

“Divagazioni” sulla fisica delle particelle

La fisica delle particelle come pretesto per fare alcune semplici considerazioni di fisica

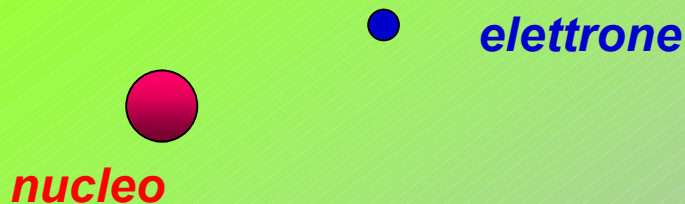
- **La struttura della materia**
- **Le particelle fondamentali**
- **Le interazioni fondamentali**

Gli Atomi

Un atomo è composto da un nucleo di carica elettrica positiva, e dagli elettroni, di carica elettrica opposta

La carica elettrica totale di un atomo è **ZERO**.

PERCHE' ? E se non fosse zero ?



Perche' e' zero non lo sappiamo.

Potrebbe nascondere qualcosa di molto profondo, ovvero un legame tra la struttura del protone e quella dell'elettrone

E se non fosse esattamente zero ?

Supponiamo $(|q_e| - |q_p|) / |q_e| = 10^{-15}$

Calcoliamo quale sarebbe la forza elettrica fra terra e sole:

$$N_{\text{protoni_Terra}} = M_{\text{terra}} / M_p = 6 \cdot 10^{24} / 1.6 \cdot 10^{-27} = 3.75 \cdot 10^{51}$$

$$N_{\text{protoni_Sole}} = M_{\text{sole}} / M_p = 2 \cdot 10^{30} / 1.6 \cdot 10^{-27} = 1.25 \cdot 10^{57}$$

$$q_{\text{terra}} = q_p \cdot 10^{-15} \cdot N_{\text{protoni_terra}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-15} \cdot 3.75 \cdot 10^{51} = 6 \cdot 10^{17} \text{ C}$$

$$q_{\text{sole}} = q_p \cdot 10^{-15} \cdot N_{\text{protoni_Sole}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-15} \cdot 1.25 \cdot 10^{57} = 2 \cdot 10^{23} \text{ C}$$

$$F_{\text{terra_sole}}^{\text{elett}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{\text{terra}} q_{\text{sole}}}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{1.2 \cdot 10^{41}}{(1.5 \cdot 10^{11})^2} = 4.8 \cdot 10^{28} \text{ N}$$

Per confronto la Forza di Gravita' fra terra e sole:



$$F_{\text{terra_sole}}^{\text{grav}} = G \frac{M_{\text{terra}} M_{\text{sole}}}{r^2} = 6.7 \cdot 10^{-11} \frac{1.2 \cdot 10^{55}}{(1.5 \cdot 10^{11})^2} = 3.6 \cdot 10^{22} \text{ N}$$

La forza di gravita' terra-sole sarebbe trascurabile rispetto alla forza elettrica !!!

In realta' non sarebbe possibile costituire aggregati di materia

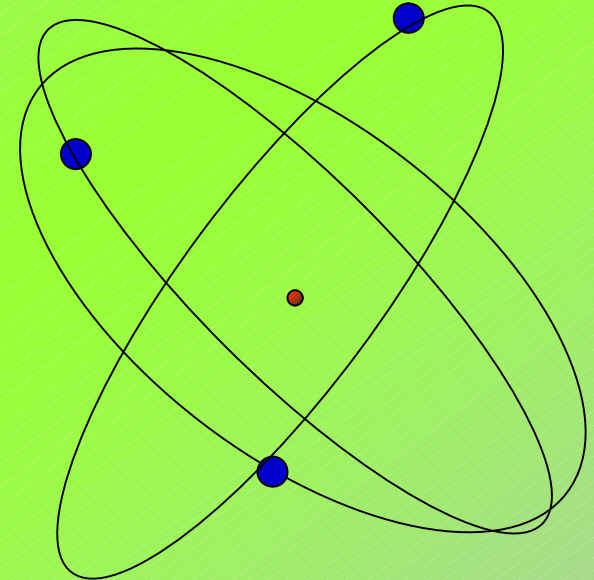
Gli Atomi

L'intera **MASSA** dell'atomo è contenuta quasi completamente nel Nucleo.

La massa degli **elettroni** è infatti circa **2000 volte** inferiore a quella del nucleo.

Eppure il **nucleo** ha dimensioni assolutamente trascurabili rispetto alle dimensioni dell'atomo (1/10000)

