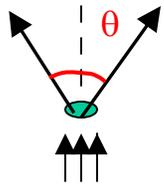


Particelle elementari e forze fondamentali

“**Particella elementare**”: non e’ una categoria assoluta, l’**“elementarieta”** dipende dallo strumento di osservazione che spesso e’ un’altra particella elementare:

Risoluzione spaziale \longleftrightarrow energia dell’interazione

Con la luce in un microscopio abbiamo una risoluzione Δr :



$\Delta r \sim \lambda / \sin\theta$, nel caso di particelle: $\lambda = h/p \rightarrow \Delta r \sim \lambda / p \sin\theta \sim h/q$
con q impulso trasferito nell’interazione. Piu’ e’ grande l’impulso Trasferito maggiore e’ la risoluzione (**potere separatore**).

Aumentando l’energia dell’interazione abbiamo scoperto vari **“stati elementari”**:

- **Atomi** (Democrito) e molecole (elementi chimici 1700-1800)
- **Struttura atomica** : fisica atomica (Rutherford inizio 1900)

$$E \lesssim \text{KeV}, r \gtrsim 10^{-8} \text{ cm}$$

-**Struttura del nucleo**: fisica nucleare, anni 30, protoni e neutroni
 $E \sim \text{MeV}$, $r \sim 10^{-13} \text{cm}$

-**Struttura dei nucleoni**: fisica subnucleare, dagli anni 50.
 $E > \text{GeV}$, $r < 10^{-13} \text{cm}$

Oggi disponiamo di 'microscopi' in grado di far interagire le particelle con energie di TeV

Particella elementare

-Non ha struttura interna: e' caratterizzata solo da una massa, carica elettrica, spin (momento magnetico).

-Non ha dimensione: $d \lesssim 10^{-18} \text{ m}$.

Ex: distribuzione di carica di un elettrone $\rho(\mathbf{r}) = q \delta(\mathbf{r})$

distribuzione di carica di un protone: $\rho(\mathbf{r}) = (q / r_0) \exp(-r/r_0)$ ($r_0 \sim 0.2 \cdot 10^{-13} \text{cm}$)

-Non ha stati eccitati.

Se l'energia dell'interazione è sufficiente si possono creare nuove particelle, Ex : $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$ se $\sqrt{s} \geq 2m_\pi$, $\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$

I fenomeni sperimentali sono inquadrati teoricamente in una: **“Teoria quantistica di campo”** che incorpora sia la relatività che la meccanica quantistica: quantizzazione del campo mediatore dell'interazione.

Particelle elementari oggi conosciute a 10^{-18} m (10^3 GeV)

– **6 leptoni + 6 quark** tutte a spin $1/2$ e con “masse” che vanno da $0.5 \text{ MeV}/c^2$ a $175 \text{ GeV}/c^2$

–4 interazioni fondamentali:

- 1) gravitazionale;
- 2) debole;
- 3) elettromagnetica;
- 4) forte.

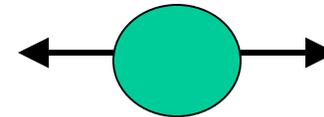
Intensità
crescente

i quark sono soggetti a tutte e 4 le interazioni mentre i leptoni sperimentano solo le prime 3.

Simmetrie

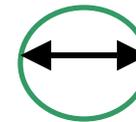
Simmetrie di spazio tempo

Parita'	P
Parita' intrinseca	P
Inversione temporale	T



Simmetrie interne

Isospin	I
Coniugazione di carica	C
G parita'	G



Simmetrie locali della lagrangiana (gauge)

Generazione delle interazioni tra le particelle → i mediatori

Simmetrie ↔ conservazione di **osservabili fisiche** (Noether)

Ex: in elettrodinamica: invarianza per cambiamento locale della fase:

$$\psi \rightarrow e^{i\theta} \psi \text{ (gruppo } U(1))$$

conservazione della carica elettrica

Applicata alla lagrangiana dell'elettrone libero genera un campo vettoriale mediatore:

il fotone e la QED

- Quali altre simmetrie (e mediatori) per le altre interazioni?
- Si possono unificare le 4 interazioni e sotto quale simmetria?

Oggi disponiamo di:

- Teoria unificata elettrodebole validata dalla scoperta di W/Z, quark top, molte misure di precisione. Manca pero' ancora un elemento: **il bosone di Higgs (scoperto nel 2012 ?)**
- Teoria delle interazioni forti la **QCD** (simile alla QED)
- Ma la gravita'!?

Fisica delle particelle, cosmologia e astrofisica

Si va sempre piu' consolidando il legame tra la fisica delle particelle e la fisica del cosmo: l'origine e l'evoluzione dell'universo e la fisica delle galassie e delle stelle (astrofisica) dipendono in maniera cruciale dalle particelle e dalle loro caratteristiche e interazioni. **Ex.**

**Il numero dei neutrini e la loro massa,
il problema della materia oscura,
l'origine dei raggi cosmici,
la stabilita' della materia,**

...

Il sole come laboratorio delle 4 forze

- Inizialmente **condensazione gravitazionale** da una nuvola di idrogeno fino a una temperatura di 10^7 K: **innesco della fusione termonucleare**.
- Prima reazione di fusione e' debole: $pp \rightarrow d+e^++\nu_e$ ("lenta")
- Gli stadi successivi coinvolgono reazioni forti e elettromagnetiche ex:



L'energia liberata si trasmette essenzialmente come raggi X dal centro del sole alla fotosfera con interazioni elettromagnetiche
ma anche come radiazione di neutrini che trasportano una frazione significativa di tutta l'energia emessa dal sole

Super-Kamiokande: Neutrini solari

$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$: energia di soglia: 5 MeV, sensibile ai neutrini solari del B

I neutrini vengono dal sole

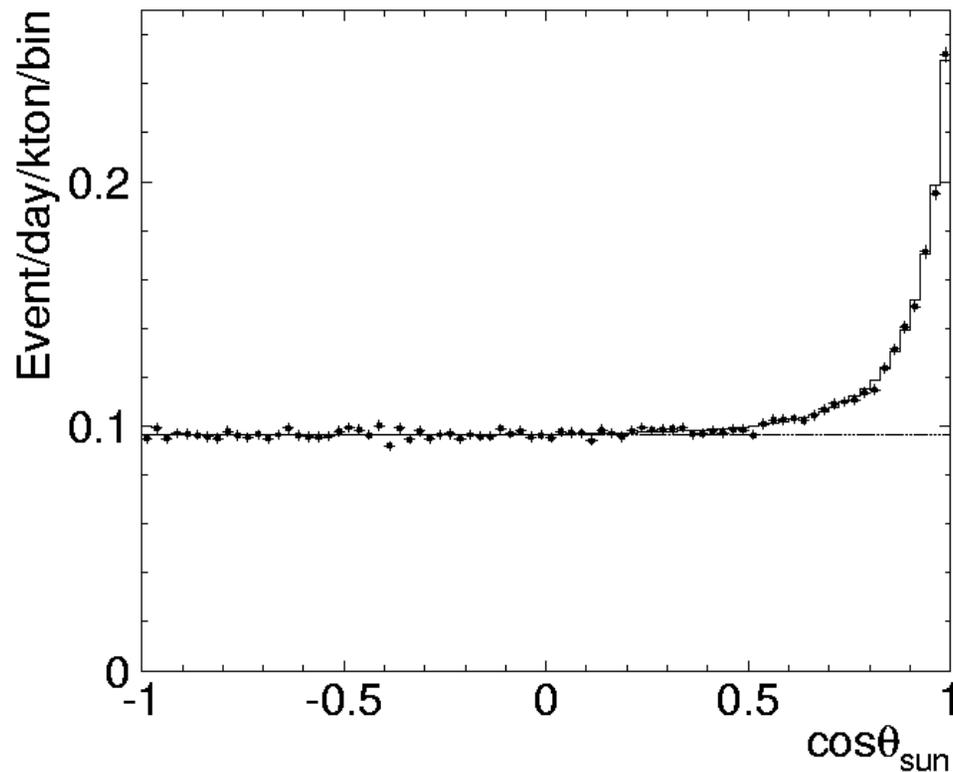
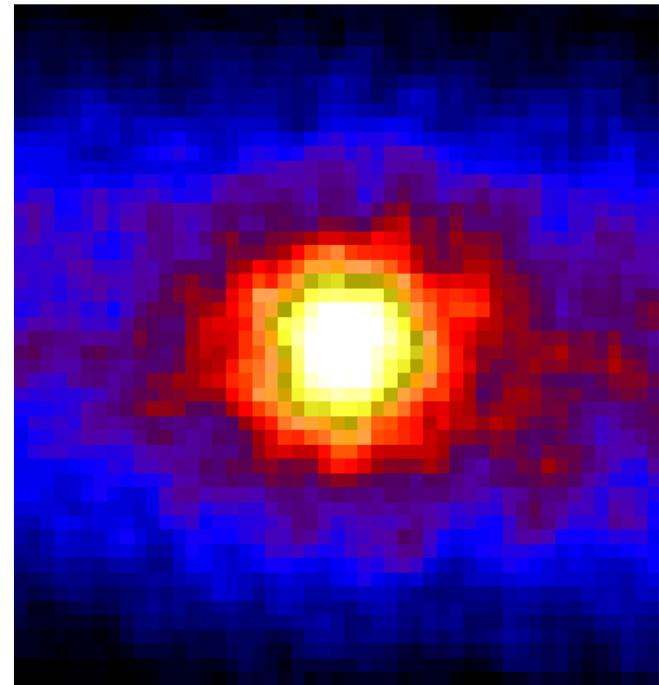


