

la scoperta del Bosone di Higgs a LHC

Roberto Ferrari
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

ITIS Leonardo da Vinci - Parma, 15 novembre 2014

Sommario

1. l'acceleratore (LHC)
2. il modello standard
3. l'esperimento (ATLAS)
4. risultati

Publicità



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC^{1,2}

ATLAS Collaboration^a

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

ARTICLE INFO

Article history:
Received 31 July 2012
Received in revised form 8 August 2012
Accepted 11 August 2012
Available online 14 August 2012
Editor: W. D. Szafron

ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The dataset corresponds to an integrated luminosity 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 $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ 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 5.9 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 programmes.

Indirect limits on the SM Higgs boson mass of $m_H < 158$ GeV at 95% confidence level (CL) have been set using global fits to precision electroweak results [12]. Direct searches at LEP [13], the Tevatron [14–16] and the LHC [17,18] 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 searches 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 D0 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], 1.1 σ for D0 [15] and 2.8 σ for their combination [16].

The previous ATLAS searches in 4.5–4.8 fb⁻¹ of data at $\sqrt{s} = 7$ TeV are combined here with new searches for $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$,³ $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ 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⁻²s⁻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 $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ channel, the increased pile-up deteriorates the event mixing transverse momentum, 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 constructed 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 analysis of the $H \rightarrow ZZ^{(0)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(0)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ 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 asymmetric 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 (pseudorapidity⁴ $|\eta| < 1.475$) 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 region ($3.2 < |\eta| < 4.9$) is 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/μ measurements 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 ($qq' \rightarrow qq'H$, denoted VBF) and Higgs-strahlung ($qq' \rightarrow WH, ZH$, denoted WH/ZH). The small contribution from the associated production with a b pair ($gg/b\bar{b} \rightarrow Hb\bar{b}$, denoted bH) 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. *PYTHIA indicates the PYTHIA6 and PYTHIA8 are used for simulation at $\sqrt{s} = 7$ TeV and $\sqrt{s} = 8$ TeV, respectively.

| Process | Generator |
|----------------------------------|---------------------------|
| ggF, VBF | POWHEG [27,28] + PYTHIA |
| WH, ZH, bH | PYTHIA |
| $W + jets, Z/\gamma^* + jets$ | ALPGEN [54] + HERWIG |
| $t\bar{t}, W, Z$ | MC@NLO [63] + HERWIG |
| $t\bar{t}$ | AceMC [62] + PYTHIA |
| $B \rightarrow WW$ | MC@NLO + HERWIG |
| $B \rightarrow WZ$ | ggMCW [61] + HERWIG |
| $B \rightarrow ZZ$ | POWHEG [62] + PYTHIA |
| $B \rightarrow \tau\tau$ | ggZZ [64] + HERWIG |
| WZ | MadGraph + PYTHIA, HERWIG |
| $W\gamma + jets$ | ALPGEN + HERWIG |
| $W\gamma^* (G)$ | MadGraph + PYTHIA |
| $tt\bar{t} \rightarrow b\bar{b}$ | SHOWER |

leading order (NLO) electroweak (EW) corrections are applied [29, 30], as well as QCD soft-gluon re-summation at up to next-to-next-to-leading order (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 k_T calculation [36], which includes QCD corrections at NLO and QCD soft-gluon re-summation up to NNLL; the effects of finite 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 bH 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 PROSPERITY [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 [66–68], PYTHIA6 [69] (for 7 TeV samples) and 8 TeV samples produced with MadGraph [70,71] or AcerMC or PYTHIA8 [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 PYTHIA6 or HERWIG are used, TAUOLA [76] and PHOTOS [77] are employed to describe the lepton decay and additional photon radiation from charged leptons, respectively.

The following parton distribution function (PDF) sets are used: CT10 [78] for the POWHEG, MC@NLO, ggZZW and ggZZZ samples; CTEQ6.1 [79] for the PYTHIA6, ALPGEN, AcerMC, MadGraph, HERWIG and SHERPA samples; and MST2MC1 [80] for the PYTHIA8 samples.

Acceptances and efficiencies are obtained mainly from full simulations of the ATLAS detector [81] using GEANT4 [82]. These simulations include a realistic modelling of the pile-up conditions observed in the data. Corrections obtained from measurements in

¹ ATLAS uses a right-handed coordinate system with its origin at the nominal interaction point (IP), in the centre of the detector, and the z axis along the beam line. The x axis points from the IP to the centre of the ATLAS ring, and the y axis points upwards. Cylindrical coordinates (r, ϕ) are used in the transverse plane, ϕ being the azimuthal angle around the beam line. Coordinates are given “centimetres” are projected into the x – y plane. The pseudorapidity is defined in terms of the polar angle θ as $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$.

^a © CERN for the benefits of the ATLAS Collaboration.
^b E-mail address: atlas.physics@cern.ch.

² The system $\bar{b}b$ states are electron or muon.

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



gli autori della scoperta

3000 "miei" collaboratori + altrettanti in CMS



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?

Bob Wilson, fondatore del Fermilab,
al comitato sull'energia atomica (1969):

"... Non ha nulla a che fare direttamente
con la difesa militare del nostro paese,
ma lo rende degno di essere difeso."

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

"Non so a cosa serva, ma prima o poi
ci metteranno una tassa sopra"

**il motore è la curiosità,
l'obiettivo la conoscenza ...**

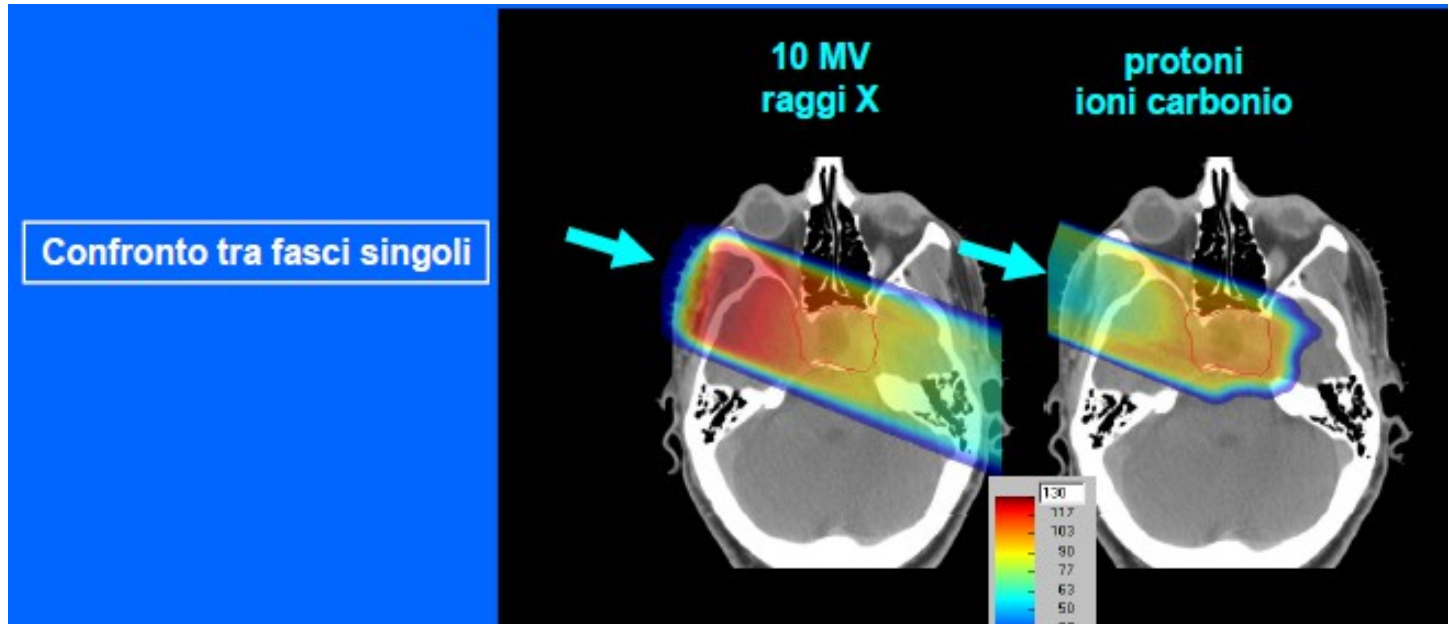
effetti collaterali →

adroterapia oncologica



proposta da
Bob Wilson
nel 1946

Vantaggi
macroscopici:



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.

MedAustron: centro simile in costruzione in Austria con la collaborazione di CERN, INFN, CNAO ...



17-18 maggio 2013

Con il Patrocinio di





Responsabile Scientifico
Prof. Roberto Drecchia

1ª GIORNATA TEORIA

08.30 Registrazione partecipanti e Saluto del Presidente
E. Borloni

09.00 Obiettivi e contenuti del Corso
R. Drecchia/G. Tafuni

09.30 Gli aspetti tecnologici nell'Adroterapia - 1
S. Rossi/M. Palla

10.30 Gli aspetti tecnologici nell'Adroterapia - 2
M. Palla

11.30 Aspetti fisici dell'Adroterapia - 1
M. Crocco

12.30 Aspetti fisici dell'Adroterapia - 2
S. Molinelli

13.30 Pausa

14.30 Radiobiologia delle particelle pesanti
A. Facchetti

15.30 I protocolli clinici in Adroterapia
A. Iannailli

16.30 Adroterapia e radioprotezione
M. Pelliccioni/M. Ferrarini

17.30 Sicurezza e qualità nell'Adroterapia
F. Gerardi

18.00 Termine Lavori

Corso accreditato ECM, rivolto a:
Medici Chirurghi (discipline: Chirurgia maxillo-facciale, Medicina Generale, Neurochirurgia, Oftalmologia, Oncologia, Otorinolaringoiatria, Radioterapia, Radiodiagnostica), Fisici Sanitari, Tecnici Sanitari di Radiologia Medica ed Infermieri
Crediti ECM preassegnati N° 18
Iscrizione al Corso:
€ 240,00 (I.V.A. inclusa)
Accettazione iscrizioni fino ad un massimo di 80 partecipanti

La Fondazione CNAO è il primo centro in Italia ad utilizzare IONI CARBONIO per la cura dei tumori



IL CORSO, UNICO NEL SUO GENERE, HA LO SCOPO DI SPIEGARE GLI ELEMENTI BASE DELLA TERAPIA CON PARTICELLE PESANTI, DISCUTENDONE LE EVIDENZE CLINICHE E LE PROSPETTIVE FUTURE

fondazione **CNAO**
Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

Sala Conferenze
Strada Campeggi 53, Pavia

17-18 MAGGIO 2013

CORSO TEORICO-PRATICO SULL'ADROTERAPIA: L'ALTA TECNOLOGIA APPLICATA ALLA CLINICA

SEGRETERIA ORGANIZZATIVA
ARTCOM
centro coordinatore

Tel. 02 89540427 - Fax 02 45491011
artcom@artcomsr.it - www.artcomsr.it

Responsabile Corso
Dr. Giovanni Tafuni

2ª GIORNATA PRATICA

08.30 Il Risk Management in Oncologia Radioterapica con particolare riferimento all'Adroterapia
A. Cassasco

09.30 Clinica e imaging nell'Adroterapia - 1
B. Tagaste

10.30 Clinica e imaging nell'Adroterapia - 2
B. Tagaste

11.30 La ricerca e la terapia in Adroterapia - 1
R. Drecchia/P. Fosatti

12.30 La ricerca e la terapia in Adroterapia - 2
R. Drecchia/P. Fosatti

13.30 Pausa

PARTE PRATICA

14.30 TC di simulazione: problematiche di centratura
L. Forcella

15.30 RM pre e post trattamento di Adroterapia: problematiche di posizionamento
S. Tampellini

16.30 Posizionamento del paziente nelle attività di Adroterapia per la regione "Testa-Collo"
L. Forcella

17.30 Posizionamento del paziente nelle attività di Adroterapia per la regione "Pelvica"
S. Tampellini

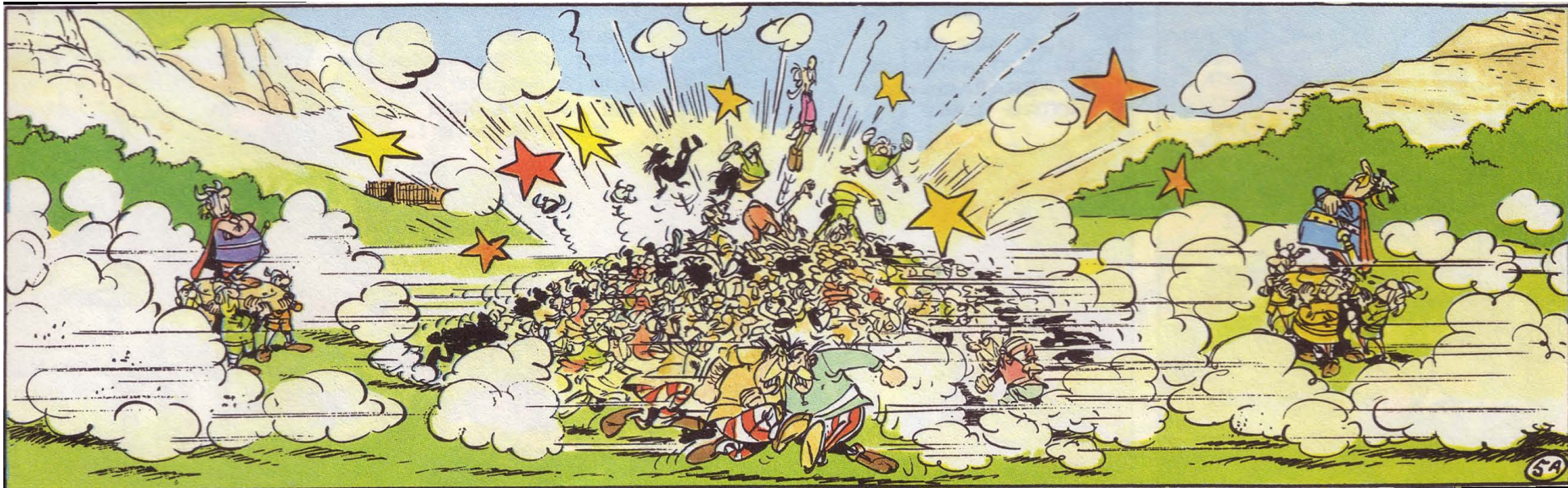
18.00 Valutazione Apprendimento



1. l'acceleratore (LHC)

come si cerca il bosone di Higgs?

- con la forza bruta
 - collisionatori ("collider")



- ma con precisioni al limite della tecnologia (e oltre)
 - posizioni al millesimo di millimetro ("micron")
 - tempi al miliardesimo di secondo ("nanosecondo")

cos'è un collider?

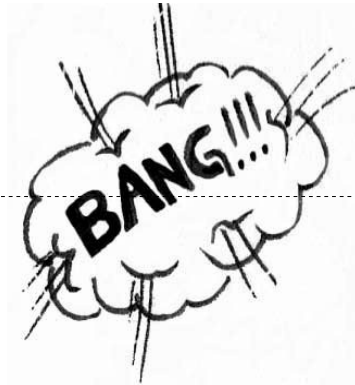
- Macchina che provoca scontri frontali tra particelle cariche accelerate ad alta energia



- Due serbatoi di energia:
 - cinetica [meccanica classica: $E = \frac{1}{2} mv^2$]
 - massa (energia "congelata") [$E = mc^2$]

cos'è un collider?

- Le particelle (o pezzi di esse) si annichilano e la loro energia si rende disponibile ...

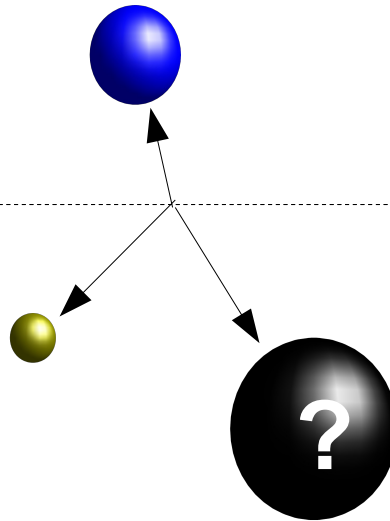


Annichilazione:

una coppia particella-antiparticella (ad es. elettrone-positrone) si fondono e liberano la propria energia (inclusa la parte congelata nella massa)

cos'è un collider?

