

Incontri tra Cielo e Terra
Società Astronomica G. V. Schiaparelli
Luca G. Molinari, Varese, 23 settembre 2017

GRAVITÀ



dalla mela di Newton
alle onde gravitazionali



Lorenzo Quinn, Le forze della natura

La gravita' e' cieca
agisce su tutto, indistintamente.
Nulla sfugge alla gravita' ...



a meno di
lasciarsi cadere ...
Allora la gravita`
si annulla !





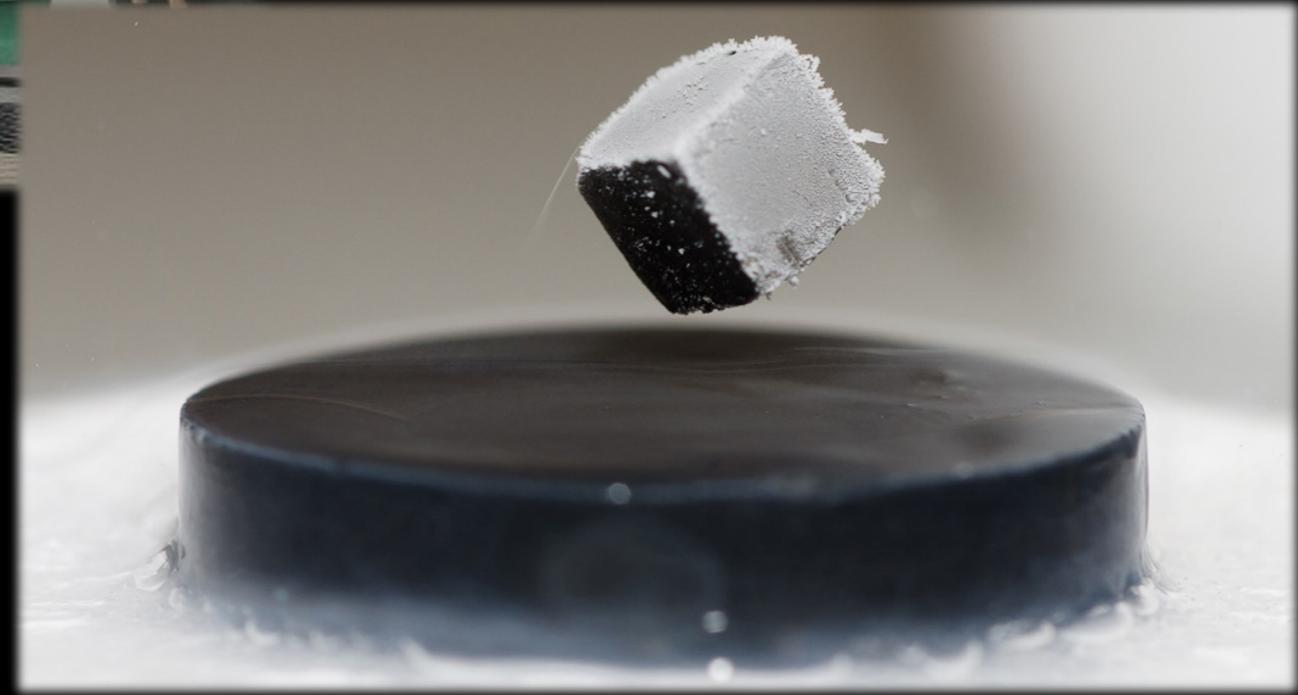
Steven Hawking (Lucasian professor - Cambridge)
sul Boeing 727 Zero Gravity Corp,
in volo parabolico per il suo 65 compleanno (2007)



Zero Gravity (Pero, MI)
galleria del vento verticale



Levitazione col trucco



Levitazione magnetica



Nessun esperimento in un “ascensore chiuso”
abbastanza piccolo e in caduta libera
puo` rivelarci che stiamo cadendo
verso Terra

Veduto come la differenza di velocità, ne i mobili di gravità diverse, si trova essere sommamente ne i mezzi più è più resistenti ... dove che tra palle d'oro, di piombo, di rame, di porfido, o di altre materie gravi, quasi del tutto insensibile sarà la disegualità del moto per aria, ché sicuramente una palla d'oro alla fine della scesa di cento braccia non preverrà una di rame di quattro dita; veduto, dico, questo, **cascai in opinione che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie descenderebbero con eguali velocità.**

Galilei, Discorsi intorno a due nuove scienze, 1638



BBC TWO



NASA GLENN RES. CENTER, OHIO
La camera a vuoto piu` grande del mondo



Apollo 15 - David Scott
caduta piuma e martello

MASSA INERZIALE
UGUALE
CARICA GRAVITAZIONALE
principio di equivalenza debole

Sommergibile E. Toti, 2005, 1465 tonn.

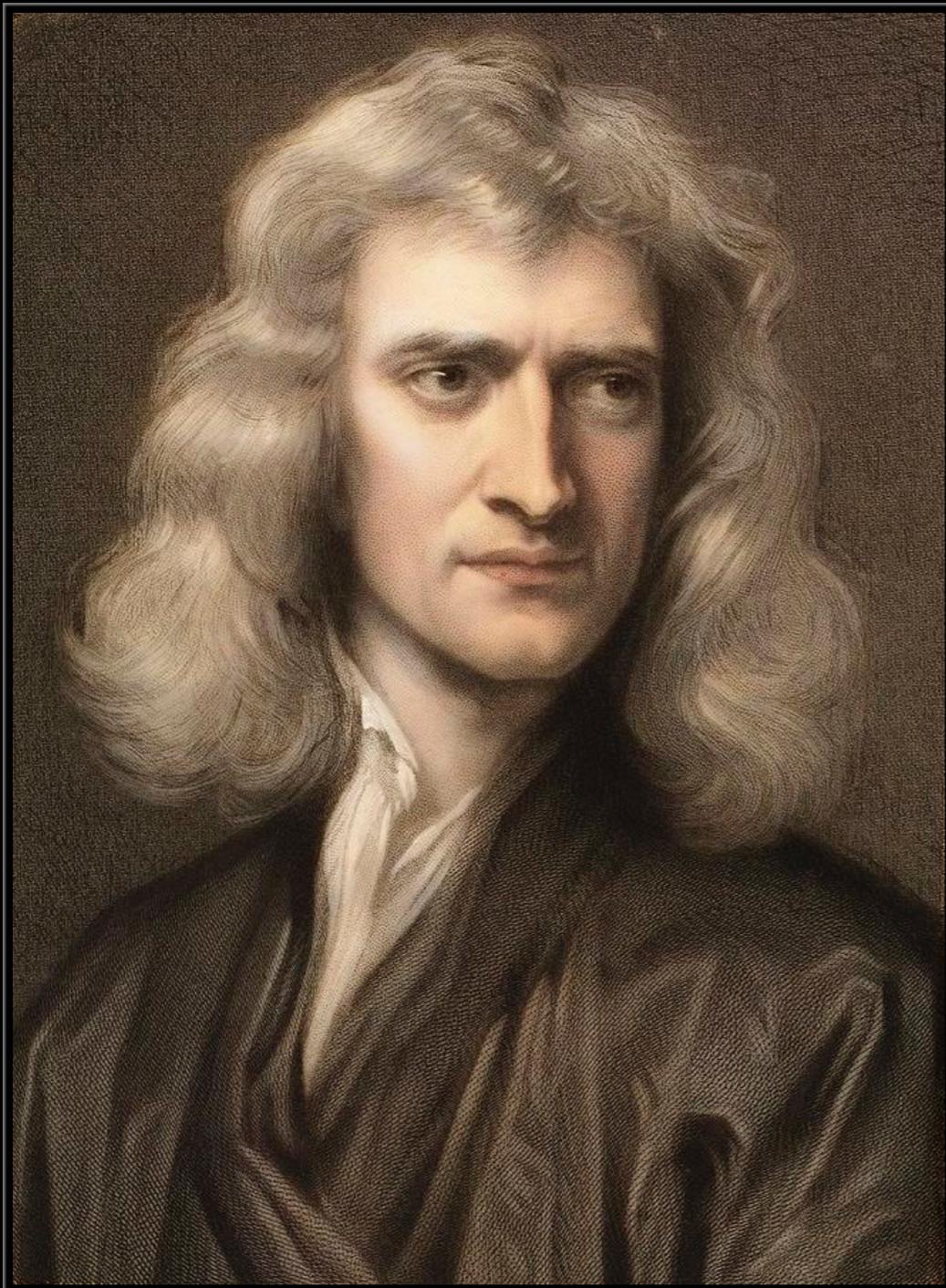


$$F = M_i a$$

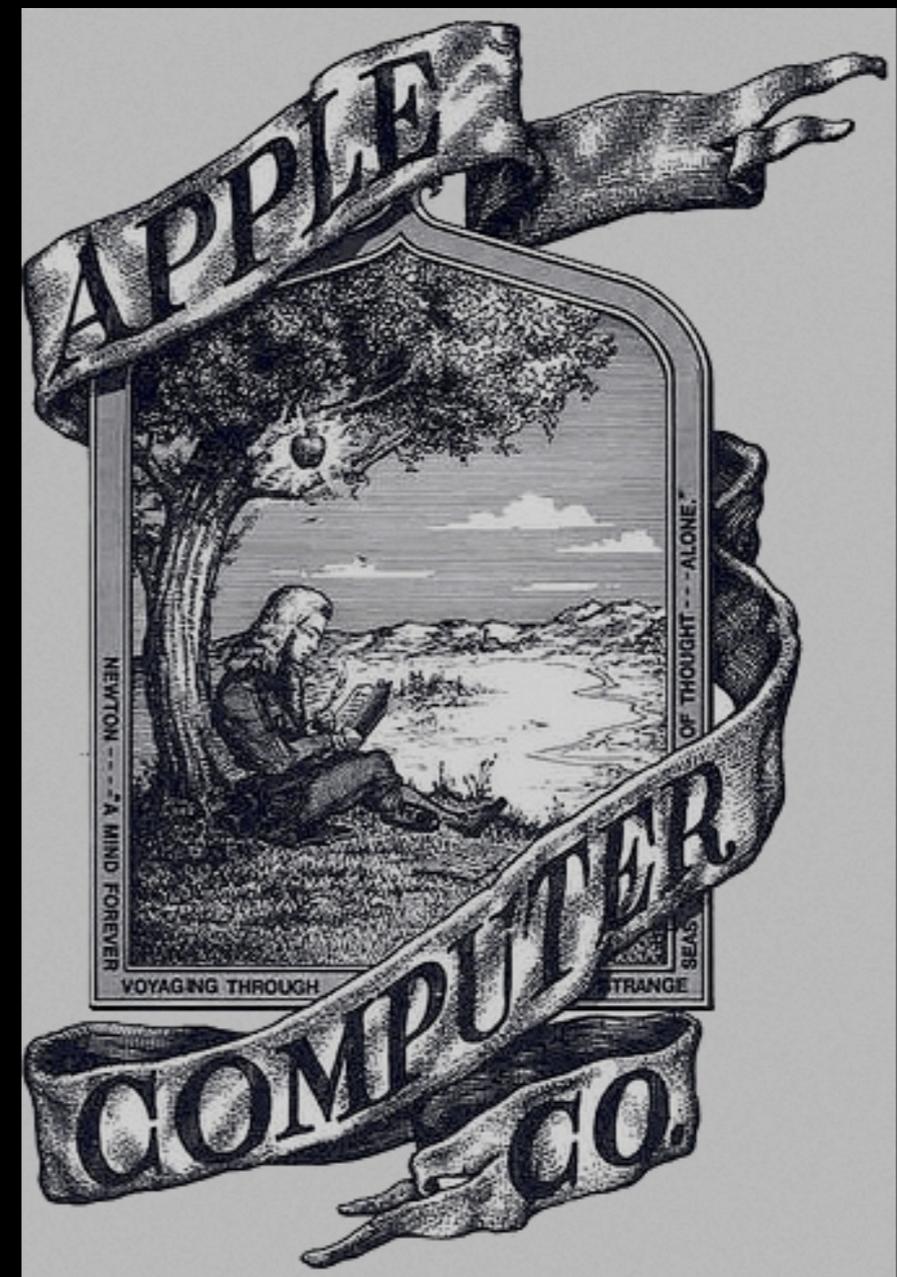
$$F = M_g g$$

ISAAC NEWTON (1642 - 1727)

Lucasian professor of Mathematics, Cambridge



(Kneller 1689)



Newton ... a mind voyaging through
strange seas of thought ... alone

"Dopo pranzo, col tempo mite,
andammo in giardino per il the
all'ombra di alcuni meli ...

Mi racconto' che era nella stessa
situazione quando l'idea di gravita`
si formo' nella sua mente.

Perché una mela cade sempre
perpendicolare al terreno? si chiese
assistendo alla caduta di una mela ...
perché non di lato o verso l'alto? ...

La Terra la guida. Deve esserci un
potere di attrazione nella materia,
e la somma delle attrazioni della materia
terrestre punta al centro della Terra ...

Se la materia attrae la materia, deve farlo
proporzionalmente alla quantita`.
Pertanto la mela attira la Terra,
così come la Terra attira la mela"

Memoria di William Stukeley,
biografo di Newton (1752)

