

Caffe' Scienza, 15 Dicembre '09

**Dalle Particelle Elementari
alla Cosmologia:
La Fisica Fondamentale e LHC**

Guido Altarelli

Ordinario di Fisica Teorica all'Universita' di Roma Tre
Gia' Direttore dell'Unita' di Fisica Teorica del CERN

In fisica fondamentale

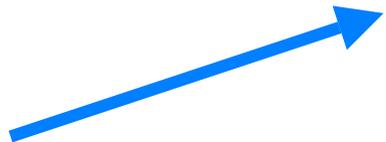
c'e' un grande progresso verso l'unita'
tra particelle e cosmologia

Molti problemi comuni

Teorie quantistiche
e relativita'
Fisica delle particelle



Relativita' Generale
Cosmologia



Teoria delle stringhe
Gravita' quantistica
Grande Unificazione
Interazioni fondamentali

.....

Nucleosintesi
Materia Oscura
Bariogenesi
Energia del vuoto
Inflazione

.....



LHC e' in funzione!

Dopo l'incidente del 19 Sett. '08 e' ripartito nel Nov. '09 e sta funzionando bene

Top prioritá' di fisica LHC (ATLAS&CMS):

- Trovare la particella di Higgs (predetta dal Modello Standard)
- Ricerca di nuova fisica al \sim TeV (forti argomenti teorici)
- Identificazione delle particelle che costituiscono la Materia Oscura nell'Universo

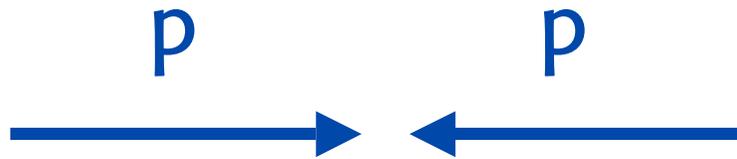
Inoltre:

- LHCb: Decadimenti degli adroni con b (asimmetria materia-antimateria)
- ALICE: Collisioni di ioni pesanti (QCD ad alta densita' e T)



LHC: Large Hadron Collider

Urti pp (protone protone)



ora	1.18	1.18	TeV
tra pochi giorni	3.5	3.5	
a fine 2010	5	5	
infine	7	7	

In USA il
Tevatron
ha 1 TeV/ fascio
(funziona dal
1989)



Unita' di energia

1 eV : **elettronVolt**, l'energia di un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

1 eV ~ $1.6 \cdot 10^{-12}$ erg ~ $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule ~ $0.38 \cdot 10^{-19}$ cal

1 MeV = 10^6 eV = 1 milione di eV

1 GeV = 10^9 eV = 1 miliardo di eV

1 TeV = 10^{12} eV = 1000 miliardi di eV

1 TeV ~ 1.6 erg ~ energia di un insetto di 1 g che si muove a 1.8 cm/s

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

⊕ Nel fascio ~ 3000 pacchetti di $\sim 10^{11}$ p --> energia tot ~ 100 MJ

Perche' grandi acceleratori (alto costo)?

- Per guardare dentro le particelle a piccole distanze

Meccanica quantistica:

Lunghezza d'onda $\lambda \sim h/p \sim hc/E \sim$ risoluzione

h : costante di Planck

$E \sim 100 - 1000 \text{ GeV} \rightarrow \lambda \sim 10^{-16} - 10^{-17} \text{ cm}$
(atomo $\sim 10^{-8} \text{ cm}$, protone $\sim 10^{-13} \text{ cm}$)

- Per produrre particelle pesanti con $Mc^2 < E$
(instabili con vita media τ corta)

p.es. la particella di Higgs ha $M > 114 \text{ GeV}/c^2$ e $\tau < \sim 2 \cdot 10^{-22} \text{ s}$

- Per seguire la storia dell' Universo fino a

$$t(\text{s}) \sim (1 \text{ MeV}/kT)^2$$

tempo dal Big Bang

$kT \sim E$

$E \sim 100-1000 \text{ GeV}$

$t \sim 10^{-10} - 10^{-12} \text{ s}$



LHC COST

(Taken from **LHC The Guide 2008**)

The cost for the machine alone is about 2900 million Euro.

The total project cost breaks down roughly as follows:

Construction costs (10^9 Euro)	Personnel	Materials	Total
LHC Machine and areas	0,57	2.29	2,86 *)
CERN share to Detectors	0.49	0,19	0,68
LHC injector upgrade	0,06	0.04	0,10
LHC computing (CERN share)	0,06	0,06	0,12
Total	1,18	2,58	3,76

*) (including $0,27 \cdot 10^9$ € of in-kind contributions)



Particelle elementari e Cosmologia:
un'unita' sempre piu' stretta

Eta' dell'Universo: 13.7 Gy (Miliardi di anni) dal Big Bang (BB)

L'Universo si espande e si raffredda

$$1 \text{ eV} \sim 11600 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$k \sim 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}/^\circ\text{K}$$

costante di Boltzmann

$$kT = \frac{1 \text{ MeV}}{\sqrt{t(s)}}$$

tempo
in sec
dal BB

Per es.:

I processi elementari all'energia di 1 TeV = 1000 GeV
determinano la fisica dell'Universo a 10^{-12} s dopo il BB

Gli acceleratori di particelle e la teoria dei processi
fondamentali ricostruiscono l'Universo primordiale



CERN: in origine Comitato Europeo per la Ricerca Nucleare

In realta' e' un laboratorio per la fisica delle particelle.
Ricerca fondamentale non applicata (direttamente)

Quando il CERN e' sorto nel 1954 la ricerca in Europa era in fase di ricostruzione dalle rovine della guerra

La crescita del CERN e' andata di pari passo con il recupero della scienza in Europa

A partire dagli anni '70 il gap con gli USA e' stato colmato e oggi addirittura il CERN e' all'avanguardia nella fisica delle particelle (in particolare il progetto LHC)

LHC: un anello di ~27 Km con magneti superconduttori a 1.9 °K (~ 271 °C sotto zero)



