

# Andiamo in onda - Viaggio tra le onde gravitazionali

Alessandra Gnechi  
*CERN, Theoretical Physics Department*

23 Novembre 2017



European  
Commission

H2020-MSCA-IF-2015  
702548 *GaugedBH*

# Outline

1. Intro - Le onde in fisica
2. Il caso delle onde gravitazionali
  1. Le sorgenti
  2. La rivelazione
  3. Next: multimessenger astronomy

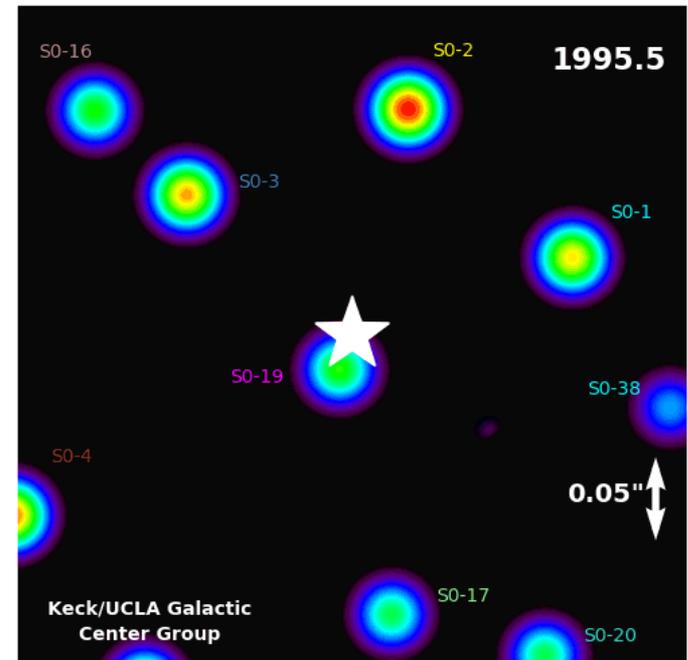
End: Cosa “rimane” da scoprire...?

# La mia ricerca - Perché studiare i buchi neri?

- Punto finale del collasso gravitazionale di stelle sufficientemente massive
- “Non” emettono luce ma si possono riconoscere e studiare
  - *Sono sistemi talmente attrattivi che influenzano l'orbita dei corpi celesti che li circondano.*
  - **Possiamo rilevare onde gravitazionali!!!**



From the Movie «Interstellar»



Animation created by Prof. Andrea Ghez and her research team at UCLA and are from data sets obtained with the W. M. Keck Telescopes.

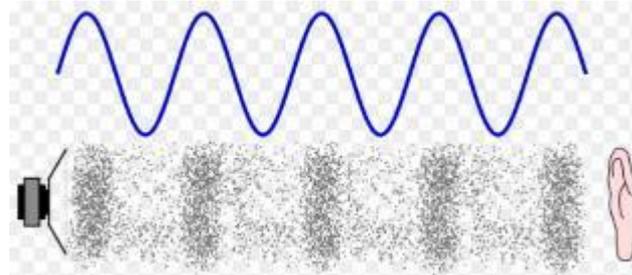
- Sono l'oscillatore armonico della gravità quantistica (A. Strominger)

# Introduzione: Le onde in fisica

- Onde meccaniche: acustica, fluidodinamica
  - Forze elastiche
- Onde nel vuoto:
  - Elettromagnetismo
- La fisica fondamentale
  - Meccanica quantistica (onde piane)
  - Relatività generale (onde gravitazionali)

# Onde di origine meccanica

- Onde sonore



- Sistema di molle elastiche

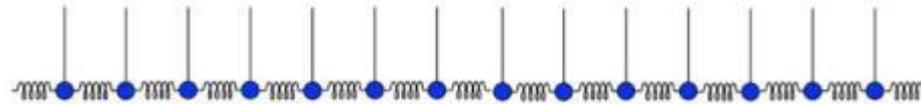


Image by  
Wikimedia Commons

- La tensione è una forza elastica tra le componenti di una corda

# Equazione delle onde

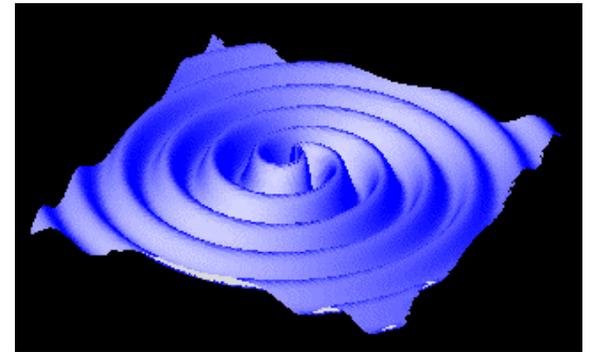
- Tutti gli esempi precedenti sono descritti da un'unica equazione. Nel vuoto:

$$\frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \psi(\vec{x}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi(\vec{x}, t)}{\partial t^2} = 0$$

- Le onde:

$$\psi(\vec{x}, t) = e^{\pm i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}, \quad |\vec{k}| = \frac{\omega}{c}$$



# Maxwell & Einstein: onde nel “vuoto”

- Elettromagnetismo

- Potenziali elettromagnetici:

$$A_\mu \equiv (\varphi, \vec{A})$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{J}$$

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Gravità (RG)