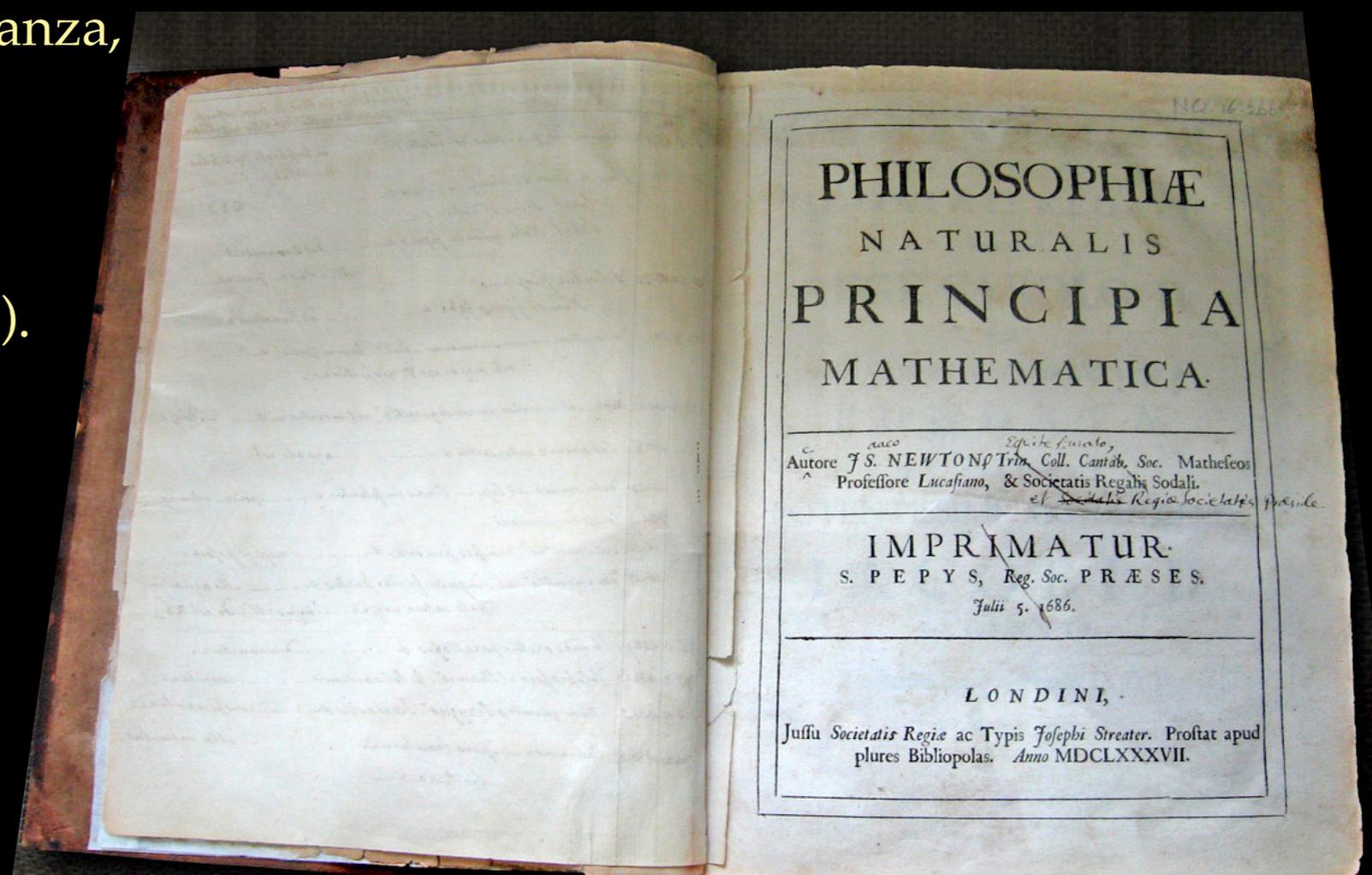


La casa di Newton a Woolsthorpe Manor
e l'antica pianta di melo

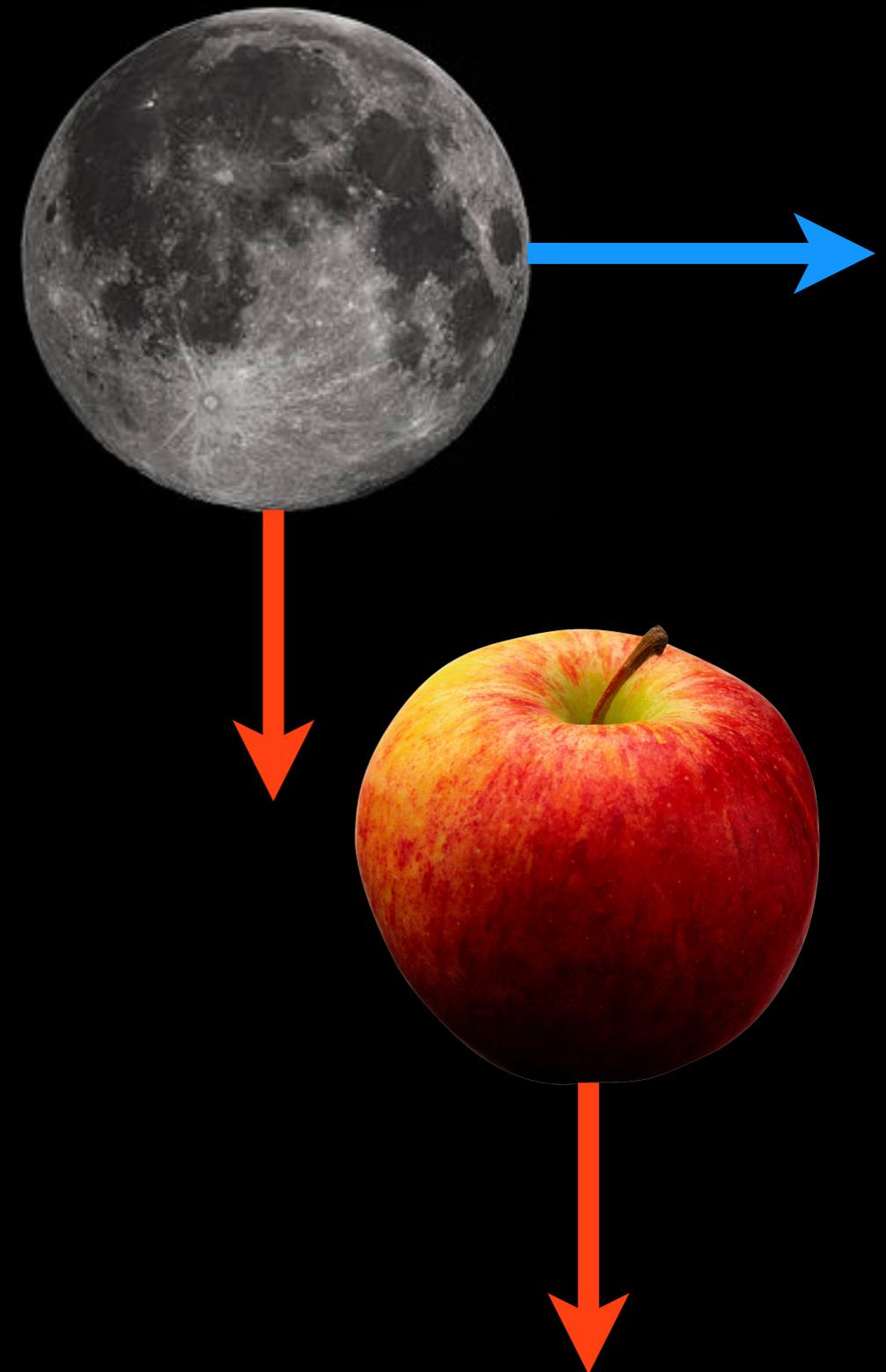
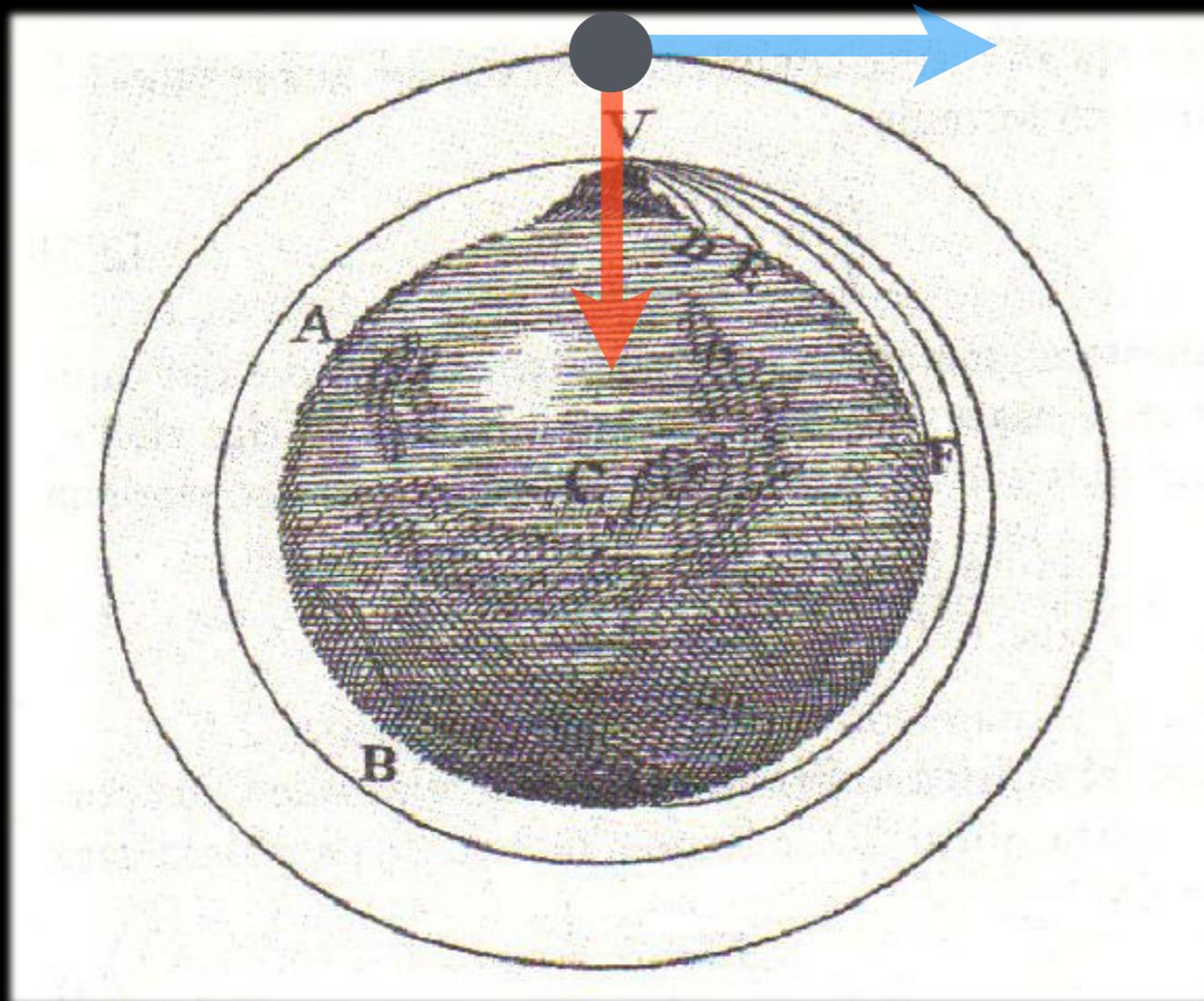
Era l'anno 1666. Per sfuggire alla peste Newton aveva lasciato Cambridge per tornare alla casa natale. Per comprendere il moto della Luna, immaginò che la gravità terrestre si spingesse fino a quella distanza.

Dopo l'episodio della mela, trascorse molti anni sulle equazioni per dimostrare che la forza gravitazionale decresce col quadrato della distanza, e le orbite sono sezioni coniche.

Quest'ultima deduzione convinse Halley a spingerlo a pubblicare i PRINCIPIA (1687).



Come la mela cade
(e tocca il suolo)
così la Luna cade
(ma non tocca il suolo)



La gravita` di Newton

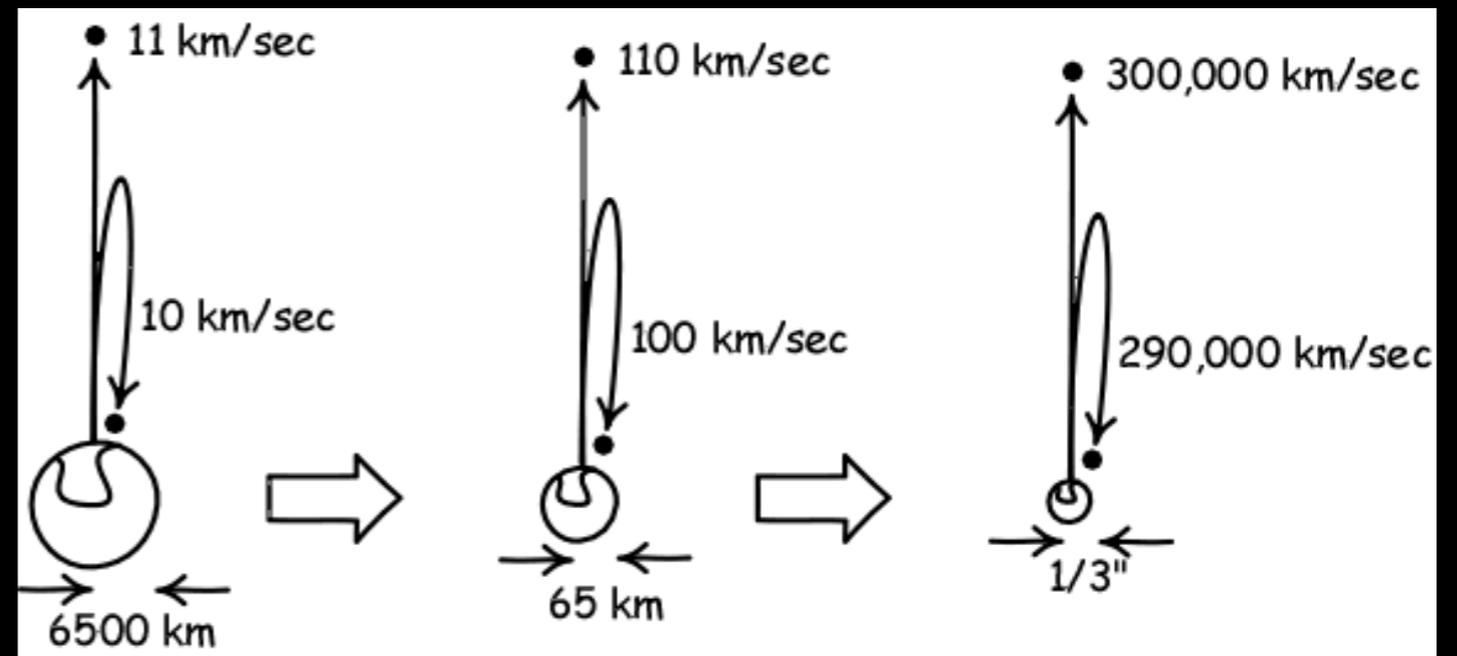
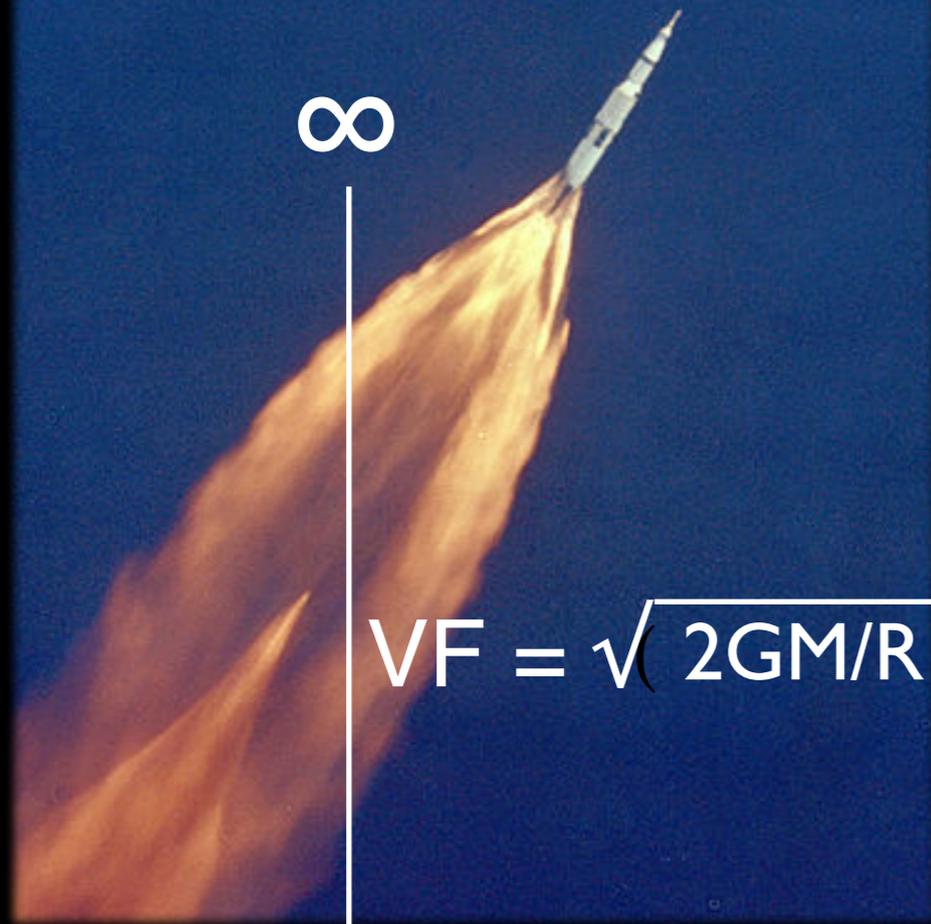


$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

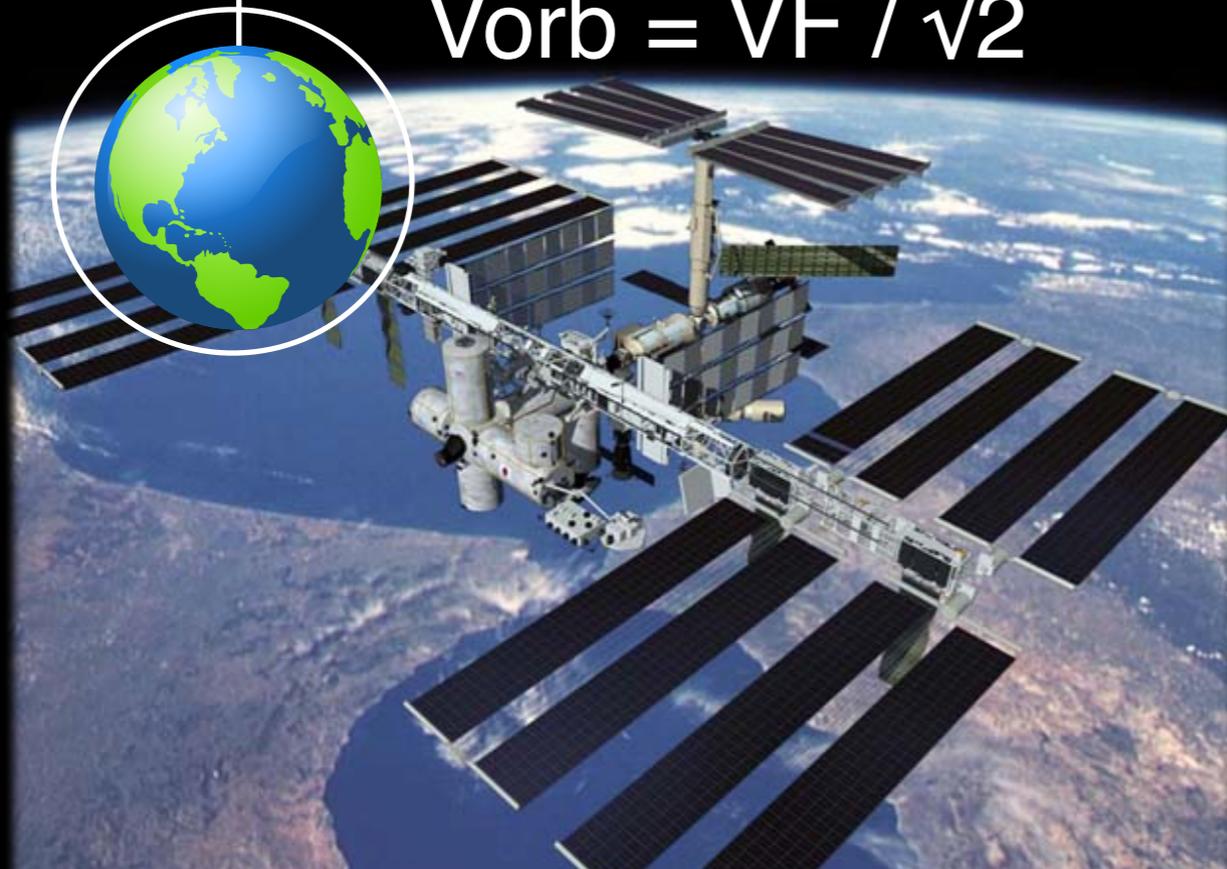
Le forze per le quali i pianeti sono continuamente distratti dai moti rettilinei, e sono trattenuti nelle proprie orbite, tendono al Sole, e sono inversamente proporzionali ai quadrati delle distanze dal centro dello stesso (Principia Mathematica)

A ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria: le azioni di due corpi sono sempre uguali e dirette verso parti opposte.

LA VELOCITA' DI FUGA



$$Vorb = VF / \sqrt{2}$$



$$VF = 11 \text{ km/s} = a.t$$

(se $a=5g$, $t=220 \text{ s}$)

ISS: 7.6 km/s

Nel marzo 1918 Parigi fu bombardata, ma non si videro bombardieri o zeppelin tedeschi. La sorpresa fu enorme. Parigi fu colpita da 2 cannoni a 121 km di distanza. Il primo colpo cadde in Place de la République



LA GRANDE BERTA

canna calibro 210 mm, lunghezza 28 m
300 Kg di esplosivo da lancio

La granata di mezzo metro pesava 106 kg. Aveva velocità iniziale **1,6 km/s**, e raggiungeva l'altezza di 29 km impiegando alcuni minuti per arrivare sull'obiettivo.

Furono sparati 351 colpi, ma per il logoramento le canne dovevano essere sostituite ogni 60-70 colpi.

PESARE LA TERRA



M

R=6371 km

$$mg = G Mm/R^2$$
$$G = ?$$

$$g=9,8 \text{ m/sec}^2$$

Una montagna ... di tre miglia di altezza e sei di larghezza non potrebbe, con la sua attrazione, spostare l'arco del pendolo di due minuti rispetto alla verticale; solo nei corpi di grandi pianeti si potrebbe apprezzare questo effetto ... (Newton)

II METODO DELLA MONTAGNA

Misura della densita' attraverso la deviazione del filo a piombo dalla verticale astronomica, misurata sui lati opposti di una montagna

CHIMBORAZO (1738)
6248 m.s.l.m.

