



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Relatività, Energia ed Ambiente

Introduzione al Corso 2020

Vincenzo Vagnoni

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e
Fondazione Giuseppe Occhialini

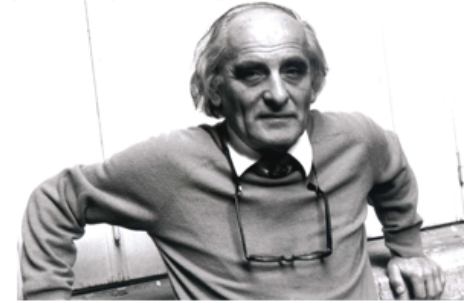
Pesaro, 23 marzo - 3 giugno 2020

Modalità del Corso 2020

- A causa dell'emergenza coronavirus, le lezioni quest'anno saranno tenute in videoconferenza tramite Google Meet, collegandosi all'indirizzo
 - <https://meet.google.com/jtp-oznt-kqp>
- È anche necessario iscriversi mediante modulo online disponibile al seguente indirizzo
 - <https://agenda.infn.it/event/22219/registrations/>
- **Attenzione:** l'iscrizione online deve essere effettuata anche se è già stato inviato un modulo alla segreteria del Liceo Marconi, quindi se non lo avete fatto fatelo subito, e spargete la voce con i vostri compagni eventualmente non presenti oggi
- Prima di una lezione programmata, controllate periodicamente se sul sito <http://www.fondazioneocchialini.it> la presenza di eventuali comunicazioni urgenti

La Fondazione Giuseppe Occhialini

- La Fondazione che porta il nome del grande scienziato forsempronese non ha fini di lucro e persegue esclusivamente **finalità di informazione e formazione scientifica**



G. Occhialini (1907-1993)

- Lo scopo principale è quello di favorire e **incrementare la conoscenza delle materie scientifiche** e rendere partecipe l'opinione pubblica del ruolo determinante che queste discipline rivestono nello sviluppo della scienza, della tecnologia e dell'intera società

La Fondazione Giuseppe Occhialini

- **Obiettivo:** illustrare la Fisica come scienza viva, valorizzarne le metodologie e le conquiste, farne comprendere il rilievo sociale e culturale
- **Destinatari:** i cittadini, i giovani, i docenti e soprattutto gli studenti che si preparano a diventare nuove matricole dell'Università
- **Strumenti:** scuole, corsi di aggiornamento per docenti, conferenze, convegni e un programma di *corsi preparatori* per studenti della Scuola Superiore

Obiettivo e metodo dei corsi della Fondazione

- Si vuole far comprendere il significato del ragionamento scientifico attraverso esempi illuminanti di come **fenomeni complessi, diversi e sovrapposti** sono riducibili ad una descrizione universale
- Si porrà ad esempio l'accento sulla **semplicità e generalità** di leggi come quella fondamentale della dinamica che presiede al moto dei corpi sulla terra e nell'universo ($F = ma$), fino a quella che descrive l'interconvertibilità tra materia ed energia ($E = mc^2$)
- Si cercherà di dare un'idea della **continua progressione in senso unitario della scienza**, che tende a riunire in una visione unificata l'infinitamente piccolo (il mondo dei quark e delle particelle) e l'infinitamente grande (l'universo)

La ricerca scientifica oggi

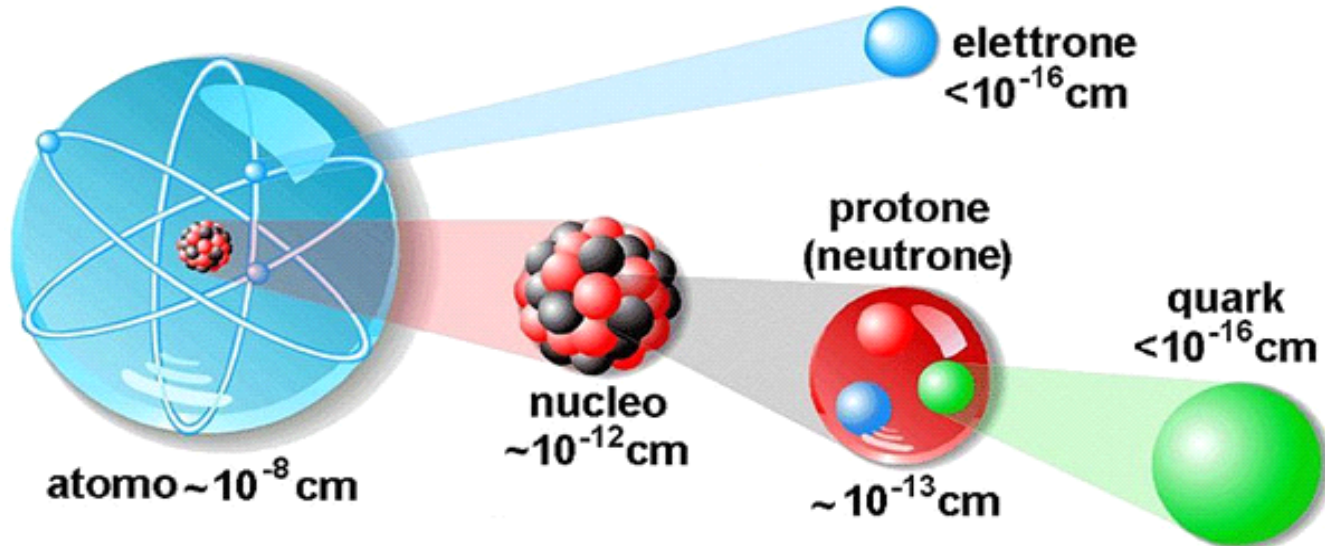
- Il secolo scorso ha prodotto una **crescita delle energie civili e militari dedicate alla ricerca**, crescita che ha raggiunto proporzioni assai rilevanti nei decenni successivi alla seconda guerra mondiale
- Si è verificato così un rapido procedere delle conoscenze scientifiche e soprattutto una **rapida immissione dei risultati della ricerca nelle tecnologie di uso quotidiano**
 - si pensi all'energia nucleare, al transistor, ai laser, ai calcolatori, ai telefoni cellulari, alla TAC, alla RM, alla PET, ecc.

La ricerca scientifica oggi

- L'attività del Ricercatore, riservata un tempo a pochi eletti che lavoravano spesso isolati anche se legati da una deontologia comune, e in un certo senso sacerdotale, ha assunto oggi una **configurazione del tutto professionale**
- Lo stesso **concetto di laboratorio** ha subito una trasformazione genetica impressionante: dalla cantina o dalle baracche avventurose in cui spesso si lavorava ai tempi dei coniugi Curie, i laboratori sono diventati oggi vere e proprie funzionalissime cittadelle all'interno di **organizzazioni nazionali e internazionali**, capaci di ospitare **centinaia o migliaia** tra scienziati, ingegneri, tecnici e addetti ai servizi

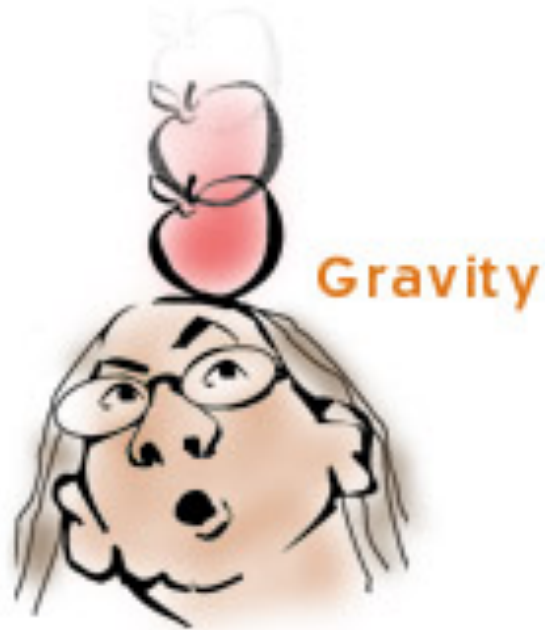
Le forze della natura

I costituenti della materia ordinaria



- Il nucleo è **10000 volte più piccolo** dell'atomo
- Il protone ed il neutrone sono **10 volte più piccoli** del nucleo
- Elettroni e quark sono almeno **1000 volte più piccoli** dei protoni

Le quattro Forze Fondamentali

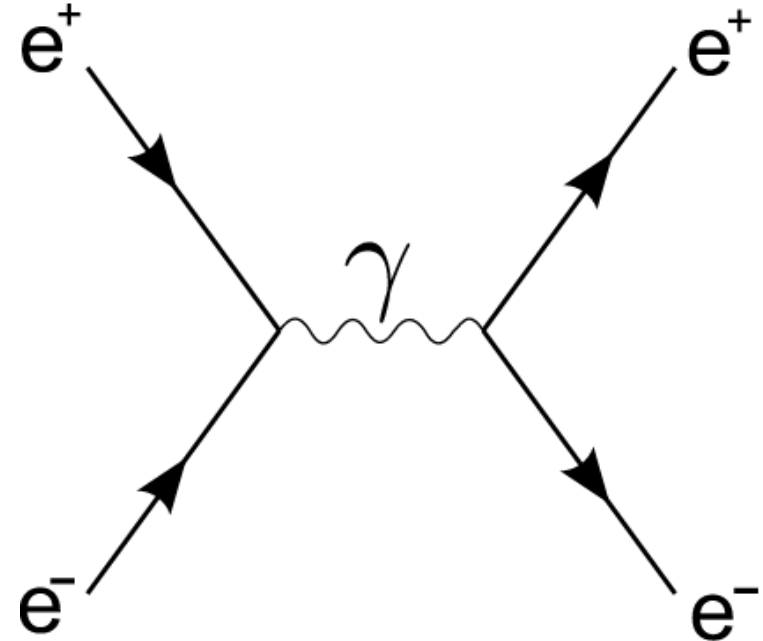
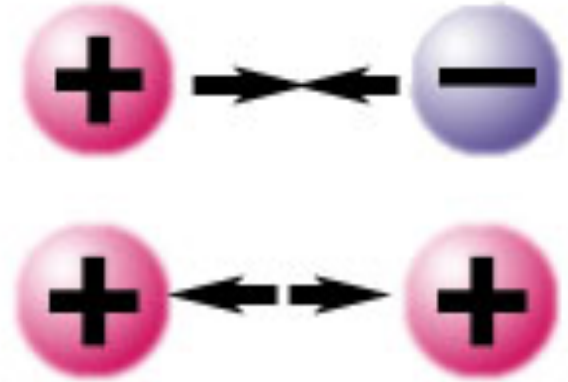


L'intensità relativa delle quattro forze fondamentali

| Tipo di forza | Intensità relativa | Dove si manifesta (esempi) |
|------------------|--------------------|------------------------------------|
| Nucleare forte | 1 | Nuclei atomici |
| Elettromagnetica | 0.001 | Elettricità, magnetismo |
| Nucleare debole | 0.00001 | Decadimenti radioattivi |
| Gravitazionale | 10^{-38} | Mantiene i nostri piedi a terra... |

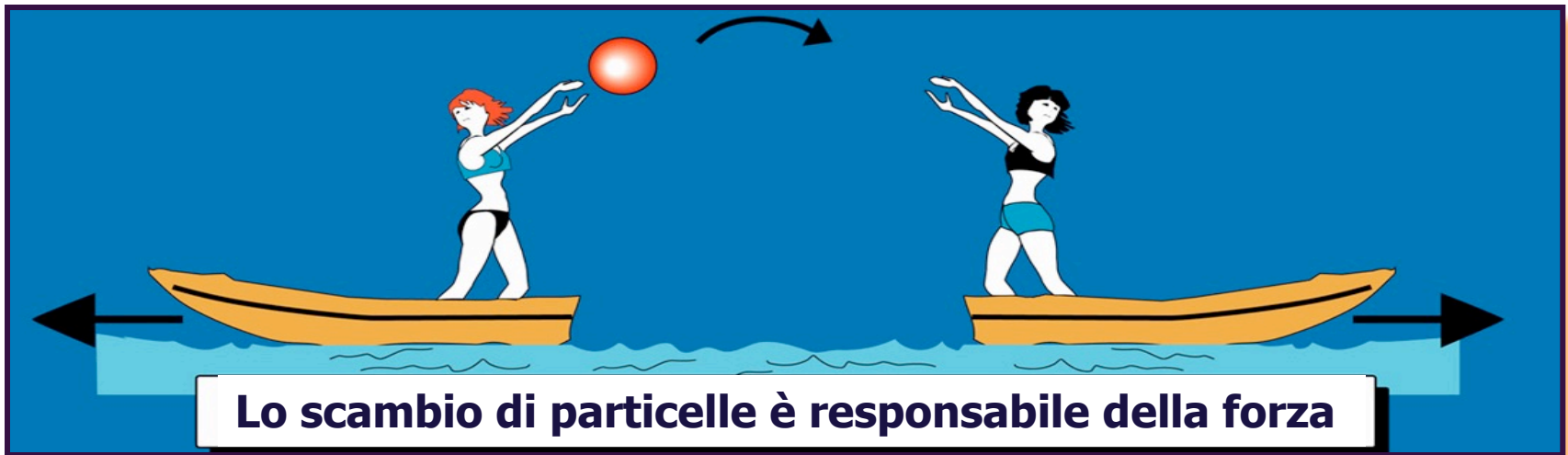
La forza elettromagnetica

- Si esercita tra particelle che posseggono una carica elettrica
- Il portatore della forza è il fotone (γ)
- Il fotone è senza massa e si propaga alla velocità della luce



Un concetto importante

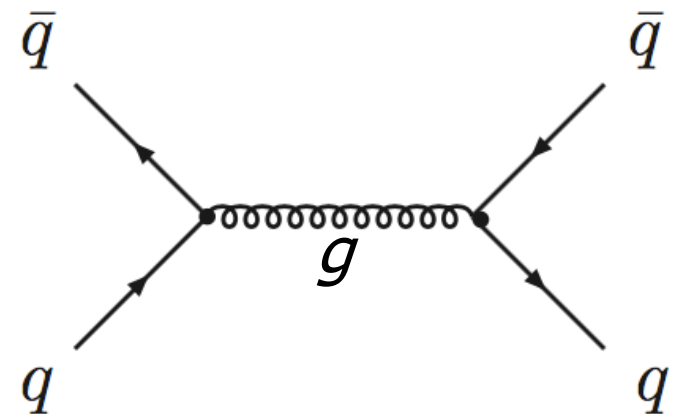
- La forza reciproca tra due particelle si esercita sempre mediante lo scambio di una o più particelle mediatrici



- Le caratteristiche della forza hanno a che fare con proprietà e modalità di comportamento delle particelle che agiscono da mediatrici


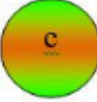


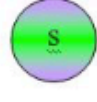







La forza nucleare forte

- In aggiunta alla carica elettrica, **esiste un altro tipo di carica**, che è posseduta dai quark, detta “**carica di colore**”
- Analogamente al caso della forza elettromagnetica, la forza nucleare forte si propaga **mediante lo scambio di una particella mediatrice**, anch'essa priva di massa, denominata **gluone (g)**



I quark

- Esistono in natura **sei tipi differenti di quark**
 - Più le rispettive particelle di antimateria, gli antiquark
- La maniera in cui interagiscono tramite la forza nucleare forte è **esattamente identica**
- Tuttavia i vari quark hanno **masse molto differenti** tra loro
- Il più pesante, il top, è circa 100000 volte più massiccio del più leggero, il quark up
- Up e down sono gli unici due quark che **costituiscono la materia ordinaria**

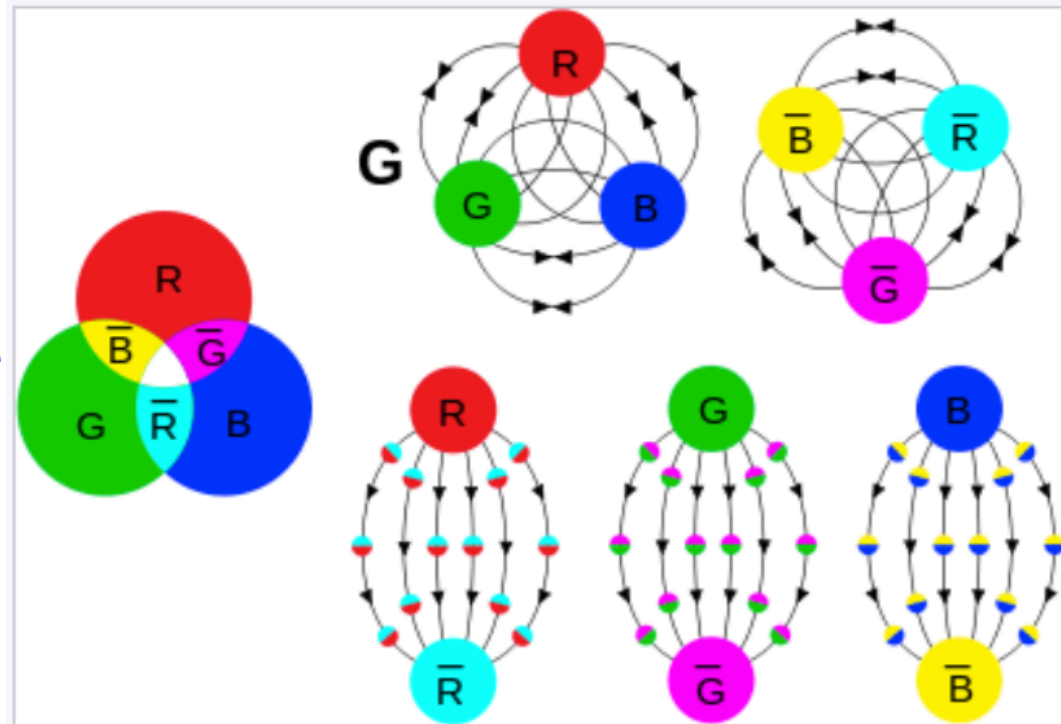
| Generation | | 1 | 2 | 3 |
|-------------|------|--|---|--|
| Quarks | +2/3 |  UP |  CHARM |  TOP |
| | -1/3 |  DOWN |  STRANGE |  BOTTOM |
| Anti-quarks | -2/3 |  ANTI-UP |  ANTI-CHARM |  ANTI-TOP |
| | +1/3 |  ANTI-DOWN |  ANTI-STRANGE |  ANTI-BOTTOM |

La carica di colore

- Nonostante l'apparente similarità con la forza elettromagnetica, la dinamica della forza nucleare forte è molto differente
- In luogo delle due cariche elettriche, positiva e negativa, esistono sei cariche di colore, convenzionalmente denominate **rosso**, **verde**, **blu**, **antirosso**, **antiverde**, **antiblu**

Perchè l'abbiamo chiamata convenzionalmente "carica di colore"

- Il motivo è che i quark che compongono una particella devono possedere **specifiche combinazioni di cariche di colore** tale che la particella risulti "non colorata"



- Questo si può ad esempio ottenere con tre particelle **rosso+verde+blu**, oppure con due particelle **rosso+antirosso**, **verde+antiverde** o **blu+antiblu**

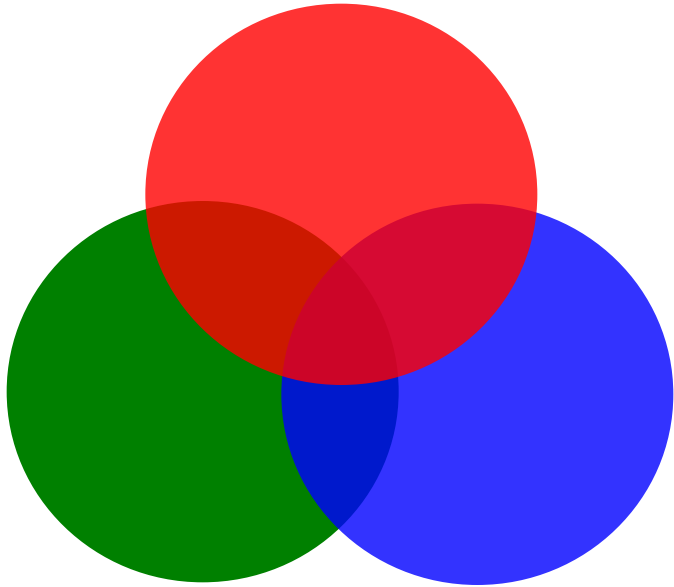
E i quark liberi?

- Tutte le particelle costituite da quark che osserviamo in natura sono **sempre neutre per carica di colore**
 - Non è possibile “ionizzare” una particella composta da quark, come possiamo fare ad esempio nel caso elettromagnetico con gli atomi strappando via elettroni dal nucleo

E i quark liberi?

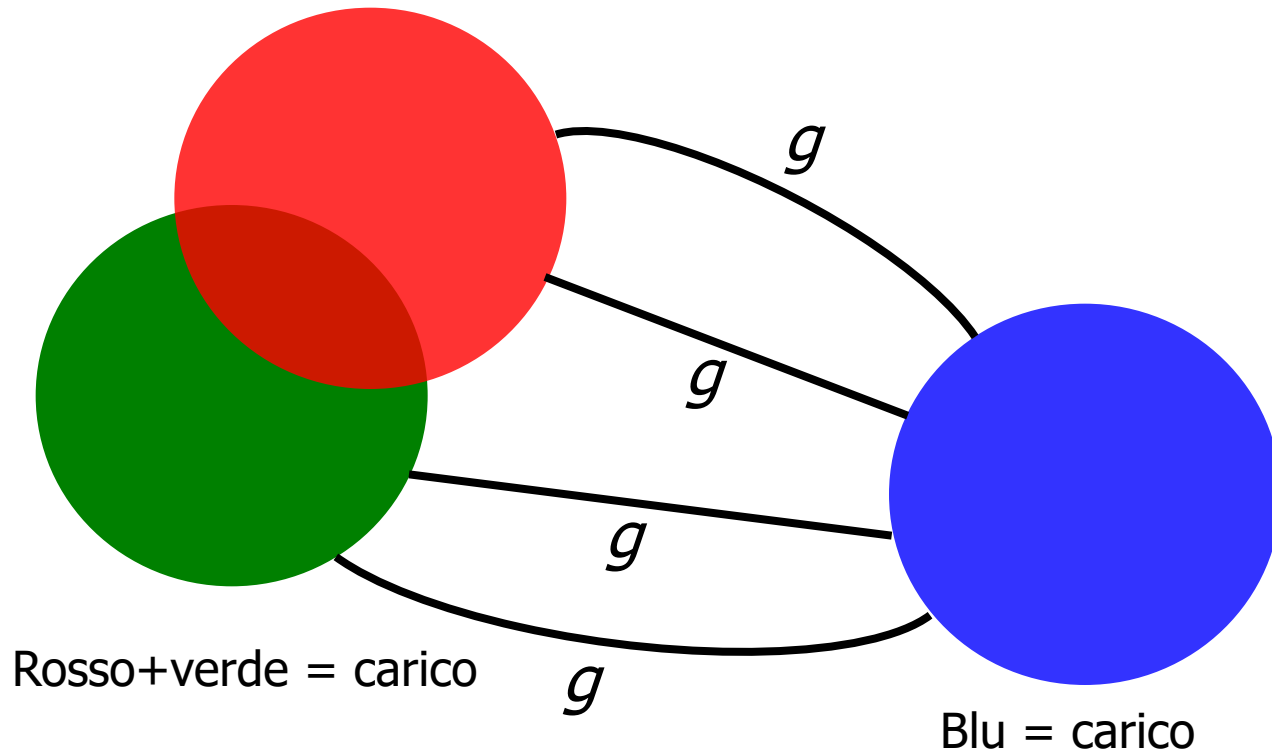
- Se i quark esistono, perchè non possiamo avere in natura un quark libero, cioè non associato ad altri quark all'interno di una particella composita neutra per carica di colore?
 - Il motivo è che la carica di colore libera **creerebbe un campo di forza così intenso** tale per cui l'energia di questo campo produrrebbe per conversione energia-materia nuovi quark per neutralizzarsi

E i quark liberi?

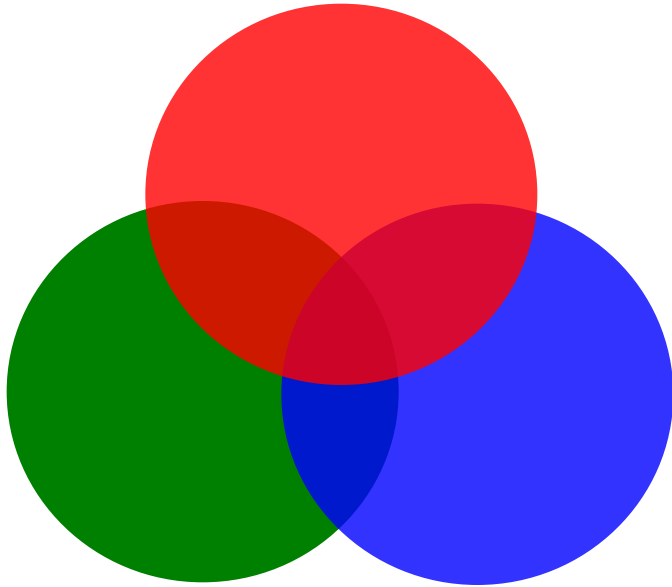


Rosso+verde+blu = neutro

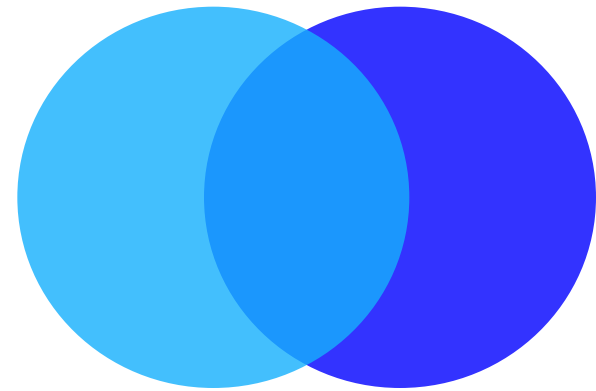
E i quark liberi?



E i quark liberi?



