

Roma, 3 Febbraio 2010

**Fisica Fondamentale
Contemporanea
e Cultura Generale**

Guido Altarelli

Ordinario di Fisica Teorica all'Università di Roma Tre
Già Direttore dell'Unità di Fisica Teorica del CERN

- Che cosa e' la fisica fondamentale?

Leggi quadro: teoria quantistica, relativita'
Particelle elementari e loro interazioni.

Cosmologia: la struttura dell'Universo e la sua storia

- A che serve la fisica fondamentale?

Base di tutti gli sviluppi e le applicazioni
Conoscenza e cultura

- Strumenti e costi della fisica fondamentale

Esempi:

Il CERN, il maggiore laboratorio
del mondo per la fisica delle particelle
Il progetto LHC (Large Hadron Collider)

Il satellite Planck per lo studio
della radiazione cosmica di fondo

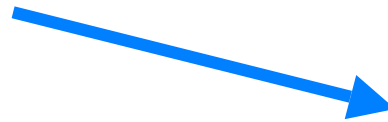


In fisica fondamentale

c'e' un grande progresso verso l'unita'
tra particelle e cosmologia (da 10^{-33} cm a 10^{+28} cm)

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

.....



La Fisica Fondamentale ha dei costi (relativamente) elevati



Qual'è il "ritorno" che il contribuente può aspettarsi?

Normalmente si insiste sulle **ricadute tecnologiche**

effettivamente impressionanti 

Io vorrei qui reiterare che non meno importanti sono le **ricadute culturali**.

Ovvero le **conoscenze** che possono essere apprezzate da tutti e che arricchiscono **la spiritualità dell'uomo**

Ogni uomo è un filosofo e la fisica fondamentale porta a delle conclusioni e a delle concezioni che sono importanti per il pensiero



Il costo dell'acceleratore e dei rivelatori (senza contare il personale e le spese di ricerca) e' di circa 3.5-4 miliardi di Euro

LHC COST

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

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

**pagati da ~25
paesi in ~15 anni**

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)

La Fisica Fondamentale ha dei costi (relativamente) elevati



Qual'è il "ritorno" che il contribuente può aspettarsi?

Normalmente si insiste sulle **ricadute tecnologiche**

effettivamente impressionanti 

Io vorrei qui reiterare che non meno importanti sono le **ricadute culturali**.

Ovvero le **conoscenze** che possono essere apprezzate da tutti e che arricchiscono **la spiritualità dell'uomo**

Ogni uomo è un filosofo e la fisica fondamentale porta a delle conclusioni e a delle concezioni che sono importanti per il pensiero



La Fisica Fondamentale: 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 realtà nella storia
recente sono state più
produttive le ricadute
della ricerca fondamentale
che non la ricerca
"applicata"



La Fisica Fondamentale ha dei costi (relativamente) elevati



Qual'è il "ritorno" che il contribuente può aspettarsi?

Normalmente si insiste sulle **ricadute tecnologiche**

effettivamente impressionanti 

Io vorrei qui mostrare che non meno importanti sono le **ricadute culturali**.

Ovvero le **conoscenze** che possono essere apprezzate da tutti e che arricchiscono **la spiritualità dell'uomo**

Ogni uomo è un filosofo e la fisica fondamentale porta a delle conclusioni e a delle concezioni che sono importanti per il pensiero



La fisica fondamentale ha un magnifico curriculum di ricadute culturali.

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....

E' chiaro che tutto ciò ha avuto una grande rilevanza per il pensiero del XX secolo

Questa sera darò degli esempi di conquiste **recenti**, diciamo degli ultimi 40 anni, e di sfide concettuali della fisica fondamentale contemporanea, con particolare riferimento al programma del LHC che è agli inizi



Le particelle elementari e le interazioni fondamentali

Le interazioni fondamentali:

- **Forti** (legame dei nucleoni nel nucleo, dei quark nei nucleoni)
- **Elettromagnetiche** (fisica atomica e molecolare, luce.....)
- **Deboli** (radioattivit , energia del sole e delle stelle, neutrini....)
- **Gravitazionali** (apprezzabili solo per masse enormi: peso, astronomia, cosmologia o a $E_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$)

Una teoria coerente e predittiva delle interazioni forti e elettrodeboli:
il **Modello Standard**

Le particelle fondamentali

- Quarks (u, d, s, c, t, b)
- Leptoni (e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ)
- Mediatori (γ , gluoni, W^\pm , Z)
- Higgs (?)
- ?

Il Modello Standard delle interazioni forti, elettromagnetiche e deboli piu' la teoria classica della gravitazione descrivono quasi tutti i fenomeni



Il Modello Standard della fisica delle particelle

Forti X Elettrodeboli X Gravitazionali

QCD (Quantum ChromoDynamics)

8 gluoni g

QED e interazioni deboli

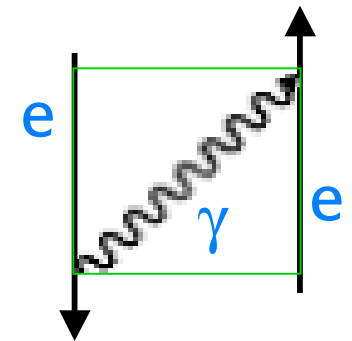
W^\pm, Z, γ
Higgs?

Classica: Einstein

[Quantistica ??? Corde?]

G: gravitone

Teoria basata su una simmetria "di gauge" perfettamente formulata e ben verificata salvo il settore di Higgs (masse dei W, Z, q & l)



$$\begin{bmatrix} uuu \nu_e \\ dde \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} ccc \nu_\mu \\ sss \mu \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} ttt \nu_\tau \\ bbb \tau \end{bmatrix}$$

3 "famiglie"
o "generazioni" (??)

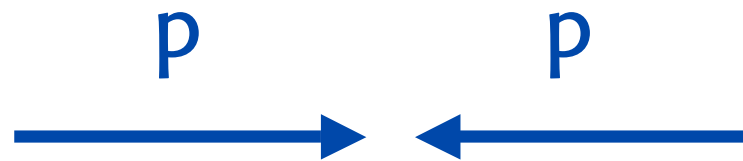
⊕ Gli 8 "colori" sono le cariche delle interazioni forti

LHC: Large Hadron Collider

Situato al CERN, vicino a Ginevra, tra Svizzera e Francia

Dopo l'incidente del 19 Sett. '08 e' ripartito nel Nov. '09 e ha funzionato bene. Questo mese dovrebbe avere inizio la fisica

Urti pp (protone protone)



Dic. '09

1.18

1.18

TeV

tra pochi
giorni

3.5

3.5

per 18-24 mesi

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

infine

7

7



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

Le generazioni sono identiche (stesse cariche etc) salvo che le masse sono differenti

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

Quark e leptoni pesanti sono instabili e decadono per effetto delle interazioni deboli (le uniche che cambiano il "sapore")



Alcune vite medie:

$$\mu: 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$\tau: 0.29 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

$$b: 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

$$t: 5 \cdot 10^{-25} \text{ s}$$

$$W: 3.1 \cdot 10^{-25} \text{ s}$$

$$Z: 2.6 \cdot 10^{-25} \text{ s}$$

Se non ci fossero la 2a e 3a generazione cosa cambierebbe?

Per es non ci sarebbe la violazione di CP nel MS

Kobayashi, Maskawa 1973

Nobel Prize 2008

I meccanismi noti di bariogenesi non funzionerebbero



II CERN

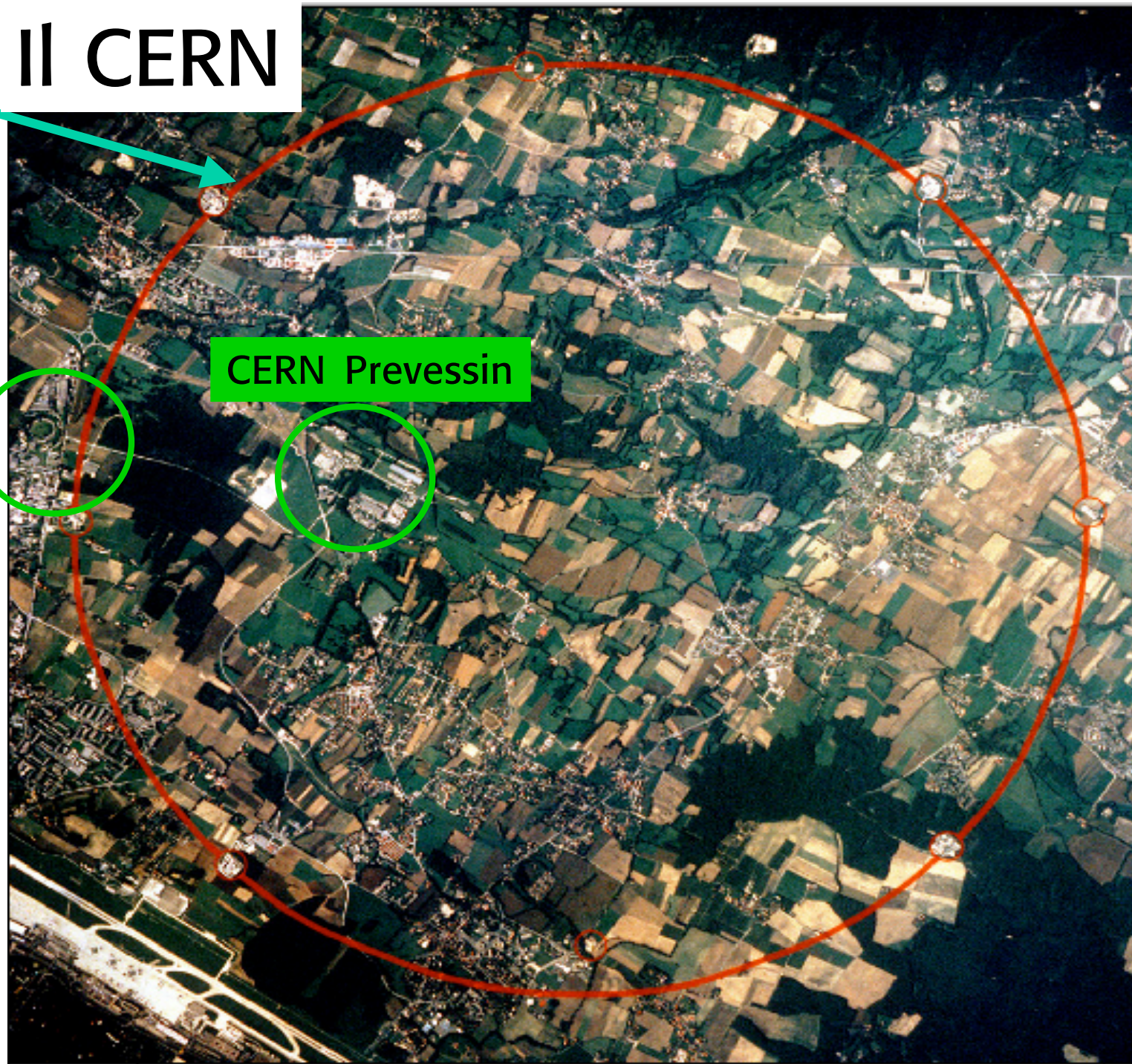
Tunnel
LEP/LHC
(27 Km)

