
La nascita dell'astronomia delle onde gravitazionali: Virgo e LIGO

The birth of gravitational wave astronomy: Virgo and LIGO

Matteo Lorenzini

Gran Sasso Science Institute, L'Aquila, Italia

Shane L. Larson

Northwestern University, IL, USA

Riccardo De Salvo

Università del Sannio, Benevento, Italia

Cosa sono le onde gravitazionali?

Le onde sono onnipresenti nel mondo fisico. Le prime onde che in ordine di tempo hanno portato questo nome, le onde del mare, non sono che una delle moltissime voci di un ricco bestiario: il suono, la luce, le vibrazioni del suolo ed

What are gravitational waves?

Waves are ubiquitous in the physical world. The sea waves, which originally brought the name, are just one of many in a rich bestiary: sound, light, ground vibrations up to earthquakes, power through electric lines, even particles, they are all different types of waves. Whenever something changes there is always a wave (or perhaps many)

i terremoti, i segnali delle linee elettriche, perfino le particelle, tutti questi fenomeni rientrano nella classe dell'onda. Ogni cambiamento produce sempre un'onda (o più di una) che diffonde l'informazione nell'universo¹. Non è difficile trovare un esempio: immaginate di lanciare una pietra nell'acqua di uno stagno. La perturbazione indotta dalla pietra crea increspature della superficie che si irradiano in tutte le direzioni, diventando progressivamente più deboli quanto più si allontanano dalla sorgente (per inciso, non possiamo più dire che lo stagno *riflette un cielo immoto*²).

Vi sono molti aspetti interessanti nei fenomeni ondulatori che li rendono un elemento centrale nello studio della natura. Inanzitutto le onde verificano il *principio di sovrapposizione*: se due onde si trovano a passare per lo stesso punto, le loro ampiezze si sommano. In particolare, se le loro ampiezze sono uguali in modulo ma opposte di segno, il risultato è nullo (*interferenza distruttiva*). Quello che più propriamente individua un'onda non è necessariamente il trasporto di materia, e nemmeno una vibrazione meccanica: ad esempio, le onde sismiche non trasportano rocce, ma vi sono onde, come quelle che descrivono la propagazione di particelle massive, che trasportano massa. Un cavo teso è fisicamente scosso quando lungo esso viaggiano onde elastiche, mentre può essere percorso da onde elettromagnetiche senza alcun visibile movimento³. Analizzando meglio il completo bestiario delle onde, la caratteristica condivisa da tutte le voci è il trasporto di una certa quantità di energia, impulso, o informazione. Queste quantità conservate sono sottratte alla sorgente dell'onda ed irradiano lontano da essa, guadagnandosi un'esistenza indipendente sotto forma di onde: onde e sorgente da questo momento vivono vite separate.

La separazione tra onda e sorgente è in realtà conseguenza del fatto che la velocità di propagazione dell'onda è finita. Per capirlo, pensate ad

that carry the news away in the Universe¹. It is easy to find an example: the still waters in a quiet pond are perturbed by a thrown stone, and ripples on the water surface radiate in all directions, progressively weaker as they get farther from the source (by the way, the pond no longer *mirrors a still sky*²).

There are several interesting aspects regarding waves, making them such a central element in the study of nature. The first is the so called *superposition of effects*: if two waves travel through the same point, their amplitudes add. Significantly, if the amplitude is the same but of opposite sign, they cancel each other (*destructive interference*). What properly identifies a wave is not necessarily a matter flow, nor the physical shaking: seismic waves do not transport rock, while other waves like the ones describing massive particles carry the mass. Elastic waves shake a physical wire, but electro-magnetic signals propagate through the same wire, or even in vacuum without need of a material medium³. By inspecting the whole "wave bestiary", the feature shared by all is the propagation of a certain amount of energy, momentum, stress or information. These quantities are subtracted from the wave source and radiate away gaining independent existence as a wave that becomes separated from the source.

The "separation" between source and waves is somewhat related to the (finite) velocity of propagation. Imagine a kid shaking water on

¹Wave e away condividono, probabilmente la stessa etimologia, che proviene da una radice proto-indoeuropea *wegh* andare, muoversi, trasportare in un veicolo

²W.B.Yeats, *The Wild Swans at Coole* (1917).

³A proposito, fu la vana ricerca di un adeguato mezzo per far propagare la luce che ha attivato la linea di pensiero che ha poi portato all'idea di spazio-tempo, ed eventualmente alla Relatività Speciale di Einstein e al concetto moderno di campo di forze.

¹Wave and away probably share the same etymology, coming from an original proto-Indoeuropean root **wegh-* "to go, move, transport in a vehicle".

²W.B.Yeats, *The Wild Swans at Coole* (1917).

³By the way, it was the vain quest for a medium suitable for propagating light that triggered the line of thought that brought to the idea of space time, and eventually to Einstein's Special Relativity and to the modern concept of force fields.

un bimbo che smuove la superficie di uno stagno, immergendo ed estraendo una barchetta dall'acqua. Quando il giocattolo è spinto giù, il livello dell'acqua tutt'intorno sale. Se questo effetto potesse propagarsi immediatamente a tutto lo stagno, il livello della superficie (o, in altre parole, l'energia gravitazionale) potrebbe essere riportato al livello iniziale semplicemente estraendo la barchetta. Questo però non accade: la variazione del livello dell'acqua è diffusa a velocità finita⁴ e ne risulta un'onda. L'onda rimane e continua la sua propagazione anche se il giocattolo è completamente rimosso. Come corollario, poiché esiste una velocità limite (la velocità della luce), ogni perturbazione dà origine ad un qualche tipo di segnale irradiato. Queste semplici osservazioni sono in grado di condurci molto lontano. Se è vero che l'informazione riguardo la presenza di massa in un dato punto è diffusa altrove attraverso l'apparire di un campo di forze (infatti ne possiamo percepire l'effetto usando un dinamometro che misura l'entità dell'attrazione gravitazionale), è lecito aspettarsi l'insorgere di una radiazione quando la massa sorgente del campo è mossa ed accelerata. Le considerazioni precedenti suggeriscono, seppur ad un livello molto generale, che una radiazione gravitazionale debba esistere. Se vogliamo ricavare le sue proprietà in dettaglio dobbiamo però disporre di molte più informazioni riguardo la natura della gravità. L'interazione gravitazionale ha a che fare con molte strane cose, come descrizioni geometriche, sistemi di riferimento, deformazioni dello spazio-tempo, curvatura e così via. Lo scienziato che riuscì nell'intento di dare una sistemazione (apparentemente) semplice a tutta la vicenda fu Albert Einstein (supportato dalle intuizioni di molti altri, tra i quali Tullio Levi-Civita, Marcel Grossman e David Hilbert).

Noi non ripeteremo i ragionamenti che portarono Einstein alla formulazione della Relatività Generale [1]: questo potrebbe facilmente essere l'argomento di molti articoli dedicati. Invece, saltiamo direttamente alle conclusioni e ricordiamo solo quello che interessa per la nostra ricerca.

Un primo passo consiste nel comprendere che quelle che a noi appaiono come forze gravitazionali NON sono forze. Ciò di cui facciamo

⁴La velocità della luce nel vuoto c è una costante della natura, il cui valore è $c = 299\,792\,458$ m/s.

a pond surface, with a floating toy. When the toy is pushed down, the surrounding water is displaced upwards; if this effect could be propagated without delay to the entire pond, the water level (that is, the gravitational energy) would be completely restored by removing the toy. But this is not the case: the information about the water level travels at a finite speed and a wave appears. The wave remains and continues its propagation even if the toy is completely removed. As a corollary, since a general limit velocity exists (the speed of light)⁴, any perturbation will give rise to a radiating signal of some kind. These simple remarks bring us very, very far. If the information about the presence of a mass in a given point is spread out through its gravitational attraction (indeed we can "feel" it by using a dynamometer to detect the resulting gravitational force), we also expect some radiated signal if the mass is accelerated and moved. Therefore, the existence of some kind of gravitational radiation can be argued just on the basis of the former considerations. However, to dig out the features of such waves, we need much more information about the nature of gravity. Gravity has to do with geometry, with reference frames, with space-time stress-strain and its curvature and other odd things. The scientist elaborating the (apparently) simple evidence was Albert Einstein (coalescing the intuitions of many, such as Tullio Levi-Civita, Marcel Grossman and David Hilbert).

We will not review the reasoning that led Einstein to the formulation of General Relativity [1]: this would easily fill many dedicated articles. Instead, we jump directly to his conclusions and just retain what is interesting for our quest.

The first step is to realize that what we call gravitational forces are NOT forces. What we experience when we sit on a chair is NOT gravi-

⁴The speed of light in the vacuum c is a constant in nature, whose value is assumed to be $c = 299,792,458$ m/s.

esperienza quando, ad esempio, siamo seduti NON è una forza di gravità, ma la forza che la sedia applica al nostro fondoschiena per accelerarlo verso l'alto. Il risultato è la percezione di una accelerazione, esattamente la stessa che sentiamo contro la schiena quando siamo seduti in auto e il pilota preme sul pedale. Una particella non sottoposta all'effetto di alcuna forza (non gravitazionale) è detta *in caduta libera* e si muove lungo un percorso chiamato *linea geodetica*. Esempi intuitivi di geodetiche, in accordo coi principi di Newton, sono un punto (per un corpo fermo) od una linea dritta che descrive un moto lineare uniforme. È utile notare esplicitamente che questi esempi di geodetiche implicano un movimento nello spazio e nel tempo: in altre parole, le linee geodetiche sono tracciate in un sistema di coordinate spazio-temporali. Secondo la Relatività Generale le geodetiche nel vuoto sono in generale linee rette, tuttavia esse si curvano e si deformano se nelle vicinanze è presente massa o energia. Usando la felice espressione di J. A. Wheeler, "lo spazio-tempo dice alla materia come deve muoversi, la materia dice allo spazio-tempo come curvarsi"⁵. La gravità, ovvero la naturale tendenza dei corpi dotati di massa a muoversi l'uno verso l'altro, compare come effetto di questa curvatura (come in figura 1).

Sic stantibus rebus, una riflessione più accurata è sufficiente per rendersi conto che una deformazione dello spazio-tempo ha l'effetto di avvicinare o allontanare due geodetiche inizialmente parallele. Immaginiamo un insieme di linee parallele tracciate su uno spesso foglio di gomma. Se adesso stiriamo il foglio tirandolo agli estremi nella direzione delle linee, queste si avvicinano, mentre si allontanano se comprimiamo gli stessi estremi. È interessante notare che il comportamento è esattamente l'opposto se comprimiamo o stiriamo il foglio in direzione perpendicolare alle linee. Se poi la pressione è applicata in un punto, ad esempio schiacciando il foglio nel centro con un dito, le linee inizialmente rette si incurvano. Questo particolare comportamento è chiamato *deviazione geodetica*.

⁵J. A. Wheeler, in *Geons, Black Holes, and Quantum Foam* (2000), p. 235.

Le geodetiche offrono uno schema intuitivo per la comprensione dell'effetto delle onde gravitazionali: se queste ultime devono trasportare

tational force, it is the force that the chair is applying on our bottom to accelerate us up. The result of that force is the feeling of acceleration, exactly like the feeling that the seat of a car generates on our back when accelerating forward. A particle that is not experiencing external (non-gravitational) forces is said to be in *free fall* and moves along a path that is called a *geodesic*. Very intuitive geodesics, according to the Newton's principles, are a point (for a body at rest) or a straight line to describe motion. Notice that these geodesics involve a movement in space and time; that is, geodesics are drawn in a space-time reference system. General Relativity states that geodesics are not straight, they are bent or warped away from straight lines by the presence in the neighbourhood of mass or energy. In the words of J. A. Wheeler, "space-time tells matter how to move; matter tells space-time how to curve" [2].

Sic stantibus rebus, a deeper insight in the space-time behaviour reveals that warping makes parallel geodesics get closer or farther along the line. This can be understood imagining a set of parallel lines drawn on a flat rubber sheet. If the sheet is deformed by pulling along the lines they get closer, while applying a compressional force makes the separation between lines wider. Note that the opposite happens by acting in the direction perpendicular to the lines. If the pull is applied in a point, like a clump of mass, the initially straight lines become curved. This feature is referred to as *geodesic deviation*.

Now, we have a way to imagine the nature of gravitational waves: since they have to carry information on the gravitational field, they must

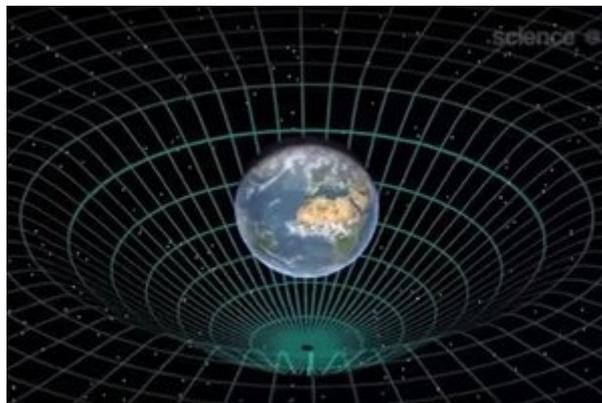


Figura 1: Un oggetto massivo come la terra deforma lo spazio-tempo, e causa la caduta degli oggetti.
A massive object like the Earth will bend space-time, and cause objects to fall toward it.
 Credit: Science@NASA.

informazione sullo stato del campo gravitazionale, devono necessariamente agire sulla deviazione geodetica locale. Solitamente la radiazione gravitazionale è descritta come una increspatura dello spazio-tempo⁶ che viaggia alla velocità della luce: il suo passaggio è indicato dalla variazione ritmica della distanza misurata tra due corpi in caduta libera. Tale variazione può anche essere interpretata come una compressione (o espansione) dello spazio che separa i due corpi, purché si tenga presente che l'opposto accade in direzione perpendicolare: equivalentemente, l'effetto può essere descritto come la comparsa di *forze di marea* oscillanti.

Le forze di marea sono forze apparenti dovute alla variazione differenziale del campo gravitazionale (distorsione spaziale) tra porzioni distanti di un corpo esteso. Il fenomeno delle maree è il paradigma di questo tipo di effetti. Le maree sono il risultato della diversa attrazione gravitazionale esercitata da sole e luna in punti diversi della superficie terrestre⁷; lo schema degli effetti mareali è caratteristico e merita un breve approfondimento. Come mostrato in figura 2, (a), la superficie del mare si gonfia in due quadranti, verso la luna e in direzione opposta; nei quadranti complementari il livello del mare si abbassa. Questo schema di distorsione è detto *deformazione*

act by changing the local geodesic deviation. Usually, gravitational radiation is pictorially described as ripples in the space-time⁵ running at the speed of light. Their effect should appear as a rhythmic variation in the distance between freely falling bodies. It can be interpreted as a shrinking (or expanding) of the space in between two chosen points at the price of doing the opposite on a perpendicular direction, or, equivalently, as oscillating *tidal* forces.

Tidal forces are forces that appear due to a differential change in the gravitational field (space distortion) across an extended body. Sea tide is the result of the different attraction of the Moon and the Sun in different zones of the Earth⁶; the tidal pattern is characteristic and deserves more attention. Look at figure 2, (a). The sea bulges on two quarters, toward the Moon and away from it. On the contrary, in the perpendicular two quarters the surface of the sea shrinks. This is what is called a *quadrupole deformation*. And this is, perhaps not surprisingly, also the typical pattern of space deformation induced by a gravitational wave passing by! The local effect of a gravitational wave, GW for shortness, is represented

⁶Questa definizione molto evocativa, sebbene facilmente comprensibile, non è del tutto corretta: l'effetto fisico è contenuto nella deviazione geodetica, mentre la particolare descrizione dello spazio-tempo dipende dalla scelta di gauge.

⁷Ecco perché le maree sono più forti quando il sole è allineato con la luna.

⁵This colourful definition, even if easily recognised, is not actually correct: the physical effect is encompassed by the geodesic deviation, while the specific description of space-time is gauge dependent.

⁶That is why tides are stronger when the Sun happens to align with the Moon.

quadrupolare. A questo punto, non dovrebbe sorprendere troppo il fatto che questo stesso schema descrive la tipica deformazione spaziale indotta dal passaggio di un'onda gravitazionale! L'effetto locale associato all'onda è mostrato in figura 2, (b) usando la celeberrima mela di Newton... tagliata a metà. Quando l'onda gravitazionale (OG per brevità) attraversa la mela propagandosi perpendicolarmente alla superficie tagliata, il diametro del frutto subisce una variazione periodica corrispondente allo schema quadrupolare discusso sopra. Se alla mela sostituiamo un insieme di corpi in caduta libera (figura 2, (c)), le loro traiettorie ne risulteranno alterate secondo lo stesso schema, come risultato della deviazione geodetica locale dovuta alle OG.

La deformazione di marea ha luogo sia quando la luna è allo zenit, sia quando è al nadir, perciò le maree hanno un periodo di dodici e non ventiquattro ore. Esse avvengono con una frequenza doppia rispetto alla frequenza di rotazione della terra; in modo del tutto analogo, le OG posseggono una frequenza doppia rispetto alla frequenza del sistema sorgente orbitante.

È possibile ricavare tutte le caratteristiche delle OG nell'ambito del formalismo della Relatività Generale. Le equazioni di Einstein, che rappresentano il fondamento del formalismo, mettono in relazione le proprietà dello spazio-tempo al suo contenuto in massa e energia:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

Massa ed energia sono contenute nel tensore $T_{\mu\nu}$, chiamato *tensore energia-impulso* mentre la struttura del tensore $G_{\mu\nu}$ è alquanto intricata. Esso è costruito a partire dalle derivate di un altro tensore, $g_{\mu\nu}$, detto *tensore metrico* dello spazio-tempo, che ne descrive la curvatura; solitamente si fa uso delle equazioni di Einstein per determinare $g_{\mu\nu}$ a partire dalla conoscenza delle sorgenti (massa ed energia). Dalla metrica, il formalismo consente infine di ricavare le geodetiche che rappresentano il contenuto fisico della teoria.

L'idea consiste nel cercare soluzioni di tipo onda per le equazioni di Einstein. Potrebbe sembrare un compito proibitivamente difficile; in realtà, esso è significativamente facilitato se teniamo conto di una serie di considerazioni di caratte-

in figure 2, (b). Let's consider Newton's apple. When a GW passes through an apple cut in half perpendicular to the propagation direction, its diameter is stretched with the same quadrupole deformation illustrated above. If the apple is replaced with a set of freely falling objects (figure 2, (c)), their trajectories will be altered following the same quadrupole pattern, as the result of the local geodesic deviation due to the GWs.

Stretching happens equally if the Moon is above or below Earth: tides have 12 hour periods, not 24 hours. Tides happen at twice Earth's rotation frequency, similarly GWs will happen at twice the orbital frequency of the generating orbiting bodies.

All the features of GWs can be calculated in detail with the complete formalism of General Relativity. At the core of the theory, the Einstein's equations relate the metric properties of the space-time to its content in terms of mass and energy:

Here, $T_{\mu\nu}$ is a tensor (called *stress-energy tensor*) that codifies the mass and energy content; the description of the $G_{\mu\nu}$ tensor is a little crooked. It is built with derivatives of another tensor, $g_{\mu\nu}$, that describes the space-time metric: $g_{\mu\nu}$ is usually the unknown quantity, and one has to solve equations to find it. Then, geodesics can be obtained from the metric solution, and this is finally the physical outcome of the General Relativity formalism.

The idea is to search for wave-like solutions in the Einstein's equations. It could seem really hard to do it, but a number of considerations make the task easier. First GWs propagate in the vacuum of space, thus we start setting the

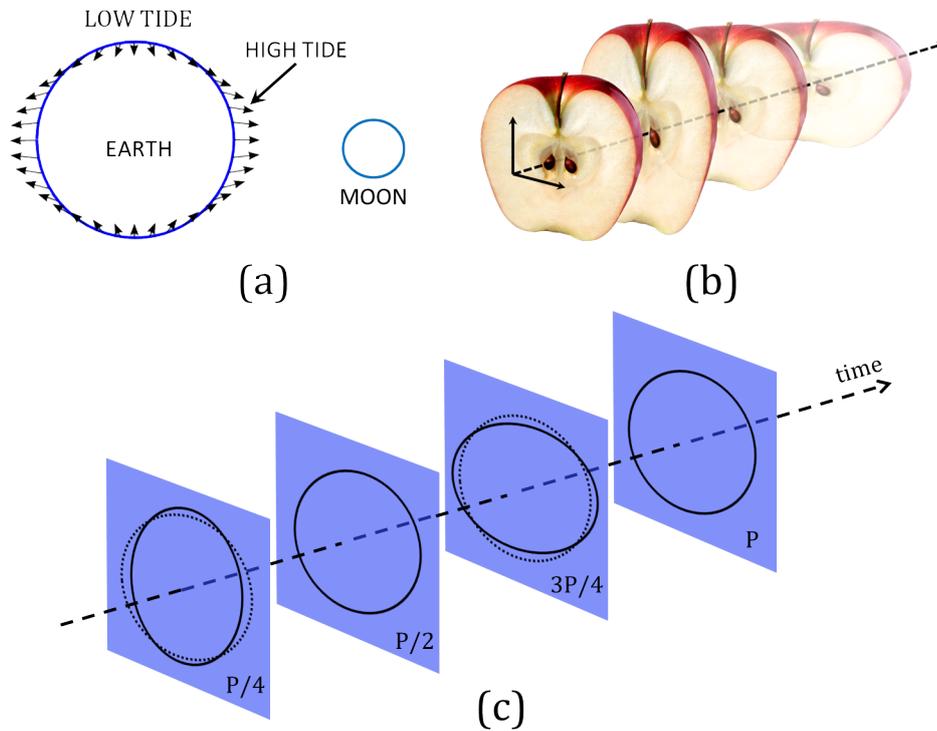


Figura 2: Rappresentazione artistica delle forme quadrupolari nella gravitazione. (a) Geometrie delle forze di marea sulla luna dovute all'attrazione esercitata dalla luna. (b) Effetti di una OG che colpisce una mela perpendicolarmente al taglio che l'ha divisa a metà. (c) Effetti di una OG su un anello di masse puntiformi in caduta libera. P è il periodo dell'onda.