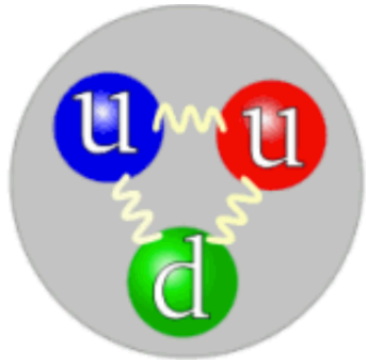
Rosso+verde+blu = neutro



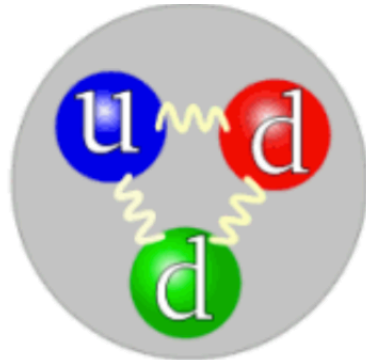
Antiblu+blu = neutro

- In questo caso l'energia del campo di gluoni si trasforma in una coppia di quark blu-antiblu in modo che ci troviamo alla fine con **due particelle neutre per carica di colore**

Protoni e neutroni



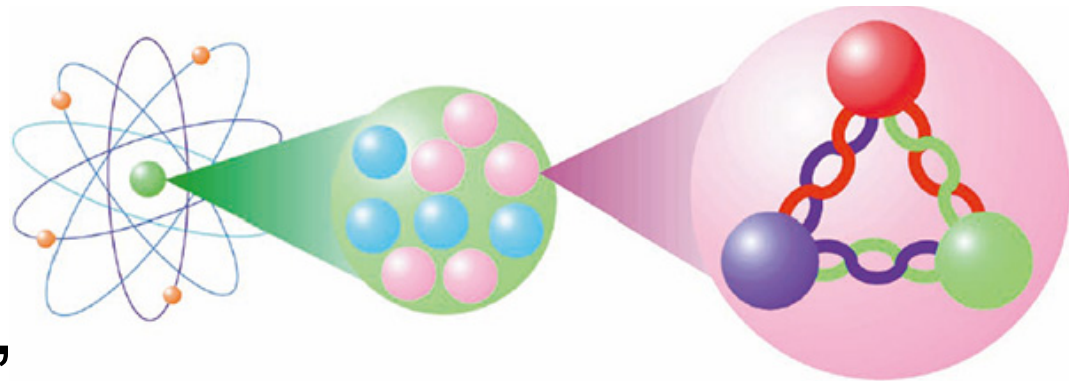
Protone



Neutrone

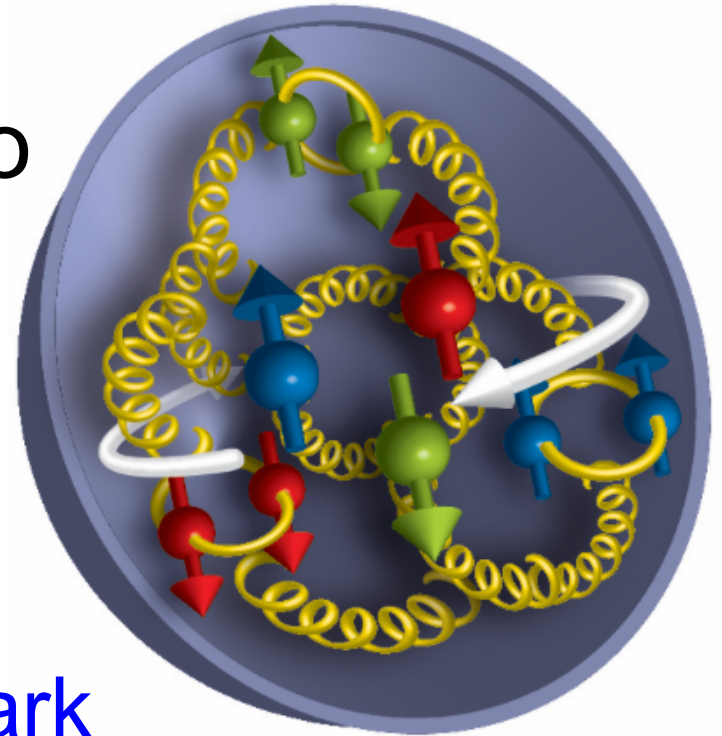
- Aggregazioni di quark up e down, compongono i nuclei degli atomi di cui siamo fatti

- Ma questa è una rappresentazione **molto semplificata**, le cose in realtà sono molto più complesse



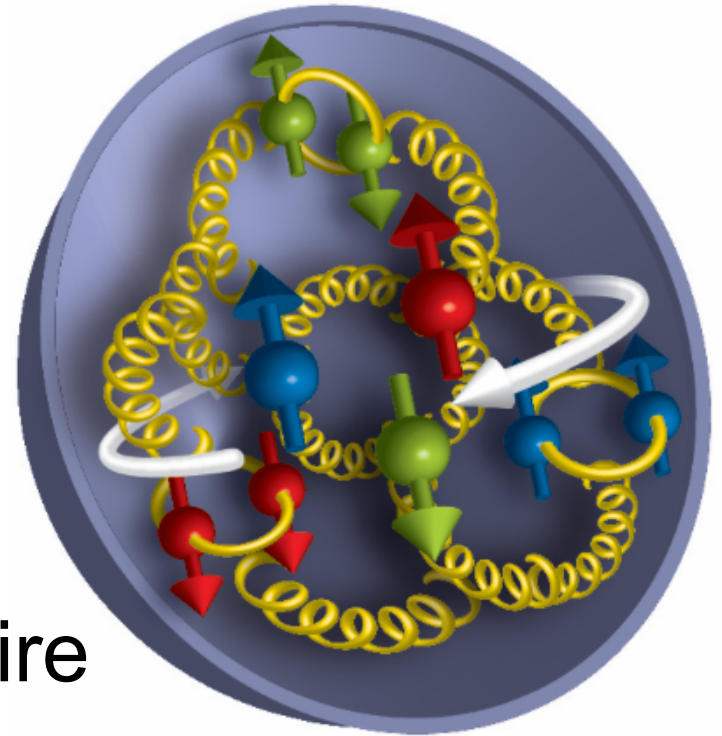
Il protone

- Un protone non è propriamente un oggetto statico
 - Oltre ai tre quark costituenti, contiene un **ribollire di gluoni e coppie di quark e antiquark** che si formano e si distruggono in continuazione in frazioni infinitesime di tempo muovendosi in maniera vorticososa



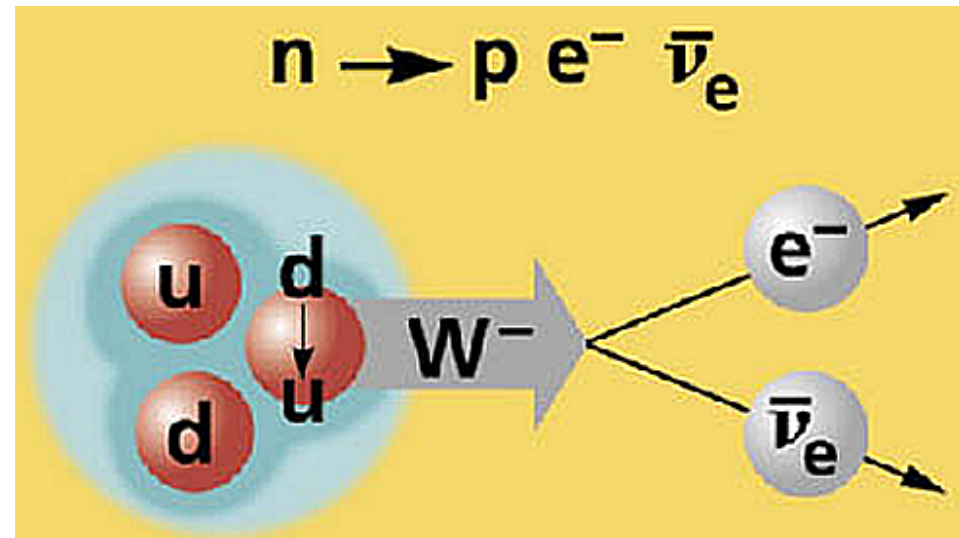
Il protone

- Se sommiamo la massa dei tre quark costituenti otteniamo **meno dell'un percento** della massa totale del protone
- Tutta la restante massa è dovuta all'energia del ribollire di gluoni e quark $\rightarrow E=mc^2$
- Tutta la massa che compone i nostri corpi è semplicemente **energia confinata nello spazio**
 - In effetti la massa è energia confinata!



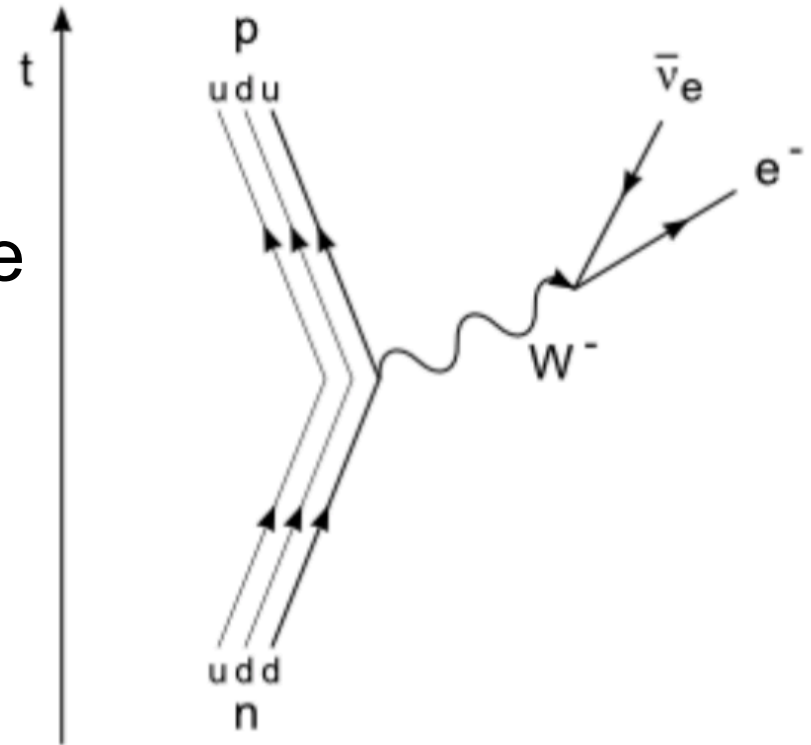
La forza nucleare debole

- Le interazioni deboli sono responsabili del decadimento dei quark e dei leptoni pesanti in quark e leptoni più leggeri
- In questo esempio un neutrone “decade” in un protone (quark d si trasforma in u) emettendo un elettrone e un antineutrino



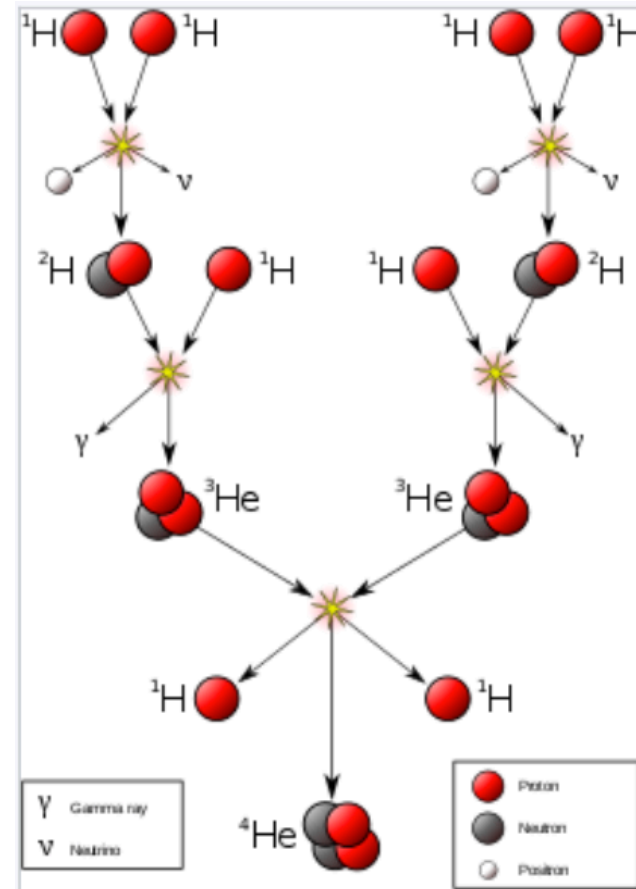
La forza nucleare debole

- Anche in questo caso, come di regola, l'interazione debole avviene tramite una particella mediatrice, che nel caso di un decadimento di un neutrone si chiama W^-
- Insieme alla particella Z , è responsabile delle interazioni deboli
- La loro scoperta condusse al Nobel di Carlo Rubbia nel 1984



Forze nucleari nella combustione delle stelle

- Entrambe le forze nucleari forte e debole sono necessarie per **attivare la combustione dell'idrogeno** per produrre energia all'interno delle stelle
- Le interazioni forti non sono in grado di trasformare un protone in un neutrone, quindi l'interazione debole è **necessaria** alla base della catena per avere neutroni da utilizzare per la fusione nucleare → senza interazioni deboli **le stelle non potrebbero esistere**

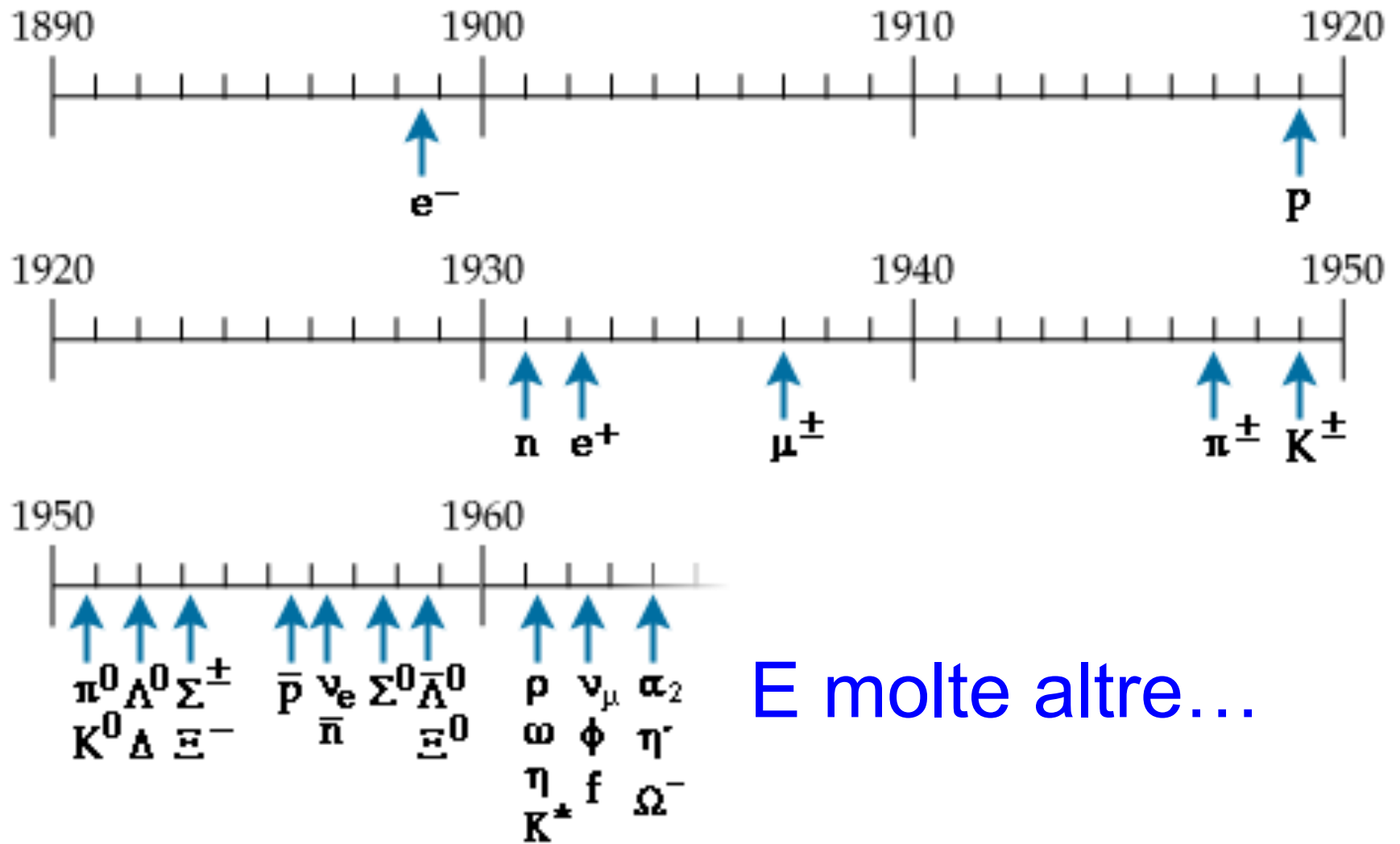


E la gravità?

- La gravità è la più debole delle forze
- È importante a distanze macroscopiche in presenza di grandi masse, ma è **del tutto trascurabile** quando si ha a che fare con singole particelle
- Oggi non ne parleremo, ma di fatto è ad oggi la forza che conosciamo meno
- Non siamo ancora riusciti a **integrare in maniera completa** la sua descrizione all'interno di una teoria quantistica di campo coerente
- Quando un giorno ne capiremo i dettagli probabilmente la cosa avrà delle conseguenze **molto importanti** sulla nostra comprensione dell'Universo

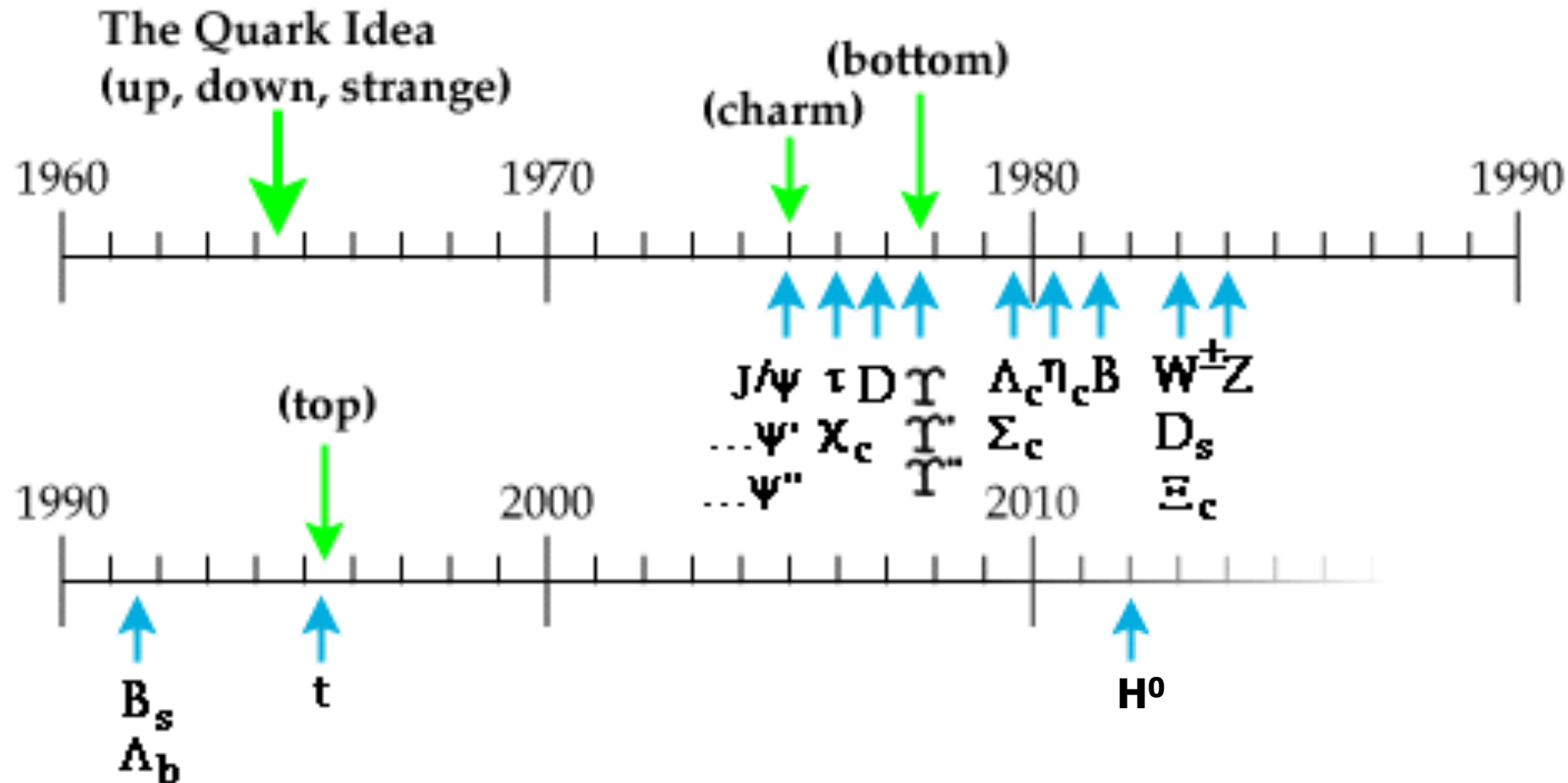


Esistono tante particelle...



E molte altre...

Ma oggi sappiamo che sono costituite da un numero ristretto di particelle fondamentali



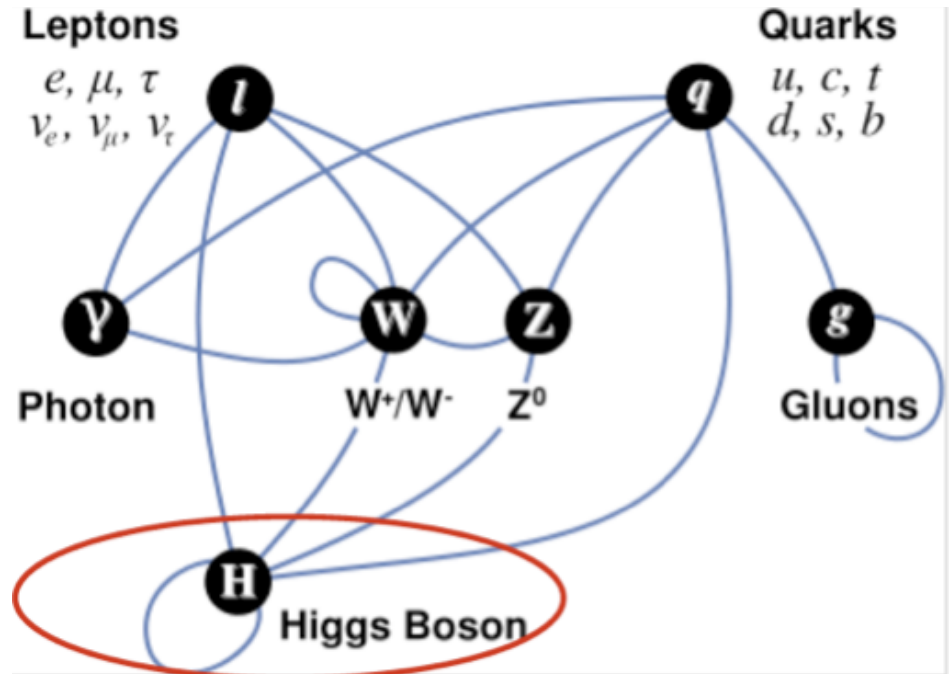
I costituenti fondamentali della materia nel Modello Standard delle particelle

| | | | | |
|--|---|--|---|---|
| UP mass $2,3 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$  | CHARM mass $1,275 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  | TOP mass $173,07 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  | GLUON 0 0 1  | HIGGS BOSON mass $126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0  |
| DOWN mass $4,8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  | STRANGE mass $95 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  | BOTTOM mass $4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  | PHOTON 0 0 1  | |
| ELECTRON mass $0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$  | MUON mass $105,7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$  | TAU mass $1,777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$  | Z BOSON mass $91,2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1  | |
| ELECTRON NEUTRINO mass $<2,2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$  | MUON NEUTRINO mass $<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$  | TAU NEUTRINO mass $<15,5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$  | W BOSON mass $80,4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1  | |

- Infatti conosciamo svariate centinaia di particelle
- Ma quasi tutte sono generate dall'unione di un insieme molto piccolo di particelle elementari

- 6 quark + 6 leptoni + 4 portatori di forza + la particella di Higgs

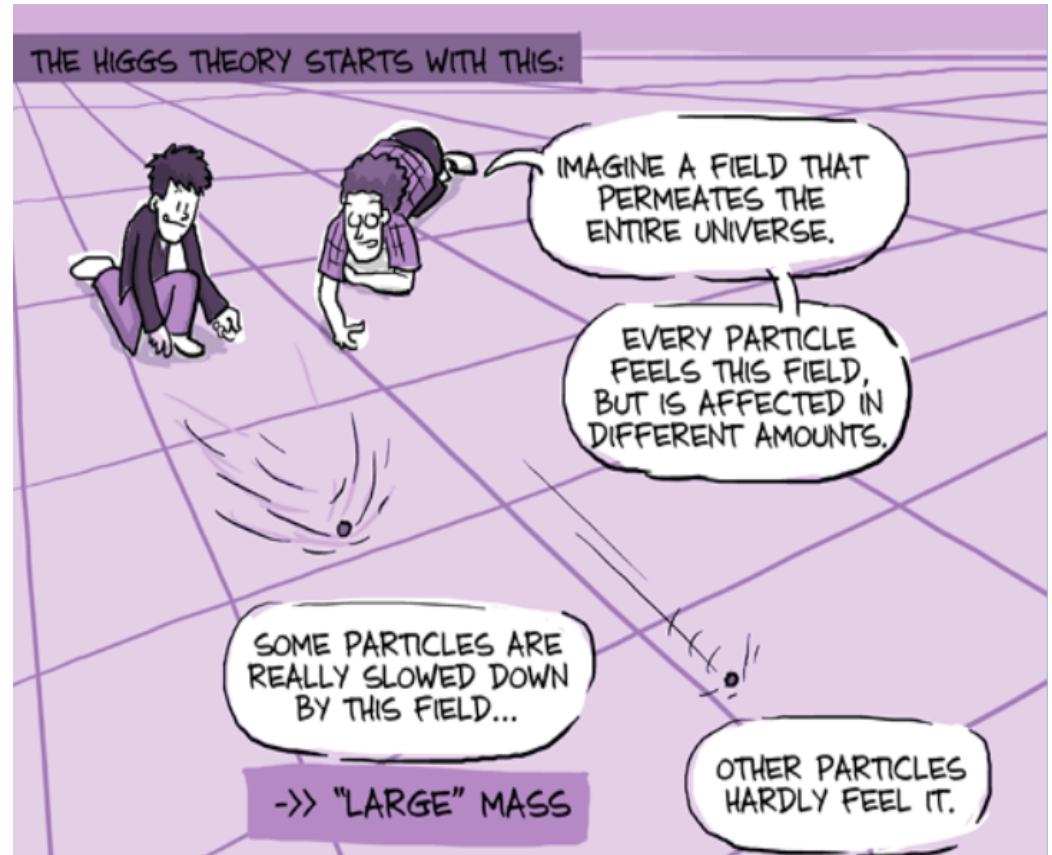
Il Campo di Higgs



- Tutte le particelle dotate di massa interagiscono con il campo di Higgs
 - Maggiore è la massa della particella e più è grande l'interazione con l'Higgs

