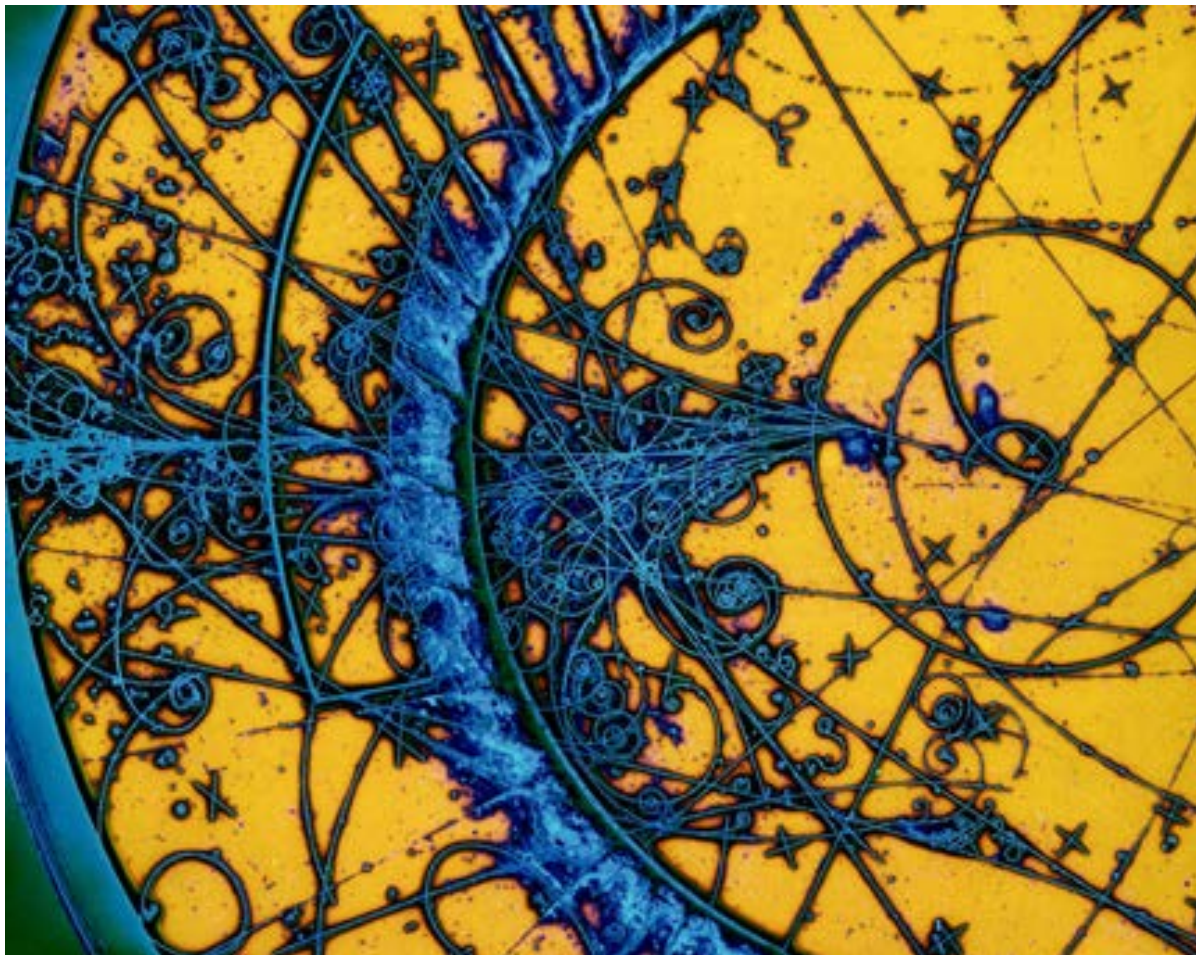


Fotografare l'invisibile: *rivelatori di particelle elementari*



Massimiliano Fiorini

Università degli Studi di Ferrara

INFN Sezione di Ferrara



European
Research
Council

I Venerdì dell'Universo

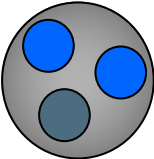
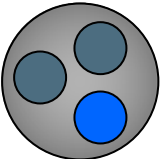
Ferrara - 9 Luglio 2021

Costituenti fondamentali

- La materia è costituita da atomi: nuclei (formati da protoni e neutroni) ed elettroni

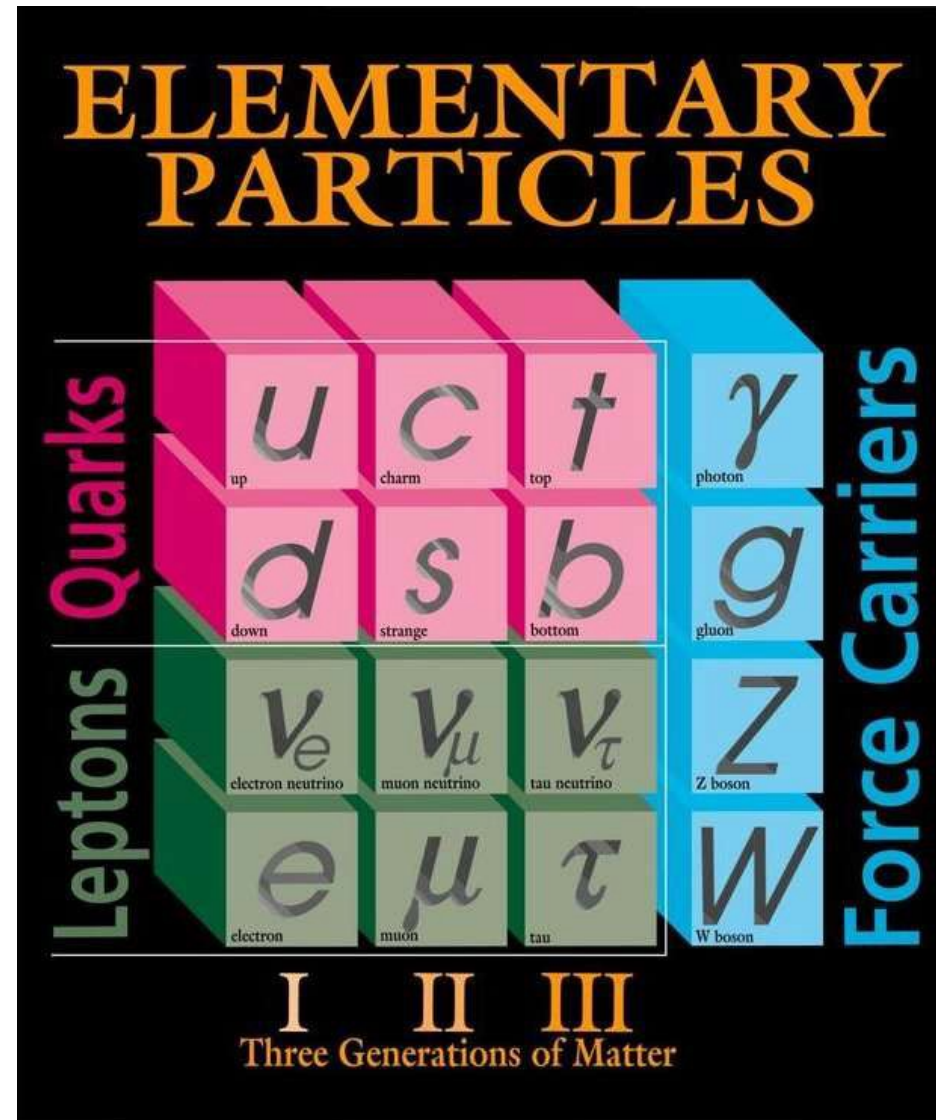
quark {  quark up (carica $+2/3$)
 quark down (carica $-1/3$)

leptone {  elettrone (carica -1)

particelle composte {  protone
 neutrone } nucleoni

Particelle elementari

- Abbiamo finora osservato 12 particelle elementari (più le loro anti-particelle) raggruppate in 3 «famiglie»
 - 6 leptoni
 - 6 quarks
- La forza tra le particelle «di materia» è trasmessa (mediata) da altre particelle, i «bosoni di gauge»
- La materia ordinaria è formata solo dalla prima generazione

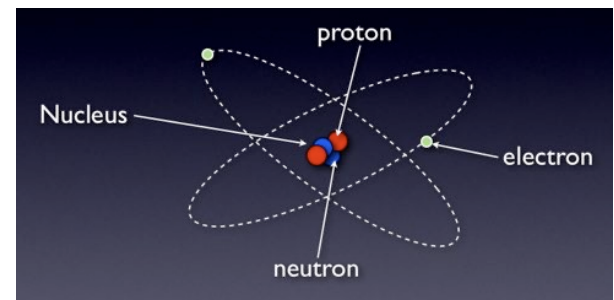
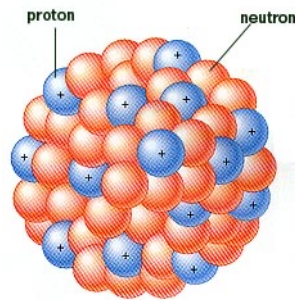
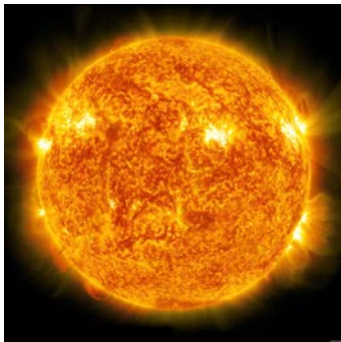
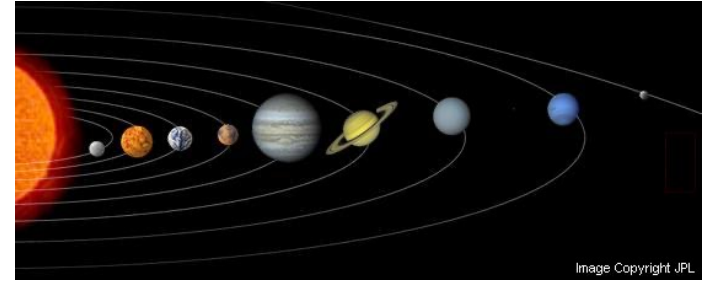


Come rivelare le particelle?

- Il principio di funzionamento di un rivelatore di particelle è il trasferimento di tutta o di una parte dell'energia della radiazione alla massa del rivelatore, dove è convertita in qualche altra forma più accessibile alle percezioni umane
 - La forma in cui l'energia viene convertita dipende dal tipo di rivelatore
- Storicamente
 - Rivelatori per «immagini»
 - Rivelatori «logici» (elettronici)
- A partire dagli anni '70 le due tradizioni si sono combinate in «immagini elettroniche»

Le interazioni fondamentali

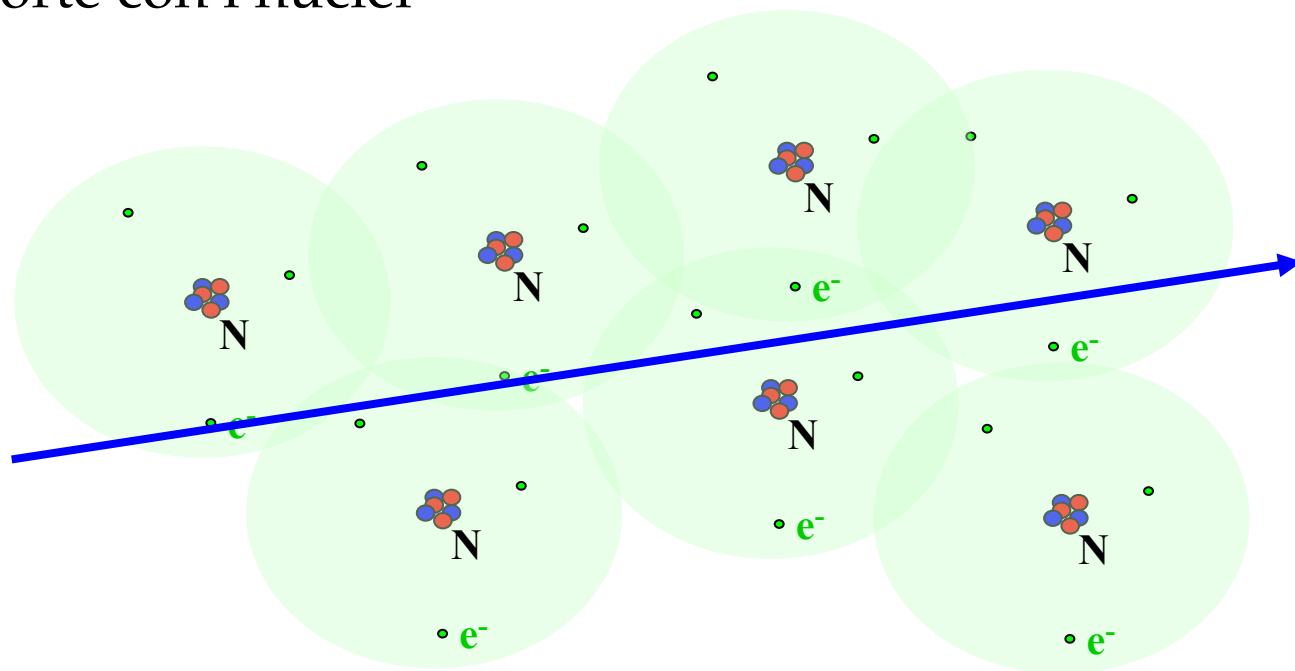
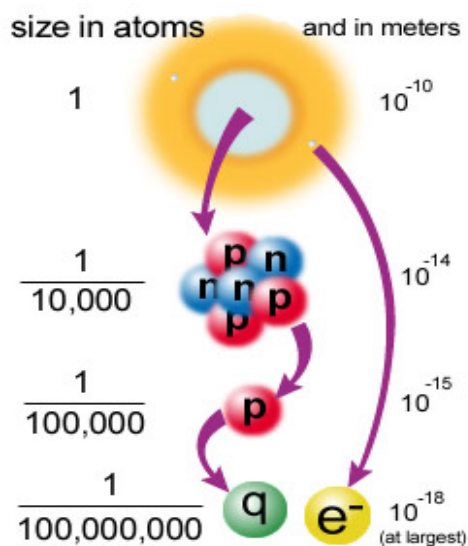
- Le interazioni fondamentali in natura sono quattro:
 - Gravitazionale
 - Elettromagnetica
 - Forte
 - Debole



- Le interazioni dei vari tipi di particelle con la materia sono sfruttate per realizzare i rivelatori
 - Principalmente interazioni elettromagnetiche

Interazione radiazione-materia

- La particella interagisce con gli elettroni atomici e/o con i nuclei del materiale che attraversa
 - Particelle con carica elettromagnetica perdono energia gradualmente urtando principalmente gli elettroni atomici e liberando delle cariche elettriche nel materiale
 - Particelle con carica forte (adroni) interagiscono anche tramite interazione forte con i nuclei



Visione: rivelazione di fotoni

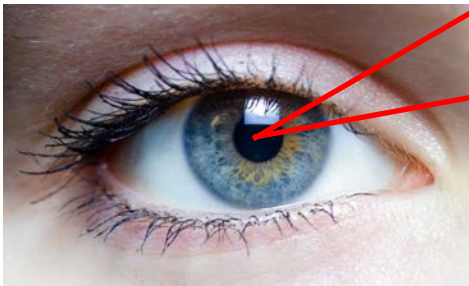
Sorgente



Bersaglio



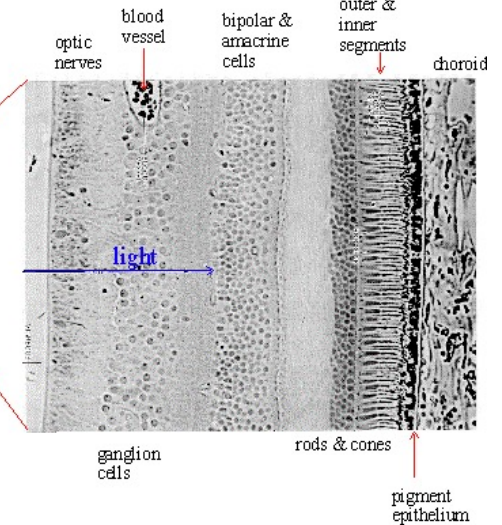
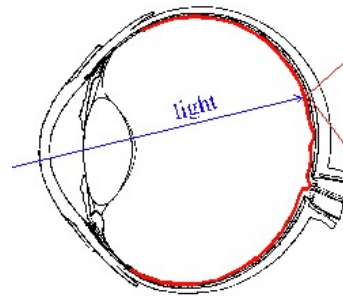
Rivelatore



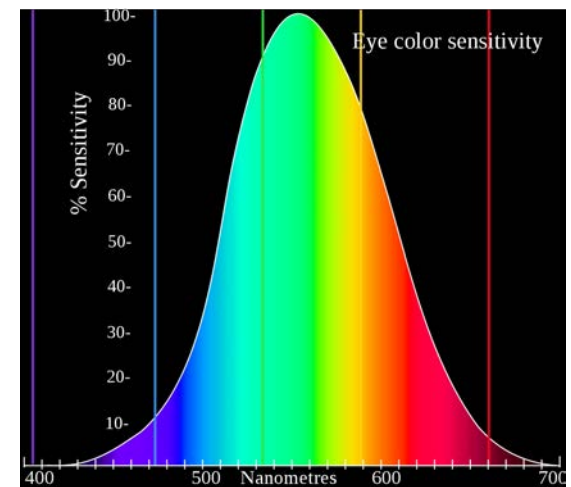
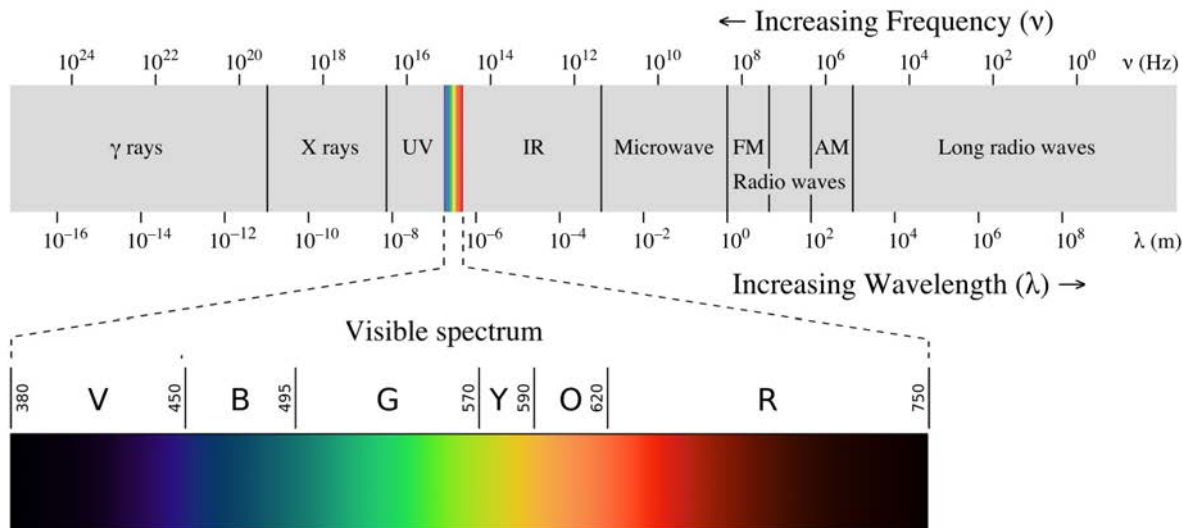
- Schema simile a esperimento in fisica delle particelle...

Occhio umano

- Il più antico «rivelatore» di particelle (fotoni visibili)

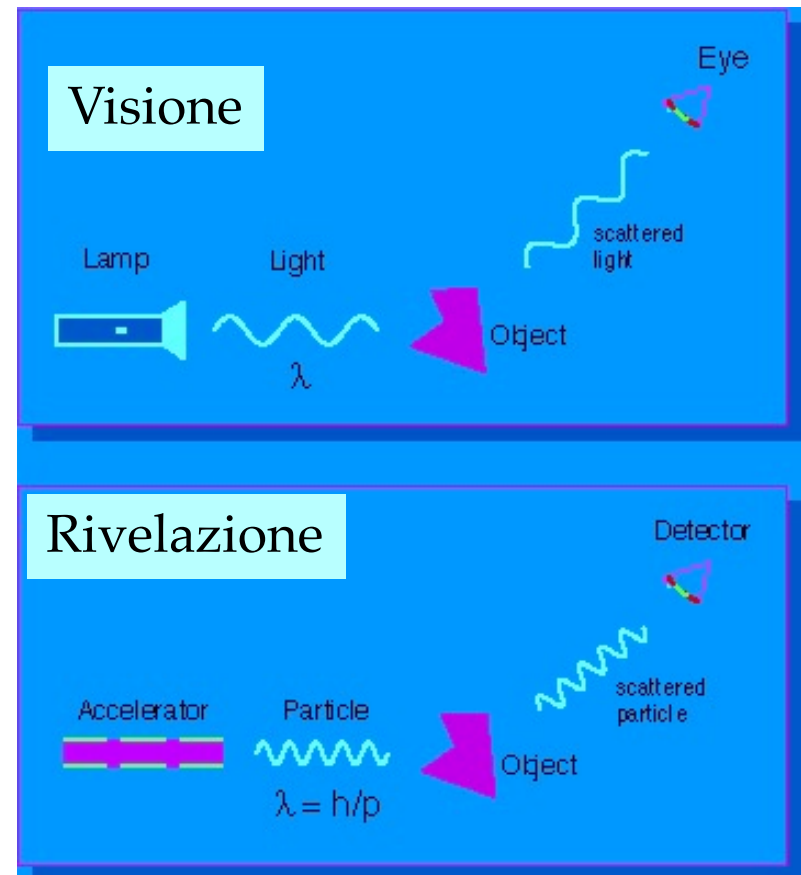


Adapted from Boycott & Dowling, 1969



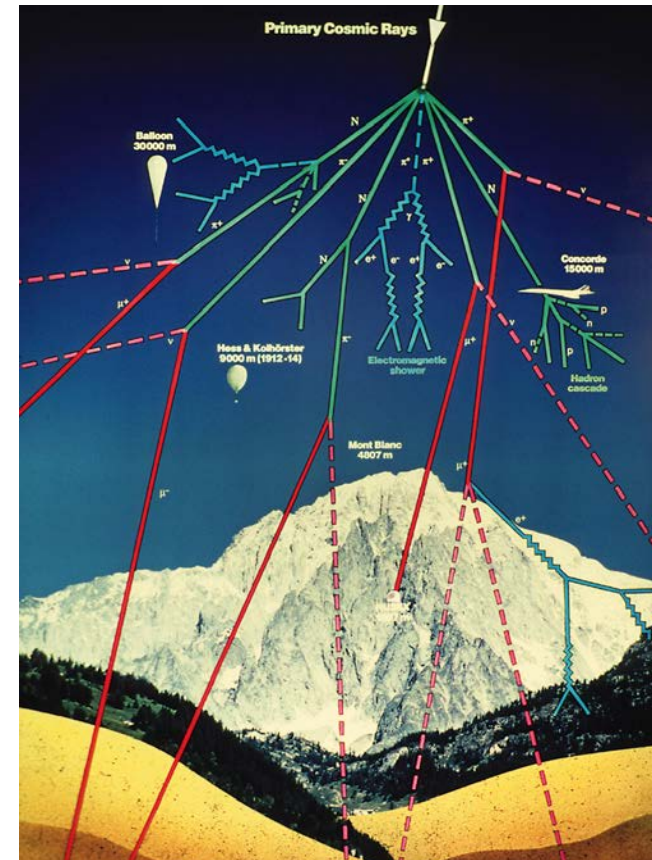
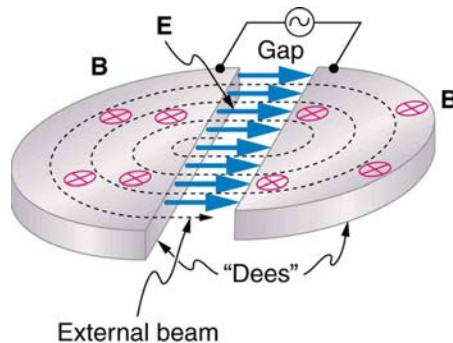
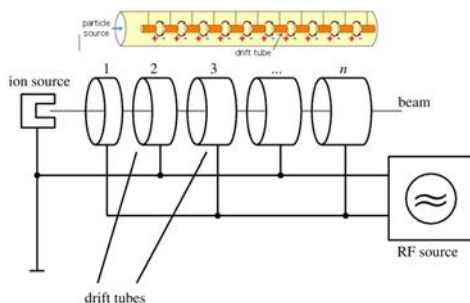
Come osservare oggetti più piccoli?