Frontiera
Fr-Ch

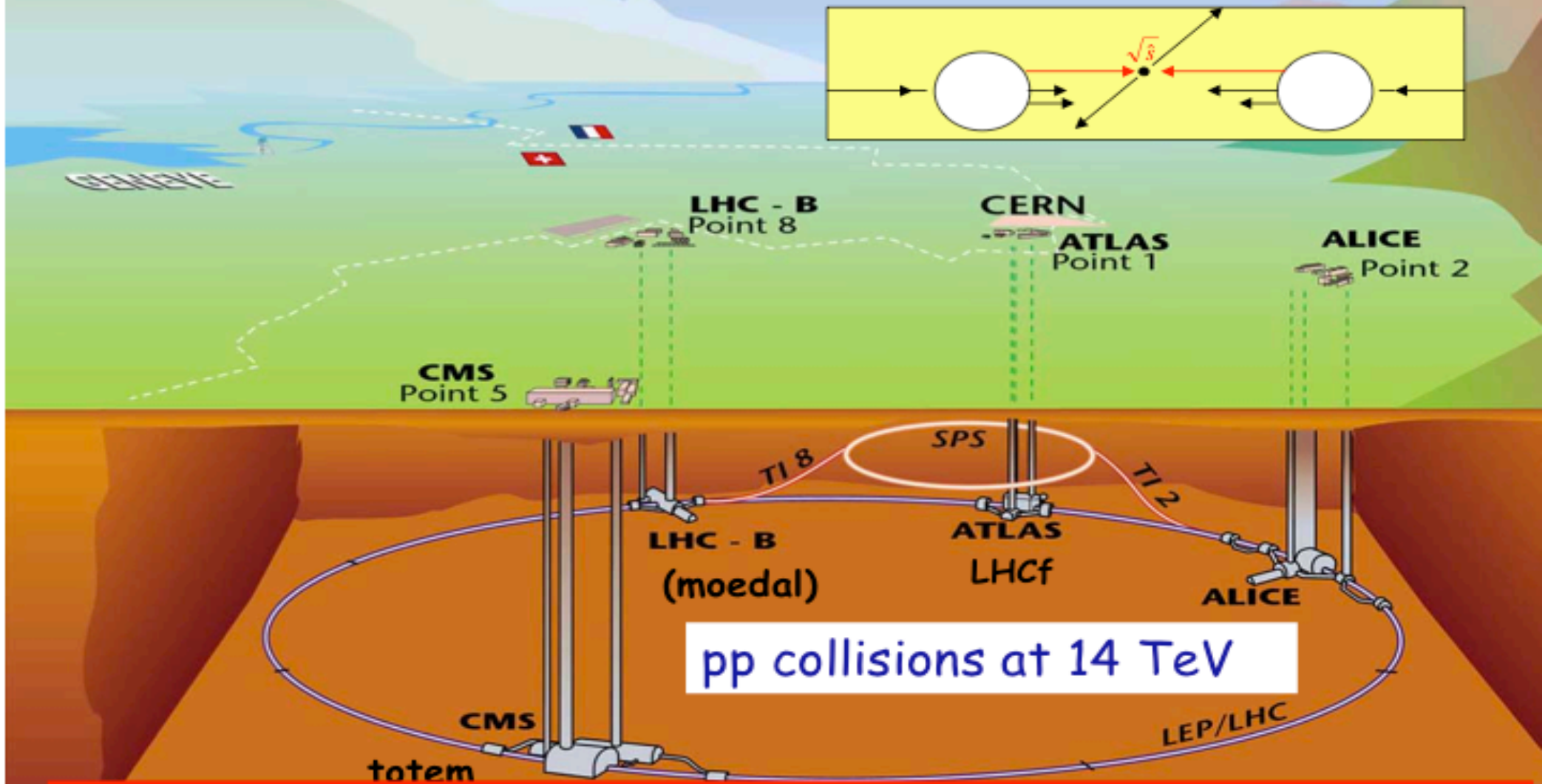
CERN Meyrin

CERN Preessin

Aeroporto

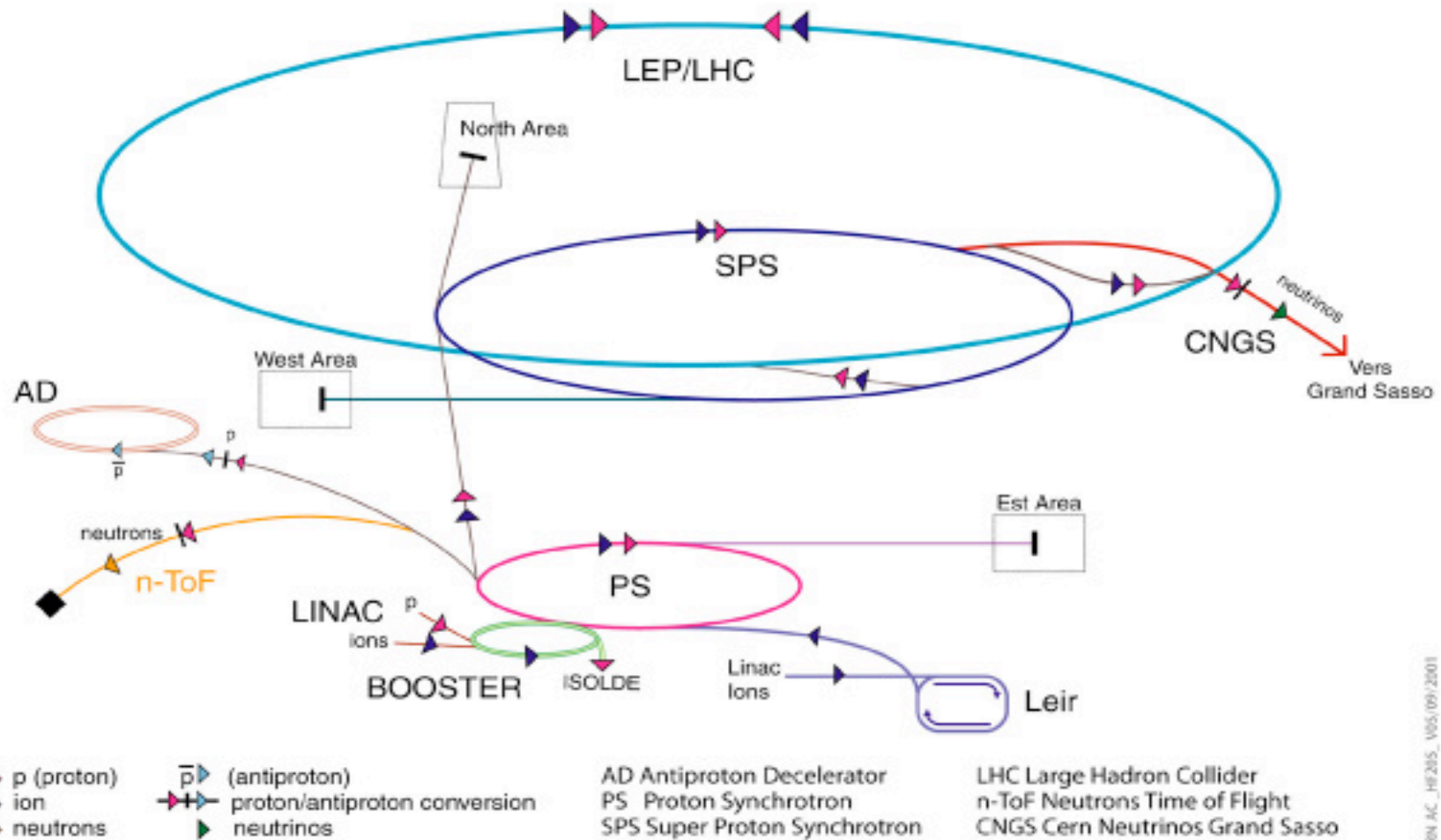


The LHC Machine and Experiments



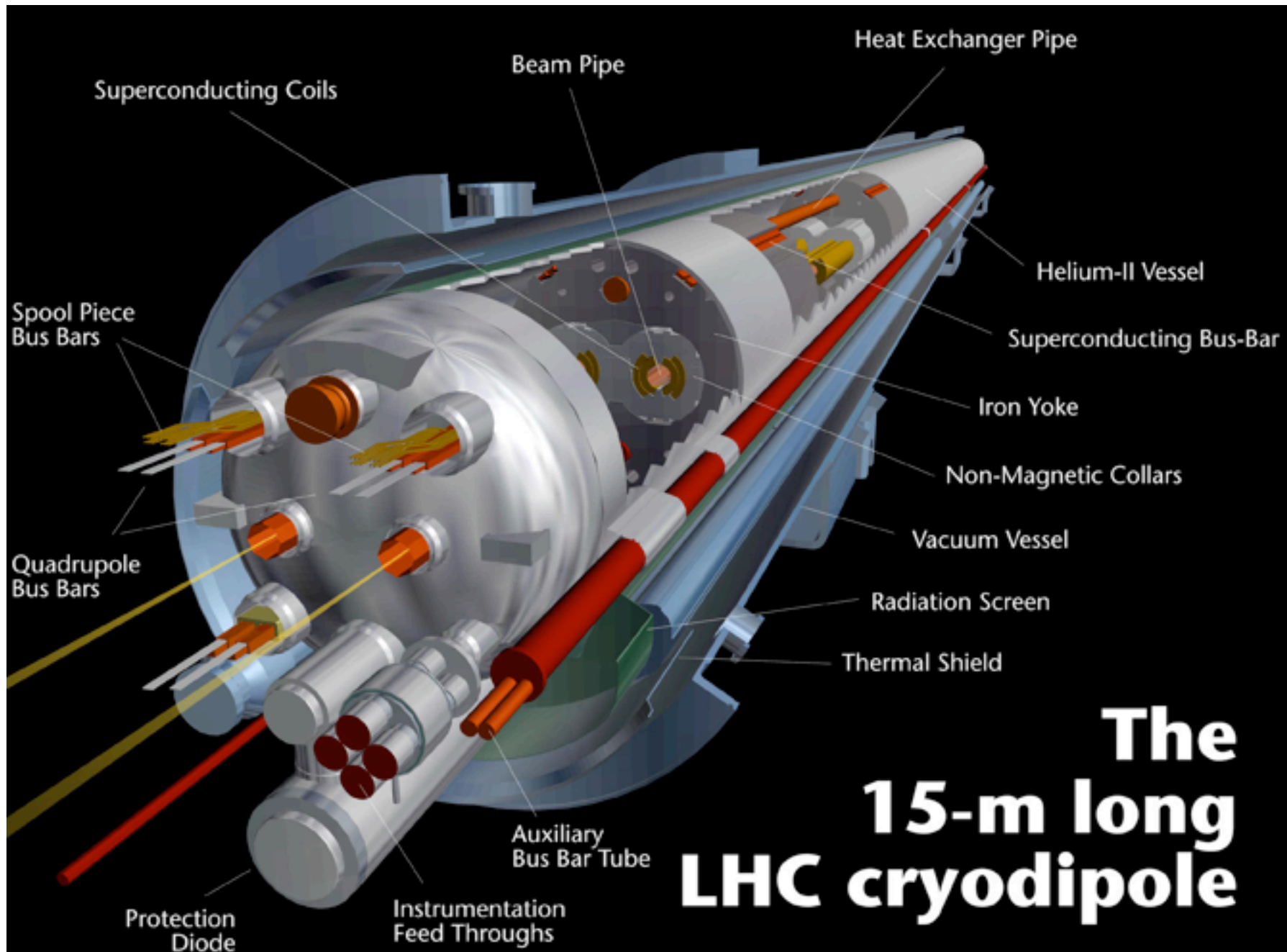
- High Energy \Rightarrow factor 7 increase w.r.t. present accelerators
- High Luminosity (# events/cross section/time) \Rightarrow factor 100 increase

Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



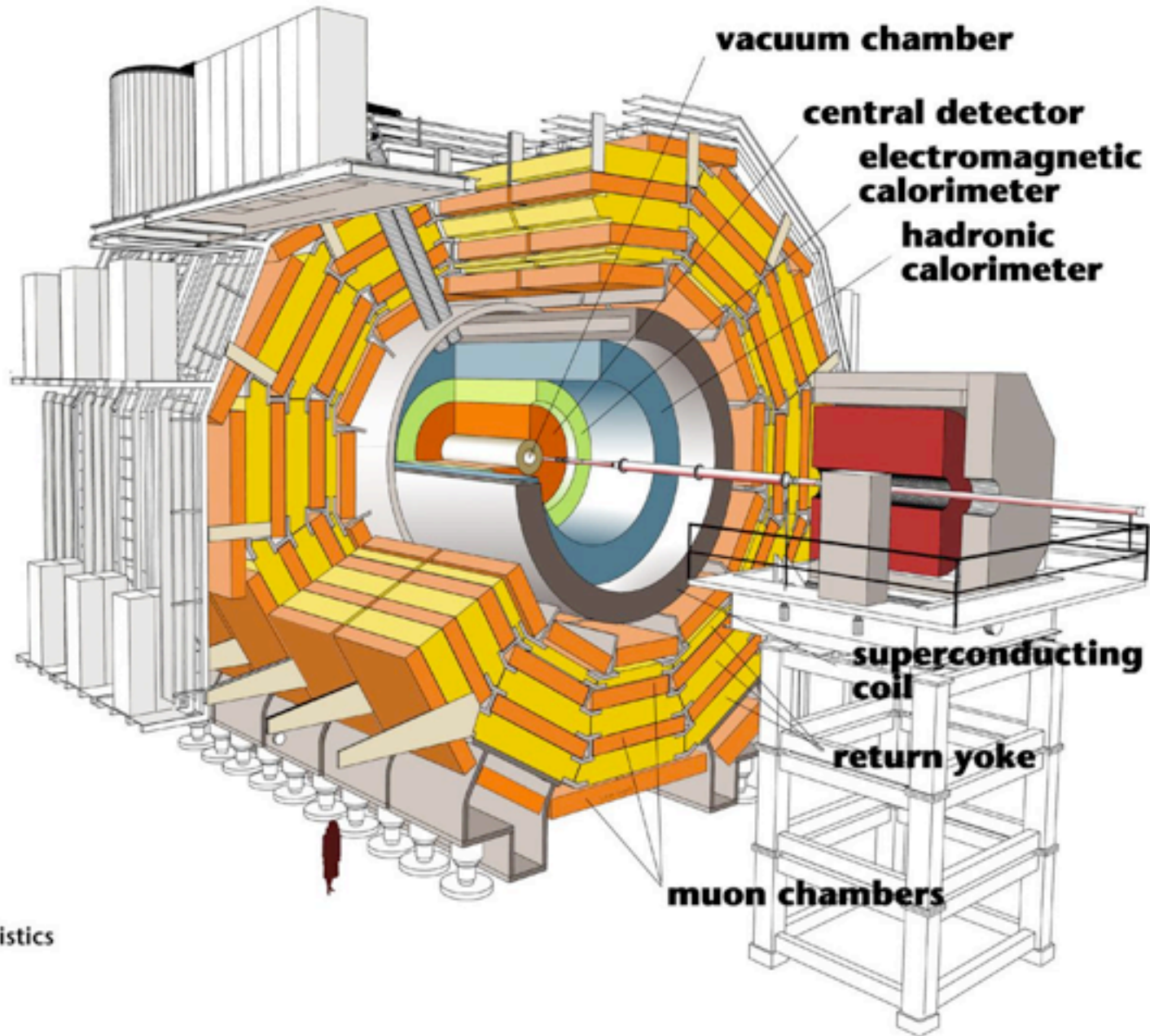
I magneti superconduttori del LHC ($1.9 \text{ } ^\circ\text{K}$, 8-9 Tesla) sono installati nel tunnel di $\sim 27 \text{ Km}$





$B = 8.3$ Tesla

$i \sim 12000$ A



Detector characteristics

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

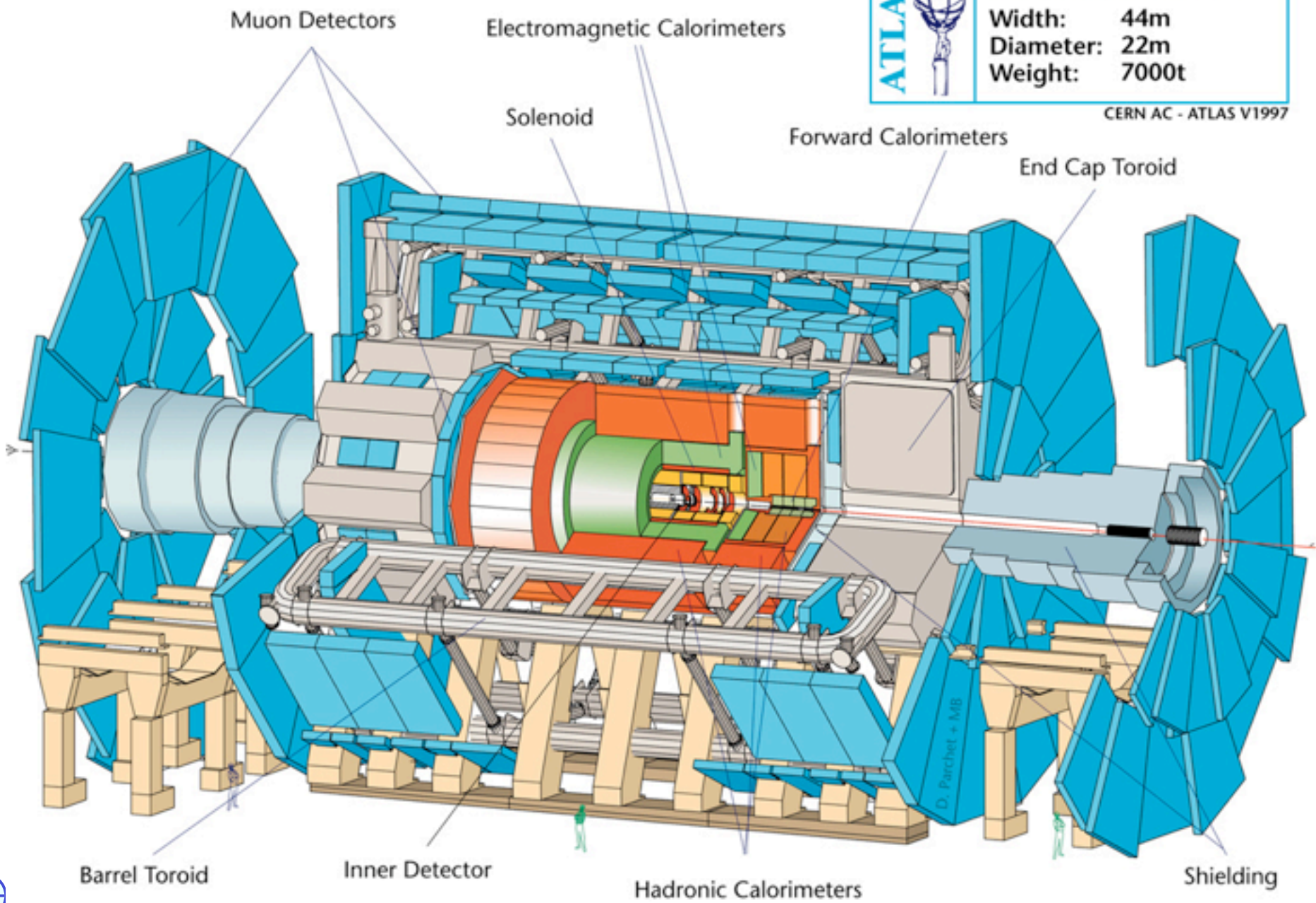




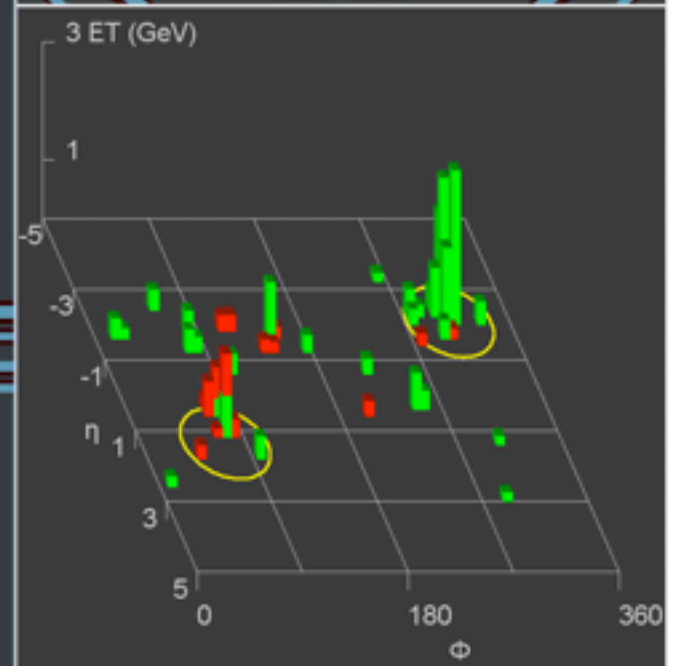
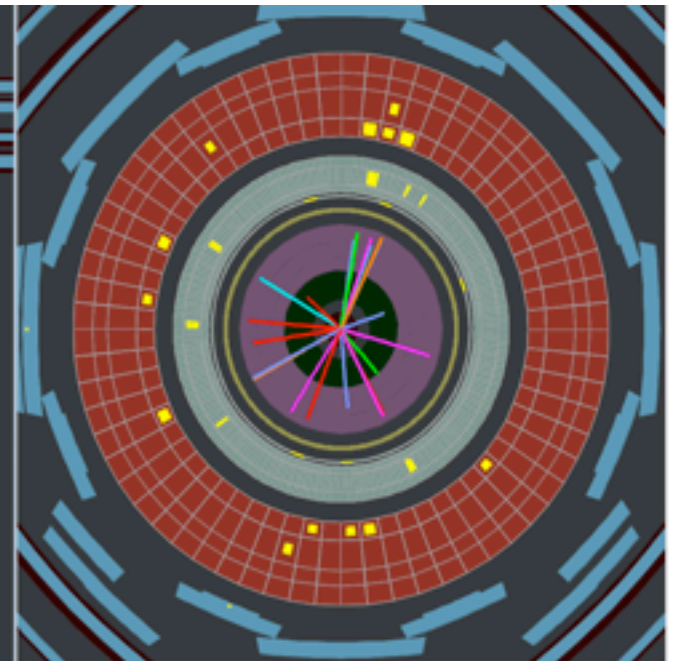
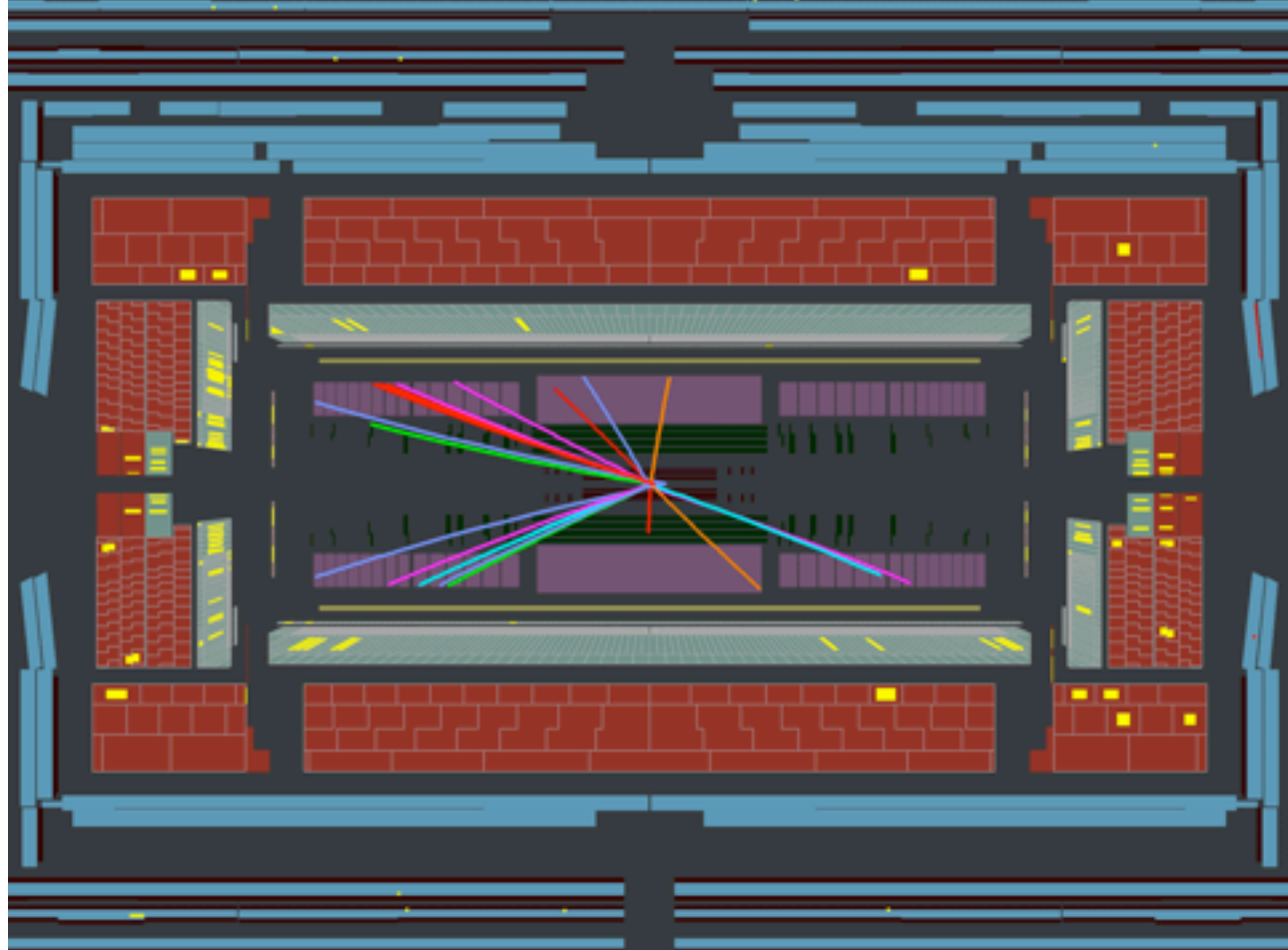
Detector characteristics

