

ALCUNI CONCETTI DI FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

F. Tartarelli (INFN-Milano)

Masterclass 2015

Milano, 25/03/2015

Benvenuti alle International Masterclasses
Hands on particle physics
11th Masterclasses 2015

2^a edizione Milano (INFN+UNIMI)
12/03/2015 e 25/03/2015

Masterclasses

- ◎ 11th edizione: dal 25/02 al 02/05/2015
- ◎ Per un giorno introdurre studenti liceali alla ricerca, dando loro la possibilità' di lavorare come dei fisici sperimentali e fianco a fianco con dei ricercatori:
 - analizzare veri dati sperimentali
 - dati dell'esperimento ATLAS a LHC (CERN) nel nostro caso
- ◎ Progetto che coinvolge 10.000 studenti liceali in 42 nazioni nel mondo e 200 Università' o altre Istituzioni

Organizzazione

- ⊙ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) – Sezione di Milano *
- Ente pubblico di ricerca
- 20 Sezioni, 4 Laboratori Nazionali
- ⊙ Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano

(*) delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

A community of researchers who want to discover the mechanisms of the universe, an explanation for everything. They invent and develop innovative technologies, make the most accurate measurements humanly possible.



STUDENTI DELLE SUPERIORI RICERCATORI PER UN GIORNO

COMUNICATO STAMPA: A poche settimane dalla ripartenza, prevista per l'ultima settimana di marzo, della macchina più grande del mondo, l'acceleratore di particelle LHC del...



LINES OF RESEARCH

1 **PARTICLE** physics

2 **ASTROPARTICLE** physics

3 **NUCLEAR** physics

4 **THEORETICAL** physics

5 **TECHNOLOGICAL** physics

Conferenze

08-04-2015: RM2 - IFAE2015
[Conferenze]

CHNART 2015 -
n.it/index.php?lang=en

Seminari

Eventi

12-03-2015: MI - "Masterclasses 2015" a Milano - 1a data

[Eventi] 03/03/2015 00:00:00

Undicesima edizione dell'evento formativo

asimmetrio.it

LHC Italia



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sezione di Milano

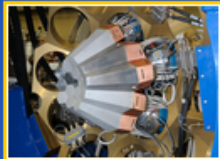
Via Celoria 16 - 20133 MILANO

STUDENTI DELLE SUPERIORI RICERCATORI PER UN GIORNO

Masterclass
Milano 12 e 25 marzo 2015



Cerca nel sito



Mappa del sito

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ([INFN](#)) è un Ente Pubblico di Ricerca fondato nel 1951. È uno dei più prestigiosi ed importanti Istituti di ricerca italiani ed i suoi compiti istituzionali sono la conduzione, il finanziamento ed il coordinamento della ricerca fondamentale nei campi della fisica nucleare, subnucleare ed astroparticellare.

[Laboratori e sezioni](#) dell'INFN si trovano in molte città italiane. Questo è il sito Web della Sezione INFN di [Milano](#).

Nel caso desideriate *veramente* raggiungere la vecchia home-page della Sezione di Milano, è disponibile [qui](#).



Chi siamo

- » [Il sito principale dell'INFN](#)
- » [Unità e Laboratori dell'INFN](#)
- » [Il Direttore](#)
- » [Milano](#)
- » [Laboratorio Acceleratori e Superconduttività applicata \(LASA\)](#)
- » [INFN - Bicocca](#)
- » [LHC Italia](#)
- » [Come contattare l'INFN a Milano \(incluso indirizzo PEC\)](#)
- » [Come raggiungere l'INFN a Milano](#)

Gruppi di ricerca

- I: [Fisica subnucleare sperimentale con acceleratori](#)
- II: [Fisica Astroparticellare e Fisica del Neutrino](#)
- III: [Fisica nucleare sperimentale](#)
- IV: [Fisica teorica](#)
- V [Ricerca tecnologica](#)
- [Progetti speciali INFN](#)

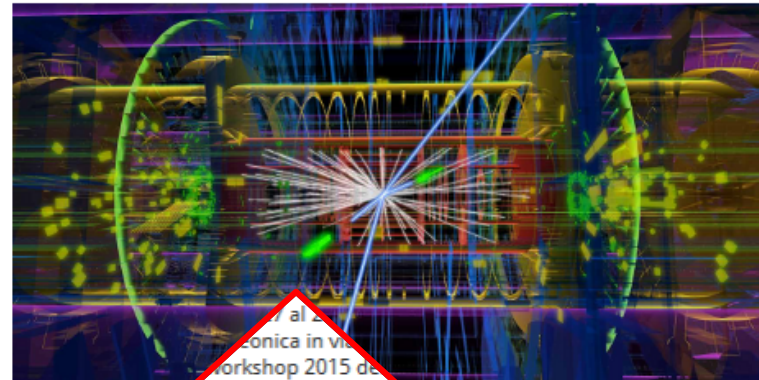


Dipartimento di

Fisica

Il Dipartimento di Fisica è sede di attività di ricerca in vari settori della Fisica fondamentale e applicata quali Astrofisica, Fisica Teorica, Nanotecnologie, Ottica, Fisica delle Particelle, del Nucleo, della Materia Condensata e dei Plasmi, Fisica degli Acceleratori, dei Sistemi Complessi, dell'Ambiente, dei Beni Culturali e Fisica Medica.

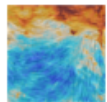
> [CONTINUA](#)



[HOMEPAGE](#) [ORGANIZZAZIONE](#) [PERSONE](#) [RICERCA](#) [DIDATTICA](#) [PUBBLICITÀ](#)



NOTIZIE



[I nuovi risultati di planck e bicep2: dall'inflazione alla polvere](#)

A quasi un anno dall'annuncio della prima misura della traccia di onde gravitazionali primordiali, avvenuta lo scorso marzo da un gruppo di scienziati americani, arriva una sorpresa.

[disco di](#)

[opera a](#)

owave Sky in
e Planck ha
dell'intera
nalizzato i

[Masterclass - hands on particle physics - 12 e 25 marzo 2015](#)

Visto il successo dell'edizione 2014, torna Masterclass per gli studenti degli ultimi anni delle scuole superiori. Un'iniziativa del Dipartimento di Fisica e della Sezione INFN di Milano. LE ISCRIZIONI SI SONO CHIUSE IL 12 FEBBRAIO 2015.

[Borexino nella Top Ten 2014](#)

La rivista internazionale Physics World ha inserito Borexino tra i dieci migliori esperimenti del mondo del 2014.

preparazione alla gestione di emergenze nucleari o radiologiche.

- [Offici](#)
- [Band](#)



Via Celoria,
02.503.17201

> [VAI ALLA MAPPA](#)

Programma della giornata

- ⦿ Ore 9.30:
 - Registrazione - Sala Consiglio
 - Benvenuto del Direttore della Sezione I.N.F.N./Direttore del Dipartimento di Fisica
- ⦿ Ore 10.15:
 - dott. F. Tartarelli “Alcuni concetti di Fisica delle Particelle Elementari”
 - dott. L. Carminati “Acceleratori, rivelatori e altro ancora”
- ⦿ Ore 12.30:
 - Pausa pranzo
- ⦿ Ore 13.45:
 - Analisi dati di Z^0 dell’esperimento ATLAS al CERN
- ⦿ Ore 16.00:
 - Videoconferenza con gli altri gruppi di lavoro partecipanti all'evento: São João del Rei, Cosenza, Wuppertal
- ⦿ Ore 17.30:
 - Fine Lavori

Un giorno da ricercatore?

◎ **Lezioni:**

- Studio, aggiornamento continuo
- Seminari, conferenze, articoli,...

◎ **Analisi dati:**

- Verifica sperimentale: il cuore del metodo scientifico

◎ **Scambio di informazioni:**

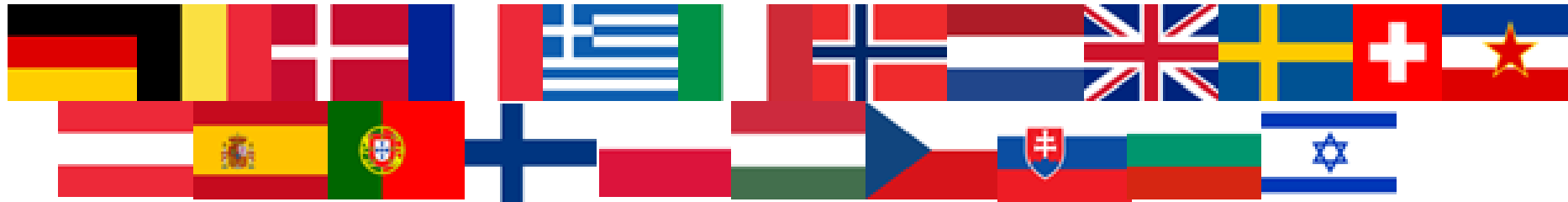
- Discussione dei risultati con colleghi del proprio gruppo di ricerca/esperimento
- Confronto e scambio di informazioni con colleghi di altri esperimenti/gruppi
- Rendere pubblici i risultati delle proprie ricerche con tutti i dettagli così' che tutti possano controllare e/o ripetere gli stessi studi
- La scienza e' «aperta»

CERN, the European Organization for Nuclear Research, is celebrating its 60th birthday on September 29th 2014

The key messages engulfing all the celebrations are

- 60 years of Science for Peace
- Scientific Discoveries and the way ahead
- International Cooperation – Science as a motor for international dialogue
- 60 years of progress in Science and Technology
- Science Education and Training – Modern Science for Everyone

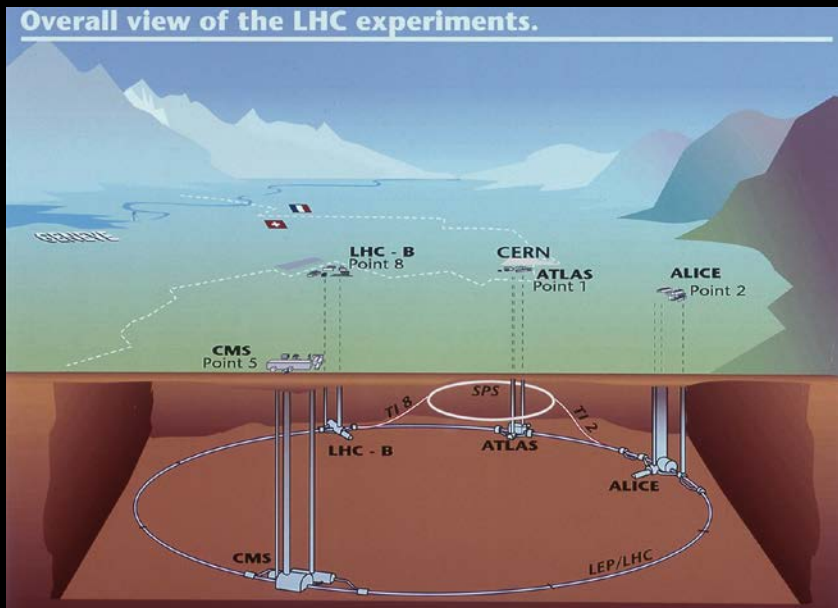
The celebrations happen at the site of the Organization in Meyrin in the Canton of Geneva and in all of the now 21 members states.



