

Dark Matter, Neutrinos and Underground Physics

Curriculum Physics of Fundamental
Interactions and Experimental Techniques

Prof. P. Belli

6 CFU – I Anno, 2 SEMESTRE LM FISICA 2024-25

Inizio del corso: 3 marzo 2025. Orari: Lunedì 09:00-11:00 Aula T5bis
Mercoledì 09:00-11:00 Aula T5bis

Pierluigi Belli

pierluigi.belli@roma2.infn.it

<https://pbelli.users.roma2.infn.it/>

Sito con informazioni: <https://pbelli.users.roma2.infn.it/dmnu25.html>

Program of the

Dark Matter, Neutrinos and Underground Physics course (6 CFU) – A.A. 2024/2025 (Prof. P. Belli)

Brief **historical overview** of fundamental interactions between particles, quantum mechanics, waves and particles, relativity, relativistic quantum field theories, fundamental fields, conservation laws, symmetries, and Outline of the Standard Model of elementary particles. Historical references.

Interactions of charged particles with the matter; radiation-matter interactions; cross sections; range; mean free path; cross section p-p. Nuclei fragmentation.

Formation of nuclei in the Universe; theoretical explanation of the cosmic rays abundances. **Primordial nucleosynthesis**. Short history of the early Universe. The n/p ratio. The first 200 s (three minutes). Light elements abundances and ${}^7\text{Li}$ problem. The formation of nuclei heavier than $A=7$. Nucleosynthesis in the stars. Thermonuclear fusion processes. Evolution of a star. Fusion cross sections; S-factor; Gamow factor and peak. The fusion reactions in the Sun. Subsequent stages of a star. The triple alpha process. The s-, r-, and p- processes. The last stages of a star. Degenerate stars. The Chandrasekhar mass. White dwarfs. Supernovae (SN) and their classification. Neutron stars. Pulsars. Black holes.

The **Dark Universe**. Astrophysical evidence of Dark Matter (DM). Rotational curves of spiral galaxies; cluster of galaxies; the bullet cluster. The standard Big Bang model. Overview of **Cosmology**. The Friedmann equations. The geometry of the Universe. The basis of the Big Bang model. The cosmic microwave background (CMB); the anisotropy of CMB; information on the geometry of the Universe; the Ω budget. The expansion of the Universe (Hubble law); Sn type IA as standard candles; the expansion is accelerating; **dark energy**. Gravitational probes. Nucleosynthesis. The abundance of light elements. The Baryonic acoustic oscillations (BAO). Concordance Λ CDM model. Hot, Warm and Cold non-baryonic dark matter. Hot DM and neutrinos. **Dark Matter** candidates.

Decoupling of DM particles in the early Universe. Relic cold DM. Axions and axion searches. **Strategies for DM detection**. Indirect detection. Overview of experimental techniques. The direct detection. Processes of direct detection. The cases of elastic and inelastic interactions on nuclei. Halo models, parameters. Expected signals. Uncertainties in the evaluation. Arguments related to the experimental procedures. Low-background techniques. The model independent signature. Classification of the different experimental efforts. Status, experimental signals, and perspectives.

Neutrino Physics and neutrino astronomy. Astrophysical and terrestrial, natural, and home-made sources of neutrinos. Overview of neutrino history. Neutrino interactions; neutrino oscillations in vacuum and in matter (MSW effect). Majorana neutrinos. **Solar neutrinos**. Production of neutrinos in the Sun. Detection schemes. Experiments and interpretation. Confirmation of oscillation parameters from long-baseline reactor antineutrinos. **Atmospheric neutrinos**. Detection methods and experimental results. Confirmation of oscillation parameters from long-baseline accelerator experiments. Disappearance of ν_μ ; appearance of ν_τ . PMNS mixing neutrino matrix. Measurement of θ_{13} and CP violation phase. Sterile neutrinos. **Geoneutrinos** and their detection. **Supernovae neutrinos**. SN1987A and detection of SN neutrinos. Perspectives and estimates. First detection of **high energy (extragalactic) neutrinos**. Anisotropy and power law. **Relic cosmological neutrinos** and estimates on neutrino masses. Measurements of neutrino masses from the end-point of β decay. **Neutrino masses** and Majorana neutrino in **2β decay experiments**; Schechter-Valle theorem; expectations. 2β decay experiments, a classification and description of the experimental method. Some examples of techniques, experiments, and results.


The technical and experimental details of the **Underground Physics** will be discussed during the lectures.

Recommended readings.

- M. Spurio, *Particles and Astrophysics, a multi-messenger approach*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-08051-2
- D. Perkins, *Particle Astrophysics*. Oxford Master series in Particle Physics.
- J. Rich, *Fundamentals of Cosmology*. Springer. DOI 10.1007/978-3-642-02800-7
- J.L. Basdevant, J. Rich, M. Spiro, *Fundamentals in Nuclear Physics*. Springer. ISBN 0-387-01672-4
- M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) and 2019 update.
- C. Grupen, *Astroparticle Physics*. Springer.
- S. Bilenky, *Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos*. Springer DOI 10.1007/978-3-319-74802-3
- P. Blasi, *Acceleration of galactic cosmic rays*. Riv. Nuovo Cim. 42 (2019) 549.
- U. Sarkar, *Particle and Astroparticle Physics*. Taylor and Francis. ISBN-13: 978-1-58488-931-1
- K. Zuber, *Neutrino Physics*. CRC press. ISBN: 978-1-138-71889-0
- bibliography mentioned during lectures
- other references will be given upon request

Astroparticle Physics

Cosmology of particles; Cosmoparticle Physics, ...



Particle Physics
studies the Nature
on small scale



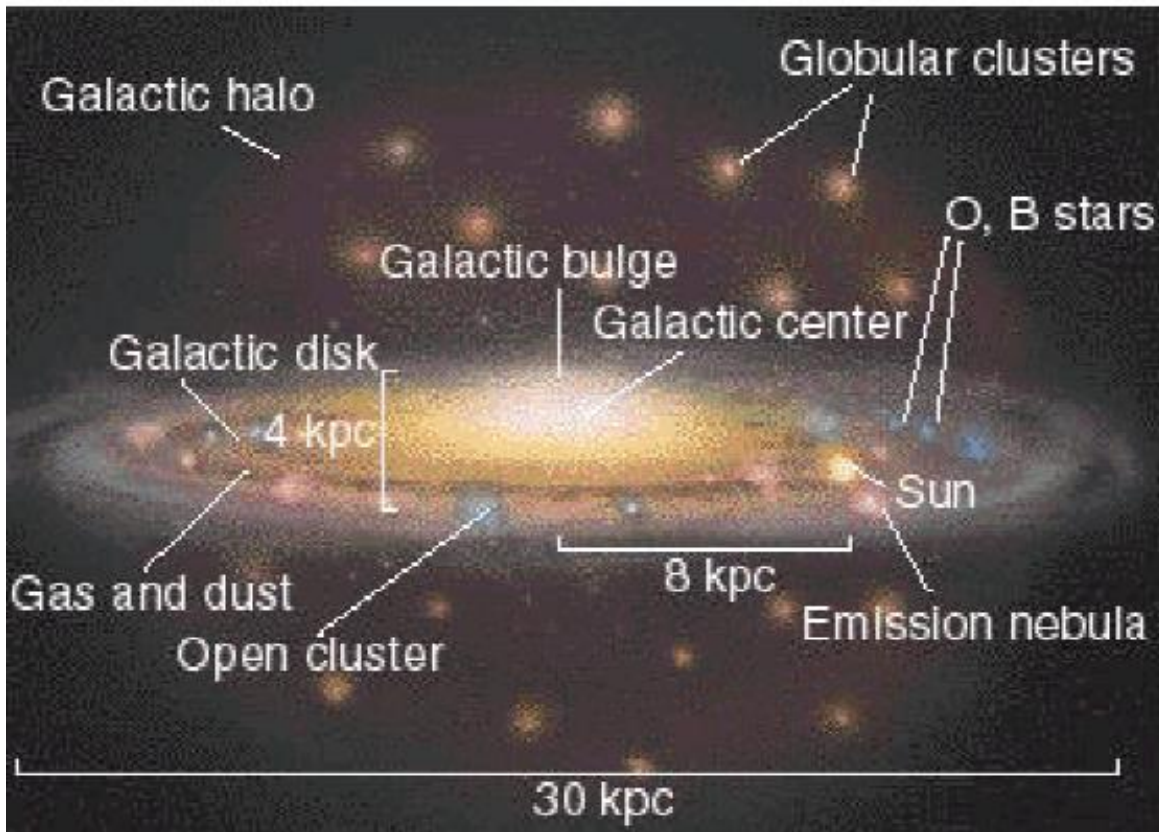
Cosmology
studies the Nature
on large scale

