

La scoperta del Bosone di Higgs a LHC

Roberto Ferrari

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Liceo Marconi - Parma, 8 marzo 2013

Sommario

1. l'acceleratore (LHC)
2. il modello standard
3. l'esperimento (ATLAS)
4. risultati
5. un po' di pubblicità

1. l'acceleratore (LHC)

Come si cerca il bosone di Higgs?

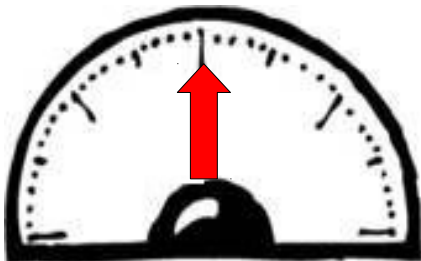
- Con la forza bruta
 - Collisionatori ("collider")



- Ma con precisione al limite della tecnologia (e oltre)
 - Posizioni al millesimo di millimetro ("micron")
 - Tempi al miliardesimo di secondo ("nanosecondo")

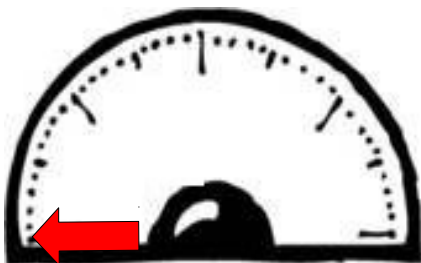
Cos'è un collider?

- Macchina che provoca scontri frontali tra particelle cariche accelerate ad alta energia



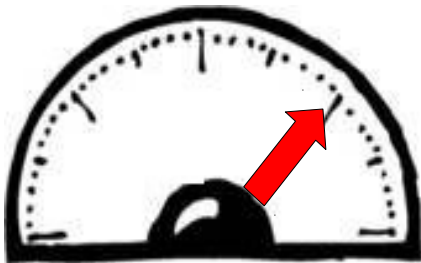
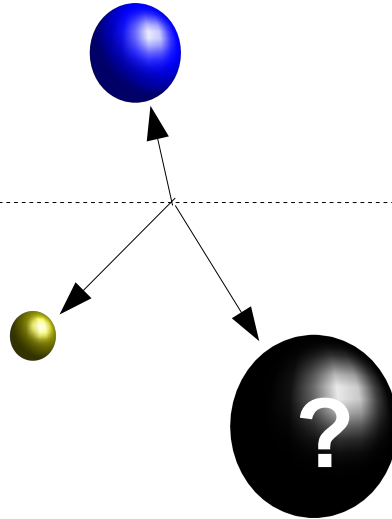
Cos'è un collider?

- Le particelle (o pezzi di esse) si annichilano e tutta l'energia è disponibile per ...



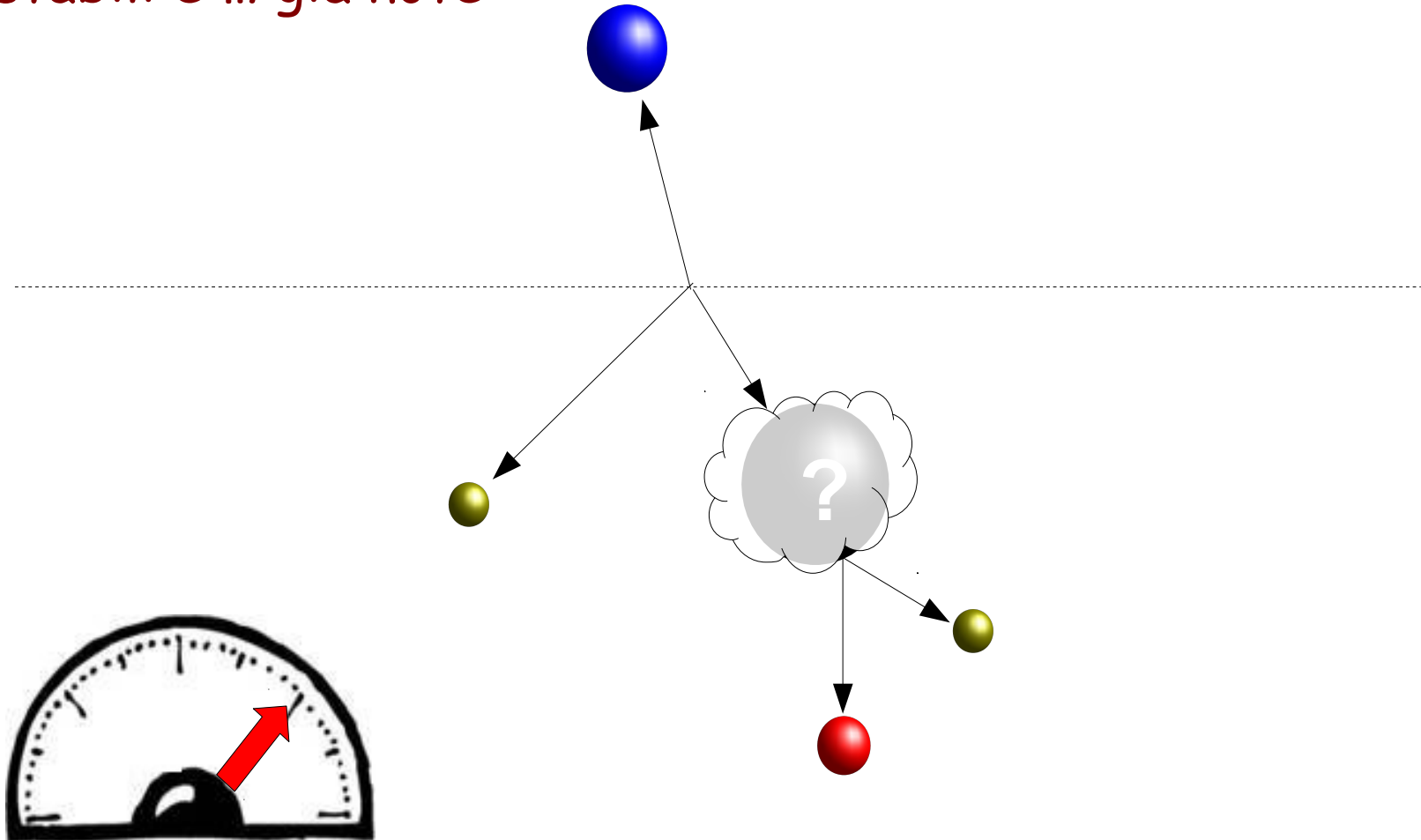
Cos'è un collider?

- .. per creare altre particelle, più pesanti e più rare
 - ... più energia, più possibilità di creare particelle sempre più pesanti



Cos'è un collider?

- Che però decadono subito in particelle più leggere, più stabili e ... già note



Collider

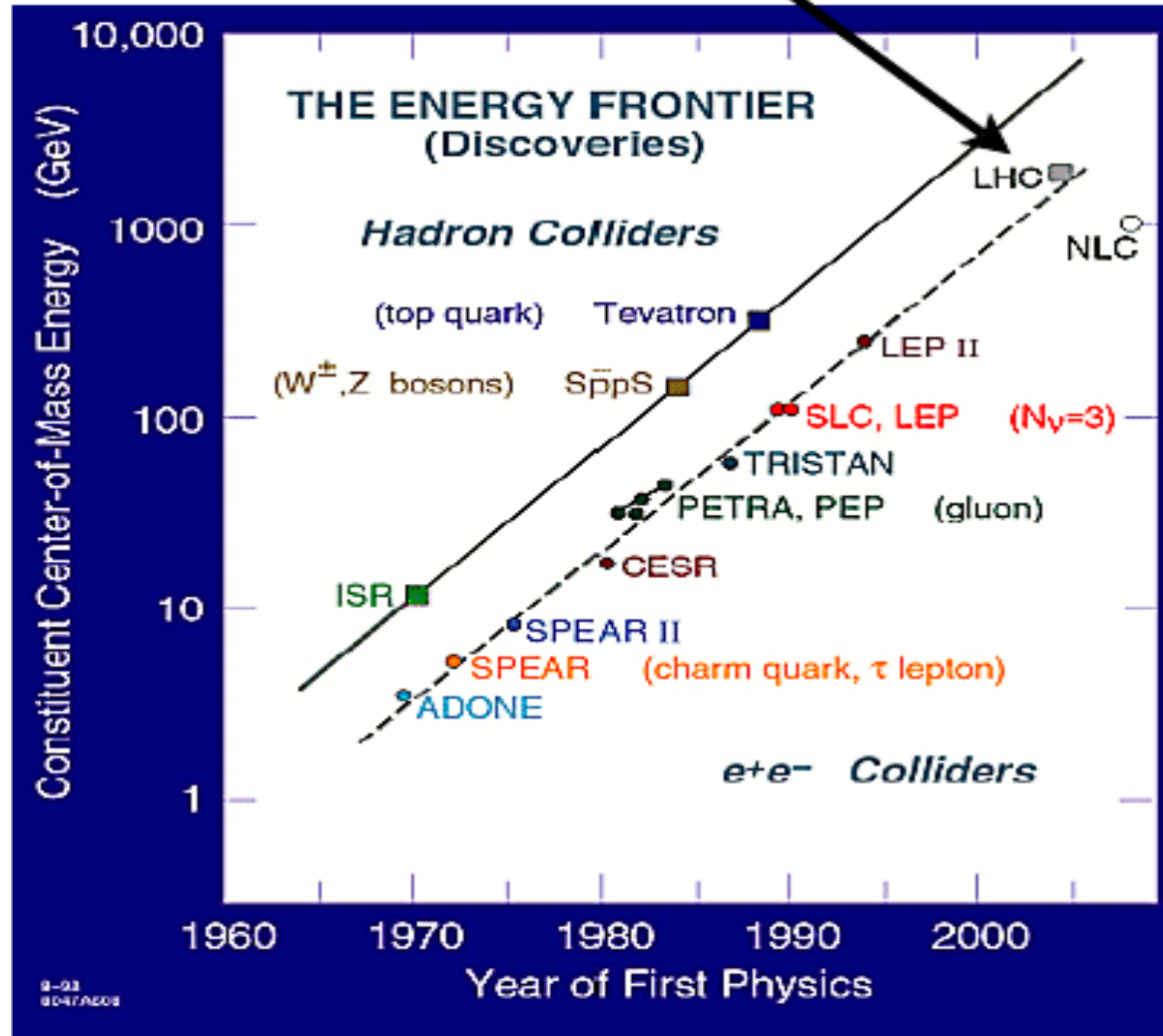
Due categorie:

e^+e^- [1]

$pp/pp\bar{p}$ [2]

[1]=pallettoni da
cinghiale

[2]=pallottole per
quaglie (tanti pallini)



Accelerazione di Protoni

Tutto parte da una bombola di idrogeno ...

Gli atomi vengono ionizzati ("spogliati" dell'unico elettrone)

Un campo elettrico spinge i protoni "nudi" nel primo acceleratore

Campi magnetici li catturano e li tengono sulla "giostra"

Campi elettrici e elettromagnetici (radiofrequenze) li accelerano

All'energia giusta vengono passati nell'acceleratore successivo

Protoni in pacchetti (in LHC 2808 con 10^{11} protoni ciascuno)

Elementi di un Acceleratore (sincrotrone)

Campi magnetici (dipoli):

immaginate le catene del calcinulo

Campi elettromagnetici (cavità a radiofrequenza):

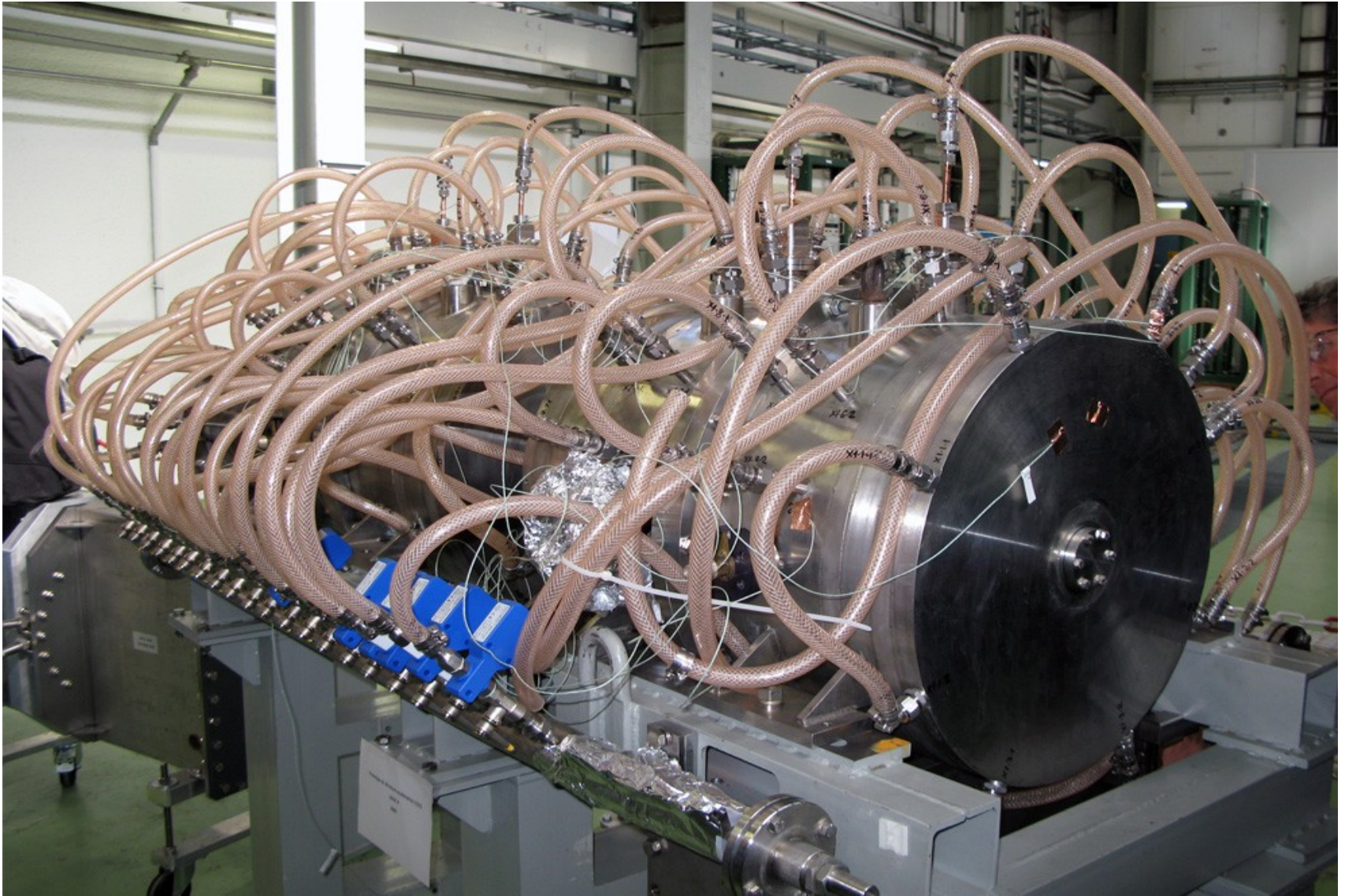
immaginate un braccio che dà una spinta ogni volta che un seggiolino gli passa davanti

spinge più forte chi va più piano !

I Dipoli



Le Cavità a RadioFrequenza

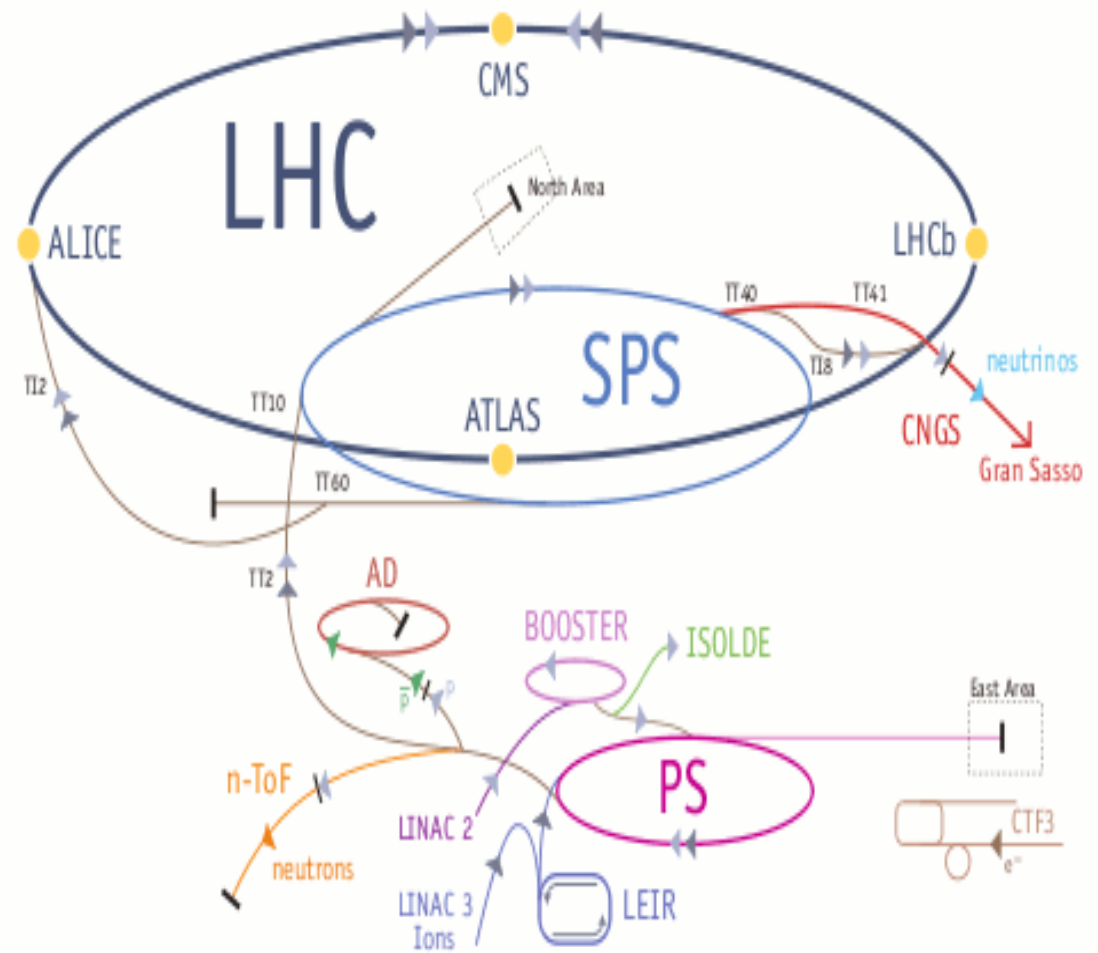




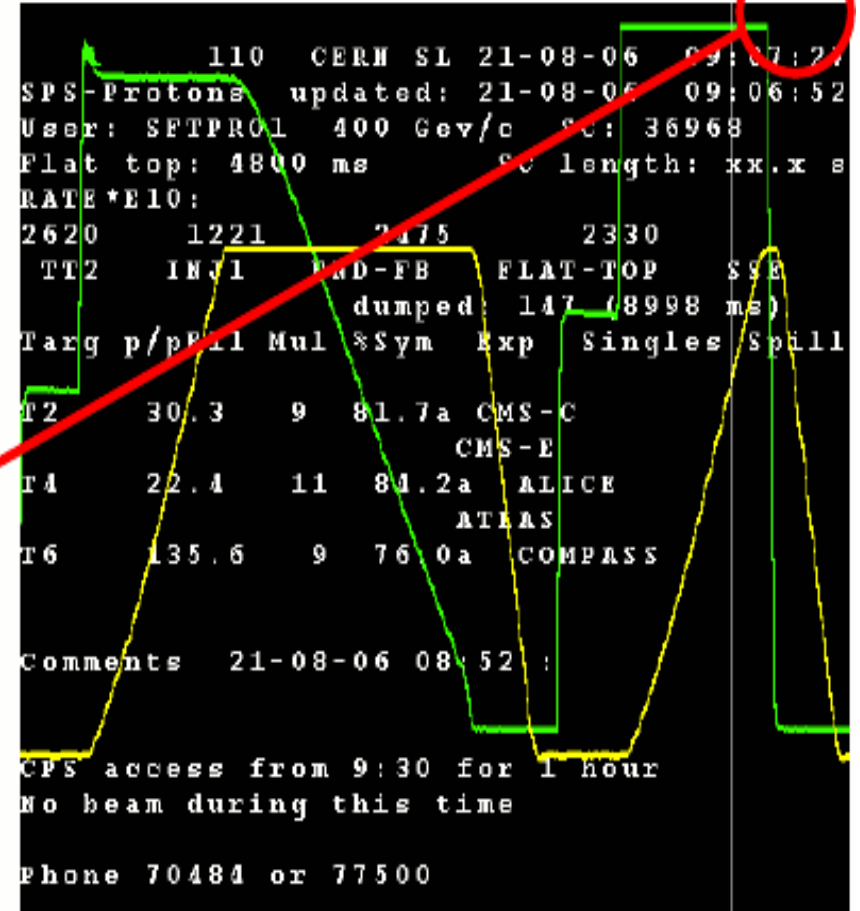
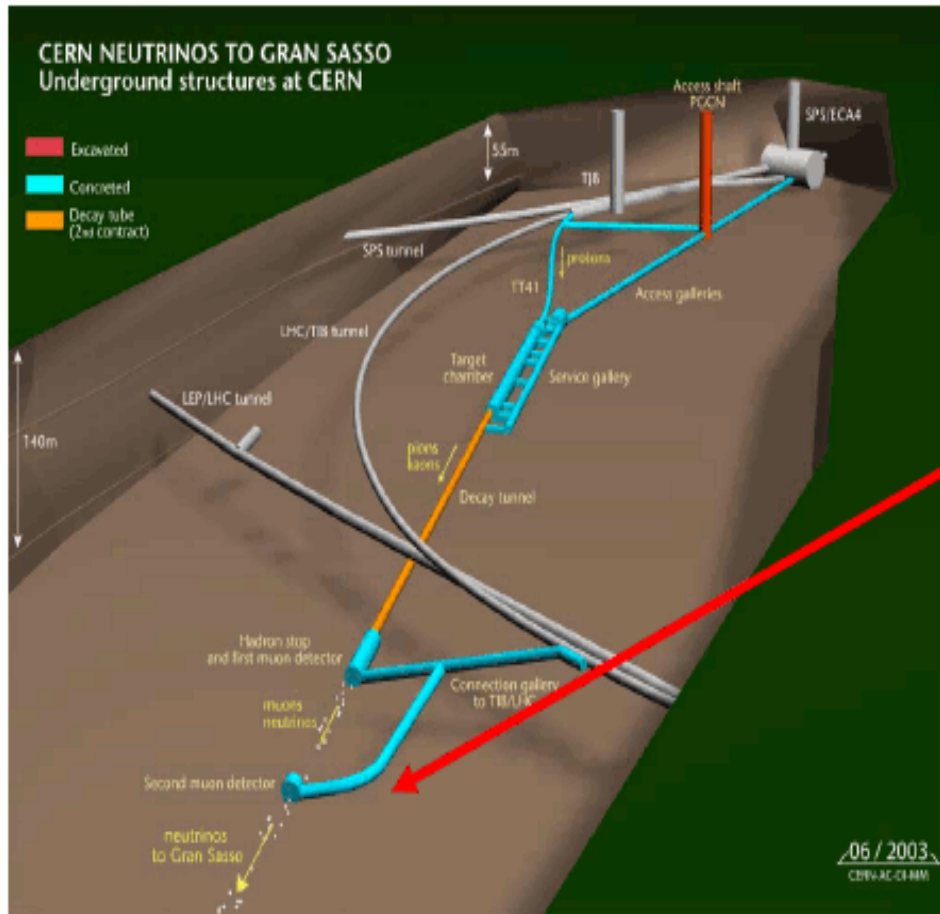
CERN

