

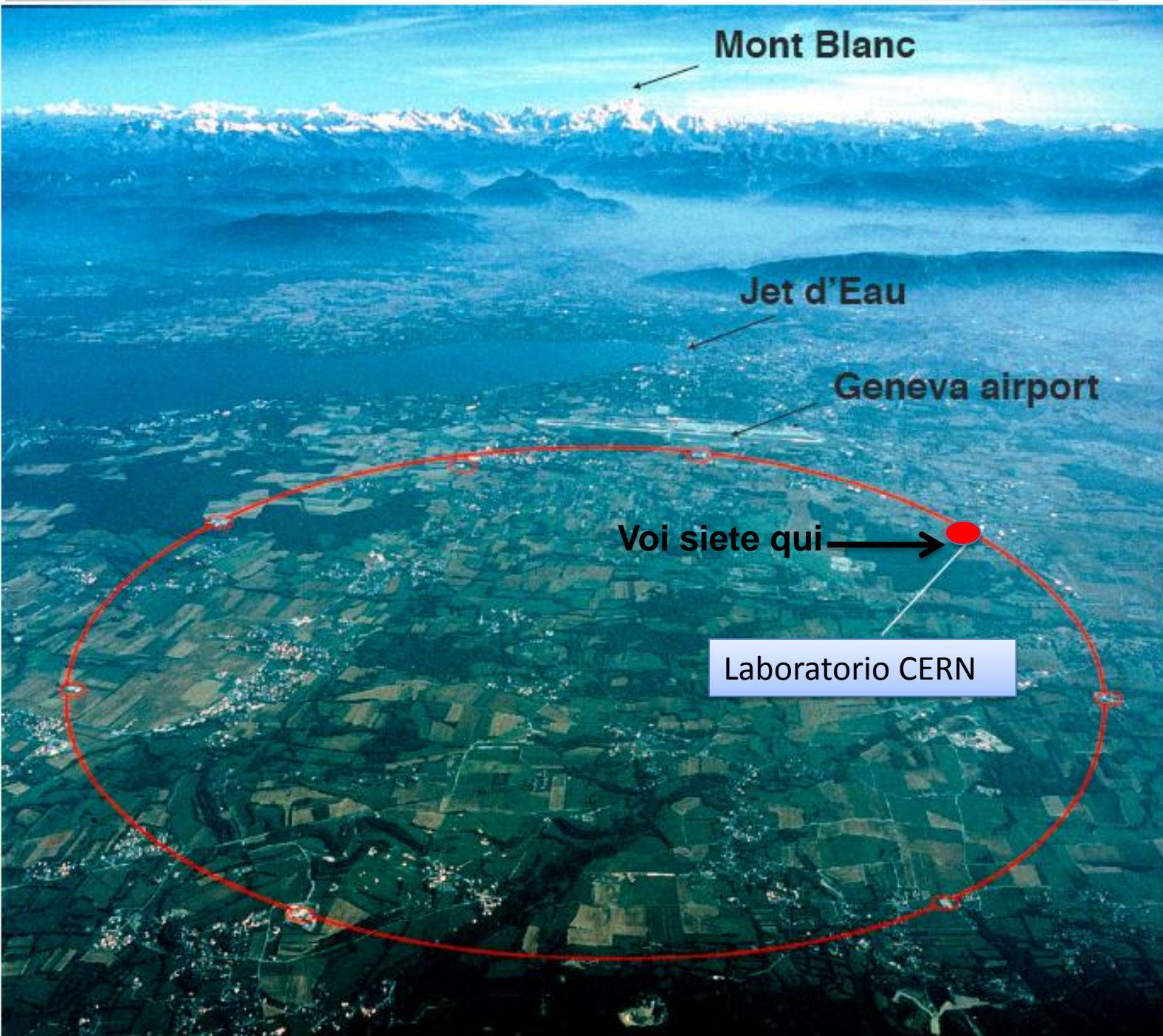


Quello che sappiamo

ovvero

Dalla struttura dell'atomo alla ricerca del “desiderato” bosone di Higgs: un percorso lungo piu` di 100 anni

Chiara Roda – Università di Pisa e Istituto di Fisica Nucleare



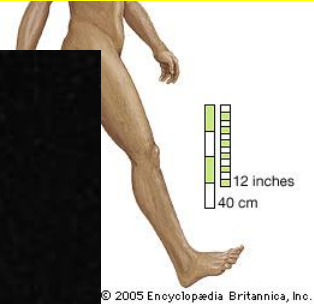


A cosa serve questo l'acceleratore LHC ?



>0.000000000000000001 m

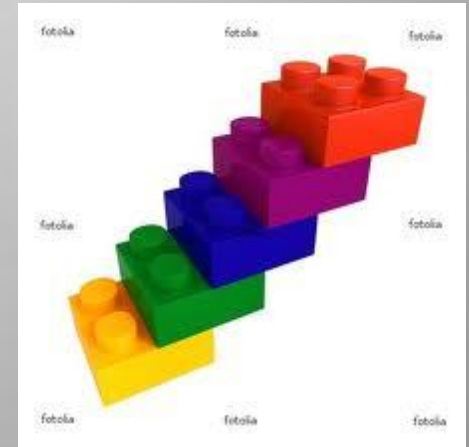
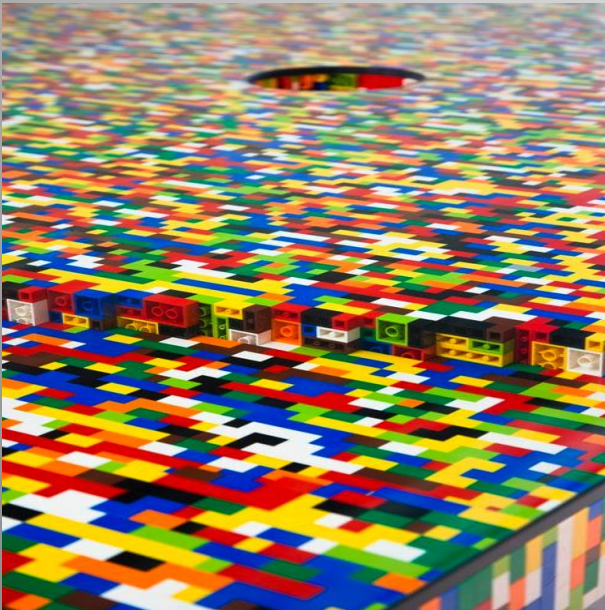
Un milionesimo di miliardesimo di metro



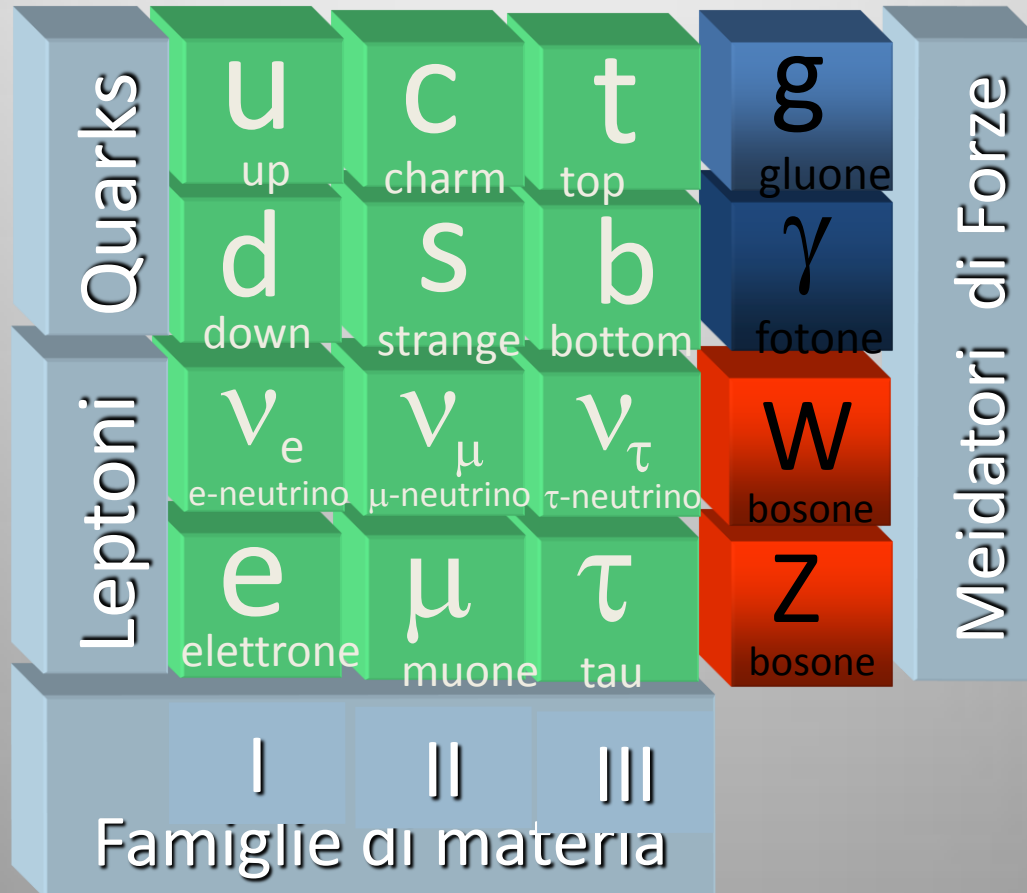
© 2005 Encyclopædia Britannica, Inc.



La materia non e` continua e` fatta di tanti piccoli pezzi ...



I componenti della materia dopo ~ 100 anni di studi



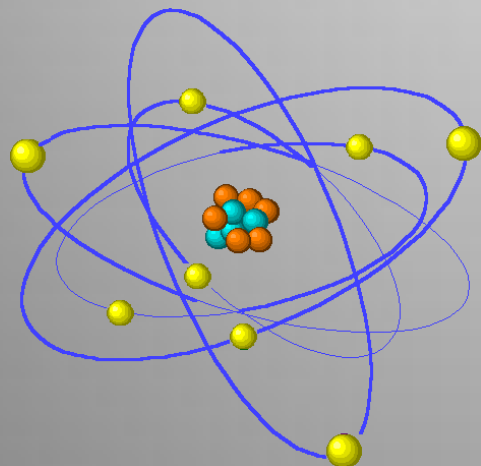
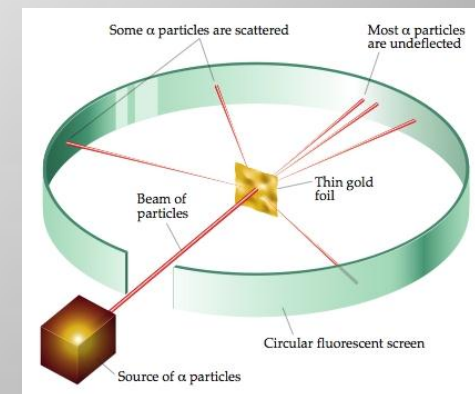


L'inizio del secolo: l'atomo



1897 - scoperta dell'elettrone J.J. Thomson

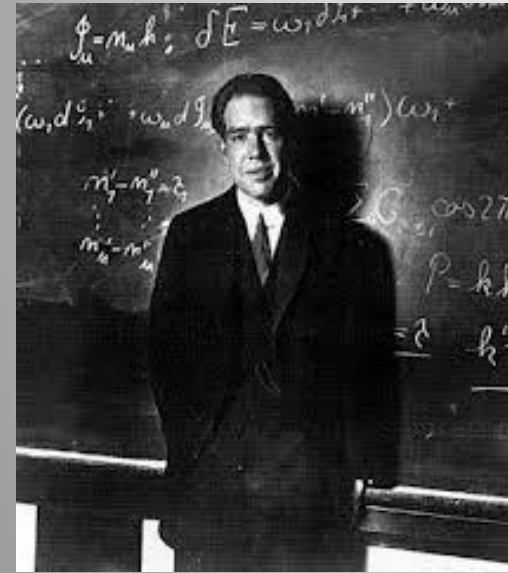
1911 - scoperta del nucleo Rutherford
→ dimensione del nucleo (10^{-15} m)



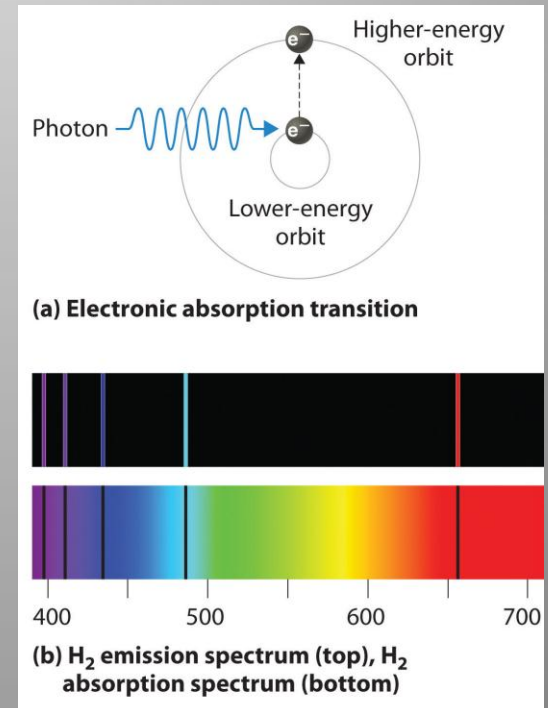
Come fanno gli elettroni ad orbitare intorno al nucleo senza irraggiare ?
Di cosa e` fatto il nucleo ?

La quantizzazione

1913 Bohr propose la quantizzazione delle orbite: solo alcune orbite sono possibili e sono stati stazionari → questa ipotesi mise le basi per la nascita della meccanica quantistica



L'idea di Bohr fu confermata sperimentalmente riuscendo a spiegare lo spettro della lampada ad idrogeno. Le righe spettrali corrispondono ai salti energetici tra i possibili orbitali dell'atomo di idrogeno.



Nel frattempo ...

- Alcuni effetti della forza elettrica erano già noti dall'antichità
- Il compimento nella comprensione delle forze elettriche e magnetiche si deve a Maxwell (metà 1800)

- **La prima unificazione !** Forza elettrica e magnetica vengono descritte come due aspetti di un unico fenomeno
- Maxwell utilizza l'innovativo concetto di *campo* fondamentale per lo sviluppo della fisica quantistica
- Il campo permette di dividere l'entità che subisce la forza da chi la produce
- Le equazioni prevedono che oscillazioni dei campi elettromagnetici producano onde: **LA LUCE**

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

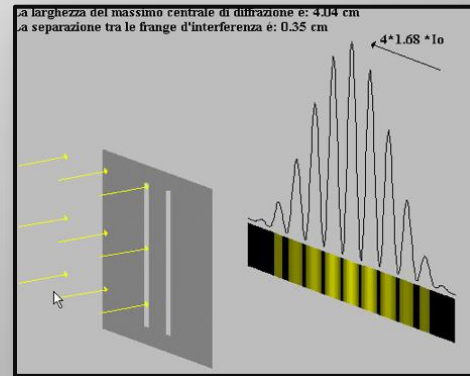
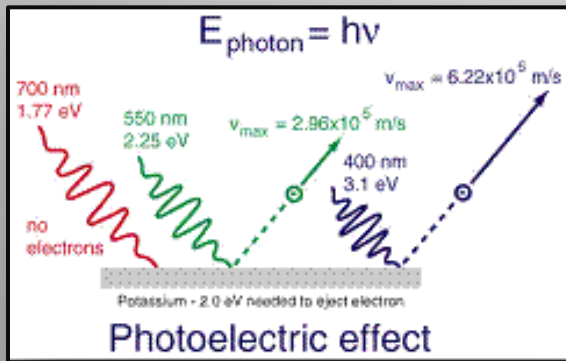


La luce: onde o particelle ?

1900-1905

Tutt'e due dipende dalla situazione:

- effetto fotoelettrico spiegato da luce composta da particelle (fotoni) di energia $E=h\nu$
- figure di interferenze dimostravano che la luce è un'onda



Le dualità` onda corpuscolo applicata all'elettrone...

Le nuove idee applicate all'elettrone

1923-1927

- Anche gli elettroni sono interpretabile come onde (De Broglie):



- Equazione di Schrodinger utilizzando la conservazione dell'energia e il nuovo formalismo della meccanica quantistica ottenne l'equazione che spiegava la struttura dell'atomo

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

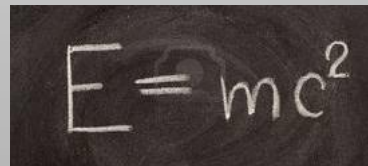
- Cosa e` $\psi(r,t)$? Descrizione deterministica (classica) \rightarrow probabilistica: elettroni sono descritti da funzioni d'onda: $|\psi(r,t)|^2 =$ probabilita` che un elettrone sia localizzato in un punto r in un dato istante t

Nel frattempo ...teoria della relativita` speciale

1905

Postulati: velocita` della luce costante + equivalenza dei sistemi di riferimento inerziali

- Idea che spazio e tempo fossero due entita` analoghe
- Cambiando sistema di riferimento: contrazione degli intervalli spazio e dilatazione dei intervalli temporali
- Applicando queste idee ai corpi in movimento Einstein ottiene


$$E=mc^2$$

- Equivalenza tra massa ed energia: possibilita` di generare particelle di alta massa avendo sufficiente energia



Meccanica quantistica + relativita` equazione di Dirac

1928

Meccanica quantistica → la comprensione dei processi che implicano oggetti microscopici segue leggi diverse da quelle della fisica classica

Relativita` → molti concetti della fisica classica non sono piu` veri se applicate a particelle in moto a velocita` prossime a quella della luce

Dirac voleva trovare un'equazione che descrivesse il moto degli elettroni liberi ad alta energia doveva quindi unire i nuovi concetti di entrambe le teorie

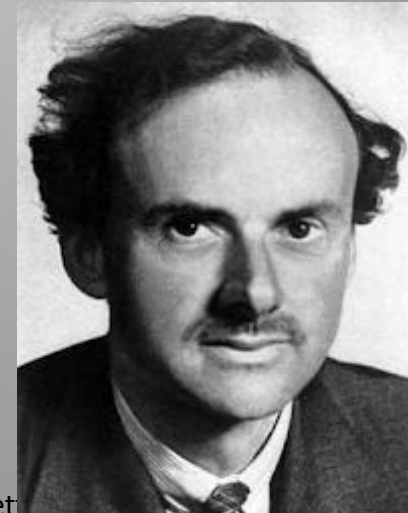
$$E = \frac{p^2}{2m} \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

'Free' Schrödinger equation - non-relativistic kinetic energy

$$E^2 = p^2 + m^2 \rightarrow E = \pm(\alpha \cdot p) + \beta m$$

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

'Free' Dirac equation - relativistic energy-momentum





... due soluzioni per l'equazione

L'equazione di Dirac descriveva correttamente l'elettrone (incluse anche le proprietà magnetiche) tuttavia ... permetteva una seconda soluzione per una particella di massa uguale all'elettrone ma carica opposta.

Tre anni di confusione ...

Nel 1931 Dirac compie il passo decisivo per l'interpretazione di questa soluzione: ... **“se esistesse la nuova particella sarebbe un nuovo tipo di particella, sconosciuta alla fisica sperimentale, dotata della stessa massa e di carica opposta a quella dell'elettrone”**

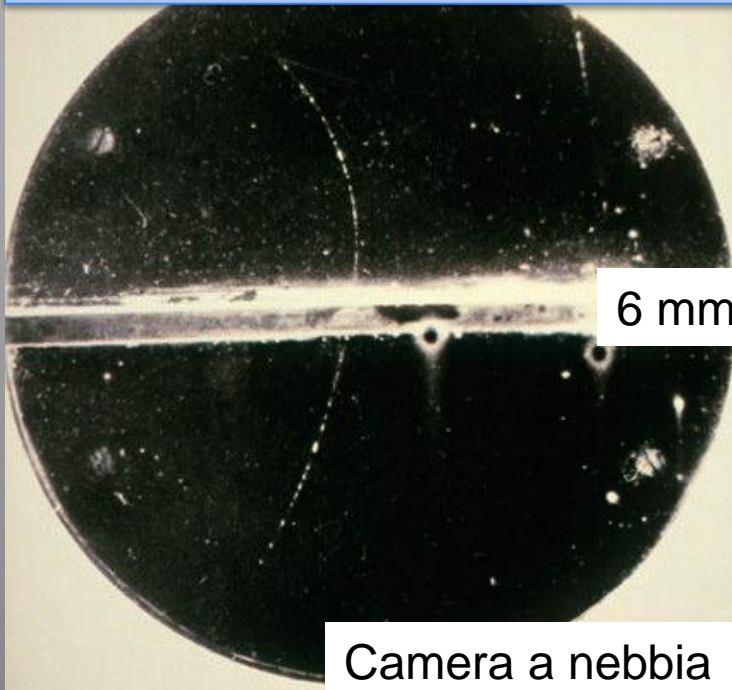
Scoperta dell'anti-elettrone

Circa un anno dopo la postulazione della sua esistenza, Anderson scoprì una particella con massa uguale all'elettrone ma carica opposta ...

1932

Il positrone esiste... Dirac aveva ragione !