- La geometria dello spazio tempo, la metrica:

$$g_{\mu\nu} \approx \overline{g_{\mu\nu}} + h_{\mu\nu}$$

$$\eta^{\alpha\beta} \partial_\alpha \partial_\beta h_{\mu\nu}(x^\sigma) = 0$$

# Maxwell & Einstein: scale di energia

- Elettromagnetismo
  - Forza tra due cariche
- Gravità (newtoniana)
  - Forza tra due corpi

$$F_{em} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F_g = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Le due forze a confronto

$$\frac{F_{em}}{F_G} \approx 10^{42} \quad (e)$$
$$\approx 10^{36} \quad (p)$$

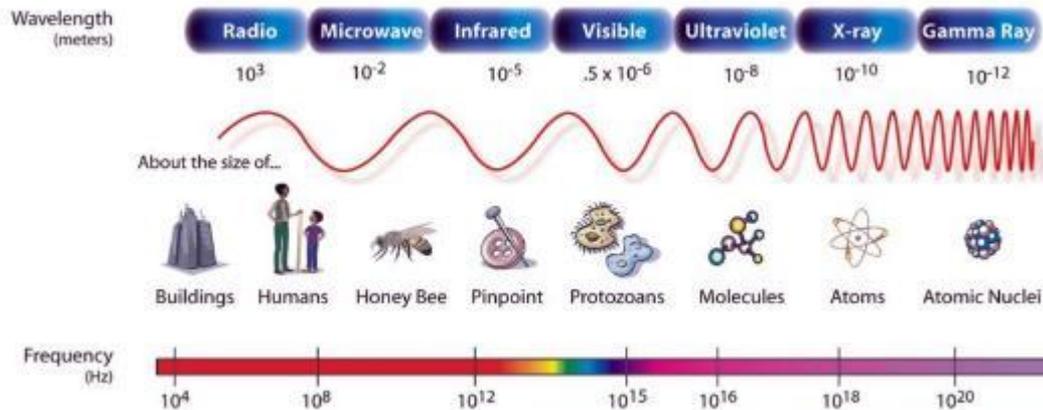
$$\bar{m} \sim \underbrace{\sqrt{\frac{e}{\hbar c 4\pi\epsilon_0}}}_{\alpha} \underbrace{\sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}}_{M_{Pl}}$$

# Maxwell & Einstein: scale di energia

- Elettromagnetismo
  - Energia della luce visibile, quantizzata
$$E = \hbar\omega$$
  - Accoppiamento di una particella carica ai campi elettromagnetici:

$$\alpha = \sqrt{\frac{e}{\hbar c 4\pi\epsilon_0}} \approx \frac{1}{137}$$

- Gamma rays  
1 MeV
- X-rays  
1-100 keV
- UV  
10-100 eV
- Visible  
1 eV
- IR  
10-100 meV, 1eV
- Micro-radio waves  
10<sup>-9</sup> eV, meV



*image: Nasa*

# Maxwell & Einstein: scale di energia

- Gravità
  - Massa fondamentale

$$M_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 1.22 \cdot 10^{19} \frac{GeV}{c^2}$$

- Segnala la scala in cui le particelle fondamentali iniziano a influenzare loro stesse lo spazio tempo che le circonda
- La relatività generale descrive energie molto più basse

# Esperimenti di fisica delle particelle

- Test del modello standard
- Esperimenti conducibili:
  1. In laboratorio (acceleratori)
  2. Con telescopi in osservatori terrestri
  3. Con satelliti
- Fisica degli acceleratori: LHC
  - Energia  $\sim 1\text{-}10 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$
  - Si cercano nuove particelle fondamentali, nuove forze di interazione a scale molto inferiori alla scala di Planck

# L'Universo come un laboratorio

- Radiazione elettromagnetica
  - Sorgenti:
    - Corpi celesti stazionari*
    - Implosioni stellari*
    - Radiazione di fondo (CMB, 240  $\mu\text{eV}$ ): informazioni sull'inflazione*
    - Dark matter?.....*
- Distanze
  - Scale ~ 15 Mpc
- Energie
  - Radiazione solare : reazioni nel sole, 100 MeV – 1.6,3.4eV luce visibile
  - Gamma ray bursts: ~ TeV
- Al di là della gravità Newtoniana
  - Test della relatività generale, regime non lineare

$$1 \text{ eV} = 1.06 \times 10^{-19} \text{ J}$$

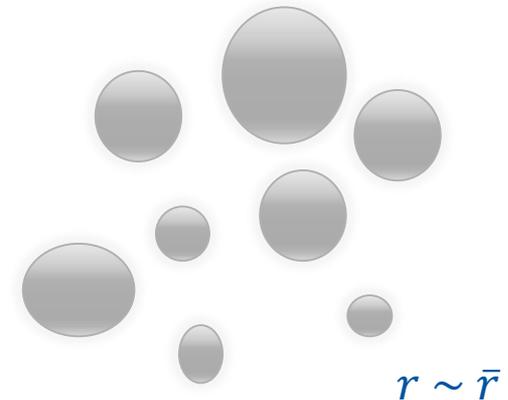
# Fenomeni ondulatori in gravità

- La rivelazione di onde gravitazionali con interferometri avviene quando si verificano fenomeni di  *fusione* che coinvolgono corpi sufficientemente massivi.
- È necessario che avvengano fenomeni catastrofici perchè si producano onde gravitazionali?

# Fenomeni ondulatori in gravità

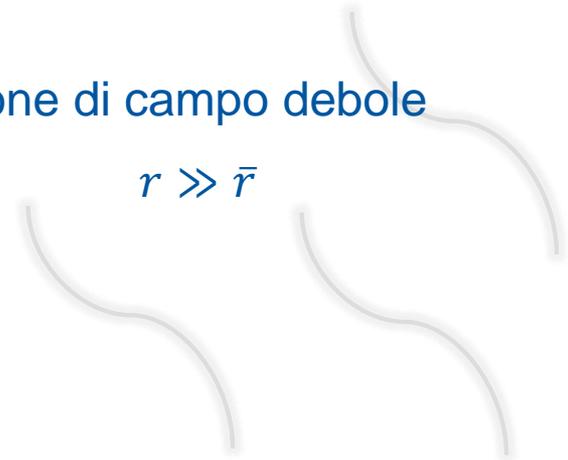
- *Sorgente*: distribuzione di materia
- La sorgente determina lo spazio intorno ad essa
- Lontano dalla sorgente, a scale di massa molto inferiori, siamo in una regione di *campo debole*
- Si può approssimare i fenomeni osservati utilizzando la *gravità linearizzata*