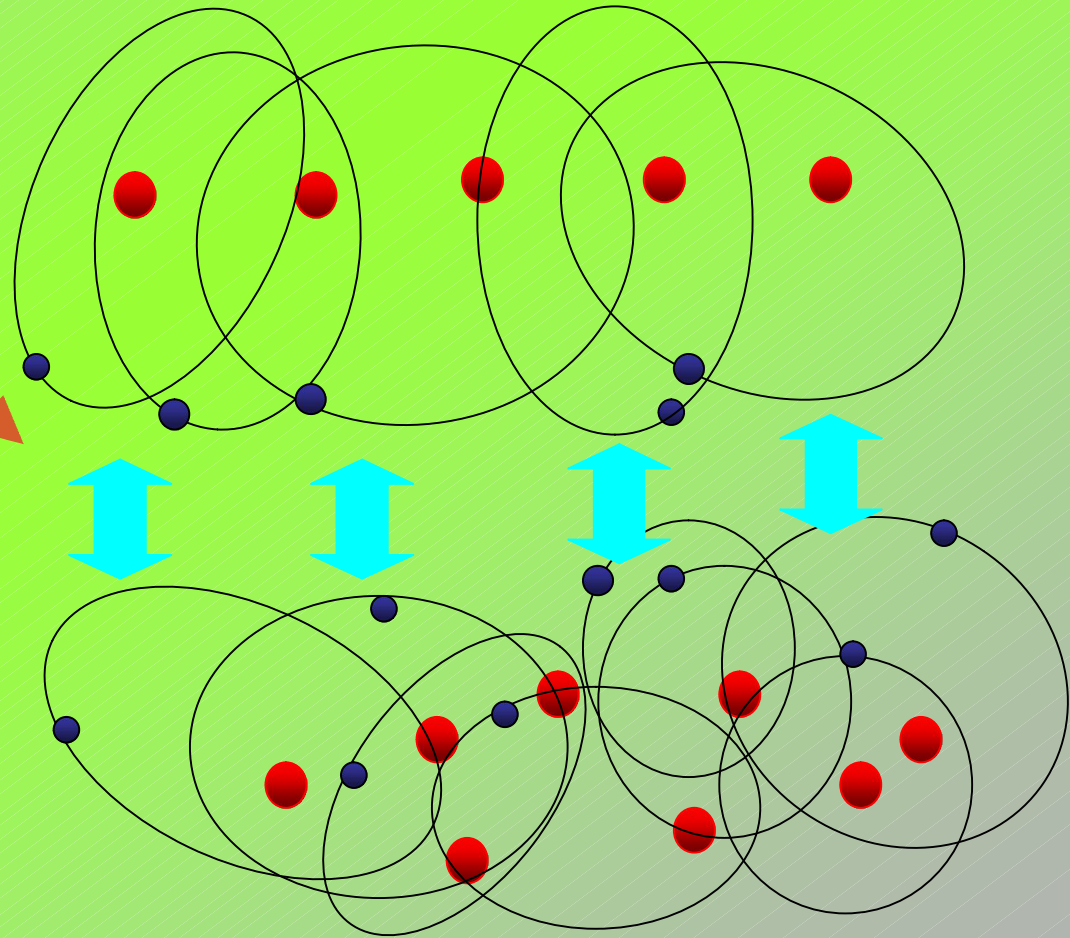
Il **VOLUME** degli atomi, e quindi della materia, è dato quindi dagli presenza degli elettroni, e **dall'interazione elettromagnetica fra nucleo e elettroni**

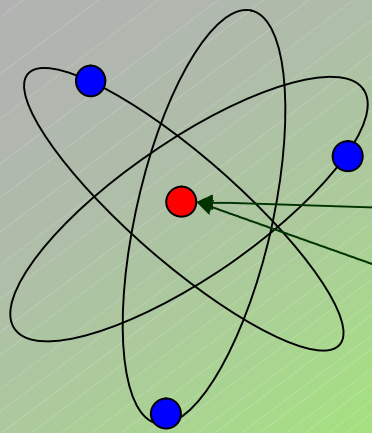


Gli atomi

Il modo in cui percepiamo un oggetto, dipende dall'interazione elettromagnetica fra noi e la materia.

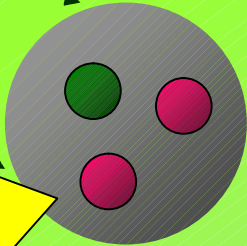
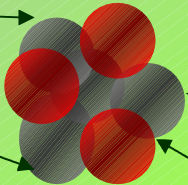
Innumerevoli fenomeni con cui conviviamo, dovuti alla presenza di **cariche elettriche** nella materia





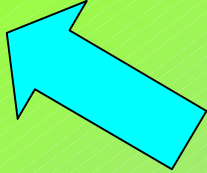
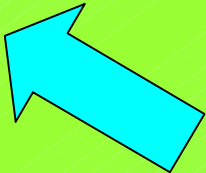
nucleo

protone e
neutrone

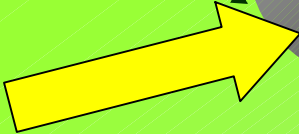
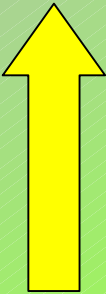


