

Il **L**arge **H**adron **C**ollider e il **M**odello **S**tandard delle particelle



Vittorio Del Duca
INFN LNF

Incontri di Fisica

5 ottobre 2011

Materia

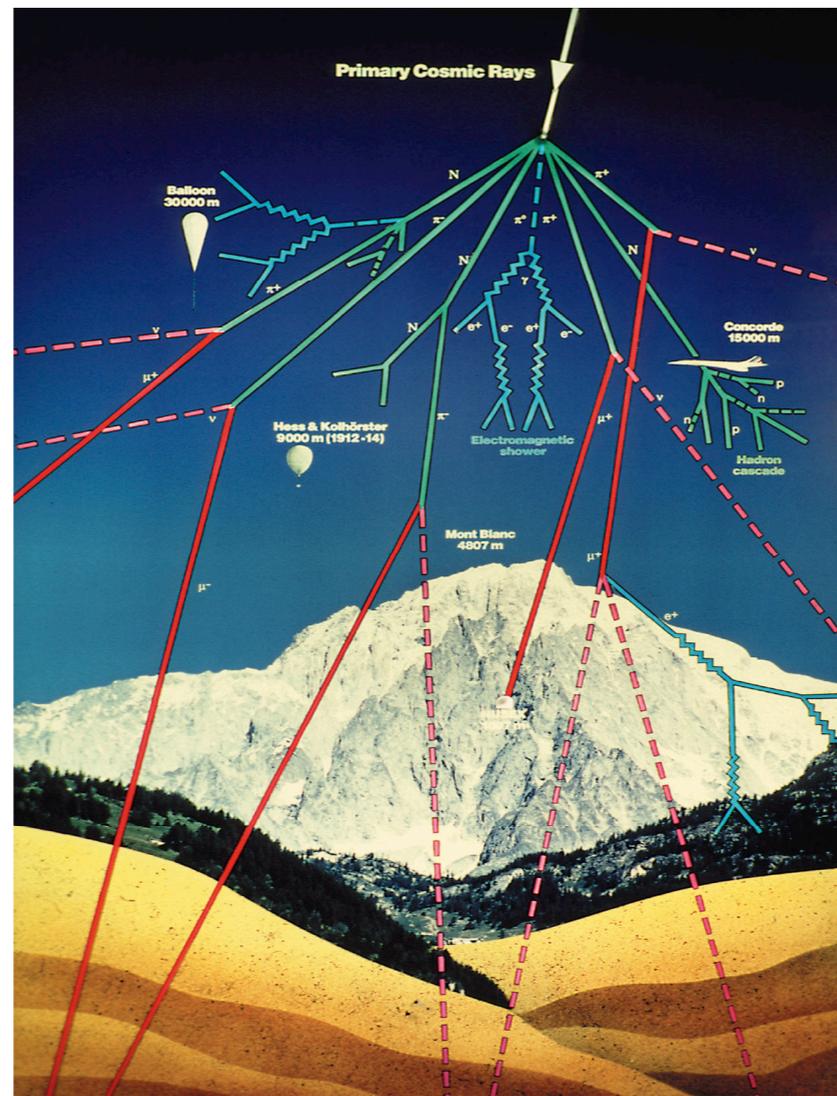
- La materia è fatta di elementi con definite proprietà chimiche
- Ciascun elemento ha come mattone fondamentale un atomo
- L'atomo contiene elettroni (particelle elementari, il tipo più leggero di leptoni), che ruotano intorno a un nucleo ...
- ... che è formato da protoni e neutroni, il tipo più comune di materia adronica (da cui il nome **LHC**) ...
- ... che sono composti di quark e gluoni
- Tra gli anni '60 e '90 si è classificata tutta la materia nota mediante 6 tipi di quark, raggruppati in 3 famiglie, l'elettrone e altri due leptoni più pesanti, il muone e il tau, ciascuno col suo neutrino, anch'essi raggruppati in 3 famiglie

La materia secondo il Modello Standard delle particelle

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

- Le 3 famiglie sono identiche, eccetto che per le masse
- Il *flavor* identifica quark e leptoni, ma le interazioni deboli possono cambiare il *flavor*

La materia dell'esperienza quotidiana è descrivibile con la prima famiglia di quark e leptoni, ma ...



... già nei raggi cosmici, scoperti un secolo fa, si osservavano particelle strane, muoni, antimateria, ...

Negli acceleratori i fasci di particelle raggiungono energie tipiche dei raggi cosmici

Interazioni

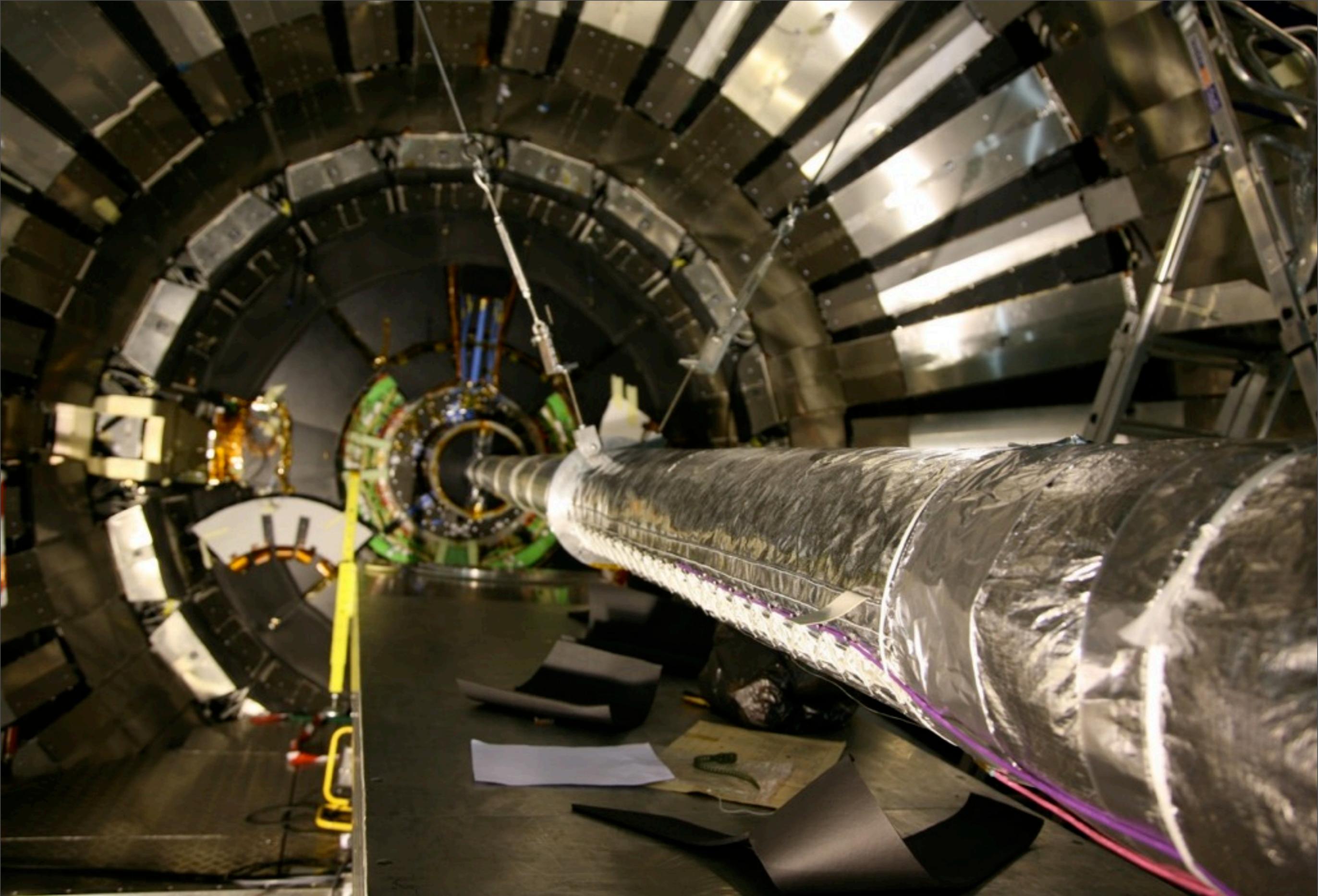
- Le particelle interagiscono mediante 4 interazioni fondamentali
 - gravitazionali** (importante per grandi aggregati di particelle: stelle, pianeti, cosmologia ...)
 - elettromagnetiche** (forza tra atomi e molecole, luce, onde em)
 - deboli** (radioattività, neutrini, ...)
 - forti** (legame tra protoni e neutroni nel nucleo, forze tra quark e gluoni ...)
- La **gravitazione** è la più debole: $F_{grav} \sim 10^{-40} F_{em}$
è trascurabile in fisica delle particelle
- su scala microscopica, il **Modello Standard** descrive le interazioni tra particelle mediante le forze **elettromagnetica, debole e forte**



endcap di CMS

Simmetria

- Il **Modello Standard** delle particelle si basa sul concetto di simmetria.
- Ci sono delle trasformazioni che cambiano le funzioni d'onda che descrivono le particelle, ma non le equazioni del **Modello**, che descrivono come le particelle interagiscono mediante le forze **elettromagnetica, debole e forte**
- Queste trasformazioni sono dette di simmetria
- Ce n'è un tipo per ciascuna delle tre forze **elettromagnetica, debole e forte**



beampipe e tracker di CMS

Unificazione

- Nel 1861-2, Maxwell unificò in un gruppo di equazioni le forze **elettrica** e **magnetica**: l'**elettromagnetismo**
- Nel 1967, Glashow, Salam e Weinberg mostrarono che a un'energia sufficientemente alta (dell'ordine di 200 GeV), le forze **elettromagnetica** e **debole** si unificano nella forza **elettrodebole**
- Questo processo d'unificazione continua a energie più alte ?
Si possono unificare le forze **elettrodebole** e **forte** ?
Accade in alcune teorie, dette di **grande unificazione**,
ma al momento non c'è evidenza sperimentale in loro favore
- Si possono unificare la forza **elettrodebole** e/o **forte**
e la **gravitazione** ?

Electroweak Symmetry Breaking

- Il **Modello Standard** delle particelle ha avuto e ha un enorme successo sperimentale, ma lascia aperte molte questioni
- Qual'è l'origine della materia ? Cosa dà massa alle particelle ?
- La simmetria tra le forze **elettromagnetica** e **debole**, che soggiace alla loro unificazione si rompe a un'energia di circa 200 GeV. Quindi a energie più basse le due forze sono distinte
- Il meccanismo che regola la rottura della simmetria **elettrodebole** (**EW**SB = **E**lectroweak **S**ymmetry **B**reaking) è ancora sconosciuto
- Il modello di rottura più studiato è il meccanismo di **Higgs**, che si realizza mediante una particella, il bosone di **Higgs**, da **Peter Higgs**, che lo ideò nel 1964
- Ma il bosone di **Higgs** non è stato ancora trovato ...



