



# RIVELATORI DI PARTICELLE

---

Bardonecchia, Gennaio 2017

E.Menichetti – Dip. di Fisica e INFN, Torino

Riprendendo lo schema iniziale del nostro strumento universale per indagare la struttura della materia:

*Acceleratore* → Sonda incidente

Proiettile di qualche tipo ↔ Onda di qualche tipo

‘Collisione’ fra sonda e bersaglio  
Interazione = Scambio di energia

Questa da’ informazioni  
sulla struttura studiata

Sonda diffusa → *Rivelatore*

Proiettile di qualche tipo ↔ Onda di qualche tipo

Schema applicabile al microscopio ottico ed elettronico

## Sorgente di luce

Gas caldo, Scarica elettrica in un gas, Filamento riscaldato, LED, ...

## Ottica

Lenti, Prismi, Specchi, ...per convogliare la luce dalla sorgente al campione

## Interazione Luce-Materia nel campione

Assorbimento, Emissione, Diffusione, ...

## Ottica

Lenti, Prismi, Specchi, ...per raccogliere la luce diffusa dal campione sul rivelatore

## Rivelatore di luce

Retina, Pellicola fotografica, CCD, ...

## Processore di immagini

Cervello, Computer, ...

## Sorgente di elettroni

Filamento riscaldato, ...

## Accelerazione & Ottica elettronica

Cessione di energia all'elettrone + Lenti elettrostatiche, magnetiche, collimatori,...per convogliare gli elettroni sul campione

## Interazione Elettrone-Materia nel campione

Ionizzazione, diffusione, irraggiamento, ...

## Ottica elettronica

Lenti elettrostatiche, magnetiche, collimatori,...per raccogliere gli elettroni

## Rivelatore di elettroni

Pellicola fotografica, rivelatore al silicio, moltiplicatore di elettroni, CCD, ...

## Processore di immagini

Computer, ...

Quindi: I due schemi sono molto simili

Passo interessante per il seguito: Rivelazione Luce/Elettrone  
Basata sulle interazioni Luce/Elettrone – Materia

Poiche' la materia e' costituita da molecole/atomi  
→ Problema spostato a

Interazione Luce/Elettrone – Atomo

Problema iniziale da cui si e' sviluppata tutta la fisica delle  
particelle

## Luce:

Caratteristiche ondulatorie: Campo elettromagnetico variabile nel tempo e nello spazio → Onda e.m.

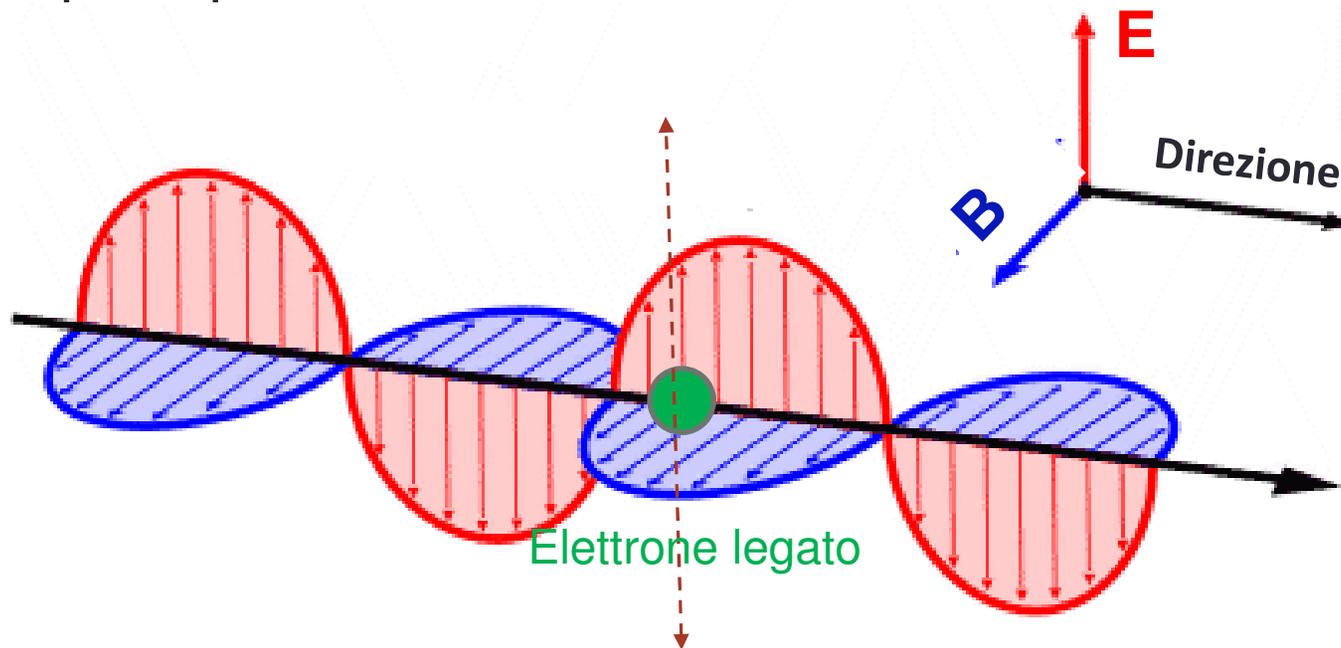
Caratteristiche corpuscolari: Flusso di particelle (molto speciali!) → *Corrente di fotoni*

## Elettroni:

Caratteristiche corpuscolari: Flusso di particelle  
→ Corrente di elettroni

Caratteristiche ondulatorie: Campo (molto speciale!) variabile nel tempo e nello spazio → *Onda di de Broglie*

Interazione fra campo elettromagnetico e atomi:  
Modellino ondulatorio supersemplificato  
Elettrone (leggero) legato al nucleo (pesante)  
Campo  $\mathbf{E}$  pilota il movimento dell'elettrone

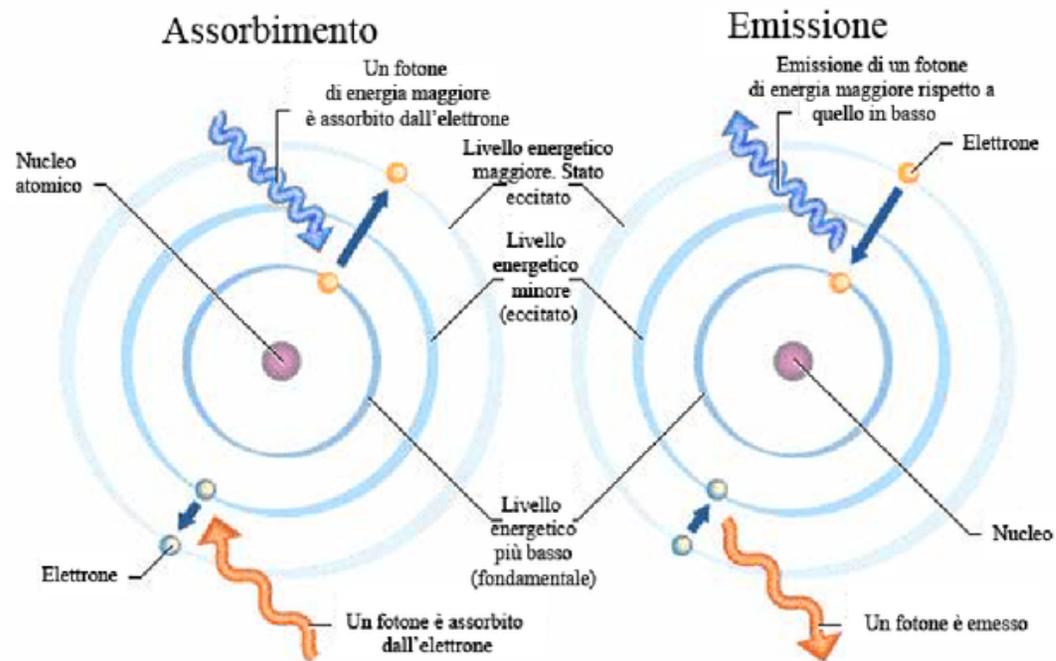


Cessione di energia all'elettrone atomico  $\rightarrow$  Eccitazione  
Distacco dell'elettrone dall'atomo  $\rightarrow$  Ionizzazione

# Interazione fra campo elettromagnetico e atomi

## Modellino corpuscolare supersemplificato:

### 'Collisione' fra fotone ed atomo



Cessione di energia all'elettrone atomico → Eccitazione  
Distacco dell'elettrone dall'atomo → Ionizzazione

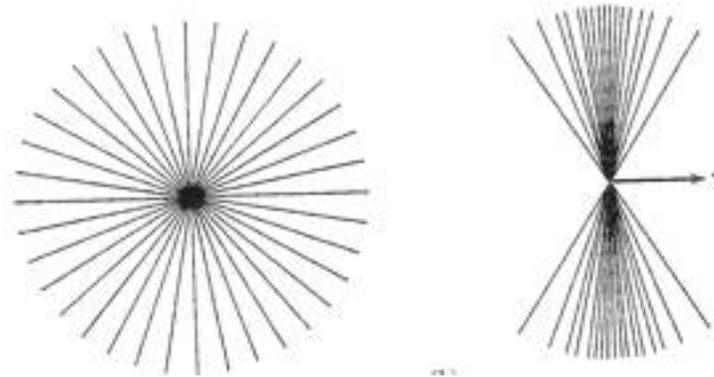
Interazione fra particelle cariche veloci ed elettroni atomici:

Particella carica in moto rapido da' origine a un *campo elettromagnetico* rapidamente variabile (Quasi un'onda elettromagnetica..)

Tutto e' ricondotto all'interazione fra i *campi elettromagnetici* rapidamente variabili creati dalla particella in moto e gli elettroni atomici

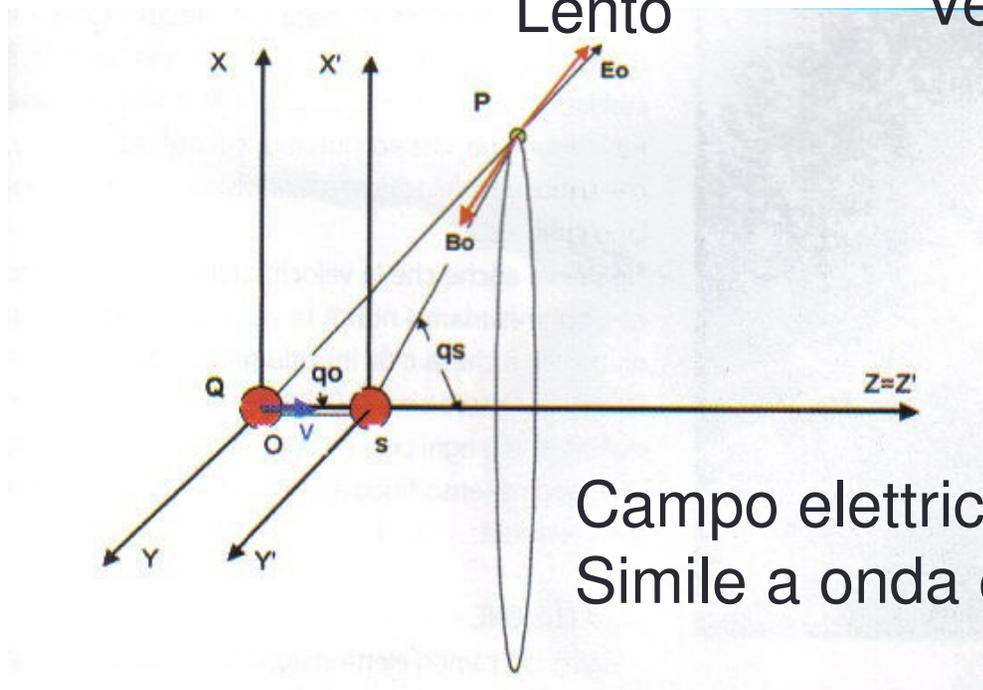
→ Rientra effettivamente nel caso precedente (con alcune variazioni)

