

*Paolo Strolin*

# Particelle Elementari e Interazioni Fondamentali


Che sono

Come le studiamo

Perché ?

*Con immagini da siti Web*

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

A smooth, light-colored stone with text inscribed on it. The stone is oval-shaped and has a slightly textured surface. The text is written in a blue, sans-serif font and is centered on the stone. The background is a light brown, textured surface.

Le questioni  
semplici sono sovente  
le più 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.



**Lucrezio, *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

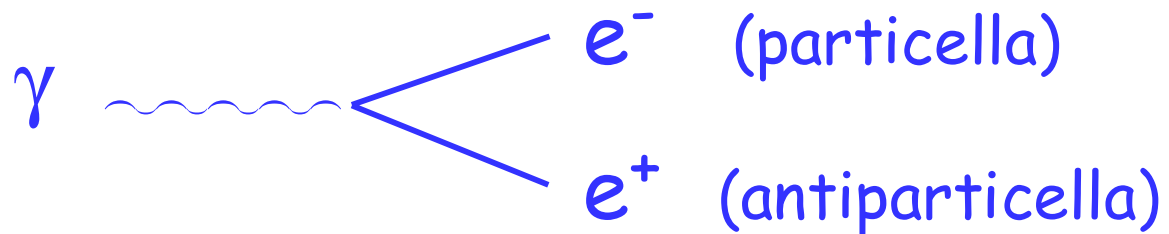
A photograph of a handwritten equation  $E = mc^2$  on a piece of paper. A red diagonal line is drawn through the equation, crossing out the  $c^2$  term.

Se lo avessimo saputo prima, avremmo posto  $c=1$  e scritto  $E=m$

energia 

 massa

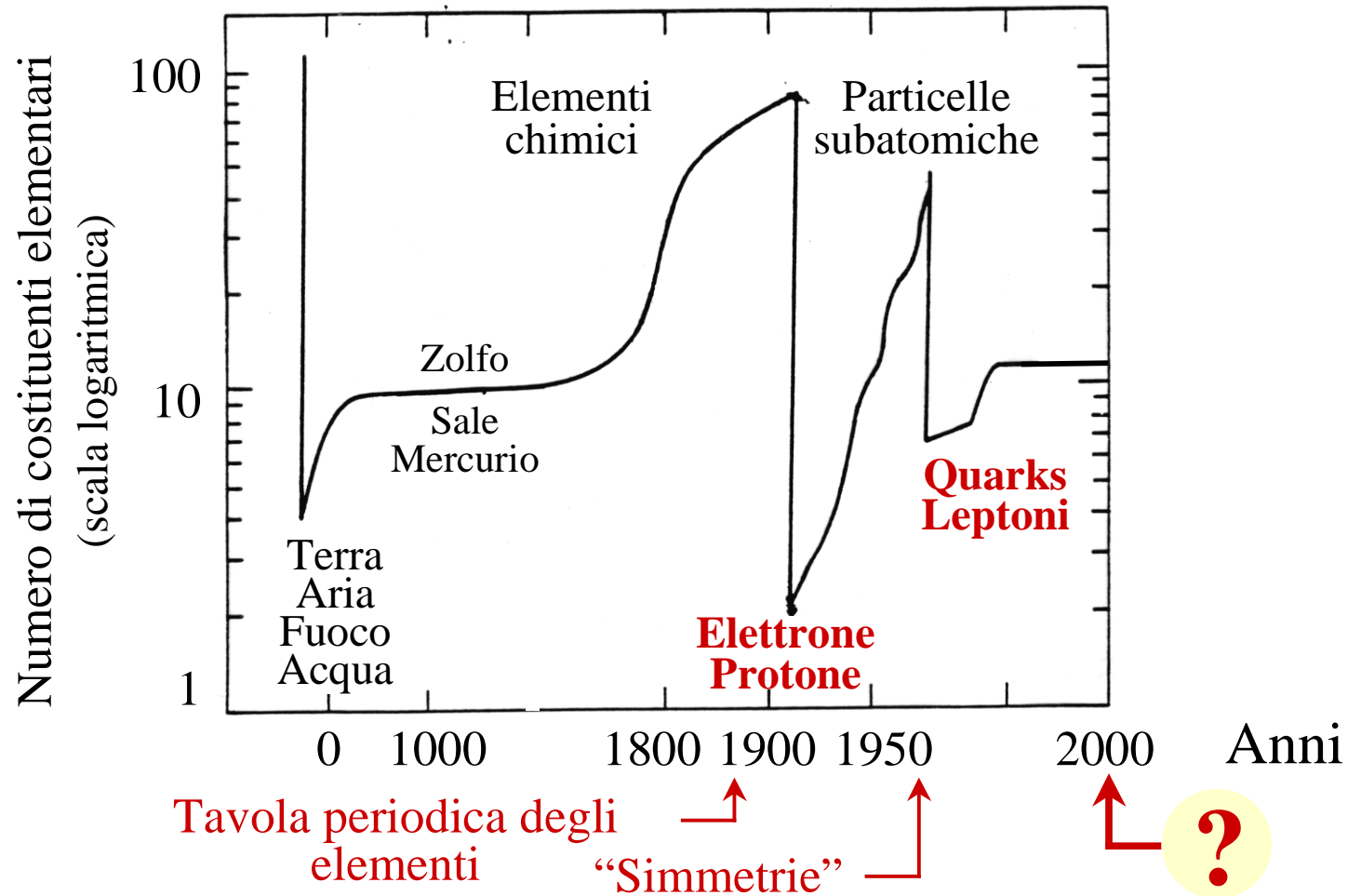
Esempio :



Le particelle non sono più solide e immutabili

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

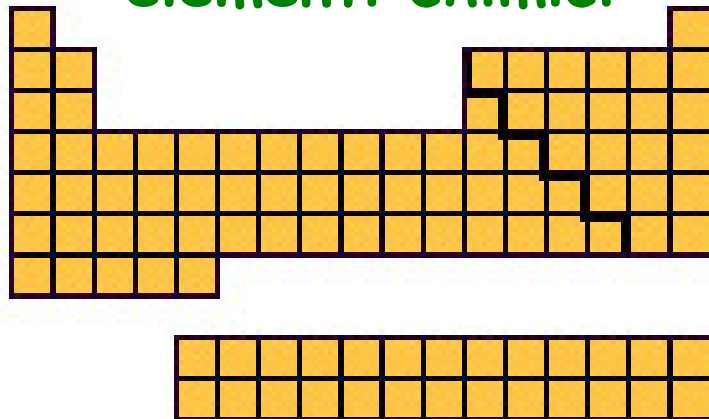
# Storia dei costituenti fondamentali della materia



Democrito : la varietà e il divenire di quanto osserviamo in natura proviene dalle tante diverse combinazioni di “costituenti elementari”  
( 60 miliardi di individui viventi : tutti con un diverso DNA)

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		





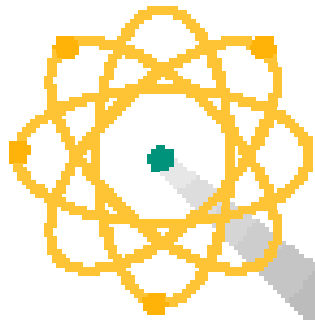
# Particelle Elementari



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

L'atomo non è più considerato come "elementare" :  
è formato da elettroni e da un nucleo

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



**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)

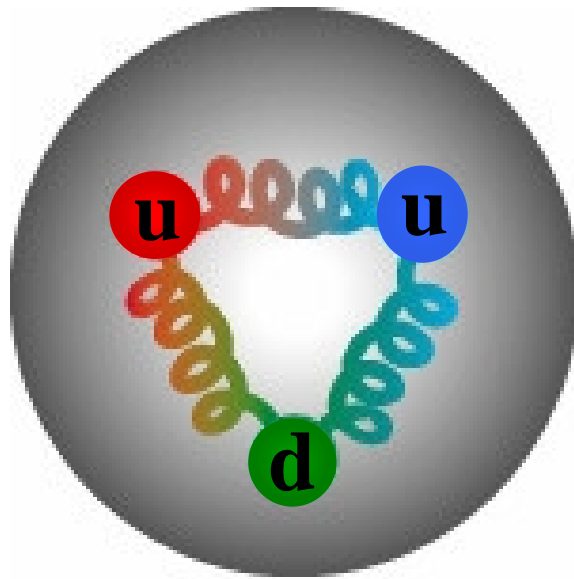
**Sono veramente "elementari" ?**

**Dagli atomi  
ai quarks**

**Dimensioni**  
**Interazione**

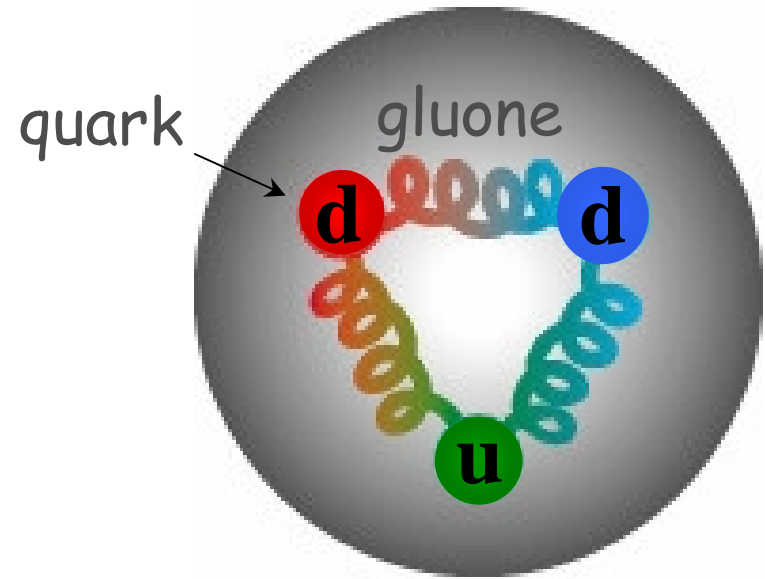
**Energia  
di legame**

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



protone

$$Q = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$



neutrone

$$Q = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 0$$

Quarks con "carica di colore"  
Forze "di colore" trasmesse dai "gluoni"  
(mediatori delle "Interazioni Forti" )