- Il livello di dettaglio è limitato dalla lunghezza d'onda
 - La luce visibile non ci consente di “vedere” oggetti più piccoli di qualche frazione di μm (10^{-6} m)
- De Broglie (1924): possiamo considerare le particelle come “onde di materia”
 - Lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ (h costante di Planck, p quantità di moto)
- Utilizzare le particelle come sonde
 - Acceleratori di particelle (variamo p e quindi λ)



Come studiare le particelle?

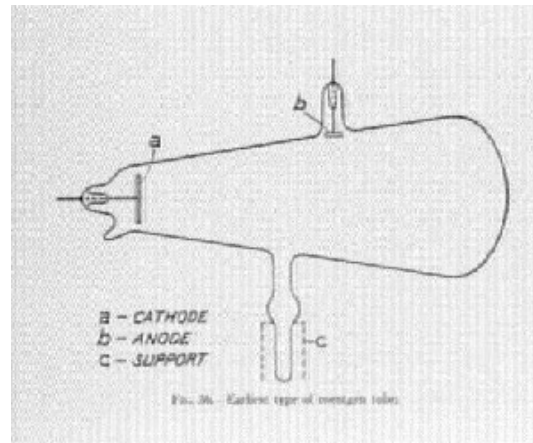
- Dobbiamo utilizzare proiettili di alta energia
 - Piccoli (protoni, elettroni, etc.) e molto veloci ($\lambda=h/p$)
- Dopo Rutherford, la fisica delle particelle è continuata utilizzando:
 - Sorgenti radioattive
 - Raggi cosmici
 - Acceleratori lineari e circolari



Rivelatori per “immagini”

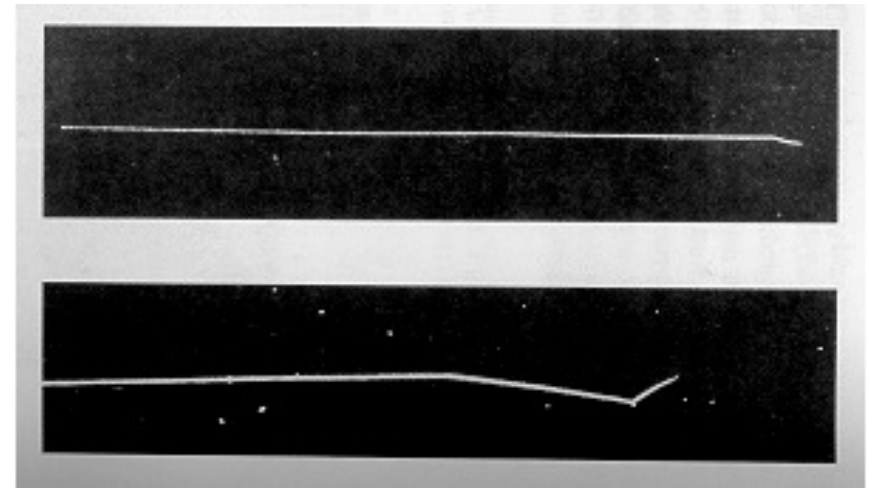
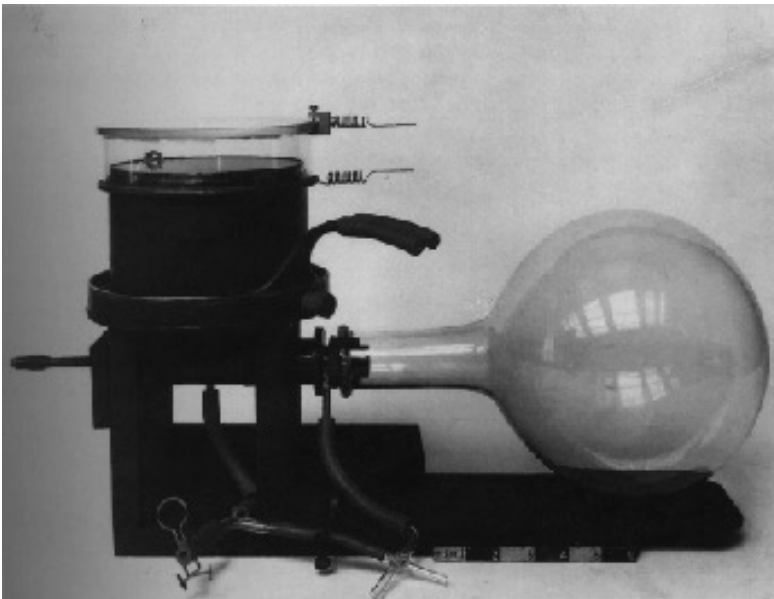
Scoperta dei raggi X

- Röntgen nel 1895 scoprì la radiazione elettromagnetica nell'intervallo di frequenza noto come raggi X
 - Schermo fluorescente (emissione di luce da ZnS)
 - Lastra fotografica (AgBr/AgCl + «energia» $\rightarrow$ Ag metallico $\rightarrow$ annerimento)

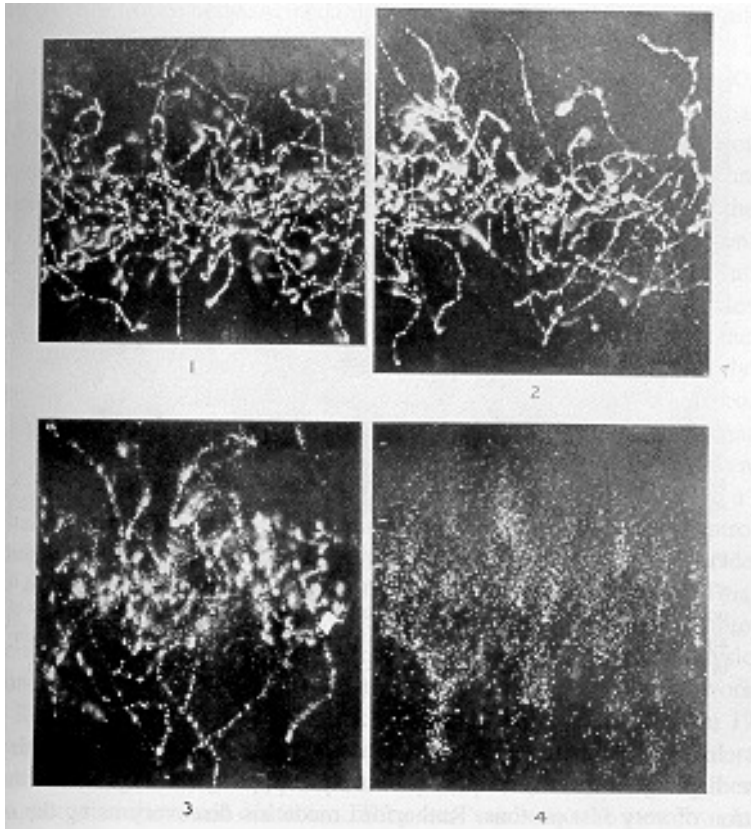


Camera a nebbia

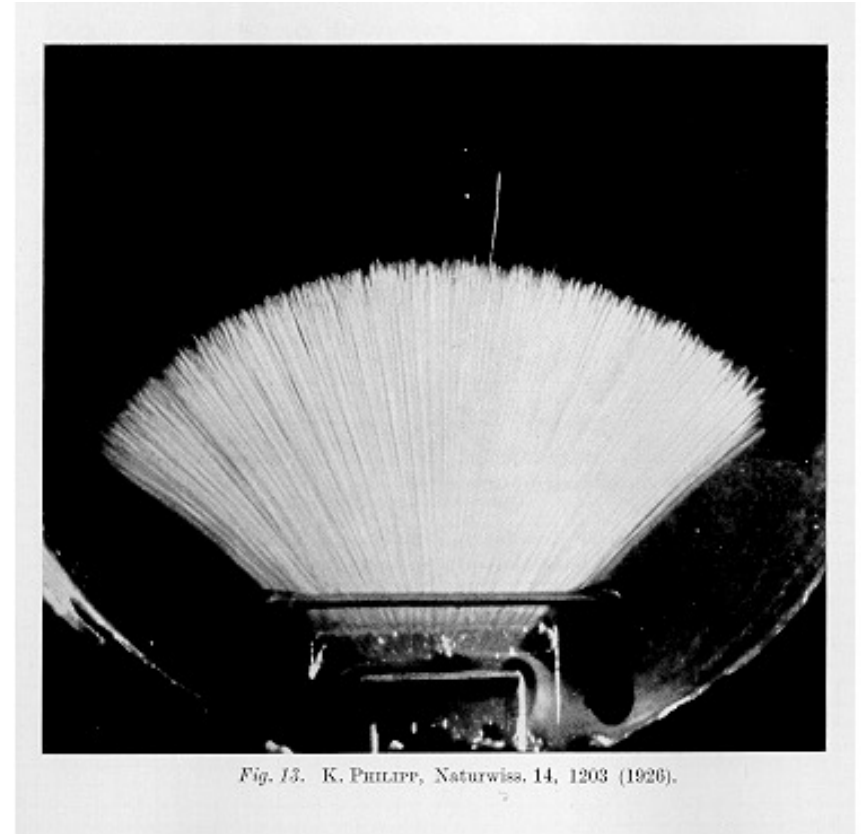
- C.T.R. Wilson era un meteorologo che propose una camera riempita di vapore acqueo soprasaturo per studiare la formazione delle nuvole causata dagli ioni presenti nella camera (1911)
 - Utilizzando lampade riuscì ad osservare tracce a occhio nudo



Alcune immagini



X-rays, Wilson 1912



Alphas, Philipp 1926

Scoperta del positrone

- Carl D. Anderson (1932)
 - Premio Nobel 1936

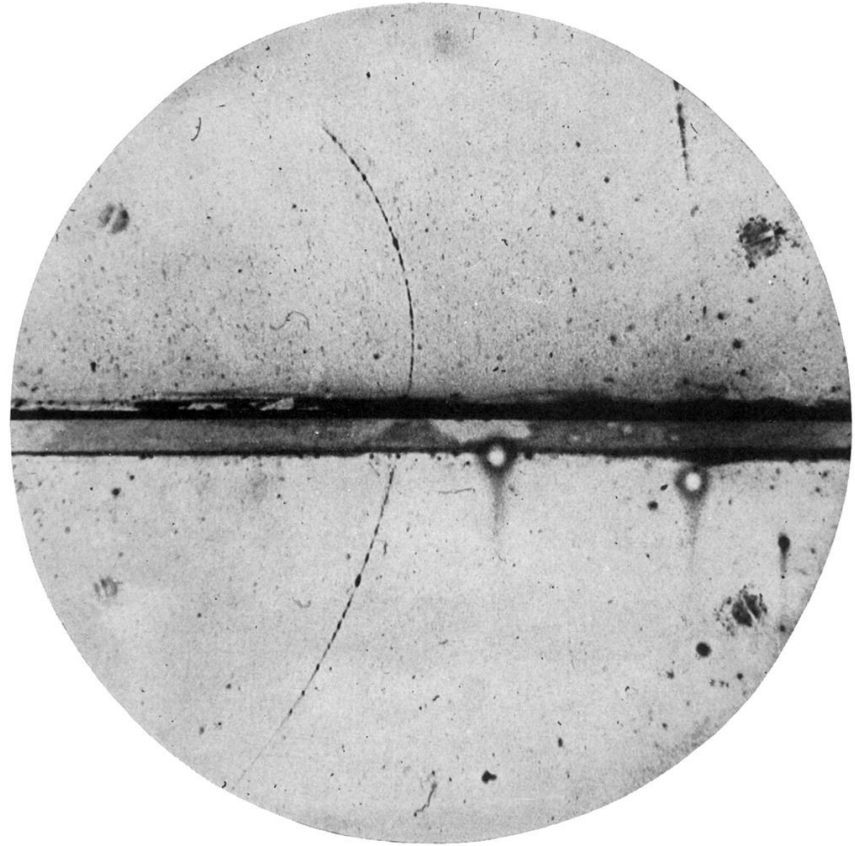
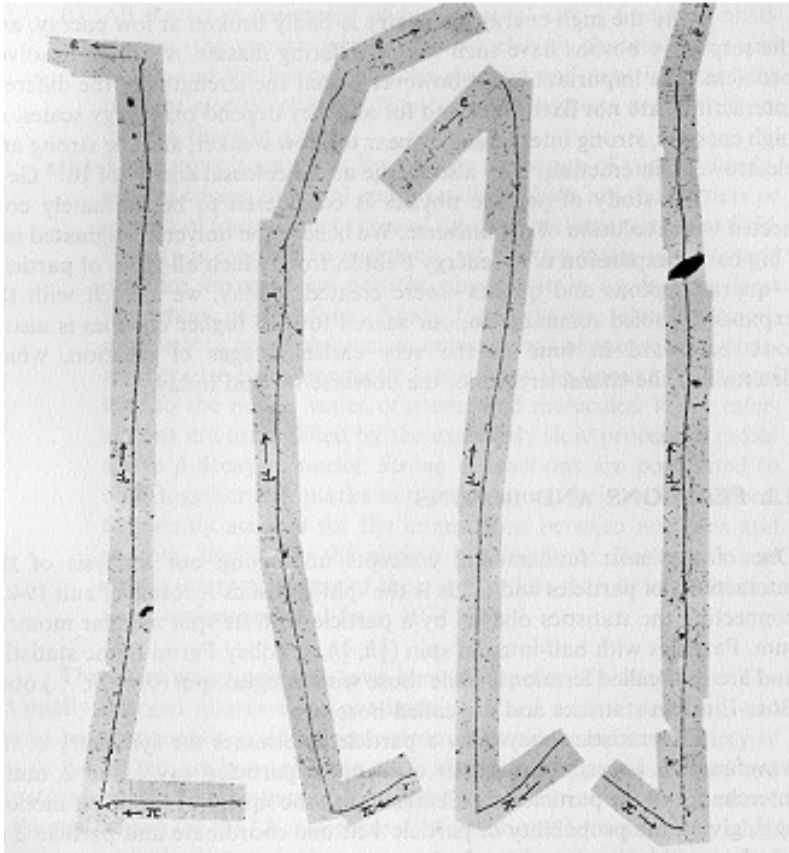


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho = 2.1 \times 10^5$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

La particella ha carica positiva: entra nella camera a nebbia dal basso e perde energia nei 6 mm di piombo come si vede dalla minore curvatura ($B=1.5$ T)
Il cammino, molto più lungo di quello atteso per un protone, è simile a quello di un elettrone

Emulsioni nucleari

- La tecnica delle emulsioni nucleari permise di «fotografare» singole particelle



- Il muone venne scoperto nel 1936 ma venne inizialmente confuso con il mesone di Yukawa mediatore delle interazioni forti
 - Il lungo «range» del muone era in contraddizione con questa ipotesi iniziale
- Powell osservò il decadimento di un pione in un muone e una particella invisibile (1947)

Camera a bolle

- Costruita negli anni '50 da D. Glaser basandosi sull'analogia con la camera a nebbia (poi ulteriormente sviluppata da L. Alvarez)
 - Anziché un vapore soprasaturo, venne utilizzato un liquido surriscaldato oltre il punto di ebollizione

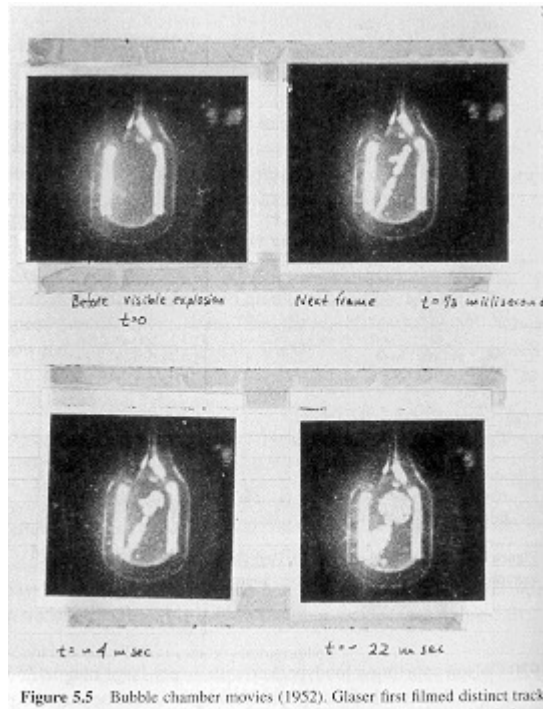
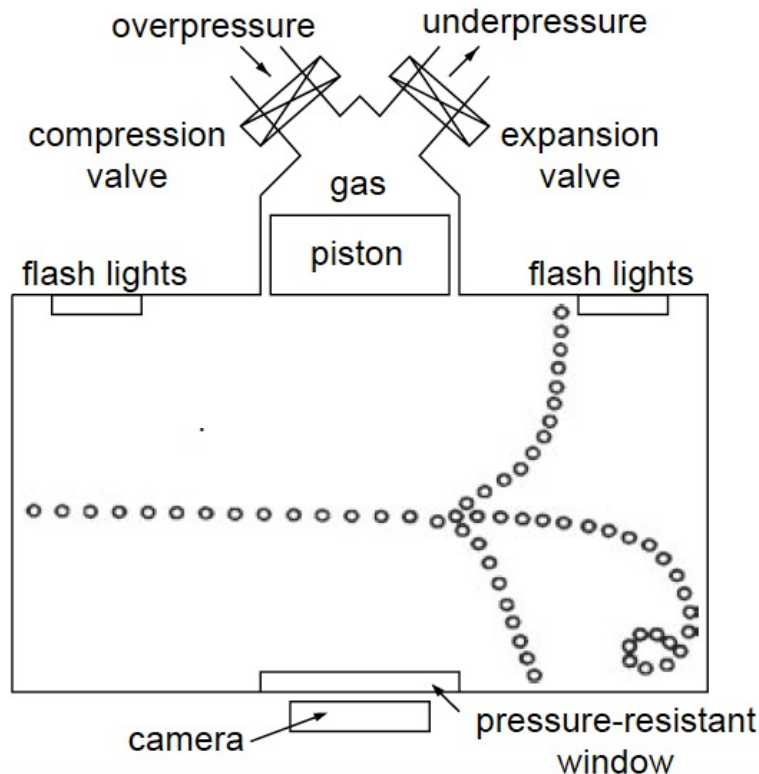


Figure 5.5 Bubble chamber movies (1952). Glaser first filmed distinct tracks

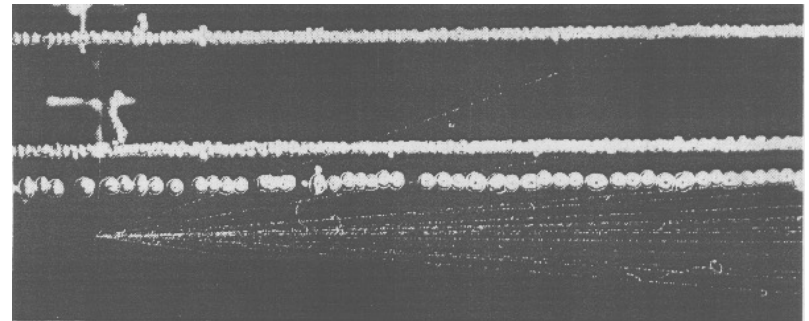
- Le dimensioni della camera aumentarono rapidamente
 - 1954 (6-10 cm)
 - 1956 (25 cm)
 - 1959 (180 cm)
 - 1963 (200 cm)
 - 1973 (370 cm)

Camera a bolle

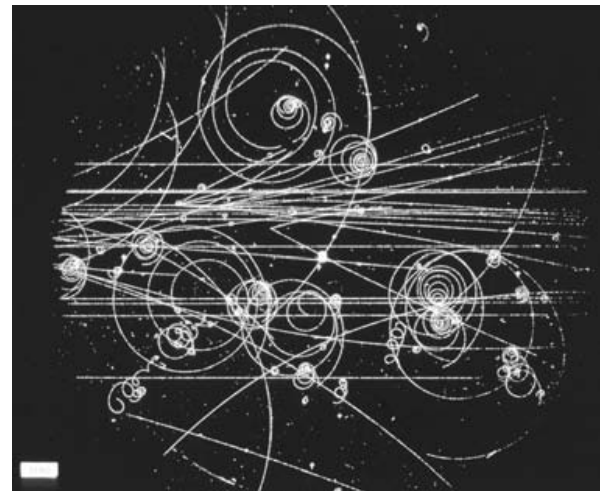
- Una particella deposita energia causando l'ebollizione del liquido creando una «scia» di bolle
 - Utilizzando campi magnetici era possibile misurare la quantità di moto



'vecchie bolle'

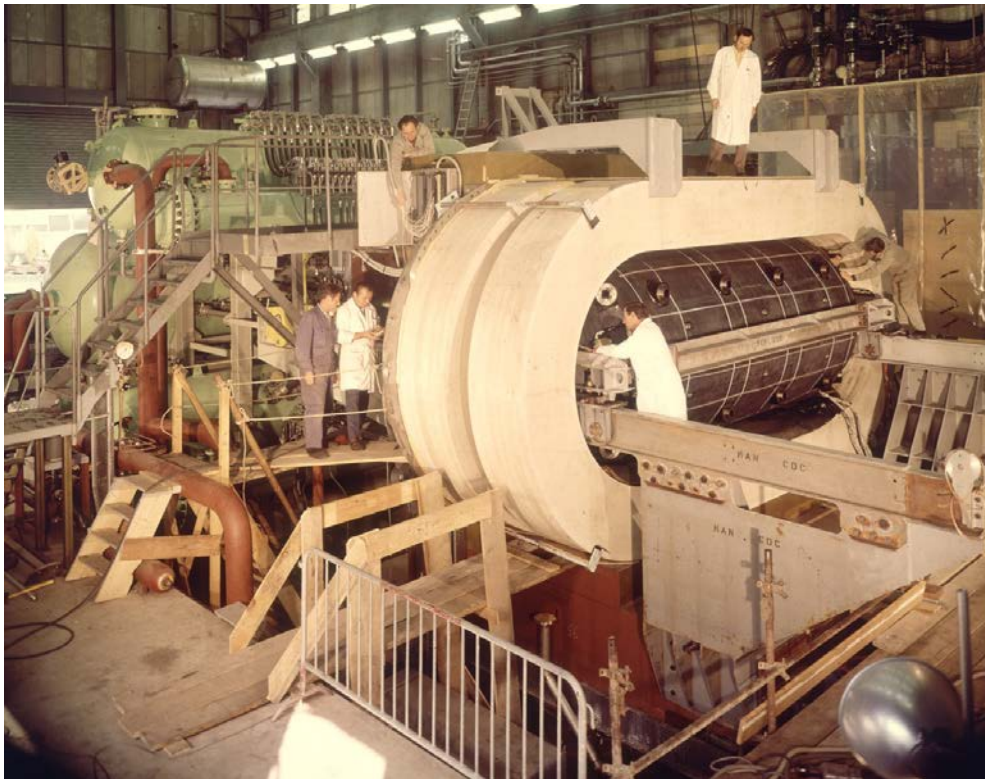


'nuove bolle'

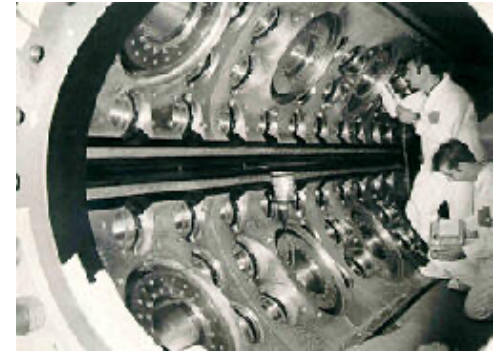


Camera a bolle

- Questo strumento permise la scoperta di nuove particelle e delle «correnti deboli neutre» (interazioni del neutrino tramite scambio di Z^0)
 - Gargamelle 1973, 2 m × 4 m, magneti da 2T



