

# **L'Universo, la forza di gravità e le onde gravitazionali**

**due storie e un «colpevole»**

**Scuola media Ovidio – Marzo 2018**

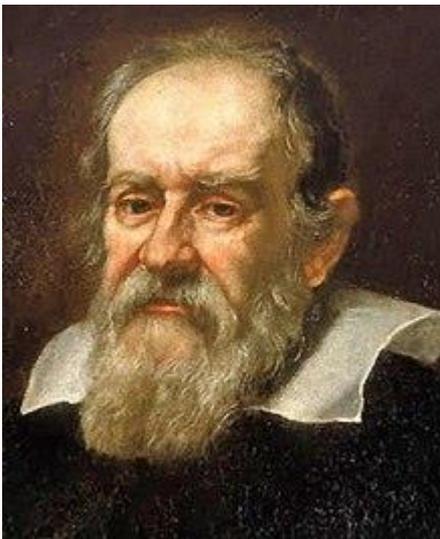
# La Scienza...

- \* La scienza è come un romanzo giallo: ci sono gli investigatori, gli indizi, il colpevole e poi la ricostruzione della verità.
- \* Noi parleremo della **storia di come si sono accumulati gli indizi**, troveremo il **colpevole** e poi faremo la ricostruzione: racconteremo la **storia del mondo**.

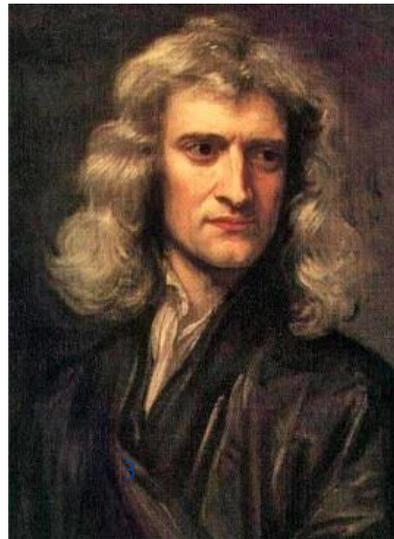
# Gli Investigatori

- \* Gli investigatori sono tantissimi, cominciano con gli uomini primitivi più «furbi», con gli astronomi-sacerdoti babilonesi e continuano fino agli scienziati di oggi nei centri di ricerca.
- \* Ma vi voglio presentare i tre più importanti:

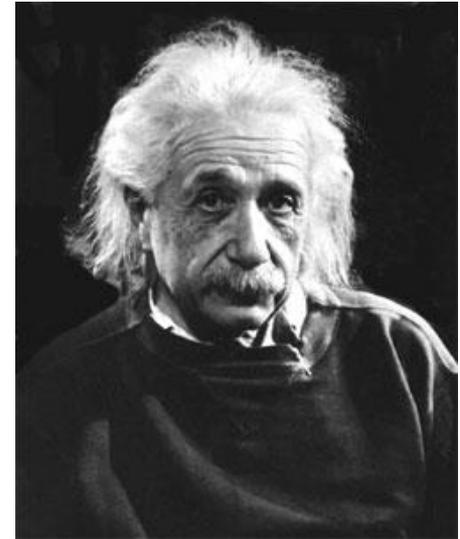
Galileo (1564-1642)



Newton (1642-1727)



Einstein (1879-1955)



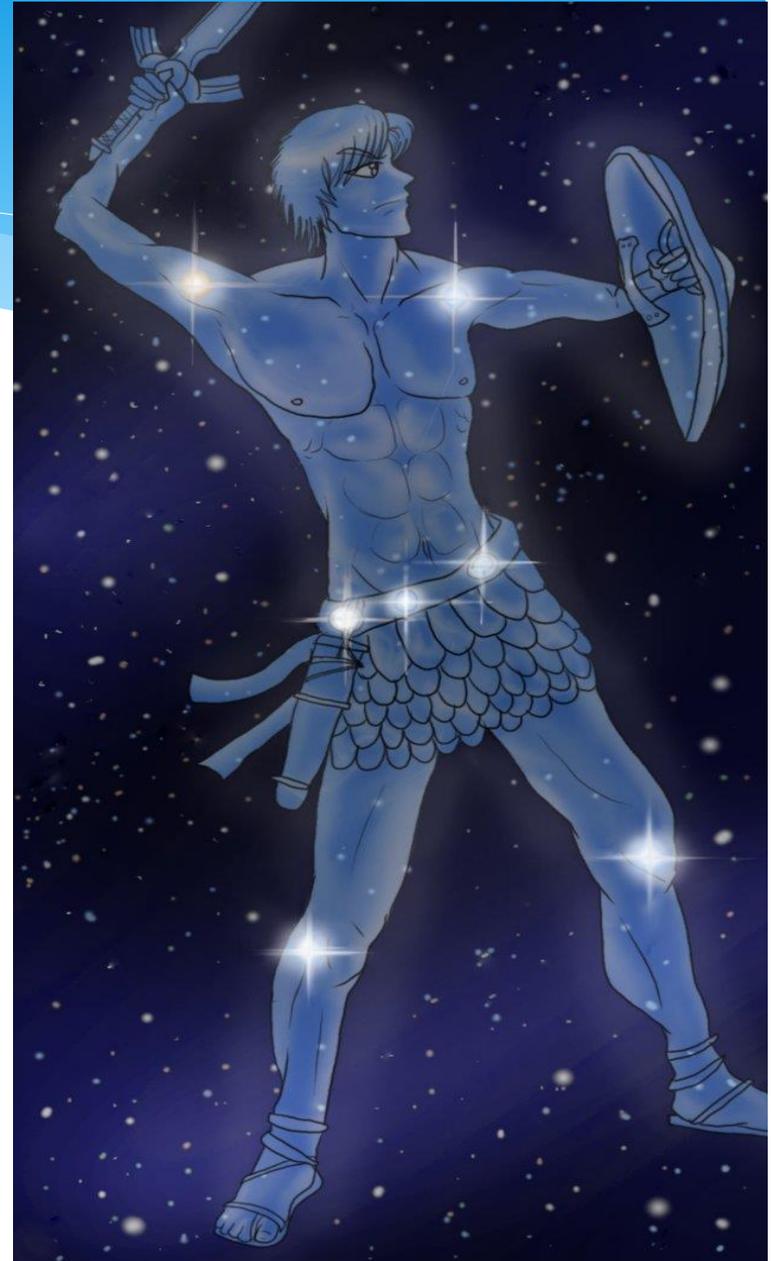
# Gli indizi

**Cominciamo dall'antichità...**

# Il cielo stellato



# Orione



# Movimento apparente delle stelle

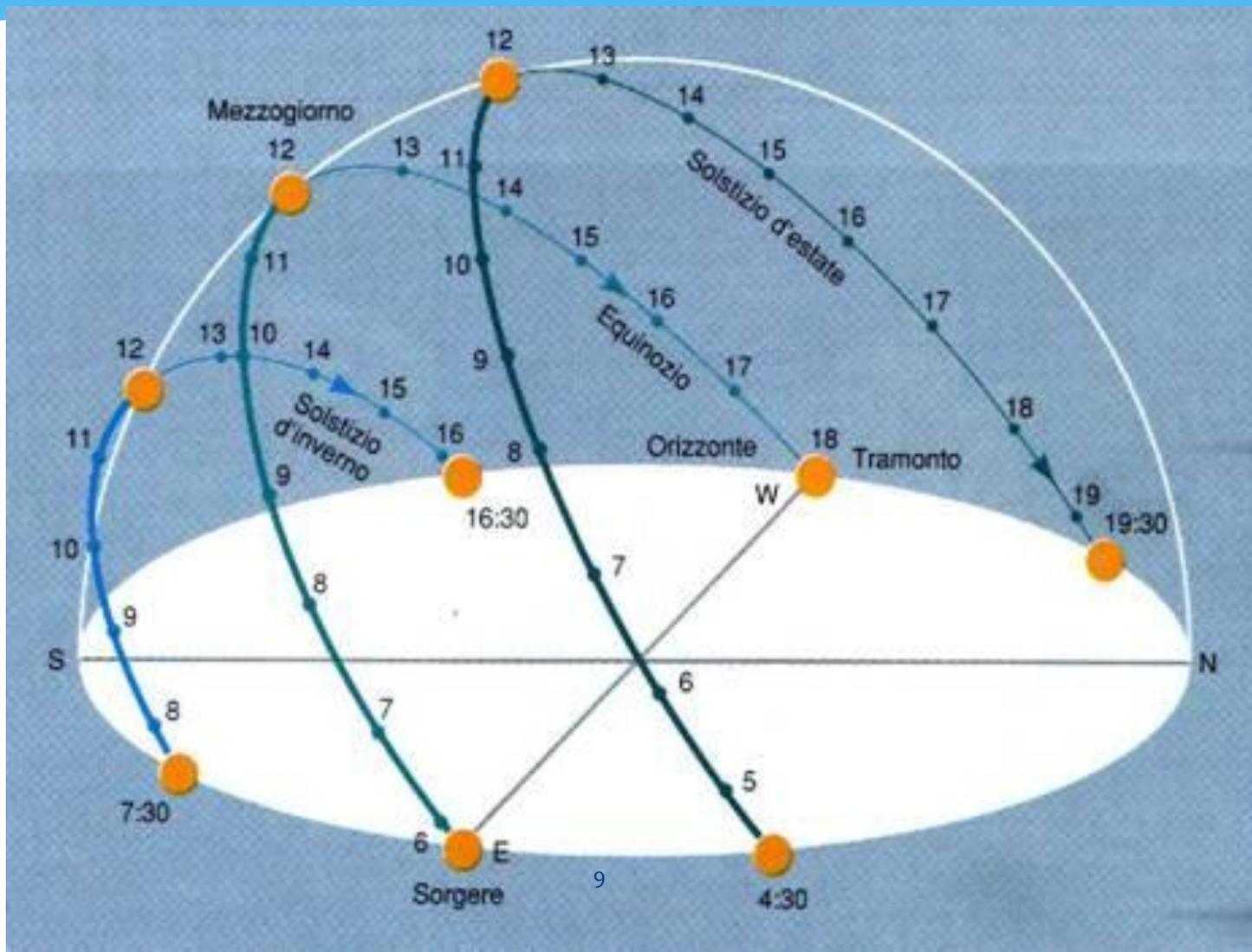
**Puntando la  
fotocamera  
con l'obiettivo  
aperto verso la  
stella polare**