Celebrating 60 years of Science for Peace

LHC al CERN

- ⦿ LHC = Large Hadron Collider
- ⦿ Grande collisionatore protoni-protoni
- ⦿ Posto in un tunnel circolare tra la Svizzera e la Francia, vicino Ginevra

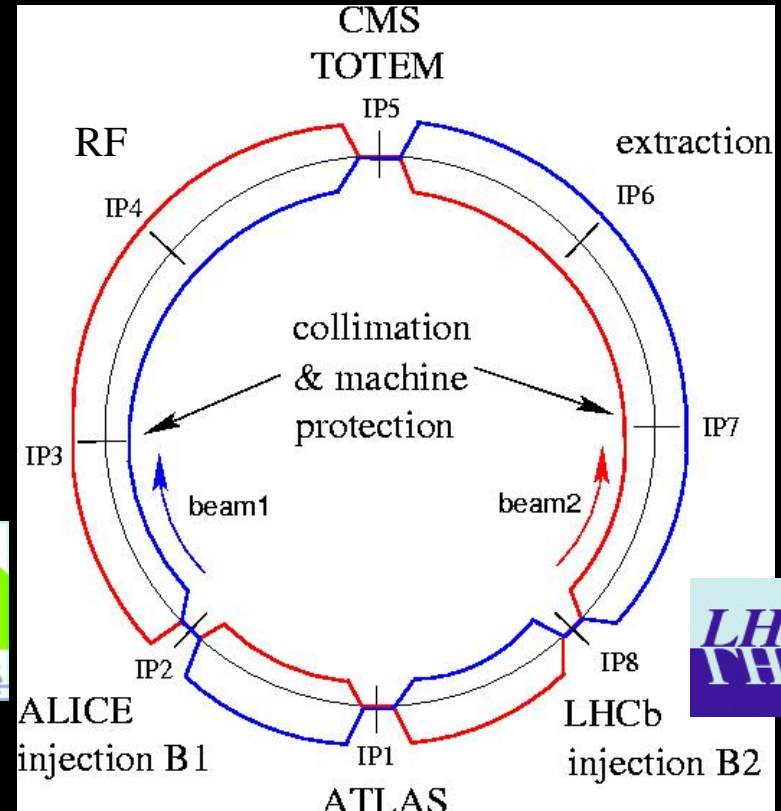


- ⦿ 4 Sale sperimentali sotterranee per altrettanti esperimenti:
 - ⦿ **ALICE, ATLAS, CMS, LHCb**

LHC layout



- Total length: ~26.7 km
 - 8 arcs (aka sectors): ~2.8 km each
 - 8 long straight sections: ~700 m each



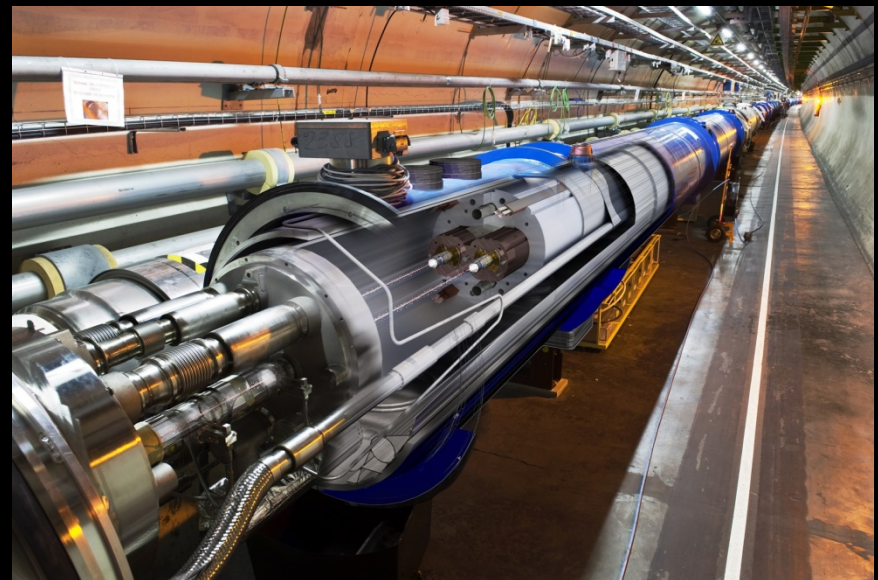
- 2-in-1 magnet design with separate vacuum chambers

- p-p, ion/ion, or p/ion collisions
- beams cross in 4 points



LHC

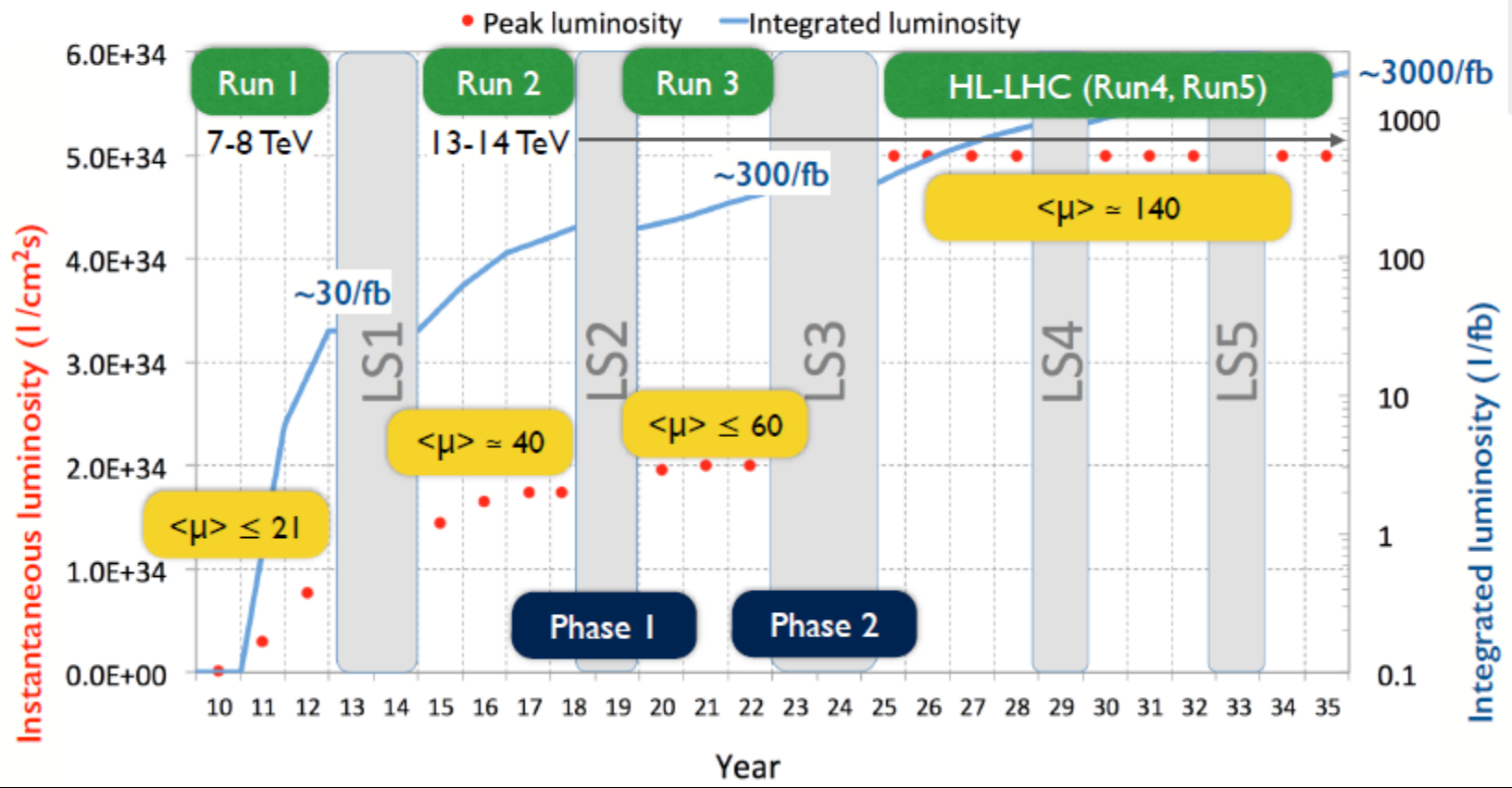
- ⊙ I principali magneti di LHC's operano ad una temperatura di 1.9 K (-271.3°C), piu' freddo dei 2.7 K (-270.5°C) dello spazio
- ⊙ 10⁴ km di tubi sotto vuoto: e' uno dei sistemi di vuoto piu' grossi al mondo
 - La pressione nei tubi e' 10⁻¹⁰ to 10⁻¹¹ mbar, un vuoto piu' rarefatto di quello che si trova sulla superficie della luna.



Summary: 2010 to 2012

$$L = \frac{k N_b^2 f \gamma}{4\pi \beta^* \varepsilon^*} F$$

| Parameter | 2010 | 2011 | 2012 | Nominal |
|---|---------|---------------------|---------|---------|
| Energy [TeV] | 3.5 | 3.5 | 4.0 | 7.0 |
| N_b [10^{11} p/bunch] | 1.2 | 1.45 | 1.6 | 1.15 |
| k (no. bunches) | 368 | 1380 | 1380 | 2808 |
| Bunch spacing [ns] | 150 | 75 / 50 | 50 | 25 |
| Stored energy [MJ] | 25 | 112 | 140 | 362 |
| ε^* [μm] | 2.4 | 2.4 | 2.5 | 3.75 |
| β^* [m] | 3.5 | 1.5 \rightarrow 1 | 0.6 | 0.55 |
| Crossing angle [μrad] | 200 | 240 | 290 | 285 |
| L [10^{34} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$] | 0.02 | 0.35 | 0.76 | 1.0 |
| Beam-beam parameter/IP (ΔQ_{bb}) | -0.0054 | -0.0065 | -0.0069 | -0.0033 |
| Average Pile-up @ beg. of fill | 8 | 17 | 38 | 26 |



Future Circular Collider Study - SCOPE

CDR and cost review for the next ESU (2018)

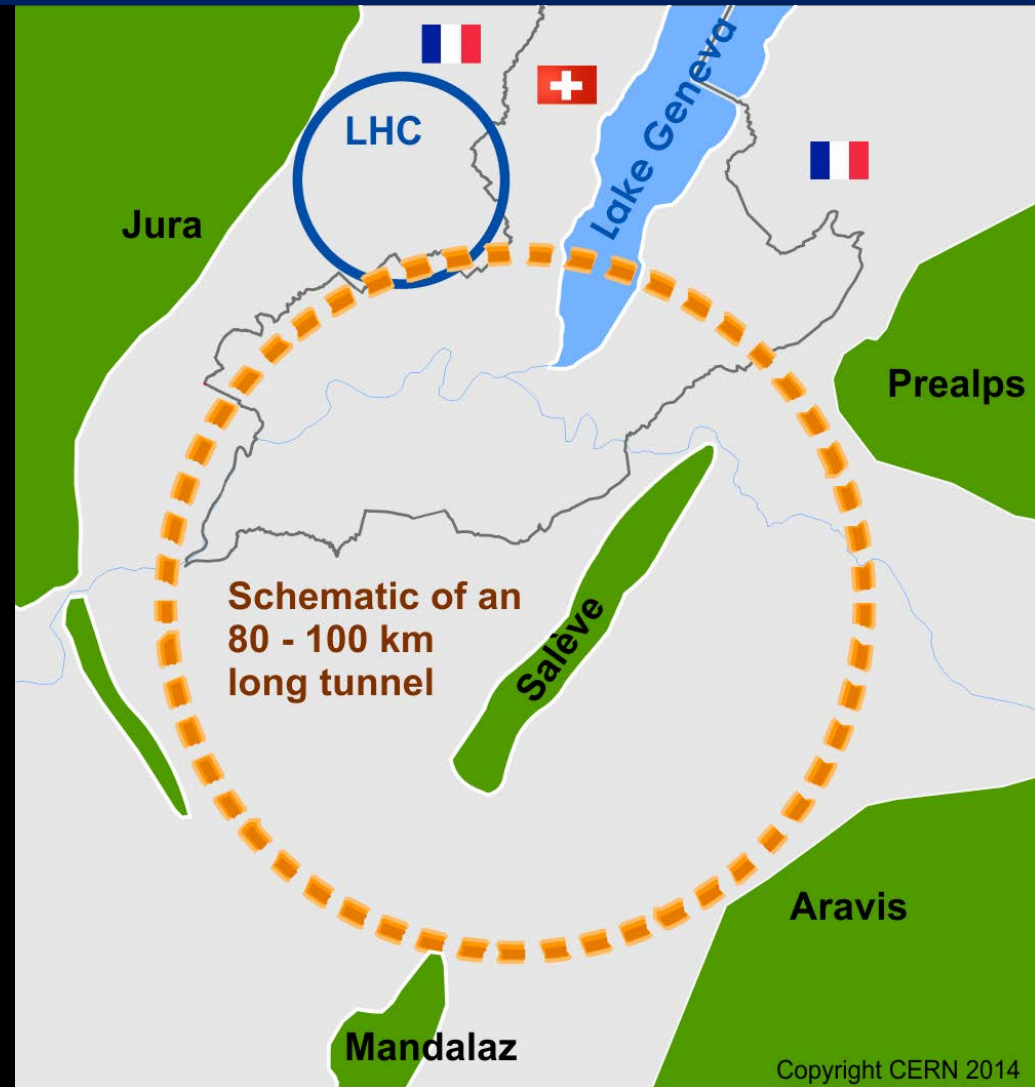
Forming an international collaboration to study:

- pp -collider (*FCC-hh*)
→ defining infrastructure requirements

~16 T \Rightarrow 100 TeV pp in 100 km

~20 T \Rightarrow 100 TeV pp in 80 km

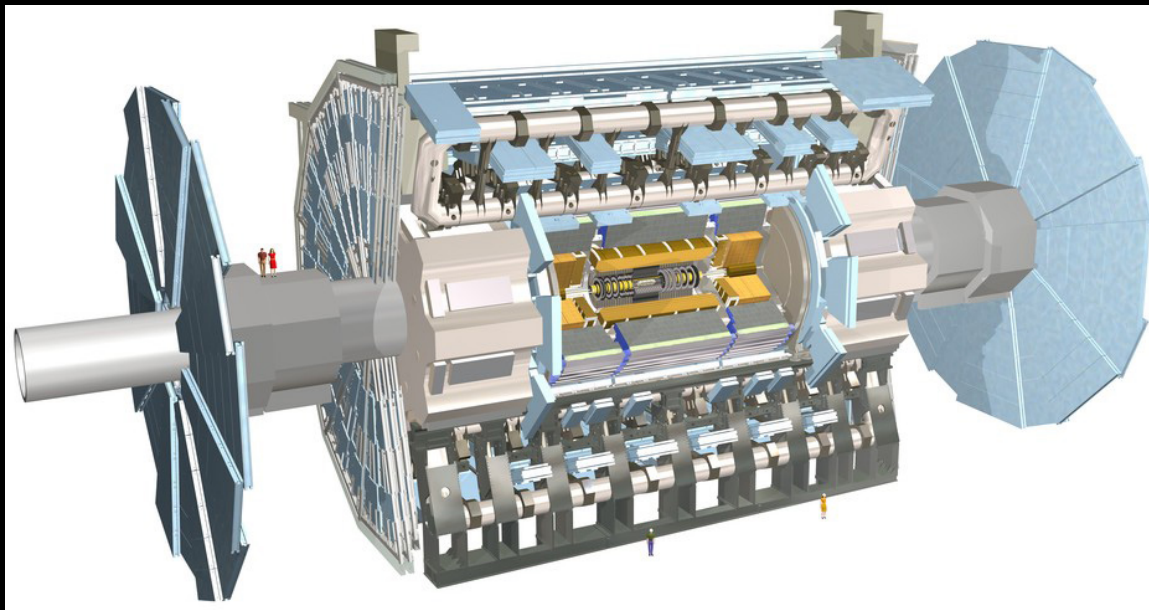
- e^+e^- collider (*FCC-ee*) as potential intermediate step
- $p-e$ (*FCC-he*) option
- 80-100 km infrastructure in Geneva area



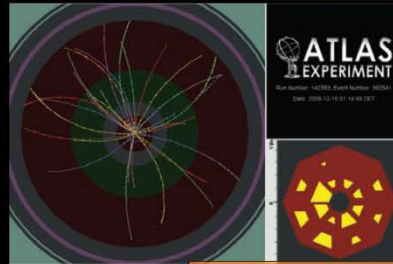
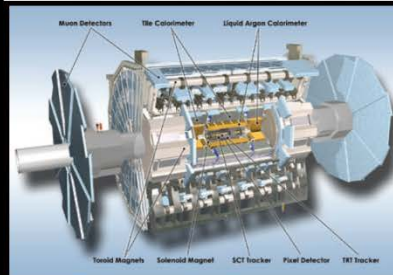
- ⊙ Joule (J) come unità di misura dell'energia ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$):
 - Una massa di 100 g ad 1 m da terra ha una energia potenziale di circa 1 J
- ⊙ In fisica delle particelle al suo posto si usa una unità più comoda chiamata elettronvolt (eV)
- ⊙ energia cinetica acquistata da un singolo elettrone quando attraversa una differenza di potenziale di 1 V.
 - $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- ⊙ Multipli dell' elettronvolt, per cui è comodo introdurre la seguente terminologia:
- ⊙ $1 \text{ MeV} = 1.000.000 \text{ eV} = 10^6 \text{ eV}$ (un milione di eV)
- ⊙ $1 \text{ GeV} = 1.000.000.000 \text{ eV} = 10^9 \text{ eV}$ (un miliardo di eV)
- ⊙ $1 \text{ TeV} = 1.000.000.000.000 \text{ eV} = 10^{12} \text{ eV}$ (un bilione di eV)

ATLAS

- ◉ Rivelatore polivalente, con un vasto raggio di studi:
 - Higgs, Supersimmetria, Fisica oltre il Modello Standard
- ◉ Il piu' grosso dei 4 rivelatori



Pictures, videos and full information at:
<http://atlas.ch>



People

3000 scientists (including about 1000 graduate students)
 38 countries
 174 universities and labs

Detector Size and Weight

Diameter: 25 m
 Length: 46 m
 Overall weight: 7000 tonnes
 3000 km of cables
 Weight of ATLAS is same as a hundred 747 jets (empty)
 ATLAS is half the size of Cathedral of Notre Dame de Paris

Precision Measurement

0.001 centimeters (0.0004 inches)

Data Recorded Per Year

The 3200 terabytes of data that will be seen each year are the equivalent of the content in:

- 7 km (4 miles) of CDROMs stacked on top of each other
- 600 years of listening to songs
- 3 billion books

Construction Cost (material cost)

550 million Swiss Francs

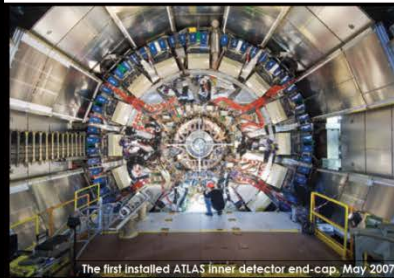
ATLAS Cavern

53 m long
 35 m high (10-storey building)
 30 m wide
 floor 92 m below ground

Timeline

| | | |
|------------|-----|----------------------------------|
| Late 1980s | ... | The Idea |
| Oct 1992 | ... | Letter of Intent |
| Dec 1994 | ... | Technical Proposal |
| 1997 | ... | Construction starting |
| Jun 2003 | ... | Installation in the pit starting |
| Sep 2008 | ... | First LHC beam |
| Nov 2009 | ... | First 0.9 TeV collisions |
| Mar 2010 | ... | First 7 TeV collisions |
| until 2030 | ... | Data taking |

Pictures, videos and full information at:
<http://atlas.ch>



The first installed ATLAS inner detector end-cap, May 2007



Muon wheel and end-cap magnet in Dec. 2007



The last barrel toroid magnet is placed into its final position, Aug. 2005



Simulated Event in ATLAS

The Set of Toroid Magnets

weighs 1300 tonnes and has 1.6 GJ of stored energy.

This is the same as the energy:

- to melt 64 tonnes of lead
 - of 2000 cars cruising at 100 km/h
 - of the whole ATLAS magnet if it were "flying" at 180 km/h
- 80 kilometers of superconducting cable in magnets

Barrel Toroid Magnets

25 m length; 20 m outer diameter

830 tonnes weight

End-cap Toroid Magnets

5 m axial length; 11 m outer diameter

240 tonnes weight each

Collision Events (at full luminosity and at 14 TeV)

When any of the protons collide, the process is called an "event".

Bunches of protons cross 40 million times a second.

Each bunch contains 10^{11} protons.

About one billion proton-proton collisions per second occur in the detector.

The Trigger and the Event Filter then select for permanent storage about 200 "interesting" events per second.

Typical frequency of producing a Higgs boson that has decayed to two Z bosons each of which has decayed to an electron-positron pair is extremely rare: once in $10^{13} = 10,000,000,000,000$ interactions.

Trigger and Data Acquisition (TDAQ)

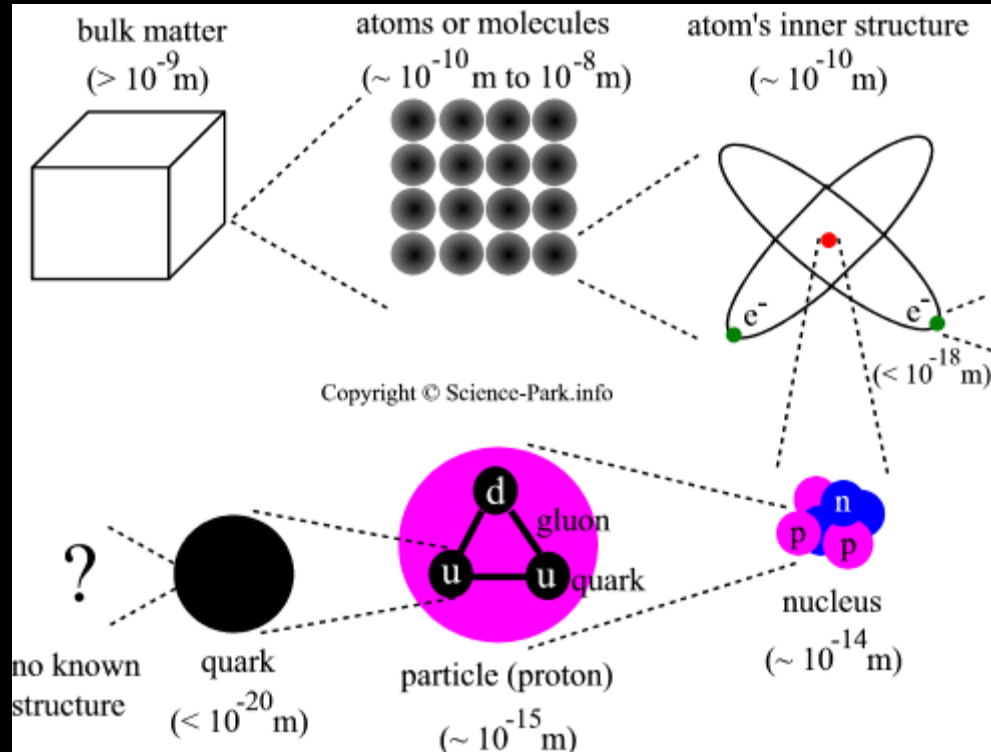
If all data would be recorded, this would fill 100,000 CDs per second. This data rate is also equivalent to making 50 billion telephone calls at the same time.