Tanti diversi acceleratori: PS, SPS, ..., LHC

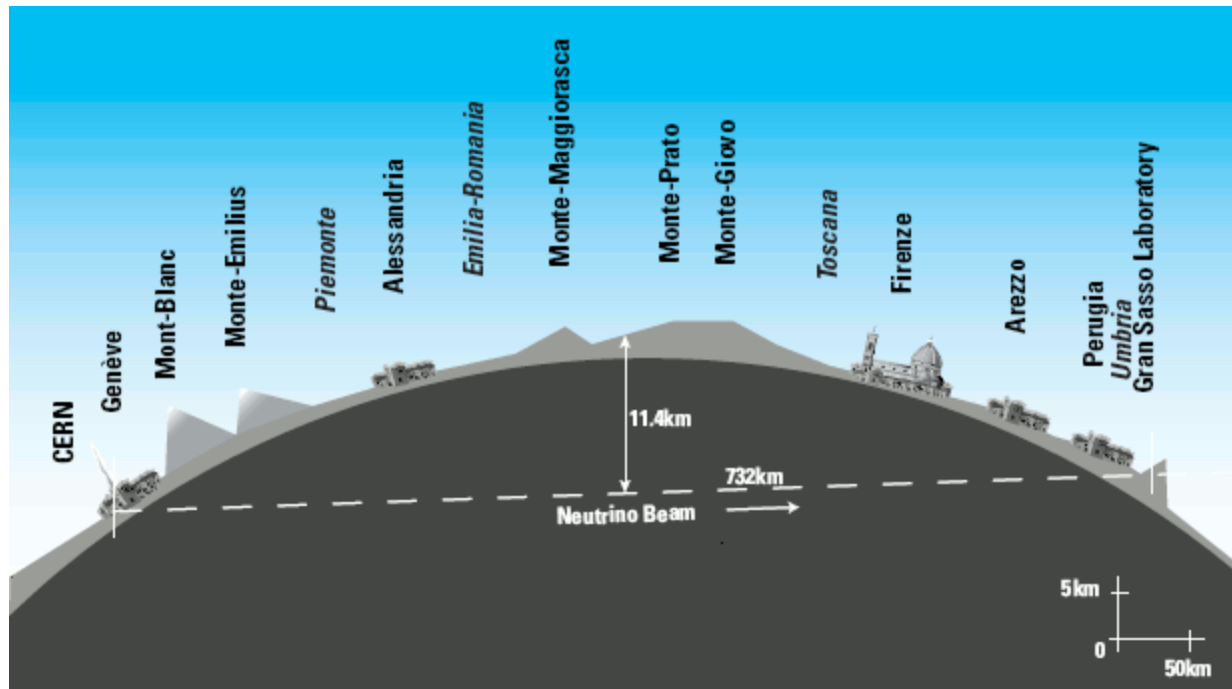
Programma di ricerca mirato (ma non esclusivo) alla fisica delle particelle.



CERN - SPS → Gran Sasso



Verso il Gran Sasso



Il fascio di neutrini per il Gran Sasso passa sotto il Monte Maggiore (confine Parma-Piacenza-Genova)

Parametri importanti (LHC)

1) Energia: 14 TeV [ora 8 TeV]

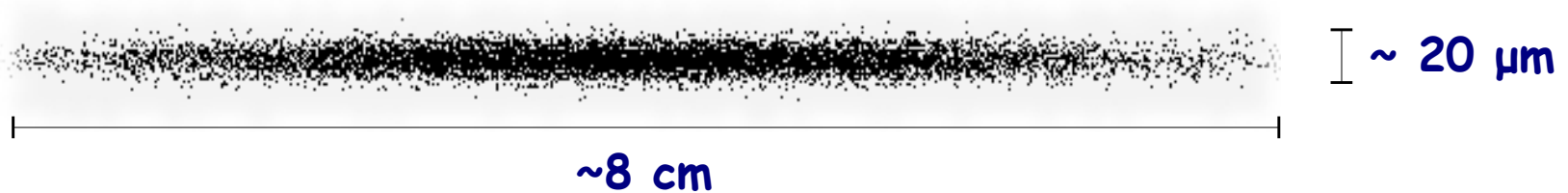
2) Intensità: 1 miliardo/s

3) Frequenza: 40 milioni/s [ora 20 milioni/s]

1 TeV = energia di una zanzara in volo, concentrata in uno spazio un milione di milioni di volte più piccolo ...

Treni di protoni

- il bosone di Higgs è raro: < 1 ogni 10 miliardi di collisioni protoni raggruppati in pacchetti da 100 miliardi ciascuno



circa 3000 pacchetti circolanti

=> 40 milioni di collisioni al secondo

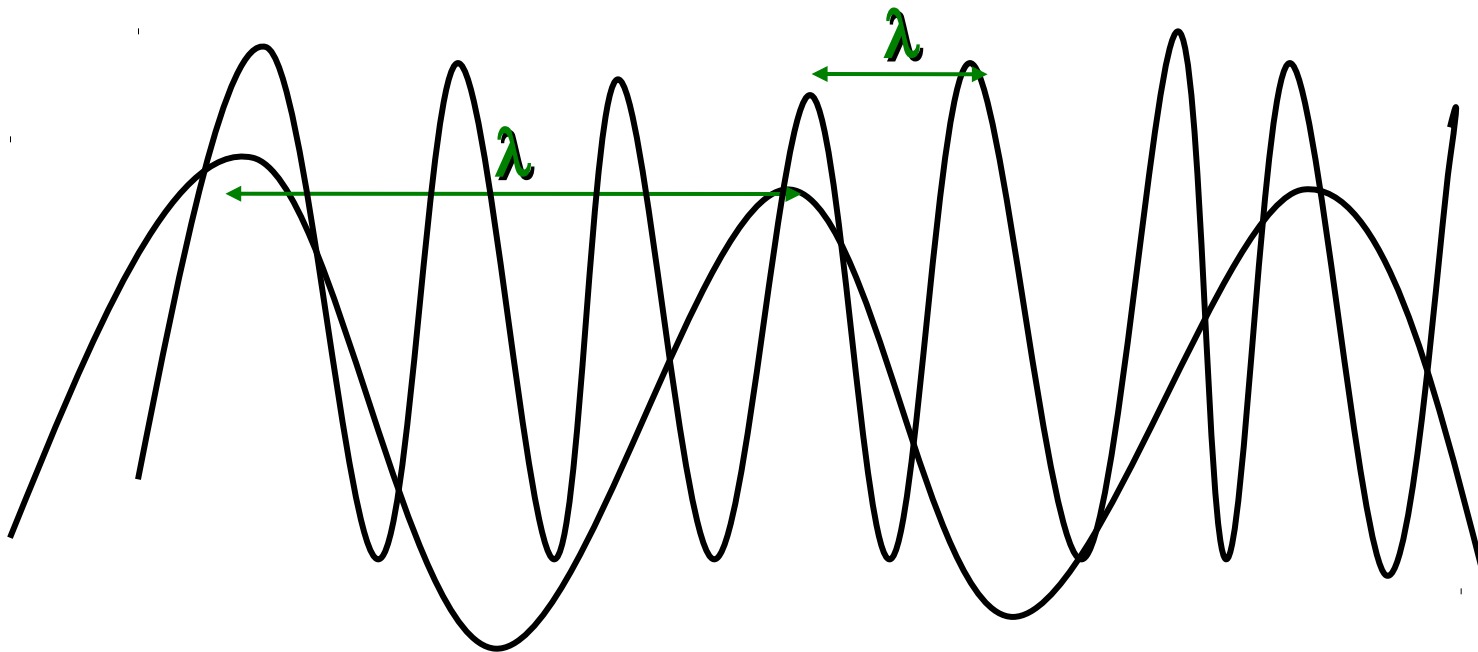
- come sparare due spilli dai lati opposti dell'Atlantico e farli urtare a metà strada ogni 25 miliardesimi di secondo



Energia e lunghezza

lunghezza d'onda * frequenza = velocità della luce

energia : frequenza = costante di Planck

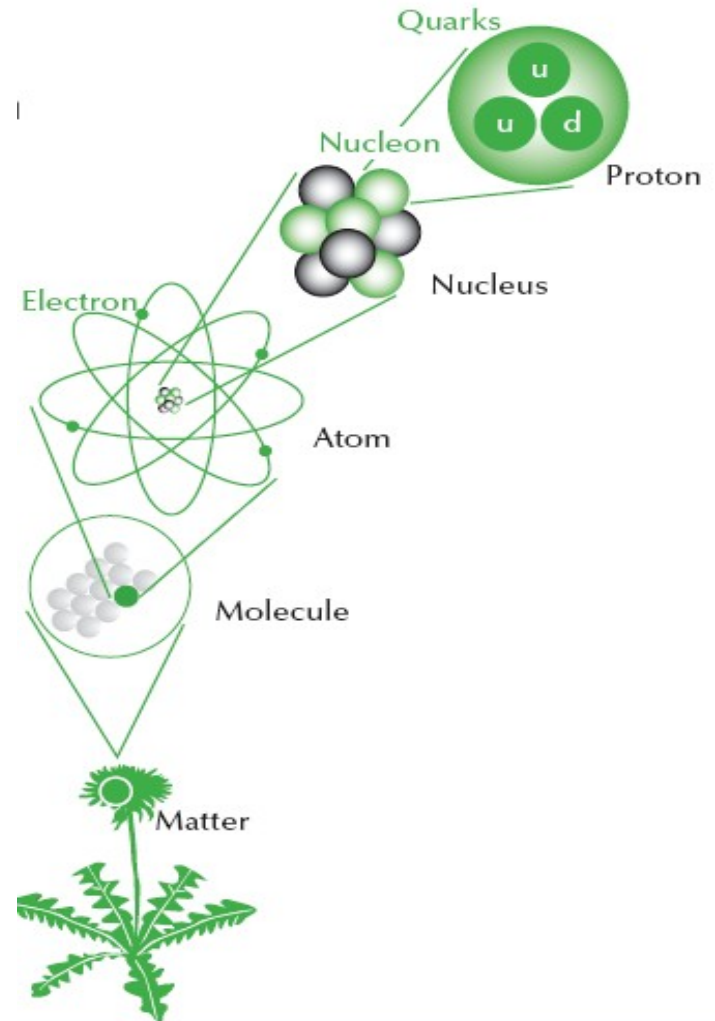


$$\lambda * E = \text{costante}$$

$$(1 \text{ nm} \rightarrow 200 \text{ eV})$$

Dimensioni

- Cellula: qualche millesimo di mm (10^{-6} m)
- Molecola: qualche milionesimo di mm (10^{-9} m)
- Atomo: ~ 100 miliardesimi di mm (10^{-10} m)
- Nucleo: ~ 0.001 miliardesimi di mm (10^{-15} m)
- Quark (?) < 0.1 milionesimi di miliardesimi di mm (10^{-19} - 10^{-20} m)



Mondo Osservabile

Atomo : Nucleo $\sim 10^5 \sim$ Nucleo : Quark

Uomo : Atomo $\sim 10^{10} \sim$ Atomo : Quark

Età universo = 13.7 miliardi di anni

→ dimensioni universo "osservabile" $\sim 10^{26}$ m

circa 46 "ordini di grandezza" rispetto ai quark

(Universo : Uomo) quasi come (Uomo : Quark)

Microscopio per Particelle

Maggiore energia degli urti

→ migliore capacità di risoluzione

del "microscopio":

LHC → $\sim 10^{-20}$ m

come se guardassimo un campo da calcio dai confini dell'universo

LHC = Microscopio più potente mai costruito !

nuove particelle ?

sottostruttura dei quark ?

dimensioni extra ?

stringhe ?

Macchina del Tempo

Negli urti piombo-piombo, densità (pressioni)
e temperature come solo pochi istanti
dopo il Big Bang:

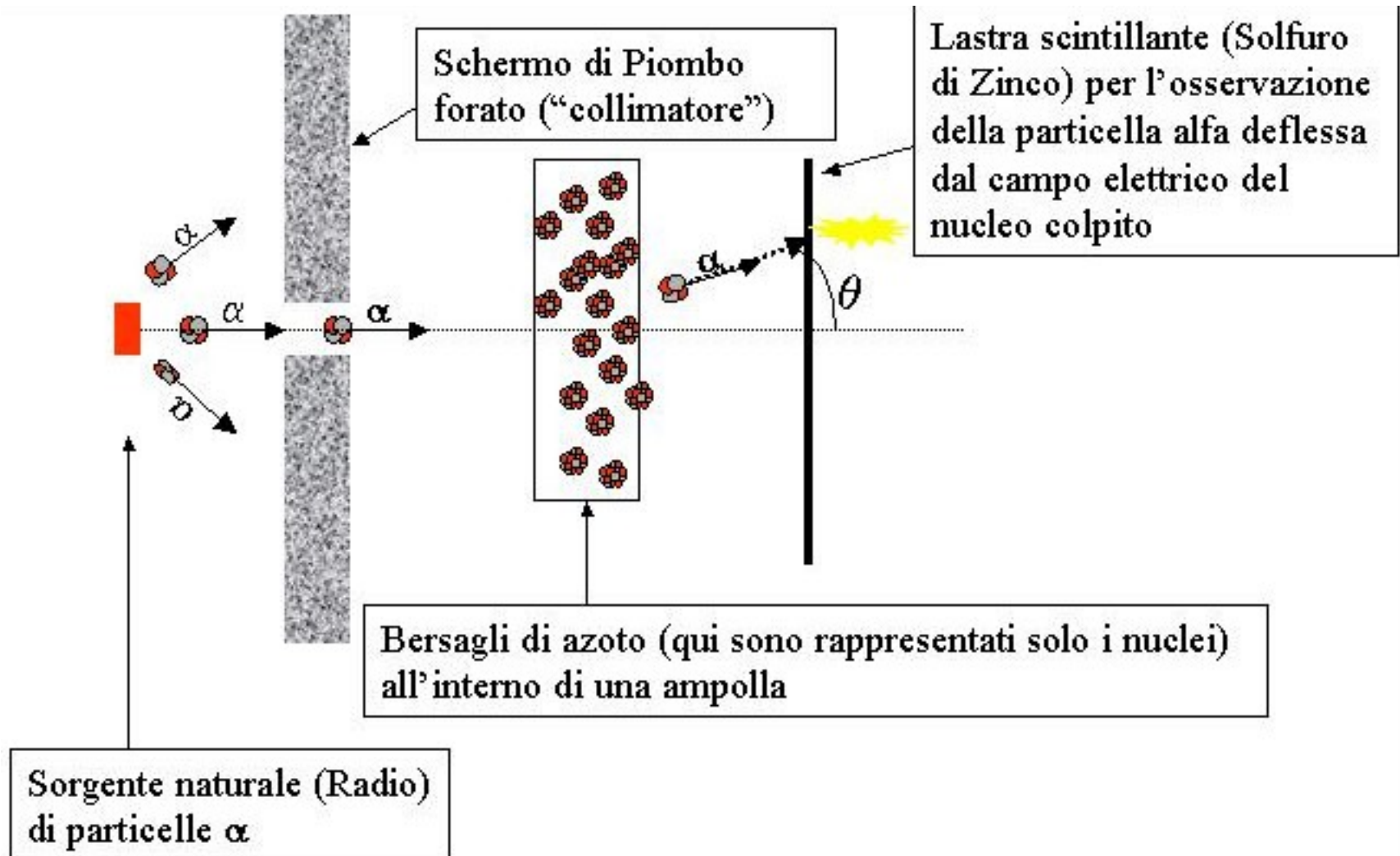
$T \sim 1800$ miliardi di gradi
 $\sim T(\text{interno del sole}) \times \text{centomila}$

materia ordinaria (protoni, neutroni, nuclei)
completamente "fusa"

→ nuovo stato della materia

2. il modello standard

L'esperimento di Rutherford (1909-1911)



La struttura dell'atomo

- 1 o più elettroni "orbitano" attorno ad un nucleo
- massa concentrata nel nucleo
 - raggio orbite ~ 0.1 nanometri (10^{-10} m)
 - raggio nucleo ~ 1 femtometro (10^{-15} m)

Legame atomico: cariche e forze elettromagnetiche (energie ~ 1 eV)

Se l'atomo fosse un campo da calcio

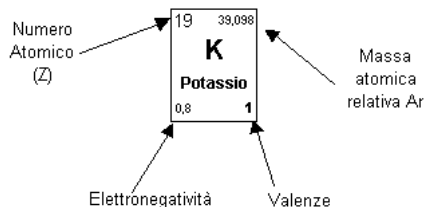
→ il nucleo sarebbe una biglia di 1 mm al centro del campo

Problema: cosa tiene assieme il nucleo ?

... cariche e forze nucleari (energie ~ 1 MeV)

TAVOLA PERIODICA degli ELEMENTI

										GRUPPO 0																																																																															
IA										II A										III A										IV A										V A										VI A										VII A										-																			
1	1,0079																			2	4,00260																																																																				
1	H Idrogeno																			2	He Elio																																																																				
2	3 6,941	4 9,01218																			5 10,81	6 12,011	7 14,0067	8 15,9994	9 18,99840	10 20,179																																																															
2	Li Litio	Be Berillio																			B Boro	C Carbonio	N Azoto	O Ossigeno	F Fluoro	Ne Neon																																																															
3	11 22,98977	12 24,305																			13 26,98154	14 28,086	15 30,97376	16 32,06	17 35,453	18 39,948																																																															
3	Na Sodio	Mg Magnesio																			Al Alluminio	Si Silicio	P Fosforo	S Zolfo	Cl Cloro	Ar Argo																																																															
4	19 39,098	20 40,08	21 44,9559	22 47,90	23 50,9414	24 51,996	25 54,938	26 55,847	27 58,9332	28 58,70	29 63,546	30 65,38	31 69,72	32 72,59	33 74,9216	34 78,96	35 79,904	36 83,80																																																																							
4	K Potassio	Ca Calcio	Sc Scandio	Ti Titanio	V Vanadio	Cr Cromo	Mn Manganese	Fe Ferro	Co Cobalto	Ni Nichelio	Cu Rame	Zn Zinco	Ga Gallio	Ge Germanio	As Arsenico	Se Selenio	Br Bromo	Kr Kripto																																																																							
5	37 85,4678	38 87,62	39 88,9059	40 91,22	41 92,9064	42 95,94	43 (97)	44 101,07	45 102,9055	46 106,4	47 107,868	48 112,40	49 114,82	50 118,69	51 121,75	52 127,60	53 126,9045	54 131,30																																																																							
5	Rb Rubinio	Sr Stronzio	Y Ittrio	Zr Zirconio	Nb Niobio	Mo Molibdeno	Tc Tecnezio	Ru Rutenio	Rh Rodio	Pd Palladio	Ag Argento	Cd Cadmio	In Indio	Sn Stagno	Sb Antimonio	Te Tellurio	I Iodio	Xe Xeno																																																																							
6	55 132,9054	56 137,34	57 138,9055	72 178,49	73 180,9479	74 183,85	75 186,207	76 190,2	77 192,22	78 195,09	79 196,9665	80 200,59	81 204,37	82 207,2	83 208,9804	84 [209]	85 [210]	86 [222]																																																																							
6	Cs Cesio	Ba Bario	La Lantanio	Hf Afnio	Ta Tantallio	W Tungsteno	Re Renio	Os Osmio	Ir Iridio	Pt Platino	Au Oro	Hg Mercurio	Tl Tallio	Pb Piombo	Bi Bismuto	Po Polonio	At Astatato	Rn Radon																																																																							
7	87 223	88 226,0254	89 [227]															90 232,0381	91 231,0359	92 238,029	93 237,0482	94 (244)	95 (243)	96 (247)	97 (247)	98 (251)	99 (254)	100 [257]	101 [258]	102 [255]	103 [260]																																																										
7	Fr Francio	Ra Radio	Ac Attinio															Th Torio	Pa Protoattinio	U Uranio	Np Nettunio	Pu Plutonio	Am Americio	Cm Curio	Bk Berkelio	Cf Californio	Es Einstenio	Fm Fermio	Md Mendelevio	No Nobelio	Lw Lawrencio																																																										
										III B										IV B										V B										VI B										VII B										VIII B										I B										II B									



