

Acceleratori e rivelatori.....

..e cosa questi ci hanno permesso di capire sulla
natura “ *dell’infinitamente piccolo*”

a cura di

E. Vercellin E. Chiavassa

Presentato da

A. Ferretti

Dipartimento di Fisica Sperimentale dell'Università di Torino
& INFN Sezione di Torino

Perche' gli acceleratori di particelle?

Dimensioni: Filo di ragnatela: 10^{-5} m;
 Atomo: 10^{-10} cm ;
 Nucleo: 10^{-14} m;
 Nucleone: 10^{-15} m (1 fm)

Per poter continuare con successo la metodologia sperimentale di Rutherford e poter sondare sempre piu' "in piccolo" occorre disporre di particelle-sonda di energia sempre piu' elevata, per due ragioni:

- Meccanica quantistica
- Equivalenza tra massa ed energia

Effetti quantistici

Meccanica quantistica: natura “ondulatoria” associata alle particelle subatomiche.

$$\lambda \propto 1/p \quad (\text{Relazione di De Broglie})$$

dove $p = mv$ e' il *momento* (quantita' di moto).

Una particella e' in grado di sondare oggetti-bersaglio di dimensioni dell'ordine della propria lunghezza d'onda:

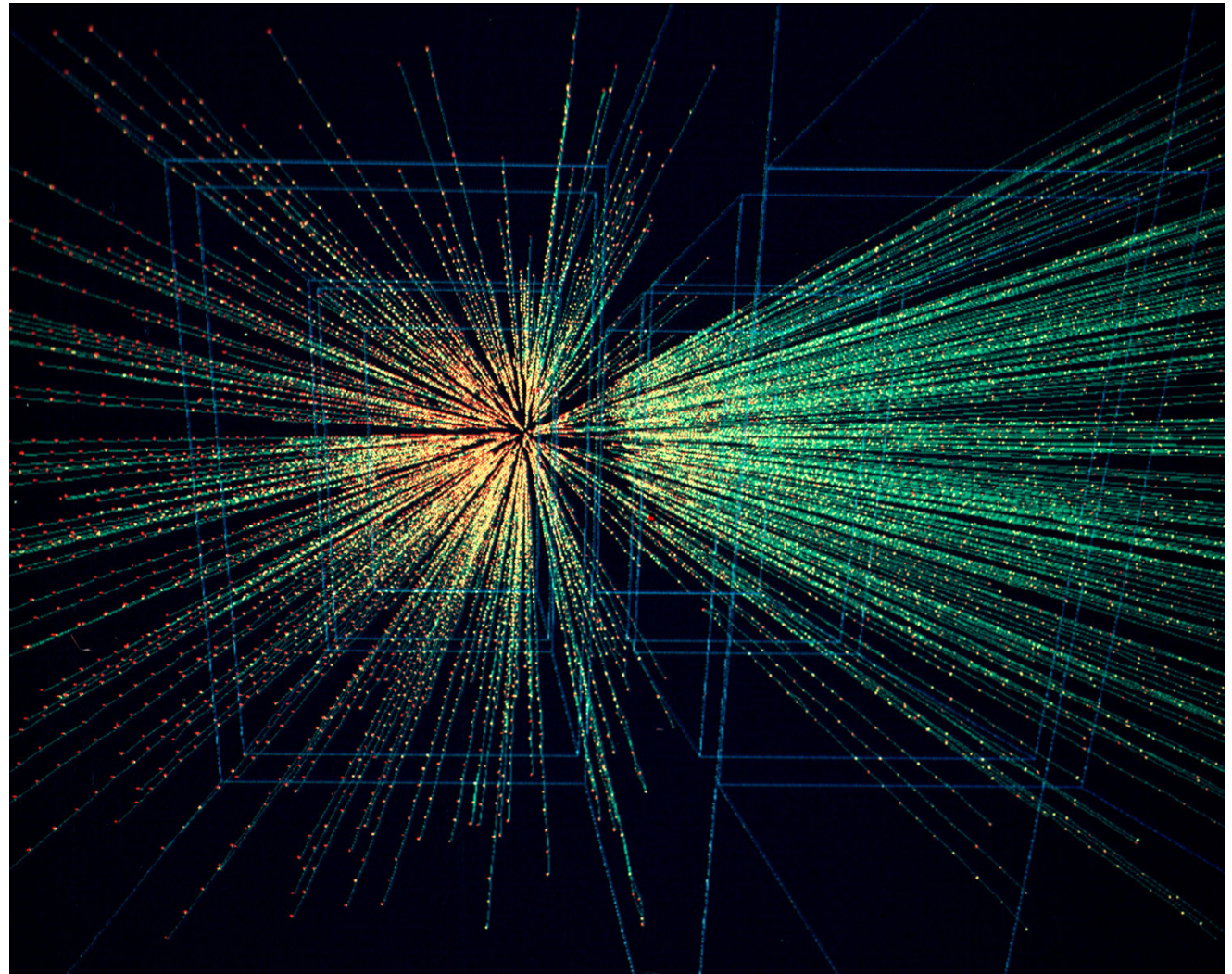
Alte energie \rightarrow *alti momenti* \rightarrow *piccole λ* \rightarrow *sondare in piccolo*

Nelle collisioni di particelle accelerate ad alte energie nuove particelle vengono prodotte

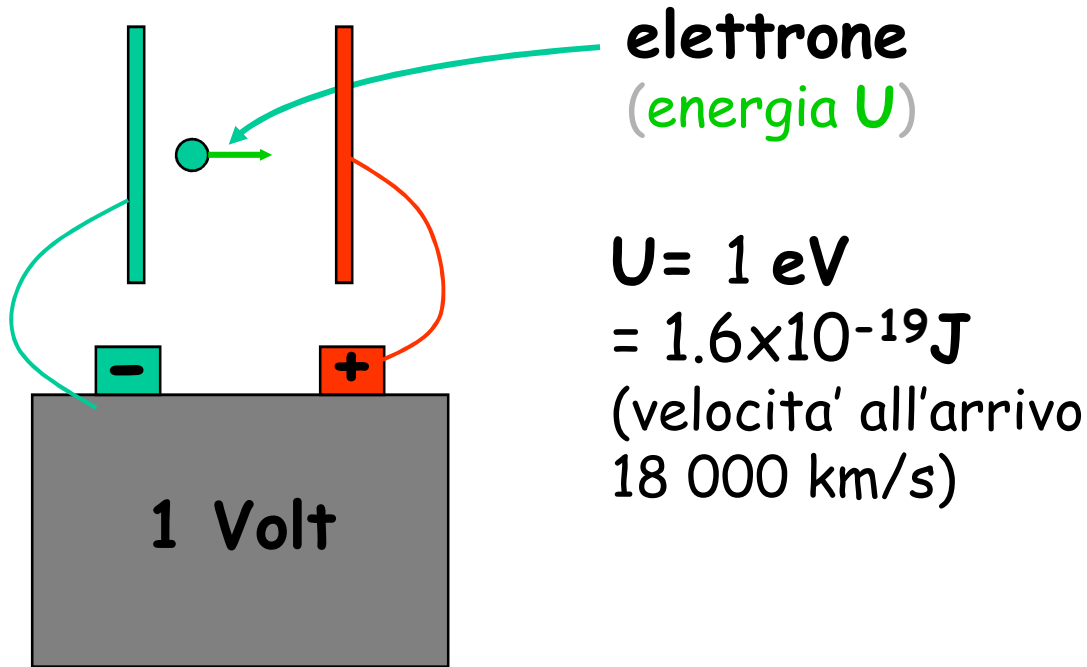
Cio' avviene in
ossequio alla
equivalenza fra
massa ed energia
(Einstein)

$$E=Mc^2$$

La massa e' una
forma di energia:
l'energia cinetica
puo' quindi
convertirsi in
energia di massa.



UNITA' PRATICHE



elettrone
(energia U)

$U = 1 \text{ eV}$
 $= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
(velocita' all'arrivo
18 000 km/s)

$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
 $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
 $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

LEP = 209 GeV
LHC = 14 TeV

Viviamo in un mondo di atomi e/o molecole in moto con energia cinetica di $0.025 \text{ eV} = 3/2 \text{ kT}$

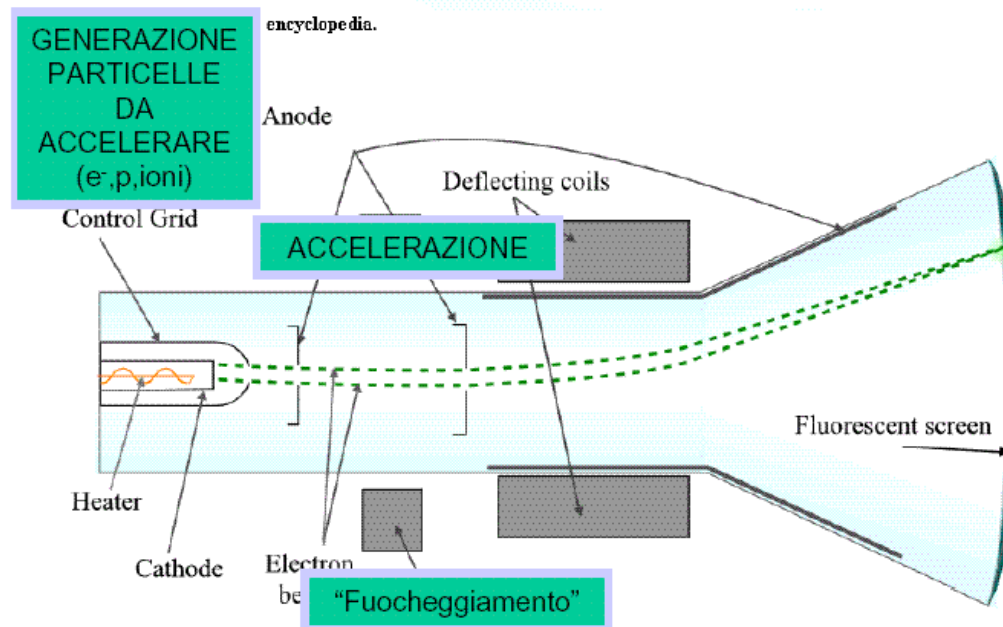
De Broglie: $\lambda = 1 \text{ fm}$ per $p = 200 \text{ MeV}/c$

Massa del protone (M_p) = 936 MeV ($\sim 1 \text{ GeV}$)

Acceleratori di particelle

- Sorgenti radioattive naturali → energie di pochi MeV
- Raggi cosmici → energie elevate, ma scarsa intensita'
- Acceleratori → energie via via piu' elevate, alte intensita'

■ Qual è l'acceleratore più comune? il tubo catodico

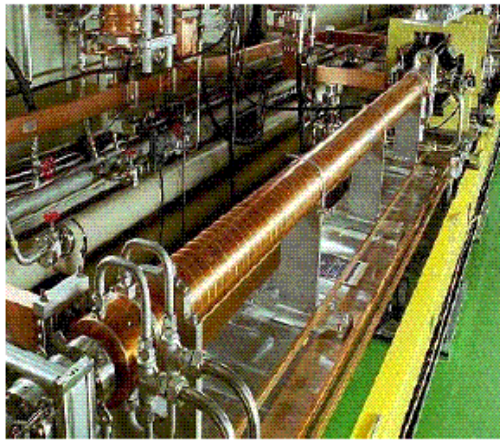


L'accelerazione di particelle cariche avviene mediante il campo elettrico

Acceleratori lineari e circolari

I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base al processo di accelerazione in:

Lineari



Circolari

Ciclotrone 1930
Betatrone 1940
Sincrotrone 1945
Microtrone 1946



Si accelerano particelle cariche che si muovono nel vuoto di moto rettilineo o circolare.

Vantaggio degli acceleratori circolari: le particelle attraversano molte volte ciascuna cavità acceleratrice.

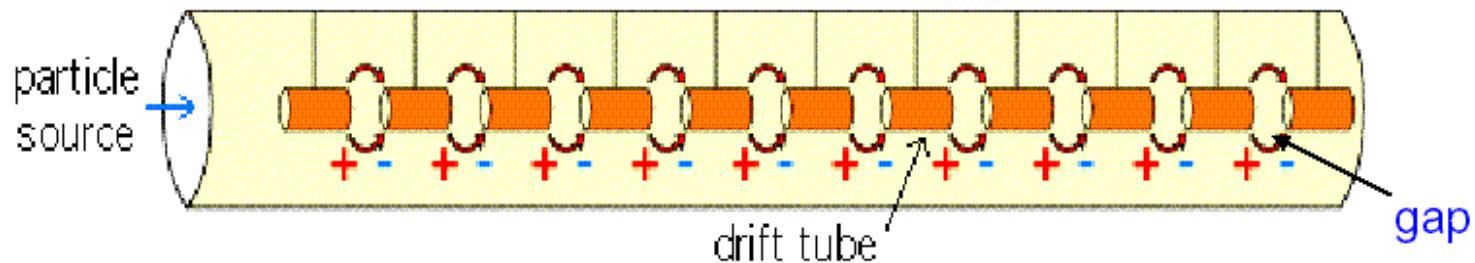
Acceleratori lineari

Cavità a radiofrequenza - I

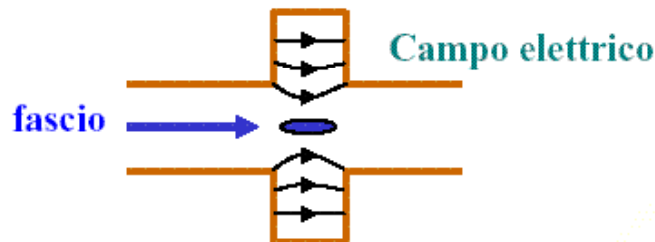
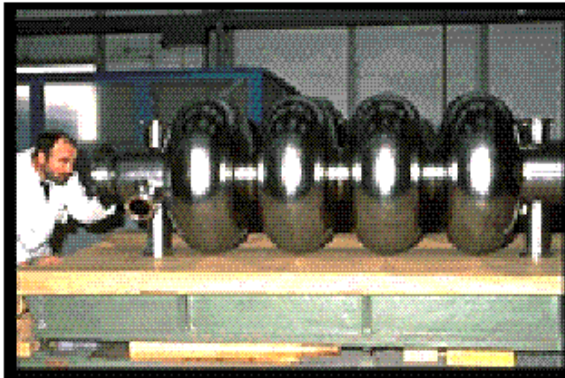
Wideroe (1928)

Anziché applicare un elevato campo elettrico statico si applica una tensione variabile nel tempo (sinusoidale) ad una sequenza di *tubi di drift*. In questo caso le particelle non sentono campo accelerante quando si muovono all'interno di ciascun tubo di drift (regione di spazio equipotenziale) e vengono accelerate in corrispondenza dei *gaps*.

La fase si inverte durante il tempo di volo nei tubi e la particella subisce progressive accelerazioni

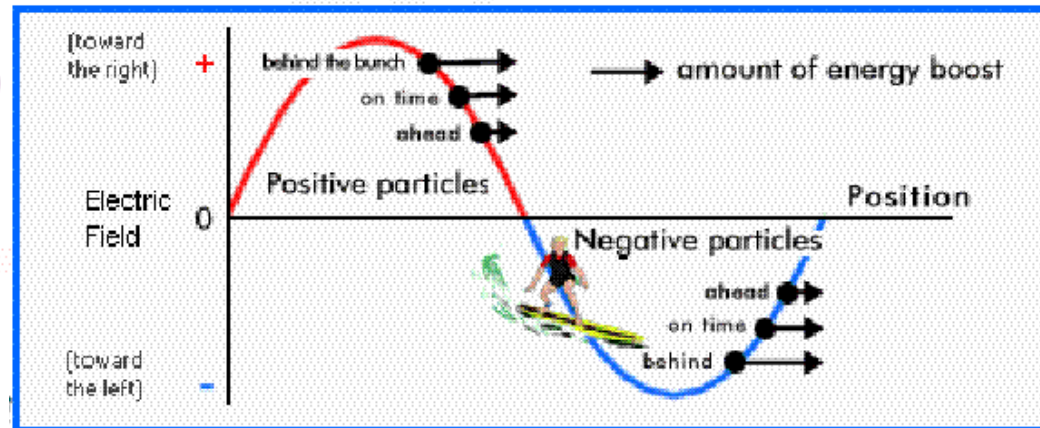


Cavità a radiofrequenza - II

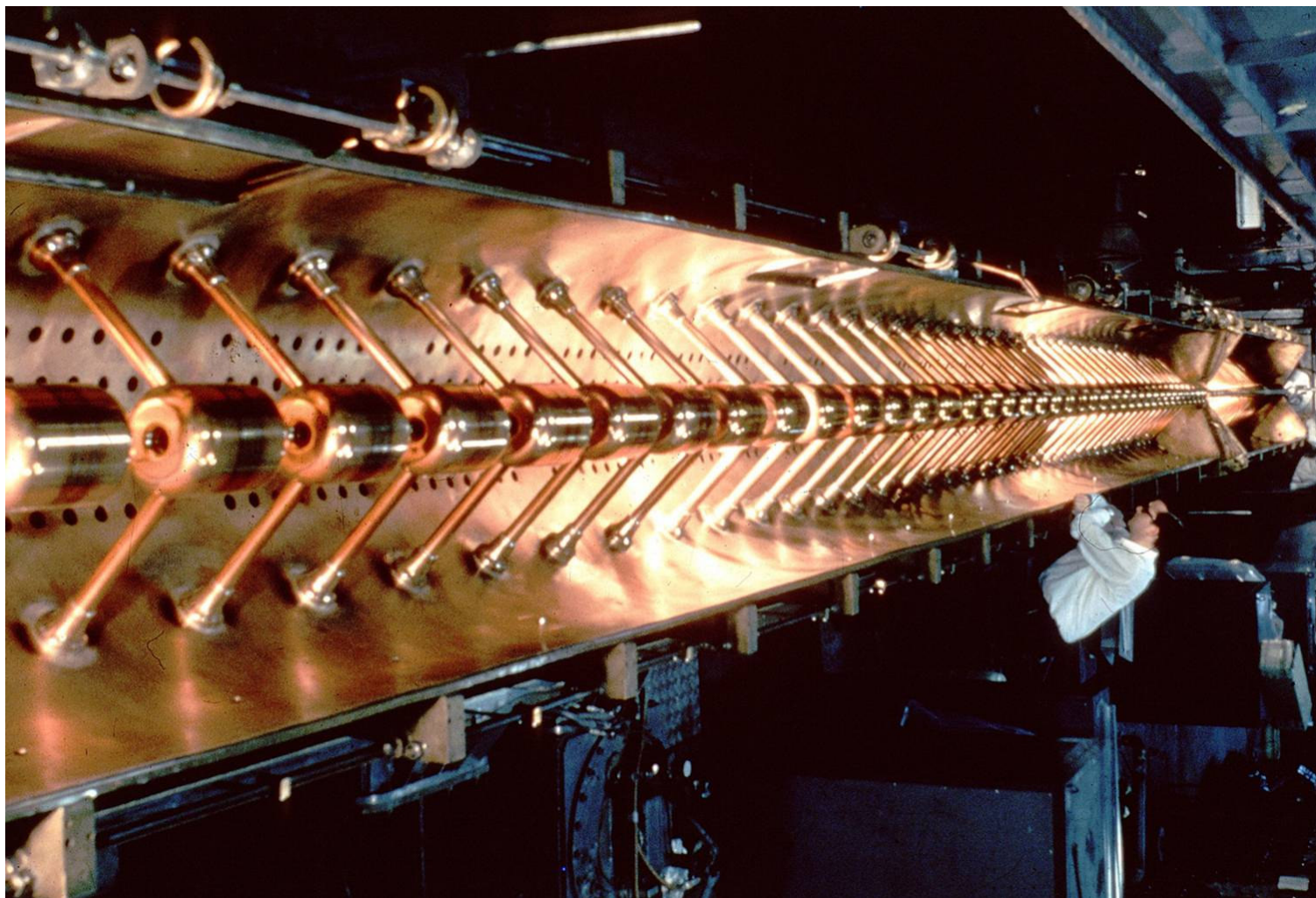


Il campo accelerante è una sinusoide. Le particelle che arrivano in anticipo rispetto alla “posizione ideale” (detta fase sincrona) verranno accelerate di meno mentre quelle in ritardo vedranno un campo più intenso. **Le particelle oscilleranno quindi attorno alla fase corretta** raggruppandosi longitudinalmente in **pacchetti (bunches)**

Si è poi passati al concetto di accelerazione con campi a radiofrequenza: La struttura accelerante consiste in una cavità risonante in cui viene accumulata l'energia di campi elettromagnetici RF.