Peter Higgs
Edimburgo, dicembre '08

Meccanismo di Higgs

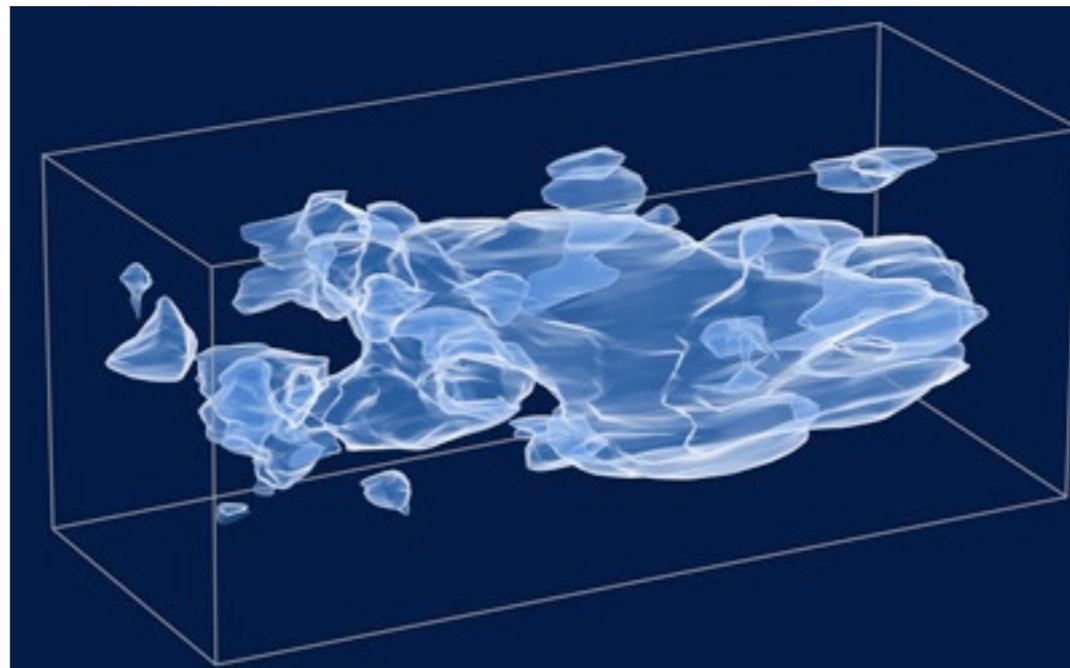
- Il meccanismo di Higgs non è una vera teoria dell'EWWSB ma un meccanismo ad hoc, che fornisce la rottura senza un motivo
- Ci sono delle correzioni quantistiche alla massa del bosone di Higgs dipendenti dall'energia, grandi e di segno opposto
- Perché la massa del bosone di Higgs rimanga stabile su un ampio intervallo di energie, le cancellazioni tra quelle correzioni devono essere molto precise
- Ciò è considerato innaturale (problema della *naturalness*, o del *fine tuning*)
- Le simmetrie del Modello Standard impediscono che le correzioni quantistiche alle masse dell'elettrone, del fotone, del quark, diventino molto grandi
- Il bosone di Higgs non ha simili simmetrie che lo proteggano

EWWSB e Nuova Fisica

- Ci sono altri modelli che evitano le cancellazioni innaturali e in cui l'**EWWSB** non è un meccanismo ad hoc, ma una conseguenza dinamica della teoria
- modelli di **technicolor** prevedono che il bosone di **Higgs** sia una particella composta, uno stato legato di nuove interazioni **forti**
- modelli extra-dimensionali prevedono che il mondo abbia più di 4 dimensioni e che il bosone di **Higgs** sia la componente extra-dimensionale di un nuovo bosone. Quindi la simmetria che protegge **Higgs** è quella del nuovo bosone, simile a quella che nel **Modello Standard** protegge il fotone o i bosoni **W, Z**
- modelli supersimmetrici ipotizzano che ci sia una simmetria tra bosoni e fermioni. Quindi la simmetria che protegge **Higgs** è quella del fermione associato, analoga a quella che nel **Modello Standard** protegge l'elettrone o i quark
- **LHC** affronterà la questione dell'**EWWSB**

Materia Oscura

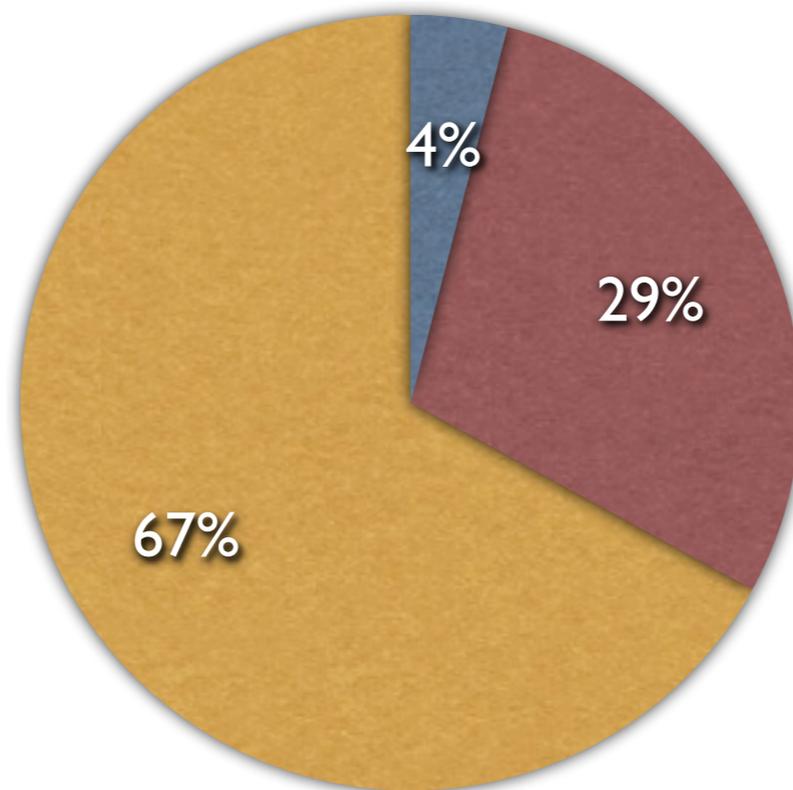
La distribuzione di materia oscura nell'Universo da una mappatura del Hubble Space Telescope fatta col gravitational lensing



la dimensione sul lato lungo è il tempo:
a destra tempi più remoti, a sinistra tempi più recenti

- Da osservazioni astronomiche cominciate 70 anni fa, sappiamo che la materia a noi nota può rendere conto solo di circa il 4% della materia (densità d'energia) dell'Universo
- Circa il 23% è materia oscura
- Circa il 67% è energia oscura

● materia ordinaria ● materia oscura ● energia oscura



Energia Oscura

- L'Universo si espande o si contrae ?
- Dipende dalla densità d'energia dell'Universo
- In ogni caso, si pensava che la gravità rallentasse l'espansione
- Osservando delle supernovae, nel 1998 Perlmutter, Riess e Schmidt (Premio Nobel per la Fisica 2011) hanno mostrato che l'espansione dell'Universo accelera!
- Ciò è dovuto all'energia oscura

Materia e Antimateria

- Nel 1928, Dirac predice l'esistenza di particelle di antimateria, con le stesse masse delle particelle di materia, ma altre proprietà (come carica elettrica, ecc.) opposte
- Nel 1932, Anderson scopre il positrone, l'antiparticella dell'elettrone, nei raggi cosmici
- Nelle reazioni tra particelle, materia e antimateria sono ugualmente presenti, ma l'Universo sembra essere fatto di sola materia. Perché ? Com'è nata la materia nell'Universo ?
- **LHC** proverà a trovare risposte a tutte queste domande

