

# Particelle Elementari e Interazioni Fondamentali

Che sono

Come le studiamo

Perché ?



se non lo capiamo  
perché impegnarsi ?

*Con immagini da siti Web*

*CERN, CPPM Marsiglia, Fermilab, LAPP Annecy e Particle Adventure*

Le questioni semplici  
sono sovente le più  
fondamentali e  
profonde

Esempio : che cosa è la "massa" ?

# Che sono

Costituenti fondamentali della materia



*Particelle Elementari*

Origine del loro legame (o repulsione)



*Interazioni Fondamentali*

# Da Democrito e Epicuro ai versi di Lucrezio

(*De rerum natura, Libro I versi 483 e 548*)

*I corpi a loro volta si suddividono in elementi primordiali e in oggetti formati dalla coesione delle particelle elementari.*  
*Invece gli elementi primordiali non vi è forza capace di scinderli; prevalgono sempre per la solidità del loro corpo.*

.....

*Le particelle elementari sono dunque di solida semplicità,*  
*altrimenti, conservandosi attraverso le epoche, non potrebbero già da tempo infinito rinnovare le cose.*

*Corpora sunt porro partim primordia rerum,  
partim concilio quae constant principiorum.  
Sed quae sunt rerum primordia, nulla potest vis  
stinguere; nam solido vincunt ea corpore demum.*

.....

*Sunt igitur solida primordia simplicitate  
nec ratione queunt alia servata per aevum  
ex infinito iam tempore res reparare.*



# Tito Lucrezio

(~ 97-55 aC)

"Nasce il poeta Tito Lucrezio; questi, divenuto pazzo per un filtro d'amore, dopo aver scritto nei momenti di lucidità diversi libri in seguito pubblicati da Cicerone, si suicidò all'età di 44 anni."

Annotazione di S. Gerolamo (IV secolo dC) al *Chronicon* di Eusebio di Cesarea

*De Rerum Natura* era poco noto nel Medioevo. Lucrezio era considerato un lunatico ed ateo. Il testo venne diffuso dopo la scoperta nel 1417 di un antico manoscritto da parte di Poggio Bracciolini, umanista e segretario del Papa.



Lucretius, *De Rerum Natura*  
Copiato da Girolamo di Matteo de Tauris per Sisto V, 1483  
Roma, Biblioteca Vaticana

E nel 1905:



La massa è una forma di energia

(se lo avessimo saputo prima, avremmo posto  $c=1$  e fatto a meno di una delle due)

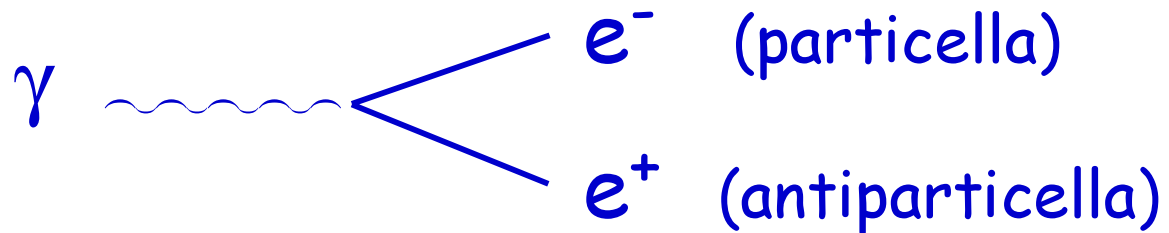
A photograph of the handwritten equation  $E = mc^2$  on a piece of paper. A red diagonal line is drawn through the  $c^2$  term, crossing the equals sign.

niente  $c^2$   
se  $c=1$

energia 

 massa

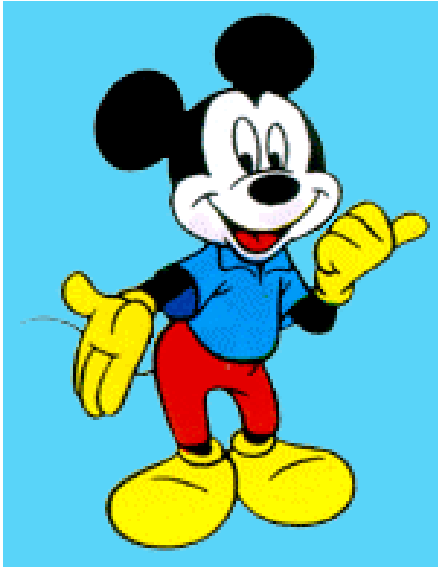
Esempio :



Le particelle non sono più "solide e immutabili"

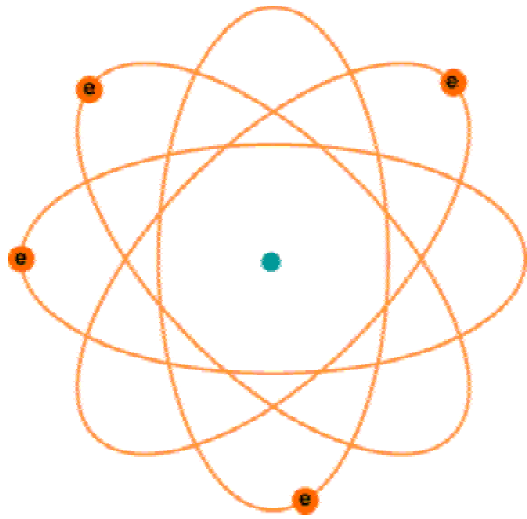
ma le radici filosofiche (Democrito, Epicuro e Lucrezio) restano ben presenti

# Particelle Elementari



Le particelle elementari di oggi  
non lo saranno forse più domani

L'essere considerata particella "elementare"  
dipende dal momento dello sviluppo scientifico



L'atomo non è più considerato come "elementare" :

è formato da elettroni e da un nucleo,

il nucleo è formato da ...

## Particelle "Elementari"

**Quindi:**

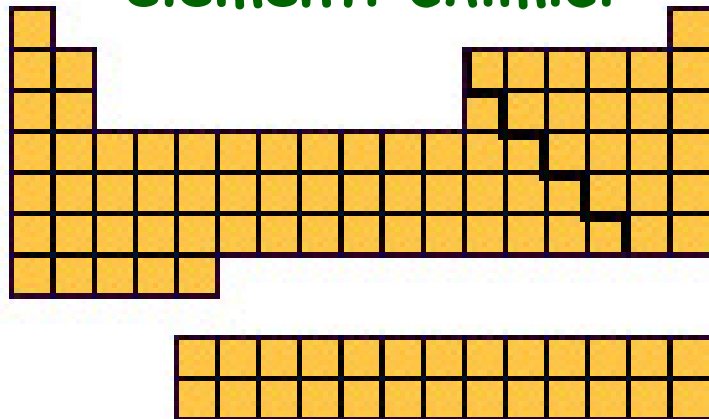
Le particelle elementari di oggi non lo saranno forse più domani.

L'essere considerata "particella elementare" dipende dal momento dello sviluppo scientifico



Regolarità → ?

Tavola periodica degli  
elementi chimici



Fisica atomica

protone, neutrone, elettrone  
per "costruire"  
tutti gli elementi chimici

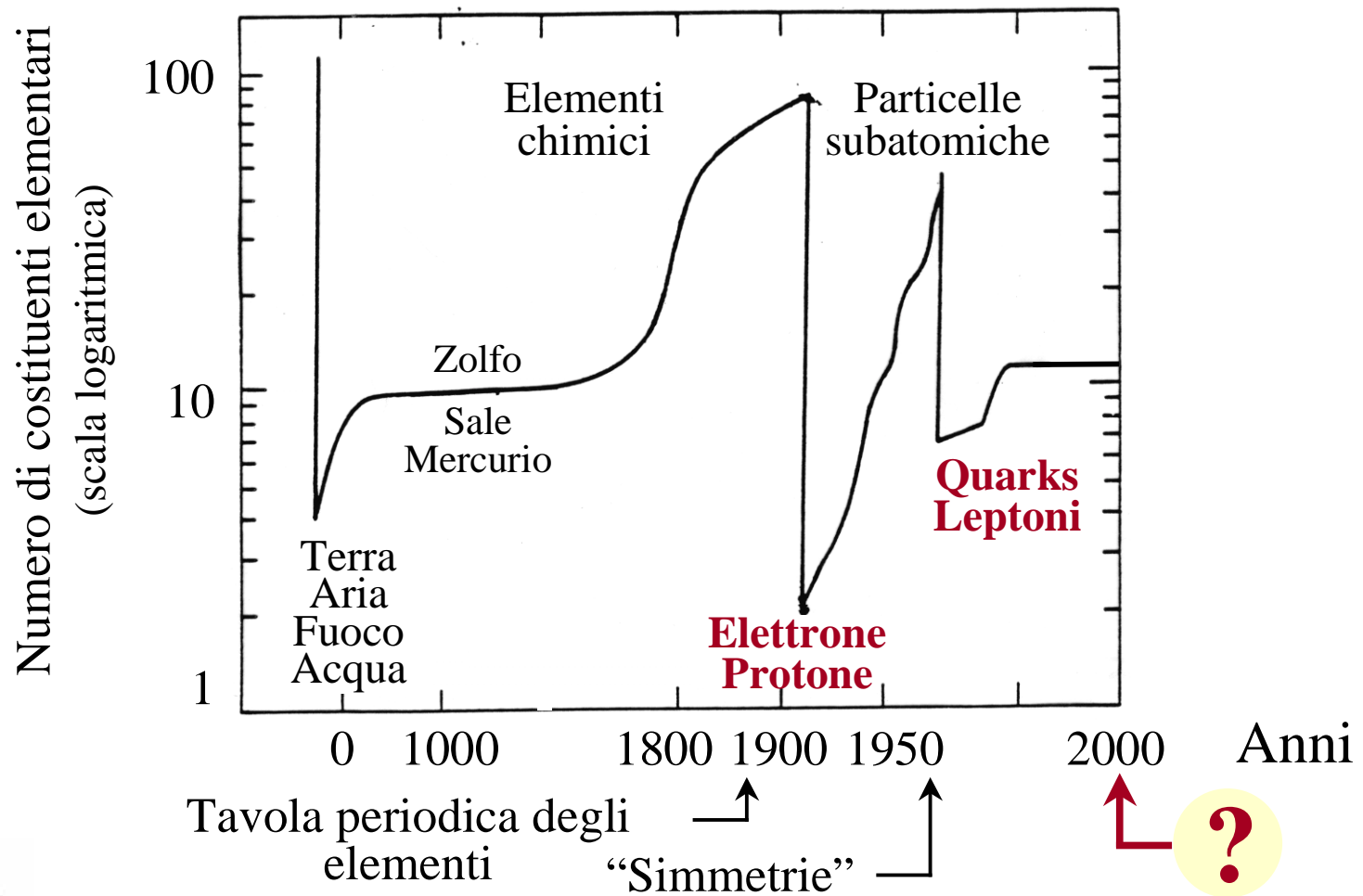
Le particelle  
"elementari" di oggi

Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	<i>e</i> electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		



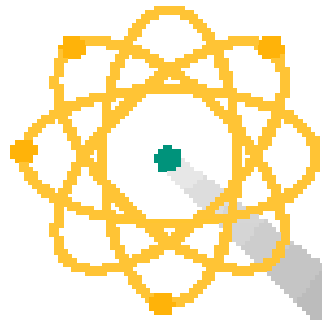
?