# Campo elettrico di una carica puntiforme in moto



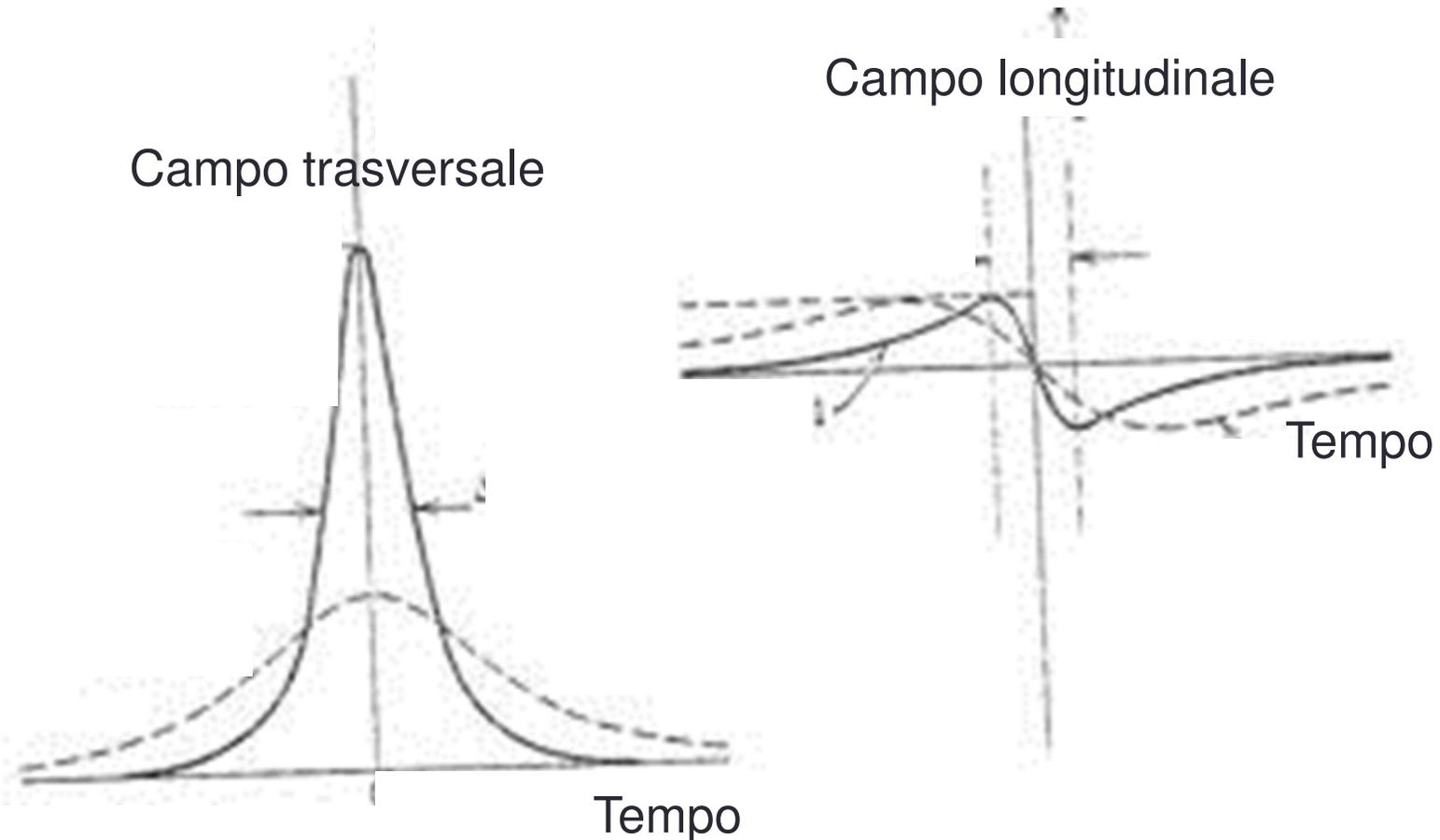
Lento

Veloce



Campo elettrico  $\perp$  Campo magnetico  
 Simile a onda elettromagnetica...

## Campo elettrico rapidamente variabile nella posizione dell'elettrone atomico



- L'elettrone atomico riceve un *forte impulso trasversale*
- Cessione di energia cinetica, talvolta fino a staccarlo dal nucleo: *Eccitazione* , *Ionizzazione*

A livello microscopico, piu' appropriata la descrizione corpuscolare: Meccanica Quantistica

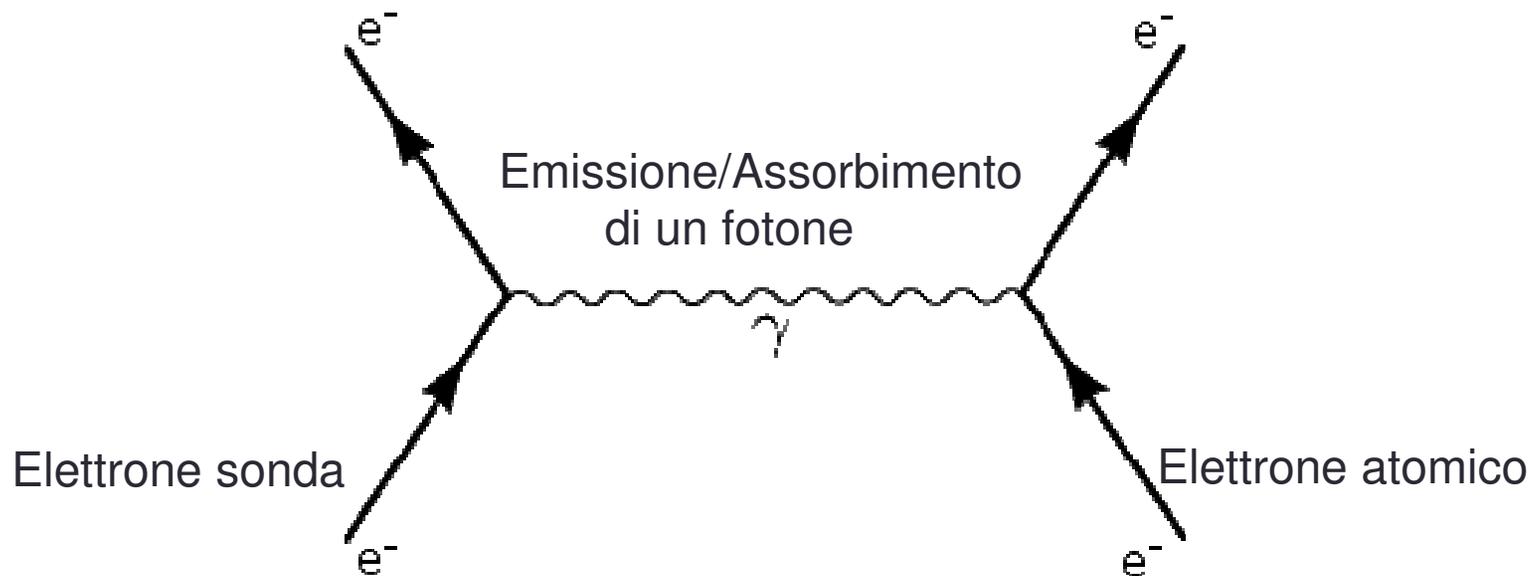
La 'corrente elettromagnetica' della particella in movimento *emette* un fotone

La 'corrente elettromagnetica' dell'elettrone atomico *assorbe* un fotone

Processi di emissione e assorbimento:  
Anche caratteristiche ondulatorie

Alla base dell'*Elettrodinamica Quantistica*

## Simbolismo appropriato: *Diagrammi di Feynman*



Molto piu' di semplici cartoon: usati estensivamente in 'espressioni algebriche' che consentono di fare veri calcoli, anche molto complicati

## Conseguenza di eccitazione e ionizzazione

### Eccitazione:

Elettrone atomico su livello eccitato

Rapido ritorno allo stato fondamentale con emissione di un fotone → Produzione di *luce*

### Ionizzazione:

Elettrone atomico slegato dal nucleo → carica  $-va$  libera

Resto dell'atomo: Ione positivo → carica  $+va$  libera

→ Produzione di *cariche libere*

Entrambe utilizzabili per rivelare il passaggio della particella

## Rivelatori *visualizzanti*:

Basati su opportuni processi chimico-fisici che, in certe condizioni, si possono produrre vicino ai nuclei di ionizzazione, rendendo visibile la traccia della particella carica

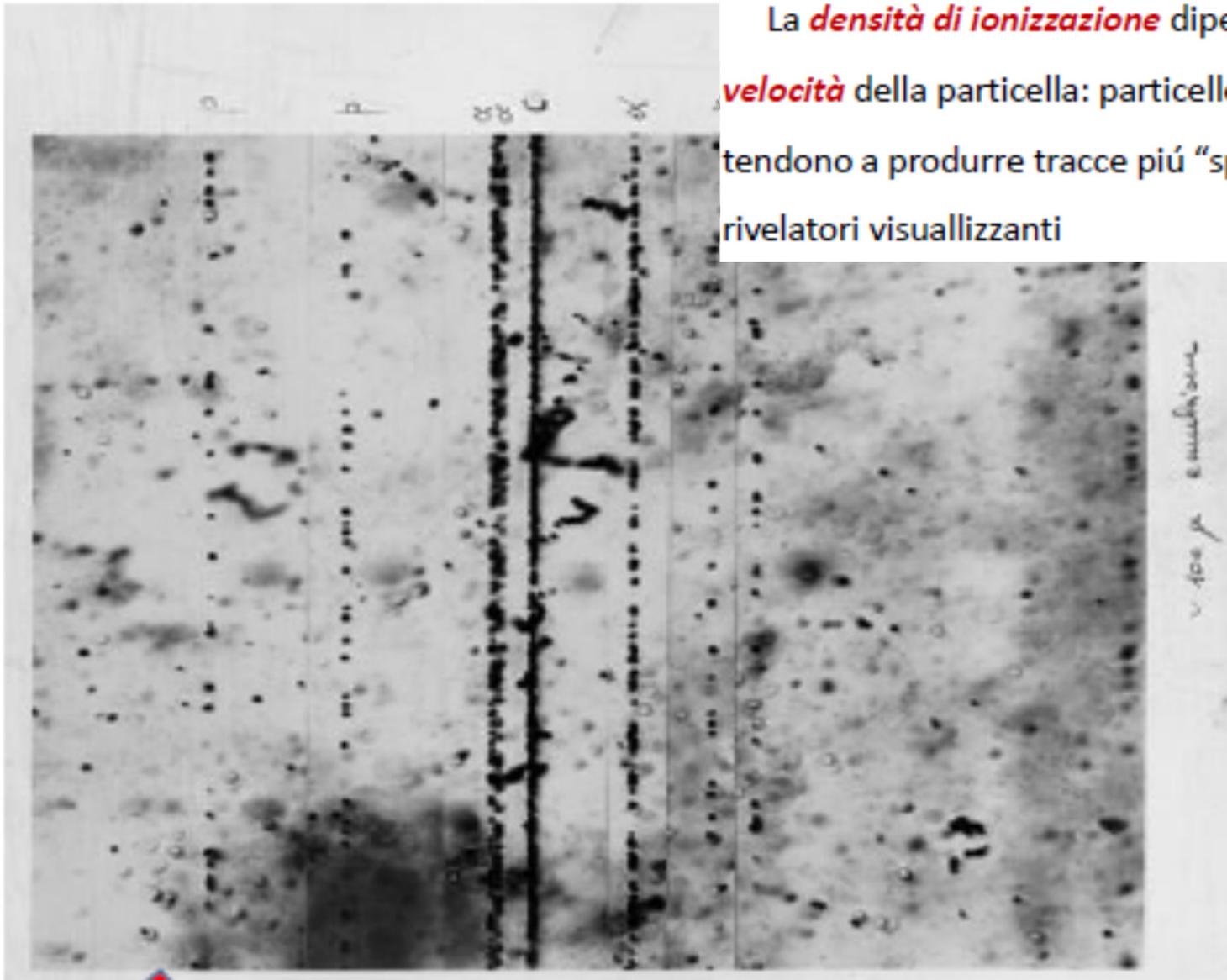
‘Lenti’, quindi inadatti all’uso con flussi intensi di tracce