© Giorgia Hofer

# Movimento apparente delle stelle (video)

# Il movimento del Sole



# Stonehenge



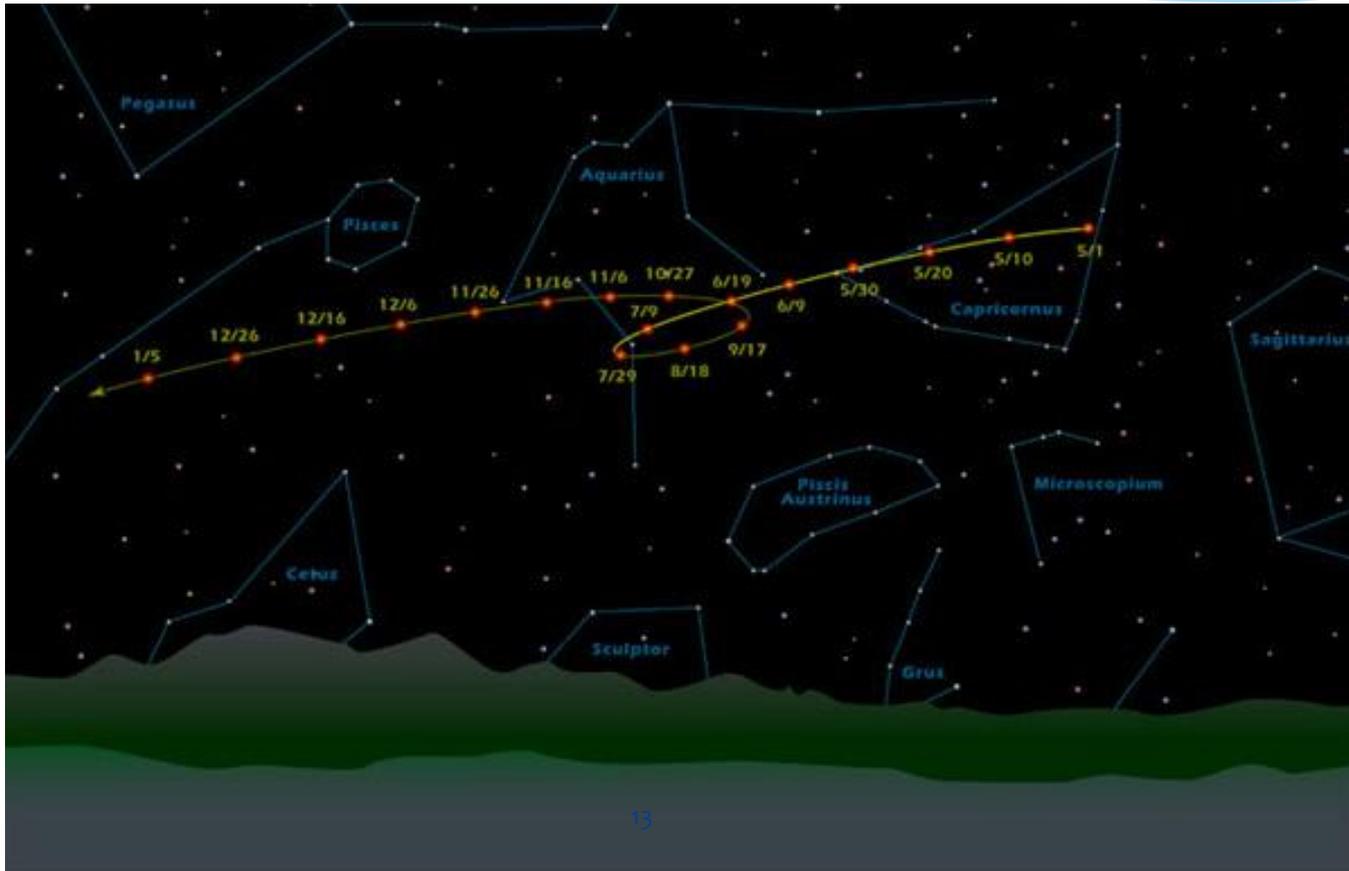
# La meridiana



# Santa Maria degli Angeli

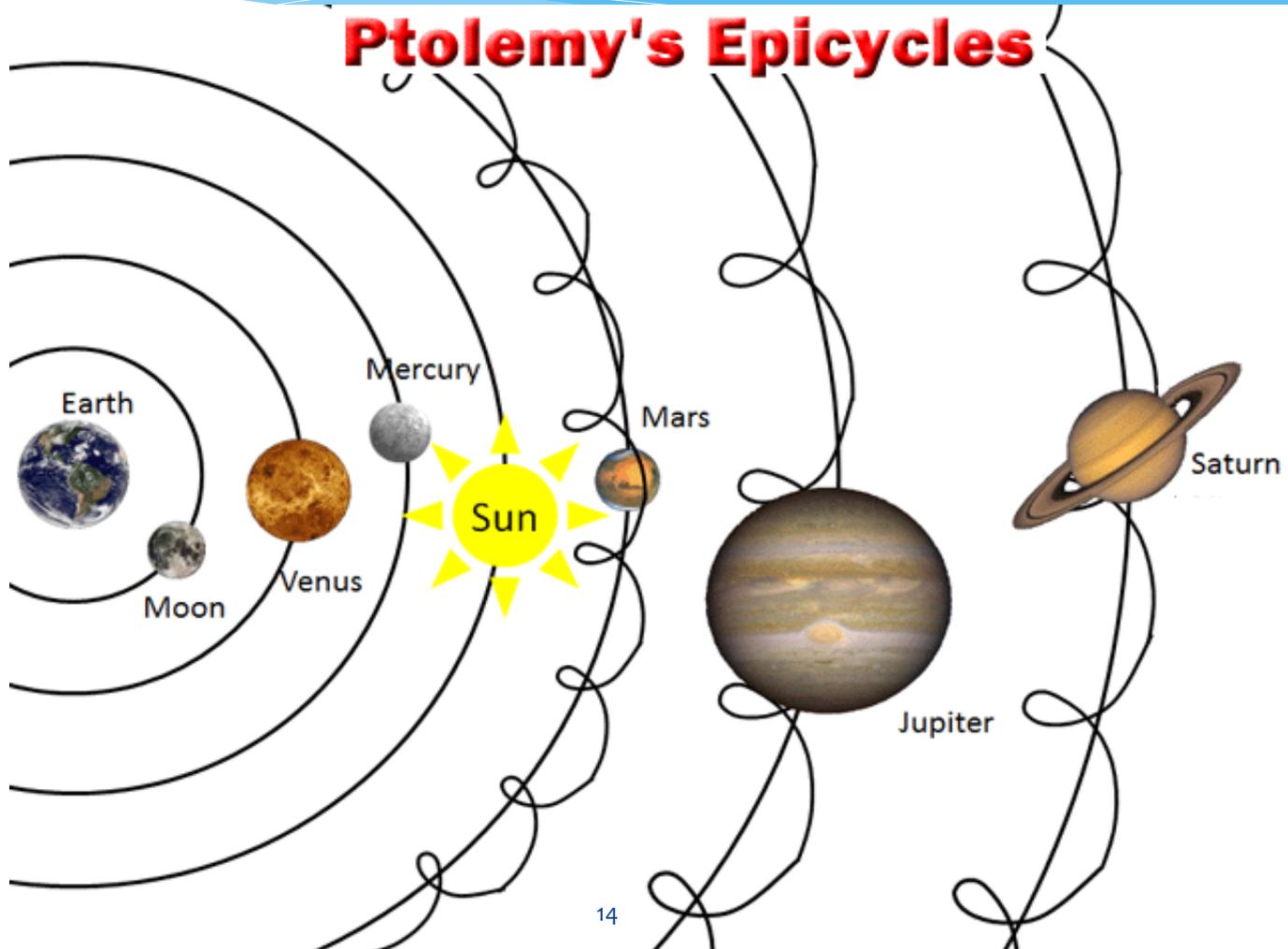


# Come si muove un pianeta visto dalla Terra

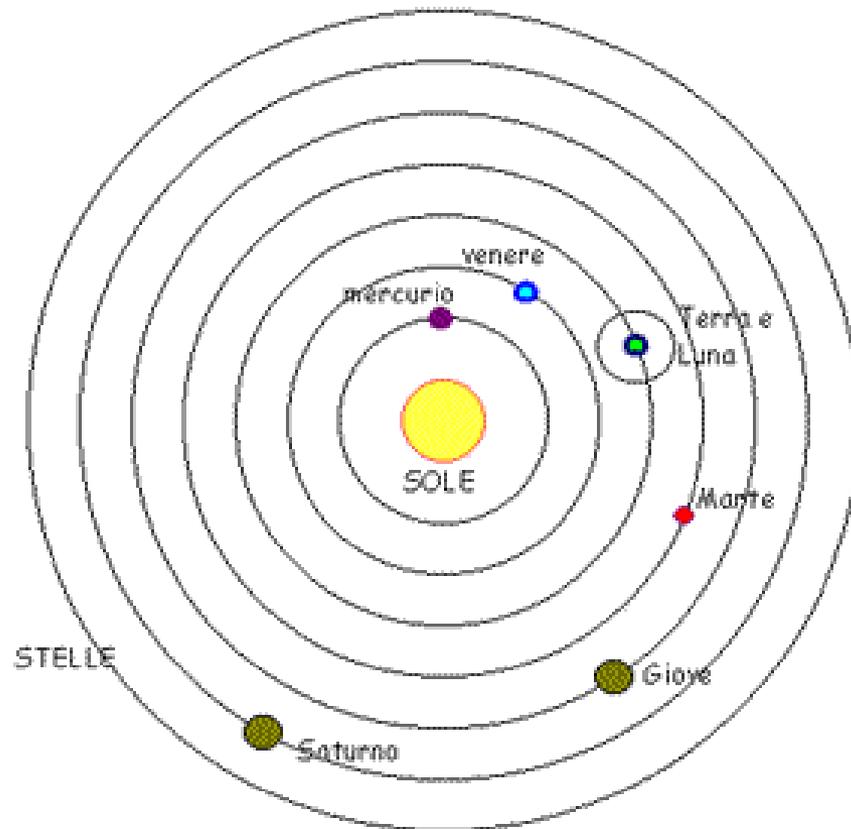


# Come si muove un pianeta visto dalla Terra

## Ptolemy's Epicycles

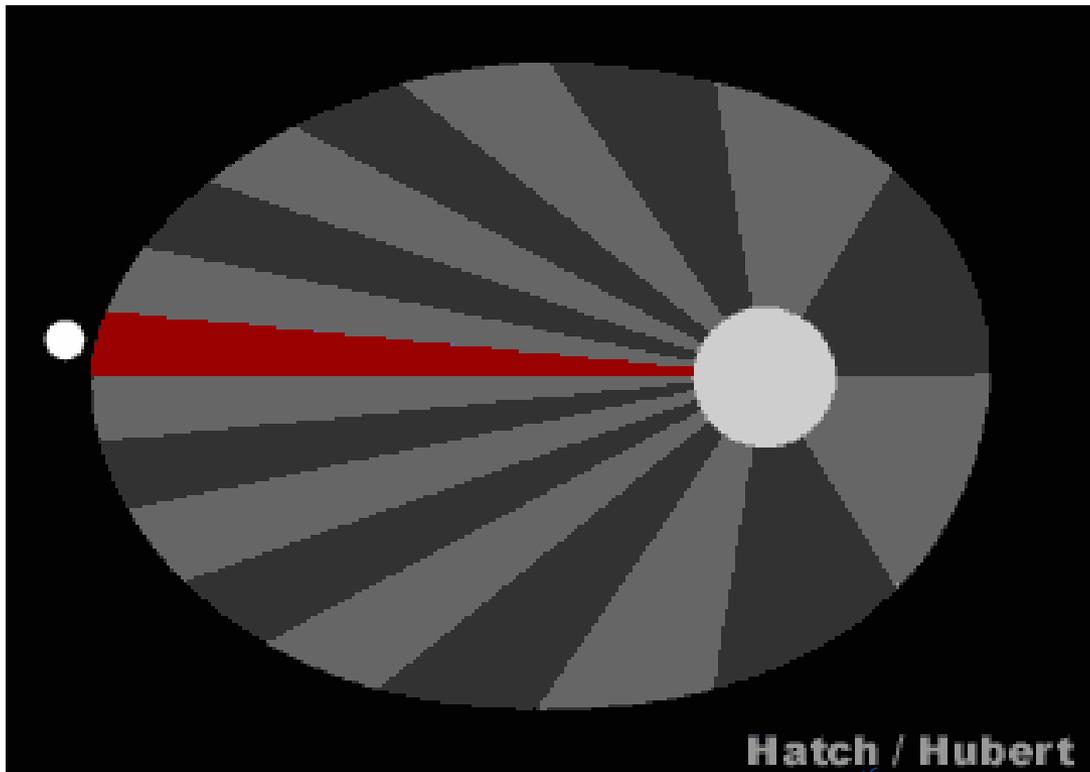


# Sistema copernicano



Niccolò Copernico (1473-1543)