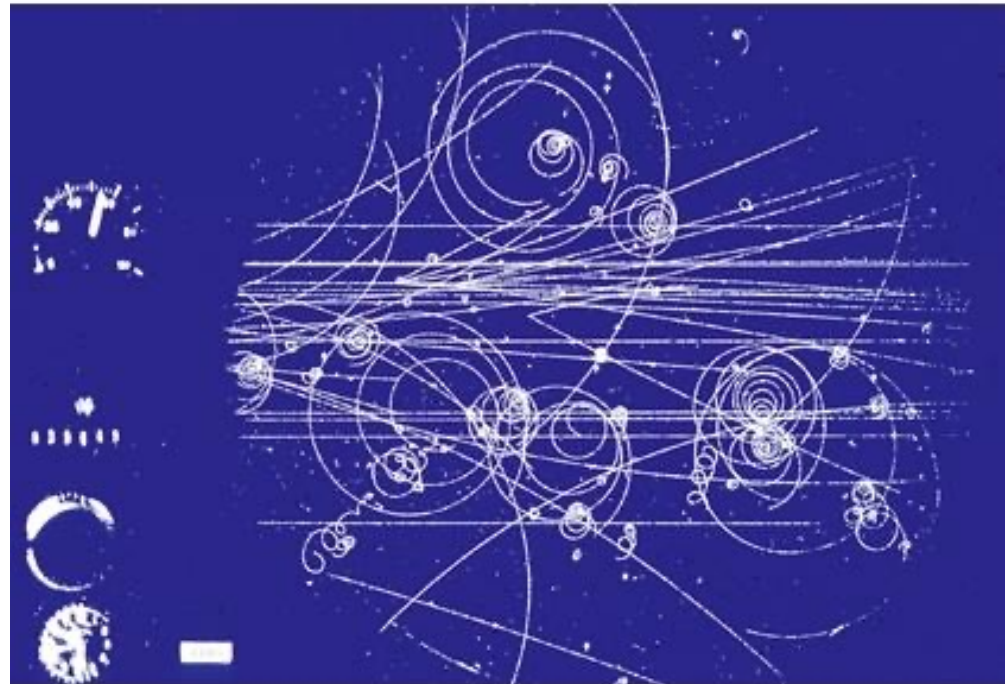
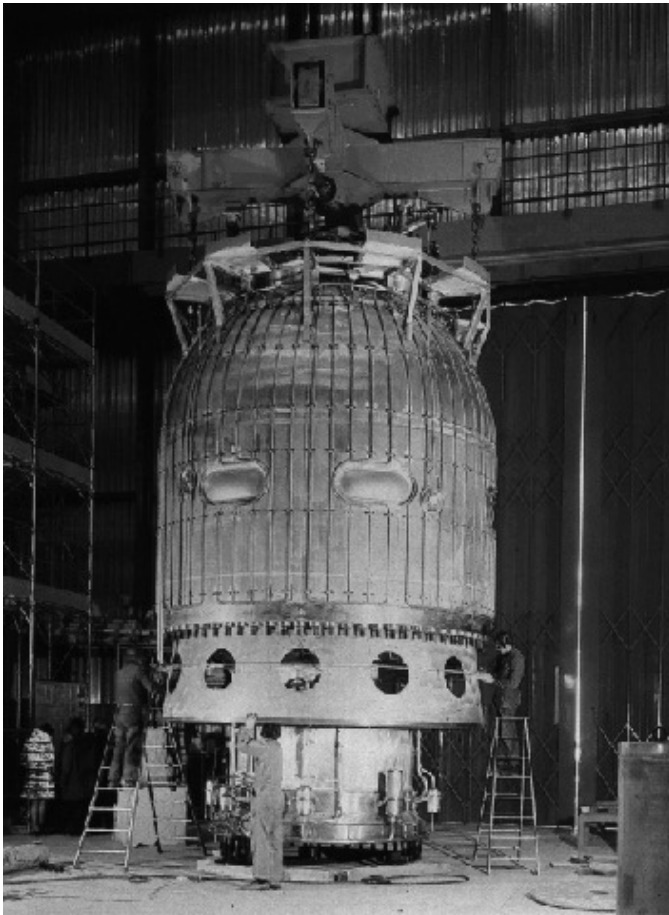
negli anni '70



oggi (CERN Microcosm)

Camera a bolle

- BEBC (Big European Bubble Chamber) ha acquisito circa 6 milioni di immagini tra il 1973 e il 1984
 - 3.7 metri



Camera a bolle

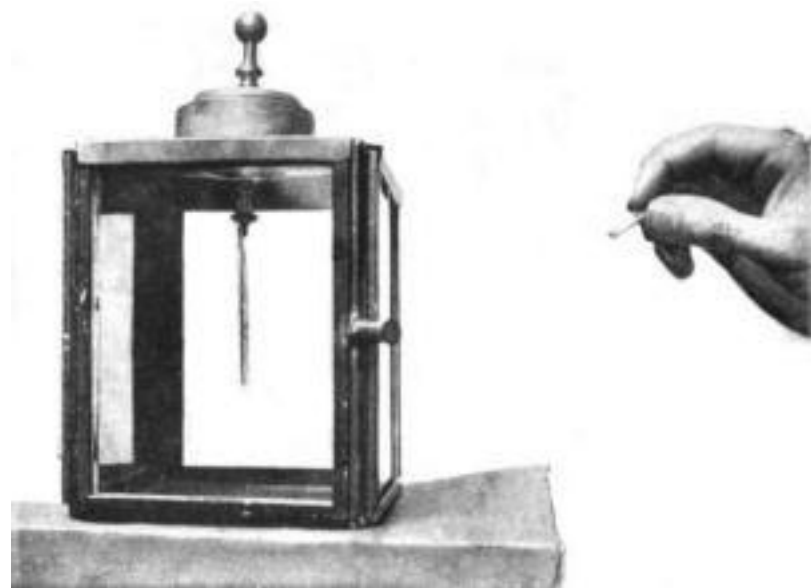
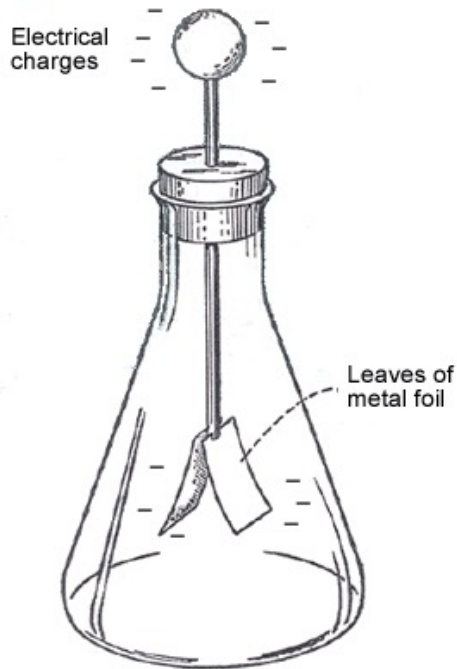
- L'eccellente risoluzione spaziale (5-10 micron) e il fatto che il bersaglio e il volume di rivelazione coincidessero ha reso questo strumento praticamente insuperabile per lo studio degli eventi «complessi»
- Tuttavia...
 - Il numero massimo di eventi registrabili era qualche decina al secondo
 - Gli eventi non potevano essere selezionati a priori e tutte le interazioni erano fotografate
 - Le immagini dovevano essere analizzate singolarmente da operatori
- Questo ha portato all'abbandono di questa tecnologia in favore dei rivelatori «elettronici» a partire dagli anni '70



Rivelatori “logici”

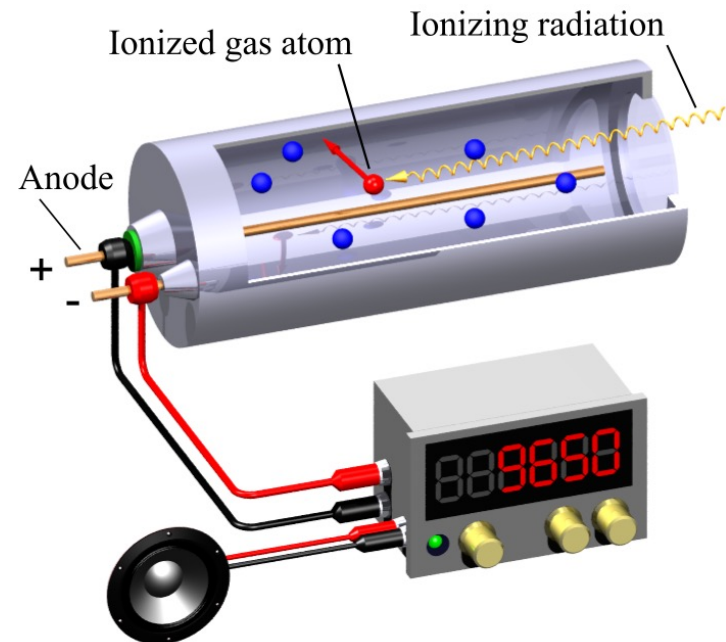
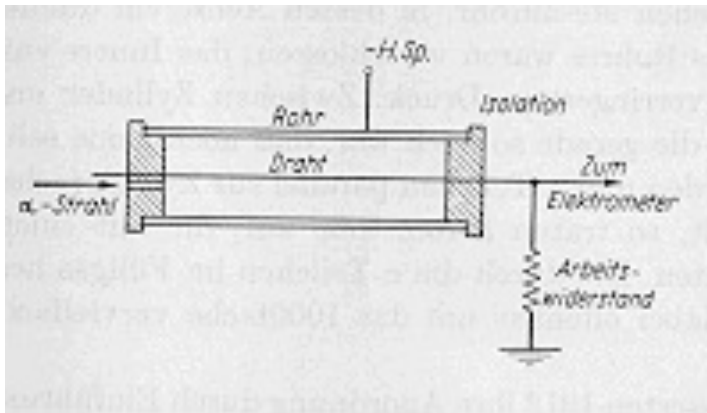
Elettroscopio

- La misura della velocità di scarica di un elettroscopio era utilizzata per quantificare la quantità di “radiazione”
 - Scoperta dei raggi cosmici 1911-1912 (Pacini, Hess)



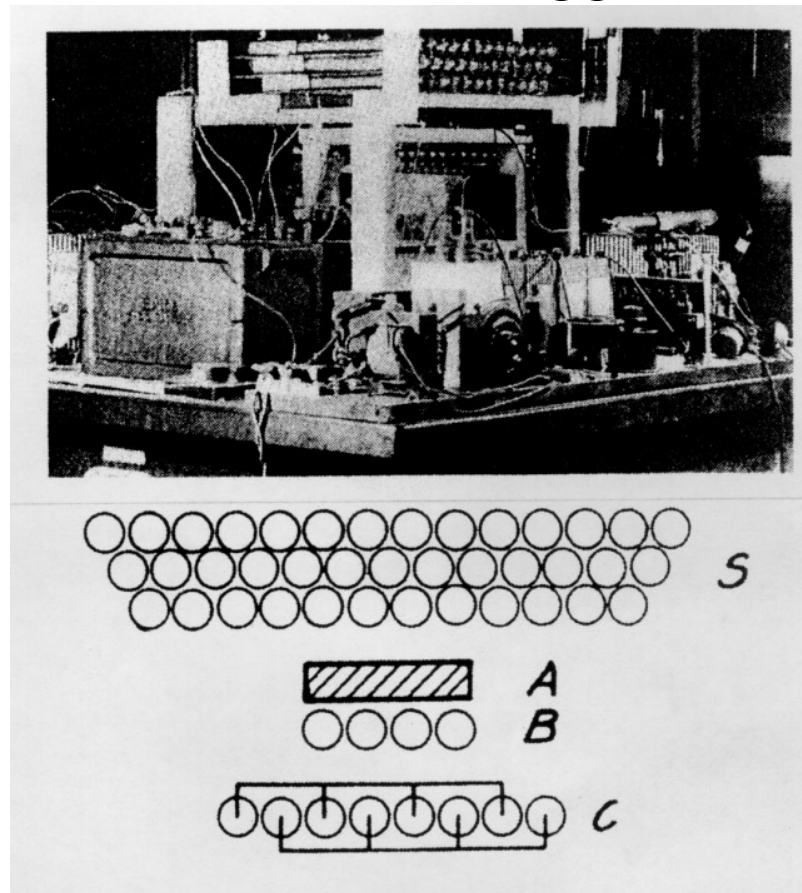
Contatore Geiger

- Nel 1908 Geiger e Rutherford svilupparono un dispositivo per misurare particelle alfa
 - ❑ Ionizzazione, deriva degli elettroni, moltiplicazione in intenso campo elettrico e scarica (misurata con elettroscopio)
 - ❑ Le scariche osservate in assenza di alfa vennero interpretate come instabilità del dispositivo
 - ❑ Nel 1928 Müller realizzò che le scariche erano dovute ai raggi cosmici



Lettura in coincidenza

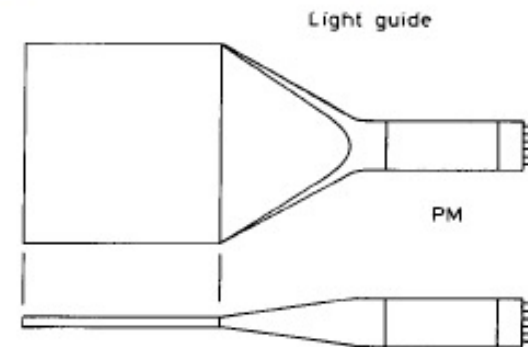
- W. Bothe sviluppò inizialmente la tecnica dei contatori in coincidenza, poi perfezionata da B. Rossi
 - Studio delle distribuzioni di raggi cosmici



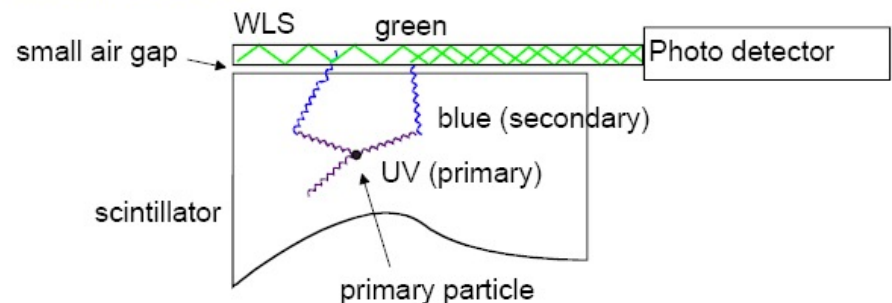
«Telescopio» per raggi cosmici

Scintillatori

- Un materiale (solido, liquido o gassoso) che, eccitato dal passaggio di una radiazione, si diseccita emettendo fotoni (visibili o UV)
 - La luce prodotta viene «guidata» verso rivelatori di fotoni

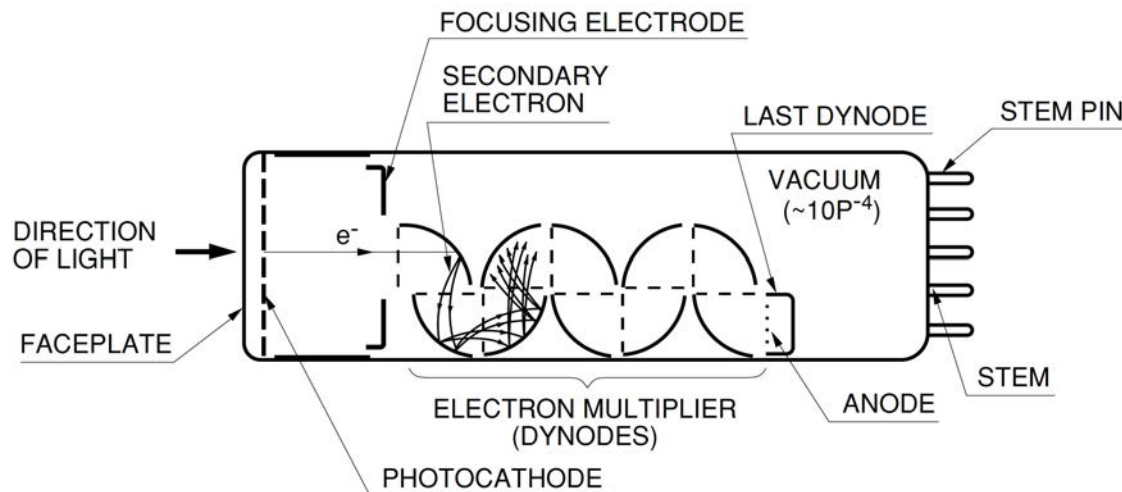


“fish tail”



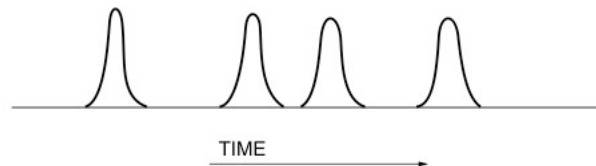
Tubo fotomoltiplicatore

- E' in grado di convertire un fotone incidente in un elettrone, e di moltiplicare l'elettrone grazie a dinodi in cascata
 - Segnale in uscita di $\sim 10^6$ elettroni facilmente misurabile



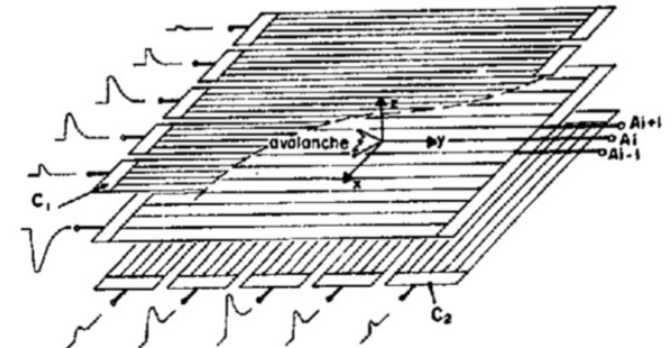
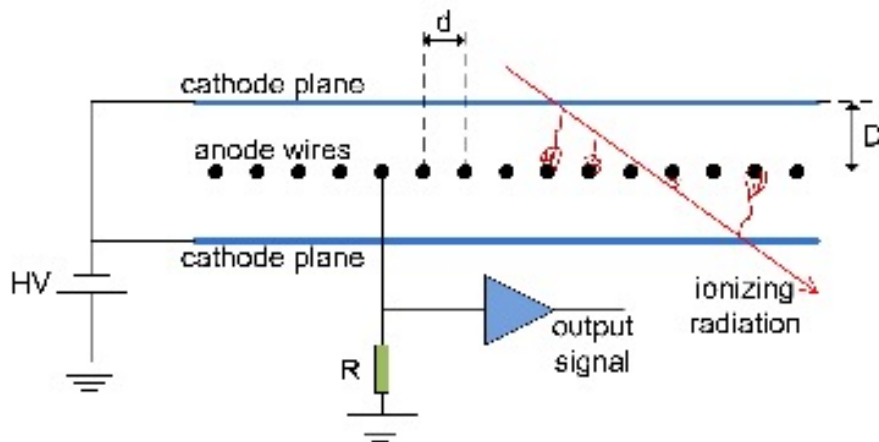
- E' possibile contare il numero di fotoni incidenti

Discrete Output Pulses (Single Photon Event)



Camere proporzionali a multifili

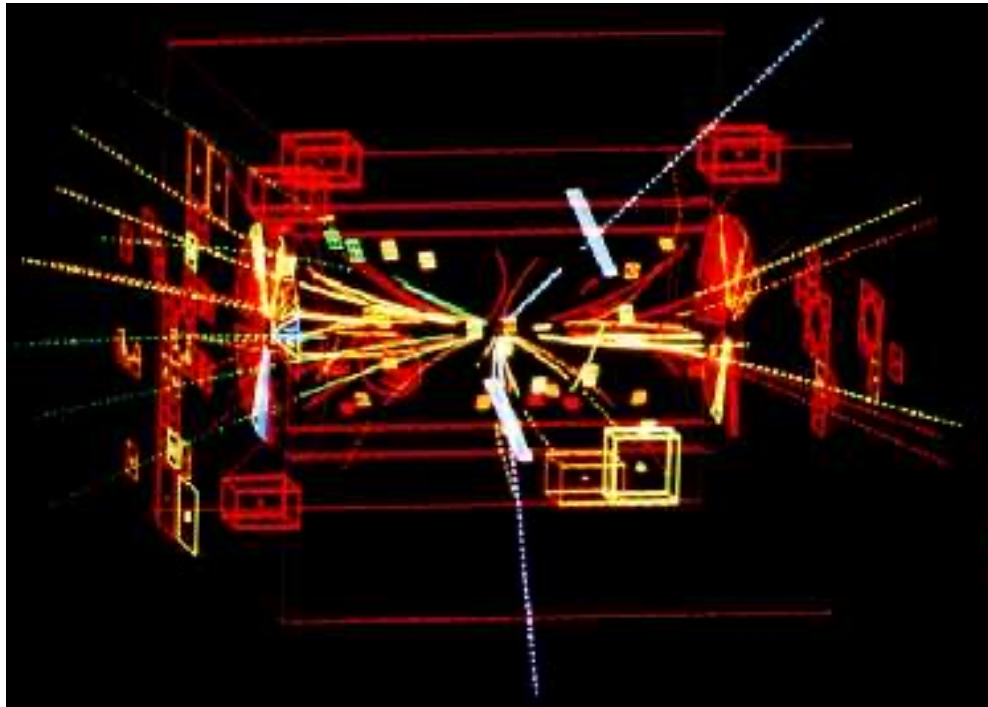
- Rivelatori a gas basati su fili letti individualmente e funzionanti in regime proporzionale
 - Elettroni dalla ionizzazione «derivano» verso i fili e vengono moltiplicati dall'intenso campo elettrico
 - Un segnale elettrico viene indotto sul filo e letto da un amplificatore
 - Distanze tra i fili di 2-5 mm, 10 mm tra i catodi



Rivelatori per “immagini”

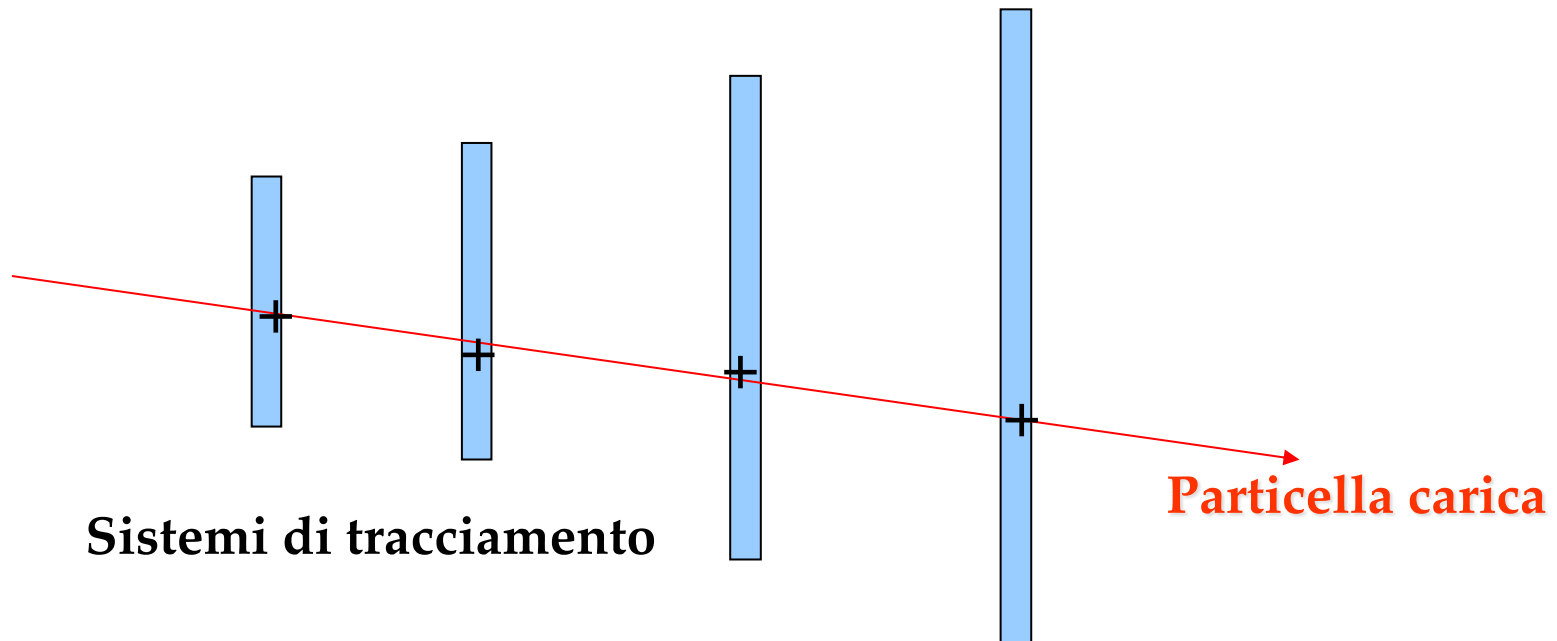
Immagini elettroniche

- Nel corso degli anni '70 i rivelatori per «immagini» e quelli «logici» si sono unificati in «immagini elettroniche»
- Esempio: esperimento UA1 1983 (scoperta dei bosoni W/Z, Carlo Rubbia)
 - Ricostruzione al computer delle tracce corrispondenti al decadimento $Z^0 \rightarrow e^+e^-$



