

Il Large Hadron Collider



Vittorio Del Duca
INFN LNF

Stages Estivi

15 giugno 2012

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*

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 ...



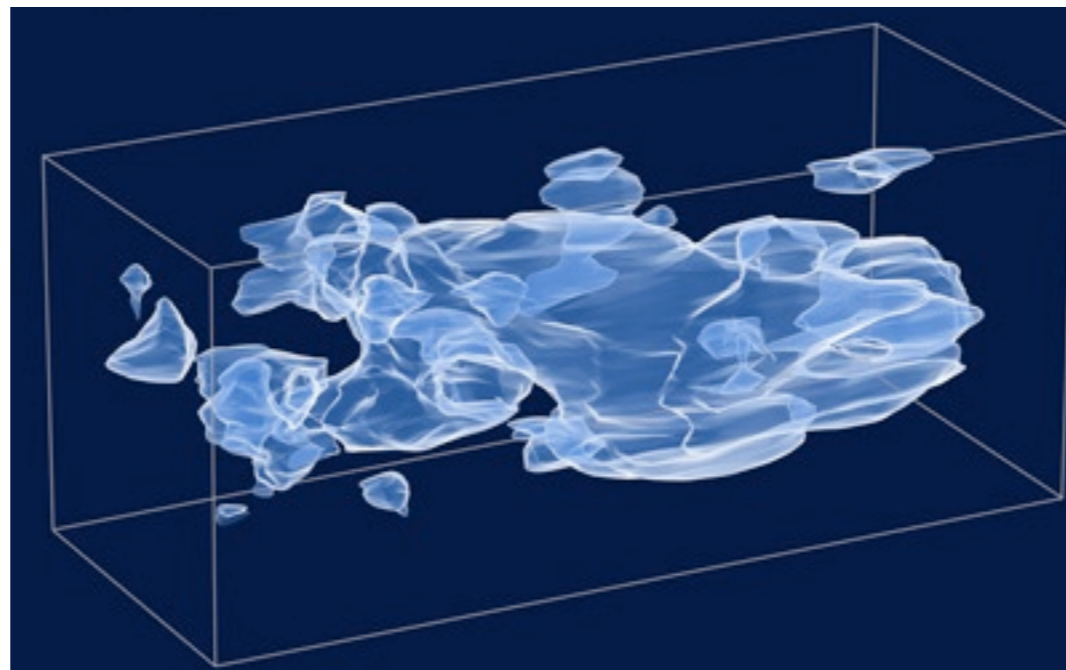
Peter Higgs
Edimburgo, dicembre '08

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

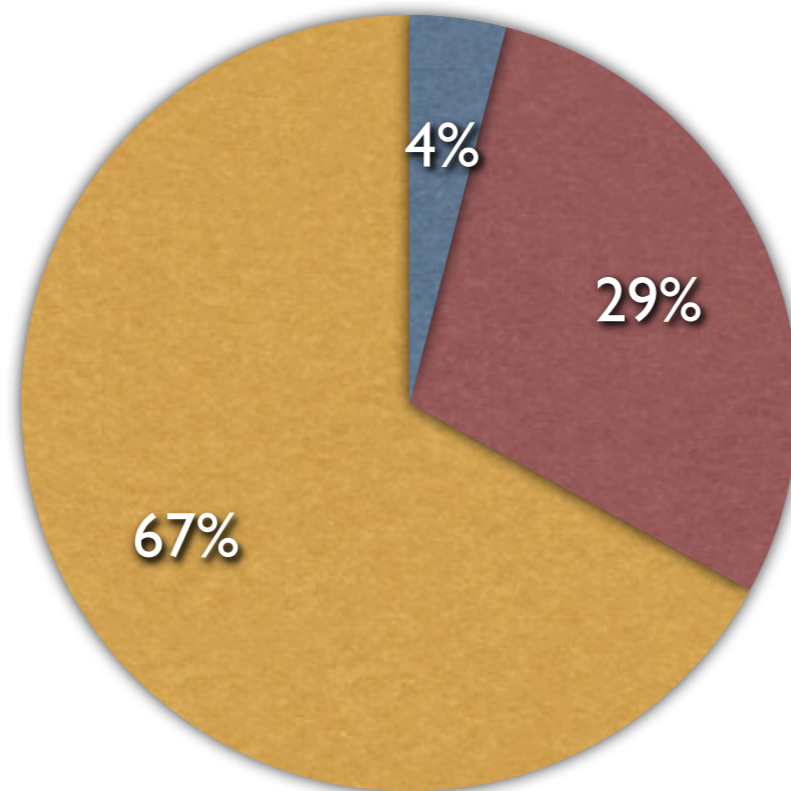
La distribuzione di materia oscura nell'Universo da una mappatura del Hubble Space Telescope fatta col gravitational lensing



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 29% è materia oscura
- Circa il 67% è energia oscura

● materia ordinaria ● materia oscura ● 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

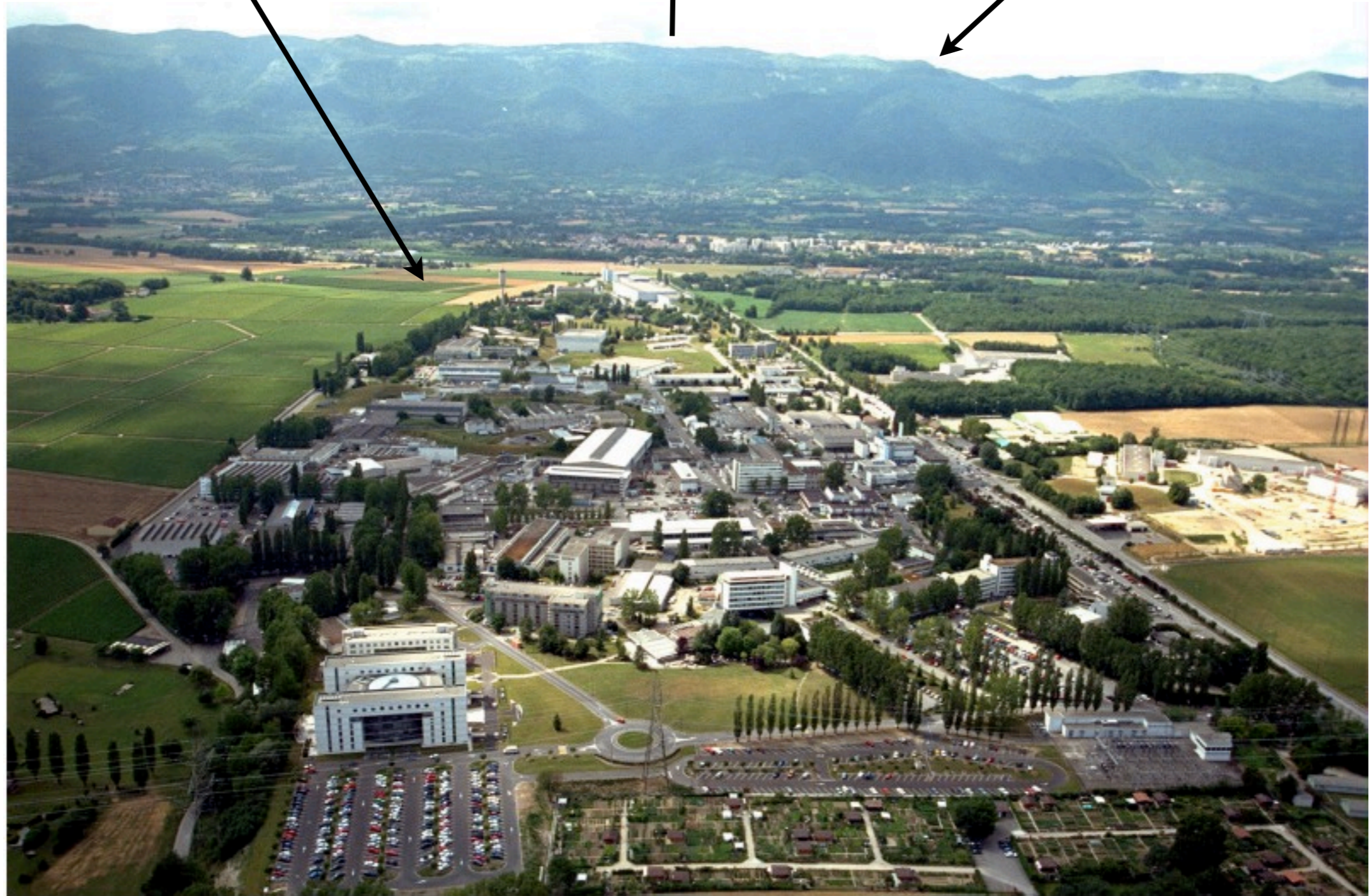


- Il **L**arge **H**adron **C**ollider è un acceleratore e collisore di protoni
- È un tunnel a forma di anello (formato da 8 archi connessi da 8 piccole sezioni diritte) di 26,6 Km di circonferenza e 3,8 m di diametro
- È situato al CERN, a una profondità tra 50 e 175 m sotto la frontiera tra Francia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