Pictorial representation of quadrupole patterns in gravitation. (a) Pattern of tidal forces on Earth due to gravitational attraction exerted by the Moon. (b) Effect of a GW perpendicularly impinging on an apple cut in half. (c) Effect of a GW on a ring of point masses in free fall. P is the period of the wave.

re fisico. Innanzi tutto, le OG si propagano nel vuoto: possiamo quindi per prima cosa porre a zero il tensore energia-impulso. Inoltre, essendo le sorgenti astrofisiche molto, molto lontane, è lecito assumere che l'effetto delle OG sia solo una piccola perturbazione $h_{\mu\nu}$ della metrica locale. Queste osservazioni semplificano di molto le equazioni, e non è ancora tutto.

La Relatività Generale deve il suo nome ad una proprietà sorprendente delle equazioni di Einstein: esse mantengono la loro forma indipendentemente dal sistema di riferimento considerato (e, pertanto, dalla particolare scelta di coordinate). Storicamente, questo è stato il primo caso riconosciuto di invarianza di gauge, caratteristica fondamentale delle moderne teorie di campo. (In realtà, l'elettromagnetismo classico di Maxwell è una teoria che possiede simmetria di gauge, ma non fu in origine coscientemente riconosciuta come tale.). Nella trattazione delle OG, una scelta opportuna del sistema di coordi-

stress-energy tensor to zero. Because astrophysical sources are very, very far away from us, we consider the effect of GWs as a very small perturbation $h_{\mu\nu}$ of the local metric. These observations greatly simplify the equations, but this is still not the whole story.

General Relativity owes its name to an astonishing property of Einstein's equations: they keep their form, no matter which reference frame is considered. That means, they are the same for any set of coordinates. This was the first recognised example of the so called *gauge freedom*, now a central feature of all field theories. (Actually, the first theory exhibiting gauge symmetry was the Maxwell's classical electromagnetism, however, it was not originally conceived in these terms.) In the discussion on GWs, it is important to wisely choose a coordinate system in which the equations assume their simplest form. This

nate può semplificare nettamente le equazioni. È possibile mostrare che un sistema di riferimento particolarmente “comodo” è quello agganciato alle masse in caduta libera, nel quale perciò esse risultano in quiete. Con questa scelta, le equazioni di Einstein assumono proprio la forma di equazioni d’onda:

$$\square h_{\mu\nu} \equiv \left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] h_{\mu\nu} = 0 \quad (2)$$

Le OG spuntano fuori quasi magicamente come soluzioni di questa equazione. Non è a questo punto una sorpresa che le OG risultino viaggiare alla velocità della luce, come le onde e.m. descritte da Maxwell, e che producono una deformazione quadrupolare della metrica di natura tensoriale. Le OG hanno una serie di altre interessanti proprietà: ad esempio, mostrano due possibili stati di polarizzazione, chiamati *cross* (×) e *plus* (+). Essi differiscono solo nell’orientazione della deformazione mareale: la polarizzazione × corrisponde a quella + (mostrata in figura 2) ruotata di 45°.

Sorgenti di onde gravitazionali

Le equazioni di Einstein ci dicono molto di più. Se siamo interessati ai meccanismi di emissione della radiazione gravitazionale, dobbiamo considerare le possibili sorgenti e le caratteristiche della loro emissione. Ci limiteremo a descrivere i risultati *dal lato dell’offerta*, omettendo i dettagli tecnici della loro derivazione.

Il processo di emissione di OG è alimentato dalla variazione di distribuzione di massa nel tempo, in piena analogia con l’accelerazione di cariche e l’emissione di onde e.m. Ciò non di meno, vi sono differenze importanti. Tanto per cominciare, l’emissione di dipolo è soppressa. Esattamente come accade per le maree lunari, le OG devono mostrare uno schema quadrupolare (compressione ed espansione in due direzioni ortogonali, entrambe normali alla propagazione). In conseguenza di ciò, la distribuzione di massa che alimenta l’OG deve esibire un momento di quadrupolo variabile.

Inoltre, l’ampiezza dell’effetto ovvero $|h_{\mu\nu}|$ è incredibilmente piccola. Ciò è conseguenza naturale di due fatti. Innanzitutto, l’interazione gravitazionale è di gran lunga più debole di quella

frame turns out to be the one in which coordinates are referred to a set of freely falling masses. With this choice, the Einstein’s equations take in a form that clearly describes a wave:

Magically GWs appear solving this equation. Not surprisingly, like Maxwell’s e.m. waves, GWs travel at the speed of light c , and they convey a quadrupole deformation of metric having a tensor nature. GWs have a number of other interesting properties, such as they appear in two polarizations. These only differ in the orientation of the pattern of tidal deformation: the × polarisation corresponds to the + pattern (the one shown in Figure 2) rotated by 45°.

Sources of gravitational waves

Einstein’s equations tell us much more. If we want to study the emission of gravitational radiation, we need to consider possible sources, and the characteristics of the emission. However, the details are quite technical and we are going to skip them. Instead, let us just summarize the results *on the supply side*.

The emission of GWs is a process sourced by a time varying mass distribution, in analogy with accelerating charge and electro-magnetic wave emissions. Nonetheless, there are significant differences. For starters, dipole emission is forbidden. Just like Earth-Moon tides, GWs must be quadrupolar (stretch in one direction, and compress in a second direction, both perpendicular to the propagation direction). As a consequence, the emitting mass distribution must also exhibit a time varying quadrupole deformation to emit GWs.

Second, the amplitude of the effect, that is, $|h_{\mu\nu}|$, is incredibly tiny. This is naturally related to the fact that the gravitational interaction is by far weaker than electro-magnetism; quite

elettromagnetica: spesso, e in modo alquanto pittoresco, si suole dire che lo spazio-tempo è estremamente rigido. In effetti Hertz non avrebbe avuto la stessa buona sorte, se avesse tentato di usare OG invece di onde radio nel corso del celebre esperimento al Politecnico di Karlsruhe. Una stima diretta della intensità della radiazione gravitazionale prodotta da un corpo di grande massa (ad esempio, un enorme bilanciere) messo in rotazione su sé stesso con la massima rapidità raggiungibile (ovvero fino al punto di rottura del materiale di cui è fatto) dimostra l'impossibilità pratica di qualsiasi rivelazione. La variazione di distanza vista da un ricevitore costruito in laboratorio, ponendo due masse in caduta libera ad un metro l'una dall'altra, sarebbe pari a 10^{-38} m: da un punto di vista sperimentale tale valore è totalmente indistinguibile da zero⁸.

Sorgenti astrofisiche: stelle di neutroni e buchi neri

La situazione cambia drasticamente se consideriamo sorgenti astrofisiche. In pratica il cosmo è pieno di oggetti estremi, in grado di emettere OG di incredibile intensità. Queste sorgenti si trovano a milioni o miliardi di anni luce da noi (per fortuna) eppure la loro emissione gravitazionale è così forte da raggiungerci mantenendosi ad un livello ancora rivelabile. Ecco perché quando parliamo di OG non accenniamo mai a telecomunicazioni, ripetitori, trasmettitori: intendiamo invece invariabilmente segnali provenienti dagli angoli più remoti dell'Universo.

Per emettere OG ad un livello significativo, un oggetto astrofisico deve essere caratterizzato da elevata compattezza, deve possedere una deformazione quadrupolare ed evolvere con estrema rapidità (ovvero, con velocità tipica vicina alla velocità della luce). Se elenchiamo i candidati in possesso di queste caratteristiche, ci imbattiamo inevitabilmente in due classi di oggetti stellari estremi di grande fascino: le stelle di neutroni ed i buchi neri. Entrambi sono molto, molto compatti.

Le stelle di neutroni sono ciò che resta di stelle che hanno consumato tutto il combustibile nu-

often, and quite quaintly, people are used to say the space-time is very very stiff. Hertz would not have been so lucky, if he had tried using GWs instead of radio waves in his famous experiments at Karlsruhe Polytechnic. The estimate of the gravitational radiation produced by a massive body (for instance, a gigantic barbell) spinning very fast (up to the breaking point of its material) leaves no room to any possible detection [3]. A receiver built with two freely falling particles 1 m apart would see only a variation of some 10^{-38} m in their separation⁷. Such a variation is a vanishing quantity in all imaginable experimental respects.

Astrophysical sources: neutron stars and black holes

A very different situation arises if we look at astrophysical sources. It turns out that the cosmos has plenty of very extreme objects, able to emit incredibly intense GWs. Fortunately these sources are millions to billions light years away from us, yet their gravitational radiation is strong enough to reach us while still being at a detectable level. This is why, when we speak about GWs, we do never refer to GW broadcasting stations, or communications, or laboratory emitters: we always mean that we listen at signals from the furthest corners of the Universe.

To be a significant GW emitter, astrophysical objects must be very compact, possess a quadrupole deformation and cycle rapidly (that means, with typical velocities approaching the speed of light). If we take on the task of listing possible GW sources, we come across a couple of fascinating and extreme stellar objects: neutron stars and black holes. They are very compact, indeed.

Neutron stars are the leftovers of burnout stars; when their inner power engine has consumed all

⁸Inoltre, per distinguere le OG dagli effetti di campo vicino, il rivelatore dovrebbe essere posto ad almeno qualche centinaio di chilometri di distanza.

⁷Moreover, in order to be able to distinguish the produced GW from near field effects, this detector would have to be placed at least a few hundred kilometres away.

ciare disponibile. Quando il loro motore interno si ferma l'improvviso stallo nella produzione di energia, unitamente al raffreddamento del gas, causa un rapido collasso gravitazionale. Il collasso termina solo quando le forze repulsive tra i costituenti dei nuclei atomici (protoni e neutroni) del gas sono sufficienti ad impedire ogni ulteriore contrazione della materia stellare. Quest'ultima è così compressa che gran parte degli elettroni si fonde coi protoni trasformandoli in neutroni, di modo che la stella degenera che ne risulta è per lo più composta da neutroni⁹. Una stella di neutroni possiede una massa maggiore di quella del sole, compressa in una sfera di soli 10 km di diametro!

I buchi neri rappresentano lo stadio definitivo in questo gioco di estrema violenza: se la quantità di massa coinvolta nella contrazione è più di 1.5-2 masse solari, la sua pressione gravitazionale non può essere sostenuta neppure dalle forze tra protoni e neutroni. La contrazione continua finché l'intera stella collassa in un unico punto, avvolto da un orizzonte degli eventi. In corrispondenza dell'orizzonte, la velocità di fuga uguaglia quella della luce: ciò che penetra questa barriera non può più uscirne, neppure la luce. Un buco nero è un autentico oggetto estremo.

Orbite accelerate

Siamo abbastanza sicuri che un sistema binario di stelle *debba* emettere OG: in questo caso, la variazione del momento di quadrupolo del sistema non è e non può essere zero. Tuttavia, solamente i sistemi composti da stelle di neutroni o buchi neri permettono, in virtù della loro compattezza, il raggiungimento di orbite abbastanza strette perché le OG emesse siano rivelate sulla terra. Orbite strette comportano velocità orbitali prossime alla velocità della luce e frequenze abbastanza elevate da entrare nella banda di sensibilità dei rivelatori nelle fasi finali della loro vita, prima di fondersi in un singolo buco nero.

Da un punto di vista teorico, il problema principale riguardava l'individuazione dei processi responsabili della formazione di sistemi binari composti da stelle di neutroni e buchi neri. Sebbe-

⁹Alcuni elettroni e protoni rimangono liberi anche nelle stelle di neutroni, e sono responsabili degli intensi campi magnetici delle pulsar.

available nuclear fuel, the sudden loss of power production and cooling of the gas allows a fast infall. At the end of the fall the only way to contrast the stellar mass gravity is through the repulsive forces of the constituents of atomic nuclei. The compressive force is so strong that most electrons fall into protons, turning them in neutrons, and neutrons sit shoulder to shoulder⁸. A neutron star has a mass larger than the Sun's, compressed in a sphere 10 km wide!

Black holes represent the ultimate level in this violent game: if the amount of infalling mass is more than 1.5 to 2 solar masses, not even the repulsive forces between protons and neutrons can counteract gravity, the infall restarts and the whole star collapses into a point shrouded by an "event horizon". At the event horizon the escape velocity is equal to the speed of light and therefore even light cannot escape through it. A black hole is a truly extreme object.

Accelerating orbits

We are pretty sure that a binary system of stars *must* emit GWs: the quadrupole moment of orbiting objects is far from being zero. Yet only neutron star and black hole binaries, or mixed systems are compact enough to allow sufficiently tight orbits that, with the orbital speed close to the speed of light reached just before merging into a single black hole, can produce GW at sufficiently high frequency and strength to be detectable on Earth.

The major theoretical question was represented by the formation process of these systems. While we were unable to calculate their production probability, we could expect to find some of them.

⁸Some electron and proton remain free, even in neutron stars, and account for the strong magnetic field of pulsars.

ne non fossimo in grado di stimare con precisione la probabilità di formazione di questi sistemi, era ritenuto verosimile che se ne potessero osservare alcuni. In effetti, R.A. Hulse e J.H. Taylor furono i primi a scoprire un sistema binario composto da due stelle di neutroni (in realtà, due pulsar), il sistema chiamato PSR 1913+16 [4]. Non solo, le osservazioni condotte dai due scienziati consentirono di verificare che lo spiraleggiamento del sistema era in accordo perfetto con l'ipotesi di emissione di OG di bassa frequenza (non osservabili sulla terra) (figura 3). Sistemi come PSR 1913+16 hanno tipicamente tempi di vita dell'ordine di milioni di anni. Il lavoro di Hulse e Taylor pubblicato nel 1981 ha anticipato largamente l'evidenza diretta delle OG, e questa scoperta è valsa ai due autori l'assegnazione del premio Nobel nel 1993. Inoltre, la prova dell'esistenza di sistemi binari di stelle compatte forniva almeno la promessa dell'esistenza di sorgenti di OG reali. Fu questa promessa a spingere e sostenere gli scienziati che avevano iniziato la progettazione di rivelatori terrestri di OG.

The first observed binary system formed by neutron stars (actually two pulsars) was indeed discovered by R.A. Hulse and J.H. Taylor observing the binary pulsar PSR 1913+16 [4]. Even better, this system was found to inspiral at exactly the rate foreseen by the emission of low-frequency (undetectable on Earth) GWs (figure 3). These systems have typical lifetimes to plunge of millions of years. The work of Hulse and Taylor, published in 1981, largely anticipated any direct evidence of GW emission, and for this breakthrough the two authors shared the Nobel prize in 1993. Observation of binary neutron star systems gave us at least some guaranteed GW sources. Having these "guaranteed signals" to hunt for, scientists started designing Earth-based GW detectors.

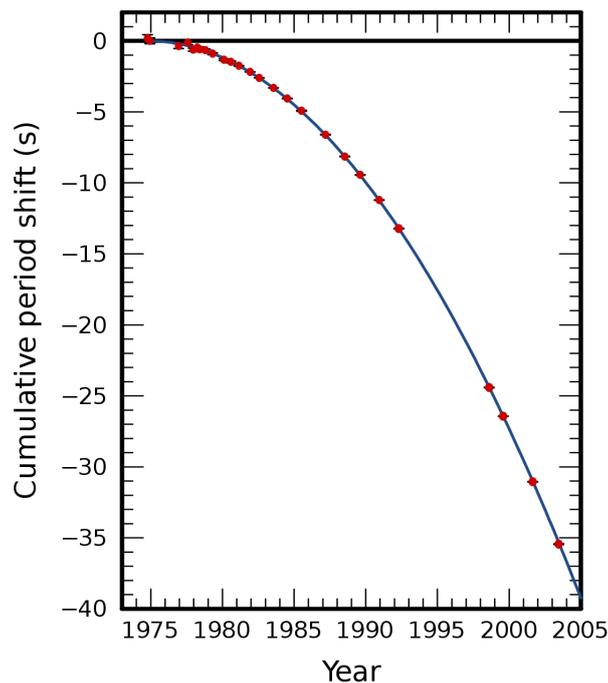


Figura 3: Grafico dello spostamento del periodo orbitale del sistema binario PSR 1913+16 in funzione del tempo. I punti sono i valori misurati, mentre la linea continua è il risultato di calcoli basati sulla Relatività Generale, nell'ipotesi che l'emissione di OG sia responsabile di tutta la perdita di energia rotazionale. L'accordo è notevole.
Plot of the shift of the orbital period of the PSR 1913+16 binary system as a function of time. Dots are the measured values, while the solid line is the result of a theoretical computation based on General Relativity, under the assumption that the emission of GWs accounts for the whole loss of orbital energy. The agreement is pretty remarkable.

Come e perché la variazione del periodo orbitale di PSR 1913+16 è legata all'emissione di radiazione gravitazionale? Le OG trasportano energia (e momento angolare). Il che significa che se un sistema binario è abbastanza relativistico da emettere una quantità significativa di radiazione, esso perderà energia gravitazionale orbitale. L'energia sottratta dall'onda causa una diminuzione del periodo orbitale e una contrazione delle orbite. Alla fine, i due oggetti compagni cadranno uno sull'altro e si fonderanno in un unico oggetto finale. Lo spiraleggiamento di una binaria coalescente è un evento di incredibile rapidità e violenza: la potenza emessa sotto forma di OG cresce drammaticamente in un tempo dell'ordine dei secondi, generando un impulso di radiazione la cui energia totale è misurata addirittura in masse solari. Come vedremo eventi di questo tipo, in cui sono coinvolti buchi neri e stelle di neutroni, sono stati osservati direttamente ed in numero sorprendentemente elevato tramite la rivelazione di radiazione gravitazionale.

Onde da stelle di neutroni ruotanti?

È possibile che una singola stella di neutroni rotante emetta OG? No, verrebbe da dire se immaginiamo tale stella come una sfera perfetta, caratterizzata da una variazione di momento di quadrupolo nulla. In realtà ciò può non essere del tutto vero. L'osservazione delle pulsar ha mostrato che alcune stelle di neutroni possono emettere segnali radio periodici molto collimati, la cui pulsazione è uguale alla frequenza di rotazione della stella. In questi rari casi la stella di neutroni è identificata come pulsar. Ora, i segnali provenienti dalle pulsar mostrano una straordinaria regolarità, interrotta solo da eventi eccezionali nei quali il periodo si modifica improvvisamente in corrispondenza di un aumento quasi istantaneo della rapidità di rotazione. Si è suggerito che questi sbalzi siano associati con improvvisi riassetamenti della superficie delle pulsar (i così detti *stellamoti*, in inglese *starquakes*); ciò suggerisce che le pulsar dispongano di una crosta rigida e possibilmente non del tutto sferica. La non esatta sfericità della crosta (e quindi l'emissione di OG da stelle di neutroni singole) è supportata anche da altre idee: rigonfiamento equatoriale, vibrazioni non radiali, dischi di

Let us explain how the shift of the period of PSR 1913+16 is related to the emission of gravitational radiation. GWs carry energy (and momentum). This means that, if a binary system is "relativistic enough" to emit a significant amount of gravitational radiation, it will lose orbital energy. The stolen energy causes a drop of the orbital period and a shrinking of the binary system. Eventually, the binary companions will collapse on each other and merge into a final object. The inspiral of a coalescing binary is a rapid and incredibly violent event: the emitted GW power rises up dramatically in a period of the order of seconds generating a pulse radiating an amount of energy measured in solar masses. As we will see, mergers of neutron star and black hole binaries were eventually observed through their GW emission, in a surprisingly large number.

Spinning neutron star sources?

Could a single spinning neutron star emit GW? The answer is no if we imagine neutron stars as perfect spheres, therefore with null variation of the quadrupole moment. But, this may not be actually true. We know from pulsar observations that some neutron stars can emit very collimated radio signals, pulsating with the rotation period of the object. In that (rare) case, the neutron star is identified as a pulsar. Now, pulsars have a very regular time behaviour, except for occasional glitches corresponding to an instantaneous increase of the spinning frequency. It is suggested that these glitches are associated with a sudden rearrangement of the pulsar crust (the so called *starquakes*), which hints that the surface of a neutron star may be, to some extent, rigid, and possibly not completely spherical. Other ideas also support the idea that neutron star may not be perfectly spherical and that the emission of GWs from neutron stars could be detectable (equatorial bulge, non-radial vibrations, accretion disks...).

accrescimento...

Sorgenti di GW esplosive

Fin qui abbiamo discusso solo di sorgenti periodiche o quasi periodiche, ovvero di oggetti orbitanti o rotanti che si suppone emettano OG periodiche. Naturalmente, non c'è alcun motivo per non pensare che esistano anche emissioni impulsive di OG. Alcune potrebbero essere esotiche e difficilmente prevedibili, ma ve ne sono di più facili da immaginare. Orbite cometarie di buchi neri o stelle di neutroni, soprattutto se in ammassi stellari densi, possono produrre un singolo impulso di OG nel punto di massimo avvicinamento.

