 2017.
- [26] Taglio del nastro per Advanced Virgo. <http://public.virgo-gw.eu/taglio-del-nastro-per-advanced-virgo/>.
- [27] Sito web dell'INFN. <http://www.infn.it/infimages>.
- [28] B. P. Abbott et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 2016.
- [29] B. P. Abbott et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo. *Living Rev. Relativity*, 19, 2016.
- [30] B. P. Abbott et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 2016.
- [31] B. P. Abbott et al. Tests of general relativity with GW150914. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 2016.
- [32] B. P. Abbott et al. Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914. *Astrophys. J. Lett.*, 818(2), 2016.
- [33] P. S. Shawhan. Rapid alerts for following up gravitational wave event candidates. In *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV*, 2012. <https://inspirehep.net/record/1120098/plots>.
- [34] Sito web del progetto ILIAS. <http://www-iliac.cea.fr>.
- [35] M. Abernathy et al. Einstein gravitational wave telescope conceptual design study. Technical report, Einstein Telescope, 2011.
- [36] P. Amaro-Seoane et al. Low-frequency gravitational-wave science with eLISA/NGO. arXiv:1202.0839v2, 2012.
- [37] T. Edwards et al. Study of the laser interferometer space antenna: Final technical report. Technical report, EADS Astrium, 2000.
- [38] Sito web di LISA Pathfinder. <http://www.asi.it/it/attivita/esplorare-lo-spazio/cosmologia-e-fisica-fondamentale/lisa-pathfinder>.
- [39] M. Armano et al. Sub-femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA Pathfinder results. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 2016.