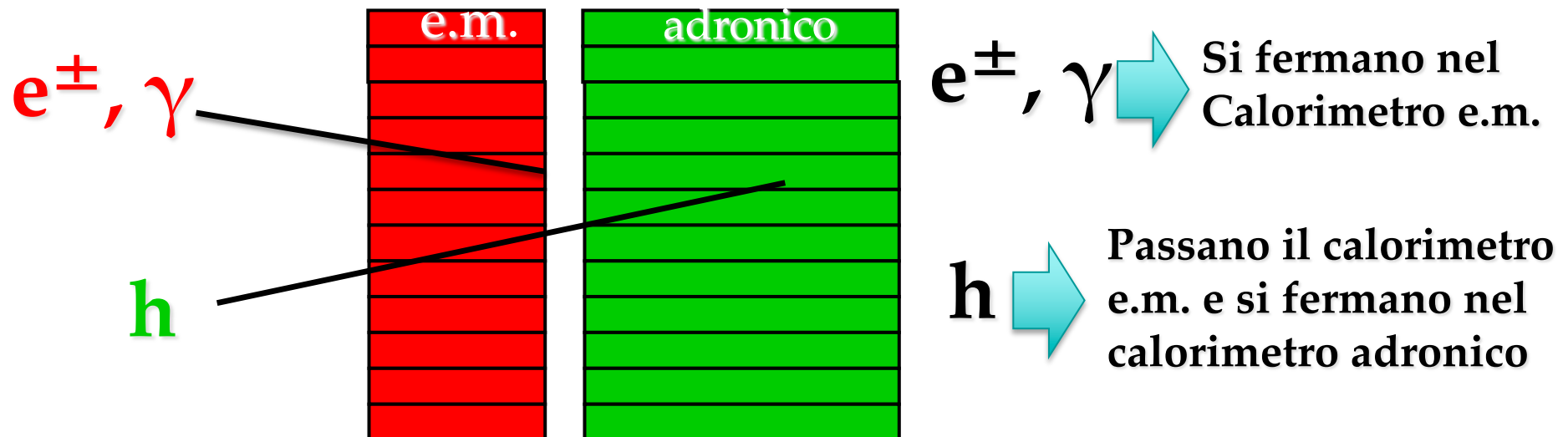
Rivelatori: tracciatori

- Misurano la direzione delle particelle cariche senza deviarle apprezzabilmente
 - Uso di campo magnetico per misura di quantità di moto
- Uso di materiali poco densi (gas) o di strati molto sottili (silicio, materiale plastico)
- Più strati per misurare la direzione della “traccia”



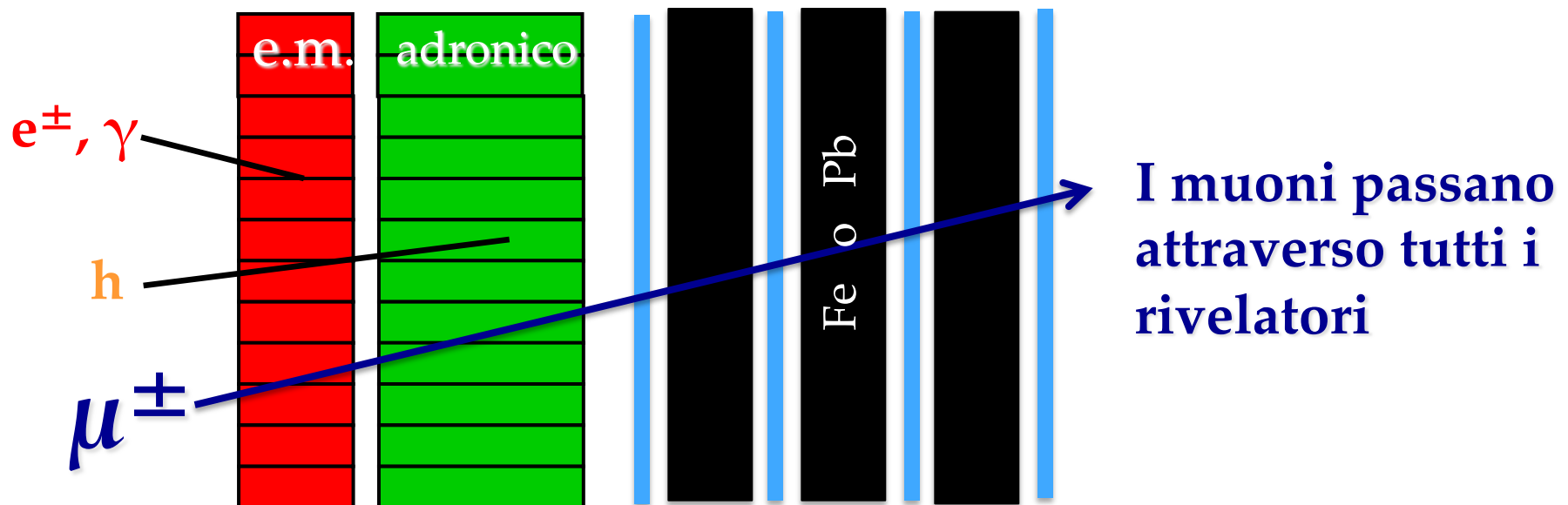
Rivelatori: calorimetri

- Misurano l'energia delle particelle fermandole (cioè assorbendo tutta la loro energia) → sono costituiti da materiali molto densi (ad esempio Pb, Fe, etc..)
- Possono essere:
 - Elettromagnetici: ottimizzati per misurare l'energia di elettroni e fotoni
 - Adronici: per misurare l'energia degli adroni (sono posti esternamente a quelli e.m.)



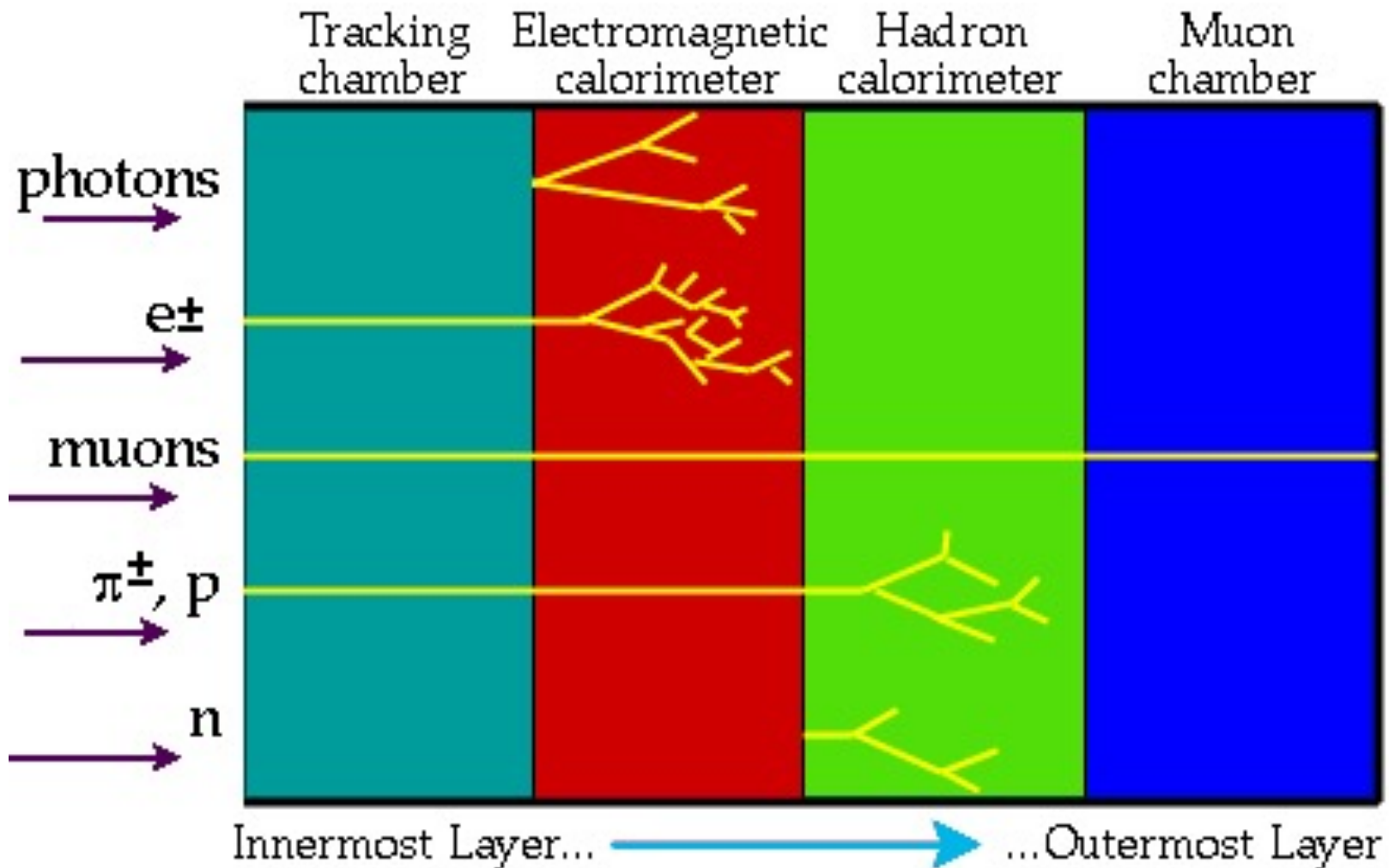
Rivelatori di muoni

- Identificano il passaggio dei muoni filtrando tutte le altre particelle
- Tipicamente sono costituiti da strati alternati di materiale molto denso (Fe, Pb) e materiale rivelatore
- Sono i rivelatori più esterni, posti “dopo” i calorimetri che fermano quasi tutte le altre particelle



In sintesi

- Il comportamento delle particelle in diversi tipi di rivelatore



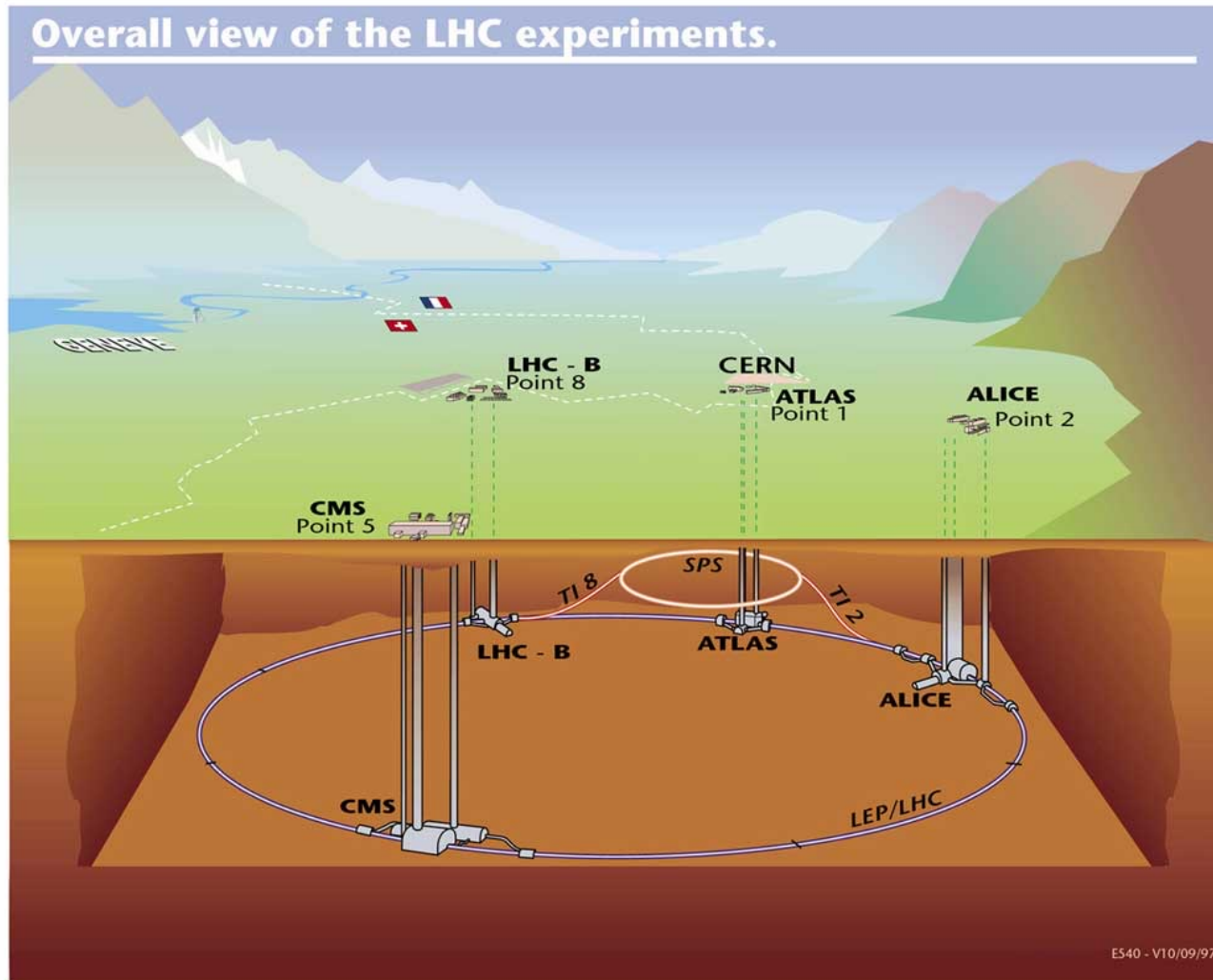
Il Large Hadron Collider

- Il Large Hadron Collider (LHC) è il più grande e potente acceleratore di particelle realizzato finora
- 27 km di circonferenza
- Più di mille magneti superconduttivi tenuti alla temperatura di -271.3°C
- Energia massima 8 TeV per ciascun fascio
- Operativo da Settembre 2008
- Collisore protone-protone al CERN di Ginevra
 - La collisione avviene tra i quarks (e i gluoni) di cui è costituito il protone



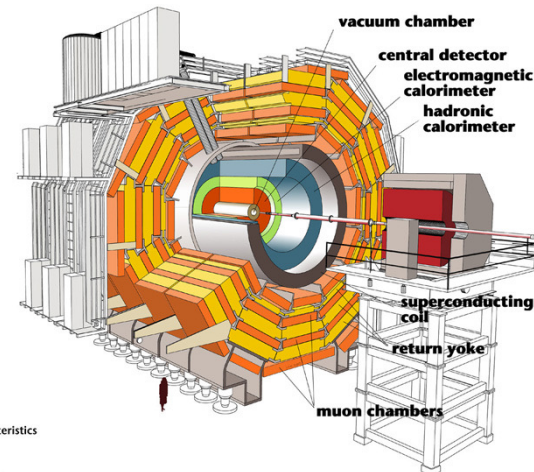
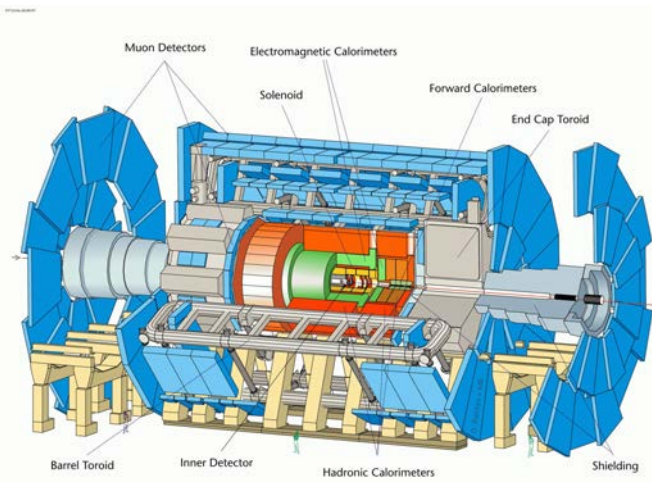
Gli esperimenti ad LHC

- 4 esperimenti principali: ATLAS, CMS, LHCb e ALICE



ATLAS e CMS

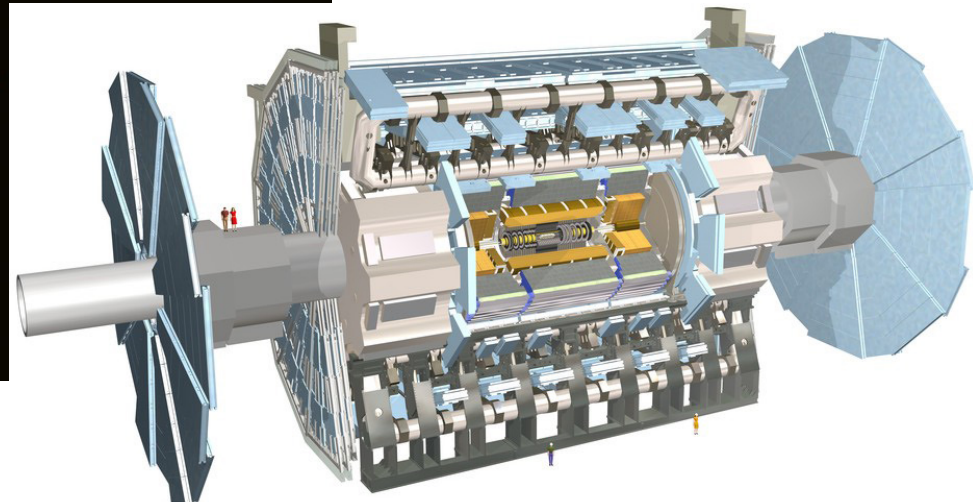
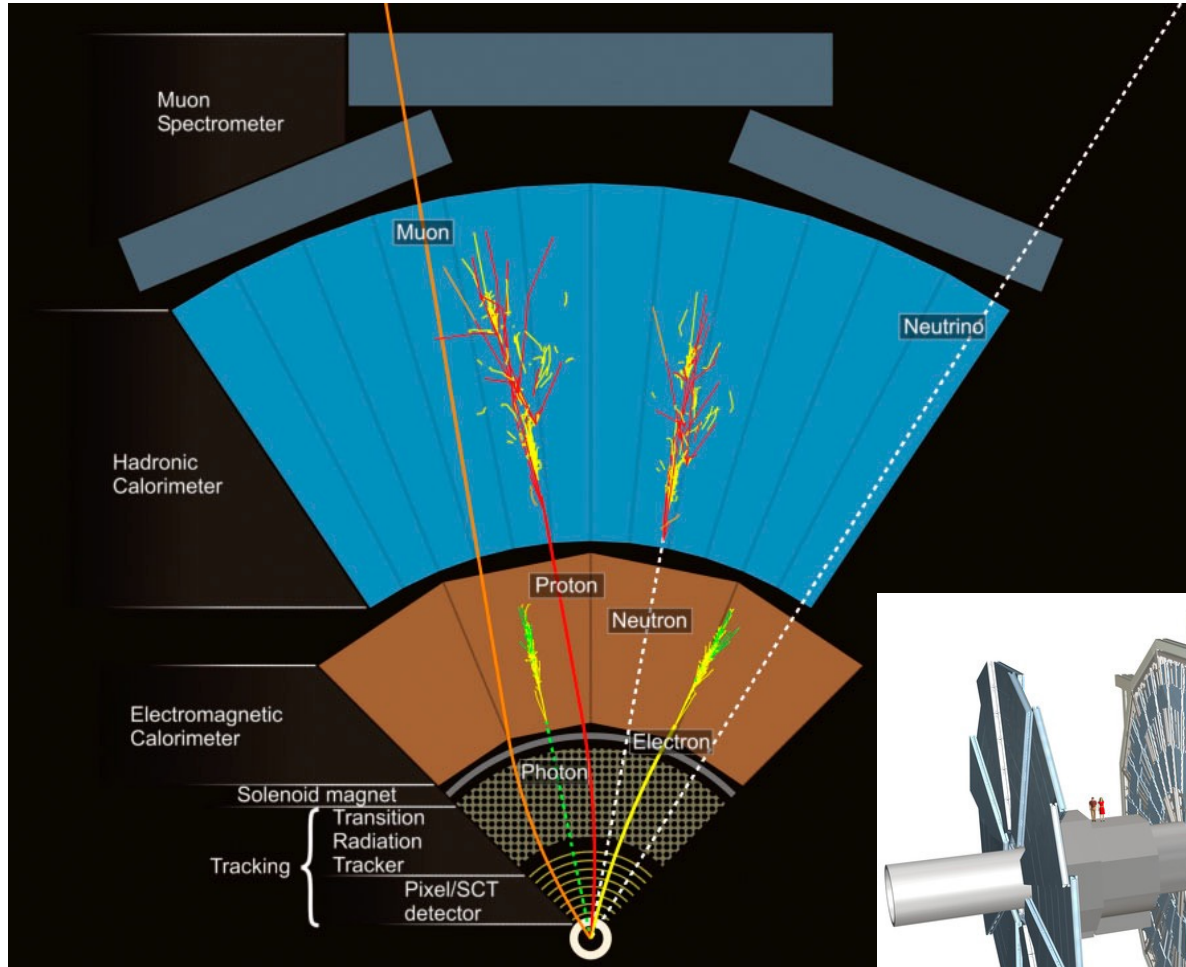
- ATLAS e CMS: rivelatori “multi-purpose”, cioè non focalizzati su un singolo processo di fisica
- Il compito fondamentale di questi due esperimenti è la ricerca del bosone di Higgs e lo studio delle sue proprietà
- Altri obiettivi: verifiche sulle previsioni del Modello Standard in questa finestra di energie
- Inoltre: trovare Nuova Fisica non prevista dal Modello Standard, come l'esistenza di particelle supersimmetriche



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

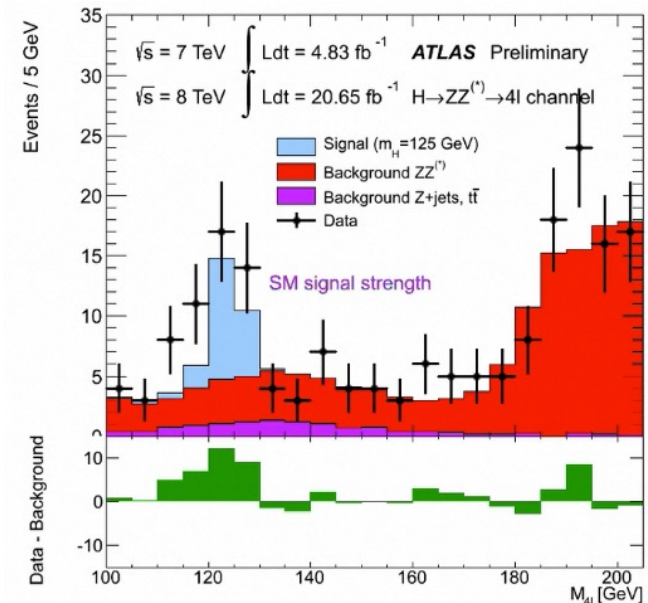
Esperimento ATLAS a LHC

- Più di 100 milioni di canali elettronici...



Scoperta del bosone di Higgs

- Annuncio della scoperta del bosone di Higgs è stato dato il 4 Luglio 2012 dalle collaborazioni ATLAS e CMS
- Nell'anno successivo sono state misurate varie altre proprietà che hanno confermato la scoperta
- E' una particella con massa di circa 125 GeV
- E' inoltre molto instabile e decade quasi istantaneamente
- Nobel per la Fisica 2013 a Peter Higgs e Francois Englert per la "scoperta teorica del meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell'origine delle masse delle particelle subatomiche"



Il contributo Italiano

INFN e UNIFE

- L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è un ente pubblico di ricerca dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia
- Fondato nel 1951 per portare avanti la tradizione di ricerca iniziata da Enrico Fermi a Roma negli anni '30
- La Sezione INFN di Ferrara fu creata grazie alla determinazione del Prof. Pietro Dalpiaz nel 1987
 - Completa sinergia con il Dipartimento di Fisica di UNIFE



Università
degli Studi
di Ferrara

Infrastrutture dell'INFN

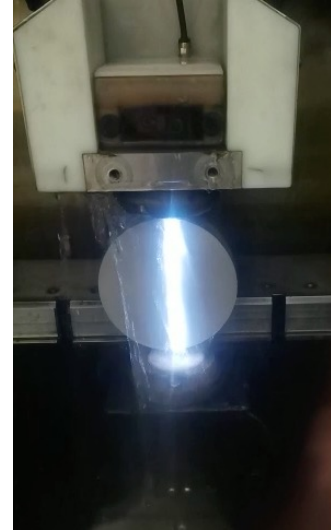
- 4 Laboratori Nazionali
- 20 Sezioni
- 6 Gruppi associati
- 3 Centri Nazionali e Scuole
- 1 Consorzio internazionale



Come si crea un rivelatore?

