

Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale





# ONDE GRAVITAZIONALI

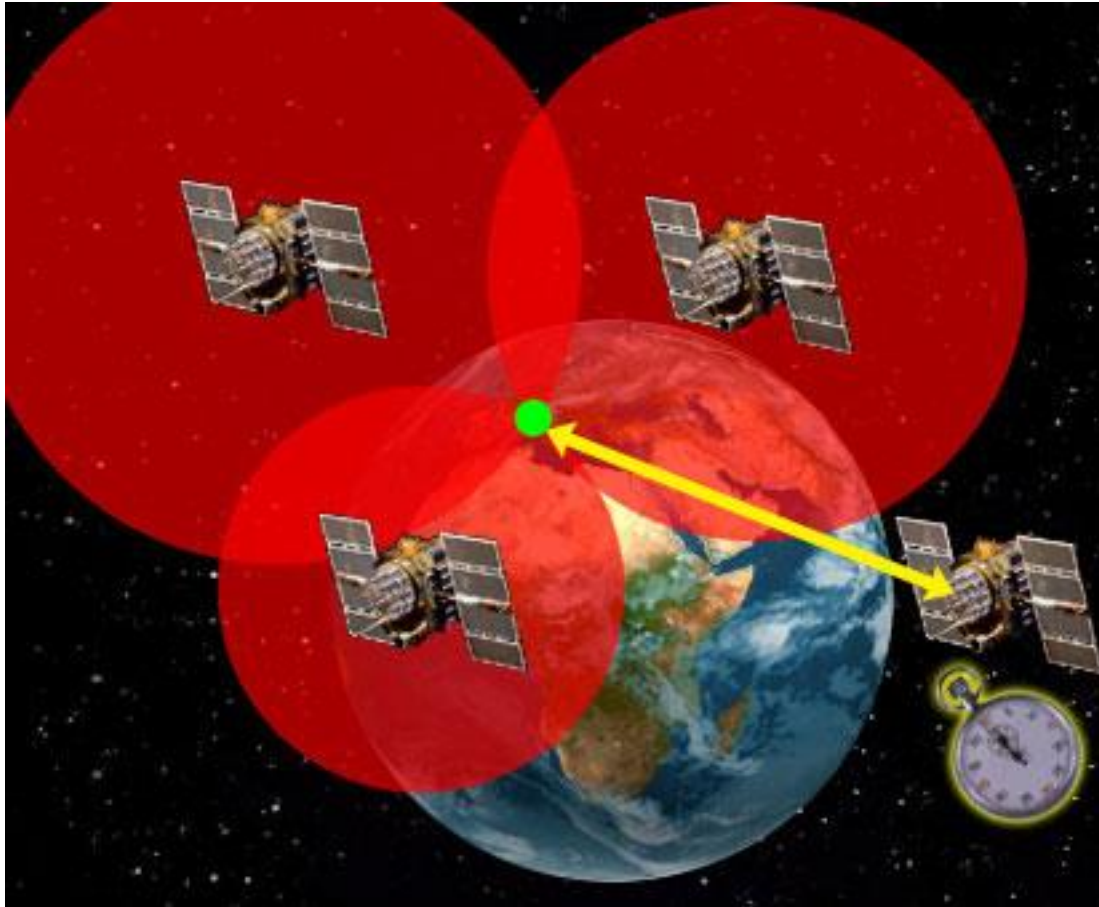
**Effetti hanno luogo anche nei dintorni della Terra, sebbene con intensità bassa...**

**... ma NON trascurabile nemmeno nella nostra VITA QUOTIDIANA !!!**



**La  
costellazione  
dei 24 satelliti  
GPS**

**Come funziona il sistema di individuazione della posizione di un utente sulla superficie terrestre?**



## **Tri-laterazione:**

**Precisione di  $\Delta L=1$  metro richiede conoscenza dei tempi con una precisione di**

$$\Delta(\text{tempo}) \approx \Delta L/c = 1 \text{ m}/300000 \text{ km/s} = 10^{-8} \text{ s} \approx 3\text{-}10 \text{ nanosec}$$

# **Effetti Relativistici NON trascurabili !!!**

**Visto che i satelliti del GPS si muovono rispetto al terreno a circa 14000 km/h, la Relatività Ristretta (alta velocità di moto relativo) e Generale (dilatazione dei tempi) predicono un moto degli orologi a bordo che è**

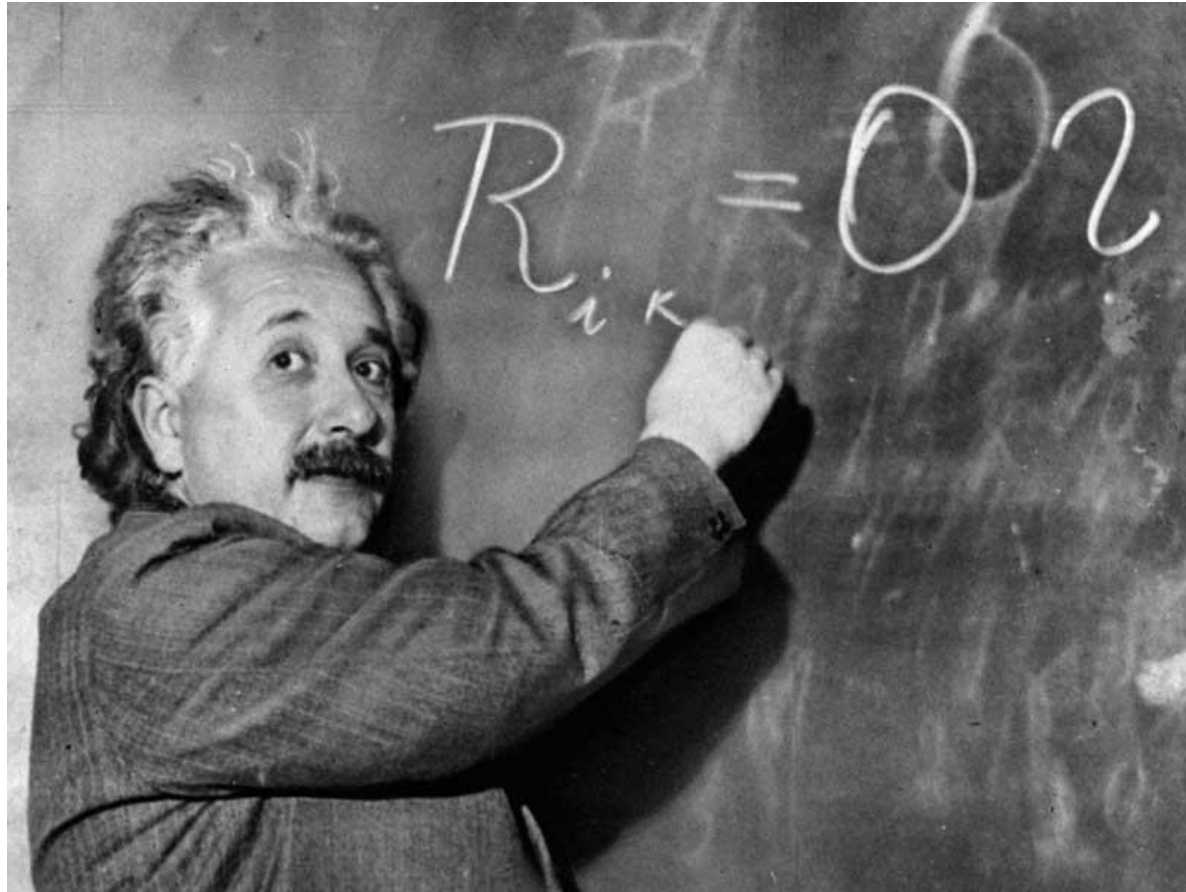
**PIU' LENTO di 7 milionesimi di secondo al giorno**

**A seguito della loro altezza sulla superficie (circa 20000 km) i satelliti del GPS avvertono una gravità minore e quindi la Relatività Ristretta e Generale predicono un moto degli orologi a bordo che è**

**PIU' VELOCE di 45 milionesimi di secondo al giorno**

**Complessivamente gli orologi sui satelliti GPS scandiscono un tempo più rapido degli orologi a terra, con una differenza di circa 38 milionesimi di secondo al giorno...senza tenere conto della correzione relativistica, si localizza un veicolo sulla Terra con un errore di 2km !!!**

***Il rivoluzionario schema interpretativo della Natura che va sotto il nome di Fisica Relativistica è stato sviluppato in due parti ed è molto ampio ...***



**Einstein (1879-1955)**



*TUTTO E' RELATIVO*

# Equazioni di Maxwell

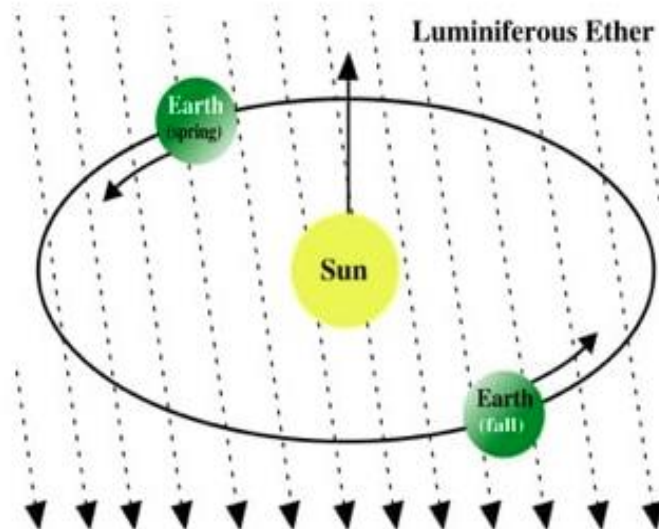
- Legge di Gauss per il campo  $E$   $\Phi(\vec{E}) = \frac{Q_{tot}^{int}}{\epsilon_0}$
- Assenza di monopoli magnetici  $\Phi(\vec{B}) = 0$
- Legge di Faraday-Neumann  $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}$
- Legge di Ampère-Maxwell  $\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}$

Teorizzate nel 1873 J.C. Maxwell, le onde elettromagnetiche vengono poi dimostrate esistere da Hertz nel 1888. La loro velocità è  $c=299792458$  m/s nel vuoto

Il problema dell'etere....



