# Andiamo in onda - Viaggio tra le onde gravitazionali

Alessandra Gnecchi
*CERN, Theoretical Physics Department*

22 Marzo 2018

H2020-MSCA-IF-2015
*702548 GaugedBH*

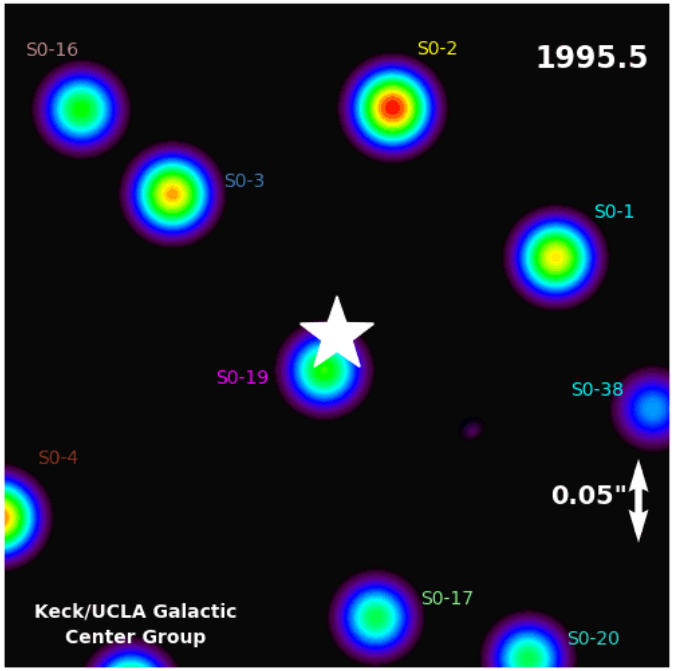
# Outline

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 - Perchè 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!!!**




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

*From the Movie «Interstellar»*

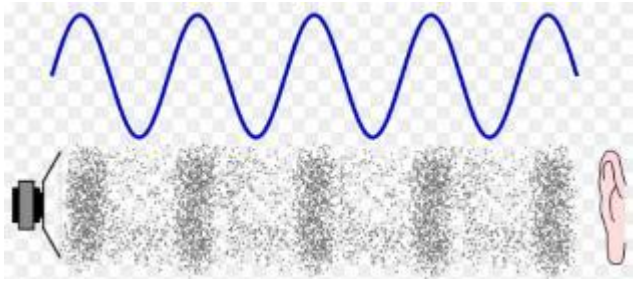
- Sono l'oscillatore armonico della gravità quantistica (A. Strominger)

# Introduzione: Le onde in fisica

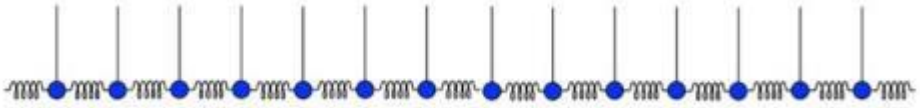
- Onde meccaniche: acustica, fluidodinamica
  - Forze elastiche
- Onde nel vuoto:
  - Elettromagnetismo
- La fisica fondamentale
  - Meccanica quantistica (onde piane)
  - Relatività generale (onde gravitazionali)

# Onde di origine meccanica

- Onde sonore



- Sistema di molle elastiche



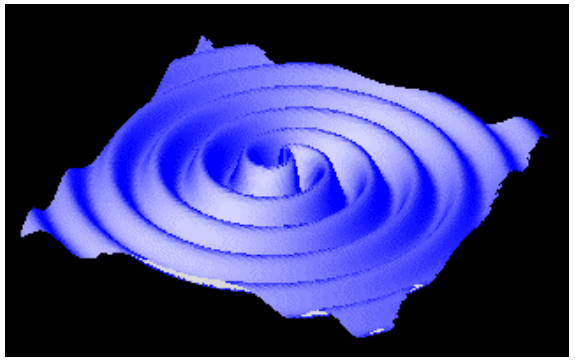
- La tensione è una forza elastica tra le componenti di una corda

# 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:

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

relazione di dispersione per onde nel vuoto

# Maxwell & Einstein: onde nel “vuoto”

- Elettromagnetismo
  - Potenziali elettromagnetici:

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

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

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

- 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

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

- Gravità (newtoniana)
  - Forza tra due corpi

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

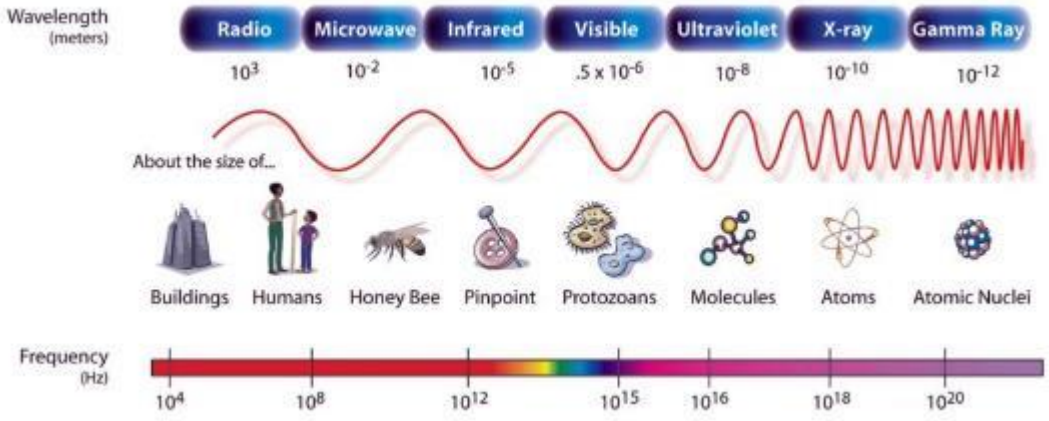
Le due forze a confronto

$$\frac{F_{em}}{F_G} \approx \begin{cases} 10^{42} & (e) \\ 10^{36} & (p) \end{cases}$$

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

# 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
  $10^{-9}$ eV, meV

*image: Nasa*

# Maxwell & Einstein: scale di energia

- Gravità
  - Massa fondamentale

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

  - Segnala la scala in cui le particelle fondamentali iniziano a influenzare loro stesse lo spazio tempo che le circonda
  - La teoria della relatività generale, ad energie pari alla massa di Planck, non è compatibile con la descrizione delle particelle elementari in termini di campi quantistici

→ *cos'è la gravità quantistica?*

# 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 ~ 1-10 TeV = $10^{12}$ eV

  Si cercano nuove particelle fondamentali, nuove forze di interazione a energie molto inferiori alla scala di Planck

# L'Universo come un laboratorio

## Radiazione elettromagnetica

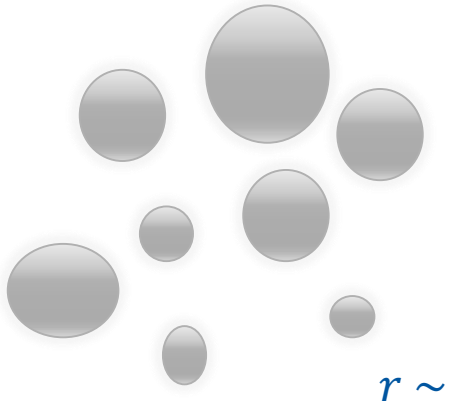
- Sorgenti:
  *Corpi celesti stazionari*
  *Implosioni stellari*
  *Radiazione di fondo (CMB, 240 $\mu$eV): informazioni sull inflazione*
  *Dark matter?.....*
- Distanze ~ 15 Mpc
- Energie
  - Radiazione solare : reazioni nel sole, 100 MeV – 1.6,3.4eV luce visibile
  - Gamma ray bursts: ~ TeV
- Al di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

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

# 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*

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



$r \sim \bar{r}$

regione di campo debole

$r \gg \bar{r}$

# Fenomeni ondulatori in gravità

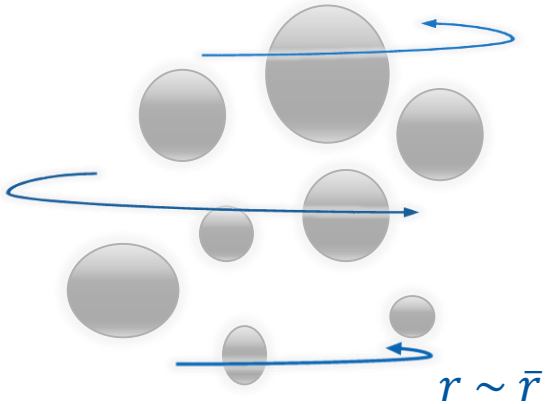
- In presenza di fenomeni che *perturbano* il background, dall'equazione della relatività linearizzata si ottengono le equazioni delle onde per il campo gravitazionale

