

Acceleratori e rivelatori di particelle

prof. Massimo Della Pietra

Napoli, 18 Febbraio 2025

Introduzione

Quali sono gli strumenti di lavoro di un fisico che studia le particelle elementari?

- Acceleratori

- Perché gli acceleratori?
- Generazione delle particelle
- Cavità a radiofrequenza
- Tipologie di acceleratori
- Modo di utilizzo

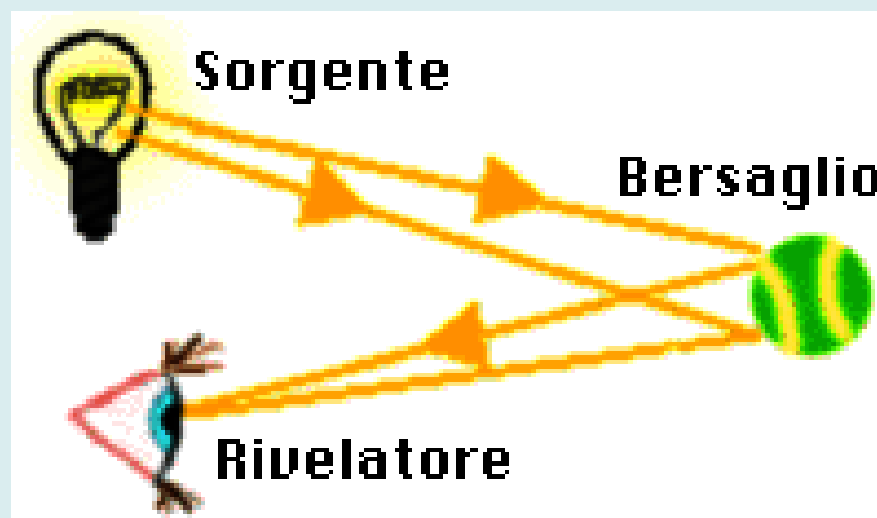
- Rivelatori

- Tipologie di rivelatori
- Tracciatori
- Calorimetri
- Apparati per esperimenti
- Esempi di rivelazione



• Come percepiamo il mondo?

- fascio di luce
- apparato
- rivelatore
- elaborazione dei dati



Premessa

- Altri modi per “vedere” !
 - Sottrazione di “luce”
 - Con il suono (pipistrelli, delfini, ecografia)....



Perché si usano i raggi X e gli ultrasuoni e non la luce ed il suono “normali” per “illuminare” ?



Perché gli acceleratori?

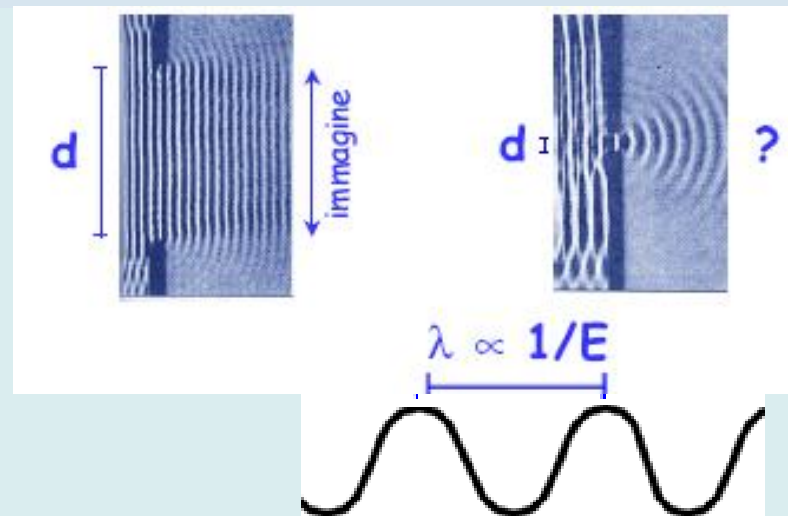
Per vedere oggetti "piccoli"
occorrono onde "corte".



Più sono corte maggiore è la
"risoluzione" dell'immagine.

$$\lambda \ll d$$

Le particelle si comportano come delle
onde con lunghezza d'onda inversamente
proporzionale alla quantità di moto
(dualismo onda-corpuscolo)



Perché gli acceleratori?

- Particelle con una grande quantità di moto possono “illuminare” oggetti piccoli
- Inoltre è possibile convertire l’energia liberata nell’urto fra particelle in nuove particelle più pesanti $E=mc^2$
- Lo studio delle collisioni ci aiuta a capire la natura della materia e delle forze

Da dove prendiamo le particelle?

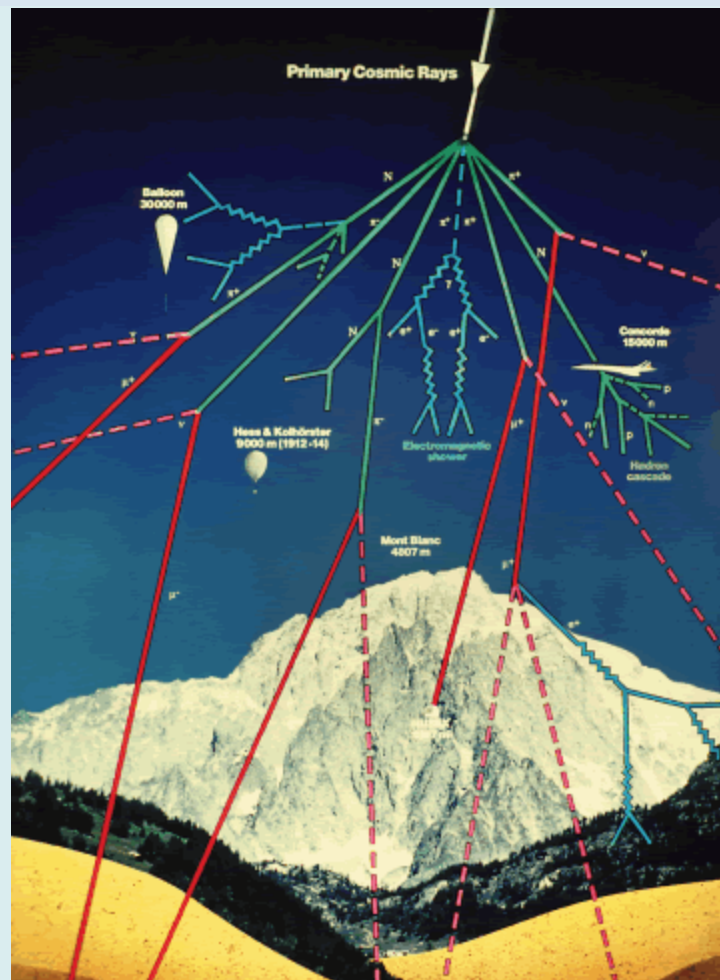
- Piovono dal cielo!

I primi fasci di particelle per gli studi di fisica nucleare e subnucleare erano costituiti o da particelle α ($E=10\text{MeV}$) o dai raggi cosmici

Protoni e fotoni primari provenienti dallo spazio generano particelle secondarie nell'urto con i nuclei dei gas atmosferici (100 particelle a m^2 sul livello del mare)

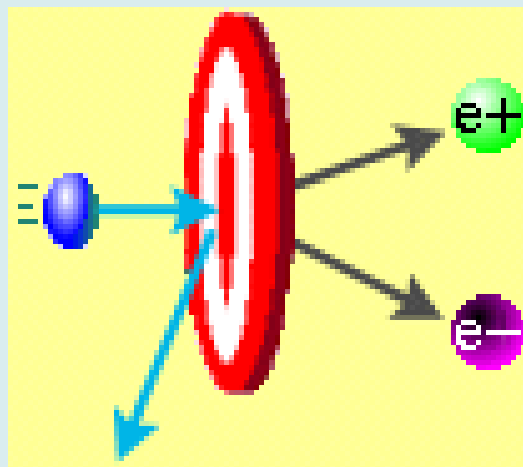
Esistono raggi cosmici molto energetici ma rari ad arrivo casuale

ACCELERATORI



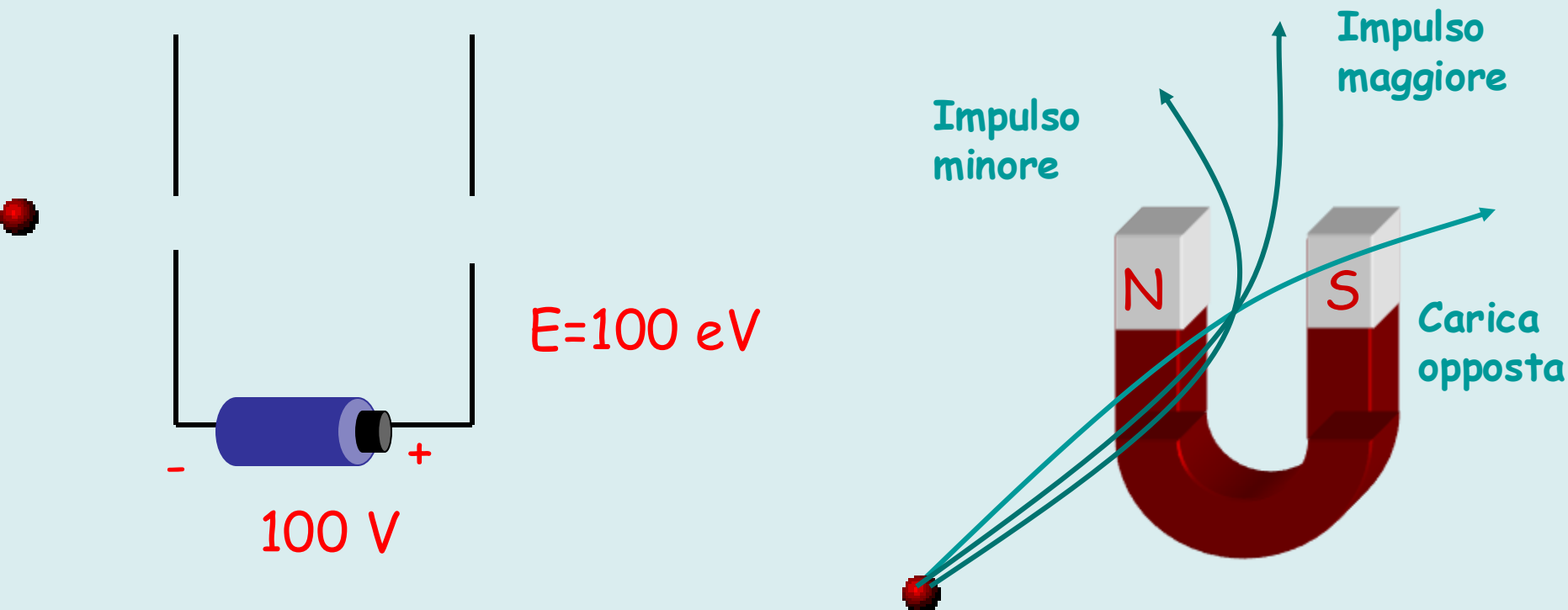
Da dove prendiamo le particelle?

- Gli elettroni si ottengono riscaldando dei filamenti metallici ("effetto termoionico")
- I protoni sono i nuclei dell'atomo di idrogeno
- E le anti-particelle?



Come le facciamo muovere?

- Campi elettrici per accelerare
- Campi magnetici per curvare

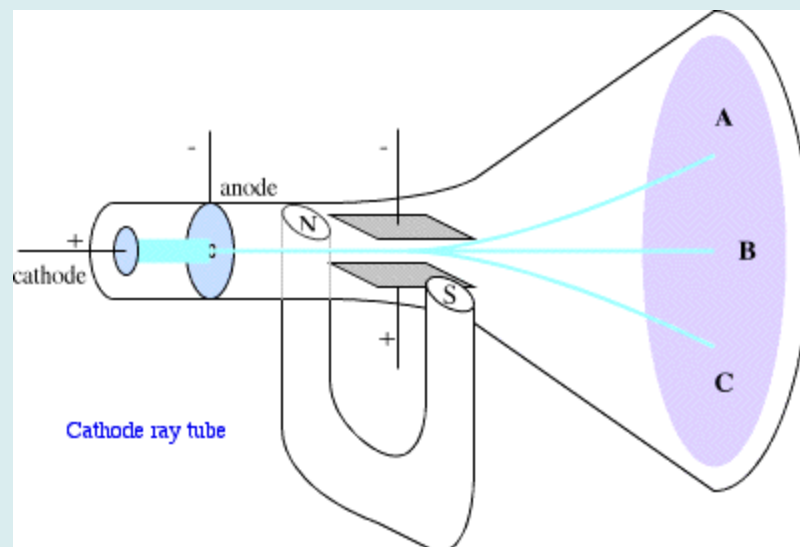


Come funziona un acceleratore?

- Qual è l'acceleratore più comune?

Lo trovate nelle cantine dei vostri nonni....

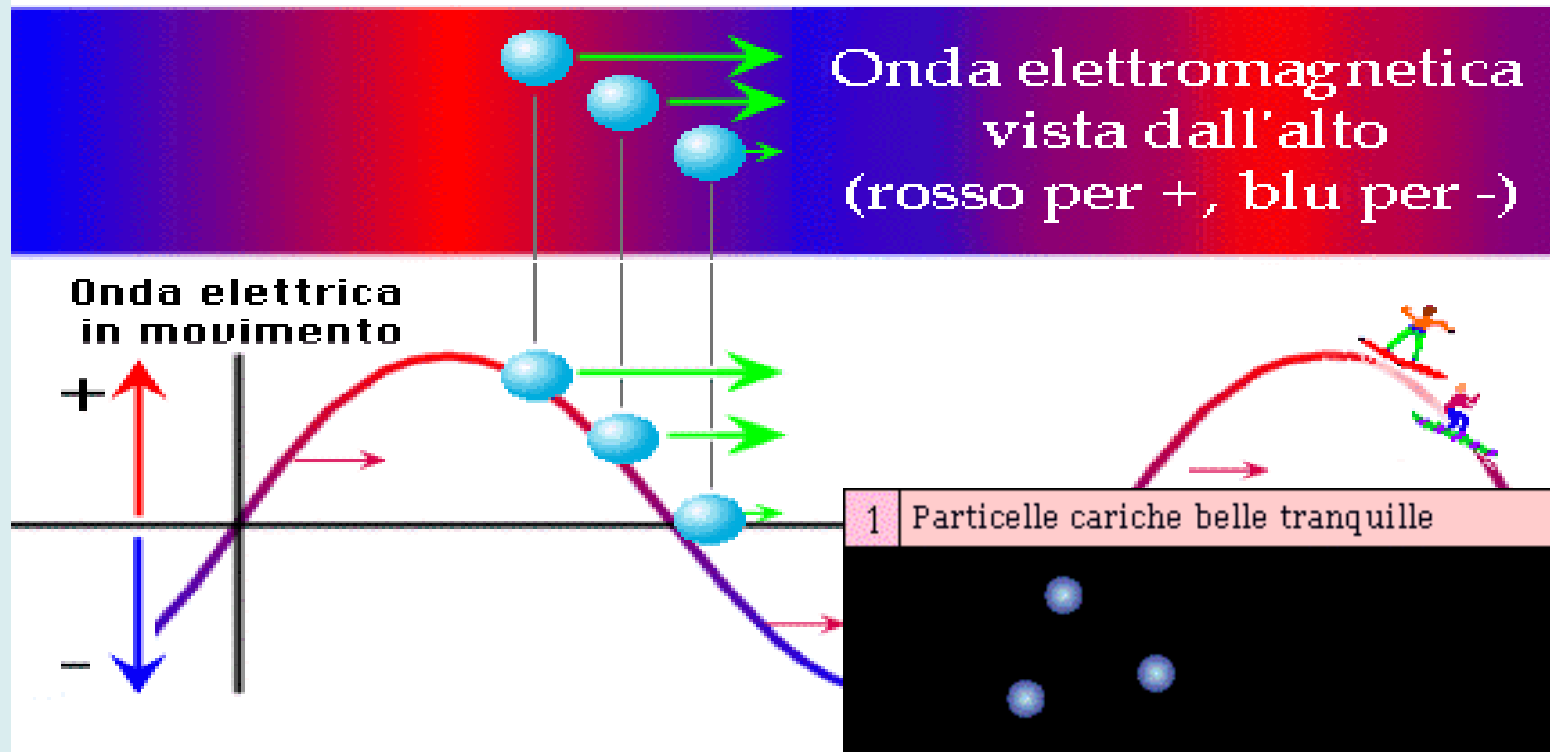
il vecchio televisore



$$E=20000 \text{ eV}$$

Le cavità a radiofrequenza

L'onda elettromagnetica si muove e spinge le particelle avanti con sè

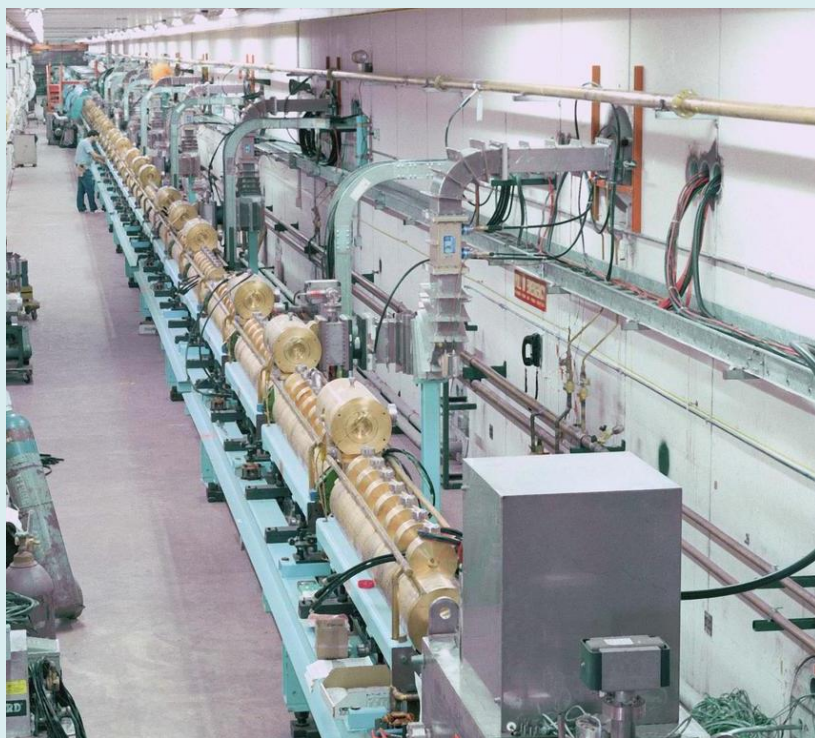


Le particelle con carica positiva vicino alla cresta dell'onda E-M ricevono una grossa spinta in avanti, le particelle verso il centro ricevono una spinta minore, il risultato è che tutte le particelle si muovono insieme all'onda.