Fotografia di particelle di raggi cosmici in una camera nebbia



6 mm di Piombo

Camera a nebbia

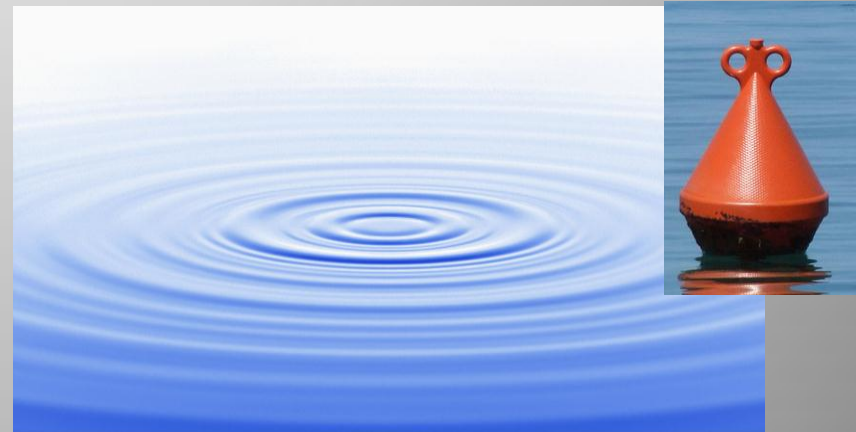


C.Anderson

Un nuovo passo avanti nella comprensione luce materia

Il successo dell'applicazione dell'utilizzo congiunto di teoria della relatività e meccanica quantistica ottenuto da Dirac trova il suo completamento nella teoria quantistica dei campi che descrive l'interazione tra particelle.

Alla base della teoria è il concetto di campo, introdotto da Maxwell, ma ora modificato in modo che rispettasse i nuovi concetti introdotti dalla meccanica quantistica e della relatività.

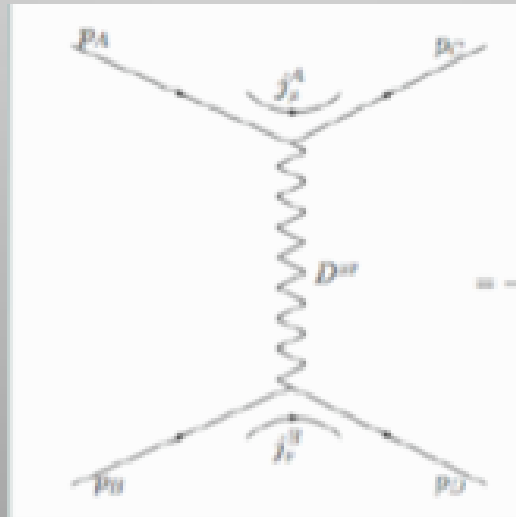
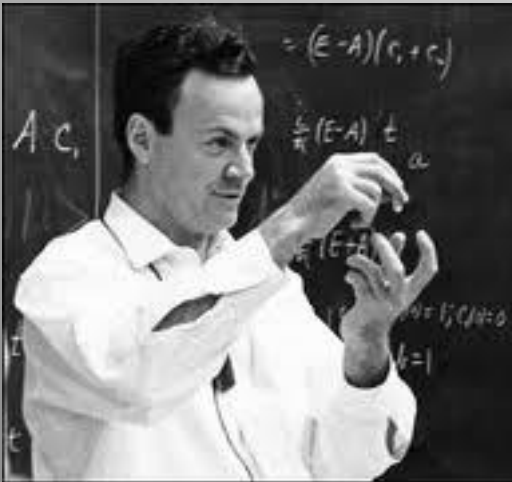


Dopo la quantizzazione i campi non sono più continui ma decomposti in una serie di granuli di energia quello che noi indichiamo con "particelle" che sono in effetti la manifestazione di un campo quantistico

QED: Quantum Electrodynamics

Feynman, Tomonaga, Schwinger 1934 - 1948

- La forza è l'interazione di due campi: ad esempio quello dell'elettrone e quello del fotone in cui il fotone è il mediatore del campo elettromagnetico
- Questa teoria descrive una realtà in continuo movimento in cui energia e massa si trasformano una nell'altra così come particelle possono mutare o trasformarsi in altre particelle




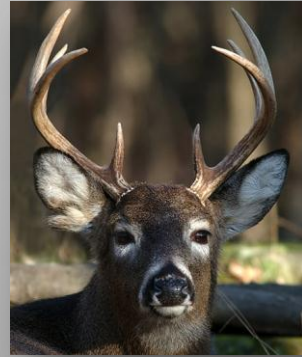
Diagrammi di Feynman

La meraviglia maggiore di questa teoria è che scaturisce da un concetto di simmetria →
LA SIMMETRIA DI GAUGE DEL CAMPO ELETTRICOMAGNETICO

... simmetrie e invarianze

- La simmetria è una invarianza di un sistema se sottoposto ad una trasformazione:

- il cerchio è invariante per rotazione intorno al suo centro 
- il nostro corpo è (~)invariante per riflessione intorno ad un asse verticale



- In fisica ad ogni simmetria corrisponde conservazioni di quantità fisiche (Teorema di E. Noether)

Symmetry	Space translation	Time translation	Rotation
Conserved quantity	Linear momentum	Energy	Angular momentum



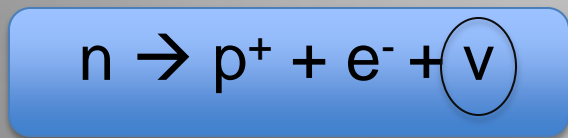
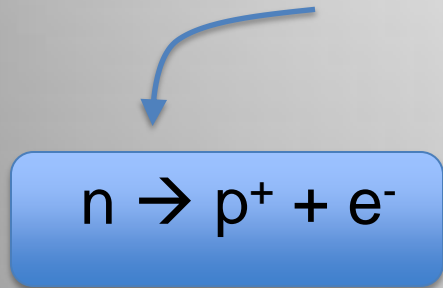
La simmetria di Gauge

- Nelle equazioni di Maxwell si vide che esisteva una invarianza, indicata con invarianza di gauge, legata alla conservazione della carica
 - Questo tipo di invarianza e` propria di un insieme di teorie che si indicano come teorie di gauge
 - La forza elettromagnetica (e di conseguenza la QED) e` la conseguenza di una simmetria di gauge della natura: imposto alla teoria la simmetria le interazioni sono completamente determinate.
- Una caratteristica fondamentale delle teorie di gauge e` che la particella che media l'interazione, per esempio il fotone, ha massa nulla → fotone soddisfa a questa richiesta

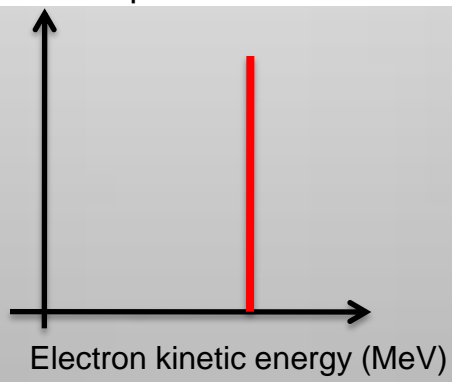
Intanto ...lo studio della radioattività`

1930

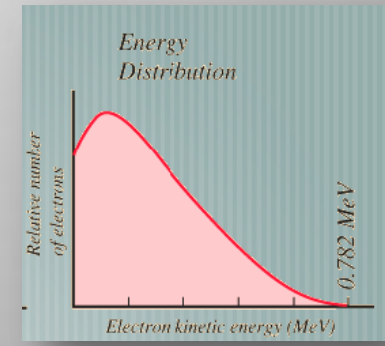
La radiazione beta poneva problemi, in generale si spiegava il processo con la transizione:



Spettro E elettrone aspettato
 $E_e = E_n - E_p$



Spettro E elettrone misurato



L'ipotesi corretta fu fatta da Pauli il processo era dovuto alla esistenza di una nuova particella, il neutrino, che portava parte l'energia mancante

La particella aveva massa nulla o molto piccola e carica zero e risultava invisibile ai rivelatori ...

da dove provenivano i neutrini ed elettroni ? erano all'interno del nucleo ?

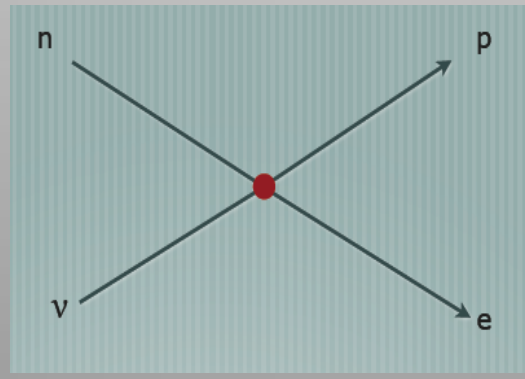
Una nuova forza

1934

- Fermi fu il primo ad intuire la spiegazione giusta: il processo è una transizione in cui il neutrone si trasforma in protone con l'emissione di un elettrone ed un neutrino
- La transizione è dovuta a una nuova forma di interazione, molto meno intensa (10^{-5}) della forza elettromagnetica e con un raggio azione molto piccolo (10^{-18} m): la **FORZA DEBOLE**



Incontro con i docenti italiani



Chiara Roda – Università' di Pisa & INFN

Il neutrino interagisce con la materia solo attraverso la forza debole (ha carica zero) e` per questo che non e` rivelato negli esperimenti... si dovette aspettare il 1956 per la conferma sperimentale

Questa spiegazione
terra` per circa 30 anni...

Ma cosa tiene insieme il nucleo ???

1934

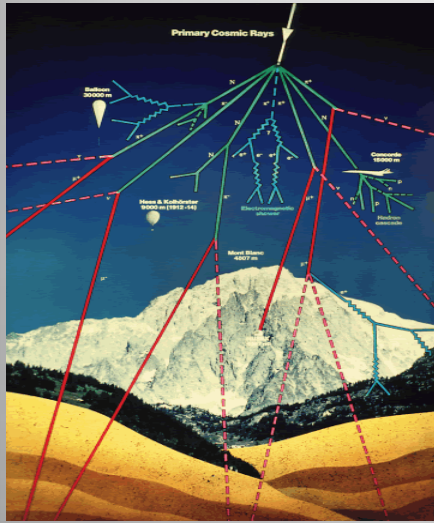
- Si era stabilito che neutrini ed elettroni non facevano parte del nucleo ma non si capiva come protoni e neutroni fosser tenuti insieme: la forza em agisce nel senso sbagliato o nullo ... tentativi di utilizzare la forza debole fallirono ...
- Una nuova forza: FORZA FORTE indipendente dalla carica elettrica, agisce in modo uguale su protoni e neutroni

Yukawa ebbe un'intuizione che risultò un'idea fondamentale: La FORZA FORTE, è efficace solo a piccole distanza perché è mediata da una particella di massa diversa da zero: raggio di azione della forza e massa della particella mediatrice sono inversamente proporzionali.



La particella mediatrice della FORZA FORTE si chiamò PIONE e si prevedeva avesse una massa $\sim 200 m_e$

A caccia del pione di Yukawa nei raggi cosmici...

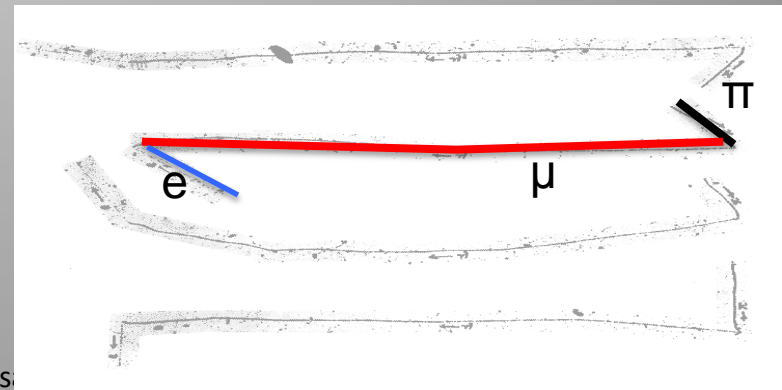


1936: Anderson e Neddermeyer analizzando i raggi cosmici con una camera nebbia scoprirono una nuova particella con caratteristiche molto simili alla particella ipotizzata da Yukawa: massa 100-400 volte quella dell'elettrone Trovato il pione di Yukawa ??

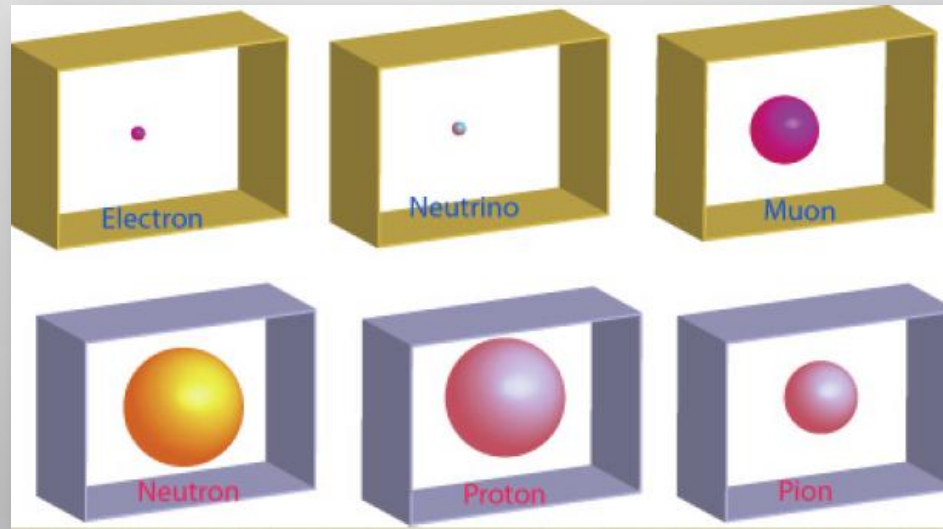
NO

Conversi, Pacine e Piccioni nel 1946 dimostrano che la particella ha una interazione troppo bassa con il nucleo non puo` essere la particella di Yukawa

Powel e Occhialini portano emulsioni fotografiche sul Pic du Midi ed individuano una nuova particella, il pione di Yukawa, che decade in muone. Era il 1947.



Lo spettro e le forze nel 1947



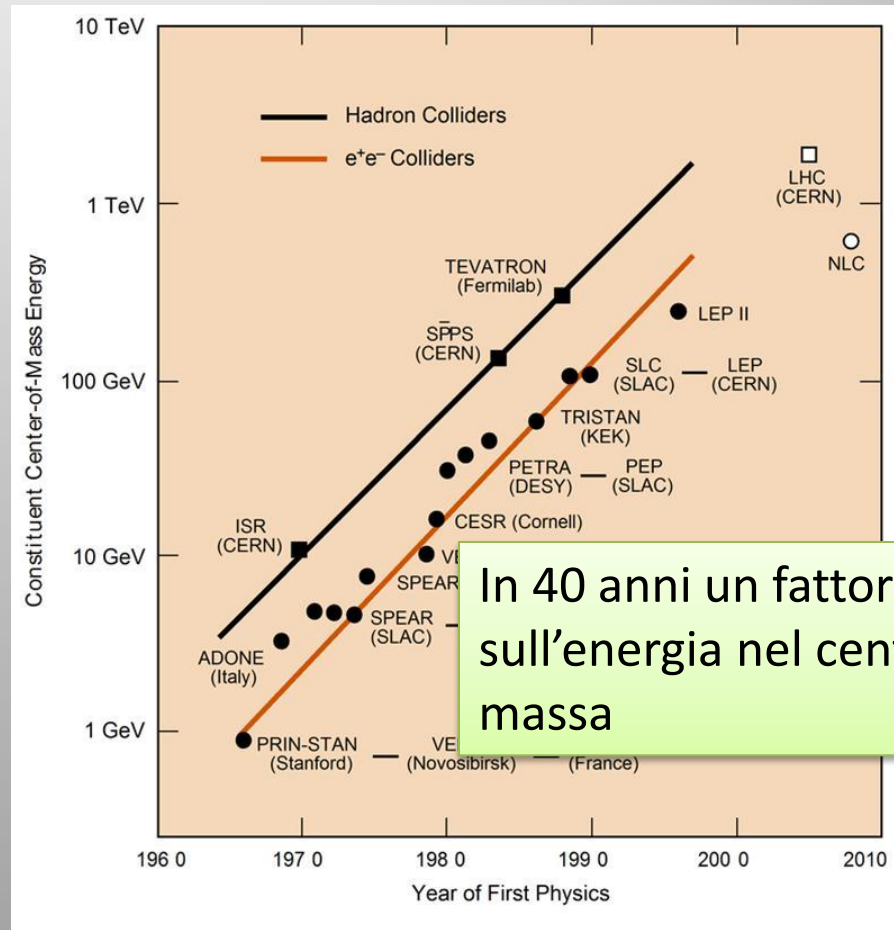
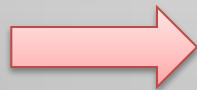
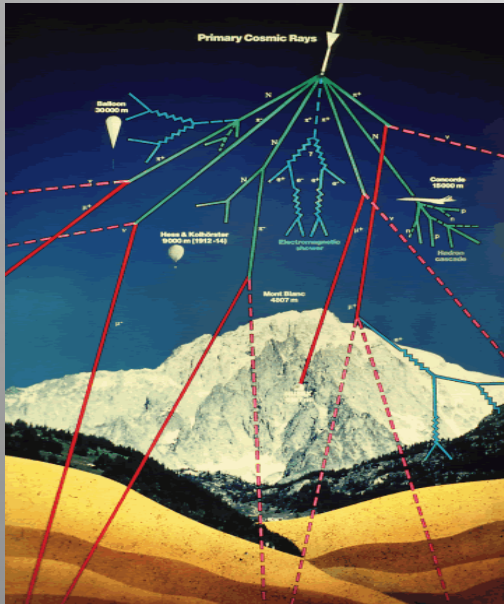
“Who ordered that
?”
I.Rabi

Forza elettromagnetica \rightarrow QED

Forza debole \rightarrow modello fenomenologico di Fermi

Forza forte \rightarrow modello di Yukawa

L'inizio di una nuova era: gli acceleratori di particelle



In 40 anni un fattore 10000 sull'energia nel centro di massa

La vita con gli acceleratori

La vita con gli acceleratori risulta all'inizio molto confusa !
 La nascita degli acceleratori rivelò ai fisici uno zoo di particelle
 Alcune delle particelle si disintegravano molto lentamente anche se
 erano state generate in tempi molto brevi... questo portò ad
 assegnare a queste particelle una proprietà detta *stranezza*



nel 1960 si conoscevano
 circa un duecento
 particelle a cui mancava
 però completamente una
 organizzazione



Un po' di ordine...

1963

- Intanto per fare un po' di ordine si comincio' a classificare con nuovi nomi le varie particelle:
 - leptoni (dal greco leptos, sottile) sono le particelle che risentono solo della forza em e/o debole
 - adroni le particelle che risentono anche della forza forte ... il vero zoo
- Gli adroni, le nuove particelle osservate nelle interazioni, potevano essere tutte spiegate come formate da 3 tipi di quark (e anti-quark):
- Adroni: mesoni (qqbar), barioni (qqq)
- esempio: p=uud n=ddu
- up, strange $Q=+2/3$
- down $Q=-1/3$



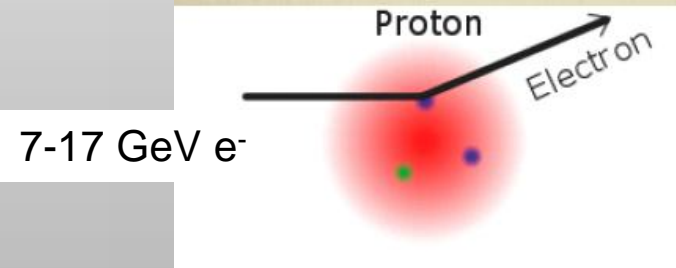
Gell-Mann

Non si era fino ad allora mai osservata una particella con carica frazionaria quindi anche in questo caso si faceva un'ipotesi ... fantasiosa

Una svolta: la verifica sperimentale dell'esistenza dei quark...

1968

- Un altro esperimento alla Rutherford fatto allo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)
- Friedmann, Kendal, Taylor condussero un esperimento in cui un fascio di elettroni incideva su un bersaglio



La deflessione degli elettroni era perfettamente compatibile con la presenza di 2 quark up e 1 down



Nel frattempo ...l'interazione debole...



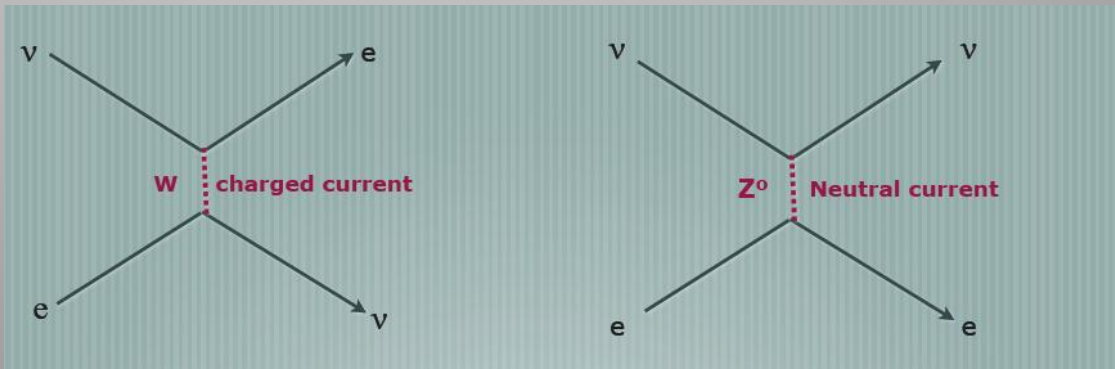
- Agli inizi degli anni 60 la teoria di Fermi era ancora la migliore descrizione dell'interazione debole
- Ma si voleva trovare qualcosa di migliore anche piu` in analogia con quello che si pensava fosse la corretta descrizione delle altre forza conosciute: elettromagnetica e forte mediate rispettivamente da fotoni e pioni
- L'ipotetica particella mediatrice delle interazioni deboli si indicava con il nome di bosone W ed era una particella carica
- Alla fine la teoria giusta fu trovata nell'ambito delle teorie di gauge...