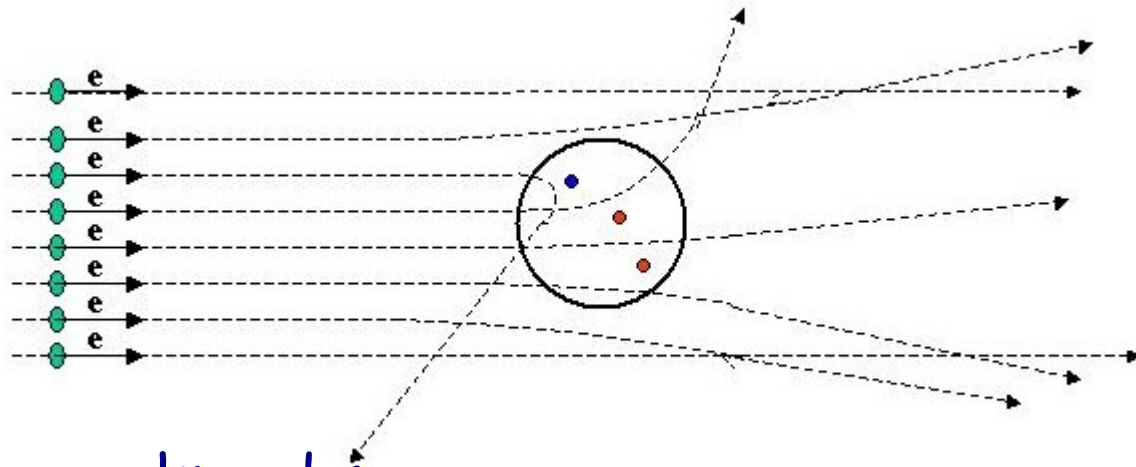
- GAS
- LIQUIDI
- SOLIDI
- PREPARATI ARTIFICIALMENTE
- ELEMENTI DI TRANSIZIONE

by Bottasso & Riba ©

I Quark

1969 Stanford Linear Accelerator (SLAC)

Scattering (urti) inelastici (il protone si rompe) di fasci di elettroni su bersagli (protoni)



Si parte con 3 quark: u,d,s

protone: uud neutrone: udd

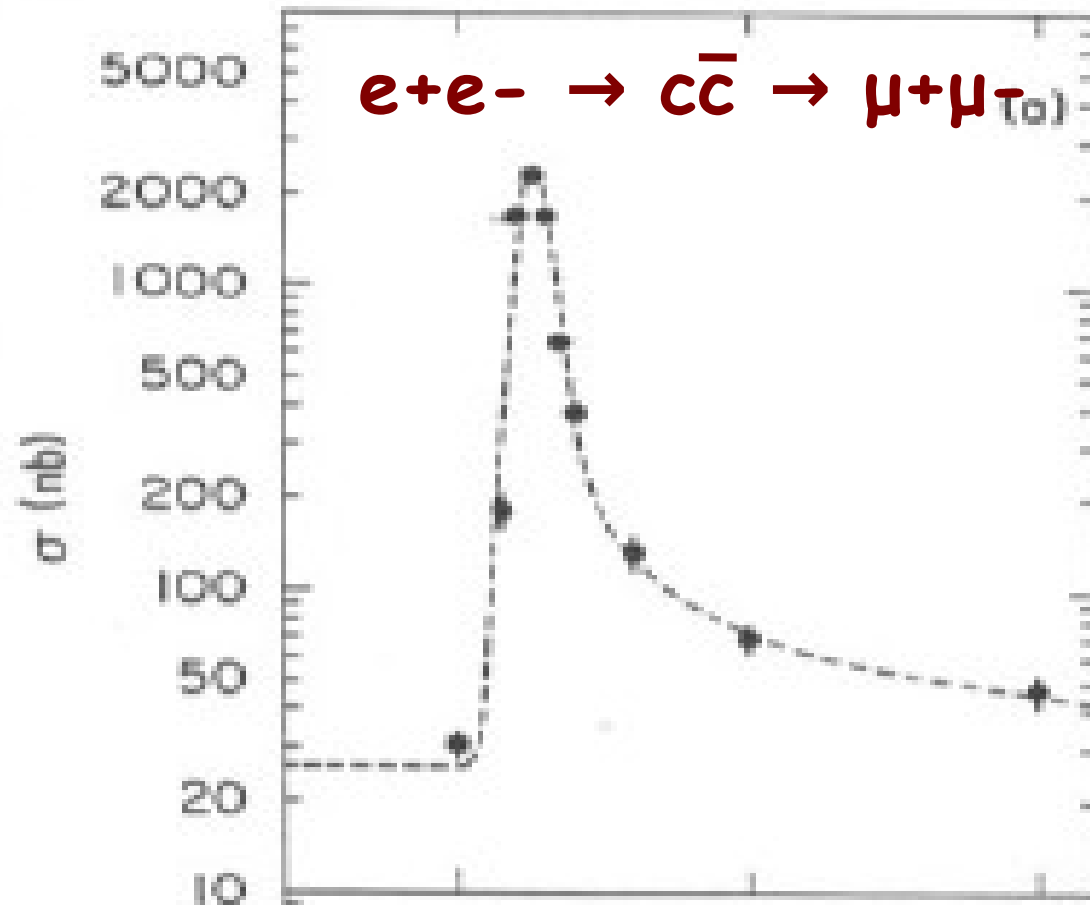
decadimenti deboli: d,s \leftrightarrow u

[es. decadimento "beta" del neutrone: $n \rightarrow pe\nu$]

il quark charm

1974: J/Ψ (stato legato $c\bar{c}$)

Quando la
sfiga ...

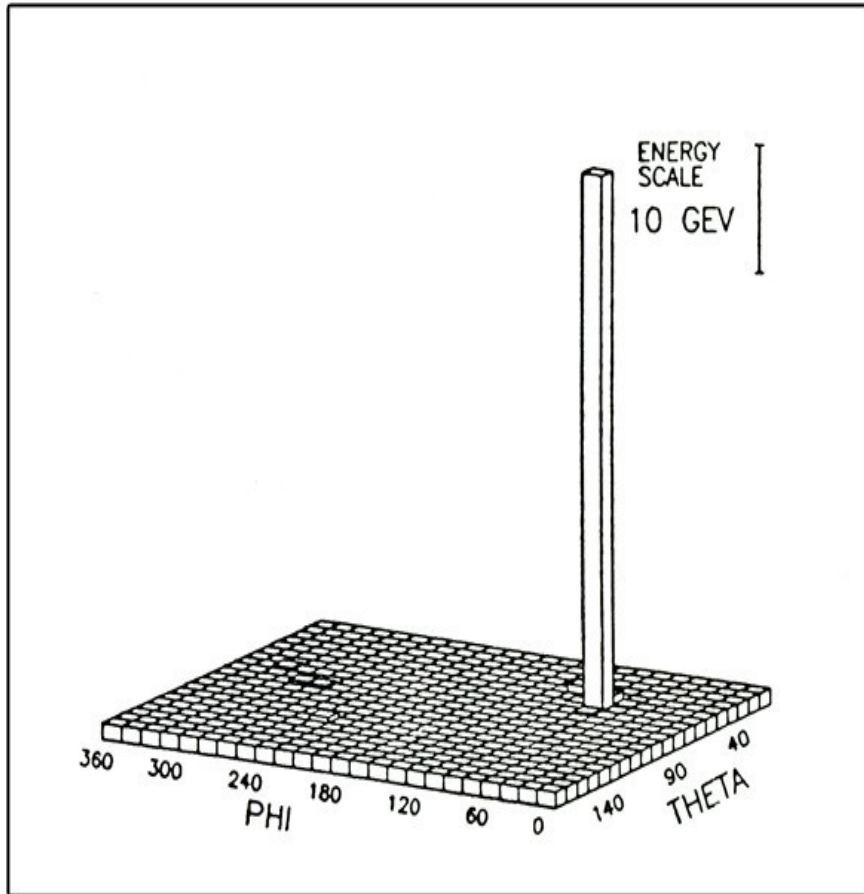


SLAC $e+e-$ ring (SPEAR)

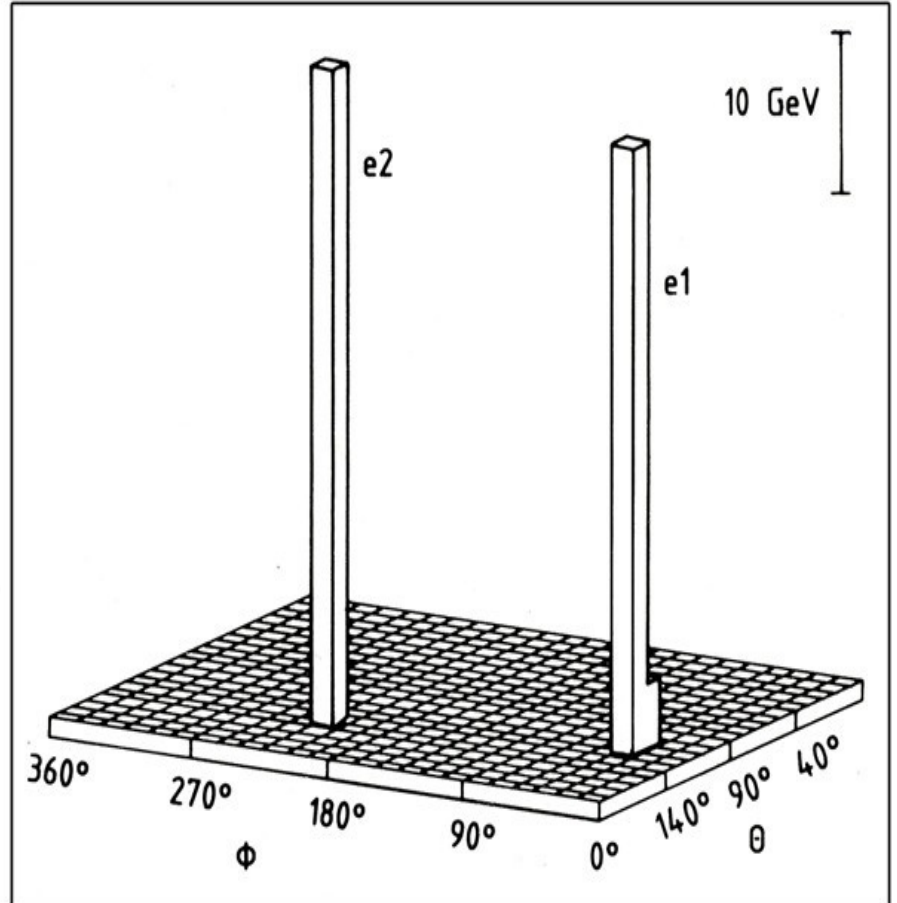
Adone (LNF)



I bosoni vettoriali W^\pm/Z^0 (1983)



$$p\bar{p} \rightarrow W^\pm \rightarrow e^\pm \nu$$



$$p\bar{p} \rightarrow Z \rightarrow e^+e^-$$

CERN $p\bar{p}$ Collider

interazioni deboli

Cariche:

decadimento beta: $n \rightarrow p W^- \rightarrow p e^- \bar{\nu}$

→ emissione di un W "virtuale"

produzione W : $p\bar{p} \rightarrow W^\pm \rightarrow e^\pm \nu$

→ creazione di un W "reale"

Neutre:

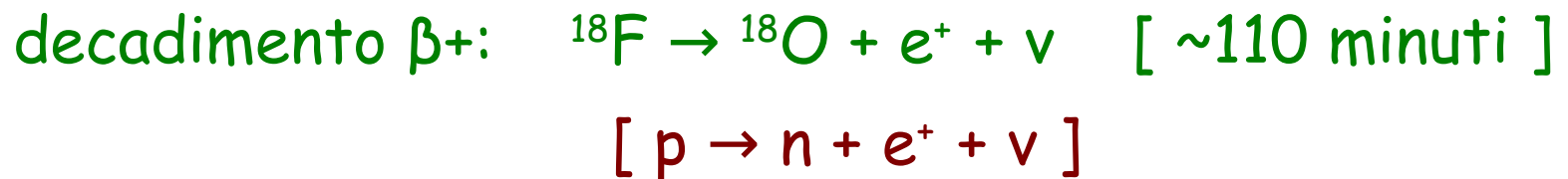
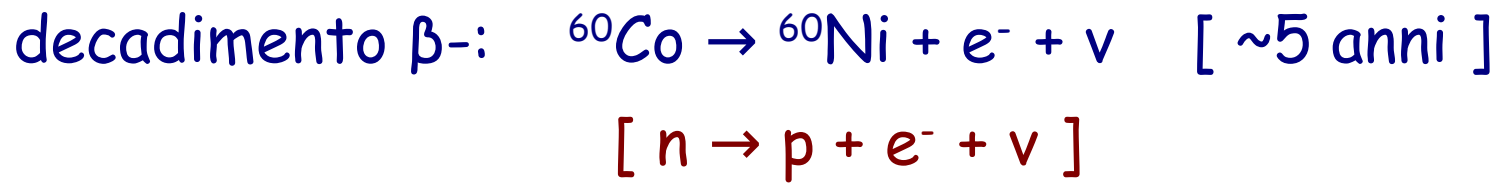
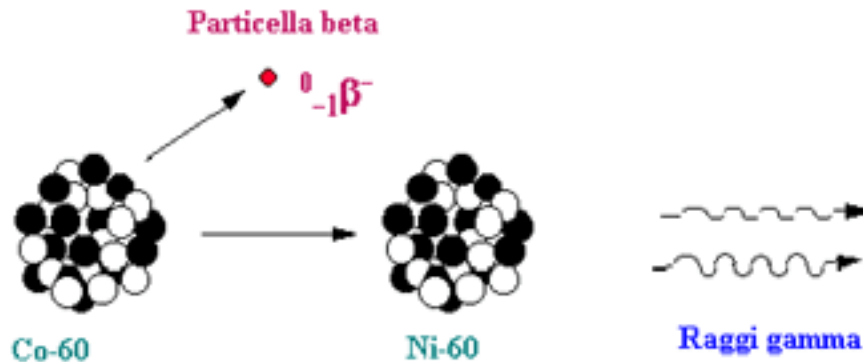
correnti neutre: $\nu p \rightarrow \nu p$

→ scambio di uno Z "virtuale"

produzione Z : $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$

→ creazione di uno Z "reale"

I decadimenti β^\pm



*** PET ***

e^+ (1932) = positrone = antiparticella dell'elettrone

<<Cari Signore e Signori Radioattivi,

Come latore di queste righe [...] cercherò di spiegarmi in modo più esatto, considerando le statistiche 'false' dei nuclei dell' $N-14$ e del $Li-6$, così come lo spettro β continuo. Ho escogitato un rimedio disperato per salvare il "teorema dello scambio" di statistiche e il teorema dell'energia. Vale a dire [c'è] la possibilità che possano esistere nei nuclei particelle elettricamente neutre che mi piace chiamare **neutroni**, le quali hanno uno spin di $1/2$ e obbediscono al principio di esclusione e, in più, differiscono dai quanti di luce nel senso che non viaggiano alla velocità della luce: la massa del neutrone deve essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell'elettrone e, in ogni caso, non superiore a $0,01$ della massa del protone. Lo spettro β continuo diventerebbe allora comprensibile in base al presupposto che nel decadimento β un neutrone venga emesso insieme all'elettrone, in modo tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone resti costante. [...]

Ma non mi sento abbastanza sicuro di pubblicare qualcosa riguardo a questa idea, così per prima mi rivolgo con fiducia a voi, cari radioattivi, con una questione in merito alla situazione concernente la prova sperimentale di un tale neutrone, se abbia qualcosa come circa 10 volte la penetrante capacità di un raggio γ

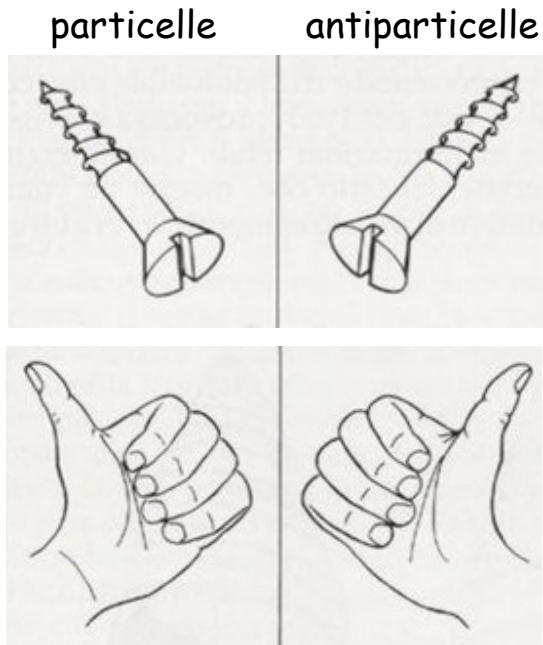
Ammetto che il mio rimedio può sembrare di avere una piccola probabilità a priori, perché i neutroni, se esistono, probabilmente sarebbero stati visti molto tempo fa. Tuttavia, solo chi scommette può vincere, e la gravità della situazione dello spettro β continuo può essere resa in modo chiaro con il detto del mio onorato predecessore in carica, Mr. Debye, [...]

"È meglio non pensarci affatto, come le nuove tasse." [...]

Così, cari radioattivi, mettetelo alla prova e sistematelo nel modo giusto. [...]

Con tanti saluti a voi, anche a Mr. Back, il vostro devoto servitore »

un bel problema: la massa !



a) i decadimenti beta coinvolgono solo particelle "sinistre" e anti-particelle "destre"

b) la massa mescola in modo irreparabile particelle "destre" e "sinistre" (esistono sistemi di riferimento in cui le due proprietà si invertono) → non può essere inclusa nella teoria;

* le equazioni diventano incoerenti e inutilizzabili *

Soluzione:

- + nuova forza [campo di Higgs]
- + (almeno) un nuovo mediatore associato ad essa [bosone di Higgs]

Meccanismo di Higgs (BEHGHK)

a) un campo di forza permea lo spazio ovunque uniformemente

b) le diverse particelle sono più o meno note al campo (più sono note = più fortemente interagiscono)

- immaginate questo campo come la folla ad una fiera

- immaginate le altre particelle come persone più o meno famose che attraversano la folla:

→ più sono famose e più lentamente riusciranno a passare → più massa acquisteranno

particelle senza massa continueranno a muoversi alla velocità della luce

Il Bosone di Higgs

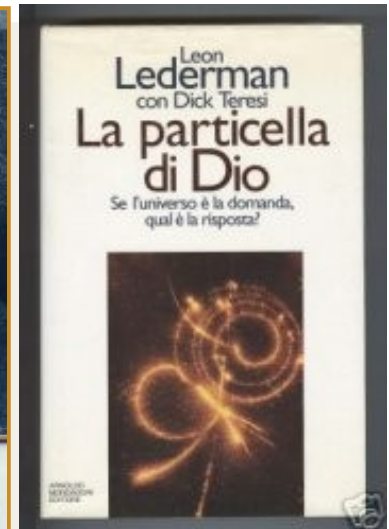
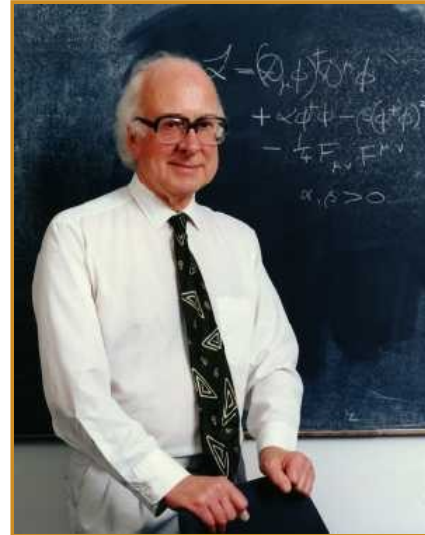
- il campo frena le particelle, come la gelatina frena un proiettile



- rallentare una particella equivale a farle acquisire una massa

- particelle indifferenti a questo campo di forza restano di massa zero

- la "forza" è trasportata da una particella nuova (mediatore):
il bosone di Higgs



il nome del bosone ...

diverse scuole di pensiero:

1) bosone di Higgs

2) bosone BEH (Brout-Englert-Higgs)

3) bosone BEHGHK (Brout-Englert-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble)

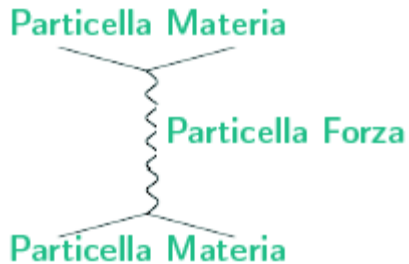
4) bosone scalare del modello standard

ipotizzato per la prima volta nel 1964 (da Peter Higgs)

Mediatori

Forza \rightarrow lavoro = trasferimento energia

Azione a distanza ? No \rightarrow mediatori interazione



es. 1: interazione e.m. : fotoni

es. 2: interazione nucleare forte : pioni

[previsione: 1935 \rightarrow scoperta: 1947]

es. 3: interazione nucleare debole : W/Z

[previsione: \sim 1965 \rightarrow scoperta: 1983]

Bosoni / Fermioni

Due categorie di particelle a seconda del momento angolare (spin)

- spin intero (0, 1, ...) : statistica di Bose-Einstein

→ Bosoni

fotoni (1), particelle α (0), ^{12}C (0), ^6Li (1)

scalari: spin 0

vettoriali: spin 1

- spin semi-intero (1/2, 3/2, ...) : statistica di Fermi-Dirac

→ Fermioni

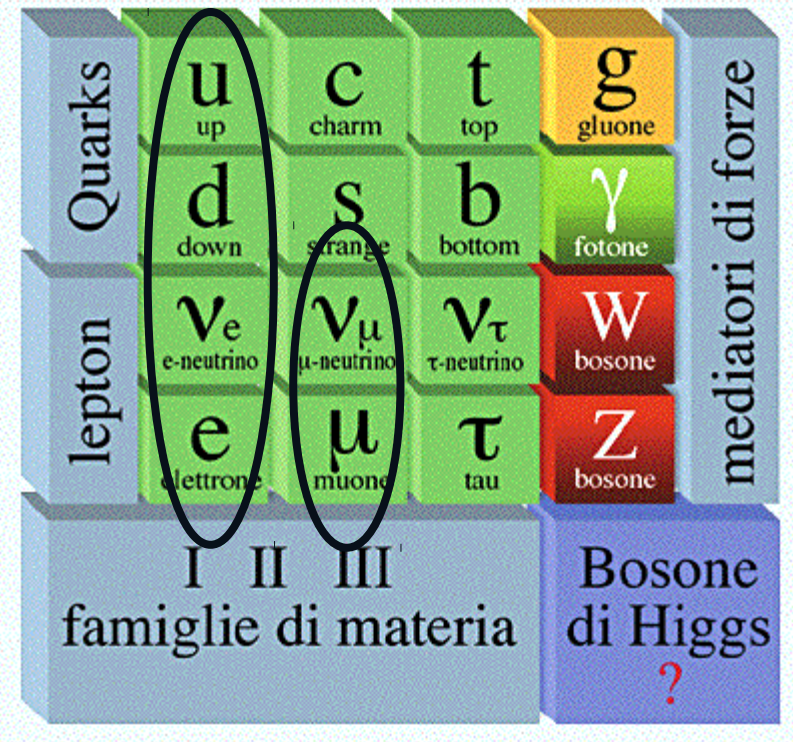
(principio di esclusione di Pauli)

elettroni, protoni, neutroni, neutrini (tutti con spin $\frac{1}{2}$)