Foto del sole con i neutrini



Il sistema di unita' naturali i.e. $c = 1, \hbar = 1$

Nel SI, $c=2.998 \cdot 10^8$ m/s e $\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34}$ J s, $1 \text{ GeV}= 1.6 \cdot 10^{-10}$ J

-**massa** (mc^2) e impulsi (pc) in **GeV**. Ex $m_p=1.7 \cdot 10^{-27}$ Kg= 0.938 GeV

-**lunghezza** ($\lambda_c = \hbar/mc$) in **GeV⁻¹** ex $1 \text{ GeV}^{-1} = 0.197 \cdot 10^{-13}$ cm= 0.197 fm

-**aree** in **GeV⁻²** ex $1 \text{ GeV}^{-2} = 0.0388$ fm²= $0.388 \cdot 10^{-27}$ cm²= 0.388 mbarn

-**tempi** ($t=\lambda_c/c$) **GeV⁻¹** ex $1 \text{ GeV}^{-1} = 6.57 \cdot 10^{-25}$ s

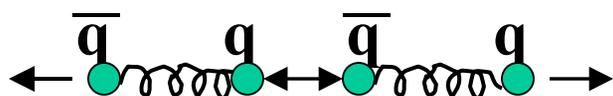
-**forza**: $F=ma=mlt^{-2} = m^2$ i.e. **GeV²**

ex: $1 \text{ dyne} = \text{gr cm/s}^2 = 1.24 \cdot 10^{-11}$ GeV²

ex: potenziale quark-antiquark (quarkonio): 

$$V(r) = br - \frac{a}{r} + V_0$$

Se $b=0.18 \text{ GeV}^2$ $F=15$ ton; se $r=1 \text{ fm} \sim 5 \text{ GeV}^{-1}$, $V(r) = 0.9 \text{ GeV}$



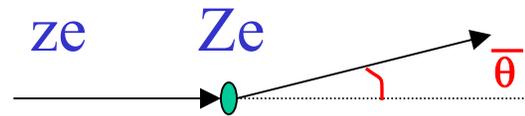
$m_\pi = 0.14 \text{ GeV}$

Ex. $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

$$S.I. E_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \Rightarrow \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right] = \text{MeV} \cdot \text{fm} \Rightarrow$$

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \text{ e' adimensionale} = \frac{1}{137} \equiv \alpha$$

Ex: scattering Rutherford:



$$\begin{aligned} \sigma(\theta > \bar{\theta}) &= \frac{\pi z^2 Z^2}{4} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right]^2 \frac{1}{T^2} \frac{1}{\tan^2 \frac{\bar{\theta}}{2}} = \frac{\pi z^2 Z^2}{4} \alpha^2 \left(\frac{\hbar c}{T} \right)^2 \frac{1}{\tan^2 \frac{\bar{\theta}}{2}} = \\ &= \frac{\pi z^2 Z^2}{4} \left[\frac{1}{137} \right]^2 \left[\frac{197}{T(\text{MeV})} \right]^2 \text{fm}^2 \frac{1}{\tan^2 \frac{\bar{\theta}}{2}} \end{aligned}$$

Se $T = 1 \text{ MeV}$, $\bar{\theta} = \pi/2$, $\sigma(\theta > \pi/2) = 1.6 \text{ fm}^2$, se $z=1$, $Z=1$

Per la sezione d'urto differenziale abbiamo (formula di Rutherford):

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(Zz)^2}{16} \left[\frac{197}{137 \cdot T(\text{MeV})} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} (\text{fm}^2 \text{sr}^{-1})$$

Ex. $\sigma(\text{Thomson}) E_\gamma \ll m_e$

$$\sigma(\gamma e \rightarrow \gamma e) = \frac{8}{3} \pi \frac{\alpha^2}{m_e^2} = \frac{8}{3} \pi \cdot r_e^2 = 0.7 \text{ barn}$$

Ex. Interazione $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ se $s \gg m_\mu^2$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4}{3} \pi \frac{\alpha^2}{s} \quad s = (p_1 + p_2)^2$$

Se siamo nel c.m. $e^+ \longrightarrow \longleftarrow e^-$, se $E(e^+) = E(e^-) = 1 \text{ GeV}$. $s = 4 \text{ GeV}^2$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4}{3} \pi \left[\frac{1}{137} \right]^2 \cdot \frac{1}{4 \text{ GeV}^2} = 2.1 \cdot 10^{-33} \text{ cm}^2 = 21 \text{ nb}$$

Forza gravitazionale

Potenziale Newtoniano: $V = G_N \frac{m_p^2}{r}$

$$G_N = 6.67 \cdot 10^{-11} m^3 Kg^{-1} s^{-2} = 4.17 \cdot 10^{-5} GeV \cdot cm / gr^2 = \\ = 0.67 \cdot 10^{-38} GeV^{-2} \text{ (incertezza } \approx 130 \text{ ppm)}$$

se $m_p = \text{massa protone} \approx 1 GeV$

$$r = 10^{-13} cm \approx 1 fm \approx 5 GeV^{-1} \Rightarrow V \approx 10^{-39} GeV$$

nel caso Coulombiano $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \frac{\hbar c}{\hbar c} = \alpha \frac{0.197 \cdot GeV \cdot fm}{1 fm} \approx 1.4 \cdot 10^{-3} GeV$

\Rightarrow su scala microscopica (fm) la gravita' e' totalmente trascurabile

Notiamo:

$$\sqrt{G_N} \equiv \frac{1}{M_P} \approx 0.8 \cdot 10^{-19} GeV^{-1} = 5.3 \cdot 10^{-44} s = 1.6 \cdot 10^{-33} cm \\ \frac{1}{G_N} \equiv M_P \approx 10^{19} GeV \text{ (massa di Plack)}$$

L'interazione gravitazionale diventa significativa (paragonabile alle altre) a energie (masse) dell'ordine di M_P oppure a distanze $r \sim 10^{-33}$ cm.