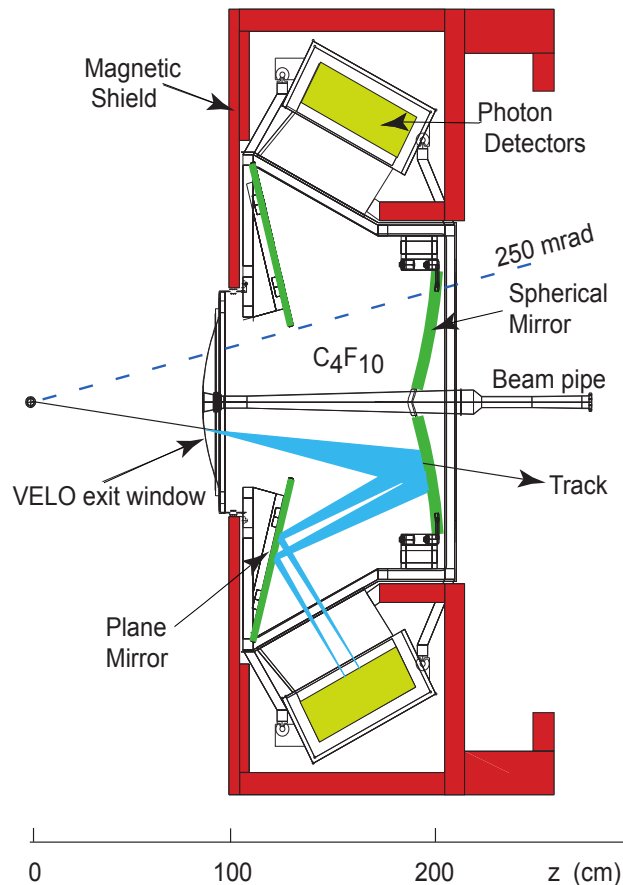
- Idea: principio di funzionamento
- Disegno e modellizzazione
- Costruzione di un prototipo
 - Sensore
 - Meccanica (e raffreddamento)
 - Elettronica
 - Acquisizione dati
- Test del prototipo in condizioni realistiche
 - Fasci di particelle, resistenza alle radiazioni
- Costruzione del sistema completo
 - Controllo di qualità
- Installazione, messa in opera, utilizzo nell'esperimento

Progettazione e realizzazione a Ferrara



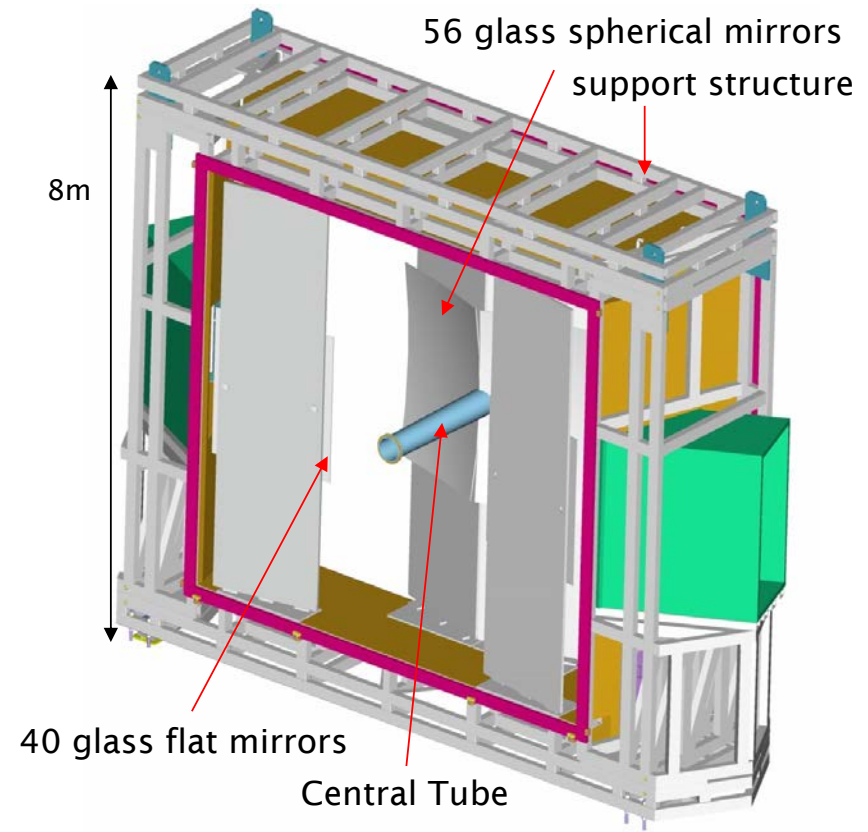
Upgrade del LHCb RICH detector

- Ring Imaging Cherenkov (RICH) detector
 - Necessario upgrade per lettura eventi a 40 MHz (era 1 MHz)



RICH1 (25-300 mrad)

4 m³ C₄F₁₀ $n = 1.0014$, up to 60 GeV

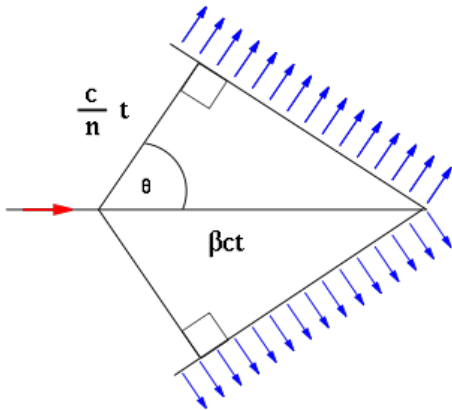


RICH2 (15-120 mrad)

100 m³ CF₄ $n = 1.0005$, up to ~100 GeV

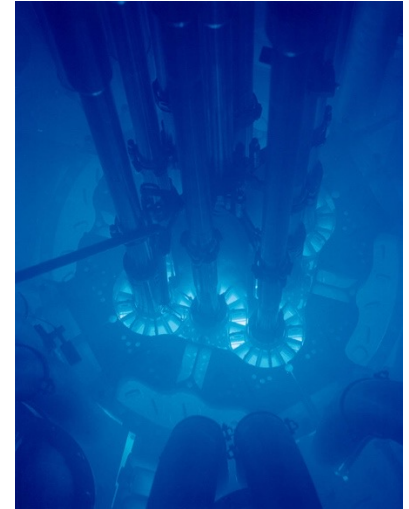
Effetto Cherenkov

- Emissione di radiazione elettromagnetica da una particella carica elettricamente che attraversa un mezzo dielettrico con velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo



$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

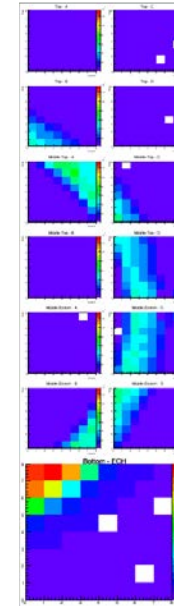
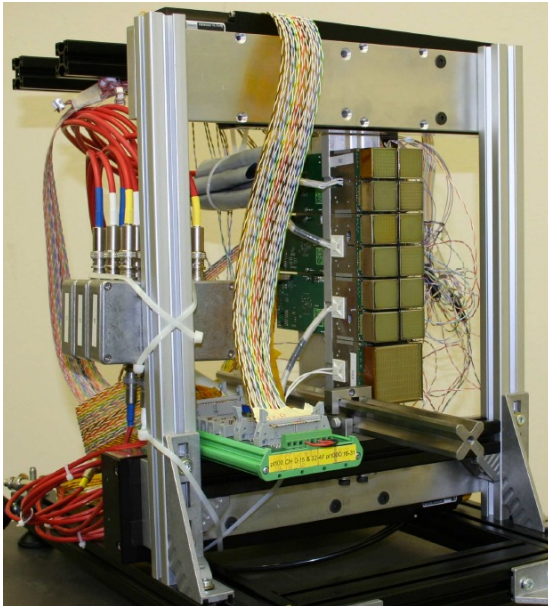
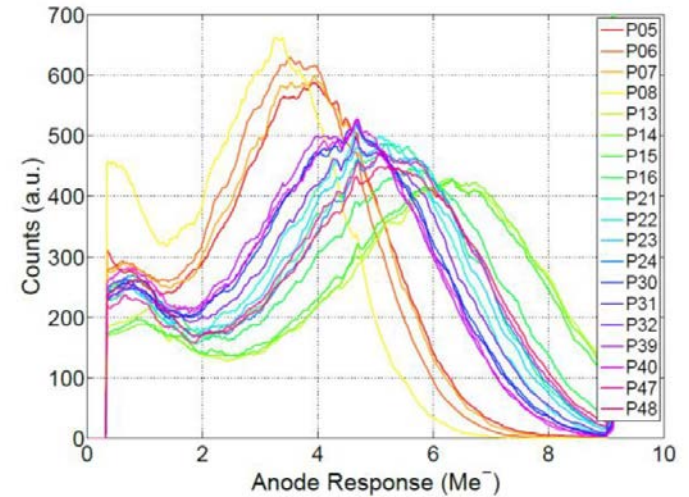
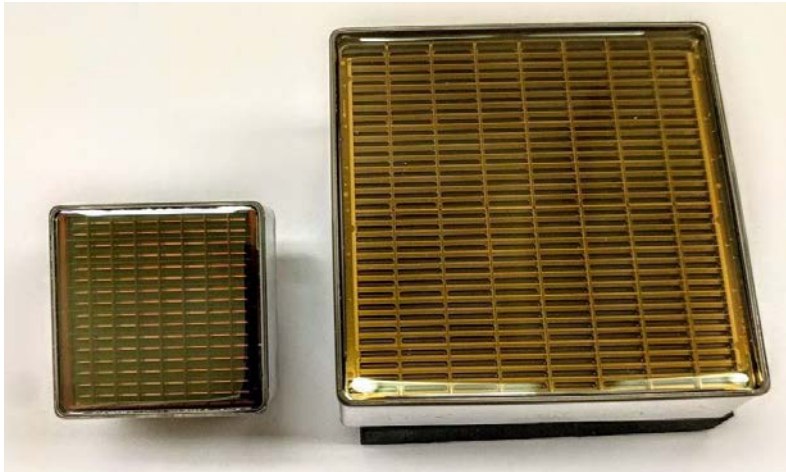
θ : angolo Cherenkov
 β : velocità della particella
 n : indice di rifrazione



- Spettro della luce con massima intensità nella regione dell'ultravioletto e nella parte viola-blu dello spettro visibile
 - Effetto ben osservabile nei reattori nucleari a immersione
- L'effetto Cherenkov è ampiamente utilizzato nel campo della fisica delle alte energie per l'identificazione delle particelle

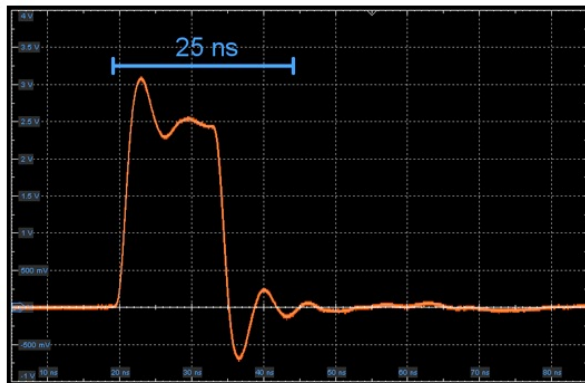
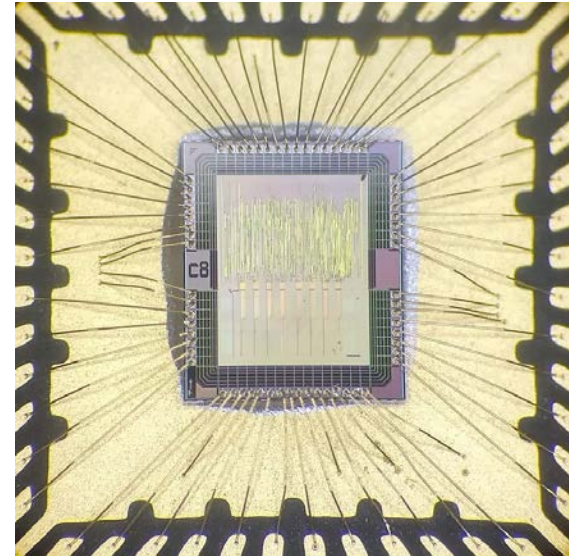
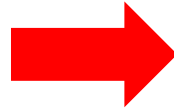
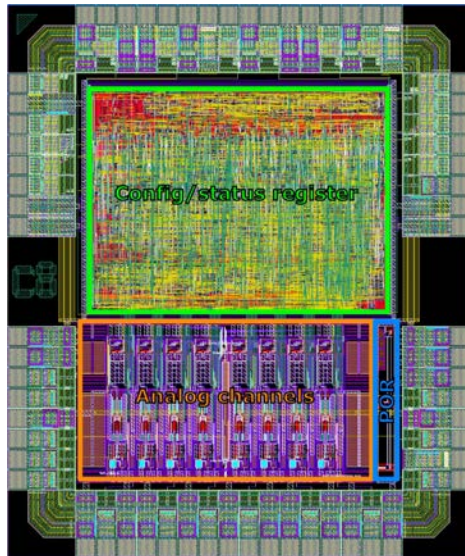
LHCb RICH upgrade

- Tubi fotomoltiplicatori sensibili alla posizione



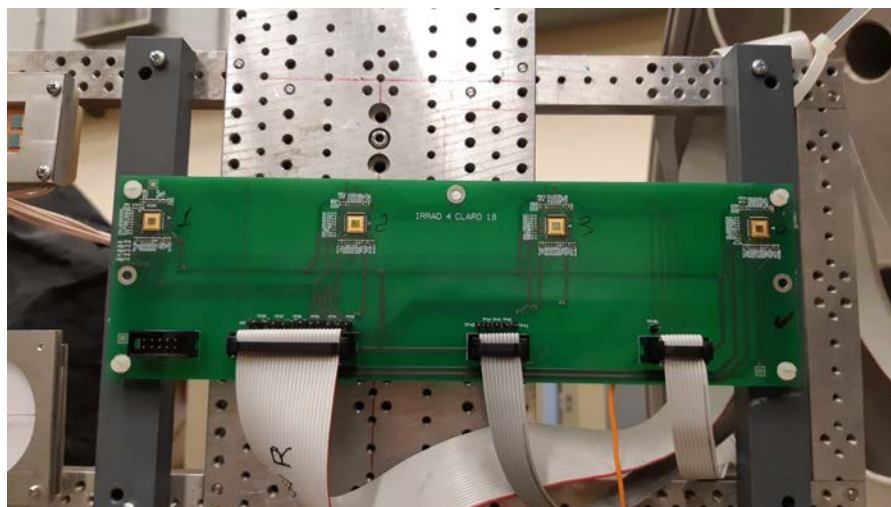
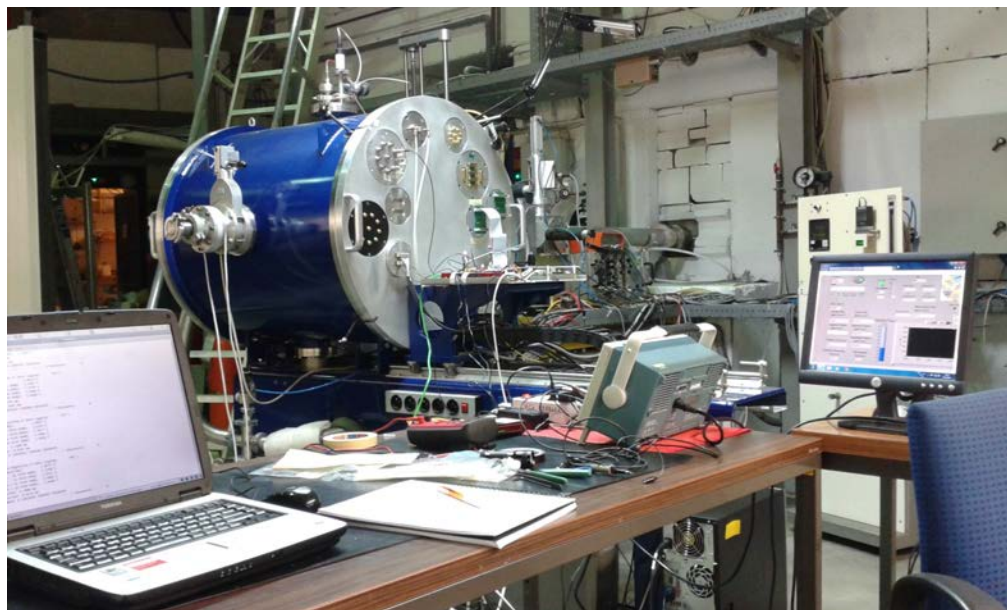
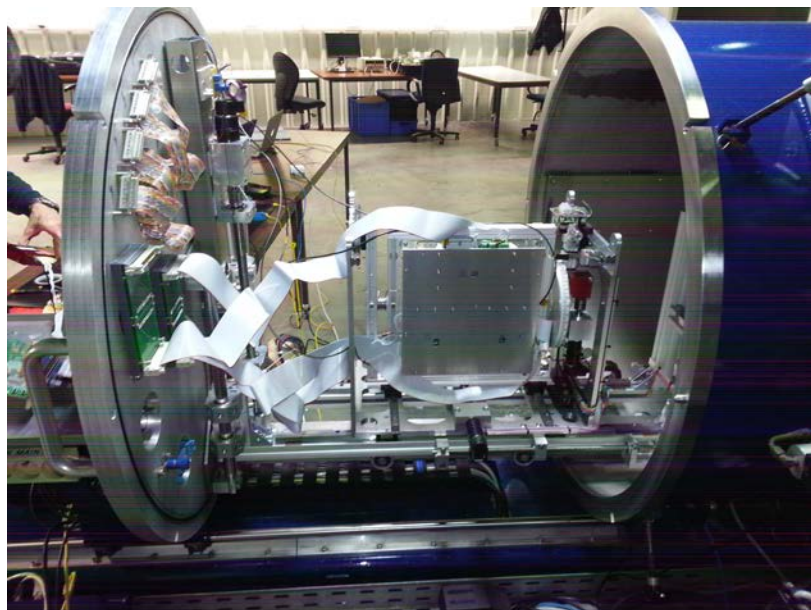
LHCb RICH upgrade

- Design e produzione circuito integrato



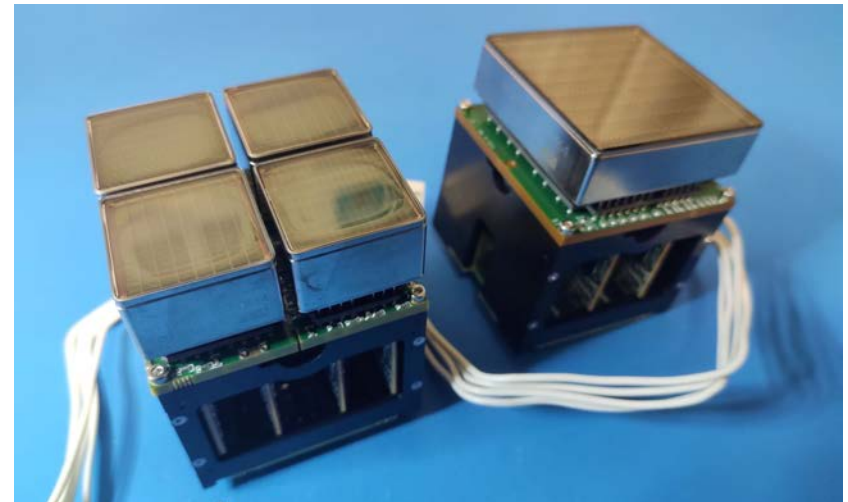
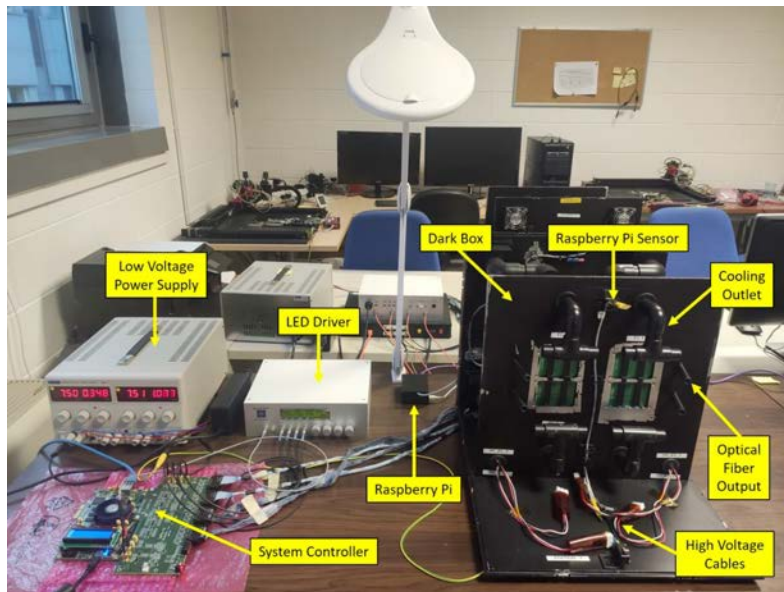
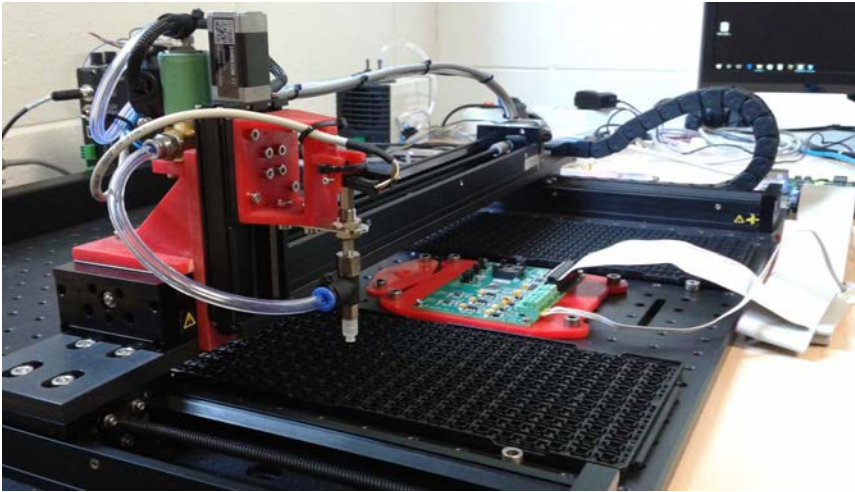
LHCb RICH upgrade

- Test di resistenza alle radiazioni



LHCb RICH upgrade

■ Produzione e controllo di qualità



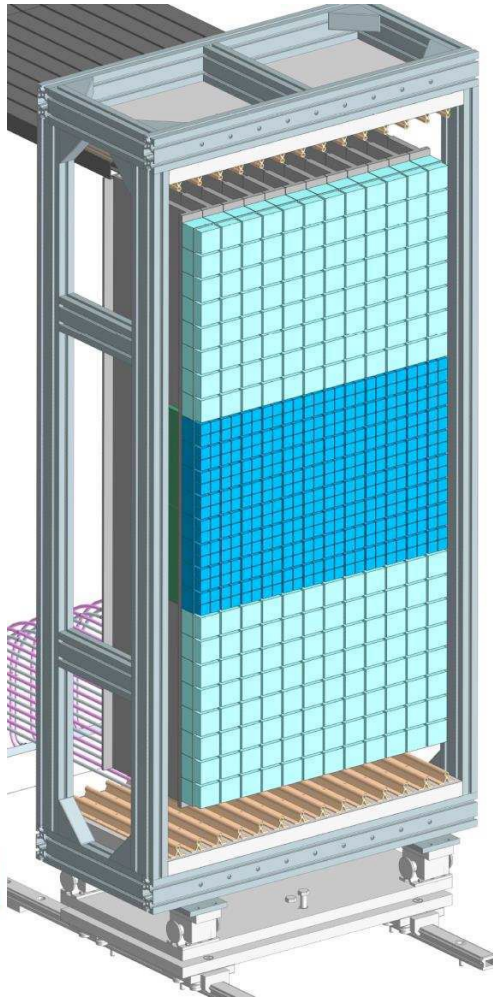
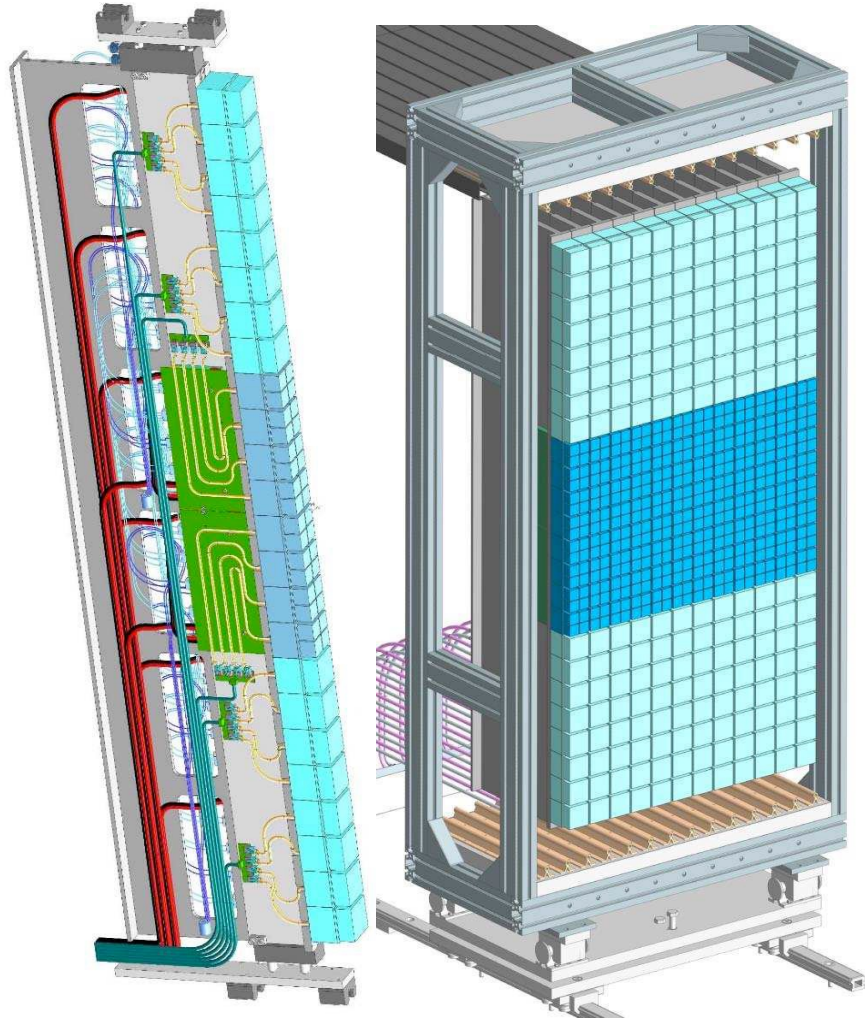
LHCb RICH upgrade