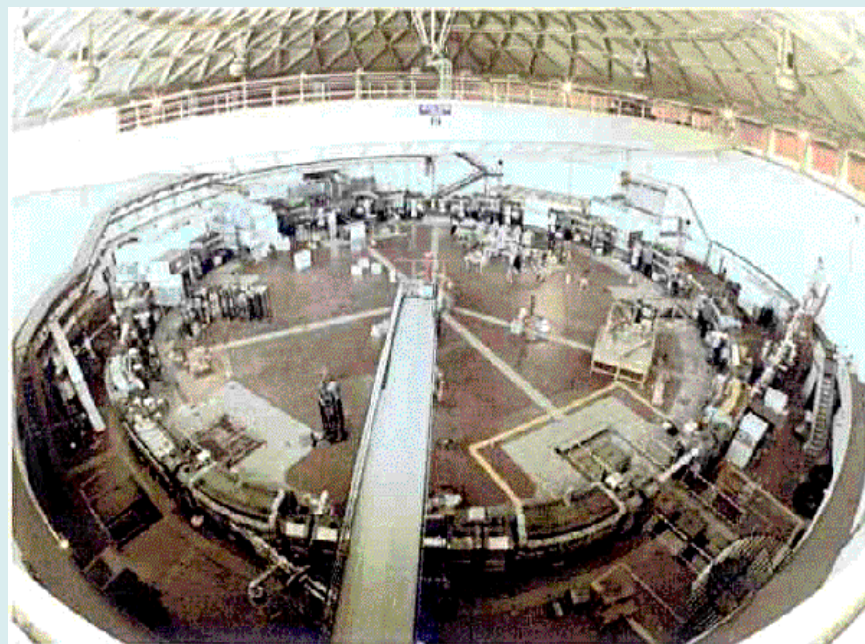
Acceleratori

- Esistono diversi tipi di acceleratori:

Lineari



Circolari



Modo di utilizzo

Bersaglio fisso

Acceleratore



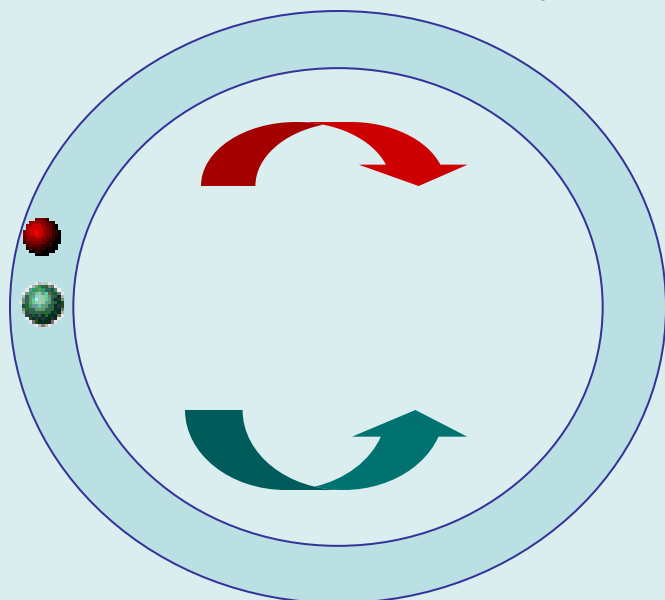
Rivelatori



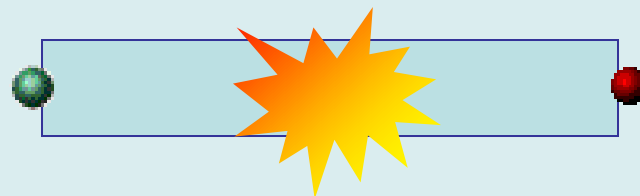
Esperimento
di Rutherford

Collisori

Nel 1961 Bruno Touschek ebbe l'idea geniale di utilizzare lo stesso acceleratore per far collidere materia e antimateria.



Tutta l'energia della collisione è disponibile ad essere convertita



Fascio
(450 GeV) Bersaglio
(a riposo)

$E = 29 \text{ GeV}$

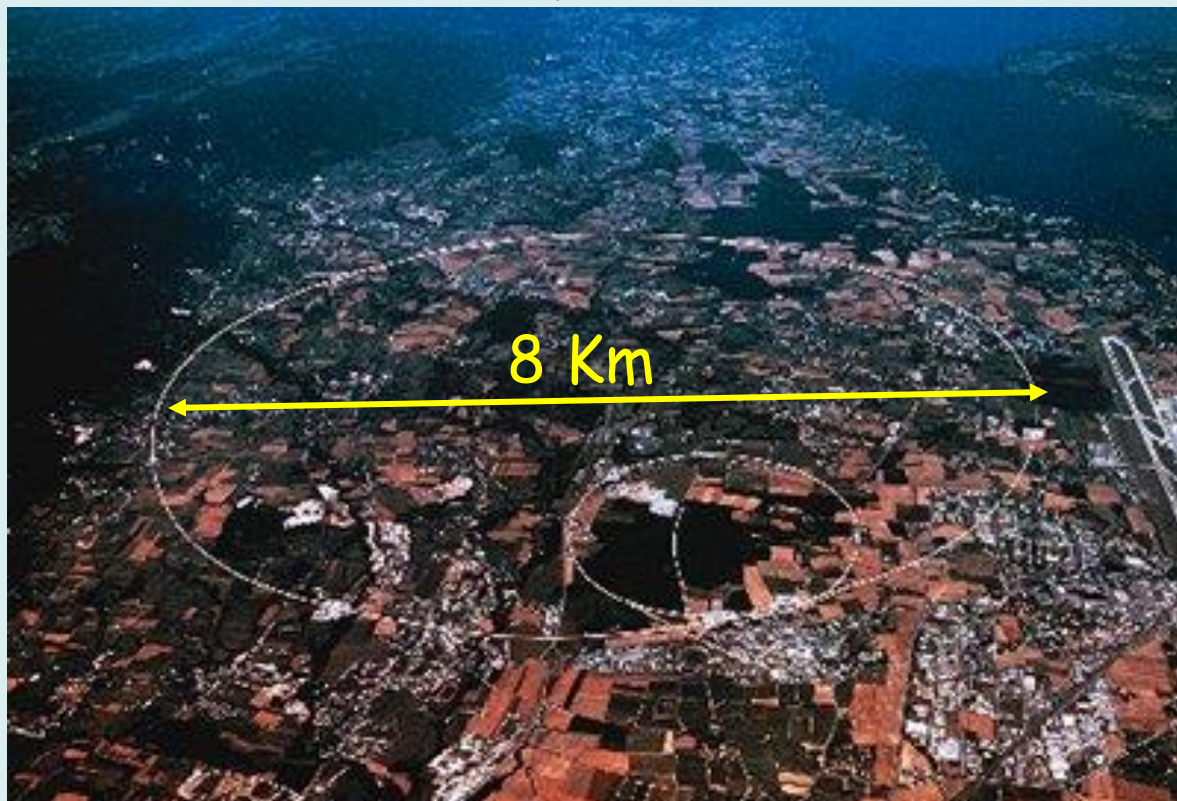
Fascio
(450 GeV) Fascio
(450 GeV)

$E = 900 \text{ GeV}$

LEP al CERN

LEP al CERN di Ginevra (1988-2001)

Il collisore $e^+ e^-$ a più alta energia ($E=207 \text{ GeV}$)

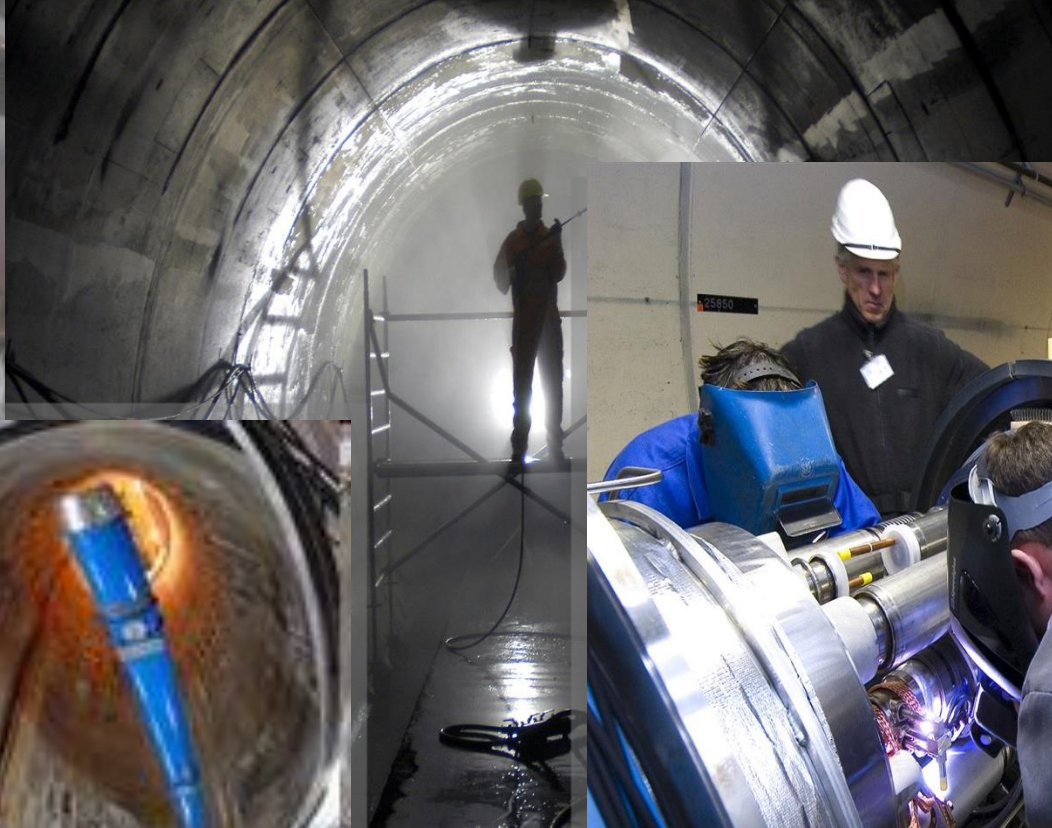
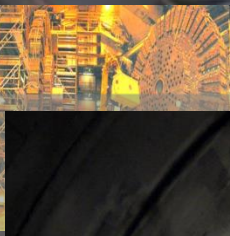


LHC al CERN (dal 2008)



LHC: The Large Hadron Collider

di un tunnel
tuato al confine
originariamente
Electron



LHC: The Large Hadron Collider

LHC è l'acceleratore di particelle più grande e potente mai realizzato dall'uomo, progettato per far collidere protoni ad un'energia nel centro di massa di 14 TeV, mai raggiunta fino ad ora in laboratorio.

I componenti più importanti del LHC sono gli oltre 1600 magneti superconduttori raffreddati alla temperatura di 1,9 K (-271,25 °C) da elio liquido superfluido che realizzeranno un campo magnetico di circa 8 Tesla, necessario a mantenere in orbita i protoni all'energia prevista. Il sistema criogenico di LHC è il più grande che esista al mondo oltre ad essere il luogo massivo più freddo dell'universo.

LHC: The Large Hadron Collider

1 electron volt (eV)
= 1.6×10^{-19} joules

Dimensioni tipiche di un
protone = 10^{-15} m

Numero di protoni in un
fascio = 10^{18}

Frequenza di collisione = 40
MHz (ogni 25 ns)

Numero di interazioni/s =
 10^9

In termini assoluti l'energia del LHC (14 TeV) non è così grande se comparata con le energie coinvolte nei processi a cui assistiamo nella vita di tutti i giorni.

Ad esempio 1 TeV è circa l'energia del moto di una zanzara....

L'evento straordinario è che LHC concentra questa energia in uno spazio milioni e milioni di volte più piccolo di quello occupato da una zanzara!!!

LHC: The Large Hadron Collider

**1 electron volt (eV)
= 1.6×10^{-19} joules**

**Dimensioni tipiche di un
protone = 10^{-15} m**

**Numero di protoni in un
fascio = 10^{18}**

**Frequenza di collisione = 40
MHz (ogni 25 ns)**

**Numero di interazioni/s =
 10^9**

Tuttavia anche se l'energia di 1 protone è piccola, nei fasci che contengono 1 miliardo di miliardi di protoni, è accumulata una energia totale di 350 MJ.

Quanti sono 350 MJ?

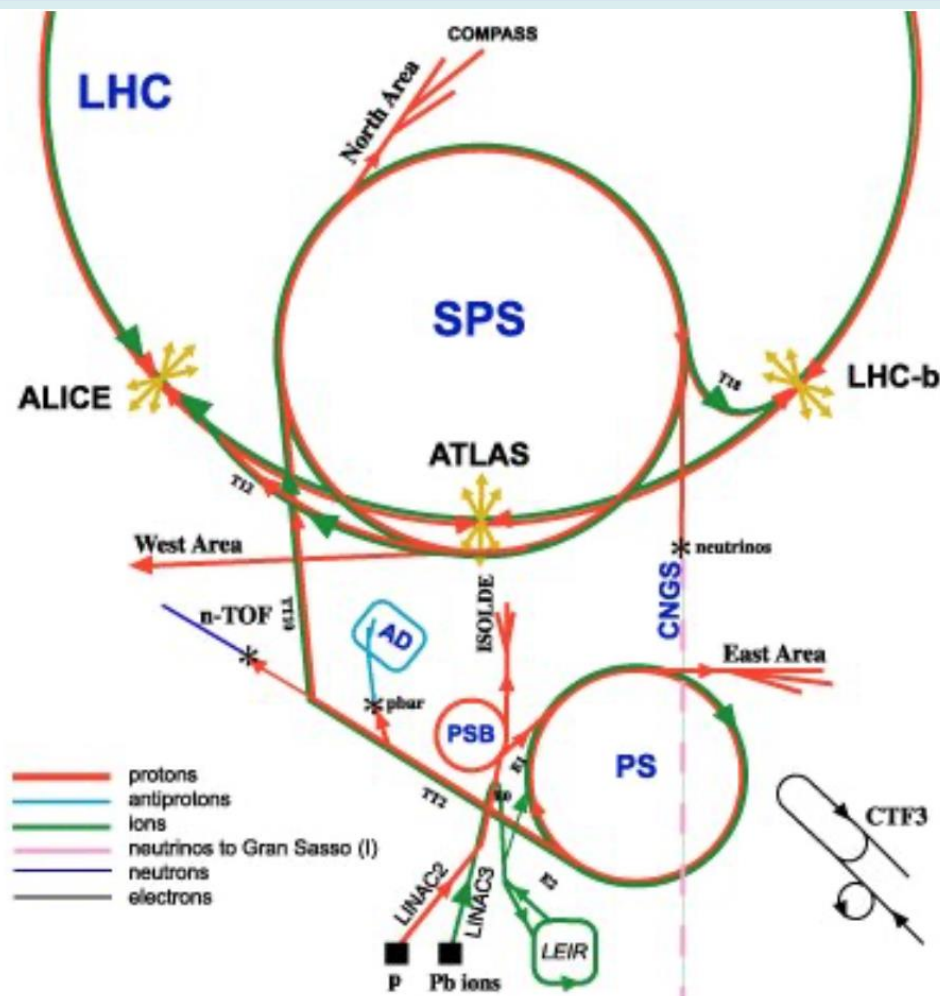
Immaginiamo un elicottero "Apache" (8000 Kg) che vola a 360 Km/h, la sua energia cinetica è di:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{8000 \text{ kg} (100 \text{ m/s})^2}{2} = 40 \text{ MJ}$$

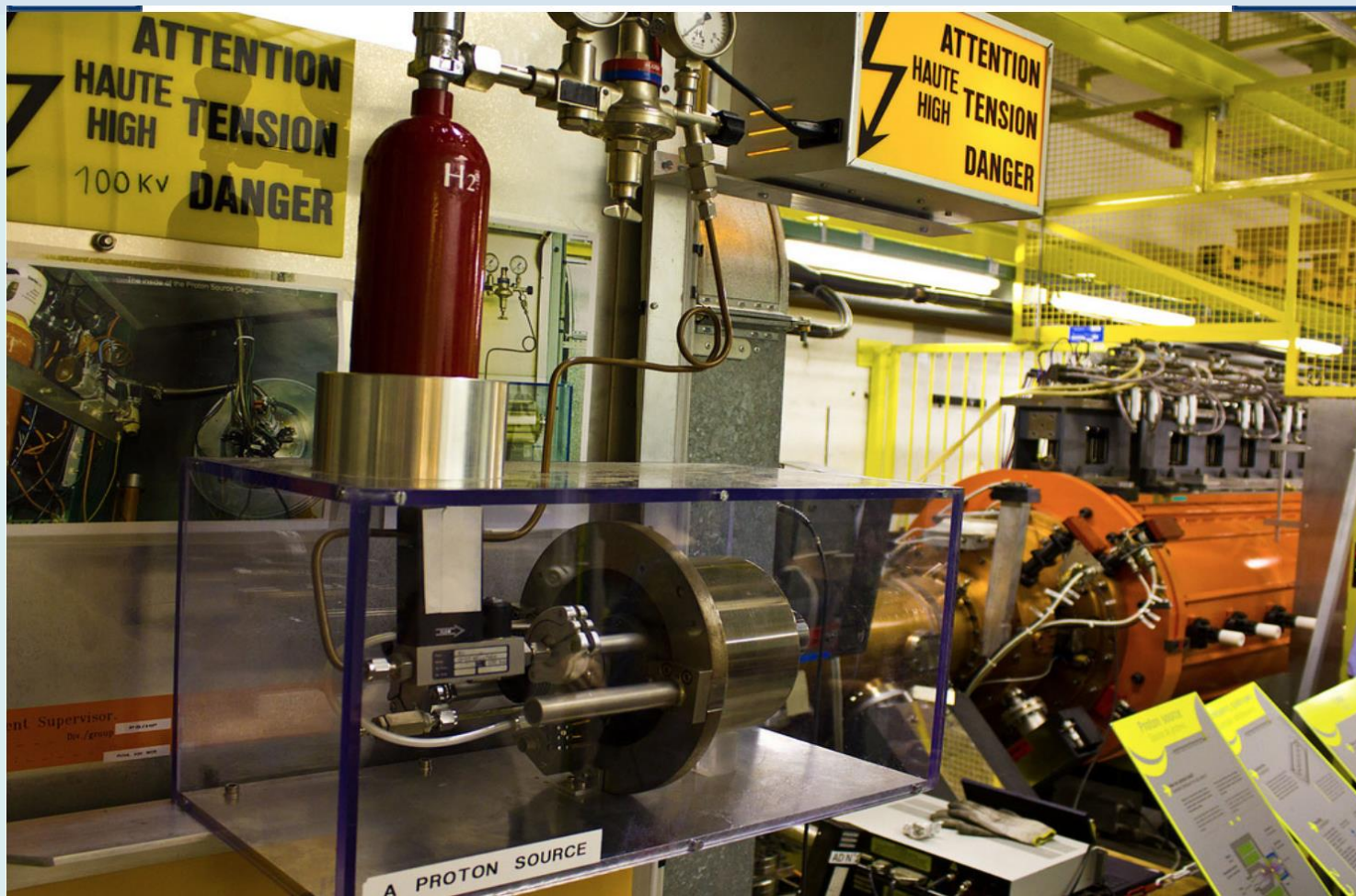
Quindi l'acceleratore in funzione accumula una energia pari a 8 elicotteri Apache in volo (Apocalypse Now...)