Se assumiamo che l'intensità dell'interazione gravitazionale sia come quella elettromagnetica alla massa di Planck quanto vale la corrispondente costante di accoppiamento gravitazionale, α_{GN} , a basse energie (1 GeV)?:

$$\alpha_{GN} \sim \frac{1 \text{ GeV}^2}{M_P^2} \alpha \approx 10^{-38} \quad \alpha \approx 10^{-40}$$

Forza nucleare debole

Responsabile della radioattività' decadimento beta:



Dalla vita media si estrae la costante di accoppiamento

$$T = \frac{1}{\Gamma} \propto G_F^2$$
$$G_F \sim 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{G_F}} \approx 300 \text{ GeV}$$
$$\sqrt{G_F} \approx 0.7 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

→ **Scala a cui le interazioni deboli diventano significative. paragonabili a quelle elettromagnetiche**

A 1 GeV:

$$\alpha_W = \frac{(1 \text{ GeV})^2}{(300 \text{ GeV})^2} \alpha \approx 10^{-5} \quad \alpha \approx 10^{-7}$$

Forza elettromagnetica

Potenziale Coulombiano:

$$V = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Ex. Nell'atomo di idrogeno l'energia di legame (formula di Bohr):

$$|E_1| = \frac{1}{2} \alpha^2 (\mu c^2), \mu = \text{massa ridotta} \approx m_e, \alpha = 1/137$$

$$|E_1| \approx 14eV$$

Per un sistema legato p \bar{p} , $\mu = m_p/2 = 1000 m_e \rightarrow$

$$|E_1| \approx 14KeV$$

La forza dell'interazione e' determinata da α

Forza nucleare forte

L'energia di legame elettromagnetica $p \bar{p} \sim 14 \text{ KeV}$ ma se prendiamo un sistema simile: il deutone : (pn) l'energia di legame e' molto piu' grande $\sim 2 \text{ MeV}$ \longrightarrow

la costante di accoppiamento delle interazioni forti α_S
(e il deutone e' un sistema legato per interazione forte):

$$\alpha_S \sim 100 \alpha \text{ (confinata entro } r \sim 10^{-13} \text{ cm)}$$

L'intensita' relativa delle 4 forze vale:

$$10^{-40} \quad 10^{-7} \quad 10^{-2} \quad 1$$

Unificare la gravita?

$$F \equiv GeV^2, F_N = \frac{G_N m^2}{r^2} \equiv GeV^2, \text{ abbiamo gia' visto } G_N \equiv 1/GeV^2$$

$$1/\sqrt{G_N} = M_P \approx 10^{19} GeV$$

Il flusso del campo gravitazionale H in 3 dimensioni vale:

$$\Phi(H) = 4\pi \cdot r^2 \cdot H = m \cdot G_N \Rightarrow H \propto G_N / r^2$$

Teorema di Gauss in 3+d dimensioni:

$$H' = G_D / r^{2+d}$$

Con $G_D =$ “costante di gravita’ in 3+d dimensioni”

Ma H' deve avere le stesse dimensioni di H quindi se

$$G_N = 1/M_P^2, G_D = 1/M_D^{2+d}, \text{ ma } H = H' \text{ (almeno a grandi distanze)} \Rightarrow$$

$$\frac{G_N}{r^2} = \frac{1}{M_P^2 r^2} = \frac{G_D}{r^{2+d}} = \frac{1}{M_D^{2+d} r^{2+d}}$$

Da cui $M_P^2 = M_D^{2+d} r^d$,
con d la dimensione degli spazi extra

Vogliamo unificare la gravita' con l'interazione elettrodebole:

$$M_D = 1 \text{ TeV} \longrightarrow$$

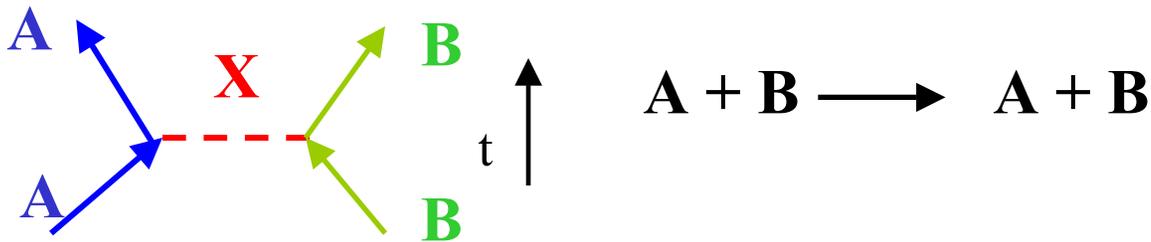
$$r^d = \frac{M_P^2}{M_D^{2+d}} = 10^{32} (\text{TeV})^{-d} \Rightarrow r = 10^{\frac{32}{d}} \text{TeV}^{-1}$$

$$\text{Se } d=2 \text{ } r=10^{16} \text{ TeV}^{-1} = 2\text{mm} !!$$

La forza di gravita' e' cosi' "debole" perche' "diluita" nelle
extra dimensioni

Si dovrebbero osservare deviazioni alla gravita' Newtoniana
a distanze $\sim r$ (esperimenti di microgravita')

Raggio di azione delle forze



Possiamo schematizzarlo come un “processo virtuale” con A che emette X

$$A(M_A, \vec{0}) \rightarrow A(E_A, \vec{p}) + X(E_X, -\vec{p})$$

$$\text{con } E_A = \sqrt{M_A^2 + p^2}, \quad E_X = \sqrt{M_X^2 + p^2}$$

La differenza di energia finale-iniziale ΔE si puo' scrivere come:

$$\Delta E = E_X + E_A - M_A = \sqrt{M_X^2 + p^2} + \sqrt{M_A^2 + p^2} - M_A > M_X$$

Il processo puo' avvenire solo se il tempo caratteristico τ vale:

$$\tau \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \leq \frac{\hbar}{M_X}$$

La distanza massima di propagazione della particella X ,R vale:

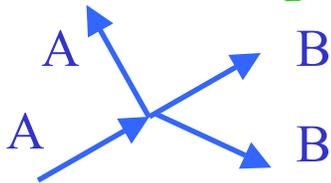
$$R = c \cdot \tau \leq \frac{\hbar c}{M_X} \text{ (range)}$$

Se $M_X=0$ (fotone) $R \longrightarrow \infty$, ma anche $\Delta E \longrightarrow 0$ e $\tau \longrightarrow \infty$:
il fotone e' reale

Nel caso di interazioni deboli $M_X=M_Z=90 \text{ GeV}$.:

$$R \leq \frac{\hbar c}{M_Z} = \frac{0.197 \cdot \text{GeV} \cdot \text{fm}}{M_Z} \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$$

Se l'impulso p della particella A (o B) e' tale che la lunghezza d'onda De Broglie $\lambda_B \gg R$, abbiamo in approssimazione di "interazione puntuale":
 alla Fermi.



Nel caso di interazioni nucleari forti sappiamo che $R \sim 10^{-13} \text{ cm}$ da cui:

$$M_X \sim \frac{\hbar c}{R} \sim 100 \text{ MeV (Yukawa)} \quad \text{Particella trovata nel 1947 (mesone } \pi \text{) con } M_\pi = 140 \text{ MeV} .:$$

Ma questa tra nucleoni non e' una forza veramente elementare...

Ordini di grandezza

Quantita' fondamentali:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1}{137}, G_F = \frac{10^{-5}}{m_p^2}, m_e = 0.51 \text{ MeV}, m_p = 1800 m_e, m_\pi = \frac{m_p}{7}$$

Raggio atomo di idrogeno:

Momento angolare : $pr \sim 1 \Rightarrow p \sim 1/r$

Energia cinetica $T = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{1}{2r^2m_e}$

Energia coulombiana $U = \frac{-\alpha}{r}$

Energia totale $E_T = \frac{1}{2m_e} \left(\frac{1}{r^2} \right) - \frac{\alpha}{r}$

Minimo di E_T : $\frac{\partial E_T}{\partial r} = 0 \Rightarrow \frac{1}{m_e r^3} + \frac{\alpha}{r^2} = 0$ da cui :

$r = 1/\alpha m_e = r_B$ (raggio di Bohr) = $5 \cdot 10^{-9}$ cm

In QED abbiamo 3 lunghezze fondamentali che differiscono di α :

Raggio di Bohr : $r_B = 1/\alpha m_e$;

Lunghezza d'onda Compton: $\lambda_c = 1/m_e$

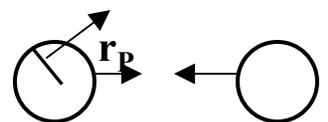
Raggio classico elettrone: $r_e = \alpha/m_e$

