

Scoperta del bosone di **Higgs**: Come funziona un rivelatore di particelle.

Cesare Bini
Sapienza Università e INFN Roma

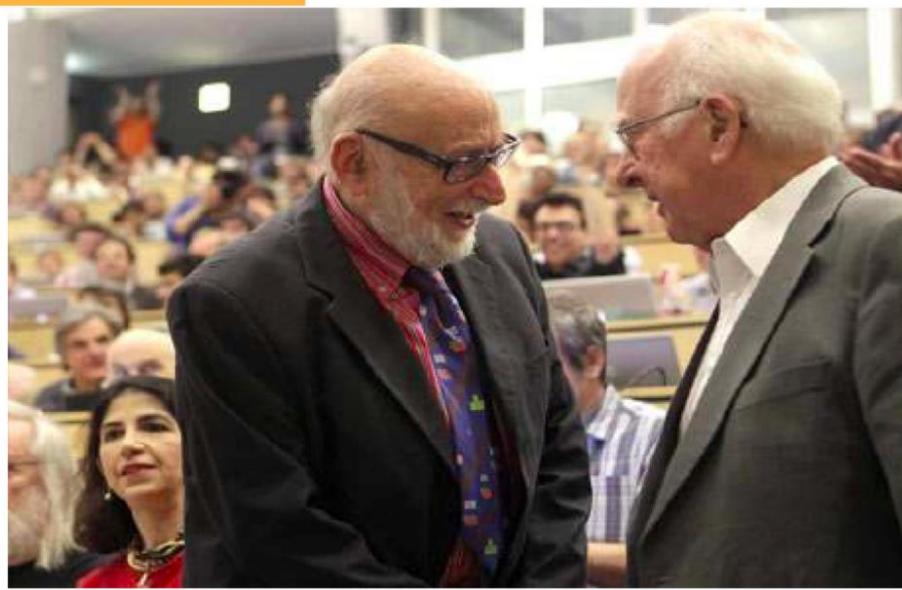
Di cosa parliamo oggi.

- Introduzione: 100 anni di Fisica Fondamentale
- Il Metodo: far “*scontrare*” cose e “*vedere*” cosa succede
- Perché *Higgs*: la questione della *Massa*
- La caccia al *Bosone di Higgs*
- Cosa rimane da fare adesso ?
- A che serve il Bosone di Higgs ? (ottima domanda)

Introduzione: 100 anni di Fisica Fondamentale

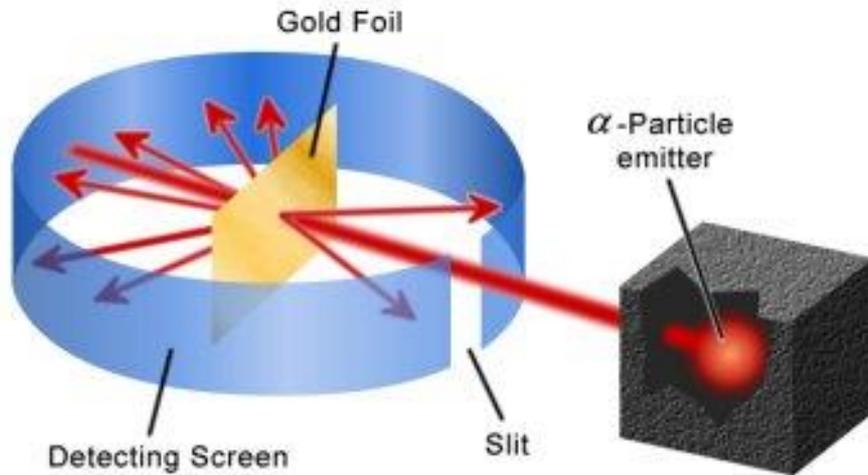
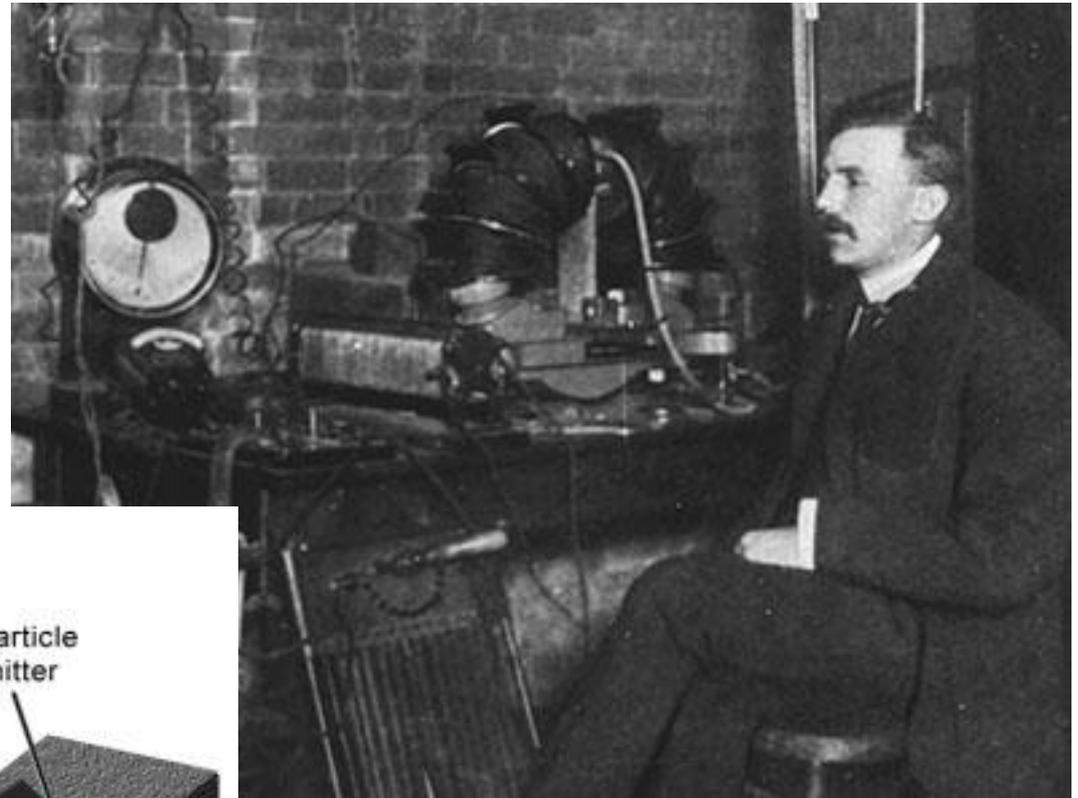


4 Luglio 2012



In realtà la storia era iniziata circa 100 anni prima. Tra il **1910** e il **1912** in Inghilterra un fisico neozelandese di nome Ernest Rutherford...

Questo celebre esperimento non è solo la *scoperta della struttura atomica*: è l'inizio i *una linea di ricerca nuova*.. che a distanza di 100 anni va ancora avanti !



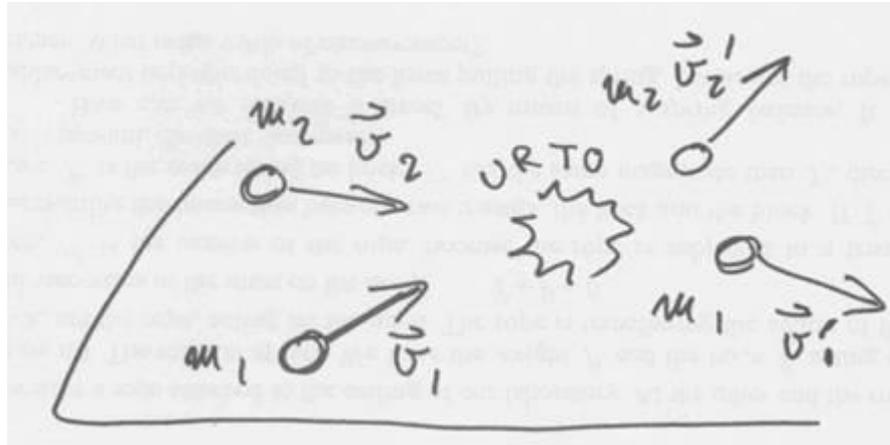
PROIETTILE
BERSAGLIO
RIVELATORE

Linea di ricerca verso cosa ? La “Fisica Fondamentale”

- Mi aspetto che la Natura si presenti in ultima analisi in modo semplice: una “*teoria del tutto*”, una sola equazione che descriva tutto
- Pochi mattoni elementari (le *particelle*) e poche interazioni fondamentali (le *forze*)

Il metodo: far “*scontrare*” cose e
“*vedere*” cosa succede.

Urti in “Fisica Classica”



“Pallina” 1 $\rightarrow m_1, v_1 \quad \rightarrow m_1, v'_1$

“Pallina” 2 $\rightarrow m_2, v_2 \quad \rightarrow m_2, v'_2$

Come calcoliamo v'_1 e v'_2 dati m_1, m_2, v_1 e v_2 ?

\rightarrow Conservazione della **quantità di moto mv** ;

\rightarrow Conservazione della **massa m** ;

\rightarrow Conservazione delle **energie cinetiche $mv^2/2$** (se l'urto è elastico)

Esempio: urto elastico – caso unidimensionale
 m_1 in moto con velocità v_1 m_2 è ferma.

$$m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad \longrightarrow \quad v'_1 = v_1 \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}$$
$$\frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad \longrightarrow \quad v'_2 = v_1 \frac{2m_1}{m_1 + m_2}$$

2 aspetti fondamentali in questa descrizione:

- (1) massa ed energia cinetica si conservano “separatamente”
- (2) risultato univocamente determinato

Nella fisica del '900 ambedue questi aspetti cadono.

La **Relatività Ristretta** fa cadere (1)

La **Meccanica Quantistica** fa cadere (2)

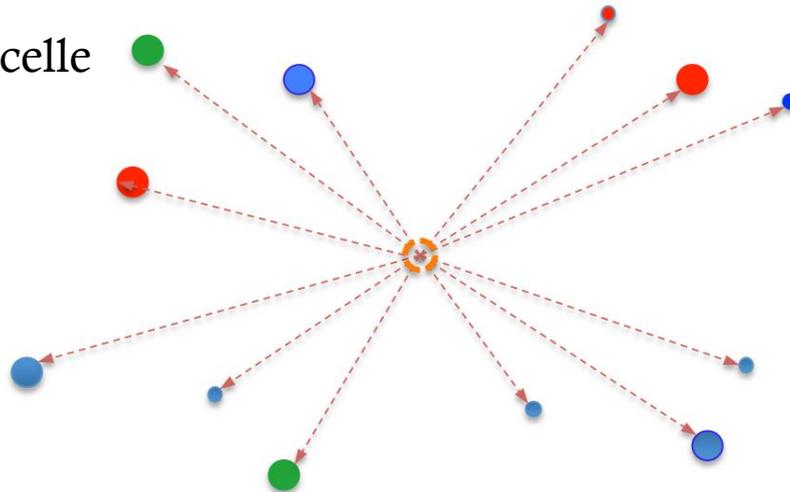
In una reazione NON si conserva la massa !

- *annichilazione* $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
massa(finale) \ll massa(iniziale), $M(\gamma) = 0$
- *annichilazione* $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
massa(finale) \gg massa(iniziale), $M(\mu) = 200 \times M(e)$

$E=mc^2$ al lavoro: da massa ad energia e/o da energia a massa



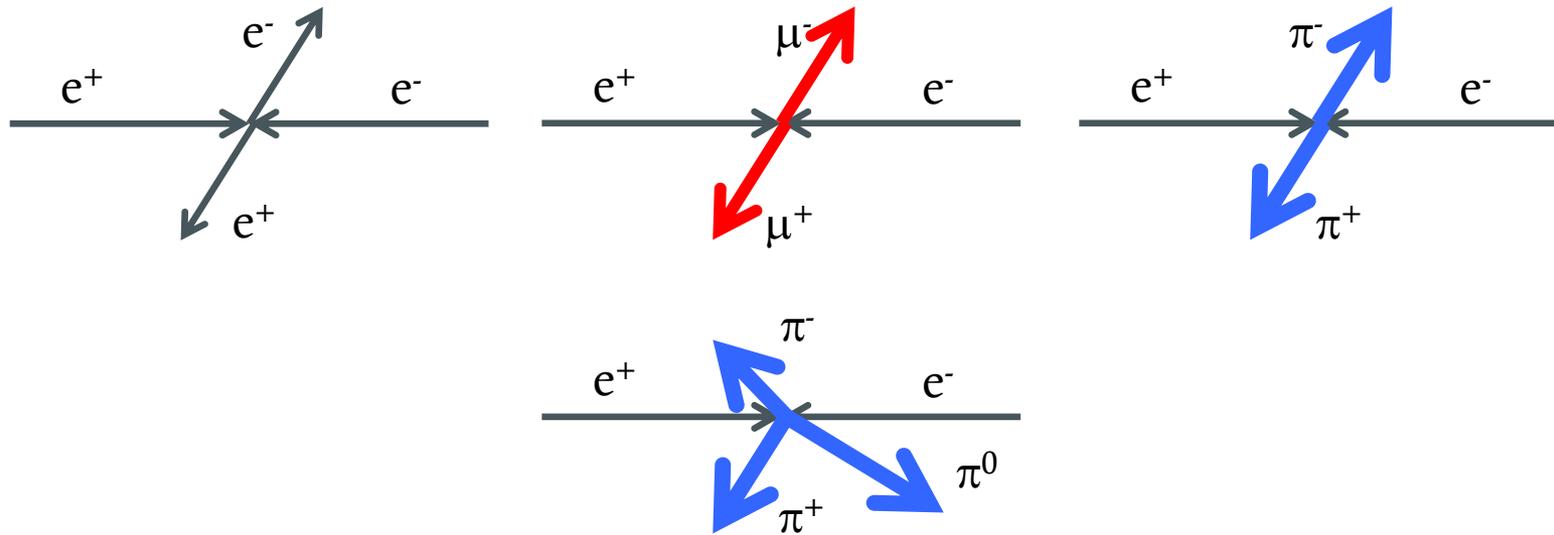
Inoltre: da 2 particelle
che si urtano,
possono
scaturirne
un numero
 $\gg 2$!



MA se conosco masse ed energie cinetiche delle due particelle che urtano, posso PREVEDERE quale sarà il risultato dell'urto ?

NO !

Posso solo calcolare la PROBABILITA' di un risultato o di un altro !



In ogni collisione e^+e^- “*tirano i dadi*” e scelgono in cosa trasformarsi...
La teoria permette di prevedere solo la probabilità di ciascun processo.

Con l'esperimento contiamo quante volte quel processo accade e ne misuriamo la frequenza.

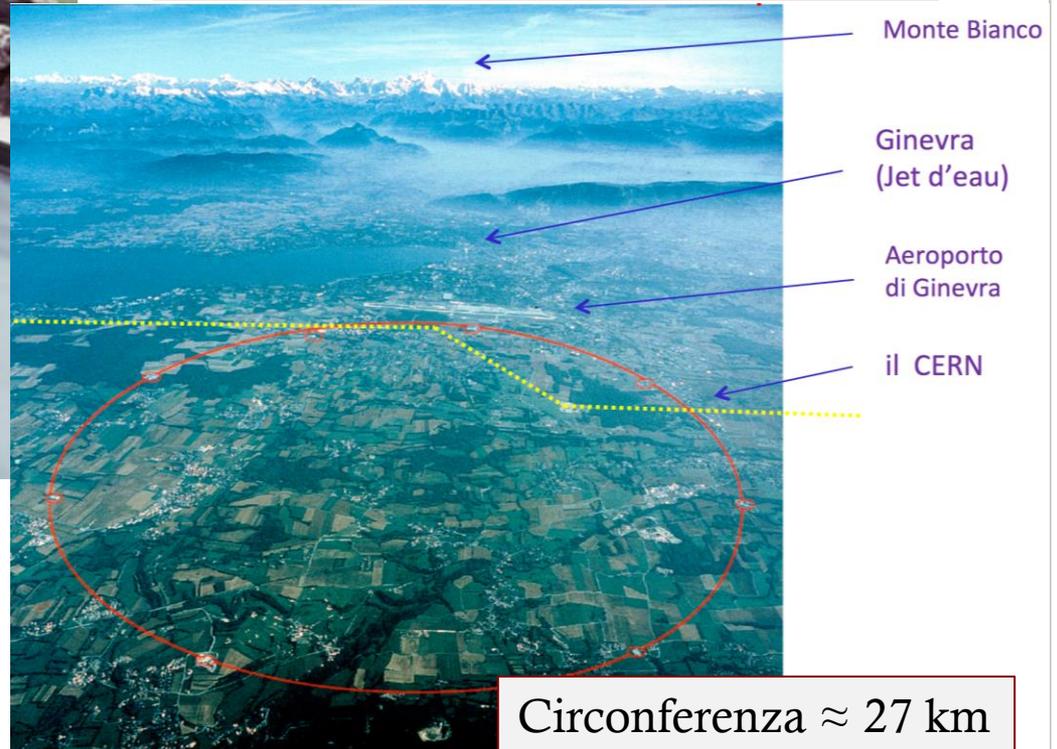
Accelerare particelle e farle *urtare*: questo è stato ed è lo strumento chiave della fisica fondamentale



Circonferenza ≈ 3 m

AdA @ Frascati:
primo “collisore” di elettroni
e positroni sviluppato negli
anni ‘60.

LHC @ CERN (Ginevra):
“collisore” gigante di protoni contro
protoni entrato in funzione nel 2009



Circonferenza ≈ 27 km

Perché acceleratori sempre più grandi ?

- Risposta: perché vogliamo avere fasci di particelle sempre più energetiche.
- 2 semplici formule: ($p \approx E_K$ per particelle ultra-relativistiche)

$$\Delta E_K = q\Delta V = qEL$$

$$R = \frac{p}{qB}$$

Per aumentare di ΔE_K l'energia cinetica di una carica elettrica q devo fornire grandi campi elettrici (E) in spazi molto lunghi (L)

Una carica elettrica q di quantità di moto p in un campo magnetico B si muove in un'orbita di raggio R

→ Servono grandi dimensioni, grandi campi elettrici e magnetici

Cosa ci spinge ad andare ad energie sempre più alte ?

Motivazione n.1

→ Energie più alte = dimensioni più piccole

Da **Rutherford** in poi: per studiare un “oggetto” di dimensione d occorre una sonda con lunghezza d'onda λ inversamente proporzionale a p

$$\lambda = \frac{h}{p} \gg d$$

Per “risolvere” un atomo devo quindi avere una sonda con

$$\lambda \sim 1 \text{ \AA} \rightarrow \text{raggi X}$$

Per “risolvere” un nucleo devo avere una sonda più energetica:

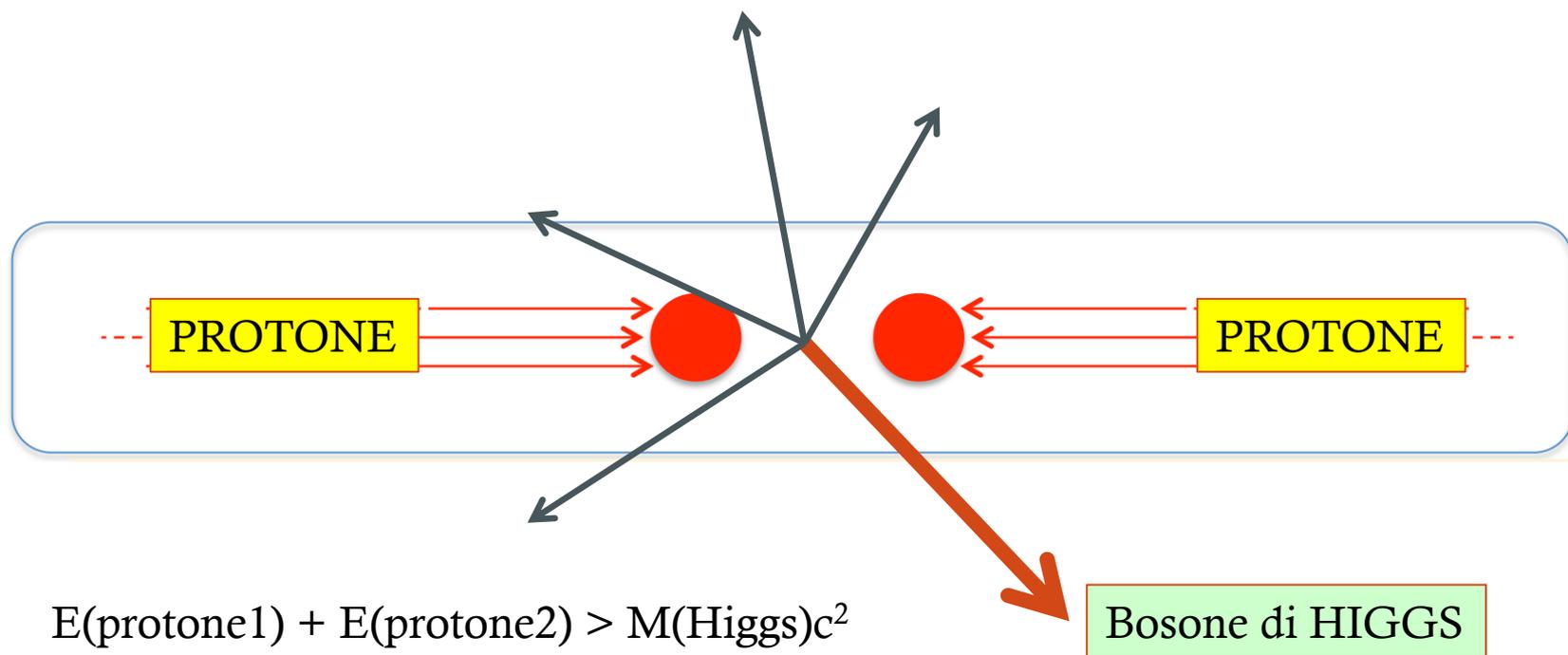
$$\lambda \sim 1 \text{ fm} \rightarrow p > 1 \text{ GeV}/c \text{ (servono gli acceleratori)}$$

SLAC, anni '60-'70 $p = 20 \text{ GeV}/c$: il protone non è puntiforme → **quark**

Cosa ci spinge ad andare ad energie sempre più alte ?

