



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

Relatività, Energia ed Ambiente

Introduzione al Corso 2015

Vincenzo Vagnoni

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e
Fondazione Giuseppe Occhialini

Pesaro, 25 Marzo - 3 Giugno 2015

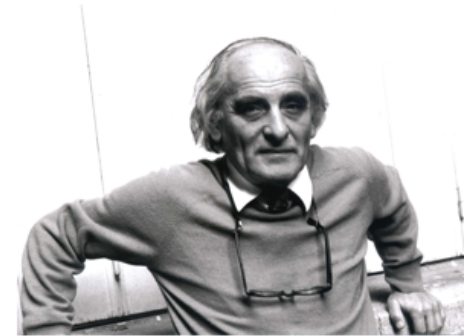


La Fondazione Giuseppe Occhialini



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



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



Diffondere l'interesse per la scienza



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Una delle contraddizioni caratteristiche delle società tecnologicamente avanzate consiste nella **diminuzione dell'interesse per le questioni scientifiche**, in controtendenza con la diffusione delle tecnologie, che pure dalla scienza traggono origine
- Vogliamo **ridestare la curiosità per la comprensione del mondo che ci circonda**, indurre a riflettere con più profondità sui fenomeni naturali, anche quelli più comuni nella vita dell'uomo



L'importanza della ricerca scientifica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Le maggiori debolezze del nostro sistema produttivo sono nel settore dell'**innovazione** e dello **sviluppo tecnologico**.

E' su questo fronte che si giocano la tenuta dei livelli occupazionali, le carte della **competitività** internazionale e la possibilità di avere uno sviluppo qualificato.

Ciò deve indurre ad una **revisione della politica della ricerca** nel nostro paese.



La ricerca scientifica oggi



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il secolo appena trascorso 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 e alle loro applicazioni pacifiche e belliche, ai telefoni cellulari, alla TAC, alla RM, alla PET, ecc.



La ricerca scientifica oggi



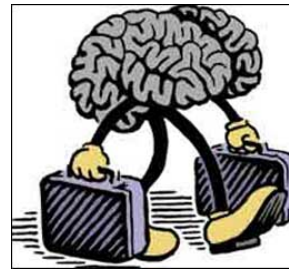
FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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



Il *brain drain*

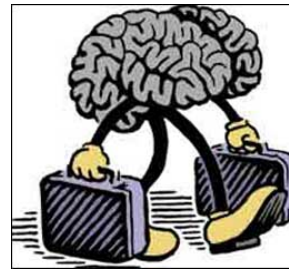


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- l'Italia regala agli Stati Uniti 5 miliardi di euro all'anno attraverso le **migliaia di giovani ricercatori che lasciano il nostro Paese** dopo essere costati allo Stato almeno 500.000 euro
- Più del 50% dei giovani ricercatori statunitensi è straniero
 - 400.000 scienziati europei lavorano negli Stati Uniti
 - Solo il 13% di essi intende tornare



Il brain drain



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

- Nei paesi dell'OCSE gli studenti che decidono di frequentare l'università al di fuori del proprio paese sono 1.650.000
- Di questi, il 70% si iscrive nelle università degli Stati Uniti, del Regno Unito, della Germania, della Francia e dell'Australia
- **La presenza di studenti stranieri negli atenei italiani al contrario è sempre stata particolarmente scarsa**
- **La quota degli studenti stranieri in Italia è solo del 2%, mentre raggiunge**
 - il 30% negli USA
 - il 12% in Germania e Regno Unito
 - il 10% in Australia
 - il 9% in Francia



Che fare in Italia?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- In Italia ancor più che nel resto dell'Europa bisogna:
 - **fermare il *brain drain***, rendere le carriere dei ricercatori più attraenti, anche dal punto di vista finanziario, sociale e previdenziale
 - **aumentare le prospettive** di carriera e di occupazione adeguata
 - attribuire la dovuta importanza alla **titolarizzazione** della posizione, limitare e restringere i periodi a tempo determinato nella ricerca
 - istituire un **sistema di valutazione** chiaro e trasparente e rendere ad esso correlato l'accesso ai fondi della ricerca
 - **investire** di più in ricerca (!!!)
 - **aprire le Università al mondo esterno** e aumentare la loro attrattiva internazionale (che è piuttosto scarsa)



Obiettivi e metodo dei corsi della Fondazione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Si vuole **dissipare il pregiudizio sulla “difficoltà” della scienza** e sull’estraneità del suo linguaggio, proponendo un’immagine della scienza come espressione rigorosa ma spontanea della nostra naturale curiosità sull’essenza del mondo.
- Riteniamo che il **coinvolgimento fra i banchi di scuola degli scienziati** in quanto diretti operatori scientifici, che riferiranno su **esperienze vissute in prima persona**, rappresenti lo strumento più importante di stimolo intellettuale per i giovani nei confronti della scienza



Obiettivi e metodo dei corsi della Fondazione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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).



Il Corso 2015



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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



Il Corso 2015



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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 saranno delle condizioni...
 - **essere iscritti ad una Facoltà universitaria a indirizzo scientifico** (matematica, fisica, ingegneria, medicina, ecc., se avete dubbi chiedete)
 - **aver partecipato ad almeno 3/4 delle lezioni** del corso
 - a proposito...
- E' una bella occasione per dimostrare il proprio valore e anche per vincere una cospicua borsa di studio.



Il Corso 2015



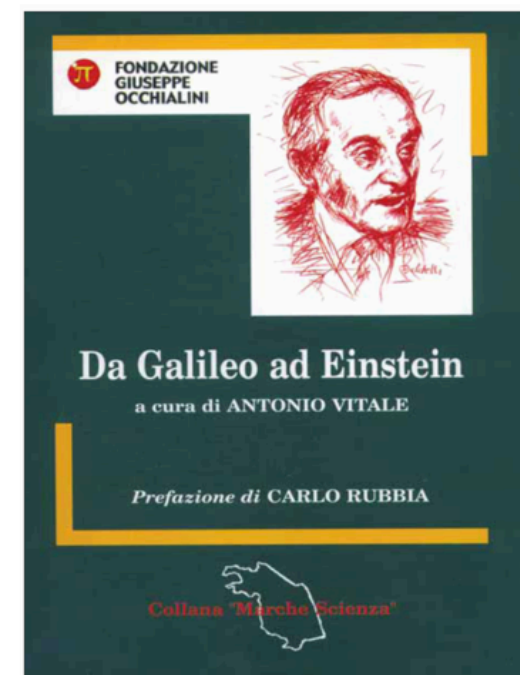
FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Antonio Vitale

Da Galileo ad Einstein

Collana "Marche Scienza"

Prefazione di Carlo Rubbia



Testo di riferimento: "Da Galileo ad Einstein"

Livello universitario, ma pensato per studenti dell'ultimo anno delle scuole superiori



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



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

Fondazione Cassa di Risparmio di Pesaro | Provincia di Pesaro e Urbino | Comune di Fossombrone

 **FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

**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



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Le forze della natura



Di cos'è fatto il mondo?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Anticamente: 4 elementi
- 19^{mo} secolo: atomi
- Inizio 20^{mo} secolo: elettroni, protoni, neutroni
- Oggi: quark e leptoni





Modello per l'atomo



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Con gli esperimenti si possono “spaccare” gli atomi
- Particelle leggere a carica negativa (elettroni) intorno ad un nucleo positivo e pesante
- L'atomo è praticamente vuoto



1900



Present Day

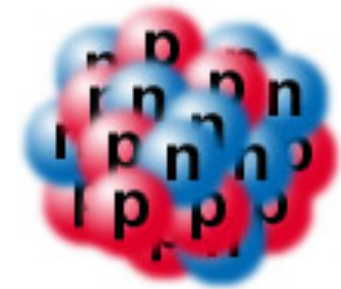


Il nucleo



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il nucleo è piccolo e denso.
- Per un po' si pensò che fosse puntiforme
- Ma vi erano tanti nuclei diversi quanti erano gli atomi
- Semplificazione: tutti i nuclei sono fatti di **protoni** carichi e **neutroni** neutri



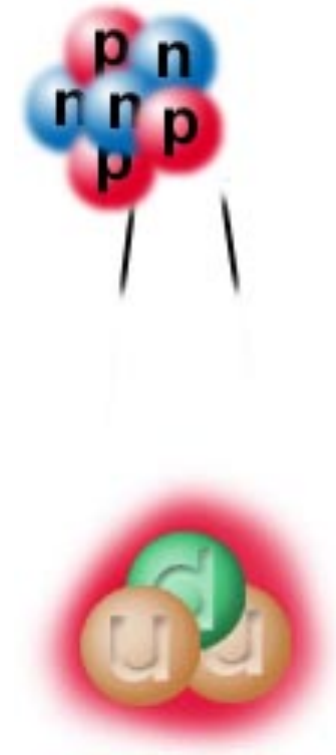


Quarks



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Adesso sappiamo che anche protoni e neutroni non sono unità fondamentali
- Sono composti da particelle più piccole dette quarks
- Per il momento questi quarks sembrano essere puntiformi



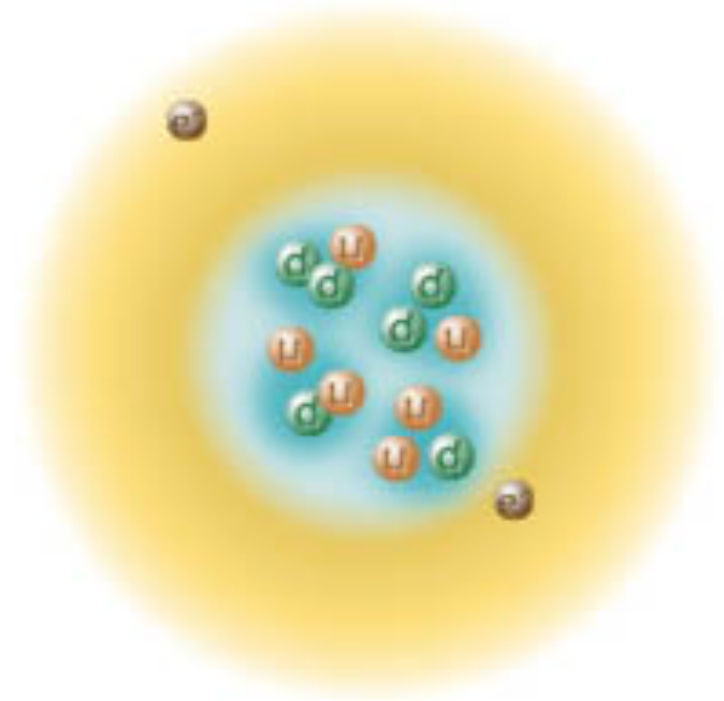


L'atomo moderno



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Una nuvola di elettroni in moto costante intorno al nucleo
- Protoni e neutroni in moto nel nucleo
- Quarks in moto nei protoni e nei neutroni



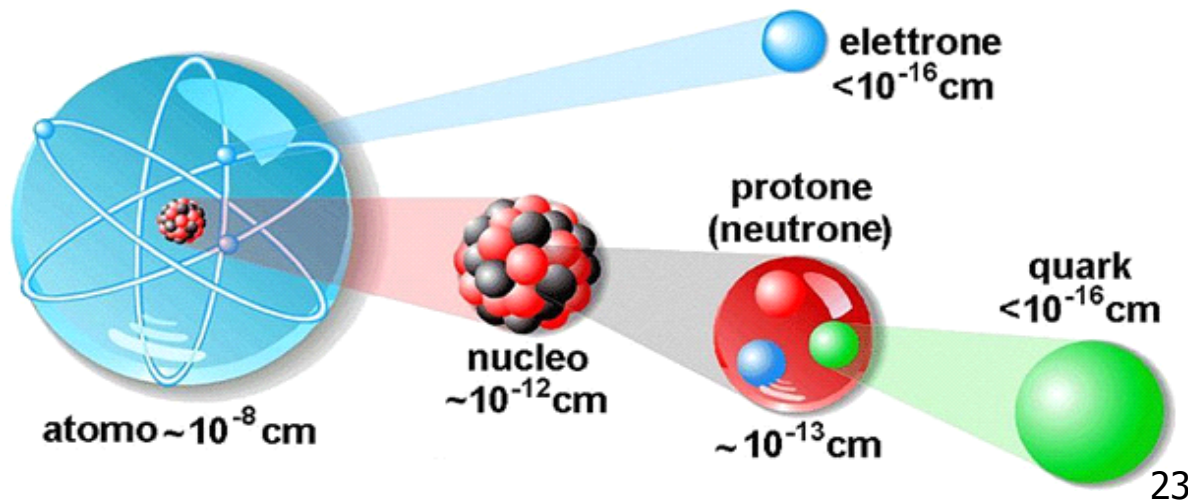


Dimensioni (sub)-atomiche



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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 piccoli dei protoni



23

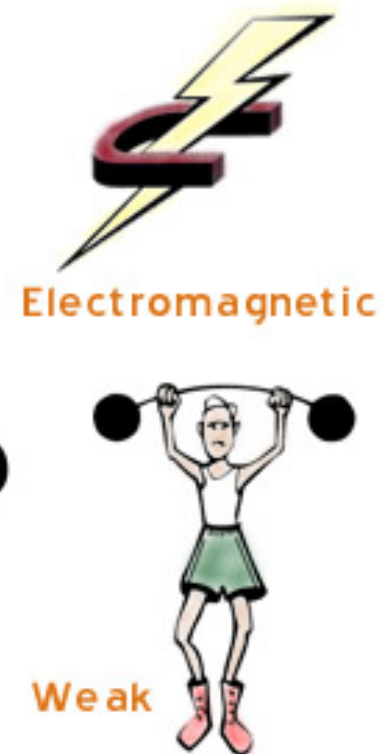
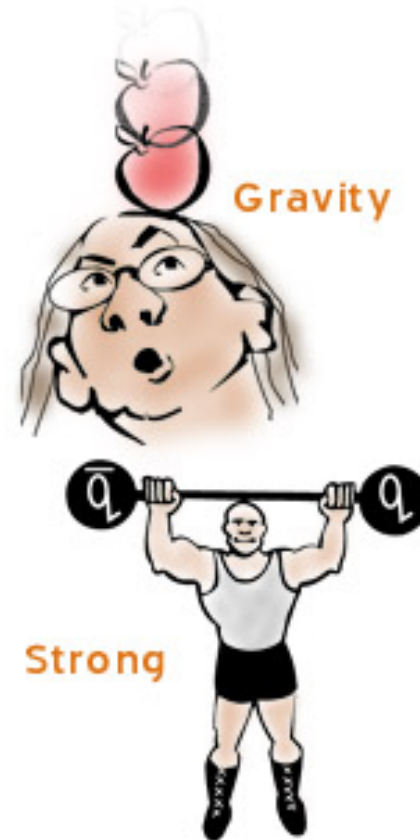


Quattro Forze Fondamentali



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Ci sono 4 interazioni fondamentali in natura
- Tutte le forze possono essere attribuite a queste interazioni
- La gravità è solo attrattiva, le altre sono anche repulsive
- Le interazioni sono anche responsabili dei decadimenti delle particelle instabili



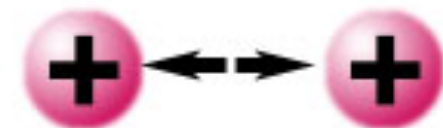


Elettromagnetismo



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Le forze elettromagnetiche fanno sì che cariche opposte si attraggano e cariche uguali si respingano
- Il portatore della forza è il fotone (γ)
- Il fotone è senza massa e si propaga alla velocità della luce



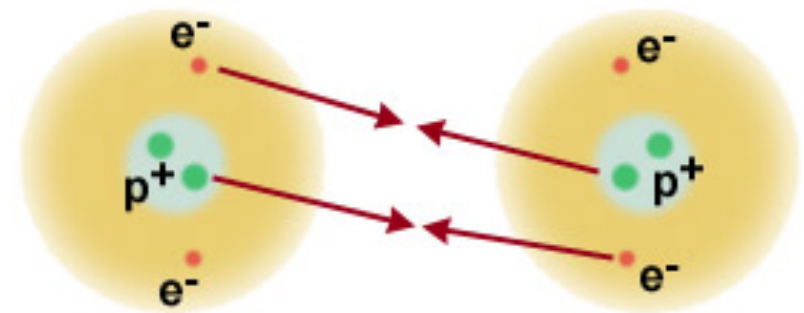


Forza Elettromagnetica residua



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Normalmente gli atomi sono neutri avendo lo stesso numero di protoni e neutroni
- La parte carica di un atomo può attrarre la parte carica di un altro atomo
- Gli atomi si possono così legare in molecole



Residual E-M force in action: the atoms are electrically neutral, but the electrons in one are attracted to the protons in another, and vice versa!

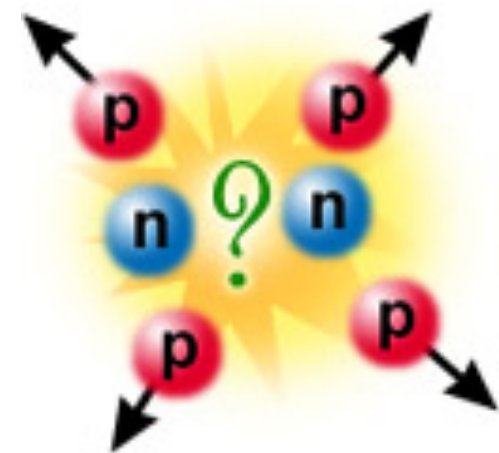


Perché un nucleo non esplode?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Un nucleo pesante contiene molti protoni, tutti con carica positiva
- Questi si respingono
- Perché allora il nucleo non esplode?





Forza Forte



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- In aggiunta alla carica elettrica, i quarks portano anche un nuovo tipo di carica, detta “carica di colore”
- Ci sono 3 “colori” convenzionalmente chiamati rosso, verde, blu
- La forza tra le particelle che hanno carica di colore è detta forza forte





Il mediatore della forza forte il Gluone



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- La forza forte tiene insieme i quarks a formare gli adroni
- I portatori della forza forte sono i gluoni: ci sono 8 diversi gluoni
- La forza forte agisce solo su corte distanze



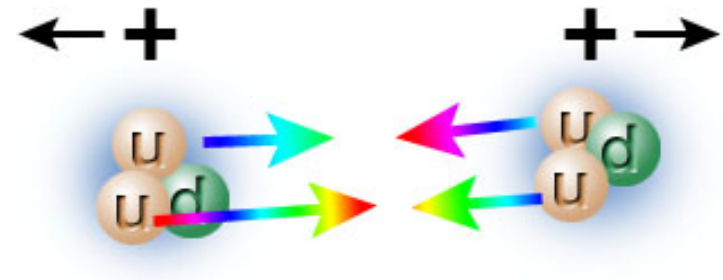


Forza Forte residua



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- La forza forte tra i quarks in un protone ed i quarks in un altro protone è abbastanza intensa da superare la forza di repulsione elettromagnetica



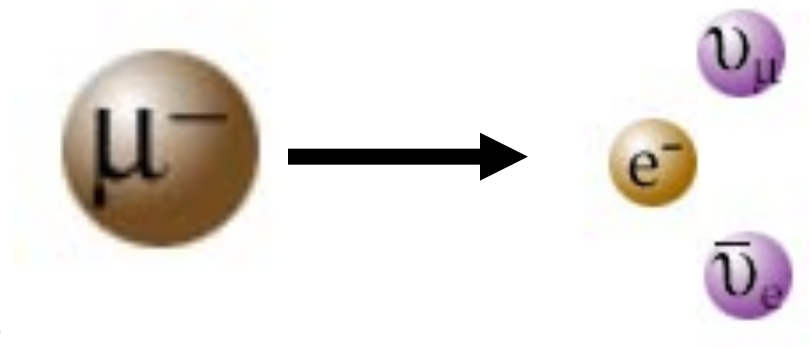


Decadimento delle particelle



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- In un decadimento, una particella “instabile” scompare trasformandosi in un certo numero di particelle più leggere
- Qui le particelle prodotte non sono “pezzi” della particella iniziale, ma sono altre particelle completamente nuove





Forza debole



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Le interazioni deboli sono responsabili del decadimento dei quarks e dei leptoni pesanti in quarks e leptoni più leggeri
- I portatori della forza sono le particelle W e Z





E la gravità?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- La gravità è molto debole
- È importante a distanze macroscopiche in presenza di grandi masse
- Il portatore della forza gravitazionale, il gravitone, è predetto dalla teoria ma non è ancora mai stato osservato direttamente

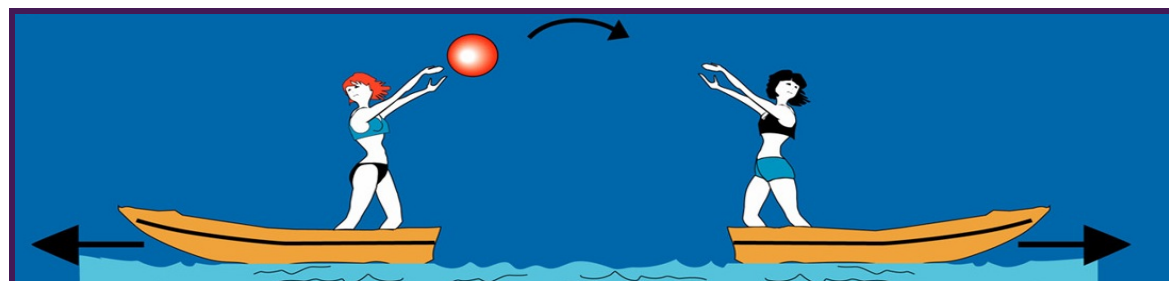




Riassunto: le quattro forze della natura



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Lo scambio di particelle è responsabile della forza