Dimensioni degli adroni: se la costante di accoppiamento forte $\alpha_s \sim 1$ abbiamo solo una lunghezza caratteristica:

$$1/m_\pi \sim 0.8 \text{ fm} \sim r_p$$

(il π e' il piu' leggero degli adroni: $m_\pi \sim 140 \text{ MeV}$)

Interazioni adroniche a grande energia, se $r_p \sim 1 \text{ fm}$ abbiamo:



The diagram shows a circle representing a proton with a radius vector r_p pointing from the center to the right edge. To the left of the circle, an arrow points towards it, representing an incoming particle.

$$\sigma_{pp} \approx \pi \cdot r_p^2 = 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 = 30 \text{ mb}$$

Gli altri adroni sono mesoni composti da 2q (π, K) o barioni composti da 3q. Quindi se σ_{qq} e' la sezione d'urto qq mi aspetto:

$$\sigma(pp) = 3 \times 3 \sigma(qq) ; \quad \sigma(\pi p) = 2 \times 3 \sigma(qq)$$

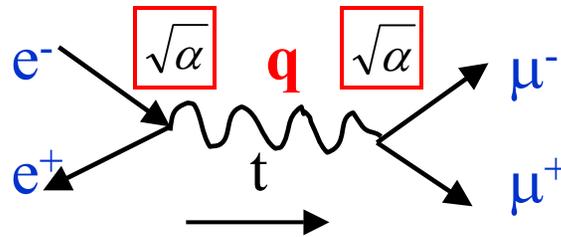
$$\frac{\sigma(\pi p)}{\sigma(pp)} \sim \frac{\sigma(Kp)}{\sigma(pp)} \sim \frac{2}{3} \Rightarrow \sigma(\pi p) = \sigma(Kp) \sim 20 \cdot mb$$

Sperimentalmente: $\sigma(pp) \sim \sigma(np) \sim \sigma(\bar{p}p) \sim \sigma(\bar{n}p) \sim 40 \text{ mb}$
 $\sigma(\pi p) \sim 25 \text{ mb}; \sigma(Kp) \sim 20 \text{ mb}$

Scarsamente dipendenti da \sqrt{s} , se $\sqrt{s} \gg m_p$

Interazioni elettromagnetiche

a) $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$:

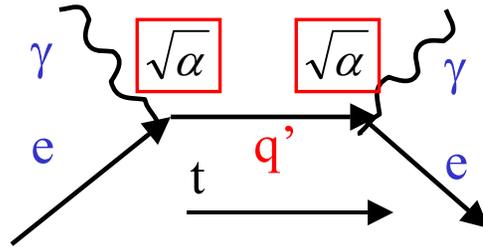


Unico invariante di Lorentz: $q^2 = q_0^2 - \vec{q}^2 = E_{cm}^2 \equiv s$

Per cui, dimensionalmente: $\sigma = \frac{\alpha^2}{s}, se s \gg m_\mu^2$

$$\sigma(vera) = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha^2}{s}, se s = 1 \text{ GeV}^2, \sigma = 4 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^2$$

b) Scattering Compton : $\gamma e \rightarrow \gamma e$



$\sigma = \alpha^2 f(s, m_e)$, e sia E_γ l'energia del fotone:

1) Caso non relativistico: $E_\gamma \ll m_e$ (l'energia del fotone non cambia) e $s \sim m_e^2$

$$\sigma = \frac{\alpha^2}{m_e^2}, \quad \sigma(\text{vera}) = \frac{8\pi}{3} r_0^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{\alpha^2}{m_e^2} \text{ sezione d'urto Thomson}$$

2) Caso ultrarelativistico: $s \gg m_e^2$

$$\sigma = \frac{\alpha^2}{s}, \quad \sigma(\text{vera}) = 2\pi \frac{\alpha^2}{s} \ln\left(\frac{s}{m^2}\right)$$

La correzione logaritmica deriva da effetti di spin dell'elettrone e fotone: ad alta energia prevale l'interazione magnetica (tra momenti magnetici).

Interazioni deboli

$$\nu_{\mu} n \rightarrow \mu^{-} p$$

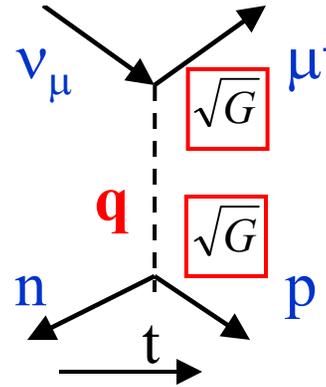
$$\nu_{\mu} N \rightarrow \mu^{-} X$$

Ci aspettiamo: $\sigma(\nu N) = G^2 f(s, m_N)$

se $s \gg m_N^2$, m_N e' trascurabile e, **dimensionalmente** essendo $[G] = s^{-1}$:

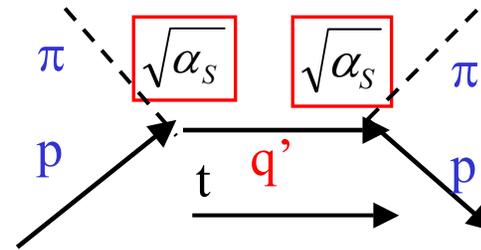
$$\sigma(\nu N) = G^2 s \xrightarrow{\text{lab}} = G^2 m_N E_{\nu} \sim 10^{-10} E_{\nu} (\text{GeV}) \text{ GeV}^{-2} \sim 4 \cdot 10^{-38} E_{\nu} (\text{GeV}) \text{ cm}^2$$

$$\sigma(\text{vera}) = 0.6 \cdot 10^{-38} E_{\nu} (\text{GeV}) \text{ cm}^2$$



Interazioni forti (scattering Compton forte)

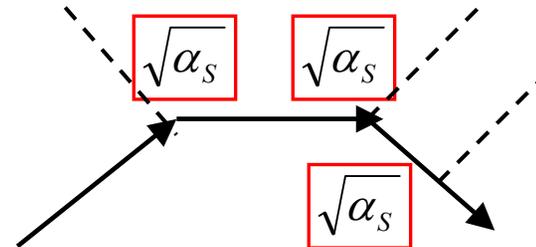
$$\pi p \rightarrow \pi p, \quad \sigma_{Th} = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\alpha_s}{m_p} \right)^2 \quad (*)$$



Ma sperimentalmente $\sigma(\pi p) = 2 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 = 5 \cdot 10 (0.4 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2) = 50 \text{ GeV}^{-2}$

Per cui utilizzando la (*) $\alpha \sim 2.4$!!!!

Problemi con la teoria delle perturbazioni: ex:
il processo $O(\alpha_s^3)$ non e' un contributo di
ordine superiore!!



Lo studio delle particelle elementari attraverso misure:

- di scattering ex. $eN \longrightarrow eN$ (struttura nucleone);
- stati legati ex. (e^+e^-) (livelli energetici, parita'...);
- vite medie di particelle instabili ex.

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

Vita media

Particella instabile $P \longrightarrow a+b$ con una probabilita' di decadere per unita' di tempo ω , costante nel tempo. La variazione dn di popolazione n di P sara':

$$dn = -n \cdot \omega \cdot dt \rightarrow n = n_0 \cdot e^{-\omega \cdot t}; \quad \frac{1}{\omega} \equiv \tau \equiv \text{vita media della particella}$$

L'incertezza sul tempo di decadimento implica anche un'incertezza sull'energia dello stato (particella): $\Delta E = \Gamma$:

$$\Delta E \equiv \Gamma = \frac{1}{\tau} \quad \Gamma \equiv \text{larghezza della particella}$$

$$\text{ex. } \tau_{\pi^\pm} = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s} \Rightarrow$$

$$\Gamma_{\pi^\pm} = \frac{1}{2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}} = \frac{6.5 \cdot 10^{-25}}{2.6 \cdot 10^{-8}} \text{ GeV} \approx 2.5 \cdot 10^{-17} \text{ GeV}$$

In termini di decadimento dello stato $\psi(\vec{r}, t)$

$$|\psi(\vec{r}, t)|^2 = |\psi(\vec{r}, t = 0)|^2 e^{-\Gamma t} \text{ e la funzione d'onda } \psi:$$

