



Perchè LHC ?

- **Motivazioni scientifiche**
- **Descrizione dell'acceleratore**

**Giuseppe Iacobucci
INFN Napoli**

Cosa speriamo di imparare con l'acceleratore LHC ed i suoi rivelatori?

1. Quali sono le **leggi fondamentali** che regolano l'universo
2. Qual'è la **composizione dell'universo**

Convergenza della fisica delle particelle elementari e dell'astrofisica

Lo Standard Model

- Negli ultimi **decenni** i fisici delle particelle elementari hanno determinato in maniera completa le **leggi della natura** che regolano i fenomeni osservati **fino a distanze di $\approx 10^{-17}$ cm** (**0,000 000 000 000 000 01 cm !!!**)
- Questo costrutto teorico, ampiamente verificato sperimentalmente, è in grado di descrivere le **interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche**.
- Viene chiamato “**Modello Standard delle particelle elementari e delle loro interazioni**” o in breve “**SM**”

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

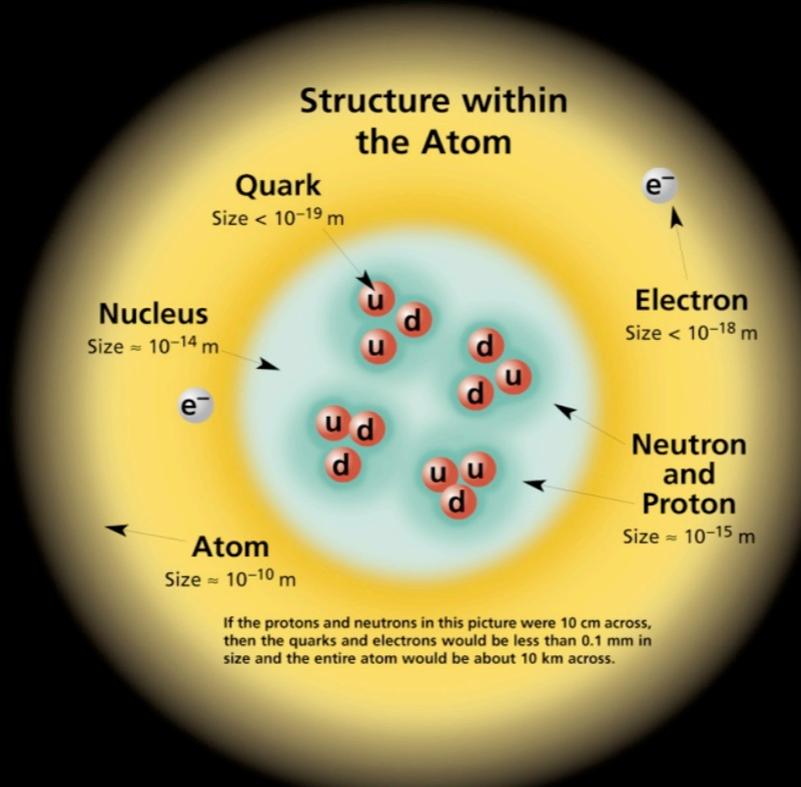
matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3



If the protons 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.

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

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^{-18} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	

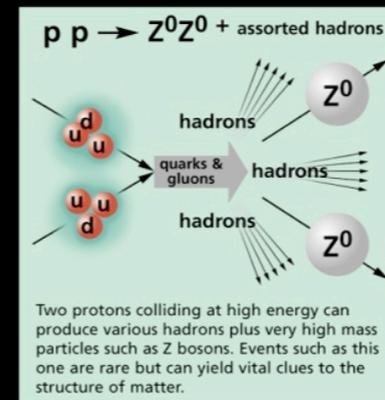
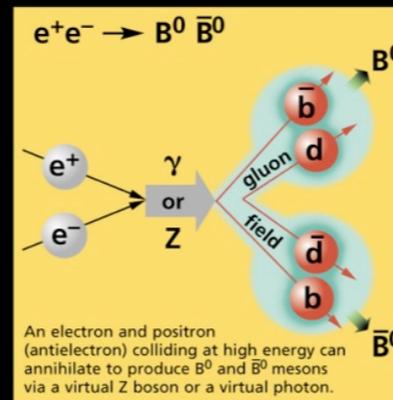
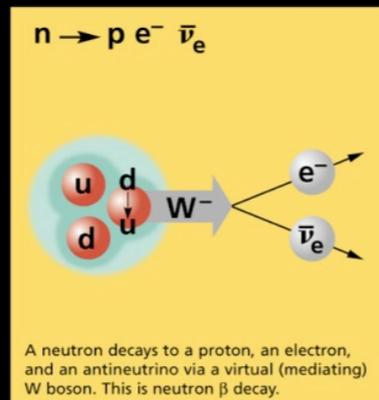
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are **not** exact and have **no** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

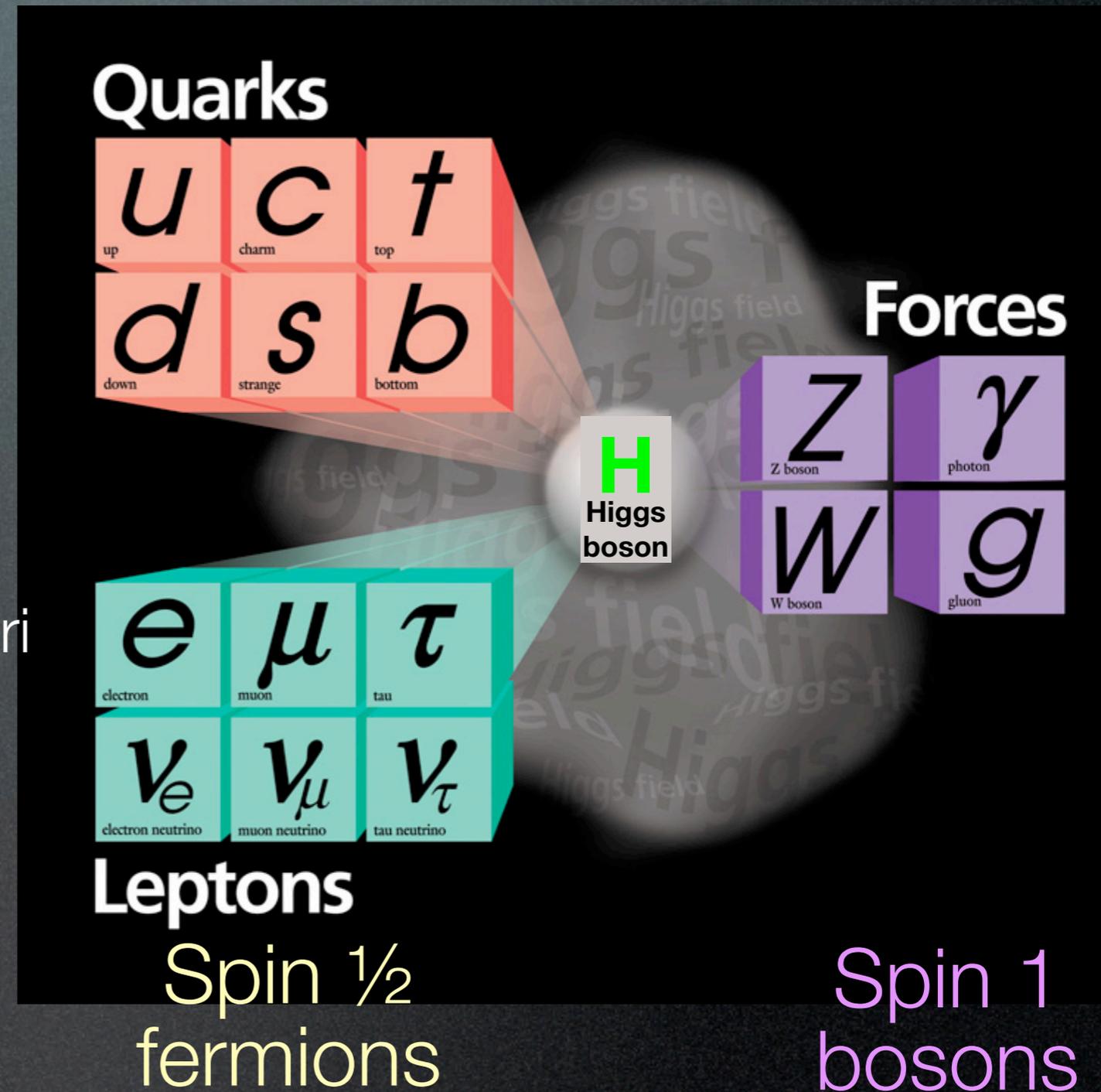
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

Il Modello Standard delle particelle elementari e delle loro interazioni

- Simmetria di gauge:
 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
colore isospin ipercarica
- 3 generazioni di quarks e leptoni
- i Bosoni mediano le forze
- eccellente accordo con i dati sperimentali ottenuti agli acceleratori di particelle. Un enorme successo!
- 19 parametri liberi (forse troppi...)
- un solo pezzo mancante:

il bosone di Higgs



Lo Standard Model non descrive tutte le osservazioni sperimentali

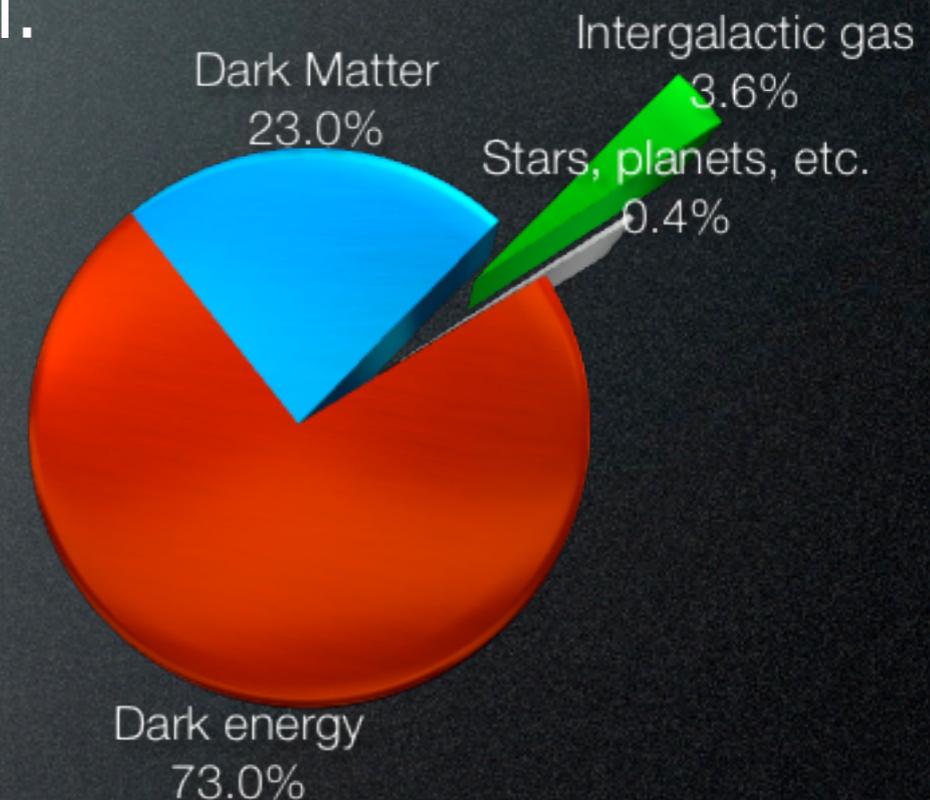
i dati non descritti dallo Standard Model:

Cosmologia

- Bariogenesi: $n_B/n_\gamma \approx 10^{-10}$
- Asimmetria materia/antimateria
- Dark matter, dark energy

Fisica delle particelle

- Masse e "mixing" dei neutrini
- Problema della "gerarchia": perche' $G_N/G_F \approx 10^{-32}$?
- Origine delle masse delle particelle (\Rightarrow meccanismo di Higgs??)