- 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

- 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



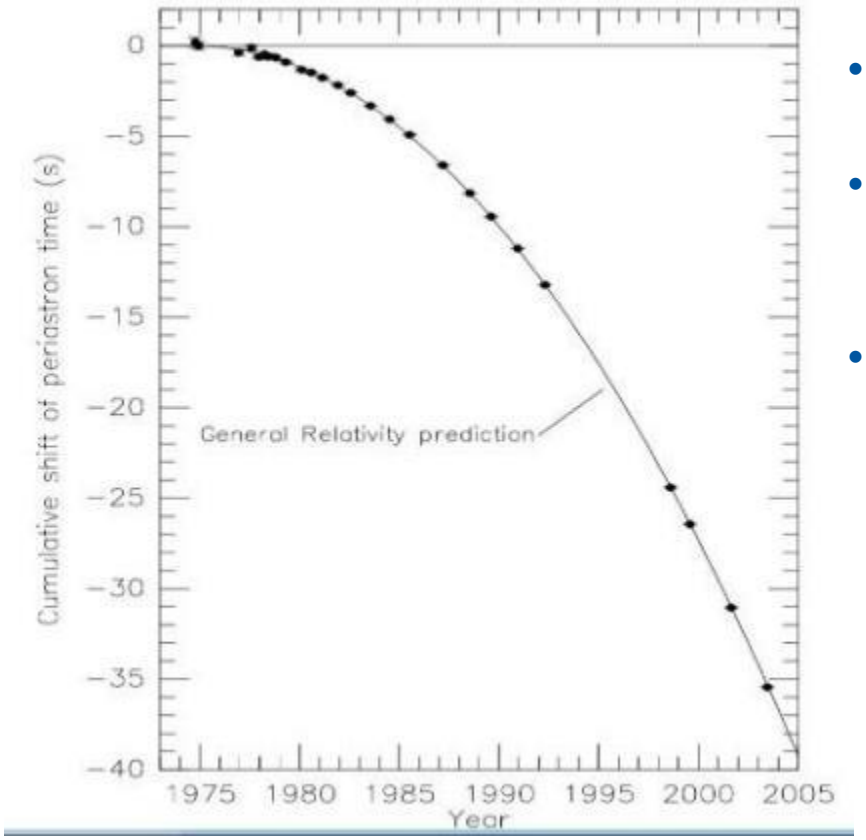
$r \sim \bar{r}$

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

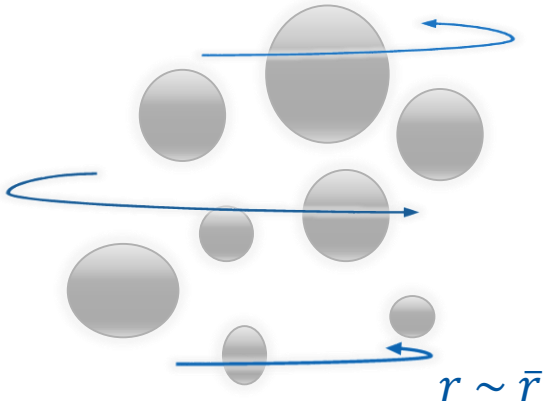
[ArXiv:astro/ph/0407149 Weisberg-Taylor]