# Storia dei costituenti fondamentali della materia



Democrito : la varietà e il divenire di quanto osserviamo in natura proviene dalle diverse combinazioni di “costituenti elementari”

( 60 miliardi di individui viventi : tutti con un diverso DNA)



**Atomo**  
 $\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$   
elettro-magnetica  
 $E \sim 1 \text{ eV}$



**Nucleo**  
 $\sim 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm}$   
"forte"  
 $E \sim 1 \text{ MeV}$



**Nucleoni (p o n)**  
 $\sim 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm}$   
"forte"  
 $E \sim 100 \text{ MeV}$

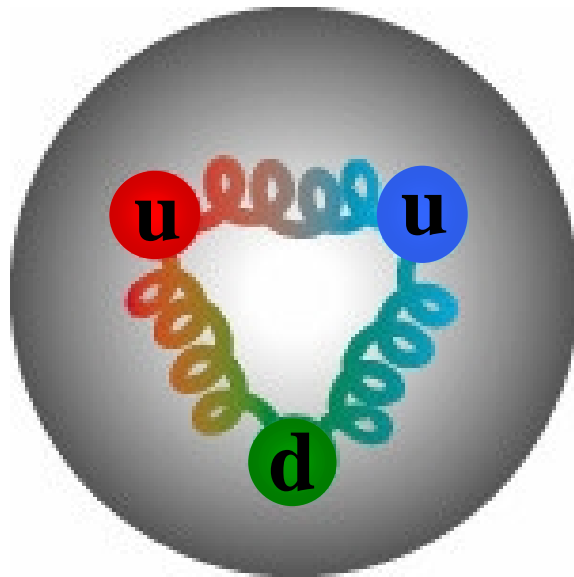


**Quarks u, d, ...**  
(limite delle nostre attuali conoscenze)  
Sono veramente "elementari" ?

**Dagli atomi  
ai quarks**

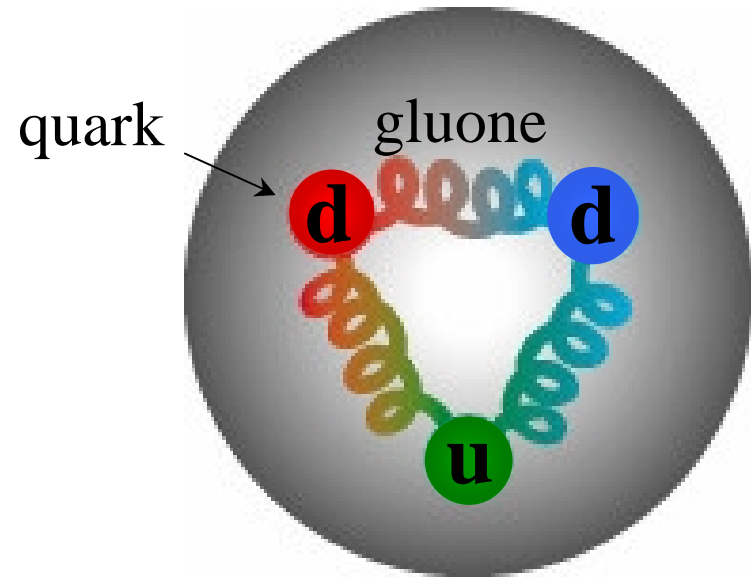
**Dimensioni**  
**Interazioni**  
**Energie di  
legame**

Lo scandalo delle "cariche elettriche" frazionarie:  $Q_u = +2/3$  e  $Q_d = -1/3$



**protone**

$$Q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$$



**neutrone**

$$Q = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$$

Quarks con "carica di colore"  
Forze "di colore" trasmesse dai "gluoni"  
(mediatori delle "interazioni forti" )

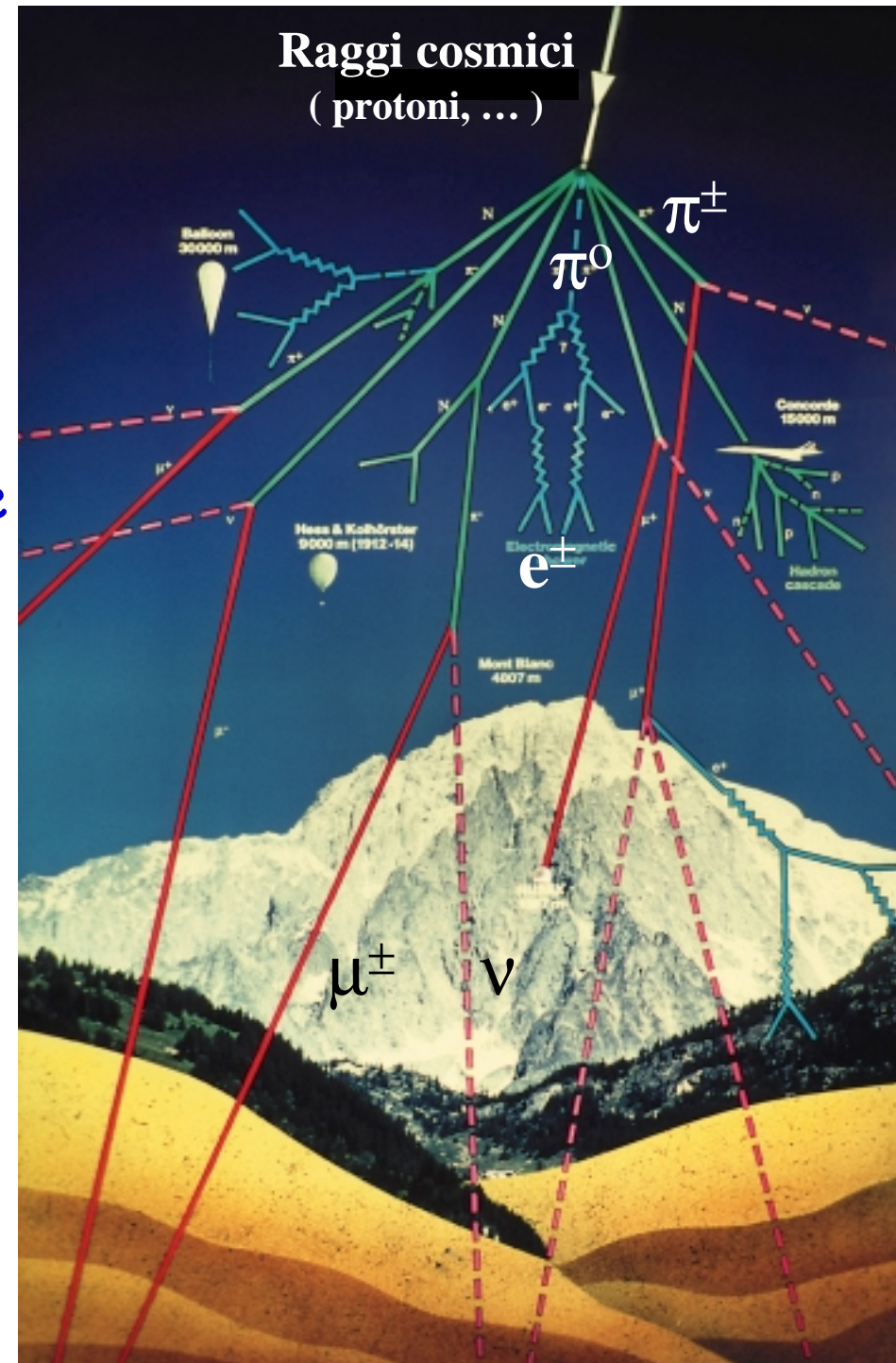
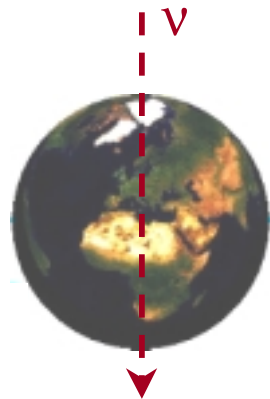
Materia ordinaria : p, n , e<sup>-</sup>

## La pioggia cosmica

Particelle elementari di altissima energia sono generate in lontane galassie, con meccanismi ancora sconosciuti

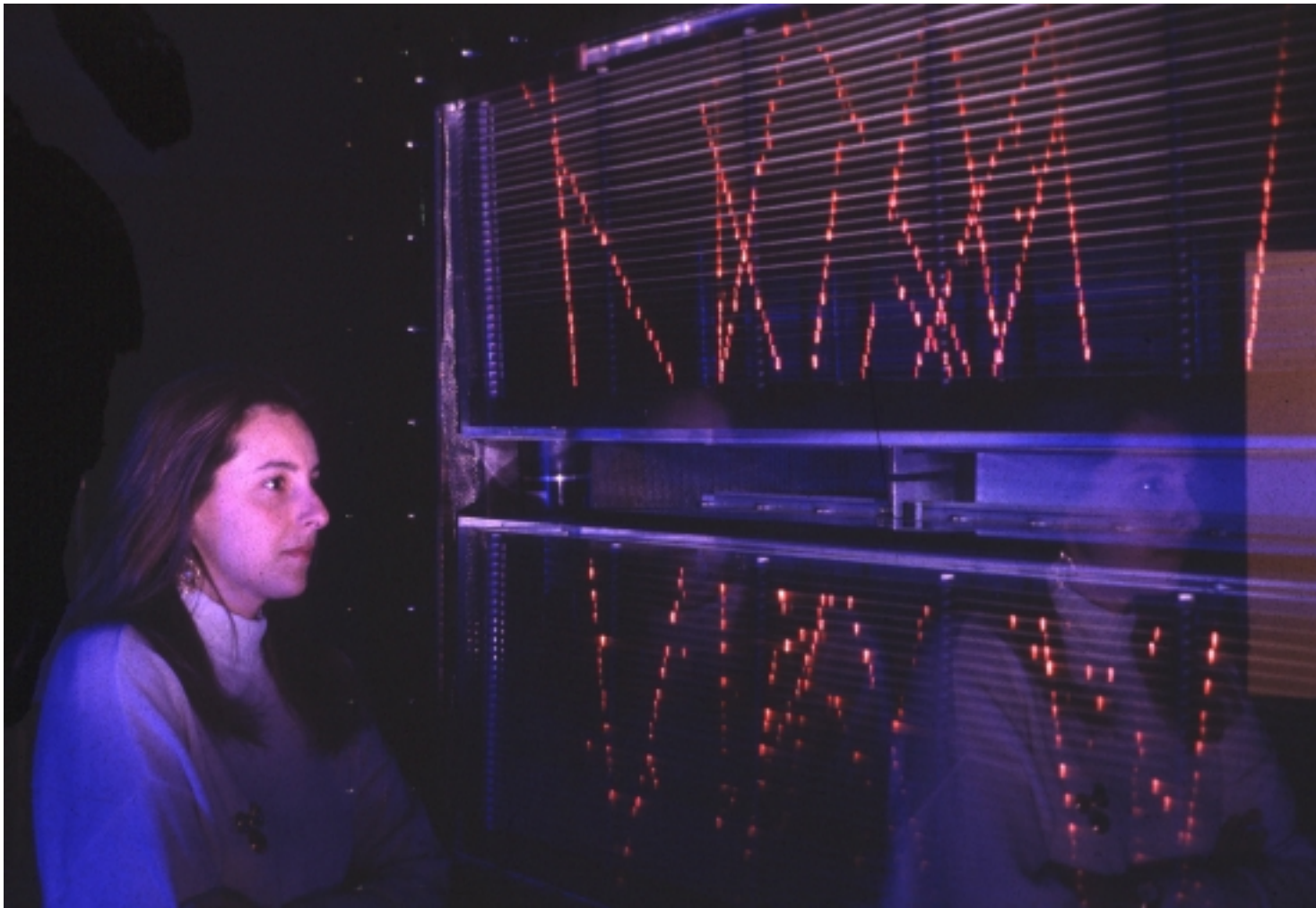
Interagendo nell'atmosfera generano "sciami" di particelle

**I neutrini attraversano la terra !**





**E la possiamo anche "vedere"**  
(mediante "rivelatori di particelle")



Tracce di particelle visualizzate da una "camera a scintilla"

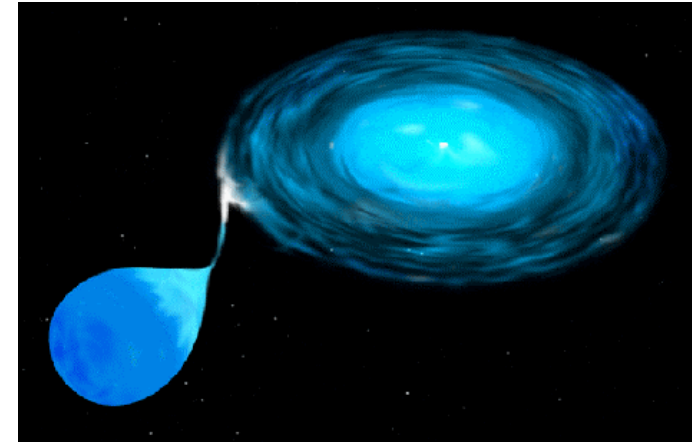
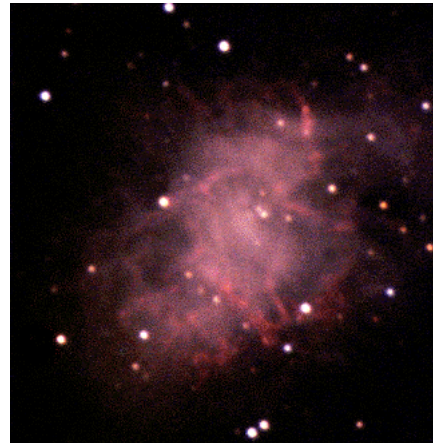
# Sorgenti di raggi cosmici e neutrini di alta energia

