

La Gravità come Teoria Fondamentale

Marco G. Giammarchi

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

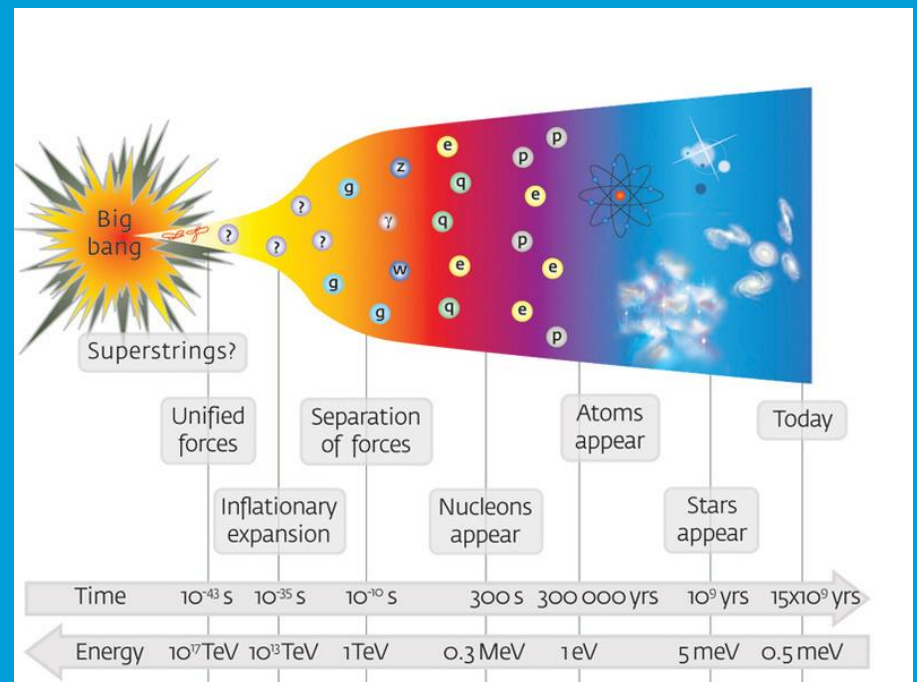
Via Celoria 16 – 20133 Milano (Italy)

marco.giammarchi@mi.infn.it

<http://pcgiammarchi.mi.infn.it/giammarchi/>



- Costituenti della Materia
- Le Interazioni Fondamentali
- La Gravità di Newton
- La Gravità di Einstein: la Teoria della Relatività Generale
- La Gravità nell'Universo
- Le Onde Gravitazionali



1. I Costituenti della Materia

Cosa abbiamo imparato (a scuola) ?

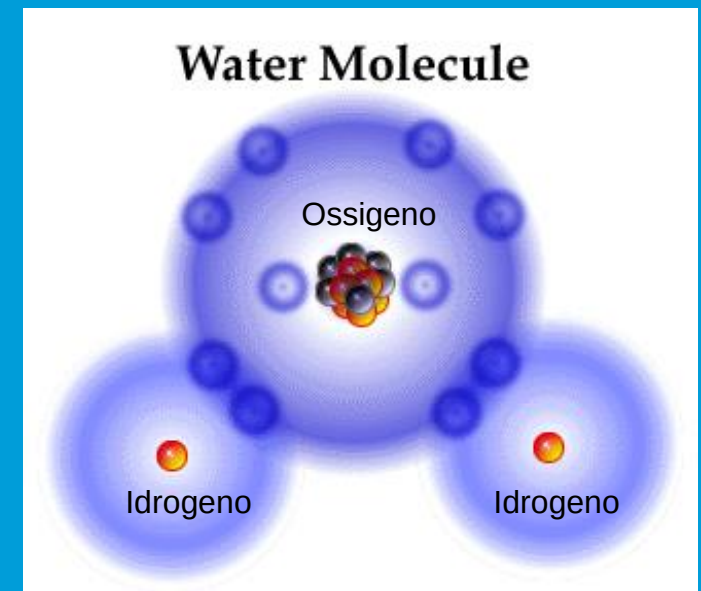
Materia: composta da costituenti fondamentali:
Molecole, Atomi, Nuclei

Molecole: costituenti della materia

Ipotizzate per comprendere la Chimica

Leggi di Dalton e di Avogadro (1803-1811)

Dimostrazione sperimentale finale: lo studio dei
moti molecolari (moto browniano e lavori di
Perrin, 1911)

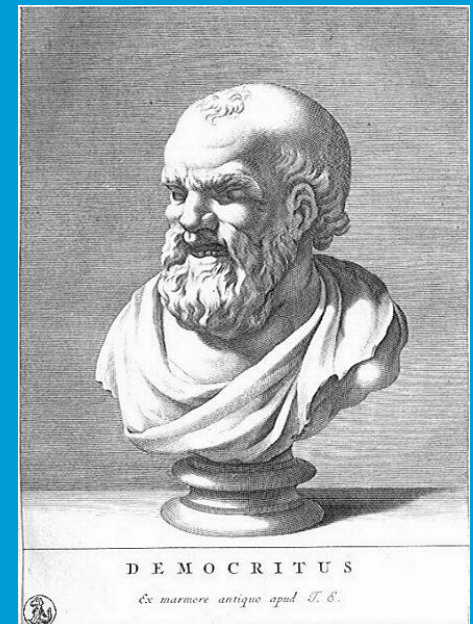
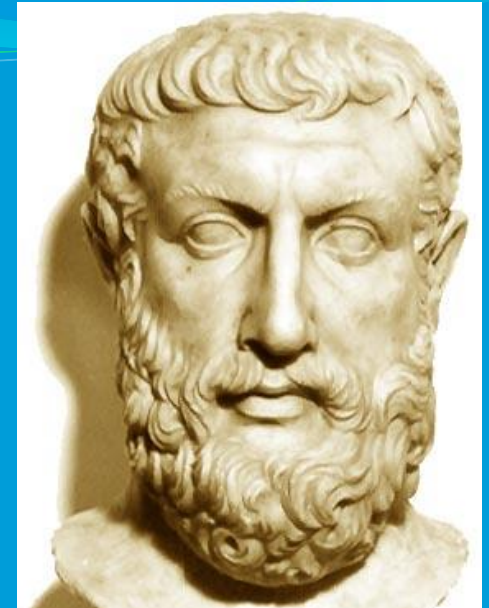


10^{-10} m

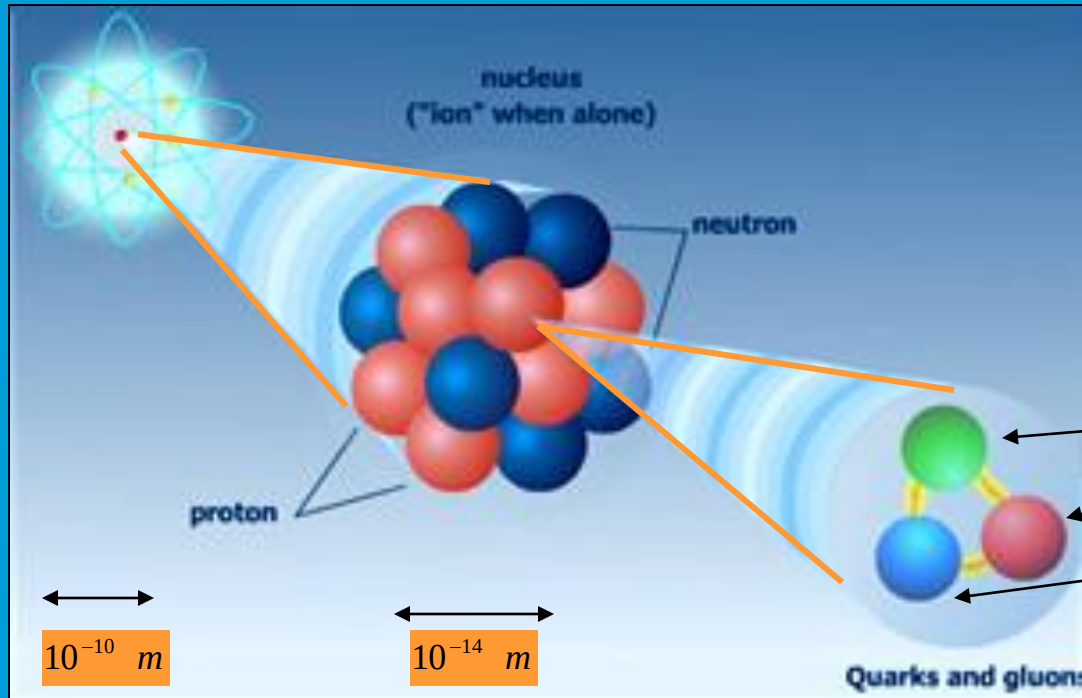
Sul significato dell'Atomismo

Parmenides (circa 500 AC), Zenon (circa 490 – 430 AC): l'esperienza della molteplicità è **negabile**.
La materia è divisibile e suddivisa all'infinito. La divisione infinita della estensione fornisce come risultato zero, il niente, e quindi la molteplicità in cui consiste l'estensione corporea non esiste, è opinione illusoria.

Demokritos (circa 460 – 370 AC): l'esperienza della molteplicità è **innegabile**.
La materia è suddivisa ma non all'infinito.
A-tomos, indivisibile. Venne introdotto per fermare il processo di “riduzione al nulla” dell'estensione spaziale (Parmenide, Zenone).
L'atomo è il punto in cui tale processo si ferma.
Il senso in cui tutto ciò era inteso è diverso dal senso moderno di scienza.



