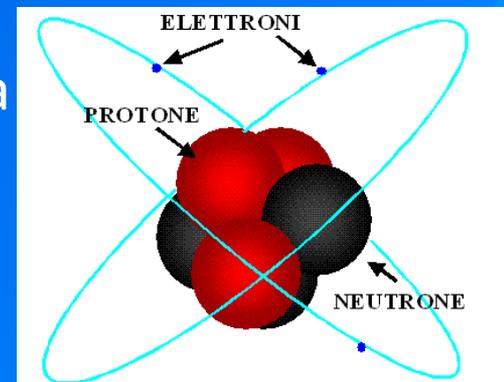
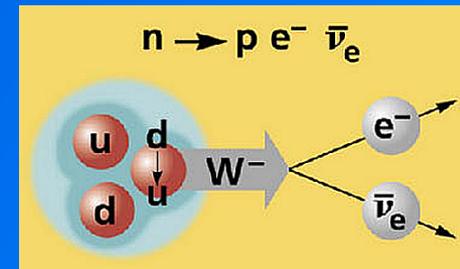
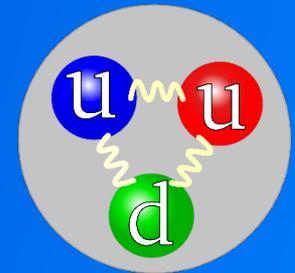


La Gravitazione: Da Aristotele alle Onde Gravitazionali

Michele Punturo
INFN Perugia

4 interazioni fondamentali

- Interazione nucleare forte, che tiene uniti i quark e i nucleoni
- Interazione nucleare debole, che entra in gioco nei decadimenti radioattivi
- Interazione elettromagnetica, che caratterizza gli atomi e le molecole
- Interazione gravitazionale: ?



Ipse Dixit

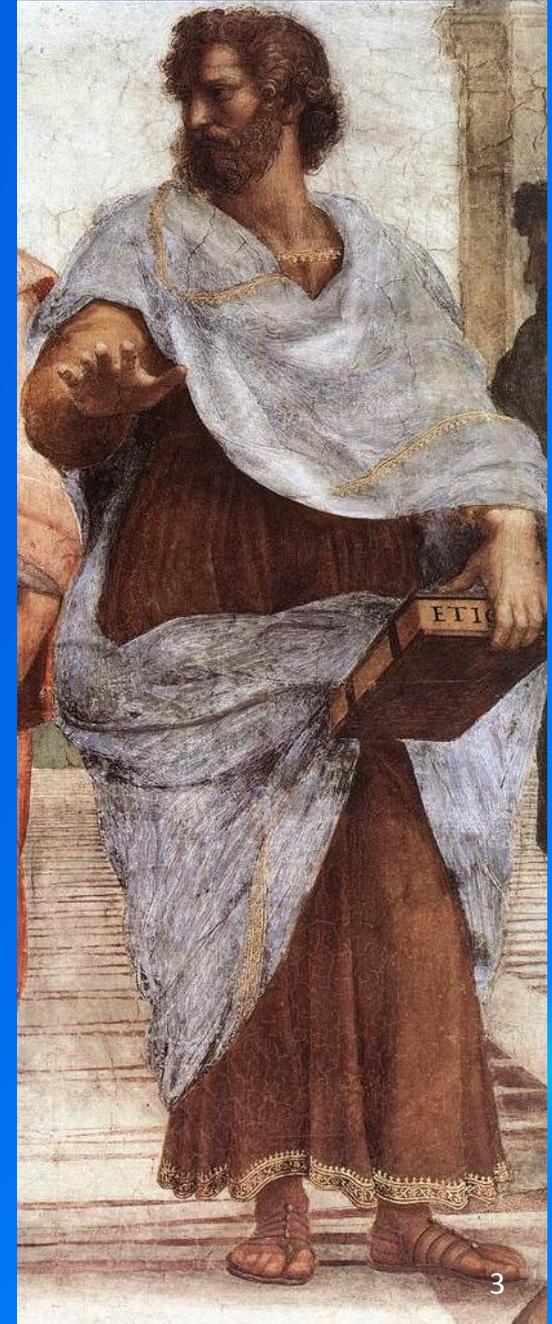
Aristotele (384-322 A.C.)



“Il moto verso il basso di una massa di oro o di piombo, o di qualsiasi altro corpo, dotato di peso, è tanto più veloce quanto maggiori sono le sue dimensioni”

Dettaglio dalla [Scuola di Atene](#) di [Raffaello Sanzio](#) (1509).

M.Punturo - MasterClass 2016



Galileo, agli arresti domiciliari ad Arcetri (1636, villa Gioiello), portò a compimento la sua opera più importante, “Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo”, pubblicata due anni dopo nella città protestante di Leiden:



Galileo di fronte al Sant'Uffizio
dipinto di [Joseph-Nicolas Robert-Fleury](#)

Aristotele dice “Una palla di ferro di cento libbre, cadendo dall’altezza di cento braccia, arriva in terra prima che una di una libbra sia scesa di un sol braccio; io dico ch’ell’arrivano nello stesso tempo; voi trovate, **nel farne l’esperienza**, che la maggiore anticipa due dita la minore, cioè che quando la grande percuote in terra, l’altra ne è lontana due dita: **ora vorreste dopo queste due dita appiattar le novantanove braccia di Aristotele, e parlando solo del mio minimo errore, metter sotto silenzio l’altro massimo**”



Isaac Newton (1642-1727)

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica
(1687),

gravitazione universale

leggi del moto,

meccanica classica

progresso della teoria eliocentrica

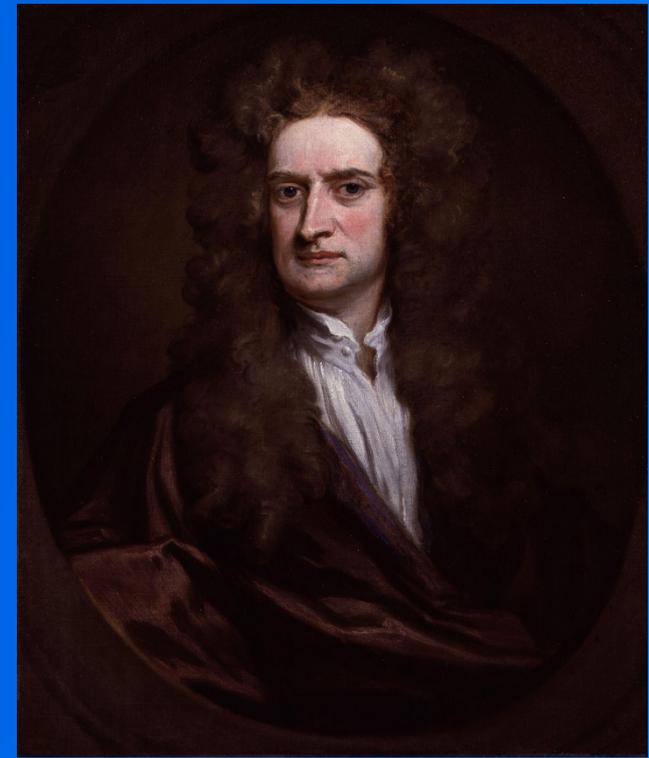
sistematizzazione matematica delle leggi
di Keplero sul movimento dei pianeti

Studio delle

orbite ellittiche, iperboliche e paraboliche.