(i neutrini sono perfetti messaggeri di conoscenza : si propagano su enormi distanze senza interagire o venire deflessi da campi magnetici)

## Sorgenti galattiche

Resti di Supernovae

Sistemi binari attorno a pulsar (stella di neutroni in rotazione rapida) o buco nero

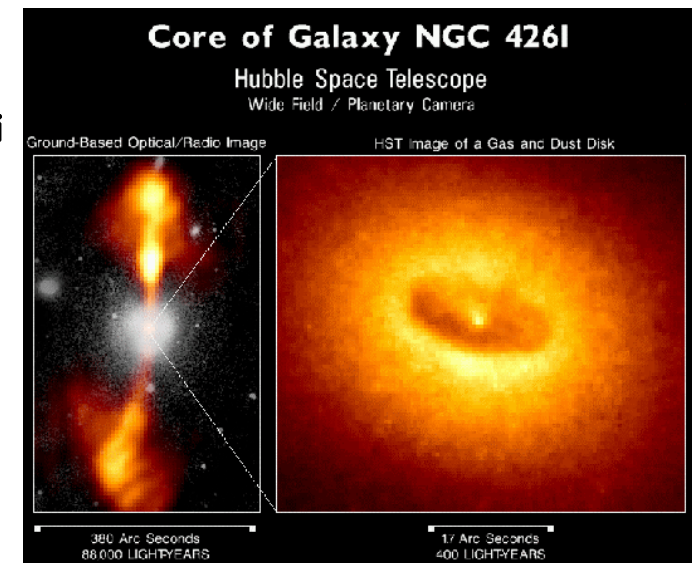
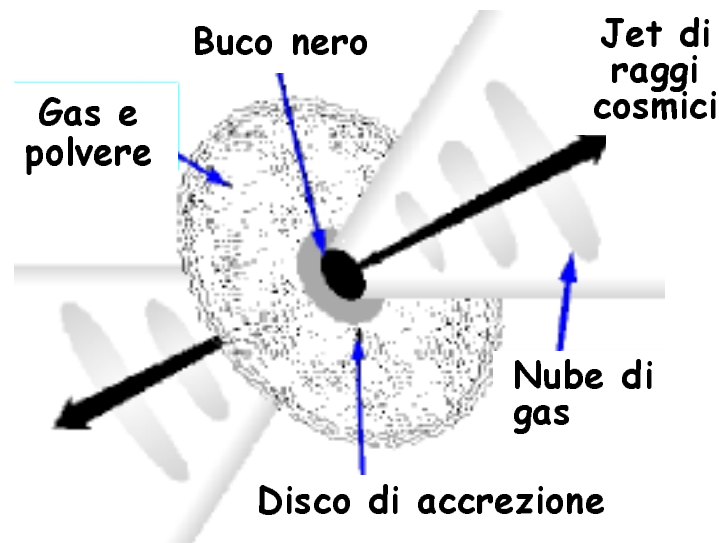


## Sorgenti extra galattiche

Nuclei Galattici Attivi (quasars)



altissime energie

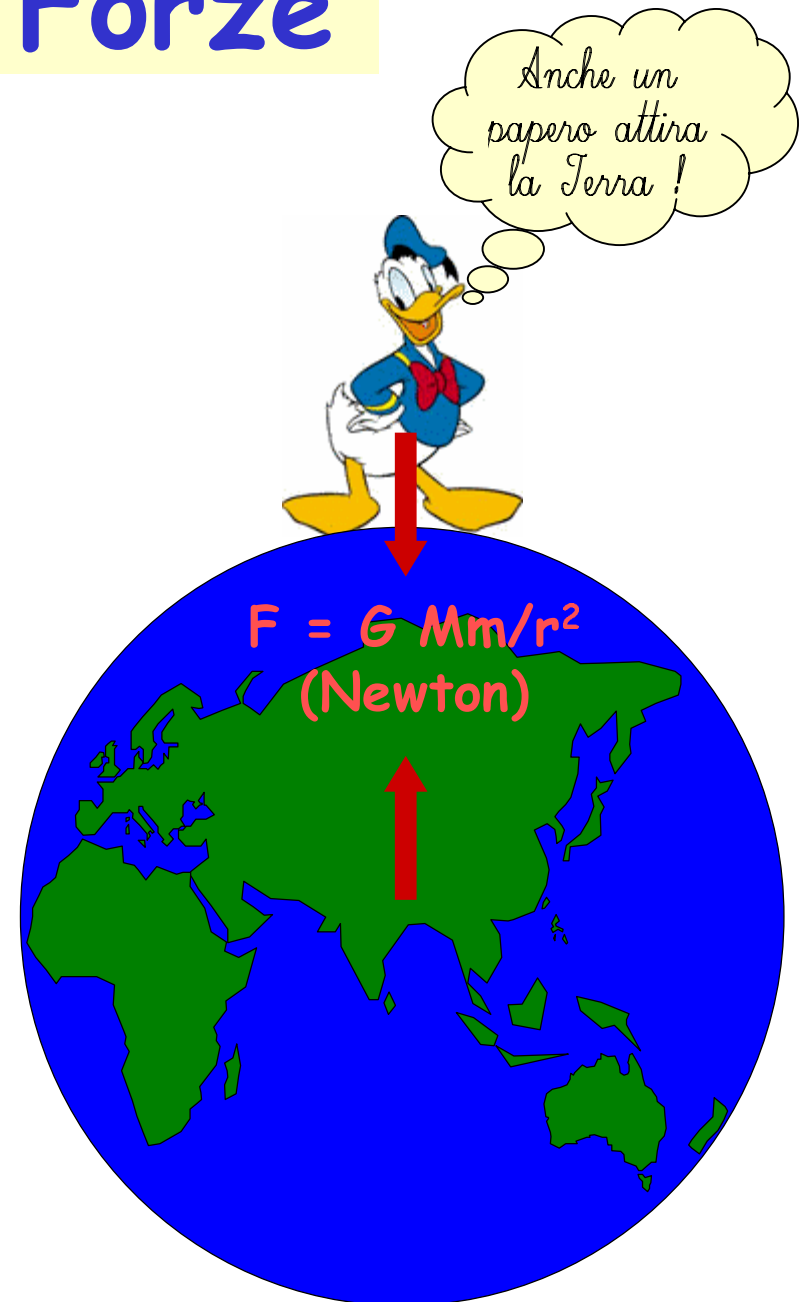


# Interazioni e Forze

Pensiamo solo alla forza con cui la terra ci attrae, e non a quella con cui noi attraiamo la terra!



Il concetto di "interazione" è più completo



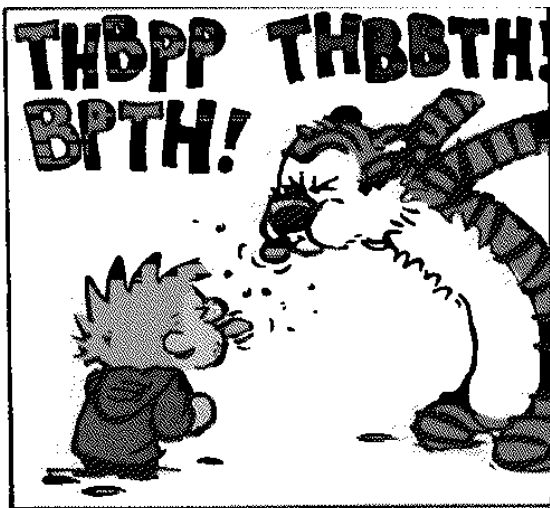
# Ogni *interazione* ha un *mediatore*

(anche i mediatori sono particelle !)

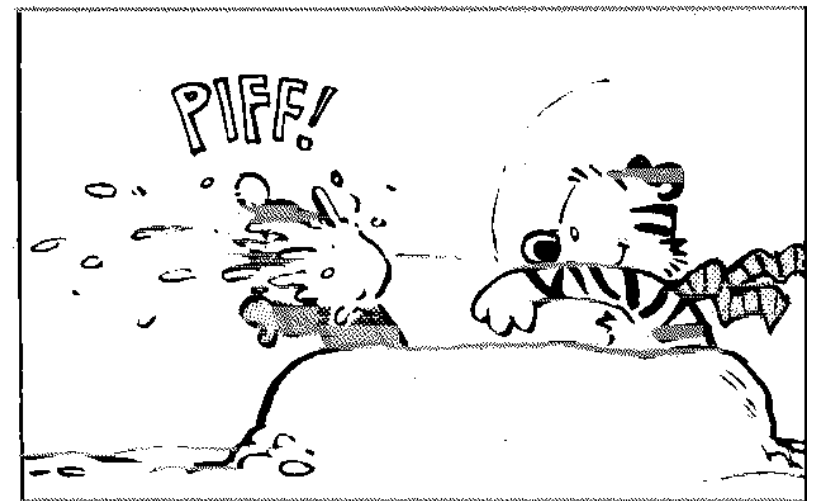
## Dinamica classica

Interazione "a distanza"

$$Q \quad q \quad F = q E$$



## Dinamica Quantistica Relativistica



# Le tre interazioni "fondamentali"

	Intensità relativa	Carica	Mediatori	Agisce su : quark e <sup>-</sup> ν	La vediamo in :
Forte	1	colore	Gluoni ( $m_g = 0$ )	✓	Nucleo atomico
Elettro-magnetica	$\sim 10^{-3}$	elettrica	Fotone ( $m_\gamma = 0$ )	✓ ✓	Atomo, molecole, DNA, ...
Debole	$\sim 10^{-5}$		Bosoni $W^\pm, Z^0$ ( $m \sim 100 \text{ GeV}$ )	✓ ✓ ✓	Decadimenti $\beta$ radioattivi
Gravitazionale*	$\sim 10^{-38}$	massa	Gravitone ?	✓ ✓	Corpi celesti



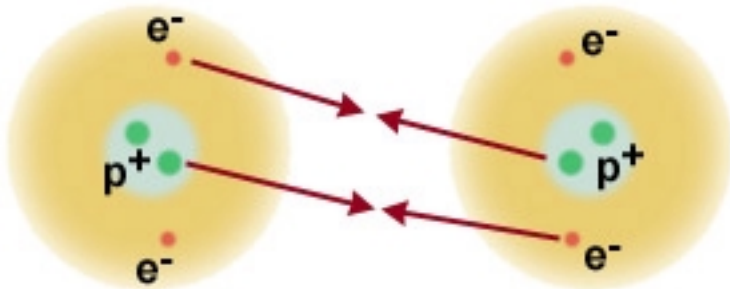
- ▶ Dinamica classica : per scambio di mediatore solo repulsione
- ▶ Dinamica Quantistica : repulsione o attrazione

\* totalmente trascurabile per particelle elementari  
nei corpi materiali appare molto intensa solo perché le cariche (masse) sono tutte positive



# Interazioni

elettro-magnetica ➔ coesione atomica e molecolare



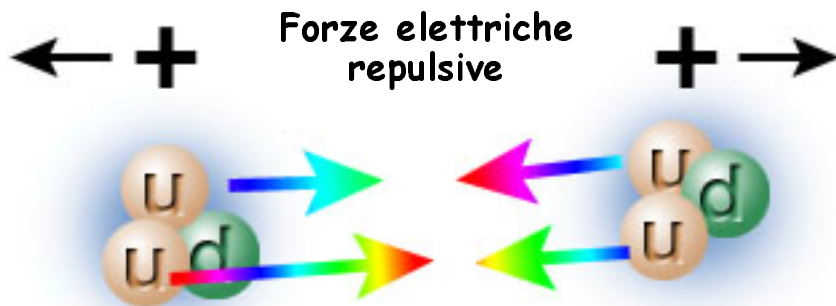
$\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$  ;  $E_{\text{legame}} \sim 1 \text{ eV}$

Gli **atomi** sono elettricamente neutri, ma si ha il legame molecolare

E' spiegata dalla meccanica quantistica

E' come se prevalessero le forze attrattive

forte ➔ coesione nucleare



$\sim 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm}$  ;  $E_{\text{legame}} \sim 1 \text{ MeV}$

Le **interazioni "forti"** (carica di colore) dominano nel nucleo atomico

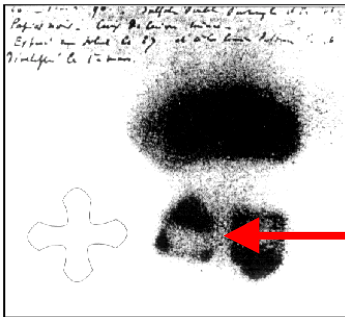
Il colore è complessivamente neutro, ma si ha la fortissima **coesione nucleare**

# Interazione "debole"

## Becquerel (1896)

lastre fotografiche  
riposte al buio da vennero  
trovate impressionate !