Motivazione n.2

→ Energie più alte = posso scoprire nuove particelle più pesanti (per esempio il bosone di Higgs)



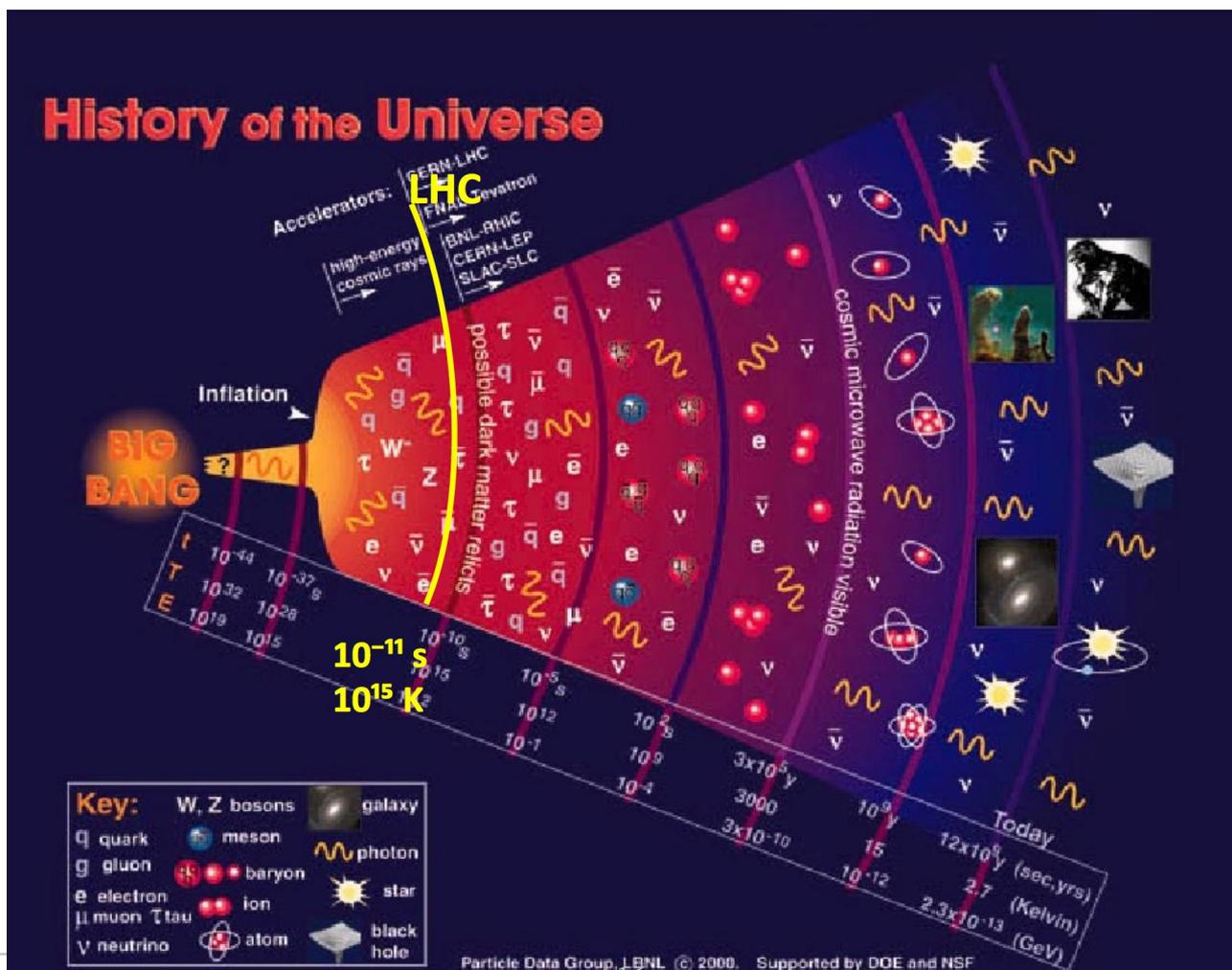
$$E(\text{protone1}) + E(\text{protone2}) > M(\text{Higgs})c^2$$

→ Salendo in energia posso produrre particelle più pesanti altrimenti inaccessibili !

Cosa ci spinge ad andare ad energie sempre più alte ?

Motivazione n.3

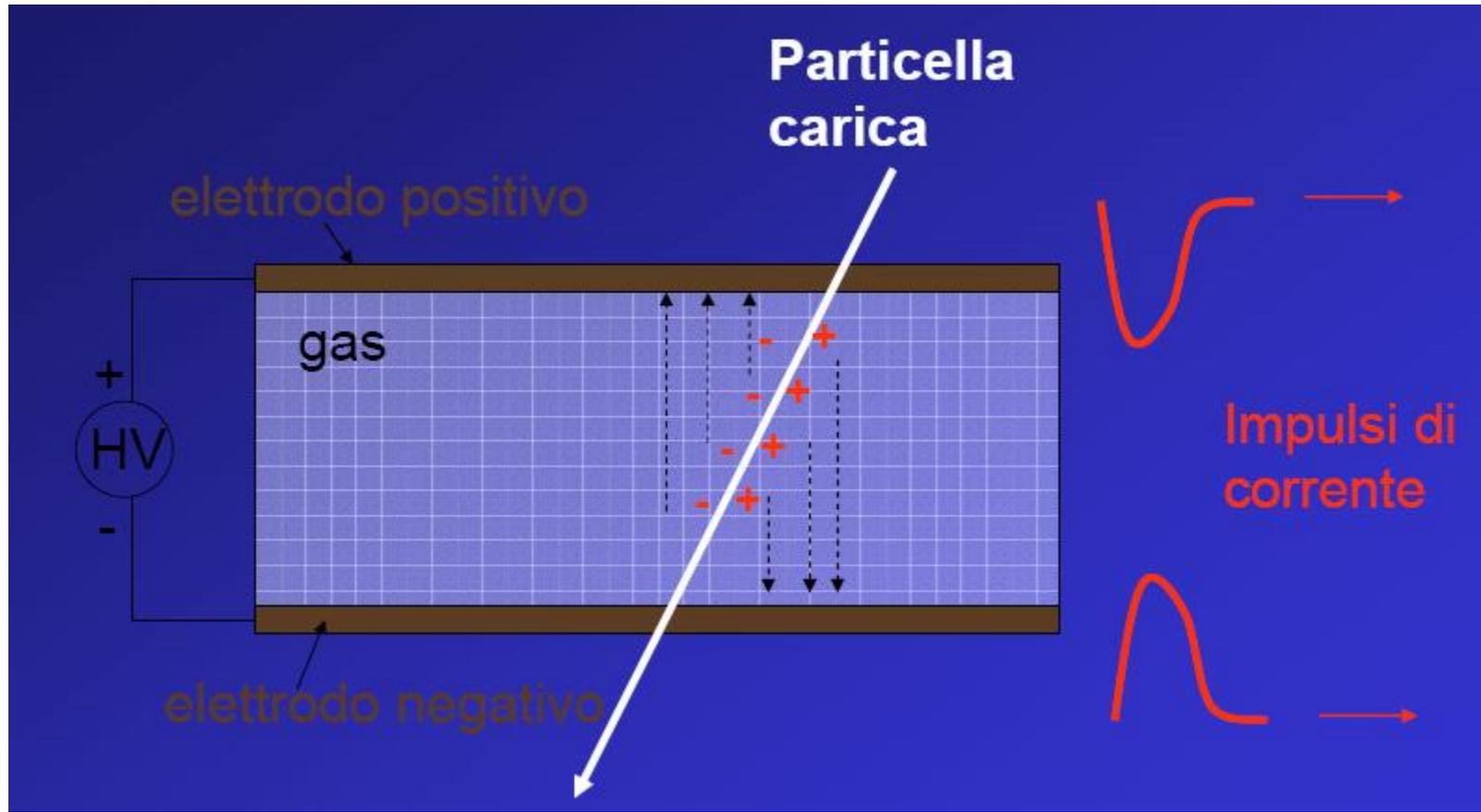
→ Energie più alte = indietro nel tempo...



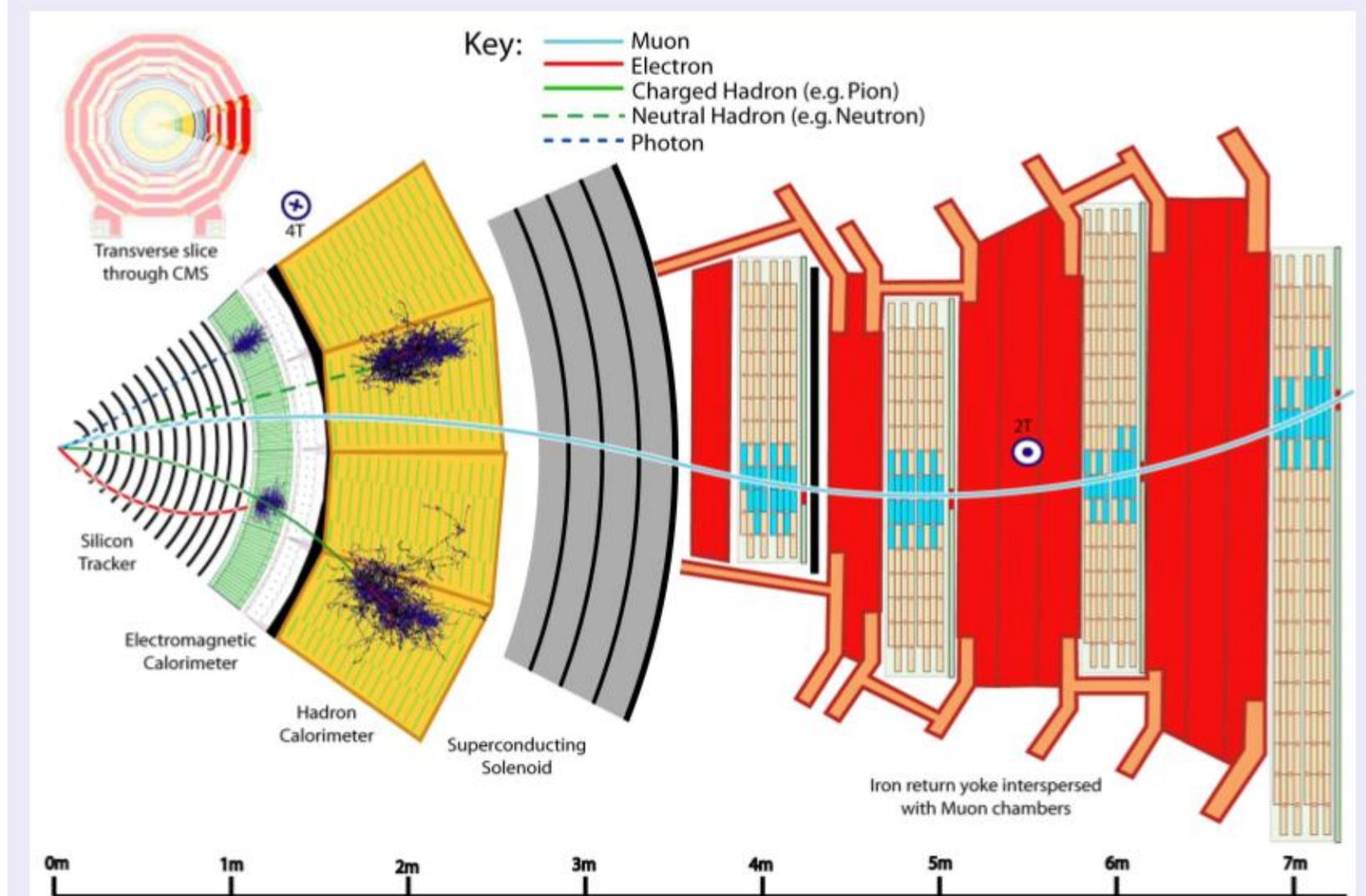
“Vedere” cosa succede: I rivelatori di particelle

- *Le particelle non si possono vedere al **microscopio**; il microscopio e' utile solo fino all'atomo.*
- Occorre trovare un materiale che, attraversato da una particella, “faccia qualcosa” che noi possiamo vedere:
 - ***Scintillazione** → osservazione di lampi di luce*
 - ***Ionizzazione** → carica elettrica accumulata*
 - ***Condensazione / Ebollizione** → goccioline / bollicine*
 - ***Aumento di temperatura, suono,....***

Il contatore Geiger (1913): il prototipo di tutti i rivelatori a ionizzazione



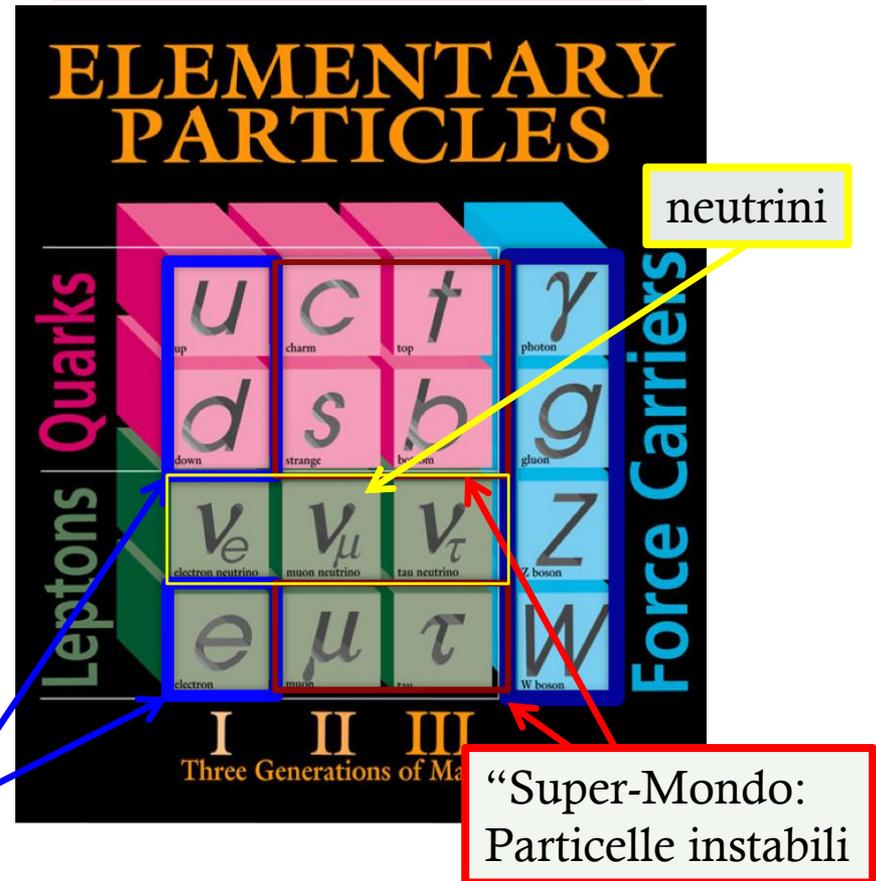
In un esperimento moderno lavorano insieme tanti rivelatori diversi, ognuno con un compito ben determinato...



Cosa abbiamo imparato ? (1)

- Cosa c'è di elementare nell'Universo ?
- Particelle:
 - **Quarks** (6 tipi diversi)
 - **Leptoni** (6 tipi diversi)
- Campi di Forze:
 - **Fotone** (campo elettromagnetico)
 - **W/Z** (campo nucleare debole)
 - **Gluone** (campo nucleare forte)
 - “**Gravitone**” (campo gravitazionale, ancora in alto mare...)

La nuova Tavola Periodica



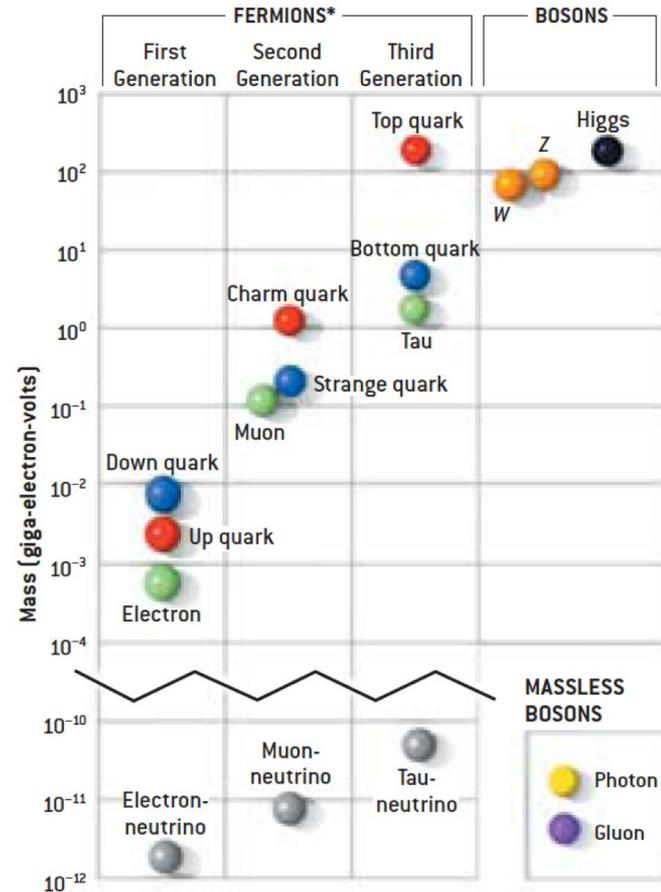
Cosa abbiamo imparato ? (2)

- Incrociando con i dati cosmologici
 - Espansione dell'universo
 - Radiazione di fondo
 - Abbondanza degli elementi
 - ...
- ➔ Modello del Big-Bang “caldo” con costante cosmologica Λ

Perché Higgs: la questione della MASSA

Come sono fatte queste particelle ?

- Ogni particella ha una proprietà che la distingue dalle altre: la sua **massa**. E' una proprietà che rompe la simmetria della teoria (e la “mette in crisi”).
- Masse molto diverse, almeno 12 ordini di grandezza. *Perché ?* Nessuno ha capito perché le masse delle particelle abbiano i valori che hanno.
- Ma sono numeri IMPORTANTI: se fossero anche di poco diversi l'Universo sarebbe diverso !



Ma che cos'è la massa ?