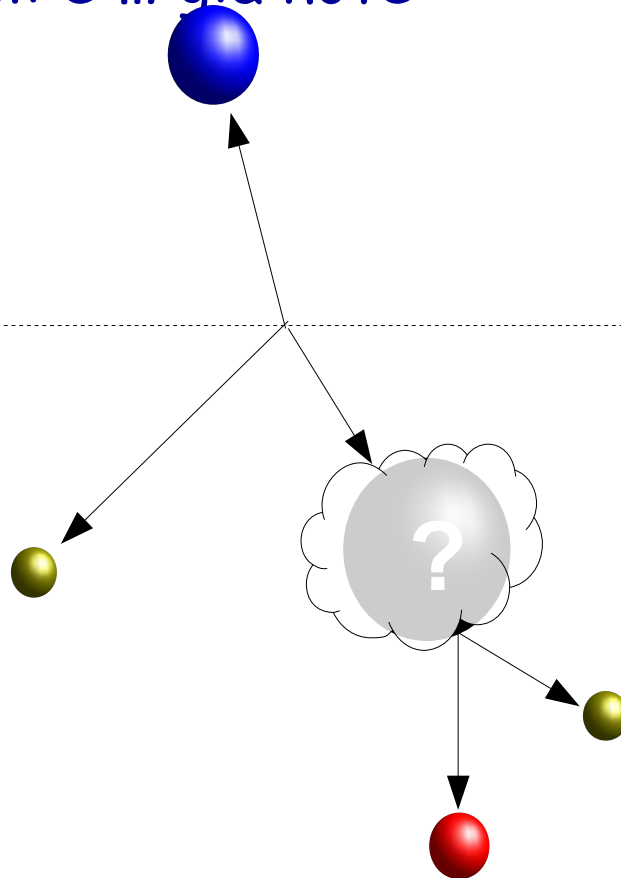
- ... per creare altre particelle, più pesanti e più rare
 - ... più energia, più possibilità di creare particelle sempre più pesanti



→ parte dell'energia disponibile può [quando tutte le regole della natura lo permettono] convertirsi nuove particelle ...

cos'è un collider?

- che - tipicamente - decadono subito in particelle più leggere, più stabili e ... già note



collider

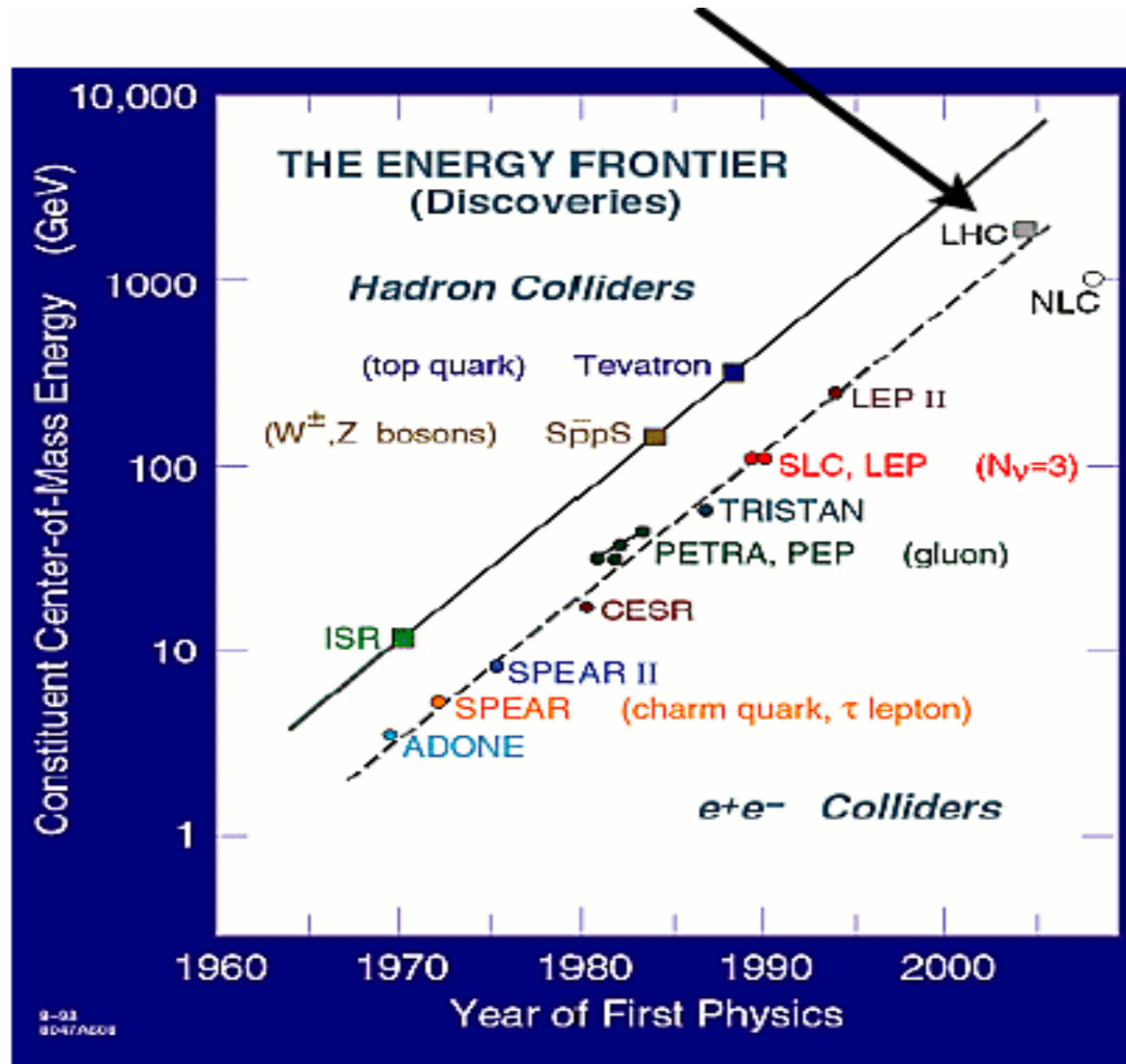
Due categorie:

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 100 miliardi ciascuno)

elementi di un acceleratore (sincrotrone)

Campi magnetici (dipoli):

immaginate le catene del calcinulo

Campi elettrici (elettromagnetici → cavità a radiofrequenza):

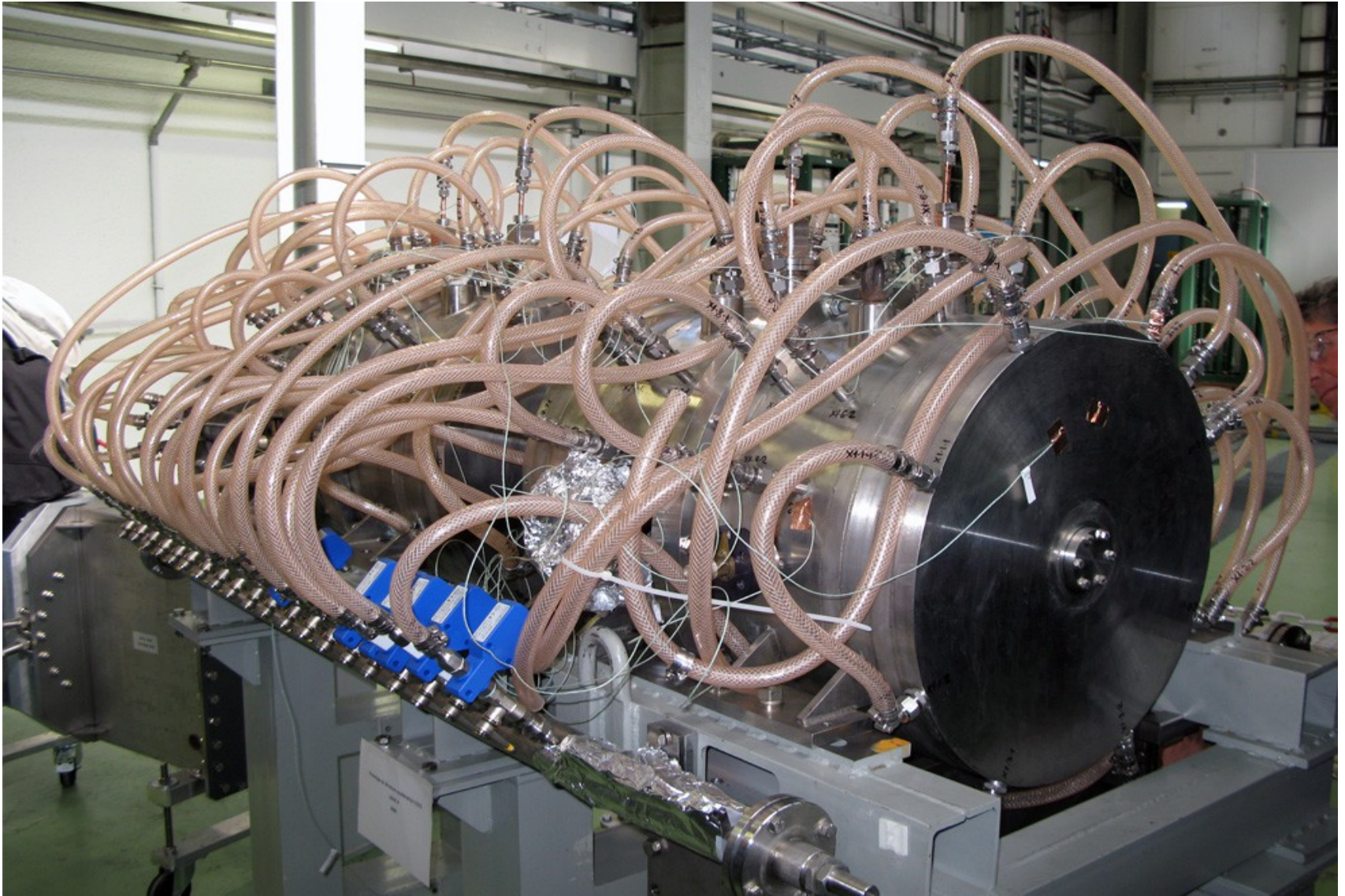
immaginate un braccio che dà una spinta ogni volta che un
seggolino gli passa davanti

spinge più forte chi va più piano !

i dipoli



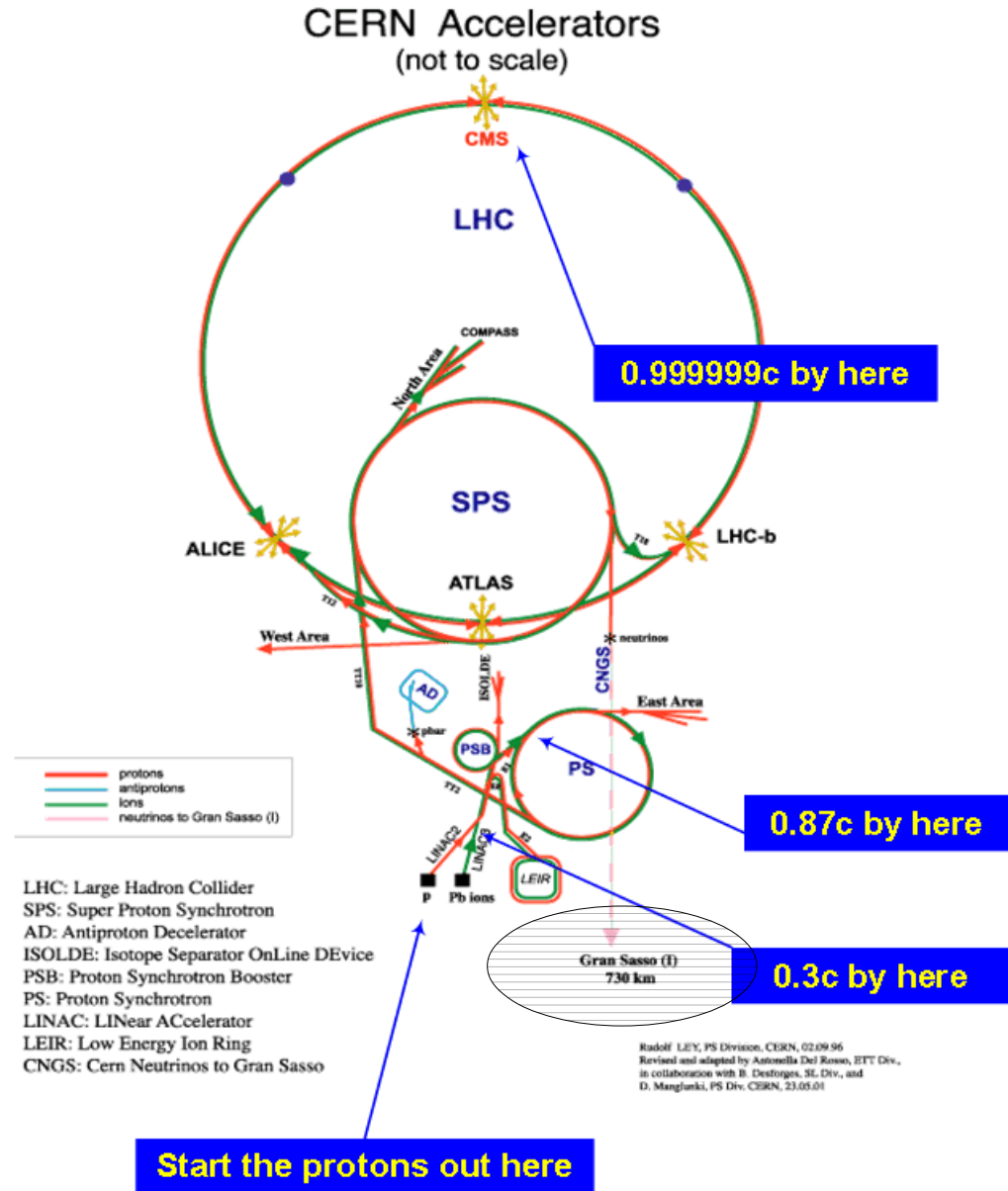
le cavità a radiofrequenza



CERN

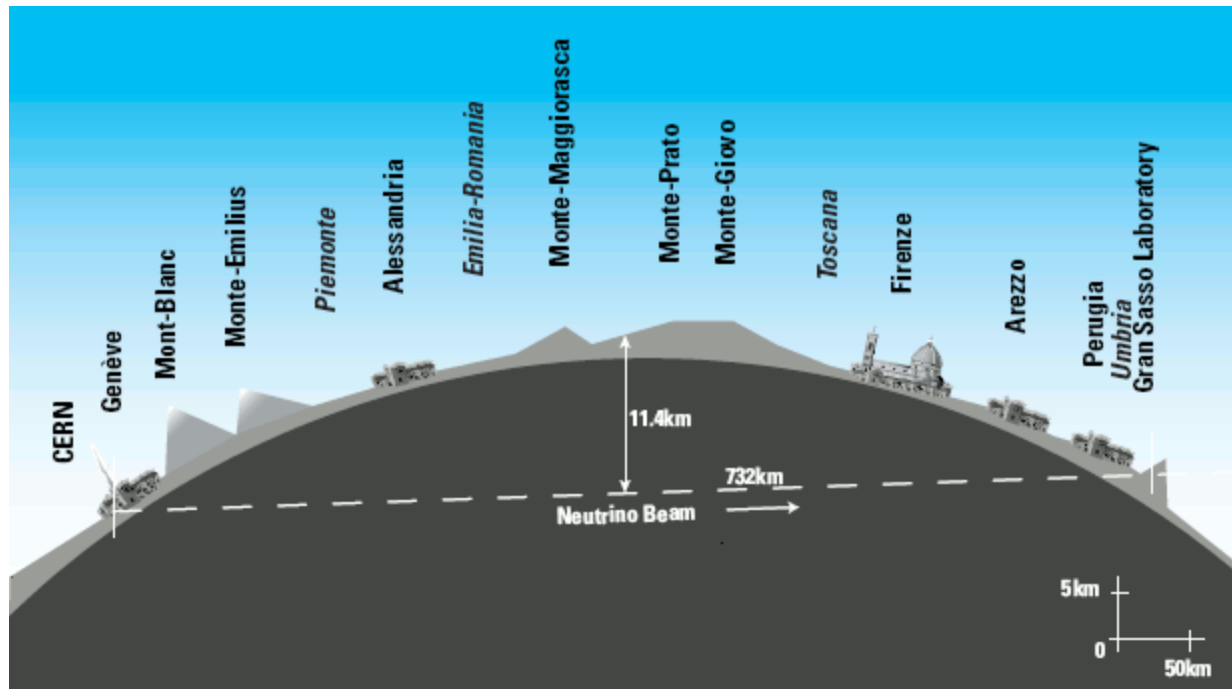
Tanti diversi acceleratori: PS, SPS, ..., LHC

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





verso il Gran Sasso



il fascio di neutrini per il Gran Sasso passa (passava)
sotto il Monte Maggioreasca (sul confine Parma-Piacenza-
Genova)

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 ?