Attraverso delle precisissime misurazioni della velocità della luce effettuate durante diversi periodi dell'anno, considerando che la Terra ruota attorno al Sole, se fosse esistito davvero l'etere ed essendo la velocità media di rotazione della Terra lungo la sua orbita circa di  $v = 30 \text{ km/s}$ , durante il suo moto la Terra si sarebbe dovuta muovere per metà orbita in favore della velocità della luce nell'etere e nella seconda metà in direzione sfavorevole. Cioè si sarebbe dovuto rilevare il cosiddetto vento d'etere.



1887: per verificare le ipotesi del vento d'etere si allestisce

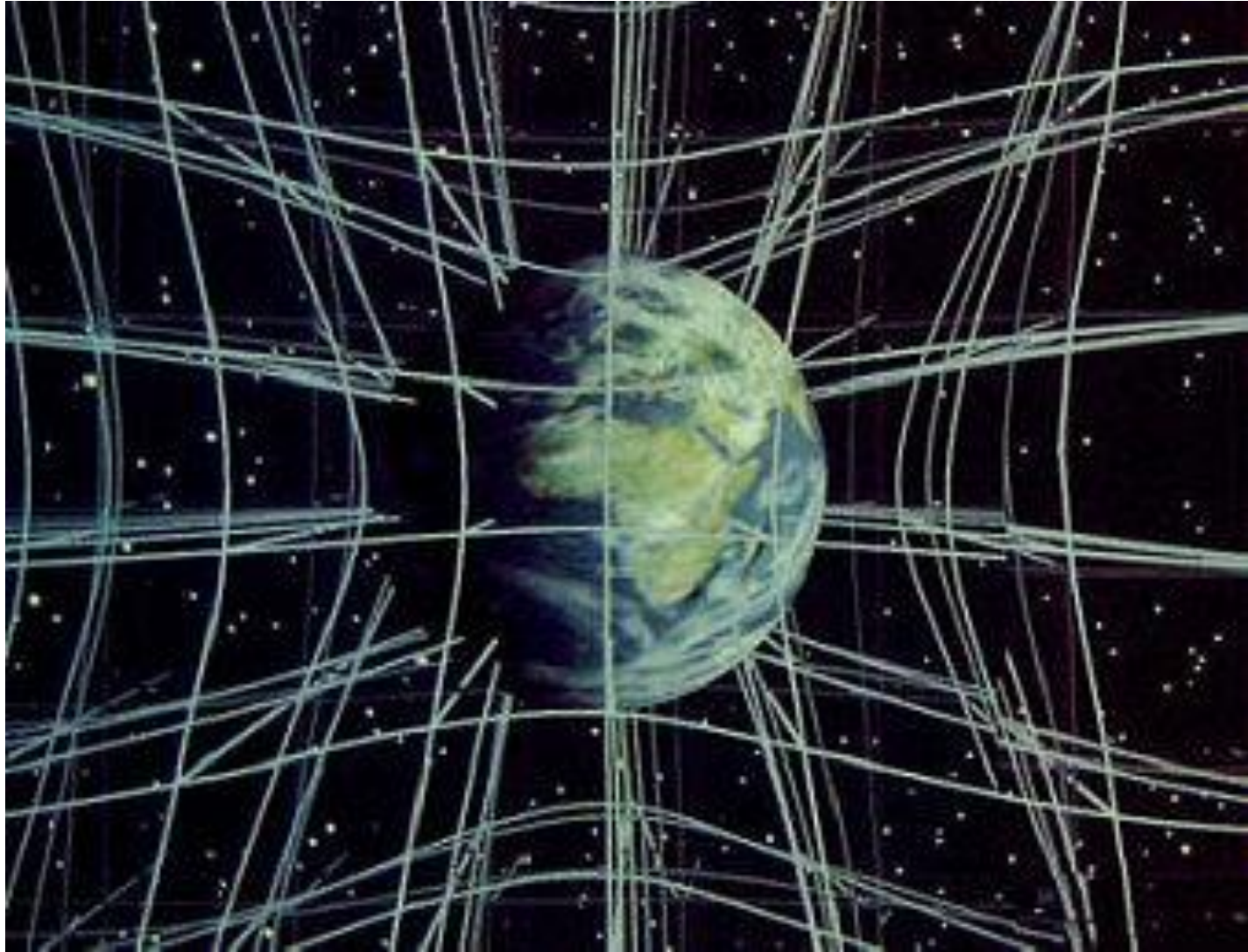
l'esperimento di Michelson Morley

Il nostro interferometro e come abbiamo rimediato

CONSEGUENZE DELLA RELATIVITA'  
RISTRETTACONSEGUENZE DELLA RELATIVITA'  
RISTRETTA

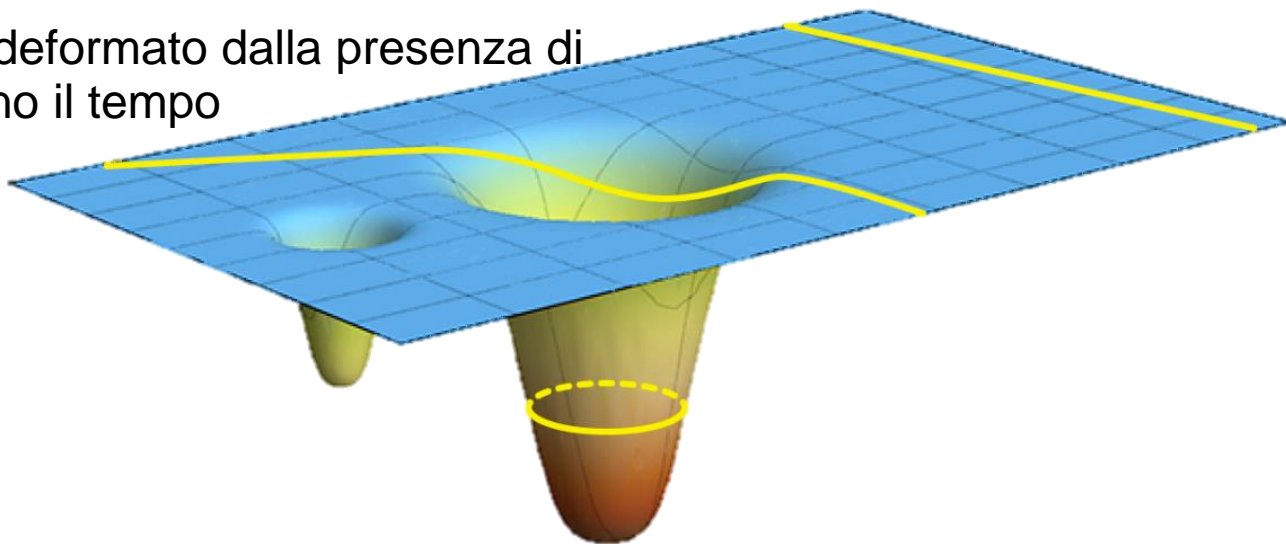
Non esiste l'etere e la velocità della luce è la stessa in ogni sistema di riferimento.

SPAZIO-TEMPO: cos'è con un'immagine 3D



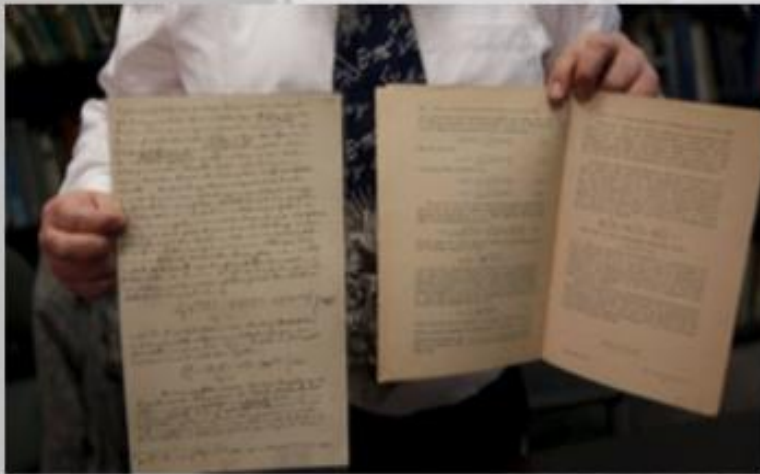


Lo spazio-tempo è deformato dalla presenza di masse che rallentano il tempo



## Tutto in una equazione....

$$R_{\eta\nu} - \frac{1}{2} g_{\eta\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\eta\nu}$$