- **Massa Inerziale**

$$F = ma$$

E' l'attitudine di un corpo
a "resistere" alle sollecitazioni

- **Massa Gravitazionale**

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

E' l'agente della gravitazione universale
Tutti i corpi si attraggono in ragione
della loro massa

Sintesi "*Relativistica*":

Massa inerziale = Massa Gravitazionale (Principio di Equivalenza)

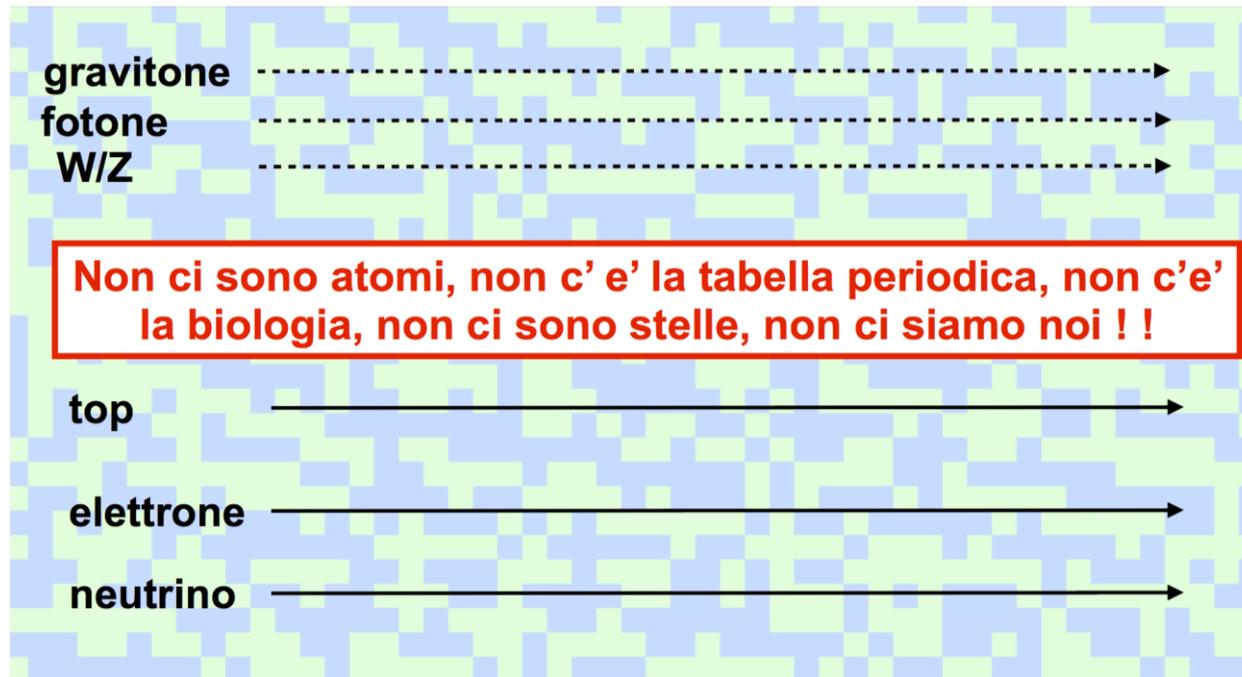
Massa = forma di energia $\rightarrow E = Mc^2$

\rightarrow Una particella senza massa non è mai in quiete, si muove con $v=c$

\rightarrow Una particella con massa può essere in quiete oppure muoversi con $v=p/E$

Se le particelle elementari non avessero massa, allora...

Tutte si muoverebbero alla velocità della luce senza fermarsi mai !



A meno che... qui è l'idea di Peter Higgs dei primi anni '60...

- Il vuoto contiene un “*campo*” fondamentale, una sorta di “*substrato*” onnipresente, con il quale particelle di caratteristiche diverse interagiscono in modo diverso: si ha un “vuoto ordinato” ...
- *Analogia* (ma solo analogia e nulla di più):
 - Mezzo “viscoso” nel quale più sei aerodinamico più ti muovi facilmente
 - Questa “aerodinamicità” è la massa !

Il campo **permea tutto l'universo**.
Le particelle che lo attraversano
avvertono ognuna
una resistenza diversa.
Questa **resistenza** è quella
che chiamiamo **massa**

CAMPO DI HIGGS

Particelle di massa
piccolissima o zero
(fotoni, elettroni, ecc.)

Particelle
di massa media
(muoni, ecc.)

Particelle
di grande massa
(quark top, ecc.)



Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Come il bosone di Higgs genera la massa della particella Einstein



il vuoto è come la sala di un congresso.
I fisici presenti sono i bosoni di Higgs.



Si annuncia l'arrivo di un fisico famoso per la conferenza: una particella.



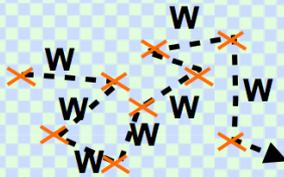
Einstein entra nella sala. I fisici si accalcano intorno a lui. Einstein è rallentato. E' come se la sua massa fosse aumentata a dismisura: cammina piano piano nella sala.



Nel vuoto ordinato alcune particelle vanno piu' lente che la velocita' della luce

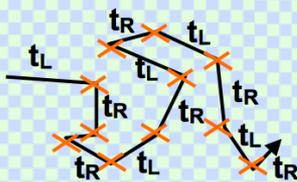
gravitone ----->
fotone ----->

W/Z

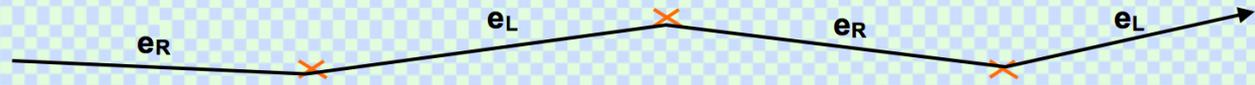


Queste particelle interagiscono col campo che "frena" il loro moto: **le particelle hanno quindi massa**

top



elettrone



E allora ci sono gli atomi, la tabella periodica...

neutrino



Dunque:

L'idea è che esista un campo (detto di Higgs) che è diverso da 0 in ogni punto dello spazio.

E quello che determina la massa di una particelle è quanto fortemente essa interagisce con questo campo fondamentale.

Bella idea, ma... sarà vero ?

Fin qui, una bella e interessante congettura: ma sarà vero ?

- Una teoria deve fare una predizione che sia controllabile sperimentalmente, altrimenti non è una teoria “scientifica” in senso stretto.
- Predizione: questo vuoto ordinato “oscilla” e questa oscillazione si comporta come una particella !
- **Quindi: cerchiamo questa particella.** Non sappiamo che massa abbia ma ci aspettiamo sia in un intervallo definito: tra 100 e 1000 volte la massa del protone. Occorre dunque un acceleratore di **ALTISSIMA ENERGIA.**

La caccia al bosone di Higgs

CERN

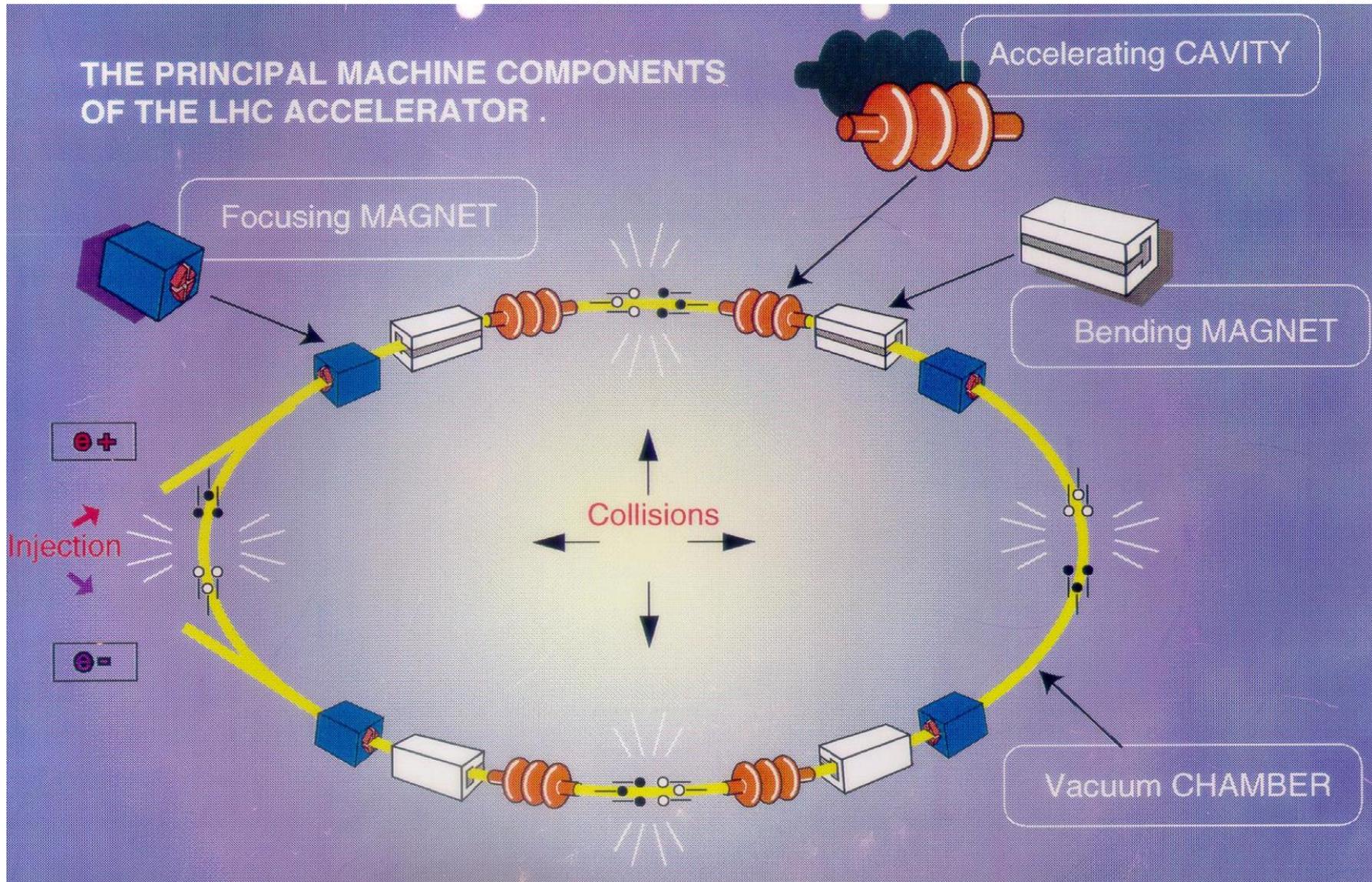
<http://home.web.cern.ch/>

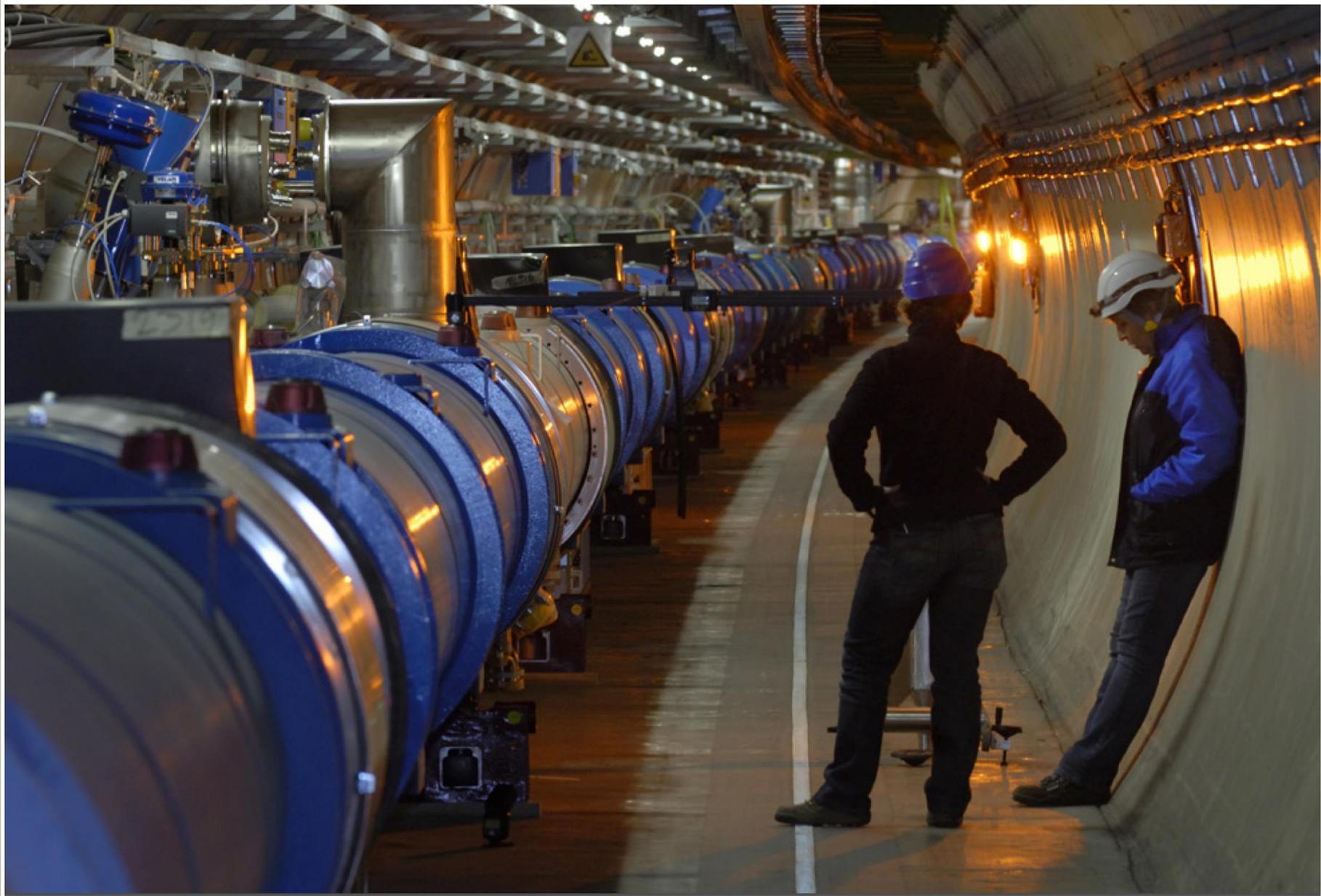


Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire

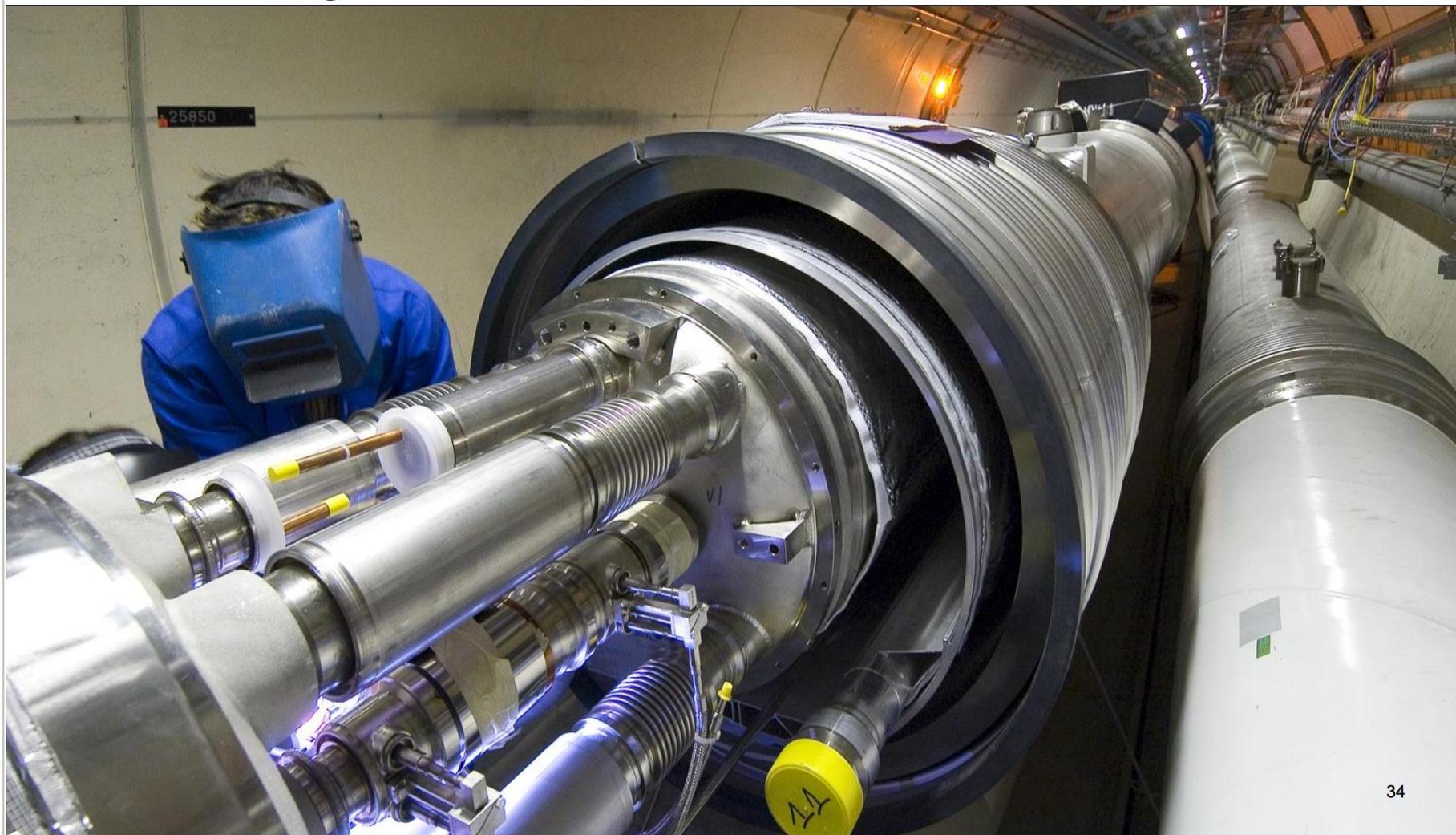
- ❖ Organizzazione fondata nel 1953 per costruire anche in Europa un laboratorio di livello mondiale per le ricerche di Fisica fondamentale.
- ❖ Costituito inizialmente da 12 Stati membri:
Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Grecia, Gran Bretagna, Italia, Jugoslavia, Norvegia, Olanda, Svezia, Svizzera.
- ❖ Comprende oggi 21 Stati membri (+: Spagna, Israele, Austria,
- ❖ Ci sono Stati "osservatori": USA, Russia, Giappone, India,
- ❖ Ci sono Stati con "accordi di cooperazione" (Cina, Arabia Saudita, ...).
- ✓ Il CERN ha 2.500 dipendenti fissi (fisici, ingegneri, informatici, ..).
- ✓ Svolgono ricerche al CERN circa 10.000 ricercatori da 600 istituti e università di 113 nazioni. Metà dei ricercatori (HEP) del mondo. 
- ✓ Gli italiani che partecipano alle ricerche sono 1137 (Gennaio 2014).
- ✓ In Italia la ricerca è coordinata dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LHC ACCELERATOR.





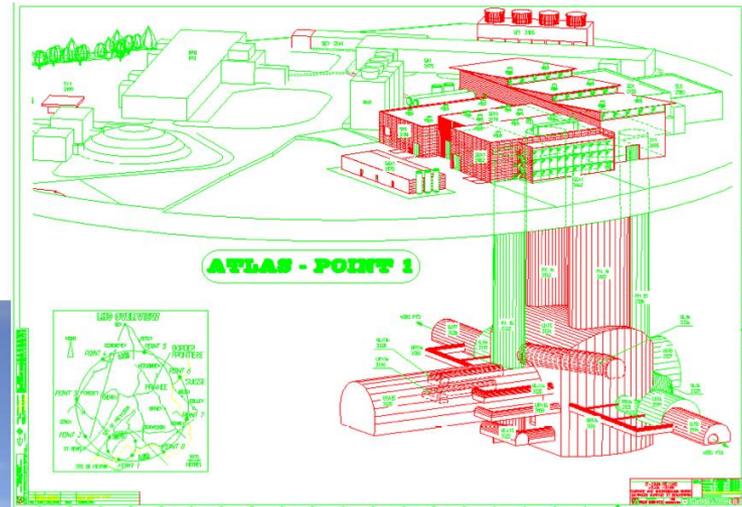
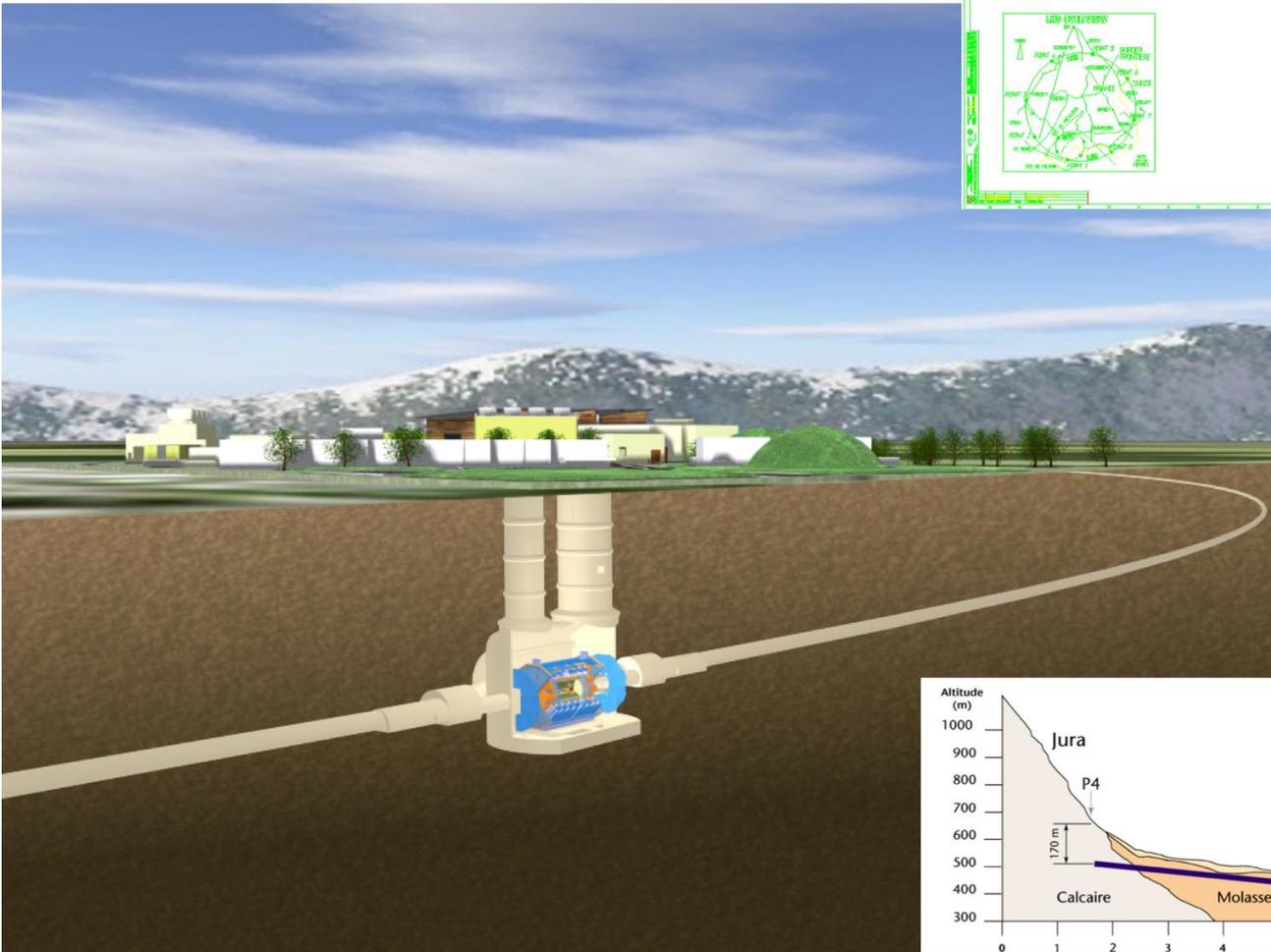
I magneti superconduttori mantengono i protoni energetici in traiettorie circolari !