Hypothesis of Light (Ipotesi sulla luce)

del 1675), sviluppò il calcolo infinitesimale
stabilì un cambio fisso fra la sterlina e l'oncia
d'oro, e più che altro morì vergine!



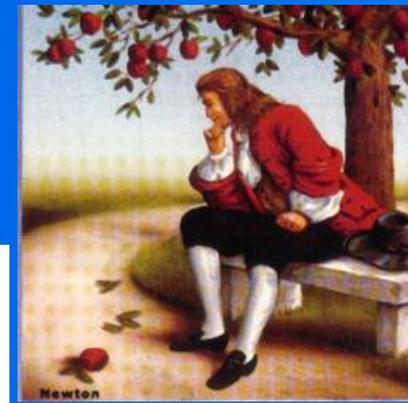
[National Portrait Gallery: NPG 2881](#)

Epitaffio di Alexander Pope:
« La natura e le leggi della
natura giacevano nascoste
nella notte; Dio disse: «Che
Newton sia!», e luce fu »

La gravitazione di Newton

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

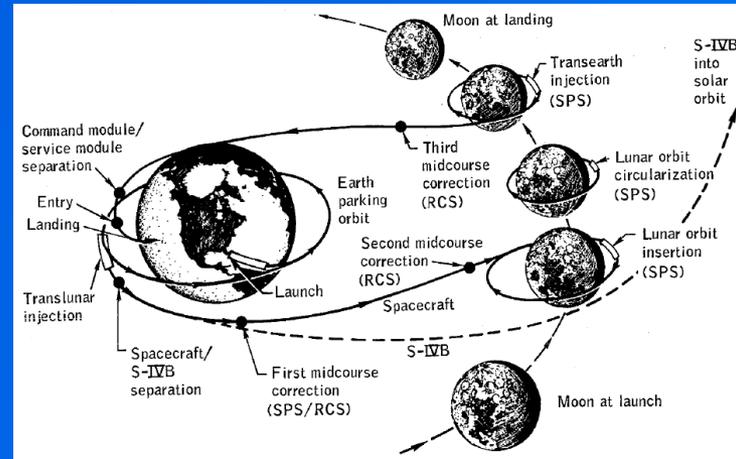
$$V(r) = -G \frac{m \cdot m'}{r}$$



- Nel sistema solare la teoria di Newton rappresenta una buona approssimazione.
- Dato un corpo di massa m' che si muove con velocità v intorno ad una massa centrale m , l'approssimazione newtoniana è buona se:

$$|V(r)| \ll m'c^2 \Rightarrow r \gg G \frac{m}{c^2}$$

e $v \ll c$

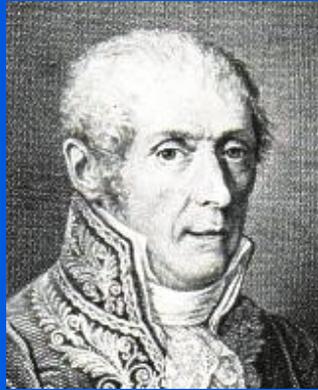


- Se m è il sole $m=M_{\odot}=2 \cdot 10^{33}g$, si ha $Gm/c^2=1.5km$, condizione ovviamente soddisfatta in ogni caso pratico

