

Gravità e onde gravitazionali

Lo sviluppo di una teoria fisica

ovvero

Come abbiamo cercato di capire come funziona il mondo

Sergio Frasca

Di cosa parleremo

- * Che le cose sono «pesanti» e, se non sorrette, cadono lo sappiamo tutti: è la **gravità**.
- * La gravità è stata tra i primi argomenti di ricerca scientifica, sin dall'antichità.
- * Sorprendentemente, come intuito da Newton, questo fenomeno è legato al problema del **moto dei corpi celesti**.
- * Così, con esperimenti via via più complessi e teorie sempre più eleganti, riusciamo a capire come è nato l'universo e forse anche come finirà.
- * In particolare ci soffermeremo su uno degli esperimenti oggi di punta relativo alla gravità: la ricerca delle **onde gravitazionali**.

Esperimenti



Osserva il fenomeno



Lo prevede e lo controlla

Manca la **Misura**: sulle misure si può operare matematicamente

La forza di gravità

- * La forza di gravità è una delle quattro forze individuate in natura. Le altre sono
 - * La forza elettromagnetica (che «controlla» soprattutto la chimica)
 - * La forza debole (decadimenti radioattivi)
 - * La forza forte (che tiene legati neutroni e protoni nel nucleo atomico)
- * Attualmente la forza E.M. e la debole sono unificate nella teoria elettro-debole e si è a buon punto per l'unificazione di queste con la forza forte (GUT)
- * Siamo lontani per unificare con esse anche la gravità (teoria del tutto).

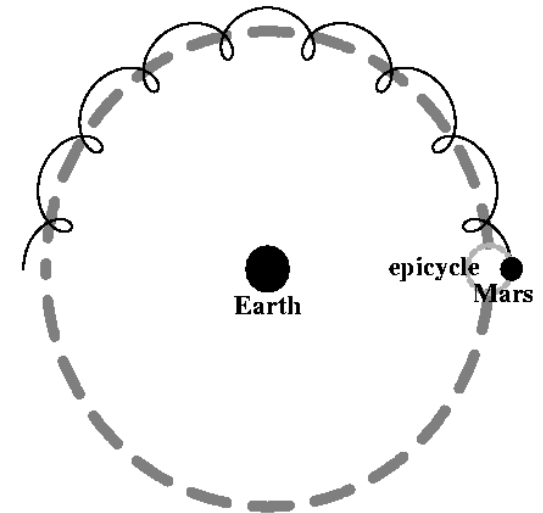
Aristotele

l'inventore della parola **Fisica** (**Φυσική** «le cose naturali»)

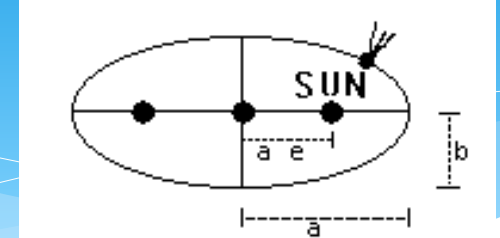
- * Secondo la teoria della gravità di Aristotele ogni corpo si muove verso il proprio luogo naturale. Per certi oggetti il luogo naturale sarebbe il centro della Terra, per questo essi si muovono in quella direzione. Per altri oggetti, quali i gas, il luogo naturale sarebbero le sfere celesti: il vapore, ad esempio, tende ad allontanarsi dal centro della Terra dirigendosi verso lo Spazio e la Luna.
- * La velocità di questo movimento è proporzionale alla massa dell'oggetto che si muove.

Il moto dei pianeti

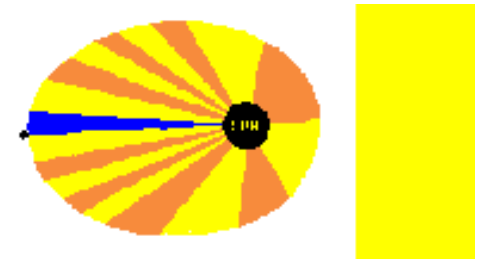
- Nel cielo distinguiamo le stelle «fisse» che apparentemente ruotano tutte insieme intorno alla Terra e i pianeti che rispetto ad esse fanno dei movimenti complessi (delle epicicloidi).
- Tolomeo (nel secondo secolo AD) aveva trovato un modo per rappresentare (e prevedere) questo moto.
- Copernico (nel XVI secolo) aveva mostrato che se i moti dei pianeti si riferivano al Sole, questi seguivano semplicemente delle circonferenze incentrate nel Sole (come già proposto da Aristarco di Samo nel III sec. aC)
- Successivamente Keplero, sulla base delle precise misurazioni di Tycho Brahe, perfezionò la teoria.



Le leggi di Keplero



- * I pianeti compiono orbite ellittiche di cui il Sole occupa uno dei fuochi
- * La congiungente il Sole e un pianeta spazza aree uguali in tempi uguali
- * Il rapporto tra il cubo del semiasse maggiore dell'orbita di ciascun pianeta e il quadrato del periodo orbitale, per un dato sistema, è una costante



Pianeta	P (anni)	a (AU)	T ²	R ³
Mercurio	0.24	0.39	0.06	0.06
Venere	0.62	0.72	0.39	0.37
Terra	1	1	1	1
Marte	1.88	1.52	3.53	3.51
Giove	11.9	5.2	142	141
Saturno	29.5	9.54	870	868

Galileo e la scienza sperimentale

(fine 500 – inizio 600)

- * Il giovane Galileo, studente di medicina con interessi matematici, osservando le oscillazioni di una lampada, scoprì l'isocronismo delle piccole oscillazioni del pendolo, indipendenti dalla massa e dall'ampiezza.
- * Successivamente, da giovane professore di matematica dell'università di Pisa, scoprì che due corpi di massa diversa, lasciati cadere dalla stessa altezza, giungevano a terra nello stesso tempo, smentendo così Aristotele. In realtà già altri avevano fatto esperimenti in tal senso: per esempio Giovanni Filopono (nel VI sec.) e Simone Stevino (alcuni anni prima di Galileo).
- * **Questi esperimenti sono la base del principio di equivalenza introdotto da Einstein.**



Fig. 2. Galileo's experiment in Pisa.

Le lune di Giove

altra scoperta di Galileo

- * In seguito (1609) Galileo perfezionò il cannocchiale e lo usò per fare osservazioni degli oggetti celesti.
- * Tra le varie scoperte che fece con questo strumento (crateri lunari, fasi di Venere, composizione stellare della via Lattea,...) ci fu la scoperta di quattro satelliti di Giove, i primi corpi celesti che non ruotavano intorno al Sole o alla Terra.
- * Queste osservazioni portarono a pensare (Boulliau, Giovanni Alfonso Borelli, Hooke e quindi Newton) che ci fosse una forza agente tra i corpi celesti e che questa decrescesse col **quadrato della distanza**.