quark

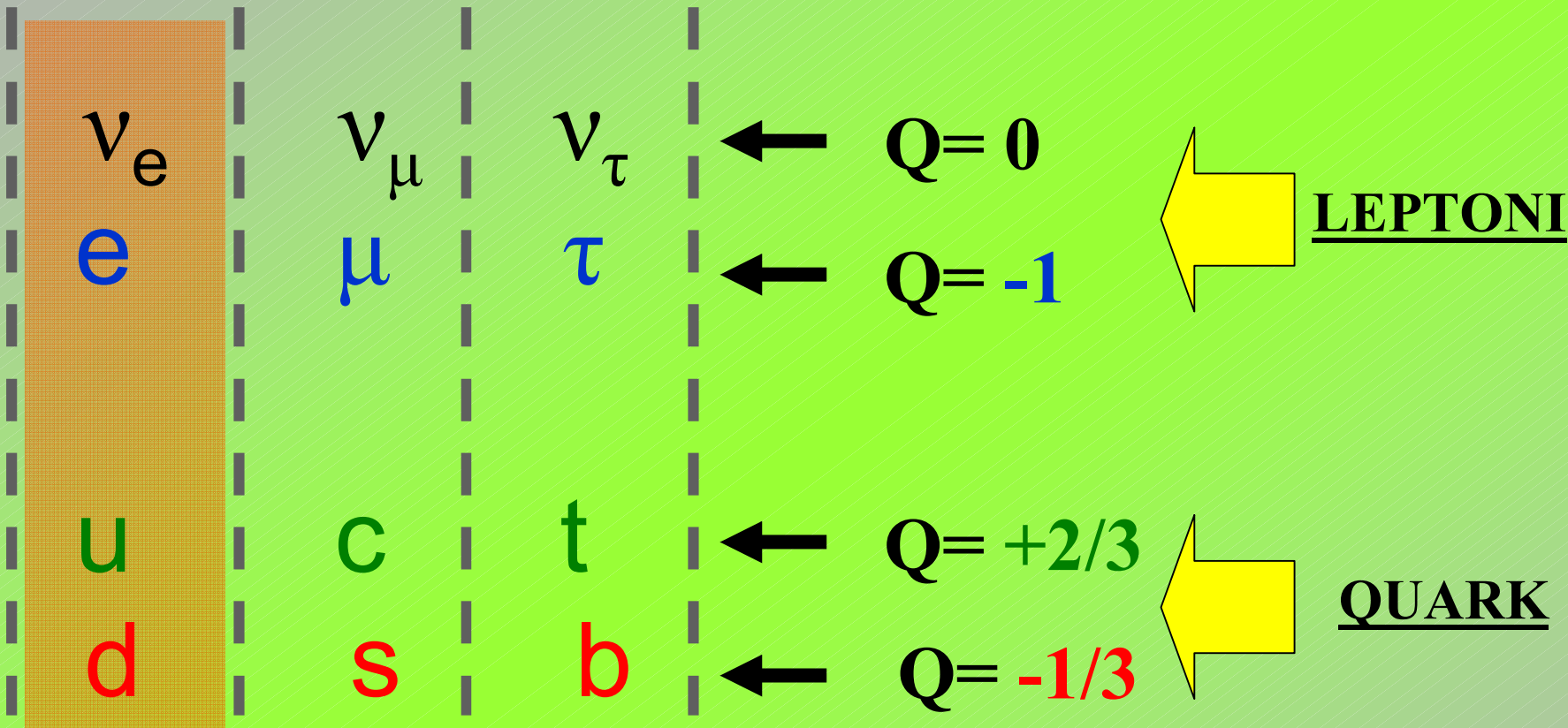
elettrone



Esiste un legame tra la carica elettrica dei quark e dell'elettrone ?



Le particelle fondamentali della natura hanno spin = 1/2



3 famiglie

3 famiglie

...piu' le corrispondenti antiparticelle

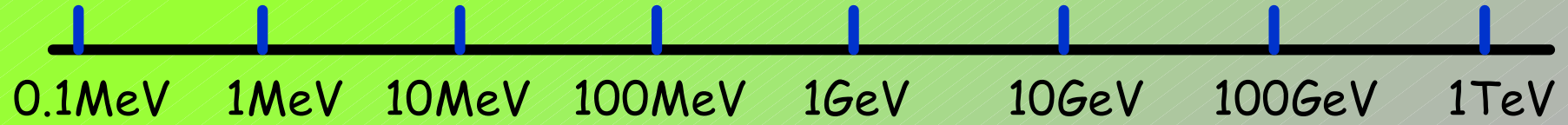
Masse delle particelle fondamentali

Perche' questa differenza di masse ?

Materia ordinaria

A yellow rounded rectangle highlights the particles that constitute ordinary matter: the up quark (u), the down quark (d), and the electron (e).

W^\pm, Z^0



u

d

e

c

s

μ

b

τ

t

Fotone e gluoni: massa nulla
Neutrini: massa "quasi" nulla

Le Interazioni fondamentali

- Tutti i fenomeni che conosciamo sono interpretabili mediante 4 forze, o “interazioni” fondamentali.
 - 1) Int. **GRAVITAZIONALE**
 - 2) Int. **ELETTROMAGNETICA**
 - 3) Int. **DEBOLE**
 - 4) Int. **FORTE** (o nucleare, o “di colore”)

Le interazioni fondamentali

ν_e

ν_μ

ν_τ

Debole, Gravitazionale

e

μ

τ

Debole, Gravitazionale,
Elettromagnetica

u

c

t

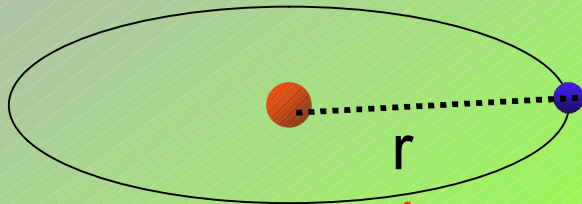
Debole, Gravitazionale,
Elettromagnetica, Forte

d

s

b

Potrebbe un atomo essere tenuto assieme dalla forza di gravita' ?



$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_e q_p}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{(0.5 \cdot 10^{-10})^2} = 9.2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Raggio di Bohr
dell'atomo di Idrogeno

$$F_{gr} = G \frac{M_e M_p}{r^2} = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 1.7 \cdot 10^{-27}}{(0.5 \cdot 10^{-10})^2} = 4.1 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

**39 ordini di
grandezza !!!**

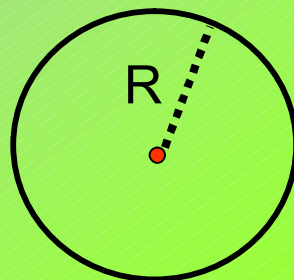
La forza di gravita' e' assolutamente trascurabile
nel mondo subatomico

Calcolo del raggio dell'atomo

$$m \frac{v^2}{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R_e^2}$$

$$v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mR_e}$$

Atomo
"elettrico"



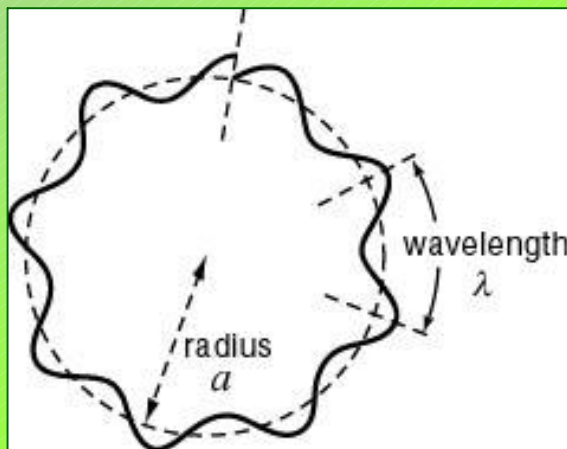
Atomo
"gravitaz."

$$m \frac{v^2}{R} = G \frac{Mm}{R_g^2}$$

$$v^2 = G \frac{M}{R_g}$$

Relaz. di De Broglie

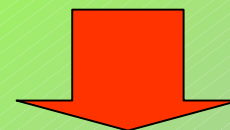
$$2\pi R = (n) \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \Rightarrow v = \frac{\hbar}{mR}$$



$$\frac{R_g}{R_e} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{GMm}$$



$$\sim 10^{-39}$$



$$R_g = 10^{24} \text{ m} \sim 10 \text{ milioni di anni luce}$$

La scala di Planck

In quale caso la gravita' diventa importante su scala subnucleare ?