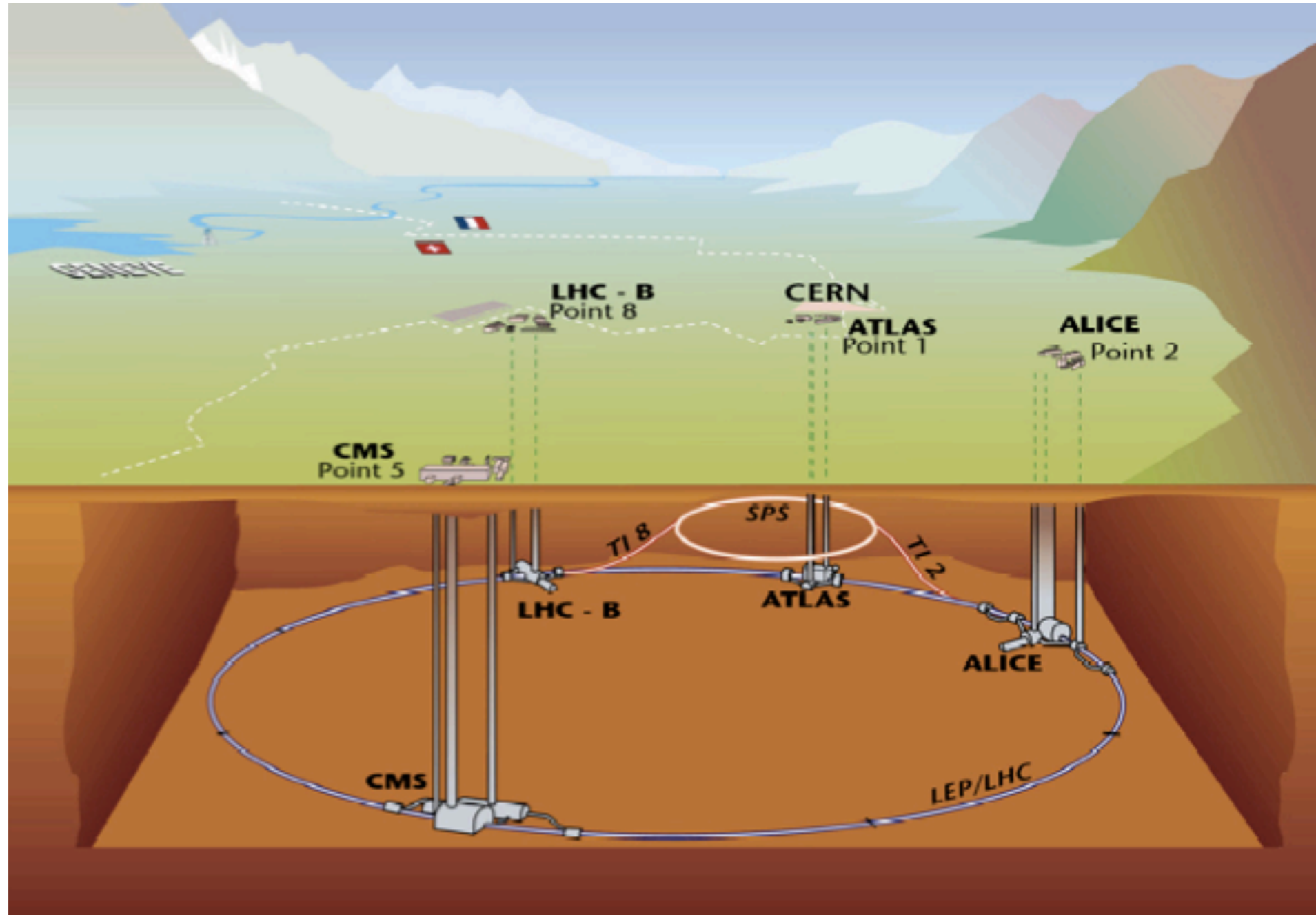
il CERN

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, l'energia di ciascun protone sarà di 7.000 GeV (ora è 4.000 GeV)
- A regime, i protoni avranno una velocità di 299.792.455 m/s, pari a $0,99999999910 \times$ 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 299.792.450 m/s, pari a $0,99999999725 \times c$)

Provate a vedere quanta energia ci vuole ad aggiungere un 9 alla velocità dei protoni relativa a quella della luce, cioè incrementare di 0,000000008 la velocità relativa ...

Energie Relativistiche

● 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 $m = 1,672621637(83) \times 10^{-27} \text{ kg} = 0,938272013(23) \text{ GeV}/c^2$

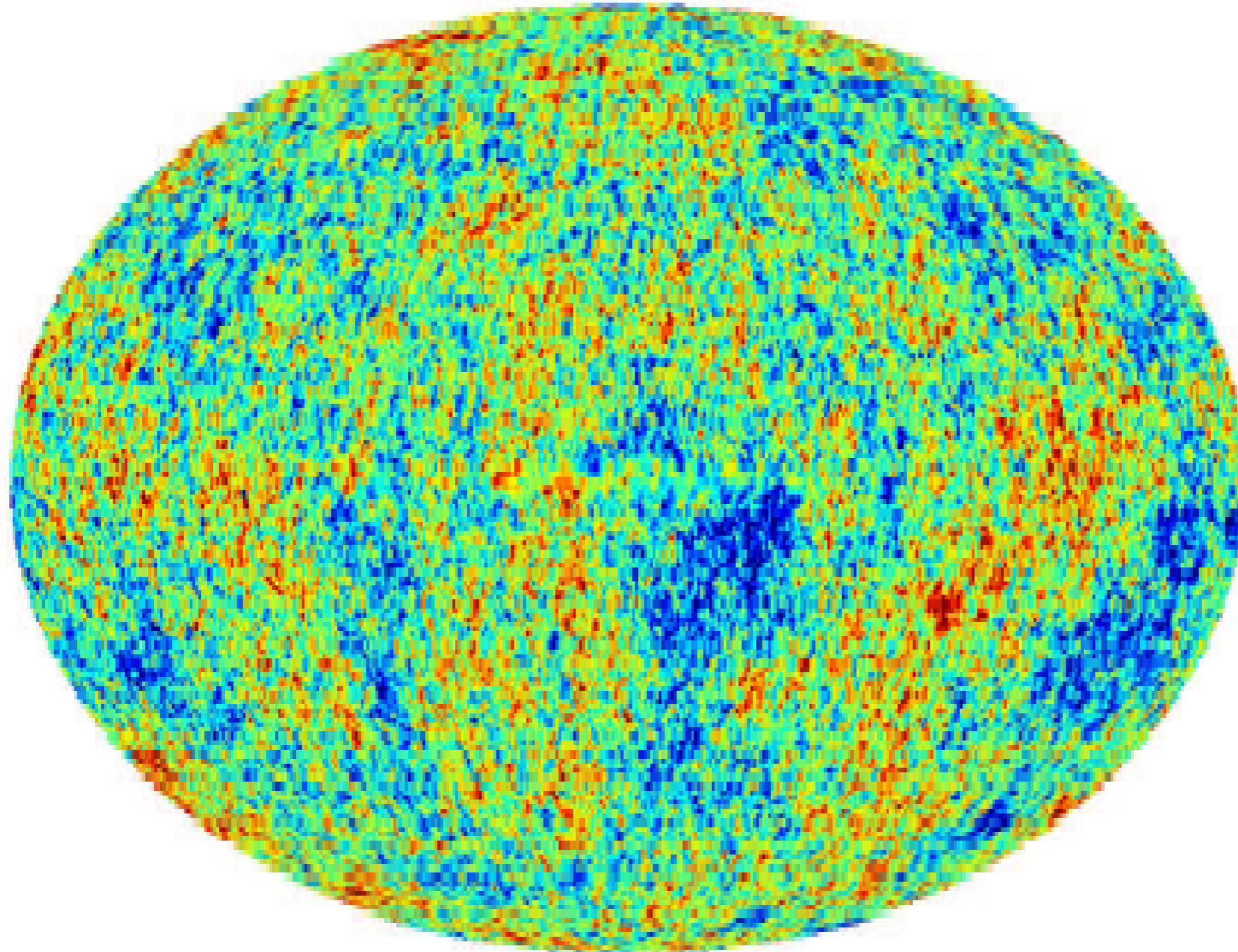
$1 \text{ eV} = 1,602176565(35) \times 10^{-19} \text{ J}$