Tipo di forza	Intensità relativa delle forze	Particelle scambiate	Dove si manifesta
Forza forte	~ 1	gluoni	Nuclei atomici
Forza elettromagnetica	$\sim 10^{-3}$	fotoni	Elettricità
Forza debole	$\sim 10^{-5}$	bosoni W,Z	Sole, decadimento radioattivo β
Gravità	$\sim 10^{-38}$	gravitoni	Mantiene i nostri piedi per terra



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

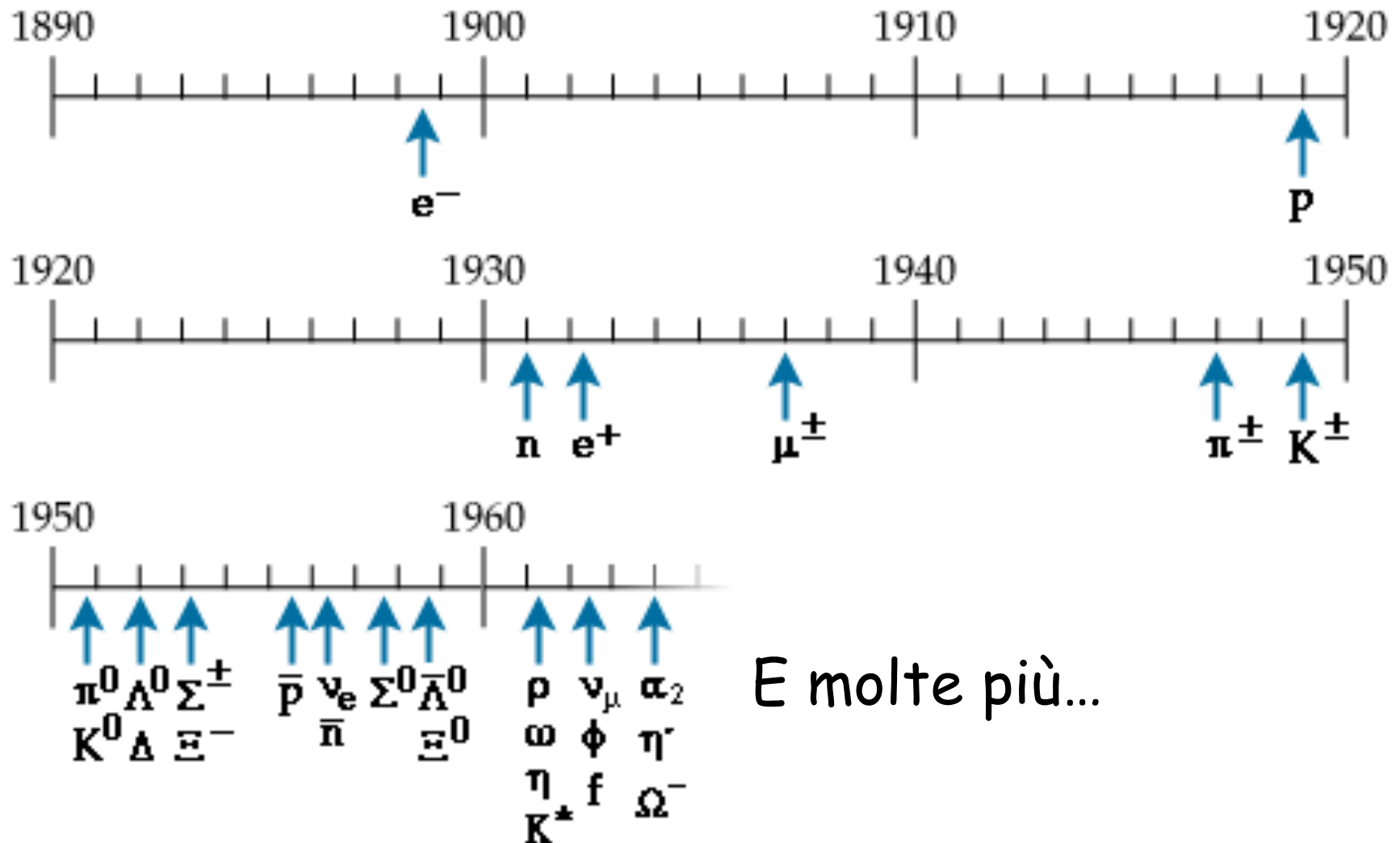
Le particelle



Esistono tante particelle...



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



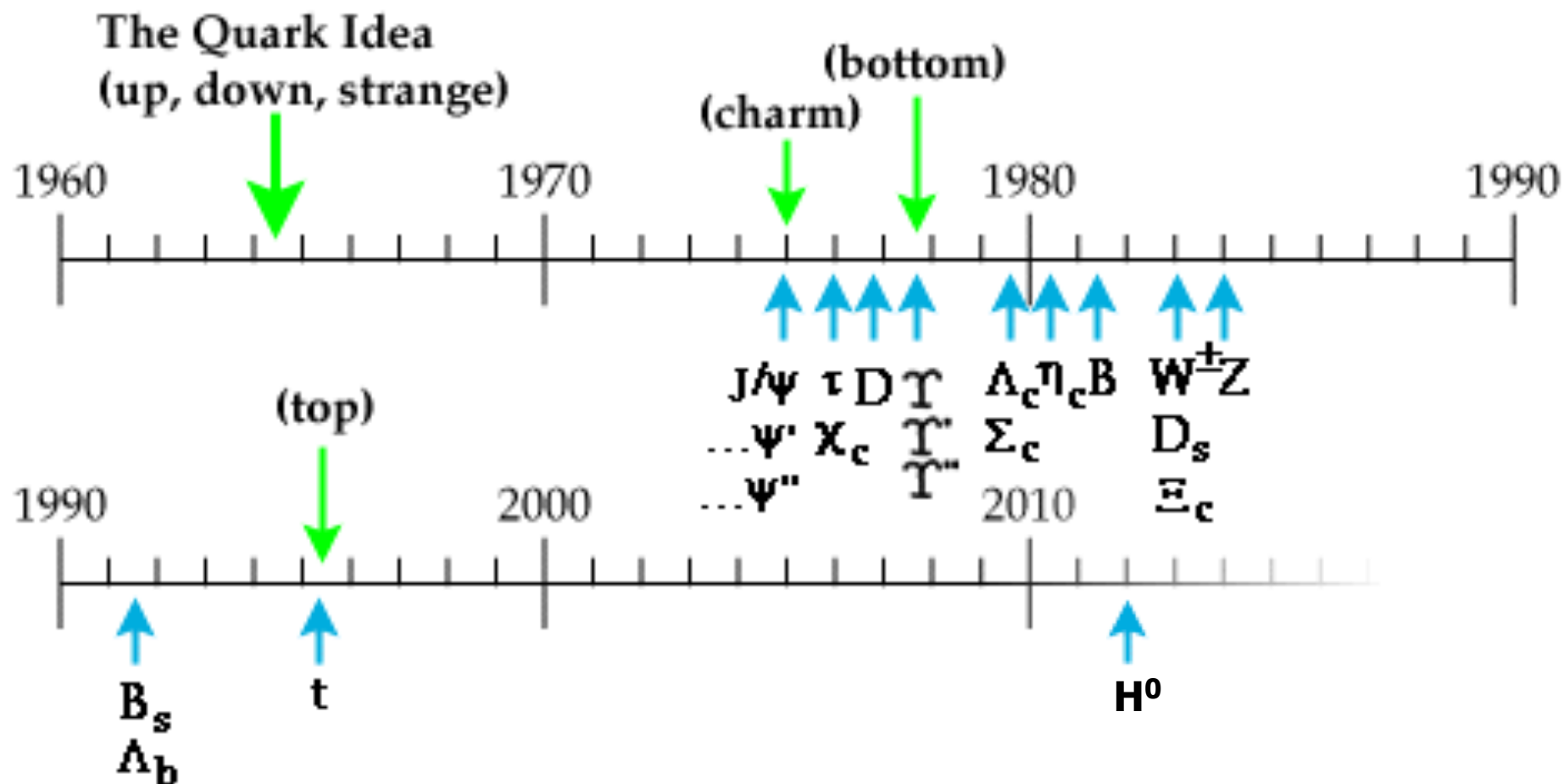
E molte più...



Ma oggi sappiamo che sono costituite da quark



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI





Come si “vedono”?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Serve una radiazione molto energetica, cioè con lunghezza d'onda molto piccola:

usiamo gli acceleratori di particelle!

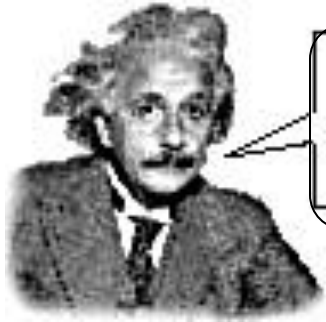




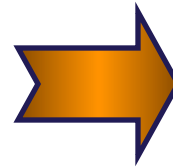
Come si producono?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

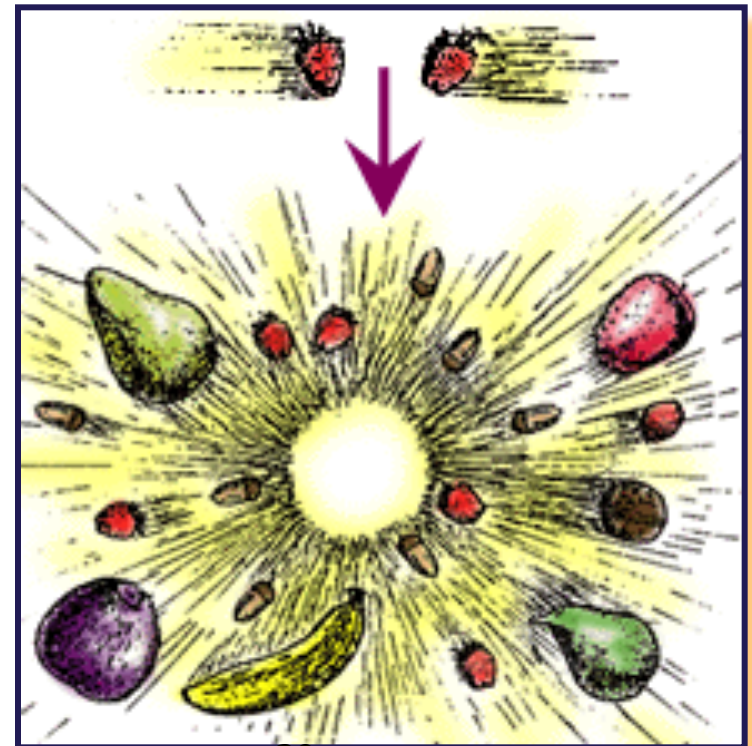


- *La massa è una*
- *forma di energia*



$$E=mc^2$$

- ❑ 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**

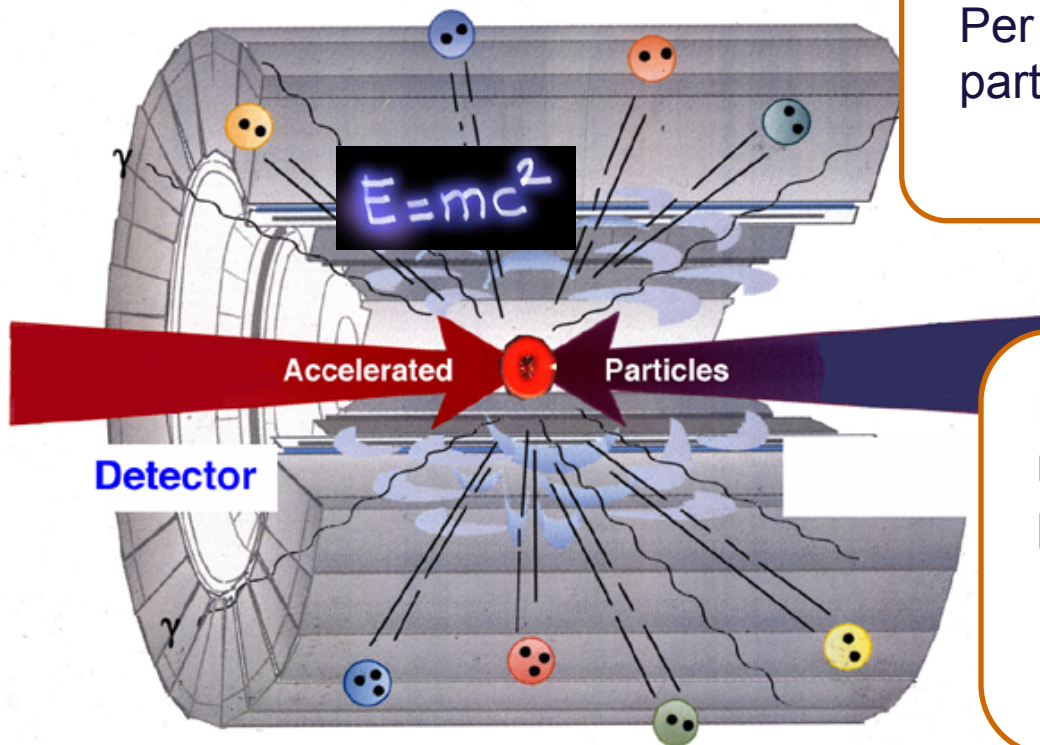




Con quali strumenti si osservano?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



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

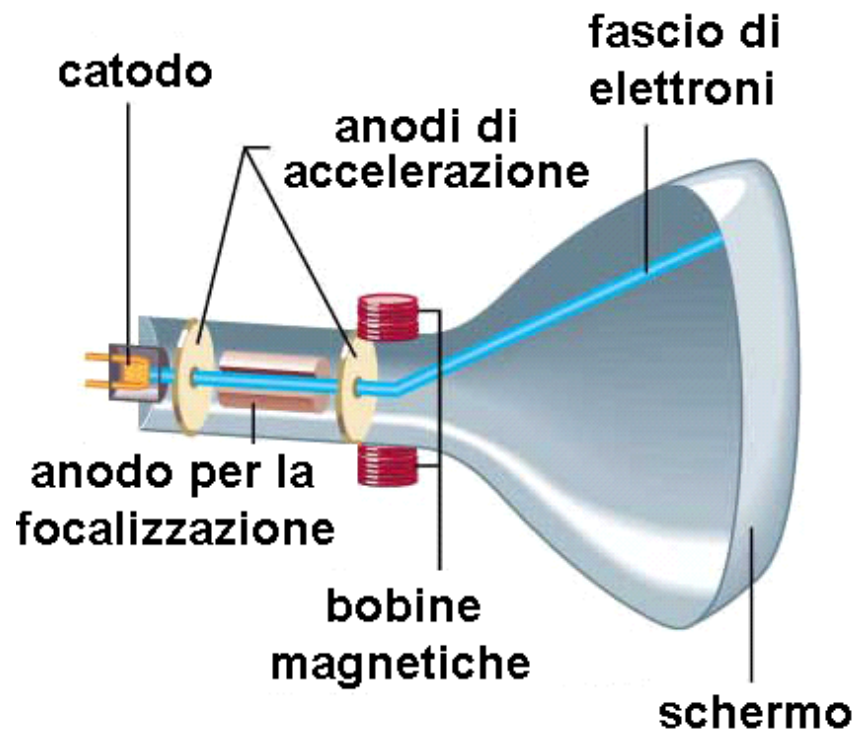
↳ Calcolo, reti



Acceleratori di particelle π

FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- ❑ Con il nome di acceleratore di particelle si intende una macchina capace di immagazzinare e far raggiungere energie elevate a particelle di vario genere, costringendole a seguire una traiettoria data, per essere poi impiegate come proiettili contro bersagli fissi o altre particelle.
- ❑ Un'acceleratore di elettroni diffusissimo fino a pochi anni fa, oramai del tutto rimpiazzato da nuove tecnologie, è il televisore a tubo catodico.



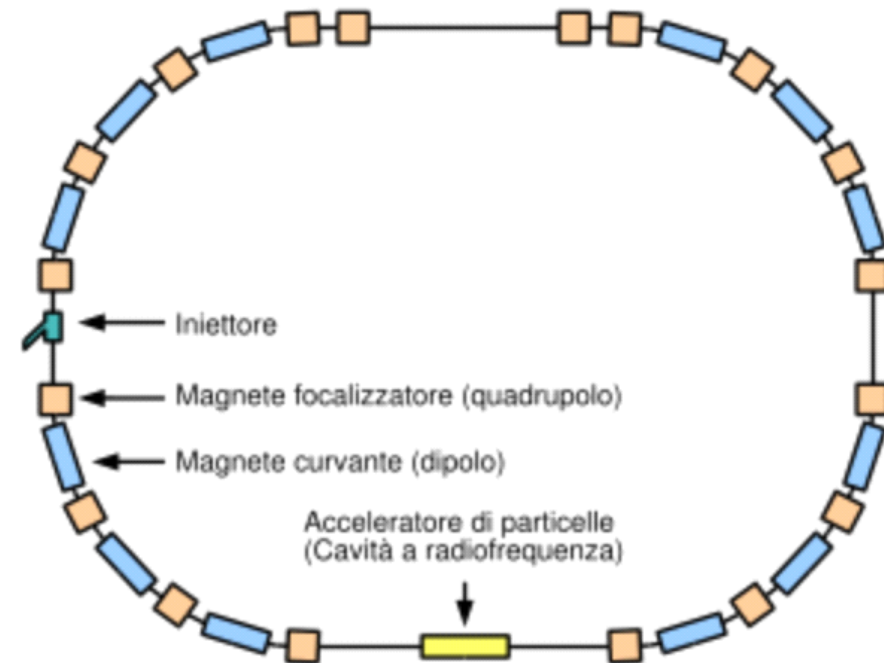


Gli acceleratori moderni il sincrotrone



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il sincrotrone è un acceleratore nel quale le particelle sono accelerate lungo una traiettoria (grosso modo) circolare
- Il vantaggio principale rispetto ad un dispositivo come il ciclotrone è che il campo magnetico è presente soltanto lungo il circolo descritto dalla particella
- 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

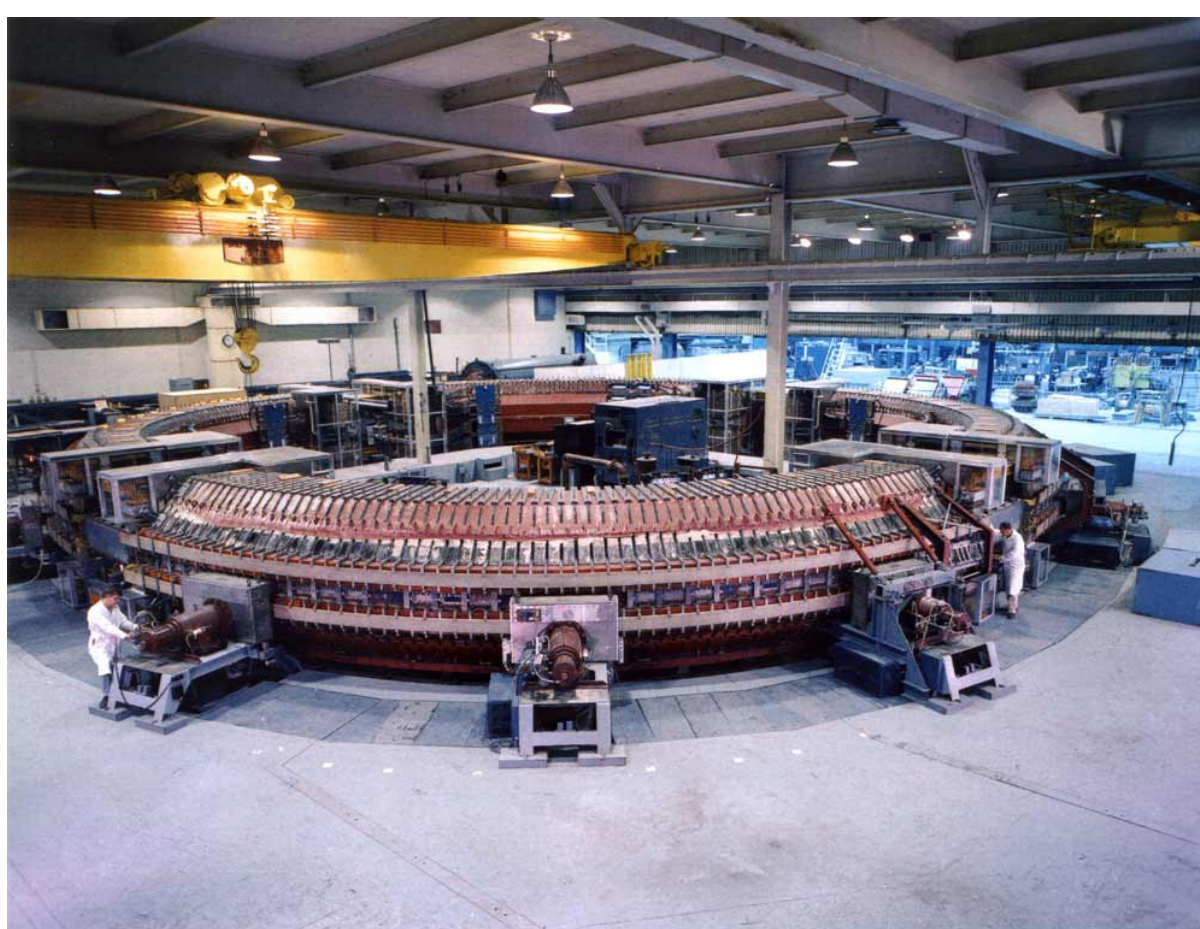




Cosmotron (BNL) 1953



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



- Il primo grande acceleratore adronico a superare la barriera del GeV e il primo ad avere una estrazione del fascio per esperimenti all'esterno.