$$g_{\mu\nu} \approx \overline{g_{\mu\nu}} + h_{\mu\nu}$$



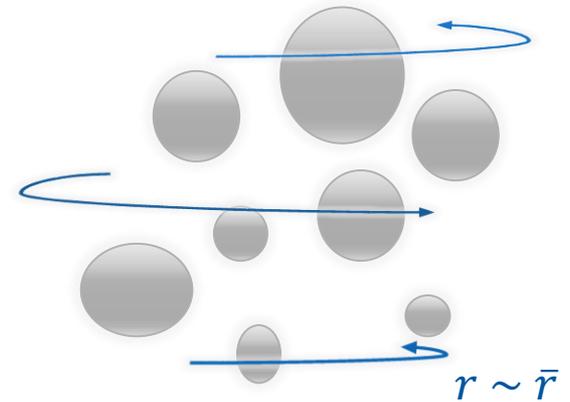
regione di campo debole

$$r \gg \bar{r}$$



# Fenomeni ondulatori in gravità

- Le equazioni della relatività generale che descrivono la sorgente diventano equazioni delle onde
- Sistemi stazionari emettono energia **gravitazionale** per *irraggiamento*
- Si può osservare nella diminuzione del periodo di rotazione in sistemi binari di stelle



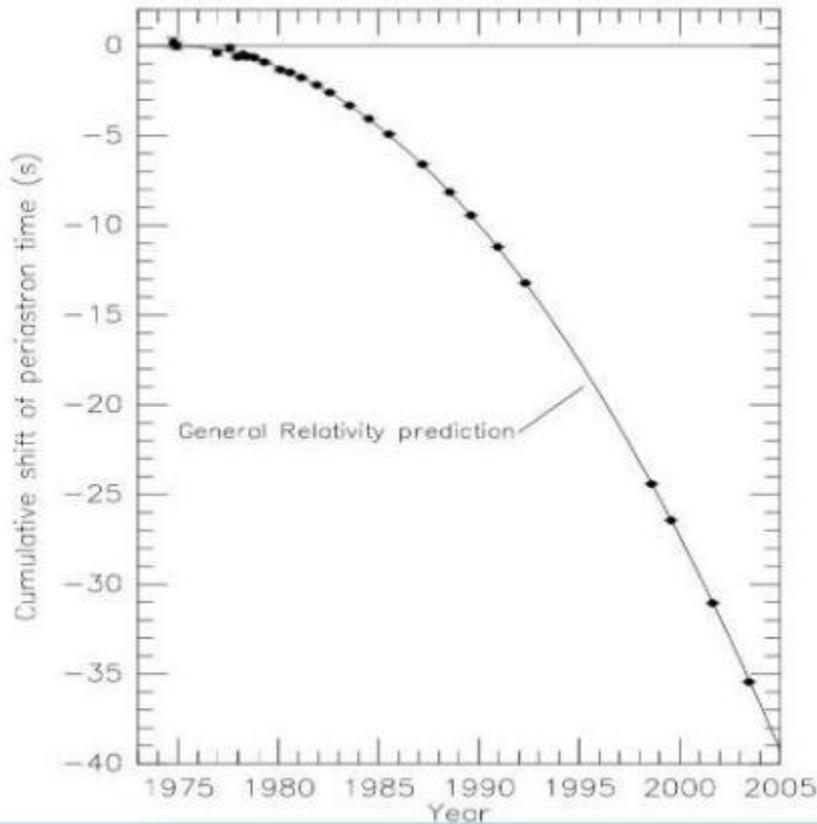
regione di campo debole

$$r \gg \bar{r}$$



# Onde gravitazionali – rivelazione indiretta

Sistemi binari di stelle con perdita di energia per irraggiamento di onde gravitazionali

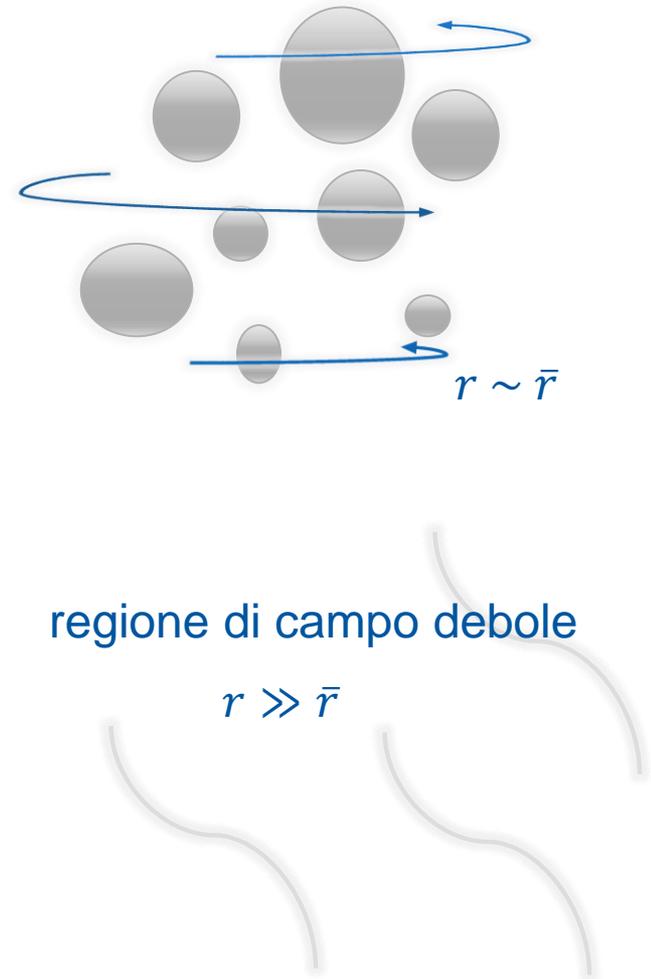


- prima osservazione PSR B1913+16 , Hulse&Taylor, 1974
- sistema binario di pulsar e stella di neutroni con periodo di rivoluzione di sole otto ore
- Nobel Prize 1993