In realtà la situazione è un po' più complicata: le orbite sono ellittiche

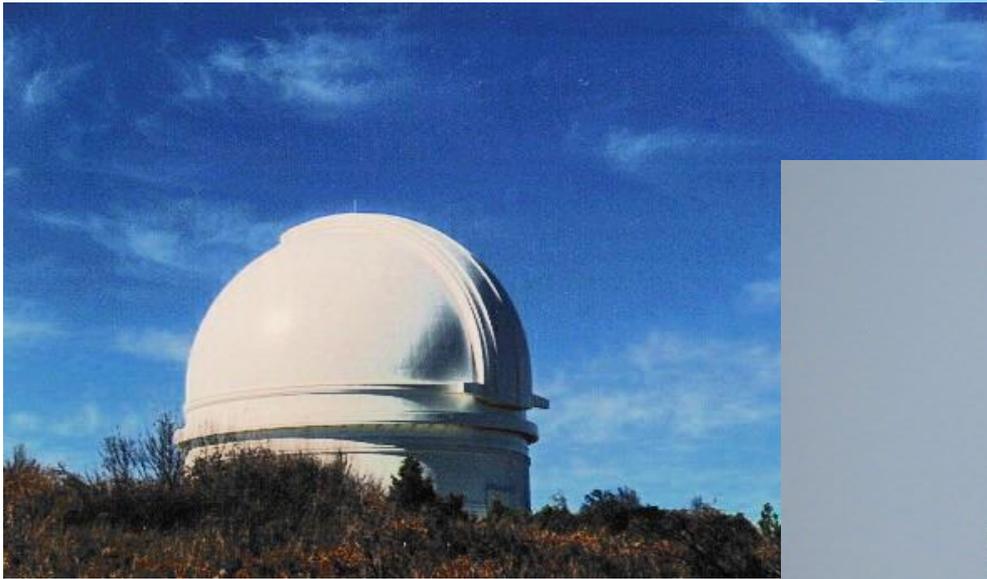


Hatch / Hubert

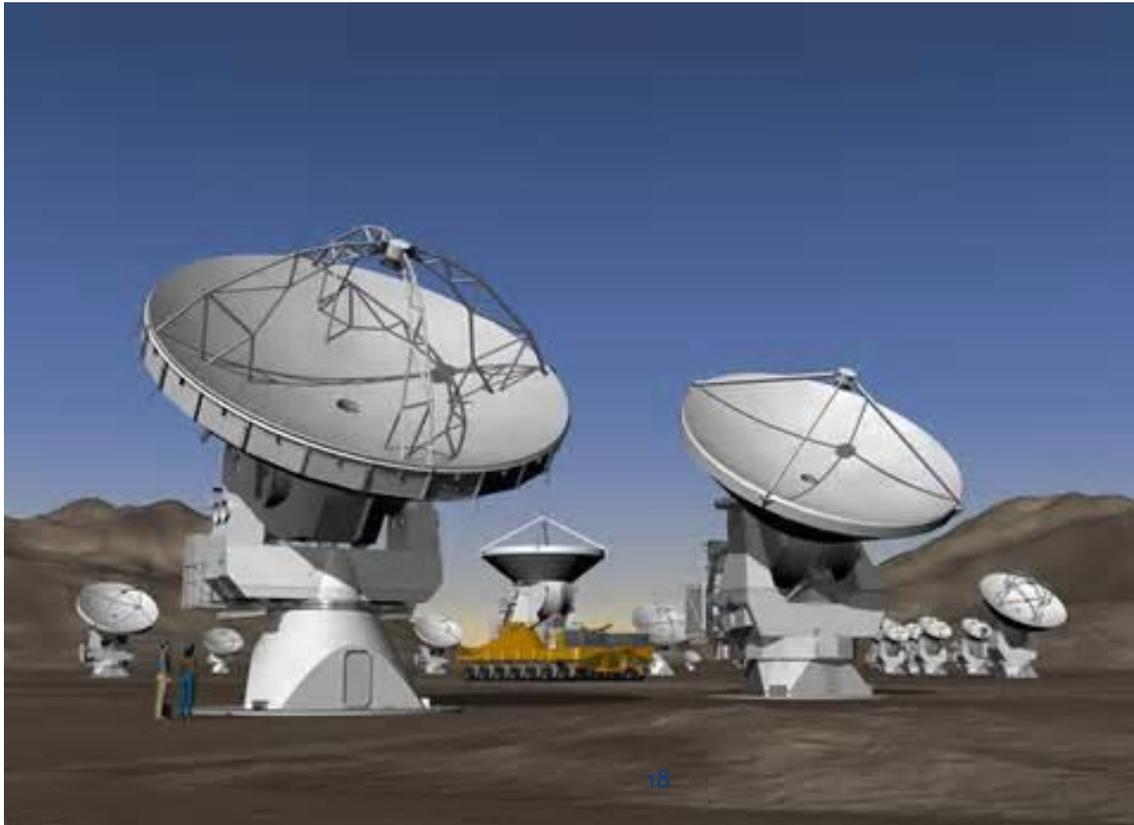


Giovanni Keplero (1571-1630)