Il meccanismo di Higgs

- Englert, Brout e Higgs postularono l'esistenza di un campo di forza che permea tutto l'Universo e che, interagendo con le particelle da' loro la massa



Un'analogia

Un modo per immaginare il Meccanismo di Higgs: lo spazio e' permeato di acqua (= campo di Higgs) che determina le caratteristiche di mobilita' (= massa) degli elementi che vi transitano (pesci = particelle)



pesante

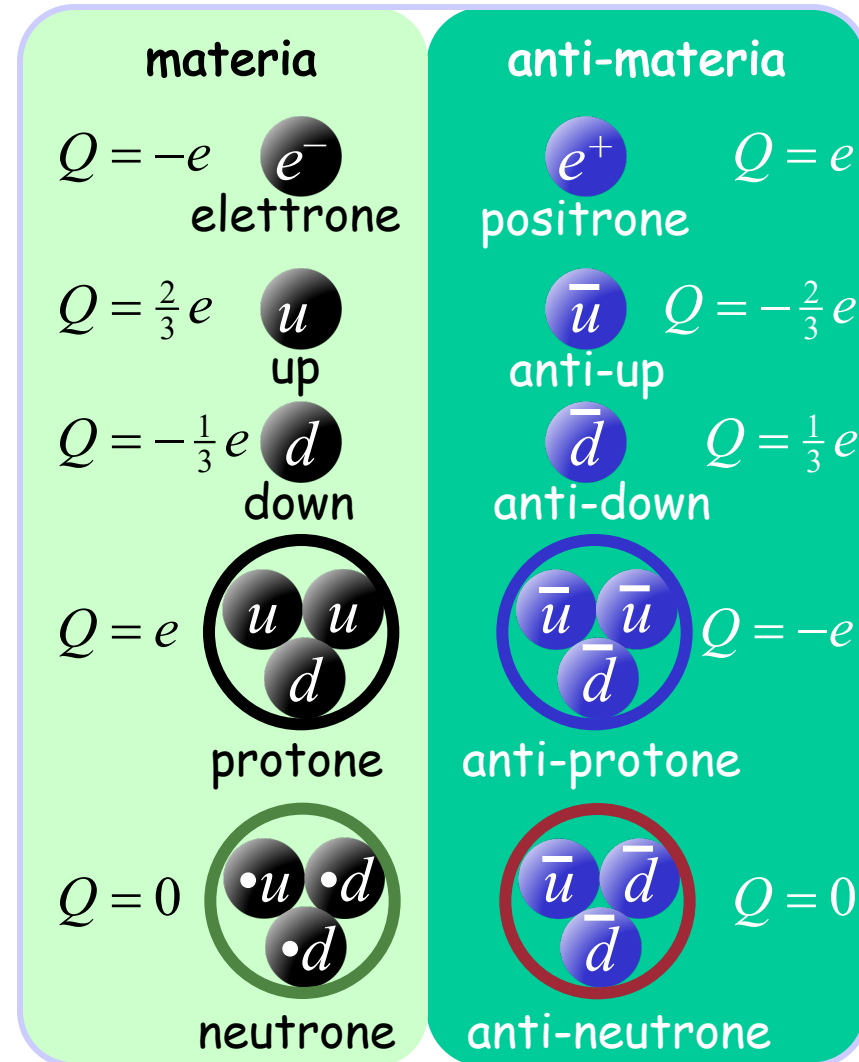


leggero



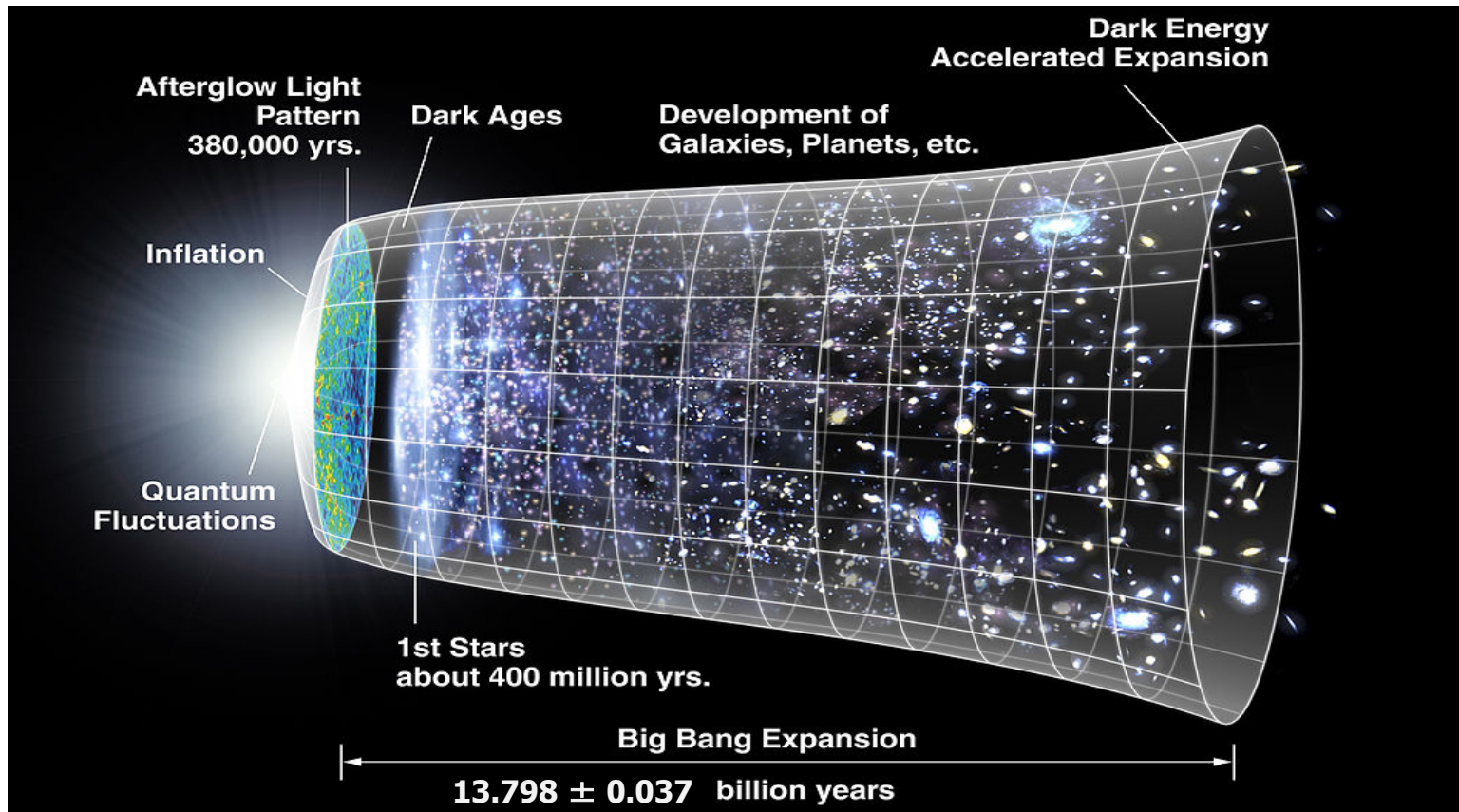
Le antiparticelle

- Per ogni **particella** costituente della materia esiste un'**antiparticella** costituente dell'antimateria
- Le antiparticelle sono **identiche** alle corrispettive particelle in tutto **eccetto** che nella **carica elettrica** e nel **momento magnetico**, che sono **opposti**
 - ad esempio, la carica del protone è positiva e quella dell'antiprotone è negativa
- Particelle e antiparticelle hanno la **stessa massa**



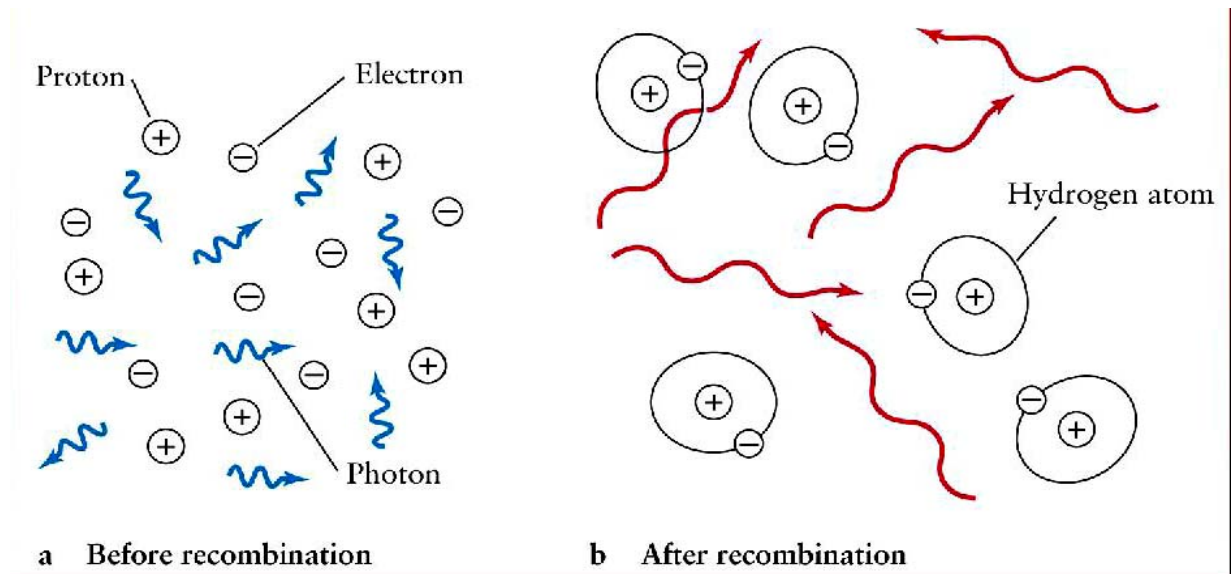
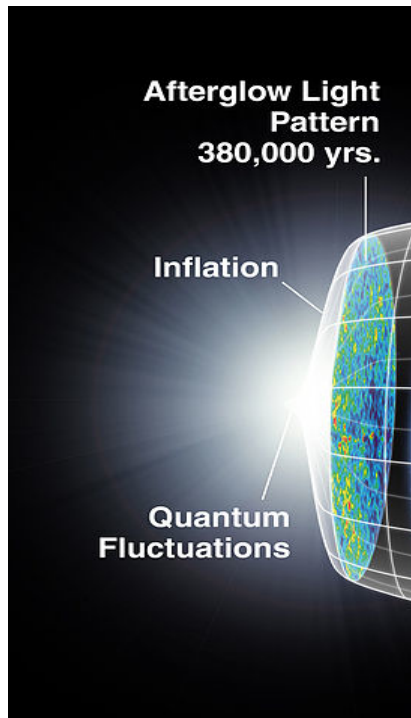
La cosmologia

Il Modello Standard della Cosmologia



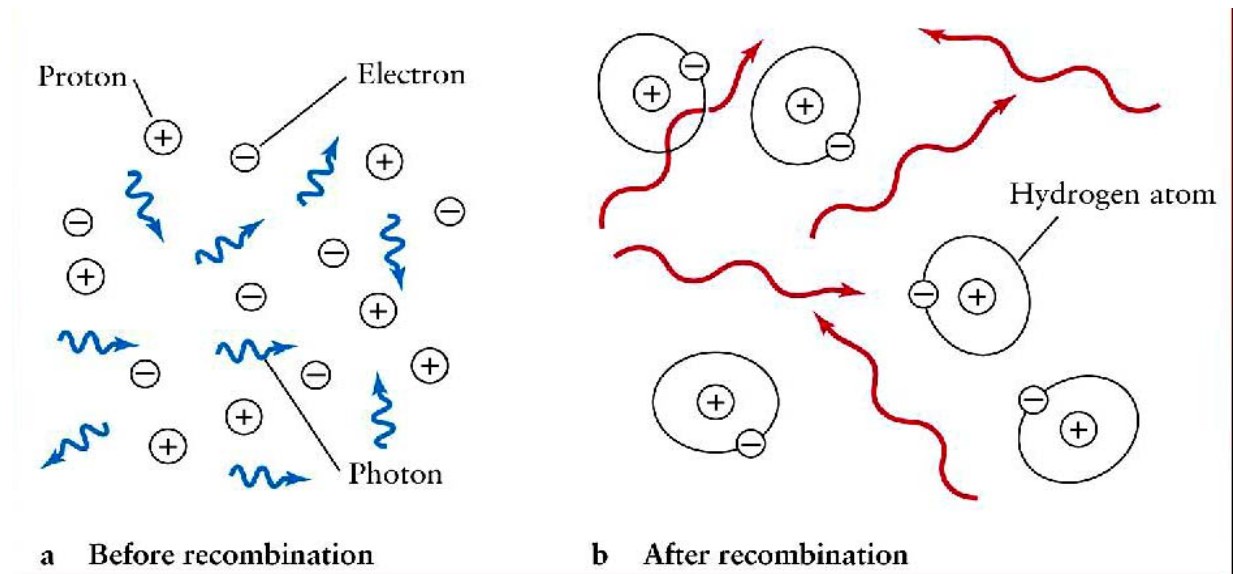
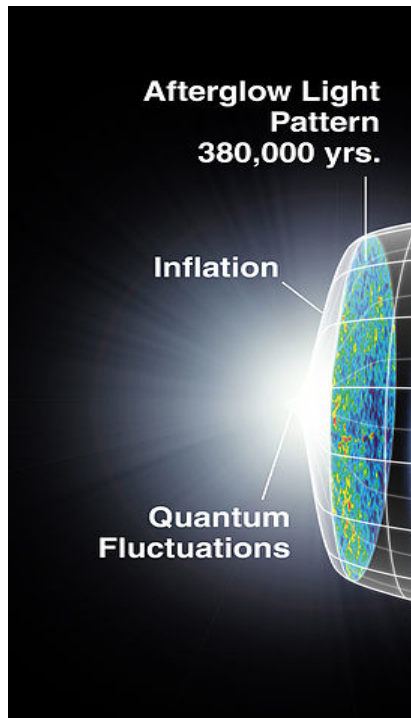
- La teoria del Big Bang, con l'aggiunta in una fase iniziale di espansione esponenziale (inflazione), costituisce la base della cosmologia moderna
- Ci sono molte fasi interessanti nell'evoluzione dell'Universo, alcune delle quali sono rappresentate in questa immagine

La Ricombinazione



- Questa fase ebbe luogo 380,000 anni dopo il Big Bang, quando l'Universo si era espanso al punto di raffreddarsi ad una temperatura inferiore ai 3000 K
 - Prima di questo periodo, a causa dell'elevata temperatura la materia era ionizzata, e la luce era continuamente emessa e riassorbita dagli elettroni liberi → la luce non poteva propagarsi e l'Universo era avvolto in una sorta di nebbia, opaco alla radiazione elettromagnetica

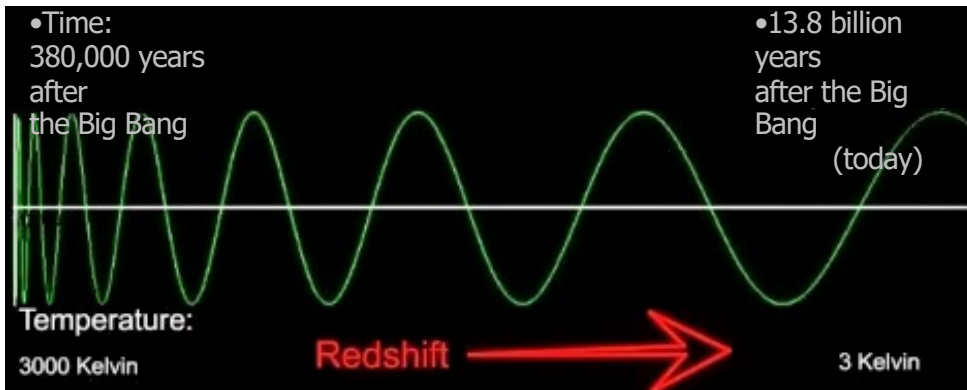
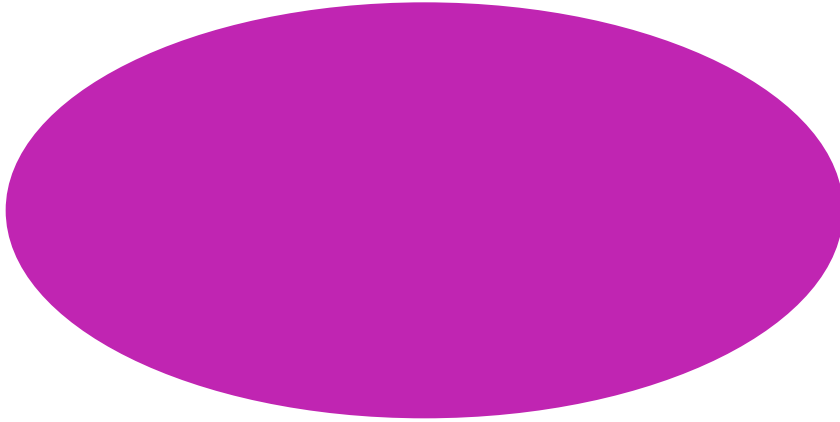
La Ricombinazione



- A $T=3000$ K, gli elettroni si sono combinati con i nuclei
 - H e He in massima parte
- La materia presente nell'Universo diventò neutra e la luce per la prima volta poté viaggiare per lunghe distanze senza essere riassorbita, raggiungendoci oggi dopo 13.8 miliardi di anni

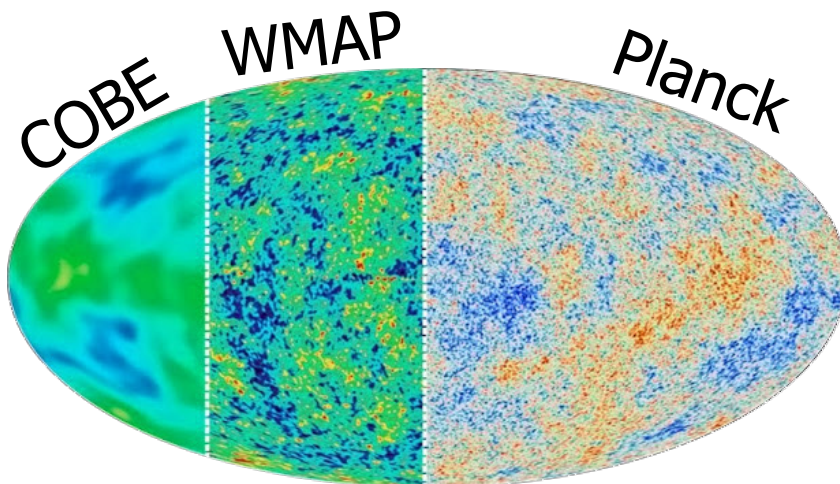
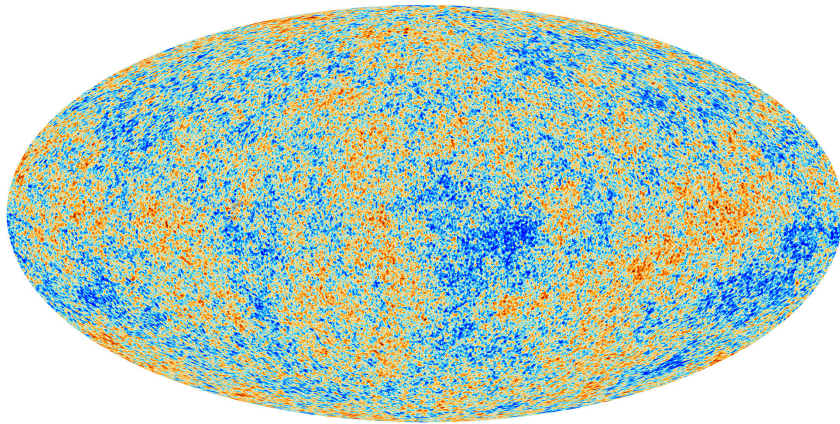
Il Fondo Cosmico a Microonde

Se avessimo occhi sensibili alle microonde



- Guardando il cielo con rivelatori sensibili alle microonde, si osserva una **radiazione di corpo nero uniforme in tutte le direzioni alla temperatura di 2.7255 K**
 - Questo è quanto rimane della radiazione emessa a $T \approx 3000$ K all'epoca della Ricombinazione
 - Da allora, a causa dell'espansione dell'Universo la lunghezza d'onda è stata stirata (red shift) e la frequenza della radiazione quindi ridotta
 - per questo ora la radiazione corrisponde ad una temperatura di soli 2.7 K

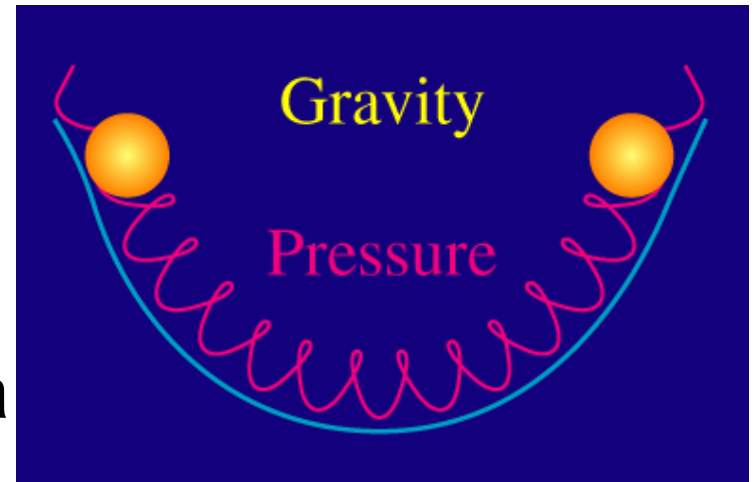
Fluttuazioni della temperatura del fondo a microonde



- Ma guardando con strumenti più sensibili (in particolare satelliti Planck, e prima ancora WMAP e COBE), si possono osservare fluttuazioni della temperatura al variare del punto osservato al livello dello **0.001%** ($\approx 10 \mu\text{K}$)
- Queste fluttuazioni riflettono le variazioni in densità del plasma prima dell'epoca della Ricombinazione

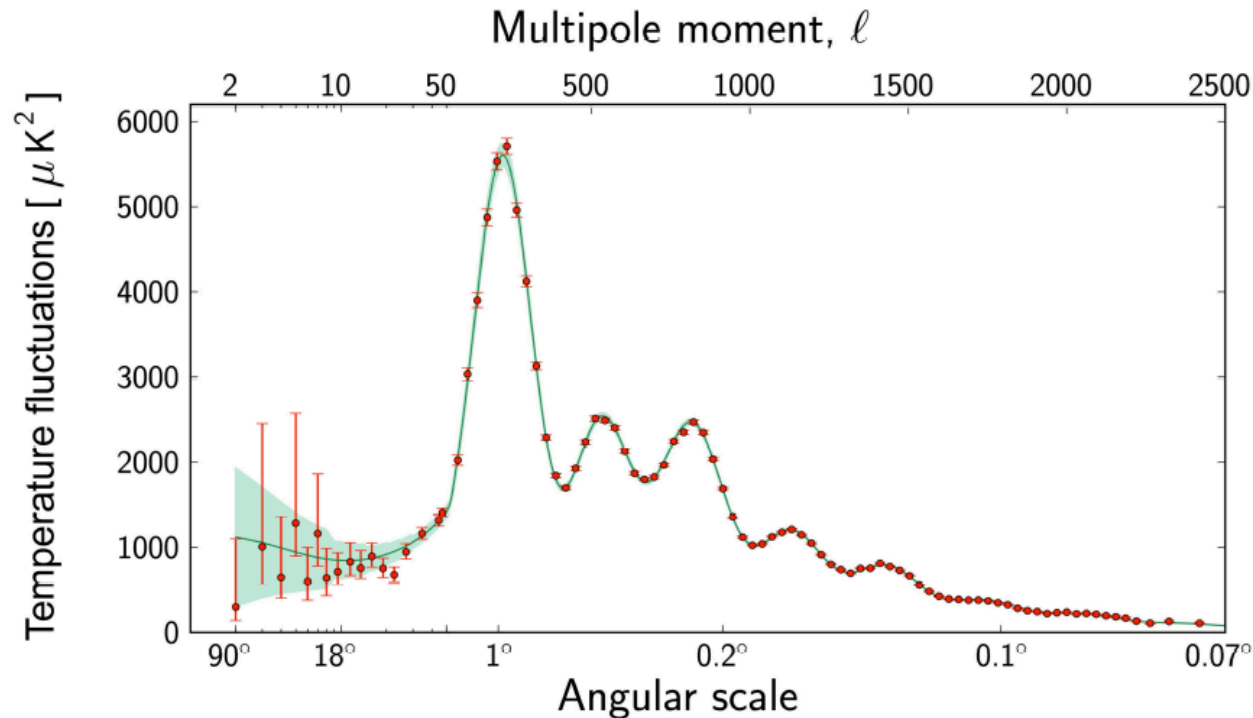
La sinfonia cosmica

- Prima della Ricombinazione, queste fluttuazioni di densità si propagavano nel plasma sotto forma di onde acustiche governate dalla gravità e dalla pressione di radiazione che agivano sulla materia ionizzata
- **Aspetto importante:** studiando la decomposizione spettrale di queste onde acustiche, possiamo ottenere informazioni molto precise sull'esatta composizione del plasma primordiale



Wayne Hu, University of Chicago

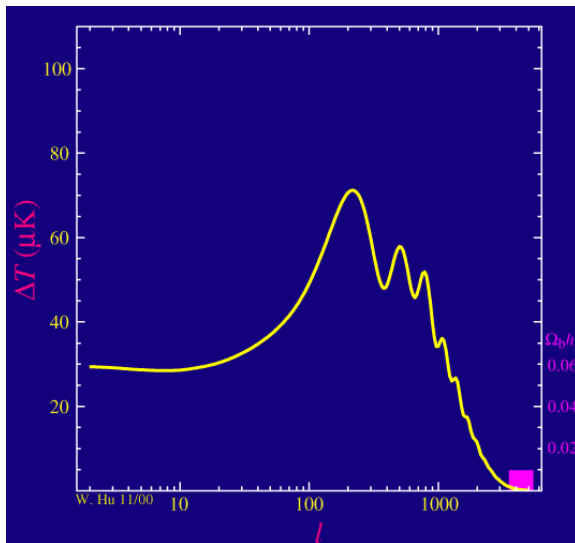
Spettro di potenza del fondo a microonde



- Lo spettro di potenza del fondo a microonde è descritto con incredibile accuratezza dal modello cosmologico standard (Λ CDM)
- Questi dati determinano i parametri cosmologici con altissima precisione
 - ad esempio, quanta materia ordinaria, quanta materia oscura, quanta energia oscura, ecc.