Linac per protoni del Cern



L'acceleratore lineare piu' grande del mondo

SLAC 3 km 50GeV e



Acceleratori circolari

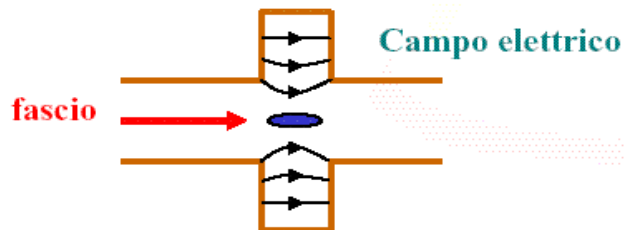
La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

\vec{p} = impulso
 m = massa
 \vec{v} = velocità
 q = carica

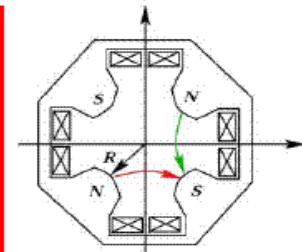
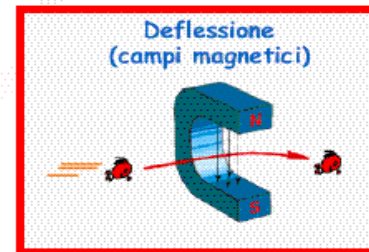
ACCELERAZIONE

\vec{E} = campo elettrico



CURVATURA E FOCHEGGIAMENTO

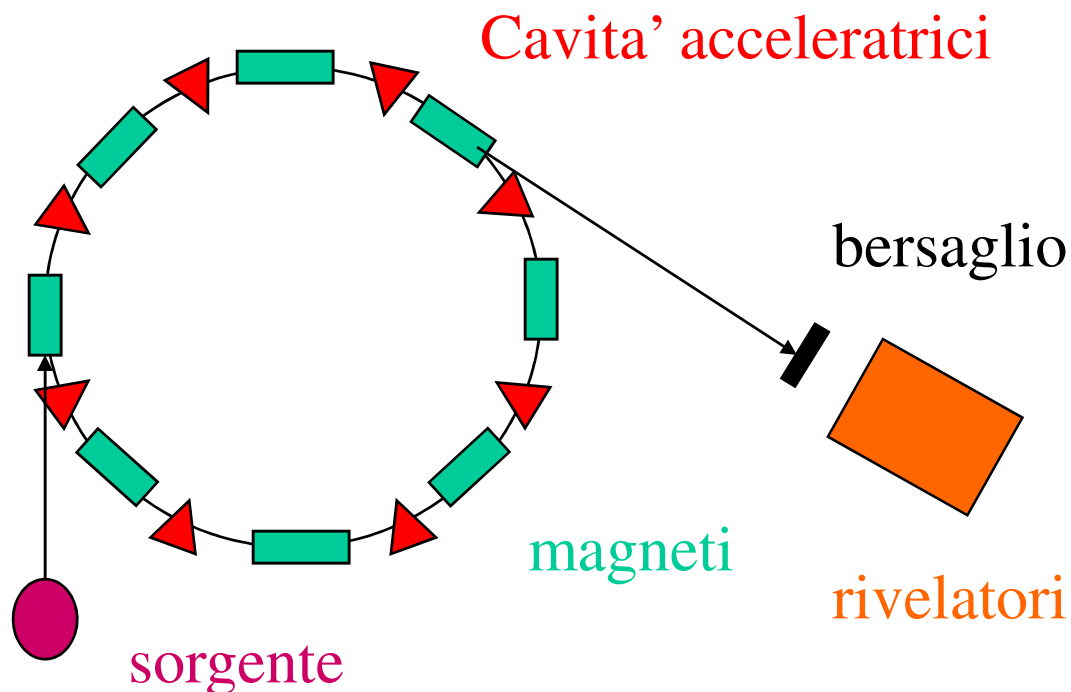
\vec{B} = campo magnetico



Schema di un sincrotrone

Le particelle si muovono su un'orbita circolare di raggio fissato
→ durante la accelerazione il campo magnetico cresce nel tempo al crescere della quantità di moto.

Sincrotrone a bersaglio fisso



USA:

Chicago (Tevatron)

Brookhaven (AGS, RHIC)

Europa:

Amburgo (Desy)

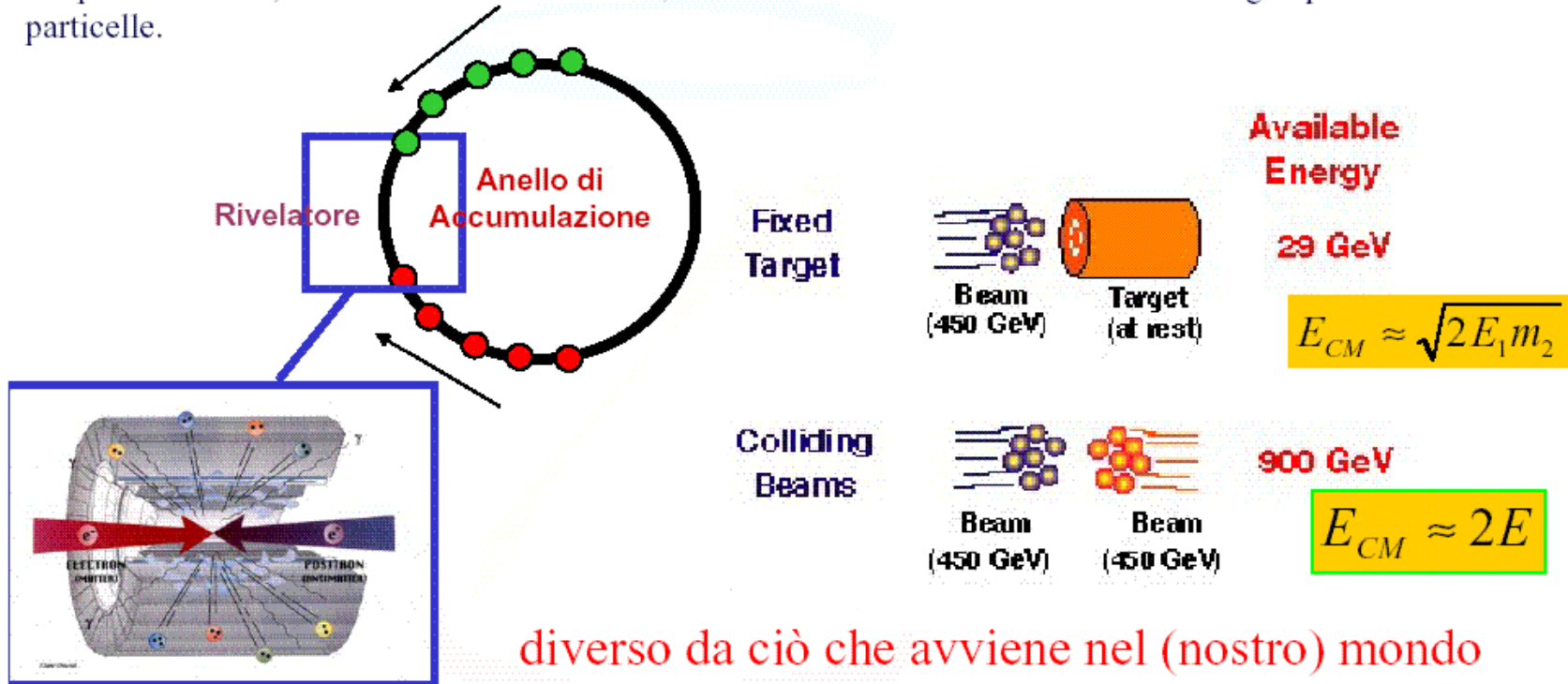
Legnaro (ALPI)

Frascati (DAΦNE)

CERN (PS, SPS, LEP, LHC)

I collisionatori

La geniale idea di **Bruno Touschek** fu quella di utilizzare come particelle collidenti particelle ed antiparticelle che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato tutta la loro energia per creare nuove particelle.

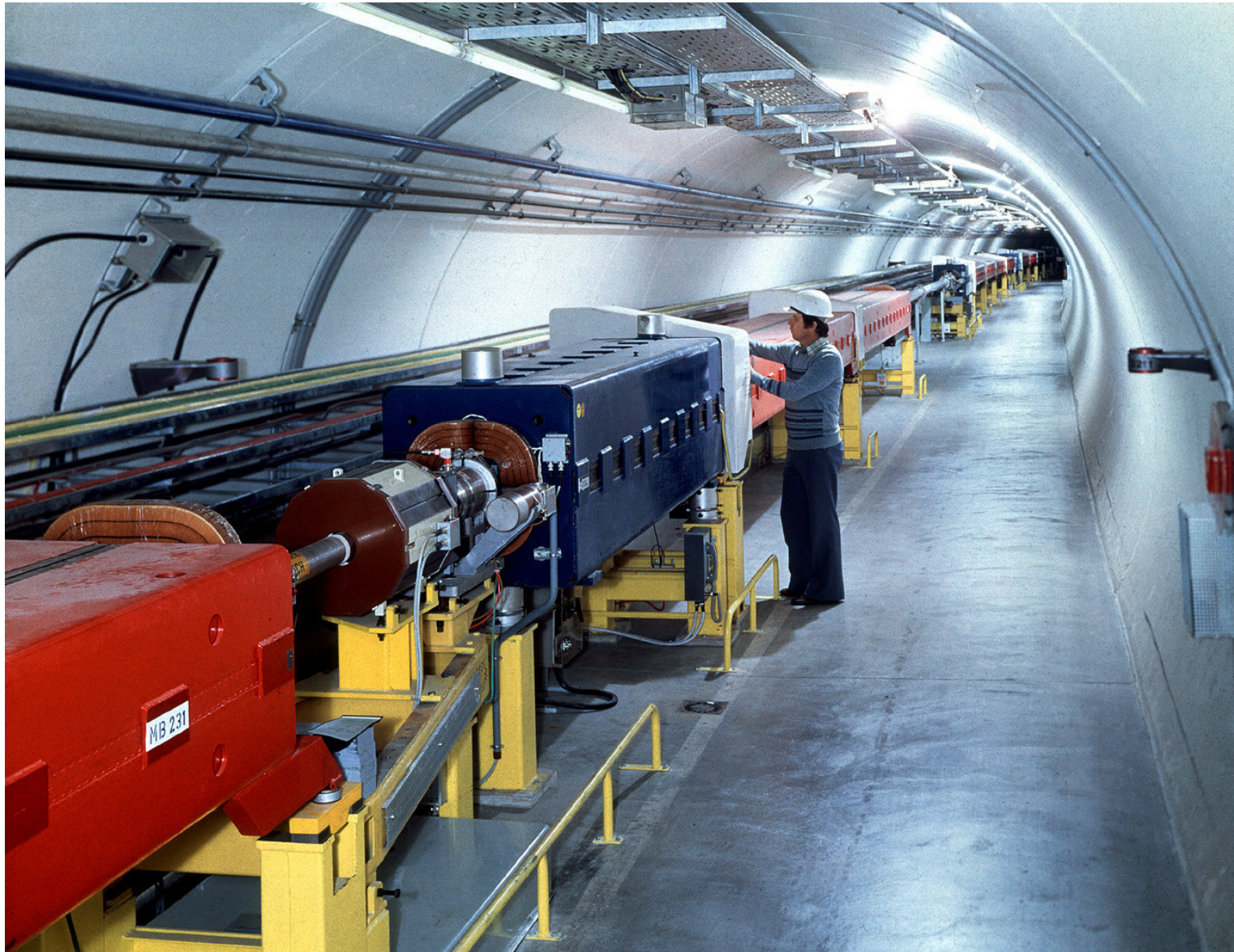


diverso da ciò che avviene nel (nostro) mondo non relativistico (es.: auto contro auto)

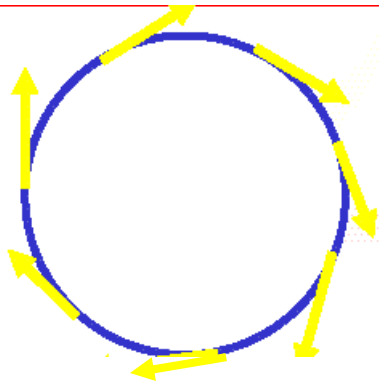
Esempi di collisionatori: SPS (p-p_{bar}), Tevatron (p-p_{bar}), LEP (e⁺e⁻)

Ed in futuro LHC (p-p)

Il Super Proto Sincrotrone del CERN



Limiti degli acceleratori circolari



Una particella carica che si muove su una traiettoria circolare è sottoposta alla accelerazione centripeta.

L'elettromagnetismo classico ci dice che se una carica elettrica è sottoposta ad accelerazione, emette (cioè perde) energia sotto forma di onde elettromagnetiche

→ ***Radiazione di sincrotrone***

Energia persa per giro

$$U = \frac{4\pi}{3} \frac{r_0}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

Massa

Raggio di curvatura della traiettoria

Energia

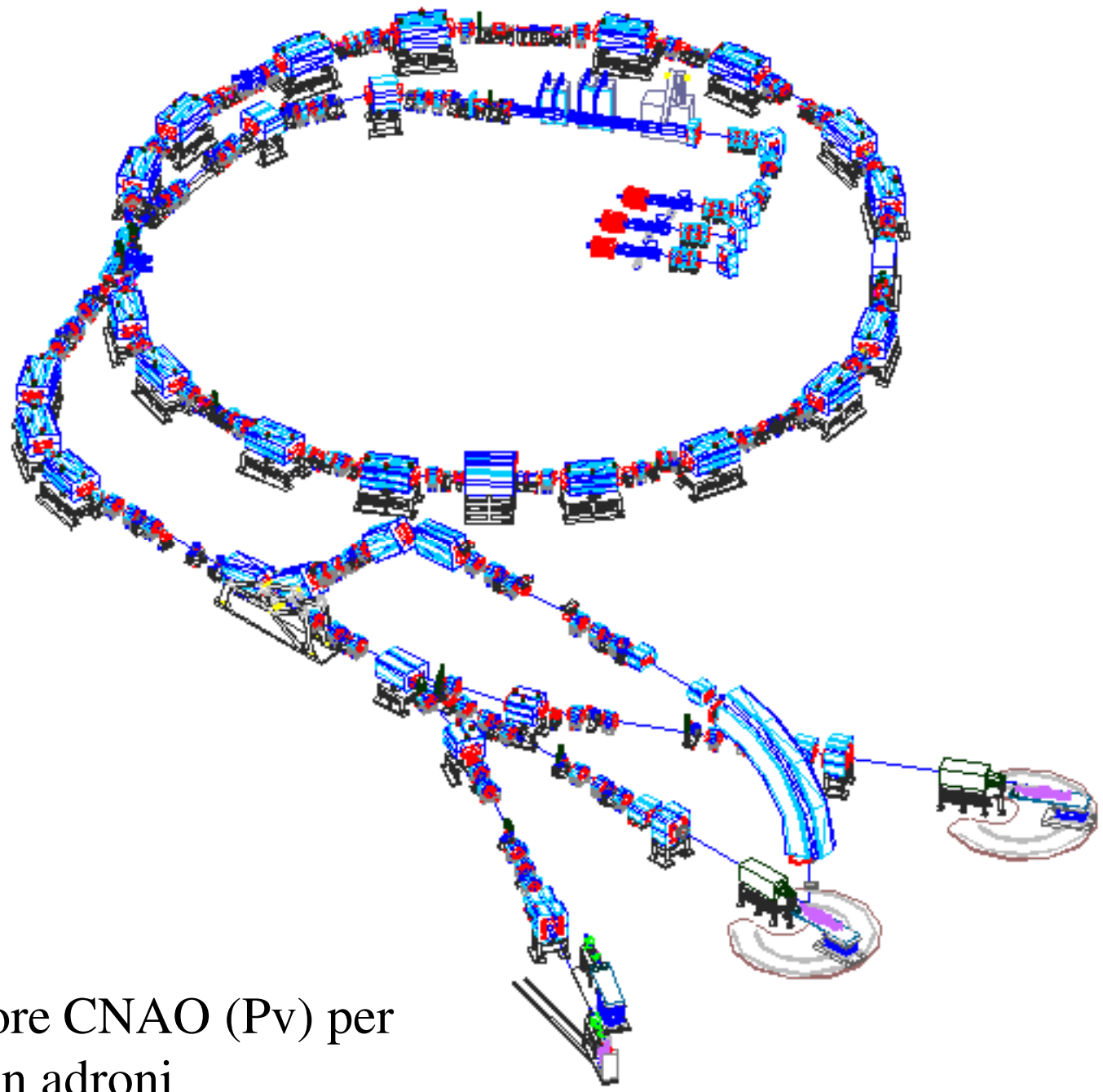
Dalla formula: perdita di energia maggiore per particelle leggere (elettroni) ad energie elevate e per raggi di curvatura piccoli → gli acceleratori devono essere grandi !!!!!!!₁₆

Particle accelerators what for ?

CATEGORY	NUMBER
Ion implanters and surface modifications	7'000
Accelerators in industry	1'500
Accelerators in non-nuclear research	1'000
Radiotherapy	5'000
Medical isotopes production	200
Hadrontherapy	20
Synchrotron radiation sources	70
<i>Research in nuclear and particle physics</i>	<i>110</i>
TOTAL	15'000

Acceleratore lineare per terapia





Acceleratore CNAO (Pv) per
Terapia con adroni

il CERN di Ginevra

Centro Europeo Ricerca Nucleare

Where the WEB was born...



Nota: il **LEP** era un acceleratore di elettroni e le sue dimensioni sono maggiori di quelle dell'**SPS**, che però accelera protoni ad energie maggiori (**400GeV**) di quelle degli elettroni del **LEP(70 GeV)**

Nel 2008 nel tunnel del **LEP(27Km)** è stato inaugurato l'**LHC** che accelererà protoni fino a **7 Tev**

Campo magnetico in **LEP**

B= 0.3 T magnete caldo

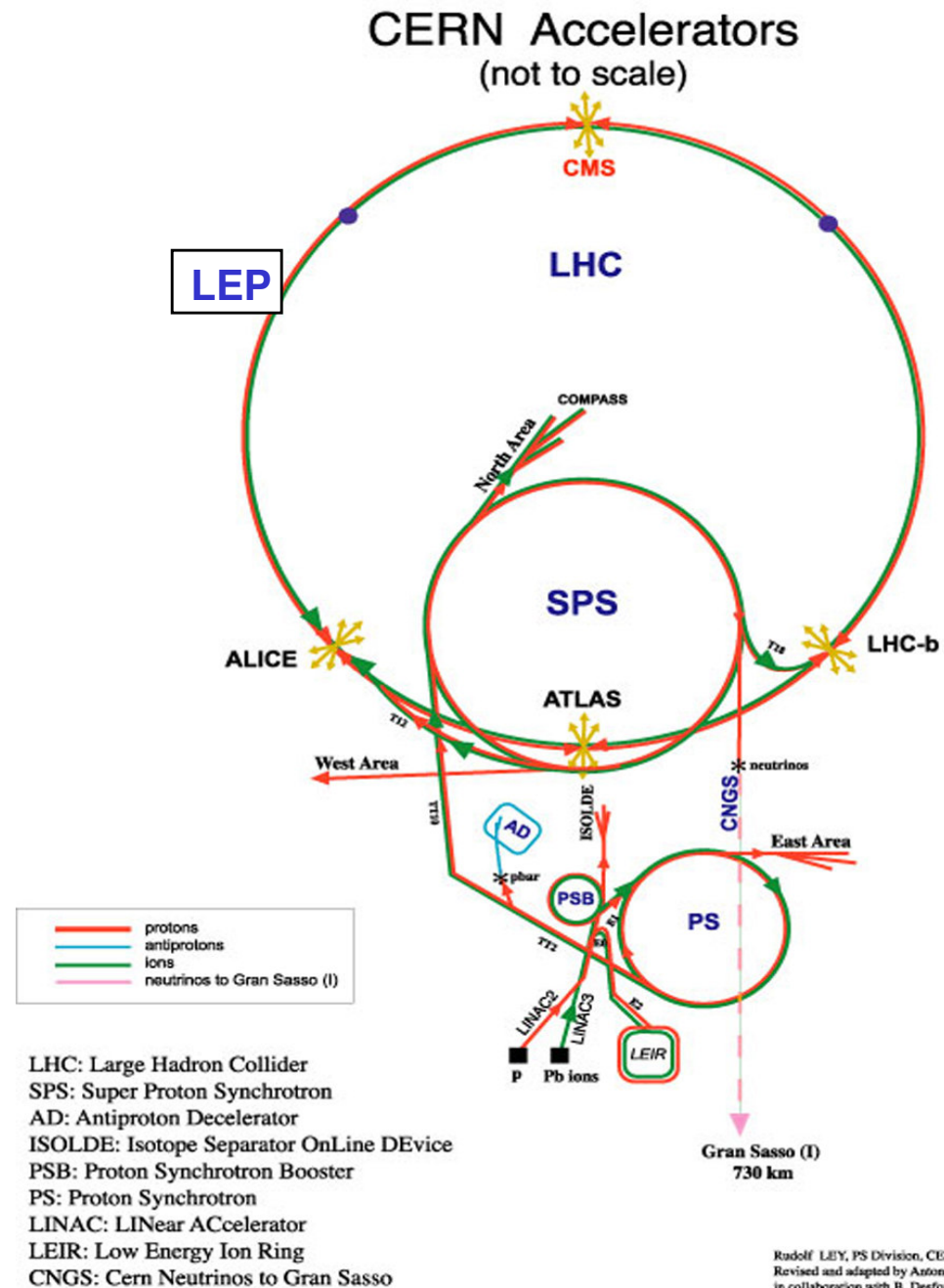
Campo magnetico in **LHC**

B= 8 T

magnete superconduttore

Temperatura **1.9 K**

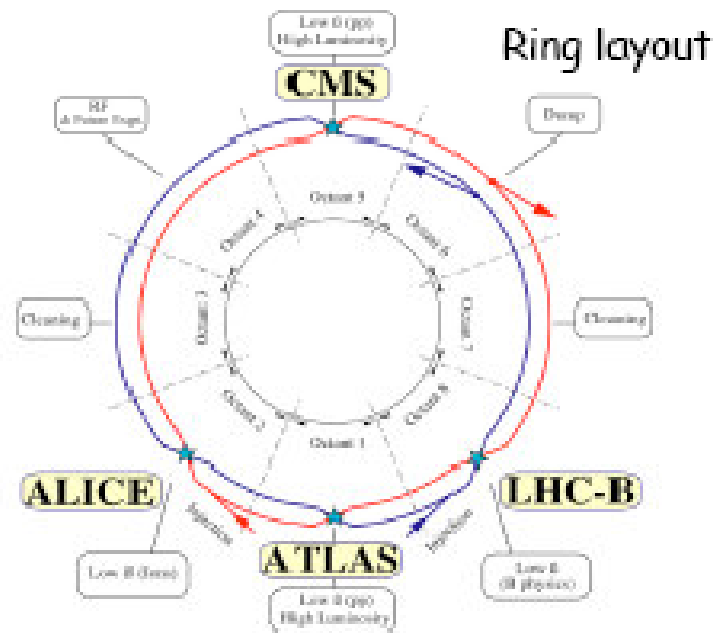
Corrente **11700A**



LHC main features

Main parameters

Energy per beam	(TeV)	7.0
Dipole field	(T)	8.3
Luminosity	($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10^{34}
Injection energy	(GeV)	450
Circulating current per beam	(A)	0.56
Bunch spacing	(ns)	24.95
Particles per bunch		1.1×10^{11}
Stored beam energy	(MJ)	334
Radiated power per beam	(kW)	4.0