Computing

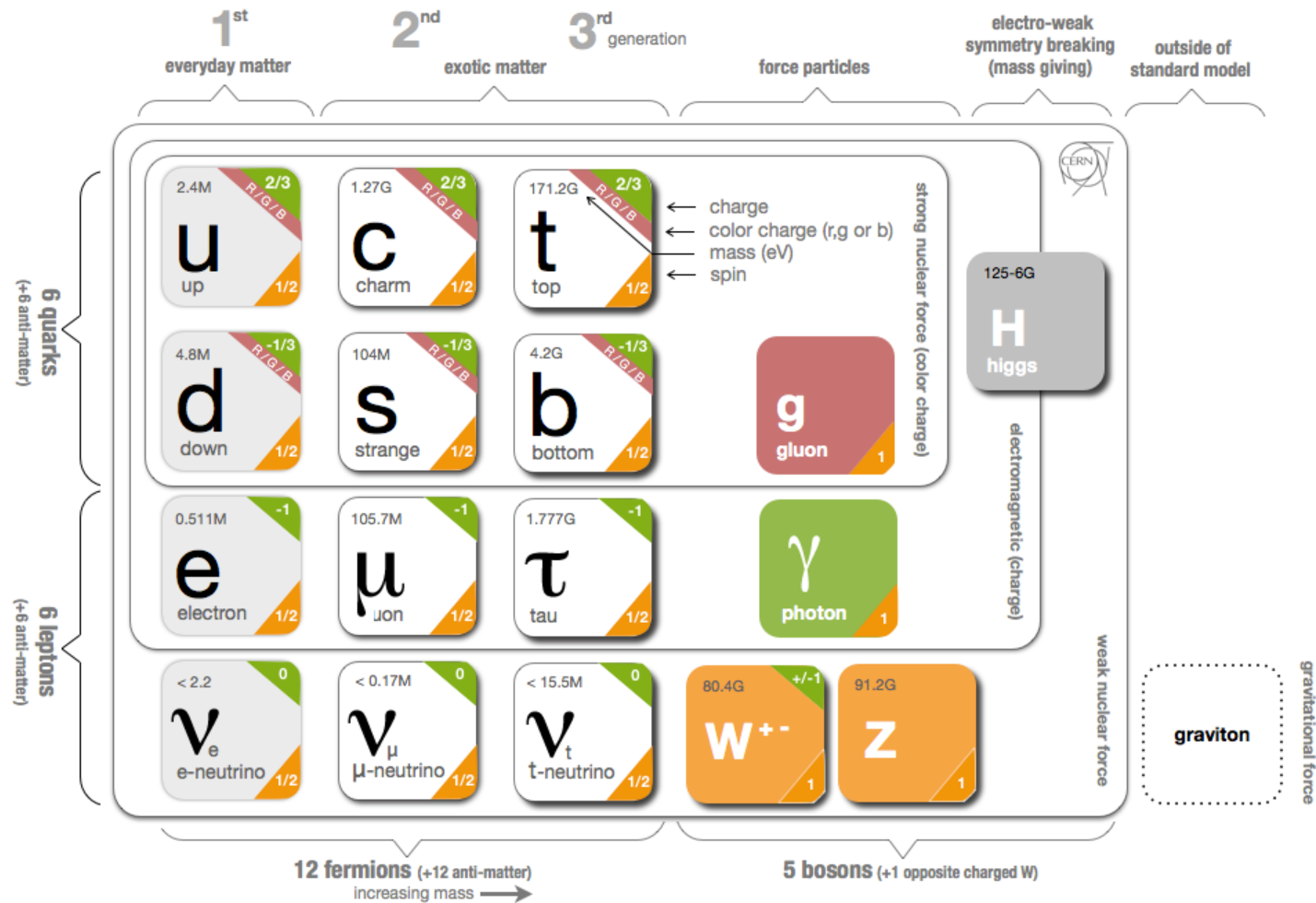
There are more than 5 million lines of code written for event analysis.

The computing effort uses 3000 online PCs and 100,000 PCs for offline processing and analysis.

La Materia

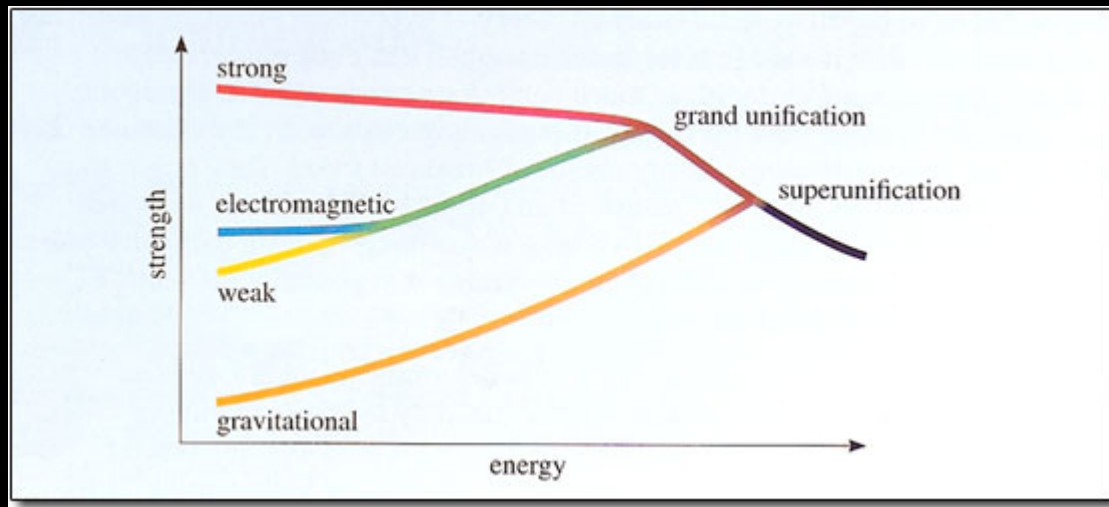


Il Modello Standard

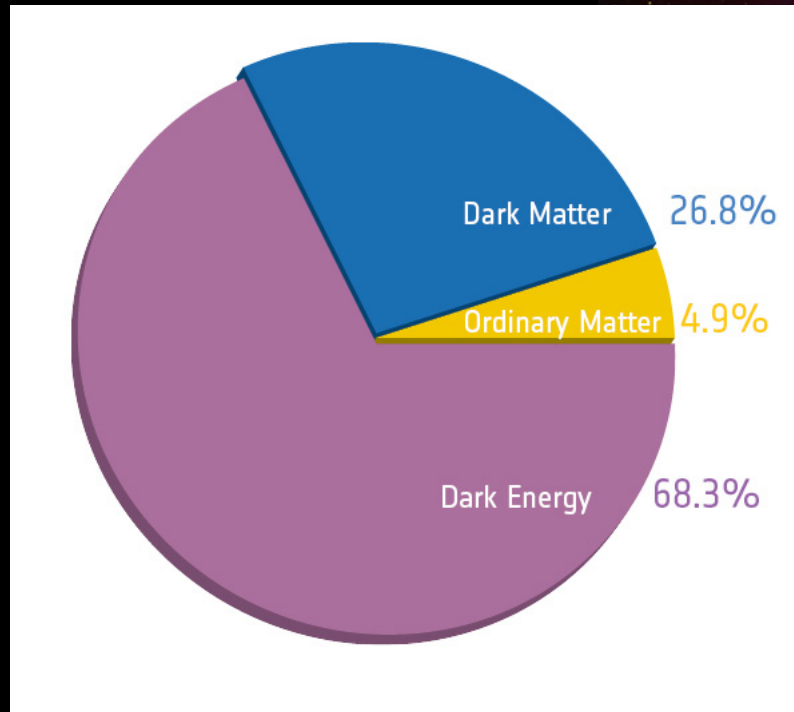


PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

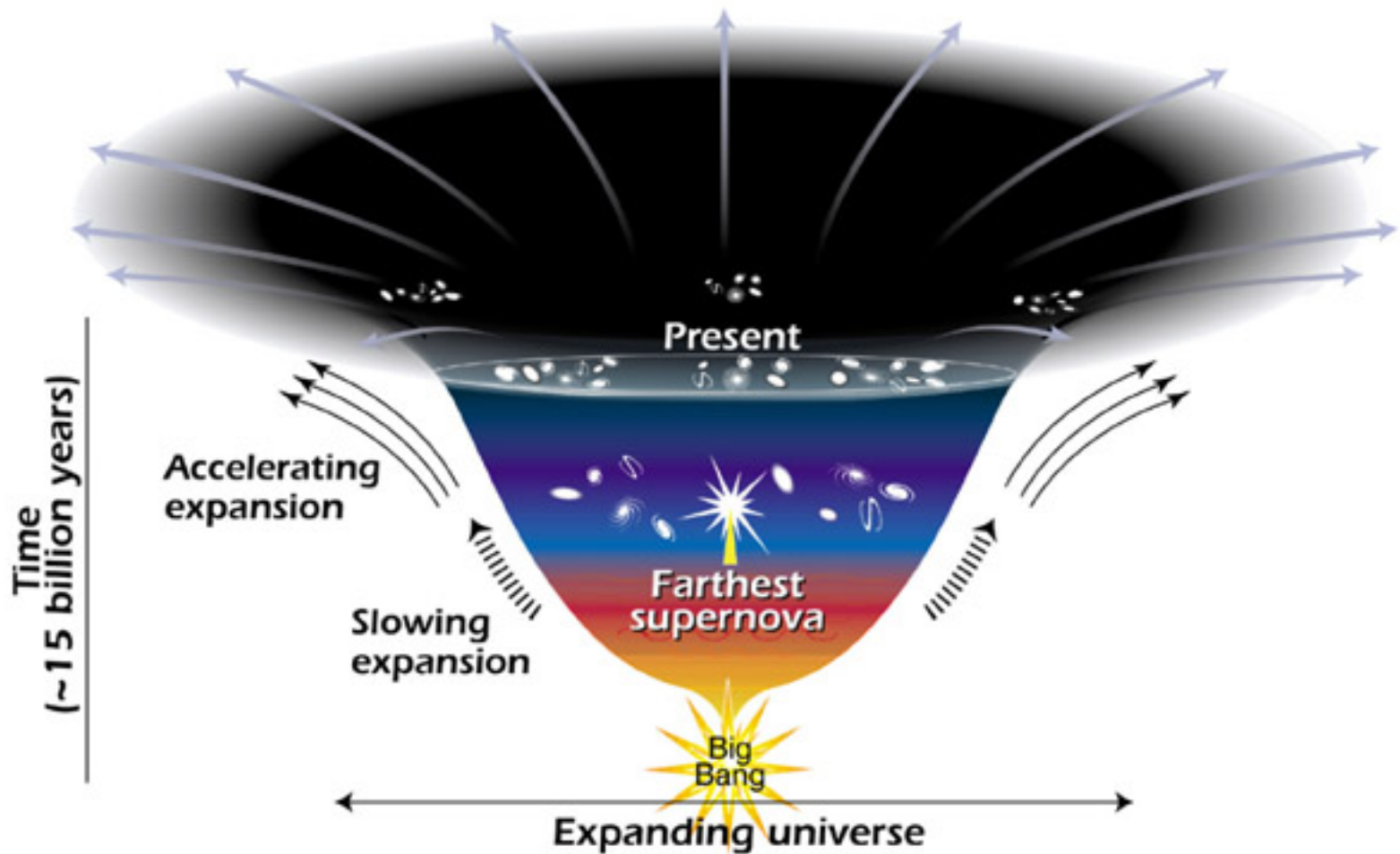
| Property \ Interaction | Gravitational | Weak | Electromagnetic | Strong | |
|---|--------------------------------|-------------------|----------------------|----------------|--------------------------------------|
| | | (Electroweak) | | Fundamental | Residual |
| Acts on: | Mass – Energy | Flavor | Electric Charge | Color Charge | See Residual Strong Interaction Note |
| Particles experiencing: | All | Quarks, Leptons | Electrically charged | Quarks, Gluons | Hadrons |
| Particles mediating: | Graviton (not yet observed) | W^+ W^- Z^0 | γ | Gluons | Mesons |
| Strength relative to electromag for two u quarks at: | 10^{-41} | 0.8 | 1 | 25 | Not applicable to quarks |
| | 10^{-41} | 10^{-4} | 1 | 60 | |
| | for two protons in nucleus | 10^{-36} | 10^{-7} | 1 | Not applicable to hadrons |