# 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,* per la radiazione elettromagnetica

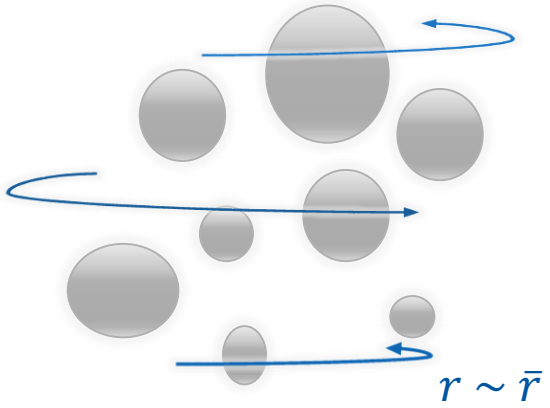



regione di campo debole

$r \gg \bar{r}$

# Fenomeni ondulatori in gravità

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




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

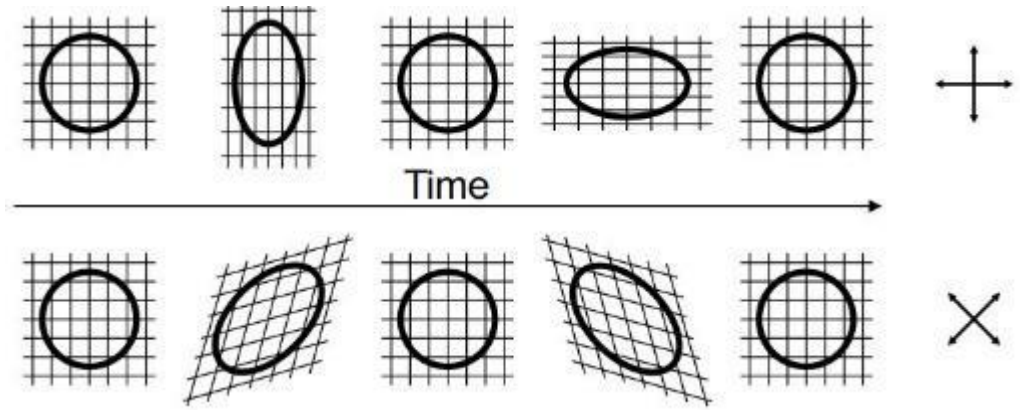



*Image by P.Sutton*

# 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:

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

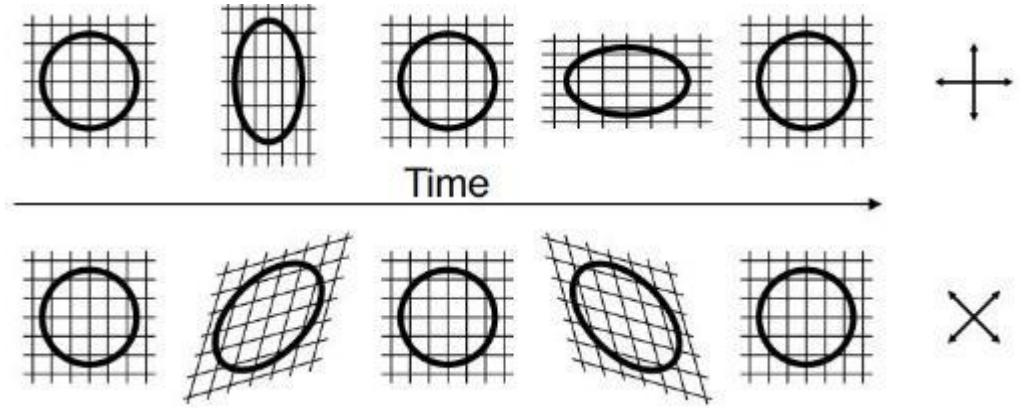



*Image by P.Sutton*

# 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 è dipendente dal tempo!
- Passaggio di un'onda gravitazionale modifica (temporaneamente) le distanze tra due masse, e tale displacement è il principio alla base dell'interferometria per la rivelazione delle onde gravitazionali