# Osservatori



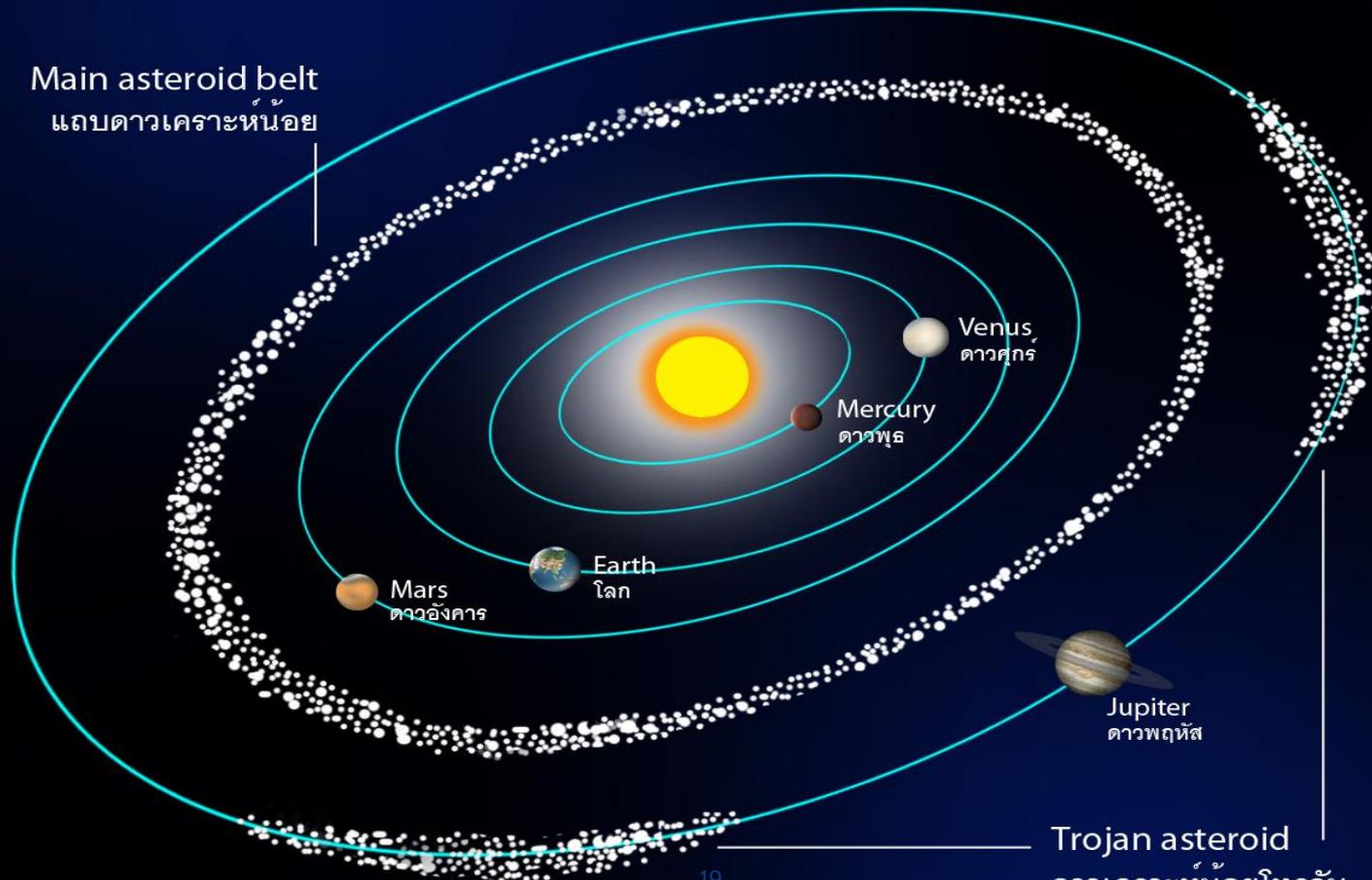
# Radiotelescopi



# Come vediamo oggi il sistema solare: gli asteroidi

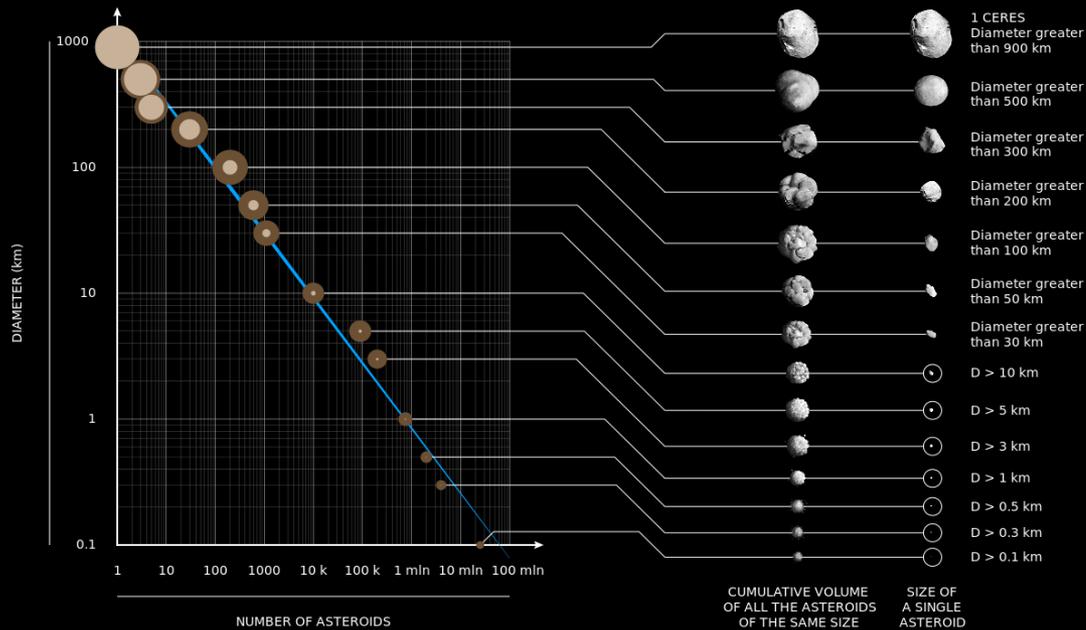
SunflowerCosmos

Main asteroid belt  
แถบดาวเคราะห์น้อย



Trojan asteroid  
ดาวเคราะห์น้อยโทรจัน

# Asteroidi e meteoriti



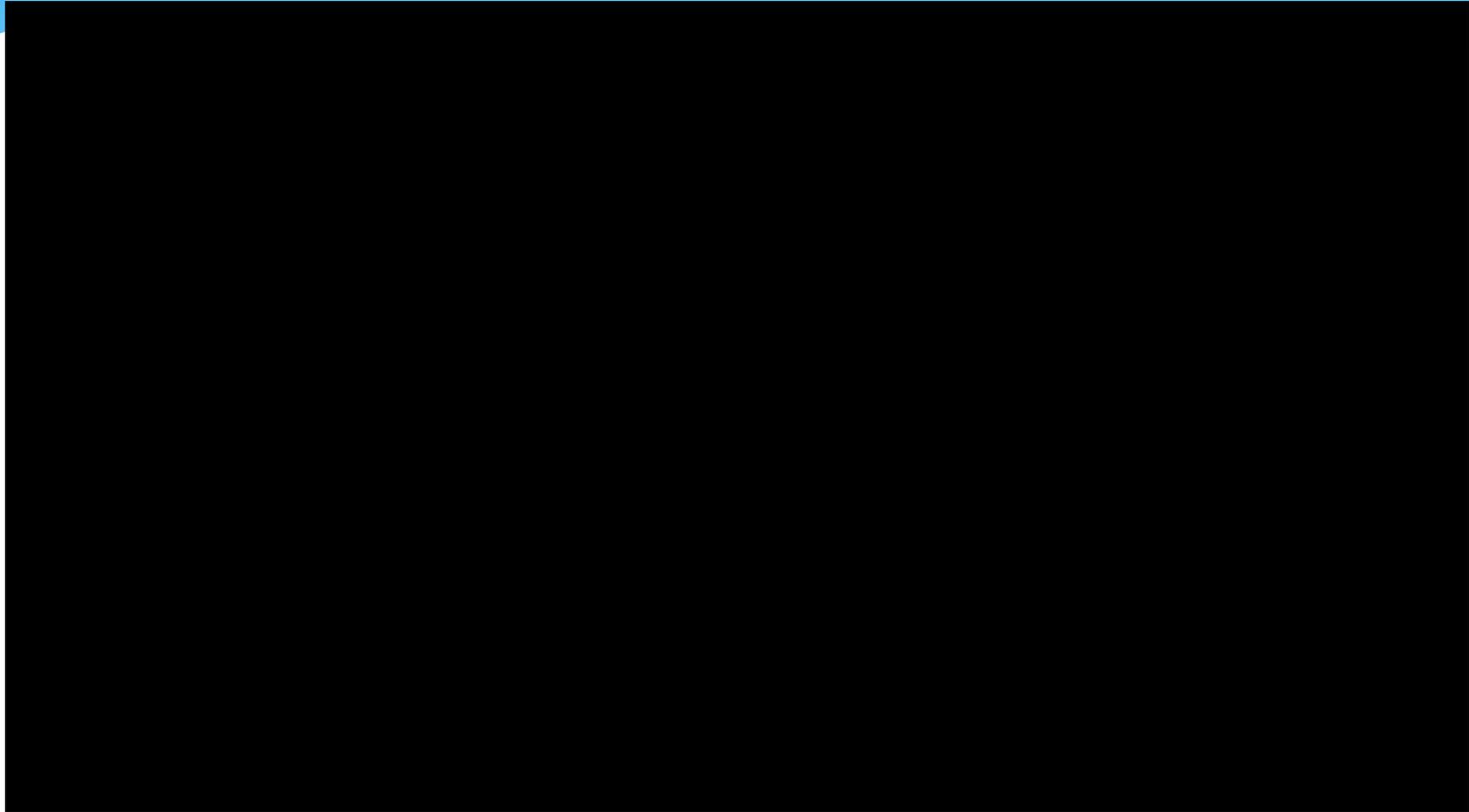
# Nebulose e ammassi stellari



# Galassie



# Le dimensioni dell'Universo



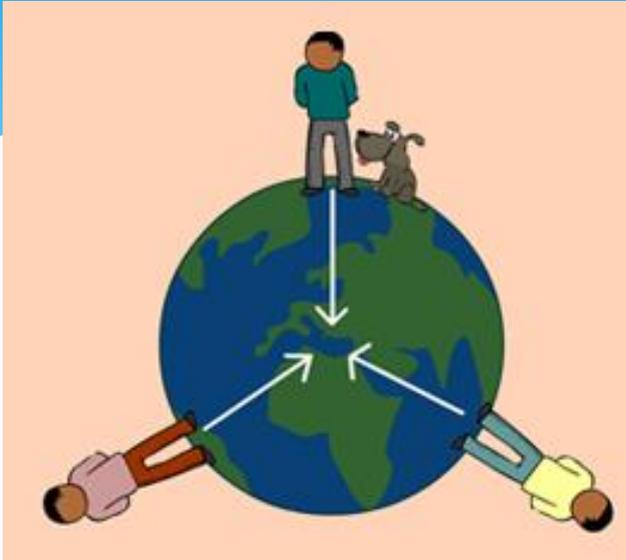
# Il colpevole

**La forza di gravità**

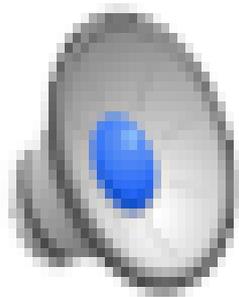
# I vostri primi esperimenti con la gravità



# La gravità è importante per la nostra vita



- Senza la gravità voleremmo via!
- Dovremmo essere tutti legati a terra
- Se dessimo un calcio ad un pallone volerebbe via per sempre!!
- Forse sarebbe divertente per un po' ma non potremmo vivere per sempre così...



da «La spada nella roccia»

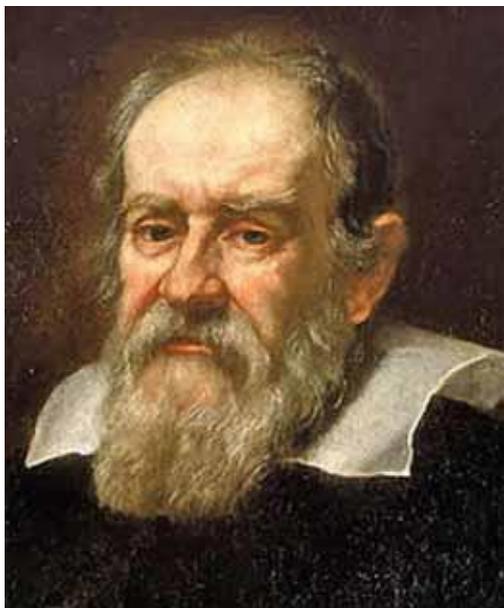


**Artù:** - Che cos'è la gravità ?

**Merlino:** - E' quello che ti fa cadere...

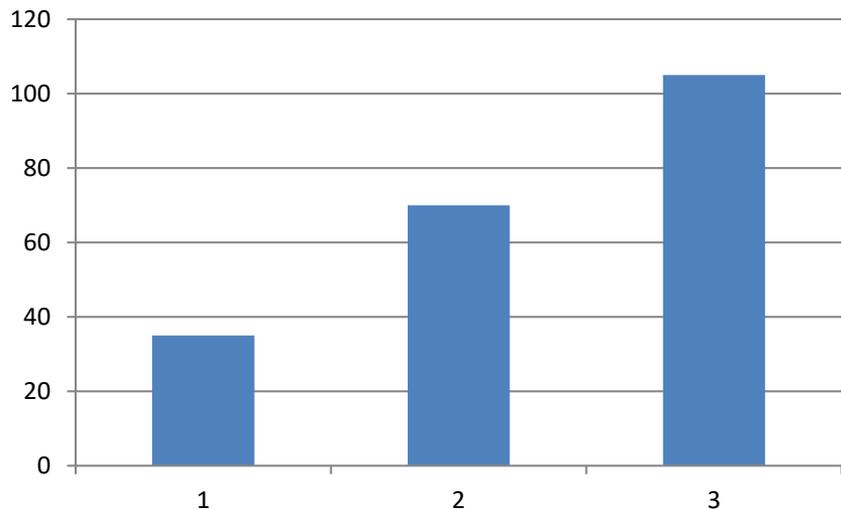
**Artù:** - Come un inciampo o uno sgambetto ?

# Galileo e l'esperimento della torre di Pisa



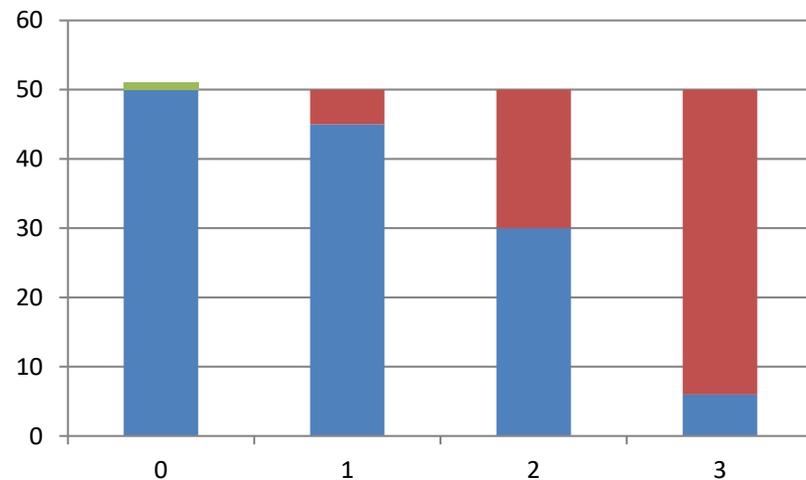
# Come cadono gli oggetti dalla torre di Pisa

Velocità (km/h)



secondi

Caduta (metri)

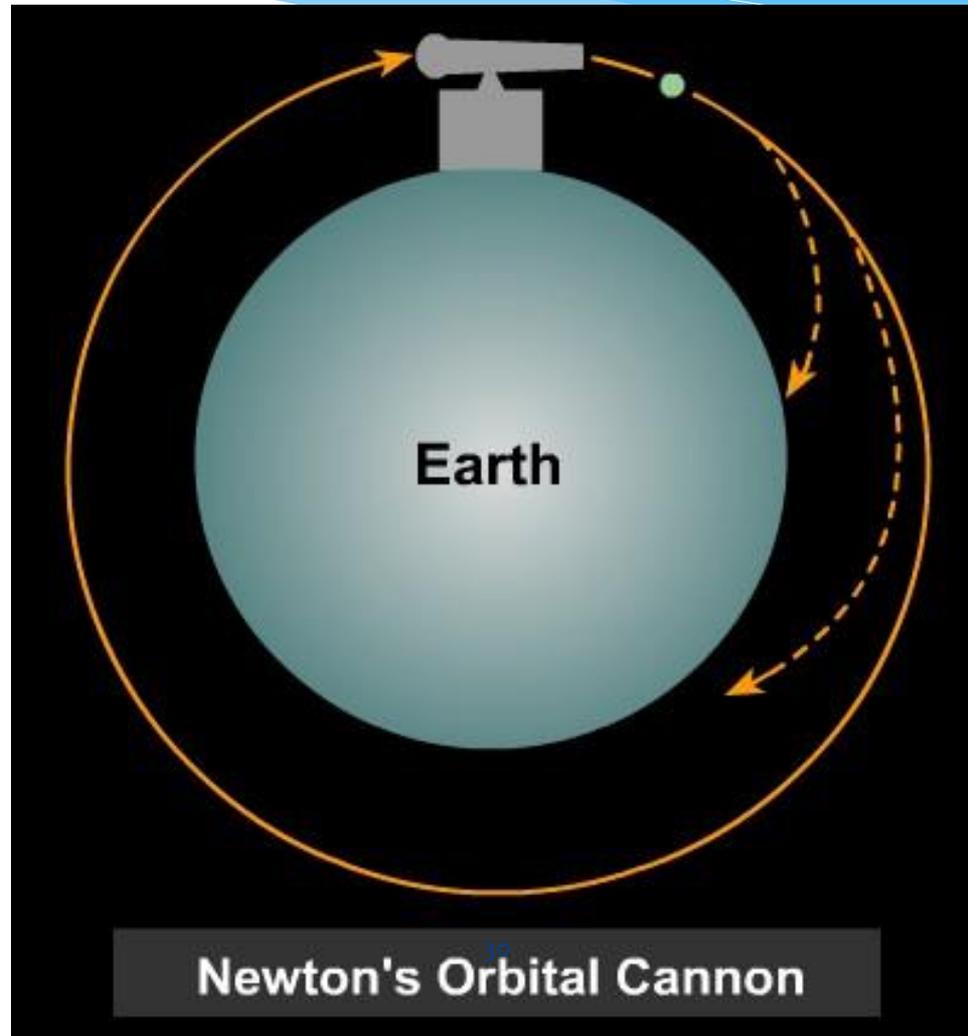


secondi

# Newton, la mela e la luna



# Cadere... senza cadere



# Cadere... senza cadere



# La gravità di Newton

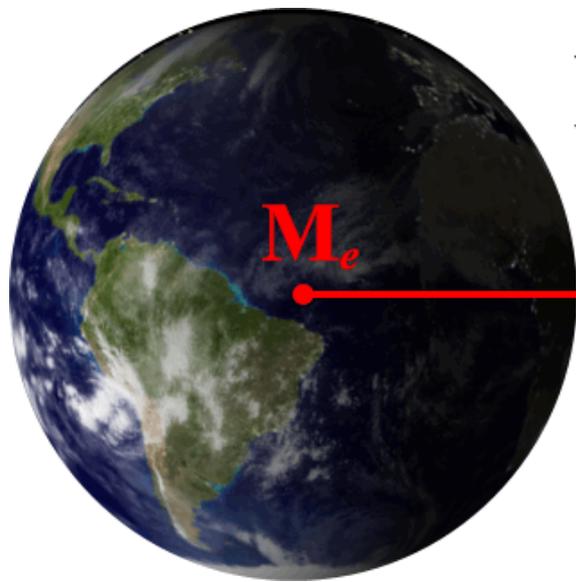
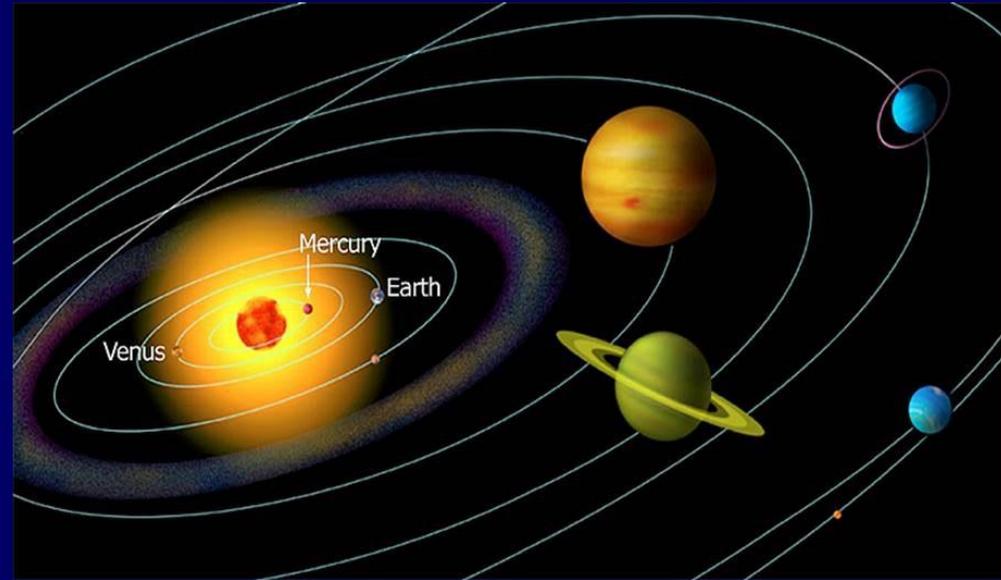
Spazio e tempo sono assoluti e separati

La luce viaggia in linea retta

La gravità è una forza fra corpi.