- Assemblaggio in superficie



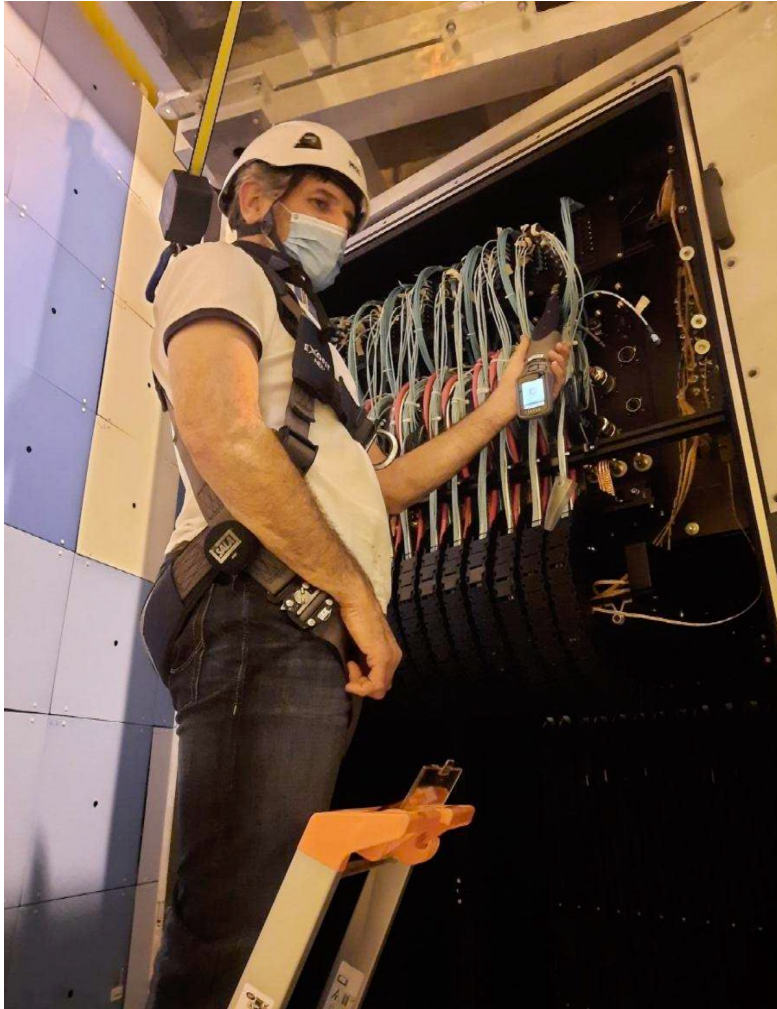
LHCb RICH upgrade

- Piani di rivelatori completi

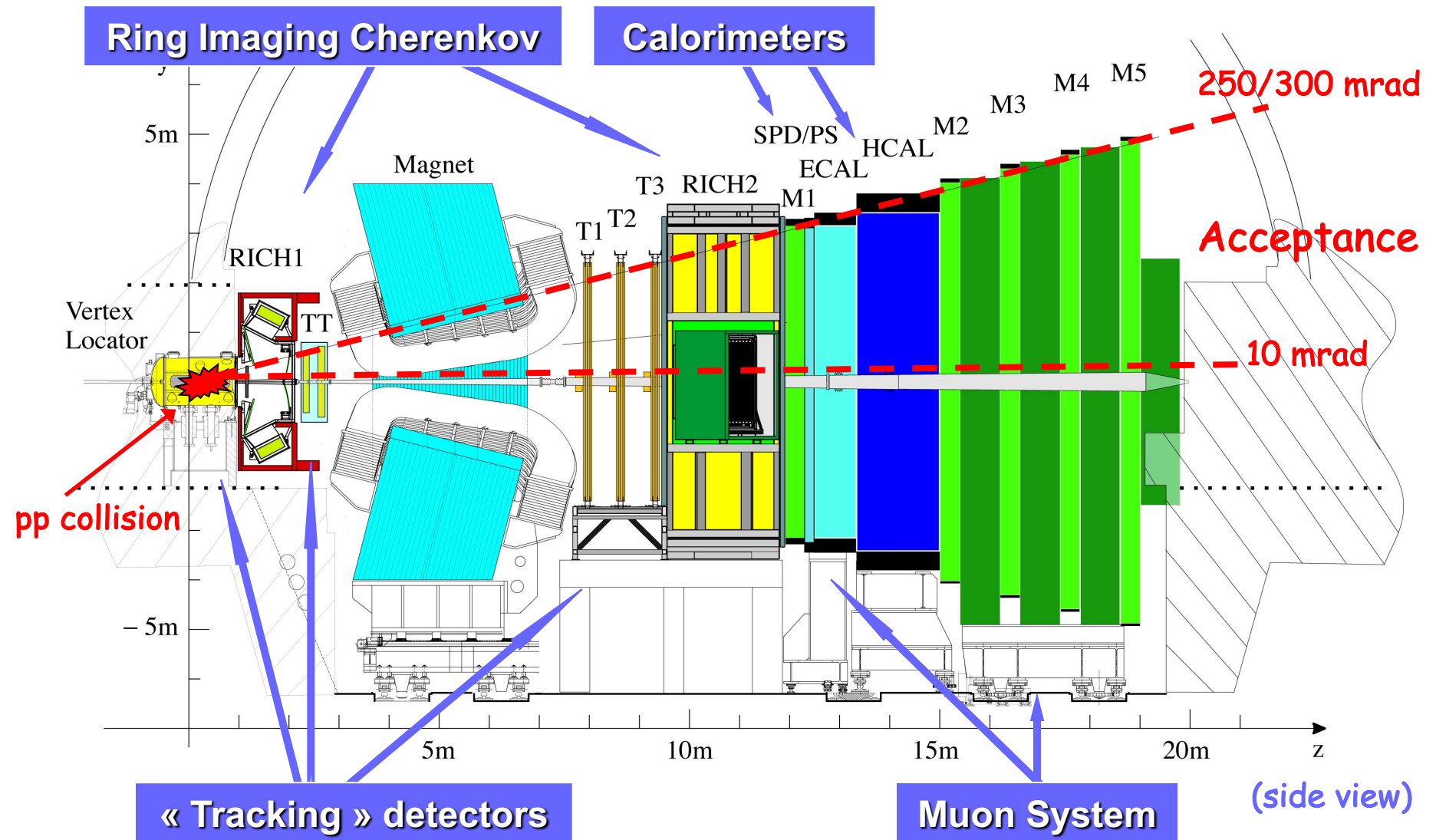


LHCb RICH upgrade

- Installazione sotterranea e cablaggi



Esperimento LHCb



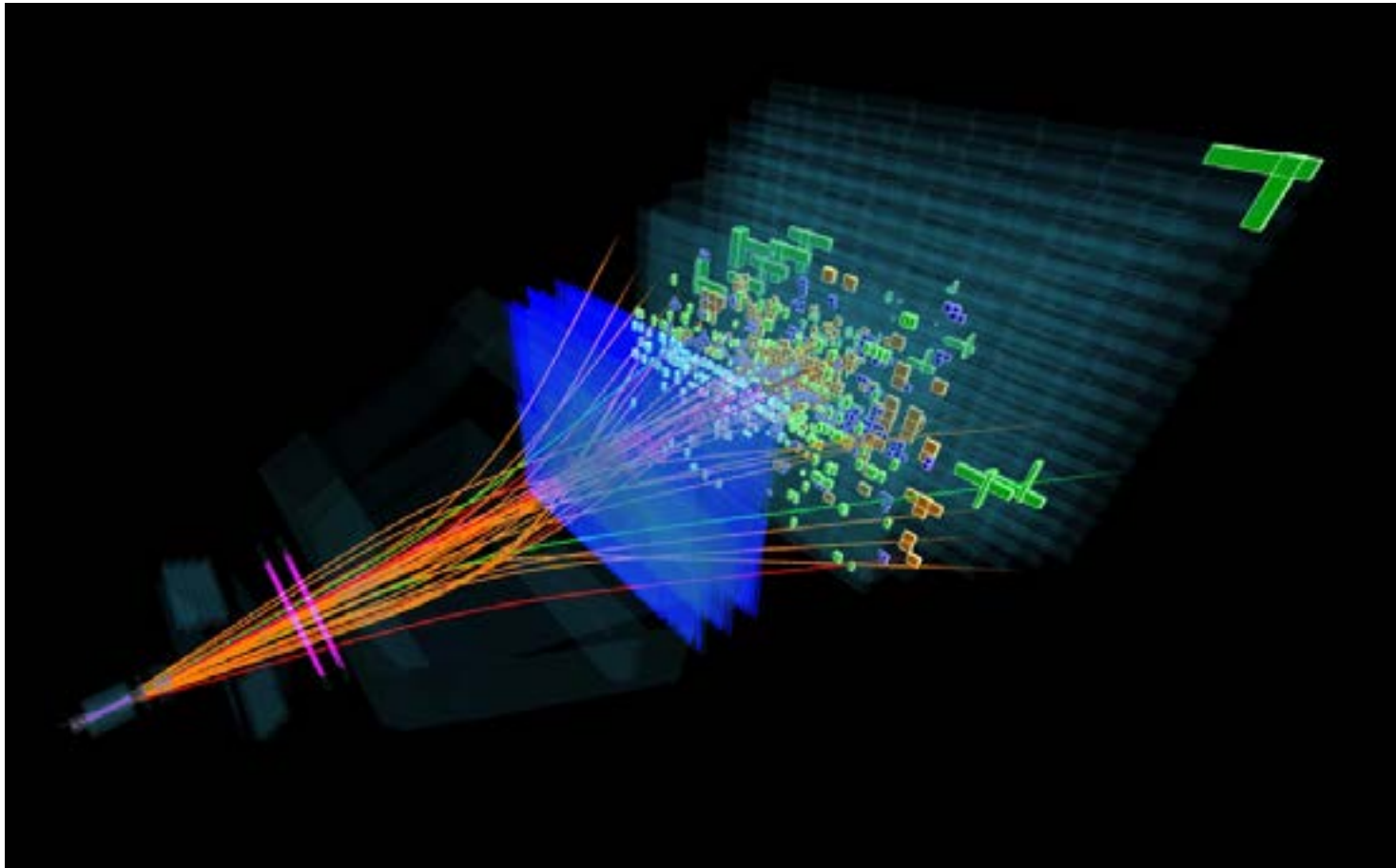
La Collaborazione LHCb

- Collaborazione internazionale: più di 70 istituti, distribuiti in una ventina di paesi in vari continenti



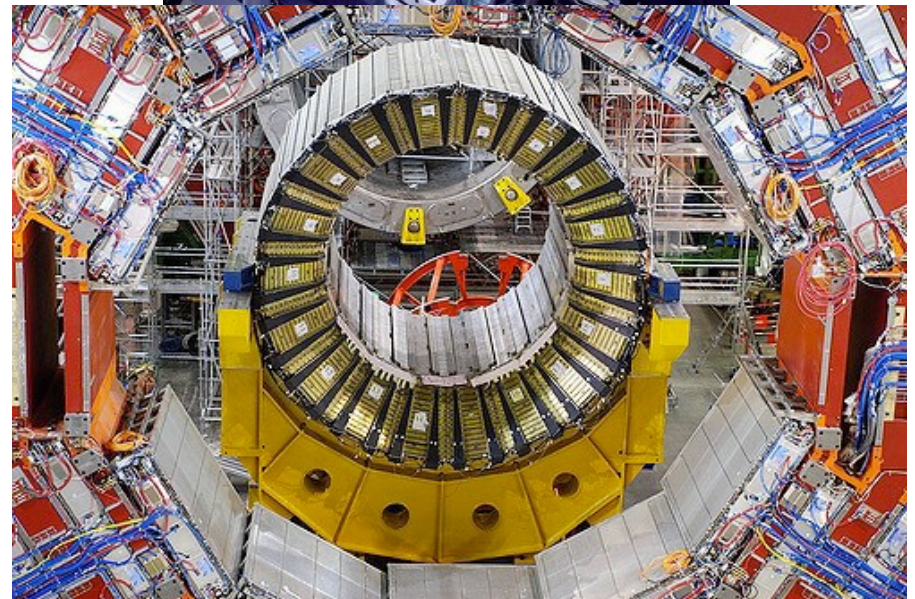
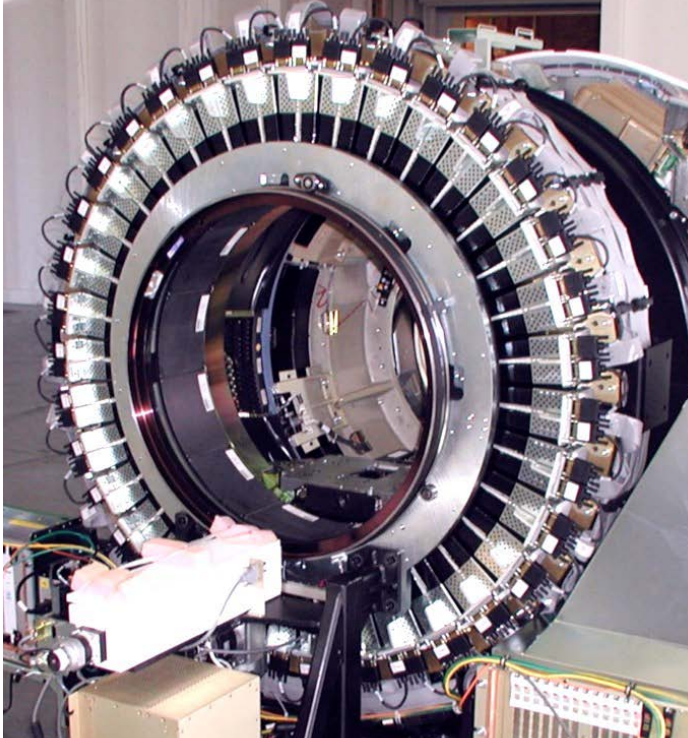
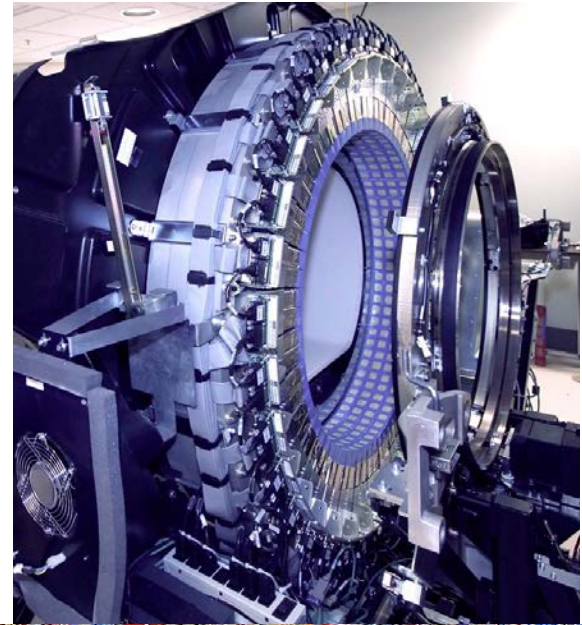
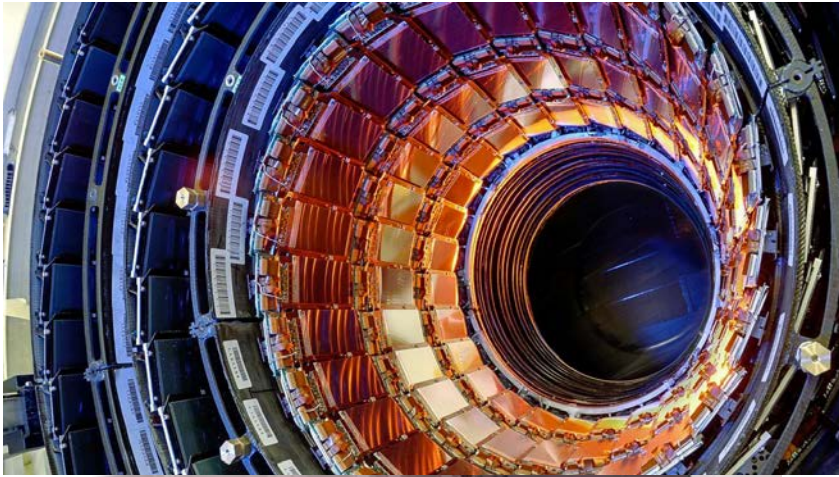
Un evento in LHCb...

- LHCb è un'immensa macchina fotografica che dal 2022 sarà in grado di scattare 40 Milioni di foto al secondo delle interazioni tra due protoni (un'immagine ogni 25 ns)



Applicazioni in fisica medica

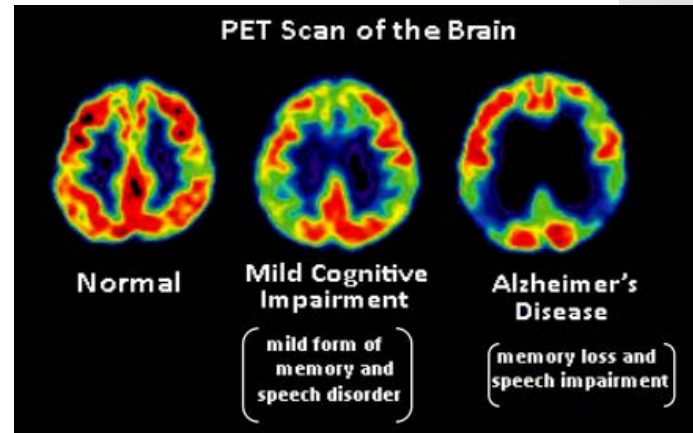
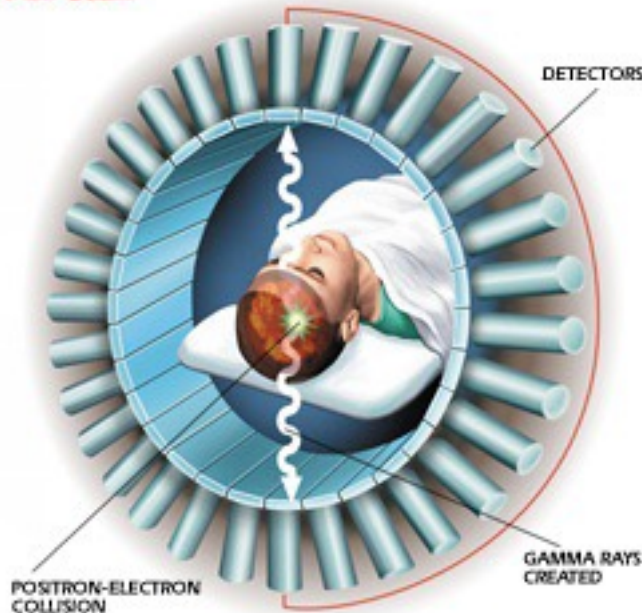
Fisica delle particelle o ospedale?



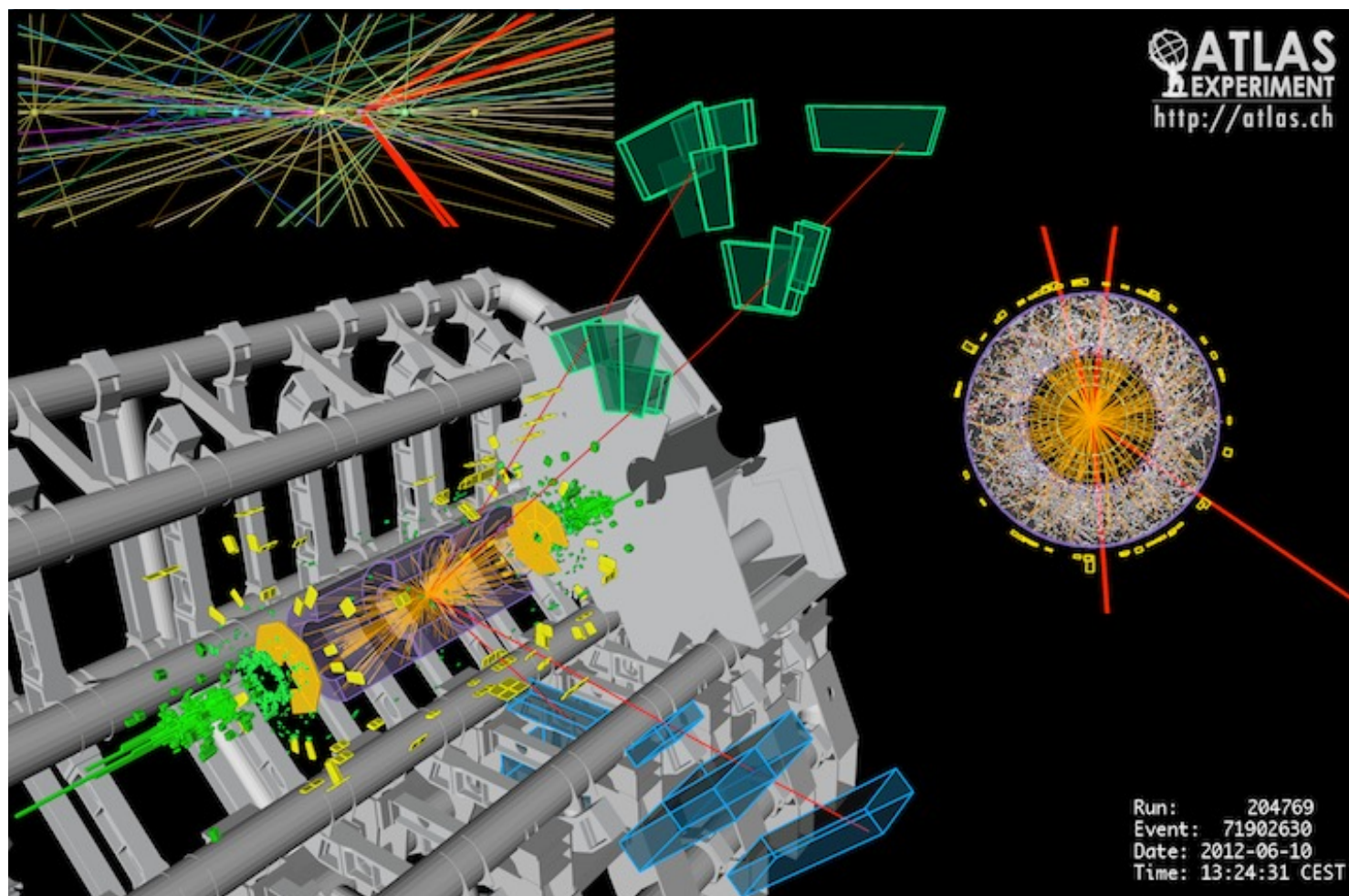
Tomografia a emissione di positroni

- PET (Positron Emission Tomography)
 - Un radiofarmaco iniettato nel paziente (radioisotopo tracciante legato chimicamente a molecola attiva a livello metabolico)
 - Isotopo si concentra nelle zone di maggiore attività, decade ed emette un positrone e si annichila con un elettrone producendo 2 fotoni
 - Ricostruzione 3D della distribuzione del radiofarmaco → informazioni funzionali