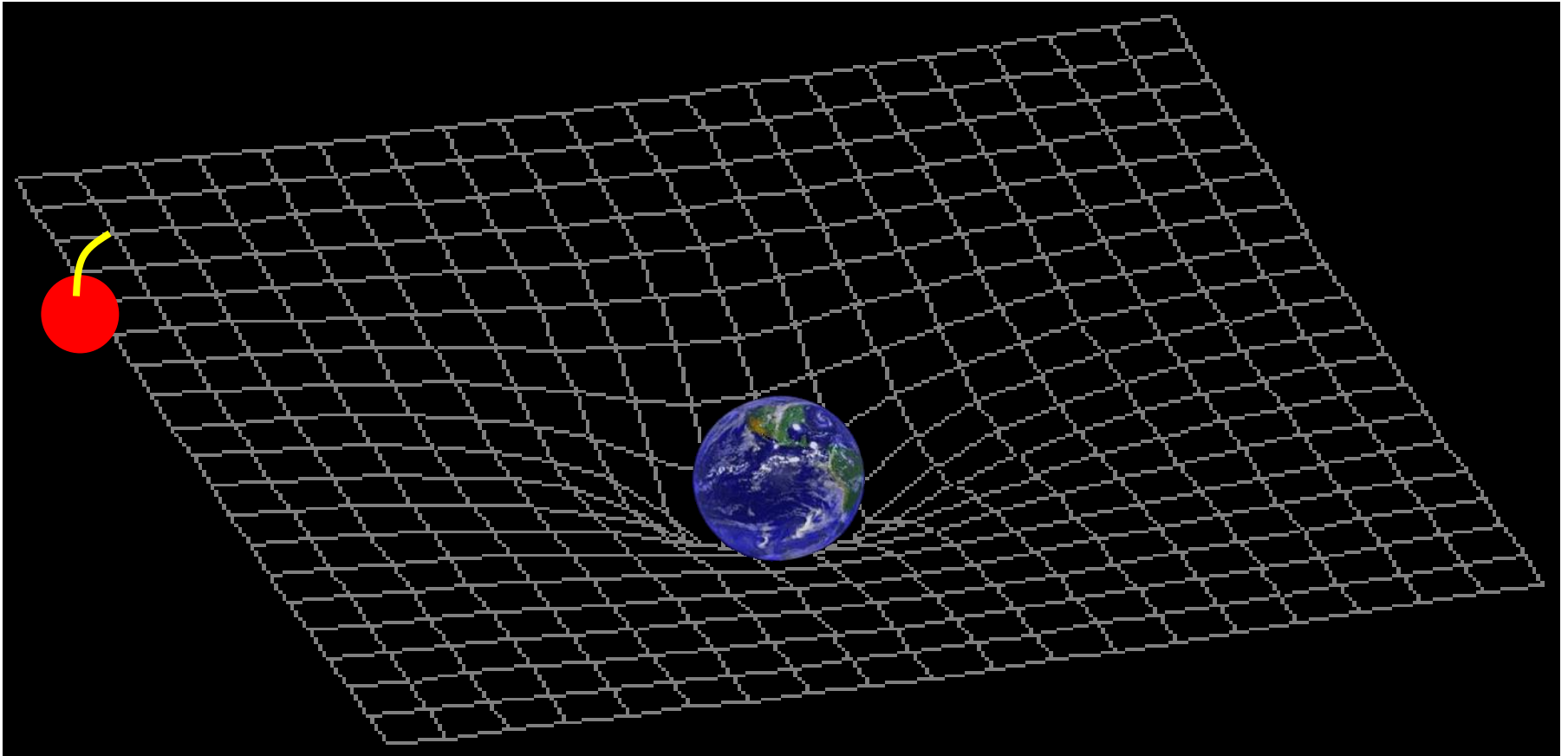


La materia (il termine  $T_{\eta\nu}$ )  
determina la curvatura  
dello spazio-tempo (il  
membro di sinistra)

Lo spazio-tempo è una struttura molto rigida: se per deformare un grande diamante di 1 cm in altezza, bisogna spingere su una superficie di 1 cm<sup>2</sup> bisogna spingere con una forza di almeno 100 tonnellate, dalla tabella si deduce che lo spazio tempo è mille miliardi di miliardi di volte più denso.

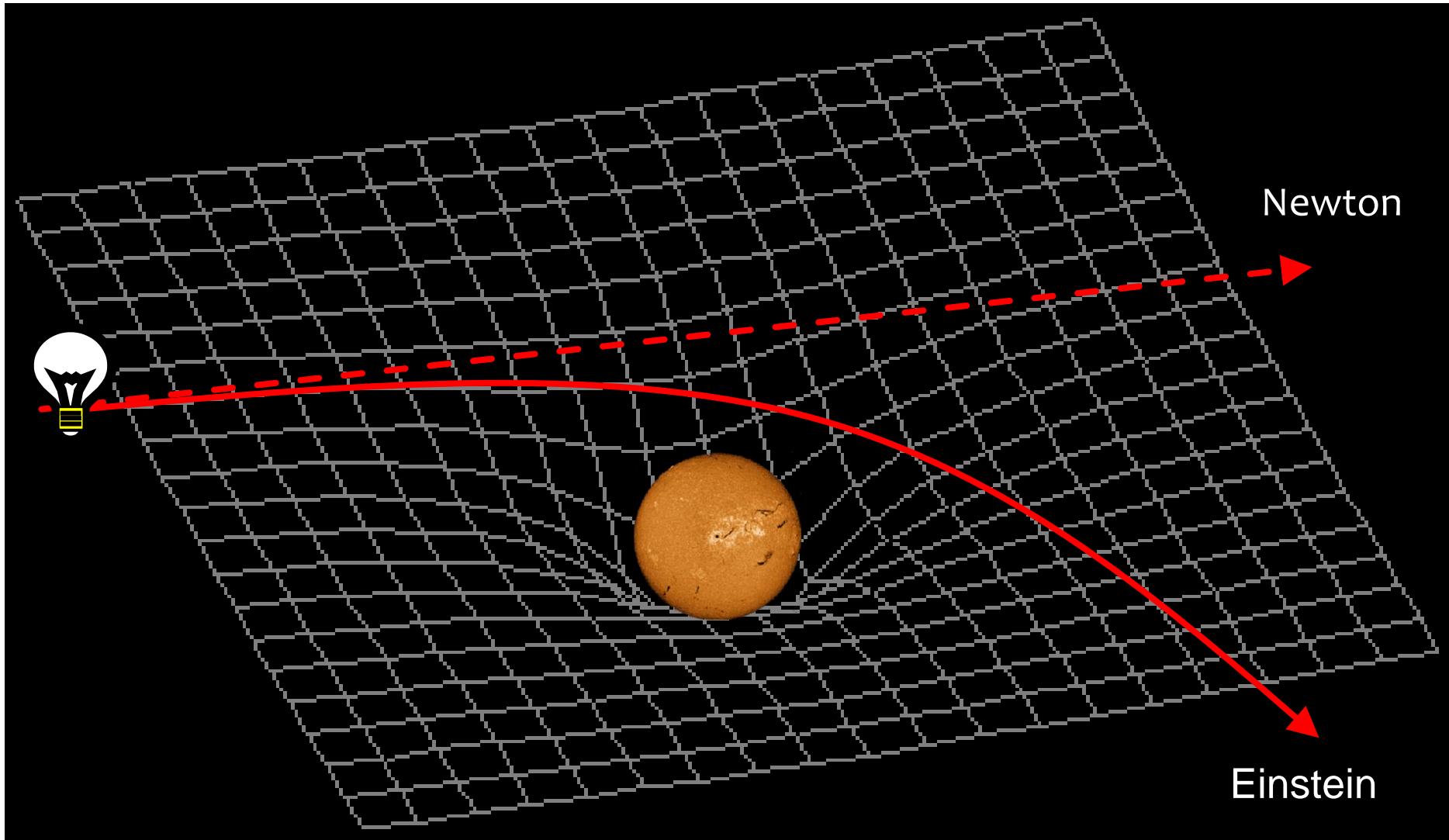
materiale	modulo di elasticità (GPa)
gomma	0,1
legno	10
acciaio	200
diamante	1200
spazio-tempo	1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000

**Secondo Einstein, una massa  $M$  (la nostra TERRA) deforma lo spazio circostante. Una massa  $m$  (la MELA), posta ad una distanza  $D$  dalla Terra), si muove cadendo liberamente (= scivolando) nelle deformazioni dello spazio-tempo**



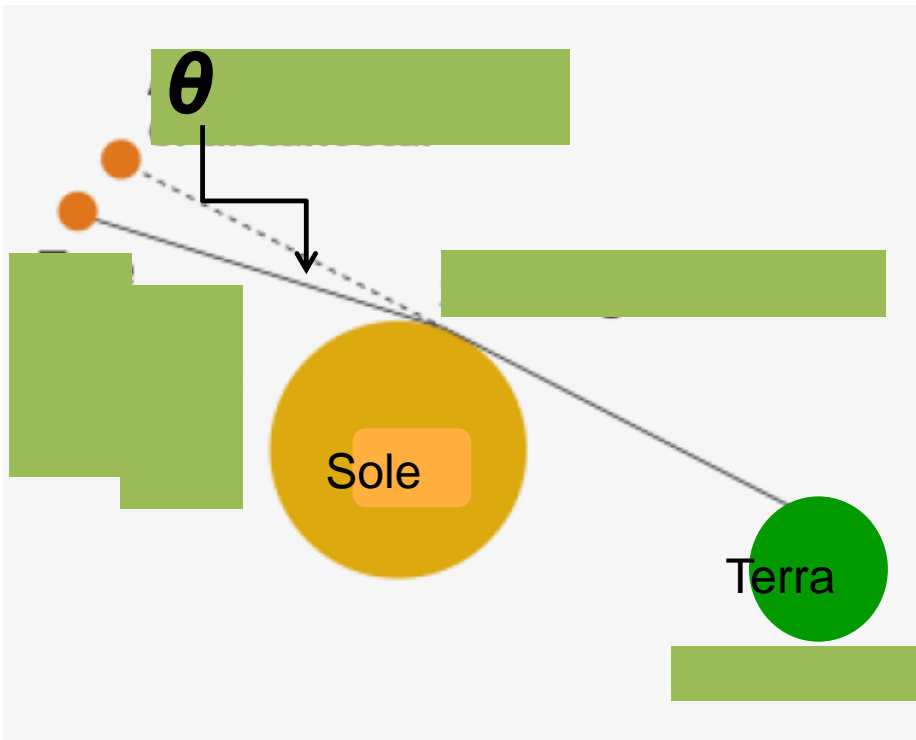
**Ecco perché la mela cade sulla terra !**

**Secondo Einstein, una qualunque massa  $M$  (ad esempio il SOLE) è in grado di deviare un raggio luminoso (un effetto impossibile secondo Newton) !**