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r}, t = 0) \cdot e^{-\frac{\Gamma t}{2}} \cdot e^{-im_0 t} (*)$$

Dove $e^{im_0 t}$ descrive l'evoluzione di uno stato stazionario ($\omega=0$) di massa m_0 :

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r}, t = 0) \cdot e^{-im_0 t} \text{ (soluz. eq. di Schroedinger con } H = m_0 : \frac{\partial \psi}{\partial t} = -iH\psi)$$

Facciamo la trasformata di Fourier della (*):

$$\psi(m) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty dt \cdot e^{imt} \psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\psi(\vec{r}, t = 0)}{-\frac{\Gamma}{2} + i(m - m_0)};$$

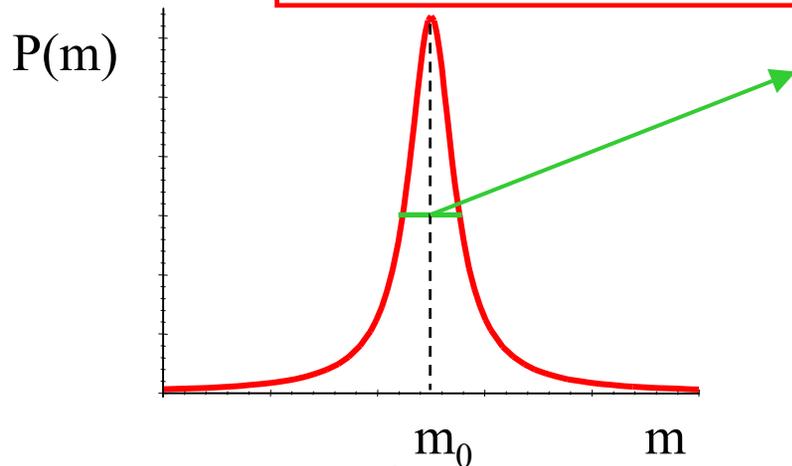
Facendo il modulo quadro e integrando sulla parte spaziale (normalizzata a 1)

$$|\psi|^2 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\Gamma^2 / 4 + (m - m_0)^2}$$

Quindi la probabilita' di osservare lo stato a una massa m vale:

$$P(m)dm = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma}{\Gamma^2/4 + (m - m_0)^2} dm$$

(con la normalizzazione: $\int_0^\infty P(m)dm = 1$)



La larghezza a meta' altezza Γ e' una misura dell'intensita' della interazione che ha prodotto il decadimento

ex. $\Gamma(\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0) = 150 \text{ MeV}$ (interazioni forti)

$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 8 \cdot 10^{-6} \text{ MeV}$ (interazioni elettromagnetiche)

$\Gamma(\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu) = 2 \cdot 10^{-14} \text{ MeV}$ (interazioni deboli)

Attenzione: Γ e' determinata anche dal numero di stati finali disponibili (spazio delle fasi). Ex: $\Gamma(W) \sim 2.1 \text{ GeV}$ (interazione debole), ma il $W(m=80 \text{ GeV})$ decade in coppie di quark o leptoni che hanno $m \ll m_W$ con un grande spazio delle fasi e quindi grande probabilita' di decadimento (larghezza).

Idea: associare a queste particelle strane un nuovo numero quantico “**la stranezza**” che si conserva in produzione (forte) ed e’ violato nel decadimento (debole).

. Anni 70-80. Il fenomeno delle particelle “strane” si replica con altri adroni ancora piu’ pesanti: ex: D^{+}, D^0 ($m \sim 2$ GeV), Λ_c ; B^{+}, B^0 ($m \sim 5$ GeV), Λ_b

**Introduzione di altre “qualita’” che caratterizzano la materia adronica:
charm (c) , beauty (b)**

Anni 90: scoperto l’ultimo stato degli adroni: **top (t)** ($m \sim 175$ GeV),
ma non ha stati legati!!

Questi numeri quantici sono manifestazioni di gradi di liberta’ interni degli adroni (i costituenti): **i quark. Modello:**

$$\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} Q = 2/3 \\ Q = -1/3 \end{bmatrix} + \text{antiquark, tutti a spin} = 1/2$$

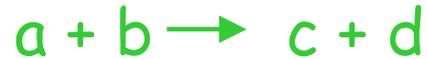
Gli adroni misurati **non sono elementari** ma **composti da quark:**

$[q \bar{q}]$: mesoni a spin intero ex. $\pi^+ = [u \bar{d}]$, $\pi^- = [\bar{u} d]$, $\pi^0 = [u \bar{u} + d \bar{d}]$

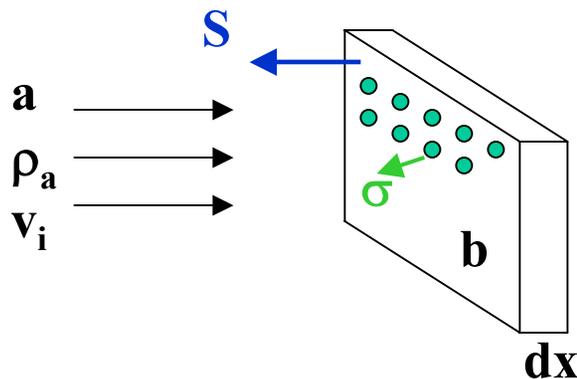
$[q q q]$: barioni a spin semintero ex. $p = [u u d]$, $n = [u d d]$

Sezione d'urto

Misura 'l'intensita' della interazione: consideriamo ad es. la reazione:



Flusso di particelle a sulle particelle bersaglio b:



Se la densita' di particelle incidenti e' ρ_a e la velocita' v_i , il flusso incidente sara':

$$\Phi = \rho_a v_i$$

La densita' di bersagli e' ρ_b e ciascuno copre un'area σ , il numero di interazioni per unita' di tempo e di area, R sara':

$$R = \Phi \cdot \sigma \cdot \rho_b \cdot dx = \rho_a \cdot v_i \cdot \sigma \cdot \rho_b \cdot dx$$

Sul volume $dV = S dx$ avro' un numero di interazioni totali al secondo: dN/dt :

$$\frac{dN}{dt dV} = \rho_a \cdot v_i \cdot \rho_b \cdot \sigma$$

Integrando sul tempo e sul volume (su dx) otteniamo il numero N di interazioni:

$$N = n_b \cdot \rho_a \cdot \int v_i dt \cdot \sigma = \frac{n_a \cdot n_b}{S} \sigma;$$

n_a/S = particelle incidenti per unita' di superficie;

n_b = numero totale di bersagli b

Se \mathcal{N} = numero di Avogadro;

A = peso atomico;

ρ = densita' del bersaglio

$$n_b = \frac{\rho V \mathcal{N}}{A}$$

$$n'_b (\text{nucleoni}) = \rho V \mathcal{N}$$

Da cui:

$$N = n_a \frac{\rho V \mathcal{N}}{AS} \sigma = n_a \left[\frac{M_b}{AS} \right] \mathcal{N} \sigma \quad \text{con } M_b = \text{massa del bersaglio}$$

Riscriviamo N:

$$N = \left[\frac{n_a}{S} \right] \left[\frac{n_b}{V} \right] \cdot V \cdot \sigma \quad \text{Se } T \text{ e' il tempo totale di misur e } \Phi_a = n_a/S$$

$$N = \frac{\Phi_a}{T} \cdot \rho_b \cdot V \cdot T \cdot \sigma = f \cdot \rho_b \cdot V \cdot T \cdot \sigma \quad \text{con } f = \frac{\Phi_a}{T}$$

Vogliamo passare dal lab a un riferimento qualsiasi; nota che **VT e N sono invarianti di Lorentz**; vogliamo che anche **f ρ_b lo sia**.