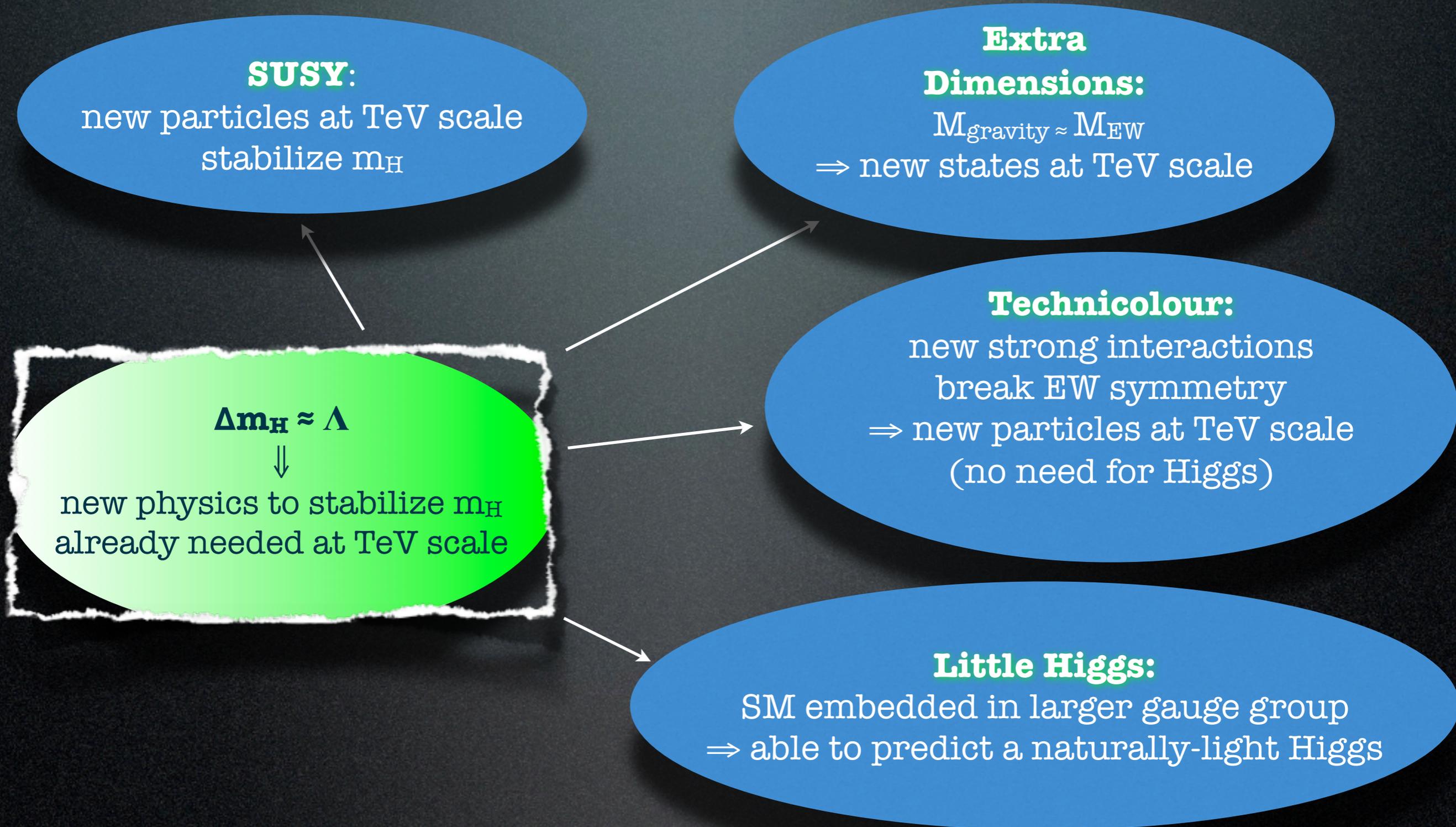


suggeriscono che ci debba essere una teoria ancora piu' fondamentale di cui il Modello Standard sia una approssimazione a bassa energia

Perche' l'LHC ?

- per scoprire il meccanismo che da' **massa** alle particelle (meccanismo di Higgs ?)
- per scoprire se ci sono **teorie ancora piu' fondamentali** dello Standard Model (meno parametri liberi?) che diano risposte ai quesiti ancora aperti ed a quelli che verranno dall'LHC stesso e dalla cosmologia

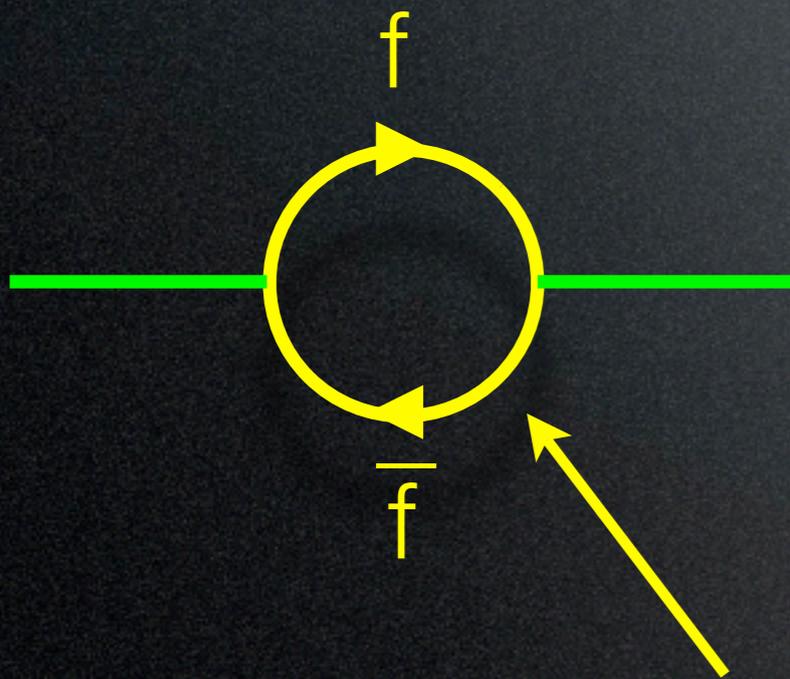
Theories Beyond the SM



Tutte queste ipotesi richiedono particelle di massa ≈ 1 TeV.
 \Rightarrow bisogno di un acceleratore di tali energie

Prima di discutere il meccanismo di Higgs ricordiamo in cosa consiste

il vuoto nella teoria dei quanti:



... è tutt'altro che vuoto!

Coppie virtuali particella-antiparticella vengono prodotte dal nulla, purché rispettino la diseguaglianza di Heisenberg: $\Delta E \cdot \Delta t < \hbar$

le particelle virtuali hanno gli stessi numeri quantici e le stesse proprietà delle particelle reali, eccetto che:

$$E^2 - p^2 \neq m^2$$

Il meccanismo di Higgs

Le masse non emergono da sole dalla teoria dello Standard Model.

Pero` secondo il meccanismo di Higgs,

il vuoto e` riempito da un “condensato di bosoni di Higgs”:

quarks, leptoni, bosoni W e Z mentre viaggiano attraverso il “vuoto” collidono continuamente con questi bosoni di Higgs.

Il risultato e` che muoversi attraverso il condensato di Higgs e` come muoversi in un liquido molto denso, che rallenta qualsiasi particella con cui interagisce \Rightarrow e` come se acquisisse massa

Piu` forte e` la interazione tra una particella ed il condensato di Higgs piu` pesante diviene la particella.

In altre parole, per costruzione:

“l'accoppiamento” tra il bosone di Higgs ed una particella e` proporzionale alla massa della particella

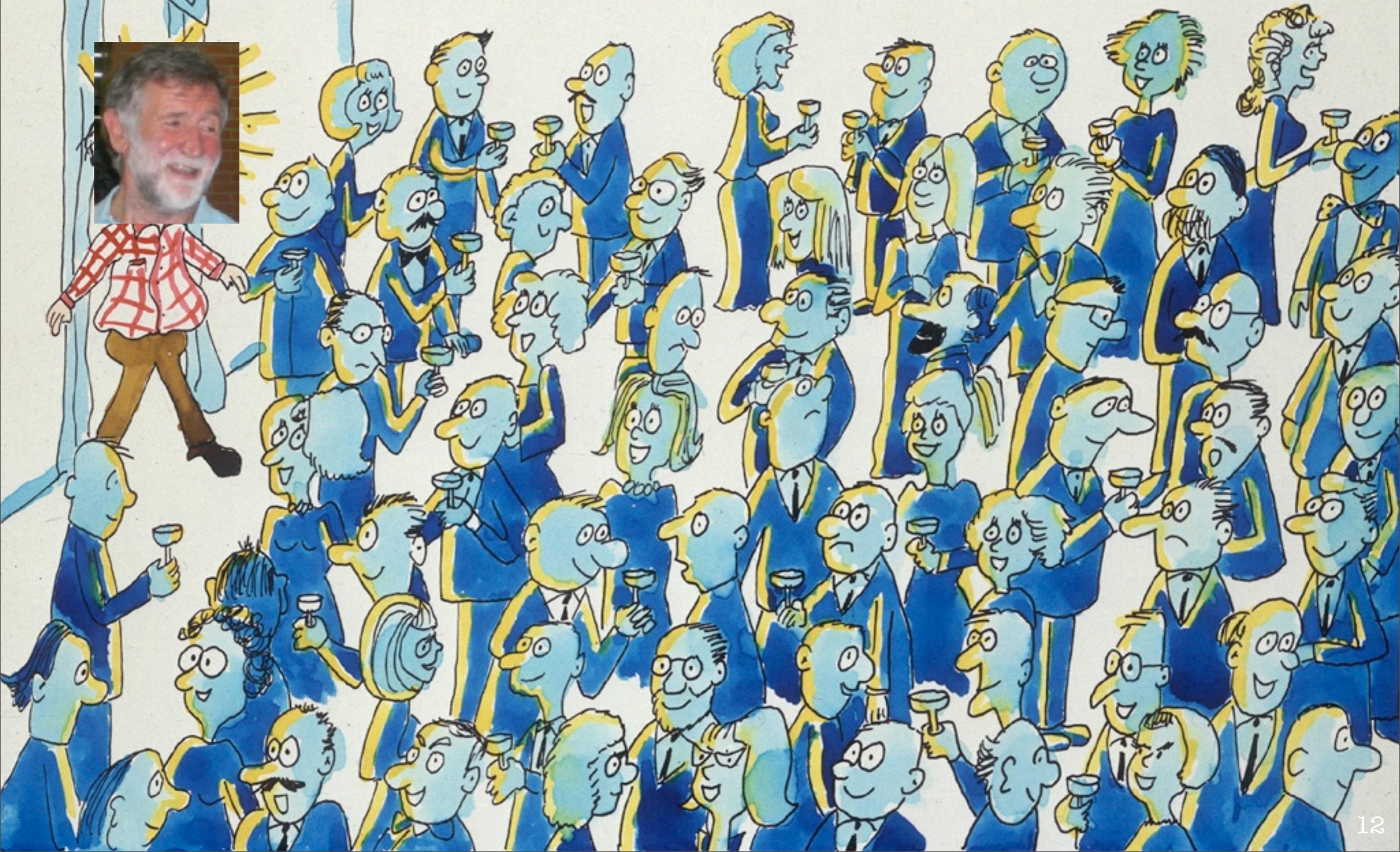
Per capire il meccanismo di Higgs, immaginate che una stanza piena di fisici che discutono tranquillamente sia lo spazio riempito dal campo di Higgs (il condensato di Higgs)...



