



Università della Terza Età "Cardinale
Giovanni Colombo" – Milano

A. A. 2022 - 2023
Corso di Astrofisica

Docente:
Adriano Gaspani

Le Onde Gravitazionali

Newton (1687)



masse M e m a distanza r tra loro $\rightarrow$ forza attrattiva:

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^2}$$

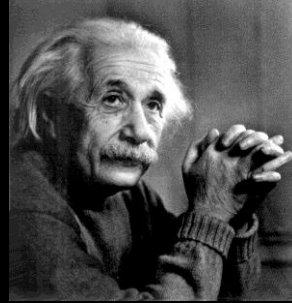
costante di Newton
($6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

Prima teoria unificata della Fisica: spiegazione di maree e forma della Terra, moti astronomici e terrestri, ma ...

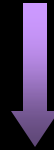
azione istantanea attraverso lo spazio che separa le masse:
con quale meccanismo ??

Einstein (1916)

Relatività Speciale:
massima velocità di
propagazione di un
segnale = c



Principio d'Equivalenza:
massa inerziale m_i
||
massa gravitazionale m_g



proposta rivoluzionaria:

struttura dello spaziotempo deformata dalla
massa-energia distribuita al suo interno

**Gravità NON è una forza ma la manifestazione della
geometria dello spaziotempo**

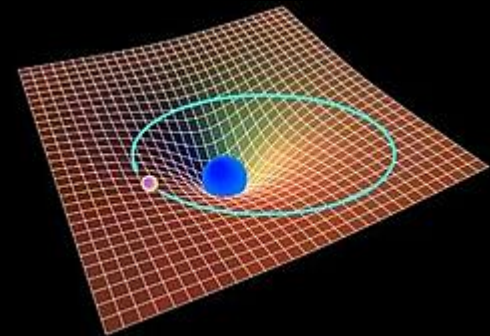
Newton vs Einstein

Newton: gravità è una forza



La Terra si muove su **orbita curva** intorno al Sole perché la gravità solare la costringe ad allontanarsi dal suo **cammino rettilineo naturale**

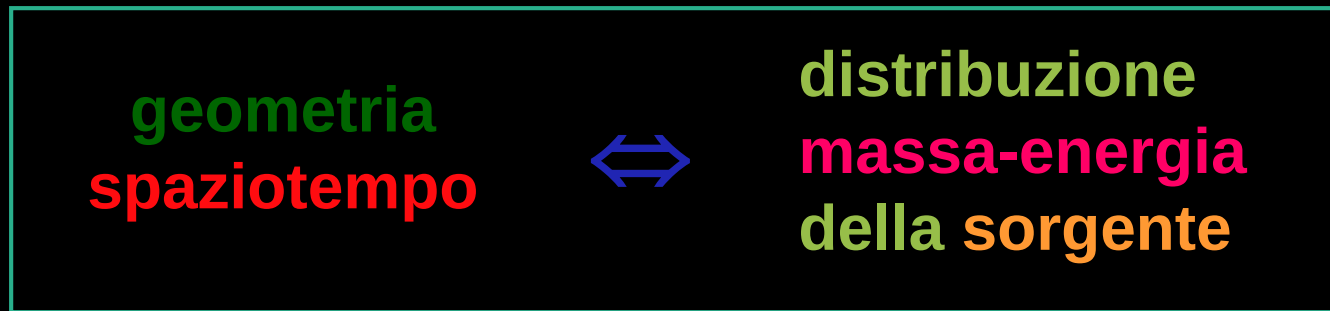
Einstein: gravità è curvatura



massa del Sole **distorce geometria dello spaziotempo** vicino alla Terra e questa si muove **liberamente** lungo **cammino il più possibile rettilineo** ($\approx$ **ellisse**) in questo ambiente deformato

Equazioni di Einstein

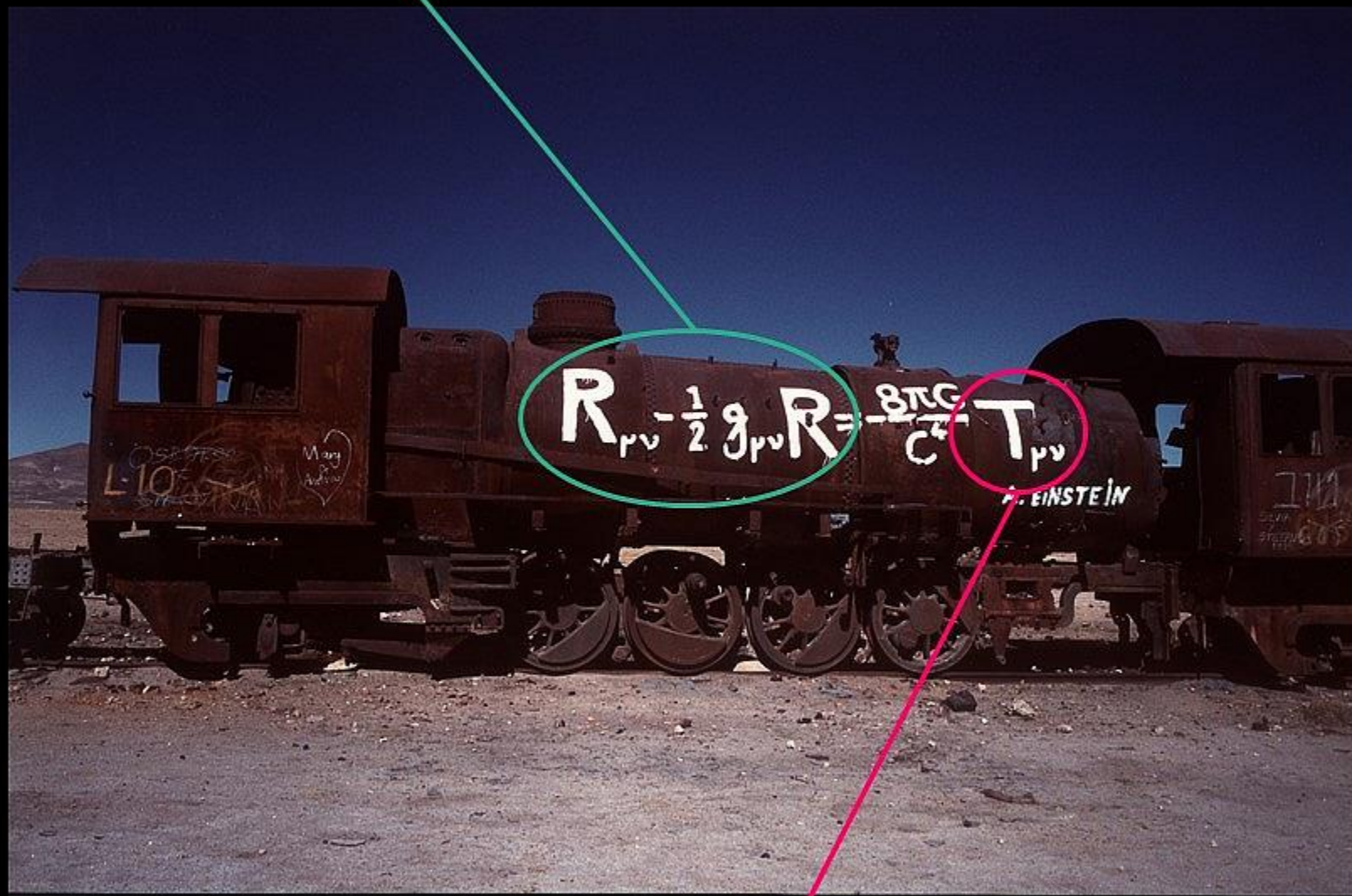
equazioni di campo che connettono entità e natura della distorsione dello spaziotempo alle qualità della materia gravitante che la produce



spaziotempo dice alla materia come muoversi;
materia dice allo spaziotempo come distorcersi

(J. Wheeler)

Geometria spaziotempo



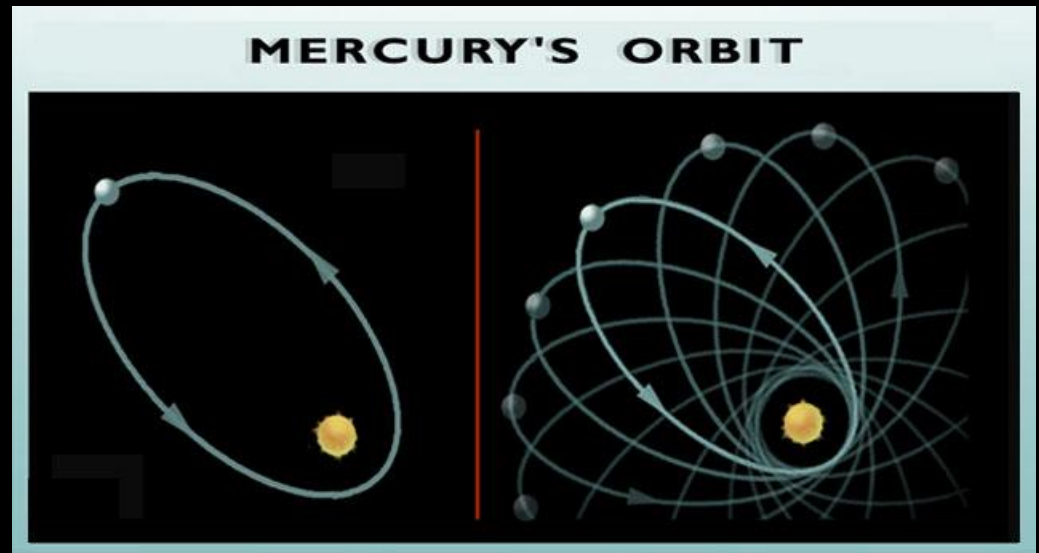
Massa-energia sorgente

Verifiche Sperimentali

1. Orbita di Mercurio

Precessione lenta del
perielio dell'orbita di
circa 43" di arco/secolo

$$\Delta\pi R = \frac{3n^3a^2}{c^2(1-e)^2}t$$



Teoria di Einstein è perfettamente in accordo con le osservazioni

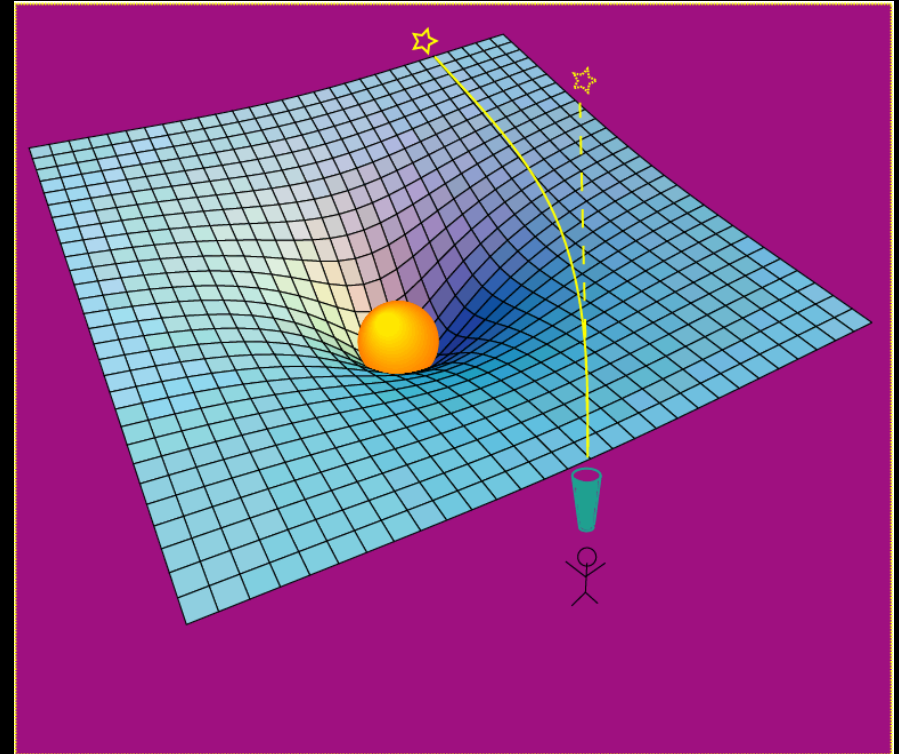
Verifiche Sperimentali

2. Curvatura della Luce

Anche la traiettoria di un raggio luminoso è affetta dalla gravità

Effetto osservato per la prima volta nel 1919 da Eddington durante una eclisse di Sole

Entità dello spostamento della posizione apparente di una stella in perfetto accordo con quanto previsto dalla teoria di Einstein



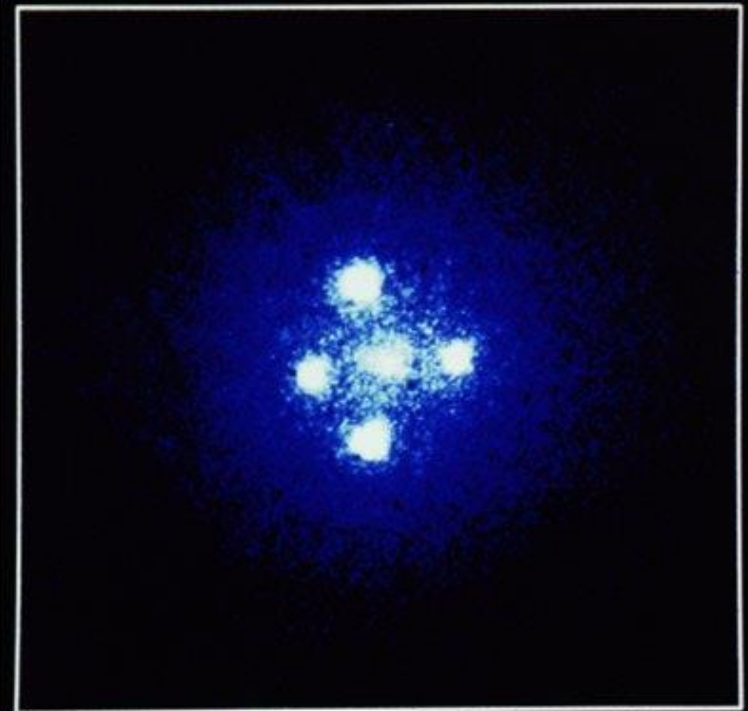
Gravitational Lensing

Verifiche Sperimentali

Croce di Einstein

Immagine di un quasar appare “moltiplicata” per la presenza di una galassia che si trova interposta tra la Terra e la posizione del quasar