Creazione spontanea di  
radiazione



Una croce al  
merito ha  
assorbito le  
radiazioni :  
la sua "ombra"

Decadimento  $\beta$  nucleare  
elementi chimici non immutabili

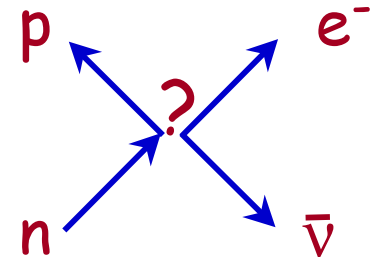


## Ipotesi del neutrino (Pauli 1930)



## Teoria di Fermi (1933)

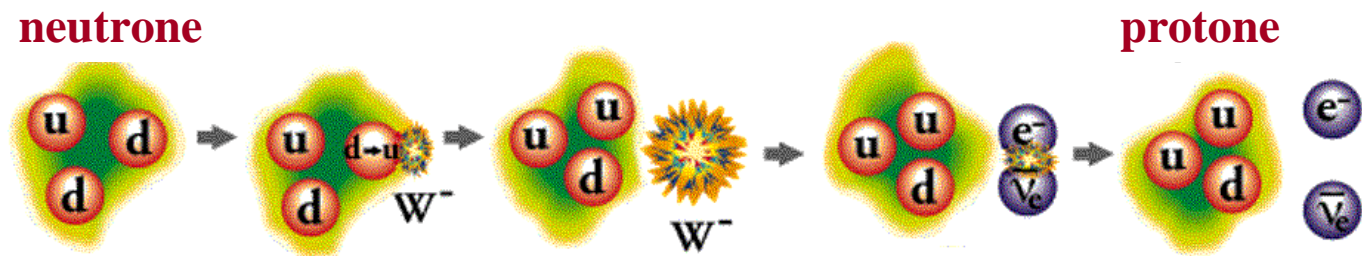
ancora senza mediatore



# E ora è diventata elettro-debole

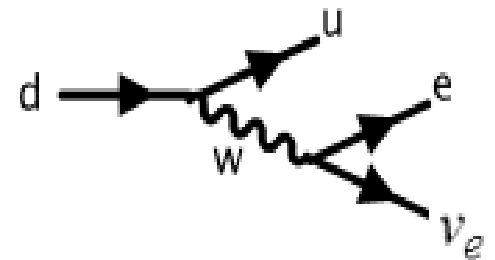
## Decadimento $\beta$ oggi :

scambio di  $W$  tra quarks nelle interazioni elettro-deboli



Descritto sinteticamente e quantitativamente da

*“Diagramma di Feynman”*



Ma le proprietà del neutrino restano un mistero,  
a cominciare dalla sua massa

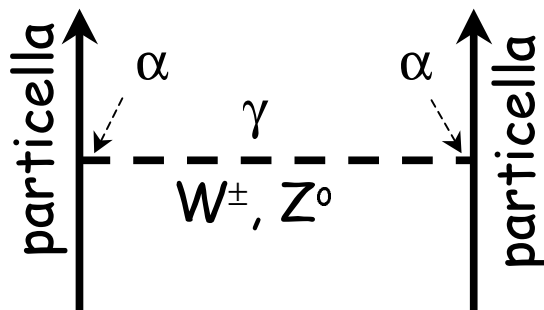
# QuantoElettrodinamica e QuantoCromodinamica

(le attuali teorie delle interazioni elettro-deboli e forti)

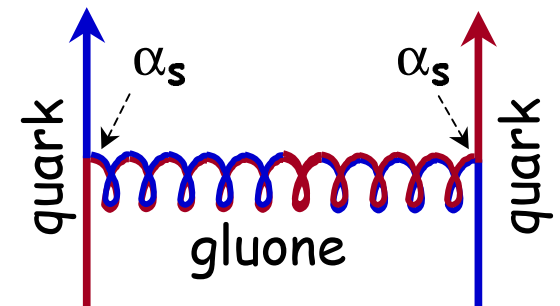
"costante di accoppiamento" = probabilità di emissione del mediatore  
( $\alpha$  per QED,  $\alpha_s$  per QCD)

Interazioni *diverse* = *diversa* costante di accoppiamento

**QED**  
(carica elettrica)



**QCD**  
(carica di colore)



*"Diagrammi di Feynman"*



se scritti in termini di (probabilità)<sup>1/2</sup> anziché di probabilità  
[ come prescrive la Meccanica Quantistica ]

# L'unificazione elettro-debole

Interazioni elettromagnetiche e deboli :

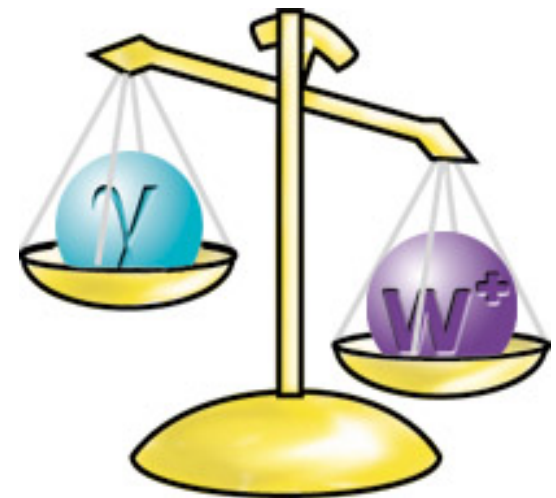
- Stessa "costante di accoppiamento"  $\alpha = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137$ 
  - Fondamentalmente non sono diverse  
(lo è invece l'interazione gravitazionale : costante  $G$ )

Ma viene scambiato un diverso mediatore

e.m : fotone  $\gamma$    
deboli:  $W^\pm, Z^0$  

Perché interazioni "deboli" ?

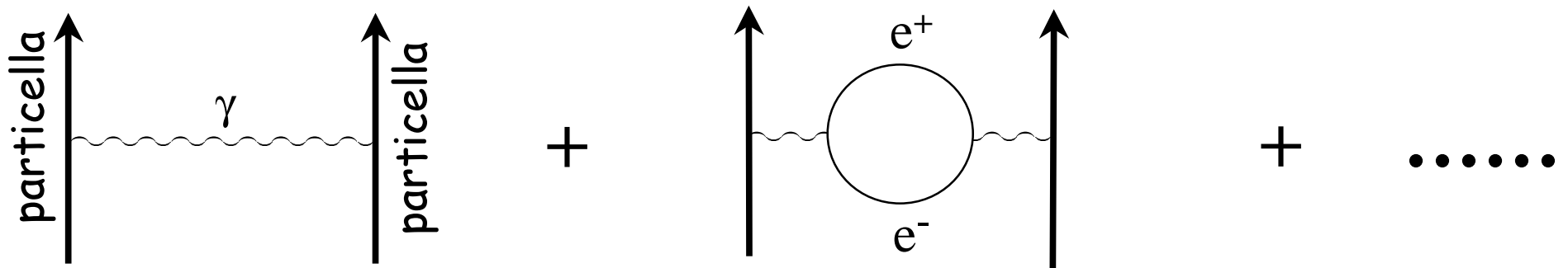
- $W^\pm$  o  $Z^0$  : massa (energia a riposo) estremamente grande
- piccolissima probabilità di scambio





# Le teorie quantistiche animano il vuoto !

- Tutto regolato da probabilità
- Le probabilità per le varie eventualità vanno sommate
- Bisogna anche considerare la probabilità che :
  - il mediatore ( $\gamma$ ) emetta una coppia particella-antiparticella
  - queste si annichilino nel mediatore stesso
- E ancora tutta una serie di altre eventualità ...




Lo spazio tra le due particelle è popolato da coppie "virtuali" particella-antiparticella

**"Polarizzazione del vuoto"**

# Tutto in termini di particelle

(anche i mediatori delle interazioni)


## Costituenti della materia

( spin  $\frac{1}{2}$  → "fermioni")

quarks: u, d, ...

leptoni:  $e^-$ , ...

## Mediatori delle interazioni

( spin 1 → "bosoni")

$\gamma$ ,  $W^\pm$   
gluoni

con i quarks si costruiscono gli "adroni"

"barioni" qqq : spin  $\frac{1}{2}$ , ...

protone, neutrone, ...

"mesoni" qq : spin 0, 1, ...

pioni, ...

protoni e neutroni formano i "nuclei atomici"

nuclei atomici ed elettroni formano gli "atomi"

.....

# Interrogativi

## Esiste il “bosone di Higgs” ?

Un “pezzo mancante” nella attuale teoria : necessario.

## Il neutrino ha massa ?

Nuova visione della fisica delle particelle  
Implicazioni per astrofisica e cosmologia

## “Grande Unificazione” elettro-debole-forte ?

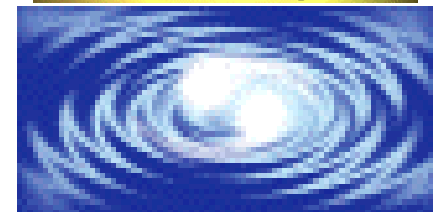
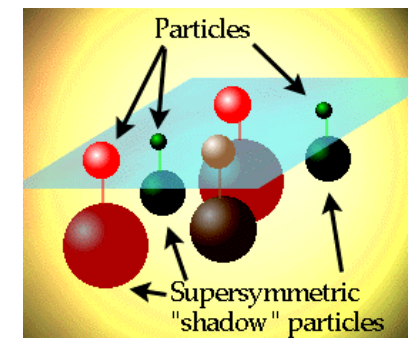
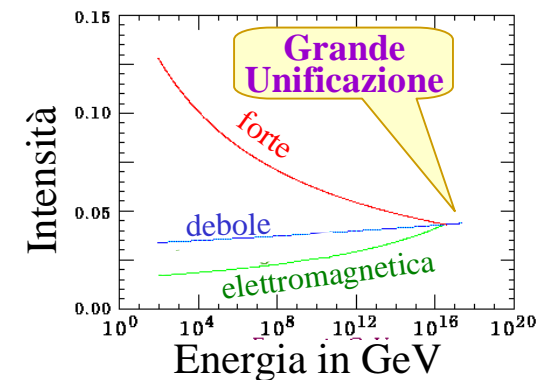
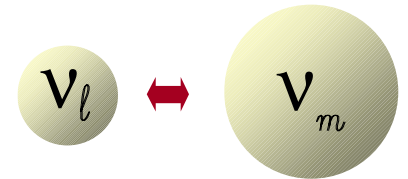
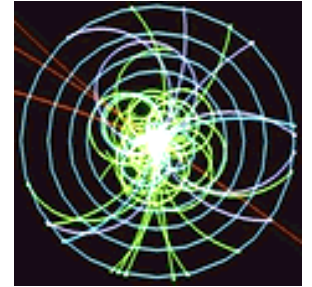
Proseguire sulla strada iniziata da Newton con la  
Gravitazione Universale

## Super-simmetria?

Significato delle simmetrie nelle “tavole” delle particelle

## “Onde” gravitazionali ?

Verifica predizione dalla relatività generale.