[ArXiv:astro/ph/0407149  
Weisberg-Taylor]

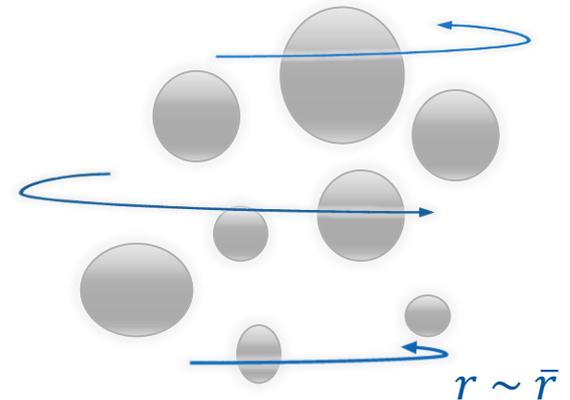
# Fenomeni ondulatori in gravità

- Irraggiamento  $\sim \frac{1}{r}$
- Per la radiazione elettromagnetica, prodotta da due (o più cariche) separate in oscillazione, si può misurare l'effetto della radiazione su una carica dovuta al momento di dipolo
- Poiché la carica è conservata non ci sono momenti di *monopolo*



# Fenomeni ondulatori in gravità

- Irraggiamento  $\sim \frac{1}{r}$
- In gravità, non solo l'energia é conservata, ma anche il momento: non c'è un momento di dipolo.
- Si osserva l'effetto della radiazione su due masse test, misurando il loro *displacement*: momento di quadrupolo
- Non possiamo osservare l'effetto su una sola massa.. l'apparato di misura sarebbe ugualmente influenzato.
- Conseguenza del principio di equivalenza, laboratorio in "free falling"



regione di campo debole

$$r \gg \bar{r}$$

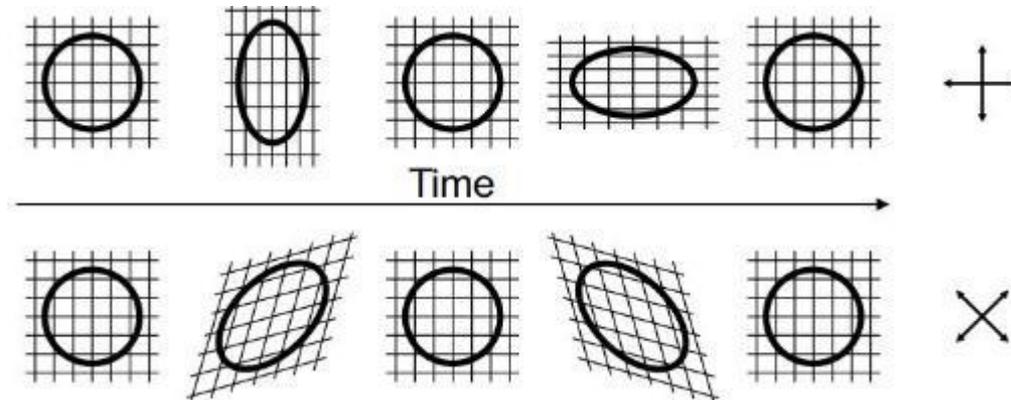


# Teoria delle onde gravitazionali

- La soluzione dell'equazione delle onde in generale è

$$h_{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta} e^{i(k \cdot x - \omega t)}$$

- L'onda si propaga alla velocità della luce
- $a_{\alpha\beta}$  descrive le polarizzazioni delle onde gravitazionali, che sono, come per le onde elettromagnetiche, **trasverse** alla direzione di propoagazione

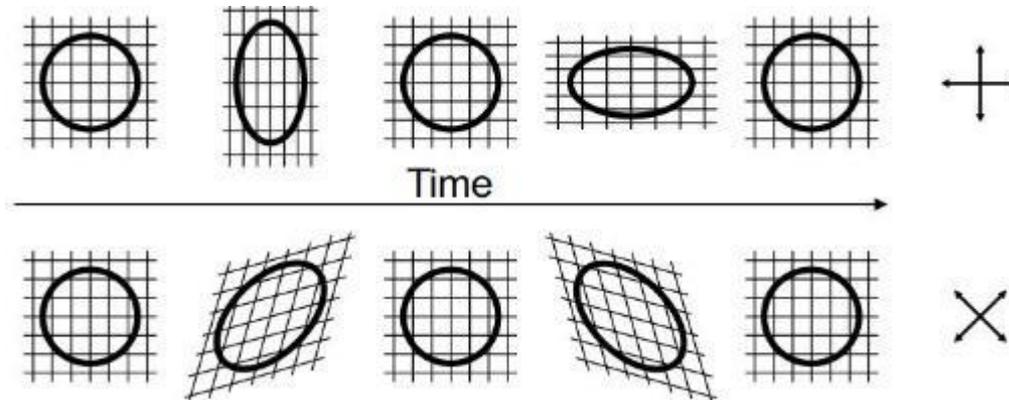


*Image by  
P.Sutton*

# Teoria delle onde gravitazionali

- Un'onda piana a frequenza definita  $\omega$  ha vettore d'onda  $k^\alpha = (\omega, 0, 0, \omega)$  (si propaga lungo  $z$ )
- Le fluttuazioni dello spazio sono descritte da una matrice della metrica:

$$h_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



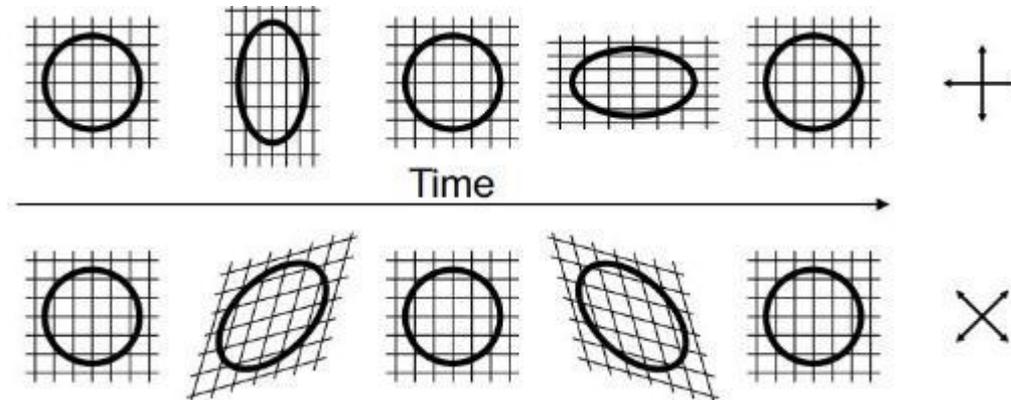
*Image by  
P.Sutton*

# Teoria delle onde gravitazionali

- L'elemento di linea è

$$ds^2 = - dt^2 + (1 + h_+)dx^2 + (1 - h_+)dy^2 + 2h_\times dx dy + dz^2$$

- La metrica è dipendente dal tempo
- La distanza tra due corpi in questa metrica è dipendente dal tempo!
- Passaggio di un'onda gravitazionale modifica (temporaneamente) le distanze tra due masse
- È il principio alla base dell'interferometria per la rivelazione delle onde gravitazionali



*Image by  
P.Sutton*

# Interferometri per onde gravitazionali

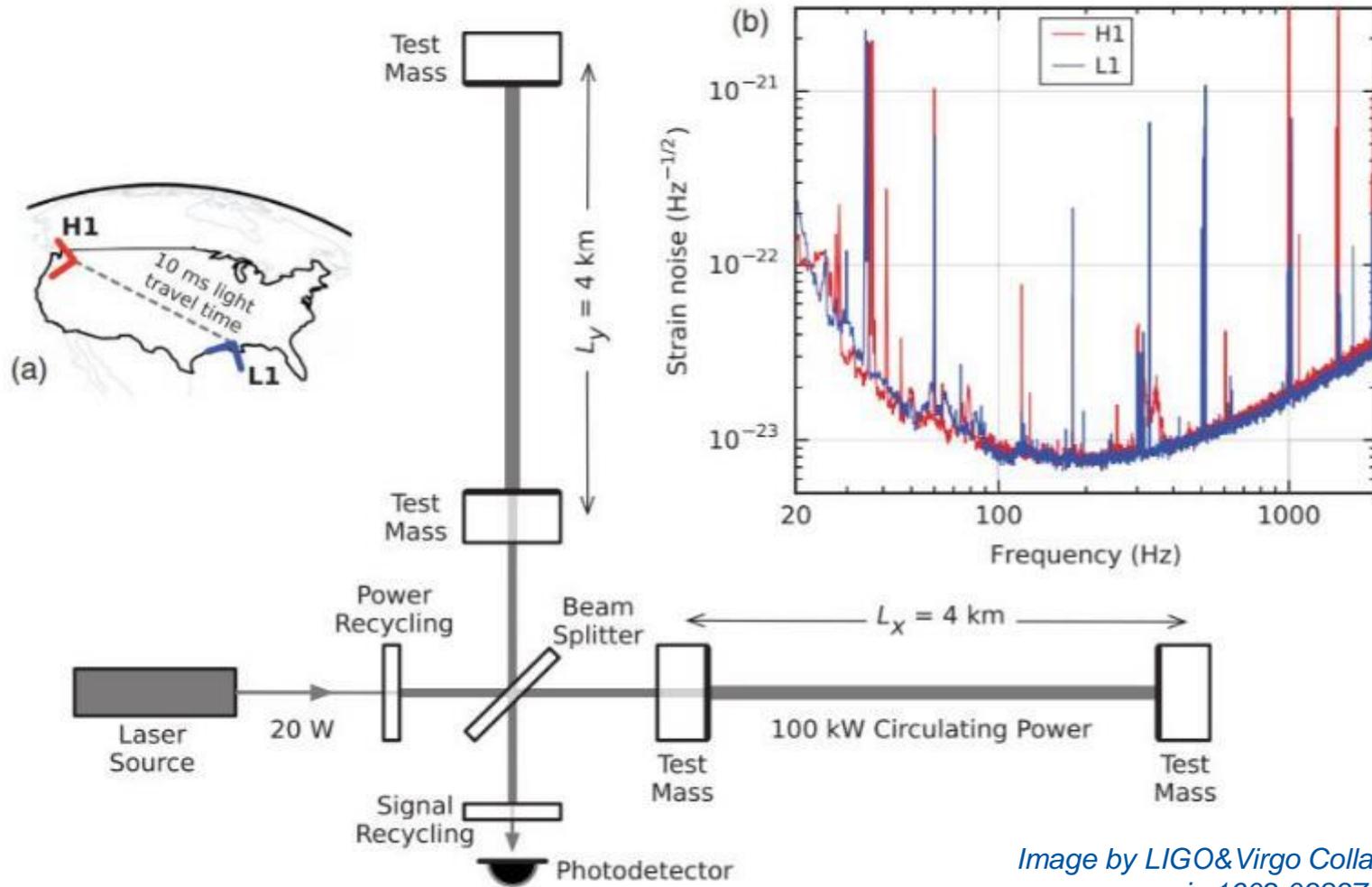


Image by LIGO&Virgo Collaborations  
arxiv:1602.03837

# Sorgenti di onde gravitazionali

Esempio: sistema binario

- Fluttuazioni della metrica

$$h_{ij}^{TT}(t, \vec{x}) = \frac{1}{r} \frac{2G}{c^4} \ddot{Q}_{ij}^{TT}(t, r)$$