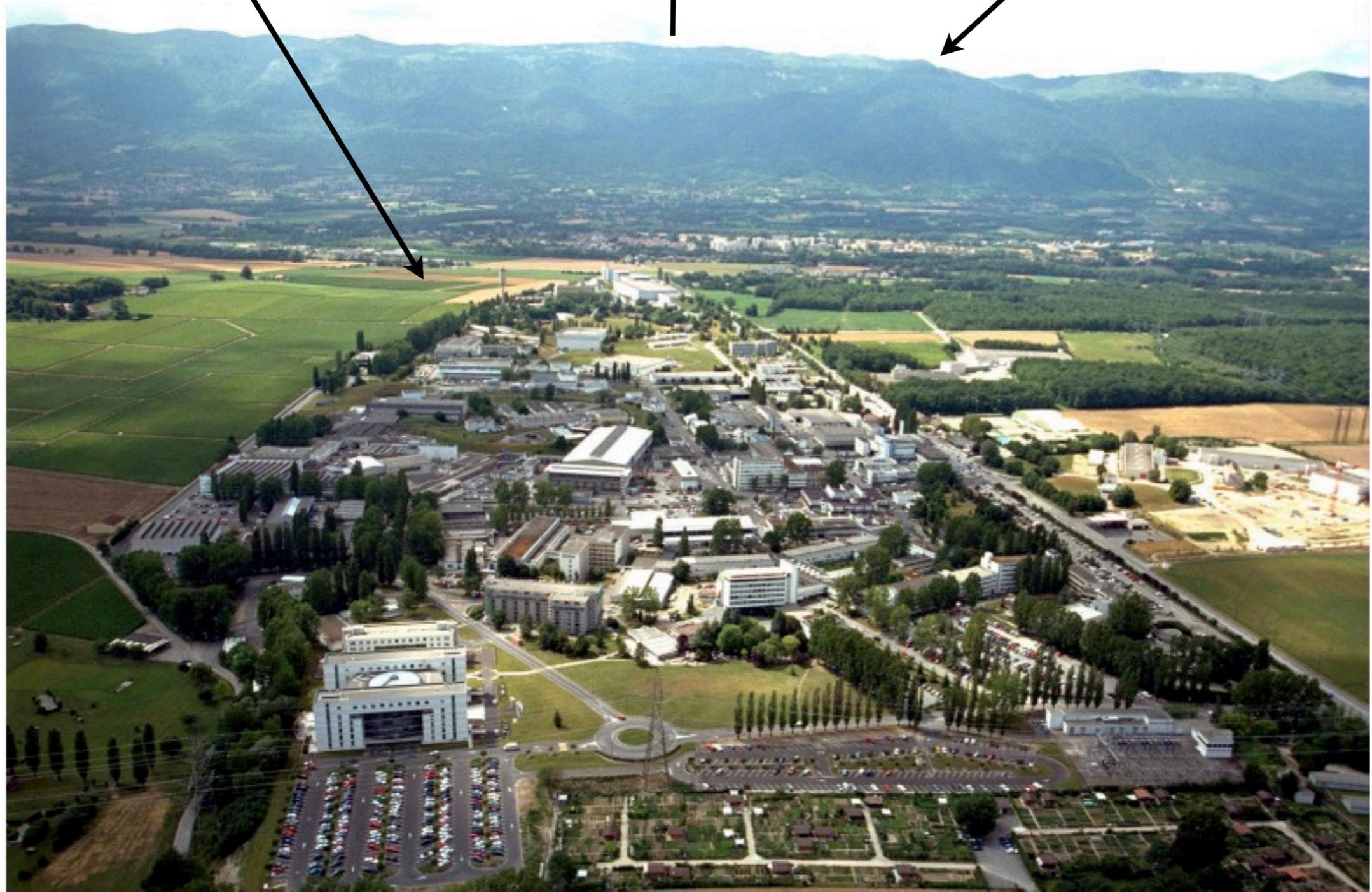


- Il **L**arge **H**adron **C**ollider è un acceleratore e collisore di protoni
- È un tunnel a forma di anello (formato da 8 archi connessi da 8 piccole sezioni diritte) di 26,6 Km di circonferenza e 3,8 m di diametro
- È situato al CERN, a una profondità tra 50 e 175 m sotto la frontiera tra Francia e Svizzera, tra Ginevra e il Jura

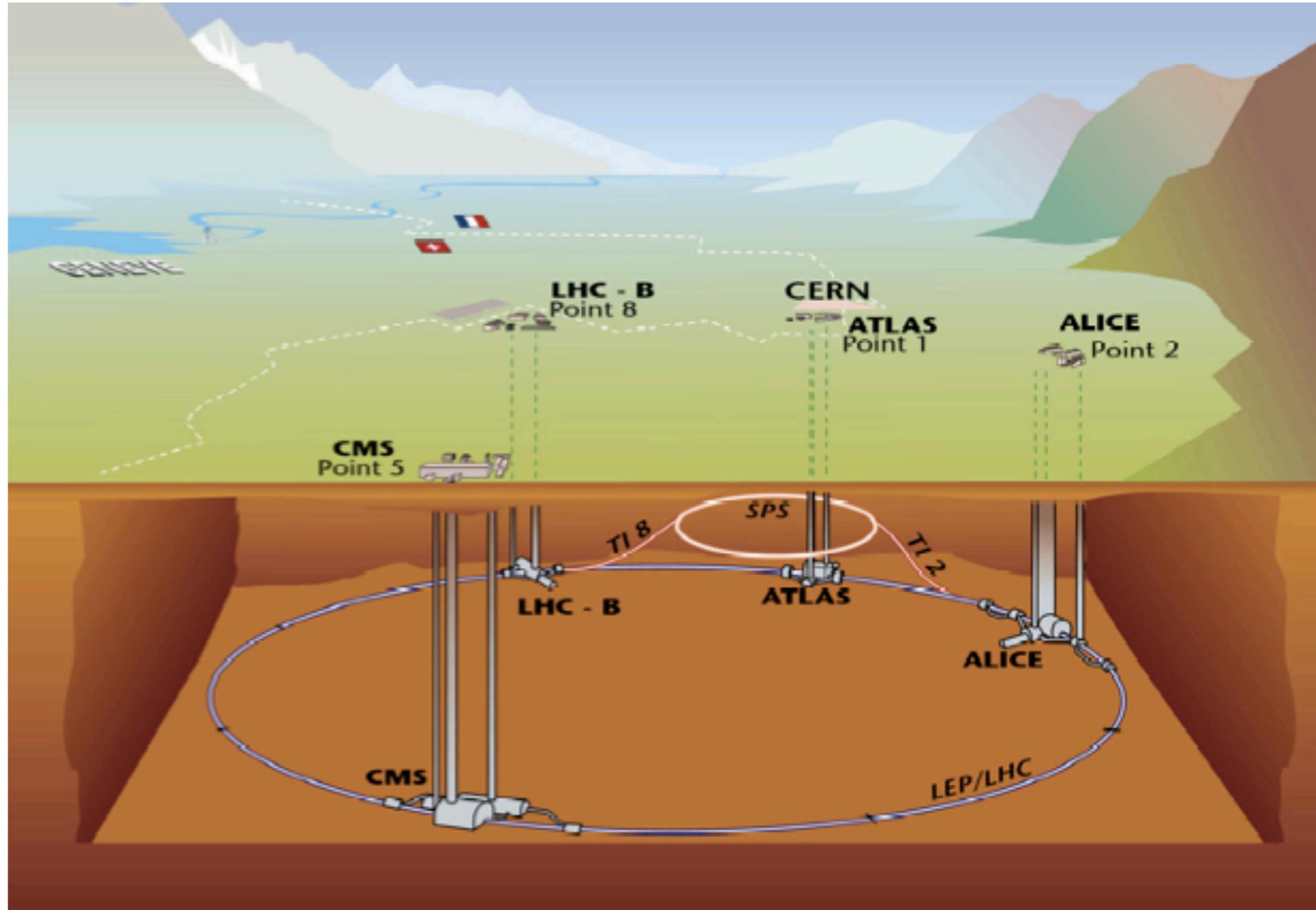
il CERN

Nord

il Jura



Schizzo di LHC



→ Nord

Fasci di Protoni

- Nel tunnel ci sono 2 tubi contenenti ciascuno un fascio di protoni circolanti uno in senso orario e l'altro in senso anti-orario
- Ogni fascio è meno largo di un capello (circa un micron) e, a regime, sarà composto da 2800 pacchetti di protoni, ciascuno contenente circa 115 miliardi di protoni
- A regime, i protoni avranno una velocità di 299.792.455 m/s, pari a $0,9999999991 \times$ la velocità della luce, $c = 299.792.458$ m/s, facendo in un secondo 11.245 volte il giro dell'anello (ora vanno solo a 299.792.447 m/s, pari a $0,9999999965 \times c$)

Provate a vedere quanta energia ci vuole ad aggiungere un 9 alla velocità dei protoni relativa a quella della luce, cioè incrementare di 0,0000000001 la velocità relativa ...

Energie Relativistiche

- A regime, l'energia di ciascun protone sarà di 7.000 GeV (ora è di 3.500 GeV)

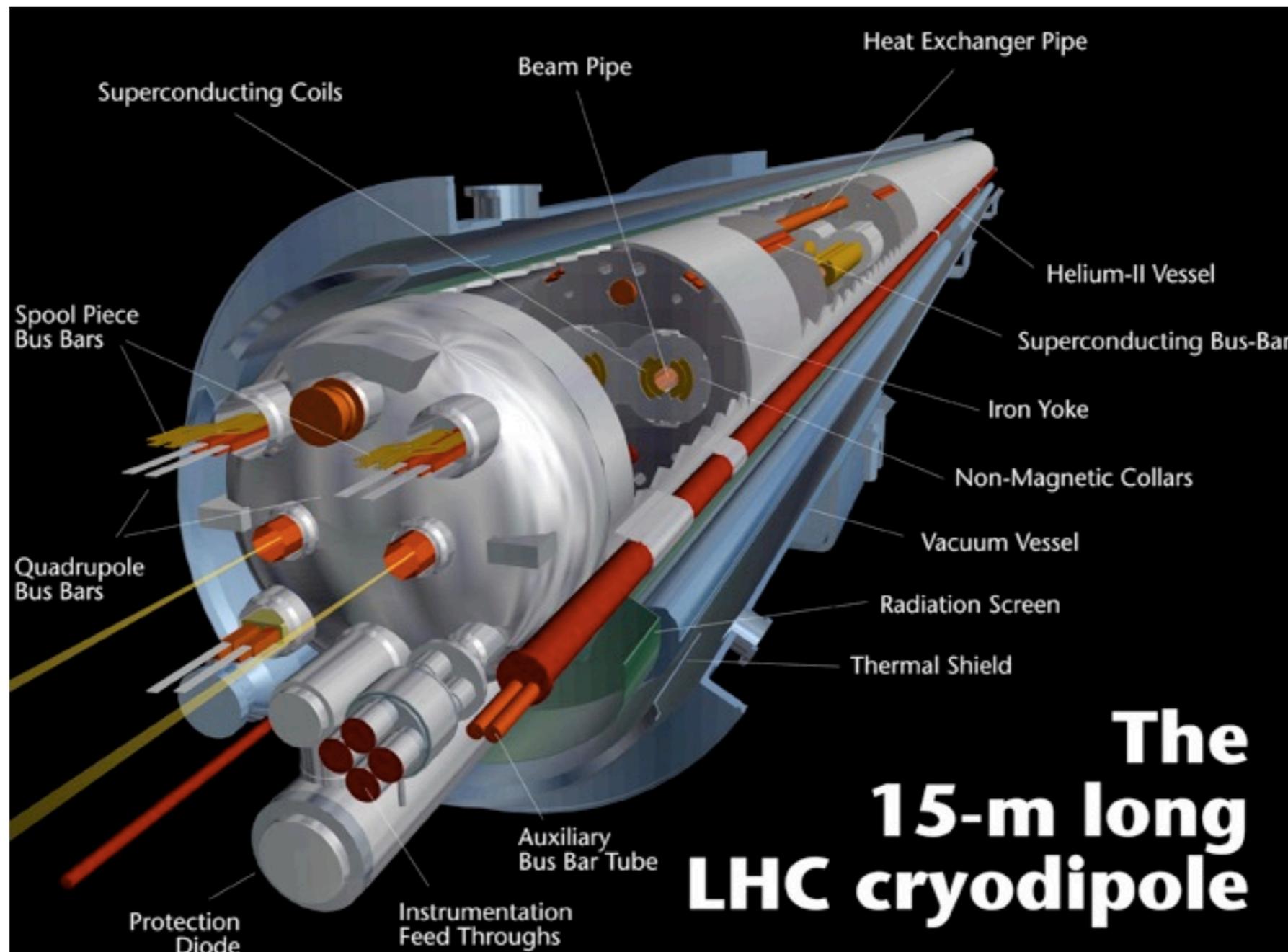
- L'energia di un protone è data da $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

La massa di un protone è $m = 1,672621637(83) \times 10^{-27} \text{ kg} = 0,938272013(23) \text{ GeV}/c^2$