XVIII-XIX secolo, i padri dell'elettromagnetismo



Luigi Galvani
1737-1798



Alessandro Volta
1745-1827



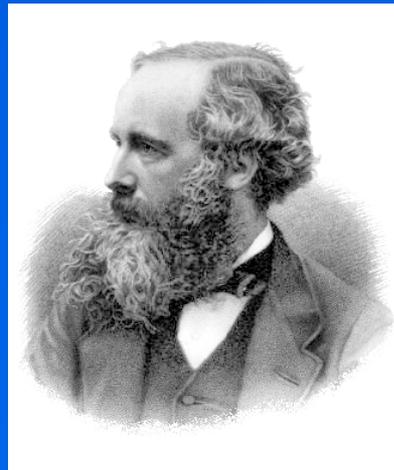
Hans Christian Ørsted
1777-1851



Michael Faraday
1791-1867



George Ohm
1789-1854

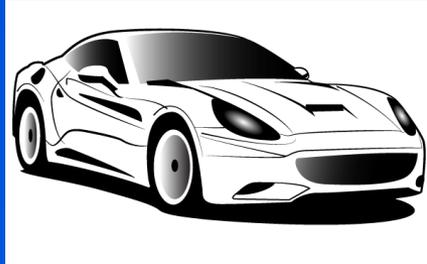


James Clerk Maxwell
1831-1879

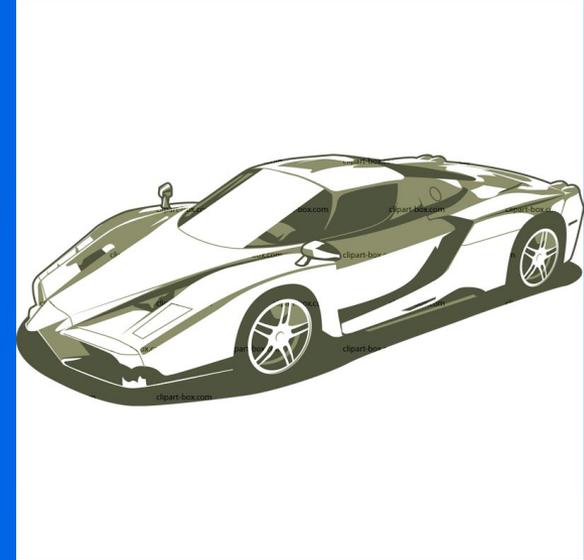


Heinrich Rudolf Hertz
1857-1894

Crisi → Svolta



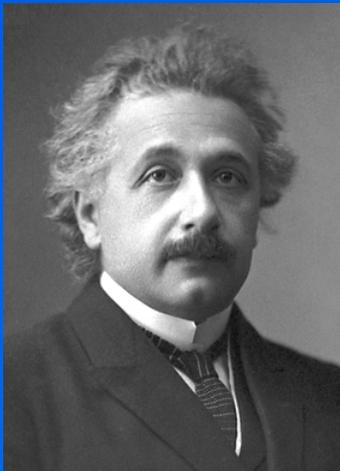
Meccanica Newtoniana



Elettromagnetismo

+ genialità di Albert Einstein =
Teoria della relatività ristretta

Albert Einstein
1879-1955



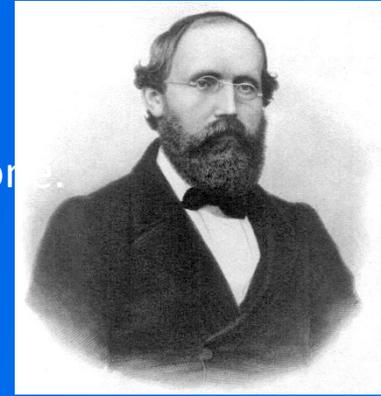
1905 - Annus Mirabilis:

- Tesi di dottorato: “Nuova determinazione delle dimensioni molecolari”
- Sviluppi sul moto “Browniano”
- “Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento” (Relatività Ristretta)
- Effetto Fotoelettrico (Premio Nobel)

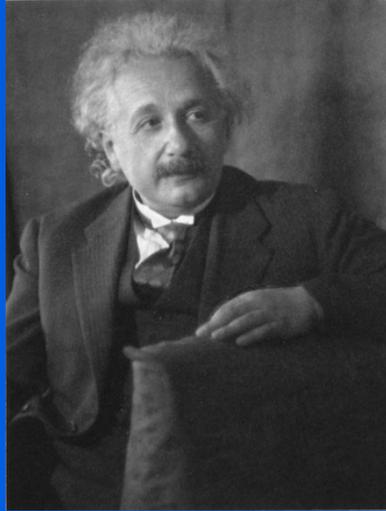
$$E=mc^2$$

Relatività Generale

Ma alla Teoria della Relatività Ristretta manca la gravitazione



Bernhard Riemann
1826-1866

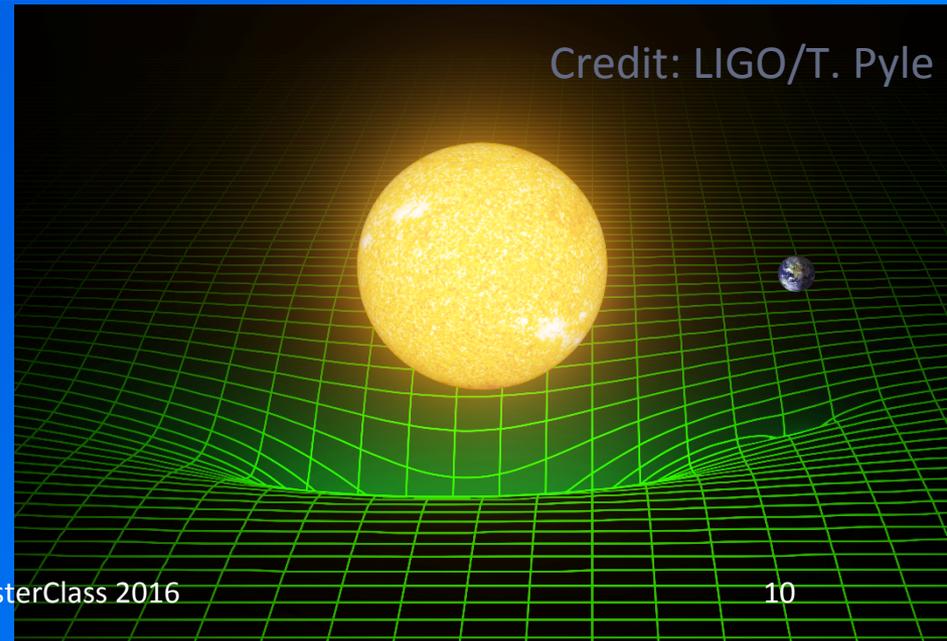


Carl Friedrich Gauss
1777-1855

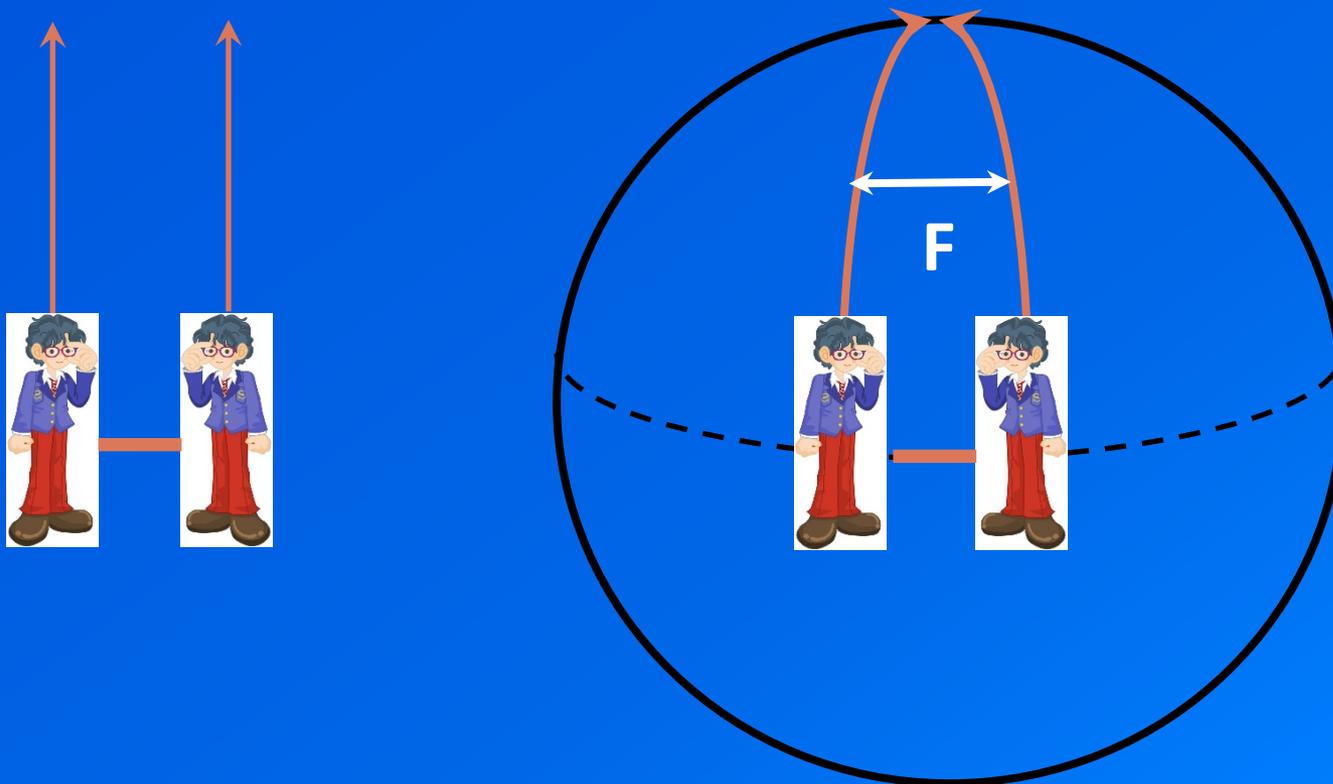
1915 – La Teoria della Relatività Generale:

Lo spazio-tempo non è più piatto o “cartesiano” ma è curvato dalla presenza delle masse.

“La gravità è un fattore geometrico”



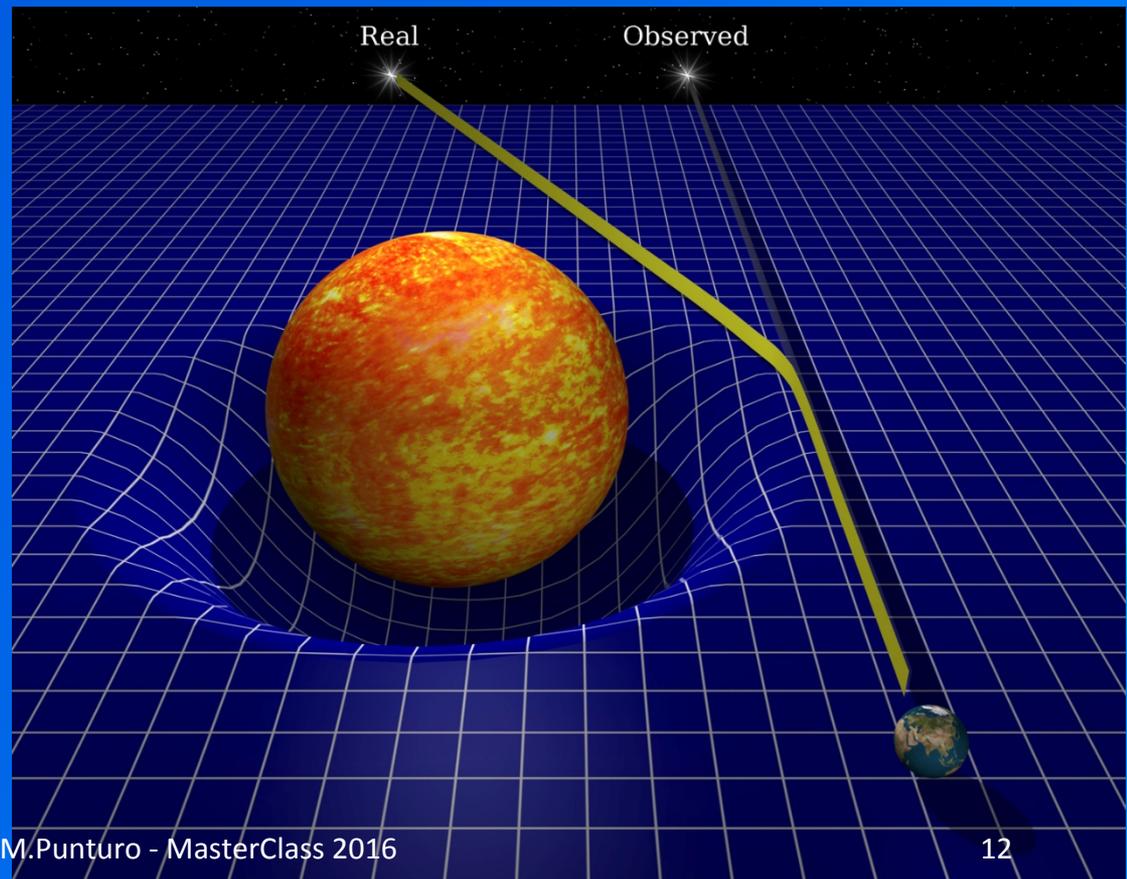
Geometria curva = Forza?





Arthur Eddington
1882-1944

1919 - Eclissi di sole



Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\alpha\beta}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter „erster Näherung“ ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\alpha\beta} = -\delta_{\alpha\beta} + \gamma_{\alpha\beta} \quad (1)$$