Newton e la legge di gravitazione universale

(fine del 600)

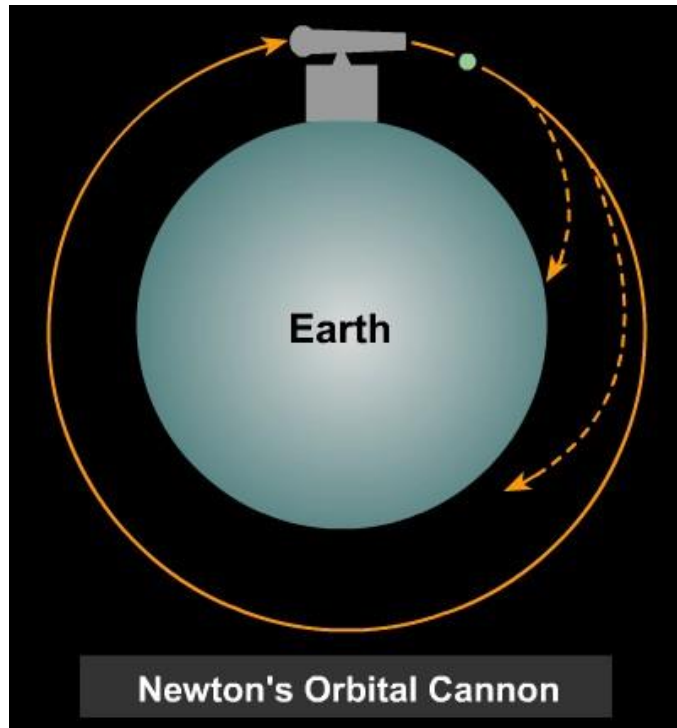
- * Newton, sviluppando il calcolo infinitesimale, trovò che a partire dalle leggi di Keplero si dimostrava che la forza di attrazione tra i corpi celesti era inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra di essi.
- * Ma la sua più grande intuizione fu il supporre che questa forza fosse la stessa che faceva cadere gli oggetti sulla Terra ed essa si esercitava tra tutti i corpi, proporzionalmente alla loro massa. La chiamò **forza di gravitazione universale**:

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

Secondo Newton la misura di **G** era al di fuori della portata umana

Newton e la mela

qualche considerazione



- L'idea base di Newton è rappresentata in figura: il punto di caduta della palla di cannone si allontana sempre più con l'aumentare della velocità iniziale, finché compie un'orbita completa.
- L'unificazione di due forze prima ritenute diverse è tendenza costante della Fisica. Newton dimostrò che le stesse leggi che governano i corpi celesti, governano la materia terrestre, con cui è fatto anche il nostro corpo.
- Analogamente padre Angelo Secchi, nell'800, dimostrò che la stessa analisi spettroscopica che si faceva sugli elementi chimici sulla Terra, poteva farsi sulla luce proveniente dal Sole e dalle stelle.

Cavendish (e Michell) e la misura di G (fine del 700)

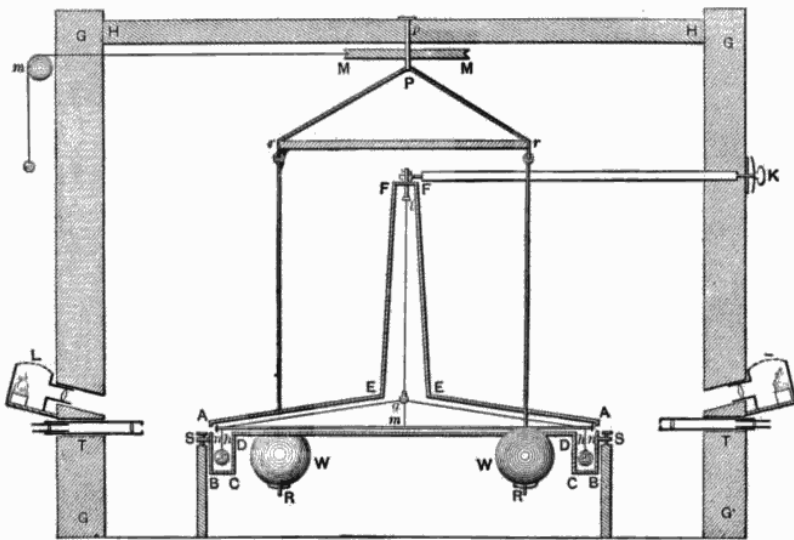


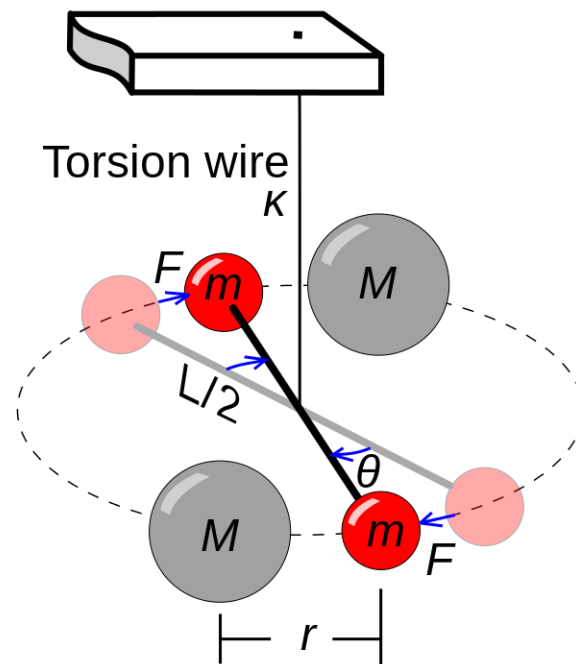
Fig. 1

- Come si attraggono gli astri, così avviene per gli oggetti terrestri.
- Il primo che fece un esperimento del genere fu Cavendish, utilizzando la bilancia di torsione, strumento inventato per tale scopo da John Michell.
- Egli quindi misurò il coefficiente G della formula di Newton e quindi la massa della Terra.
- John Michell è anche noto per essere stato il primo a supporre l'esistenza dei buchi neri.

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kg \ s^2}$$

Massa della Terra $\approx 6.7 \cdot 10^{24}$ kg densità ≈ 5.5 g/cm³

Bilancia di torsione



Laplace e la perfezione del metodo analitico



1749 - 1827

- * L'analisi matematica applicata ai principi posti da Newton si sviluppò enormemente per tutto il XVIII e XIX secolo.
- * Un esempio della raffinatezza delle previsioni che questa teoria era in grado di fare è la scoperta del pianeta Nettuno, la cui esistenza e posizione fu prevista da Le Verrier e altri (anni 40 dell'ottocento).
- * Laplace enunciò la sua visione del mondo completamente deterministica, che fu poi detta del «diavoletto di Laplace»

Il diavoletto di Laplace

«Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come l'effetto del suo passato e la causa del suo futuro. Un intelletto che ad un determinato istante dovesse conoscere tutte le forze che mettono in moto la natura, e tutte le posizioni di tutti gli oggetti di cui la natura è composta, se questo intelletto fosse inoltre sufficientemente ampio da sottoporre questi dati ad analisi, esso racchiuderebbe in un'unica formula i movimenti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomi più piccoli; per un tale intelletto nulla sarebbe incerto ed il futuro proprio come il passato sarebbe evidente davanti ai suoi occhi.»