Nell'Astronomia moderna queste immagini dovute al **gravitational lensing** sono utilizzate per rivelare concentrazioni estese di 'materia oscura' di natura astrofisica



Gravitational Lens G2237+0305

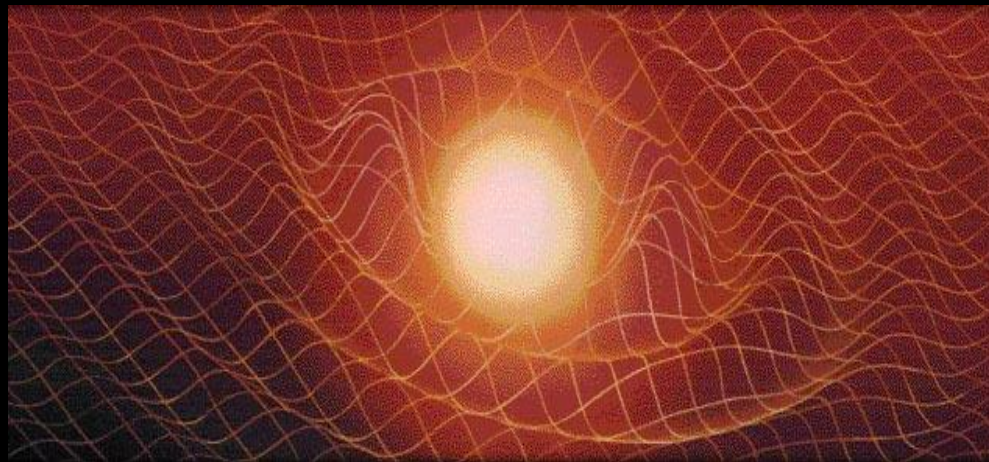
Onde Gravitazionali

Gravitazione = curvatura dello spazio-tempo $\oplus$ velocità limite per la propagazione degli effetti gravitazionali



Onde Gravitazionali

increspature nella curvatura dello spaziotempo prodotte dal moto (a simmetria non-sferica) di massa-energia, che si propagano nello spazio alla velocità della luce



Onde Gravitazionali

Fisica Newtoniana: spaziotempo come griglia concettuale
infinitamente rigida → onde gravitazionali NON
possono esistere: velocità e densità d'energia ∞

Relatività Generale: coefficiente d'accoppiamento finito tra la
curvatura dello spaziotempo e la distribuzione
di massa-energia che produce tale curvatura

$$\alpha = \frac{8\pi G}{c^4}$$



caratterizza rigidità dello spaziotempo
(α^{-1} è legato al modulo di elasticità)



$$\sim 10^{-43} \text{ N}^{-1}$$

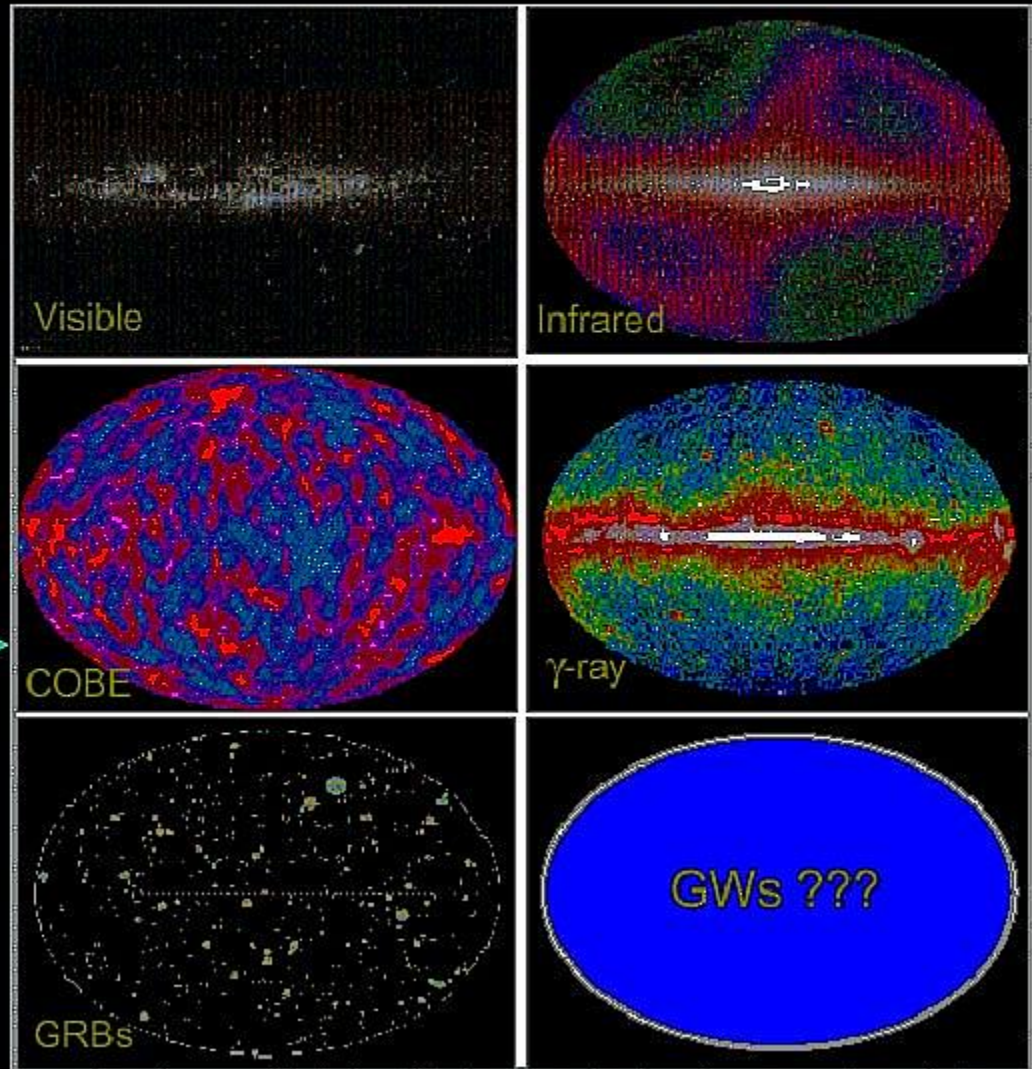


- ✓ Fisica newtoniana applicabile in molte situazioni reali
- ✓ Onde Gravitazionali: generazione fortemente inibita; rivelazione estremamente difficile

? Onde Gravitazionali

1. verifica diretta della **Relatività Generale**
2. nascita dell'**Astrofisica Gravitazionale**
3. esistenza di **fondo cosmico di O.G.** →
“fotografia” dello stato
dell'Universo $\sim 10^{-43}$ s
dopo **Big Bang**

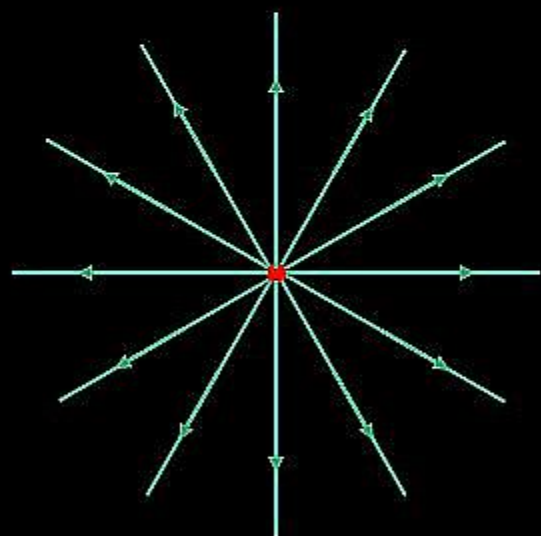
N.B. **fondo cosmico di microonde**: la “foto” si riferisce a $\sim 3 \times 10^5$ anni dopo **B.B.**



Analogia: Onde e.m.

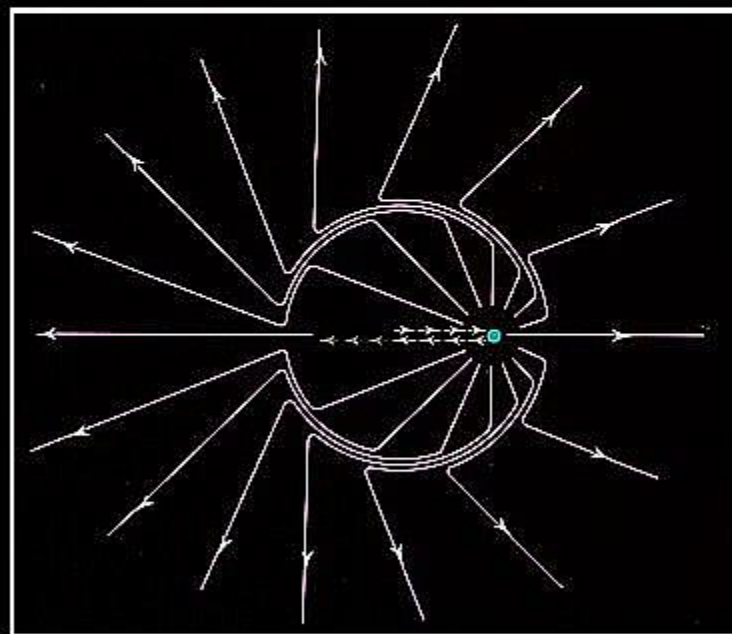
Meccanismo di Generazione

Carica elettrica in quiete



Campo Elettrico radiale statico

Carica elettrica accelerata

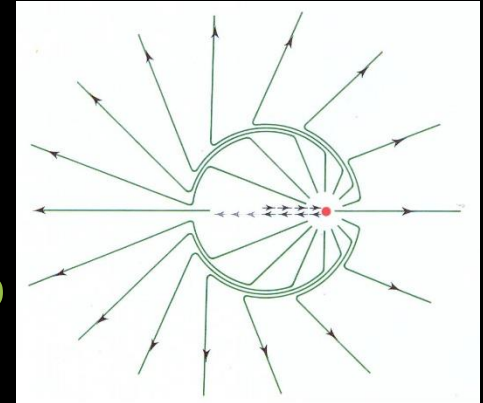


"kink" viaggiante

Kink e.m.

Struttura del kink

- a) in corrispondenza di esso tutte le linee di campo ruotano di $90^\circ \rightarrow$ il disturbo è **trasverso**
- b) in esso le linee di campo si addensano $\rightarrow$ il campo è molto forte in una shell che circonda le 2 posizioni della carica $\rightarrow$ volume V della shell $\propto r^2$, mentre lunghezza $L \propto r \rightarrow$ campo del **kink** = densità delle linee di campo $\propto L / V = r^{-1}$
- c) la lunghezza del **kink** è **0** lungo l'asse congiungente le 2 posizioni della carica e **massima** nella direzione $\perp \rightarrow \propto \sin \theta \rightarrow$ distribuzione in energia $\propto \sin^2 \theta \rightarrow$ **radiazione di dipolo**



Dipolo Elettrico



kink come impulso ondulatorio trasverso dipolare
che si allontana dalla carica con velocità c

Carica che oscilla avanti e indietro $\rightarrow$

kink = onda e.m.

Campo di radiazione **identico** se accelero 2 cariche opposte in
direzione contraria, i.e. se considero un **dipolo elettrico oscillante**
(carica $+$ verso dx è elettricamente $\equiv$ a carica $-$ verso sx)

Potenza emessa da un **dipolo**
elettrico $d = \sum_i q_i x_i$ **oscillante**

$$P = \frac{2}{3} \ddot{d}^2$$

Dipolo Gravitazionale ?