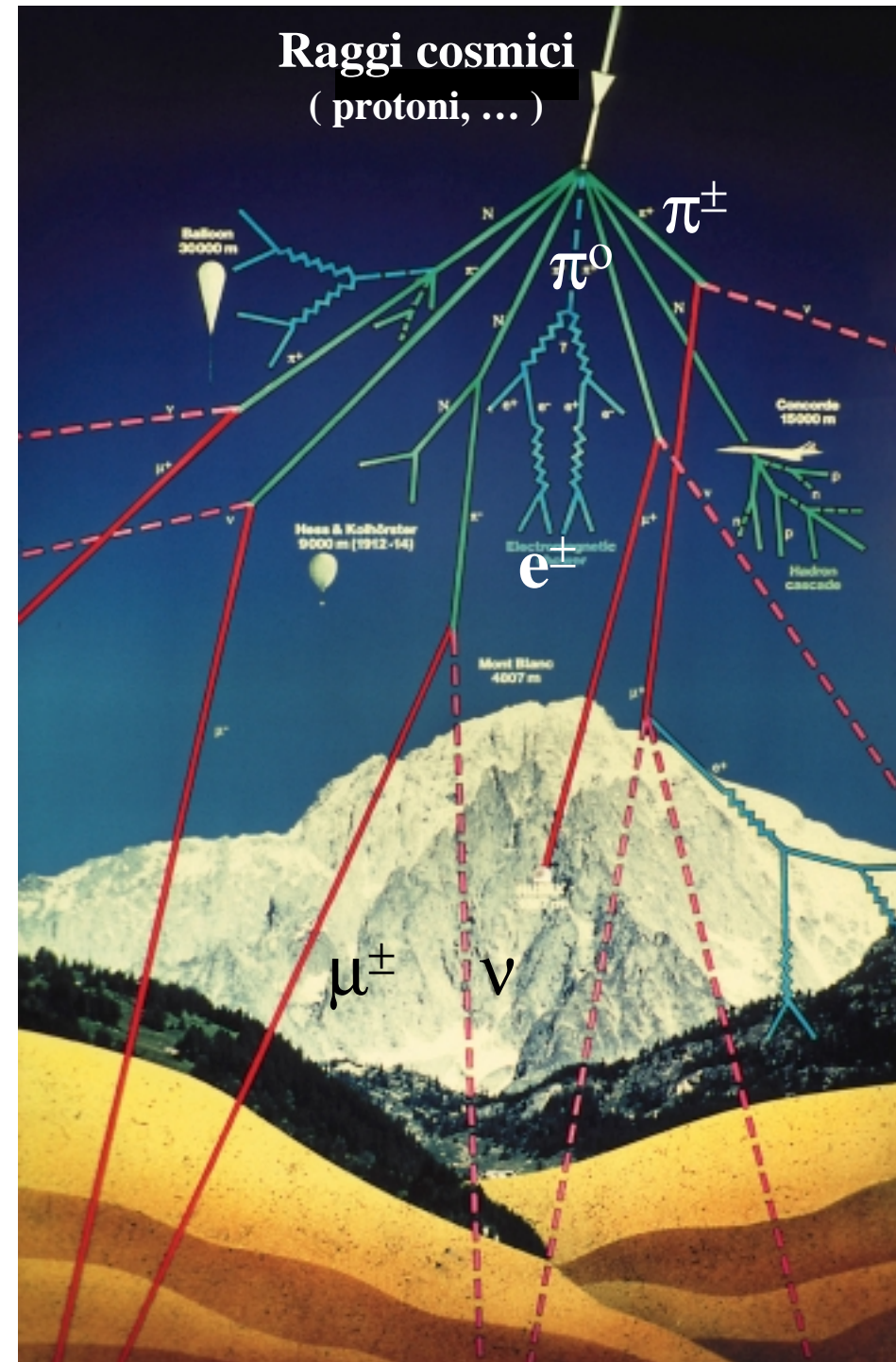
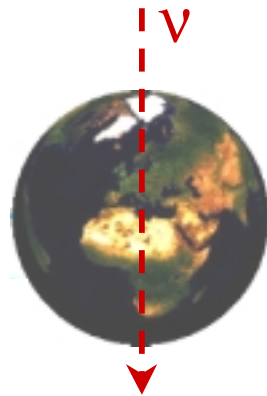
Materia ordinaria : p, n , e<sup>-</sup>

## La pioggia cosmica

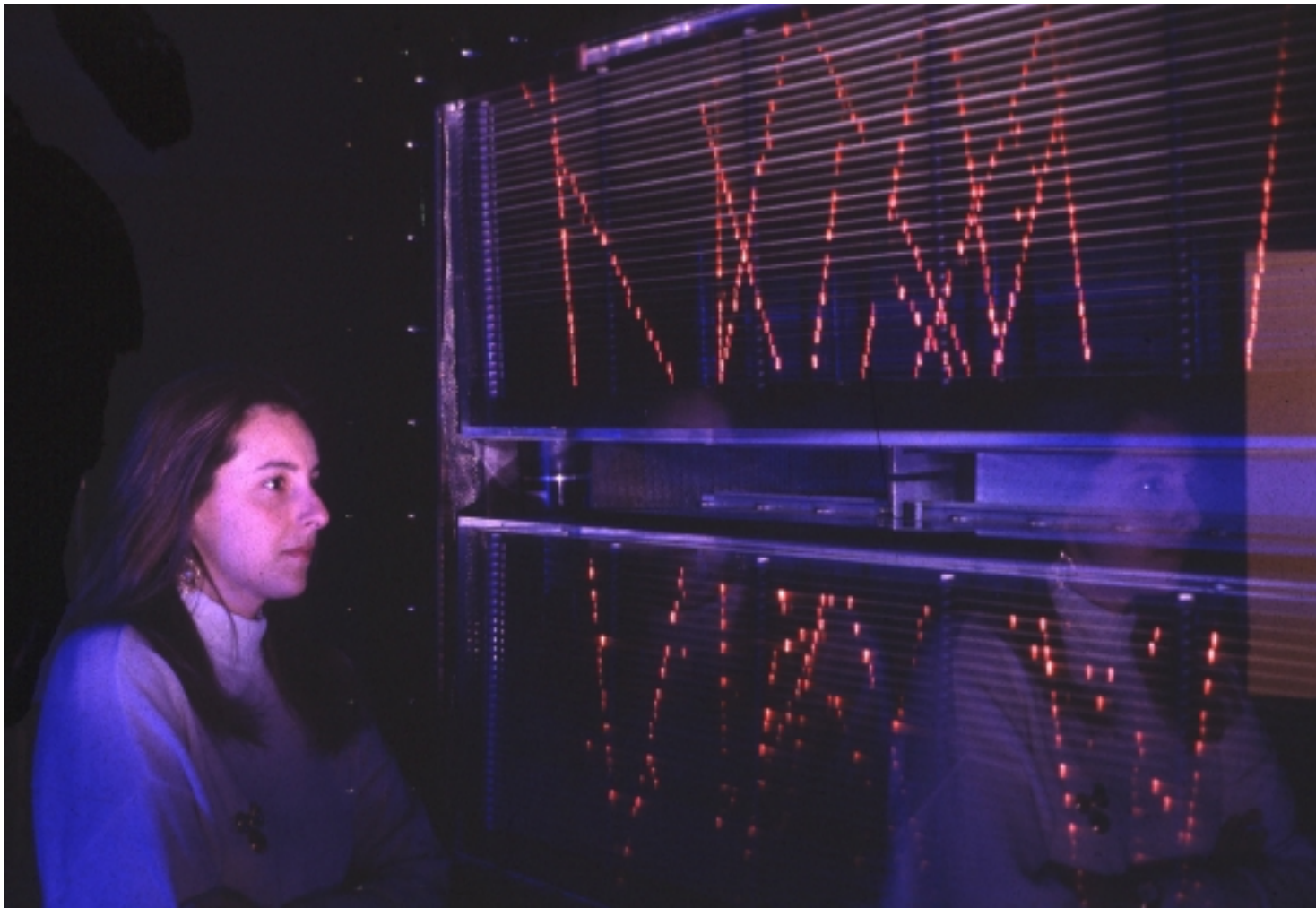
Particelle elementari di altissima energia sono generate in lontane galassie, con meccanismi praticamente sconosciuti

Interagendo nell'atmosfera esse producono "sciame" di particelle

I neutrini attraversano la terra !



# Possiamo "vedere" la pioggia cosmica (mediante "rivelatori di particelle")



Tracce di particelle visualizzate da una "camera a scintilla"



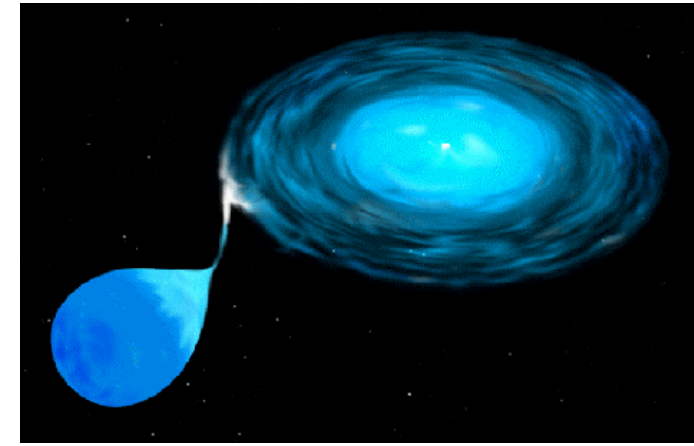
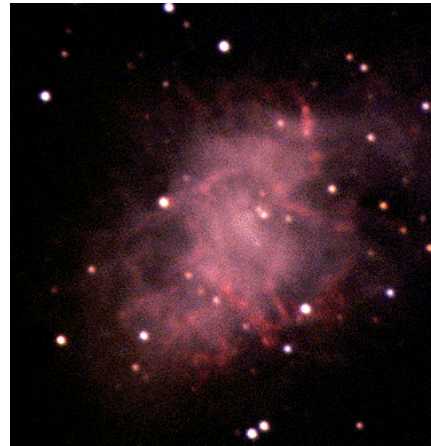
# Sorgenti di raggi cosmici e neutrini di alta energia