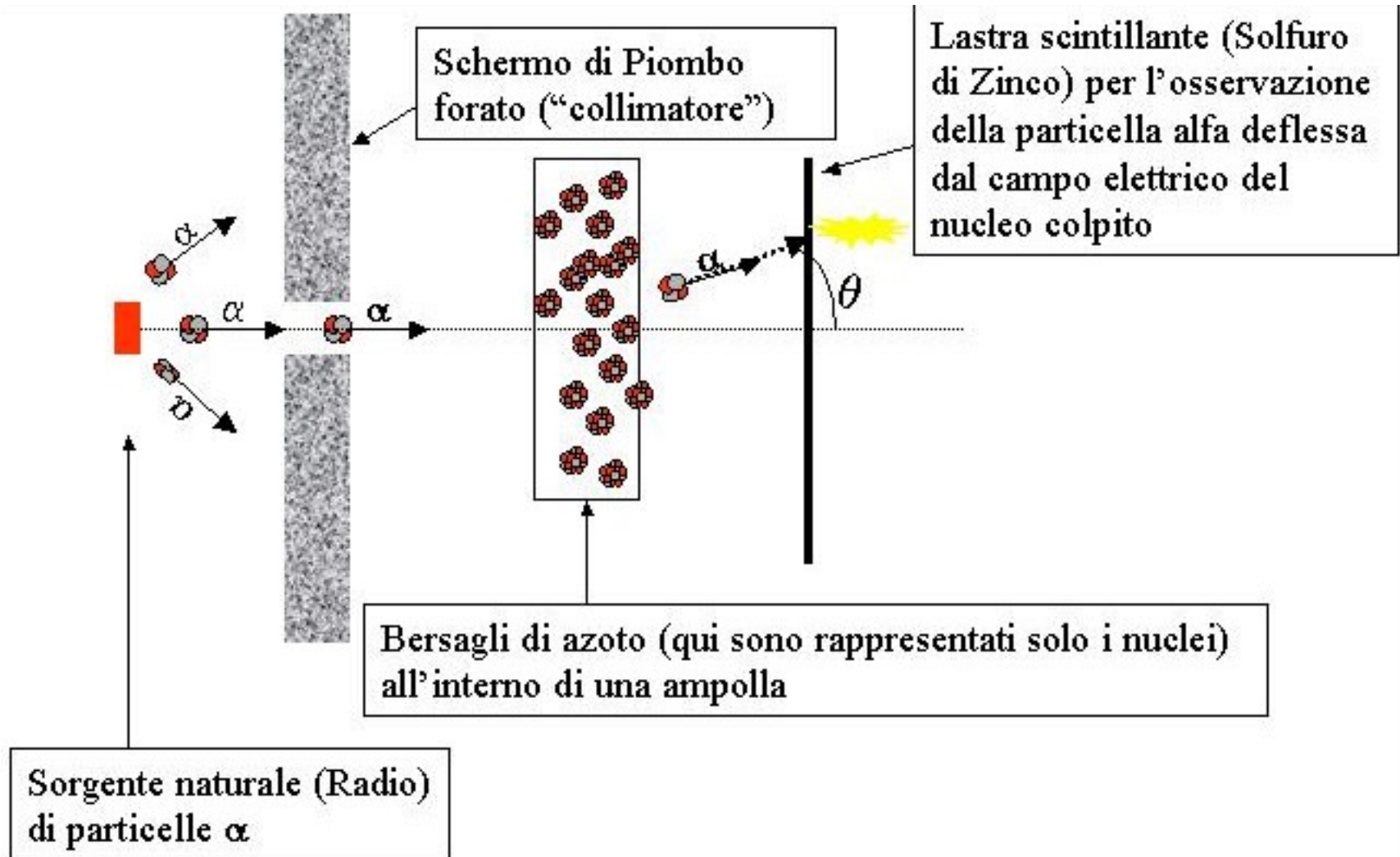
sottostruttura dei quark ?

dimensioni extra ?

stringhe ?

2. il modello standard

l'esperimento di Rutherford (1909-1911)

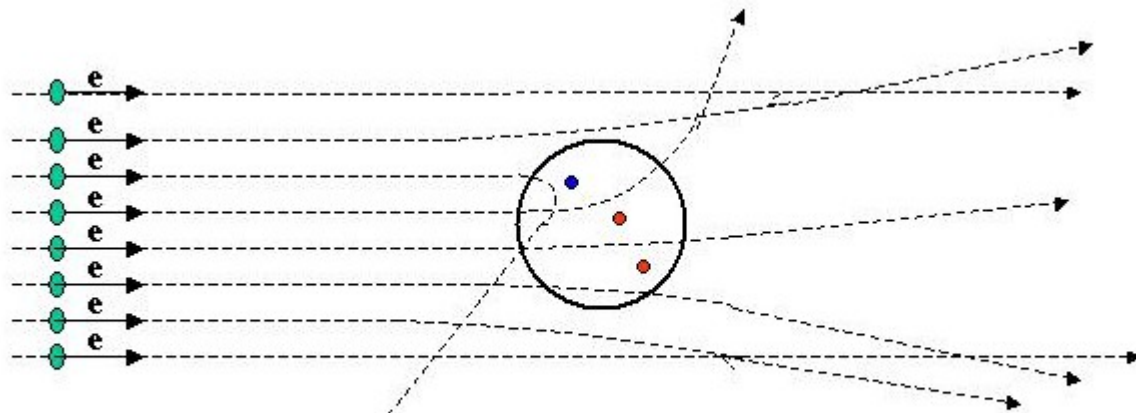


→ struttura dell'atomo

i quark

1969 Stanford Linear Accelerator (SLAC)

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

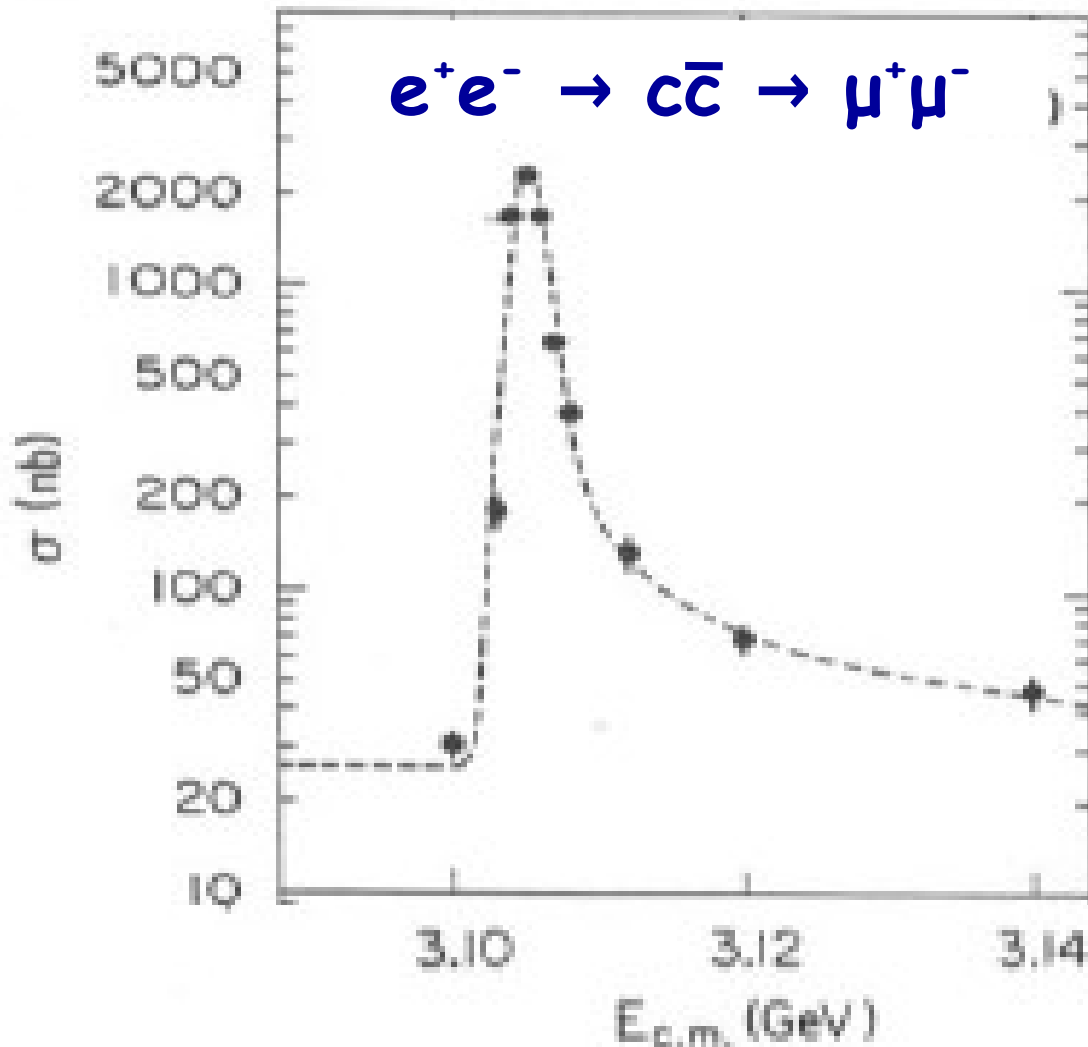


Si parte con 3 quark: u,d,s

protone: uud neutrone: udd

il quark charm

SLAC e^+e^- ring (SPEAR)



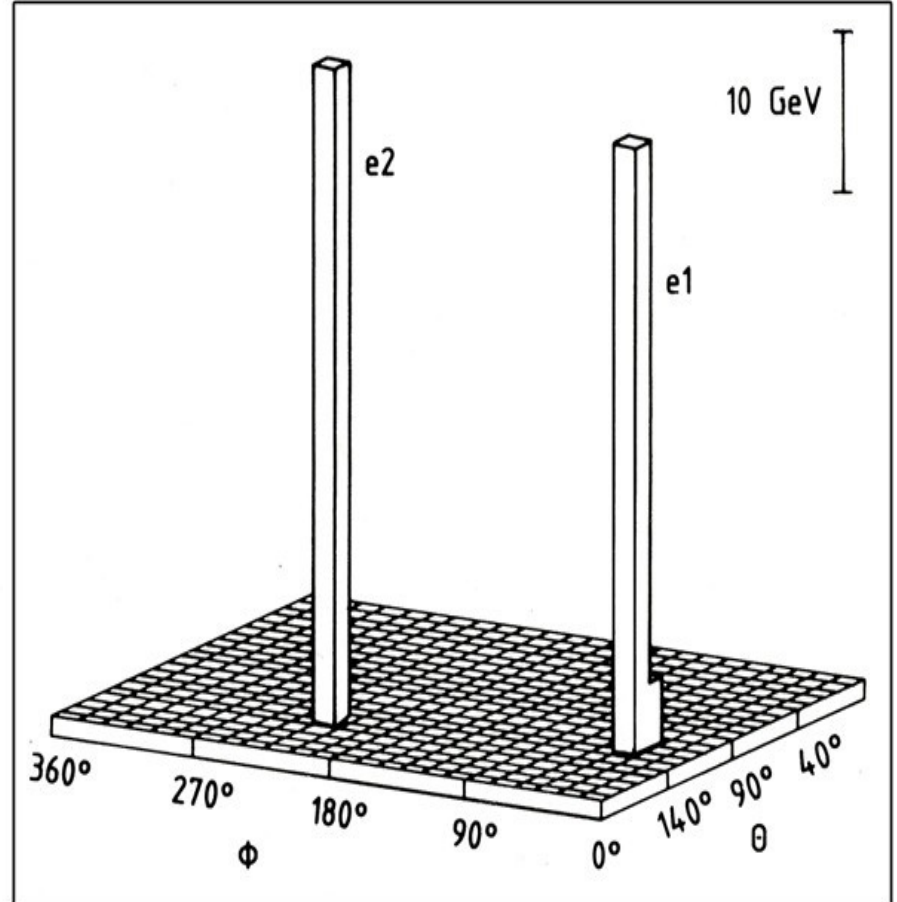
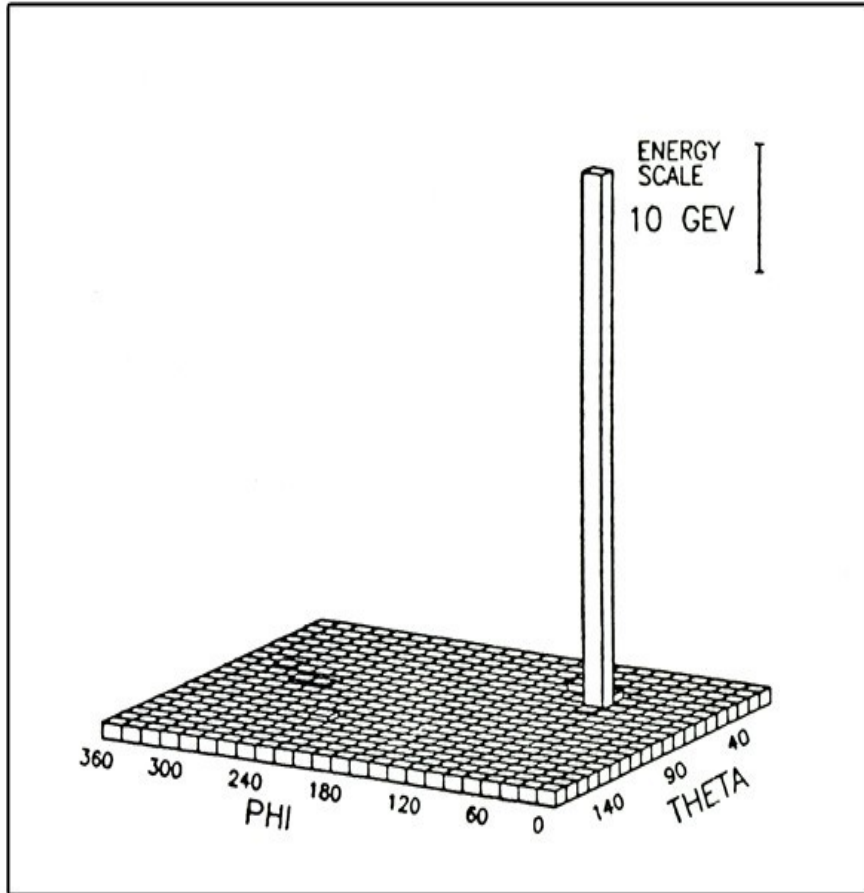
1974: J/ψ
(stato legato $c\bar{c}$)

... quando la
sfiga ...

Adone (LNF)



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



CERN $p\bar{p}$ Collider

le interazioni deboli e i loro mediatori ...

$W \rightarrow$ interazioni cariche: scambio energia ma anche carica elettrica

$$[\nu n \rightarrow p e^- , \bar{\nu} p \rightarrow n e^+]$$

$Z \rightarrow$ interazioni neutre: scambio energia ma non carica

$$[\bar{\nu} n \rightarrow \bar{\nu} n , \nu p \rightarrow \nu p]$$

parenti di quelle elettromagnetiche ... ma:

$$M_W \text{ e } M_Z \neq 0 \sim 80 \text{ e } 90 \times M(\text{protone})$$

\rightarrow il campo debole non si propaga alla velocità della luce!

* le equazioni diventano incoerenti e inutilizzabili *

possibile soluzione: + nuova forza e (almeno) un nuovo mediatore associato ad essa

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

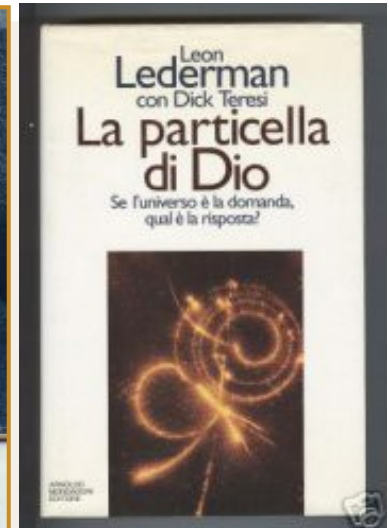
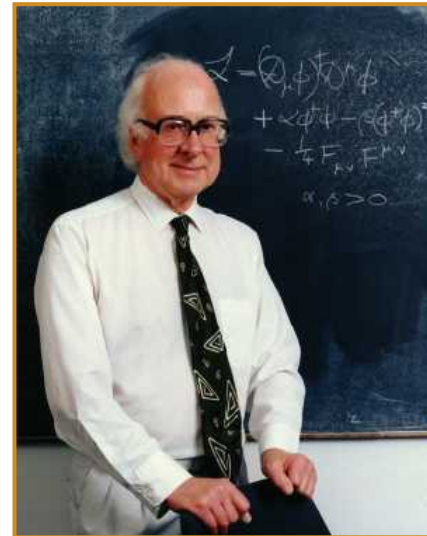
- il campo frena le particelle, come la gelatina frena un proiettile



- 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) → premio Nobel

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

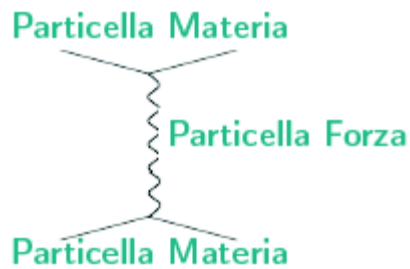
4) bosone scalare del modello standard

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

mediatori

Forza → lavoro = trasferimento energia

Azione a distanza ? No → mediatori interazione



es. 1: interazione e.m. : fotoni

es. 2: interazione nucleare forte : pioni

[previsione: 1935 → scoperta: 1947]

es. 3: interazione nucleare debole : W/Z

[previsione: ~1965 → 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 $\frac{1}{2}$)