● 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

Magneti Superconduttori

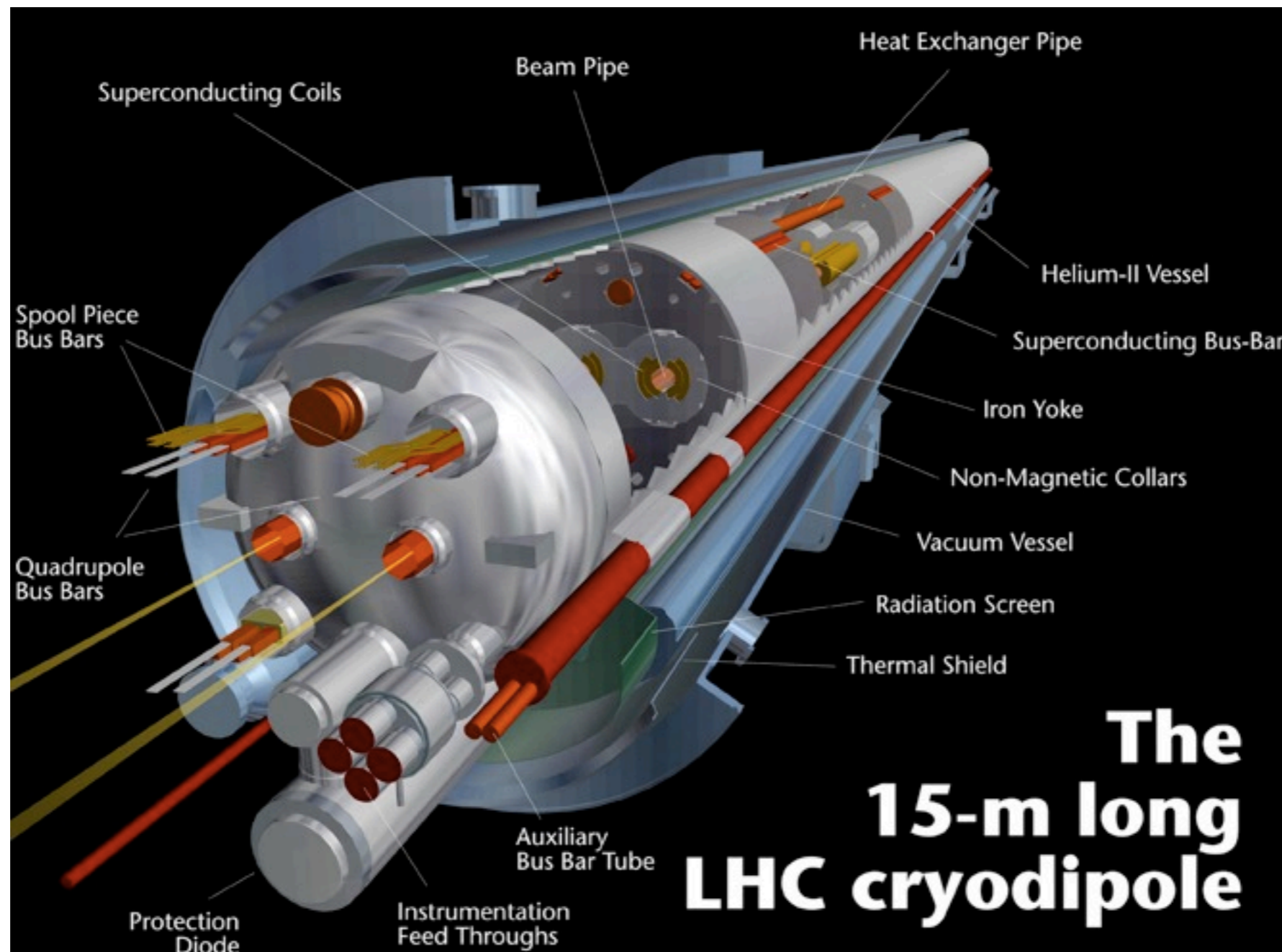
- Lasciato per i fatti suoi, un protone se ne va dritto ... ma ha una carica elettrica, e la sua traiettoria curva quando passa in un campo magnetico
- Il protone allora emette radiazione, e perde energia
- Per tenere i protoni sulla traiettoria (+ o -) circolare dell'anello di LHC, s'usano 1.232 bobine 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 = $-271,3\text{ C}$

Cosmic Microwave Background



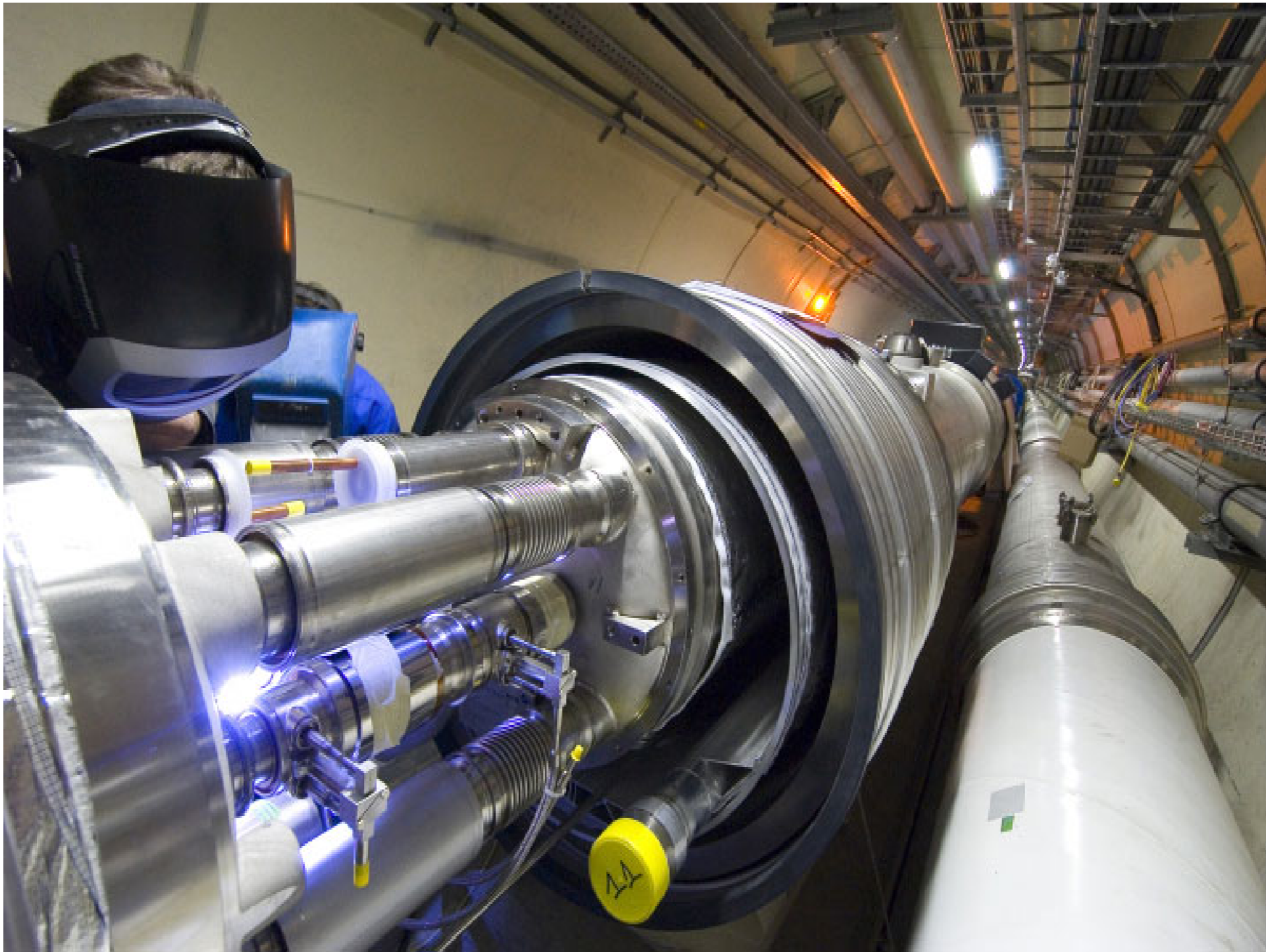
la temperatura della radiazione a micro-onde
del fondo cosmico è di 2,7 K