In gran parte obsoleti

Ancora usati per applicazioni particolari

# Emulsione nucleare

La **densità di ionizzazione** dipende dalla **velocità** della particella: particelle lente tendono a produrre tracce più "spesse" nei rivelatori visualizzanti



## Camera a bolle



Se il rivelatore visualizzante é immerso in campo magnetico, le traiettorie (tracce) delle particelle cariche non saranno rettilinee, bensì avranno una **curvatura** (dovuta alla forza di Lorentz) il cui raggio dipende dalla **quantità di moto** della particella

## Rivelatori elettronici

### Rivelatori a gas o semiconduttore

Si raccoglie direttamente la carica rilasciata sotto forma di un segnale di corrente.

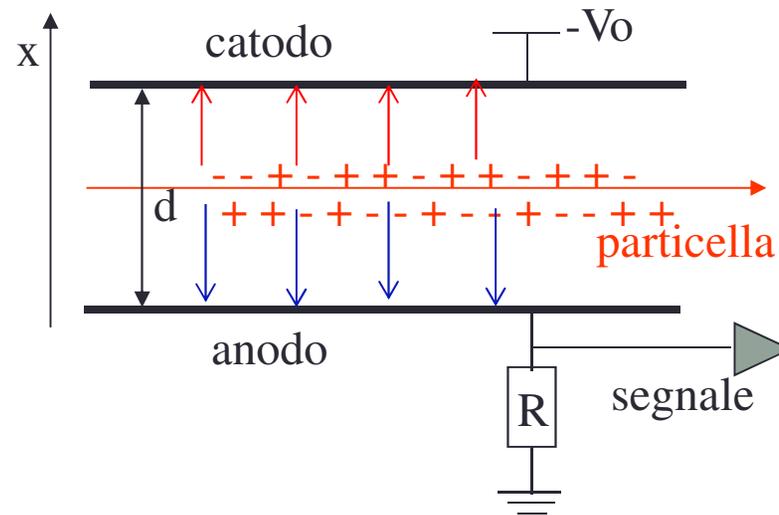
### Scintillatori + Fotorivelatori

Sia l'eccitazione che la ionizzazione degli atomi contribuiscono a produrre eccitazioni molecolari che danno come risultato l'emissione di luce, che può essere raccolta e trasformata in un segnale di corrente

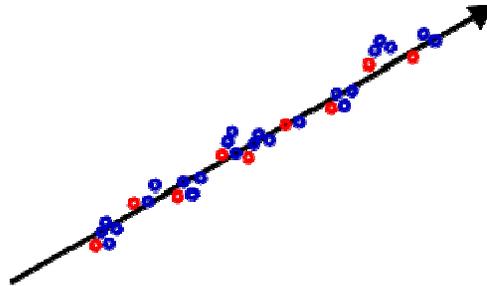
Morale: Quasi tutti gli apparati oggi danno una *risposta di natura elettrica*: ad un certo punto l'informazione viene trasformata in un impulso elettrico che può essere trattato elettronicamente.

*Camere a ionizzazione:* Coppia di elettrodi piani e paralleli.

Una tensione applicata fra gli elettrodi produce un campo elettrico omogeneo. Gli elettrodi sono montati in una scatola a tenuta riempita di gas. La carica di ionizzazione migra verso gli elettrodi → Impulso di corrente (piccolo!)



Assumiamo un apparato spesso 1 cm e riempito di Argon



n totale  $\sim 100$  coppie elettrone-ione

$$Q_{\text{tot}} \sim 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ C}$$

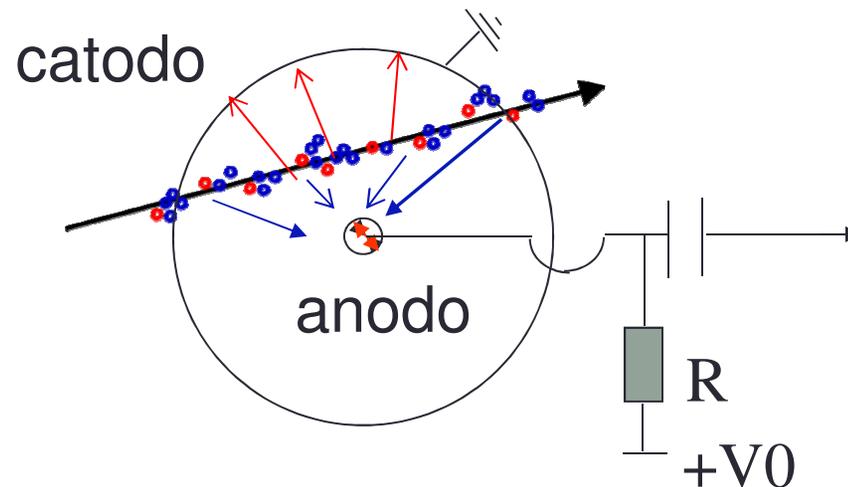
Molto piccola: il segnale deve essere amplificato

Ma il rumore di fondo degli amplificatori è  $\sim 1000 e^-$ , e l'amplificatore è democratico: amplifica sia il segnale sia il rumore

→ Bisogna aumentare il numero di coppie ione-elettrone

## *Contatore proporzionale:*

Tubo metallico con filo metallico teso sull'asse. Fra i due viene stabilita una tensione elevata

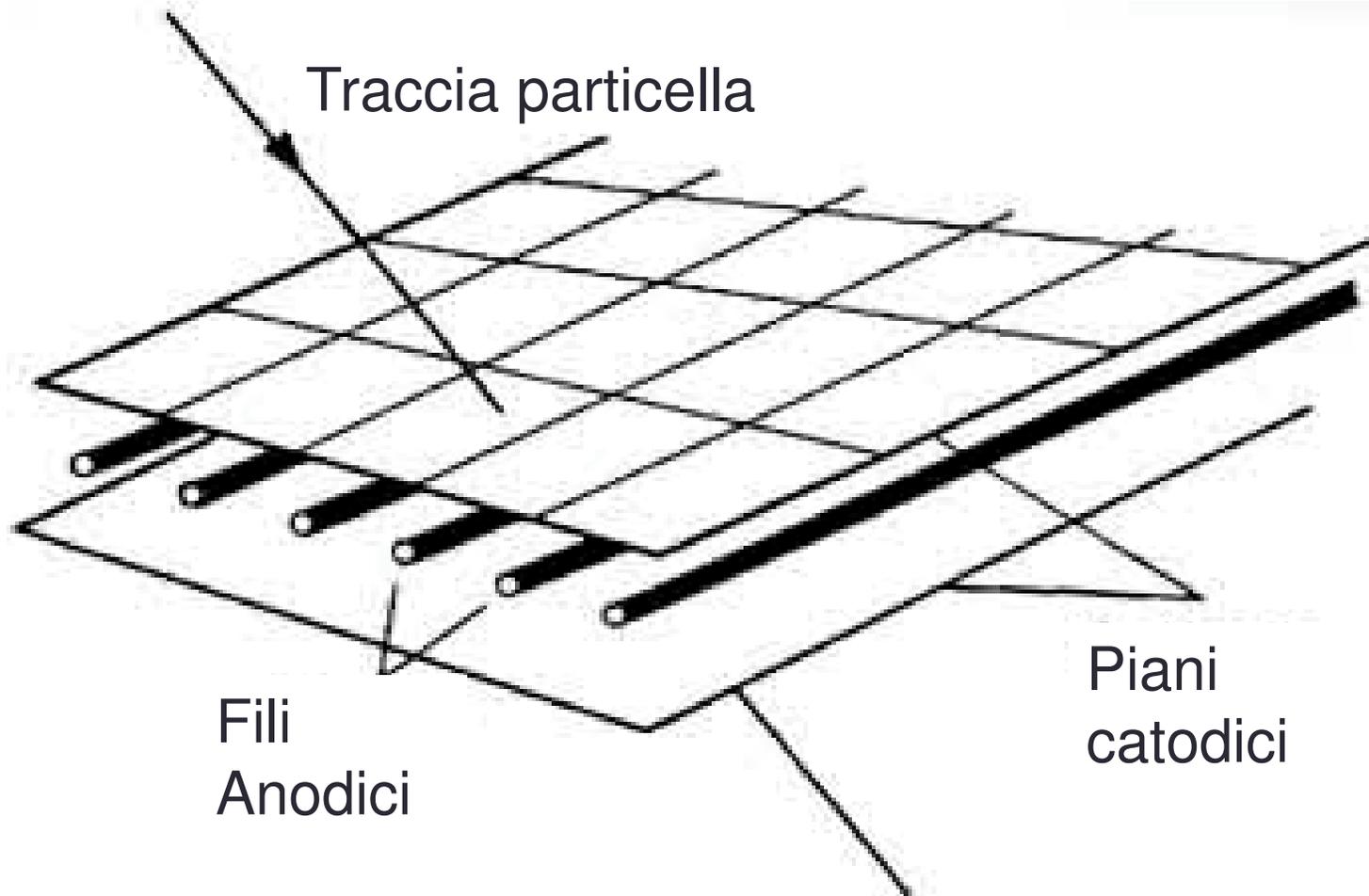


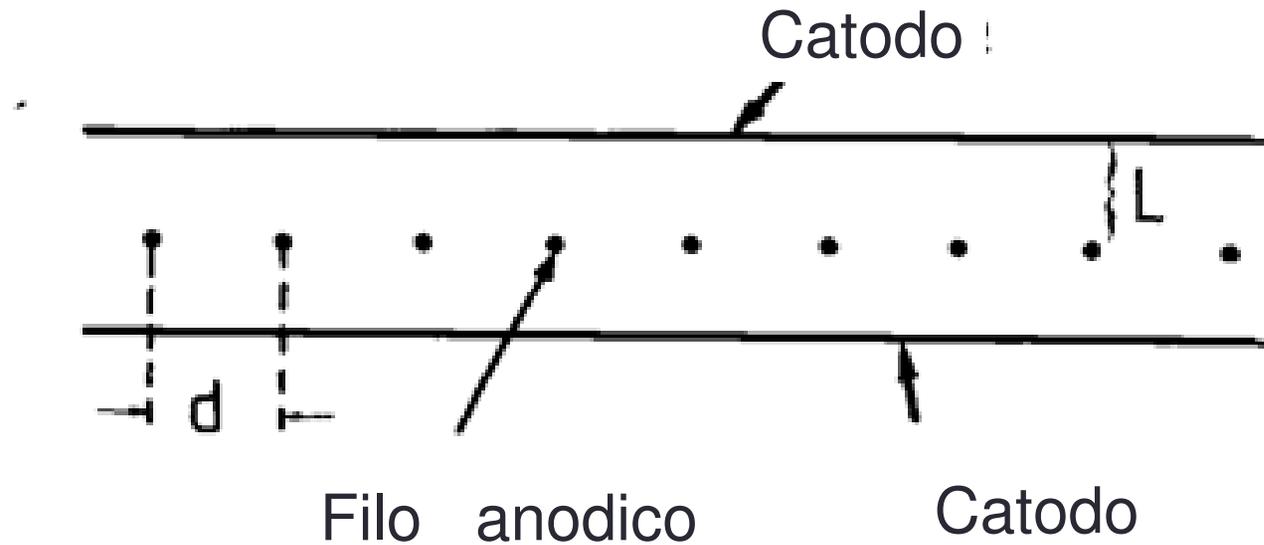
Il campo elettrico cresce andando verso l'anodo a filo.