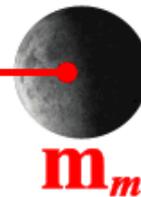
L'interazione gravitazionale è istantanea

# Classical Physics



$$\mathbf{F}_g = \frac{G M_e m_m}{r^2}$$

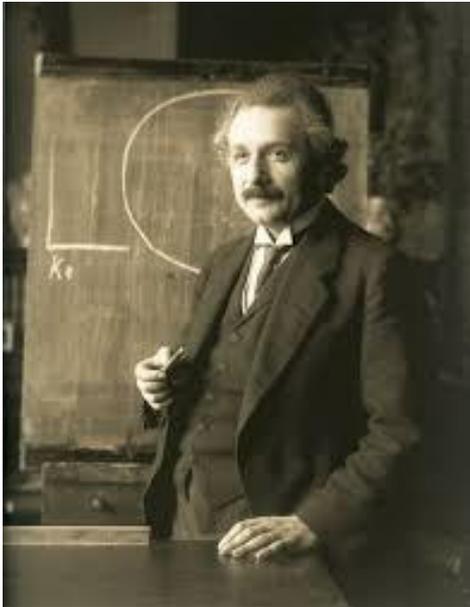
$r$



Questa visione classica funziona bene...  
infatti viene anche insegnata a scuola

*Ma non funziona sempre...*

# Einstein e la Relatività Generale: la nuova teoria della gravitazione

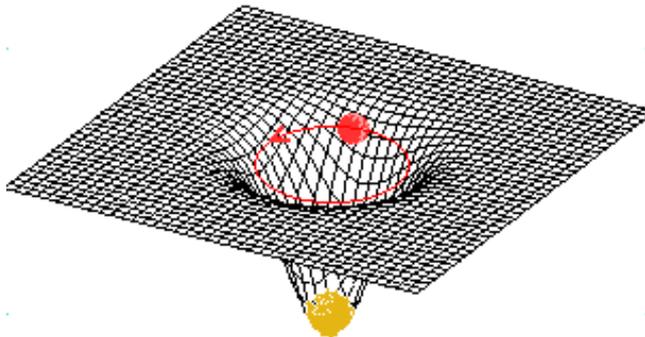


La Relatività Generale è la teoria einsteiniana della gravitazione. La base è il principio di equivalenza. J.A.Wheeler dette la seguente definizione della Teoria della Relatività Generale:

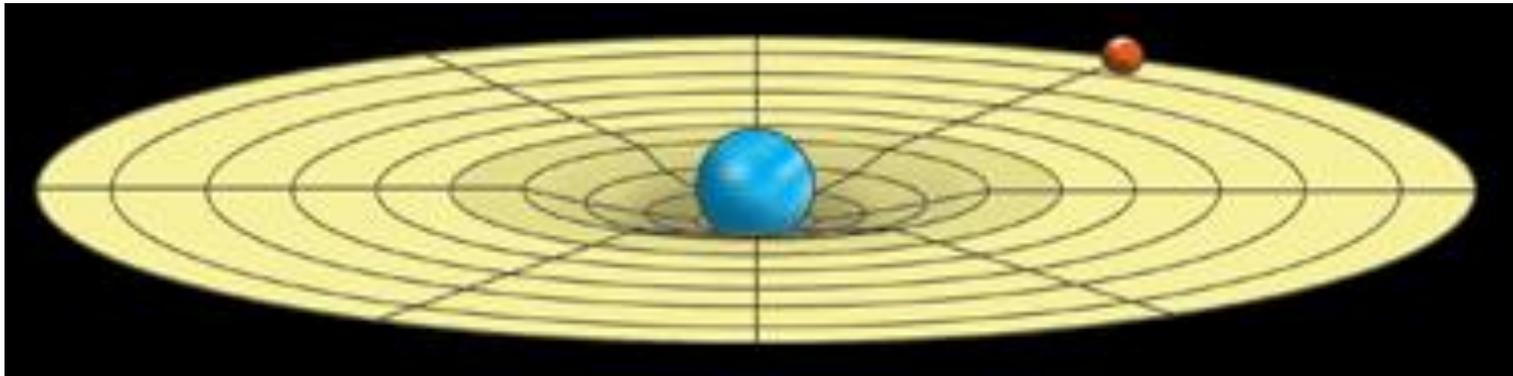
*La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi, lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi.*

Cioè il campo gravitazionale di un corpo incurva lo spazio-tempo, le traiettorie di un corpo in un campo gravitazionale sono **geodetiche** dello spazio-tempo curvo. In altre parole la presenza di massa modifica la “geometria” dello spazio-tempo e nello spazio-tempo curvo il principio d’inerzia diventa il moto in un campo gravitazionale.

La teoria della R.G. ingloba la teoria di Newton, valida in buona approssimazione quasi sempre.



# La gravitazione per Einstein



Nella teoria di Einstein **non c'è più la forza di gravità**, che eserciterebbe una «strana» azione a distanza, ma i corpi interagiscono localmente con la curvatura dello spazio-tempo. L'effetto è analogo a quello di una accelerazione (principio di equivalenza).

# Sviluppi della Relatività Generale

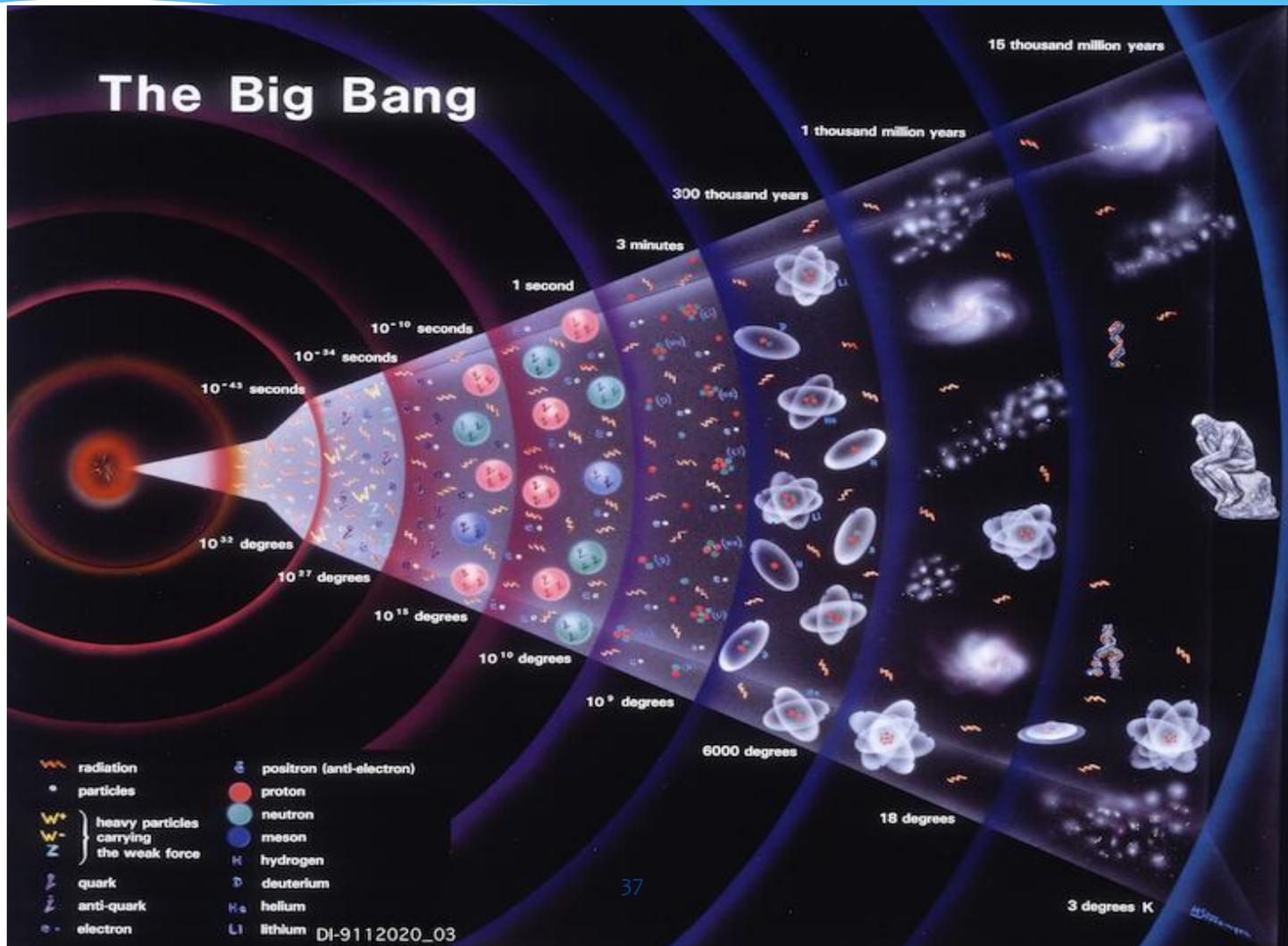
- \* **La curvatura dei raggi luminosi**
- \* **Il red shift gravitazionale (spostamento verso il rosso delle linee spettrali) e quindi il rallentamento del tempo vicino a una grande massa**
- \* **I buchi neri**
- \* **La cosmologia del Big Bang**

Come sono andati i fatti

# La storia dell'Universo

# Il Big Bang

Il grande scoppio



# La gravità determina il destino delle stelle a seconda della loro massa



Spiega come le stelle si muovono all'interno delle Galassie

E come le galassie si muovono l'una rispetto all'altra e come/perche' a volte si scontrano



# Altre conseguenze

**Le onde gravitazionali**  
previste da Einstein nella sua teoria

# 1 febbraio 2016: l'annuncio di una scoperta

LA STAMPA

Quotidiano Data 12-02-2016  
Pagina 1+18/1  
Foglio 1 / 3

SCOPERTE LE ONDE GRAVITAZIONALI, CAMBIA IL MODO DI GUARDARE L'UNIVERSO

## 100 anni dopo, la vittoria di Einstein



VIAGGIARE SCIENZA  
di Claudio Frattini

Simulazione di due buchi neri (simulation of two black holes)  
© J. S. Schwab

### Il cinguettio dell'universo

**E**instein aveva ragione. Le onde gravitazionali, ipotizzate un secolo fa dalla Teoria della Relatività Generale, esistono davvero. E viaggiano alla velocità della luce. Per la prima volta gli scienziati hanno osservato in modo diretto le increspature nel tessuto dello spaziotempo prodotte

il 14 settembre 2015, 11:50:45 (ora italiana). Si apre l'era dell'astronomia gravitazionale: gli interferometri gemelli Ligo negli Stati Uniti registrano onde gravitazionali entro una finestra temporale di dieci milisecondi. «Ricevo la mia e-mail quotidiana contenente le registrazioni dei rivelatori, e noto subito un'energia

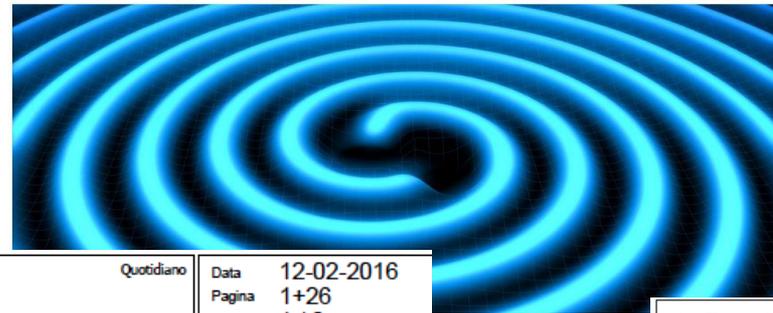
all'altro. Il segnale era chiaro, bellissimo. Si apre l'era dell'astronomia gravitazionale: gli interferometri gemelli Ligo negli Stati Uniti registrano onde gravitazionali entro una finestra temporale di dieci milisecondi. «Ricevo la mia e-mail quotidiana contenente le registrazioni dei rivelatori, e noto subito un'energia

R.it Scienze

Home Politica Economia Sport Spettacoli Tecnologia Motori Tutte le sezioni D Rep tv

Comments 61 | Consegna Condividi 30 mila | Tweet G+1 356 | LinkedIn 333

### Fisica, scienziati annunciano: osservate onde gravitazionali ipotizzate da Einstein



Quotidiano Data 12-02-2016  
Pagina 1+26  
Foglio 1 / 2

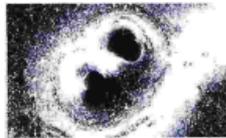
SCOPERTA STORICA NELLA FISICA

## Einstein aveva ragione: ecco le onde gravitazionali

di Patrizia Caraveo

**L**a natura non poteva fornire un modo migliore per festeggiare il centenario della teoria della relatività generale. Dopo mesi di voci sem-

pre più insistenti, ieri è stata data la notizia ufficiale: è nata l'astronomia gravitazionale. Il rivelatore Ligo (per Laser interferometer gravitational-wave observatory, composto da due strumenti, uno



in Louisiana e uno nello stato di Washington) ha visto un segnale compatibile con quello atteso dalla coalescenza di due buchi neri (nell'immagine).