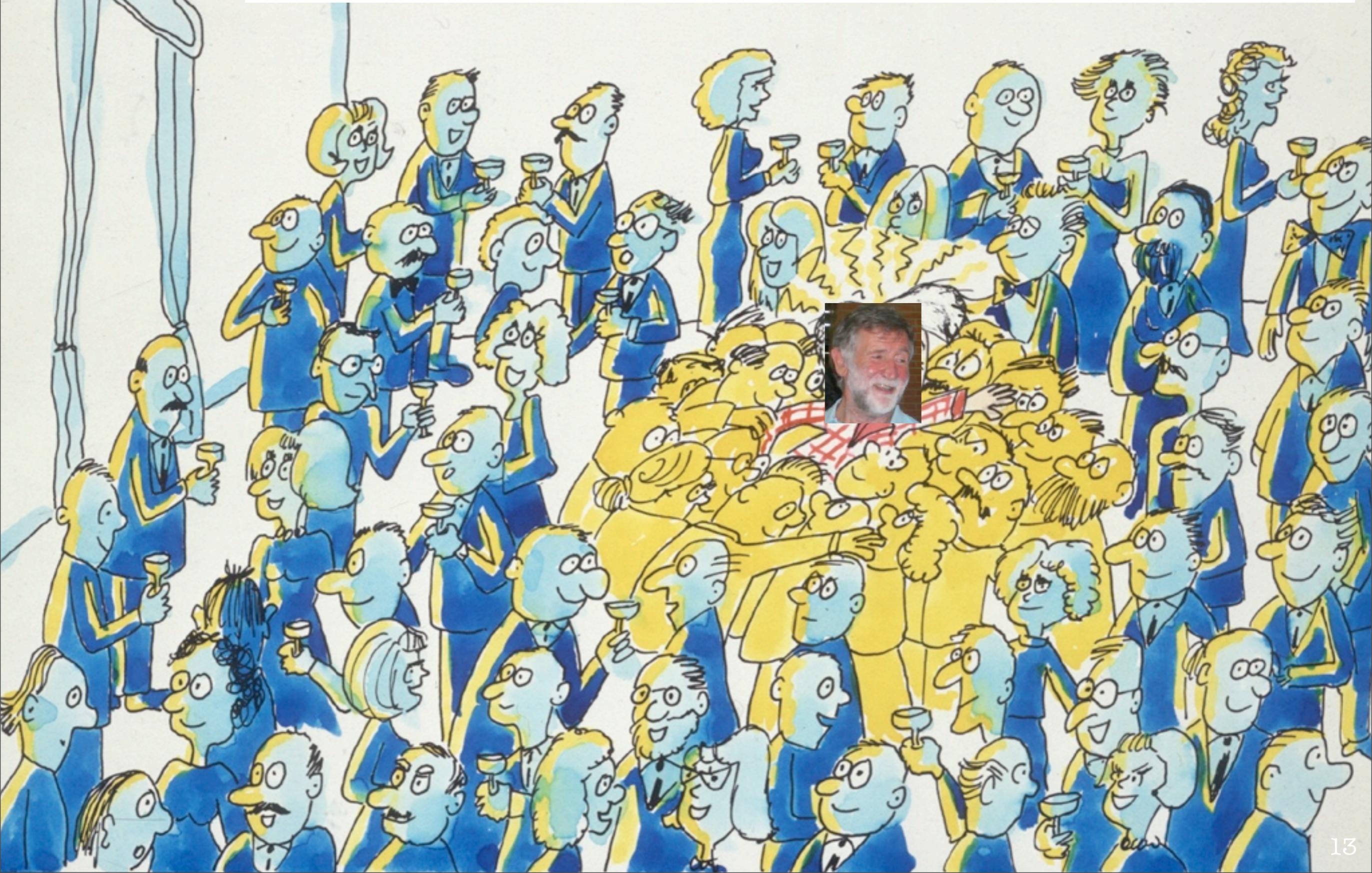
... uno scienziato famoso all'improvviso entra nella stanza, attirando l'attenzione dei presenti, ed attraendo gruppi di ammiratori ad ogni passo...



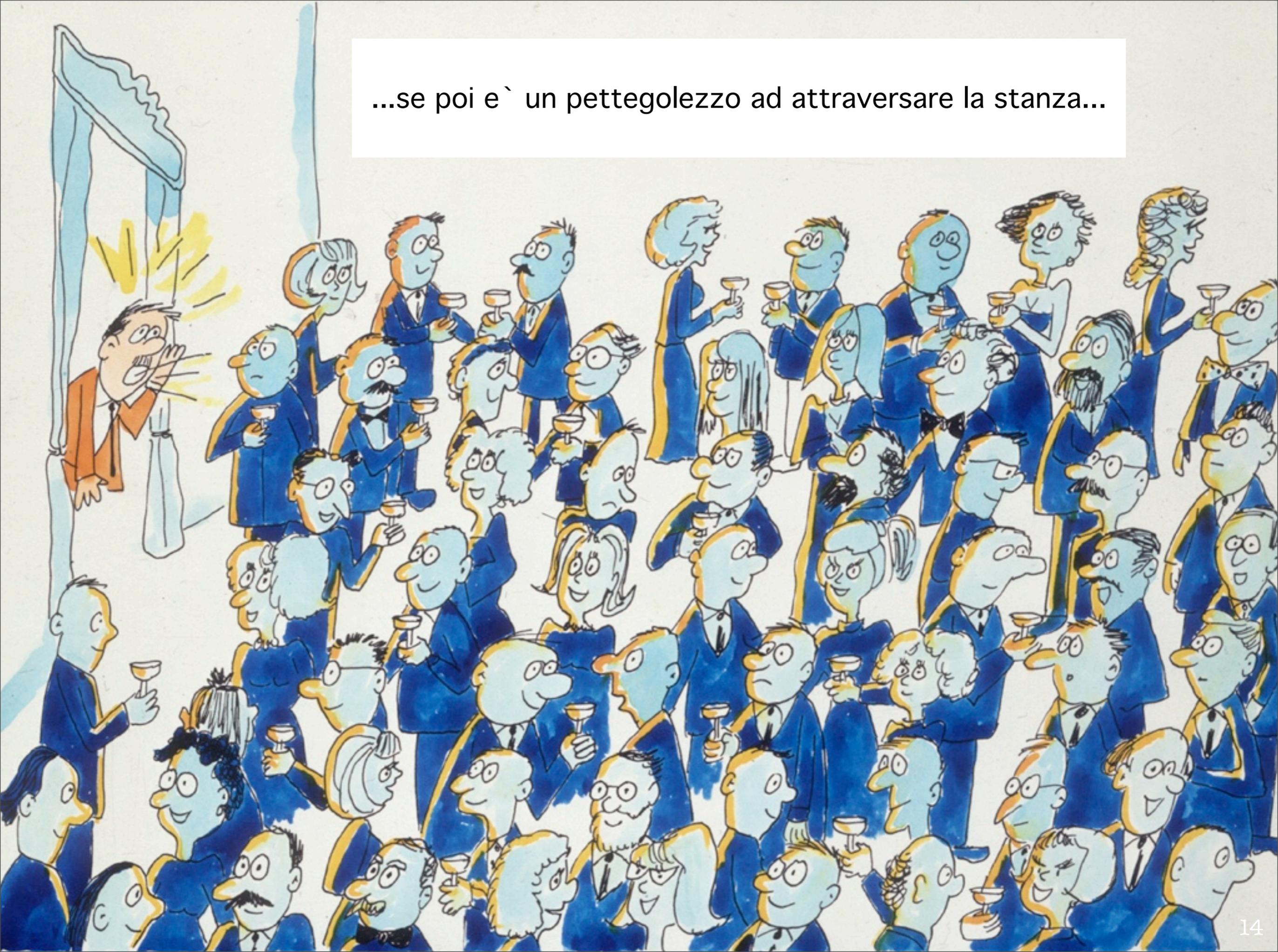
... uno scienziato famoso all'improvviso entra nella stanza, attirando l'attenzione dei presenti, ed attraendo gruppi di ammiratori ad ogni passo...



...di conseguenza, i suoi movimenti trovano sempre maggior resistenza. In altre parole, e` come se il fisico famoso acquisisse una massa maggiore. Questo e` quello che accade ad una particella che si muove nel campo di Higgs.



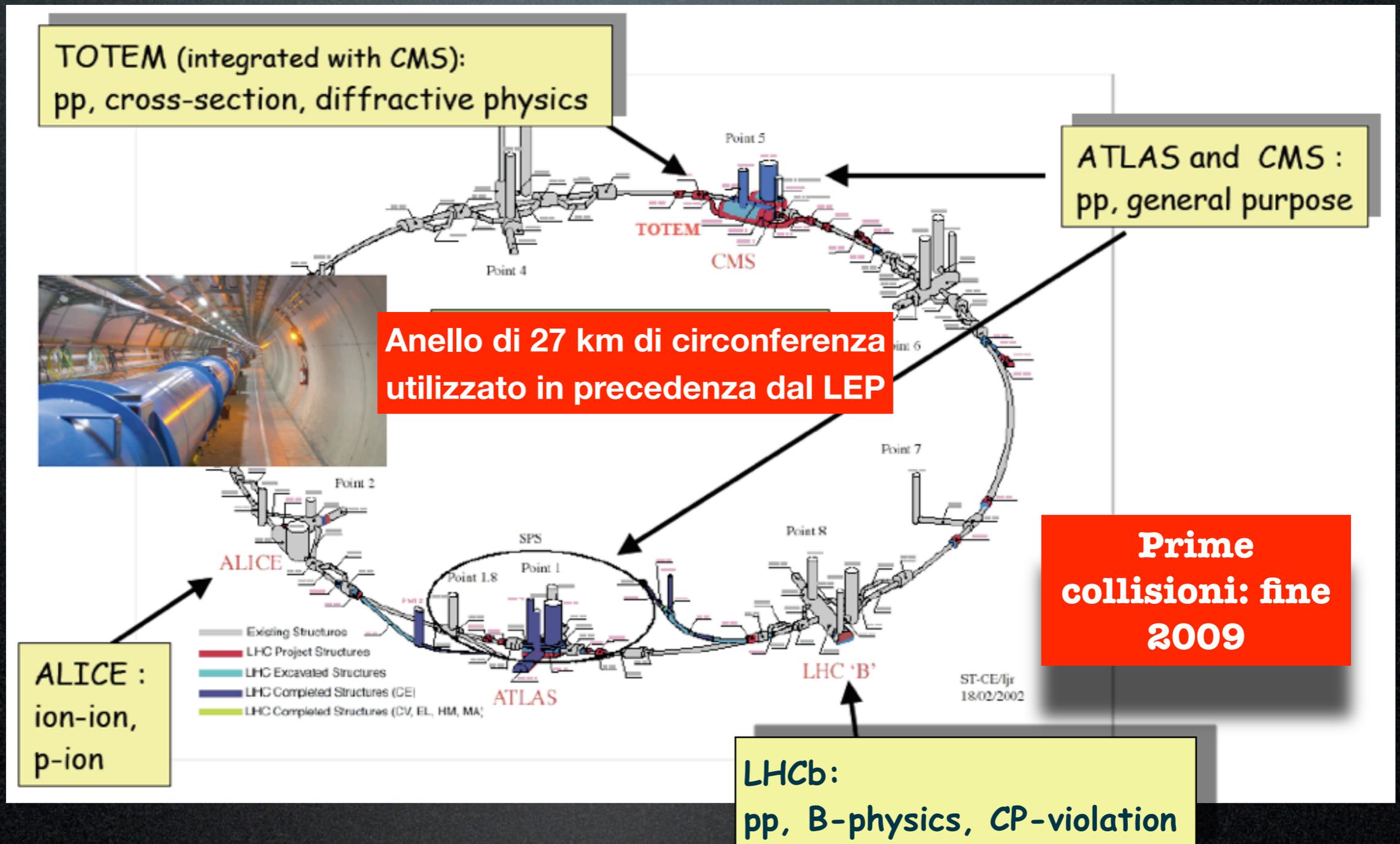
...se poi e` un pettegolezzo ad attraversare la stanza...