Immaginate dunque come devono essere complicate le operazioni di arresto (dump) dei fasci.

La catena di accelerazione



La sorgente di protoni



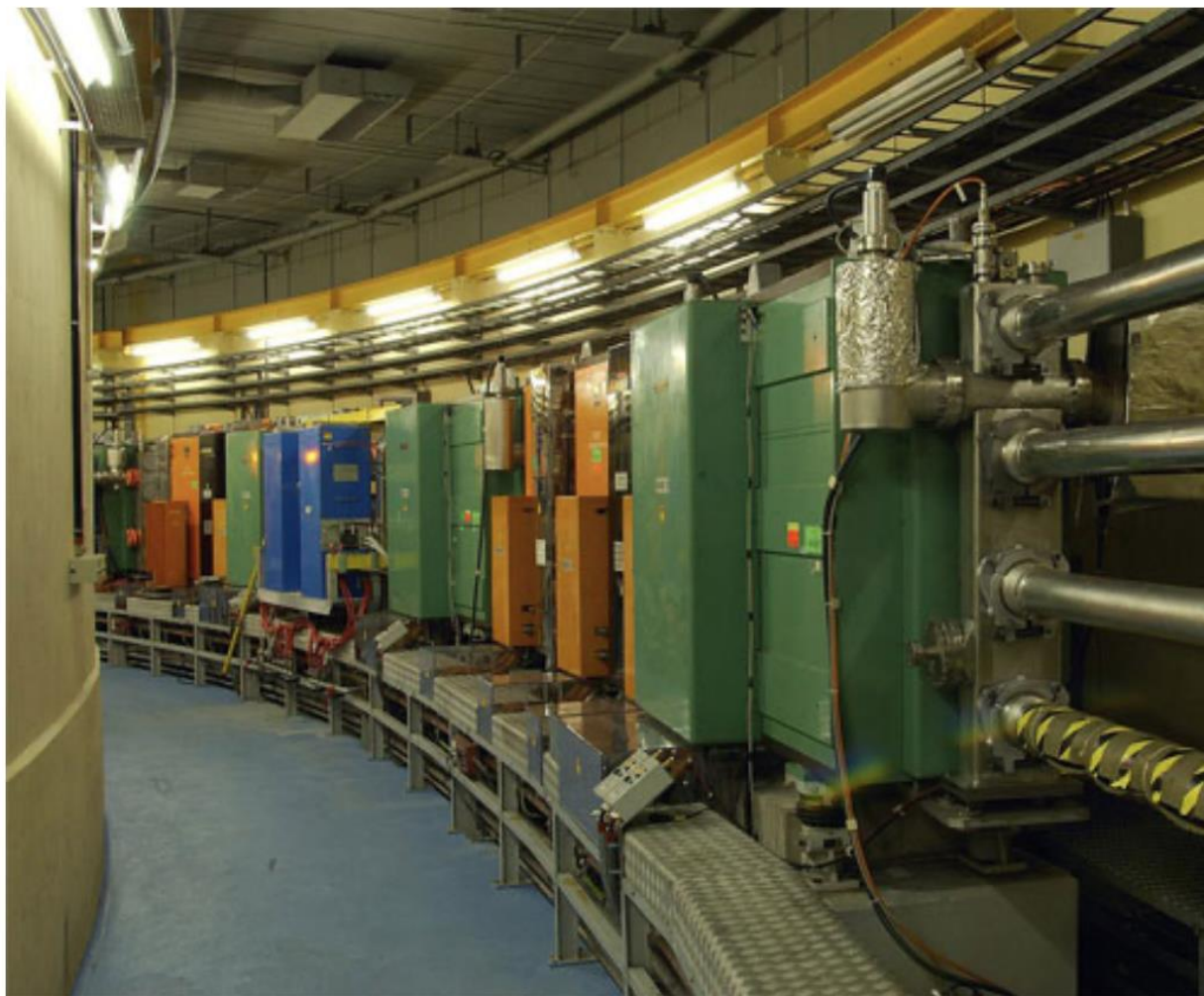
Linac



50 MeV
180mA
30m

13

PSB (Booster)

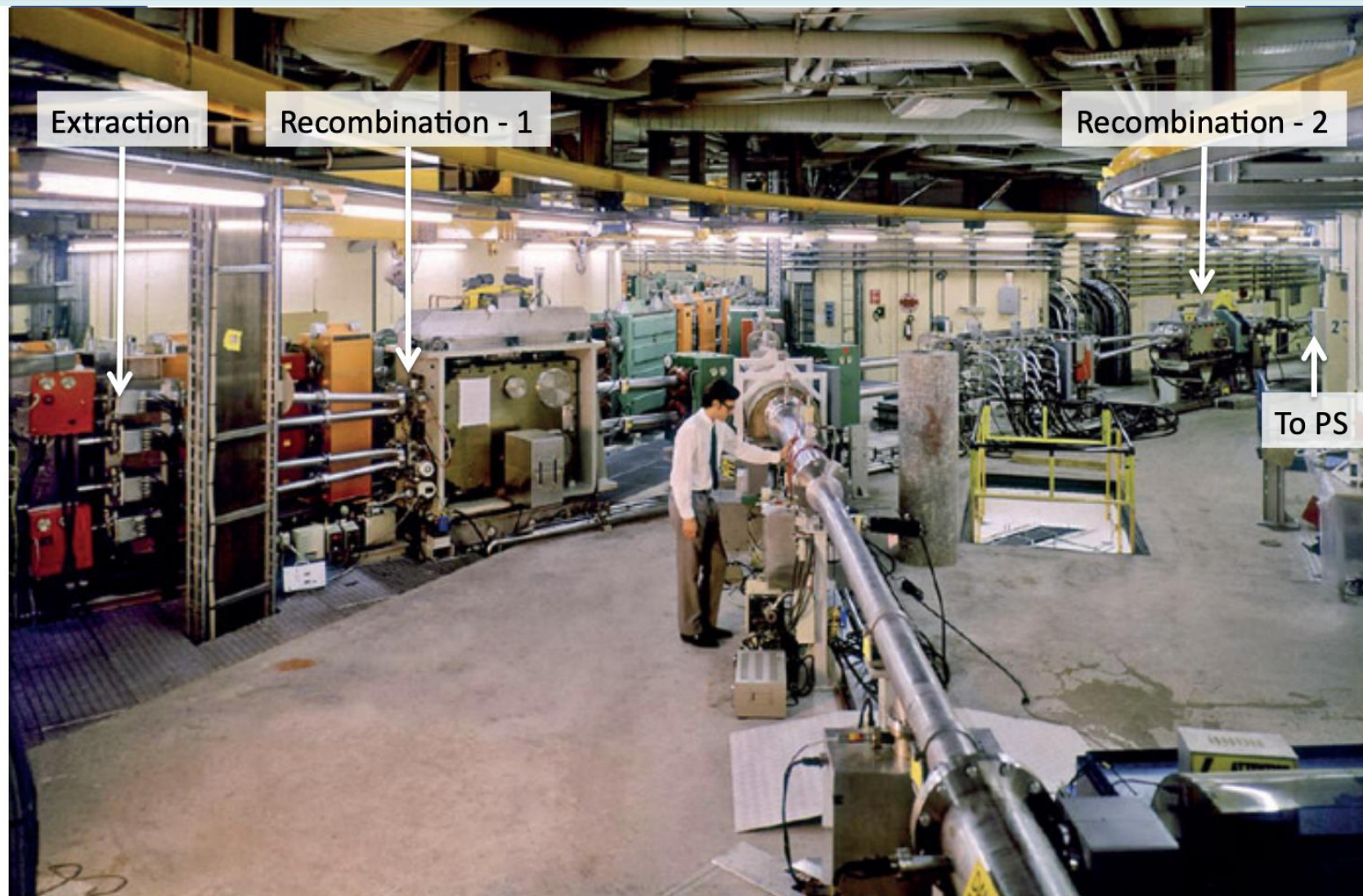


4 rings (157m)

1.4 GeV

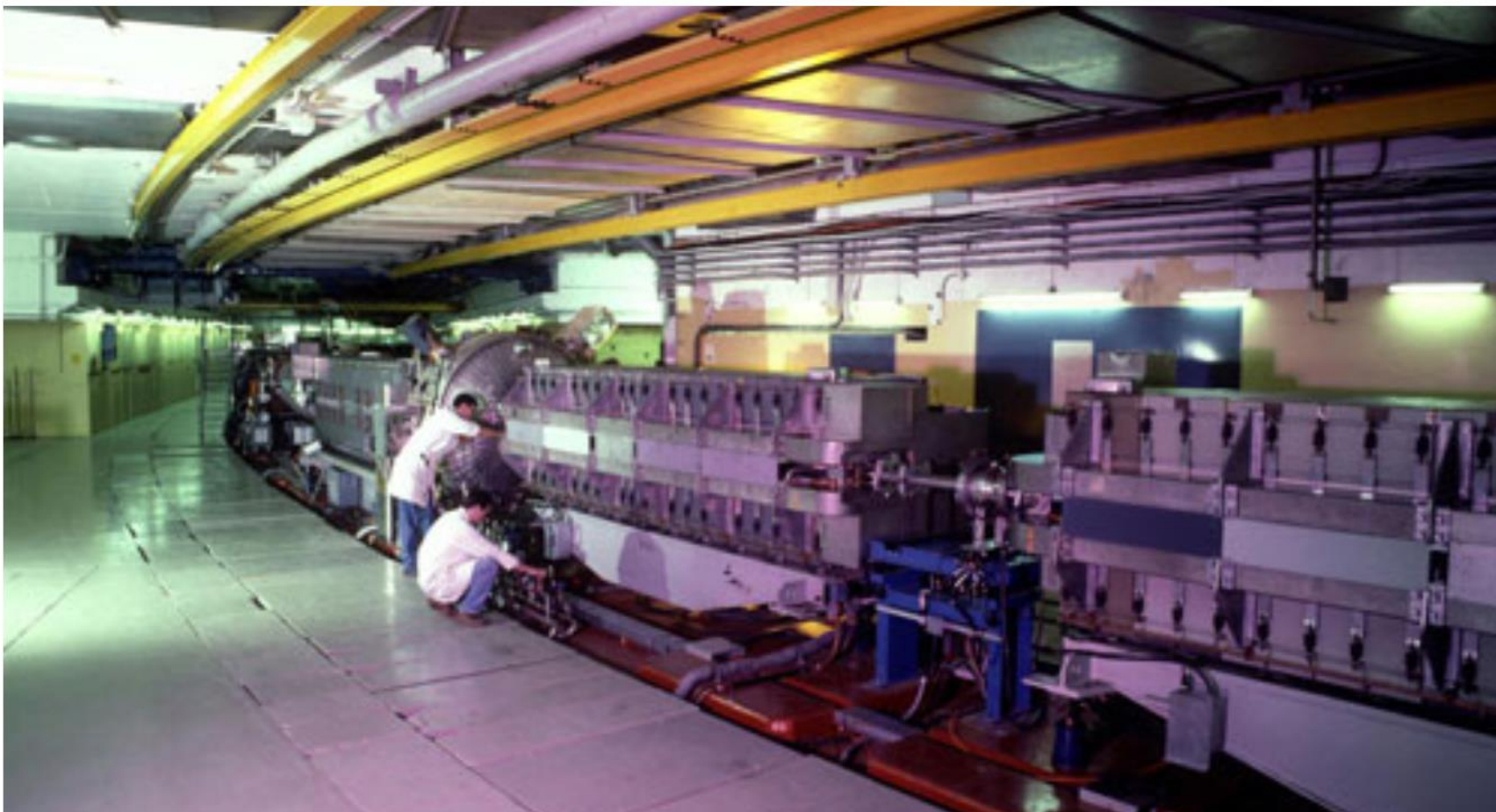
10^{13} p/ring

PSB Iniezione ed estrazione



PS (proto sincrotrone) 25 GeV, 628 m

RF Gymnastics: Bunches are compressed merged and split (BCMS)
In order to get long high intensity low emittance “trains” in the LHC



SPS (450 GeV, 6.9 km)



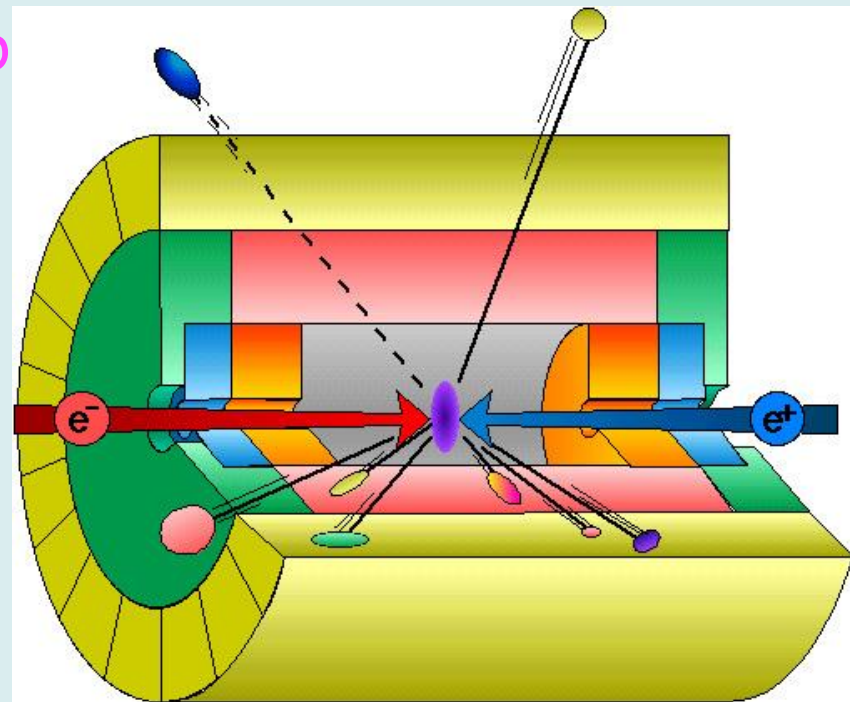
LHC (7 TeV, 26.7 km)



Rivelatori

- Una volta che abbiamo prodotto le particelle che dobbiamo misurare?

- Posizione e direzione del moto
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso
- Massa
- Tempi di vita



Rivelare le particelle

- Tutte le particelle, attraversando la materia, perdono una parte della loro energia.
 - Particelle cariche: urti anelatici con gli elettroni degli atomi che incontrano;
 - Tutti gli adroni (carichi e neutri) per reazioni nucleari con i nuclei che incontrano;
 - Elettroni emettono luce “frenando”
 - Fotoni possono creare coppie e^+ e^-
 - Neutrini hanno solo l’interazione debole.... “sfuggono” ai nostri rivelatori lasciando “poche tracce”!
 - Muoni perdono poca energia, sono più penetranti

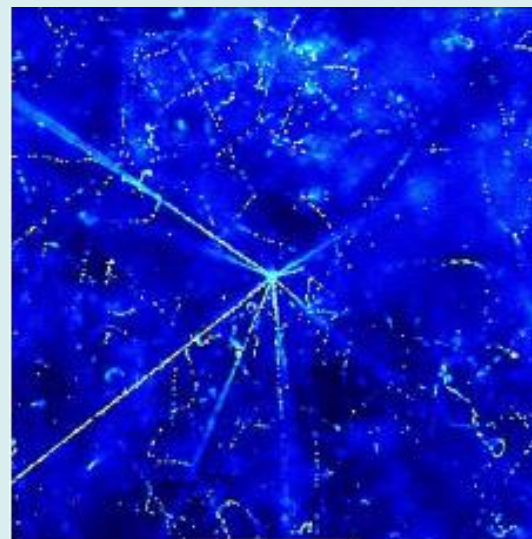
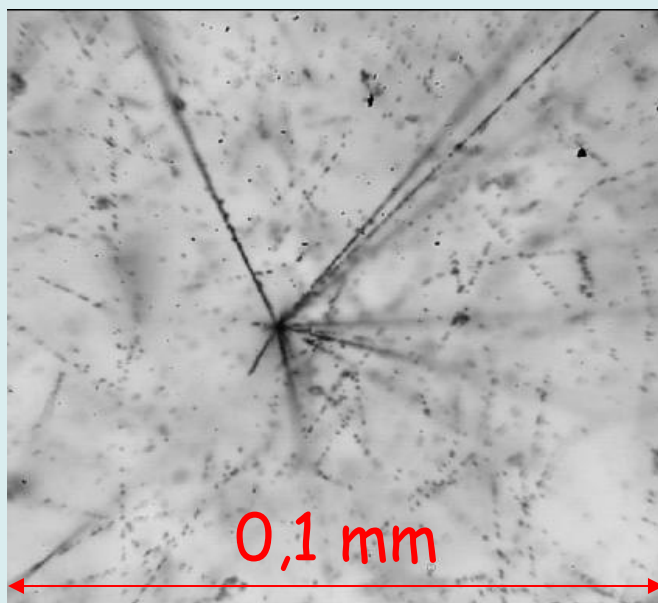
Rivelare le particelle

- Alla base di tutti i rivelatori c'è il principio di convertire questa energia rilasciata in "segnali" concreti da "rivelare".
- Tecniche diverse a seconda del tipo di particella da rivelare.
- Ad esempio un rivelatore di fotoni deve essere necessariamente diverso da un rivelatore di muoni.