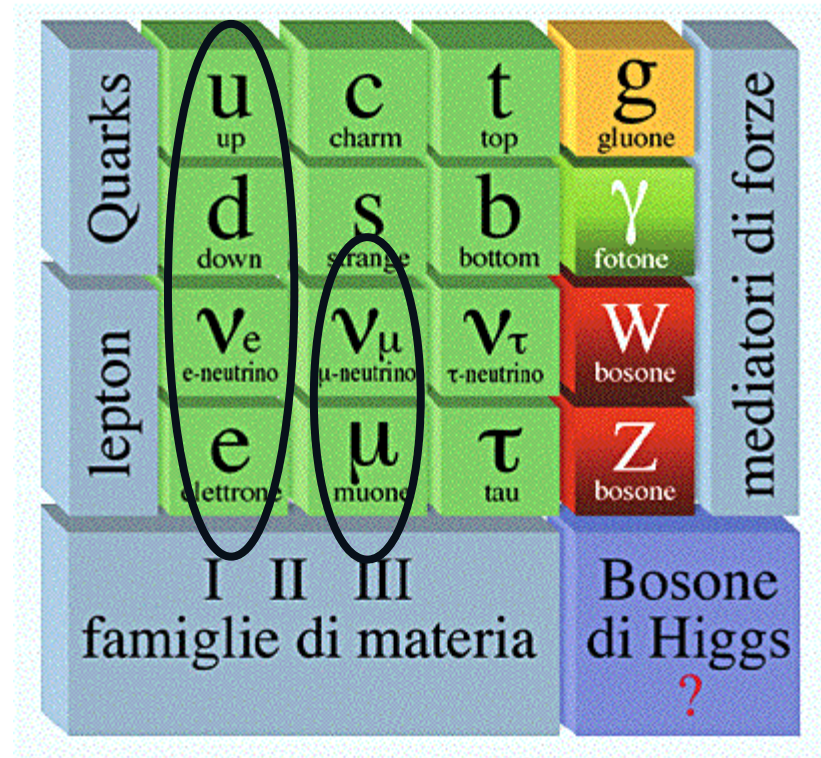
il Modello Standard (tavola periodica degli elementi)

- 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):

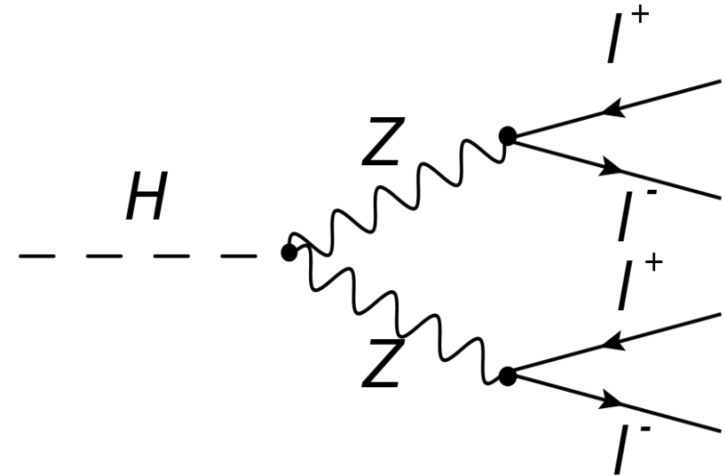
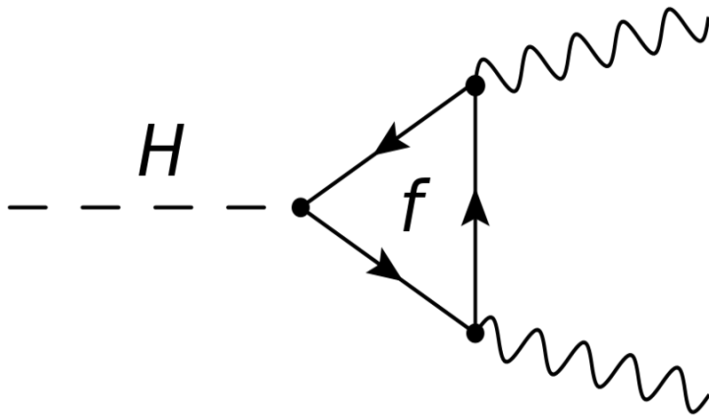
- Forza nucleare forte (1)
- Forza nucleare debole (10^{-5})
- Forza elettromagnetica (10^{-2})

- *Non pervenuta: Gravità (10^{-36})*



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 125 GeV \pm V
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

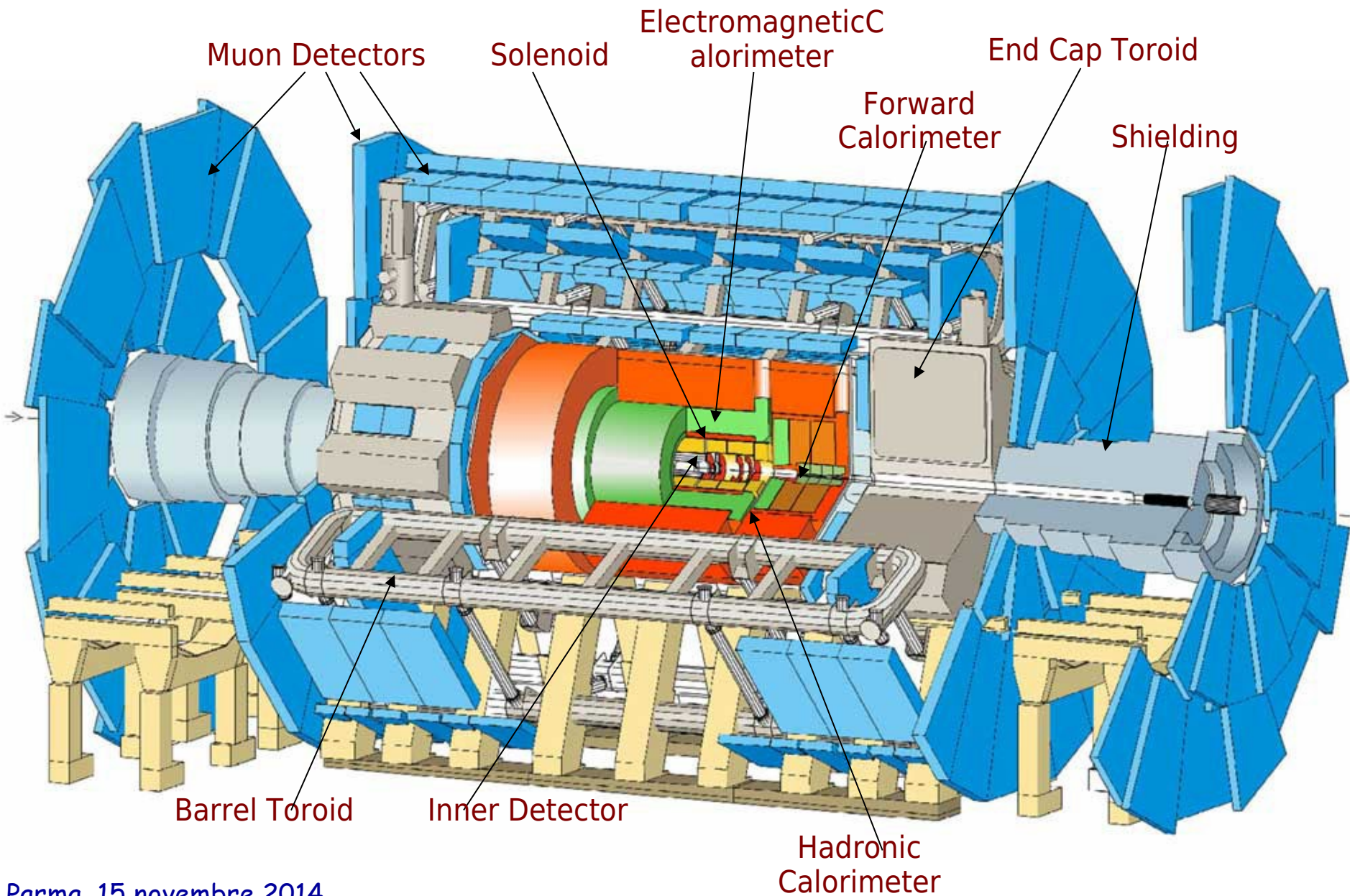
Impronta del dito indice sinistro

IL SINDACO Peter Higgs

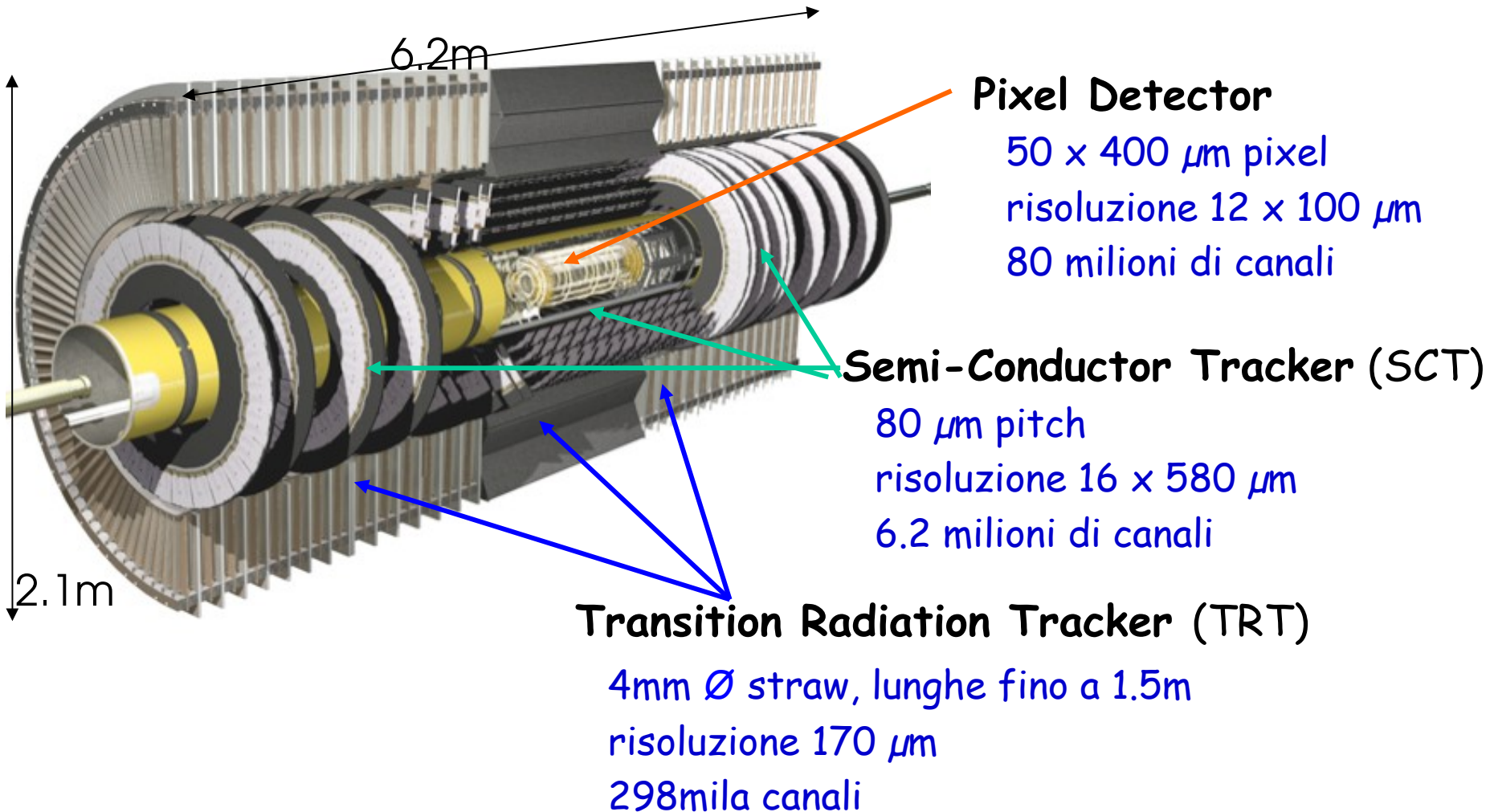


3. l'esperimento (ATLAS)

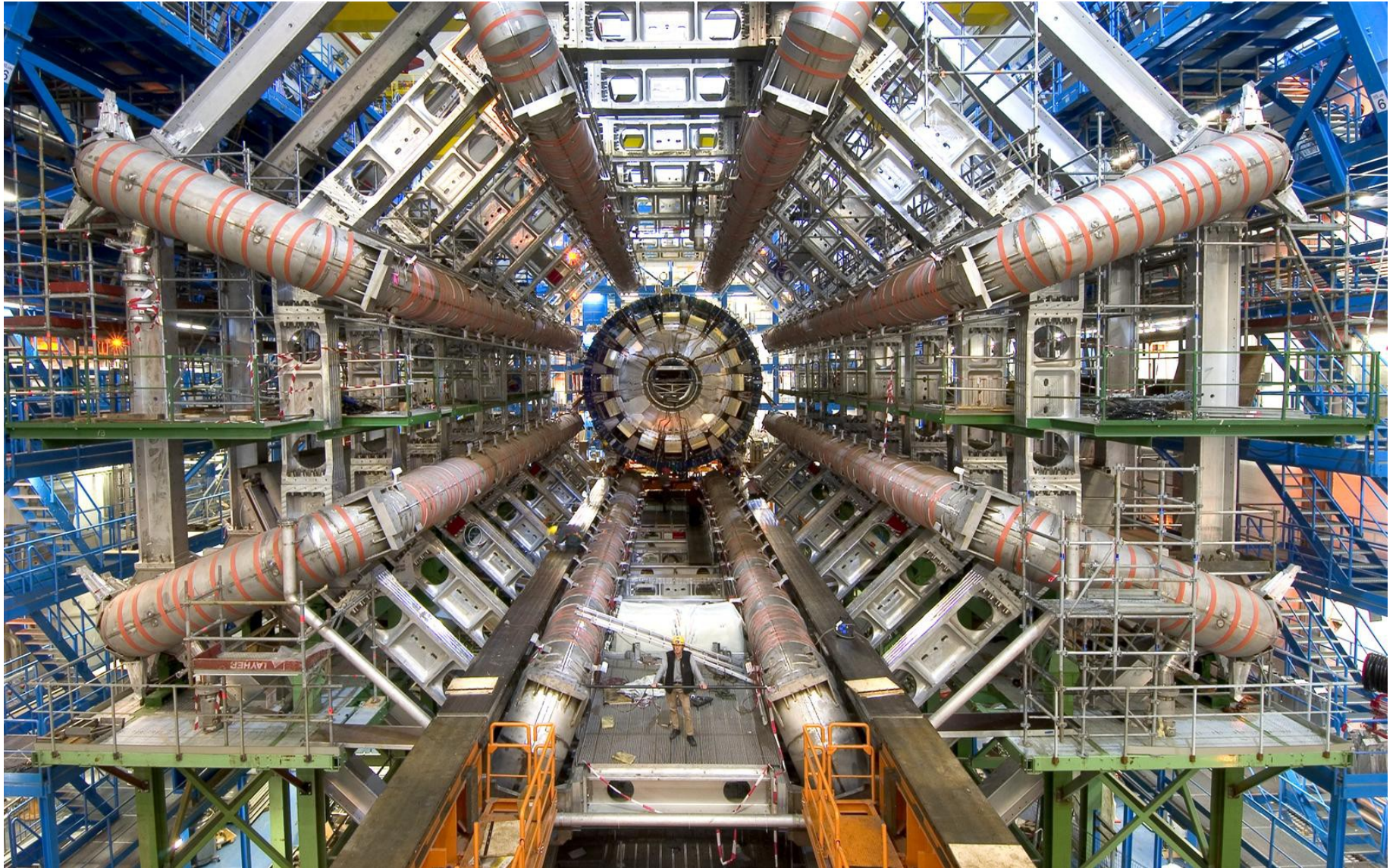
ATLAS: un microscopio alto 25 e lungo 46 m