...esso crea lo stesso tipo di raggruppamenti, ma in questo caso tra i fisici stessi. In questa analogia, questi raggruppamenti sono i bosoni di Higgs.



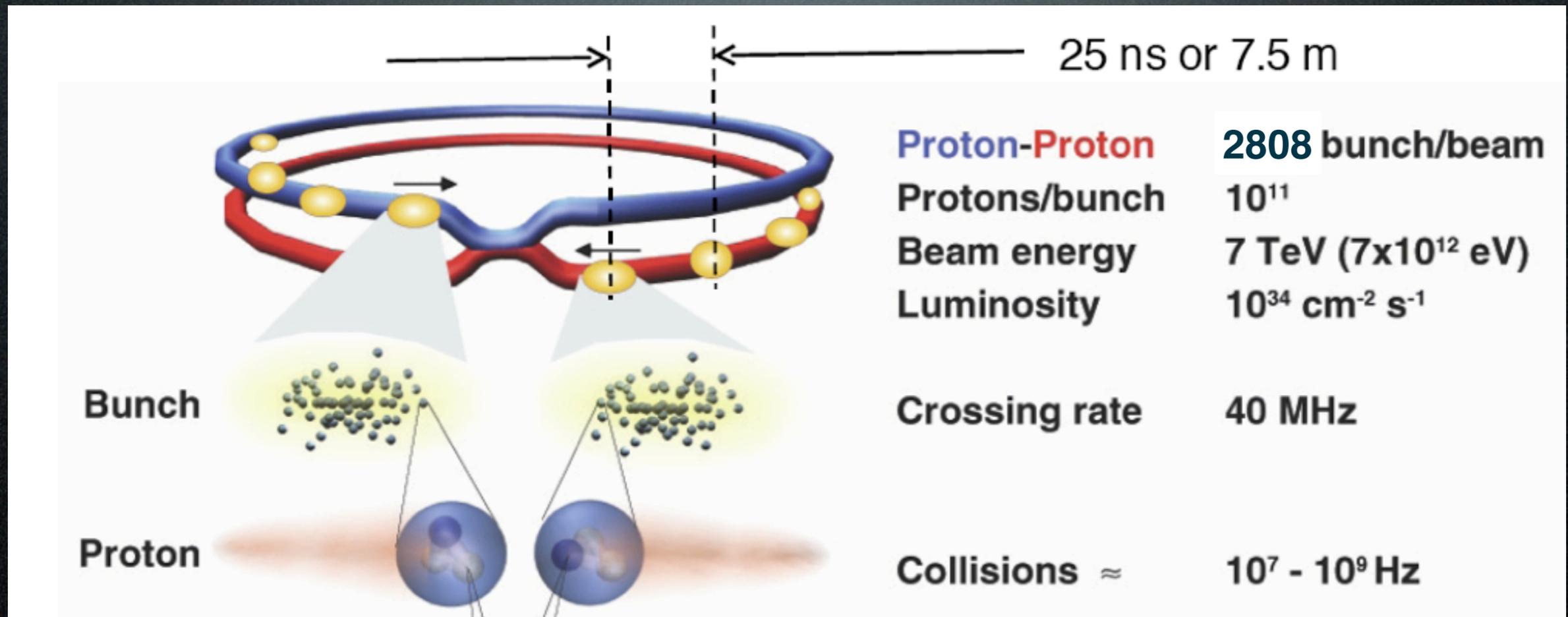
The Large Hadron Collider



LHC: la macchina dei records

- Costo: ≈ 4 miliardi di € (acceleratore + esperimenti)
- Risorse umane: > 5000 fisici coinvolti
- Energia: $\sqrt{s} = 14$ TeV,
 - ▶ 7 volte maggiore che al Tevatron
 \Rightarrow si possono cercare particelle di massa fino a ≈ 5 TeV
- Luminosità: $L_{\text{design}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - ▶ 100 volte maggiore che al Tevatron
 \Rightarrow si possono cercare PROCESSI RARI
- Dimensioni e complessità di rivelatori ed acceleratore
 - ▶ il più grande sistema criogenico del mondo: 1232 magneti dipoli superconduttori che lavorano a 1.9 °K per generare $B = 8.4$ Tesla

I parametri dell'LHC in breve



1 miliardo di collisioni al secondo in ogni esperimento di cui “solo” 100 eventi al secondo saranno selezionati online (1-2 MB ciascuno) e scritti, per un totale di 15 PB all'anno (15 milioni di GB... una pila di CD alta 20 km ogni anno !!!)

Di quali energie stiamo parlando ???

- di un moscerino in volo ?
- di una moto lanciata a 60 km/h ?
- di una portaerei che naviga a 10 nodi ?

Di quali energie stiamo parlando ???



... di una portaerei che naviga a 10 nodi !

Infatti:

qui facciamo collidere due fasci di protoni di $E = 7 \text{ TeV}$ ciascuno:

- 1 TeV è \approx l'energia cinetica di un moscerino in volo (... poca roba, ma questa energia è "compressa" in una regione 10^{-12} di un moscerino!)
- ed ho $7 \text{ (TeV)} \times 2808 \text{ (bunches)} \times 10^{11} \text{ protoni/bunch}$

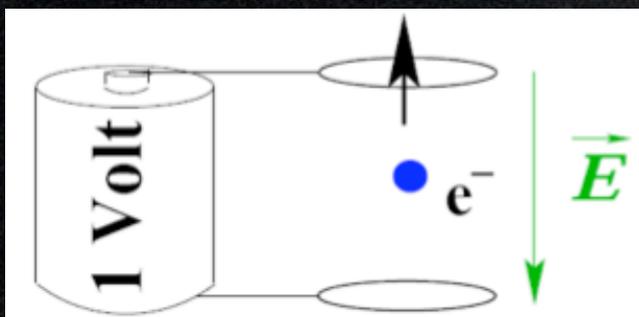
Ne risulta una **energia per fascio di $\approx 300 \text{ MJ}$**

- **abbastanza per fondere 500 kg di rame, oppure**
- **equivalente a:**

60 kg di dinamite,

un Airbus A320 a pieno carico in fase di atterraggio,

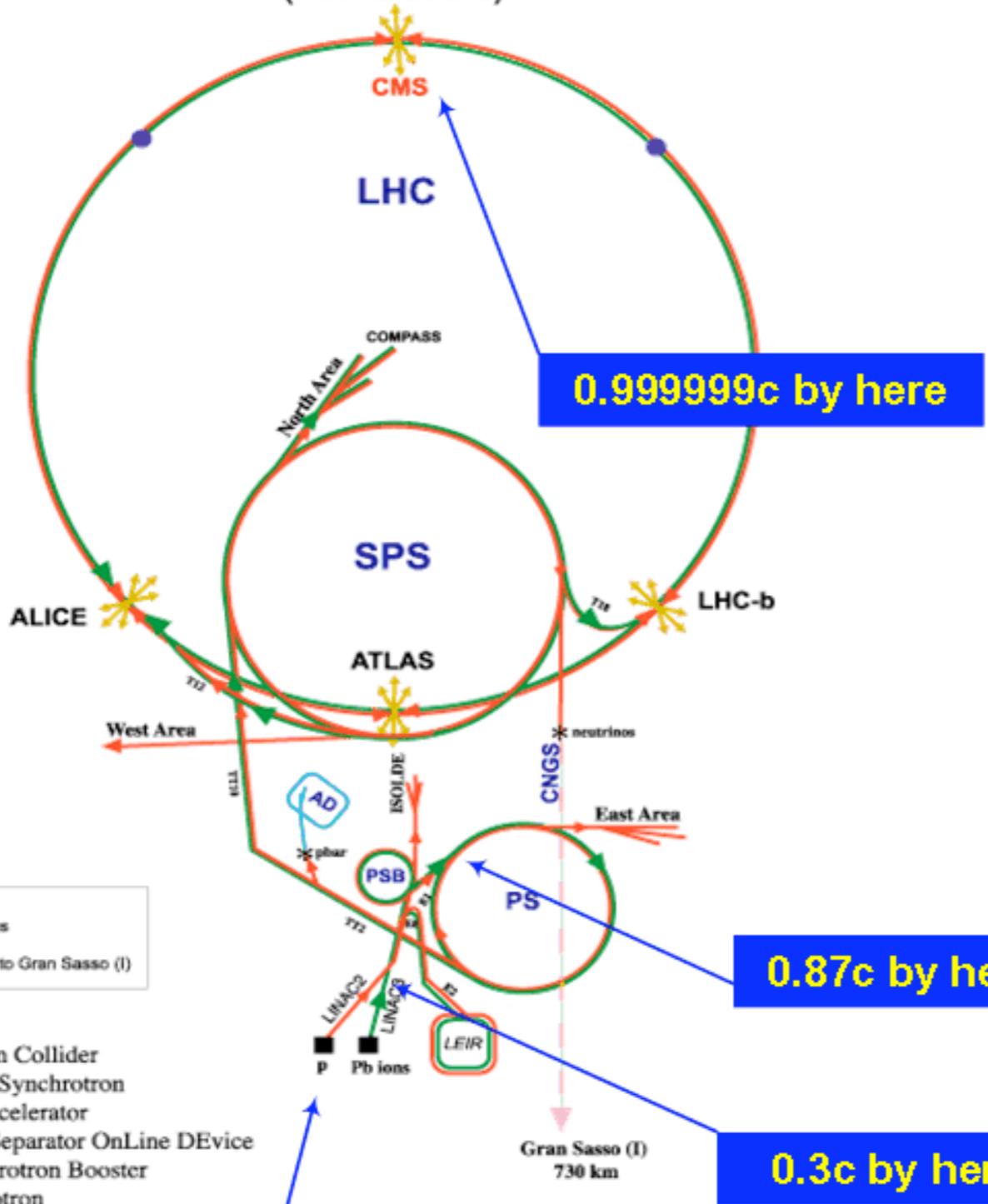
una portaerei che naviga a circa 10 nodi



1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joules, e' l'energia cinetica acquisita da un elettrone libero accelerato da un campo di 1 V

$$\begin{aligned} 1 \text{ LHC beam} &= 7 \cdot 10^{12} \cdot 2808 \cdot 10^{11} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ &= 3.1 \cdot 10^{4+11-7} = 3.1 \cdot 10^8 \text{ J} = 310 \text{ MJ} \end{aligned}$$

CERN Accelerators (not to scale)