Un corpo di massa M ha "associato" un buco nero di raggio

$$r = 2 \frac{GM}{c^2}$$

Si chiama Raggio di Schwarzschild e si calcola

classicamente imponendo che $v=c$ sia la velocita' di fuga da M:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GMm}{r}$$

Nel caso della terra $r = 3 \text{ mm} !!!$

Problema: che energia deve avere una particella perche' la sua lunghezza di De Broglie associata sia pari al raggio di

Schwarzschild r ?

$$E = \hbar \nu = \frac{\hbar c}{\lambda} = Mc^2 \rightarrow \lambda = \frac{\hbar}{Mc} = r = 2 \frac{GM}{c^2}$$

$$M^2 = \frac{\hbar c}{2G} \rightarrow (E = Mc^2) \rightarrow E = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{2G}}$$

$\sim 10^{19} \text{ GeV}$ Energia di Planck

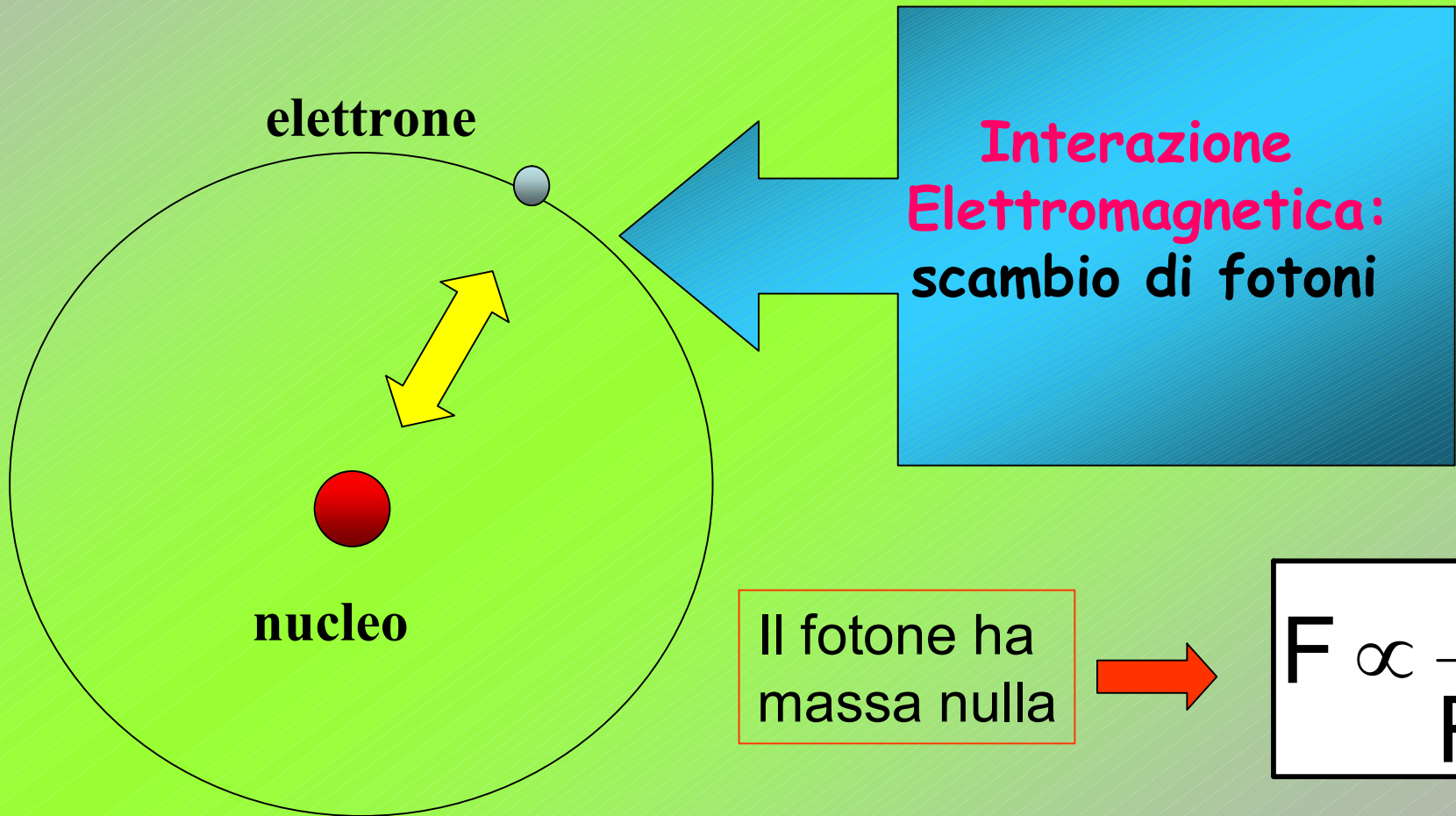
$$\lambda = \sqrt{\frac{2G\hbar}{c^3}}$$

$\sim 10^{-33} \text{ cm}$ Lunghezza di Planck

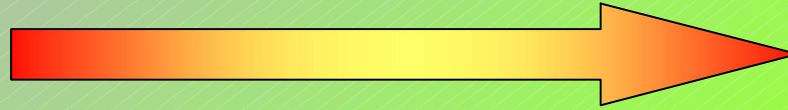
Gravita' non piu' trascurabile !!!

**Le interazioni avvengono
mediante scambio di particelle
di spin intero
(1 o 2), che si chiamano
“portatori della forza”**