Una nuova unificazione: la forza elettrodebole

1968

- La cosa piu` sorprendente era che W e fotone erano due mediatori dello stesso tipo di forza: la forza elettrodebole
- La differenza tra l'intensita` della forza elettromagnetica e debole era solo dovuta al fatto la che la forza debole e` mediata da particelle massive che fanno si` che il range della forza sia anche limitato
- Questa teoria prevedeva anche una ulteriore particella mediatrice dell'interazione debole: il bosone Z neutro
- Tutti i quark e leptoni hanno una carica "debole"

Glashow
Salam
Weinberg

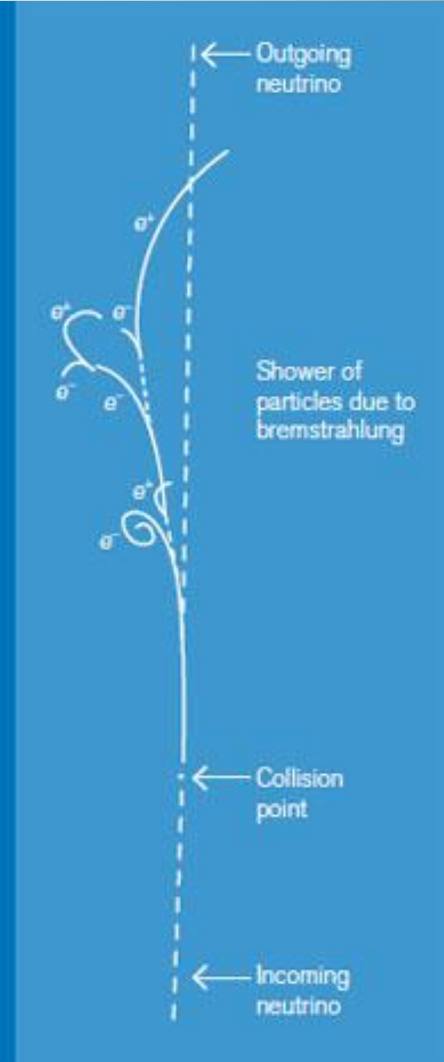
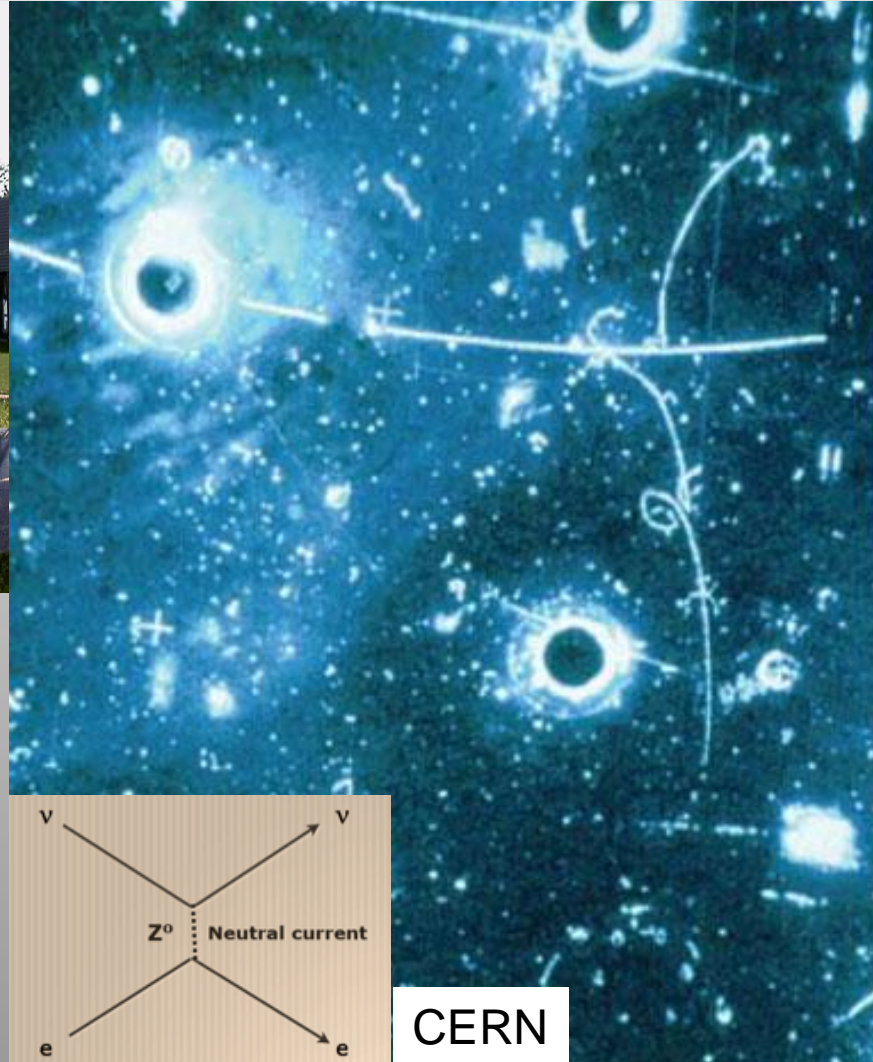




Conferma sperimentale correnti elettrodeboli neutre

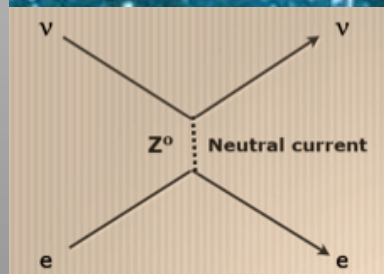


1973



Diffusione del neutrino su un elettrone del nucleo

Incontro con i docenti italiani

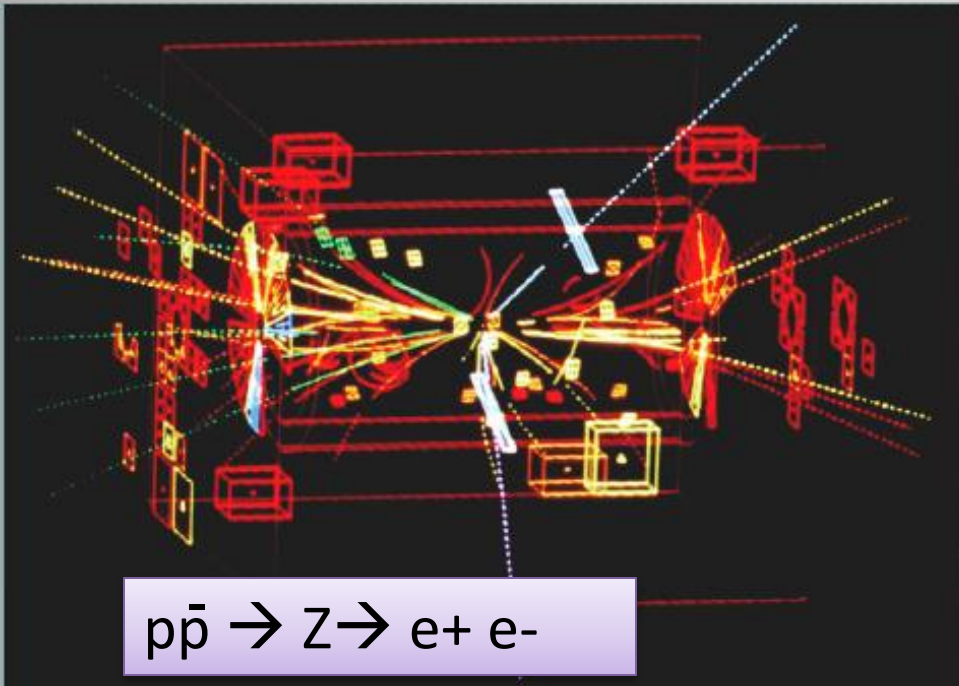


CERN

La scoperta del W e dello Z

1983

C.Rubbia applicando una idea di Van der Meer propone di modificare l'acceleratore SpS per far collidere protoni e anti-protoni
 Due esperimenti UA1 e UA2 costruiti per misurare i prodotti delle collisioni ppbar.
 Scoperta dei bosoni W e Z !!





La forza forte ...

Feynman e Bjorken dimostrarono che i dati sperimentali erano consistenti con dei quark che si muovevano liberamente all'interno degli adroni, in gergo si dice che i quark godono della **liberta` asintotica**.

La forza tra i quark pero` aumentava quando i quark si allontanavano in modo che i quark fossero **confinati** all'interno degli adroni.



Gross inizio` a studiare il problema dal punto di vista teorico perche` era convinto che nessuna teoria di campo quantistica fosse compatibile con una forza che aumentava all'aumentare della distanza.

Con sorpresa trovo che le uniche teorie che godevano della liberta` asintotica erano le teorie di gauge !



Il bigino della...

Gross, Wilczek, Politzer



QCD: Quantum Chromodynamics

La Teoria che descrive le interazioni forti e` la QCD

1973

Così` come i fotoni sono i mediatori della forza elettromagnetica i gluoni sono i mediatori della forza forte

I gluoni hanno massa nulla

La carica della forza forte si chiama colore: i quark portano la carica di colore (e` di tre tipi: blu, rossa e verde) → da cui QCD

I gluoni, al contrario dei fotoni, portano carica di colore e quindi possono interagire con se stessi → la forza aumenta all'aumentare della distanza.

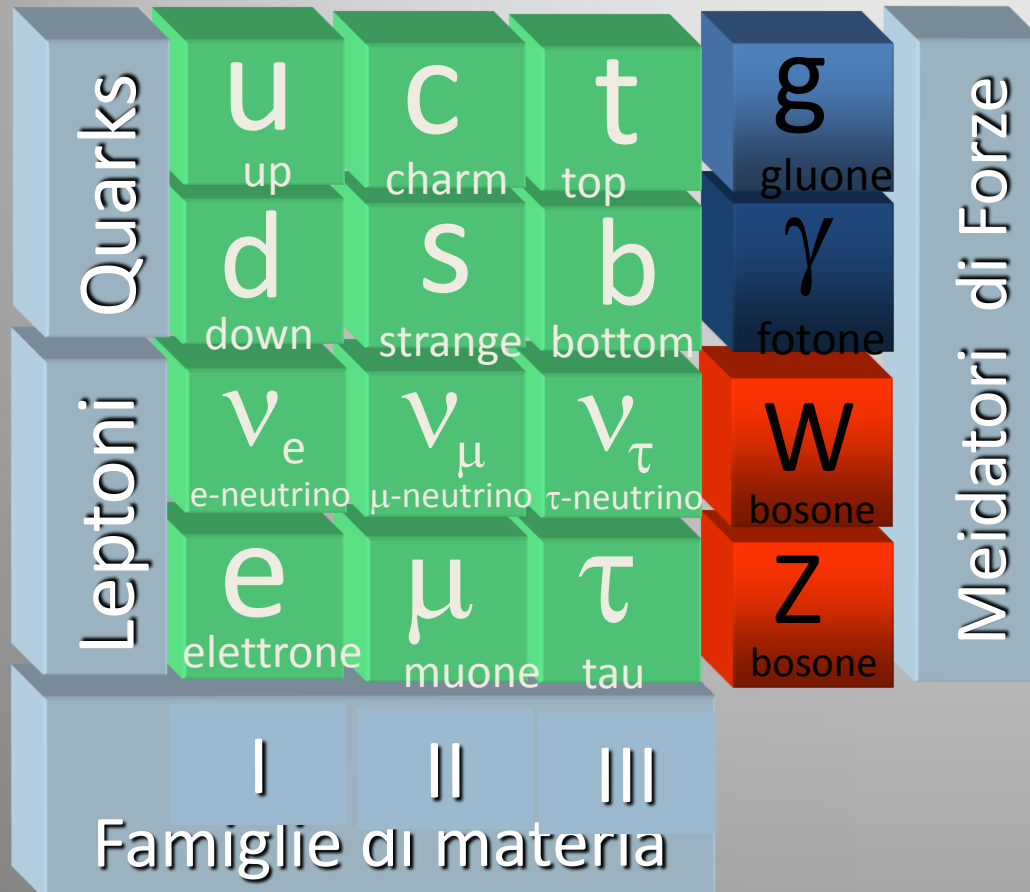


Il completamento del quadro



- La struttura della correnti debole prevedeva che l'interazione avesse la stessa forza per quark o leptoni
- 1970 Glashow, Iliopolis e Maiani ipotizzano l'esistenza di un quarto quark – charm
- 1974 L'esistenza di questo quarto quark fu confermata sperimentalmente da due esperimenti a SLAC e Brookhaven (scoperta della J/ψ)
- 1975 Tutto era tranquillo quando fu scoperta una nuova particella tipo l'elettrone ma molto piu` pesante il tau \rightarrow predizione di un'intera nuova famiglia (b, t, ν_τ)
- 1977 Scoperta del quark b
- 1995 Scoperta dell'ultimo (?) quark predetto t (top)

Le particelle del Modello Standard



Materia: leptoni e quark sono fermioni (spin=1/2)
 Mediatori forze: bosoni (spin=1)

Forza elettromagnetica, debole e forte sono descritte da teorie di gauge



La teoria del Modello Standard

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
& \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\mu)g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\mu W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
& \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \frac{2M^2}{g^2} + \\
& \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
& \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^-) + \\
& g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
& g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
& W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
& \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - \phi^0 \partial_\mu Z_\mu^0) + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}ig \frac{1-2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
& m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \nu^\lambda) (1 + \\
& \gamma^5) \nu^\lambda + (\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda] + (\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda + \\
& (\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda) (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \nu^\lambda) (1 + \gamma^5) e^\lambda] + (\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) (1 + \\
& \gamma^5) C_{\lambda c} d_j^\lambda + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) (1 + \gamma^5) \nu^\lambda] + (\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda) C_{\lambda c}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda + \\
& \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_h^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\
& i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda c} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 + \\
& \gamma^5) d_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \bar{u}_j^\lambda (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \bar{d}_j^\lambda (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
& X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + \\
& ig c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
& ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
& ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \\
& \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
& \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
& \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \\
& - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^-) + \\
& g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + \\
& g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^- \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - \phi^0 \partial_\mu Z_\mu^0) + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}ig \frac{1-2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
& m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \nu^\lambda) (1 + \\
& \gamma^5) \nu^\lambda + (\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda] + (\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda + \\
& (\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda) (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \nu^\lambda) (1 + \gamma^5) e^\lambda] + (\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) (1 + \\
& \gamma^5) C_{\lambda c} d_j^\lambda + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) (1 + \gamma^5) \nu^\lambda] + (\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda) C_{\lambda c}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda + \\
& \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_h^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\
& i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda c} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 + \\
& \gamma^5) d_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \bar{u}_j^\lambda (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \bar{d}_j^\lambda (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
& X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + \\
& ig c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
& ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
& ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \\
& \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
& \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
& \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

Perche' il bosone di Higgs ?



La teoria di gauge delle interazioni elettrodeboli funziona ma ... le particelle mediatrici in questo tipo di teoria devono avere massa nulla ... Z e W pesano circa $80/90 m_p$... non sono affatto magre. Una possibile soluzione (la soluzione?):



F.Englert

P.Higgs



Kibble Guralnik Hagen Englert Brout



Il meccanismo di Higgs (rottura spontanea della simmetria) permette di avere una teoria di gauge con bosoni massivi ma prevede l'esistenza di campo di Higgs con cui W, Z ma anche tutte le particelle che osserviamo avere massa interagiscono.

Il bosone di Higgs

- Il vuoto non è più vuoto ma è “riempito” dal campo di Higgs
- Una eccitazione del campo di Higgs si manifesta come il bosone di Higgs uno bosone di spin 0

Una stanza piena di persone
Il campo di Higgs



Arriva una persona famosa
Una particella ...



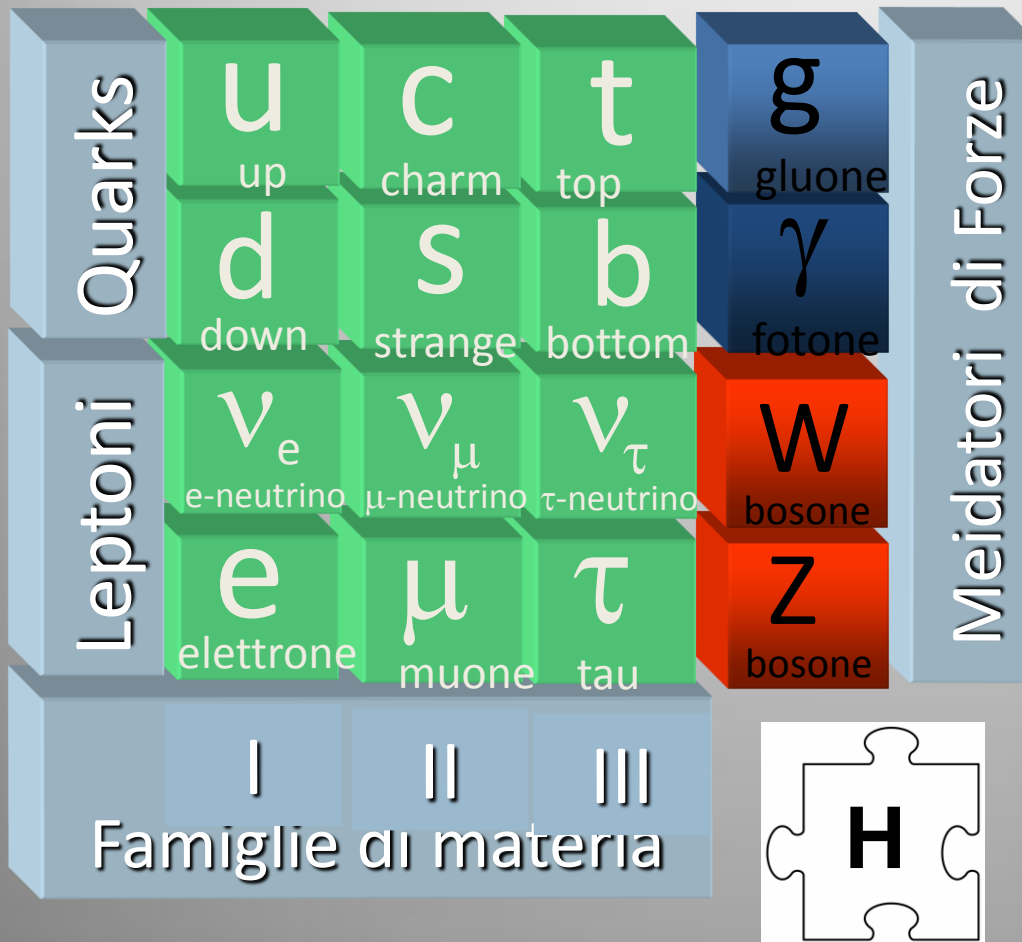
Le persone gli si avvicinano
... acquista massa



Il bosone di Higgs



Il modello Standard al completo



La teoria prevede l'esistenza di questa particella e delle proprietà con cui interagisce con le altre particelle elementari ma non prevede la sua massa.

Il bosone di Higgs così come la maggior parte delle particelle elementari non esiste nella materia ordinaria...possiamo ricrearle condensando sufficiente energia in un punto

Come possiamo trovare l'Higgs

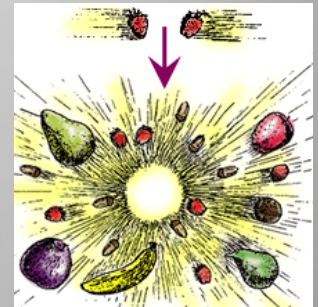
Ricreiamo in laboratorio le condizioni in cui si possono generare e rivelare le particelle che cerchiamo ed in particolare il bosone di Higgs

Ingredienti:

⊙ **Collisioni di particelle di alta energia:** particelle di bassa massa accelerate ad alta velocità \rightarrow alta energia a disposizione permette di creare anche particelle di massa elevata, la relazione chiave è $E=mc^2$

⊙ **Alto numero di collisioni:** gli eventi che cerchiamo sono rari \rightarrow la natura decide la probabilità di produrre una certa particella \rightarrow se la probabilità è molto bassa non ci resta che provare tante volte

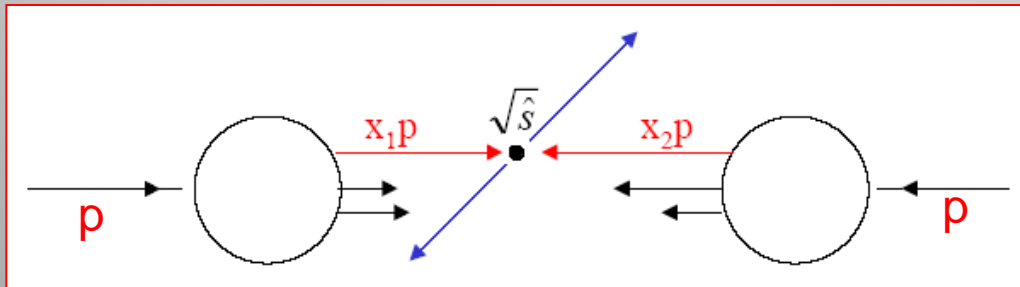
⊙ **Un apparato preciso** per registrare le caratteristiche delle collisioni



Perche` alta energia ?