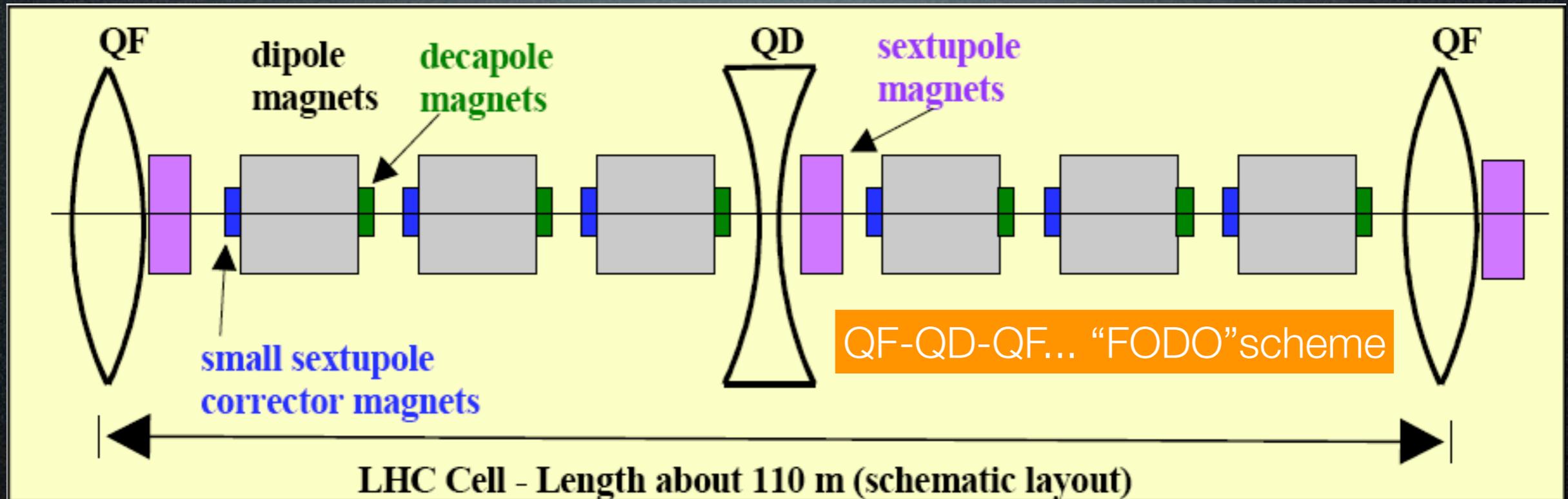


- LHC: Large Hadron Collider
- SPS: Super Proton Synchrotron
- AD: Antiproton Decelerator
- ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
- PSB: Proton Synchrotron Booster
- PS: Proton Synchrotron
- LINAC: LINear ACcelerator
- LEIR: Low Energy Ion Ring
- CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96
Revised and adapted by Antonella Del Russo, ETT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
D. Manglunki, PS Div. CERN, 23.05.01

Acceleratore	Energia (GeV)	Circonf. (km)	Anno
Linac	0.05		
PSBooster	1.4	0.15	1972
PS	28	0.6	1959
SPS	450	7	1976
LHC	7000	27	2007

Elemento di ottica dell'LHC



- Magneti **dipoli** (curvanti) e **quadrupoli** (QF = focalizzatori, QD = defocalizzatori)
 - ▶ forniscono una traiettoria stabile per particelle con momento nominale
- Magneti **sestupoli**
 - ▶ correggono le traiettorie per le particelle con momento sbagliato (errori "cromatici")
- Magneti correttori multipolari
 - ▶ piccoli **sestupoli** e **decapoli** ai lati dei dipoli, sono usati per compensare le imperfezioni dei dipoli e stabilizzare le traiettorie delle particelle per aumentare la vita media dei fasci

I magneti dipoli dell'LHC

1232 dipoli sono disposti lungo il tunnel.

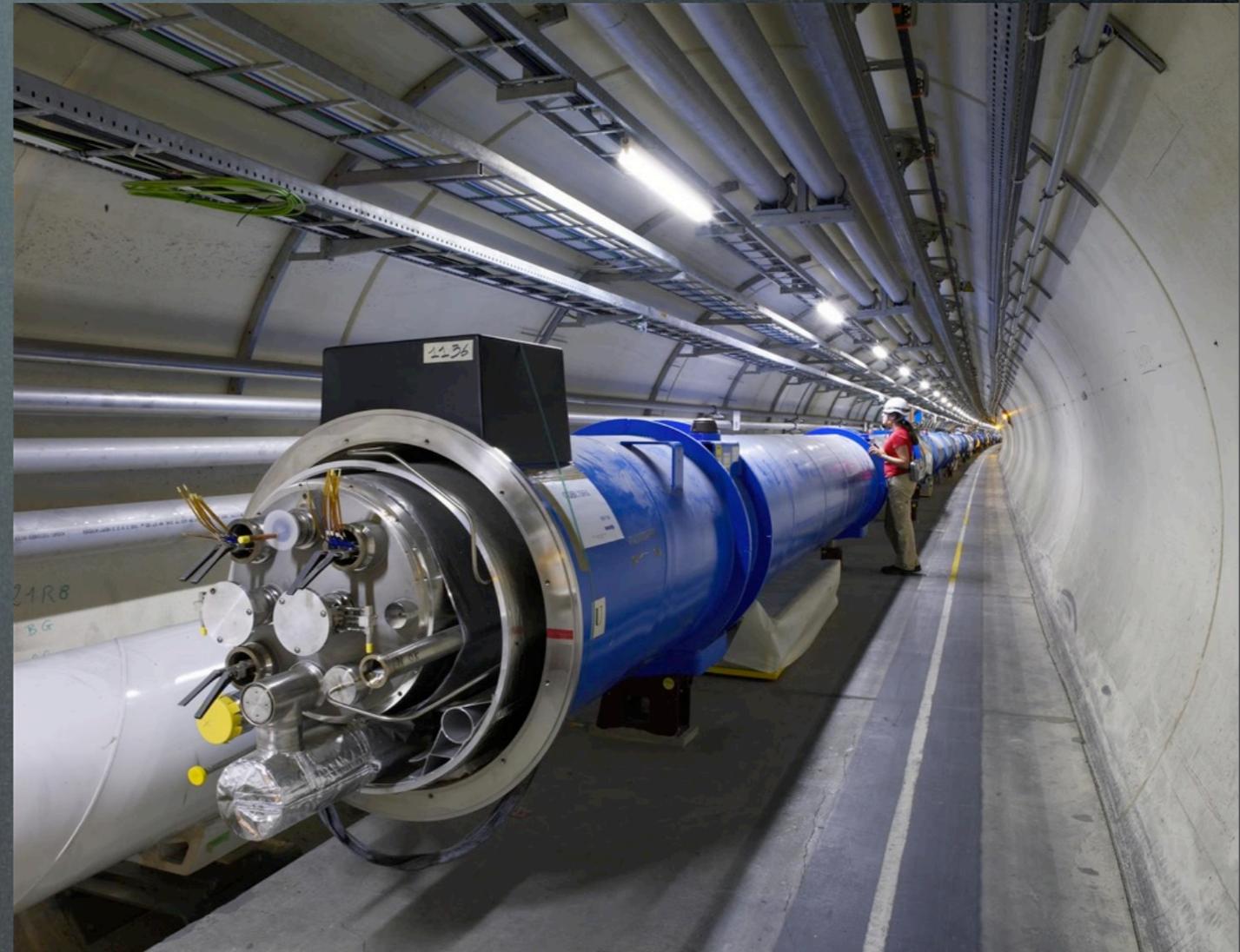
Lunghezza 14.3 m

Campo magnetico nominale 8.33T

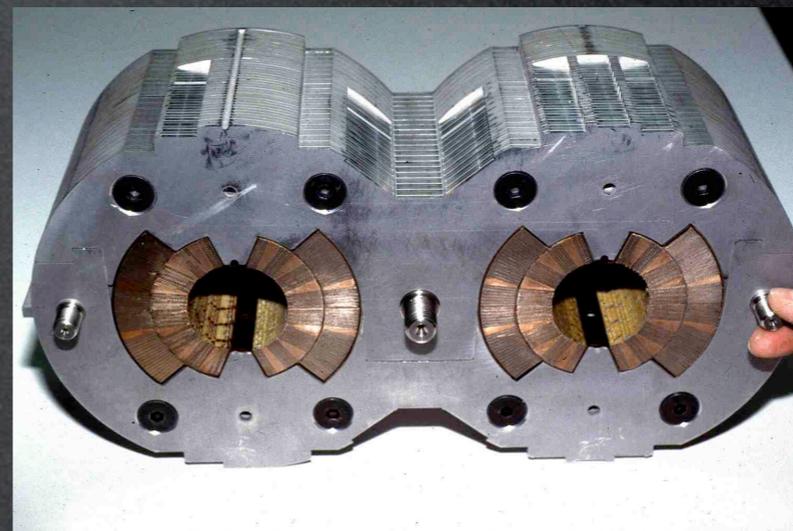
Corrente nominale 11800 A

Energia immagazzinata 7 MJ

Temperatura di lavoro 1.9 °K



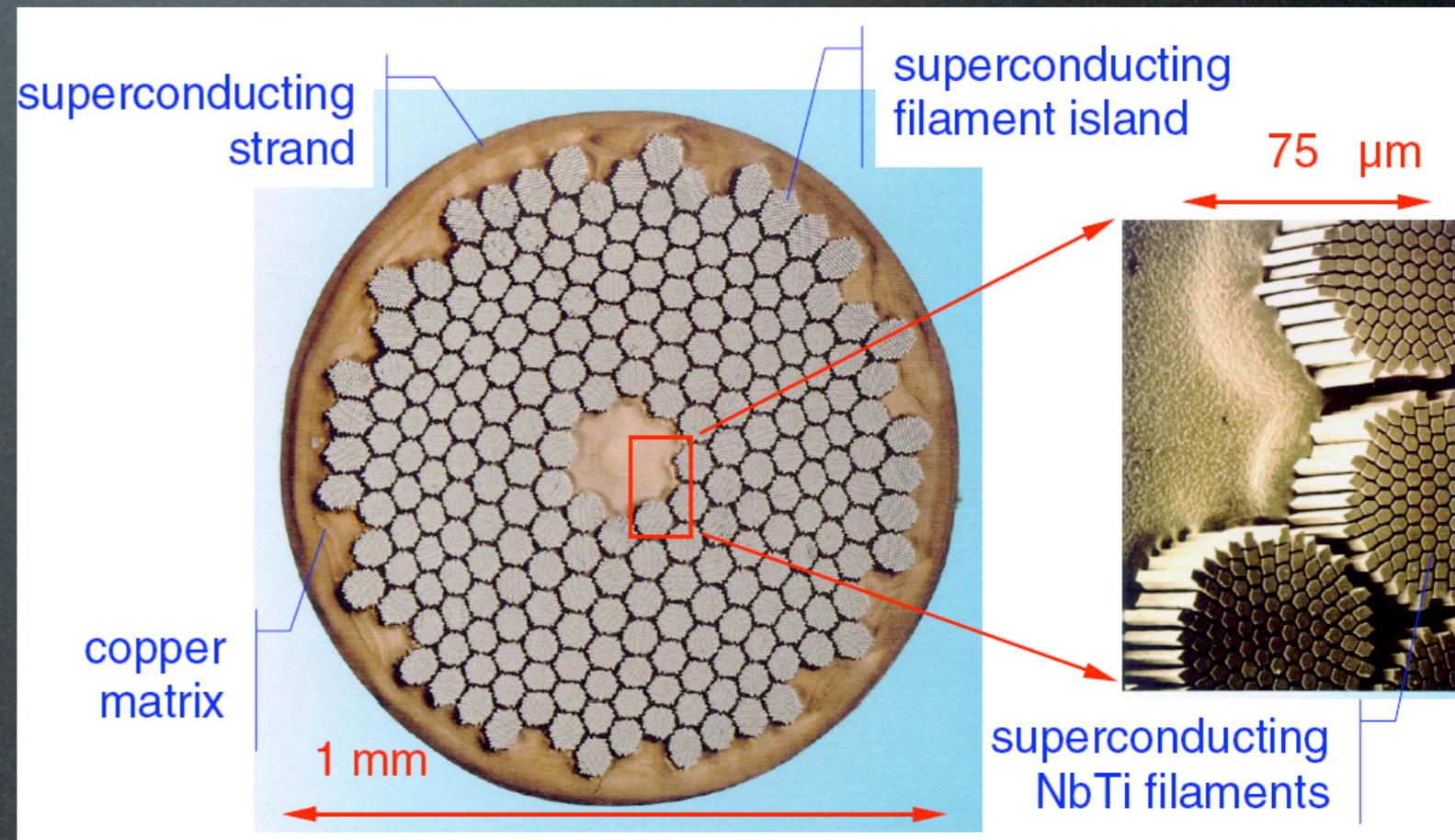
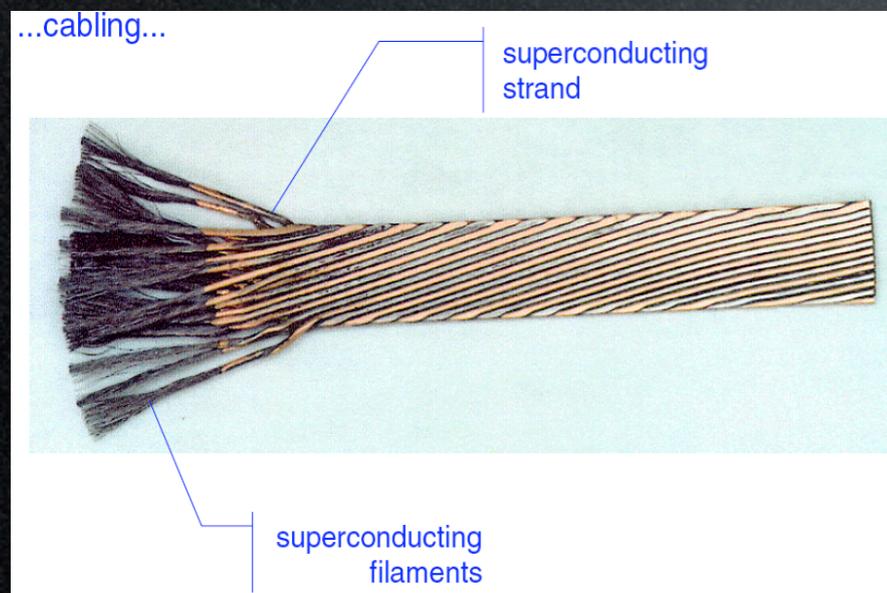
Due dipoli nello stesso giogo permettono di far circolare i due fasci di protoni in direzioni opposte.