Possibility to investigate physics beyond the Standard Model

Early Universe

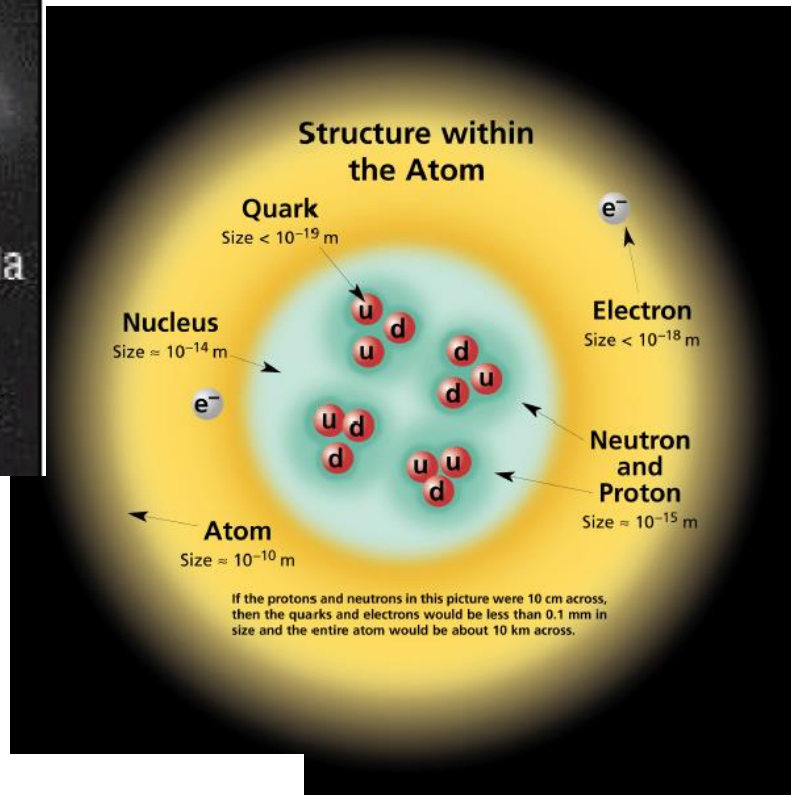


**Ultimate
particle
accelerator?**

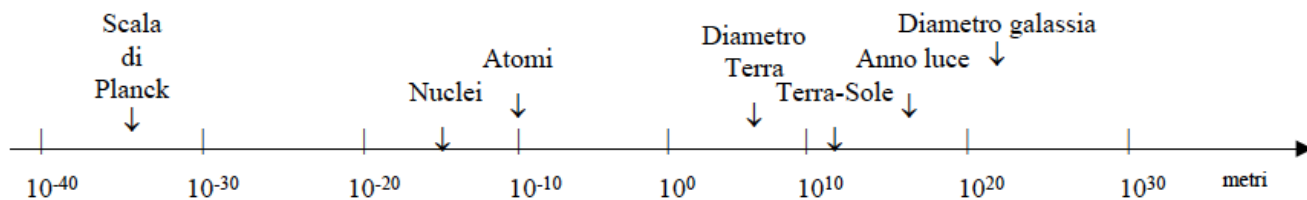


The Milky way

Subnuclear Scale

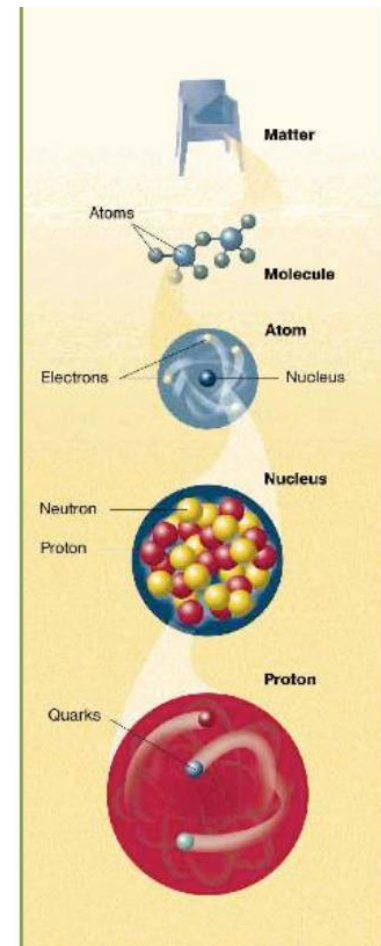


Ladder of distances:



The Standard Model of Elementary Particles is the theory describing the fundamental interactions among elementary particles

The search for latter components of the matter and of the fundamental interactions among them has accompanied the history of men



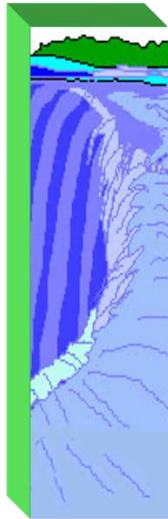
An old idea...

Esistono degli elementi fondamentali a partire dai quali possiamo costruire tutto il nostro mondo?

Material constituents



Earth



Water



Air



Fire

Forces

Amore

Odio



Il Modello Antico

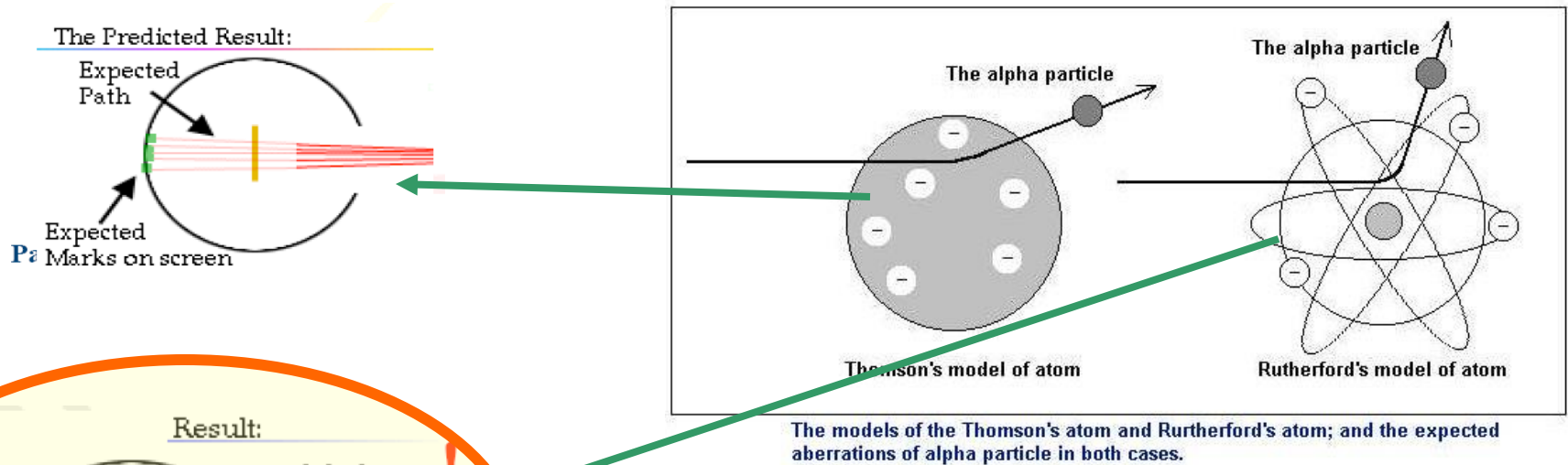
Empedocle

Il filosofo greco Empedocle fu il primo ad effettuare una classificazione degli elementi fondamentali: fuoco, acqua, aria e terra.

Fisica dei primi anni del 1900

→ L'atomo non è indivisibile

- 1895 Thomson lavorò sui raggi catodici e misurò il rapporto tra la carica elettrica e la massa. Queste particelle vennero chiamate **elettroni**.
- 1909-1910 Esperienza di Rutherford

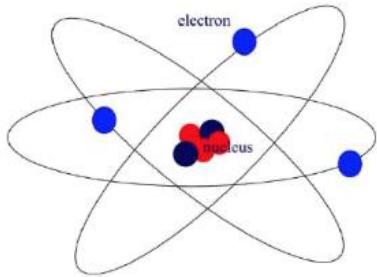


Conclusion

L'atomo (dimensioni tipiche 10^{-8} cm) contiene un nucleo di carica positiva di dimensione < 10 fm [1 fm = 10^{-13} cm]. Gli elettroni, di carica negativa, orbitano attorno al nucleo.

Se il nucleo fosse un'arancia, l'atomo avrebbe le dimensioni di 10 km!!!!

Superamento del concetto di atomo di Dalton
(1808, atomo inalterabile ed indistruttibile)
Modello planetario dell'atomo



Atomic Planetary Model

Gli elementi chimici sono diversi perché hanno diverso numero di elettroni

- Le proprietà chimiche sono dovute all'arrangiamento elettronico (spiegato dalla Meccanica Quantistica)

(Un elemento chimico può avere vari isotopi, caratterizzati dalle stesse proprietà chimiche e da diversa massa nucleare)

I nuclei sono composti di protoni e neutroni (nucleoni):

- I protoni (carichi) sono tanti quanti gli elettroni
- I neutroni (neutri) possono essere di numero diverso in isotopi diversi

(un nucleo con troppi neutroni diventa instabile, decade tramite decadimento- β)

Dagli anni '30: nuove particelle scoperte nei raggi cosmici e negli acceleratori di alta energia (principalmente adroni, cioè particelle soggette alla forza nucleare, come i nucleoni)

Si osservavano molti adroni e sembrava non esserci alcuna relazione tra loro (come tra gli elementi chimici prima di Mendeleev)

- Anni '60 : Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman trovarono alcune regolarità (simmetria-SU(3))
- 1964: Murray Gell-Mann e George Zweig scoprono una struttura interna agli adroni

Le particelle elementari divennero:

- quark (costituenti i nuclei e altri adroni)
- leptoni (non soggetti all'interazione nucleare, come gli elettroni)