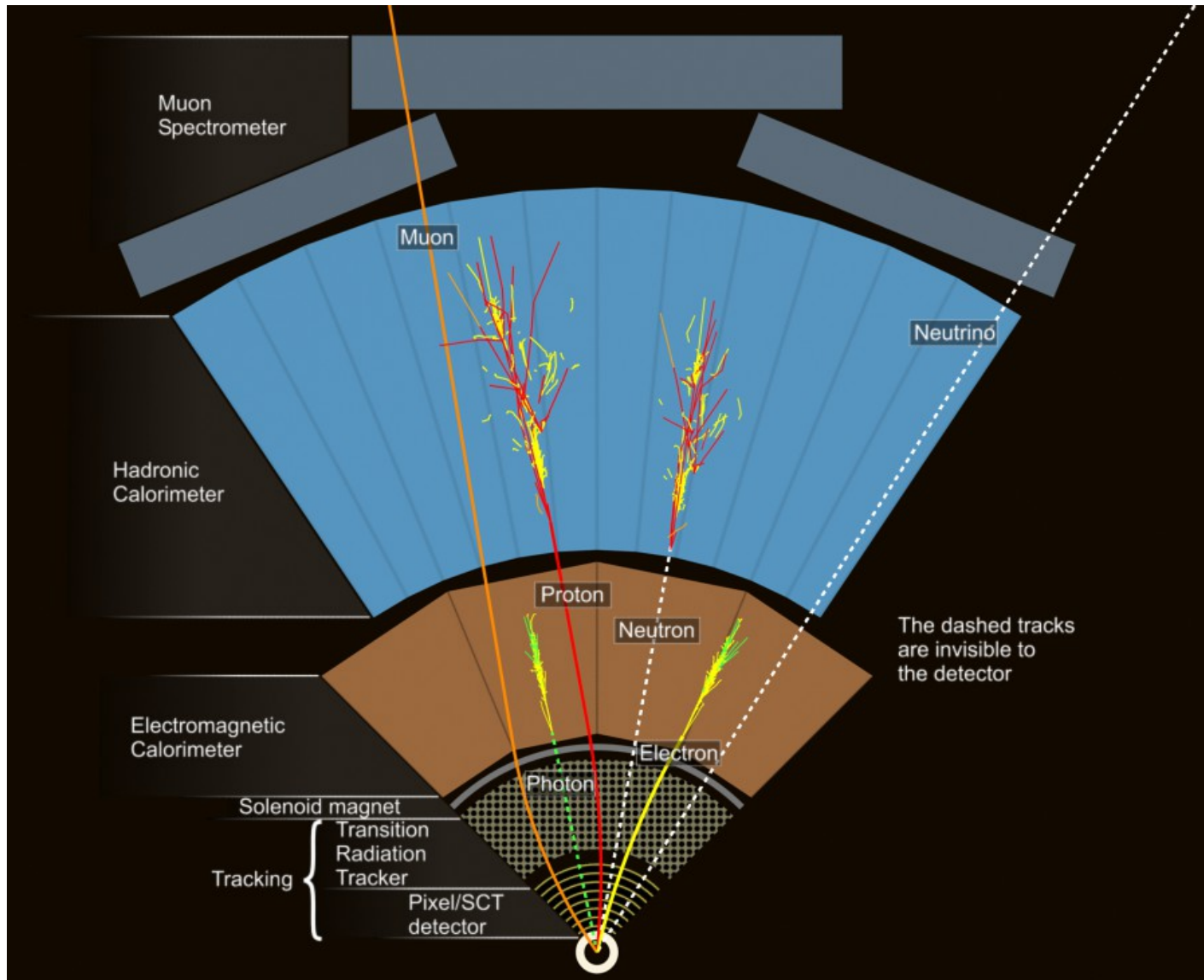
il tracciatore interno



il toroide centrale (barrel)



tante (diverse) macchine fotografiche

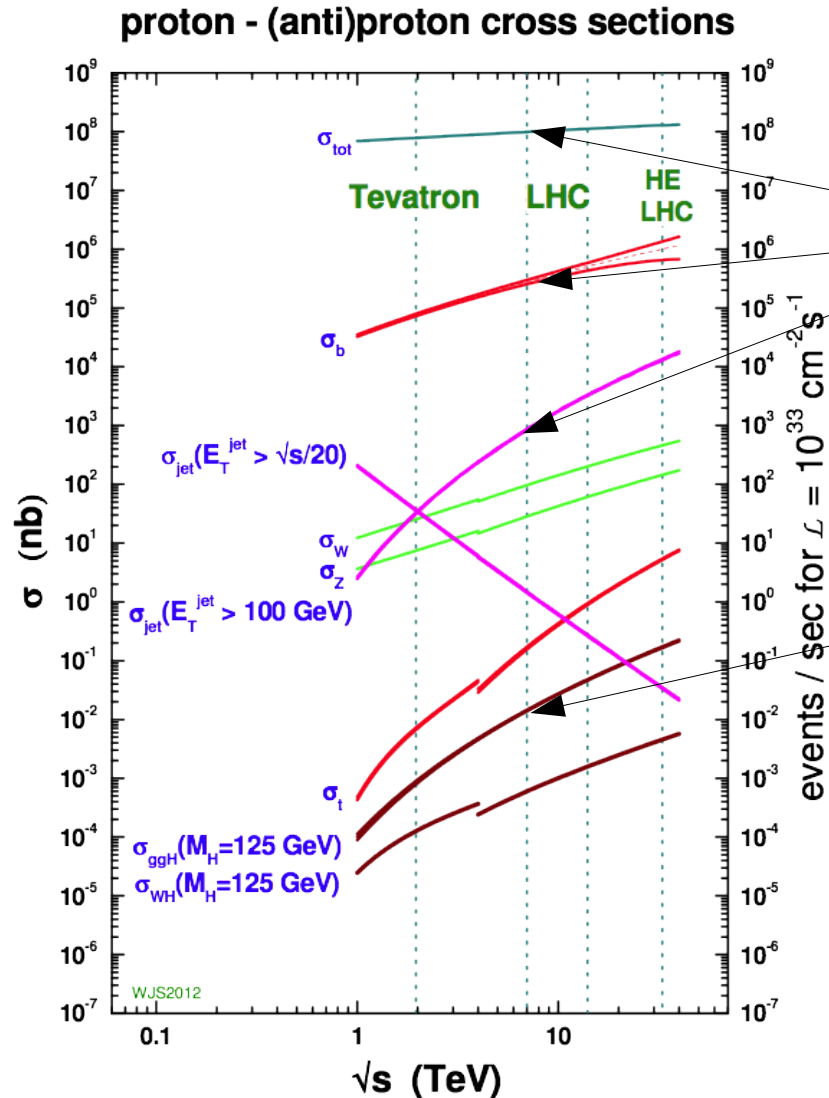


come funziona ?

- 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"

quanto è probabile un "Higgs" ?



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

un ago in migliaia di pagliai

Eventi interessanti (rarissimi) contengono:

a) un numero "piccolo" (1,2,3,4,...) di elettroni, muoni, fotoni, getti di grande energia

b) grande energia mancante

Ad esempio, il bosone di Higgs può decadere in:

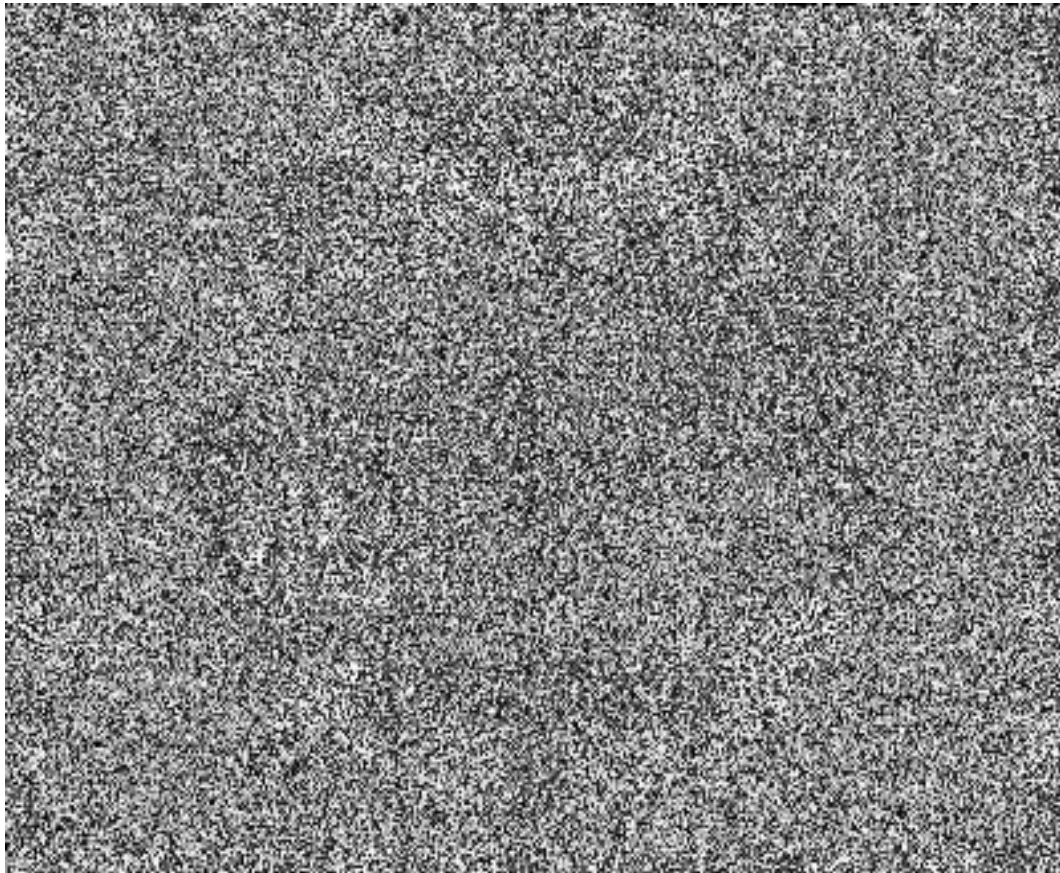
$4e$, 4μ , $2e2\mu$, $2e2\nu$, $2\mu2\nu$, $e\mu2\nu$, $2e2j$, $2\mu2j$, 2γ , ... 4ν

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

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

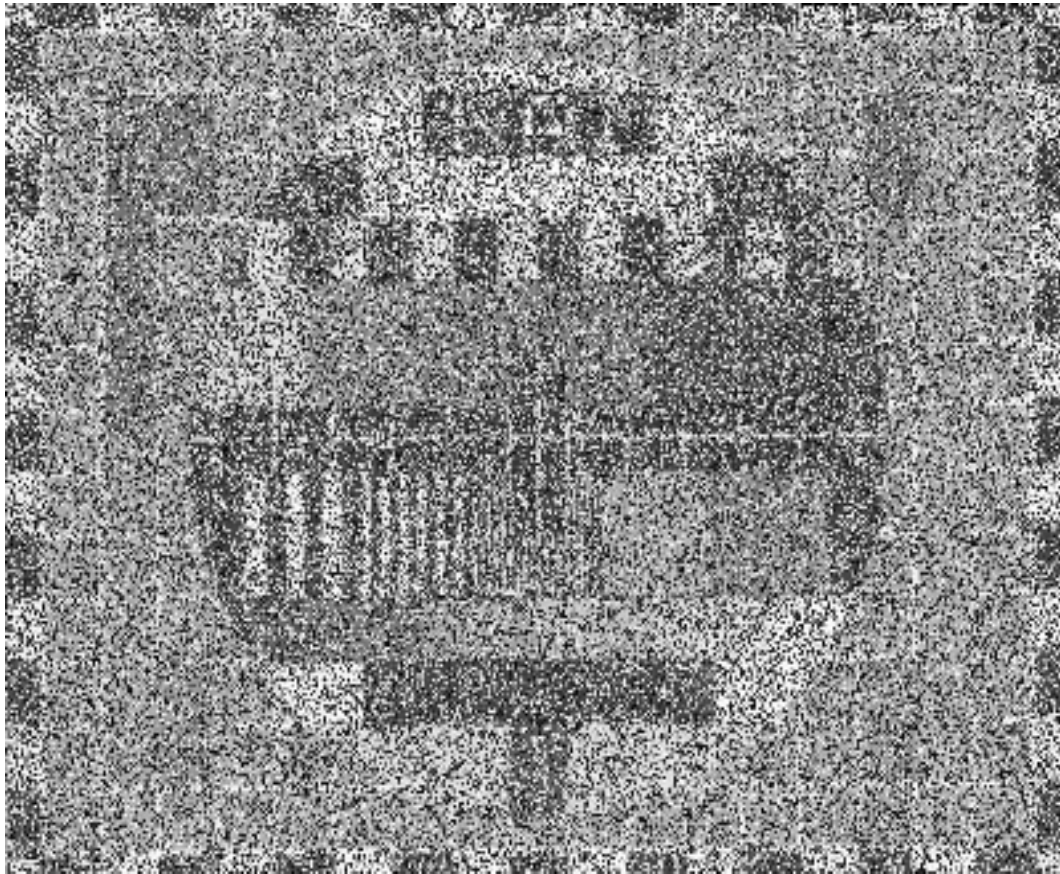
segnale e rumore (1)

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



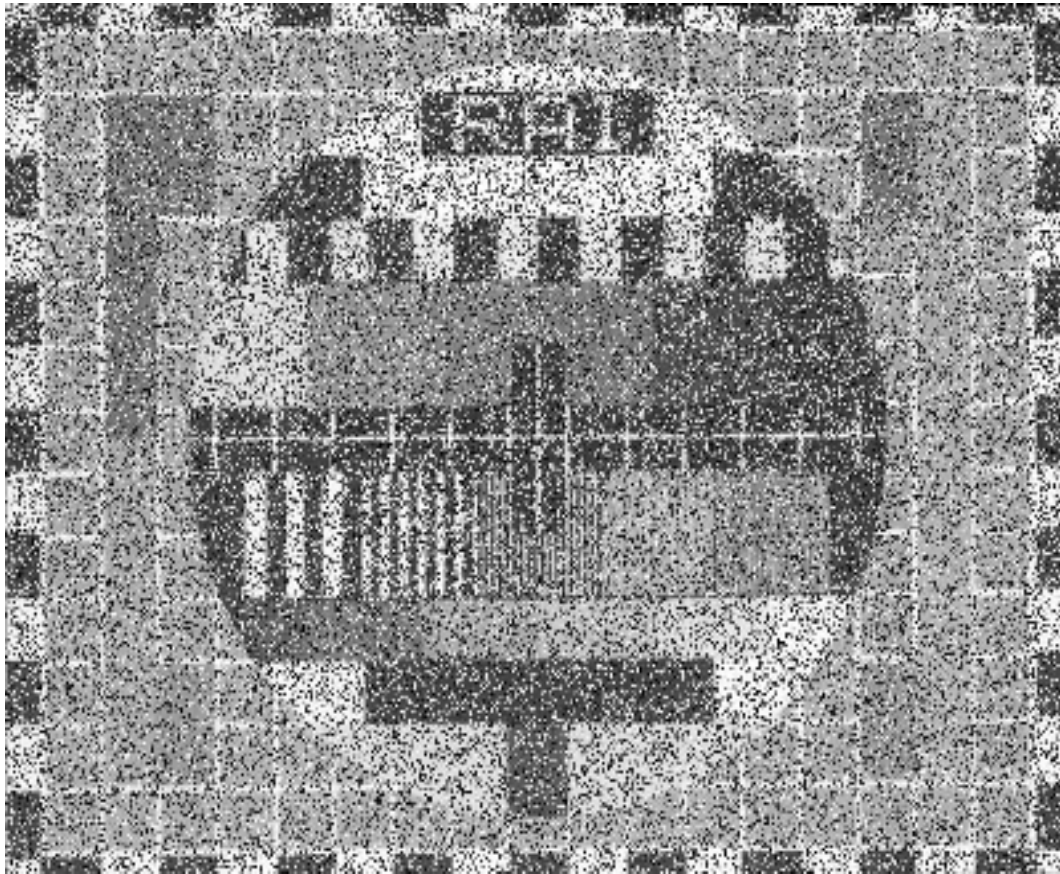
segnale e rumore (2)

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



segnale e rumore (3)

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

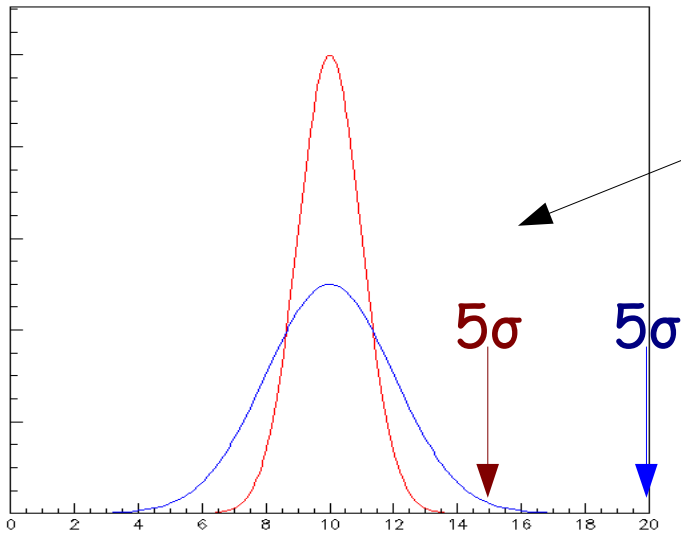


scoperta o non scoperta

Fondo (o rumore):

- tutto ciò che nasconde (o meglio simula) quello che si cerca
- ha un valor medio e una "dispersione"

dispersione rispetto al valor medio: deviazione standard ("sigma"):



Possibili distribuzioni del fondo

valor medio = 10

dispersione:

a) curva rossa = 1

b) curva blu = 2

esclusione

scoperta

Sovrafluttuazioni casuali:

| | | | | | | |
|-------|------------|------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| > | 1 σ | 2 σ | 3 σ | 4 σ | 5 σ | 6 σ |
| prob. | 16% | 2.3% | 0.14% | 3×10^{-5} | 3×10^{-7} | 1×10^{-9} |

prob(6 al superenalotto) $\sim 1.6 \times 10^{-9}$



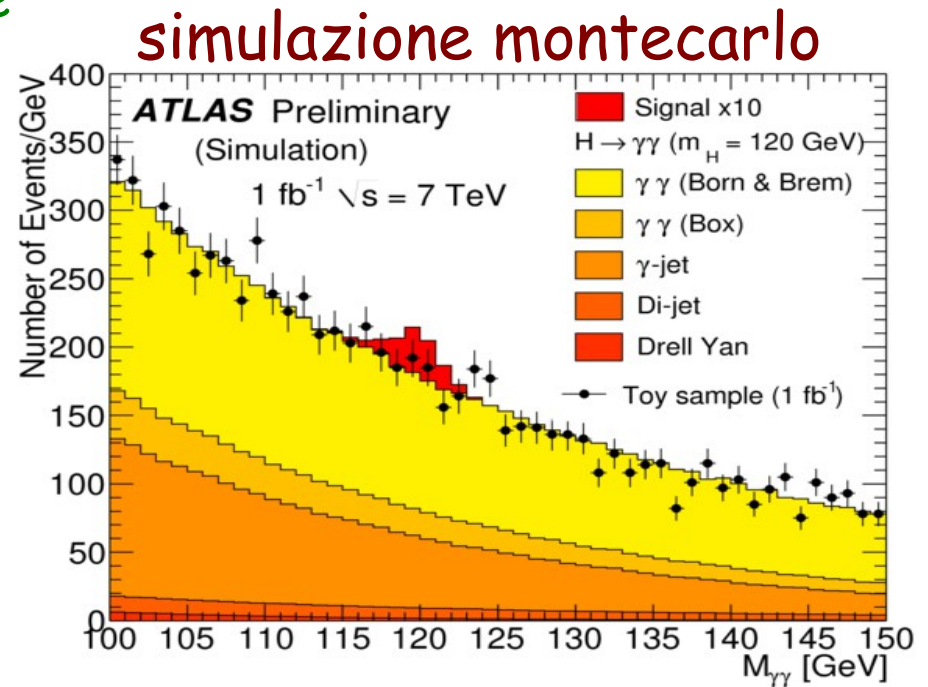
- miglior canale a bassa massa
- rapporto segnale/rumore comunque pessimo:
 - immaginate di cercare di riconoscere una nota musicale nella confusione di una fiera
- precisione di misura fondamentale

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

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

→ Scoperta

necessari anni di presa dati (?)