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

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

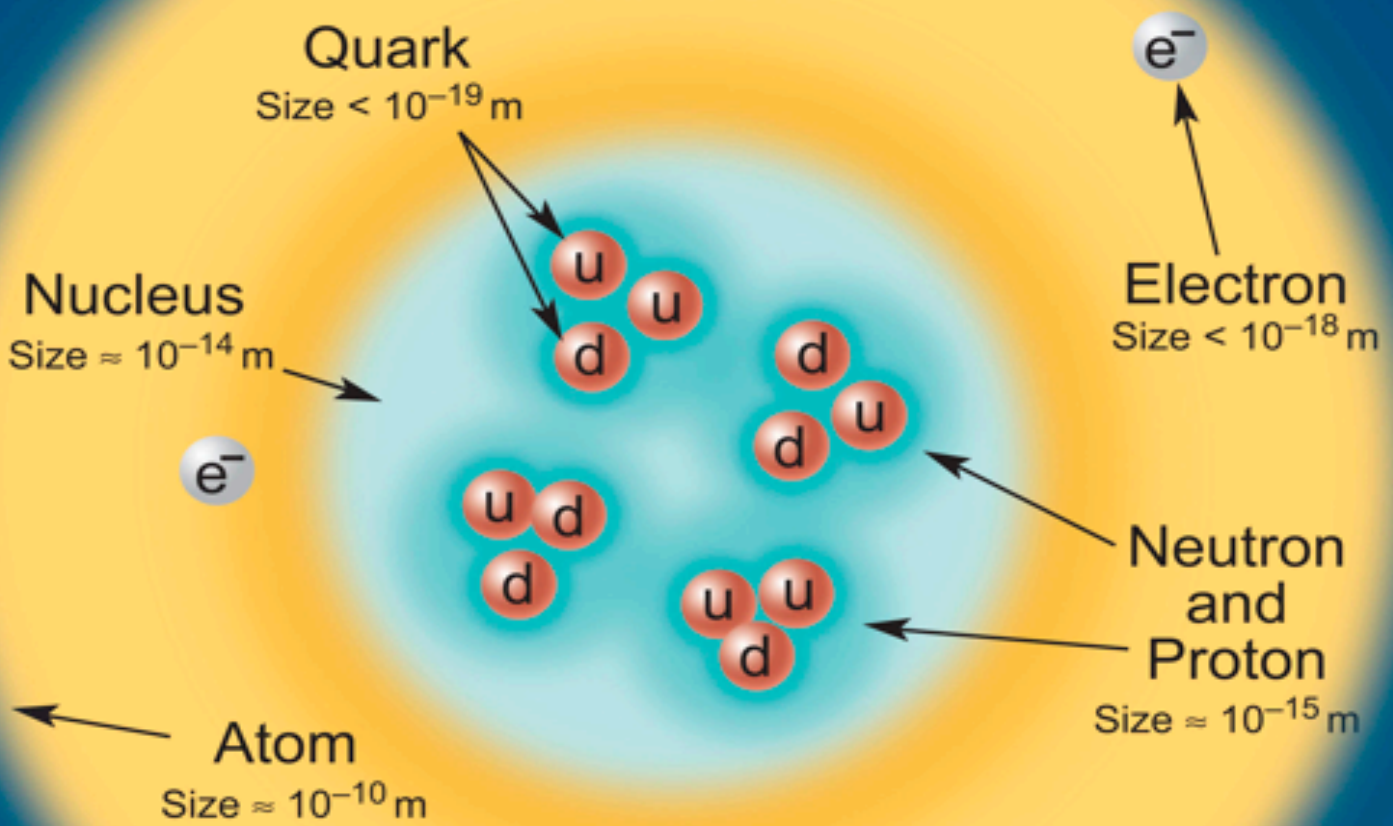
$kT \sim E$

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

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



Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

- Atomo
 - elettroni
 - nucleo
- Nucleo
 - protoni
 - neutroni
- Protone
 - $p \sim uud$
- Neutrone
 - $n \sim ddu$
- quarks
- quarks e leptoni
- appaiono puntiformi e elementari

I punti sono un'astrazione. Quindi anche i quarks e i leptoni avranno una estensione.

Ma sperimentalmente le loro dimensioni d sono minori di 10^{-16} cm. A LHC si potrà far ~ 10 volte meglio

Nella teoria delle corde (teoria della gravitazione quantistica unificata con le altre interazioni) $d \sim 10^{-33}$ cm

Le molecole, gli atomi, i nuclei, i protoni sono tutti composti

Saranno composti anche i quark e i leptoni?

Finora non c'è alcuna evidenza in questo senso e molte indicazioni contrarie

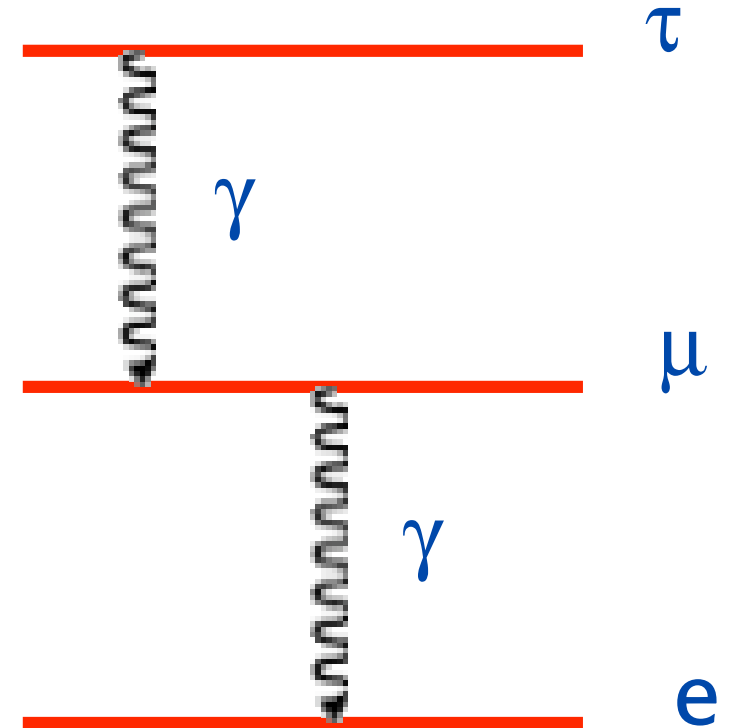
Per es per i composti esistono stati eccitati. Ma gli stati della seconda generazione non sono eccitazioni della prima etc
Non si ottiene nessuna migliore comprensione dello spettro



Se i leptoni e , μ , τ fossero fatti di costituenti dello stesso tipo si avrebbero i decadimenti

$\tau \rightarrow \mu \gamma$, $\mu \rightarrow e \gamma$

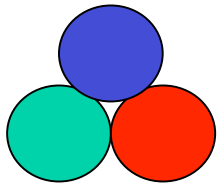
che non sono stati osservati (probabilmente esistono ma sono estremamente rari).



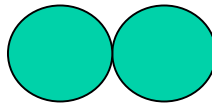
Adroni -> Quark

Riduzione delle particelle fondamentali
Spiegazione dello spettro osservato

Tutti gli adroni osservati sono composti senza colore di quark



Barioni: qqq



Mesoni: $q\bar{q}$

Per esempio:

Protone p : uud

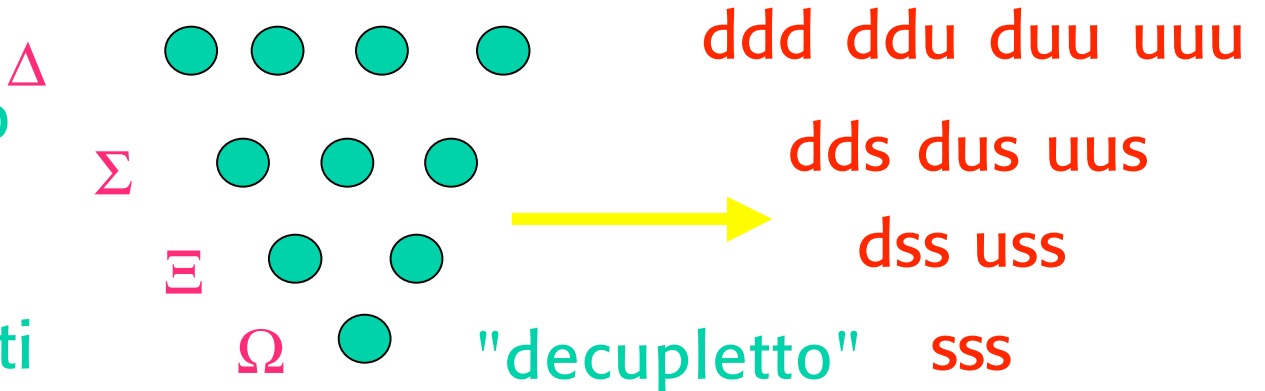
Neutrone n : ddu

Pione π^+ : $u\bar{d}$

Con i quark leggeri u , d , s si possono formare tante combinazioni che sono osservate

I mesoni osservati sono nove

I barioni osservati sono ottetti e decupletti



Se i protoni sono fatti di quark, perche' non si possono smontare e tirare fuori i quark?

Non si puo' per il "confinamento", una proprieta' delle interazioni forti, che rende infinita l'energia che serve per separare le particelle colorate (quark, gluoni,...)

Solo le particelle senza colore (il protone e gli altri barioni, il pione e gli altri mesoni) si possono osservare libere.

Ma inviando un fotone di cortissima lunghezza d'onda a esplorare la struttura interna del protone si vedono i quark (esperimenti di diffusione altamente inelastica - Premio Nobel 1990 a Friedman, Kendall e Taylor)

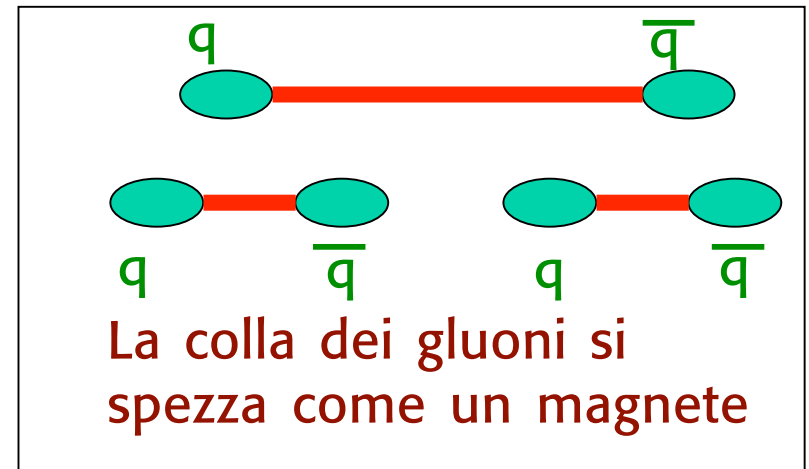
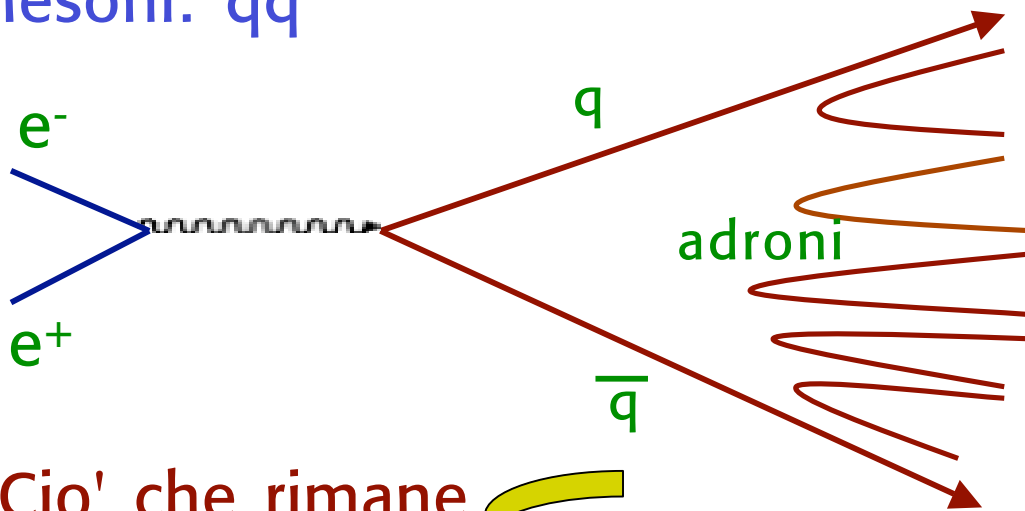