1 eV = $1,602176565(35) \times 10^{-19} \text{ J}$

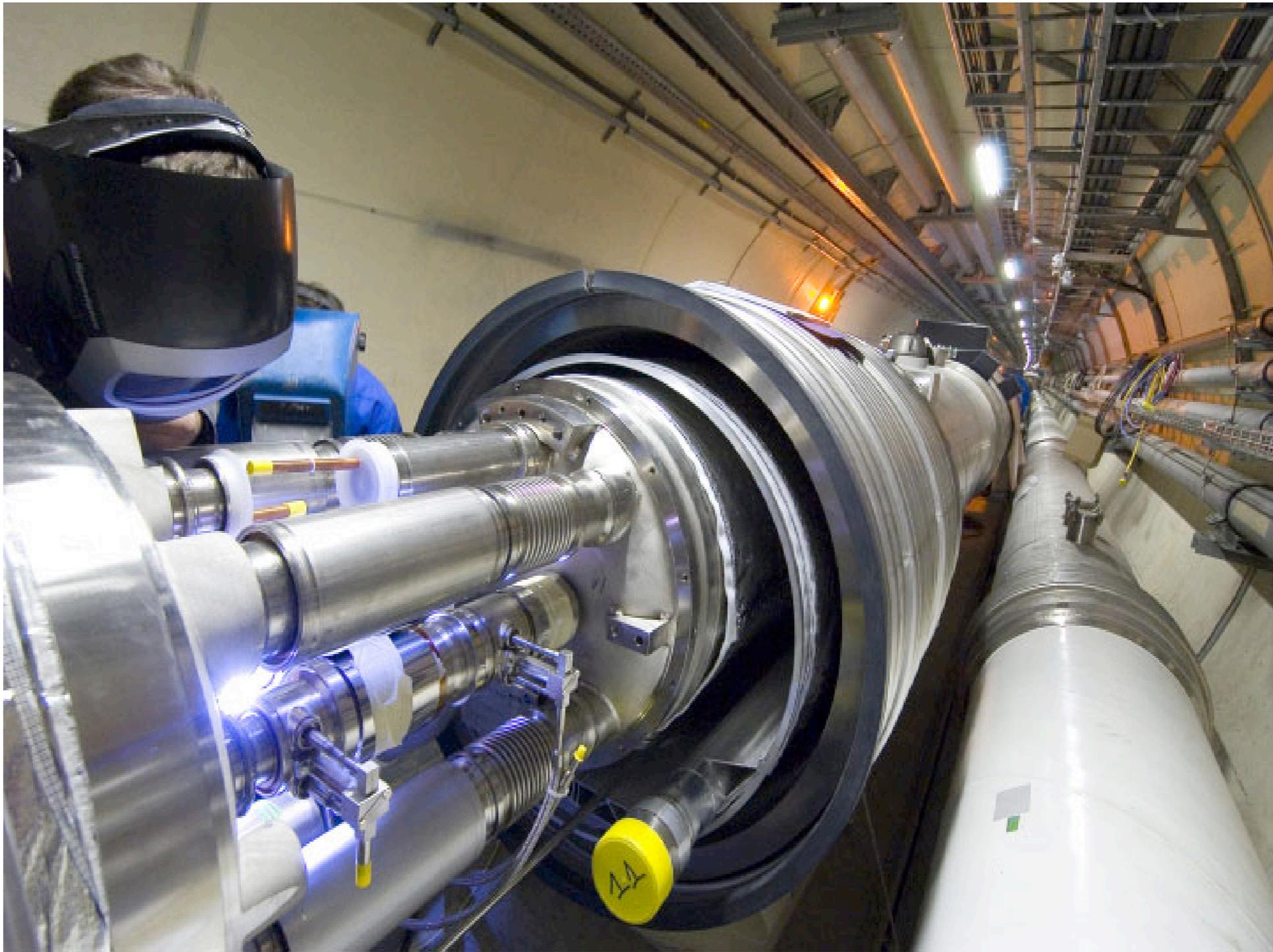
- L'energia di un fascio di 322 trilioni di protoni di 7000 GeV d'energia ciascuno è di 360 MJ, pari all'energia cinetica di un treno di 400 tonnellate che viaggia a 150 Km/h

bobina magnetica



corrente $i = 12.000 \text{ A}$

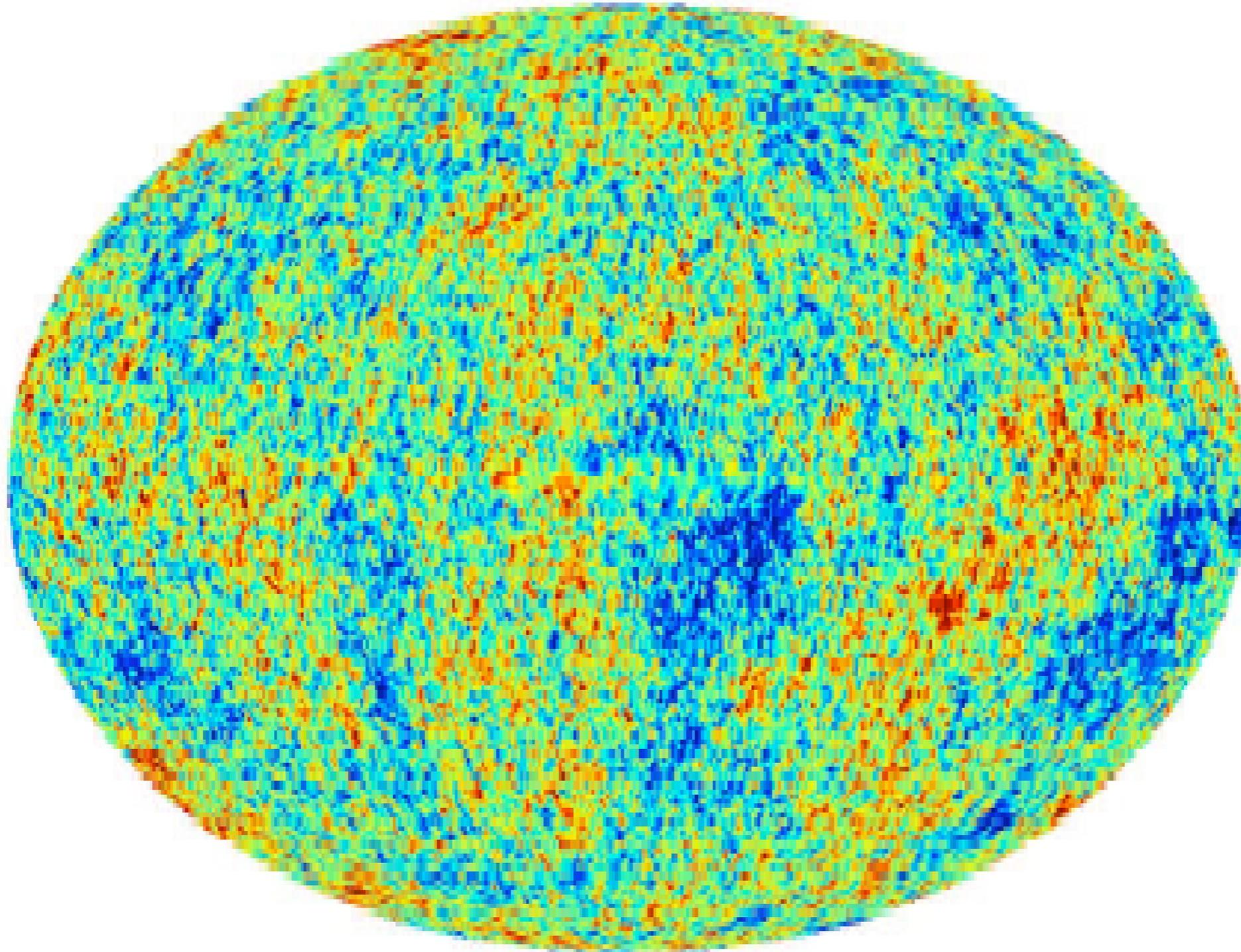
campo magnetico $B = 8,3 \text{ Tesla}$



Magneti Superconduttori

- Lasciato per i fatti suoi, un protone se ne va dritto ... ma ha una carica elettrica, e la sua traiettoria curva quando passa in un campo magnetico
- Il protone allora emette radiazione, e perde energia
- Per tenere i protoni sulla traiettoria (+ o -) circolare dell'anello di LHC, s'usano 1.232 bobine magnetiche lunghe 15 m e pesanti 32 t, che generano dei campi 100,000 volte più intensi del campo magnetico terrestre
- Per raggiungere campi così intensi, i cavi delle bobine sono superconduttori, cioè conducono l'elettricità con una minima dispersione d'energia, e quindi operano a una temperatura di 1,9 K, cioè 1,9 gradi sopra lo zero assoluto = -271,3 C