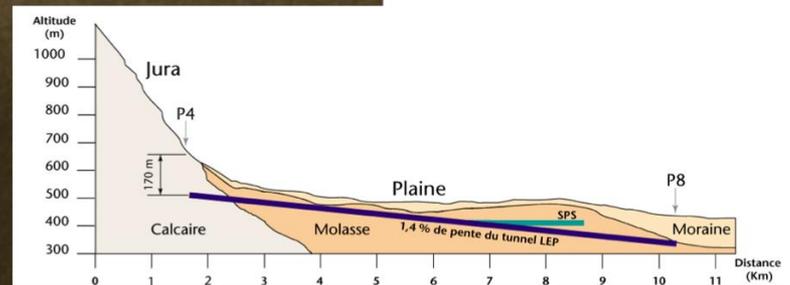
34

La caverna che ospita l'esperimento ATLAS

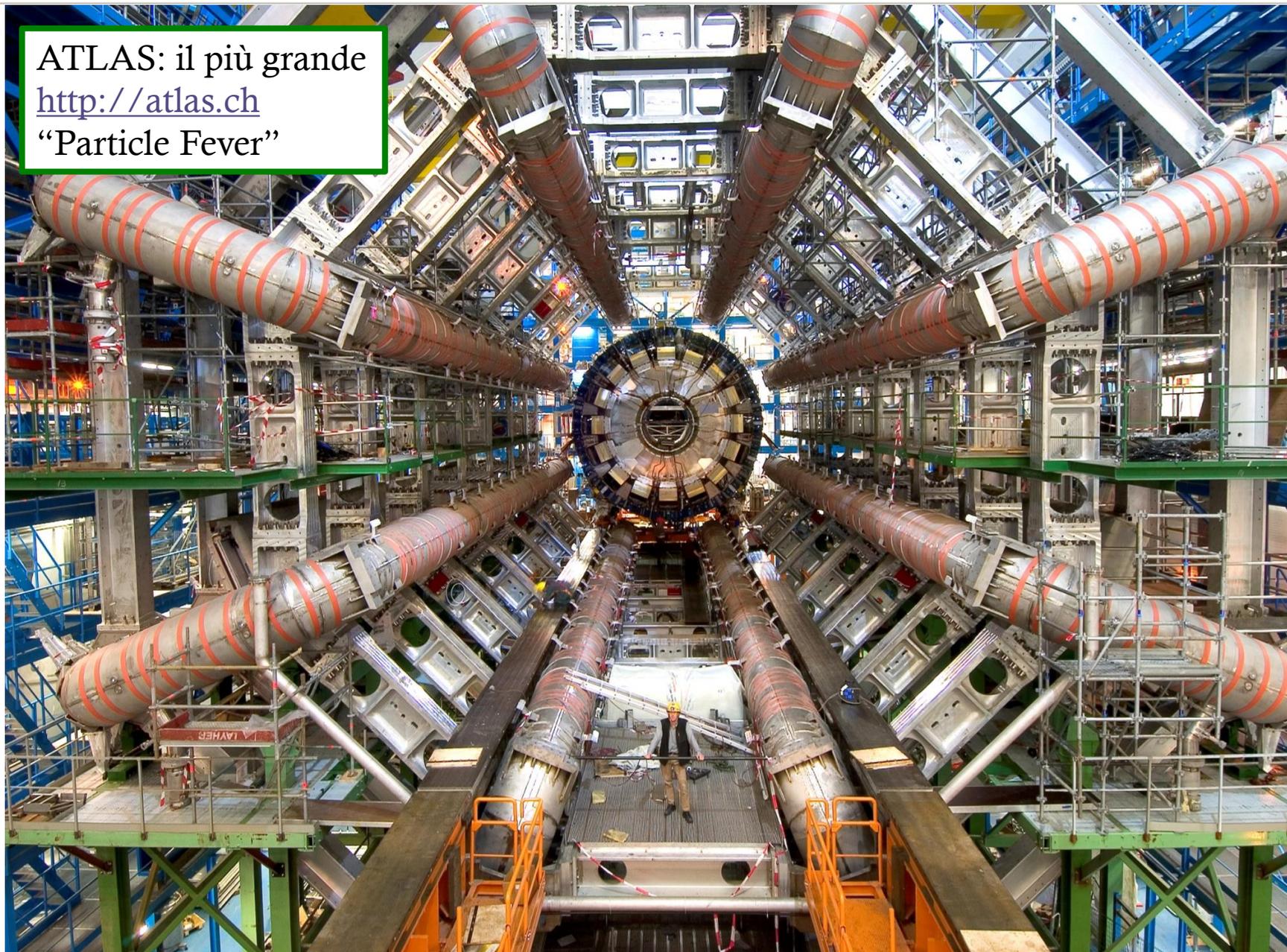
circa 100 m sotto la superficie



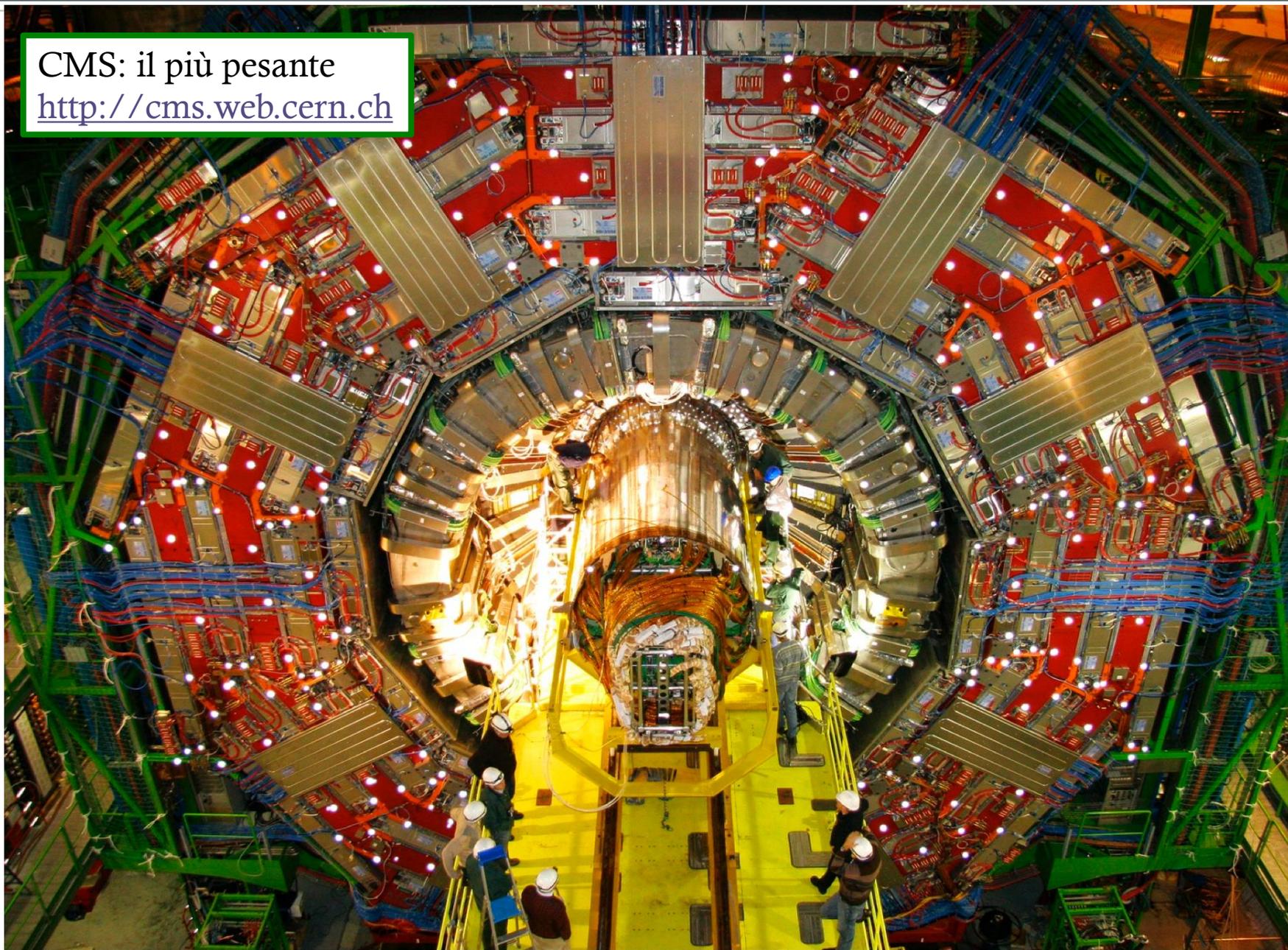
Lunghezza = 55 m
Raggio = 32 m
Altezza = 35 m



ATLAS: il più grande
<http://atlas.ch>
“Particle Fever”

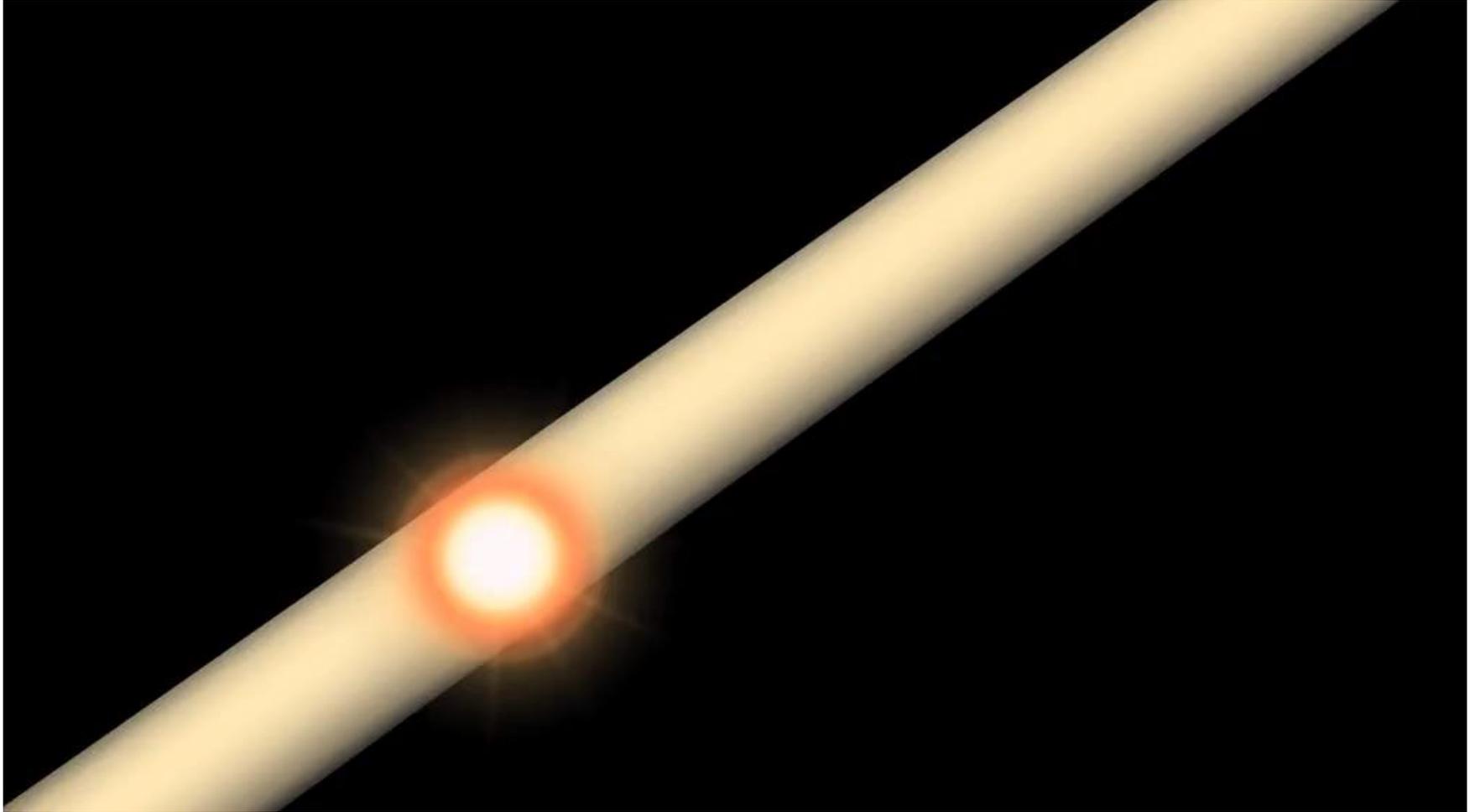


CMS: il più pesante
<http://cms.web.cern.ch>



Cosa fanno i circa 2500 fisici di ciascun esperimento ?

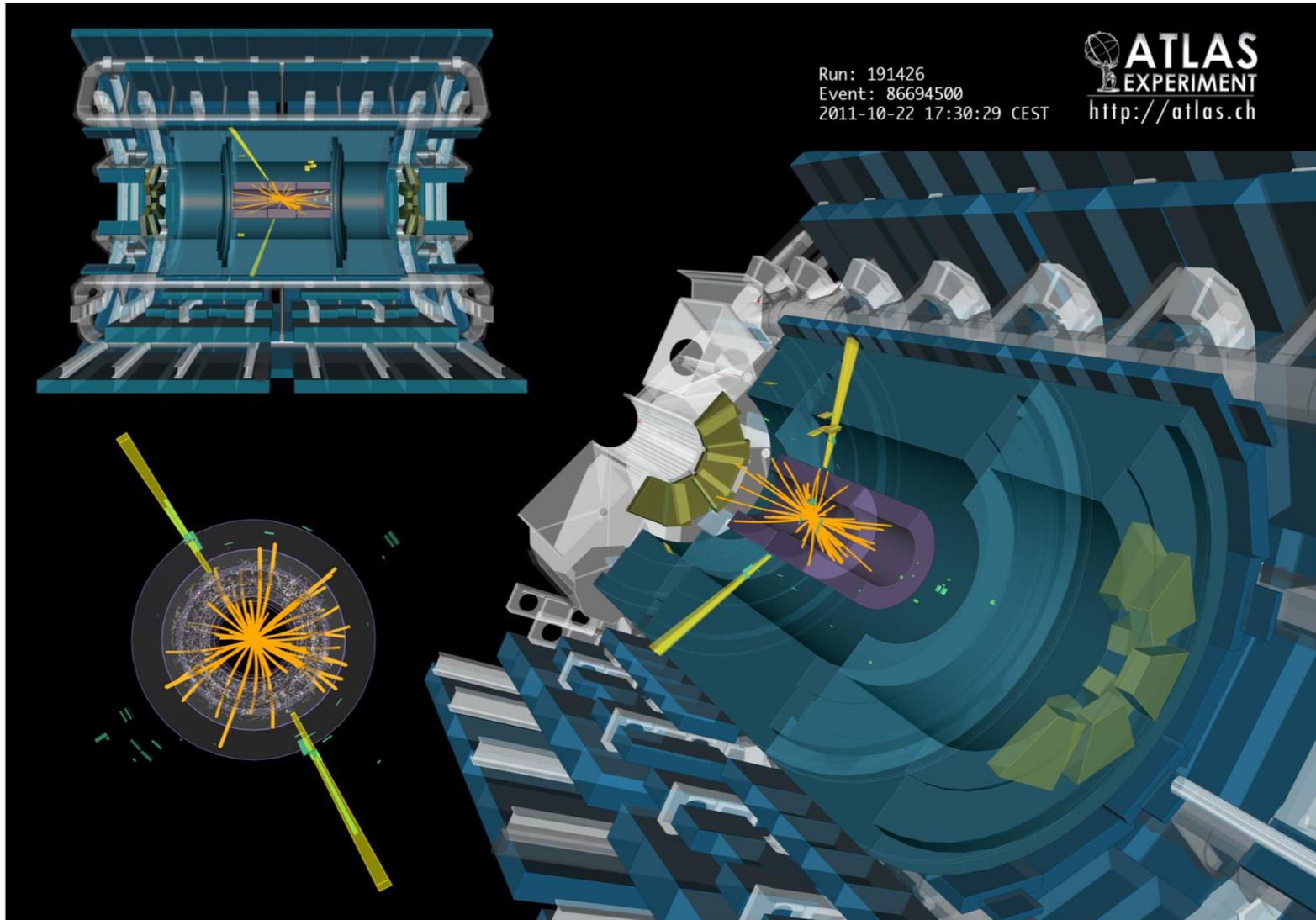
- Mettono in funzione il rivelatore (lo “costruiscono”, lo calibrano, lo controllano, ne fanno la manutenzione...)
- Raccolgono i dati (facendo turni, controllando che tutto vada bene, che tutto sia acceso e funzionante)
- Analizzano i dati (per questo ci vogliono tanti, ma tanti computer...)
- Provano a capire i dati e a tirare fuori i risultati...