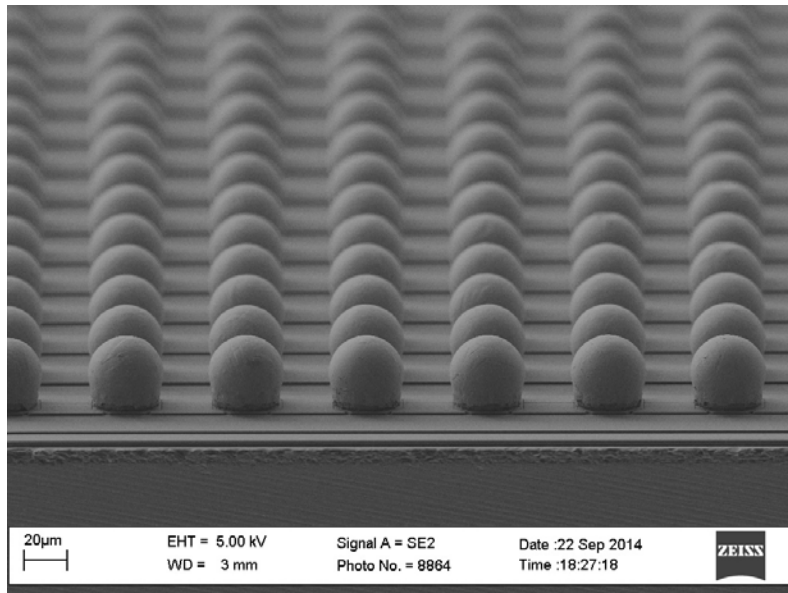
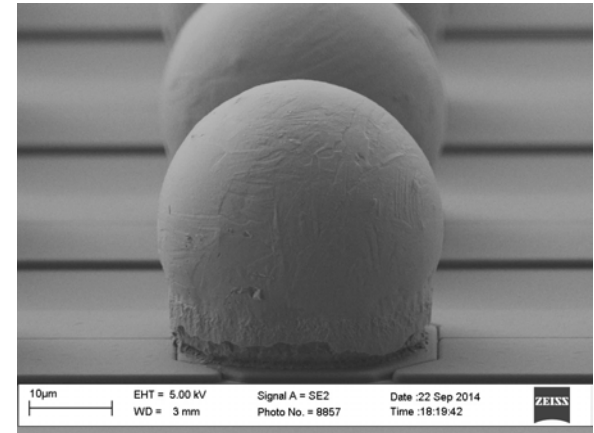
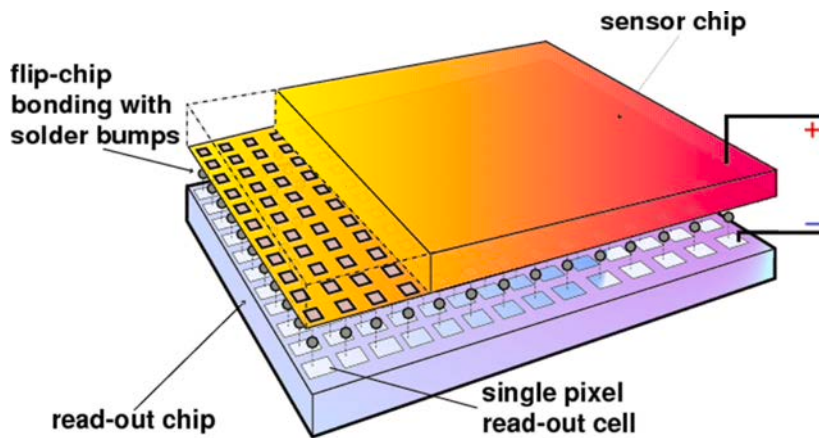
PET Scan



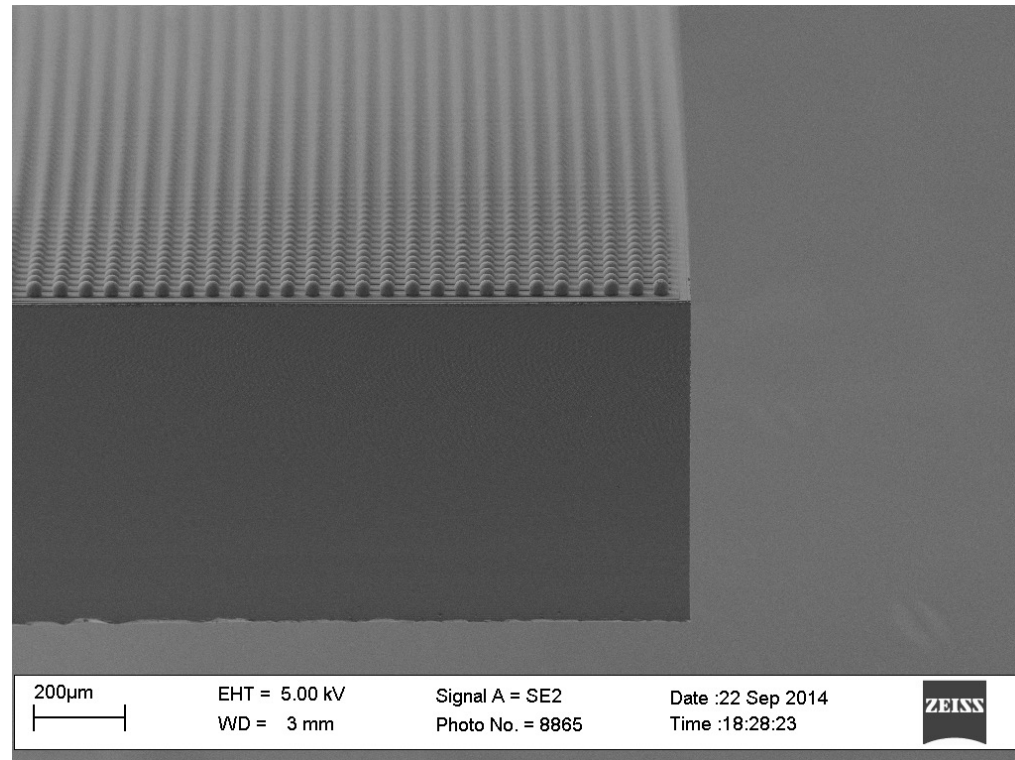
Rivelatori di vertice



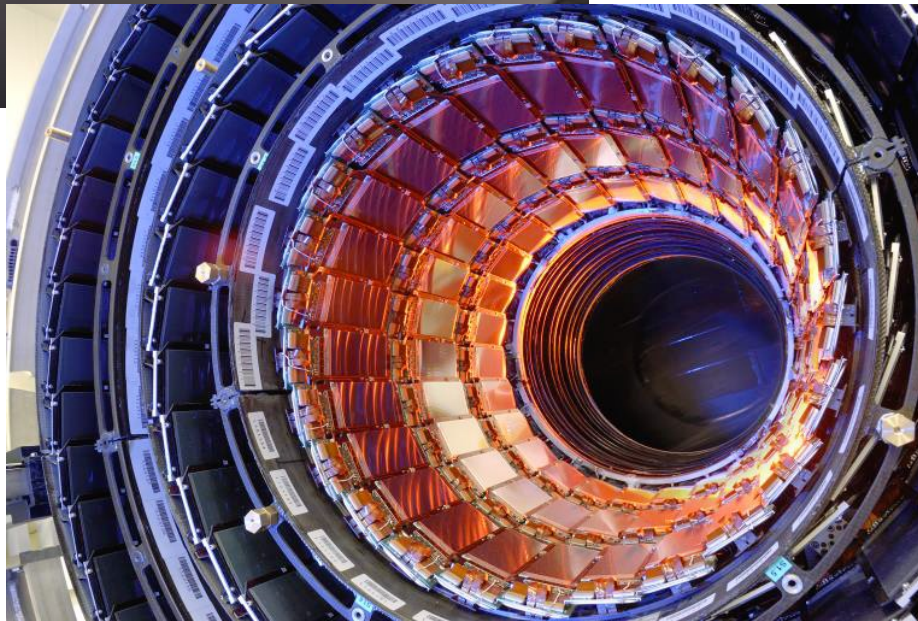
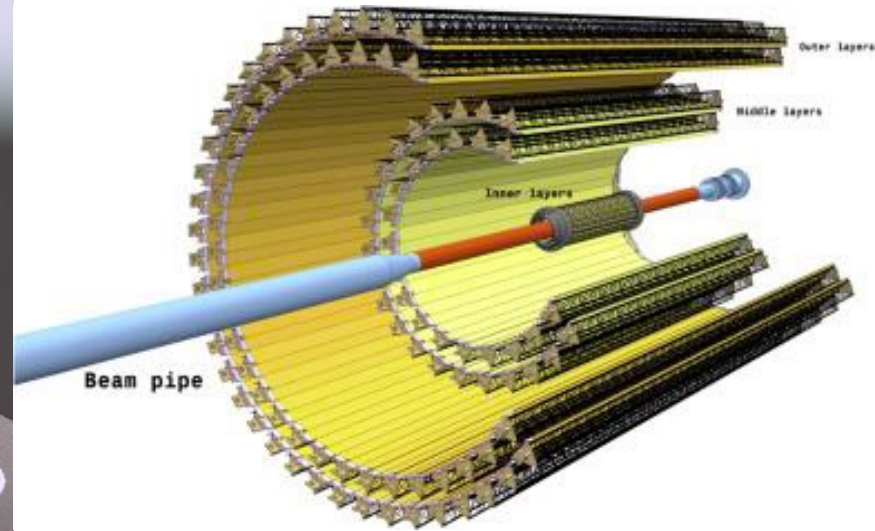
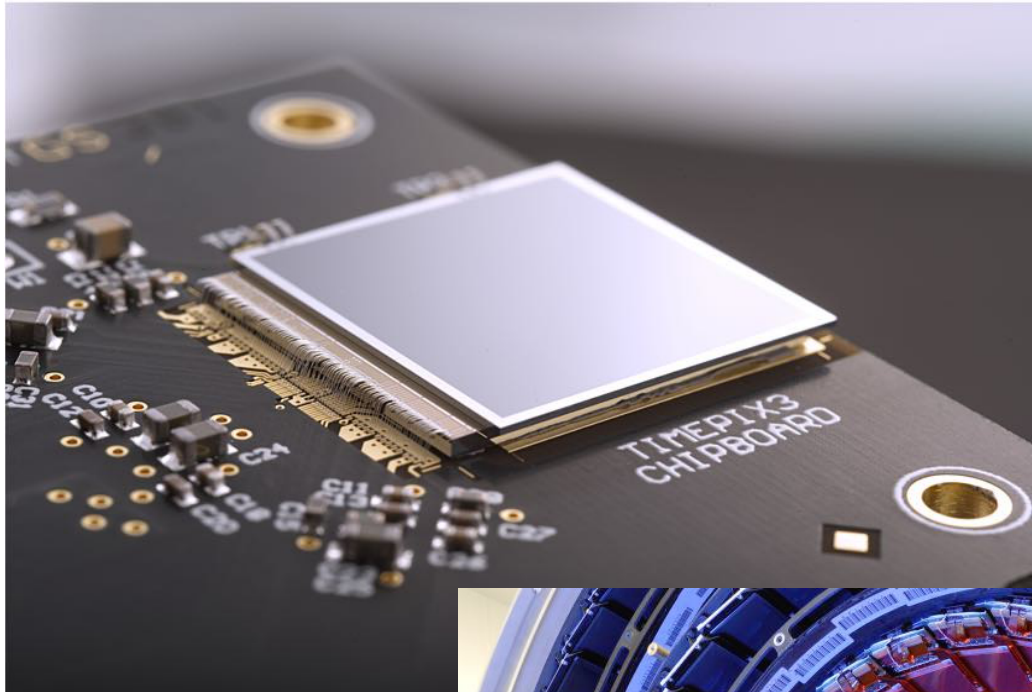
Rivelatori a pixel ibridi



Courtesy Advacam



Rivelatori a stato solido



«Camera per radiazioni»

- Sviluppato dalla collaborazione Medipix (CERN)

Discovering radiation online

Advacam radiation camera - MiniPIX EDU

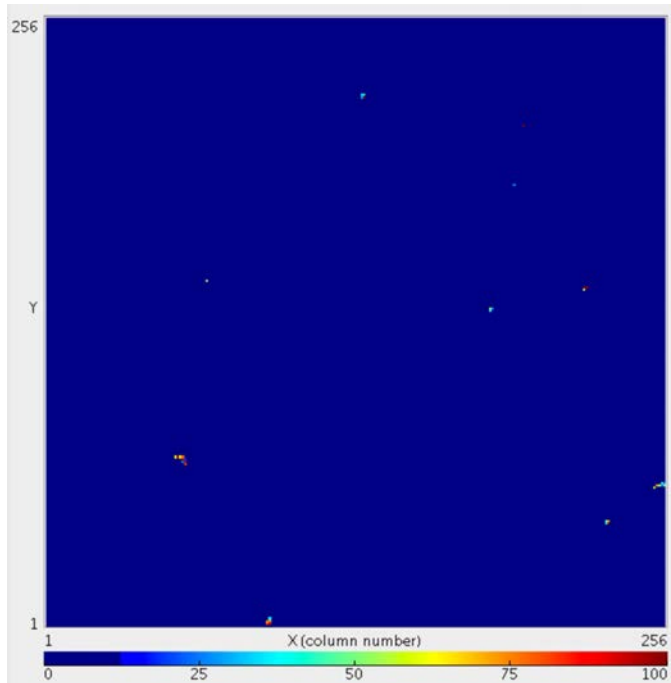


Prague, May 2021

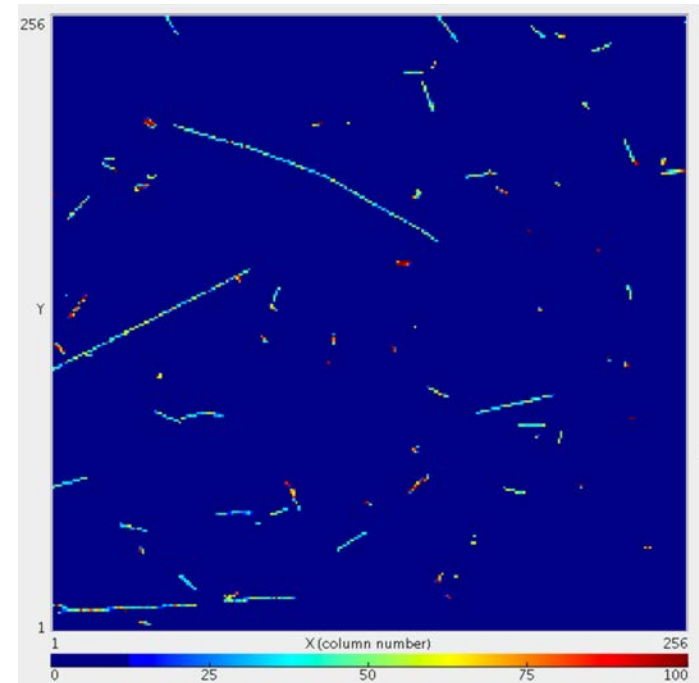
YouTube video: <https://www.youtube.com/watch?v=tgJRma0VBW8>

Livelli di radiazioni

- Esposizione di 60 secondi

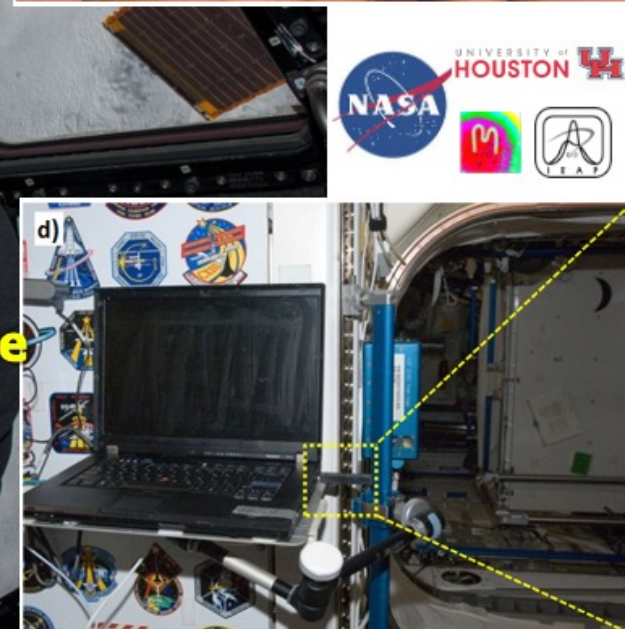
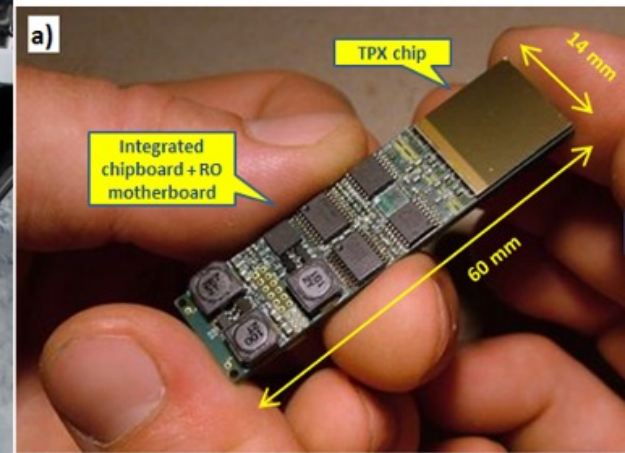


vicino al suolo

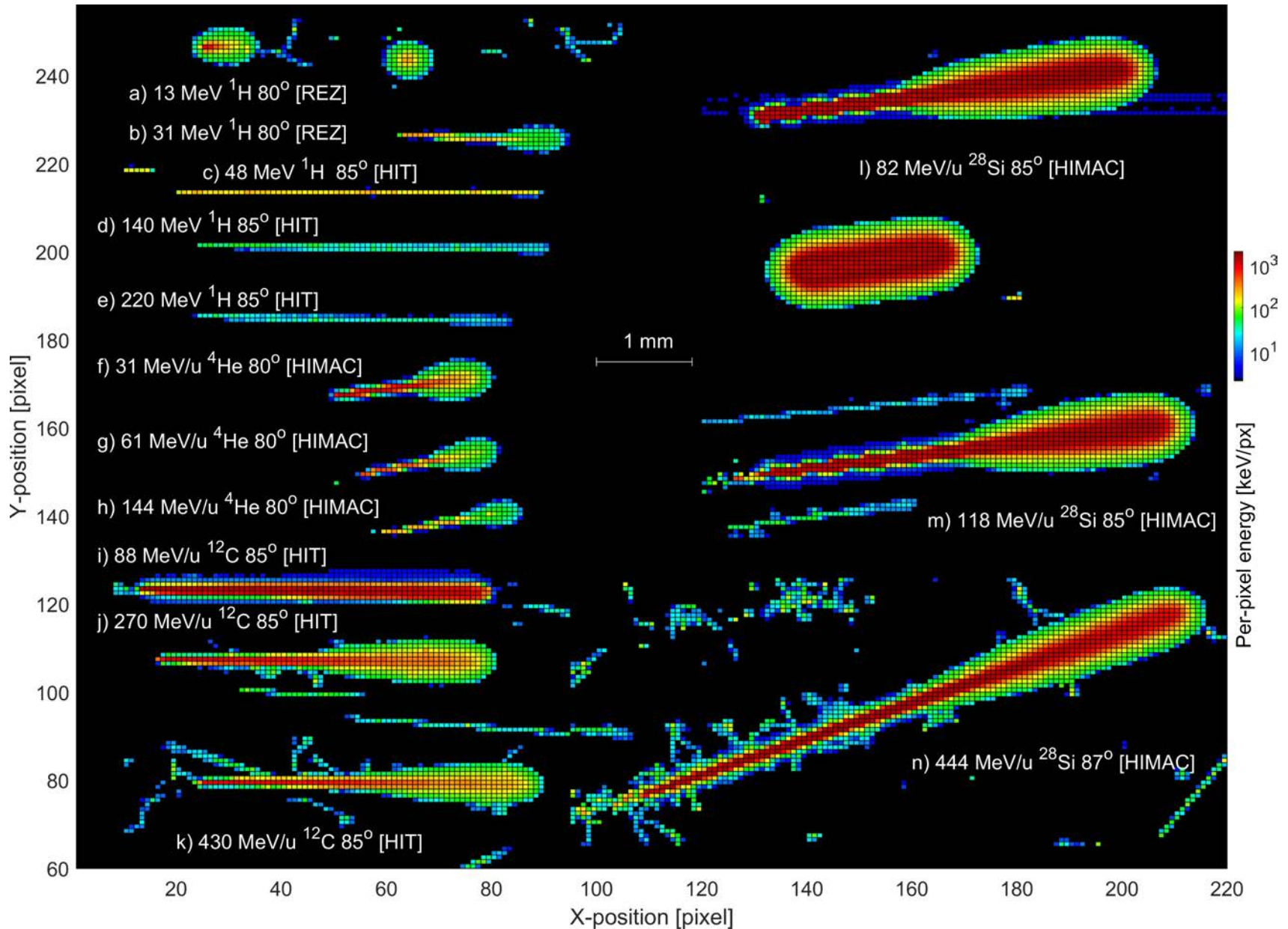


su un volo di linea (10 km)

A bordo della ISS

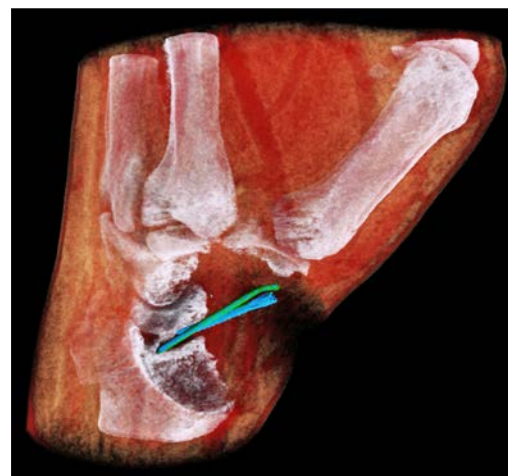
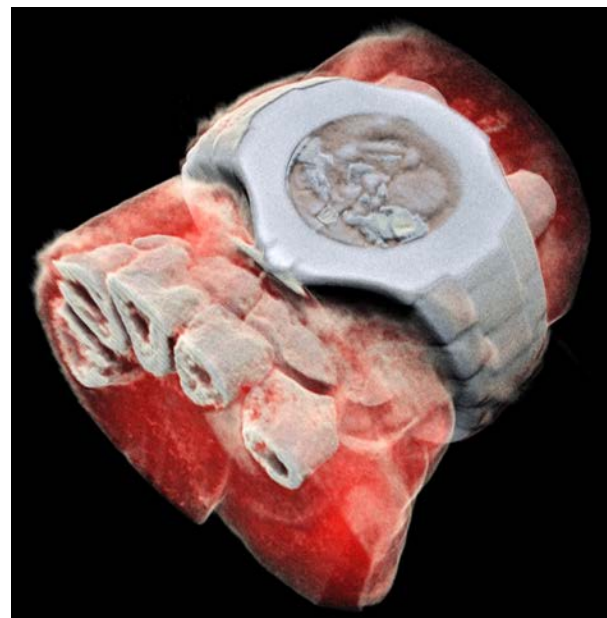


MiniPix camera per radiazioni



Radiografie a «colori»