Emulsioni Fotografiche

Nei primi esperimenti con i raggi cosmici si inviavano lastre fotografiche sui palloni aerostatici.

Le particelle cariche "impressionano" le lastre fotografiche lasciando una scia del loro passaggio.



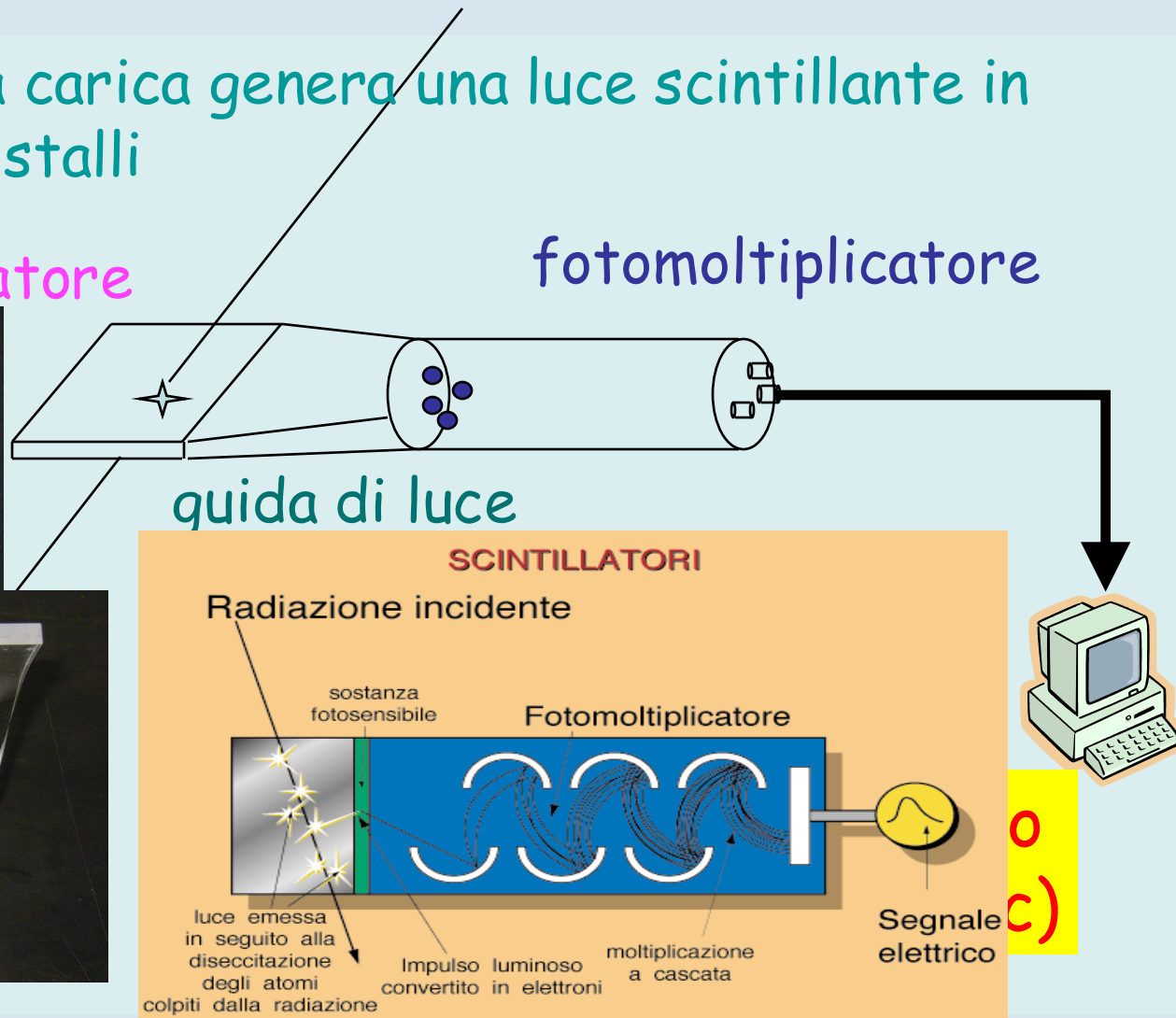
Scintillatori

Una particella carica genera una luce scintillante in particolari cristalli

Scintillatore

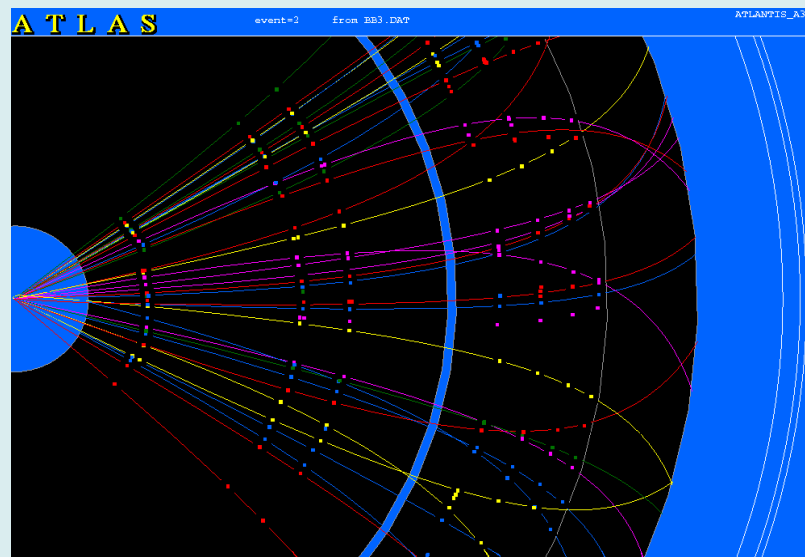
fotomoltiplicatore

guida di luce



Tracciamento di particelle

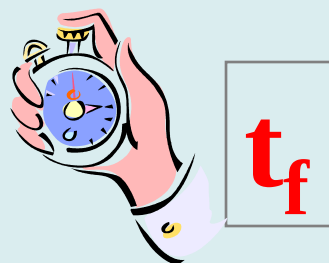
- Nei rivelatori “traccianti” i segnali generati al passaggio delle particelle cariche servono a misurare con precisione i punti dove è passata la particella.
- Per poter rivelare la particella senza “distruggerla” o alterarla troppo occorre che i tracciatori siano “trasparenti”
- Il modo di determinare i singoli punti può variare a seconda della tecnica usata
 - Rivelatori a Gas
 - Rivelatori a semiconduttore
- Tramite la connessione di punti si ricostruisce la traiettoria



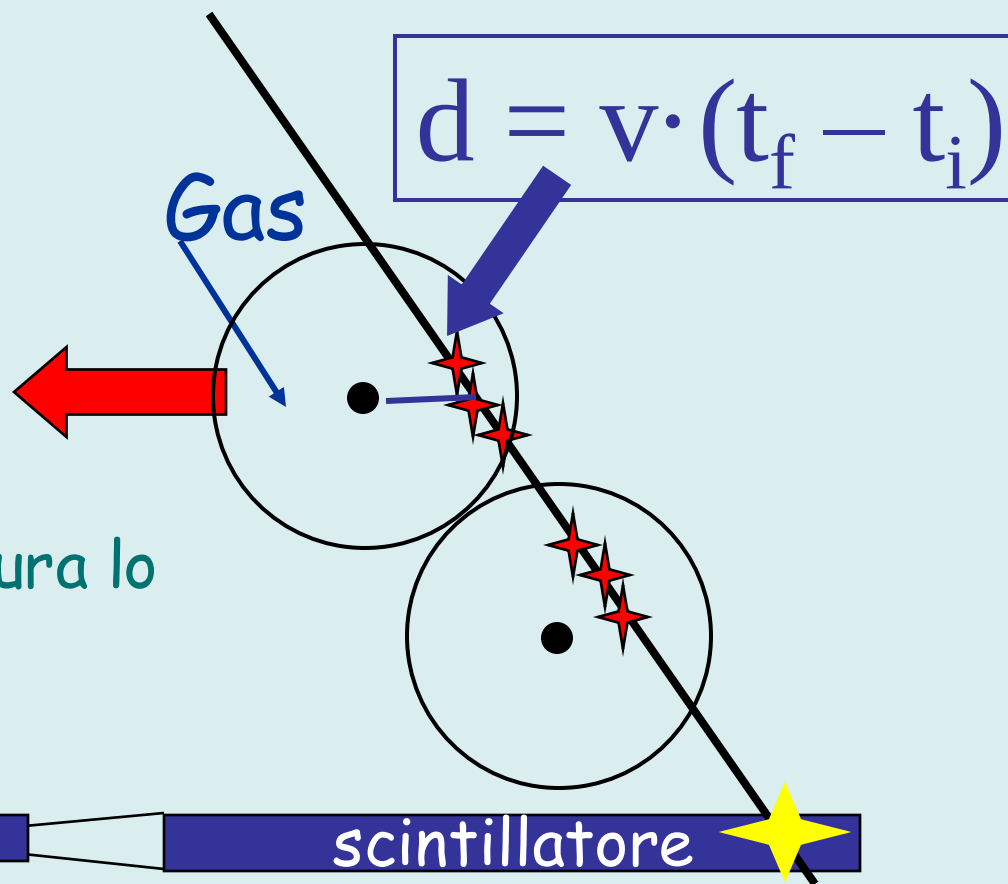
Rivelatori a Gas

Le particelle cariche ionizzano il gas

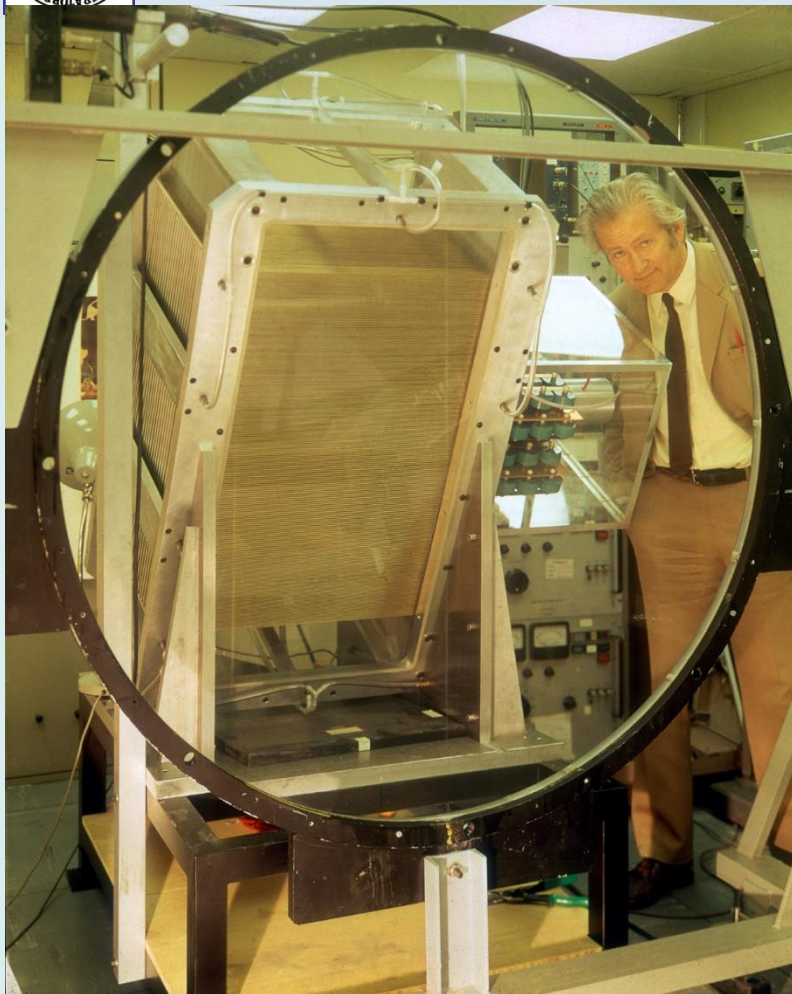
Gli elettroni prodotti
vengono raccolti sull'anodo



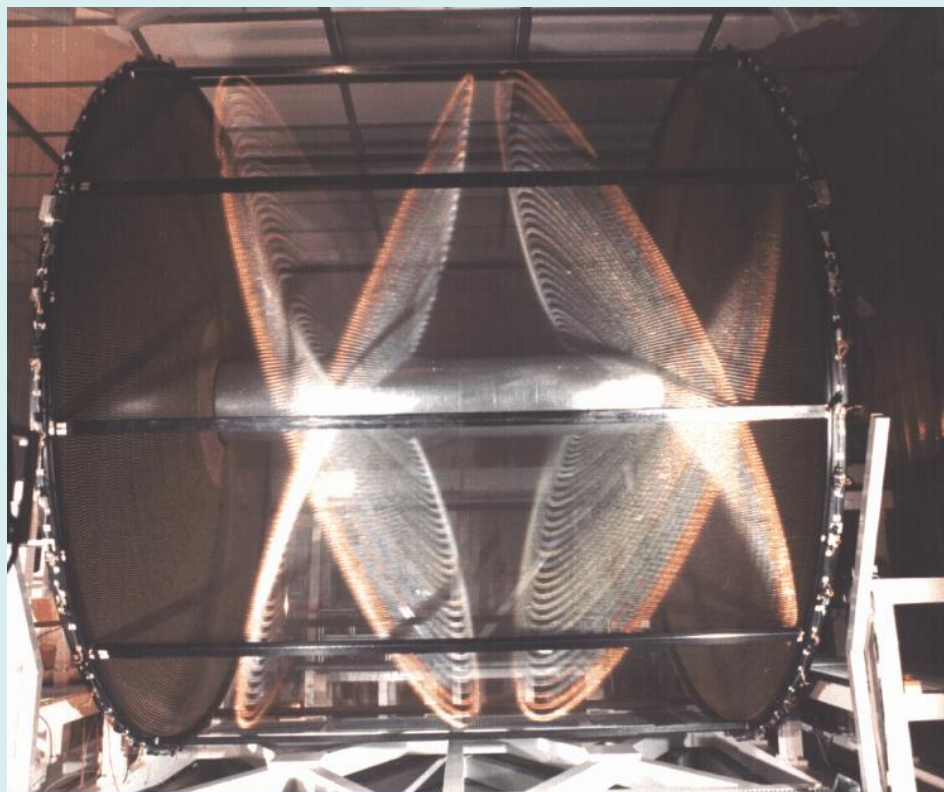
Dal tempo di "deriva" si misura lo
spazio percorso



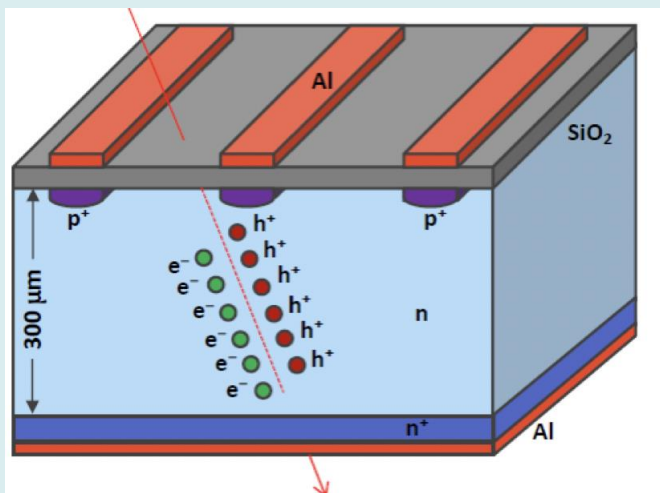
Camere a filo



Prof. Charpak Premio Nobel del 1992 per
l'invenzione delle camere a multifilo (1968)



Camera a fili di KLOE



- L' elemento attivo è un sottile strato di Semiconduttore drogato, principalmente Silicio (ma anche Ge, ZnCdTe, Diamante)
- Una particella ionizzante che attraversa il rivelatore collide con il materiale semiconduttore e produce coppie di elettroni (e^-) e lacune positive (h^+)
- Il campo elettrico separa le cariche che muovendosi verso gli elettrodi producono un segnale elettrico
- La costruzione sfrutta la tecnologia di realizzazione dei microchip elettronici

Calorimetri

A differenza dei tracciatori che devono essere trasparenti per misurare la particella senza modificare lo stato, i **Calorimetri** sono blocchi di **materiale denso** che devono degradare tutta l'energia in entrata fino a poterla rivelare (metodo distruttivo: vale anche per particelle neutre)

L'energia della particella **E** viene convertito in un segnale **S** proporzionale ad **E**

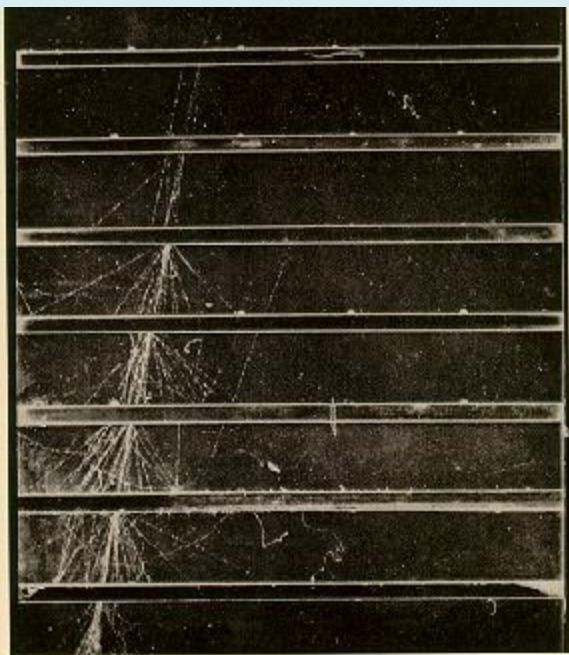
Usualmente sono cristalli di materiale organico, od inorganico, oppure volumi di "gas nobile" allo stato
genera un segnale luminoso proporzionale
rilasciata