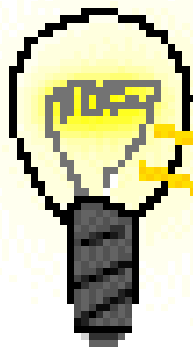


**Come :**

*acceleratori di particelle  
rivelatori e esperimenti*

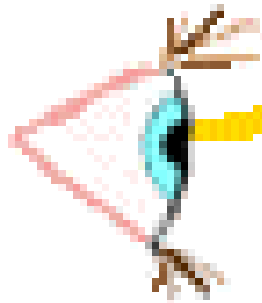
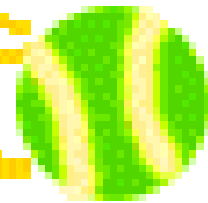
# Fare un esperimento è "osservare"

sorgente

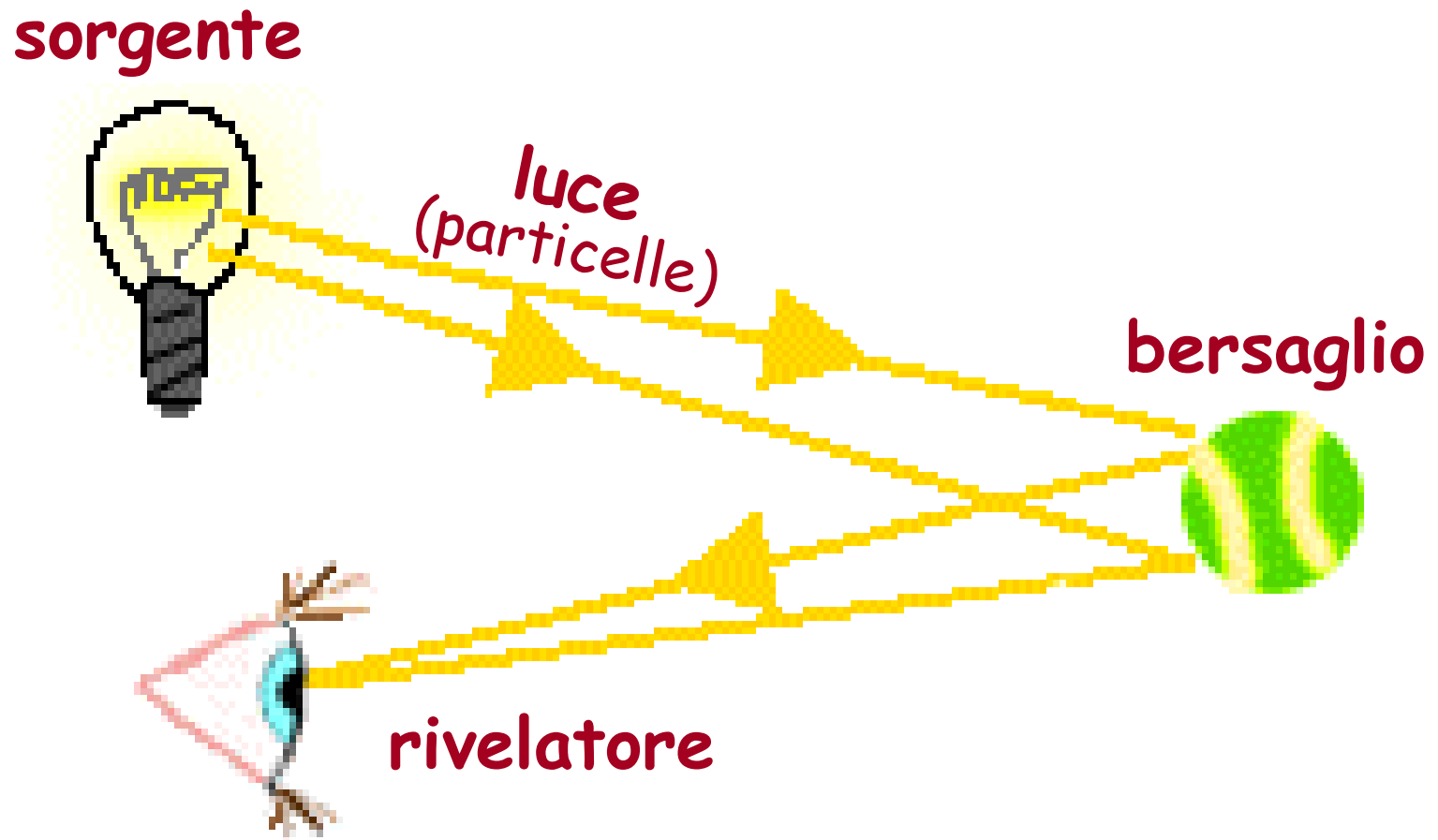


luce  
(particelle)

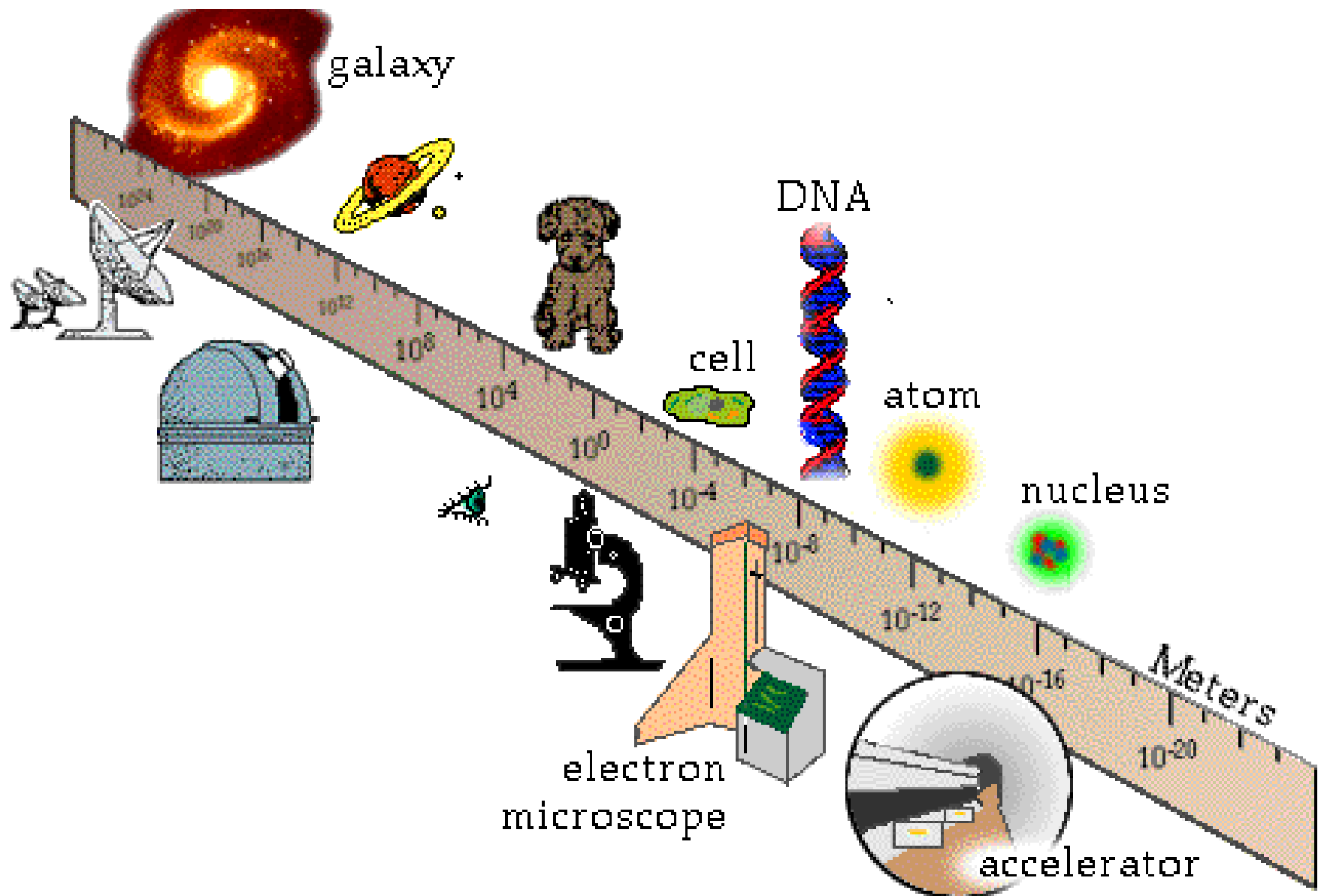
bersaglio



rivelatore

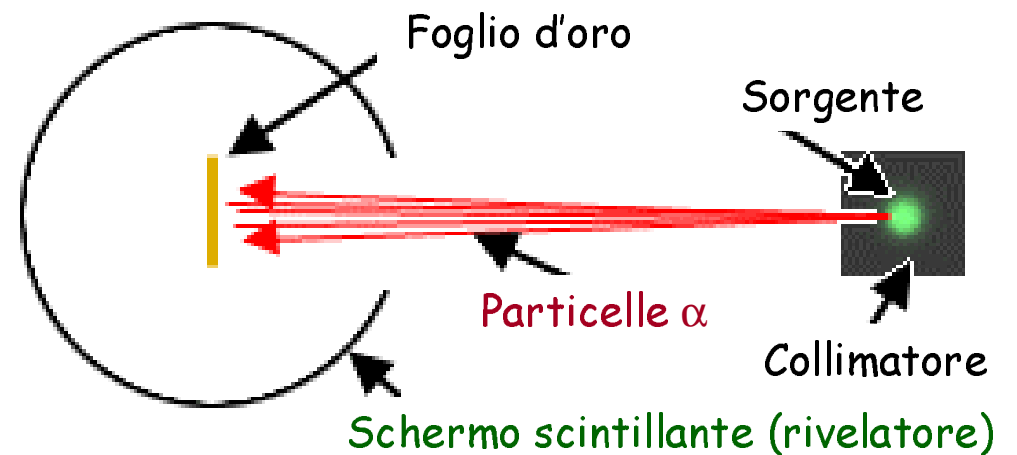


# Strumenti e dimensioni degli oggetti da "osservare"

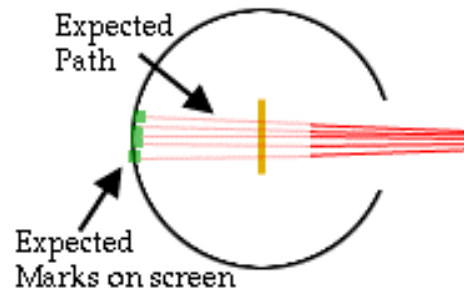
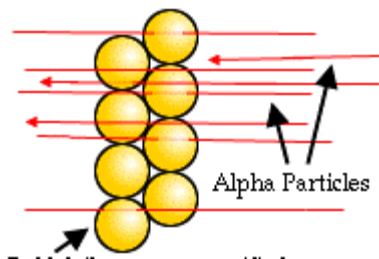




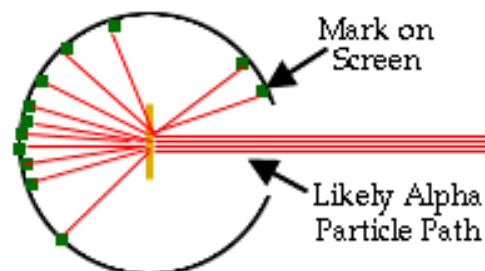
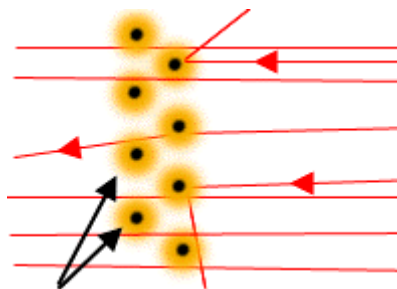
# Un classico intramontabile: l'esperimento di Rutherford



## Verifica di ipotesi alternative sulla struttura interna degli atomi

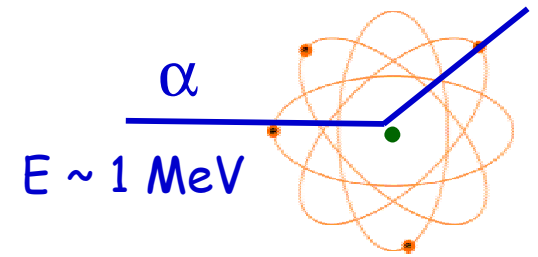


Atomi "amorfi"  
⇒  
solo piccoli angoli di diffusione



Atomi con struttura interna  
⇒  
collisioni dure con nuclei  
⇒  
angoli di diffusione inaspettatamente grandi !