Esempio: l'atomo

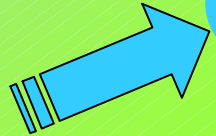


PRIMA



DOPO

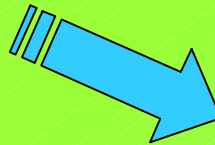
particella A



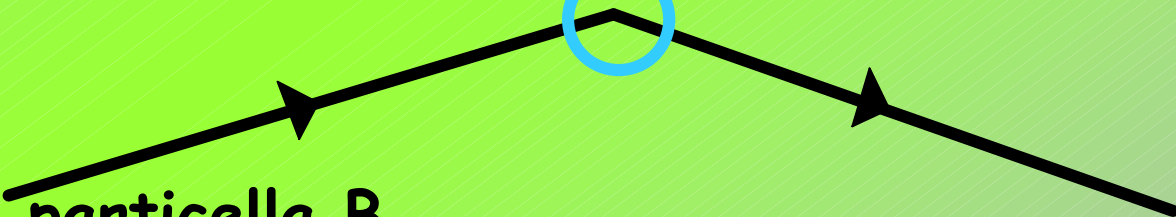
**Interazione
carica-mediatore**



**Mediatore della forza,
scambiato tra A e B**

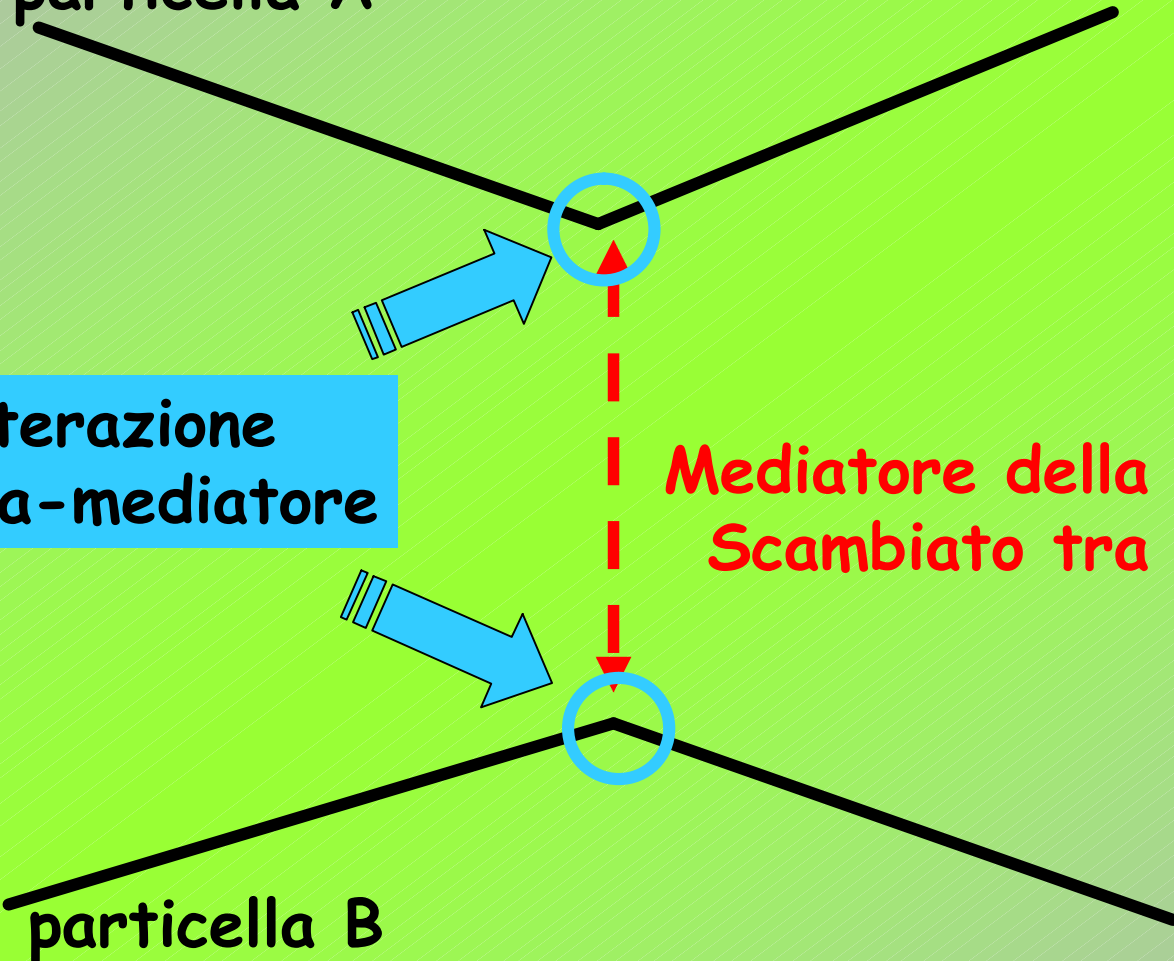


particella B



Int. Elettrom. Il fotone

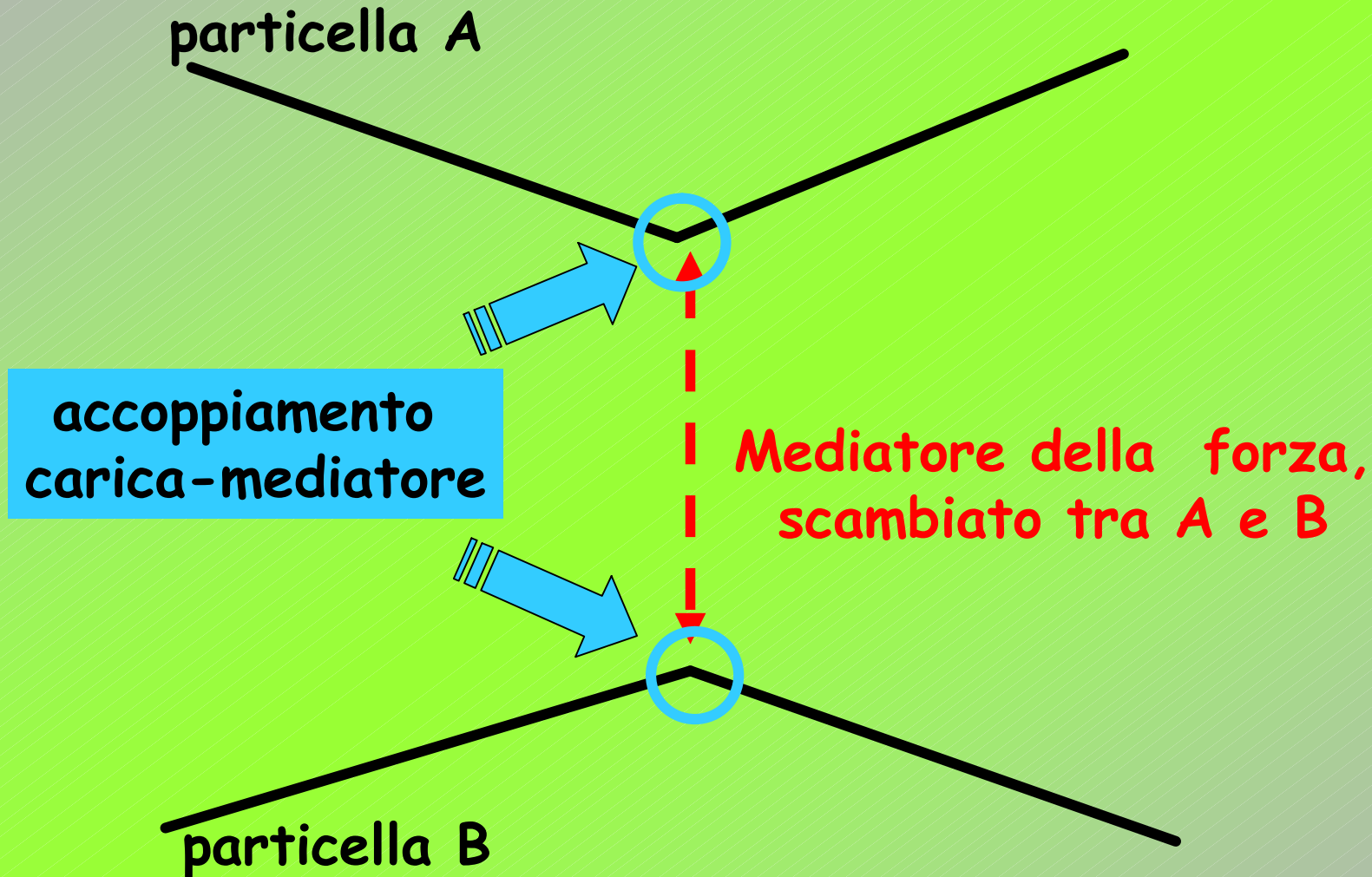
particella A



Interazione
carica-mediatore

Mediatore della forza,
Scambiato tra A e B

La probabilita' che un processo avvenga dipende dall'intensita' dell' accoppiamento carica-mediatore



Caratteristiche delle interazioni

- **Interazione forte:**
agisce su oggetti "colorati" (quark e gluoni).
raggio di azione $< 10^{-13}$ cm
- **Interazione elettromagnetica**
agisce su cariche elettriche
raggio di azione infinito
- **Interazione debole**
agisce sulle cariche deboli
raggio di azione \ll dimensioni del nucleo
- **Interazione Gravitazionale**
agisce sulle masse-energie
raggio di azione infinito

"Gerarchia" delle intensita' delle interazioni

Forza fra due protoni in contatto fra loro

- **Interazione forte**
(1)
- **Interazione elettromagnetica**
($\sim 10^{-2}$)