Il cavo superconduttore

Sono stati usati 7600 km di cavo s.c. NbTi, del peso di 1200 t

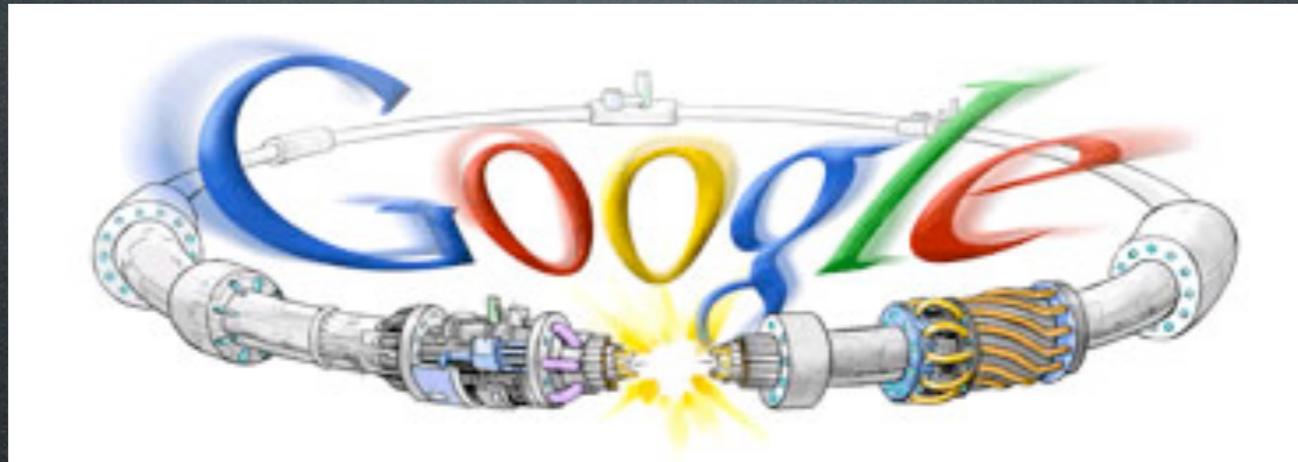
Diametro del filamento di NbTi	7 μm
Diametro del filo	1 mm
No. di fili/cavo	28
Spessore del cavo	15 mm



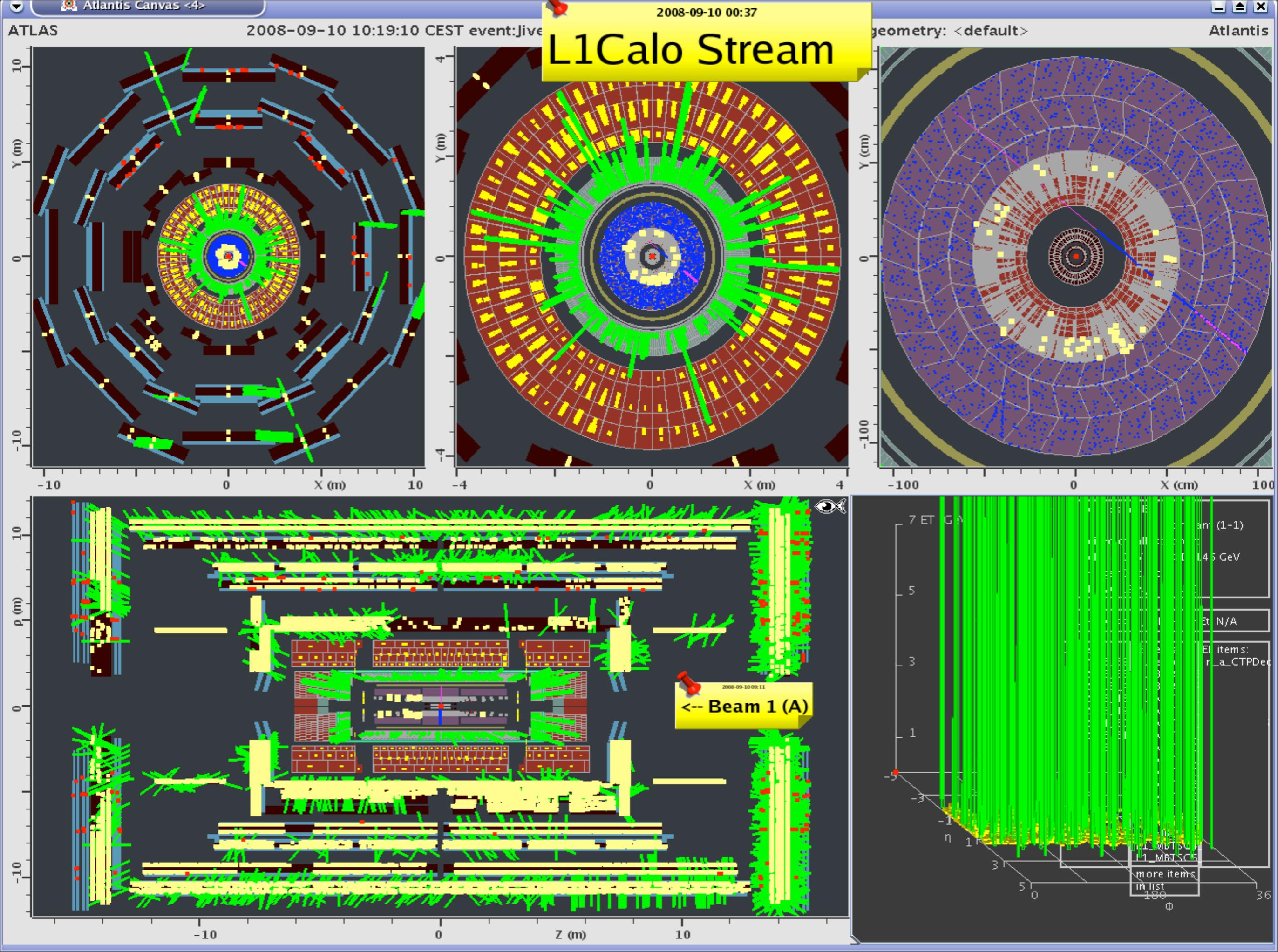
Lunghezza totale dei filamenti: $1.7 \cdot 10^9$ km \approx 10 Unità Astronomiche !!