Cosmic Microwave Background



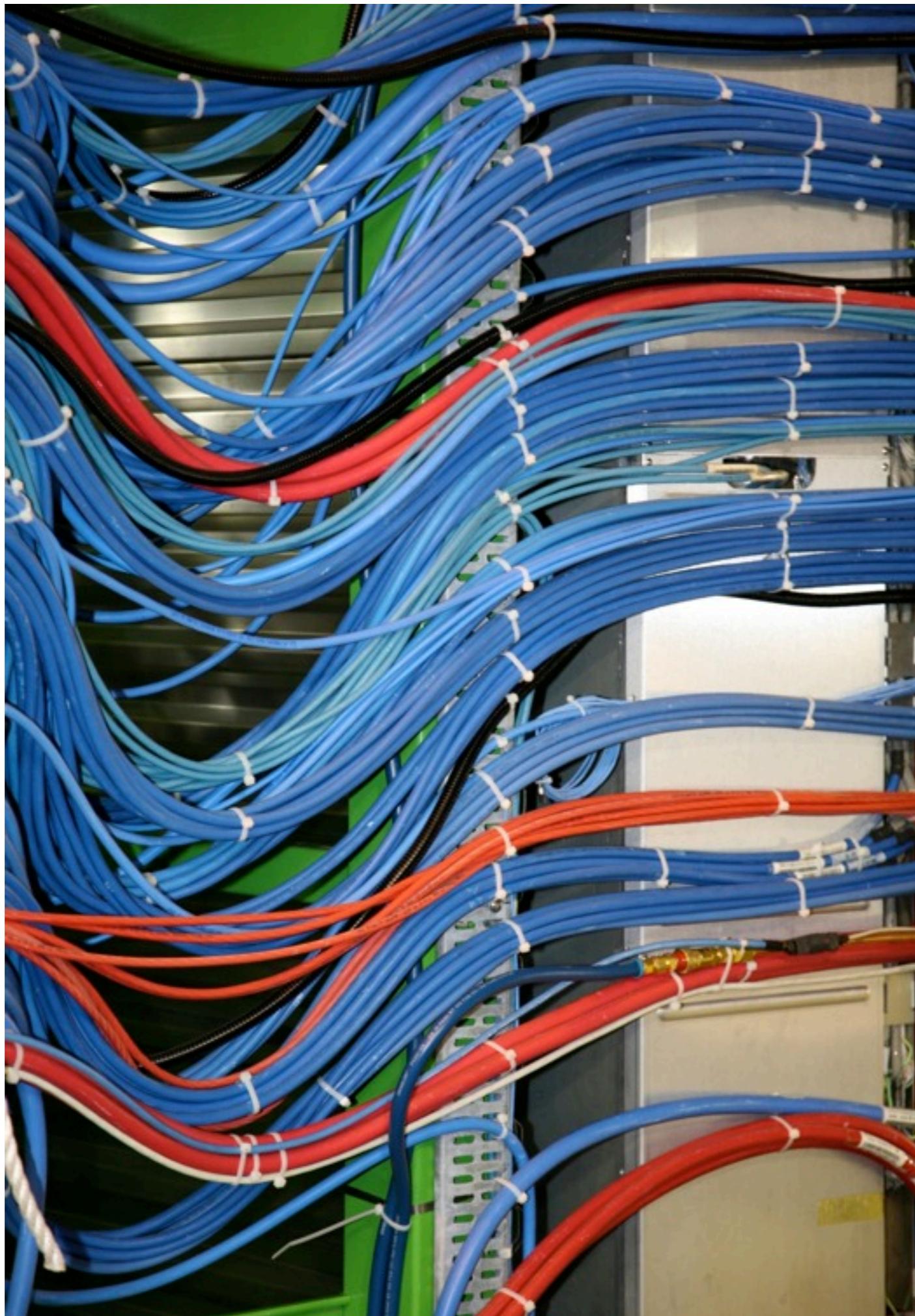
la temperatura della radiazione a micro-onde
del fondo cosmico è di 2,7 K

Punti d'Interazione

- In 4 punti dell'anello, si fanno scontrare i pacchetti dei due fasci di protoni. In questi punti si trovano i 4 esperimenti, **ALICE**, **ATLAS**, **CMS**, **LHCb**
- A regime, nei punti d'interazione, i pacchetti si scontrano 40 milioni di volte al secondo. Ogni collisione tra pacchetti produce in media 25 collisioni tra protoni, quindi circa un miliardo di collisioni tra protoni al secondo
- È impossibile elaborare una quantità così grande di dati!

Data Acquisition (DAQ)

- I dettagli della presa dati variano un po' da esperimento a esperimento. Per darvi un'idea, descrivo che capita in **CMS**
- In base a considerazioni fisiche iniziali, il sistema ritiene 1 Mbyte di dati per ciascuna di 100.000 collisioni, ne fa una ricostruzione più precisa, e conserva infine i dati dettagliati di 100 collisioni, che sono registrati per essere analizzati
- È un po' come dover scaricare, elaborare e guardare 100.000 foto tra un miliardo, per decidere di tenerne 100 e cestinare le altre. Ma tutto ciò va fatto ogni secondo!
- A regime, ogni anno si raccoglieranno 15 milioni di Gbyte di dati, un po' come riempire di dati 20 milioni di CD, che farebbero una pila di 20 km ...



Un dettaglio della cablatura della farm di computers del DAQ di CMS

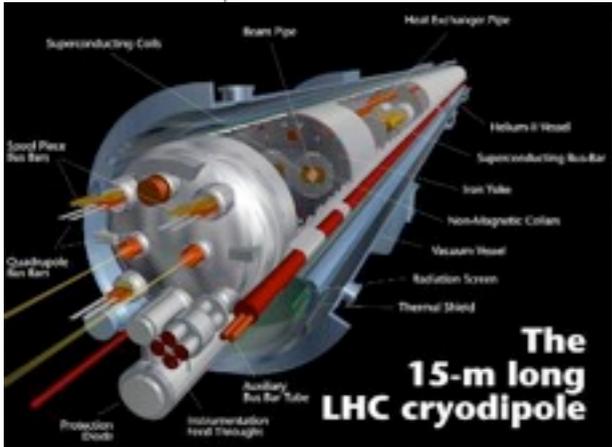
I 4 esperimenti,
ALICE, **ATLAS**, **CMS**, **LHCb**
e i loro rivelatori

LHC

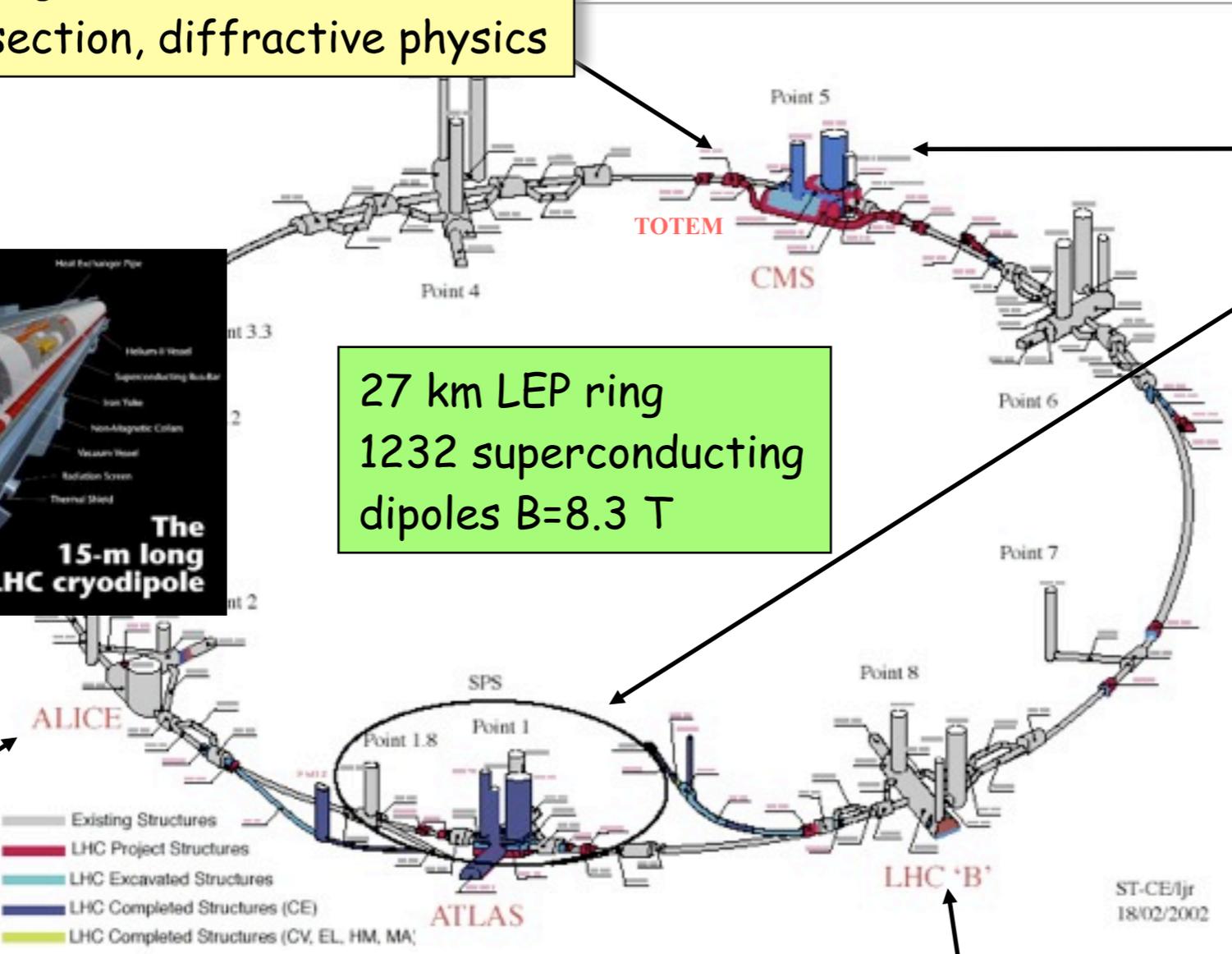
- pp $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ $L_{\text{design}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (after 2013)
- $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ $L_{\text{initial}} \sim 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2010-2012)
- Heavy ions (e.g. Pb-Pb at $\sqrt{s} \sim 1000 \text{ TeV}$)