(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

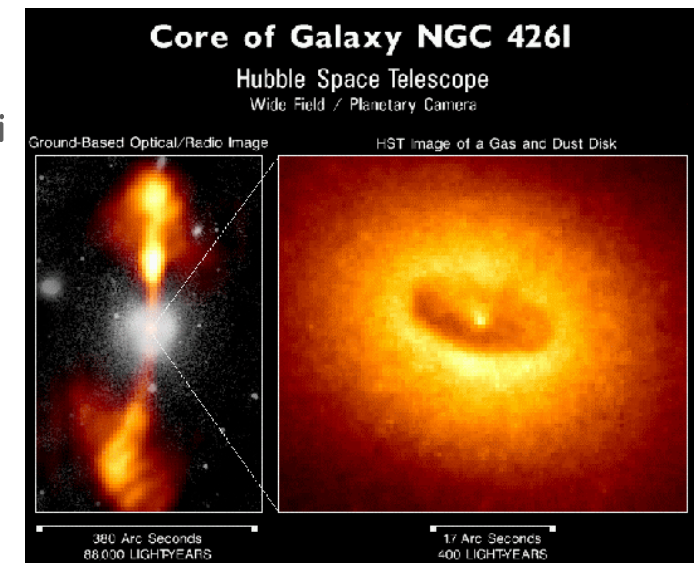
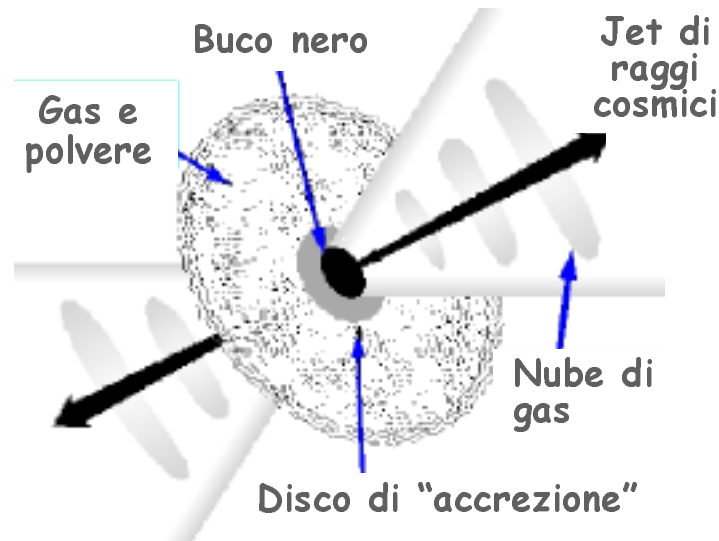
Sistemi binari attorno a pulsar (stella di neutroni in rotazione rapida) o buco nero



## Sorgenti extra galattiche

Nuclei Galattici Attivi (quasars)

↓  
altissime energie

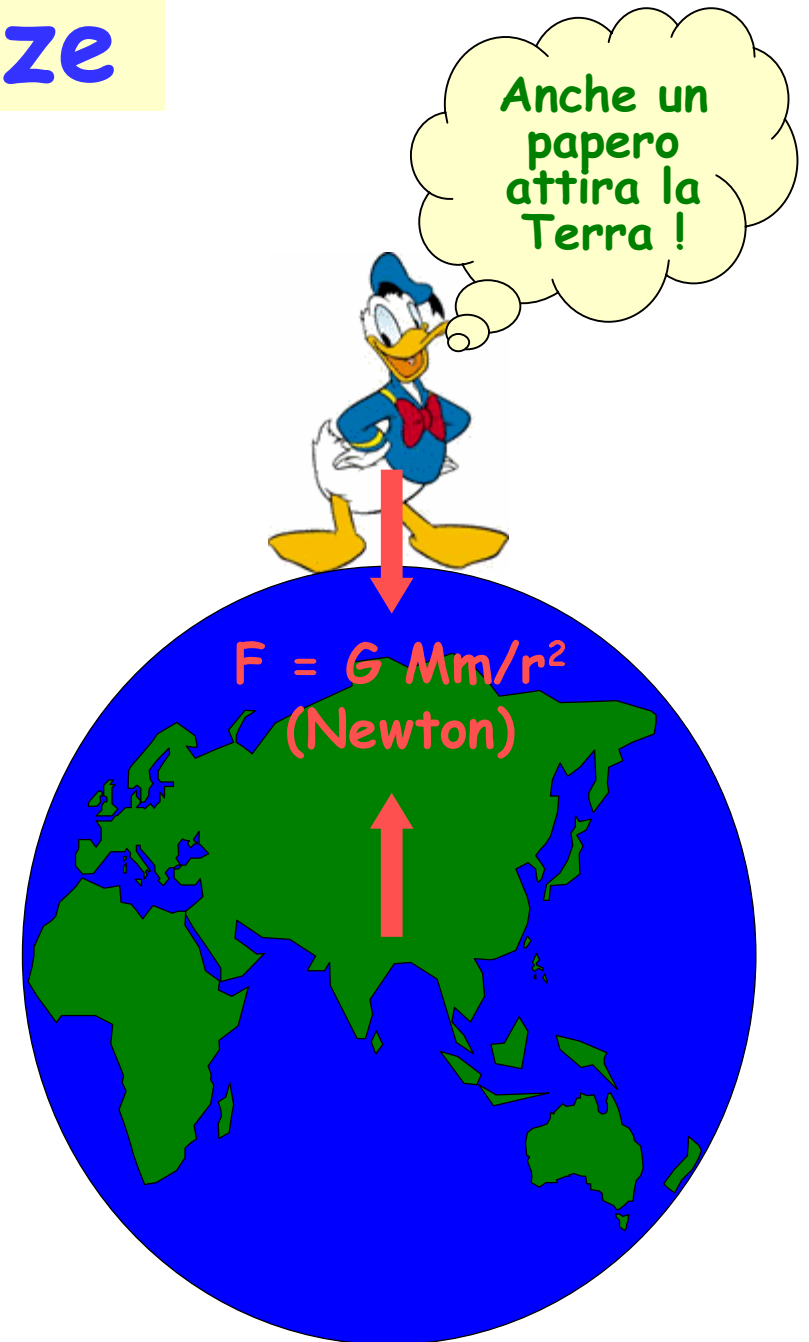


# Interazioni e Forze

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



Il concetto di "interazione" è più completo



# Ogni interazione ha un mediatore

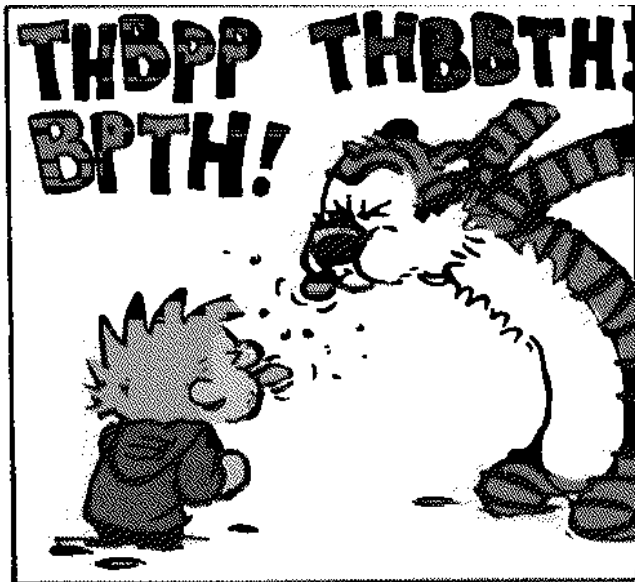
(i mediatori sono particelle "vettori di forza")

## Dinamica Classica

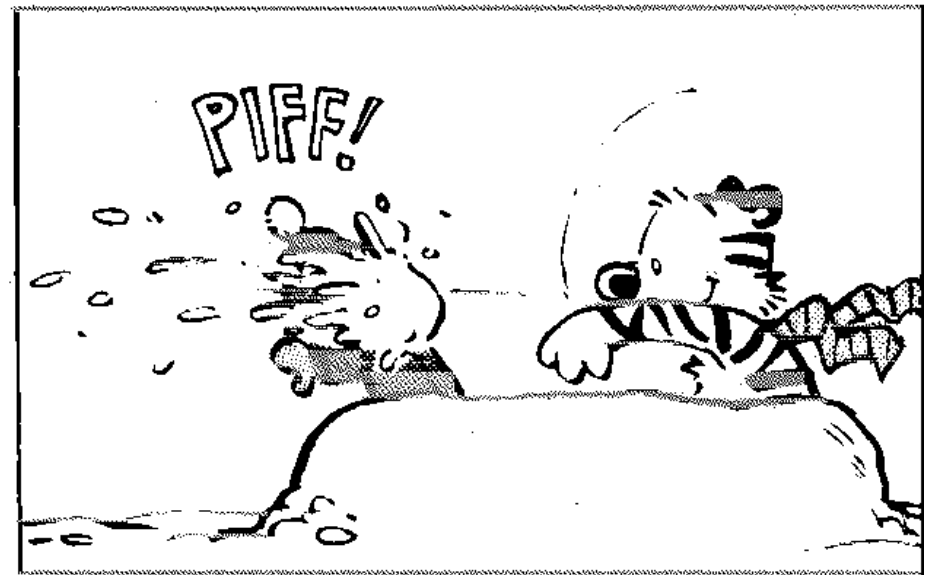
Interazione "a distanza"

$Q$                        $q$        $F = q E$





## Dinamica Quantistica Relativistica



# Le tre interazioni "fondamentali"

	Intensità relativa	Carica	Mediatori	Agisce su :			La vediamo in :
				quark	$e^-$	$\nu$	
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

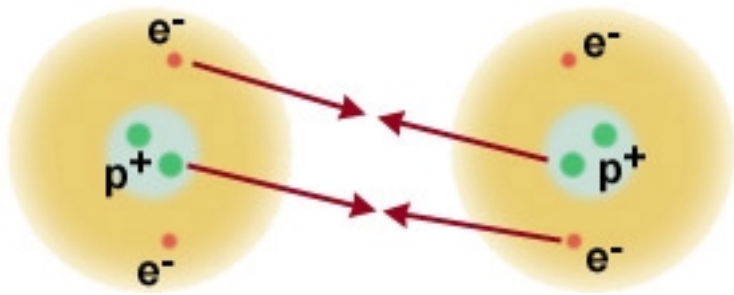


Per scambio di mediatore

- ▶ Dinamica classica : 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

## Interazione Elettro-Magnetica ➔ coesione atomica e molecolare



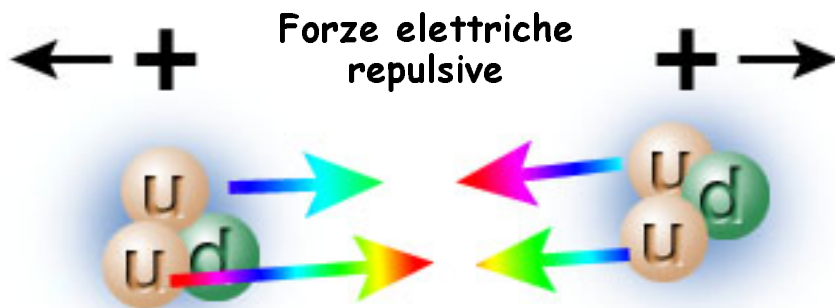
$$d \sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$$

$$E_{\text{legame}} \sim 1 \text{ eV}$$

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

E' spiegato dalla meccanica quantistica  
Prevalgono le forze attrattive

## Interazione Forte ➔ coesione nucleare



$$d \sim 1 \text{ F} = 10^{-13} \text{ cm}$$

$$E_{\text{legame}} \sim 1 \text{ MeV}$$

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

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

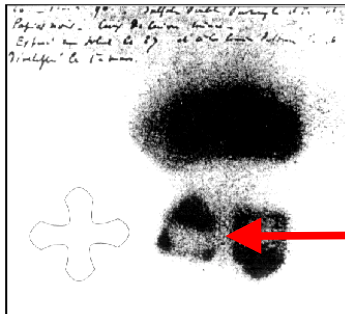


# Interazione "Debole"

## Becquerel (1896)

Lastre fotografiche riposte al buio vennero trovate impressionate !