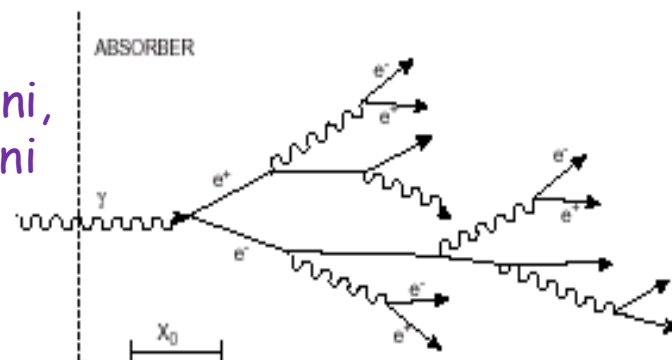
Calorimetri

Foto in una camera a nebbia di uno sciame elettromagnetico di un elettrone

Piombo

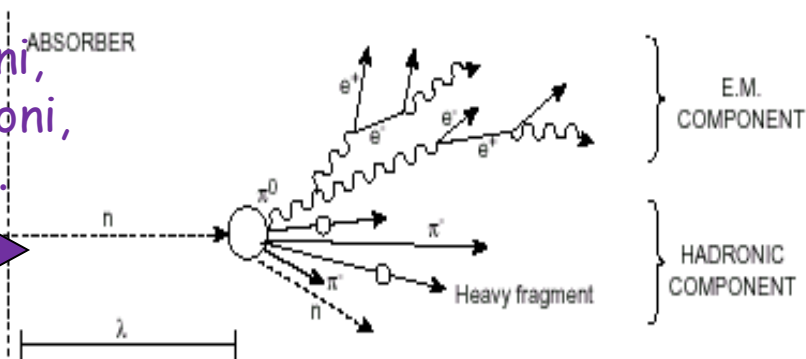


Fotoni,
elettroni,
positroni



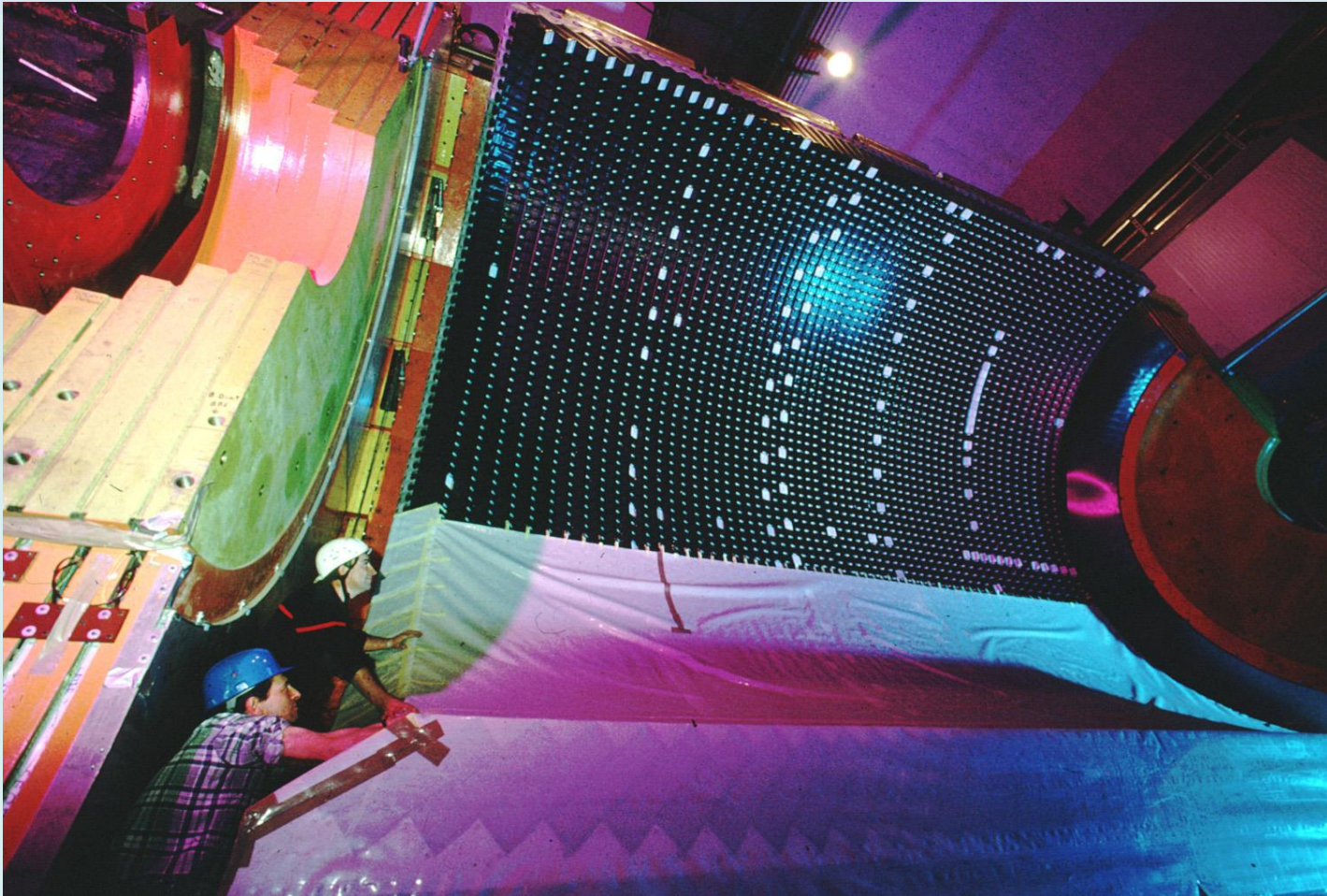
Sciame elettromagnetico

Protoni,
neutroni,
pioni...



Sciame adronico

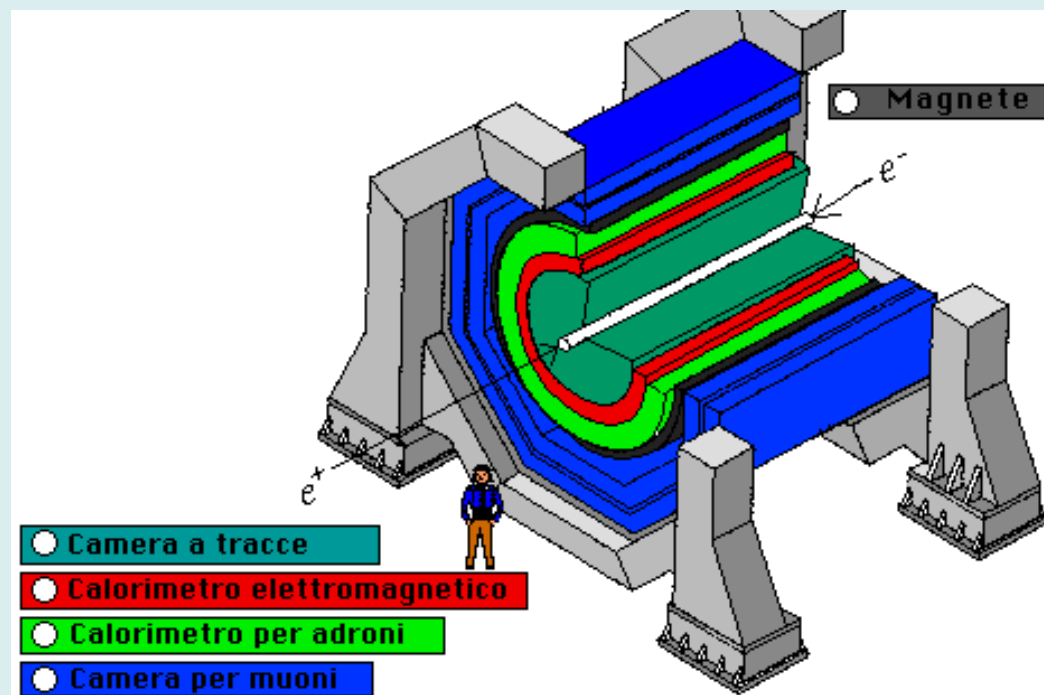
Calorimetri



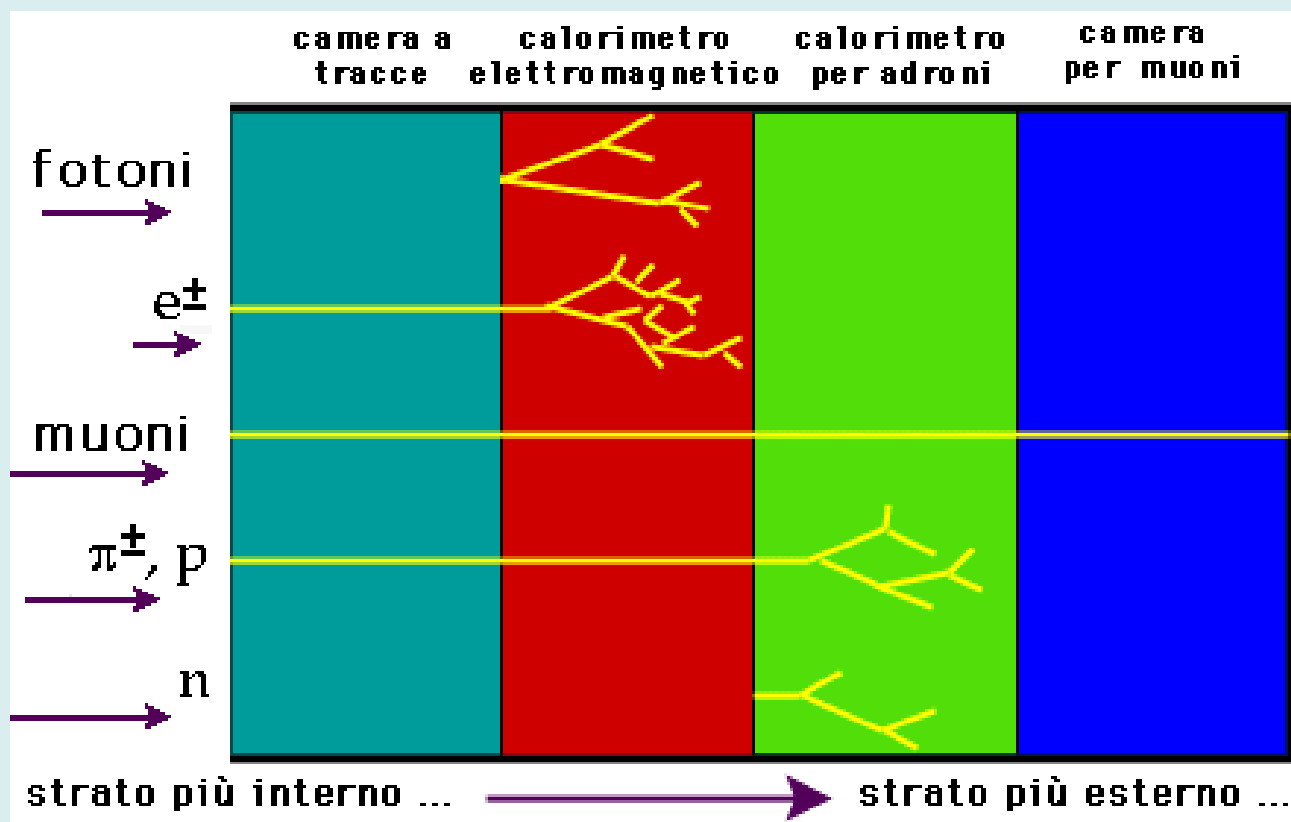
Esperimento ai collider

Struttura a "cipolla"

- Tracciatori
- Calorimetro per elettroni e fotoni
- Calorimetro per adroni
- Tracciatori per muoni
- Magneti per curvare



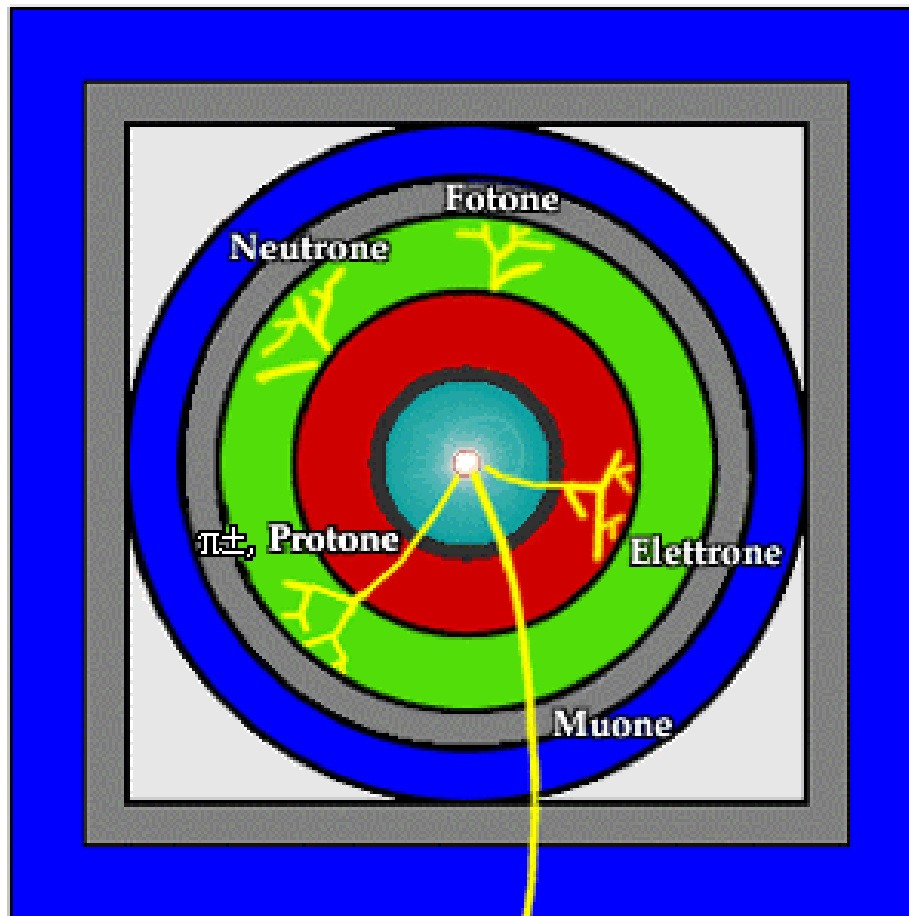
Esperimento ai collider



Esperimento ai collider

Sezione di un rivelatore, con indicate tracce di particelle

-  Fascio (al centro)
-  Camera a tracce
-  Bobina del magnete
-  Calorimetro E-M
-  Calorimetro per adroni
-  Acciaio magnetizzato
-  Camere per muoni



Cosa manca?

Interagiscono così poco
con la materia che sono
capaci di attraversare
indisturbati la terra da
parte a parte

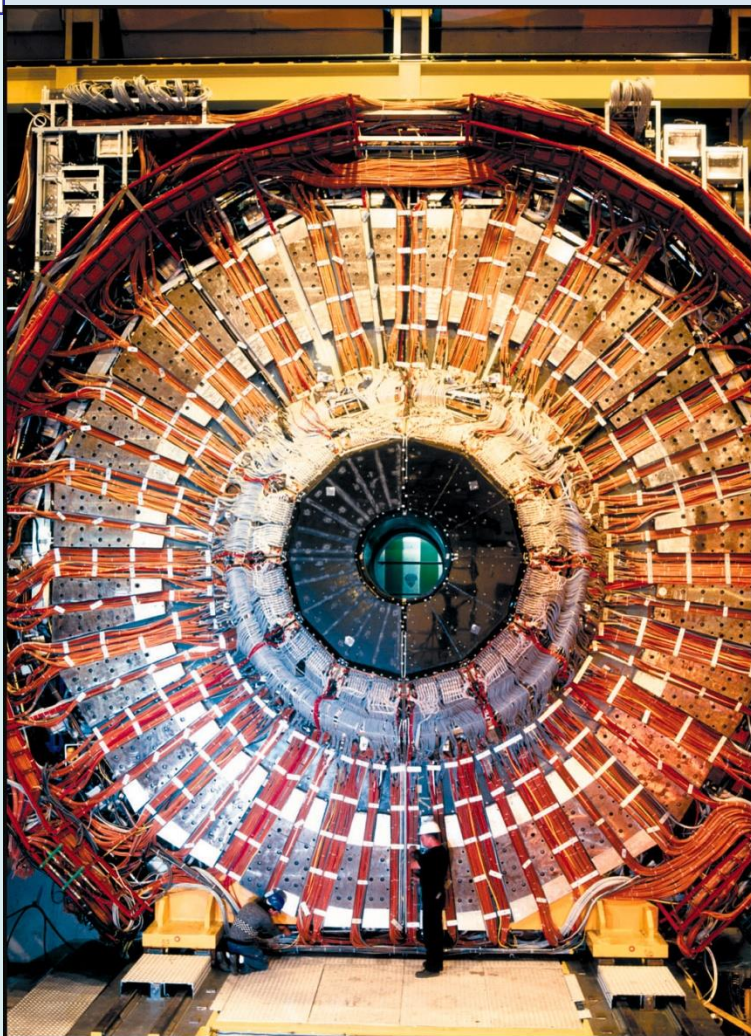
Energia e Impulso si conservano!