Un altro esempio di emissione impulsiva viene dalle supernovae. Si chiama supernova l'evento catastrofico di esplosione/implosione che conclude la vita di una stella massiccia, originando una stella di neutroni. Il collasso della stella comporta un improvviso cambiamento nella distribuzione locale di massa, associato con l'enorme quantità di energia emessa nell'espulsione degli strati esterni dell'astro. Se il collasso mantiene una distribuzione sferica non si produce alcuna radiazione gravitazionale. D'altronde, un *collasso del nucleo* simmetrico non riesce a spiegare le caratteristiche peculiari osservate nelle esplosioni di supernovae. Le più recenti simulazioni mostrano che non appena il nucleo metallico inizia a contrarsi, il materiale in caduta turbolenta innesca uno shock estremamente intenso, in grado di risalire fino agli strati esterni e causare la fase esplosiva. Sebbene i dettagli del processo siano ancora non compresi, ciò che è sicuro è che un collasso perfettamente simmetrico non può funzionare [5]. Una ulteriore conferma proviene dall'osservazione delle velocità orbitali delle stelle di neutroni nella galassia che indicano chiaramente l'effetto di forti impulsi residui al momento dell'evento di supernova, indizio indiretto di asimmetrie nel collasso. Così, teoria ed osservazioni sono concordi nel suggerire che le esplosioni nelle supernove a collasso nucleare possono esibire gradi di asimmetria sufficienti per l'emissione di impulsi di OG di intensità rivelabile, purché l'evento avvenga nei limiti della galassia.

Burst GW sources

As for now, we only discussed *periodic* or *quasi-periodic* sources, that is, orbiting or rotating objects that are expected to emit periodic GWs. Of course, there is no reason that sources of GW bursts cannot exist. Some may be so exotic, that we cannot guess, but some are easier to imagine.

Comet-like orbits of Black Holes or Neutron Stars, especially in dense globular clusters, may produce a single GW pulse at the closest approach point.

Other impulsive events are expected to be GW sources. Supernovae are an example. A supernova event is the catastrophic explosive/implosive death of a massive star generating neutron stars. The infall involves a sudden change in the local mass distribution (associated with the enormous amount of energy release ejecting the rest of the star). If the infall maintains a spherical distribution, no GW will be emitted. However symmetric *core-collapse* is unable to explain the observed supernovae explosions. The latest simulations show that when the star metallic core starts collapsing, infalling material produces turbulence that fuels a shock strong enough to propagate through the outer shell of the star and power the explosion. The process is still not completely clear, but what is clear is that a fully symmetric collapse would not work [5]. Observed neutron stars orbiting speeds in the galaxy also indicate the presence of strong neutron star natal kicks, due to asymmetric collapse. Both observations and theory indicate that core-collapse supernova explosions may exhibit sufficiently strong asymmetries, which would give rise to detectable GW pulses if the event happens within our own galaxy.

... e il Big Bang,, naturalmente !

Non potevamo chiudere questo veloce elenco di sorgenti senza citare l'affascinante questione del contributo cosmologico di OG, provenienti dalle prime turbolente fasi della vita dell'Universo. Se rivelata, l'eco gravitazionale del Big Bang fornirebbe informazioni di prima mano sulla fase inflazionaria che è stata ipotizzata per giustificare il notevole grado di piattezza dell'Universo attuale. OG provenienti dall'inizio del tempo sono previste anche in modelli che postulano l'esistenza di altre singolari o esotiche condizioni che avrebbero accompagnato la nascita della materia ordinaria e finanche del vuoto.

La ricerca (quasi onirica) delle onde gravitazionali

Che significa esattamente intensità rivelabile? Perfino i più sognatori tra gli scienziati, quando per la prima volta hanno incontrato il microscopico fattore nelle equazioni di Einstein ($8\pi G/c^4 = 2 \cdot 10^{-43} \text{ m}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^2$), probabilmente sono stati tentati di dubitare della stessa rivelabilità di qualsiasi OG.

Cerchiamo di farci un'idea delle enormi difficoltà poste dalla rivelazione della radiazione gravitazionale. L'ampiezza di una OG è rappresentata dal modulo della perturbazione metrica che abbiamo definito $h \simeq |h_{\mu\nu}|$. Possiamo tradurre in un segnale la deviazione geodetica locale misurando la distanza tra due corpi in caduta libera. È in definitiva questo cambiamento nella curvatura dello spazio-tempo che consente di registrare il passaggio di una OG.

Si può dimostrare che, se L è la distanza imperturbata tra i due corpi in caduta libera, la variazione di lunghezza ΔL dovuta al passaggio di una OG che si propaga perpendicolarmente ad L è:

$$\Delta L = \frac{hL}{2} \quad (3)$$

Ora, per le più intense sorgenti nelle nostre vicinanze cosmiche, ovvero più o meno nel raggio di un miliardo di anni luce, la teoria consente di stimare un valore spettacolarmente basso per h , dell'ordine di 10^{-21} (quando rivelato sulla terra). Questo numero implica che l'obiettivo che ci

...and the Big Bang!

In this quick review of GW sources, we cannot overlook the fascinating contribution from cosmological GWs from the turbulent early history of the Universe. If detected, GW relic from the Big Bang would give valuable information on the inflationary phase that has been assumed to explain the remarkable flatness of the present day Universe. Other fancy recordings of the birth of ordinary matter (and even vacuum) after the Big Bang may show up in GW signals.

The dream-quest for detecting gravitational waves

What does "detectable level" mean? When visionary scientists first looked at that incredibly tiny factor in the Einstein's equations ($8\pi G/c^4 = 2 \cdot 10^{-43} \text{ m}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^2$) they were tempted to ask: are there any GW at a detectable level at all?

Let's try to figure out some of the enormous difficulties. The GW amplitude is represented by the modulus of the metric term that we define as $h \simeq |h_{\mu\nu}|$. Monitoring the distance between freely falling bodies is an effective way to transduce into a signal the geodesics change in a local environment. This change of space-time curvature ultimately allows to detect and record GWs.

It can be shown that, if L is the macroscopic distance between two bodies in free fall, the length variation due to a GW passing perpendicularly to the length L is:

For the most intense sources in our cosmic neighbourhood (within a radius of roughly a billion of light years), theoretical estimates produce an astonishingly small value for h , of the order of 10^{-21} on Earth!

In order to fully understand the implications

poniamo equivale a misurare spostamenti pari ad un milionesimo di milionesimo di millimetro su una distanza imperturbata di un metro! In altre parole, vogliamo osservare variazioni di lunghezza inferiori ad un millesimo del raggio di un protone su una distanza di alcuni chilometri.

Se pensate che ciò sia del tutto ridicolo, non siete i soli. L'idea di rivelare sperimentalmente un effetto così piccolo è stata considerata completamente folle da molti scienziati. Molti, incluso Einstein, erano dell'opinione che fosse assolutamente impossibile. È una fortuna che vi siano stati scienziati altrettanto folli da tentare, ed abbastanza capaci da riuscire nell'impresa!

Le onde gravitazionali sono reali?

Più o meno per quarant'anni dopo la prima soluzione ondulatoria delle equazioni della Relatività Generale, dovuta allo stesso Einstein, la comunità scientifica è stata attraversata da accesi dibattiti sulla effettiva esistenza fisica di OG. La *querelle* si affiancava ai calcoli eseguiti per comprendere la loro natura e le loro caratteristiche, e per immaginare modi efficaci per misurarle. Einstein aveva fornito una formula per stimare l'intensità della radiazione gravitazionale, la così detta *formula del quadrupolo*, grazie alla quale fu subito evidente l'impossibilità di eseguire esperimenti simili a quello di Hertz, con un trasmettitore ed un ricevitore posti nello stesso laboratorio. Questa semplice osservazione stimolò una serie di ricerche teoriche volte a fare maggior chiarezza sulle caratteristiche fisiche di questo nuovo tipo di onde.

Eddington mostrò, in un famoso lavoro del 1922, che le varie soluzioni ondulatorie note allora avevano comportamenti marcatamente differenziati – la velocità di propagazione di alcuni tipi di onde dipendeva dal sistema di coordinate scelto, mentre per altri la velocità ne era indipendente. In alcuni casi le velocità risultavano perfino superluminali. Innervosito da queste incongruenze, Eddington finì per dubitare dell'esistenza stessa delle OG, arrivando a dichiarare ironicamente che esse viaggiano alla velocità del pensiero [6]. Analogamente, Einstein e Nathan Rosen furono indotti, nel 1936, a negare la realtà fisica delle onde [7][8], poiché la soluzione da loro trovata possedeva una singolarità - singola-

of this number, it means that we need to detect a displacement of one billionth of one billionth of a millimetre for a couple of masses 1 m apart. In other words, we have to measure length changes less than one thousandth of a proton radius over distances of few kilometers!

If you think this is completely ridiculous, you are not alone: the idea of measuring such a vanishingly small effect had been regarded as foolish by most scientists. Many of them, including Einstein, thought it was totally impossible. Happily there were scientists foolish enough to try it, and capable enough to eventually be successful!

Are gravitational waves real?

For most of the first four decades after Einstein's first wave solution in General Relativity, the scientific community vigorously debated whether or not gravitational waves were a real, observable phenomenon. The debate was driving largely by calculations designed to understand their nature and behaviour, and how one might in fact go about measuring them. Einstein had provided a way to estimate the strength of gravitational waves using the "quadrupole formula," and it was immediately apparent that it would not be possible to conduct a Hertz-like experiment with a laboratory scale generator and receiver for the waves. That simple fact led to a variety of theoretical calculations attempting to better illuminate the character of the waves.

Eddington famously showed in 1922 that different wavelike solutions behaved differently – some propagated at different speeds, including super-luminal speeds, depending on the coordinates chosen, and still others propagated with speeds independent of coordinates. Incensed by these inconsistencies, Eddington doubted the waves were physical at all, declaring that they "propagate at the speed of thought" [6]. Similarly, in 1936, Einstein and Nathan Rosen [7][8] famously thought the waves might be non-physical because they had found a solution with a singularity, though it was later discovered to be an artifact of the coordinates they were using.

rità che, come fu poi dimostrato, era un artefatto della particolare scelta di coordinate da loro impiegata.

Molte di queste iniziali difficoltà erano il risultato dell'inesperienza nel trattare le equazioni della Relatività Generale, e della difficoltà di separare chiaramente effetti fisici indipendenti dal sistema di riferimento (invarianti) e perciò reali da subdole implicazioni non fisiche generate solo da scelte inadeguate delle coordinate. Nella pratica attuale, gli esperti di Relatività Generale sono ben consci del fatto che le quantità utili per la realizzazione di strumenti osservativi sono i così detti invarianti (ovvero grandezze sulle quali c'è completo accordo fra tutti gli osservatori possibili, indipendentemente dal loro stato di moto e dal sistema di coordinate impiegato) oppure osservabili fisiche come la curvatura dello spazio-tempo, contenuta nel tensore di curvatura di Riemann. Il primo a formulare compiutamente questo approccio fu Felix Pirani. Nel 1957 Pirani pubblicò un approccio pratico all'uso della curvatura nella concezione di esperimenti fisici. Questo lavoro ottenne ben poca risonanza, finché Pirani ne presentò i contenuti alla famosa conferenza di Chapel Hill, nel 1957, sotto il titolo "Il ruolo della gravitazione nella fisica". Egli mostrò che la curvatura imposta dalle OG allo spazio-tempo produceva variazioni nella distanza tra particelle in caduta libera – la deviazione geodetica – che in principio potevano essere misurate. Feynman era presente alla conferenza (sebbene non lo fosse alla relazione di Pirani) e reinterpretò l'effetto dal punto di vista del lavoro fatto sulle particelle, fornendo una chiara descrizione del meccanismo con cui le onde potevano depositare calore in un sistema. Tale calore rappresentava un segnale che, almeno euristicamente, poteva essere dichiarato misurabile. Bondi era presente alla relazione e tempestò Pirani di domande. Egli seguì la stessa linea di pensiero e formulò quello che è oggi conosciuto come l'argomento della perline sulla bacchetta, che pubblicò lo stesso anno su *Nature*. [9].

L'esperimento mentale di Bondi può essere descritto come segue: immaginate due perline che scorrono lungo una bacchetta liscia ma non del tutto priva di attrito. Al passaggio di una OG le due perline iniziano a muoversi l'una rispetto all'altra per effetto della curvatura dello

Many of these early difficulties resulted from inexperience with General Relativity, and the difficulty of separating invariant physical effects from deleterious non-physical implications resulting purely from a poor choice of coordinates. Today, practitioners of General Relativity are cognizant that the quantities useful to build observation tools are either invariants (quantities that all observers agree on, irrespective of their state of motion and the coordinates they lay down to cover spacetime), or are physically observable quantities like the curvature of spacetime (usually embodied by the Riemann Curvature Tensor). The first person to realise this, was Felix Pirani. In 1956 he published a very practical approach to using the curvature to devise physical experiments. Pirani garnered little attention until he presented the work at the famous 1957 Conference in Chapel Hill entitled "The Role of Gravitation in Physics." Pirani showed that considering the curvature the gravitational waves imposed on spacetime would induce changes in distance between free particles – geodesic deviation – which could in principle be measured. Feynman who was also at the conference (though not at Pirani's presentation) reinterpreted the effect from the perspective of work being done on the particles, leading to a manifest representation of how the waves could deposit heat in a system, a signal that at least heuristically was understood as measurable. Bondi, who was at the presentation thoroughly questioned Pirani about it. He followed a similar line of thought and created what today is known as the "sticky bead argument", which he published that same year in *Nature* [9].

Bondi's sticky bead argument can be thought as follows: imagine two small beads, allowed to slide along a nearly, but not perfectly frictionless rod. When a gravitational wave passes by, it curves the spacetime, and as a result the two beads move with respect to one another. Because

spazio-tempo. A causa dell'attrito che si oppone al moto delle perline una piccola parte di energia è dissipata sotto forma di calore, il cui effetto può essere rivelato monitorando la temperatura della barretta.

Una volta compreso l'effetto delle OG sulle distanze tra particelle, fu dimostrato definitivamente che le OG devono essere trasverse – esse producono spostamenti delle particelle su un piano perpendicolare alla direzione di propagazione. L'effetto segue uno schema caratteristico: data una griglia uniforme di particelle, una OG incidente aumenta la distanza tra particelle lungo una direzione della griglia, e simultaneamente ne diminuisce la separazione lungo la direzione ortogonale. Peter Bergman descrisse questo effetto in termini di particelle disposte in cerchio, nel suo classico testo *L'enigma della gravità*, del 1968. Se l'onda passa per il centro dell'anello, essa lo deforma alternativamente facendolo apparire oblatò o oblungo, dipendentemente da quale asse è compresso e quale è invece espanso.

Progettare osservatori di onde gravitazionali: interferometri a luce laser

L'aver capito che le OG producono effetti misurabili ha rappresentato il primo passo verso la progettazione di esperimenti in grado di rivellarle. Realizzare un esperimento in grado di raggiungere una sensibilità così estrema rappresentò fin dall'inizio una vera e propria sfida tecnologica. Buchi neri e stelle di neutroni, sebbene teorizzati, non erano ancora neppure stati scoperti. Gli oggetti più massicci dei quali gli astronomi possedevano conoscenza certa erano le stelle, perciò le sorgenti più intense di OG suggerite in principio furono le supernovae, esplosioni durante le quali l'intera massa di una stella era coinvolta in un moto dinamico. Ciò non di meno, l'ampiezza prevista per le OG era minuscola se misurata in termini del moto relativo prodotto in un sistema di due particelle – la tecnica di misura avrebbe richiesto una precisione straordinaria. Furono passate al vaglio numerose idee, tra le quali spiccava il suggerimento di usare un laser per monitorare la distanza tra due masse, in questo caso

the rod is not perfectly frictionless, friction impedes the beads' motion, dissipating some energy in the form of heat, which can be detected by monitoring the temperature of the rod.

Once understood that gravitational waves change the distances between particles, it was firmly established that the gravitational waves must be transverse – they displace particles in a plane perpendicular to the direction the wave is travelling. They affect particles in an asymmetric pattern. For a uniform grid array of particles, a passing gravitational wave will increase the particle separations along one grid axis, while simultaneously decreasing the particle separations along the perpendicular axis. Peter Bergman, in his classic 1968 book "The Riddle of Gravitation" [10] famously described this distortion in terms of a ring of small particles. As a gravitational wave passes through the centre of the ring, it alternatively makes the ring look either oblate or prolate, depending on which axis was being stretched and elongated, and which axis was being compressed and shortened.

Designing the observatories: laser light interferometers

Understanding that gravitational waves can produce a measurable effect in a physical system is the first step on the road to designing an experiment capable of detecting them. The technological hurdle, however, was to design experiments sensitive enough for the job. Black holes and neutron stars had not yet been discovered, though they had been theorized. The most massive objects astronomers knew of with certainty were stars, and the most intense possible source of gravitational waves then imagined was a supernova explosion, where the entire mass of a star core was moving dynamically. Even so, the predicted amplitude of the gravitational waves were tiny in terms of the scales of motion that would be produced between two particles – measurement technology would have to be extraordinarily precise. Many ideas were considered, but among them was the idea that lasers could be used to monitor the distance between two masses, i.e. massive mirrors reflecting the laser light back and forth, a metrology experiment on a really

rappresentate da specchi massicci in grado di riflettere la luce avanti ed indietro: un esperimento di metrologia estrema su scala imponente.

Immaginate di disporre di un interferometro di Michelson per rivelare i cambiamenti di distanze tra gli specchi (come in figura 4). Gli specchi all'estremità dei bracci si trovano in corrispondenza di un anello di Bergman. L'interferometro risulta distorto secondo lo stesso identico schema – un braccio è stirato ed allungato, l'altro è compresso ed accorciato. La variazione di lunghezza dei bracci comporta una condizione di interferenza distruttiva o costruttiva all'uscita dello strumento, dove i fasci laser si ricombinano. Col passaggio dell'onda, allungamento e accorciamento si alternano, e così luce e buio si alternano all'uscita dell'interferometro in sincronia con l'onda.

Il modo più diretto di comprendere l'utilità della luce nel monitoraggio della distanza tra due corpi è interpretare l'esperimento come una misura di tempo. La velocità della luce è costante in tutti i sistemi di riferimento. Immaginate un fotone emesso da un corpo che viaggia fino ad uno specchio lontano, è riflesso e torna al punto di partenza. Se la distanza percorsa è modificata dal passaggio di un'onda gravitazionale, il tempo impiegato per coprirlo aumenta o diminuisce e così si modifica la fase accumulata dal fotone alla fine del percorso. Impiegando luce coerente (come nel caso di un laser) è possibile rivelare il cambiamento di fase tramite fenomeni di interferenza.

Un interferometro classico di Michelson possiede due bracci disposti ad angolo retto (figura 4). All'estremità di ogni braccio si trova uno specchio che riflette la luce indietro verso il centro dello strumento. La luce è fornita da un laser e divisa da un separatore di fascio in due parti uguali, inviate lungo i due bracci; i fasci sono poi riflessi e rimandati sul separatore, che li ricombina e li proietta sul fotodiodo rivelatore. Nell'interferometro, la durata del viaggio compiuto dal laser può essere decisa in modo pratico: le lunghezze dei due bracci sono scelte in modo da garantire all'uscita un dato rapporto tra le fasi dei fasci ricombinati. È possibile scegliere, ad esempio, interferenza costruttiva o distruttiva. Nel caso specifico dei rivelatori interferometrici di OG viene scelta una condizione di interferenza (quasi

grand scale.

Imagine using a Michelson interferometer to track the distances between mirrors (see figure 4 for reference). One can think of the end mirrors as being masses sitting on one of Bergmann's rings. The interferometer gets distorted in exactly the same pattern - one arm gets stretched and elongated, while the other gets compressed and shortened. The change in the arm length makes the recombined beams at the output of the device interfere destructively or constructively. As the wave passes by, the arms alternately stretch and compress, and so the amount of light at the measurement port fluctuates in synch with the wave.

The easiest way to understand the use of light for monitoring the separation between two masses is as a timing experiment. The speed of light is a constant in all frames of reference. Imagine a photon emanating from a mirror, travelling along a straight line to a distant mirror, reflects and returns back to the first one. If the distance is changed by a gravitational wave passes by, the time it takes becomes longer or shorter and the photon gets de-phased. If the used light is highly coherent (laser light), that dephasing can be measured.

A classic Michelson laser interferometer has two such arms at right angles (see figure 4). Each end of the arm has a mirror that reflects light back toward the corner of the interferometer. A laser sits just outside the corner, where a beam splitter sends half of the light down each of the two arms; when the light beams return to the beam splitter it recombines and escapes for measurement. In the interferometer, the timing of the laser journey is fine-tuned in a practical way – the arm lengths are chosen so the light arriving back for measurement have a fixed relationship. An experimenter can choose to have constructive or destructive interference. In the GW detector case almost perfect destructive interference is chosen, so that the output measurement sees almost no light (it is called a *dark port*). When a

completamente distruttiva, così che il fotodiodo in uscita vede sostanzialmente buio (ed è chiamato perciò *porta scura*). È chiaro quindi che, al passaggio di una OG, il cambiamento della lunghezza dei bracci produce uno sfasamento relativo dei fotoni nei fasci ricombinati e la quantità di luce che raggiunge la porta scura aumenta leggermente. Ogni variazione della lunghezza dei bracci dell'interferometro modifica l'ampiezza della luce rivelata, in modo proporzionale alla variazione stessa.

gravitational wave passes by, and changes the length of the arms, the photons arriving at the beam splitter are no longer precisely phased, and the amount of light leaking from the output port changes. Any change in the length of an interferometer arm causes changes of light amplitude to be seen proportionally to the length change.