bobina magnetica



corrente $i = 12.000 \text{ A}$

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

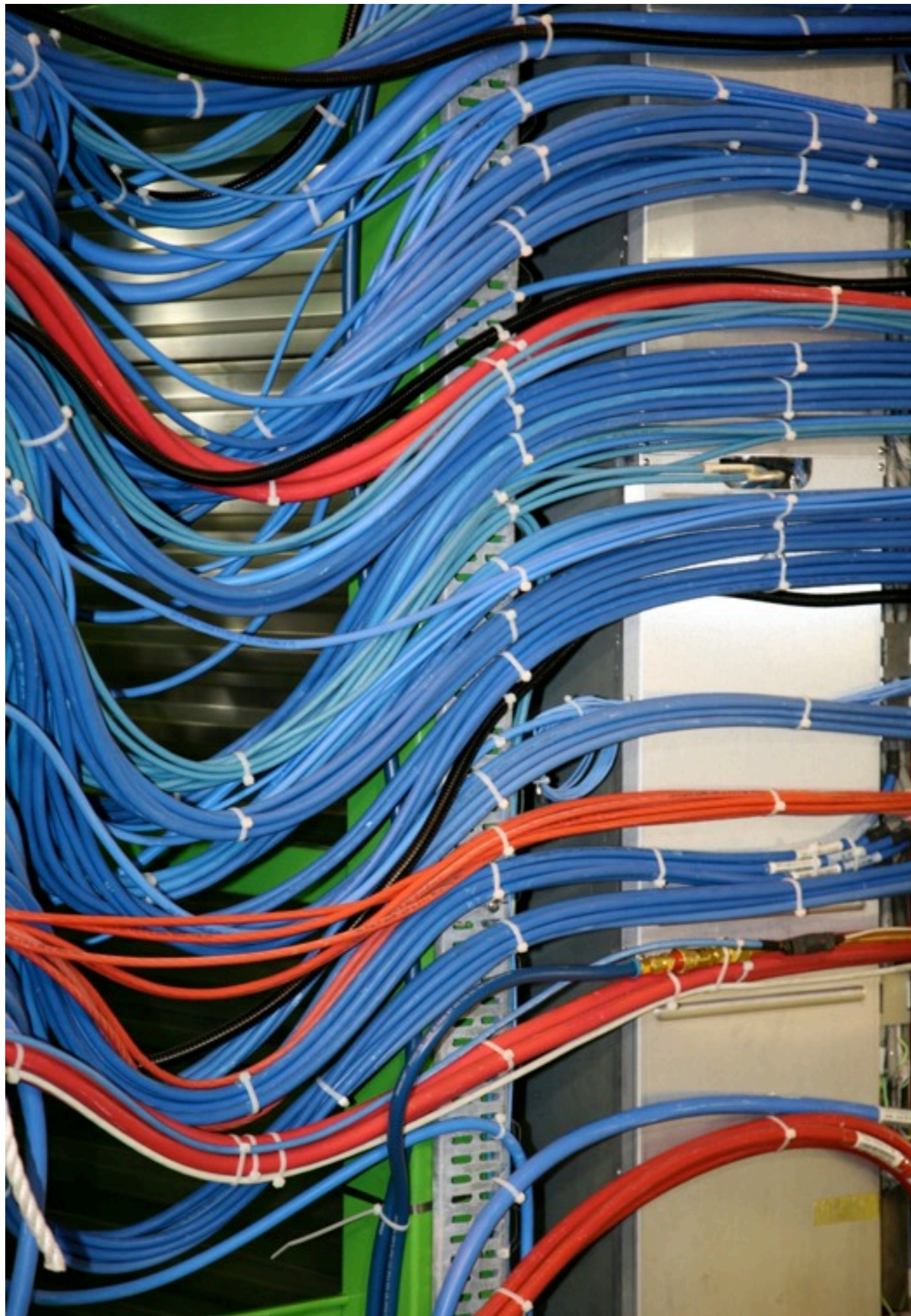


Punti d'Interazione

- 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

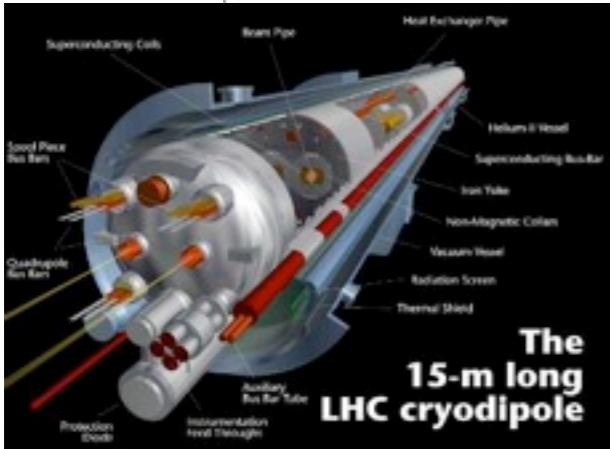
I 4 esperimenti,
ALICE, **ATLAS**, **CMS**, **LHCb**
e i loro rivelatori

LHC

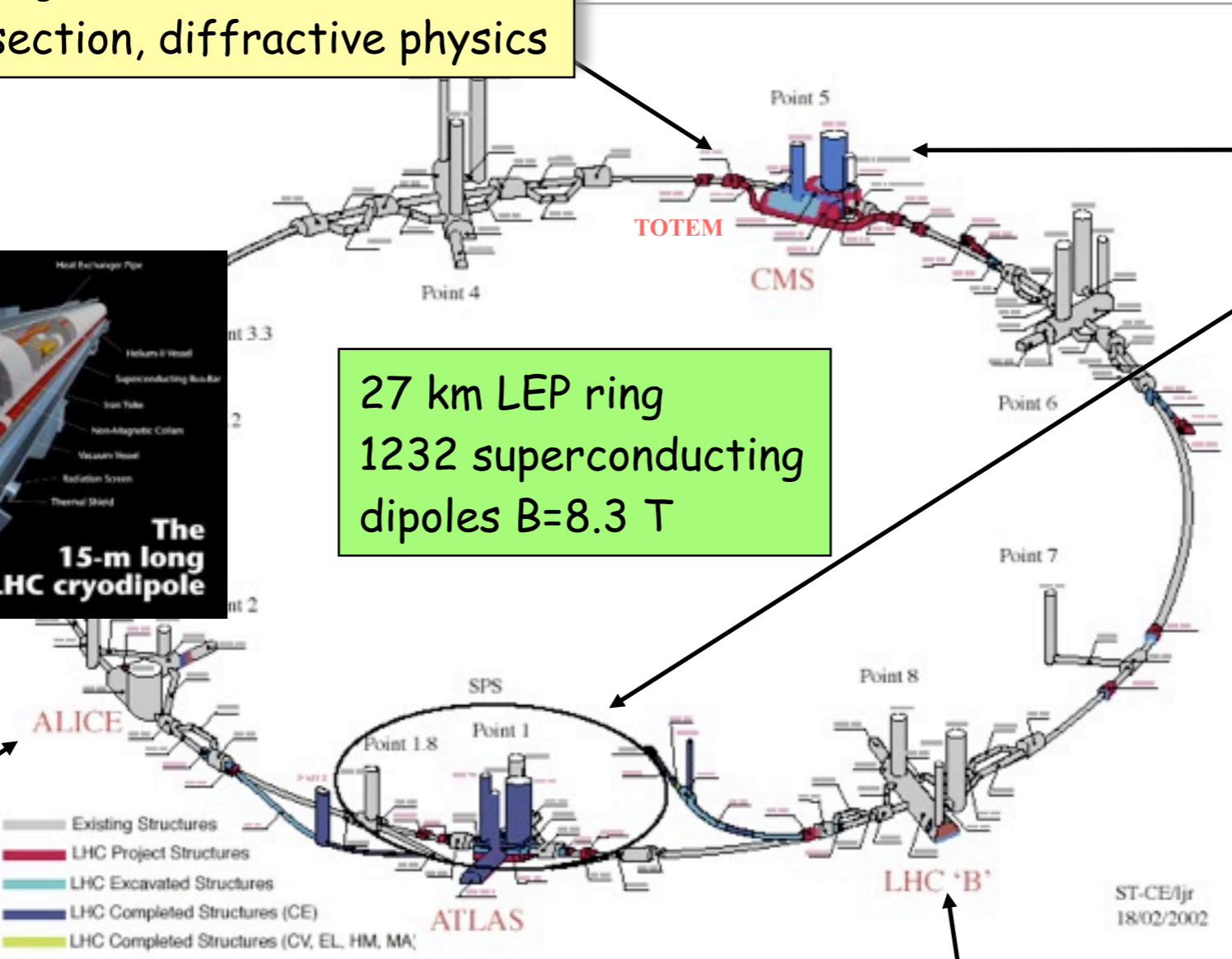
- pp $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ $L_{\text{design}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (after 2014)
 $\sqrt{s} = 7\text{-}8 \text{ TeV}$ $L_{\text{initial}} \sim 5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2010-2012)
- Heavy ions (e.g. Pb-Pb at $\sqrt{s} \sim 1000 \text{ TeV}$)