Materia ed Energia oscura



Nelle galassie c'è più materia (blu) di quella che vediamo (rossa):
Materia stimata dalla dinamica delle galassie o dal gravitational lensing



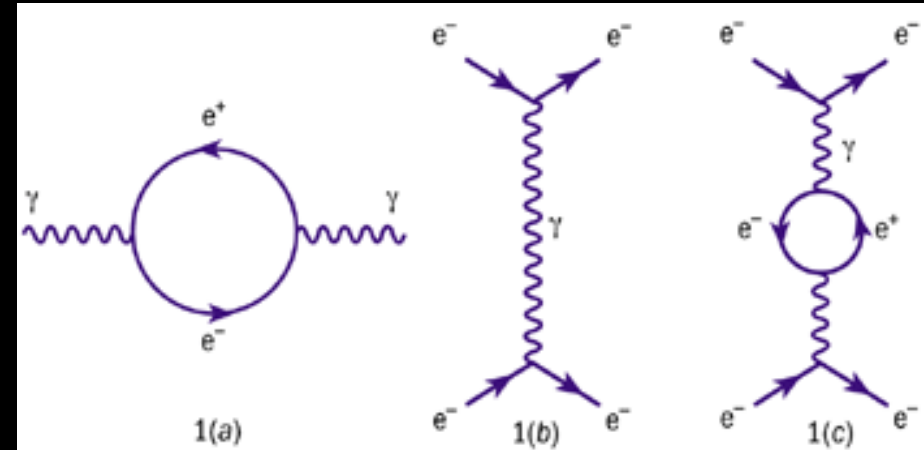
This diagram reveals changes in the rate of expansion since the universe's birth 15 billion years ago. The more shallow the curve, the faster the rate of expansion. The curve changes noticeably about 7.5 billion years ago, when objects in the universe began flying apart at a faster rate. Astronomers theorize that the faster expansion rate is due to a mysterious, dark force that is pushing galaxies apart.

Forze e particelle

- ⊙ Le interazioni tra particelle avvengono per scambio di altre particelle di spin 1 o 2 (bosoni) che sono dette mediatori della forza
- ⊙ Forza elettromagnetica:
 - Fotone
- ⊙ Forza debole:
 - W^+ , W^- , Z^0
- ⊙ Forza forte:
 - Gluoni (8 tipi)

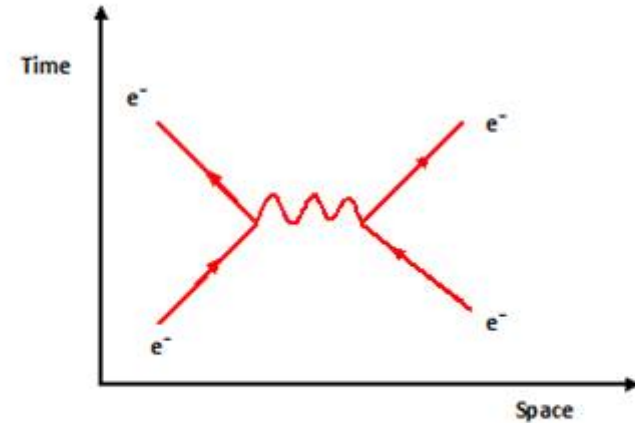
Particelle virtuali

- Effetto quantistico
- Teorie di campo quantistiche:
 - Particelle come propagatori delle forze
- Non rispettano la relazione:
 - $M^2 = E^2 - p^2$
- Possibile grazie al principio di indeterminazione:
 - $\Delta E \times \Delta t > \hbar/2$



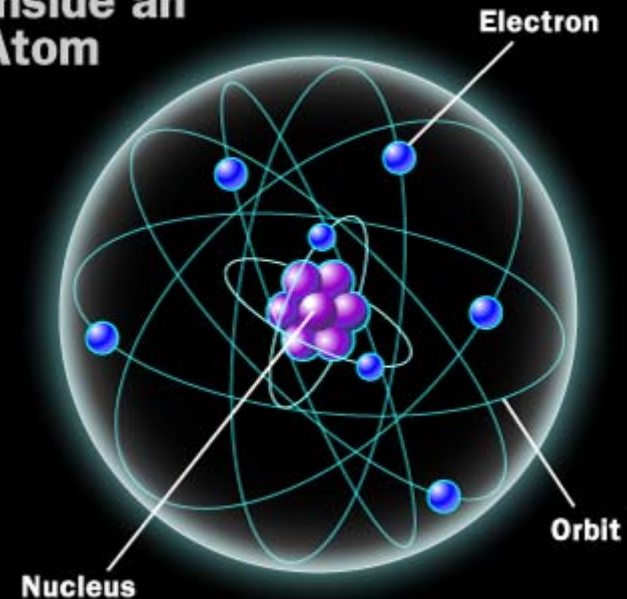
Forza e.m.

- ⦿ Due elettroni (stessa carica) che si respingono si scambiano fotoni
- ⦿ Anche in un atomo il nucleo (positivo) e gli elettroni si scambiano fotoni



Feynman diagram showing two electrons repelling each other by the exchange of photons.

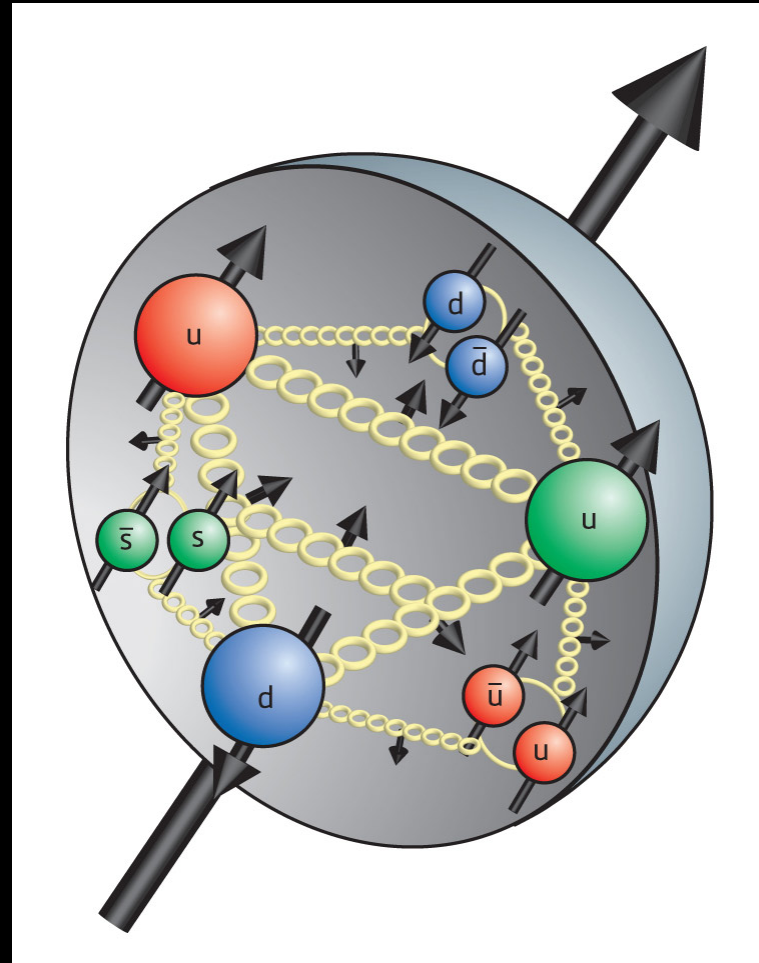
Inside an Atom



©2003 HowStuffWorks

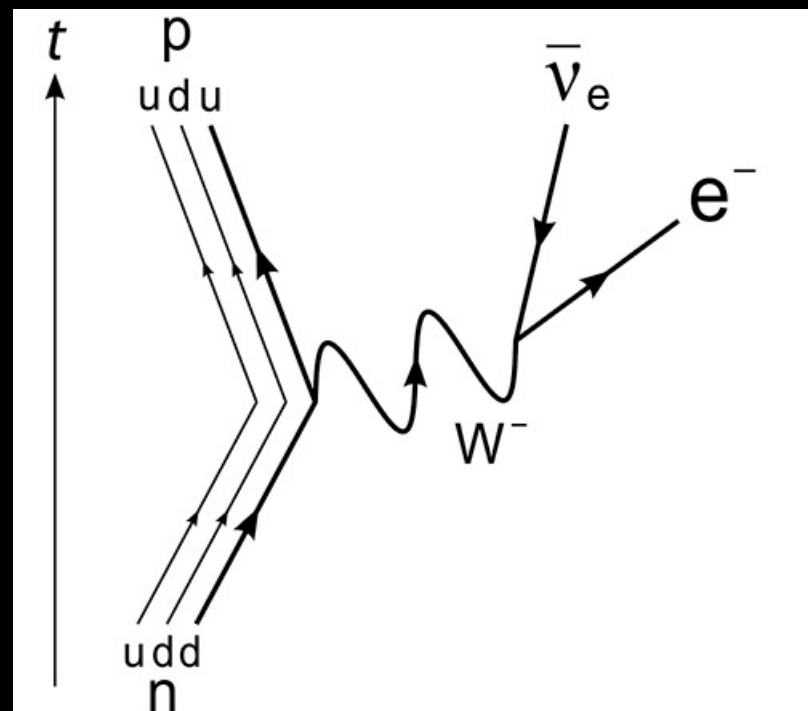
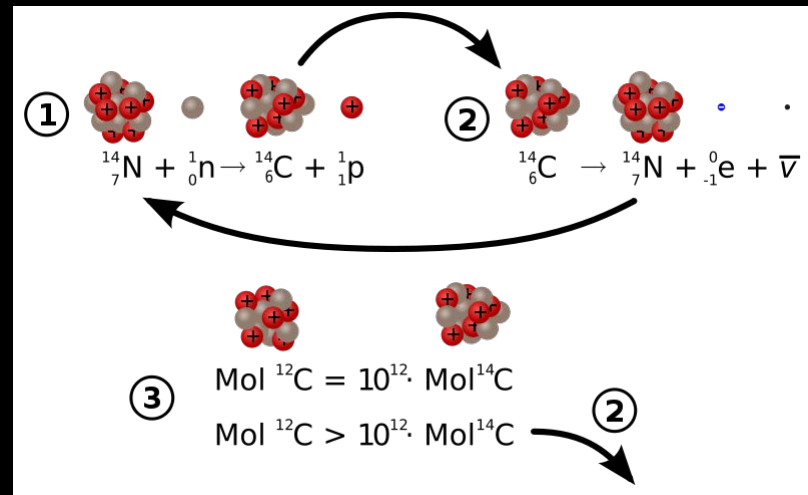
Forza forte