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

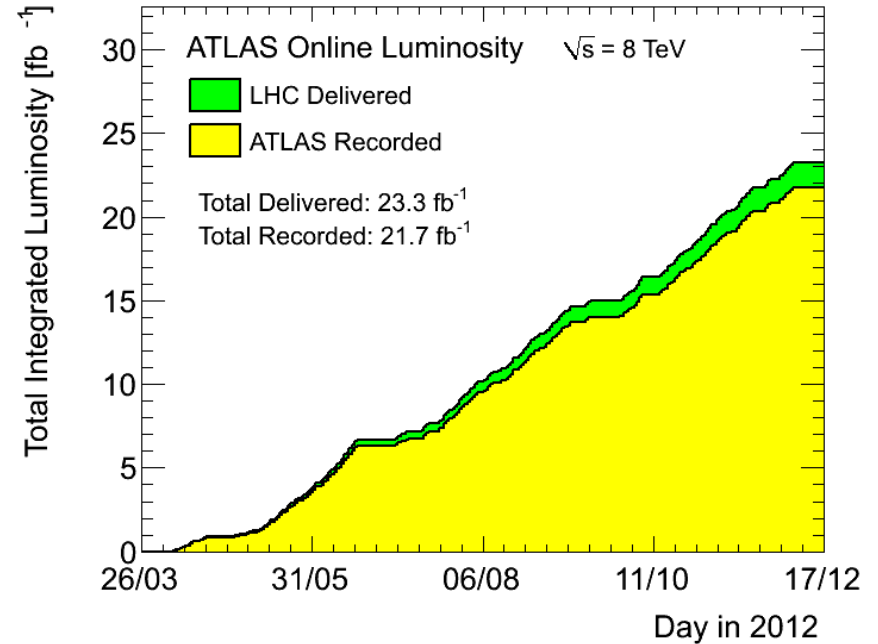
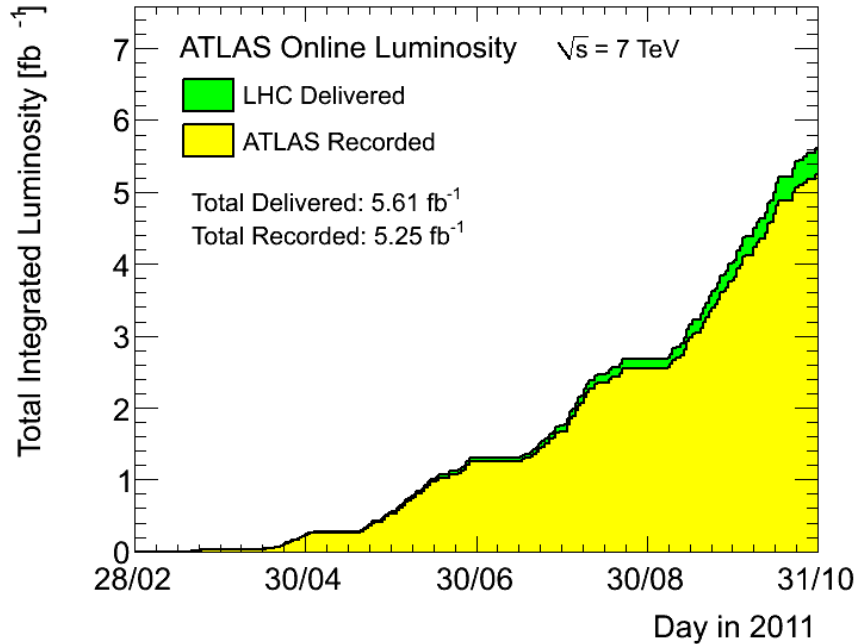
- → del campo da tennis rimangono 2 tavoli da ping pong

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

dati 2011-2012



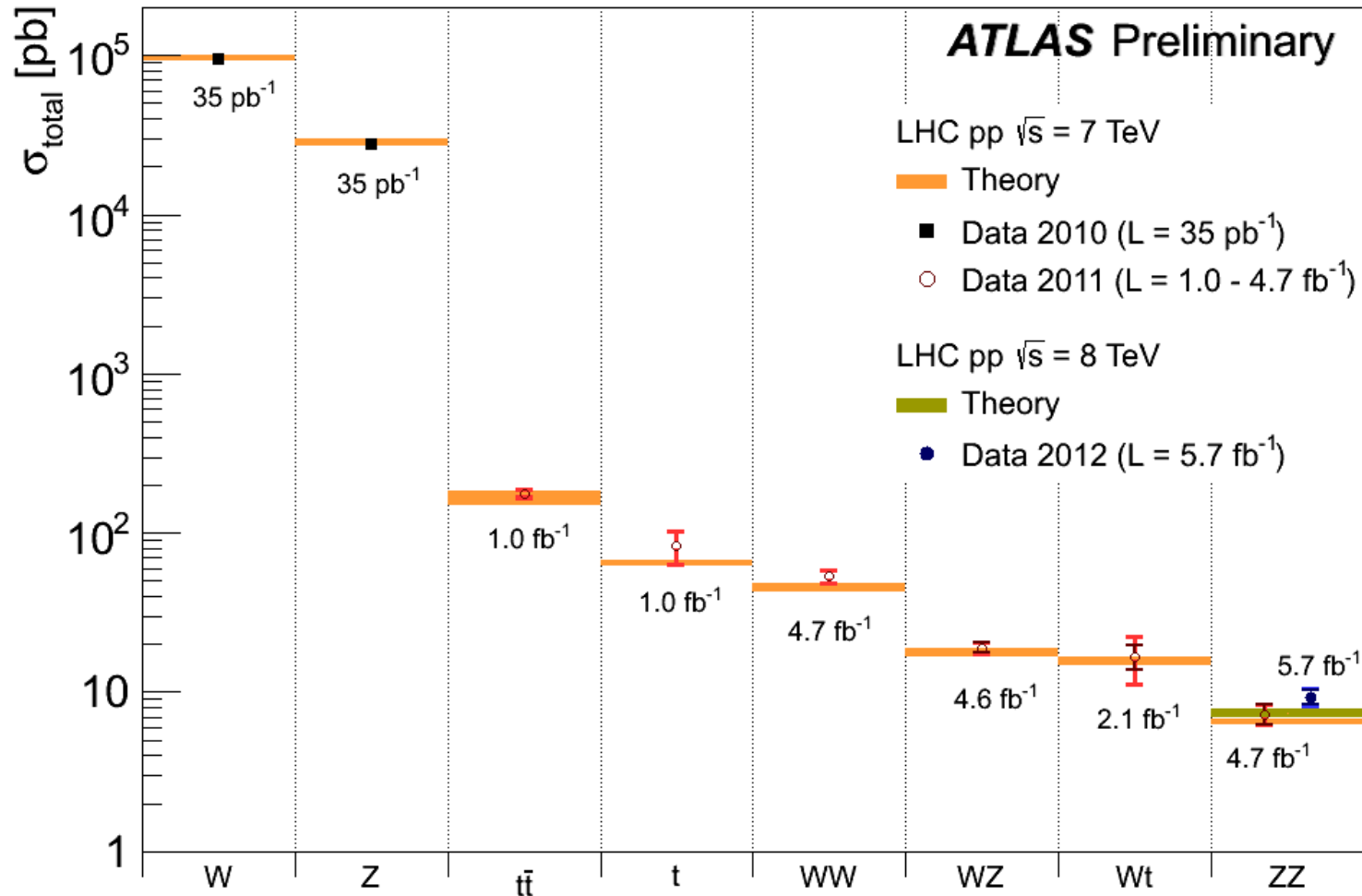
$1.5 \text{ MB/evento} \times 400 \text{ eventi/s} \times 50\% \text{ (compr.)}$

$\rightarrow 1 \text{ TB/ora} \times 1/3 \text{ (live time)}$

$\rightarrow \underline{3 \text{ PB/anno}} \text{ (} \rightarrow 10 \rightarrow 50 \rightarrow >100 \text{)}$