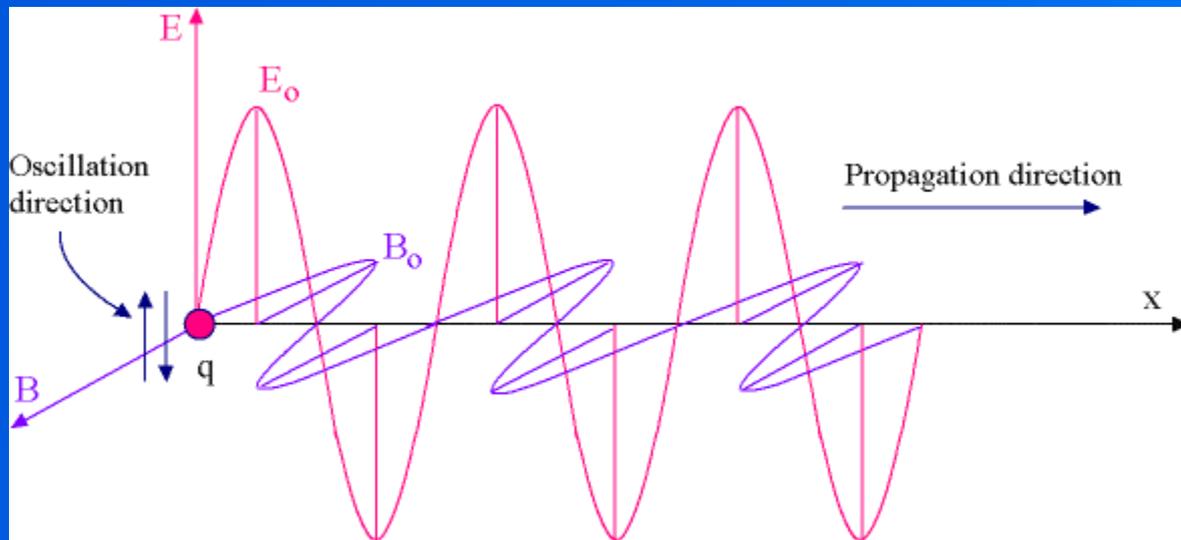


Integrazione Approssimata dell'equazione di campo della gravitazione

Carica elettrica accelerata



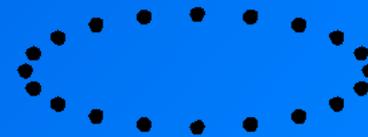
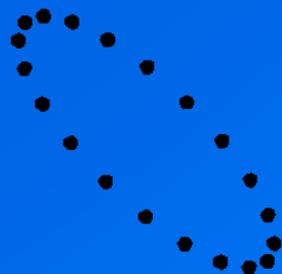
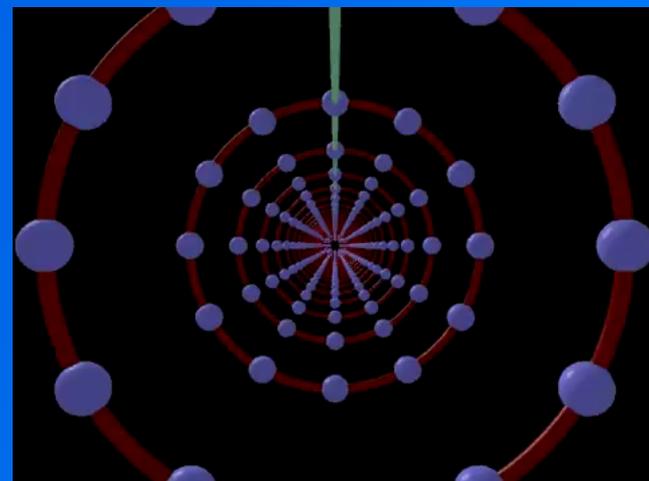
Onda elettromagnetica