Il confinamento: non ci sono particelle colorate libere

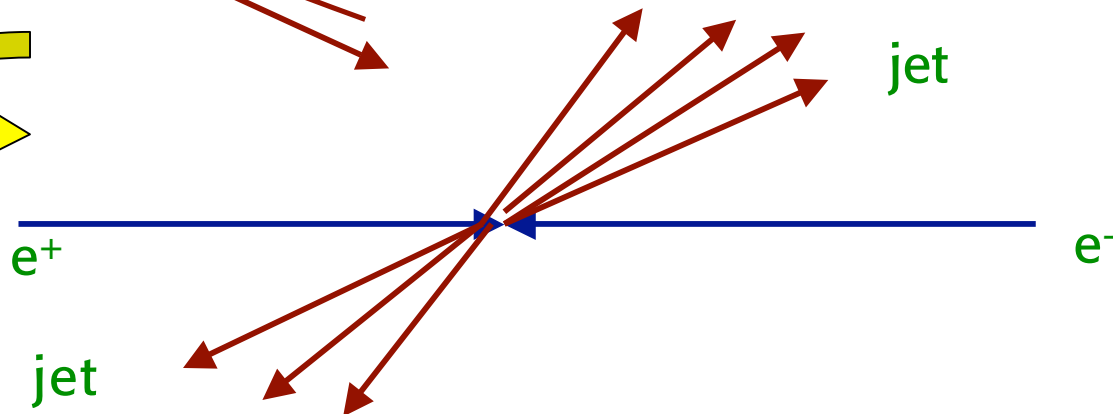
Potenziale $q-\bar{q}$: $V(r) \approx C_F \left[\frac{\alpha_s(r)}{r} + \dots + \sigma r \right]$

short \swarrow \searrow long dist.

Barioni: qqq
Mesoni: $q\bar{q}$



Cio' che rimane del quark e' un getto di adroni senza colore



Un evento a
due getti nel
rivelatore
DELPHI a LEP

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



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

$E \sim 100 - 1000 \text{ GeV} \longrightarrow \lambda \sim 10^{-16} - 10^{-17} \text{ cm}$
(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

$kT \sim E$

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

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



Principali priorit  di fisica LHC (ATLAS&CMS):

- Trovare la particella di Higgs (predetta dal Modello Standard)
- Ricerca di nuova fisica al $\sim \text{TeV}$ (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)



La particella di Higgs

Il settore elettrodebole del Modello Standard si basa su una congettura ancora non verificata: esiste una particella, il bosone di Higgs, che ha una interazione con tutte le altre particelle in proporzione alla loro massa.

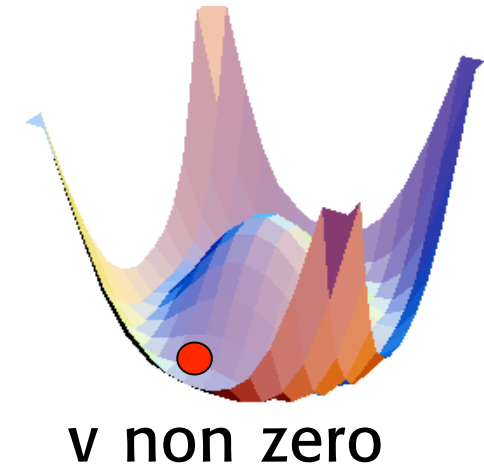
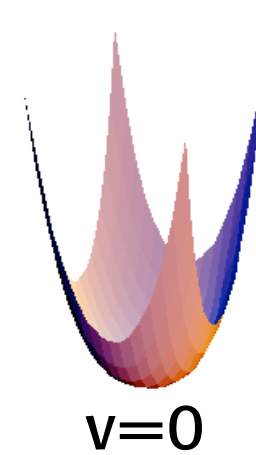
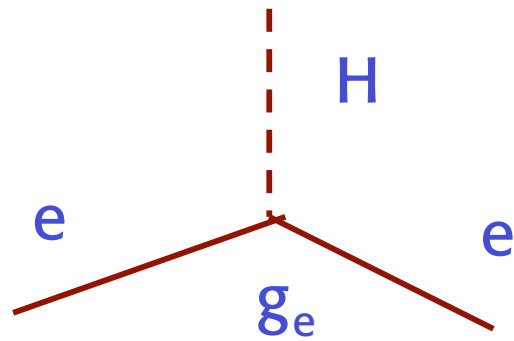
In effetti le masse dei W^\pm e Z , dei quark e dei leptoni sono tutte dovute a questa interazione

Dal fatto che non è stata ancora trovata sappiamo che $m_H c^2 > 114 \text{ GeV}$, ma dai suoi effetti indiretti che $m_H c^2 < 186 \text{ GeV}$

È difficile da produrre e da rivelare perché è molto pesante ed è solo accoppiata a particelle pesanti

⊕ Il LHC è stato progettato per trovarla

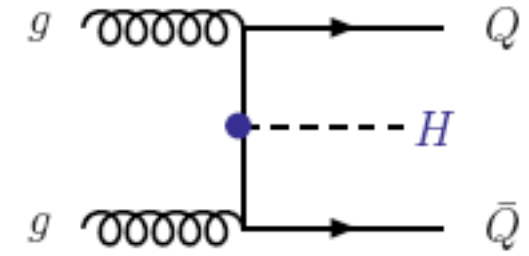
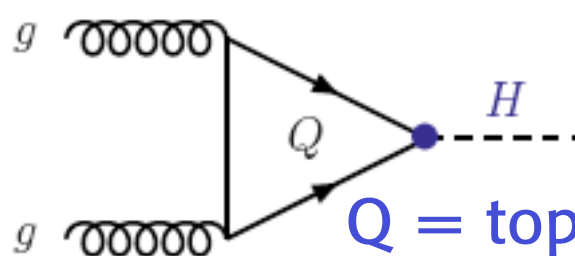
Il campo di Higgs oscilla intorno ad un valore medio costante v , non nullo, uguale in tutti i punti dello spazio



Una particella, per es. un elettrone, accoppiato al campo di Higgs con costante di accoppiamento g_e acquista una massa $m_e = g_e v$

Il bosone di Higgs e' difficile da osservare perche' e' pesante ($m > 114 \text{ GeV}/c^2$) ed e' solo accoppiato a particelle pesanti

p.es. a LHC:



Il MS funziona molto bene

Quindi perche' non trovare l'Higgs e poi dichiarare che la Fisica delle particelle e' compiuta?

Prima di tutto bisogna trovarlo!  LHC

A causa di:

Problemi concettuali

- Soprattutto il "problema della gerarchia"

E indicazioni sperimentali:

- Unificazione degli accoppiamenti
- Masse dei neutrini
- Materia oscura
- Bariogenesi (asimmetria materia-antimateria)
- Energia del vuoto



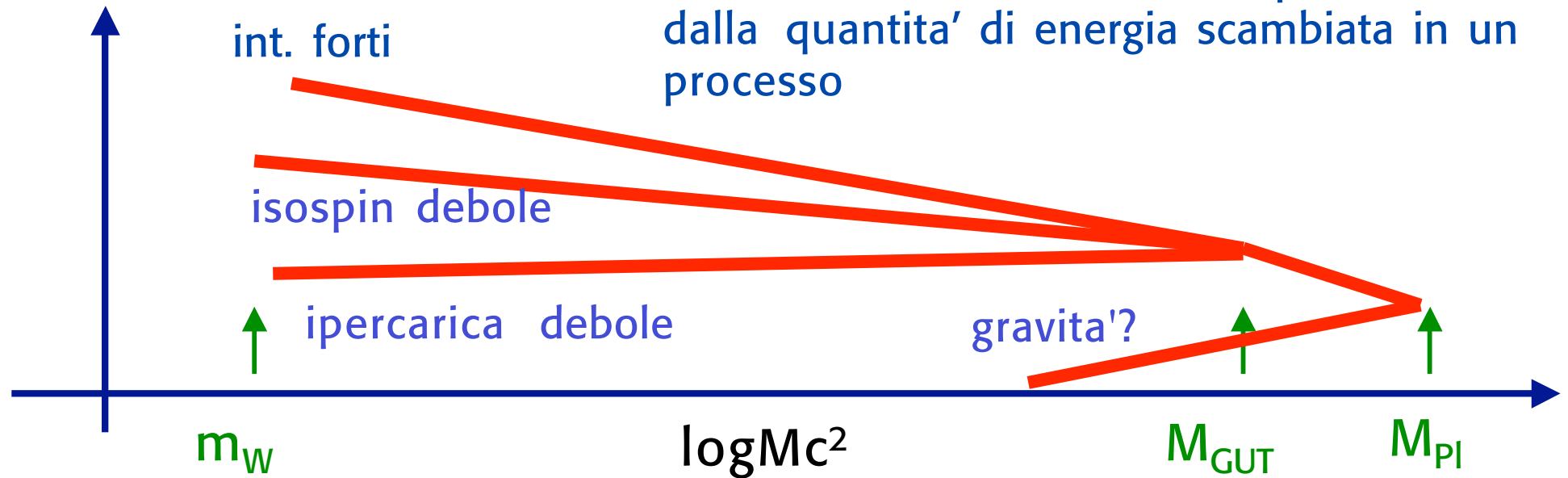
La Grande Unificazione

GUT's

Forti X Elettrodeboli X Gravitazionali

Intensita'

L'intensita' delle interazioni dipende dalla quantita' di energia scambiata in un processo



Le interazioni forti e elettrodeboli si unificano a $M_{GUT} c^2 \sim 10^{16}$ GeV