Bevatron (Berkeley) 1954



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 1956 scoperta dell'antiprotone (necessari almeno 6.5 GeV)
- 1959 Premio Nobel a Segrè e Chamberlain





Proto Sincrotrone (CERN) 1959



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Scoperta
correnti
deboli neutre



28 GeV





AGS (Brookhaven) 1960



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



- Le misure a questa macchina portarono a 3 premi Nobel
 - 1976: Samuel C. C. Ting per la scoperta della prima particella con quark charm, la J/ψ
 - 1980: James Cronin e Val Fitch per la scoperta della violazione della simmetria CP (asimmetria tra materia e antimateria)
 - 1988: Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger per la scoperta del neutrino muonico

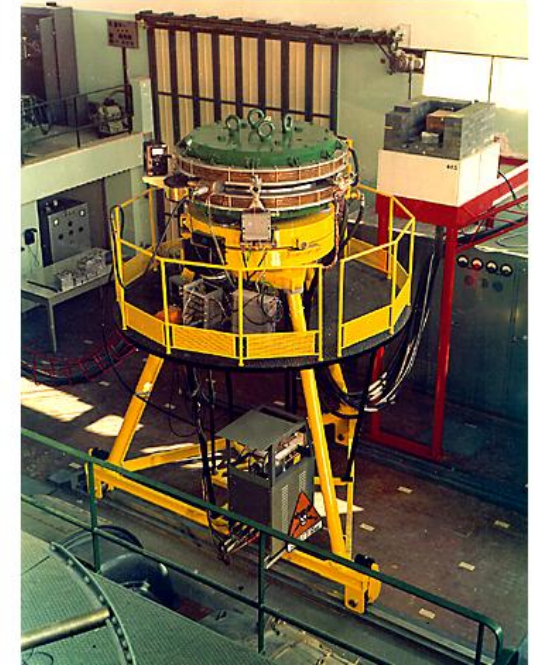


AdA (Frascati) 1961



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Non solo macchine adroniche
- Il primo collisionatore al mondo, che faceva scontrare elettroni e positroni, venne costruito a LNF
- Nei collisionatori due fasci di particelle vengono accelerati in direzioni opposte e fatti scontrare frontalmente
- Prima macchina al mondo a far collidere materia e antimateria, energia 200 MeV per fascio
- Successivamente ADONE (1967), 1.5 GeV per fascio





ISR (CERN) 1971



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il primo collisionatore adronico
- Energia dei fasci 62 GeV, corrispondenti a 2000 GeV di un acceleratore con bersaglio fisso



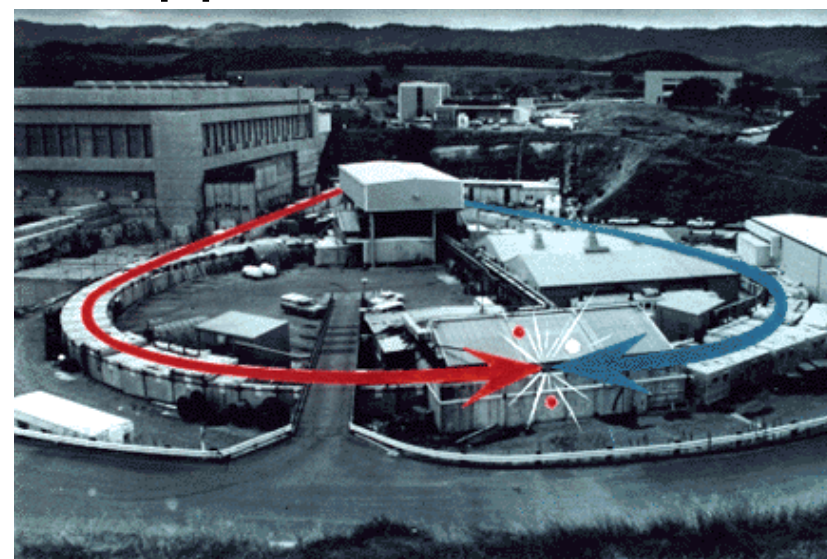


SPEAR (SLAC) 1972



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Anello da 80 metri di diametro, con fasci di elettroni e positroni circolanti in direzioni opposte
 - Energia fino a 4 GeV
- Premio Nobel a Richter nel 1976 insieme a Ting per la scoperta della particella J/ψ
- Premio Nobel a Perl nel 1995 per la scoperta (nel 1976) del terzo leptone carico dopo elettrone e muone, la particella τ





Super Proto Sincrotrone (CERN) 1976



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Acceleratore sotterraneo da 7 km di diametro e 450 GeV di energia
- Alla fine degli anni '70 viene convertito in un collisionatore protone-antiprotone da 900 GeV
- Premio Nobel a Rubbia e a Van Der Meer nel 1984 per la scoperta dei mediatori delle interazioni deboli, le particelle W e Z





Tevatron (FNAL) 1983



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Collisionatore con fasci di protoni e antiprotoni di 980 GeV
→ quasi 2 TeV nel centro di massa
- È stato definitivamente spento nel 2011



- Nel 1995 scoperta l'esistenza del quark top, la particella elementare più pesante ad oggi nota
 - ≈ 175 volte la massa del protone



LEP (CERN) 1989



FONDAZIONE

- Il più grande collisionatore e^+e^- mai costruito
- Anello circolare con una circonferenza di 27 km posizionato in un tunnel a 100 m di profondità
- Quando iniziò a lavorare nel 1989, accelerava elettroni e positroni all'energia di circa 45 GeV, in modo da produrre la risonanza Z^0 che ha una massa di circa 91 GeV
- L'acceleratore venne poi aggiornato per permettere la produzione di coppie W^+W^- , ciascuno avente una massa di circa 80 GeV
- L'energia complessiva raggiunse il massimo di 209 GeV nell'ultima fase di vita della macchina nel 2000
- Alla fine del 2000, LEP è stato smantellato per far posto a LHC





HERA (DESY) 1992



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Primo grande collisionatore elettrone-protone, situato nella periferia di Amburgo
- Con 6.3 km di circonferenza, elettroni all'energia di 27.5 GeV venivano sparati come proiettili contro protoni da 920 GeV per rompere il protone e investigarne la struttura
 - Deep Inelastic Scattering





KEKB (KEK) e PEP-II (SLAC) 1999



FONDAZIONE

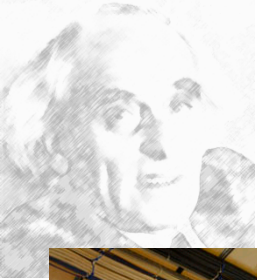
GIUSEPPE OCCHIALINI



8 GeV e^- x 3.5 GeV e^+

9 GeV e^- x 3.1 GeV e^+

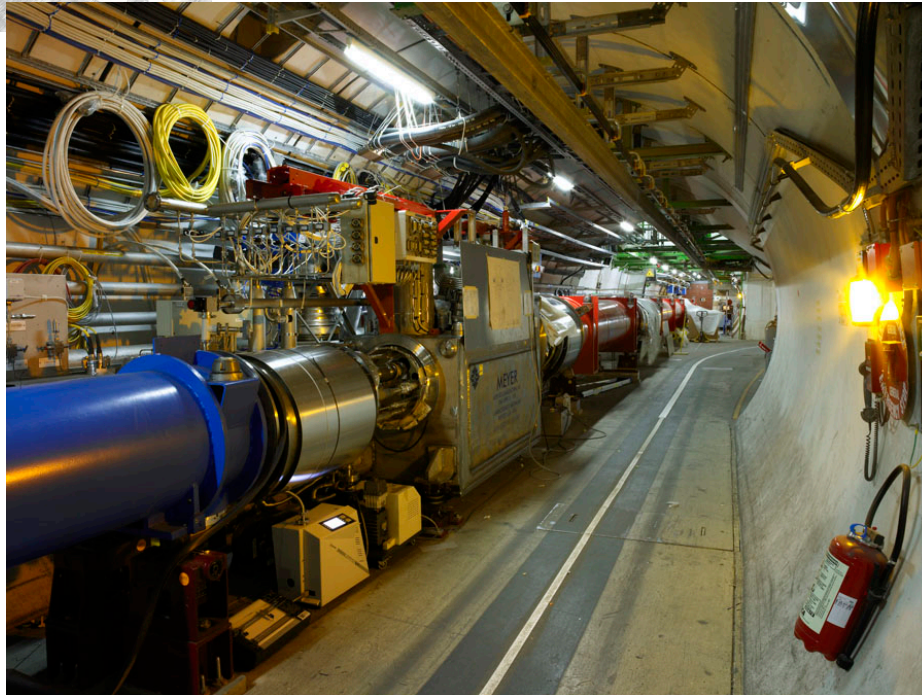
- Premio nobel nel 2008 a Kobayashi e Maskawa “per la scoperta dell’origine della rottura della simmetria che prevede l’esistenza di almeno tre famiglie di quark in natura”
- Articolo pubblicato nel 1973 ma previsione pienamente confermata solo nel 2001



LHC (CERN) 2008



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



- Il più potente collisionatore adronico, installato nel tunnel precedentemente scavato per LEP
- Due fasci di protoni circolanti in versi opposti
- Progettato per lavorare fino a 7 TeV di energia per fascio
 - Fino ad ora 4 TeV al massimo
 - Saranno alzati a 6.5 TeV nel 2015 e successivamente a 7 TeV
- Scoperta del bosone di Higgs
 - Premio Nobel nel 2013 a Higgs a 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”

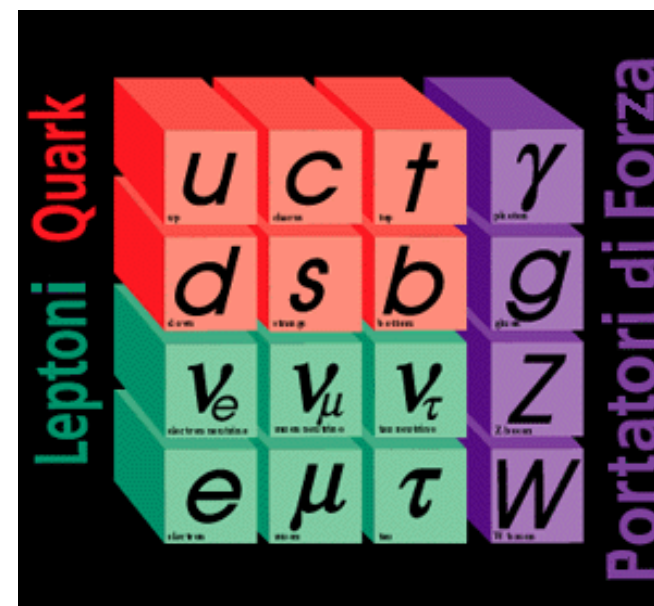
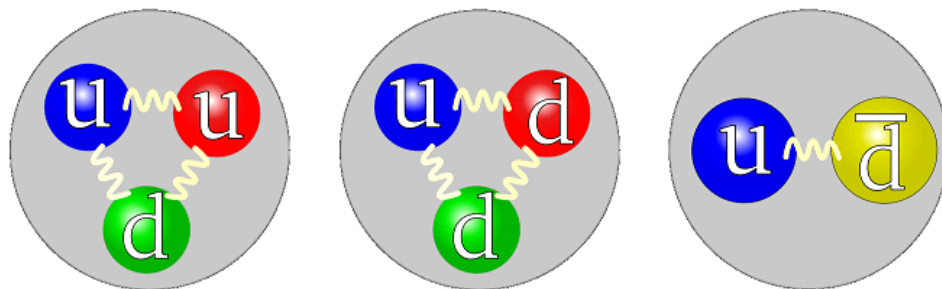
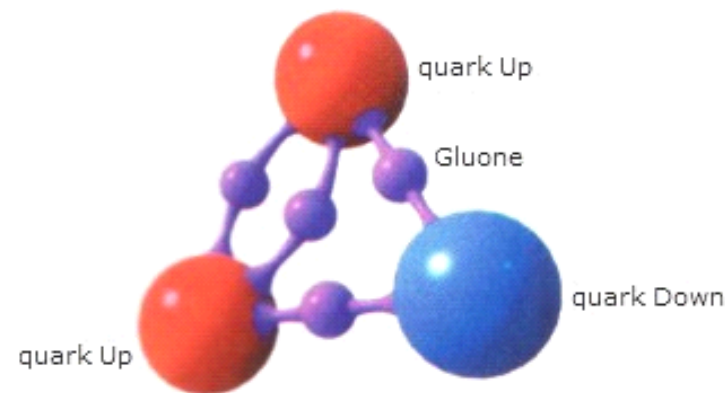


I costituenti fondamentali della materia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Infatti conosciamo svariate centinaia di particelle
- Ma 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



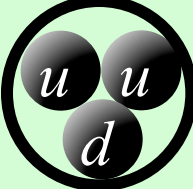
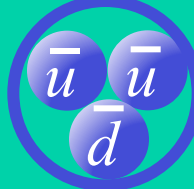
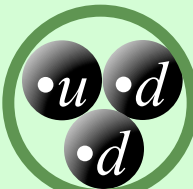
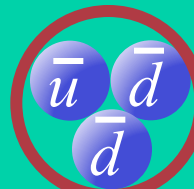


Le antiparticelle



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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**

materia	anti-materia
$Q = -e$  elettrone	 $Q = e$ positrone
$Q = \frac{2}{3}e$  up	 $Q = -\frac{2}{3}e$ anti-up
$Q = -\frac{1}{3}e$  down	 $Q = \frac{1}{3}e$ anti-down
$Q = e$  protone	 $Q = -e$ anti-protone
$Q = 0$  neutrone	 $Q = 0$ anti-neutrone



Energie in gioco



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

• $1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

- $\approx 50 \times 10^3 \text{ eV}$
 - energia cinetica degli elettroni in un tubo catodico
- $\approx 10^9 \text{ eV}$
 - massa del protone
- $4 \times 10^{12} \text{ eV}$
 - energia cinetica dei protoni dell'acceleratore LHC nel 2012
 - energia cinetica di una zanzara in volo
- $6 \times 10^{18} \text{ eV}$
 - energia cinetica di una massa di 100 g che cade da un dislivello di 1 m
- $\approx 10^{20} \text{ eV}$
 - energia cinetica di una palla da tennis lanciata da un giocatore professionista
- $10^9 \div 10^{21} \text{ eV}$
 - intervallo di energia di interesse dei raggi cosmici

Le più alte energie mai osservate nei raggi cosmici sono ordinarie se considerate in termini macroscopici, ma enormi se concentrate in una singola particella

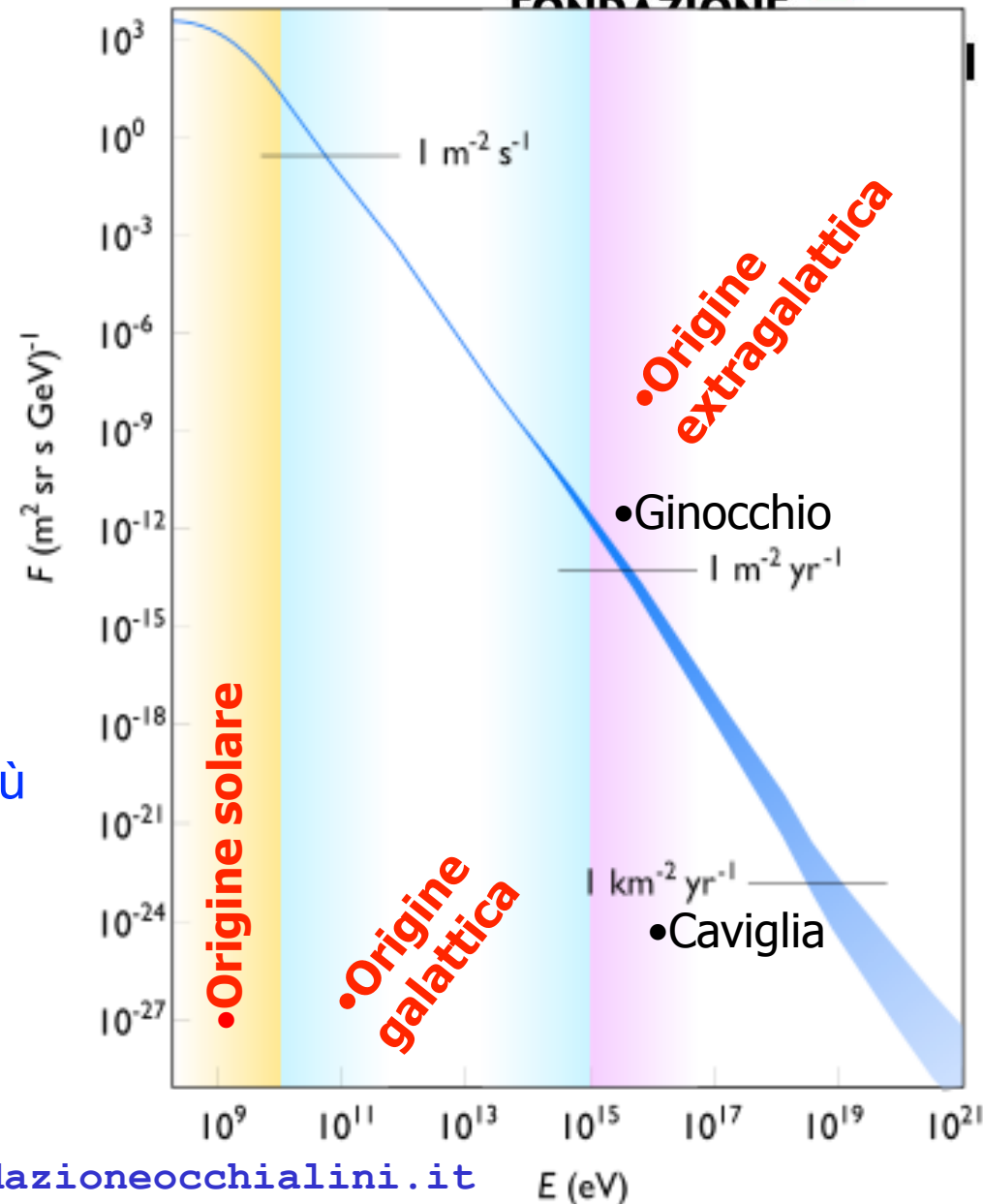


Correlazione energia-flusso dei raggi cosmici



FONDAZIONE

- Correlando energia e numerosità dei cosmici che arrivano sulla Terra, si osserva una **dipendenza molto forte**
- Le energie in gioco raggiungono i 10^{21} eV, ma sono eventi molto rari
 - Notate che l'acceleratore di più alta energia mai costruito (LHC) accelererà (dal 2015) protoni fino all'energia di 7×10^{12} eV