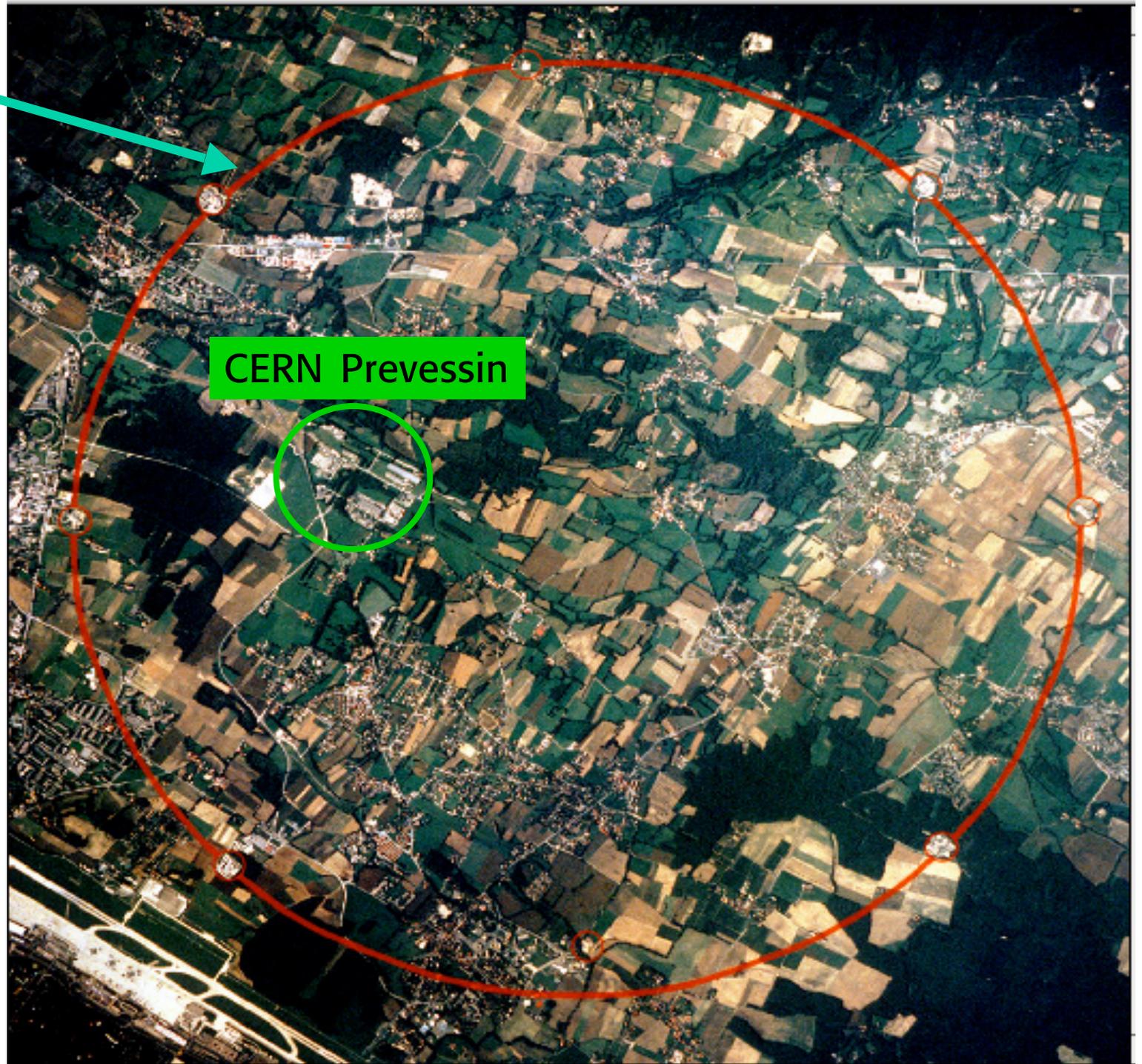
Tunnel
LEP/LHC
(27 Km)

Frontiera
Fr-Ch

CERN Meyrin

Aeroporto

CERN Preessin



CERN-Meyrin

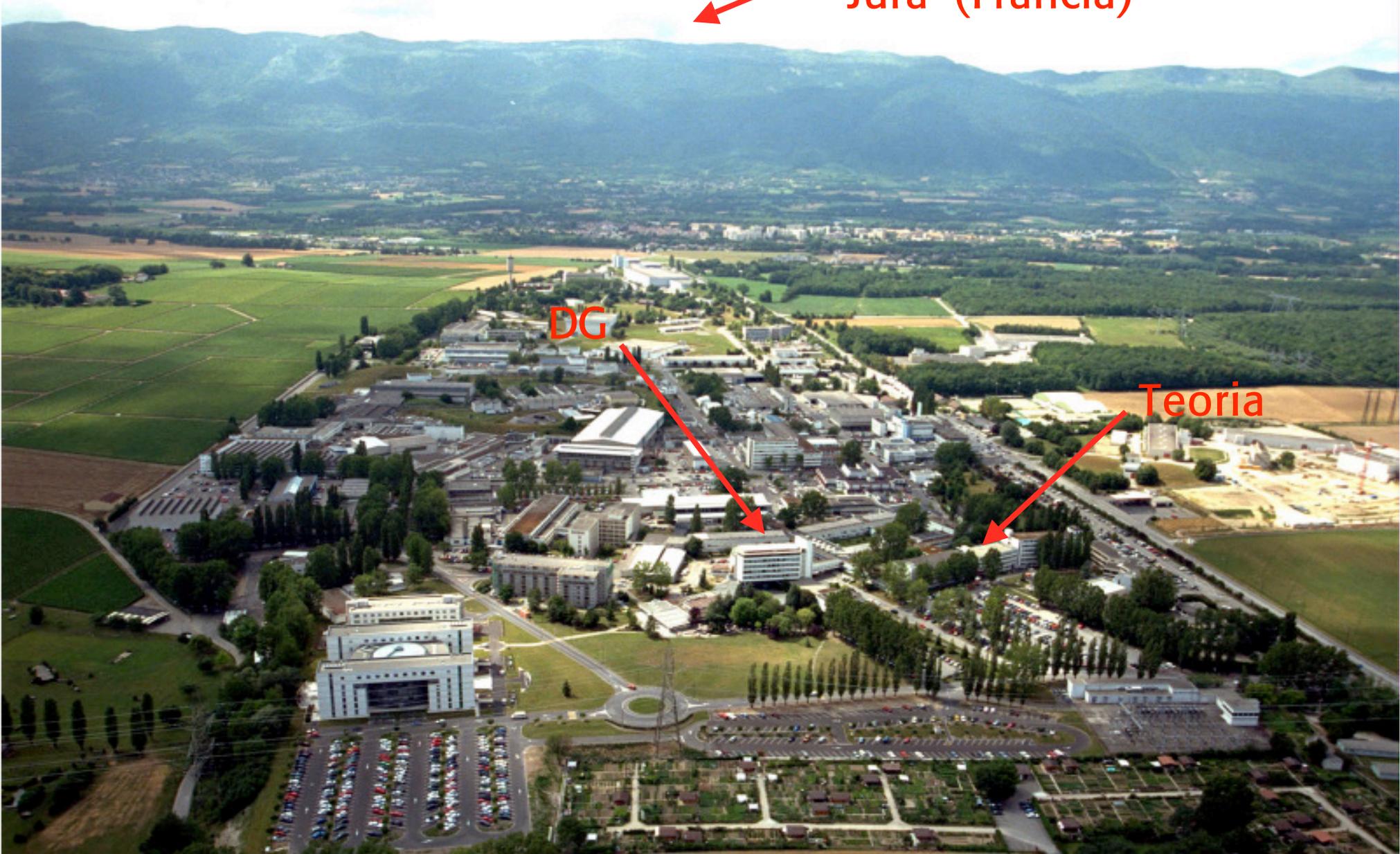
Catena montuosa del Jura (Francia)