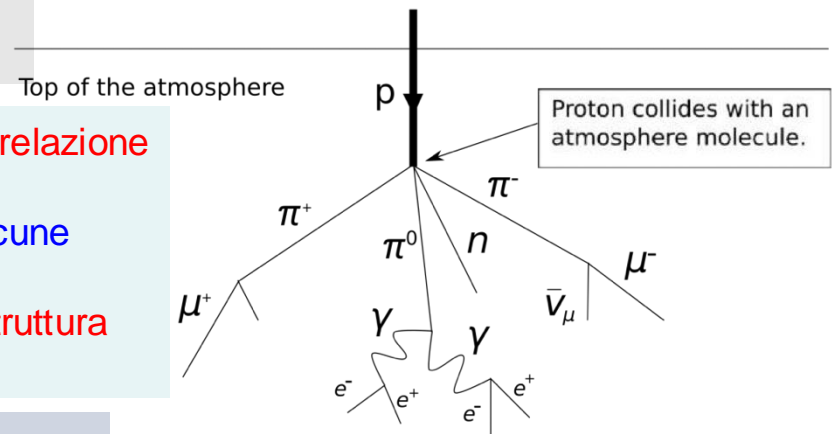
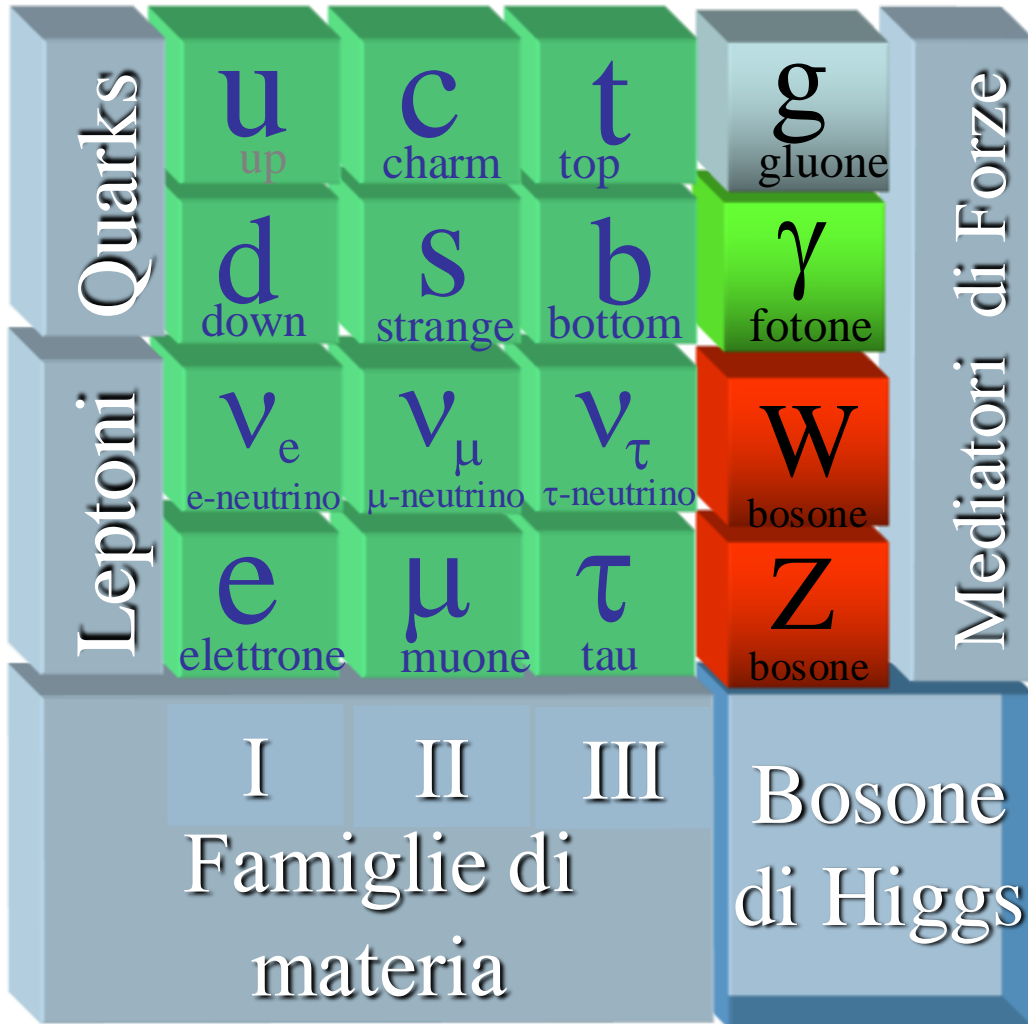
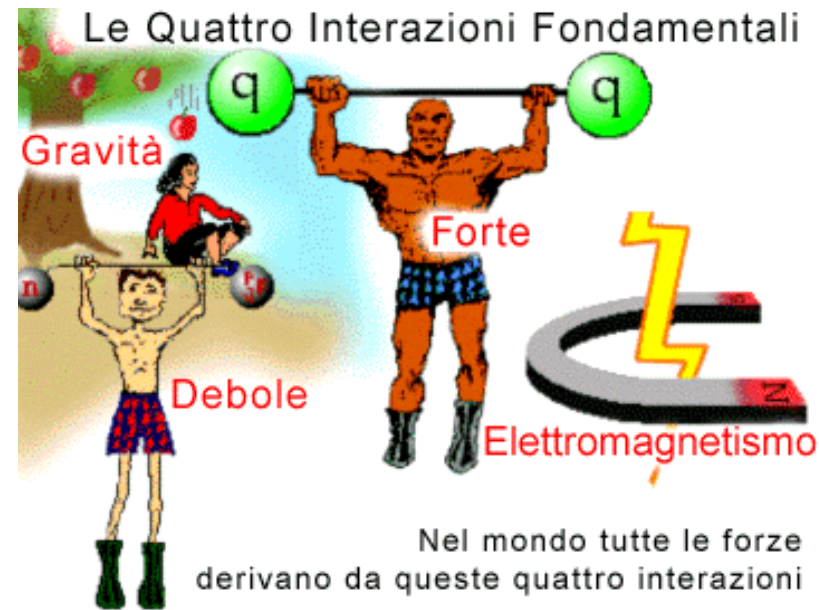


Foto di famiglia al completo ... (!?)

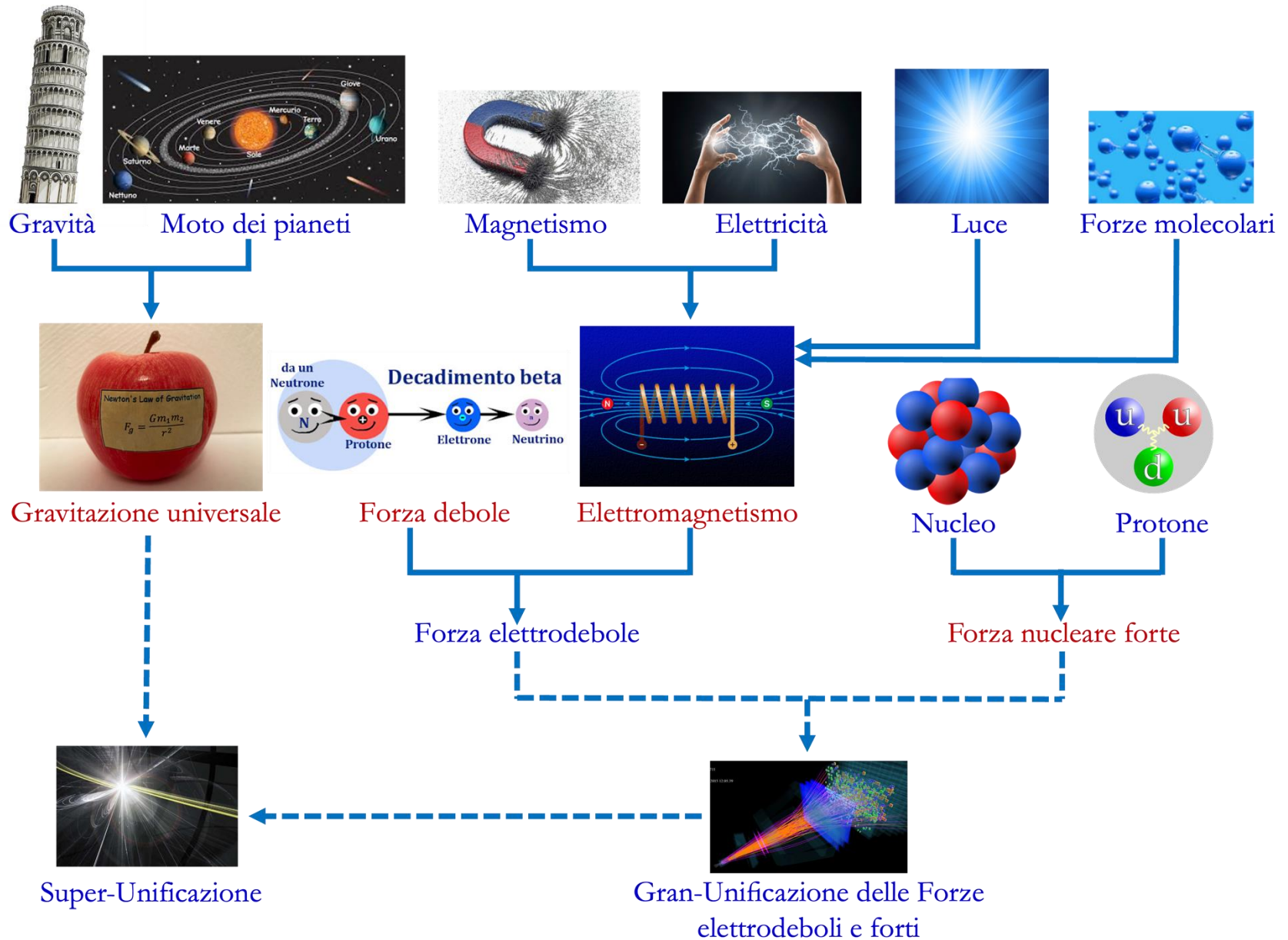
Costituenti materiali Forze



Il Modello Standard



L'unificazione delle forze della natura



Il Modello Standard è la teoria che descrive le interazioni fondamentali di quark e leptoni

Per introdurre il Modello Standard dobbiamo prima introdurre:

- La Meccanica Quantistica
- La Teoria della Relatività

Fisica Moderna

Il Modello Standard è una teoria quantistica e relativistica

Fisica Classica (<1900)

MECCANICA

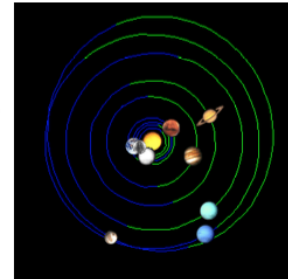
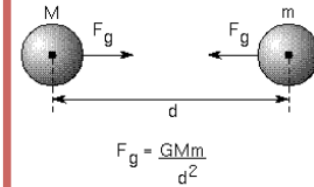