Modello Standard

(tavola periodica)

- particelle "materia" e particelle "forza" (+ relative antiparticelle)
- tre famiglie di materia
- mondo conosciuto fatto della prima (e un po' di seconda)



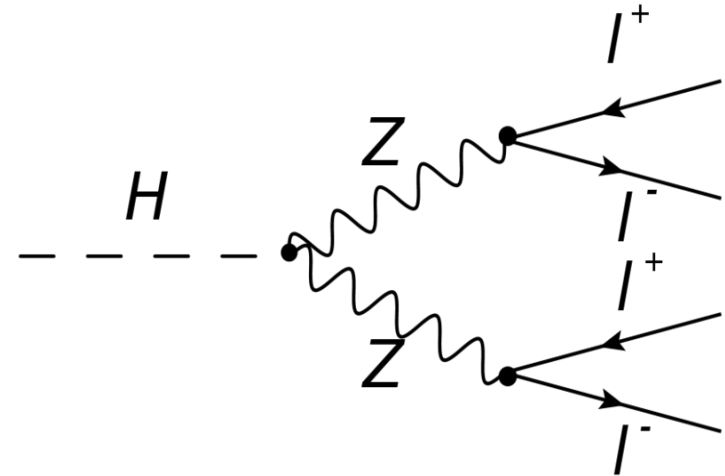
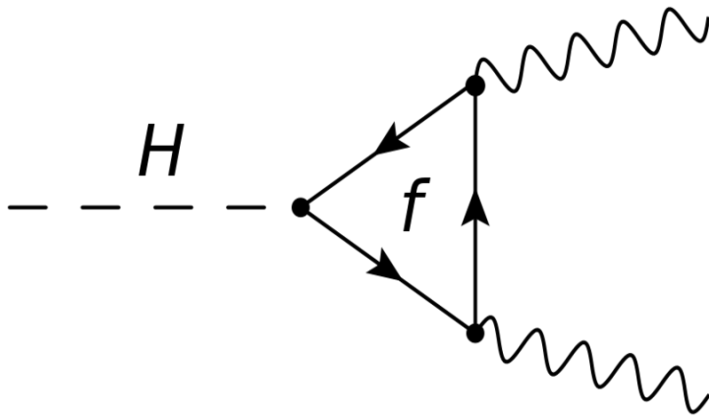
3 forze (intensità relativa):

- Forza nucleare forte (1)
- Forza nucleare debole (10^{-5})
- Forza elettromagnetica (10^{-2})
- Non pervenuta: Gravità (10^{-36})

- (*) Cariche elettriche ?
- (*) Masse ?
- (*) Numero famiglie ?
- (*) Materia Oscura ?
- (*) Gravitazione ?

Higgs: decadimenti possibili

- il bosone di Higgs non è stabile, decade in particelle più leggere
- gli "stati finali" sono molteplici e previsti dalla teoria
 - i più importanti sono:



- Il bosone di Higgs, come tutte le particelle instabili, viene "ricostruito" partendo dai prodotti che ci aspettiamo dal suo decadimento

Carta d'identità del bosone di Higgs

Cognome Bosone
Nome Higgs
nato il $\sim 10^{-30}$ s dopo il BigBang
(atto n..... P..... S.....)
a Ovunque (.....)
Cittadinanza Nostro universo
Residenza Ovunque
Via.....
Stato civile Assai poligamo
Professione Spacciatore di massa
CONNOTATI E CONTRASSEGNI SALIENTI
Statura Da 100 a 1000 GeV
Spin 0
Parità +1
Segni particolari Sfuggente
Accoppiamento con le particelle
proporzionale alla loro massa



Firma del titolare Decado in $\gamma\gamma$, WW ,
 ZZ , bb , cc , $\tau\tau$, ecc

Impronta del dito indice sinistro IL SINDACO
Peter Higgs



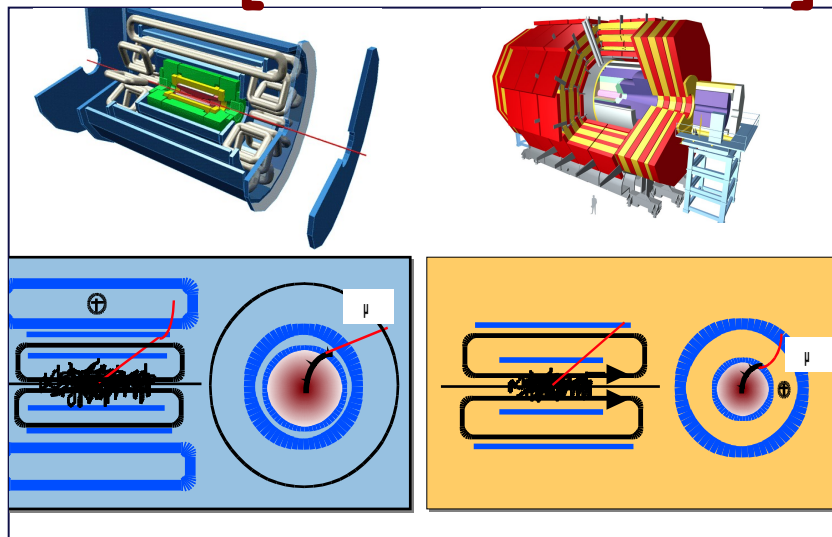
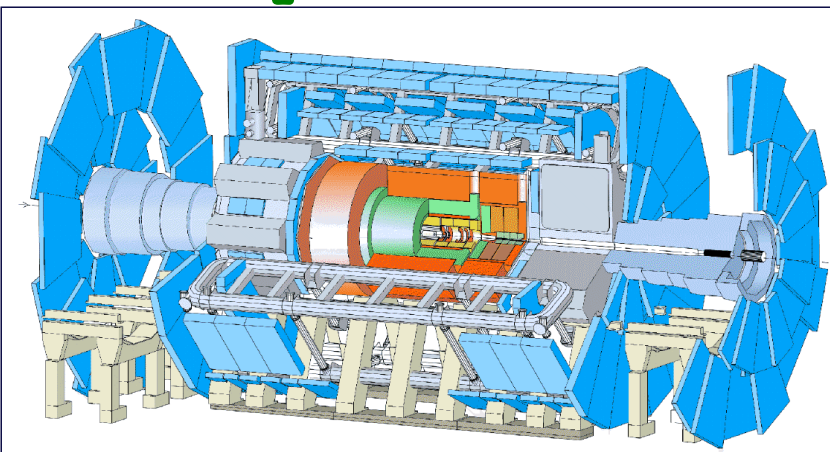


3. l'esperimento (ATLAS)

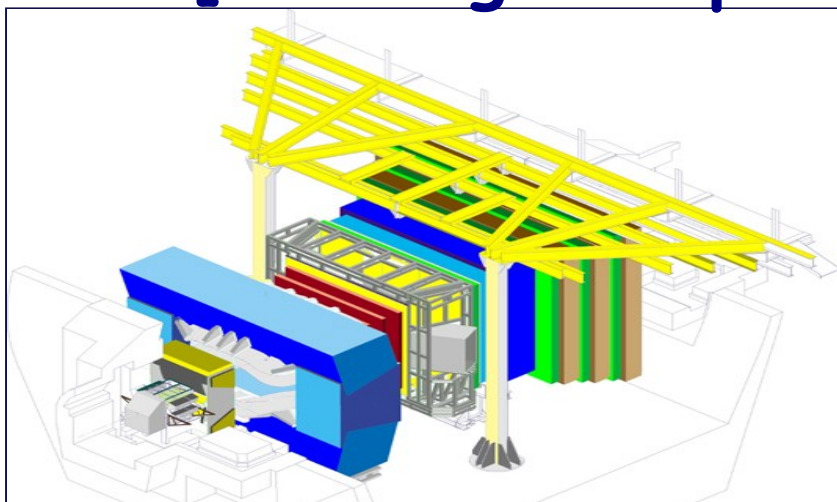
I 4+2 Moschettieri [portavoce 2011]

ATLAS [Fabiola Gianotti]

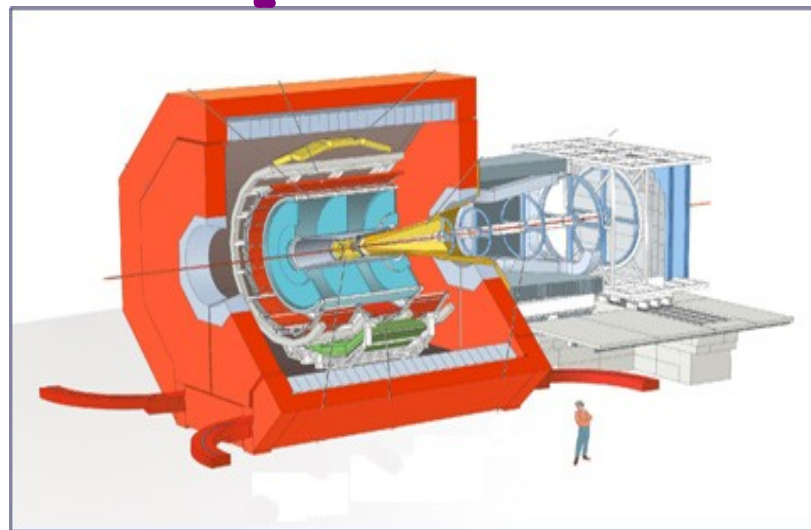
CMS [Guido Tonelli]



LHCb [Pierluigi Campana]

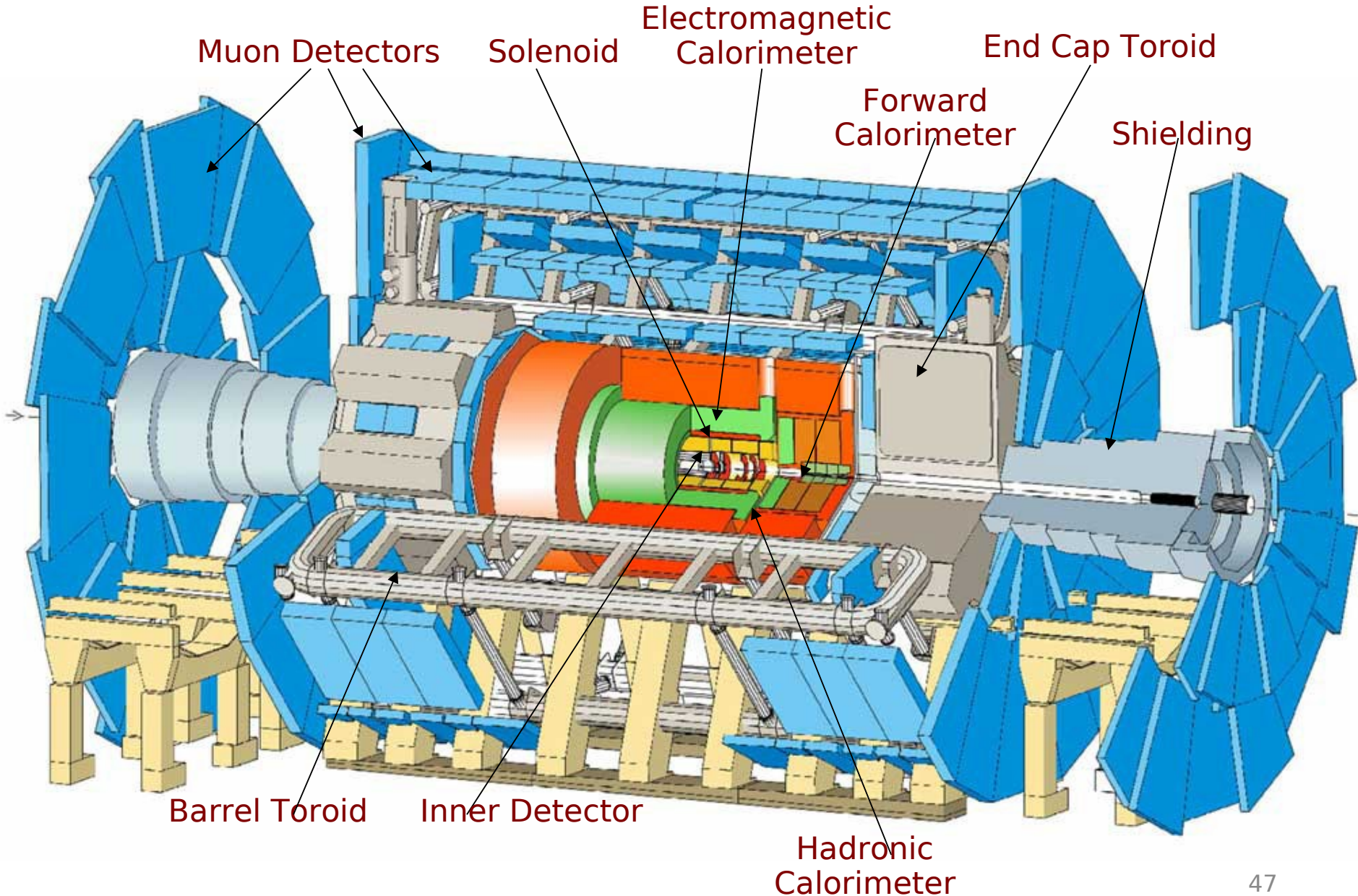


ALICE [Paolo Giubellino]

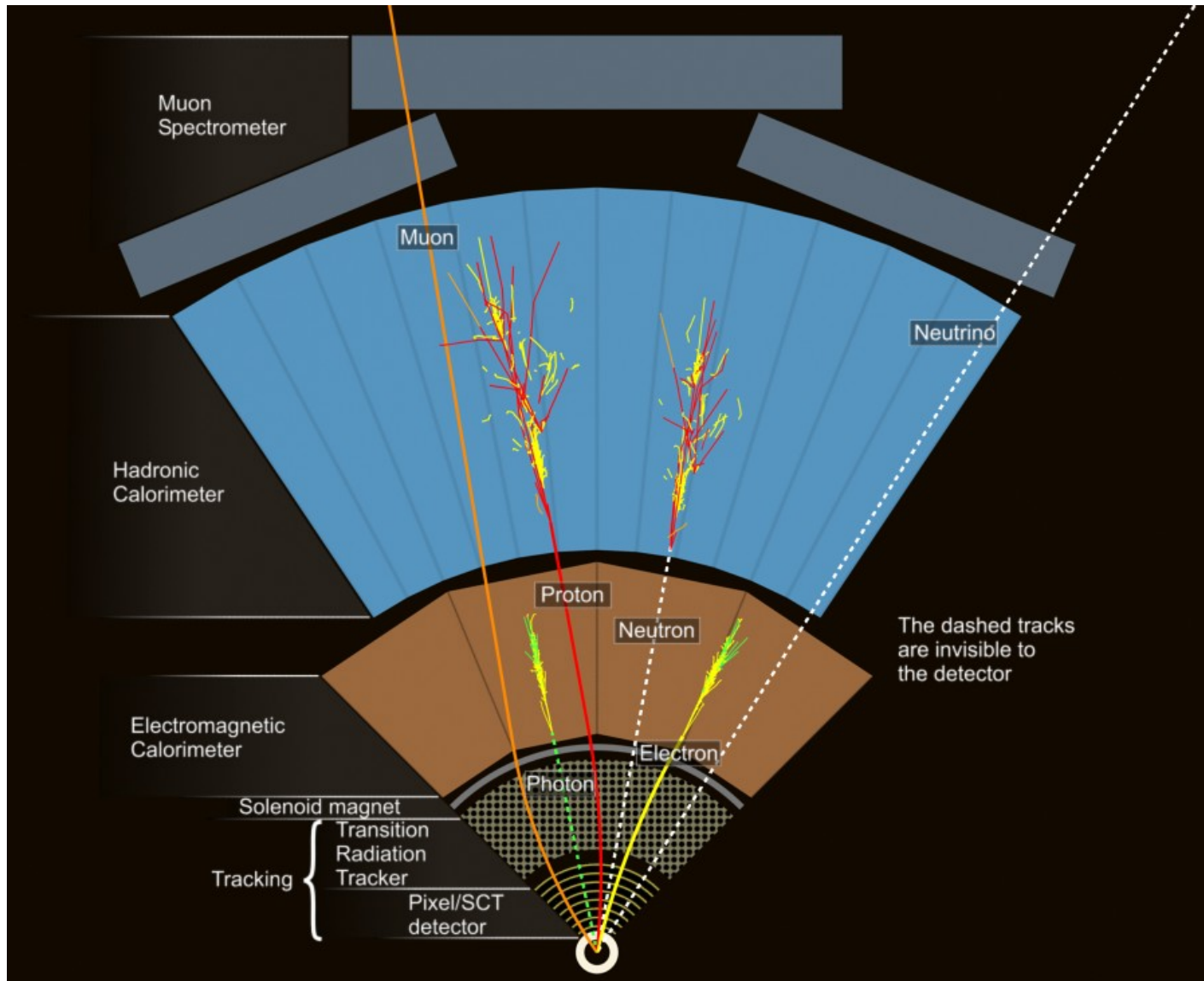


più Totem e LHCf

ATLAS: un microscopio alto 22 e lungo 46 m



Tante (Diverse) Macchine Fotografiche

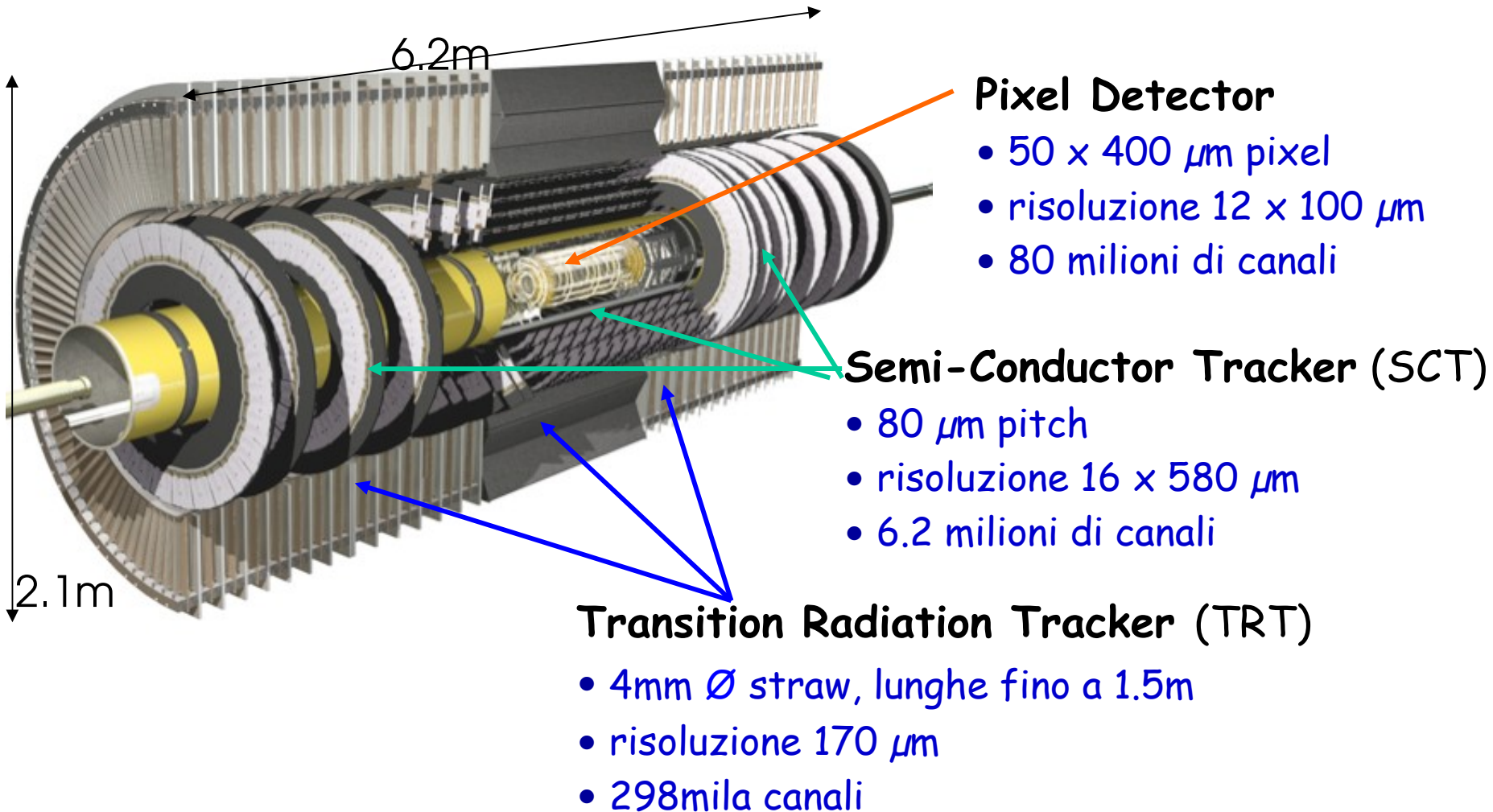


Come funziona ?