La carica di ionizzazione iniziale viene moltiplicata per un fattore elevato  $10^4 \div 10^5$  vicino al filo

→ Segnale di corrente fortemente amplificato

# Camera a fili: Equivalente a molti contatori proporzionali paralleli



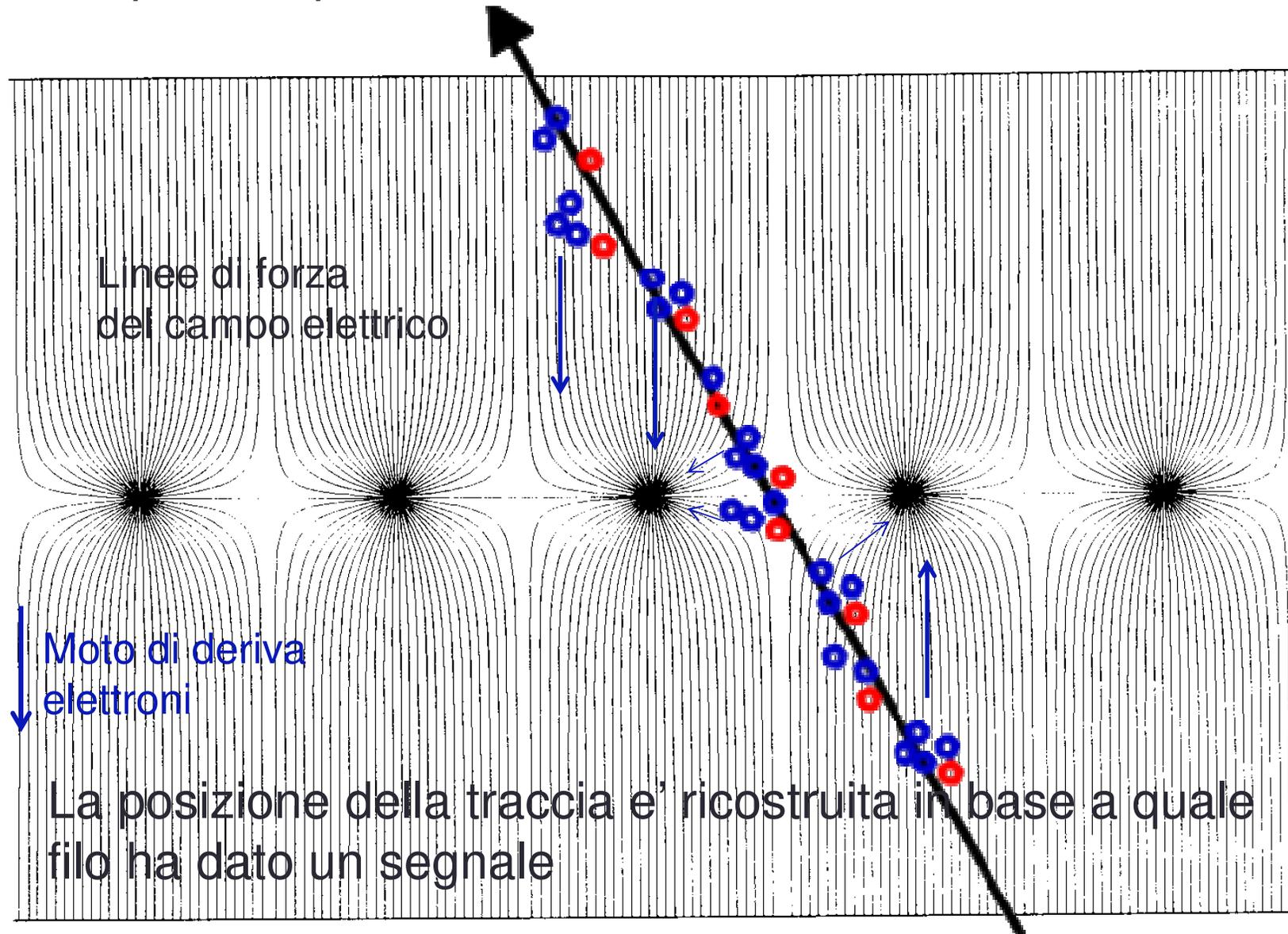


Parametri tipici:

$L=5\text{mm}$ ,  $d=1\div 2\text{ mm}$ ,  $\text{diam}(\text{filo})\sim 20\mu\text{m}$

Centinaia/Migliaia di fili  $\rightarrow$  Dimensione fino a diversi  $\text{m}^2$

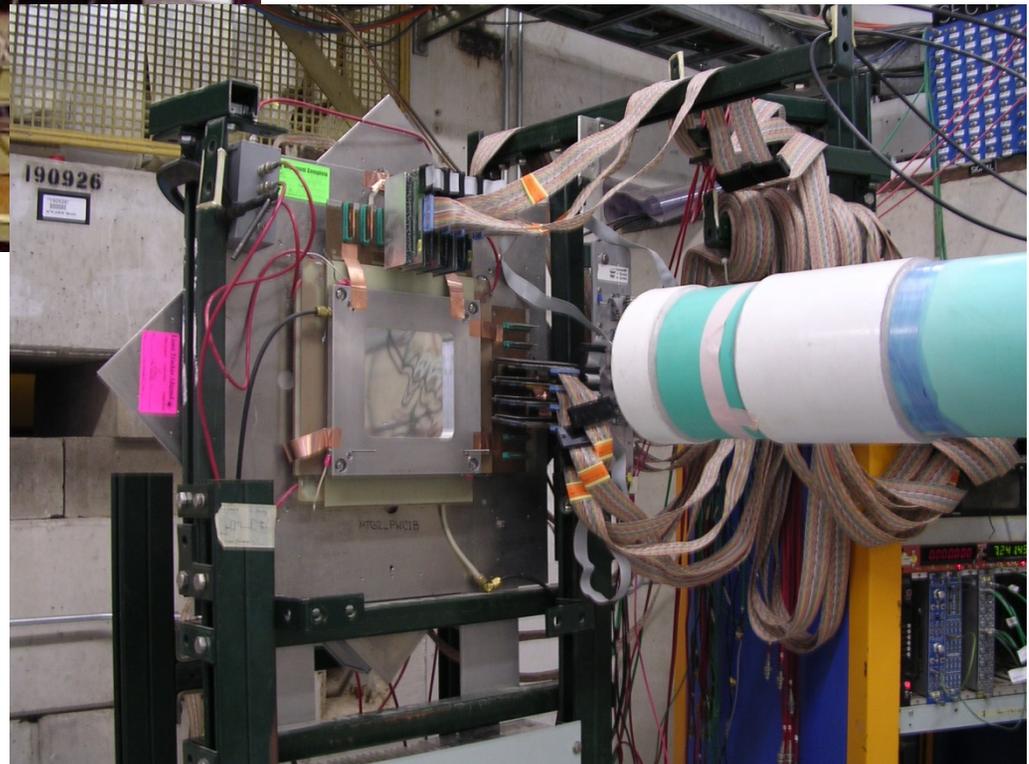
Risposta rapida, adatta a flussi elevati:  $\sim 10^{-8}$  s