- Momento di quadrupolo legato alla distribuzione di materia

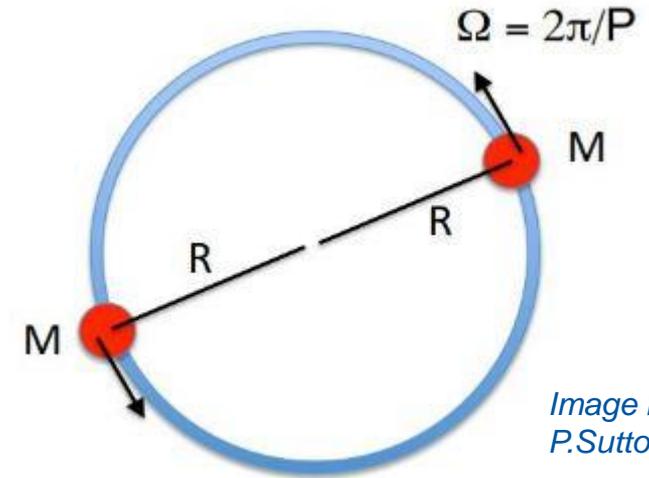
$$M_{ij} \approx mR^2 e^{i\omega_s t}$$

- ampiezza dell'onda gravitazionale

$$h_{\times,+} \sim \frac{1}{r} \frac{4GmR\omega_s^2}{c^4}$$

- Terza legge di Keplero

$$\omega_s = \frac{Gm}{R^3} \quad \longrightarrow \quad h \sim \frac{1}{r} \frac{2G}{c^4} \frac{m^2}{R}$$



# Sorgenti di onde gravitazionali

Esempi:

1. Stelle di neutroni in sistema binario

$$M \approx 1.4 M_{\odot}, r = 5 \text{ kpc}, \omega = 1 \text{ hour}^{-1}$$
$$h \sim 10^{-22}$$

2. Per lo stesso sistema, ma ora con una frequenza  $f \sim 100 \text{ Hz}$  (che si può rilevare agli interferometri), si ottiene la stessa ampiezza  $h \sim 10^{-22}$  ad una distanza  $r = 15 \text{ Mpc}$ , approssimativamente uguale alla distanza con il cluster di galassie Virgo.

3. Per un periodo  $T \sim 0.02 \text{ s}$ , corrispondente alla frequenza di  $100 \text{ Hz}$ , la separazione orbitale è  $R \sim 100 \text{ km}$  ! **Corpi molto compatti!!** (NS-NS, NS-BH, BH-BH) (e.g.  $R_{\odot} \sim 7 \times 10^5 \text{ km}$ )

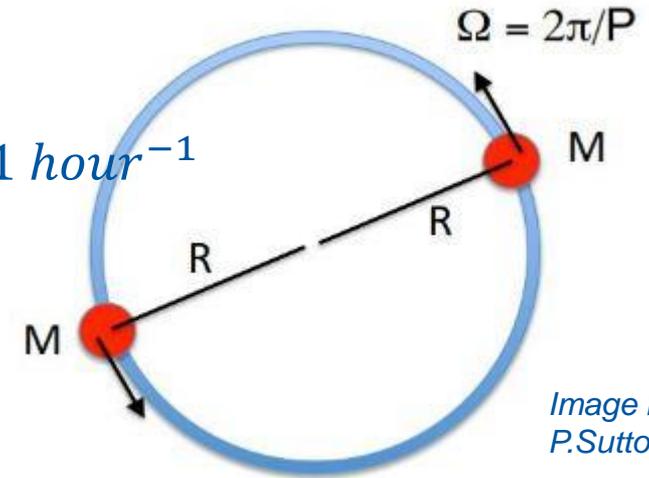


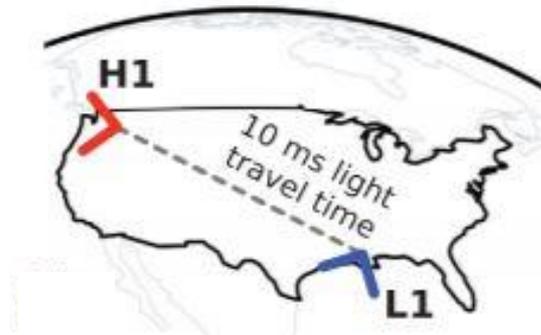
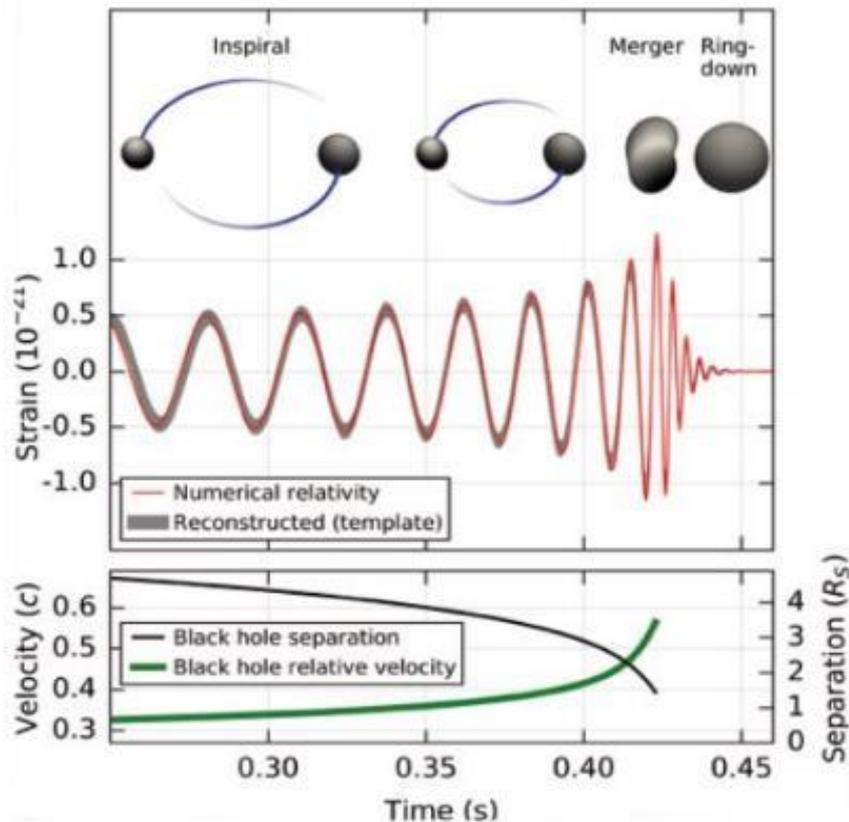
Image by P.Sutton