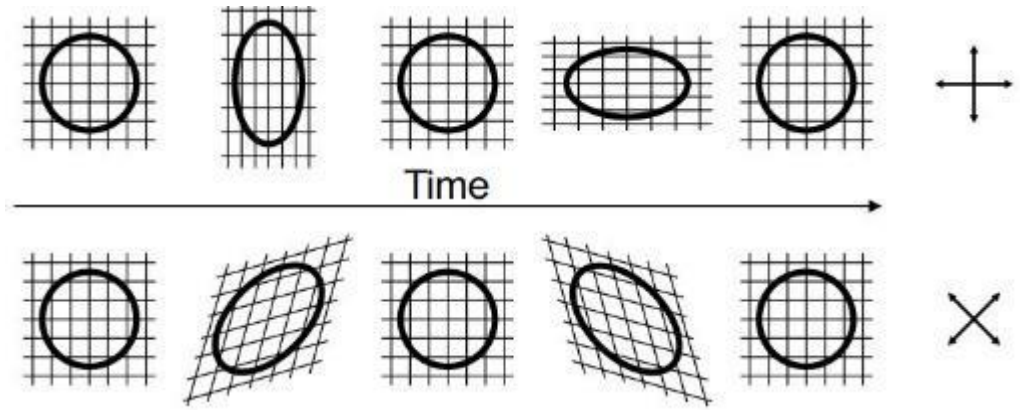



*Image by P.Sutton*

# Interferometri per onde gravitazionali

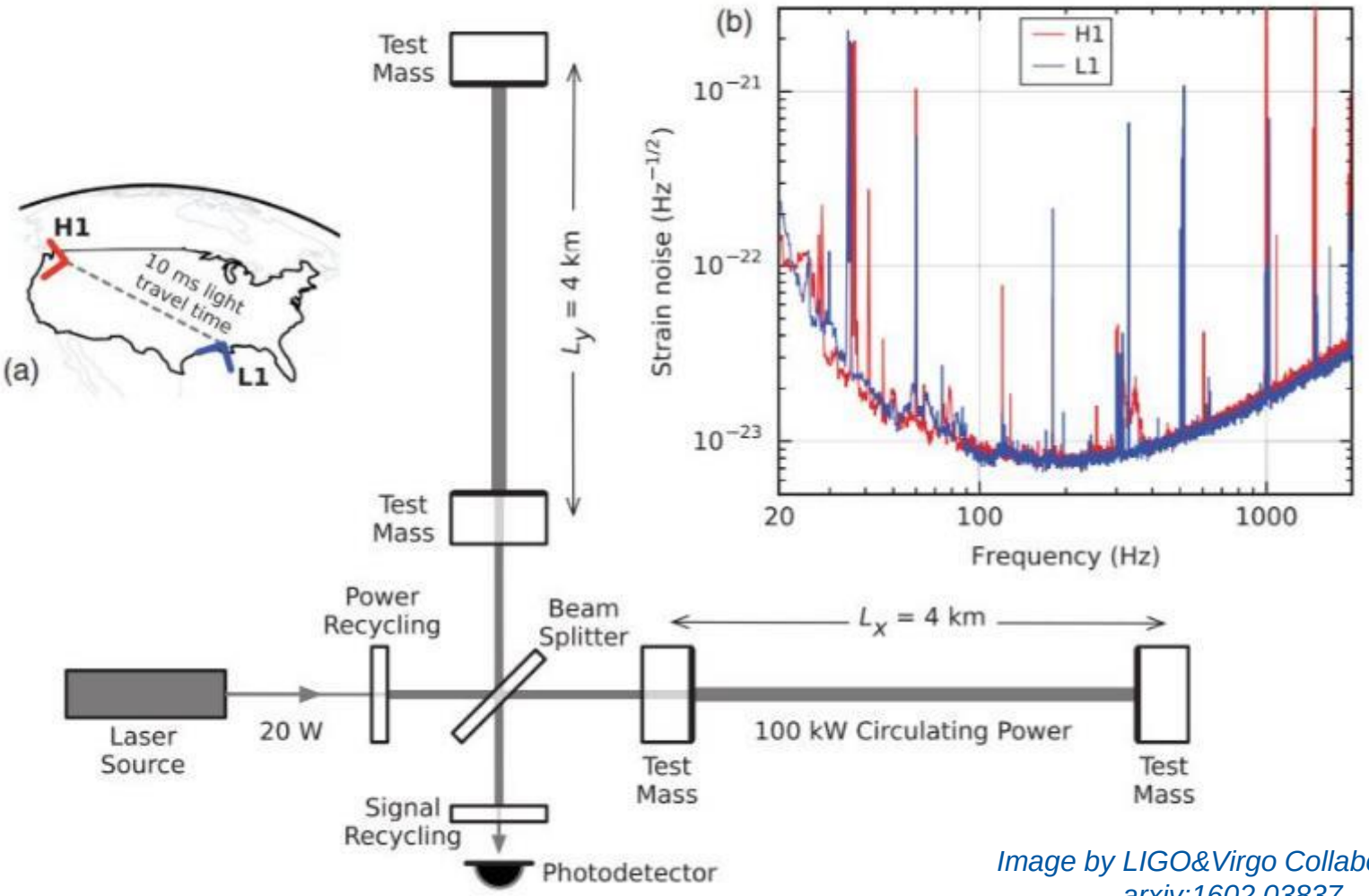



*Image by LIGO&Virgo Collaborations*
*arxiv:1602.03837*

# 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

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

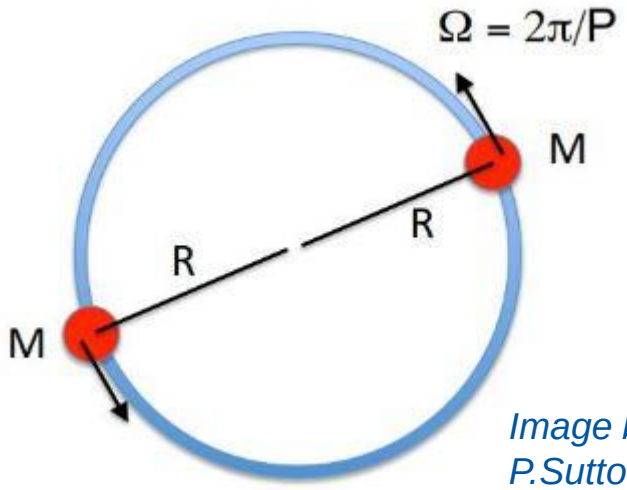



*Image by P.Sutton*

- ampiezza dell'onda gravitazionale per un osservatore a distanza *r:*

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

- Terza legge di Keplero

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

# Sorgenti di onde gravitazionali

Esempi:

1. Stelle di neutroni in sistema binario
   $M \approx 1.4\, M_{\odot}$ , $\mathrm{r} = 5$ kpc, $\omega = 1\ hour^{-1}$
   $h \sim 10^{-22}$