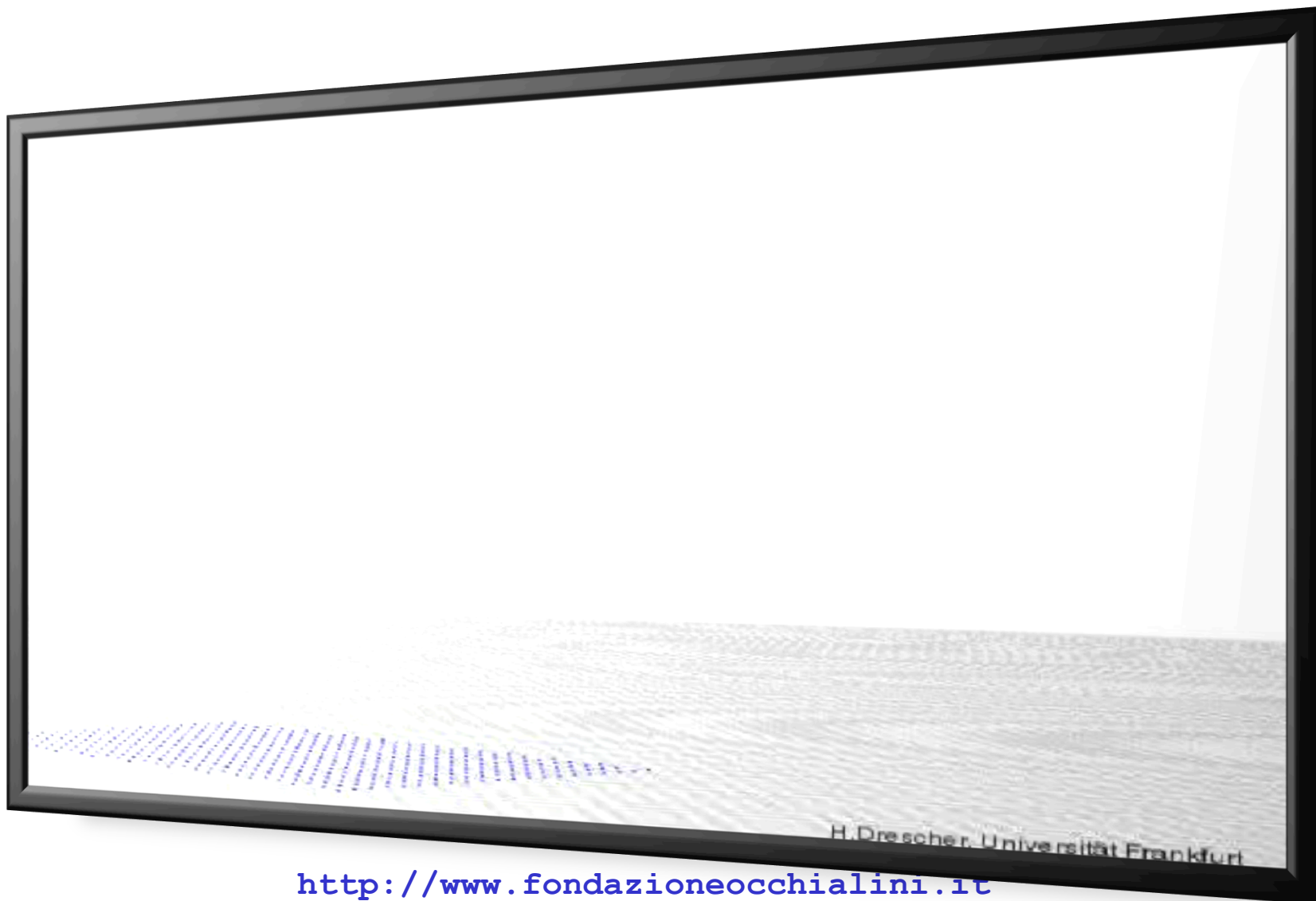




Simulazione di un nucleo di Ferro con $E=10^{19}$ eV che impatta sull'atmosfera



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



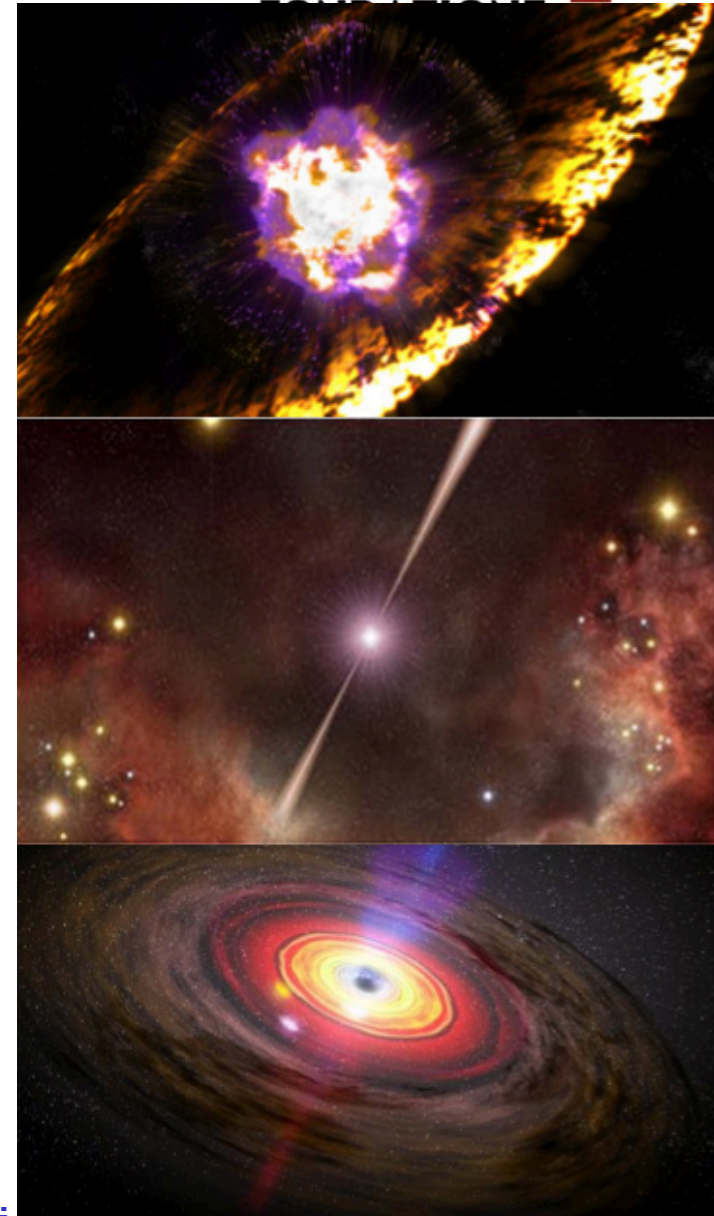
H. Drescher, Universität Frankfurt



Acceleratori cosmici



- Esistono quindi nell'Universo **fenomeni estremi** che sono in grado di produrre accelerazioni impossibili da riprodurre sulla Terra, ad esempio
 - onde d'urto da esplosione di supernovae
 - stelle di neutroni
 - buchi neri rotanti e supermassivi
 - i buchi neri più grandi ad oggi noti hanno masse miliardi di volte maggiori rispetto al Sole
 - presenza di nuova fisica
- **Non conosciamo bene questi fenomeni**
 - i raggi cosmici sono l'unico strumento di esplorazione diretta

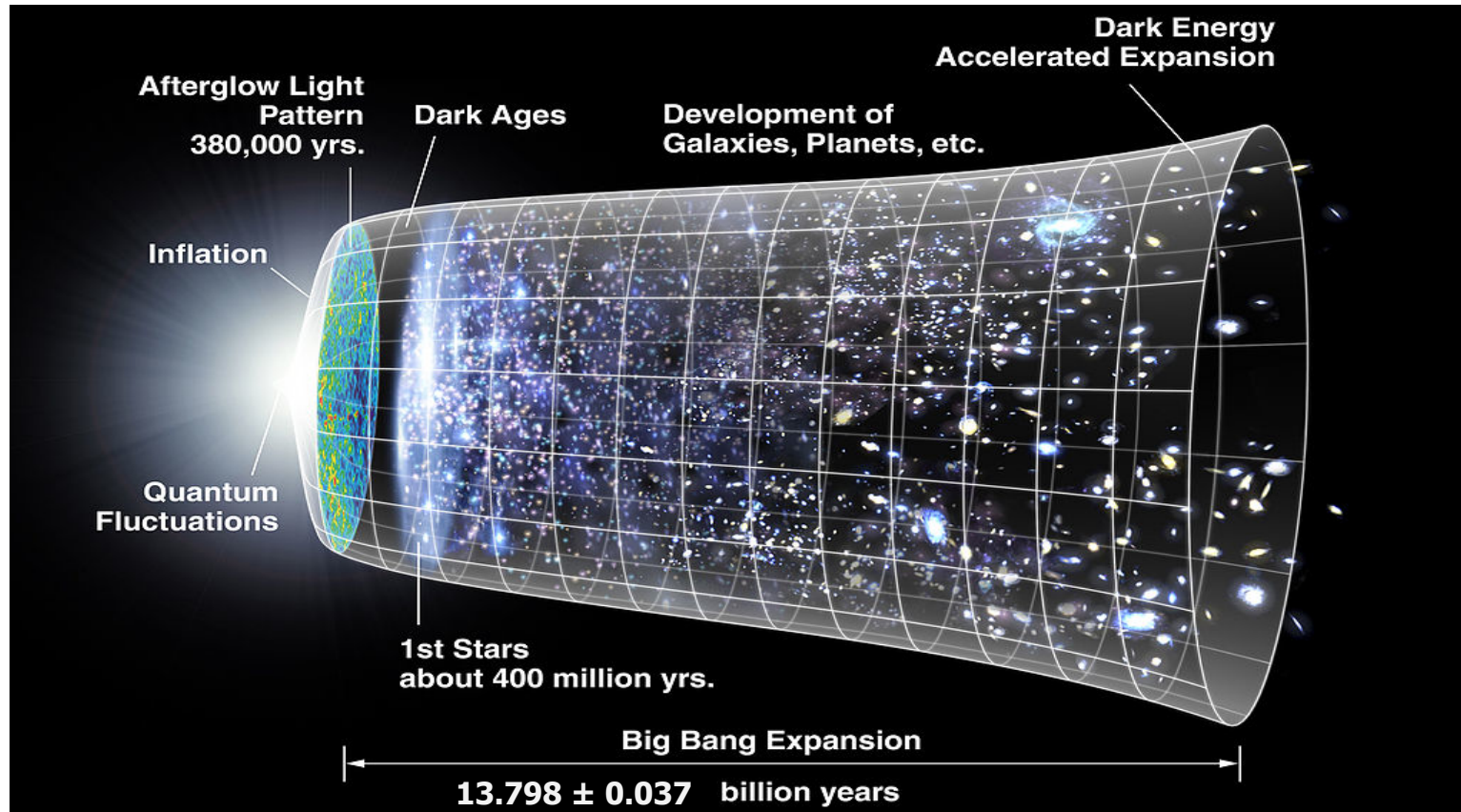




Il Modello Standard della Cosmologia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



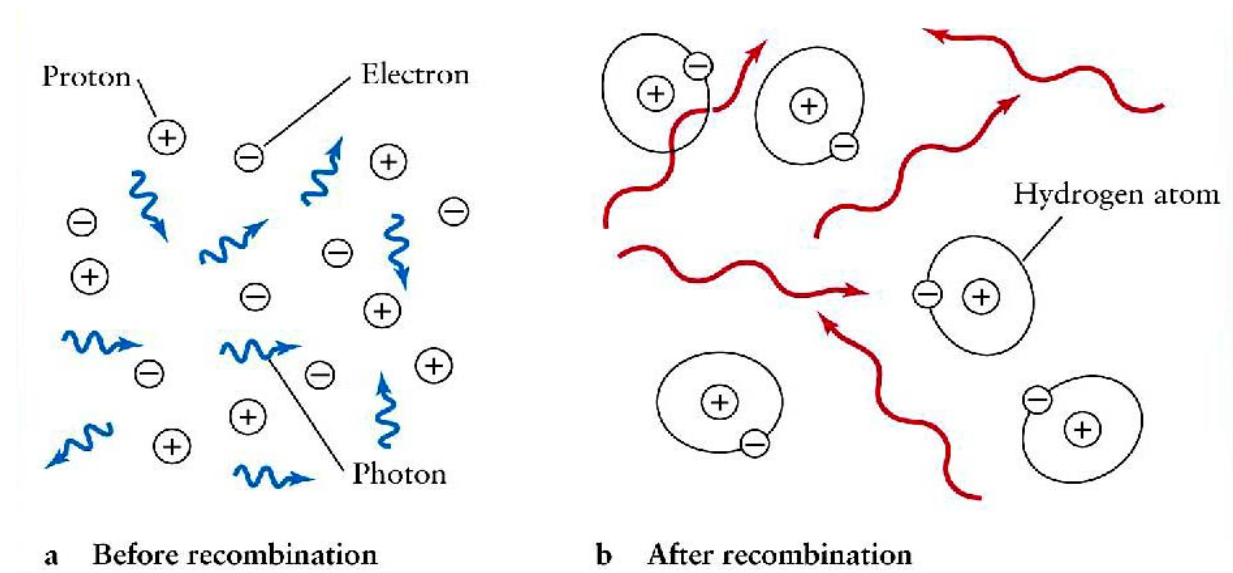
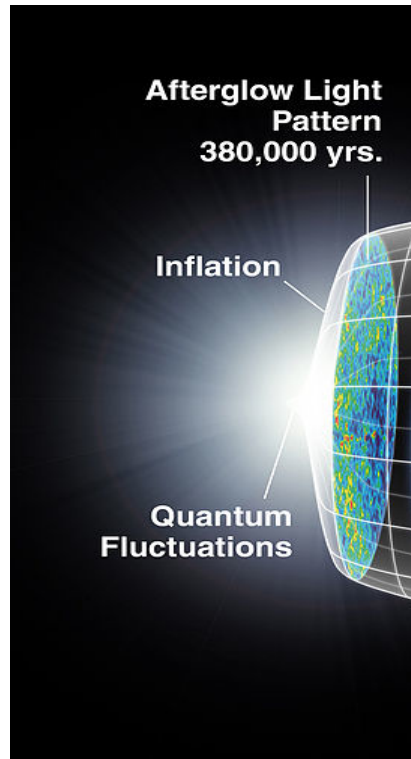
- La teoria del Big Bang, con l'aggiunta in una fase iniziale di espansione esponenziale (inflazione), costituisce la base della cosmologia moderna
- Ci sono molte fasi interessanti nell'evoluzione dell'Universo, alcune delle quali sono rappresentate in questa immagine



La Ricombinazione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



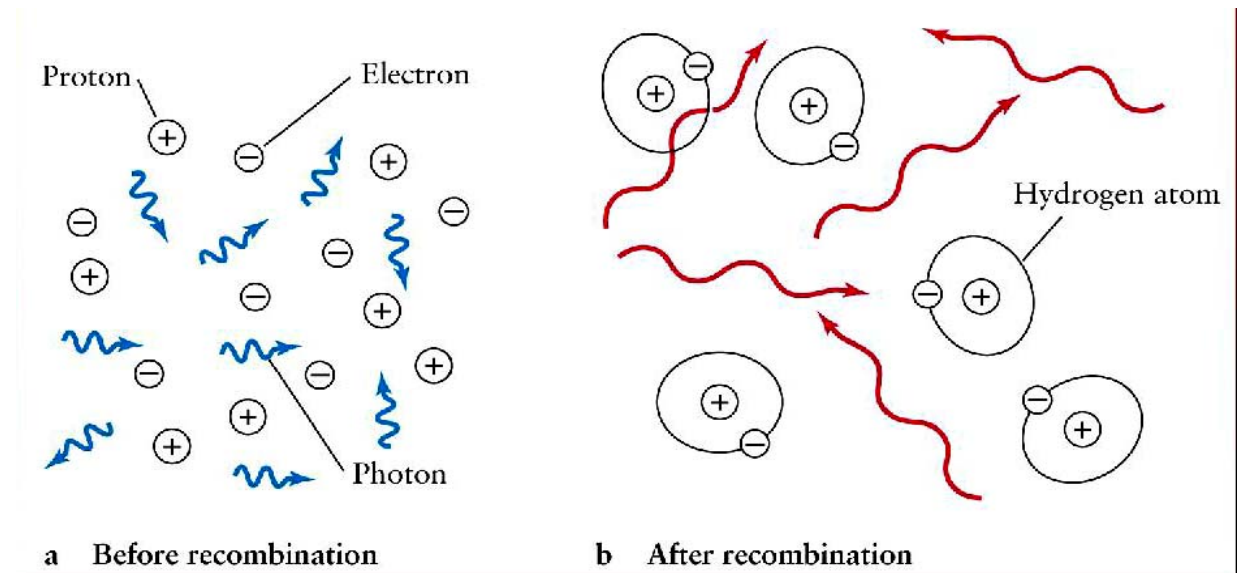
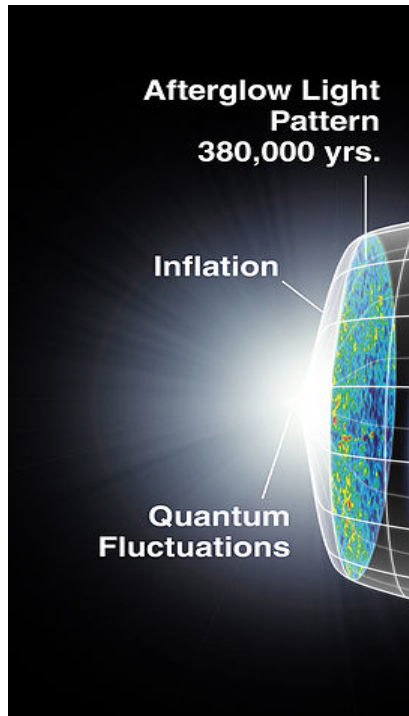
- Questa fase ebbe luogo 380,000 anni dopo il Big Bang, quando l'Universo si era espanso al punto di raffreddarsi ad una temperatura inferiore ai 3000 K
 - Prima di questo periodo, a causa dell'elevata temperatura la materia era ionizzata, e la luce era continuamente emessa e riassorbita dagli elettroni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



La Ricombinazione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



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

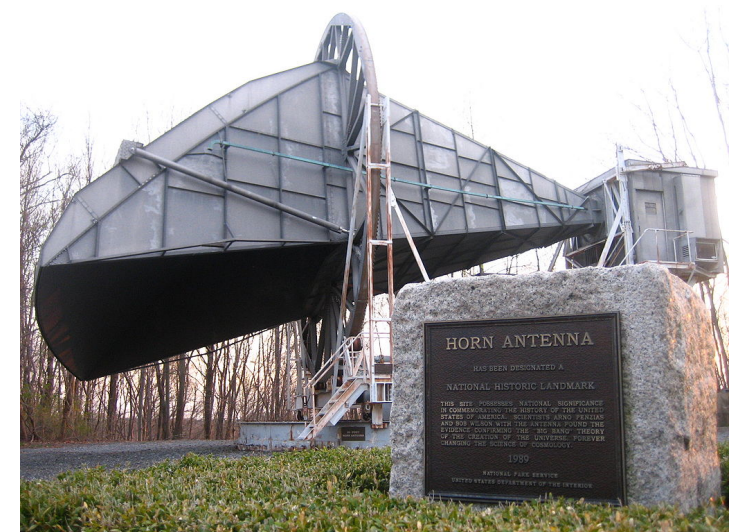


Previsione e scoperta dell'esistenza del fondo a microonde



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Nel 1940 George Gamow, uno dei pionieri della cosmologia del Big Bang, predisse che la luce emessa dal Big Bang dovrebbe essere rivelabile ancora oggi
- Predisse anche che la radiazione sarebbe stata isotropa, avrebbe avuto uno spettro di frequenze di corpo nero con una temperatura di pochi Kelvin
- Nel 1965 Wilson e Penzias stavano lavorando su un ricevitore a microonde molto sensibile, costruito per comunicazioni satellitari
- Trovavano però dallo strumento un rumore inatteso del quale non riuscivano a liberarsi, e non sapevano nulla della predizione di Gamow
- Si capì presto che per puro caso Penzias e Wilson avevano fatto una scoperta epocale, per la quale nel 1978 sono stati insigniti del Premio Nobel



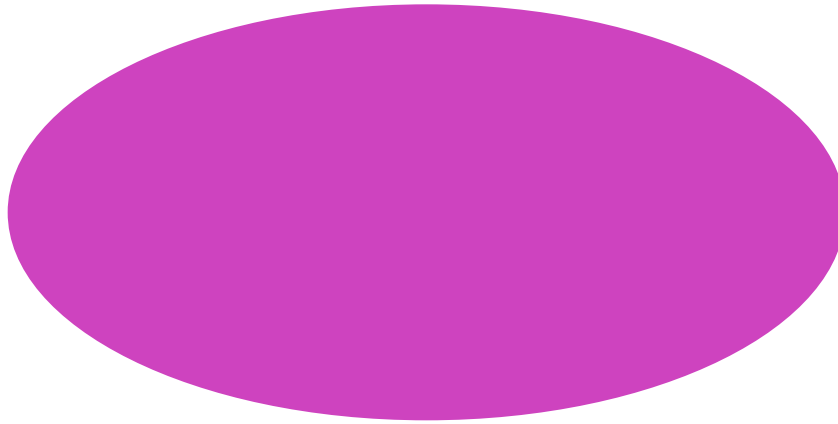


Il Fondo Cosmico a Microonde

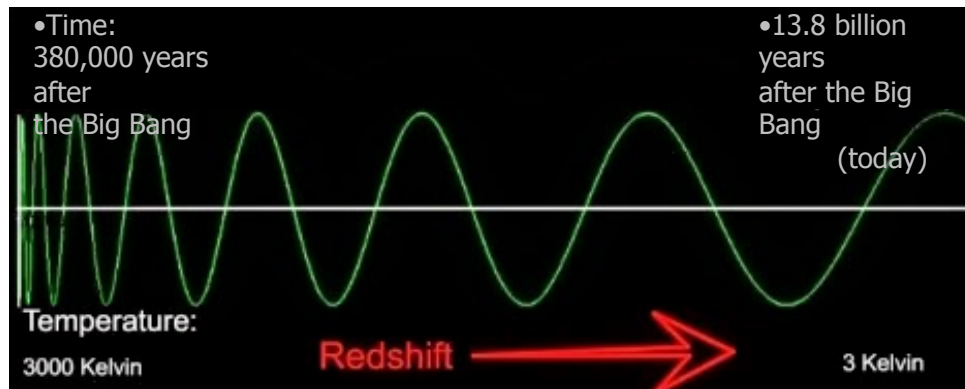


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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