$$h \sim \frac{1}{r} \frac{2G}{c^4} \frac{m^2}{R}$$

$$\omega_s = \frac{Gm}{R^3}$$

$$f_{GW} \sim 2f_s = \omega_s/\pi$$

# Interferometri per onde gravitazionali



ArXiv:1602.03837

PRL 116, 061102 (2016)

“On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal.”

LIGO & Virgo  
Scientific Collaborations

# Interferometri per onde gravitazionali

- Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (**LIGO**)
  - LIGO Hanford, Washington
  - LIGO Livingston, Louisiana

<http://www.ligo.org/>



*Hanford Interferometer  
Image by LIGO collaboration*

- **Virgo** interferometer
  - Cascina (Pisa)

<http://www.virgo-gw.eu/>



*Image by Virgo collaboration*

# Osservazione di GW



Image credit: LIGO/Virgo/Caltech/MIT/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

## Black hole mergers

- GW150914:  
36 e 29 masse solari
- GW151226:  
14 e 7.5 masse solari
- GW170104  
31 e 19 masse solari
- GW170814  
30 e 25 masse solari

Rivelatori sensibili  
alle frequenze intorno a  
 $\sim 100\text{Hz}$  : *chirp*

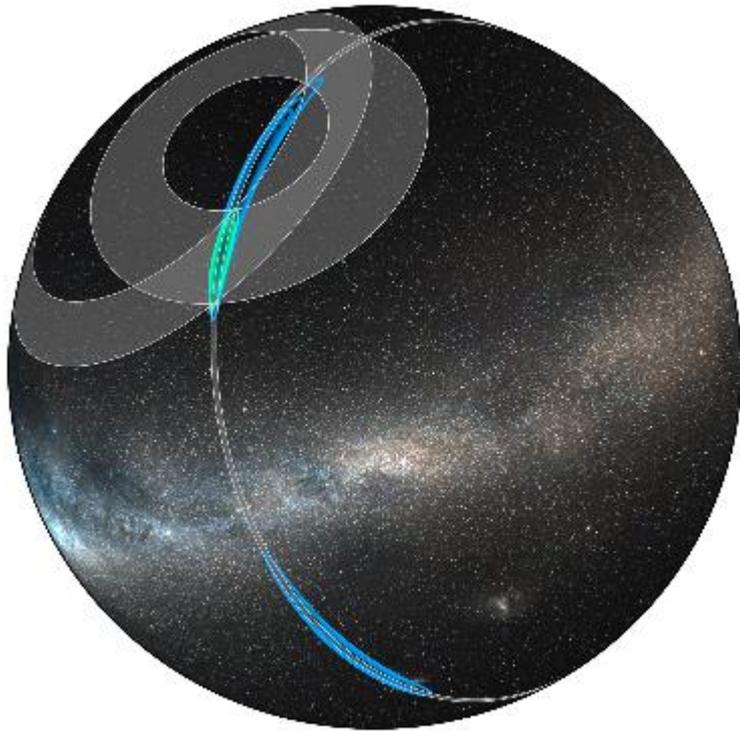
# Osservazione di GW da stelle di neutroni



16 Ottobre 2016:  
annuncio di GW170817 –  
merging di stelle di neutroni

Radiazione emessa non è solo  
gravitazionale, ma anche  
luce e materia, che poi decade  
e vengono osservate le “righe”  
degli elementi prodotti

# Osservazione di GW da stelle di neutroni



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

Triangolazione LIGO-Virgo

I black spot di Virgo danno comunque un'indicazione importante per determinare la posizione!

# Multimessenger astronomy

- Segnale gravitazionale all'interferometro. Poi:
  - Rilevazione della posizione
  - Rilevazione direzionale di radiazione luminosa

Onde elettromagnetiche	Onde gravitazionali
accelerazione di cariche	accelerazione di distribuzioni di materia (non sferica)
Emissione continua nei giorni (mesi) successivi al merger	Emissione istantanea
Alta interazione con la materia	Trasparenti alla materia
Frequenza > 10 MHz	Frequenza < 10 kHz

# Multimessenger astronomy

- Cosa abbiamo scoperto:

## Onde elettromagnetiche successive al merging

- origine di alcuni Gamma ray bursts ( $< 2''$ )
- osservazione di un nuovo stato della stella di neutroni, dove nuclei pesanti vengono espulsi: *kilonova*
- Origine di elementi pesanti più del ferro (oro, argento..), conferma di ipotesi teoriche
- Determinazione più precisa della posizione grazie a coordinazione di 70 osservatori

...è tutto?  
cosa possiamo scoprire in più?