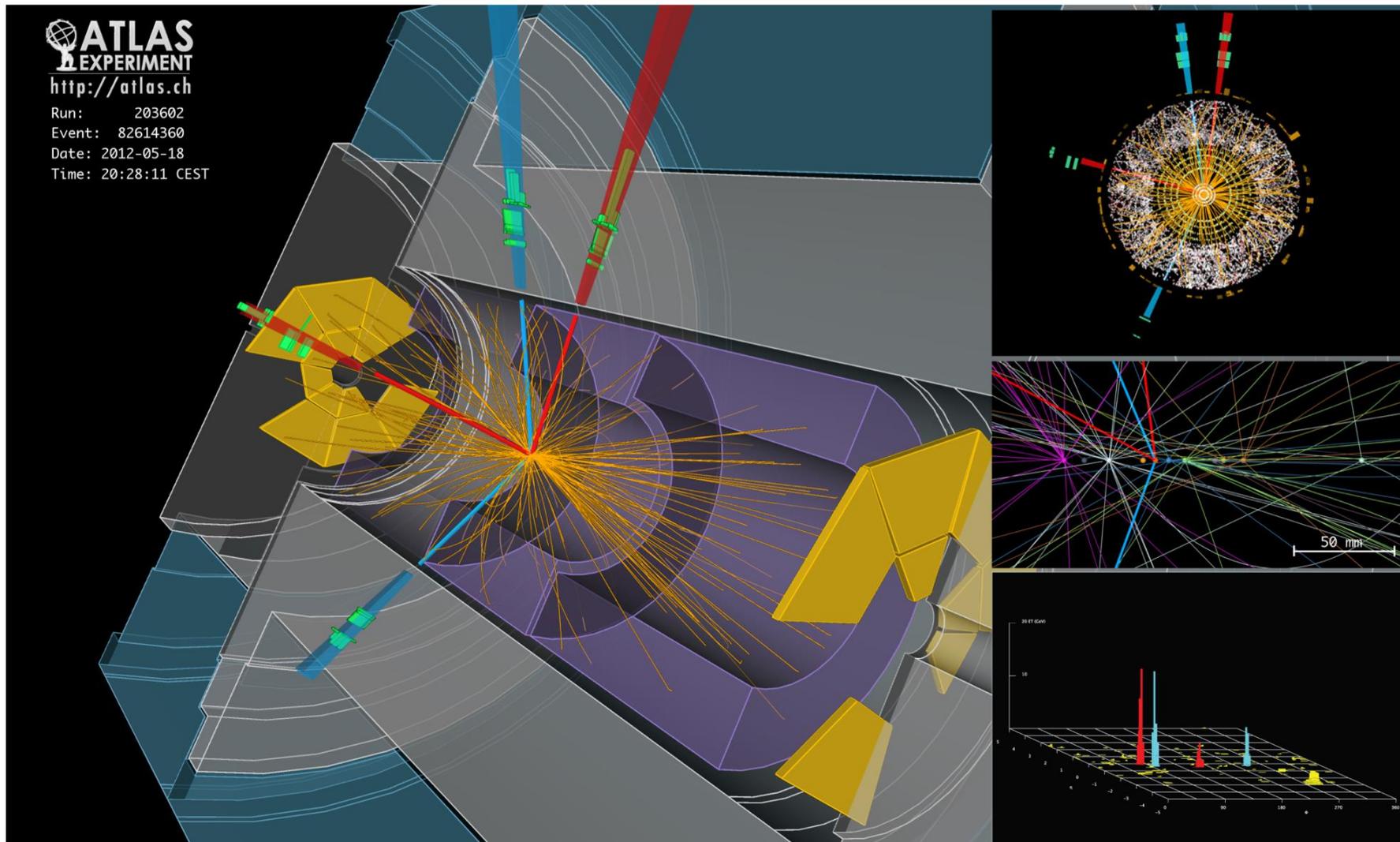
Cosa devo cercare ?

- Tra le tantissime collisioni come quella che abbiamo vista (ce n'è una ogni 50 ns) devo trovare quelle buone !
- La teoria mi indica cosa devo cercare:
Collisioni nelle quali tra le tante cose 2 fotoni
 - Collisioni con 4 elettroni
 - Collisioni con 4 muoni

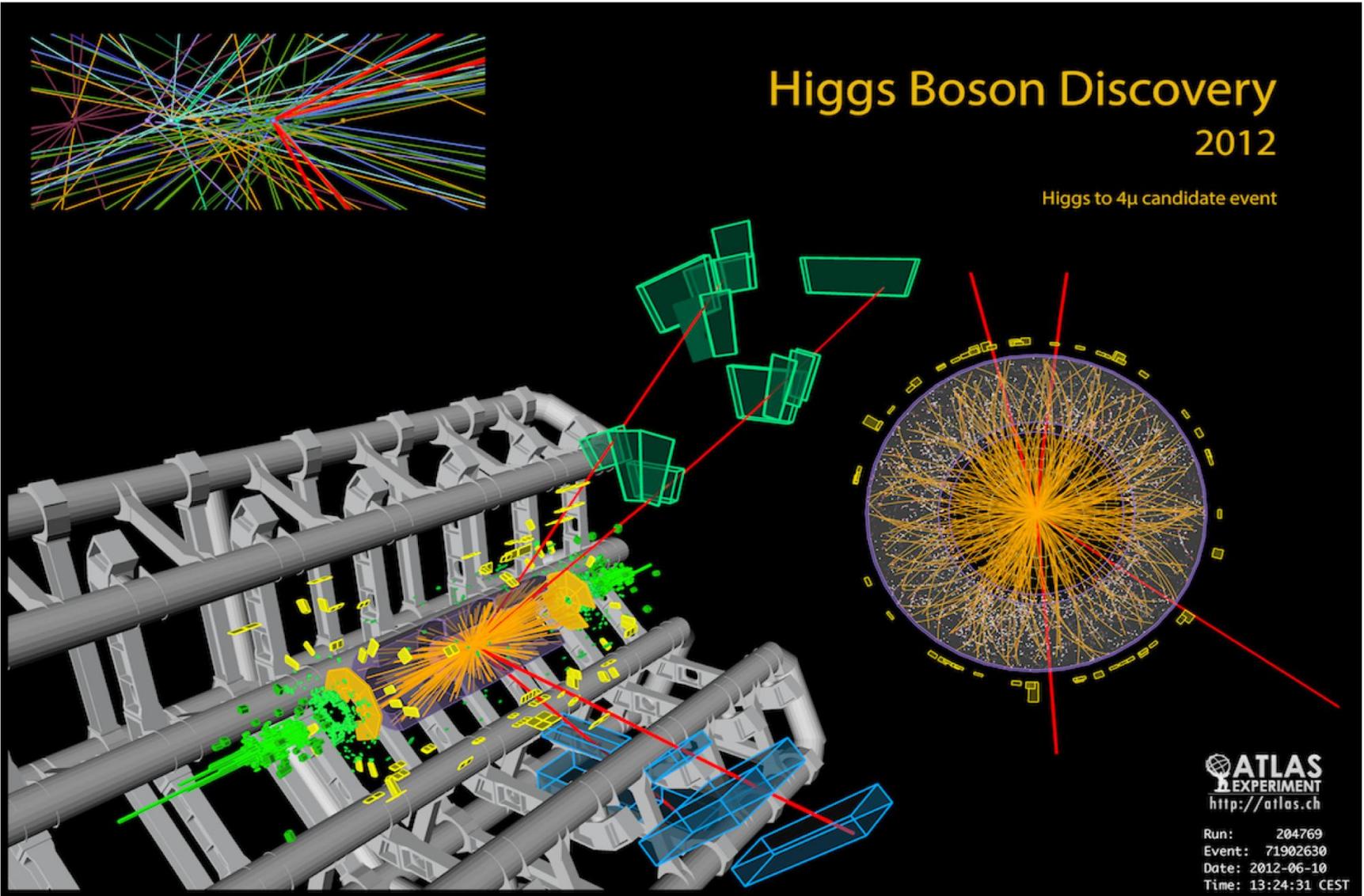
Un bosone di Higgs decade in 2 fotoni



Un bosone di Higgs decade in $Z^0 Z^0 \rightarrow 4$ elettroni

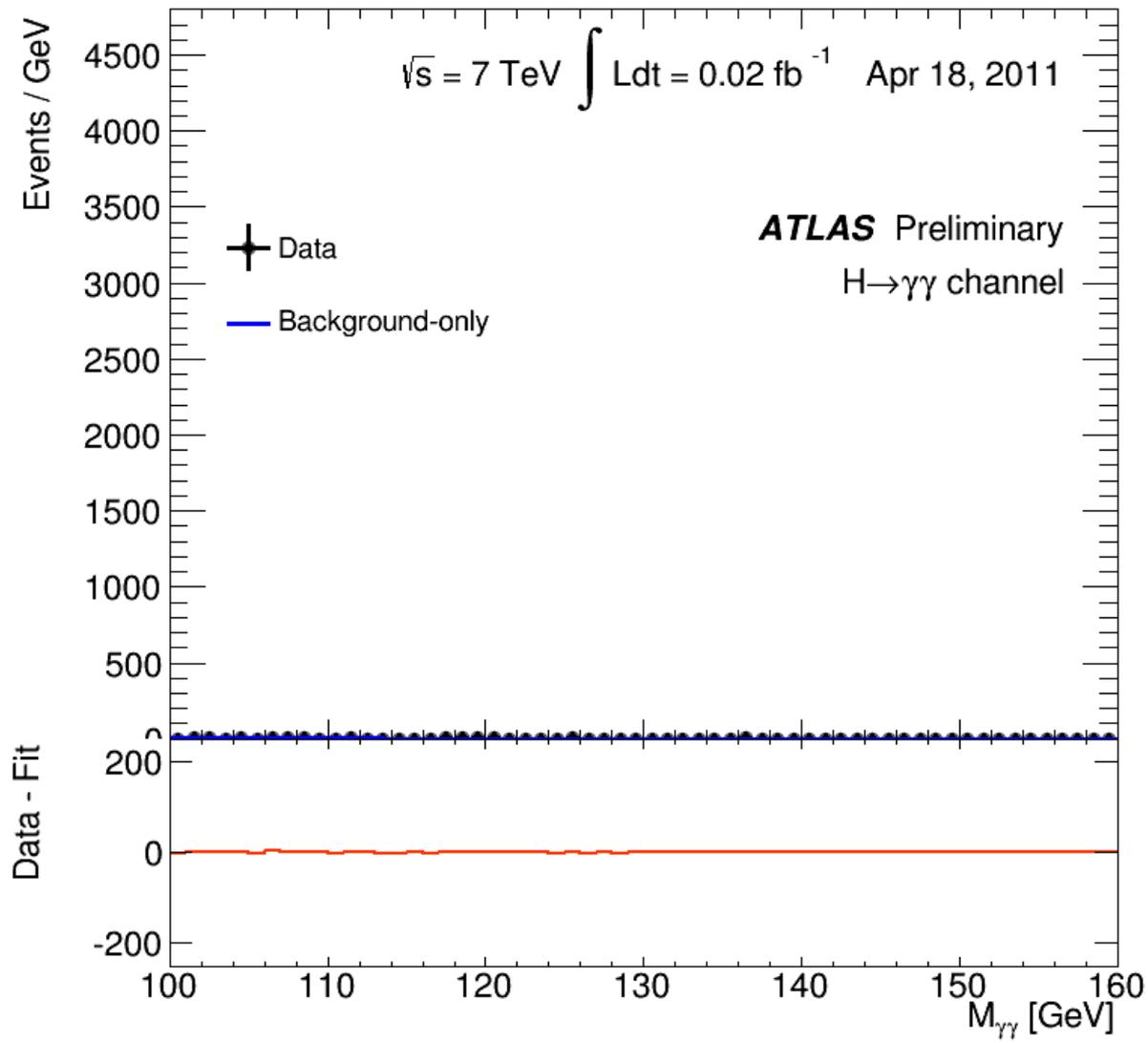


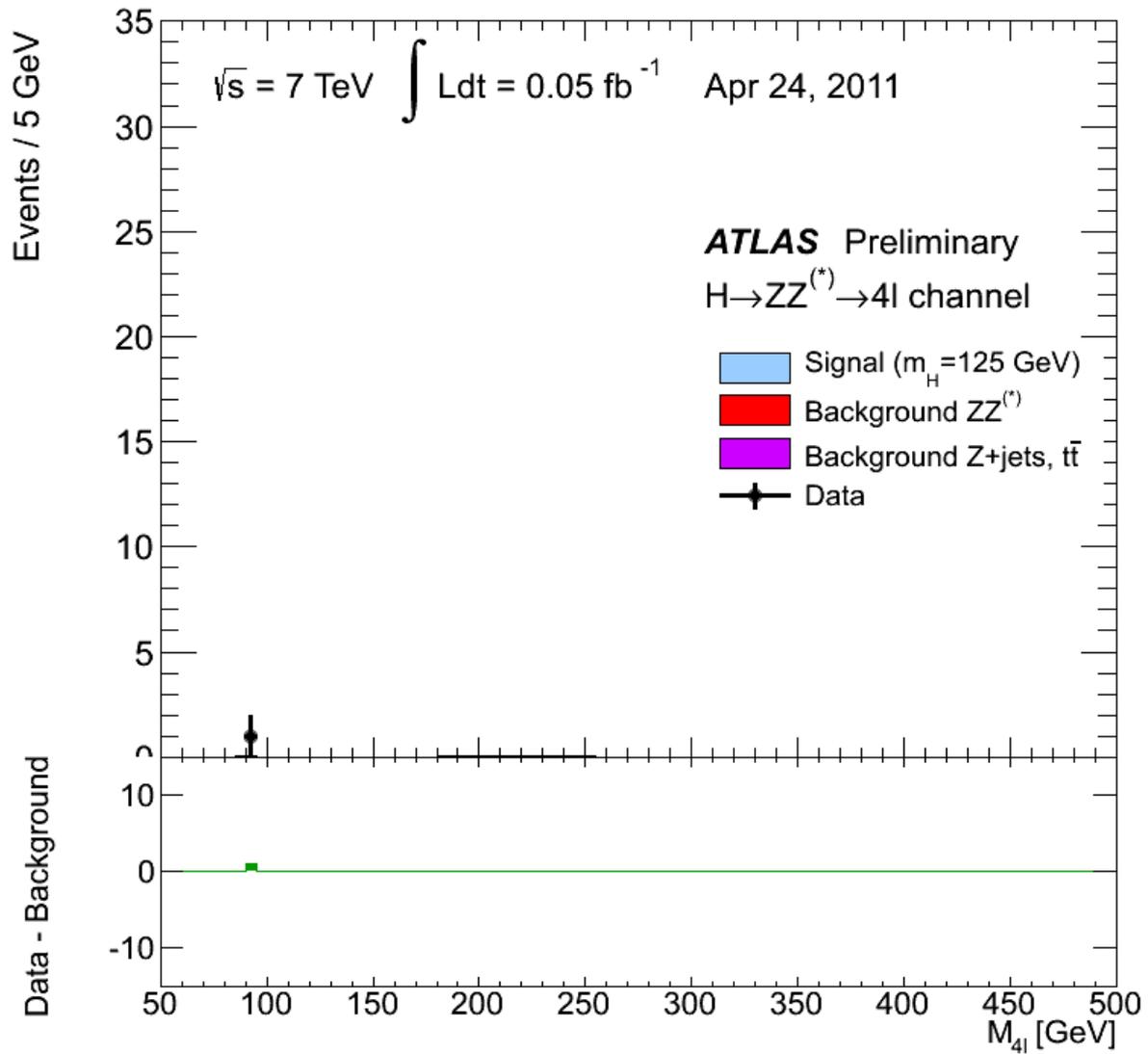
Un bosone di Higgs decade in $Z^0Z^0 \rightarrow 4$ muoni

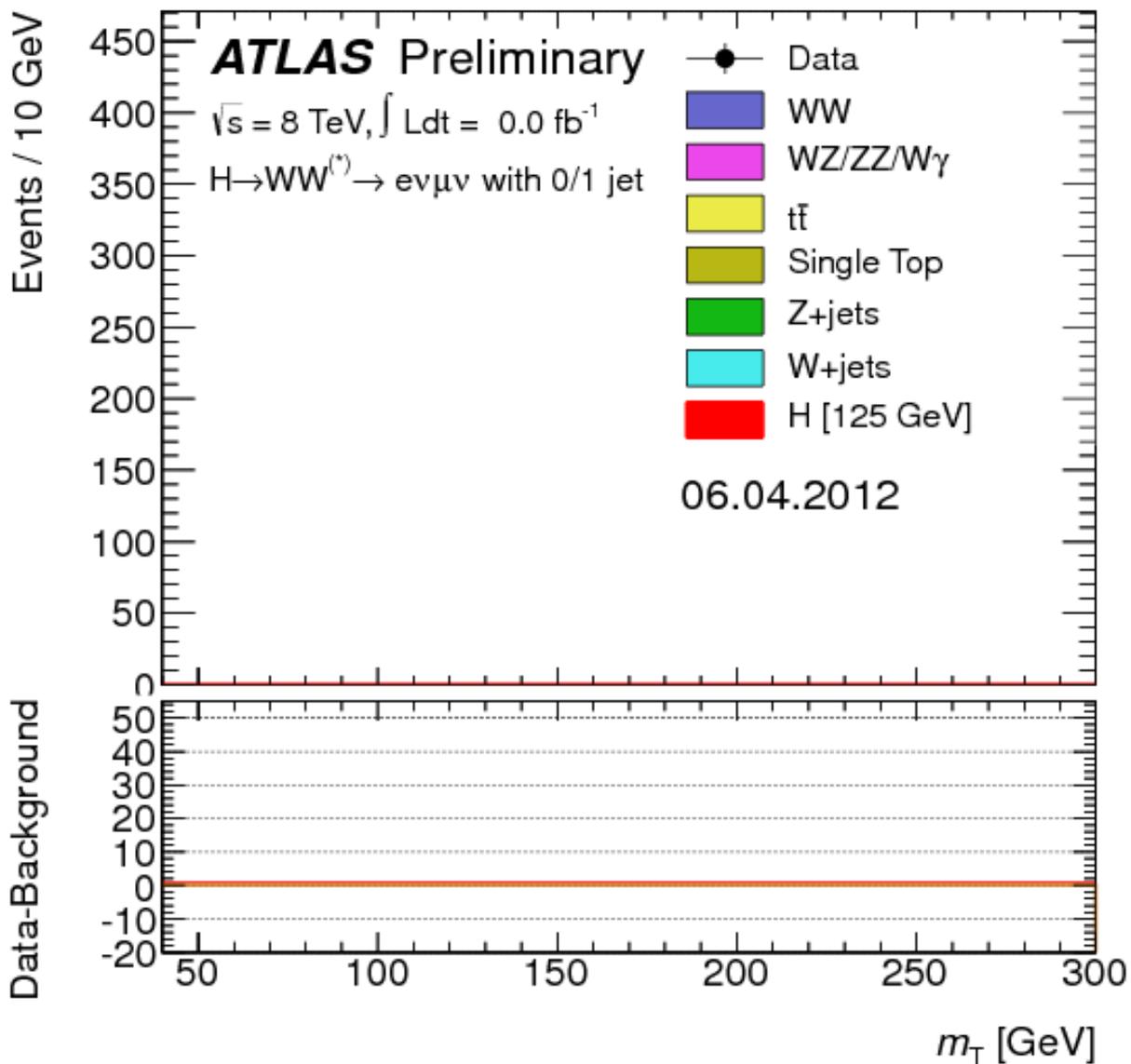


Si cerca un “picco” in una distribuzione..

- Come facciamo a poter dire che abbiamo “visto” una nuova particella ?
 - Non la vediamo direttamente perché “immediatamente” essa decade → dobbiamo guardare ai suoi prodotti di decadimento;
 - Dai prodotti di decadimento possiamo risalire alla particella “madre”;
 - Vediamo se i decadimenti si “accumulano” tutti provenienti da una madre di una certa massa fissa → si cerca un picco in una distribuzione.

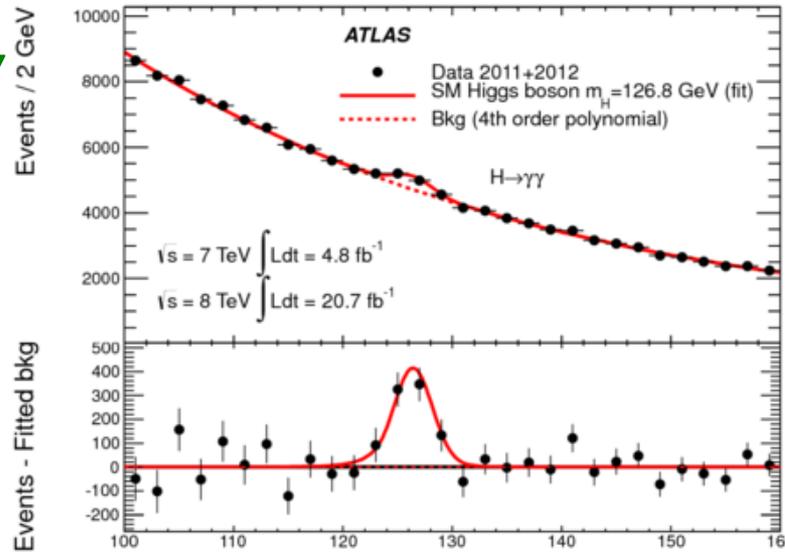




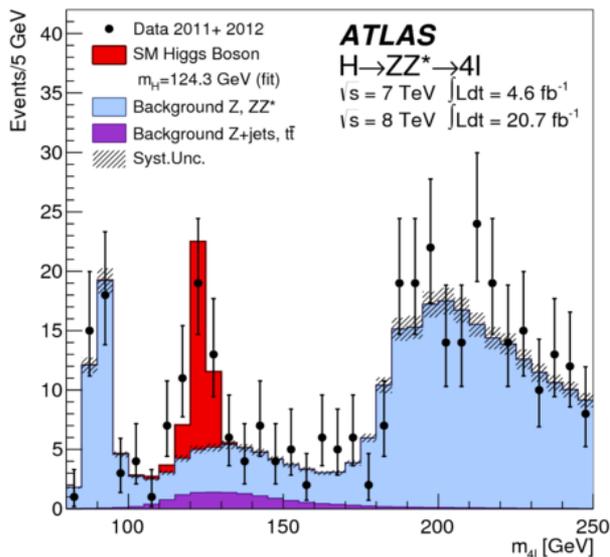


UNA GALLERIA DI PICCHI

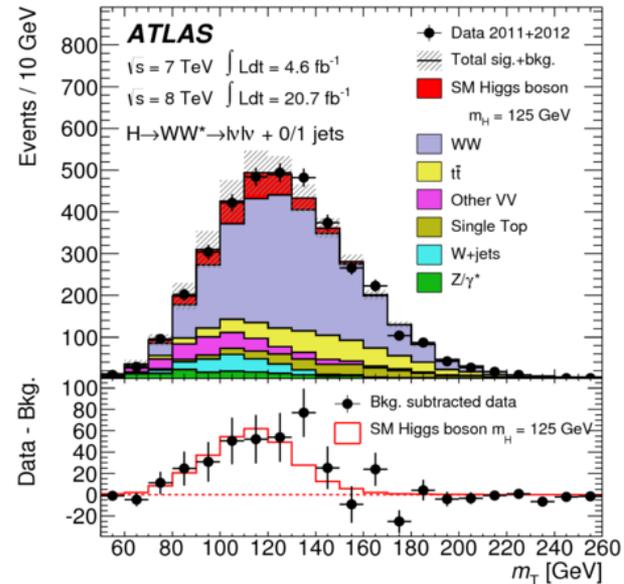
$H \rightarrow \gamma\gamma$



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



Trovato il picco: vista la nuova particella !