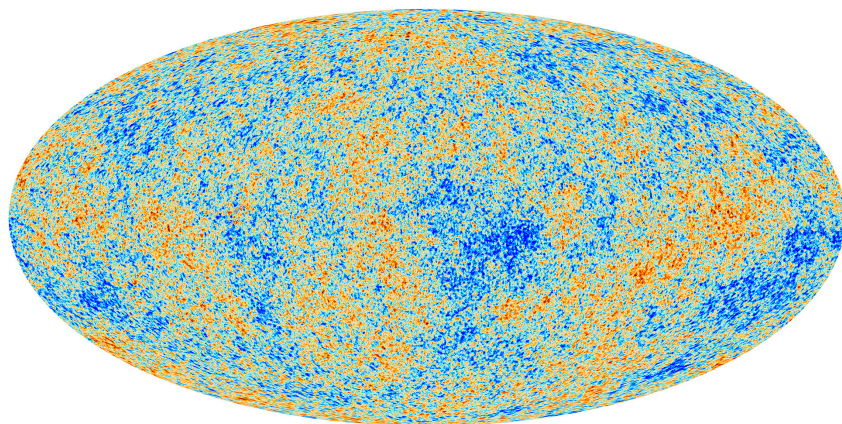




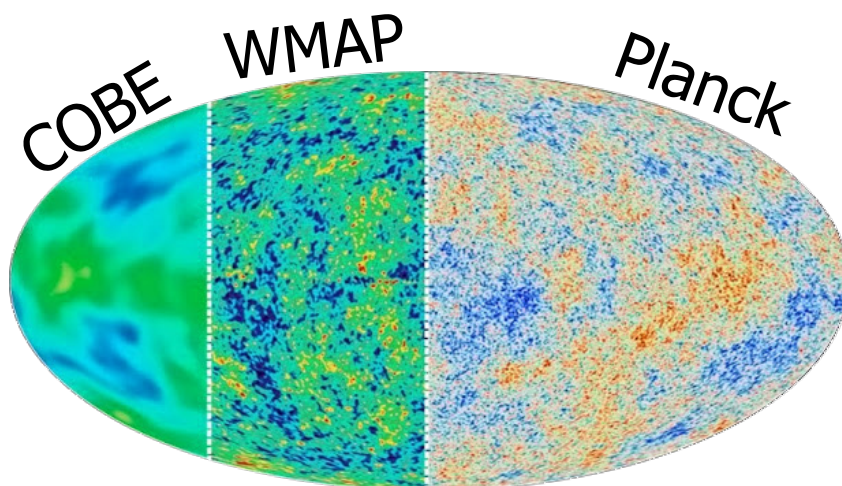
Fluttuazioni della temperatura del fondo a microonde



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



- 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



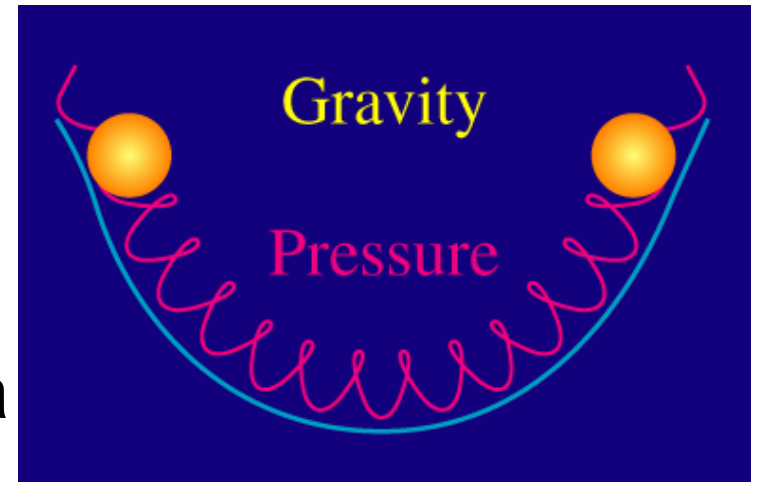


La sinfonia cosmica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Prima della Ricombinazione, queste fluttuazioni di densità si propagavano nel plasma sotto forma di onde “sonore” 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



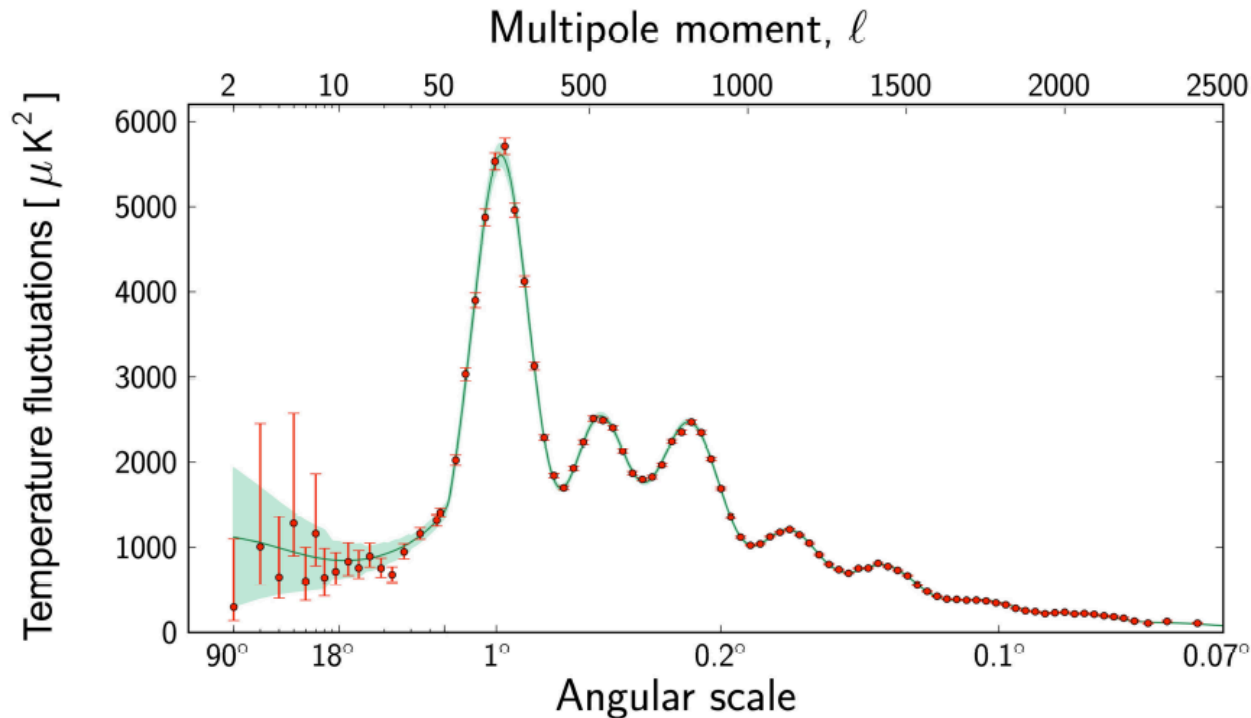
Wayne Hu, University of Chicago



Spettro di potenza del fondo a microonde



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



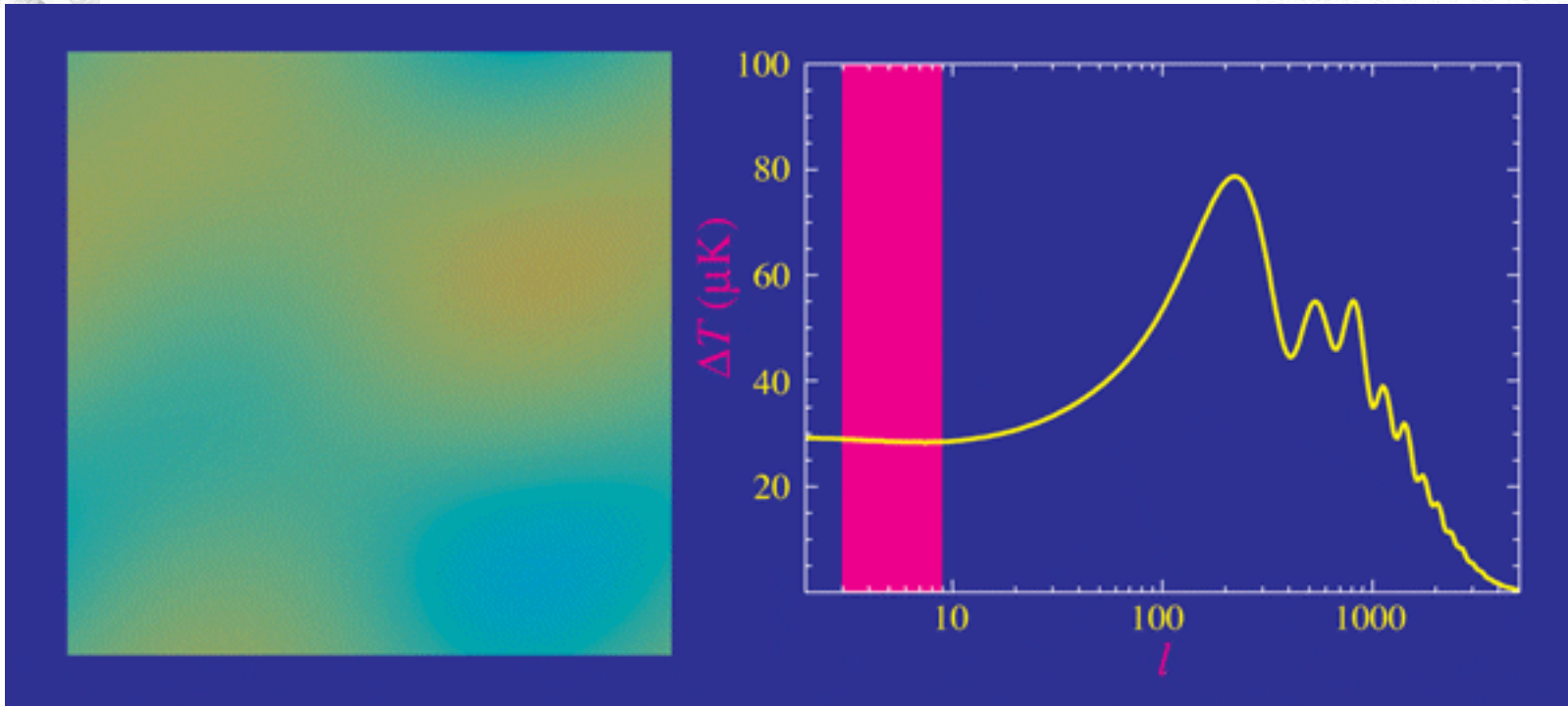
- Lo spettro di potenza del fondo a microonde è descritto con incredibile accuratezza dal modello cosmologico standard (Λ CDM)
- Questi dati determinano i parametri cosmologici con altissima precisione
 - ad esempio, quanta materia ordinaria, quanta materia oscura, quanta energia oscura, ecc.



Sensibilità dello spettro di potenza



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Wayne Hu, University of Chicago

- Lo spettro di potenza della temperatura del fondo a microonde separa l'intensità delle zone più calde e di quelle più fredde in funzione della scala angolare

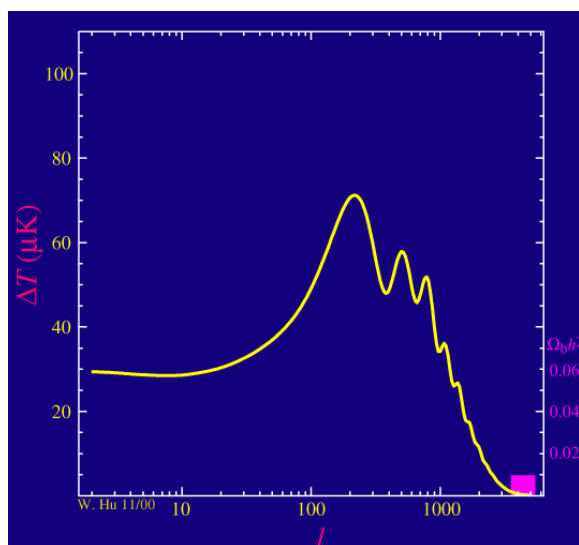


Sensibilità dello spettro di potenza



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

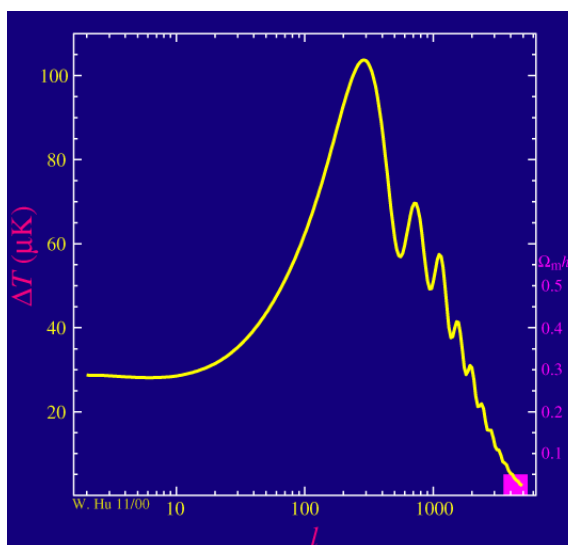
Materia ordinaria



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

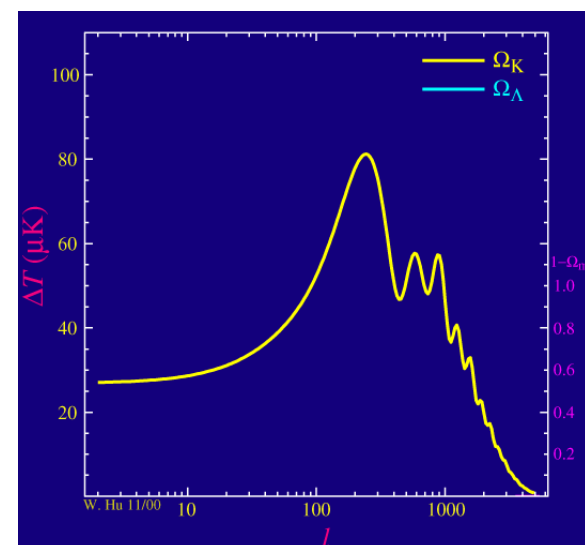
Wayne Hu, University of Chicago

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

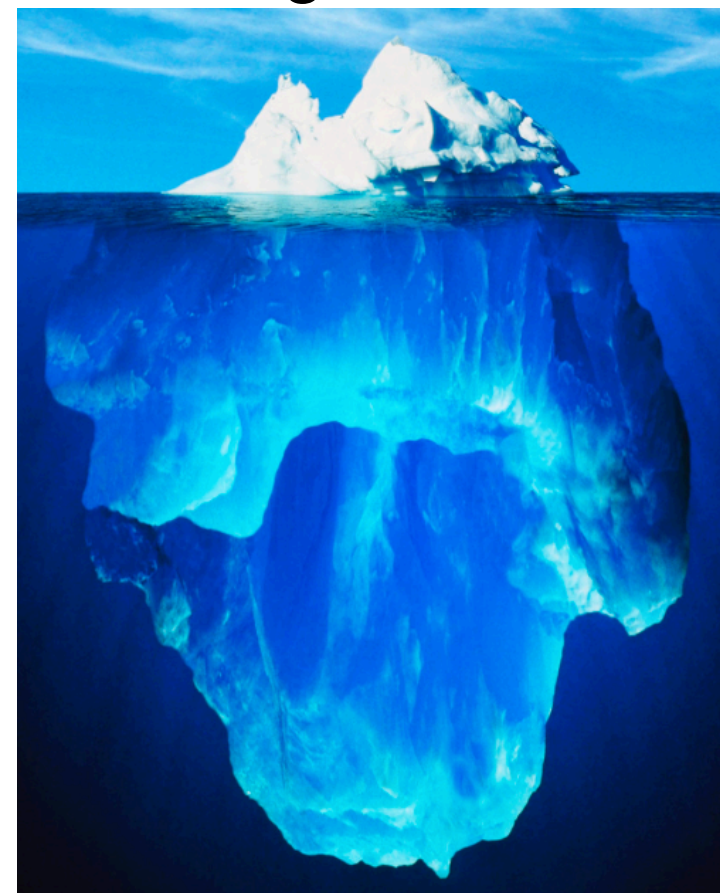
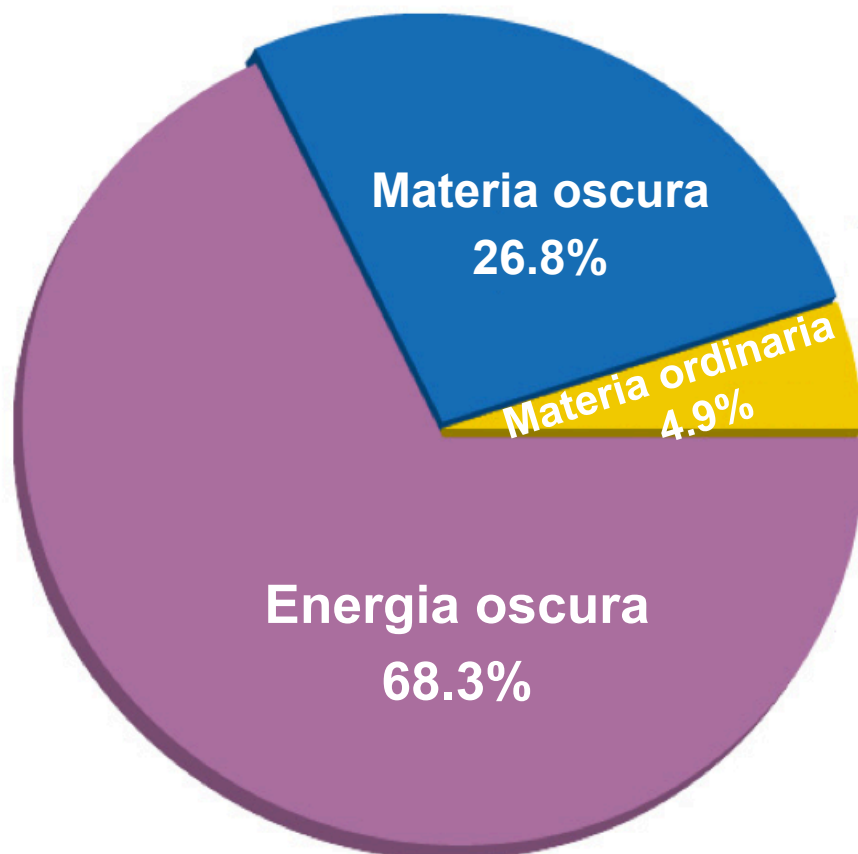


Abbondanza di materia ordinaria, materia oscura ed energia oscura determinata dal fondo a microonde



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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

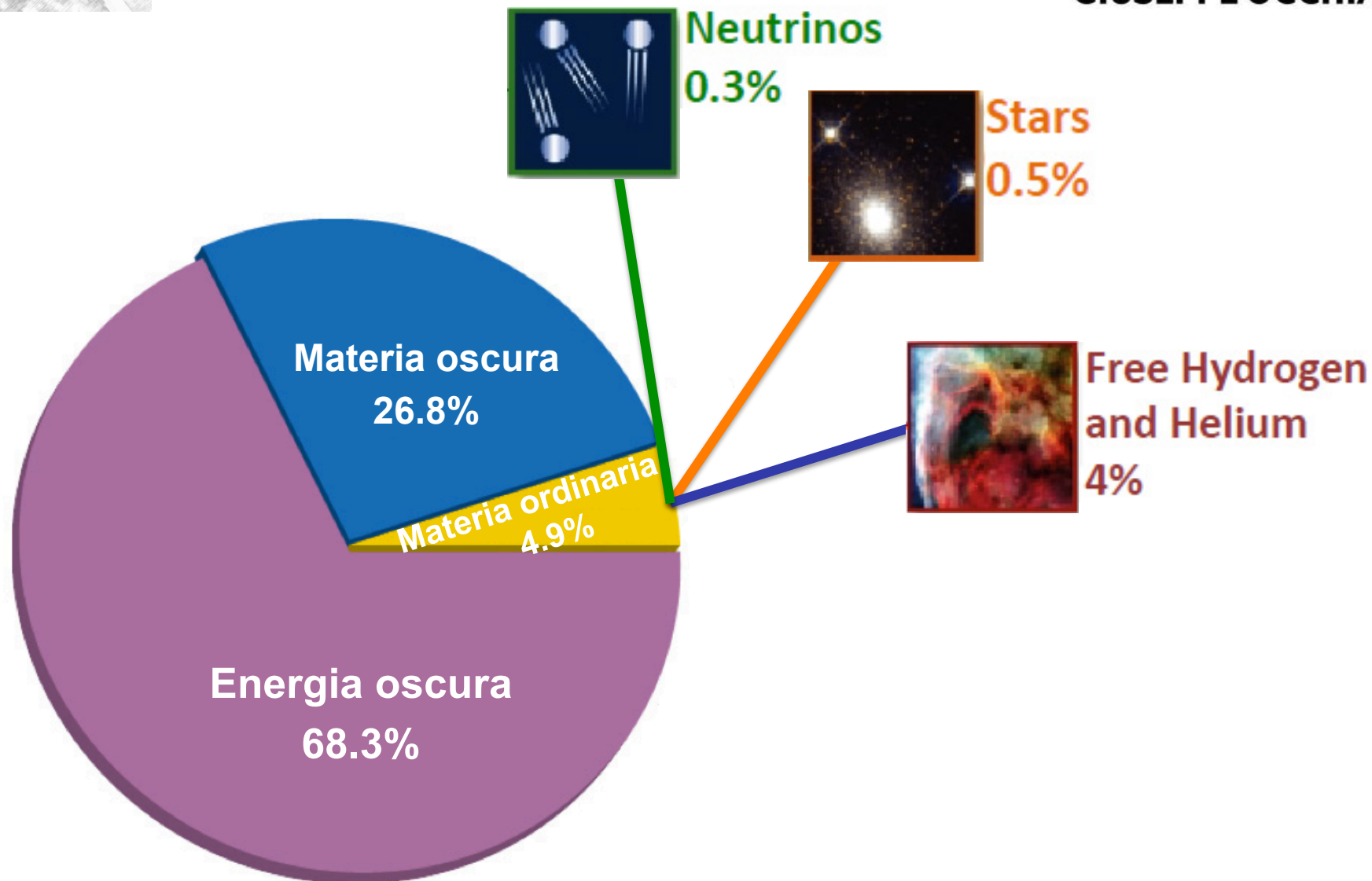




Abbondanza di materia ordinaria, materia oscura ed energia oscura determinata dal fondo a microonde