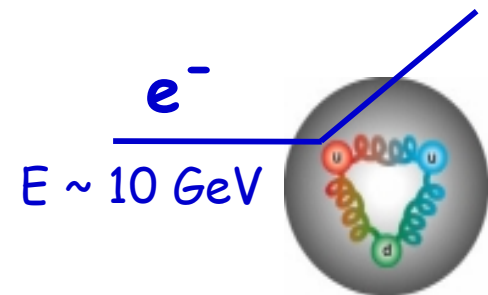
L'esperimento di Rutherford  
come inizio di una metodologia



L'osservazione di diffusioni fornisce informazioni  
sulla struttura interna di oggetti sconosciuti

(una radiografia evidenzia strutture interne attraverso una misura di  
**assorbimento** : meno sensibile, quindi forti dosi di radiazione)

Metodologia "alla Rutherford" anche per scoperta dei  
**quarks**  
all'interno di protone e neutrone

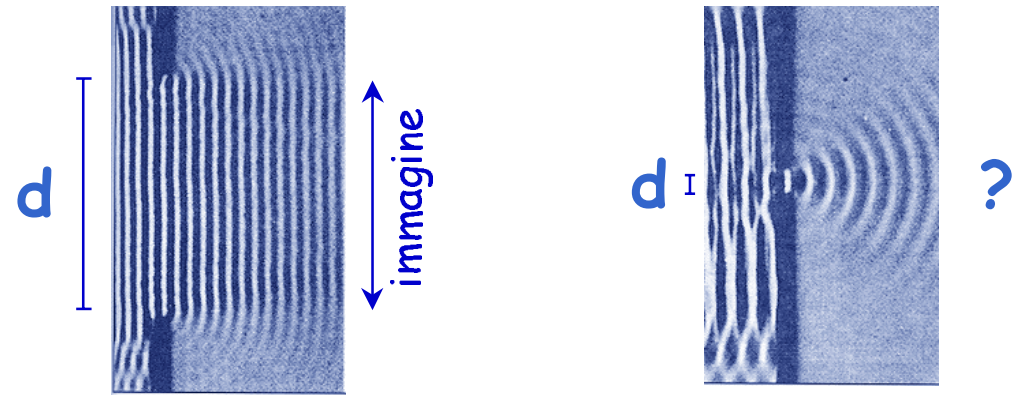


Per indagare oltre servono altissime energie  
Perché ? Come fare ?

# Lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) e potere risolutivo

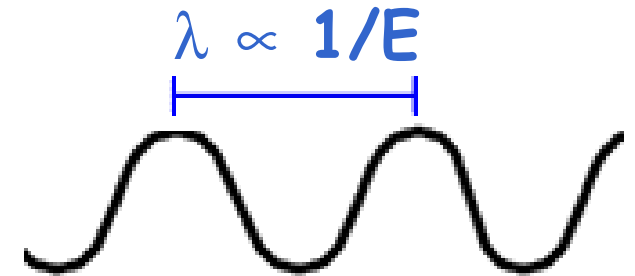
## Fisica classica

Immagine visibile se  
 $\lambda \ll d$



## Fisica quantistico-ondulatoria

Particelle rappresentate da un'onda



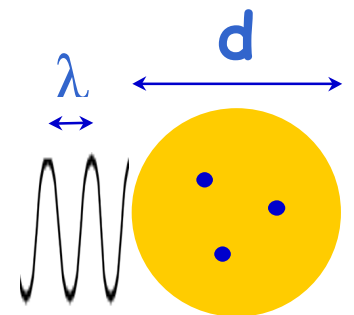
## Studio di particelle subnucleari

$$\lambda \ll d \sim 10^{-13} \text{ cm}$$



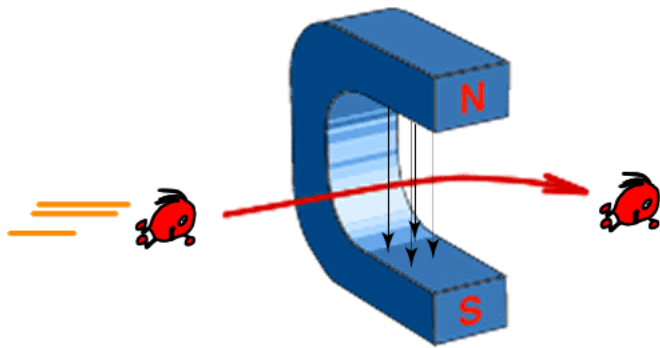
Sorgenti di particelle ad altissima energia

**Acceleratori di particelle**

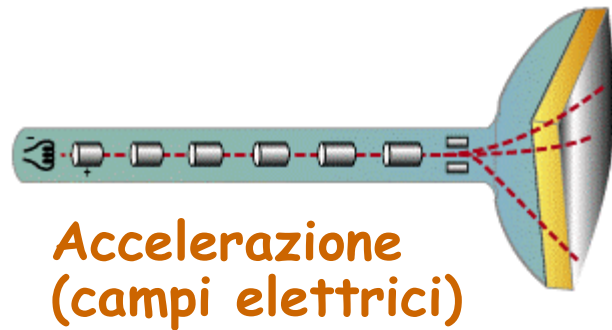
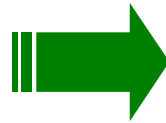


# Acceleratore circolare di particelle

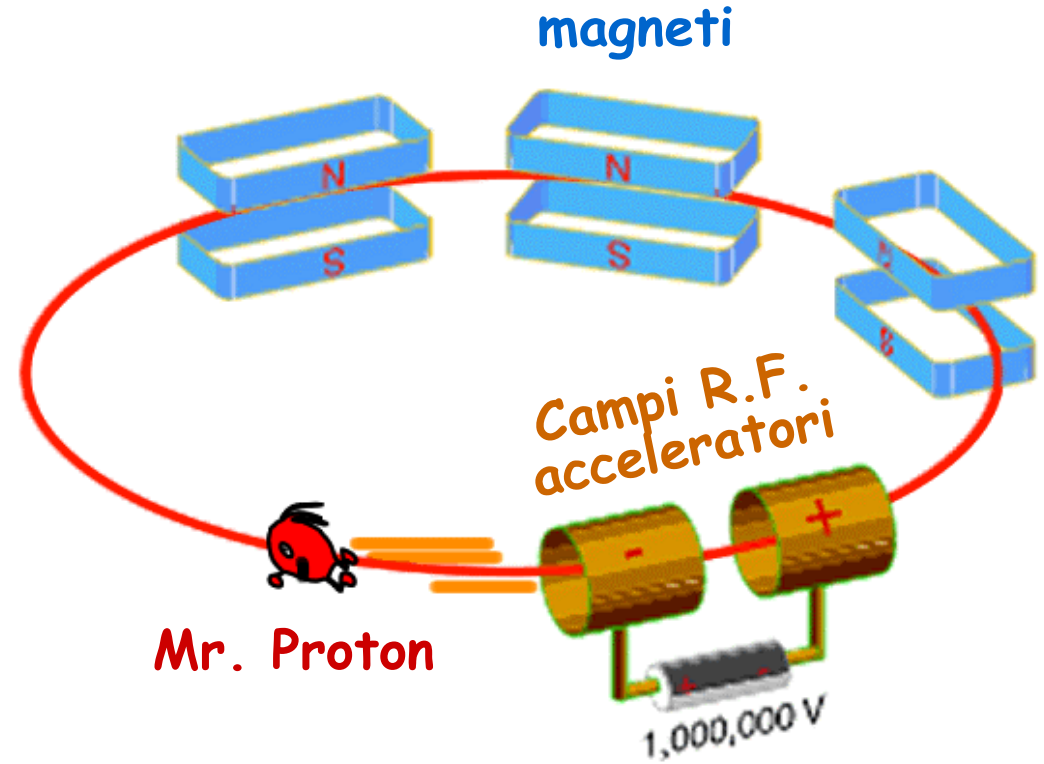
Deflessione  
(campi magnetici)



+



Accelerazione  
(campi elettrici)

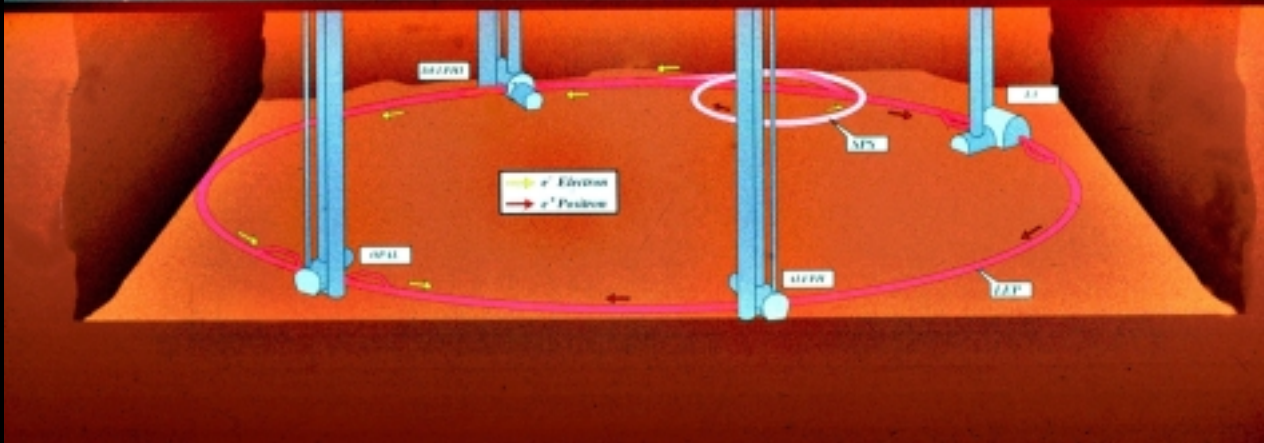
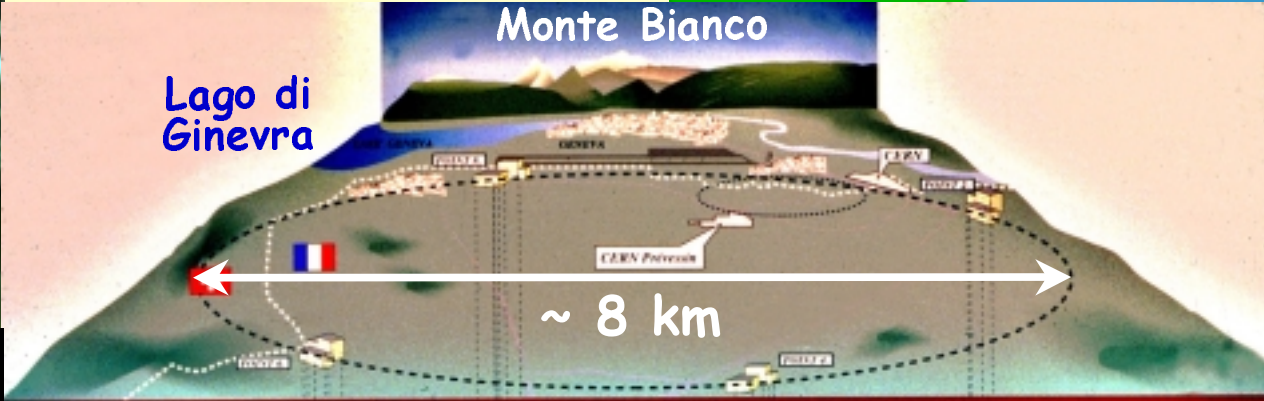
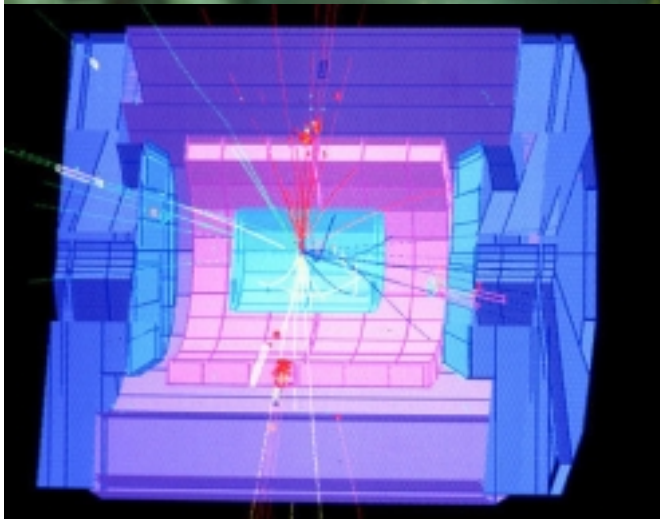