Meccanismo di produzione **analogo** a quello delle **onde e.m.** :

accelerazione di massa-energia (i.e. di “carica gravitazionale”)

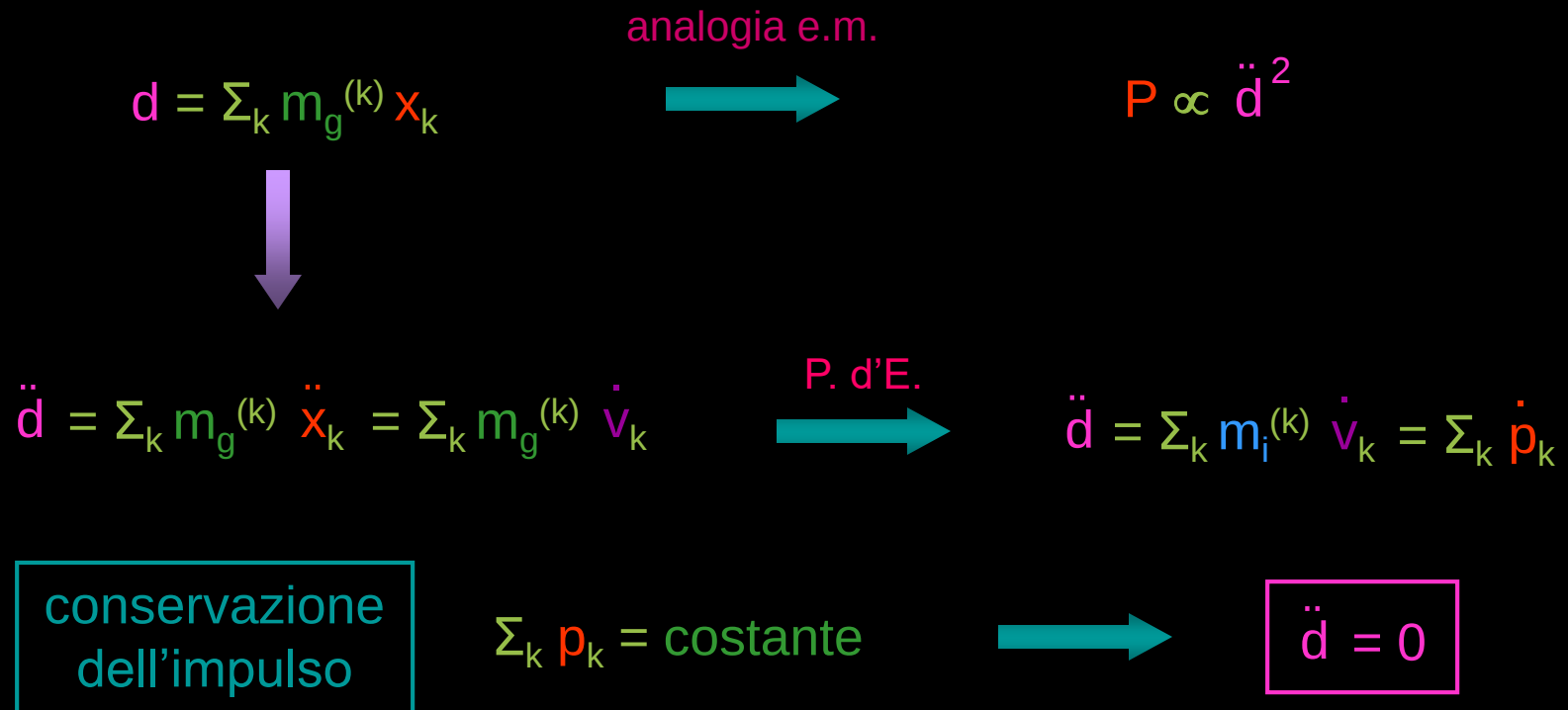
Differenza fondamentale con le **onde e.m.** è conseguenza
della natura **puramente attrattiva della gravità**



tutte le cariche gravitazionali sono **+** → moto di una massa
verso **dx** gravitazionalmente non equivalente a quello verso **sx**
→ impossibile costruire dipolo gravitazionale oscillante

Principio d'Equivalenza

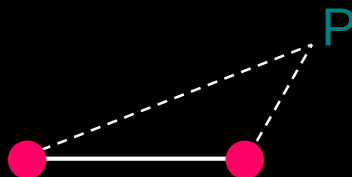
Impossibilità della costruzione di un dipolo gravitazionale oscillante
è conseguenza diretta del **Principio d'Equivalenza**: $m_i = m_g$



Quadrupolo Gravitazionale

Sistema composto di 2 masse che accelerano in verso opposto (e.g. masse connesse tramite molla) è un **quadrupolo**

In prima approssimazione i disturbi gravitazionali associati al moto di ciascuna massa si elidono, ma, causa **velocità di propagazione finita**, la diversa posizione delle masse implica tempo diverso per giungere in un stesso punto **P** → i 2 disturbi arrivano in **P** **sfasati**
→ **l'esatta cancellazione NON si verifica**



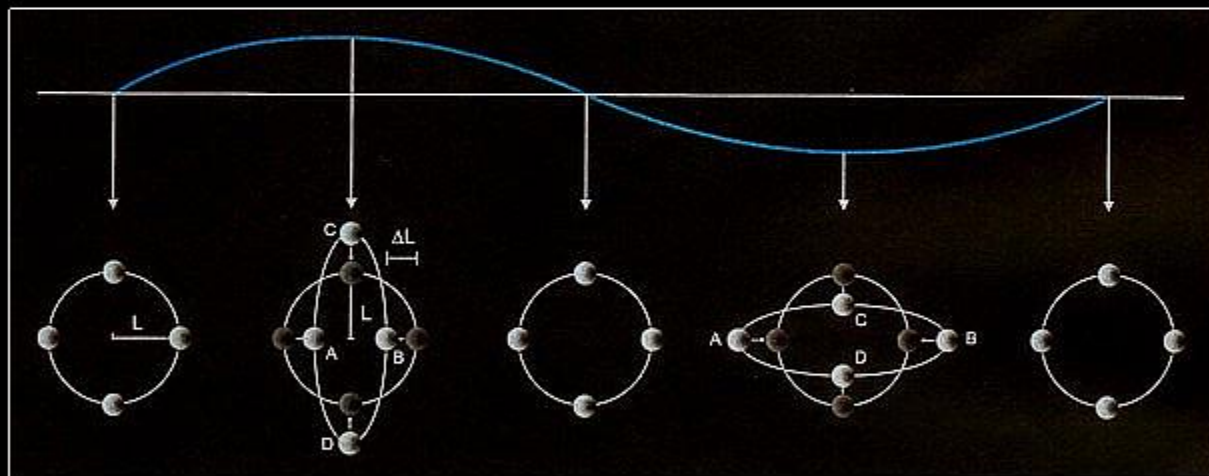
campo di radiazione + complicato:
distribuzione angolare dell'energia
 $\propto \sin^4 \theta$

O.G. sono tensoriali

Forza Mareale

Natura **quadrupolare** → diversa struttura del **sistema test**:
anello flessibile di masse (i.e. oggetto 2-dim.) posto nel piano
⊥ alla direzione di propagazione dell'onda

Passaggio dell'onda → **effetto mareale**: **distorsione dell'anello**



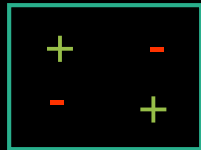
h = intensità
dell'onda

N.B. – sorgente + intensa: **SN nella Galassia** →
 $h \approx 10^{-18}$ → $L = 1 \text{ km}$: $\Delta L \approx$ **raggio protone**

Emissione di Quadrupolo

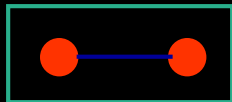
Radiazione da quadrupolo oscillante

- Quadrupolo elettrico : $Q_{jk} = q (3 x_i x_k - \delta_{jk} r^2)$ (j,k = x,y,z)



$$P_{e.m.} = \frac{1}{180} \ddot{Q}_{jk} \ddot{Q}_{jk}$$

- Quadrupolo di massa Q_{jk} : $Q_{jk} \{q \rightarrow m\}$

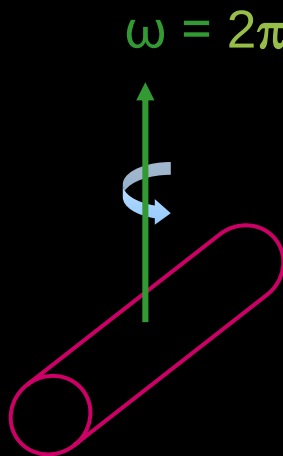


$$P_{gr.} = \frac{1}{45} \frac{G}{c^5} \langle \ddot{Q}_{jk} \ddot{Q}_{jk} \rangle$$

($\langle \rangle$ = media temporale)

Sorgenti di Laboratorio

Cilindro rotante di
massa M e lunghezza L



$M = 10^5 \text{ ton}$
 $L = 200 \text{ m}$
 $f = 1 \text{ Hz}$



$P \sim 10^{-24} \text{ W}$

N.B. – scala di P determinata da

$$\frac{c^5}{G} = 3.6 \times 10^{52} \text{ W}$$

(**maggiore** della potenza emessa dall'intero
Universo in forma di calore & luce)

Potenza Irraggiata

... in termini della velocità periferica $v = \omega L / 2$

$$P = \frac{32}{45} \left(\frac{r_G}{L} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6 \left(\frac{c^5}{G} \right)$$

raggio di Schwarzschild $= \frac{2 G M}{c^2}$



in sistemi in moto ultrarelativistico ($v \approx c$) e molto compatti ($L \approx r_G$) si può avere una emissione con potenza $\approx c^5 / G$

N.B. – Terra : $v \approx 10^{-6} c$; $r_G \approx 10 \text{ mm}$ $\rightarrow$ $P \sim 30 \text{ mW}$

Sorgenti Astrofisiche

Esempio: Cluster di stelle orbitanti (massa totale = M ; raggio = R)

potenza emessa in forma
di onde gravitazionali

$$P \sim \frac{G^4}{c^5} \left(\frac{M}{R} \right)^5$$

Minima dimensione del sistema: $R_{\min} = r_G \longrightarrow P_{\max} = \frac{c^5}{G}$

N.B. – $R < r_G \rightarrow$ il sistema diviene un black hole $\rightarrow$
nessuna radiazione riesce a sfuggire $\rightarrow c^5 / G$
è la massima energia fisicamente producibile

Sistemi Binari

2 stelle di massa M in orbita
di raggio R intorno al comune
centro di gravità



flusso stazionario di onde con
frequenza = $1/(\text{periodo orbitale})$

Esempio: $M \sim M_{\text{Sole}}$; $R = 10^7$ km



$P \approx 10^{19}$ W

sistema a distanza $d \rightarrow$ densità di potenza che
giunge sulla Terra: $p \sim P / d^2$

(1 pc = 3.26 anni-luce)

$d = 1$ kpc



$p \sim 10^{-20} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

“oggetti”
+
compatti



stelle di neutroni (NS)

black holes (BH)

$R \sim 10^3$ km @ 1 kpc

$p \sim 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Collassi Gravitazionali

Stella che ha esaurito il combustibile nucleare collassa sotto l'effetto della propria gravità. Il collasso del **core** della stella è accompagnato dall'espulsione degli strati più esterni della stella → **supernova (SN)**

Destino del **core** collassante dipende dalla massa iniziale della stella:

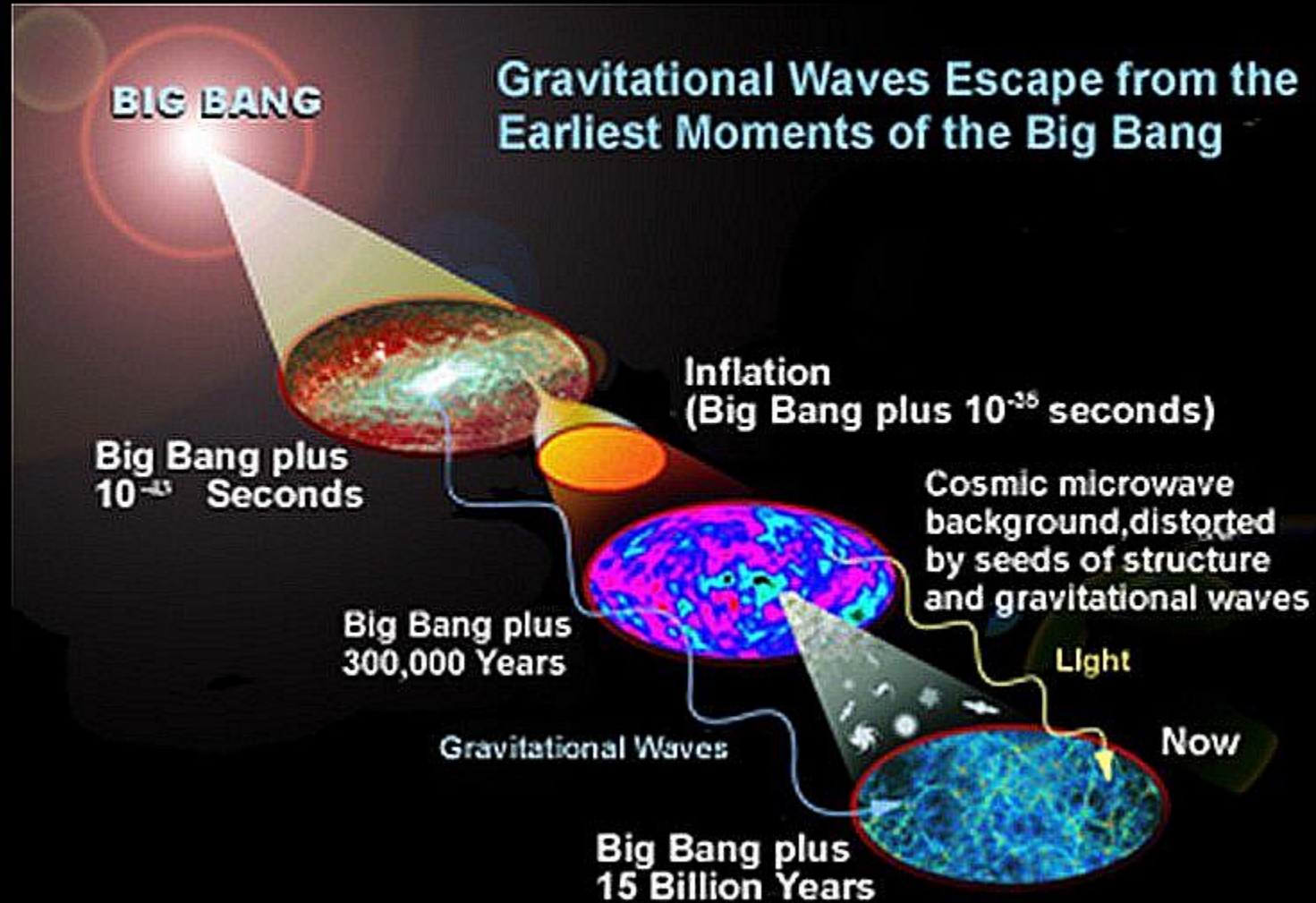
- ✓ $M > 3 M_{\text{Sole}}$ → black hole
- ✓ $M \sim M_{\text{Sole}}$ → stella di neutroni