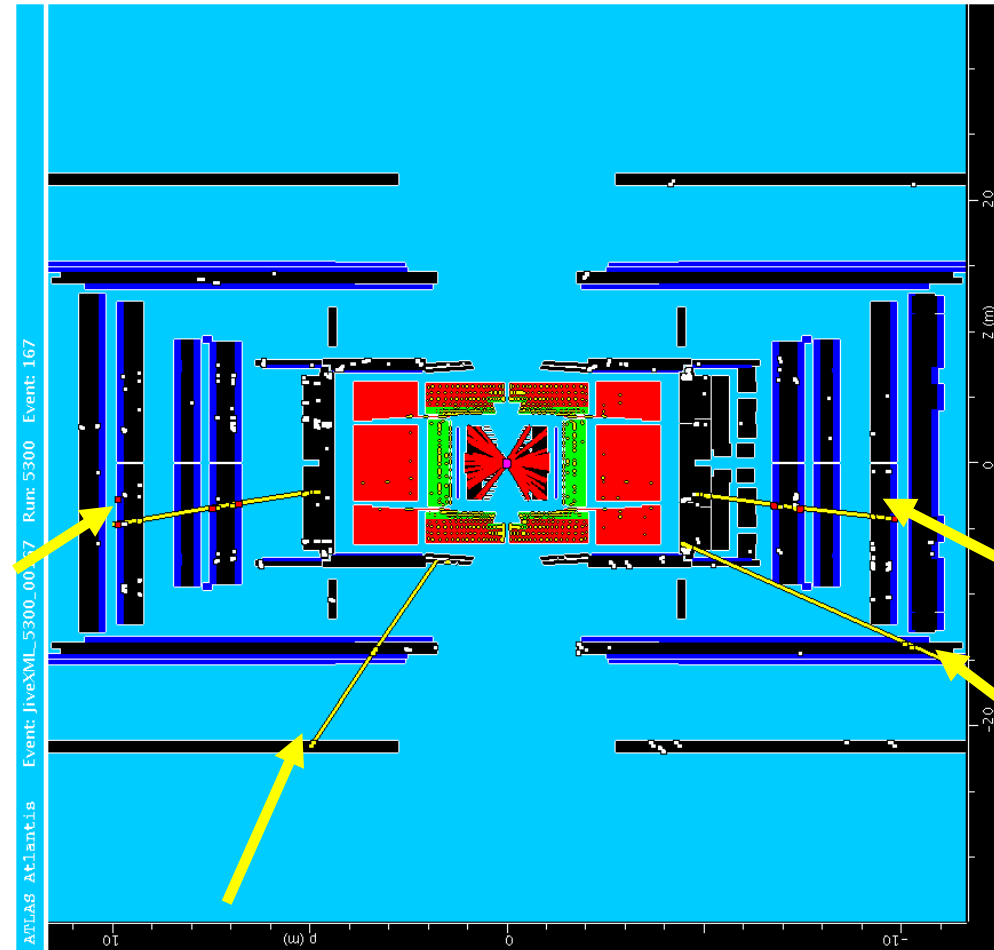
$[4 \text{ miliardi di eventi }]$

verifiche del Modello Standard

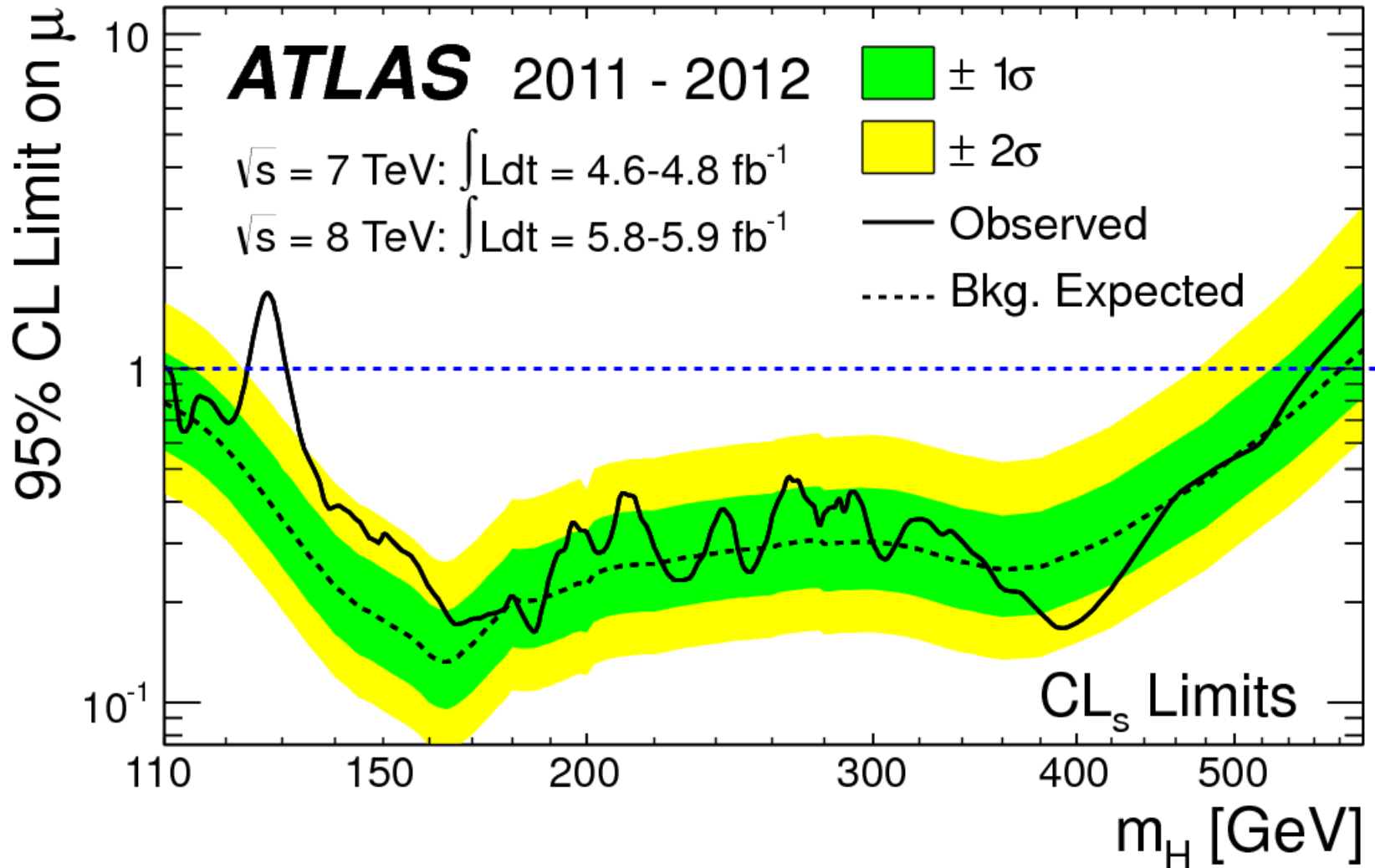


il Bosone di Higgs

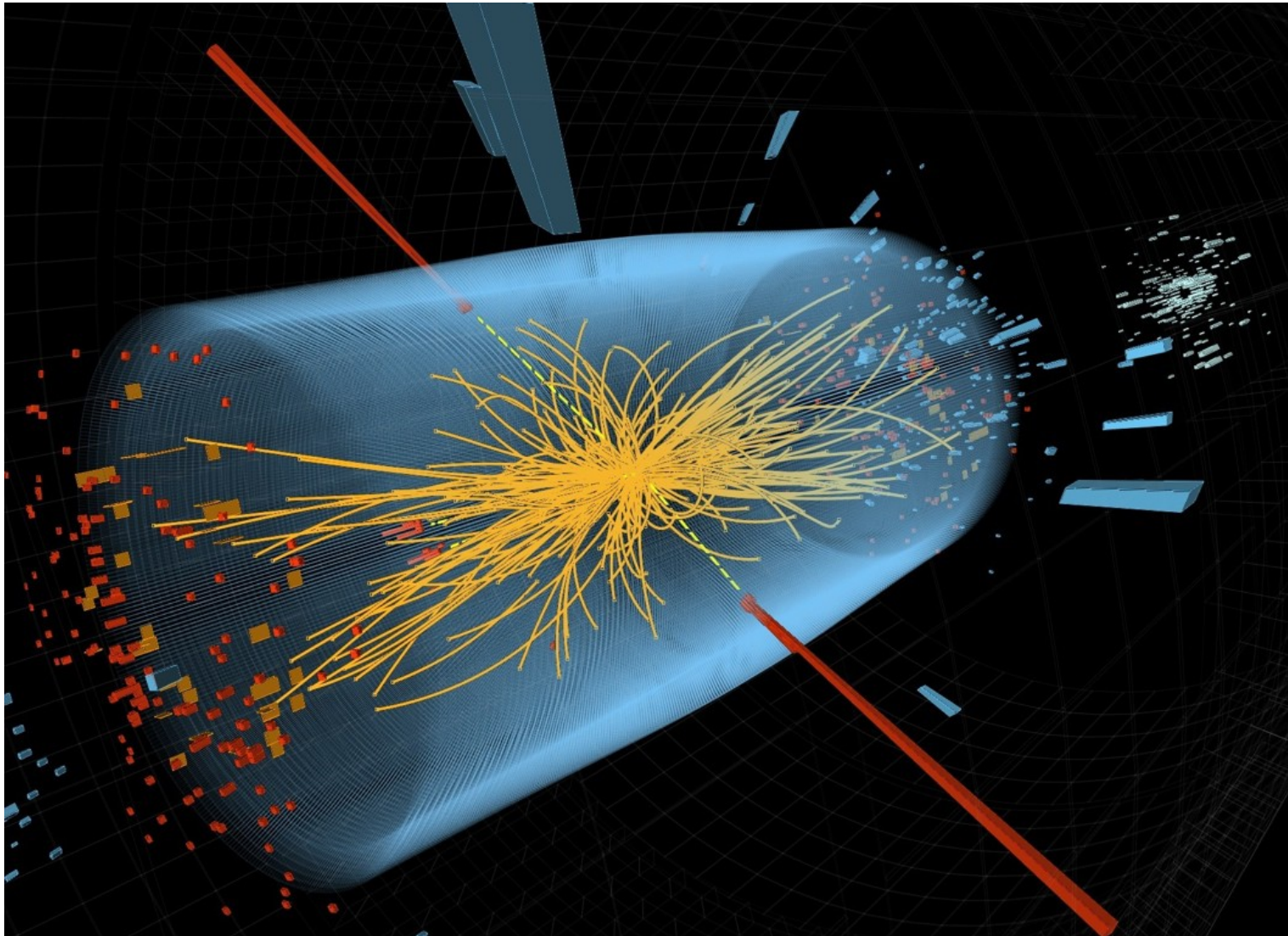
$$H(130 \text{ GeV}) \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \mu$$



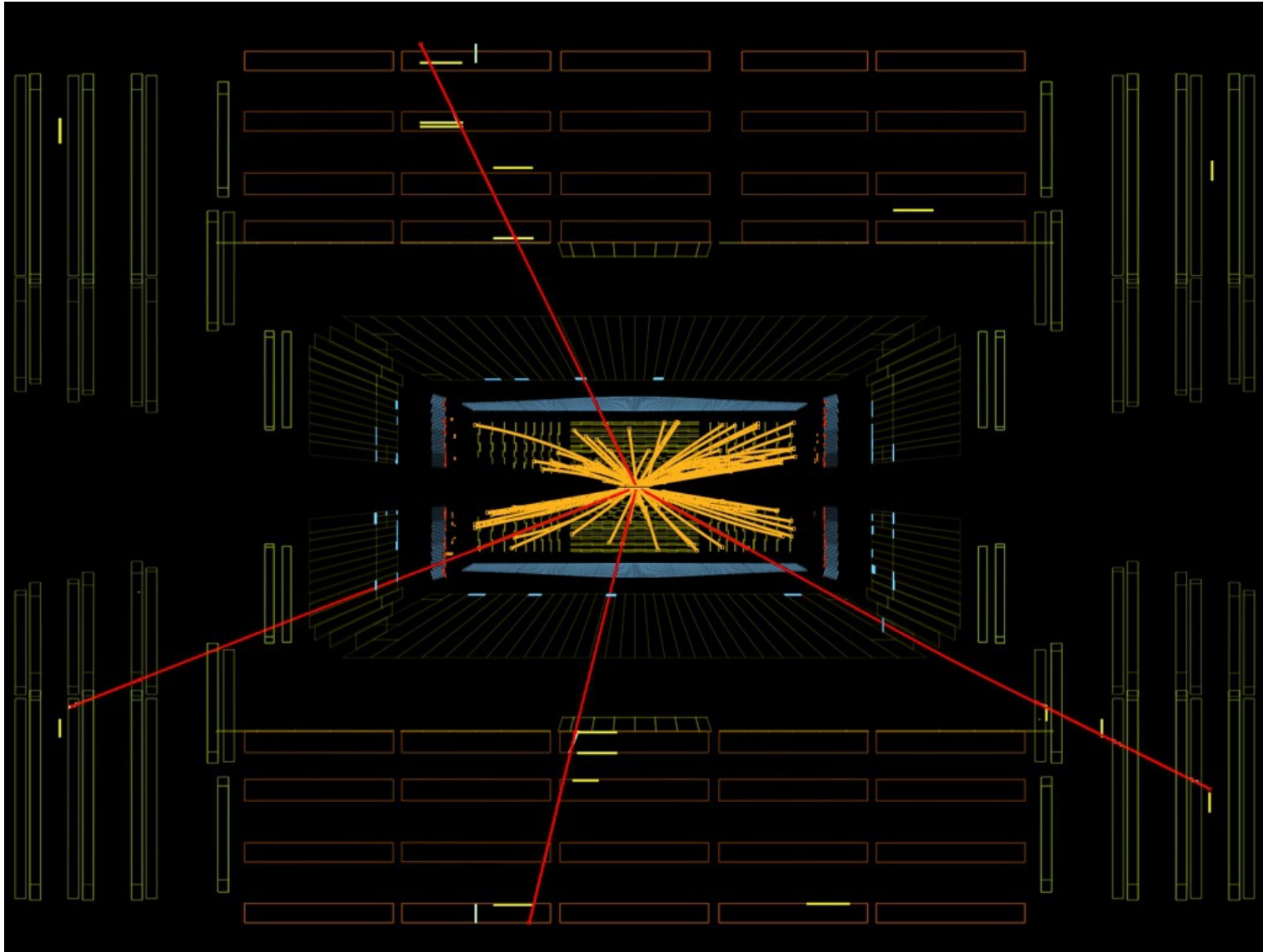
sensibilità sperimentale



evento candidato $H \rightarrow \gamma\gamma$

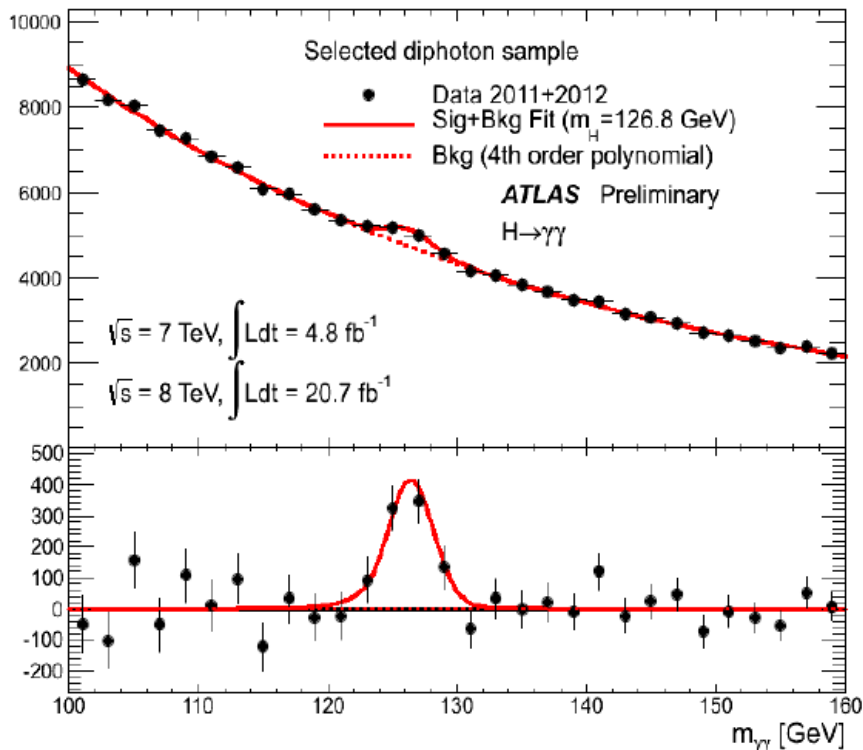


evento candidato $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$



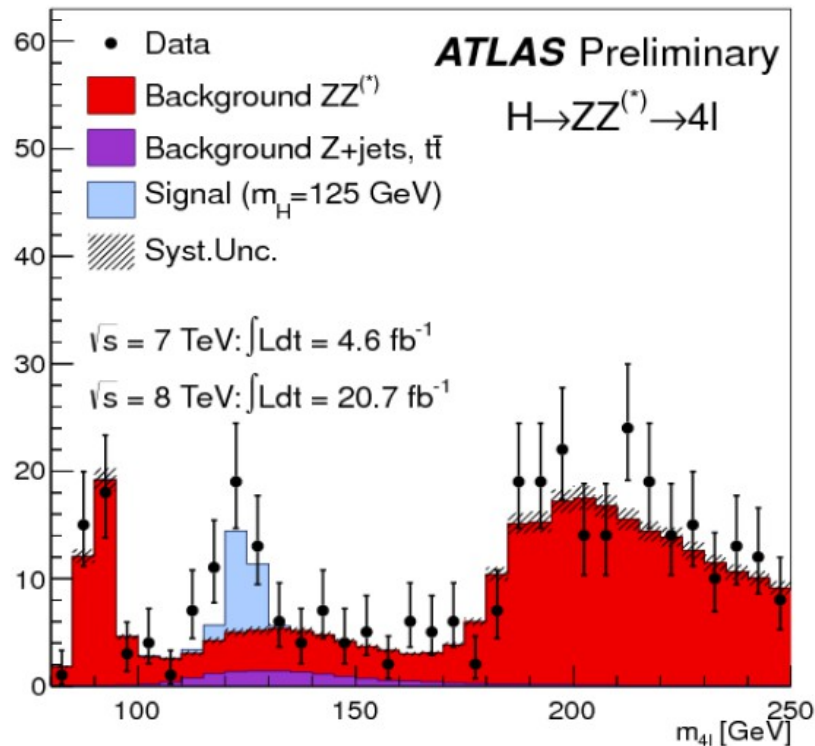
dati 2012

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



“picco”:

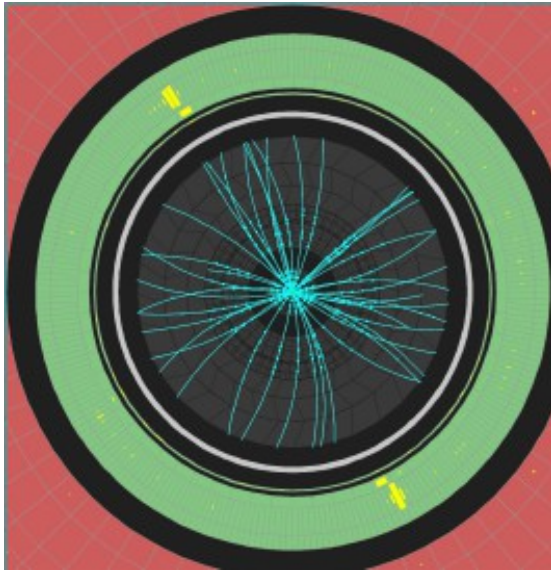
~900 eventi in eccesso
~30000 eventi di fondo



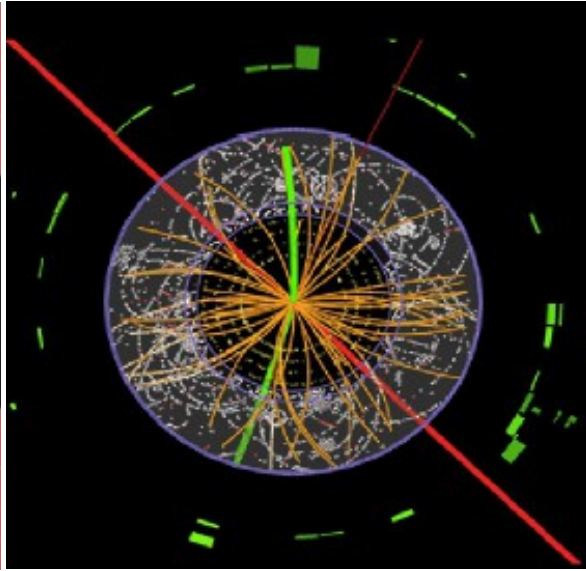
“picco”:

~16 eventi in eccesso
~11 eventi di fondo

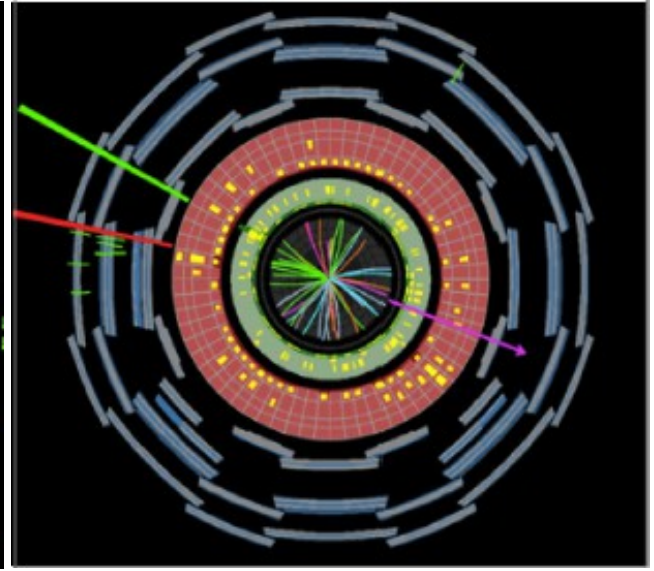
Higgs animati



fotone-fotone



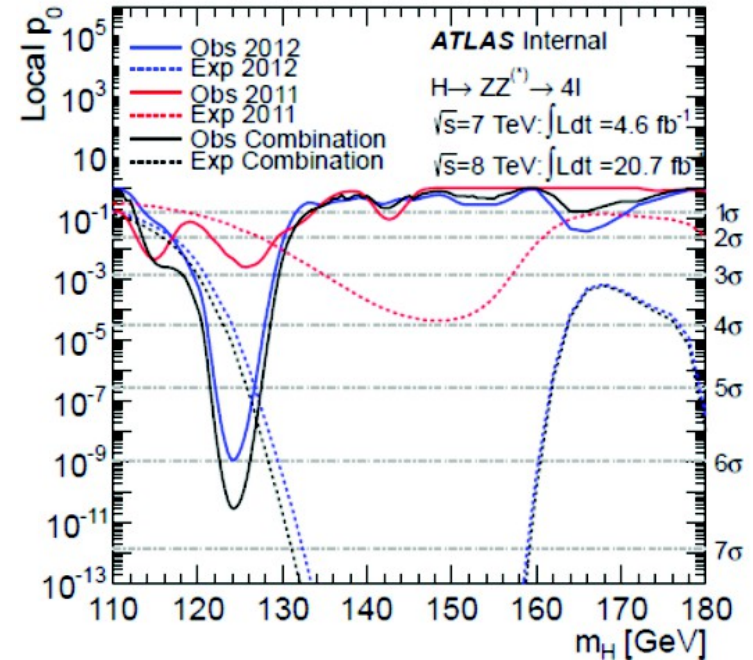
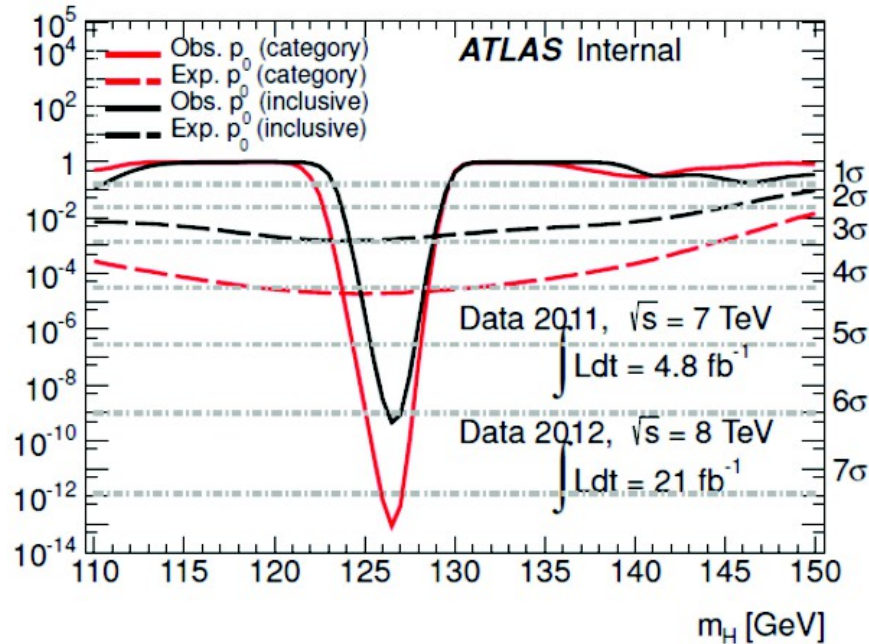
4 leptoni



WW

c'è qualcosa di nuovo ?