LHC startup: 10 settembre 2008

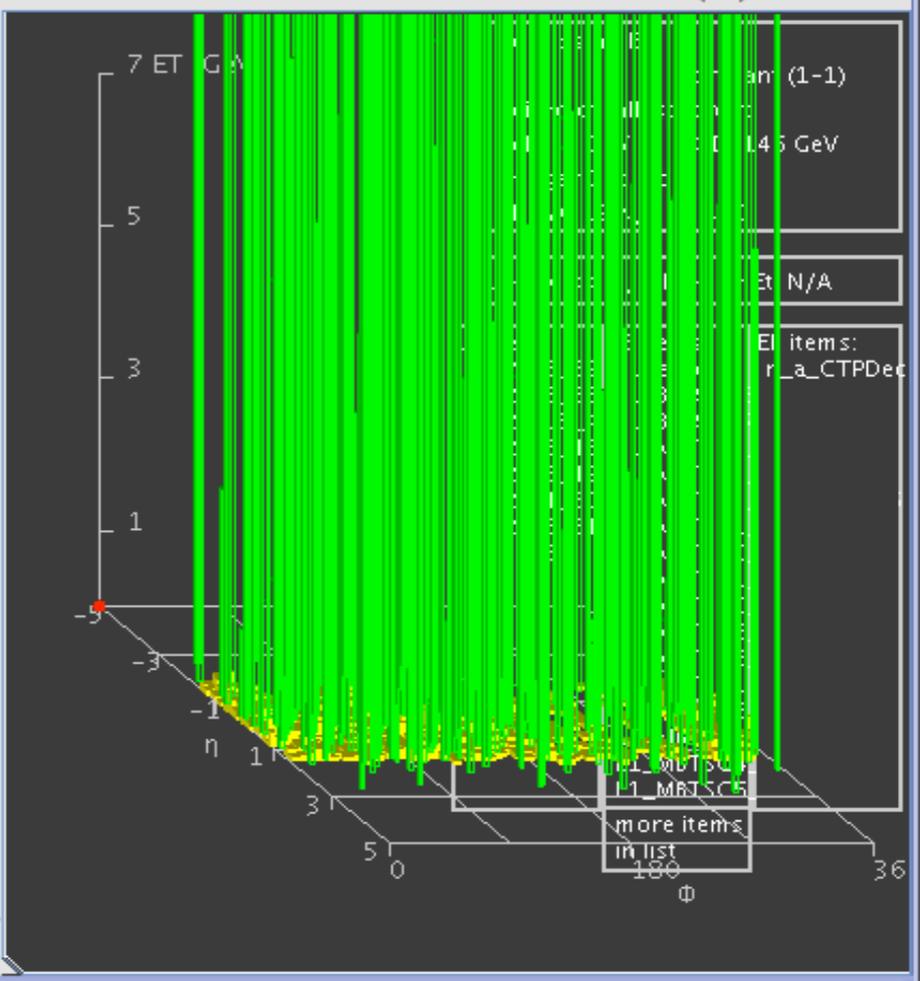
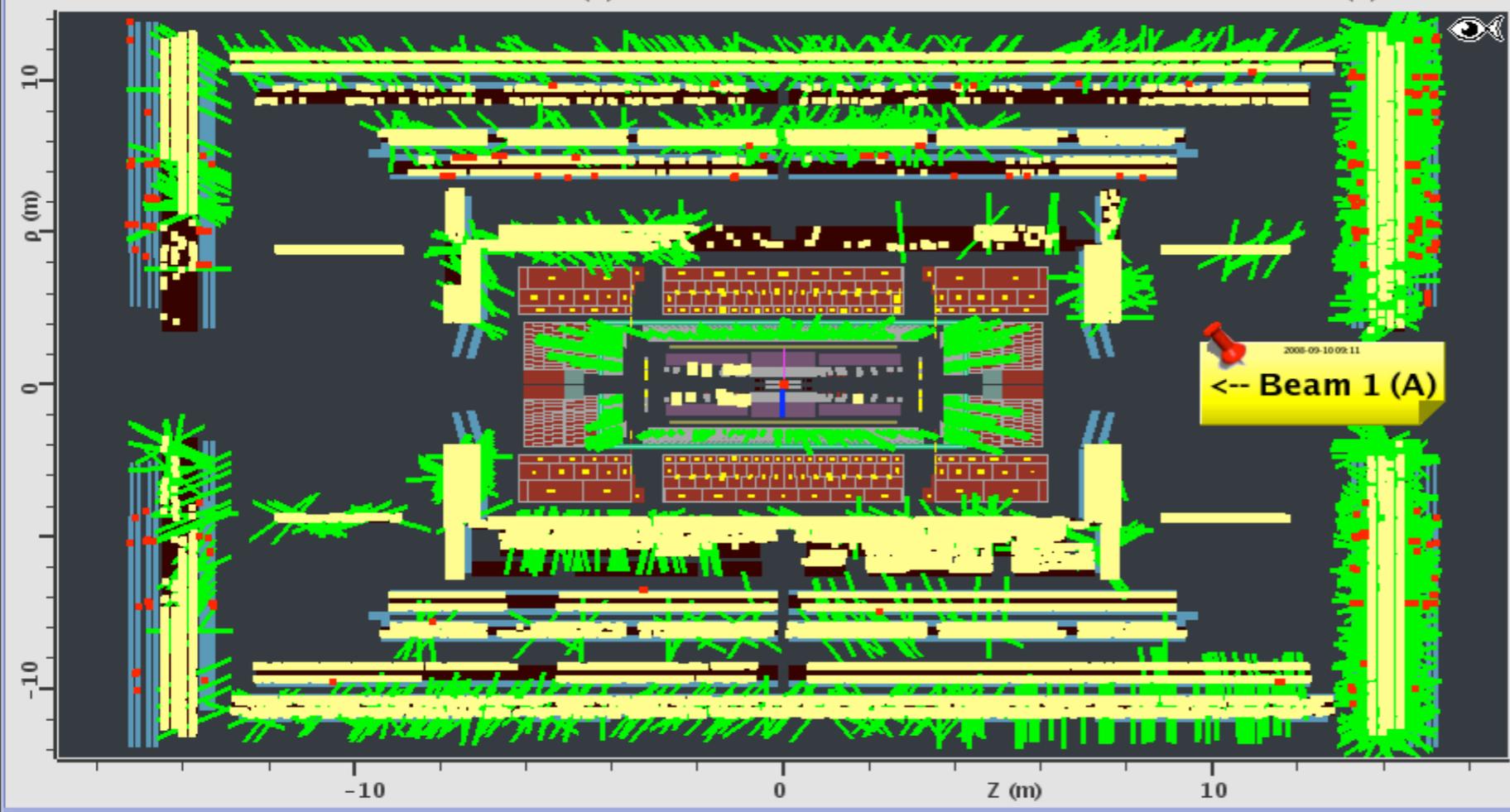
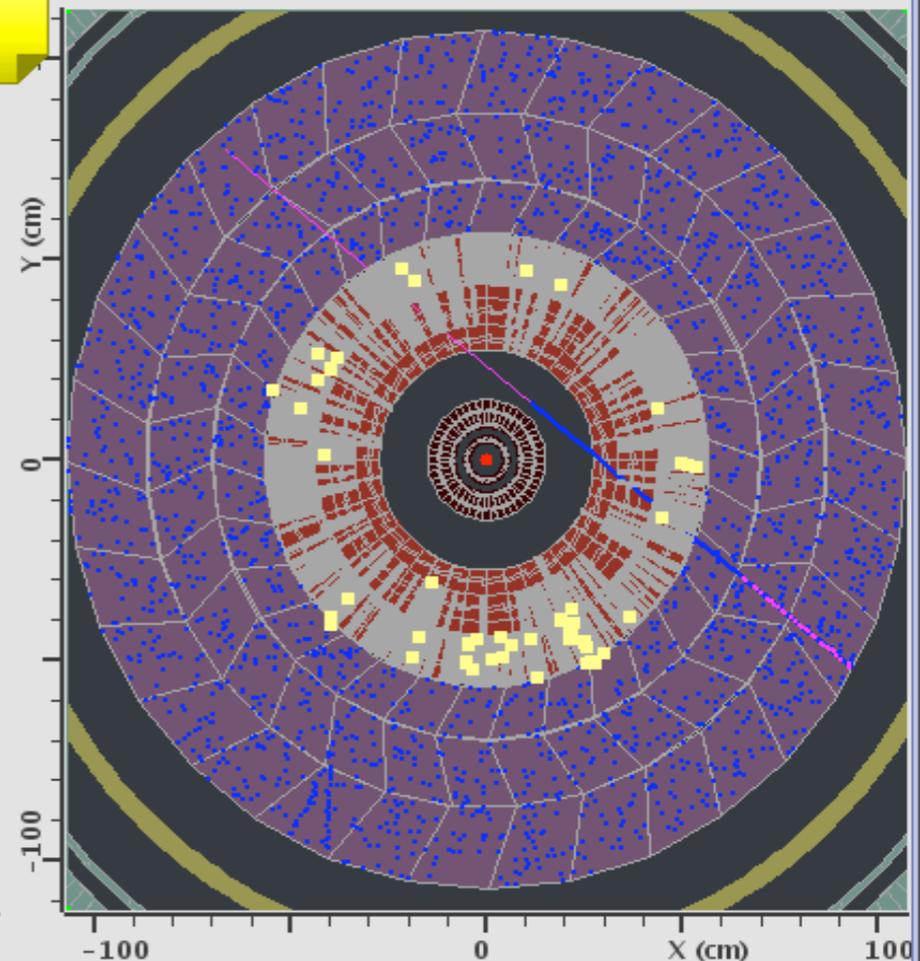
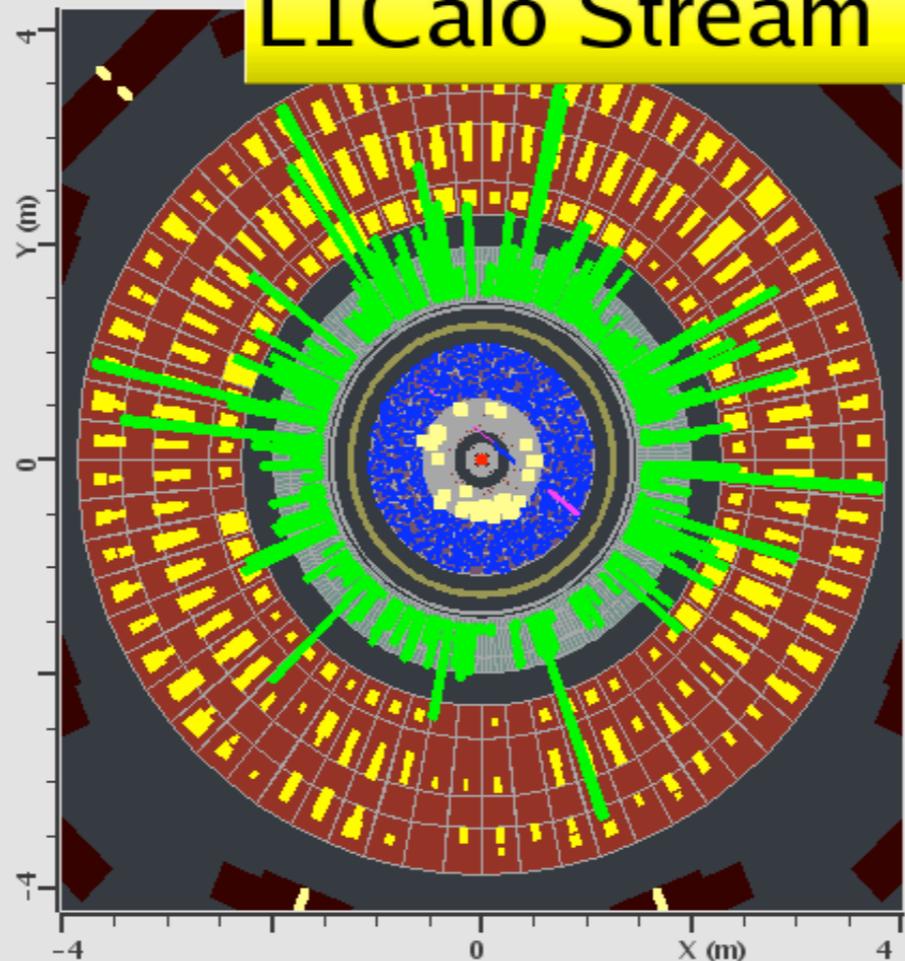
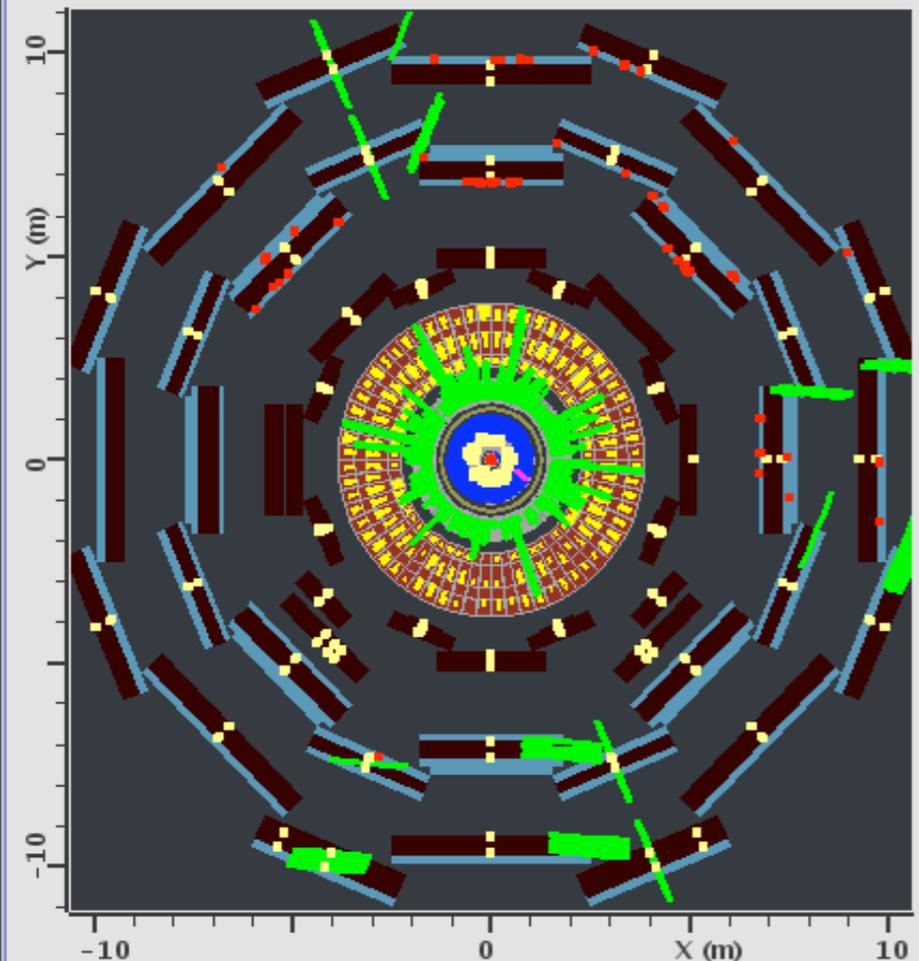
evento di rilievo mondiale:



- ❑ LHC ha fatto circolare entrambi i fasci !
- ❑ Il “commissioning” e` progredito estremamente bene.
- ❑ Fascio 1 : un intero giro
- ❑ Fascio 2 : > 300 giri completi con una iniezione
- ❑ Primi eventi dovuti al fascio registrati dagli esperimenti

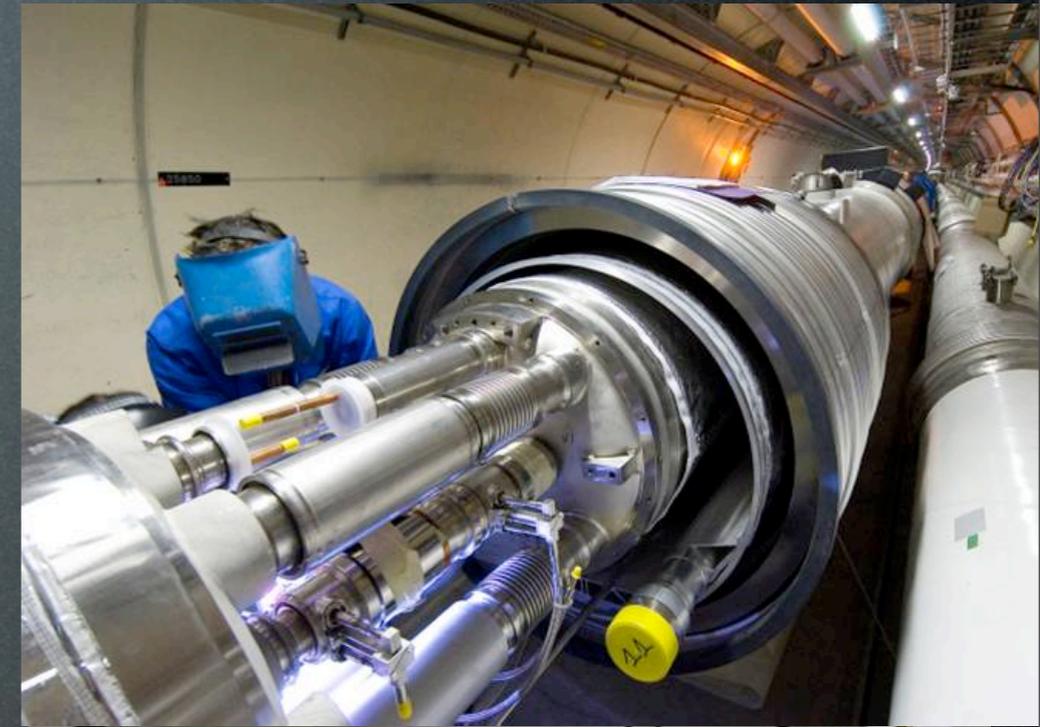


L1Calo Stream



L'incidente:

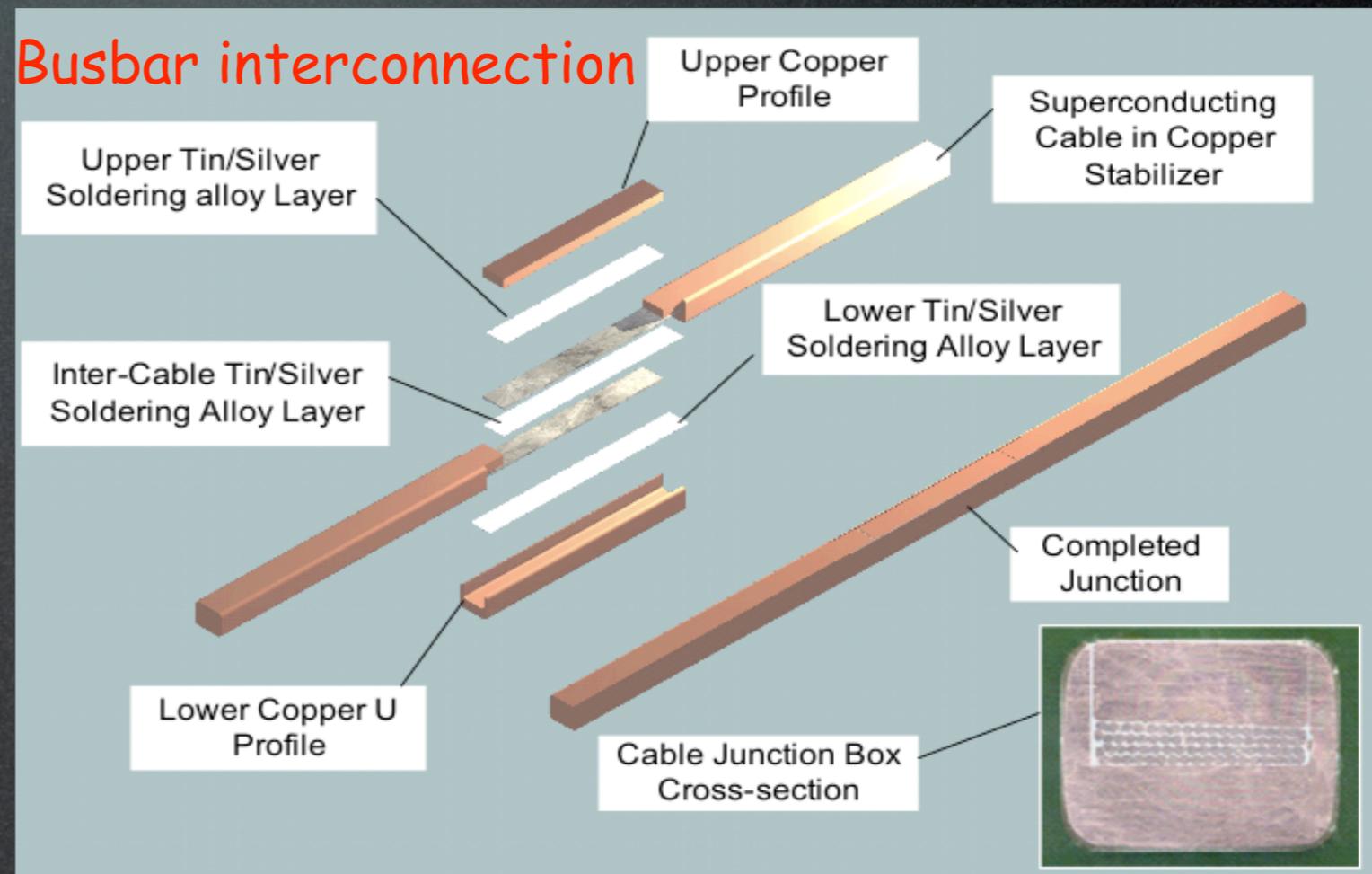
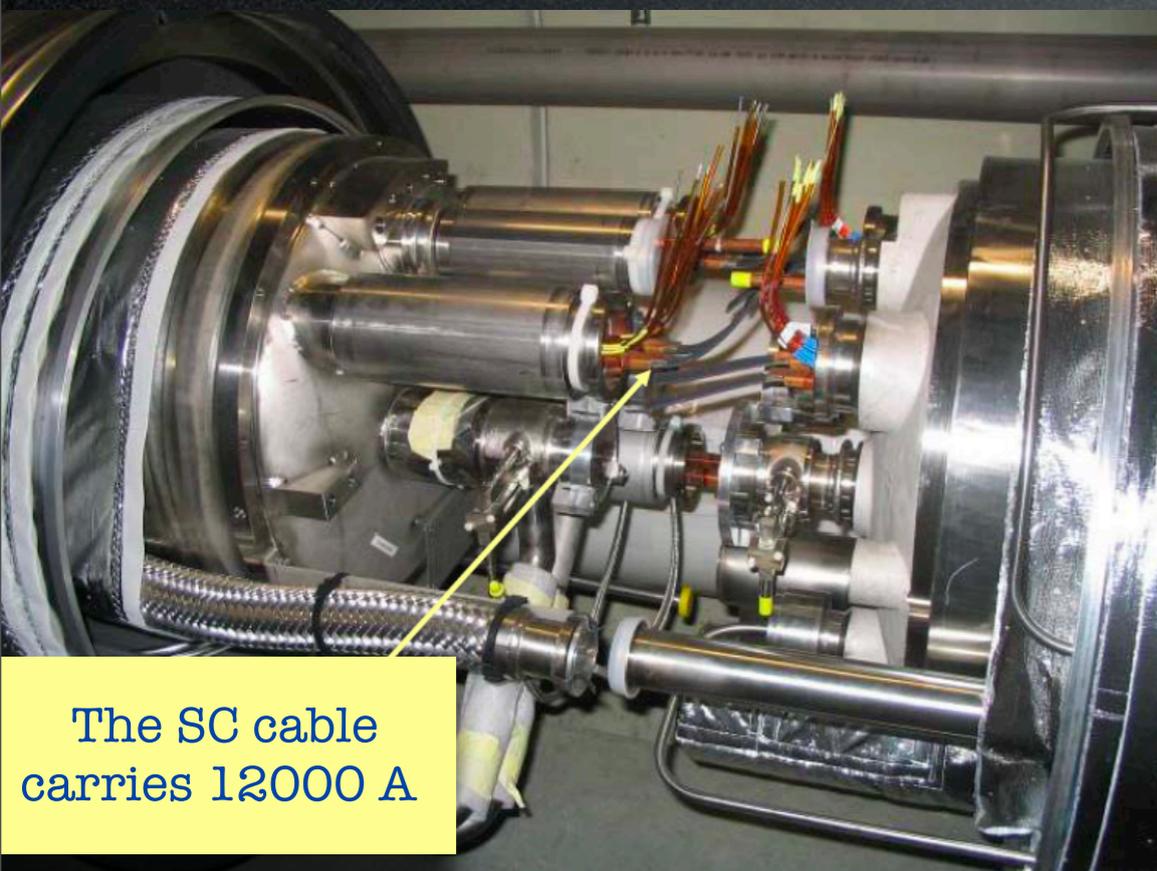
- Il 19 settembre (senza fasci circolanti) c'è stata una perdita di elio liquido nel tunnel. 53 magneti sono stati danneggiati.
- Da allora, si sono investigate e capite le cause dell'incidente, i danni sono stati riparati, e sono stati sviluppati sistemi aggiuntivi per prevenire futuri incidenti.



Cosa è accaduto?

I magneti erano ok.

Ma una tra le migliaia di giunzioni tra i magneti aveva una resistenza elettrica di $\approx 200 \text{ n}\Omega$ (invece di $0.35 \text{ n}\Omega$) che ha prodotto del calore che ha fuso il materiale intorno. Conseguenze: fuga di una grossa quantità di elio liquido, forte onda d'urto + 53 magneti spostati e danneggiati





Si riparte a metà novembre, con una energia iniziale di 3.5 TeV per fascio. Si acquisirà esperienza, e l'energia verrà portata a 5 TeV nel corso del 2010.

Ioni pesanti verranno iniettati per la prima volta a fine 2010

Poi “shutdown” per prepararsi a fasci di 7 TeV

Che cosa scoprirà l'LHC?

... non lo sappiamo!

ma i miei colleghi vi illustreranno cosa ci aspettiamo e
con che mezzi intendiamo cercare la nuova fisica