Sensibilità dello spettro di potenza

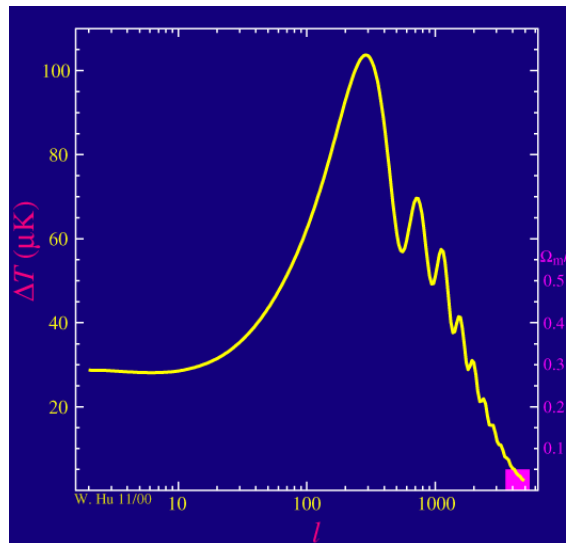
Materia ordinaria



Aumentando la densità di materia ordinaria, i picchi dispari aumentano la loro altezza rispetto ai picchi pari

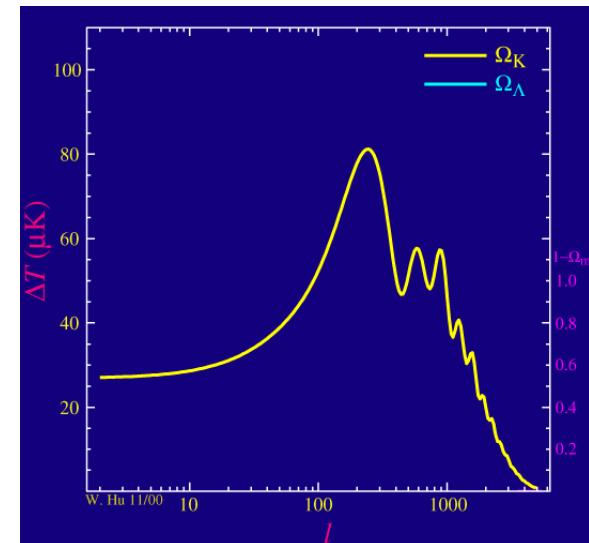
Wayne Hu, University of Chicago

Materia oscura



Se facciamo aumentare la densità di materia oscura, l'ampiezza di tutti i picchi diminuisce

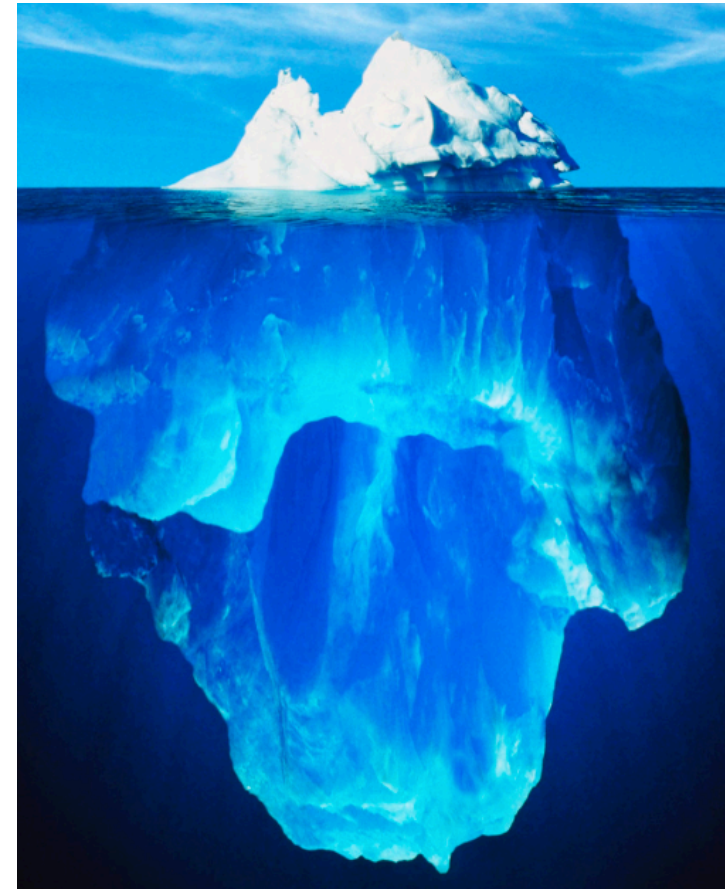
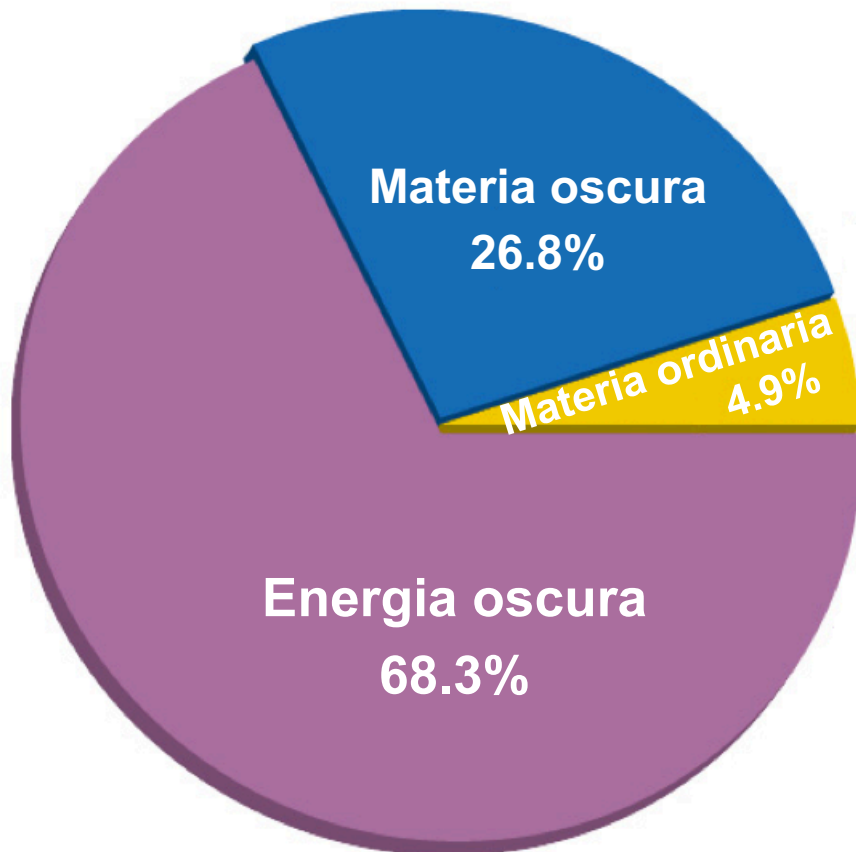
Curvatura spaziale e energia oscura



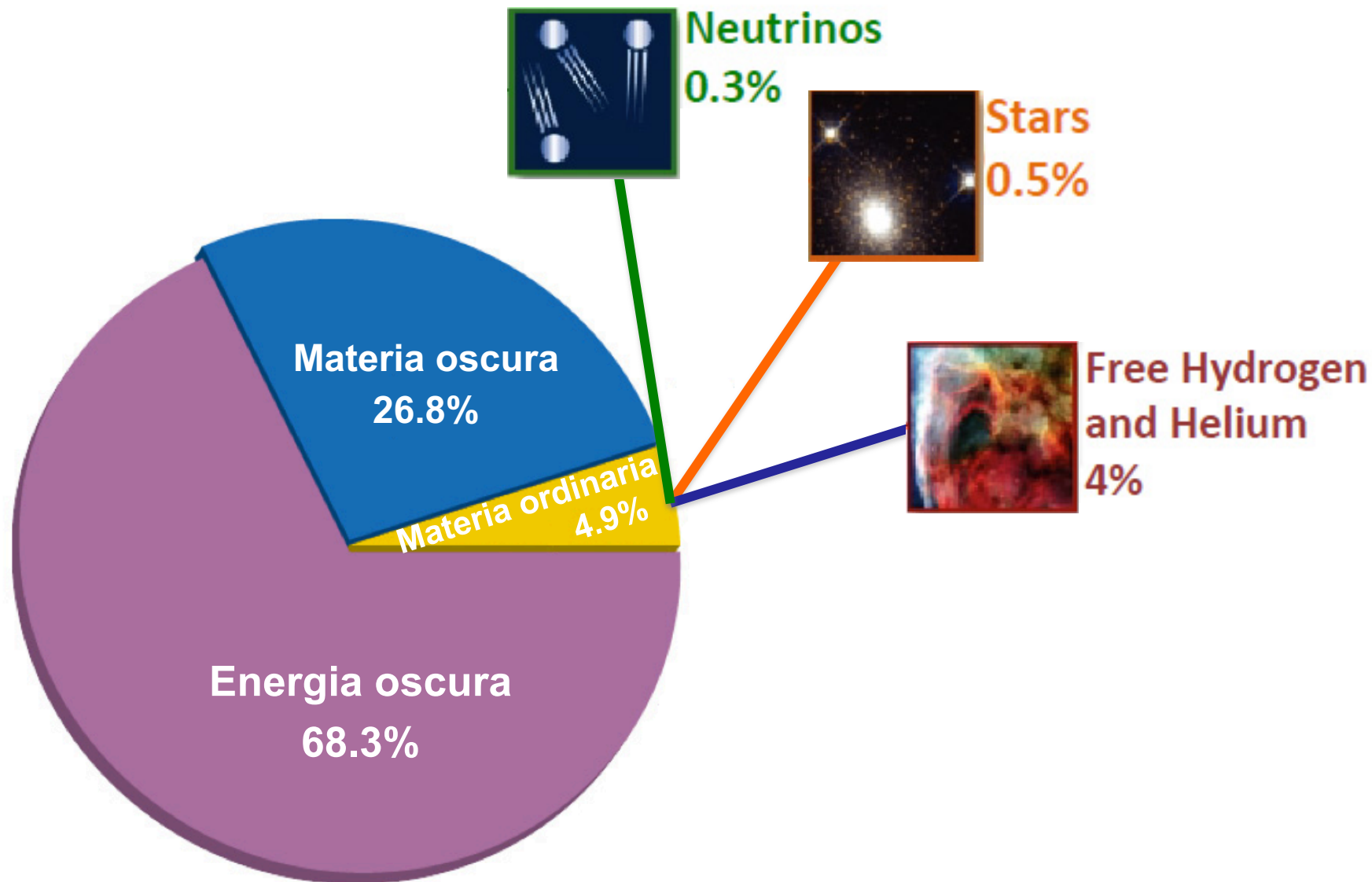
Se aumentiamo la curvatura dello spazio e la densità di energia oscura, i picchi si spostano a destra e a sinistra

Abbondanza di materia ordinaria, materia oscura ed energia oscura determinata dal fondo a microonde

- La materia ordinaria è solo la punta dell'iceberg: ~5% della densità totale di materia-energia dell'Universo



Abbondanza di materia ordinaria, materia oscura ed energia oscura determinata dal fondo a microonde

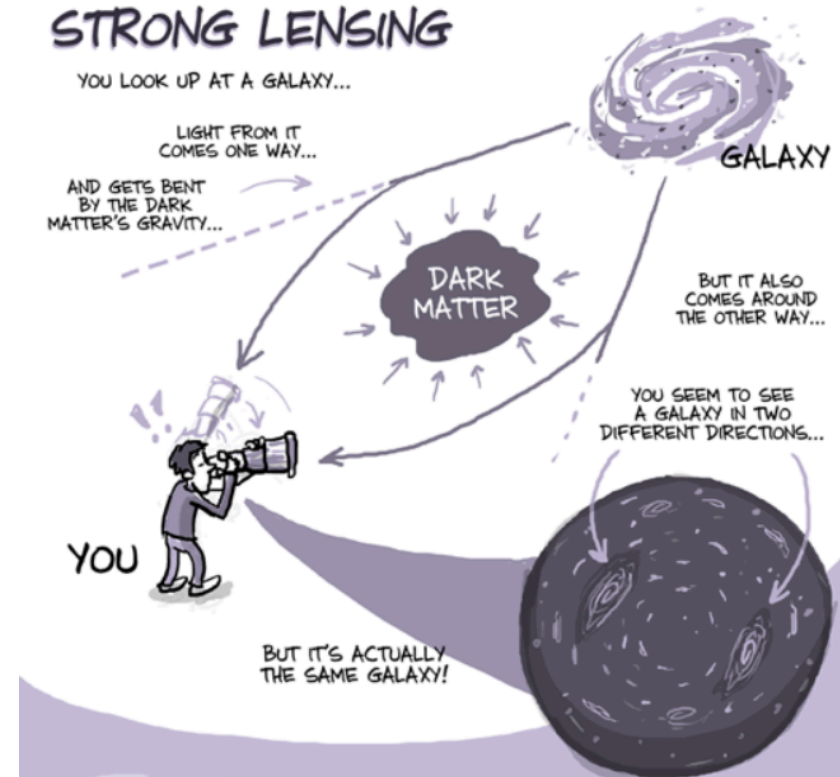
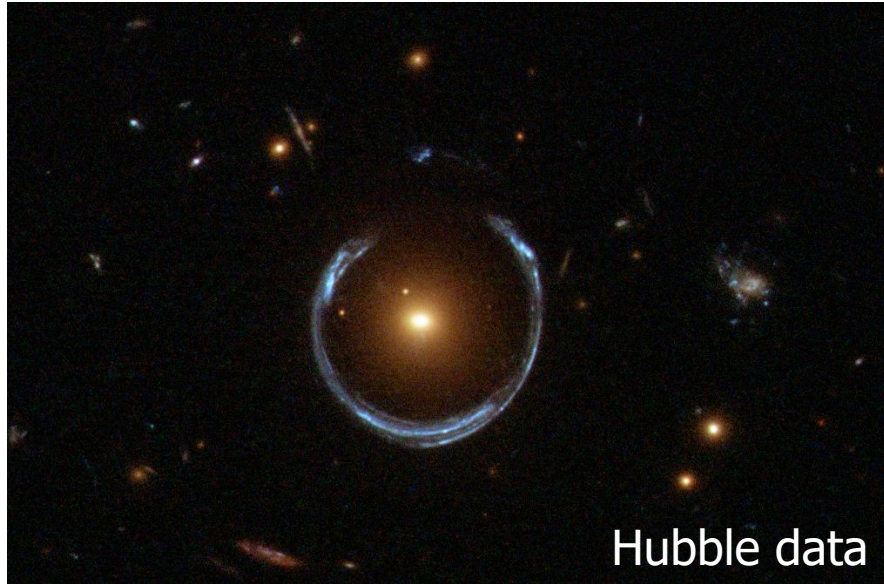


Abbondanza di materia ordinaria, materia oscura ed energia oscura determinata dal fondo a microonde



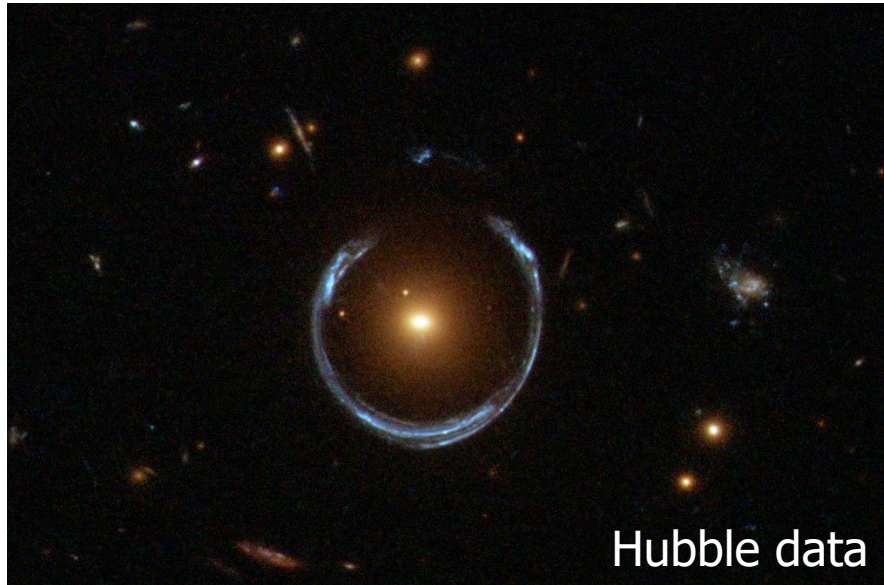
Evidenze astronomiche di materia oscura

Lenti gravitazionali

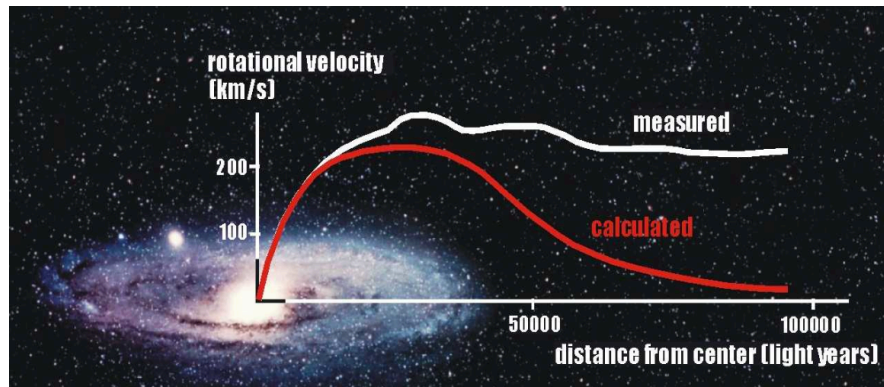


Evidenze astronomiche di materia oscura

Lenti gravitazionali

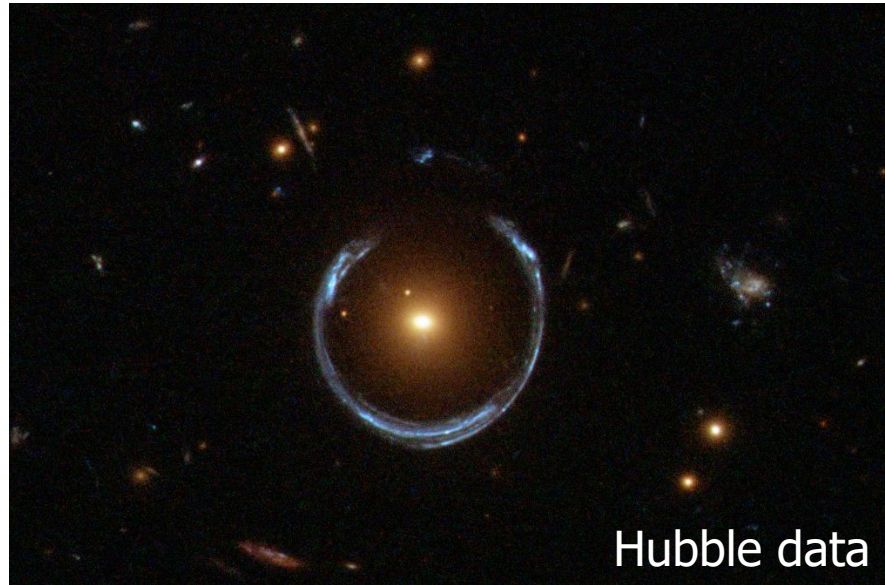


Velocità di rotazione delle galassie



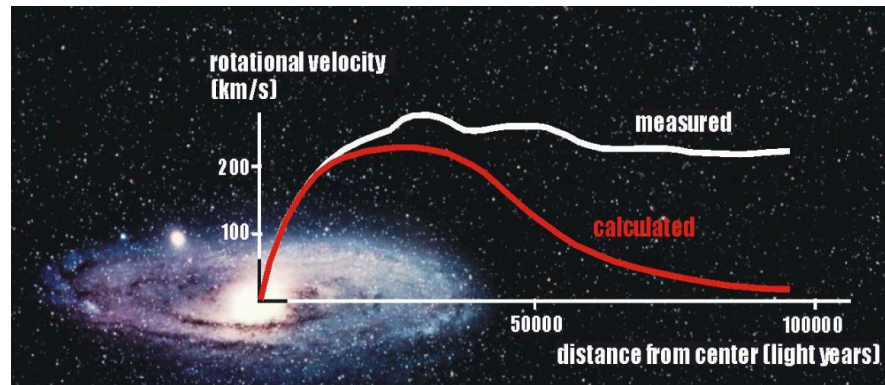
Evidenze astronomiche di materia oscura

Lenti gravitazionali



- Molte osservazioni indipendenti (non solo quelle mostrate qui) sono in ottimo accordo tra di loro
- Si noti che l'esistenza di materia invisibile nell'Universo era stata congetturata già negli anni '30 del secolo scorso misurando le velocità relative delle galassie che fanno parte del cluster Coma, stimando in questo modo la massa del cluster stesso
 - la massa risultò essere molto maggiore rispetto a quella visibile che si poteva dedurre dalla luce emessa dalle stelle visibili

Velocità di rotazione delle galassie



- **La materia oscura oggi è una solida evidenza sperimentale**

Alcune questioni irrisolte

- Se antimateria e materia erano presenti in quantità uguali dopo il Big Bang, perché solo la materia è sopravvissuta?
- Di cosa è composta la materia oscura?
- Di cosa è composta l'energia oscura?

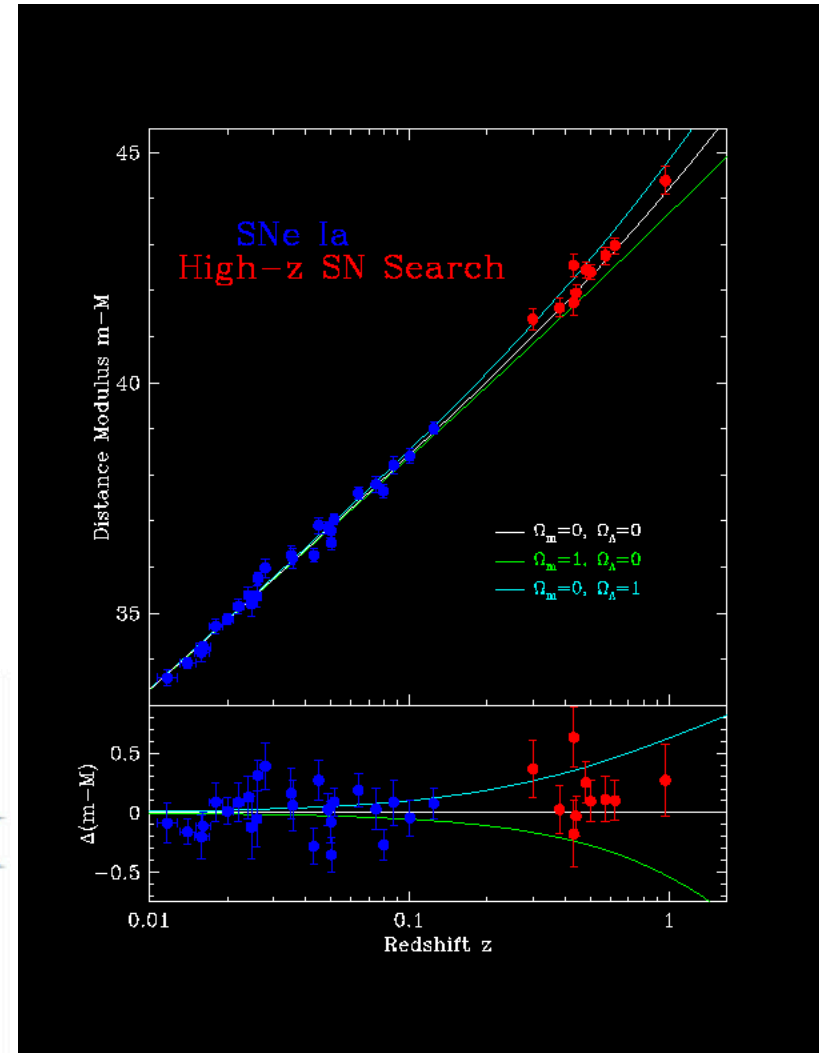
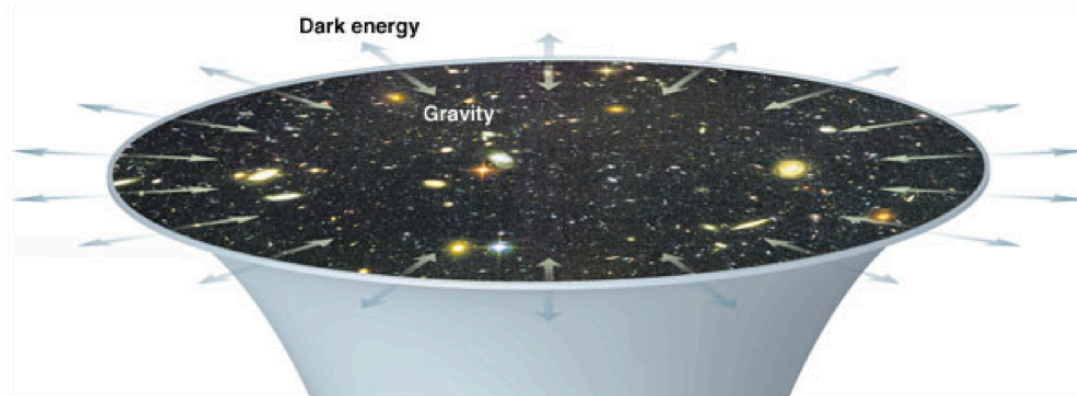
Di cosa è composta l'energia oscura?

Di cosa è composta l'energia oscura?

Non ne abbiamo idea!

Di cosa è composta l'energia oscura?