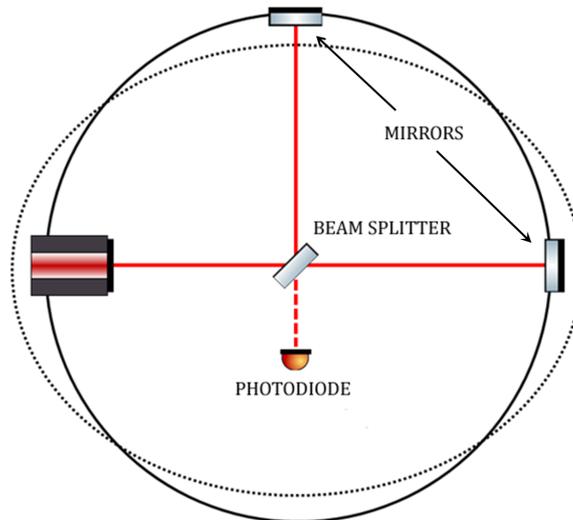


Figura 4: Schema di un semplice interferometro di Michelson. Il fascio del laser è separato in due da un beam splitter, quindi i due fasci viaggiano verso gli specchi alla fine dei bracci, sono riflessi e ricombinati dopo il beam splitter su un fotodiode. L'effetto di una OG che passa è rappresentato dalla deformazione di un anello di masse puntiformi in caduta libera.

Scheme of a simple Michelson interferometer. The beam from the laser is divided in two by a beam splitter, then the two beams travel to the mirrors at the end of the arms, are reflected and recombined after the beam splitter on a photodiode. The effect of a passing GW is represented by the deformation of a ring of pointlike masses in free fall.

Il primo tentativo documentato di realizzare un interferometro laser per OG risale al 1971 ad opera di Robert Forward presso la compagnia Hughes Aircraft. La prima campagna di misura fu condotta da Forward per una durata di 150 ore nel corso dell'autunno dell'anno successivo. Lo strumento impiegato all'epoca era in grado di rivelare spostamenti dell'ordine dei *femtometri* (10^{-15} m), consentendo una misura tra le più sensibili mai ottenute con un apparato di interferometria laser; ciò non di meno, esso era diecimila volte meno sensibile (e mille volte più corto) dei rivelatori di oggi. Niente male, comunque, per un primo tentativo!

La nascita concettuale degli interferometri a

The first documented attempt to build a laser interferometer for gravitational wave detection was by Robert Forward at Hughes Aircraft in 1971, with the first interferometric search being conducted over the course of 150 hours during the fall of 1972. At the time, the instrument was able to sense displacements on the scale of *femtometers* (10^{-15} m), the best measurement ever made with a laser interferometry system, but still a ten-thousand time less sensitive than present detectors, and a thousand time shorter. Yet it was the first attempt.

The stage for modern kilometre scale interfer-

bracci chilometrici avvenne nel 1972, quando Rai Weiss pubblicò una relazione trimestrale sullo stato della ricerca sulla gravitazione al MIT. Nella prima metà della relazione si parlava di una campagna di ricerca con palloni per la misura del fondo cosmico a microonde; la parte rimanente conteneva una lista di considerazioni sperimentali finalizzate alla costruzione di un osservatorio interferometrico in grado di rivelare la radiazione gravitazionale di origine cosmica. Lo schema concettuale presentato nella relazione, divenuta celebre, identificava già gran parte degli elementi operativi necessari per il funzionamento di un rivelatore di oggi come Virgo o LIGO (con l'eccezione della vitale introduzione delle cavità Fabry-Pérot, proposte originariamente da Ron Drever e discusse più in dettaglio nel seguito), e discuteva in dettaglio le principali sorgenti di rumore di misura che sono tuttora un limite per i rivelatori di OG moderni.

Verso un vero rivelatore interferometrico di OG

Il rapporto Weiss identificava i contributi principali di rumore presenti nel segnale di uscita di un rivelatore interferometrico. Ognuno di questi contributi rappresenta, in una particolare banda di frequenze, un limite alla capacità di rivelazione. La sensibilità del rivelatore influisce in ultima analisi sulla massima distanza alla quale una data classe di oggetti è rivelabile. Nel caso della prima generazione di rivelatori di OG, tale distanza raggiungeva i dieci megaparsec per le stelle di neutroni binarie; comunque, alla fine di un periodo di osservazione durato un anno, non fu rivelato alcun segnale dovuto ad OG.

Le osservazioni in radiazione elettromagnetica, unite alle rivelazioni di OG raccolte fino ad oggi, consentono di porre un limite al numero di sorgenti astrofisiche di OG attese in un dato volume di spazio ed in un dato intervallo di tempo. Come è naturale aspettarsi, gli eventi di emissione di OG sono relativamente rari. Una vera e propria astronomia gravitazionale può esistere solo se sono disponibili rivelatori con sensibilità elevata, ovvero in grado di estendere quanto più possibile il volume di universo osservabile e corrispondentemente la frequen-

ometers was set in 1972, when Rai Weiss published a *Quarterly Progress Report* [11] on gravitational research at MIT. The first half of the report outlined an experimental ballooning campaign to measure the cosmological infrared background, but the second half of the report outlined the necessary experimental considerations to construct an interferometric observatory capable of detecting gravitational waves of cosmic origin. The article is famous for presenting a notional schematic that still today captures most of the essential operating elements of a modern detector like LIGO or Virgo (minus the vital Fabry-Pérot arm proposed by Ron Drever, further discussed in the following), and for detailing all the major sources of experimental noise that limit the performance of modern gravitational wave interferometers.

Toward real interferometers for GW detection

The Weiss report identified the main noise contributions to the output of an interferometric GW detector. Each of these noise sources is, in a different frequency window a limit to the detection reach. The sensitivity of the interferometer ultimately determines the maximum range for a given class of sources to be detectable. The reach of the first generation of GW detectors was, for neutron star binaries, of the order of ten megaparsec. A year-long observation period resulted in no observations.

Electromagnetic observations, and now the collected GW detections, put a constraint on the number of astrophysical GW emitters that are expected within a given volume and a given interval of time. Perhaps not surprisingly, GW emitting events are relatively rare. To make real GW astronomy, it is vital to develop high sensitivity detectors, extending as much as possible the detection reach for each class of sources, increase the volume of observable Universe and correspondingly increase the rate of detections. Equally important, higher sensitivity detectors

za delle osservazioni. Non di meno, rivelatori molto sensibili consentono di osservare le sorgenti ottimali (cioè quelle prossime alla terra e di grande intensità, ma anche piuttosto rare) con un rapporto segnale-rumore molto alto; in questo modo diviene possibile studiare in dettaglio la parte finale ed evanescente dei segnali, ottenendo informazioni sull'interazione spin-spin, le deformazioni mareali, la disintegrazione delle stelle di neutroni ed eventuali deviazioni dalla Relatività Generale.

Perché sono necessari bracci molto lunghi?

Un vero rivelatore di OG è un oggetto molto più complesso e sofisticato di un interferometro di Michelson convenzionale. L'osservazione del moto degli specchi in un Michelson avviene tramite la rivelazione di interferenza distruttiva (frangia scura) o costruttiva (frangia chiara) tra i fasci ricombinati. In termini di spostamento degli specchi, la distanza tra le due condizioni di interferenza è una frazione della lunghezza d'onda della luce laser impiegata¹⁰. L'uscita di un Michelson passa da luce a buio con uno spostamento degli specchi di un quarto di lunghezza d'onda λ , ~ 100 nanometri per luce visibile. È possibile rivelare anche spostamenti più piccoli, misurando di quanto cambia l'intensità dell'uscita (ad esempio, una frangia brillante che si scurisce), cioè contando le variazioni nel numero di fotoni in uscita. Tuttavia, anche con un laser dotato di potenza tra le più elevate oggi disponibili - qualche centinaio di watt, la risoluzione spaziale ottenuta col metodo descritto è molto lontana dalle dimensioni caratteristiche (spettacolosamente piccole) dovute al passaggio di una OG, inferiori a 10^{-18} m.

I ricercatori hanno individuato molti trucchi per migliorare le prestazioni dello schema Michelson e per ridurre le sue limitazioni. La questione riguardante la lunghezza d'onda del laser sembra essere l'espressione di qualche limite fondamentale. Non abbiamo bisogno, in effetti, di misurare lo spostamento di un'intera frangia (da completamente chiara a buia) all'uscita: basterebbe disporre di un fotodiodo ideale in grado

¹⁰Può essere interessante notare che di fatto impieghiamo onde per misurare altre onde...

also allow to detect optimal (that is, close to the Earth and very strong, but very rare) sources with high signal to noise ratio, to reveal important details of their final evolution like spin-spin interaction, tidal deformation, neutron star shredding and possibly deviations from General Relativity.

The need of long arms

A real GW interferometric detector must be much more sophisticated than a conventional Michelson scheme. The tracking of mirror motion in a Michelson occurs through the detection of constructive/destructive patterns in the recombined light. In terms of mirror displacement, the distance between the two patterns is a fraction of the laser wavelength⁹. A Michelson switches from dark to bright in a $1/4$ wavelength λ , ~ 100 nanometers for visible light. It can detect smaller changes by measuring the relative amplitude of the dark and bright field, i.e. counting the number of photons exiting on each side. Even with the reasonably high power of available lasers, a few hundred of watts, the spatial resolution would be very far from attaining the spectacularly tiny length changes due to GW, less than 10^{-18} m.

Scientists invented many "tricks" to boost the performances of the Michelson and reduce its limitations. The argument of the wavelength of laser light seems to be somewhat fundamental. We do not need to measure a full fringe shift (that is, from bright to dark) at the output: an ideal photodiode able to detect infinitely small changes in the intensity at the output port of the interferometer would do the trick. Unfortunately

⁹It is perhaps worthwhile to notice that we actually use waves to detect other waves...

di rivelare cambiamenti infinitesimi di intensità sulla porta scura. Sfortunatamente, non esistono fotodiodi dotati di sensibilità indefinitamente grande poiché la sensibilità è comunque limitata dalle fluttuazioni intrinseche nel numero dei fotoni raccolti.

Il numero N di fotoni raccolti all'uscita del rivelatore è proporzionale al tasso \bar{n} con cui i fotoni sono emessi dalla sorgente, moltiplicato per il tempo di osservazione τ . Se si ipotizza che l'arrivo di ogni fotone sia completamente scorrelato dagli altri, N segue la statistica di Poisson e le sue fluttuazioni naturali sono pari a \sqrt{N} . Quanto più alta è la frequenza del segnale sotto osservazione, tanto più breve è il tempo di osservazione τ , così come il numero di fotoni misurati N . Questo contributo al rumore complessivo è detto *shot noise*. Il minor tempo τ ad alta frequenza è la ragione per la quale il limite dello *shot noise* alla sensibilità dei rivelatori di OG cresce con la frequenza, mentre per sua natura lo *shot noise* è bianco e piatto. Ora, facendo una stima grossolana, per rivelare i moti dello specchio dell'ordine di $h \times L$, poiché l'intervallo tra una frangia chiara e una scura corrisponde ad una lunghezza d'onda, l'errore relativo nel conteggio del numero di fotoni deve soddisfare la relazione:

$$\frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}\tau}} \lesssim \frac{hL}{\lambda} . \quad (4)$$

Questa relazione pone un requisito sul valore minimo del numero di fotoni emessi dal laser, cioè, sulla potenza del fascio. Per frequenze nell'intervallo 100 Hz - 1 kHz (dove ci si aspetta si trovino molti segnali astrofisici) e per luce visibile, la minima potenza richiesta per le più intense sorgenti può essere espressa come

$$P_{\min} \sim \frac{10^{13}}{L^2} \text{ W} . \quad (5)$$

Se la lunghezza del braccio dell'interferometro fosse di ~ 1 m, la potenza sarebbe dell'ordine di migliaia di gigawatt (cioè più dell'insieme della produzione energetica mondiale), sufficiente per vaporizzare qualsiasi specchio e completamente fuori dalla scala di ogni apparato sperimentale. Per progettare un interferometro molto sensibile abbiamo bisogno di aumentare L che, per ragioni pratiche, è limitato a qualche chilometro (3 km in Virgo, 4 km in LIGO). Con questa scelta, l'am-

an infinitely sensitive photodiode does not exist, its sensitivity is limited by the intrinsic fluctuations in the number of photons it collects.

In a Michelson, the number N of photons collected at the output of the detector is proportional to the rate \bar{n} at which photons are emitted by the source times the observation time τ . Under the hypothesis that there is no correlation between the arrival of different photons, N obeys Poissonian statistics and its natural fluctuations are, at best, equal to \sqrt{N} . The higher the frequency of the monitored signal, the shortest is the time interval τ , and the smaller the number N . This contribution to overall noise is called *shot noise*. The shorter τ at high frequency is the reason why the shot noise limit to the sensitivity of GW detectors grows with frequency, while the shot noise itself is white and flat in nature. Now roughly speaking, to detect mirror motions of order $h \times L$, since the interval between bright and dark fringe corresponds to a wavelength, the relative error of the photon number count must meet the requirement:

This relation puts a requirement on the minimum value of the number of photons emitted by the laser, that is, on the beam power. For frequencies in the range 100 Hz-1 kHz (where many astrophysical signals are expected to be) and for visible light, the minimum power required for most intense sources can be worked out as:

If the interferometer arm length was ~ 1 m, the latter number would be of the order of thousand gigawatt (that is, more than the world's combined energy production), sufficient to vaporize any mirror and totally out of scale for any experimental equipment. To design a very sensitive interferometer we need to increase L , which for feasibility reasons, is limited to few kilometers (3 km in Virgo, 4 km in LIGO). With this choice, the required amount of standing power

montare della potenza richiesta sullo specchio scende a solo 1 MW. È chiaro che raggiungere 1 MW è un compito difficile, ma realizzabile.

Come allungare il percorso ottico: le cavità risonanti

Laser stabili esistono fino a potenze di qualche centinaio di W. Ronald Drever, il più geniale collaboratore alla progettazione di rivelatori di OG, suggerì di usare cavità di Fabry-Pérot (FP) con alta *finesse* nei bracci di Michelson. Una cavità FP è fatta da due specchi, uno che riflette solo il 99.9% del fascio e posizionato all'ingresso, e l'altro completamente riflettente alla fine del braccio. Se i due specchi sono posizionati ad una distanza che è un multiplo esatto della lunghezza d'onda, le onde elettromagnetiche si riflettono avanti ed indietro nella cavità e si sommano costruttivamente fino ad una potenza proporzionale alla *finesse* \mathcal{F} (vedi sotto) della cavità. In queste condizioni la cavità di FP è detta in una condizione di *risonanza ottica*

Il tempo di accumulazione τ_S , cioè il tempo medio passato da ogni fotone nella cavità, è dato da:

$$\tau_S = \frac{L}{\pi c} \mathcal{F} \quad (6)$$

dove la *finesse* \mathcal{F} , una quantità caratteristica della cavità FP proporzionale al numero di viaggi andata-ritorno del fotone, dipende solo dalle riflettanze r_1 e r_2 dei due specchi:

$$\mathcal{F} = \pi \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2} \quad (7)$$

Le cavità FP hanno un vantaggio aggiuntivo, mentre il Michelson passa dalla frangia chiara a quella scura in un 1/4 di lunghezza d'onda, una cavità FP lo fa molto più velocemente, con un cambio di lunghezza di λ / \mathcal{F} .

Con una riflettanza di ~ 0.999 , la trasmittanza è ~ 0.001 , il suo inverso ~ 1000 , e la potenza intra-cavità è aumentata di circa mille volte. Ripetendo questo trucco un paio di volte, prima nei due bracci, e una seconda volta sul fascio riflesso indietro verso il laser è possibile raggiungere, e anche superare, 1 MW di potenza accumulata. Lo schema fondamentale di un interferometro per la rivelazione di OG è mostrato nella Figura 5.

on the mirror decreases to "only" 1 MW. It is clear that reaching 1 MW circulating power is a tall order, but feasible.

Optical path folding with resonant cavities

Stabilized lasers only exist to a few hundred W power. Ronald Drever, the most genial contributor to the design of GW detectors, suggested to use high finesse Fabry-Pérot (FP) cavities in the Michelson arms. A FP cavity is made by two mirrors, one reflecting "only" 99.9% at the input and the other totally reflective at the end of the arm. If the two mirrors are kept at an exact multiple of the wavelength, the electromagnetic waves reflected back and forth in the cavity add up constructively to a final power proportional to the cavity *finesse* \mathcal{F} (see infra). In this condition the FP cavity is said to be in an *optical resonance* condition.

The storage time τ_S , that is, the average time spent in the cavity by each photon, is given by:

where the *finesse* \mathcal{F} , a characteristic quantity of the FP cavity proportional to the average number of photon round trips, only depends on the reflectance r_1 and r_2 of the two mirrors:

The FP cavities have an added advantage, while the Michelson switches from bright to dark in a 1/4 wavelength, a FP cavity does it much faster, with a length change of λ / \mathcal{F} , which means that the length sensitivity is almost \mathcal{F} times higher!

With a reflectance of ~ 0.999 , the transmittance is ~ 0.001 , its inverse $\sim 1,000$, and the intra-cavity power is boosted by about a thousand times. Playing this trick twice, first in the two arms, and a second time on the beam reflected back to the laser (using an additional mirror called *power recycling* mirror), stored laser light powers of 1 MW can be reached and exceeded. The fundamental optical layout of an interferometer for the detection of GW is shown

in figure 5.

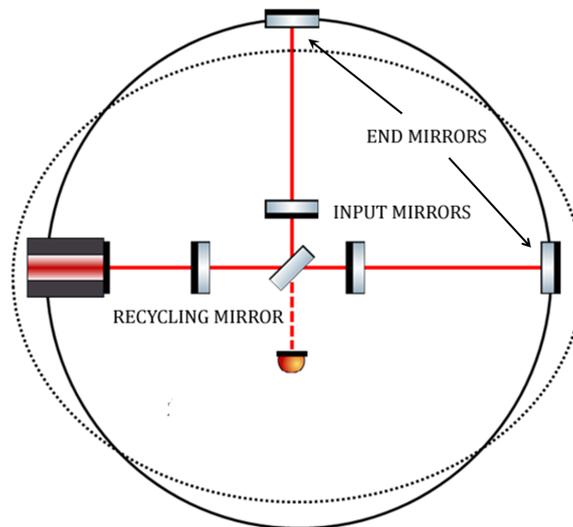


Figura 5: Schema della geometria ottica di un rivelatore interferometrico di OG. I bracci sono sostituiti con cavità di Fabry-Pérot, mentre una cavità aggiuntiva è costruita posizionando uno specchio semitrasparente prima del beam-splitter.

Outline of the optical layout of an interferometric GW detector. Arms are replaced with Fabry-Pérot cavities, while an additional cavity is made by placing a recycling mirror before the beam splitter.

Cavità FP con alta finezza possono essere viste come un metodo per ripiegare il fascio in modo da realizzare un interferometro con una lunghezza ottica effettiva di centinaia di chilometri. Questo è un grande vantaggio poiché la variazione della lunghezza da misurare è proporzionale a L . L_{OPT} non deve eccedere metà della minima lunghezza della OG che si vuole osservare per evitare che l'effetto complessivo dell'OG sia mediato a zero.

Specchi dielettrici

Gli specchi metallici riflettono un massimo del $\sim 95\%$ e assorbono $\sim 5\%$ per dissipazione ohmica, che alla fine si trasforma in calore. Con 1 MW di potenza circolante, gli specchi metallici si scalderebbero assorbendo 50000 W, ed istantaneamente vaporizzerebbero.

La tecnologia necessaria per costruire una cavità risonante con una potenza circolante di 1 MW è quella degli specchi dielettrici. Siccome i dielettrici non conducono elettricità, non sono soggetti alla dissipazione ohmica. Se i materiali utilizzati nel rivestimento sono sufficientemente puri, possono assorbire meno di 1/4 di una parte per milione della potenza incidente. Questo

High finesse FP cavities can be seen as a method to fold the beam allowing to build an interferometer with an effective optical arm length L_{OPT} of hundreds of km. This is a major advantage because the length variation to be measured is proportional to L . L_{OPT} must not exceed half of the minimum GW wavelength one wants to observe to avoid averaging out the effects of the GW.

Dielectric mirrors

Metallic mirrors reflect a maximum of $\sim 95\%$ and absorb $\sim 5\%$ by Ohmic dissipation, which ends up into heat. With 1 MW standing power the metal films would be heated by 50,000 W, and instantaneously vaporize.

The technology needed to build a resonant cavity with 1 MW circulating power is dielectric mirrors. As dielectrics do not conduct electricity, they are not affected by Ohmic dissipation. If the materials used in the coatings are pure enough, they proved to absorb less than 1/4 of a part per million of the incoming power. This means, less than 1/4 W is deposited in the mirrors for 1 MW

implica che, per 1 MW accumulato nella cavità, poco meno di 1/4 W è depositato sugli specchi.

Rivestimenti dielettrici con la necessaria purezza e regolarità su specchi di grandi dimensioni sono uno straordinario risultato della ricerca tecnologica stimolata dalla necessità di rivelare OG. I grandi specchi di alta precisione, e a basse perdite, ottimizzati per i rivelatori di OG sono in gran parte un risultato di Jean Marie Mackowski, un visionario scienziato dei materiali.