# I grandi acceleratori di particelle nel Laboratorio Europeo CERN (Ginevra)

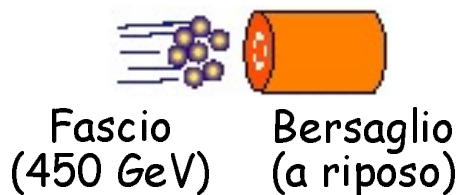
SPS, LEP, ... LHC



## Esperimenti "a bersaglio fisso"

Fascio di particelle su un bersaglio

Densità dei corpi solidi → alte  
probabilità di interazione  
Adatti per ricerca di eventi rari

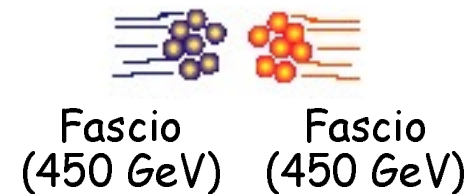
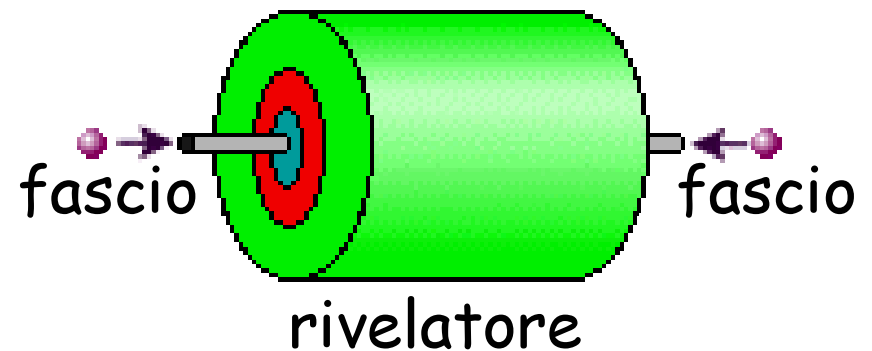


Energia di collisione 29 GeV

## Esperimenti "con collisionatori"

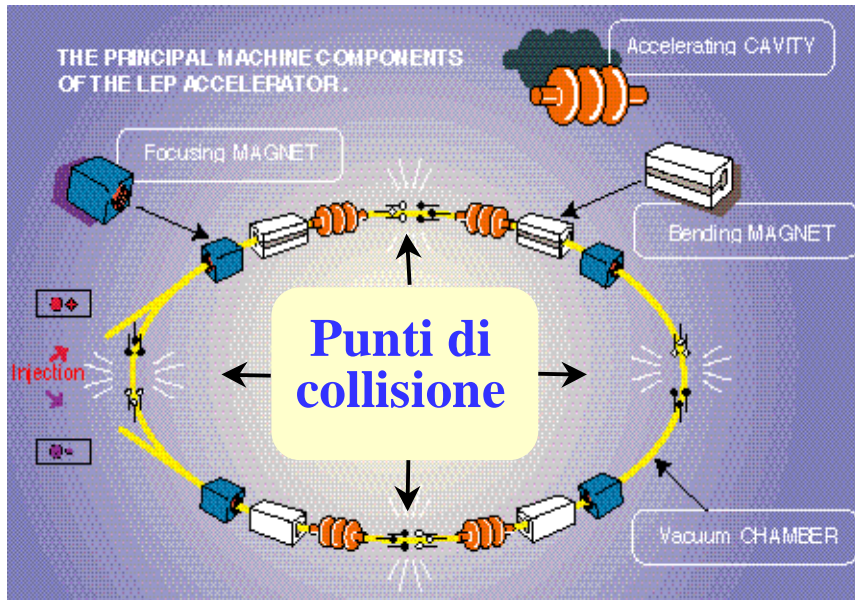
Collisioni frontali tra due fasci di  
particelle

Energie (di collisione) molto elevate  
Ma i fasci hanno bassa densità



Energia di collisione 450+450 GeV





# Collisionatori elettroni-positroni

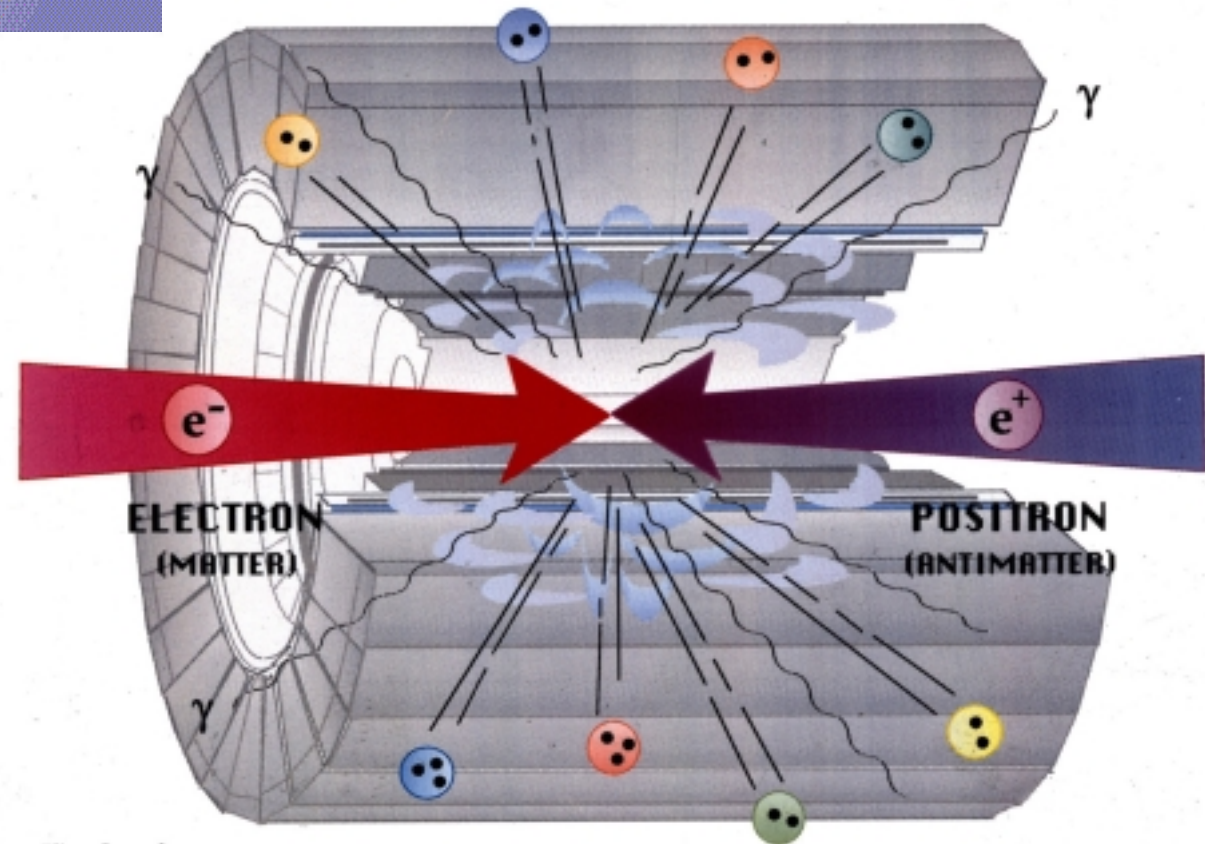
(materia)

(antimateria)

**LEP al CERN**

100 + 100 GeV

Un rivelatore in  
ciascun punto di  
collisione



# Ma vi è anche la frontiera degli eventi rari (es. Fisica del Neutrino)

## Frontiera delle alte energie



Alte energie per indagare la  
struttura interna delle  
particelle o nuovi fenomeni



Collisionatori a energia  
sempre più alta

Complesse e grandi  
installazioni

## Frontiera degli eventi rari

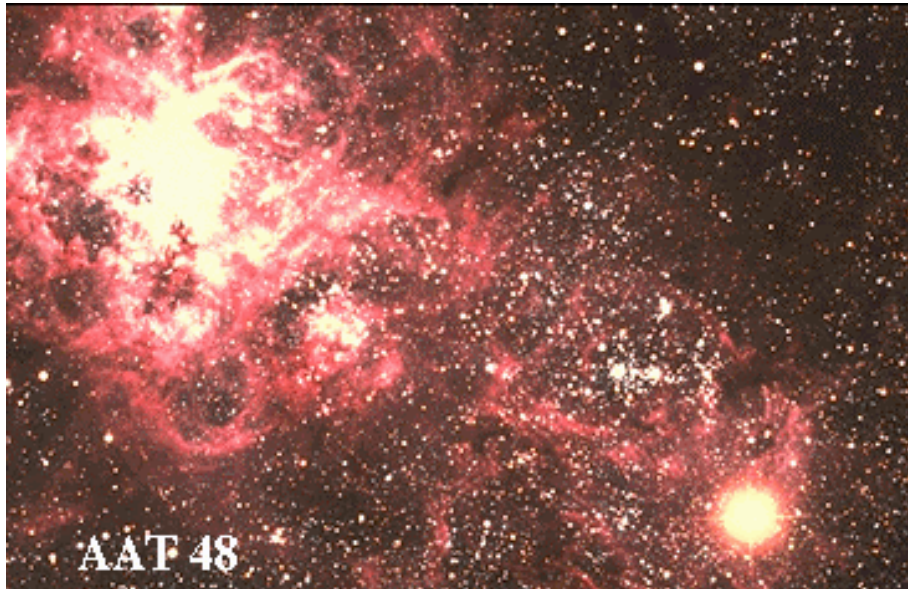


Anomalie rispetto a quanto  
"crediamo di sapere" possono  
rivoluzionare la conoscenza



L'ago nel pagliaio con  
tecnologie moderne e  
raffinatissime

Frontiera della pazienza e  
dell'astuzia sperimentale

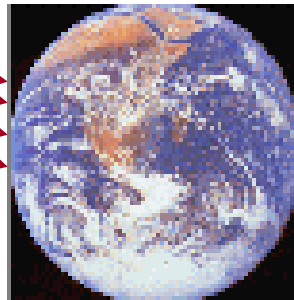


## Neutrini e Supernovae

Nebulosa Tarantula e Supernova 1987A  
nella Grande Nube di Magellano

Una esplosione eccezionalmente vicina (una  
ogni  $\sim 300$  anni) che ha inondato la terra di  
neutrini

$\sim 170000$  anni luce



Nel 1987, in laboratori sotterranei :

- si sono osservati neutrini emessi nell'esplosione di una Supernova
- dalla misura dei tempi di arrivo si è cercato di misurare la loro  
differente velocità e quindi la loro massa

**Pietra miliare per Fisica e Astrofisica**

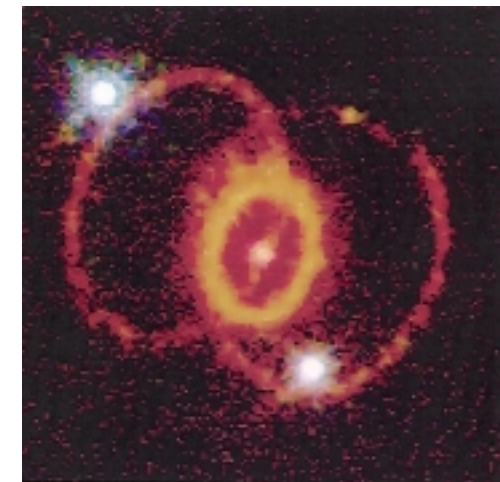


Per avere una idea della immane energia sprigionata nel collasso gravitazionale e della complessità dei fenomeni



