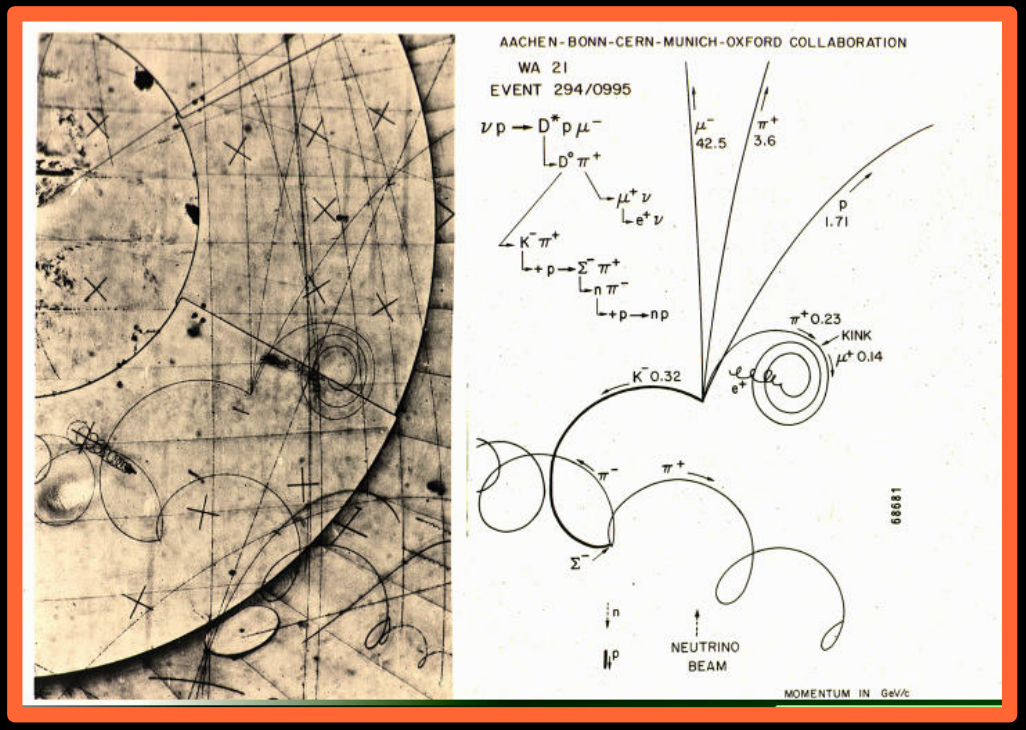
La Fisica delle Particelle Elementari: Stato dell'Arte e Prospettive

Prof. Franco Simonetto
Universita' di Padova e
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
franco.simonetto@pd.infn.it



La ricerca dei fondamenti

- Esistono dei costituenti fondamentali che semplificano l'apparente molteplicita' della materia ?
- Quali sono e come interagiscono tra loro ?

La risposta del filosofo

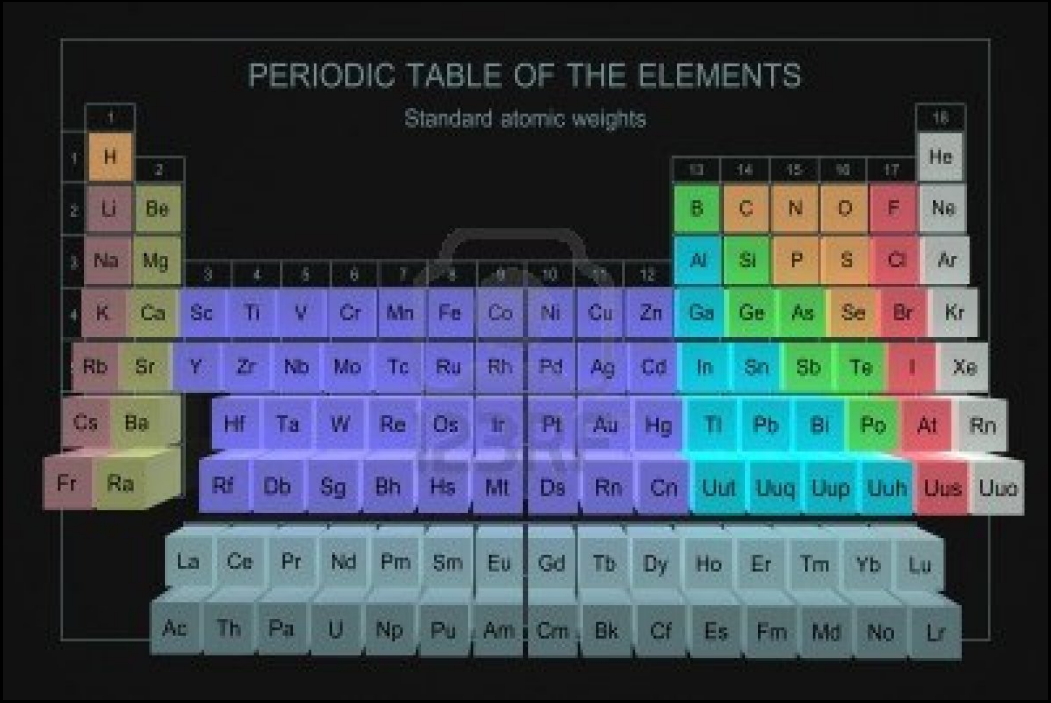
- Esistono dei costituenti fondamentali che semplificano l'apparente molteplicita' della materia ?
- Quali sono e come interagiscono tra loro ?
- Empedocle (IV secolo AC) : i 4 elementi

La risposta del filosofo

- Esistono dei costituenti fondamentali che semplificano l'apparente molteplicita' della materia ?
- Quali sono e come interagiscono tra loro ?
- Empedocle (IV secolo AC) : i 4 elementi
- ... un modello ancora molto popolare

La risposta dello scienziato (dell'800)

- Regolarita' nelle proprieta' delle sostanze indicano un principio unitario (l'atomo) che soggiace all'apparente molteplicita' degli elementi



La risposta dello scienziato (1900)

- Regolarita' nelle proprieta' delle sostanze indicano un principio unitario (l'atomo) che soggiace all'apparente molteplicita' degli elementi
- L'atomo (neutro) e' composto da un egual numero di costituenti di carica positiva positiva (protoni) e di carica negativa (elettroni) (...e in piu' i neutroni ...)
- Ma come e' distribuita la materia nell'atomo ?
- Come posso risolvere una struttura $r \sim 10^{-10}$ m ?

Un'analogia

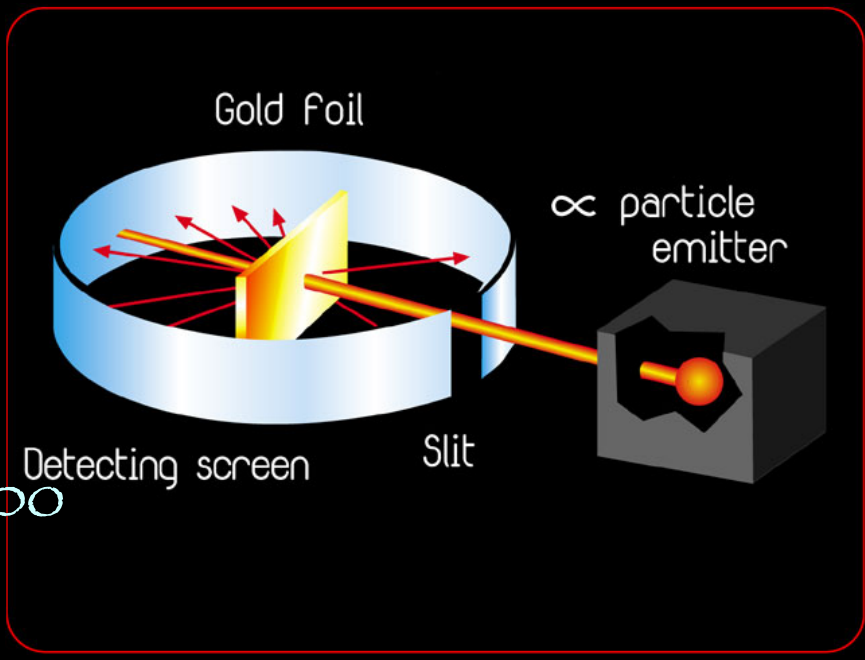
- Uno dei due sacchi contiene solo sabbia, e un'altro anche pepite d'oro

- Come faccio a scegliere se non posso toccarli ?

La risposta sbrigativa (1987)

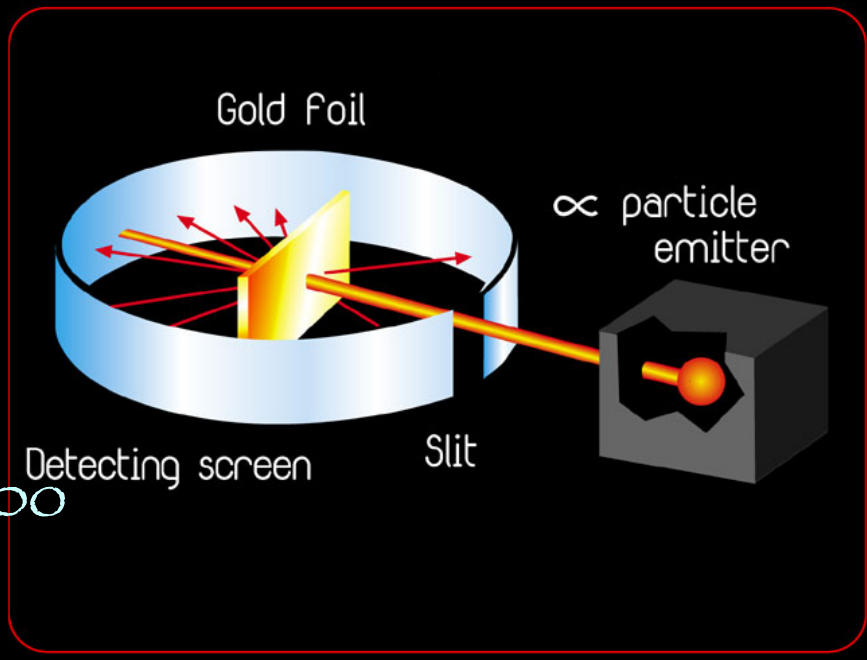
L'esperimento di Rutherford (1910)

- Pallottole : particelle α prodotte da sorgente radioattiva ($q = 2e$, $m \sim 8000\, m_e$)
- Bersaglio : sottile lamina d'oro
- Osservo la deflessione delle particelle dopo l'urto



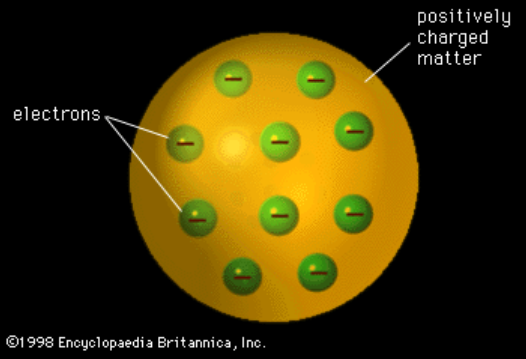
L'esperimento di Rutherford (1910)

- Pallottole : particelle α prodotte da sorgente radioattiva ($q = 2e$, $m \sim 8000\, m_e$)
- Bersaglio : sottile lamina d'oro
- Osservo la deflessione delle particelle dopo l'urto



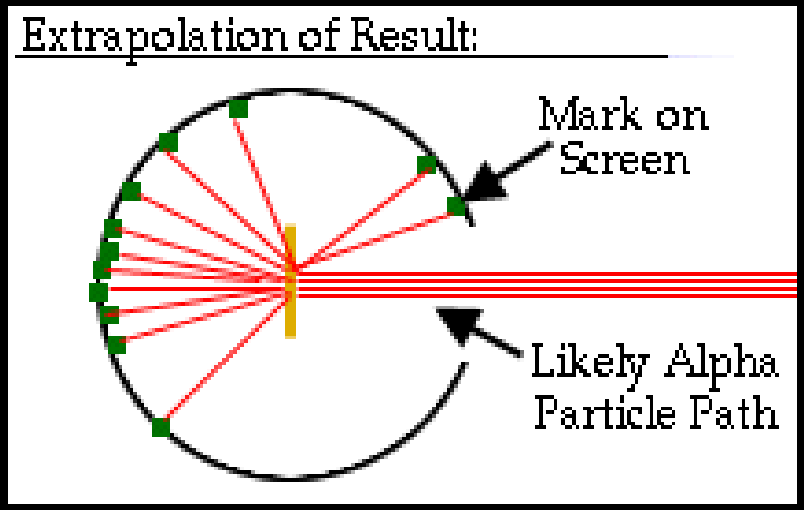
Il pregiudizio : modello di Thomson

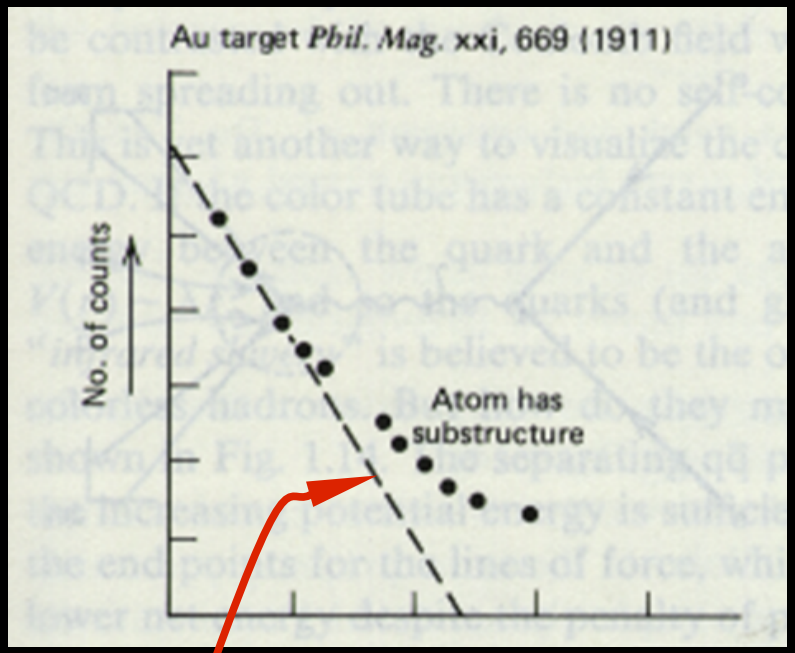
- Il panettone: la carica positiva e' distribuita uniformemente su una sfera (la pasta) su cui sono incastonati gli elettroni (l'uvetta)
- Predizione: le particelle α non devieranno gran che



L'osservazione

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !

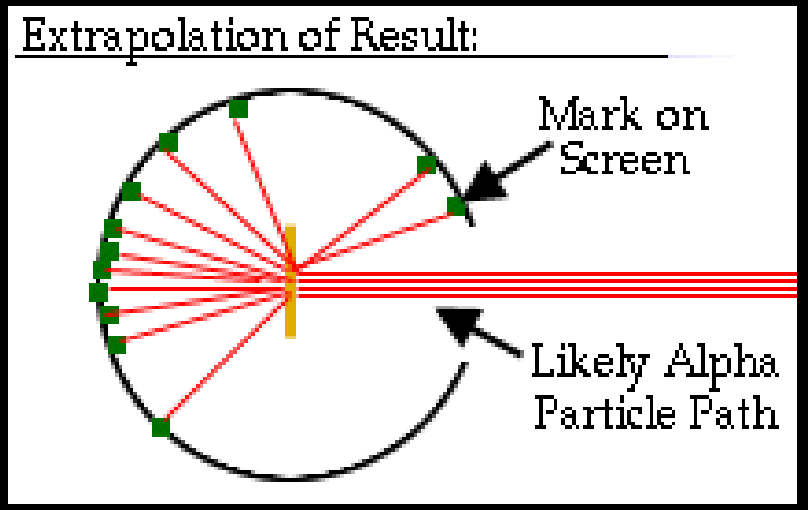


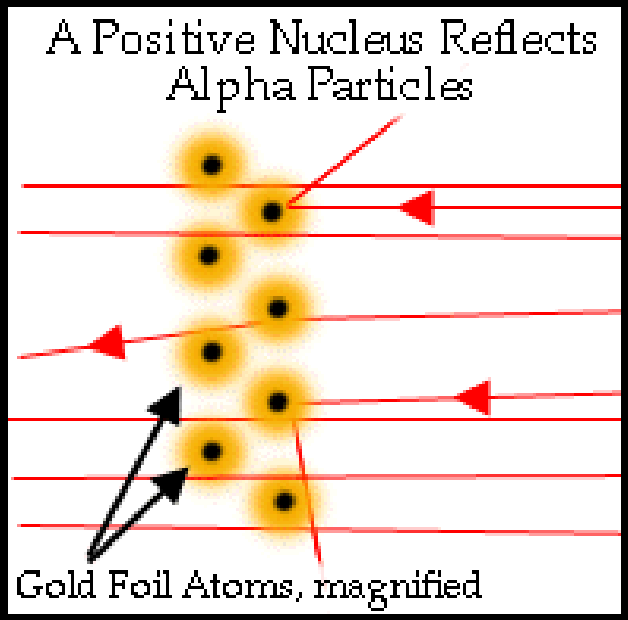


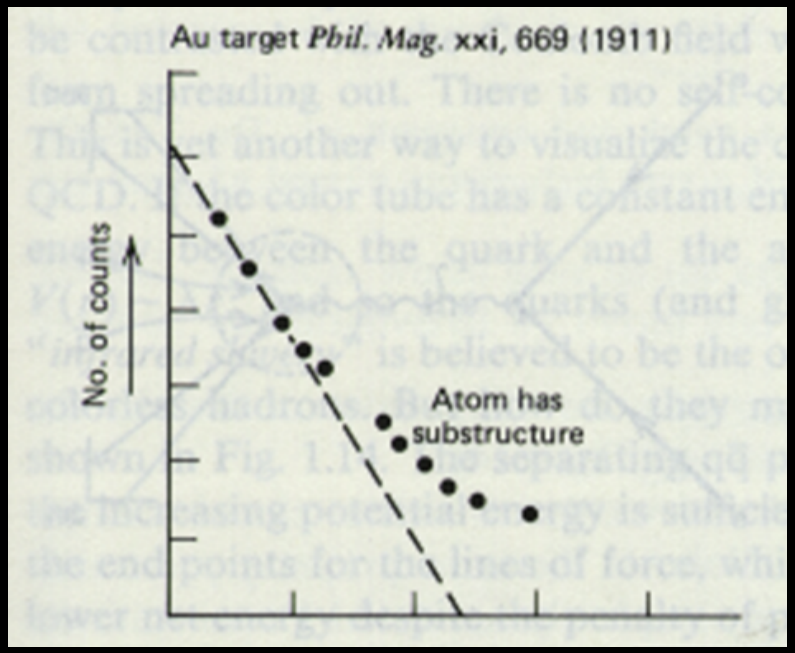
Predizione del modello a panettone

L'interpretazione: il modello nucleare

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata (le pepite)

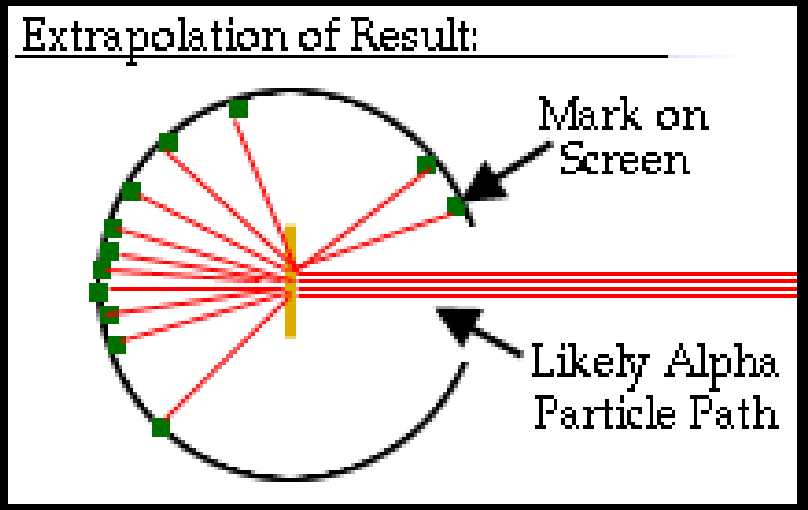


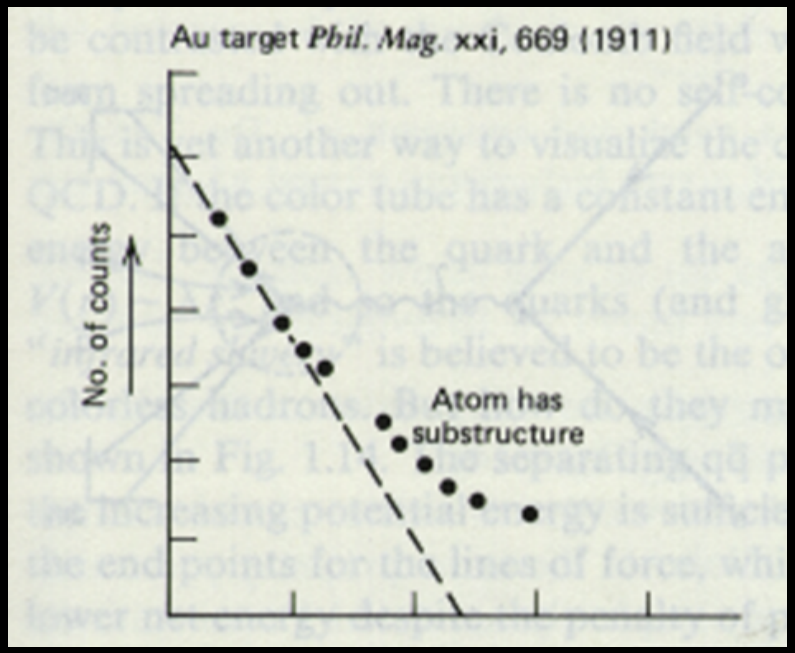


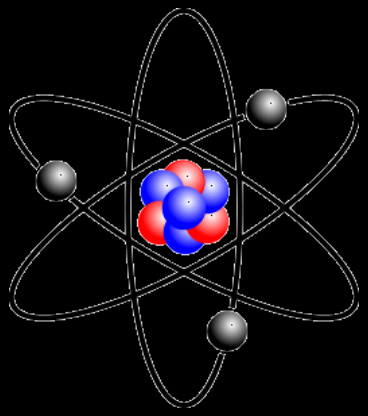


L'interpretazione: il modello nucleare

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata (le pepite)
- Ora sappiamo che :
  - $R_{Atomo} \sim 10^{-10}$ m
  - $R_{Nucleo} \sim 10^{-15}$ m $\sim R_{atomo}/100\,000$



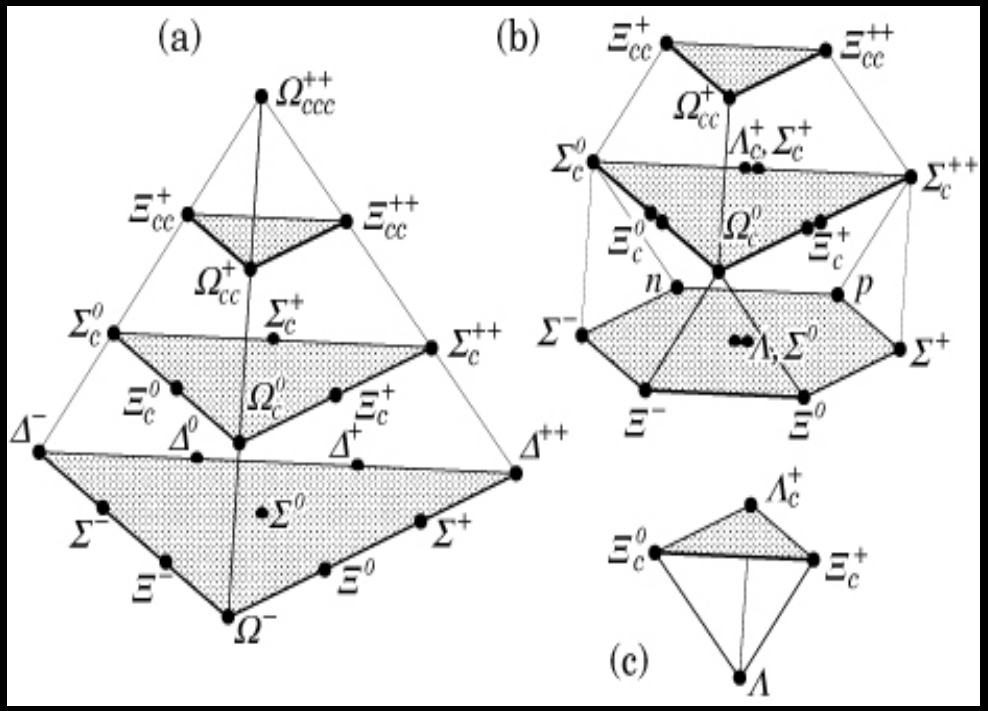




INFN

Le Stesse Cose Ritornano

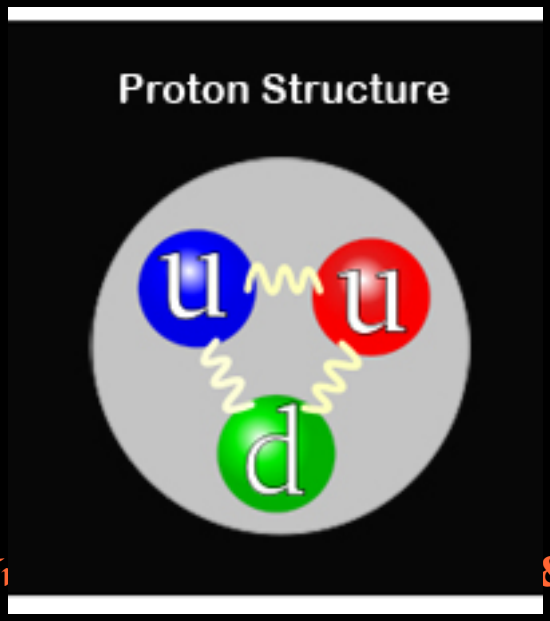
- 1940-1960: osservate centinaia di diverse particelle subnucleari instabili (che cioe' decadono molto rapidamente), chiamate ADRONI
- Regolarita' : catalogati in "multipletti"