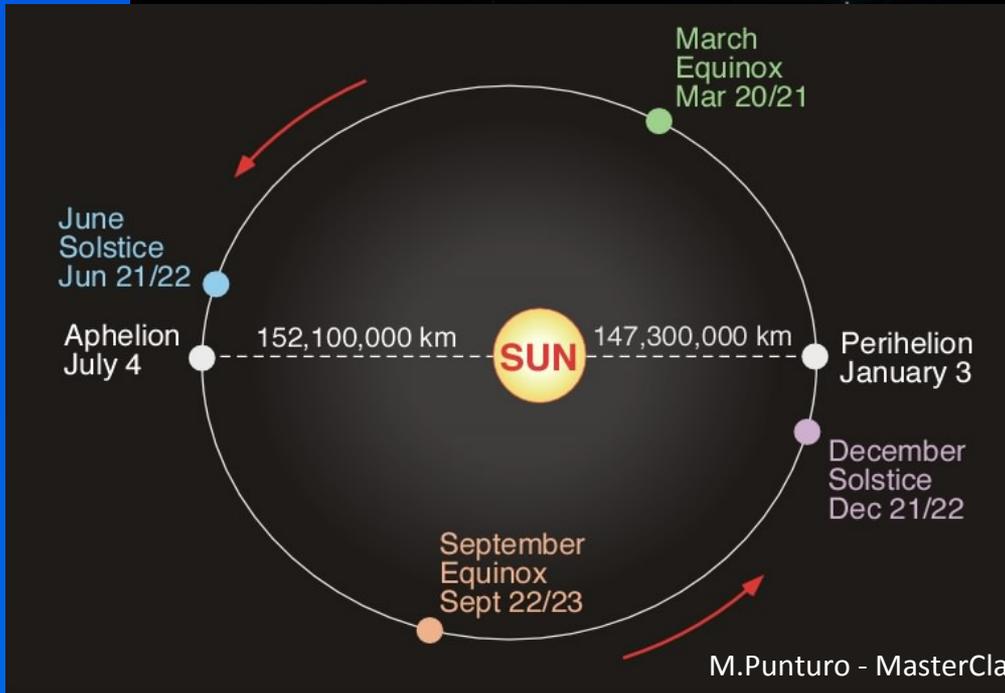


Massa accelerata



Onda gravitazionale



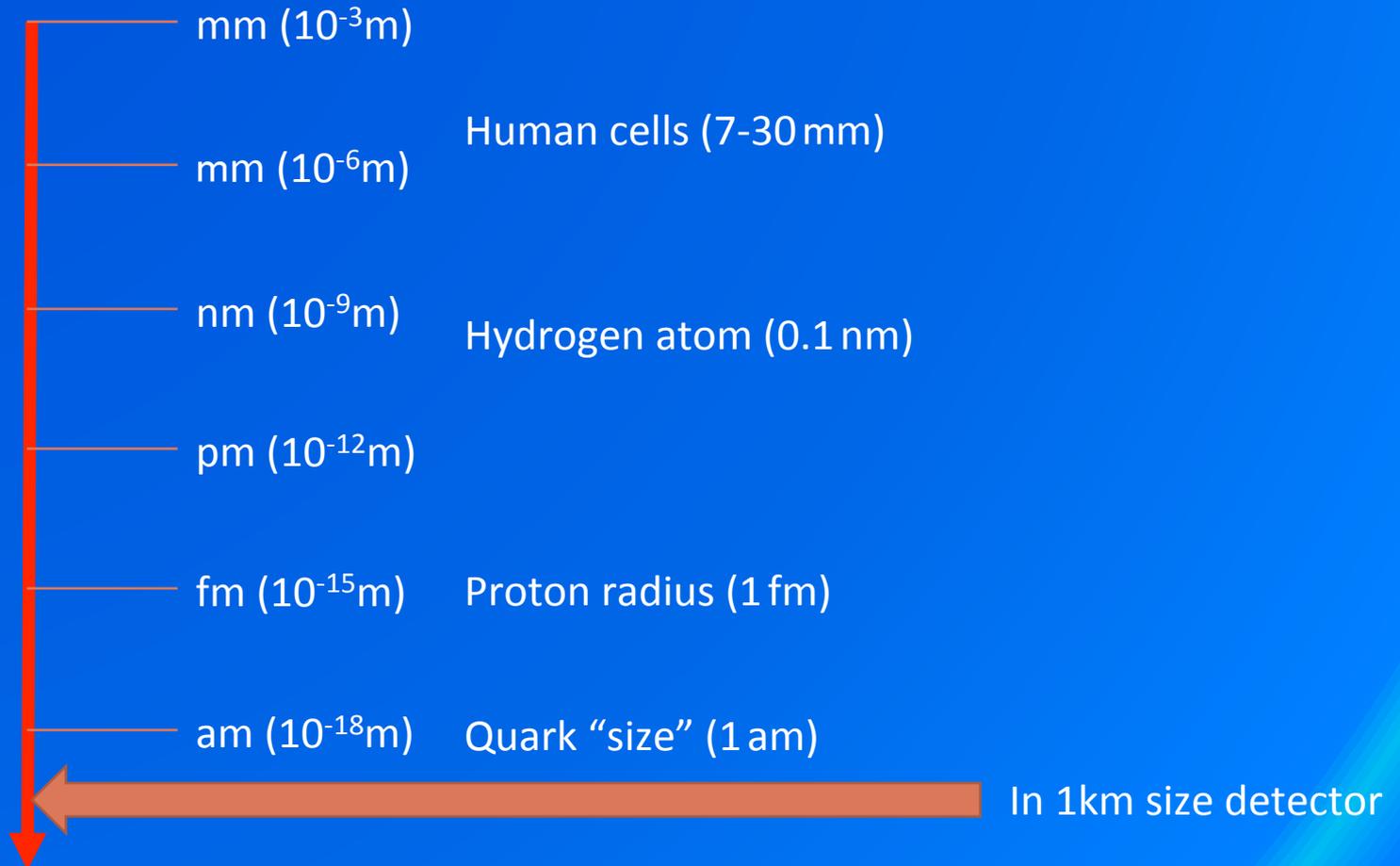


Distanza Terra-Sole variata per la dimensione di un atomo



Cosa significa 10^{-19}m ?

DL atteso in Virgo $\sim 10^{-19}\text{m}$



Terrestrial Detectors

Advanced detectors 2015-2025

Data exchange:
aGWD network!