Potenza emessa da **SN**: $P \sim 10^{44} \text{ W}$ → $d = 100 \text{ pc}$

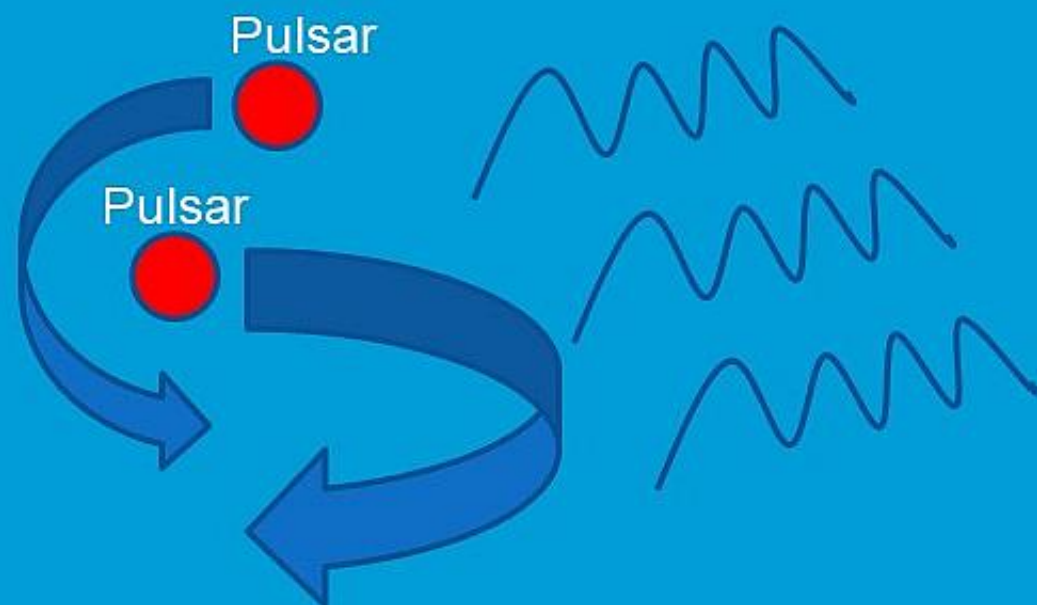
N.B. – in media in una galassia si verifica una esplosione di **SN** ogni 30 anni.

$$p \sim 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Fondo Stocastico



Consideriamo ora un sistema di due oggetti molto compatti in orbita reciproca :



In base alla teoria un sistema gravitante (due stelle compatte e pesanti) in orbita emette onde gravitazionali

Ma così facendo il sistema perde energia! E le velocità delle due pulsar devono cambiare !

Si può così ottenere evidenza INDIRETTA dell'esistenza delle Onde Gravitazionali!

L'effetto può essere rivelato!

Onde Gravitazionali: Evidenza

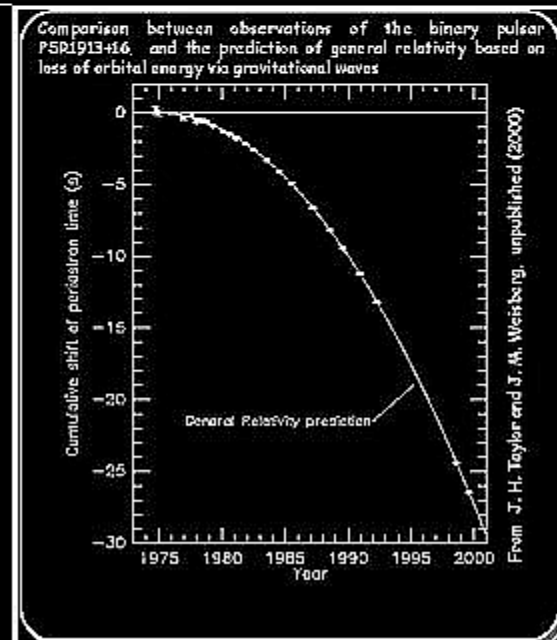
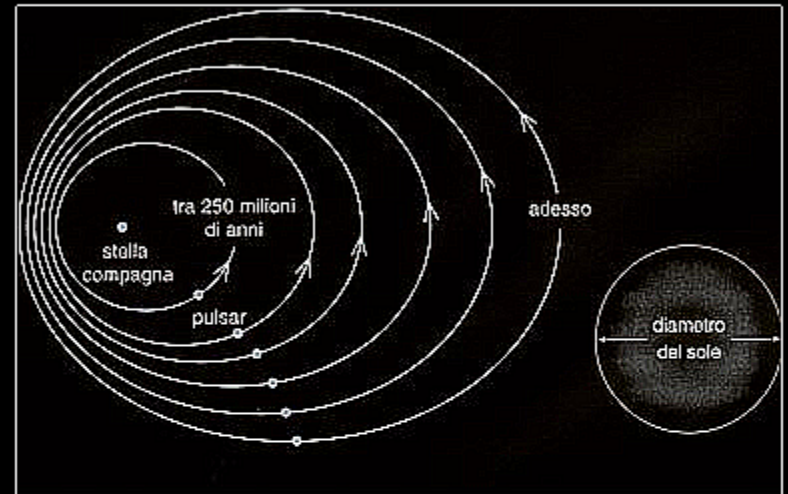
esiste solo prova indiretta

Sistema binario PSR 1913+16:
pulsar in orbita attorno a NS

misura periodo di ripetizione
degli impulsi radio → periodo
orbitale T della pulsar

osservazione del sistema per
17 anni (Hulse & Taylor)

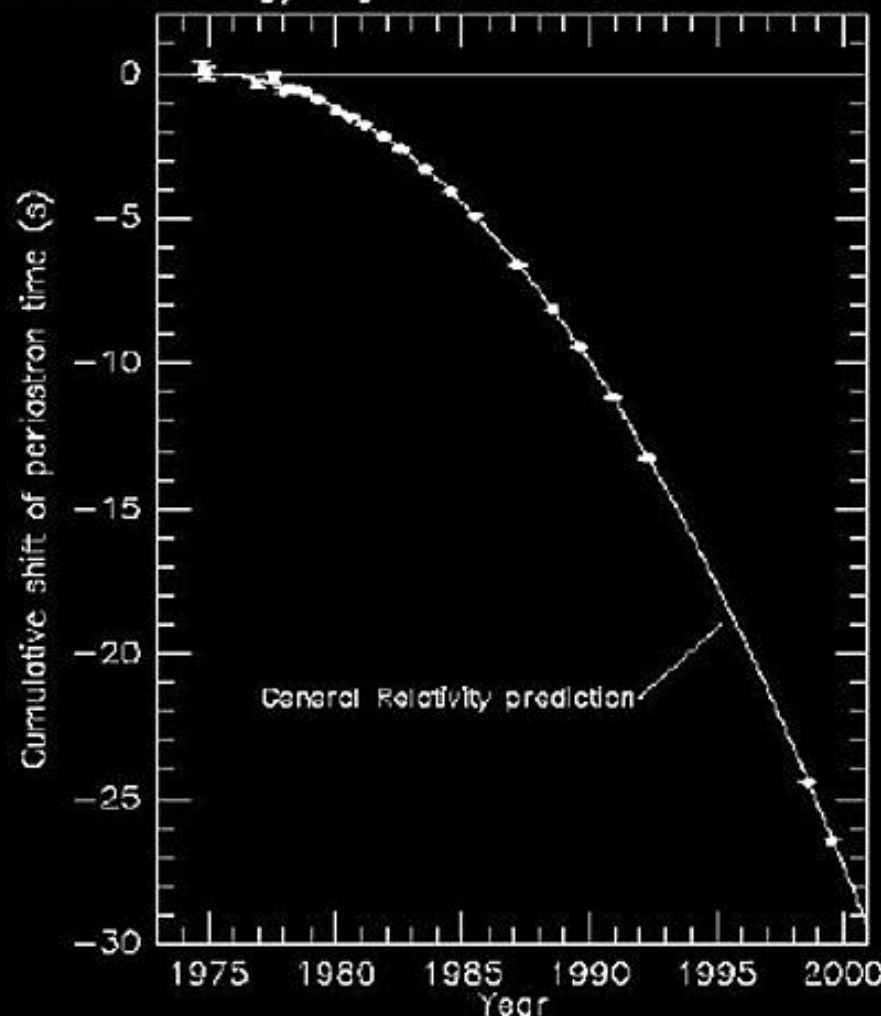
T diminuisce con il ritmo
previsto dall'ipotesi che la
pulsar perda energia per
emissione di O.G.



Evidenza “indiretta” d'esistenza delle Onde Gravitazionali



Comparison between observations of the binary pulsar PSR1913+16, and the prediction of general relativity based on loss of orbital energy via gravitational waves

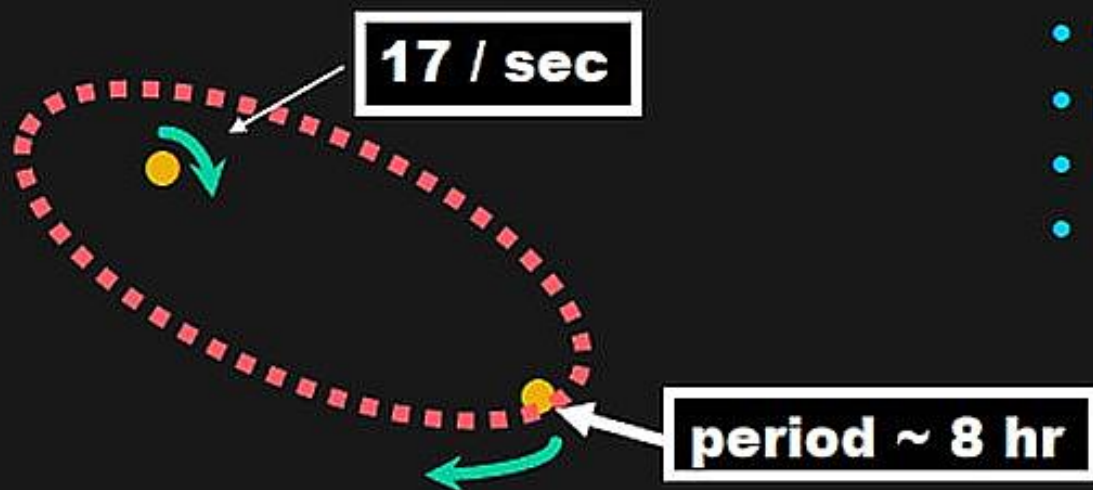


From J. H. Taylor and J. M. Weisberg, unpublished (2000)

Vi è una perdita di energia che è pari a quella che la teoria prevede per emissione di onde gravitazionali.

Evidenza dell'esistenza delle Onde Gravitazionali

Hulse & Taylor



PSR 1913 + 16
Timing of pulsars

Sistema binario di stelle compatte

- separazione $\sim 10^6$ km
- $m_1 = 1.4$ masse solari
- $m_2 = 1.36$ masse solari
- eccentricità = 0.617

Predizione della Relatività Generale

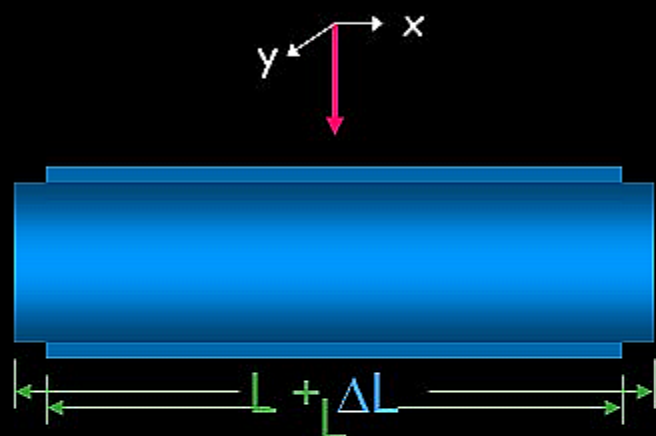
- riduzione progressiva dell'orbita 3 mm/orbita

Rivelatori

2 tipi fondamentali

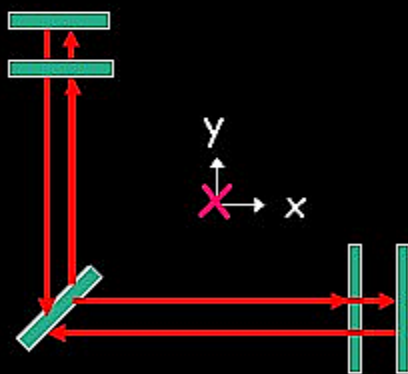
1. Rivelatori Risonanti

O.G. eccita modi di vibrazione longitudinali di una barra metallica



2. Rivelatori Interferometrici

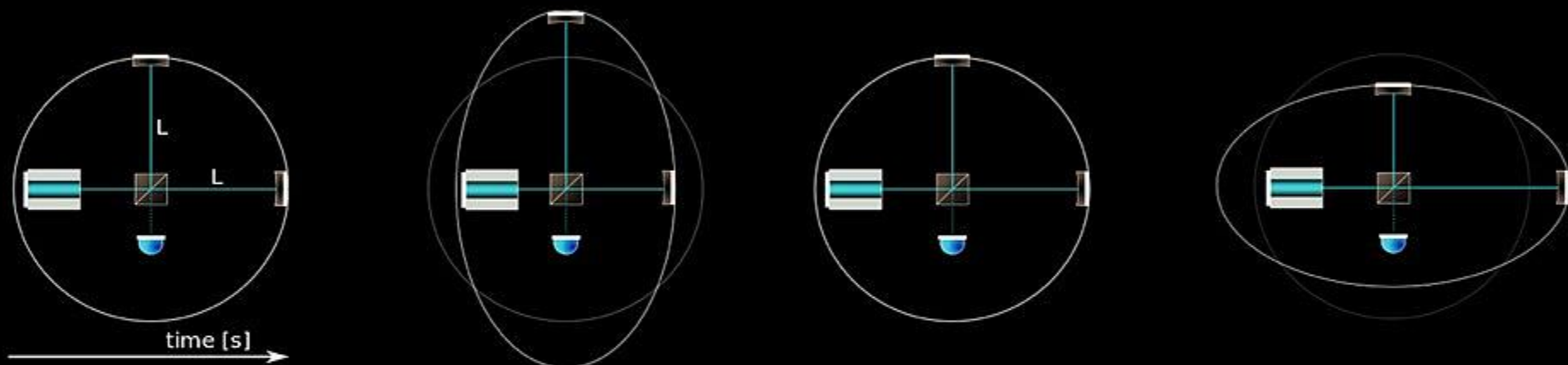
O.G. produce differenza di cammino della luce lungo i bracci di un interferometro