Special features

- ◆ SC dipoles and quadrupoles with two-in-one design
- ◆ SC cables operating with 15% margin from critical field
- ◆ Superfluid He coolant with tight cryogenic load budget
- ◆ e-cloud
- ◆ high vacuum without diffused pumping (cryo-pumping)

Performance improvements

- ◆ β -field $\times 15$
- ◆ luminosity $\times 25$
- ◆ collimation efficiency 70 \rightarrow 99.9 %
- ◆ beam stored energy $\times 100$
- ◆ beam energy density $\times 1000$

Corrente nei dipoli 11700 A
Pressione 10^{-13} atm



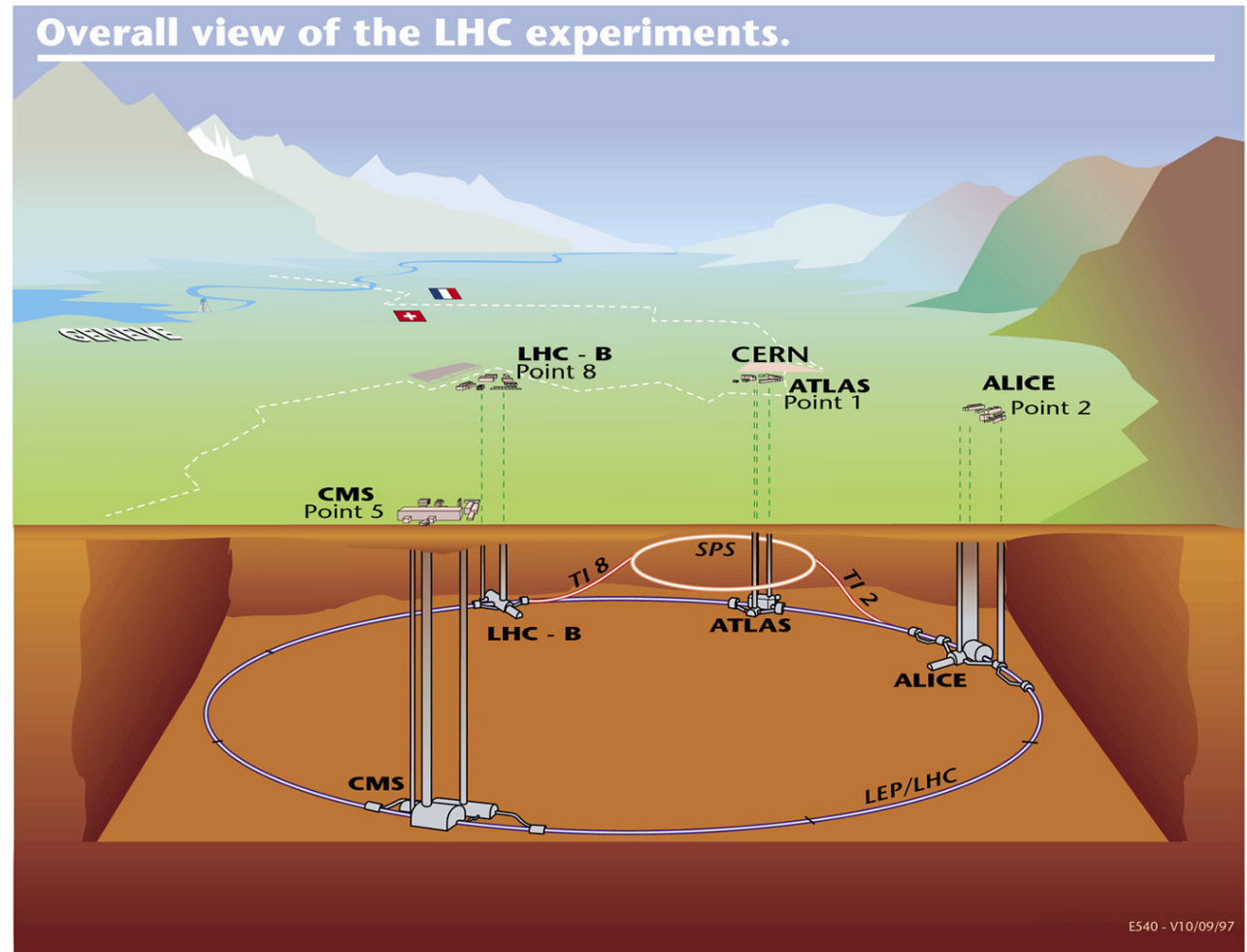
Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN

Stesso tunnel del
LEP !

Magneti
superconduttori !!!!

p-p a $E_{cm}=14$ TeV

Pb-Pb a $E_{cm}=5.5$
TeV



Fact 1) When the 27 km long circular tunnel was excavated, between Lake Geneva and the Jura mountain range, the two ends met up to within 1 cm.

Fact 2) Each of the 6300 superconducting filaments of niobium–titanium in the cable produced for the LHC is about 0.006 mm thick, about 10 times thinner than a normal human hair.

Fact 3) If you added all the filaments together they would stretch to the Sun and back five times with enough left over for a few trips to the Moon.

Fact 4) The central part of the LHC will be the world's largest fridge. At a temperature colder than deep outer space, it will contain iron, steel and the all important superconducting coils.

Fact 5) The pressure in the beam pipes of the LHC will be about ten times lower than on the Moon. This is an ultrahigh vacuum.

Fact 6) Protons at full energy in the LHC will be travelling at 0.999999991 times the speed of light. Each proton will go round the 27 km ring more than 11 000 times a second.

Fact 7) At full energy, each of the two proton beams in the LHC will have a total energy equivalent to a 400 t train (like the French TGV) travelling at 200 km/h. This is enough energy to melt 500 kg of copper.

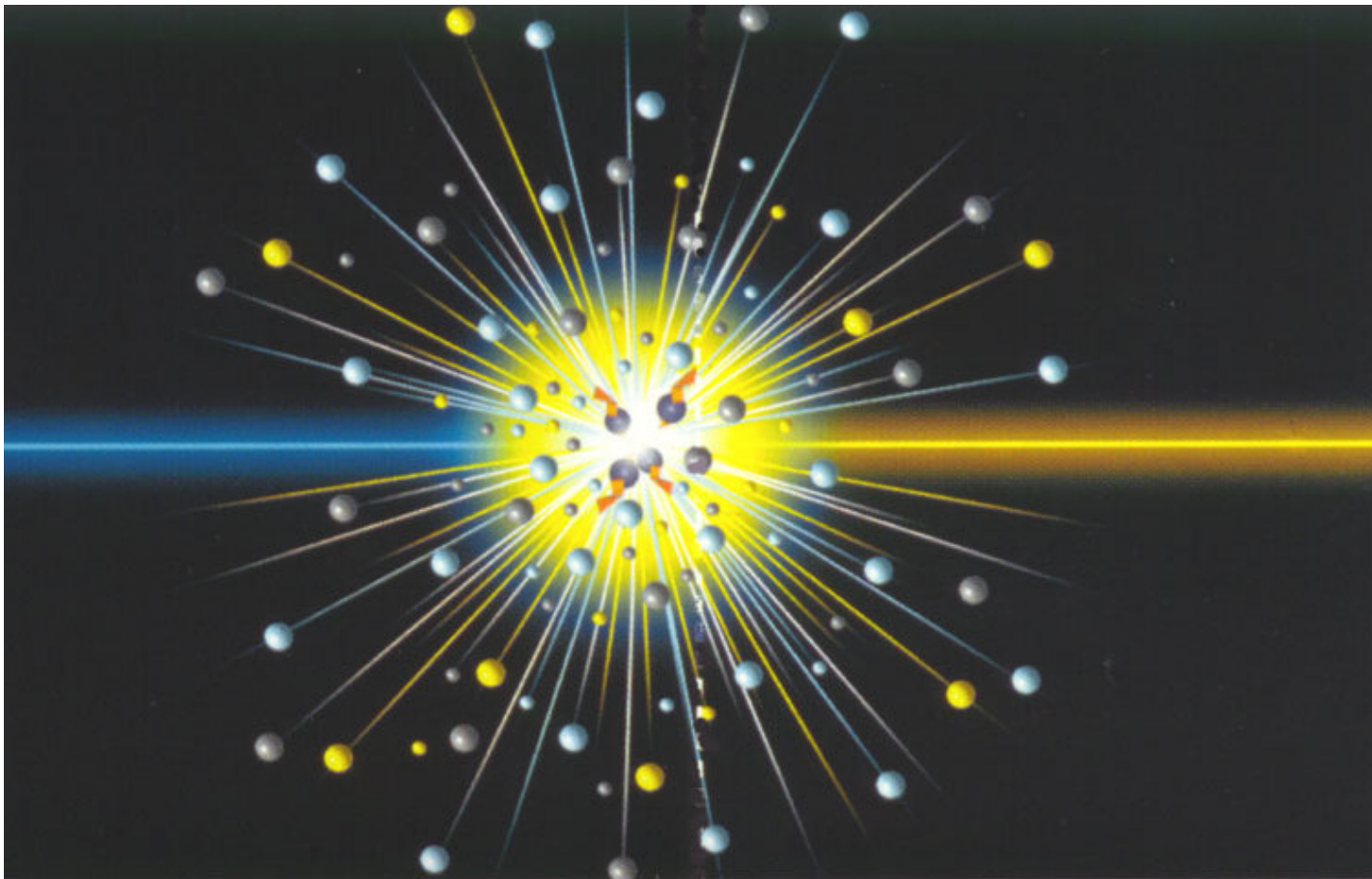
Fact 8) The Sun never sets on the ATLAS collaboration. Scientists working on the experiment come from every continent in the world, except Antarctica.

Fact 9) The CMS magnet system contains about ^{7,500t} 10 000 t of iron, which is more iron than in the Eiffel Tower.

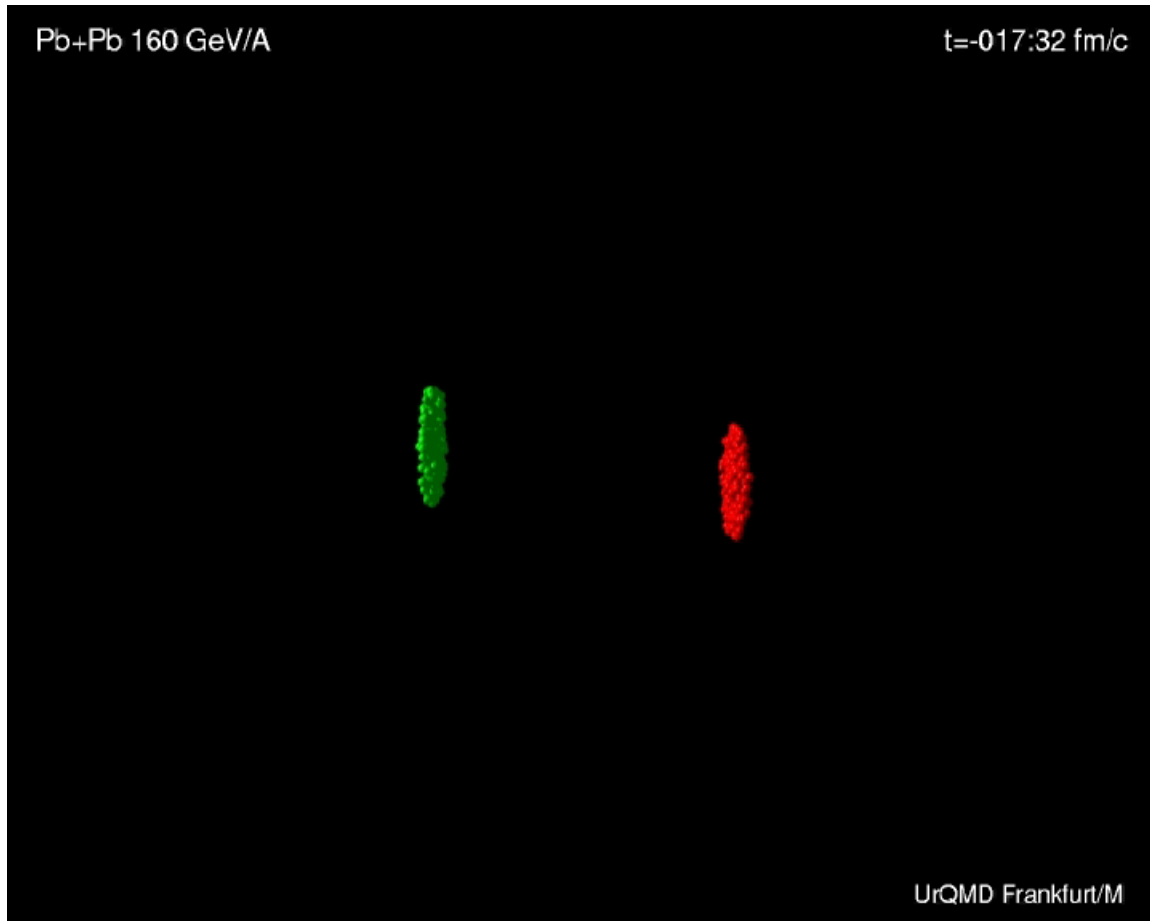
Fact 10) The data recorded by each of the big experiments at the LHC will be enough to fill around 100 000 DVDs every year.

Negli urti si creano nuove particelle
di cui si vuole conoscere carica, massa ed energia

Urto tra particelle



Urto di Ioni Ultrarelativistici



I rivelatori di particelle

Strumenti in grado di dare un segnale del passaggio di una particella al loro interno

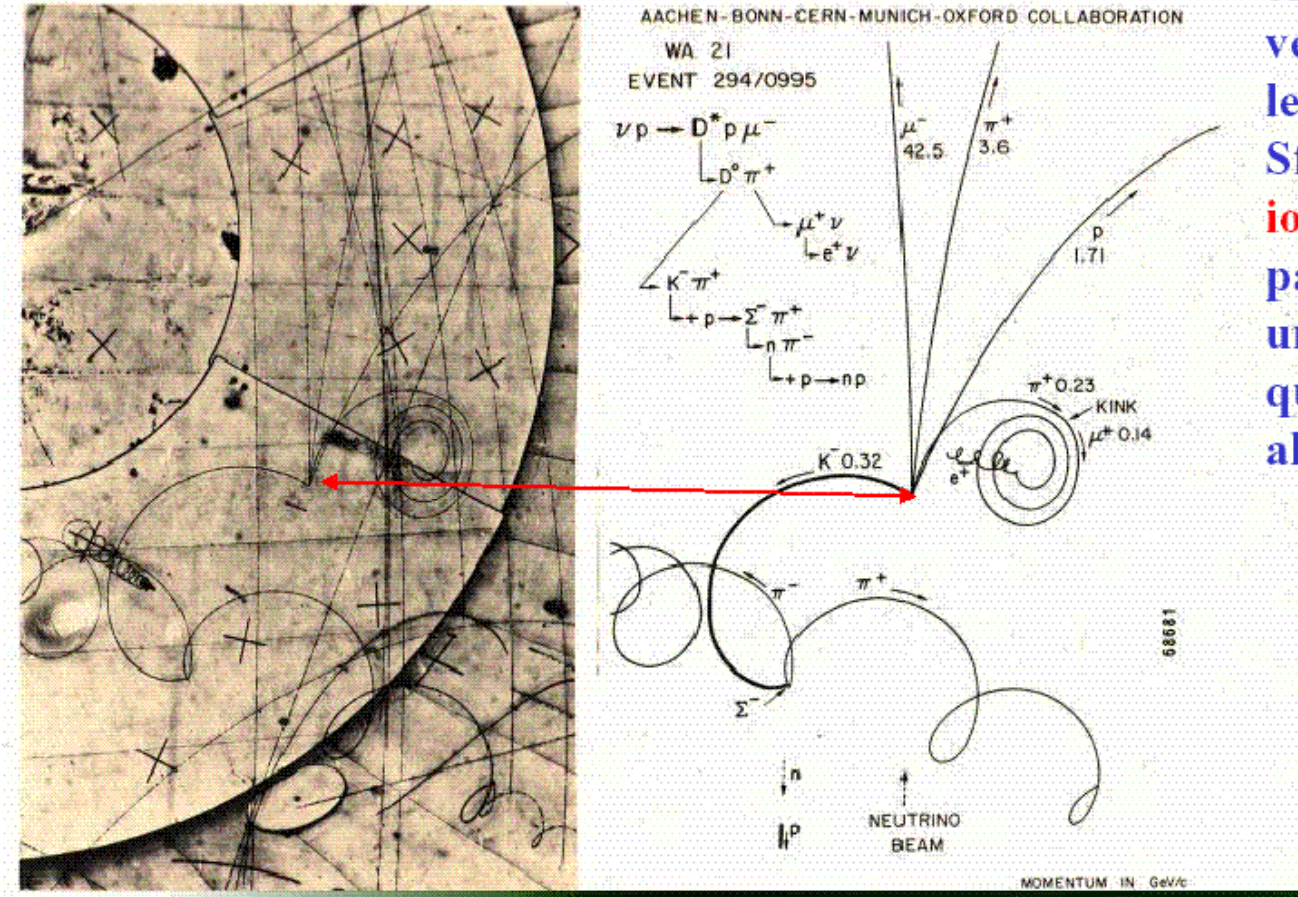
Possono:

- 1 Misurare l'energia ceduta dalla particella**
- 2 Localizzare dove la particella e' passata**
- 3 Misurare il tempo in cui la particella e' passata**
- 4 Misurare la velocita' della particella**
- 5**

Tutto va fatto con la minima incertezza possibile nel minor tempo possibile

Camera a Bolle

strumento “glorioso”
che permetteva di
vedere e fotografare
le particelle.
Sfruttando la
ionizzazione delle
particelle cariche in
un liquido (H in
questo caso) prossimo
all'ebollizione

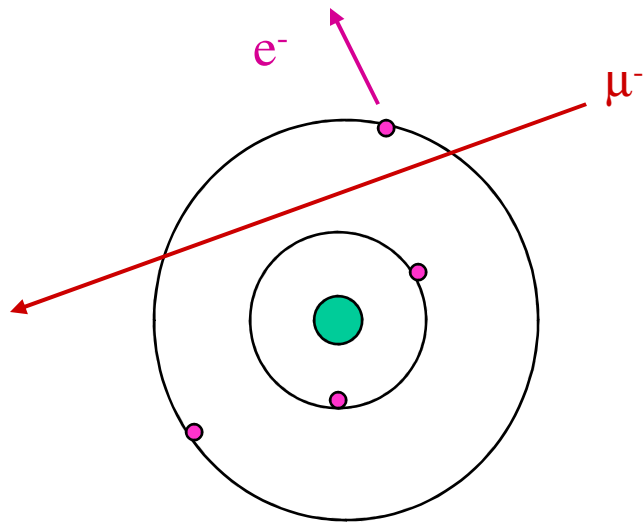


Campo magnetico: p misurato dalla curvatura r della traiettoria ($r=p/qB$)

Noto p , la massa m della particella viene ricavata dalla “densita’ delle bolle”, che dipende dalla **ionizzazione** e dunque dalla velocita’