La risposta dello scienziato (1960)

- 1940-1960: osservate centinaia di diverse particelle subnucleari instabili (che cioe' decadono molto rapidamente), chiamate ADRONI
- Regolarita' : catalogati in "multipletti"
- 1964: Gell-Mann & Zweig ipotizzano che gli adroni siano strutture complesse, composte da tre costituenti elementari,

i quark up, down, Strange



Three quarks for Muster Mark

"Then, in one of my occasional perusals of Finnegans Wake, by James Joyce, I came across the word "quark" in the phrase "THREE quarks for Muster Mark".

in realta' i quark sono SEI (arrangiati in tre doppietti):

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Three quarks for Muster Mark

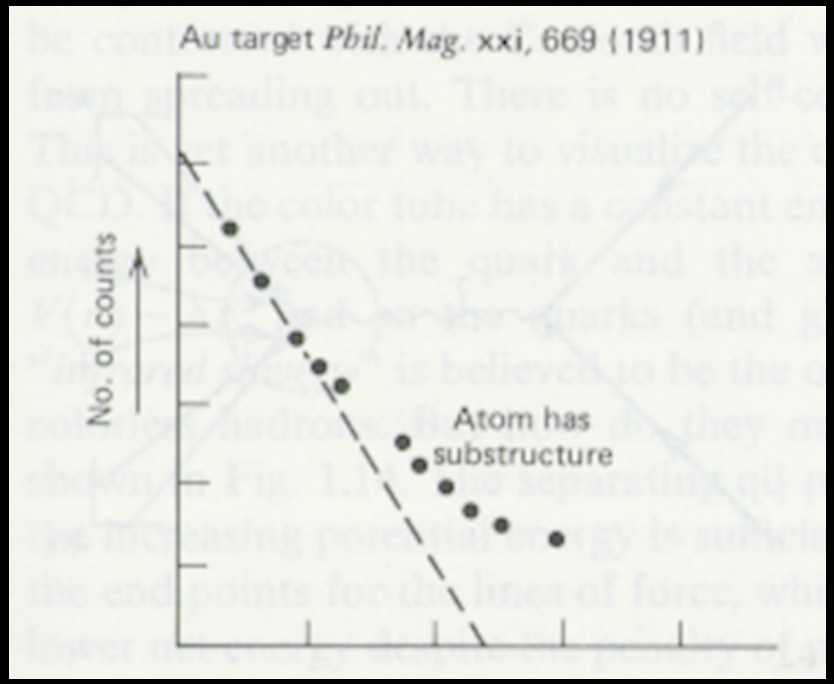
"Then, in one of my occasional perusals of Finnegans Wake, by James Joyce, I came across the word "quark" in the phrase "THREE quarks for Muster Mark".

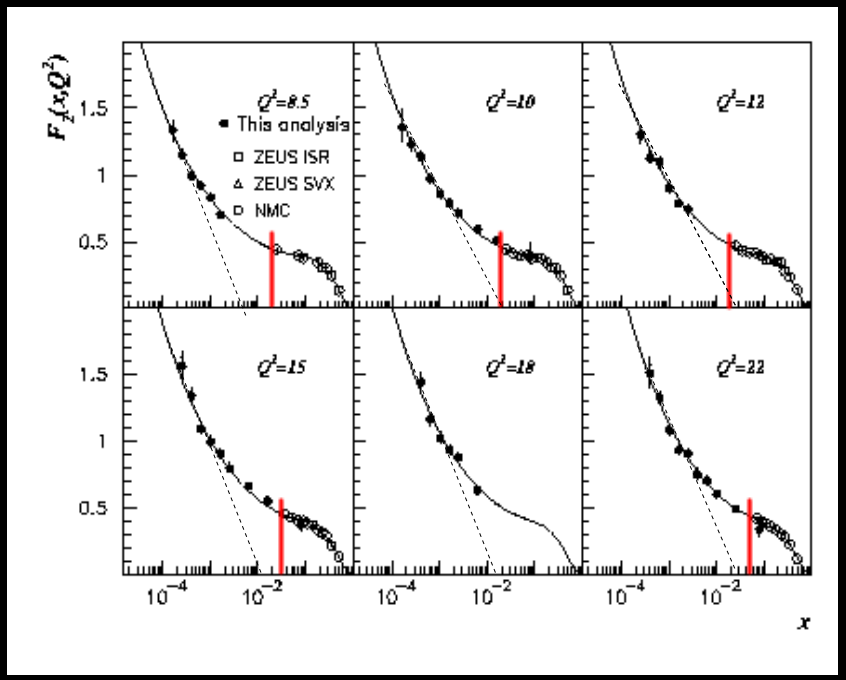
"A man's errors are his portals to discovery".

Prof. Franco Simonetto **Universita' & INFN PD**

Le Stesse Cose Ritornano

- L'ipotesi e' poi confermata da esperimenti "a la Rutherford" di diffusione di elettroni da nuclei d'idrogeno (protoni) (SLAC 1965 - Desy 1980)



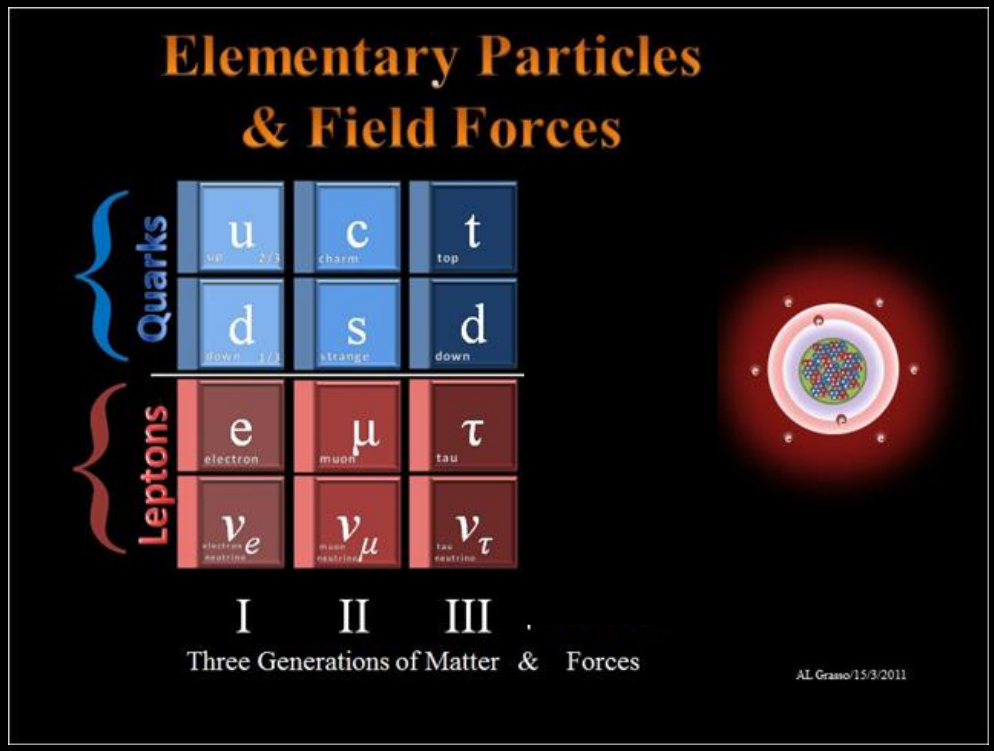


1910 : i protoni nel nucleo

1980 : i quark nel protone

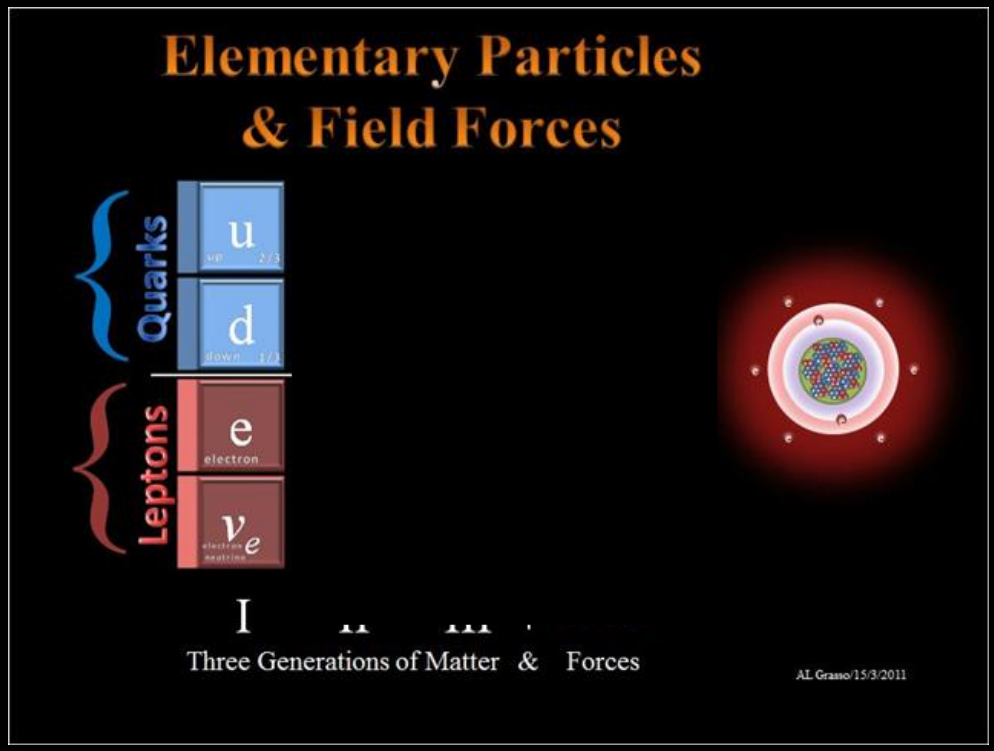
I Costituenti Fondamentali : 1980

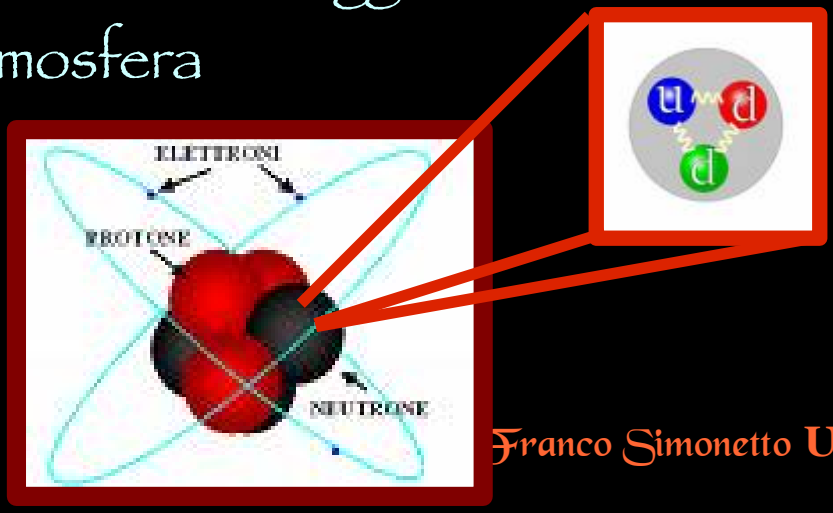
- La materia consiste di 12 particelle elementari, *6 leptoni* e *6 quark*, raggruppate in 3 famiglie
- Per ogni particella, c'e' un'antiparticella, identica in tutto, tranne che per avere carica (elettrica, debole, o forte) di segno opposto



I Costituenti Fondamentali

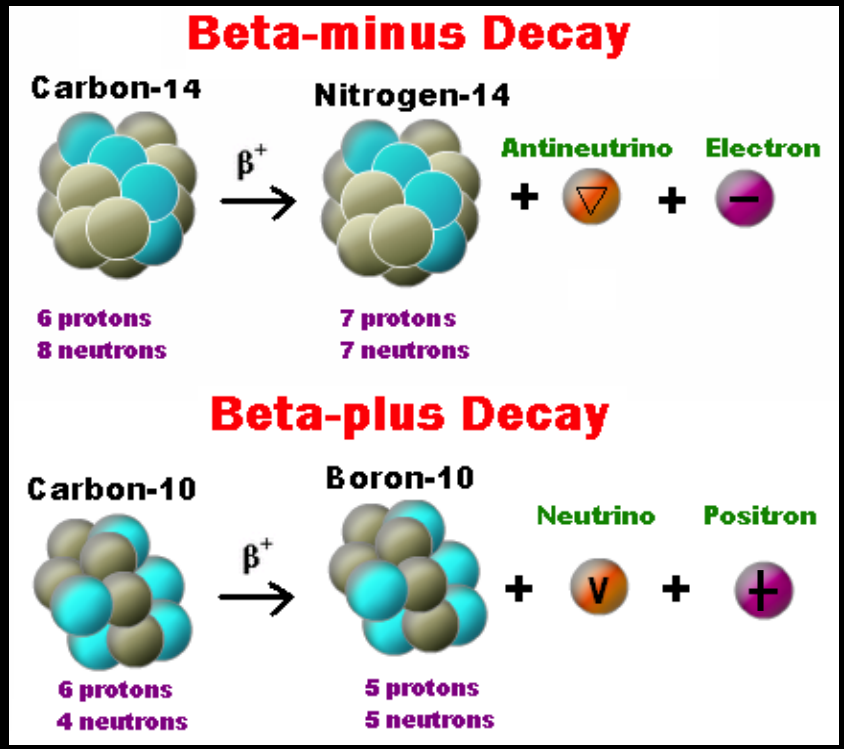
- La materia consiste di 12 particelle elementari, *6 leptoni* e *6 quark*, raggruppate in 3 famiglie (generazioni)
- La materia ordinaria nell'universo e' formata solo dalle particelle della prima generazione, il resto e' prodotto in laboratorio o dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera



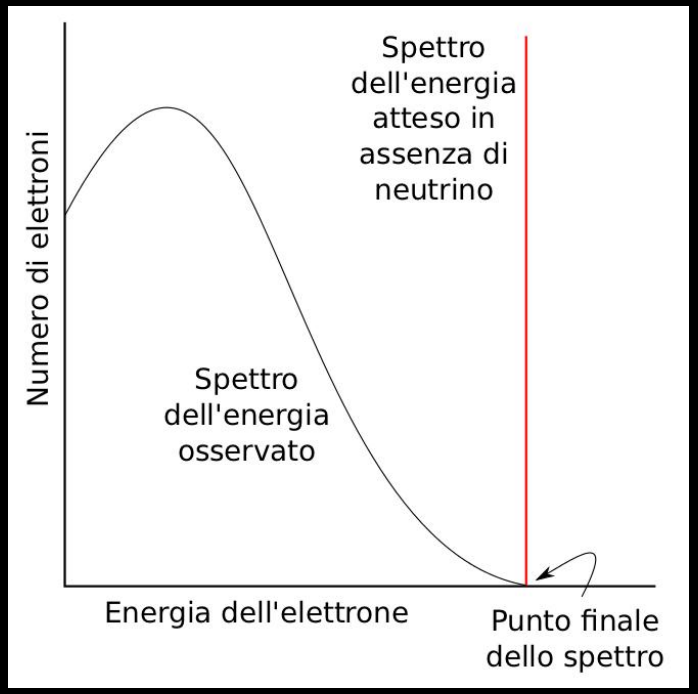


Neutrini

- Prodotti nel decadimento β di nuclei instabili
- Processi rari: $T_{1/2}$ (^{14}Ca) ≈ 5730 ys
- Interazioni deboli : particelle elusive



Neutrini

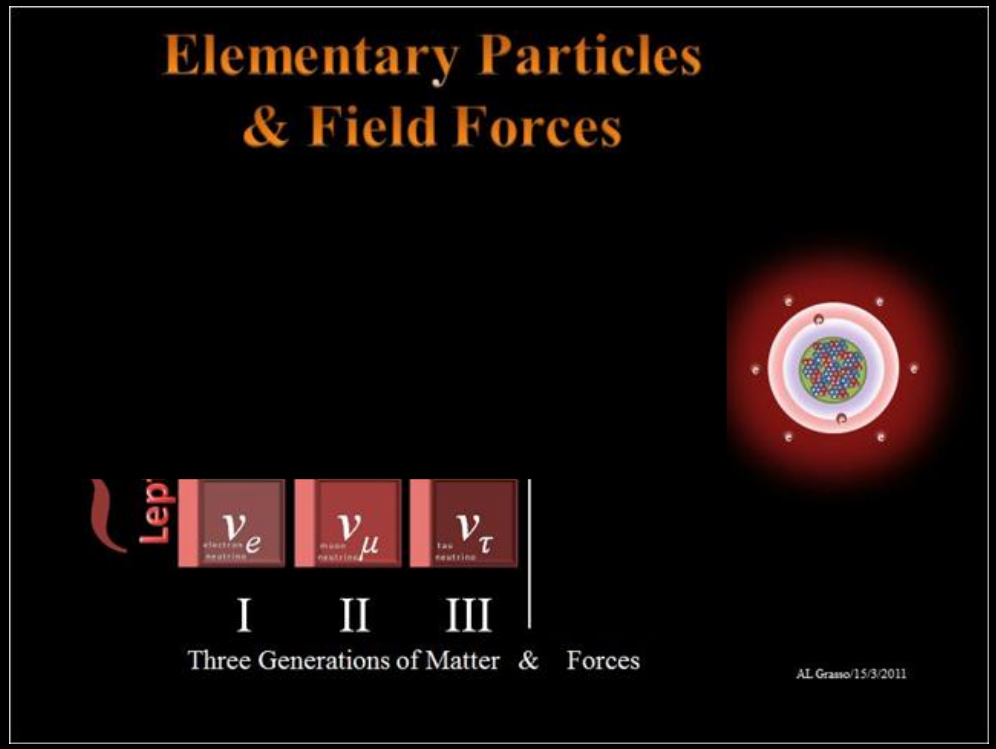


- Prodotti nel decadimento β di nuclei instabili
- Processi rari: $T_{1/2}$ (^{14}Ca) ≈ 5730 ys
- Interazioni deboli : particelle elusive

- 1930 : Pauli postula l'esistenza del ν_e per garantire la conservazione dell'energia nel decadimento β
- 1957 : Reines e Cowans osservano il processo di cattura : $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$
- 1962 : Steinberg, Lederman & Schwartz scoprono un nuovo neutrino (ν_μ)
- 1990 : dati di LEP confermano l'esistenza di tre specie di neutrini ($\nu_e/\nu_\mu/\nu_\tau$)
- 2000 : DONUT (FNAL) annuncia l'osservazione del ν_τ

I Costituenti Fondamentali

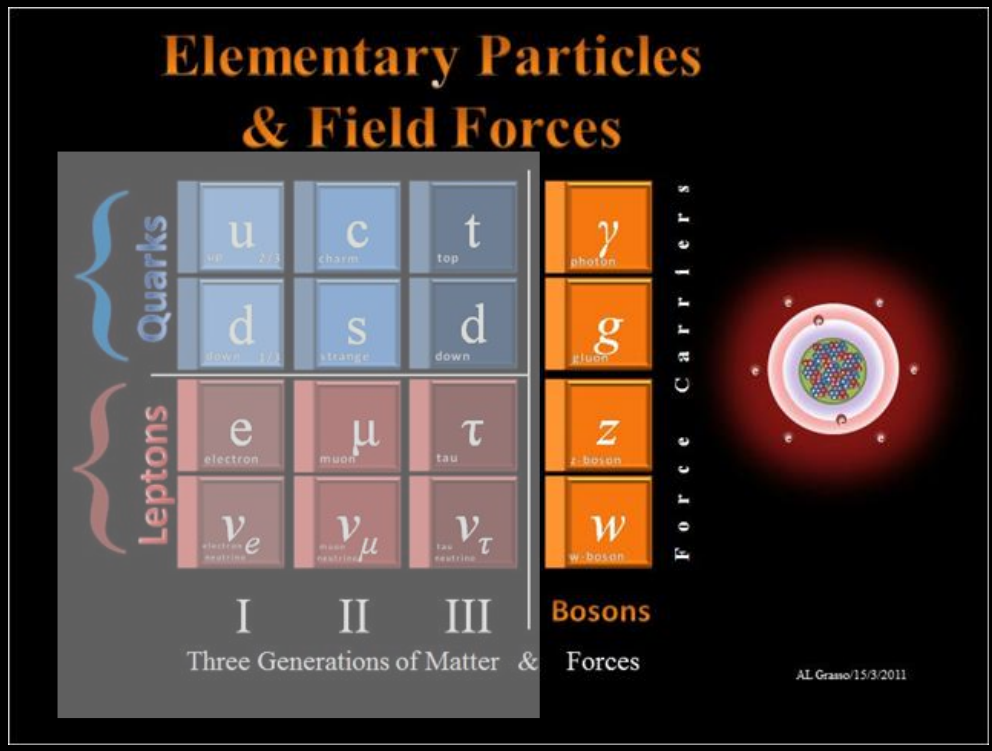
- La materia consiste di 12 particelle elementari, *6 leptoni* e *6 quark*, raggruppate in 3 famiglie (generazioni)
- La materia ordinaria e' formata solo dalla prima generazione, le altre sono prodotte in laboratorio o dai raggi cosmici
- I neutrini permeano l'universo



- dal Sole (10^{11} / cm^2 / s)
- dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera
- dall'esplosione di Supernovae
- relitti del Big Bang (100 / cm^{-3})

I Costituenti Fondamentali

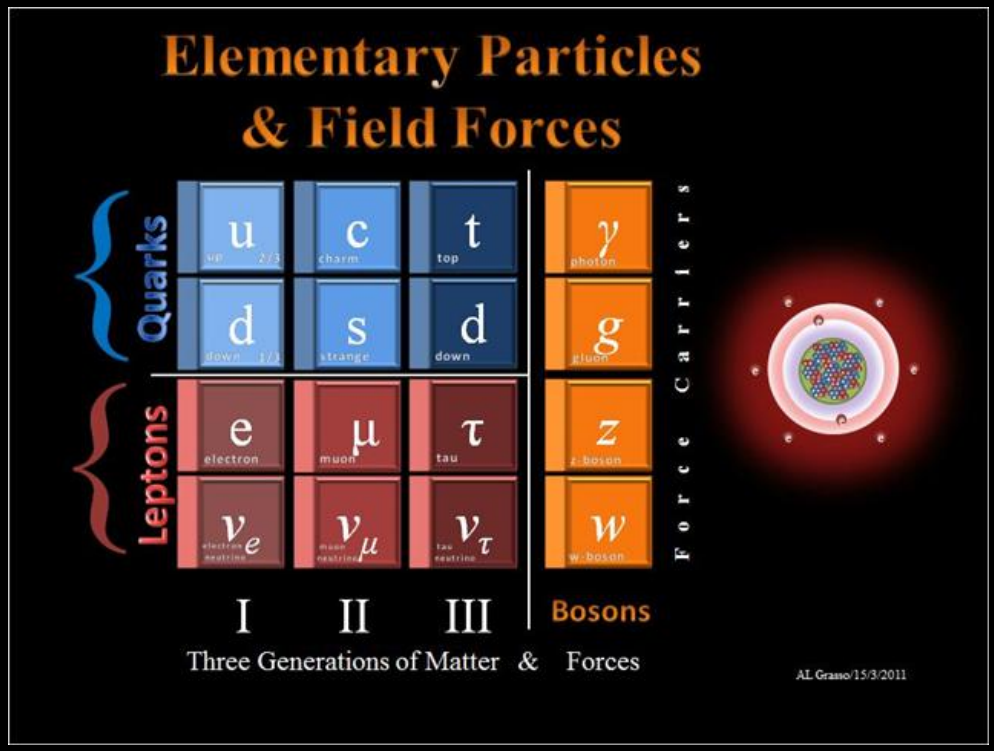
- La materia consiste di 12 particelle elementari, *6 leptoni* e *6 quark*, raggruppate in 3 famiglie (generazioni)
- La materia ordinaria e' formata solo dalla prima generazione, le altre sono prodotte in laboratorio o dai raggi cosmici
- I neutrini permeano l'universo



- La forza tra le (anti) particelle di materia e' trasmessa (mediata) da altre particelle , i cosiddetti bosoni di Gauge

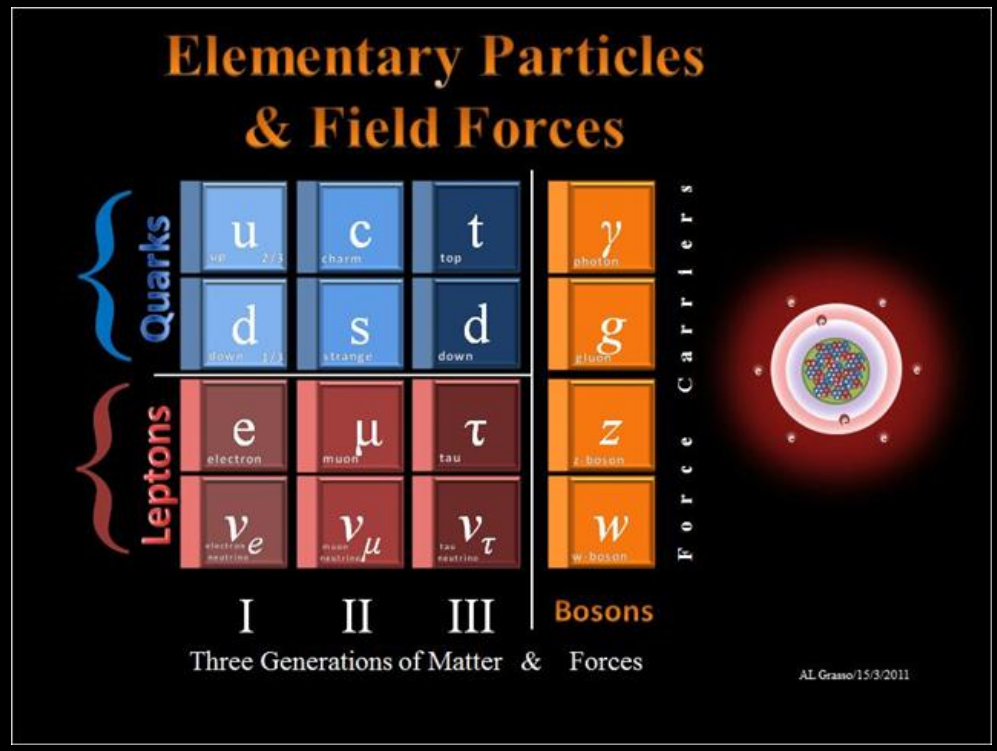
I Costituenti Fondamentali

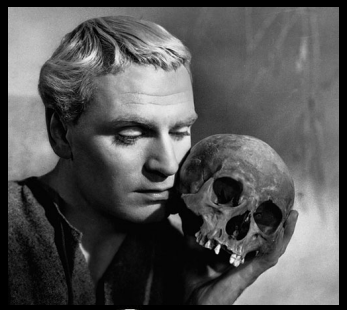
- Abbiamo misurato molto bene le proprieta' di tutte queste particelle
- Ne conosciamo:
  - carica elettrica, nucleare, debole
  - ... durata (vita media) ...