Si possono però ottenere
informazioni su di loro
per differenza tra
l'energia e impulso
iniziale e quelle misurate

- **I neutrini!**

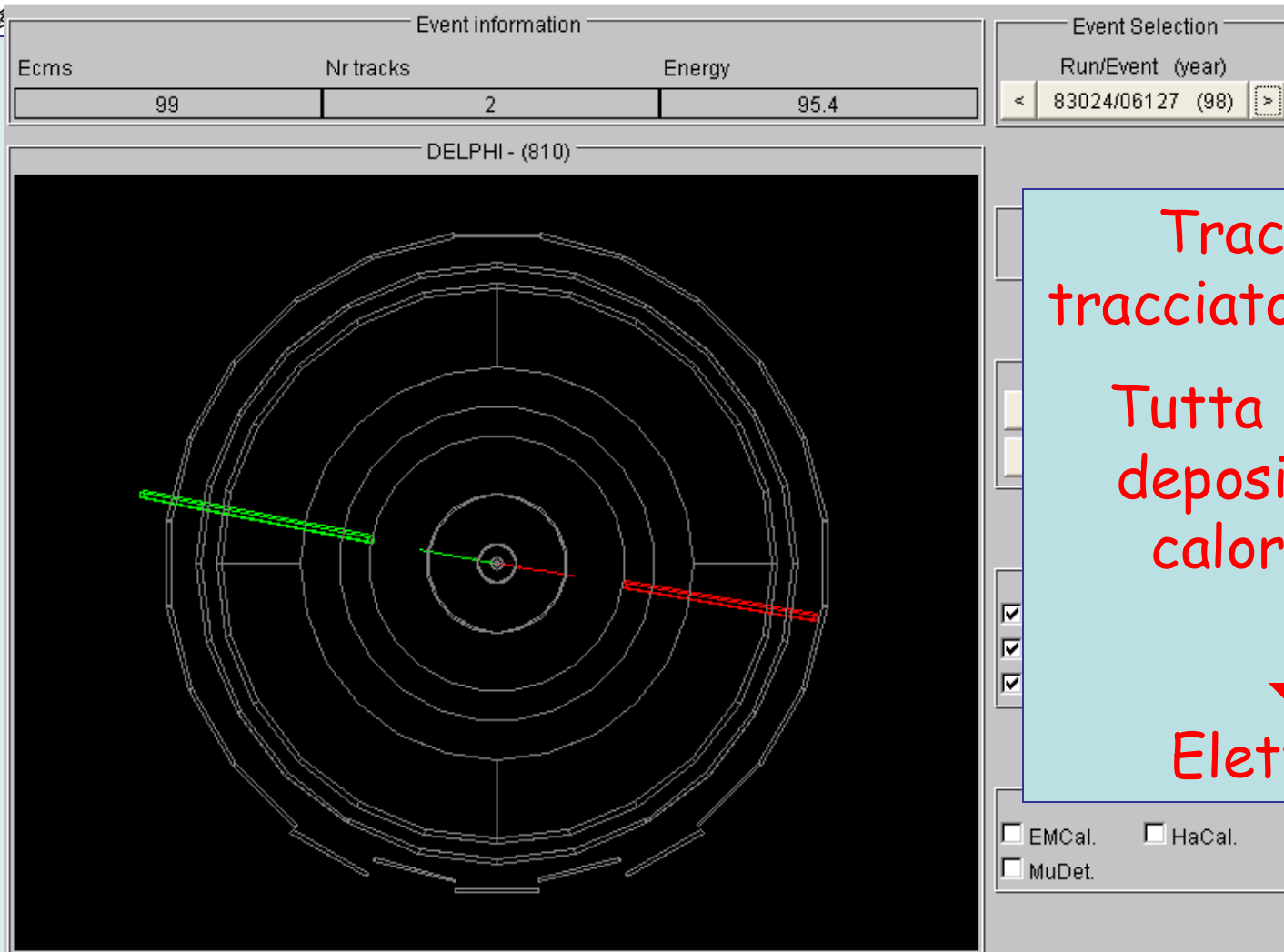


L'esperimento Delphi al LEP



DELPHI è uno dei quattro
esperimenti al LEP del CERN

Ha rivelato milioni di
bosoni Z e W (e non solo)
che ci hanno permesso di
verificare il Modello
Standard



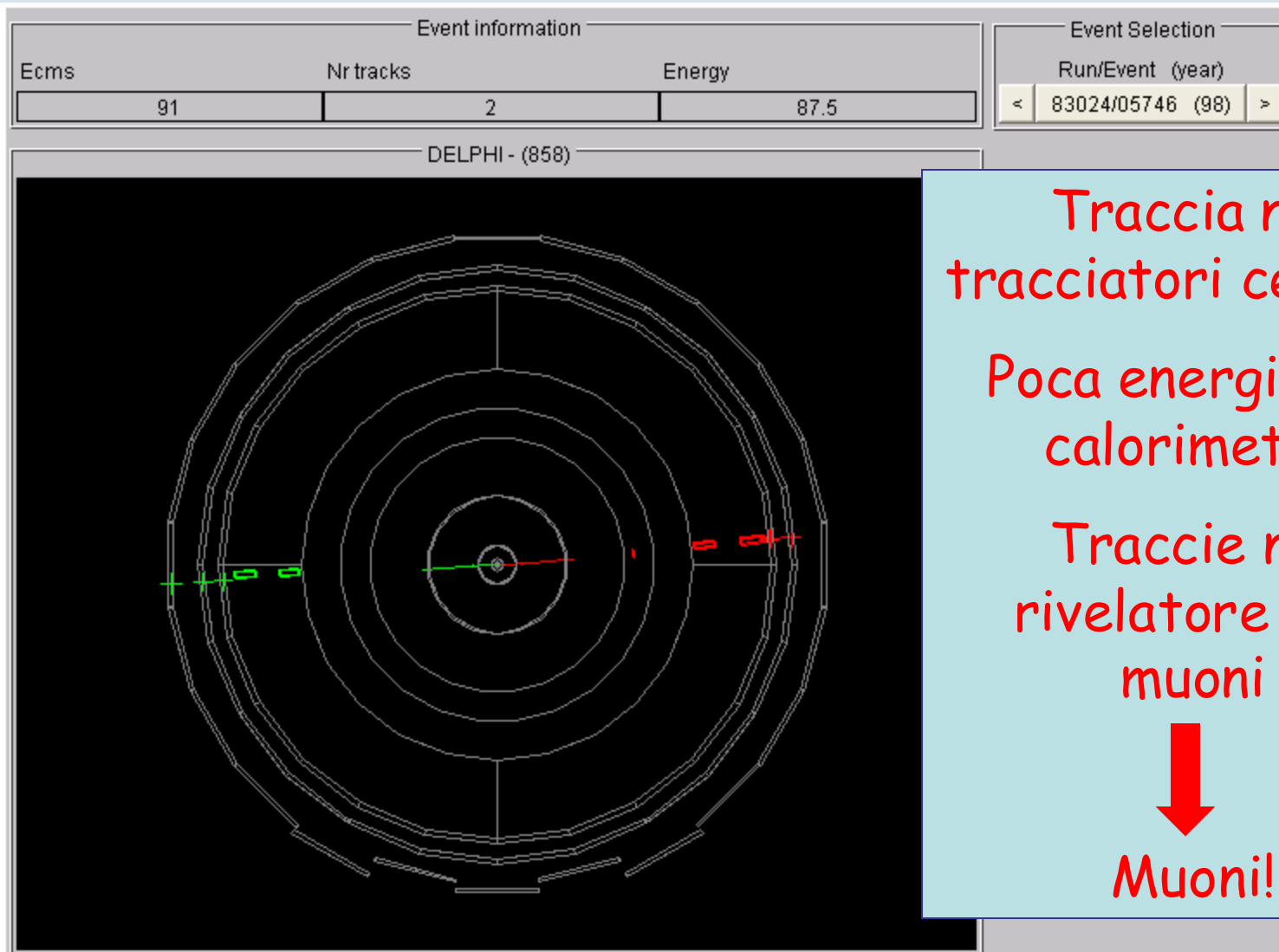
Traccia nei
tracciatori centrali

Tutta l'energia
depositata nel
calorimetro



Elettrone!

Muoni



Traccia nei
tracciatori centrali

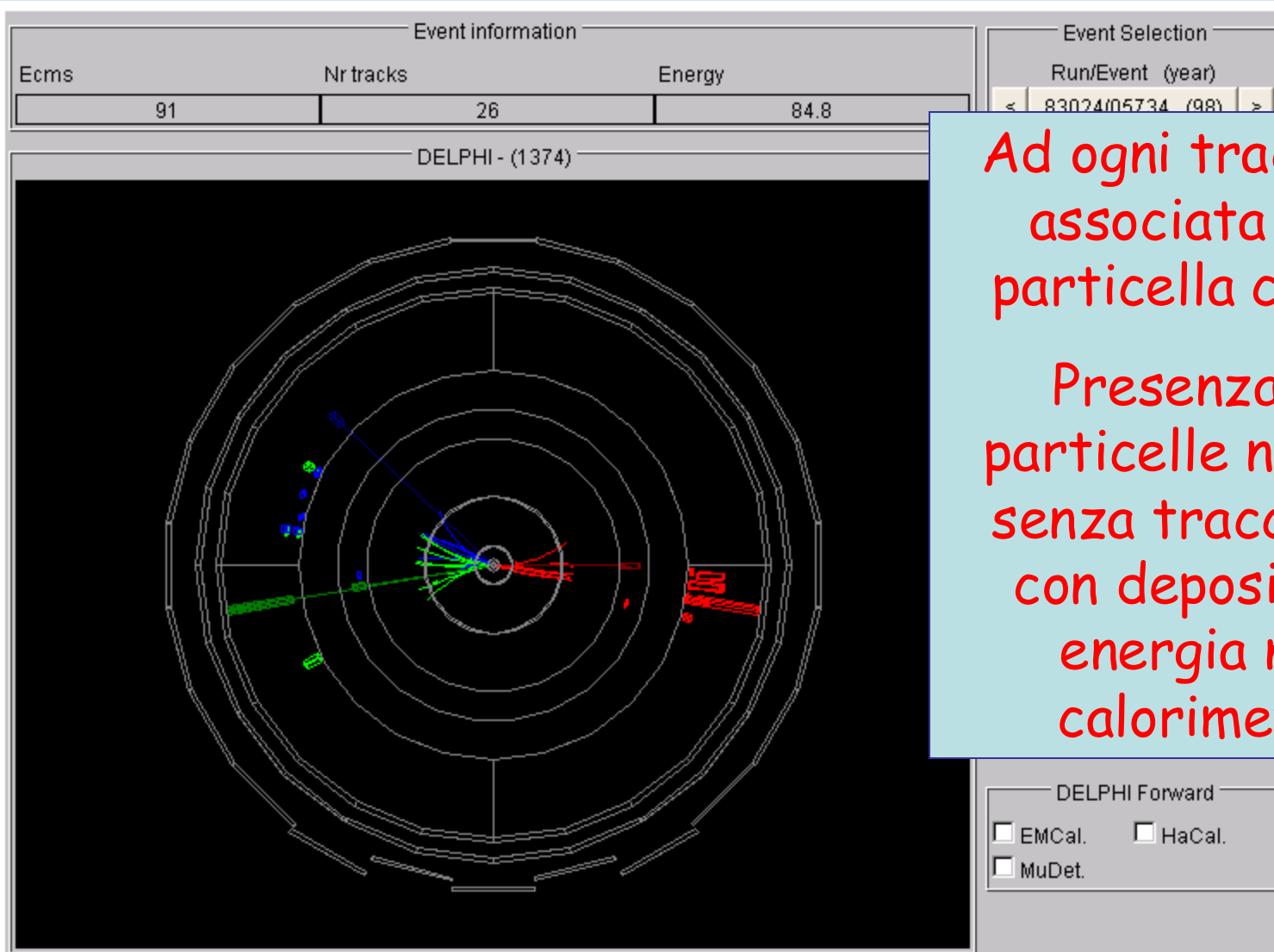
Poca energia nel
calorimetro

Tracce nel
rivelatore per
muoni



Muoni!

Jet di adroni



Ad ogni traccia è associata una particella carica

Presenza di particelle neutre senza tracce ma con depositi di energia nei calorimetri

Conclusioni

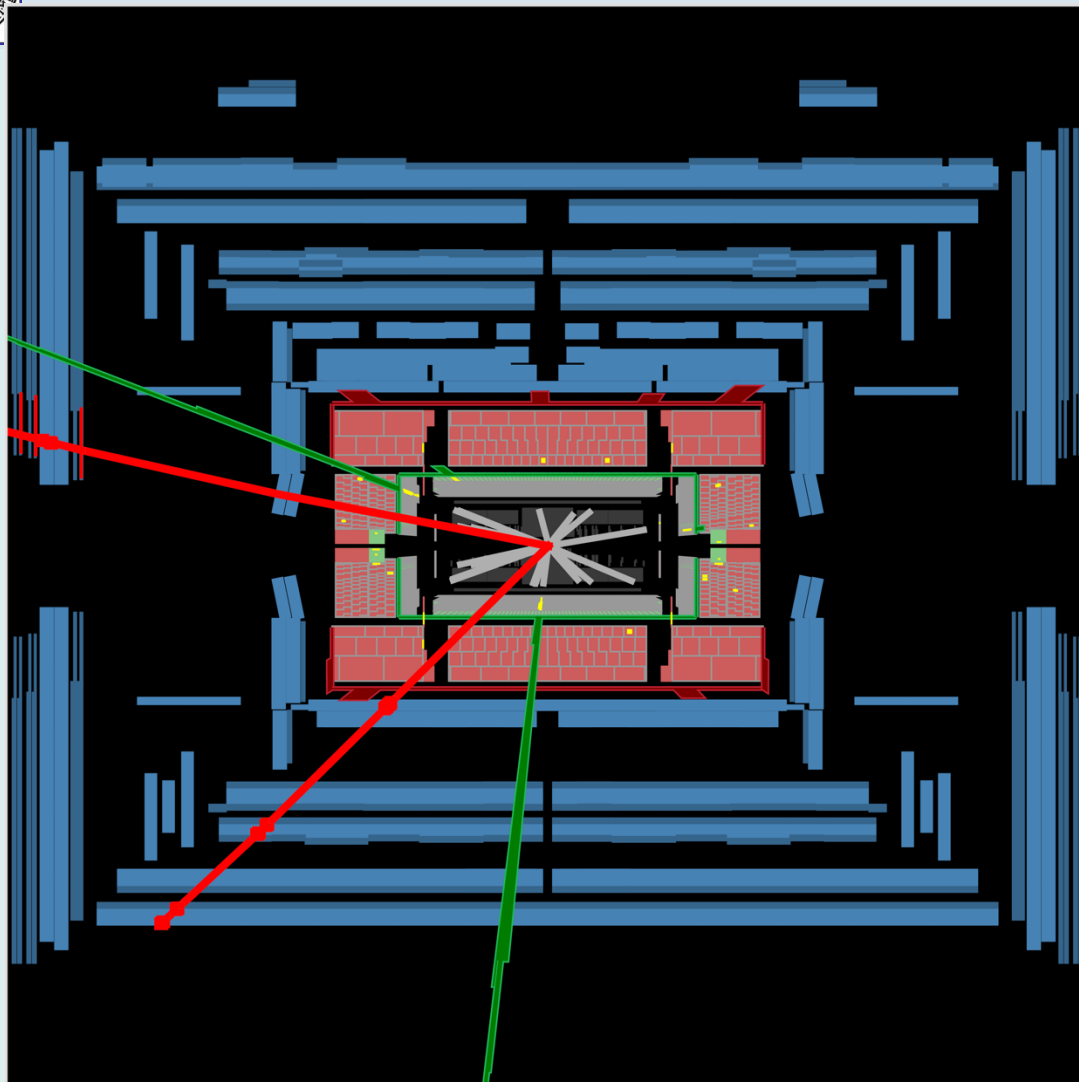
- Gli acceleratori sono strumenti fondamentali per produrre e studiare le particelle elementari
- Alte energie servono sia per produrre particelle nuove con masse maggiori che per indagare a distanze sempre più piccole
- Le tecniche di rivelazione delle particelle elementari sono applicate anche alla medicina e alla biologia (TAC, PET, RMN...)
- Sviluppo di elettronica e software di frontiera

L'esperimento ATLAS



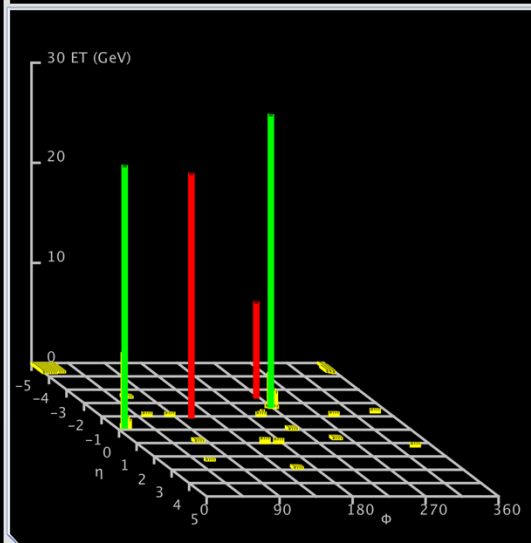
- 7000 tonnellate di peso
 - La torre Eiffel pesa 10000 tonnellate
- 3000 Km di cavi
 - Coprono la distanza Napoli Parigi e ritorno
- 100 milioni di canali di elettronica per la raccolta dei dati

Eventi ATLAS



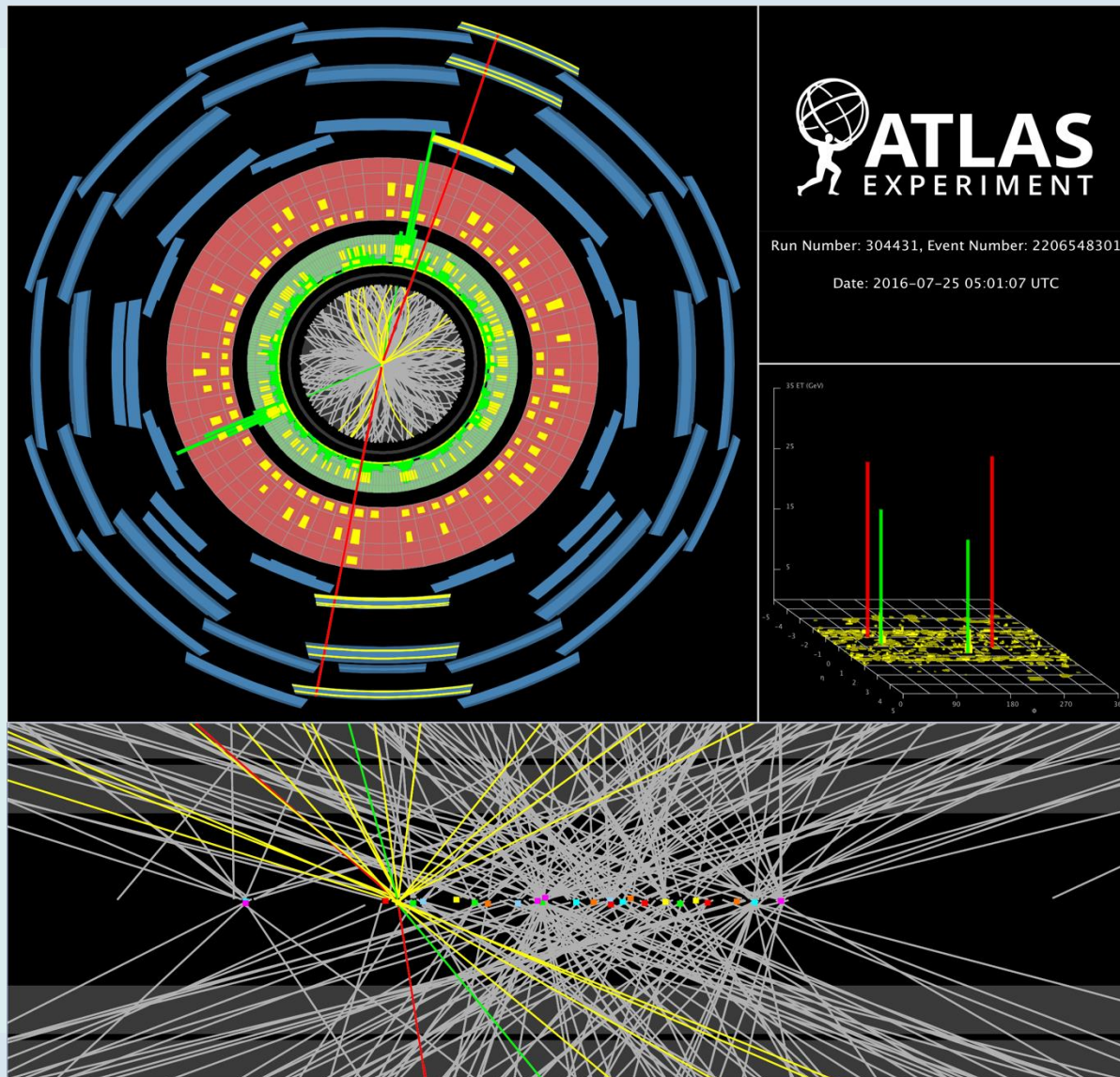
Run Number: 328263, Event Number: 953423990