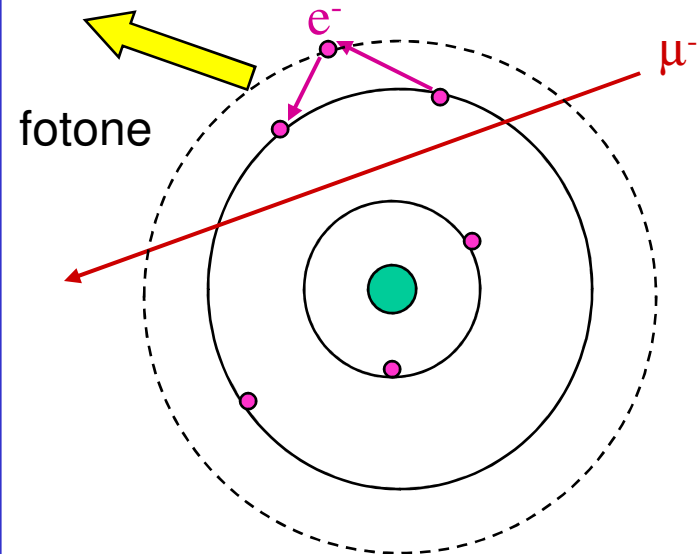
Interazione particelle cariche - materia

Perdita di energia per ionizzazione



Viene liberato un elettrone... in
nuce un segnale elettrico!!!!
Energia spesa per creare una
Coppia ione elettrone $\cong 20\text{eV}$

Eccitazione e diseccitazione con emissione di luce di scintillazione

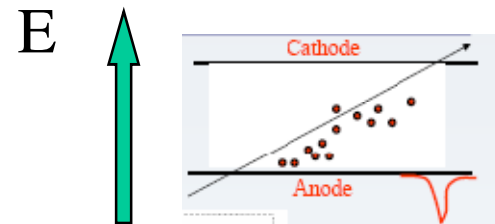


Viene emessa luce ... da
convertirsi in un segnale elettrico
Energia spesa per generare
un fotone $\approx \text{eV}$

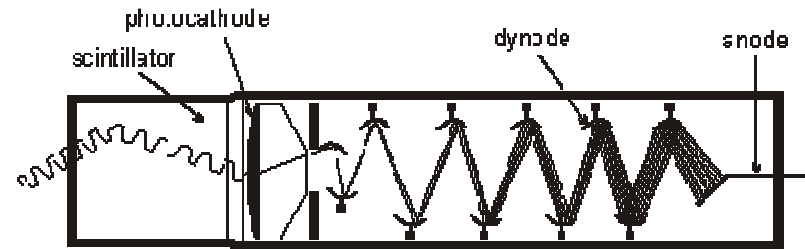
I rivelatori ‘vedono’ particelle cariche che lasciano tracce contenenti coppie di **ioni-elettroni** e **fotoni** nella materia



Rivelatori di cariche

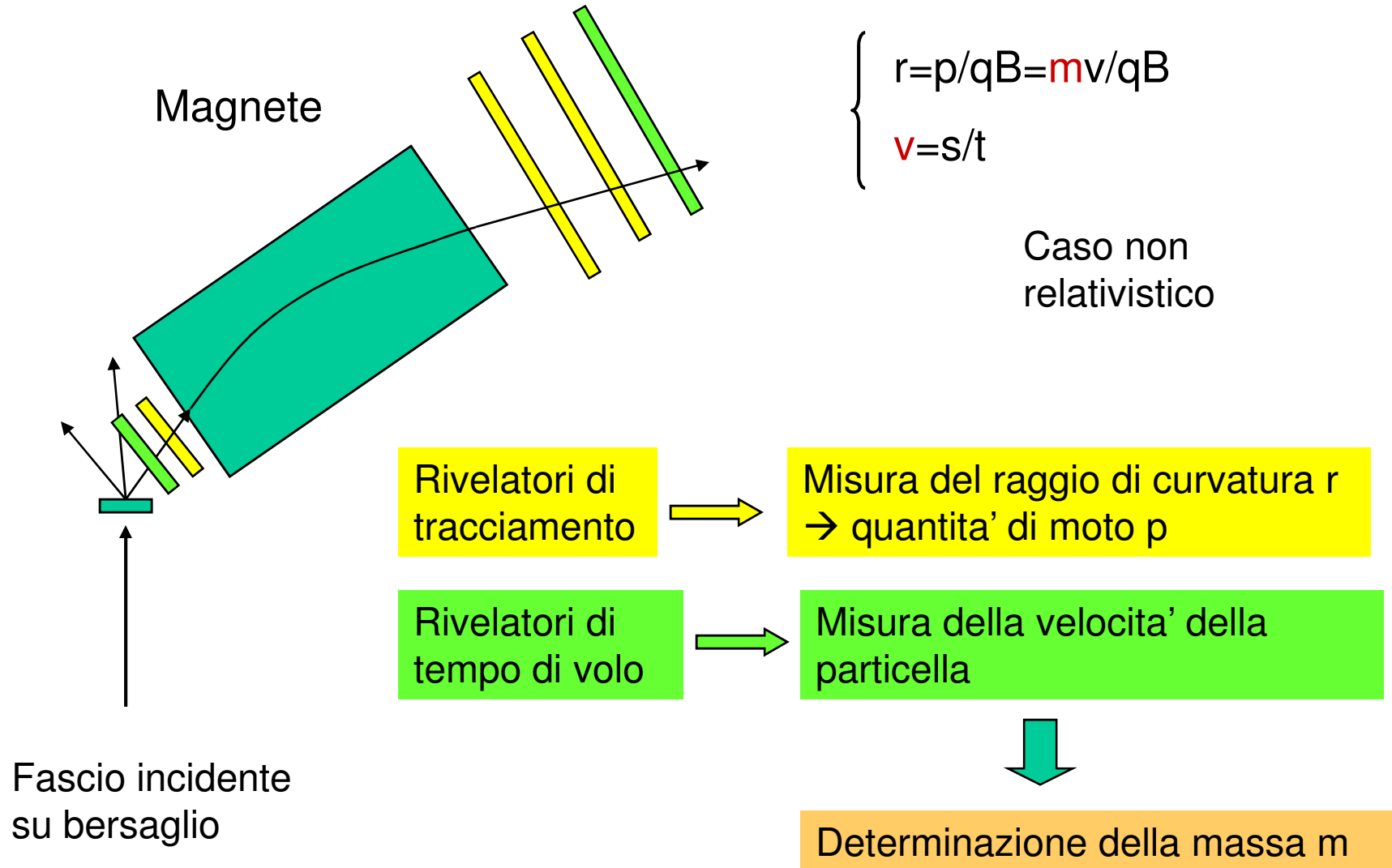


Rivelatori di fotoni



Esempio: spettrometro magnetico

Solo per particelle cariche



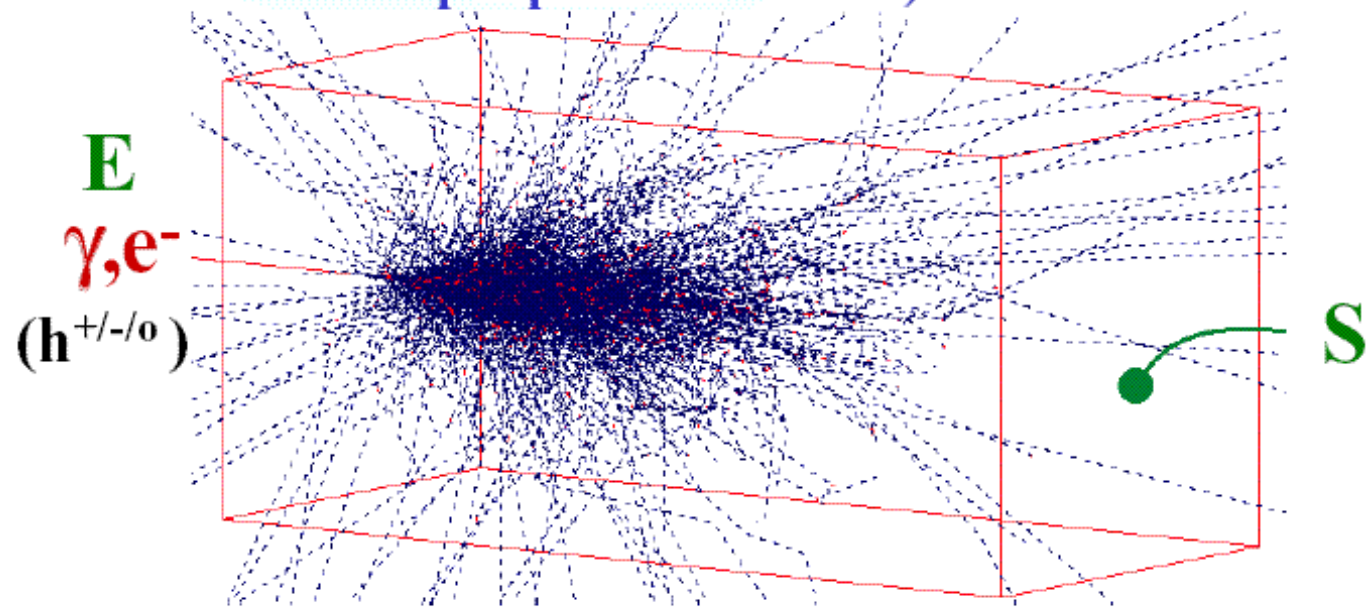
Le particelle neutre ;

Neutroni Raggi gamma (Fotoni) Neutrini

- vengono rivelate solo dopo che in una interazione hanno prodotto una o piu' particelle cariche.
- La quantita' di materia che attraversano prima di produrre particelle cariche e' molto diversa da particella a particella
Per fotoni e neutroni cio' accade con alta probabilita' in cammini dell'ordine del metro, per i neutrini la probabilita' resta molto bassa anche in cammini di Km

I calorimetri – Per carichi e neutri

A differenza dei Tracciatori che devono essere “trasparenti” per misurare le particelle senza modificarne 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)



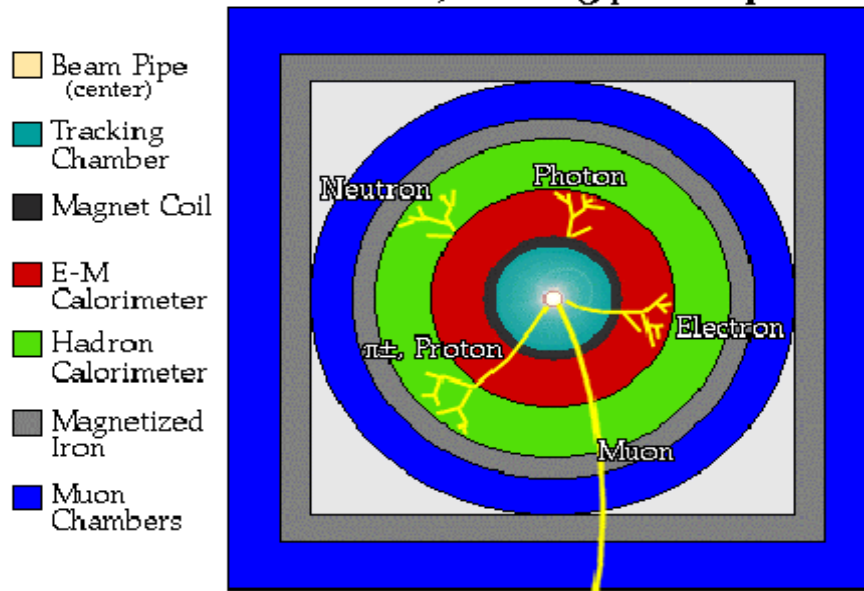
L’energia E della particella incidente viene convertita in segnale S del rivelatore

Il segnale misurabile $S \propto E$

Alle alte energie si vuole:

- 1 seguire le traiettorie delle particelle cariche in campo magnetico
senza modificarle valutando la loro quantita' di moto
Rivelatori localizzanti sottili
- 2 Fermare le particelle valutando la loro energia cinetica
Rivelatori spessi Calorimetri
- 3 Identificare le particelle

A detector cross-section, showing particle paths



Rivelatori al Si di particelle cariche

Diodi in cui il segnale e' generato dalla raccolta di cariche liberate per ionizzazione dalla particella

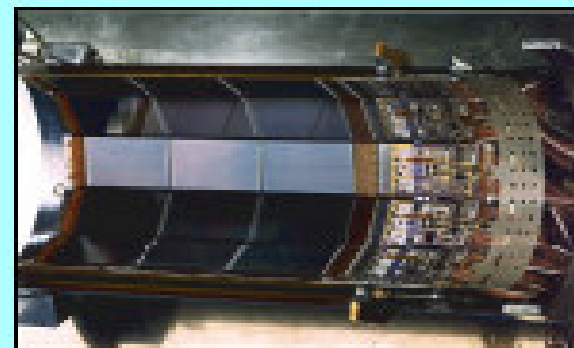
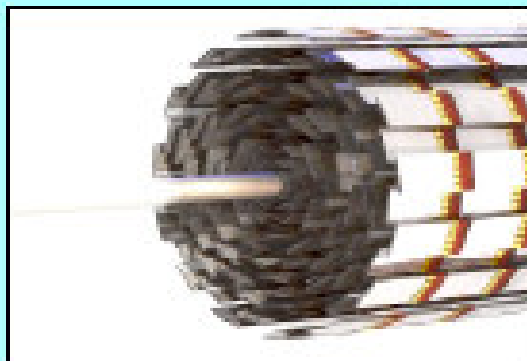
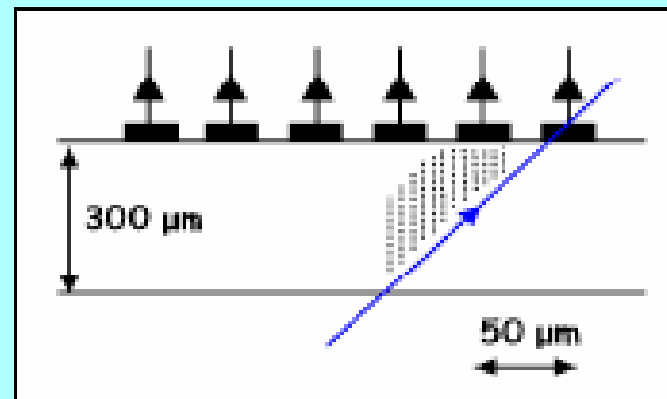
Si possono costruire in strisce di $100\mu\text{m}$



Silicon Strip Detectors

Silicon Strip Detectors

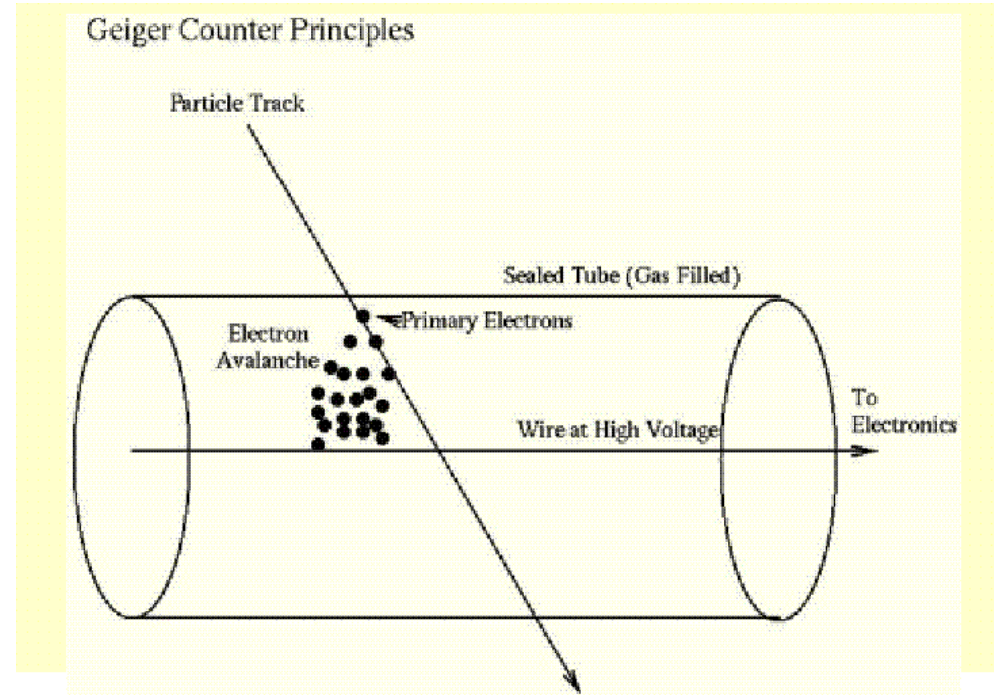
Main high precision detectors used today. Thin wafers of silicon are divided into many long thin diodes. Charged particles create electron-hole pairs which can be detected with sensitive amplifiers. The spatial resolution can be as good as $5\mu\text{m}$.



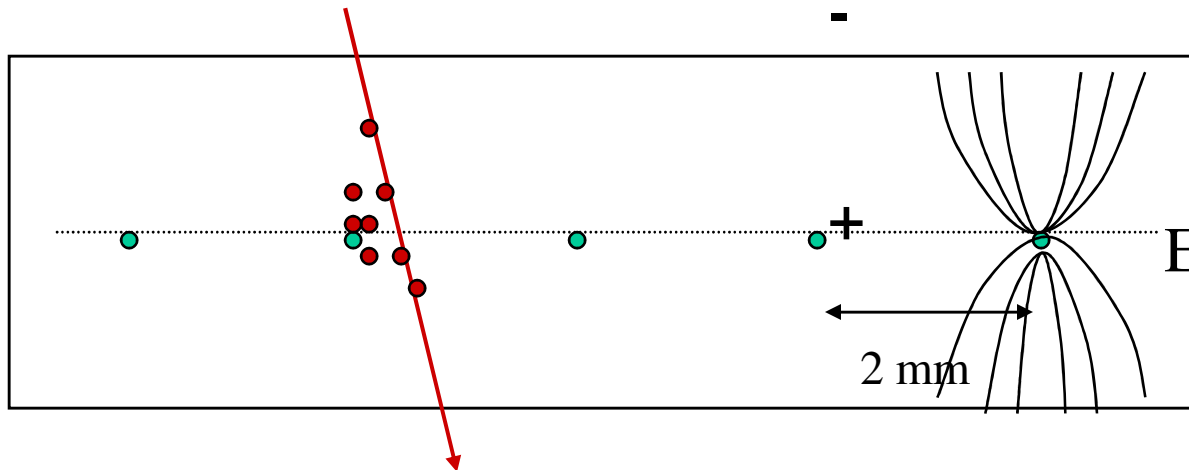
Rivelatori a gas - I

Geometria cilindrica: il contatore Geiger

- Il volume del rivelatore e' riempito di una opportuna miscela gassosa basata su una larga percentuale di gas nobile (Argon) .
- Il campo elettrico non e' costante, ma cresce vicino al filo ($E \propto 1/r$), per raggiungere un valore tale da conferire agli elettroni primari una energia cinetica (in un libero cammino medio) tale da permettere loro di ionizzare e di innescare il processo di moltiplicazione
- **Il rivelatore e' al tempo stesso un amplificatore di segnale!!**

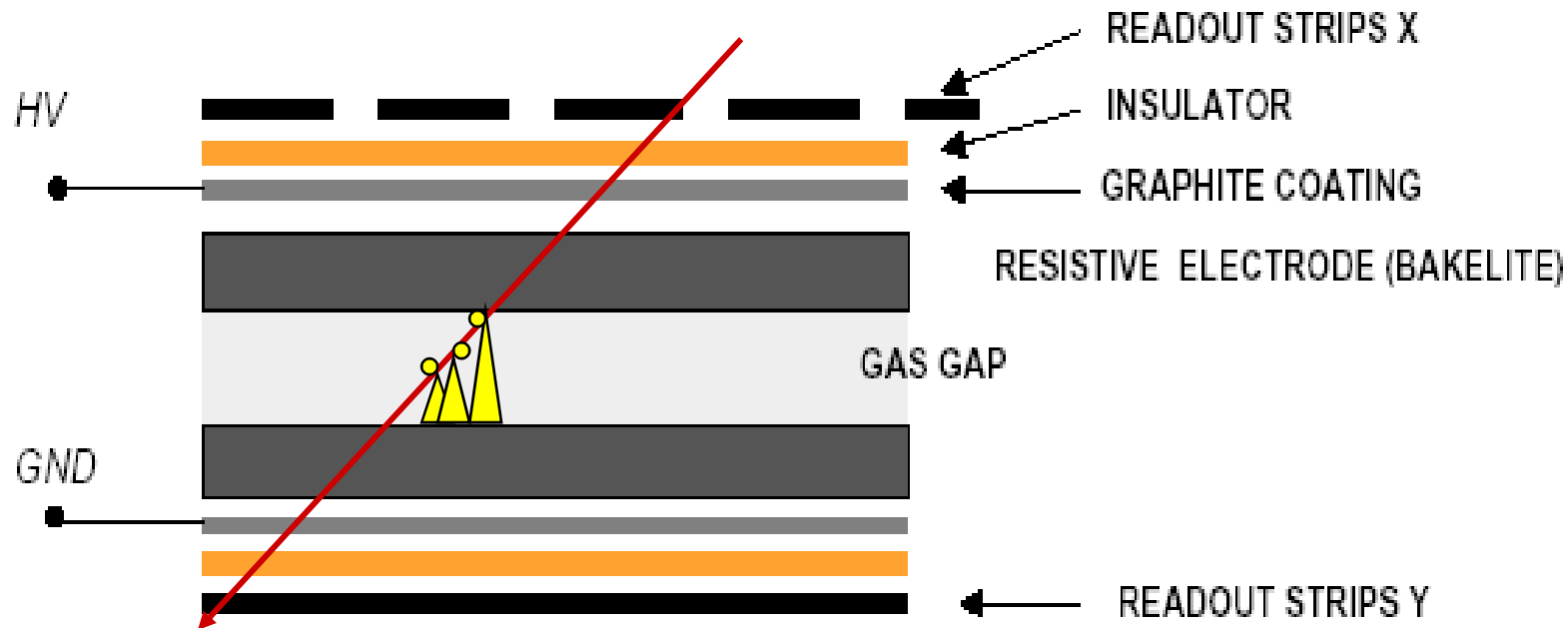


Camera multifilo (G. Charpak, premio Nobel)



- Principio molto simile a quello del contatore Geiger
- Gli elettroni della valanga si raccolgono sul filo di anodo piu' vicino al punto di passaggio della particella
- Rivelatore "position sensitive" → puo' misurare la posizione della particella con una **risoluzione spaziale dell'ordine del millimetro**.