I Costituenti Fondamentali

- Abbiamo misurato molto bene le proprieta' di tutte queste particelle
- Ne conosciamo:
  - carica elettrica, nucleare, debole
  - ... durata (vita media) ...
  - ... massa





Ay, there's the rub

Le scale delle masse

- Fermioni (materia) :

$$m(TOP) \simeq m(Yb) \simeq 170\, m(Protone)$$

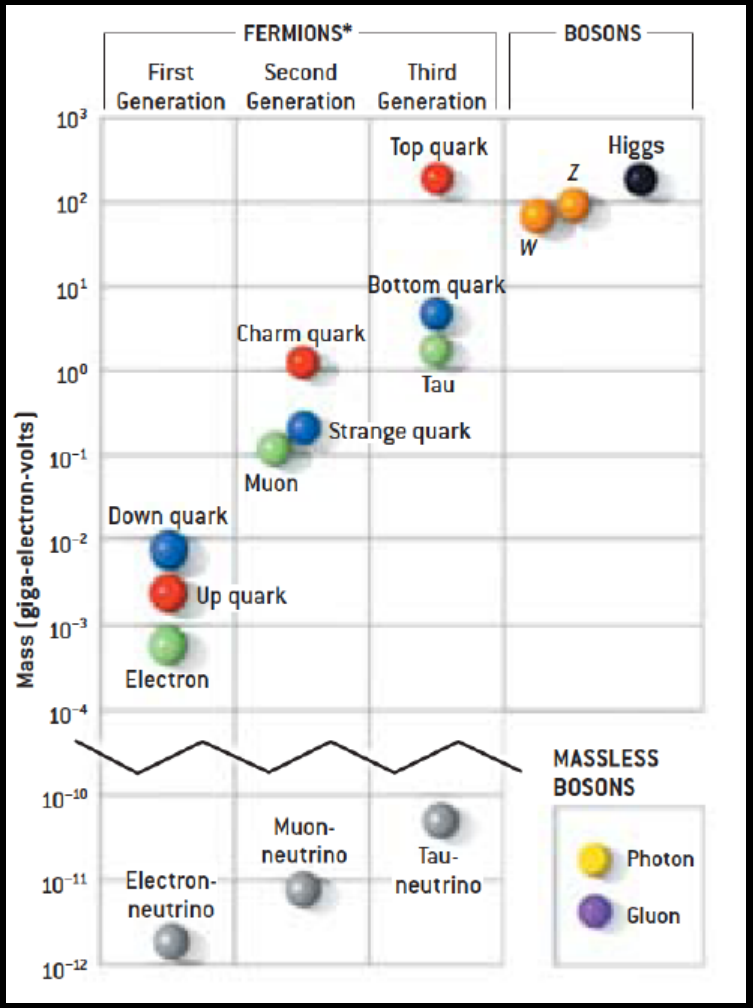
$$m(TOP) \simeq 350\,000\, m(elettrone)$$

$$m(e) > 500\,000\, m(\nu)$$

- Bosoni (forza)

$$m(Z) \simeq m(W) \simeq \frac{1}{2} m(TOP)$$

$$m(\gamma) = m(gluone) = 0\,!$$

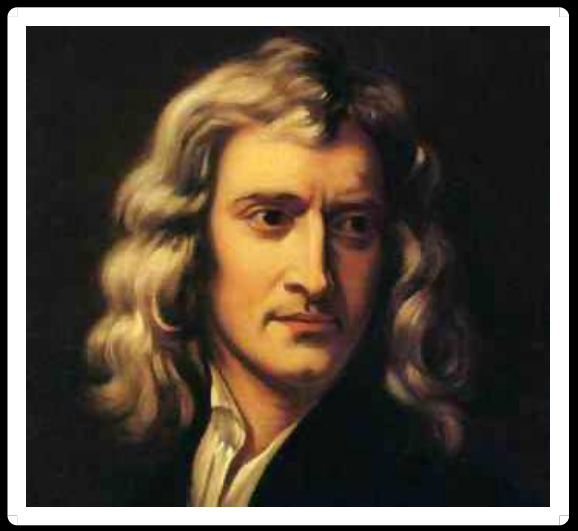


... perche' tanta differenza ?

Cos'e' la massa ?

- Fisica Classica: la massa e' l'inerzia con cui un corpo reagisce all'azione di una forza

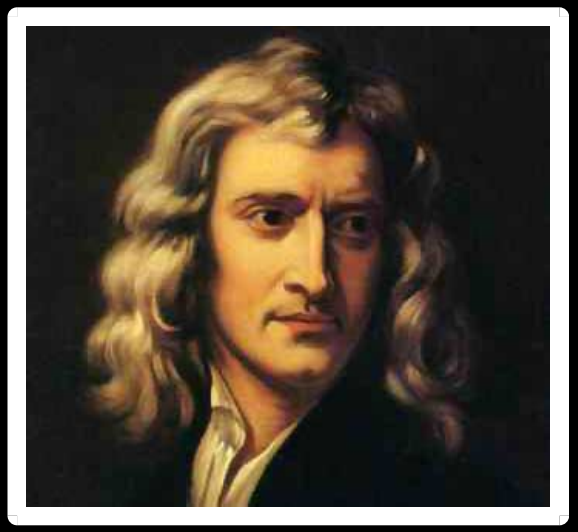
$$\vec{F} = m\,\vec{a}$$



Cos'e' la massa ?

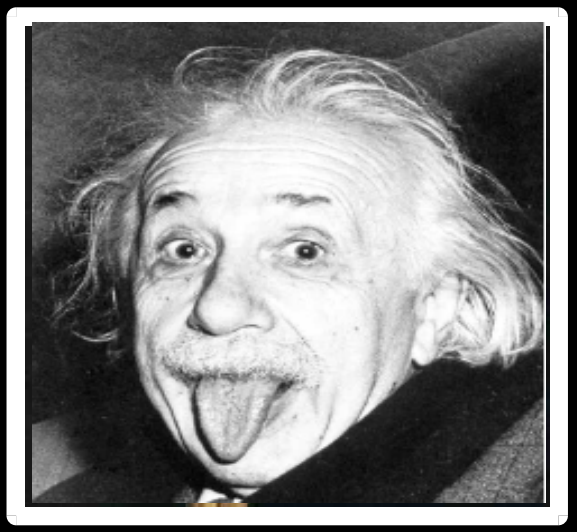
- Fisica Classica: la massa e' l'inerzia con cui un corpo reagisce all'azione di una forza

$$\vec{F} = m\,\vec{a}$$



- Fisica Moderna : la massa e' l'energia che possiede un corpo isolato, in quiete

$$E = m\,c^2$$



Cos'e' la massa ?

- Fisica Classica: la massa e' l'inerzia con cui un corpo reagisce all'azione di una forza
- Fisica Moderna : la massa e' l'energia che possiede un corpo isolato, in quiete

- In entrambi i casi e' un parametro che inseriamo "a forza" nelle nostre equazioni

Cos'e' la massa ?

- Fisica Classica: la massa e' l'inerzia con cui un corpo reagisce all'azione di una forza
- Fisica Moderna : la massa e' l'energia che possiede un corpo isolato, in quiete

- MODELLO STANDARD (teoria Quantistica Relativistica) :

massa : interazione particella -campo di Higgs

Cos'e' la massa ?

- Fisica Classica: la massa e' l'inerzia con cui un corpo reagisce all'azione di una forza
- Fisica Moderna : la massa e' l'energia che possiede un corpo isolato, in quiete

- MODELLO STANDARD (teoria Quantistica Relativistica) :

massa : interazione particella -campo di Higgs

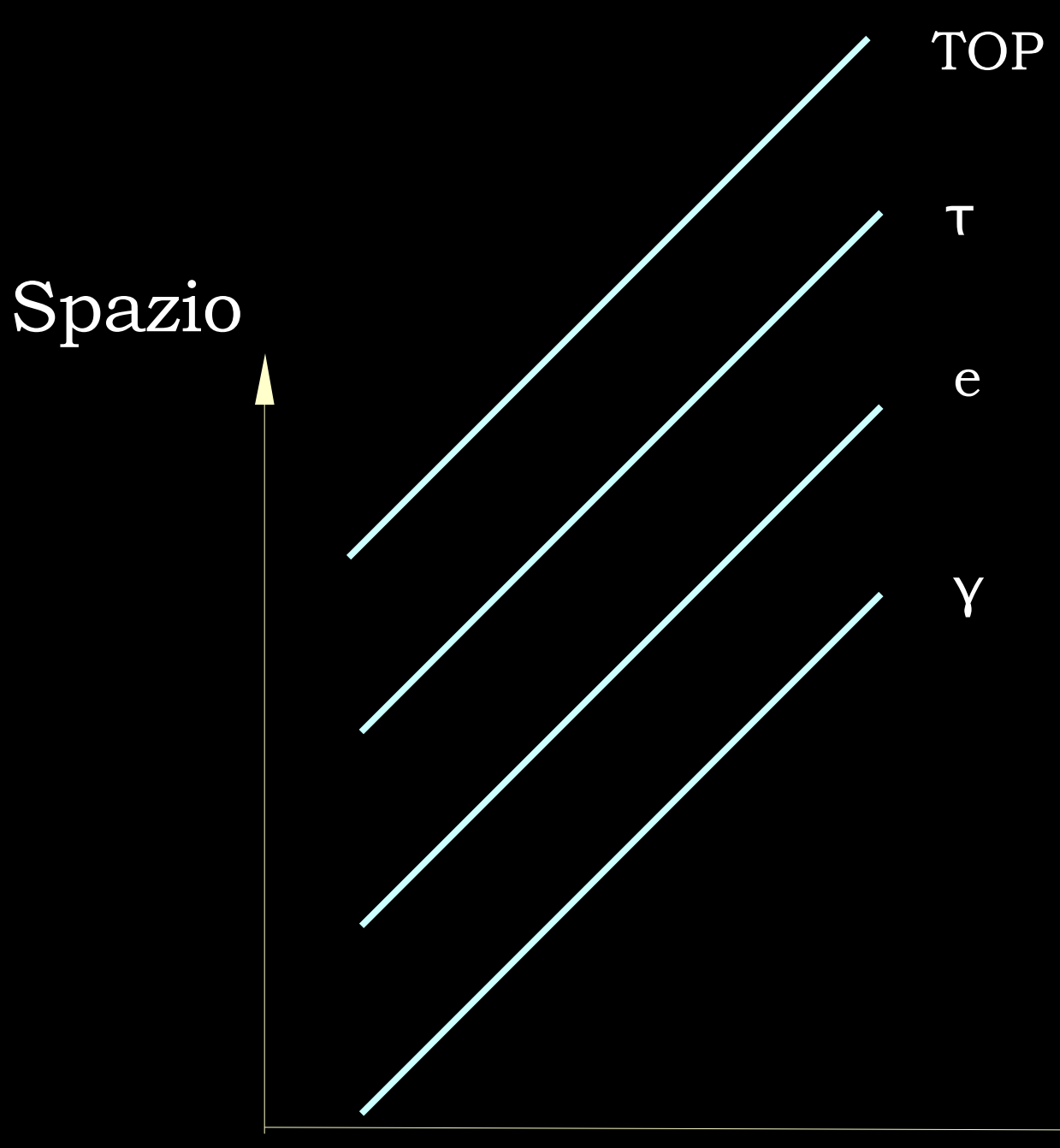
la V forza

Il Modello Standard (senza l'Higgs)

- Senza il campo di Higgs, tutte le particelle sarebbero prive di massa

$$m(e) \approx m(TOP) \approx m(W) \approx \ldots \approx 0\,!$$

- si muoverebbero tutte alla velocita' della luce
- non ci sarebbero strutture :
  - niente atomi
  - niente molecole
  - niente stelle
  - ... e neanche noi !

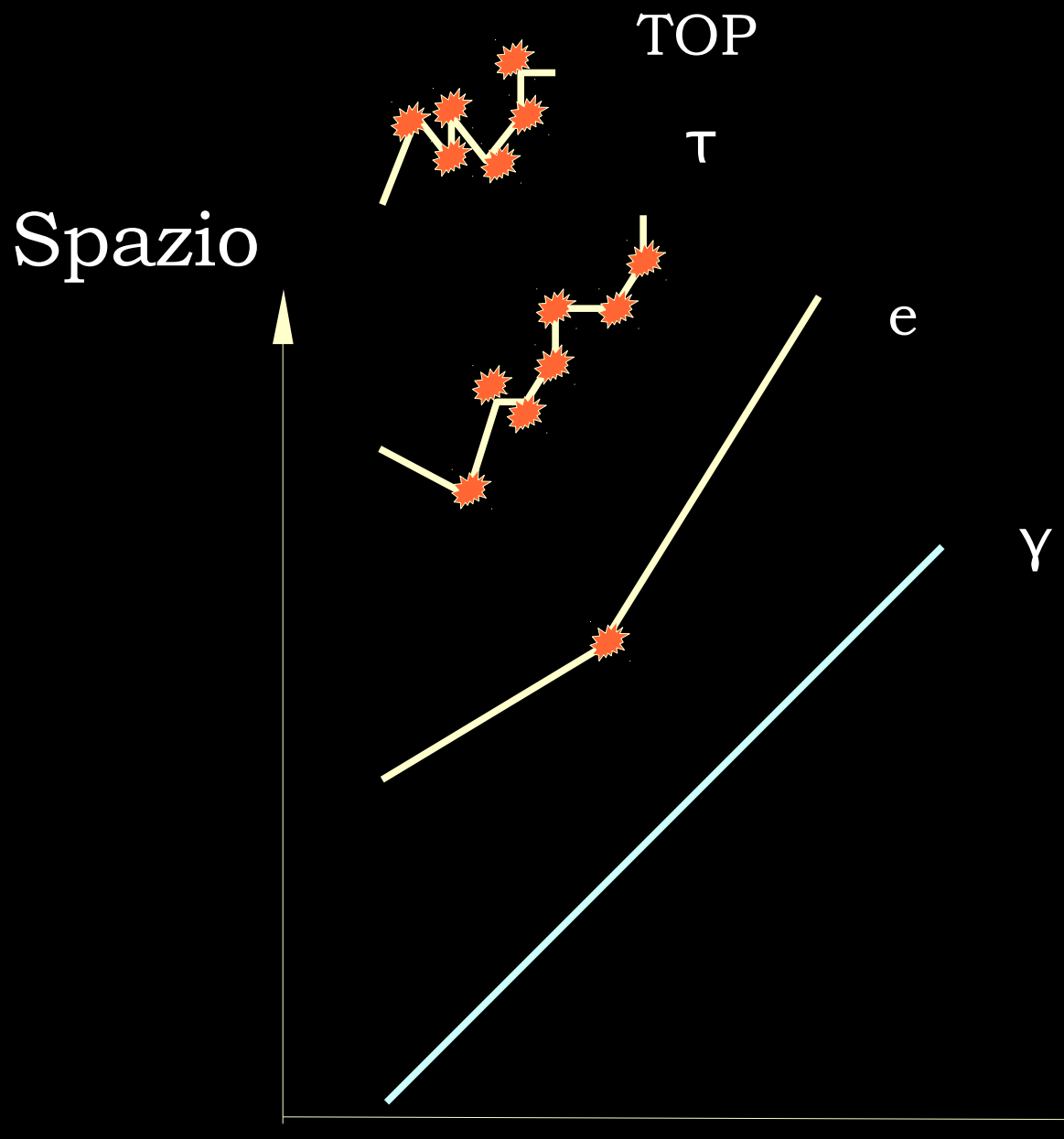


Nel Modello Standard
senza il campo di Higgs
tutte le particelle sono prive
di massa e si muovono alla
velocita' della luce

il Campo di Higgs

Nambu, Brout, Englert:

- Tutto l'universo e' permeato da un "campo" ($\Phi(x)$)
- Le particelle percepiscono (interagiscono) con questo campo e ne vengono frenate
- Maggiore e' l'interazione, maggiore e' il rallentamento
- Massa : manifestazione della interazione con il campo
- Grande massa : grande legame tra la particella e il campo Φ



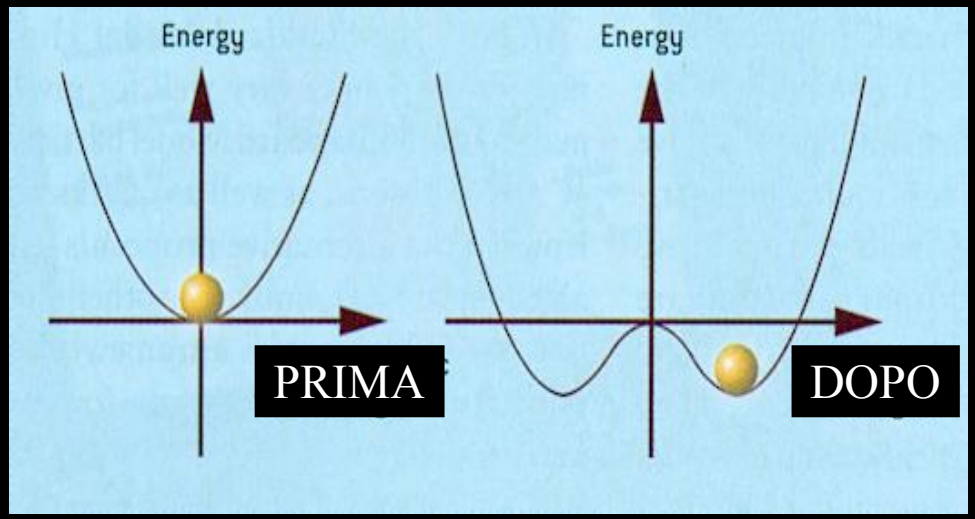
Le particelle interagiscono con il campo di Higgs .
Maggiore l'interazione, maggiore e' la viscosita' del moto
Questa "viscosita'" e' quel che chiamiamo MASSA

Fotoni (e gluoni) hanno massa nulla, perche' non interagiscono con Φ

... come pesci nel mare ...

il Campo di Higgs e la storia dell'Universo

- Questo processo avviene in un momento preciso della storia dell'universo
- Espandendosi dopo il Big Bang, questo si raffredda
- Il campo $\Phi(x)$ cambia forma, e nasce l'interazione con le particelle (ROTTURA SPONTANEA DI SIMMETRIA)

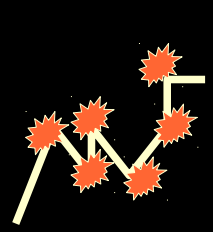


il Campo di Higgs e la storia dell'Universo

- Questo processo avviene in un momento preciso della storia dell'universo
- Espandendosi dopo il Big Bang, questo si raffredda
- Il campo $\Phi(x)$ cambia forma, e nasce l'interazione con le particelle (TRANSIZIONE DI FASE)
- cio' avviene

$$10^{-12}\, sec$$

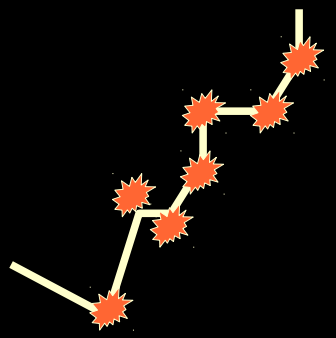
- ossia 1 millesimo di miliardesimo di secondo dopo il Big Bang



TOP

Z

Spazio



e

Le particelle interagiscono con il campo di Higgs .
Maggiore l'interazione, maggiore e' la viscosita' del moto
Questa "viscosita'" e' quel che chiamiamo MASSA

Y

Ci sono gli atomi , le stelle, i pianeti , la biologia

... ci siamo noi

con Φ

Tempo

L'equazione del Modello Standard

$$
\begin{aligned}
&\mathcal{L}_{SM} = \\
&-\frac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu + \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu \\
&-\partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \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\left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g}H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)\right] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h \\
&-igc_w\left[\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)\right] \\
&-igs_w\left[\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)\right] \\
&-\frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2\left(Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu\right) + g^2 s_w^2\left(A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu\right) \\
&+g^2 s_w c_w\left[A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu\right] - g\alpha\left[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-\right] \\
&-\frac{1}{8}g^2\alpha_h\left[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2H^2\right] - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H \\
&-\frac{1}{2}ig\left[W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)\right] + \frac{1}{2}g\left[W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) - W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)\right] \\
&+\frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_wMA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- \\
&-\phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_wA_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \frac{1}{4}g^2W^+_\mu W^-_\mu\left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-\right] - \frac{1}{4}g^2\frac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu[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^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \frac{1}{2}ig^2\frac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \frac{1}{2}g^2s_wA_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) \\
&+\frac{1}{2}ig^2s_wA_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - g'^2s_w^2A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - e^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda\gamma\partial\nu^\lambda \\
&-\bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_wA_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \frac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)] \\
&+\frac{ig}{4c_w}Z^0_\mu\left[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)u^\lambda_j) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5)d^\lambda_j)\right] \\
&+\frac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu\left[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)\right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu\left[(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\lambda\kappa}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)\right] \\
&+\frac{ig}{2\sqrt{2}}\frac{m^\lambda_e}{M}\left[-\phi^+(\bar{\nu}^\lambda(1-\gamma^5)e^\lambda) + \phi^-(\bar{e}^\lambda(1+\gamma^5)\nu^\lambda)\right] - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_e}{M}\left[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda)\right] \\
&+\frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left[-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j)\right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left[m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)u^\kappa_j\right] \\
&-\frac{g}{2}\frac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \frac{ig}{2}\frac{m^\lambda_d}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- \\
&+\bar{X}^0\left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}\right)X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_wW^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0X^- - \partial_\mu\bar{X}^+X^0) + igs_wW^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+Y) + igc_wW^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^-X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0X^+) \\
&+igs_wW^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^-Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_wZ^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) + igs_wA_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H \\
&+\frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w}igM[\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-] + \frac{1}{2c_w}igM[\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-] + igMs_w[\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-] \\
&+\frac{1}{2}igM[\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0]
\end{aligned}
$$

M. Veltman "Diagrammatica"

Un'elegante speculazione ?