L'impatto della pressione di radiazione

Per ottenere una migliore sensibilità, si potrebbe ingenuamente suggerire di aumentare la potenza del laser mantenendo fisso il valore della *finestra*. Il vantaggio di questo approccio è limitato dall'impulso del fotone. Durante la riflessione, questo impulso è trasferito agli specchi e li spinge. Come conseguenza delle fluttuazioni statistiche del numero di fotoni che interrogano la posizione della superficie, gli specchi sono continuamente scossi e la loro posizione fluttua in maniera scorrelata rispetto alle OG. Questo effetto è chiamato *rumore di pressione di radiazione*, e cresce aumentando la potenza del laser. Mentre la pressione di radiazione è filtrata dall'inerzia degli specchi, la loro massa è limitata a decine di kg e ad un certo punto la pressione di radiazione comincia a rovinare la sensibilità del rivelatore.

Laser super-stabilizzati

La discussione precedente è stata svolta ipotizzando un laser perfetto, con una linea spettrale infinitamente sottile, o, in altri termini, una luce perfettamente monocromatica. Chiaramente non è questa la situazione nelle reali sorgenti di luce: frequenza, potenza e anche puntamento fluttuano in continuazione. Allo stato dell'arte, sono disponibili laser con una lunghezza d'onda di circa $1 \mu\text{m}$ ¹¹. Le sorgenti laser utilizzate nei rivelatori di OG sono ulteriormente stabilizzate attraverso l'effetto di filtraggio di cavità ottiche risonanti e con una serie di cicli di correzioni retroattive, fino ad un rumore di frequenza incredibilmente piccolo, di circa $1 \mu\text{Hz}/\sqrt{Hz}$ (la frequenza della luce laser a questa lunghezza d'onda è $c/10^{-6}\text{m} = 300 \text{THz}$).

¹¹Questa lunghezza d'onda non è visibile all'occhio umano e si trova nella regione infrarossa.

in the cavity. Dielectric coatings with the needed purity and regularity over large size mirrors are an extraordinary achievement of technological research driven by the needs of GW detection. The large, low-loss, high precision mirrors optimized for GW detectors are in large part the achievement of Jean Marie Mackowski, a visionary material scientist.

The radiation pressure impact

To get better sensitivity, one could naively suggest to increase the laser power at fixed *finestra*. The payoff of this approach is limited by photons' momentum. Upon reflection, this momentum is transferred to the mirrors and pushes them. As a consequence of the statistical fluctuation of the number of photons "interrogating" the position of their surface, mirrors are continuously shaken and their position fluctuates in a manner that is unrelated to GW. This effect is called *radiation pressure noise*, and grows as the laser power increases. While the radiation pressure is filtered by the inertia of the mirrors, their mass is limited to tens of kg and at a certain point radiation pressure starts to spoil the detector sensitivity.

Super-stabilised lasers

The former discussion was conducted assuming a perfect laser, with an indefinitely narrow spectral line, or, in other terms, perfectly monochromatic light. This is not of course the case in real light sources: frequency, power and even pointing continuously fluctuate. At the state of art, very stable lasers are available with a wavelength of about $1 \mu\text{m}$ ¹⁰. The laser sources employed in GW detectors are further stabilised through the filtering effect of optical resonant cavities and with nested active correction loops, up to an astonishingly small residual frequency noise of about $1 \mu\text{Hz}/\sqrt{Hz}$ (the laser light frequency at this wavelength is $c/10^{-6}\text{m} = 300 \text{THz}$).

¹⁰This wavelength which is not visible for human eye and stands in the near infra-red region.

Aberrazioni termiche

Può sembrare del tutto ragionevole supporre che l'effetto dovuto all'assorbimento di meno di 1/4 W sulla superficie di specchi messicci non debba interferire con le prestazioni dell'interferometro. Sebbene ciò possa sorprendere, non è così. Quando uno specchio si scalda si espande, la sua superficie si deforma ed il suo indice di rifrazione cambia, producendo effetti di focalizzazione spuria. Queste deviazioni dal comportamento ideale degli specchi sono più che sufficienti a minacciare la stabilità operativa del rivelatore e devono essere appropriatamente compensati per potenze elevate. Ritourneremo su questo punto quando descriveremo i moderni interferometri evoluti.

La rivelazione di OG con interferometri di Michelson migliorati da cavità FP sembra possibile nonostante tutto. Ma all'inizio di questa discussione abbiamo sollevato altre questioni ed è giunto il momento di affrontarle.

Grandi volumi in ultra alto vuoto

Fluttuazioni della densità dell'aria influenzano la lunghezza del percorso del laser, mentre la polvere o altri contaminanti diffondono la luce del fascio. L'aria sul percorso della luce laser deve essere rimossa, quindi un grande volume di spazio deve essere tenuto sottovuoto, inclusi i bracci lunghi vari km e il volume attorno agli specchi, ciò che rende le camere a vuoto dei rivelatori di OG tra i più grandi volumi di vuoto nel mondo (7000 m³ in Virgo e 10000 m³ in ognuno degli osservatori LIGO, superati solo dal Large Hadron Collider del CERN). Il livello di vuoto richiesto è veramente spinto: qualche unità in 10⁻¹⁰ mbar per l'aria, e uno spettacolare 10⁻¹⁴ per gli idrocarburi. Per raggiungere questo valore così basso, sono stati sviluppati speciali processi metallurgici come il desorbimento di idrogeno a 400°C per la fabbricazione di parti delle camere a vuoto. In aggiunta, per eliminare il vapore acqueo, tutte le parti che compongono il sistema sono state scaldate sottovuoto a 150°C per diversi giorni all'inizio del ciclo di vuoto. Soltanto questo processo richiede più di 1 MW di riscaldamento elettrico per braccio.

Sospensioni ed attenuazione sismica

Thermal lensing

It could be a reasonable guess, that only a 1/4 W heating heavy mirrors would not affect the interferometer performance. Perhaps unexpectedly, this is not the case. When a mirror heats up it expands, its surface is deformed and its index of refraction changes, resulting in spurious lensing effects. These deviations from the ideal behaviour of the mirrors are largely sufficient to prevent the stable operation of the detector and need to be properly compensated for higher power. We will come back on this point when describing today advanced interferometers.

The detection of GWs with the FP boosted Michelson seems to be possible after all. But at the beginning of this discussion we raised other issues that have now to be addressed.

Large Ultra High Vacuum pipes

Fluctuations in air density affect the path length of the laser, while dust or contaminants scatter light out of the beam. Air on the path of the laser light must be removed, therefore a very large volume of space must be kept under vacuum, including the km scale arms and the volume surrounding the mirrors, making the vacuum chambers of GW detectors among the largest ultra-high vacuum volumes in the world (7,000 m³ in Virgo, 10,000 m³ in each LIGO observatory, only surpassed by the Large Hadron Collider at CERN). The requested vacuum level is really demanding: some in the range of 10⁻¹⁰ mbar for air, and a spectacular 10⁻¹⁴ mbar for hydrocarbons. To attain this very low value, special metallurgical processes such as hydrogen desorption at 400 °C have been developed for the fabrication of the vacuum parts. In addition, to eliminate the water vapour, all vacuum parts were heated under vacuum at 150°C for several days at the beginning the vacuum cycle. This process alone needs more than 1 MW of electrical heating power per arm.

Seismic attenuation and suspensions

In un semplice interferometro di Michelson gli specchi sono normalmente montati su sostegni, e non sono in caduta libera. I sostegni sono in contatto con l'ambiente: vibrazioni meccaniche ed acustiche sono trasferite agli specchi. È una comune esperienza, quando si cammina vicino ad un apparato di Michelson, vedere frange chiare e scure spostarsi in maniera casuale all'uscita del rivelatore. Anche in assenza di persone, il moto sismico del terreno è più che sufficiente per rovinare la sensibilità, specialmente a basse frequenze.

Nonostante ciò, gli specchi devono essere sostenuti in qualche modo, e anche posizionati con precisione, perché le cavità necessitano di uno stretto controllo sulla separazione degli specchi entro 10^{-12} m. È possibile sostenerli e soddisfare contemporaneamente la condizione di caduta libera? Se consideriamo la propagazione nella direzione del fascio la risposta è positiva. Caduta libera significa che nessuna forza, tranne la gravità, sta agendo sullo specchio, e se garantiamo che la cavità FP sia libera di traslare lungo l'asse ottico avremo soddisfatto la condizione. Abbiamo bisogno di una maniera furba per sostenere gli specchi contro il campo gravitazionale locale, senza alcuna forza rilevante nella direzione longitudinale. Una sospensione a pendolo libera di oscillare è la soluzione perfetta. I pendoli sono molto morbidi rispetto a piccoli spostamenti orizzontali, applicando trascurabili forze per movimenti di 10^{-18} m, e questo è quello che intendiamo quando affermiamo che gli specchi sono (praticamente) in caduta libera.

Il pendolo è anche un filtro meccanico molto efficiente. Si immagini di tenere in una mano l'estremità di un filo a piombo, e di farla oscillare nella direzione orizzontale: il peso in fondo seguirà stabilmente il moto. Adesso, cominciamo ad accelerare l'oscillazione sempre più velocemente. L'ampiezza dell'oscillazione del peso inizialmente aumenterà fino alla *risonanza* del moto del pendolo. Al di sopra della frequenza di risonanza, il peso rimarrà indietro seguendo il moto nella direzione opposta, con una ampiezza che si riduce velocemente con la frequenza. Come mostra questo semplice esperimento, se un rumore meccanico, dovuto a perturbazioni sismiche o antropiche, muove l'estremità superiore di un pendolo ad una frequenza superiore alla sua

In a simple Michelson, mirrors are usually mounted on supports, not in free fall. The supports are in contact with the environment: mechanical and acoustical vibrations are passed to the mirrors. It is common experience, when walking close to a Michelson setup, to see dark and bright fringes convulsively shift at the detector output. Even in absence of persons, the seismic motion of ground is much more than enough to spoil the sensitivity, especially at low frequencies.

Nonetheless, mirrors need to be supported somehow, and precisely positioned, because the FP cavities require very tight control on the mirror separation to 10^{-12} m. Is it possible to have them supported while meeting the condition of free fall? Definitely yes in the beam direction. Free fall means that no force other than gravity is acting on the mirror, and if we guarantee that the entire FP cavity is free to slide along the optical axis we meet the condition. We therefore need a clever way to support the mirrors against local gravity field, without relevant force in the longitudinal direction. A pendulum suspension free to swing does the trick. Pendula are very "soft" against small horizontal displacements, applying negligible forces for movements of 10^{-18} m, and that is exactly what we mean when we say that mirrors are (practically) in free fall.

A pendulum is also a very effective mechanical filter. Imagine to keep in a hand the tip of a plumb line, and make it slowly oscillate in the horizontal direction: the plumb at the bottom end steadily follows the movement. Now, start accelerating the oscillation faster and faster. The amplitude of the plumb oscillation will initially grow, up to the *resonance* of the pendulum motion. Faster than the resonance frequency, the plumb will fall behind following the movement in the opposite direction, with amplitude dropping very quickly with frequency. As this simple experiment shows, if any mechanical noise (due to seismic or anthropic disturbances) drives the upper end of a pendulum at a frequency higher than its natural frequency, the lower end

naturale frequenza, la risposta dell'estremità inferiore è fortemente attenuata. Gli specchi nei rivelatori di OG sono appesi a catene di sostegno che seguono le caratteristiche di attenuazione dei pendoli: filtri meccanici ad alta prestazione che sono molto morbidi in tutte le direzioni, non solo lungo l'asse ottico. (La flessibilità lungo l'asse ottico permette anche che gli specchi siano tenuti in posizione garantendo la condizione di risonanza nelle cavità FP, tramite l'azione di piccolissime forze attive.) Le prestazioni delle catene di filtro sono impressionanti: sopprimono i moti sismici di quindici ordini di grandezza a 100 Hz. La necessità di attenuazione verticale o trasversale può apparire in contraddizione con l'ipotesi che siamo interessati solamente ai gradi di libertà longitudinali. Tuttavia, i bracci sono così lunghi che la verticale locale è diversa tra una estremità e l'altra dell'interferometro (la terra è rotonda): spostamenti verticali sono quindi accoppiati con quelli orizzontali¹².

Limitazioni fondamentali

Come menzionato sopra, la sensibilità di un rivelatore di OG è limitata dall'ammontare del residuo moto sismico trasmesso agli specchi, che può essere arbitrariamente ridotto. Anche con una attenuazione sismica infinita, la sensibilità è ancora limitata dal rumore termico dello specchio e delle sospensioni, dal rumore Newtoniano, e dai cosiddetti *rumori quantistici*, cioè, *shot noise* e pressione di radiazione. In particolare, la pressione di radiazione e il rumore termico delle sospensioni sono i più importanti a bassa frequenza, il rumore termico causato dalla deposizione dielettrica riflettente degli specchi a frequenze intermedie, mentre lo *shot noise* interviene nella parte alta della banda di frequenza. Le capacità di un osservatorio di OG sono rappresentate da una curva di sensibilità, un grafico che mostra i limiti inferiori di sensibilità all'intensità della OG sull'asse verticale, e la frequenza della OG sull'asse orizzontale. Euristicamente la curva di sensibilità disegnata in questo spazio rappresenta l'intensità del segnale che la OG deve avere per superare la soglia di rivelabili-

response is strongly attenuated. Mirrors in GW detectors are hung to a support chain that follows the attenuation features of pendula: high performance mechanical filters that are very soft in all directions, not only along the optical axis. (Softness along the optical axis also allows the mirrors to be kept in the FP resonance position, by the action of minute active forces). The performance of the filter chain is impressive: they suppress seismic motions by fifteen orders of magnitude at 100 Hz. The need of vertical or transversal attenuation may appear in contradiction with the assumption that we are only interested in the longitudinal degree of freedom. However, arms are so long the local verticality is different from one to the other of the interferometer (Earth is round): vertical displacements are therefore coupled to the horizontal one¹¹.

Fundamental limitations

As mentioned above, the sensitivity of a GW detector is limited by the amount of residual seismic motion passed to the mirrors, which can be reduced arbitrarily. Even with infinitely good seismic attenuation, the sensitivity is still limited by thermal noise of mirror and suspensions, Newtonian noise, and by the so called *quantum noises*, that is, shot noise and radiation pressure. In particular, radiation pressure and suspension thermal noise are mostly relevant at low frequency, mirror coating thermal noise at intermediate frequencies, while shot noise intervenes in the upper part of the frequency band. The capabilities of a gravitational wave observatory are represented by a sensitivity curve - a plot showing the lower sensitivity limit to the gravitational wave strength on the vertical axis, and gravitational wave frequency along the horizontal axis. Heuristically the sensitivity curve plotted in this space represents the strength a gravitational wave signal must have to cross the threshold of detectability. The overall shape of the sensitivity is defined by the sources of noise that gravitational

¹²Poiché il raggio della terra è di circa $R = 6400$ km, gli specchi di Virgo, distanti 3 km, hanno una divergenza angolare $\alpha = (3\text{km})/R$ di circa $4.7 \cdot 10^{-4}$ radianti.

¹¹Since the Earth's radius is roughly $R = 6400$ km, the 3 km distant mirrors of Virgo have a vertical divergence angle $\alpha = (3\text{km})/R$ of about $4.7 \cdot 10^{-4}$ radians

tà. La forma globale della sensibilità è definita dalle sorgenti di rumore ai quali sono sovrapposti i segnali di OG. Per illustrare questi concetti, la tipica curva di sensibilità di un rivelatore di moderna generazione è mostrata nella Figura 6.

wave signals are competing against. To illustrate these concepts, the typical sensitivity curve of an advanced generation detector is shown in figure 6.

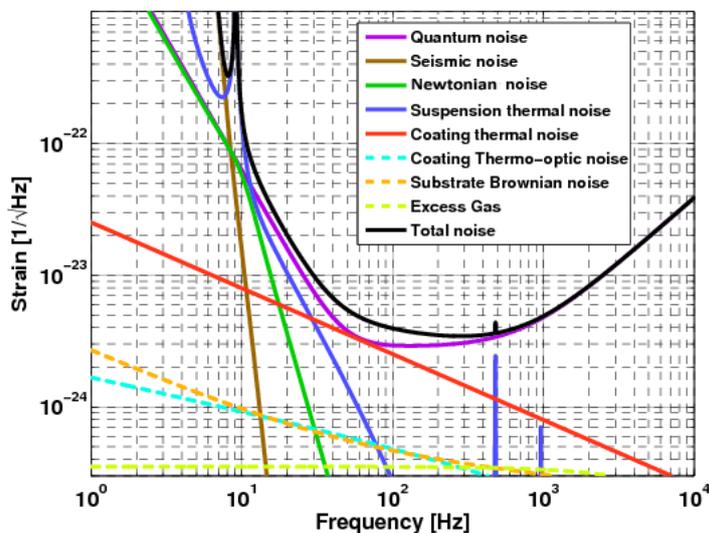


Figura 6: Grafico che mostra la curva di sensibilità per un rivelatore di OG avanzato. Le principali sorgenti di rumore che contribuiscono al rumore totale (linea nera) sono messe in evidenza.
Plot showing the sensitivity curve of an advanced GW detector. The main noise sources contributing to the total noise (black curve) are highlighted.

Un'osservazione accurata dello schema, fa emergere altre sorgenti di rumore. In primo luogo prestiamo attenzione al *rumore di spostamento* della superficie dello specchio, cioè, ad ogni sorgente di rumore di fase dovuto allo spostamento fisico delle superfici riflettenti nelle cavità FB.

Come per la pressione di radiazione, l'effetto è una rumorosa forza longitudinale che influenza direttamente la lunghezza L della cavità, indipendentemente dalla lunghezza ottica dei bracci. Questo significa che il rumore di spostamento diventa grande per un alto grado del mescolamento ϕ , equivalentemente, per un maggior valore della *finesse*. Questo spiega perché non possiamo costruire un rivelatore con bracci corti (dell'ordine del metro) e *finesse* molto alta. Questo renderebbe gli effetti di ogni rumore di spostamento drammaticamente grandi.

Il rumore termico

Anche se la superficie degli specchi sembra ferma, gli atomi che la compongono bollono e si agitano. Questo incessante e turbolento moto è le-

Upon a careful review of the scheme, other sources of limiting noise pop up. Firstly, focus on the mirror surface *displacement noise*: that is, any source of phase noise that is due to a physical displacement of the reflecting surfaces in the FP cavities.

As for radiation pressure, the effect is a noisy longitudinal force directly affecting the length L of the cavity, independent on the optical length of the arms. This means that displacement noise grows larger for a higher degree of folding or, equivalently, for a larger value of the finesse. This explains why we cannot build a detector with short arms (in the order of meters) and very high finesse. It would make the effects of any displacement noise dramatically larger.

The thermal noise

Even if the surface of mirrors seems still, atoms on it are boiling and roiling. This incessant and turbulent motion results in the dynamics of ther-

gato alla dinamica dell'equilibrio termico. Come possiamo misurare luce riflessa con una precisione di 10^{-18} m su una pentola di elettroni caldi? Se il moto degli elettroni fosse completamente scorrelato, la fase media letta dalla luce incidente sarebbe abbastanza pulita, grazie al grande numero di atomi implicato. Tuttavia, da un punto di vista macroscopico, gli atomi agiscono anche collettivamente. Ad esempio, la deformazione di uno specchio che vibra secondo un modo proprio a tamburo del primo ordine è mostrata nella Figura 7. In un vetro perfetto, non dissipativo, questi modi sarebbero completamente indipendenti, e immagazzinerebbero l'intera energia di equipartizione termica. Una dissipazione meccanica finita causa deformazioni dello specchio fuori risonanza. La deformazione della superficie dello specchio entra nel segnale interferometrico, perché cambia la lunghezza percorsa dalla luce riflessa e limita la sensibilità raggiungibile.

mal equilibrium. How can we measure 10^{-18} m precision reflecting light on a pot of hot electrons? If the motion of electrons was completely uncorrelated, the averaged phase read by the impinging light would be quite clean, due to the enormous number of atoms involved. However, from a macroscopic point of view, atoms also act collectively. As an example, the deformation of a mirror under a first-order drum mode is shown in figure 7. In a perfect, non-dissipating glass, these modes would be completely independent, and store the entire thermal equipartition energy. Finite mechanical dissipation causes off-resonance mirror deformation. The deformation of the mirror surface actually enters the interferometer signal, because it changes the length travelled by reflected light and limits the achievable sensitivity.

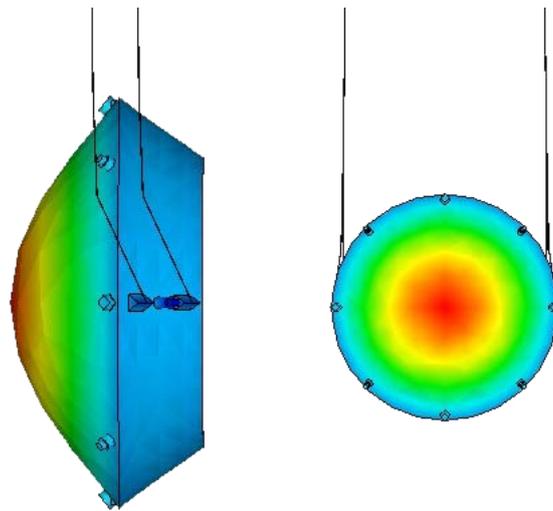


Figura 7: Deformazione relativa ad un modo di vibrazione risonante di uno specchio sospeso. Questo modo particolare è detto a tamburo per la sua forma. L'ammontare dello spostamento lungo l'asse ottico è rappresentato dai colori dal blu al rosso.