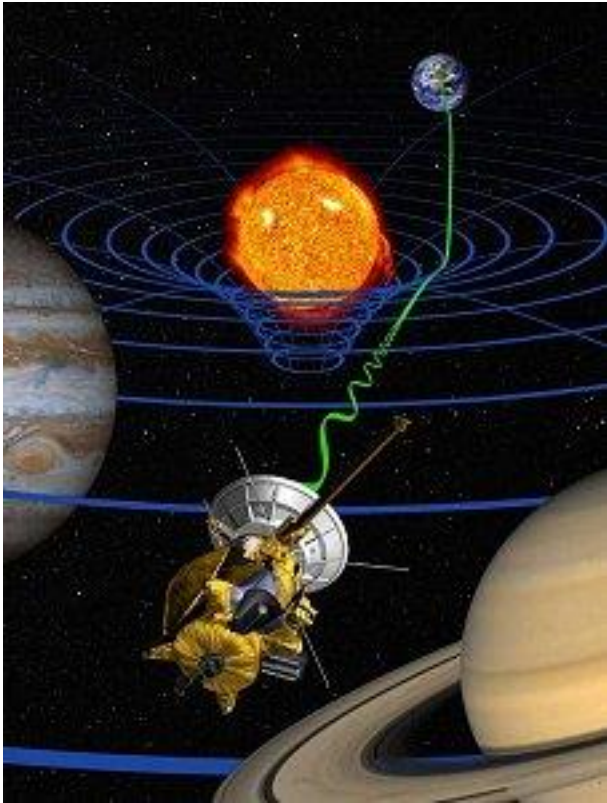




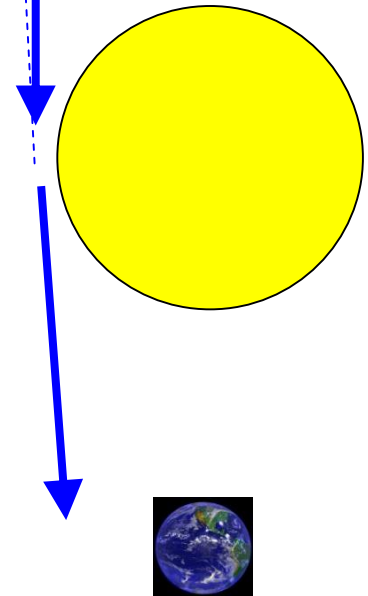
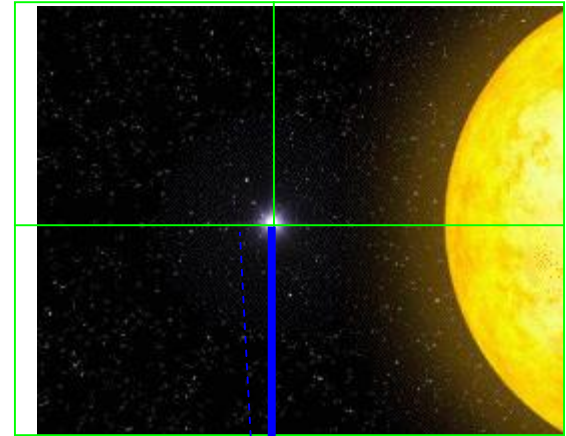
# L'angolo di deflessione...



Per fotoni che passano  
radenti la superficie del  
Sole la deflessione è  
pari a  $8 \cdot 10^{-6}$  radianti,  
ossia 1.75''



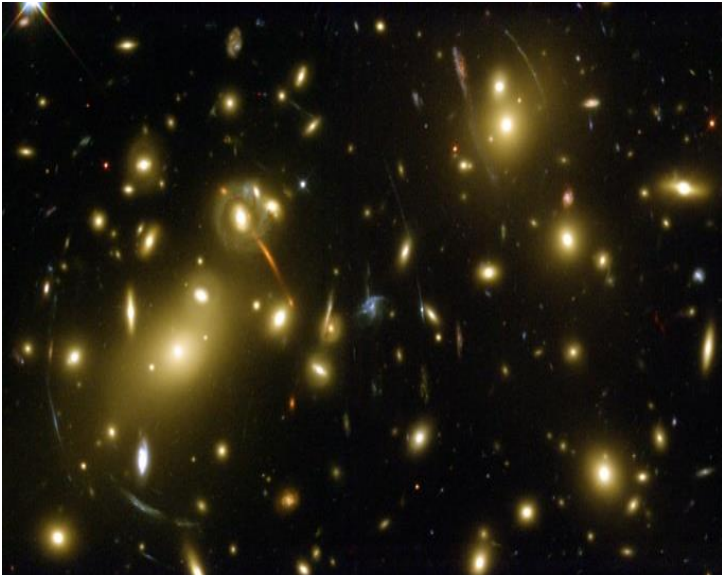
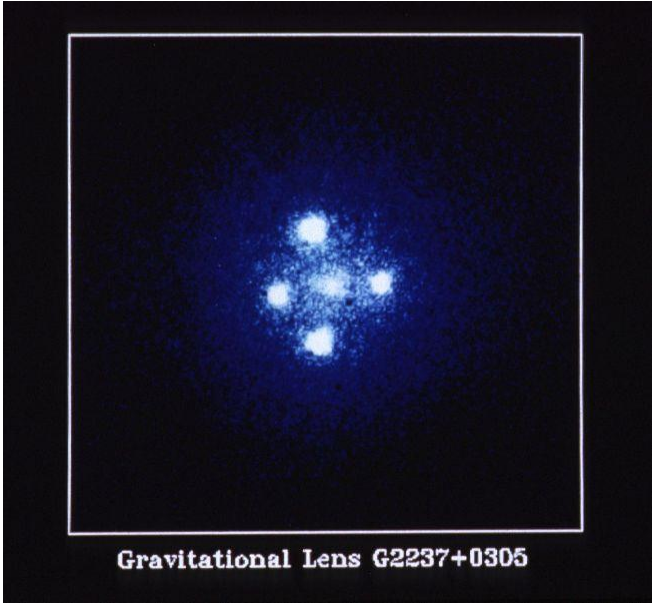
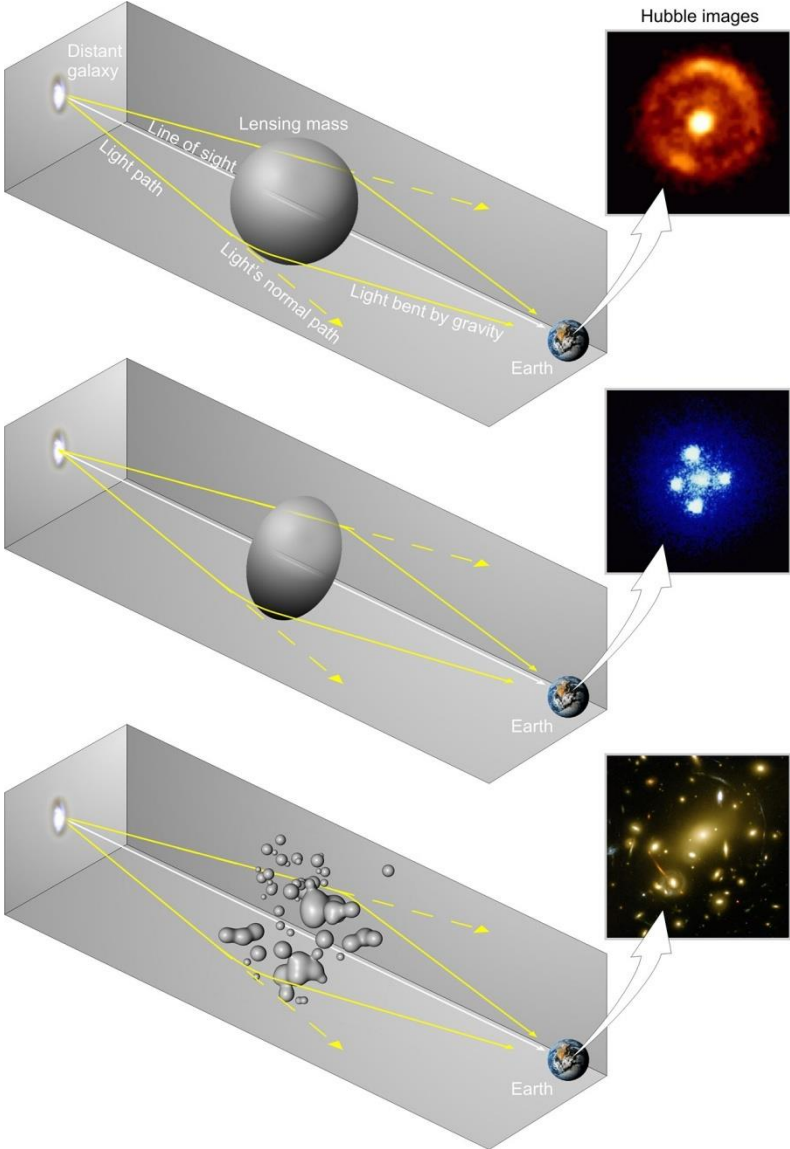
**Il primo grande  
esperimento  
celeste:  
Eddington (1919)**



## Gli anelli di Einstein: la massa della materia come una lente



# Deflessione gravitazionale: non solo anelli ...



***... il nuovo schema interpretativo di Einstein è stato sviluppato in due parti ed è molto ampio ...***

## **Relatività ristretta (1905) :**

- Insuperabilità della velocità della luce nel vuoto
- Il tempo intercorrente fra due eventi non è identico per due osservatori in moto relativo (dilatazione dei tempi)
- Le dimensioni di un oggetto non sono identiche per due osservatori in moto relativo (contrazione delle lunghezze)
- Equivalenza fra massa e energia:  $E = mc^2$