Poincaré e i limiti del metodo analitico (fine dell'800)



1854-1912

- * In seguito questa posizione è stata sostanzialmente abbandonata, sia per lo sviluppo della teoria del caos deterministico (sviluppata dagli studi di Poincaré sul «problema dei tre corpi»), sia per lo sviluppo della meccanica quantistica.
- * Già ai tempi di Laplace era comunque chiaro che ci fossero dei limiti alla precisione delle misure e quindi alla precisione dei calcoli su queste basate. Ma si tendeva a dare un valore assoluto alle «verità scientifiche».

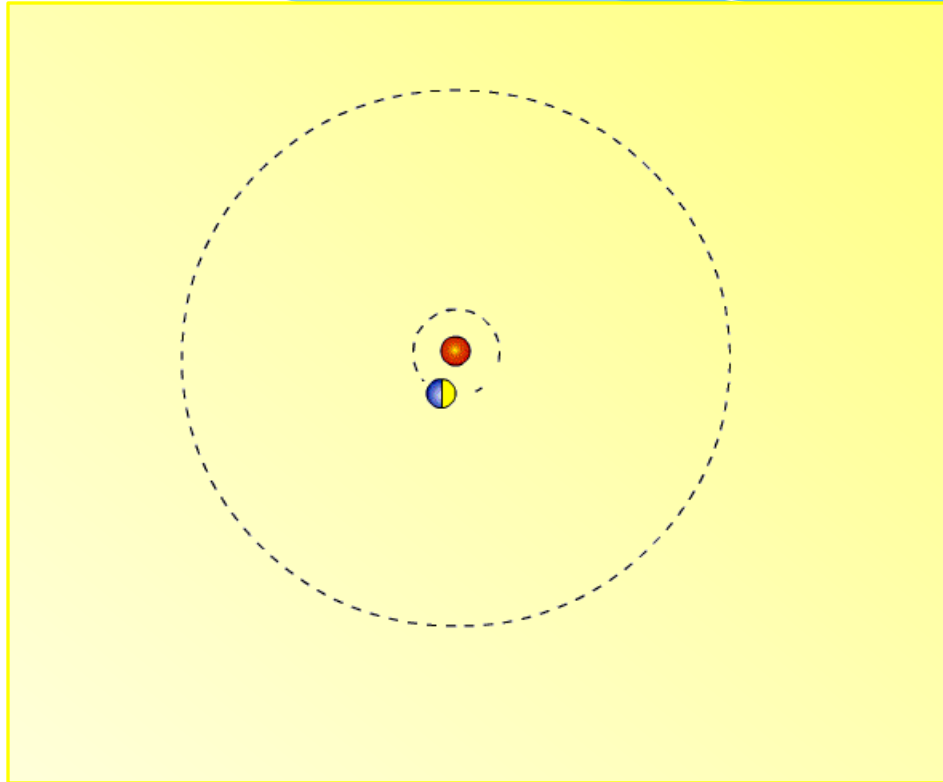
La precessione del perielio di Mercurio

Le Verrier, di cui abbiamo già parlato a proposito della scoperta del pianeta Nettuno, trovò anomalie nel moto del pianeta Mercurio, il cui perielio, che, a causa del disturbo degli altri pianeti, dovrebbe ruotare di 531 secondi d'arco al secolo (circa 0.15 gradi, un giro completo in circa 24000 anni), in realtà ruota di 574 secondi d'arco al secolo (circa 0.16 gradi).

Questa differenza di 0.01 gradi al secolo era l'unico "errore" della teoria di Newton trovato fino a cento anni fa.

Per "correggere" questo errore scese in campo Albert Einstein.

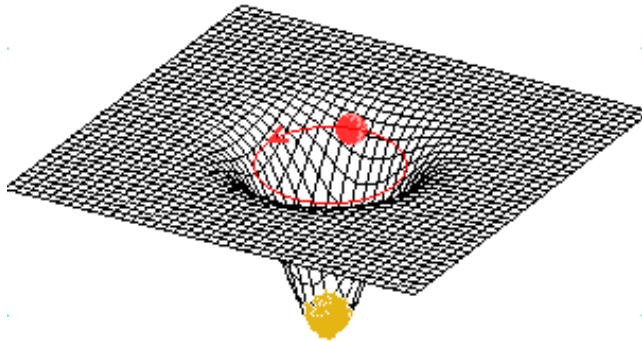
La precessione del perielio di Mercurio



Einstein e la Relatività Generale

nuova teoria della gravitazione

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



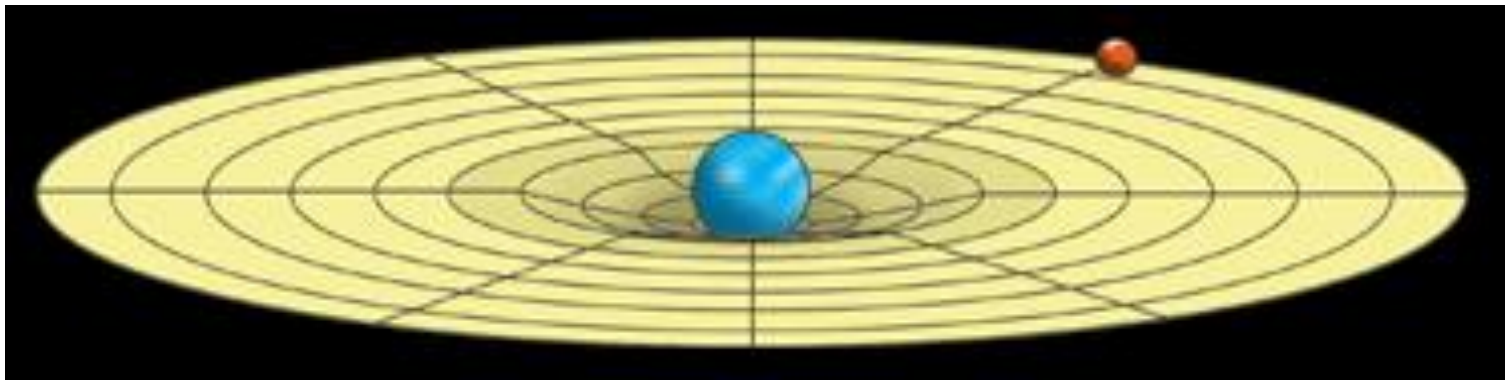
La Relatività Generale è la teoria einsteiniana della gravitazione. La base è il principio di equivalenza. J.A.Wheeler dette la seguente definizione della Teoria della Relatività Generale:

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

Le onde gravitazionali

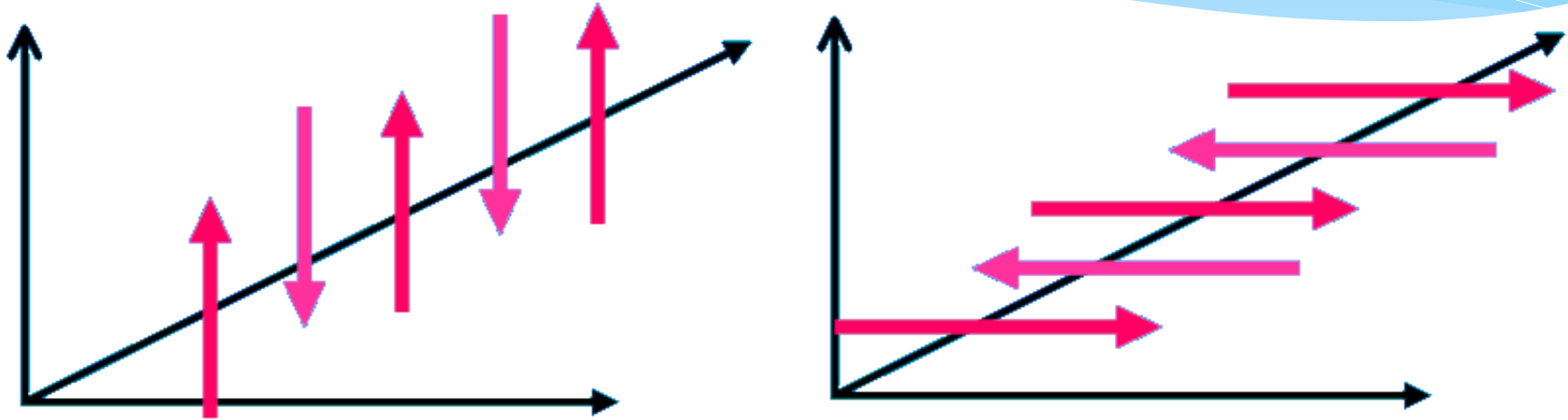
Come nella relatività speciale, anche nella relatività generale nulla può avere una velocità superiore della velocità della luce e quindi qualsiasi variazione del campo gravitazionale si propaga alla velocità della luce. Il mezzo che porta l'informazione di variazione sono le **onde gravitazionali**.

La situazione è analoga a quella del campo elettro-magnetico, le cui variazioni sono “portate” dalle onde elettromagnetiche.

Così, come ogni carica elettrica accelerata genera onde elettromagnetiche (come avviene in un'antenna, dove le cariche elettriche fanno un moto armonico e quindi accelerato), così ogni massa accelerata genera onde gravitazionali.

Ovviamente ci sono varie differenze, una di queste è che le onde generate da qualsiasi oggetto con massa e velocità “terrestri” sono estremamente deboli. La situazione migliora nel caso di onde generate da oggetti astronomici, con masse dell'ordine della massa del Sole, velocità vicine a quella della luce e densità elevatissime, come le stelle di neutroni o i buchi neri.

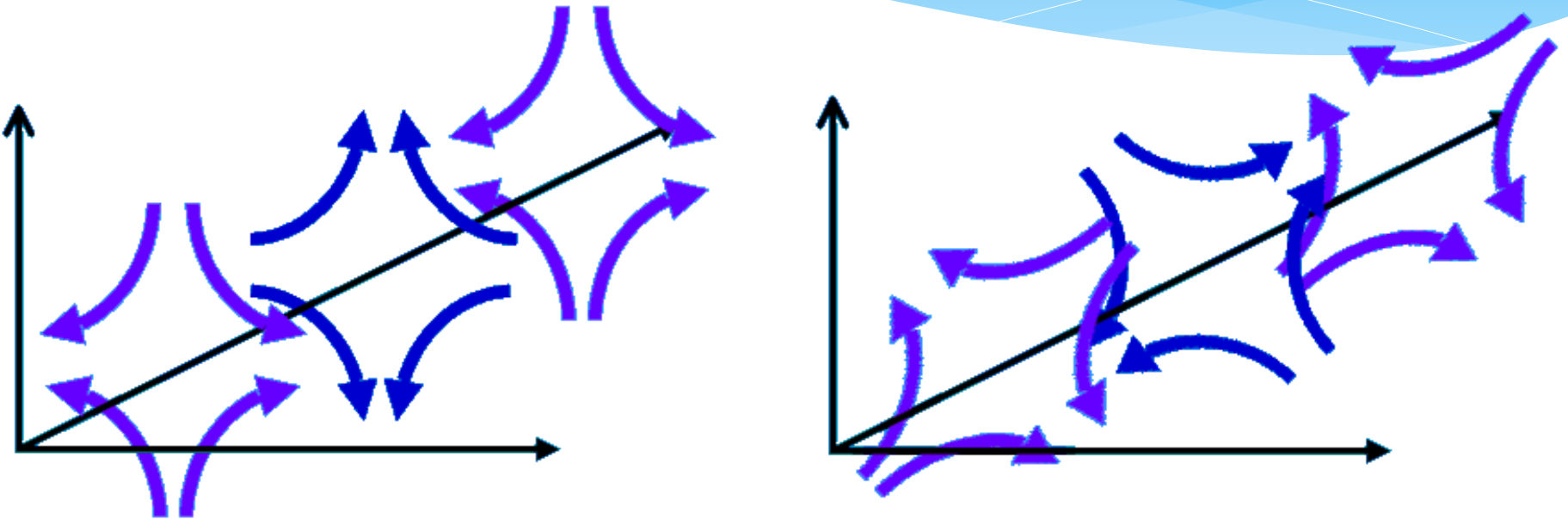
Polarizzazione delle onde elettromagnetiche



Effetto delle onde elettro-magnetiche su di una carica elettrica.

Su questo effetto si basano le antenne per le onde radio (radio, TV, telefonini...)

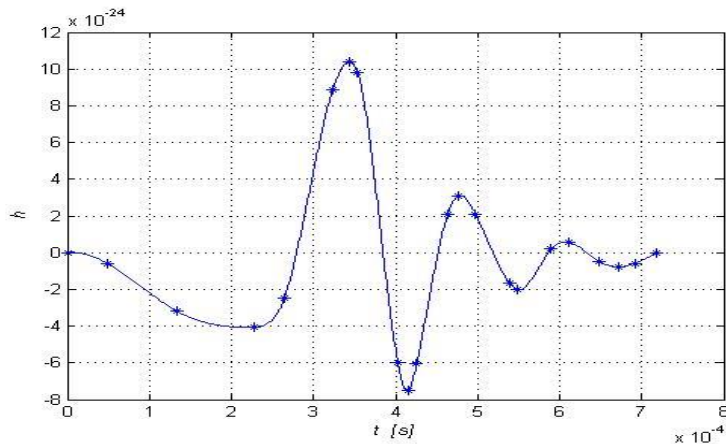
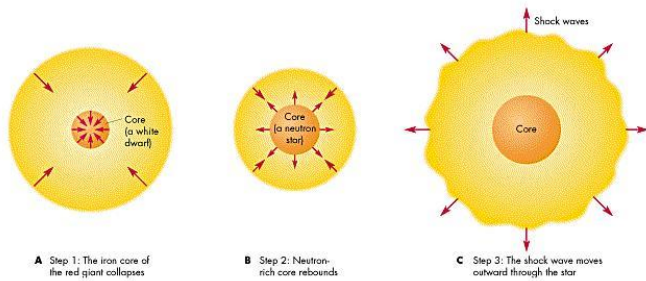
Polarizzazione delle onde gravitazionali



Effetto delle onde gravitazionali sullo spazio in cui si propagano.