TOTEM (integrated with CMS):
pp, cross-section, diffractive physics

ATLAS and CMS :
general purpose



27 km LEP ring
1232 superconducting
dipoles $B=8.3 \text{ T}$



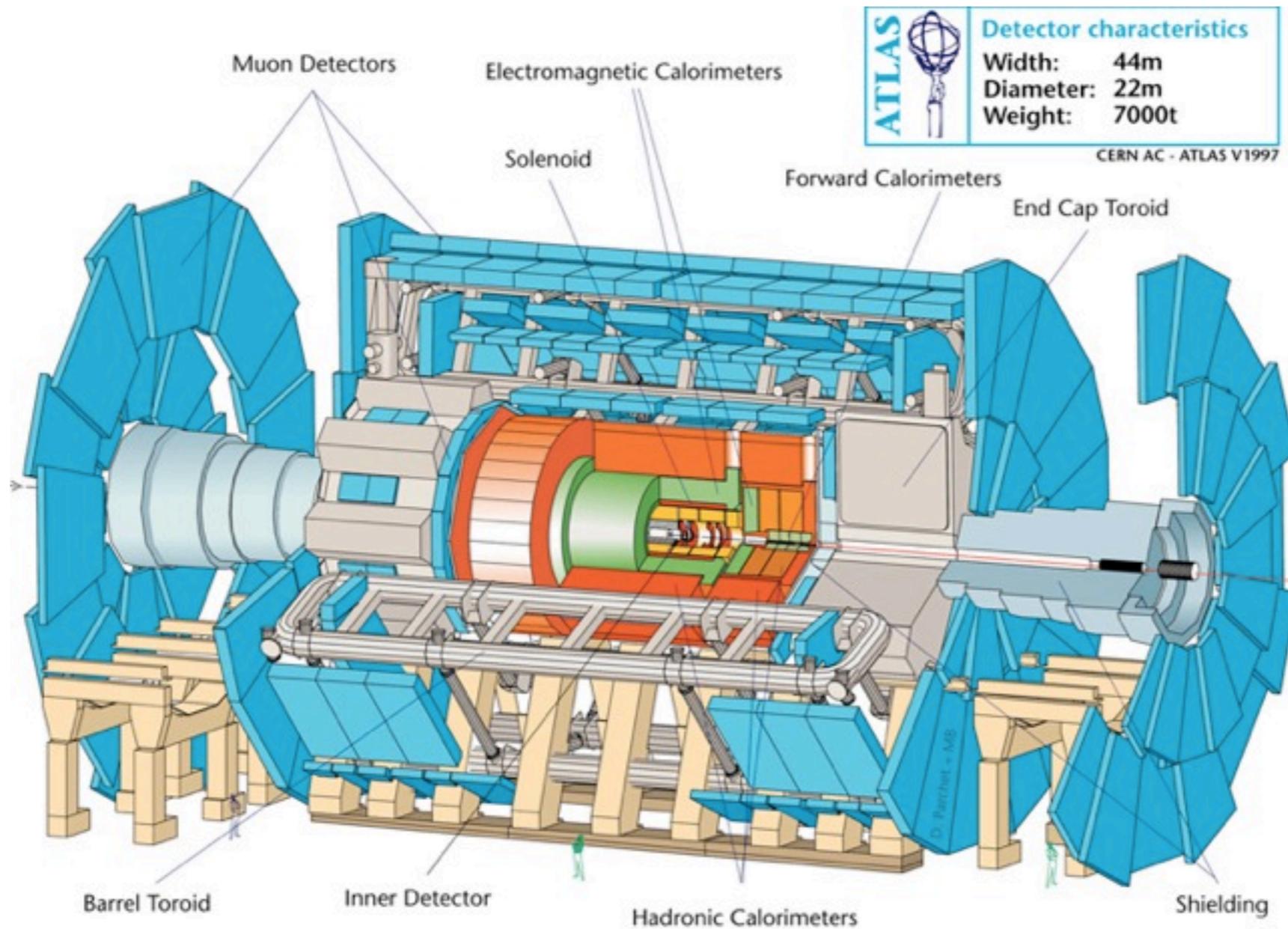
ALICE :
ion-ion,
p-ion

Here:
ATLAS and CMS

LHCb :
pp, B-physics, CP-violation

ATLAS

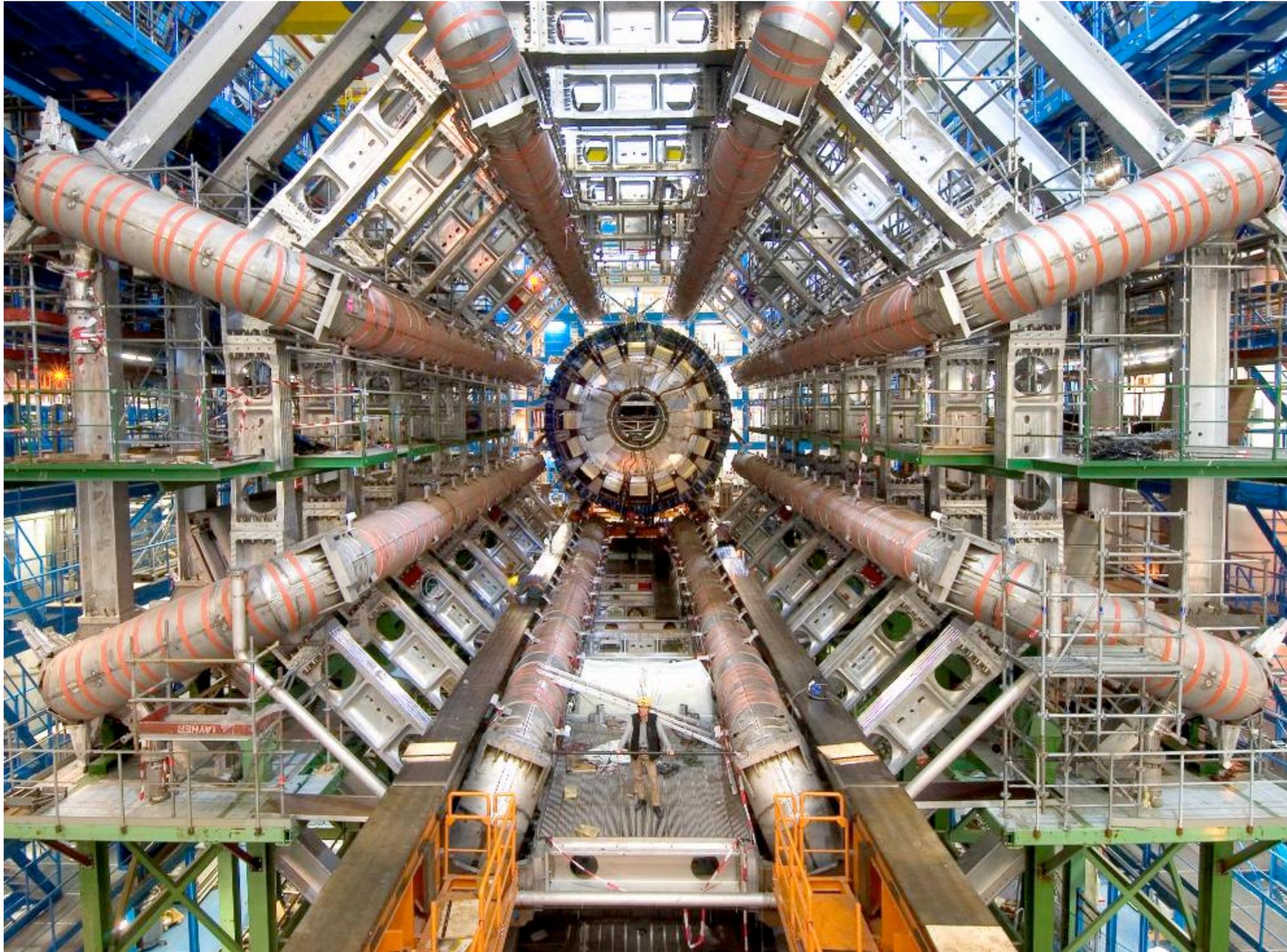
cerca **Higgs**, supersimmetria, modelli di nuova fisica



diametro: 22 m
lunghezza: 44 m
lunghezza del magnete: 26 m
peso: 7.000 t

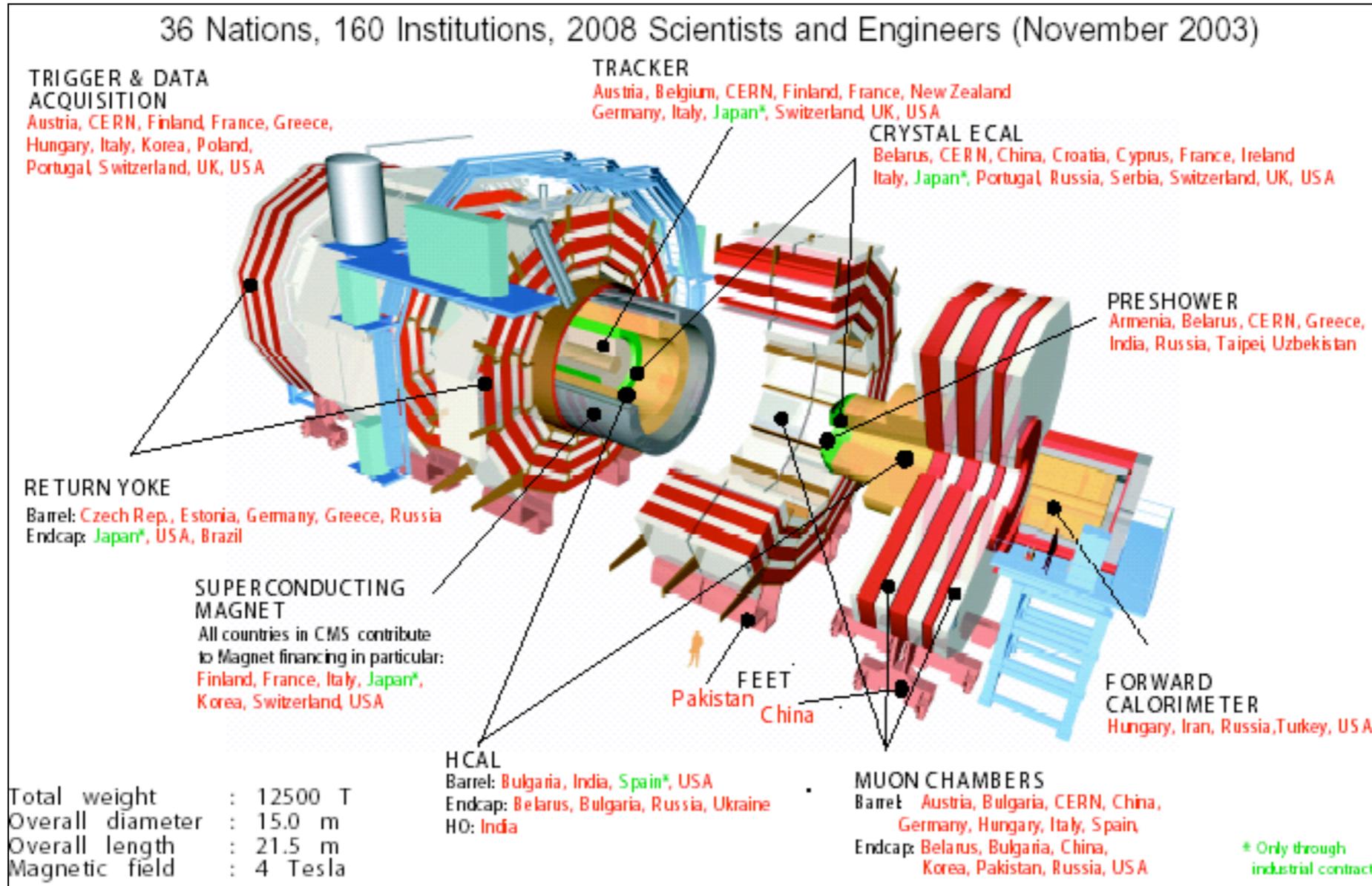
circa 3.000 fisici
di 174 istituti
di 38 nazioni