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

ATLAS and CMS :
general purpose



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



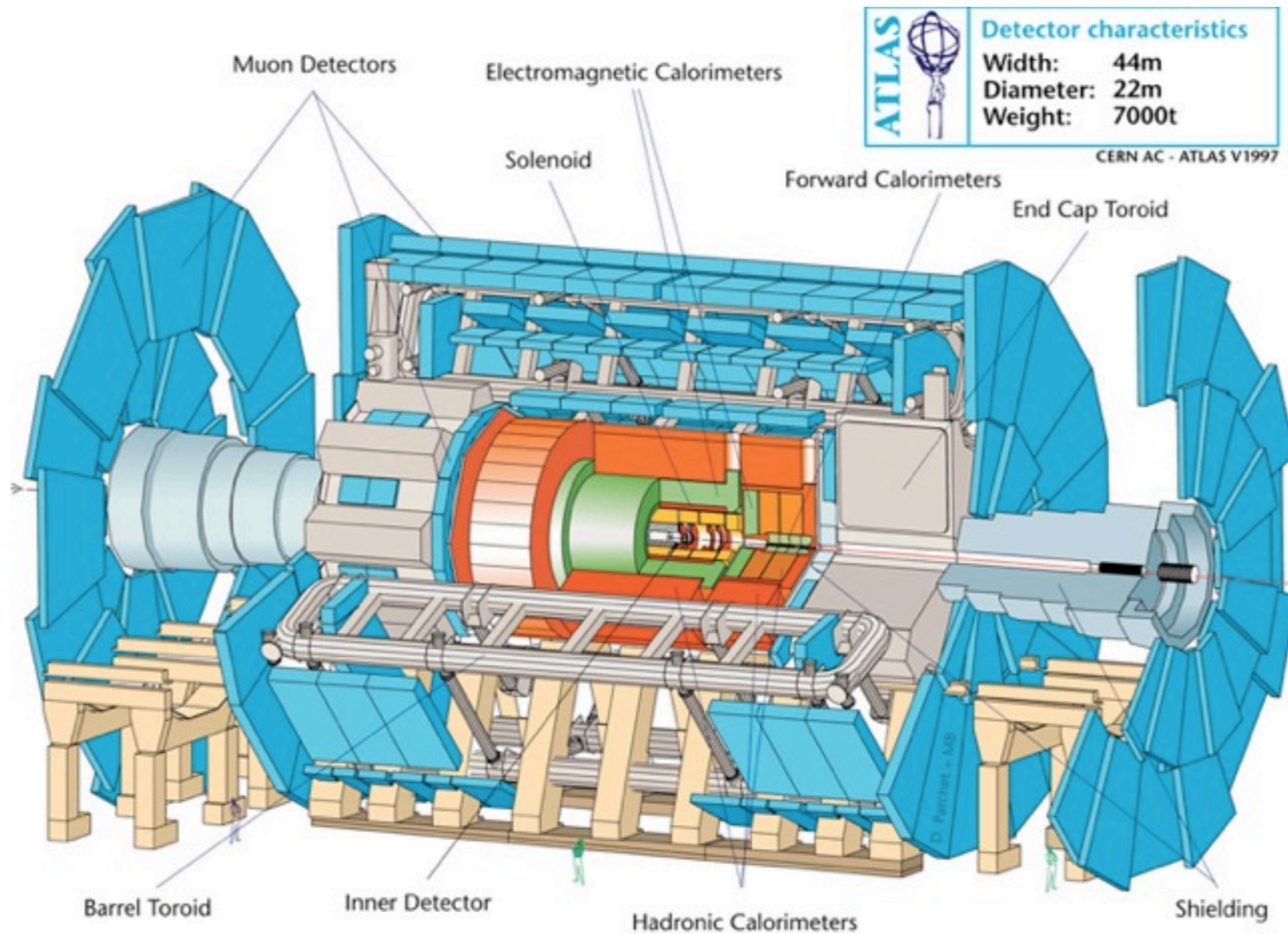
ALICE :
ion-ion,
p-ion

Here:
ATLAS and CMS

LHCb :
pp, B-physics, CP-violation

ATLAS

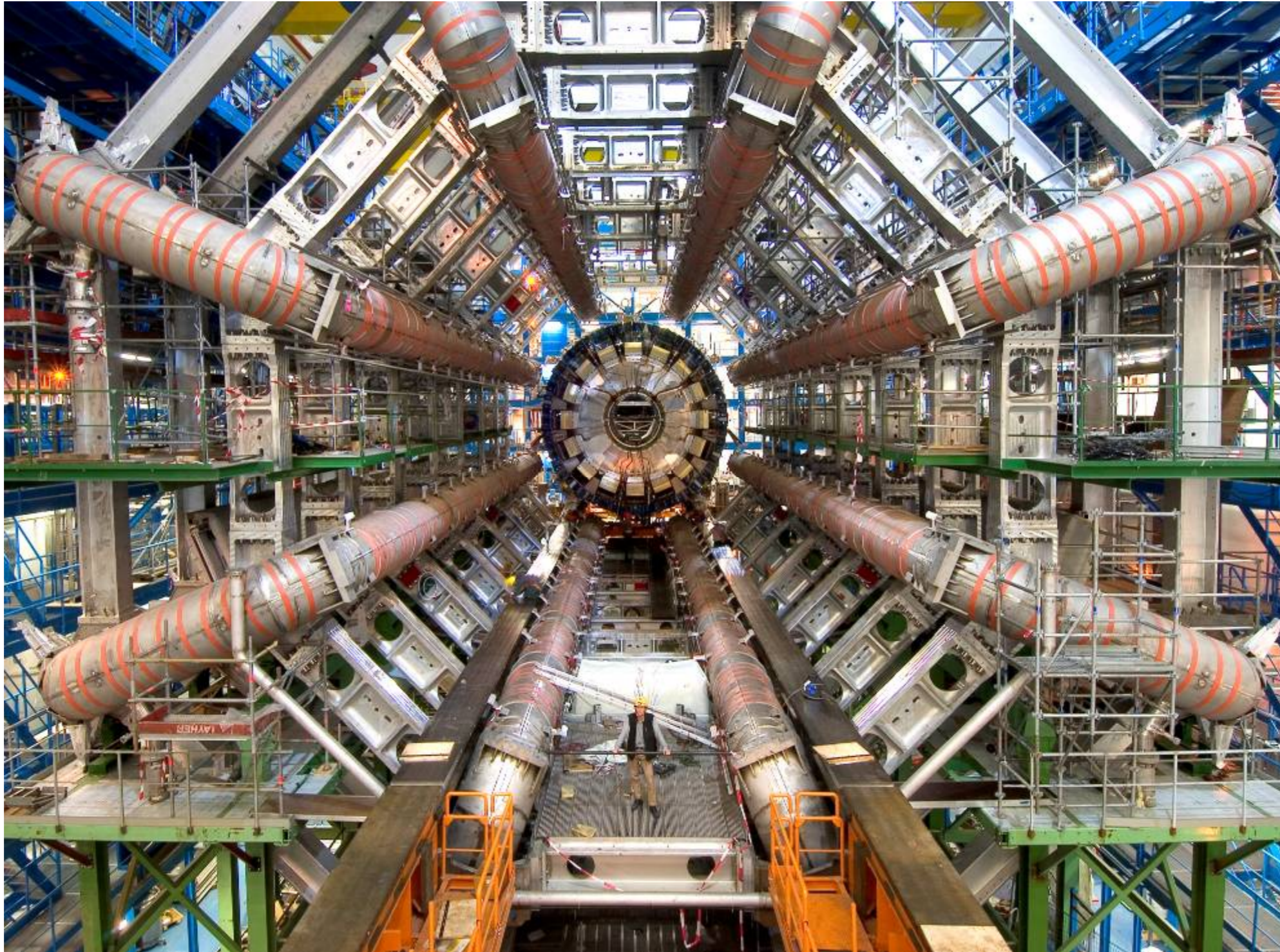
cerca **Higgs**, supersimmetria, modelli di nuova fisica