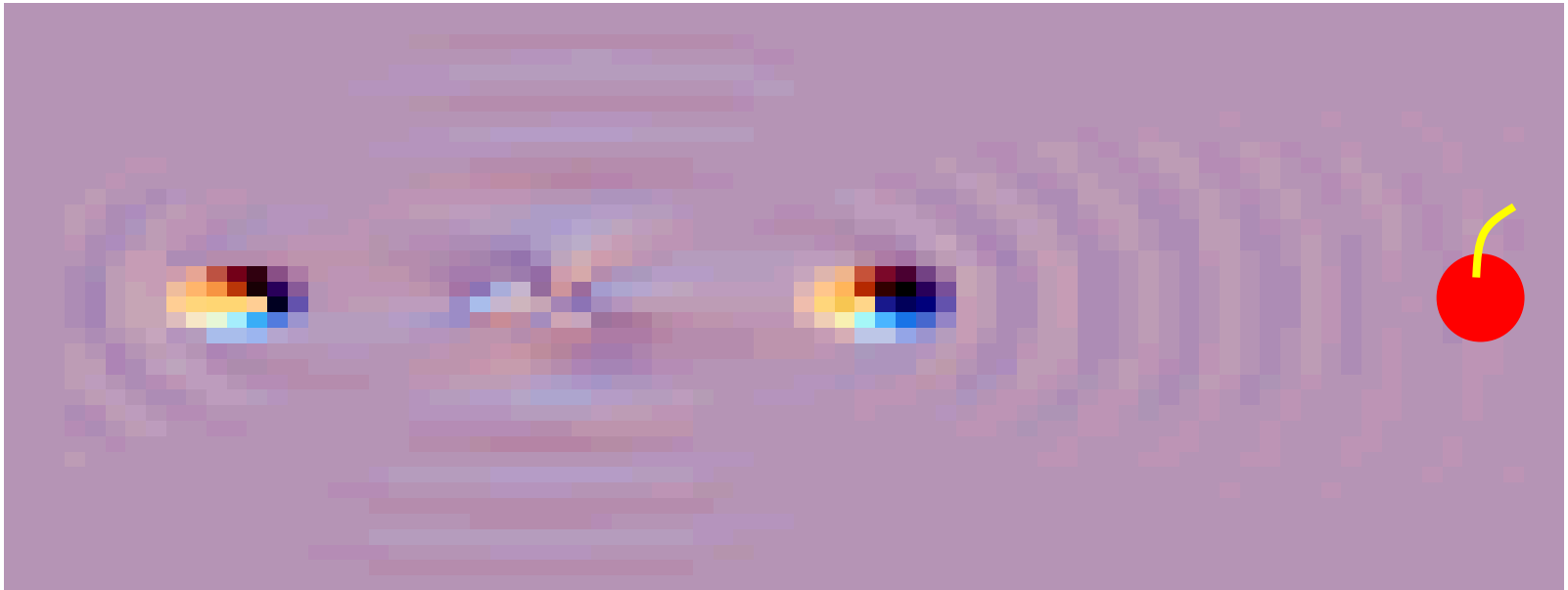
+ .....

## **Relatività generale (1907-1915):**

- I corpi massicci deviano la luce
- I moti orbitali risentono della curvatura dello spazio-tempo e si discostano da ellissi chiuse
- Due corpi celesti che si orbitano devono emettere energia sotto forma di onde gravitazionali

+ .....

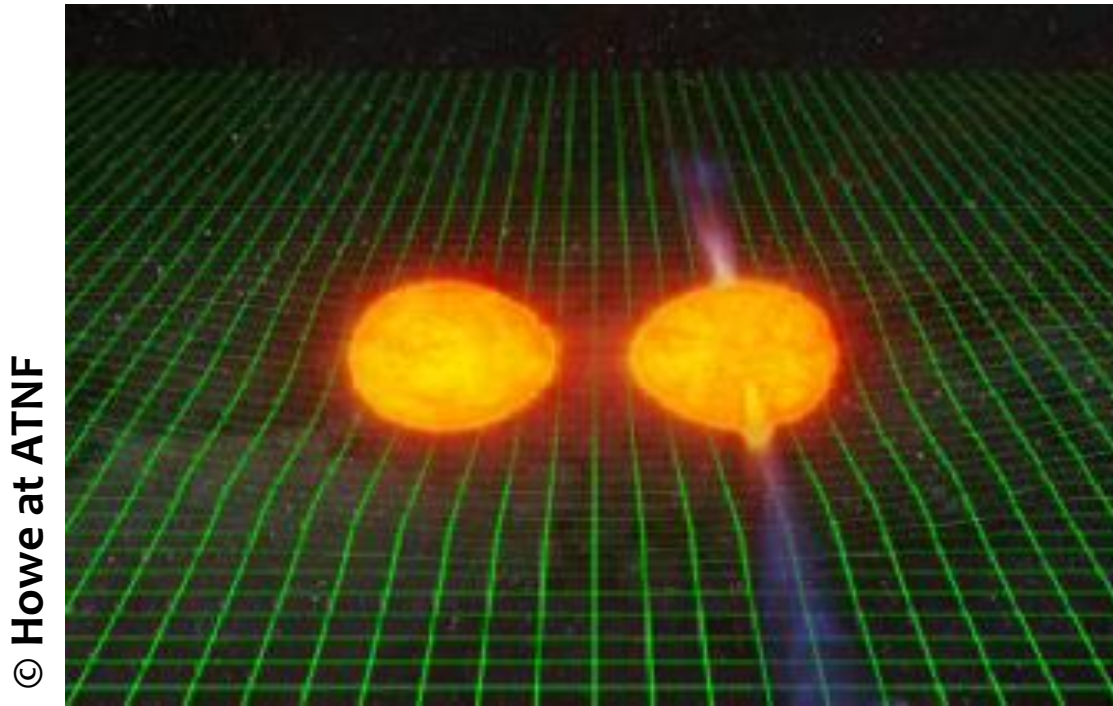
**Secondo Einstein (ma NON secondo Newton!) due corpi celesti che orbitano uno intorno all'altro generano le cosiddette onde gravitazionali**



**Ecco cosa succede alla mela, secondo Einstein**

# Le stelle orbitanti, prima o poi, devono venire a contatto diretto !!

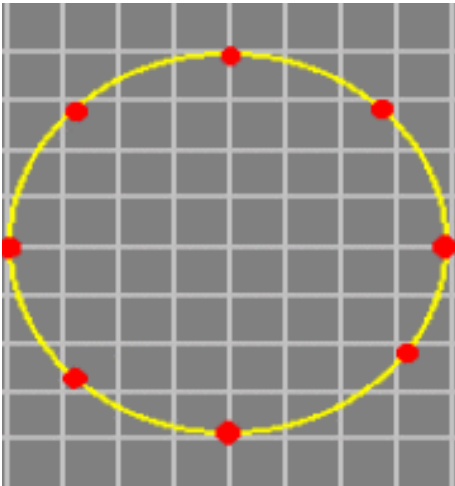
Ad esempio, nel caso della pulsar Doppia, le due stelle di neutroni si fonderanno fra 85 MILIONI di anni



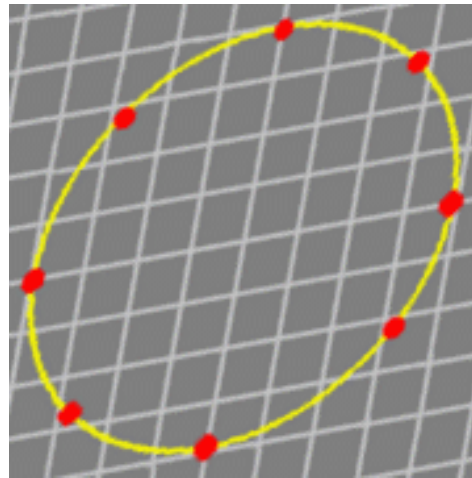
© Howe at ATNF

All'atto della coalescenza, la teoria della relatività generale predice l'emissione di un " botto di onde gravitazionali "

... le onde gravitazionali sono perturbazioni dello spazio-tempo il cui passaggio “deforma” ritmicamente ogni cosa ...

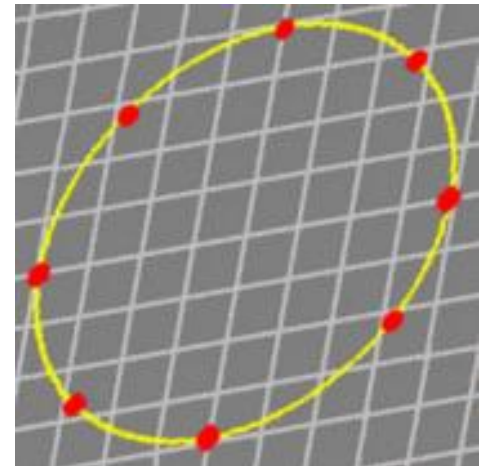


Onda Gravitazionale  
perpendicolare allo  
schermo (pol. +)



Onda  
Gravitazionale  
(pol. Circolare)

Onda Gravitazionale  
perpendicolare allo  
schermo (pol. X)