LHC e` stato progettato per poter escludere o trovare l`Higgs in tutto il range di massa previsto \rightarrow 100 GeV – 1 TeV GeV

Collisioni protone-protone sono collisioni di particelle composite: fasci di partoni che collidono non solo quark u,d ma anche altri quark e gluoni...



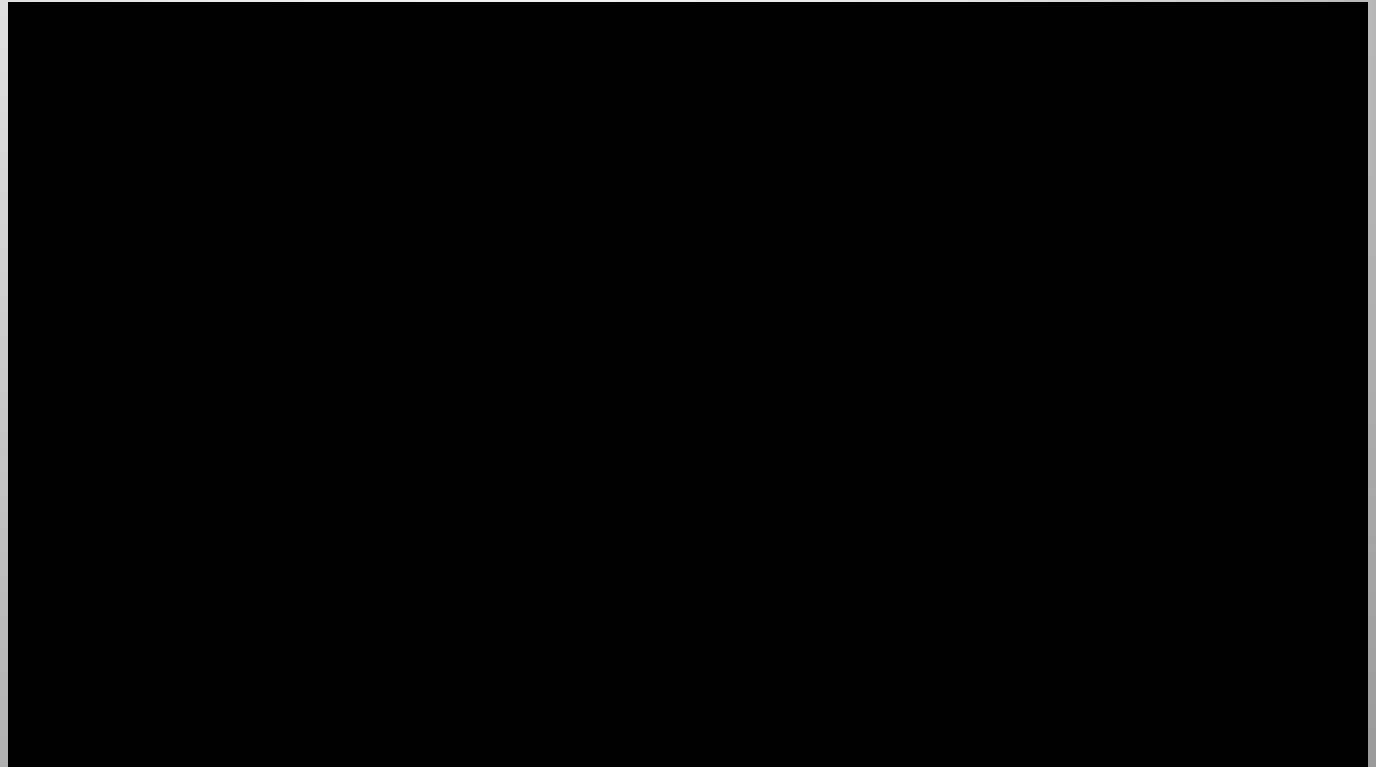
$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2 s}$$

Visione semplificata circa meta` dell`impulso portato da gluoni e meta` dai tre quark uud \rightarrow $x_1=x_2=1/6$ assumendo energia dei fasci $p = 7$ TeV:

$$x_1 p \sim x_2 p \sim p/6 \rightarrow \sqrt{s} \sim 2 \text{ TeV}$$

$\sqrt{s} \sim 2$ TeV energia a disposizione per produrre l`Higgs

Una interazione protone-protone

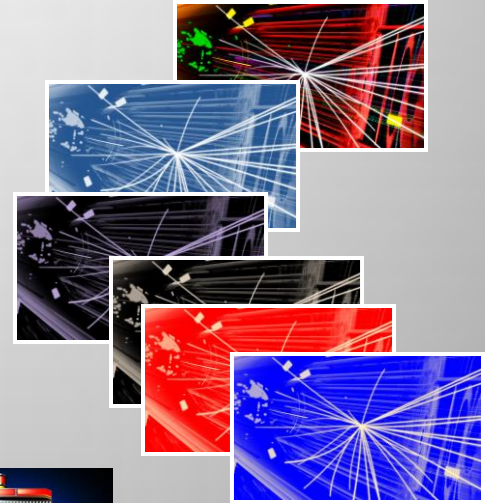
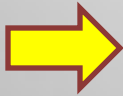


= Evento 1Mbyte ~ 1 foto digitale ...

Cosa succede quando i protoni collidono

Modello Standard

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}g_s^2 \partial_\mu \phi^a \partial_\nu \phi^a - g_s f^{abc} \partial_\mu \phi^a \partial_\nu \phi^b \phi^c - \frac{1}{2}g_s^2 f^{abc} f^{ade} \phi^a \phi^b \phi^c \phi^d \phi^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_2^2 (\bar{q}^i \gamma^\mu q^j) g_\mu^a + G^a \partial^\mu G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\mu Z_\nu^0 - \frac{1}{2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2} m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^a \partial_\nu \phi^a \phi^b \phi^b - \frac{1}{2} M^2 \phi^a \phi^a - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^2}{g} \alpha_h - ig_{c_w} [\partial_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) - ig_{s_w} [\partial_\mu A_\nu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\mu^- W_\nu^+) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+)] - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + g^2 e_w^2 (Z_\nu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\mu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^2 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & g M W_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{g} Z_\nu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\nu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{2s_w}{c_w} M Z_\nu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\nu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{2s_w}{c_w} Z_\nu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- (\phi^0)^2 + \dots
 \end{aligned}$$



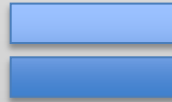
Da cosa dipende la frequenza di produzione di eventi ?
 Quanti Higgs produce LHC ?
 In mezzo a quanti eventi devo cercare l'Higgs ?
 ... cosa devo fare per vincere alla slot machine 😊



Alta energia non basta ...

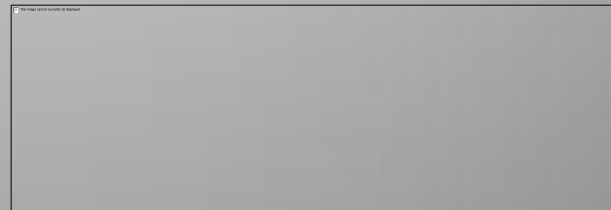
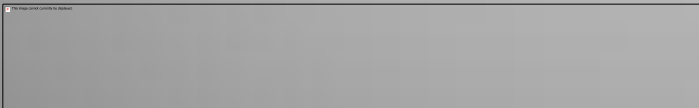
La frequenza di produzione degli eventi dipende dal:

- probabilita` di produrre un particolare processo: sezione d'urto (σ)
- da quanti protoni al secondo riesco a far collidere : luminosita` istantanea (L)

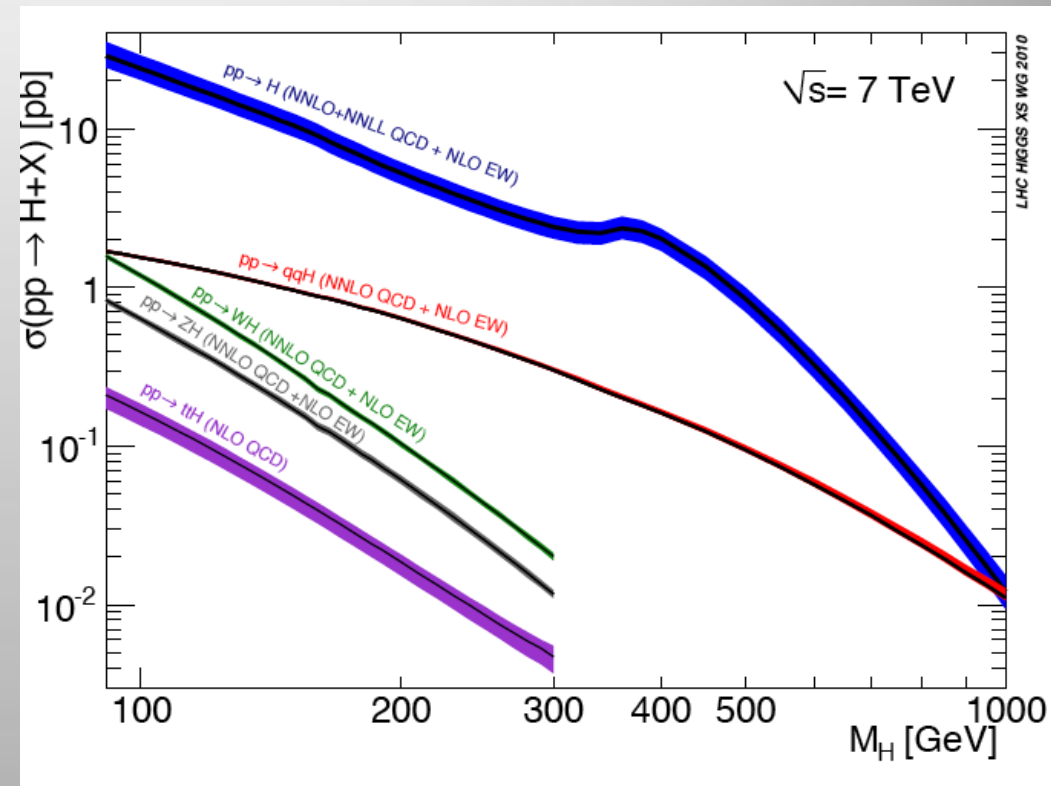
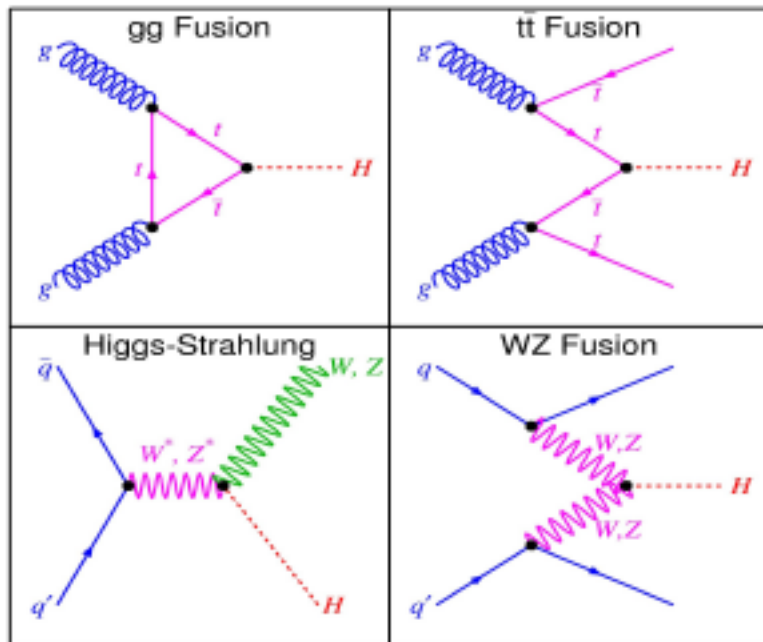


La frequenza di vittoria alla slot machine dipende:

- probabilita` di produrre una particolare combinazione
- dalla frequenza con cui si gioca (1/giorno, 10/giorno...)

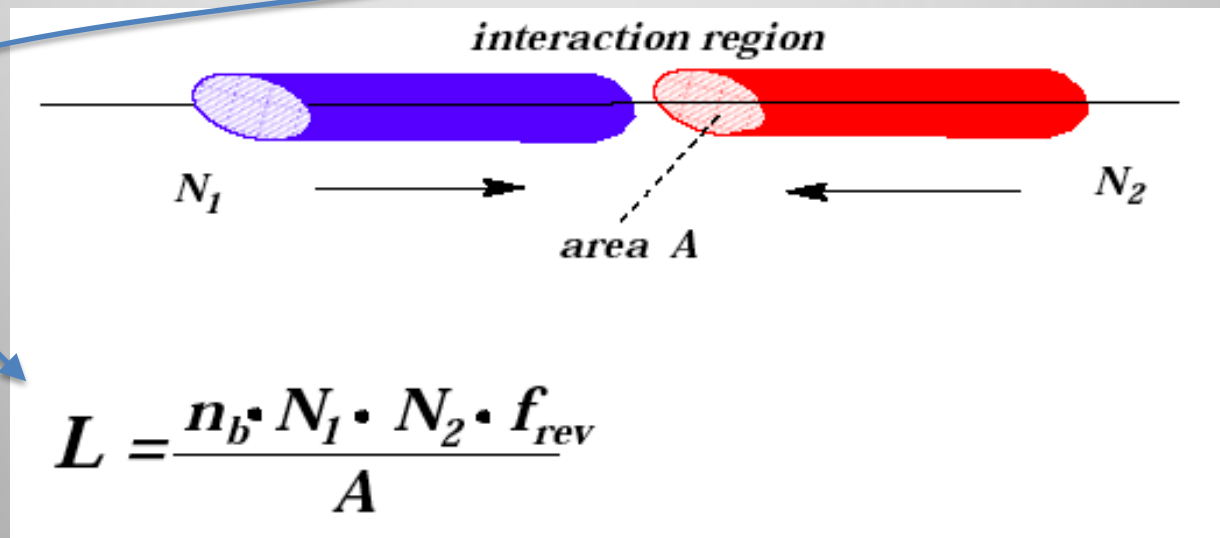
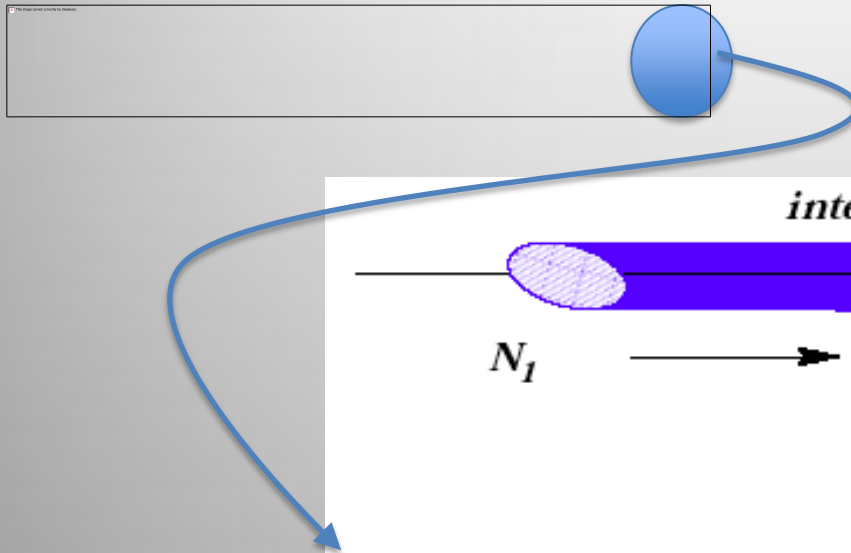


La sezione d'urto di produzione dell'Higgs



Con queste sezioni d'urto se avessimo una collisione protone-protone al secondo dovremmo aspettare 10^{26} anni per produrre un Higgs ...

La luminosita`



N_1 ed N_2 nro di protoni nel pacchetto

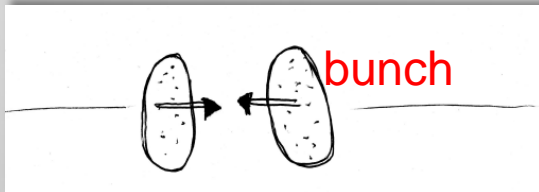
A area della sezione

N_b nro di pacchetti lungo la circonferenza di LHC

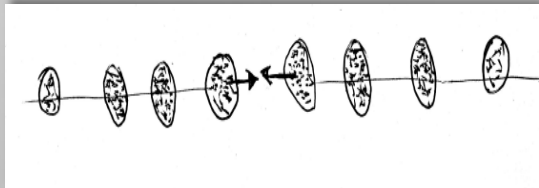
f_{rev} frequenza di collisione

Come si ottiene alta luminosita`

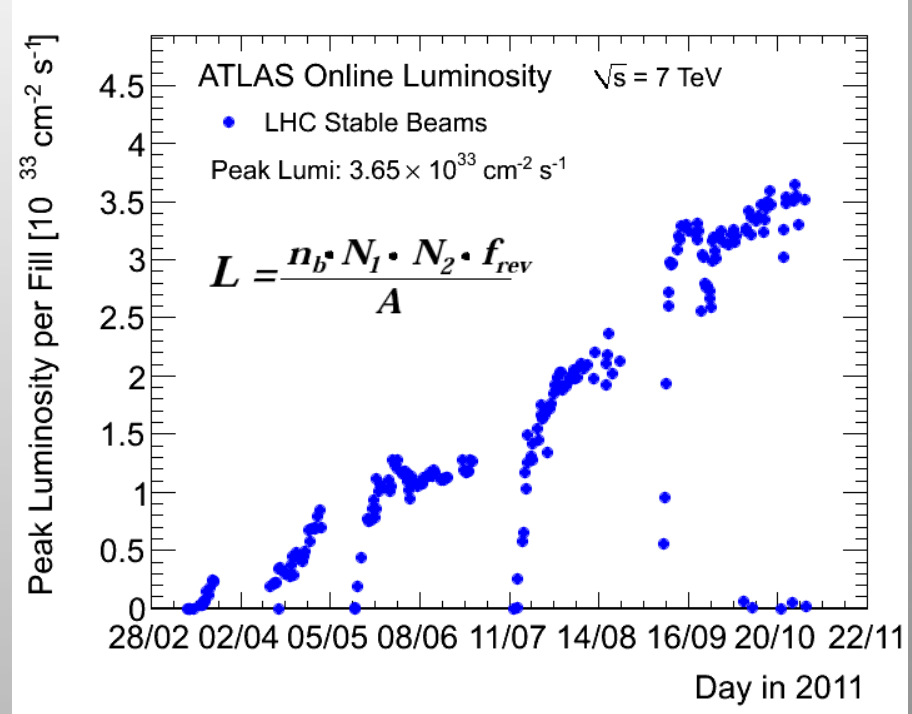
Bassa luminosita`



Alta luminosita`



2800 pacchetti che circolano con 100 miliardi (10^{11}) di protoni condensati su una dimensione dell'ordine del filo di ragnatela ($16 \mu\text{m}^2$)
 20 milioni di collisioni al secondo



Numero di Higgs prodotti in un anno 10 pb x 5 fb⁻¹ = 50000

Ma allora e` facile ??

Gli eventi prodotti...

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

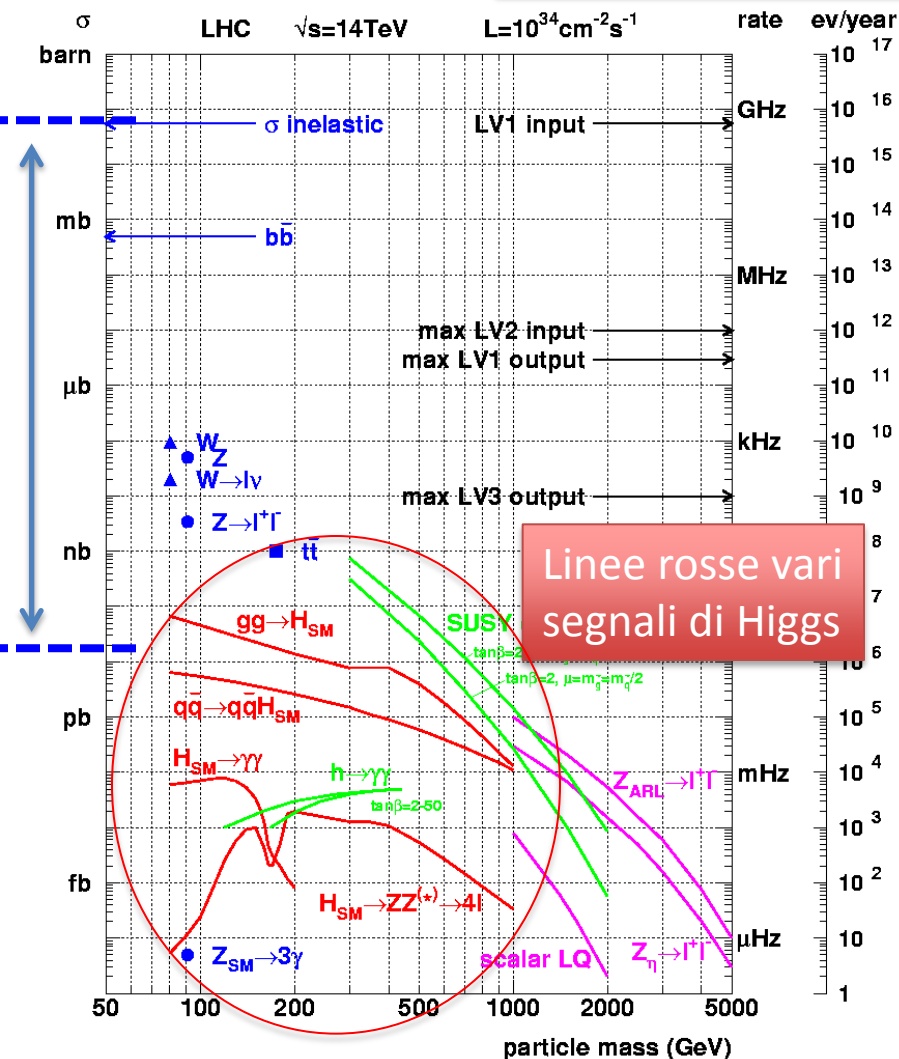
Processi noti e già indagati ...