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

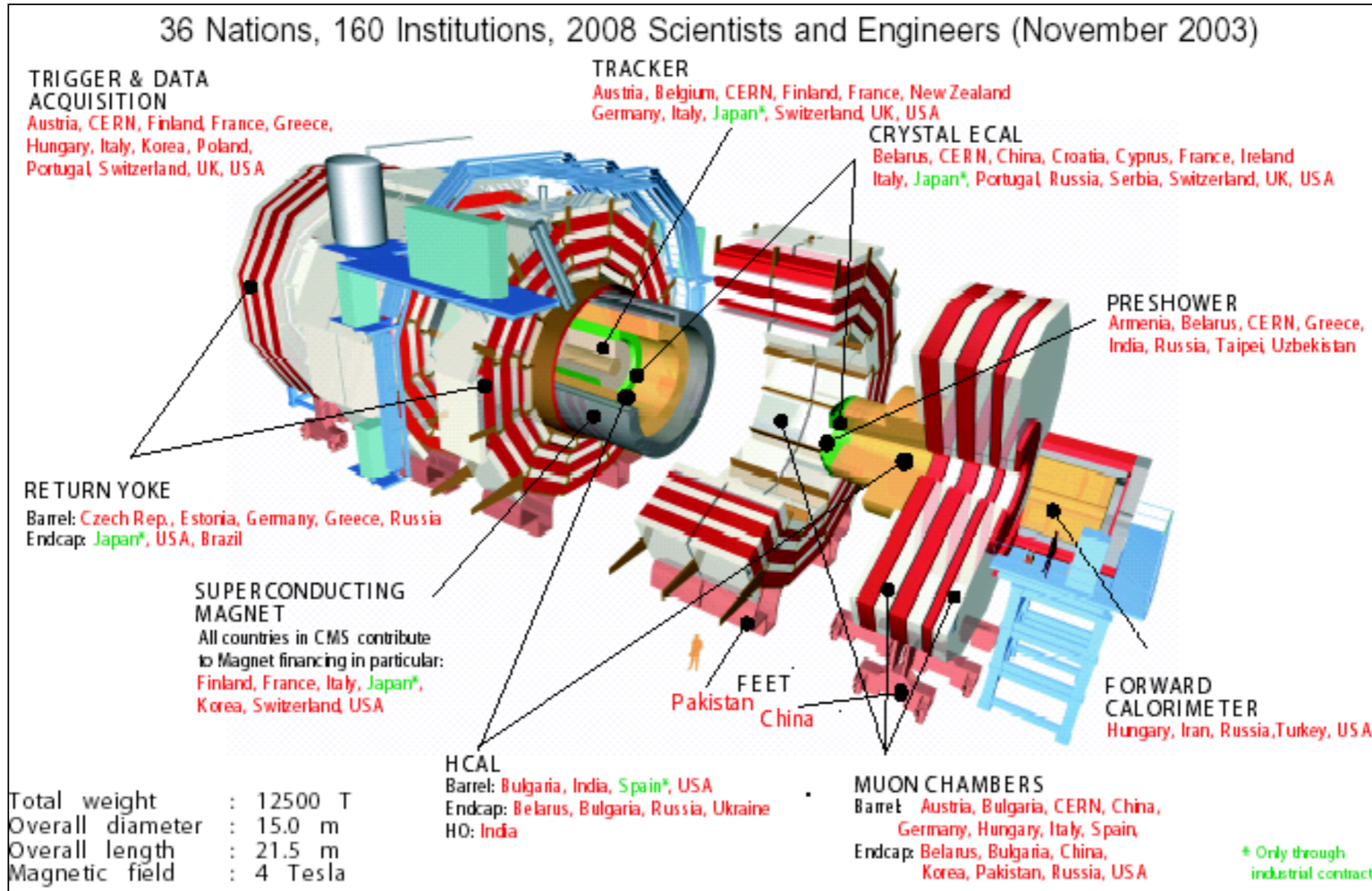
circa 3.000 fisici
di 174 istituti
di 38 nazioni