All'equatore, per la forma della Terra, e' "piu' alta" dell'Everest

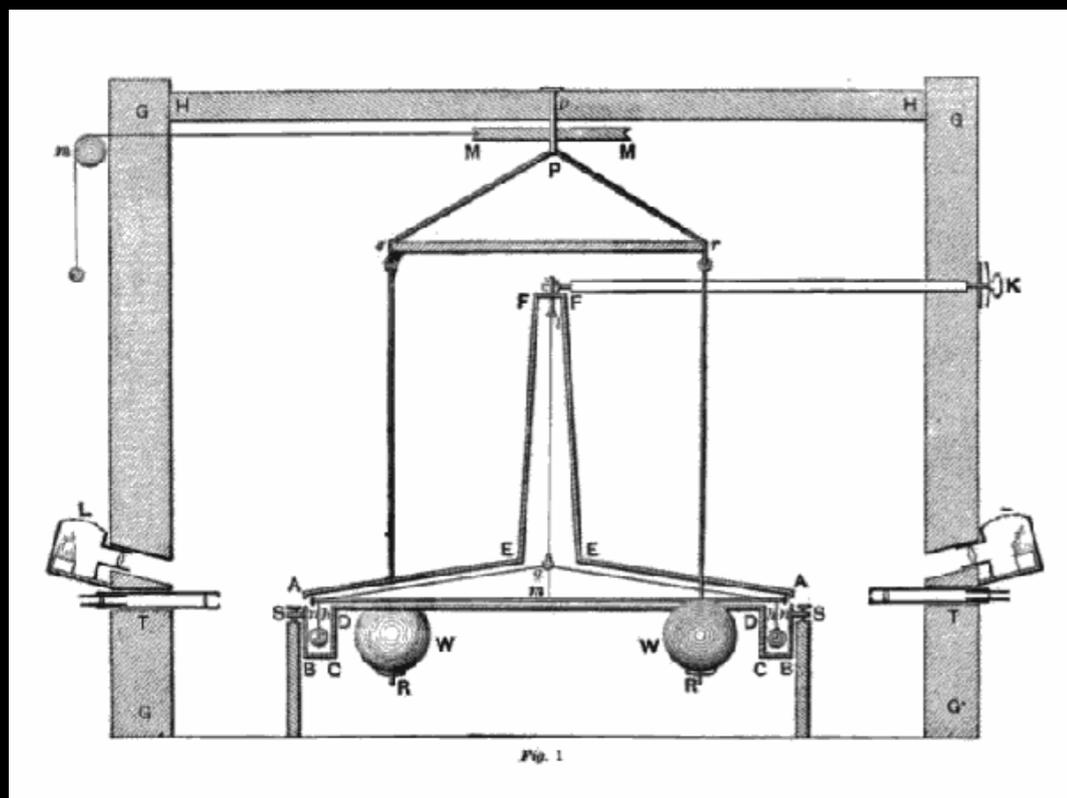


Le anomalie nella misura del meridiano dei monti Allegheni furono interpretate da Cavendish come effetto gravitazionale sui fili a piombo degli strumenti.
La Royal Soc. affido' a Nevil Maskelyn (Astronomo Reale) le misure sul monte SCHIEHALLION (Scozia) (1774)

JOHN MICHELL (1724-1793) professore a Cambridge, si ritirò a vita privata dedicandosi alla scienza. Abituati frequentatori erano **Henry Cavendish** e **William Herschel**, musicista tedesco con cui amava suonare il violino e che divenne famoso astronomo.

Sostenne che i terremoti propagassero come onde, si interessò alla pressione della luce. Scrisse per la Royal Society un lavoro in cui mostrava che un corpo che cadesse dall'infinito su una sfera 500 volte il Sole vi giungerebbe più veloce della luce. Supponendo che la luce sia attratta dalla stessa forza, ecco che la luce emessa da tale corpo dovrebbe ricaderci, per gravità.

Idea e costruì un apparato per misurare la massa della Terra, ma lo lasciò al grande amico Cavendish che fu il primo a fare la misura.



Henry
Cavendish
1731-1810



The Cavendish Laboratory

29 premi Nobel

James C. Maxwell
elettromagnetismo (1850)

Lord J. Rayleigh (1904)

Argon, teoria del suono, diffusione della luce

Sir Joseph Thompson (1906)
elettrone, spettroscopia di massa, isotopi

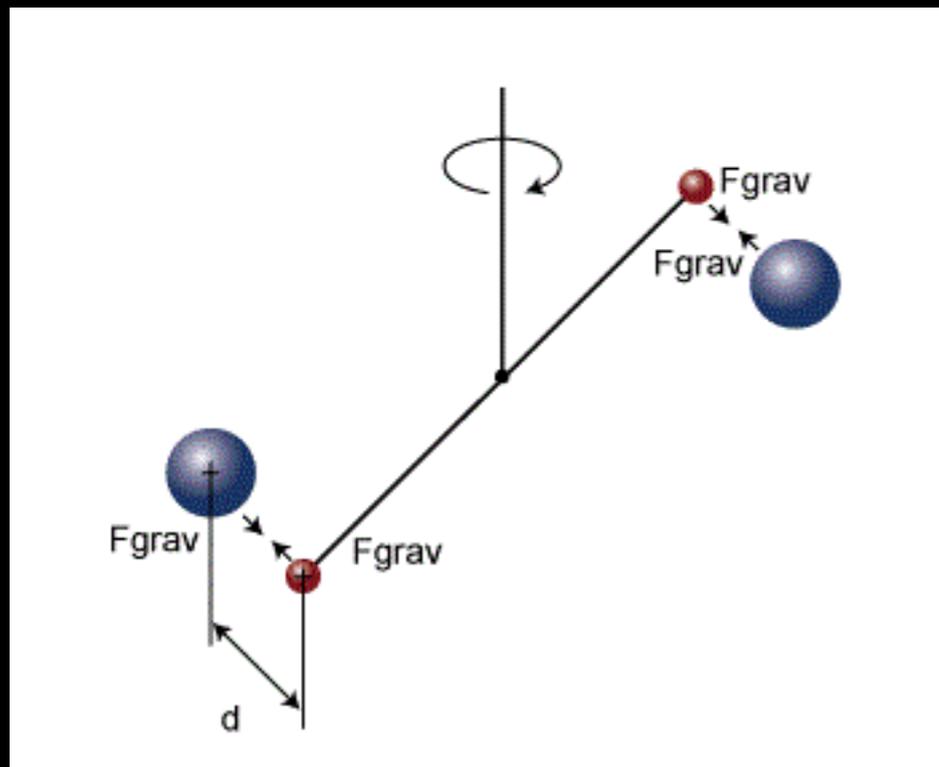
Lord Ernest Rutherford (1908)
struttura dell'atomo, radioattività

Sir Lawrence Bragg (1915)
raggi X (DNA)

Sir Nevill Mott (1977)
fisica dello stato solido



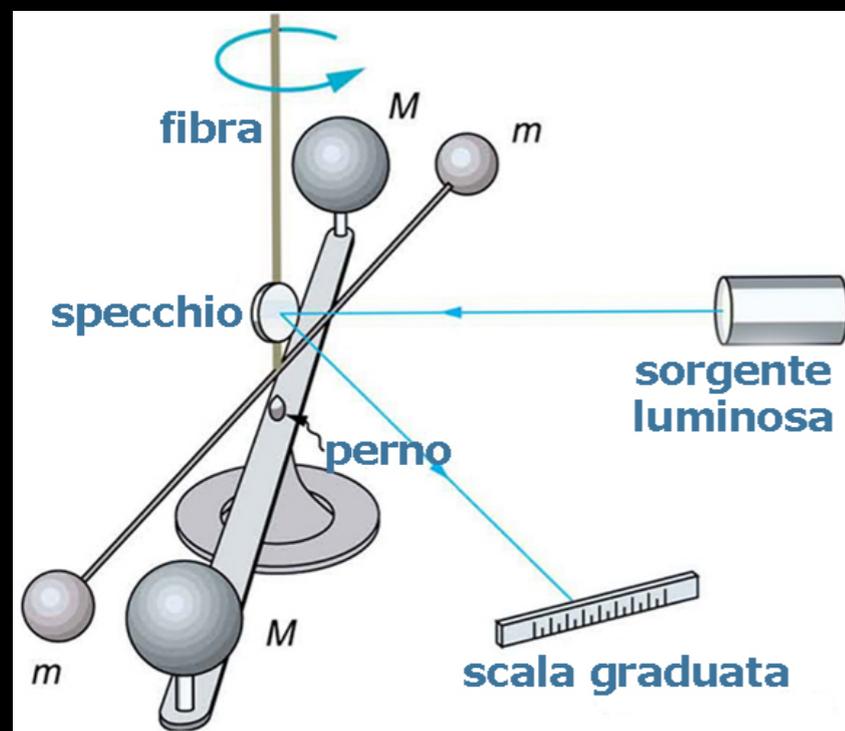




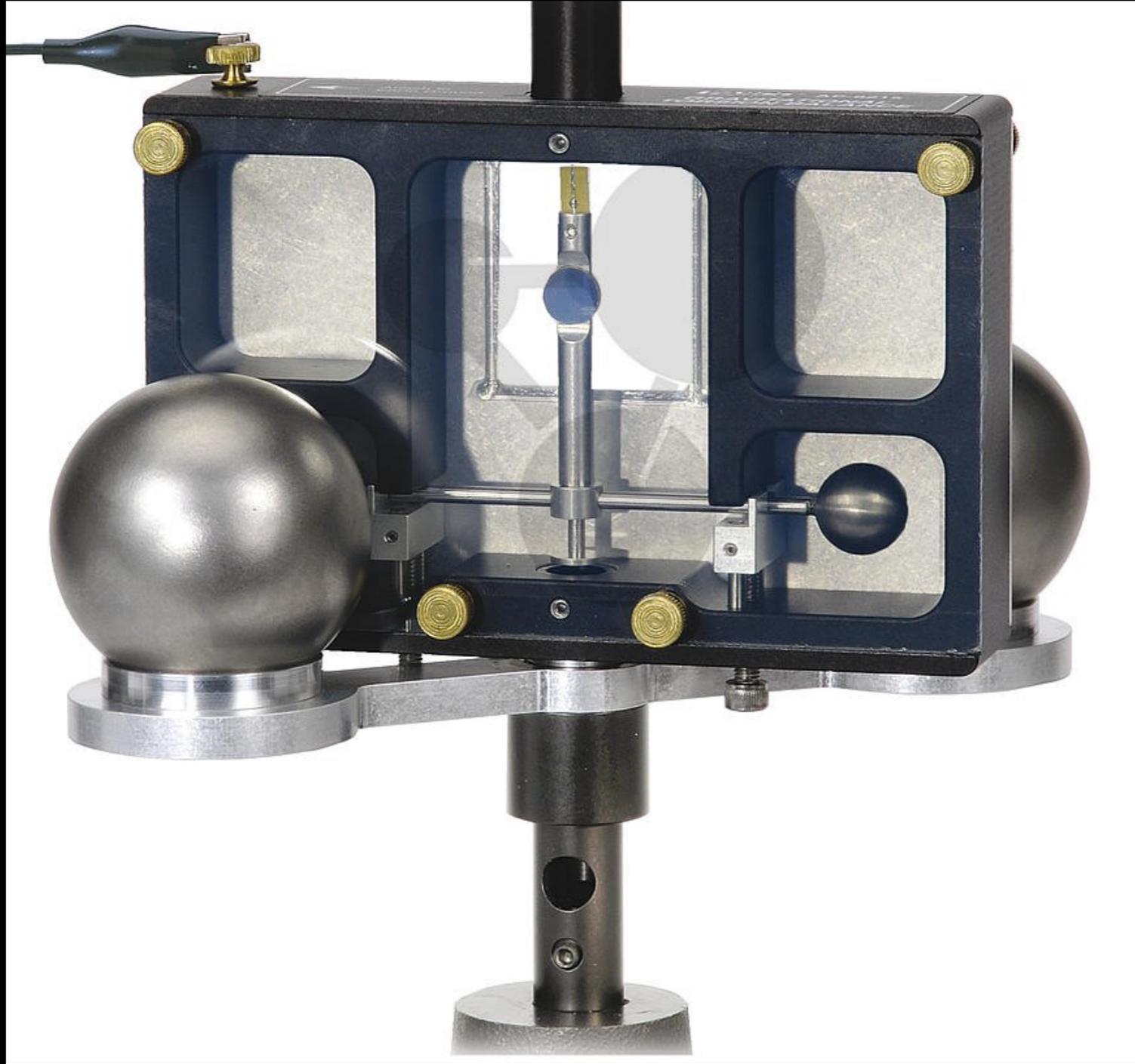
Un'asta orizzontale di circa 2m e' sospesa al centro a una sottile fibra. Le estremita` portano due sfere di piombo da 1 kg. Accanto a ciascuna e' posta una grossa sfera di piombo. La loro attrazione torce l'asta in senso orario.

Dopo alcune ore, le sfere grosse sono portate presso la faccia opposta delle sfere piccole, causando la torsione dell'asta in senso antiorario.

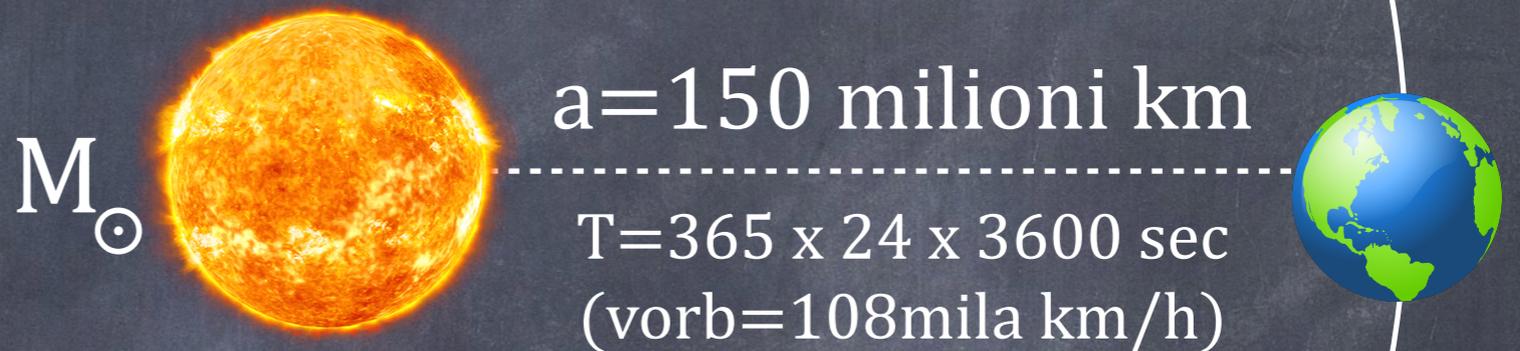
Misurando l'angolo formato dall'asta nelle due posizioni, Cavendish pote' calcolare la debolissima forza attrattiva esercitata dalla sfera grande su quella piccola.



Con pochi calcoli, calcolo` la massa della Terra: 6×10^{24} kg (prossimo al valore odierno).



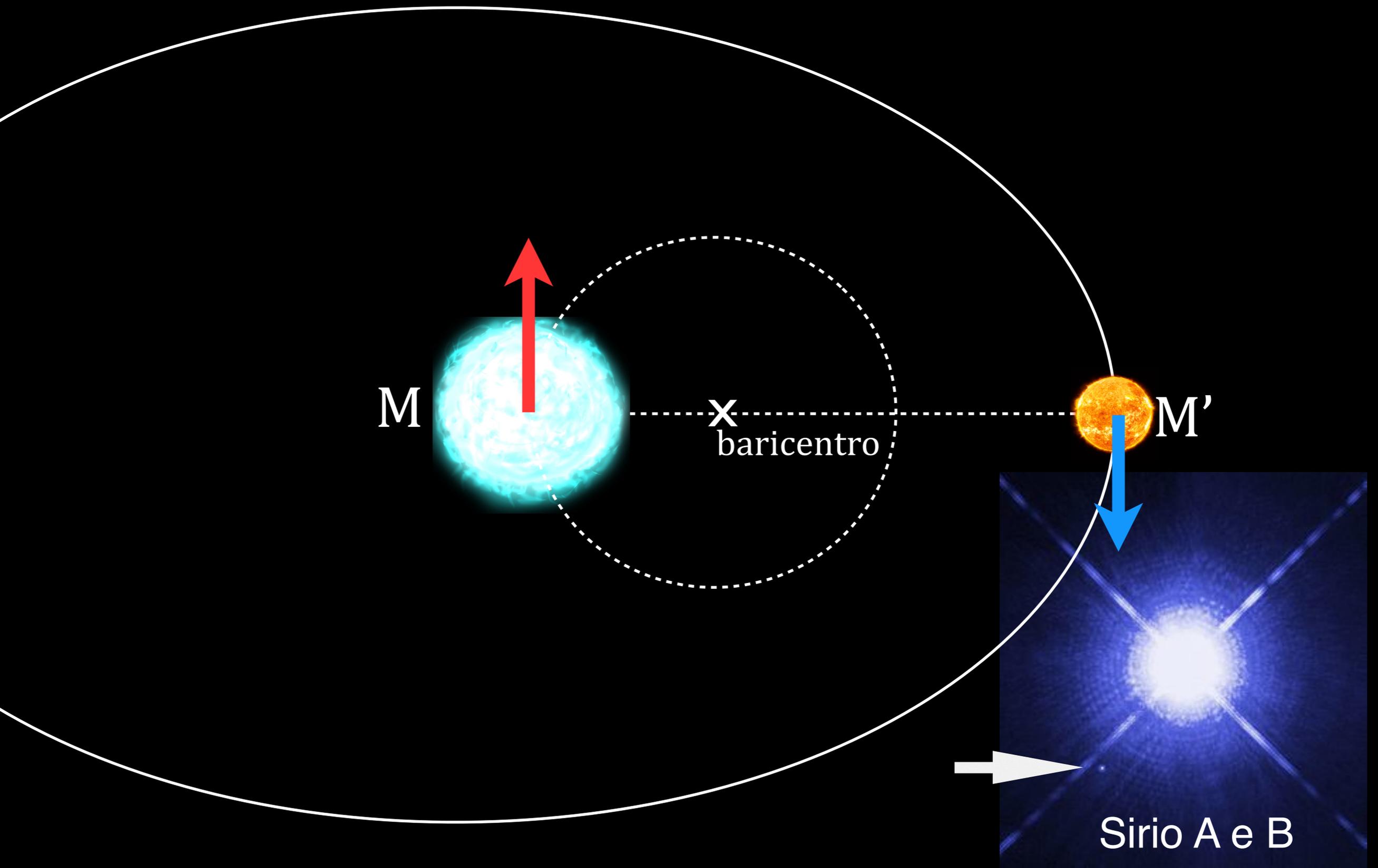
PESARE IL SOLE



$$a^3 / T^2 = G M_{\odot} / 4\pi^2$$

$$M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

PESARE LE STELLE





Barone Lorand Eotvos

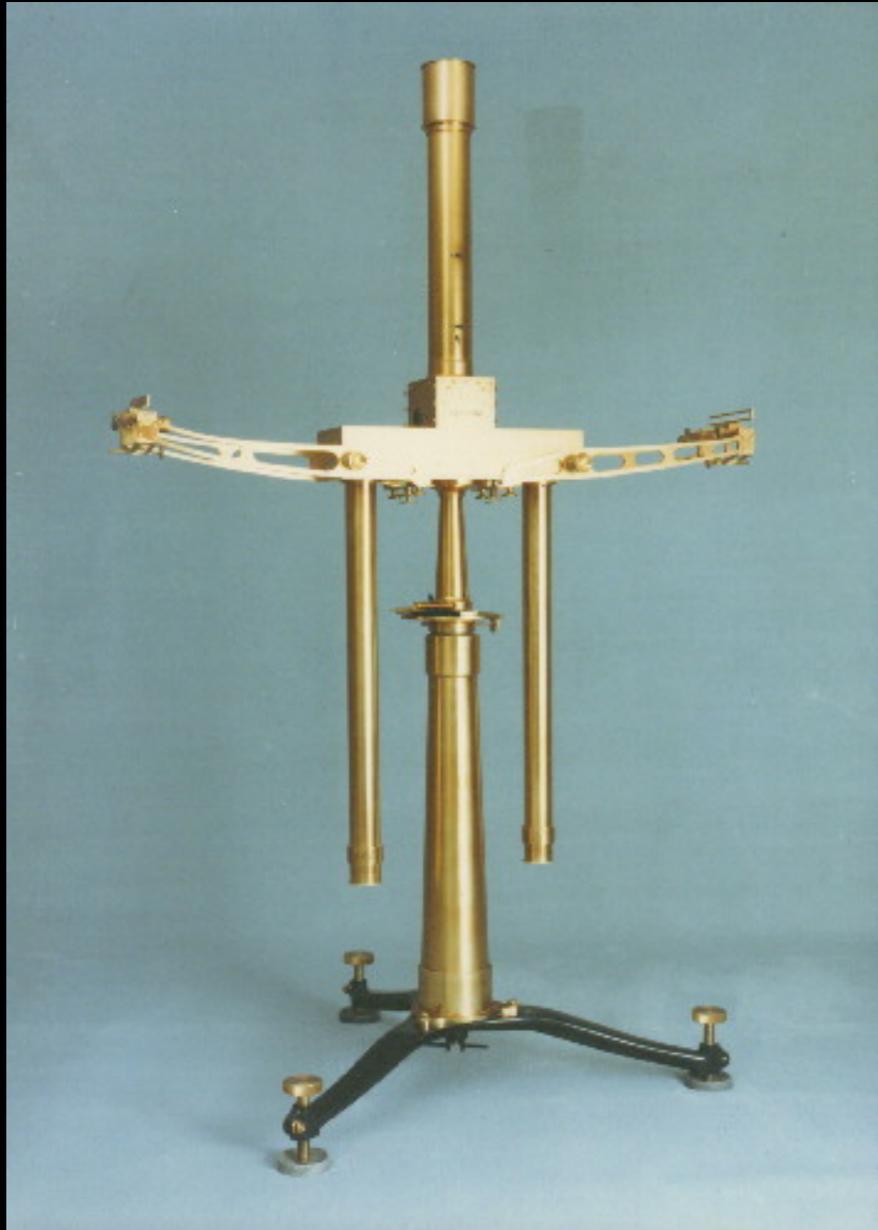
(Pest 1848 - Budapest 1919)