La Supernova 1987A prima e dopo l'esplosione

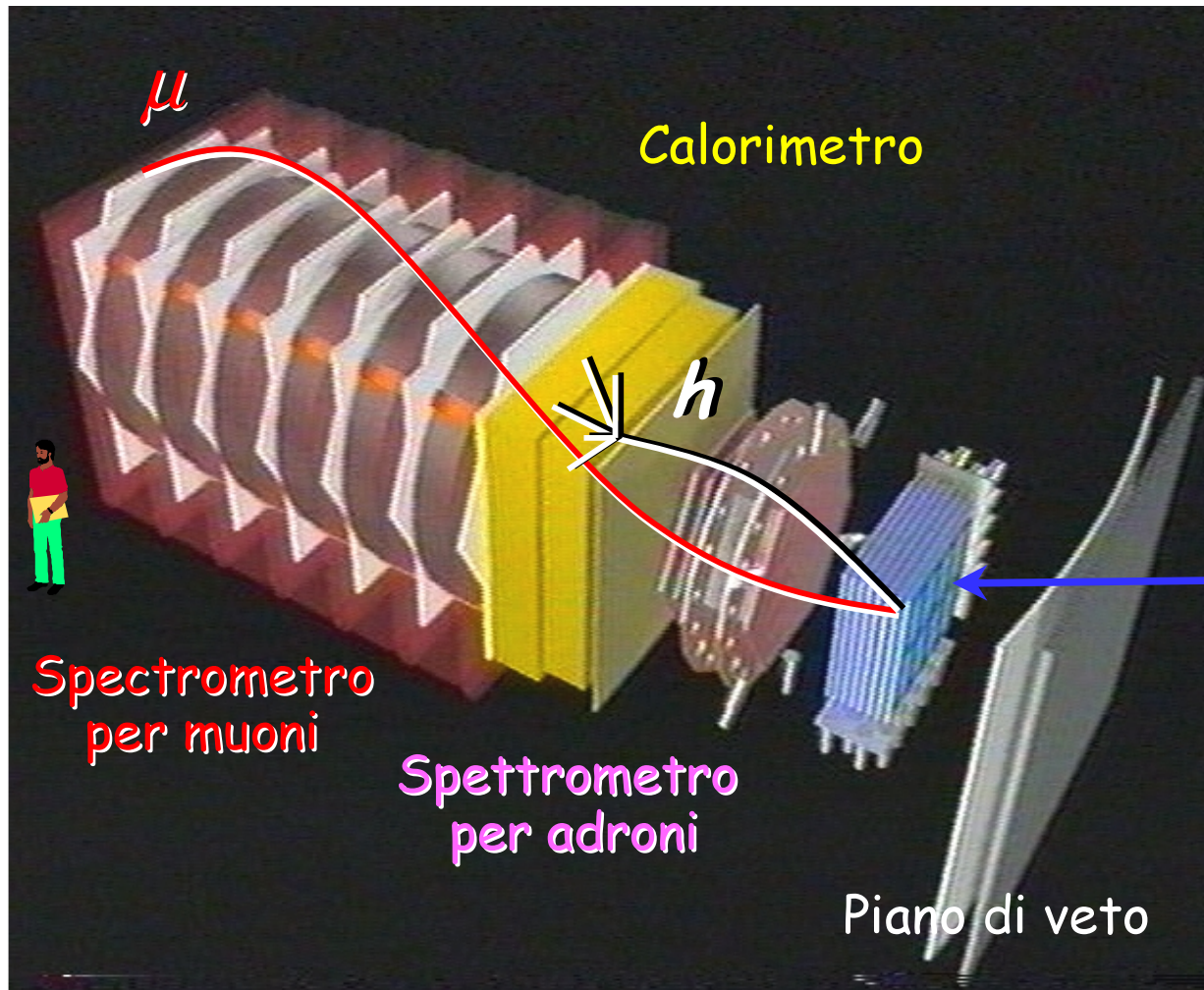
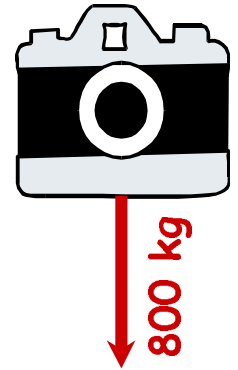
... e gli straordinari anelli osservati nei suoi resti nel 1994 dall'Hubble Space Telescope (eccezionale risoluzione possibile fuori dall'atmosfera)





# CHORUS

una speciale "macchina fotografica"  
per "vedere"  $\nu_\tau$ ... in 3 dimensioni!



Rivelatori "elettronici"

- localizzare tracce nelle emulsioni
- identificare le particelle
- misurarne l'energia

**fibre ottiche scintillanti  
e altre tecniche**

Bersaglio attivo per  
"vedere" interazioni di  
neutrini in 3D

**800 kg di emulsioni  
fotografiche**

~ 0,1 mm

**Perché**





# Ulisse e Dante Alighieri

La Divina Commedia, Inferno Canto XXVI

Considerate la vostra semenza:

**fatti non foste a viver come bruti,  
ma per seguir virtute e conoscenza.**

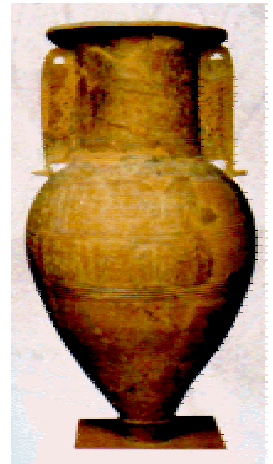
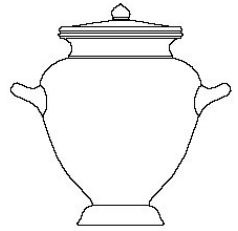
Li miei compagni fec'io sì aguti,  
con questa orazion picciola, al cammino,  
che a pena poscia li avrei ritenuti;  
e volta nostra poppa nel mattino,  
dei remi facemmo ali al folle volo,  
sempre acquistando dal lato mancino.

# Ulisse fu infatti

uomo d'azione  
animato da  
"curiositas" ...

con intelligenza e  
astuzia  
sperimentale

Odisseo e le sirene (stamnos a figure attiche rosse)  
Periodo tardo arcaico, da Vulci, British Museum



Il cavallo di Troia (pithos), VII secolo aC  
Mykonos (Museo Archeologico)

**... e inoltre**

**La ricerca "fondamentale" apre la strada a future applicazioni**

radio, transistor, laser, ... basati su precedenti scoperte di fisica fondamentale

**Nascita e sviluppo di nuove tecnologie**

Web nato al CERN

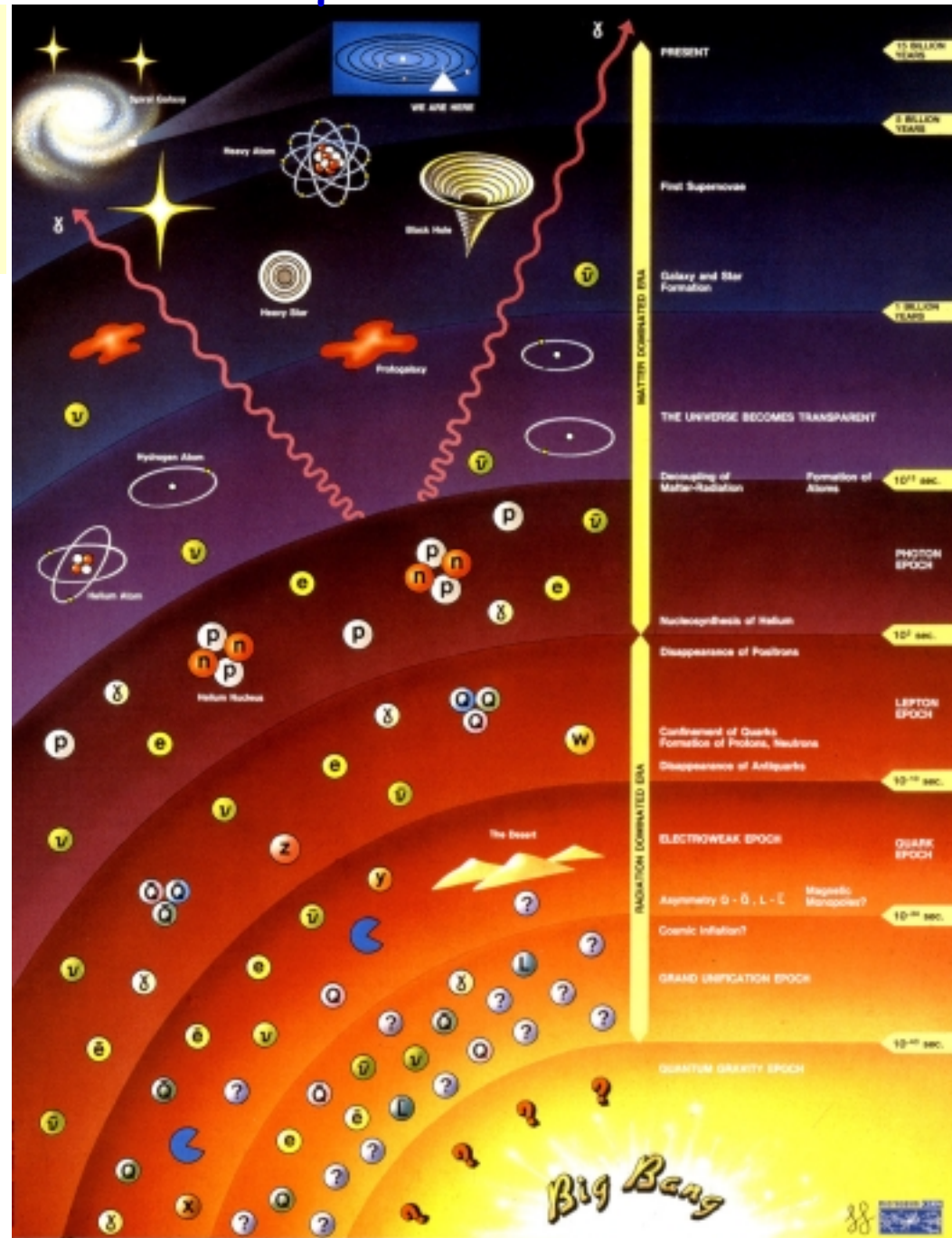
Ricerca ↔ Tecnologia

**Formazione di competenze e professionalità**

partecipazione alla ricerca nell'Università e in Laboratori :  
tesi di laurea e dottorato, borse di studio, ...

noi siamo qui ↘

# La storia dell'universo in una pagina



oggi !

$5 \times 10^9$  anni

$10^9$  anni

$10^{13}$  s

$10^2$  s

$10^{-10}$  s

$10^{-34}$  s

$10^{-43}$  s

L'inizio rapidissimo

Un momento importante ↗

Disaccoppiamento radiazione-materia (minore densità, bassa probabilità di interazioni)

L'universo diventa trasparente !



# Misteri

Dalla galassia della  
porta accanto ...

(Andromeda, a "solo" 2  
milioni di anni luce)



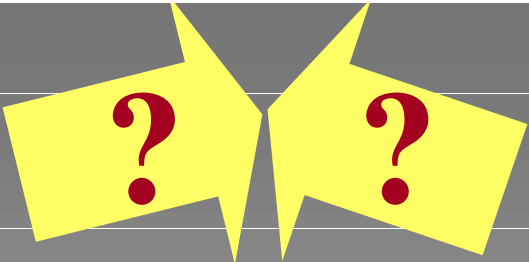
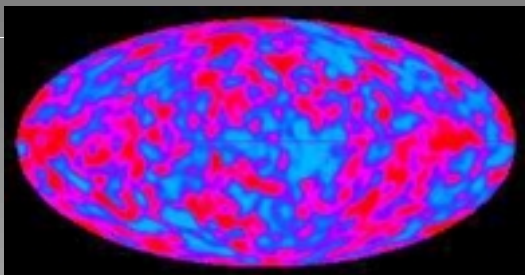
... agli "oggetti" più lontani

(circa 10 miliardi di anni luce ~ vita dell'universo)

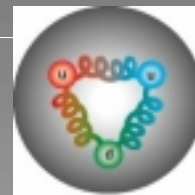


Quando guardiamo a stelle lontane andiamo indietro nel tempo, verso il big-bang  
( 10-20 miliardi di anni fa ?)

radiazione cosmica 3°K



quarks



Andare verso l'infinitamente piccolo è andare verso il Big-Bang ???