Processi rari ... quelli interessanti

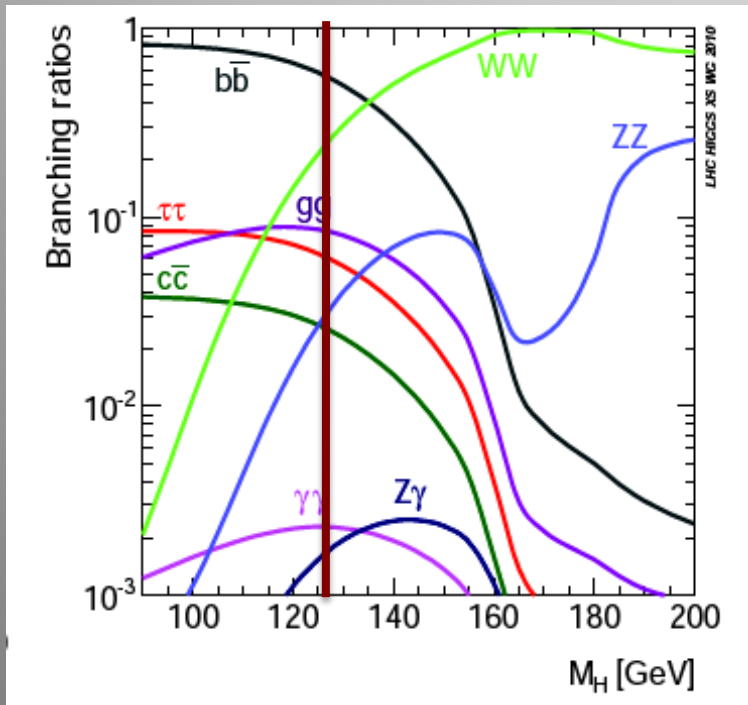
Per ogni Higgs prodotto ho un miliardo di eventi che contengono quark o gluoni ...
Quali eventi di Higgs riesco a vedere ?

10^{-9}



Come appare l'Higgs ?

- L'Higgs decade immediatamente dopo essere stato prodotto cioè si trasforma in altre particelle
- spesso anche i prodotti di decadimento a loro volta decadono → nei rivelatori si "vedono" le particelle finali di questa catena di decadimento
- Il tipo di decadimento dipende dalla massa dell'Higgs



Tre esempi:

$$H \rightarrow b\bar{b} \rightarrow \text{jet}_b \text{jet}_{b\bar{b}}$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

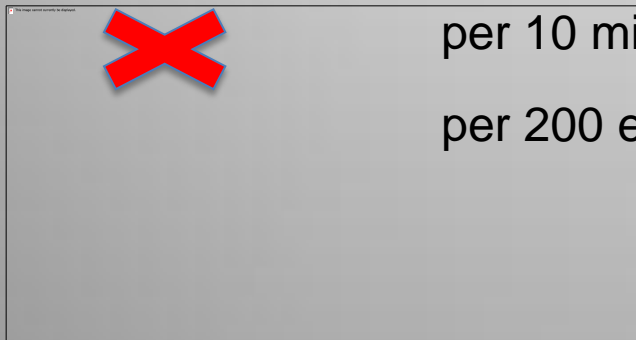
Cercare l'ago nel pagliaio ...



... gli eventi che cerchiamo sono rari

Inoltre ci sono eventi che producono stati finali molto simili a quelli in cui si ha il bosone di Higgs ... aghi che si assomigliano !

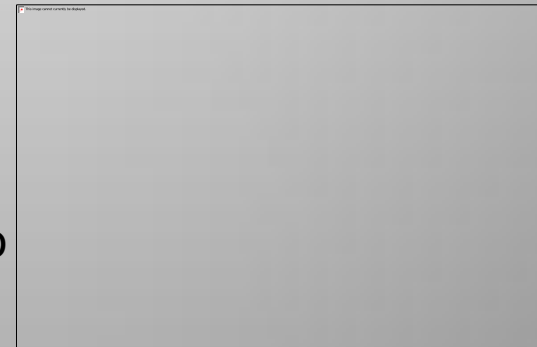
1 evento
1 evento
1 evento



per 10 milioni di eventi

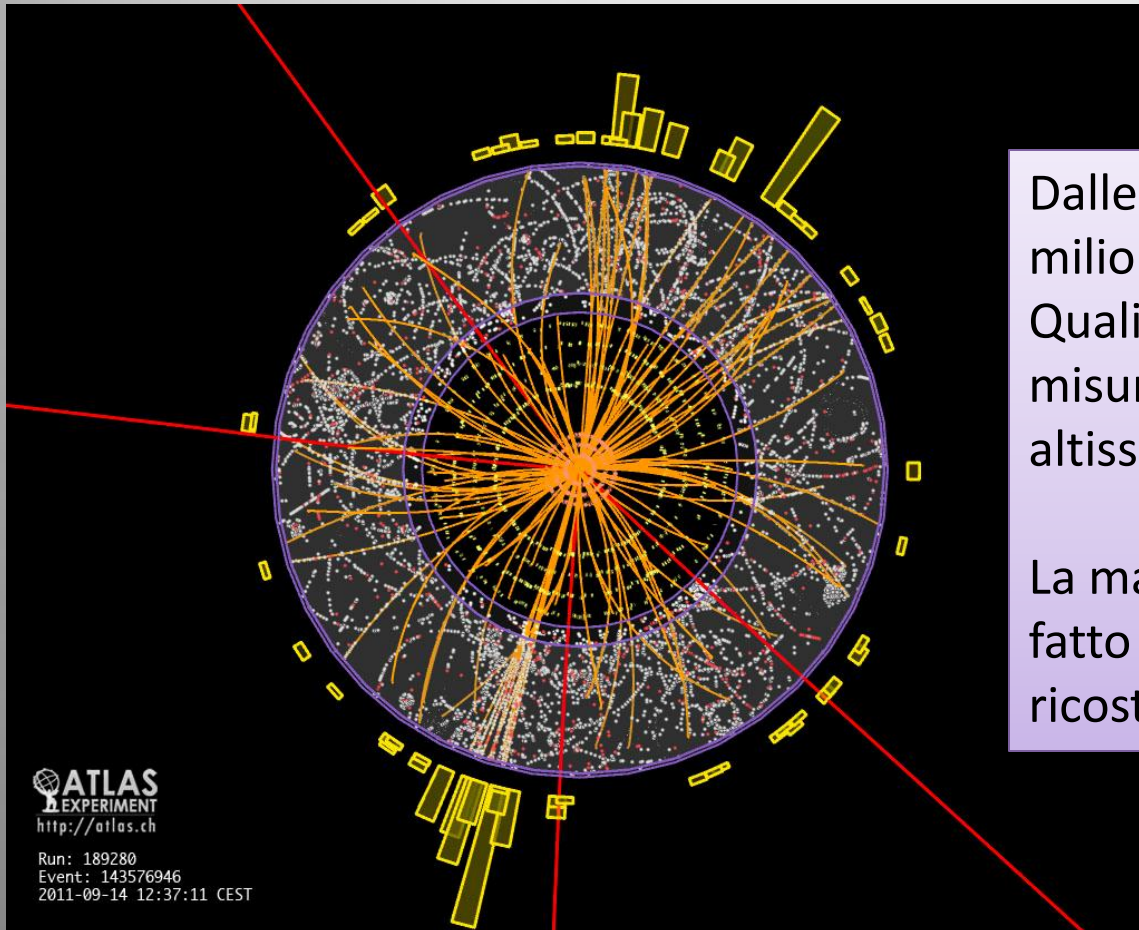
per 200 eventi

per 1 evento



Abbiamo bisogno di rivelatori molto precisi per poter capire cosa è stato prodotto nelle collisioni dei protoni

Ricostruzione degli eventi

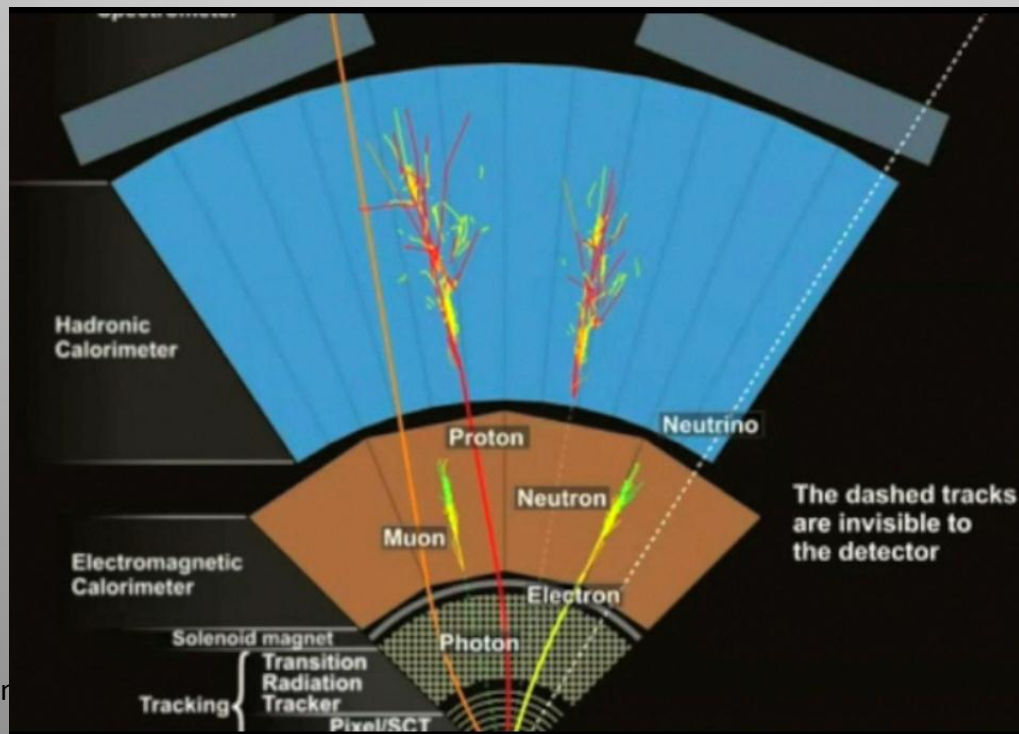


Dalle informazioni dei circa 100 milioni di canali dobbiamo capire: Quali particelle sono presenti, misurare le direzioni, velocità con altissima precisione

La maggior parte di questo lavoro è fatto con sofisticati SW di ricostruzione

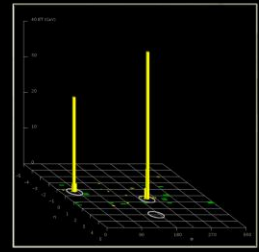
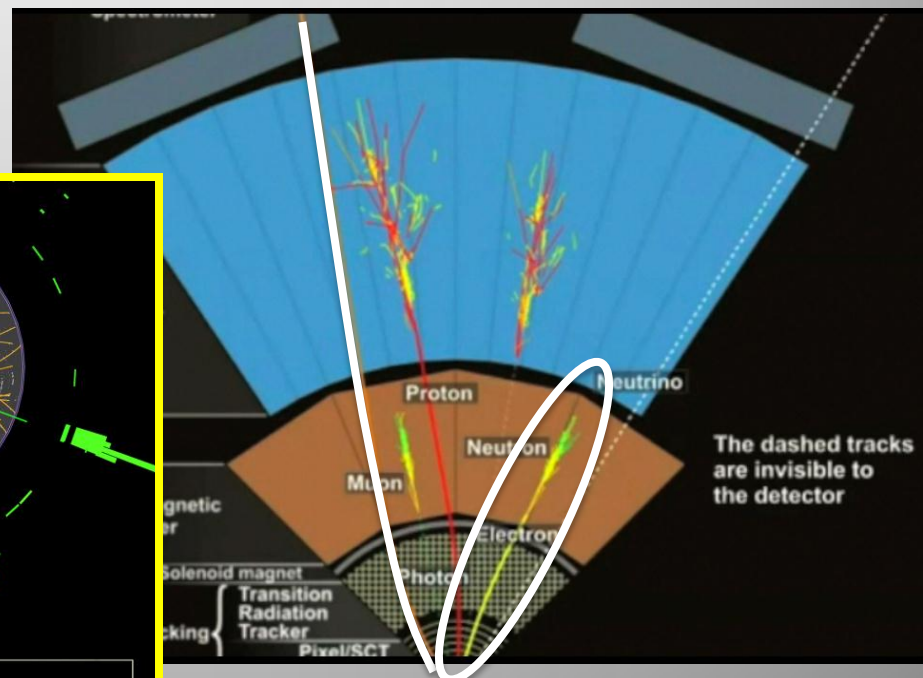
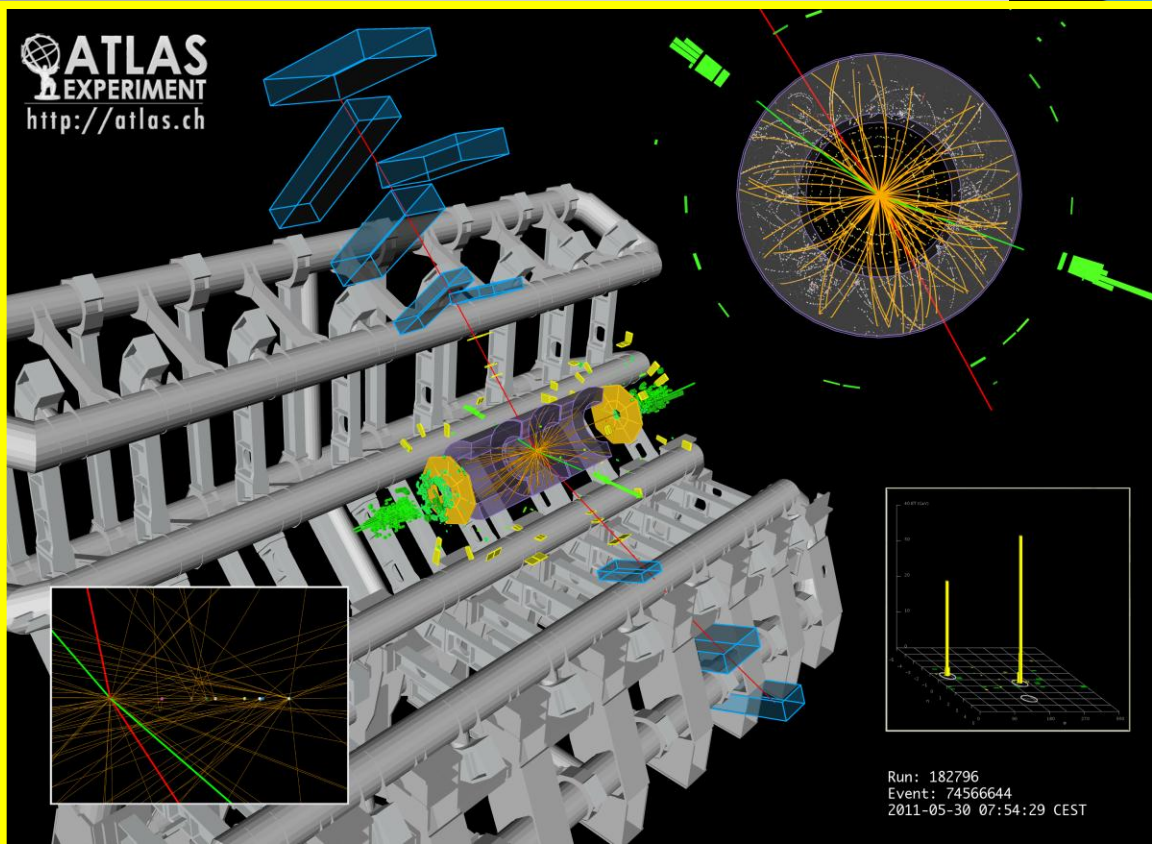
Analisi dei dati: alla ricerca di impronte ...

- Il rivelatore e' costruito a strati l'insieme delle informazioni dei vari strati ci indica il tipo di particella
- L'informazione dei rivelatori permette di misurare velocita', direzione e tipi delle particelle





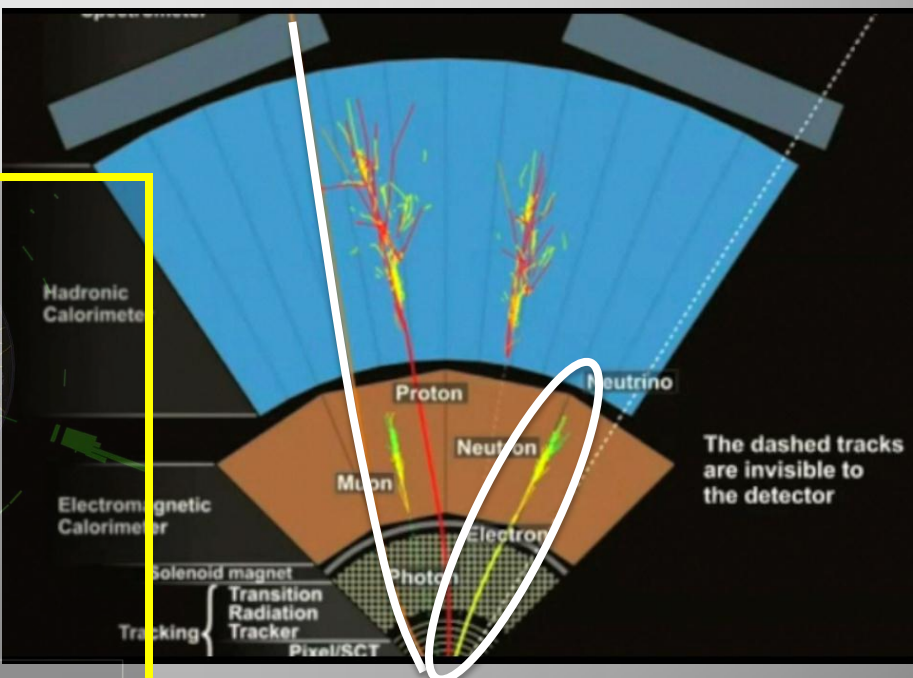
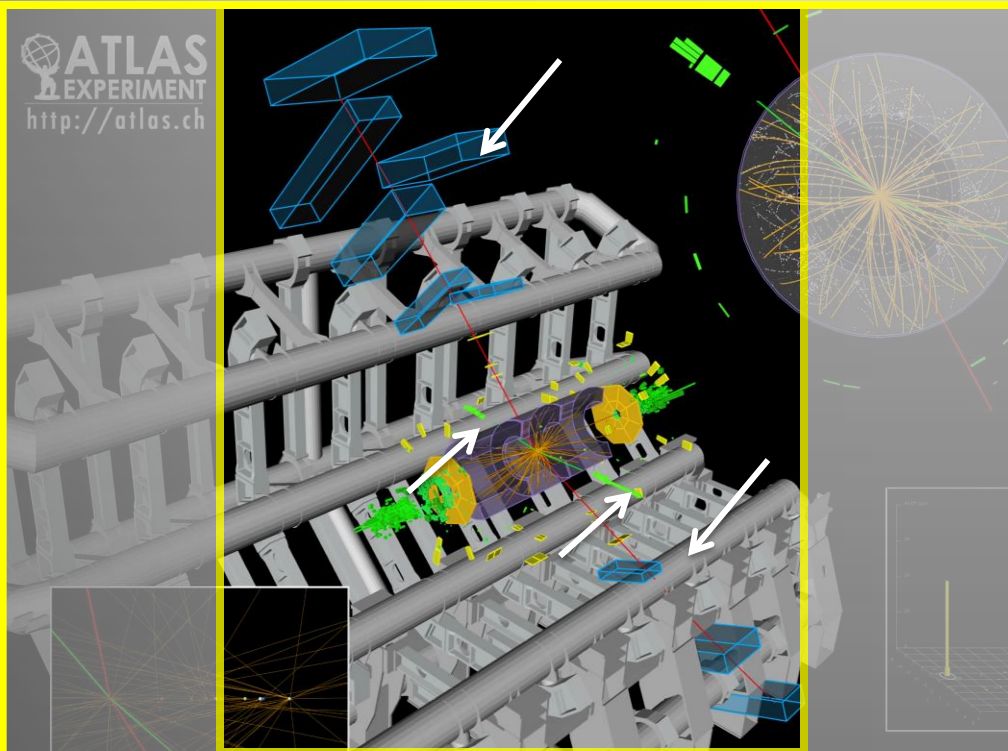
Un candidato Higgs misurato in ATLAS