- Sappiamo che non è materia e che agisce come una forza gravitazionale repulsiva
- Si ipotizza che sia ciò che provoca l'accelerazione dell'espansione dell'Universo durante gli ultimi 5 miliardi di anni



L'antimateria in natura

- **Non** c'è evidenza di **antimateria primaria** nell'Universo
 - La **distanza minima** dalla Terra di un **eventuale dominio di antimateria** è comparabile con la **scala dell'orizzonte visibile** (alcuni Gpc)
 - Deve esistere un **meccanismo asimmetrico** che “preferisce” la **materia** all'antimateria
- Quanto deve essere stata **intensa** inizialmente quest'asimmetria? **Quale eccesso di materia** rispetto all'antimateria deve essersi verificato?
 - In realtà **meno di quanto si possa pensare**
 - Sono necessarie **poche parti ogni 10 miliardi**

La teoria più accreditata è che l'antimateria non esiste più

- Le particelle di antimateria si sono annichilate con quelle di materia, ma una **piccolissima differenza** tra materia e antimateria ha permesso che nell'Universo sia sopravvissuta una **piccolissima quantità di materia**
 - Ogni 10 miliardi di particelle e antiparticelle che si sono annichilate, una manciata di particelle di materia sono sopravvissute
 - La radiazione prodotta in questo gigantesco processo di annichilazione è ciò che oggi possiamo osservare come radiazione di fondo a microonde
- **Ma da dove ha origine questa piccolissima differenza?**



Sappiamo spiegare questa piccola differenza di comportamento tra materia e antimateria?

- Qualitativamente si
 - il Modello Standard include un meccanismo che descrive l'asimmetria materia-antimateria e funziona molto bene per descrivere i risultati degli esperimenti agli acceleratori
- Sulla base del Modello Standard delle particelle si può calcolare il rapporto previsto tra il numero di particelle barioniche e quello dei fotoni presenti nell'Universo

$$\eta = \frac{n_B}{n_\gamma} \sim \frac{(m_t^2 - m_u^2)(m_t^2 - m_c^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_s^2 - m_d^2)A}{M^{12}}$$

dove $A \approx 3 \times 10^{-5}$ e $M \approx 100 \text{ GeV}$

Sappiamo spiegare questa piccola differenza di comportamento tra materia e antimateria?

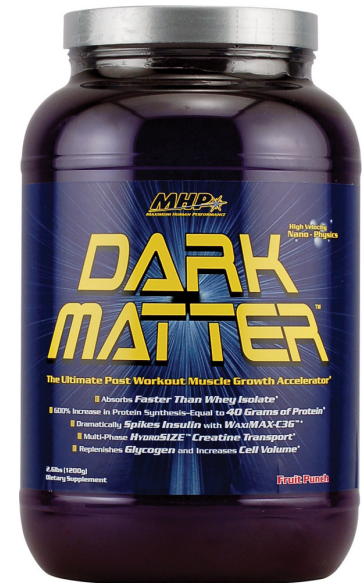
- Inserendo i valori sperimentali delle masse dei quark, si ottiene $\eta \approx 10^{-19}$, mentre la misura di precisione usando i dati del fondo a microonde è

$$\eta = (6.04 \pm 0.08) \times 10^{-10}$$

- Fuori di 10 ordini di grandezza \rightarrow il Modello Standard delle particelle elementari fallisce in modo clamoroso da un punto di vista quantitativo!

Di cos'è composta la materia oscura?

- I tentativi di spiegare la totalità della materia oscura come composta da oggetti astronomici che non emettono luce è fallita
- Le proprietà della materia oscura cominciano ad essere ben delineate
 - Interagisce gravitazionalmente
 - È stabile su scale di tempi cosmologici
 - È “fredda”, cioè si muove a velocità piccole rispetto alla velocità della luce
 - Non è composta da barioni
 - Deve interagisce molto debolmente con la materia ordinaria

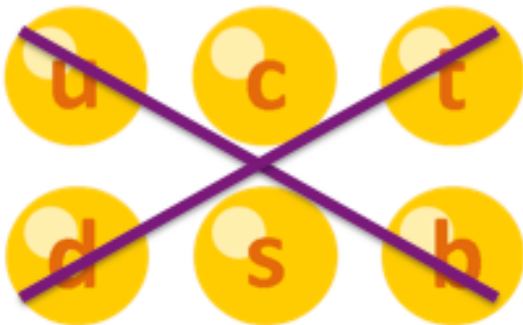


Di cos'è composta la materia oscura?

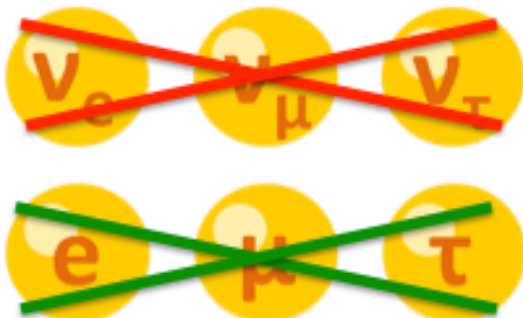
Fermions

matter particles

Quarks

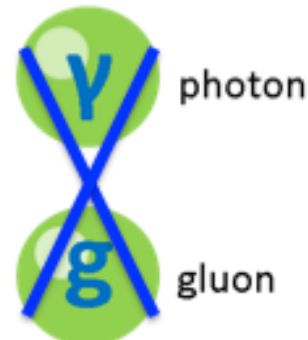


Leptons



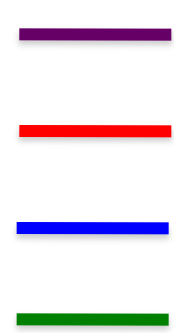
Gauge bosons

force carriers



Higgs boson

origin of mass



Barioni

“Caldi”

Senza massa

Carichi/instabili

Non è costituita da particelle conosciute!

Come si indaga la natura della materia oscura?

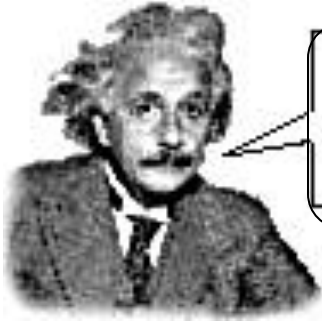
- Cercare interazioni di materia oscura preesistente nell'universo con rivelatori molto massivi a terra
 - Ad esempio esperimenti sotterranei ai laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sotto il massiccio del Gran Sasso
- Cercare segnali di annichilazione di particelle di materia oscura e le rispettive antiparticelle nell'Universo, o decadimenti di materia oscura
 - Sia con esperimenti a terra che su satellite

Come si indaga la natura della materia oscura?

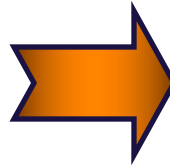
- Produrre particelle di materia oscura nelle collisioni ultra energetiche agli acceleratori di particelle per rivelare direttamente la loro esistenza e studiarne le proprietà
 - Ad esempio questo è quello che si fa con gli esperimenti ATLAS e CMS al CERN
- Studiare processi a bassa energia ma con alta precisione per rivelare effetti quantistici di particelle virtuali
 - Ad esempio esperimento LHCb al CERN

Lo studio delle particelle elementari

Come si producono le particelle?

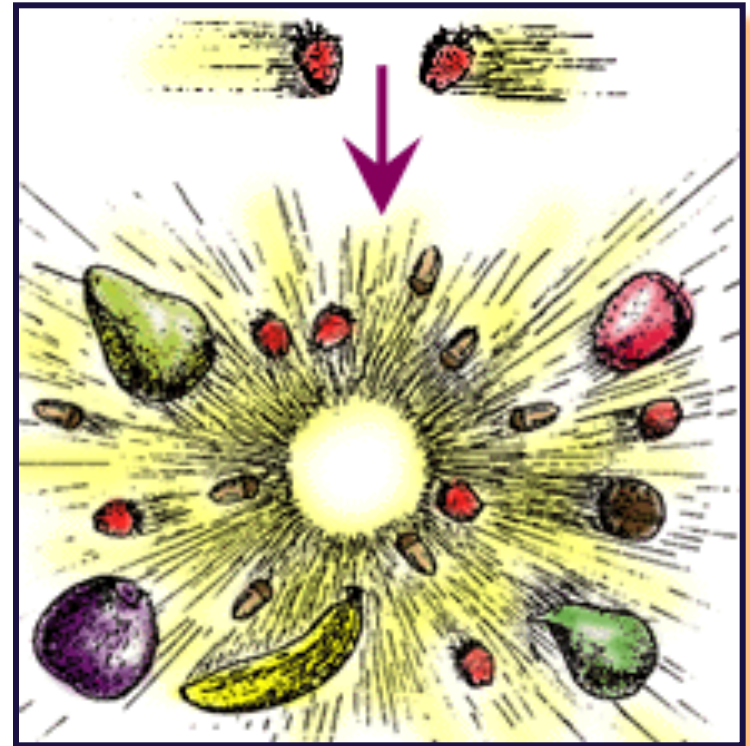


- *La massa è una*
- *forma di energia*

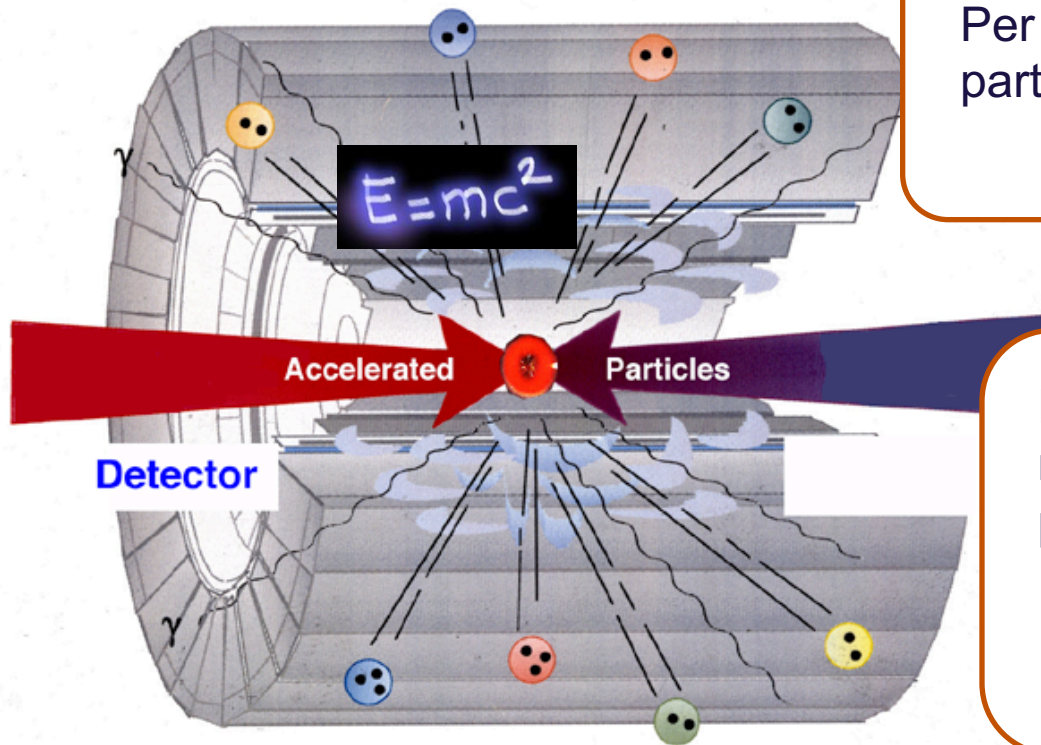


$$E=mc^2$$

- Per studiare particelle di grande massa e molto instabili si utilizzano particelle ordinarie, di piccola massa cui viene fornita una energia cinetica elevata **mediante un acceleratore**



Con quali strumenti si osservano?



Per concentrare l'energia sulle particelle e farle collidere

↳ Acceleratori

Per osservare, identificare, misurare le proprietà delle nuove particelle così create

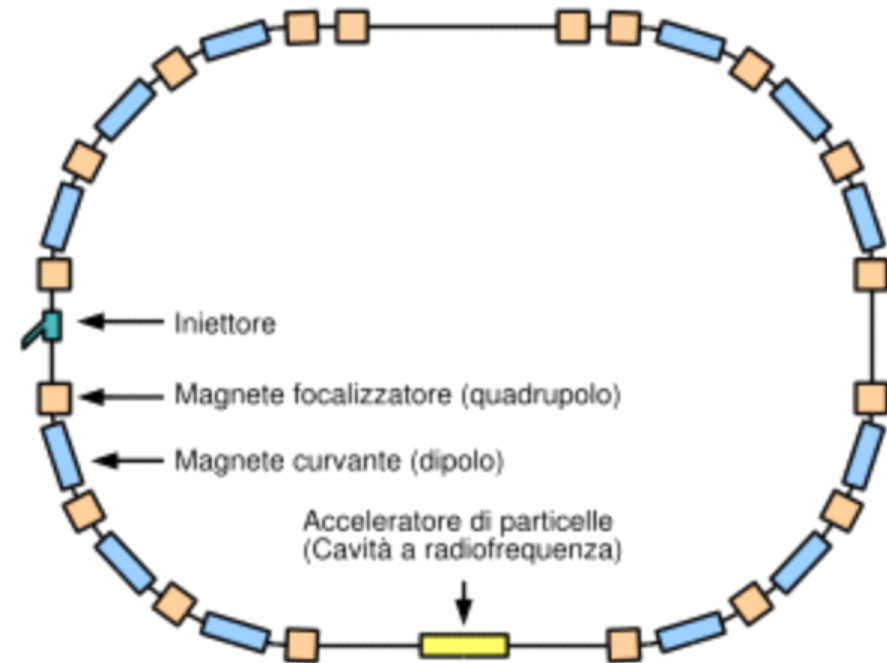
↳ Rivelatori
("occhi elettronici")

Per raccogliere ed analizzare i dati

↳ Calcolo, reti

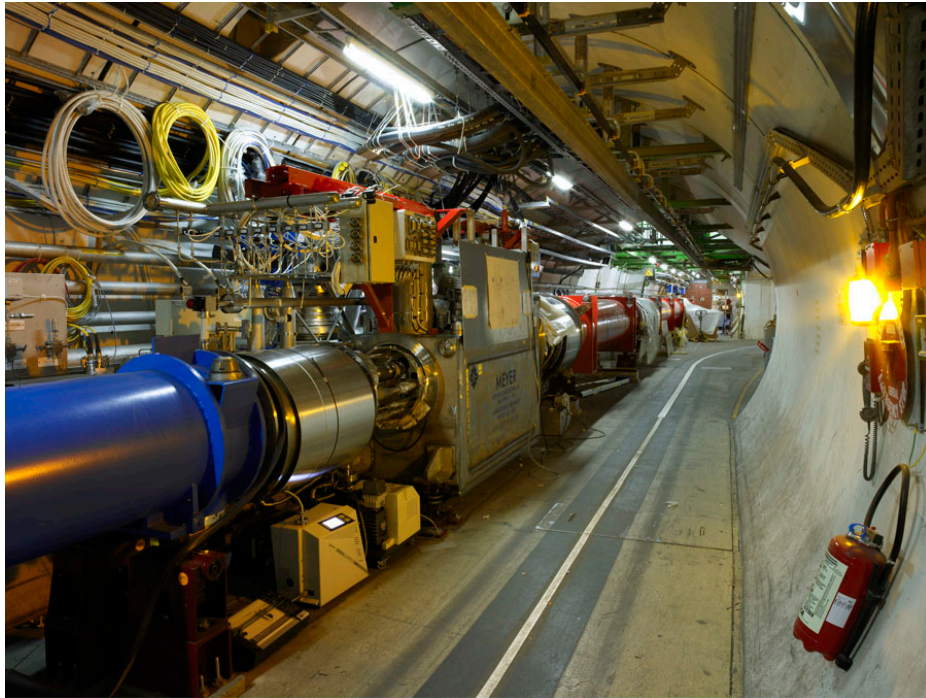
Schema di un moderno acceleratore: il sincrotrone

- Il sincrotrone è un acceleratore nel quale le particelle sono accelerate lungo una traiettoria (grosso modo) circolare



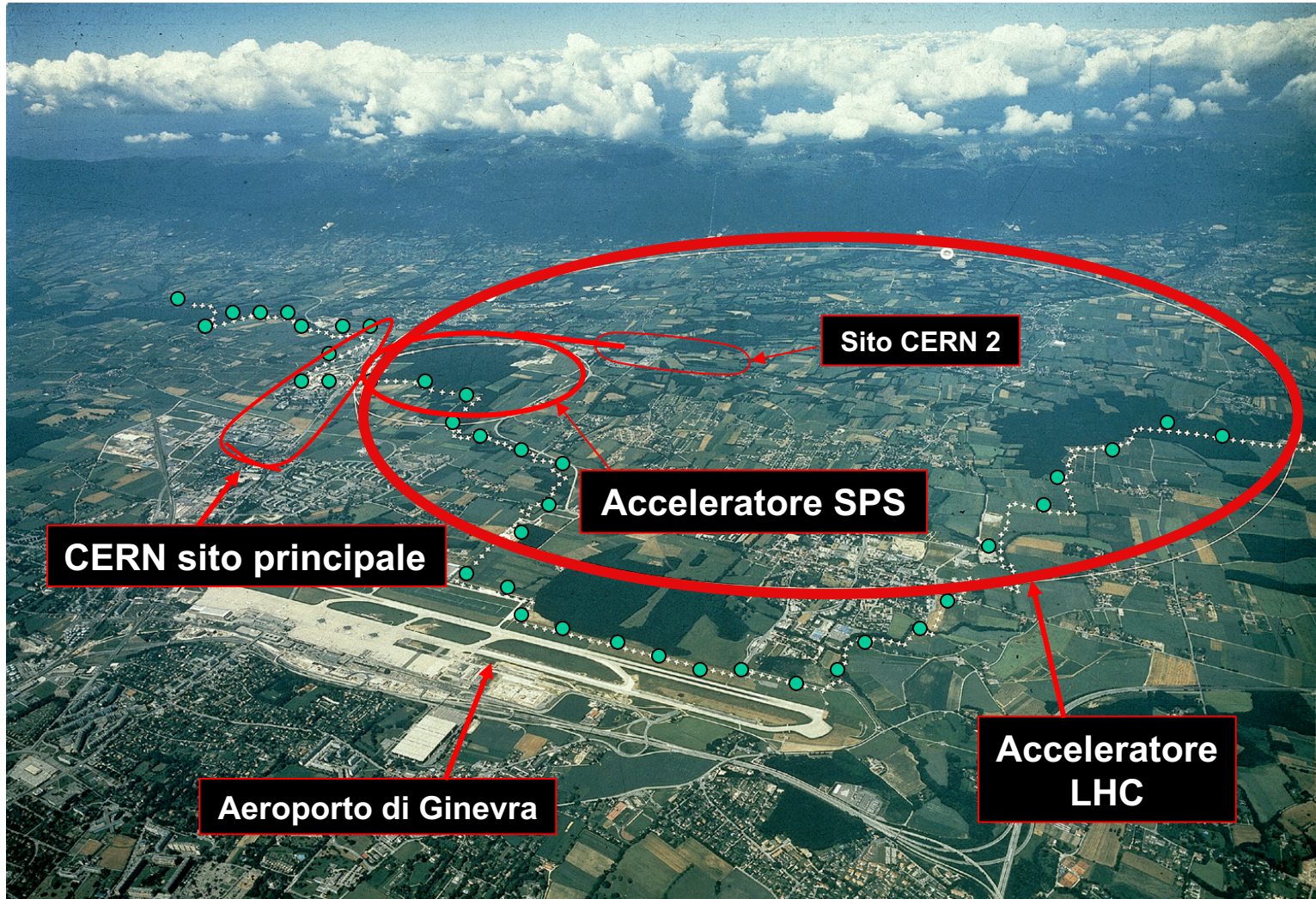
- L'accorgimento da prendere, poiché l'aumento di energia viene impresso alle particelle ad ogni rivoluzione, è che l'intensità del campo magnetico necessaria alla curvatura sia incrementata man mano che l'energia delle particelle aumenta

Il Large Hadron Collider al CERN di Ginevra



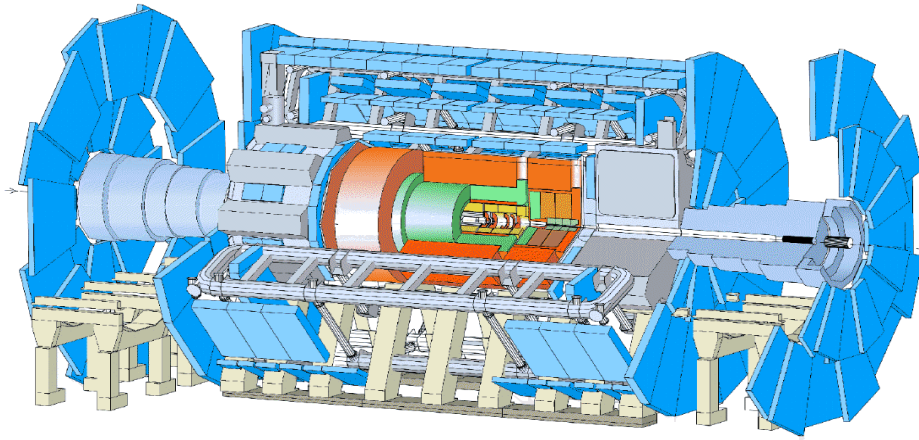
- Il più potente collisionatore adronico, installato in un tunnel lungo 27 km a Ginevra
- Due fasci di protoni circolanti in versi opposti
- Progettato per lavorare fino a 7 TeV di energia per fascio
 - Fino ad ora 6.5 TeV, non ancora al massimo
- Scoperta del bosone di Higgs
 - Premio Nobel nel 2013 a Higgs e Englert “per la scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell’origine della massa delle particelle subatomiche, e che è stato recentemente confermato attraverso la scoperta della predetta particella fondamentale, da parte degli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider del CERN”

Il complesso di LHC visto dall'alto

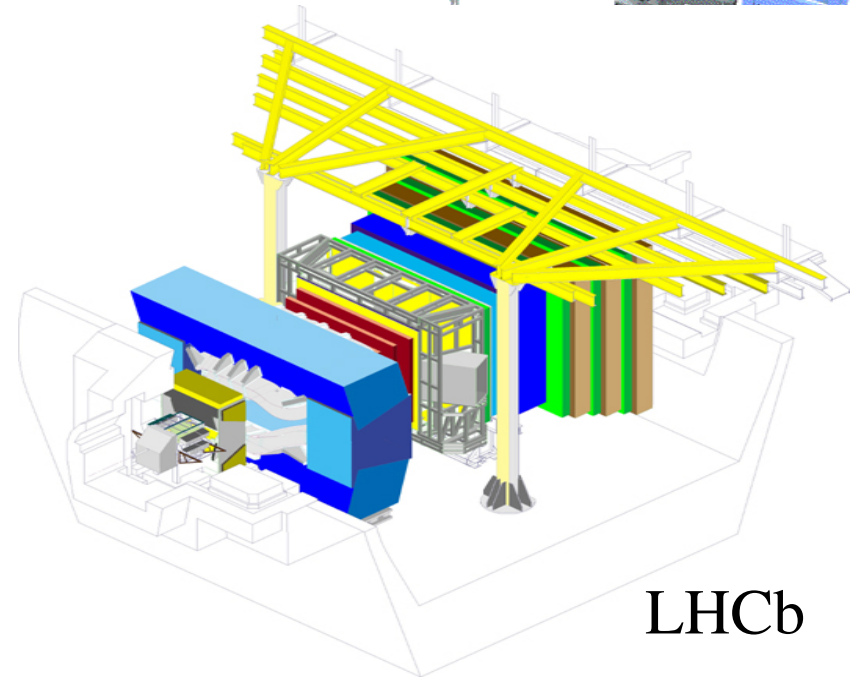
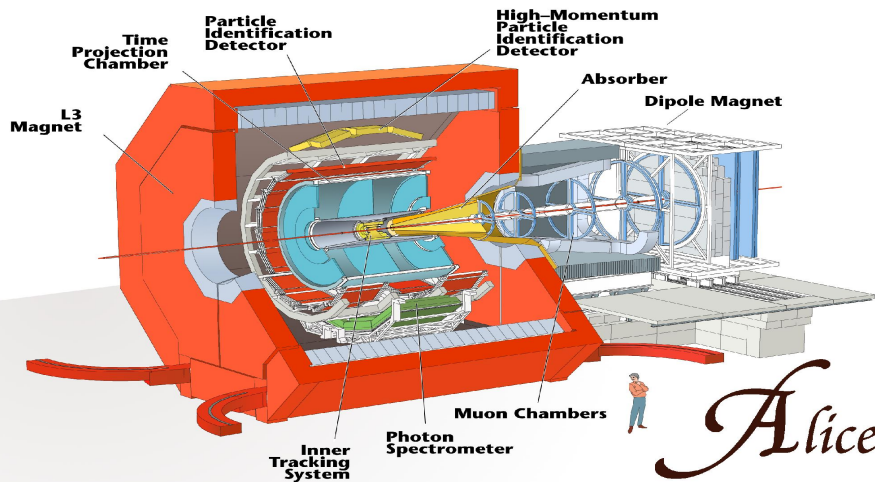
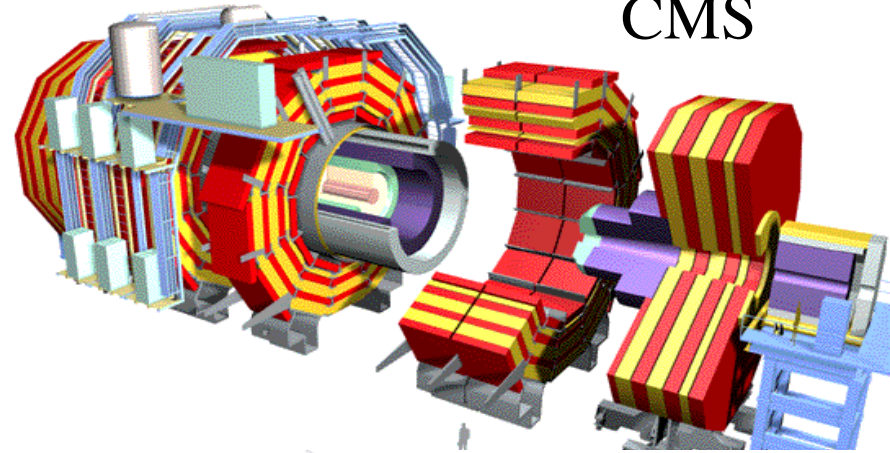