Newton 1686

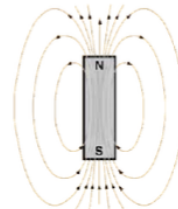
$$F = m \cdot a$$

Equazione del moto

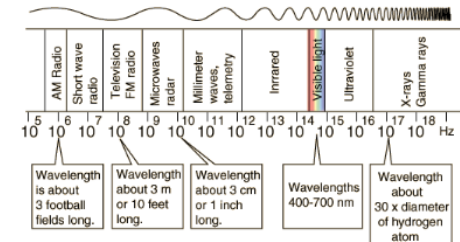
GRAVITAZIONE UNIVERSALE



ELETTO-MAGNETISMO

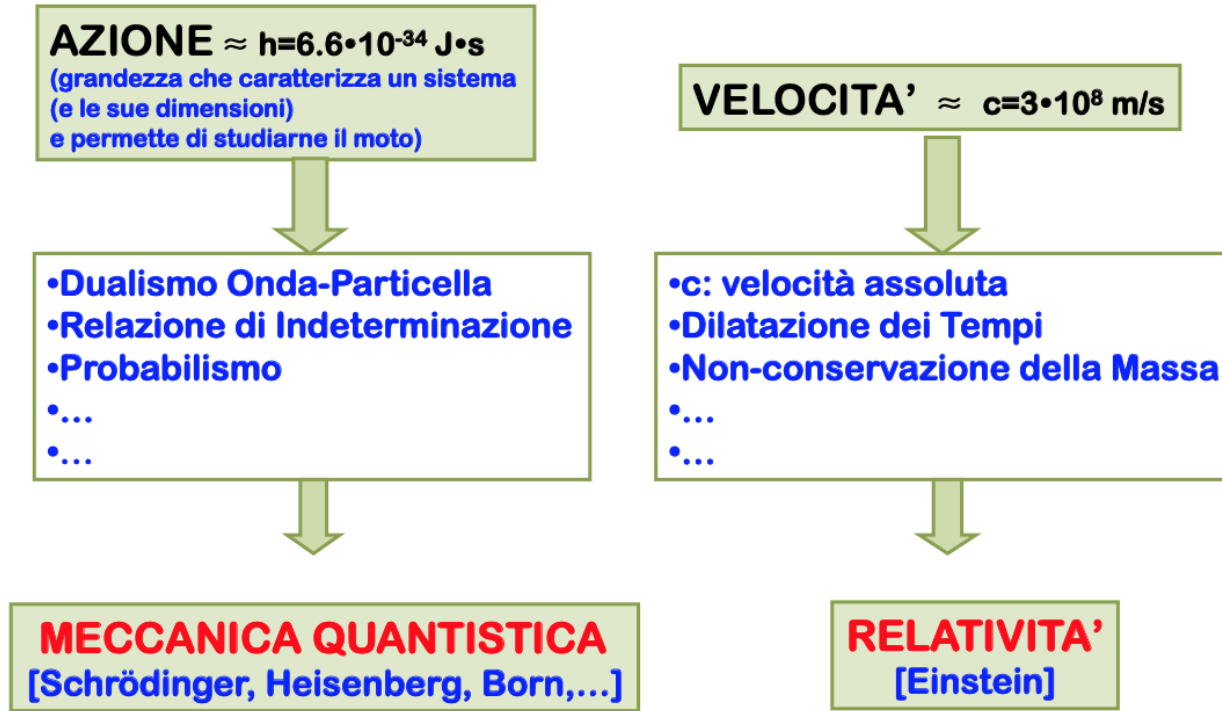


Maxwell 1865



Fine '800 – Inizio '900

Studio di Fenomeni su scala atomica



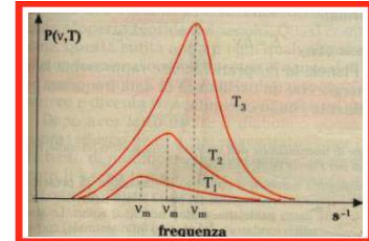
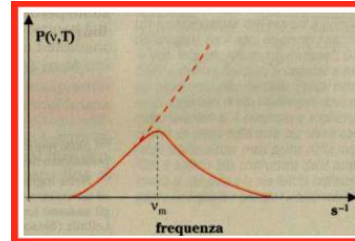
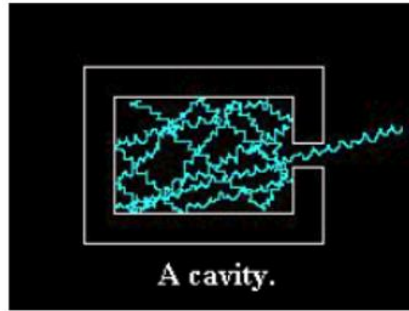
Limiti della Fisica classica → nascita della Fisica moderna



Meccanica Quantistica

Proprietà corpuscolari della Radiazione Elettromagnetica

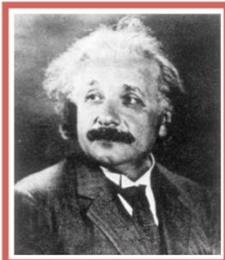
- Spettro del corpo nero



- Effetto fotoelettrico



Scoperta:
Hertz 1887



Teoria: Einstein 1905

- Effetto a soglia:

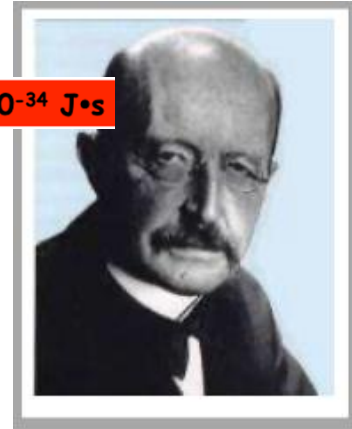
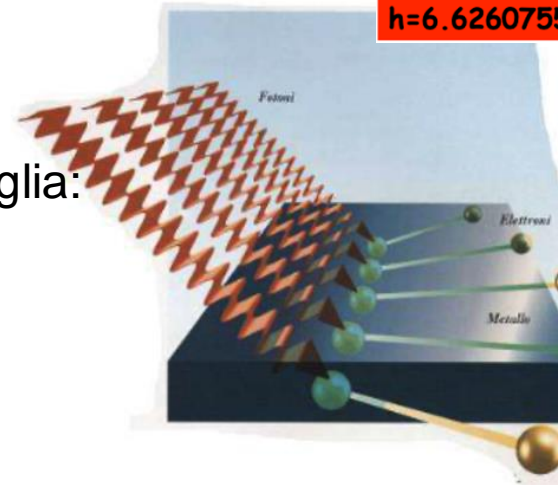
$$\nu > \nu_S$$

$$E_e \propto \nu$$

$$N_e \propto I$$

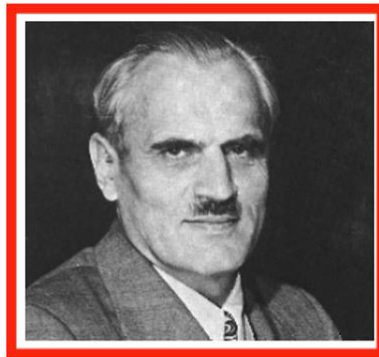
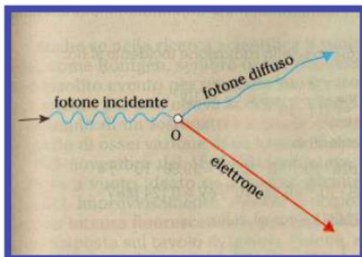
$$E_{\text{photon}} = h\nu$$

$$h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$



Planck 1900

- Effetto Compton



Compton 1922

- Urto $\gamma - e$ in cinematica relativistica:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \neq 0$$

$$E_\gamma = h\nu = hc/\lambda; p_\gamma = E_\gamma/c$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\vartheta)$$

Meccanica Quantistica

Proprietà ondulatorie delle Particelle

Diffrazione di elettroni

De Broglie 1923:

anche le "particelle"
sono "onde"

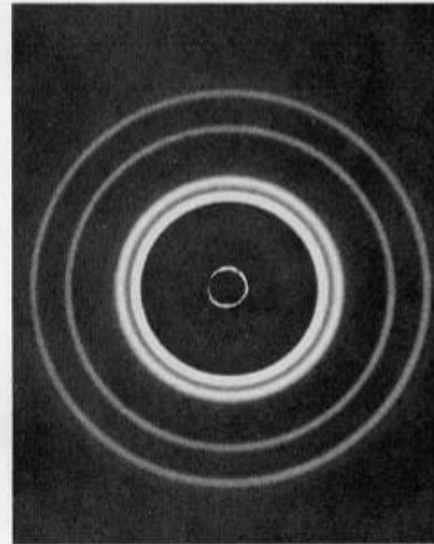


$$p = h/\lambda$$

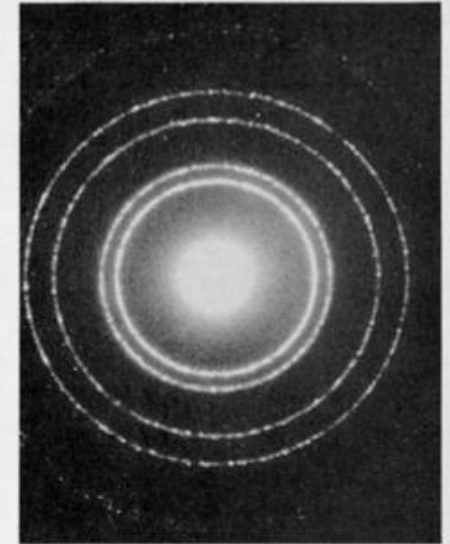


$$\lambda = h/p$$

Raggi X



Elettroni



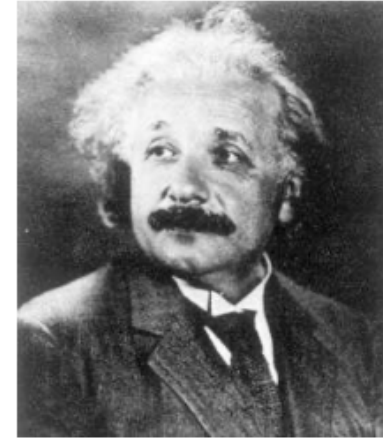
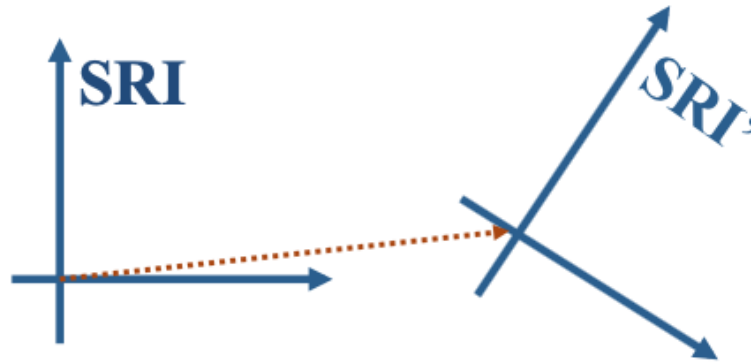
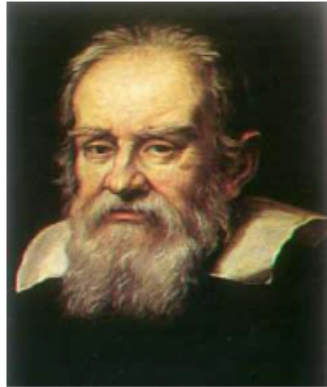
Davisson e Germer 1927

1926-1927:
Principi Fondamentali della Meccanica Quantistica
su scala atomica:

- materia e radiazione \leftrightarrow onde-particelle
- la loro traiettoria non è più definita
- relazione di indeterminazione di Heisenberg: $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
- determinismo \rightarrow probabilismo



RELATIVITA'



Galileo ('600):
Stesse leggi della MECCANICA
in ogni SRI

Einstein (1905):
Stesse leggi della FISICA
in ogni SRI

Trasformazioni di Galileo:

- Tempo assoluto
- Composizione lineare delle velocità

Trasformazioni di Lorentz:

- Tempo relativo
- c : velocità assoluta

PROBLEMI:

- Sperimentalmente " c "
in ogni SRI (Michelson-Morley)
- Eq. di Maxwell non invarianti
sotto trasformazioni di Galileo

CONSEGUENZE:

- Dilatazione dei tempi
- Non-conservazione della massa
- ...

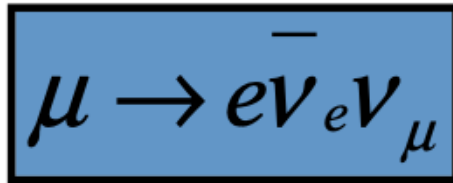
Dilatazione dei Tempi

Einstein:

il tempo dipende dal SRI in cui si osserva il fenomeno

Evidenza sperimentale:

i muoni prodotti nell'alta atmosfera arrivano sulla terra



$$N_\mu \xrightarrow{\tau} \frac{N_\mu}{2.718} \xrightarrow{\tau} \frac{N_\mu}{(2.718)^2} \xrightarrow{\tau} \dots$$

$$\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Tempo proprio
(nel SR dei muoni)

Nel SR "terra" in cui i muoni sono in moto

$$t = \gamma \tau = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tau \cong 20 \tau$$



Arrivano sulla terra!