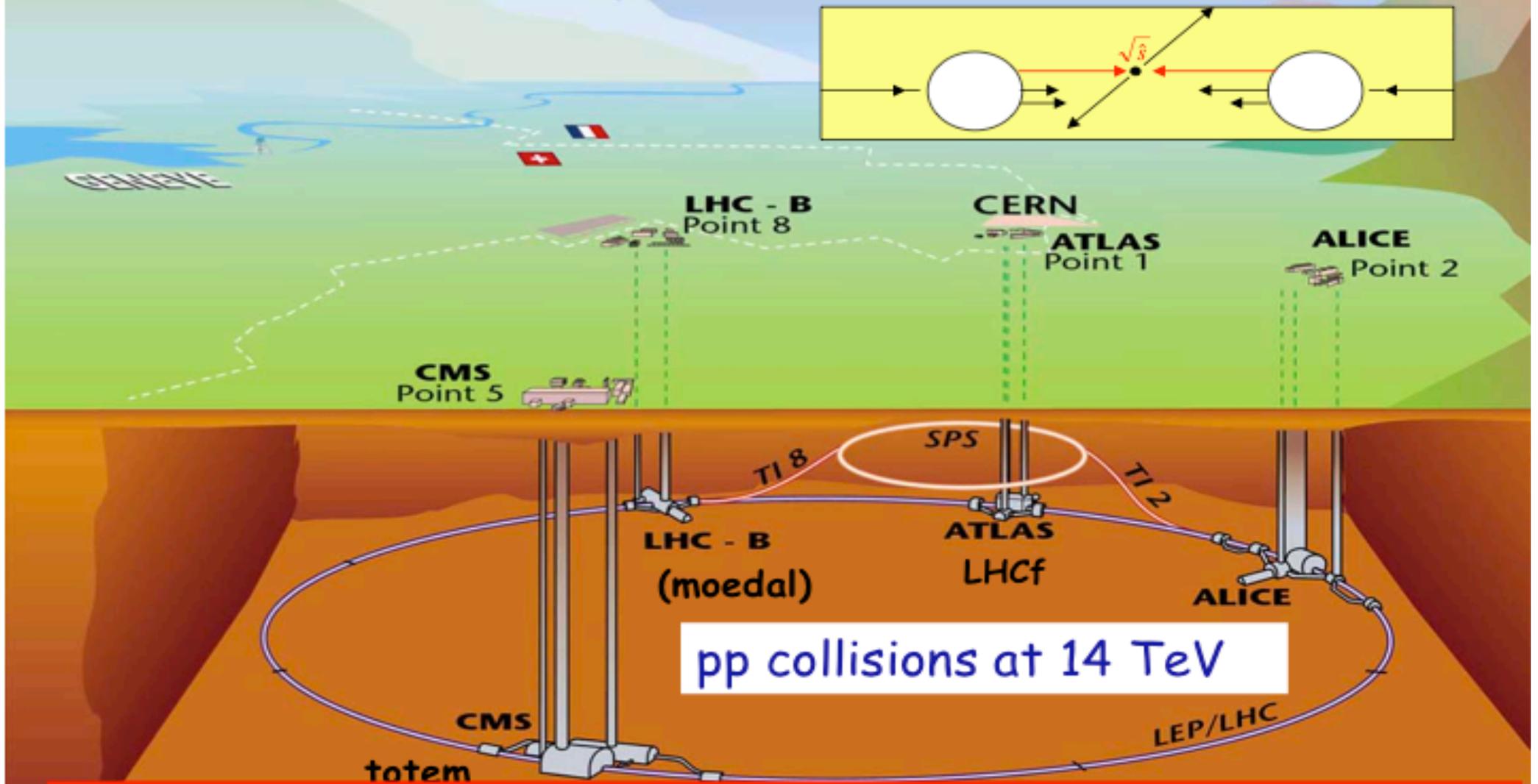
DG



Teoria

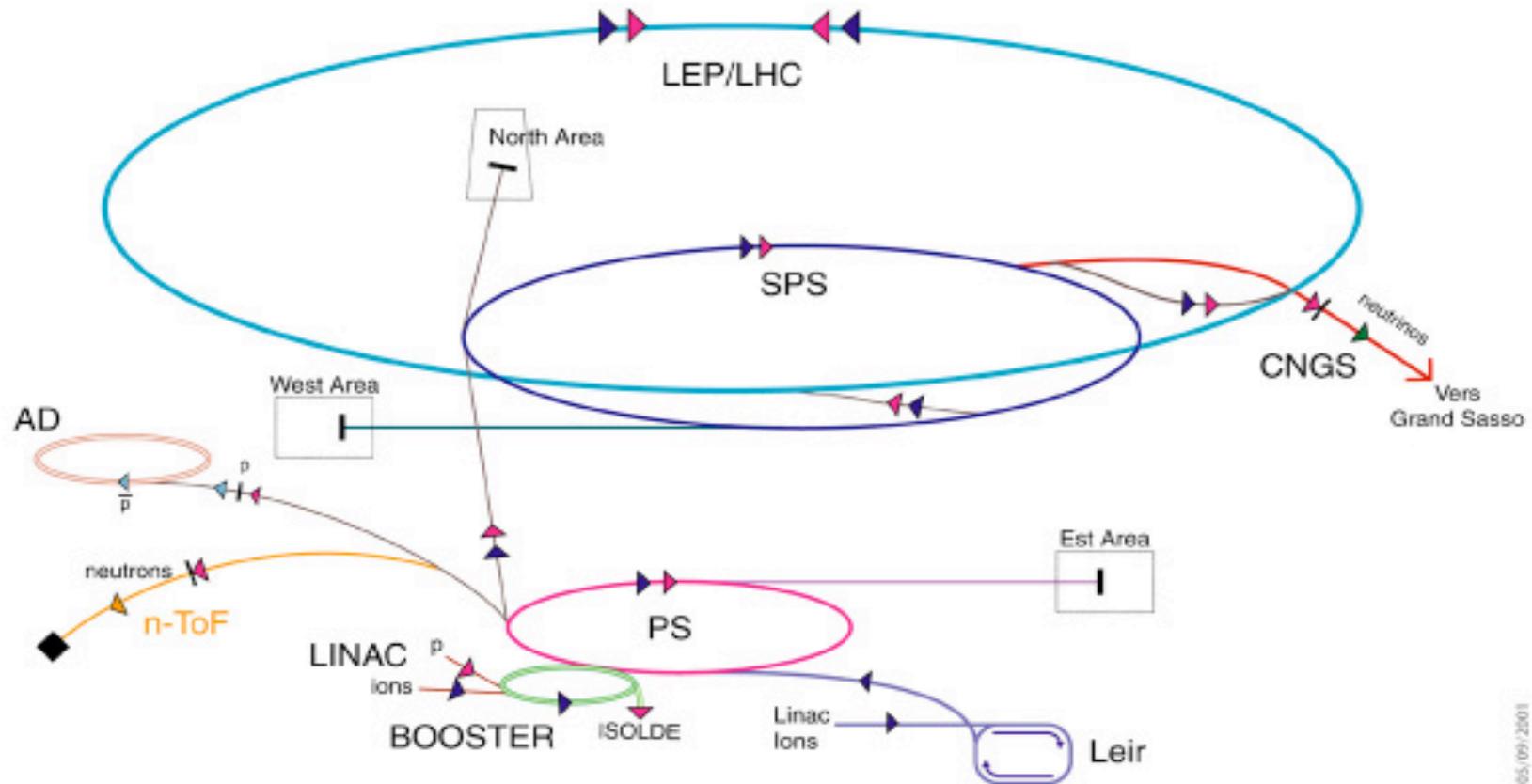


The LHC Machine and Experiments



- High Energy \Rightarrow factor 7 increase w.r.t. present accelerators
- High Luminosity (# events/cross section/time) \Rightarrow factor 100 increase

Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



▶ p (proton)
▶ ion
▶ neutrons

▶ \bar{p} (antiproton)
▶ \leftrightarrow proton/antiproton conversion
▶ neutrinos

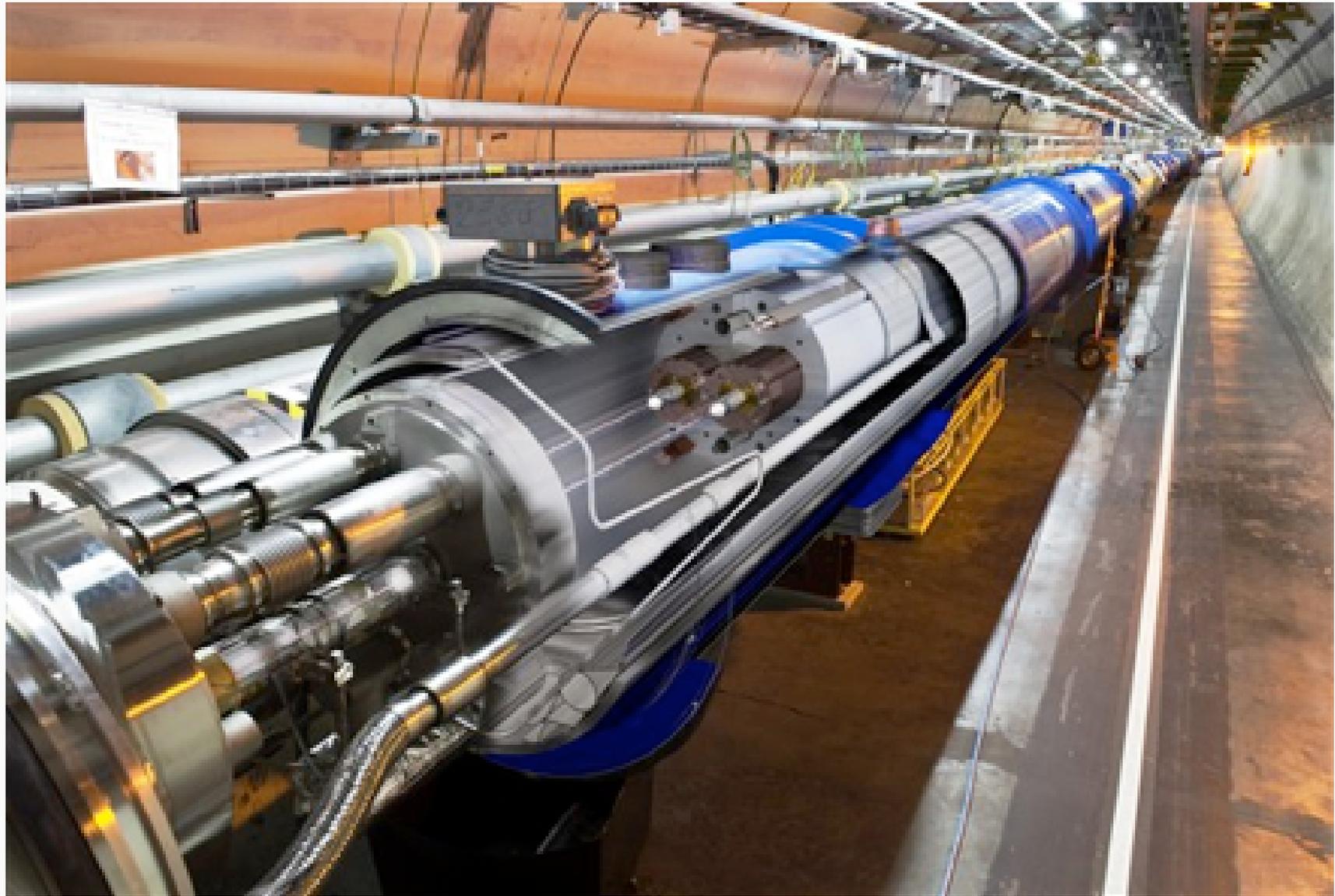
AD Antiproton Decelerator
PS Proton Synchrotron
SPS Super Proton Synchrotron