- Per esempio, e' la forza che tiene insieme i quark in un protone:
 - p: uud
- I quark si scambiano gluoni
- I quark possono avere 3 cariche (colori): Red, Green, Blue
 - I 3 colori si sommano a dare il "bianco"
- Solo combinazione bianche sono osservabili:
- 3 quarks: protone
 - Red + Green + Blue
- 2 quark: pione
 - Red + anti-Red
- La carica di colore si conserva nell'interazione:
 - Servono 8 gluoni

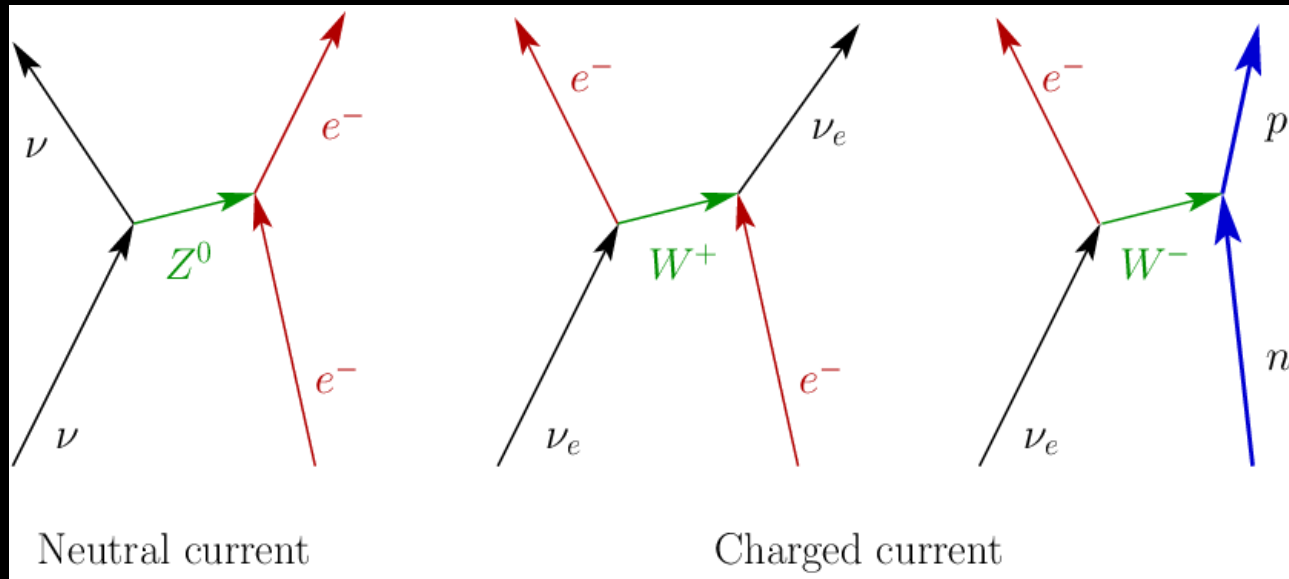


Forza Debole

- Un esempio e' il decadimento β^- del Carbonio -14 in Azoto-14:
- $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$
- Processo mediato da un W^-
- Forza debole carica



Forza debole



● Corrente debole neutra

● Uno dei metodi di rivelazione dei neutrini:

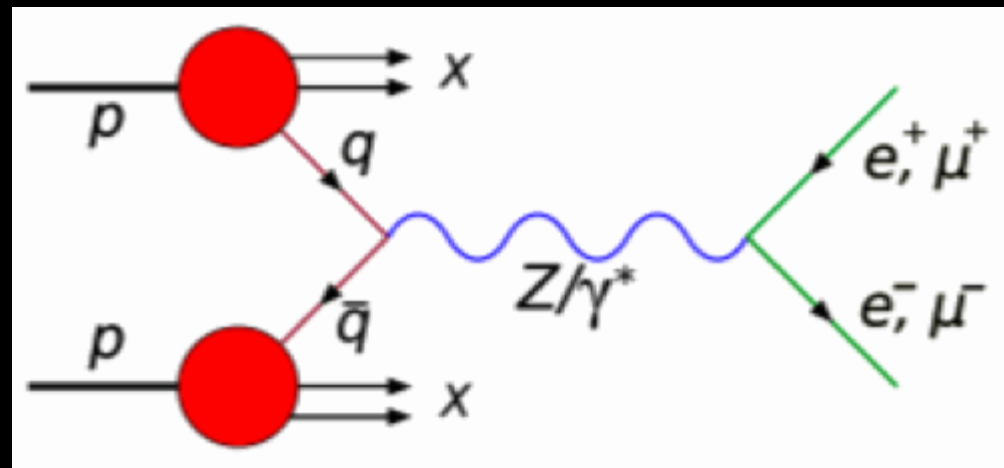
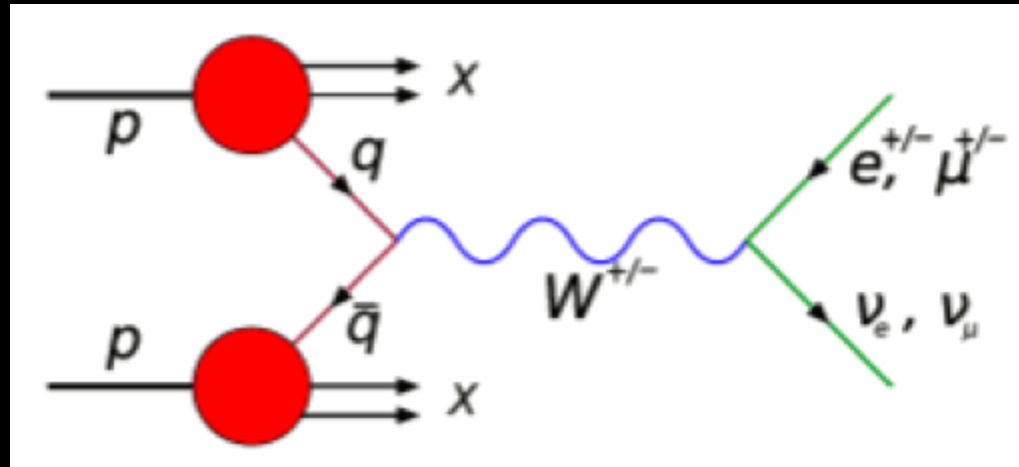
- Nell'interazione con la materia, i neutrini urtano un elettrone trasferendogli energia
- L'elettrone può essere accelerato ad energie relativistiche ed emettere radiazione (luce Cherenkov) che può essere rivelata da appositi dispositivi

Interazioni deboli

- ◉ Mediate da: W^+ , W^- e Z^0
- ◉ Caratteristiche dell'interazione debole:
- ◉ E' l'unica interazione che puo' cambiare il sapore dei quark (cioe' cambia i quark da un tipo ad un altro)
- ◉ Viola sia la simmetria di parita' P , che la simmetria CP (parita' seguita da coniugazione di carica)
- ◉ E' propagata da mediatori, noti come bosoni di gauge, che hanno una grossa massa
- ◉ Scoperte al CERN nel 1983 al SppS al CERN che operava ad una energia di 450 GeV
 - Poi studiate in dettaglio a LEP, a SDC al Tevatron

Produzione di W e Z

- A LHC in urti protone-protone
- I bosoni hanno una vita media cortissima ($\sim 10^{-25}$ s) e decade subito in altre particelle
- I prodotti del decadimento possono essere rivelati



Proprieta' W e Z

● Massa M (GeV/c^2):

- W: 80.385 ± 0.015
Z: 91.1876 ± 0.0021

● Ampiezza Γ (GeV/c^2):

- W: 2.085 ± 0.042
Z: 2.4952 ± 0.002

W⁺ DECAY MODES

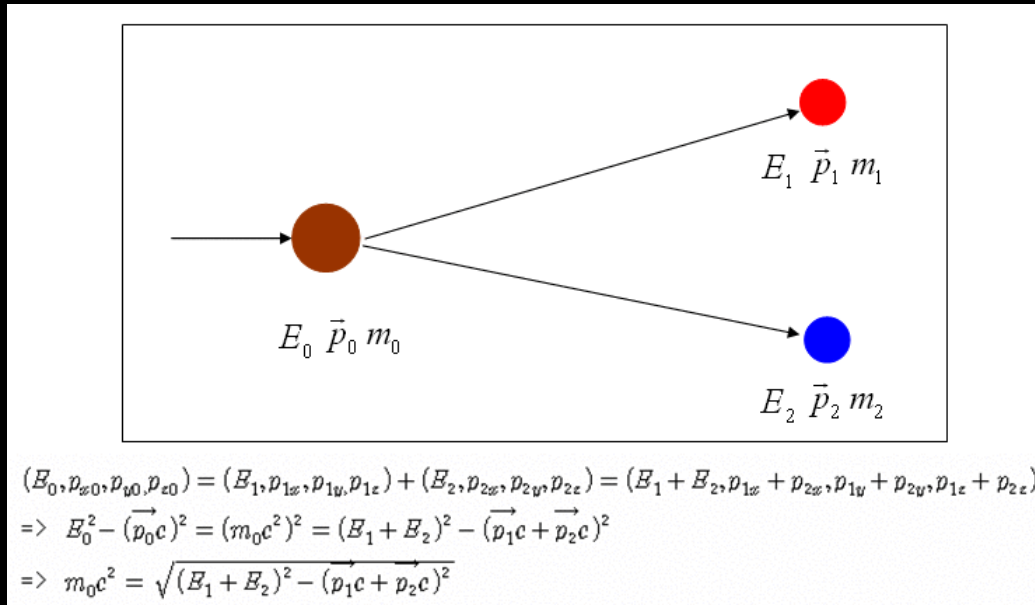
W⁻ modes are charge conjugates of the modes below.

| Mode | Fraction (Γ_i/Γ) |
|-------------------------|--------------------------------|
| Γ_1 $\ell^+ \nu$ | [a] $(10.80 \pm 0.09) \%$ |
| Γ_2 $e^+ \nu$ | $(10.75 \pm 0.13) \%$ |
| Γ_3 $\mu^+ \nu$ | $(10.57 \pm 0.15) \%$ |
| Γ_4 $\tau^+ \nu$ | $(11.25 \pm 0.20) \%$ |
| Γ_5 hadrons | $(67.60 \pm 0.27) \%$ |