Run: 182796
Event: 74566644
2011-05-30 07:54:29 CEST



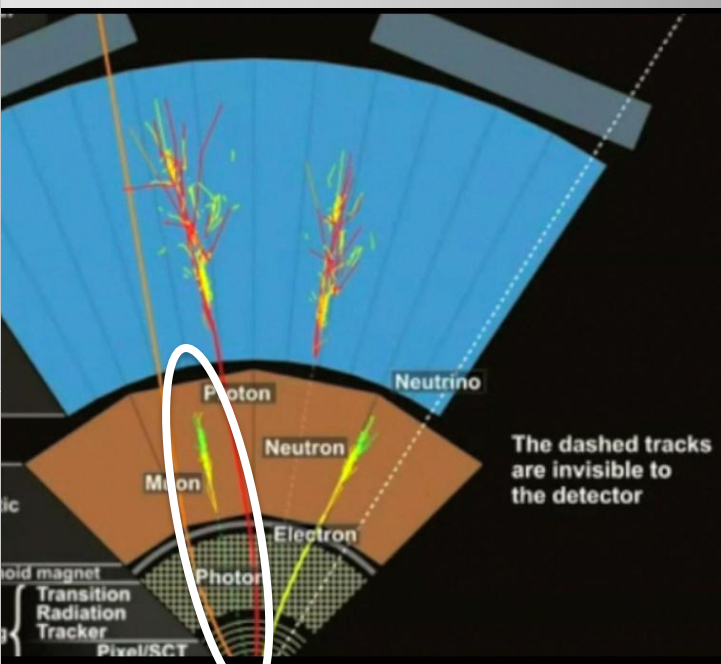
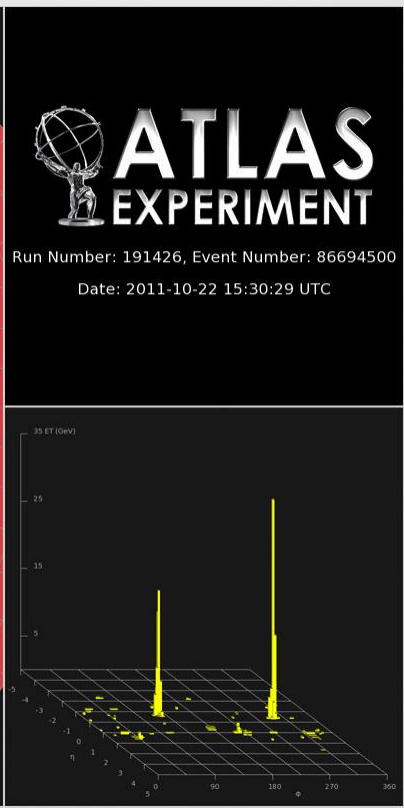
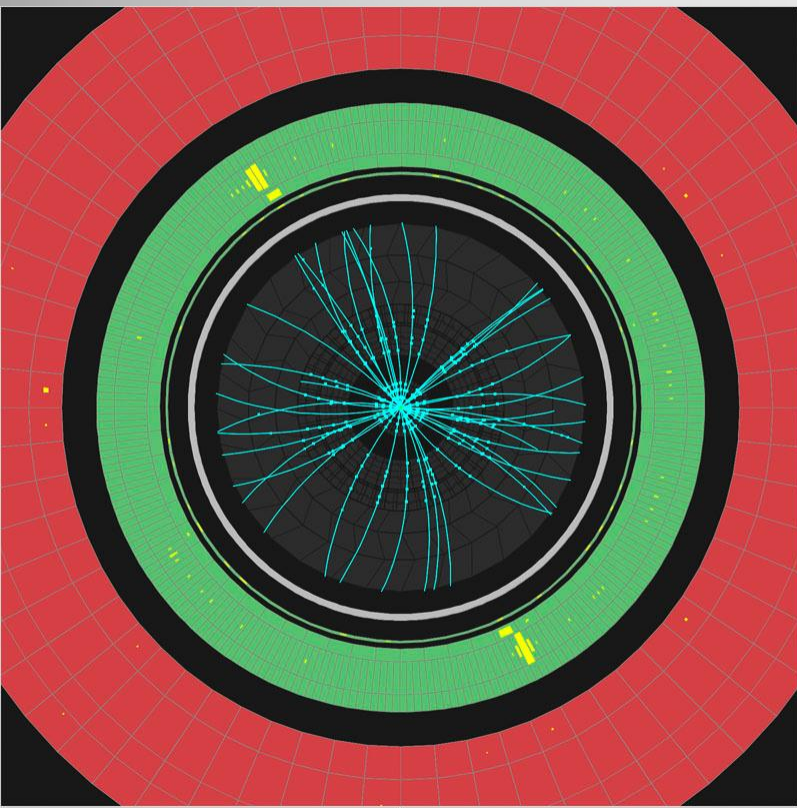
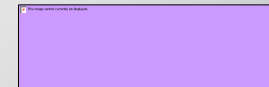
Un candidato Higgs misurato in ATLAS



ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



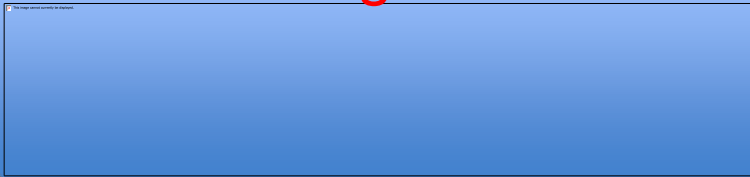
Un candidato Higgs misurato in ATLAS



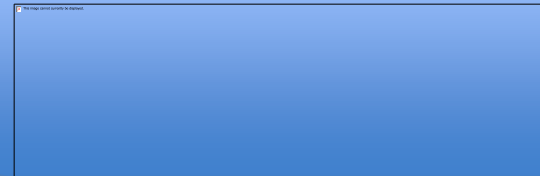
Sono davvero Higgs ??

La domanda e` lecita perche` come faccio a distinguere tra questi due casi in cui le particelle che osservo nel mio rivelatore sono le stesse nei due casi:

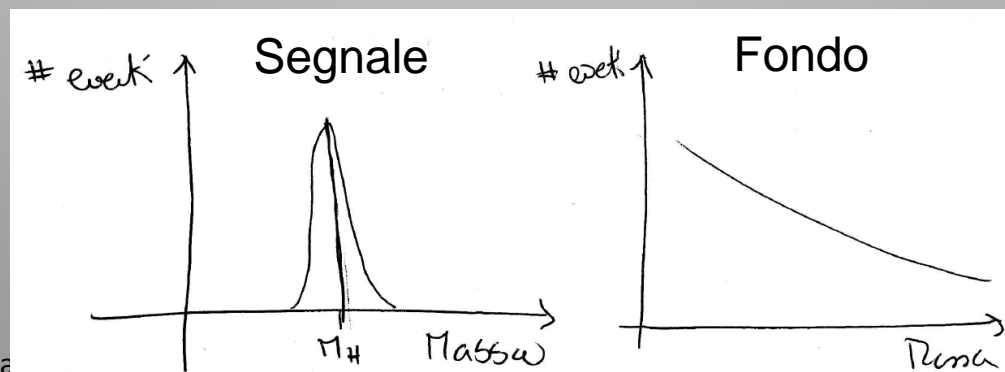
Segnale



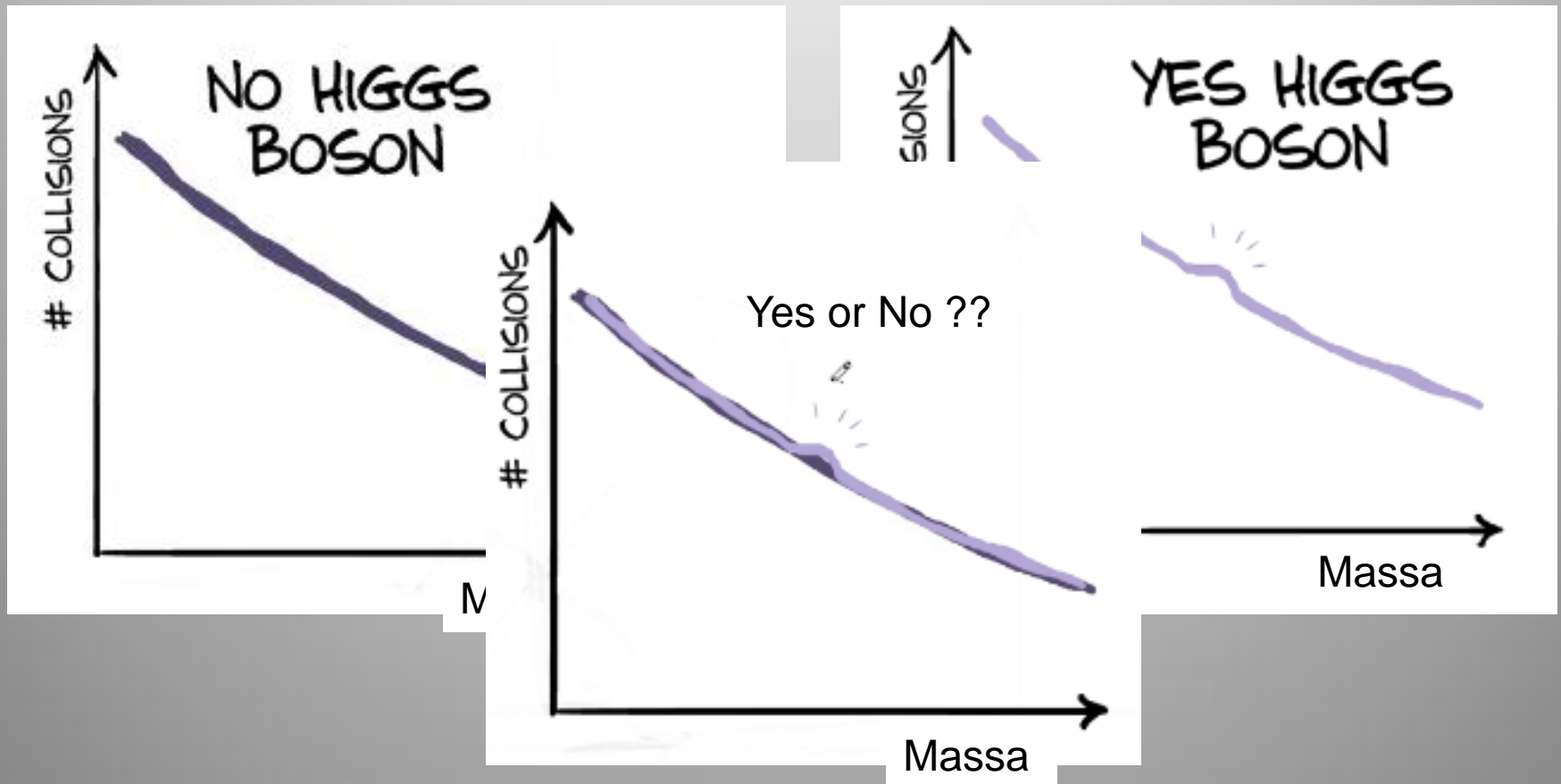
Fondo



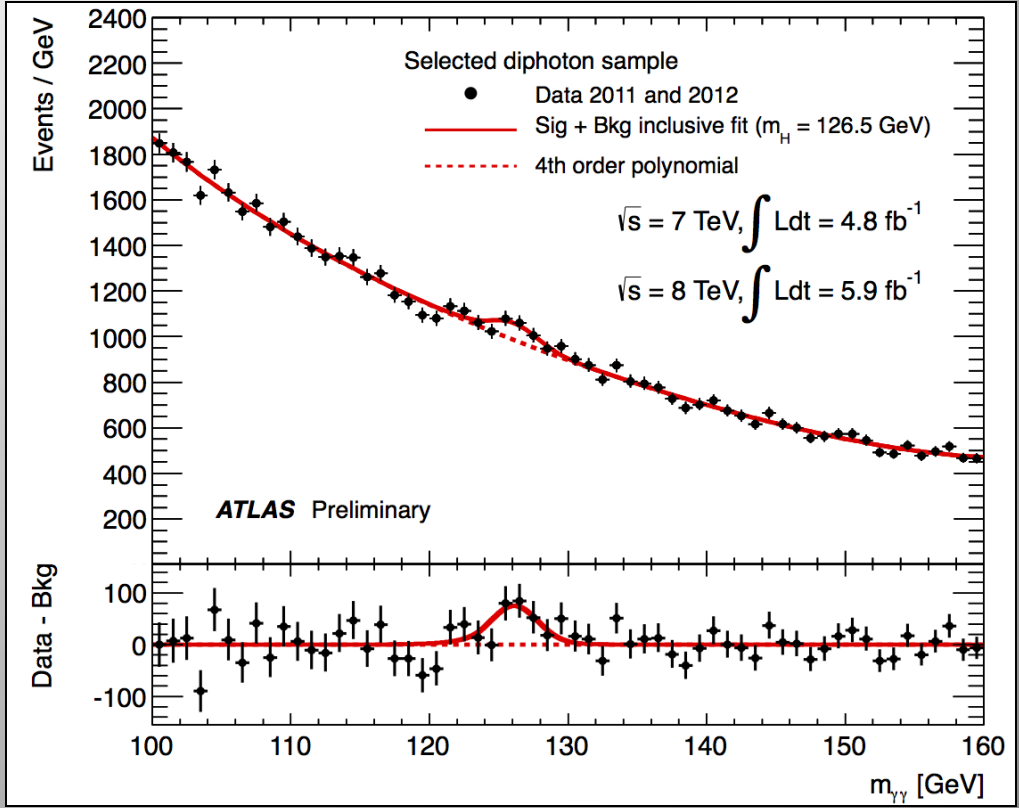
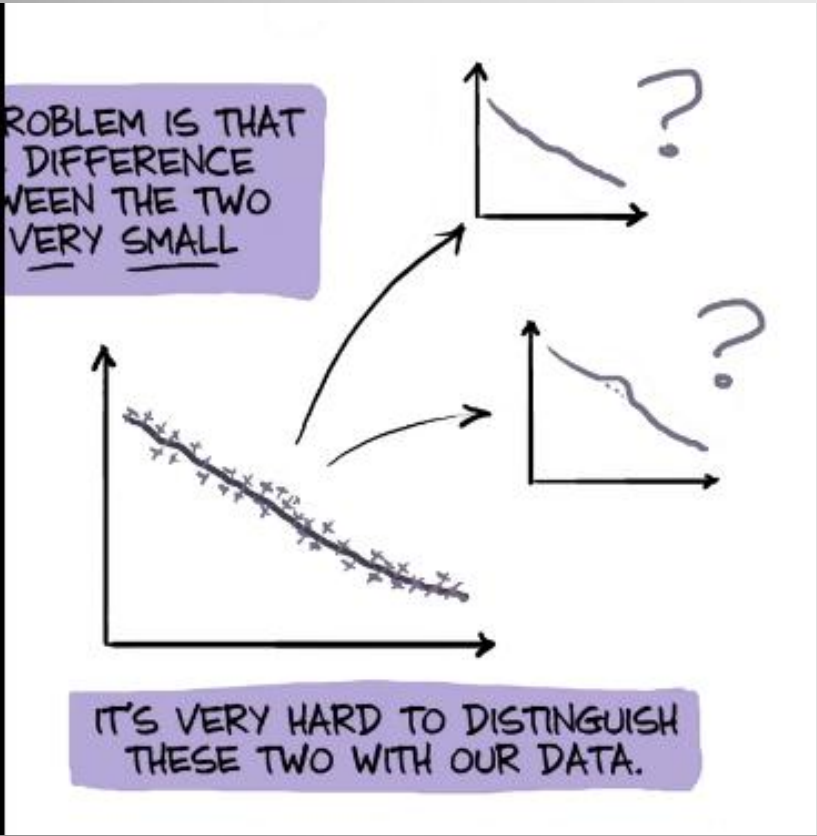
Le particelle che osservo nel rivelatore si “ricordano” della massa della particelle da cui provengono...massa invariante



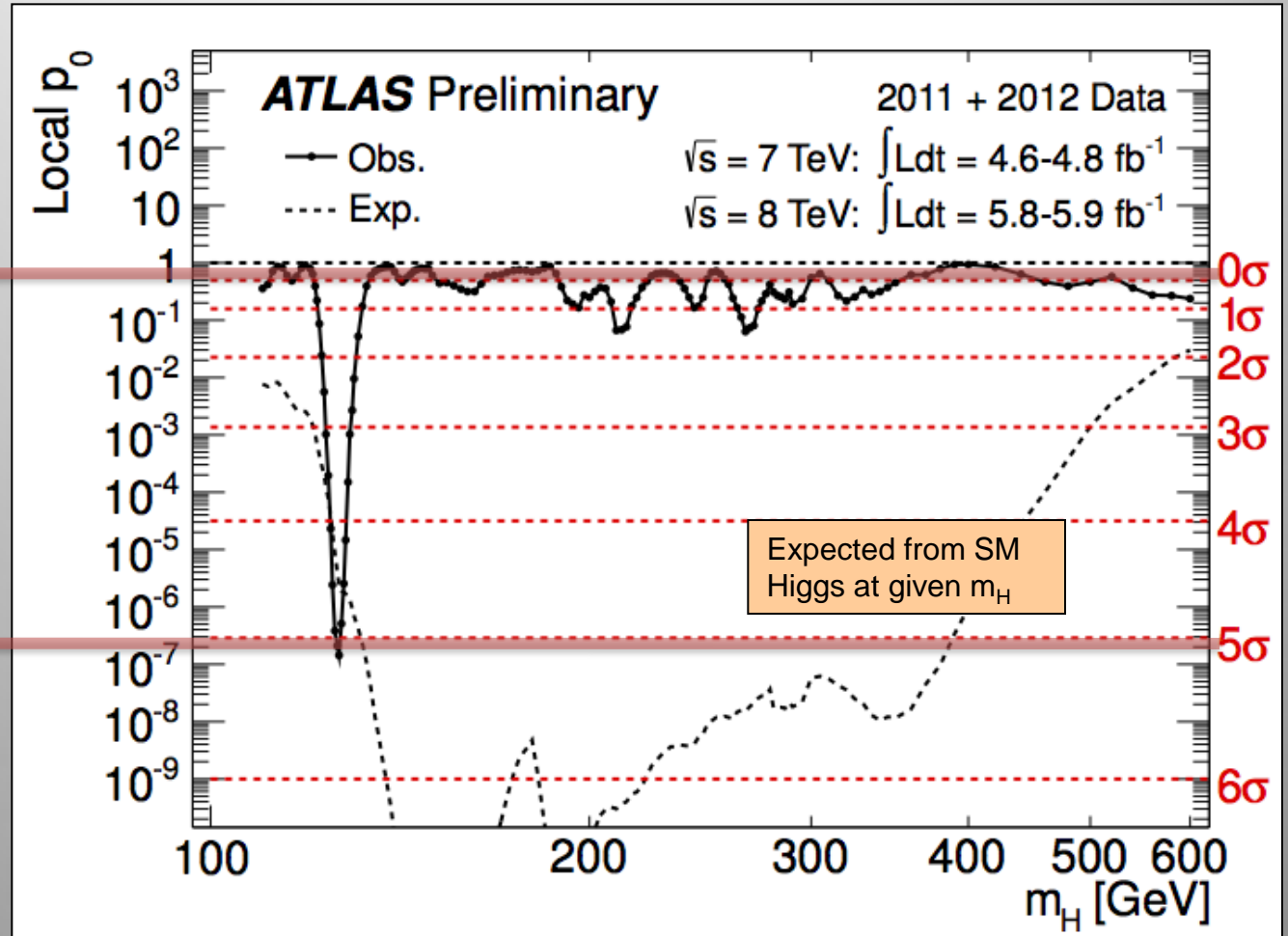
La distribuzione della massa delle particelle



La distribuzione della massa delle particelle



Tutti i decadimenti insieme...