- **Interazione debole**
($\sim 10^{-7}$)
- **Interazione Gravitazionale**
($\sim 10^{-39}$)

La **struttura matematica** delle interazioni fondamentali si ricava dalla richiesta che le leggi della natura siano invariante (non cambino) per cambiamenti di fase del tipo:

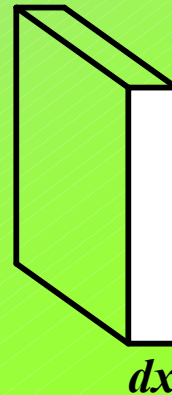
$$\psi \rightarrow \psi e^{i\theta(x)}$$

Questa si chiama "**invarianza di Gauge**" ed e' uno dei principi piu' importanti della fisica.

Le interazioni fondamentali nascono dalla invarianza di Gauge

La sezione d'urto: come una particella vede un bersaglio

Flusso incidente Φ
[cm⁻² s⁻¹]
(uniforme sulla superficie S)



Bersaglio di superficie S,
spessore dx , contenente
 n bersagli per cm³

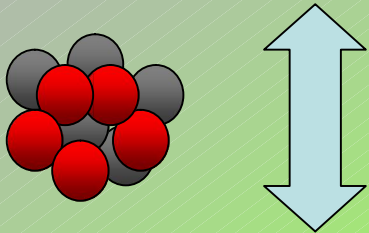
Numero di interazioni al secondo = $\Phi S n \sigma dx$

- La sezione d'urto puo' dipendere dall'energia e da altre caratteristiche del proiettile e del bersaglio
- La sezione d'urto dipende dal tipo di interazione che entra in gioco

Sezione d'urto:
L'area offerta dal bersaglio al proiettile

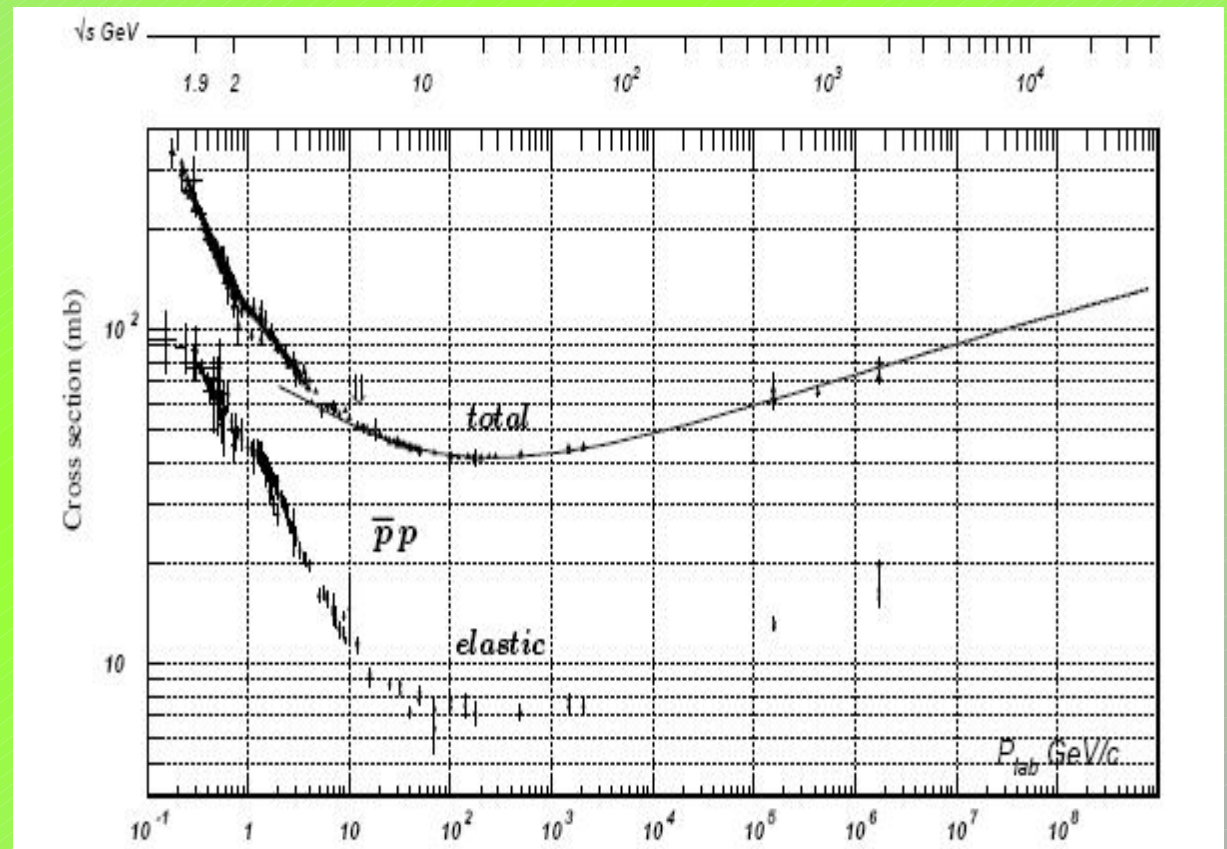
Le particelle subatomiche non si comportano come bocce di biliardo !!!