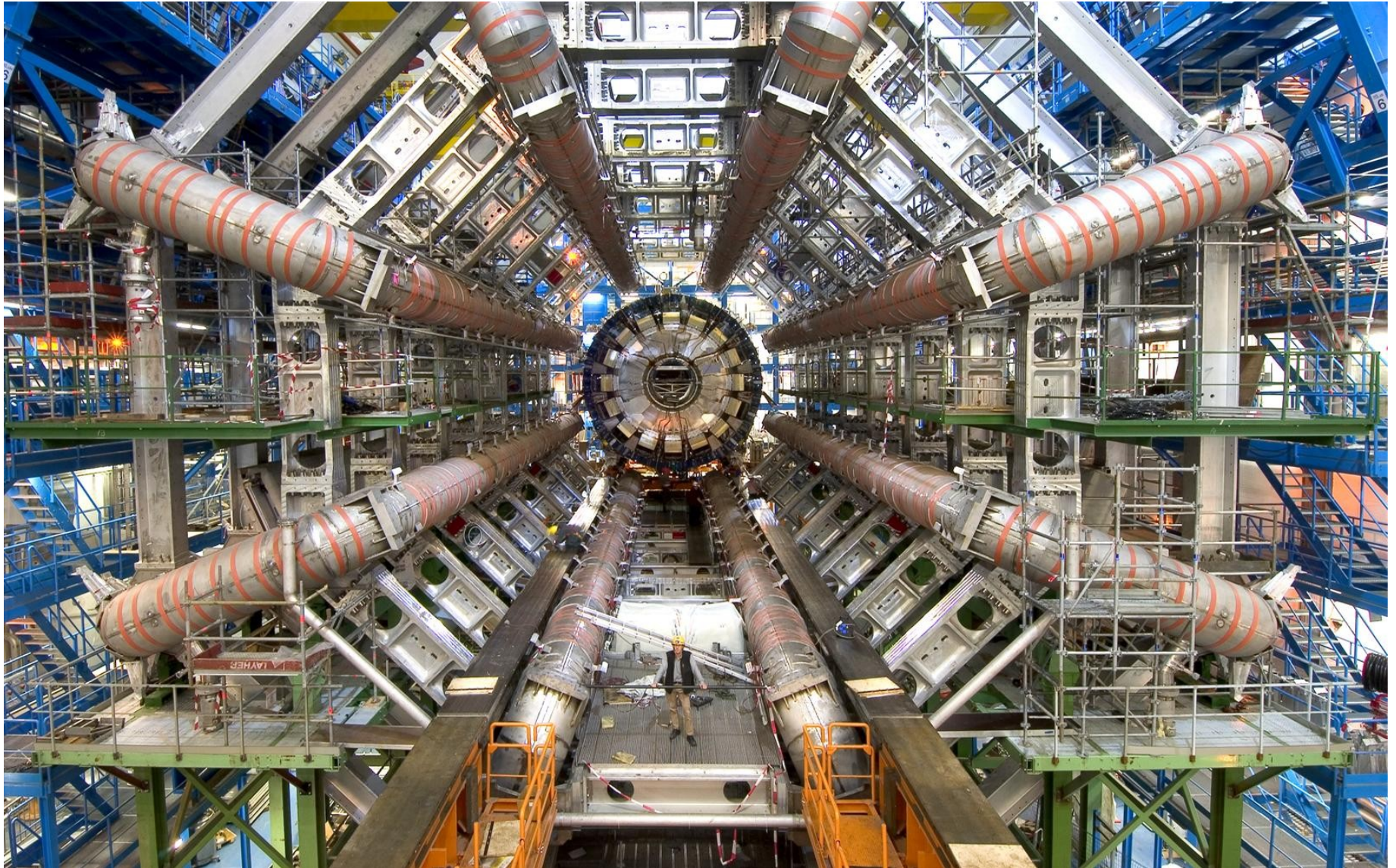
- 1) si fermano le particelle di bassa "energia"
(solenoidi superconduttore)
- 2) si identificano tutte le altre (cariche, neutre,
leggere, pesanti) !!!
- 3) si misura la loro energia

Poche proprietà fondamentali
determinano il comportamento
di ogni particella "quasi stabile"

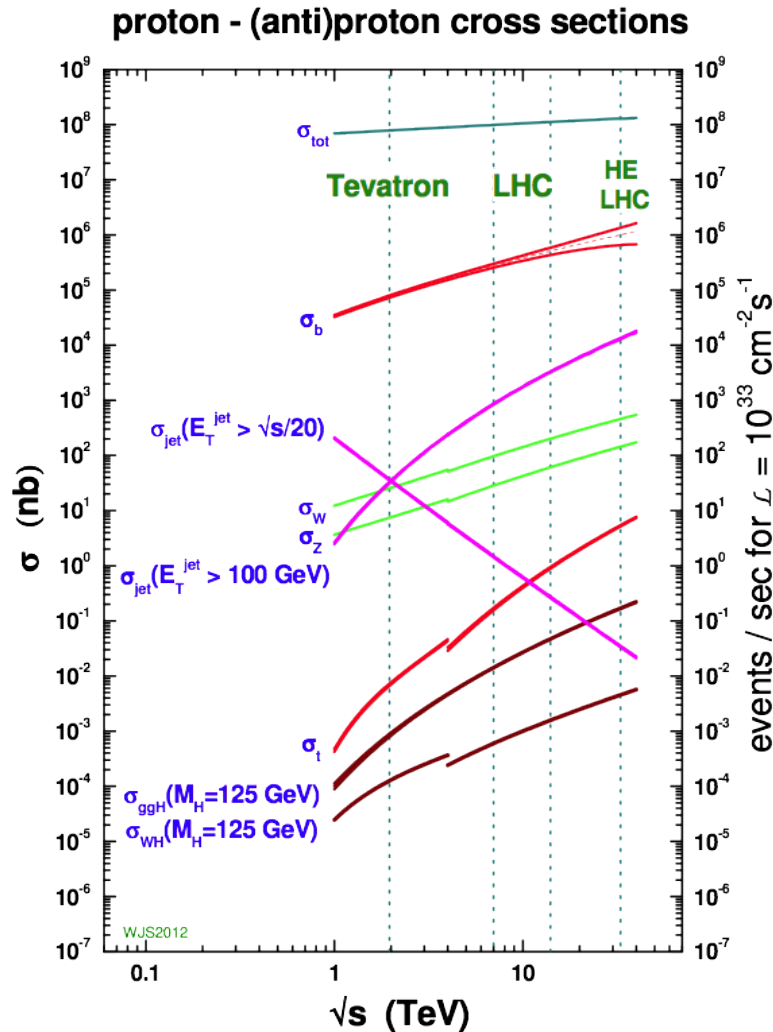
Il Tracciatore Interno



Il Toroide Centrale (Barrel)



Quanto è probabile un "Higgs" ?



- La creazione di un bosone di Higgs ha una probabilità **MOOOOLTO** piccola
(~ uno ogni 10 miliardi di urti)
- Eventi di "fondo" (soprattutto QCD) sono estremamente più probabili
- Occorre una "selezione" molto alta (1 evento su 10 milioni)

un ago in migliaia di pagliai

Eventi interessanti (rarissimi) contengono:

a) 1,2,3,4,... elettroni, muoni, fotoni, getti di grande energia

b) grande energia mancante

Ad esempio, il bosone di Higgs può decadere in:

$4e, 4\mu, 2e2\mu, 2e2\nu, 2\mu2\nu, e\mu2\nu, 2e2j, 2\mu2j, 2\gamma, \dots$

“Golden channels” : $H \rightarrow 4e, 4\mu, 2e2\mu$ [$m_H \sim 150-500 \text{ GeV}$]

~ 1 Higgs ogni 300 mila miliardi di urti .. se va bene !



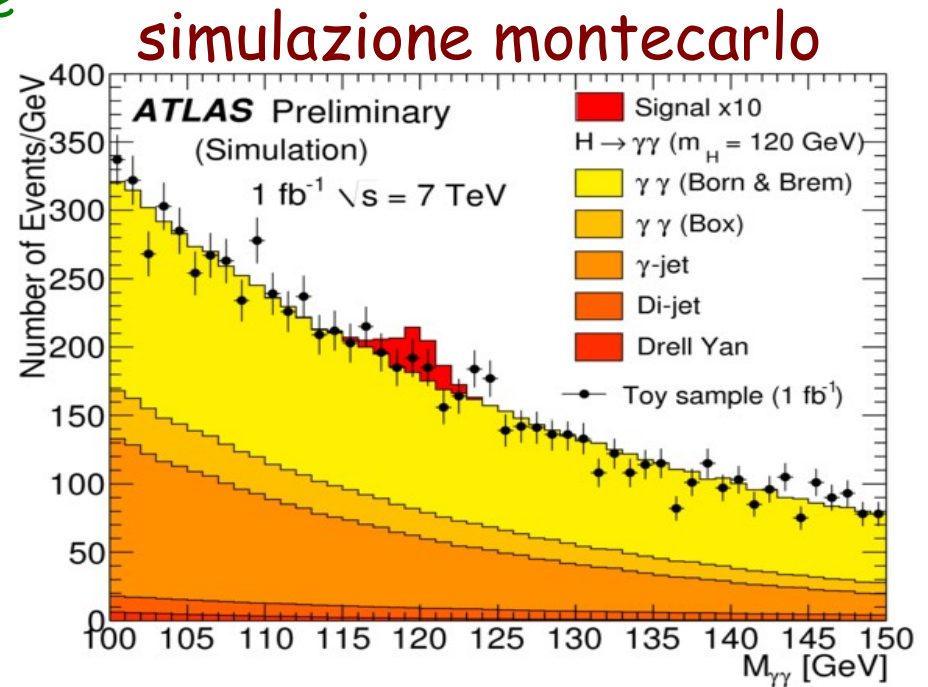
- miglior canale a bassa massa
- rapporto segnale/rumore comunque pessimo:
 - immaginate di cercare di riconoscere una nota musicale nella confusione di una fiera
- precisione di misura fondamentale

$$S = \frac{N_s}{\sqrt{N_B}}$$

$$\text{Prob}(S > 5) < 3 \cdot 10^{-7}$$

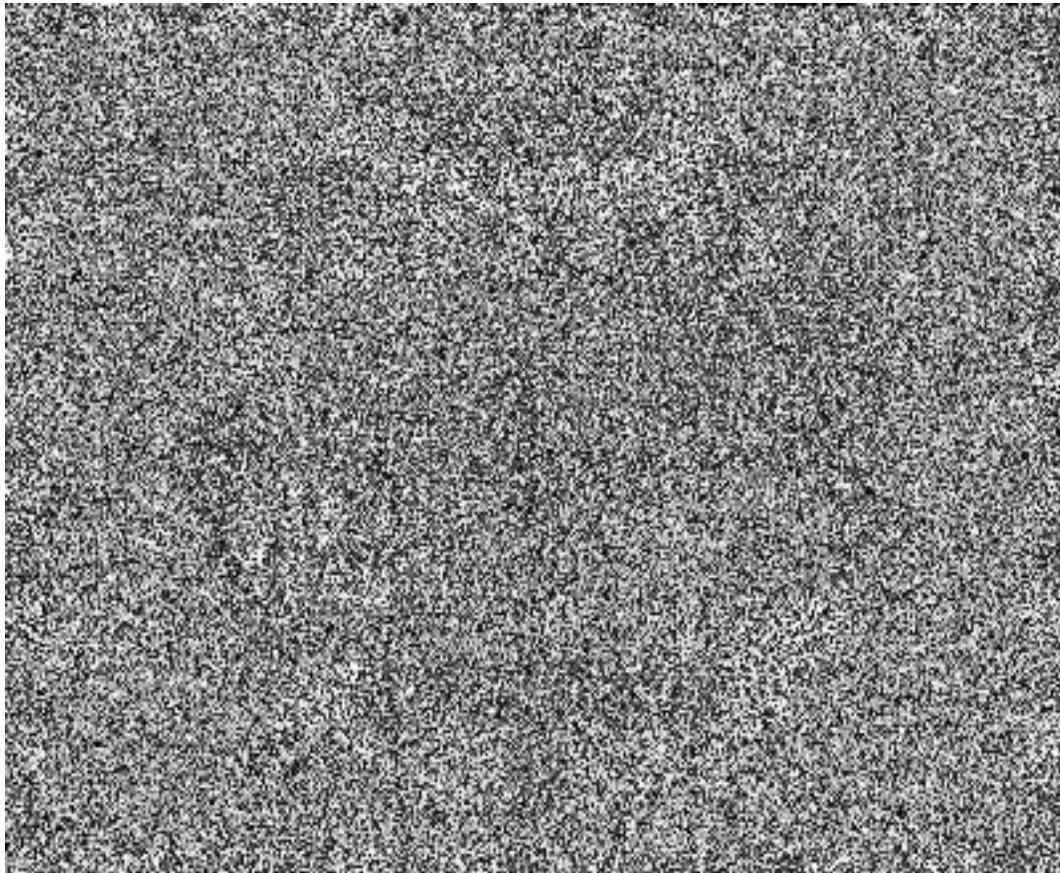
→ Scoperta

necessari anni di presa dati (?)



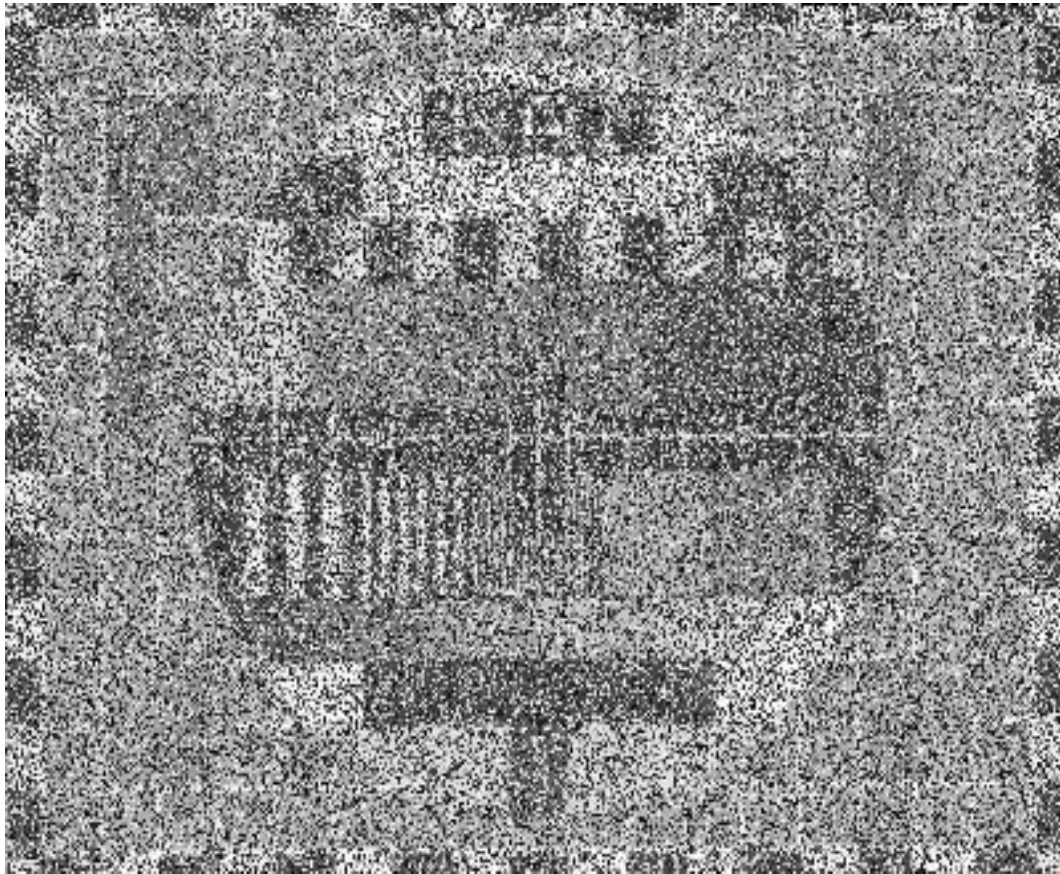
Segnale e Rumore

- Il segnale c'è ma è completamente nascosto dal rumore di fondo



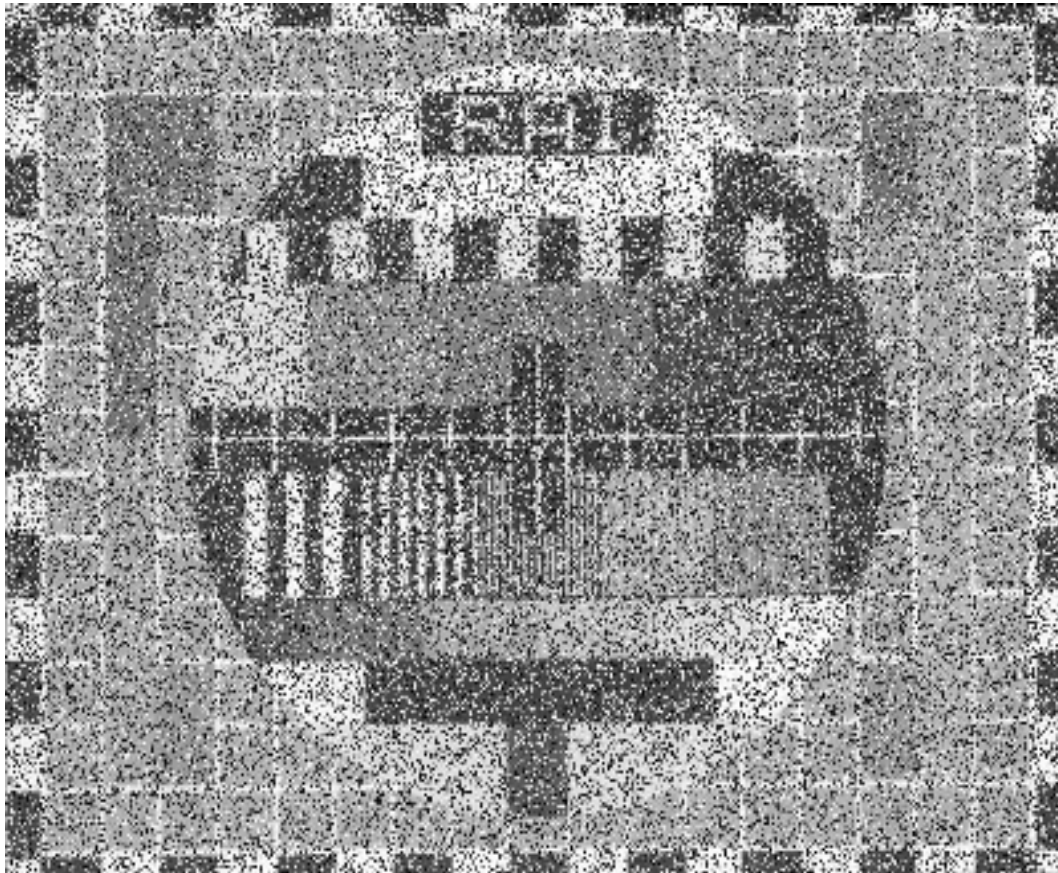
Segnale e Rumore

- Se sommo ("integrò") tante schermate il rapporto segnale/rumore migliora



Segnale e Rumore

- Aumentando ancora la "statistica" (integrando più a lungo) il segnale diventa riconoscibile



Selezione Eventi

- ogni secondo avvengono 40 milioni di scontri
- bisogna selezionare i 200 più interessanti per analizzarli con calma

a) un primo sistema si preoccupa solo di segnalare se ritiene ci sia almeno 1 elettrone o 1 muone di alta energia, selezionando in media ~ 100 mila eventi

- cercate un granello di sabbia: avevate 20 campi da calcio da ispezionare → rimanete con un campo da tennis

b) un secondo sistema analizza un pò meglio i 100 mila eventi e segnala i 3 mila più interessanti

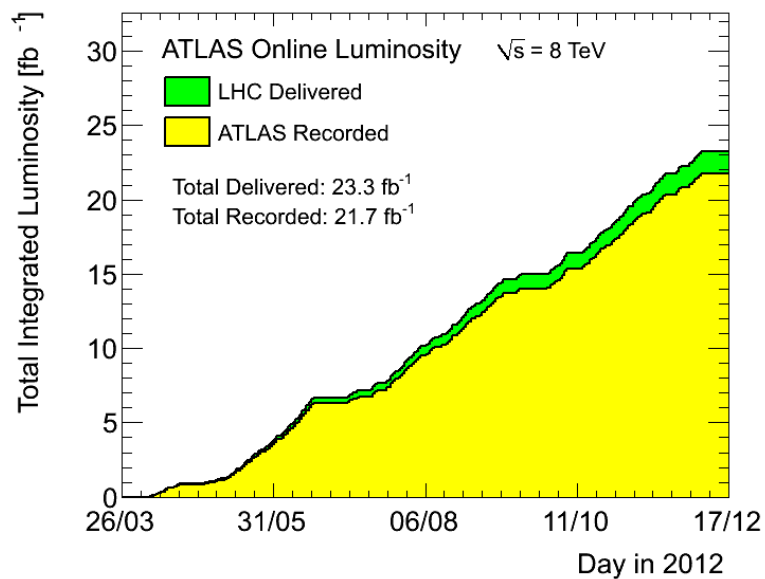
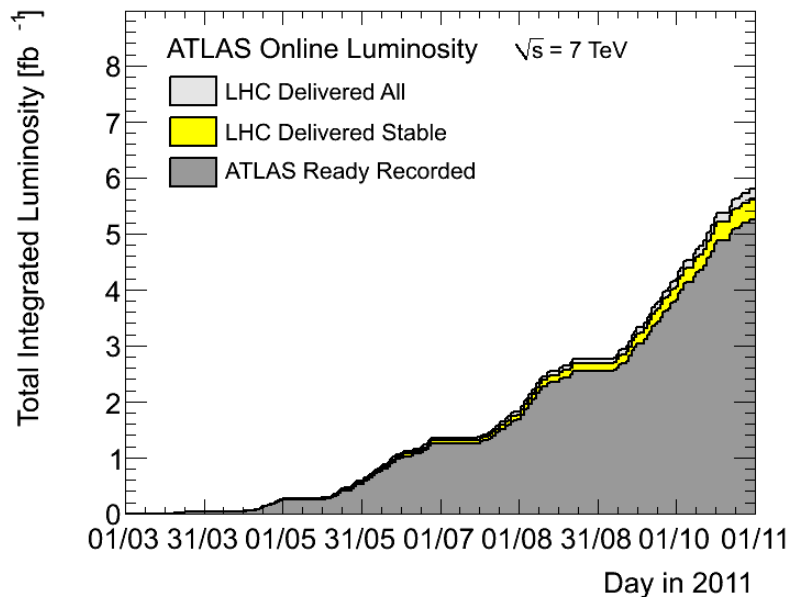
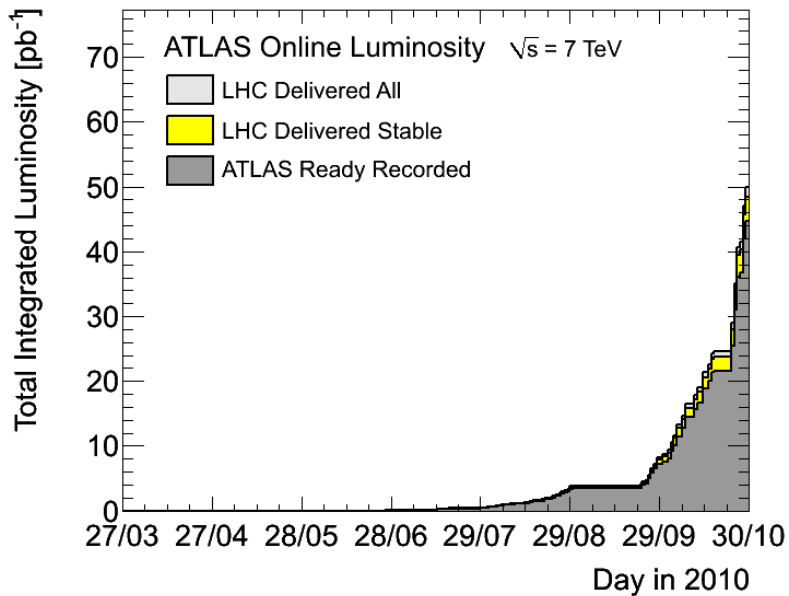
- → del campo da tennis rimangono 2 tavoli da ping pong

c) un terzo sistema analizza molto meglio i 3 mila restanti e segnala i 200 più interessanti