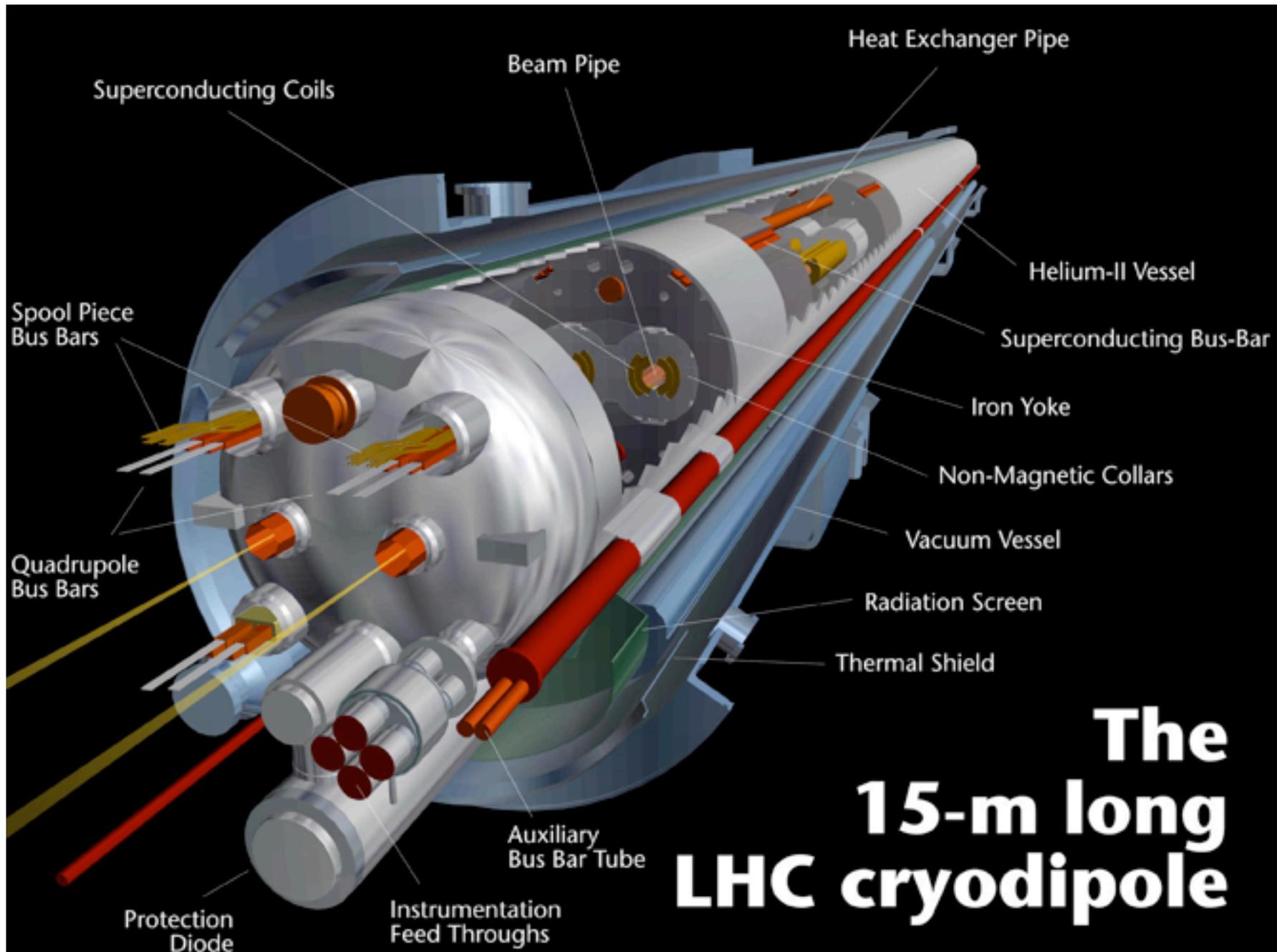
LHC Large Hadron Collider
n-ToF Neutrons Time of Flight
CNGS CERN Neutrinos Grand Sasso



I magneti superconduttori del LHC ($1.9 \text{ } ^\circ\text{K}$, 8-9 Tesla) sono installati nel tunnel di $\sim 27 \text{ Km}$

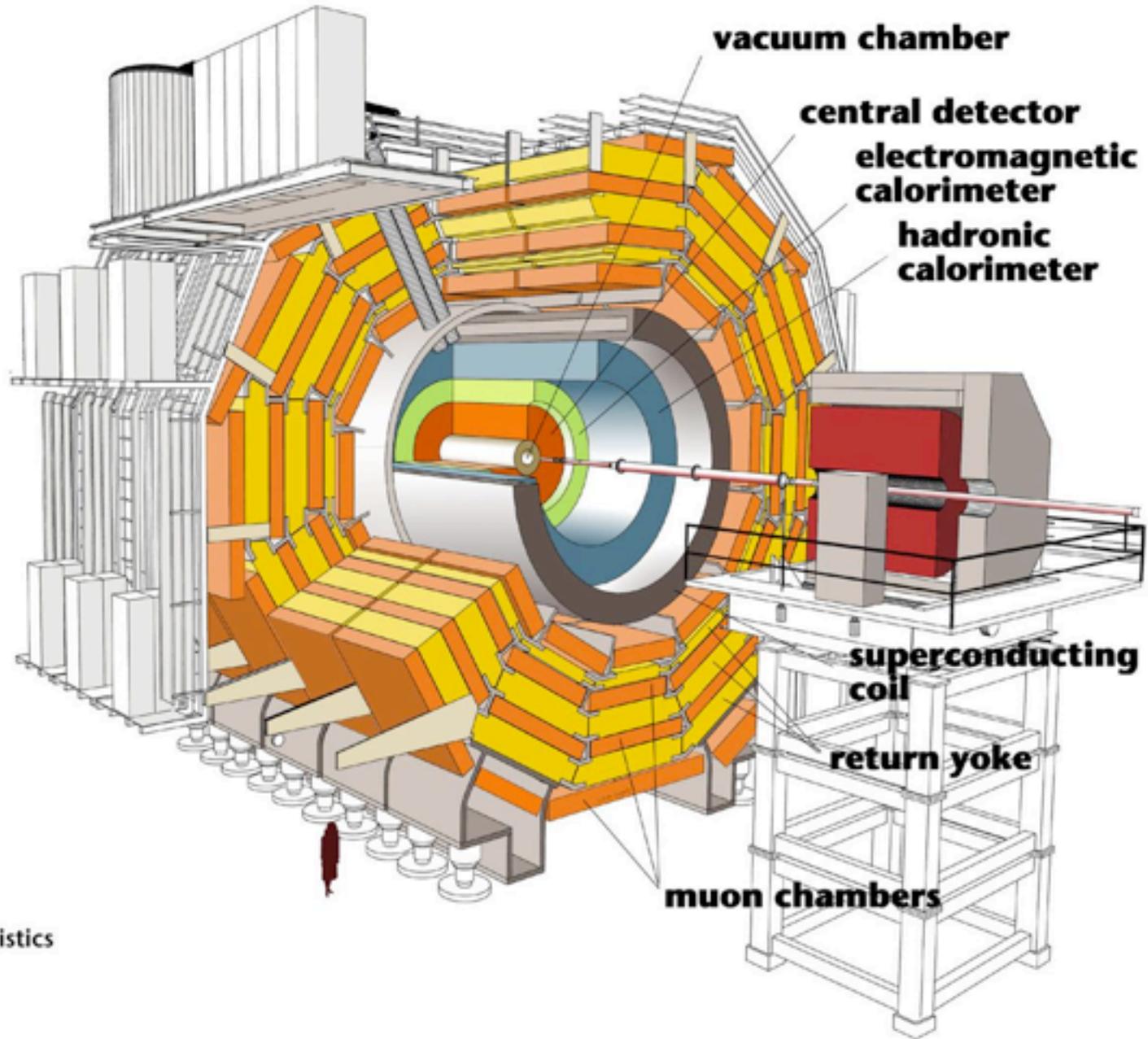
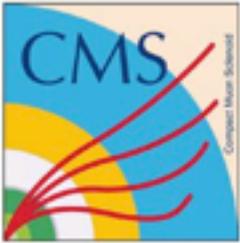