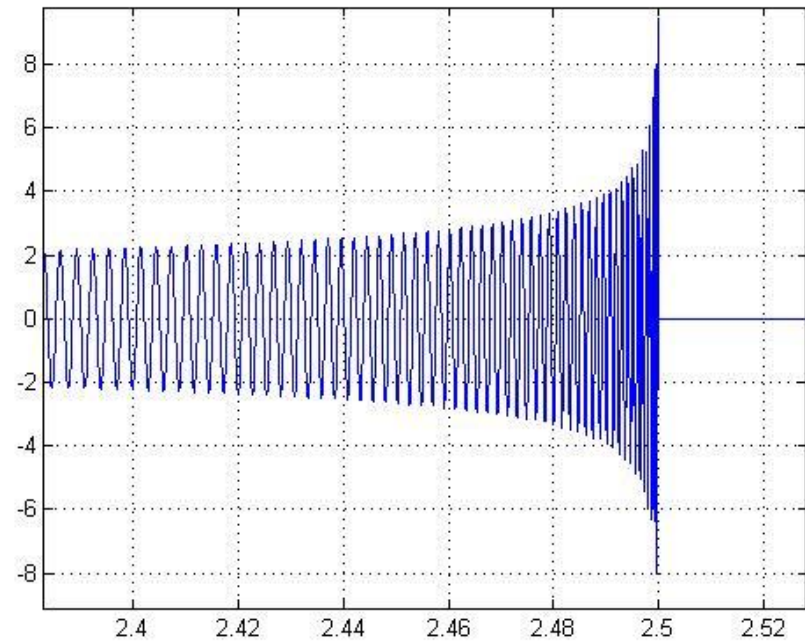
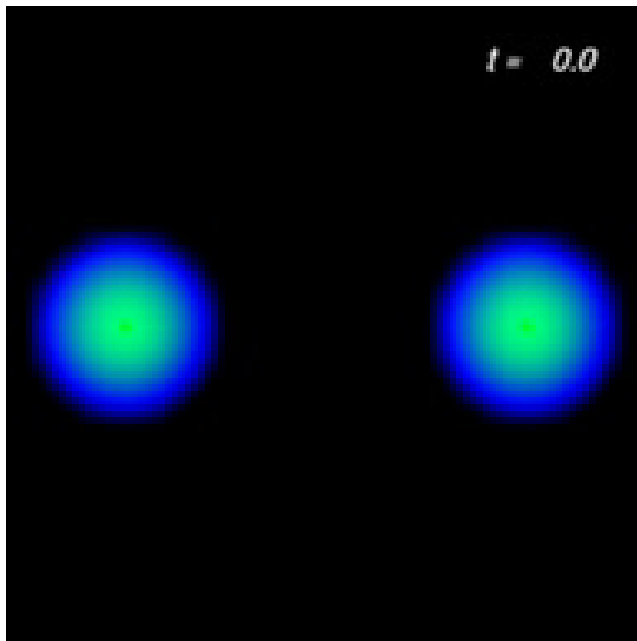
Su questo effetto si basano le antenne gravitazionali.