LIGO

GEO, Hannover, 600 m



~2018



KAGRA

~2022



2016

AdV, Cascina, 3 km



2015



LIGO

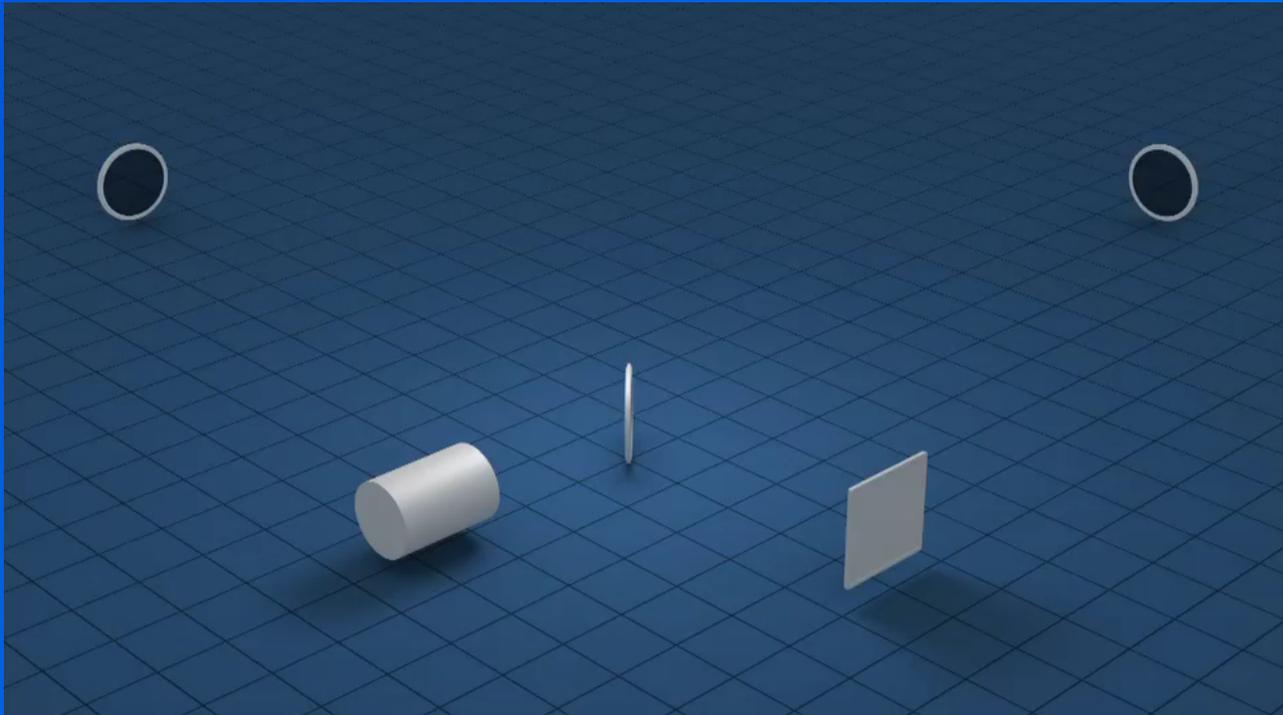
aLIGO Hanford, 4 km



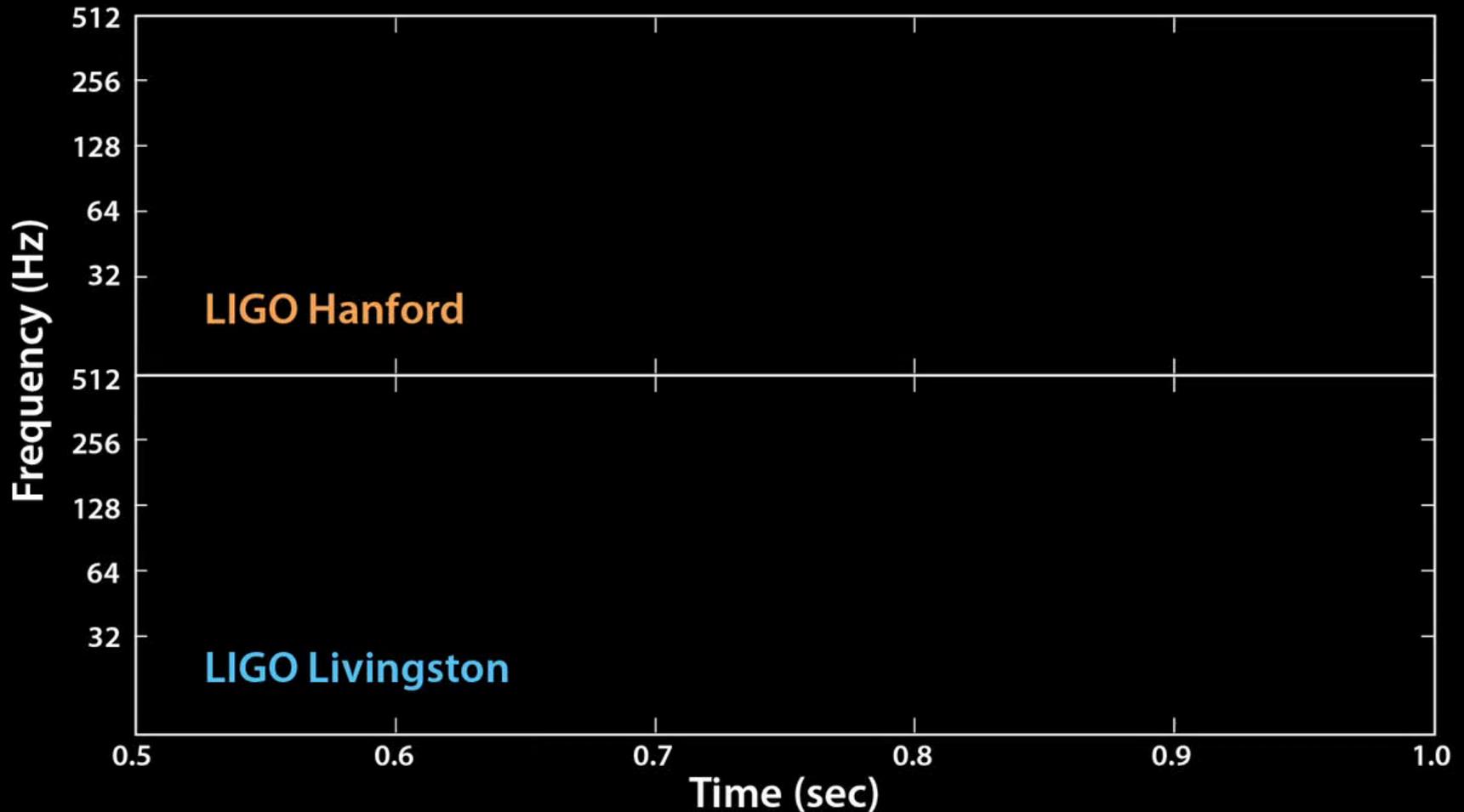
aLIGO Livingston, 4 km

Principio funzionamento GWD

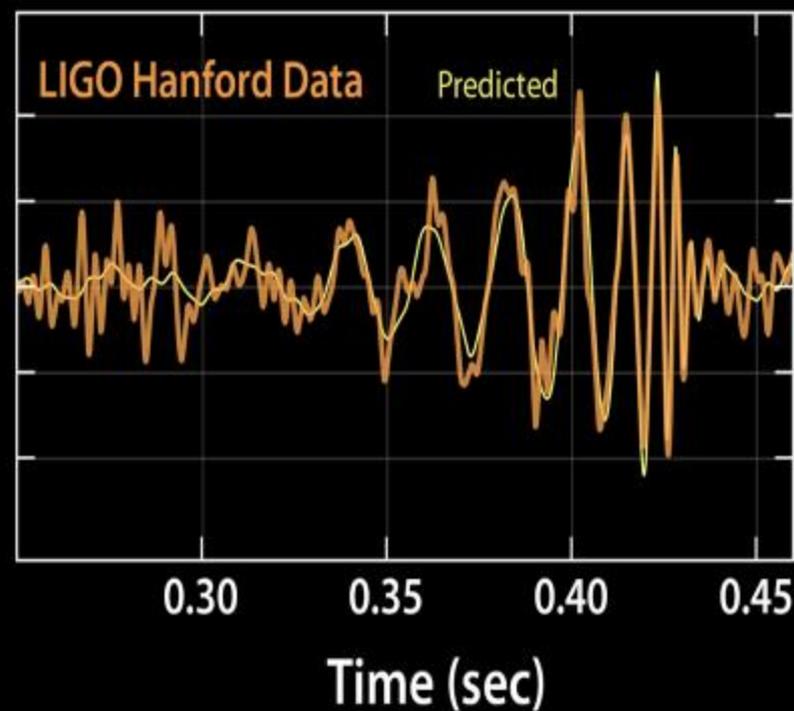
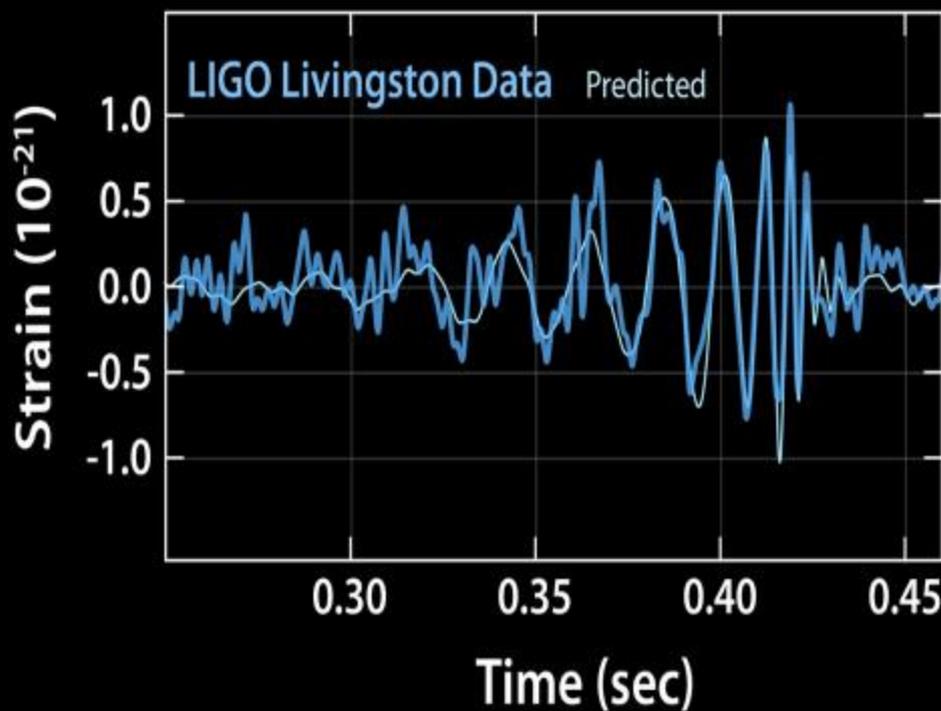
- Il principio base è l'interferometria laser