Partiamo dall'invariante:

$$\rho_a \rho_b F = \frac{\rho_a \rho_b}{m_a m_b} \sqrt{(p_a \cdot p_b)^2 - (m_a m_b)^2}$$

Che si riduce a ρ_b nel lab dove

$$p_a = [E_a, \vec{p}_a], p_b = [m_b, \vec{0}]$$

Nel centro di massa di a e b (cms): $\vec{p}_a = -\vec{p}_b$ e definiamo $|\vec{p}_a| = |\vec{p}_b| \equiv q$

$$F = \frac{q(E_a + E_b)}{m_a m_b} = \frac{q\sqrt{s}}{m_a m_b}, \text{ con } s = (p_a + p_b)^2$$

Occorre definire ρ_a e ρ_b . E' conveniente scegliere la cosiddetta "normalizzazione covariante" della funzione d'onda tale che assicura che la densita' di volume sia la stessa in ogni sistema di Lorentz.

$$\int_{V=1} \rho \cdot d^3x = 2E$$

Se ρ_a, ρ_b sono le densita' nel sistema di riposo: $\rho_a = 2m_a, \rho_b = 2m_b$, da cui:

$\rho_a \rho_b F = 4m_a m_b \frac{q\sqrt{s}}{m_a m_b} = 4q\sqrt{s}$ e nel cms $N = 4q\sqrt{s} \cdot V \cdot T \cdot \sigma$ E il rate R (eventi/tempo)

$$R = \frac{N}{T} = \left\{ \rho_a \rho_b q \frac{(E_a + E_b)}{m_a m_b} V \right\} \cdot \sigma \equiv L \cdot \sigma$$

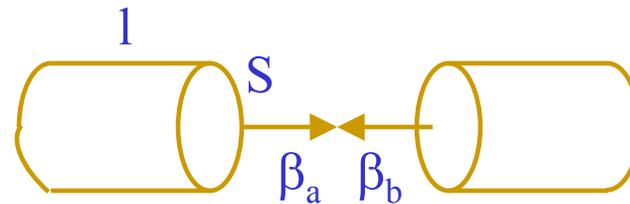
L e' definita come la luminosita' del sistema e ha dimensioni $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$$L = (\rho_a \rho_b q \frac{(E_a + E_b)}{m_a m_b V} V^2) = \rho_a V \rho_b V \frac{1}{V} [\gamma_a \frac{q}{m_b} + \gamma_b \frac{q}{m_a}] =$$

$$\rho_a V \rho_b V \frac{1}{V} \gamma_a \gamma_b [\beta_a + \beta_b] \quad \text{con } \gamma_{a,b} = \frac{E_{a,b}}{m_{a,b}} \text{ e } \beta_{a,b} = \frac{q}{\gamma_{a,b} m_{a,b}}$$

Se le particelle sono contenute in due pacchetti di sezione S e lunghezza l :

volume del pacchetto
nel suo sistema di
riferimento



$$L = \rho_a \gamma_a V \rho_b \gamma_b V \frac{\beta_a + \beta_b}{lS} = n_a n_b \frac{\beta_a + \beta_b}{lS}$$

Ex. $n_a = n_b = 10^{10}$

$l = 10 \text{ cm}$

$S = 1 \text{ mm}^2$

$\beta_a = \beta_b = 1$



$L = 2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

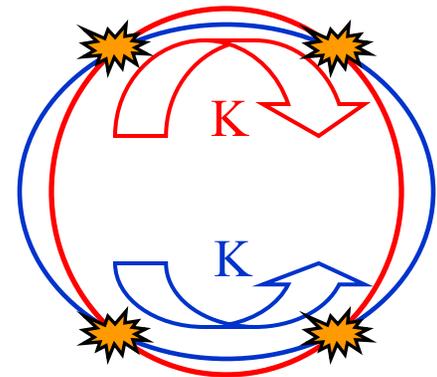
Questa, tuttavia e' una luminosita' istantanea: definisce il rate nel tempo $T=l/(\beta_a+\beta_b)$ di attraversamento dei due pacchetti.

In genere l'acceleratore e' circolare con **K pacchetti** per ciascun fascio e il rate R al secondo e':

$$R = n_a \cdot n_b \cdot \frac{\beta_a + \beta_b}{lS} \cdot \frac{l}{\beta_a + \beta_b} \cdot \sigma \cdot K \cdot f$$

Luminosita' integrata sul tempo di attraversamento

Frequenza di rivoluzione



Luminosita' al secondo:

$$L = \frac{n_a n_b}{S} K \cdot f$$

se n_a e n_b non sono uniformi ma distribuite gaussianamente con larghezze $\sigma_x \sigma_y$

$$L = \frac{n_a n_b}{4\pi\sigma_x\sigma_y} K \cdot f$$

$$\text{Ex. LEP : } n_a = n_b (e^+ e^-) = 5 \cdot 10^{11}, f = 10^4, K = 4, \sigma_x \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}, \sigma_y \sim 8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\underline{L \sim 3 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}$$

$$\sigma(e^+ e^- \rightarrow Z) \sim 50 \text{ nb} = 5 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^2 (\sim 10^{-1} \text{ Z al secondo})$$

$$\text{Ex. LHC : } n_a = n_b (p p) = 10^{11}, f = 10^4, \underline{K = 2800}, \sigma_x \sim \sigma_y \sim 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\underline{L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}$$

$$\sigma(pp \rightarrow H) \sim 1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2 (\sim 10^{-2} \text{ H al secondo})$$

$$\text{Ma } \sigma_{\text{tot}}(pp) \sim 100 \text{ mb} = 10^{-25} \text{ cm}^2 \longrightarrow R_{\text{tot}} \sim 10^9 \text{ al secondo}$$

Si introduce anche una luminosita' integrata:

$$N = \sigma \int L dt \quad \left(\int L dt \text{ ha dimensioni di } \text{cm}^{-2} \right)$$

La luminosita' integrata si misura in $\mu\text{b}^{-1}, \text{nb}^{-1}, \text{pb}^{-1}, \text{fb}^{-1}, \dots$

$$\text{Ex. Se } \int L dt = 10^5 \text{ pb}^{-1} \text{ (1 anno a LHC), per un processo con sezione d'urto}$$

$$\sigma = 1 \text{ pb avro' } N = 10^5 \text{ pb}^{-1} \cdot 1 \text{ pb} = 10^5 \text{ eventi}$$

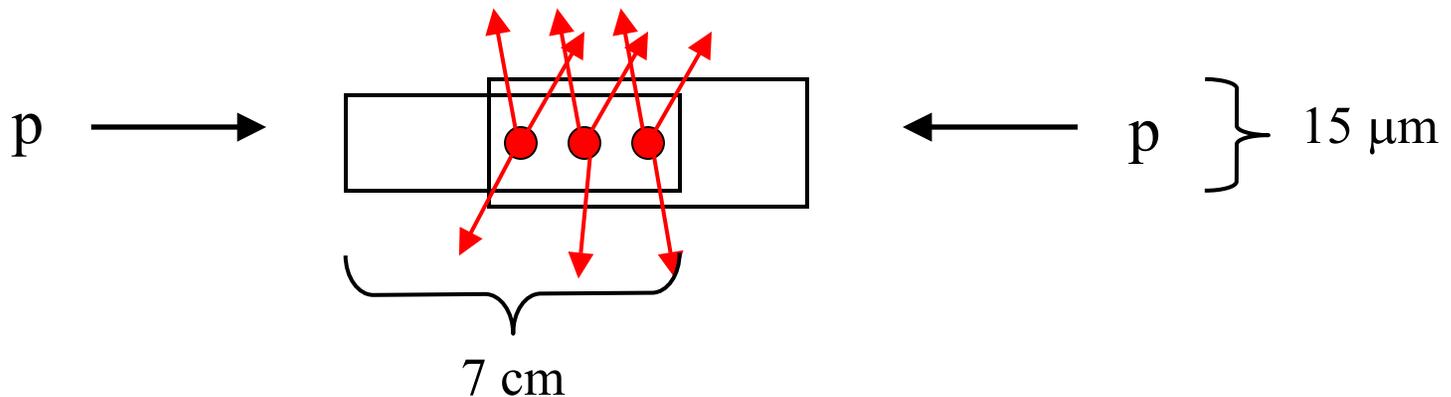
Ulteriore problema a alta luminosita' e alto rate

A LHC $\sigma_T = 100 \text{ mb}$ e se $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $R = 10^9/\text{s}$

Ci sono ~ 3000 pacchetti per fascio \longrightarrow tempo intercorrente tra due attraversamenti successivi di pacchetti (**bunch crossing**) e' **25 ns** \longrightarrow

\longrightarrow **Numero di eventi medio per bunch crossing N_{BC} :**

$$N_{BC} = 10^9 \cdot 100 \cdot 10^{-30} = 100$$



Risultato: 25 eventi prodotti entro 25 ns (distribuiti poissonianamente) e $\sim 25 \times 30 \sim 1000$ particelle cariche prodotte (+ quelle neutre) ogni 25 ns.