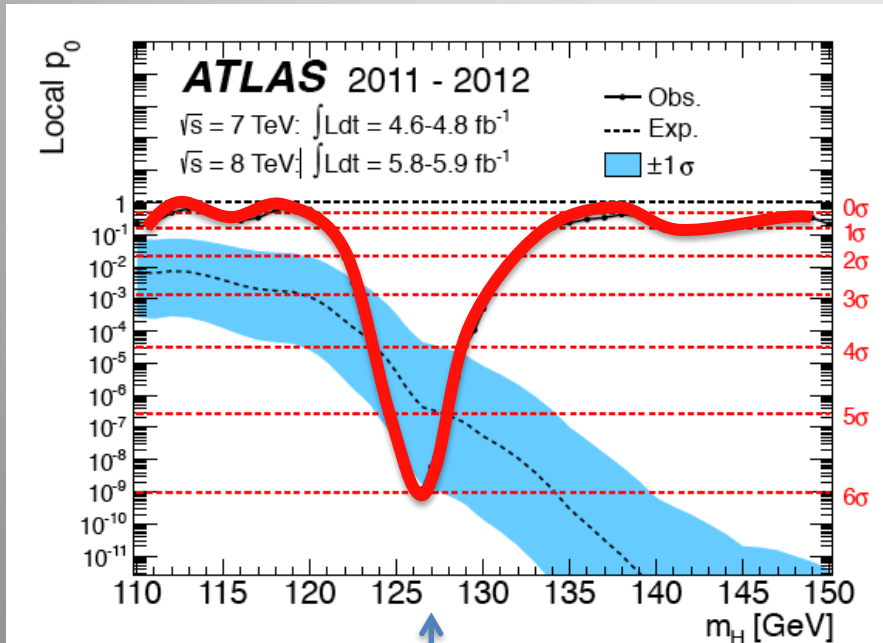


Dati sperimentali consistenti con tutto ciò che già conosciamo

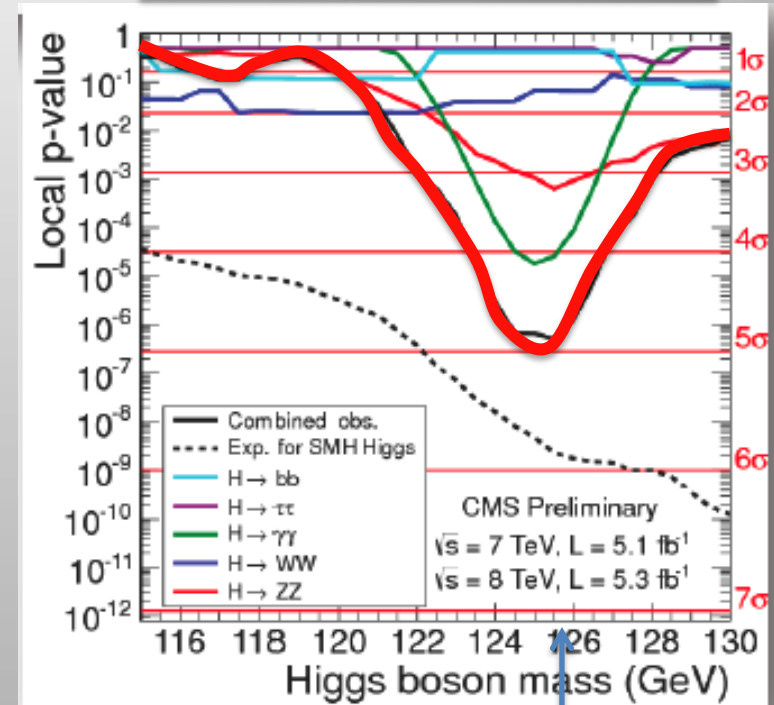
Dati sperimentali consistenti con la presenza di una nuova particella

... e i due esperimenti insieme

ATLAS



CMS



Stessa massa rivelata nei due esperimenti, stesso tipo di segnale



E' proprio il bosone di Higgs ?



I dati che stiamo raccogliendo permetteranno di fare misure precise sulle caratteristiche di questa nuova particella per capire se e' proprio il bosone di Higgs

Ma se e` il bosone di Higgs abbiamo capito tutto ?



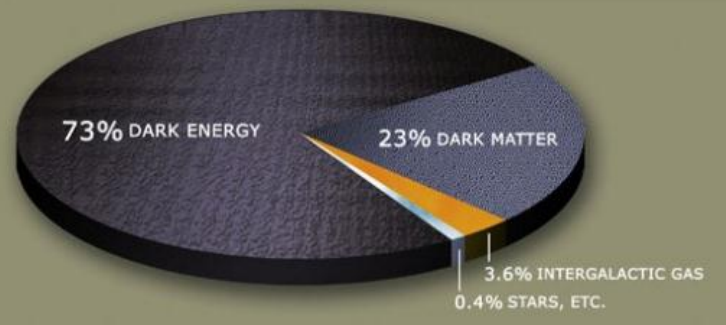
u up	c charm	t top	g gluone	u up	c charm	t top	g gluone
d down	s strange	b bottom	γ fotone	d down	s strange	b bottom	γ fotone
ν _e e-neutrino	ν _μ μ-neutrino	ν _τ τ-neutrino	W bosone	ν _e e-neutrino	ν _μ μ-neutrino	ν _τ τ-neutrino	W bosone
e elettrone	μ muone	τ tau	Z bosone	e elettrone	μ muone	τ tau	Z bosone

La tavola e` completa ?
 Esistono altre particelle a energia piu` alta ?
 Esistono altre interazioni ? ...



Unificazione di modello Standard e gravita` ? ...

La materia che sappiamo descrivere e` solo il 5% di quella nell'universo



Ma alla fine ... ne vale la pena ?





Bibliografia



Per preparare questa presentazione ho ampiamente sfruttato queste due ottime fonti divulgative:

1. Lezioni di R.Landua

<http://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/english/lectures.htm>

2. Gian Francesco Giudice, Odissea nello zeptospatio – Springer

un video molto originale e simpatico:

The Higgs boson explained <http://vimeo.com/41038445>

Molto altro materiale di tipo divulgativo relativo alla fisica delle particelle puo' essere trovato sui seguenti siti:

Pagina di pubblica del CERN <http://www.cern.ch/>

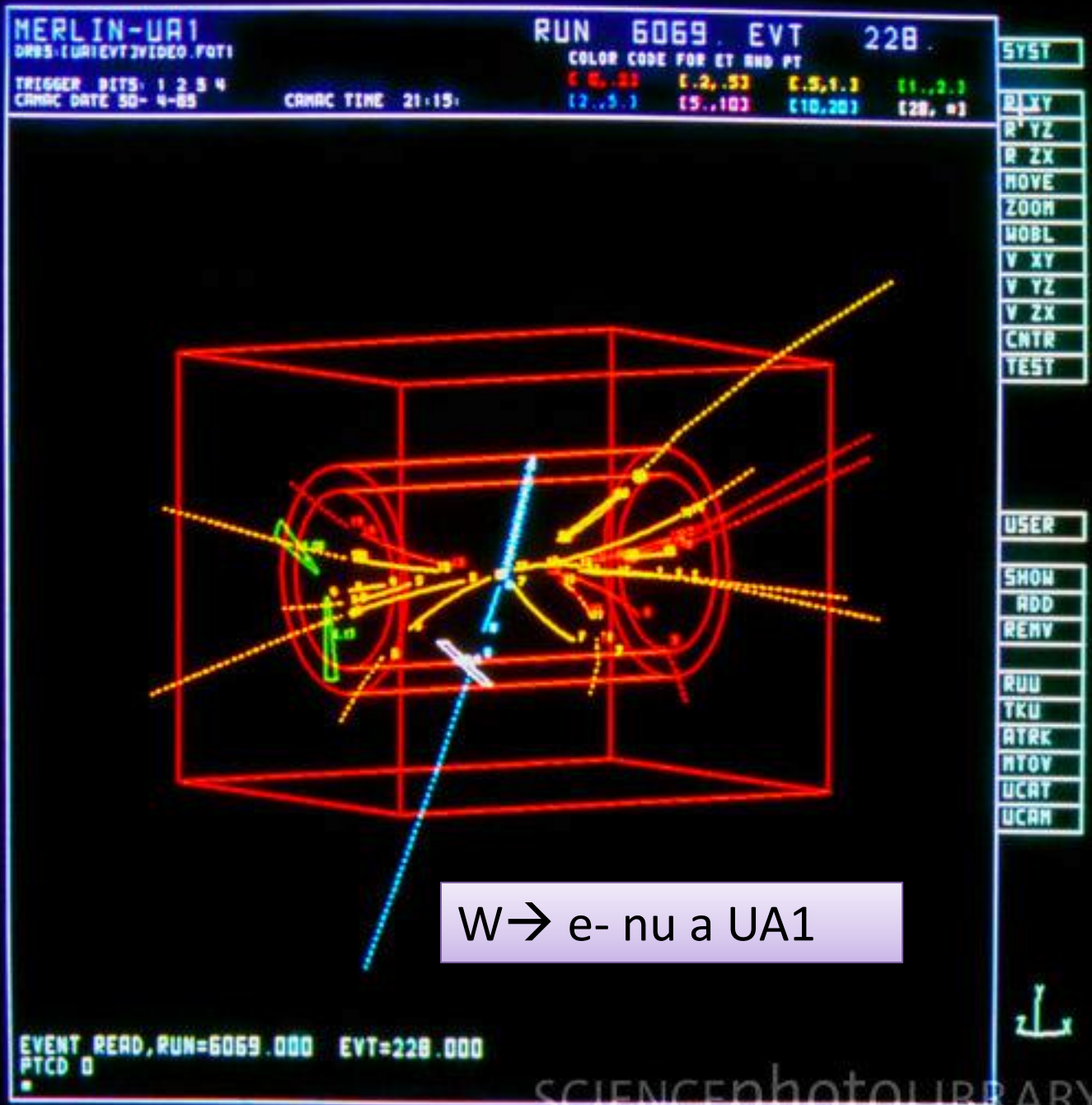
Pagina di divulgazione di ATLAS <http://www.atlas.ch/>

Pagine di divulgazione dei laboratori Nazionali del Gran Sasso

http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/index.htm?mainRecord=http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/contents/lngs_it/public/educational/



Backup Slides



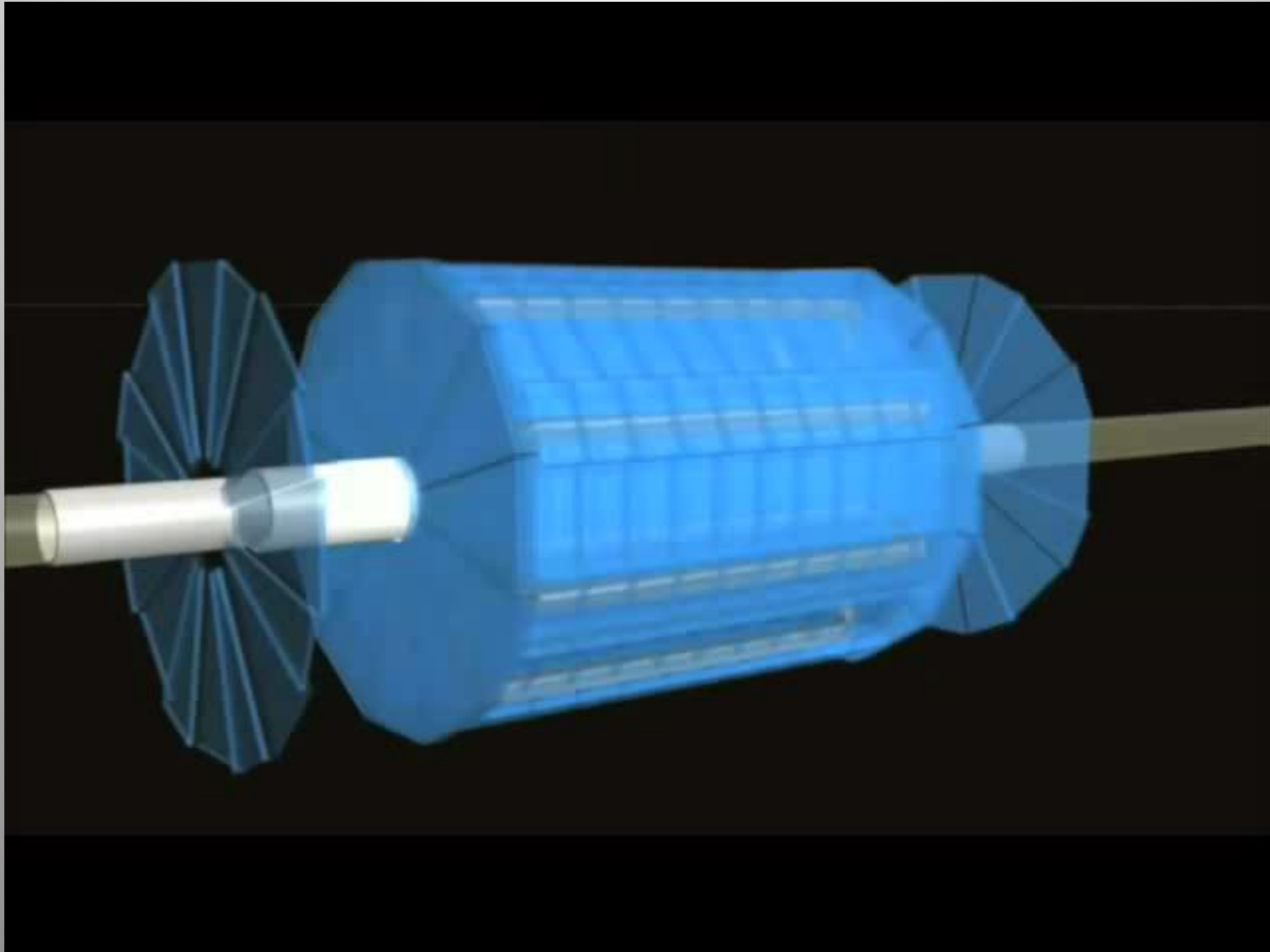
$W \rightarrow e^- \nu_e a$ UA1



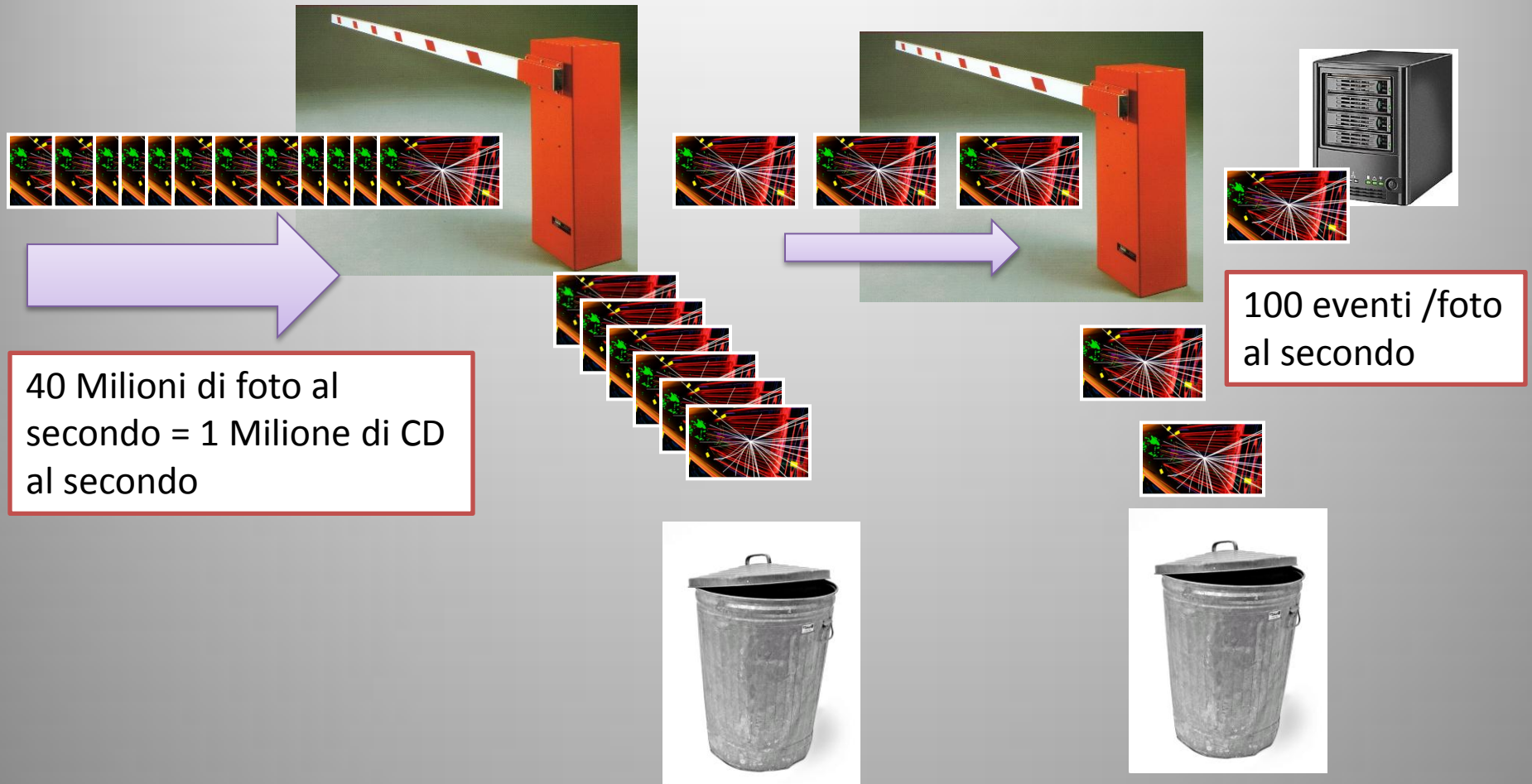
Energia immagazzinata

- L'energia immagazzinata nel fascio in condizioni nominali e` pari a 350MJ, un treno veloce (TGV) che viaggia alla velocita` di 150 Km/h.
- Questa energia e` sufficiente per sciogliere 500Kg di rame.
- L'energia totale immagazzinata nei magneti e` circa 30 volte maggiore: 11GJ

Le impronte delle particelle



Una valanga di dati in arrivo



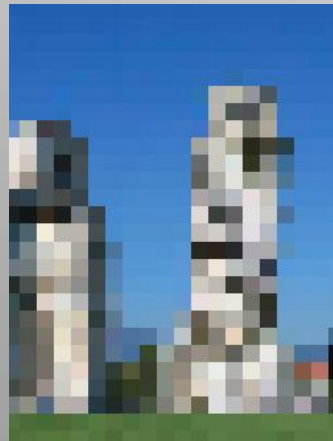
Come scegliere ?



Nella durata di un battito di ciglio deve compiere la scelta - SI/NO - per centomila eventi

SI/NO 1 evento al secondo

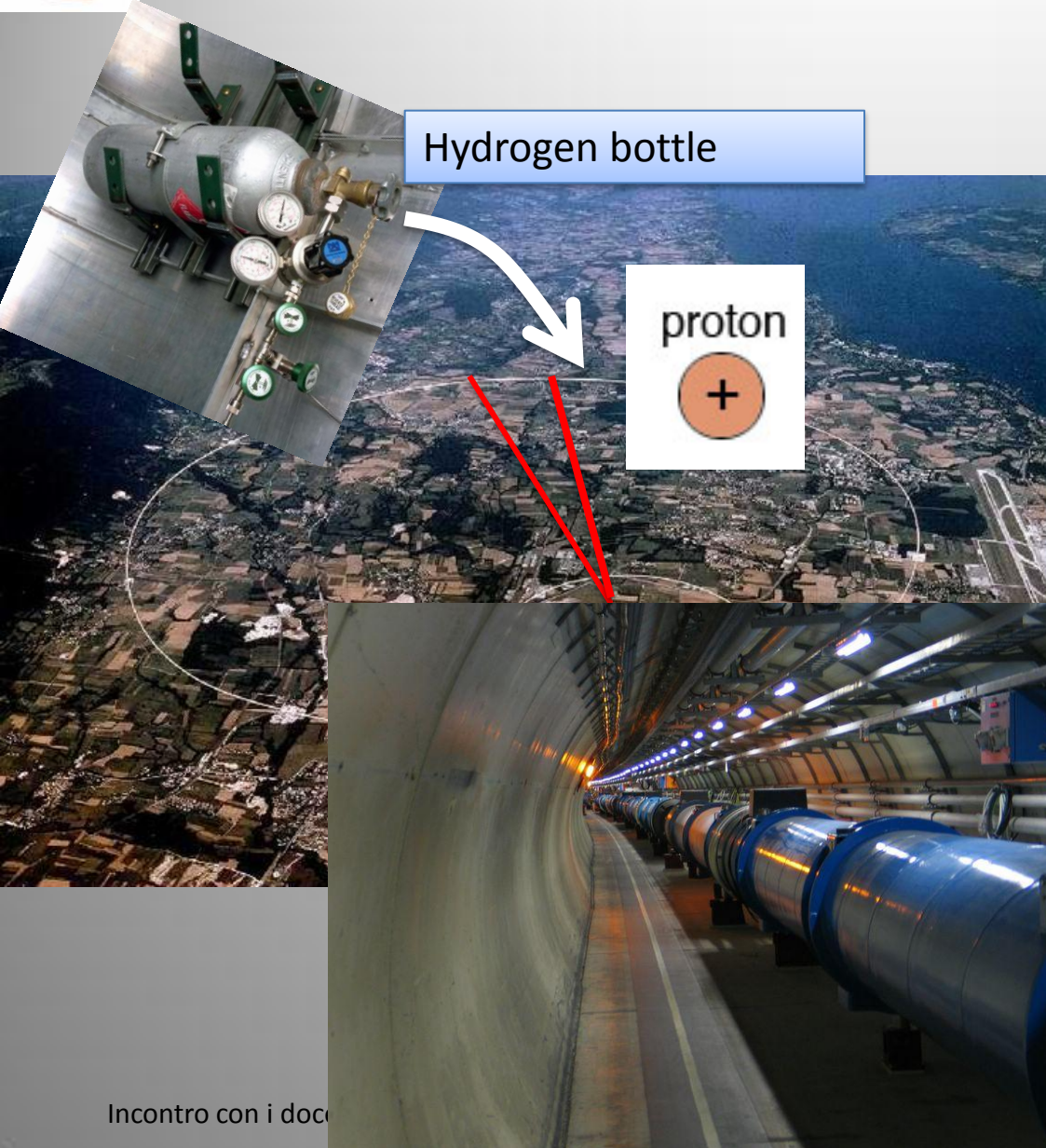
Bassa risoluzione,
scelta grossolana
ma veloce