- Come possiamo validare (verificare) questa elegante teoria ?
- Peter Higgs :

"con il nuovo campo, deve comparire anche una nuova particella (h)"

- Il Modello Standard ne predice molte proprieta' :
  - legame con le altre particelle
  - tempo di vita (brevissimo)
  - stato di rotazione intrinseca (SPIN, nullo)
  - carica elettrica (nulla)

Un'elegante speculazione ?

- Come possiamo validare (verificare) questa elegante teoria ?
- Peter Higgs :

"con il nuovo campo, deve comparire anche una nuova particella (h)"

- Il Modello St
  - legame c
  - tempo
  - stato di rotazione intrinseca (SPIN, nullo)
  - carica elettrica (nulla)

ma non ne predice (precisamente) la massa

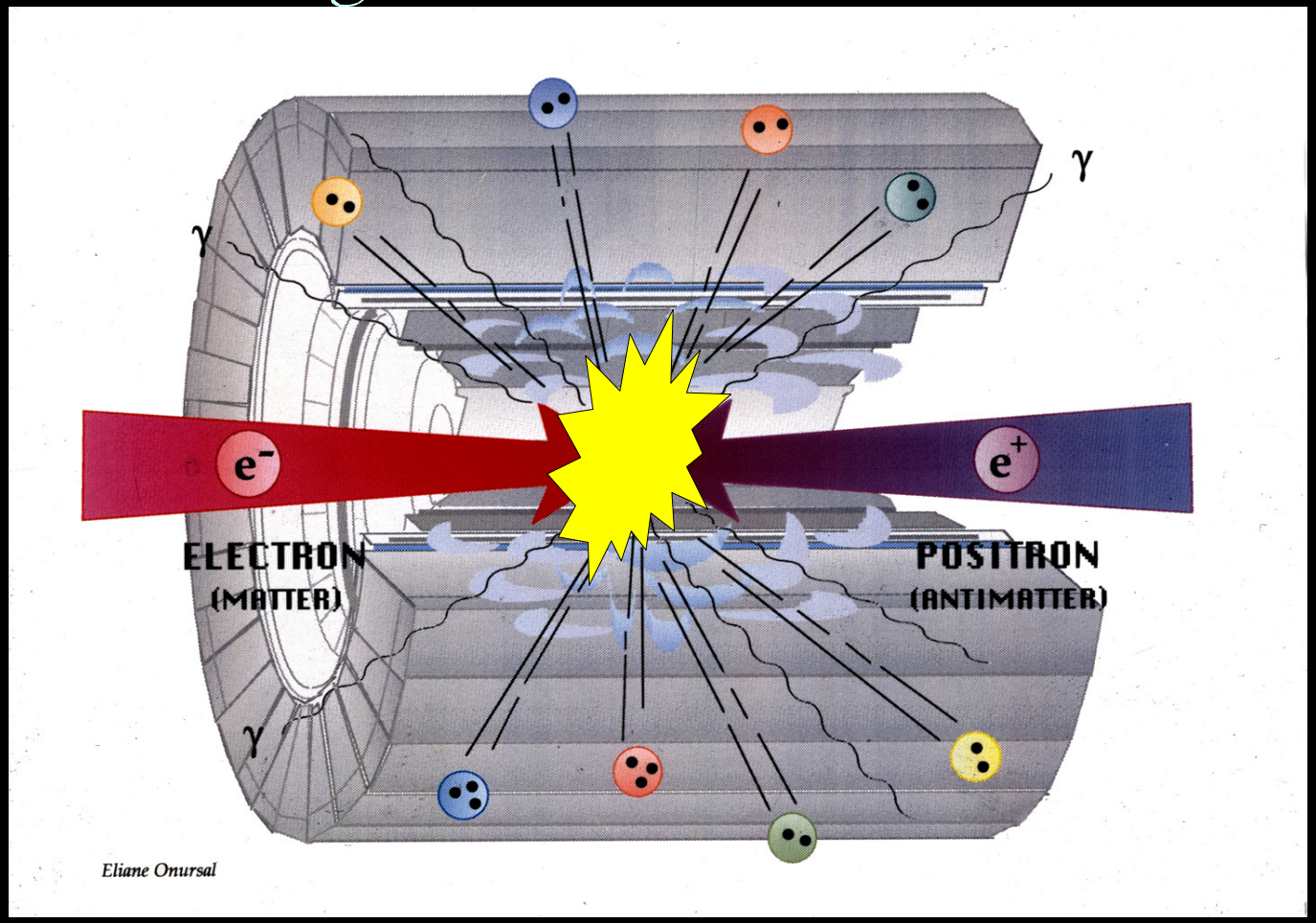
La caccia al Bosone

- Per validare questa teoria dobbiamo:
  - trovare questa particella
  - misurarne le proprieta' e confrontarle con le previsioni del modello (... *there are more things between heaven and earth* ...)
- Per tutto questo (ed altro ancora), abbiamo costruito il

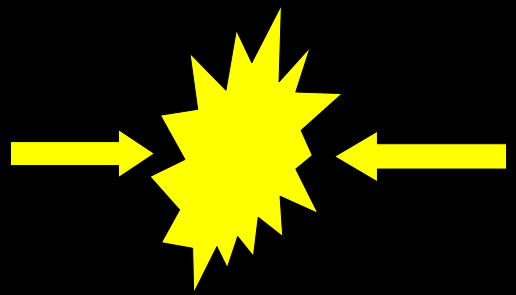
Collisori di Particelle

- Massa ed energia sono equivalenti.
- Posso convertirle l'una nell'altra
- Posso produrre particelle molto pesanti, facendo collidere particelle leggere molto energetiche

$$E = mc^2$$



Non esiste equivalente classico ...



Non esiste equivalente classico ...

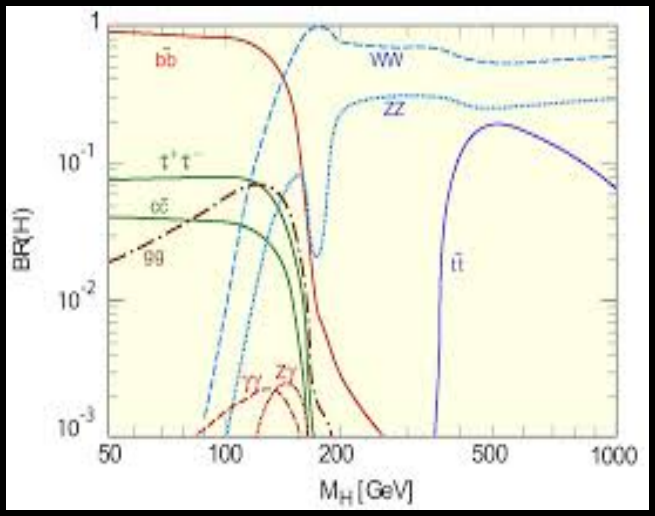
Che sapevamo prima di LHC ?

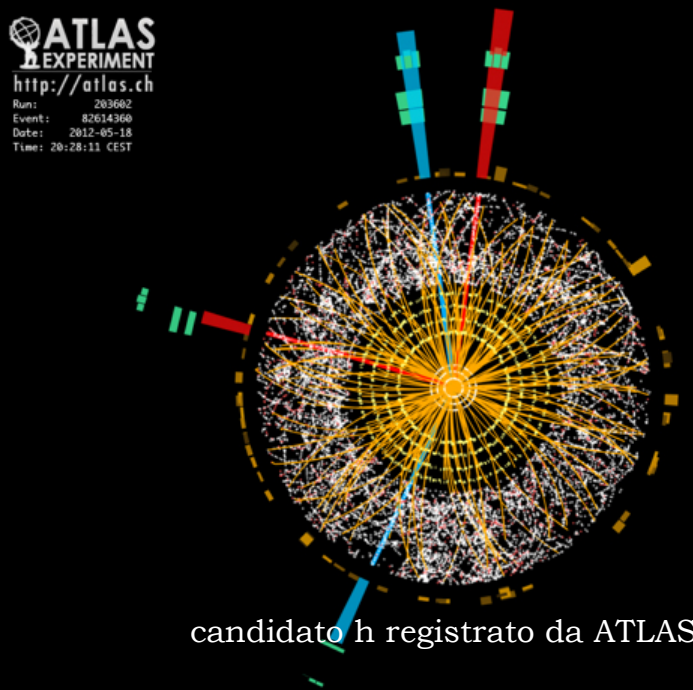
- h e' massiccio:

  m(h) > 120 GeV ~ 120 protoni

- la sua produzione e' un fenomeno rarissimo
- si disintegra (decade) immediatamente, producendo altre particelle
- in topologie anche molto complicate

modi di decadimento di h vs m(h)





candidato h registrato da ATLAS

Che sapevamo prima di LHC ?

- e' massiccio:

  m(h) > 120 GeV ~ 120 protoni

- la sua produzione e' un fenomeno rarissimo
- si disintegra (decade) immediatamente, producendo altre particelle
- in topologie anche molto complicate

Acceleratore :

- Grande energia (E ~ 14 TeV)
- Grande frequenza (LUMINOSITA')

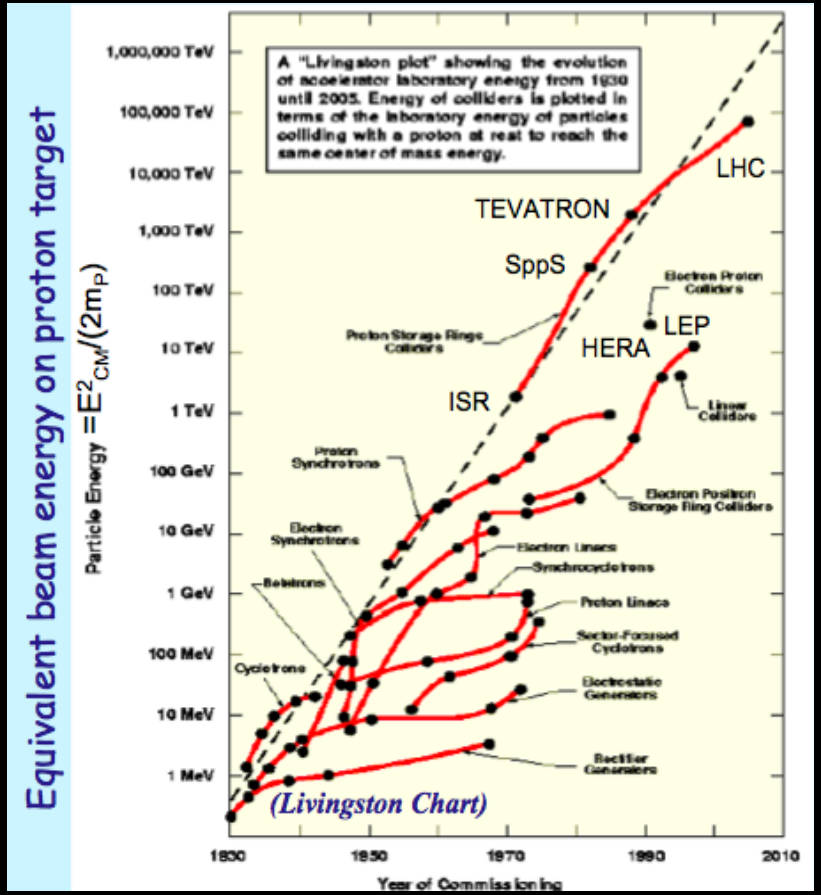
Rivelatori :

- gran dettaglio (GRANULARITA')
- gran precisione (RISOLUZIONE)

candidato h registrato da ATLAS

La Fisica agli Acceleratori

Particella	m (GeV/c^2)	Collisore	Anni	$E_{(fascio)}$ (GeV)
J/Ψ	3,01	Ada/Spear	1970-1980	1,5
Y(4S)	10,57	CESAR	1980-2000	5,38
Y(4S)	10,57	PEPII	2000-2008	10 – 3
Z0	91	LEP/SLC	1990-1995	45,5
WW	160	LEP II	1996-2000	210
Top	173	Tevatron	1983-2008	900
H	125	LHC	2012	4000
?	?	LHC	2015-2020	6500



- Una lunga storia di scoperte
- LHC e' l'acceleratore piu' prestante di sempre !

Quanto e' Grande un TeV

- L'elettronVolt (e i suoi multipli) e' l'unita' di misura utilizzata nella fisica atomica e subatomica
- 1 TeV = 10^{12} ev = 1000 miliardi di eV ~ 1000 volte la massa del protone , 6 volte la massa della particella piu' pesante tra quelle osservate, il top.

Quanto e' Grande un TeV

- L'elettronVolt (e i suoi multipli) e' l'unita' di misura utilizzata nella fisica atomica e subatomica
- 1 TeV = 10^{12} ev = 1000 miliardi di eV ~ 1000 volte la massa del protone ...
- ... cioe' ~ 1.6 erg , meno di un milionesimo di Watt sec.
- Una lampadina di un Watt, in un secondo emette circa un milione di volte l'energia dei protoni di LHC
- ... dov'e' il trucco ?

Quanto e' denso un TeV

- L'energia e' concentrata in un volume piccolissimo (~ dimensioni del protone)
- E' enorme la "densita' " di energia, ossia il rapporto :

(Energia Sviluppata) / (Volume Sensibile)

- Questo ripristina (per tempi brevissimi) situazioni prossime a quelle dell'origine dei tempi, corrispondenti a pochi istanti successivi al Big Bang
- I collisori di particelle sono vere e proprie macchine del tempo

Quanto e' denso un TeV

- Ma quest'energia e' concentrata in un volume piccolissimo (~ dimensioni del protone)
- E' enorme la "densita' " di energia, ossia il rapporto :

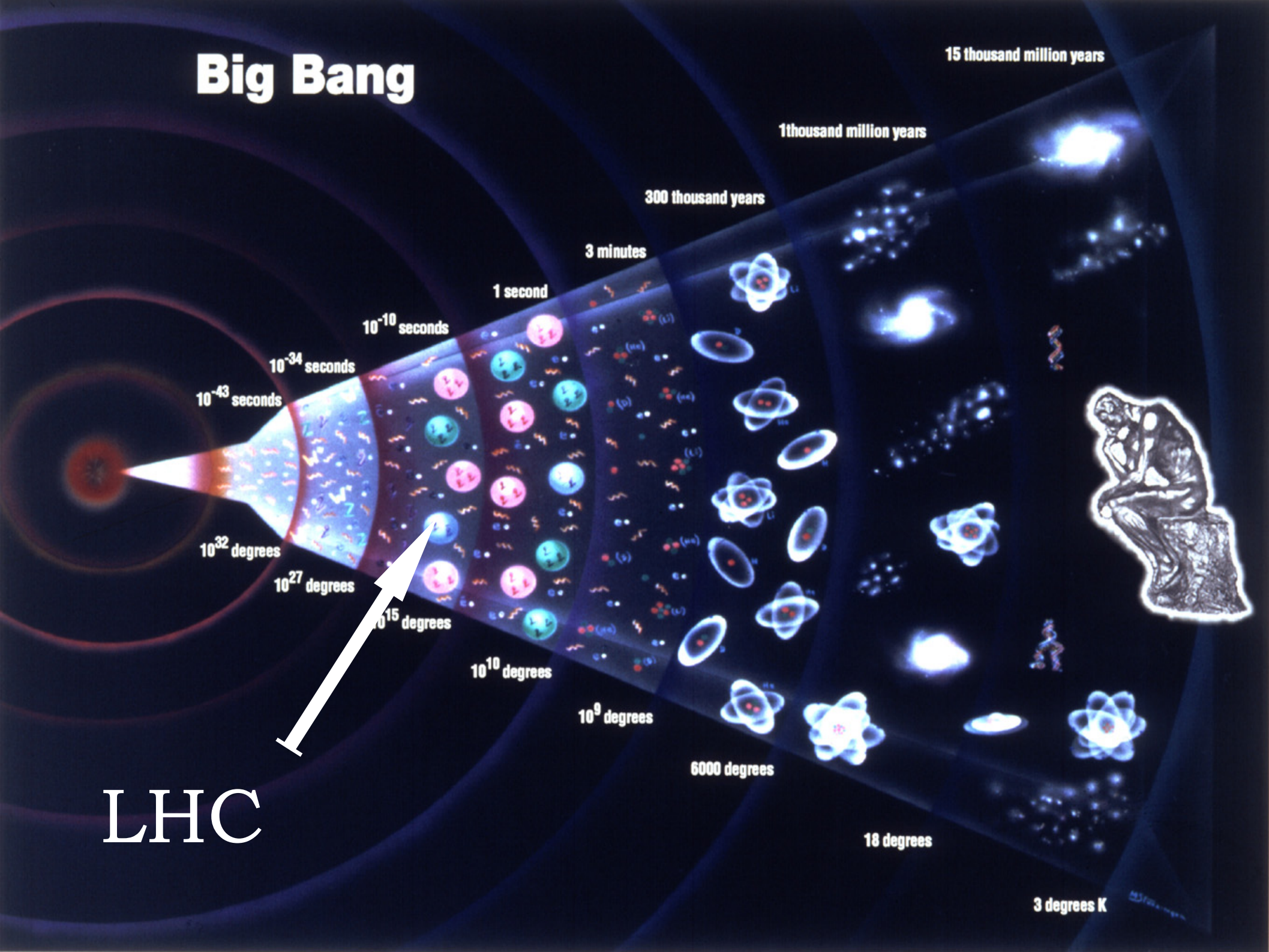
u_E = (Energia Sviluppata) / (Volume Sensibile)

$u_E \sim 10^{12} / (10^{-17})^3 = 10^{61}$ eV/m^3 - 1 collisione a LHC

$u_E \sim 10^{18} / (10^{-3})^3 = 10^{27}$ eV/m^3 - 1 sec della lampadina

A Ritroso nel Tempo

- L'Universo si espande
- Nell'espansione l'Universo ha distribuito la propria energia su un volume molto piu' vasto, disperdendosi e raffredandosi
- Il valore della temperatura, come misura della densita' di energia, e' legata al tempo trascorso dal momento del Big Bang
- LHC ~ 10^{17} °K , ovvero ~ 10^{-15} sec dopo il Big Bang, ovvero quando l'universo poteva essere contenuto nel volume di un atomo


Big Bang
15 thousand million years
1thousand million years
300 thousand years
3 minutes
1 second
10^{-10} seconds
10^{-34} seconds
10^{-43} seconds
10^{32} degrees
10^{27} degrees
10^{15} degrees
10^{10} degrees
10^{9} degrees
6000 degrees
18 degrees
3 degrees K
LHC

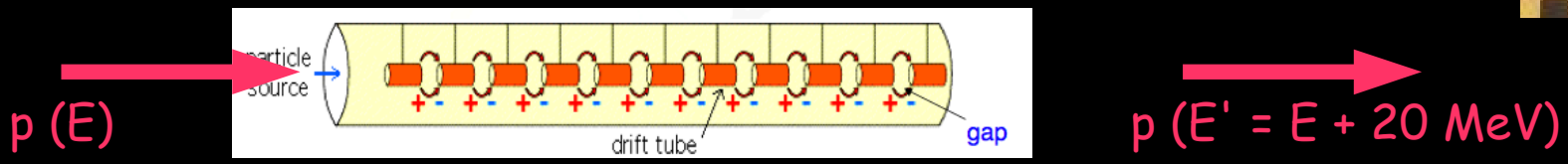
LHC - requisiti

- Idea semplice : faccio collidere due particelle (protoni) alla massima energia possibile (7+7 TeV) , e guardo cosa vien fuori
- Cerco processi rari, quindi devo accumulare molte osservazioni (eventi) :
  - molte collisioni per secondo (alta luminosita')
  - lungo periodo di osservazione (schedulati altri cinque anni di presa dati, molto probabilmente saranno almeno dieci)

(Tevatron @ Fermilab ha operato per 20 anni)

Alta Energia ...

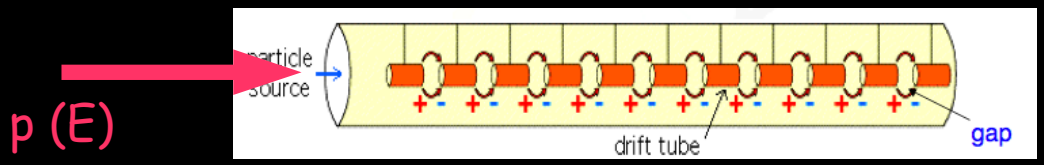
- Cavita' acceleratrici fornisco circa 20 MeV di energia per metro di lunghezza



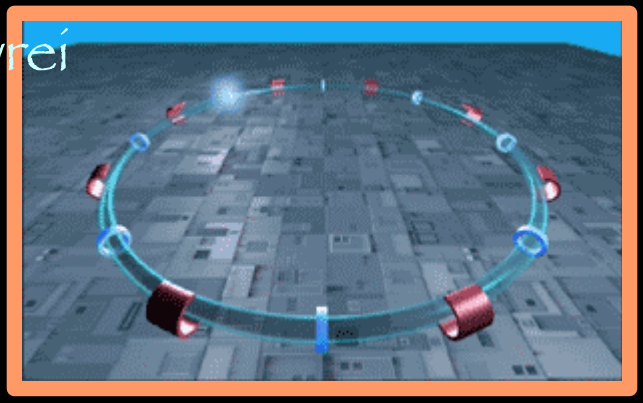
- Per raggiungere 7 TeV, ovvero 7 milioni di MeV, dovrei usare oltre 300.000 cavita' !
  - costi proibitivi
  - ingombri impensabili

Alta Energia ...