I 4 grandi esperimenti di LHC

ATLAS

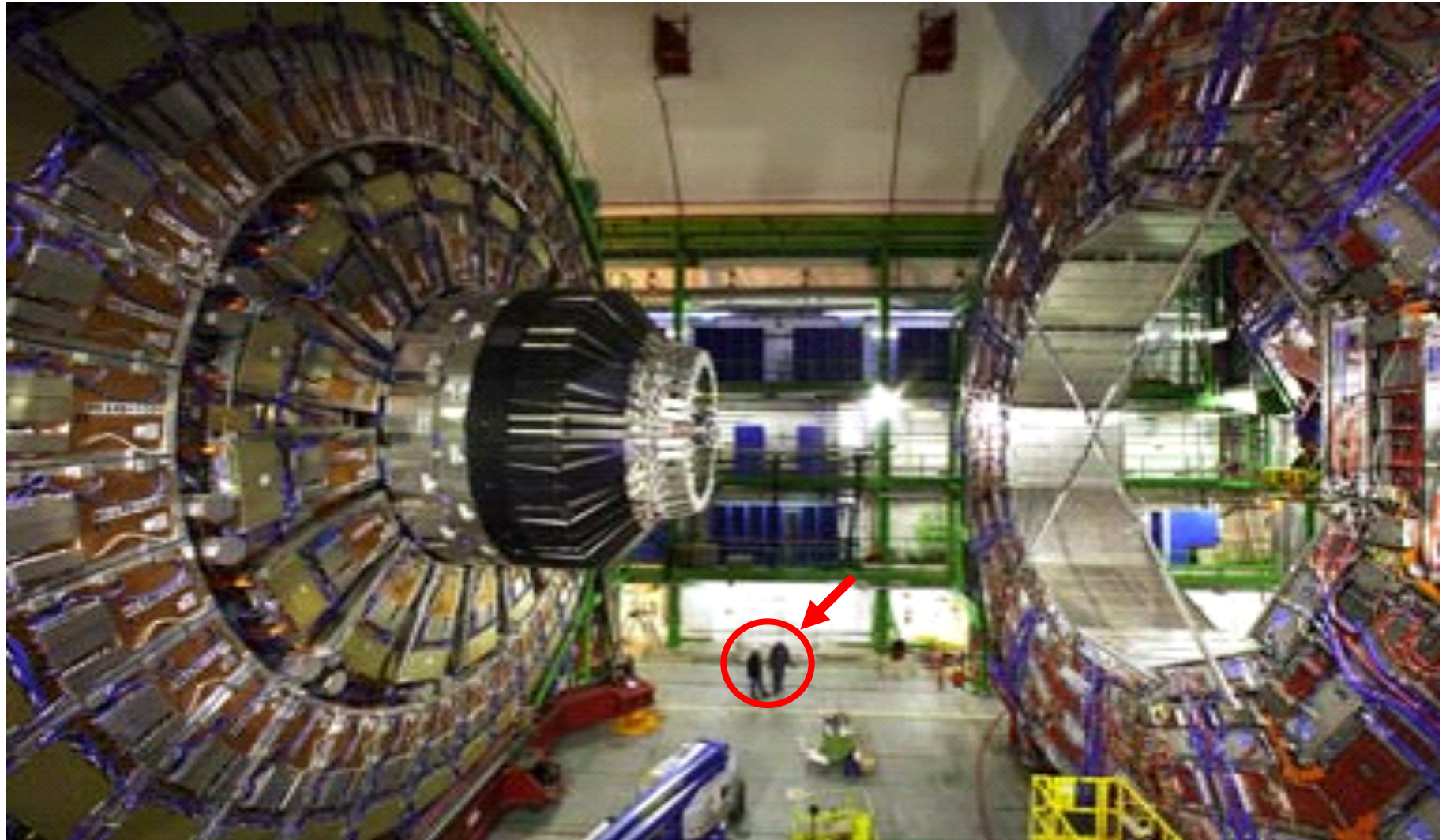


CMS

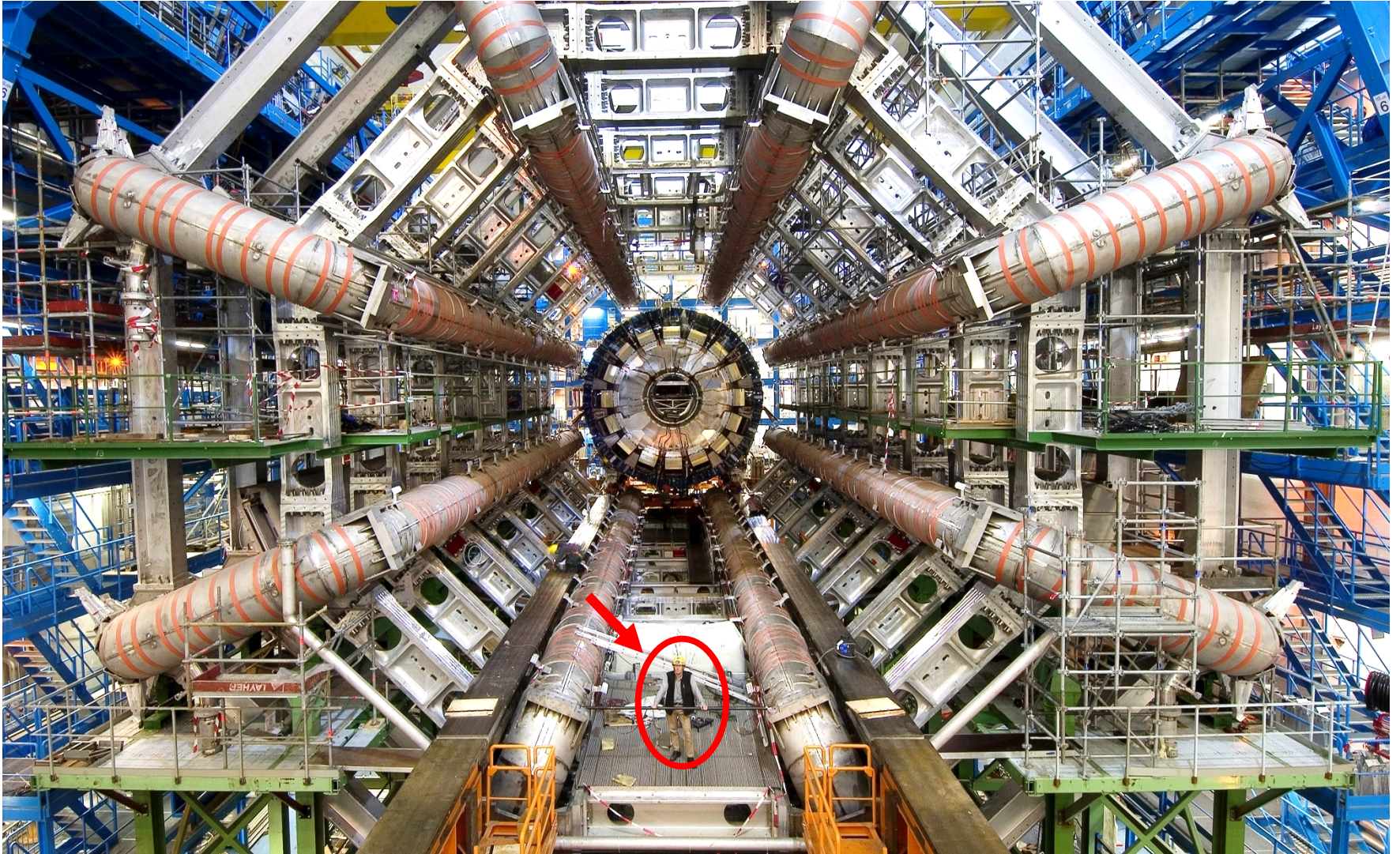


LHCb

Il rivelatore CMS durante la costruzione



Il rivelatore ATLAS durante la costruzione



Perché 4 esperimenti?

- Atlas e CMS

- Cosiddetti General Purpose Detector → sono in grado di eseguire una varietà di misure in molti settori diversi, in particolare sono dedicati alla ricerca (ed ora allo studio) del bosone di Higgs e alla rivelazione di eventuali nuove particelle di alta massa (ad es. Supersimmetria)

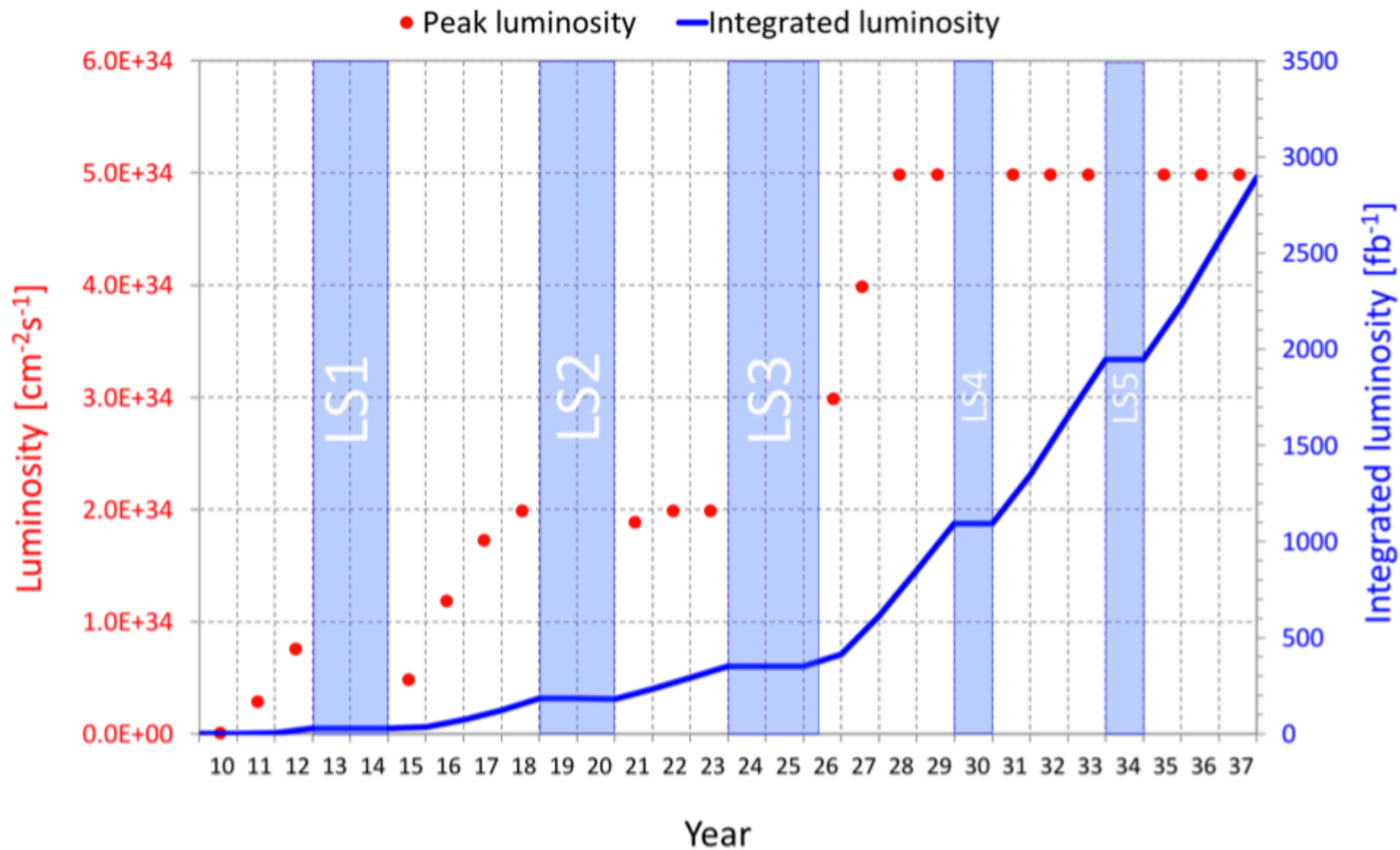
- Alice

- L'esperimento è dedicato allo studio delle collisioni di ioni pesanti (ad esempio urti di nuclei di piombo) ad altissima energia, ed è pensato per studiare il plasma di quark e gluoni che si crea nell'urto → condizioni di densità di energia molto simili ai primissimi istanti di vita dell'Universo dopo il Big Bang

- LHCb

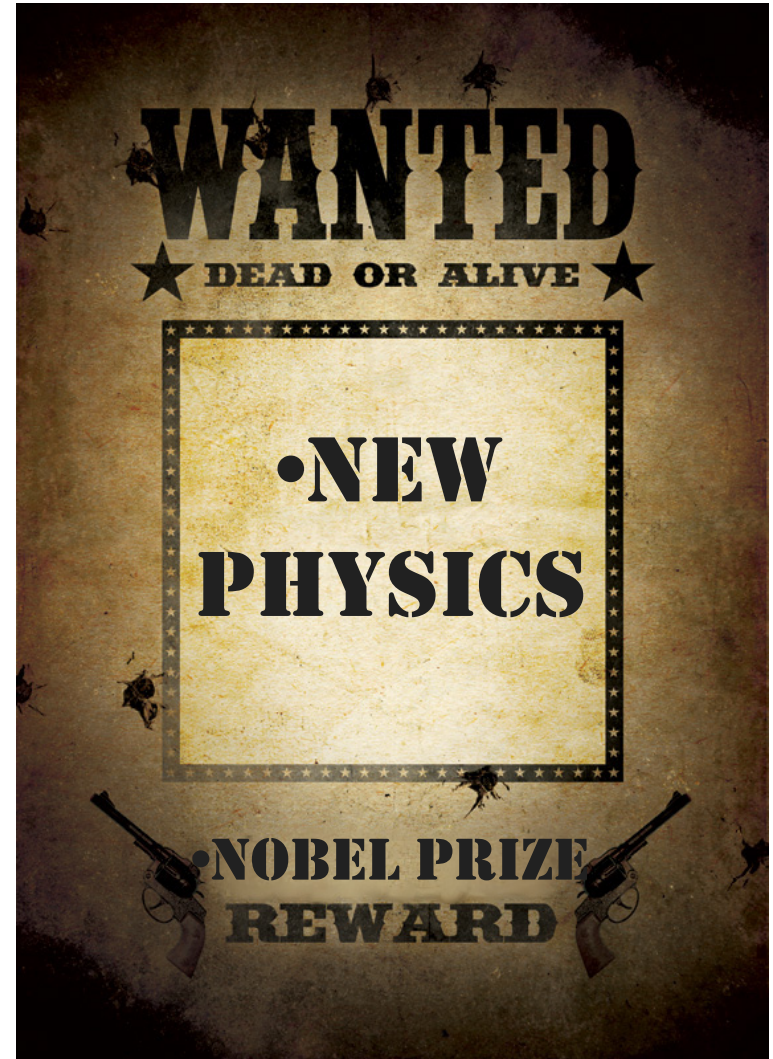
- È pensato per studiare con grande precisione le asimmetrie di comportamento tra materia e anti-materia con l'obiettivo di rispondere ad una delle domande fondamentali: per quale motivo l'Universo che osserviamo è costituito solo di materia mentre l'anti-materia sembra completamente scomparsa?

A che punto sono gli esperimenti LHC?



Il Modello Standard delle particelle elementari è certamente incompleto

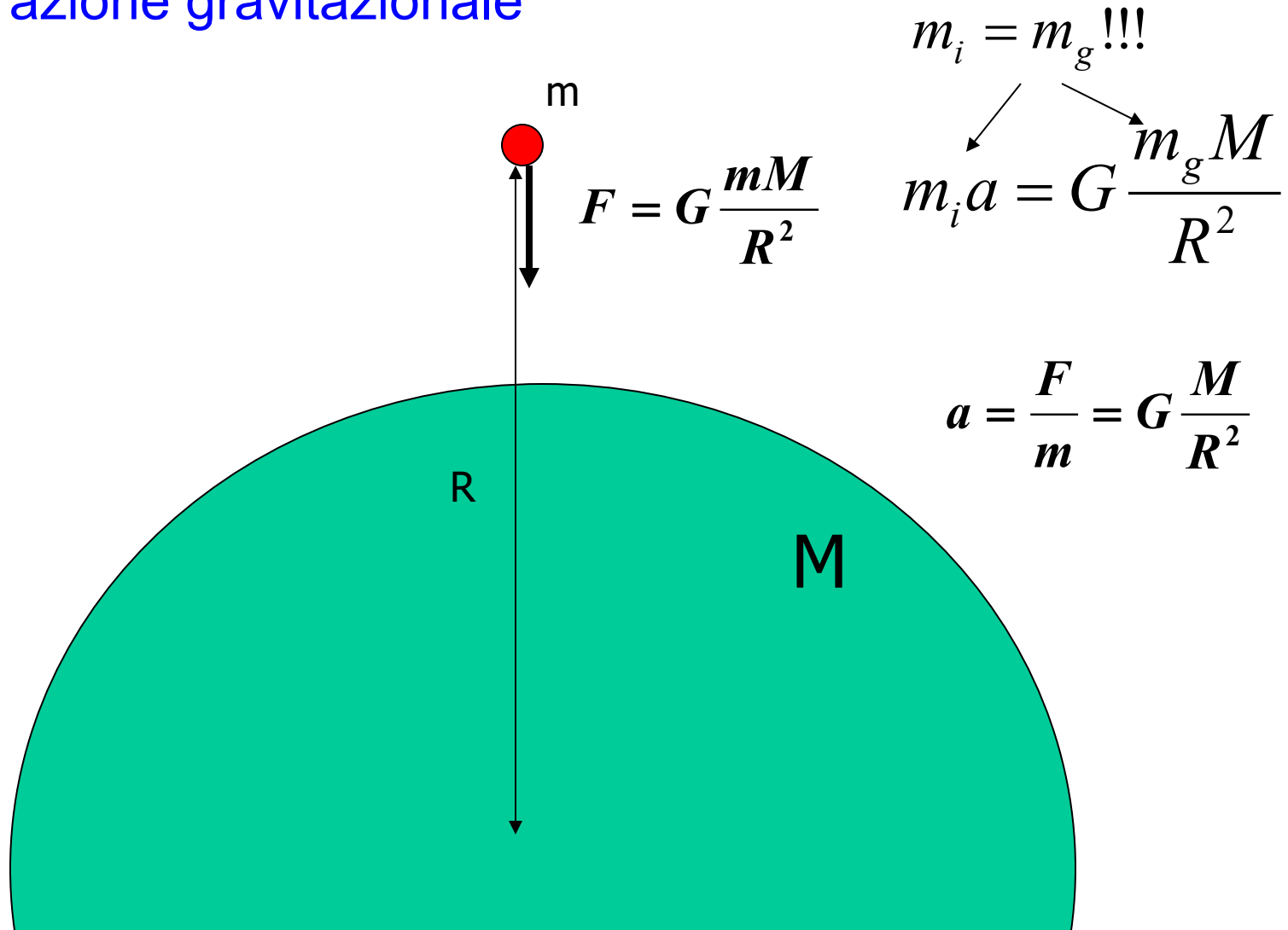
- (Come minimo) non sa spiegare
 - di cos'è fatta la materia oscura
 - da dove proviene l'asimmetria materia-antimateria nell'Universo
- Li fuori c'è certamente nuova fisica da scoprire!
 - Magari sarà qualcuno di voi a farlo...

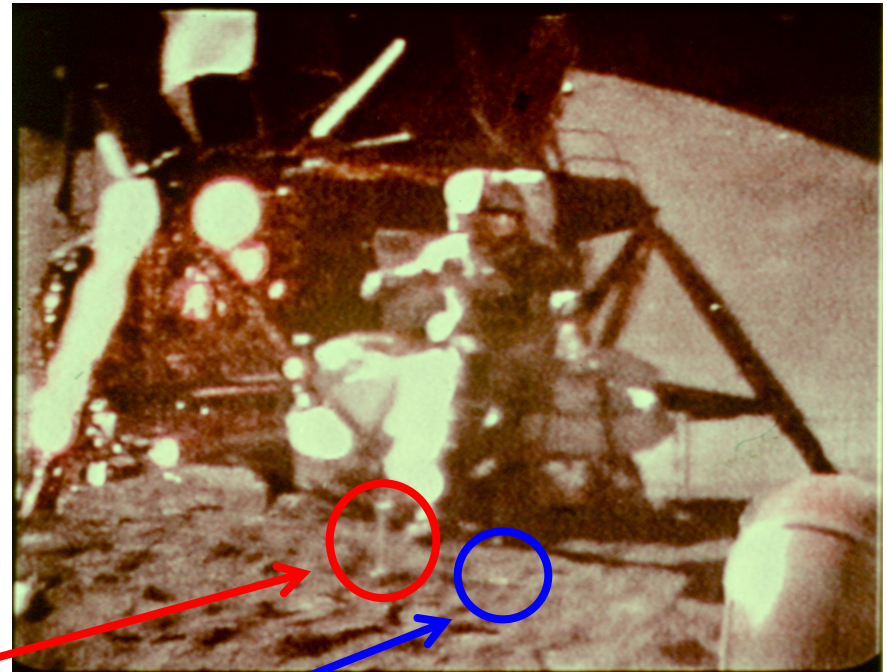
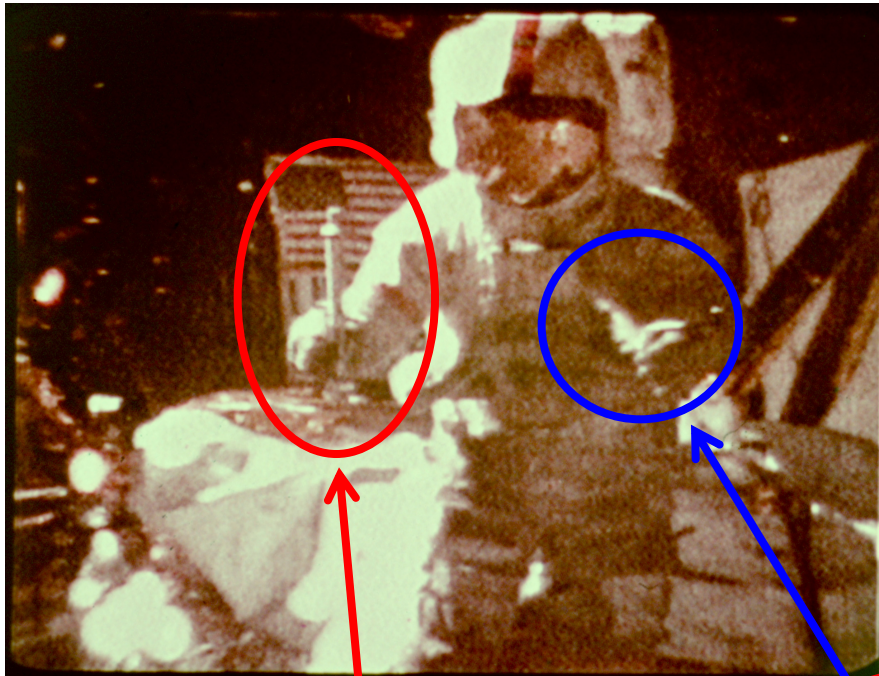


La Gravità

La Gravità ha una caratteristica molto peculiare

- Tutti i corpi nello stesso punto dello spazio subiscono la stessa accelerazione gravitazionale





Martello

Piuma

Missione Apollo 15
2 Agosto 1971

Relatività Generale



Albert Einstein

- Sviluppata negli anni 1907-1915 da A. Einstein in collaborazione stretta con alcuni matematici: Grossmann, Hilbert, Levi-Civita

... in tutta la mia vita non avevo mai lavorato così duramente, e sono stato pervaso da un grande rispetto per la matematica, i cui aspetti più sottili, nella mia superficialità, avevo sempre considerato come un inutile lusso.