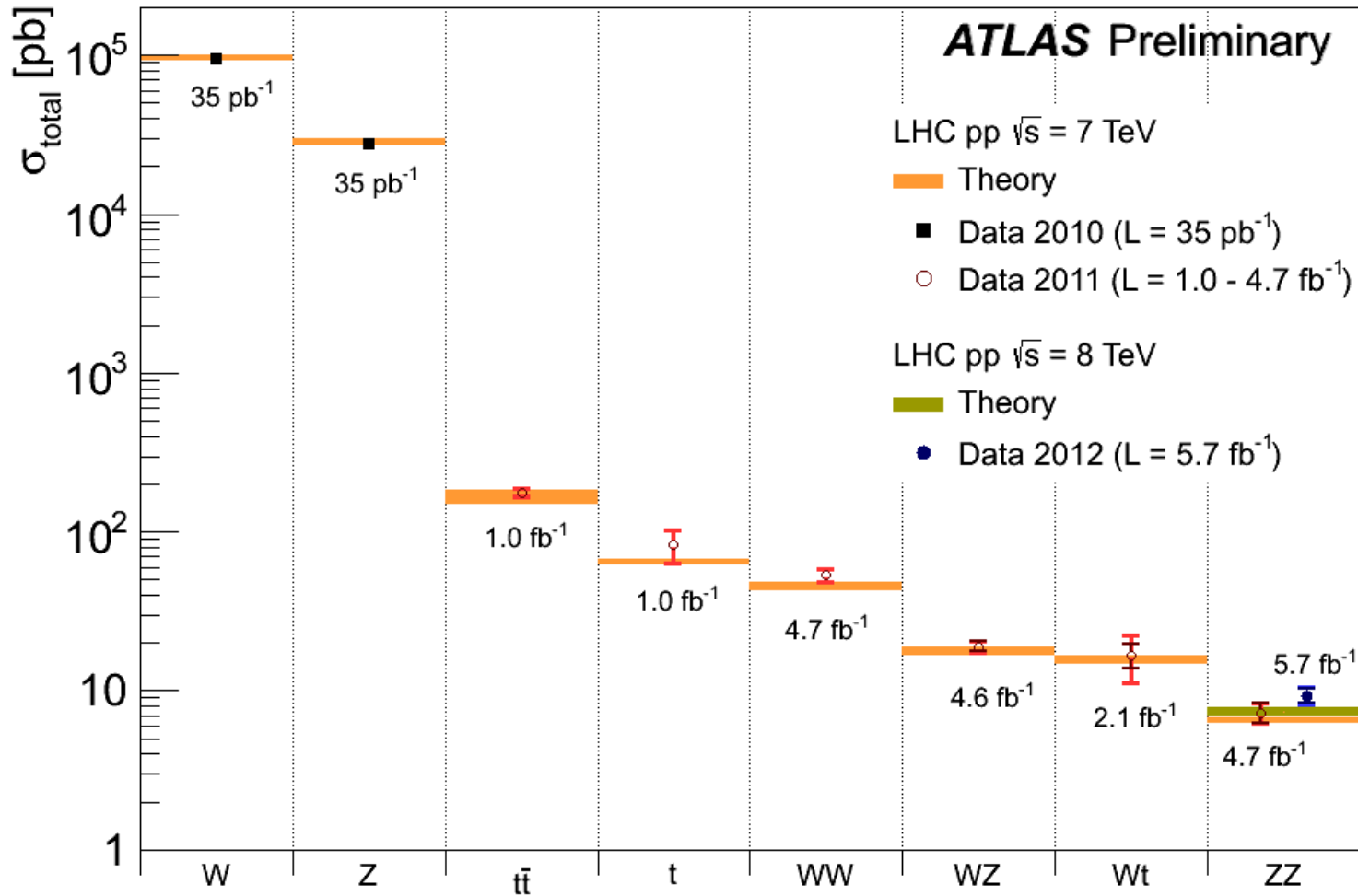
- → dei 2 tavoli da ping pong, rimane una scacchiera di 70 cm di lato

4. risultati

3 anni di presa dati

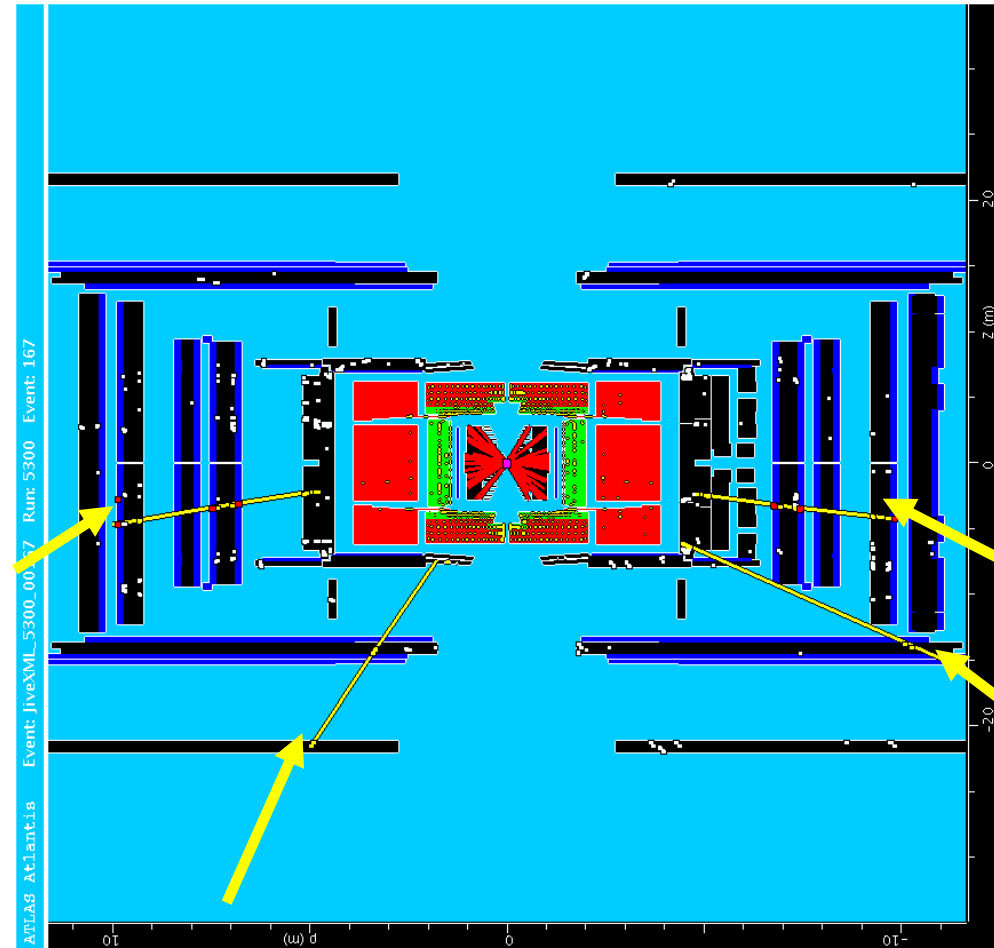
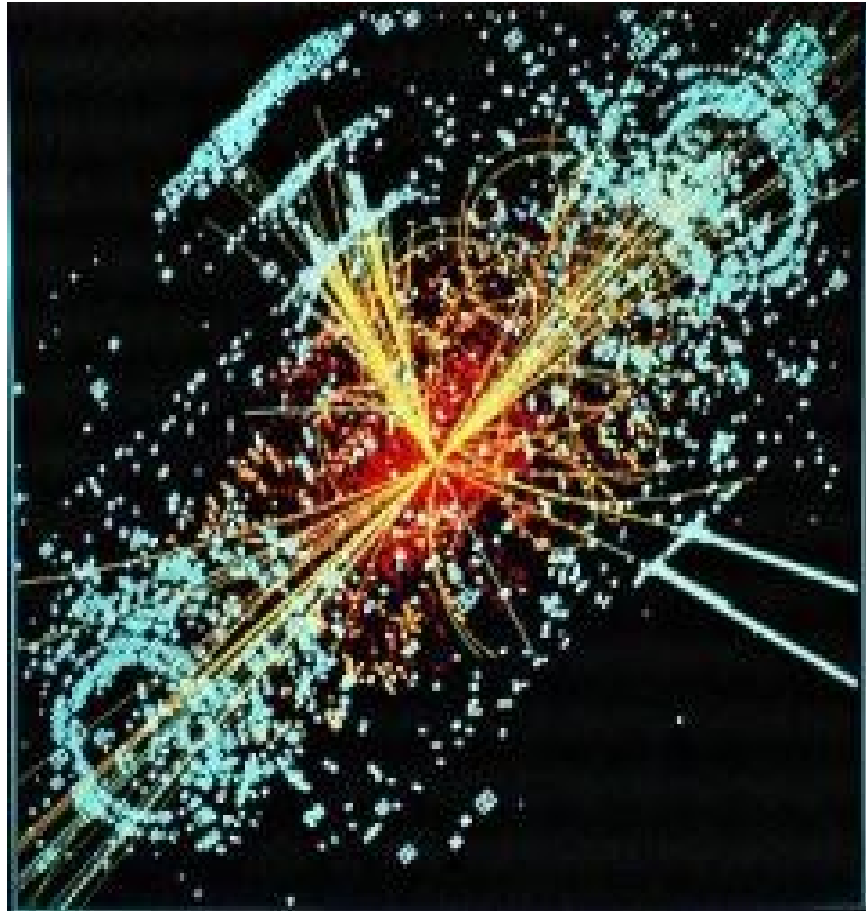


Verifiche del Modello Standard

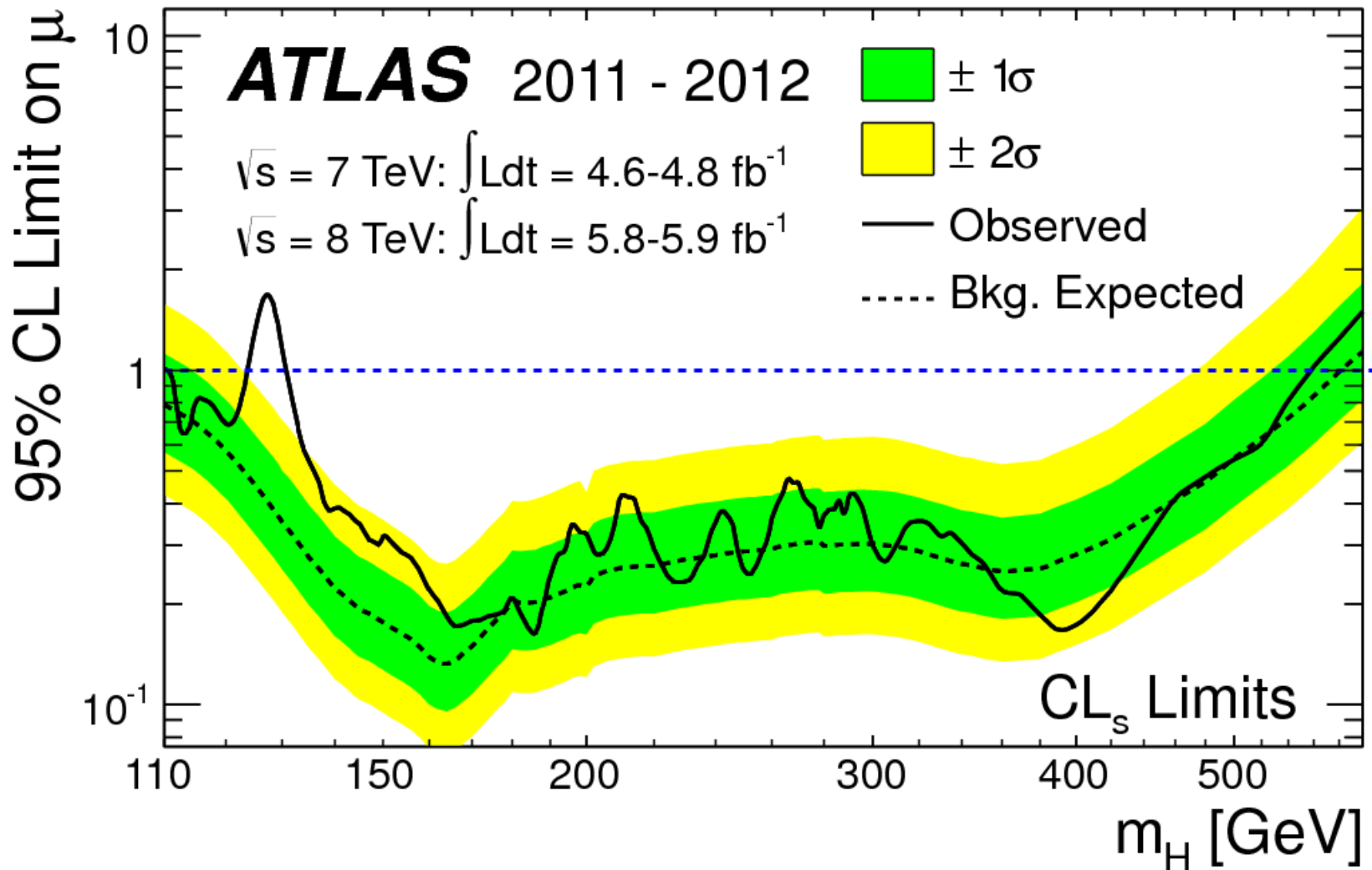


Il Bosone di Higgs

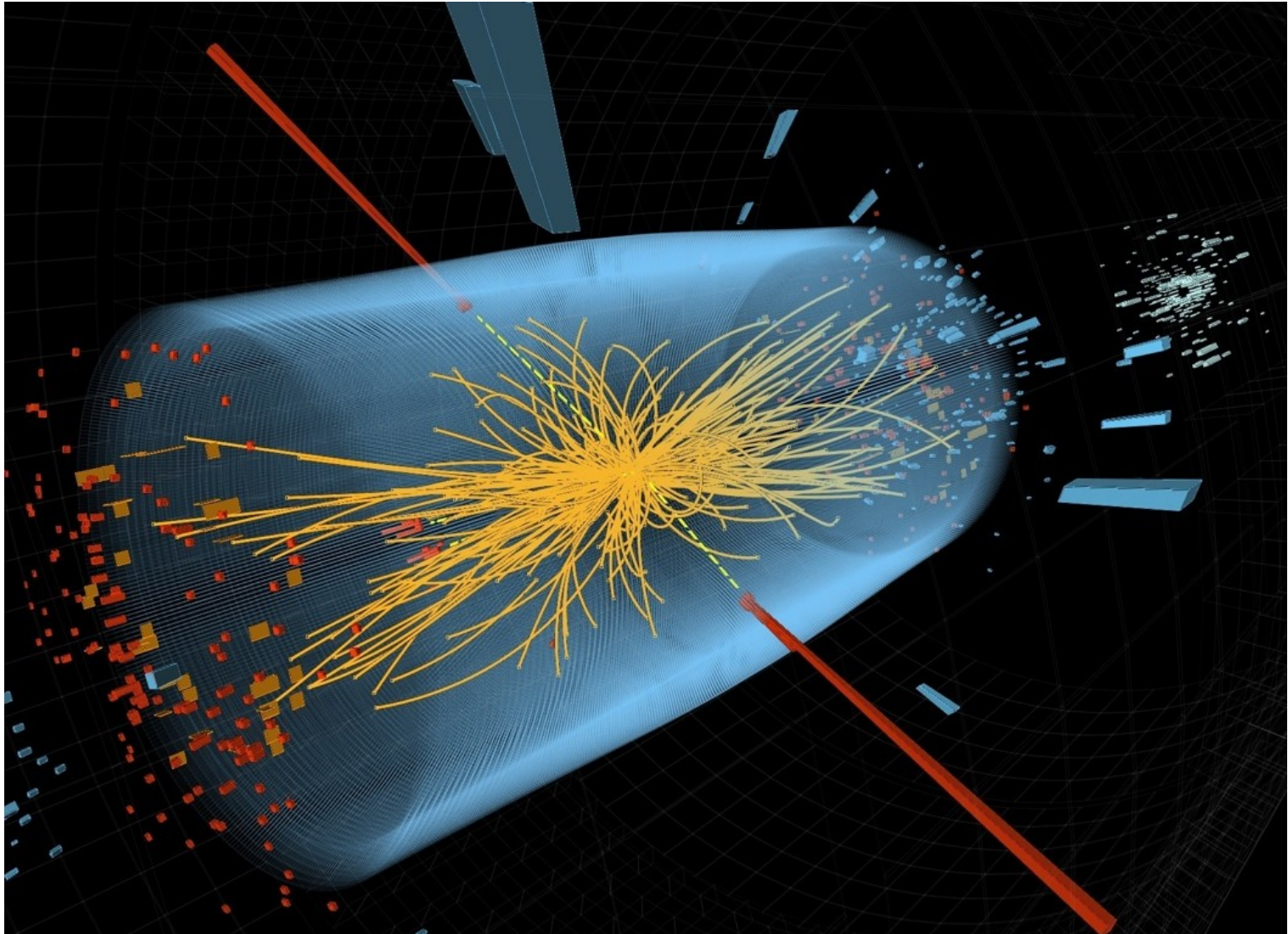
$$H(130 \text{ GeV}) \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \mu$$