- Cavita' acceleratrici fornisco circa 20 MeV di energia per metro di lunghezza



- Per raggiungere 7 TeV, ovvero 7 milioni di MeV, dovrei usare oltre 300.000 cavita' !
  - costi proibitivi
  - ingombri impensabili



- Accellero i protoni su traiettorie circolari, cosi' uso la stessa cavita' piu' volte (una per giro)

... quindi grandi strutture

- Curvo la traiettoria utilizzando campi magnetici , secondo la relazione :

$$E \simeq cp = c(B\,q\,r)$$

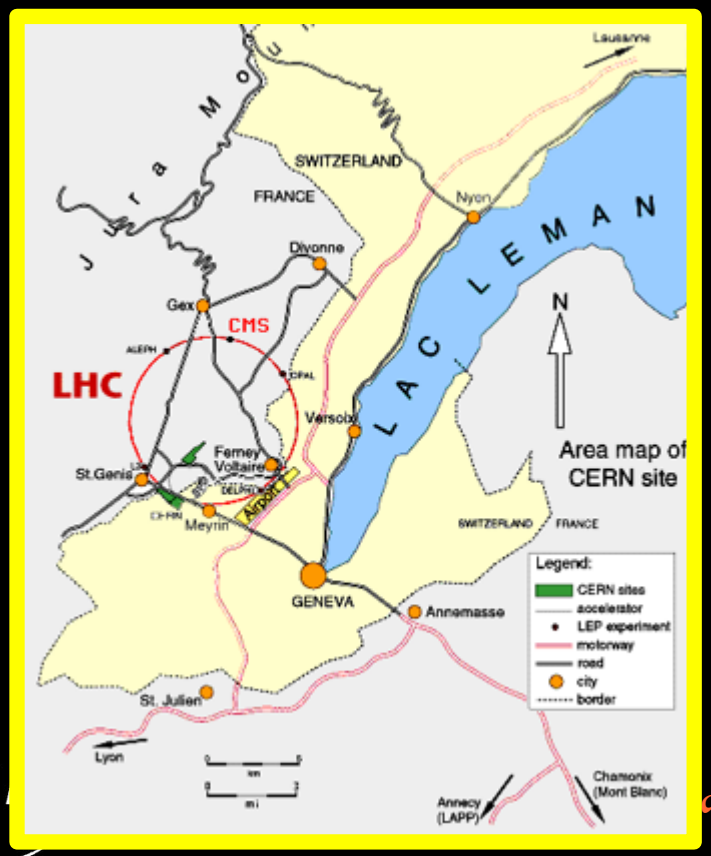
c = velocita' della luce (~ 300 000 000 m/s)
q = carica del protone (1.6 10^{-19} C)

- Grandi energie :
  - grande raggio di curvatura (r)
  - grandi campi magnetici (B)

LHC : r = 4.5 Km, B = 8 T

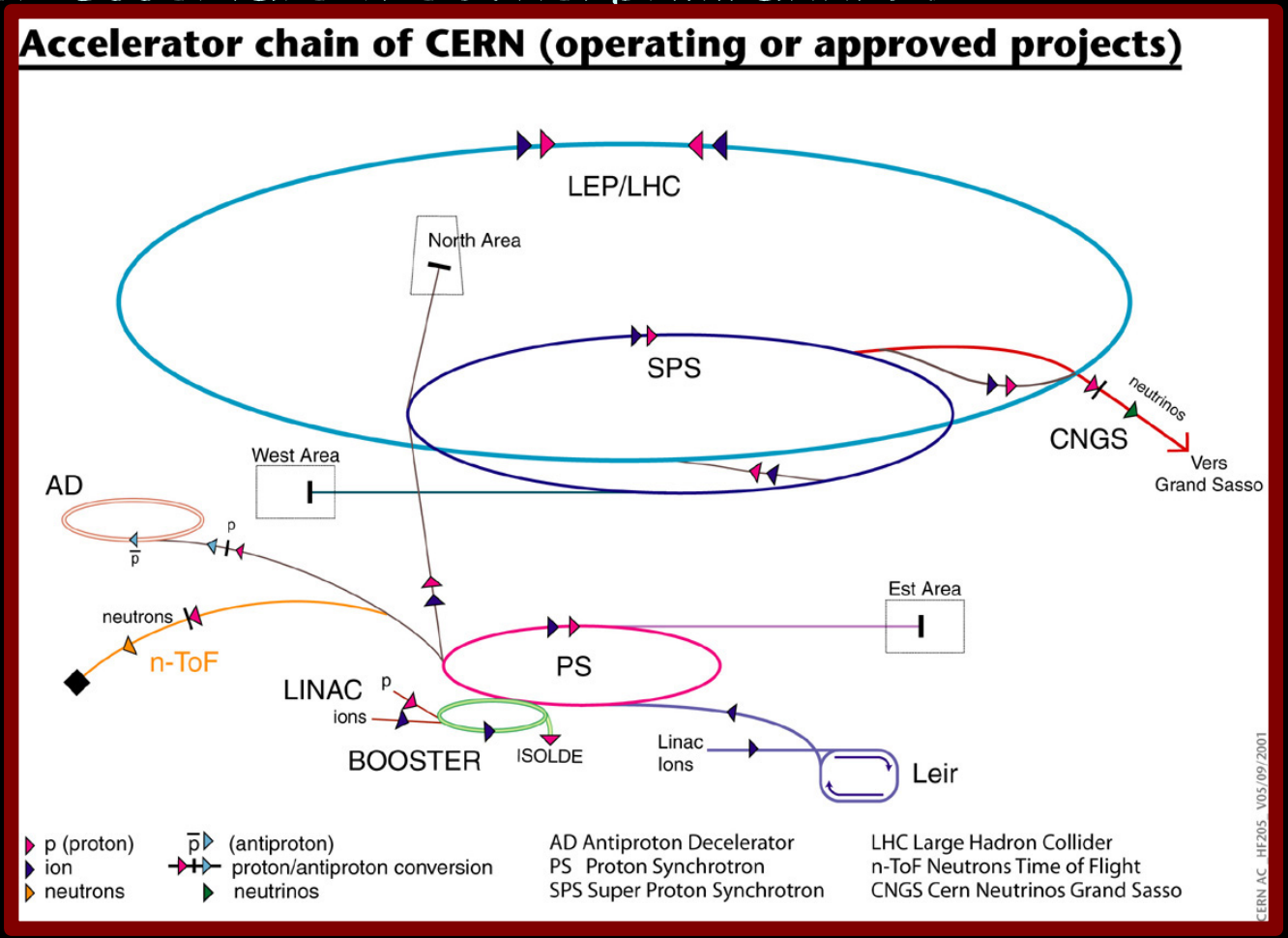
LHC : il sito

- LHC e' stato installato nel tunnel sotterraneo scavato negli anni 80 per un precedente acceleratore, il LEP
- La circonferenza del tunnel misura 27 Km, la profondita' varia tra 50 e 150 m



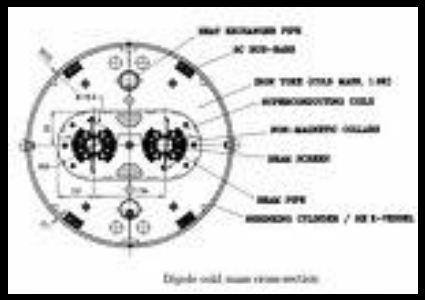
Il complesso

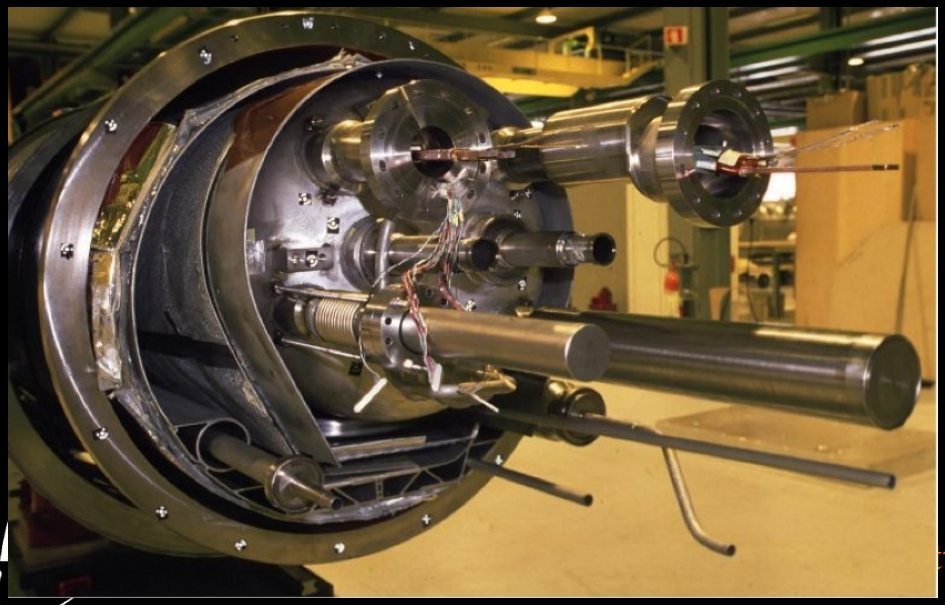
- LHC e' lo stadio finale di un complesso sistema che utilizza svariati acceleratori in cascata
- Il penultimo stadio (SpS) e' l'acceleratore progettato da Carlo Rubbia per osservare W e Z nei primi anni 80



I Magneti di LHC

- Servono comunque 1232 potentissimi magneti dipolari (9 Tesla) di grandi dimensioni (L ~ 15 m)





- Per limitare l'assorbimento di potenza : magneti superconduttori ,

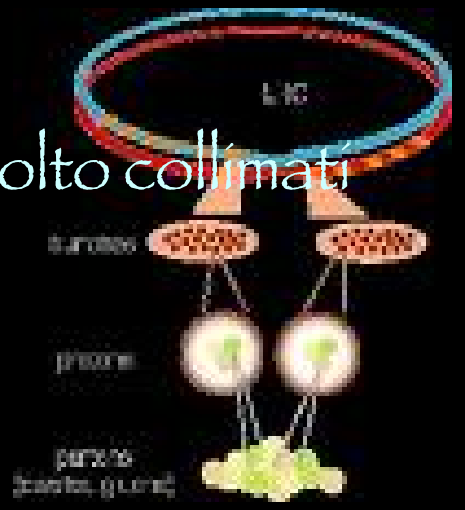
  T = 1.9 °K = -271.1 °C,

  $\langle T_{Universo} \rangle$ = 2.3 °K

Nel Tunnel

I Fasci

- I protoni vengono accelerati in due tubi a vuoto per circolare su traiettorie opposte
- In poche zone opportune le traiettorie si intersecano e hanno luogo le collisioni
- I protoni sono raggruppati in pacchetti (bunches) molto collimati (sottili) mediante 392 magneti "focalizzatori"
- In condizioni operative si hanno :
  - 115 miliardi di protoni / bunch
  - 2808 (x2) bunches simultaneamente presenti nei tubi

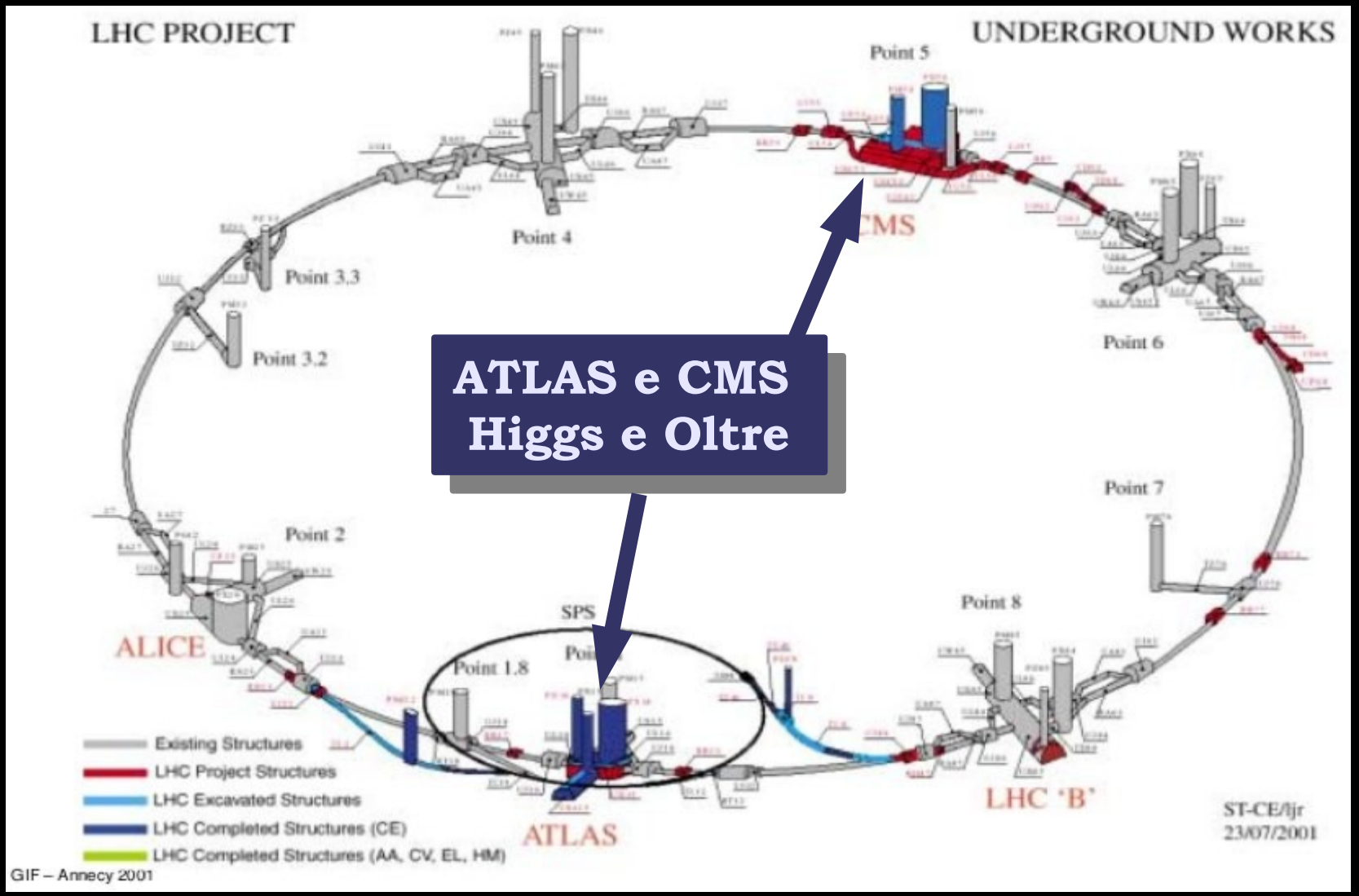


40 000 000 di collisioni al secondo

(ma ne registriamo ~ 100 / sec)

Gli esperimenti

- Le collisioni hanno luogo in quattro punti , dove sono alloggiati quattro rivelatori, disegnati con obbiettivi diversi

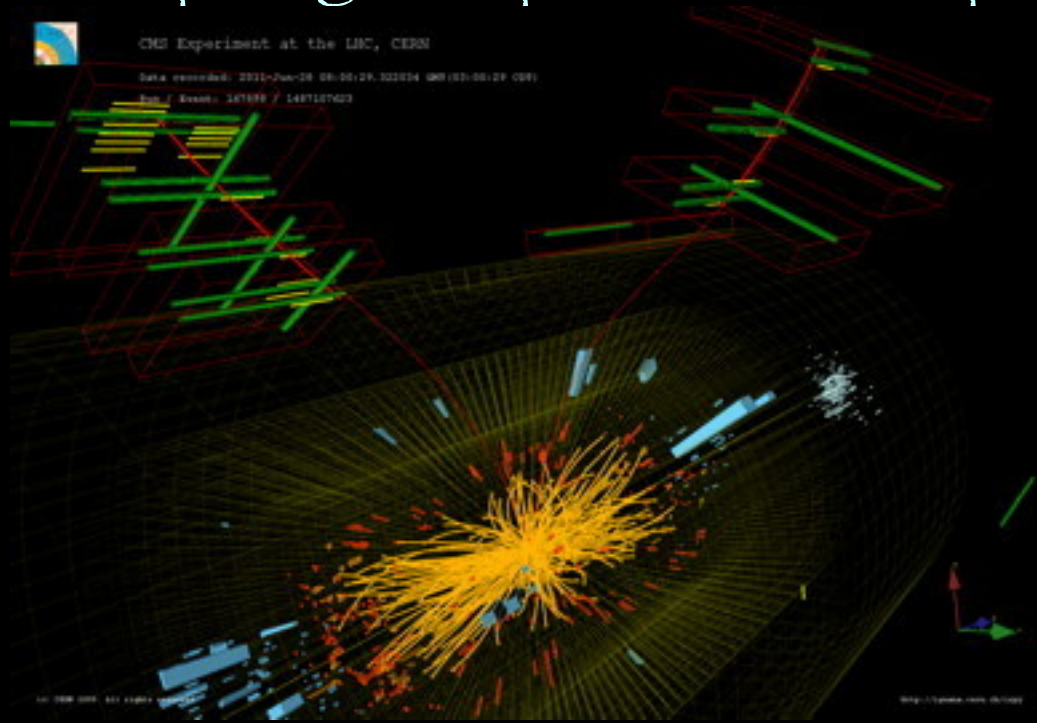


Gli obbiettivi (mission) di ATLAS e CMS

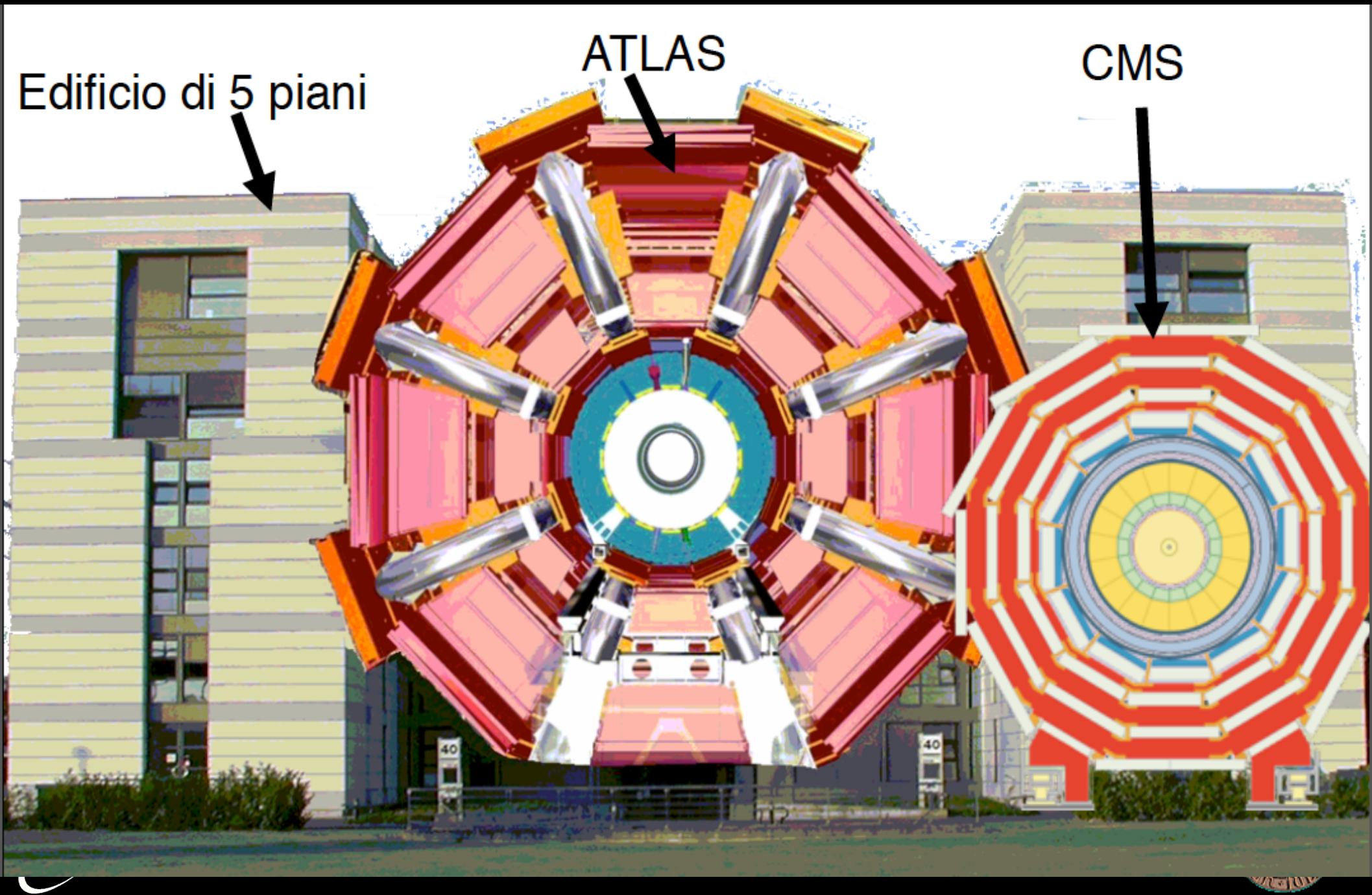
- Scoprire il Bosone di Higgs e misurarne le proprieta'
- Ricercare segnali non attesi, indicatori della presenza di nuova Fisica
- Il Bosone di Higgs , o le nuove particelle, non sono osservati direttamente, ma ricostruendo le particelle note in cui decadono:
  - $e^{-/+}$ (elettrone)
  - $\mu^{-/+}$ (muone)
  - $\pi^{+/-}$,$K^{+/-}$, $p^{+/-}$ (adroni : pioni, kaoni e protoni carichi)
  - γ (fotone)
  - K^{o}_{L}, n (adroni neutri)

Rivelatori : le dimensioni

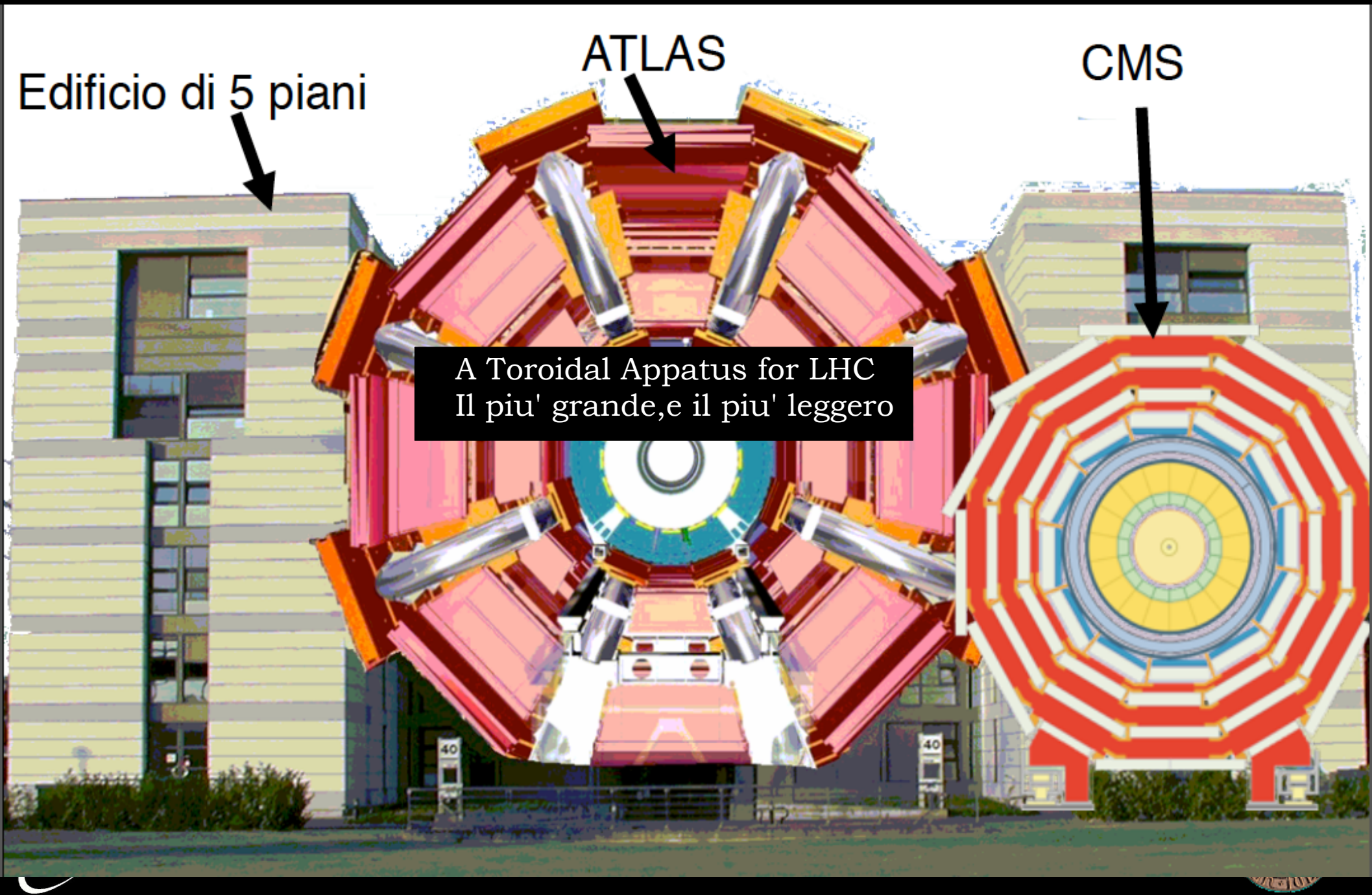
- Gli eventi sono estremamente complessi (migliaia di particelle osservabili sono prodotte ad ogni interazione)
- Servono rivelatori di dimensioni colossali
- immersi in potenti campi magnetici per misurare l'impulso delle tracce