Sorgenti di onde gravitazionali: impulsi da esplosioni di supernova



La Crab Nebula, ciò che resta da un'esplosione di supernova

Sorgenti di onde gravitazionali: “chirp” da binarie coalescenti

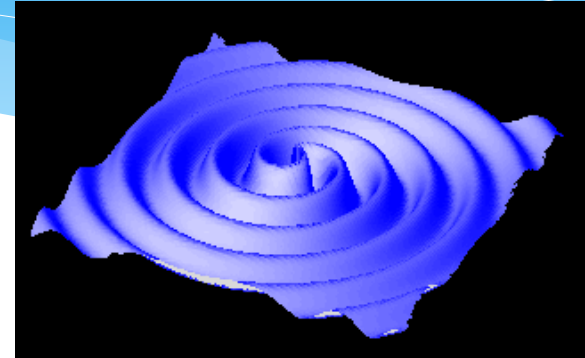


Sorgenti di onde gravitazionali: altre sorgenti

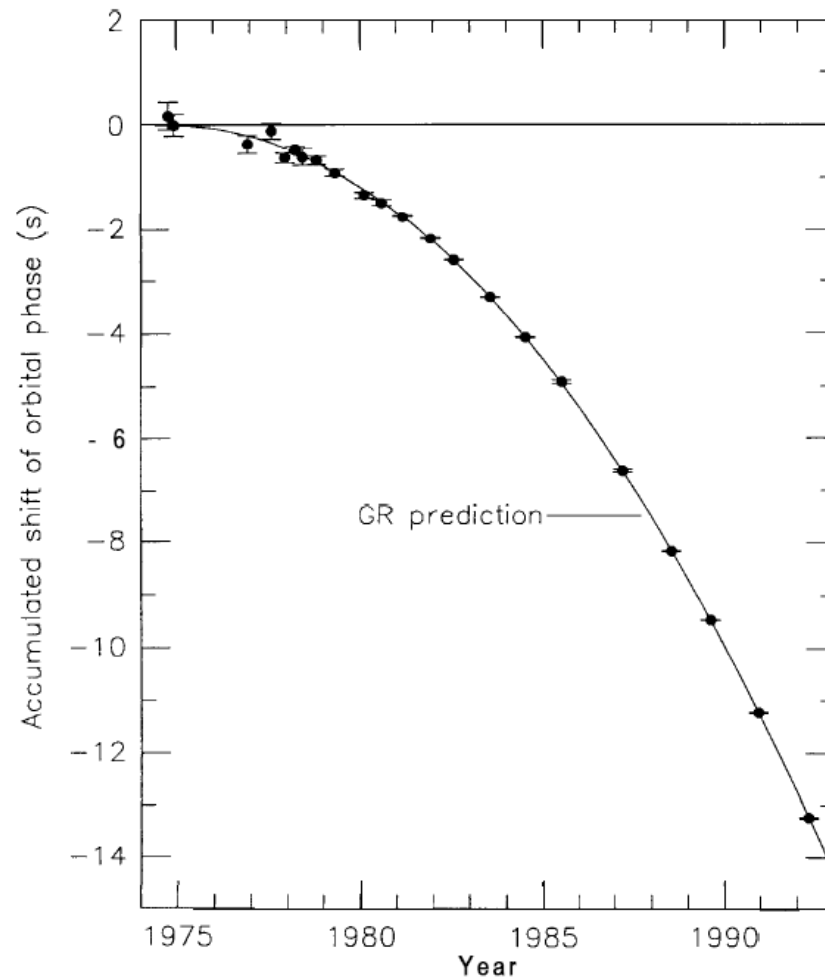
- * Sorgenti periodiche

- * Fondo stocastico

- * “Pop corn” noise



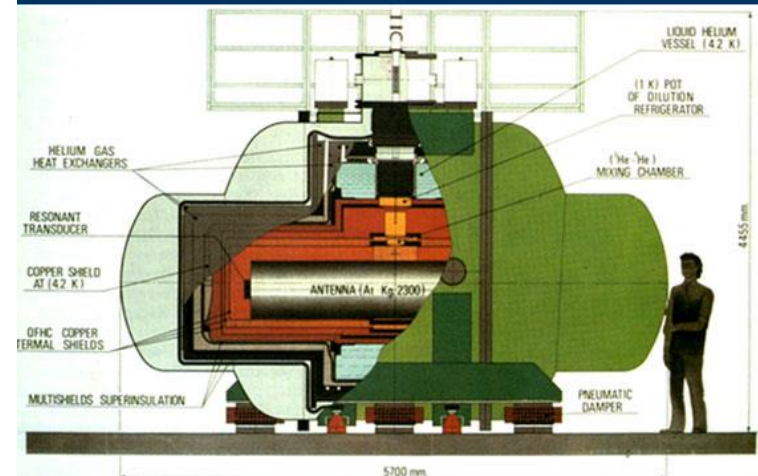
La pulsar “di Taylor” (PSR 1913+16) premio Nobel 1993



Joe Weber (1919-2000) e le «vecchie» antenne risonanti

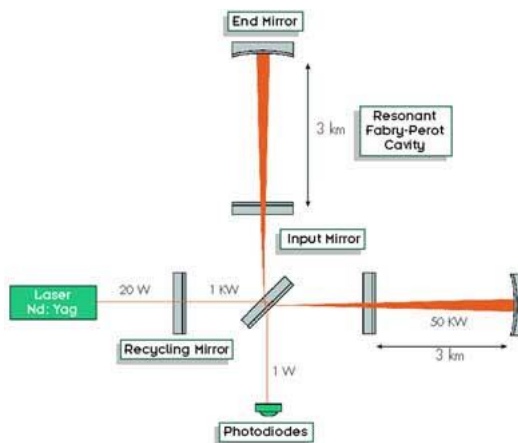
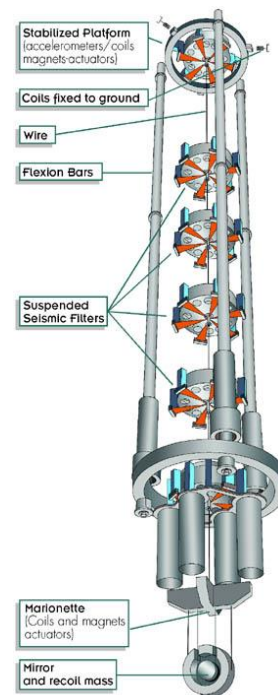


5423255 [RM] © www.visualphoto.com

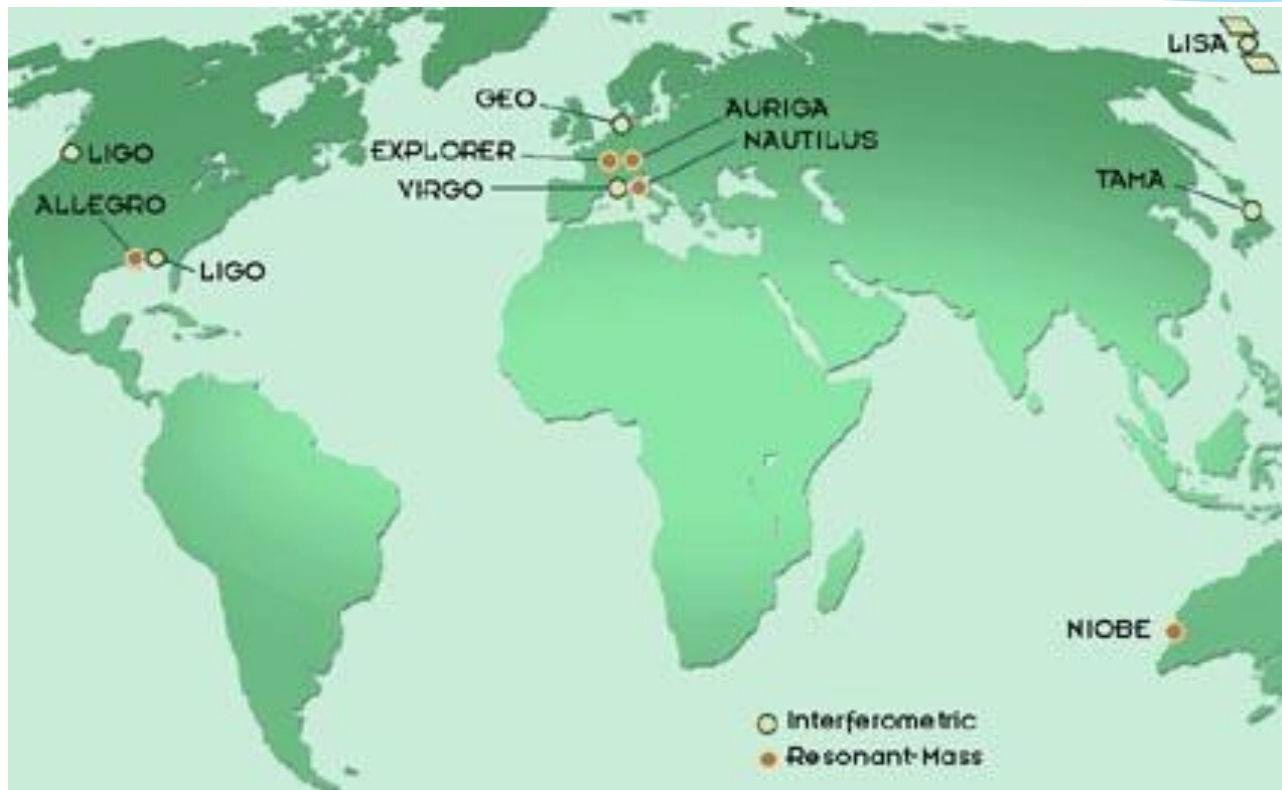


Virgo

<http://www.ego-gw.it/virgodescription/italiano/indice.html>



Le altre



Ma cosa è cambiato ?

qualche spunto di discussione

- * L'uomo sin dalla preistoria ha sempre cercato di organizzare teoricamente le proprie esperienze per controllare e prevedere i fenomeni naturali. Questa è la base della conoscenza.
- * Nel far ciò ha sviluppato una razionalità e si è costruito degli assoluti («la verità»), che non sempre gli sono tornati utili: spesso si è dovuto disfare delle proprie verità, cambiare la visione del mondo e di se stesso.
- * Una conoscenza basata su **esperimenti ripetibili** è verificabile e quindi più facilmente condivisibile.
- * Si è passati da una conoscenza puramente razionale, a una conoscenza rivelata, a una conoscenza «da scoprire».
- * Ma sembra che la conoscenza sia da costruire, senza verità assolute (almeno per ora...) da scoprire, ma equazioni («leggi») adeguate alle sempre più precise misure ottenibili con una migliore tecnologia.