Creazione spontanea di radiazione



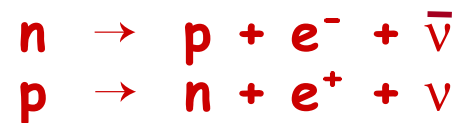
Una croce al merito ha assorbito le radiazioni :

la sua "ombra"

Decadimento  $\beta$  nucleare  
elementi chimici non immutabili

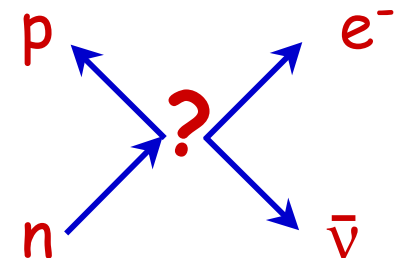


Ipotesi del neutrino (Pauli 1930)



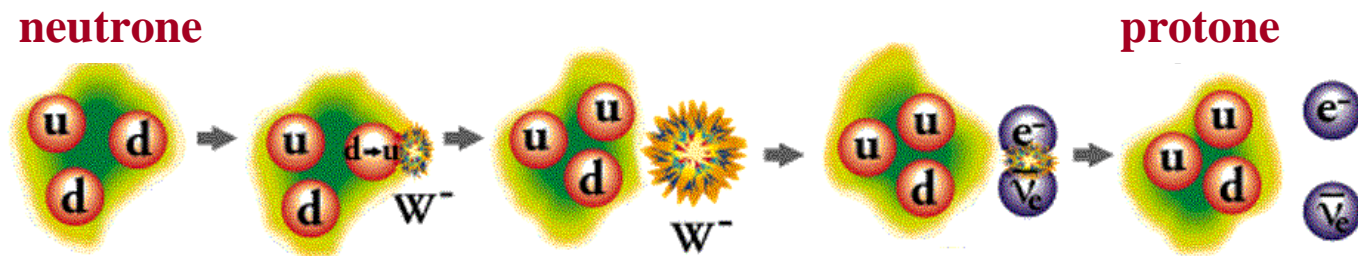
Teoria di Fermi (1933)

ancora senza mediatore



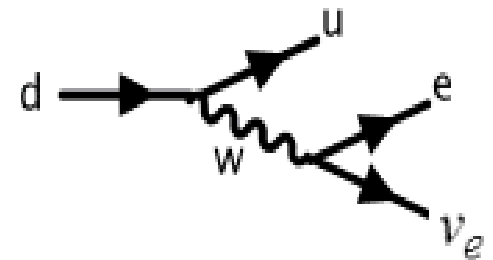
# L'Interazione Debole è diventata "Elettro-Debole"

Decadimento  $\beta$  oggi: scambio di  $W^\pm$



Descritto sinteticamente e quantitativamente da un

*“Diagramma di Feynman”*



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

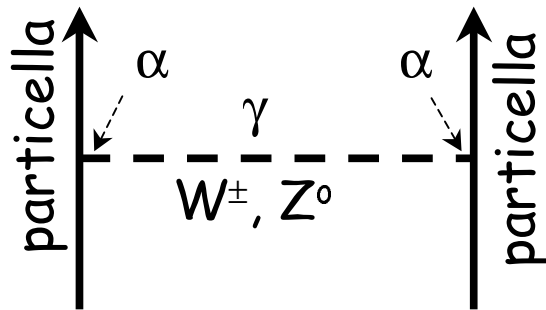
# Quanto-Elettro-Dinamica e Quanto-Cromo-Dinamica

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

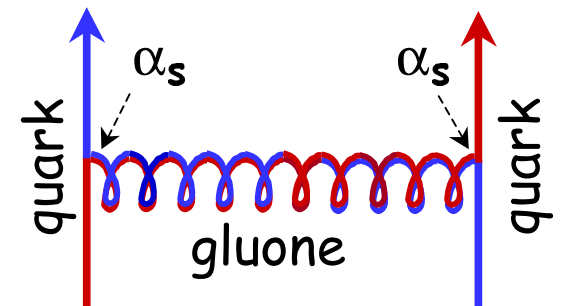
"costante di accoppiamento" = probabilità di emissione del mediatore  
( $\alpha$  per QED,  $\alpha_s$  per QCD)

Interazioni diverse = diversa costante di accoppiamento

**QED**  
(carica elettrica)



**QCD**  
(carica di colore)



*"Diagrammi di Feynman"*

scritti in termini di (probabilità)<sup>1/2</sup> anzichè di probabilità



[ come prescrive la Meccanica Quantistica ]

# L'unificazione Elettro-Debole

Interazioni elettromagnetiche e deboli :

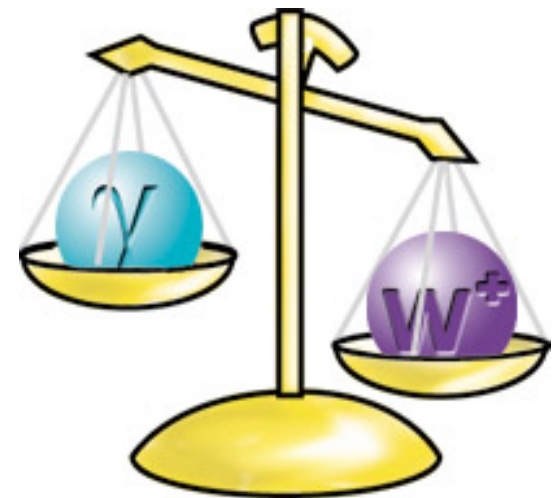
- Stessa "costante di accoppiamento"  $\alpha = e^2 / 4\pi\hbar c = 1/137$ 
  - Fondamentalmente non sono diverse  
(lo è invece l'interazione gravitazionale : costante  $G$  )

Ma viene scambiato un diverso mediatore

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

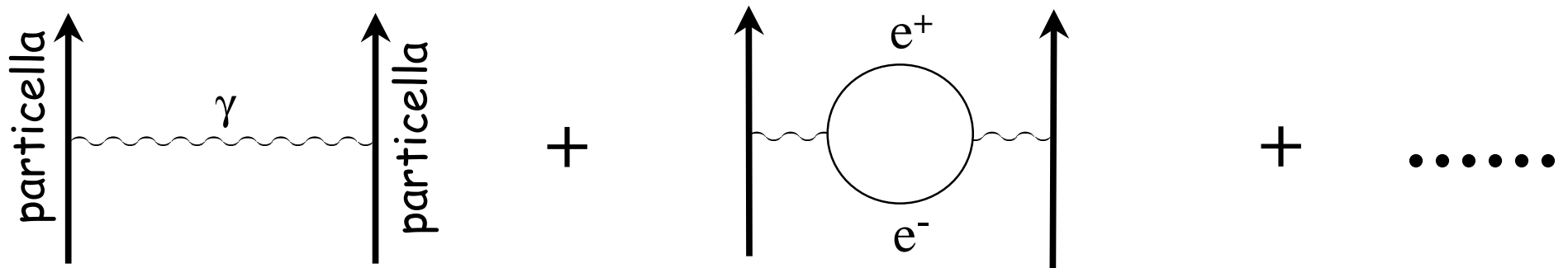
Perché interazioni "deboli" ?

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



# Le teorie quantistiche animano il "vuoto" !

- Tutto regolato da probabilità
- Le varie possibilità vanno sommate
- Bisogna anche considerare che :
  - il mediatore ( $\gamma$ ) può emettere una coppia particella-antiparticella
  - queste si annichilano 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  $\frac{1}{2}$   $\rightarrow$  "fermioni")

quarks: u, d, ...

leptoni:  $e^-$ , ...

## Mediatori delle interazioni

( spin 1  $\rightarrow$  "bosoni")

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

## Con i quarks si costruiscono gli "adroni"

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

protone, neutrone, ...

"mesoni"  $q\bar{q}$  : 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 necessario "pezzo mancante" nella attuale teoria

## Il neutrino ha massa ?

Nuova visione della fisica delle particelle  
Implicazioni per astrofisica e cosmologia

## "Grande Unificazione" eletto-debole-forte ?

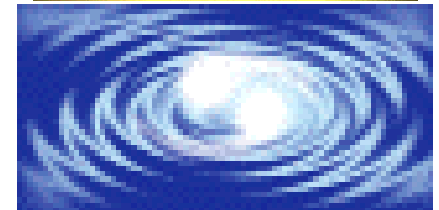
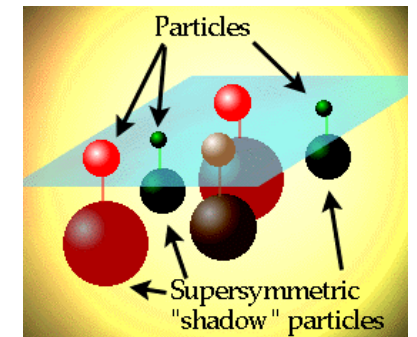
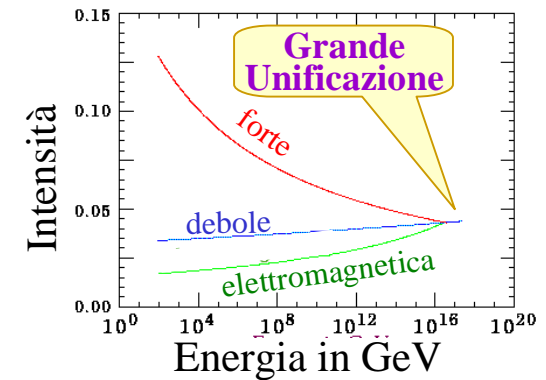
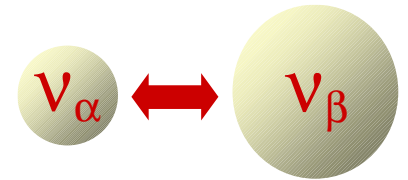
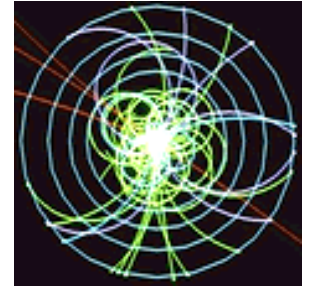
Proseguire sulla strada iniziata da Newton con la  
Gravitazione Universale