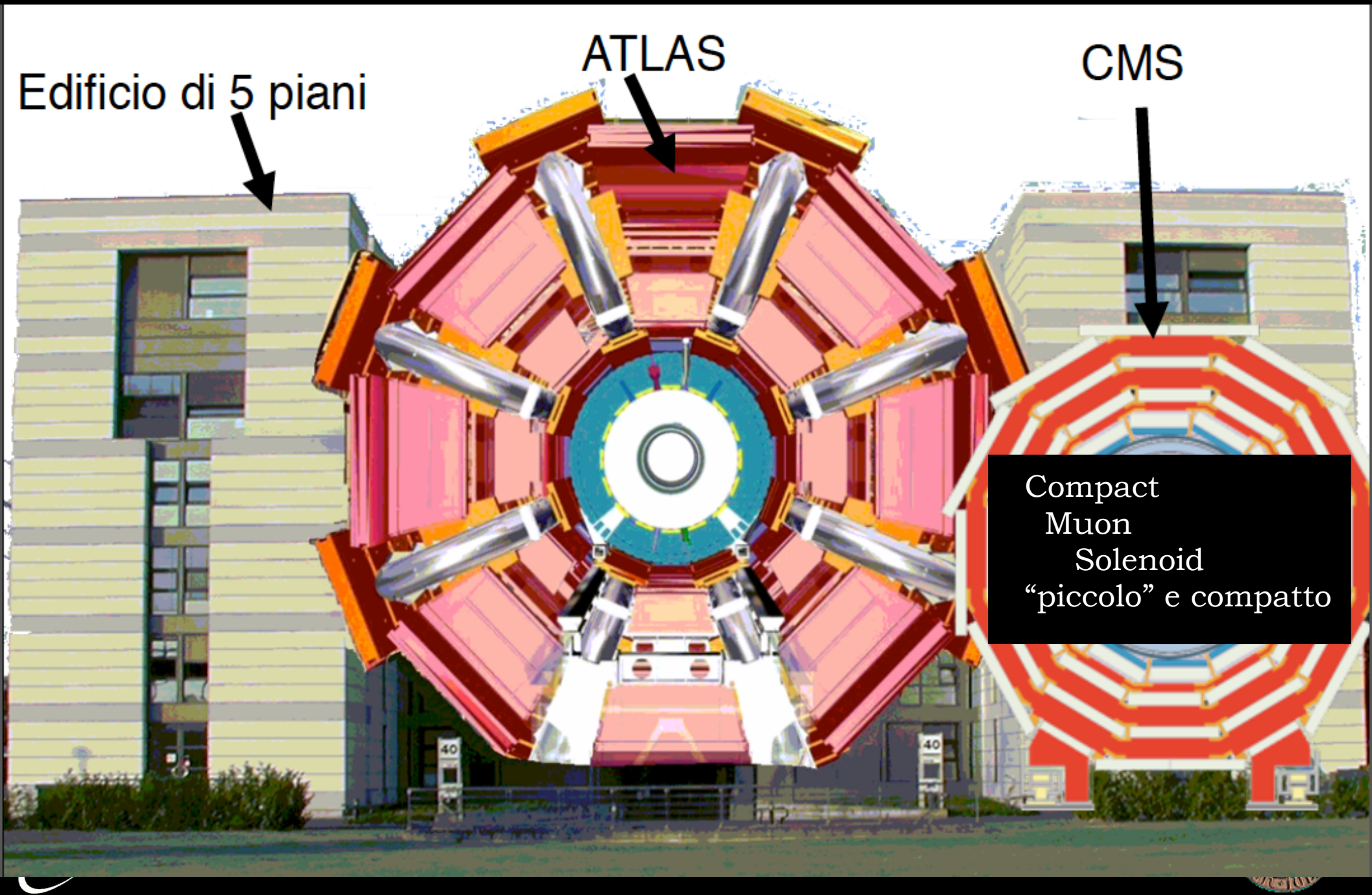
I Rivelatori

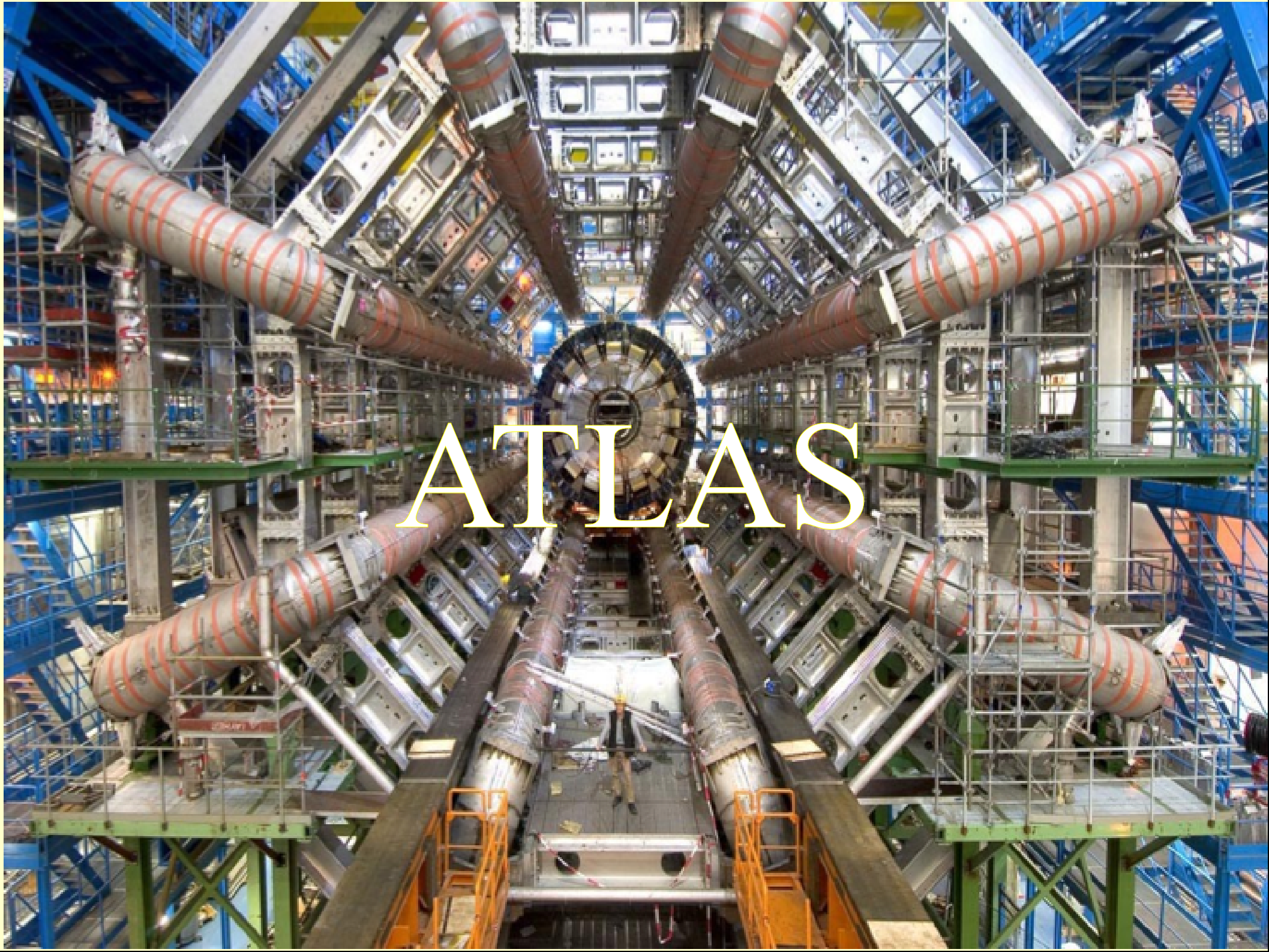


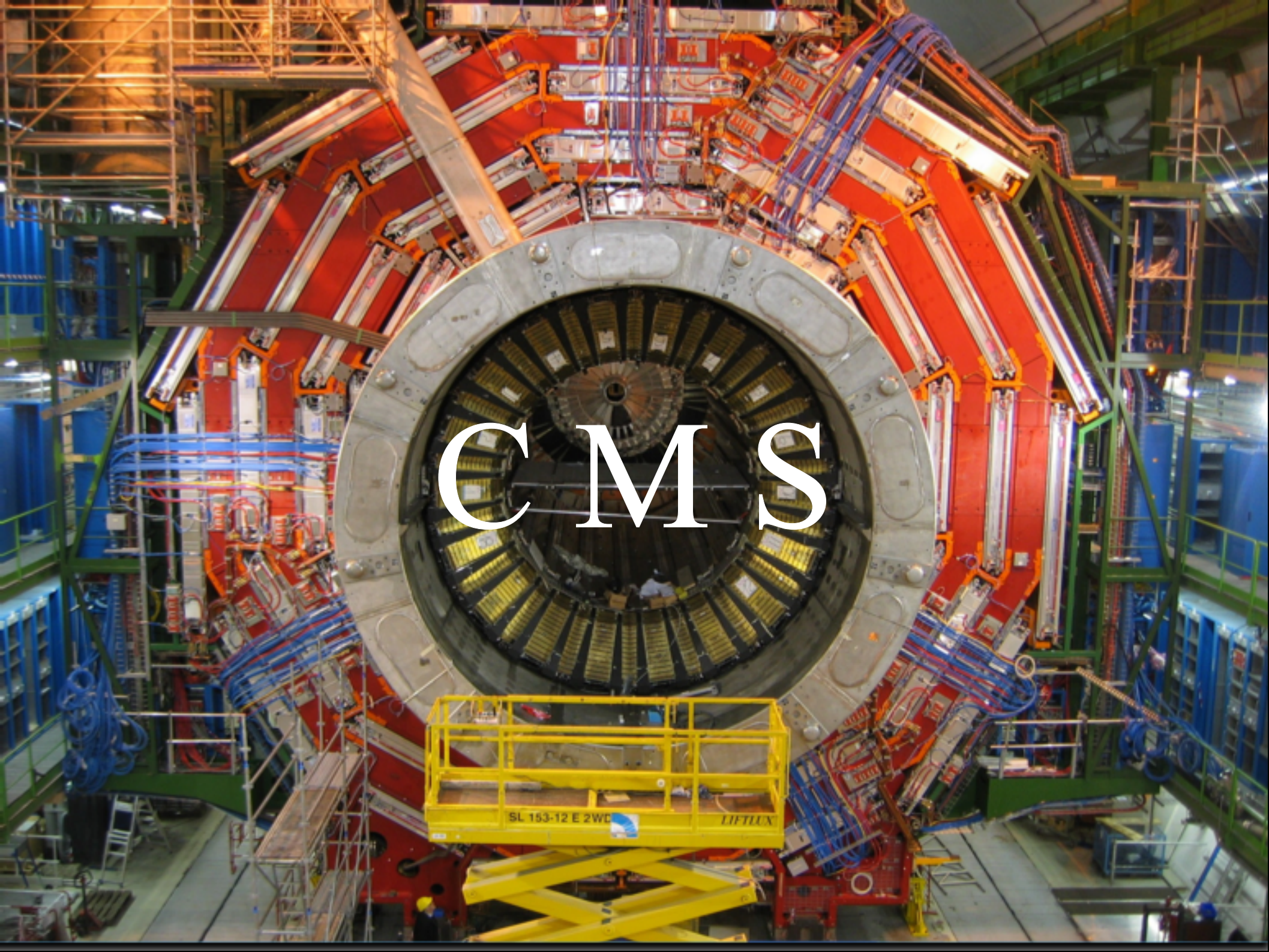
I Rivelatori

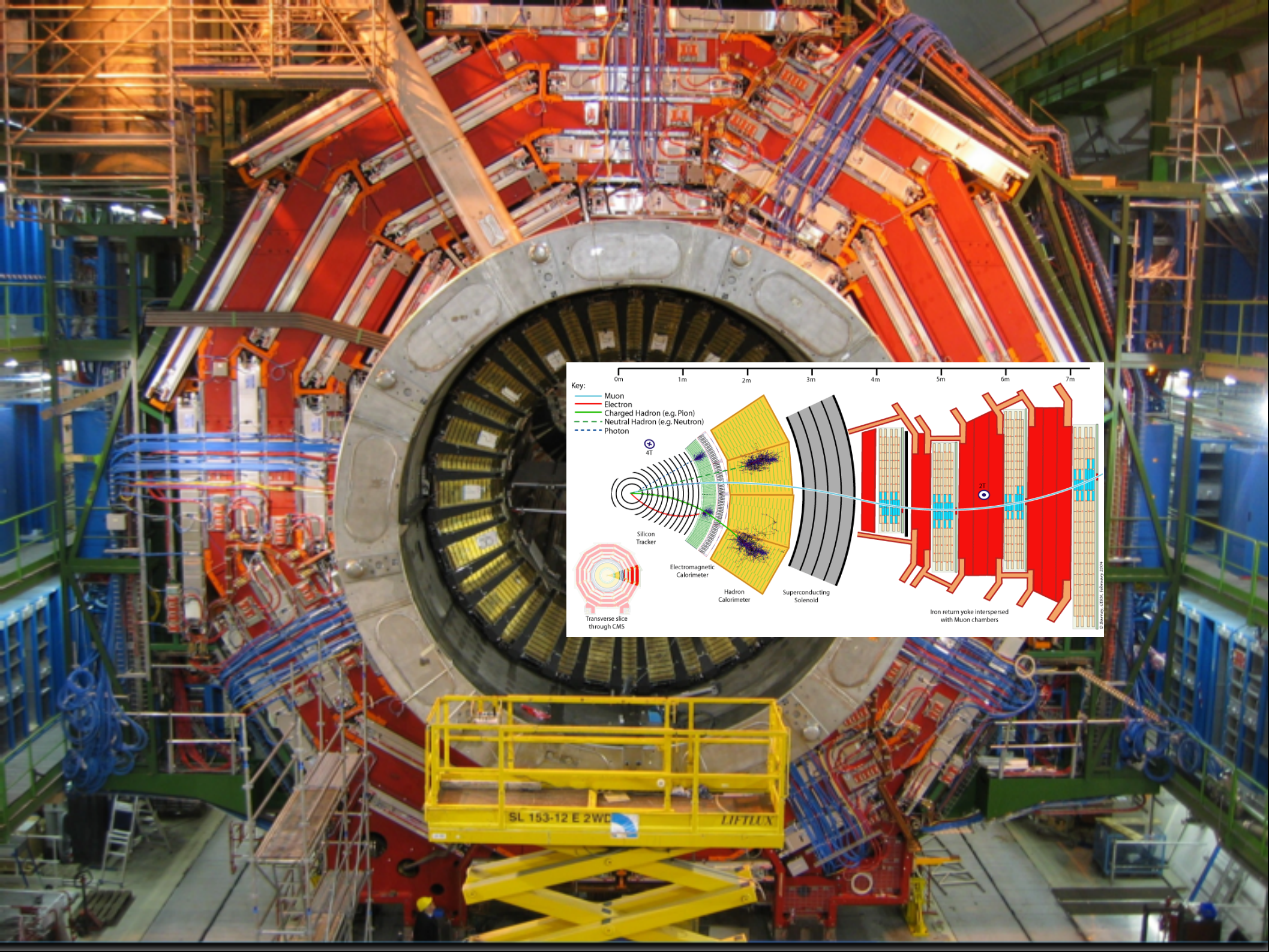


I Rivelatori

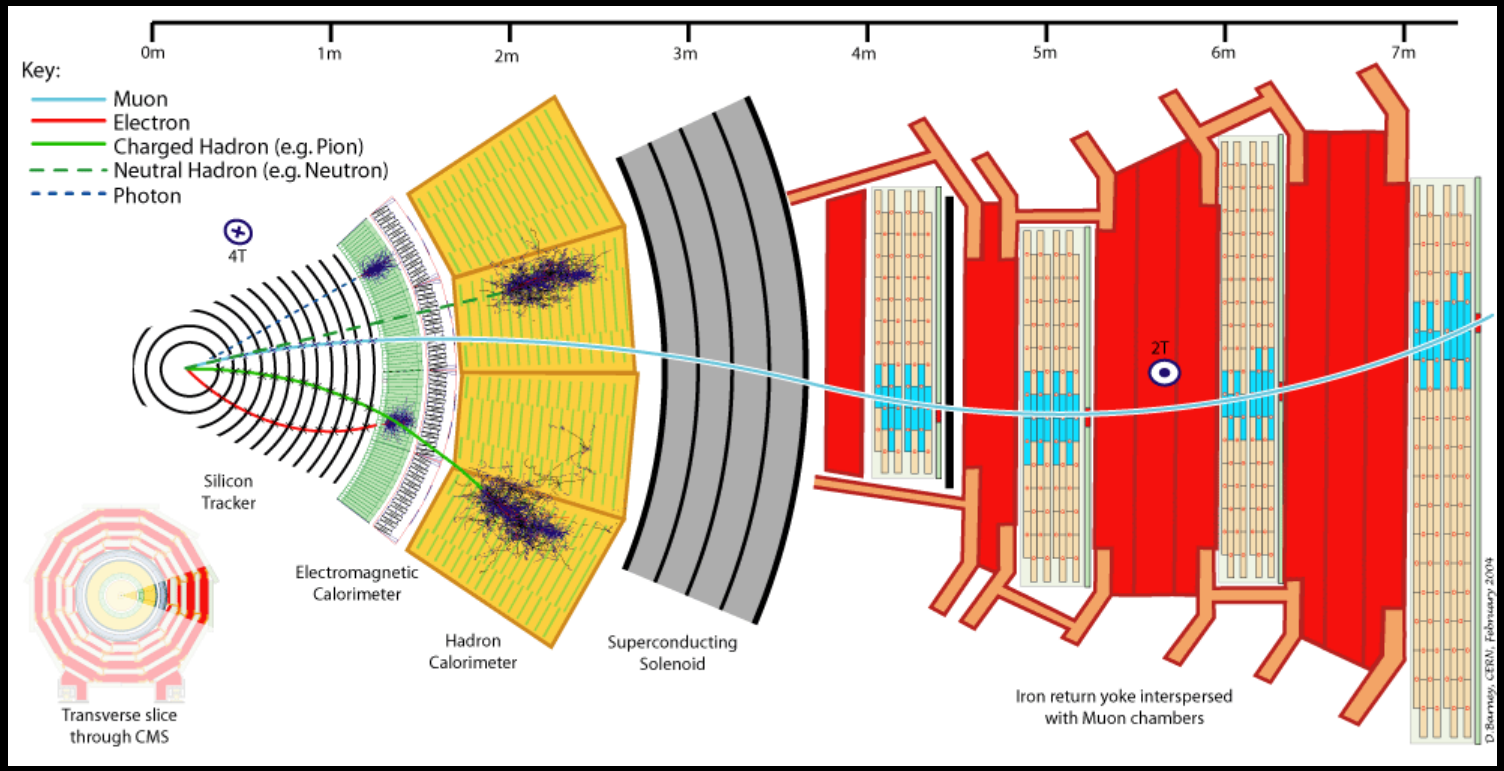



ATLAS

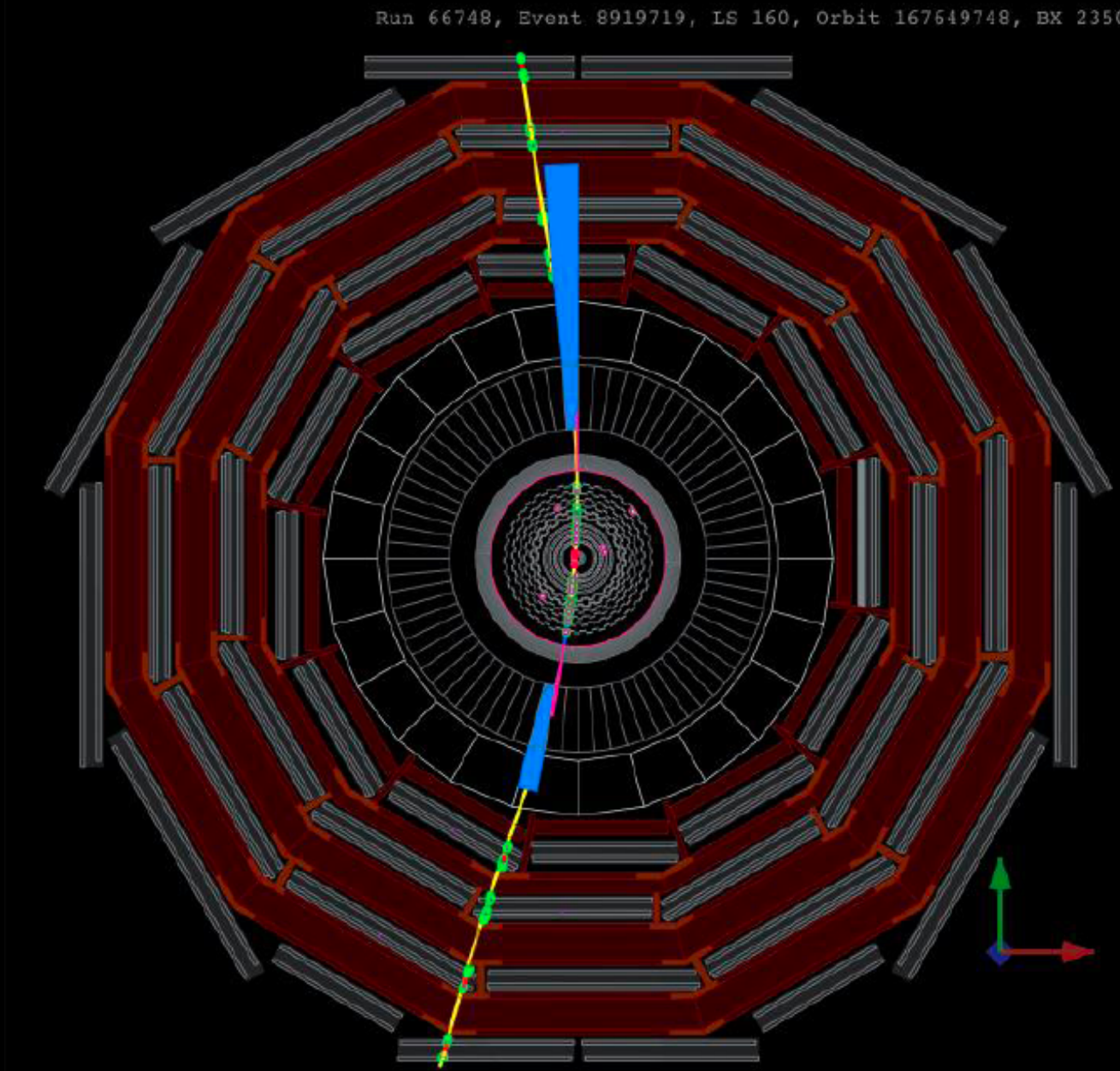

CMS
SL 153-12 E 2WD
LIFTLUX


0m
1m
2m
3m
4m
5m
6m
7m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon
4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
Transverse slice through CMS
SL 153-12 E 2WD
LIFTLUX