Z DECAY MODES

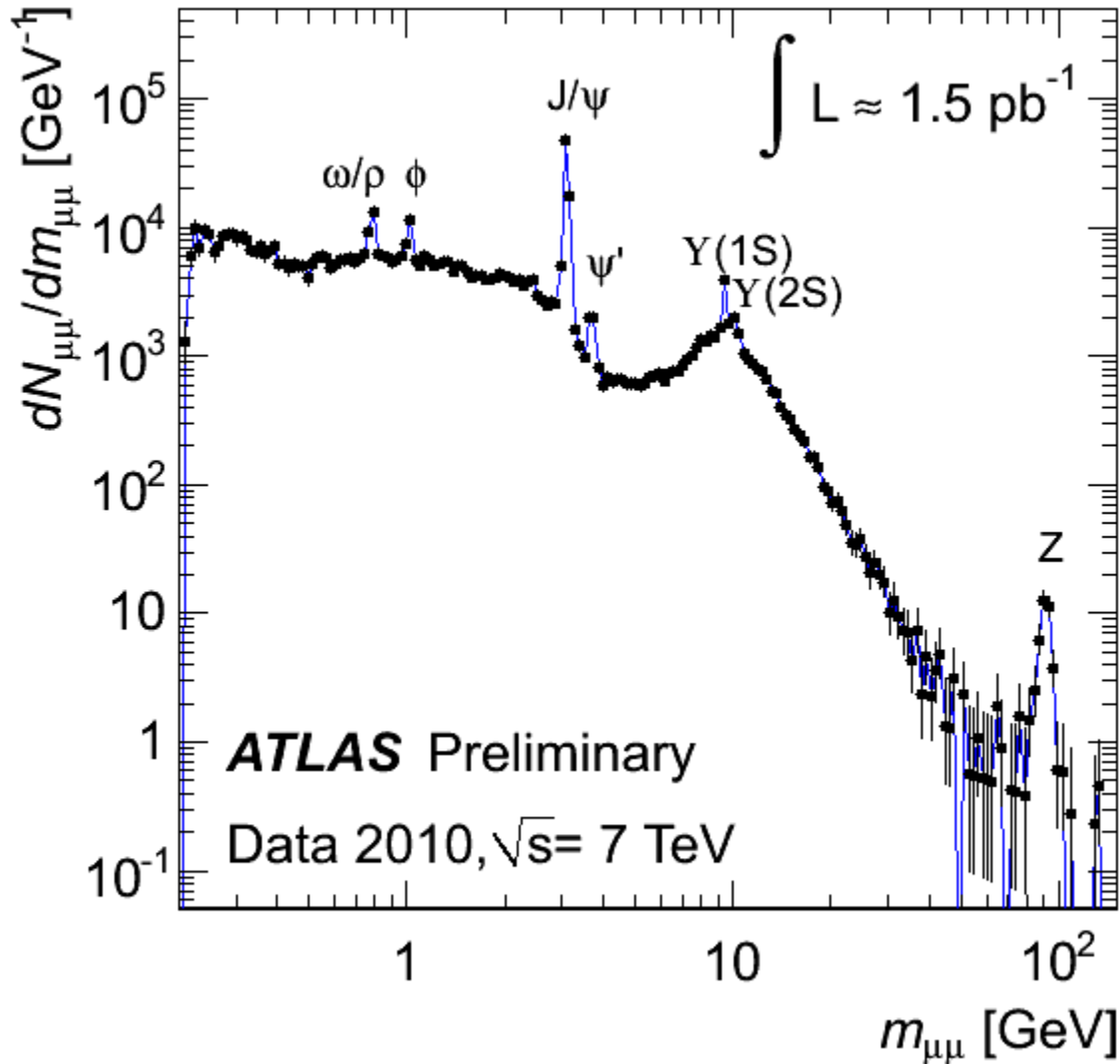
| Mode | Fraction (Γ_i/Γ) | Con |
|--|--|-----|
| Γ_1 $e^+ e^-$ | $(3.363 \pm 0.004) \%$ | |
| Γ_2 $\mu^+ \mu^-$ | $(3.366 \pm 0.007) \%$ | |
| Γ_3 $\tau^+ \tau^-$ | $(3.370 \pm 0.008) \%$ | |
| Γ_4 $\ell^+ \ell^-$ | [a] $(3.3658 \pm 0.0023) \%$ | |
| Γ_5 $\ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ | [b] $(4.2 \pm_{-0.8}^{+0.9}) \times 10^{-6}$ | |
| Γ_6 invisible | $(20.00 \pm 0.06) \%$ | |
| Γ_7 hadrons | $(69.91 \pm 0.06) \%$ | |

Massa invariante



- ⊙ Dai vettori quantita' di moto dei due prodotti di decadimento si puo' ricostruire la particella iniziale
- ⊙ In realta' poiche' siamo in ambito relativistico dobbiamo considerare i quadrimomenti delle due particelle finali:
 - $P^{1\mu} = (E_1, \mathbf{p}_1)$ e $P^{2\mu} = (E_2, \mathbf{p}_2)$
- ⊙ E costruire la massa invariante della particella che decade:
 - $M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2|^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2)$
- ⊙ Massa "invariante" perche' e' la stessa in tutti i sistemi di riferimento legati da una trasformazione di Lorentz

Spettro di massa invariante



$\rho(770)$ $775.26 \pm 0.25 \text{ MeV}$

$\omega(782)$ $782.65 \pm 0.12 \text{ MeV}$

$\phi(1020)$ $1019.461 \pm 0.019 \text{ MeV}$

J/ψ $3096.916 \pm 0.011 \text{ MeV}$

ψ' $3686.109 + 0.012 - 0.014 \text{ MeV}$

$Y(1S)$ $9460.30 \pm 0.26 \text{ MeV}$

$Y(2S)$ $10023.26 \pm 0.31 \text{ MeV}$

Z

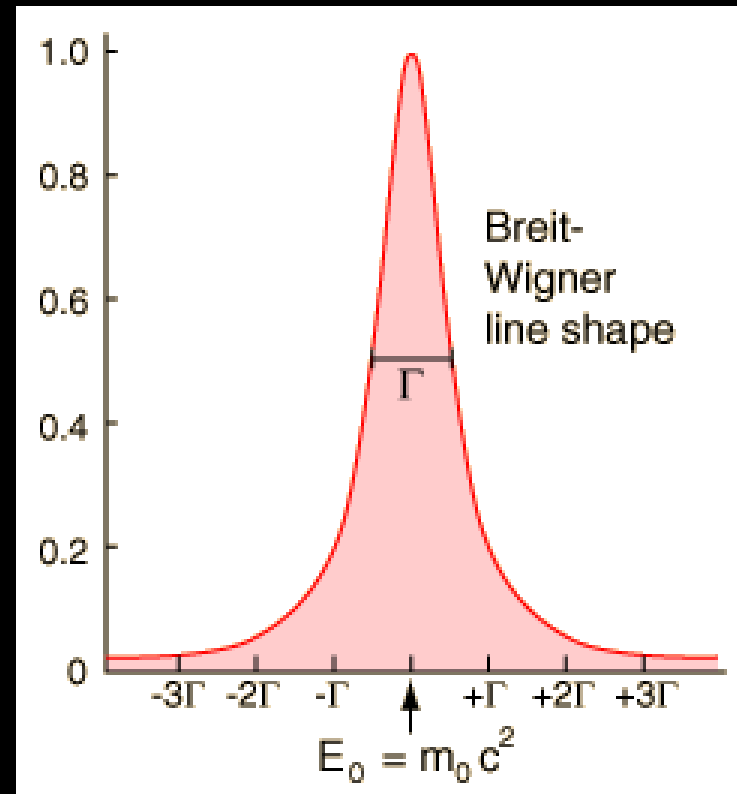
Ampiezza

- Principio di indeterminazione
- Particelle con vite medie piccole hanno incertezze piu' grandi nella misura della massa
- Misurando piu' volte la massa di una particella abbiamo una distribuzione chiamata Lorentziana o distribuzione di Breit-Wigner

$$\Delta E \times \Delta t > \hbar/2$$

$$\Delta E = \Gamma/2, \quad \Delta t = \tau$$

$$\Delta E = \hbar/2\tau$$



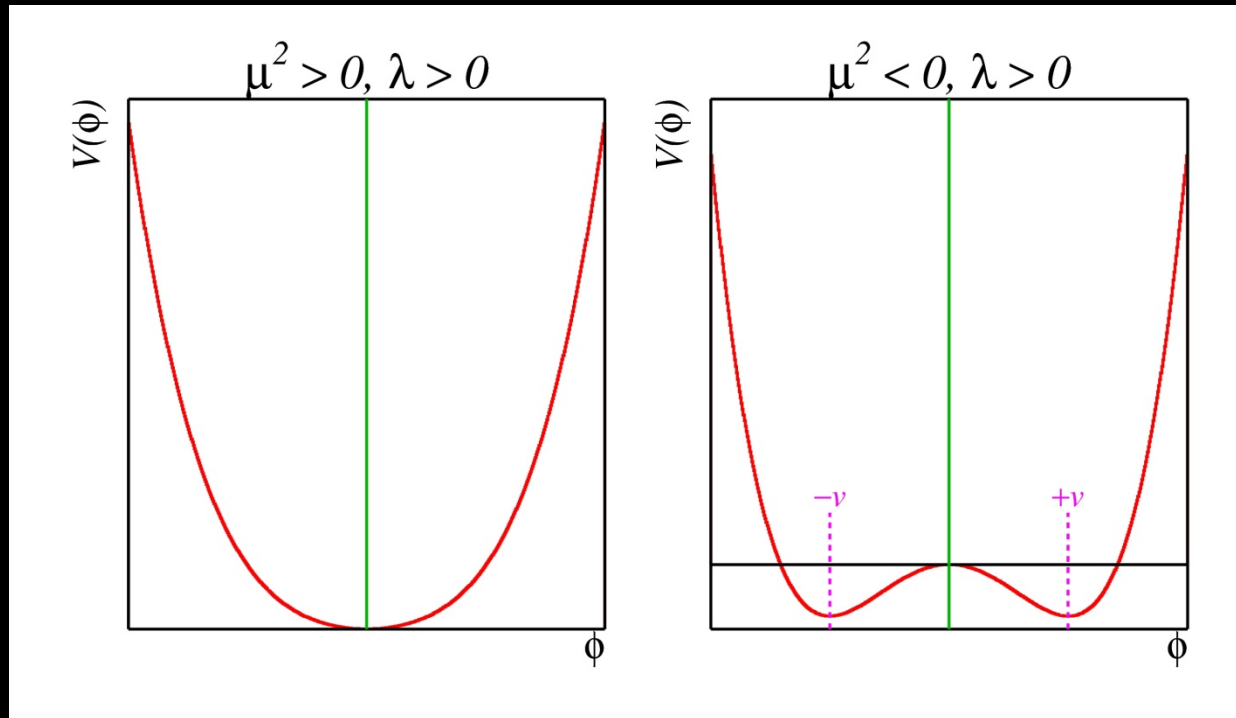
Ampiezza

- ◎ The Z boson has a mass of ~ 91.2 GeV and a width of ~ 2.5 GeV.
 - It means that the Z boson decays so fast that it can be produced with a mass of 91.2 ± 2.5 GeV.
- ◎ The Higgs boson has a mass of 125.5 GeV and a width of 4.2 MeV (0.0042 GeV).
 - It decays about 500 times less quickly than a Z (although still extremely fast), hence its mass is much better defined.