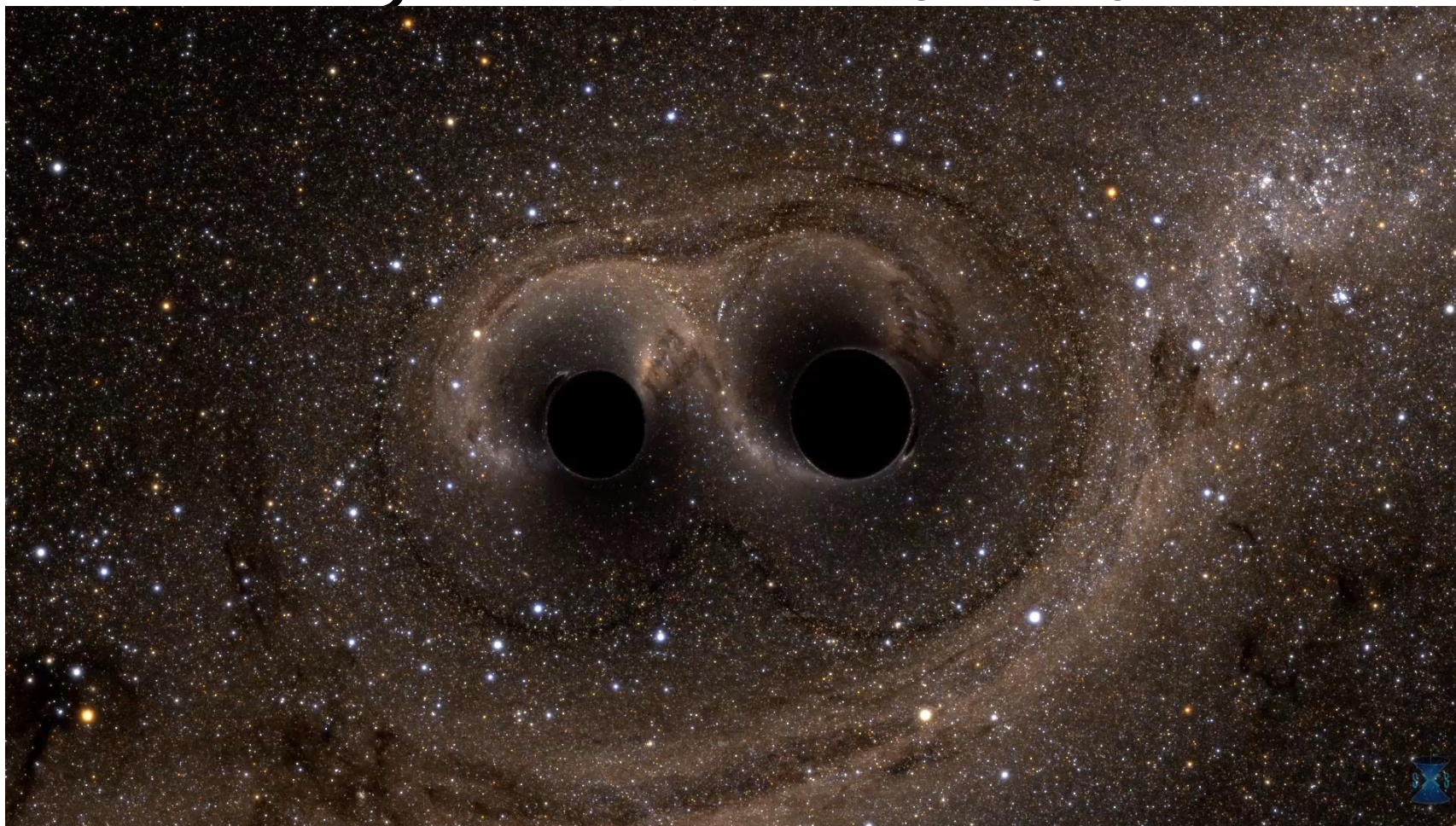




Nel frattempo, nelle increspature dello spazio-tempo a Terra è investita da onde gravitazionali, sempre che siano sufficientemente intense.....

Filmato terra colpita da onde gravitazionali ligo20160211v5.m4v

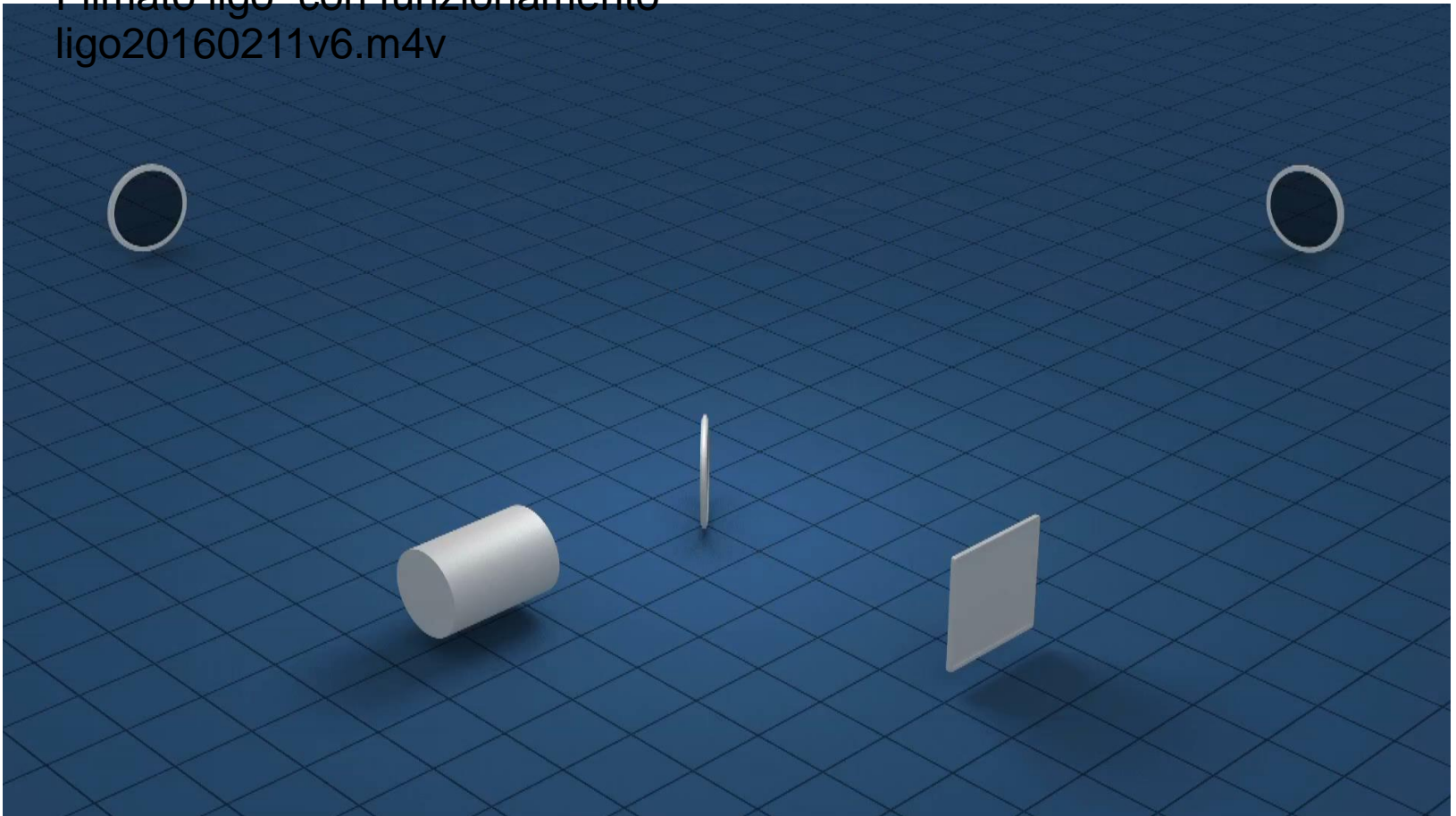
**Che cosa avremmo visto se fossimo stati  
abbastanza vicini alla binaria  
1.3 miliardi di anni or sono?**



@ Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project

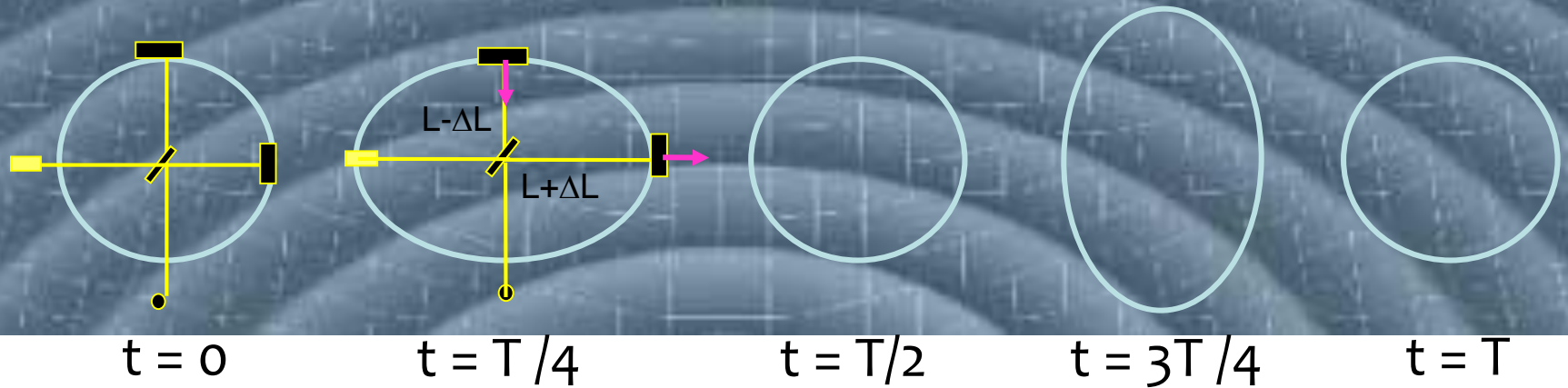
# Come funziona un interferometro per Onde Gravitazionali ?

Filmato ligo con funzionamento  
ligo20160211v6.m4v



@ LIGO/T. Pyle

# Principio di Funzionamento degli Interferometri



Gli effetti sono minutissimi: su lunghezze di 3 km, le variazioni di lunghezza sono attese dell'ordine di 10-15 millimetri: 1/1000 di nucleo atomico !