Deformed shape of one of the resonance modes of vibration of a suspended mirror. This particular mode is called drum mode due to its shape. The amount of displacement along the optical axis is represented in colours from blue to red.

È possibile calcolare lo spettro di questo rumore *termico* usando un teorema generale originariamente proposto da Callen e Welton [12]. Il *teorema fluttuazione-dissipazione* collega lo spettro di fluttuazioni spontanee all'equilibrio termico ai processi di dissipazione di energia nel sistema. Già Einstein aveva notato, studiando il *moto Browniano*, che il moto apparente dei grani di polline

It is possible to compute the spectrum of this *thermal* noise using a general theorem originally proposed by Callen and Welton [12]. The *fluctuation-dissipation theorem* relates the spectrum of spontaneous fluctuations at thermal equilibrium to energy dissipation processes in the system. It was firstly noticed by Einstein, when studying the *Brownian motion*, that the apparent random

nell'acqua può essere quantitativamente spiegato come dovuto alle continue collisioni casuali con le molecole dell'acqua. Lo stesso processo, cioè collisioni con molecole d'acqua, è la ragione per cui una particella con una certa velocità nell'acqua sente una forza viscosa che smorza il suo moto, quindi dissipa la sua energia. Dissipazione e moto casuale sono strettamente collegati.

Per chiarezza, vediamo questo punto da una prospettiva complementare concentrandoci sullo specchio del rivelatore di OG. Tutte le componenti e i gradi di libertà meccanici, incluso il moto longitudinale della superficie dello specchio, sperimentano continui scambi termici con la riserva termica. Tutti i gradi di libertà trasferiscono continuamente la loro energia di oscillazione nella riserva termica con una potenza di raffreddamento $W_{cooling} = E_{osc}/\tau_{osc}$ dove E_{osc} è il contenuto istantaneo di energia del moto, e τ_{osc} la costante di decadimento del moto, che è determinata dal fattore di qualità del materiale. All'equilibrio termico deve avvenire che, in media, $E_{osc} = KT$, dove K è la costante di Boltzmann e T la temperatura assoluta. Quindi, la potenza di raffreddamento sarà $W_{cooling} = KT/\tau_{osc}$ e la riserva termica restituisce una potenza di riscaldamento uguale ma fluttuante $W_{heating} = W_{cooling} = E_{osc}/\tau_{osc}$. Come conseguenza, il fattore di qualità usato per costruire lo specchio determina il rumore termico dello specchio stesso.

Come conseguenza dell'importanza del rumore termico, i materiali giocano un ruolo determinante nella progettazione degli specchi per i rivelatori di OG. A temperatura ambiente, la silice fusa di elevata purezza mostra un livello di dissipazione impressionantemente basso; è interessante che questo dipenda da caratteristiche molto specifiche di questo tipo di vetri, mentre altri materiali amorfi mostrano una perdita meccanica molto più elevata. Per questa ragione gli specchi negli attuali interferometri sono realizzati con silice fusa.

Ne risulta che la dissipazione nel rivestimento riflettente è attualmente dominante. Rivestimenti dielettrici sono fatti da strati alternati di materiale vetroso con alto e basso indice ottico. Il materiale ad alto indice di rifrazione (TiO_2 -drogato Ta_2O_5) nel rivestimento a multistrato ha una grande dissipazione meccanica e genera il contributo dominante al rumore termico. Il

motion of a pollen grain in water can be quantitatively explained as due to the continuous random collisions with water molecules. The same process, namely collisions with water molecules, is the reason why a particle with a given velocity in water feels a viscous force that damps its motion, therefore dissipating its energy. Dissipation and random motion are closely related.

To the sake of clarity, let's see this from a complementary perspective focussing on a GW detector mirror. All components and mechanical degrees of freedom, including the mirror surface longitudinal motion, experience continuous thermal exchanges with the thermal bath. All degrees of freedom continuously dump their oscillation energy into the thermal bath with a cooling power. $W_{cooling} = E_{osc}/\tau_{osc}$ where E_{osc} is the instantaneous energy content of the movement, and τ_{osc} the decay constant of the movement, which is determined by the material quality factor. At thermal equilibrium it must be that, in average, $E_{osc} = KT$, where K is the Boltzmann constant and T the absolute temperature. Therefore the cooling power will be $W_{cooling} = KT/\tau_{osc}$ and the thermal bath, returns an equal but random fluctuating heating power, $W_{heating} = W_{cooling} = E_{osc}/\tau_{osc}$. As a consequence, the quality factor of the materials used to manufacture the mirror determine the mirror thermal noise.

As a consequence of the relevance of thermal noise, materials play a major role in designing mirrors for GW detectors. At room temperature, very pure fused silica shows an impressively low level of dissipation; interestingly, this depends on very specific features of this kind of glass, while other amorphous materials show much stronger mechanical loss. This is the reason why mirrors in present interferometers are made of fused silica.

It turns out that dissipation in the reflecting coating is actually dominant. Dielectric coatings are made by stacks of alternate layers of glassy materials with high and low optical index. The high refraction index material (TiO_2 -doped Ta_2O_5) in the multilayered coatings has a large mechanical dissipation and gives rise to the dominant thermal noise contribution. Thermal noise

rumore termico da rivestimento è un fattore limitante della sensibilità proprio al centro della banda di rivelazione., tra circa 100 Hz fino 1 kHz. Uno dei più attesi sviluppi nello sforzo di aumentare la portata dei rivelatori di OG è la ricerca di rivestimenti con basse perdite meccaniche.

Anche il rumore termico associato alle sospensioni dello specchio è importante: nell'ultimo stadio della sospensione, gli specchi sono appesi a fibre di silice molto sottili chimicamente saldate al corpo dello specchio in una disposizione quasi-monolitica. Ognuno di questi fili di vetro spesso 100 μm può sostenere un peso di diverse decine di chilogrammi senza rompersi. Se trattato convenientemente, il vetro di silice fusa può essere più resistente dell'acciaio.

Rumore Newtoniano

Forse il rumore di spostamento più subdolo è quello dovuto al movimento continuo delle masse sulla crosta terrestre, che altera il campo gravitazionale. Onde sismiche cambiano la densità e la posizione delle rocce attorno agli specchi e causano piccole fluttuazioni dell'accelerazione di gravità g indistinguibili da una OG. (Si potrebbe pensare che la variazione di g sia una OG. Non è così; un'onda esiste solo lontano dalla sua sorgente ed indipendentemente da essa. Questo non è valido per gli effetti che stiamo considerando qui). Il rumore che ne risulta è chiamato *rumore Newtoniano*. Diventa più grande del segnale di OG di origine cosmica sotto i 10 Hz, quindi entra nella curva di sensibilità come limite alla rivelazione.

Dopo aver presentato una rassegna del bilancio di rumore in un rivelatore realistico di OG, dovremmo essere convinti che un rivelatore di questo tipo può essere costruito, nonostante tutto. Prima di riuscire a costruire un rivelatore completo e funzionante i ricercatori hanno superato una foresta di altri minacciosi problemi tecnici che non sono presentati qui. Quando si è certi che raggiungere questo obiettivo spettacolare sia possibile, cosa importano le difficoltà tecniche?

I rivelatori Virgo and LIGO

Il lavoro di Weiss ha posto le basi per decenni di sviluppi tecnologici necessari per implemen-

from coatings is a limiting factor to the sensitivity right at the centre of the detection band, between roughly 100 Hz up to 1 kHz. One of the hottest developments in the effort to enhance the reach of GW detectors is the search for coatings with low mechanical losses.

Thermal noise from the mirror suspensions is also relevant: in the last stage of suspension, mirrors are hung to very thin fused silica fibres chemically bonded to the mirror bulk in a quasi-monolithic arrangement. Each of these 100 μm thick glass wires is able to sustain a weight of several tens of kilograms without breaking. If conveniently treated, fused silica glass can be stronger than steel!

Newtonian noise

Perhaps the most sneaky source of displacement noise is because of steadily moving mass in Earth's crust, which alter the local gravitational field. Seismic waves change the density and position of rock around the suspended test masses and cause small fluctuations of the gravitational acceleration g , indistinguishable from GWs. (One might think that this variation of g is a GW. This is not the case; a wave exists only far from its source, and independent of it. This is of course not valid for the attraction effects we are considering here.) The resulting noise is called *Newtonian noise*. It gets stronger than the GW signals of cosmic origin somewhere below 10 Hz, therefore entering the sensitivity curve as a detection limit.

After reviewing the noise budget in a real GW detector, we might be convinced that such a detector can be built, after all. On the path toward a complete and working detector, people had to overcome a forest of other threatening technical issues, that are not discussed here. Having established the possibility to reach such a spectacular goal, who cares about technical difficulties?

Virgo and LIGO detectors

The Weiss report set the stage for decades of technology developments needed to implement kilo-

tare interferometri su scala chilometrica. Alla fine degli anni '80, era diventato chiaro che molti degli ostacoli tecnologici potevano essere superati, e furono approvati progetti per costruire i primi osservatori di onde gravitazionali. Richard A. Isaacson per gli Stati Uniti e Patrick Fleury sul versante europeo [13] sono stati fondamentali per convincere le agenzie di finanziamento a sostenere questo audace tentativo. La costruzione dei due siti LIGO è iniziata a Hanford, Washington e Livingston, in Louisiana, nel 1994 – 95. Nel 1996 iniziò anche la costruzione dell'Interferometro Virgo vicino a Pisa.

Limitazioni presenti e future

Riassumiamo le fonti di rumore che limitano la sensibilità di questa classe di rivelatori (si veda la figura 6 come riferimento). Alle frequenze più basse (inferiori a circa 50 Hz) le principali fonti di rumore sono la pressione di radiazione, il rumore termico delle sospensioni e il rumore newtoniano. Il rumore sismico residuo dovuto ai movimenti del terreno, non è un rumore fondamentale, esso può essere filtrato, come - vedremo - viene fatto in Virgo. La pressione di radiazione può essere mitigata con masse più grandi, potenza ottica inferiore e metodi di compressione del rumore quantistico. Il rumore termico della sospensione può essere mitigato con fibre di sospensione più lunghe o operando a temperature criogeniche.

Alle frequenze intermedie (fino a circa 200 Hz) il rumore limite è il rumore termico dello specchio, derivante dalla dissipazione meccanica. Risulta che la componente dominante proviene dai rivestimenti dielettrici. Questa può essere mitigata sviluppando materiali di rivestimento a basse perdite meccaniche. Anche in questo caso operare a temperature criogeniche può essere utile, ma il guadagno è limitato e la criogenia non tollera la grande potenza ottica necessaria per la sensibilità della lunghezza ottica ad alta frequenza.

Alle frequenze più alte, la sensibilità è dominata dallo *shot noise*, un rumore associato alle limitazioni naturali che caratterizzano la statistica della luce laser utilizzata per effettuare la misura. Inoltre, ci sono molte fonti "tecniche" di rumore -principalmente rumore di controllo, luce diffusa,

meter scale interferometers. By the late 1980s, it had become clear that many of the technological hurdles could be overcome, and projects to build the first gravitational wave observatories were approved. Richard A. Isaacson on the US side and Patrick Fleury on the European side [13] were instrumental to convince funding agencies to support this daring endeavour. Construction on the two LIGO sites began in Hanford, Washington and Livingston, Louisiana in 1994-95. In 1996, the construction of the Virgo Interferometer also commenced near Pisa.

Present and future limitations

Let us summarize the sources of noise that limit the sensitivity of this class of detectors (see for reference figure 6). At the lowest frequencies (below about 50 Hz) the primary fundamental noise sources are radiation pressure, suspension thermal noise and Newtonian noise. Residual seismic noise from ground motion is not a fundamental noise, it can be filtered out with overkill, as - we will see - it is done in Virgo. Radiation pressure can be mitigated with larger masses, lower optical power and quantum noise squeezing tricks. Suspension thermal noise can be mitigated with longer suspension fibers, or operating at cryogenic temperatures.

At intermediate frequencies (up to about 200 Hz) the limiting noise is mirror thermal noise, deriving from mechanical dissipation. It turns out that the dominant component is from the dielectric coatings. It can be mitigated by developing lower mechanical loss coating materials. Operating at cryogenic temperatures may also be useful, but the gain is slow and cryogenics does not tolerate the large optical power needed for optical length sensitivity at high frequency.

At the highest frequencies, the sensitivity is dominated by shot noise, a noise associated with the natural limitations that characterize the statistics of the laser light used to make the measurement. In addition, there are many "technical" noise sources, mainly from control noise, scattered light, laser noise, internal resonances, residual seismic noise and beam jitters, which can in principle be overcome, but, if not eliminated, dominate the sensitivity curve. Fundamental

rumore laser, risonanze interne, rumore sismico residuo e tremolio del fascio- che possono essere in linea di principio superate, ma, se non eliminate, dominano la curva di sensibilità. Il rumore di fondo e quello tecnico si combinano per formare un'ampia curva di sensibilità a forma di ampia vallata che sale ripidamente sotto i 30 Hertz e oltre i 200 Hz ed è più profonda, più sensibile, tra 100 e 200 hertz.

Rivelatori iniziali

LIGO e Virgo sono stati letteralmente i primi strumenti scientifici del loro genere. La sensibilità ai piccoli cambiamenti di lunghezza ottenuti da questi strumenti era eccelsa, di gran lunga superiore alle misurazioni della distanza più precise mai fatte prima della costruzione dei rivelatori di OG.

Conoscendo le difficoltà da superare per raggiungere la sensibilità attesa, è stato deciso che sia LIGO che Virgo avrebbero esordito con una configurazione "iniziale" per esplorare le potenzialità delle soluzioni tecnologiche.

La costruzione iniziale di LIGO è stata completata e le operazioni scientifiche sono state condotte dal 2002 al 2010. Le operazioni su Virgo sono state condotte tra il 2007 ed il 2011. Le immagini dei due rivelatori LIGO e Virgo sono mostrate nella figura 8.

Gli interferometri iniziali sono stati utilizzati per condurre ricerche preliminari di astrofisica. Sia LIGO che Virgo erano in grado di rilevare le onde gravitazionali nelle loro configurazioni iniziali, ma solo a una distanza limitata nell'Universo. All'interno del volume esplorato, il tasso di eventi di onde gravitazionali era atteso essere molto basso e, prevedibilmente, gli osservatori non hanno registrato nessuna rivelazione diretta di OG. Sebbene non siano state ottenute osservazioni dirette è stato possibile dedurre nuovi limiti rigorosi sul numero e l'intensità delle varie sorgenti di onde gravitazionali.

Rivelatori avanzati

Dopo aver identificato e compreso le più insidiose sorgenti di rumore, sono state progettate tecniche di mitigazione ed i rivelatori sono passati ad una configurazione migliorata, sufficientemente sensibile per una prima rivelazione. Per poter

and technical noise combine to make a broad, bucket-shaped sensitivity curve that climbs steeply below 30 hertz and above 200 hertz and is deepest, most sensitive, between 100 and 200 Hertz.

Initial detectors

LIGO and Virgo were literally the first scientific instruments of their kind. The sensitivity to small length changes obtained by these instruments was exquisite, far in excess of the most precise distance measurements ever made before GW detector construction.

Knowing the challenges of reaching the target sensitivity, it was decided that both LIGO and Virgo would begin with an "initial" design to explore the noise challenges.

Initial LIGO construction was completed and science operations were carried out from 2002 to 2010. Virgo science operations were carried out between 2007 and 2011. Pictures of the two LIGO detectors and of Virgo are shown in figure 8.

The initial interferometers were used to conduct preliminary astrophysical searches. Both LIGO and Virgo were capable of detecting gravitational waves in their initial configurations, but only to a limited distance in the Universe. Within the volume surveyed, the rate of gravitational wave events was expected to be very low and, predictably, the observatories were not successful to achieve first detection of gravitational waves. While no direct detections were made, new stringent limits on the number and strength of various gravitational wave sources were deduced.

Advanced detectors

After identifying and understanding the worst noise sources, mitigation techniques were designed, and the detectors upgraded to an improved configuration that would be sufficiently sensitive for detection. In order to make guar-



Figura 8: Immagini aeree dei rivelatori avanzati di OG: Virgo (Cascina, Pisa, Italy), LIGO H1 (Hanford, Washington, US), LIGO L1 (Livingston, Louisiana, US).

Pictures of the landscape around the advanced GW detectors. From top to bottom: Virgo (Cascina, Pisa, Italy), LIGO H1 (Hanford, Washington, US), LIGO L1 (Livingston, Louisiana, US).

rivelare con ragionevole certezza delle OG, al termine di una prima fase di osservazione scientifica, gli strumenti sono stati spenti per essere potenziati attraverso un'opera di migliorata durata anni, verso le cosiddette configurazioni avanzate. Con una sensibilità dieci volte maggiore, i rivelatori avanzati potevano esplorare distanze molto più lontane nell'Universo, coprendo un volume mille volte più grande. Anche eventi di onde gravitazionali rari si verificano abbastanza spesso in un volume così esteso, consentendo una potenziale rivelazione già entro poche settimane di

anteed detections, after their initial science runs the instruments were taken offline after their initial science runs and underwent a multi-year upgrade towards the so called "advanced" configurations. With ten times greater sensitivity, they could probe to much farther distances in the Universe, covering a volume a thousand times larger. Even rare gravitational wave events happen often enough in the larger volume to be detected within weeks.

The upgrade process involved the re-thinking of the optical layout of the detectors, the replace-

funzionamento. Il processo di aggiornamento ha comportato il ripensamento della configurazione ottica dei rivelatori, la sostituzione dell'ottica principale, un aumento della potenza di ingresso e diverse specifiche di progettazione, mentre la maggior parte delle infrastrutture sono state mantenute.

La rete di rilevazione di OG

La stretta collaborazione inaugurata dai primi interferometri è proseguita anche con le versioni avanzate. Come nel caso dell'udito umano, il ritardo nel tempo di arrivo tra i ricevitori consente l'identificazione della direzione del segnale in ingresso. Con molti rivelatori di OG posizionati a grandi distanze relative su tutta la terra, la posizione della sorgente nel cielo può essere trovata con un errore via via minore. La direzionalità è un requisito per identificare la controparte elettromagnetica di un evento. L'avvento di una rete di rivelatori avanzati ha reso possibile la cosiddetta *astronomia multi-messaggera*.

Advanced Virgo

Il progetto Advanced Virgo (AdV [14]) è stato finanziato nel 2009. Come in LIGO, l'obiettivo era migliorare la sensibilità del rivelatore interferometrico di un fattore dieci. Per ridurre l'impatto dello *shot noise*, AdV è stato progettato per funzionare con una potenza laser in ingresso di 125 W, raggiungendo 700 kW di potenza immagazzinata nelle cavità FP. Quest'ultimo valore, 35 volte superiore a quello originale di Virgo, è notevole. I comuni laser a CO₂ da 1 kW di potenza sono sufficienti per il taglio e la saldatura dell'acciaio nell'industria. Con un'elevata potenza circolante nelle cavità, anche gli specchi a bassissimo assorbimento utilizzati vengono notevolmente riscaldati e deformati. AdV è per costruzione particolarmente sensibile a queste deviazioni; il controllo della condizione di risonanza dell'interferometro (anche chiamato *locking*) viene immediatamente perso se la potenza di ingresso viene aumentata senza correzione degli effetti termici. AdV è dotato di un sistema di compensazione termica, ideato per correggere le distorsioni indotte così da recuperare il comportamento non aberrato del rivelatore.

ment of the main optics, an enhancement of input power and several design features, while most of the infrastructures were maintained.

The GW detection network

The upgraded interferometers continued a phase of close collaboration. There are strong advantages in operating a network of interferometers. As in the case of human hearing, the lag in the arrival time between receivers allows identification of the direction of the incoming signal. With many GW detectors, widely spread across the Earth, the position of the source in the sky can be found with diminishing error. Directionality is a requirement to identify the electromagnetic counterpart of an event. The advent of a network of advanced detectors made the so called *multi-messenger astronomy* possible.

Advanced Virgo

The Advanced Virgo project (AdV [14]) was funded in 2009. Like in LIGO the aim was to improve the sensitivity of the interferometric detector by a factor of ten. To reduce the impact of shot noise, AdV was designed to work with a 125 W input laser power, reaching 700 kW of stored power in the FP cavities. The latter value, 35 times higher than in the original Virgo, is remarkable. Common CO₂ lasers of 1 kW power are sufficient for cutting and welding in the steel in industry. With high circulating power in the cavities, even the extraordinarily clear mirrors used are significantly heated up and deformed. AdV is by design particularly sensible to these deviations; the control of the interferometer resonant condition (also called *locking*) is immediately lost if the input power is increased without correction of the thermal effects. AdV is equipped with a thermal compensation system, devised to correct induced distortions and to recover the pristine behaviour of the detector.

Il sistema di compensazione termica

I sensori per la mappatura di fase installati in AdV sono del tipo cosiddetto *Hartmann*: sfruttano le proprietà diffrattive della luce coerente per ricostruire la distorsione del fronte d'onda indotta dalle aberrazioni nel nucleo centrale del sistema ottico.

La distorsione termica così rilevata viene corretta proiettando un profilo di riscaldamento di compensazione su una finestra trasparente ausiliaria. La distorsione indotta nel fronte d'onda si somma ed annulla l'aberrazione termica. Il profilo di riscaldamento è stato creato utilizzando un potente laser da 50 W CO₂, con lunghezza d'onda di 10,6 μm . Se si pone un mattone sul percorso del fascio su di esso appare un'intensa macchia bianca luminosa in corrispondenza della quale il materiale viene vetrificato, fuso o evaporato fino a quando il foro non attraversa il mattone!