Il magnete di ATLAS





cerca Higgs, supersimmetria, modelli di nuova fisica



diametro: 15 m
lunghezza: 21,5 m
peso: 12.500 t

circa 2.600 fisici
di 172 istituti
di 39 nazioni



giugno 2008 - la costruzione di CMS



tecnici al lavoro sull'endcap di CMS

tecnici al lavoro sul tracker di CMS

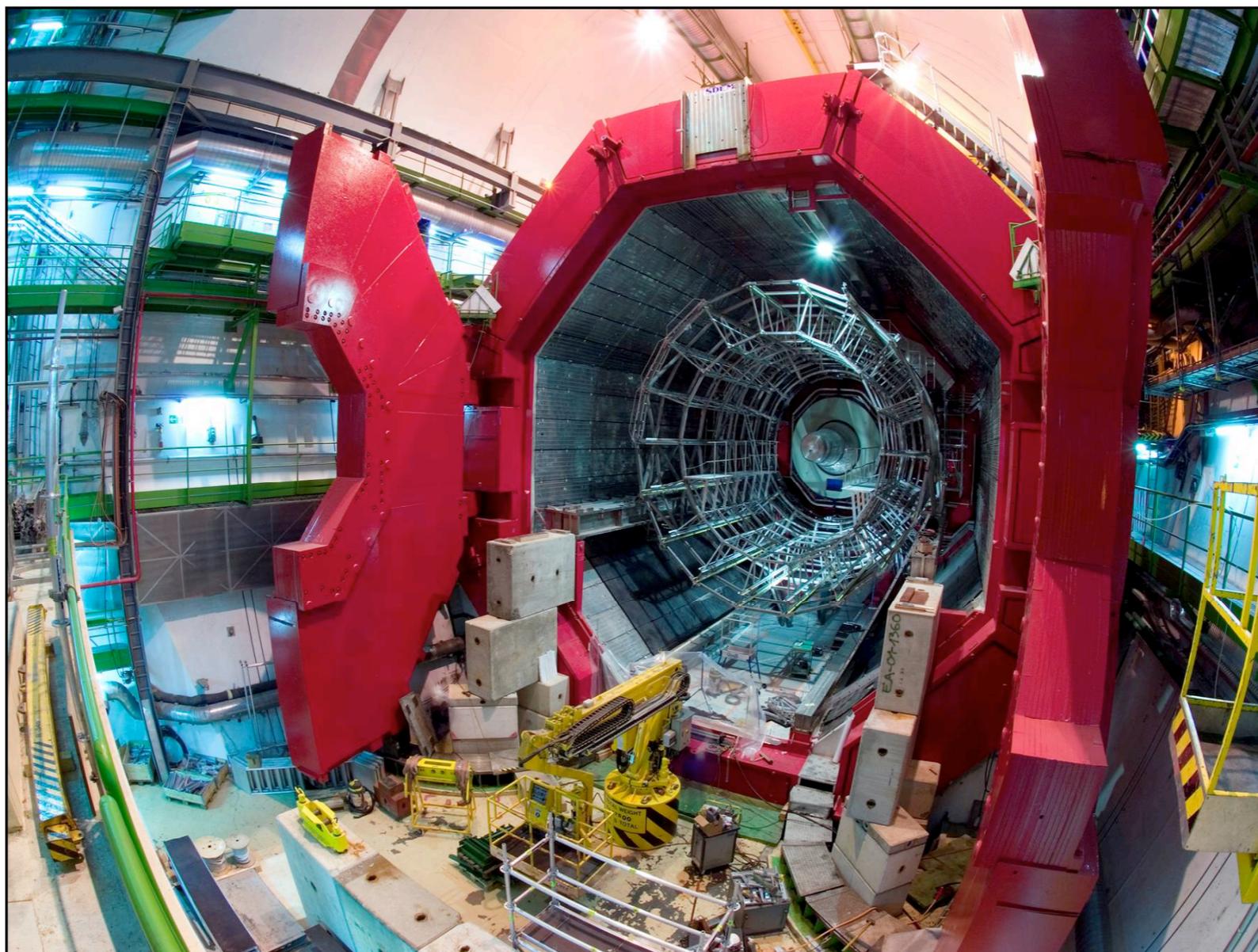




la control room di CMS

ALICE

cerca il plasma primordiale di quark e gluoni

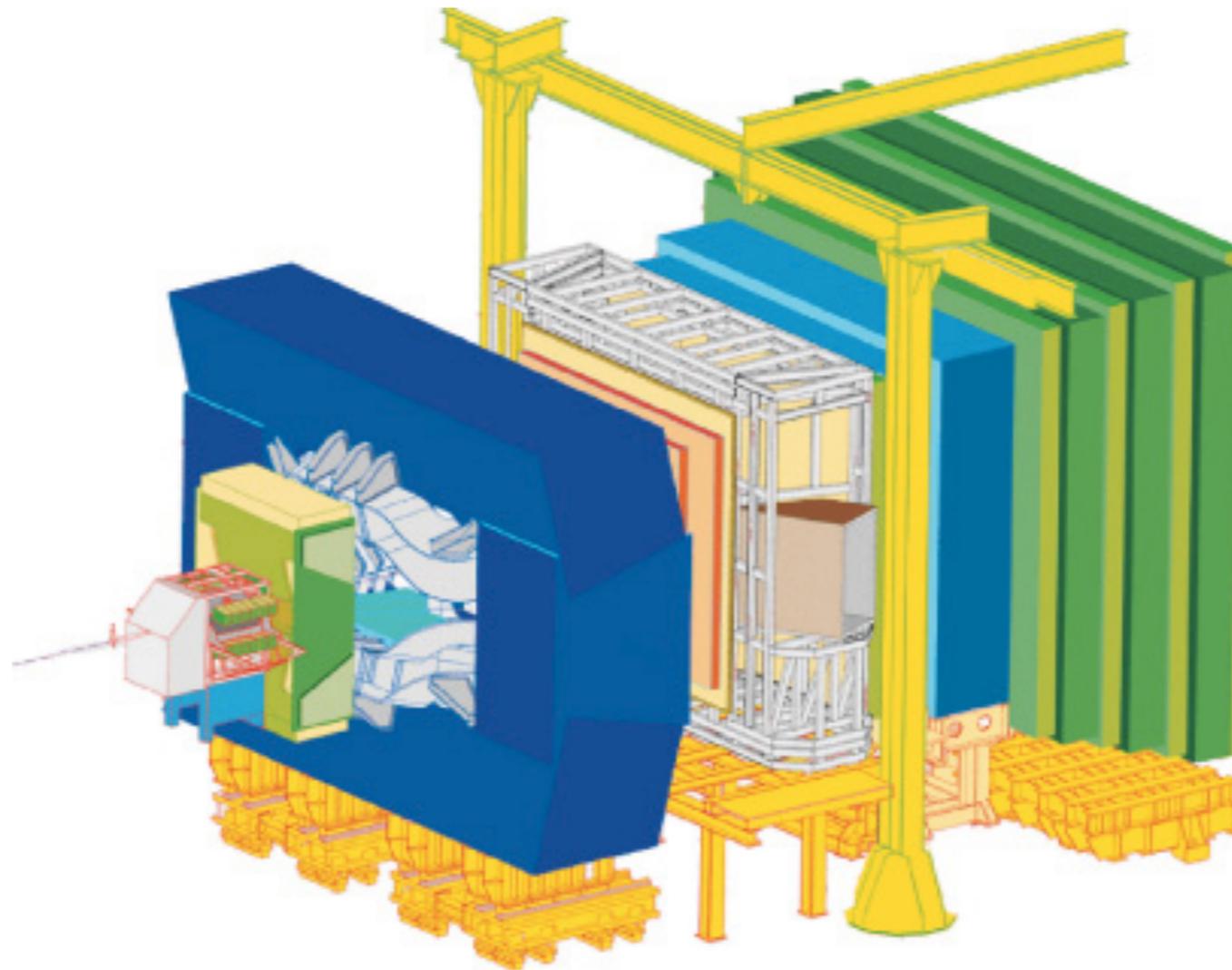


diametro: 16 m
lunghezza: 26 m
peso: 10.000 t

circa 1.000 fisici
di 116 istituti
di 33 nazioni

LHCb

esplora l'asimmetria tra materia e antimateria



lunghezza:	21 m
larghezza:	13 m
altezza:	10 m
peso:	5.600 t

circa 700 fisici
di 52 istituti

Luminosità

- Sezione d'urto = una misura dell'interazione tra 2 particelle

ha una chiara interpretazione geometrica: una palla di cannone, di raggio R , in avvicinamento ha una sezione d'urto pari a πR^2

- in fisica dello scattering, la sezione d'urto σ è data da

$I_{r(i)}$ = numero di particelle diffuse (incidenti) per unità di tempo

N = numero di particelle per unità di area

$$I_r = I_i N \sigma$$

σ si misura in barn $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$; $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$; $1 \text{ fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$

- Luminosità = numero di particelle per unità di area e di tempo

$$L = I_i N$$

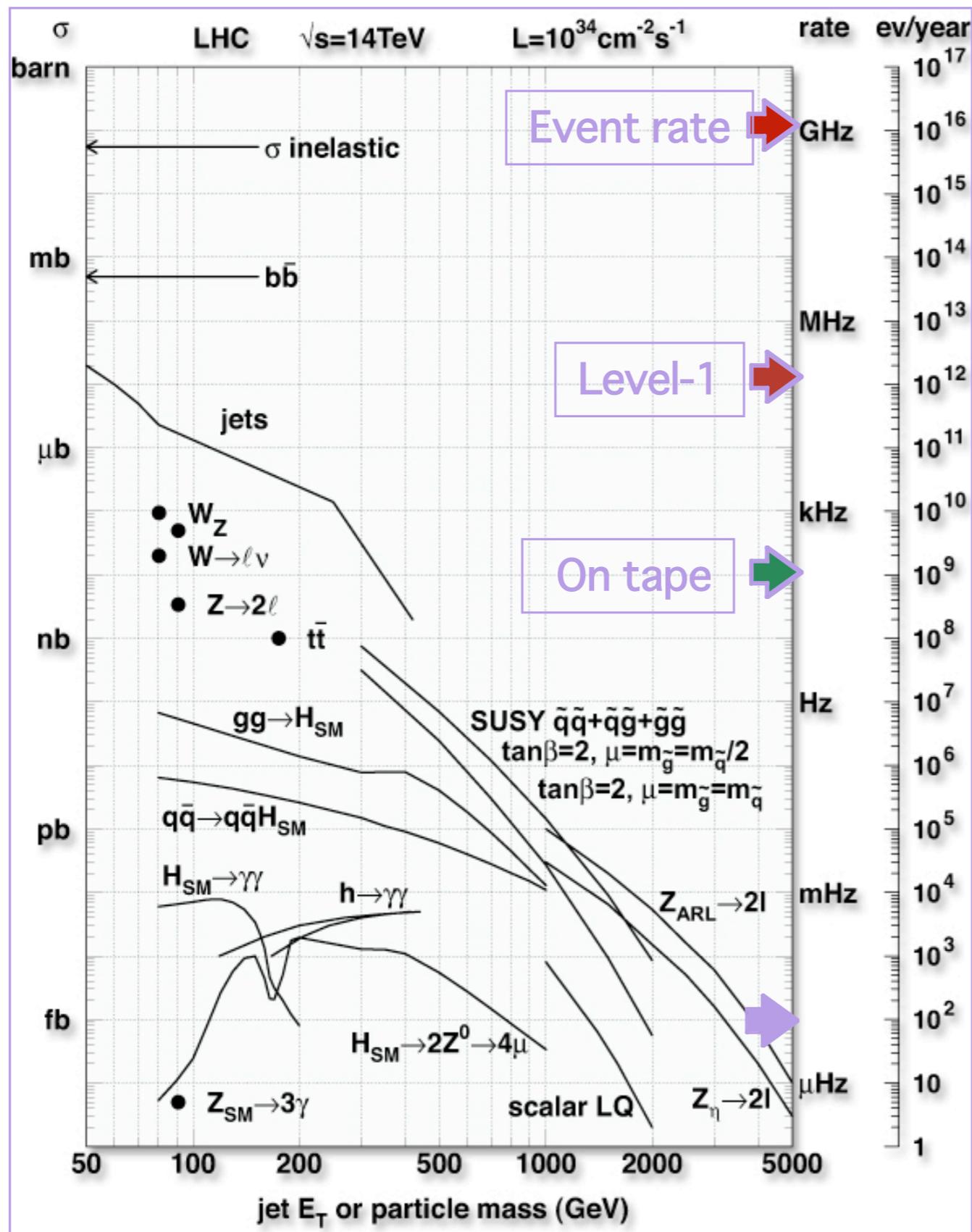
è una misura della performance dell'acceleratore