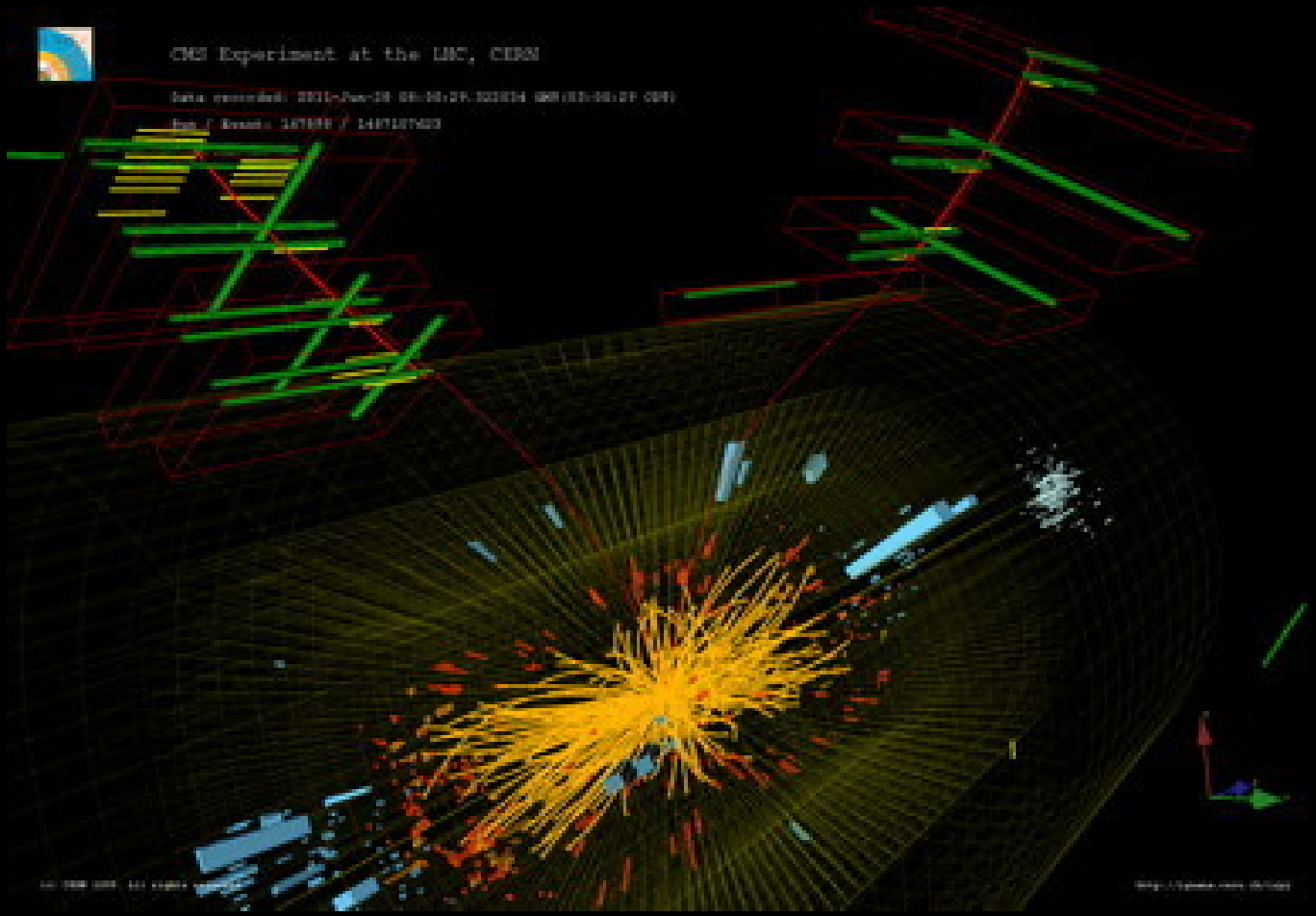
Identificazione di Particelle in CMS



Un caso facile



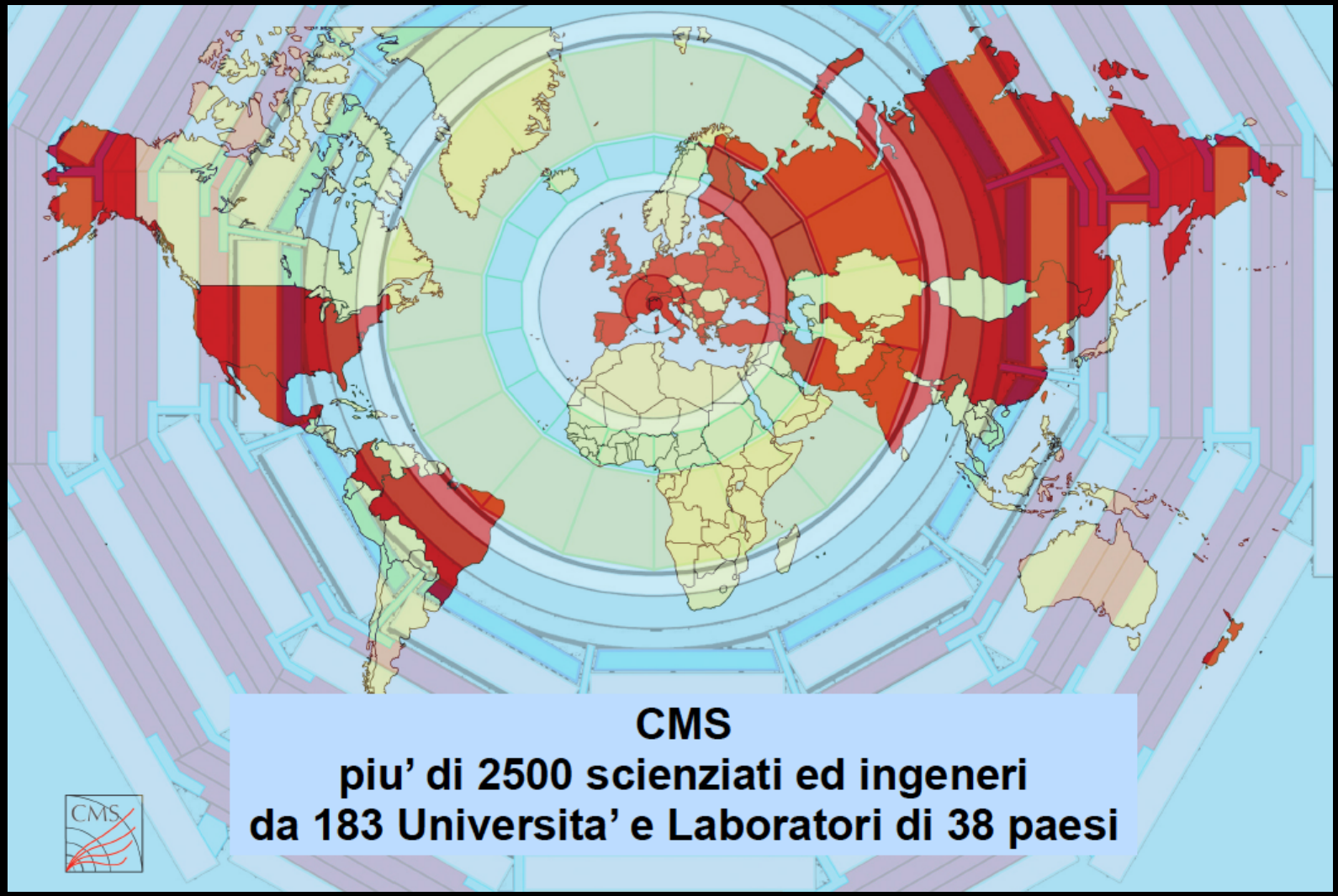
Un caso piu' tipico



Come si Misura

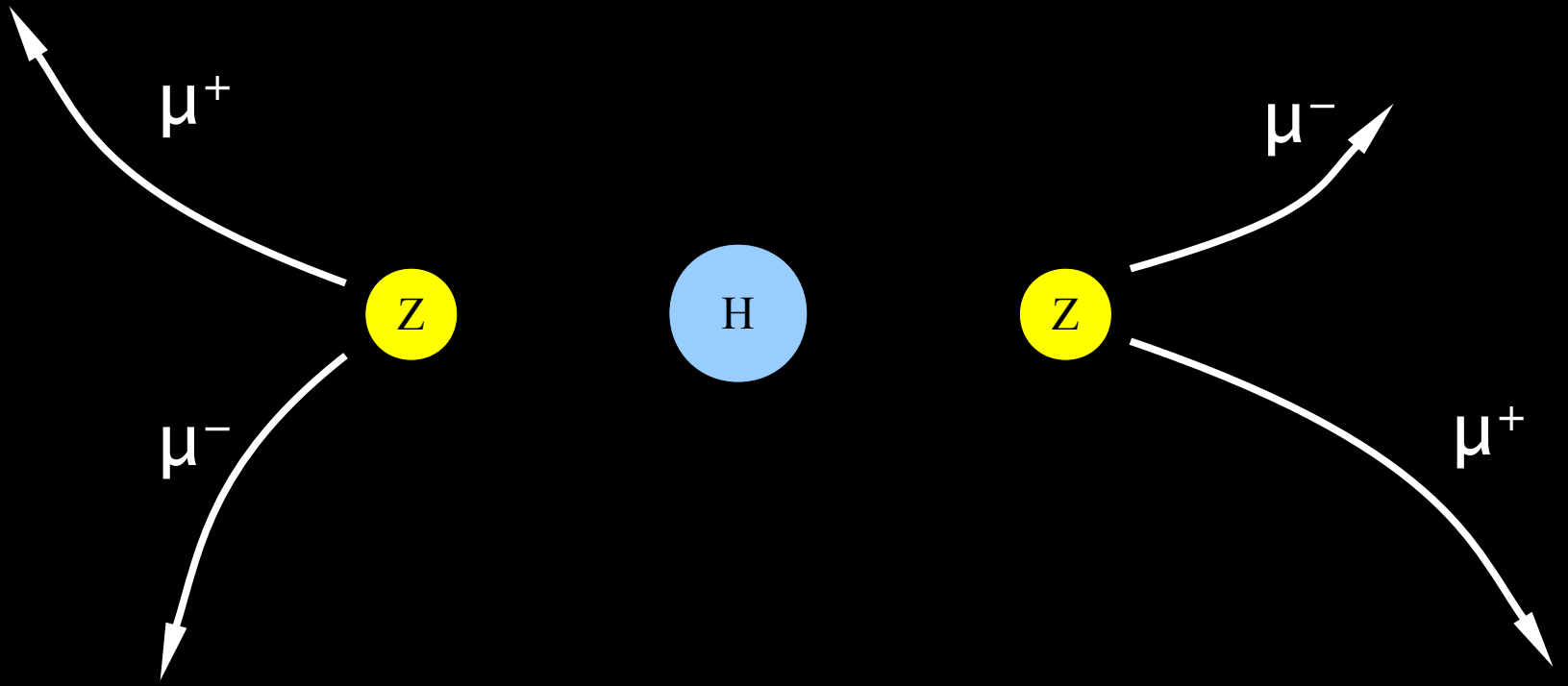
- osserva tutte le collisioni (40 milioni "foto"/sec)
- preselezione "al volo", filtra 100 mila ev/sec (reiezione eventi inutili)
- secondo filtro (50000 CPU al lavoro), 300 ev/sec scritti su disco : 3 milioni DVD / anno
- eventi distribuiti in tutto il mondo (500 Gbit/sec)
- fisici di tutto il mondo studiano (analizzano) gli eventi

LHC : World Wide Work



Le Risonanze

- Molte particelle (tra cui l'Higgs ?) decadono in tempi brevissimi (~10^{-24} s)
- Possiamo inferirne la presenza osservando i prodotti di decadimento e utilizzando la relazione massa – energia di Einstein:



$$M(h)c^2 = E(\mu_1) + E(\mu_2) + E(\mu_3) + E(\mu_4)$$

Padri e figli

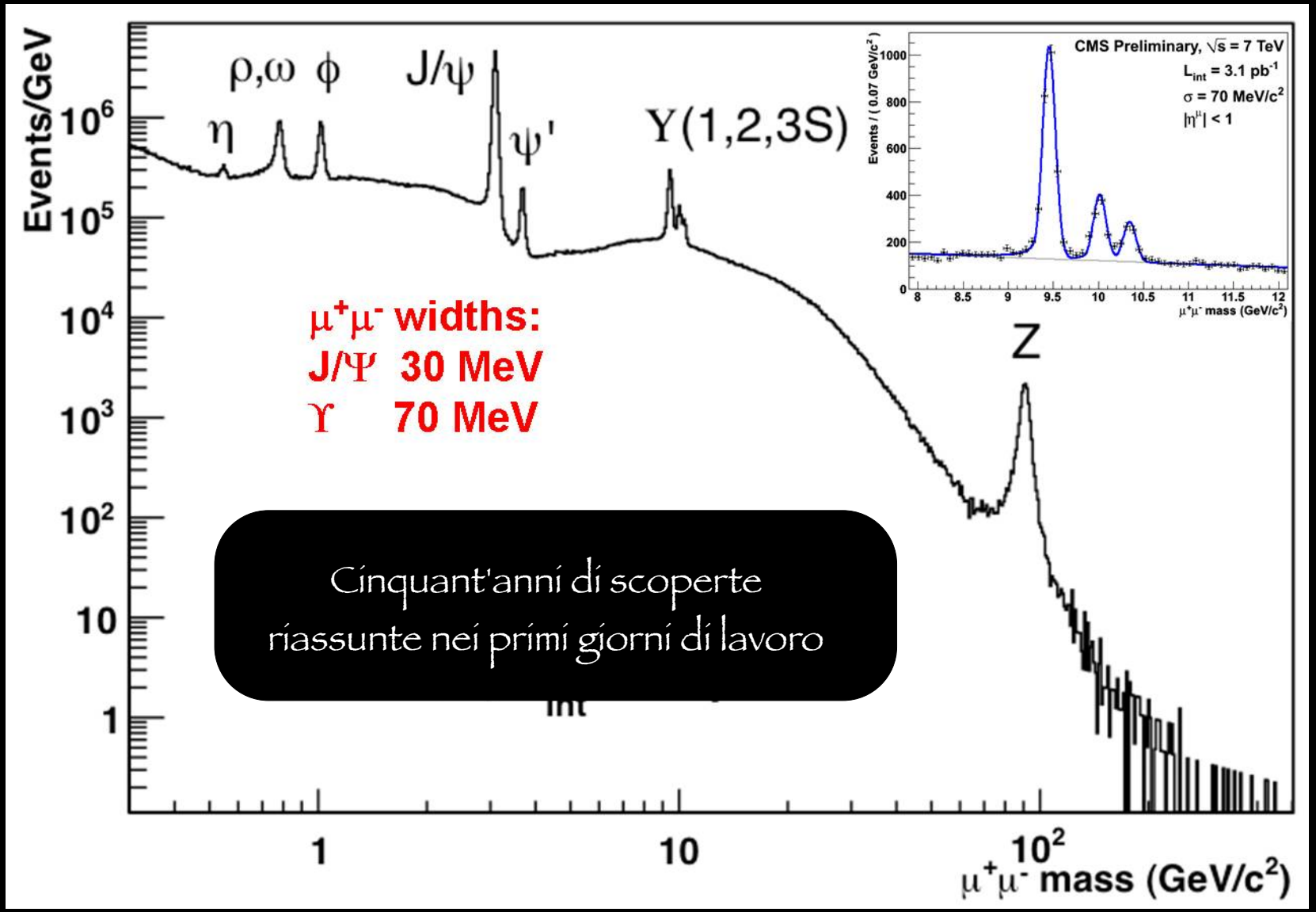
un po' come cercare dalle caratteristiche di un insieme di persone

Padri e figli

un po' come cercare dalle caratteristiche di un insieme di persone

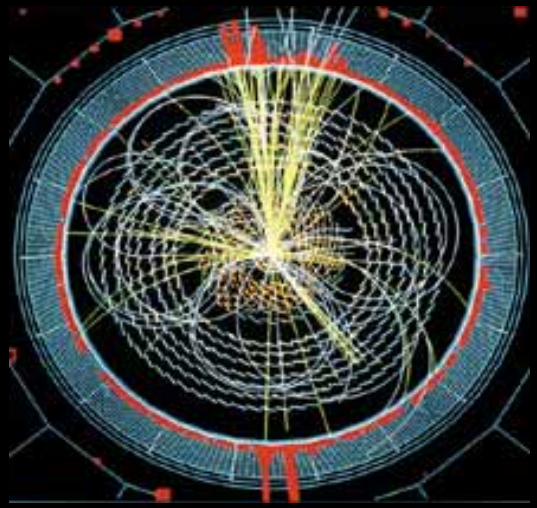
... il genitore comune

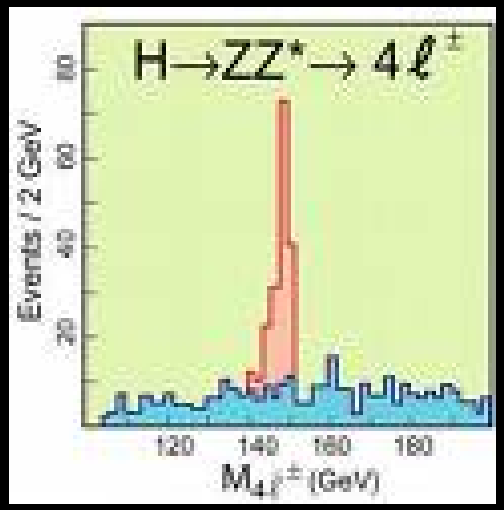
Risonanze in $\mu^+\mu^-$ a CMS

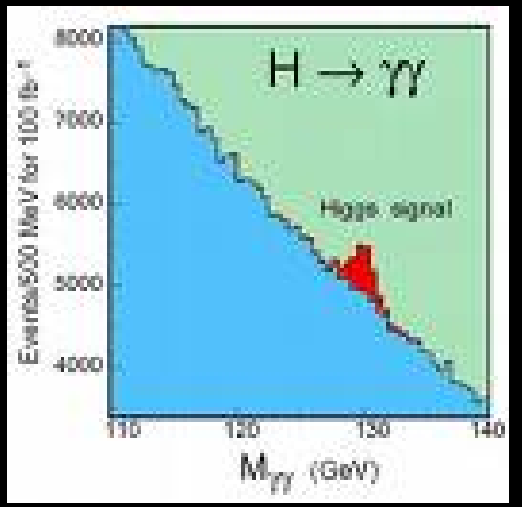


La Ricerca dell'Higgs

- La ricerca e' preparata con studi sulle simulazioni
- Il colore distingue il segnale (h) dal rumore (combinazioni casuali)
- ... ma nella realta' nessuno ci "colora" gli eventi





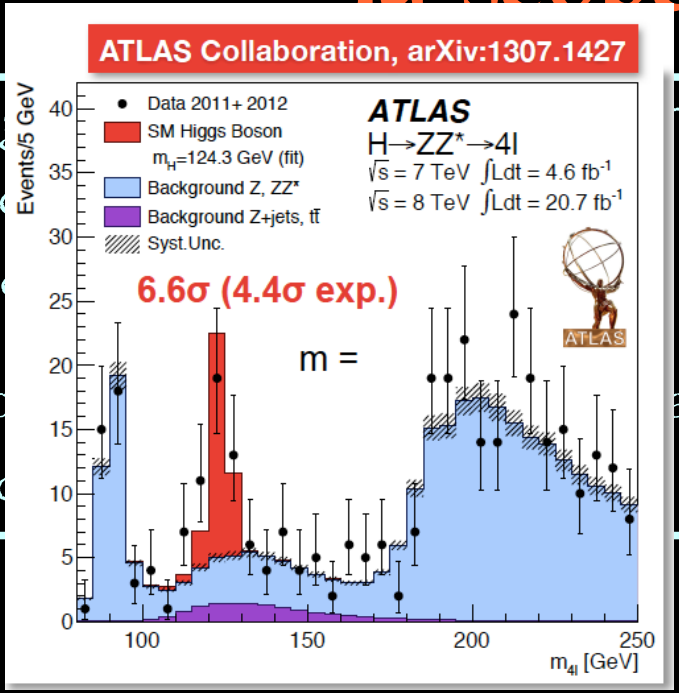


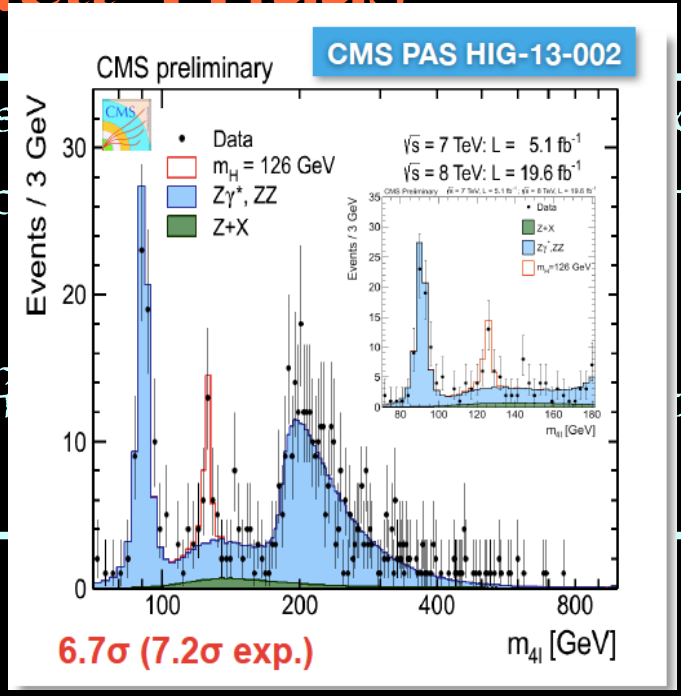
La scoperta dell'Higgs

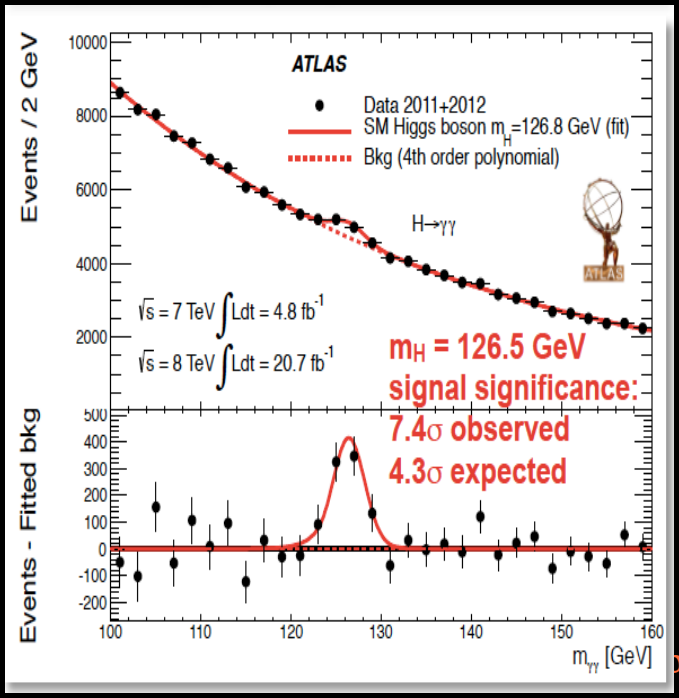
- Luglio 2012 : ATLAS e CMS annunciano simultaneamente la scoperta di una nuova particella di massa m=125 GeV con caratteristiche compatibili con quelle del BOSONE DI HIGGS
- L'osservazione e' confermata dall'analisi finale, basata su tutti i dati raccolti fino a Dicembre 2012

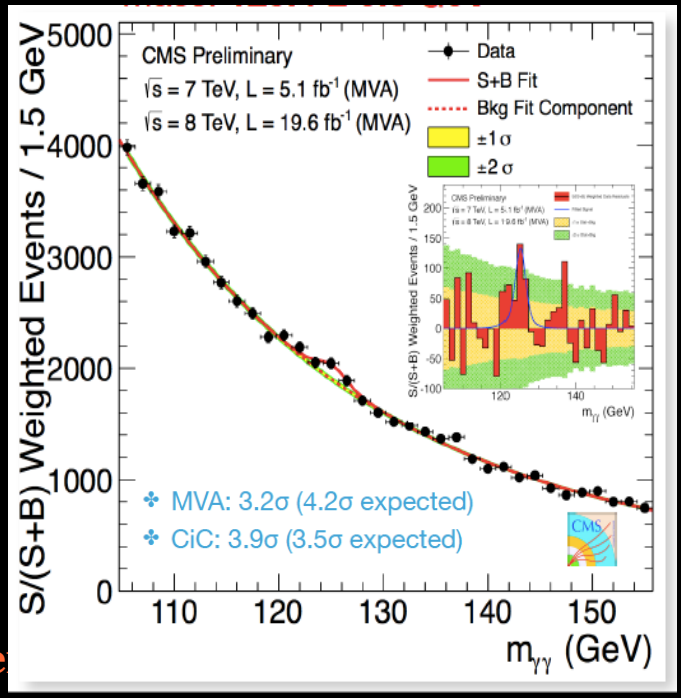
La scoperta dell'Higgs

- Lu… nunciano s… di una nu… GeV con c… n qu… all'analisi f… colti fin…



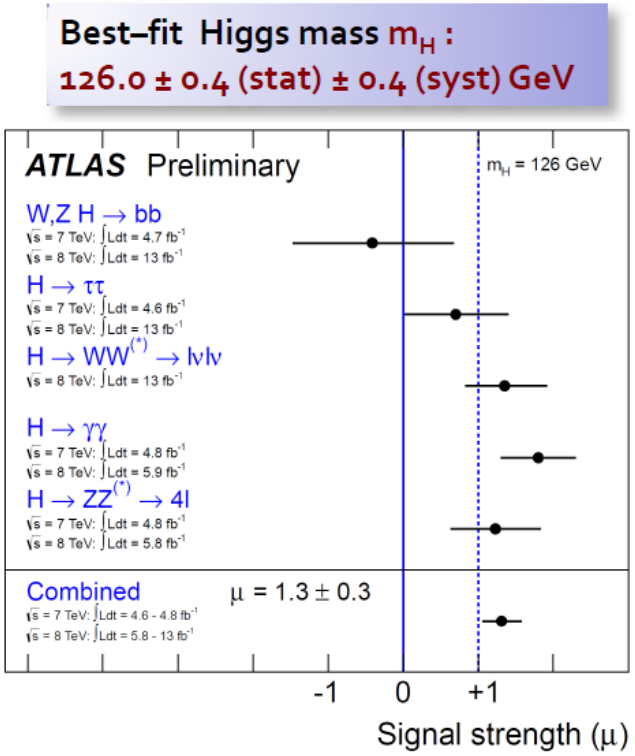




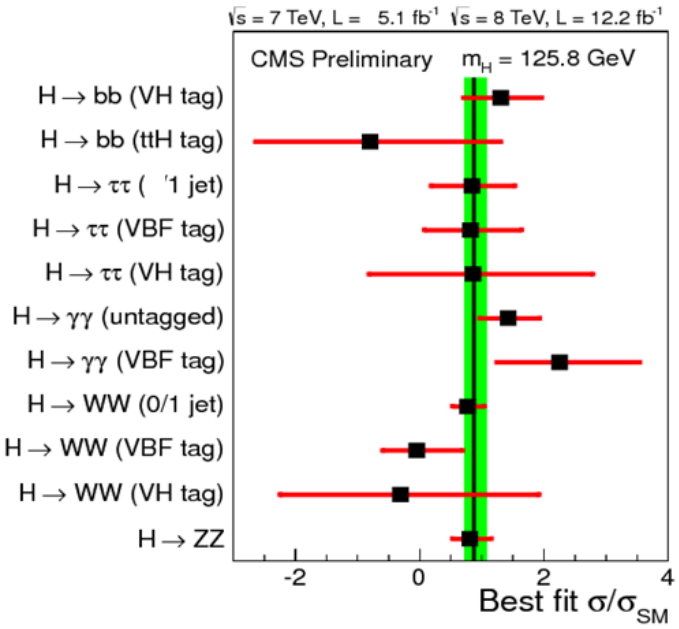


Proprieta' della nuova particella

- Tutte le misure sono consistenti con le predizioni del Modello Standard per il Bosone di Higgs



- M=125.8 ±0.4 (stat) ± 0.4 (syst) GeV



- σ/σ_{SM}=0.88±0.21

Implicazioni

The Nobel Prize in Physics 2013
François Englert, Peter Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013