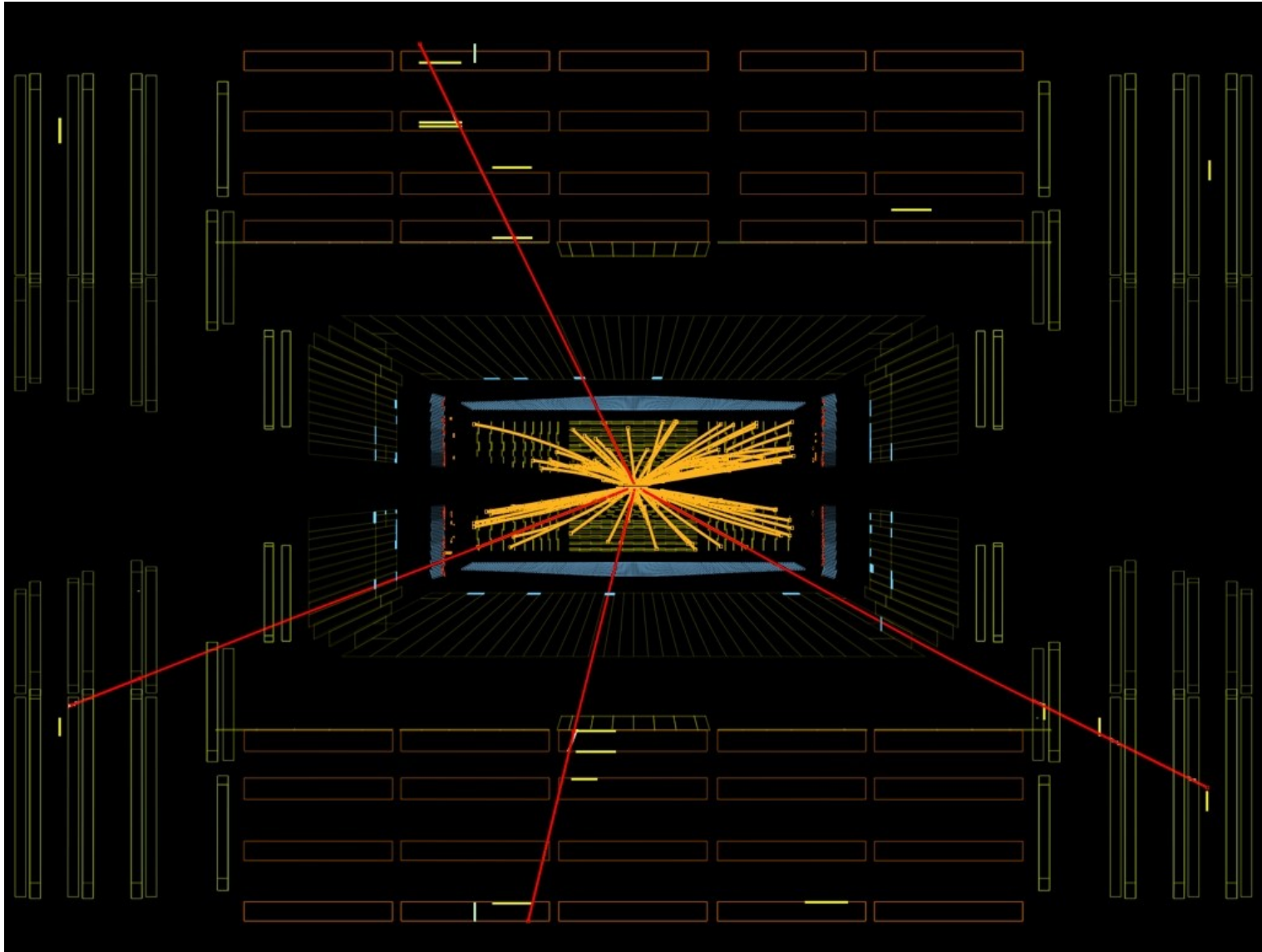
Sensibilità sperimentale



evento candidato $H \rightarrow \gamma\gamma$

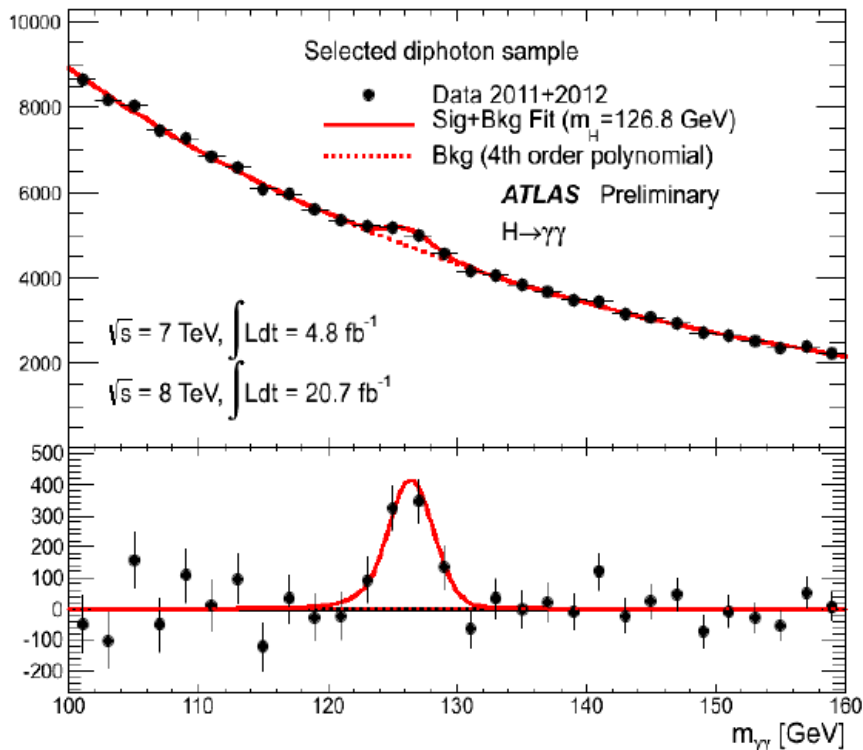


evento candidato $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$



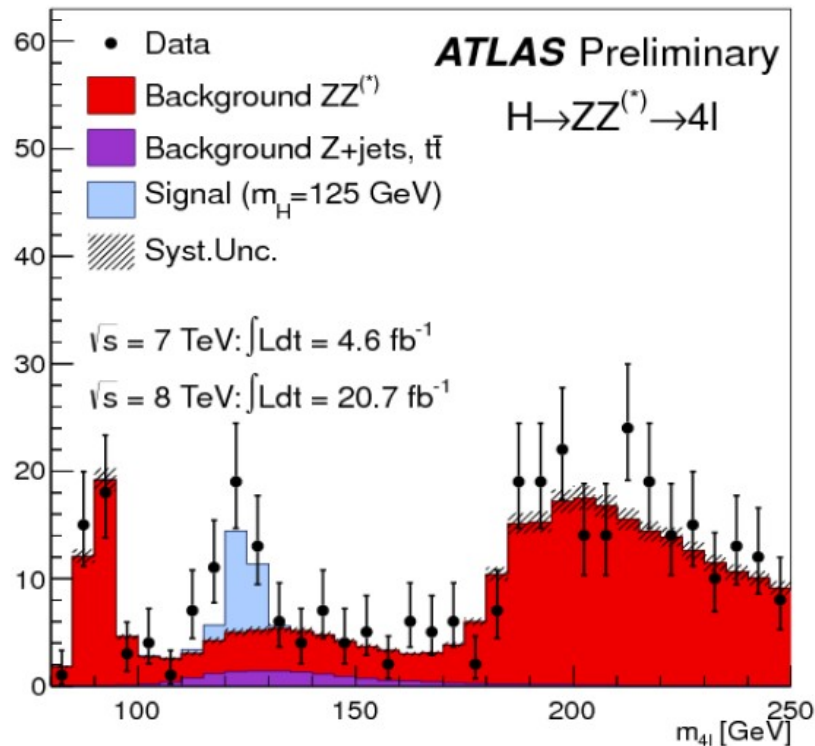
dati 2012

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_1E_2(1 - \cos \alpha)}$$



“picco”:

~900 eventi in eccesso
~30000 eventi di fondo

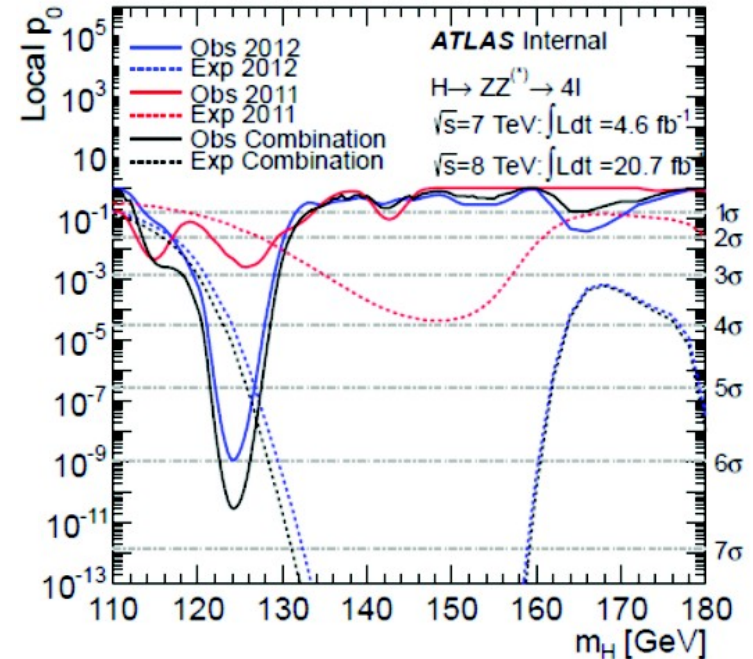
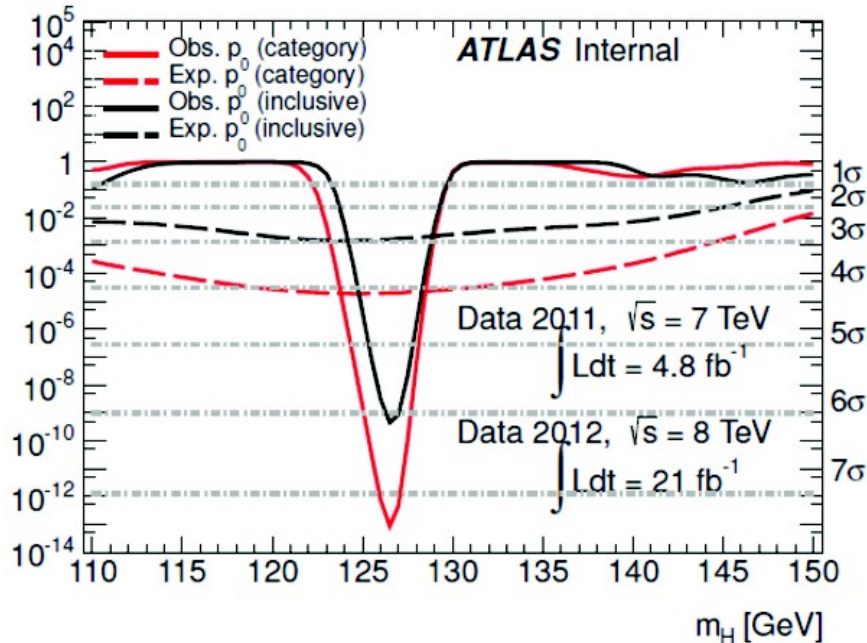


“picco”:

~16 eventi in eccesso
~11 eventi di fondo

c'e' qualcosa di nuovo ?

Probabilità che il risultato sia casuale:

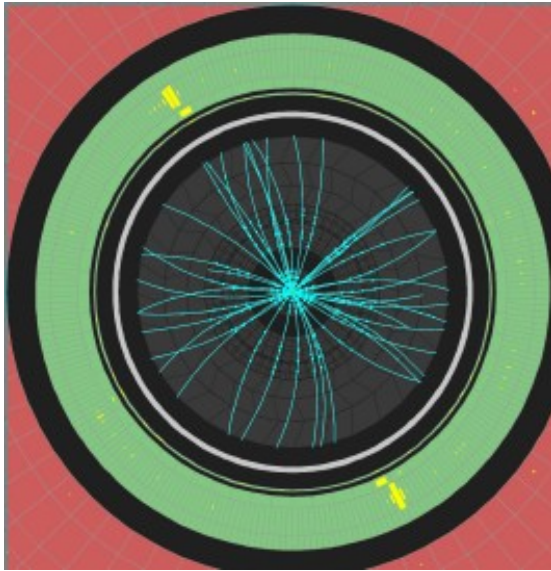


quasi uguale alla probabilità che esca 15 volte di fila lo zero alla roulette (o 77 volte di fila il rosso)

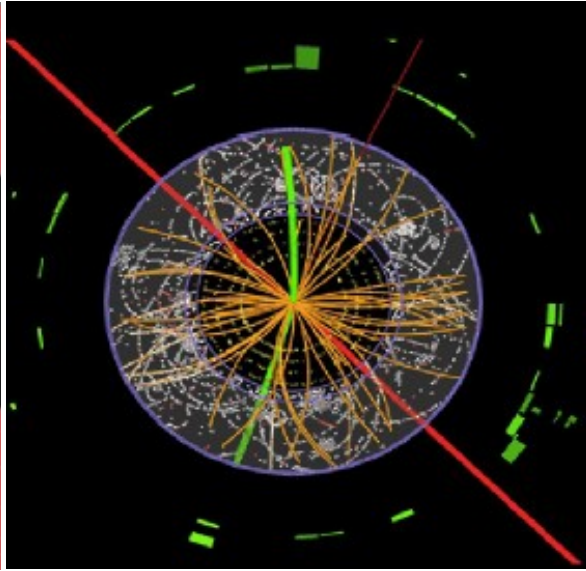
Fare 6 due volte di fila al superenalotto è ~40000 volte più facile

Bosone di Higgs del M.S. ? Statisticamente compatibile !

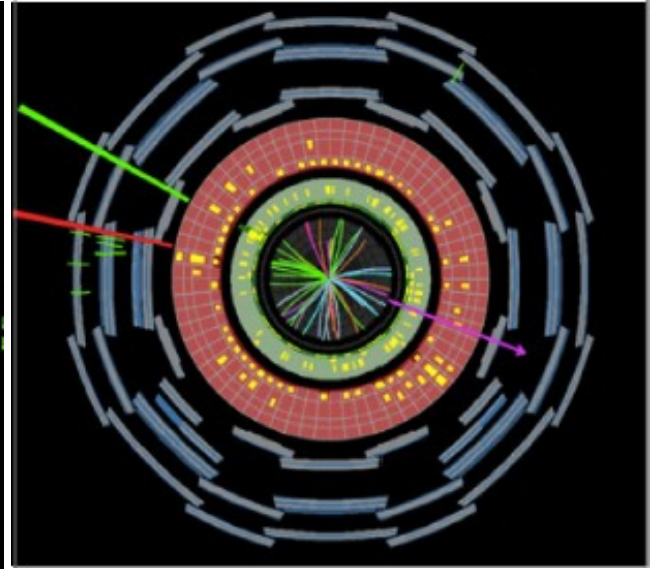
Higgs animati



fotone-fotone



4 leptoni



WW

$H \rightarrow gg$



H → ZZ

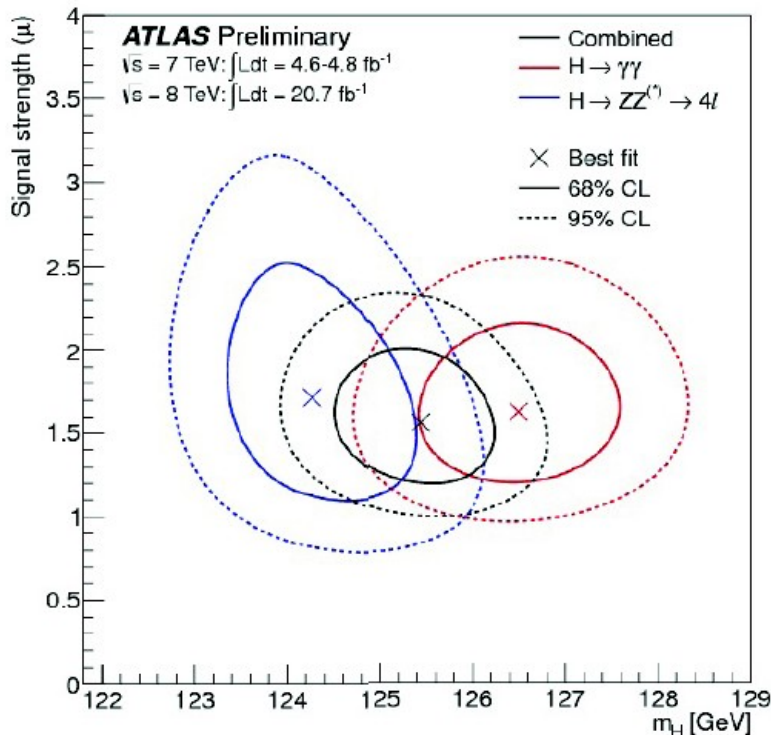
/home/roberto/Marconi080313/4I-FixedScale-NoMuProf2.gif

compatibilità con il Modello Standard

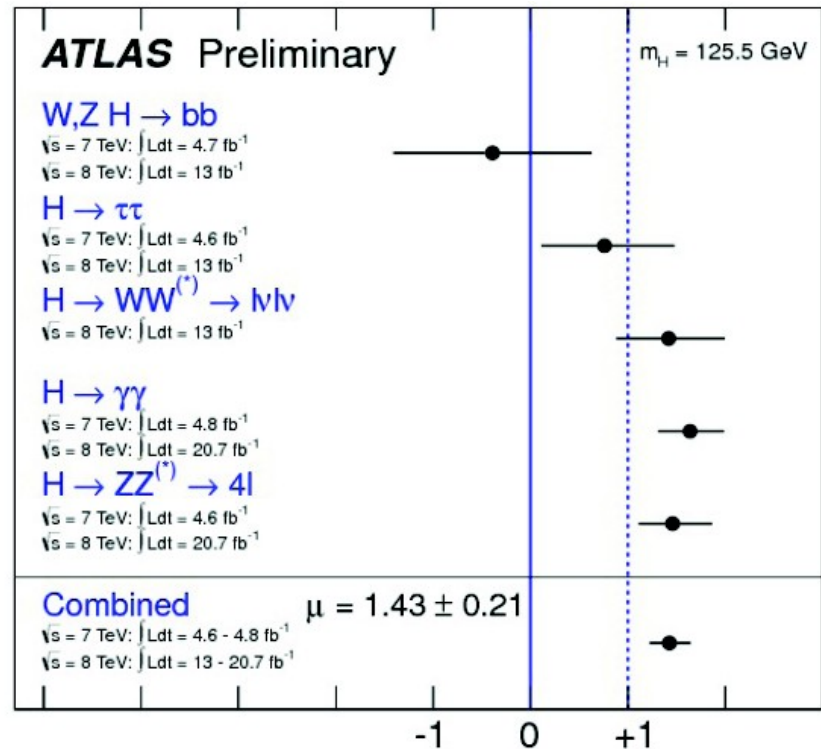
Signal Strength (= intensità del segnale):

0 = solo fondo MS 1 = fondo MS + Higgs
 [fondo : processi già conosciuti]

fit massa e S.S.



S.S. per categoria per $M=125.5 \text{ GeV}$



Conclusioni

ATLAS e CMS indipendentemente trovano che:

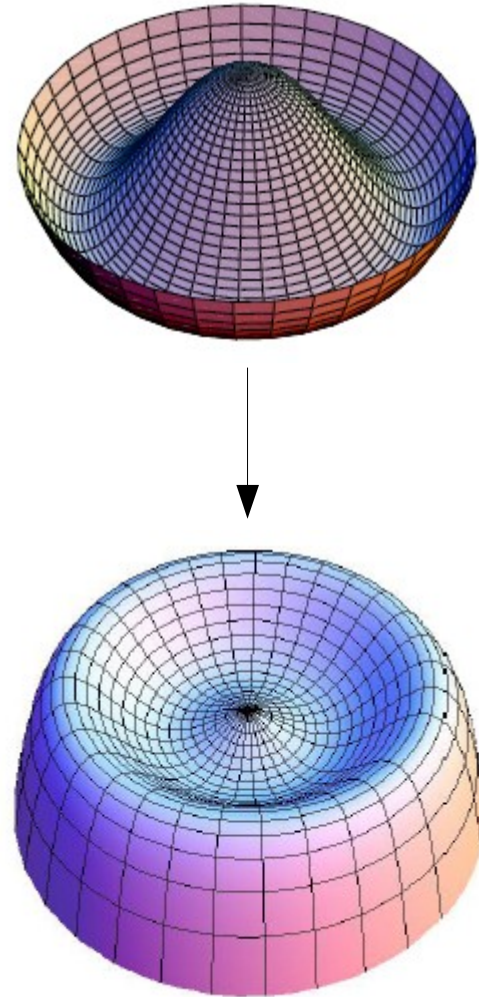
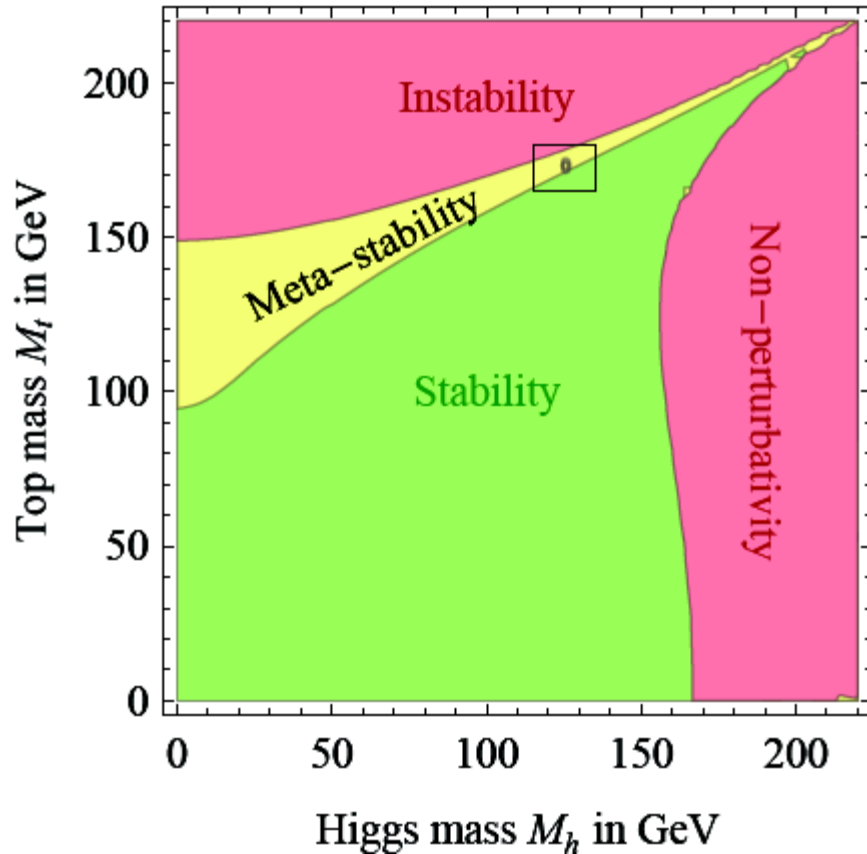
- c'è una nuova particella
- è un bosone (decade in 2 fotoni)
- non è un bosone vettoriale (decade in 2 fotoni)
- è compatibile con il bosone di Higgs del Modello Standard

Se lo è, è carino che sia lì, perché a LHC sarà possibile studiarlo in molti canali di decadimento:

$$\gamma\gamma, ZZ^* \rightarrow 4l, WW^* \rightarrow l\nu l\nu, bb, \tau\tau$$

Problema aperto: stabilità del potenziale di Higgs ?
(al crescere dell'energia l'"auto-accoppiamento"
del bosone di higgs diventa negativo)

viviamo pericolosamente ?



5. un po' di pubblicità



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC^a

ATLAS Collaboration^b

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleague who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 July 2012
 Received in revised form 8 August 2012
 Accepted 11 August 2012
 Available online 14 August 2012
 Editor: W. L. Straesser

ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately 4.8 fb^{−1} collected at $\sqrt{s} = 7$ TeV in 2011 and 5.8 fb^{−1} at $\sqrt{s} = 8$ TeV in 2012. Individual searches in the channels $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow \nu\bar{\nu}\mu\nu$ in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for $H \rightarrow ZZ^{(0)}$, $WW^{(0)}$, $b\bar{b}$ and $\tau^+\tau^-$ in the 7 TeV data and results from improved analyses of the $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of 126.0 ± 0.4 (stat) ± 0.4 (sys) GeV is presented. This observation, which has a significance of 5.8 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of 1.7×10^{-9} , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The Standard Model (SM) of particle physics [1–4] has been tested by many experiments over the last four decades and has been shown to successfully describe high energy particle interactions. However, the mechanism that breaks electroweak symmetry in the SM has not been verified experimentally. This mechanism [5–10], which gives mass to massive elementary particles, implies the existence of a scalar particle, the SM Higgs boson. The search for the Higgs boson, the only elementary particle in the SM that has not yet been observed, is one of the highlights of the Large Hadron Collider [11] (LHC) physics programme.