- Informazioni spettroscopiche permettono la separazione dei materiali

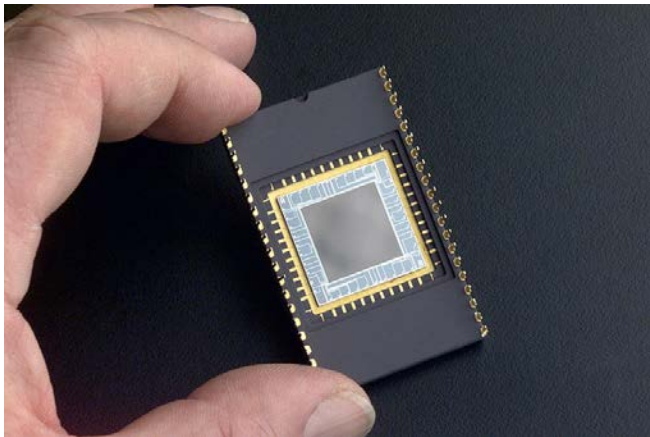


MARS Bioimaging Ltd

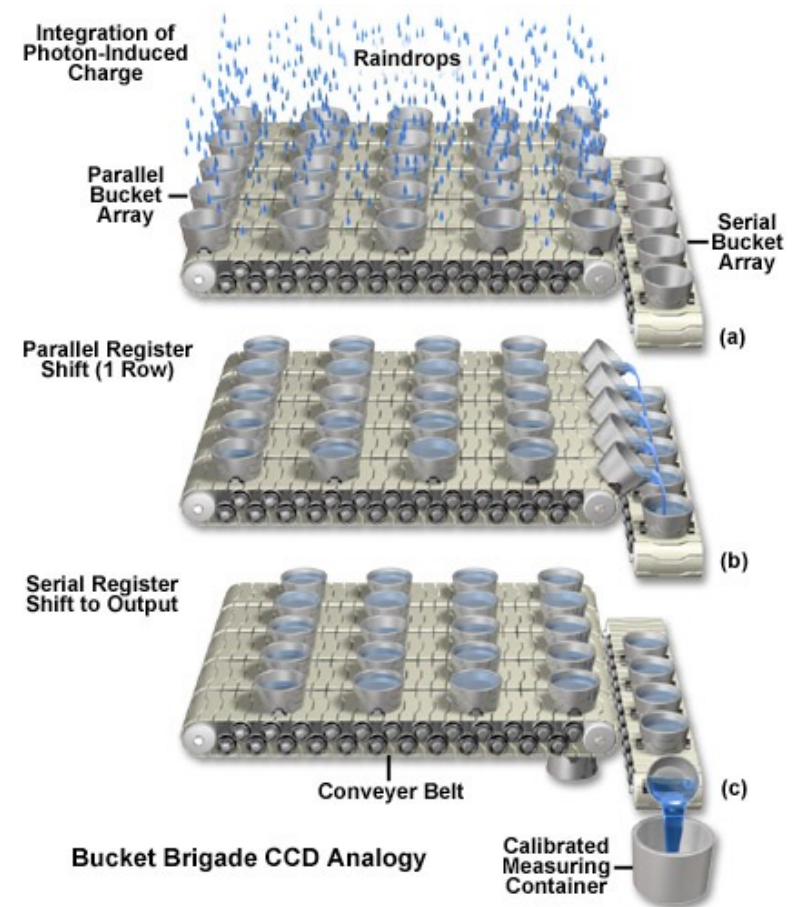
Un rivelatore di fotoni “tascabile”

CCD: Charged Coupled Device

- Una matrice di pixel in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale al numero di fotoni incidenti
 - Ciascun pixel trasferisce la propria carica a quello adiacente



Hubble ST, Galaxy NGC1300



Nuovi rivelatori

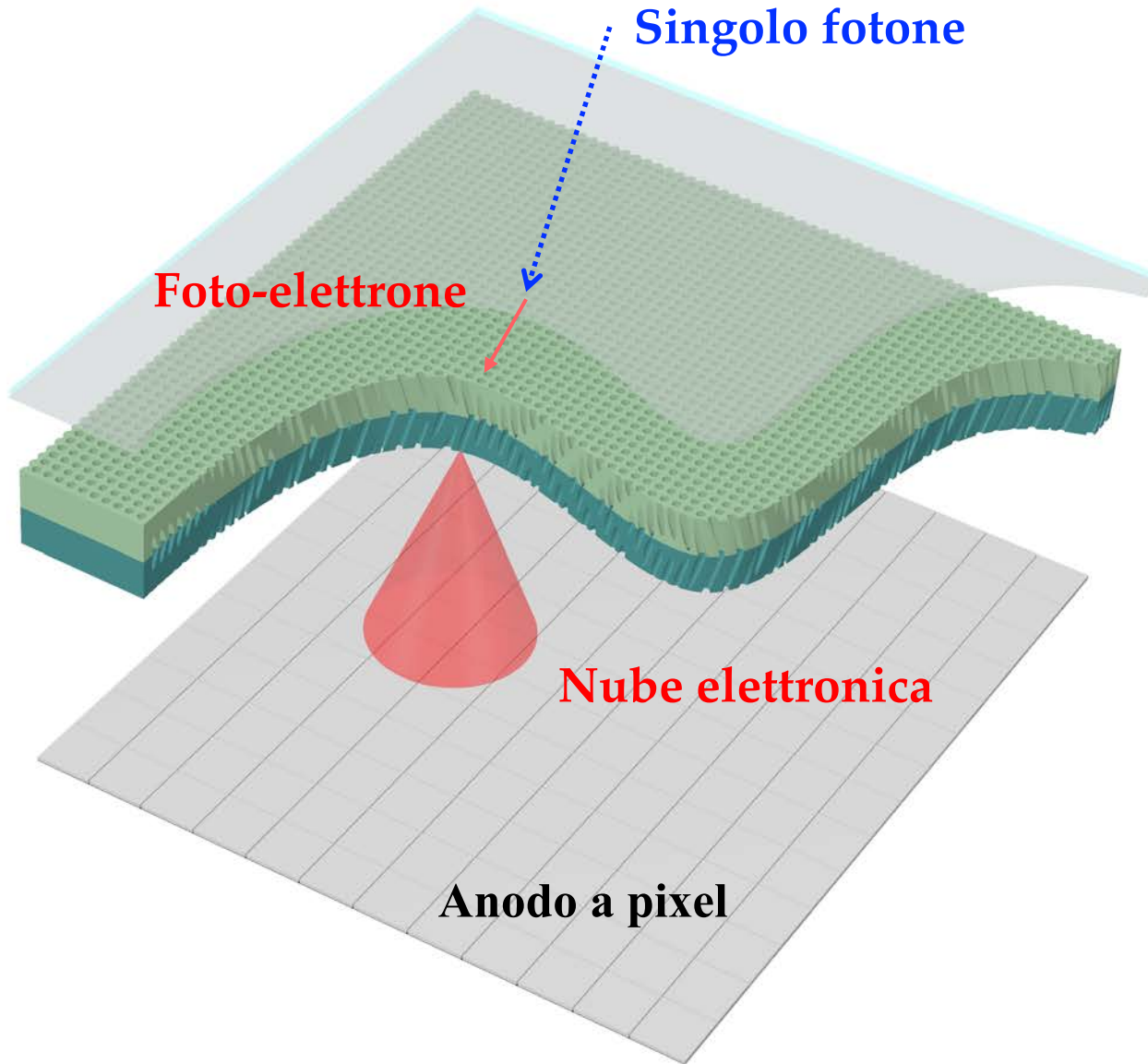
Un nuovo concetto di rivelatore

- Proposta di un nuovo rivelatore basato su un concetto «ibrido»
 - Combinare i vantaggi dei tubi a vuoto con quelli dei dispositivi basati su silicio
 - Ampia risposta spettrale in regioni di interesse
 - Basso rumore di fondo a temperatura ambiente, amplificazione variabile, ampio intervallo dinamico
 - Lettura basata su singoli pixel e non su «interi fotogrammi»
 - Finanziato dallo European Research Council
 - Progetto 4DPHOTON



Risoluzione temporale	10s ps
Risoluzione spaziale	5-10 μm
Elevato numero di conteggi	10^9 hits/s
Basso rumore a T_{amb}	10^2 counts/s
Grande area attiva	7 cm^2
Elevata densità di canali	0.23 millions

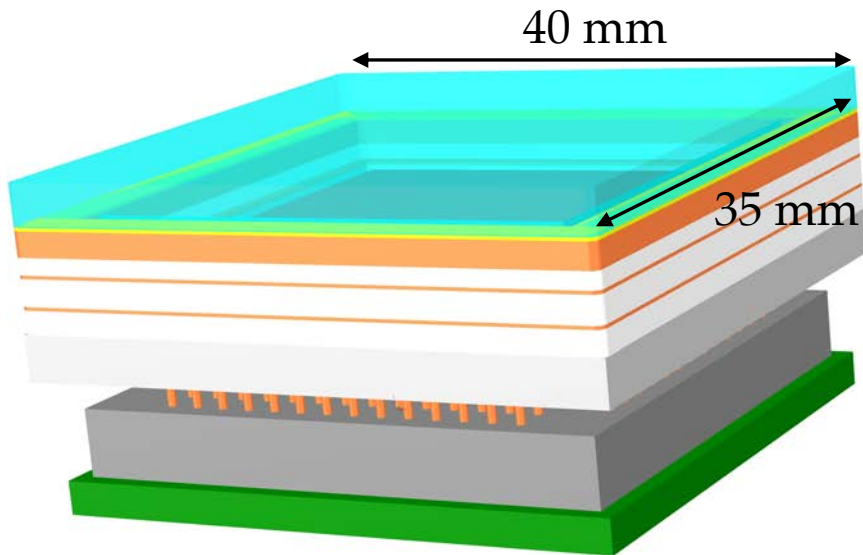
Principio di funzionamento



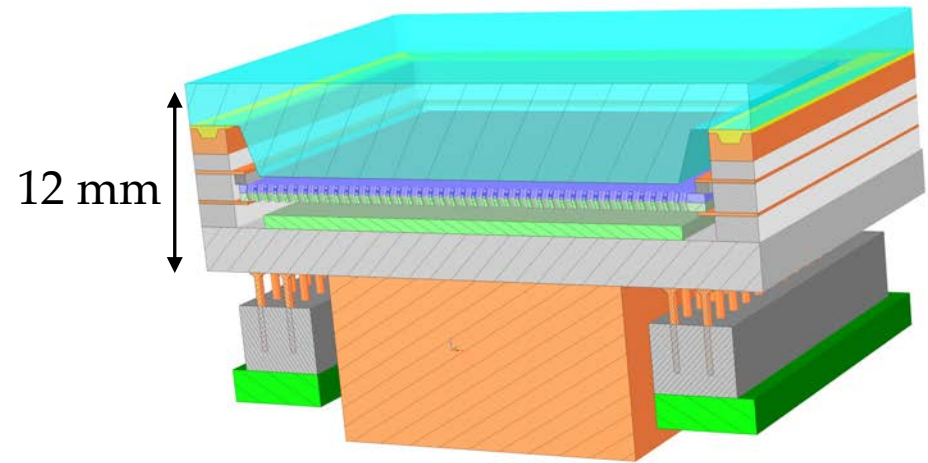
- Finestra di ingresso + fotocatodo
- Microchannel plate (chevron)
- Anodo a pixel
 - Dimensione pixel **$55\mu\text{m} \times 55\mu\text{m}$**
 - **0.23 M pixels** che misurano tempo di arrivo e durata dei segnali in ingresso
 - Area attiva **7 cm^2**
 - Rate **2.5 Ghits/s**
 - Processamento locale dei segnali

Fotorivelatore assemblato

Struttura 3D del rivelatore



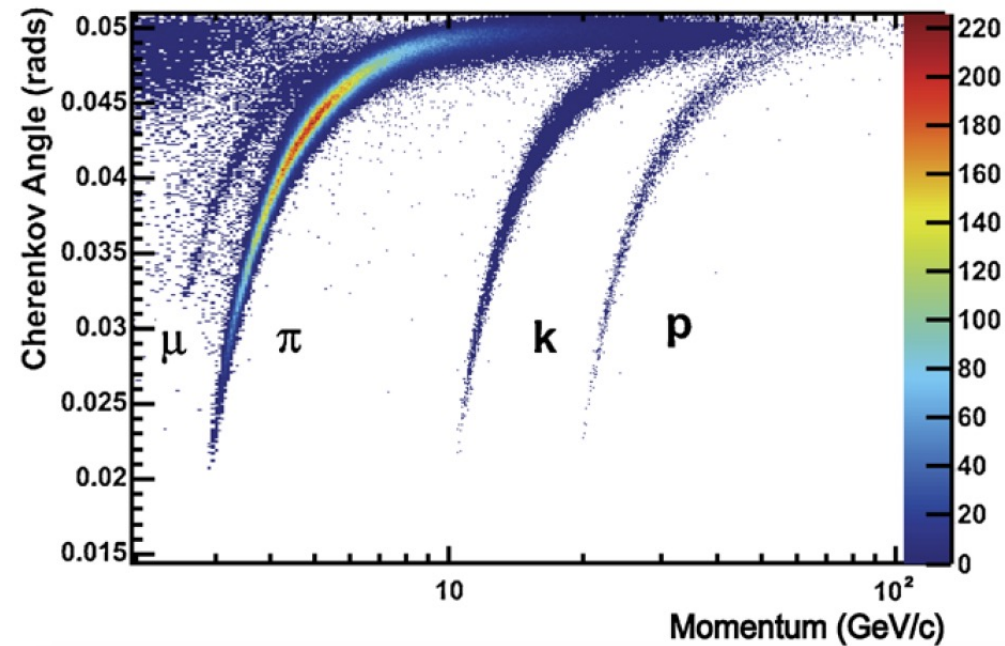
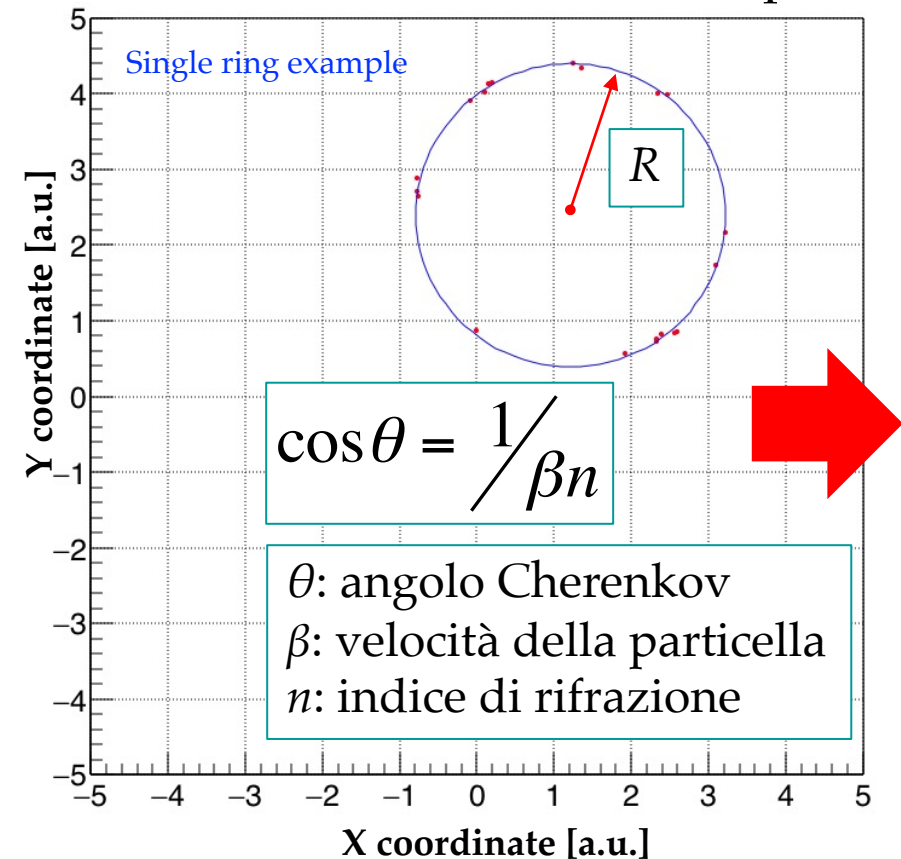
Vista in sezione



- Rivelatore basato su tubo a vuoto
 - Assemblaggio di componenti in alto vuoto (10^{-10} mbar)
 - Connessioni ad alta velocità attraverso i pin nella scheda ceramica
- Rimozione del calore per un funzionamento stabile (25°C)
- Circuito stampato per alloggiare il rivelatore
 - Collegamento dei pin, regolatori e alta tensione
 - Connesso a schede di lettura attraverso 16 link ultra-veloci a 10 Gbps

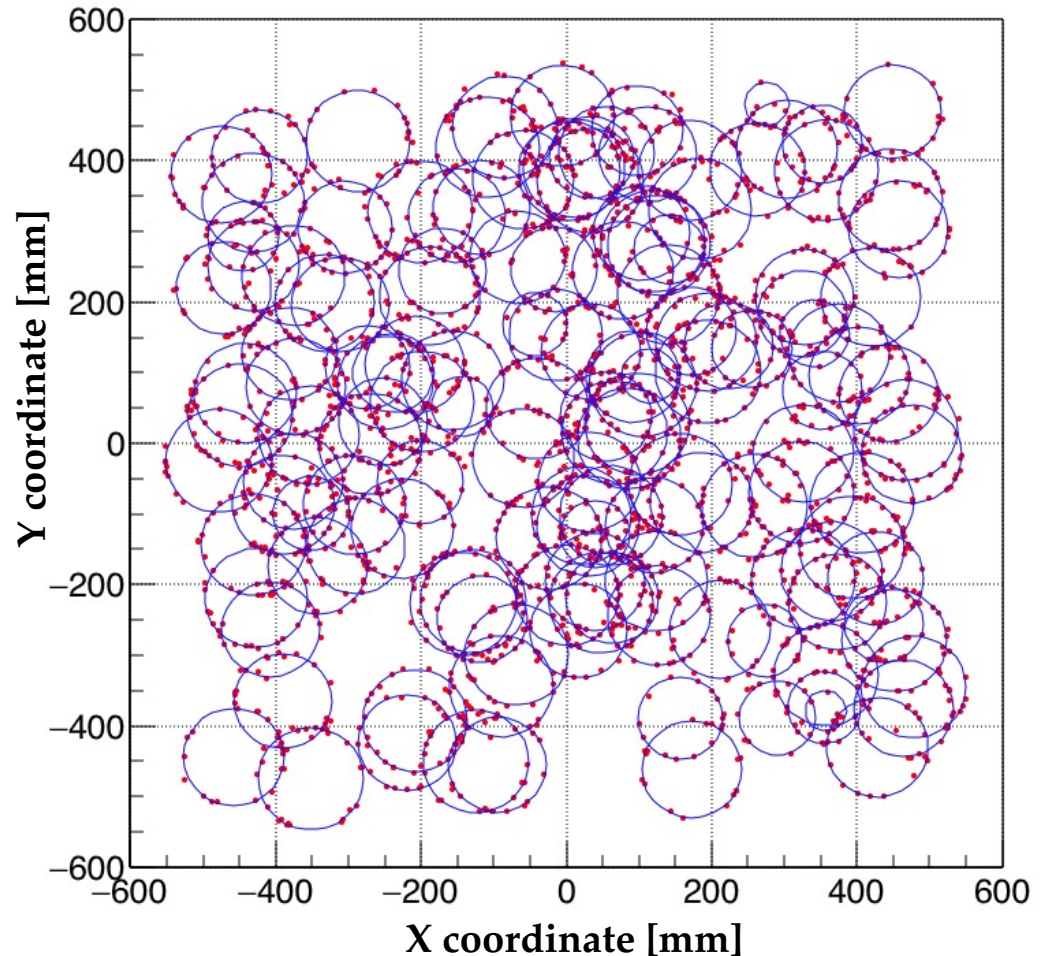
Identificazione di particelle cariche

- Rivelatori di tipo Ring Imaging Cherenkov (RICH)
 - Identificare l'anello di fotoni singoli, determinare il raggio R (proporzionale all'angolo Cherenkov θ), combinare con la quantità di moto $\rightarrow$ identificare la particella!



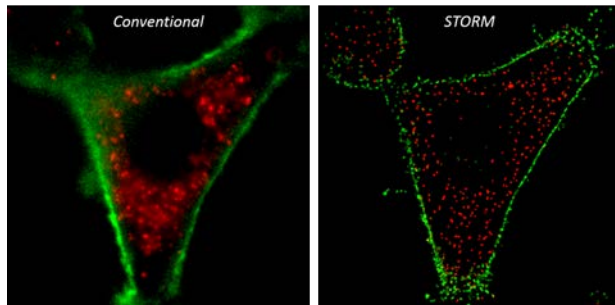
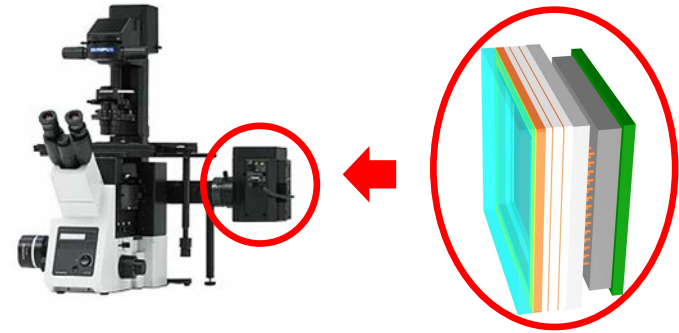
Identificazione nel «mondo reale»

- Gli anelli si sovrappongono in un ambiente a elevata molteplicità di eventi
- Esempio: l'esperimento LHCb fino al 2018
- ~2,000 fotoni in una singola immagine presa ogni 25 ns (~100 anelli)
- Per risolvere l'immagine abbiamo bisogno di informazioni da altri rivelatori (tracciatori) per ricercare il centro dell'anello

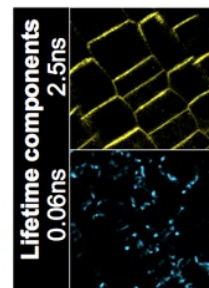
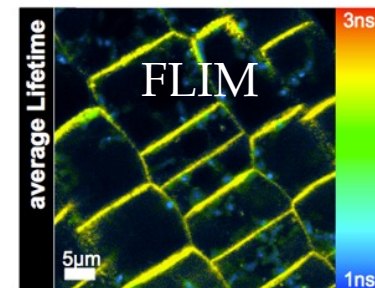
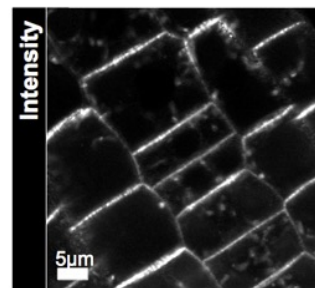


Applicazione alle scienze della vita

- Piano di lavoro: accoppiare il rivelatore con un microscopio a fluorescenza in wide-field
 - Utilizzo di microscopi a fluorescenza e dell'esperienza in UNIFE
 - Nuova meccanica, illuminatore e software
- Esplorare nuove tecniche di imaging
 - Combinazione unica di eccellenti risoluzioni temporali e spaziali in un unico rivelatore con capacità di registrare elevati flussi di fotoni
 - e.g. combinare tecniche di imaging in **super-risoluzione** (Premio Nobel per la Chimica 2014) con la **fluorescence lifetime imaging** in wide-field
 - Localizzazione dei fluorofori con risoluzioni migliori del limite di Abbe (PALM, STORM, etc.) e misura della vita media simultaneamente

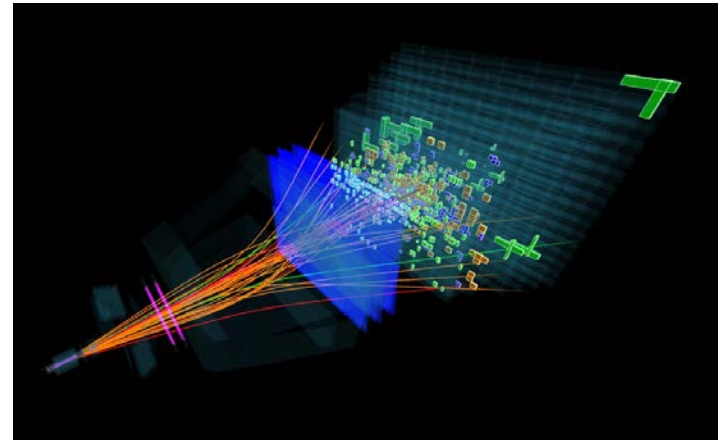
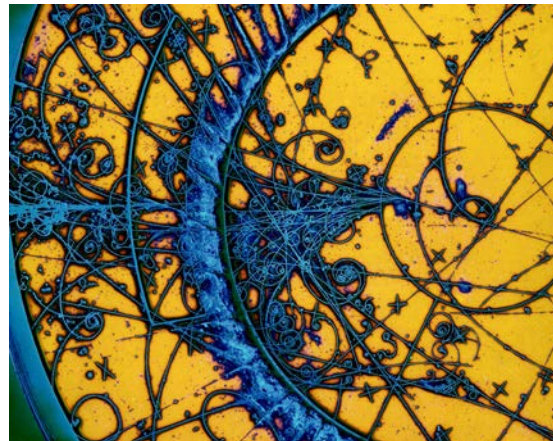
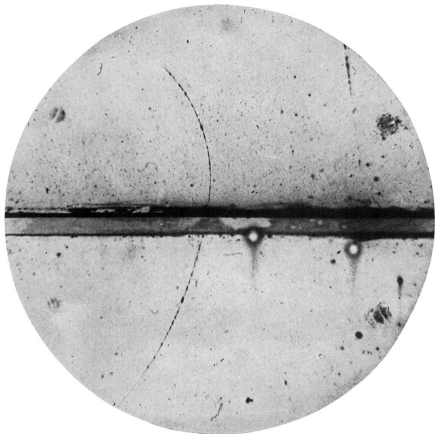


e.g.
STORM
+
FLIM



Sommario

- Lo sviluppo di nuove tecnologie e strumenti innovativi ha un profondo impatto sulla scienza, e ha spesso portato a nuove e inattese scoperte in fisica delle particelle elementari
- Tecnologie sviluppate per la ricerca fondamentale hanno importanti ricadute nella vita quotidiana
 - Impatto sulla vita di centinaia di milioni di persone



**Grazie per
l'attenzione!**