Date: 2017-06-28 22:02:01 CEST

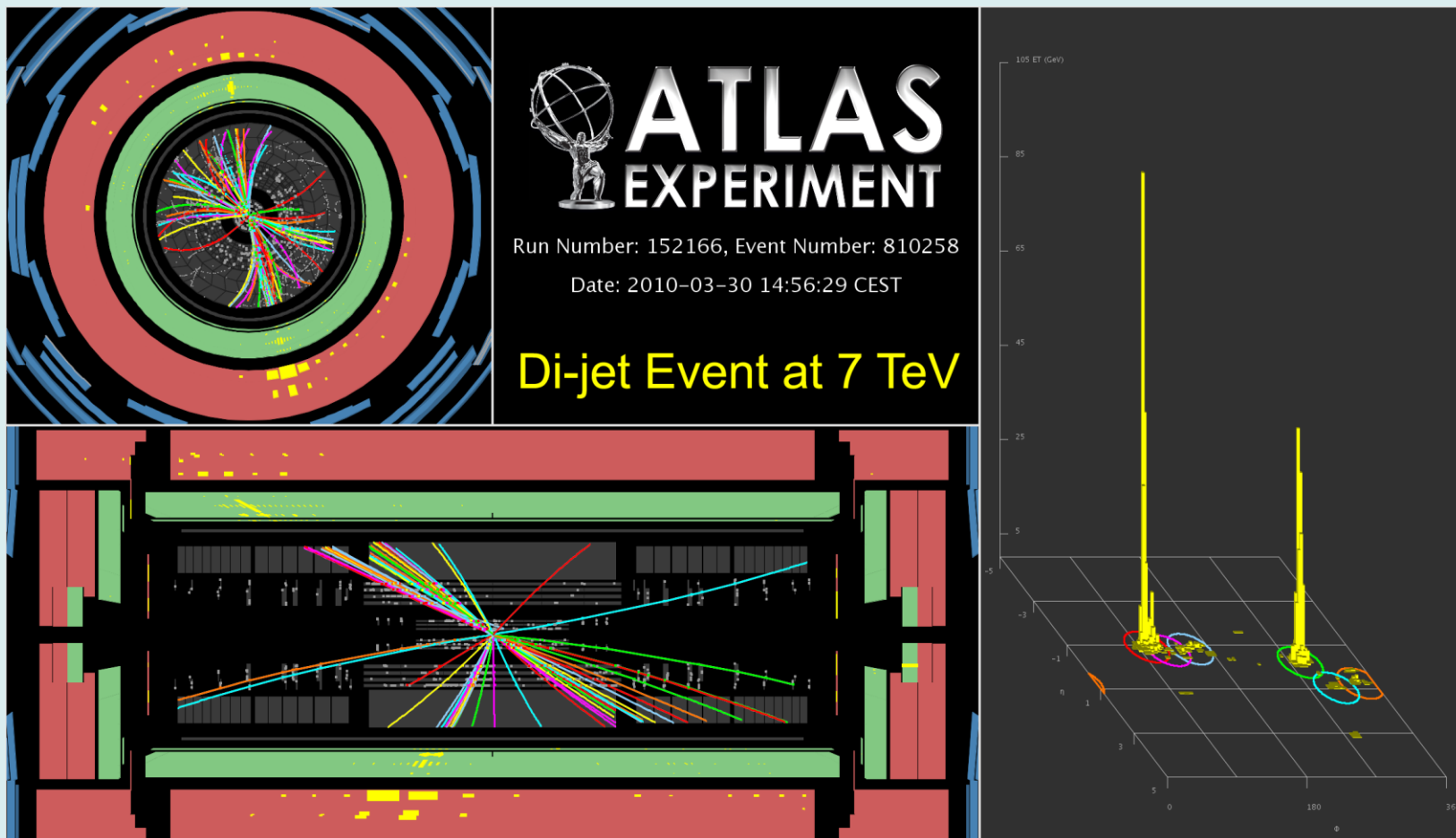




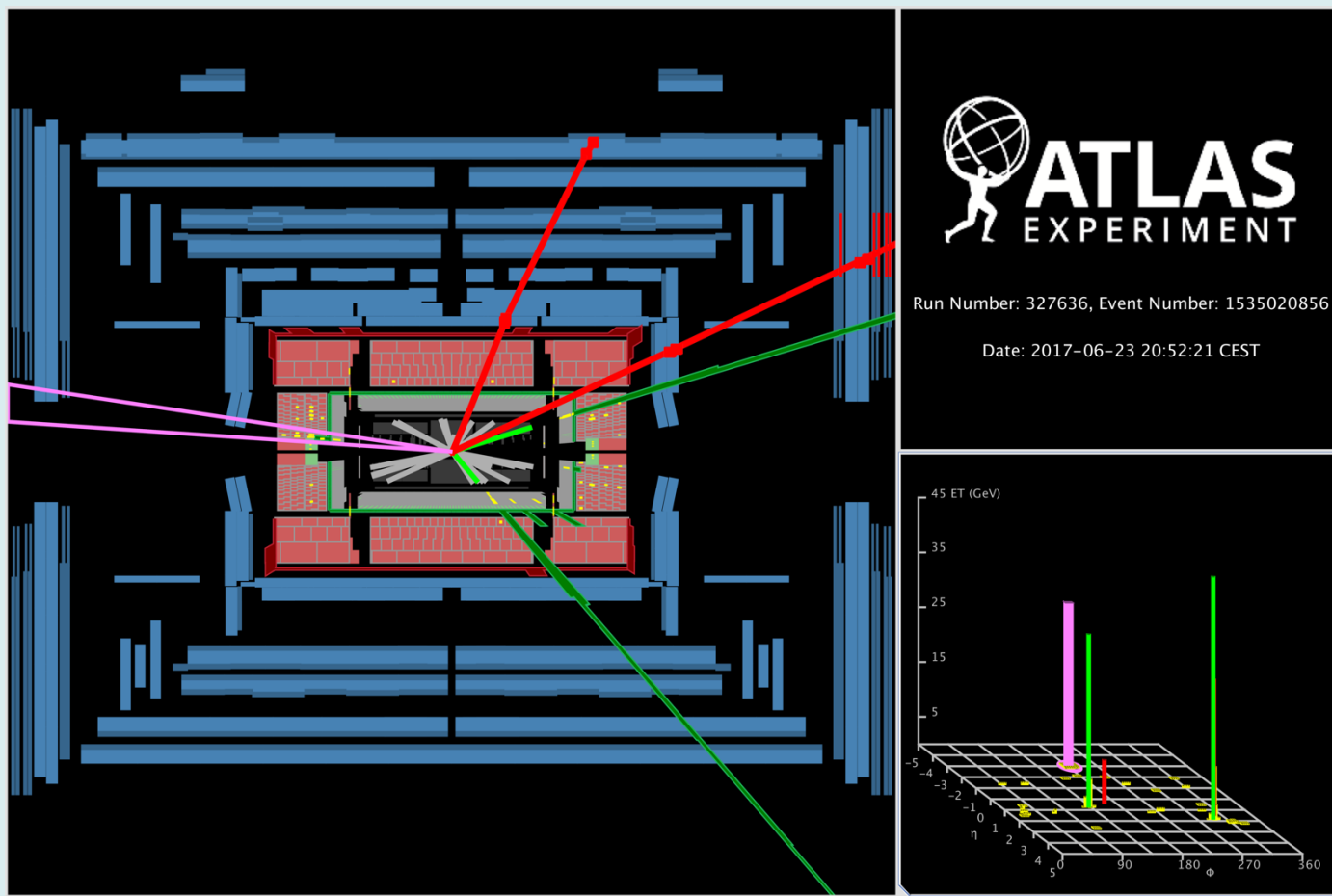
Eventi ATLAS



Eventi ATLAS



Eventi ATLAS





L'esperimento ATLAS

I numeri:

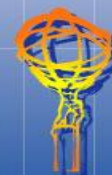
- 42 Nazioni
- 182 Istituti di Ricerca
- 3000 autori circa

Partecipazione Italiana

- 14 sezioni INFN
- 200 Scientific Authors
- 10 % circa della collaborazione la maggiore comunità europea

Australia	Poland
Austria	Portugal
Azerbaijan	Romania
Belarus	Russia
Brazil	Serbia
Canada	Slovakia
China	Slovenia
Czech Republic	Spain
Denmark	Sweden
France	Switzerland
Georgia	Taiwan
Germany	Turkey
Greece	UK
Israel	USA
Italy	CERN
Japan	JINR
Morocco	