La deformazione della superficie dello specchio dovuta all'espansione termica non può essere compensata con il laser. Un riscaldatore anulare è posizionato attorno allo specchio, vicino al retro, e grazie al suo impiego è possibile riportare il suo raggio di curvatura al valore originario.

Queste tecniche di ottica adattativa consentono al rivelatore di essere mantenuto nelle condizioni di lavoro ottimali man mano che la potenza aumenta, rendendo così AdV un interferometro *libero da aberrazioni*.

Ottica

Sono necessari specchi più pesanti per ridurre l'effetto della pressione di radiazione per maggiori potenze dei laser. Gli specchi principali in AdV sono due volte più spessi (20 cm) di quelli originali di Virgo, e quindi possiedono una massa doppia (42 Kg).

Il materiale utilizzato per realizzare gli specchi è un tipo straordinariamente puro di silice fusa, con assorbimento ottico molto basso (0,2 parti per milione per centimetro). Ciò significa che, anche dopo aver superato un chilometro di questo materiale, un fascio luminoso si attenuerebbe solo del due percento! Gli specchi della cavità sono i componenti principali del rivelatore: il loro processo di produzione è complesso, altamente tecnologico e molto costoso. Per sod-

The thermal compensation system

Position sensitive phase sensors installed in AdV are of the so called *Hartmann* type: they make use of the diffractive properties of coherent light to reconstruct the distortion in the wavefront induced by aberrations in the core optics.

The thus detected thermal distortion is corrected by projecting a compensating heating pattern on an auxiliary transparent window. The induced wavefront distortion adds up and nulls the thermal aberration. This pattern is created using a powerful 50 W CO₂ laser, with wavelength 10.6 μm . A brick placed on the beam path glows with a bright white spot, is vitrified, melted or evaporated until the hole goes through the brick!

The deformation of the mirror surface due to thermal expansion cannot be compensated with the laser. An annular heater is placed around the mirror, close to the back and the radius of curvature is restored to the pristine value.

These adaptive optics techniques allow the detector to be kept in the optimal working condition as power is ramped up, thus making AdV an *aberration free* interferometer.

Optics

Heavier mirrors are needed to reduce the effect of radiation pressure at higher laser power. The main mirrors in AdV are twice as thick (20 cm) as the original Virgo, and therefore possess double mass (42 kg).

The material used to make the mirrors is an extraordinarily pure type of fused silica, featuring very low optical absorption (0.2 parts per million per centimeter). That means, even after passing a kilometer of this material, the beam would be attenuated by only two percent! The cavity mirrors are the core components of the detector: their production process is complex, highly technological and very expensive. To comply with very stringent requirements on flatness and micro-roughness, the surface of the mirrors

disfare requisiti molto severi in termini di planarità e microrugosità, la superficie degli specchi è super-lucidata a una deviazione media dalla forma ideale di 0,5 nanometri su una regione larga 15 cm. Ciò corrisponde ad un paio di atomi di planarità o, in altre parole, allo spessore di un capello umano su tutta l'area della città di Roma! Un'immagine di uno specchio sospeso è presentata nella figura 9.

is super-polished to an average deviation from ideal shape of 0.5 nanometers over a region 15 cm wide. This corresponds to a couple of atom flatness, or the thickness of a human hair over the whole area of the city of Rome! A picture of a suspended mirror is presented in figure 9.

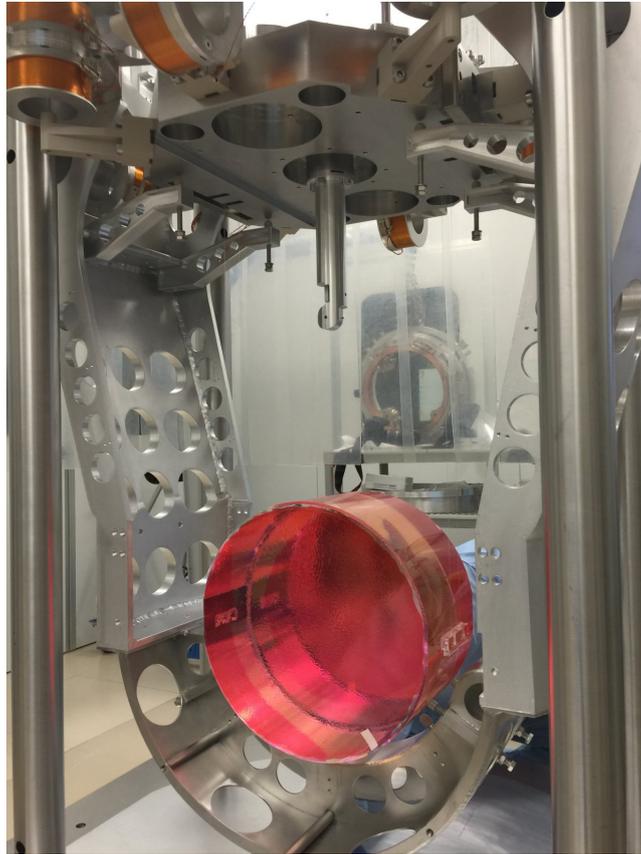


Figura 9: Immagine di uno degli specchi da 42 Kg di Advanced Virgo, sospeso da quattro sottili fili di silice. La superficie dello specchio è protetta dai contaminanti dell'aria da un film di materiale polimerico viola.
Picture of one of the 42 kg mirrors of Advanced Virgo, suspended to the payload by four thin silica wires. The mirror surface is protected from air contaminants by a film of polymeric purple material.

La sospensione degli specchi

Gli specchi sono sospesi con quattro fili di silice fusa, in una sospensione quasi monolitica. Questo primo stadio è supportato da una catena di elementi meccanici in grado di filtrare i disturbi sismici, chiamata *super-attenuatore*, che è stata sviluppata ed installata nel primo rivelatore Virgo. Il super-attenuatore (figura 10) consiste in una sequenza di cinque pendoli e molle verticali a bassa frequenza molto sofisticate che

The suspension of mirrors

Mirrors are suspended with four fused silica wires, in a quasi-monolithic suspension. This first stage is supported by a chain of mechanical elements able to filter out seismic disturbances, called *superattenuator*, that was developed and installed in the first Virgo detector. The superattenuator (figure 10) consists in a sequence of five pendula and very sophisticated low-frequency vertical springs that reject seismic noise in all the

attenuano il rumore sismico in tutti i gradi di libertà. Poiché l'effetto di filtraggio è presente solo al di sopra della risonanza, la lunghezza di ciascun pendolo è di circa un metro, per ottenere una frequenza di risonanza di 0,5 Hz. Per avere una frequenza di risonanza verticale corrispondente, la rigidità delle molle viene ridotta usando magneti *anti-molle*, una disposizione repulsiva di magneti che fornisce una forza proporzionale allo spostamento dalla posizione di equilibrio. Il super-attenuatore di Virgo è stato talmente performante che non ha richiesto alcun miglioramento significativo per AdV.

degrees of freedom. Since the filtering effect is only present above the resonance, the length of each pendulum is about a meter, to obtain a resonance frequency of 0.5 Hz. In order to have a matching vertical resonant frequency, the spring stiffness is reduced using magnetic *anti-springs*, a repulsive arrangement of magnets that provides a force proportional to the displacement from the equilibrium position. The superattenuator of Virgo was so well performing that required no significant improvement for AdV.

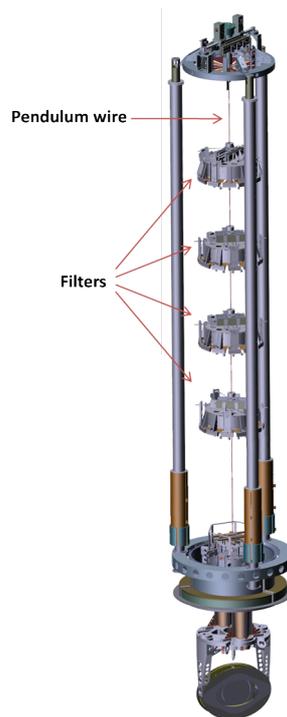


Figura 10: Schema del super-attenuatore Advanced Virgo: i filtri con le lame per la soppressione del movimento verticale sono evidenziati. La serie di pendoli è appesa ad un'alta piattaforma, sostenuta da tre gambe collegate a terra da giunti elastici (pendolo invertito)

Sketch of the Advanced Virgo superattenuator: filters with blades for the suppression of vertical motion are highlighted. The series of pendula is hanging from a tall platform, supported by three legs connected to the ground by elastic joints (inverted pendulum).

Altre caratteristiche dei rivelatori avanzati

Una nuova cavità risonante verrà aggiunta alla configurazione dei rivelatori avanzati, la cavità *di riciclo del segnale*. Uno specchio posto subito dopo la ricombinazione all'uscita dal separatore del fascio crea una cavità FP aggiuntiva per la quale l'intero interferometro funge da altro specchio.

Other features of advanced detectors

A brand new resonant cavity will be added to the layout of advanced detectors, the *signal recycling* cavity. A mirror placed just after the recombination at the beam splitter creates an additional FP cavity with the entire interferometer as the other mirror. This cavity is used to enhance the sensitivity of the detector at a given frequency (at the

Questa cavità viene utilizzata per migliorare la sensibilità del rivelatore ad una determinata frequenza (al prezzo di un peggioramento della sensibilità altrove) per la ricerca di segnali specifici con frequenza prevista nota.

Una nuova tecnica per mitigare il rumore quantistico è stata sviluppata per rivelatori avanzati: la *luce compressa*. Il campo elettromagnetico in fisica quantistica ha uno stato di vuoto che non corrisponde a energia nulla. Come conseguenza del principio di Heisenberg, le fluttuazioni sono sempre presenti e normalmente influenzano allo stesso modo le due quadrature del campo (vale a dire, ampiezza e fase). Il principio di Heisenberg si applica solo al prodotto delle quadrature. Come Carlton M. Caves ha suggerito [15] negli anni '80, le fluttuazioni in una quadratura possono essere ridotte senza conflitto con il principio di Heisenberg, se la quadratura coniugata è lasciata libera di fluttuare di una quantità maggiore. Questo stato è chiamato *vuoto compresso*. Il rumore quantico in un rivelatore OG può essere ridotto usando la luce compressa. Nel caso dell'interferometro i due effetti coniugati sono lo *shot noise* e la pressione di radiazione. Il rumore di uno peggiorerà mentre l'altro migliorerà. Fortunatamente, lo *shot noise* e la pressione di radiazione influiscono sulla misura a diverse frequenze ed il vuoto compresso può essere reso dipendente dalla frequenza.

Il vuoto compresso è una tecnologia sperimentale all'avanguardia. La prima prova di stati compressi di fasci di luce risale al 1985 (R. E. Slusher e collaboratori). I rivelatori avanzati ora stanno installando la luce "semplice" compressa per migliorare la sensibilità alle alte frequenze. Le tecniche per preparare la compressione *dipendente dalla frequenza* sono in fase di sviluppo per ottenere una riduzione del rumore quantico nell'intera banda di rilevazione.

I rivelatori avanzati hanno iniziato l'attività in una configurazione intermedia, con una sensibilità significativamente migliorata, ma non ancora a livello di progettazione. Periodi di sperimentazione scientifica si alternano con interventi di miglioramento della sensibilità. Mentre scriviamo, sia Advanced Virgo che Advanced LIGO sono in fase di miglioramento in vista della prossima fase di osservazione congiunta prevista per i primi mesi del 2019. La sensibilità è stata suffi-

price of worsening the sensitivity elsewhere) for search of specific signals with known expected frequency.

A novel technique to mitigate quantum noise was developed for advanced detectors, *squeezed light*. The electromagnetic field in quantum physics has a vacuum state that does not correspond to zero energy. As a consequence of the Heisenberg's principle, fluctuations are always present and normally affect in the same way the two quadratures of the field (namely, amplitude and phase). Heisenberg's principle only applies to the product of the quadratures. As Carlton M. Caves suggested [15] in the 80's, the fluctuations in one quadrature can be reduced without conflict with the Heisenberg's principle, if the conjugate quadrature is left free to fluctuate by a larger amount. This state is called *squeezed vacuum*. The quantum noise in a GW detector can be reduced making use of squeezed light. In the interferometer case the two conjugate effects are shot noise and radiation pressure. The noise of one will get worse while the other is improved. Happily shot noise and radiation pressure affect the measurement at different frequencies and squeezing can be frequency-dependent.

Squeezed vacuum is a cutting edge experimental technology. The first evidence of squeezed states of light tracks back to 1985 (R. E. Slusher and co-workers). Advanced detectors are now installing "simple" squeezed light to improve the high frequency sensitivity. Techniques to prepare *frequency-dependent* squeezing are under development to get an reduction of quantum noise in the entire detection band.

Advanced detectors started activity in an intermediate configuration, with significantly improved sensitivity, but still not at the design level. Performance is continuously upgraded: science runs follow periods of commissioning leading to steps of performance. As we write, both Advanced Virgo and Advanced LIGO are in a commissioning phase with the next joint observing run foreseen for the first months of 2019. The sensitivity was sufficient to enter the era of GW detection on September 14th, 2015: the detection

ciente a rendere possibile l'era di rivelazione di OG, iniziata il 14 Settembre, 2015: l'individuazione di una coppia di buchi neri che si fondono ha segnato l'alba di una nuova era eccitante e rivoluzionaria.

Dall'osservazione all'astronomia e all'astrofisica delle onde gravitazionali.

Nel settembre 2015, entrambi i siti di Advanced LIGO, recentemente potenziati, hanno iniziato la presa dati operando a circa due volte e mezzo la sensibilità iniziale di LIGO.

Inaspettatamente, alla fine del ciclo di ingegnerizzazione, appena prima che gli strumenti venissero portati in modalità di osservazione, nei dati è apparso un segnale chiaro e non ambiguo.

Per la maggior parte del tempo i rivelatori operano in modalità automatica, registrando e monitorando il flusso di dati e con i segnali e contrassegnando i più interessanti per una ulteriore revisione da parte degli operatori. L'intero set di dati viene poi passato attraverso un pettine a denti fini, dove i filtri automatici rilevano eventi importanti e li portano all'attenzione immediata della collaborazione LIGO-Virgo.

Alle 09 : 50 : 45 UTC del 14 settembre 2015, un forte segnale transiente è stato registrato nel rivelatore LIGO che opera a Livingstone, e 7 millisecondi dopo, nel rivelatore di Hanford (figura 11). Il primo a rendersi conto che il segnale poteva corrispondere ad un reale evento astrofisico era stato registrato fu il ricercatore post-doc Marco Drago, presso l'Albert Einstein Institute di Hannover. Egli ha ricevuto una notifica via email dal sistema informatico solo tre minuti dopo che l'evento era stato registrato e, nel giro di un'ora, dopo aver effettuato alcuni controlli iniziali per accertarsi che nulla fosse sbagliato, ha inviato via email la notizia all'intera collaborazione scientifica LIGO-Virgo.

Lo schema di denominazione per gli eventi di onde gravitazionali è il codice letterale GW seguito da un numero di sei cifre per la data (anno, mese, giorno); il nome del primo evento è quindi GW150914. La sorgente del segnale erano le orbite finali dello spiraleggiamento, seguito dalla fusione, di due buchi neri, situati a 400 Megapar-

of a pair of merging black holes signed the dawn of a new exciting and revolutionary era.

From observation to gravitational wave astronomy and astrophysics.

In September 2015, both sites in the newly upgraded Advanced LIGO went online operating at roughly two-and-a-half the initial LIGO sensitivity. Unexpectedly, at the end of the engineering run, just before the instruments were turned into observation mode, a clear and unambiguous signal showed up in the data.

For most of the time the detectors operate on automatic mode, logging and monitoring the data stream for signals that are flagged for humans review. The entire data set is later passed through a fine toothed comb, but automated filters detect strong events and bring them to the immediate attention of the LIGO-Virgo collaboration.

At 09 : 50 : 45 UTC on 14 September, 2015, a strong transient signal was recorded in the Livingston LIGO detector, and 7 milliseconds later, in the Hanford detector (figure 11). The first person to recognise that a possible astrophysical event had been logged was postdoctoral scholar Marco Drago, at the Albert Einstein Institute in Hannover. He received an email notice from the computer system just three minutes after the event was logged, and within an hour, after doing some initial due diligence to ensure nothing was amiss, emailed the LIGO-Virgo Scientific Collaboration.

The naming scheme for gravitational wave events is the letter code GW followed by a six digit number for the date (year, month, day); the first event's name thus is GW150914. The source was the final orbit of the inspiral, followed by the merger, of two black holes, located 400 Megaparsecs, about 1 giga-light-year, from Earth. The

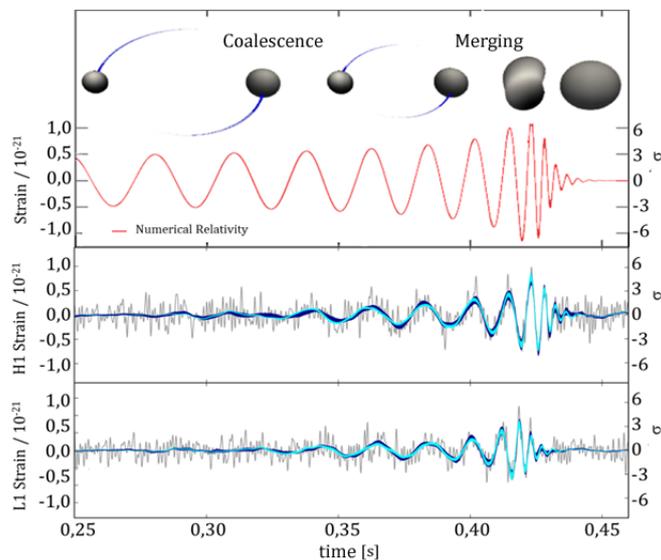


Figura 11: *GW150914 visto da LIGO H1 e Ligo L1, confrontato con il modello calcolato numericamente in Relatività Generale. I dati grezzi degli interferometri sono stati filtrati in banda e il rumore delle linee di frequenza note è stato rimosso: i segnali sono piuttosto evidenti dopo il filtraggio.*
GW150914 as seen from LIGO H1 and Ligo L1, compared with the template numerically computed in General Relativity. Raw data from the interferometers have been band filtered and noise from known frequency lines was removed: the signals are pretty evident after the filtering.

sec, circa 1 giga-anno-luce dalla terra. Le masse dei due buchi neri originali erano 29 masse solari e 36 masse solari; questi si sono fusi per formare un nuovo buco nero più grande, con una massa di 62 masse solari. L'aritmetica di base mostra che mancano 3 masse solari tra i buchi neri iniziali e il resto finale - questa massa mancante rappresenta l'energia totale irradiata sotto forma di onde gravitazionali, quasi interamente negli ultimi 0,2 secondi dello spiraleggiamento. A titolo di paragone, il nostro sole irradia circa l'1% della sua massa sotto forma di calore e luce durante i suoi 10 miliardi di anni di vita. In quel breve intervallo di tempo di 0,2 secondi, anche in assenza di emissione luminosa, l'emissione del GW150914 era energeticamente più "luminosa" dell'intero universo.

L'evento è stato importante per molte ragioni. È stato il primo rilevamento diretto delle onde gravitazionali che impiegava uno strumento progettato per questo scopo. È stato il primo rilevamento diretto di buchi neri, al contrario del rilevamento degli effetti gravitazionali di buchi neri su altri oggetti astrofisici, lenti gravitazionali o raggi X emessi da gas che cadono in un buco nero. Come tutte le nuove scoperte astronomiche, ci sono state sorprese. La cosa più sorprendente

mass of the two original black holes were 29 solar masses and 36 solar masses; they coalesced to form a new, larger black hole that had a mass of 62 solar masses. Basic arithmetic shows there are 3 solar masses missing between the initial black holes and the final remnant - that mass represents the total energy radiated as gravitational waves, mostly in the last 0.2 seconds of the inspiral. As a comparison, our sun radiates about 1% of its mass in the form of heat and light over its 10 billion year lifespan. For that short 0.2 s time span, even if no light was emitted, the GW150914 emission was energetically more "luminous" than the entire Universe.

The event was momentous for a multitude of reasons. It was the first direct detection of gravitational waves using an instrument designed for that purpose. It was the first direct detection of black holes, as opposed to detection of the gravitational effects of black holes on other astrophysical objects, gravitational lensing or the X-rays from gas falling into a BH. Like all new astronomical discoveries, there were surprises. The most startling was the mass. Excluding the super-massive galactic black holes, the largest known black hole, supposedly created through stellar-evolutionary processes, was only slightly

è stata la massa. Escludendo i buchi neri massicci galattici, il più grande buco nero conosciuto, presumibilmente creato attraverso processi stellari-evolutivi, era solo leggermente più grande di 20 masse solari, in accordo con le migliori previsioni teoriche. Il fatto che i due elementi di questa coppia fossero entrambi attorno a 30 masse solari era sorprendente. Teoricamente non si prevedeva che, anche nell'universo primordiale a bassa metallicità, si potessero creare grandi buchi neri.

Dalla prima scoperta, sono state osservate cinque o sei fusioni binarie addizionali di buchi neri, con una varietà di masse che vanno da meno di 10 masse solari alle 36 masse solari viste con GW150914.

Direzionalità della rete di osservatori

Una delle difficoltà dei rilevatori di onde gravitazionali è che, usati individualmente, non possono localizzare le sorgenti nel cielo. Questa operazione di puntamento viene espletata efficacemente solo mediante una rete di rivelatori, usando il tempo di arrivo del segnale per localizzare la sorgente per mezzo di una triangolazione. I due rivelatori LIGO potevano localizzare le sorgenti solo entro vaste aree rappresentate da ampi archi allungati nel cielo, coprendo migliaia di gradi quadrati e milioni di galassie. L'aggiunta del rivelatore europeo Virgo ha ridotto drasticamente l'area di localizzazione, come è stato dimostrato da due rilevamenti avvenuti poco dopo l'accensione di Virgo nell'agosto 2017.