## Super-simmetria ?

Un legame tra particelle di materia (quarks e leptoni) e  
particelle vettori di forza (mediatori)

## "Onde" gravitazionali ?

Verifica predizione dalla relatività generale



**Come ?**

*Acceleratori di particelle*  
*Rivelatori e esperimenti*

Fare un  
esperimento è  
"osservare"

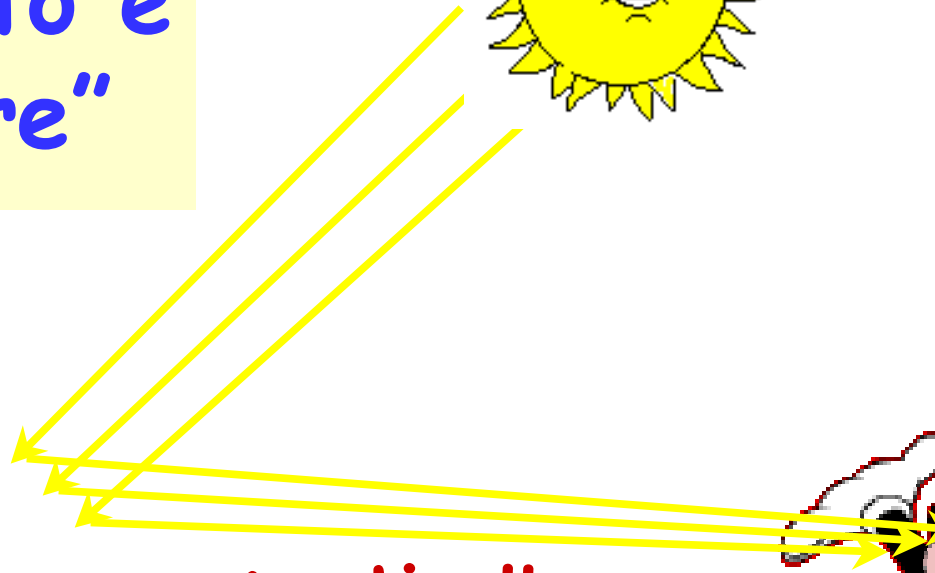


sorgente



bersaglio

(da osservare e  
studiare)

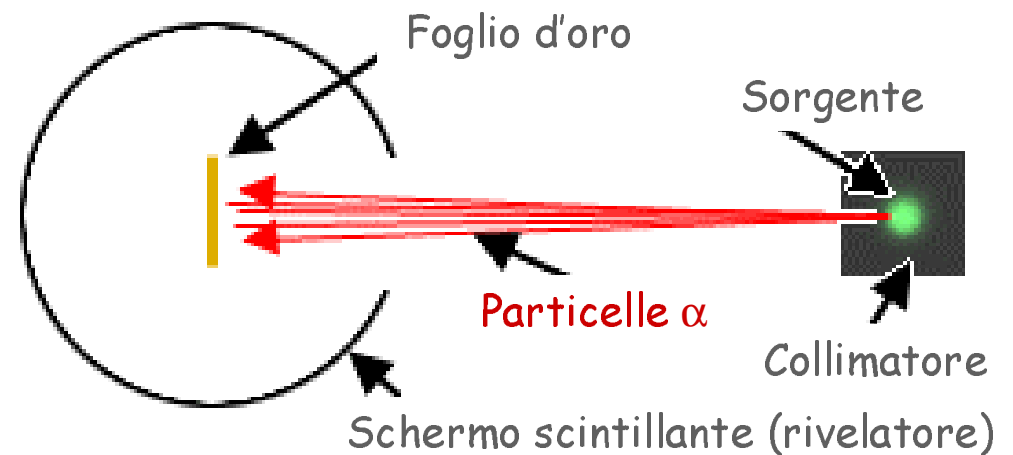


particelle  
(luce)

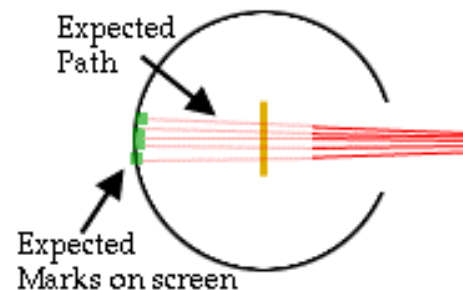
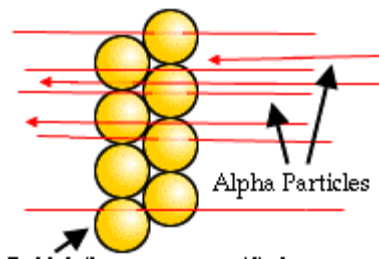


"rivelatore"  
(occhio)

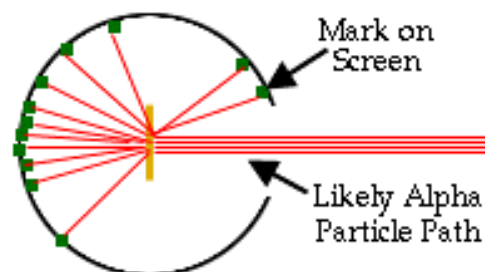
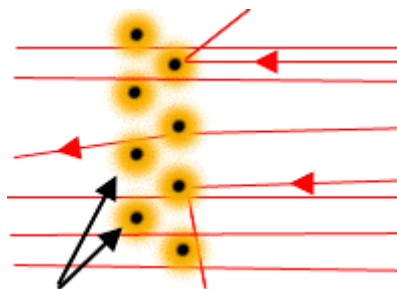
# Un classico intramontabile: l'esperimento di Rutherford



## Verifica di ipotesi alternative sulla struttura interna degli atomi



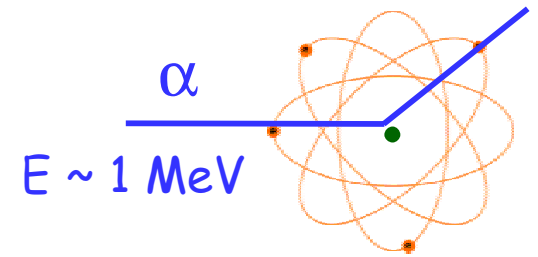
Atomi "amorfi"  
↓  
piccoli angoli di diffusione



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



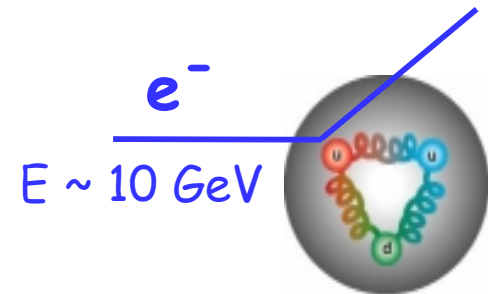
L'esperimento di Rutherford  
come inizio di una metodologia



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

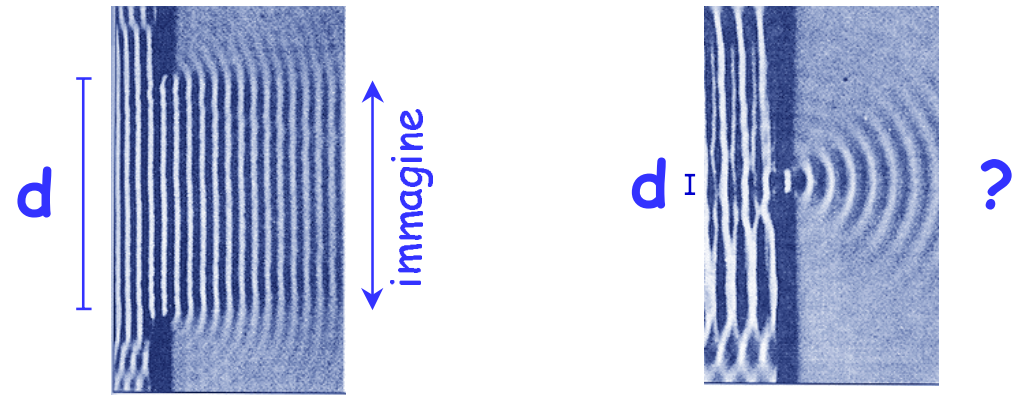


Per indagare oltre servono altissime energie  
Perché ? Come fare ?