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

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

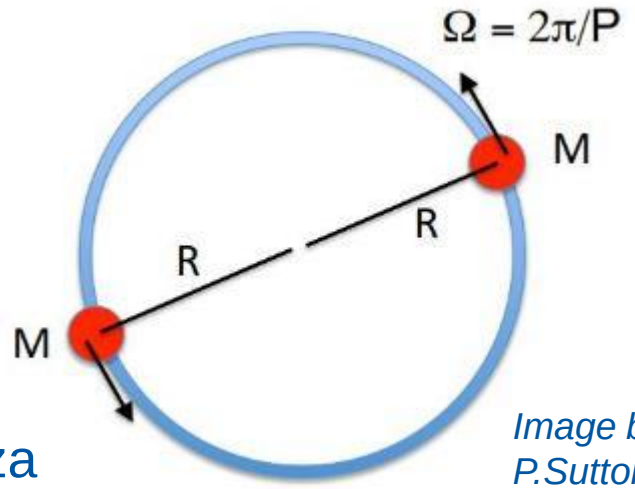


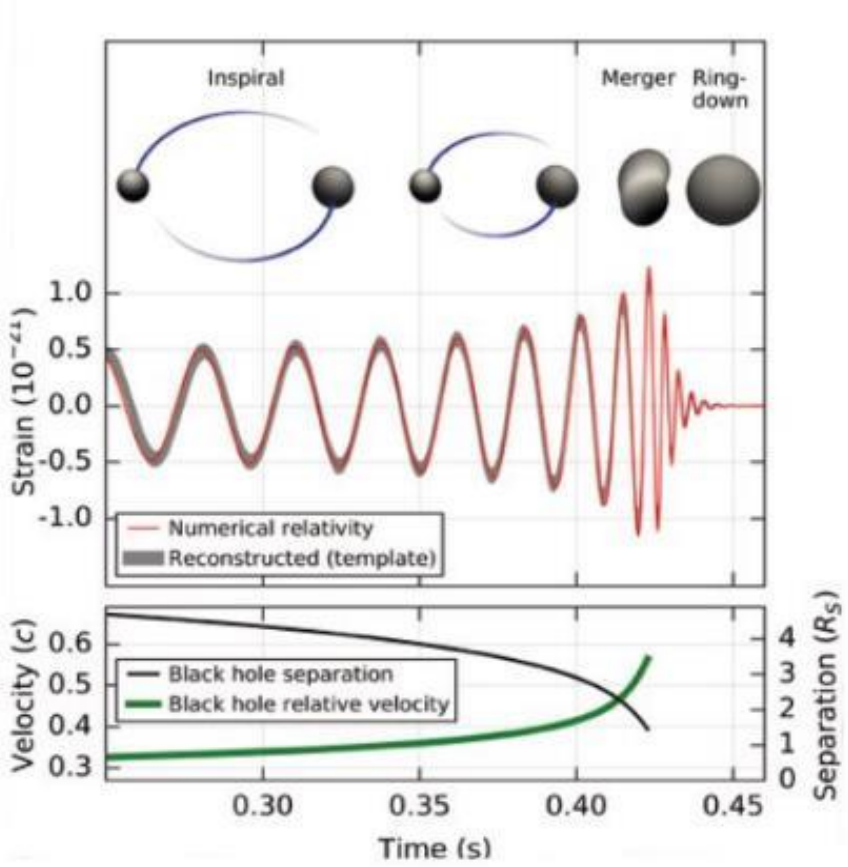

*Image by P.Sutton*

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

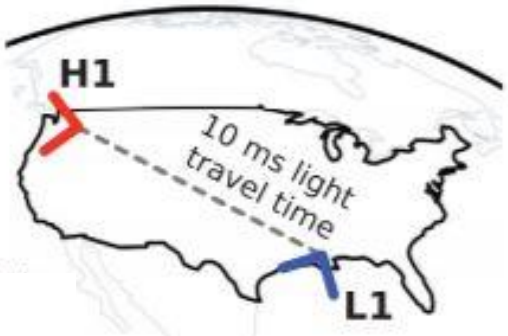
$$\omega_s = \frac{Gm}{R^3}$$

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

# Interferometri per onde gravitazionali




LIGO & Virgo
Scientific Collaborations




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."