I rivelatori più sensibili di Onde Gravitazionali attualmente sono gli interferometri

Antenne gravitazionali: i rivelatori Interferometrici

Interferometer response to h_+



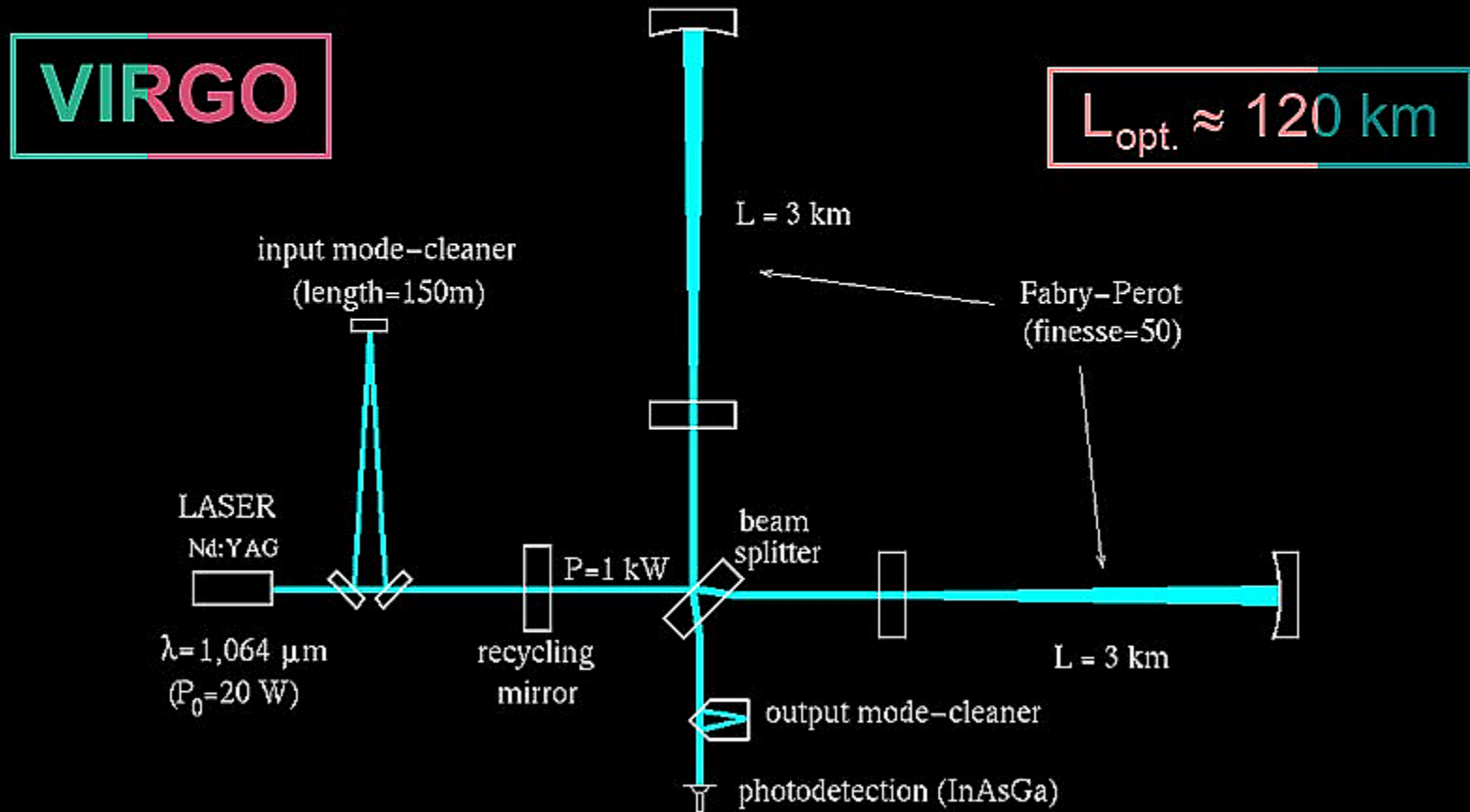
Negli interferometri si moltiplica la lunghezza efficace eseguendo molti ($\approx 10^3$) percorsi di andata e ritorno (Fabry-Perot).

partially
silvered
mirrors

supernova che esplode nella Galassia $h \approx 10^{-18}$

$$L = 1 \text{ km} : \Delta L = h L / 2 \approx 10^{-18} \cdot 10^3 = 10^{-15} \text{ m} \approx \text{raggio protone}$$

Interferometri



EGO - Virgo



L'Interferometro italo-francese
VIRGO (Cascina, Pisa) per la
rivelazione delle Onde
Gravitazionali

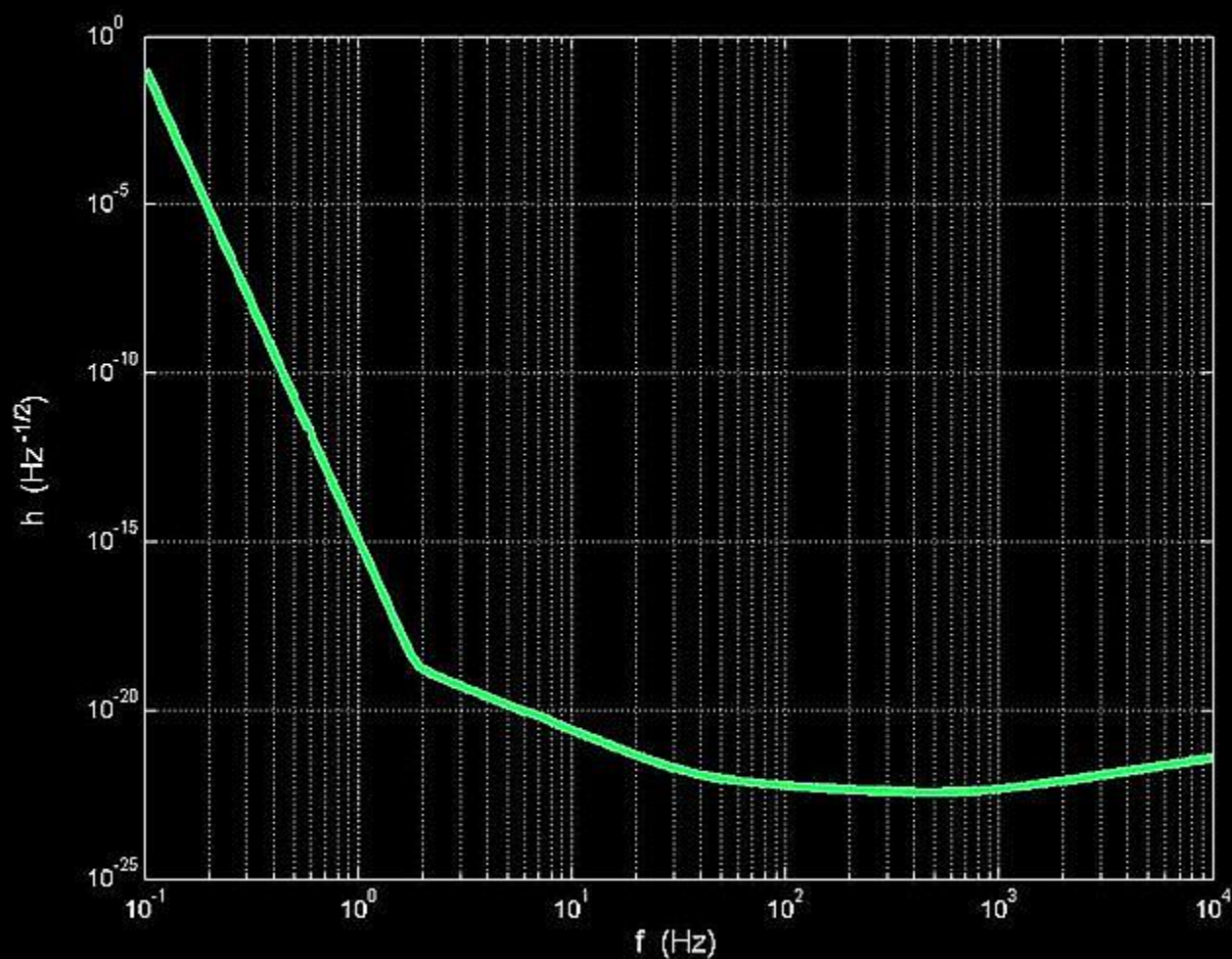


INFN - CNRS

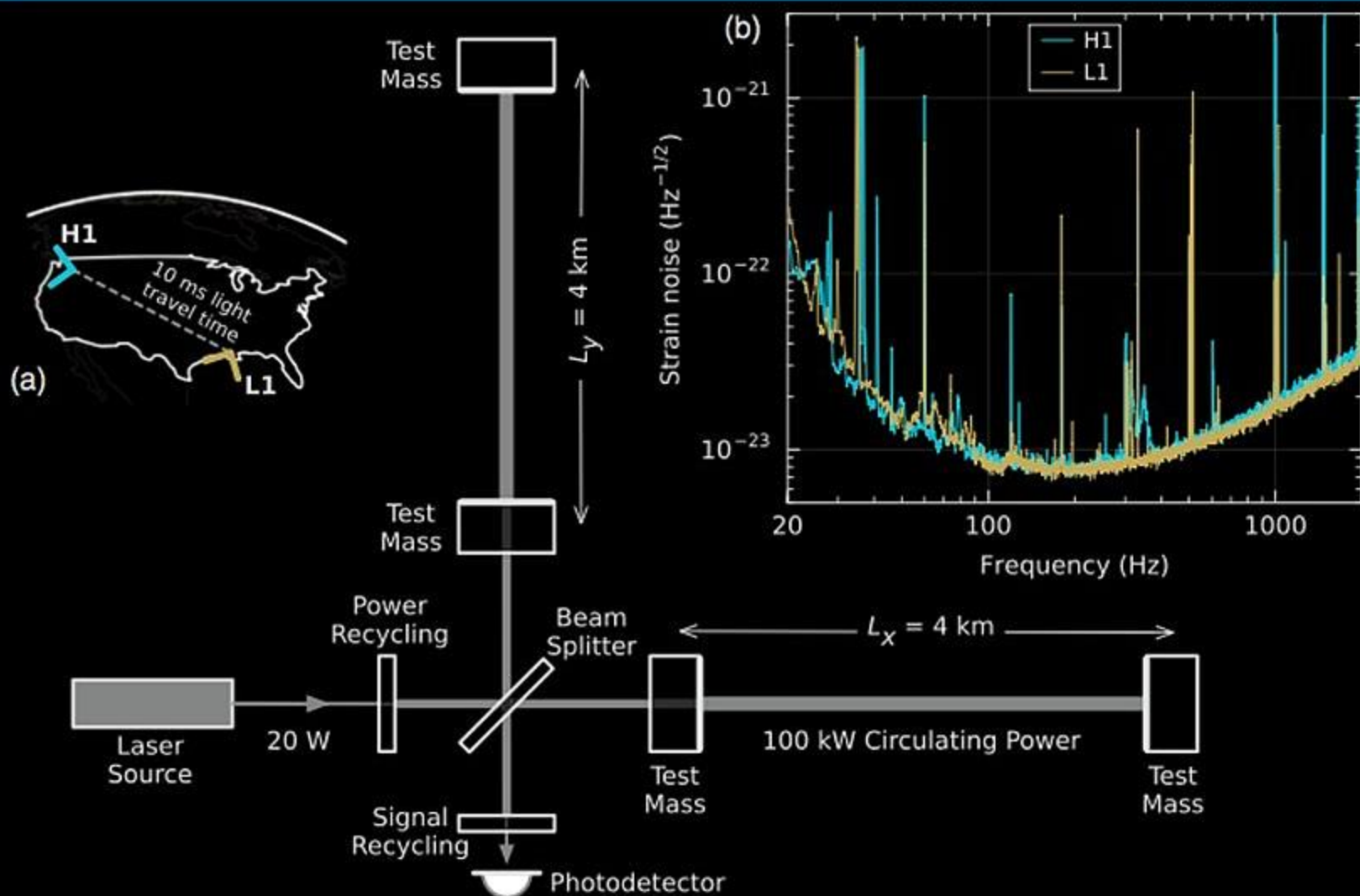


VIRGO

$L = 3 \text{ Km}$



Sensitività (2016) e posizione degli osservatori Hanford e Livingston (LIGO)



Rivelatori Risonanti

Principio di
funzionamento

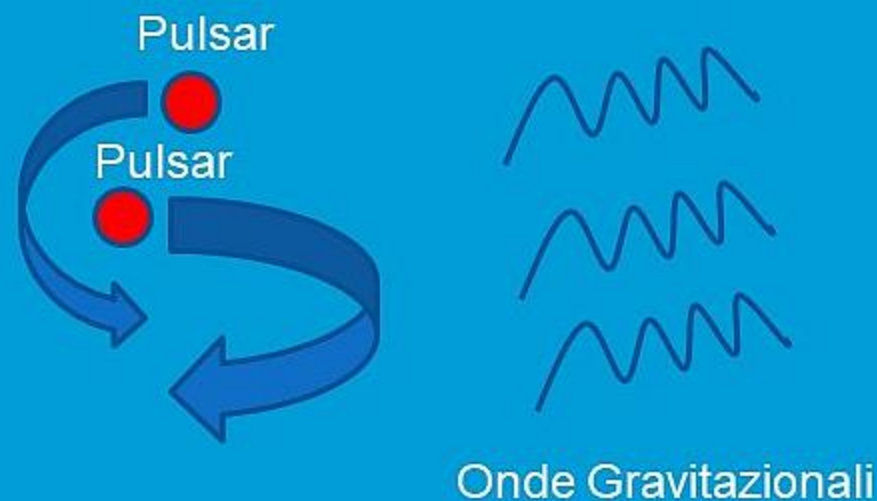
rivelazione delle vibrazioni che si instaurano
nella materia quando investita da una O.G.