La gravita' quantistica a $M_{Pl} c^2 \sim 10^{19}$ GeV



$r \sim 10^{-33}$ cm

$$G_{Newton} = \frac{\hbar c}{M_{Pl}^2}$$

Il vero livello fondamentale e' a $M_{Pl} c^2$

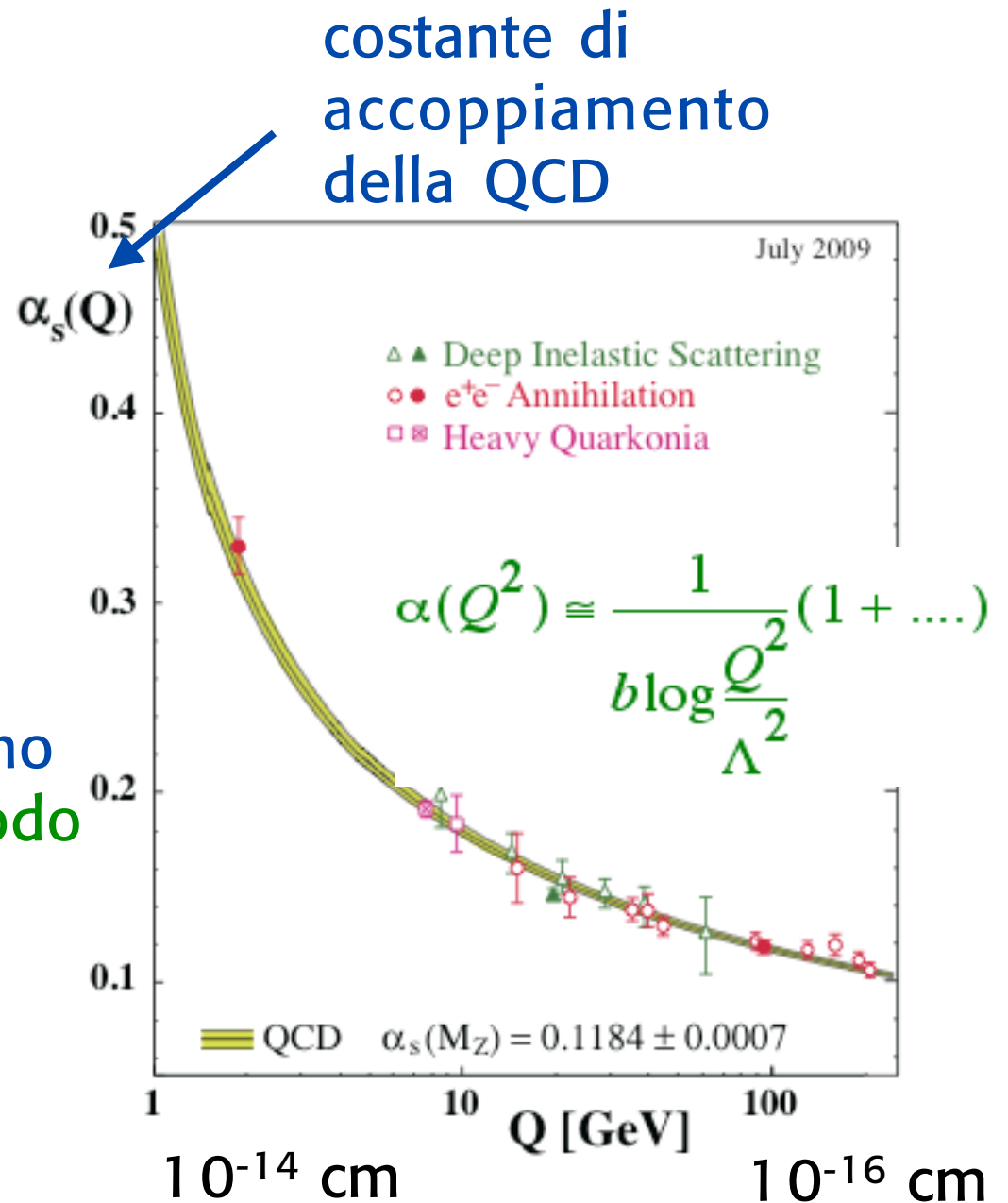


L'intensita' efficace delle interazioni, a causa delle correzioni quantistiche, dipende dalla distanza ovvero dall'energia trasferita

Le interazioni forti sono molto intense alle distanze caratteristiche degli adroni (10^{-13} cm) ma si indeboliscono a piu' piccole distanze (in modo calcolabile!)

Liberta' asintotica

Gross, Wilczek; Politzer
Nobel Prize 2004



La Grande Unificazione e' ormai accettata dai fisici teorici

- Un'unica grande simmetria G per tutte le interazioni
- Unita' delle forze
- Unita' dei quark e dei leptoni
differenti "direzioni" in G
- Spiegazione delle cariche osservate
 $Q_d = -1/3 \rightarrow -1/N_{\text{colour}}$
- Decadimento del protone, bariogenesi, masse dei neutrini
exp: vita media p $\tau_p > 2 \cdot 10^{29} - 1.6 \cdot 10^{33}$ anni
(Eta' dell'Universo $\sim 1.4 \cdot 10^9$ anni)

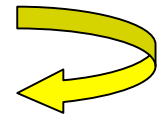
• • • • •



Problemi concettuali del MS

- I piu' ovvi:
- Niente gravita' quantistica ($M_{Pl} \sim 10^{19}$ GeV)
 - Ma una diretta estrapolazione del MS porta direttamente alle GUT's ($M_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV)

M_{GUT} vicino a M_{Pl}



- suggerisce l'unificazione con la gravita' (teoria delle stringhe)
- pone il problema della relazione m_W vs $M_{GUT} - M_{Pl}$

Puo' il MS essere valido fino a $M_{GUT} - M_{Pl}$??

← Il problema della gerarchia

Non solo appare molto improbabile ma la nuova fisica deve essere vicina (~qualche TeV)!



LHC

Il problema della gerarchia

Il Modello Standard va completato alle energie del TeV perche' la teoria risultante possa essere valida fino alla Grande Unificazione

Infatti la presenza di campi scalari fondamentali nel settore di Higgs porta ad una instabilita' della teoria:
in assenza di nuova fisica se metto per es la massa del W al valore osservato $m_W \ll M_{\text{GUT}}$ e accendo le correzioni quantistiche, m_W schizzerebbe a M_{GUT}

Rimedi possibili

Maggiore simmetria --> Supersimmetria

Higgs composti di fermioni

Ulteriori dimensioni spazio-temporali.....

⊕ In tutti i casi molte nuove particelle alla scala del TeV

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

$E \sim 100 - 1000 \text{ GeV} \longrightarrow \lambda \sim 10^{-16} - 10^{-17} \text{ cm}$
(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

$kT \sim E$

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

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



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

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

$$E=kT$$

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

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

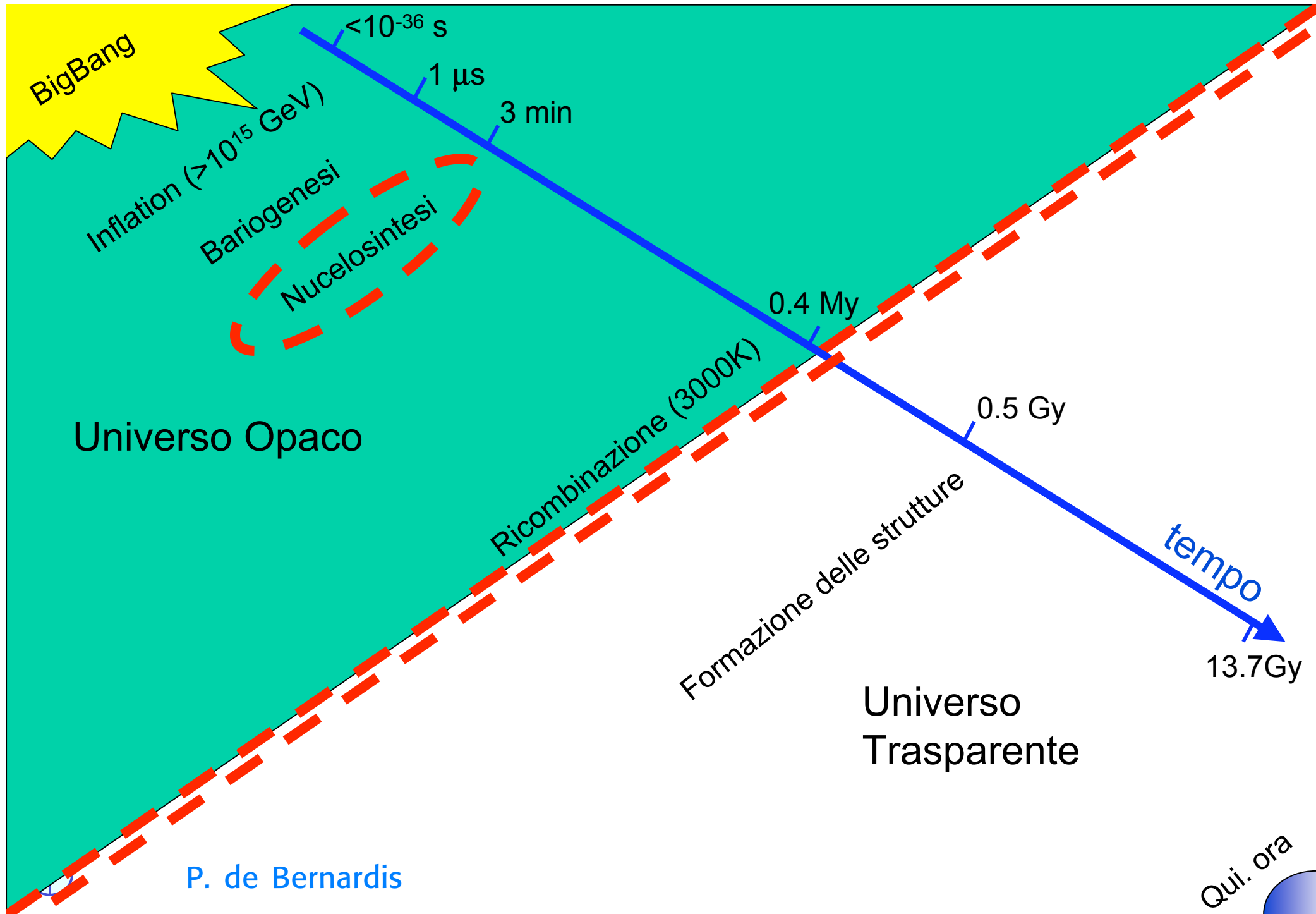


Nel primo secondo di vita dell'Universo c'e' tutta la Fisica!

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:	$t \sim 10^{-44}$,	$kT \sim 10^{19} \text{ GeV}$

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



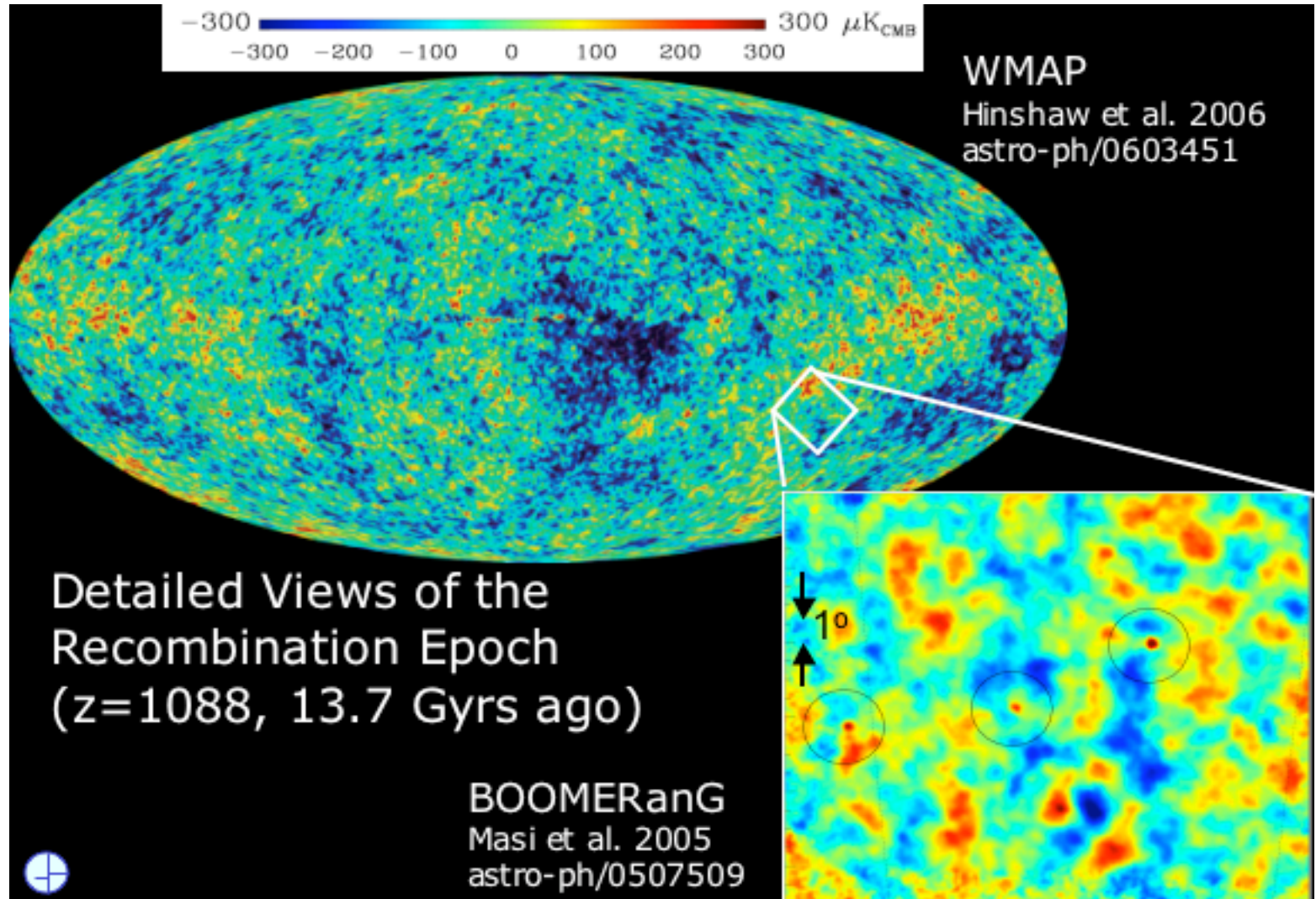


Lo studio delle anisotropie della radiazione di fondo fornisce un'immagine dell'universo quando si sono formate le strutture