Marcel Grossmann

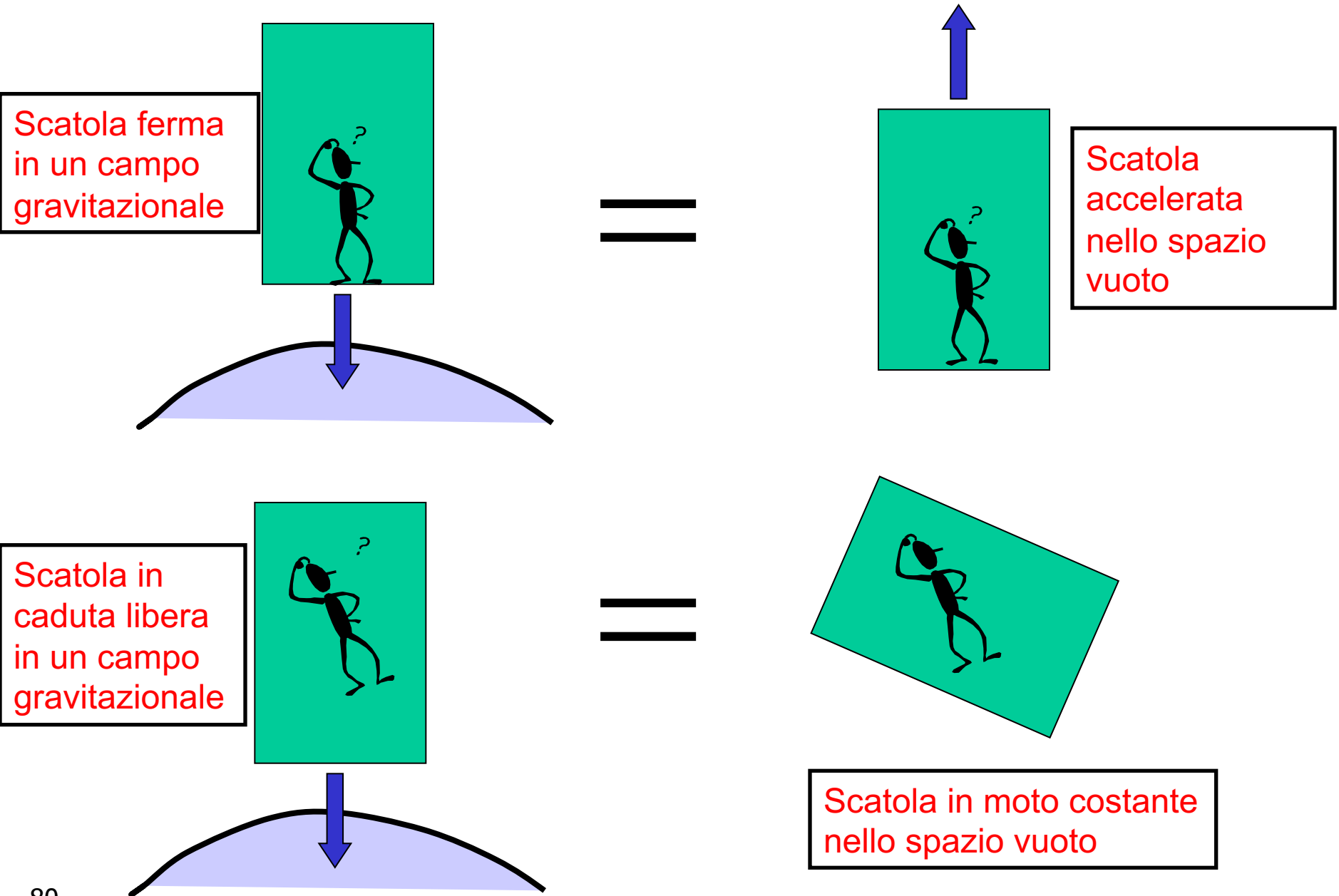


David Hilbert

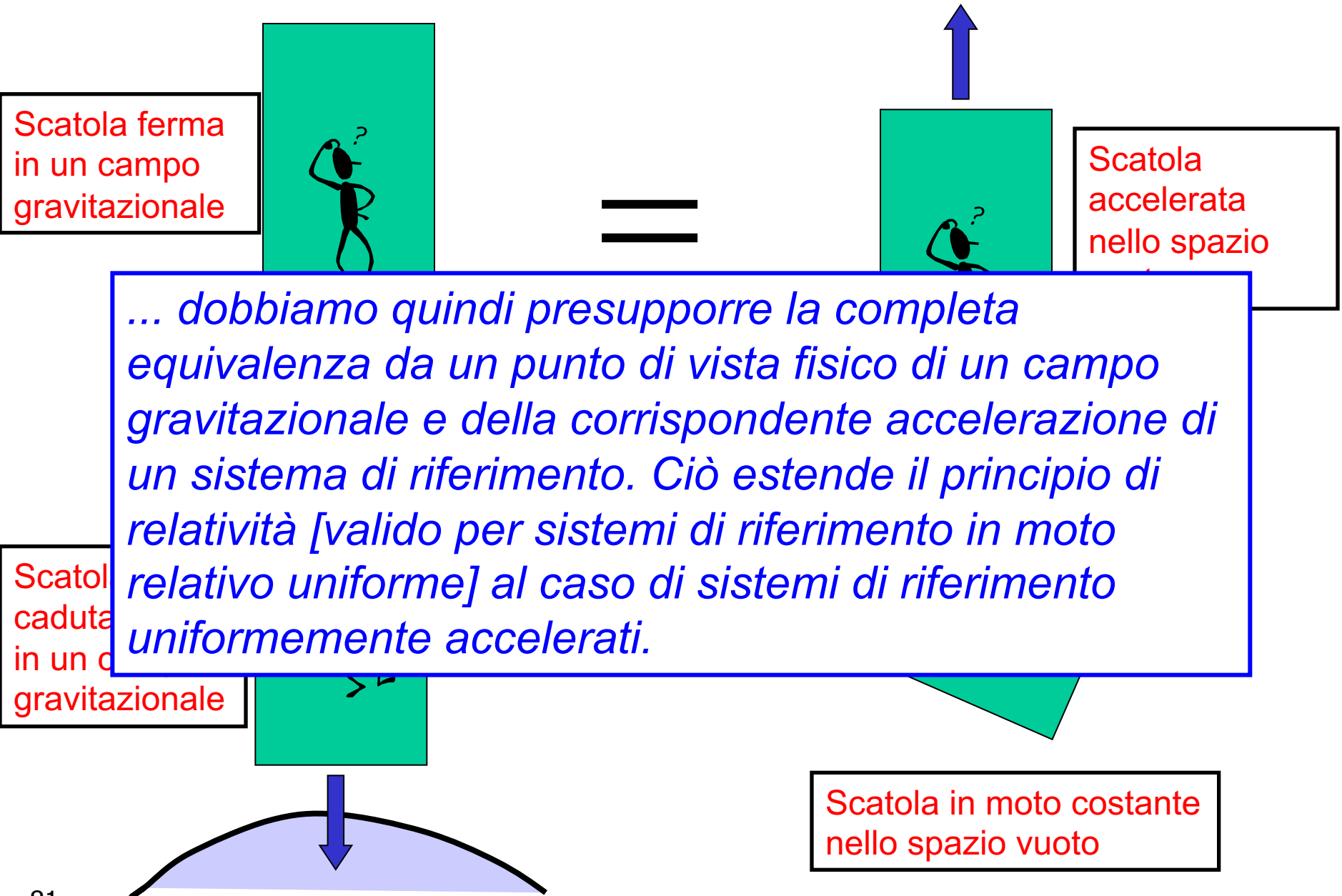


Tullio Levi-Civita

Principio di equivalenza di Einstein



Principio di equivalenza di Einstein



Conseguenze del principio di equivalenza

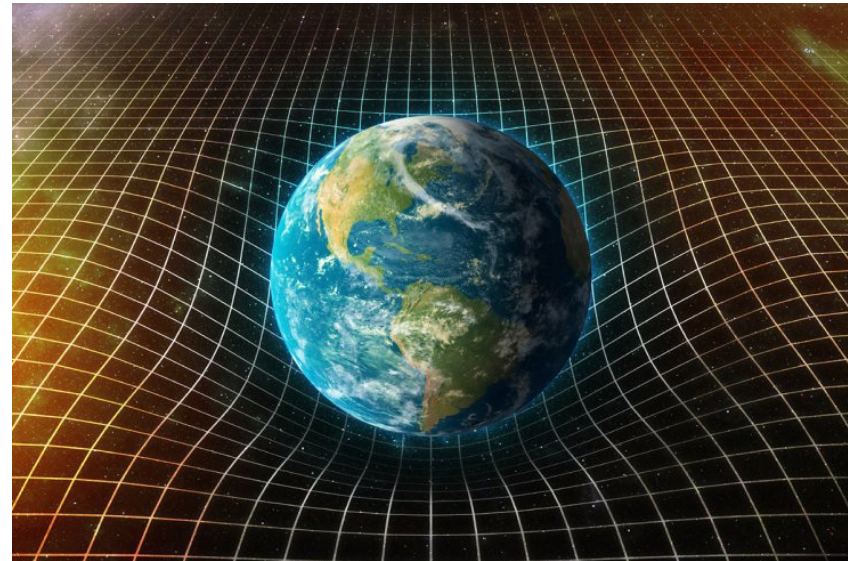
- Se la gravità può essere eliminata perché imitata dal semplice moto, la forza di gravità non è una vera forza!
- In effetti la forza di gravità è l'accelerazione che si subisce nel momento in cui ci si muove nello spazio-tempo
- Ma come si spiegherebbe il fatto che in assenza di forze un corpo in un campo gravitazionale non si muove di moto rettilineo e uniforme?

Perche lo spazio e il tempo sono curvati dalla presenza della materia!



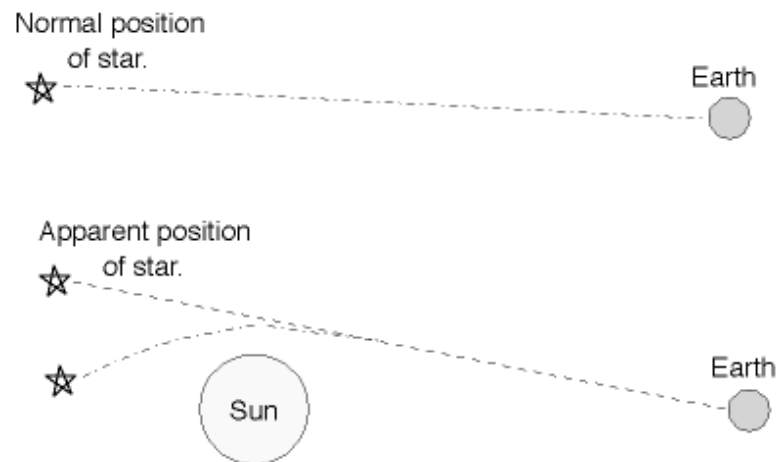
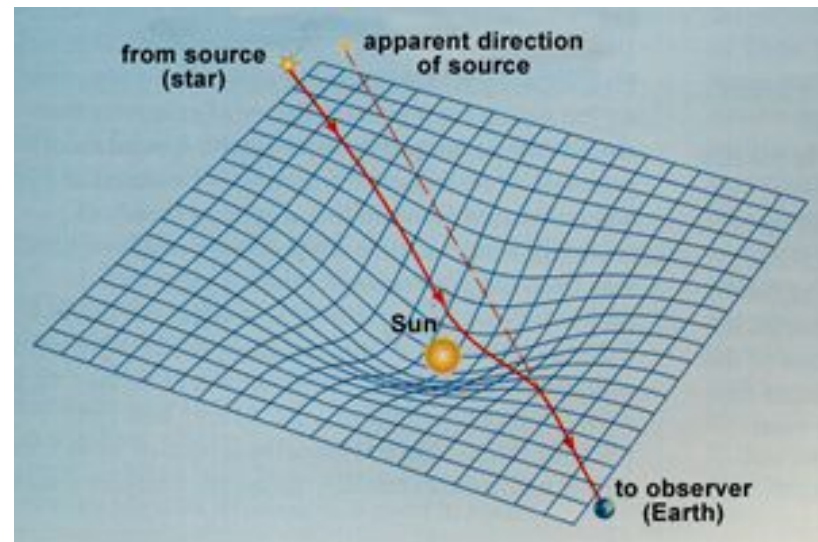
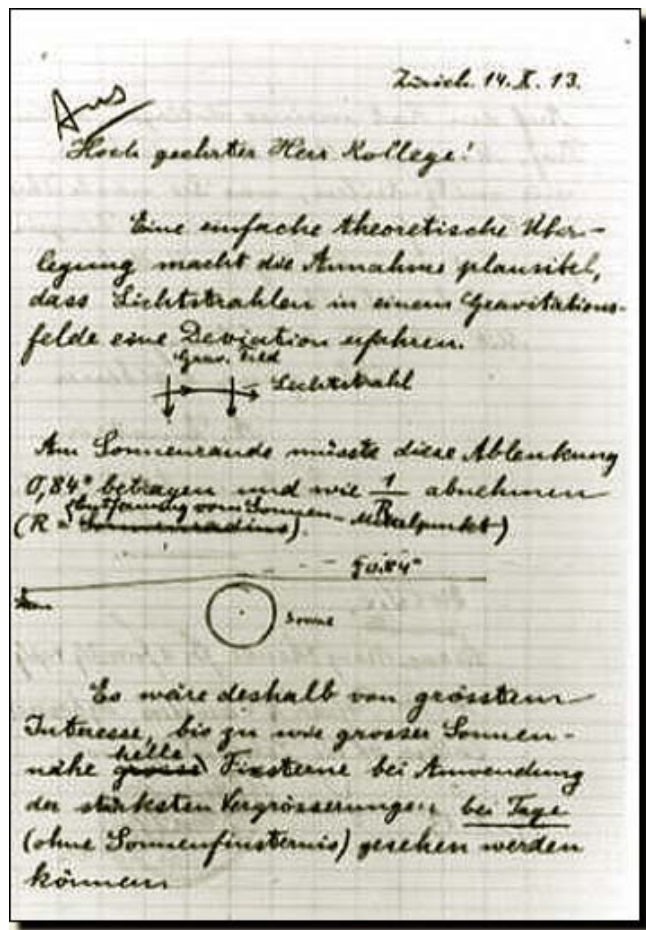
Idea di base della Relatività Generale

- Lo spazio-tempo viene curvato dalla presenza di una massa
- Gli oggetti quindi non si muovono in uno spazio-tempo piatto, ma in uno spazio-tempo curvo e il loro cammino viene alterato esattamente come se ci fosse una forza che agisce su di loro
- OK, lo spazio è curvo lo posso capire, ma che significa che il tempo è curvo?
- La curvatura del tempo la potete visualizzare come un'alterazione dello scorrere del tempo in punti differenti dello spazio



"La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi, e lo spazio-tempo restituisce il complimento dicendo alla materia come si deve muovere." John Wheeler

La curvatura della luce in un campo gravitazionale



La velocità di fuga da un campo gravitazionale

Energia cinetica $K \geq$ Energia potenziale gravitazionale $|U|$

$$K = mV^2 / 2; \quad U = -\frac{GMm}{R}$$

$$K = \frac{mV_{esc}^2}{2} = |U| = \frac{GMm}{R} \Rightarrow V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Velocità di fuga

Esempi di velocità di fuga dalle superfici di alcuni oggetti

| Oggetto | Massa | Velocità di fuga |
|-------------------|-----------------------|------------------|
| Ceres (asteroide) | 10^{21} kg | 0.64 km/s |
| Luna | 7×10^{22} kg | 2.38 km/s |
| Terra | 6×10^{24} kg | 11.2 km/s |
| Giove | 2×10^{27} kg | 60 km/s |
| Sole | 2×10^{30} kg | 618 km/s |

Cosa accadrebbe per un oggetto ancora più massivo e denso?

Buchi neri in fisica classica

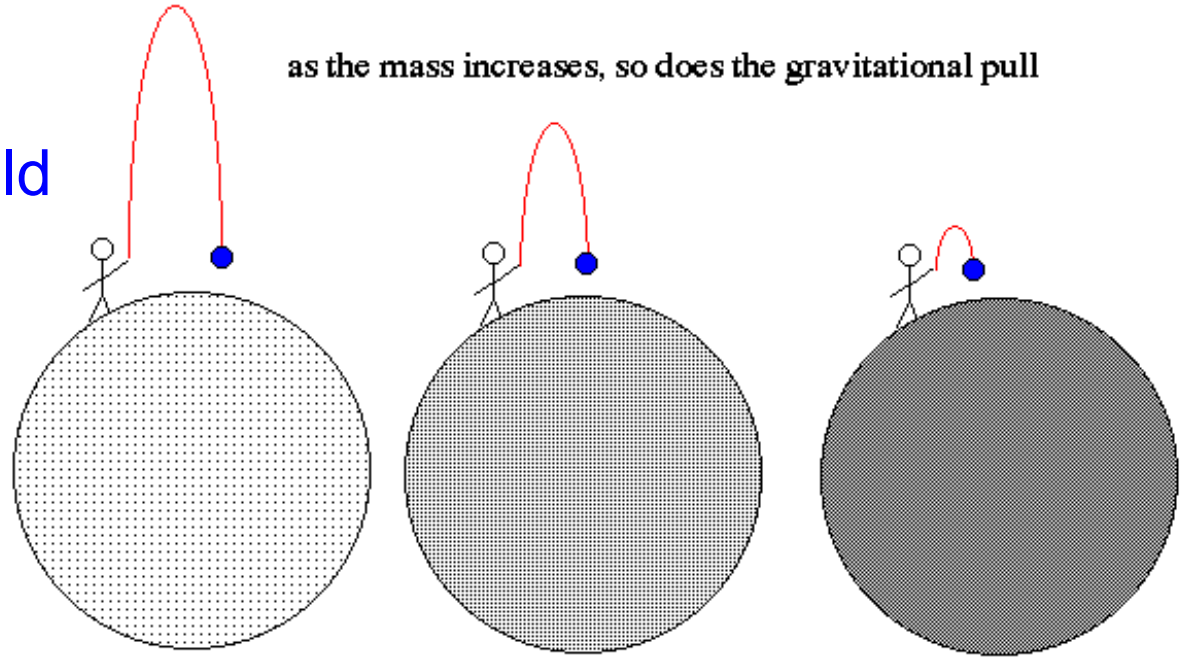
as the mass increases, so does the gravitational pull

Il raggio di Schwarzschild

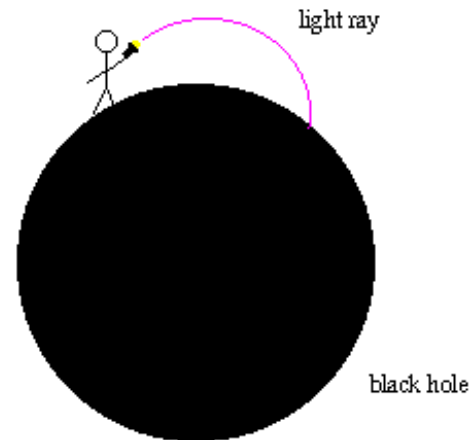
$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R_s}} = c \Rightarrow R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Questo risultato è
accidentalmente
corretto, ma la
derivazione è sbagliata e il
disegno complessivo è errato.

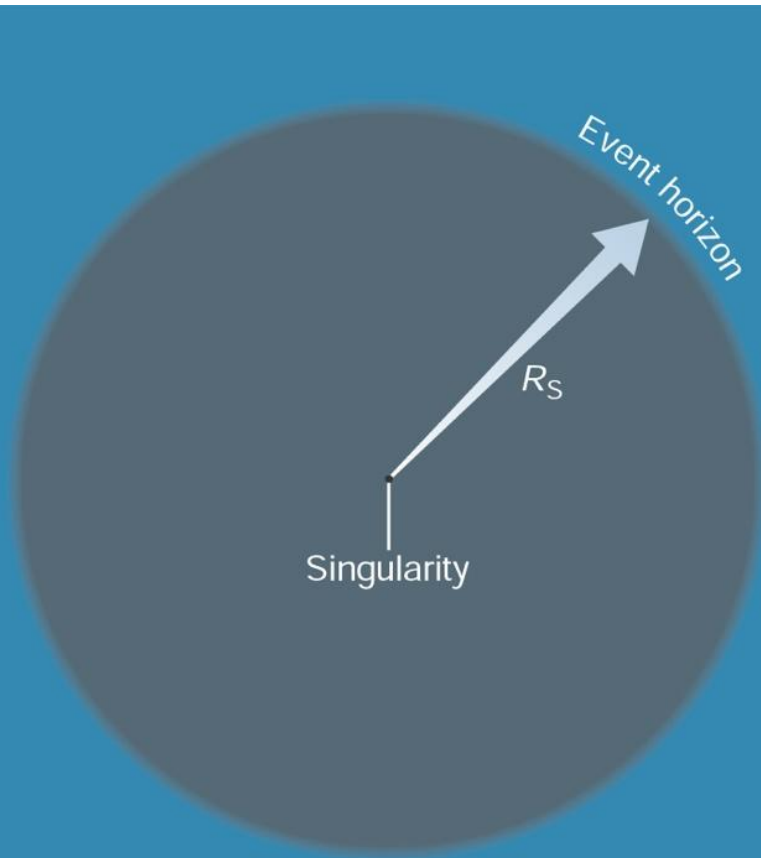
C'è bisogno della Relatività
Generale per capire fino in
fondo cosa succede



if the gravitational pull is such that even light cannot escape, then a black hole forms



Il raggio di Schwarzschild e l'orizzonte degli eventi



- Nulla (nemmeno la luce) può provenire dall'interno del raggio di Schwarzschild
- Un osservatore all'esterno non ha nessuna maniera di osservare un evento che avviene dentro a questa porzione di spazio

Quanto è grande un raggio di Schwarzschild?

| Object | Mass (M_{\odot}) | Radius |
|--------|----------------------|--------|
| Star | 10 | 30 km |
| Star | 3 | 9 km |
| Star | 2 | 6 km |
| Sun | 1 | 3 km |
| Earth | 0.000003 | 0.9 cm |

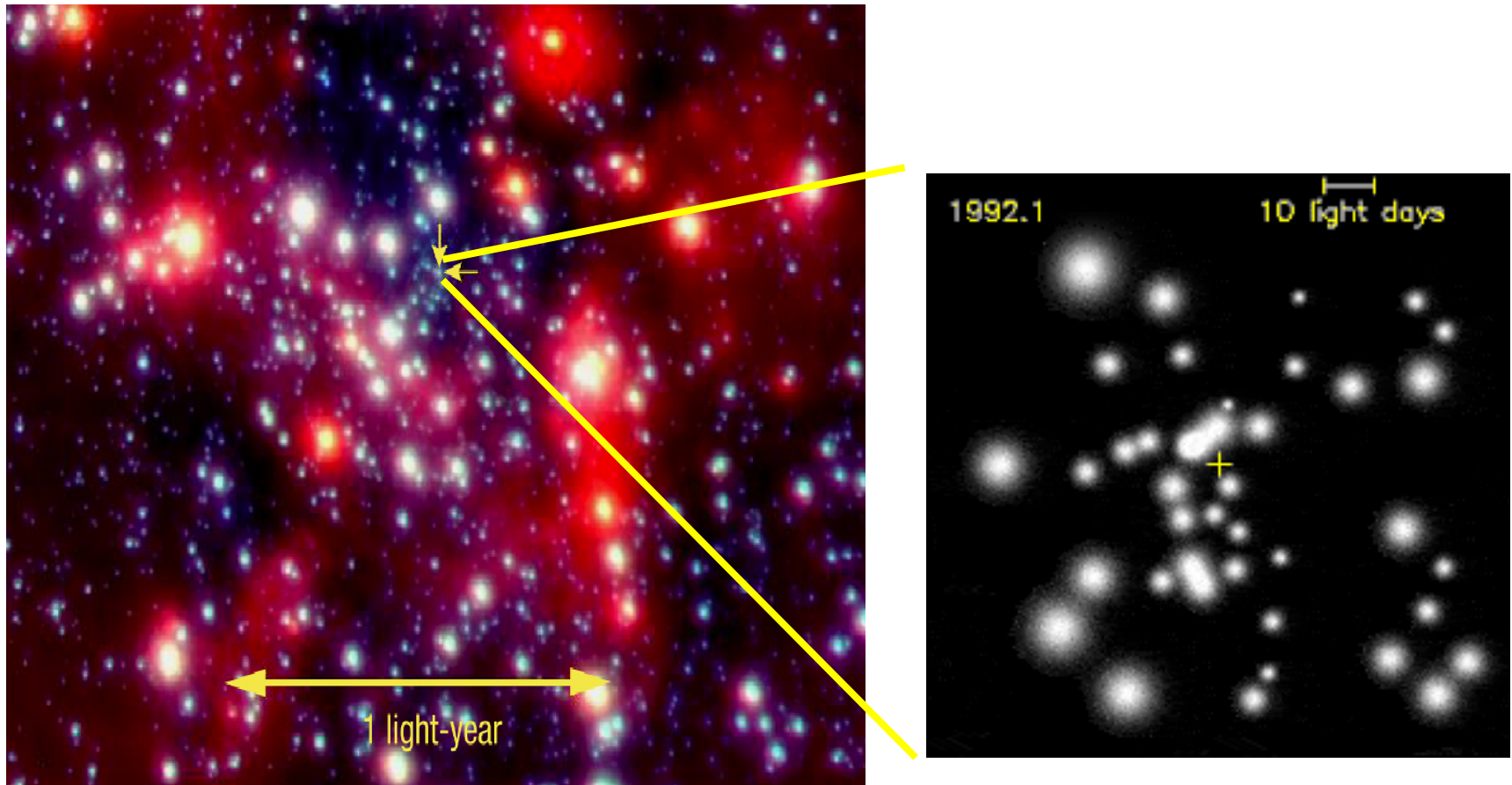
Il centro della Via Lattea

La nostra vista (tramite luce visibile) verso il centro della galassia è fortemente oscurata dalla presenza di gas e polvere



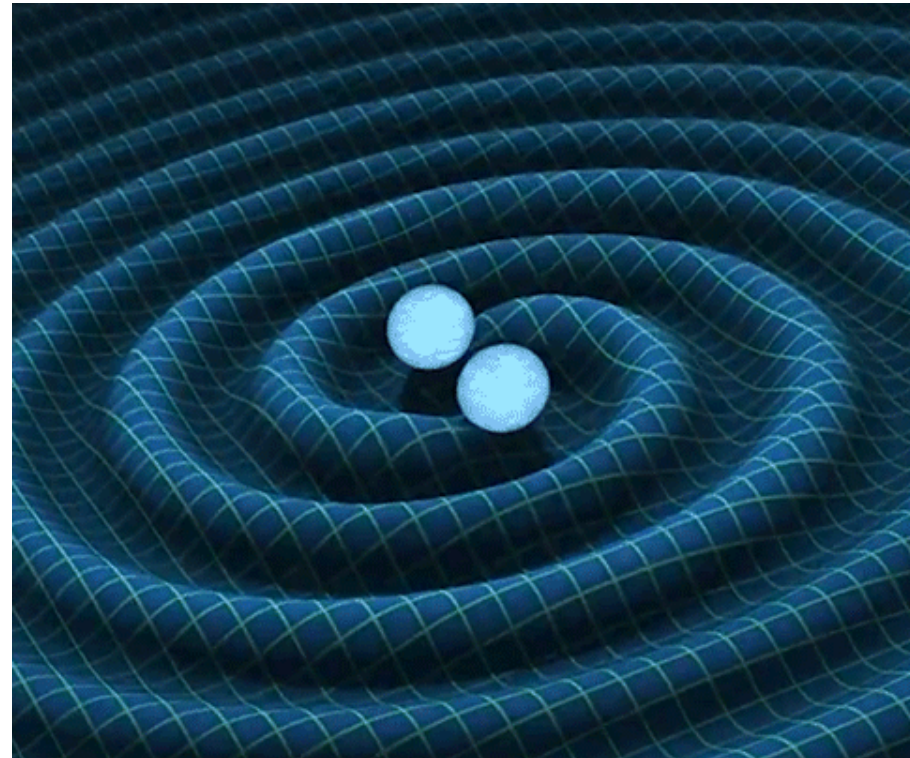
Buco nero al centro della Via Lattea

Studiando le orbite delle stelle intorno al centro della Via Lattea, la massa del buco nero al suo centro è stata misurata essere di circa 4 milioni di masse solari