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

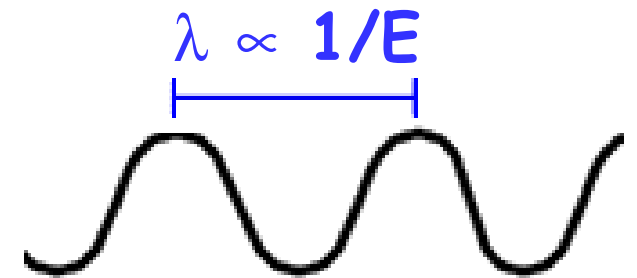
## Fisica classica

Immagine visibile se  
 $\lambda \ll d$



## Fisica quantistico-ondulatoria

Particelle rappresentate da un'onda

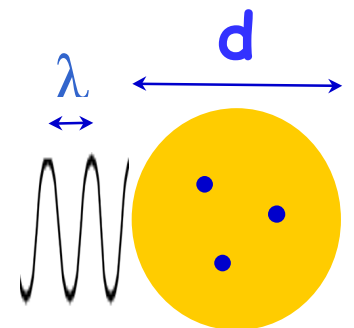


## Studio di particelle subnucleari

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

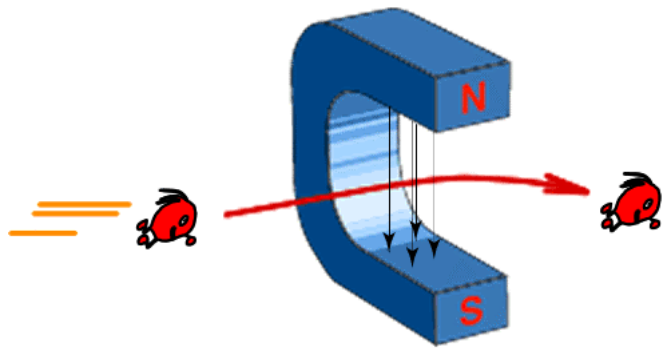


Sorgenti di particelle ad altissima energia  
**Acceleratori di particelle**

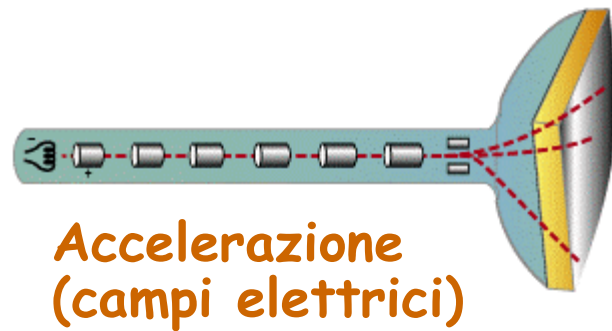
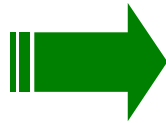


# Acceleratore circolare di particelle

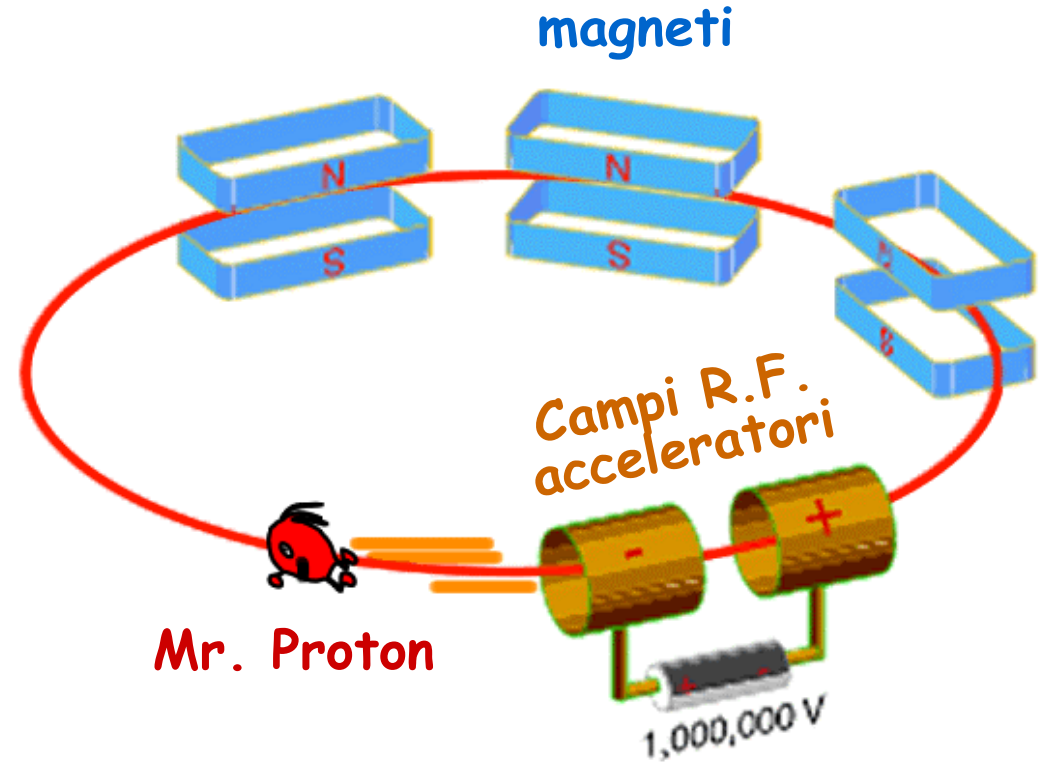
Deflessione  
(campi magnetici)



+



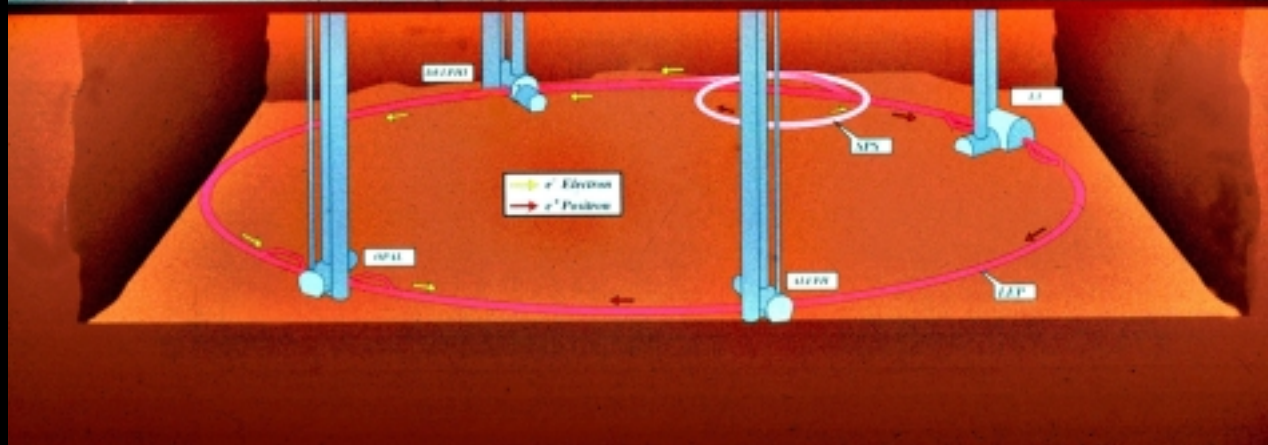
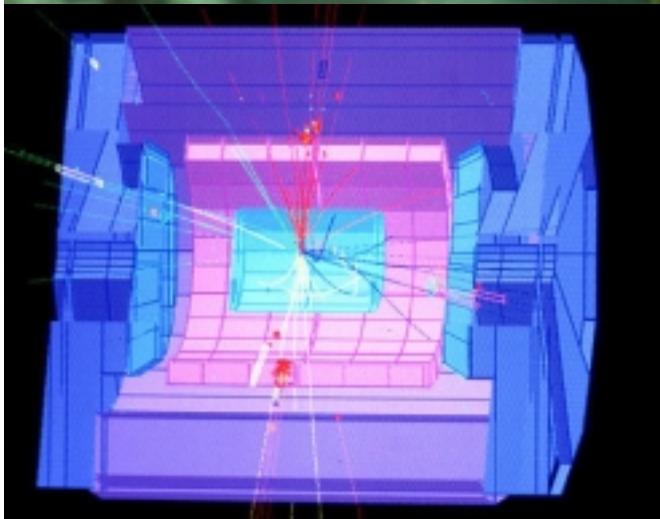
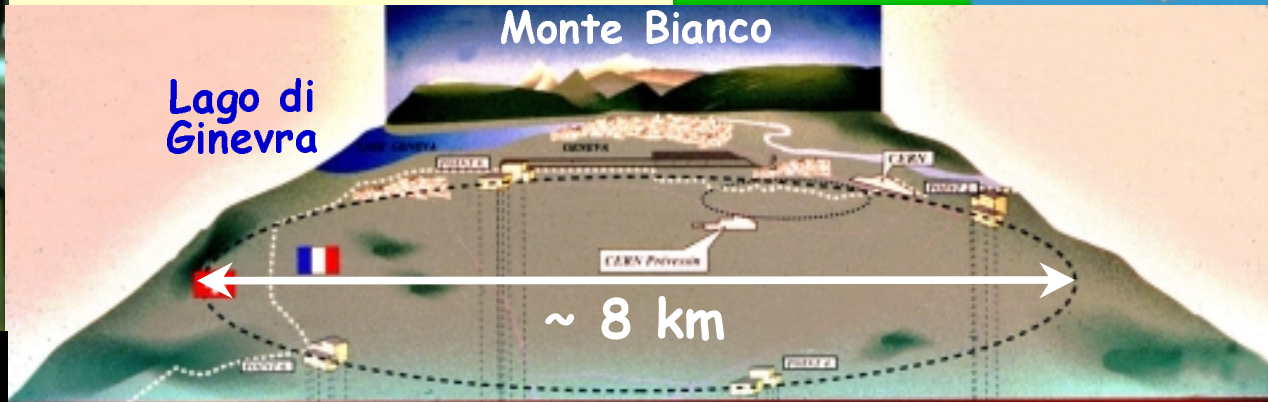
Accelerazione  
(campi elettrici)





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

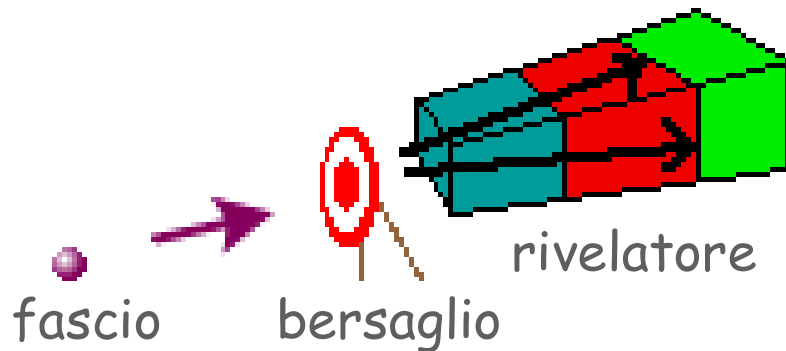
SPS, LEP, ... LHC



## Esperimenti "a bersaglio fisso"

Fascio di particelle su un bersaglio

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

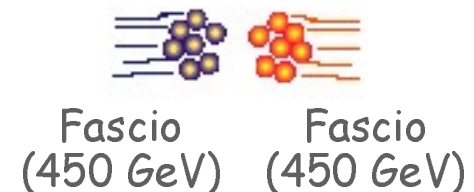
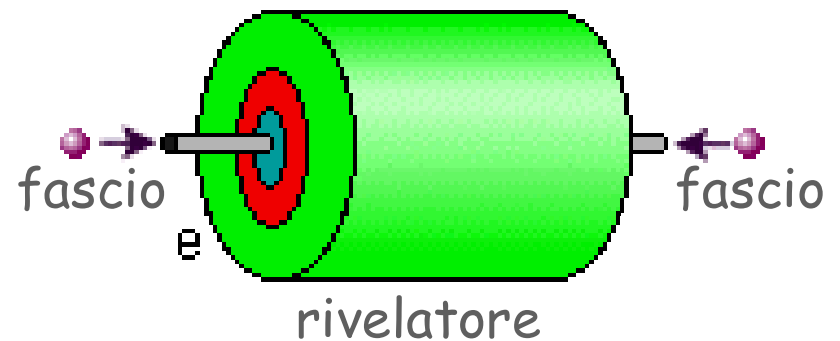