COBE, WMAP, Boomerang, , Planck

in orbita dal 2009

Nobel 2006
Mather, Smoot



P. de Bernardis



14 Maggio 2009



Il progetto Planck: 2009-11 (ESA: European Space Agency)

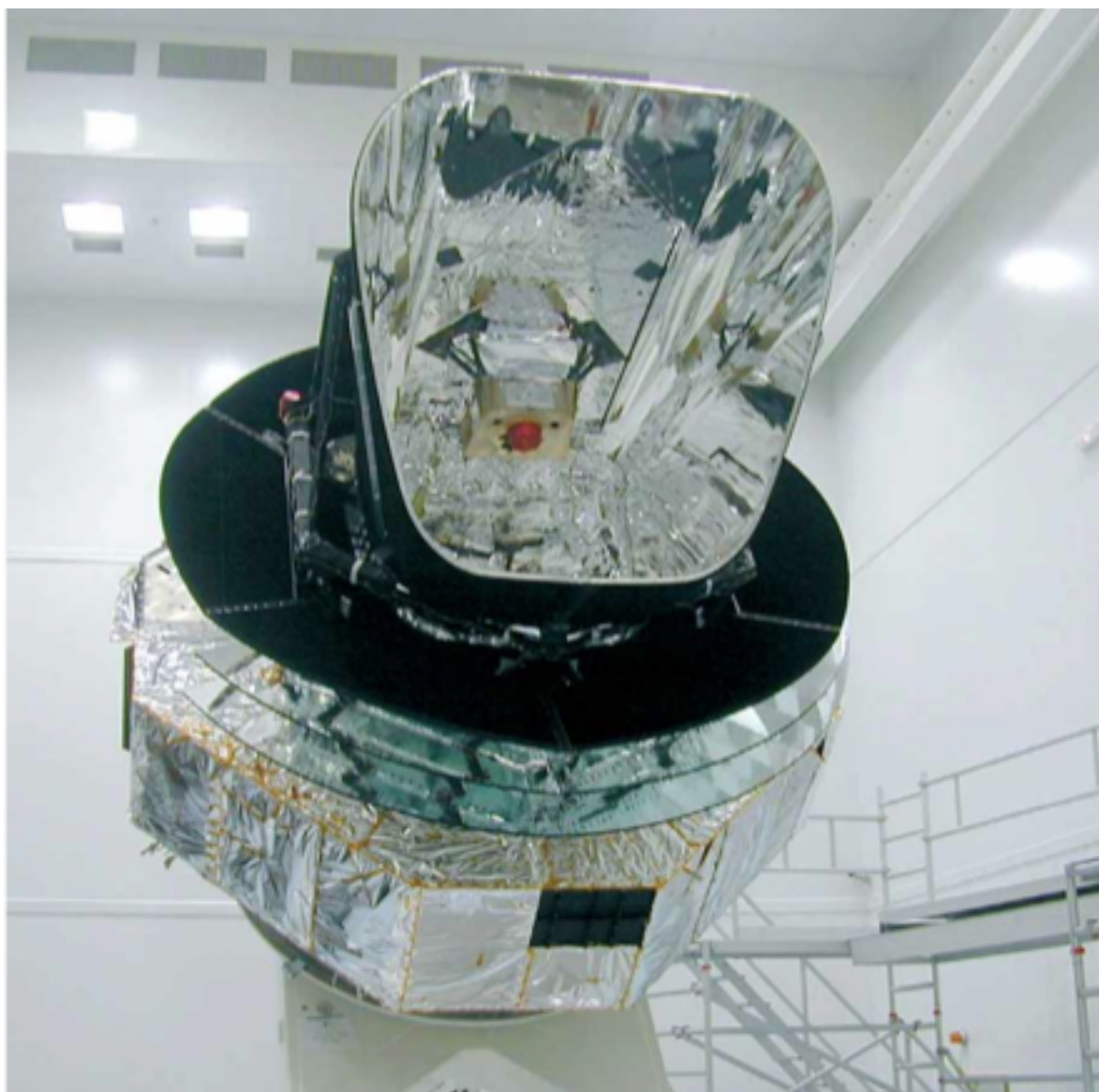
Costo: 700 milioni di Euro

Un telescopio nello spazio a 1.5 MKm dalla terra per studiare le anisotropie della radiazione cosmica di fondo

~1900 Kg, appross cilindrico ~4.2 m di altezza e di diametro

Lanciato dalla Guaiiana francese con un razzo Ariane 5 (insieme al telescopio Herschel)





Alcuni problemi comuni tra fisica delle particelle e cosmologia

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



Per Cosmologia si intende la struttura in grande dell'Universo,
non il nostro vicinato!

La Via Lattea

der
d
e
our
you
s no

La Terra
si muove con
 $v \sim 600 \text{ Km/s}$
rispetto alla
radiazione di
fondo

Noi siamo qui

Illustration Credit: R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA



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 dopo 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

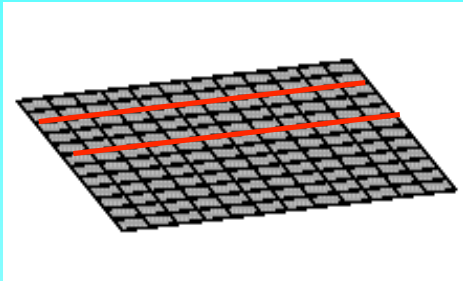
Che geometria ha il nostro universo ? Dipende da quanta massa-energia c'è !

Densità
Critica

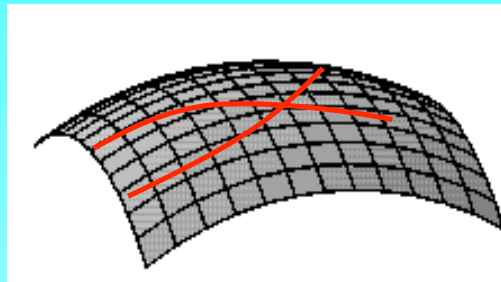
Densità
più alta

Densità
più bassa

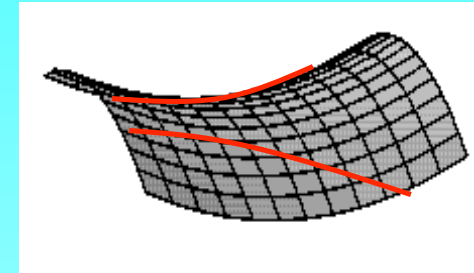
Spazio Euclideo in 2-D



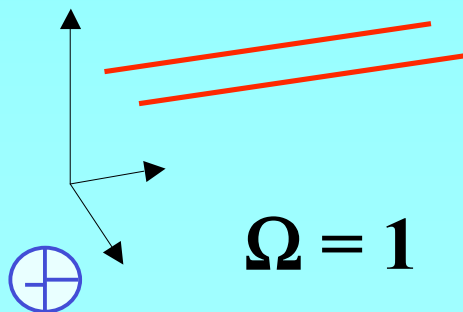
Spazio curvo in 2-D
(curvatura positiva)



Spazio curvo in 2-D
(curvatura negativa)

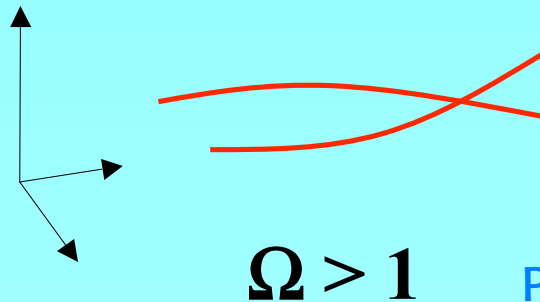


Spazio Euclideo in 3-D



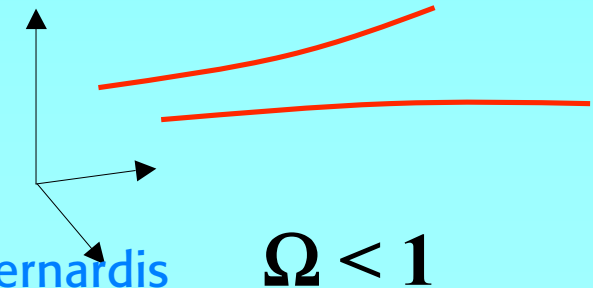
$$\Omega = 1$$

Spazio curvo in 3-D
(curvatura positiva)



$$\Omega > 1$$

Spazio curvo in 3-D
(curvatura negativa)



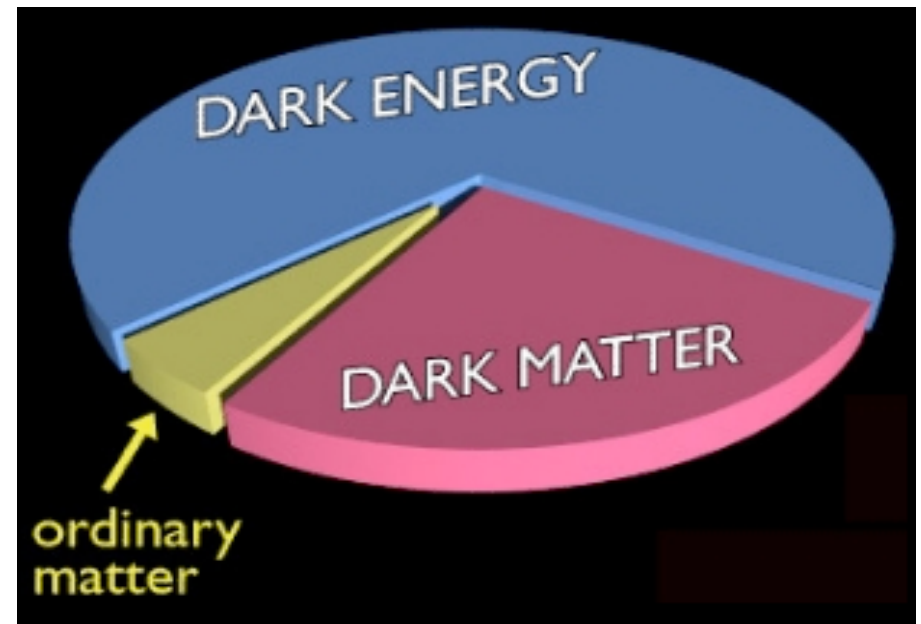
$$\Omega < 1$$

P. de Bernardis

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 ($\Omega =$ 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; i neutrini non vanno bene)