(es: $E_\mu \approx 2 \text{ GeV}$)

Conversione tra “massa” e “energia”

energia a riposo

energia cinetica

$$E = E_0 + E_k$$

$$E_0 = mc^2$$

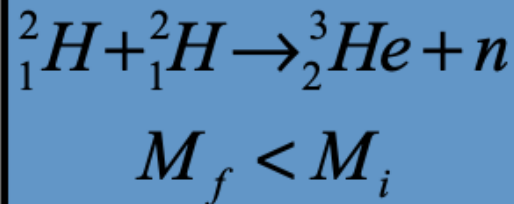
$$E_k = (\gamma - 1)mc^2$$

L'energia totale si conserva



La massa non si conserva

Evidenza sperimentale:
reazioni nucleari

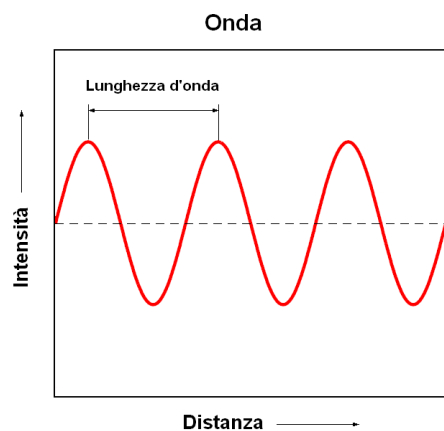
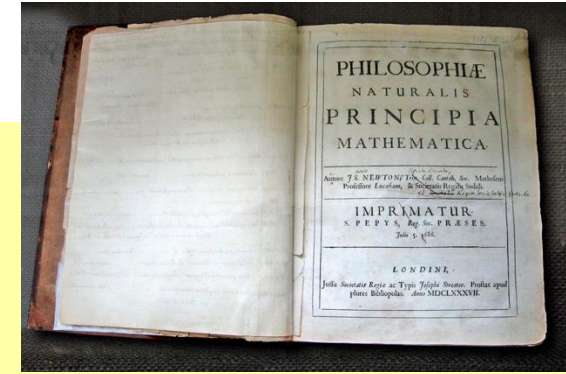


Le particelle elementari sono **quantistiche** (piccola scala) e **relativistiche** (veloci).

E' allora necessaria una teoria che metta insieme Meccanica Quantistica e Relatività:

Teoria dei campi

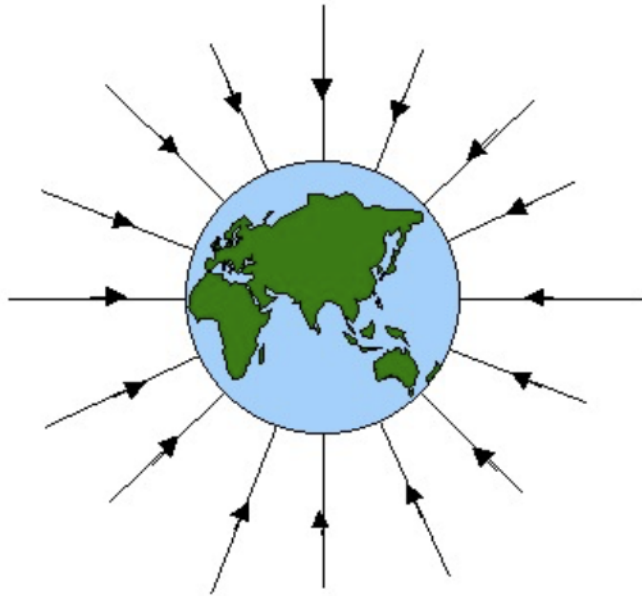
- Le teorie di campo si occupano di sistemi fisici descritti assegnando il valore di una o più quantità (campi) in ogni punto dello spazio
- Nella Fisica classica (non-quantistica) ci sono varie teorie di campo: in Acustica, Elasticità, Idrodinamica, Meteorologia compaiono campi di pressione, densità, velocità, deformazione elastica,... Questi campi corrispondono ad un'idealizzazione del sistema reale, **non rappresentano proprietà fisiche dei punti dello spazio ma proprietà medie di atomi e molecole**



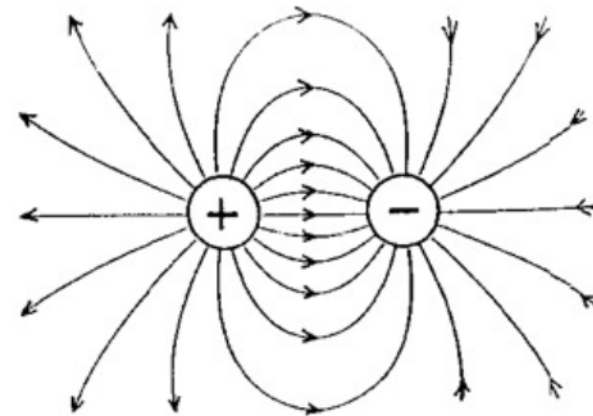
- Nell'ambito della **Fisica classica**, campi che corrispondono a proprietà fisiche dello spazio sono i **campi elettromagnetico e gravitazionale**
- Il **ruolo dei campi** è diventato **cruciale** per interpretare fenomeni fondamentali, nell'ambito della **Fisica quantistica relativistica**
- (con "c" velocità limite, l'interazione non può essere descritta come istantanea e una formulazione senza campi avrebbe la complicazione di dover introdurre il tempo di interazione)
- Il concetto di particella risulta riassorbito nel **concetto di campo** (le **particelle elementari sono** eccitazioni del campo, un po' come le onde sono eccitazioni della superficie del mare)

Campi

- Nelle teorie di campo, un campo di forze è un campo vettoriale che descrive una forza (non di contatto) agente su una particella in un qualsiasi punto del campo



campo gravitazionale

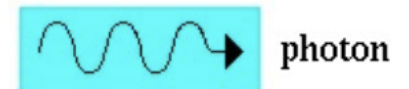


campo elettromagnetico

- Il campo è generato da una carica elettrica (campo elettromagnetico) o da una massa (campo gravitazionale), e si propaga tramite onde (es. le onde radio o la luce di un campo elettromagnetico) che trasportano energia

Campi quantistici

- Nelle teorie di campo quantistico, l'energia di un'onda nel campo è quantizzata, e le eccitazioni del campo si possono considerare come particelle che trasportano l'energia tra le cariche del campo
- onde elettromagnetiche = **fotoni** scambiati tra cariche elettriche
onde della forza forte = **gluoni** scambiati tra quarks
onde della forza debole = **bosoni W, Z** scambiati tra quarks e leptoni
onde gravitazionali = **gravitoni** scambiati tra masse
- fotoni, gluoni, bosoni W, Z hanno una natura sia corpuscolare che ondulatoria



Teoria dei campi quantistici (QFT)

- I **fondamenti della Teoria dei campi quantistici** furono formulati negli **anni '30** principalmente da **Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman e Freeman Dyson**
- Fu inizialmente **elaborata nell'ambito della Fisica delle Particelle** per risolvere i problemi che emergevano quando si tentava di **estendere la Meccanica Quantistica a sistemi relativistici**
- **L'equazione di Schrödinger della Meccanica Quantistica (non-relativistica)**

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi$$

energia cinetica
non relativistica

e' scritta in termini della **funzione d'onda**, che descrive stati di singola particella
 $|\Psi(\mathbf{x})|^2$ rappresenta la **probabilita'** di trovare la particella nella posizione \mathbf{x})

- Si provo' (Klein-Gordon, Dirac) ad estenderla a **sistemi relativistici**, incontrando il **problema delle soluzioni con energia negativa** (fino a $-\infty$, cioe' l'assenza di uno stato fondamentale)
- Il cuore del problema e' che **un'equazione in termini della funzione d'onda non puo' descrivere processi** (permessi dalla Relativita') di **annichilazione particella-antiparticella** e piu' in generale di **creazione ed annichilazione di particelle**
- Questo problema viene risolto nell'ambito della Teoria dei campi quantistici, descritta in termini di **campi** (quantita' esistenti in ogni punto dello spazio e che **definiscono la probabilita'** di **creazione ed annichilazione delle particelle**)

La **teoria dei campi** fornisce il formalismo che permette di **conciliare Meccanica quantistica e Relatività**

E permette di scrivere una teoria (Modello Standard) **ben verificata sperimentalmente**

Fundamental Fields

Characterization of the transformation properties of the particles under spatial rotations → **Spin**

It is the **intrinsic angular momentum** of the particle

Fields divided into two broad categories:

Fermions: **half-integer spin**

Bosons: **integer spin**

- Mass Fields (Fermions with spin 1/2):
Leptons, Quarks
- Mediators of the interactions (Bosons):
 γ , W, Z, g



I costituenti elementari della materia come li conosciamo oggi

- **Quark** (formano i nucleoni ed altri adroni)
- **Leptoni** (non soggetti all'interazione nucleare, come gli elettroni)

- **Quark e leptoni** compaiono in **tre generazioni** (o **famiglie**)
- **Particelle in generazioni diverse** sono quasi **cloni** le une delle altre (ad eccezione della **massa che aumenta con la generazione**)
- **Particelle della 2° e 3° generazione** sono **instabili** (non si trovano nella materia ma possono essere prodotte in collisioni di alta energia)

Non sappiamo perché le generazioni siano 3!

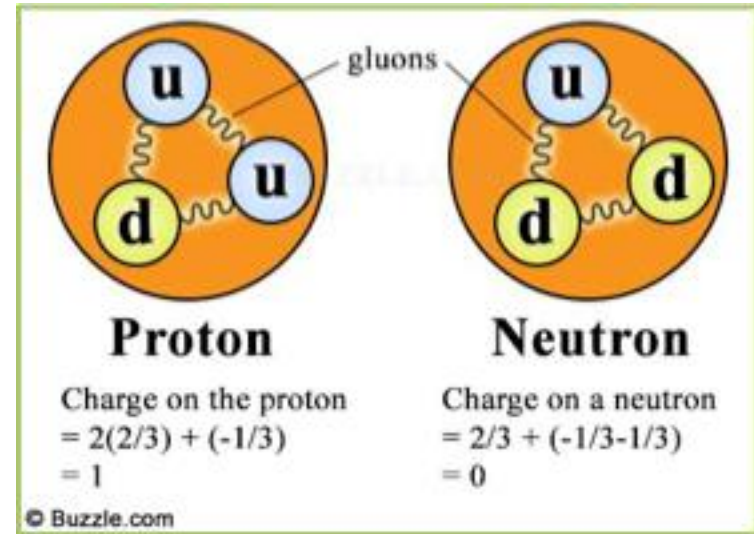
Quando nel 1936 il muone (μ , leptone carico della 2° generazione) fu scoperto, Isidor Isaac Rabi esprime il suo stupore (“Chi l’ha ordinato?”)
80 anni dopo ancora non lo sappiamo!