? vibrazioni O.G. $\equiv$ accelerazione mareale $\rightarrow$ parti diverse del
corpo tendono a cadere in modo diverso $\rightarrow$
allungamento & accorciamento del corpo $\rightarrow$ stress

Interpretazione alternativa: conversione di O.G. in onde elastiche nel
corpo: parte dell'energia associata alla vibrazione dello spaziotempo è
assorbita dal metallo e trasformata in energia vibrazionale del corpo.

Quantisticamente: annichilazione di gravitoni $\rightarrow$ creazione di fononi

La ricerca delle Onde Gravitazionali
o meglio, della loro evidenza diretta



Rivelatore a Terra



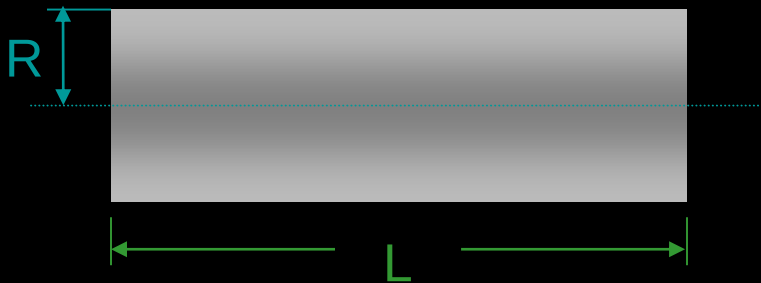
1960 J.Weber inventa e analizza la fisica dei rivelatori risonanti

J.Weber- Generation and detection of g.w. - Phys. Rev. **117**, 306 (1960)

I primi rivelatori furono barre risonanti criogeniche (in Europa proposte dal gruppo di E. Amaldi). Poi superate in sensibilità dagli interferometri.

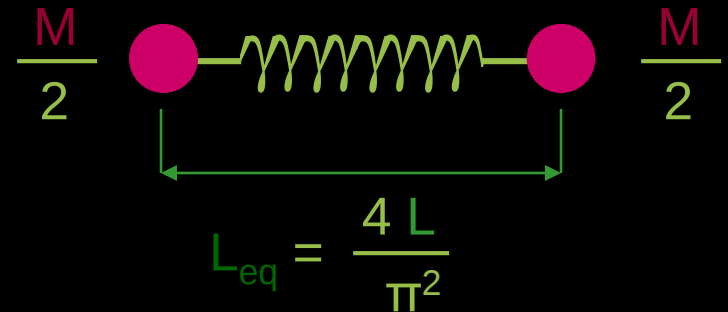
Rivelatori Risonanti

Cilindro di massa M



$\equiv$

Oscillatore Armonico



Frequenza di risonanza del modo di vibrazione longitudinale fondamentale ($R \ll L$)

$$f_0 = \frac{v_s}{2L}$$

← velocità del suono

N.B. – Al 5056 : $v_s \cong 5$ km/s

– $L = 3$ m

$$f_0 \sim 1 \text{ kHz}$$

$$\ddot{x} + \frac{1}{T_0} \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{L_{eq}}{2} \ddot{h}$$

dissipazione accelerazione mareale

$$\frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{Q}$$

← fattore di merito

Sezione d'Urto

Rivelatore risonante immerso in un bagno termico di
O.G. provenienti da tutte le direzioni in modo uniforme

Effetti dissipativi → parte dell'energia vibrazionale assorbita dall'onda
è convertita in calore → aumento fluttuazioni molecole della barra

Equilibrio
Termico



rate di dissipazione
della barra

=

rate di assorbimento
di energia dalle O.G.

$$\frac{E_{\text{vibr.}}}{T_0} = \sigma \Phi_{\text{O.G.}}$$

flusso incidente di
O.G. [W m⁻²]

sezione d'urto [m²]

Es. - Nautilus & Explorer

$Q \sim 10^6$
 $\omega_0 \sim 6 \text{ kHz}$



$\sigma \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$

Sezione d'Urto

area effettiva che la barra presenta all'onda è minore di quella atomica

? così piccola

- Impedenza della barra di Al (con superficie = 1 m²) = $\rho v_s \sim 10^7 \text{ Kg s}^{-1}$
- Impedenza dello spaziotempo = $c^3 / G \sim 10^{35} \text{ Kg s}^{-1}$



attraversando la barra l'impedenza presentata all'onda
aumenta di un fattore piccolissimo ($\cong 1 + 10^{-28}$)

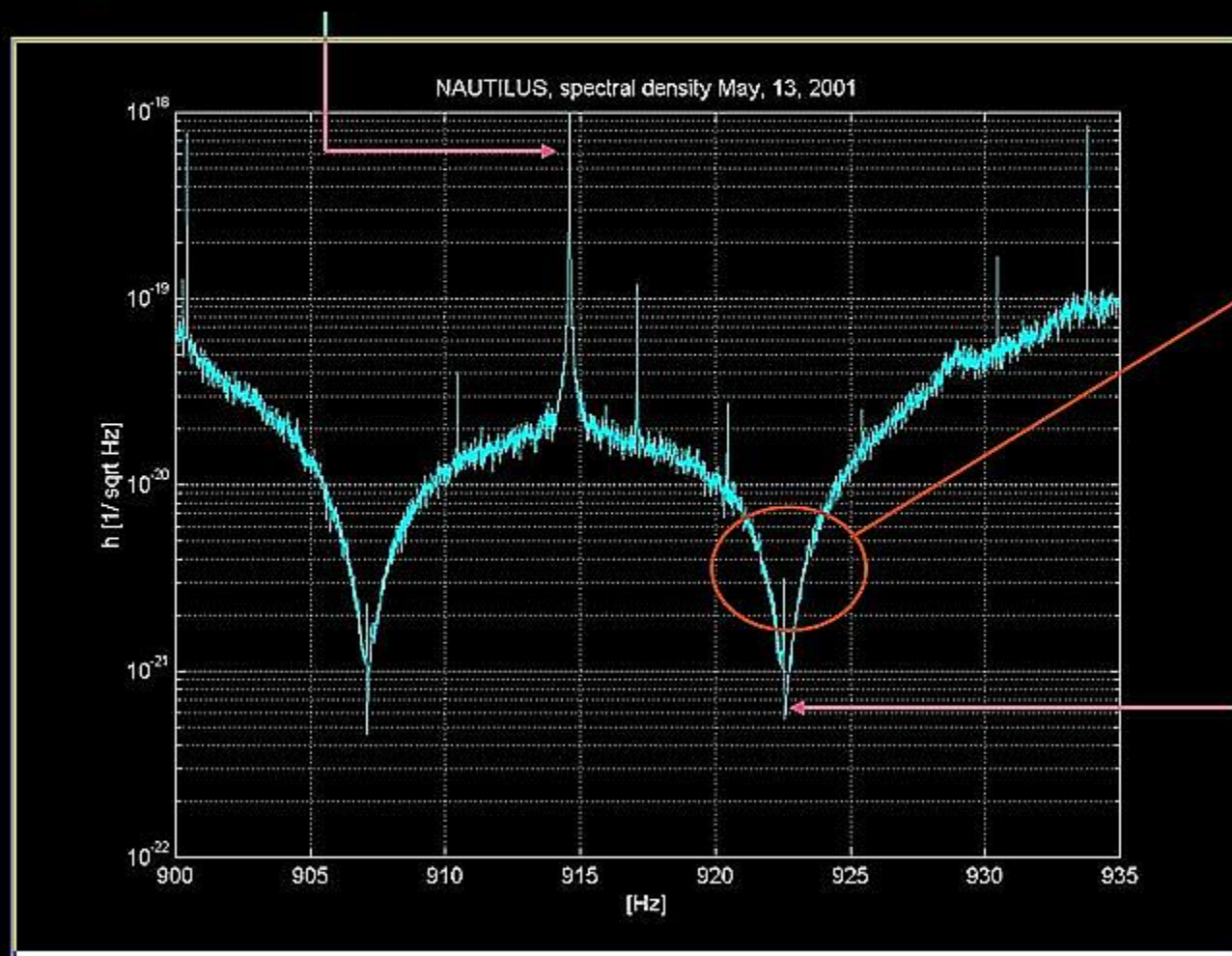
Analogia: è come se provassimo a rivelare un'onda radio usando un
gas neutro estremamente diluito con costante dielettrica $\sim 1 + 10^{-28}$

Rivelazione di O.G. è un
problema di adattamento
d'impedenza

Rivelatore risonante ideale: pezzo di
stella a neutroni ($\rho \sim$ densità della
materia nucleare) con $v_s = c$