Alta risoluzione,
scelta precisa ma
lenta



Primo ingrediente: alta energia



Hydrogen bottle

proton
+

Campi elettrici per accelerare i protoni

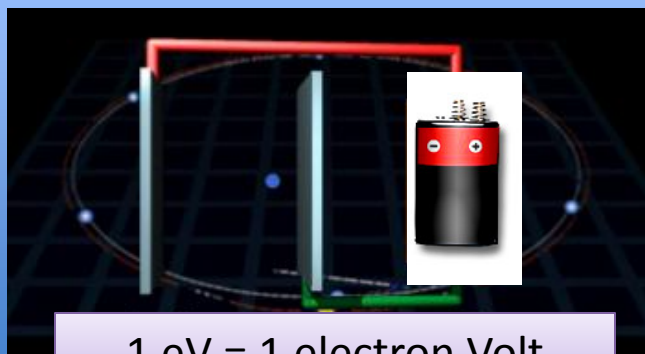
... e campi magnetici per farli ruotare

$$B\rho = \frac{p}{e}$$

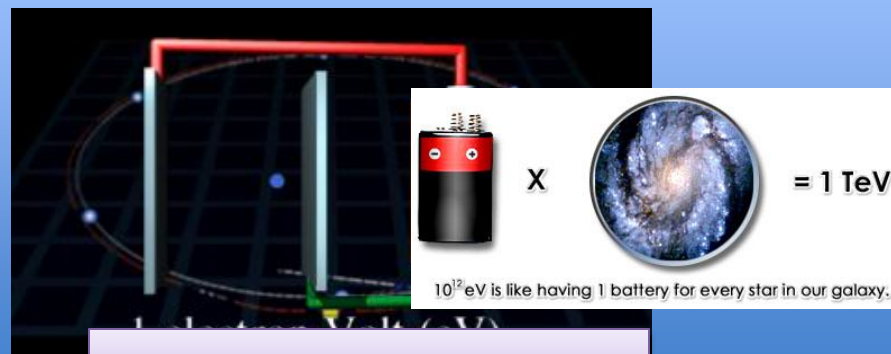
B= Campo Magnetico
p = modulo impulso dei protoni
ρ = raggio di LHC
e = carica dei protoni

L'energia dei protoni

Energia dei protoni = 7000000000000 eV = 7 TeV



1 eV = 1 electron Volt



7 TeV

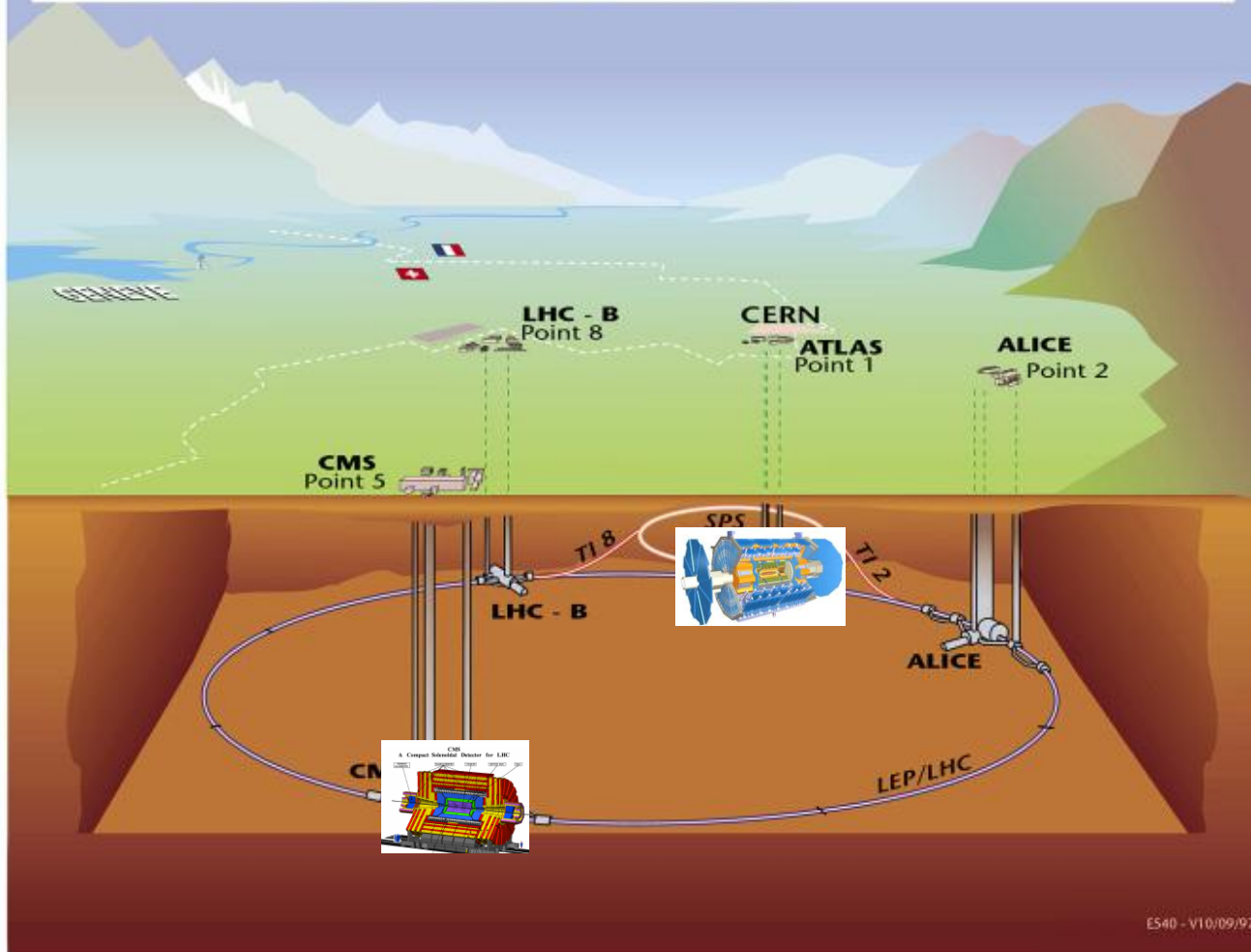
Alta energia ? Un protone di 7 TeV = energia di una zanzara che vola ... ma concentrata in un volume piccolissimo



X 0.00000000000001

Un millesimo di miliardesimo del volume di una mosca

Overall view of the LHC experiments.



Perchè due rivelatori per le stesse misure ?

- ATLAS e CMS sono due rivelatori progettati per eseguire lo stesso tipo di misure.
- Simili ma tecnicamente diversi un po' come avere una Ferrari ed una McLaren.
- La loro diversità e complementarità fornisce una garanzia ai segnali di scoperta "visti" da entrambe i rivelatori



Ricostruzione dei dati

Struttura di calcolo distribuita a livello mondiale: 100 mila processori e decine di milioni di Gbyte di spazio disco distribuiti su 130 siti e 34 nazioni.

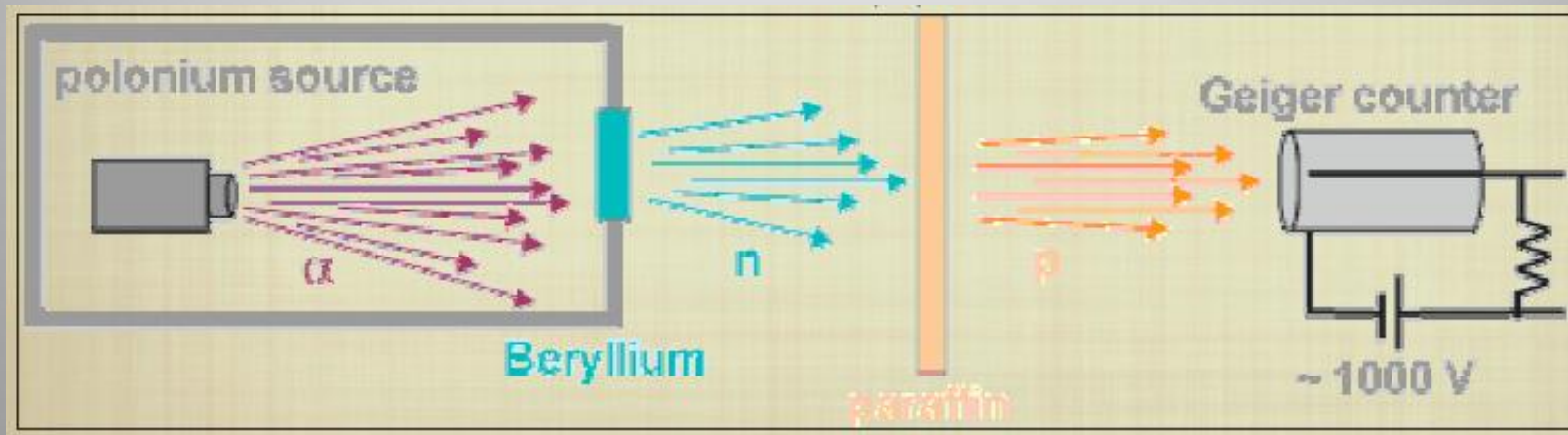


Utilizzano queste strutture varie comunità di ricerca ed industrie

1932

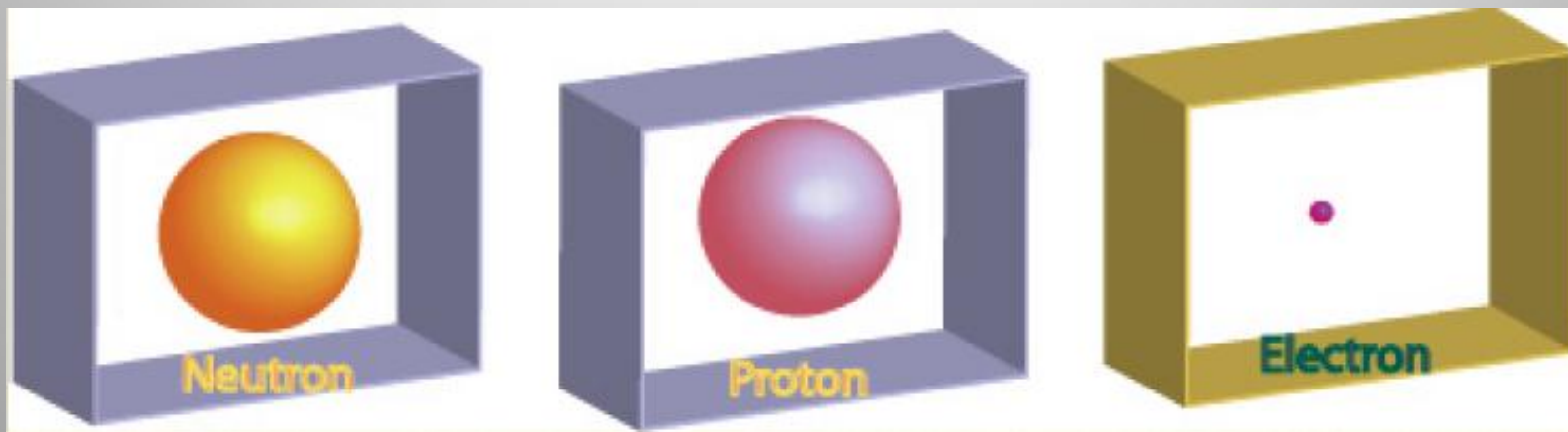
28.1.1932 Coniugi Joliot-Curie annunciano una scoperta: bombardando con particelle alpha un bersaglio di Berillio emetteva radiazione in grado di estrarre protoni da un bersaglio di paraffina.

Dalla cinematica $\text{Massa dei neutroni} \sim \text{Massa dei protoni}$



27.2.1932 Chadwick intuisce che questi risultati sono dovuti all'esistenza di una nuova particella: dopo quindici giorni di lavoro ininterrotto per riprodurre e spiegare i risultati di Joliot-Curie pubblica la scoperta del neutrone su Nature

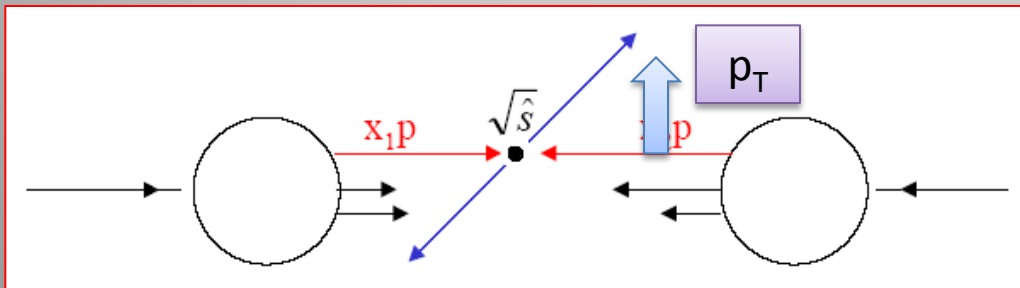
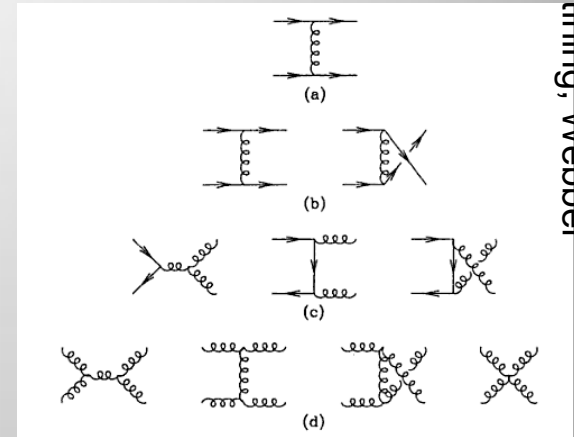
Le spettro delle particelle e le forze nel 1932



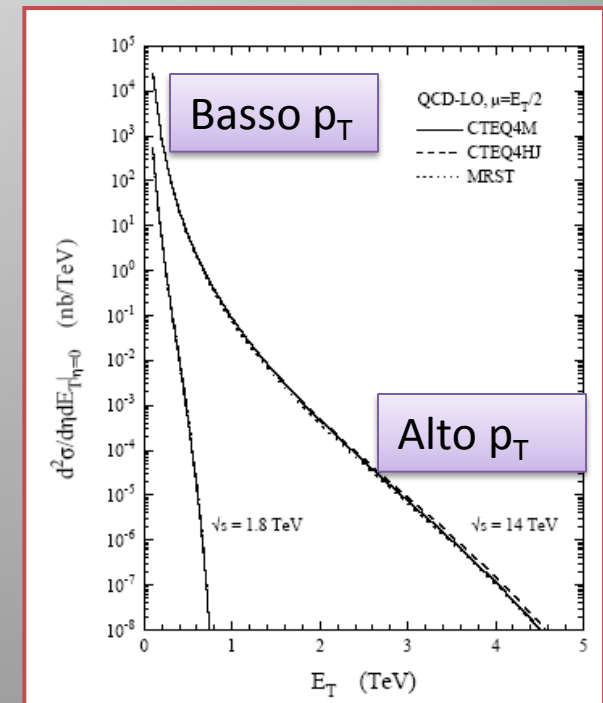
Forza elettromagnetica
(Forza gravitazionale)

Produzione di jet

- Fasci di partoni \rightarrow interazione forte produzione di partoni
- Per le caratteristiche dell'interazione forte i partoni non possono essere osservati come particelle libere (confinamento) \rightarrow si trasformano in fasci di adroni (pioni, mesoni, protoni...) detti JET
- In un collider adronico sono omni-presenti !



$$\sigma(p_T \sim 20 \text{ GeV}) > 1000 \sigma(p_T \sim 100 \text{ GeV})$$



\rightarrow Gli eventi piu` comuni contengono jets di basso impulso trasverso

Invece l'Higgs come appare ?

Channel	m_H range (GeV)
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110-150
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow ll + \nu$	110-140
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow l\tau_{had}$	100-150
$W/ZH \rightarrow bbl(l)$	110-130
$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$	110-300
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$	110-600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll \nu\nu$	200-600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll qq$	200-600
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$	240-600

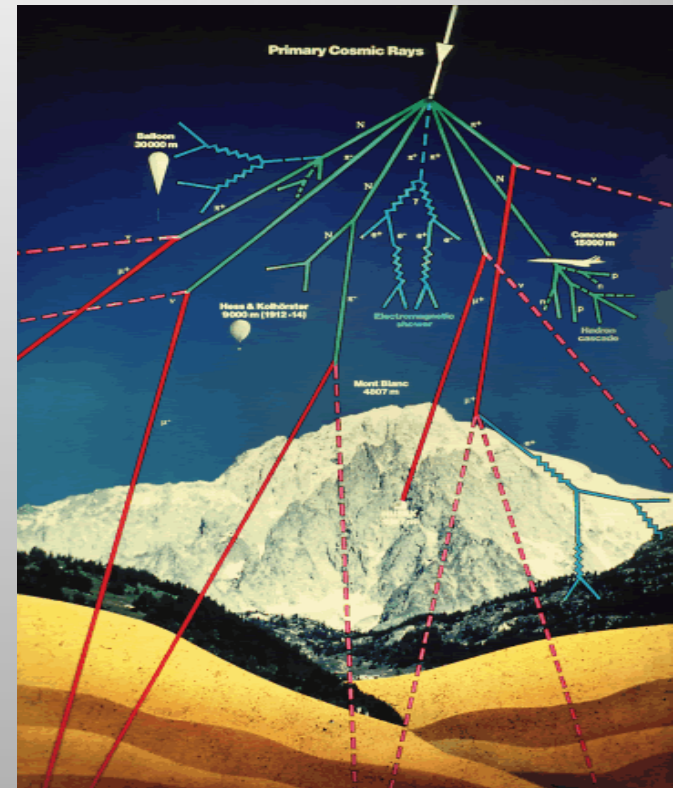
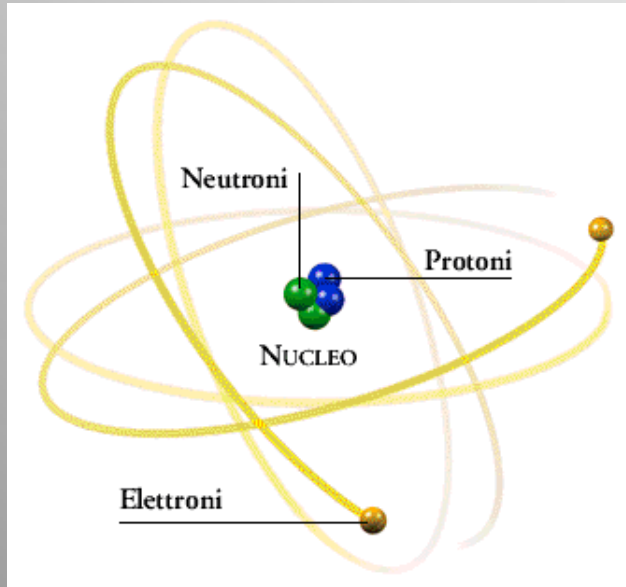
Un segnale diverso per ogni range di massa

Le particelle che investono il rivelatore:
 l == elettroni o muoni
 q, b == jets
 ν == neutrini

Un passo indietro: come siamo arrivati a LHC ?

Studio dei raggi cosmici

Studio dell'atomo



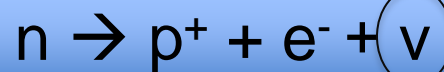
Esistono davvero gli atomi ? Di cosa sono fatti ? Quale forza li tiene insieme ?

Scoperti all'inizio del secolo
Scoperta di altri tipi di particelle: muoni, pioni

... l'ipotesi del neutrino

1930

- In un periodo in cui meccanica quantistica e relativita` scardivano tutti i concetti della fisica classica Bohr azzardo` l'ipotesi perfino che l'intepretazione corretta fosse che l'energia a livello atomico non venisse conservata
- L'ipotesi corretta fu fatta da Pauli il processo era dovuto alla esistenza di una nuova particella, il neutrino, che portava parte l'energia mancante



Ipotesi definita da Pauli disperata ...

La particella aveva massa nulla o molto piccola e carica zero e risultava invisibile ai rivelatori ...

A caccia del pione di Yukawa nei raggi cosmici...sui monti

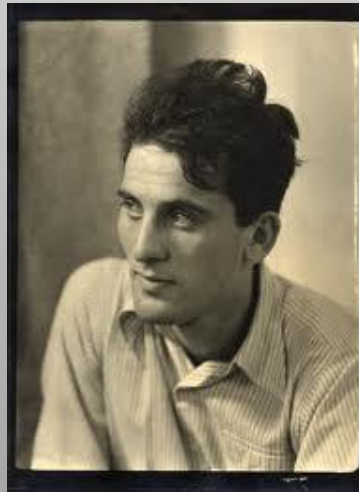
1947

Il pione di Yukawa interagendo molto fortemente con l'atmosfera era molto difficile da osservare nei raggi cosmici a livello del mare

Powell e Occhialini portano emulsioni fotografiche sul Pic du Midi ed individuano una nuova particella che decade in muone



C.Powell



G.Occhialini





Perkins DH. 2005.
Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 55:1–26