Continua > pagina 26

Avenire

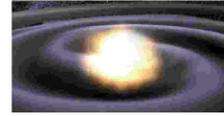
### Scoperta. Un ruolo italiano «Catturate» le onde della gravità previste da Einstein

Ugo Amaldi

Ieri alle 16.30 nell'auditorium del Cern è stata trasmessa la conferenza stampa che si teneva a Washington, conclusa con l'affermazione chiave: «Ligo ha aperto una nuova finestra sull'Universo».

LONGO A PAGINA 13. LAVAZZA A PAGINA 2

**La scoperta.** Osservate le "increspature" dello spaziotempo previste cent'anni fa da Albert Einstein. Ruolo dell'Italia fondamentale



Quotidiano Data 12-02-2016  
Pagina 1+13  
Foglio 1 / 3

DONNE E SCIENZA: PIA ASTONE, LA RICERCATRICE CHE ASCOLTA L'UNIVERSO

di Ilaria Giannini



Intervista alla scienziata italiana tra i sei redattori dell'articolo sulle onde gravitazionali di Einstein, la scoperta che cambierà il futuro dell'astrofisica

Ci sono voluti cento anni perché le onde gravitazionali teorizzate da Einstein venissero osservate per la prima volta e nel frattempo a progredire è stata non solo la scienza, ma anche la società. Nel team internazionale che ha realizzato la scoperta da premio Nobel ci sono anche diverse scienziate, tra cui Pia Astone, ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, nel gruppo del progetto Virgo, che ha analizzato i dati provenienti dalla grande antenna che si trova a Cascina, in provincia di Pisa, ed è tra i sei redattori dell'articolo sulla rivista Physical Review Letters che ha rivelato al mondo l'esistenza delle onde gravitazionali.

PANORAMA

- LEGGI ANCHE: Le onde gravitazionali, la rivelazione del secolo

L'osservazione

"Innanzitutto ora sappiamo che i sistemi complicatissimi che abbiamo costruito funzionano, che era quanto speravamo ma non era scontato" riflette Pia Astone, primo ricercatore dell'INFN e parte del gruppo che analizza i dati di Virgo, l'osservatorio per la ricerca delle onde gravitazionali costruito nei pressi di Pisa. "Per noi ora la sfida si fa ancora più difficile. Il fatto per esempio di avere rivelato le onde in un sistema di buchi neri ruotanti, come è avvenuto nel caso del segnale osservato la prima volta il 14 settembre scorso, non implica di vederli così facilmente in sorgenti diverse, per esempio stelle di neutroni singole, o esplosione di supernove".

la Repubblica

Quotidiano Data 12-02-2016  
Pagina 23  
Foglio 1 / 2

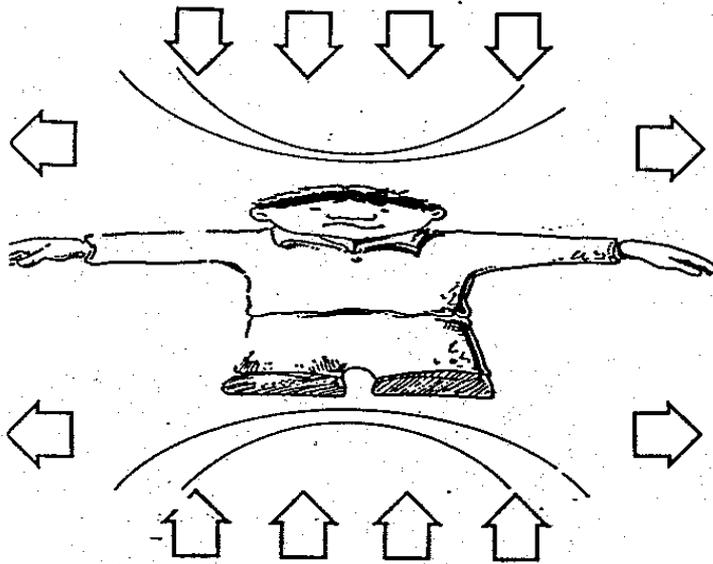
**Il reportage.** A Cascina, in provincia di Pisa dove l'osservatorio del progetto Virgo ha eliminato ogni rumore per inseguire i segnali del cosmo

## Nel fortino dei ricercatori italiani "Noi, dai falsi allarmi al successo"

Ma questa storia e' iniziata 1.3 miliardi di anni fa

# Ecco l'effetto di un'onda gravitazionale...

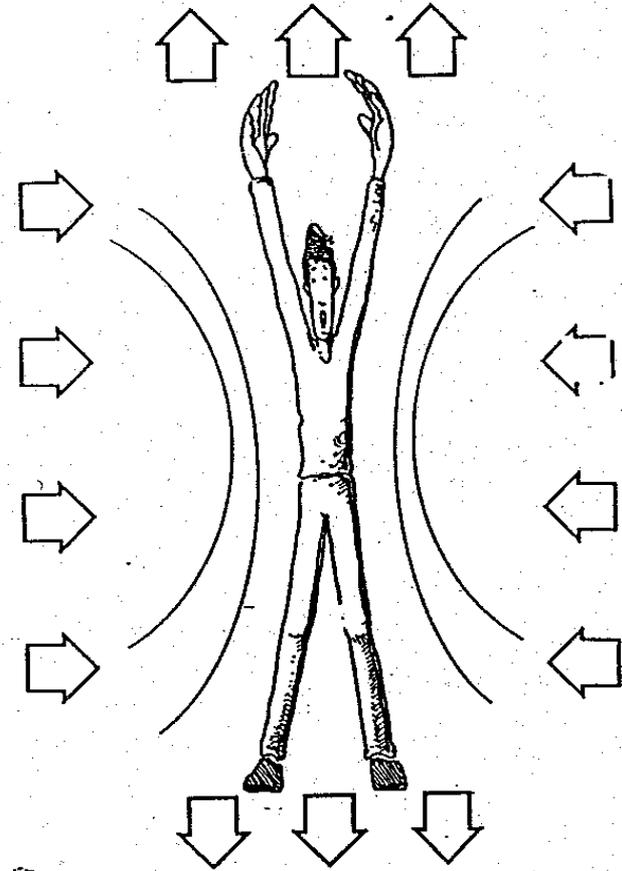
**CAUTION:  
GRAVITATIONAL  
RADIATION**



**MAY BE DANGEROUS  
TO YOUR HEALTH**

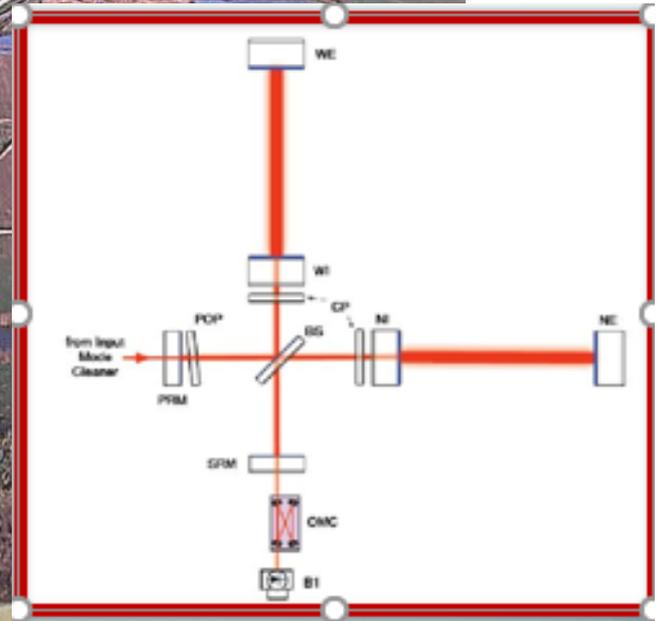
**Ma l'effetto è minuscolo, nel caso peggiore la deformazione è un miliardesimo di miliardesimo...**

**CAUTION:  
GRAVITATIONAL  
RADIATION**

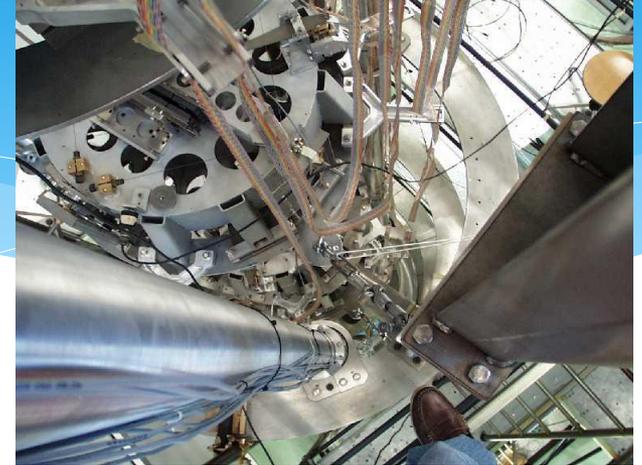


**MAY BE DANGEROUS  
TO YOUR HEALTH**

# Esperimento Virgo (vicino Pisa)



# Cosa c'è dentro ?

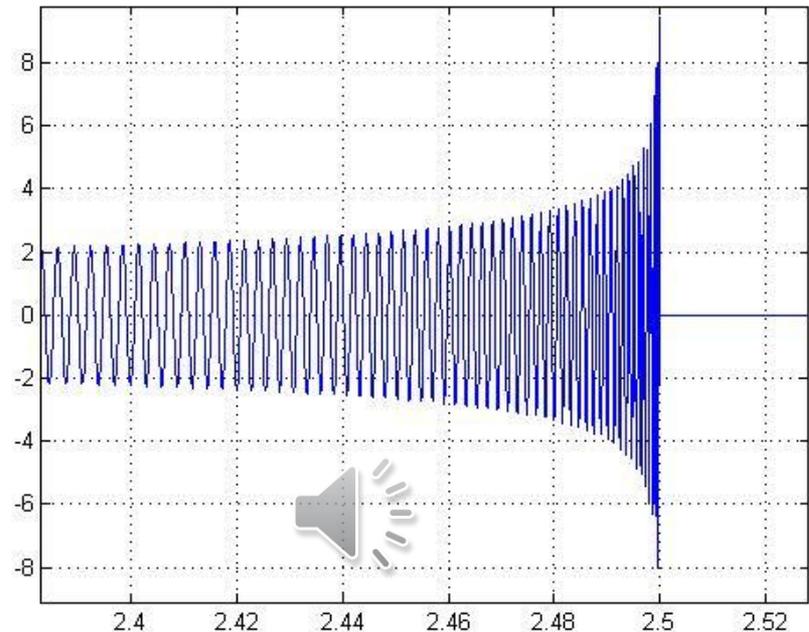
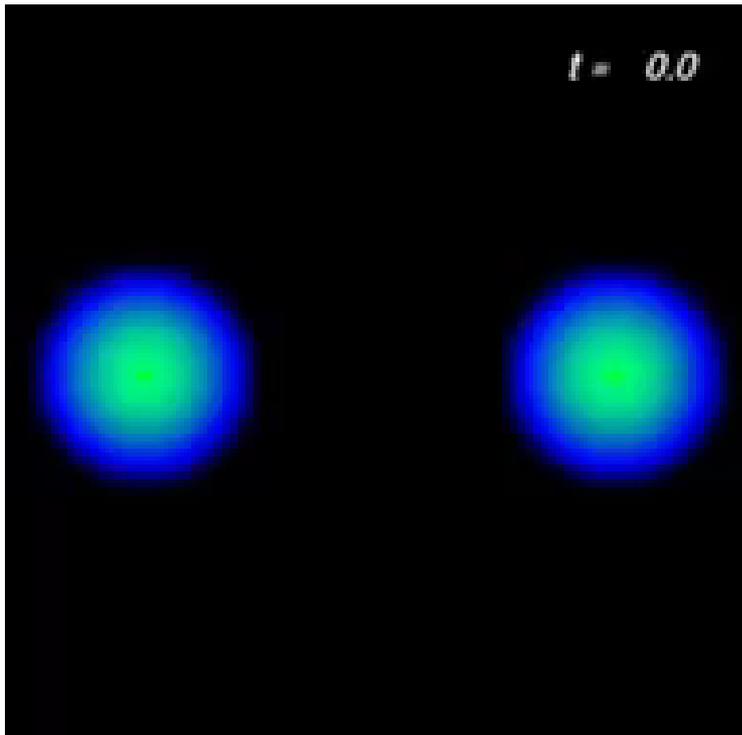