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



beampipe e tracker di CMS

tecnici al lavoro sul tracker di CMS





endcap di CMS



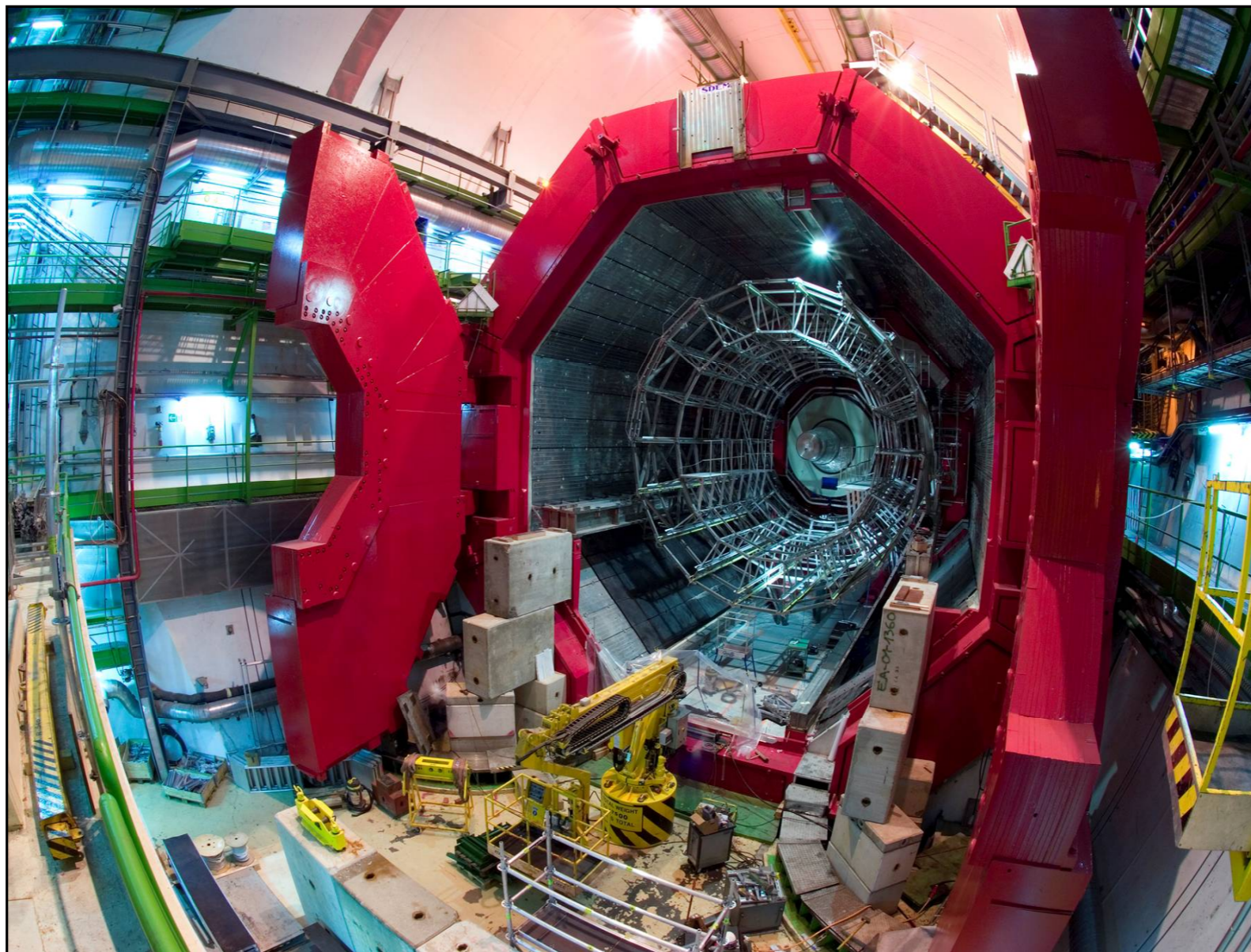
tecnici al lavoro sull'endcap di CMS



la control room di CMS

ALICE

cerca il plasma primordiale di quark e gluoni

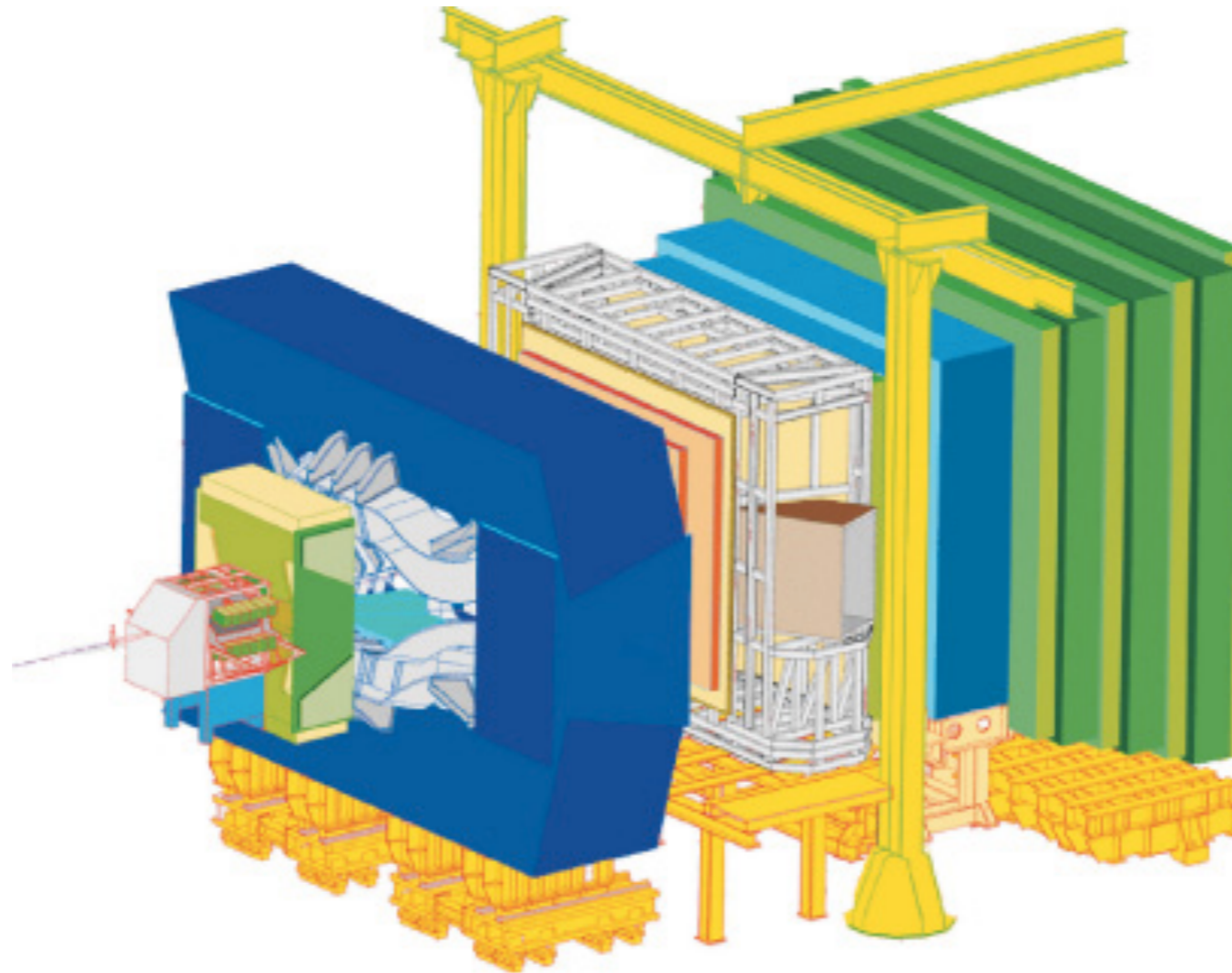


diametro: 16 m
lunghezza: 26 m
peso: 10.000 t

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

$$L = I_i N$$

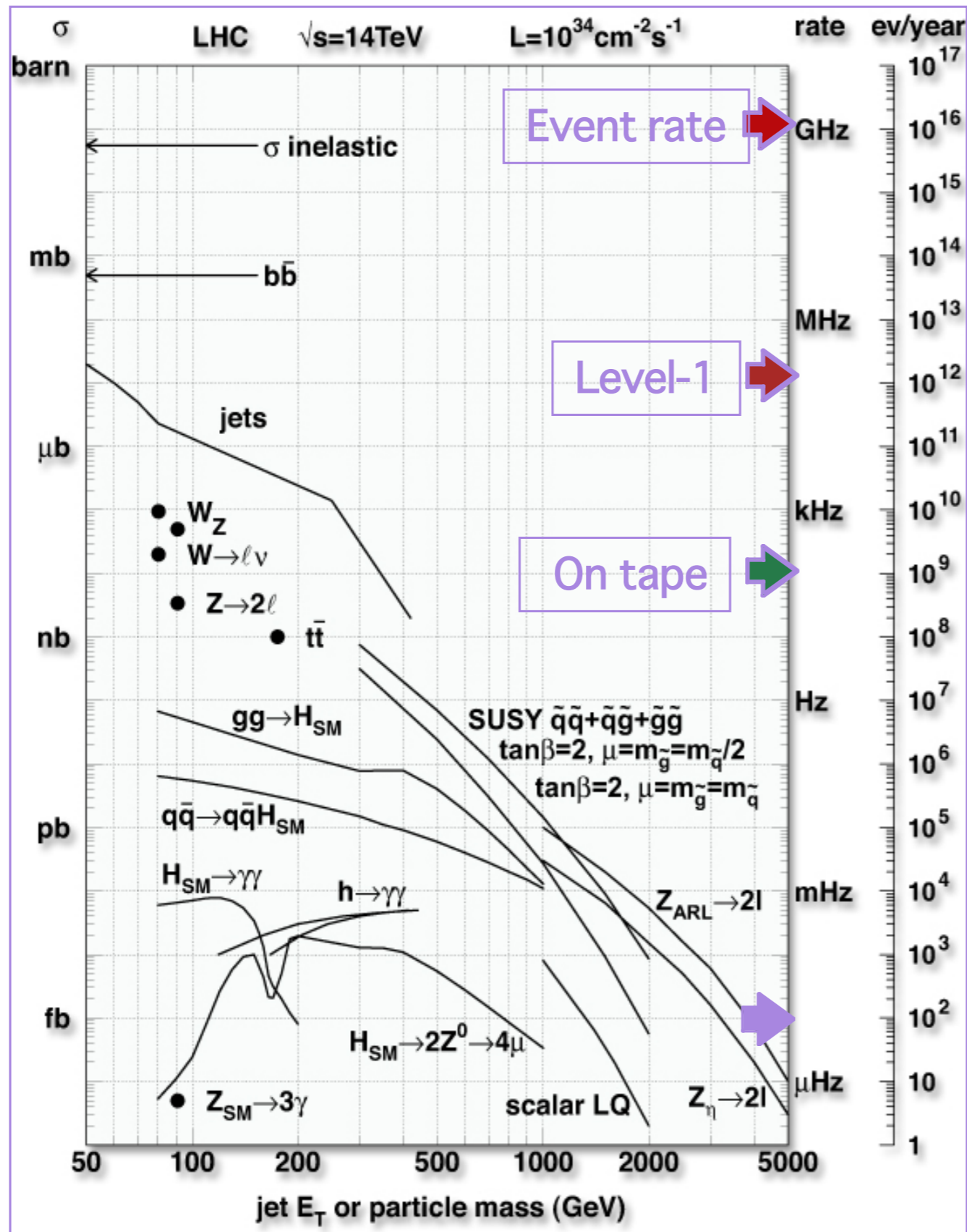
è una misura della performance dell'acceleratore