# Rete di Interferometri per Onde Gravitazionali

4 & 2 km



600 m



3 km



300 m



4 km

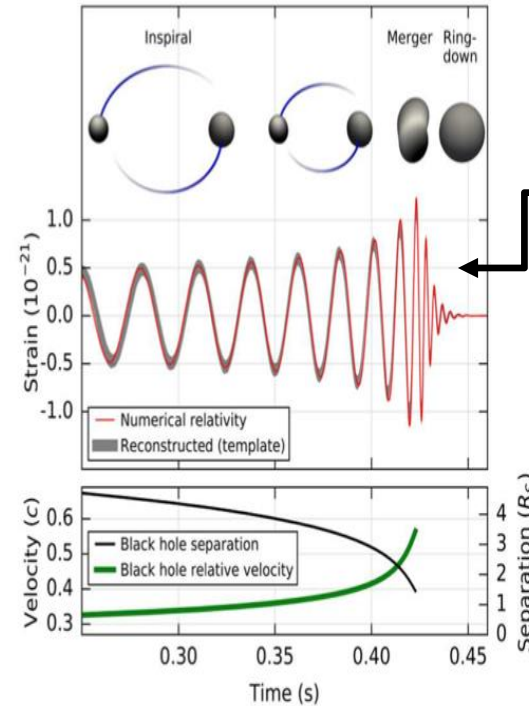
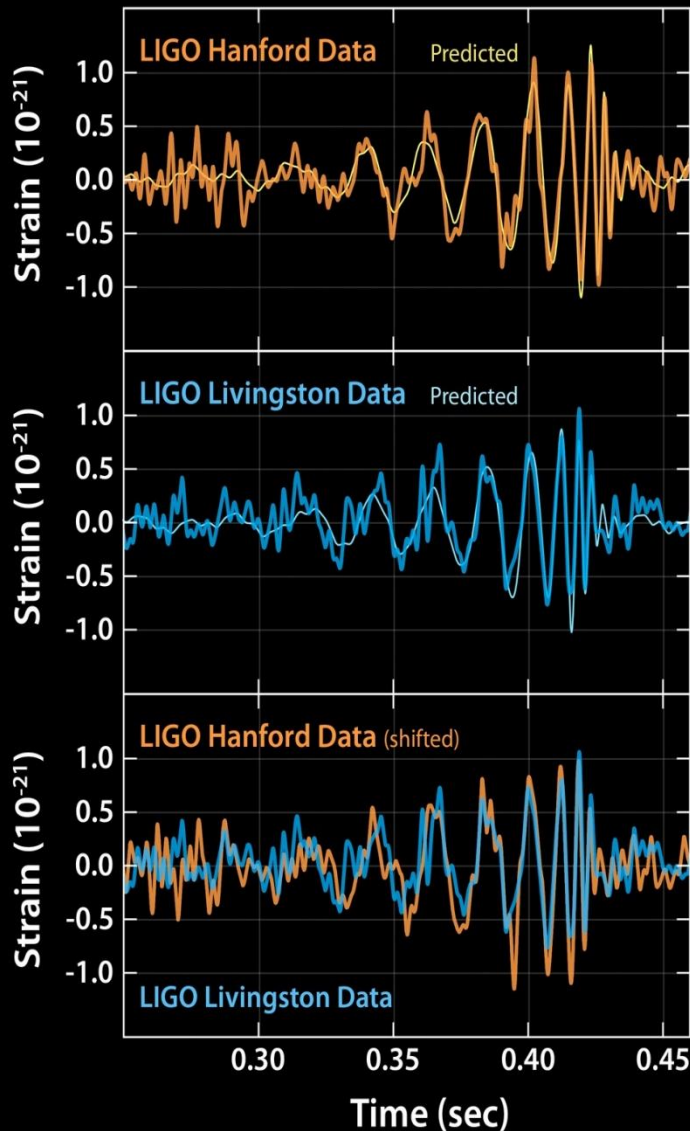




**I siti di LIGO presso  
Livingstone (Louisiana)  
e presso  
Hanford (Washington)**

**@ Caltech/MIT/LIGO Lab**

@ LIGO/VIRGO

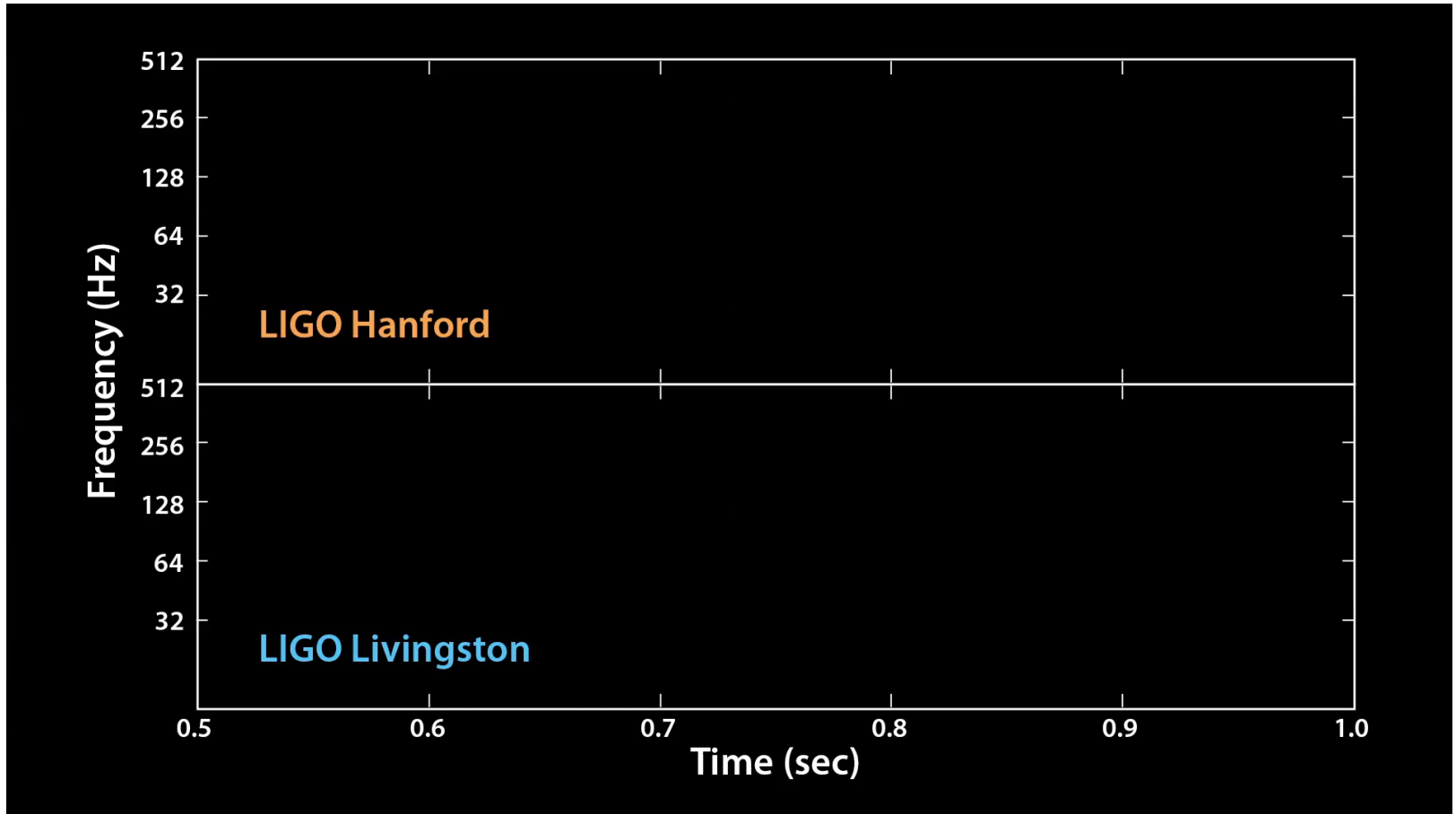


Un tipico esempio (in rosso) di forma l'onda simulata, grazie alla cosiddetta RELATIVITA' NUMERICA per la coalescenza di due buchi neri

Le predizioni della Relatività Generale di Einstein sono perfettamente verificate per un sistema binario di 2 buchi neri con masse rispettivamente di 29 e 36 masse solari

14 settembre 2015

durante un'ultima sessione di calibrazione...