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI





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



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



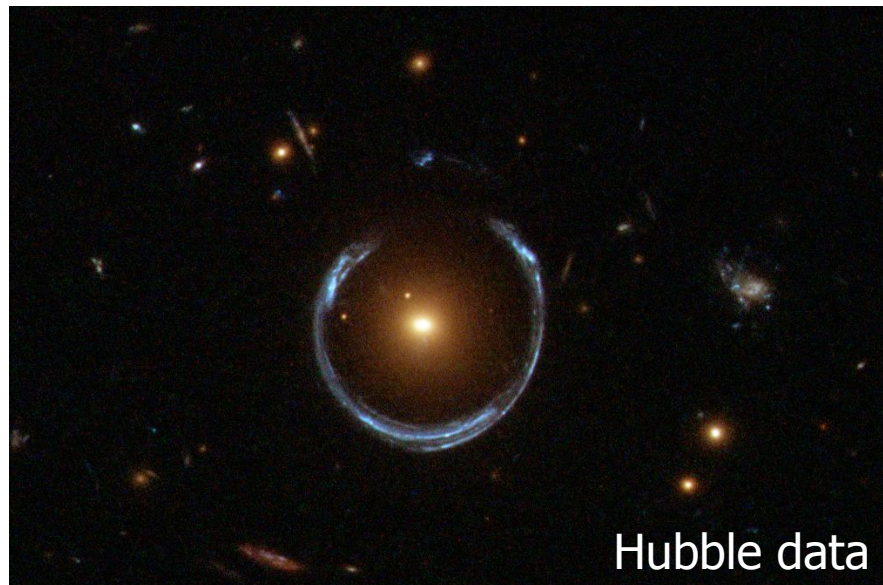


Evidenze astronomiche di materia oscura

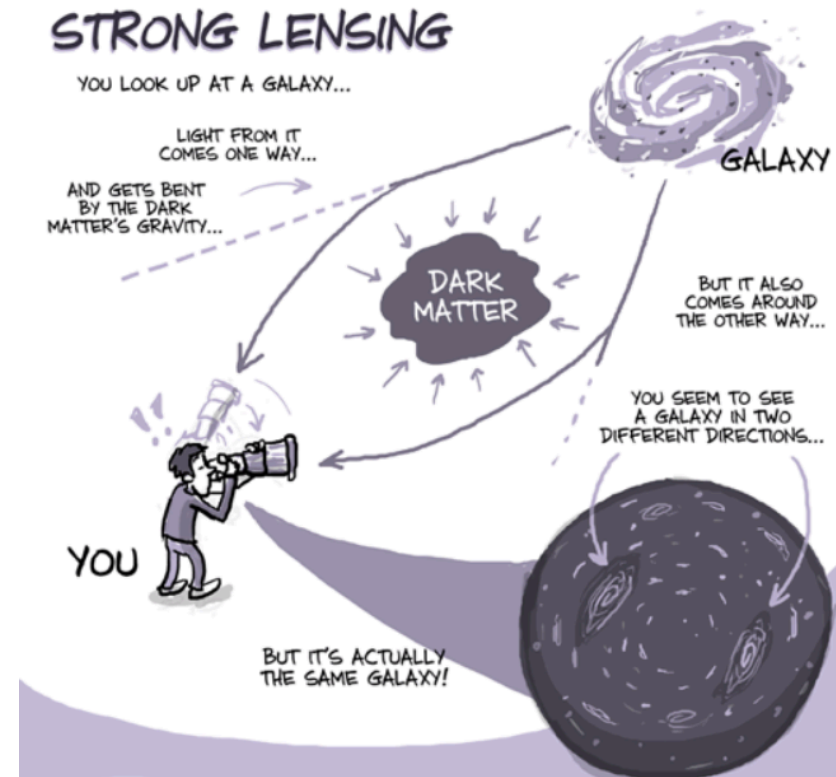
Lenti gravitazionali



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Hubble data



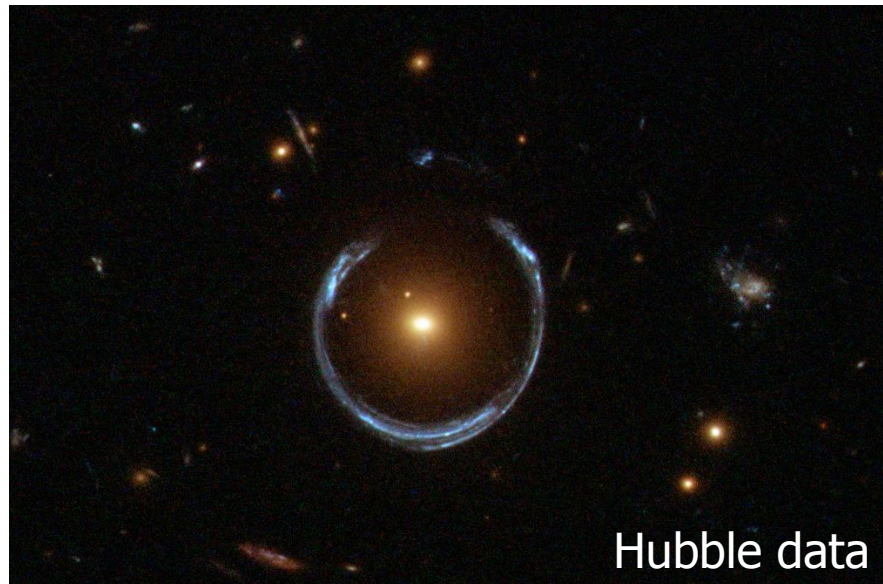


Evidenze astronomiche di materia oscura

Lenti gravitazionali

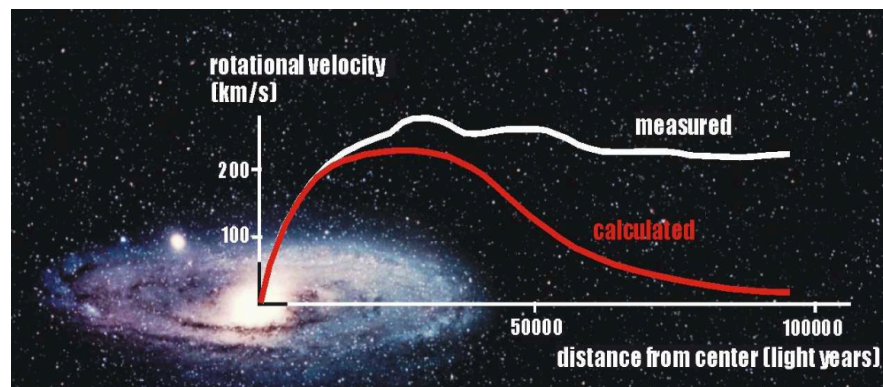


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Hubble data

Velocità di rotazione delle galassie



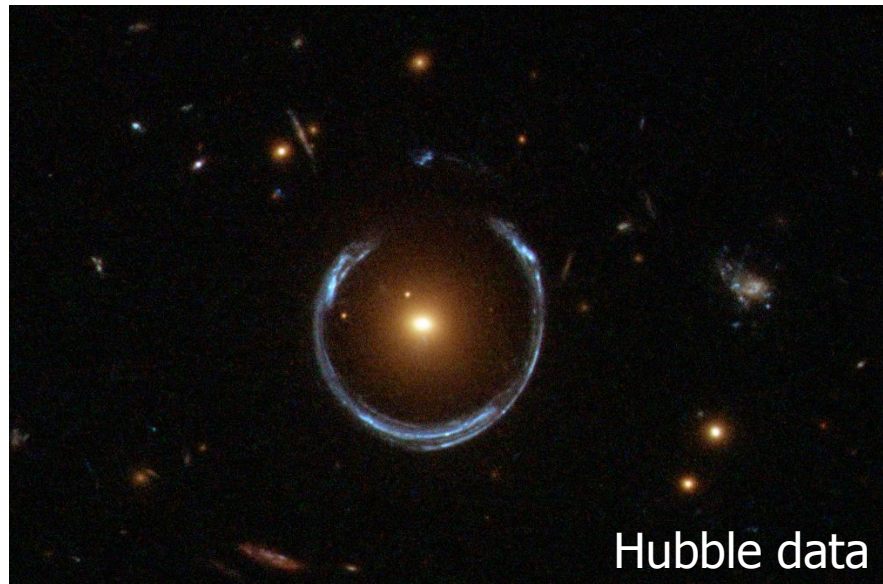


Evidenze astronomiche di materia oscura



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

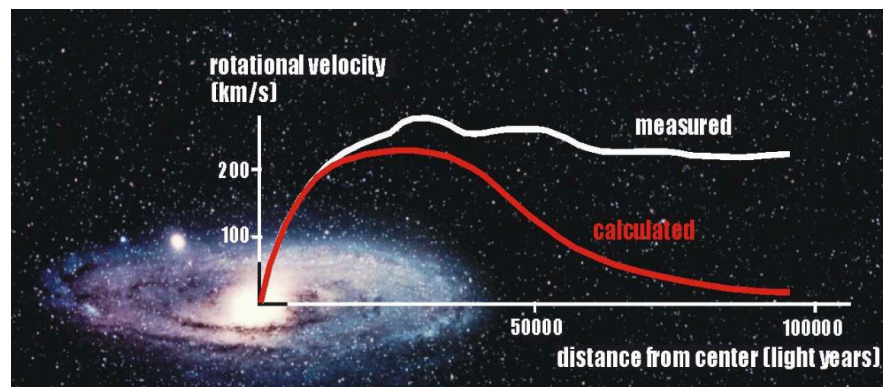
Lenti gravitazionali



Hubble data

- 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



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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?



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**



**Di cosa è composta l'energia
oscura?**



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

Non ne abbiamo idea!

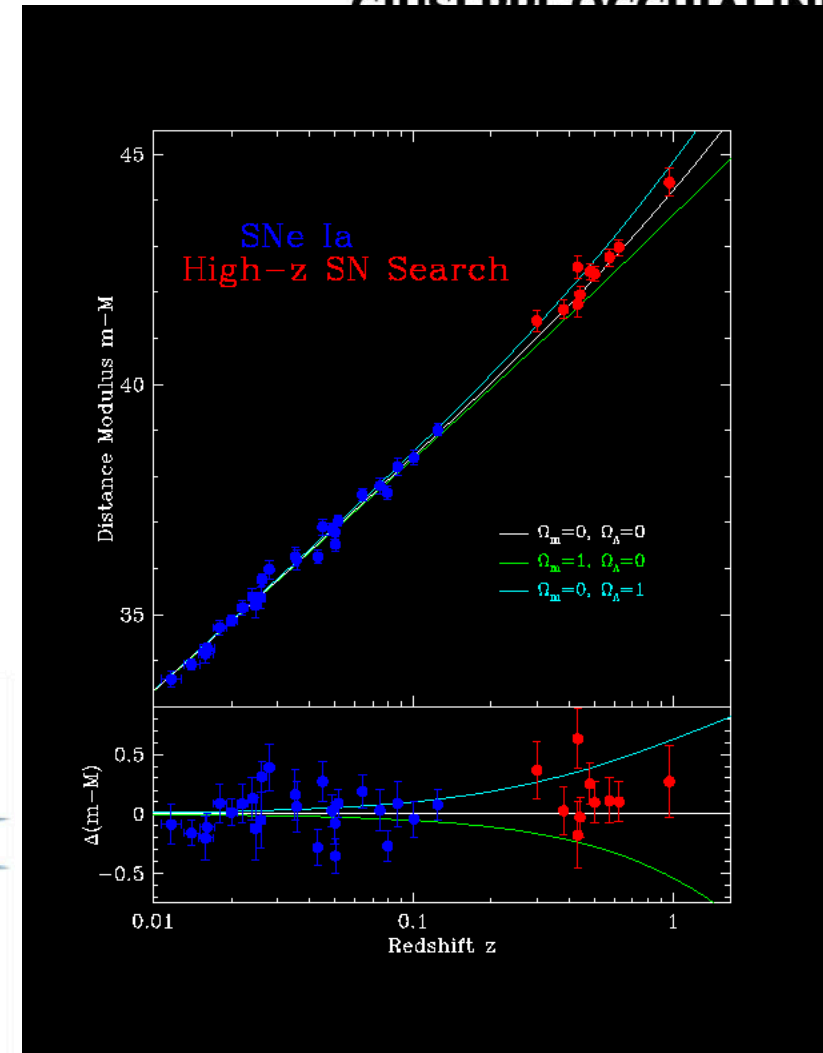
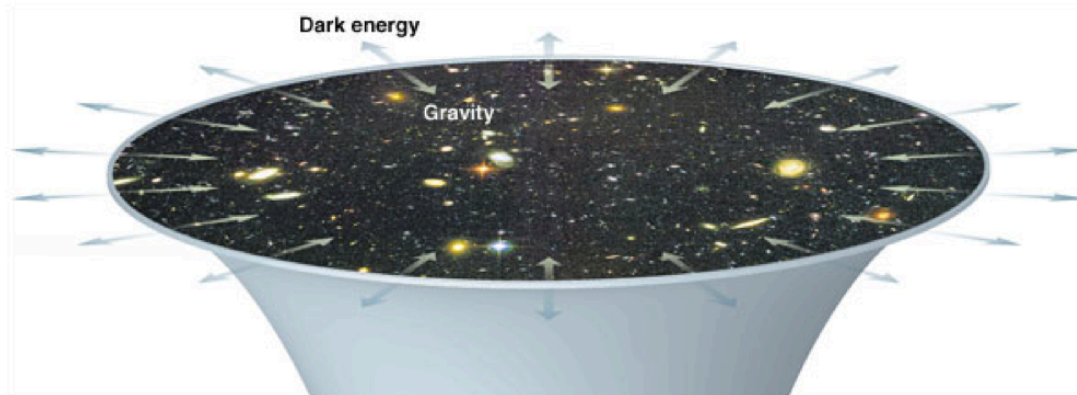


Di cosa è composta l'energia oscura?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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





Dov'è finita l'antimateria primordiale?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Anche se oggi è considerato praticamente impossibile, non è ancora escluso che da qualche parte nell'Universo possano esistere domini di antimateria, antistelle, antipianeti, ecc.
- Non possiamo scoprirli mediante l'osservazione di onde elettromagnetiche (telescopi ottici, radio, ecc.) perché le antistelle emetterebbero onde elettromagnetiche uguali a quelle delle stelle di materia ordinaria (fotoni da annichilazioni materia-antimateria non se ne vedono)
- Potrebbe però essere possibile trovare traccia di nuclei di antimateria nei raggi cosmici, provenienti da questi ipotetici lontani domini di antimateria
- Per questo motivo sono stati mandati in orbita su satellite rivelatori di particelle in grado di identificare l'identità dei raggi cosmici per verificare se sia presente una seppur piccola quantità di antimateria

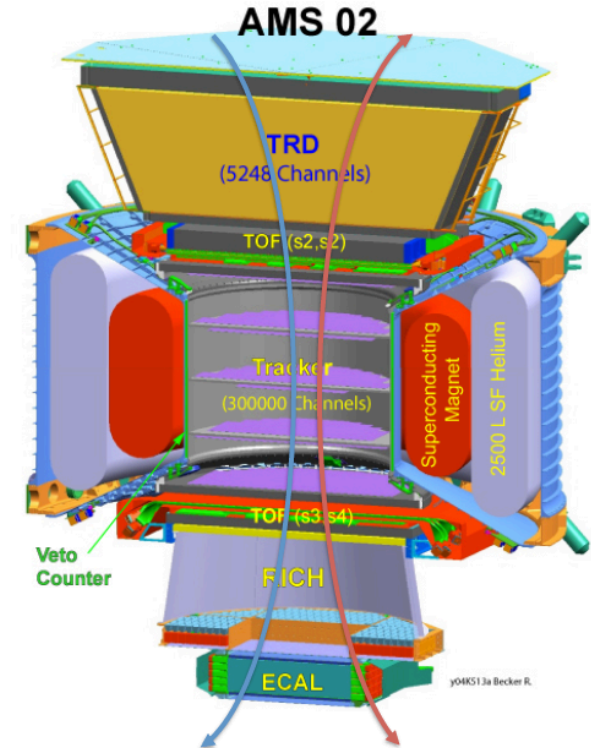


L'esperimento AMS-02



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- AMS-02 in un anno rivela più di un miliardo di cosmici
- Si tratta di analizzare la natura di centinaia di milioni di nuclei che hanno attraversato il rivelatore per vedere se ci sono antinuclei
- Se non se ne trova nessuno, possiamo essere più certi che isole di antimateria nell'Universo non ve ne sono → sarebbe un risultato molto importante





L'antimateria in natura



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- **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**
 - È necessaria **una parte per 10 miliardi**



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



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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**



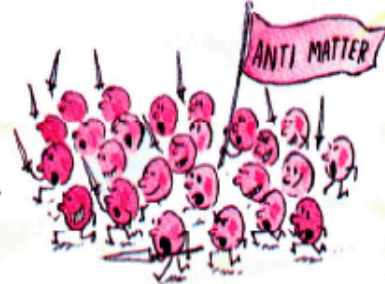
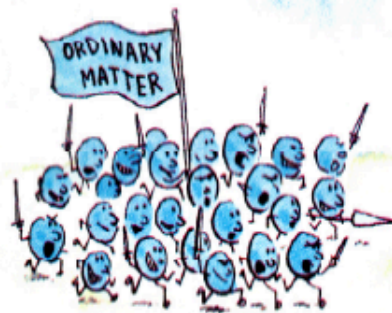
La teoria più accreditata è che l'antimateria non esiste più



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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

piccolissima differenza



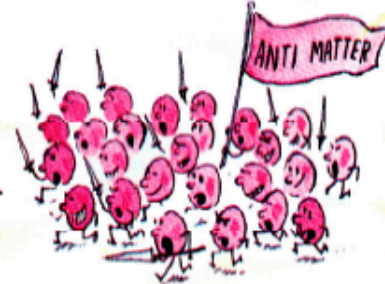


La teoria più accreditata è che l'antimateria non esiste più



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Qualitativamente si
 - il Modello Standard ingloba 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 $M \approx 100$ GeV



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



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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?

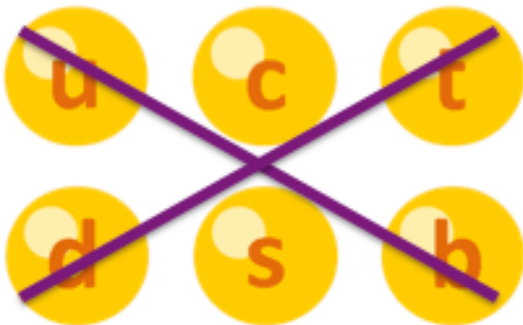


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

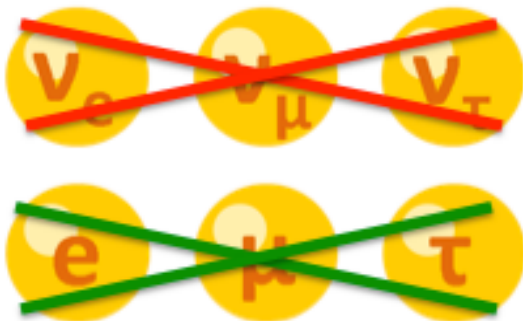
Fermions

matter particles

Quarks

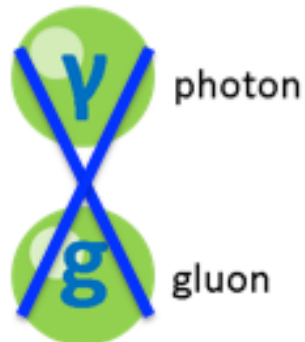


Leptons



Gauge bosons

force carriers



Higgs boson

origin of mass



Barioni

“Caldi”

Senza massa

Carichi/instabili



Di cos'è composta la materia oscura?