Resistive Plate Chambers (RPC)



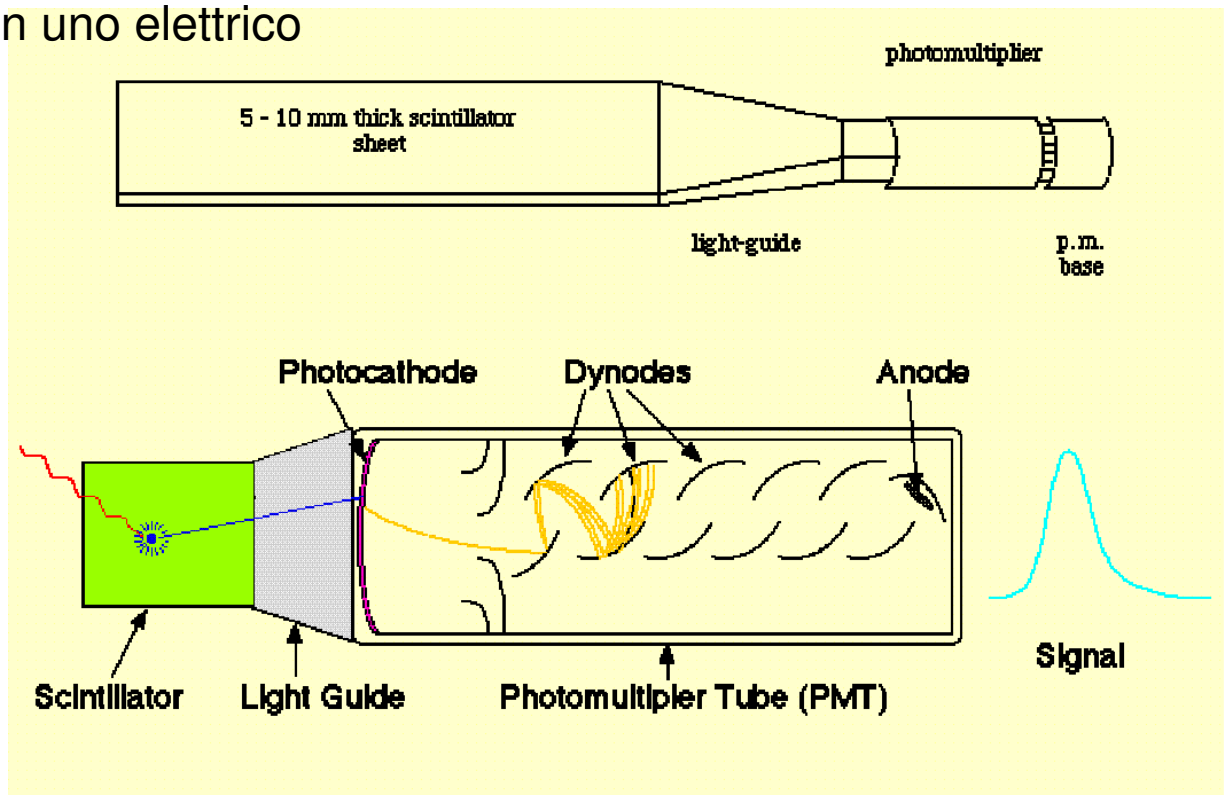
M
a
d
e
i
n
t
a
y

- Geometria piana: campo elettrico costante e sovracritico → sempre in regime di moltiplicazione
- Elettrodi resistivi:
 - per “smorzare” le scariche
 - Trasparenti al segnale → lettura tramite elettrodi esterni
- Rivelatore a basso costo, risoluzione spaziale 1 cm, temporale 1 ns. (circa)

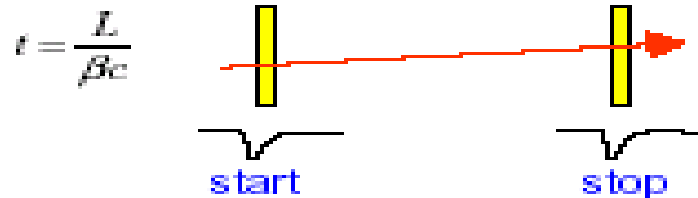
Scintillatori

- Luce emessa nella diseccitazione degli elettroni atomici
- Materiali scintillatori → “trasparenti” alla luce da essi stessi emessa in seguito al passaggio di particelle: alcuni cristalli (NaI), materiali plastici “dopati” (fluoro e wavelenght shifters)
- Luce incanalata mediante opportune guide fino al “fotomoltiplicatore” che converte il segnale luminoso in uno elettrico

Utilizzazione tipica:
misura del “tempo di volo” (risoluzione temporale meglio di 1 ns) e “trigger”



Particle ID using Time Of Flight (TOF)

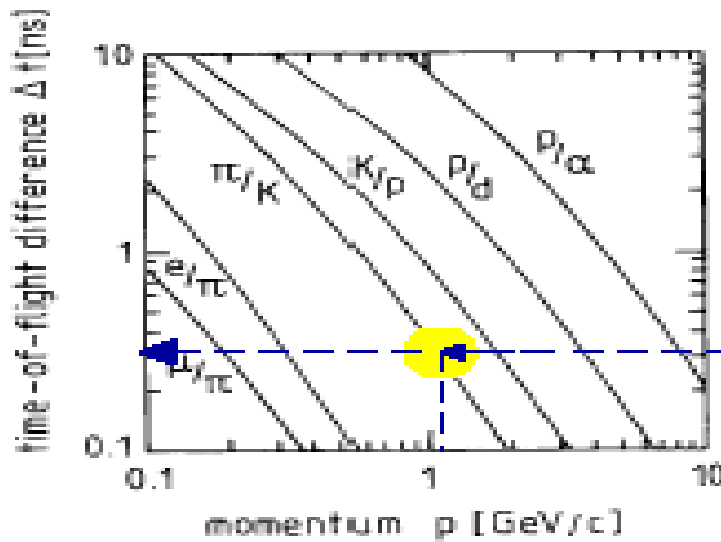


Combine TOF with momentum measurement ($p = m_0 \beta \gamma$)

$$m = p \cdot \sqrt{\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1} \quad \text{Mass resolution} \quad \frac{dm}{m} = \frac{dp}{p} + \gamma^2 \left(\frac{dt}{t} + \frac{dL}{L} \right)$$

TOF difference of 2 particles at a given momentum

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right) = \frac{L}{c} \left(\sqrt{1 + m_1^2 c^2 / p^2} - \sqrt{1 + m_2^2 c^2 / p^2} \right) \approx \frac{Lc}{2p^2} (m_1^2 - m_2^2)$$



Δt for $L = 1$ m path length

$\sigma_t = 300$ ps
 π/K separation up to
 1 GeV/c

Rivelatori a luce Cerenkov - I

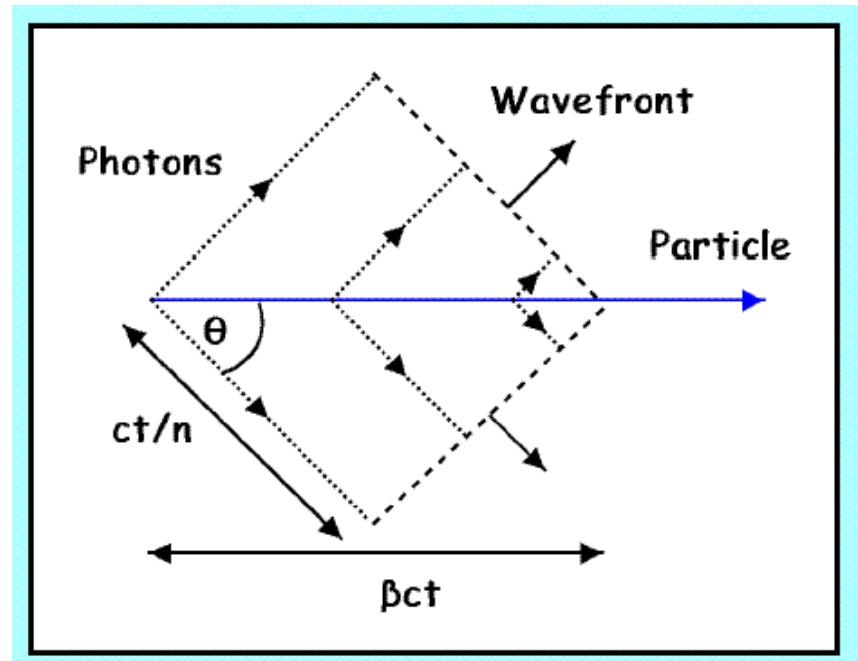
Una particella che si muove in un mezzo (trasparente) **con velocità superiore a quella della luce nel mezzo stesso** emette luce Cerenkov. Questa luce è direzionale e l'angolo di emissione dipende dalla velocità della particella



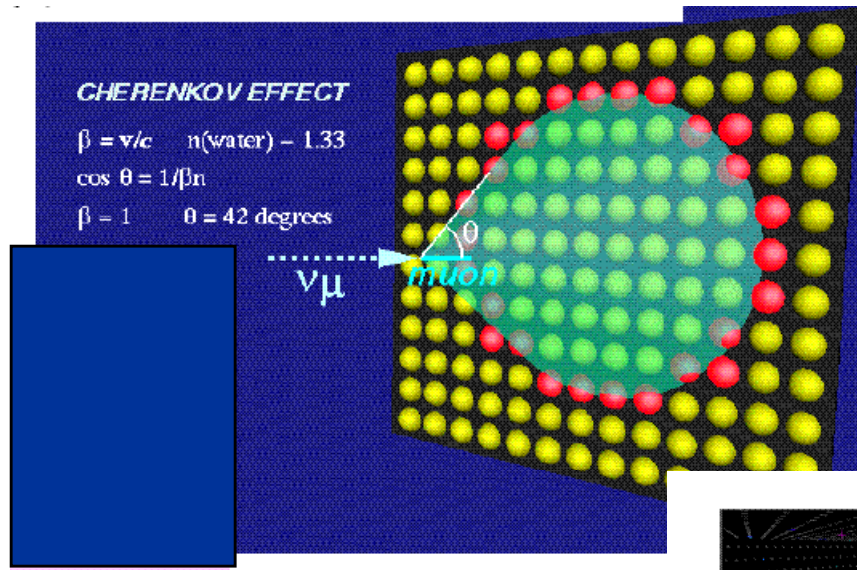
$$\beta > 1/n$$

$$\cos \theta = (ct/n)/(\beta ct) = 1/\beta n$$

- **Rivelatore a soglia** (“vede” solo particelle veloci e non quelle lente)
- Misura l'angolo θ della luce emessa (caratteristici anelli) \rightarrow **RICH**
- Conoscendo θ si ricava la velocità \rightarrow accoppiato con spettrometro permette di identificare le particelle

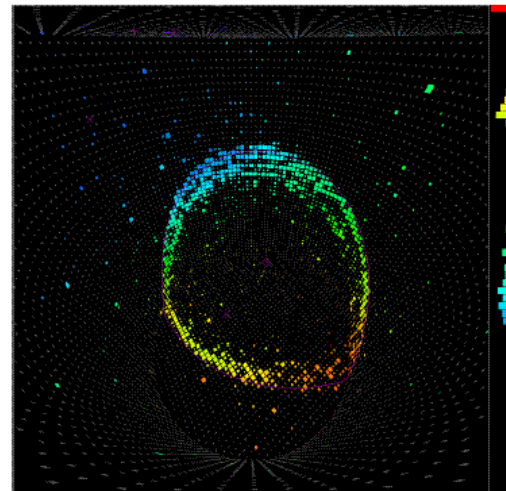


Rivelatori a luce Cerenkov - II

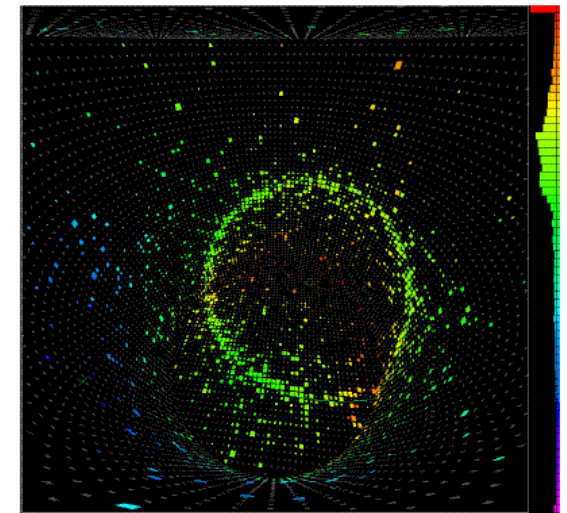


Ring Imaging Cherenkov (RICH)

...il rivelatore degli anelli.....



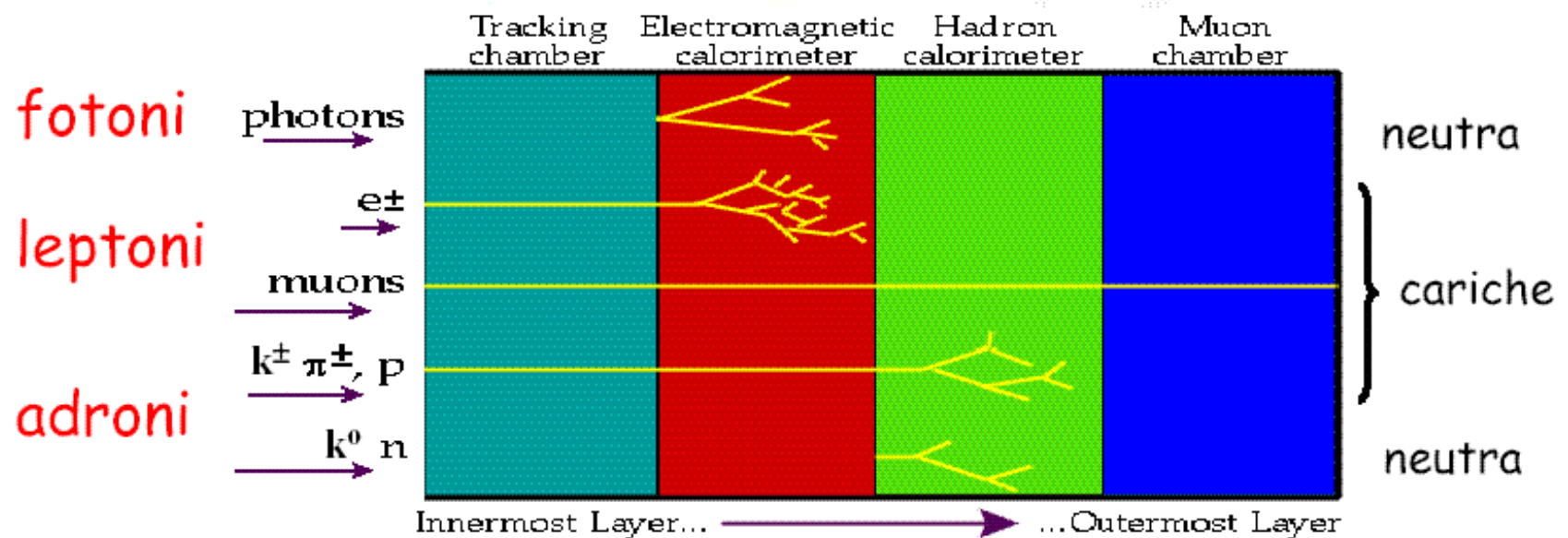
μ -ring from $\nu_{\mu} N \rightarrow \mu$:
Straight m.i.p



e-ring from $\nu_e N \rightarrow e$:
Staggered trajectory

I calorimetri

- I rivelatori sin qui incontrati sono “sottili” → perturbano di poco il moto delle particelle
- I dispositivi sperimentali moderni sono spesso completati dai **calorimetri**;
 - si basano sul processo di “sciame” (adronico o elettromagnetico)
 - modificano (spesso) totalmente il moto della particella → messi per ultimi
 - permettono di rivelare anche particelle neutre (ad es. Fotoni e neutroni)

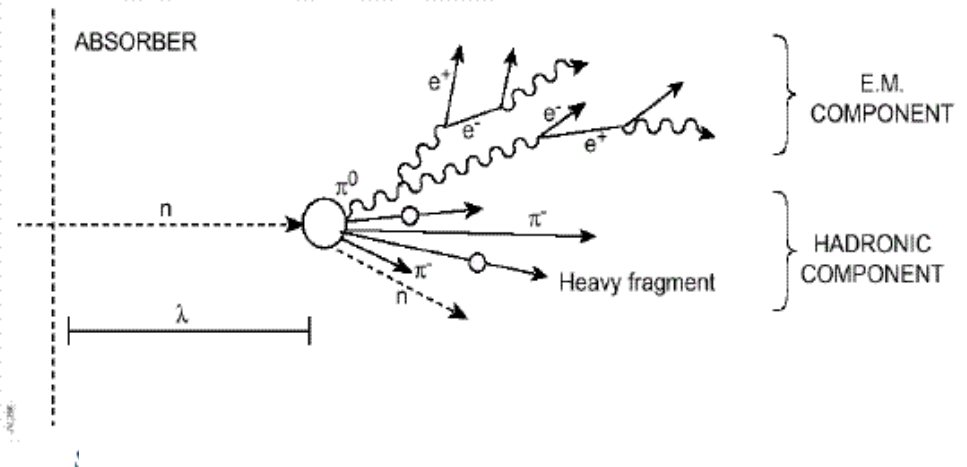
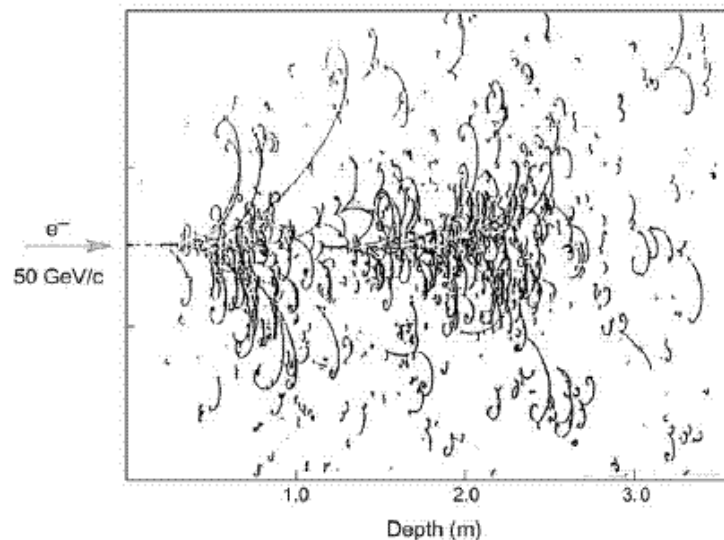