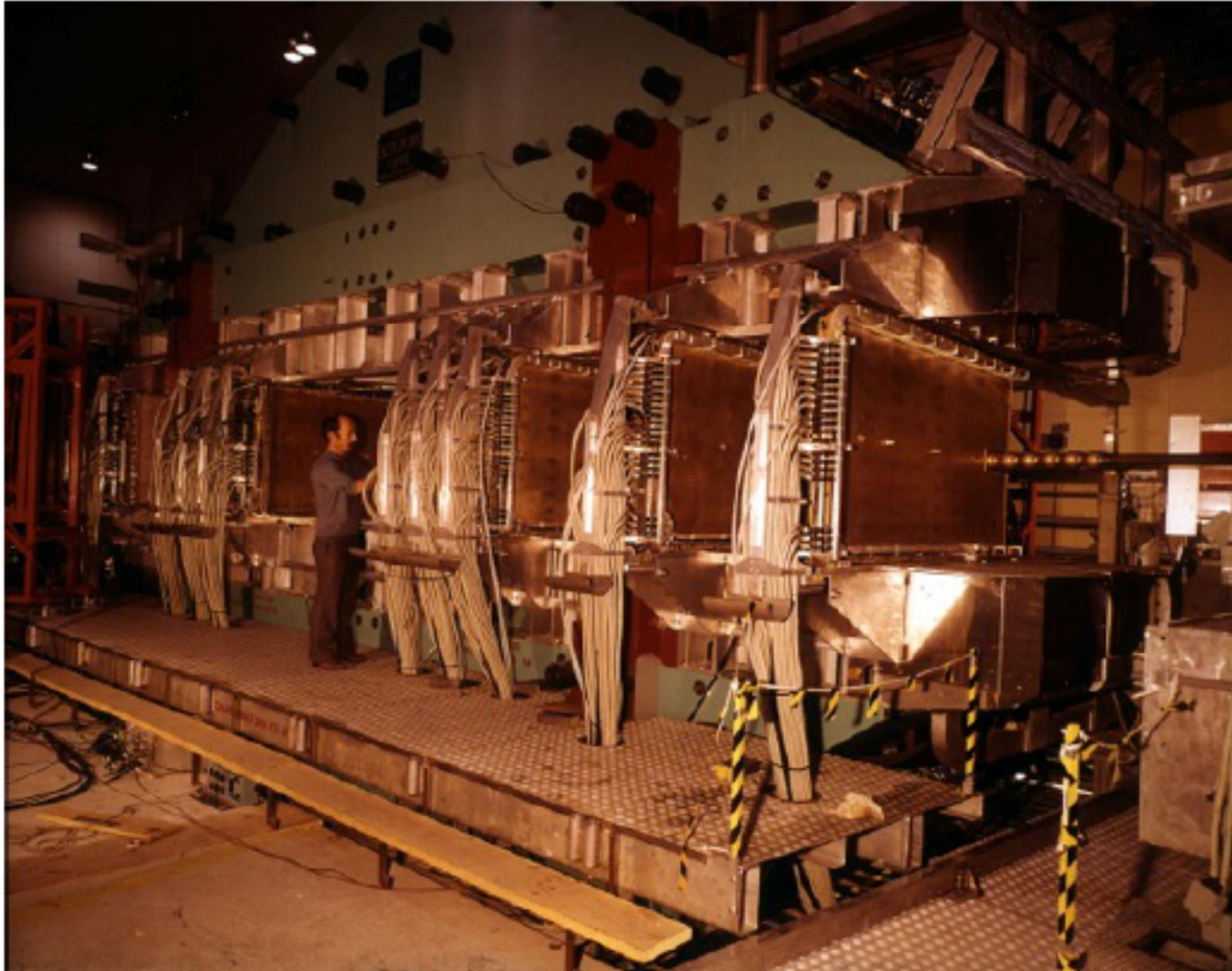
# Test di laboratorio



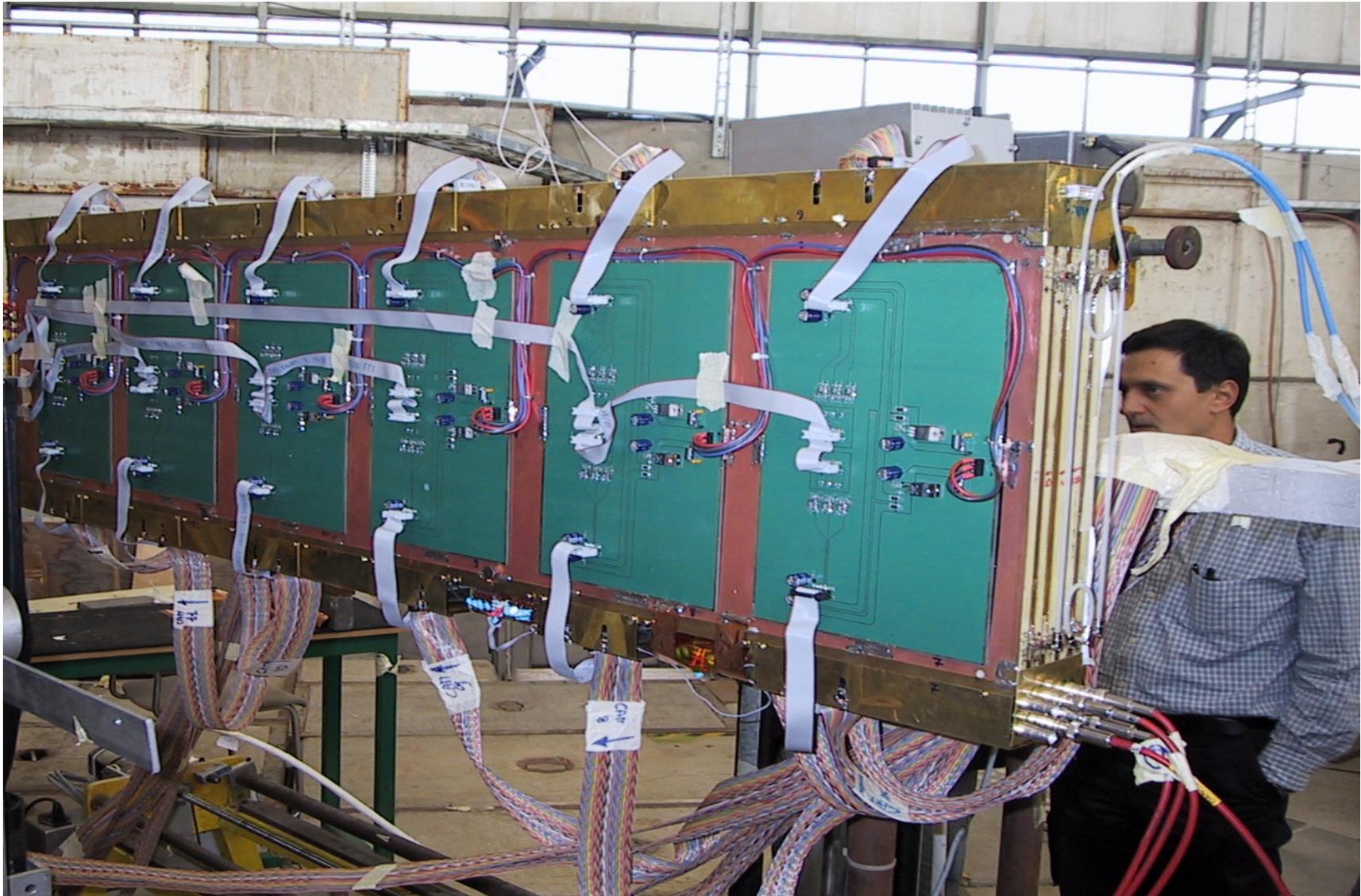
Test su fascio di particelle



## Molte camere a fili in un esperimento (anni '70)



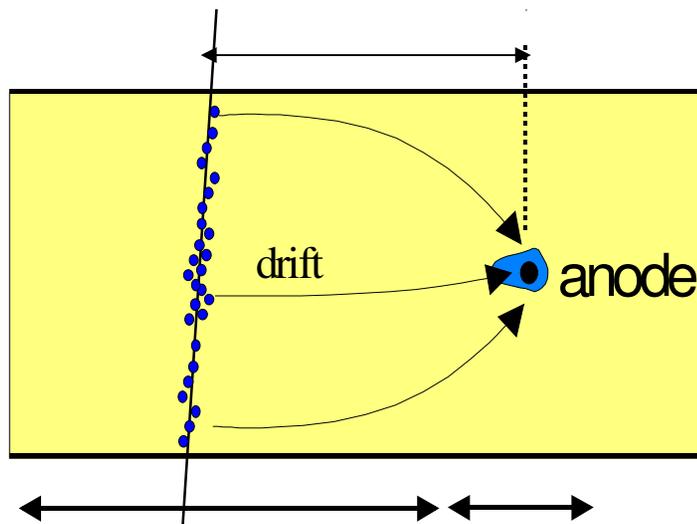
# Camere a fili in un esperimento a LHC: LHCb (2008)



*Camera a deriva*: ~ come una camera a fili, con spaziatura maggiore

Misura del *tempo* fra il segnale di arrivo sul filo e un segnale di riferimento

La posizione della traccia e' ricostruita in base a quale filo ha dato un segnale e al *tempo di deriva* della carica di ionizzazione



Regione a campo el. basso  
→ Deriva della carica

Regione a campo el. alto  
→ Moltiplicazione della carica

|

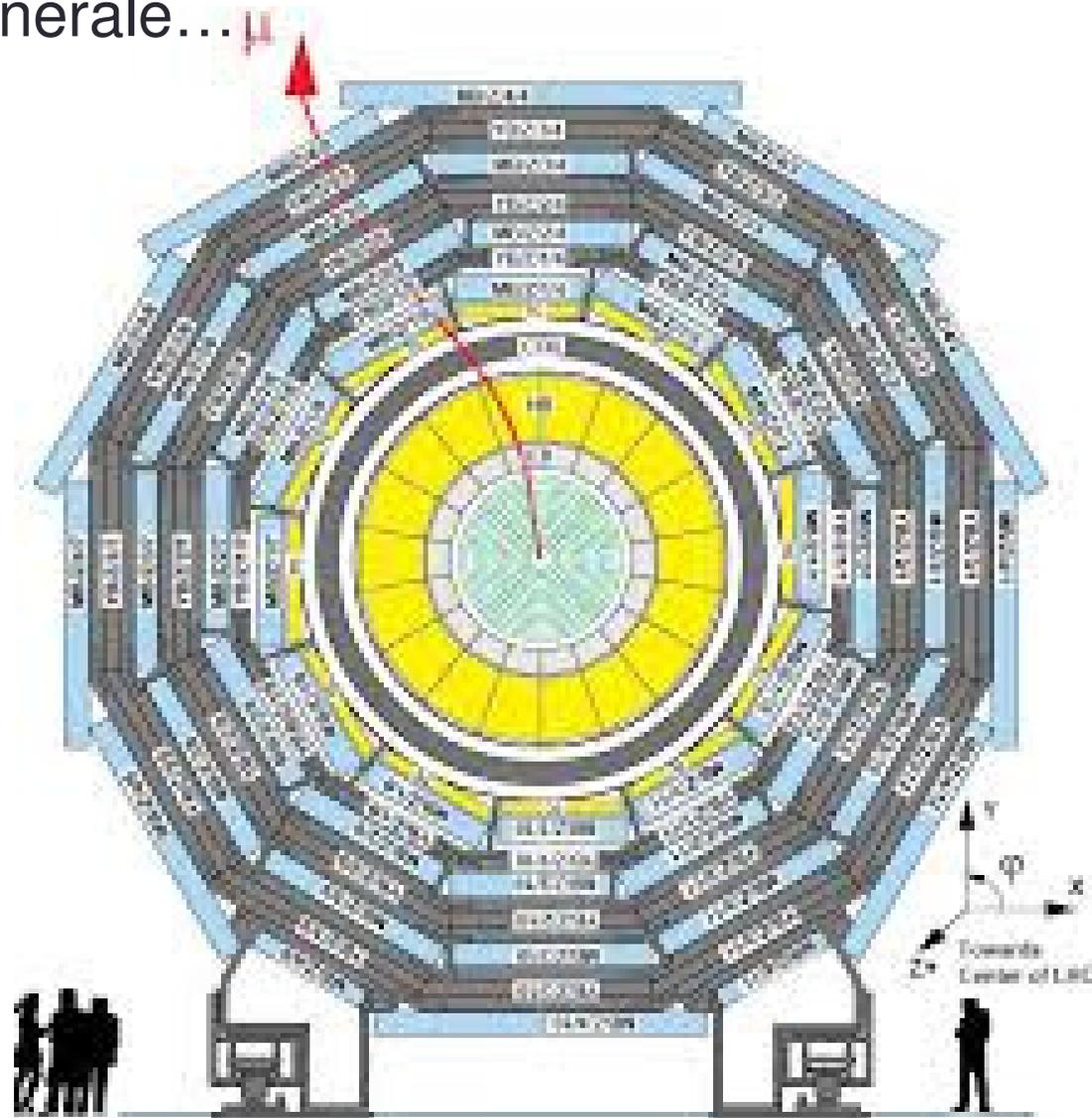
# Camera a deriva *cilindrica* di grandi dimensioni per CDF (Tevatron)



## Camere a deriva di grandi dimensioni per il rivelatore di muoni di CMS (LHC)



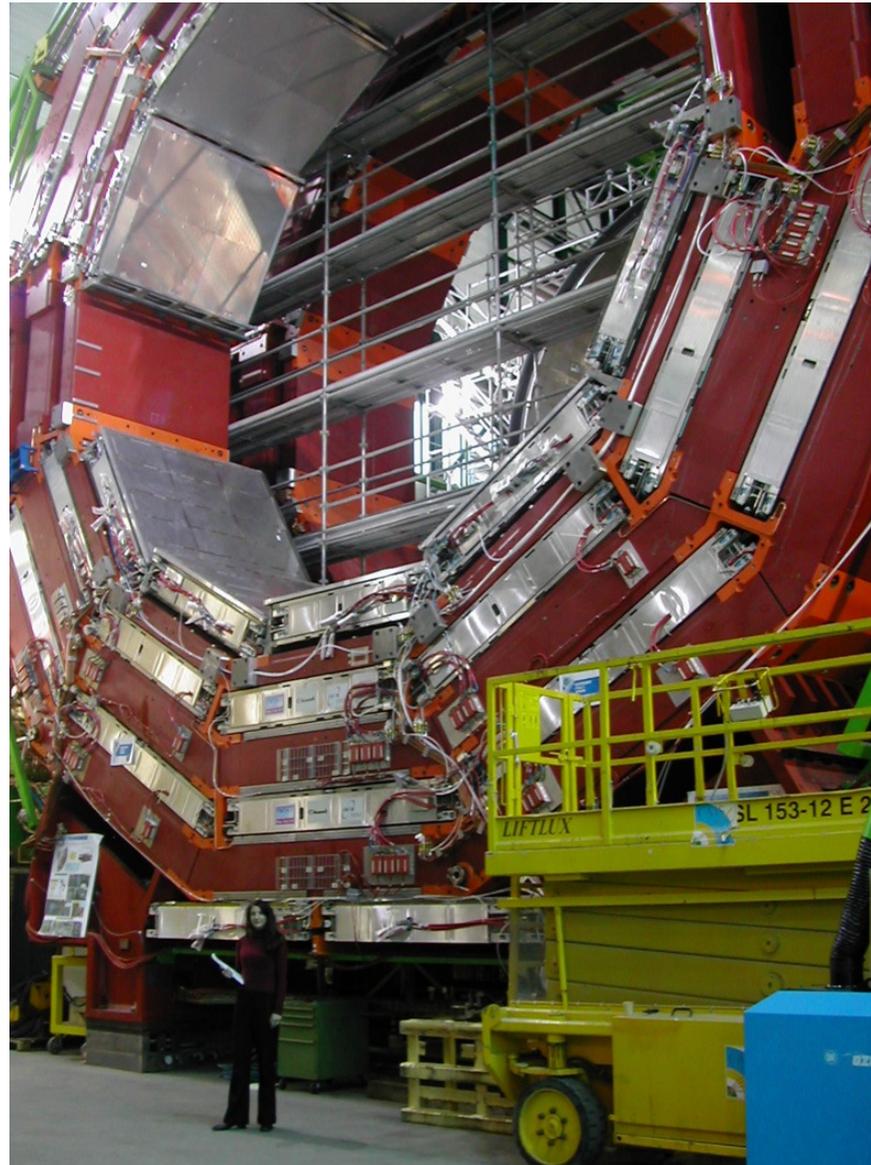
# CMS: Rivelatore di muoni – 2400 m<sup>2</sup> di camere a deriva Schema generale...