A loro volta i protoni e i neutroni sono composti da:



I quark (costituenti un protone o un neutrone) sono particelle elementari

quark

quark

quark

PROTONE

Le particelle “elementari” sono quelle che costituiscono tutte le altre e che non hanno una loro struttura interna.

Sono i mattoni costruttivi dell’Universo.



Costituenti fondamentali della materia: Quark e Leptoni

Sono elementari al meglio di 10^{-18} m

Hanno spin e carica ben definiti

Materia ordinaria

Costituiscono la
materia in
condizioni ordinarie

Costituiscono le
particelle instabili

Decadono in particelle stabili

	LEPTONS		QUARKS	
FIRST FAMILY "Ordinary" matter, least massive	 e^{-} electron	 ν_e electron neutrino	 u up	 d down
SECOND FAMILY Similar properties, more massive	 μ^{-} muon	 ν_{μ} muon neutrino	 c charm	 s strange
THIRD FAMILY Rarest particles, most massive	 τ^{-} tau	 ν_{τ} tau neutrino	 t top	 b bottom

M
a
s
s
a

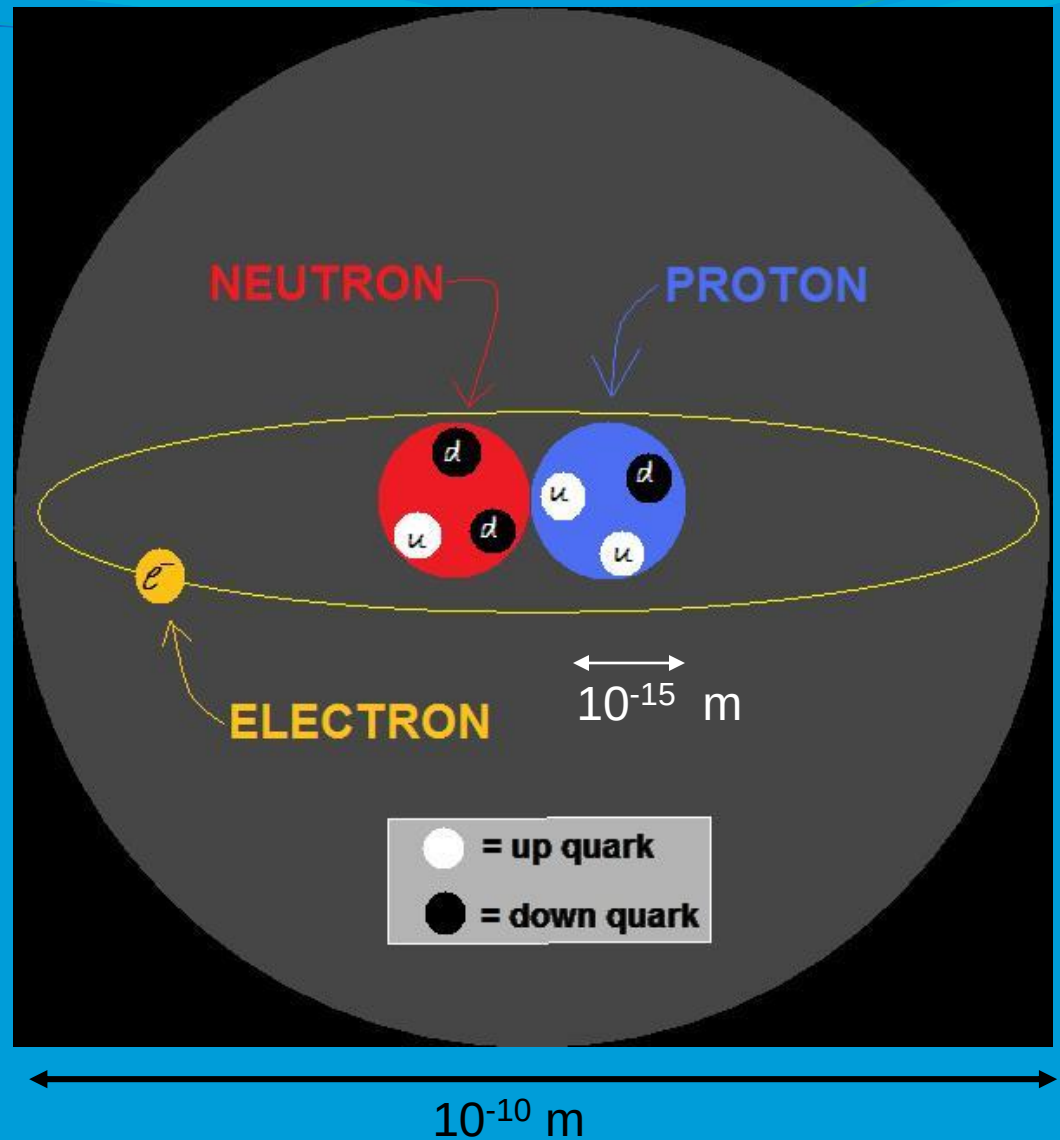
Un esempio semplice:
l'atomo di deuterio

$$p = (u, u, d)$$

$$n = (u, d, d)$$

Quark:

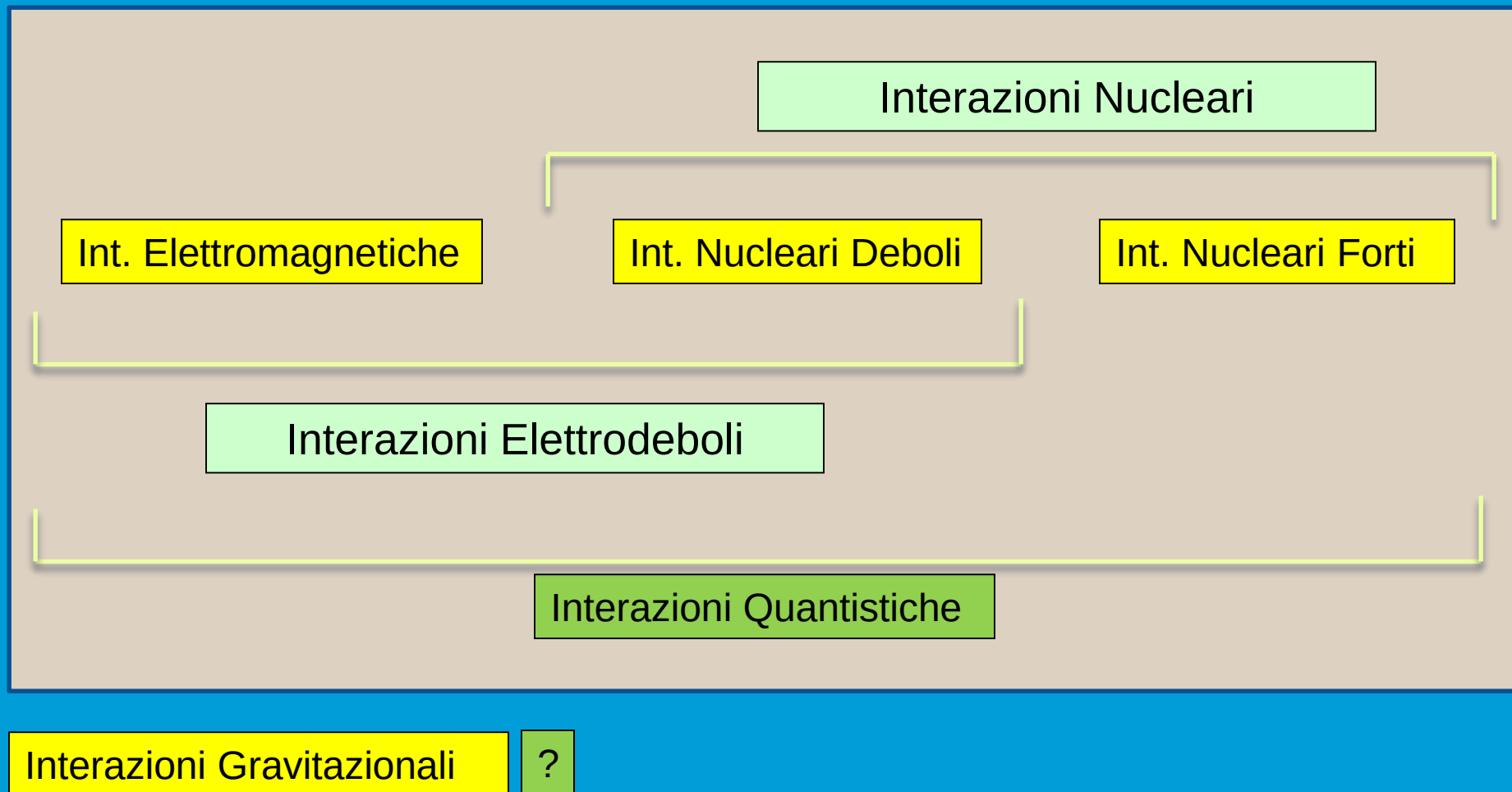
Cariche frazionarie
Spin semi-intero



Quark, elettroni e fotoni sono i Costituenti Fondamentali dell'Atomo

2. Le Interazioni Fondamentali

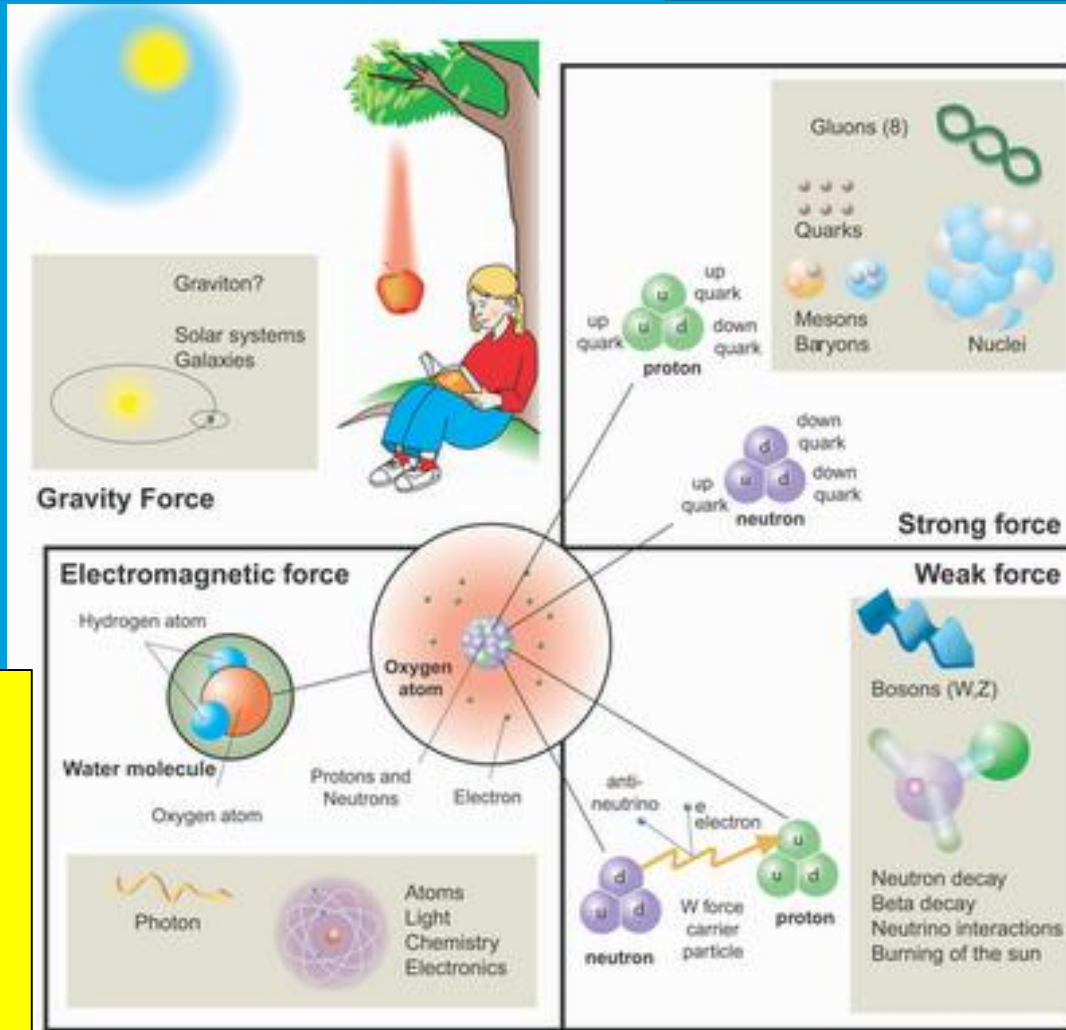
Le Forze Fondamentali regolano il modo in cui interagiscono i Costituenti



Interazione Gravitazionale: note da sempre. Teoria classica (A. Einstein) nel 1915. Responsabili della stabilità della materia su scala macroscopica.

Interazione Nucleare Forte: responsabile delle forze al livello nucleare e della stabilità nucleare. E' a corto raggio di azione: 10^{-15} m.

Interazione Elettromagnetica: Teoria classica (Faraday, Maxwell) nel 1861. Riguarda le interazioni tra particelle cariche (stabilità atomica).



Interazione Nucleare Debole: responsabile di alcuni importanti processi nucleari (fusione debole, radioattività debole). A raggio molto corto (subnucleare).

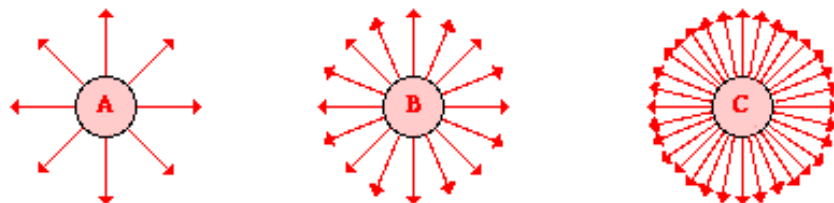
Nelle teorie quantistiche moderne il concetto di forza non è più quello classico. L'interazione è rappresentata dallo scambio di quanti

In Fisica Classica :

- Azione istantanea a distanza
- Campo (Faraday, Maxwell)

$$F = \frac{k}{r^2}$$

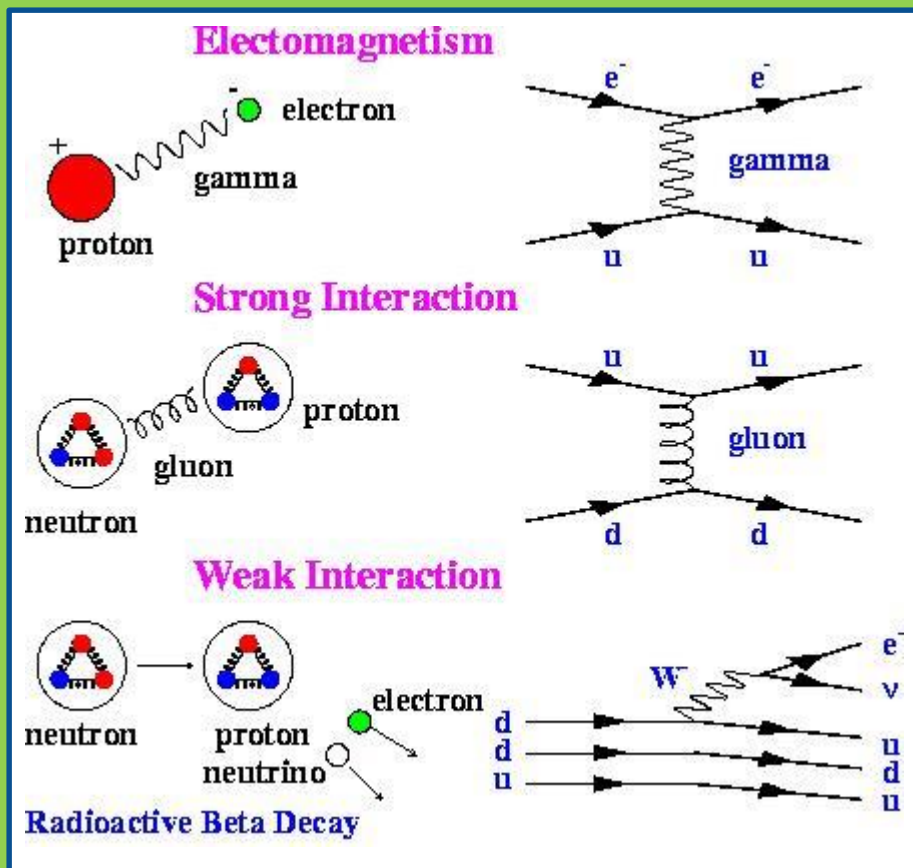
Density of Lines in Patterns



The density of electric field lines around these three objects reveals that the quantity of charge on C is greater than that on B which is greater than that on A.

In Fisica Quantistica :

- Scambio di Quanti



Come si studiano le particelle elementari e le teorie quantistiche? Ad esempio in esperimenti con acceleratori di particelle.



Ricetta:

- prendere particelle cariche
- accelerarle con sistemi elettrici e magnetici (acceleratori)
- farle urtare tra loro

Tunnel di LHC, CERN (Ginevra)

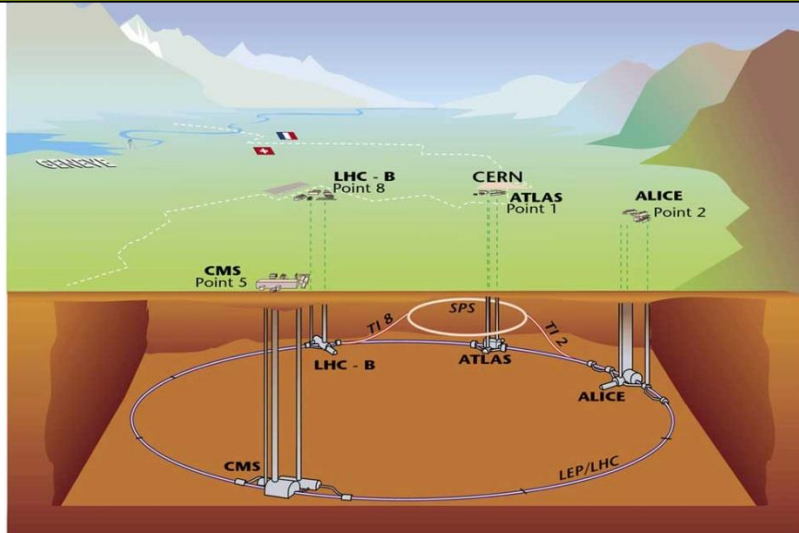
Nei grandi laboratori sistemi complessi di acceleratori portano particelle a energie elevatissime

Negli urti tra queste particelle, altre particelle vengono prodotte. Massa si trasforma in energia e viceversa



Esperimenti su particelle ai grandi acceleratori:

Sistemi complessi composti da rivelatori specializzati



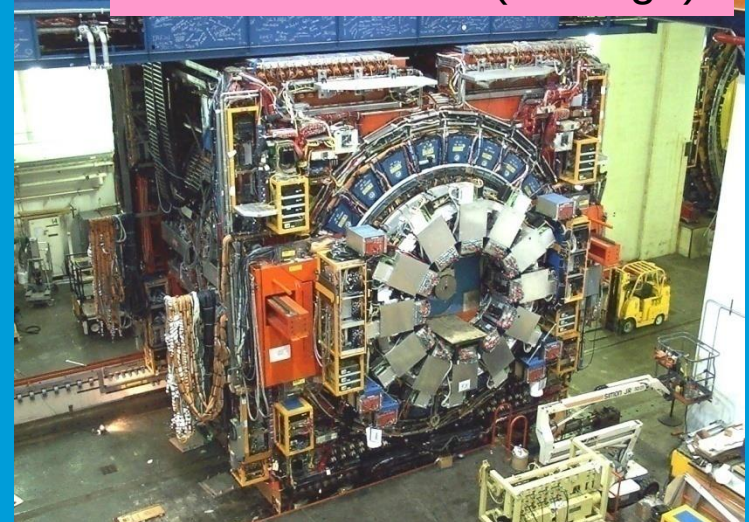
CMS al CERN di Ginevra



ATLAS al CERN di Ginevra



CDF al Fermilab (Chicago)



La Gravità è un caso a parte (almeno per ora) :

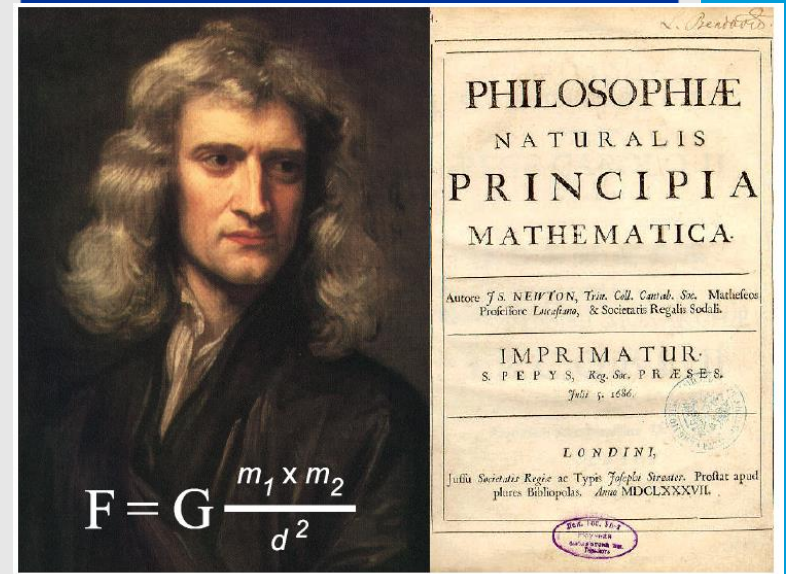
- La Gravità è assai meno intensa delle altre forze su scala microscopica
- La Gravità si comporta allo stesso modo per tutti i corpi
- Della Gravità al momento non abbiamo alcuna teoria quantistica
- La Gravità è la forza decisiva in azione nell'Universo (le forze nucleari sono limitate all'interno del nucleo e la forza elettromagnetica è dovuta a due tipi di cariche che – su distanze macroscopiche – si compensano, annullandosi a vicenda).



3. La Gravità di Newton

La Gravitazione Universale

- **Risolve gran parte dei fenomeni osservati a Terra e nel Cielo**
 - » **L'orbita dei pianeti e delle comete**
 - » **La cause delle maree**
 - » **Il moto della Luna e la perturbazione dovuta alla Gravita' del Sole**
- **Giunge ad una visione unitaria del lavoro di Galileo Copernico e Keplero.**



$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{d^2}$$

Una forza «diversa»

La Relatività Generale è una teoria della Gravitazione che rispetta il principio di equivalenza (Albert Einstein, 1905).

Campo E

(in un campo elettrico)

$$F = q E$$

$$F = m a$$

$$q E = m a$$

$$a = \frac{q E}{m}$$

Il moto dipende da come è fatta la particella

Campo G

(in un campo g)

$$F = m g$$

$$F = m a$$

$$m g = m a$$

$$a = g$$

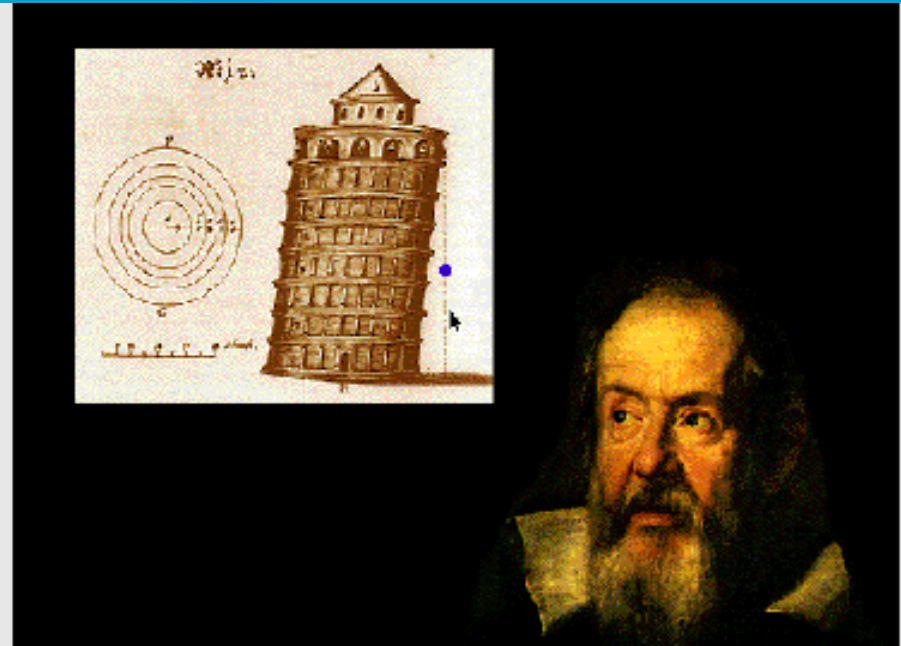
Il moto NON dipende da come è fatta la particella

Immaginiamo una particella m, q che si muova in un campo elettrico o uno gravitazionale

Ma se la gravitazione non dipende da nessuna caratteristica del corpo allora essa è una proprietà dello spaziotempo.

Teoria geometrica della gravità.
Curvatura dello spaziotempo

Inerzia e Gravitazione: il principio di Equivalenza



▪ ***Massa Inerziale***

*

Accelerazione

=

Massa Gravitazionale * **Campo d'attrazione
Gravitazionale**

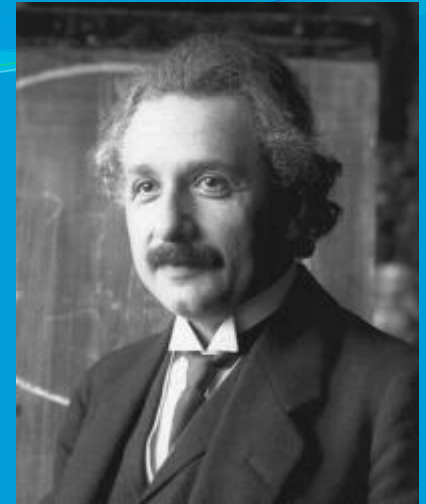
- ***L'eguaglianza tra Massa Inerziale e Massa Gravitazionale fa sì che tutti i corpi cadano con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro natura***

4. La Gravità di Einstein

La Relatività Generale è una teoria geometrica della Gravità proposta da Albert Einstein nel 1915

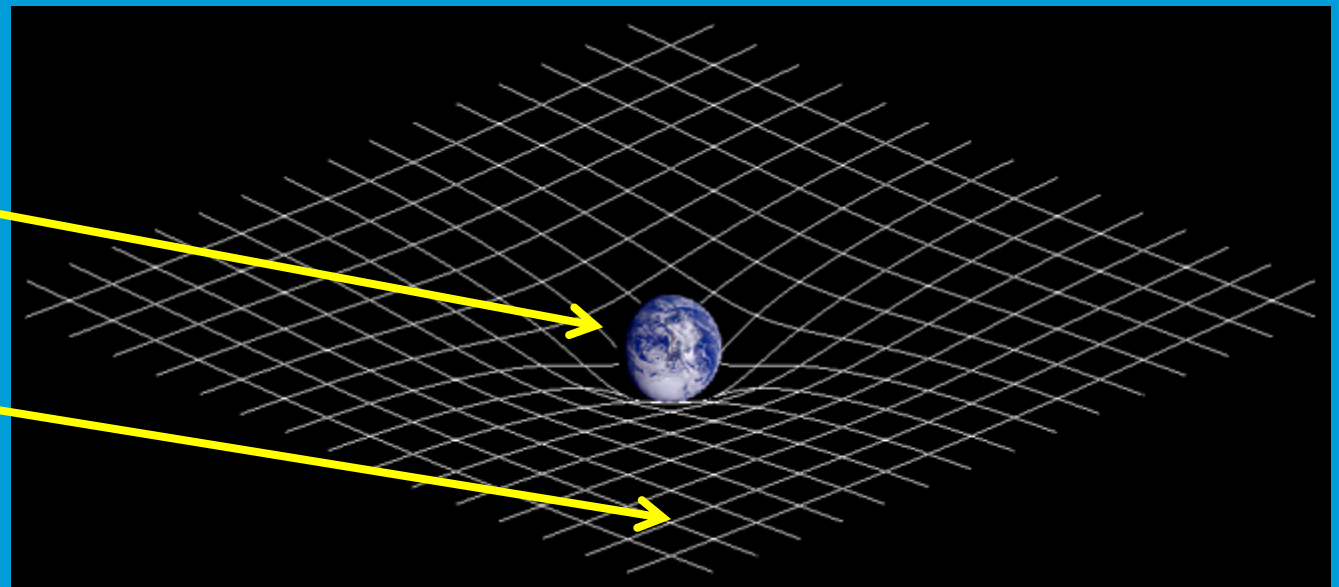
La Relatività Generale comprende la Relatività Speciale e la Teoria Newtoniana della Gravitazione.