LHC ----> WIMP's
Weakly Interacting Massive Particles

⊕ M ~ 10-1000 GeV con interazioni elettro-deboli

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$$

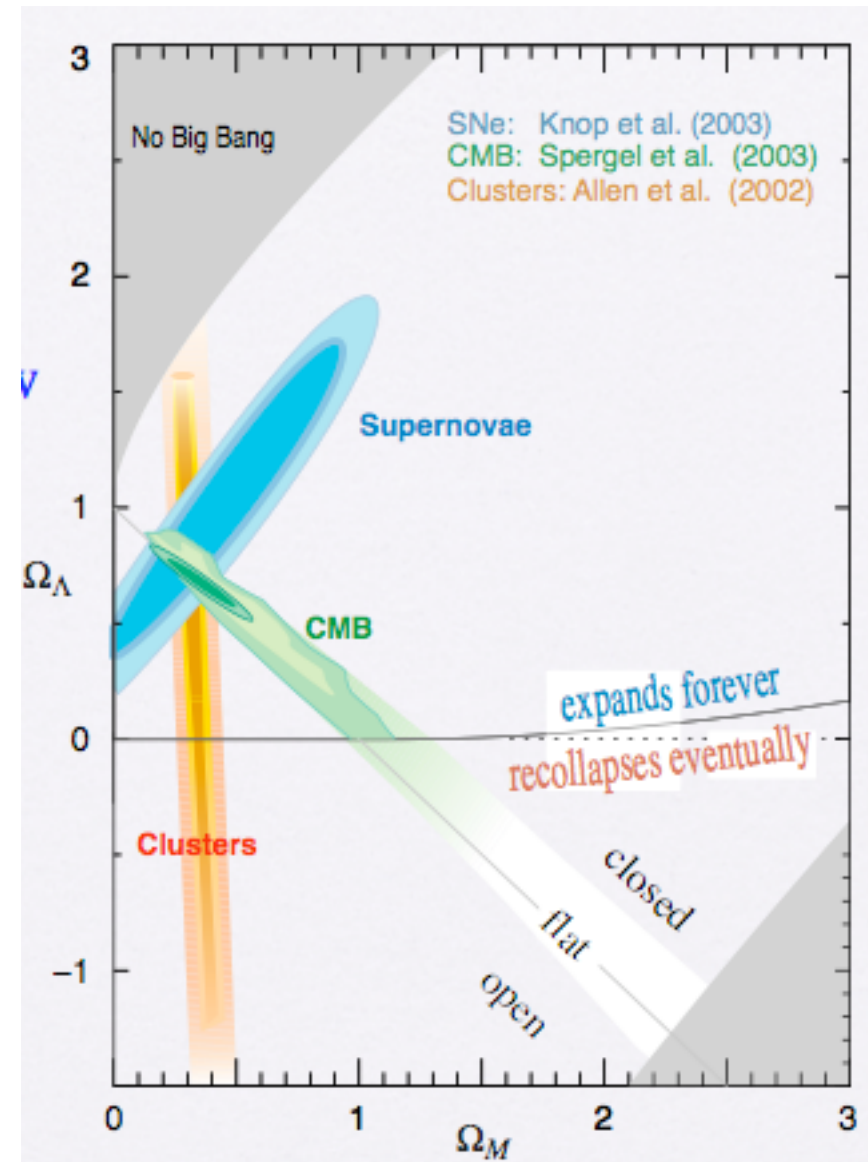
$$\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

EXP:

$\Omega \sim 1$ ← come predetto dall'inflazione

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_\Lambda \sim 0.7$$



L'evidenza per la materia oscura si ottiene da diverse osservazioni

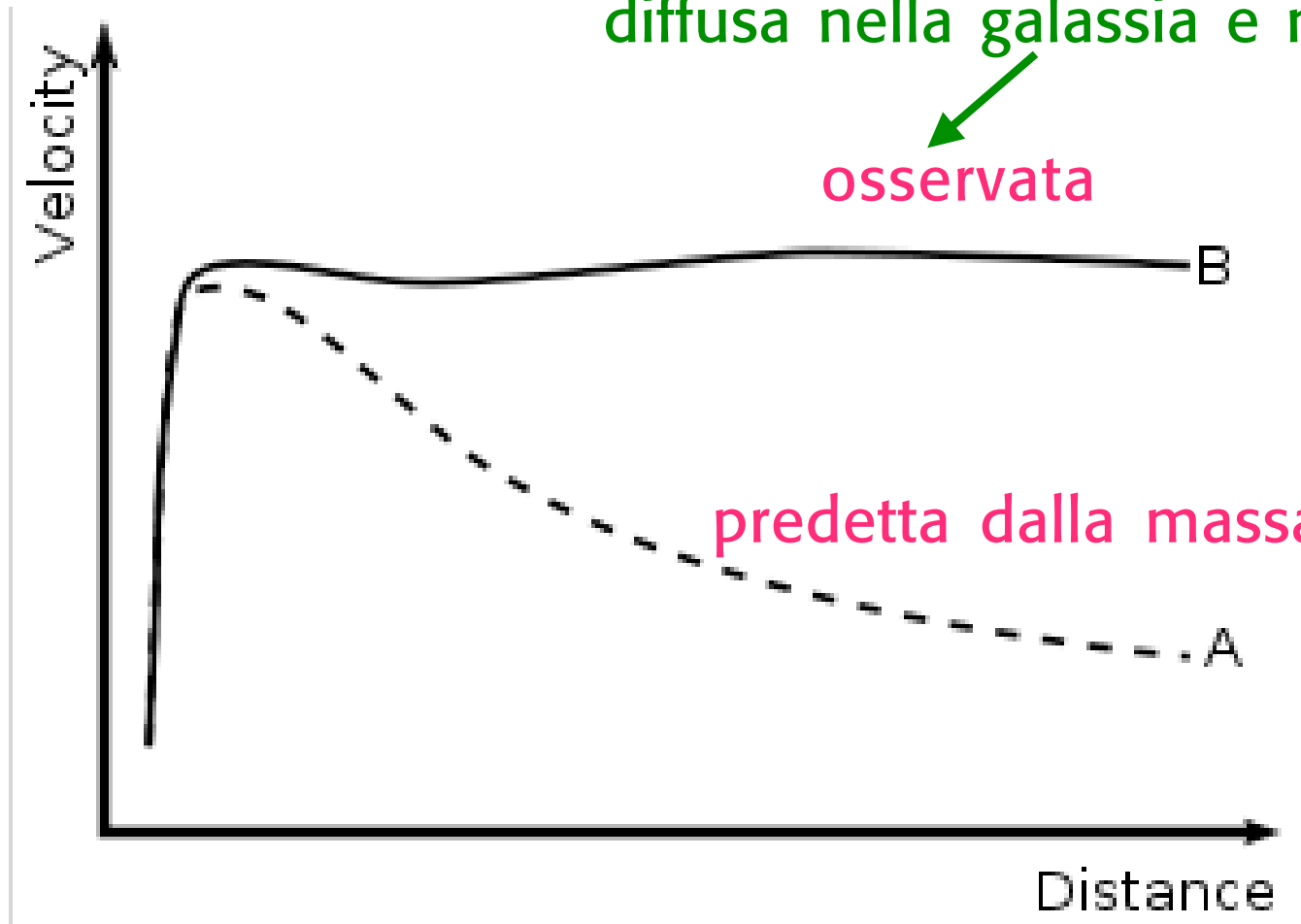
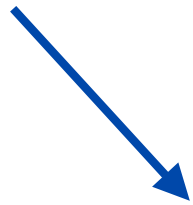
Per esempio:

- Le curve di rotazione delle galassie
- Deviazioni gravitazionali otticamente osservate (“gravitational lensing”)
- Anisotropie della radiazione di fondo e distribuzione di massa a grandi scale di distanza



La velocità di rotazione delle stelle o del gas in una galassia in funzione della distanza

compatibile con materia oscura diffusa nella galassia e nell'alone

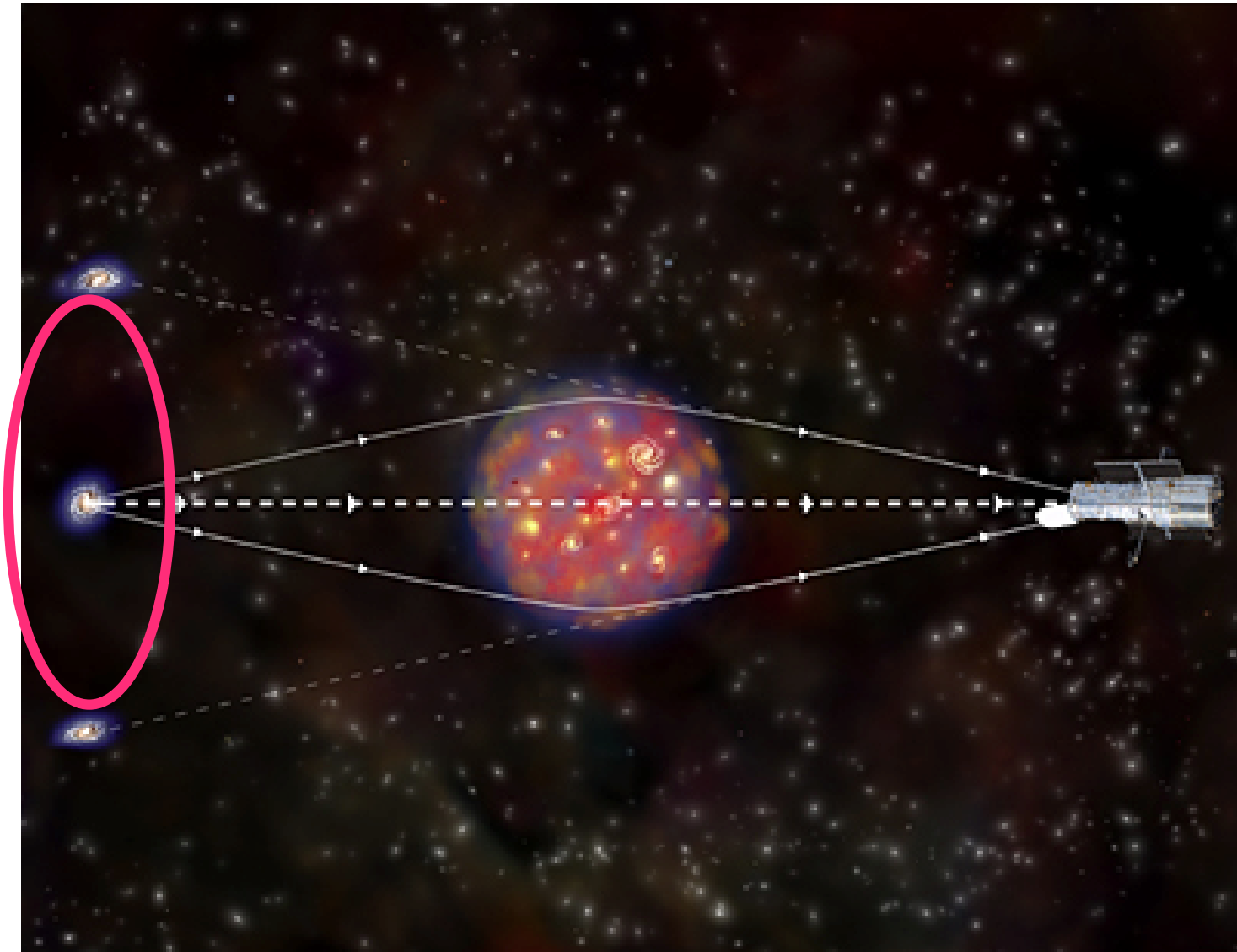


osservata

predetta dalla massa visibile



Gravitational Lensing: in condizioni perfette di allineamento con una massa enorme una stella lontana e' vista come un cerchio



Abell 2218 e' un insieme (cluster) di galassie



Gli archi di cerchio osservati indicano una massa centinaia
⊕ di volte maggiore di quella visibile

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, il colore...) 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")



Il problema dell'energia del vuoto si collega alla 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 $\sim 10^{-16}$ 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.

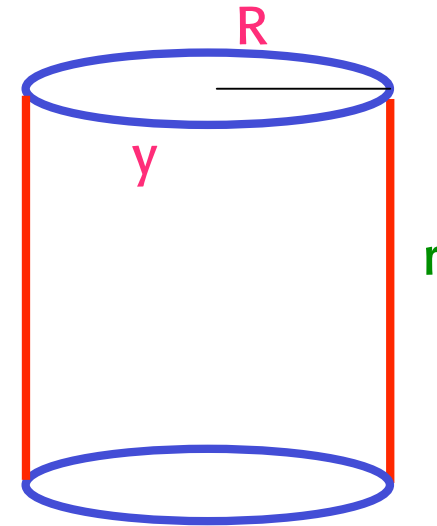
In altri Universi si potrebbero avere differenti soluzioni.

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

Conclusione

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

La fisica non e' finita!!!

Un gran numero di questioni basilari rimane aperto
l'Higgs, fisica oltre il MS, Grande Unificazione, decadimento del protone, la fisica del sapore (perche' 3 generazioni?), gravita' quantistica, teoria delle stringhe, materia oscura, bariogenesi, l'energia del vuoto, l'inflazione....

LHC ci potra' insegnare molte cose!!



Quark, 3 generazioni di Q., Q. puntiformi, Q. composti

Confinamento

Parole chiave

Liberta' asintotica

Modello Standard, Interazioni forti e elettrodeboli,
Bosone di Higgs

Grande Unificazione, problema della gerarchia

Gravita' quantistica, massa di Planck, teoria delle corde,
nuove dimensioni spazio temporali

Materia oscura, energia oscura, inflazione, $\Omega=1$



Universo o Multiverso