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

- ora a **LHC** la luminosità è circa $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 5 \times 10^{-6} \text{ fb}^{-1} \text{ s}^{-1}$

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

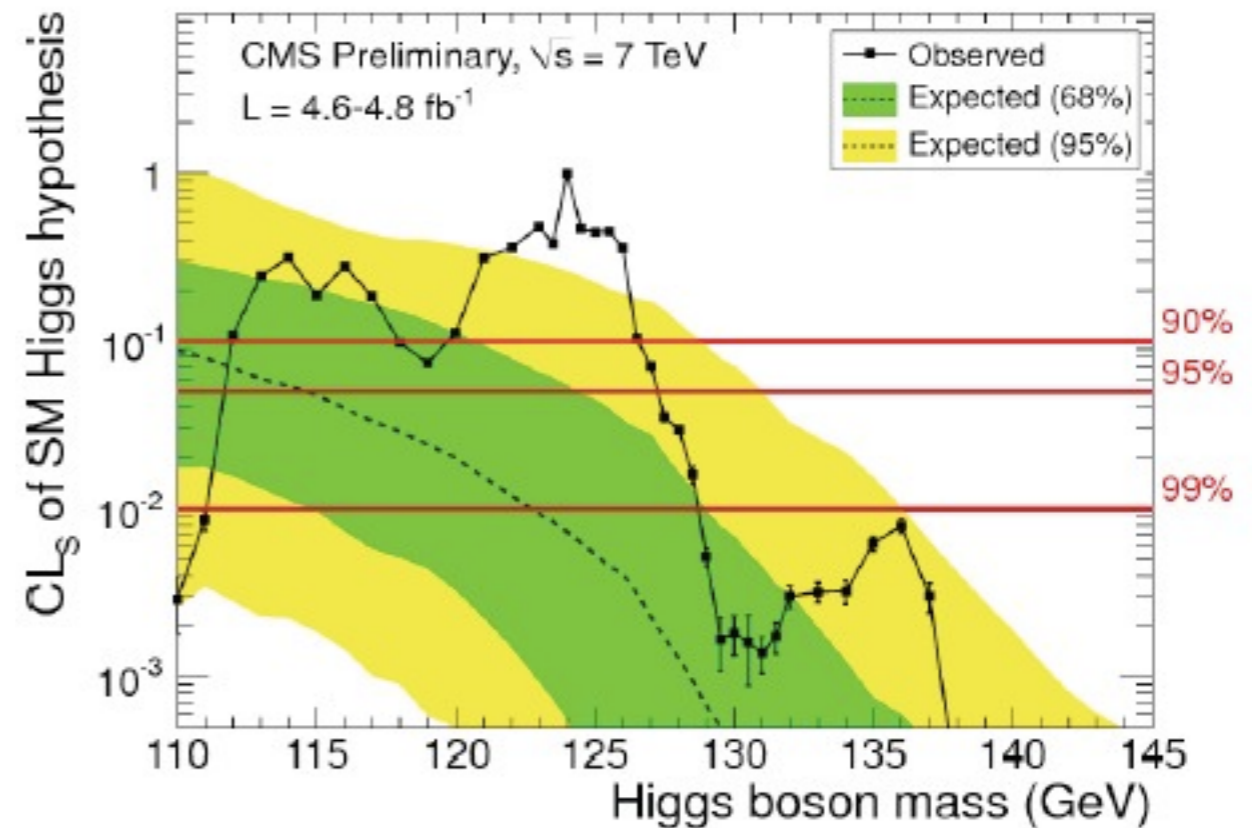
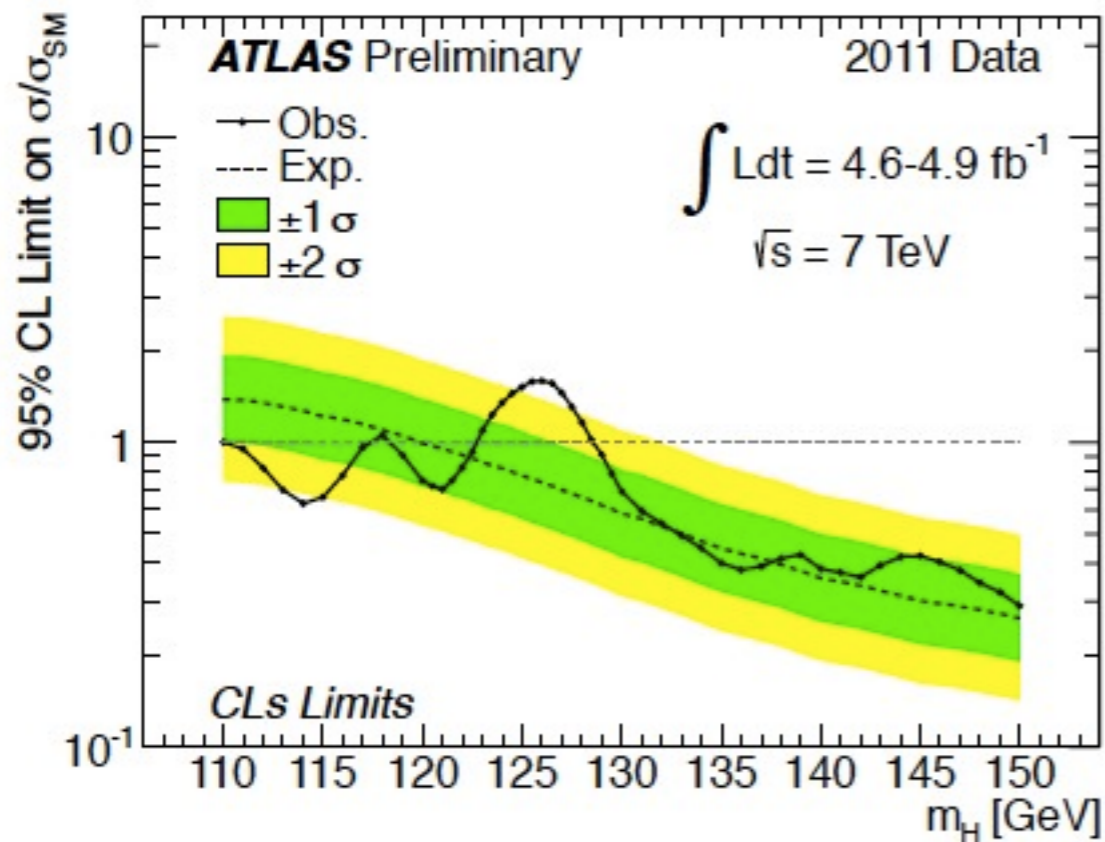
$$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{-5} \text{ fb}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

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 $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ (in parte ancora da analizzare)
- Il bosone di **Higgs** è stato escluso da **LEP** a fine anni '90 fino a $m_H = 115 \text{ GeV}$
- Il bosone di **Higgs** è stato escluso da **LHC** nel range di masse $110 \text{ GeV} < m_H < 122 \text{ GeV}$ e $127 \text{ GeV} < m_H < 600 \text{ GeV}$ con 5 fb^{-1} analizzati
- Resta quindi una finestra $122\text{-}127 \text{ GeV}$ dove l'**Higgs** potrebbe essere
- Per scoprire il bosone di **Higgs** sono necessari almeno $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$
- Per analizzare l'**EW**SB, sono necessari $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$

Grafici di Esclusione del Bosone di Higgs



- Esclusione osservata al 95% Confidence Level
 - ATLAS: 110-117.5, 118.5-122.5, 129-539 GeV
 - CMS: 127.5-600 GeV

- Osservato un piccolo eccesso a **125 GeV**: è l'Higgs ?
 I dati di quest'anno ce lo diranno

- Se il bosone di **Higgs** non c'è, ci aspettiamo di avere suggerimenti sulla natura dell'**EW**SB dallo scattering $WW \rightarrow WW$
- Ci troviamo solo all'inizio di una grande impresa, l'esperimento più grande mai concepito in fisica delle particelle