# 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

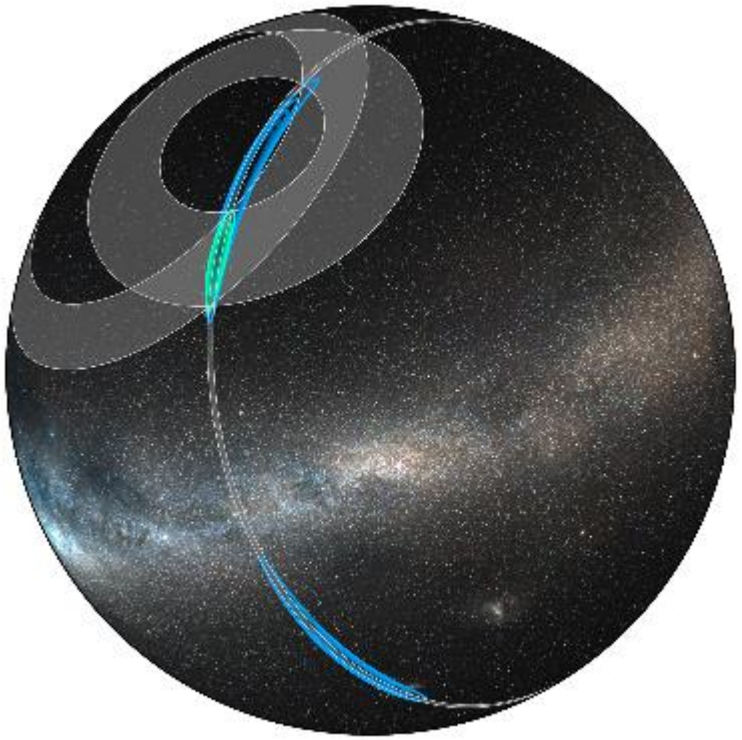
Rivelatori sensibili
alle frequenze intorno a
~100Hz : *chirp*

# 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'interferomentro. 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 |

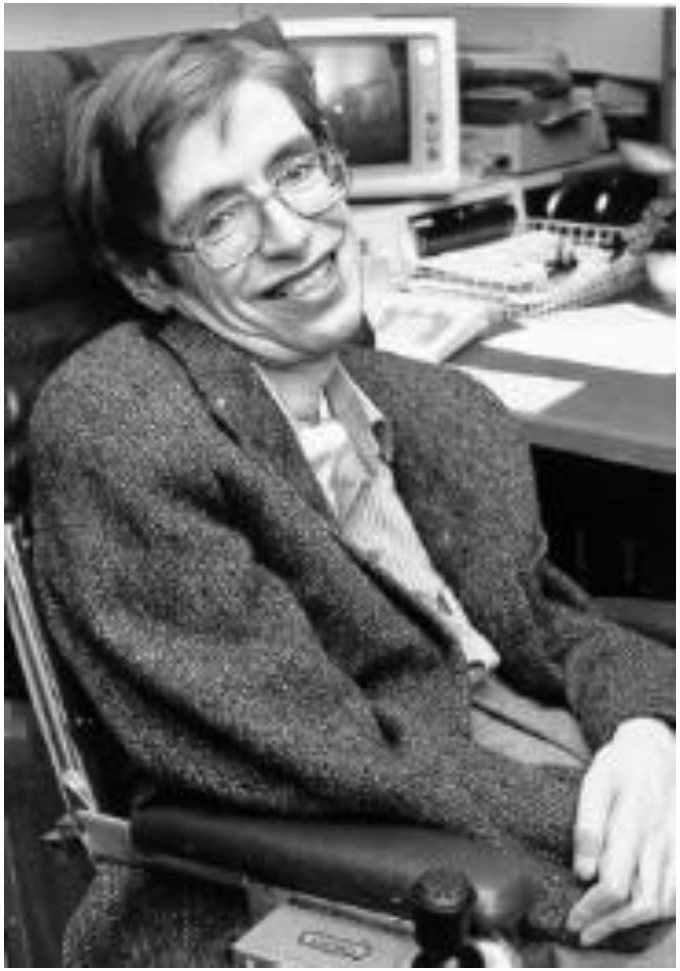
# Multimessenger astronomy

- 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?