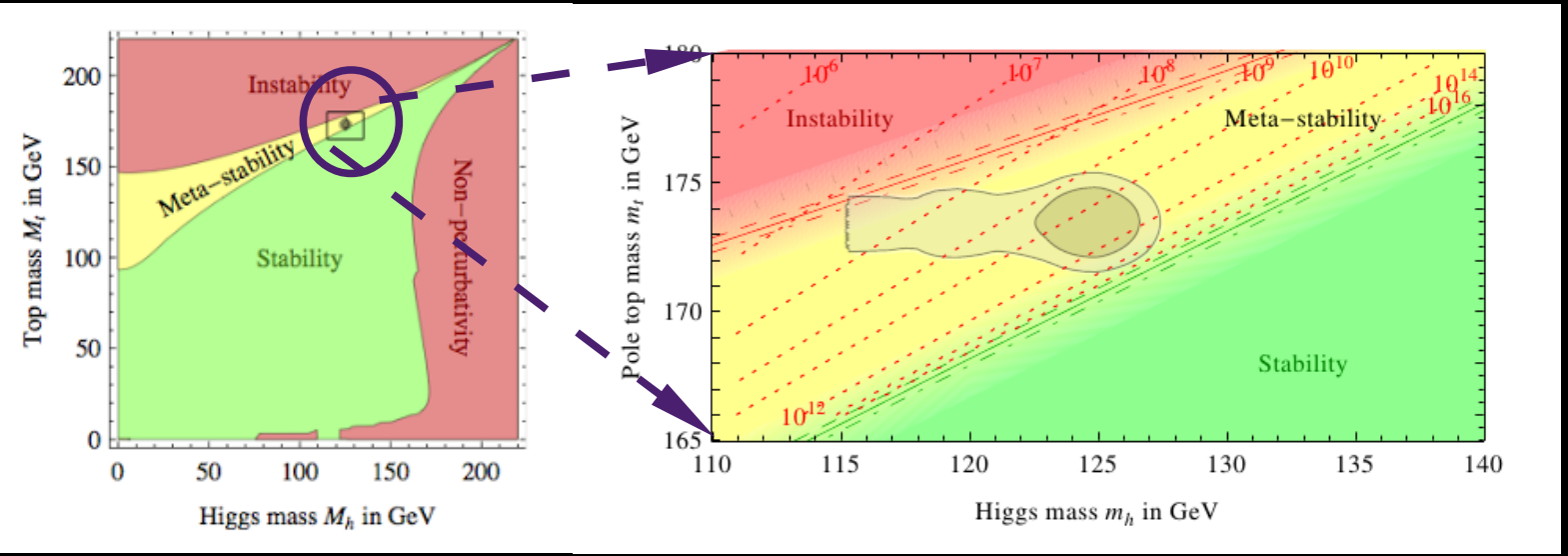
Photo: A. Mahmoud
François Englert

Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

Altre Implicazioni

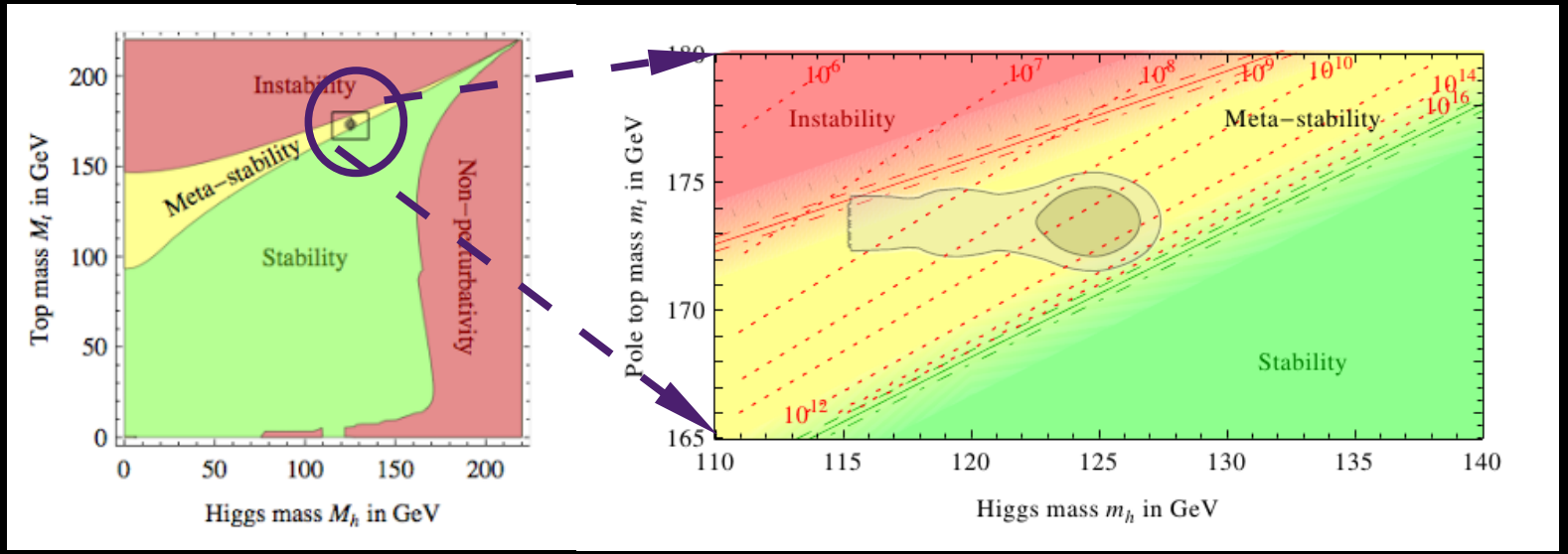
- L'Higgs permea l'universo e lo caratterizza.



- Il nostro universo e' metastabile

Altre Implicazioni

- L'Higgs permea l'universo e lo caratterizza.



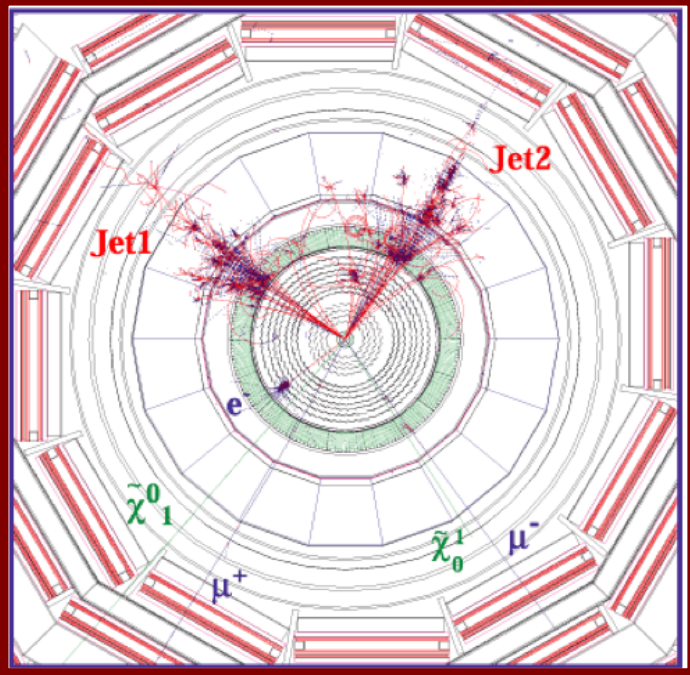
- Il nostro universo e' metastabile
- ... tra 13 miliardi di anni avra' luogo una nuova transizione di fase
- ... e l'universo collassera' ...

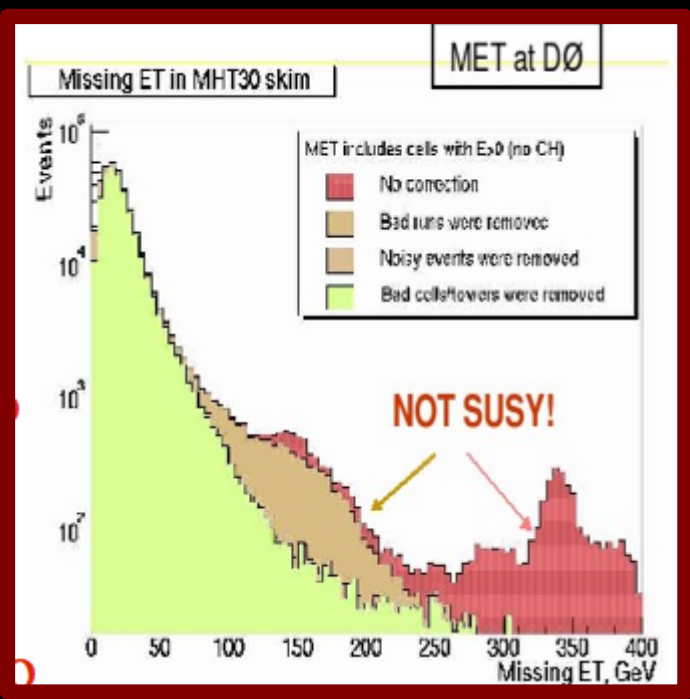
... a meno che ...

- ... non si manifestino nuovi fenomeni:
  - Supersimmetria
  - Extra dimensioni
  - Technicolor
  - Higgs : condensato di fermioni

Ricerca di Materia Oscura

- Oscura : non interagisce con la materia ordinaria
- Attraversa il rivelatore senza lasciare traccia di se'
- Allora non si bilancia l'energia totale:
  - sommo tutto quel che vedo
  - calcolo la massa totale, l'energia totale (nel piano trasverso) e vedo se manca qualcosa
- In pratica e' difficile:
  - neutrini
  - il rivelatori ha dei buchi (cavi, elettronica non funzionante)



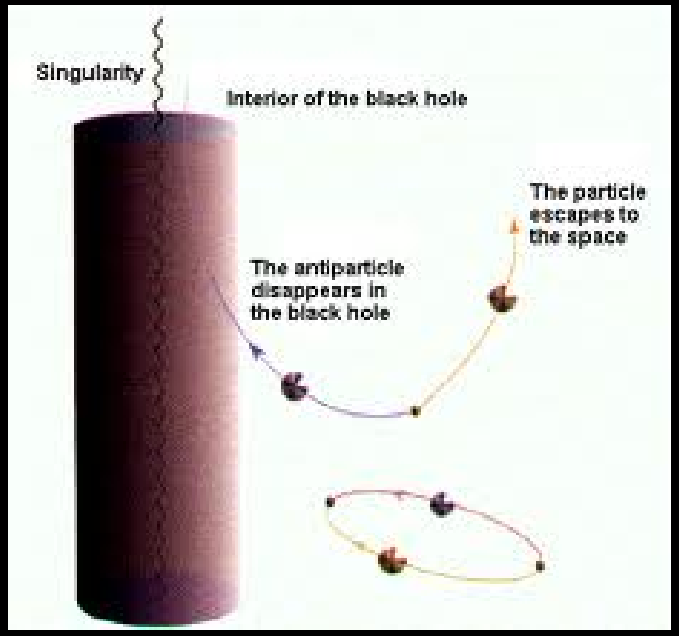


Altre Ricerche

- particelle pesanti stabili
- particelle a lunga vita media che si incagliano nel rivelatore
- Buchi neri
    - E come li vediamo ?
    - Di seguito tre possibilita'

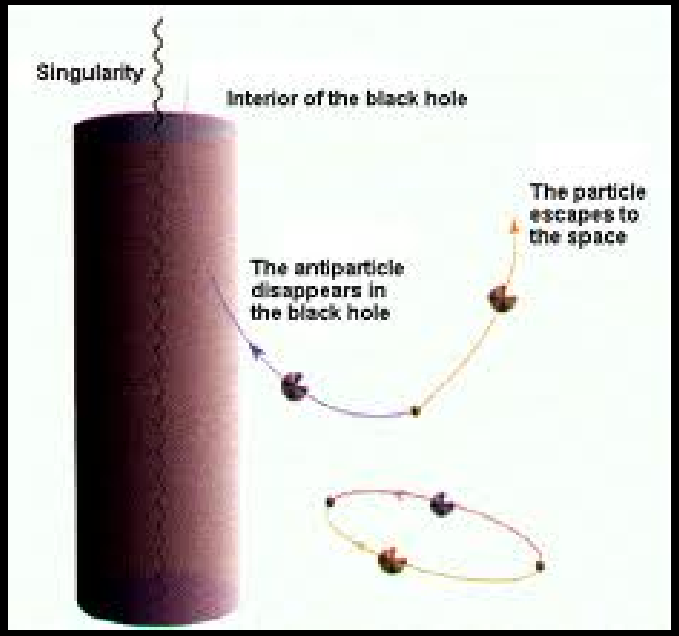
Produzione e manifestazione di un buco nero

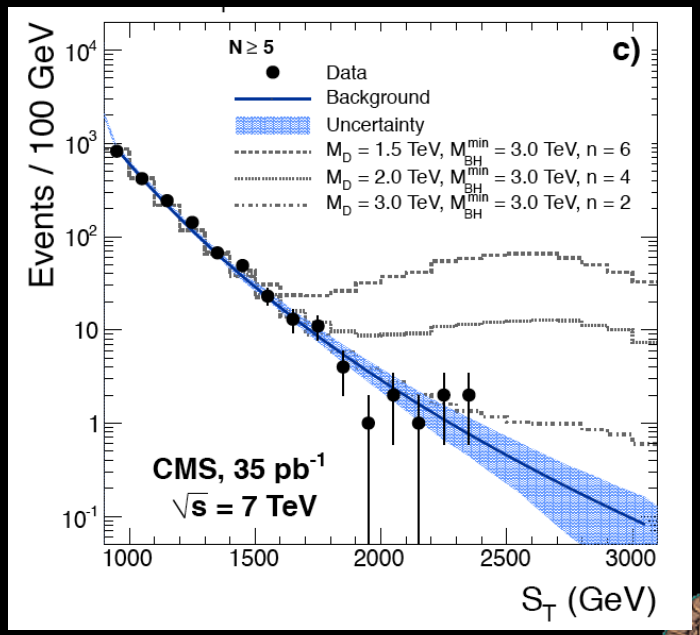
- Teorie con extra-dimensioni prevedono una produzione relativamente abbondante
- Il buco nero evapora (radiazione di Hawking) emettendo isotropicamente particelle



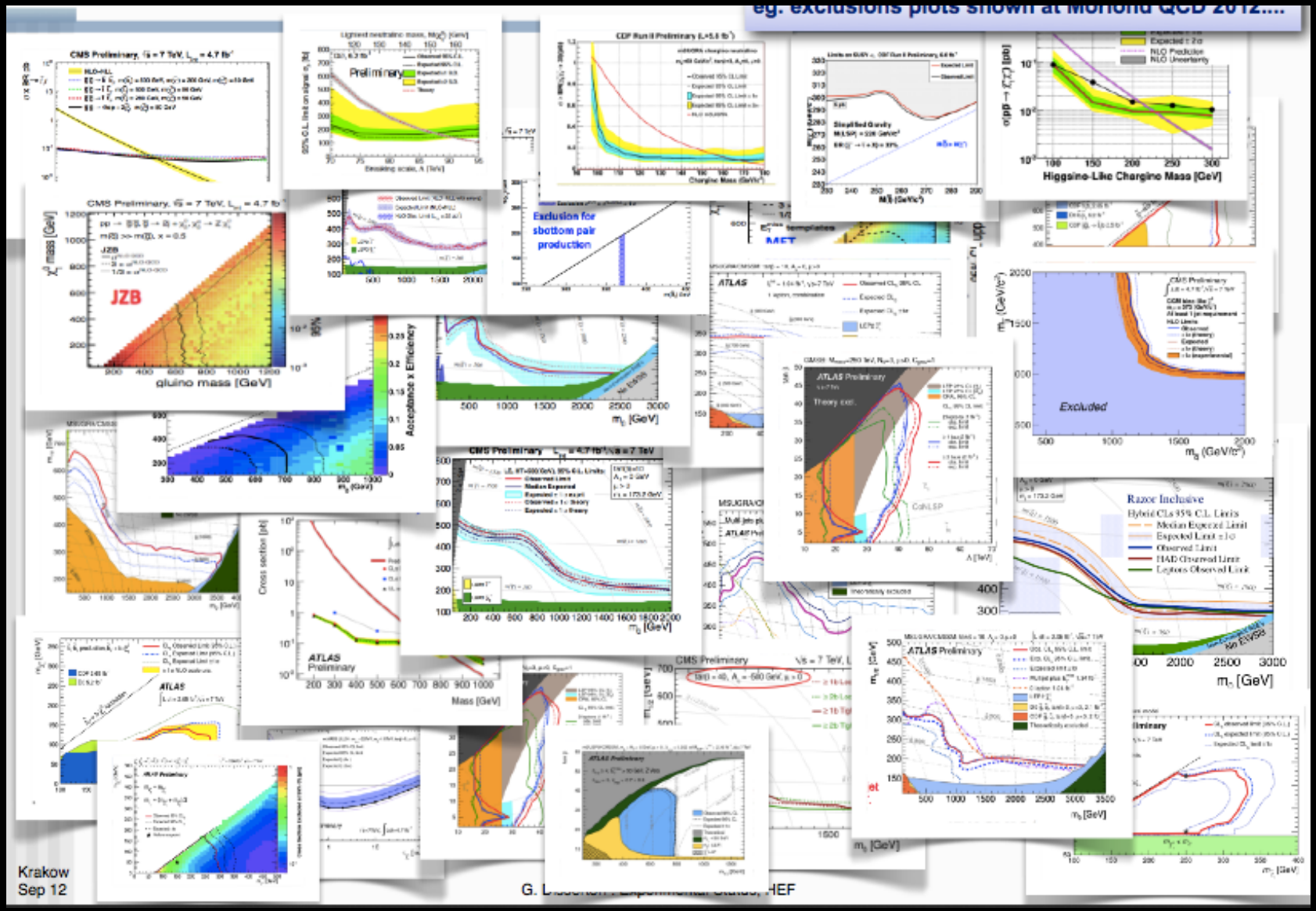
Produzione e manifestazione di un buco nero

- Teorie con extra-dimensioni prevedono una produzione relativamente abbondante
- Il buco nero evapora (radiazione di Hawking) emettendo isotropicamente particelle
- Segnale : grandi emissioni di energia, distribuita democraticamente tra molte particelle

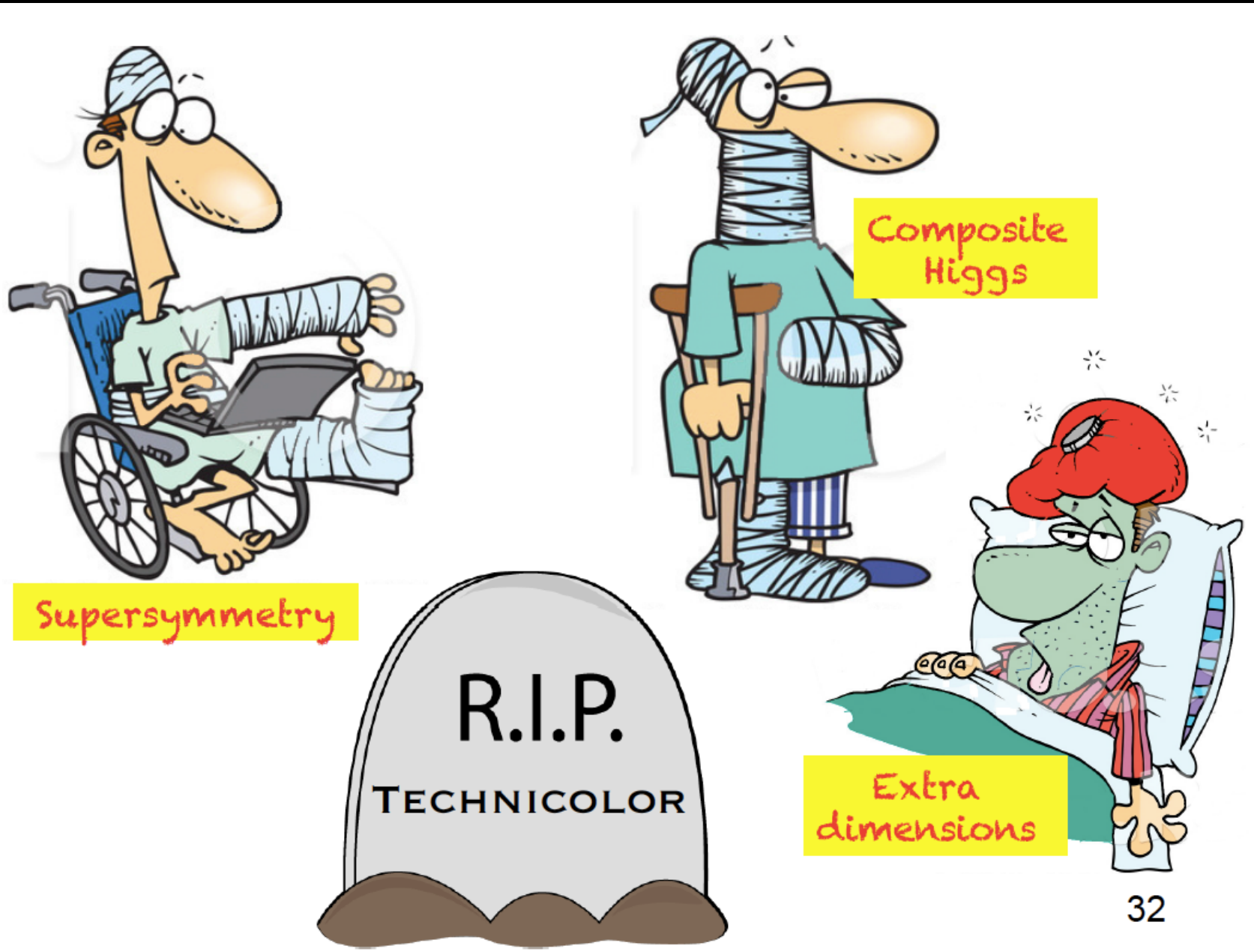




Molte novita' abbiamo cercato ...

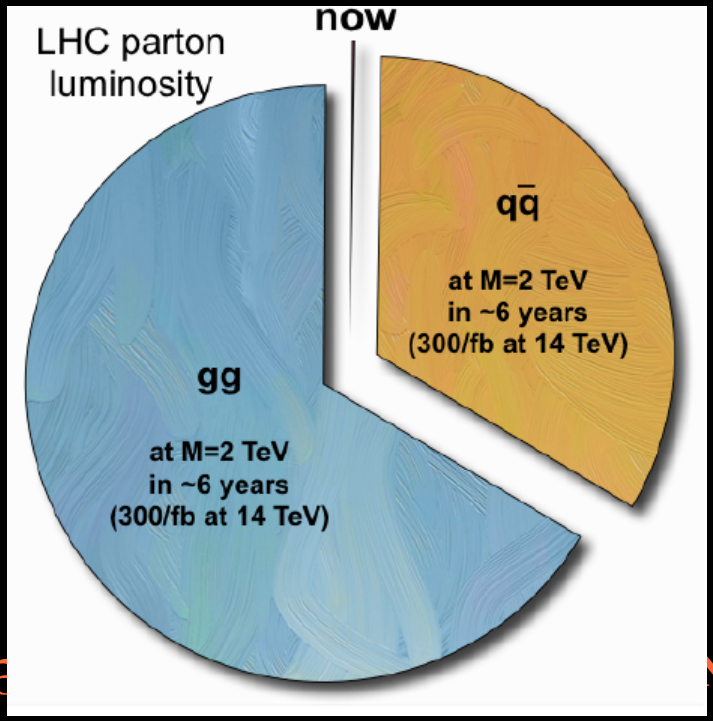


... ma nulla e' emerso



... tuttavia ...

- LHC finora ha operato a meta' della sua potenza (4+4 TeV)
- Ora e' in fase di sviluppo (rivelatori : manutenzione)
- Marzo 2015 -> 2020 : riprende operazioni a 6.5+6.5 TeV, accumula 15 x eventi raccolti finora
- Aumento esponenziale della capacita' d'indagine



Venit iam carminis aetas

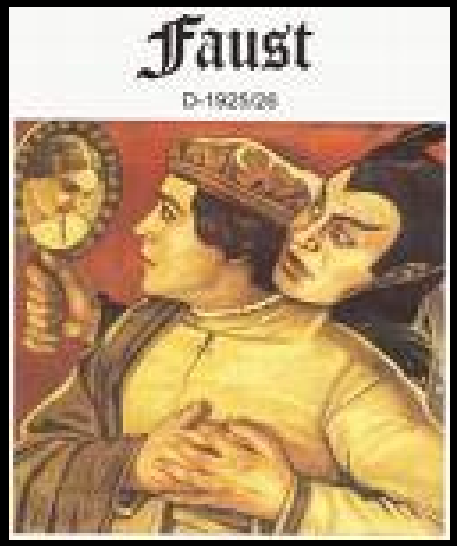
- Dopo una lunga fatica, e' iniziata l'era di LHC
- La macchina e gli esperimenti funzionano alla grande
- Finora nessuna sorpresa ...

Venit iam carminis aetas

- Dopo una lunga fatica, e' iniziata l'era di LHC
- La macchina e gli esperimenti funzionano alla grande
- Finora nessuna sorpresa ...
- ... ne' ce ne aspettavamo
- L'avventura incomincia ora, percio'

Hybris - Ate, ovvero a Largely Hypotetical Catastrophe

- 1999: Walter Wagner (avvocato), Otto Rossler (chimico fisico): le collisioni di LHC potrebbero produrre buchi neri che, contrariamente alle previsioni della Relativita' Generale, potrebbero non evaporare e assorbire rapidamente la terra



Osservazioni

Illazioni :

- Nessun calcolo basato su qualsivoglia modello

Risposta (svariate pubblicazioni,es J.Phys.G35:115004,2008.)

- L'Universo produce protoni (raggi cosmici) molto piu' energetici dei fasci di LHC che urtano sistematicamente la Terra, e sistemi molto piu' massivi (Sole, nane banche, stelle di neutroni)
- La stabilita' di nane bianche e stelle di neutroni esclude l'eventualita' che si verifichino le tre condizioni precedenti che metterebbero a rischio il nostro pianeta

Osservazioni

Illazioni :

- Nessun calcolo basato su qualsivoglia modello

Risposta (svariate pubblicazioni,es J.Phys.G35:115004,2008.)

- L'Universo produce protoni (raggi cosmici) molto piu' energetici dei fasci di LHC che urtano sistematicamente la Terra, e sistemi molto piu' massivi (Sole, nane banche, stelle di neutroni)
- La stabilita' di nane bianche e stelle di neutroni esclude l'eventualita' che si verifichino le tre condizioni precedenti che metterebbero a rischio il nostro pianeta

... la Terra e' ancora al suo posto ...