I calorimetri - III

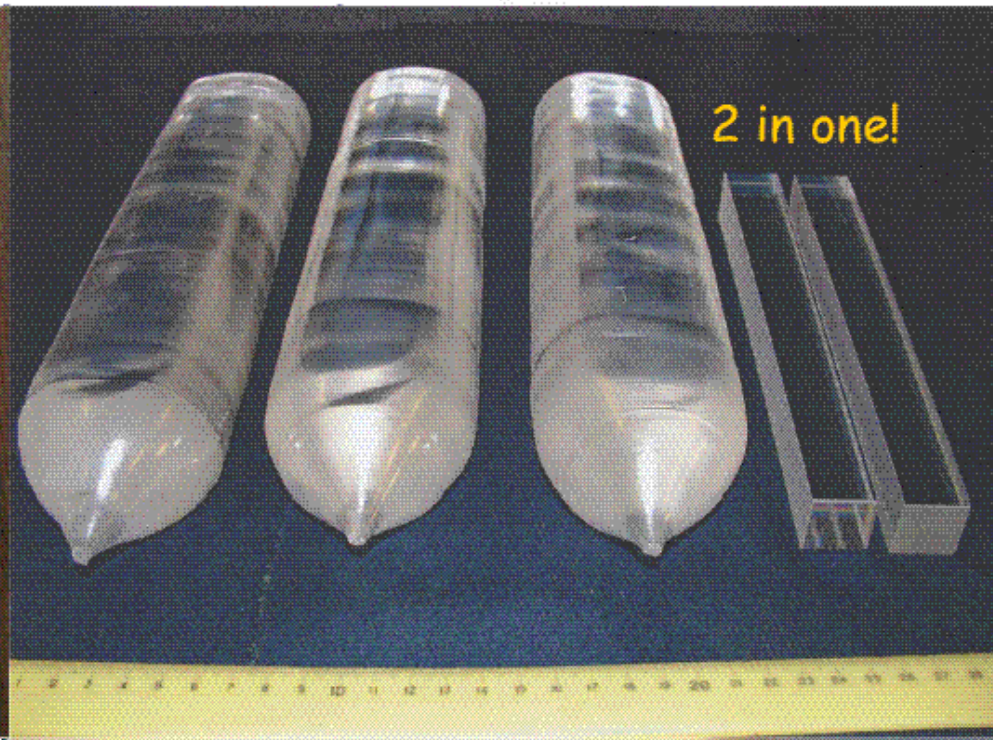
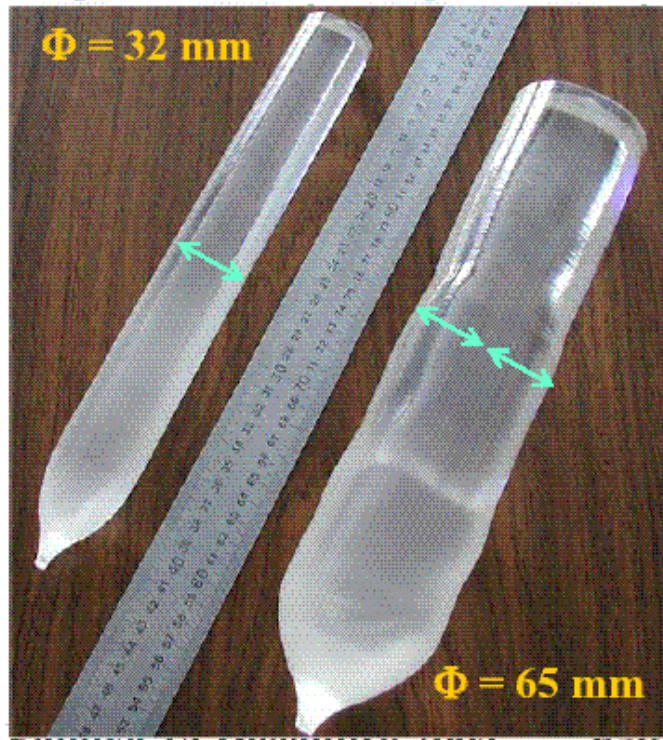
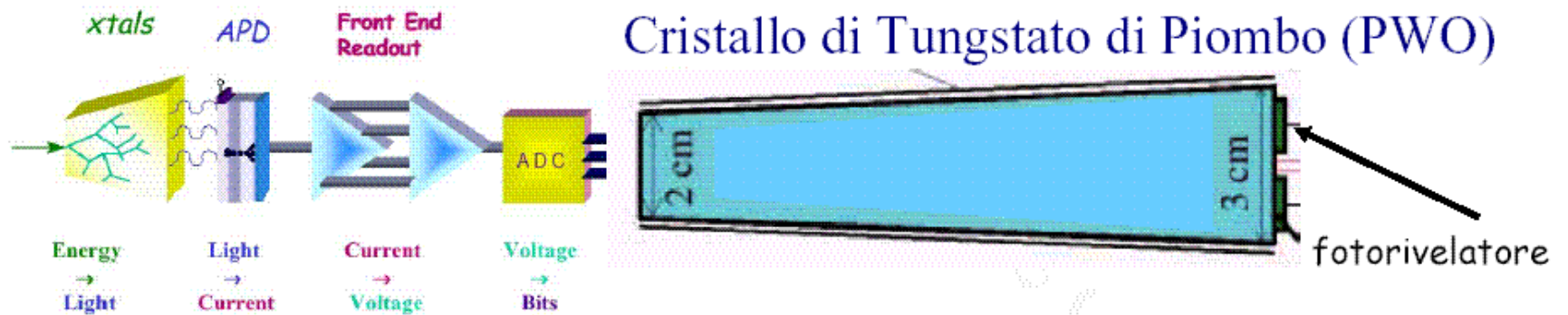
Due tipi di calorimetri: **elettromagnetici** (per elettroni e fotoni) e **adronici** (per tutte le particelle con interazione forte-in particolare per quelle neutre che altrimenti non si potrebbero misurare-)

elettromagnetici: sfruttano tra l'altro la radiazione di fotoni per frenata da parte degli elettroni e la caratteristica dei fotoni in un mezzo di creare coppie di elettroni e positroni (sciame elettromagnetico). Sono i più compatti

adronici: assorbono l'energia tramite le interazioni nucleari e necessitano di molto materiale per contenere una ragionevole frazione di energia

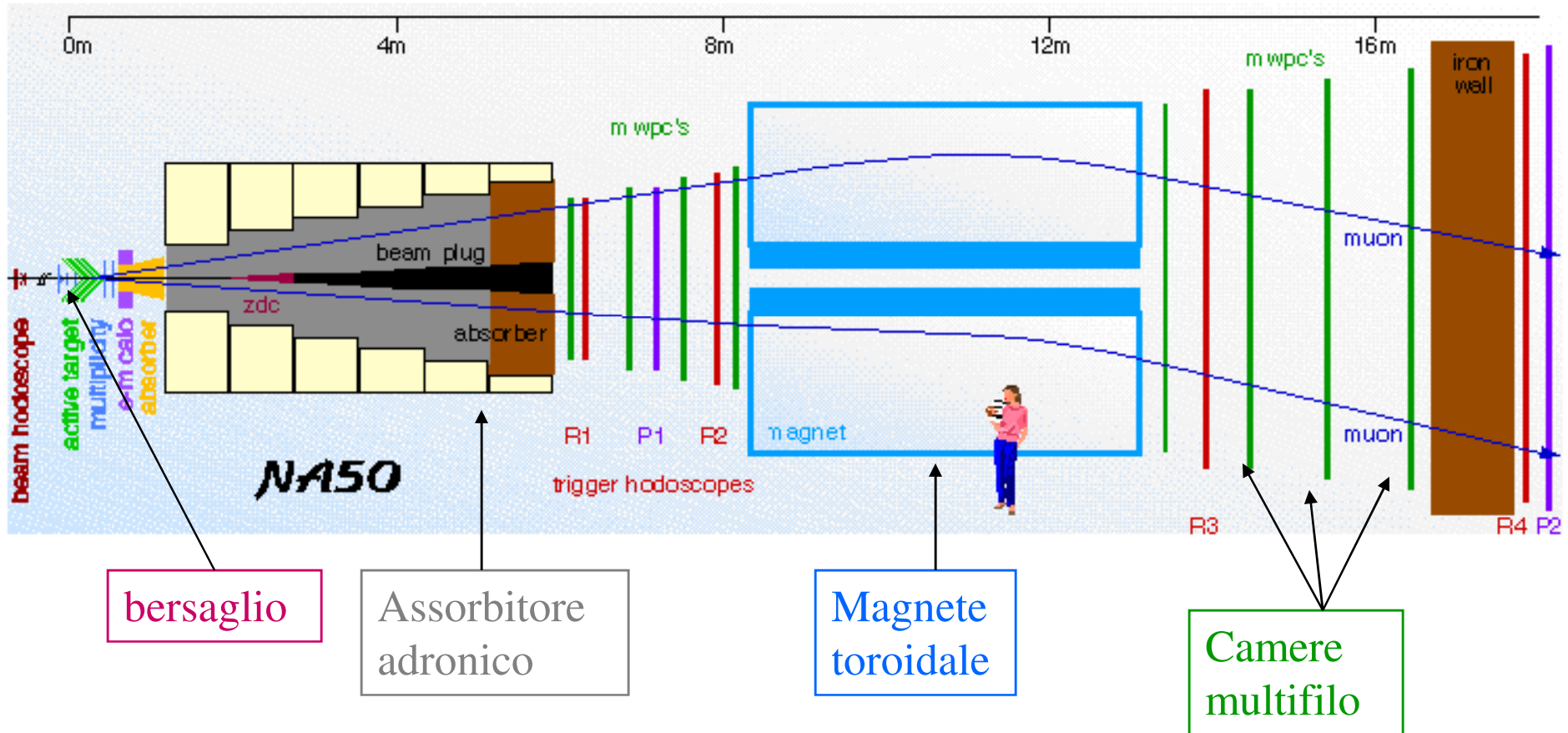


Un calorimetro elettromagnetico



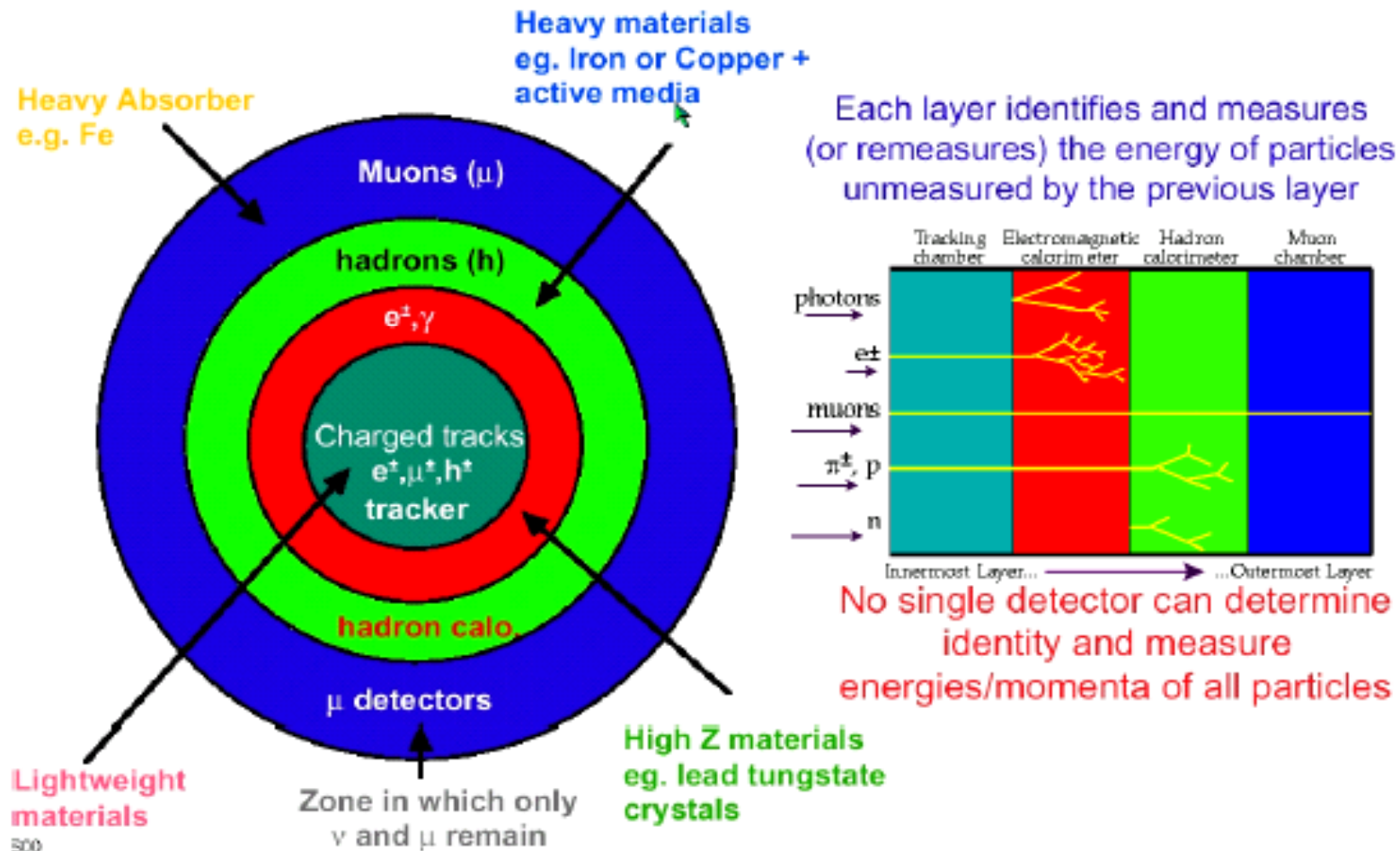
Un esperimento a geometria piana

L'esperimento NA50 al SPS del CERN



Un apparato per collider e' costituito da un insieme di cilindri concentrici in campo magnetico fatti di rivelatori con scopi diversi

Structure of a Typical Collider Detector



Un rivelatore ermetico per collider

- Si vuole misurare le proprietà di tutte le particelle prodotte nell'urto
- 1 Si seguono le traiettorie delle particelle cariche in campo magnetico (rivelatori al Si ed a gas)
 - 2 Si misura l'energia delle particelle γ e degli elettroni (calorimetri elettromagnetici)
 - 3 Si misura l'energia degli adroni (calorimetri adronici)
 - 4 Si misurano i mesoni μ

Sfuggono i neutrini

Le dimensioni sono imposte dalla energia delle particelle che si vuole misurare il numero di rivelatori dal numero di particelle prodotte nell'urto

Sistemi complessi con prestazioni eccezionali

Meccanica Precisioni di pochi μm in volumi di centinaia di m^3

Elettronica Trattamento di segnali di mV in tempi di nanosecondi con grande stabilità e linearità

Informatica Un evento contiene centinaia di informazioni su ogni particella. le particelle per evento sono migliaia

Cylindrical 'Onion-like' detector

Tracking detector in a solenoidal magnetic field

Calorimeters

Central detector

- Tracking_T
- Sign of tracks
- Flavour tagging

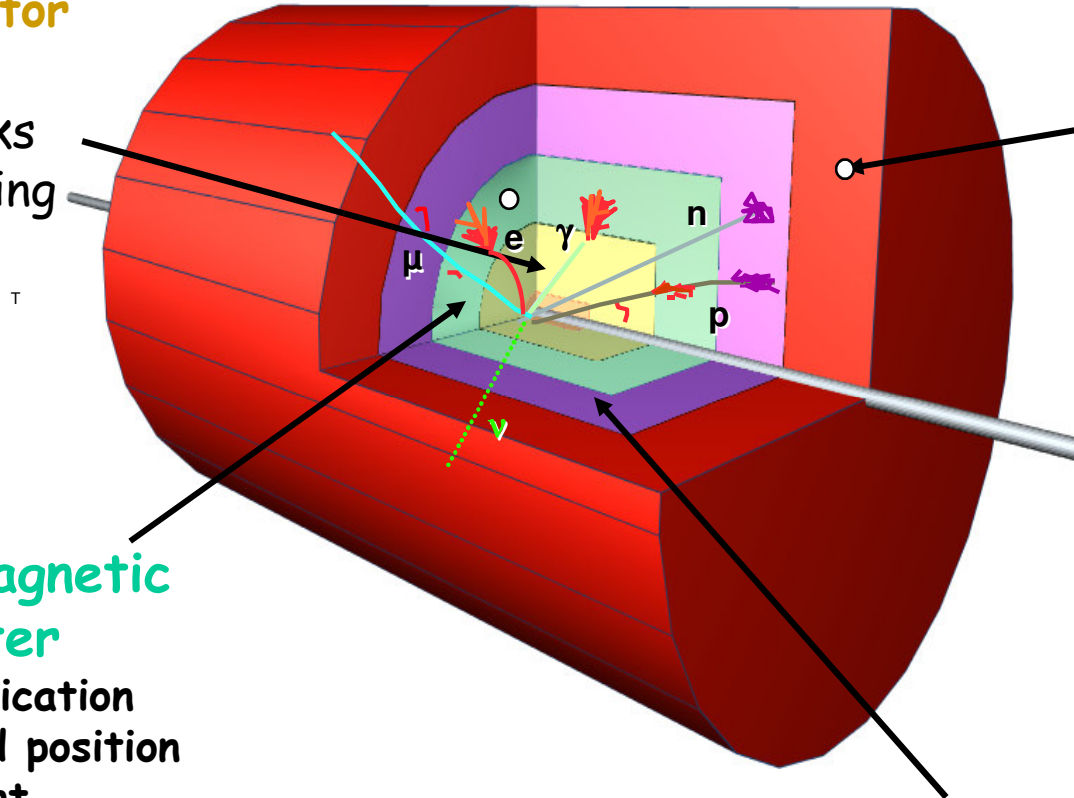
Muon detector
 μ identification and measurement

Electromagnetic Calorimeter

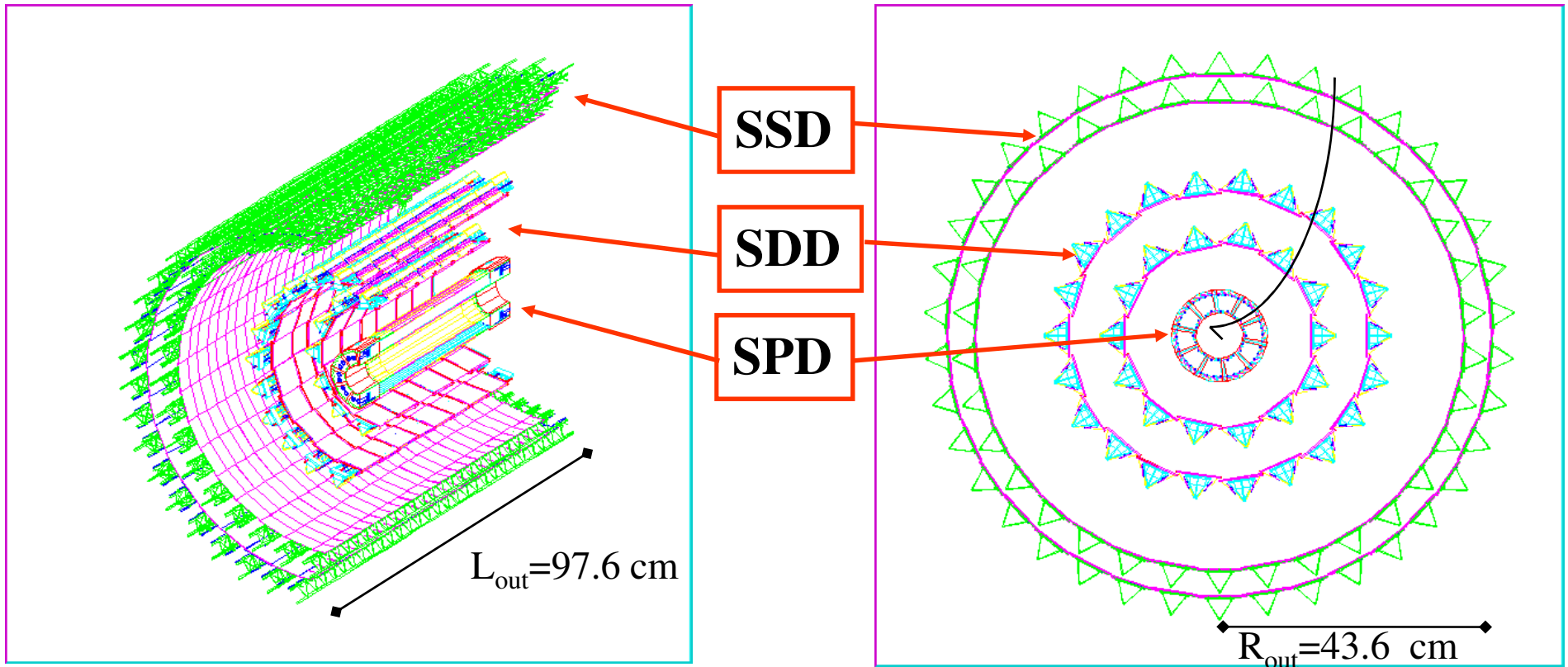
- e/ γ identification
- :energy and position measurement