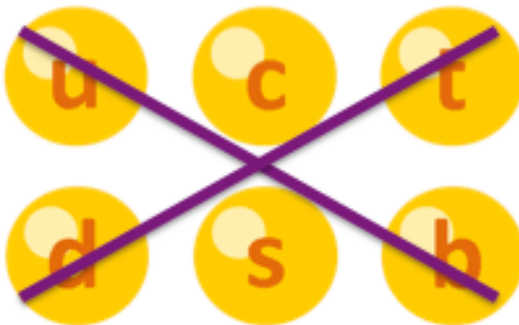


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

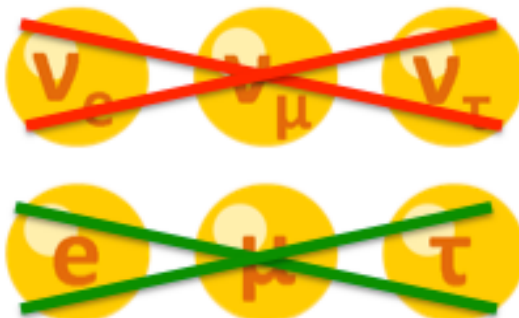
Fermions

matter particles

Quarks

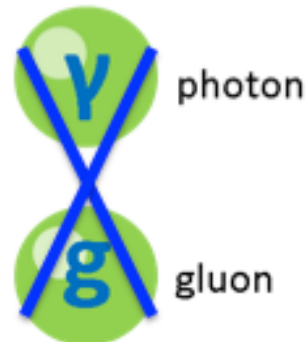


Leptons



Gauge bosons

force carriers



Higgs boson

origin of mass



- Barioni
- “Caldi”
- Senza massa
- Carichi/instabili

Non è costituita da particelle conosciute!



Come studiare la natura della materia oscura?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Fondamentalmente, 4 modi:
 - Rivelare interazioni di materia oscura preesistente con rivelatori molto massivi a terra
 - ad esempio esperimenti sotterranei ai laboratori dell'INFN sotto il massiccio del Gran Sasso
 - Rivelare 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
 - Produrre particelle di materia oscura nelle collisioni ultra energetiche agli acceleratori per rivelare direttamente la loro esistenza e studiarne le proprietà
 - Ad esempio questo è quello che si fa alla frontiera dell'energia con gli esperimenti ATLAS e CMS al CERN
 - Studiare processi a bassa energia ma con alta precisione per rivelare effetti quantistici di particelle virtuali
 - Frontiera dell'intensità, ad es. esperimento LHCb al CERN

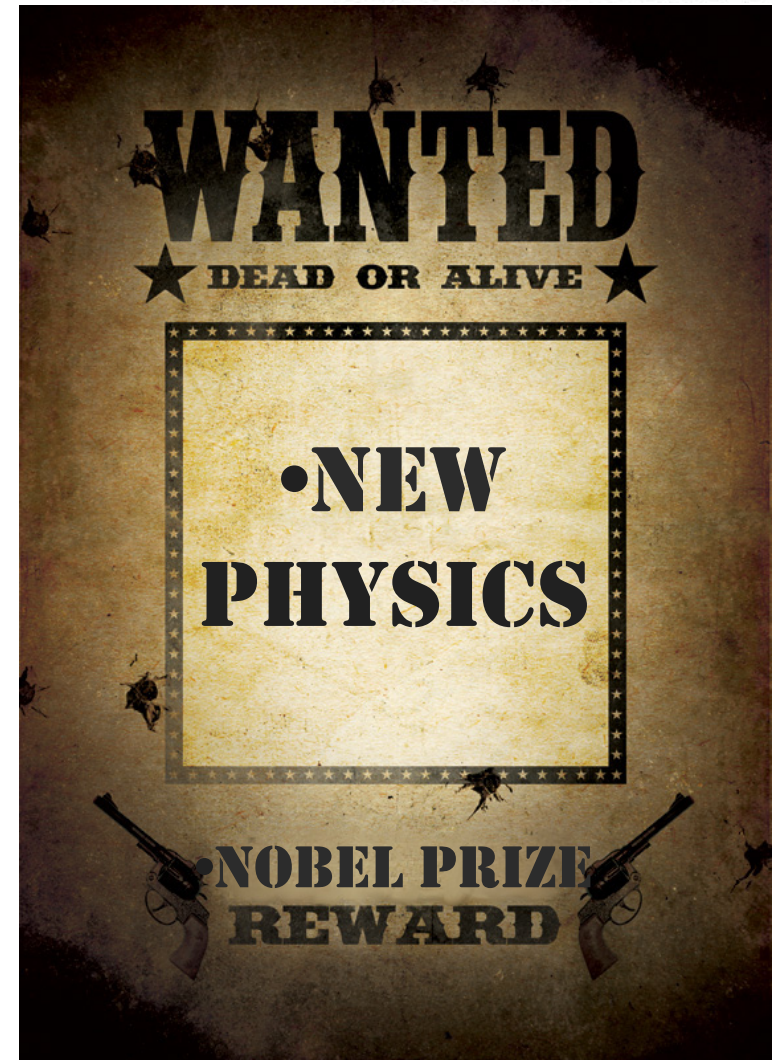


Il Modello Standard delle particelle elementari è certamente incompleto



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- (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!





FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Un po' di storia



Galileo Galilei e il Metodo Sperimentale

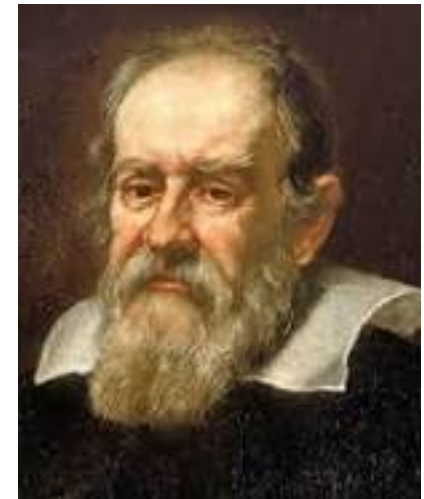


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Introdotta da Galileo Galilei (1564-1642) rivoluziona l'approccio scientifico e produce un salto epocale nella scienza moderna.

È basato su tre fasi:

- 1) Osservazione del fenomeno naturale
- 2) Riflessione ed enunciazione della legge fisica
- 3) Verifica sperimentale in diverse condizioni



Nel caso la verifica sperimentale fallisca la legge fisica **non** ha validità generale e deve essere riformulata/completata.



Il Principio di Relatività dei moti



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Dati due Sistemi Inerziali (nei quali cioè vale il Principio d'Inerzia) in moto relativo tra loro, **è impossibile** (o meglio, "non ha senso") dire quale si muove e quale sta fermo. I due sistemi sono perfettamente simmetrici ed equivalenti.

Da questo principio deriva che:

- i due sistemi sono **indistinguibili**
- le leggi meccaniche sono le stesse nei due riferimenti (**simmetria**)
- si può passare da un sistema all'altro con semplici formule, dette la **trasformazione classica**
- se esiste un Sistema Inerziale ne devono esistere **infiniti**



Il modello copernicano



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- **Nicolò Copernico (1473-1543) enuncia un modello che descrive il moto dei corpi celesti** alternativo a quello corrente risalente ad Aristotele/Tolomeo in cui la Terra è al centro dell'Universo
 - Per la prima volta la Terra perde il suo ruolo centrale, è un semplice pianeta, come gli altri, che ruota attorno al sole
 - **Un sistema complicato viene sostituito con un modello molto più semplice e funzionale**
 - Rifiuto dei teologi protestanti e cattolici, e scetticismo degli astronomi, come sempre succede per le nuove idee!!! Ma il seme è gettato.





Le osservazioni astronomiche di Brahe



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Tycho Brahe (1546-1601) che aveva effettuato **una quantità spaventosa di misurazioni astronomiche** nell'arco di circa 30 anni, non è particolarmente convinto e propone un modello ibrido



- la terra è ferma il sole ci gira attorno, ma tutti gli altri pianeti girano attorno al sole. L'allievo **Keplero è invece un sostenitore delle tesi di Copernico** e ci sono accese discussioni



Le leggi di Keplero



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Johannes Kepler (1571-1630) alla morte di Brahe ha finalmente accesso a tutti i dati scientifici registrati da Brahe
- dopo 8 anni di lavoro enuncia le famose 3 Leggi che descrivono il moto di tutti i pianeti attorno al Sole, in modo molto semplice
- A questo punto entra in gioco il genio di Isaac Newton...





La legge di Gravitazione Universale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Isaac Newton (1642-1727) **analizza le leggi di Keplero e da esse ricava che la legge di attrazione tra sole e pianeti dipende dall'inverso del quadrato della loro distanza**, poi perfeziona questi studi enunciando la Legge di Gravitazione Universale
- Si tratta della **prima grande teoria fisica "unificata"**, capace di spiegare con grande precisione la modalità di caduta dei gravi sulla Terra e la forma delle orbite dei pianeti del sistema solare sulla base di un solo meccanismo d'interazione fondamentale
 - l'attrazione gravitazionale tra i corpi, esercitata, nel primo caso, tra la Terra e gli oggetti che si trovano in prossimità della sua superficie e, nel secondo caso, tra il Sole e i pianeti
- **La sua formulazione forniva una spiegazione quantitativa dei moti planetari mentre le leggi di Keplero erano puramente descrittive.**



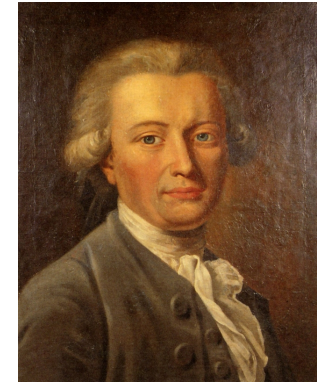


La legge di Gravitazione Universale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Un secolo dopo Henry Cavendish (1731-1810) verificò direttamente, nel suo laboratorio di Cambridge, la generalità della legge di gravitazione di Newton, dimostrando che essa è valida non solo per la Terra ed i pianeti, ma per qualsiasi oggetto tra quelli che ci circondano
- Le conseguenze della nuova teoria erano sbalorditive: la formula di Newton rendeva possibile per la prima volta ricavare indirettamente i valori della massa totale della Terra e degli altri pianeti senza conoscerne la densità e la composizione interna, utilizzando solo le misure del raggio terrestre e delle distanze tra i pianeti.
- L'immenso patrimonio di misurazioni astronomiche che secoli di osservazioni avevano reso disponibile veniva per la prima volta correttamente interpretato e pienamente sfruttato.





La legge di Gravitazione Universale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- **Un grande successo:** nel 1781 W. Herschel scopre Urano ed i suoi satelliti. L'orbita di Urano risulta però diversa da quella prevista dalla legge di Newton
- Nel 1846 Le Verrier ipotizza l'esistenza di un pianeta sconosciuto che altera l'orbita di Urano e ne prevede la posizione. 23 giorni dopo l'astronomo Johann Galle scopre in quella posizione Nettuno
 - **Conferma spettacolare della teoria di Newton e della sua capacità predittiva**
- **Un "piccolo" insuccesso:** successivamente vengono riscontrate piccole anomalie anche nell'orbita di Mercurio. Si tentò di spiegare il fenomeno come nel caso di Urano, ipotizzando l'esistenza di un nuovo pianeta. Ma tutte le ricerche fallirono
 - Limite della teoria di Newton. Il fenomeno rimarrà inspiegato, fino all'avvento della Teoria della Relatività Generale di Einstein



I principi della meccanica classica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Nel trattato “Philosophiæ naturalis principia mathematica” pubblicato nel 1687 Isaac Newton enuncia anche i tre principi della dinamica, che diverranno al pietra angolare della Meccanica Classica
- I primi due principi della dinamica erano già stati chiaramente compresi da Galileo Galilei, tuttavia il merito di Newton non consiste soltanto nell'aver formulato il terzo, ma anche nell'aver sviluppato su questi tre fondamenti uno studio coerente e sistematico della dinamica.



I principi della meccanica classica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

1. Un qualunque punto materiale che non sia sottoposto ad alcuna forza o rimane in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme
2. Un qualunque punto materiale che sia sottoposto a una o più forze ha un'accelerazione vettorialmente proporzionale alla risultante di tali forze
3. Ogni volta che un corpo esercita una forza su un altro corpo, il secondo esercita sul primo una forza vettorialmente opposta e con la stessa retta d'azione.



Legge Fondamentale della dinamica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Un corpo sottoposto a una forza subisce un'accelerazione proporzionale alla forza impressa, in breve:

$$F = ma$$

- La massa, cioè la **quantità di materia** ha in sé una specie di “forza” con cui si oppone al moto (massa inerziale). Possiamo esprimere la stessa relazione in maniera diversa

$$m = F/a$$

- Non c'è modo di misurare la massa *in sé*. La massa è un concetto derivato



Sistemi Inerziali



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il primo principio della dinamica postula quindi l'esistenza dei cosiddetti *sistemi di riferimento inerziali*, nei quali un punto materiale abbastanza lontano da tutti gli altri corpi da non risentire di alcuna influenza esterna o rimane in quiete o si muove di moto rettilineo e uniforme
 - Viene dunque istituita una differenza sostanziale tra due categorie di sistemi di riferimento, quelli inerziali e quelli non inerziali
- **La relatività ristretta eredita dalla meccanica classica il concetto di sistema di riferimento inerziale come luogo “privilegiato” in cui osservare i fenomeni fisici**
- In un riferimento inerziale, la misura dell'accelerazione di un corpo è indicazione della presenza di forze “reali” (cioè dovute all'interazione con altri corpi) agenti su di esso



I concetti base della meccanica di Newton



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- **Lo Spazio**: un contenitore vuoto in cui si trovano e si svolgono gli eventi naturali
- **Il Tempo**: scorre uniformemente per qualunque osservatore in qualunque riferimento
- **La Massa**: la "quantità di materia" contenuta in un corpo
- **La Forza**: un'azione in grado di mutare lo stato di moto, o di opporsi al moto di un oggetto

Il Meccanicismo: la Natura consiste di particelle di materia in movimento sotto l'azione delle reciproche forze

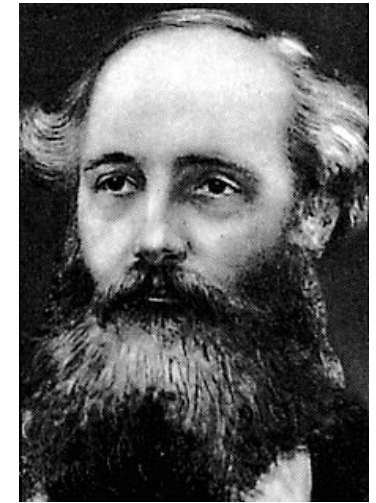


La comune essenza dei fenomeni elettrici, magnetici e luminosi



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Ci siamo soffermati su quello che è il primo e più semplice esempio di come i più rivoluzionari progressi della fisica derivino dall'unificazione e generalizzazione delle conoscenze precedenti.
- La successiva tappa fondamentale di questo processo fu **l'unificazione di elettricità e magnetismo** compiuta da James Clerk Maxwell (1831-1879), che racchiuse nella sintesi di poche fondamentali equazioni tutte le conoscenze sui fenomeni generati da cariche, correnti elettriche e magneti





La comune essenza dei fenomeni elettrici, magnetici e luminosi



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Ma nella nuova teoria di Maxwell campo elettrico e campo magnetico risultavano legati in una stretta connessione che non era ravvisabile nelle singole leggi
 - Anche in questo caso, la sintesi comportava un progresso di conoscenza
- Nella forma unificata data da Maxwell alla spiegazione dei fenomeni elettrici e magnetici era immediato riconoscere un'analogia con le tipiche equazioni con cui già da tempo veniva descritta la propagazione delle onde (la vibrazione di una corda, le onde sonore, la luce, ecc.)
 - il campo elettro-magnetico era costituito da onde



Che aspetto hanno le equazioni di Maxwell?



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

E Dio disse:

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\vec{S} = 4\pi \int \rho \cdot d\vec{V}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\vec{s} = \frac{4\pi}{c} \int \left(\mathbf{i} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\vec{S}$$

...e la luce fu

Ma non le dovete imparare a memoria per ora



La realtà del campo



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il campo elettromagnetico ha una particolare proprietà. Esso trasporta energia.
- Immaginiamo di avere una carica che oscilla. Essa produce un campo elettrico variabile ed è questa variabilità che genera un campo magnetico
 - Il risultante campo elettromagnetico sarà anch'esso oscillante e quindi produrrà un'onda elettromagnetica. Questa onda vive indipendentemente dalla carica (se fermiamo la carica il campo elettromagnetico sparisce, ma non l'onda). Essa continua a propagarsi in tutte le direzioni con velocità uguale a quella della luce.
- **Il campo è quindi un'entità reale, come la materia e l'energia**
 - È prodotto dalla materia e trasporta energia.



E poi...



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

- Si scopriva quindi che la luce non è nient'altro che un tipo particolare di onda elettromagnetica
 - Le equazioni di Maxwell fornivano quindi una descrizione unificata non solo di elettricità e magnetismo, ma anche dei fenomeni ottici
- Onde elettromagnetiche “invisibili” (le onde radio, di frequenza molto inferiore a quella delle onde luminose) furono ben presto riprodotte, captate e studiate da Heinrich Hertz (1857-1894) in esperimenti in cui egli applicò e verificò la validità delle equazioni di Maxwell
- Cominciava così l'era delle telecomunicazioni: pochi anni dopo Guglielmo Marconi (1874-1937) faceva viaggiare segnali radio su una distanza di oltre tremila chilometri attraverso l'Atlantico.



E oggi...



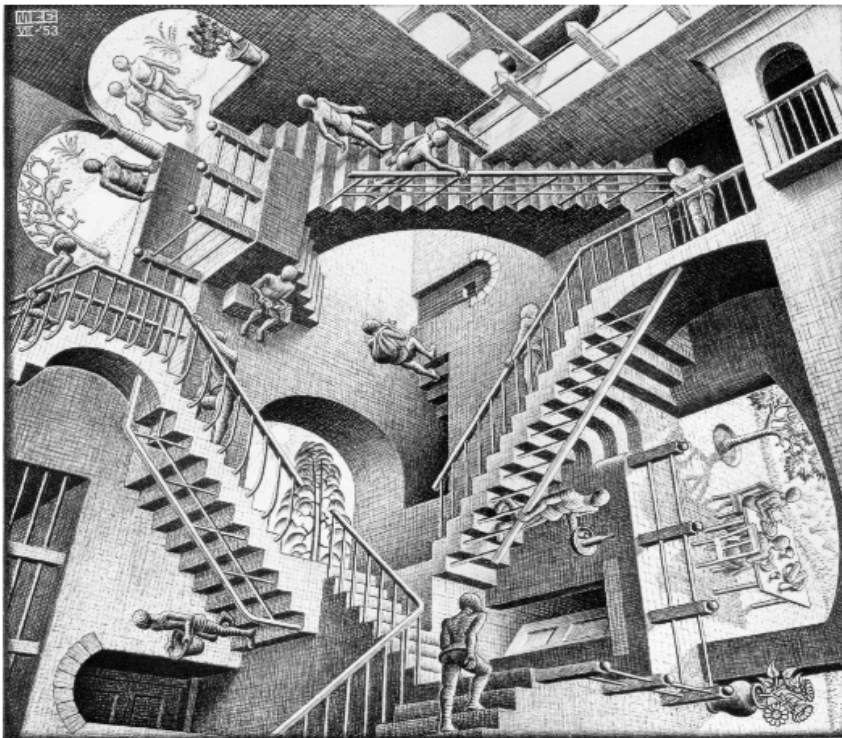
FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Ed oggi noi viviamo in un mondo che è suddito delle equazioni di Maxwell in maniera clamorosa
 - l'elettromagnetismo è infatti protagonista di tutte le principali tecnologie delle quali ci gioviamo, consciamente o inconsciamente, nel corso della nostra giornata
- Dall'illuminazione al riscaldamento, dalla radio alla televisione e al computer, non vi è ritrovato che non sfrutti le proprietà dell'interazione elettromagnetica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Lezioni sulla Teoria della Relatività Ristretta



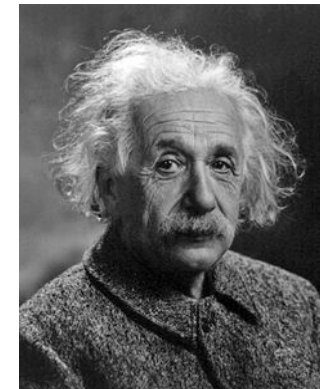
Prof. Nicola Semprini Cesari



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



- L'opera di Maxwell poneva già le premesse di un'ulteriore rivoluzione concettuale, quella con cui Albert Einstein (1879-1955) avrebbe ridefinito i concetti di spazio e tempo.
- La natura ondulatoria del campo elettromagnetico sembrava presupporre l'esistenza di un proprio mezzo di propagazione, in analogia con le altre forme conosciute di onda
 - il suono si propaga attraverso l'aria
 - l'acqua stessa è il mezzo che, fluttuando, propaga le onde del mare
- Tuttavia, nessun esperimento fu mai in grado di dimostrare l'esistenza del presunto, invisibile mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche, il cosiddetto "etere"



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Esisteva poi un grave problema concettuale
 - era noto sin dai tempi di Galileo che le leggi che descrivono il moto dei corpi sono indipendenti dal “punto di osservazione”, a patto di utilizzare certe semplici equazioni di trasformazione delle coordinate (le cosiddette “trasformazioni di Galileo” o “trasformazioni classiche”) quando ci si sposta da un sistema di riferimento ad un altro in moto rispetto al primo
- Le leggi dell'elettromagnetismo, invece, sembravano non godere della stessa proprietà
 - cambiando sistema di riferimento e applicando le trasformazioni di Galileo, le equazioni di Maxwell cambiavano completamente forma, implicando che esperimenti compiuti su cariche elettriche o magneti posti, ad esempio, in luoghi diversi della superficie terrestre avrebbero dovuto dare risultati diversi.