La gravità è descritta come una proprietà geometrica dello spaziotempo.



Massa
Energia

Rappresentazione
dello spaziotempo



La curvatura dello spaziotempo è correlata a energia/momento di materia e radiazione
Questa correlazione è data dalle Equazioni di Einstein

Tensore di Einstein

Costante cosmologica

Tensore Energia-Momento

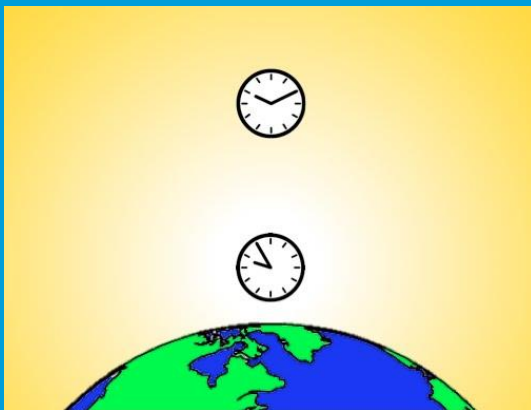
Tensore metrico

$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = G_{\mu\nu}(\partial_\theta \partial_\varepsilon g_{\alpha\beta})$$

La massa (l'energia-momento) curva lo spaziotempo.
Tempo e Spazio non più determinati in modo indipendente dall'energia/momento

1) Lo scorrere del tempo dipende dalla presenza o meno di campi gravitazionali. Il tempo non è unico.



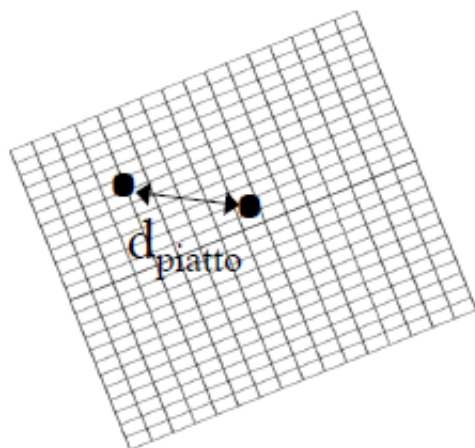
Gravità diverse

Tempi diversi

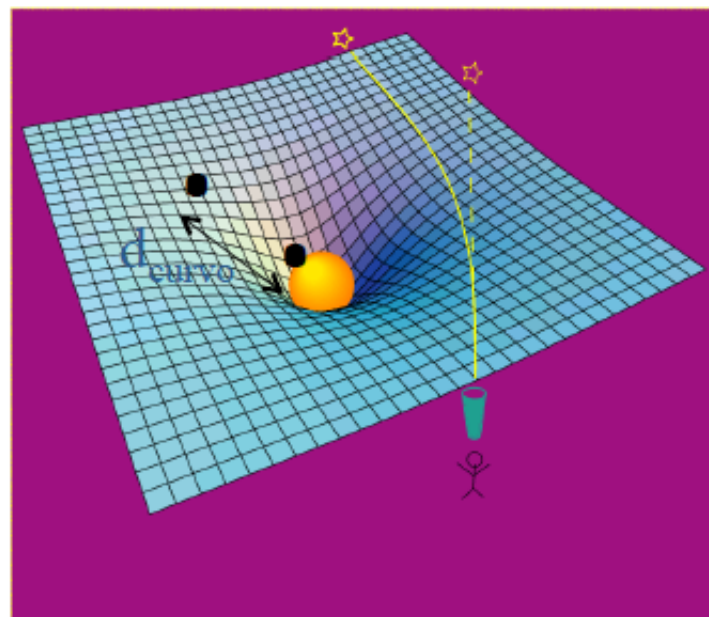


2) La struttura dello spazio dipende dalla presenza di campi gravitazionali.

Cosa intendiamo dicendo che le masse (e l'energia) curvano lo spaziotempo



Distanza tra due punti nello spazio piatto



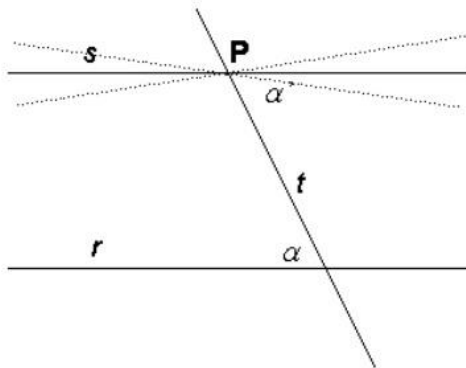
Spazio “curvato” dalla massa: la distanza tra i due punti varia

Quando le masse si muovono, esplodono, interagiscono, la distanza tra punti cambia nel tempo: le onde gravitazionali sono increspature nella curvatura dello spaziotempo prodotte dal moto di massa-energia, che si propagano nello spazio alla velocità della luce

Una geometria diversa

Enunciato

Data una retta r ed un punto P esterno ad essa, esiste una sola retta s parallela ad r e contenente P .



Sulla superficie della sfera i due «meridiani» che partono da A e B sono paralleli. Ma si incontrano al Polo!

La somma degli angoli interni del triangolo ABC supera 180 gradi!

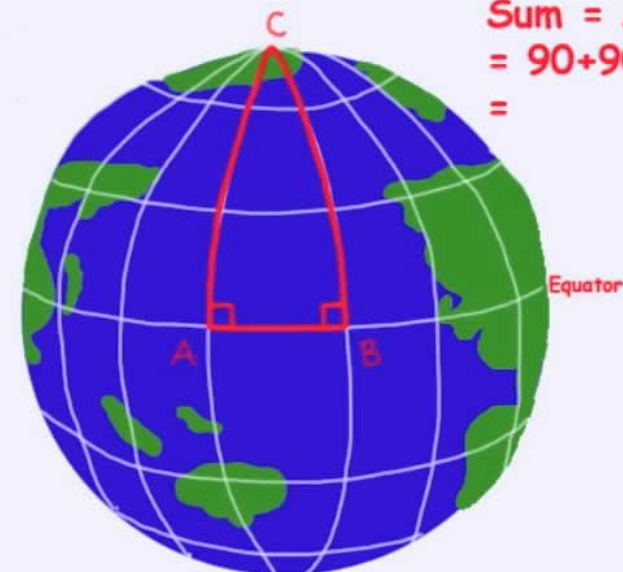
Per il quinto, detto postulato delle parallele, che in forma più semplice equivale a dire che: "Per un punto è possibile tracciare una sola retta parallela ad una retta data"

Lo stesso Euclide dubitò della validità di esso: infatti lo utilizzò nella dimostrazione del teorema della somma degli angoli interni di un triangolo ed evitò il più possibile di richiamarlo in altre dimostrazioni.

Per molto tempo i matematici furono convinti che il quinto postulato di Euclide non fosse indipendente dagli altri e fosse perciò dimostrabile come teorema: ci furono tanti tentativi di dimostrarlo e di sostituirlo con nuovi postulati ma tutte le sostituzioni si rivelarono equivalenti ad esso.

Ma alcuni matematici arrivarono persino alla negazione di tale postulato, dando vita alle GEOMETRIE NON EUCLIDEE.

What about on a sphere?



$$\begin{aligned} \text{Sum} &= A+B+C \\ &= 90+90+ ___ \\ &= \end{aligned}$$

Il concetto di interazione elementare

Newton

Azione a distanza (1680)

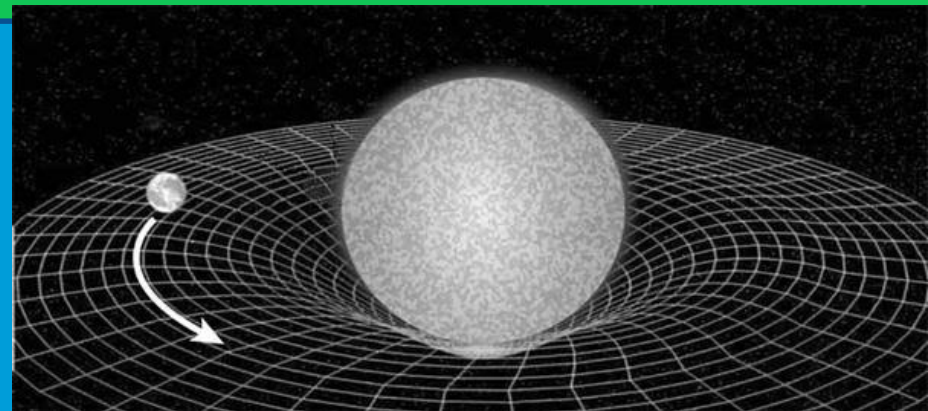
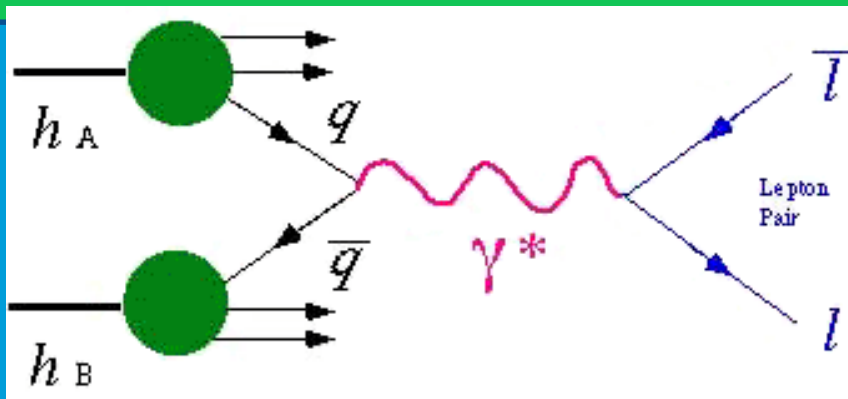
Faraday