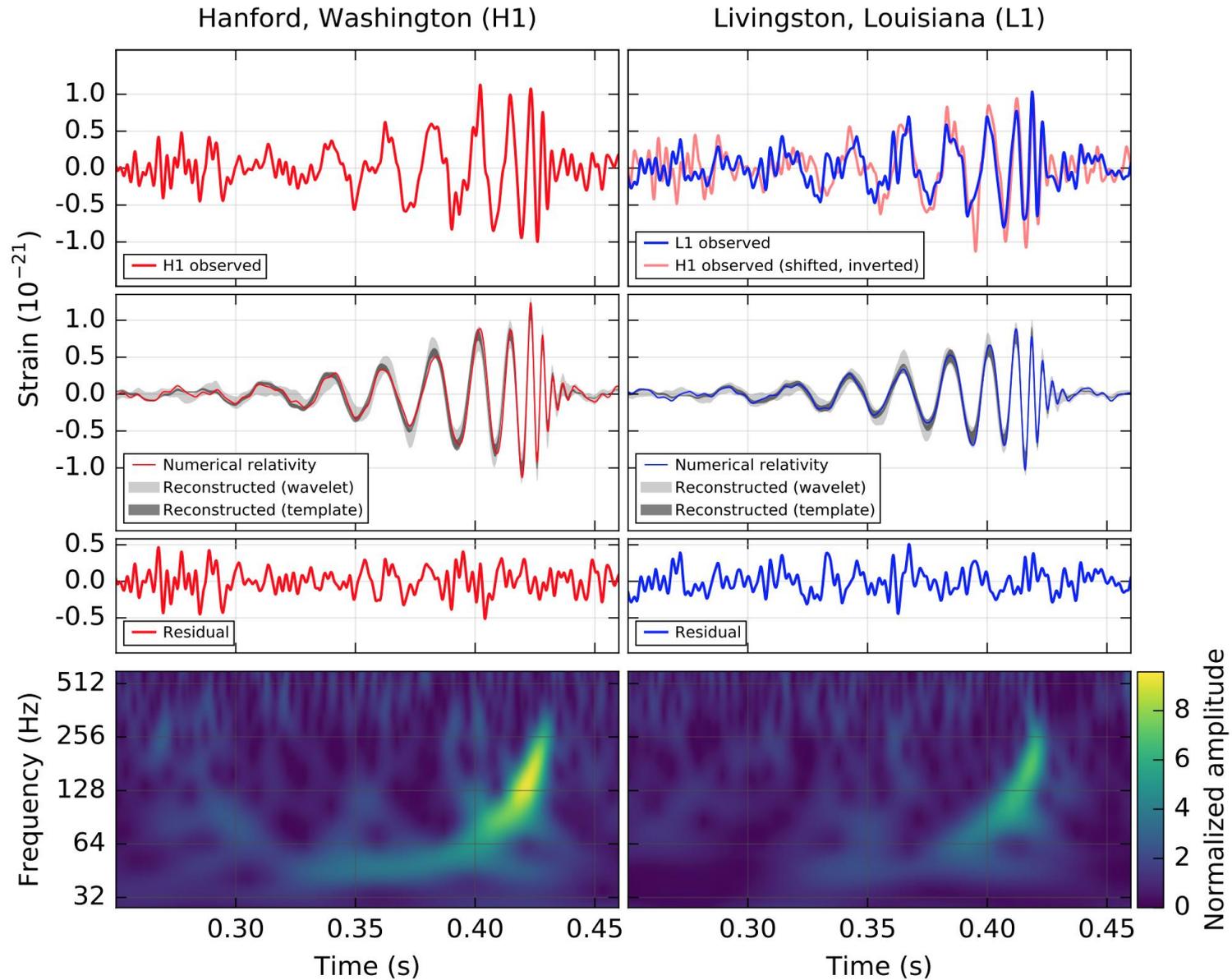
# Ma come le misuriamo: l'interferometro Michelson



**Quando arriva l'onda Gravitazionale, un braccio si allunga e l'altro si accorcia, il tempo che il laser impiega per attraversare i bracci cambia, cambia quindi la figura di interferenza e questo ci permette di misurarla**

# Sorgenti di onde gravitazionali: “chirp” da binarie coalescenti



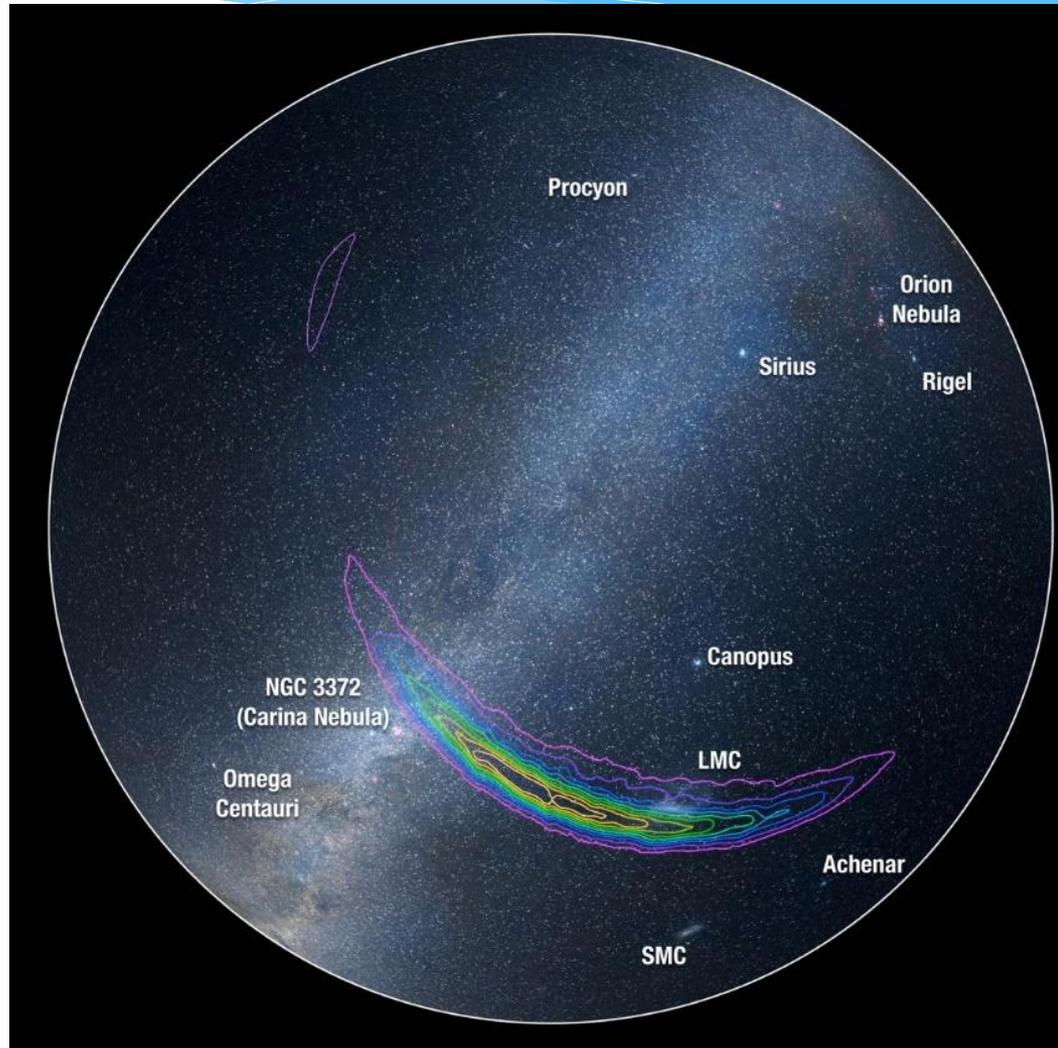


# Servizio investigativo

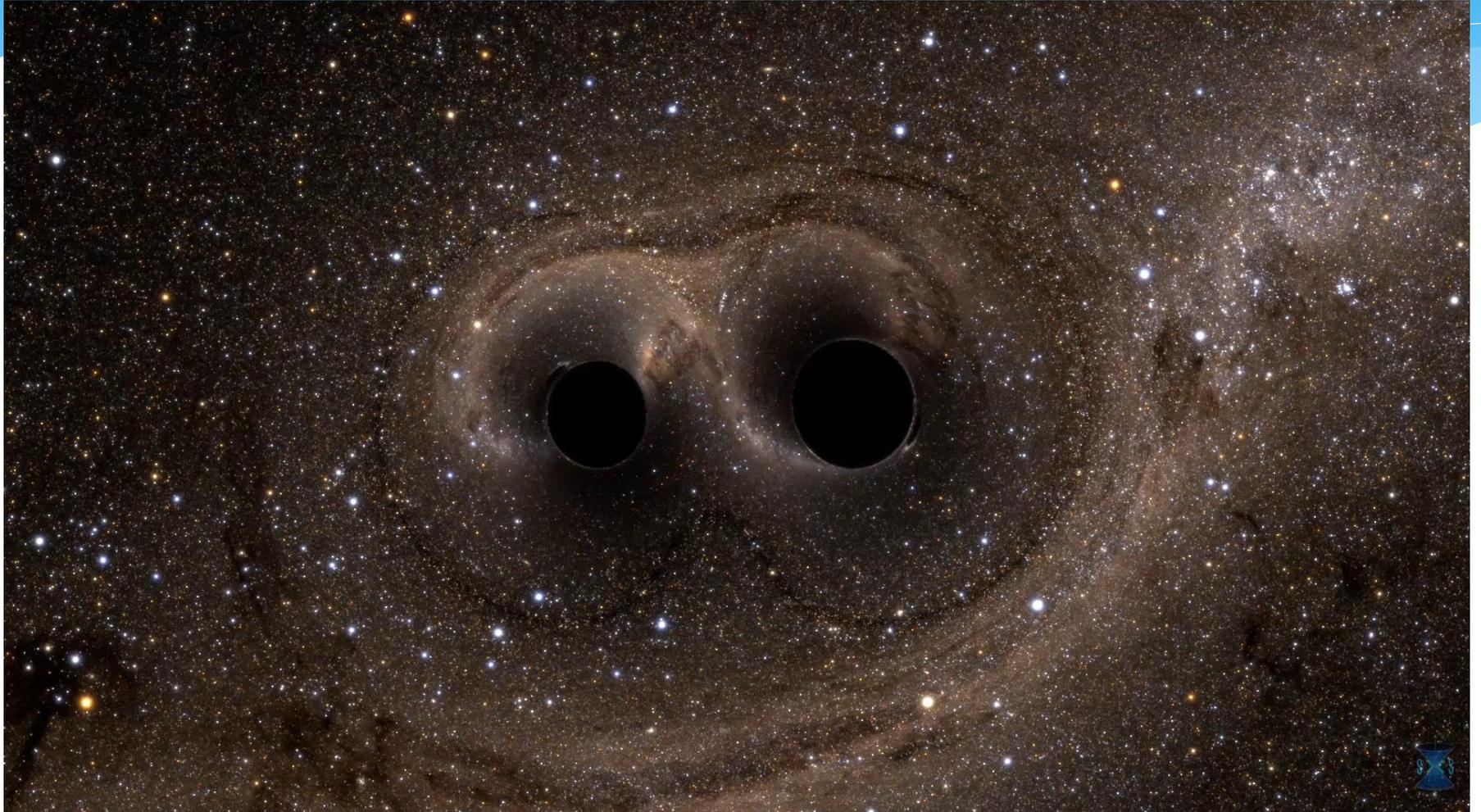
Dai segnali che abbiamo ricevuto abbiamo potuto dedurre quello che, circa un miliardo di anni fa, in una galassia lontana, era successo: due grossi buchi neri che formavano un sistema binario (due stelle che si girano una intorno ad un'altra) erano caduti uno sull'altro, crando una enorme onda gravitazionale.