- Dunque 3 canali diversi hanno un picco alla stessa massa
- Due esperimenti diversi osservano gli stessi 3 picchi grosso modo alla stessa massa
- Cominciamo a crederci...
- La probabilità che sia una fluttuazione casuale è $\approx 10^{-7}$ (una parte su 10 milioni...)
- → La congettura di Higgs fa una previsione che è ben verificata: dunque è “corretta”.

Cosa rimane da fare
adesso ?

Perché allora non ci siamo fermati qua ma continuiamo con gli esperimenti ?

- La congettura di Higgs all'interno del Modello Standard fa molte altre previsioni che vogliamo controllare con sempre maggiore precisione.
- MA soprattutto ci sono ancora molti altri problemi aperti
- Tra i tanti ne cito due: uno ha a che fare con il mistero della Massa (e che la scoperta dell'Higgs non risolve); l'altro ha a che fare con il fatto che esistiamo...

This picture is beautiful but misleading, since it only shows about 0.5% of the cosmic density.

The other 99.5% of the universe is invisible.

L'Universo "oscuro"

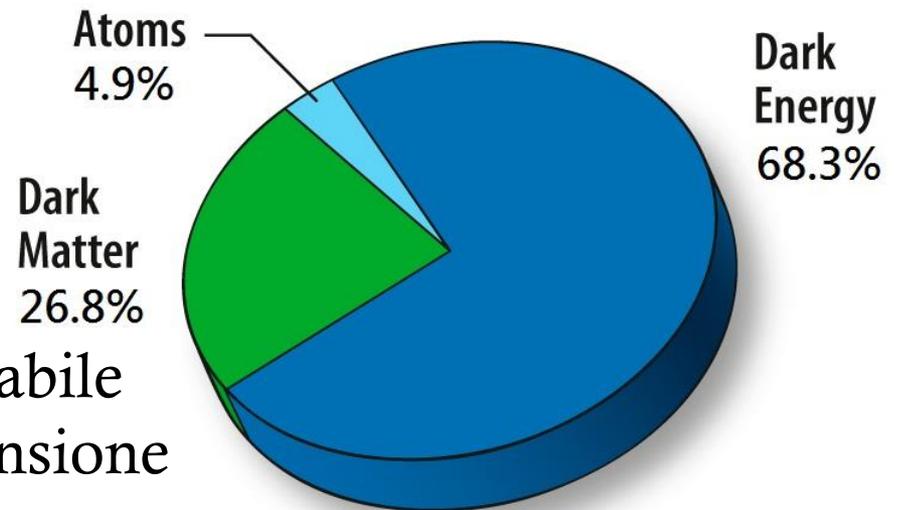
I dati cosmologici ci dicono che la maggioranza del nostro Universo è fatto di cose che non conosciamo

Dark Matter:

c'è ma non si vede...

Dark Energy

è la costante cosmologica, una forza repulsiva responsabile dell'accelerazione dell'espansione dell'Universo..

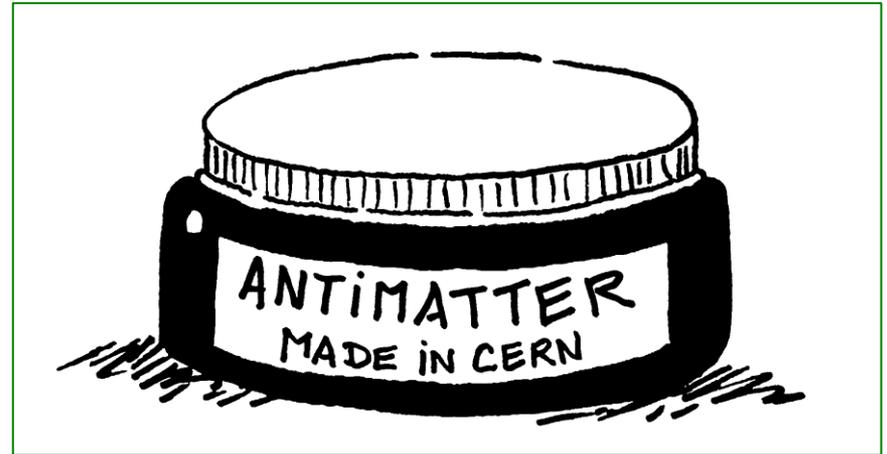


TODAY

A LHC continuiamo a cercare manifestazioni di queste cose.

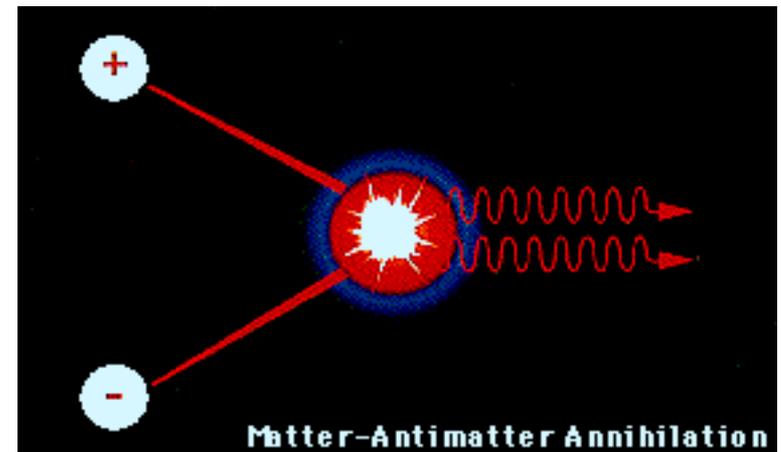
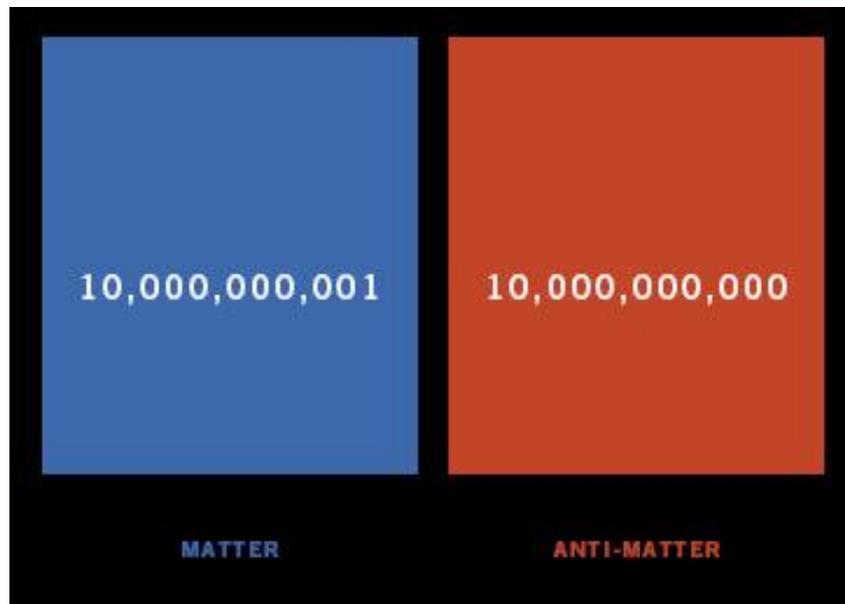
Dove è finita l'AntiMateria ?

- Proposta di Dirac nel 1930
- In seguito sono state scoperte:
 - positrone (Anderson 1933)
 - antiprotone (Segrè 1950)
 - antineutrone, antideuterio
 - antiatomi di antiidrogeno...
- Ogni particella elementare ha la sua antiparticella e le leggi della Fisica sembrano completamente simmetriche tra Materia e Anti-Materia.
- **Ma allora: perché il nostro Universo sembra fatto SOLO di materia ?** E' il problema della BARIOGENESI.



Una possibile spiegazione:

- Deve esserci *un tipo di forza sconosciuta* che “favorisce” la materia sull’antimateria, seppure di pochissimo..



10,000,000,000 annichilano → MBR
1 rimane... → galassie, stelle, vita...

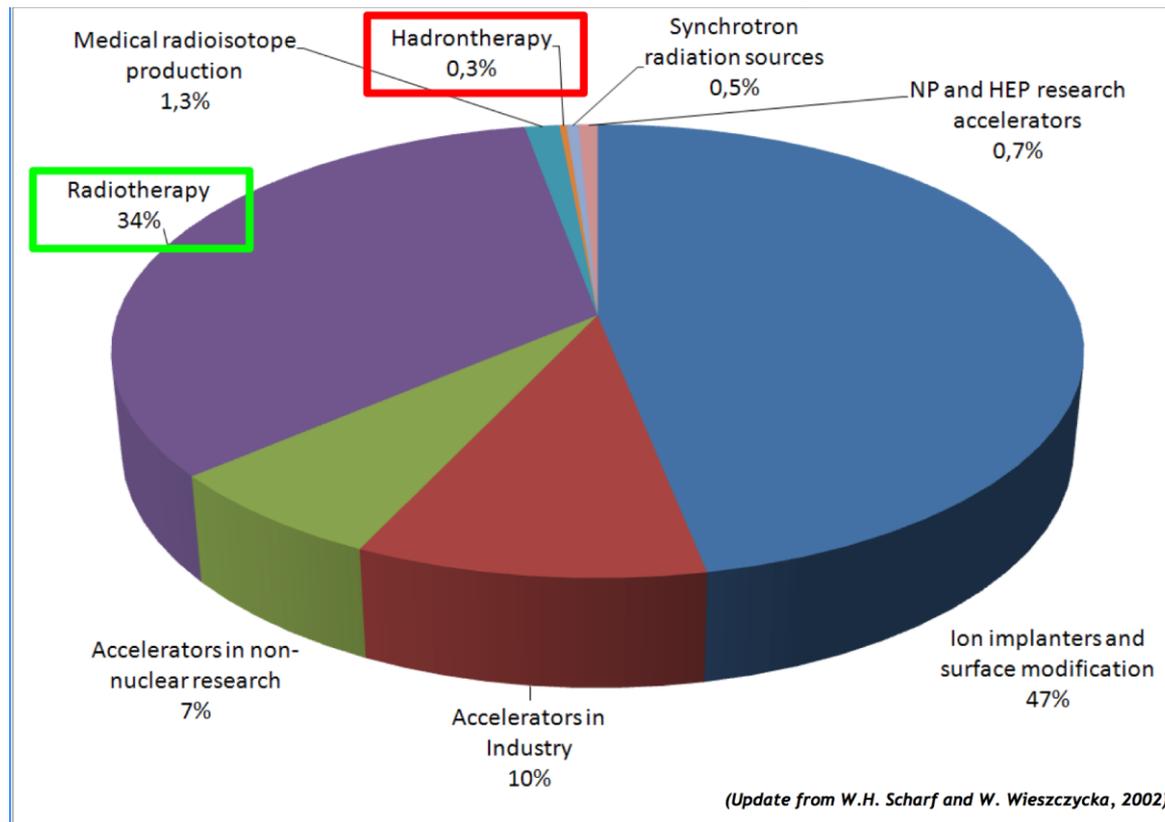
Alla fine si impone una domanda: perché proprio così ?

- Tanti indizi fanno pensare che i “parametri dell’Universo” abbiano **PROPRIO** quei valori che servono perché alla fine ci siamo **NOI** !
- → Principio **ANTROPICO**
- → Oppure, idea del **MULTIVERSO**: tanti universi distinti, ognuno con una particolare scelta di parametri. Il nostro non può essere che questo...

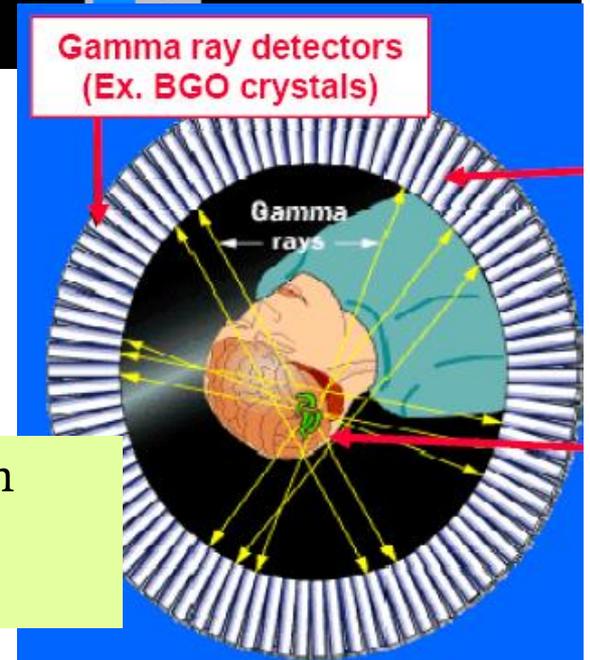
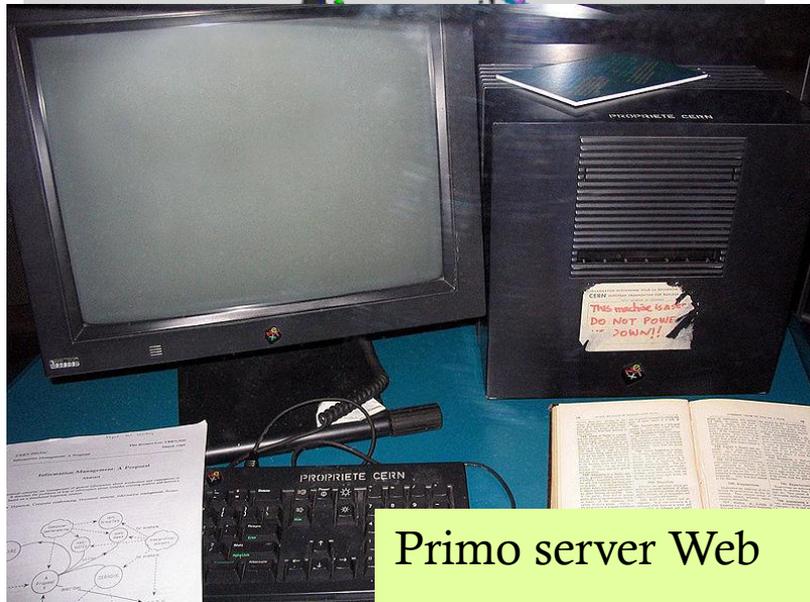
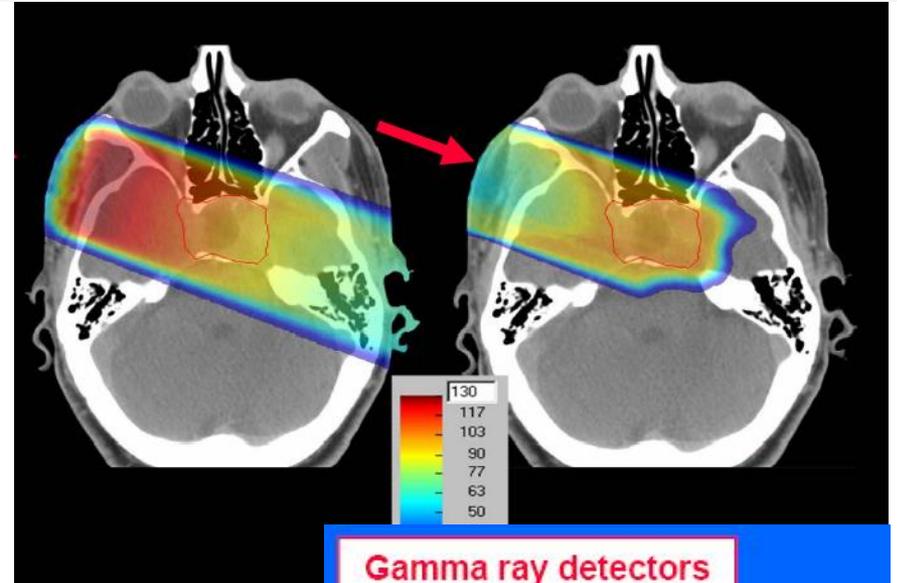
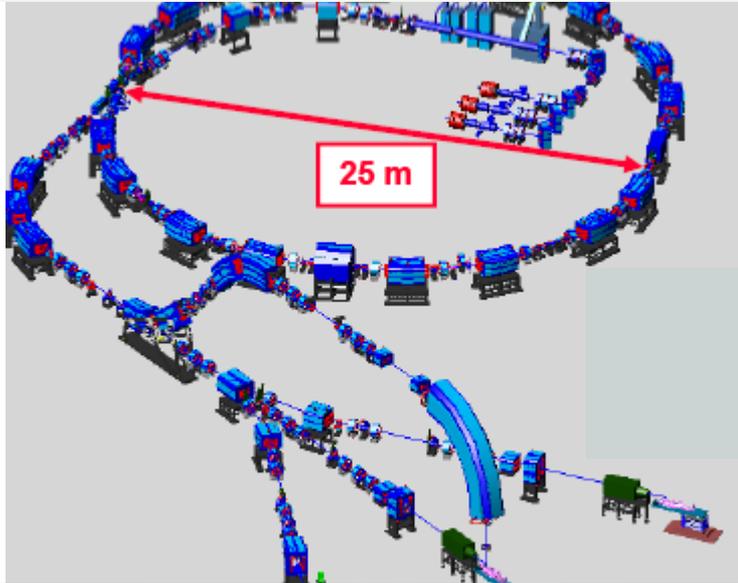
A che serve il bosone di Higgs ? (Ottima domanda..)

3 livelli di “risposta”: dalla meno alla più importante...

Risposta n.1: la ricerca fondamentale ha molte “ricadute tecnologiche”



Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO-Pavia) (~2000 pazienti /anno)



PET: positron emission technology

Risposta n.2: non si può mai sapere..

- La storia della scienza insegna che quello che deriva da una scoperta è difficilmente predicibile dagli scopritori. Lo si scopre anni dopo in contesti diversi..
- Esempi:
 - Elettricità (Faraday,...)
 - Radioattività naturale (Becquerel, Curie,...)
 - Rallentamento dei neutroni (Fermi,...)
 - Antimateria (Dirac, Anderson,...)
- Avremo mai una Higgs-technology ?

Risposta n.3: vale la pena comunque !

- Il compito che si è data la Fisica Fondamentale è irrinunciabile. Non possiamo smettere di andare oltre, verso l'infinitamente piccolo e verso l'infinitamente grande.
- E la Natura sembra non fermarsi, non si arriva mai al fondo, c'è sempre qualcosa da migliorare da approfondire...

Conclusione

La lezione principale dalla storia del bosone di Higgs è che, incredibilmente, “**la fisica funziona**”...
“La cosa più incomprensibile della Natura è che sia comprensibile” (A.Einstein)

Funziona, sì, ma non ci permette mai di arrivare veramente in fondo.
Ogni scoperta apre nuovi orizzonti ognuno con i suoi nuovi perché irrisolti...

E' un'avventura cui comunque sia, vale la pena dedicare il proprio impegno e la propria passione.

Grazie dell'attenzione !