La scienza sperimentale e la matematica (spunti)

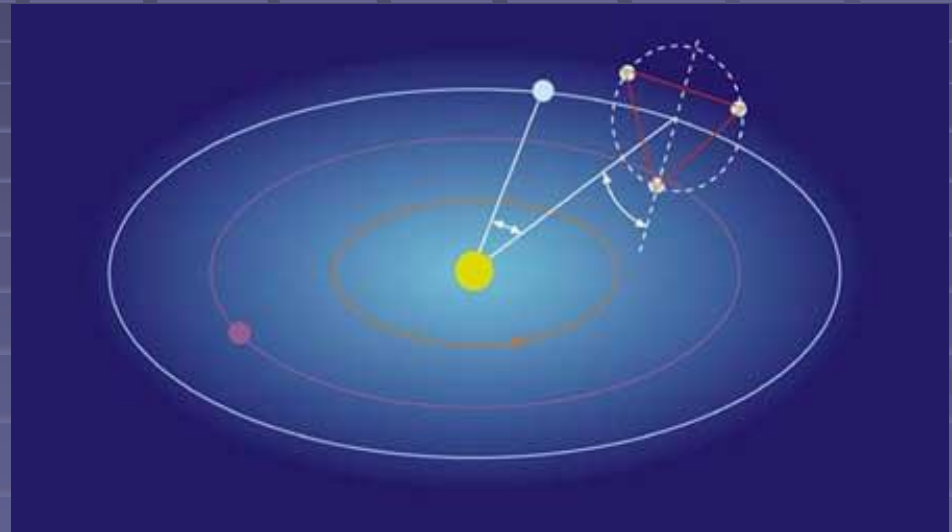
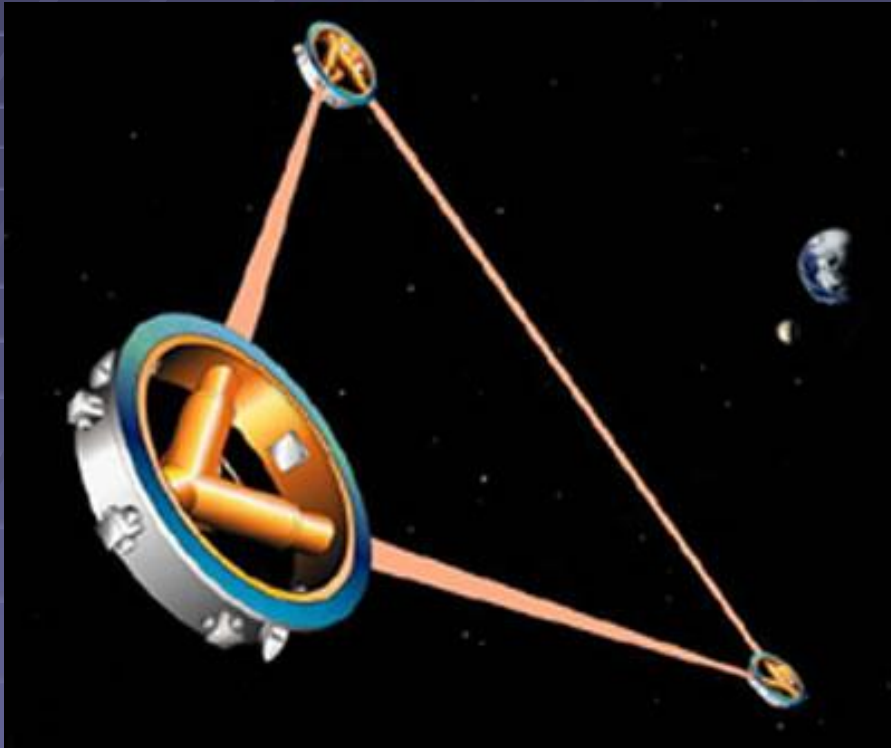
- * La matematica è lo strumento fondamentale per interpretare dati ed elaborare teorie.
- * È straordinario come tanti strumenti matematici nati per altri scopi, a volte «oziosi», si siano poi rivelati utili per la fisica (o altre scienze).
- * Altri concetti, fondamentali per la matematica, non lo sono per la fisica: esempio i numeri reali, o l'infinito. Le misure fisiche non sono in genere numeri precisi, ma intervalli di valori. I punti e le rette non esistono in fisica. La somma degli angoli interni a un triangolo non è 180 gradi...
- * Si potrebbe dire che la matematica è l'unica scienza esatta, ma da sola non ci dice molto sul mondo.

La Scienza (spunti)

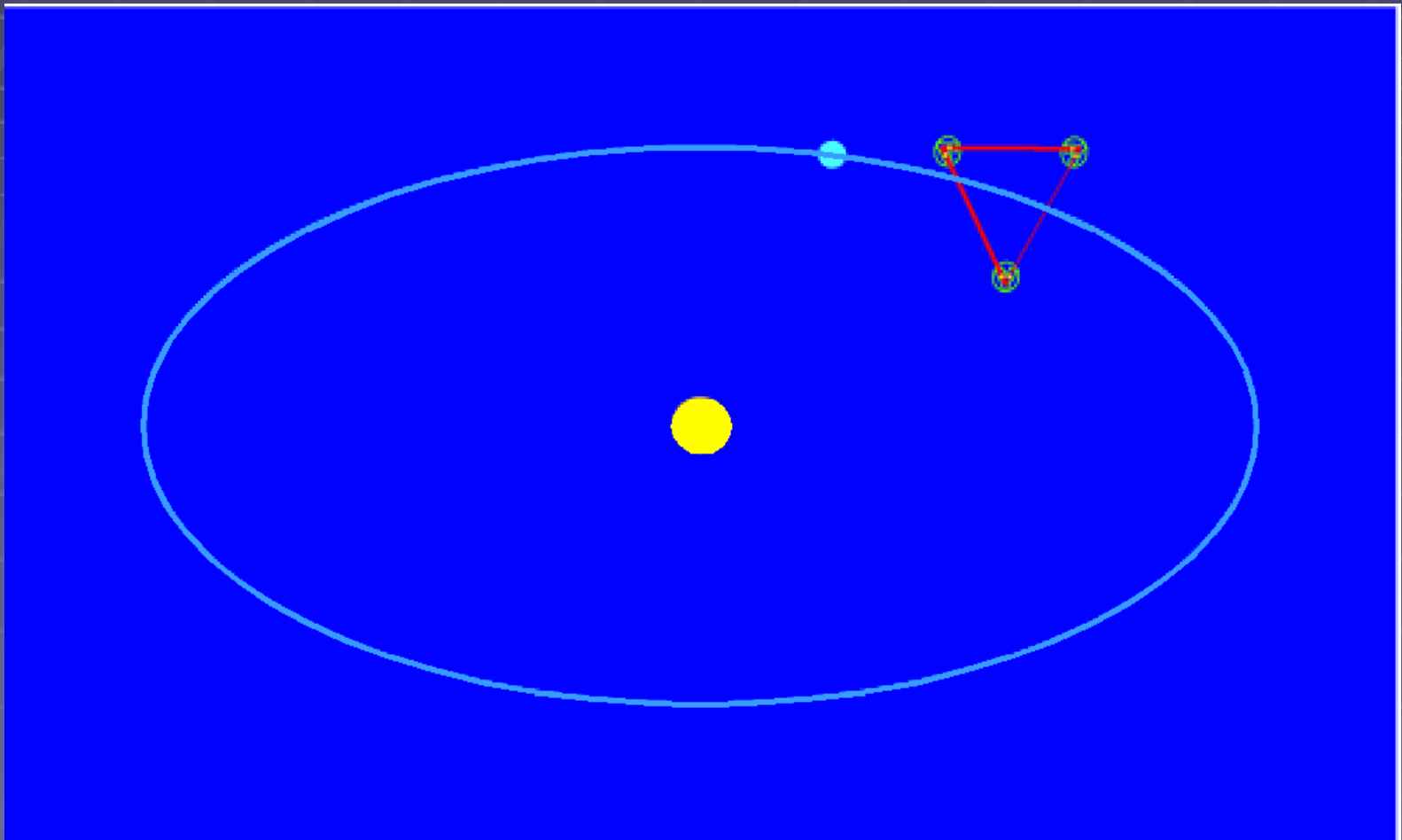
- * Non ci sono «verità scientifiche», c'è un metodo scientifico, basato su esperimenti ed elaborazione di teorie, che ci ha fatto capire tante cose su come funziona il mondo e ci ha fornito una tecnologia potentissima.
- * Ci ha anche fornito un senso critico con cui «valutare» eventuali «verità».
- * La necessità dell'uomo di «assoluti» può far sì che le attuali conoscenze o anche l'attuale metodo scientifico diventi per molti un «assoluto», a detrimento di altri possibili sviluppi.