Il primo era una fusione di buchi neri binari nota come GW170814. Con Virgo ed entrambi i rilevatori LIGO, il segnale è stato localizzato in un'area del cielo di circa 60 gradi quadrati, approssimativamente l'area di cielo coperta dalla vostra mano aperta a braccio disteso.

Il secondo evento, GW170817, il 17 agosto 2017 ha cambiato l'astronomia per sempre. GW170817 è stato il rilevamento della spiralizzazione, della frammentazione e della fusione di due stelle di neutroni, con conseguente emissione di onde gravitazionali, raggi gamma ed emissione di materia neutronica incandescente (per una quantità pari ad una piccola percentuale di una massa solare). La prima rivelazione di un sistema binario di stelle di neutroni spiraleggianti, in sé

larger than 20 solar masses, in rough agreement with the best theoretical predictions. The fact that the two elements of this binary were both around 30 solar masses was surprising. Theorists did not foresee that, even in the low-metallicity early universe, such large black holes could be created.

Since the first discovery, five or six additional binary black hole mergers have been observed, with a variety of masses ranging from below 10 solar masses to the 36 solar masses seen with GW150914.

Directionality of the network of observatories

One of the difficulties with gravitational wave detectors is that individually do not localize sources on the sky. Pointing is effectively done only with a network of detectors, using the arrival time of the signal to localize by triangulation. The two LIGO detectors could only limit the sources to broad elongated arcs in the sky, covering thousands of square degrees and million of galaxies. The addition of the European Virgo detector dramatically reduced the localization area, as was demonstrated by two detections that happened shortly after Virgo came online in August 2017.

The first was a binary black hole merger known as GW170814. With Virgo and both LIGO detectors, the signal was localized to an area in the sky of about 60 square degrees, roughly the area that would be covered behind your outstretched fist.

The second event, GW170817, on 17 August 2017 changed astronomy forever. GW170817 was the detection of the inspiral, shredding and merger of two neutron stars with emission of gravitational waves, gamma-rays, and a few percent of a solar mass in ejected, glowing neutronic matter. The first detection of a binary neutron star inspiral, in and of itself would have been a very important discovery. It was much more notable that it coincided with a short gamma ray burst, GRB170817A, detected by the Fermi satellite. LIGO and Virgo localized the event to an

e per sè, sarebbe stata una scoperta molto importante. Fatto ancora più importante, l'evento ha coinciso con una breve esplosione di raggi gamma, GRB170817A, come rilevato dal satellite Fermi. LIGO e Virgo hanno localizzato l'evento in un'area sul cielo di soli 28 gradi quadrati, migliaia di volte più ristretta rispetto all'area indicata dai rilevatori di raggi gamma di Fermi. Nel corso della giornata, poi, l'evento è stato individuato da telescopi terrestri nella galassia NGC 4993, nella costellazione di Hydra. La potenza del segnale ha subito mostrato che si trattava di un evento molto vicino. Più di 70 telescopi in tutto il mondo hanno seguito la scoperta e hanno scansionato le 50 – 60 galassie a noi più vicine racchiuse in quella zona, e a quella distanza approssimativa. In poche ore la galassia ospite fu identificata, mostrando una kilonova apparsa nell'alone galattico. L'esplosione in raggi gamma rilevata da Fermi appena 2 secondi dopo la fusione OG, confermava che la spiralizzazione delle stelle di neutroni causa un'emissione di materia neutronica, che è la fonte più probabile di esplosione in raggi gamma. I radiotelescopi e quelli ottici hanno monitorato il bagliore mentre passava dal blu al rosso scuro prima di affievolirsi, nel modo previsto per la fluorescenza dei Lantanidi. Fu la prima osservazione di produzione galattica di oro e metalli pesanti, che non possono essere forgiati nell'evoluzione stellare delle supernovae. Il segnale dell'onda gravitazionale ha consentito una calibrazione senza precedenti della produzione di diversi elementi chimici in questo processo. Questo evento ha mostrato il potere dell'astronomia multi-messaggera innescata dalla rivelazione dell'onde gravitazionale.

Conclusioni

L'attuale rete di osservatori di onde gravitazionali ha rilevato buchi neri binari e coppie di stelle di neutroni spiraleggianti. Tra gli eventi previsti, mancano solo lo spiraleggiare di una stella di neutroni in un buco nero e, naturalmente, il segnale proveniente dalle stelle di neutroni in rotazione, se queste non sono perfettamente sferiche. Chiaramente saremo entusiasti, a dir poco, di ogni sorpresa che la Natura desideri inviarci. I rilevatori di OG posti sulla terra sono limitati dal rumore newtoniano della terra, a causa del

area on the sky of just 28 square degrees, thousand times narrower than the area indicated by the Fermi gamma ray detectors. Within the day it was pinpointed by ground-based telescopes in the galaxy NGC 4993, in the constellation Hydra. The signal strength determined that it was an event happening very close-by. More than 70 telescopes around the world followed up on the discovery and imaged the 50-60 close-by galaxies enclosed in that area and at that approximate distance. Within hours the host galaxy was identified, showing a kilonova that had appeared on the galactic halo. The Fermi-detected gamma rays burst, which happened just 2 seconds after the GW merger, confirmed that NS inspiral eject neutronic matter and is the most likely source of short gamma ray bursts. The optical and radio telescopes monitored the glow while it turned from blue to deep red before it faded, in the manner predicted for the fluorescence of Lantanides. It was the first observation of the galactic gold factories that produce the heavy metals, which cannot be forged in supernova stellar evolution. The gravitational wave signal enabled an unprecedented calibration of the yield of different chemical elements in the event. This event showed the power of gravitational wave driven multi-messenger astronomy.

Conclusions

The present network of gravitational wave observatories has detected binary black holes and binary neutron star inspirals. Of the predicted events, only inspiral of a neutron star into a black hole are missing, and of course the signal from rotating neutron stars, if neutron stars are not perfectly spherical. Naturally we will be excited, to say the least, by any surprise that Nature might want to send us. Ground based GW detectors are limited by Earth's Newtonian noise to detection of black holes smaller than several hundred,

quale possono vedere solo buchi neri, ovvero con massa inferiore a diverse centinaia, forse poche migliaia, di masse solari, a seconda di quanto il rumore newtoniano possa essere annullato. Questo perché c'è un ovvio limite alla velocità dei buchi neri che spiraleggiano, cioè la velocità della luce; per i buchi neri più grandi, questo vincolo spinge la frequenza della spirale sotto il muro del rumore newtoniano. Il rilevamento di buchi neri di massa intermedi e dei buchi neri supermassicci che si nascondono al centro delle galassie, alimentando i nuclei galattici attivi, dovrà attendere i rivelatori spaziali come LISA [16]. La manciata di eventi di onde gravitazionali rivelati ci ha già fornito un'enorme ricchezza di informazioni. Molte più informazioni verranno fornite con i nuovi e più numerosi rivelatori in preparazione. La previsione delle sorprese è notoriamente difficile. Sebbene desiderosi di ottenere qualche sorpresa dalla natura, riassumiamo e forniamo alcuni esempi di ciò che pensiamo ci stia ancora aspettando.

L'evento più lontano rilevato si è verificato 1,5 miliardi di anni fa, ovvero circa il 10% dell'età dell'Universo. Questo volume di rilevazione copre già circa lo 0,1% dell'universo visibile¹³. A differenza dei telescopi ottici, la cui portata cresce con l'inverso della radice quadrata della loro sensibilità, la portata dei rilevatori di onde gravitazionali cresce con il semplice inverso della sensibilità. Se non fosse per lo spostamento dello spettro verso lunghezze d'onda maggiori (i.e. *redshift*), che sposta la frequenza delle OG da eventi lontani al di sotto del limite di rumore newtoniano, la sensibilità degli osservatori terrestri di terza generazione (che ci si aspetta sia 10 volte migliore rispetto ai rivelatori avanzati), quali l'Einstein Telescope, teoricamente coprirebbe l'intero Universo; una impresa che dovrà aspettare i telescopi spaziali come LISA, sensibili alle frequenze più basse. La crescente sensibilità dei rivelatori a terra consentirà di raccogliere un vasto catalogo di eventi, mappando la densità e la distribuzione, nell'universo locale, di stelle di neutroni e buchi neri, dei resti delle supernove

¹³Sorprendentemente, il raggio dell'universo osservabile è vicino a 50 miliardi di anni luce, molto più grande della sua età stimata (14 miliardi di anni). I numeri qui riportati sono quindi intesi come stime di ordine di grandezza.

maybe a few thousand solar masses, depending on how much Newtonian noise can be cancelled. This is because there is an obvious limit to the speed of the inspiralling black holes, namely the speed of light; for larger black holes, this constraint pushes the inspiral frequency below the Newtonian noise wall. The detection of intermediate mass black holes, and of the supermassive black holes lurking at the center of galaxies, and powering the Active Galactic Nuclei, will have to wait for space-based detectors like LISA [16]. The handful of detected gravitational wave events has already given us an enormous wealth of information. Much more information will come with the improved, and more numerous, detectors in preparation. Prediction of surprises are notoriously difficult. While eager to get some surprise from nature, let's summarize and give some examples of what we think is waiting for us to detect and measure. The farthest event detected happened 1.5 billion years ago, which is about 10% of the age of the Universe. This detection volume is already covering roughly 0.1% of the visible Universe¹². Unlike optical telescopes, whose reach grows with the inverse of the square root of their sensitivity, the reach of gravitational wave detectors grows with the simple inverse of the sensitivity. Were it not for the red shift, which drives the frequency of GWs from far events below the Newtonian noise limit, the expected 10 times improved sensitivity of the third generation ground based observatories, like the Einstein Telescope, would theoretically cover the entire Universe, a feat that will have to wait for the space telescopes like LISA, sensitive to lower frequencies. The growing sensitivity of ground-based detectors will allow to collect a vast catalog of event, mapping the density and distribution, in the local universe, of neutron stars and black holes, the remnants of supernovas and the generation of light metals. Of course the direct production of heavy metals from neutron star inspirals will be mapped as well. Perhaps more importantly, higher sensitivity will allow probing of binary evolution details and, for black hole binaries, the distri-

¹²Amazingly, the radius of the observable Universe is close to 50 billion light years, pretty larger than its estimated age (14 billion years). The numbers here reported are therefore meant as order of magnitude estimates.

e delle sorgenti di metalli leggeri. Naturalmente verrà anche mappata la produzione diretta di metalli pesanti dallo spiraleggiare delle stelle di neutroni. Forse, ancora più importante, una maggiore sensibilità consentirà di esaminare i dettagli dell'evoluzione binaria e, per i buchi neri binari, la distribuzione degli spin dei progenitori e le possibili deviazioni dalla Relatività Generale in campi molto intensi. La deviazione del segnale rilevato da stelle di neutroni binarie, rispetto a quanto calcolato dalla Relatività Generale per sorgenti "puntiformi", ha già iniziato a fornire informazioni sugli effetti di marea nelle stelle di neutroni, sulla loro equazione di stato e infine sulla dinamica della loro frantumazione. La crescente sensibilità dei rivelatori imporrà vincoli più stretti sui modelli teorici delle stelle di neutroni e sul confinamento dei quark.

L'osservazione mediante raggi gamma, luce visibile e neutrini, degli eventi di fusione misurerà la quantità di materia neutronica emessa ed i processi di decadimento che producono i metalli pesanti. La sinergia tra la fisica nucleare ed i settori elettromagnetico, neutrino e gravitazionale dell'astronomia sarà stupenda. L'individuazione di eventi di spiraleggiamento di stelle di neutroni e buchi neri porrà vincoli ancora più stringenti sui modelli nucleari. I buchi neri nella gamma di 2–3 masse solari, generati dal collasso di materia su una stella di neutroni originaria, materia proveniente dalla corona della stella partner progenitrice, sono, dimensionalmente, molto più piccoli delle stelle di neutroni. Questi piccoli buchi neri sono scalpelli molto più affilati in grado di aprire una stella di neutroni alle nostre osservazioni.

La rilevazione di onde gravitazionali da stelle di neutroni rotanti, o forse la loro assenza, imporrà altri vincoli sui modelli di stelle di neutroni. Stelle di neutroni che solo pochi anni fa apparivano come impenetrabili entità teoriche stanno rapidamente diventando oggetto di indagine sperimentale. Non dimentichiamoci della possibile individuazione di OG da una supernova vicina, che potrebbe svelarci informazioni su come la stella di proto-neutroni inghiotta il nucleo di ferro che produce l'evenienza della supernova.

La raccolta delle conoscenze scientifiche ottenuta tramite i rilevatori di onde gravitazionali è vasta e crescente. È difficile immaginare un'avventura più eccitante di quella che stiamo vivendo.

tribution of spin of the progenitors, and possible deviations of GR at very high fields. The deviation of the detected signal of binary neutron star from what calculated by GR for point-like sources has already started giving information on the tidal effects on neutron stars, on the equation of states and eventually of the dynamic of their shredding. The growing sensitivity of detectors will impose tighter constraints on theoretical models of neutron stars and their quark content. Gamma-ray, optical and neutrino observation of merger events will measure the quantity of neutronic matter ejected, and their decay path towards heavy metals. The synergy between nuclear physics and the electromagnetic, neutrino and gravitational branches of astronomy will be stupendous. Detection of black hole-neutron star inspiral events will pose even tighter constraints on nuclear models. Black holes in the range of 2-3 solar masses, generated by matter infall on a first neutron star from the corona of the progenitor of its partner, are much smaller than the neutron stars. These small black holes are much sharper scalpels opening up a neutron star for our observations. The detection of gravitational waves from rotating neutron stars, or perhaps their absence, will impose other constraints on the neutron star models. Neutron stars that only a few years ago appeared as impenetrable theoretical models are rapidly becoming object of experimental investigation. Let's not forget the possible detection of GWs from a nearby supernova, which could inform us on how the proto-neutron star gobbles up the stars iron core and generate the shock wave that ejects what are known as supernovae.

The harvest of scientific knowledge from gravitational wave detectors is vast and growing vaster. It is hard to imagine a more exciting adventure than the one we are living, perhaps comparable to the discovery of galaxies and expansion of the universe last century, or the birth of modern astronomy that came with Galileo's introduction of the telescope three centuries earlier.

do, forse paragonabile alla scoperta delle galassie e all'espansione dell'universo del secolo scorso, o alla nascita dell'astronomia moderna che venne con l'introduzione di Galileo del telescopio tre secoli prima.



- [1] A. Einstein: "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (The Foundation of the General Theory of Relativity)", *Annalen der Physik* **49** (1916) .
- [2] J. A. Wheeler, K. Ford: *Geons, black holes and quantum foam*. W. W. Norton & company, New York (1971). p. 235.
- [3] P.R. Saulson: *Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore (1994).
- [4] R. A. Hulse and J.H. Taylor: "Discovery of a pulsar in a binary system", *Ap. J. Lett.* **195** (1975) L51.
- [5] Cristian Ott: private communication.
- [6] D. Kennefick: *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*. Princeton University Press, Princeton USA (2016).
- [7] D. Kennefick: "Einstein Versus the Physical Review", *Phys. Today* **58** (2005) 43.
- [8] A. Einstein and N. Rosen: "On gravitational waves", *J. Frank. Inst.* **223** (1937) .
- [9] H. Bondi: "Plane gravitational waves in the general relativity", *Nature* **179** (1957) 1072.
- [10] P. G. Bergmann: *The Riddle of Gravitation*. John Murray, London (1968).
- [11] R. Weiss: "Electromagnetically coupled gravitational antenna", *Quarterly Progress Report, MIT* (1972) .
- [12] H. B. Callen and T. A. Welton: "Irreversibility and Generalized Noise", *Phys. Rev.* **83** (1951) 34.
- [13] VIRGO *Evaluation Report*, March 31st, 1990.
- [14] <http://public.virgo-gw.eu/language/it/>
- [15] C. Caves *Phys. Rev. D* **23** 198
- [16] <https://www.elisascience.org/>



Matteo Lorenzini: è visiting scientist presso il Gran Sasso Science Institute. Fa parte della collaborazione Virgo dal 2005. Si è occupato dello studio dei materiali e del rumore termico negli interferometri di prima generazione, prima presso l'Università di Firenze e l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, poi negli USA. Dal 2012 lavora al GSSI in collaborazione con l'Università di Roma Tor Vergata al completamento di Advanced Virgo. In quest'ambito si è dedicato specificamente allo sviluppo di sistemi ottici di compensazione adattativa e allo studio di soluzioni dei problemi legati al rumore termico nei rivestimenti usati negli specchi e nelle lenti.

Matteo Lorenzini: Matteo Lorenzini is a visiting scientist at the Gran Sasso Science Institute (GSSI). He has been a member of the Virgo collaboration since 2005. He has concentrated his activity on a study of the materials used and on the thermal noise in the first-generation interferometers, initially at Florence University and the National Institute of Nuclear Physics (INFN) and later on in the USA. He works at GSSI since 2012, in a collaboration with the University of Roma Tor Vergata aimed at the completion of Advanced Virgo. Within this activity he is in particular working on the development of optical systems of adaptive compensation and towards a solution of the problems arising from thermal noise in the coatings used in mirrors and lenses.

Shane Larson: è Professore alla Northwestern University a Direttore associato al CIERA, Center for Interdisciplinary Exploration & Research in Astrophysics. È anche membro dell'American Physical Society. Ha conseguito il suo dottorato in fisica nel 1999 presso L'Università statale del Montana. I suo

principali interessi di ricerca sono rivolti principalmente all'astrofisica con le onde gravitazionali, ma si interessa anche di vari aspetti della cosmologia, l'evoluzione di stelle binarie, dinamica gravitazionale nei sistemi esoplanetari, e il clima terrestre. Si è interessato attivamente alle informazioni sulla struttura della galassia nascosta con il confuso background generato dalle onde gravitazionali di bassa frequenza, all'influenza sull'emissione di onde gravitazionali da magnetars dell'auto gravitazione, allo sviluppo di tecniche di analisi per l'identificazione di onde gravitazionali emesse da eccentrici sistemi binari compatti.

Shane Larson: is a Research Associate Professor at Northwestern University and Associate Director, CIERA, Center for Interdisciplinary Exploration & Research in Astrophysics. He is also a Fellow of the American Physical Society. He obtained his Ph.D. in Physics in 1999 from Montana State University. His research interests are primarily concerned with gravitational wave astrophysics and data analysis, but he is also interested in various aspects of cosmology, binary star evolution, gravitational dynamics in exoplanetary systems, and Earth's climate. He has been actively interested on the information about the structure of the galaxy that is embedded in the confusion background of low frequency G-waves, on the self-gravity influence on gravitational wave emission from isolated magnetars, on the development of gravitational wave analysis techniques for detecting eccentric binary systems in compact (gravitational wave emitting) binary systems.

Riccardo De Salvo: si è laureato presso l'Università di Pisa nel 1979 presentando una tesi riguardante un esperimento di spettroscopia con risoluzione temporale. Successivamente si è spostato al CERN dove ha sviluppato un metodo di calibrazione di camere e drift e ha collaborato in esperimenti per la misura della vita media del mesone π^0 e della sezione d'urto elastica di protoni su nuclei. Si è quindi spostato all'Università Cornell, dove ha costruito il tracciante centrale di CLEO per le misure di sezione d'urto elastica protone-nucleo a Fermilab. È ritornato al CERN dove ha contribuito notevolmente al progetto LAA, in particolare allo sviluppo del Hybrid Photo Diode Detector. Nel 1995 ha cominciato ad interessarsi alla ricerca per i rivelatori di onde gravitazionali, prima nel gruppo di Pisa di Virgo, e poi a Caltech dove ha dato importanti contributi alla costruzione del rivelatore LIGO, e ha inventato i rivestimenti dielettrici ottimizzati per gli specchi di LIGO. Dal 2014 a oggi ha lavorato presso l'Università statale della California e quella del Sannio sviluppando meta-materiali nano-stratificati per abbassare il rumore termico dei rivestimenti dielettrici degli specchi e ha progettato sensori per la realtà virtuale. Nel giugno 2018 ha iniziato Riclab per l'applicazione della tecnologia nell'industria, che considera anche il progetto di sensori ed attuatori per coscienza artificiale e realtà virtuale.

Riccardo De Salvo: Riccardo De Salvo obtained his University Degree from the University of Pisa in 1979, working on an experiment on time resolved spectroscopy. He has worked later on at CERN, where he developed drift chamber laser calibrations, measured the lifetime of the neutral pi meson and the proton nuclear elastic cross section. He has later moved to Cornell, where he has built the CLEO central tracker and contributed to the measurement of the proton nuclear elastic cross section. He has later come back to CERN, where he has given a significant contribution to the LAA project, in particular on the development of the Hybrid Photo Diode Detector. He has been involved in research on Gravitational Wave Detectors since 1995, first within the Pisa Virgo group and later on at Caltech, where he has given important contributions to the construction of the LIGO detector, and invented the optimized dielectric coatings for the LIGO mirrors. Between 2014 and 2018 he has worked at the California State University and University of Sannio, developing nano-layered meta-materials for lower thermal noise dielectric mirrors coatings and designing sensors for computer awareness and VR. In June 2018 he started Riclab aimed at the design of sensors and actuators for computer awareness and VR.