Backup

La Camera a Nebbia (C. Wilson - 1912)

- Recipiente contenente aria satura di vapore acqueo “prossimo alla condensazione”;
- Con una rapida espansione, l’aria diviene sovrassatura, e basta una piccola impurita’ per dar luogo ad un “nucleo di condensazione”;
- Una particella carica si comporta come una impurita’ creando “nuclei di condensazione” lungo la sua traiettoria

Disegno originale di Wilson

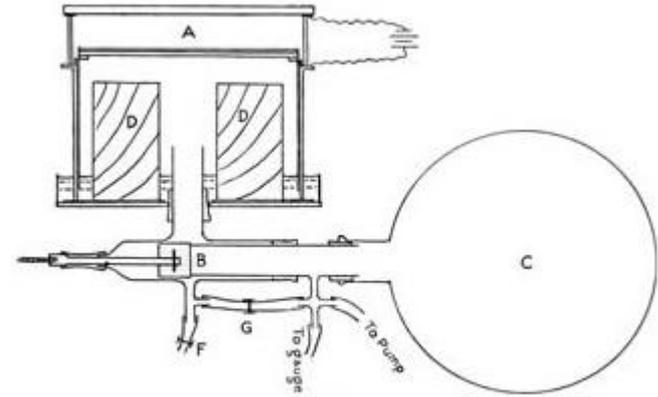
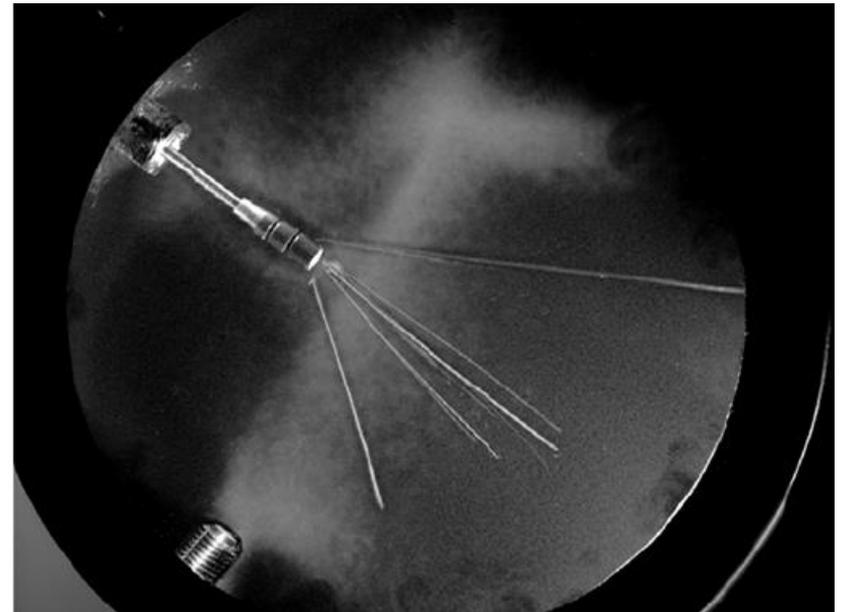


FIG. 1.
A diagram of Wilson's apparatus. The cylindrical cloud chamber ('A') is 16.5cm across by 3.4cm deep.



La Camera a Bolle (D.A.Glaser 1952)

- Il principale rivelatore dagli anni '50 agli anni '70
- Recipiente contenente un liquido "prossimo all'ebollizione";
- L'espansione lo porta in una condizione di "sovrariscaldamento";
- Una particella carica crea dei nuclei di ebollizione che danno luogo ad una traccia

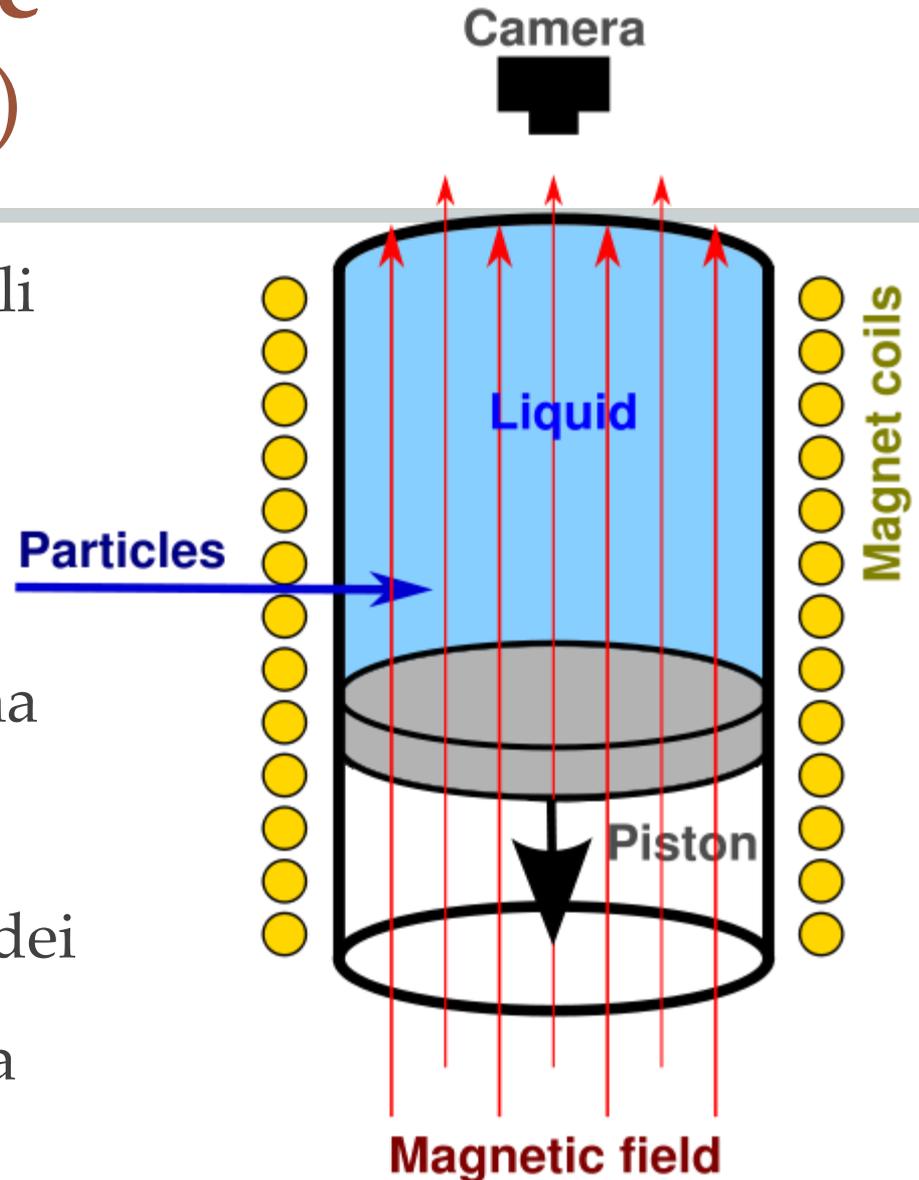
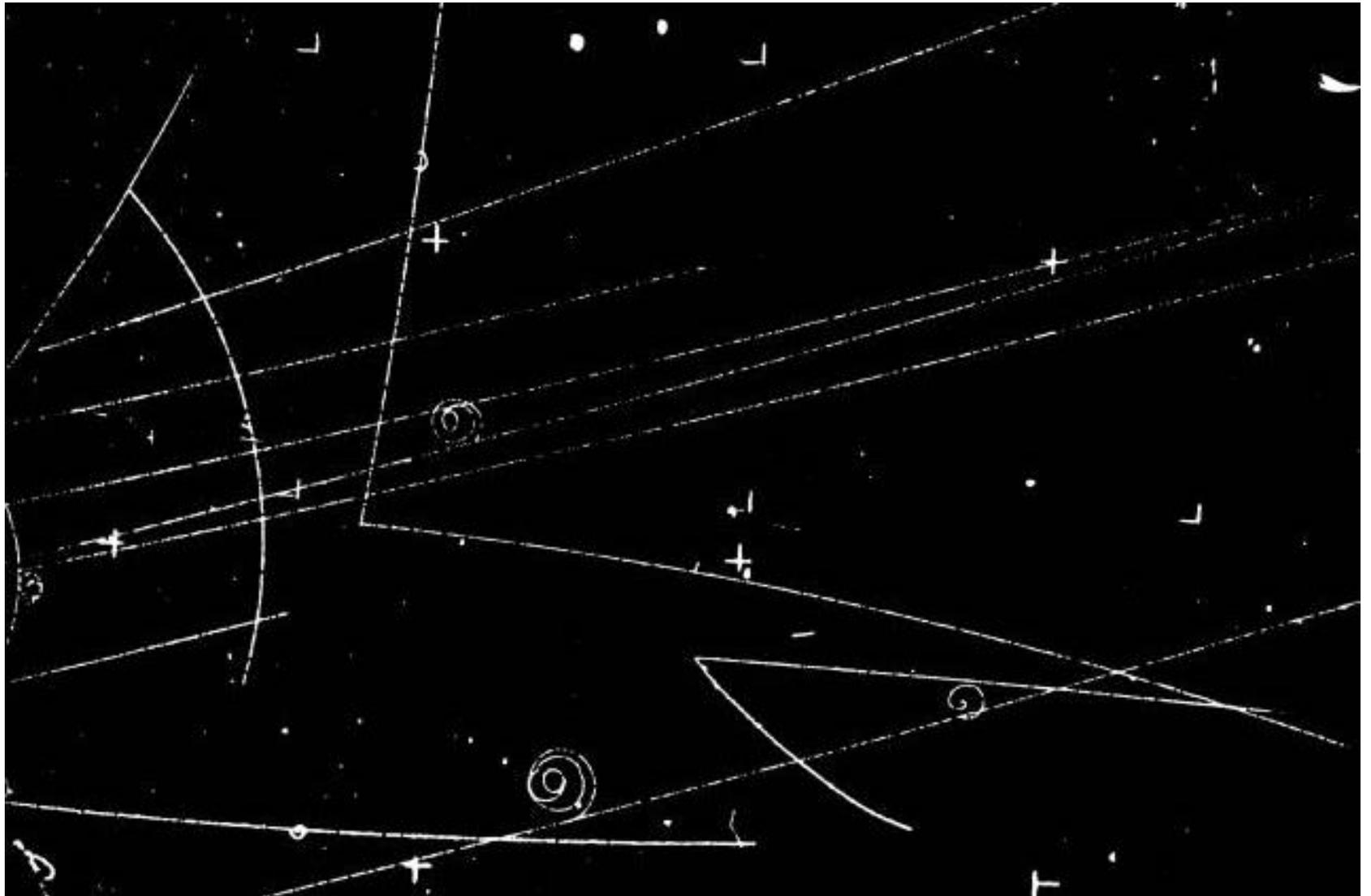
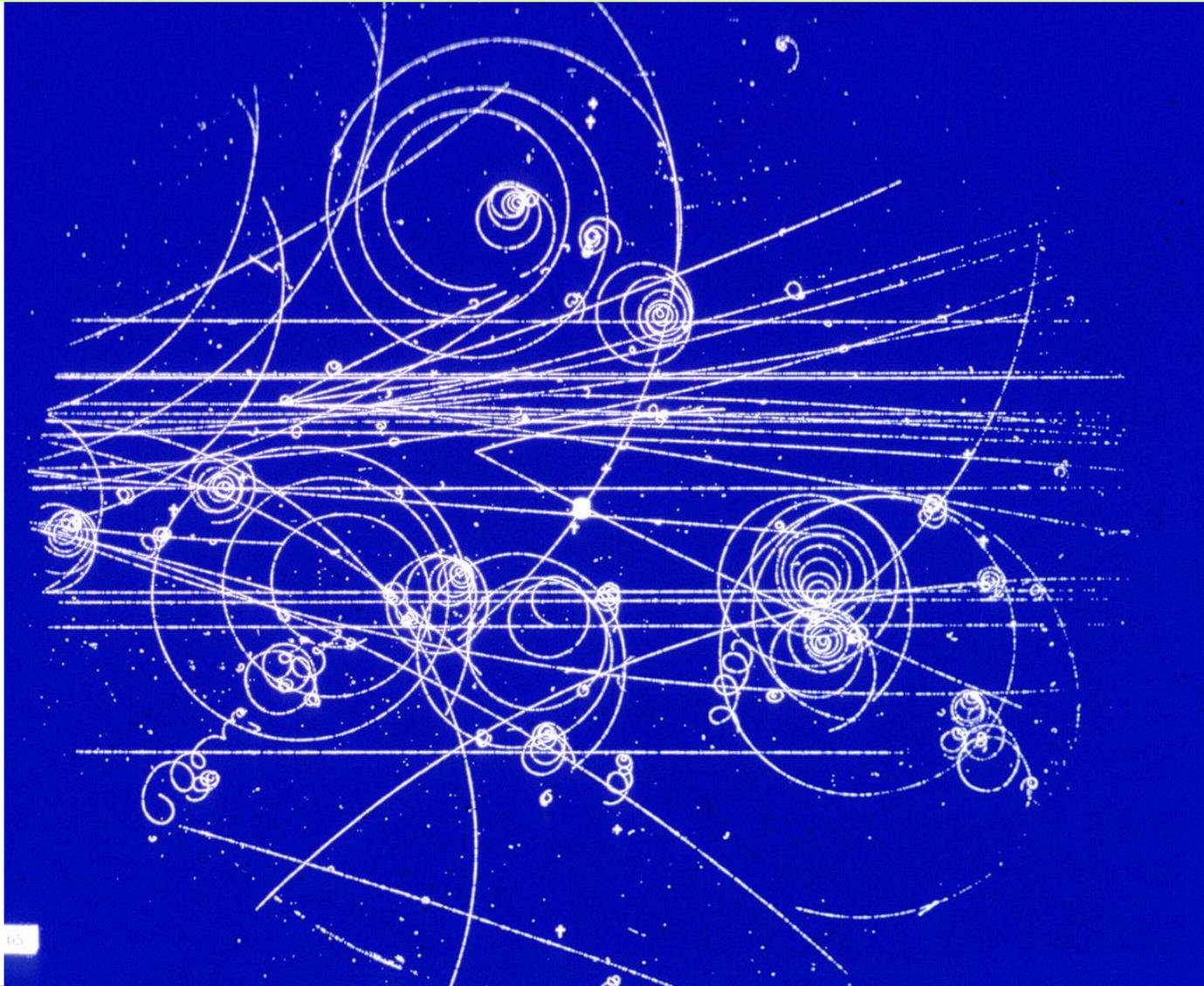


Foto di un fascio di particelle che attraversano una camera a bolle in campo magnetico: si osservano le interazioni a "V"



Altra foto: qui i “riccioli” sono particelle che perdono energia e sono sempre piu’ curvati nel campo magnetico



Uno studio di funzione...

- Immaginiamo che il “vuoto” scelga di essere il minimo di una funzione “potenziale” fatta così (a e b costanti reali):

$$f(x) = ax^2 + bx^4$$

- Troviamone i massimi e i minimi:

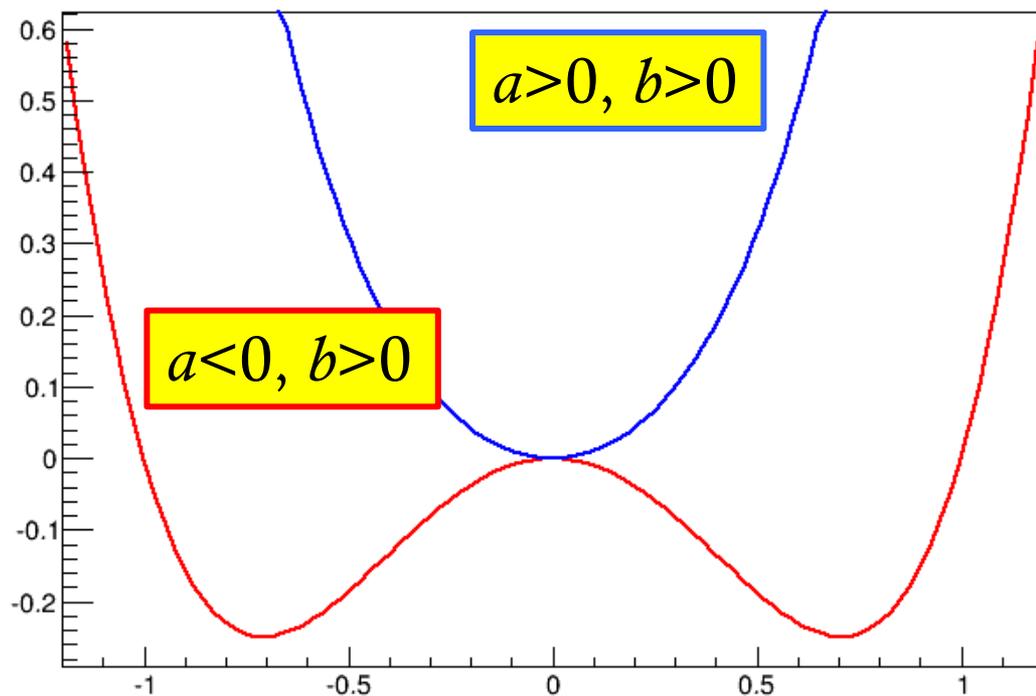
$$f'(x) = 2ax + 4bx^3$$

$$f'(x) = 0 \rightarrow x_1 = 0; x_2 = \pm\sqrt{-\frac{a}{2b}}$$

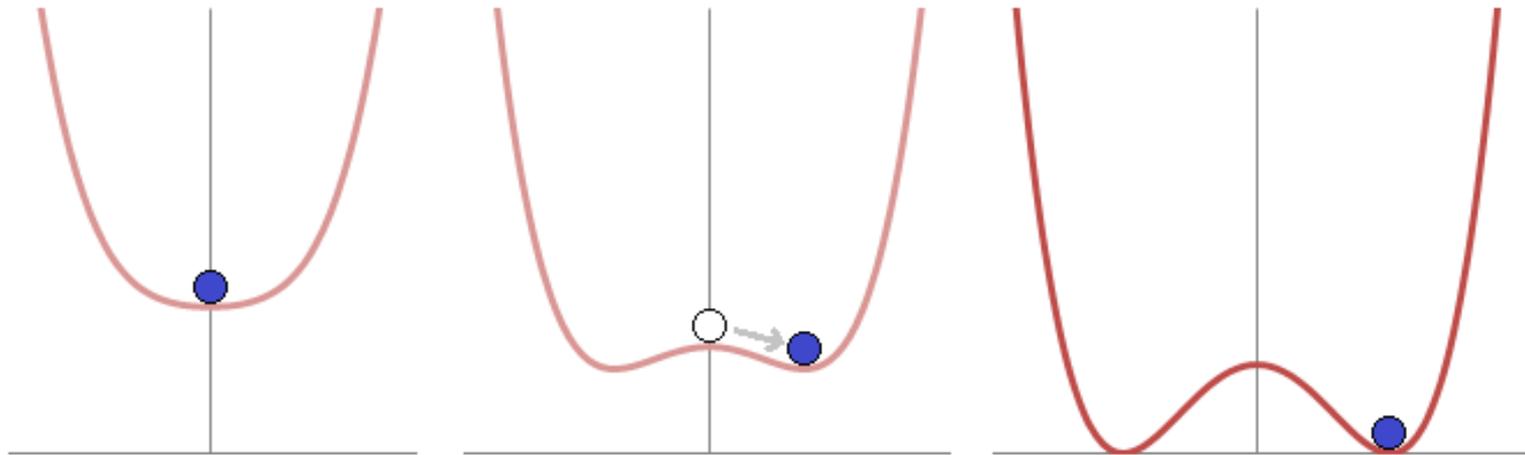
- La seconda soluzione è reale solo se $a/2b < 0$

Come è fatta questa funzione ?