14 Settembre, 2015 – 11:50:45 CET

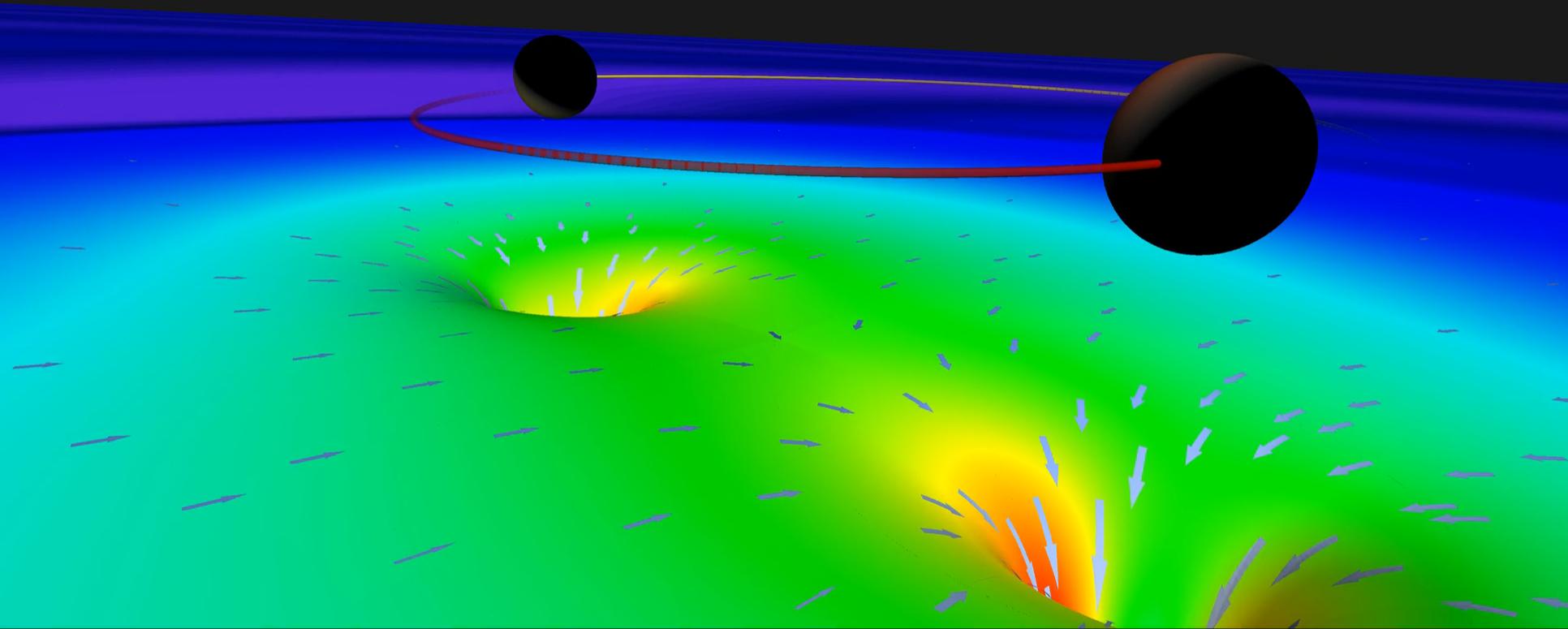


Numerical relativity waveform prediction for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914



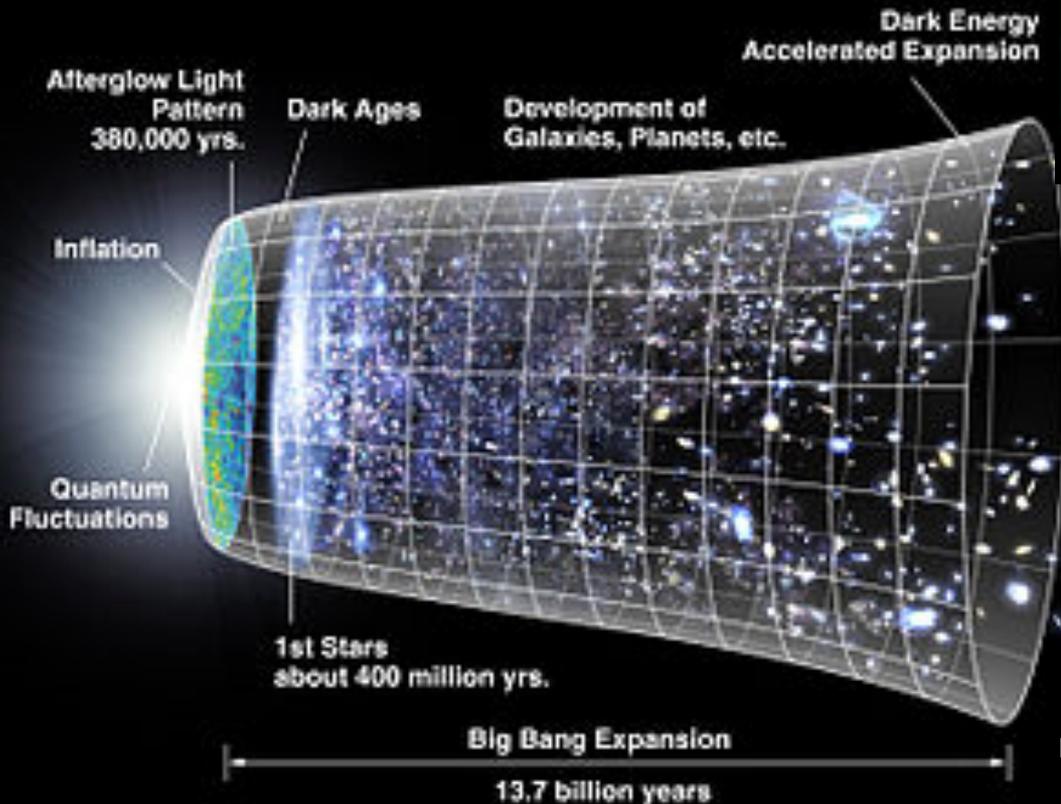
Nell'ultima frazione della collisione, la potenza emessa è pari a 100'000 miliardi di miliardi di soli

-0.41s



Una nuova era dell'astrofisica

Supernova explosion



Big Bang

END