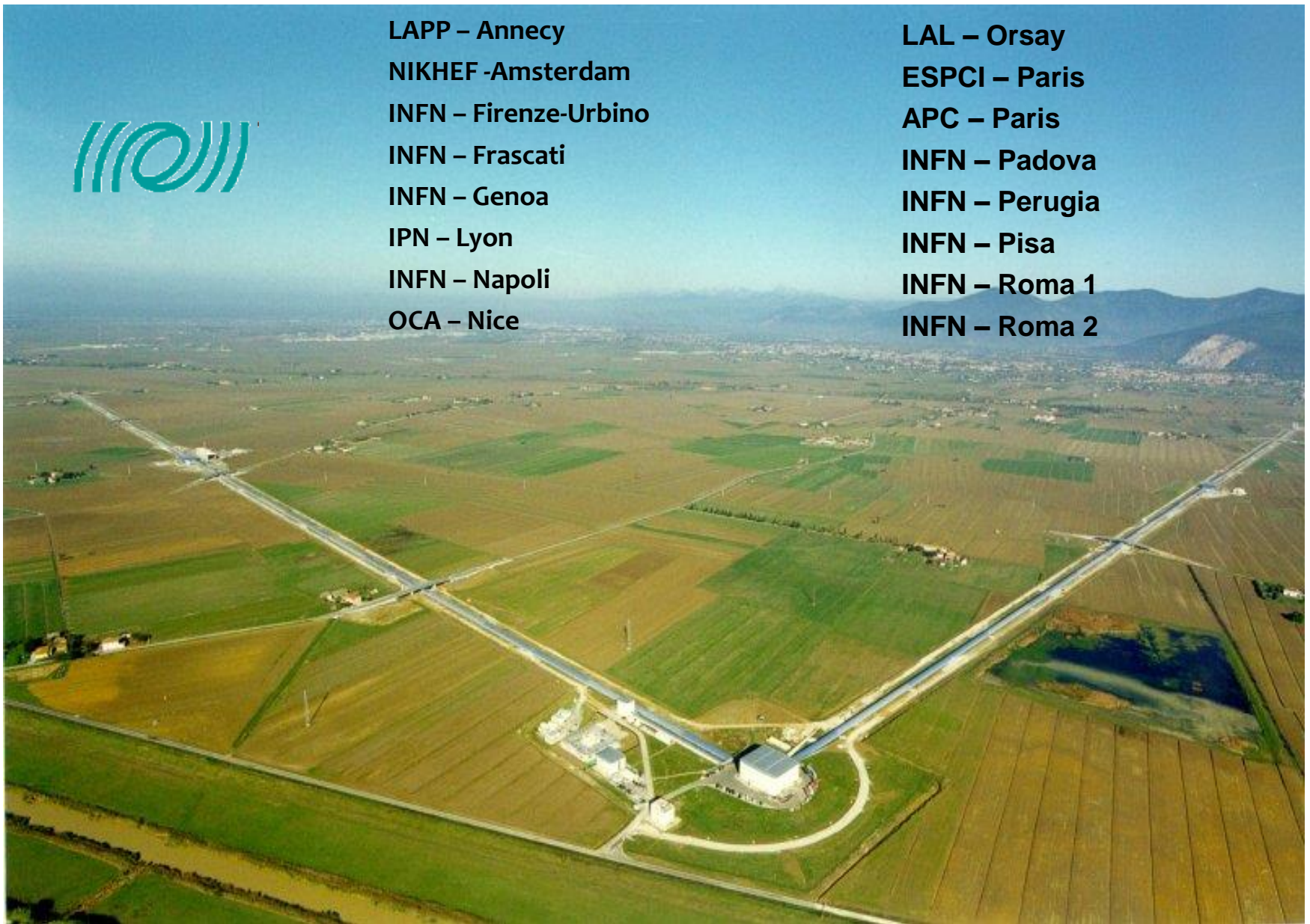
@ Caltech/MIT/LIGO Lab





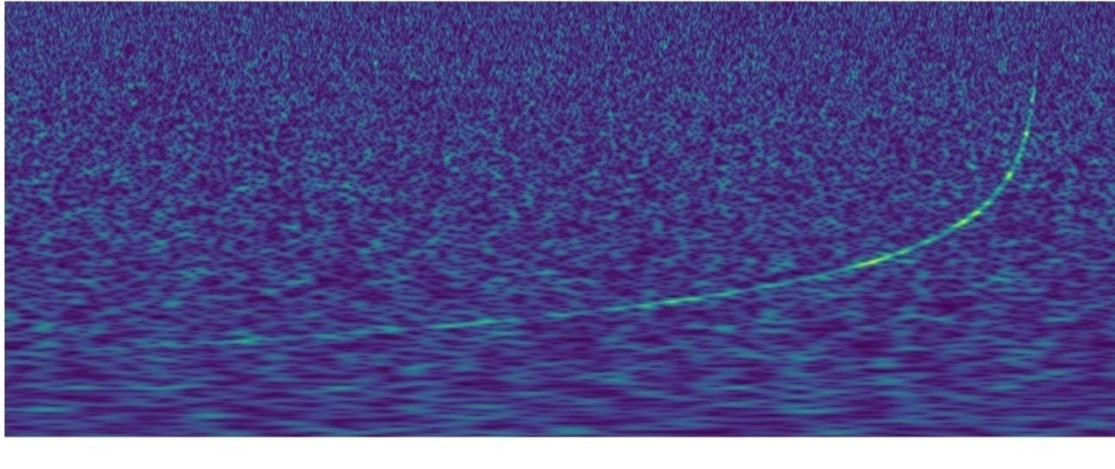
LAPP – Annecy  
NIKHEF -Amsterdam  
INFN – Firenze-Urbino  
INFN – Frascati  
INFN – Genoa  
IPN – Lyon  
INFN – Napoli  
OCA – Nice

LAL – Orsay  
ESPCI – Paris  
APC – Paris  
INFN – Padova  
INFN – Perugia  
INFN – Pisa  
INFN – Roma 1  
INFN – Roma 2



**VIRGO presso il sito EGO (Cascina – Pisa )**

30 secondi

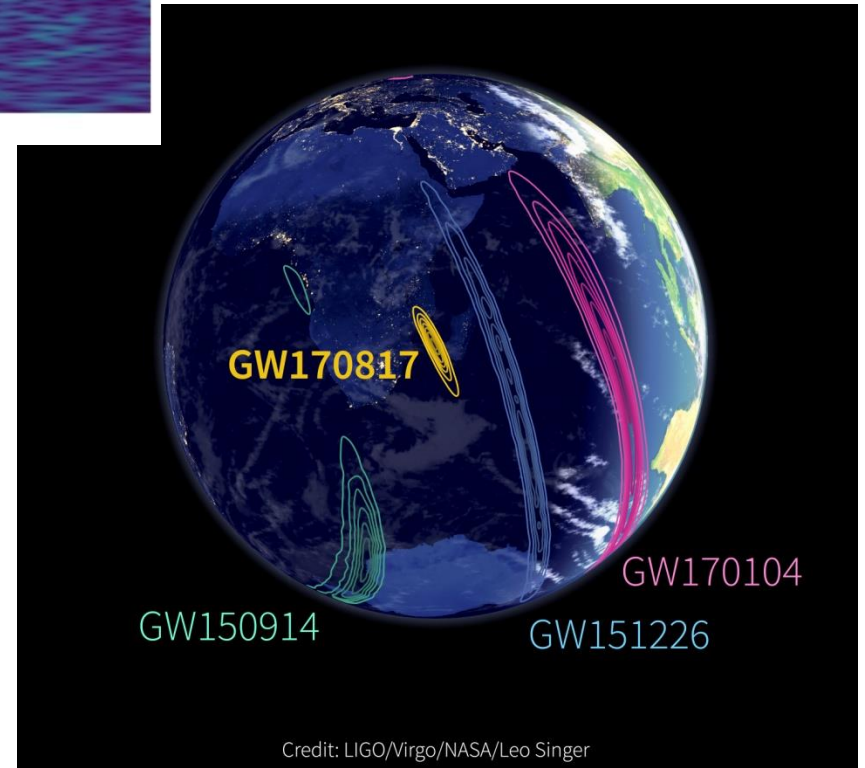


**17 agosto 2017**

**Dopo circa due settimane**

**dall'apertura di**

**Advanced-VIRGO...**



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer

© LIGO/VIRGO/NASA

... univocamente identificata per la prima volta una  
controparte ottica ...



... grazie alla rapida localizzazione, oltre 70 telescopi in azione ...



**... univocamente identificata per la prima volta una Kilonova...**

Lampo Onde Gravitazionali

Lampo Gamma

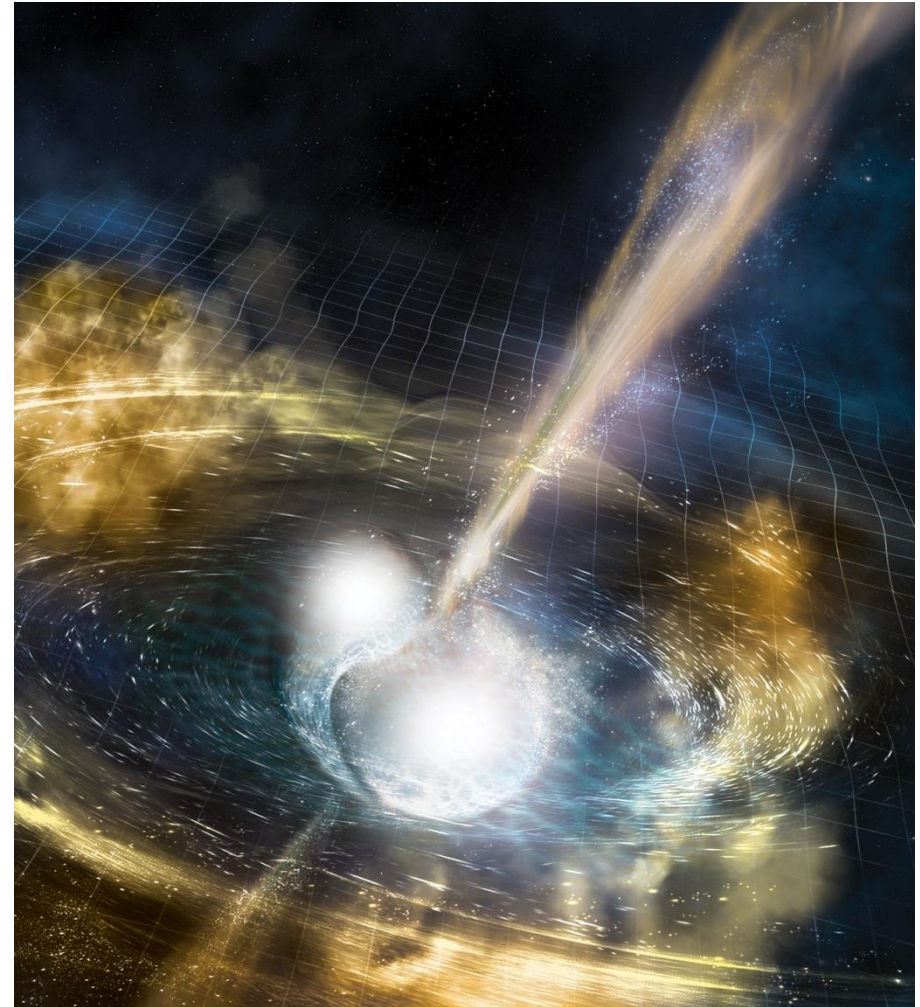
Controparte Ottica

Controparte IR

Controparte UV

Controparte Raggi X

Controparte Radio



© LIGO/VIRGO/NASA

**... e quindi la sede di produzione degli elementi pesanti come Oro, Platino etc**

*Due straordinari lasciti delle indagini  
multi-messenger relative a GW170817 e  
alla kilonova associata*

**1) Le onde gravitazionali si muovono ad una  
velocità compatibile con la velocità della luce  
nel vuoto  $c$**

**2) Le coalescenze di stelle di neutroni sono gli  
eventi (gli unici?) in cui si producono i metalli  
più pesanti dell'Universo: oro, platino etc ...**

## RIASSUMENDO:

[https://www.hwupgrade.it/news/sistemi/le-onde-gravitazionali-spiegate-con-un-fumetto\\_60915.html](https://www.hwupgrade.it/news/sistemi/le-onde-gravitazionali-spiegate-con-un-fumetto_60915.html)

<https://www.youtube.com/watch?v=4GbWfNHtHRg>

<https://www.youtube.com/watch?v=iphcyNWFD10>

## L'EVENTO:

<https://www.youtube.com/watch?v=cf7ZjDNTdcw>