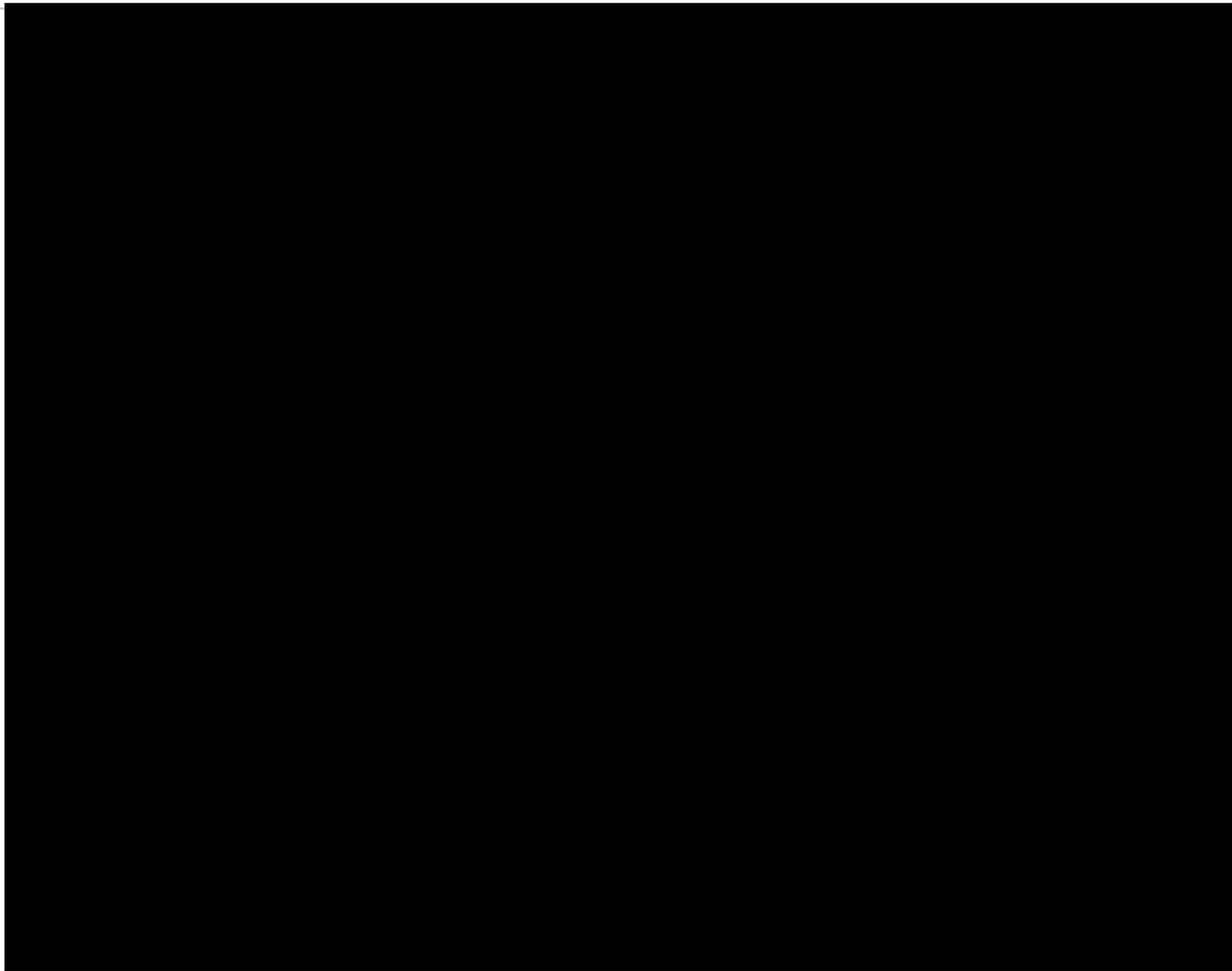
Grafico della funzione precedente in due casi diversi:



E dunque ipotizziamo che ad un certo istante dopo il big-bang ci fu la transizione da vuoto disordinato a vuoto ordinato (a cambia segno..)



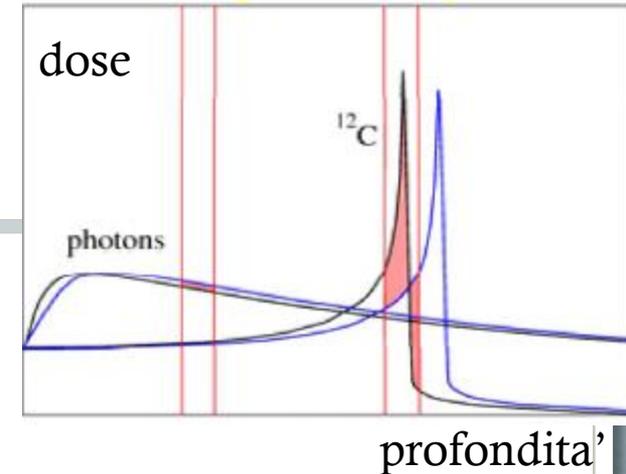
Quindi: da quel punto in poi (10^{-12} s dopo il big-bang) il vuoto diventa ordinato e le particelle acquistano massa. Tutto cambia e inizia uno sviluppo diversificato delle varie parti dell'Universo.



Le applicazioni: l' Adroterapia Oncologica

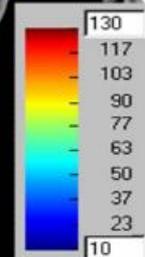
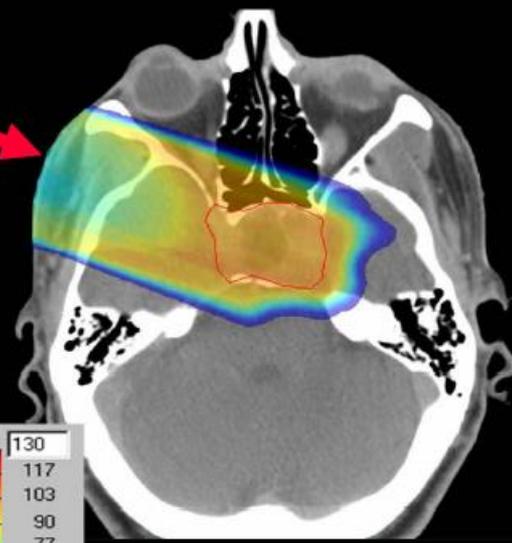
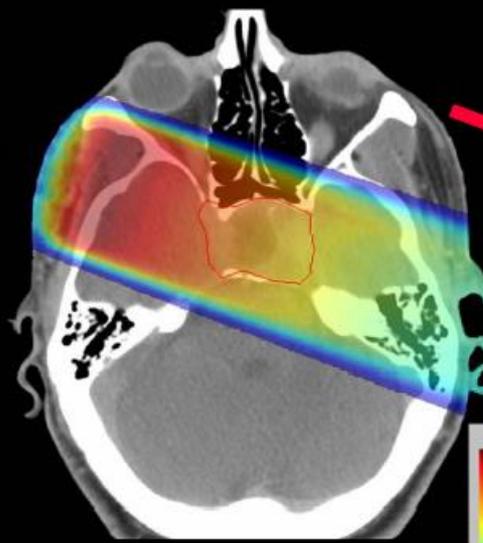
Adroterapia: uso di fasci di ioni carbonio o protoni per colpire tumori localizzati.

CNAO a Pavia: primo centro italiano
(~2000 pazienti /anno)



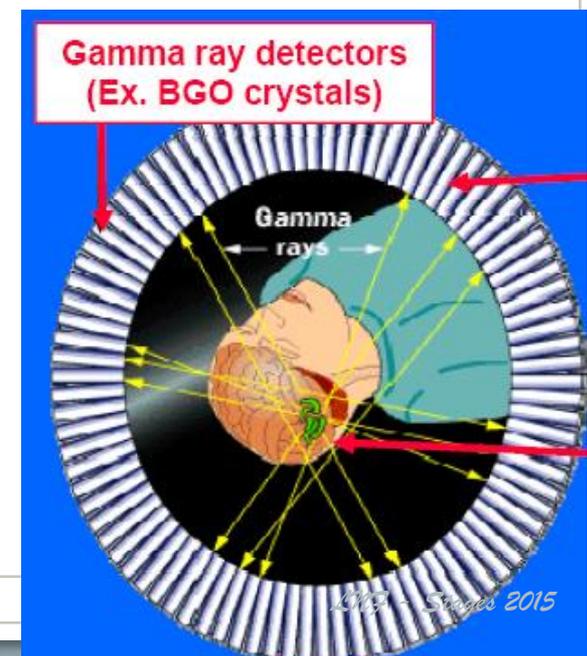
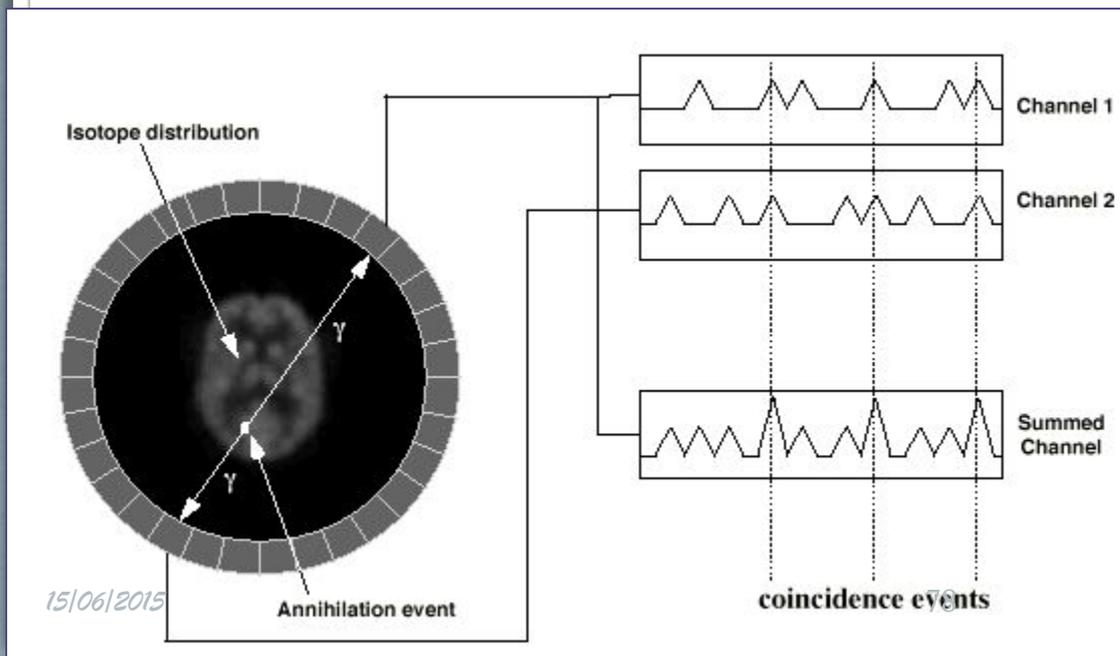
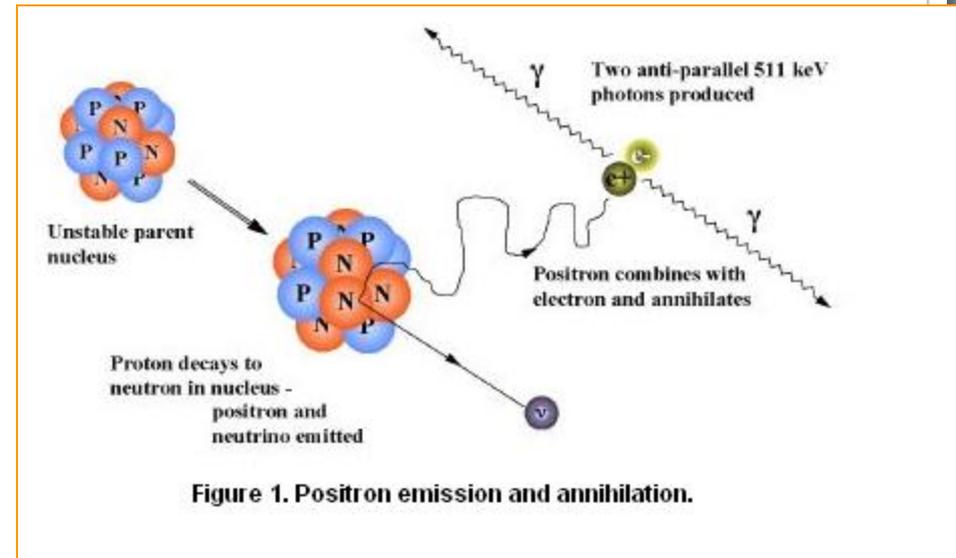
X rays

Protons or Carbon ions



La PET: Positron Emission Tomography

Tecnica diagnostica oncologica
→ il "tracciante" decade β^+ ;
→ il positrone **annichila** con un elettrone in pochi mm;
→ nell'annichilazione sono "prodotti" **due fotoni "back-to-back"**;
→ dalla coincidenza → posizione

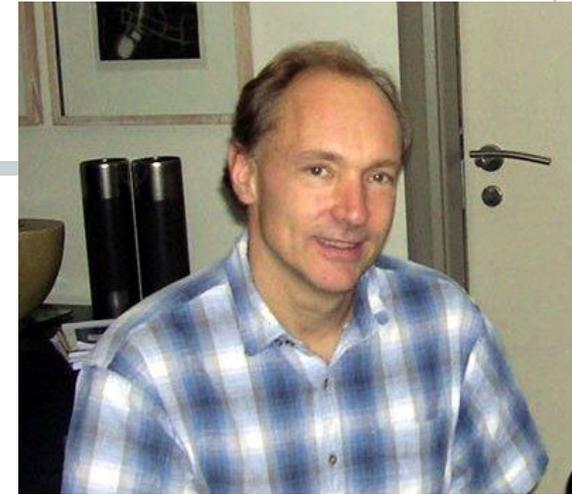


Dove è nato il WWW ?

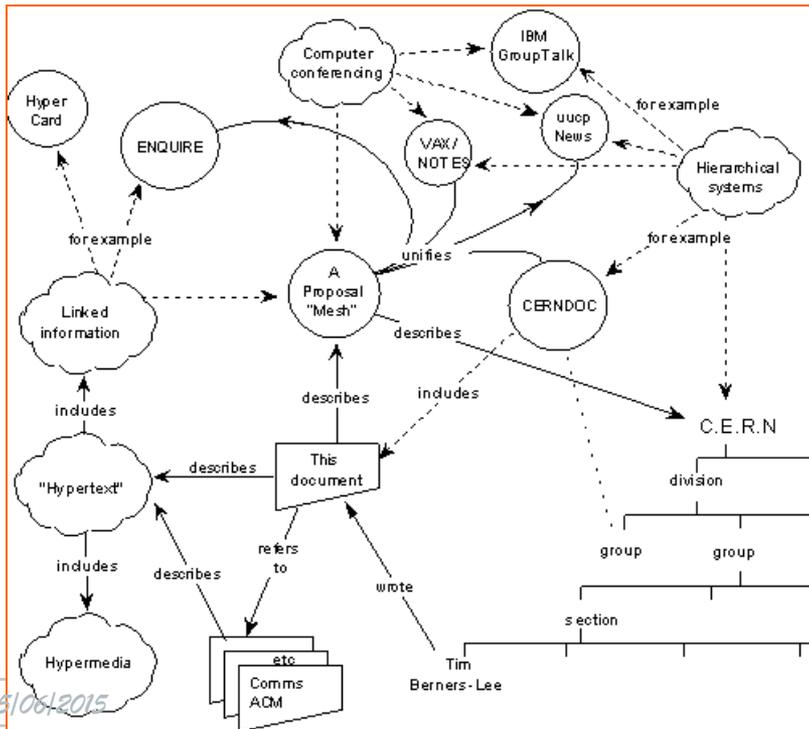
Risposta: al **CERN**

1989: proposta di una rete per scambiare le informazioni tra gli esperimenti;

1991: primo nodo Web del mondo al CERN e primo "rudimentale" browser



Tim Berners-Lee (1955 -)

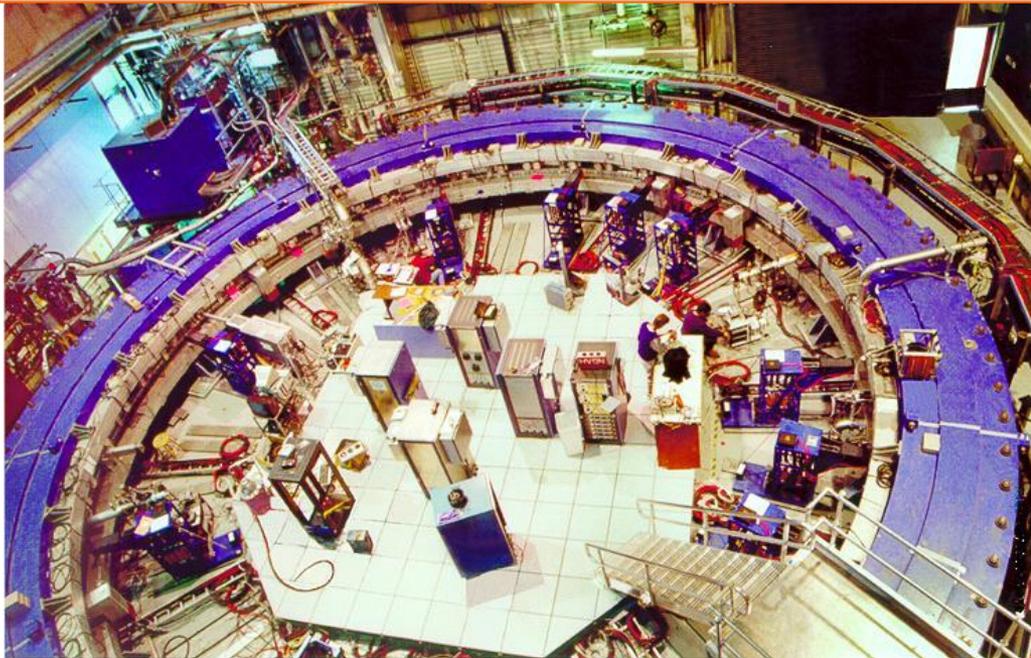


Primo server Web

La lezione principale dalla storia del bosone di Higgs è che incredibilmente, **“la fisica funziona”** ...
 “La cosa più incomprensibile della Natura è che sia comprensibile” (A.Einstein)

Il calcolo teorico: matematica, conti,....

L'esperienza: pezzi di ferro, magneti, bobine



Momento magnetico del muone: il **valore misurato** corrisponde con la **predizione teorica** entro pochi **ppm**

Here,

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = i\bar{e}_L^i \partial e_L^i + i\bar{u}_L^i \partial u_L^i + i\bar{e}_R^i \partial e_R^i + i\bar{u}_L^i \partial u_L^i + i\bar{d}_L^i \partial d_L^i + i\bar{u}_R^i \partial u_R^i + i\bar{d}_R^i \partial d_R^i ; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{\text{mass}} = -v \left(\lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_u^i \bar{u}_L^i u_R^i + \lambda_d^i \bar{d}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{M_Z^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu ; \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4} (G_{\mu\nu}^a)^2 - \frac{1}{2} W_\mu^+ W^{-\mu\nu} - \frac{1}{4} Z_\mu Z^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_{WZA} , \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} G_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_3 f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ W_\mu^\pm &= \partial_\mu W_\nu^\pm - \partial_\nu W_\mu^\pm \\ Z_\mu &= \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu \\ F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu , \end{aligned} \quad (5)$$

and

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WZA} &= ig_2 \cos \theta_W \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu Z^\nu + W_\mu^+ W^{-\mu\nu} Z^\nu - W_\mu^- W^{+\mu\nu} Z^\nu \right] \\ &+ ie \left[(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu A^\nu + W_\mu^+ W^{-\mu\nu} A^\nu - W_\mu^- W^{+\mu\nu} A^\nu \right] \\ &+ g_2^2 \cos^2 \theta_W \left(W_\mu^+ W_\nu^- Z^\mu Z^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu\nu} Z_\nu Z^\mu \right) \\ &+ g_2^2 \left(W_\mu^+ W_\nu^- A^\mu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu\nu} A_\nu A^\mu \right) \\ &+ g_2 e \cos \theta_W \left[W_\mu^+ W_\nu^- (Z^\mu A^\nu + Z^\nu A^\mu) - 2W_\mu^+ W^{-\mu\nu} Z_\nu A^\nu \right] \\ &+ \frac{1}{2} g_2^2 \left(W_\mu^+ W_\nu^- \right) \left(W^{+\mu\nu} W^{-\nu\mu} - W^{+\nu\mu} W^{-\mu\nu} \right) ; \end{aligned} \quad (6)$$

and

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}/\psi} = -g_3 A_\mu^a J_{(3)}^{a\mu} - g_2 \left(W_\mu^+ J_{W^+}^\mu + W_\mu^- J_{W^-}^\mu + Z_\mu J_Z^\mu \right) - e A_\mu J_A^\mu , \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} J_{(3)}^{a\mu} &= \bar{u}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a u^i + \bar{d}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a d^i \\ J_{W^+}^\mu &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\bar{u}_L^i \gamma^\mu e_L^i + V^{ij} \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j \right) \\ J_{W^-}^\mu &= \left(J_{W^+}^\mu \right)^* \\ J_Z^\mu &= \frac{1}{\cos \theta_W} \left[\frac{1}{2} \bar{e}_L^i \gamma^\mu e_L^i + \left(-\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W \right) \bar{e}_L^i \gamma^\mu e_L^i + \left(\sin^2 \theta_W \right) \bar{e}_R^i \gamma^\mu e_R^i \right. \\ &+ \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_L^i \gamma^\mu u_L^i + \left(-\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_R^i \gamma^\mu u_R^i \\ &+ \left. \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_L^i \gamma^\mu d_L^i + \left(\frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_R^i \gamma^\mu d_R^i \right] \\ J_A^\mu &= (-1) \bar{e}_L^i \gamma^\mu e^i + \left(\frac{2}{3} \right) \bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left(-\frac{2}{3} \right) \bar{d}^i \gamma^\mu d^i . \end{aligned} \quad (8)$$