**Energia di collisione 29 GeV**

## Esperimenti "con collisionatori"

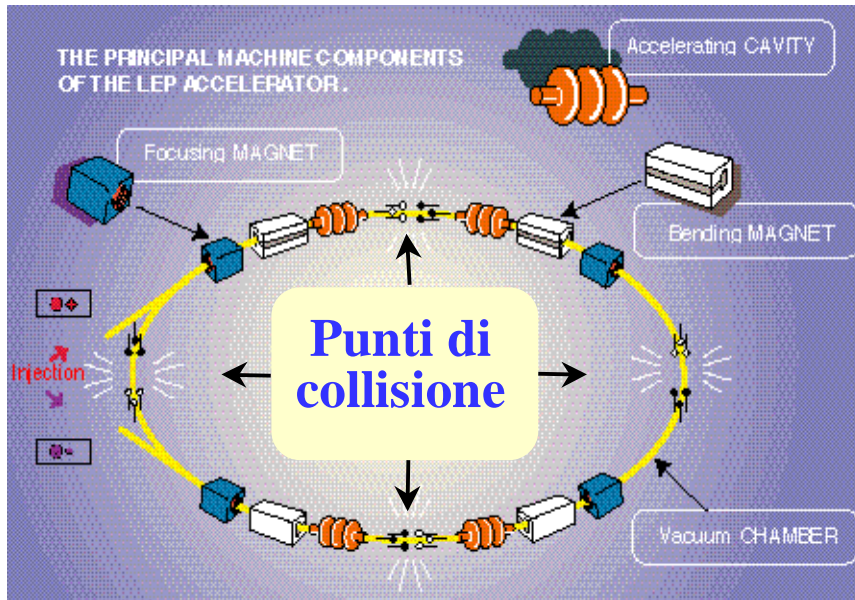
Collisioni frontali tra due fasci di  
particelle

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



**Energia di collisione 900 GeV**





# Collisionatori elettrone-positrone

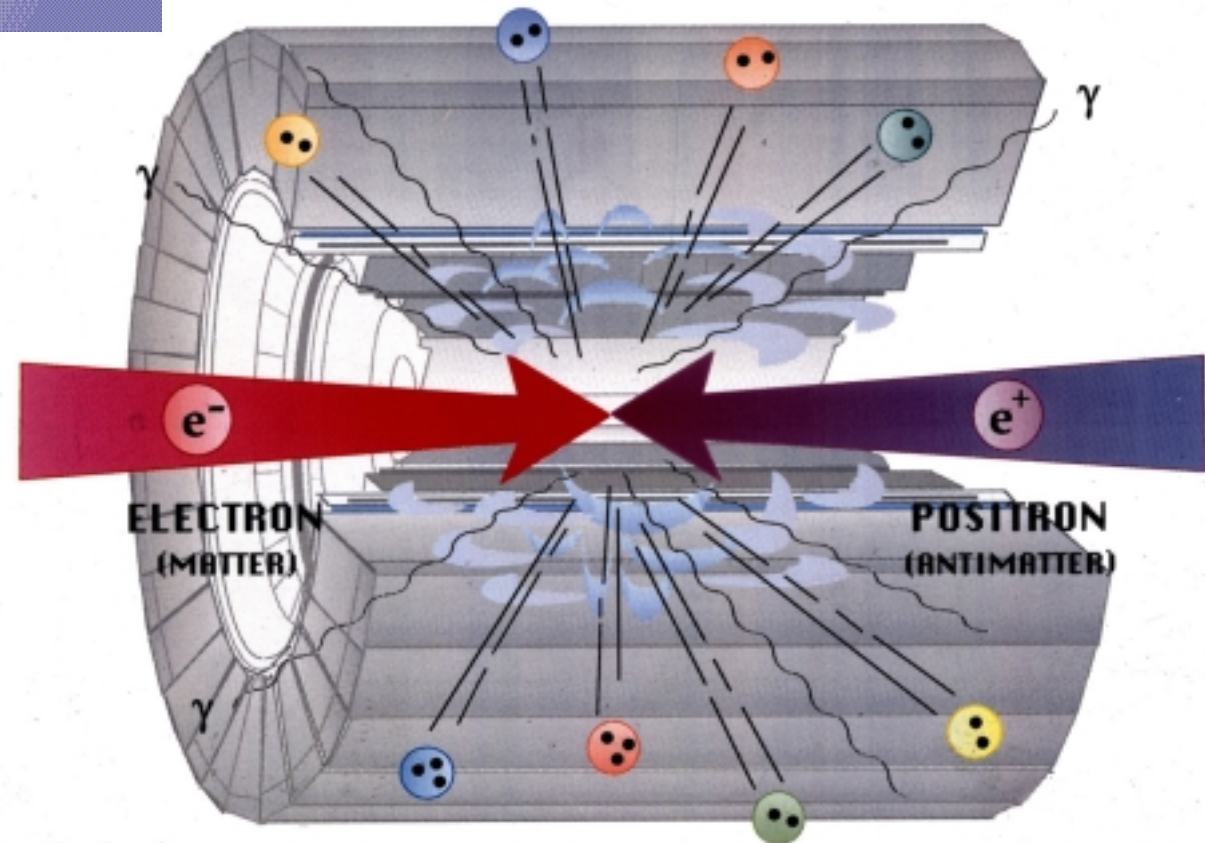
(materia)

(antimateria)

**LEP al CERN**

100 + 100 GeV

Un rivelatore in  
ciascun punto di  
collisione





# Ma vi è anche la frontiera degli eventi rari (per esempio la 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

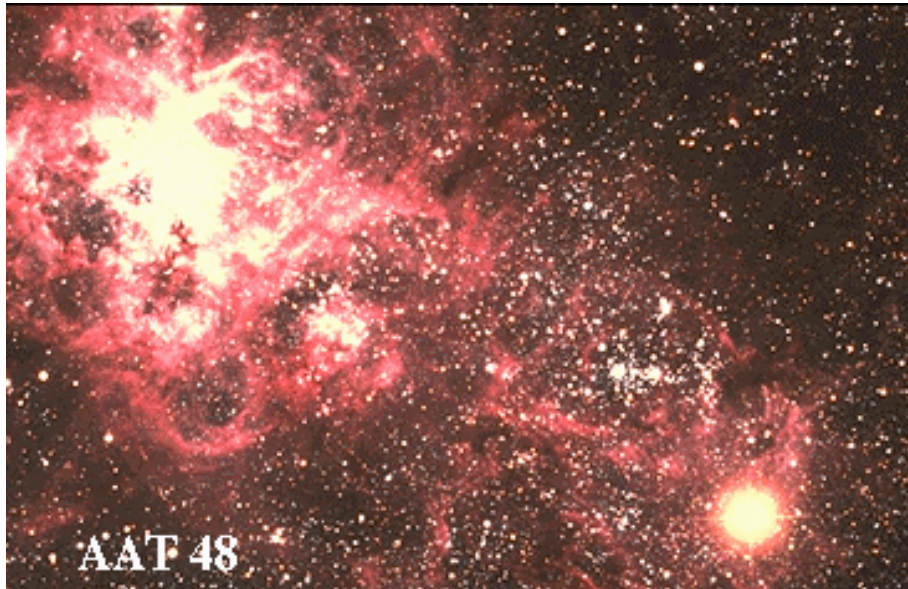


L'ago nel pagliaio, con tecnologie moderne e raffinatissime



Fasci di alta intensità

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**

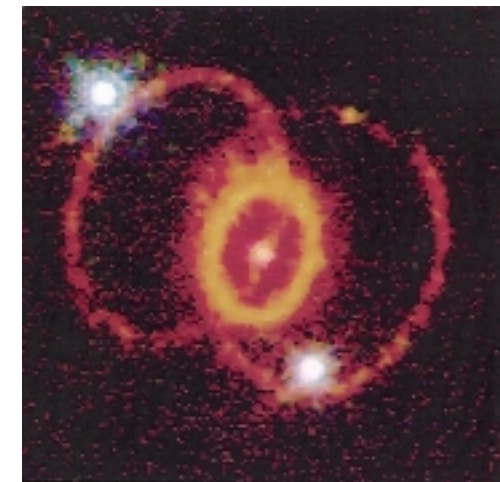


Per avere una idea della immane energia sprigionata nel collasso gravitazionale e della complessità dei fenomeni