# Stephen Hawking,  1942 -2018

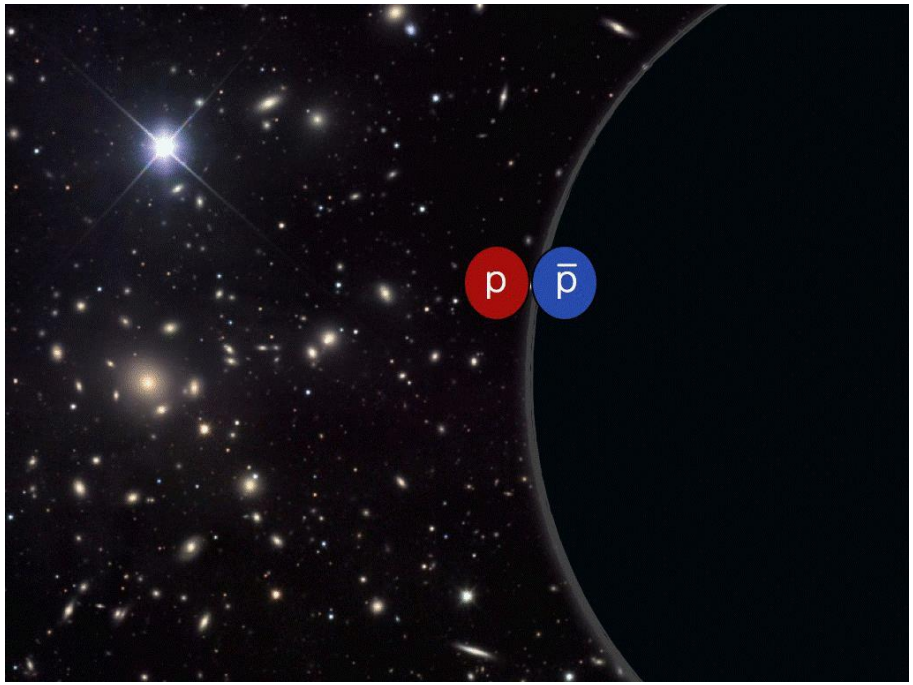


# Termodinamica dei buchi neri

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

$$dM = T\,dS + \Phi\,dQ$$

$$T = \frac{\kappa}{2\pi} \sim \frac{1}{2\,r_h}$$




Il buco nero ha carattere termodinamico/ statistico

Un osservatore all'infinito percepisce una radiazione che in prima approssimazione è radiazione di *corpo nero* – equilibrio radiazione-materia

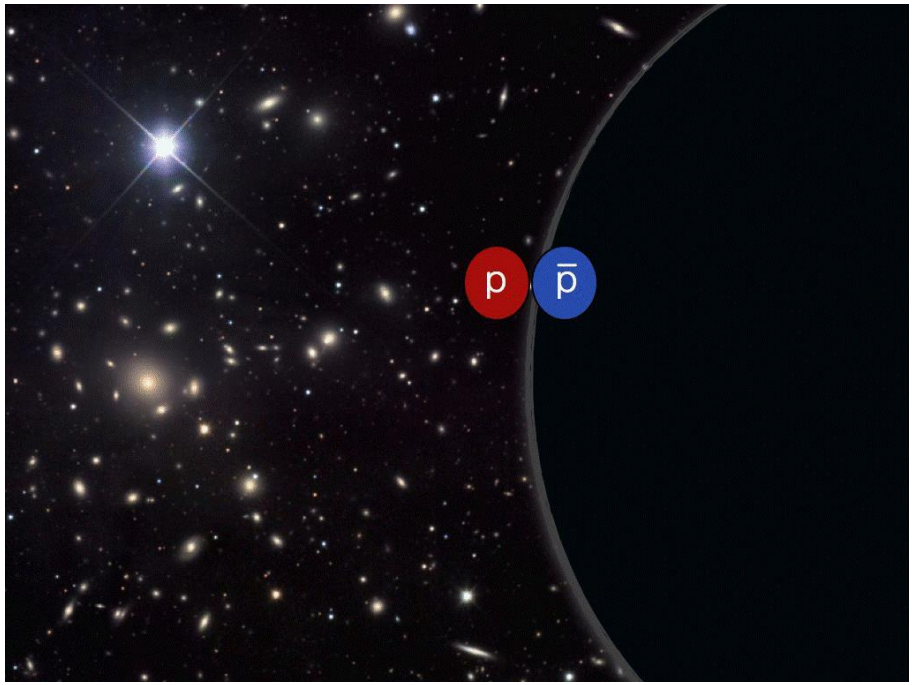
# Termodinamica dei buchi neri

**Radiazione di Hawking**

⇓

Meccanica quantistica in uno spazio curvo

$$S = \frac{c^3 k_B}{\hbar G_N} \frac{A}{4}$$



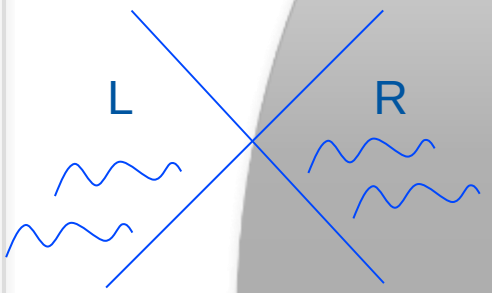

Che origine ha l'entropia?

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!




$$|\psi> = \sum_{n,m} |n>_L \otimes |m>_R$$

$r \sim r_h$

???

# 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 sensitività 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!