Universita` di Budapest "Lorand Eotvos"

- Studi di capillarita`
- Verifica che la massa inerziale e gravitazionale differiscono meno di 1 parte per 20milioni
- Uso della bilancia per indagine geofisica

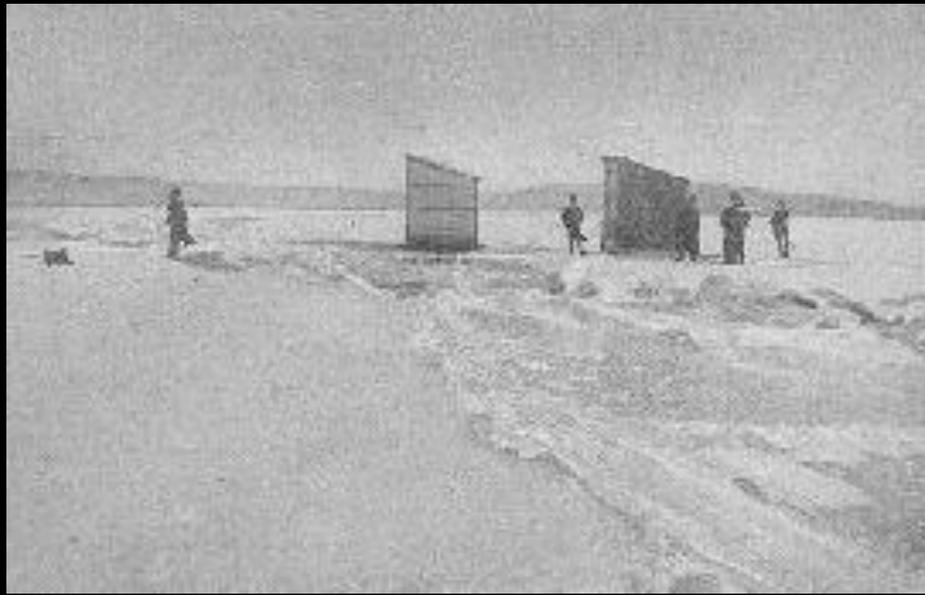
La bilancia di Eotvos



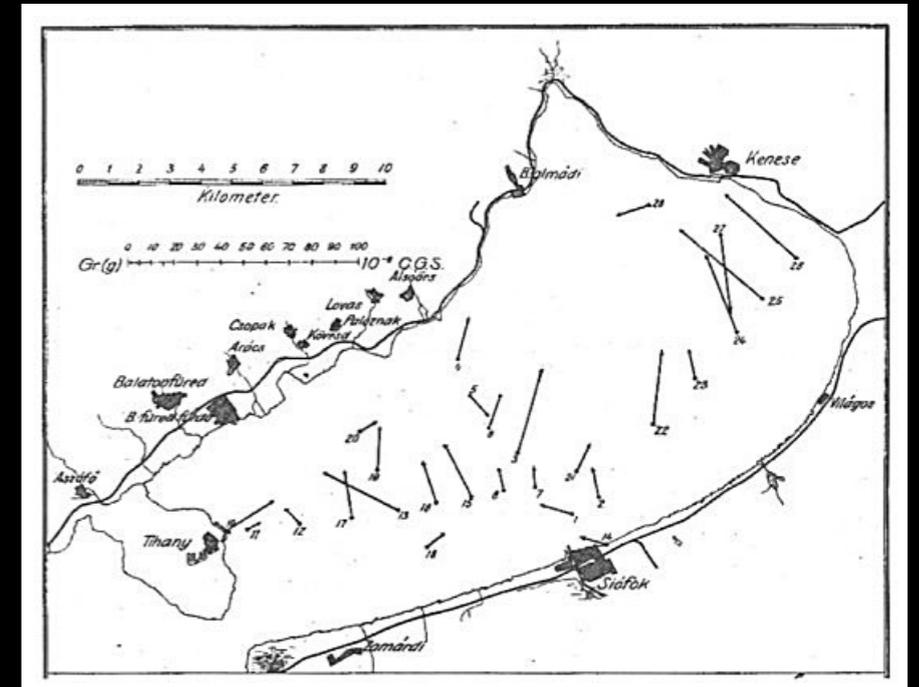
Come strumento ho usato una semplice asta, appesantita alle due estremità e protetta dal vento e dalle variazioni di temperatura.

Una massa, vicino o lontana, esercita una forza sull'asta, e la fibra a cui essa è appesa, vi resiste, torcendosi, con un angolo che misura direttamente l'intensità della forza ...

È semplice, come il flauto di Amleto, devi solo sapere come suonarlo ... In questo modo possiamo sondare la crosta terrestre, dove né occhi né le più profonde trivellazioni potrebbero vedere.



La prima mappa di gradienti orizzontali di gravita` fu ottenuta con misure sul lago Balaton gelato (1901-03)



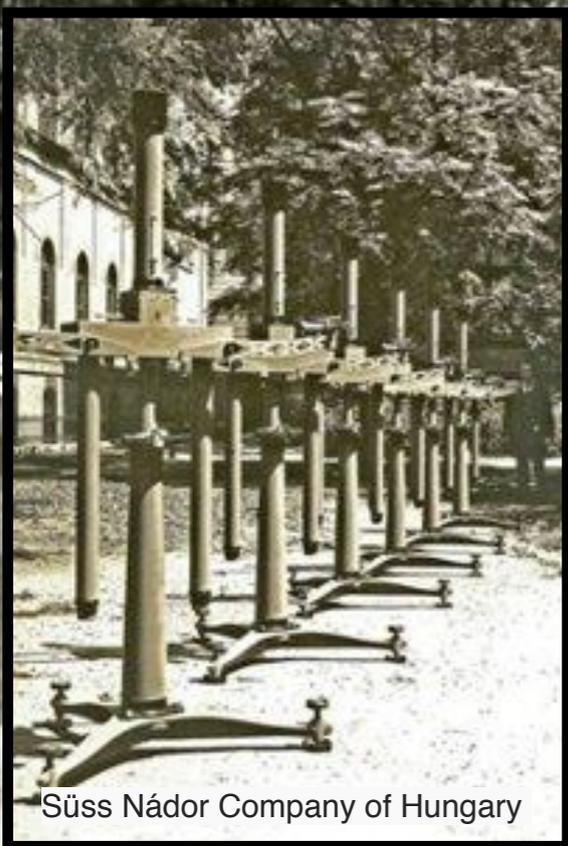
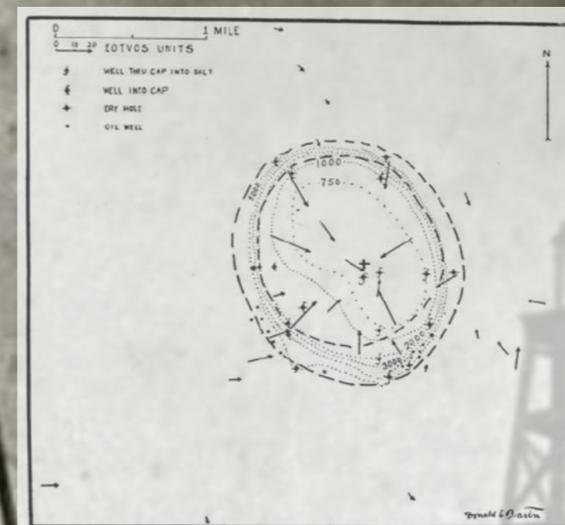
https://web2.ph.utexas.edu/utphysicshistory/UTexas_Physics_History/Arnold_Romberg.html



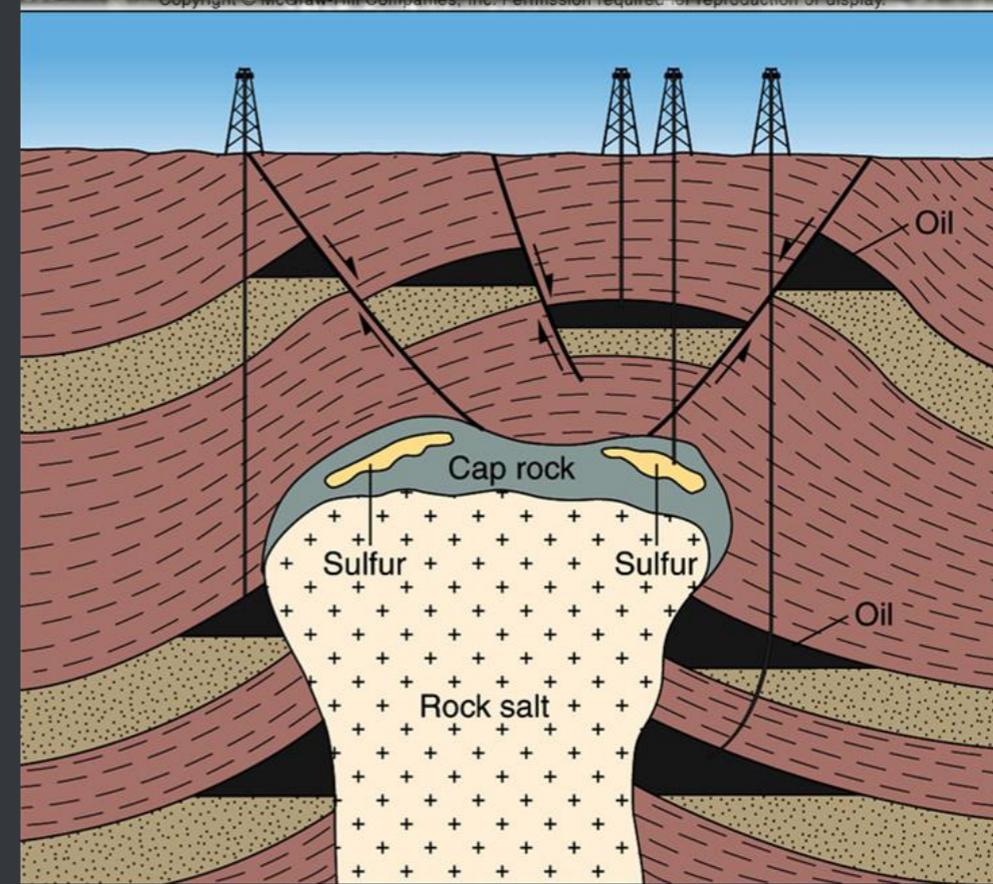
Drumchapel (Glasgow): prospezione gravitazionale con bilancia a torsione di Eötvös (1927-28)
Le anomalie gravitazionali sono dovute a ondulazioni degli strati di roccia sottostanti spessori variabili di depositi glaciali.



Il petrolio della cupola salina di Spindletop (Texas) era noto agli indiani, che lo usavano per dipingersi. Gli spagnoli lo usarono per calafatare le navi. Nel 1900 inizio' una intensa attivita' estrattiva. Qui la densita' delle rocce e' minore. La bilancia di Eotvos fu usata a Spindletop, e poi (1924) sulla cupola salina di Nash (Houston). Un pozzo trovo' il tappo di sale e verifico' l'efficacia del metodo. Fu la prima scoperta di idrocarburi con metodi geofisici. Il metodo fu sostituito negli anno '40

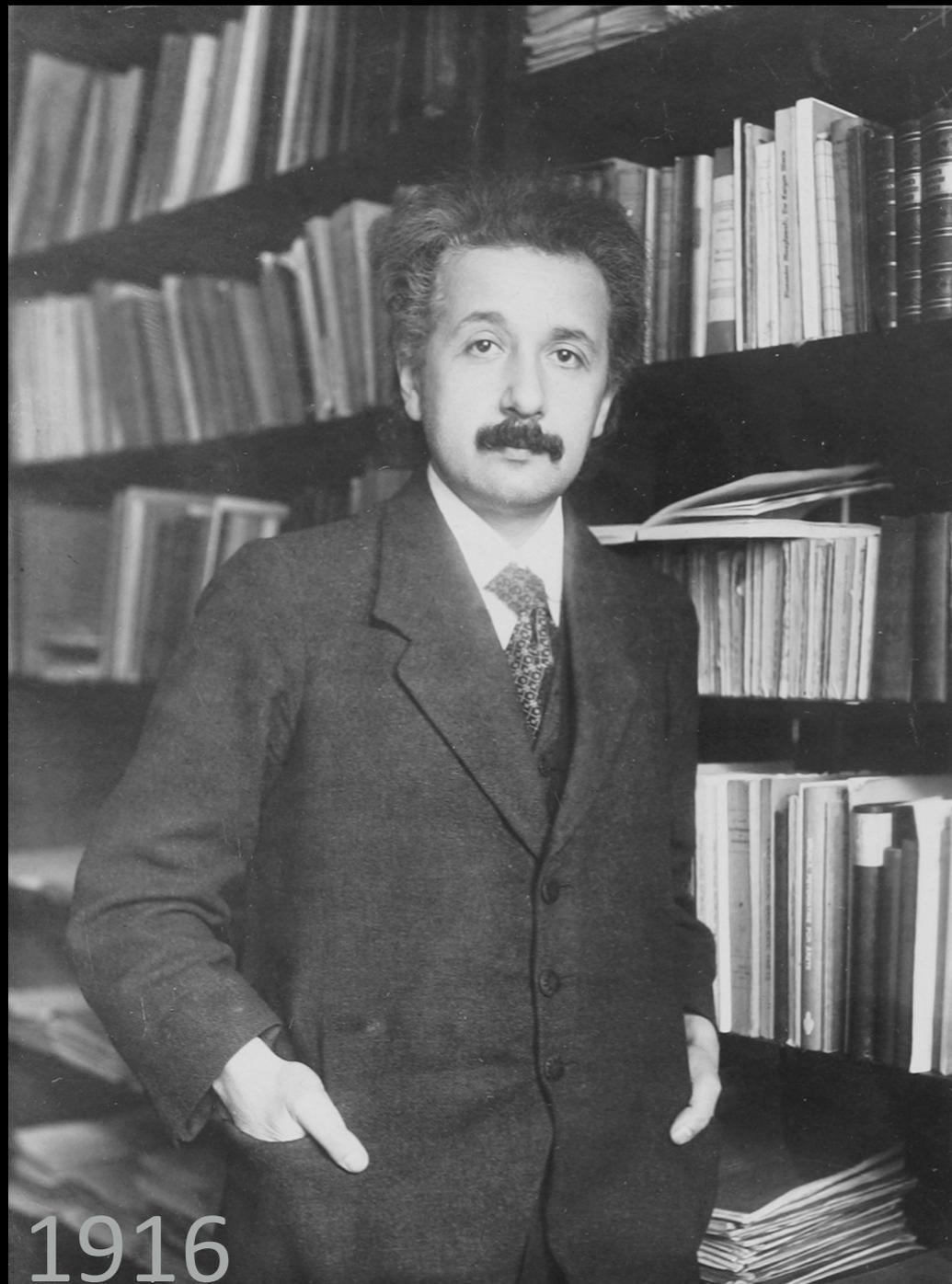


Süss Nádor Company of Hungary



Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

La gravita` di Einstein (Relativita` Generale)



La gravita` e` inscritta nella geometria dello spazio tempo

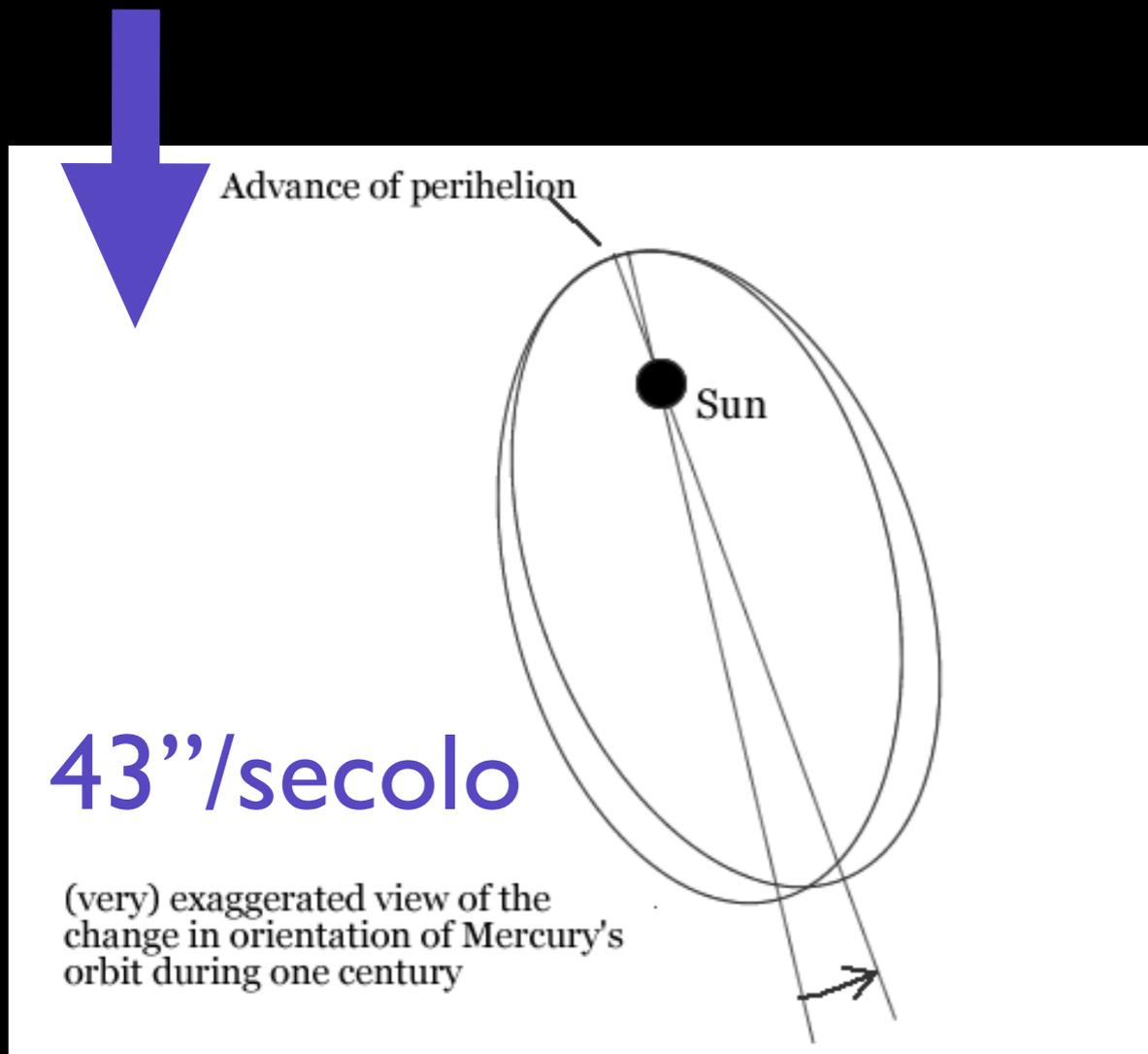
La geometria e` costituita dai punti dello spazio-tempo, e dalle reciproche distanze.