# Termodinamica dei buchi neri

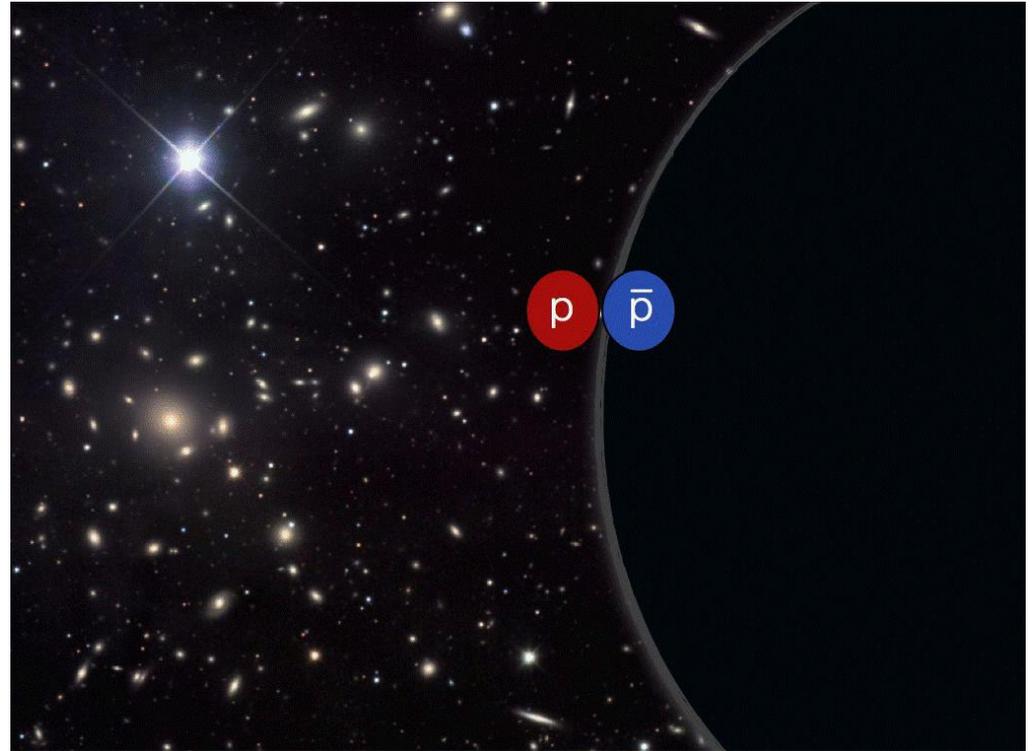
Radiazione di Hawking  
come produzione di coppie  
particella-antiparticella nel  
vuoto quantistico intorno alla  
regione dell'orizzonte

$$S = \frac{c^3 k_B}{\hbar G_N} \frac{A}{4} \quad T = \frac{\kappa}{2\pi} \sim \frac{1}{2r_h}$$

Quali sono i microstati  
che danno origine  
all'entropia?

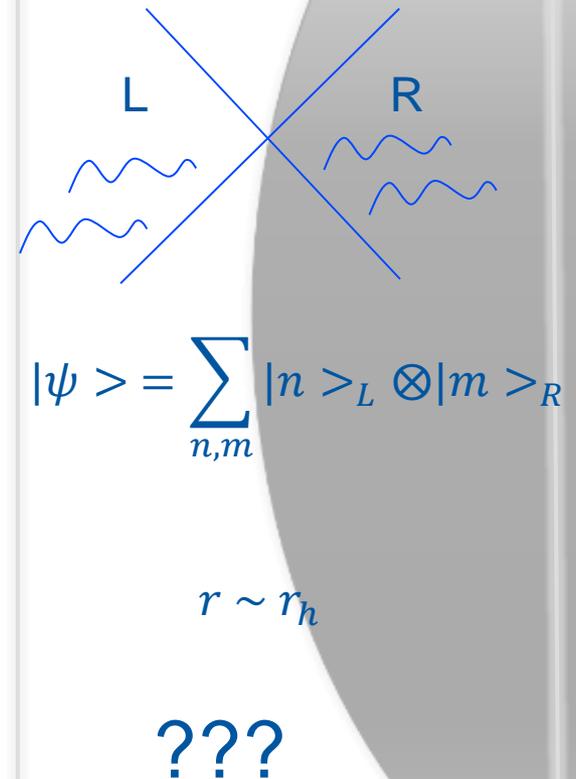
Teorema di “no hair” : in RG esiste un'unico buco nero per date  
cariche conservate M, Q, J

*I microstati appartengono ad una nuova teoria che estende la  
RG, per esempio una teoria quantistica della gravità!*



# Campi quantistici all'orizzonte

- Entanglement quantistico per campi all'orizzonte
- Per un osservatore all'infinito, che raccoglie radiazione di Hawking, ciò contraddice la statistica quantistica
- Paradosso di Mathur-AMPS:  
*“Principio di equivalenza, teoria effettiva e unitarietà non sono tra loro consistenti nell'evoluzione (evaporazione) di un buco nero”*
- Una soluzione (provocatoria): c'è un *firewall!*  
L'osservatore in caduta libera viene bruciato prima di attraversare l'orizzonte!!
- Dobbiamo ripensare alla gravità già alla scala  $r \sim r_h$ , non serve arrivare all'energia di Planck!



# Conclusioni

- I buchi neri offrono un laboratorio sulla relatività generale e possibili deviazioni a scale mai testate prima
- Sebbene siano stati predetti già nel 1916, non si ha avuta osservazione diretta fino ai tempi più recenti
- Almeno 4 eventi di merging di buchi neri sono stati osservati negli scorsi due anni dalla collaborazione LIGO&Virgo
- In Ottobre 2017 un evento di merging di due stelle di neutroni ha aperto la strada della *Multimessenger Astronomy*
- Rimangono problemi concettuali quali l'information paradox e la spiegazione della termodinamica del buco nero a cui non si ha risposta definitiva ancora

# What next?

- Upgrade dei sistemi di rilevazione per ottenere maggiore sensibilità e precisione nel posizionamento
- Coordinazione delle osservazioni con sistemi di rilevazione di onde elettromagnetiche
- Esplorazione delle caratteristiche dei BH – si può vedere l'orizzonte?
  
- Campi quantistici vicino all'orizzonte
- ...Cos'è la gravità quantistica?

Grazie dell'attenzione!