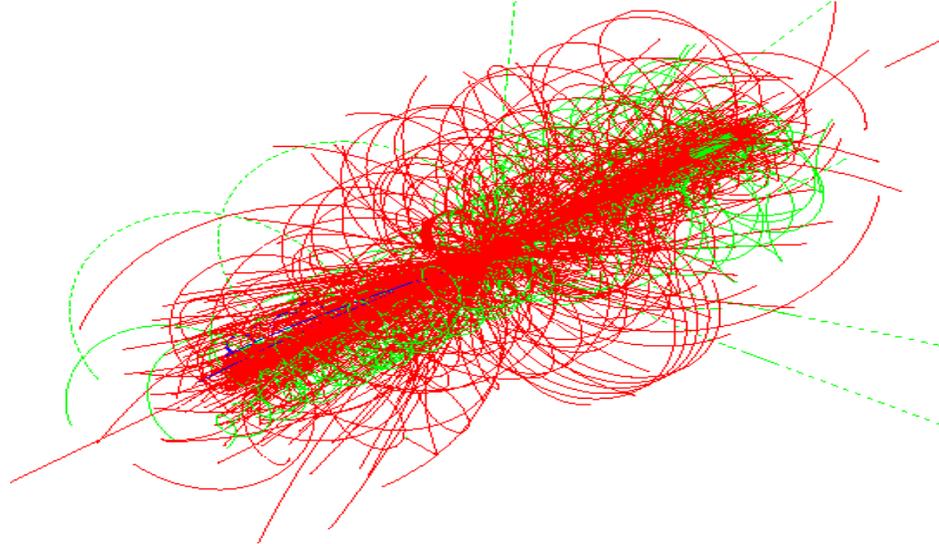
Le interazioni a LHC appariranno così:

A simulated event in ATLAS (CMS)

H ZZ 4

pp collisions at 14 TeV $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, bunch
inel. 70 mb spacing 25 ns

Interested in processes
with fb



23 overlapping minimum bias events / BC
1900 charged + 1600 neutral particles / BC

HIGH-ENERGY COLLIDER PARAMETERS: e^+e^- Colliders (I)

The numbers here were received from representatives of the colliders in early 2002 (contact C.G. Wohl, LBNL). Many of the numbers of course change with time, and only the latest values (or estimates) are given here; those in brackets are for coming upgrades. Quantities are, where appropriate, r.m.s. H and V indicate horizontal and vertical directions. Parameters for the defunct SPEAR, DORIS, PETRA, PEP, and TRISTAN colliders may be found in our 1996 edition (Phys. Rev. D54, 1 July 1996, Part I).

	VEPP-2M (Novosibirsk)	VEPP-2000 (Novosibirsk)	VEPP-4M (Novosibirsk)	BEPC (China)	DAΦNE (Frascati)
Physics start date	1974	2003	1994	1989	1999
Physics end date	2000	—	—	—	—
Maximum beam energy (GeV)	0.7	1.0	6	2.2	0.510 (0.75 max.)
Luminosity (10^{30} cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	5	100	20	10 at 1.843 GeV/beam 5 at 1.55 GeV/beam	50(→500)
Time between collisions (μ s)	0.03	0.04	0.6	0.8	0.0021–0.0054
Crossing angle (μ rad)	0	0	0	0	$\pm(1.0$ to $1.5)\times 10^4$
Energy spread (units 10^{-3})	0.36	0.64	1	0.58 at 2.2 GeV	0.40
Bunch length (cm)	3	4	5	≈ 5	2(→3)
Beam radius (10^{-6} m)	H : 300 V : 10	125 (round)	H : 1000 V : 30	H : 890 V : 37	H : 2100 V : 21
Free space at interaction point (m)	± 1	± 1	± 2	± 2.15	± 0.46 (± 157 mrad cone)
Luminosity lifetime (hr)	continuous	continuous	2	7–12	2
Filling time (min)	continuous	continuous	15	30	2 (topping up)
Acceleration period (s)	—	—	150	120	—
Injection energy (GeV)	0.2–0.6	0.2–1.0	1.8	1.55	0.510
Transverse emittance ($10^{-9}\pi$ rad-m)	H : 110 V : 1.3	H : 250 V : 250	H : 400 V : 20	H : 660 V : 28	H : 1000 V : 10
β^* , amplitude function at interaction point (m)	H : 0.45 V : 0.045	H : 0.06 V : 0.06	H : 0.75 V : 0.05	H : 1.2 V : 0.05	H : 4.5 V : 0.045
Beam-beam tune shift per crossing (units 10^{-4})	H : 200 V : 500	H : 750 V : 750	500	350	400
RF frequency (MHz)	200	172	180	199.53	368.25
Particles per bunch (units 10^{10})	2	16	15	20 at 2 GeV 11 at 1.55 GeV	3(→9)
Bunches per ring per species	1	1	2	1	50–120
Average beam current per species (mA)	50	300	80	40 at 2 GeV 22 at 1.55 GeV	800(→5000)
Circumference or length (km)	0.018	0.024	0.366	0.2404	0.0977
Interaction regions	2	2	1	2	1(→2)
Utility insertions	1	2	1	4	2 \times 2
Magnetic length of dipole (m)	1	1.2	2	1.6	e^+ : 1.21/0.99 e^- : 1.21/0.99
Length of standard cell (m)	4.5	12	7.2	6.6	—
Phase advance per cell (deg)	280	H : 738 V : 378	65	≈ 60	—
Dipoles in ring	8	8	78	40 + 4 weak	e^+ : 8(+4 wigglers) e^- : 8(+4 wigglers)
Quadrupoles in ring	20	20	150	68	e^+/e^- : 53/53
Peak magnetic field (T)	1.8	2.4	0.6	0.9028 at 2.8 GeV	1.2(→1.76) dipoles 1.8 wigglers

HIGH-ENERGY COLLIDER PARAMETERS: e^+e^- Colliders (II)

The numbers here were received from representatives of the colliders in early 2002. Many of the numbers of course change with time, and only the latest values (or estimates) are given here. Quantities are, where appropriate, r.m.s. H and V indicate horizontal and vertical directions; s.c. indicates superconducting.