Hadronic Calorimeters

- Jet energy and position measurement
- Hermeticity: Missing Pt measurement



Un esempio di tracciatore : ALICE ITS

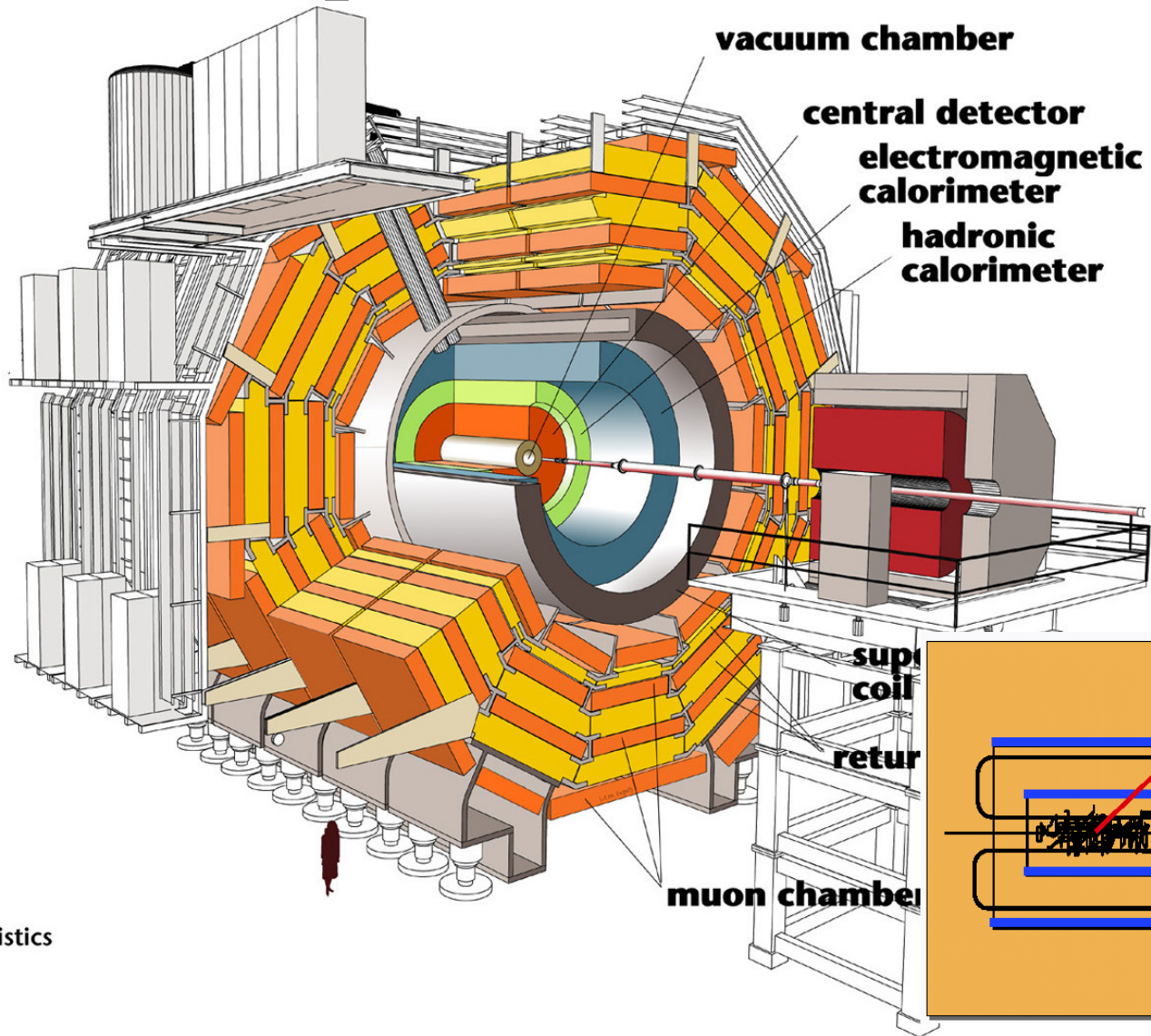
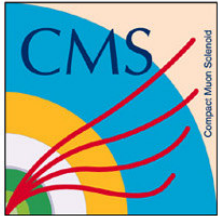


6 Layers, three technologies (keep occupancy ~constant ~2% for max mult)

- Silicon Pixels (0.2 m², **9.8 Mchannels**)
- Silicon Drift (1.3 m², **133 kchannels**)
- Double-sided Strip Strip (4.9 m², **2.6 Mchannels**)