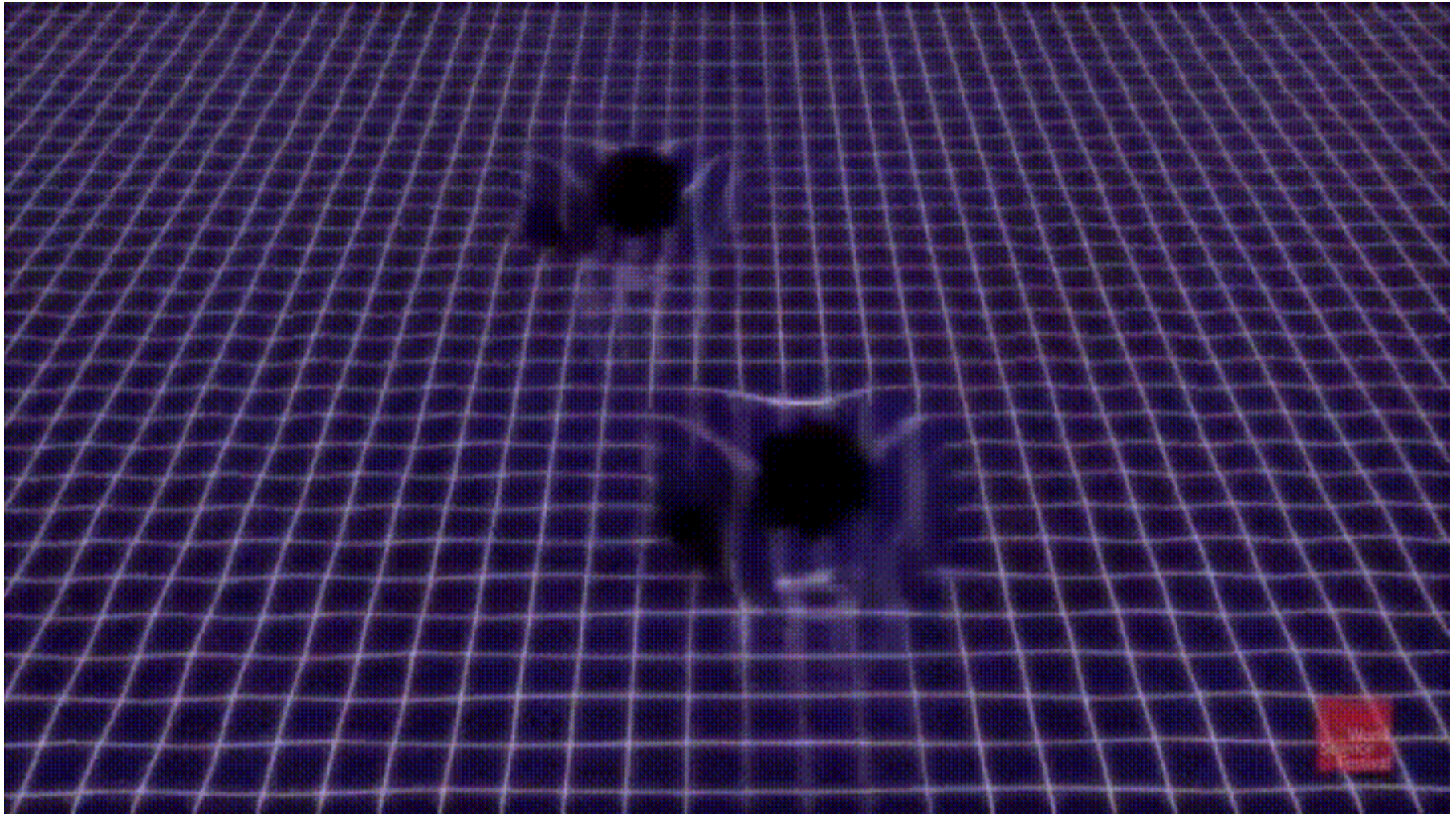


Le onde gravitazionali

- Analogamente al caso delle onde elettromagnetiche prodotte dal moto delle cariche elettriche **la Relatività Generale prevede che il moto di masse produca onde gravitazionali** che si propagano nello spazio alla velocità della luce **come increspature del tessuto dello spazio-tempo**

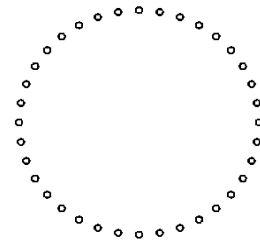
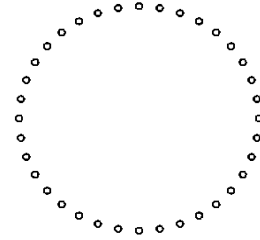


Collisione di due buchi neri ed emissione di onde gravitazionali



Effetti del passaggio di un'onda gravitazionale

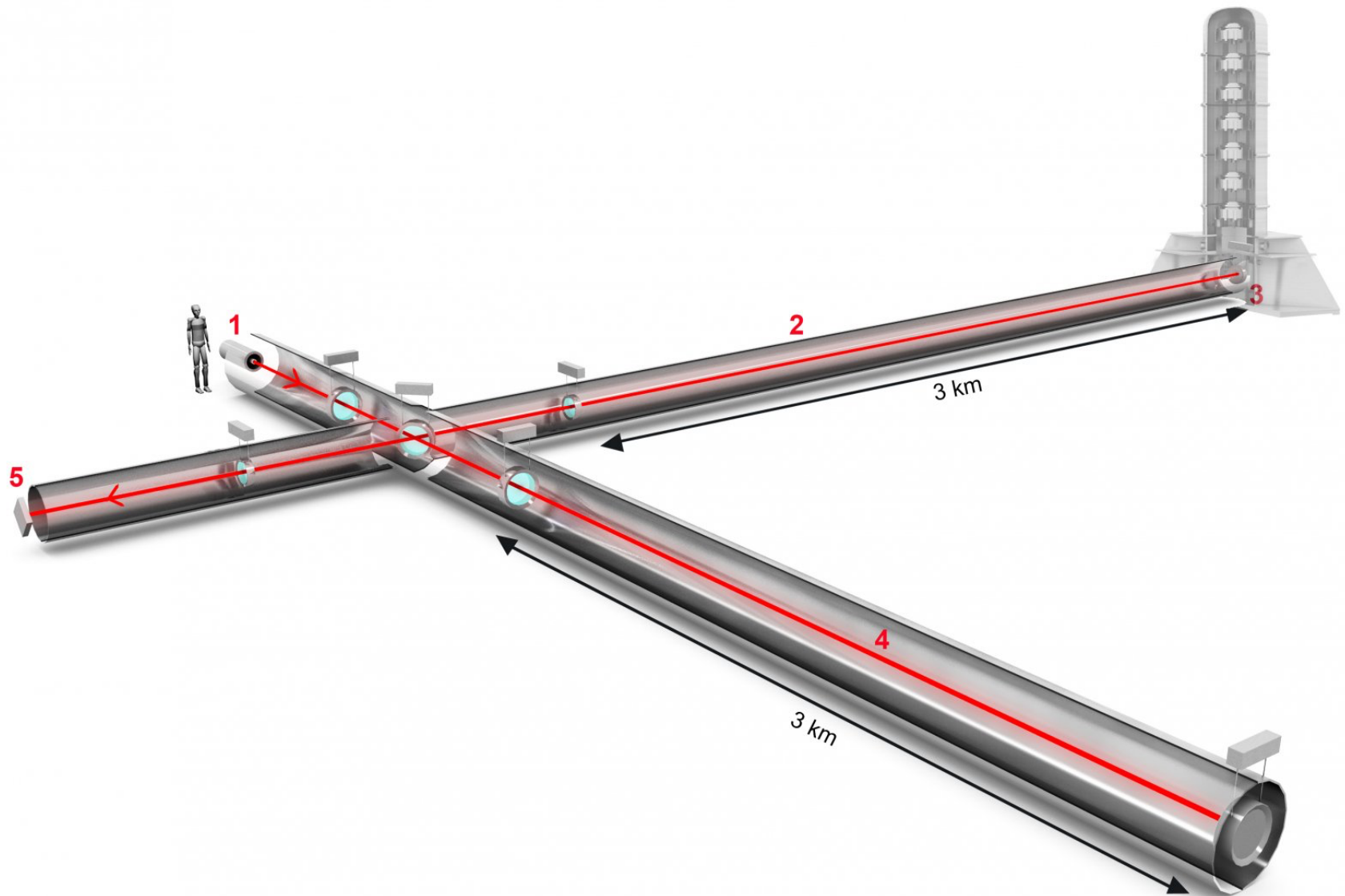
- Al loro passaggio in una regione di spazio, l'effetto delle onde gravitazionali è di comprimere lo spazio in una direzione e espanderlo in un'altra



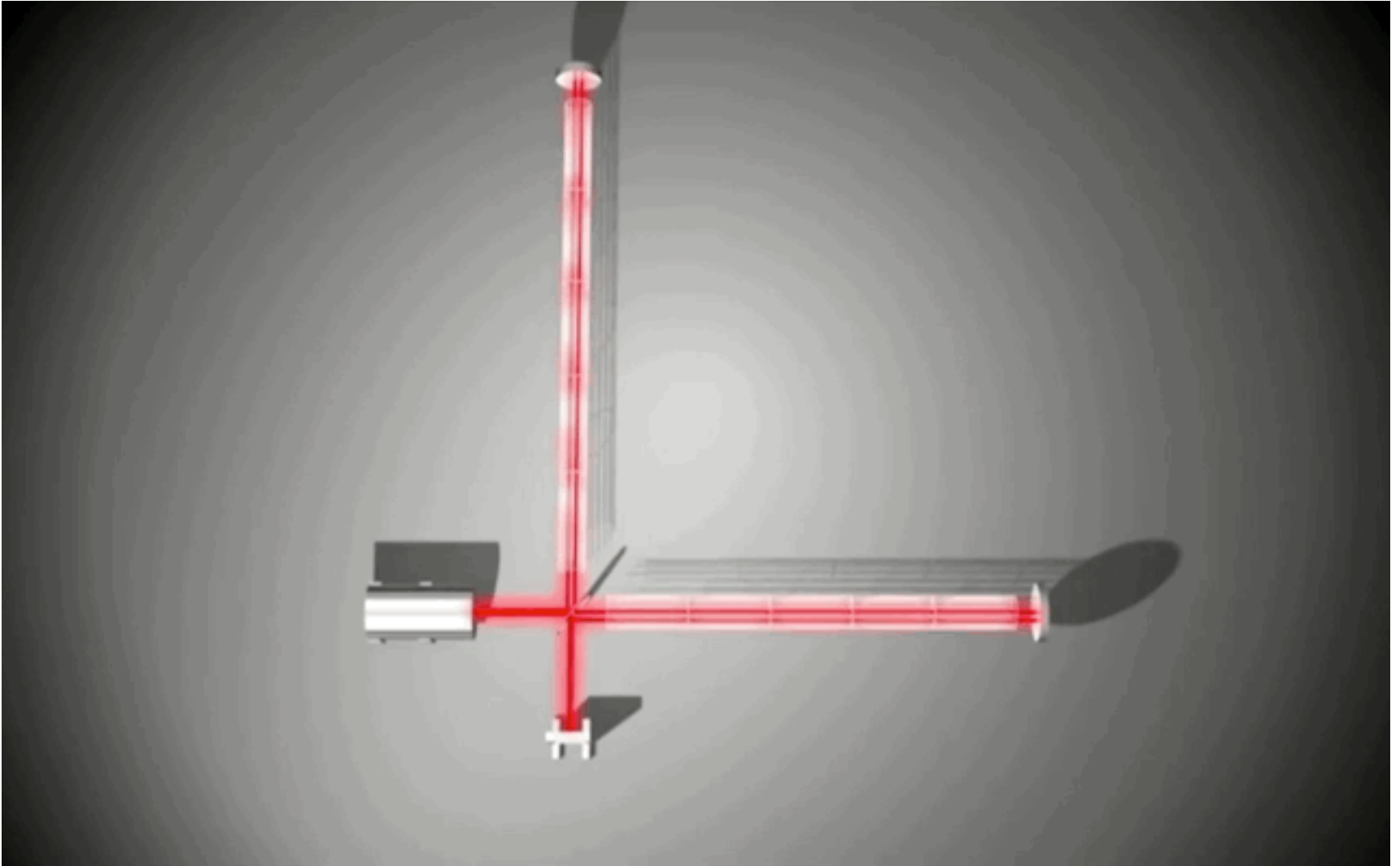
Arrivo di un'onda gravitazionale sulla Terra



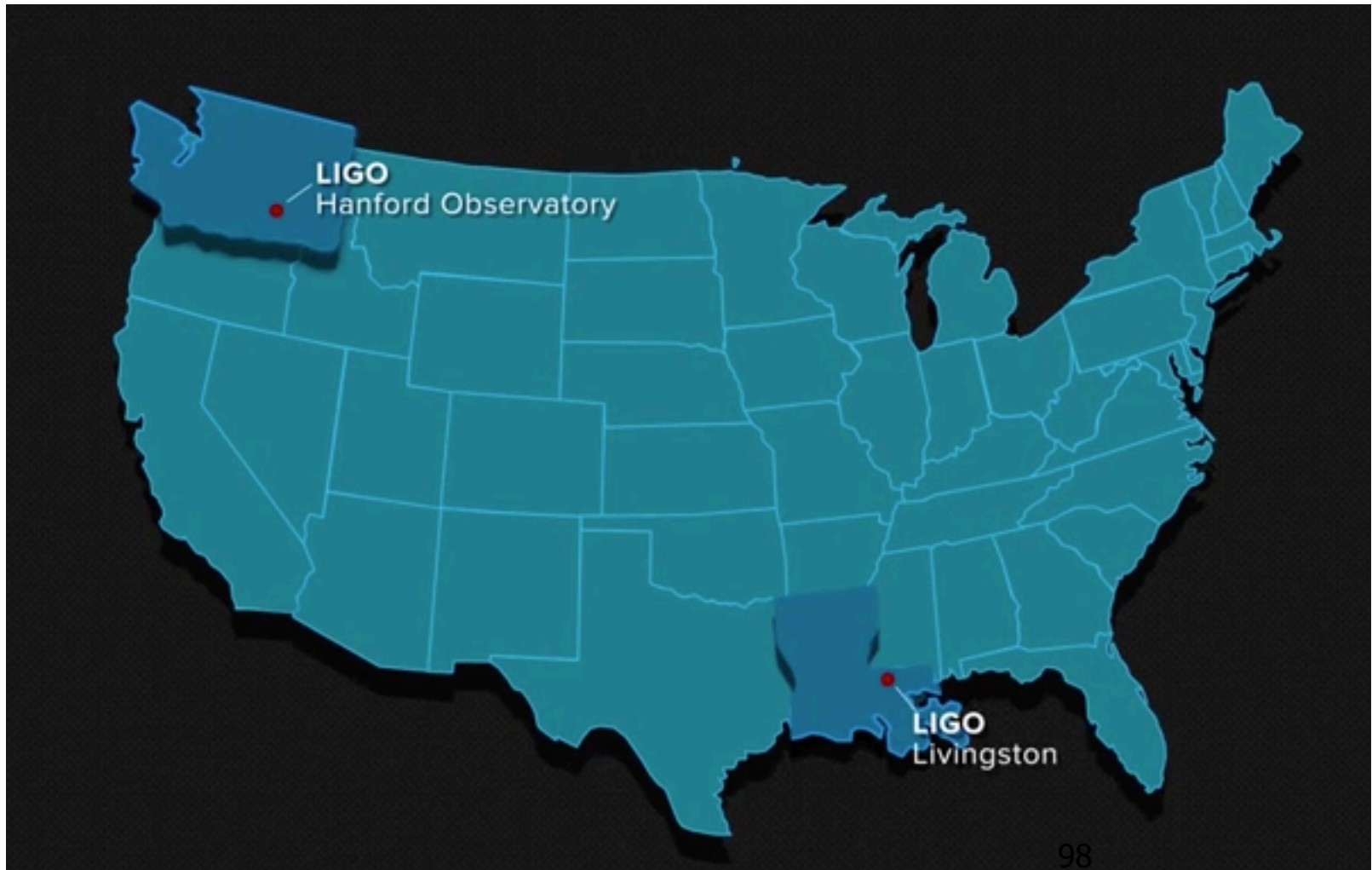
Schema degli interferometri LIGO e VIRGO



Funzionamento di LIGO e VIRGO al passaggio di un'onda gravitazionale



Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)



VIRGO: un terzo grande interferometro in Italia



LIGO e VIRGO nella realtà

LIGO Livingston



LIGO Hanford

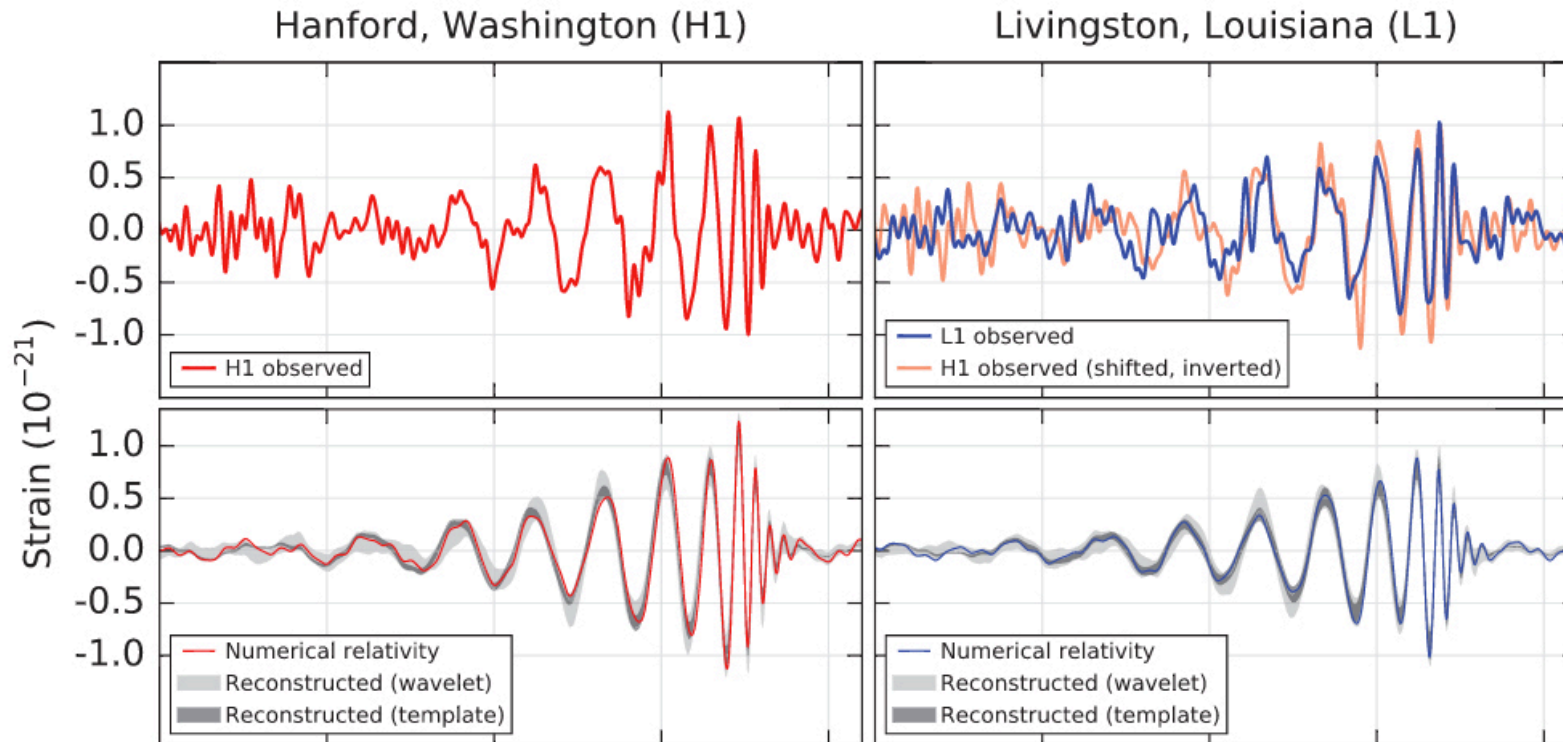


VIRGO Cascina



- Questi interferometri hanno bracci di 3-4 km e sono in grado di registrare alterazioni della lunghezza dei bracci dell'ordine di 10^{-18} m, **un millesimo della dimensione di un protone!**

Il primo segnale del passaggio di un'onda gravitazionale sulla Terra



- Segnale prodotto dalla coalescenza di due buchi neri con una massa di circa 30 masse solari ciascuno
- Al momento della collisione i due buchi neri orbitavano uno intorno all'altro ad una velocità pari alla metà della velocità della luce

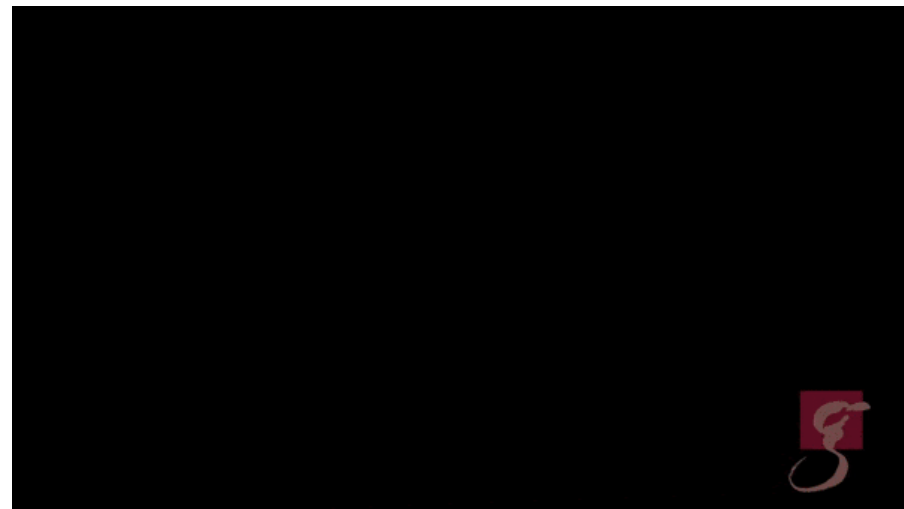
Osservazione di onde gravitazionali nello spazio

Laser Interferometer Space Antenna (LISA)



Osservazione di onde gravitazionali nello spazio

- Tre satelliti separati da milioni di chilometri in orbita intorno al Sole insieme alla Terra
- I tre satelliti sparano raggi laser l'uno verso l'altro utilizzando lo stesso concetto degli interferometri terrestri ma con una sensibilità a frequenze di onde gravitazionali impossibili da rilevare a terra
- La missione è diretta dall'Agenzia Spaziale Europea ed è in programma per l'inizio degli anni 2030



II Corso 2020

Il Corso 2020

- Si articola in 11 lezioni pomeridiane di 3 ore ciascuna ed approfondisce in particolare 3 temi:
 - **Fondamenti e formulazione della teoria della relatività ristretta**
 - **La produzione di energia**
 - **I cambiamenti climatici**
- Le lezioni saranno tenute da docenti e ricercatori universitari che lavorano nell'ambito di enti di ricerca quali INFN e CNR
- Uno degli scopi è quello di motivare i giovani studenti ad iscriversi a Facoltà universitarie ad indirizzo scientifico

Il Corso 2020

- In autunno saranno assegnate borse di studio per gli studenti più meritevoli, che avranno superato una prova di esame sugli argomenti trattati dal corso
 - Importo borse compreso tra 1.500 e 4.000 €
- Ma ci sarà una fondamentale condizione
 - essere iscritti ad una Facoltà universitaria a indirizzo scientifico e tecnologico (matematica, fisica, ingegneria, chimica, informatica, ecc., se avete dubbi chiedete)
- È una bella occasione per dimostrare il proprio valore e anche per vincere una borsa di studio

Il Corso 2020

| Data | | Orario | Docente | Argomento |
|------------|-----------|--------|-----------------------|--------------|
| 23/03/2020 | Lunedì | 15-18 | Prof. Vagnoni | Introduzione |
| 03/04/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Semprini Cesari | Relatività |
| 17/04/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Semprini Cesari | Relatività |
| 24/04/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Semprini Cesari | Relatività |
| 08/05/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Semprini Cesari | Relatività |
| 15/05/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Semprini Cesari | Relatività |
| 19/05/2020 | Martedì | 15-18 | Prof. Martelli | Seminario |
| 22/05/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Semprini Cesari | Relatività |
| 25/05/2020 | Lunedì | 15-18 | Prof. Porcù | Energia |
| 29/05/2020 | Venerdì | 15-18 | Prof. Porcù | Energia |
| 03/06/2020 | Mercoledì | 15-18 | Prof. Porcù | Climatologia |

- **Testo di riferimento: Da Galileo ad Einstein**
 - Livello universitario, ma pensato per studenti dell'ultimo anno delle scuole superiori
- Vi sarà spedito all'indirizzo riportato nel modulo d'iscrizione online



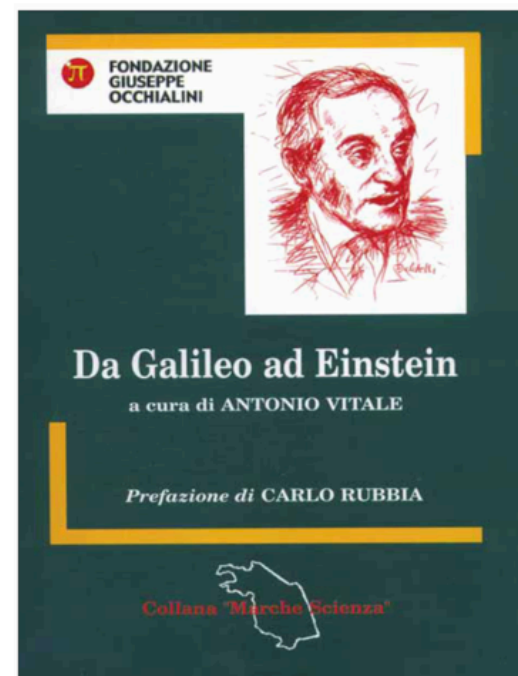
- Non dimenticate di iscrivervi all'indirizzo <https://agenda.infn.it/event/22219/registrations/>

Antonio Vitale

Da Galileo ad Einstein

Collana "Marche Scienza"

Prefazione di Carlo Rubbia



Per comunicazioni urgenti... consultare periodicamente il sito web della fondazione



Comune di Fossombrone

**Benvenuti nel sito della
Fondazione Giuseppe Occhialini**

**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

*La filosofia è scritta in questo grandissimo libro
che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo),
ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua,
e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica,
e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche,
senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola;
senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.*

(Galileo Galilei)

Pagina iniziale

Storia

Finalità

Giuseppe Occhialini

Antonio Vitale

Organizzazione

Eventi

Convegni

Rassegna stampa

Pubblicazioni

Studenti

Contatti

Il corso non è facile!

Non è richiesto che tutti voi comprendiate alla lettera ogni argomento trattato, ma ci sarà da impegnarsi comunque, in maniera particolare quest'anno con le video-lezioni

Se lo farete vi assicuro che questo vi faciliterà molto durante il primo anno di università, qualora vi iscriverete a Facoltà universitarie a indirizzo scientifico

...e potrete anche partecipare al colloquio di verifica e vincere una borsa di studio della Fondazione Occhialini

In bocca al lupo!!!