	CESR (Cornell)	KEKB (KEK)	PEP-II (SLAC)	SLC (SLAC)	LEP (CERN)
Physics start date	1979	1999	1999	1989	1989
Physics end date	—	—	—	1998	2000
Maximum beam energy (GeV)	6	$e^- \times e^+$: 8×3.5	e^- : 7–12 (9.0 nominal) e^+ : 2.5–4 (3.1 ") (nominal $E_{cm} = 10.5$ GeV)	50	101 in 1999 (105= max. foreseen)
Luminosity (10^{30} cm $^{-2}$ s $^{-1}$)	1280 at 5.3 GeV/beam	7249	4600	2.5	24 at Z^0 100 at > 90 GeV
Time between collisions (μ s)	0.014 to 0.22	0.008	0.0042	8300	22
Crossing angle (μ rad)	± 2000	$\pm 11,000$	0	0	0
Energy spread (units 10^{-3})	0.6 at 5.3 GeV/beam	0.7	e^-/e^+ : 0.61/0.77	1.2	0.7–1.5
Bunch length (cm)	1.8	0.65	e^-/e^+ : 1.1/1.0	0.1	1.0
Beam radius (μ m)	H : 460 V : 4	H : 110 V : 2.7	H : 157 V : 4.7	H : 1.5 V : 0.5	H : 200 \rightarrow 300 V : 2.5 \rightarrow 8
Free space at interaction point (m)	± 2.2 (± 0.6 to REC quads)	+0.75/–0.58 (+300/–500 mrad cone)	± 0.2 , ± 300 mrad cone	± 2.8	± 3.5
Luminosity lifetime (hr)	2–3	3.4	2.5	—	20 at Z^0 10 at > 90 GeV
Filling time (min)	5 (topping up)	10 (topping up)	3 (topping up)	—	20 to setup 20 to accumulate
Acceleration period (s)	—	—	—	—	600
Injection energy (GeV)	1.8–6	e^-/e^+ : 3/3.5	2.5–12	45.64	22
Transverse emittance (π rad-nm)	H : 210 V : 1	e^- : 24 (H), 1.1 (V) e^+ : 18 (H), 1.2 (V)	e^- : 48 (H), 1.5 (V) e^+ : 24 (H), 1.5 (V)	H : 0.5 V : 0.05	H : 20–45 V : 0.25 \rightarrow 1
β^* , amplitude function at interaction point (m)	H : 1.0 V : 0.018	e^- : 0.63 (H), 0.0070 (V) e^+ : 0.59 (H), 0.0062 (V)	e^- : 0.50 (H), 0.012 (V) e^+ : 0.50 (H), 0.012 (V)	H : 0.0025 V : 0.0015	H : 1.5 V : 0.05
Beam-beam tune shift per crossing (units 10^{-4})	H : 250 V : 620	e^- : 730 (H), 430 (V) e^+ : 720 (H), 460 (V)	H : 650 V : 350	—	830
RF frequency (MHz)	500	508.887	476	—	352.2
Particles per bunch (units 10^{10})	1.15	e^-/e^+ : 4.5/7.2	e^-/e^+ : 2.1/5.9	4.0	45 in collision 80 in single beam
Bunches per ring per species	9 trains of 5 bunches	1224	800	1	4 trains of 1 or 2
Average beam current per species (mA)	340	e^-/e^+ : 800/1100	e^-/e^+ : 1050/1800	0.0008	4 at Z^0 4–6 at > 90 GeV
Beam polarization (%)	—	—	—	e^- : 80	55 at 45 GeV 5 at 61 GeV
Circumference or length (km)	0.768	3.016	2.2	1.45 + 1.47	26.66
Interaction regions	1	1	1 (2 possible)	1	4
Utility insertions	3	3 per ring	5	—	4
Magnetic length of dipole (m)	1.6–6.6	e^-/e^+ : 5.86/0.915	e^-/e^+ : 5.4/0.45	2.5	11.66/pair
Length of standard cell (m)	16	e^-/e^+ : 75.7/76.1	15.2	5.2	79
Phase advance per cell (deg)	45–90 (no standard cell)	450	e^-/e^+ : 60/90	108	102/90
Dipoles in ring	36	e^-/e^+ : 116/112	e^-/e^+ : 192/192	460+440	3280+24 inj. + 64 weak
Quadrupoles in ring	101 + 4 s.c.	e^-/e^+ : 452/452	e^-/e^+ : 290/326	—	520+288 + 8 s.c.
Peak magnetic field (T)	0.3 normal } at 8 0.8 high field } GeV	e^-/e^+ : 0.25/0.72	e^-/e^+ : 0.18/0.75	0.597	0.135

HIGH-ENERGY COLLIDER PARAMETERS: $e\bar{p}$, $\bar{p}p$, and pp Colliders

The numbers here were received from representatives of the colliders in early 2002. Many of the numbers of course change with time, and only the latest values (or estimates) are given here. Quantities are, where appropriate, r.m.s. H , V , and, s.c. indicate horizontal and vertical directions, and superconducting.

	HERA (DESY)	S_{ppS} (CERN)	TEVATRON (Fermilab)	RHIC (Brookhaven)		LHC (CERN)	
Physics start date	1992	1981	1987	2000		2007	2008
Physics end date	—	1990	—	—		—	—
Particles collided	$e\bar{p}$	$p\bar{p}$	$p\bar{p}$	pp (pol.)	Au Au	pp	Pb Pb
Maximum beam energy (TeV)	e : 0.030 p : 0.92	0.315 (0.45 in pulsed mode)	1.0	0.25	0.1 TeV/u	7.0	2.76 TeV/u
Luminosity ($10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	75	6	210	10	0.0002	1.0×10^4	0.001
Time between collisions (μs)	0.096	3.8	0.336	0.213		0.023	0.100
Crossing angle (μ rad)	0	0	0	0		300	≤ 100
Energy spread (units 10^{-3})	e : 0.91 p : 0.2	0.35	0.09	0.7		0.1	0.1
Bunch length (cm)	e : 0.83 p : 8.5	20	38	20		7.5	7.5
Beam radius (10^{-6} m)	e : 280(H), 50(V) p : 265(H), 50(V)	p : 73(H), 36(V) \bar{p} : 55(H), 27(V)	p : 34 \bar{p} : 29	125 ($\beta^* = 1$ m)		16	16
Free space at interaction point (m)	± 6.8	16	± 6.5	16		38	38
Luminosity lifetime (hr)	10	15	7–30	10	3	10	6.7
Filling time (min)	e : 60 p : 120	0.5	30	15		7.5 (both beams)	20 (both beams)
Acceleration period (s)	e : 200 p : 1500	10	86	100		1200	
Injection energy (TeV)	e : 0.012 p : 0.040	0.026	0.15	0.023	0.011 TeV/u	0.450	0.1774 TeV/u
Transverse emittance ($10^{-9} \pi$ rad-m)	e : 20(H), 6(V) p : 5(H), 5(V)	p : 9 \bar{p} : 5	p : 3.5 \bar{p} : 2.5	13	16	0.5	0.5
β^* , amplitude function at interaction point (m)	e : 0.6 (H), 0.26(V) p : 2.45(H), 0.18(V)	0.6 (H) 0.15 (V)	0.35	1–10		0.5	0.5
Beam-beam tune shift per crossing (units 10^{-4})	e : 190(H), 450(V) p : 12(H), 9(V)	50	p : 38 \bar{p} : 97	37	23	34	—
RF frequency (MHz)	e : 499.7 p : 208.2/52.05	100+200	53	accel: 28 store: 197		400.8	400.8
Particles per bunch (units 10^{10})	e : 3 p : 7	p : 15 \bar{p} : 8	p : 27 \bar{p} : 7.5	10	0.1	11	0.007
Bunches per ring per species	e : 189 p : 180	6	36	56		2808	592
Average beam current per species (mA)	e : 40 p : 90	p : 6 \bar{p} : 3	p : 84 \bar{p} : 22	70	55	536	7.8
Circumference (km)	6.336	6.911	6.28	3.834		26.659	
Interaction regions	$e\bar{p}$: 2; e, p : 1 each, internal fixed target	2	2 high \mathcal{L}^*	6		2 high \mathcal{L}^* +1	1
Utility insertions	4	—	4	13/ring		4	
Magnetic length of dipole (m)	e : 9.185 p : 8.82	6.26	6.12	9.45		14.3	
Length of standard cell (m)	e : 23.5 p : 47	64	59.5	29.7		106.90	
Phase advance per cell (deg)	e : 60 p : 90	90	67.8	84		90	
Dipoles in ring	e : 396 p : 416	744	774	192 per ring + 12 common		1232 main dipoles	
Quadrupoles in ring	e : 580 p : 280	232	216	246 per ring		482 2-in-1 24 1-m-1	
Magnet type	e : C-shaped p : s.c., collared, cold iron	H type with bent-up coil ends	s.c. $\cos \theta$ warm iron	s.c. $\cos \theta$ cold iron		s.c. 2 in 1 cold iron	
Peak magnetic field (T)	e : 0.274 p : 4.65	1.4 (2 in pulsed mode)	4.4	3.5		8.3	
\bar{p} source accum. rate (hr^{-1})	—	6×10^{10}	20×10^{10}	—		—	
Max. no. \bar{p} in accum. ring	—	1.2×10^{12}	2.6×10^{12}	—		—	

Energia del fascio di LHC : ~ 300 MJ