Probabilità che il risultato sia casuale:



~15 zeri (o ~77 rossi) consecutivi alla roulette

~40000 volte più facile due 6 consecutivi al superenalotto

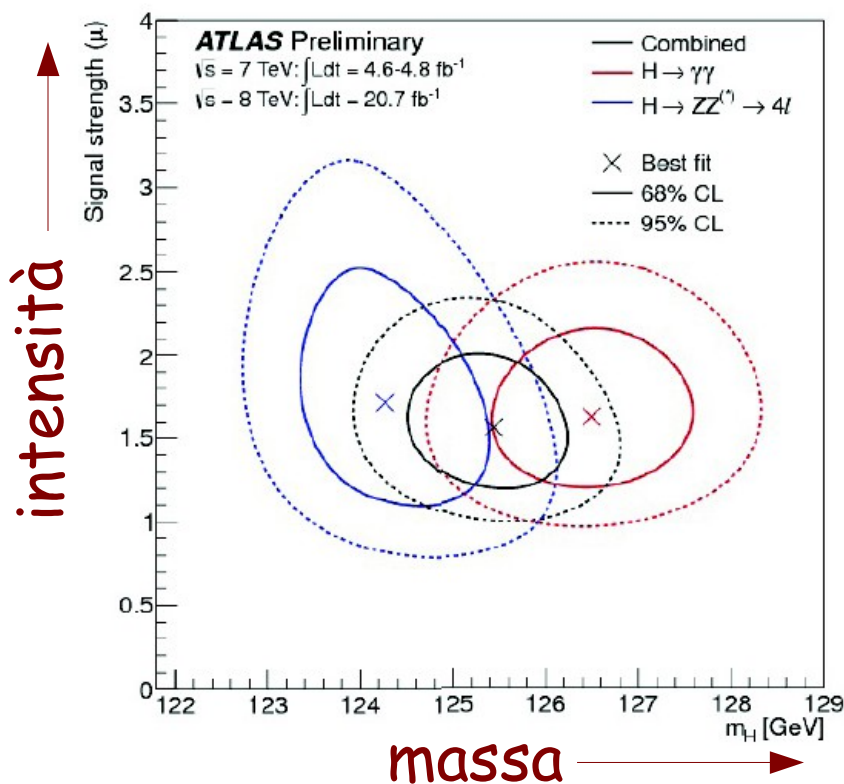
Bosone di Higgs del M.S. ? Statisticamente compatibile !

compatibilità con il Modello Standard

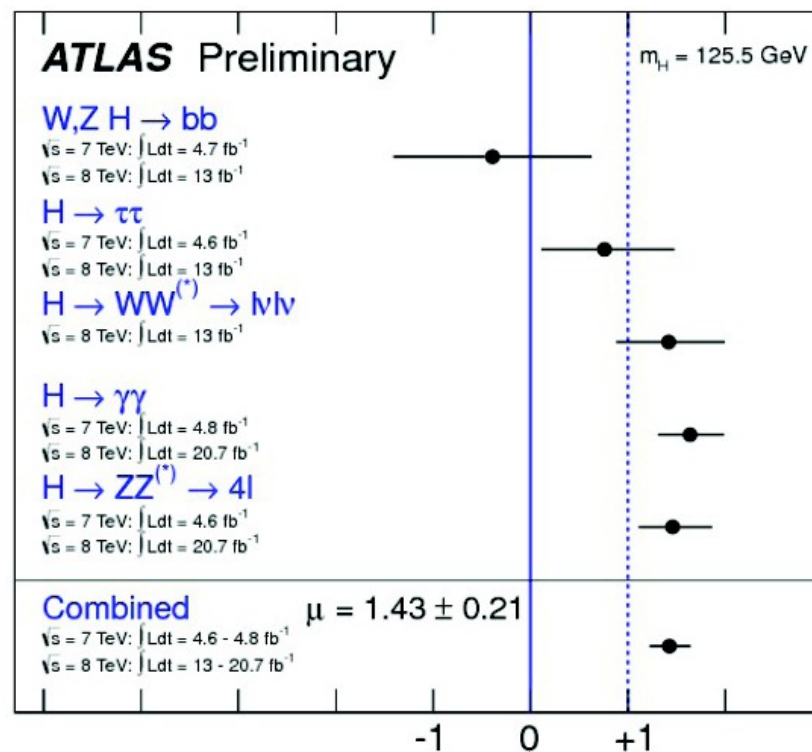
Signal Strength (= intensità del segnale):

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

fit massa e intensità (S.S.)



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



Nessun bosone

Bosone "standard"

stato dell'arte:

ATLAS e CMS indipendentemente (e con forte anticipo rispetto a quanto atteso !) trovano che:

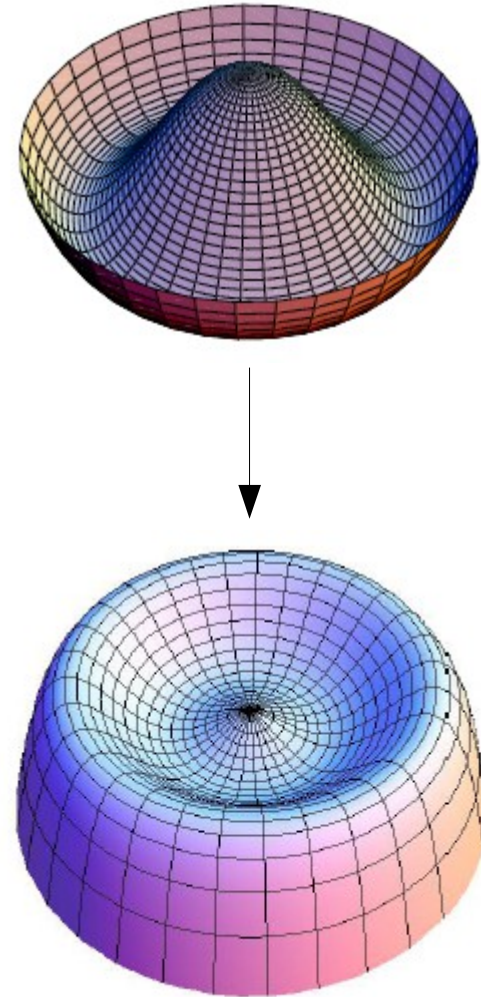
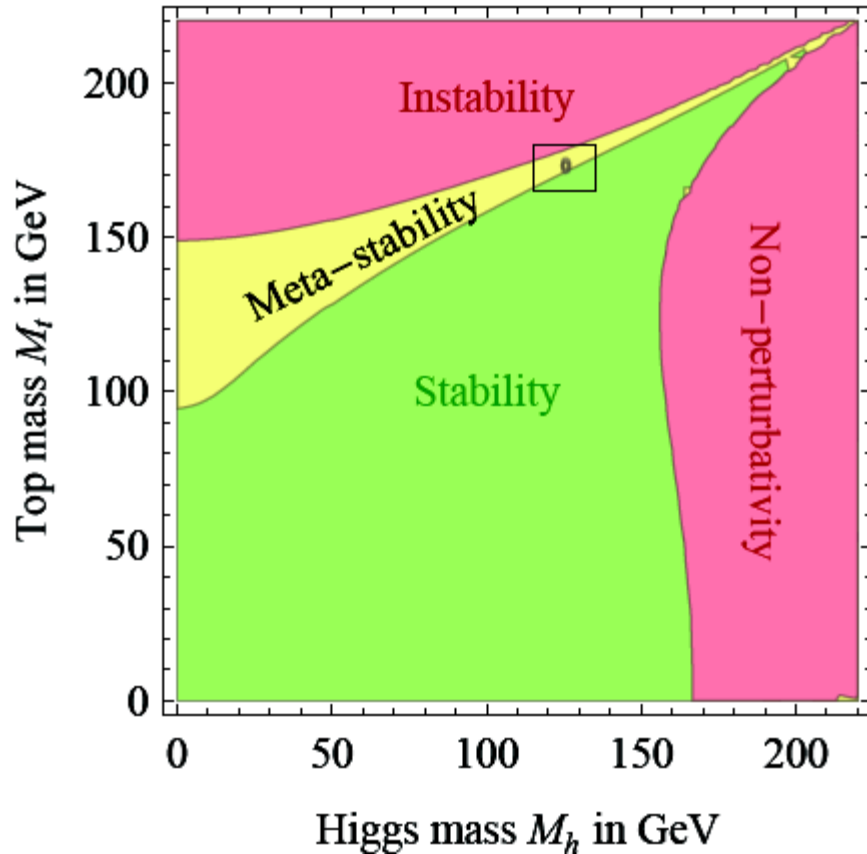
- c'è una nuova particella
- è un bosone (decade in 2 fotoni)
- non è un bosone vettoriale (decade in 2 fotoni)
- è compatibile con il bosone di Higgs del Modello Standard

A quella massa, nei prossimi anni, con i miglioramenti attesi sia dell'acceleratore che dei due esperimenti, sarà possibile studiarlo nei diversi canali di decadimento:

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

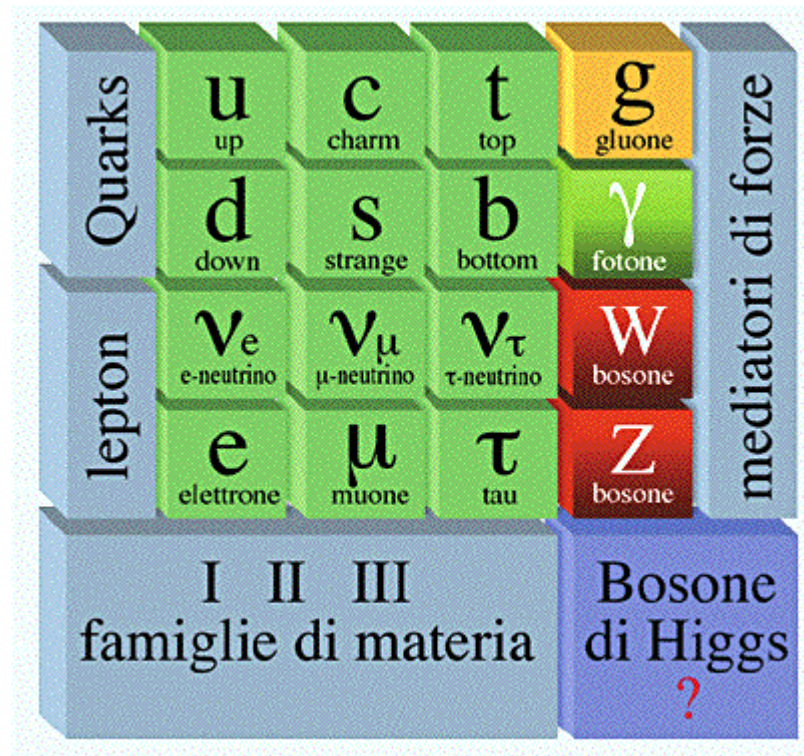
Problema aperto: stabilità del potenziale di Higgs ?
(al crescere dell'energia l'"auto-accoppiamento"
del bosone di higgs diventa negativo)

viviamo pericolosamente ?



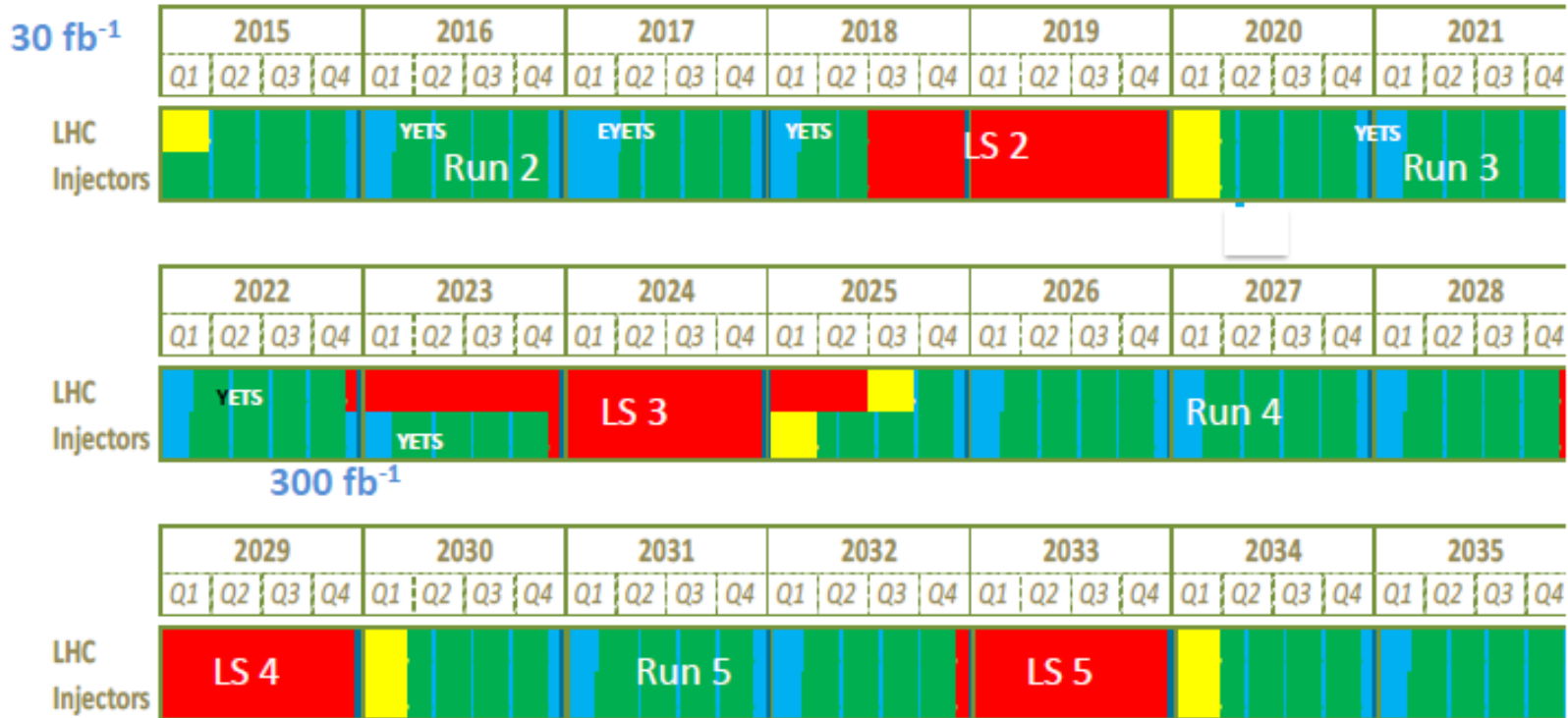
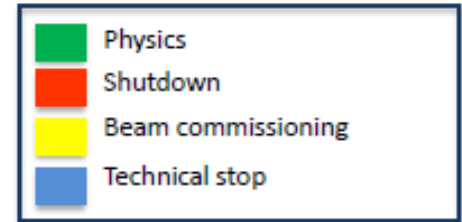
fosse solo quello che non capiamo ...

- a) Cariche elettriche ?
- b) Masse ?
- c) Numero famiglie ?
- d) Antimateria ?
- e) Materia oscura ?
- f) Energia oscura ?
- g) Gravitazione ?



LHC schedule beyond LS1

LS2 starting in 2018 (July) => 18 months + 3 months BC
 LS3 LHC: starting in 2023 => 30 months + 3 months BC
 Injectors: in 2024 => 13 months + 3 months BC



(Extended) Year End Technical Stop: (E)YETS

Goal of 3'000 fb⁻¹ by mid 2030ies



**C'è lavoro da fare ...
... anche per (qualcuno di) voi**

Grazie per l'attenzione