si misura in $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- ora a **LHC** la luminosità è circa $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{-6} \text{ fb}^{-1} \text{ s}^{-1}$

si usa la luminosità integrata su un intervallo di tempo come misura della quantità delle collisioni avvenute

LHC all'energia e luminosità di progetto



luminosità

$$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{-5} \text{ fb}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

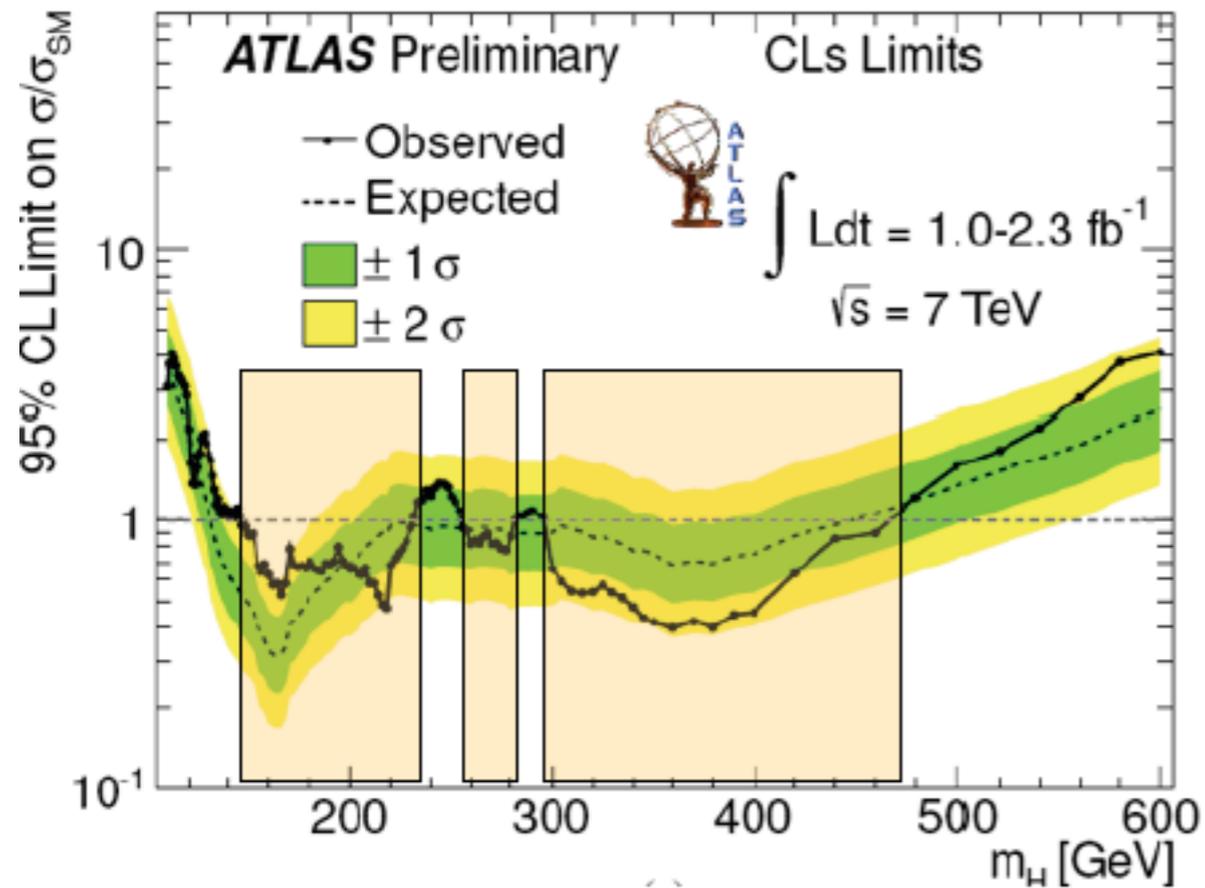
luminosità per anno

$$L \approx 100 \text{ fb}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

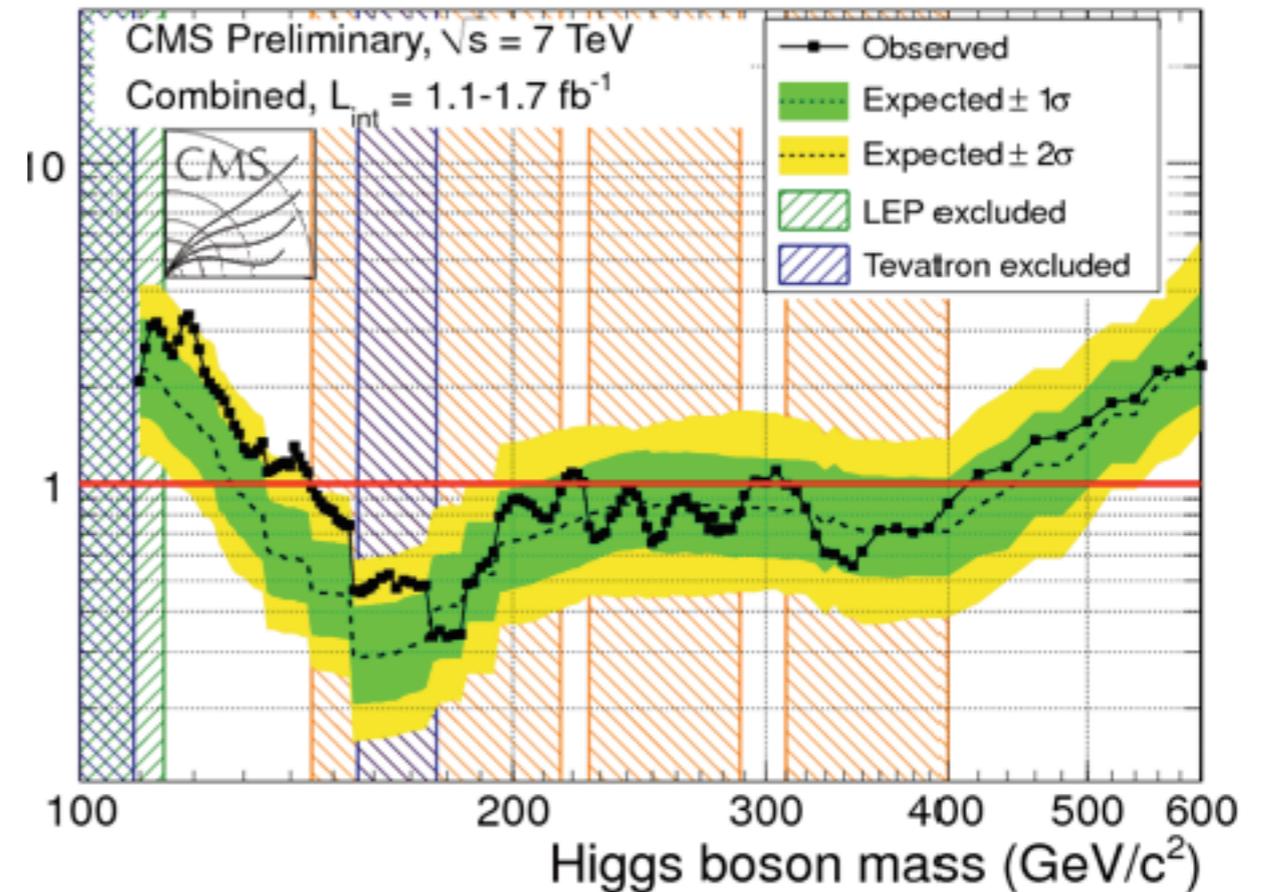
- Perché **LHC** ha bisogno di tanti protoni e tante collisioni ?
- Per cercare degli eventi molto rari!
- La luminosità integrata attuale è $\sim 4.4 \text{ fb}^{-1}$
- Il bosone di **Higgs** è stato escluso da **LEP** alla fine anni '90 fino a $m_H = 115 \text{ GeV}$
- Il bosone di **Higgs** è stato escluso da **LHC** nel range di masse $145 \text{ GeV} < m_H < 450 \text{ GeV}$
- Per escludere il bosone di **Higgs** sull'intero range di masse sono necessari $\sim 5\text{-}6 \text{ fb}^{-1}$
- Per scoprire il bosone di **Higgs**, se c'è, sono necessari $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$
- Per analizzare l'**EW**SB, sono necessari almeno $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$

Grafici di Esclusione del Bosone di Higgs

ATLAS-CONF-2011-135



CMS-PAS-HIG-11-022



- Se il bosone di **Higgs** non c'è, sarà comunque possibile esplorare la regione di massa $100 \text{ GeV} < m < 1.000 \text{ GeV}$, dove ci aspettiamo di trovare suggerimenti sulla natura dell'**EW**SB
- Ci troviamo solo all'inizio di una grande impresa, l'esperimento più grande mai concepito in fisica delle particelle