Ci sono 2 quarks e 2 leptoni in ognuna delle 3 generazioni

I costituenti della materia sono fermioni. Obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac ed al principio di esclusione di Pauli

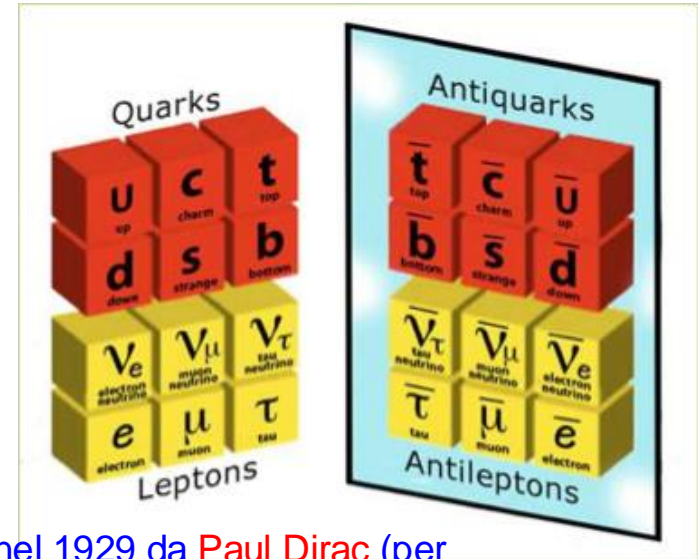
- **Neutrino** (postulato da Wolfgang Pauli nel 1930) = **piccolo neutro** in Italiano
- i **leptoni** hanno **unità intere di carica elettrica**, mentre i **quark** hanno **multipli di 1/3**
- i quark esistono di 3 colori
- gli adroni composti di 3 quark si chiamano **barioni**,
- Gli adroni composti di un quark ed un antiquark si chiamano **mesoni**



Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Per ogni particella di materia esiste un'antiparticella

- Le antiparticelle hanno la **stessa massa ma carica elettrica opposta** rispetto alle particelle (e tutti i numeri quantici additivi opposti)
- **si annichilano** con le particelle (poiché la materia è composta di particelle, le antiparticelle non possono vivere a lungo accanto a noi)



- L'esistenza delle antiparticelle fu **predetta teoricamente** nel 1929 da **Paul Dirac** (per spiegare le soluzioni di energia negativa della sua equazione quantistica-relativistica)

Il Modello Standard richiede anche dei bosoni (caratterizzati da spin intero e che obbediscono alla statistica di Bose-Einstein):

- Particelle di Gauge (s=1) per trasmettere le forze
- Bosone di Higgs (s=0) per generare le masse

Gauge boson		Spin	Charge	Mass
photon	γ	1	0	0
W-boson	W^\pm	1	± 1	80.4 GeV
Z-boson	Z^0	1	0	91.2 GeV
gluons	g	1	0	0
graviton	G	2	0	0



	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

LIVE SCIENCE

What is a Higgs Boson?

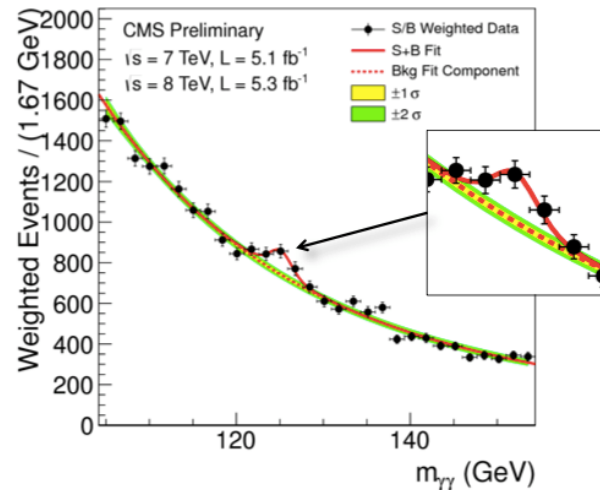
The elusive Higgs boson, if found, would complete the Standard Model of physics. It is thought that matter obtains mass by interacting with the Higgs field. If Higgs did not exist, according to the model, everything in the universe would be massless.

The "cocktail party" analogy

Imagine a party where guests are evenly spaced around the room. The room of guests represents the Higgs field, which is everywhere in the universe. Suddenly a celebrity enters. Guests notice the celebrity and rush in closer to be near her, forming a tight knot.

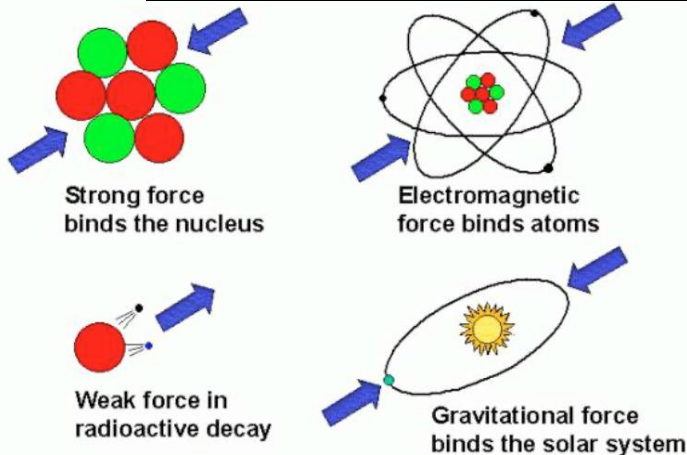
As the celebrity passes through the room, the concentrated clump of guests surrounding her gives the group additional momentum. The clump is harder to stop than one guest alone would be, and so we can say that the clump has acquired mass.

SOURCE: CERN
KARL TATE / © LiveScience.com



Interazioni fondamentali tra particelle elementari

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20



Il mondo che ci circonda dipende sensibilmente dal tipo di forze che agiscono e da quanto sono intense!

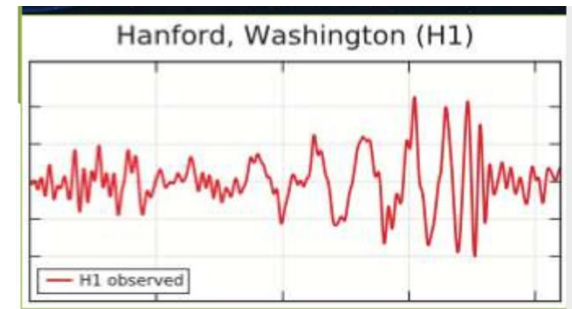
- Se la forza elettromagnetica avesse corto raggio d'azione e fosse molto debole → Gli elettroni non sarebbero legati ai nuclei, ci sarebbe un plasma (zuppa di elettroni e nuclei liberi)
- Se la forza elettromagnetica fosse molto più intensa della forza nucleare → La repulsione elettrostatica tra protoni supererebbe la forza nucleare attrattiva; ci sarebbero solo atomi di idrogeno

In entrambi gli scenari sarebbe quasi impossibile vedere qualcosa:

- Con il plasma: la luce non potrebbe viaggiare essendo continuamente emessa e riassorbita dagli elettroni
- Con una forza elettromagnetica molto intensa: ci sarebbe un plasma virtuale dovuto alle coppie elettrone-positrone prodotte dal vuoto (in accordo con il principio di indeterminazione)
- Se la forza nucleare fosse troppo debole, non avremmo nuclei pesanti
- Se la forza nucleare fosse molto più intensa, si potrebbero formare elementi chimici molto più pesanti
- Se la gravità fosse troppo debole galleggeremmo, come un astronauta in orbita

Forza gravitazionale

- La forza fondamentale più debole e la prima ad essere scoperta
- 1915: teoria della **relatività generale**
- 2016: osservazione delle **onde gravitazionali**
- Gli effetti **quantistici** della gravità non sono ancora compresi (rilevanti alla scala di Planck $\sim 10^{19}$ GeV)



$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

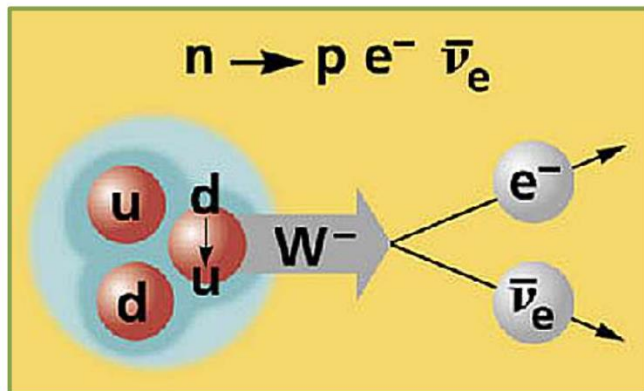
$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}$$

Forza elettromagnetica

- E', oltre la forza gravitazionale, l'unica forza che sperimentiamo tutti i giorni
- 1873: **unificazione** fenomeni elettrici e magnetici; equazioni di Maxwell

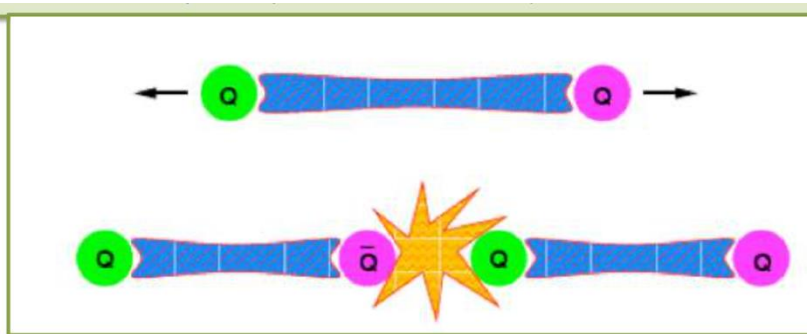
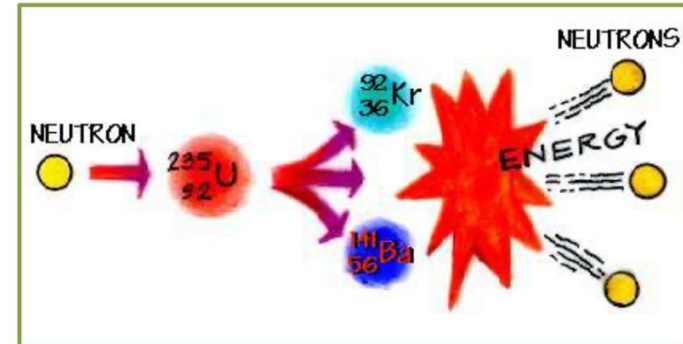
Forza debole e forza nucleare forte

- Non sperimentate nella vita di tutti i giorni a causa del **raggio di azione molto piccolo** ($10^{-17} - 10^{-18}$ m per la forza debole, 10^{-15} m per la forza nucleare forte)
- A distanze più piccole del raggio di azione obbediscono alla legge dell'inverso del quadrato. Per distanze più grandi risultano **poco intense**.