Quantity	Value	Upper/Lower error estimate	Unit
Primary black hole mass	<b>36</b>	+5 -4	M sun
Secondary black hole mass	<b>29</b>	+4 -4	M sun
Final black hole mass	<b>62</b>	+4 -4	M sun
Final black hole spin	<b>0.67</b>	+0.05 -0.07	
Luminosity distance	<b>410</b>	+160 -180	Mpc
Source redshift, $z$	<b>0.09</b>	+0.03 -0.04	
Energy radiated	<b>3</b>	+0.5 -0.5	M sun

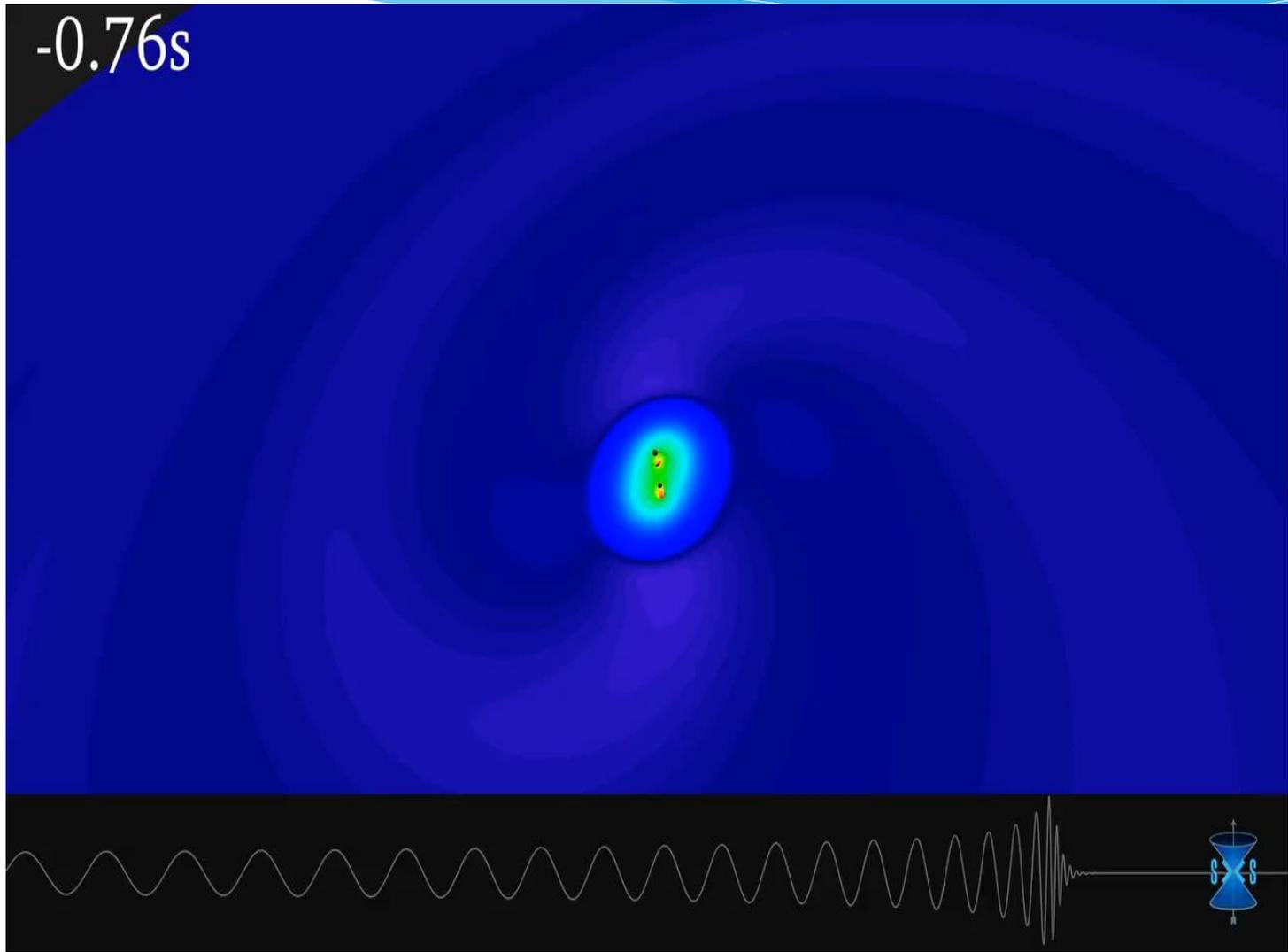
# Provenienza più probabile



# Merging BHs



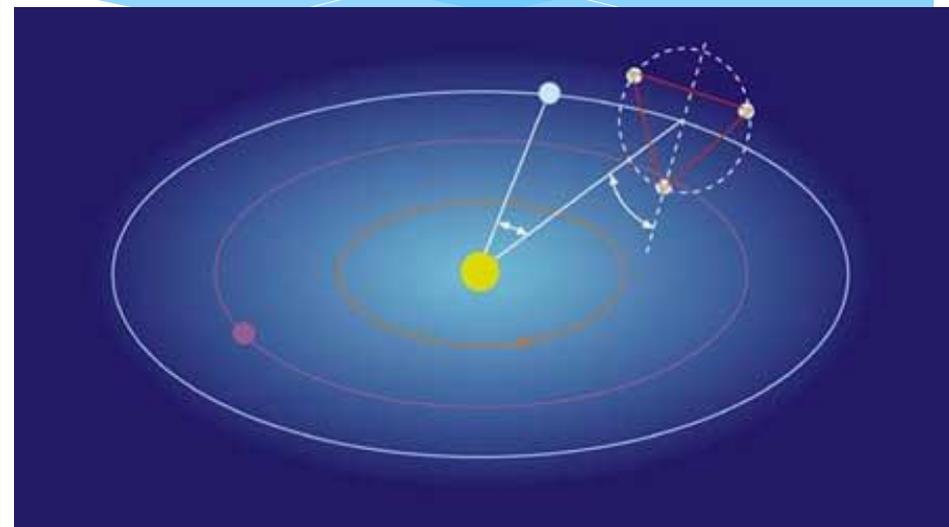
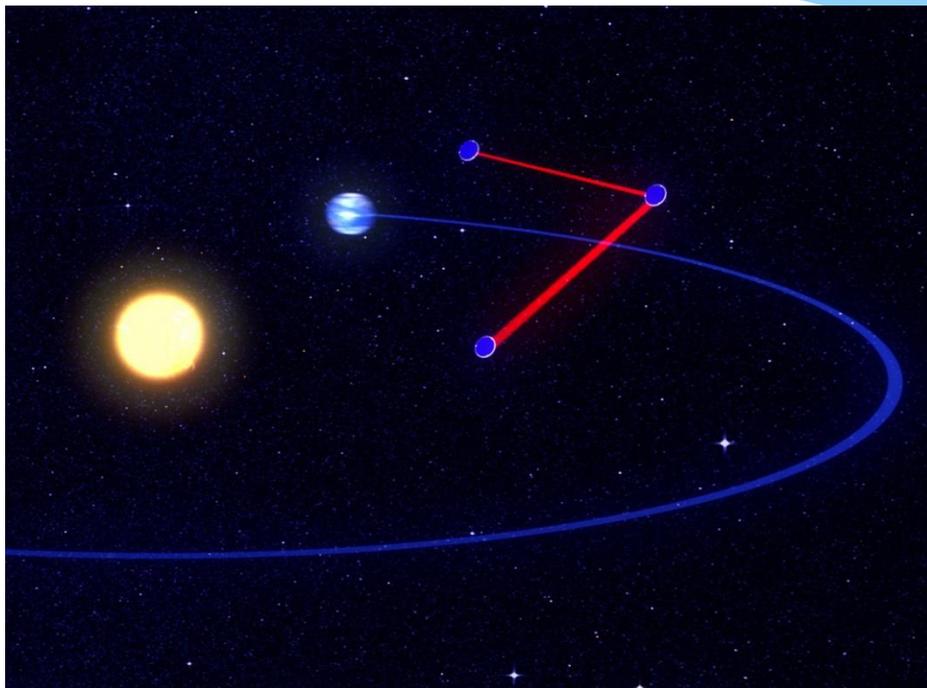
-0.76s



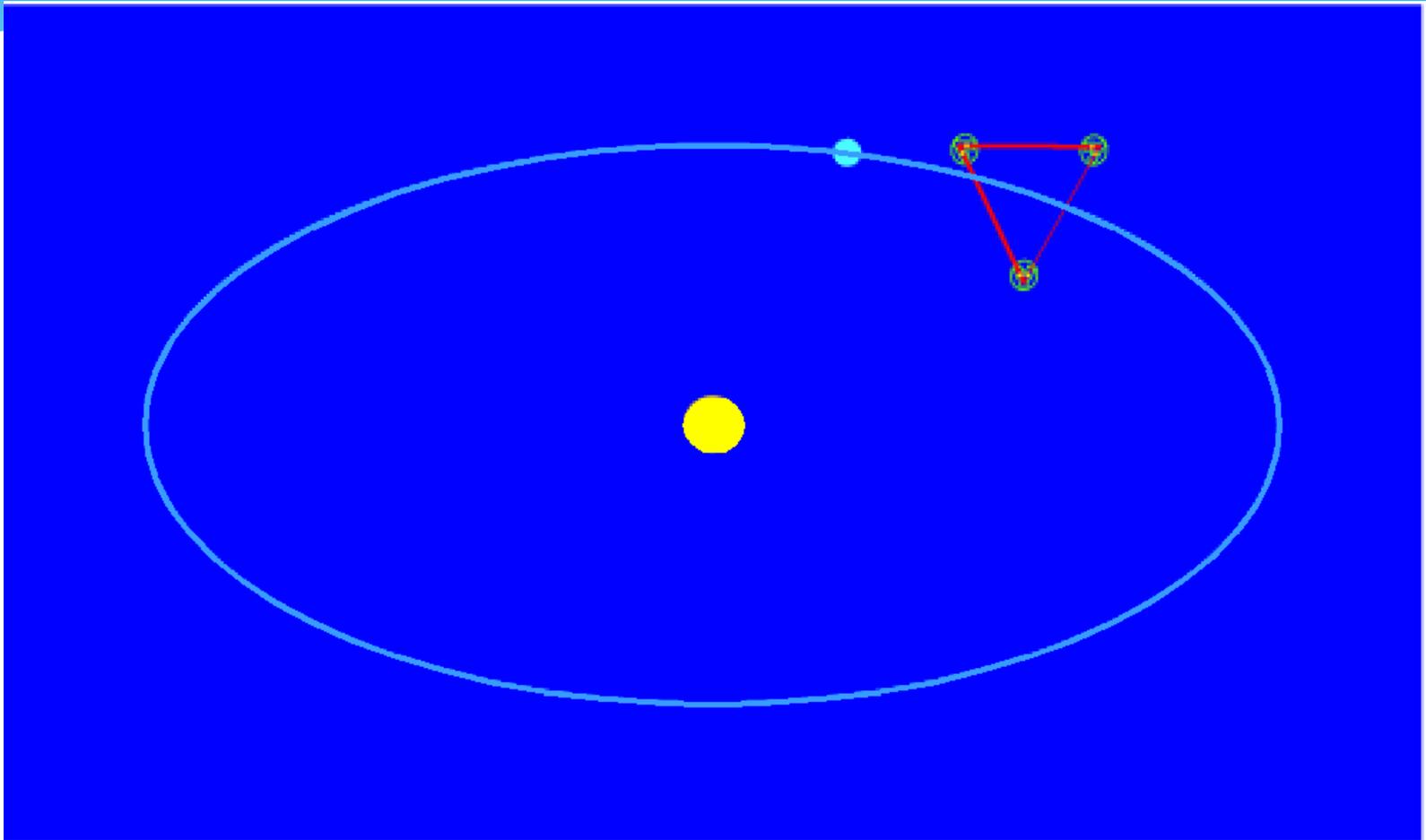
# Commenti

- \* Ampiezza dell'onda  $10^{-21}$ : come misurare un milionesimo di un capello ( $10^{-7}$  mm) sulla distanza tra la Terra e il Sole (150 milioni di chilometri)
- \* Energia irradiata: 3 masse solari in circa 0.1 s , equivalenti all'energia elettromagnetica irradiata da tutta la nostra Galassia in 2300 anni.
- \* Durante gli 0.1 s, la Terra è stata inondata dall'energia di questo evento più di tutte le stelle del cielo e della Luna.
- \* L'evento è avvenuto 1.3 miliardi di anni fa: sulla Terra si cominciavano a sviluppare le prime forme di vita.

# Antenne gravitazionali spaziali: LISA



# LISA - animazione



# Sorgenti rivelabili da LISA

Big Bang

Time →

$10^{-44}$ s	$10^{-35}$ s	$10^{-32}$ s	$10^{-10}$ s	300 s	$3 \times 10^5$ yr	$1 \times 10^9$ yr	$15 \times 10^9$ yr
Superstring (?) Era	GUT Era	Inflation Era	Electro-weak Era	Particle Era	Recombination Era	Galaxy and Star Formation	Present Era