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Il mondo scientifico dovette confrontarsi con una situazione paradossale
 - da un lato la teoria dell'elettromagnetismo, che stava ottenendo spettacolari successi, sembrava essere valida così come era stata formulata da Maxwell solo in un particolare sistema di riferimento
 - era naturale pensare che tale sistema di riferimento privilegiato fosse proprio l'etere, presunto mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche
 - d'altra parte gli esperimenti dimostravano che, al contrario, i fenomeni elettromagnetici erano esattamente identici in qualunque laboratorio venissero studiati.



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Difficile da accettare era la stessa apparente diversità di comportamento di elettromagnetismo e meccanica dei corpi agli occhi di uno spettatore che cambiasse la propria prospettiva di osservazione
 - com'era possibile che coesistessero geometrie spaziali di natura diversa a seconda del tipo di fenomeno osservato?
- Fu proprio l'idea che l'indipendenza delle leggi fisiche dal punto di vista dell'osservatore dovesse valere per tutti i fenomeni lo stimolo da cui partì Einstein per formulare nel 1905 la teoria della relatività "speciale"
 - Chiamata così per distinguerla dalla ancora più generale teoria formulata dallo scienziato tedesco undici anni più tardi



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- La teoria risolveva ogni apparente contraddizione concettuale abbandonando definitivamente il concetto di etere (sappiamo da allora che le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto, cioè senza bisogno di alcun mezzo materiale) e sostituendolo con un postulato di notevole audacia intellettuale, oggi diventato uno dei fondamenti della scienza
- contrariamente alla velocità di un oggetto ordinario, che, come sappiamo, può apparire minore o maggiore per un osservatore che si muova rispetto ad esso rispettivamente nella stessa direzione o in direzione opposta, **la velocità della luce nel vuoto ha la particolarità di essere costante e uguale per qualsiasi osservatore**
- Da questa ipotesi derivavano nuove equazioni di trasformazione delle coordinate che, sostituendo quelle di Galileo, rendevano le leggi dell'elettromagnetismo, al pari di quelle della meccanica dei corpi, indipendenti dal punto di osservazione.



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- La teoria di Einstein operava allo stesso tempo tre grandi unificazioni di preesistenti concetti fisici
- Da un lato, come abbiamo detto, essa riconciliava tra di loro due mondi fino ad allora distinti, quello in cui si muovono i corpi “ordinari” e quello in cui hanno luogo i fenomeni elettromagnetici, dimostrando che entrambi potevano essere descritti nell’ambito di una comune geometria e prospettiva dello spazio.
- Allo stesso tempo, il nuovo concetto di spazio risultava indissolubilmente legato a quello di tempo: ad essi si sostituiva la nozione unica di spazio-tempo quadridimensionale, che diventava la sede naturale di osservazione e descrizione dei fenomeni fisici.



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Infine, il concetto di massa di un corpo veniva reinterpretato come una delle possibili manifestazioni di un'entità più generale, l'energia
- L'equivalenza di massa ed energia – sintetizzata dall'equazione più famosa della storia della scienza: $E = mc^2$ – implicava inoltre che il principio di conservazione della massa, usato quotidianamente nello studio delle reazioni chimiche, era da considerarsi non più come una legge rigorosa della natura, ma come un'approssimazione valida in specifici ambiti di utilizzo
 - più in generale, essendo possibili trasformazioni di energia in massa e viceversa, diventavano ammissibili i fenomeni di creazione e distruzione di quantità di materia.



Dinamica relativistica



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Perché la quantità di moto di un sistema isolato si conservi, si dimostra che si deve definire come
- Lo stesso vale per l'energia. Affinché valga la legge di conservazione deve essere definita così
- Quando $v = 0$, segue la celeberrima formula della equivalenza massa energia

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$E = mc^2$$



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Alcune delle peculiarità della nuova concezione dello spazio-tempo potrebbero rivelarsi in modo evidente ai nostri occhi solo se ci muovessimo a velocità prossima o uguale a quella della luce (limite invalicabile per qualsiasi fenomeno fisico)
- Nessun essere umano ha mai avuto esperienza di tale estrema condizione
 - la velocità della luce, pari a circa 300000 chilometri al secondo, è un milione di volte più grande della velocità di crociera di un moderno aereo di linea
- Ma, qualora diventasse per noi possibile raggiungere simili velocità, assisteremmo ad avvenimenti che sfuggono alla capacità di raffigurazione della mente umana



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Ad esempio vedremmo contrarsi rispetto a noi gli oggetti che rimangono fermi a terra oppure all'interno del nostro mezzo di trasporto il tempo scorrerebbe più lentamente che a terra
- Può capitare di sentir parlare di questi fenomeni usando il termine “paradosso”
- Tuttavia, anche gli aspetti meno intuitivi della relatività di Einstein sono ormai il pane quotidiano degli scienziati che si occupano della fisica fondamentale
- La luce, le onde elettromagnetiche e le particelle del mondo atomico e subatomico possiedono velocità uguali o prossime a quella limite
 - tali entità hanno quindi, per natura, il privilegio di sperimentare direttamente aspetti dello spazio-tempo a noi inaccessibili



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Per osservare e descrivere le proprietà delle particelle elementari, tutti i giorni i fisici che operano nei laboratori della fisica subnucleare utilizzano le equazioni della relatività speciale
 - La dimostrazione più evidente della validità della teoria di Einstein è proprio il ruolo che essa ha acquisito come strumento di lavoro sperimentalmente verificato e irrinunciabile per i ricercatori di tutto il mondo.
- Il progresso apportato dalla nuova visione del mondo ha poi anche conseguenze spettacolari
 - La già citata equazione di equivalenza tra massa ed energia ($E = mc^2$) stabilisce che una piccola porzione di materia (m) può essere convertita in un'immensa quantità di energia (E), essendo c , la velocità della luce
 - ad esempio, un grammo di materia contiene una quantità di energia pari a quella prodotta in un giorno da una centrale elettrica da un Gigawatt



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Questa nozione fornisce la chiave per la comprensione dei più fondamentali processi dell'Universo, dal Big Bang al risplendere del Sole
- Ma, soprattutto, le sue implicazioni hanno condizionato l'evoluzione della scienza e della tecnologia del ventesimo secolo, facendo compiere un salto evolutivo alle tecniche di produzione di energia (reattori nucleari) e arrivando a dare all'uomo il potere di cambiare drammaticamente il corso della storia



La rivoluzione di Einstein: le sintesi di spazio e tempo, massa ed energia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- La relatività ristretta descrive l'influenza del moto relativo degli osservatori sulle loro misure di lunghezza e tempo, estendendo e generalizzando il principio classico della relatività galileiana, incompleto perché non adatto, ad esempio, a descrivere i fenomeni elettromagnetici
- Essa pone le basi di una nuova visione della fisica, in cui spazio e tempo sono unificati in un continuo quadridimensionale
- Questa nuova concezione dello spazio-tempo costituisce il fondamento della più complessa teoria della relatività "generale", essenzialmente una teoria della gravitazione, basata sul principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale



Relatività Generale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

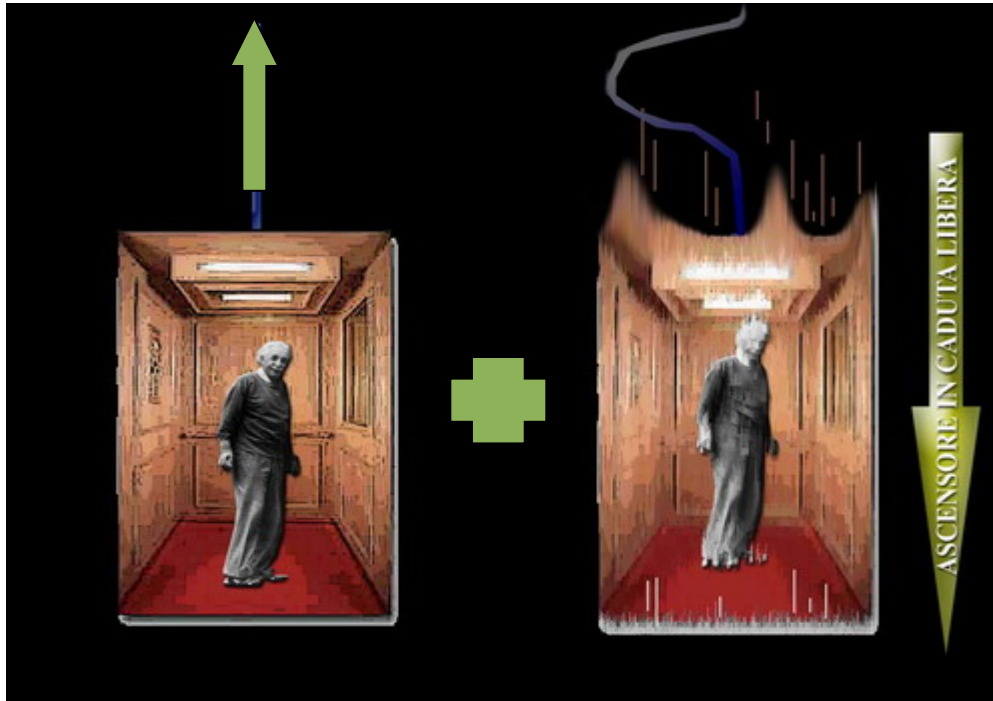
- Successivamente Einstein estende la relatività ai sistemi accelerati.
- Lo spazio di Minkowski e le geometrie non euclidee gli forniscono gli strumenti matematici.
- Giunge così a pubblicare nel 1916 la relatività generale
- **Gravitazione e inerzia sono analoghi**
- L'analogia si intuisce con il classico esperimento pensabile dell'ascensore che cade.



Relatività Generale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Una cabina accelerata in
assenza di gravità si comporta
come una cabina che risente
della sola gravità

Una persona in caduta libera
non sente la gravità

Principio di equivalenza

Effetti della gravità in sistema inerziale $\sim$ sistema non inerziale

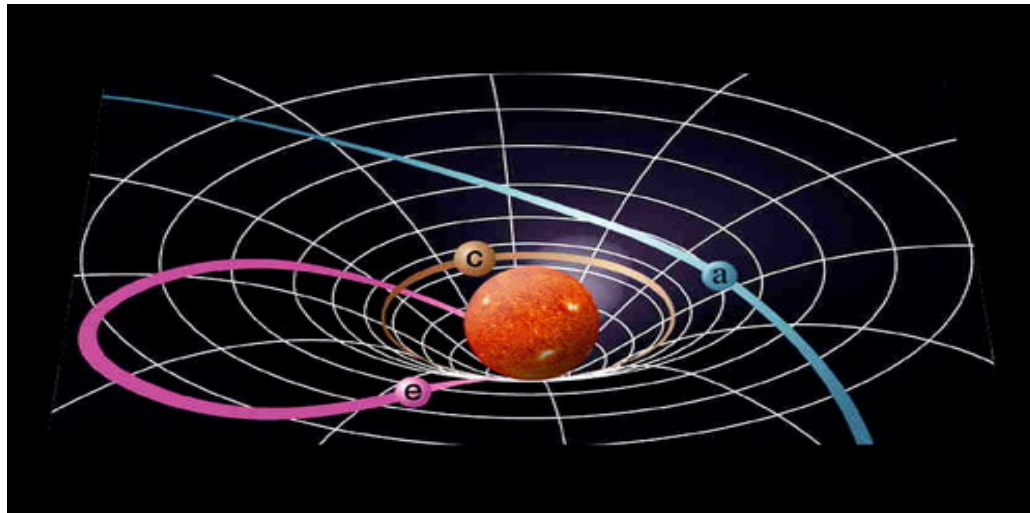


Relatività Generale

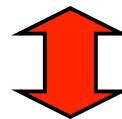


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Descrizione *geometrica* della gravità: le distorsioni dello spazio-tempo *sono la gravità* stessa



La materia dice allo spazio-tempo come curvarsi



La curvatura dello spazio-tempo dice alla materia come muoversi



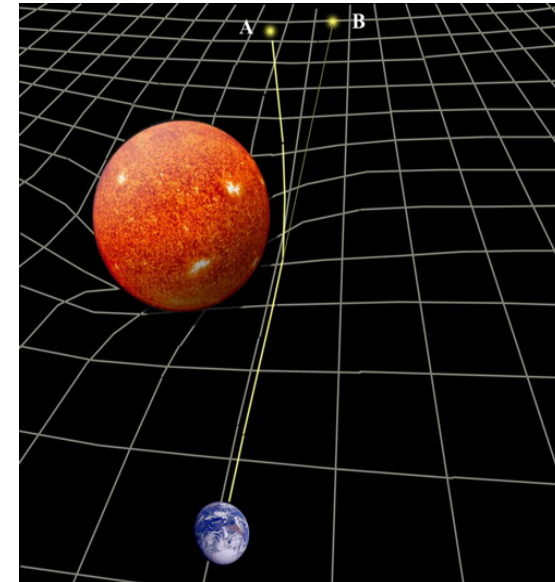
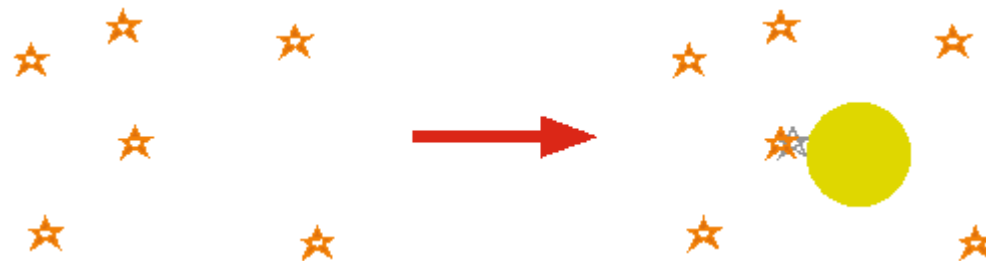
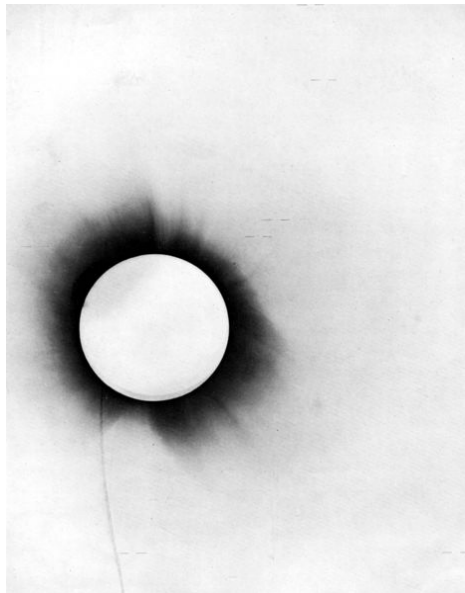
Relatività Generale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Anche il cammino della luce è influenzato dai corpi che distorcono lo spazio-tempo

Prima evidenza sperimentale



1919 Eclisse

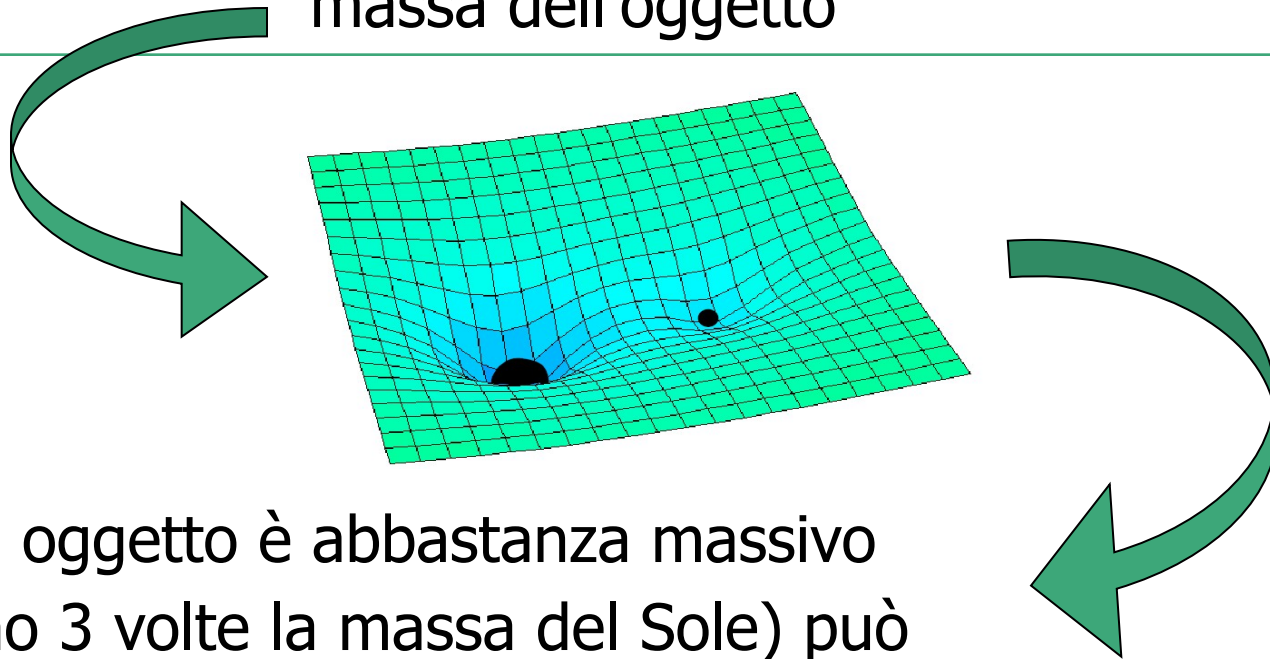


Relatività Generale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La curvatura dello spazio-tempo cambia a seconda della massa dell'oggetto



Se un oggetto è abbastanza massivo
(almeno 3 volte la massa del Sole) può
collassare fino a un punto

Stadio finale della vita di una stella



Relatività Generale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

I buchi neri sono una delle più spettacolari previsioni della Relatività Generale: regioni in cui la curvatura è così forte da intrappolare anche la luce



Immagine artistica

Nulla che vi entri dentro
(**orizzonte degli eventi**) può tornare indietro



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La questione energetica

La fissione e la fusione nucleare come fonti energetiche

Gilio Cambi

Dipartimento di Fisica Università di Bologna



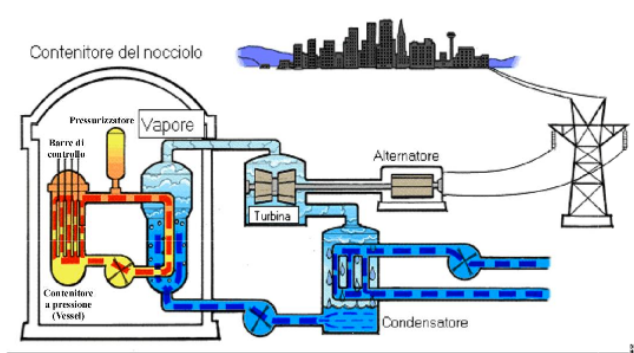
La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



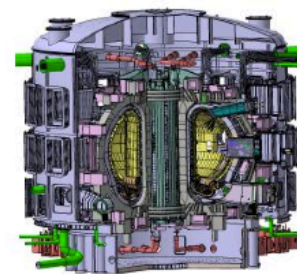
FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Sommario

- ❖ **La questione energetica: consumi e prospettive**
- ❖ **Energia da reazioni nucleari: fissione e fusione**
- ❖ **La fissione nucleare:**
le sue basi fisiche
la tecnologia (impianti nucleari attuali e futuri)
- ❖ **La fusione nucleare:**
le sue basi fisiche
la tecnologia
l'impianto ITER



ITER Tokamak - Mass Comparison



ITER Machine mass:
~23000 t
28 m diameter x 29 m tall



Charles de Gaulle mass:
~38000 t (empty)
856 ft (261 m) long
(Commissioned 2001)



Climatologia



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Introduzione al sistema climatico terrestre



Osservazioni di stato e tendenza

Federico Porcù (porcu@fe.infn.it)
Dipartimento di Fisica – Università di Ferrara

eruzione del monte Pinatubo (12-16/06/91)



**Prediction is very
difficult, especially if
it's about the future.**



In conclusione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Il corso non è facile!

Non è richiesto che tutti voi comprendiate alla lettera ogni argomento trattato, ma ci sarà da impegnarsi comunque

Se lo farete vi assicuro che questo vi faciliterà molto durante il primo anno di corso, 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!!!