Slide di supporto

Antenne gravitazionali spaziali: LISA



LISA - animazione

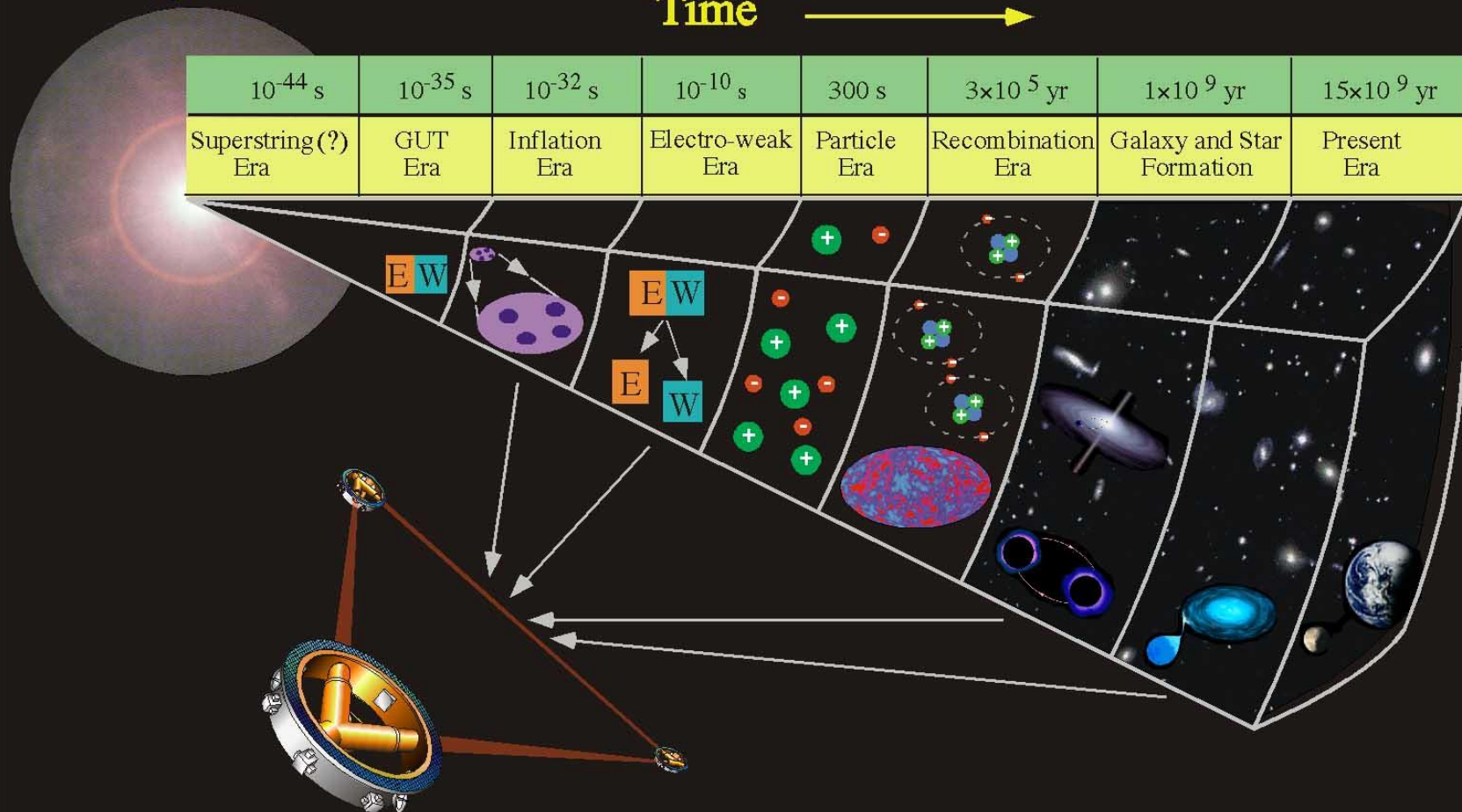


Sorgenti rivelabili da LISA

Big Bang

Time →

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



Dal programma del corso di matematica di Galilei a Pisa

- * Il metodo che seguiremo sarà quello di far dipendere quel che si dice da quel che si è detto, senza mai supporre come vero quello che si deve spiegare. Questo metodo me l'hanno insegnato i miei matematici, mentre non è abbastanza osservato da certi filosofi quando insegnano elementi fisici... Per conseguenza quelli che imparano, non fanno mai le cose dalle loro cause, ma le credono solamente per fede, cioè perché le ha dette Aristotele. Se poi sarà vero quello che ha detto Aristotele, sono pochi quelli che indagano; basta loro essere ritenuti più dotti perché hanno per le mani maggior numero di testi aristotelici[...] che una tesi sia contraria all'opinione di molti, non m'importa affatto, purché corrisponda alla esperienza e alla ragione.
- * Nel Saggiatore, Galileo scrisse infatti la celebre metafora secondo la quale «la filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo)»[[]

Termini dell'equazione di Einstein

- $R_{\mu\nu}$ è il tensore di curvatura di Ricci;
- R la curvatura scalare, ossia la traccia di $R_{\mu\nu}$;
- $g_{\mu\nu}$ il tensore metrico;
- Λ la costante cosmologica;
- $T_{\mu\nu}$ il tensore stress-energia;
- c la velocità della luce;
- G la costante di gravitazione universale.

L'analisi tensoriale

Gauss, Riemann, Ricci Curvatura e Levi Civita

Einstein e la Relatività Generale

nuova teoria della gravitazione