Le sezioni d'urto si misurano in barn: **1 barn = 10^{-28} m^2**

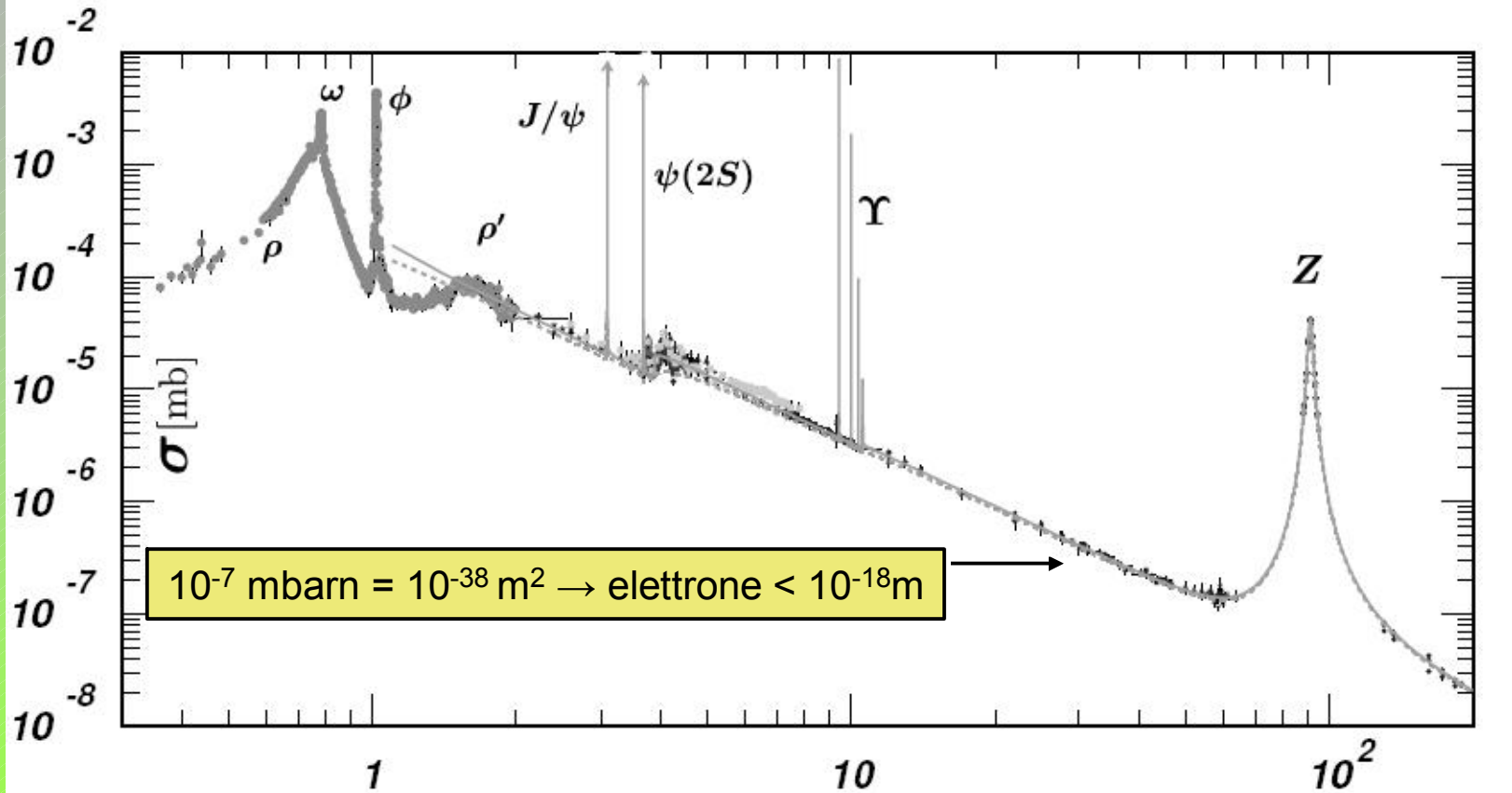


Dimensioni tipiche del nucleo: 10^{-15} m
1 barn \sim dimensioni di un nucleo di uranio

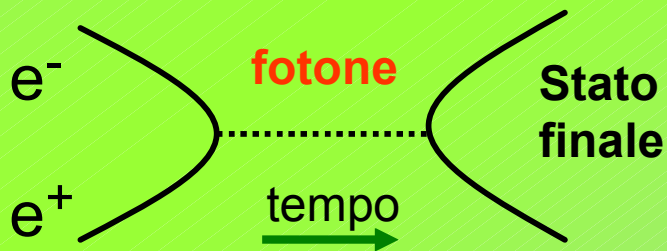
Sez. d'urto p – p



Sezione d'urto e^+e^- vs. E_{cm}



Perche' cala con l'energia ? (picchi esclusi)