Maxwell

Il Campo (1860)

Campi quantistici
(scambio di quanti)

Gravità
(curvatura dello spaziotempo)

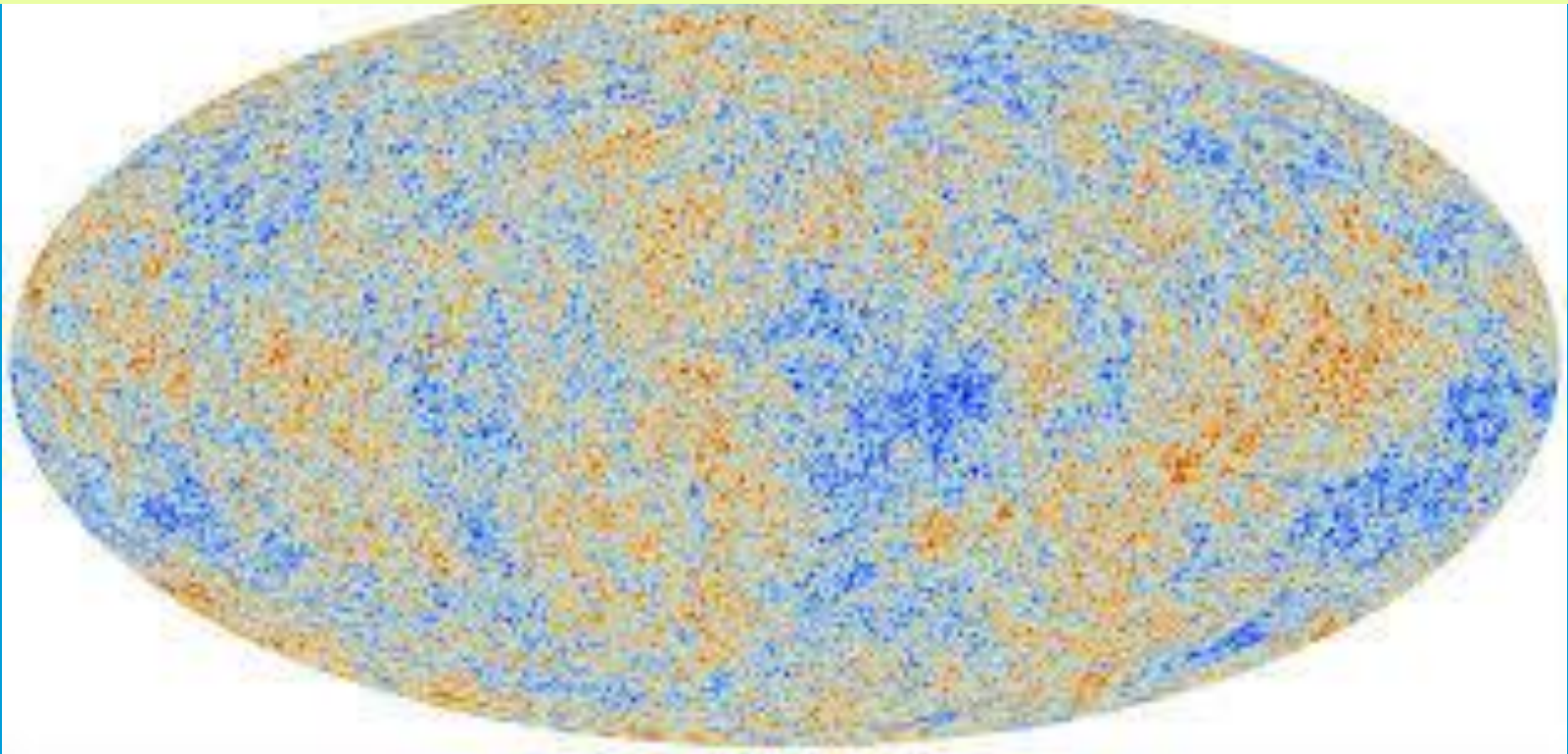


5. La Gravità nell'Universo

Il quadro teorico dell'evoluzione dell'Universo su grande scala è basato su:

- La Teoria delle Relatività Generale come Teoria della Gravitazione
- Il Modello del Big Bang caldo

(Ricostruzione della Radiazione Cosmica di Fondo a Microonde, Satellite Planck)



La radiazione cosmica di fondo è una delle prove del Modello del Big Bang

Nel Modello che descrive l'Universo e la sua espansione si usano le Equazioni di Einstein e si ipotizza che (a grande scala, 100 Mpc circa) l'Universo sia omogeneo e isotropo.

Si ottengono così le Equazioni di Friedmann per l'evoluzione dell'Universo

Le prove del Modello :

- Il red-shift di espansione
- La nucleosintesi primordiale
- La radiazione di fondo

• (L'inflazione)

Secondo tale visione l'Universo (omogeneo e isotropo alla scala > 100 Mpc) si è evoluto da uno stato nel passato di alta densità ed energia

The 'Big Bang': running the expansion backwards implies an infinite density in the past

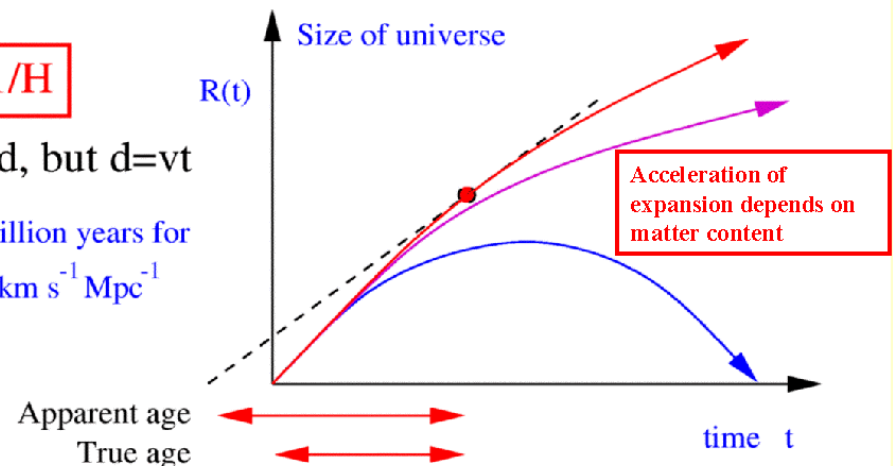


Age:

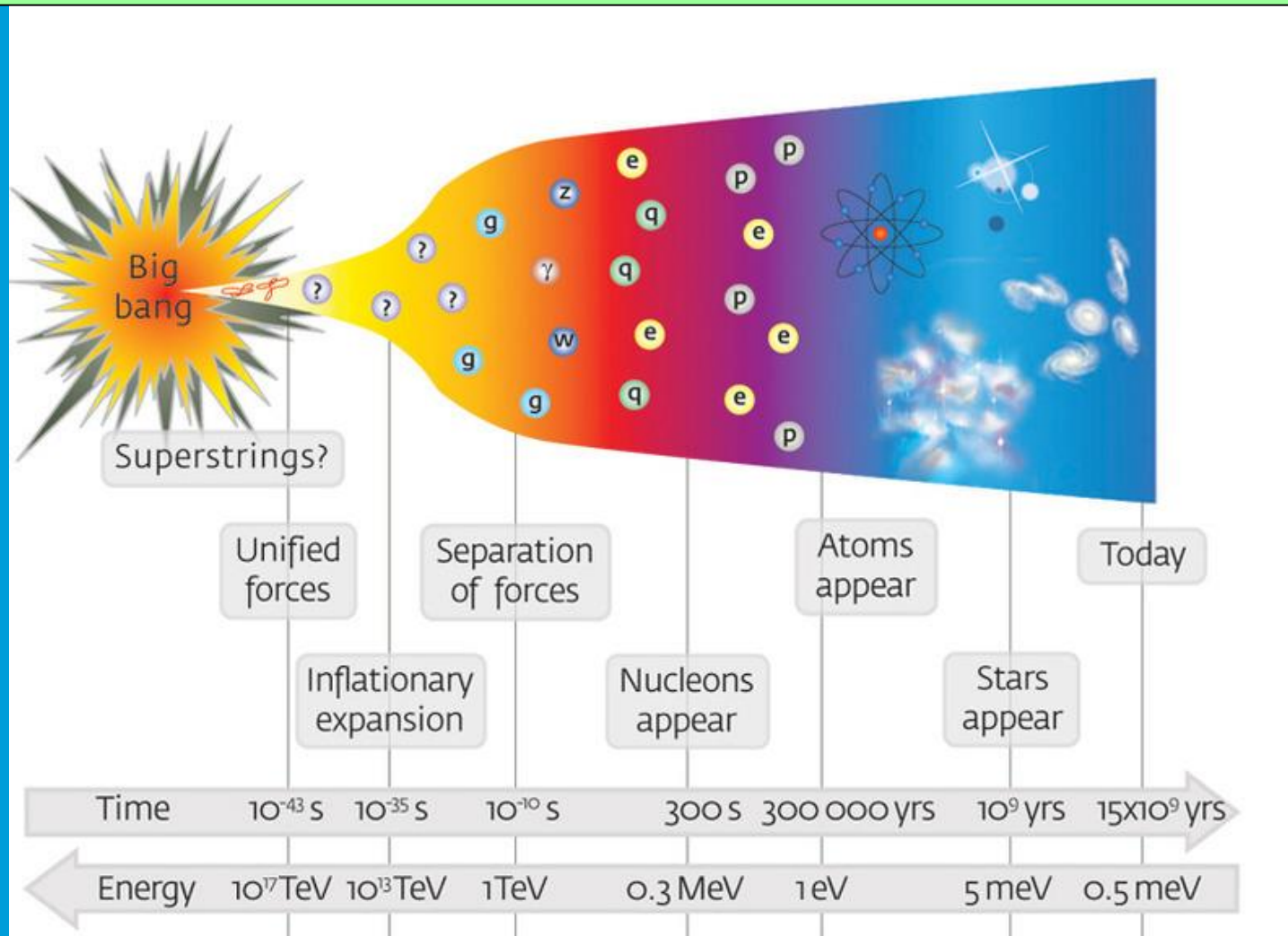
$$t = 1/H$$

$$v = Hd, \text{ but } d = vt$$

$$t = 14 \text{ billion years for } H = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$



Ed è grazie alla Gravitazione che possiamo ricostruire la storia dell'Universo



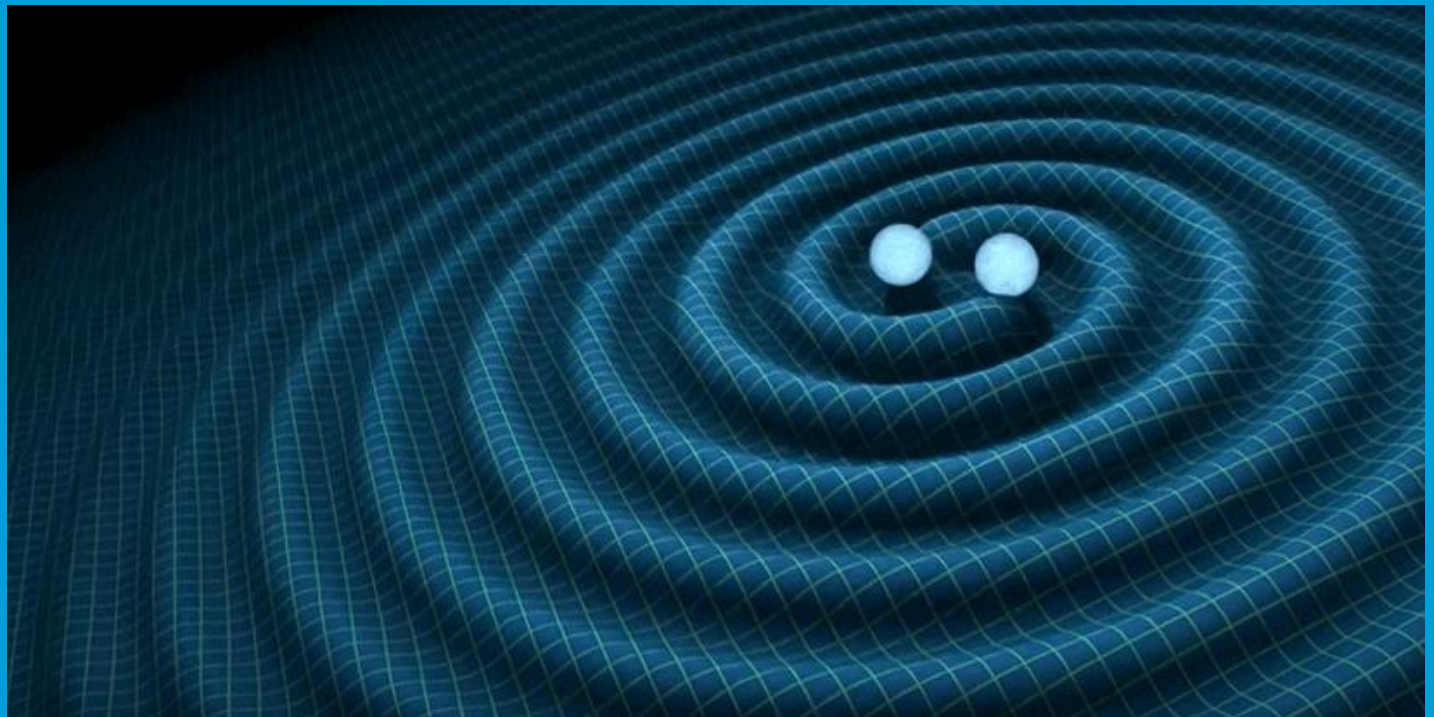
Una storia termica dell'universo

La teoria moderna della Gravità classica viene usata per descrivere tutto l'Universo. Dalle mele alle Galassie. Quali ne sono i limiti e i problemi aperti?

1. Non esiste una valida teoria quantistica della Gravità
2. La Gravità non è ancora stata verificata in certi regimi (campi molto forti)
3. Onde Gravitazionali: non rivelate direttamente fino al 2016

Onde Gravitazionali : perturbazioni dello spaziotempo dovute al movimento delle masse (energie). Si propagano alla velocità della luce.

Esempio:
due stelle di
neutroni che
orbitano
rapidamente
l'una intorno
all'altra

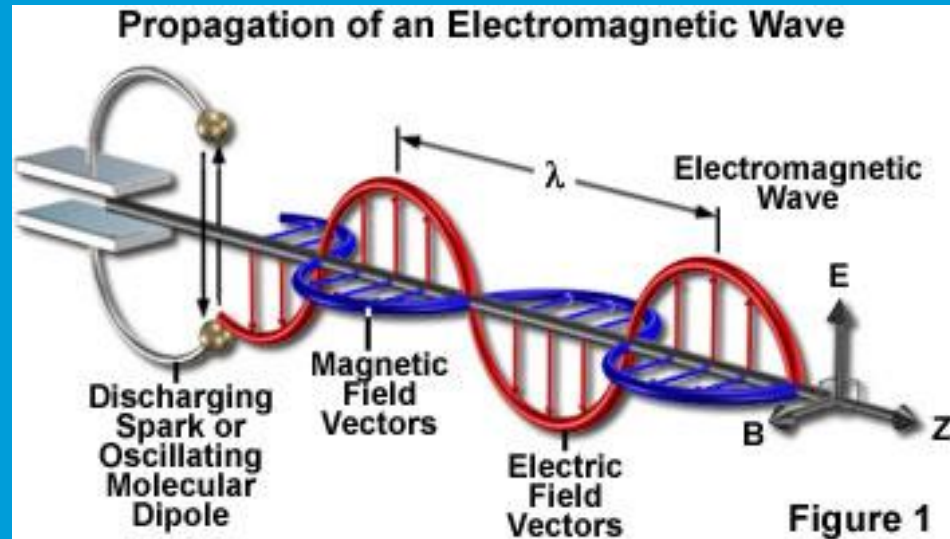


6. La Ricerca delle Onde Gravitazionali

Il Radiatore Elettromagnetico (dipolo oscillante)