Sensibilità

picco di calibrazione

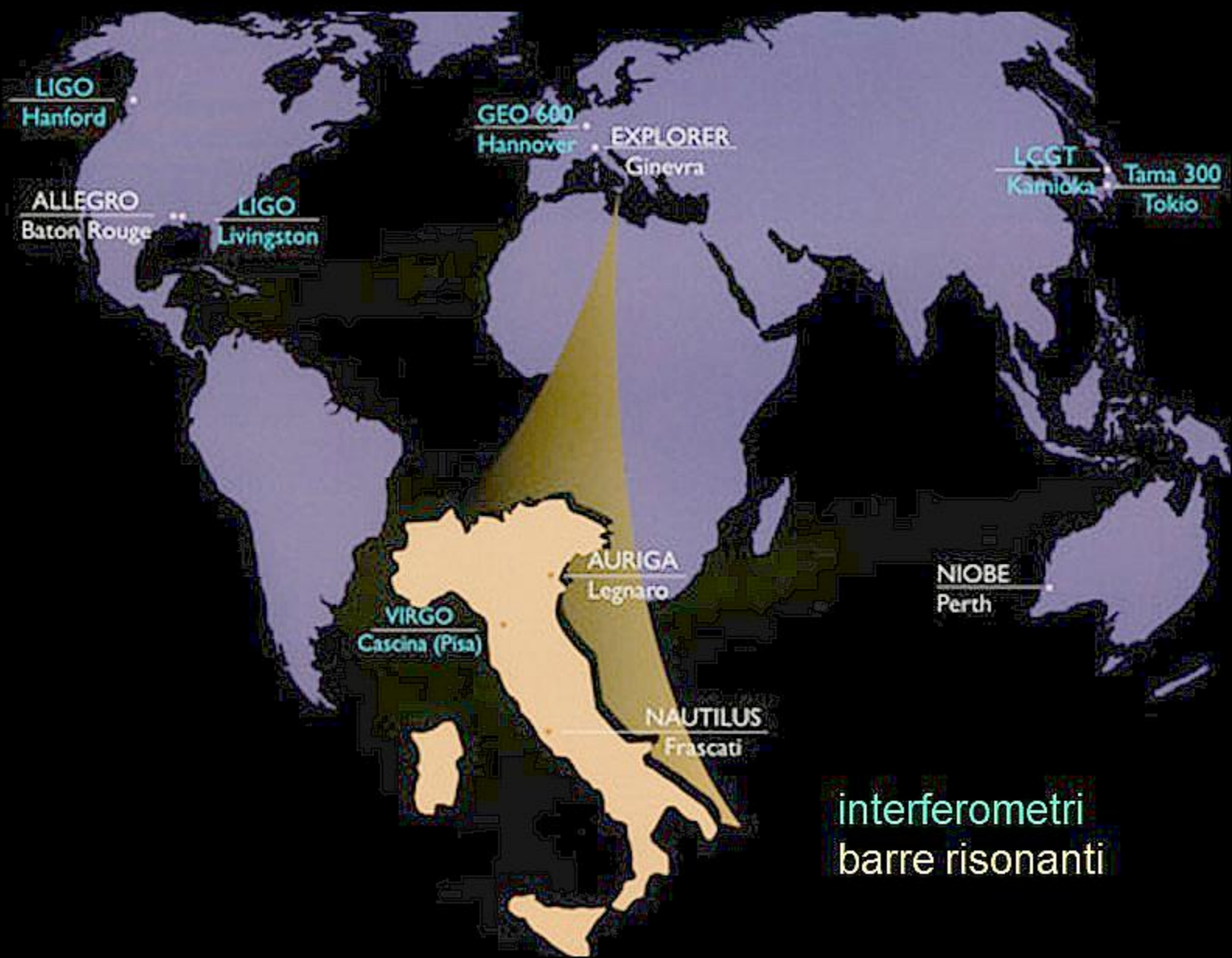


Larghezza
di banda

$$\Delta f \approx \left(\frac{\beta}{T_n} \right)^{1/2}$$

Sensibilità
di picco

$$\propto \left(\frac{T}{M Q} \right)^{1/2}$$

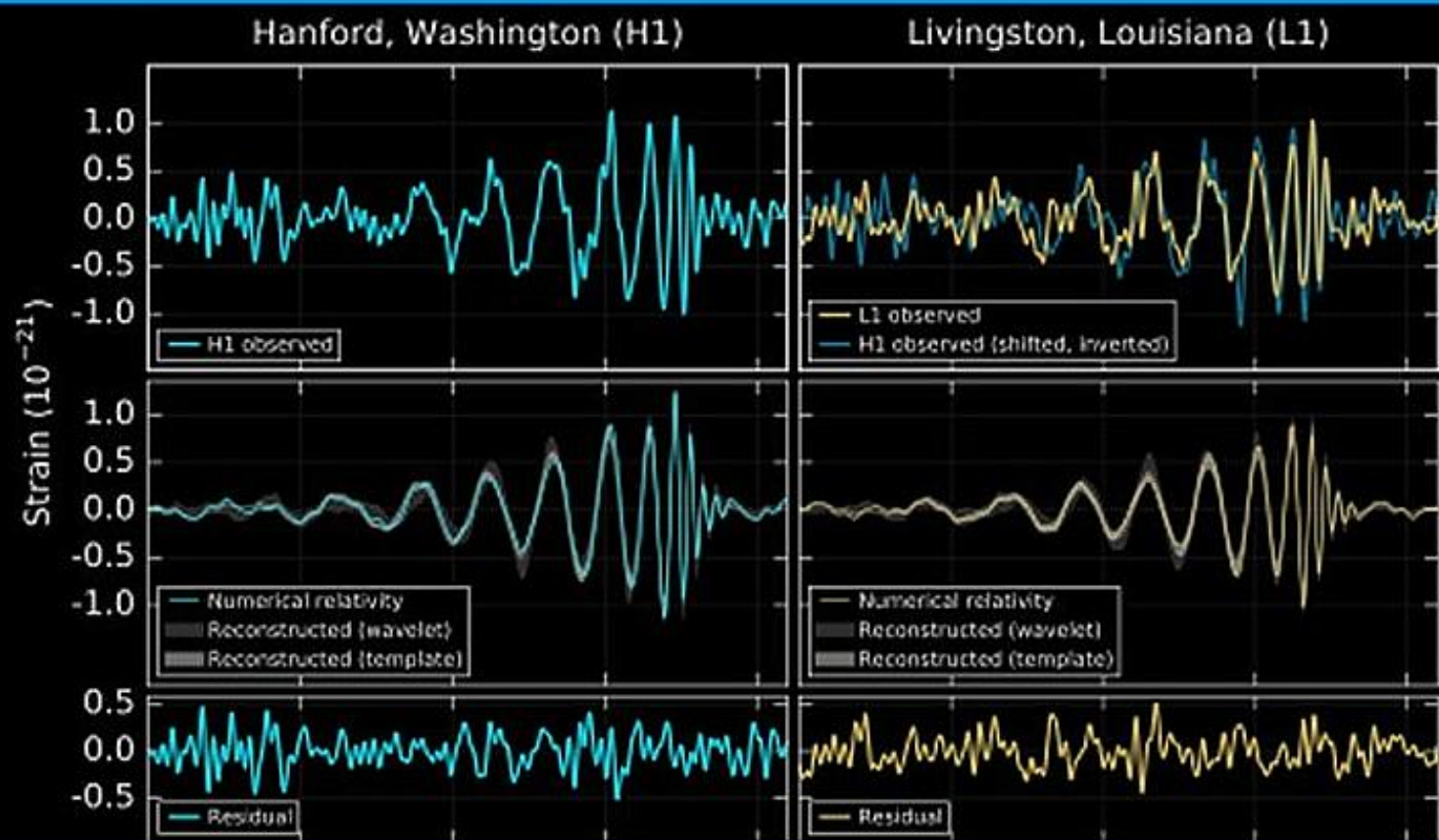


interferometri
barre risonanti

14 Settembre 2015: gli osservatori di Hanford e Livingston osservano il segnale coincidente (poi battezzato) GW150914.

Tale segnale è completamente incompatibile con il fondo, perfettamente in tempo tra Hanford e Livingston (entro i 10 ms).

Tale segnale dura in tutto 0.5 s ed è in perfetto accordo con quanto previsto per il collasso reciproco di due buchi neri.



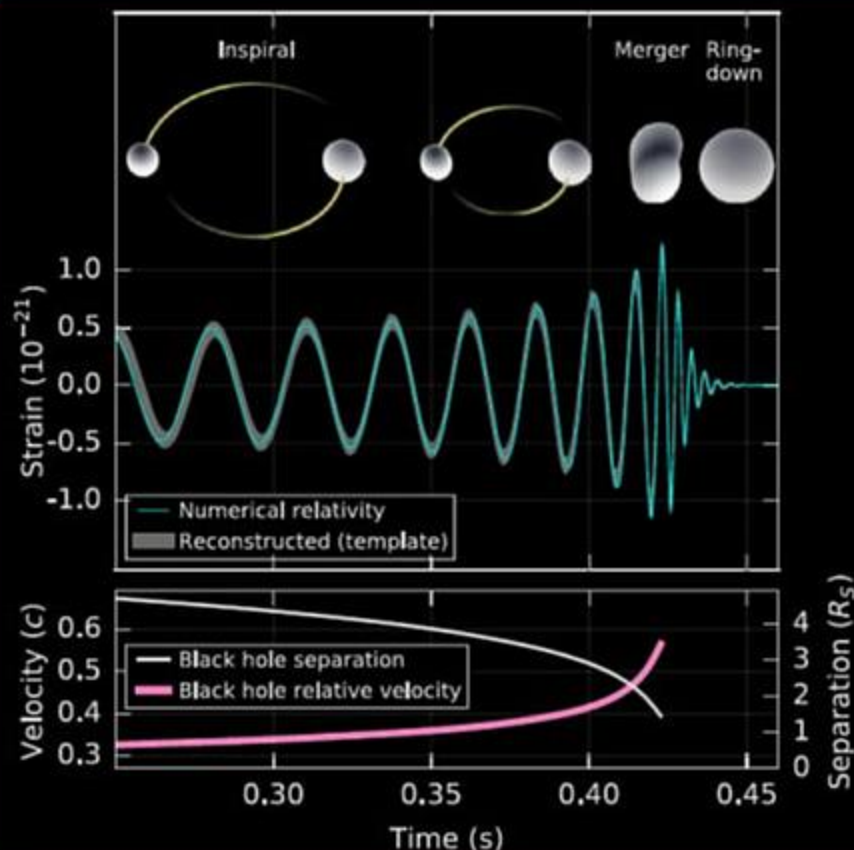
Il segnale osservato può essere generato solo dal collasso reciproco di due buchi neri di circa 36 e 29 masse solari.

Il buco nero risultato (di Kerr) ha una massa di 62 masse solari circa. Tre masse solari circa sono sparite! Trasformate in energia, vibrazione dello spaziotempo!

Physical Review Letters 116 (2016) 061102 è un articolo che entra nella storia.

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	410^{+160}_{-180} Mpc
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



Evidenza schiacciante del collasso BH-BH (solo una coppia di buchi neri può raggiungere una frequenza orbitale di 75 Hz senza contatto reciproco).

La potenza massima trasformata in onde gravitazionali è 1000 volte superiore alla potenza irradiata da una Supernova

$$P_{\text{max}} \approx 4 \times 10^{56} \text{ erg/s}$$

Posizione nello spazio poco definita (600 gradi²), differenza dei tempi di arrivo

Collasso reciproco e buco nero finale entro

$$R_S \approx 200 \text{ km}$$



La strada centenaria delle Onde Gravitazionali

1916 Previsione di Einstein sulle Onde Gravitazionali (all'Accademia delle Scienze di Prussia)
Segnale previsto molto debole, tanto che Einstein stesso era scettico sulla possibilità che fossero mai rivelate



1960's Idea delle barre risonanti criogeniche. Antenne di "Gravity Joe" Joseph Weber.

Edoardo Amaldi e la costruzione delle antenne risonanti europee Auriga (Pd), Nautilus (Frascati), Explorer (CERN)



1990 Costruzione degli Interferometri ad alta sensibilità LIGO (Weiss, Drever, Thorne) e Virgo (Giazotto, Brillet)

2016: 1000 scienziati da varie parti del mondo (USA, Italia, Francia, Germania...) osservano direttamente le onde gravitazionali





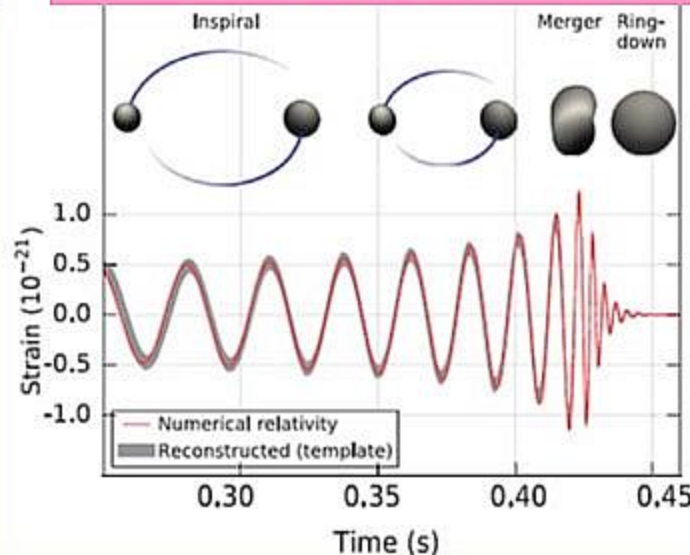
Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

- I rivelatori di LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) hanno osservato onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di masse stellari.
- La forma d'onda rivelata è in accordo con le predizioni della relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri e l'assestamento del buco nero risultante.
- Questa osservazione dimostra l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di masse stellari.
- Questa è la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione di un sistema binario di buchi neri coalescenti.



Scoperta di altre sorgenti di Onde Gravitazionali? Sì!

PRL 116, 241103 (2016)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
17 JUNE 2016

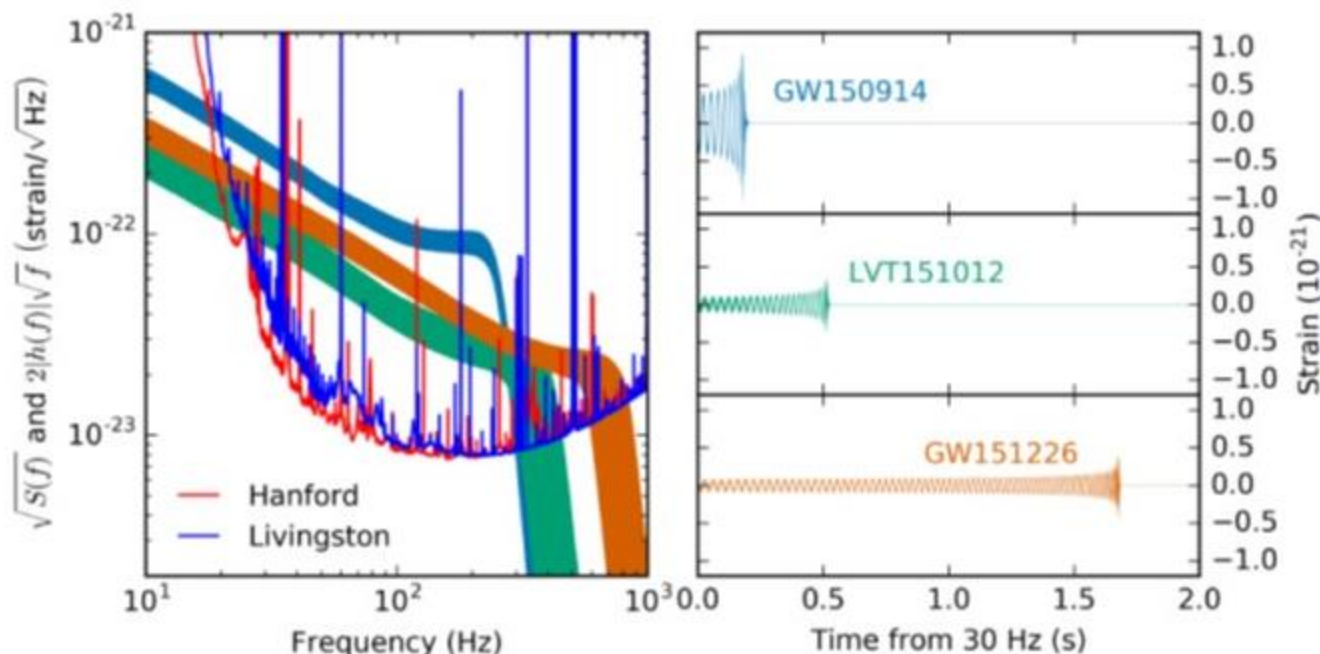


GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 31 May 2016; published 15 June 2016)



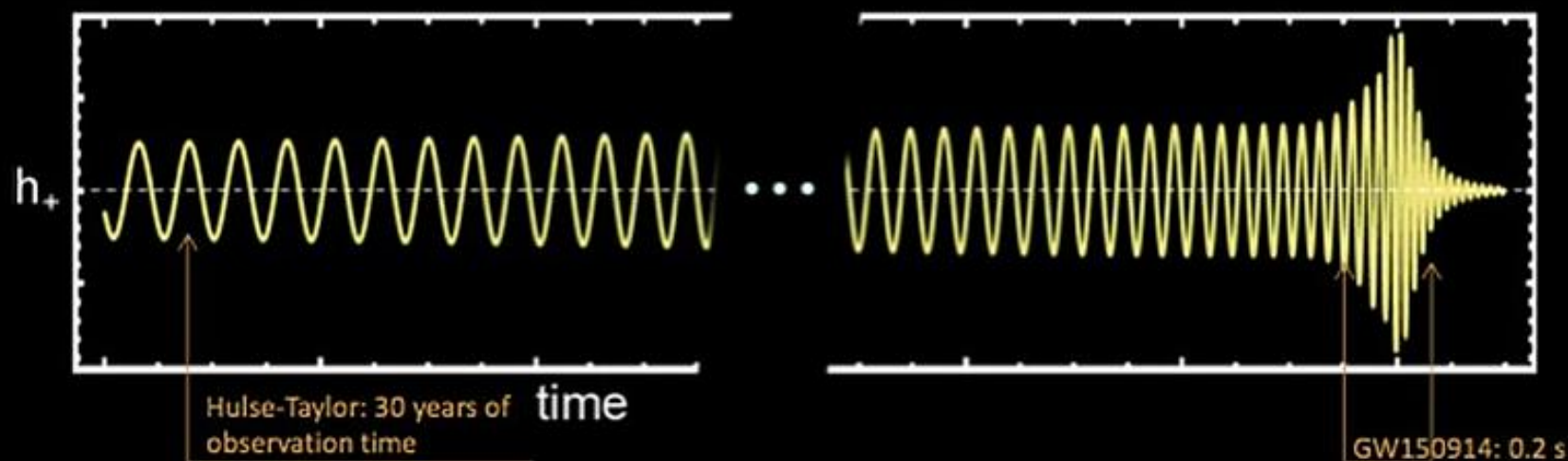
La seconda osservazione di due Black-Holes Coalescenti!