**ATLAS
Collaboration**



L'esperimento ATLAS

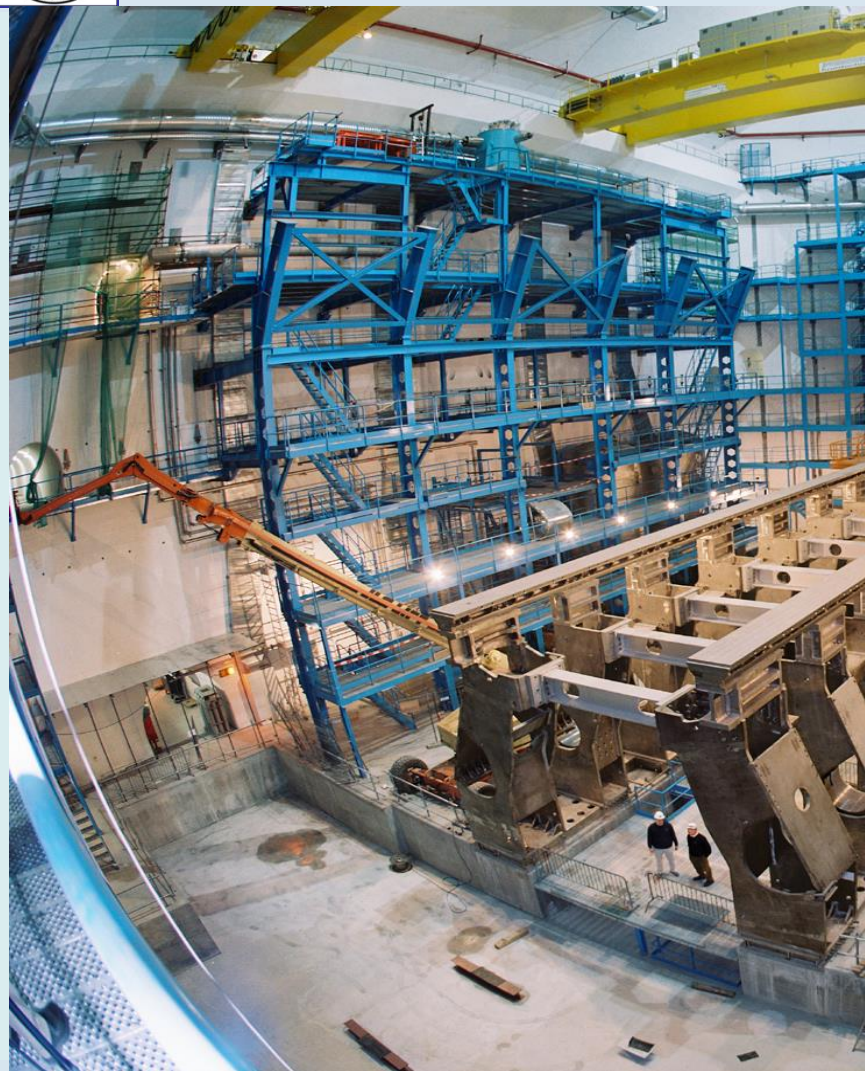


L'esperimento ATLAS



2002

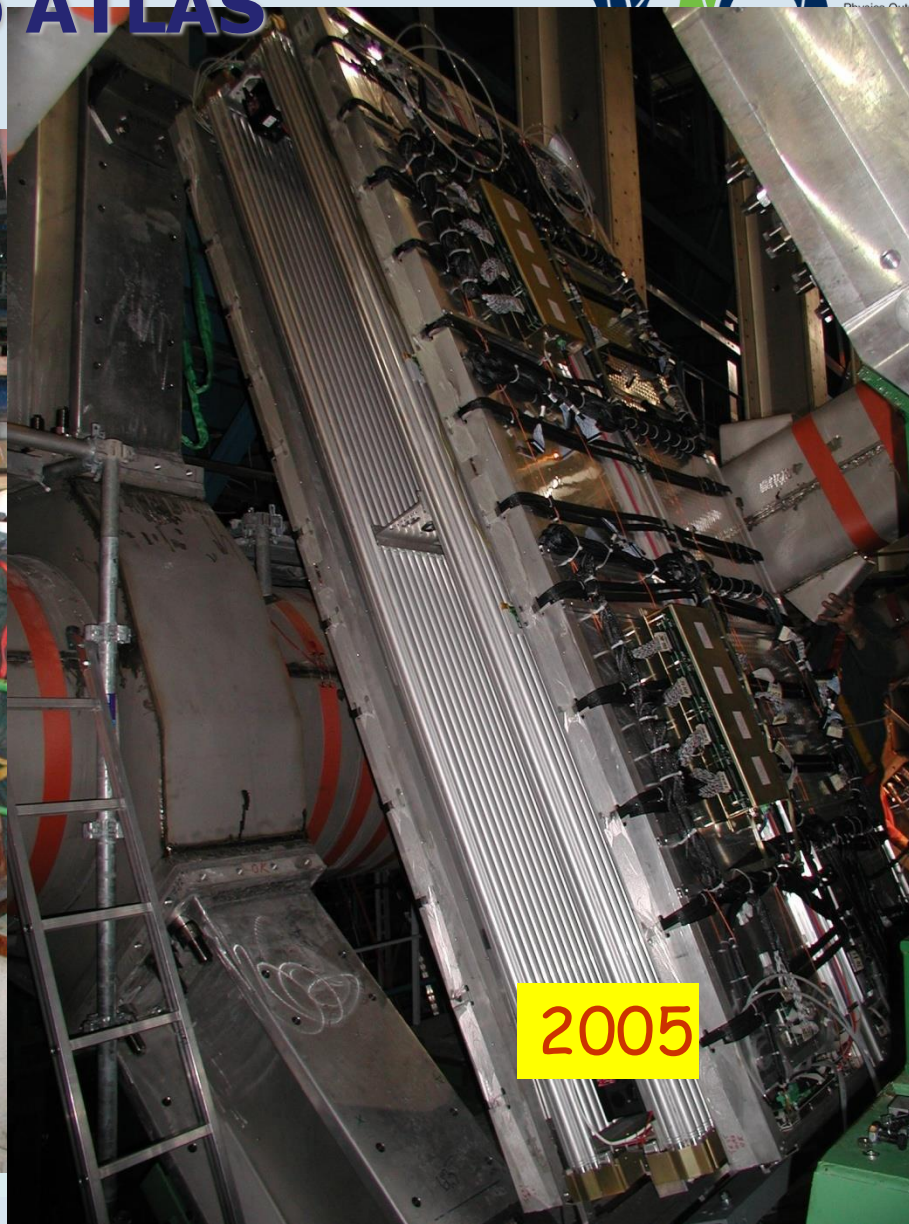
L'esperimento ATLAS



L'esperimento ATLAS



L'esperimento ATLAS



Camere RPC testate a Napoli

18 febbraio 2025

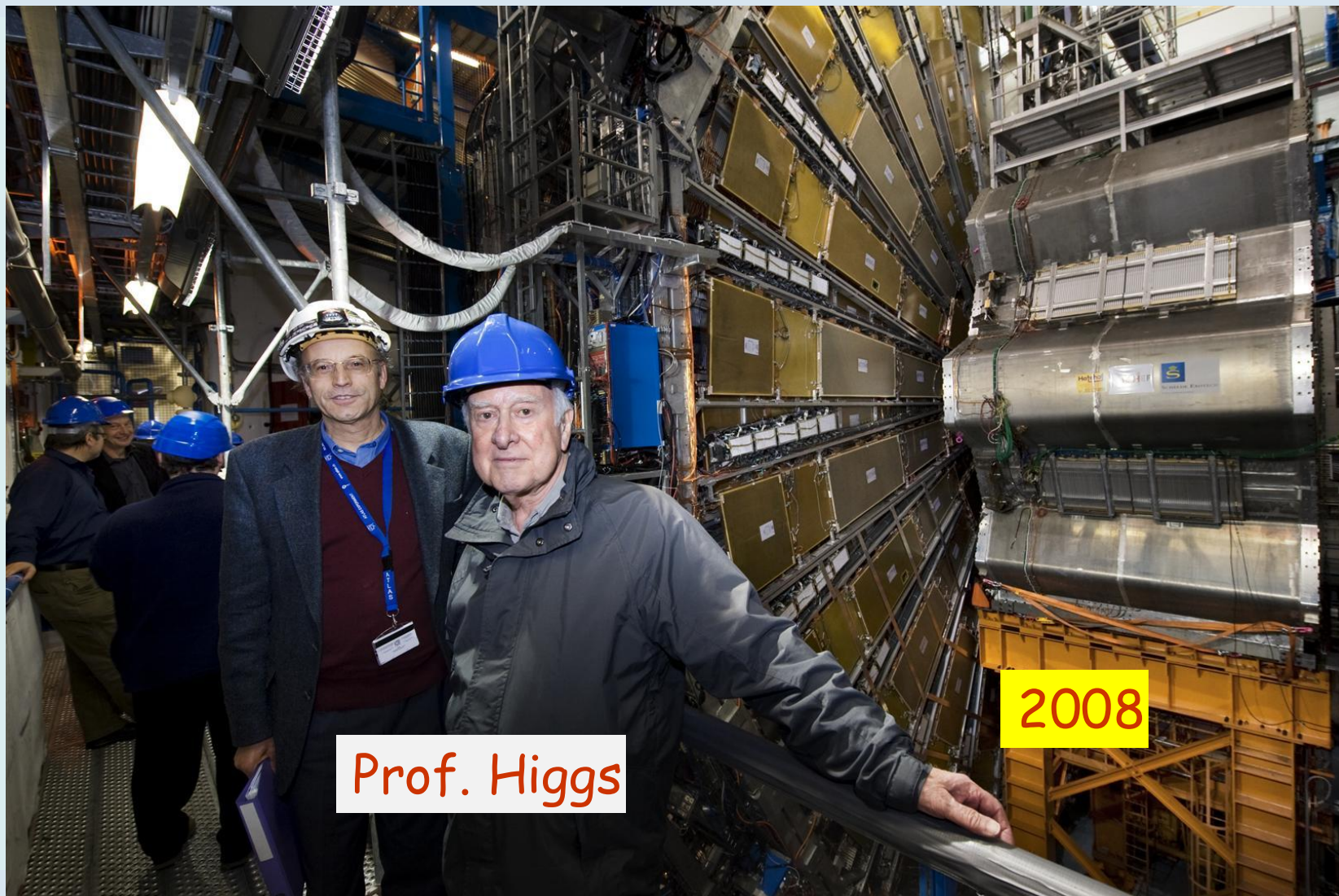
Acceleratori e Rivelatori

60

L'esperimento ATLAS



L'esperienza ATLAS



L'esperimento ATLAS



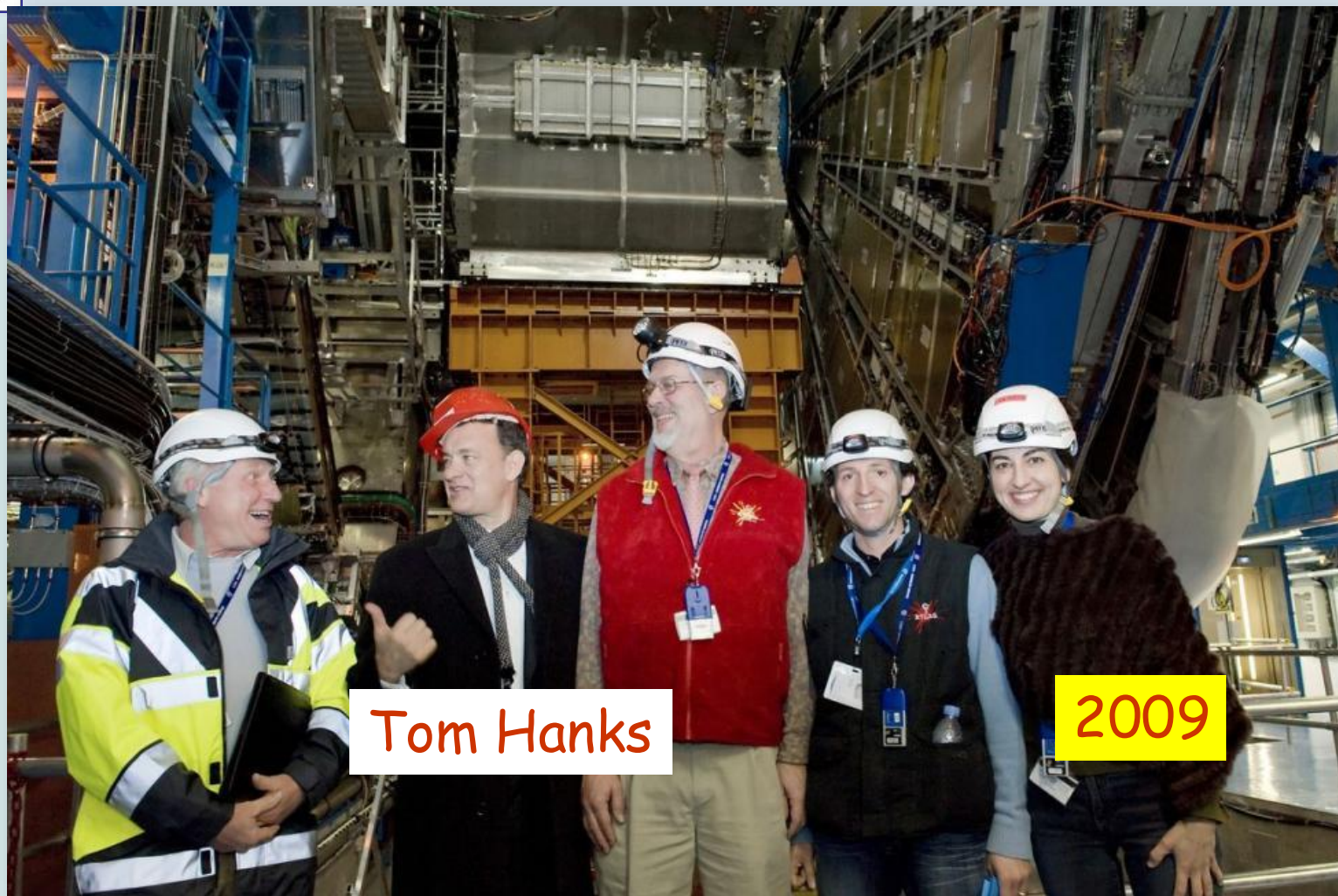
L'esperimento ATLAS



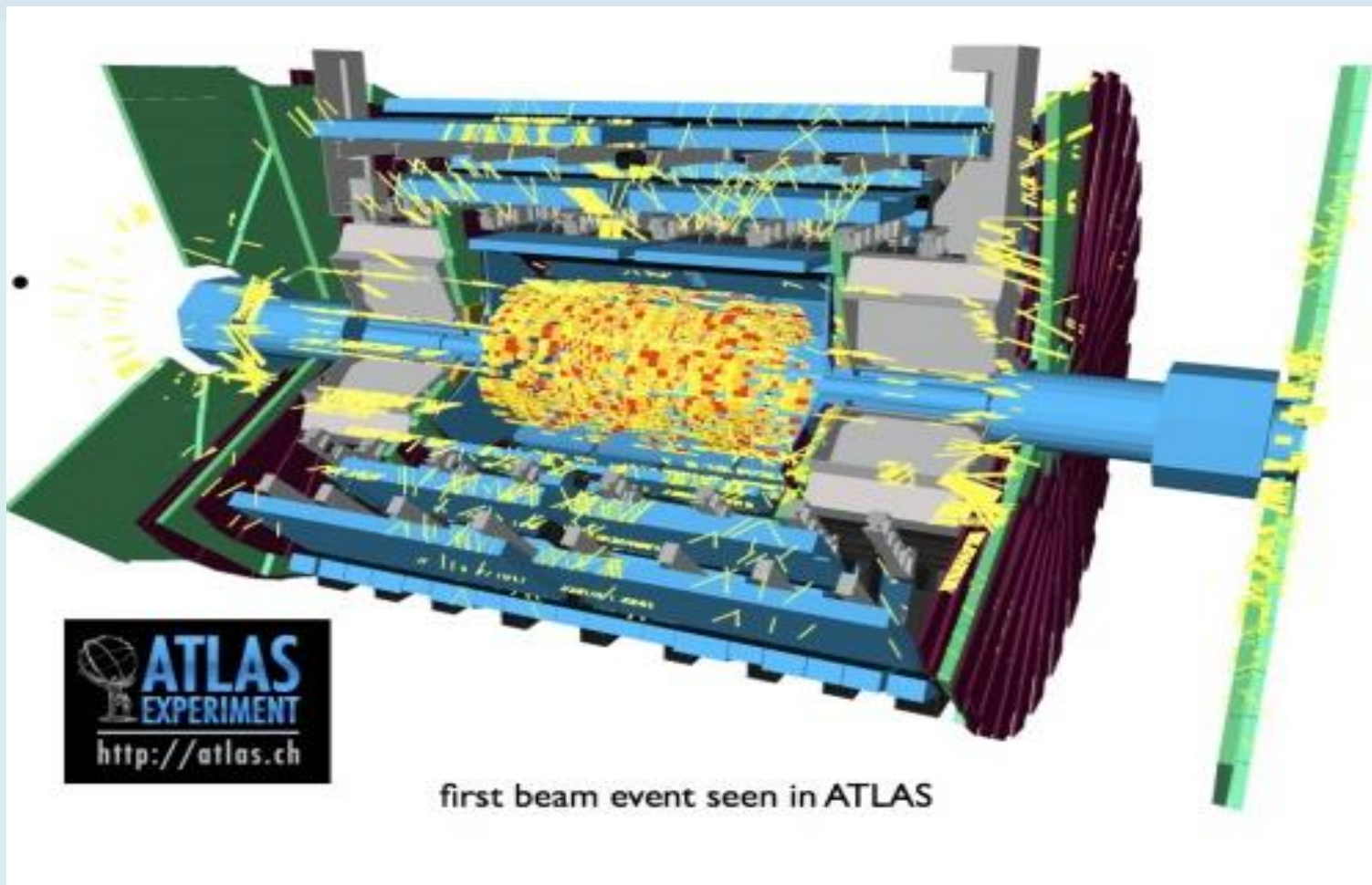
L'esperimento ATLAS



L'esperimento ATLAS

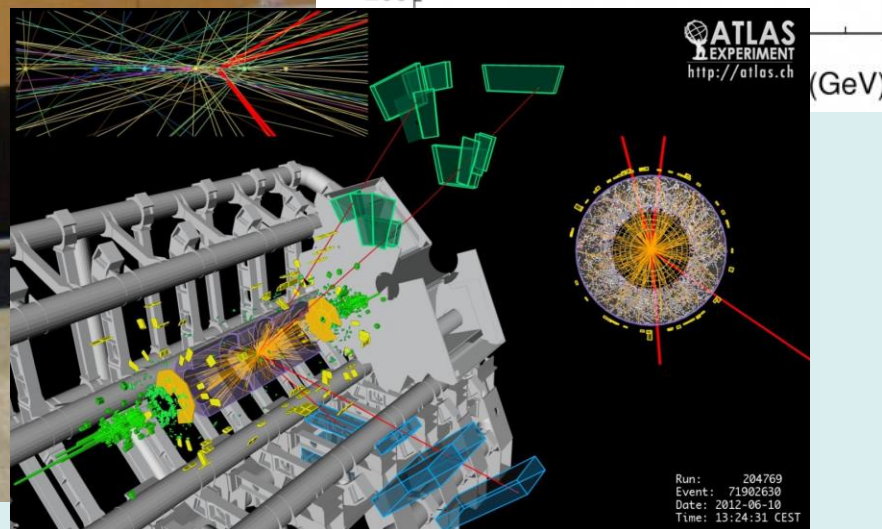
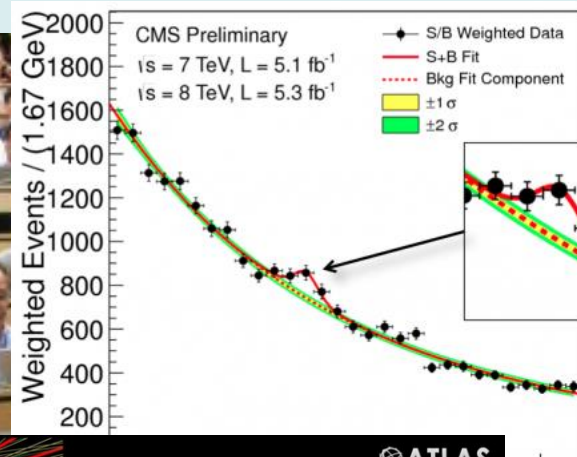


L'esperimento ATLAS

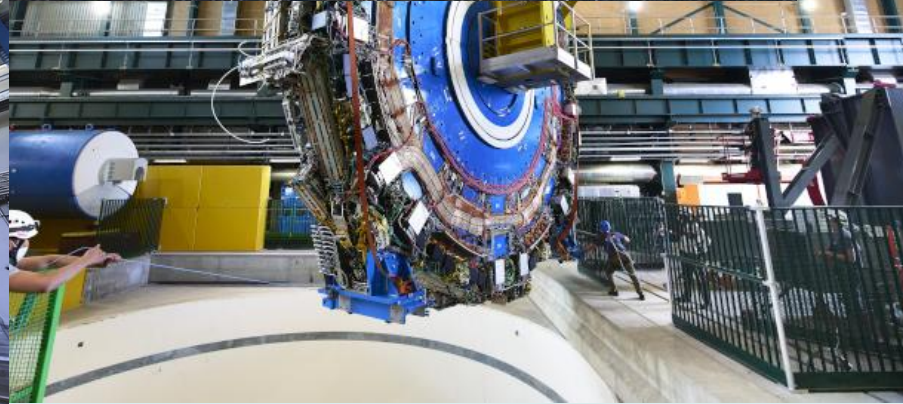
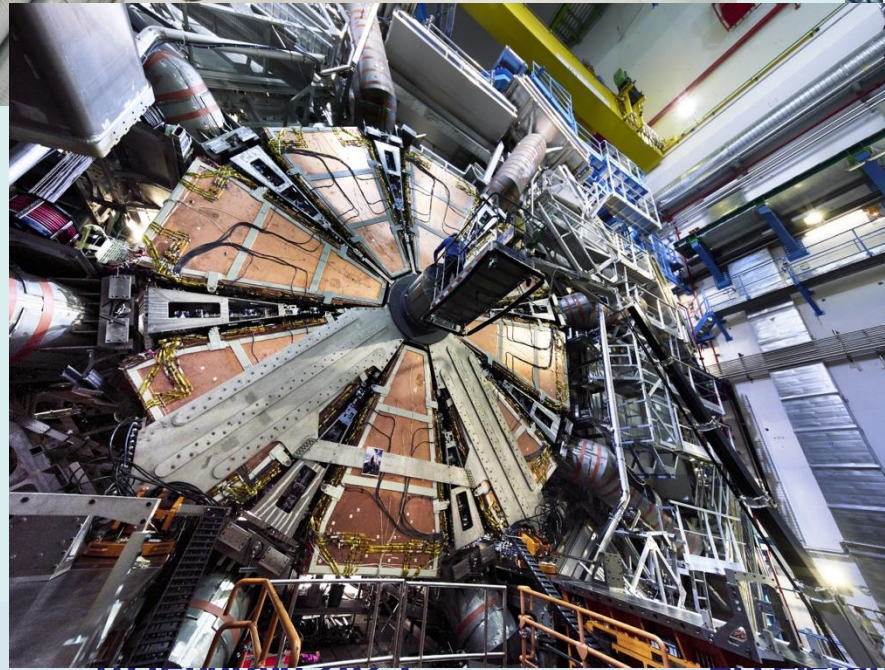
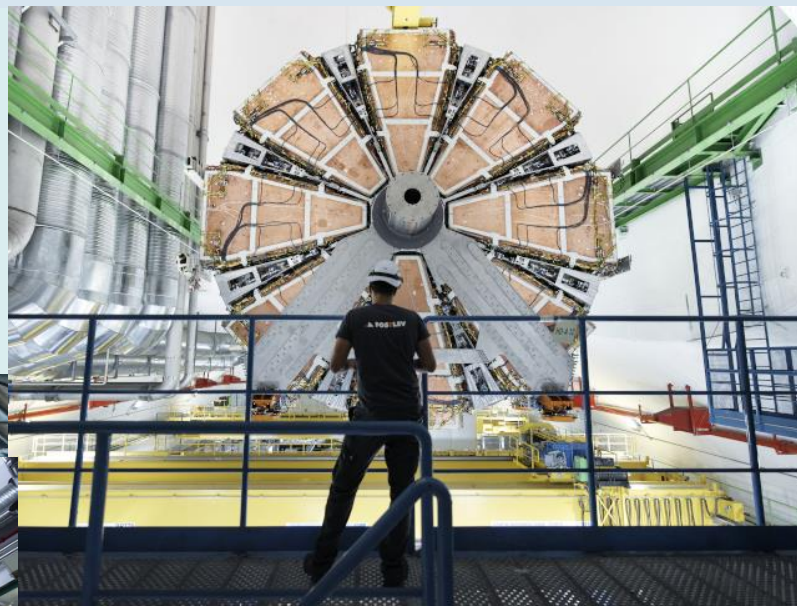
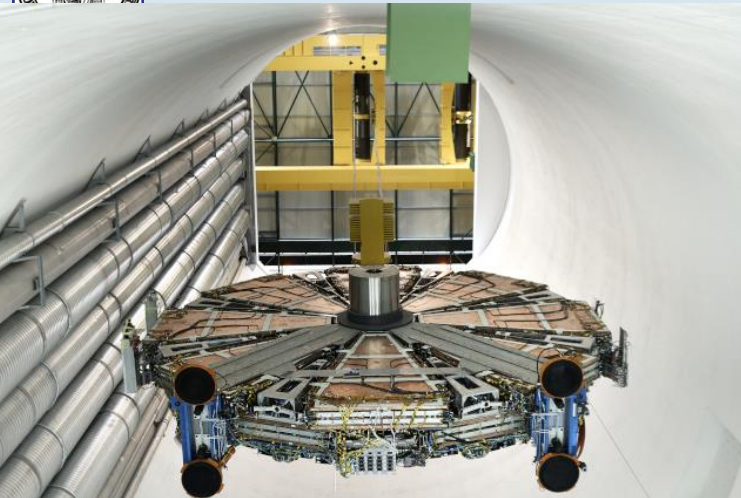


2008

L'esperimento ATLAS



L'esperimento ATLAS



2021



Riferimenti e approfondimenti

- <https://atlas.cern>
 - Sito dell'esperimento ATLAS per informazioni e tour virtuali
- <https://web.infn.it/atlas/>
 - Sito divulgativo della comunità italiana di ATLAS
- <https://home.cern>
 - Homepage del CERN