Indirect limits on the SM Higgs boson mass of $m_H < 158$ GeV at 95% confidence level [12], have been set using global fits to precision electroweak results [12]. Direct searches at LEP [13], the Tevatron [14–16] and the LHC [7,18] have previously excluded, at 95% CL, a SM Higgs boson with mass below 500 GeV, apart from some mass regions between 116 GeV and 127 GeV.

Both the ATLAS and CMS Collaborations reported excesses of events in their 2011 datasets of proton–proton (pp) collisions at centre-of-mass energy $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC, which were compatible with SM Higgs boson production and decay in the mass region 124–126 GeV, with significances of 2.9 and 3.1 standard deviations (σ), respectively [17,18]. The CDF and DØ experiments at the Tevatron have also recently reported a broad excess in the mass region

120–135 GeV, using the existing LHC constraints, the observed local significances for $m_H = 125$ GeV are 2.7 σ for CDF [14], 1.3 σ for DØ [15] and 2.8 σ for their combination [16].

The previous ATLAS searches in 4.6–4.8 fb^{−1} of data at $\sqrt{s} = 7$ TeV are combined here with new searches for $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$,¹ $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow \nu\bar{\nu}\mu\nu$ in the 5.8–5.9 fb^{−1} of pp collision data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV between April and June 2012.

The data were recorded with instantaneous luminosities up to 6.8×10^{33} cm^{−2}s^{−1}; they are therefore affected by multiple pp collisions occurring in the same or neighbouring bunch crossings (pile-up). In the 7 TeV data, the average number of interactions per bunch crossing was approximately 10; the average increased to approximately 20 in the 8 TeV data. The reconstruction, identification and isolation criteria used for electrons and photons in the 8 TeV data are improved, making the $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ searches more robust against the increased pile-up. These analyses were re-optimised with simulation and frozen before looking at the 8 TeV data.

In the $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow \ell\nu\bar{\nu}\nu$ channel, the increased pile-up degrades the event mixing transverse momenta, E_T^{miss} resolution, which results in significantly larger Drell–Yan background in the same-flavour final states. Since the $e\mu$ channel provides most of the sensitivity of the search, only this final state is used in the analysis of the 8 TeV data. The kinematic region in which a SM Higgs boson with a mass between 110 GeV and 140 GeV is

searched for was kept blinded during the analysis optimisation, until satisfactory agreement was found between the observed and predicted numbers of events in control samples dominated by the principal backgrounds.

This Letter is organised as follows. The ATLAS detector is briefly described in Section 2. The simulation samples and the signal predictions are presented in Section 3. The analyses of the $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow \nu\bar{\nu}\mu\nu$ channels are described in Sections 4–6, respectively. The statistical procedure used to analyse the results is summarised in Section 7. The systematic uncertainties which are correlated between datasets and search channels are described in Section 8. The results of the combination of all channels are reported in Section 9, while Section 10 provides the conclusions.

2. The ATLAS detector

The ATLAS detector [19–21] is a multipurpose particle physics apparatus with forward-backward symmetric cylindrical geometry. The inner tracking detector (ID) consists of a silicon pixel detector, a silicon microstrip detector (SCT), and a straw-tube transition radiation tracker (TRT). The ID is surrounded by a thin superconducting solenoid which provides a 2 T magnetic field, and by high-granularity liquid-argon (LAr) sampling electromagnetic calorimetry. The electromagnetic calorimeter is divided into a central barrel (pseudorapidity³ $|\eta| < 1.675$) and end-cap regions on either end of the detector ($1.375 < |\eta| < 2.5$ for the outer wheel and $2.5 < |\eta| < 3.2$ for the inner wheel). In the region matched to the ID ($|\eta| < 2.5$), it is radially segmented into three layers. The first layer has a fine segmentation in η to facilitate e/γ separation from π^0 and to improve the resolution of the shower position and direction measurements. In the region $|\eta| < 1.8$, the electromagnetic calorimeter is preceded by a presampler detector to correct for upstream energy losses. An iron-scintillator/tile calorimeter gives hadronic coverage in the central rapidity range ($|\eta| < 1.7$), while a LAr hadronic end-cap calorimeter provides coverage over $1.5 < |\eta| < 3.2$. The forward regions ($3.2 < |\eta| < 4.9$) are instrumented with LAr calorimeters for both electromagnetic and hadronic measurements. The muon spectrometer (MS) surrounds the calorimeters and consists of three large air-core superconducting magnets providing a toroidal field, each with eight coils, a system of precision tracking chambers, and fast detectors for triggering. The combination of all these systems provides charged particle measurements together with efficient and precise lepton and photon measurements in the pseudorapidity range $|\eta| < 2.5$. Jets and E_T^{miss} are reconstructed using energy deposits over the full coverage of the calorimeters, $|\eta| < 4.9$.

3. Signal and background simulation samples

The SM Higgs boson production processes considered in this analysis are the dominant gluon fusion ($gg \rightarrow H$, denoted ggF), vector-boson fusion ($q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}H$, denoted VBF) and Higgs-strahlung ($q\bar{q} \rightarrow W^{\pm}ZH$, denoted $WH^{(0)}$). The small contribution from the associated production with a $b\bar{b}$ pair ($q\bar{q} \rightarrow b\bar{b}H$, denoted $b\bar{b}H$) is taken into account only in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ analysis.

For the ggF process, the signal cross section is computed at up to next-to-next-to-leading order (NNLO) in QCD [22–28]. Next-to-

Table 1
 Event generators used to model the signal and background processes. *PYTHIA8 indicates that PYTHIA8 and PTHAD are used for simulations at $\sqrt{s} = 7$ TeV and $\sqrt{s} = 8$ TeV runs, respectively.

Process	Generator
ggF , VBF	POWHEG (2.0) [29] + PTHAD
WH , ZH , $b\bar{b}H$	PTHAD
$H \rightarrow \text{jets}, Z, \gamma, \tau^+\tau^- + \text{jets}$	ALPGEN (2.1) + HERWIG
$t, \bar{t}, W^{\pm}, \tau^{\pm}$	MCFIXLO (2.0) + HERWIG
top	AceMC (2.1) + PTHAD
$q\bar{q} \rightarrow WW$	MCFIXLO + HERWIG
$q\bar{q} \rightarrow W^{\pm}W^{\pm}$	gg2WW (5.0) + HERWIG
$q\bar{q} \rightarrow ZZ$	POWHEG (2.0) + PTHAD
$q\bar{q} \rightarrow Z\gamma$	gg2Z (5.0) + HERWIG
$W\gamma + \text{jets}$	MadGraph + PTHAD, HERWIG
$W\gamma^* (\text{to } Z) + \text{jets}$	ALPGEN + HERWIG
$b\bar{b}H \rightarrow \gamma\gamma$	MadGraph + PTHAD
	SHERRA

leading order (NLO) electroweak (EW) corrections are applied [29, 30], as well as QCD soft-gluon re-summations at up to next-to-next-to-leading logarithm (NNLL) [31]. These calculations, which are described in Refs. [32–35], assume factorisation between QCD and EW corrections. The transverse momentum, p_T , spectrum of the Higgs boson in the ggF process follows the log^2 calculation [36], which includes QCD corrections at NLO and QCD soft-gluon re-summations up to NNLL; the effects of these quark masses are also taken into account [37].

For the VBF process, full QCD and EW corrections up to NLO [38–41] and approximate NNLO QCD corrections [42] are used to calculate the cross section. Cross sections of the associated WH/ZH processes (VH) are calculated including QCD corrections up to NNLO [43–45] and EW corrections up to NLO [46]. The cross sections for the $b\bar{b}H$ process are estimated up to NLO QCD [47–51].

The total cross sections for SM Higgs boson production at the LHC with $m_H = 125$ GeV are predicted to be 17.5 pb for $\sqrt{s} = 7$ TeV and 22.3 pb for $\sqrt{s} = 8$ TeV [52,53]. The branching ratios of the SM Higgs boson as a function of m_H , as well as their uncertainties, are calculated using the HDECAY [54] and PROPHET4Y [55,56] programs and are taken from Refs. [52,53]. The interference in the $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$ final states with identical leptons is taken into account [55,56,53].

The event generators used to model signal and background processes in samples of Monte Carlo (MC) simulated events are listed in Table 1. The normalisations of the generated samples are obtained from the state of the art calculations described above. Several different programs are used to generate the hard-scattering processes. To generate parton showers and their hadronisation, and to simulate the underlying event [57–59], PTHAD [60] (for 7 TeV samples) and 8 TeV samples produced with MadGraph [7671] or AceMC [61] or PTHAD [72] (for other 8 TeV samples) are used. Alternatively, HERWIG [73] or SHERPA [74] are used to generate and hadronise parton showers, with the HERWIG underlying event simulation performed using JIMMY [75]. When PYTHIA8 or HERWIG are used, DUCOLA [76] and PHOTOS [77] are employed to describe tau lepton decays and additional photon radiation from charged leptons, respectively.

The following parton distribution function (PDF) sets are used: CT10 [78] for the POWHEG, MCFIXLO, gg2WW and gg2ZZ samples; CTQ6L1 [79] for the PTHAD, ALPGEN, AceMC, MadGraph, HERWIG and SHERPA samples; and MST2MC1 [80] for the PTHAD samples.

Acceptances and efficiencies are obtained mostly from full simulations of the ATLAS detector [81] using GARNET [82]. These simulations include a realistic modelling of the pile-up conditions observed in the data. Corrections obtained from measurements in

^a © CERN for the benefit of the ATLAS Collaboration.
^b E-mail address: atlaspublications@cern.ch.

³ The symbol η stands for pseudorapidity.

E' uno sporco lavoro ma qualcuno lo deve pur fare ...



gli autori della scoperta

3000 "miei" collaboratori

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

~ 3000 scienziati di ~180 istituti da ~40 paesi diversi
più di 1000 studenti di dottorato



Argentina	Morocco
Armenia	Netherlands
Australia	Norway
Austria	Poland
Azerbaijan	Portugal
Belarus	Romania
Brazil	Russia
Canada	Serbia
Chile	Slovakia
China	Slovenia
Colombia	South Africa
Czech Republic	Spain
Denmark	Sweden
France	Switzerland
Georgia	Taiwan
Germany	Turkey
Greece	UK
Israel	USA
Italy	CERN
Japan	JINR

ATLAS
Collaboration



L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



sezione
gruppo
laboratorio

19 sezioni, 11 gruppi,
4 laboratori
nazionali,
1850 dipendenti.

~ 5000 ricercatori,
la maggior parte
universitari,
distribuiti in 16
regioni diverse

Fortemente integrato con il
sistema universitario

Paradiso e Inferno

Il Paradiso è dove:

i cuochi sono francesi, i poliziotti inglesi, i meccanici tedeschi, gli amanti italiani e tutto è organizzato dagli svizzeri

L'Inferno è dove:

i cuochi sono inglesi, i poliziotti tedeschi, i meccanici francesi, gli amanti svizzeri e tutto è organizzato dagli italiani

A che serve la ricerca fondamentale?

Faraday (1821, sulla induzione e.m.):

"Non lo so ma sicuramente prima o poi
ci metteranno una tassa sopra"

Bob Wilson, fondatore del Fermilab
alla commissione governativa sull'energia, 1969:

"Non ha nulla a che fare direttamente
con la difesa militare del nostro paese,
se non per il fatto che lo rende degno
di essere difeso."

un paio di effetti collaterali →

Il Web

The screenshot shows a web browser window with the address bar containing <http://public.web.cern.ch/public/en/About/Web-en.html>. The browser interface includes a menu bar (File, Edit, View, History, Bookmarks, Tools, Help), a search bar with the Google logo, and a navigation bar with links for 'Più visitati', 'Popolare Network', and 'Rai Podcast Radio2'. The website content features a navigation menu with 'About us', 'Science', 'Research', 'The LHC', and 'People'. A large image shows a man (Tim Berners-Lee) looking at a computer monitor displaying the CERN website. The main content area is titled 'Where the web was born' and contains the following text:

Where the web was born

Tim Berners-Lee, a scientist at CERN, invented the World Wide Web (WWW) in 1990. The Web, as it is affectionately called, was originally conceived and developed to meet the demand for automatic information sharing between scientists working in different universities and institutes all over the world.

CERN is not an isolated laboratory, but rather a focus for an extensive community that now includes about 60 countries and about 8000 scientists. Although these scientists typically spend some time on the CERN site, they usually work at universities and national laboratories in their home countries. Good contact is clearly essential.

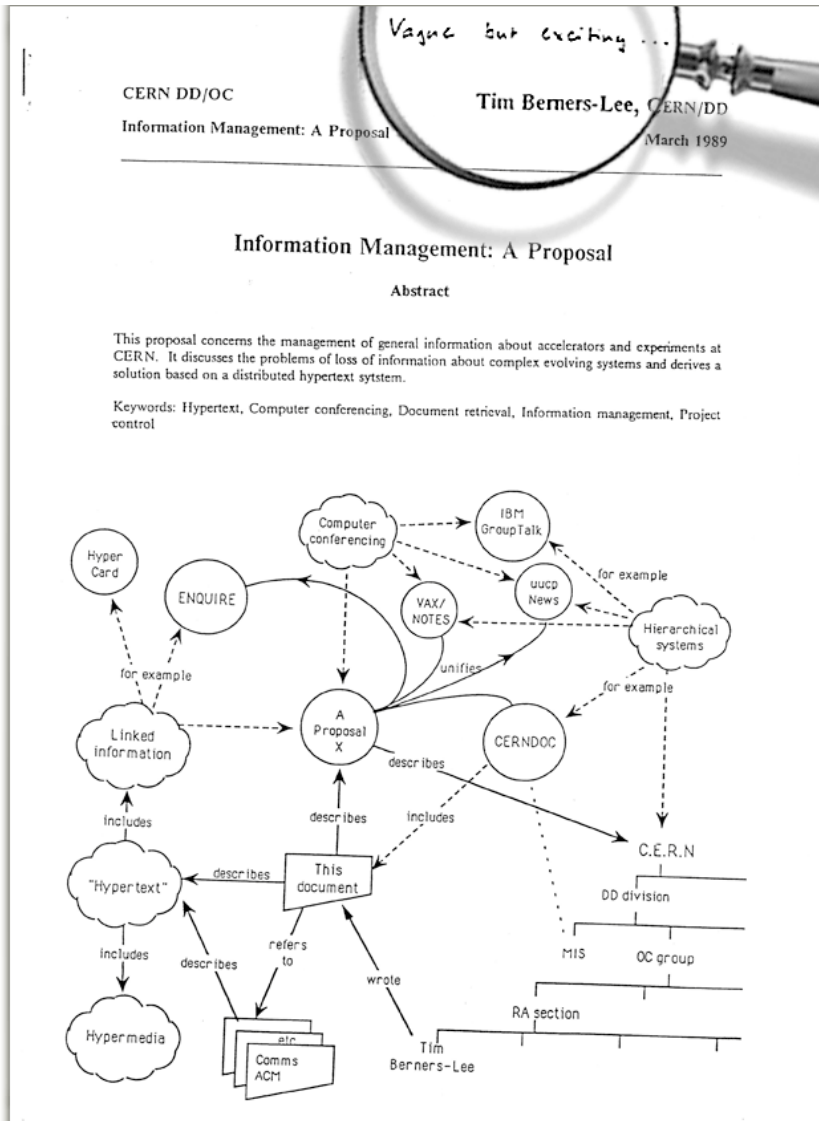
The basic idea of the WWW was to merge the technologies of personal computers, computer networking and hypertext into a powerful and easy to use global information system.

Copyright CERN 2008 - [Web Communications](#), DSU-CO

Done

nel 2010 ha compiuto 20 anni -
<http://info.cern.ch/www20>

la proposta iniziale ...



1989

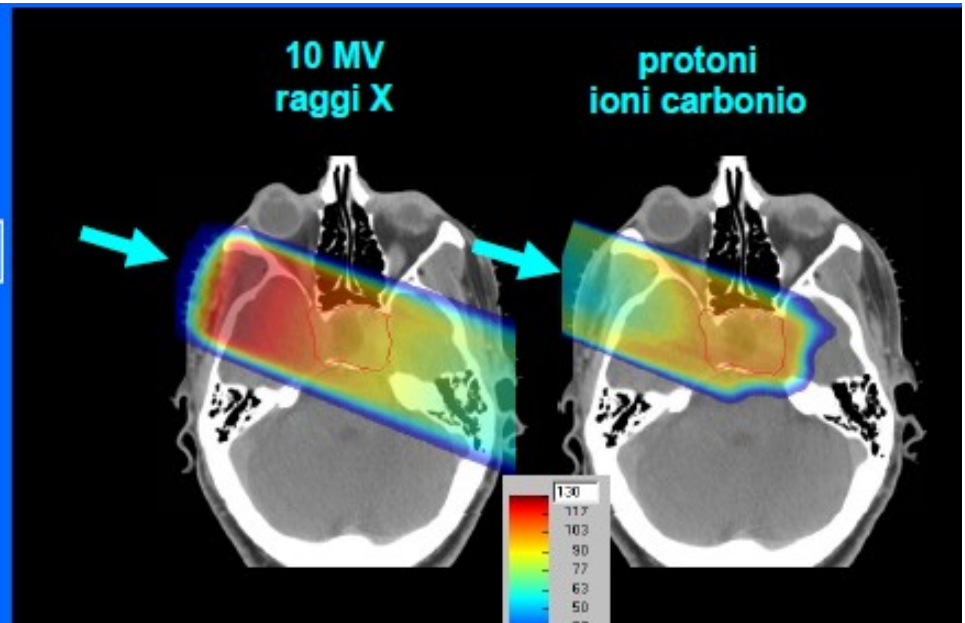
"vague but exciting"

Adroterapia Oncologica



**Vantaggi
Macroscopici:**

Confronto tra fasci singoli



C.N.A.O. - a Pavia

Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

Inaugurato ufficialmente il 15 febbraio 2010

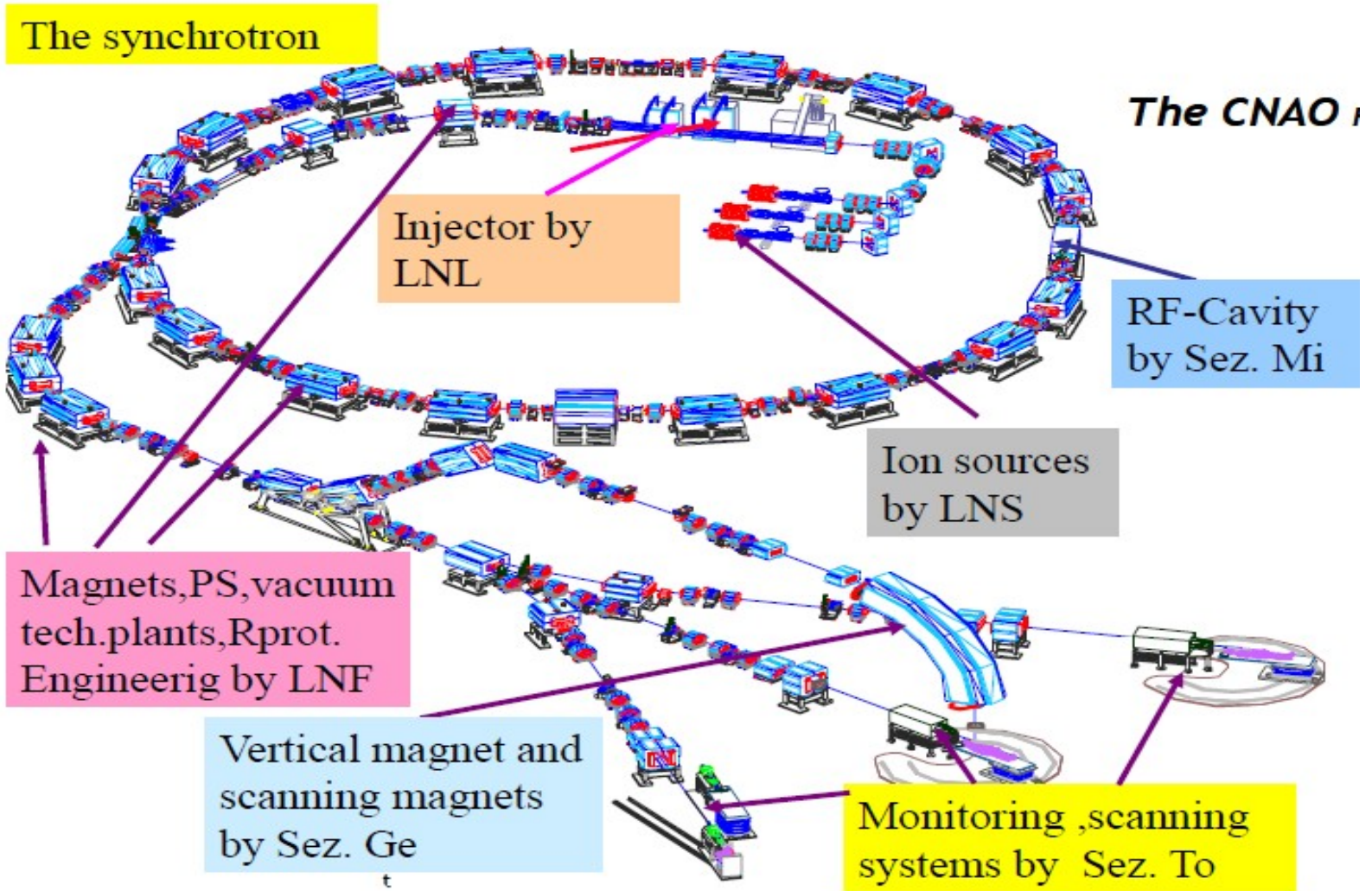
Fasci di particelle (protoni e ioni carbonio) per la cura di tumori difficilmente operabili, radio-resistenti, ...

3 sale, ~20000 sedute per ~3000 pazienti l'anno

Tutta la parte di generazione e controllo dei fasci è sviluppata dall'INFN.

Centro simile in costruzione in Austria (in collaborazione con CNAO, INFN, CERN, ...)

CNAO / INFN



CNAO



Grazie per l'attenzione