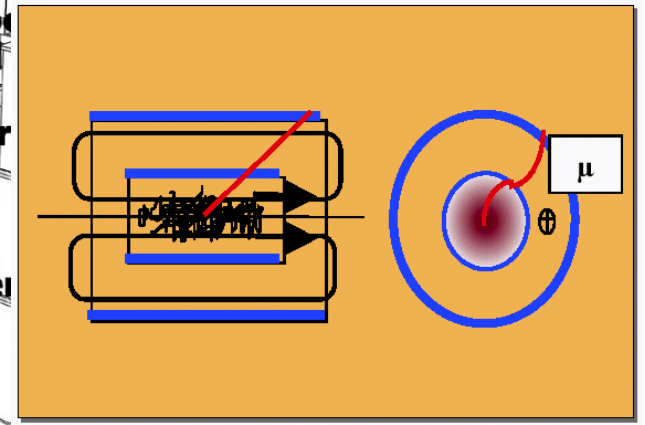
Un apparato ad LHC

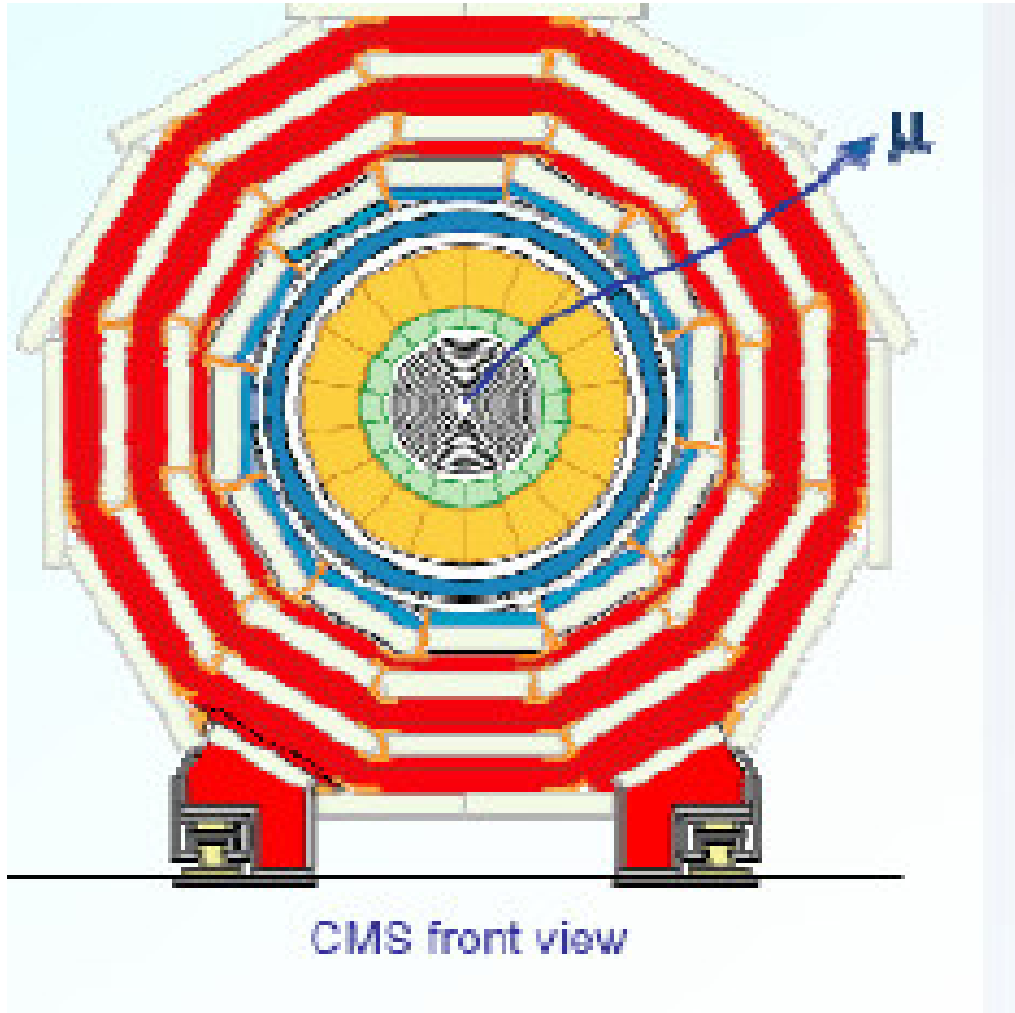
Compact Muon Solenoid



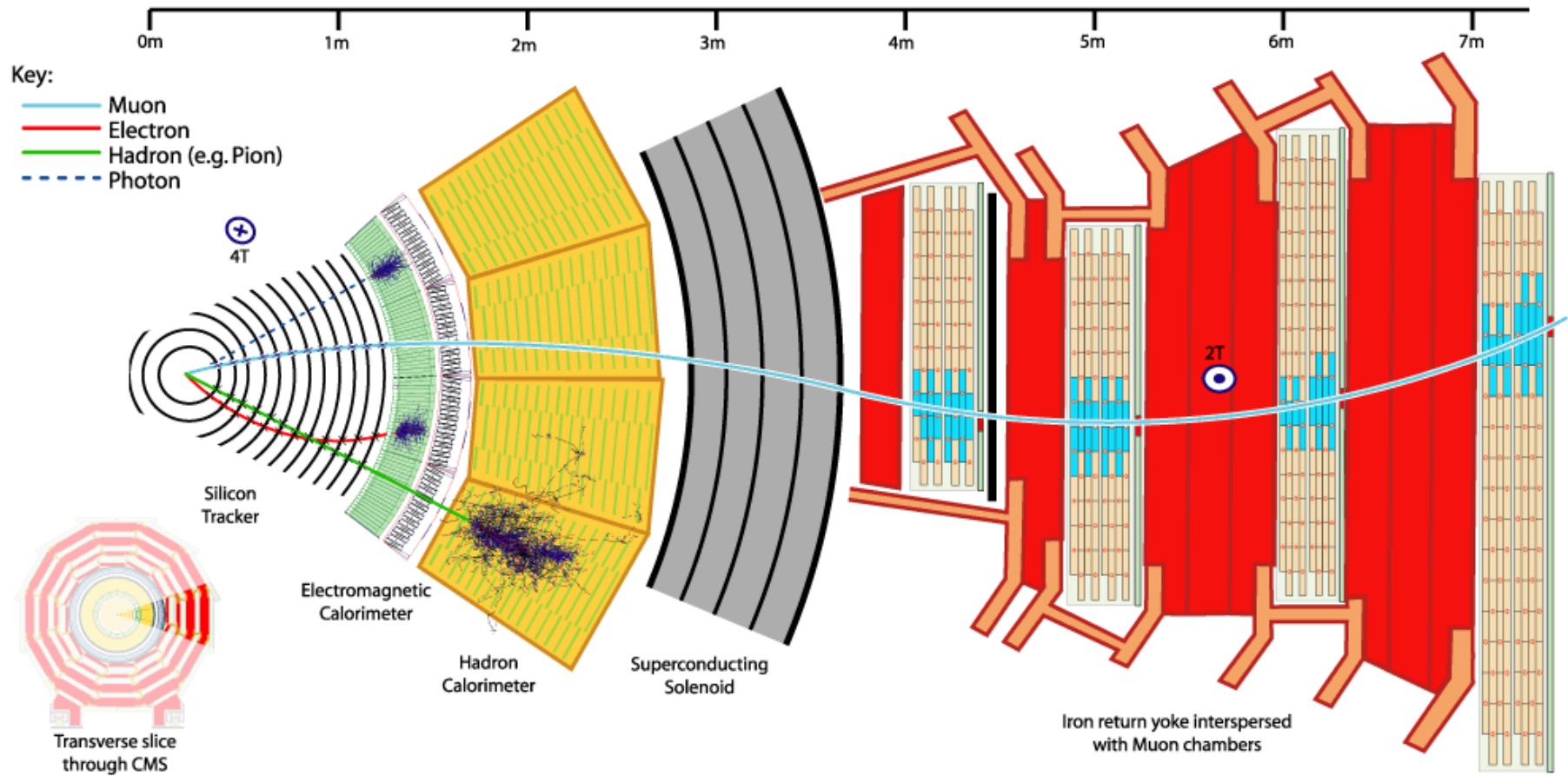
Detector characteristics

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

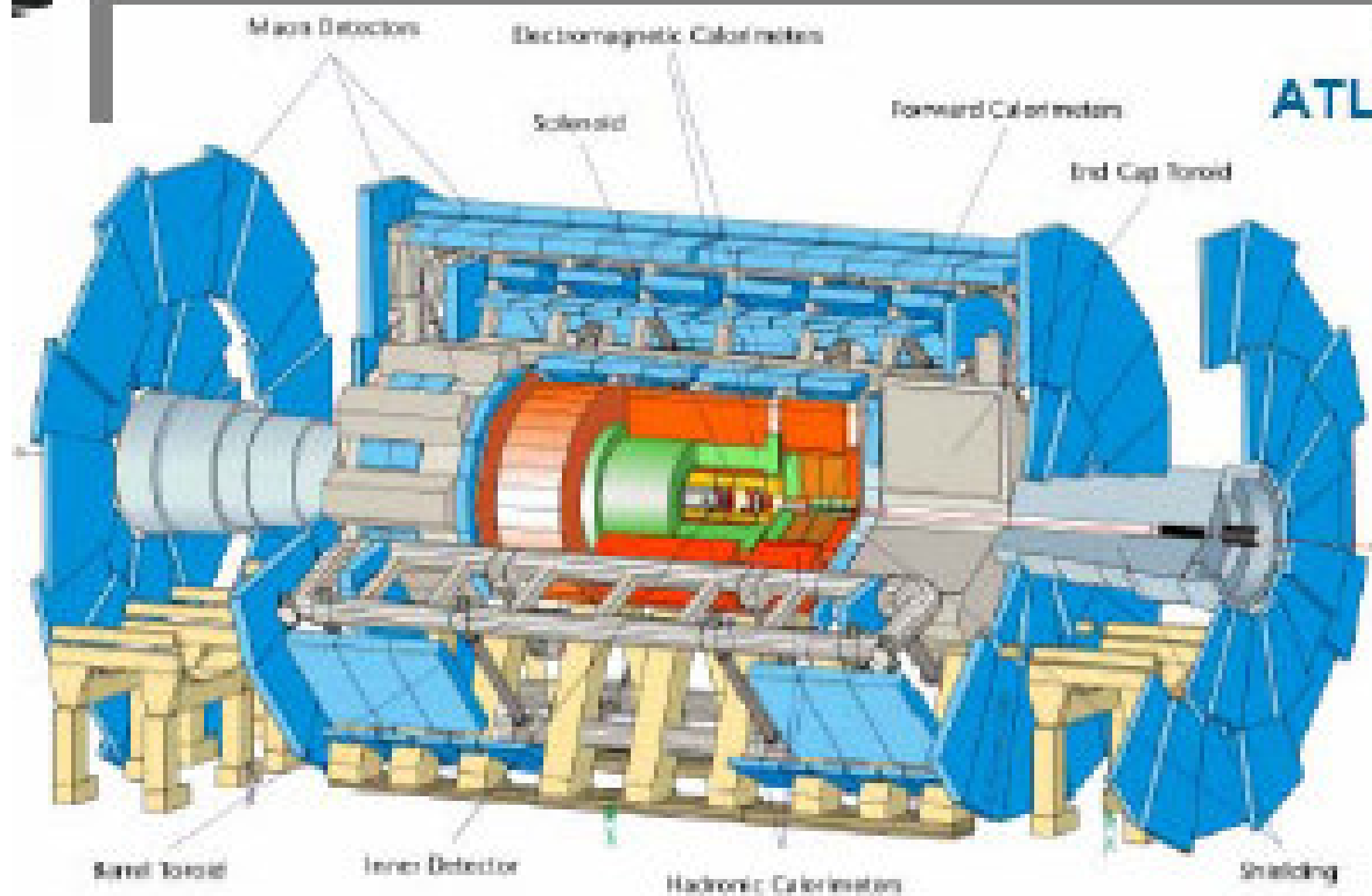


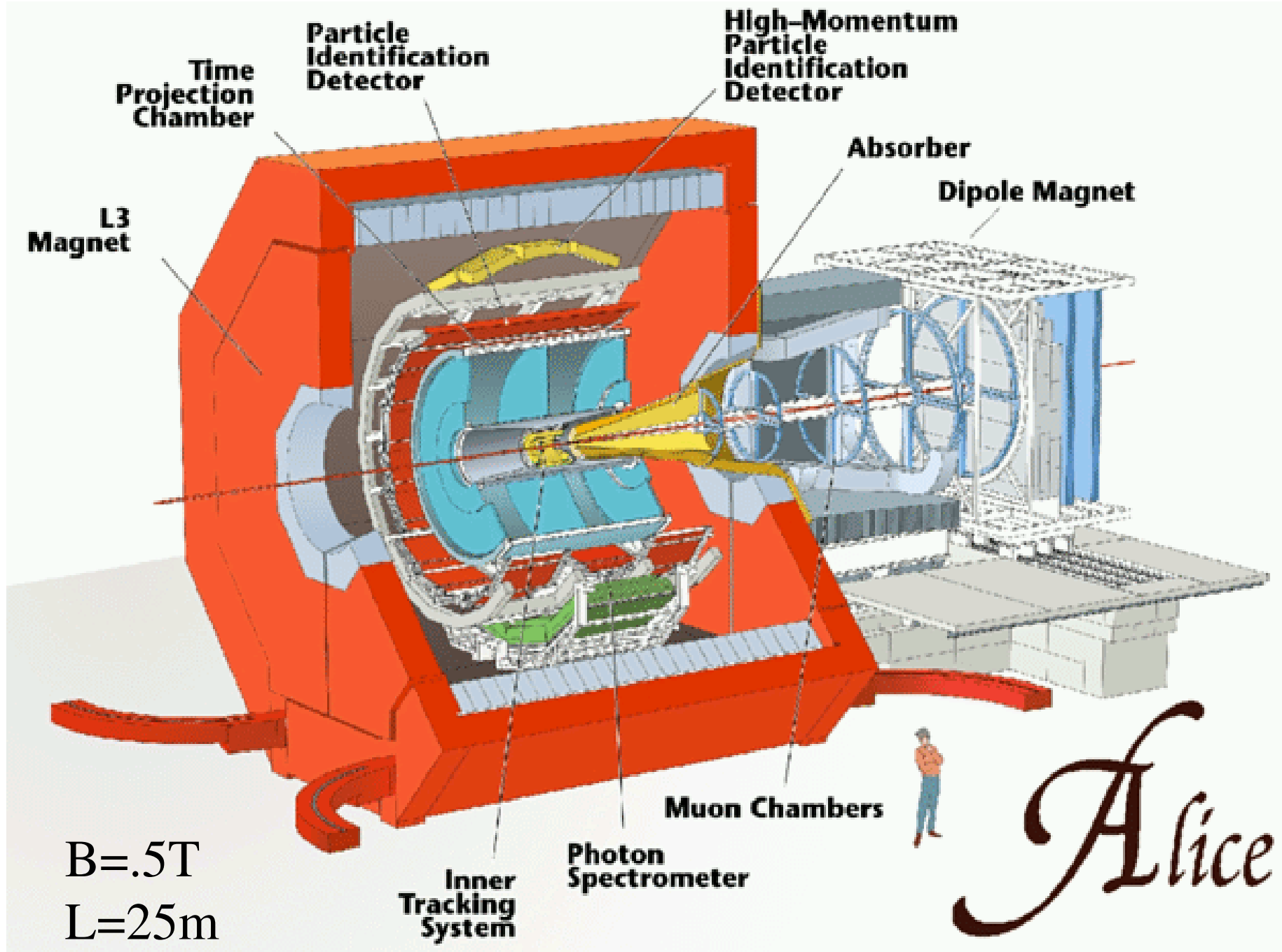


Particles in CMS detectors



ATLAS

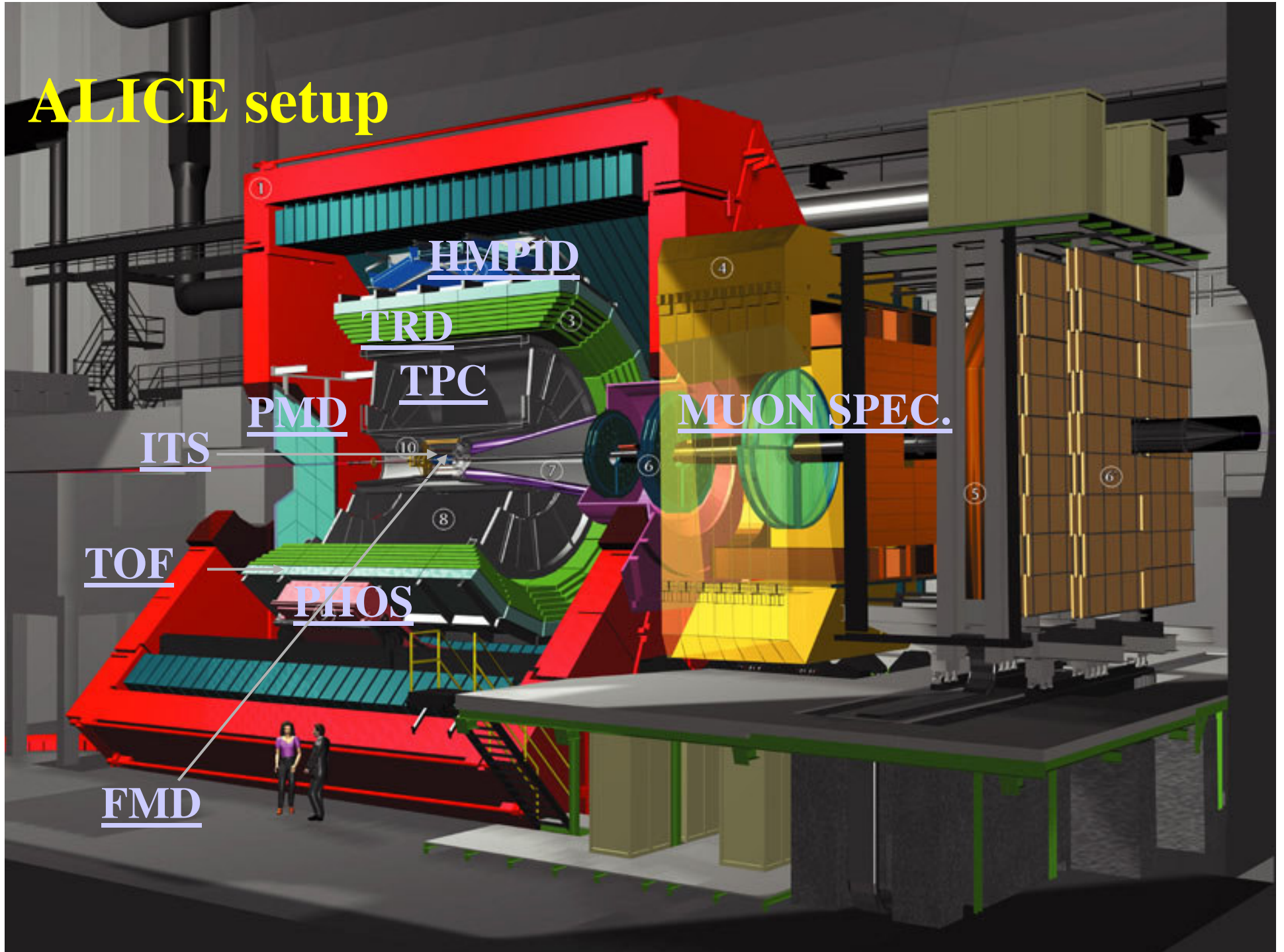


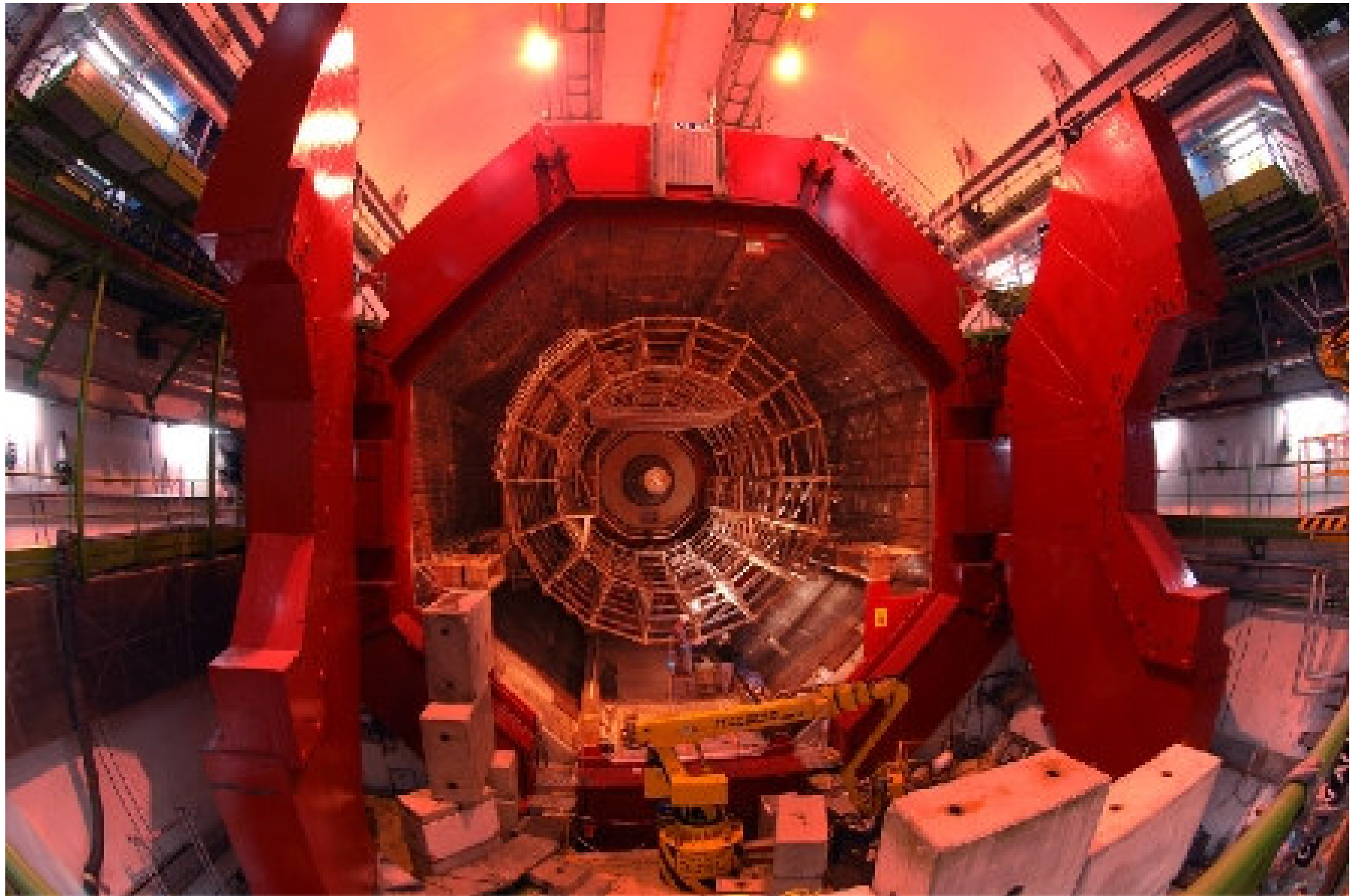


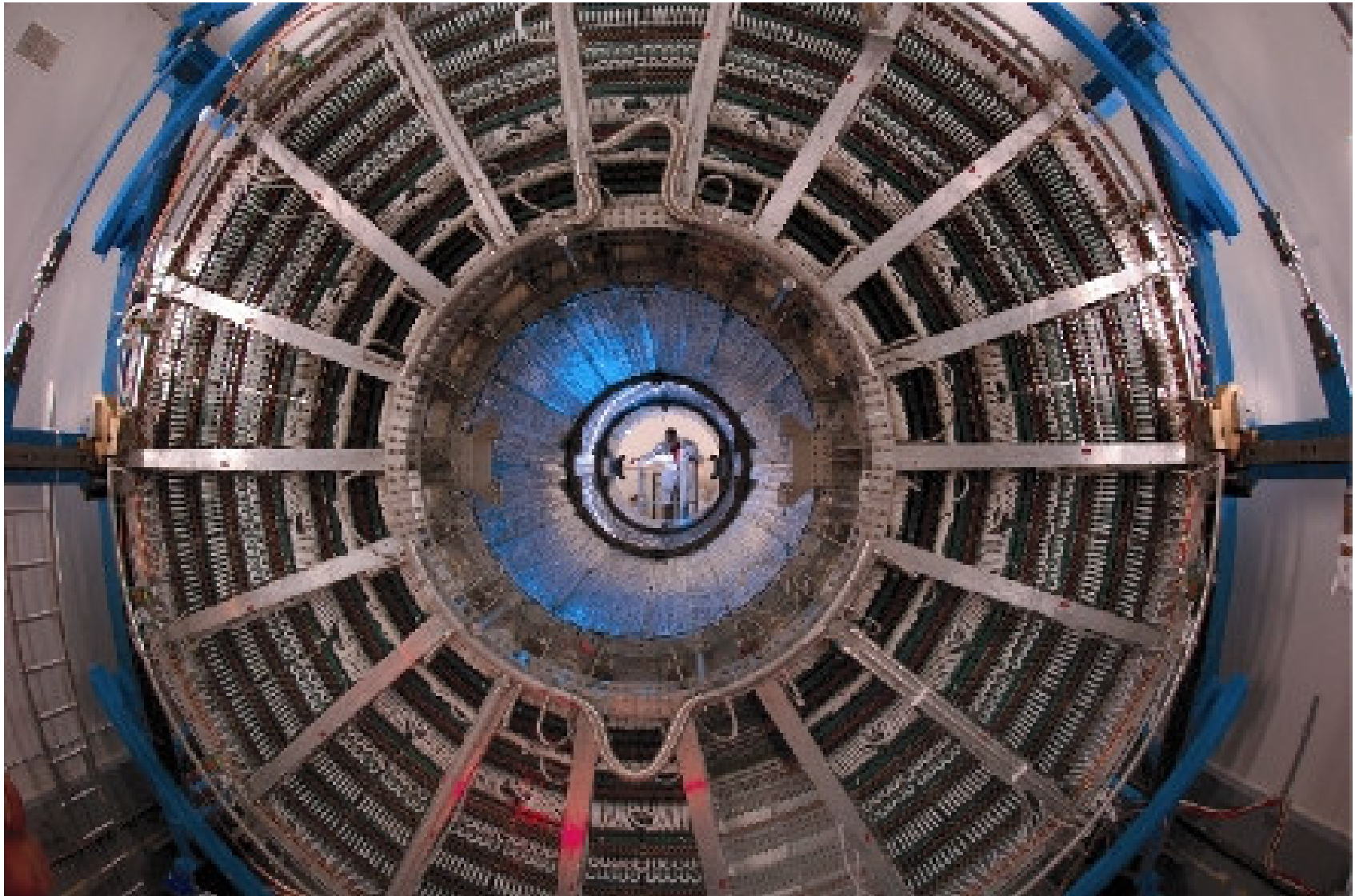
$B = .5T$
 $L = 25m$
 $R = 8 m$

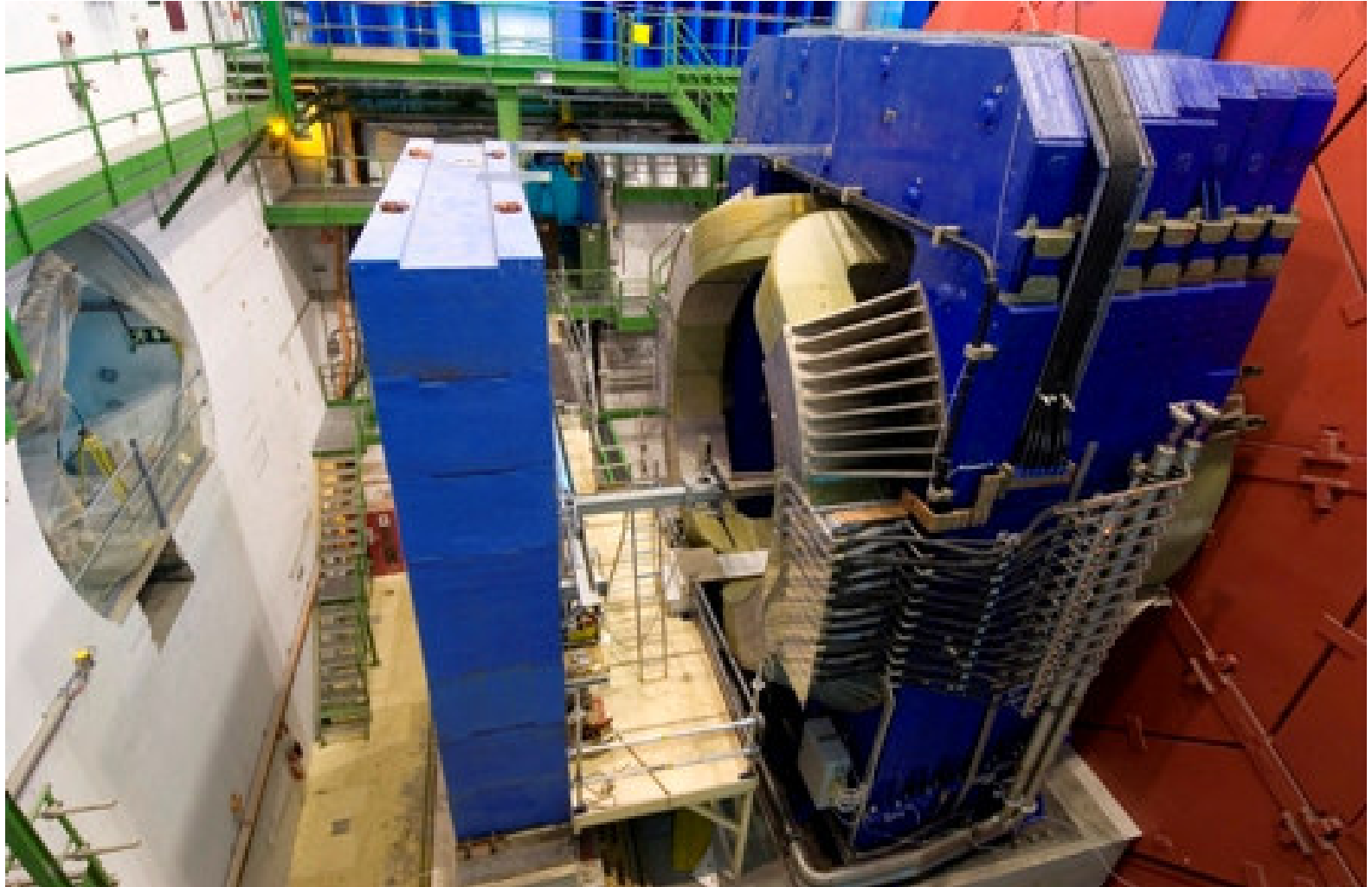
Alice

ALICE setup

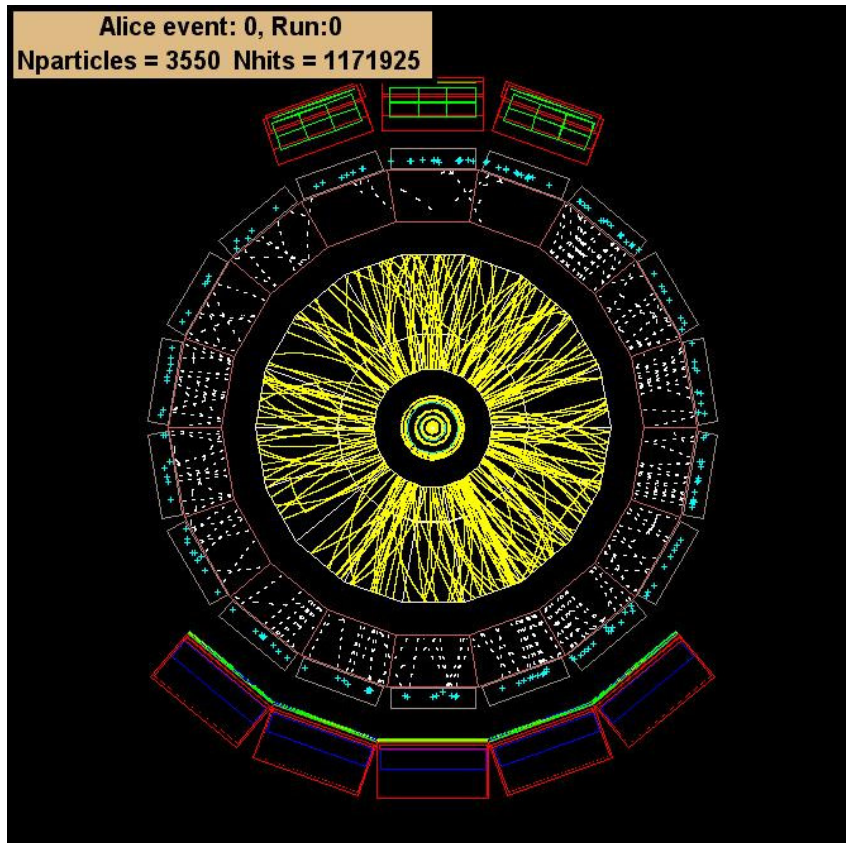




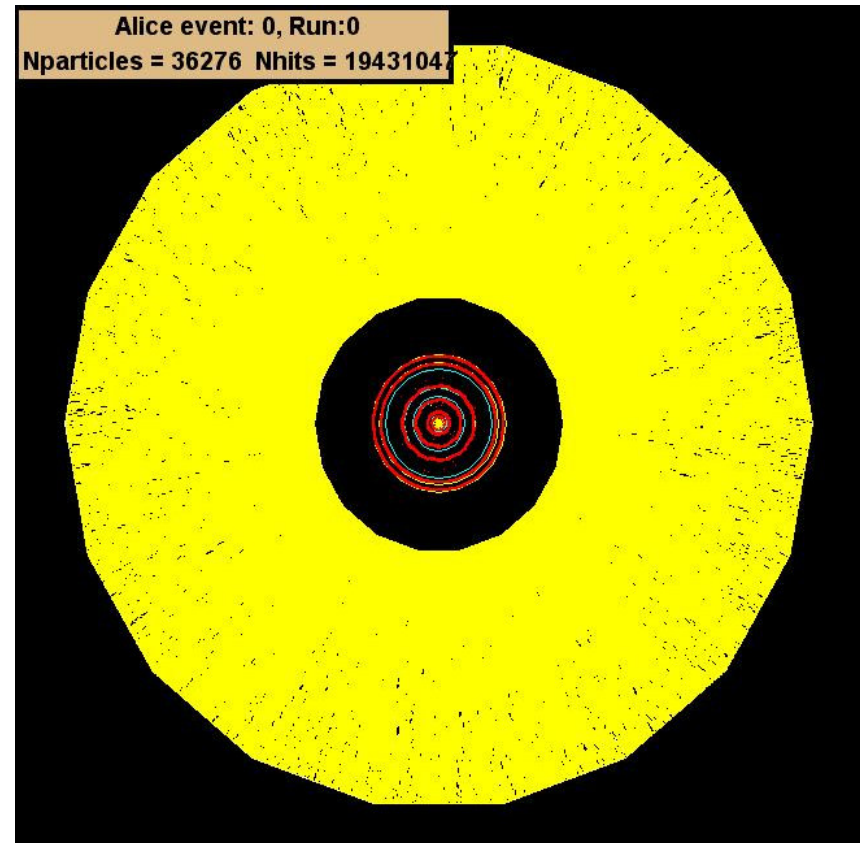




La raccolta dei dati



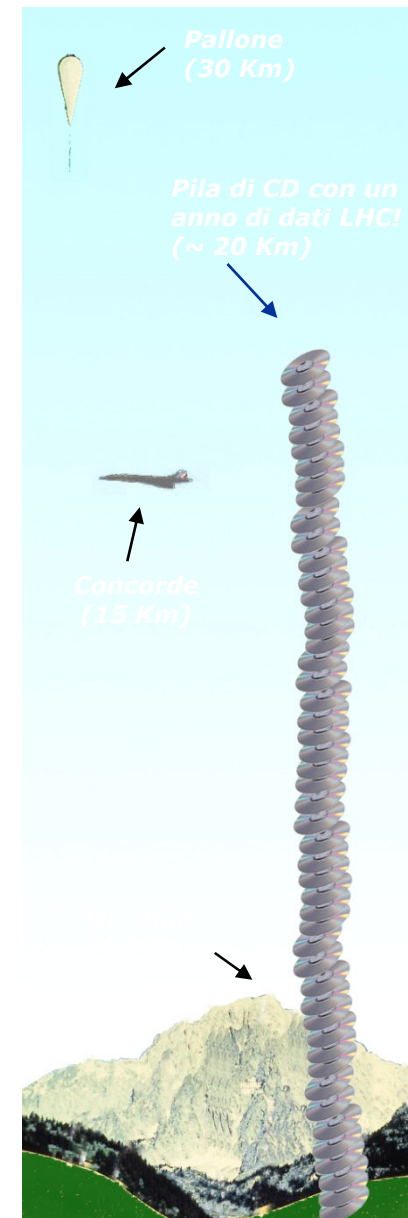
$60^\circ < \vartheta < 62^\circ!$



One collision :
Pb+Pb @ 5.5 TeV
 $dN/dy = 8,000$

I dati di LHC

- 40 milioni di collisioni al secondo
- Dopo il filtraggio, 100 collisioni interessanti al secondo
- Da 1 a 12 MB per collisione \Rightarrow da 0.1 a 1.2 GB/s
- 10^{10} collisioni registrate ogni anno
- ~ 10 Petabytes (10^{15} B) per anno
- I dati di LHC data corrispondono a 20 milioni di CD all'anno!



I collaboratori del CERN nel



Europa: 267 istituti, 4942 utenti
Altrove: 208 istituti, 1752 utenti

Conclusioni e prospettive

- Acceleratori e rivelatori ci hanno permesso di capire molte cose riguardo alla fisica nucleare e “subnucleare”.
- Hanno notevoli applicazioni pratiche
- Medicina..beni culturali...
- Con l'avvento di LHC e dei suoi rivelatori la sfida tecnologica in questi due campi sara' portata a livelli senza precedenti.
- Ci auguriamo che anche il patrimonio di conoscenza riguardo alla fisica subisca un incremento commensurato allo sforzo tecnologico.

P.S. Lavorare sullo sviluppo di rivelatori (e acceleratori) e' , inoltre, una attivita' estremamente divertente....