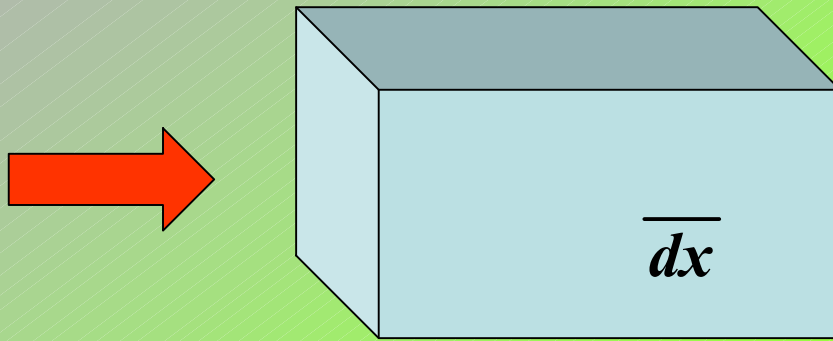


Fotone "contro-natura", che viola il principio di cons. energia !

Puo' farlo grazie a $\Delta E \Delta t > h$ ma piu' e' aassivo e meno e' probabile che il processo avvenga

Neutrino di $E=3$ MeV (ad esempio proveniente dal sole):

$$\sigma = 10^{-19} \text{ barn} = 10^{-47} \text{ m}^2$$



Se sparo N_0 neutrini, nell'unita' di lunghezza dx
ne interagiranno $dN = -N_0 n \sigma dx$ (n = numero di bersagli per unita' di volume)



$$N = N_0 e^{-x/\lambda}$$

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \text{ e' il } \mathbf{\text{libero cammino medio}}$$

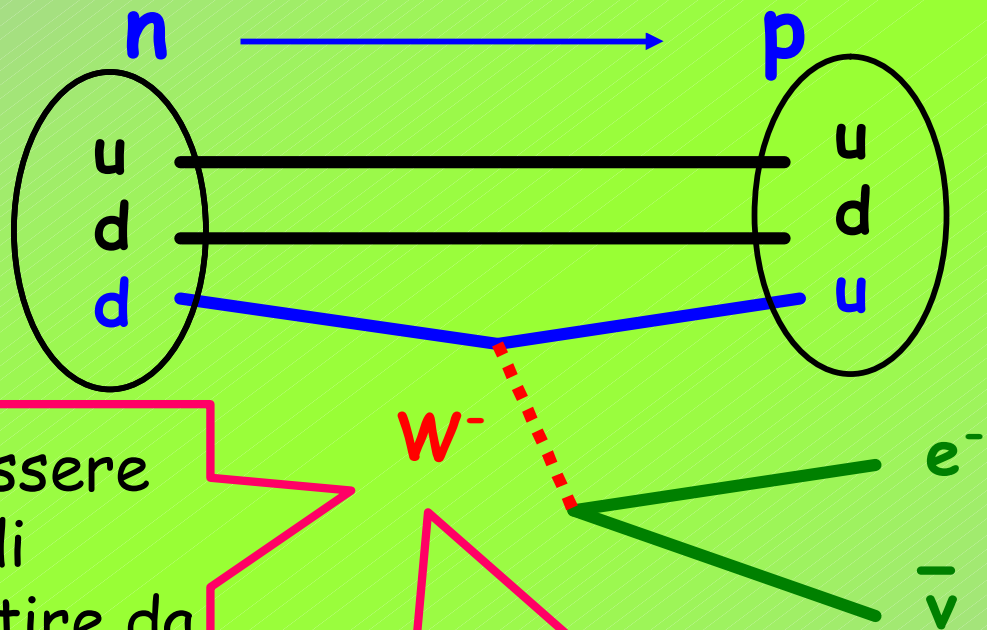
Per $E=3$ MeV, per i neutrini, $\lambda \sim 100$ anni luce !

Su una dist. L , la probab. di interaz. $e' = 1 - e^{-L/\lambda} \sim 10^{-18}$ per metro H_2O

Caso "basse energie": decadimento β .



$$M_n - M_p \sim 1 \text{ MeV}$$



"Ostacolato": deve essere prodotto un oggetto di massa $\sim 80 \text{ GeV}$ a partire da 0.001 GeV disponibili.

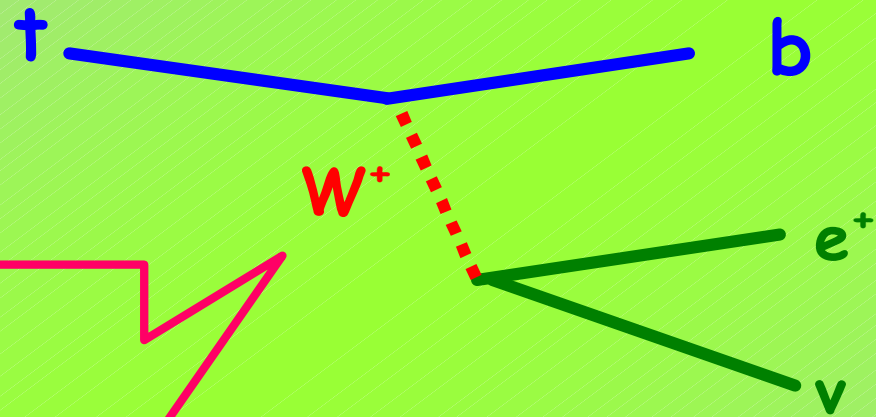
Vita media "lunga"

Ha un raggio di azione molto piccolo perche' la W puo' esistere solo per un tempo molto breve, compatibile con il principio di indeterminazione di Heisenberg: $\Delta t \cdot \Delta m > \hbar$

Caso "alte energie": decadimento quark top.

$$t \rightarrow b e^+ \nu$$

$$M_t - M_b \sim 170 \text{ GeV}$$



"Favorito" : deve essere prodotto un oggetto di massa $\sim 80 \text{ GeV}$ a partire da 170 GeV disponibili.

Vita media "brevissima"

La W e' **reale** e non virtuale, perche' c'e' energia a sufficienza per produrla.

In queste condizioni il processo debole avviene molto facilmente.