I punti sono variamente descritti da 4 coordinate.

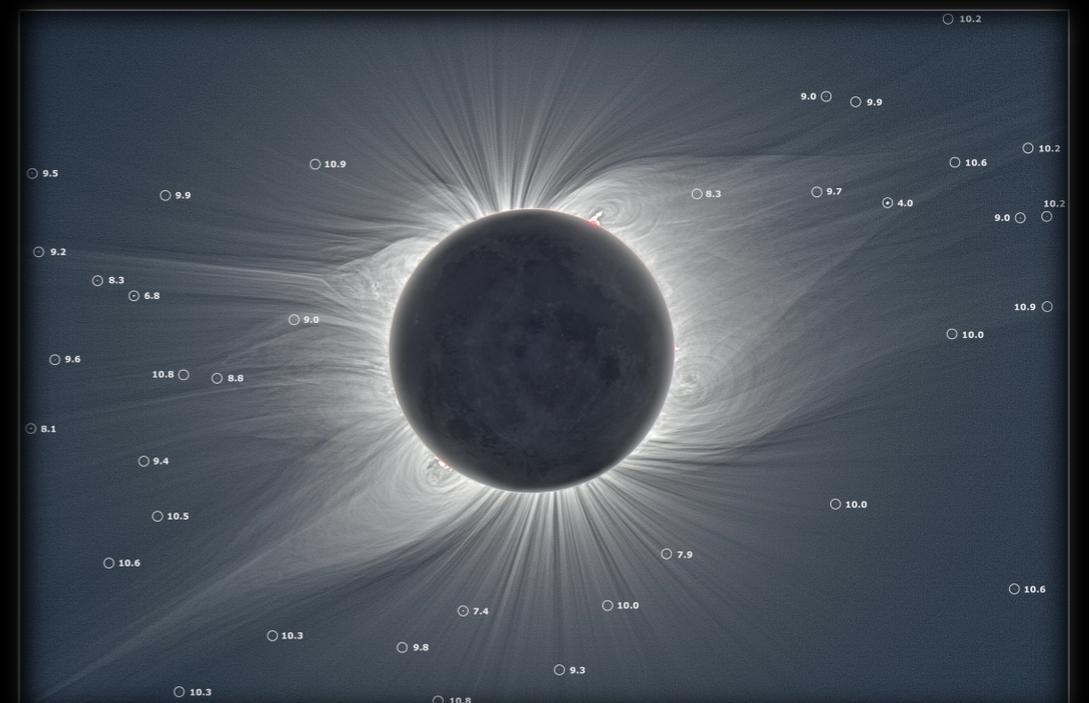
Localmente, la gravita` puo` essere "cancellata" da una scelta delle coordinate, ma rimane inscritta nelle quantita` della geometria invarianti per cambiamento di coordinate.

Le prime conferme:

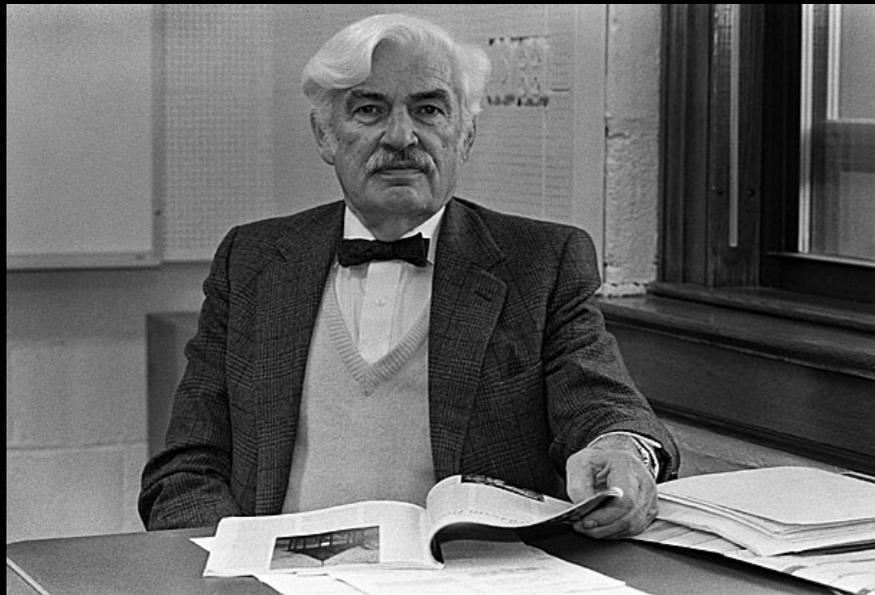
- redshift gravitazionale
- deviazione raggi luminosi
- precessione orbita di Mercurio



ECLISSE MONGOLIA, 2008



L'esperimento di Pound e Rebka (1960)



Robert Pound (1919-2010)
NOBEL per la scoperta della
risonanza magnetica nucleare (NMR)

La Relativita` Generale
prevede che i fotoni che
scalano un campo
gravitazionale sono
spostati verso il rosso.
Quelli che scendono sono
spostati nel blu.



Pound e l'assistente Rebka utilizzarono la
torre del Jefferson Physical Lab.
dell'Universita` di Harvard, alta circa 22,5m.
Dalla cima furono emessi fotoni gamma del
Fe57, riassorbiti da Fe 57 alla base.
La riga del Fe e' molto sottile. Per avere
assorbimento, il blue-shift gravitazionale fu
compensato muovendo lentamente la base
(Doppler shift)

*Approximate Integration of Field Equations of Gravitation.***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 $g_{\mu\nu}$ 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

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

*About Gravitational Waves***Über Gravitationswellen.**

VON A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

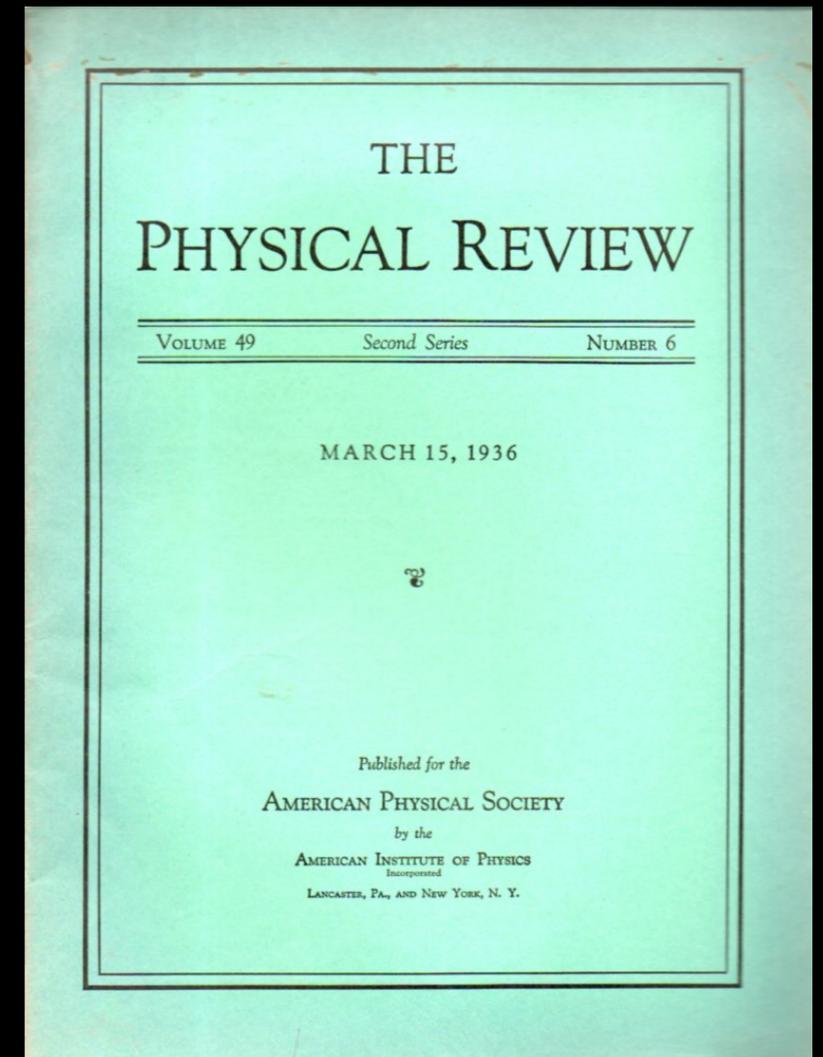
Le onde gravitazionali

“... a mechanical system that maintains spherical symmetry cannot radiate, in contrast to the result - disfigured by a calculational mistake - of the previous paper.”

(Einstein 1918)

Vent'anni dopo, Einstein riprese l'argomento:
Con un giovane collaboratore, sono giunto
all'interessante risultato che le onde
gravitazionali non esistono, sebbene esse si
manifestino in prima approssimazione
(lettera a Max Born)

ed espose le nuove idee nell'articolo
“Do gravitational waves exist ?”
che invio` al Physical Review.



Il revisore anonimo dimostrò che la tesi era sbagliata:
le coordinate usate da Einstein non erano adatte in presenza di singolarità,
e chiese la revisione radicale dell'articolo. Einstein, si arrabbiò molto ...

*Egregio Signore,
Noi (Mr. Rosen e io) vi abbiamo inviato un manoscritto per la pubblicazione
e non vi abbiamo autorizzato a mostrarlo a specialisti prima della stampa.
Non vedo alcuna ragione nel ricevere i commenti (comunque errati) di un
esperto anonimo. Sulla base di questo incidente preferisco pubblicare il lavoro
altrove. Con rispetto,
A. Einstein*

Einstein non pubblicò più sul Physical Review.

L'articolo uscì nel *Journal of the Franklin Institute*, con conclusioni molto diverse.

Gli autori individuarono nuove coordinate e mostrarono che **avevano scoperto una soluzione di onde gravitazionali cilindriche** (la metrica di Einstein-Rosen).



Il revisore anonimo
Howard P. Robertson,
non fece mai menzione
del ruolo in questo
episodio.



Negli anni 1936-37
Robertson e Walker
determinarono la geometria
piu' generale di uno
spazio-tempo omogeneo
e isotropo a tutti i tempi,
come richiesto dal
principio cosmologico.

La geometria su grande scala
dell'universo e' oggi descritta
dalle equazioni di
Friedmann-Robertson-Walker

Einstein e Lemaitre
a Pasadena (Cal) nel 1936

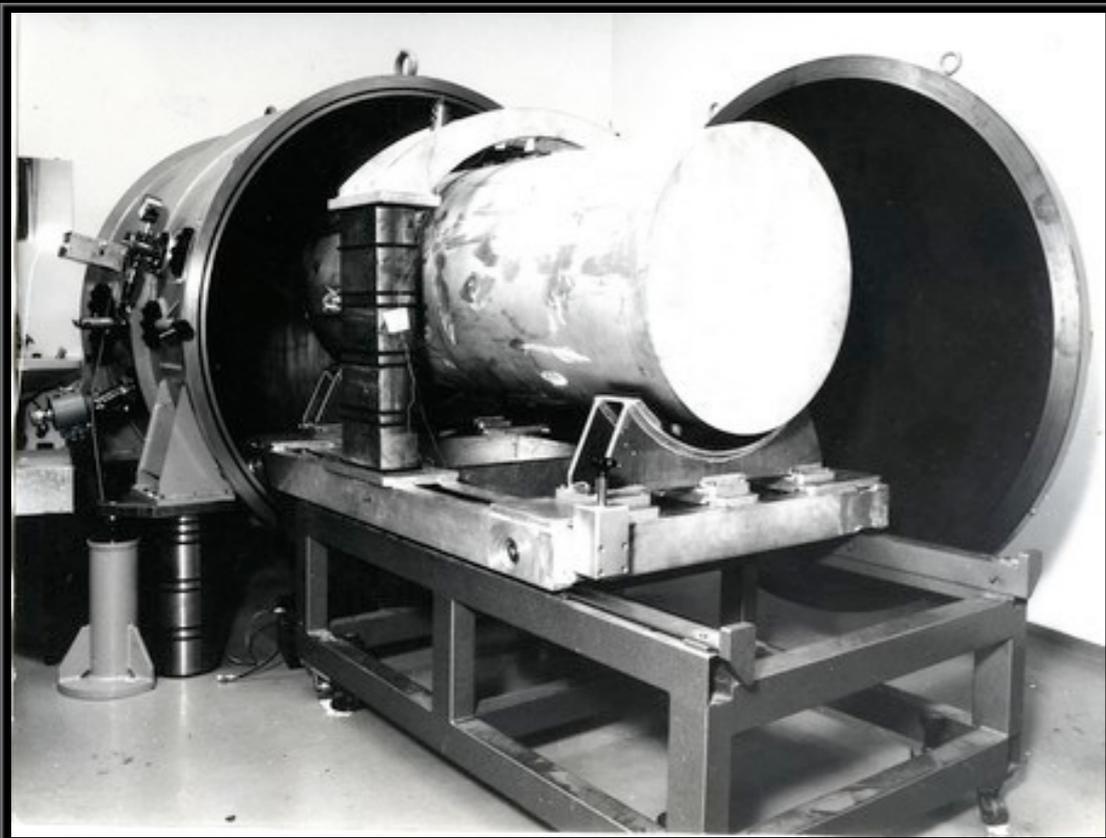


Il pioniere della ricerca delle onde gravitazionali

Joseph Weber

(1919-2000)

Per registrare le onde gravitaz. utilizzo' una barra di 1 tonni di Alluminio, sospesa a un filo e isolata dall'ambiente. I sensori sulla barra avrebbero rivelato le vibrazioni indotte dal passaggio dell'onda. Weber capto' un segnale nel 1969 in 2 antenne, nel Maryland e nell'Illinois.



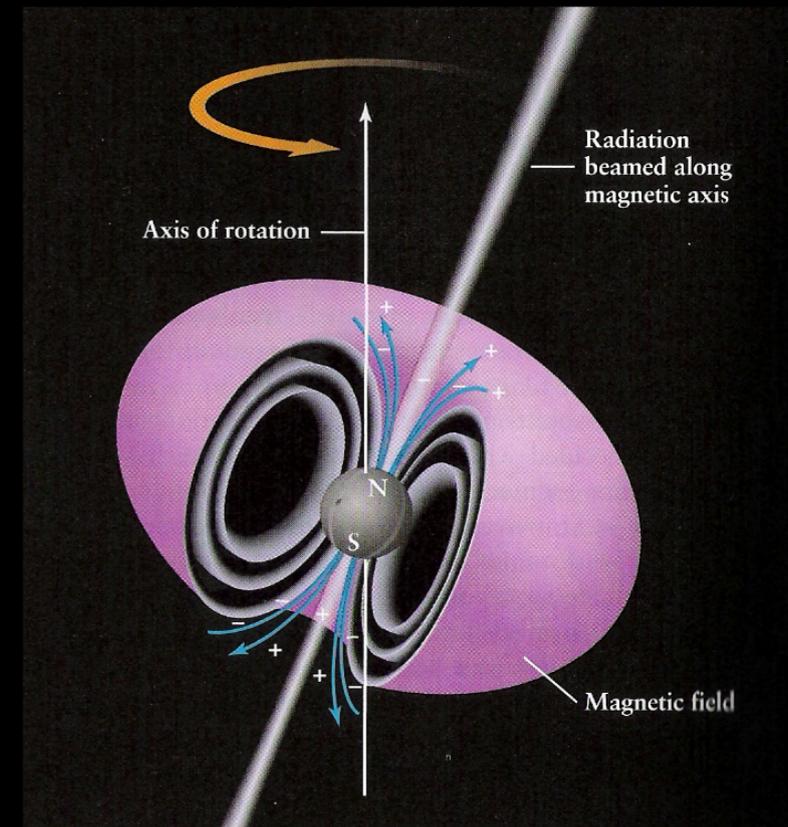
La pulsar binaria Hulse-Taylor (1974)



Russel A. Hulse



Joseph Taylor



NOBEL 1993

per la scoperta di un nuovo tipo di pulsar, che apre nuove strade per lo studio della gravita'

La pulsar aveva un periodo di 59 ms. Le misure mostrarono una ciclicità di 7,75 h, indicando che la pulsar è in orbita con un'altra stella. Negli anni il periodo della pulsar è stato misurato con grande precisione. La RG ci dice che un sistema binario emette onde gravitazionali e che il periodo orbitale lentamente diminuisce, fino alla collisione finale.