La Supernova 1987A prima e dopo l'esplosione

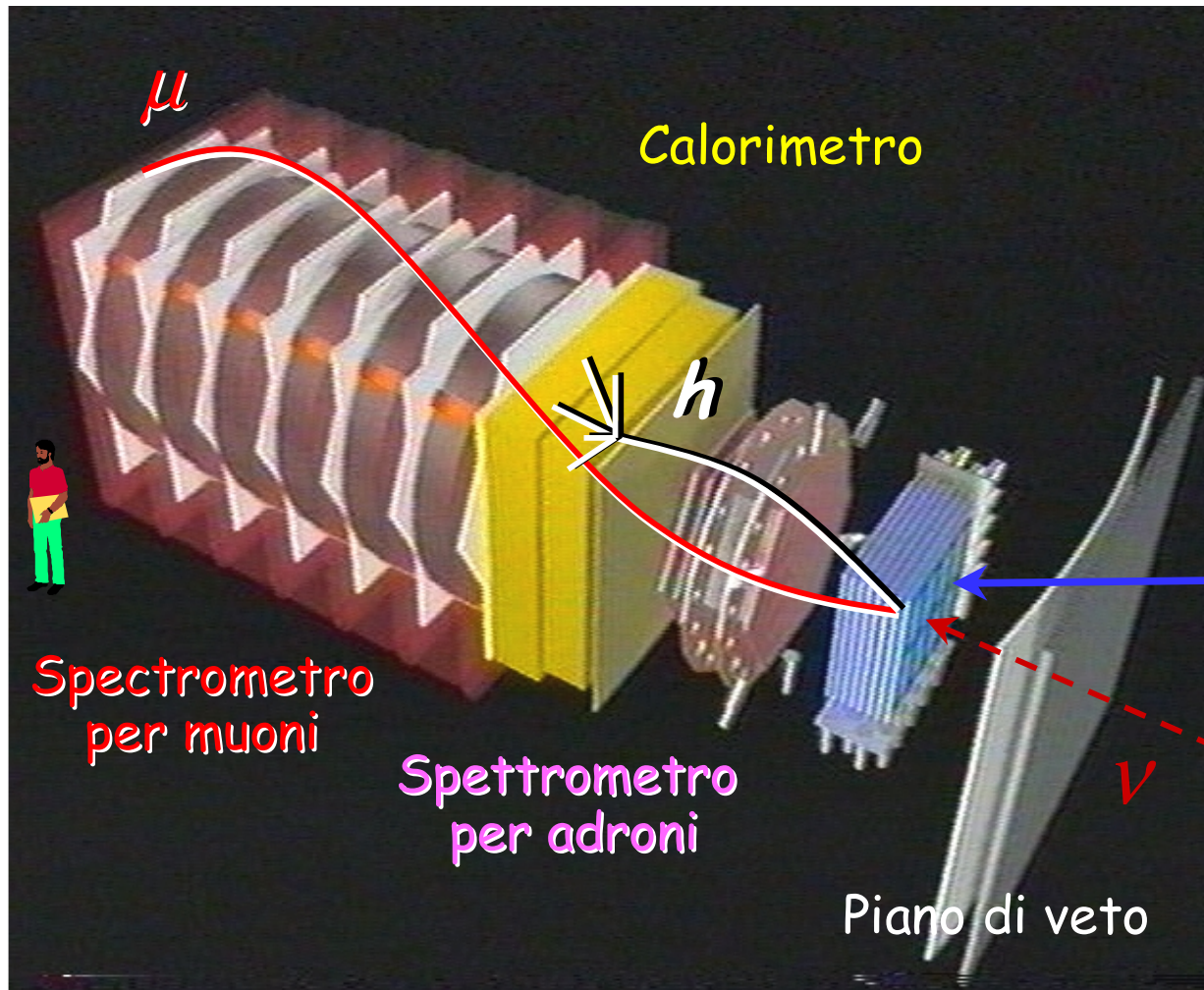
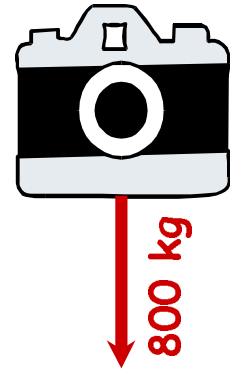
... e gli straordinari anelli osservati nei suoi resti  
nel 1994 dall'Hubble Space Telescope  
(eccezionale risoluzione possibile fuori dall'atmosfera)





# CHORUS

una "macchina fotografica" per  
micro-immagini di interazioni di neutrini  
prodotti da acceleratori!



## Rivelatori "elettronici"

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

## Fibre ottiche scintillanti e altre tecniche



**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.**

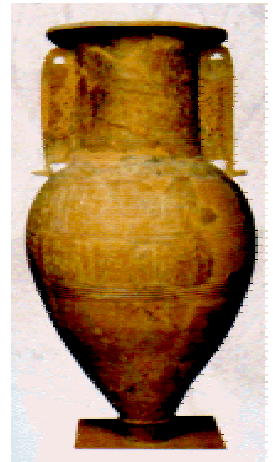
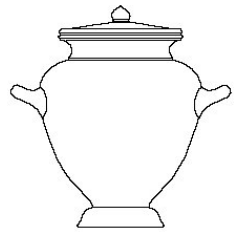
Li miei compagni fec'io sì aguti,  
con questa orazion picciola, al cammino,  
che a pena poscia li avrei ritenuti;  
e volta nostra poppa nel mattino,  
dei remi facemmo ali al folle volo,  
sempre acquistando dal lato mancino.

# Ulisse fu infatti

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

con intelligenza e  
astuzia  
sperimentale

Ulisse 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

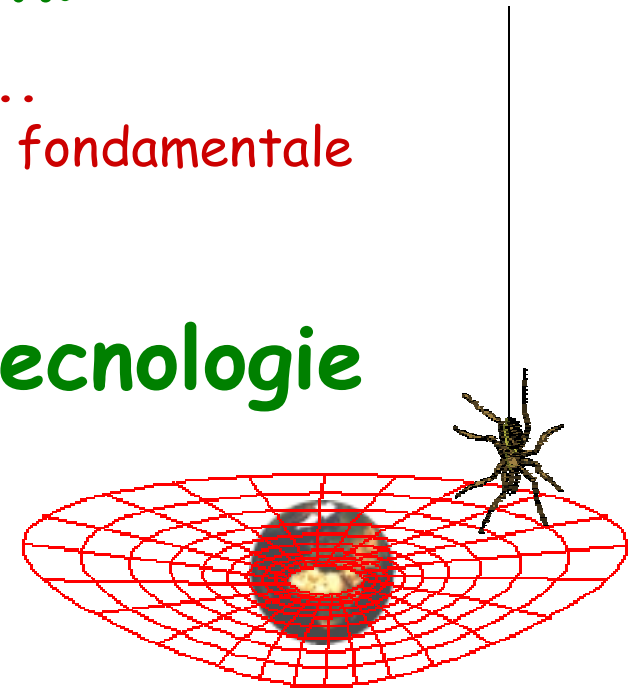
La ricerca "fondamentale" apre la strada a future applicazioni

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

Nascita e sviluppo di nuove tecnologie

World Wide Web nato al CERN

Ricerca ↔ Tecnologia

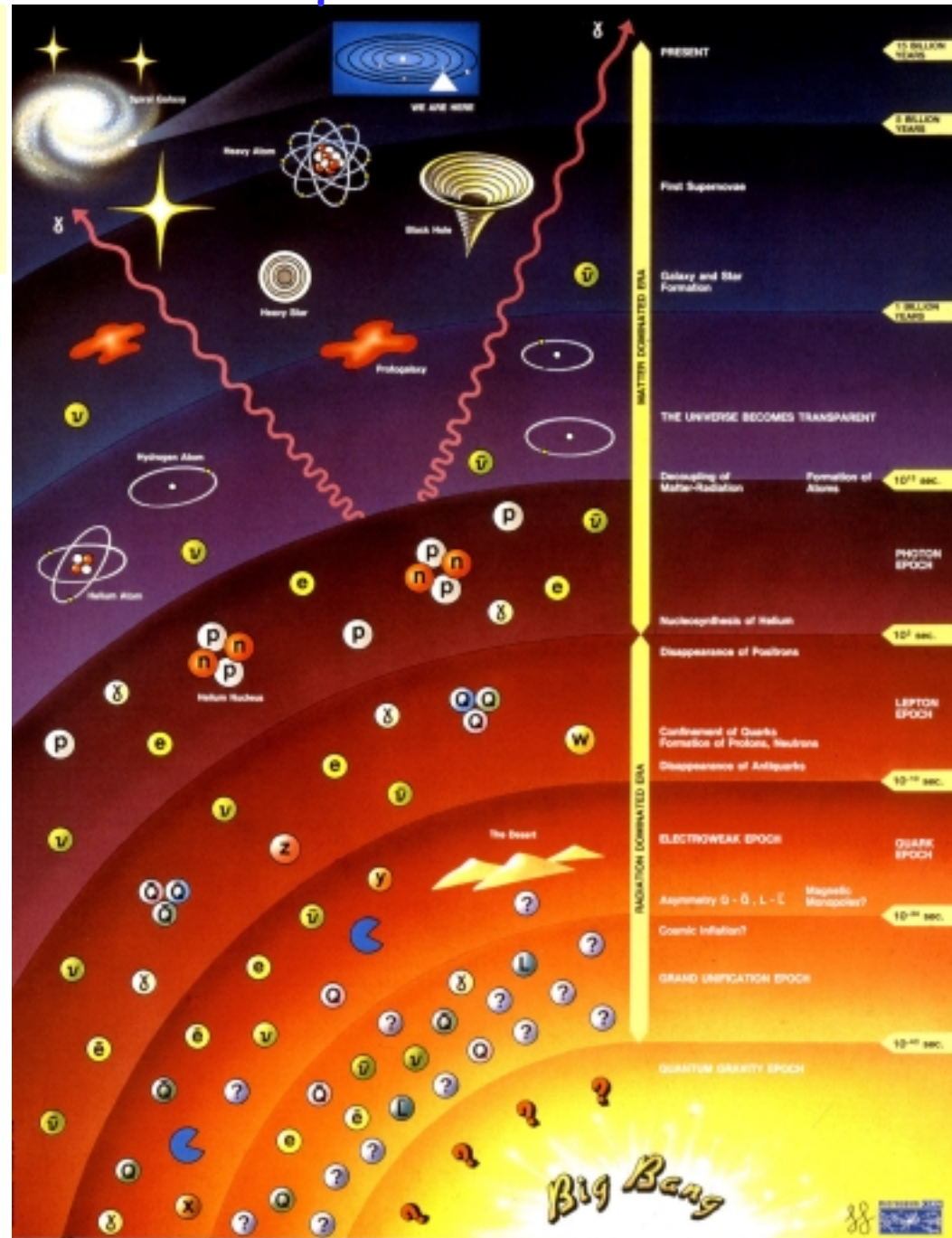


Formazione di competenze e professionalità

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

$10^{13}$  secondi

$10^2$  s

$10^{-10}$  s

$10^{-34}$  s

$10^{-43}$  s

Un momento importante ↗

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

L'universo diventa trasparente !

L'inizio rapidissimo ↻

# Misteri

Dalla galassia della  
porta accanto ...

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



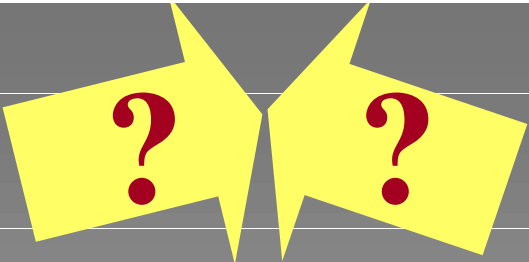
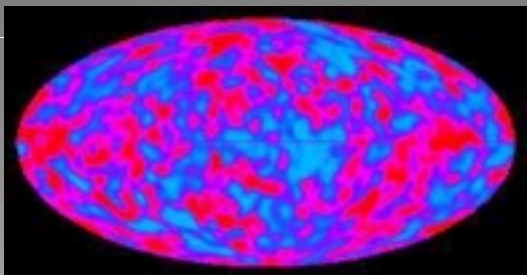
... agli "oggetti" più lontani

(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 a 3°K



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

quarks