Le coalescenze di Black Holes osservate sono certamente due. Forse tre.

Vi saranno presto tante sorgenti identificate.
Una Astronomia delle Onde Gravitazionali.

PSR1916+13 versus GW150914

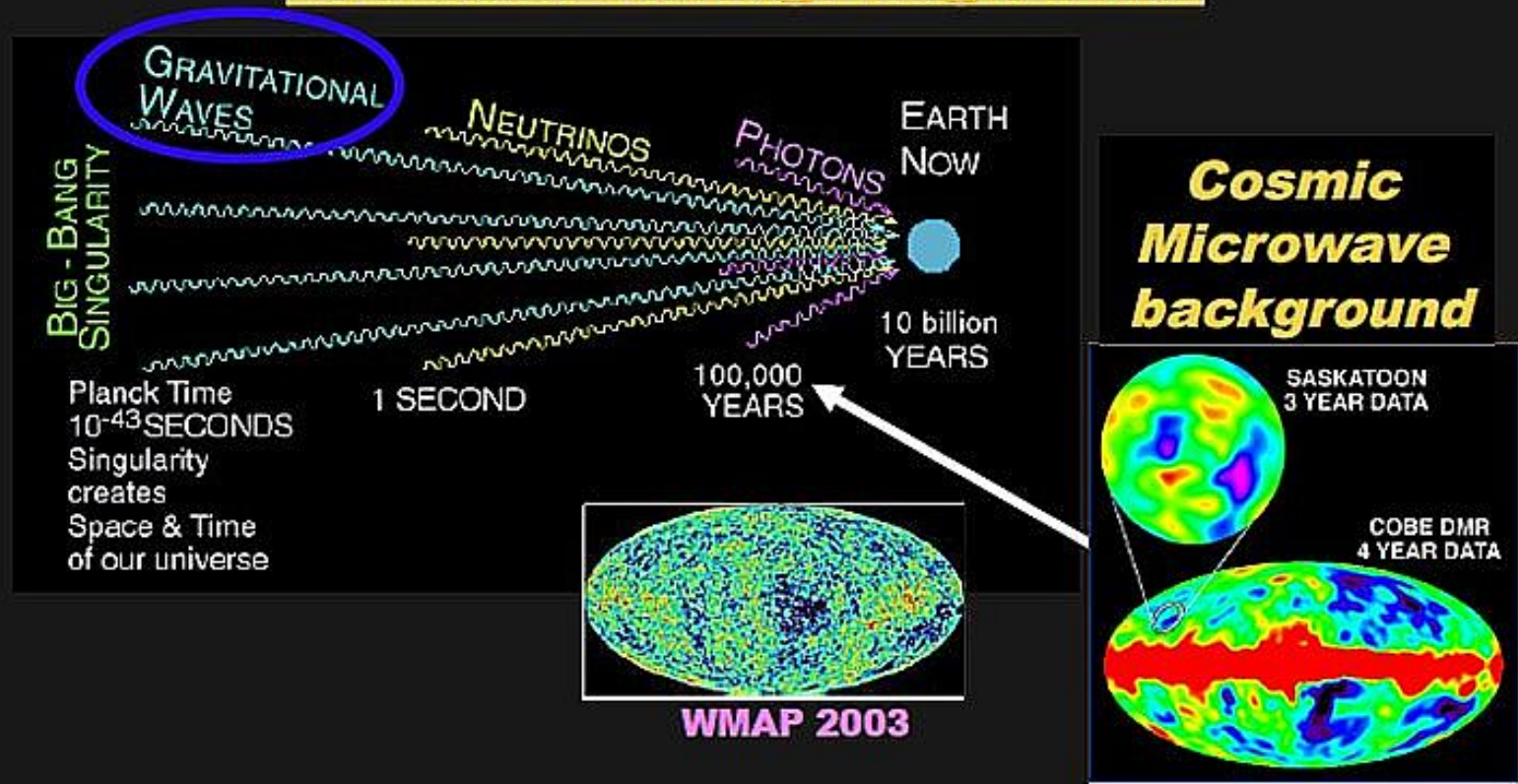
Waveform

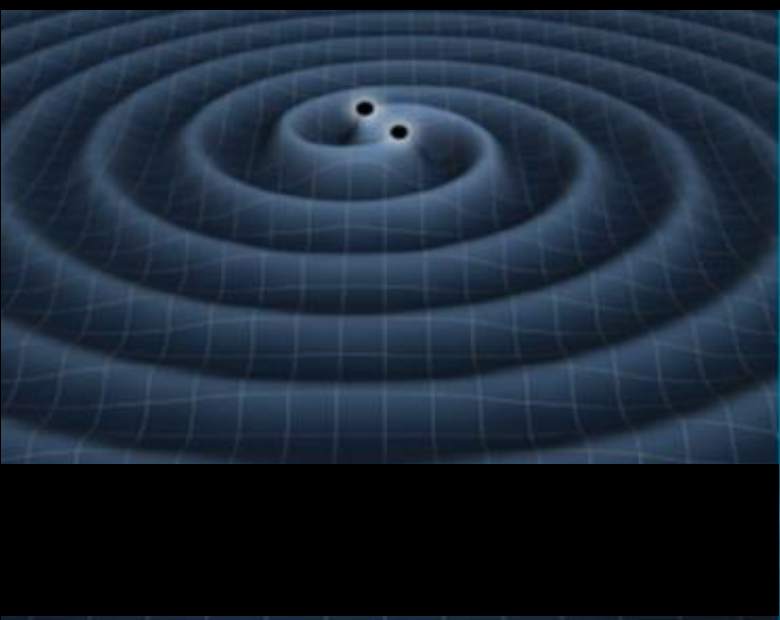


PSR1916+13	Binary system	GW150914
NS-NS	Compact object	BH-BH
$M_1 = 1.44 M_\odot, M_2 = 1.3 M_\odot$	Mass	$M_1 = 36 M_\odot, M_2 = 29 M_\odot$
4×10^{-23}	GW amplitude	2×10^{-21}
$7 \times 10^{-5} \text{ Hz}$	GW frequency	$30 \div 300 \text{ Hz}$
$7.4 \times 10^9 \text{ years}$	Time to merging	$0.3 \div 0 \text{ s}$
$6 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$	Peak luminosity	$3 \times 10^{56} \text{ erg s}^{-1}$
6.4 pc	Distance	410 Mpc
10^6 km	Radius orbit	$\sim 200 \text{ km}$

Universo Primordiale: *“rumore correlato tra i vari rivelatori”*

‘Mormorio’ dal Big Bang iniziale

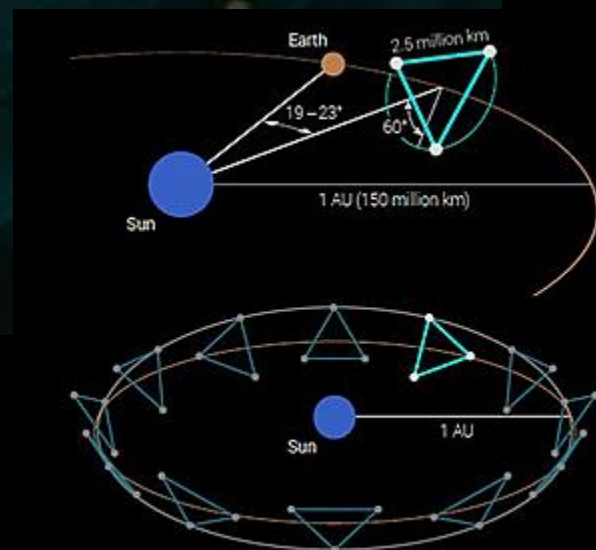
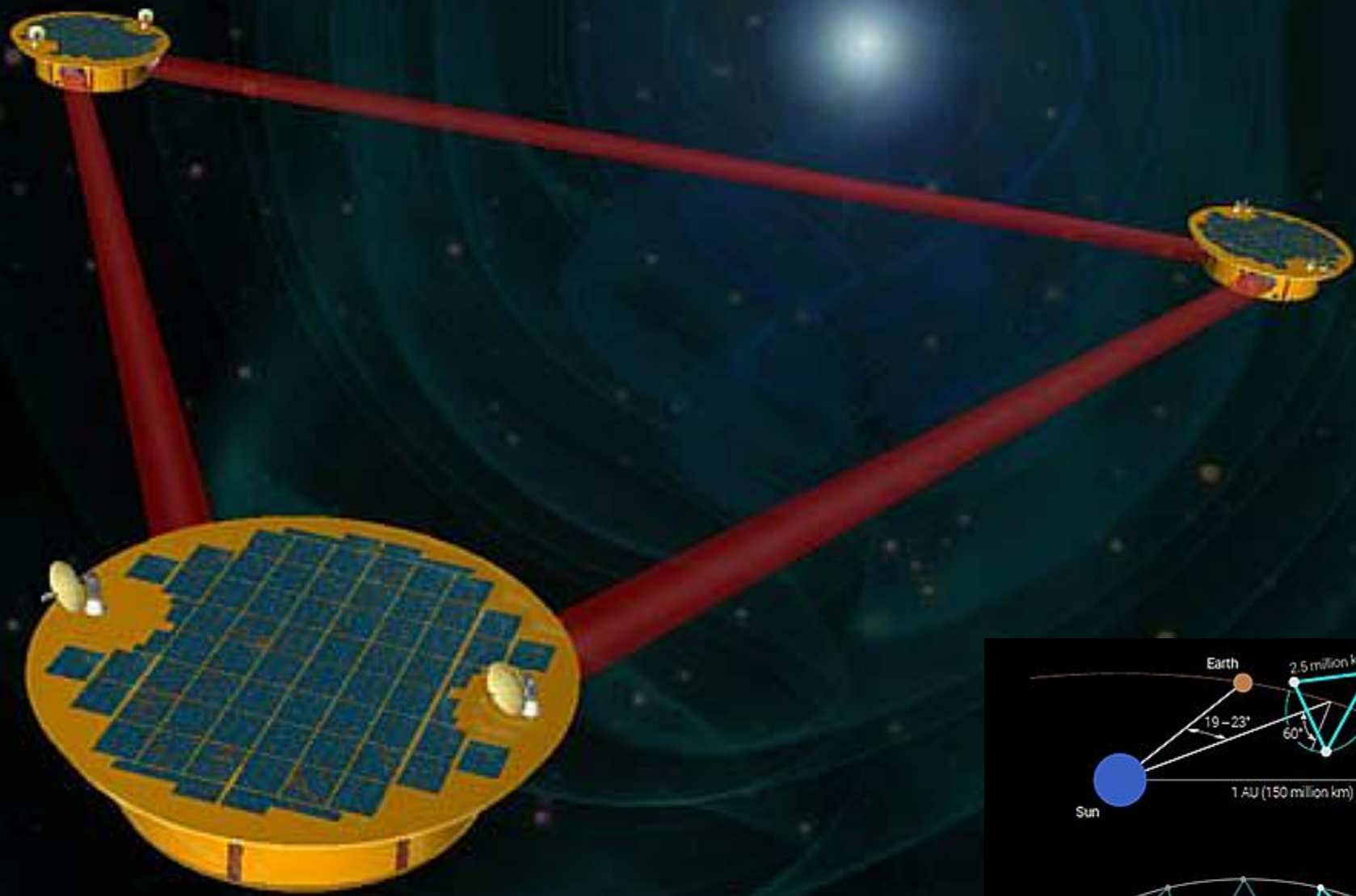




VIII. CONCLUSION

The LIGO detectors have observed gravitational waves from the merger of two stellar-mass black holes. The detected waveform matches the predictions of general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

- I rivelatori di LIGO hanno osservato onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di masse stellari.
- La forma d'onda rivelata è in accordo con le predizioni della relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri e l'assestamento del buco nero risultante.
- Queste osservazioni dimostrano l'esistenza di sistemi binari di buchi neri con masse stellari.
- Questa è la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione di un sistema binario di buchi neri coalescenti.



LISA