ARECIBO (305 m) - USA

$\lambda = 3 - 100 \text{ cm}$



FAST (500 m) - China

$\lambda = 10 - 430 \text{ cm}$



PSR B1913+16

1.9 Mill. km

unseen

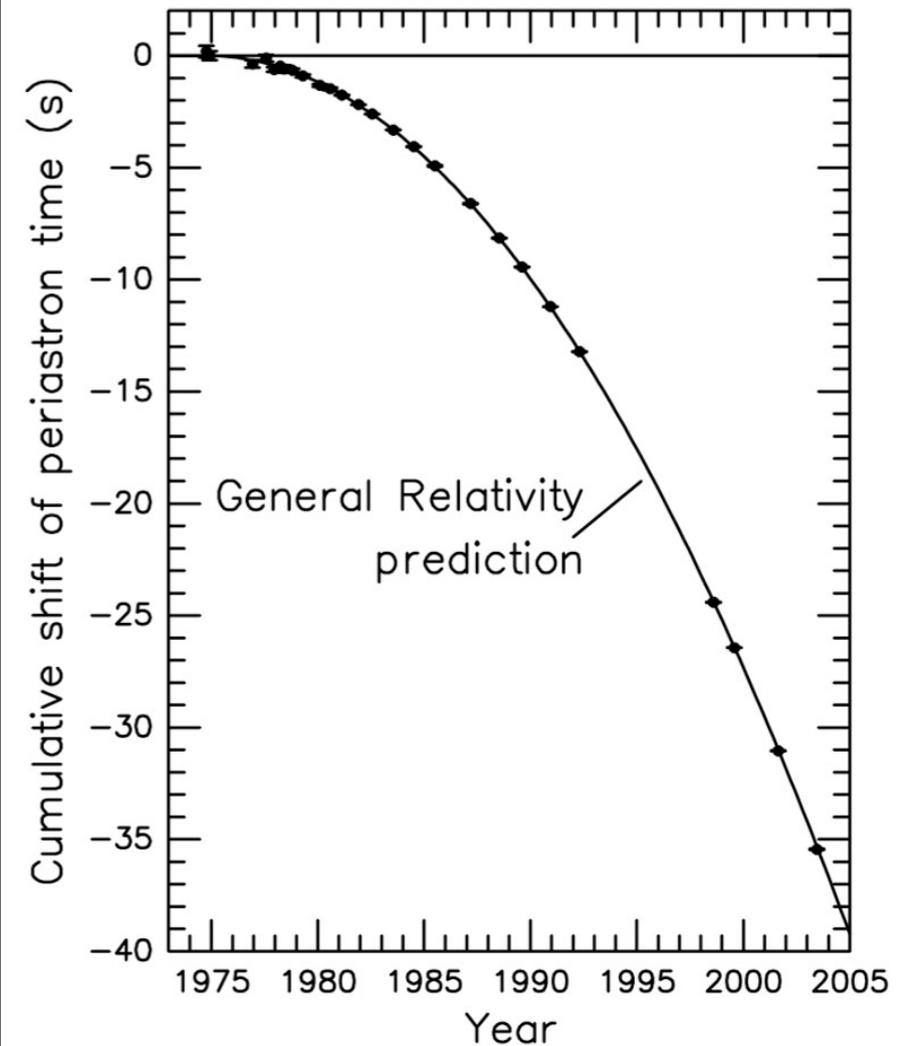
$$M_C = 1.39 M_\odot$$

$$P_b = 7.8h$$

$$P = 59ms$$

$$M_p = 1.44 M_\odot$$

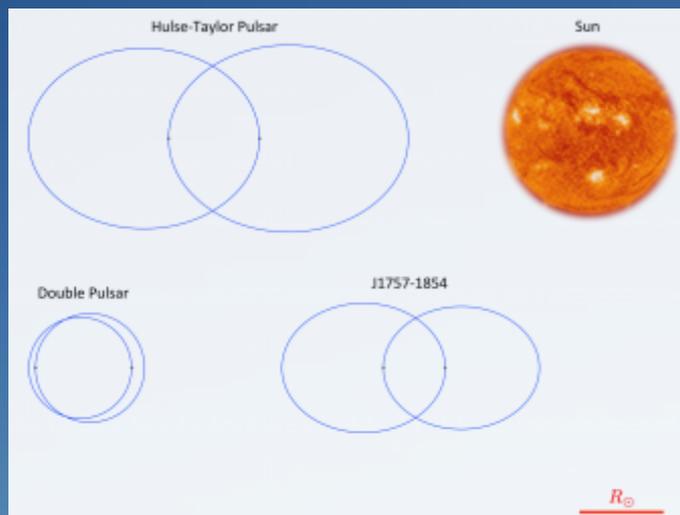
$$e = 0.617$$



Lo shift cumulativo del tempo di periastro mostra la diminuzione del periodo orbitale mentre le due stelle spiraleggiano. Sebbene sia di soli 40s in 30 anni, e' stato misurato con precisione ed e' in perfetto accordo con le previsioni della RG. L'osservazione e` considerata prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali.

Scoperte due stelle da record: è un test per la relatività di Einstein

*Sistema binario formato da una pulsar e una
stella di neutroni*



Ogni 4,4 ore la pulsar e la compagna distano poco più del diametro del Sole.

Le accelerazioni raggiungono il valore record di 70 g.

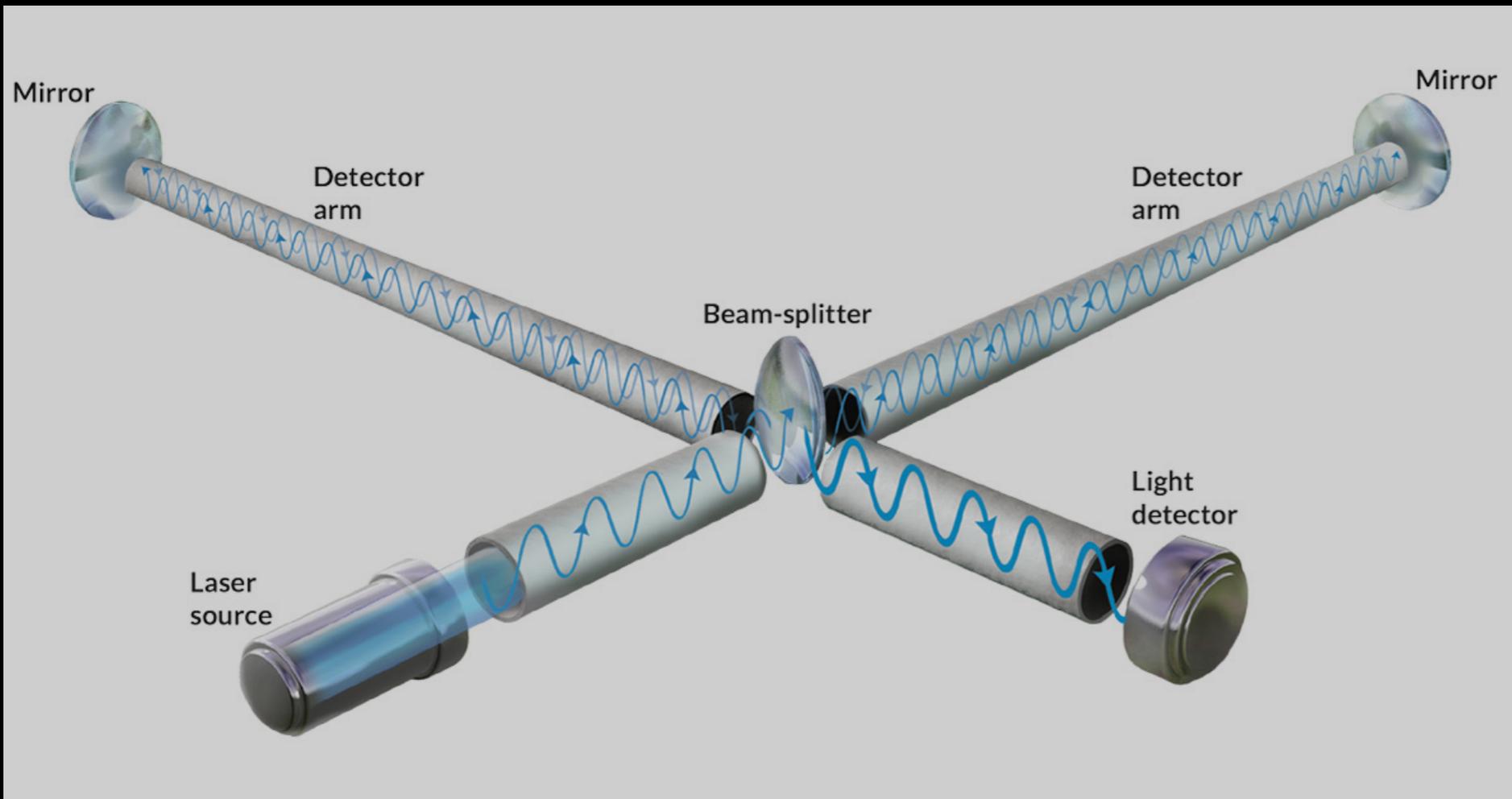
L'individuazione di J1757-1854 è avvenuta passando al vaglio migliaia di terabyte di dati raccolti nel corso della High Time Resolution Universe Survey: una ricognizione dedicata alle pulsar condotta col radiotelescopio da 64 m di Parkes, in Australia (fonte: INAF)



L'orbita si stringe di circa 9 metri all'anno. Fra 74 milioni di anni le due stelle di neutroni si fonderanno, producendo un'immensa emissione di onde gravitazionali.



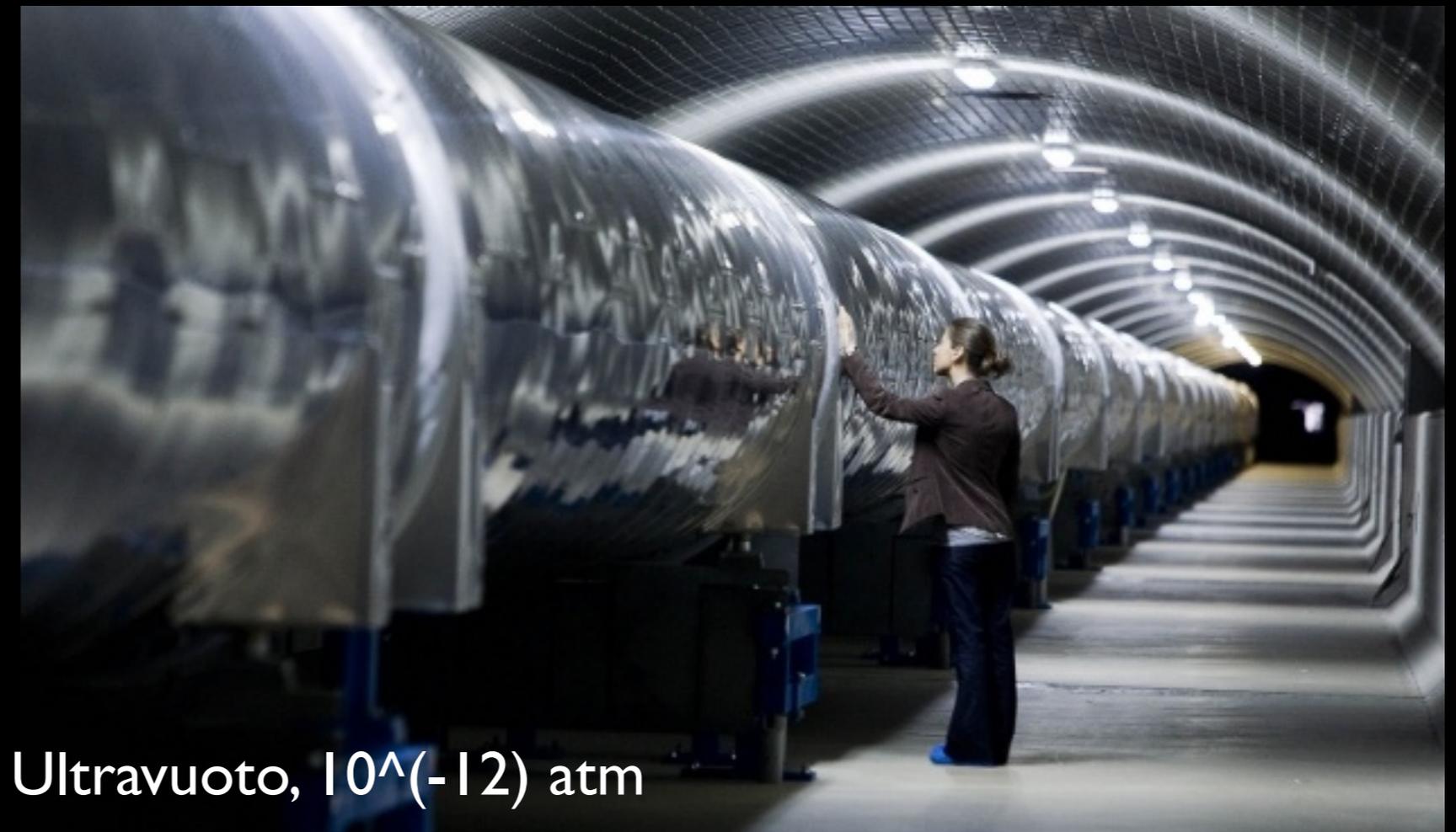
VIRGO (Cascina - Pisa)



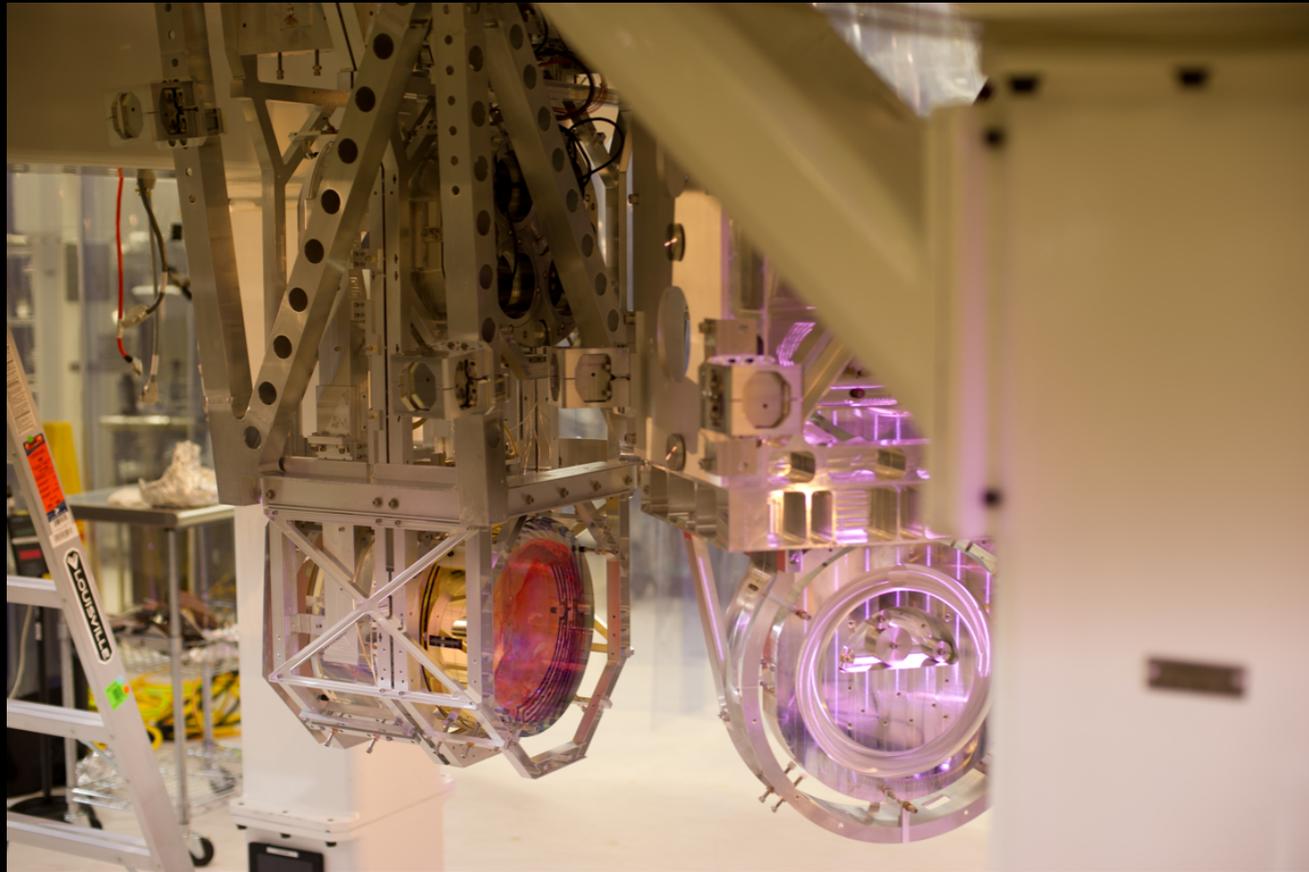
L'onda gravitazionale modifica la lunghezza del braccio di circa 1/1000 del diametro di un protone

I bracci di 3 km sono percorsi 50 volte dai fasci laser prima di combinarsi, dove la figura di interferenza rivela le variazioni di lunghezza