Cariche in movimento emettono onde elettromagnetiche

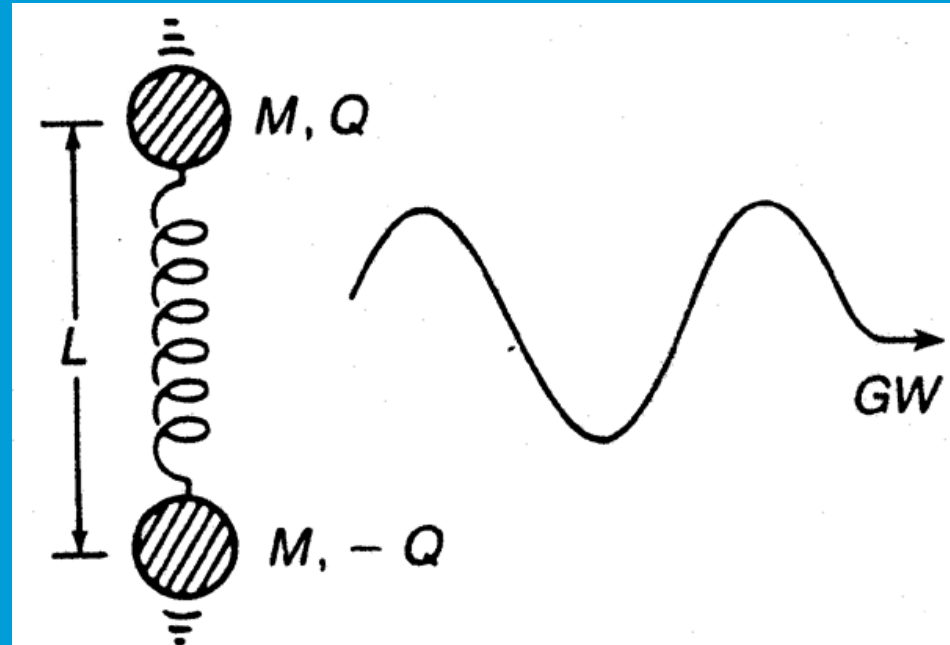
Scoperte da Hertz nel 1886



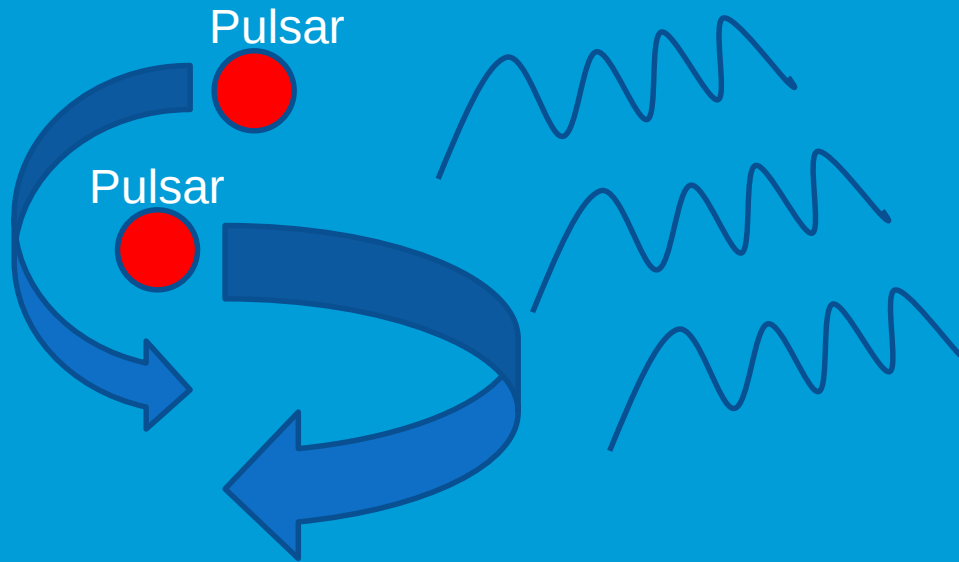
Radiatore gravitazionale (quadrupolo oscillante)

Masse in movimento emettono onde gravitazionali

Non ancora scoperte



Consideriamo ora un sistema di due oggetti molto compatti in orbita reciproca :



In base alla teoria un sistema gravitante (due stelle compatte e pesanti) in orbita emette onde gravitazionali

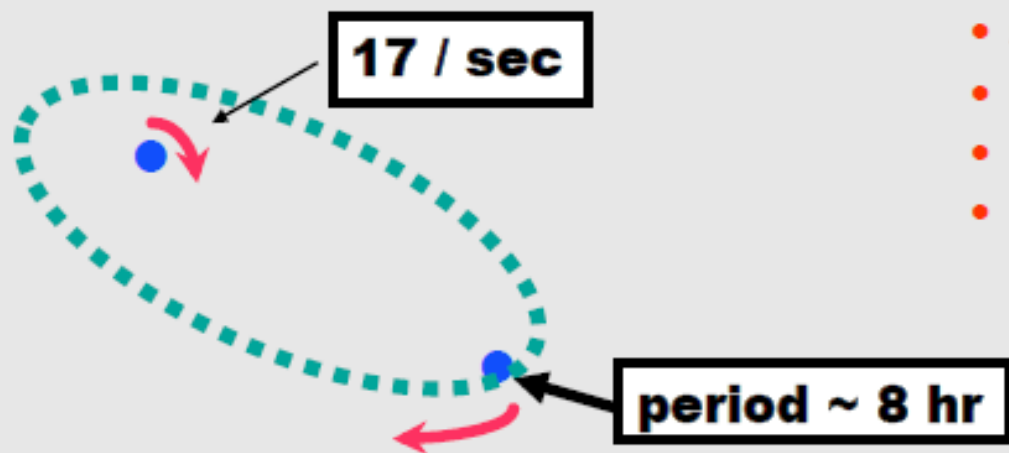
Ma così facendo il sistema perde energia! E le velocità delle due pulsar devono cambiare !

Si può così ottenere evidenza INDIRETTA dell'esistenza delle Onde Gravitazionali!

L'effetto può essere rivelato!

Evidenza dell'esistenza delle Onde Gravitazionali

Hulse & Taylor



PSR 1913 + 16
Timing of pulsars

Sistema binario di stelle compatte

- separazione $\sim 10^6$ km
- $m_1 = 1.4$ masse solari
- $m_2 = 1.36$ masse solari
- eccentricità = 0.617

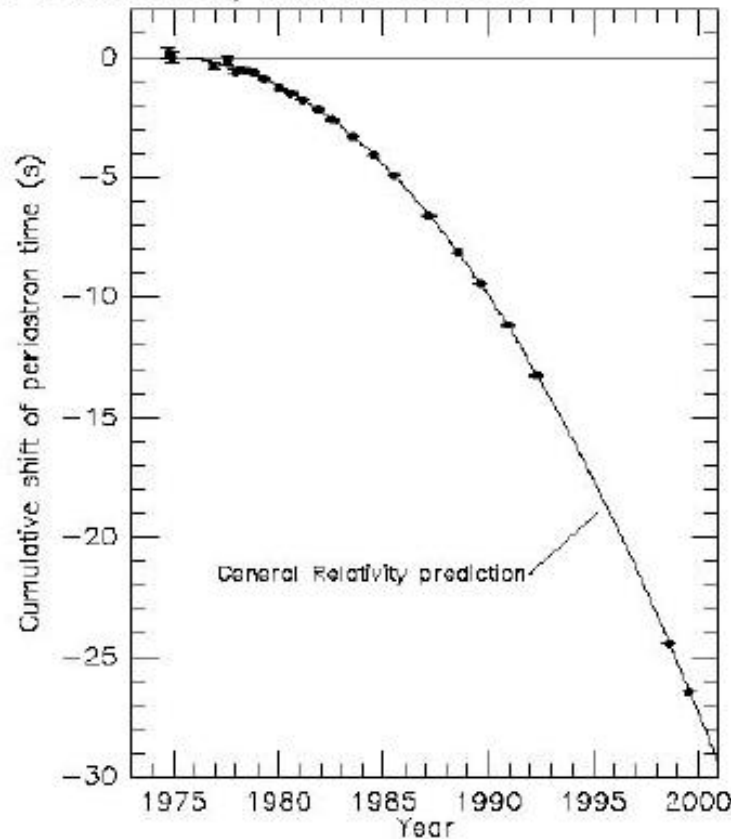
Predizione della Relatività Generale

- riduzione progressiva dell'orbita 3 mm/orbita

Evidenza “indiretta” d'esistenza delle Onde Gravitazionali



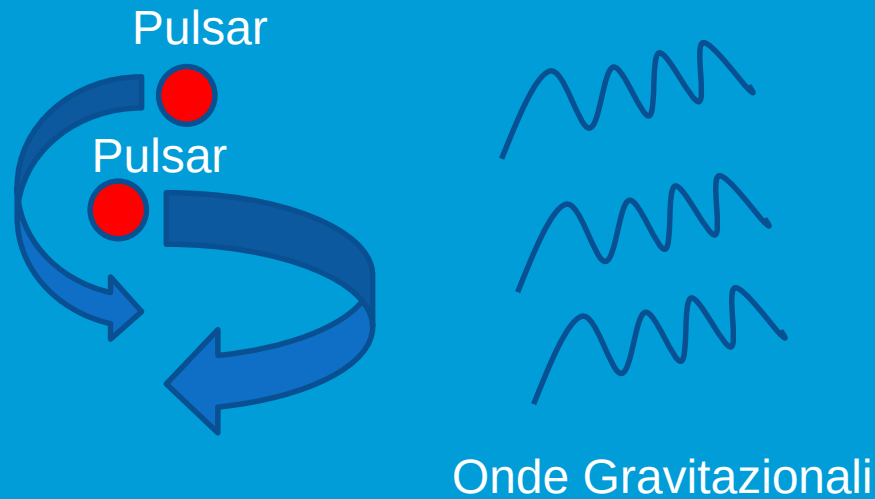
Comparison between observations of the binary pulsar PSR1913+16, and the prediction of general relativity based on loss of orbital energy via gravitational waves



From J. H. Taylor and J. M. Weisberg, unpublished (2000)

Vi è una perdita di energia che è pari a quella che la teoria prevede per emissione di onde gravitazionali (1973, Radiotelescopio di Arecibo).

La ricerca delle Onde Gravitazionali
o meglio, della loro evidenza diretta



Rivelatore a Terra



1960 J. Weber inventa e analizza la fisica dei rivelatori risonanti

J. Weber- Generation and detection of g.w. - Phys. Rev. **117**, 306 (1960)

I primi rivelatori furono barre risonanti criogeniche (in Europa proposte dal gruppo di E. Amaldi). Superate in sensibilità dagli interferometri.
Ne parleremo la prossima volta.

Conclusioni :

- La Gravità è una delle forze fondamentali della natura. Decisiva per l'Universo.
- La Relatività Generale è la migliore teoria della Gravità che abbiamo
- Le Onde Gravitazionali sono previste dalla teoria e osservate indirettamente nel '73
- L'osservazione diretta è arrivata solo nel 2016 (a 100 anni dalla previsione).



L'Interferometro italo-francese
VIRGO (Cascina, Pisa) per la
rivelazione delle Onde
Gravitazionali

Grazie della vostra attenzione