Forza forte

- L'**interazione forte** è la **più intensa** delle quattro forze (nel suo raggio d'azione)
- Si può ricavare una **quantità enorme di energia** da una piccola quantità di materiale **fissile**, usato in una centrale nucleare o in una bomba atomica
- Tra due adroni segue la **legge dell'inverso del quadrato**, con un raggio di azione di 10^{-15} m
- Indipendentemente da quanto sono distanti i due quark, c'è sempre una forza che li **riavvicina**.
- L'energia necessaria per allontanare due quark è **proporzionale** alla loro distanza. E' necessaria **un'energia infinita** per separarli all'infinito. E' più conveniente produrre **coppie quark-antiquark** che isolare i quark (**confinamento**)



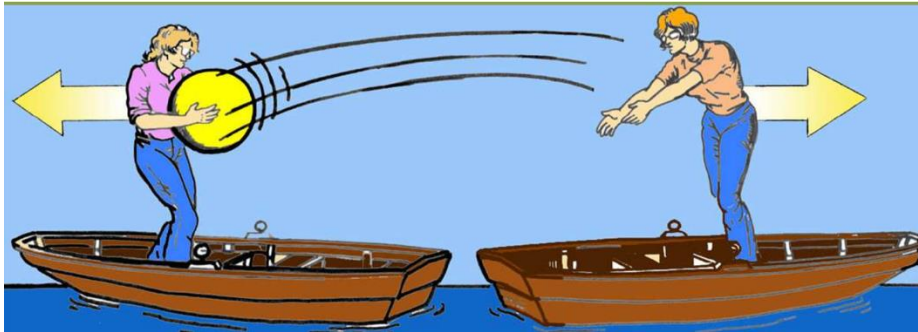
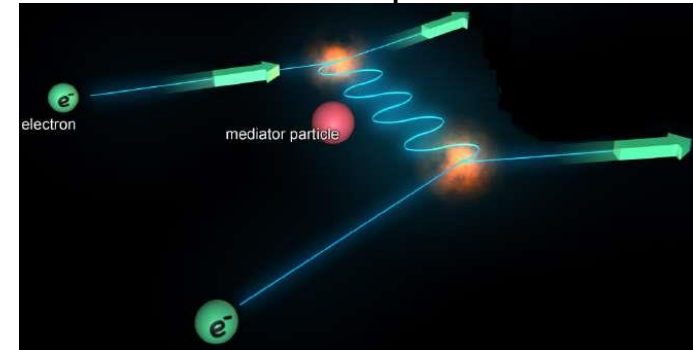
The force between nucleons at distances of ≈ 1 fm between their centers is **strongly attractive**, but decreases rapidly to become insignificant at distances over about 2.5 fm.

At distances smaller than 0.7 fm, it becomes repulsive and is responsible for the physical size of the nuclei

The nuclear force is a residual effect of the force even stronger (attractive, mediated by gluons) that binds quarks together to form the nucleons

Teoria delle Forze

- Da cosa deriva la differenza tra i **differenti raggi d'azione** tra le 4 forze fondamentali?
- Perché alcune sono **attrattive** e altre **repulsive**?
- Non si può rispondere a queste domande in Fisica classica né con la meccanica quantistica non-relativistica
- → **Teoria dei Campi Quantistici (QFT)**
- La **relazione di indeterminazione** comporta che l'energia di un sistema chiuso può fluttuare $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$ (con $\hbar = 6.6 \times 10^{-25} \text{ GeV s}$)
- Tali particelle vivono per un tempo piccolo $\Delta t \approx \hbar/mc^2$
- Particelle **virtuali** (mediatrici o di scambio)



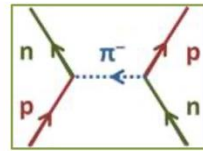
- E' così che si trasmettono le forze in QFT
- Come può lo scambio di una particella virtuale produrre una forza attrattiva?

- $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$; il segno dell'impulso scambiato è indeterminato... (**anche forza attrattiva**)
- Se la particella virtuale si muove alla velocità della luce, c , essa può viaggiare per una distanza $\Delta x \approx c \Delta t \approx \hbar/mc$ (**raggio d'azione della forza**)
- → **forze di Yukawa**

•Questo argomento, formulato da Hideki Yukawa nel 1935 lo porto' a predire l'esistenza di una nuova particella, il pione (π)

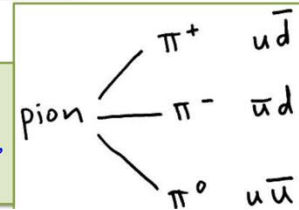
•A quei tempi era noto il raggio d'azione della forza nucleare, circa $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

•L'energia a riposo della particella virtuale associata e' allora circa $\hbar c/1 \text{ fm} = 0.197 \text{ GeV}$



•Dopo la scoperta del pione ($m_\pi = 0.14 \text{ GeV}$) Yukawa vinse il premio Nobel

•Sappiamo che il pione non e' una particella elementare, ma questo non influisce sulla sua proprieta' di trasmettere la forza nucleare



The coupling “constant” (dimensionless)

The value really depends on:

1. on their definition:

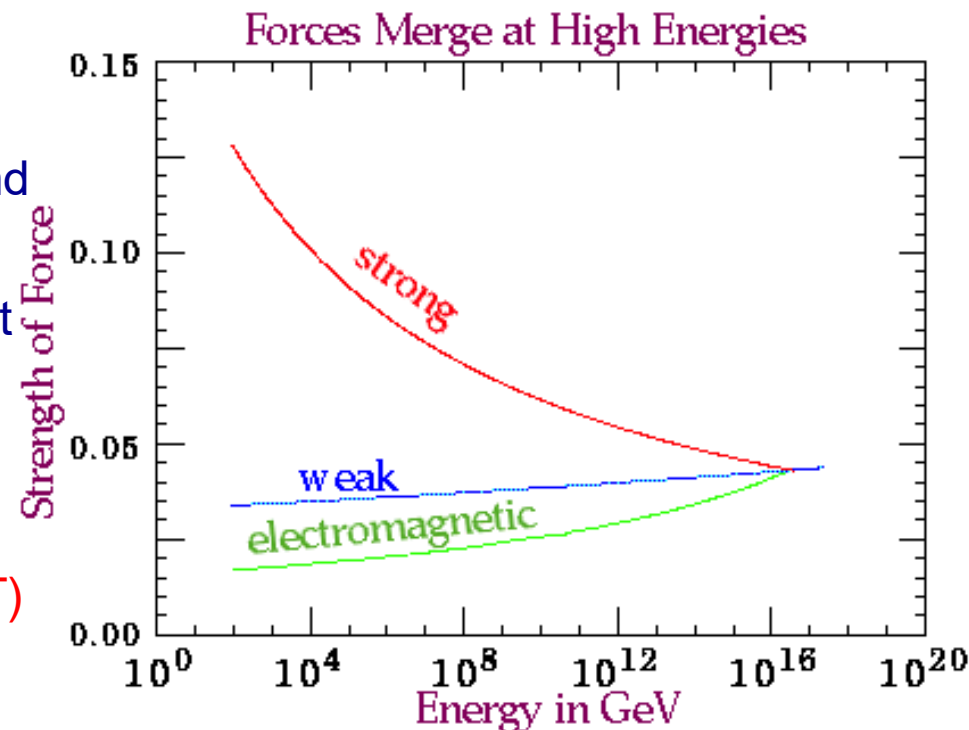
Example: the case of weak interactions. Often, we talk about the effective coupling constant which also takes account the extremely short interaction range of the force as a result of the large mass of the mediators → “strength” $\sim 10^{-14}$ much weaker than e.m. force

2. the scale at which they are measured.

Variation as a function of the momentum transfer in the interaction

Studying the behaviour of 3 coupling constants with modern quantum theories and extrapolating to the high energies it would seem that they can meet at a single value at high energies $\sim 10^{15}$ GeV

→ GREAT UNIFICATION THEORIES (GUT)



Modello Standard:

teoria basata sul gruppo di simmetria di gauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

simmetria di gauge: trasformazioni con parametro continuo dipendente dal punto dello spazio-tempo

$$\mathcal{L} = \sum_f \bar{\psi}_f \gamma^\mu i \mathcal{D}_\mu \psi_f - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W^{i\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} + (\mathcal{D}_\mu \phi)^\dagger (\mathcal{D}_\mu \phi) - \mu^2 \phi^\dagger \phi - \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 - \frac{\sqrt{2} \mu^2}{\lambda} \sum_{f, f'} \mathcal{M}_{ff'} (\bar{\psi}_{Lf} \phi \psi_{Rf'} + \bar{\psi}_{Rf'} \phi^\dagger \psi_{Lf}),$$

$$\mathcal{D}_\mu = \partial_\mu + ig' \frac{Y}{2} B_\mu + ig_W \frac{\tau^i}{2} W_\mu^i + ig_s \frac{\lambda^a}{2} G_\mu^a,$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \quad (f^{abc} = 0 \text{ for } U(1))$$

$SU(2)_L \times U(1)_Y$ mixing (“electroweak unification”):

$$\begin{aligned} A^0 &= \cos \theta_W B + \sin \theta_W W^3 \\ Z^0 &= -\sin \theta_W B + \cos \theta_W W^3 \\ e &= \cos \theta_W g_1 = \sin \theta_W g_2 \\ \sin^2 \theta_W &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \\ \alpha_{em} &= \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \\ Q &= \frac{Y}{2} + I_3 \end{aligned}$$

The Higgs mechanism and masses

$$m_W = \frac{v}{2} g_W \quad (\Rightarrow v = \frac{2m_W}{g_W} \approx 246 \text{ GeV})$$

$$m_Z = \frac{v}{2} \sqrt{g_W^2 + g'^2} = \frac{m_W}{\cos \theta_W}$$

$$m_h = \sqrt{2\lambda} v \quad (\approx \frac{v}{2} \text{ experimentally})$$

$$g_{hWW} = g_W m_W$$

$$\frac{m_f}{v} \bar{\psi}_f (v + h(x)) \psi_f \propto m_f \bar{\psi}_f \psi_f + \frac{m_f}{v} \bar{\psi}_f h \psi_f \quad \Rightarrow \quad g_{hff} = \frac{m_f}{v} = \frac{g_W m_f}{2m_W}.$$

Simmetrie e leggi di conservazione

- La Fisica è la stessa oggi e un miliardo di anni fa. **Invarianza per traslazioni temporali** implica la **conservazione dell'energia**
- La Fisica è la stessa qui sulla Terra e nelle altre parti dell'Universo. **Invarianza per traslazioni spaziali** implica la **conservazione dell'impulso**
- La Fisica è la stessa se il laboratorio è rivolto a sud o a est. **Invarianza per rotazioni** implica la **conservazione del momento angolare**