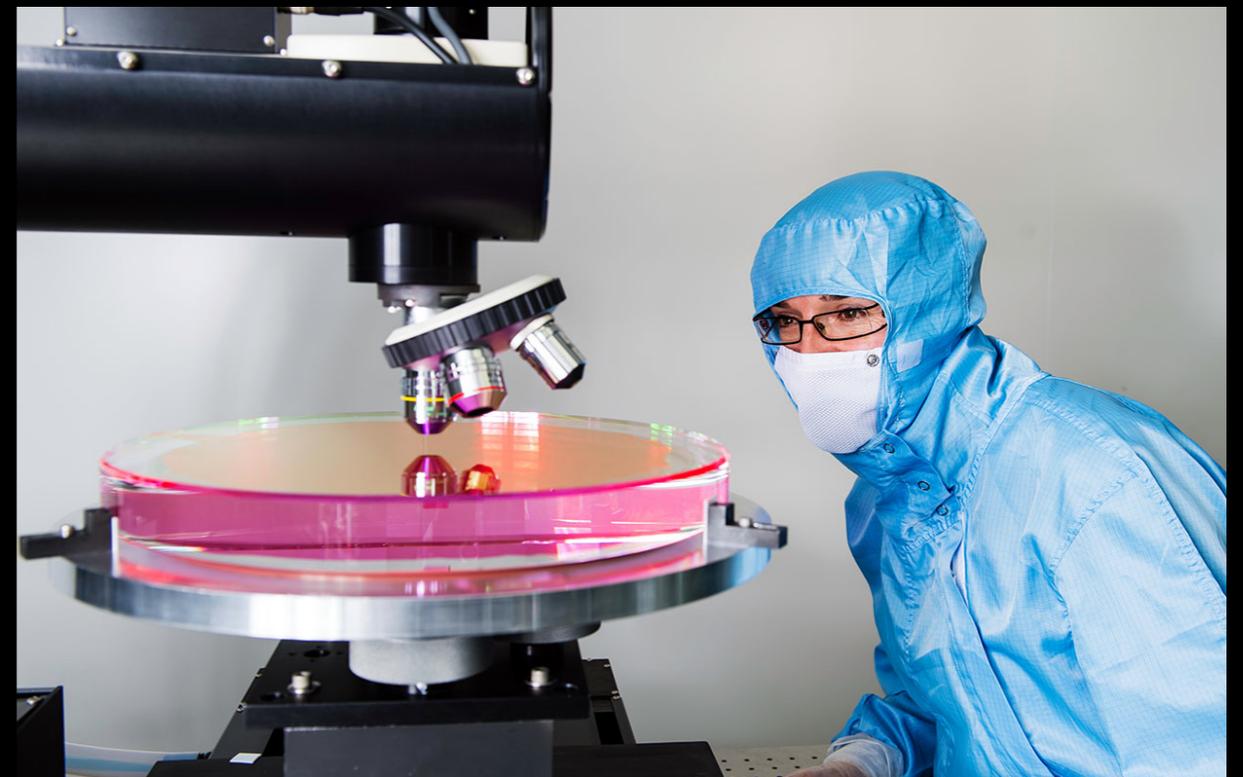
Laser 1064 nm (IR), 200 W



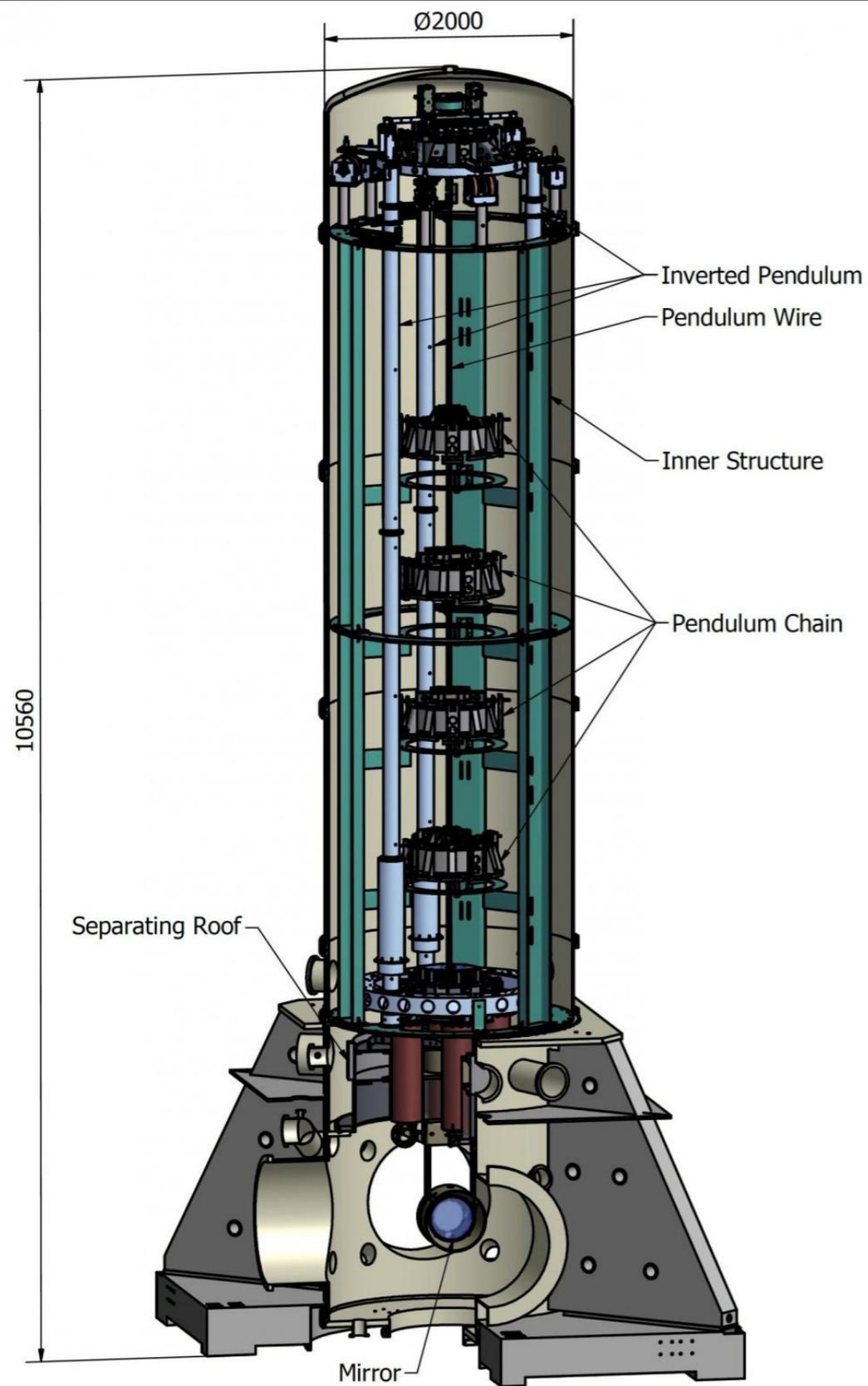
Ultravuoto, 10^{-12} atm

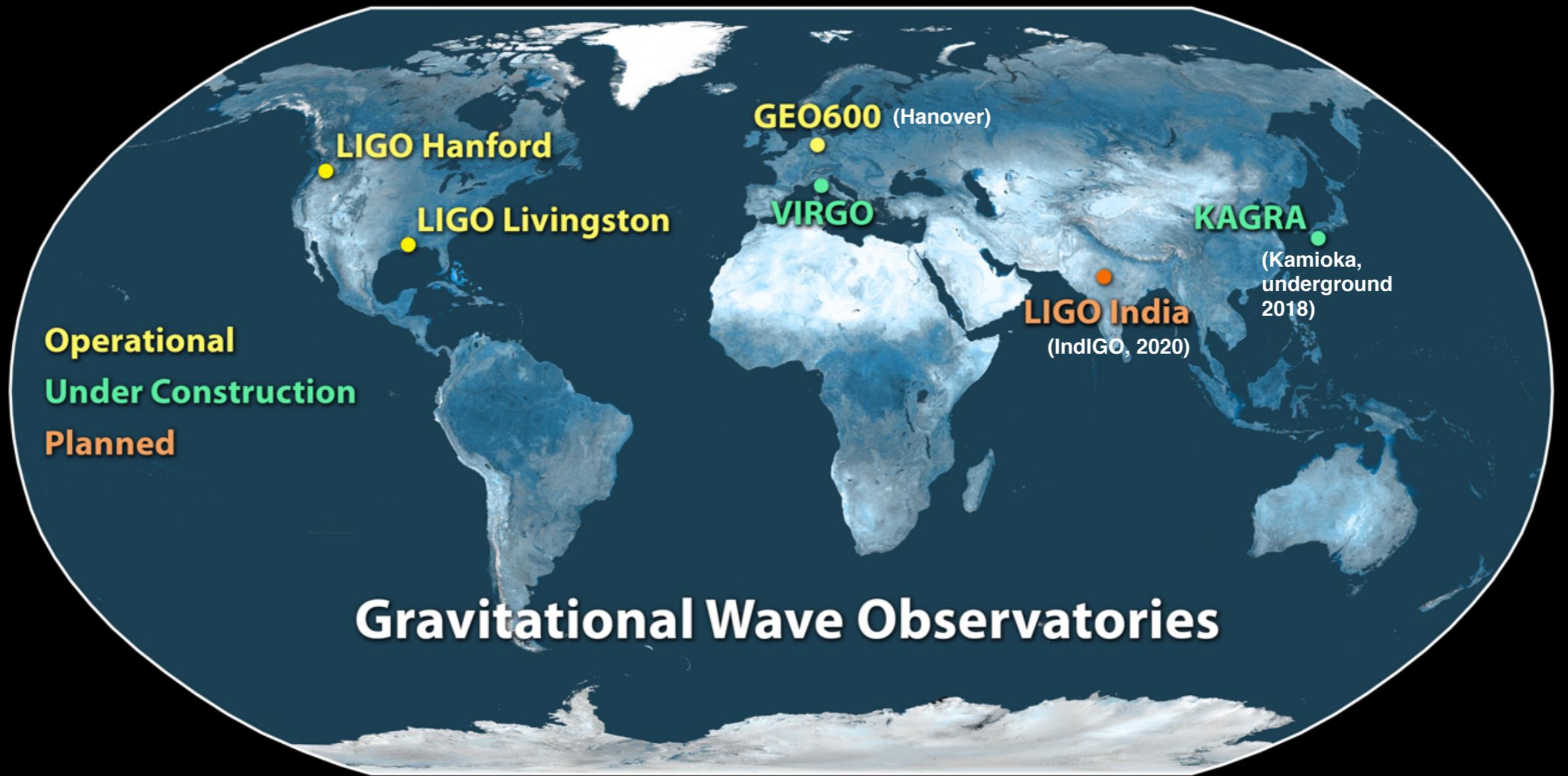


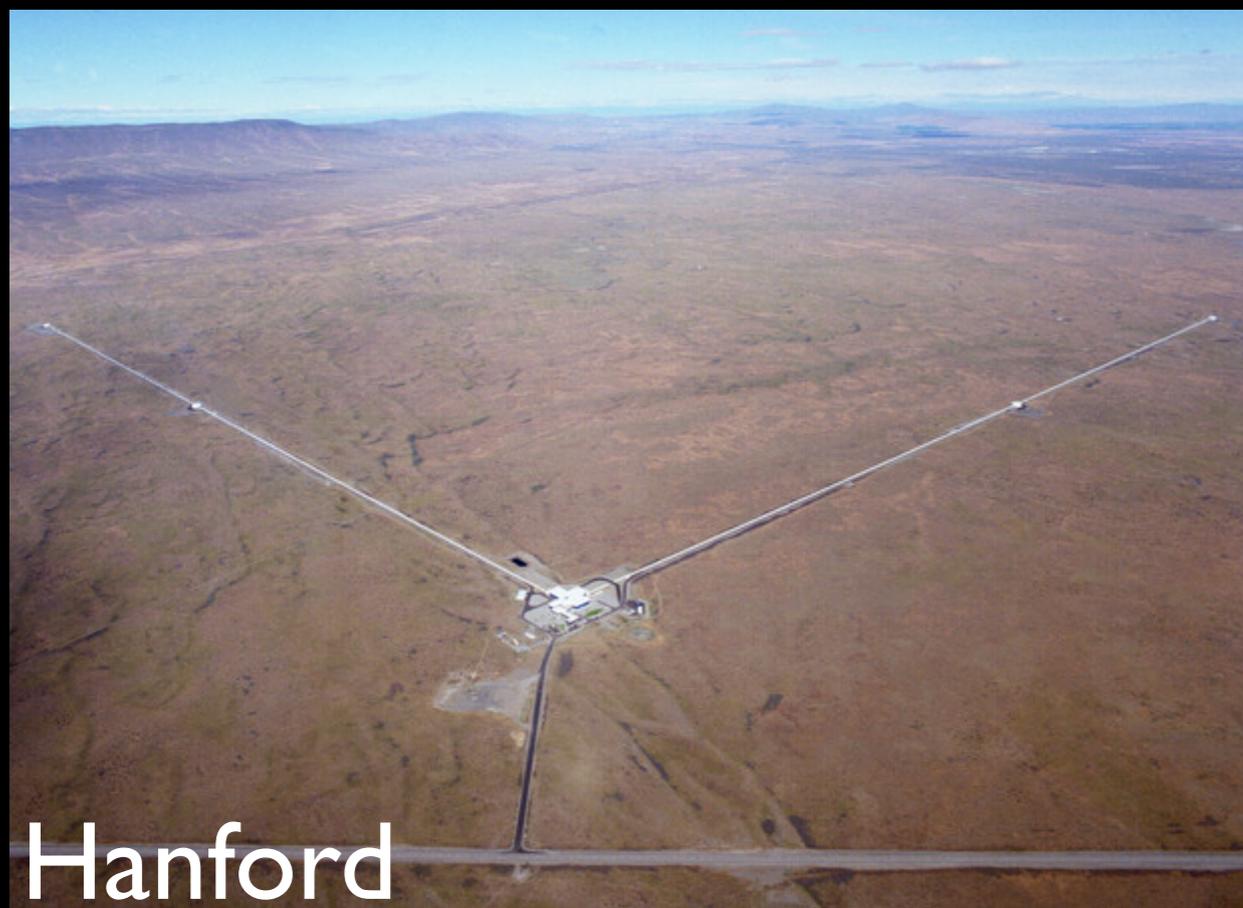
Gli specchi, diametro 35 cm e 40 kg,
sono lavorati con precisione atomica
ultrariflettenti 0,9999 %
sospesi a fili dello stesso vetro
L'ultra vuoto limita gli urti molecolari



attenuatori sismici di Virgo

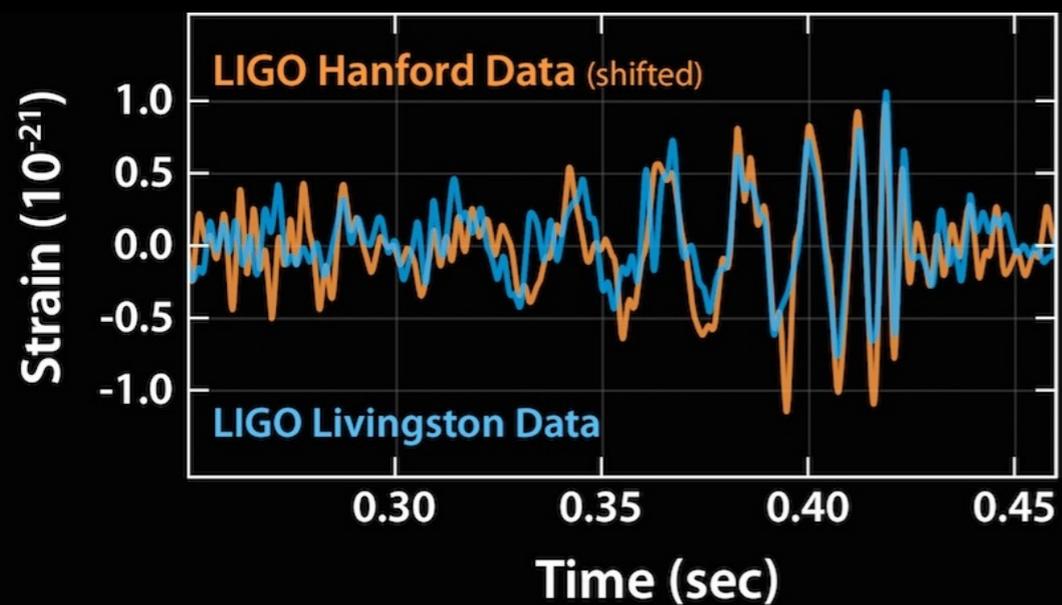






Hanford

Laser
Interferometer
Gravitational Wave
Observatory
MIT & Caltech



Livingstone



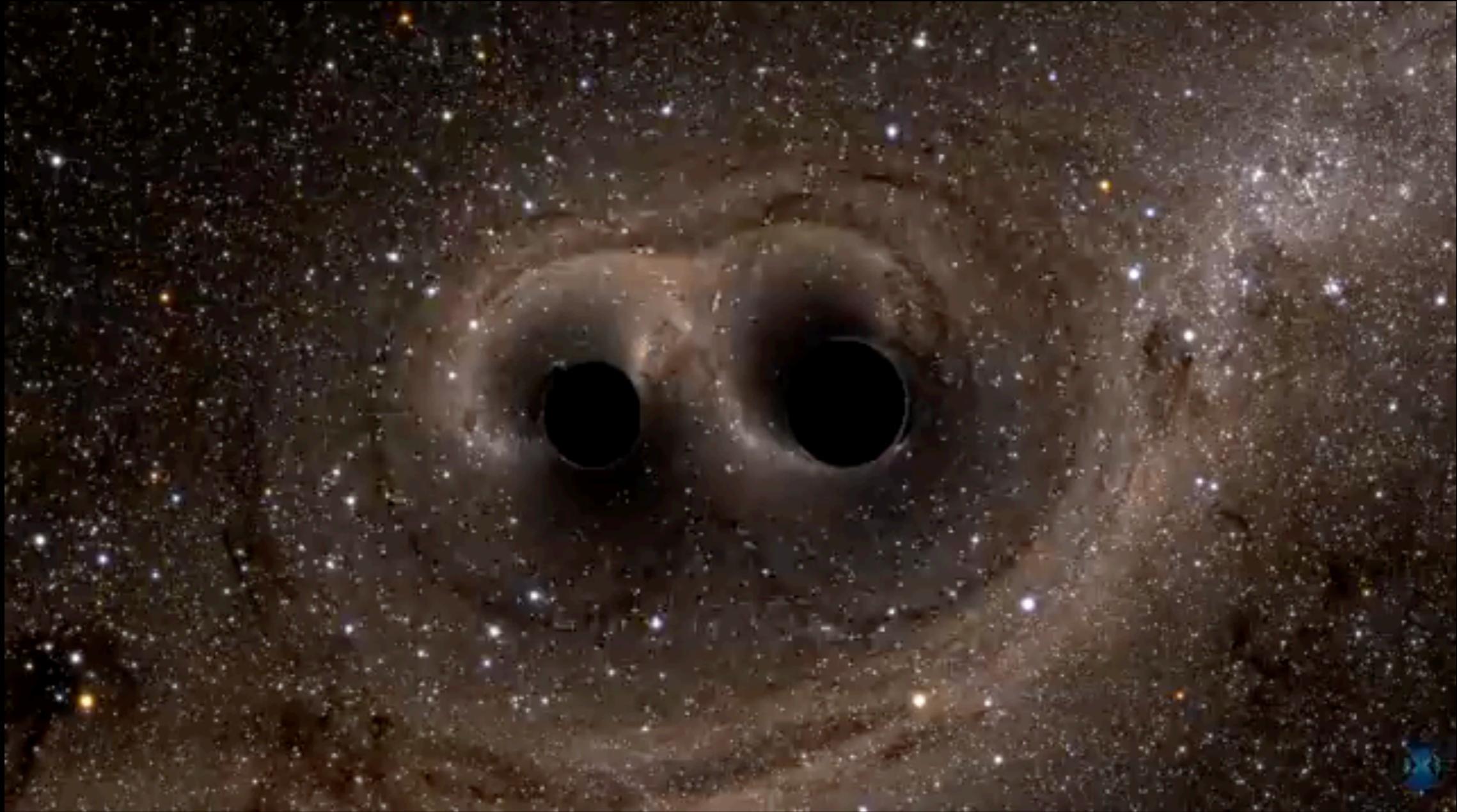
Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