$B = 8.3$ Tesla

$i \sim 12000$ A



Detector characteristics

Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t

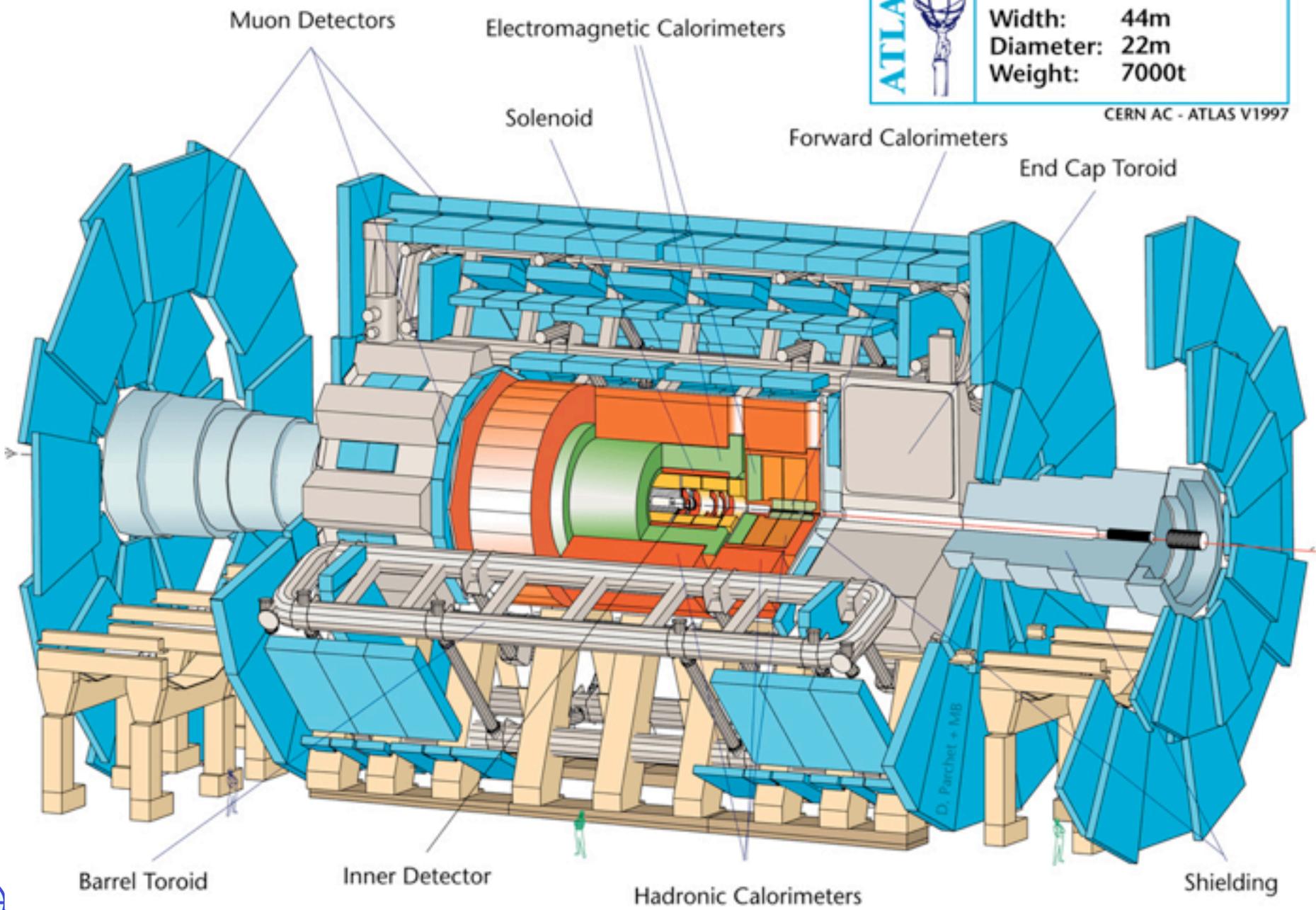




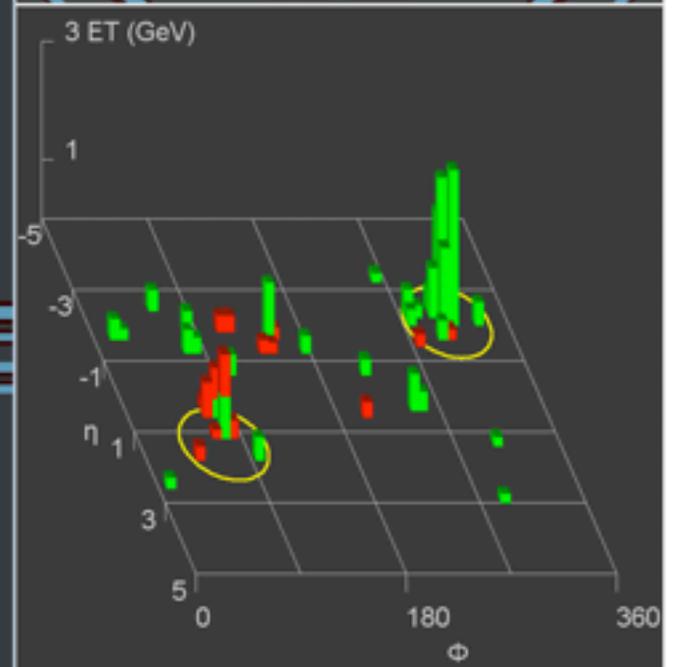
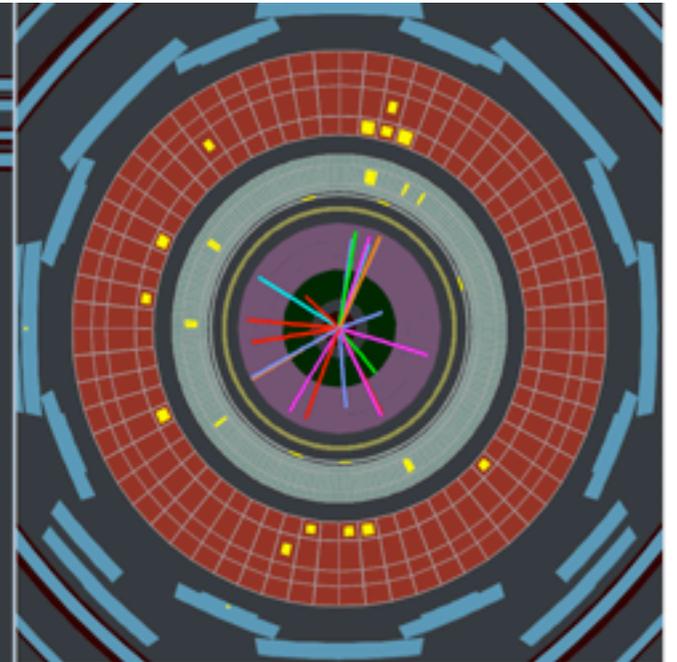
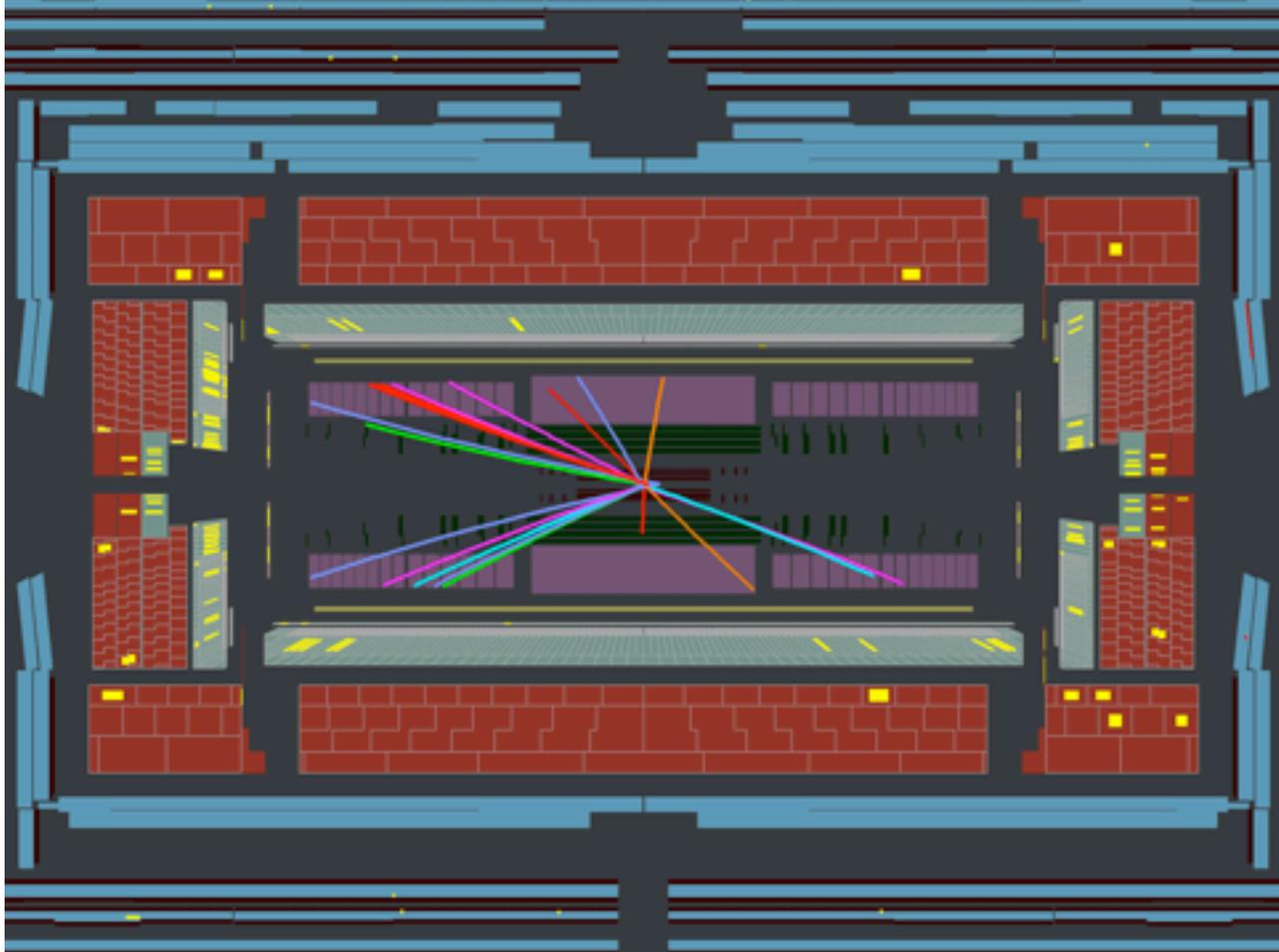
Detector characteristics

Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997



2-Jet Event at 2.36 TeV



 **ATLAS**
EXPERIMENT

2009-12-08, 21:40 CET
Run 142065, Event 116969

Alcuni problemi comuni tra fisica delle particelle e cosmologia

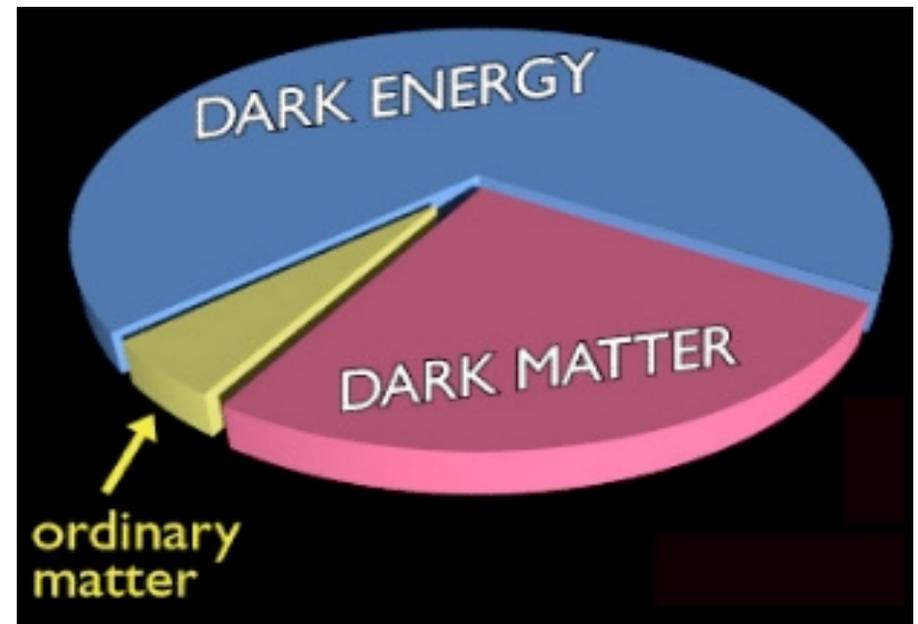
- Materia oscura
- Bariogenesi
- Energia del vuoto
- Gravita' quantistica



La materia oscura (non visibile ma gravitante)

Oggi, da un complesso di esperimenti, sappiamo che $\Omega = 1$ Universo piatto, in accordo con le teorie inflazionarie ($\Omega = \text{densita' di energia/densita' critica}$):

Sappiamo anche che la maggior parte della materia e' non visibile e non e' fatta di atomi: una misteriosa nuova particella neutra stabile (per es il neutralino delle teorie supersimmetriche)



LHC ----> WIMP's

Weakly Interacting Massive Particles



M ~ 10-1000 GeV prodotti dalle interazioni elettro-deboli



La bariogenesi (dov'è finita l'antimateria nell'Universo?)

Attualmente nell'Universo si vede solo materia.

Ma in realtà nulla impedisce di pensare che al Big Bang ci fosse uguaglianza tra materia e antimateria.

Infatti lo squilibrio osservato può essersi generato dinamicamente se le interazioni fondamentali violano la conservazione del numero barionico e del numero leptonico (come accade nella Grande Unificazione) e se violano C e CP (in misura sufficiente).

C: Coniugazione di carica

P: Parità

Esperimento LHCb

Soddisfatte queste condizioni lo squilibrio osservato può essere generato dinamicamente durante una delle fasi di non equilibrio termodinamico durante l'espansione dell'Universo (Sakharov).

Nel Modello Standard esteso a incorporare le masse dei neutrini si può spiegare la bariogenesi



L'energia del vuoto

I dati indicano che attualmente l'Universo si espande con una accelerazione positiva.