C'e' una corrispondenza tra simmetrie e leggi di conservazione (Teorema di Emma Noether)

•Le simmetrie sono studiate da una branca della Matematica chiamata **Teoria dei Gruppi**

•Una simmetria e' specificata da un gruppo di trasformazioni, che caratterizzano i numeri quantici conservati ed il modo in cui si compongono



Oltre alle simmetrie (continue) di gauge, le interazioni possono soddisfare simmetrie discrete

- Parità (o inversione spaziale), (P)

•Fino alle meta' degli anni '50 si pensava che la Fisica fosse la stessa sotto **inversione spaziale (parita')**, cioè che se un processo puo' avvenire anche il processo visto allo specchio puo' verificarsi, con la stessa probabilita'

•Il **numero quantico conservato corrispondente e' detto parita'**

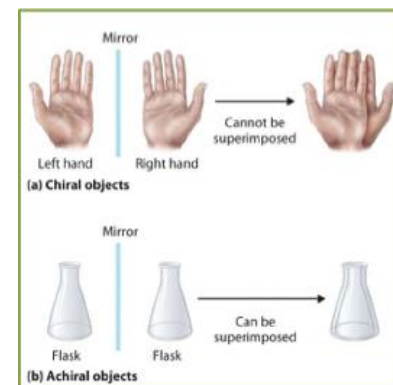
•Nel 1957 **Tsung Dao Lee e Chen Ning Yang scoprirono che la parita' e' conservata nelle interazioni forti ed elettromagnetiche ma NON nell'interazione debole**

- Coniugazione di carica (C)

•La **simmetria per coniugazione di carica vuol dire che cambiando tutte le particelle con le rispettive antiparticelle, senza modificare altri numeri quantici, il nuovo processo si verifica e con la stessa probabilita'**

•L'interazione debole **viola la coniugazione di carica, oltre che la parita'**

•L'interazione debole e' quasi invariante rispetto all'operazione combinata coniugazione di carica - parita' (CP). In realta' anche la simmetria CP e' violata, ma per una quantita' **piccola**



- Inversione temporale (T)
- → teorema TCP

Modello Standard:

teoria basata sul gruppo di simmetria di gauge $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

- Lo SM è la teoria attuale per le interazioni forti, elettromagnetiche e deboli
- Le tre interazioni fondamentali dello SM sono descritte da teorie di gauge
- E' in ottimo accordo sostanzialmente con tutte le misure sperimentali
- Tuttavia, non può essere la teoria ultima, quantomeno perché non include la Gravità Quantistica
- La Relatività Generale funziona per corpi macroscopici. Gli effetti quantistici della gravità diventano importanti a distanze molto piccole (cioè energie molto grandi: $M_{\text{Planck}} \sim 10^{19}\text{GeV}$). Tali effetti non sono ancora compresi

Ci sono anche altri motivi per cui lo SM non può essere la teoria ultima:

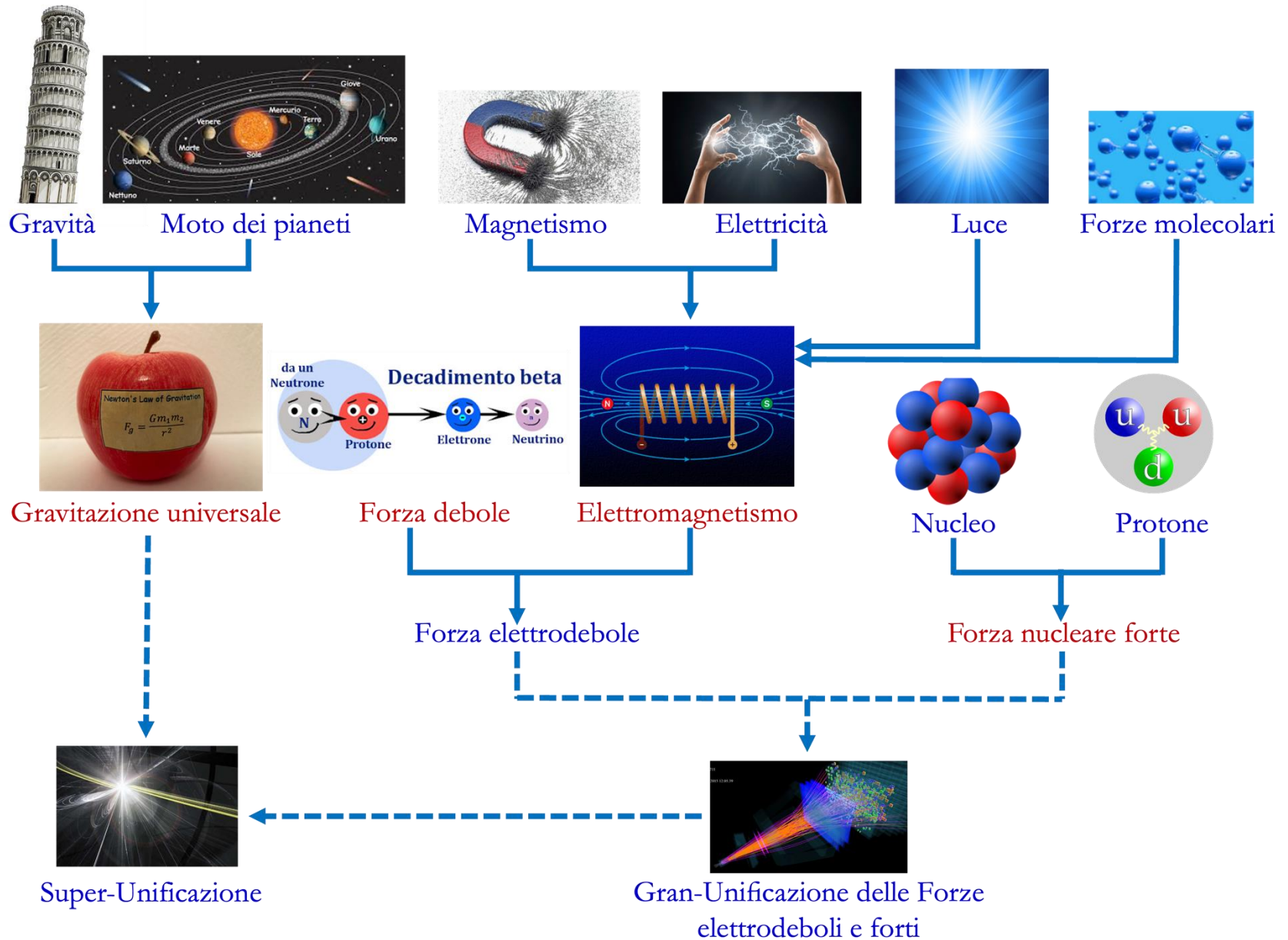
- Evidenza cosmologica di Materia Oscura (non formata dalle particelle dello SM) nell'Universo
- Per spiegare la prevalenza di materia sull'antimateria nell'Universo è necessario che sia violata la simmetria CP. La quantità di violazione di CP nello SM non è sufficiente a spiegare tale prevalenza
- Il ruolo dei neutrini con massa
- ...

Molti modelli di Nuova Fisica (oltre lo SM) sono stati formulati:

- Supersimmetria (tra bosoni e fermioni)
- Extra-dimensioni
- Higgs composto
- ...

Attualmente non si ha evidenza di effetti di Nuova Fisica oltre il SM agli acceleratori

L'unificazione delle forze della natura



Open Questions

➤ Interactions

4 instead of 1

So different

- ✓ acting on different classes of particles: the color one only on quarks
- ✓ well different intensities
- ✓ mediated by fields with different properties

? So weak Gravity

(at low energy) between 2 e^- :

$$\frac{F_{\text{Newton}}}{F_{\text{Coulomb}}} \approx 10^{-40}$$

➤ ? 3 Families

? So different mass

$$m_t \approx 10^8 m_e \quad m_\nu \approx 10^{-9} m_e$$

➤ ? Quarks & Leptons



G.U.T.

Shocking prediction: proton decay → the ultimate fate of the Universe does not provide for matter

➤ ? Bosons & Fermions



New symmetry

Supersymmetry

It correlates fermions & bosons: for each boson (fermion) exists a supersymmetric fermionic (bosonic) partner

Existence of new kind of matter: supersymmetric particles →
some of DM candidates

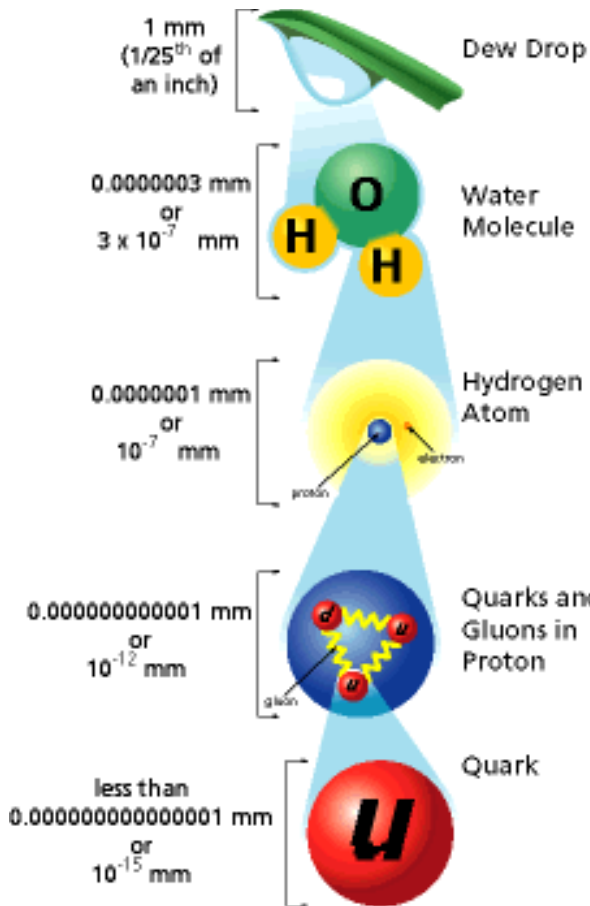
(only ≈ 4.5 % of the matter of the Universe is made of ordinary particles)

Open Questions

➤ Gravity incompatible with Quantum Mechanics

Is this related with the “weakness” of the gravity?

➤ Space-time has 3 + 1 dimensions



addition of extra spatial dimensions through which only gravity propagates, while other interactions act only in ordinary spacetime → solution of the hierarchical problem

modification of Newton's law at short distances

➤ Are the particles really point-like?

From String Theory

further microscopic level: particles are not point-like, but small (10^{-33} cm) oscillating rings

Different oscillating states of the string → different particles

Astroparticle Physics

interaction universal laws (independent on time and place)

→ extrapolation into the past (and the future)