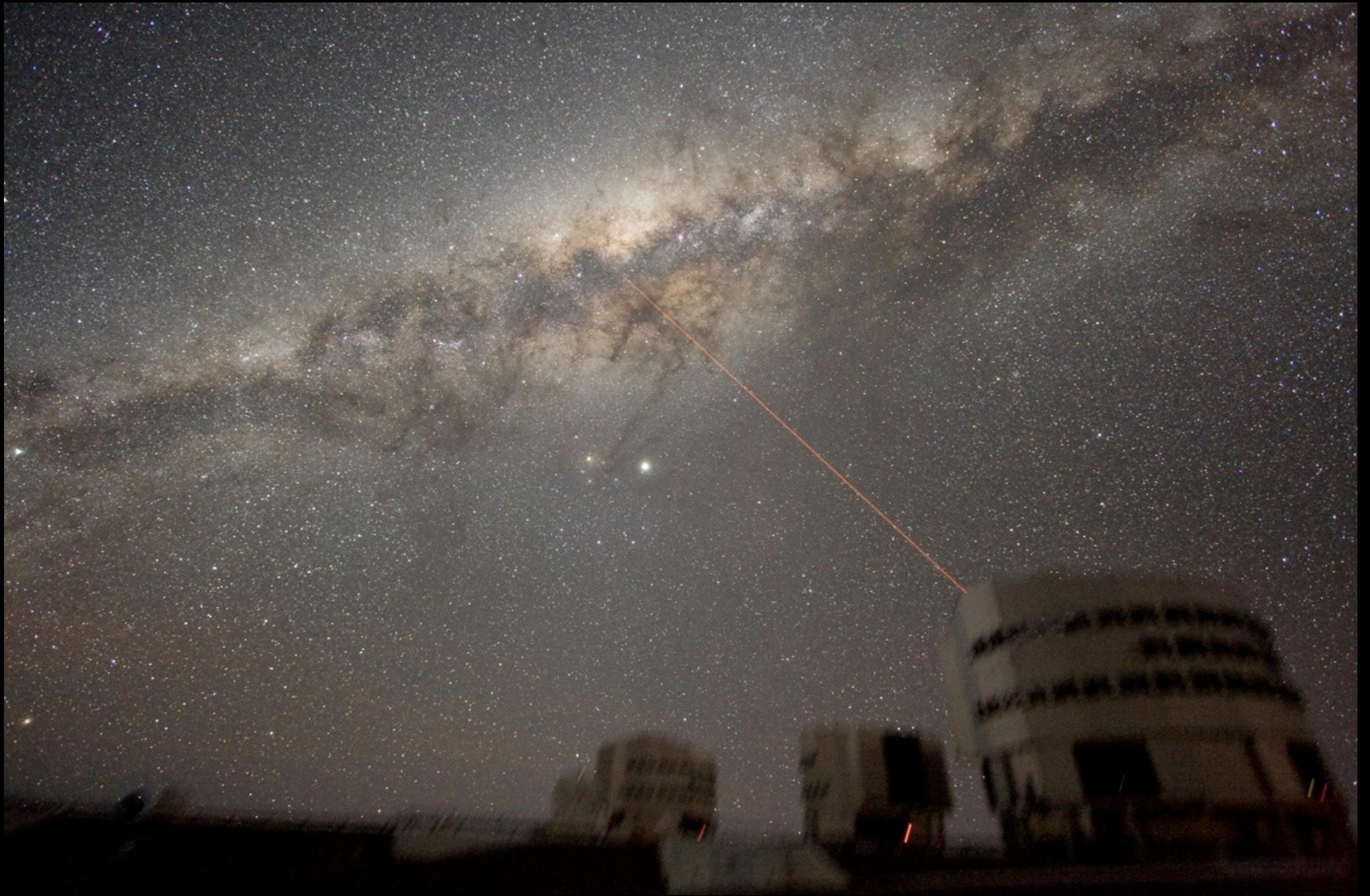
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 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. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

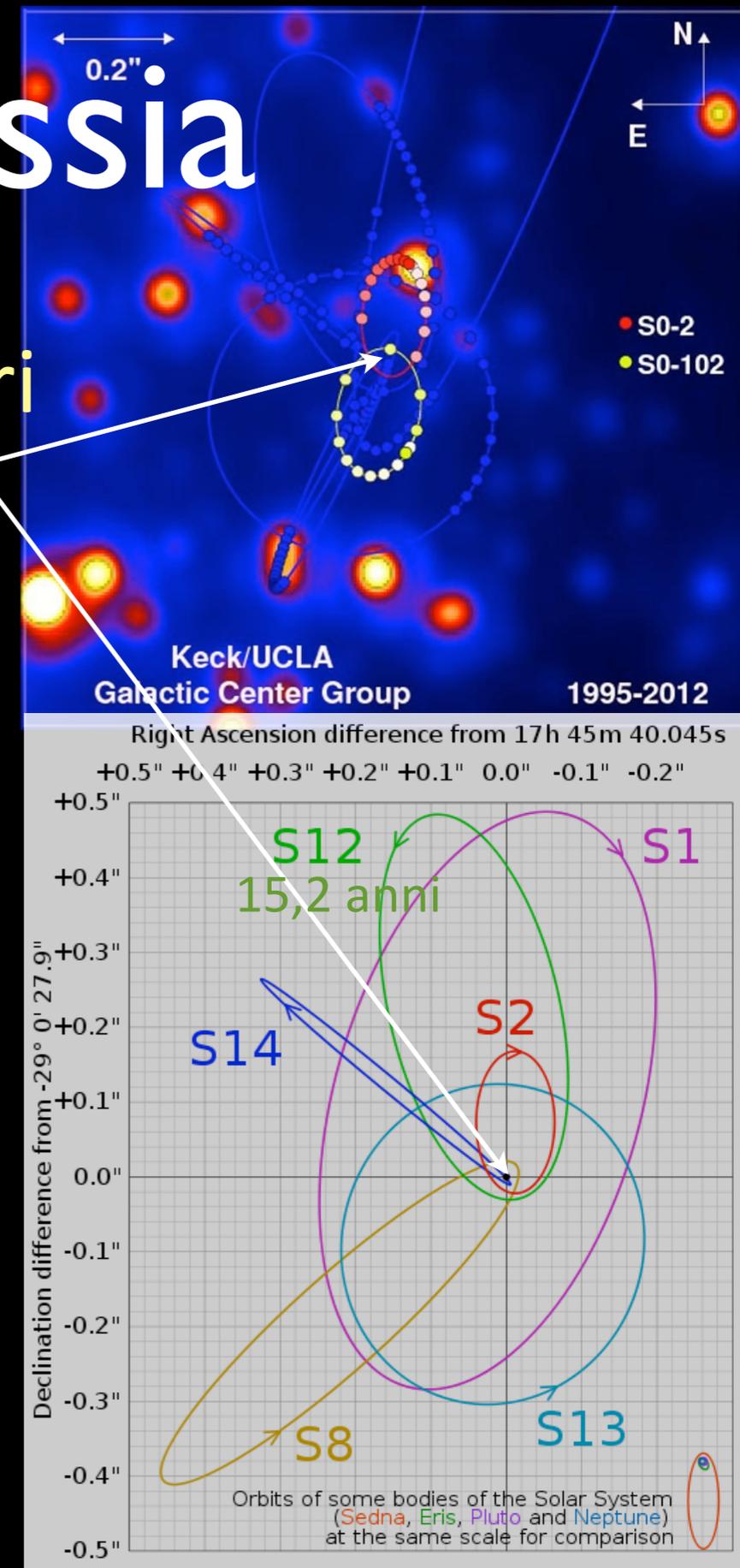


VIDEO BH MERGING



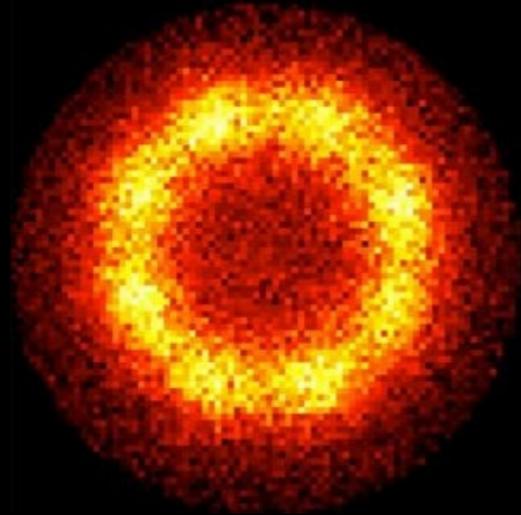
Il buco nero della galassia

~3 milioni di masse solari
nel raggio di 4 sec luce

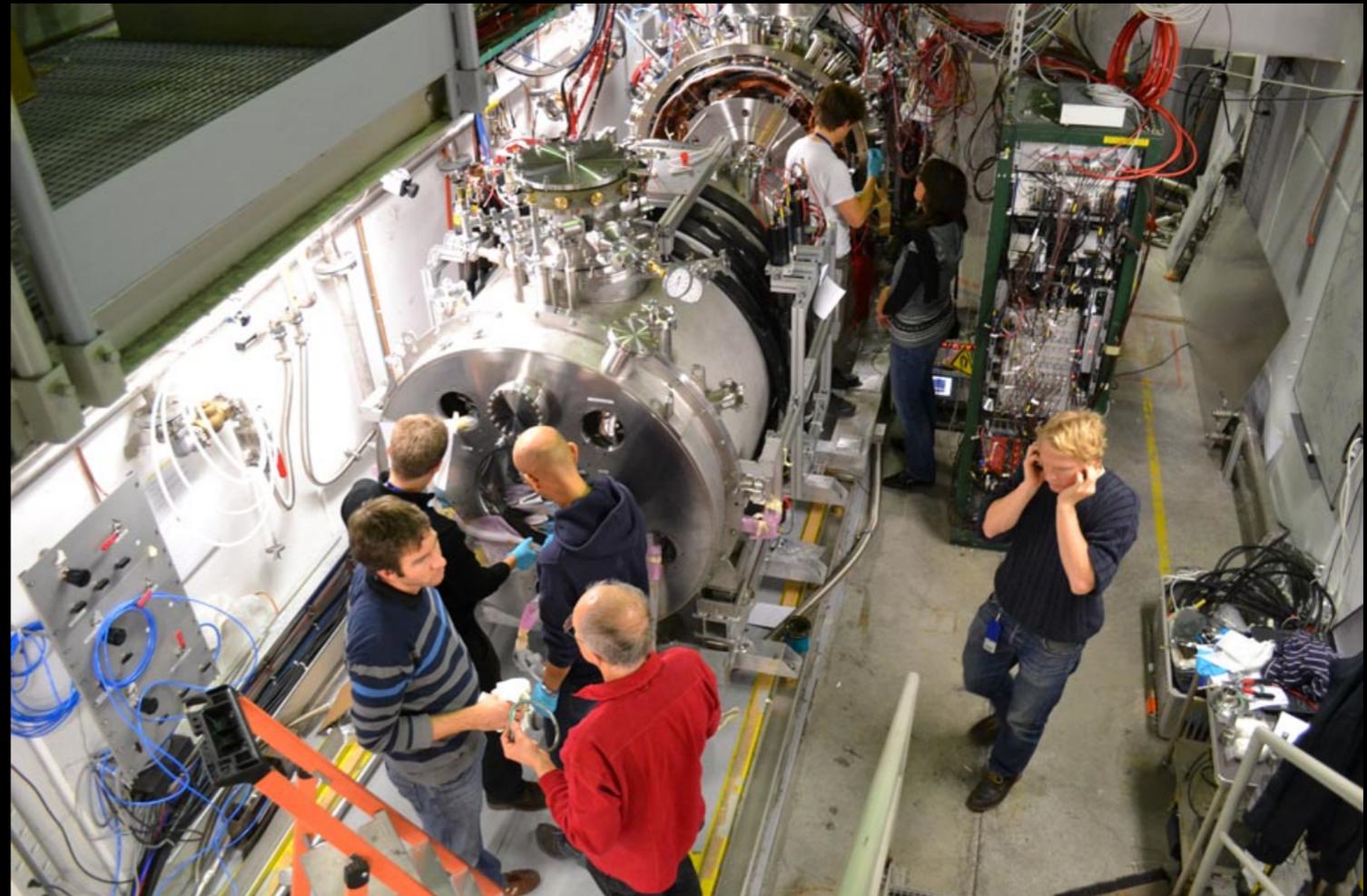


Come agisce la gravita` sull'antimateria ?

Antimatter Experiment: **g**avity, **I**nterferometry, **S**pectroscopy
(AEgIS, presso il deceleratore di antiprotoni al CERN)



ANTI-IDROGENO, 2016
exp alpha, CERN



AEgIS verifica se la gravita` agisce sull'antimateria nello stesso modo della materia, attraverso lo studio di fasci di ANTI-IDROGENO

Inviando un fascio di anti-H su una serie di reticoli di diffrazione, la frange luminose dovrebbero consentire la misura precisa della posizione del fascio entro un errore dell'1%. L'esperimento fu proposto nel 2007.

La missione MICROSCOPE è dedicata al test del principio d'equivalenza. consiste nel solo strumento T-SAGE (Twin Space Accelerometre for Space Gravity Experiment).



La sfida è migliorare di un fattore 100 la precisione di esperimenti terrestri.

Due accelerometri elettrostatici differiscono solo per la composizione metallica della massa interna: Titanio oppure Platino-Rhodio. Un accelerometro elettrostatico consiste nel sospendere mediante forze elettrostatiche una massa di prova. Questa è attorniata da un sistema di elettrodi che compongono condensatori sensibili agli spostamenti

<https://microscope.onera.fr/instrument>



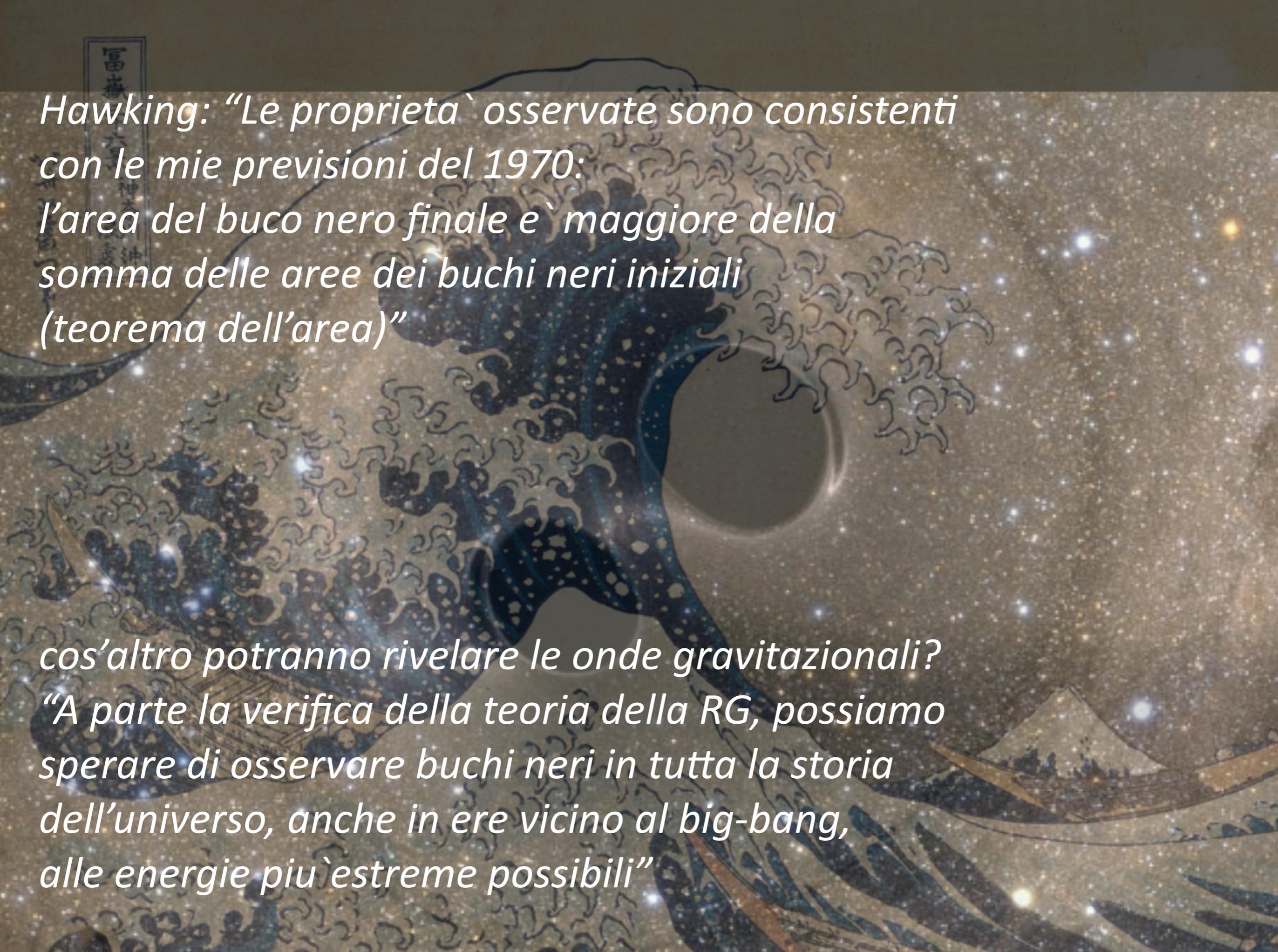
miniGrail

antenna gravitazionale sferica
di 68 cm in rame e Al (1400 kg)
raffreddata a 20mK. Sensibile a
emissione da stelle di neutroni,
piccoli buchi neri
(2 rivelatori: Olanda e Brasile)



LISA

(programma ESA Horizon 2000, lancio 2034)
interferometro laser con bracci 5M km
sensibile a spostamenti 10^{-9} cm
stelle binarie, BN super massicci
(galassie), fusione di BN superm.



Hawking: "Le proprietà osservate sono consistenti con le mie previsioni del 1970: l'area del buco nero finale è maggiore della somma delle aree dei buchi neri iniziali (teorema dell'area)"

*cos'altro potranno rivelare le onde gravitazionali?
"A parte la verifica della teoria della RG, possiamo sperare di osservare buchi neri in tutta la storia dell'universo, anche in ere vicino al big-bang, alle energie più estreme possibili"*

GRAZIE PER
L'ATTENZIONE

Lorenzo Quinn
le forze della natura