La massa dei bosoni W e Z

- **Unici bosoni con massa non nulla**
- Ad alte energie (nei primi istanti dopo il Big Bang) i bosoni W e Z avevano (come tutte le altre particelle) una massa nulla:
 - W^+ , W^- , W^0 , B^0
- **Inoltre la forza debole e la forza elettromagnetiche sono unificate:**
 - Simmetria elettrodebole
- Per spiegare l'origine delle masse e' stato introdotto il meccanismo di Higgs
- **Tutto lo spazio e' permeato da un campo di Higgs (e deve esistere una corrispondente particella di Higgs)**
- **Diminuendo l'energia il campo di Higgs assume un valore di aspettazione non nullo:**
 - La simmetria elettrodebole si rompe
 - i bosoni di gauge interagiscono col campo di Higgs e si ricombinano in W^+ , W^- , Z^0 (massivi) e il fotone (massa nulla)
 - Il bosone di Higgs assume una massa interagendo con se stesso
 - I fermioni interagiscono col campo di Higgs e assumono massa: l'accoppiamento col campo di Higgs e' proporzionale alla massa della particella

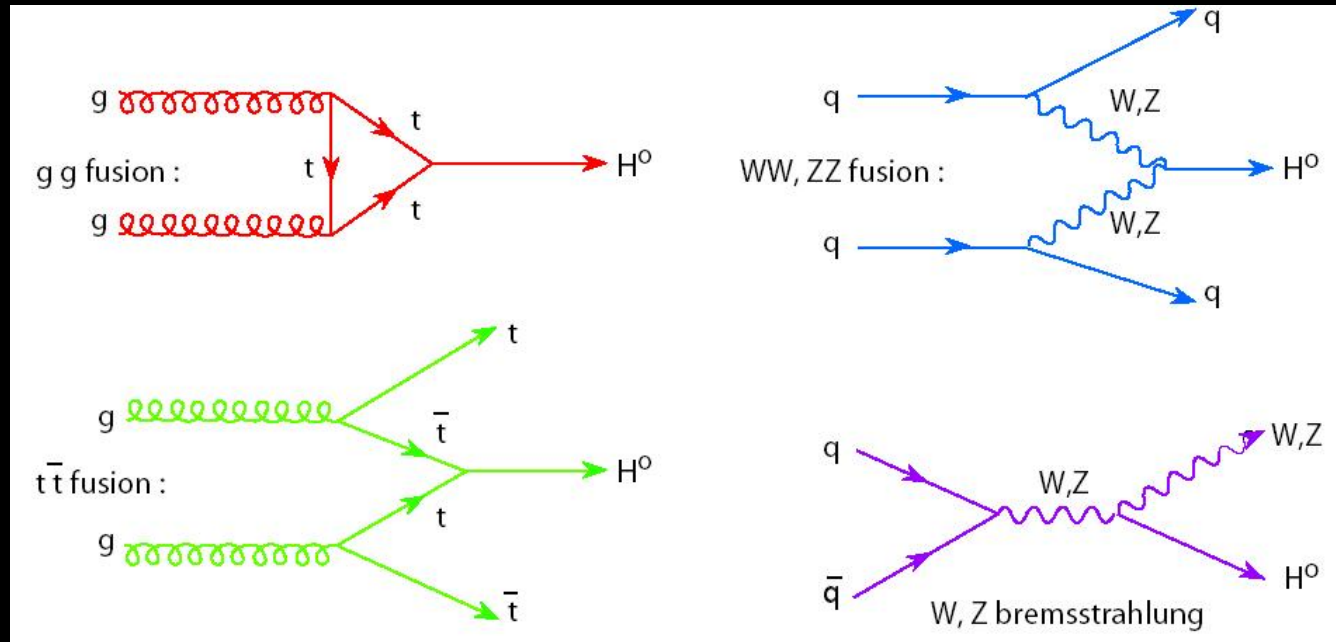
Meccanismo di Higgs



- Meccanismo verificato con la scoperta del bosone di Higgs per opera degli esperimenti ATLAS e CMS al CERN nel 2012

Produzione di Higgs a LHC

● Meccanismi di produzione

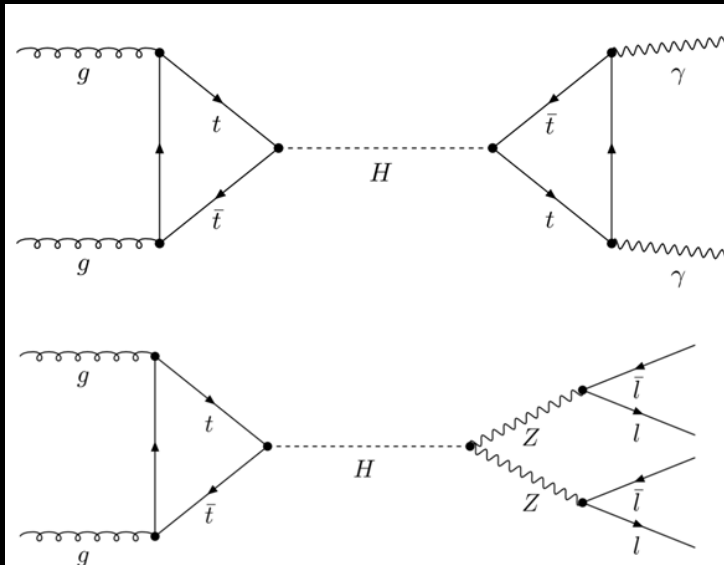
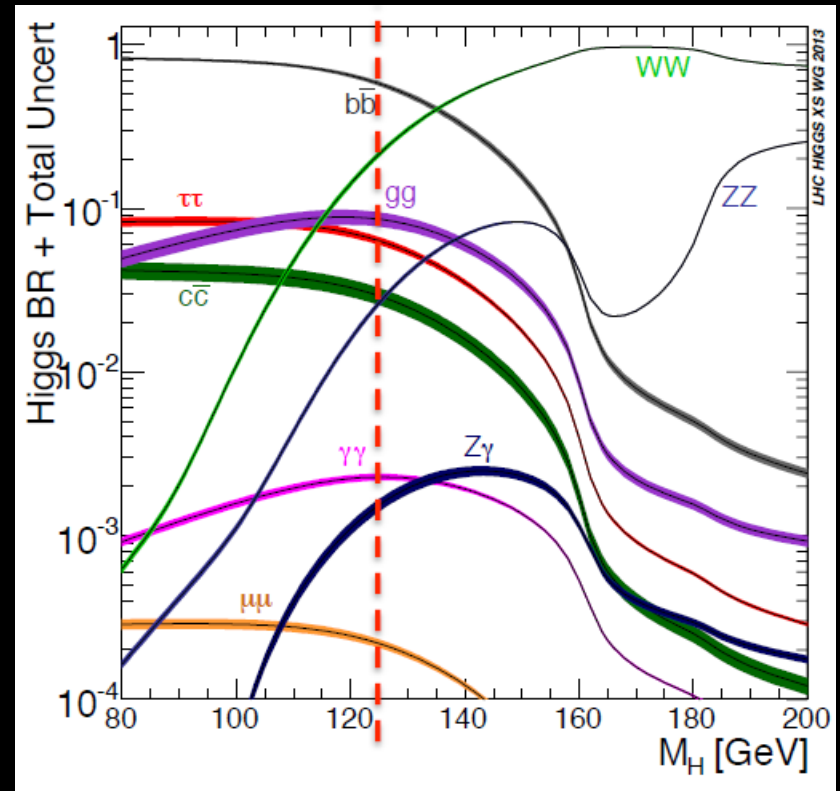


● I due canali che hanno portato alla scoperta del bosone di Higgs:

● $H \rightarrow \gamma\gamma$

● $H \rightarrow 4\text{leptoni}$

- $\mu\mu\mu\mu$
- $eeee$
- $ee\mu\mu$

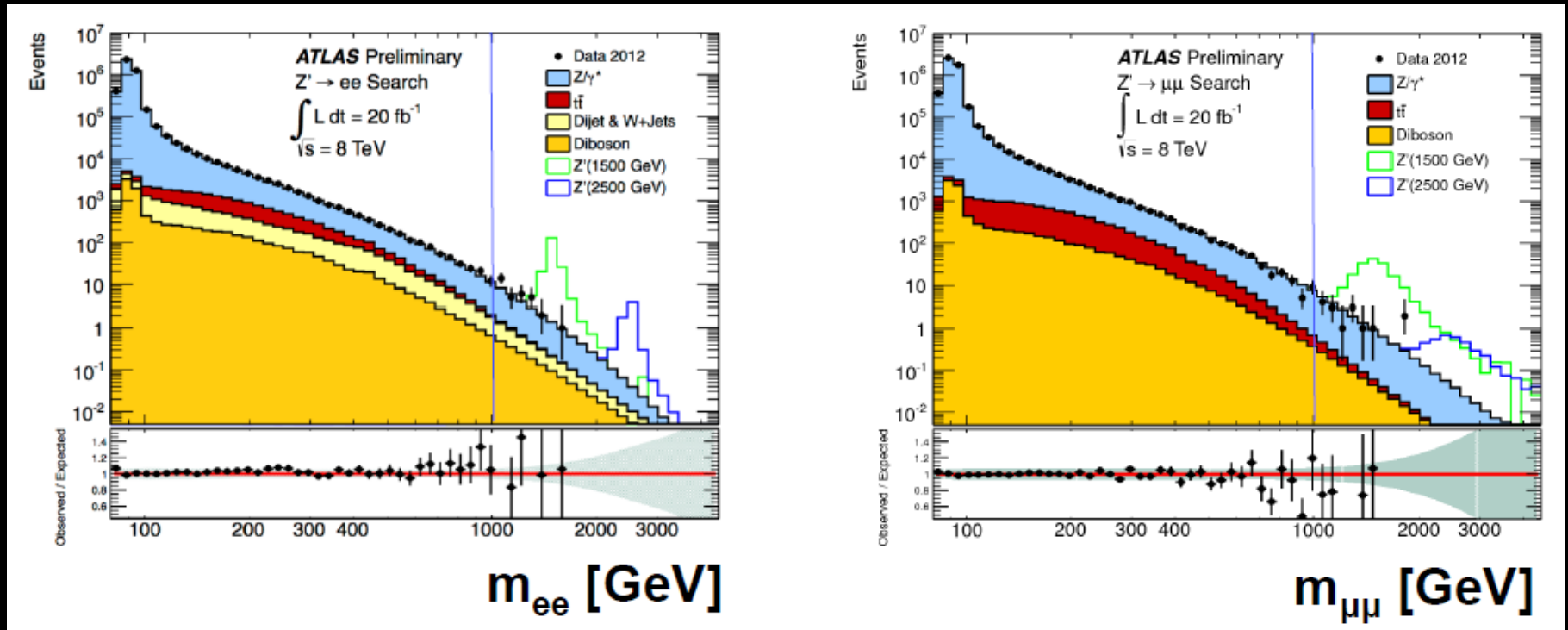


2 fotoni nello stato finale:
raro ma “abbastanza chiaro”

4 leptoni nello stato finale:
Fondo relativamente basso

Altre ricerche

- Bosone Z' di massa maggiore dello Z previsto da alcune teorie



Oltre il Modello Standard (MS)

- ◉ Massa dei neutrini
- ◉ Esistenza di materia oscura non costituita dalla materia barionica (protoni, neutroni)
- ◉ Asimmetria cosmica tra MATERIA e ANTIMATERIA:
 - esistenza di una nuova sorgente di violazione di CP oltre a quella prevista dal Modello STANDARD
- ◉ Impossibilita' nel MS di ottenere una FASE INFLAZIONARIA (espansione accelerata esponenzialmente) nell'universo primordiale
- ◉ Domande "fondamentali" a cui il Modello Standard non risponde:
 - Unificazione delle forze fondamentali
 - Masse e mescolamenti dei fermioni

Oltre il Modello Standard

◎ SUPERSIMMETRIA:

- Ogni particella “ORDINARIA” e’ accompagnata da una particella partner SUPERSIMMETRICA
- Nuova simmetria che lega bosoni (spin intero) a fermioni (spin 1/2)
- Ogni particella di un gruppo ha un partner (superpartner) dell’altro gruppo
- Perche’ la materia rimanga stabile si devono porre restrizioni che implicano che la particella SUSY piu’ leggera (NEUTRALINO) sia stabile
- Il neutralino costituisce un buon candidato di WIMP

◎ TEORIE CON NUOVE DIMENSIONI SPAZIALI:

- Oltre alle usuali 3 dimensioni spaziali, ne esistono altre (EXTRA DIMENSIONS)