La gravitazione di per se da' una accelerazione negativa (attrazione tra le masse)

Bisogna aggiungere alle eq.ni di Einstein un termine (costante cosmologica) che determina una pressione negativa che overcompensa l'attrazione gravitazionale. Tale termine era stato gia' ipotizzato da Einstein quando tentava di ottenere un Universo stazionario (prima della scoperta del Big Bang)

La fisica teorica attuale non e' in grado di comprendere il valore osservato del termine cosmologico (vorrebbe un valore molto maggiore)

L'accelerazione osservata e' vicina al valore massimo oltre il quale non si potrebbero formare le galassie (Weinberg)



Eq.ni di Einstein del campo gravitazionale

La curvatura dello spazio-tempo = Densita' di energia

$$R_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

L'energia e' la "carica" delle interazioni gravitazionali

$$R_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

$g_{\mu\nu}$ e' il campo gravitazionale

Λ costante
cosmologica



Spiegazione “Antropica”: Universo o Multiverso?

E' concepibile che il nostro Universo sia una di tante bolle generate dal vuoto da fluttuazioni quantistiche

Infatti tutte le grandezze conservate (energia, momento angolare, carica elettrica,...) sono compatibili con zero.
(per es l'energia cinetica dell'esplosione puo' essere compensata dalla attrazione gravitazionale)

Invece di un singolo Universo stazionario, una continua creazione di Universi

In ognuno la fisica potrebbe essere diversa (per esempio, nel nostro la costante cosmologica avrebbe il valore giusto per la formazione delle galassie: spiegazione "antropica")



La teoria quantistica della gravitazione

Uno dei maggiori problemi della fisica teorica contemporanea e' la formulazione di una teoria quantistica della gravita'.

La teoria delle stringhe e' emersa come una possibile soluzione.

In questa teoria le particelle fondamentali sono oggetti estesi, stringhe, con dimensioni tipiche di 10^{-33} cm (oggi sappiamo che appaiono puntiformi fino a $\sim 10^{-17}$ cm) e lo spazio-tempo ha 10 o 11 dimensioni (10 = 9 di spazio + 1 di tempo).

Il nostro Universo a 4 dimensioni sarebbe una particolare soluzione in cui le altre 6 dimensioni sono "compattificate" ovvero arrotolate su se stesse con un raggio di curvatura finito, per es di 10^{-33} cm.

In altri Universi si potrebbero avere differenti soluzioni.

Per concludere: La fisica fondamentale (particelle e cosmologia) ha un magnifico curriculum.

Un secolo fa non si conosceva la relatività, la dinamica della gravitazione, la meccanica quantistica, la fisica atomica, la struttura nucleare, lo spettro delle particelle e la dinamica delle loro interazioni, il Big Bang, l'età dell'Universo, la sua evoluzione....

Le risorse investite nella fisica fondamentale hanno prodotto un progresso enorme di conoscenze e di formidabili applicazioni tecnologiche

Un gran numero di questioni basilari rimane aperto (l'Higgs, fisica oltre il MS, Grande Unificazione, decadimento del protone, gravità quantistica, teoria delle stringhe, materia oscura, bariogenesi, l'energia del vuoto,



La fisica non è finita!!! Con LHC si apre un nuovo capitolo

Osservazione conclusiva: una scienza inutile?

Alcune **recenti** applicazioni (per non parlare di tutto il resto)

Web, Grid
Computers
Crittografia
Posizionamento Globale (GPS)
Acceleratori per terapia
Immagini per la medicina
Superconduttività
Isotopi radioattivi
Luce di sincrotrone
Sorgenti di neutroni
.....(Glashow)

Oggi i governi insistono
troppo su un immediato
ritorno delle ricerche

In realta' nella storia
recente sono state piu'
produttive le ricadute
della ricerca fondamentale
che non la ricerca
"applicata"



Nel primo secondo di vita dell'Universo c'e' tutta la Fisica!

Presente:	$t \sim 5 \cdot 10^{17} \text{s} \sim 14 \text{ Gys}$,	$T \sim 2.76 \text{ K}$
Atomi:	$t \sim 10^{12}$,	$kT \sim \text{eV}$
Nuclei:	$t \sim 1$,	$kT \sim \text{MeV}$
QCD:	$t \sim 10^{-4}$,	$kT \sim 100 \text{ MeV}$
EW:	$t \sim 10^{-10}$,	$kT \sim 100 \text{ GeV}$
LHC:	$t \sim 10^{-12}$,	$kT \sim 1 \text{ TeV}$
GUT's:	$t \sim 10^{-38}$,	$kT \sim 10^{16} \text{ GeV}$
Planck:	$t \sim 10^{-44}$,	$kT \sim 10^{19} \text{ GeV}$

$$kT = \frac{1 \text{ MeV}}{\sqrt{t(s)}}$$



Un evento a
due getti nel
rivelatore
DELPHI a LEP

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$$



Quattro interazioni fondamentali:

- **forti** (legame dei nuclei, adroni, quark e gluoni...)
- **elettromagnetiche** (luce, onde em, atomi, molecole...)
- **deboli** (radioattività, energia delle stelle, neutrini...)
- **gravitazionali** (peso, attrazione newtoniana, astronomia)

Trascurabile in fisica delle
particelle alle energie degli
esperimenti fattibili



Negli atomi:

$$F_{em} \sim 10^{40} F_{Newton}$$

La **grande maggioranza** dei fenomeni osservati sono descritti dal Modello Standard delle int. forti ed elettrodeboli (una teoria di gauge di campi relativistici quantizzati)+ la teoria classica della dinamica gravitazionale (relatività generale)

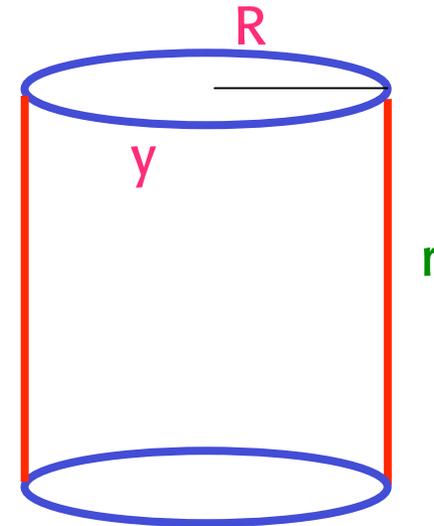
(Ma non tutti i fenomeni!!)



Nuove dimensioni spazio-temporali

Immaginiamo un piccolo insetto che abita su un lungo filo r . Per lui l'Universo ha 1 dim di spazio (e 1 di tempo).

Ma in realta' il filo ha uno spessore: e' un cilindro con sezione di raggio R (raggio di compattificazione).



Similmente il nostro Universo 4-dimensionale potrebbe avere un piccolo spessore.

La gravita' che e' collegata alla geometria agisce in tutte le dimensioni, mentre le altre interazioni potrebbero essere confinate lungo r .

Forse la gravita' ci appare debole solo perche' molte delle sue linee di forza si estendono nelle dimensioni ulteriori