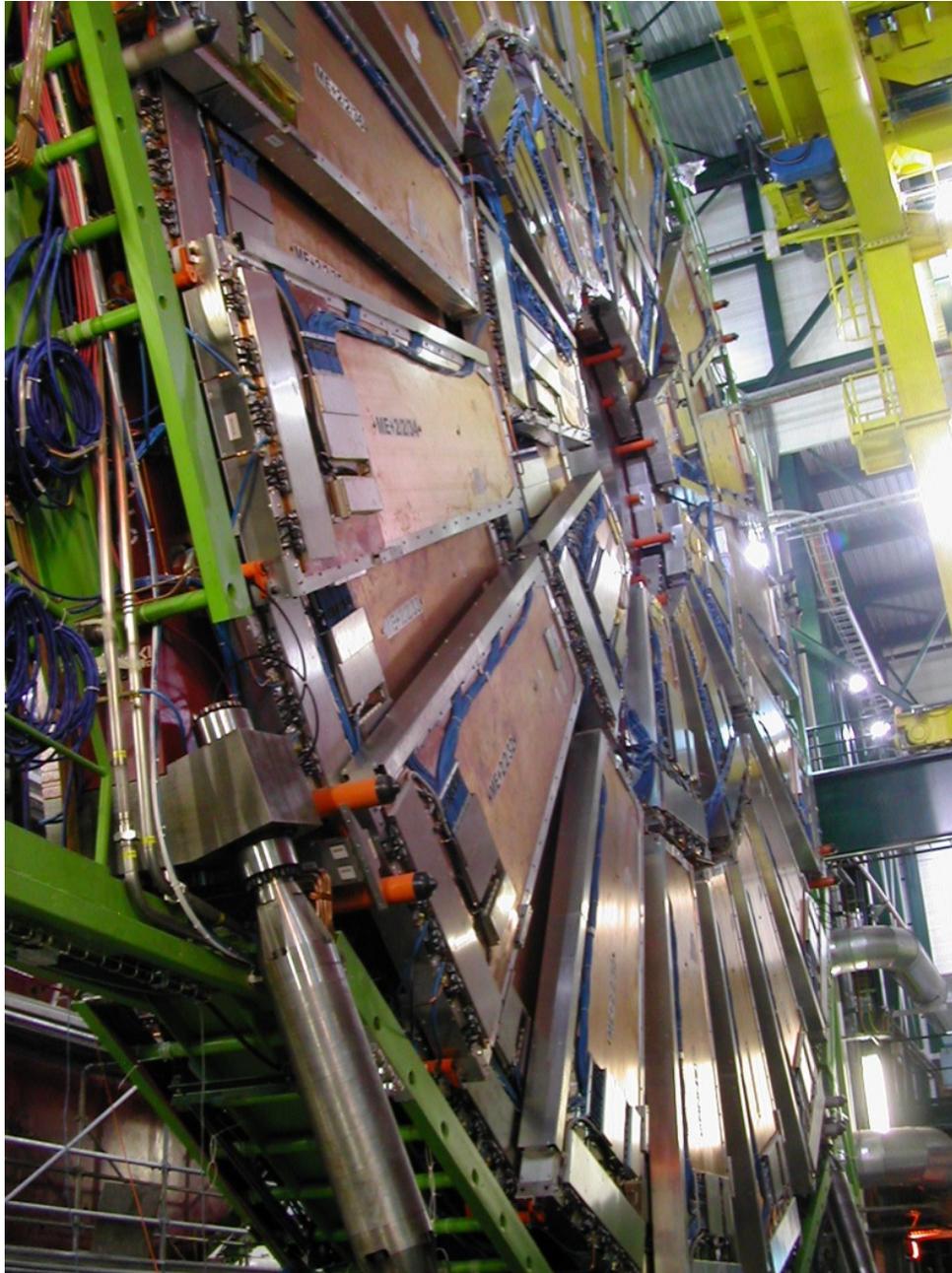


## ...Montaggio...



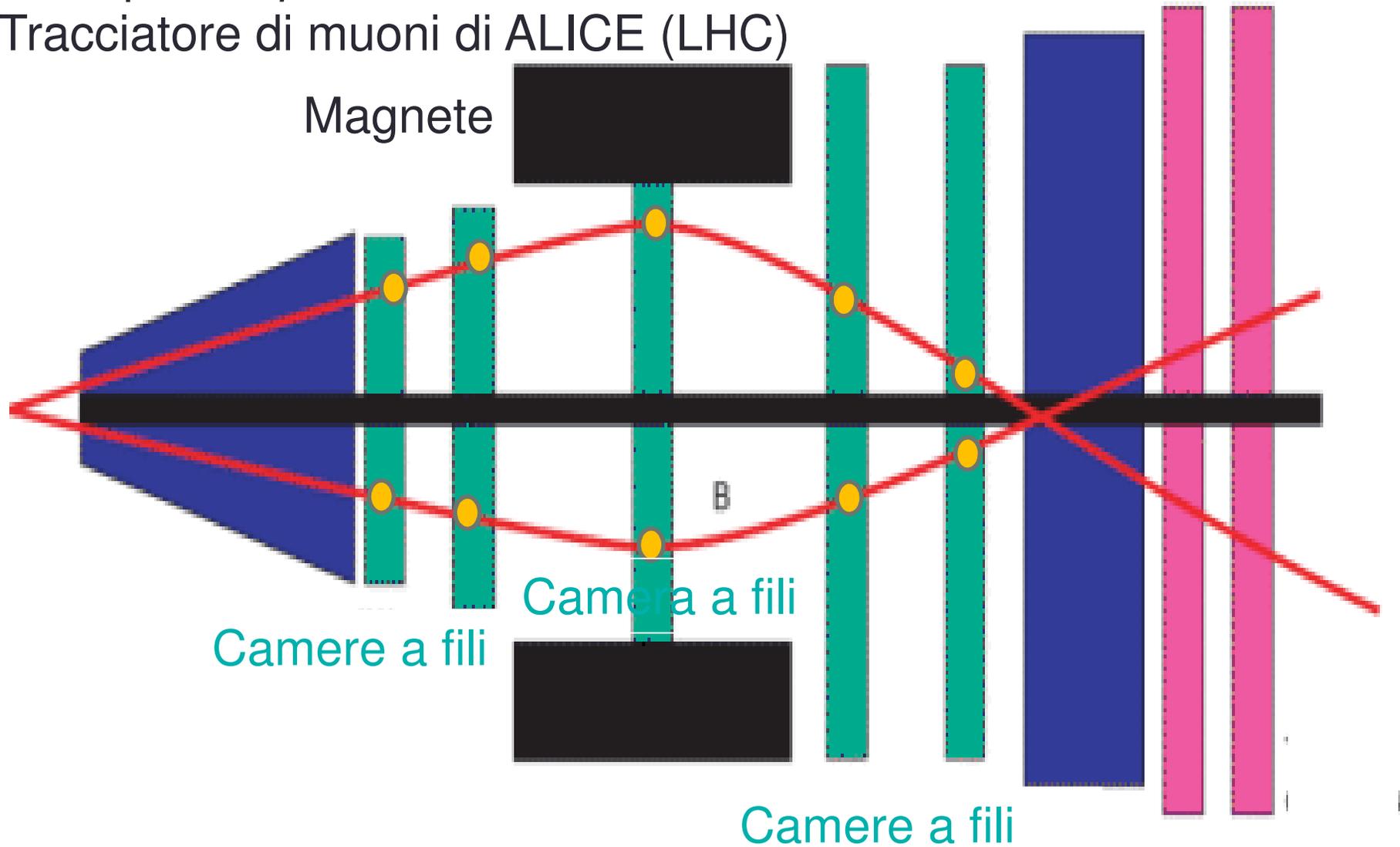
## ...segmento di rivelatore completato





Camere a muoni per uno dei 'tappi' che chiudono il rivelatore nei coni avanti e indietro (CMS)

Esempio di *spettrometro carico*:  
Tracciatore di muoni di ALICE (LHC)



Uso di intensi *campi magnetici*:

Deflessione delle particelle cariche in movimento

Dalla deflessione misurata informazioni sulla traiettoria

Camere: Misurano i *punti spaziali* in cui e' passata la traccia

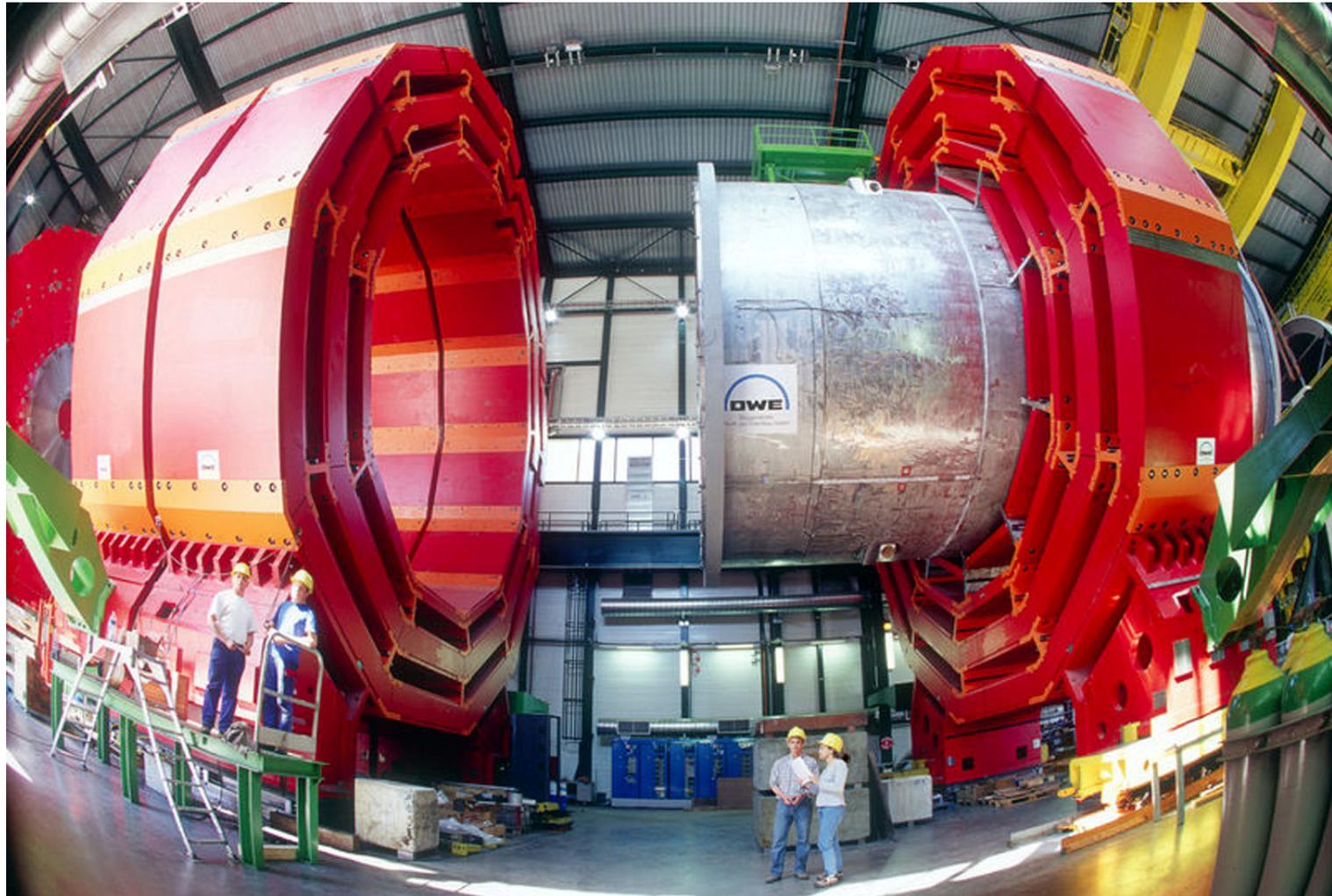
Dai punti spaziali: Ricostruzione della *traiettoria*

Dalla traiettoria: *Direzione e energia* della particella carica

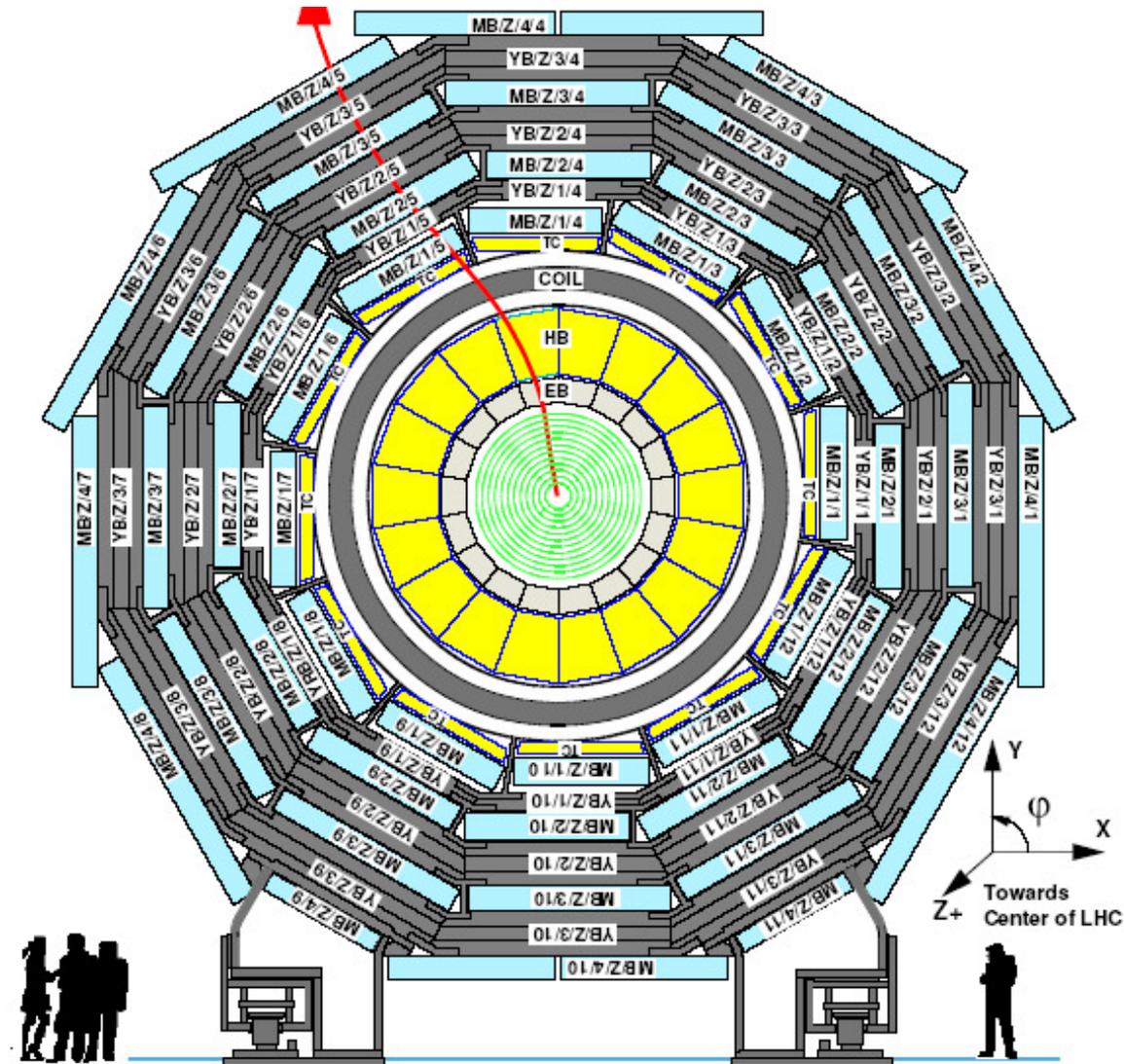
Metodi statistici

Calcoli numerici pesanti

Uso intensivo di computer



Montaggio di un grande magnete a LHC



Ricostruzione di un muone di alta energia a LHC

## Rivelatori al silicio

Con i rivelatori al silicio si possono raggiungere granularità di pochi  $\mu\text{m}$ ; inoltre essendo solidi sono autosostenenti

Possibile raggiungere precisioni di pochi  $\mu\text{m}$  estremamente utili per la rivelazione di particelle a vita breve prodotte nelle collisioni

Silicio: Materiale con proprietà elettriche a metà strada fra isolanti e conduttori

*Semiconduttore*: Materiale la cui capacità di condurre corrente elettrica dipende fortemente da:

*Temperatura* (svantaggio)

*Concentrazione di impurità* (vantaggio)

Dosando opportunamente le concentrazioni di impurità di un tipo o di un altro, si possono realizzare due tipi di semiconduttori, nei quali la corrente elettrica è trasportata prevalentemente da due diversi tipi di portatori di carica:

*Tipo n: Elettroni*, come in un conduttore

*Tipo p: Lacune*, simili a elettroni ma con carica positiva

Aspetto di grande interesse per i rivelatori:

Una giunzione fra un pezzo di tipo  $p$  e uno di tipo  $n$  (*diode*) sviluppa all'interfaccia una zona  $\sim$  priva di portatori di carica

Con l'uso di un'opportuna tensione esterna si stabiliscono condizioni in cui attraverso la giunzione non passa corrente

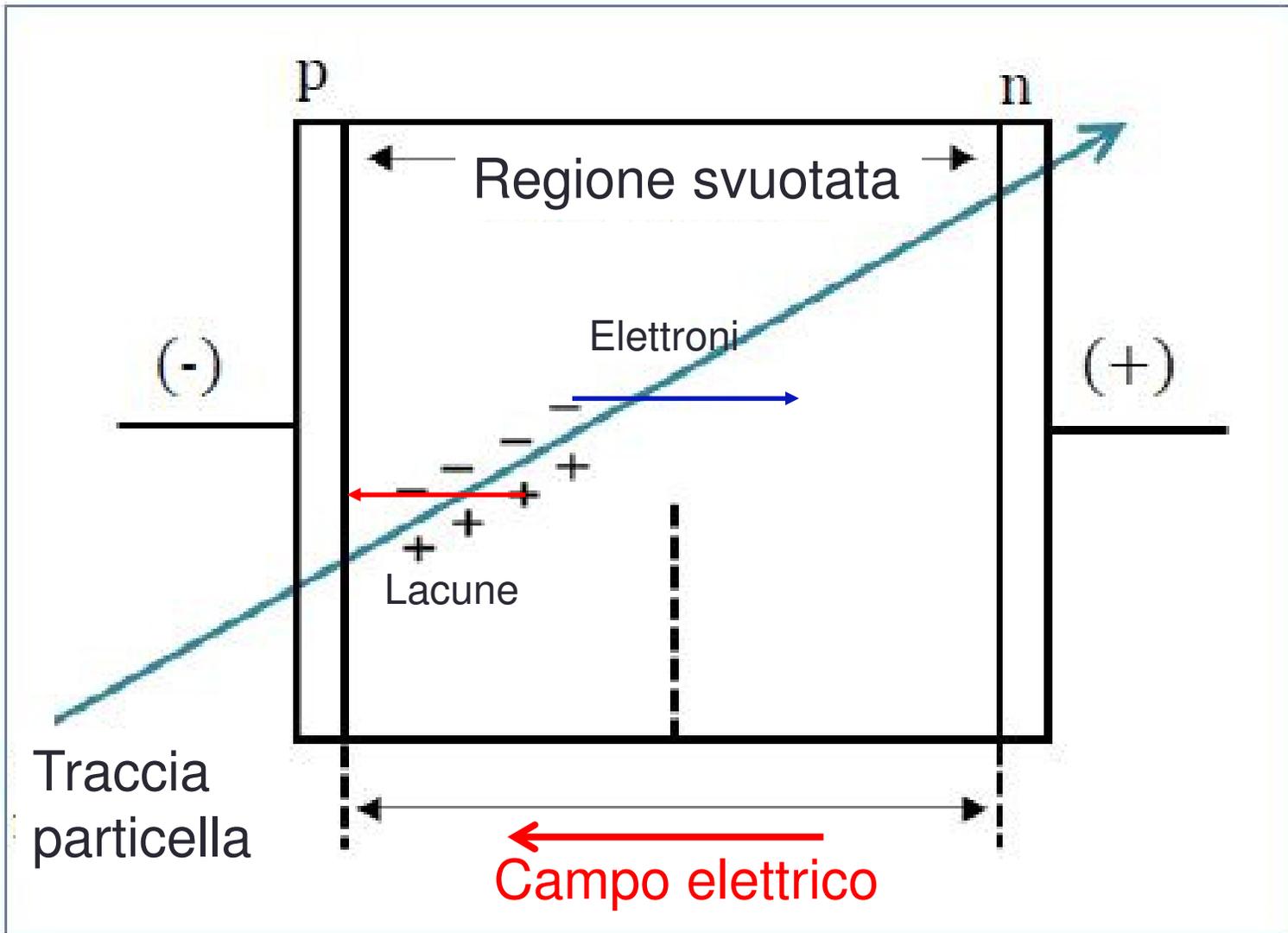
→ Giunzione *svuotata*

Se nella giunzione svuotata passa una particella carica:

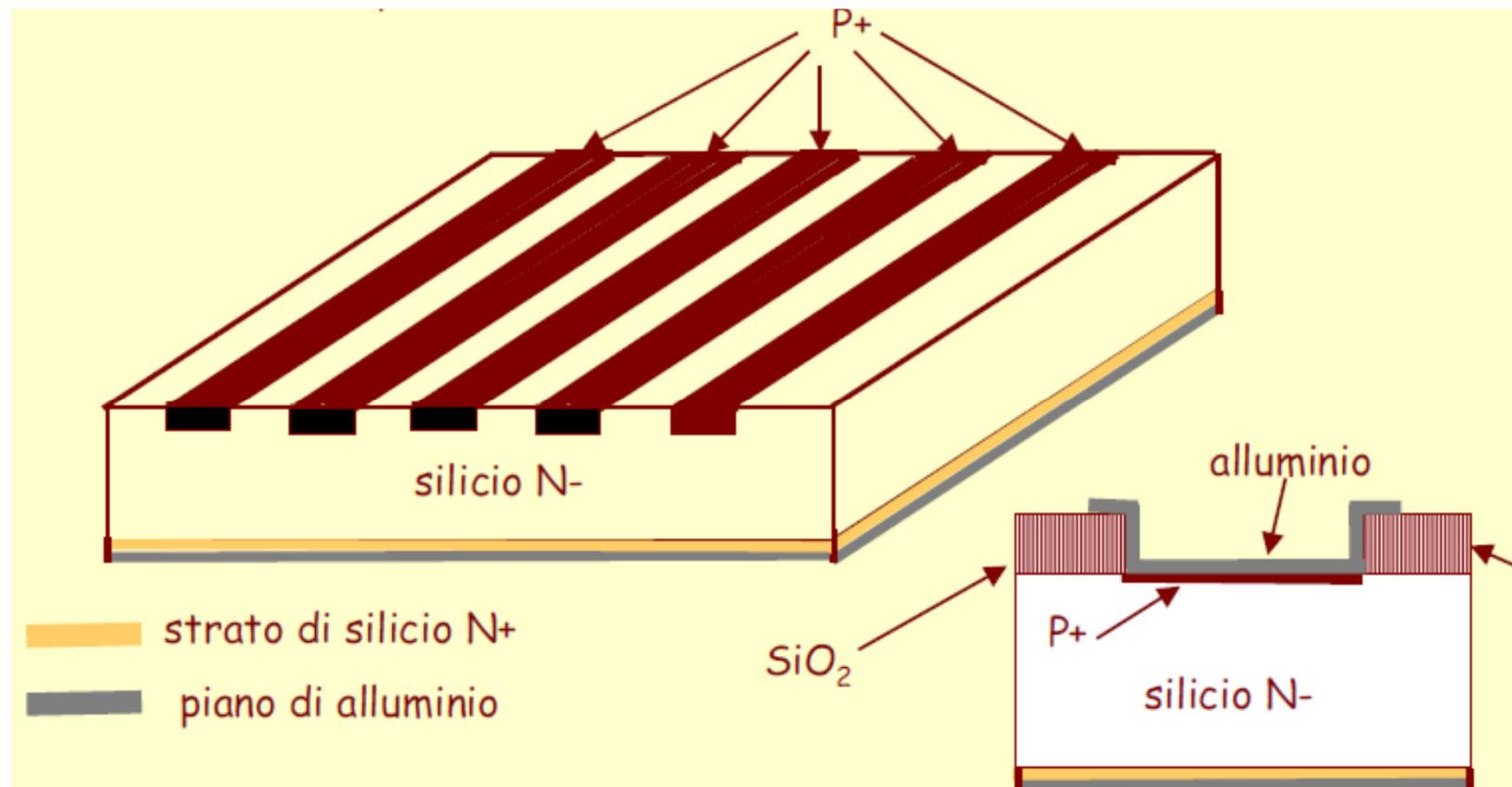
→ 'Ionizzazione', ossia liberazione momentanea di elettroni e lacune mobili

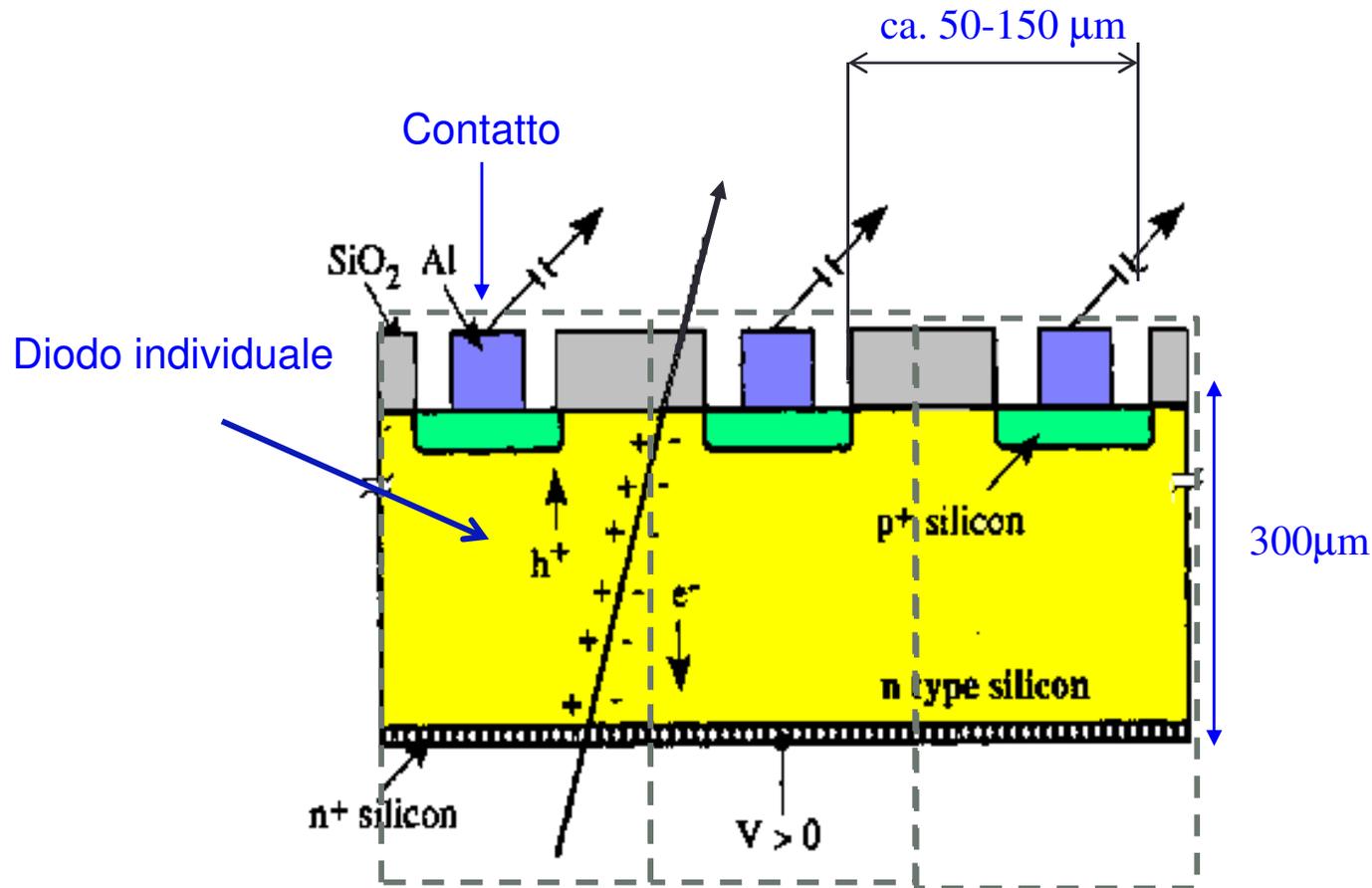
→ Moto di elettroni e lacune nel campo elettrico della regione svuotata

→ Impulso di corrente, analogo a quel che avviene in un gas

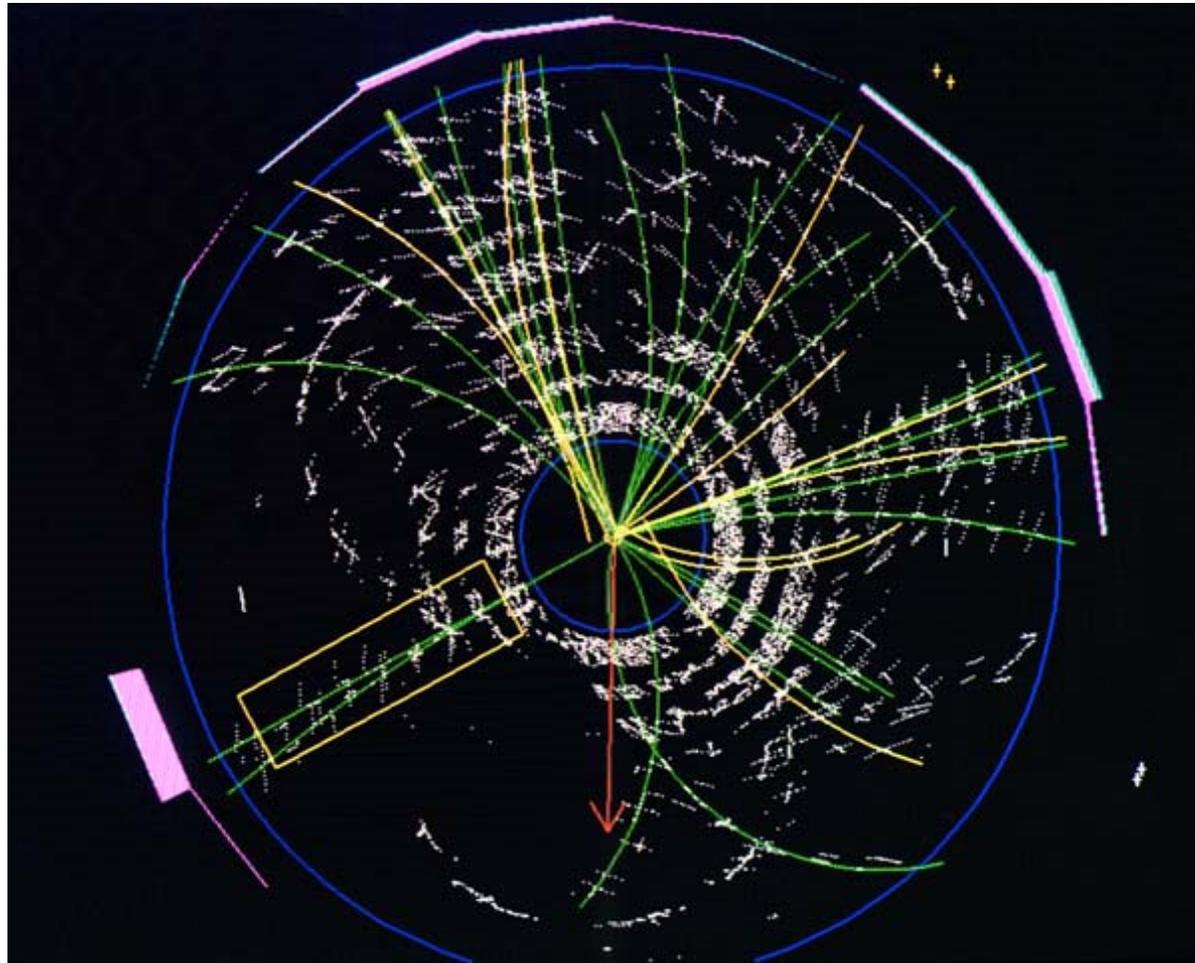


Anni '80: Diventa tecnologicamente fattibile la costruzione stile 'circuitto integrato' di un gran numero di diodi ('microstrisce') sulla stessa base di silicio



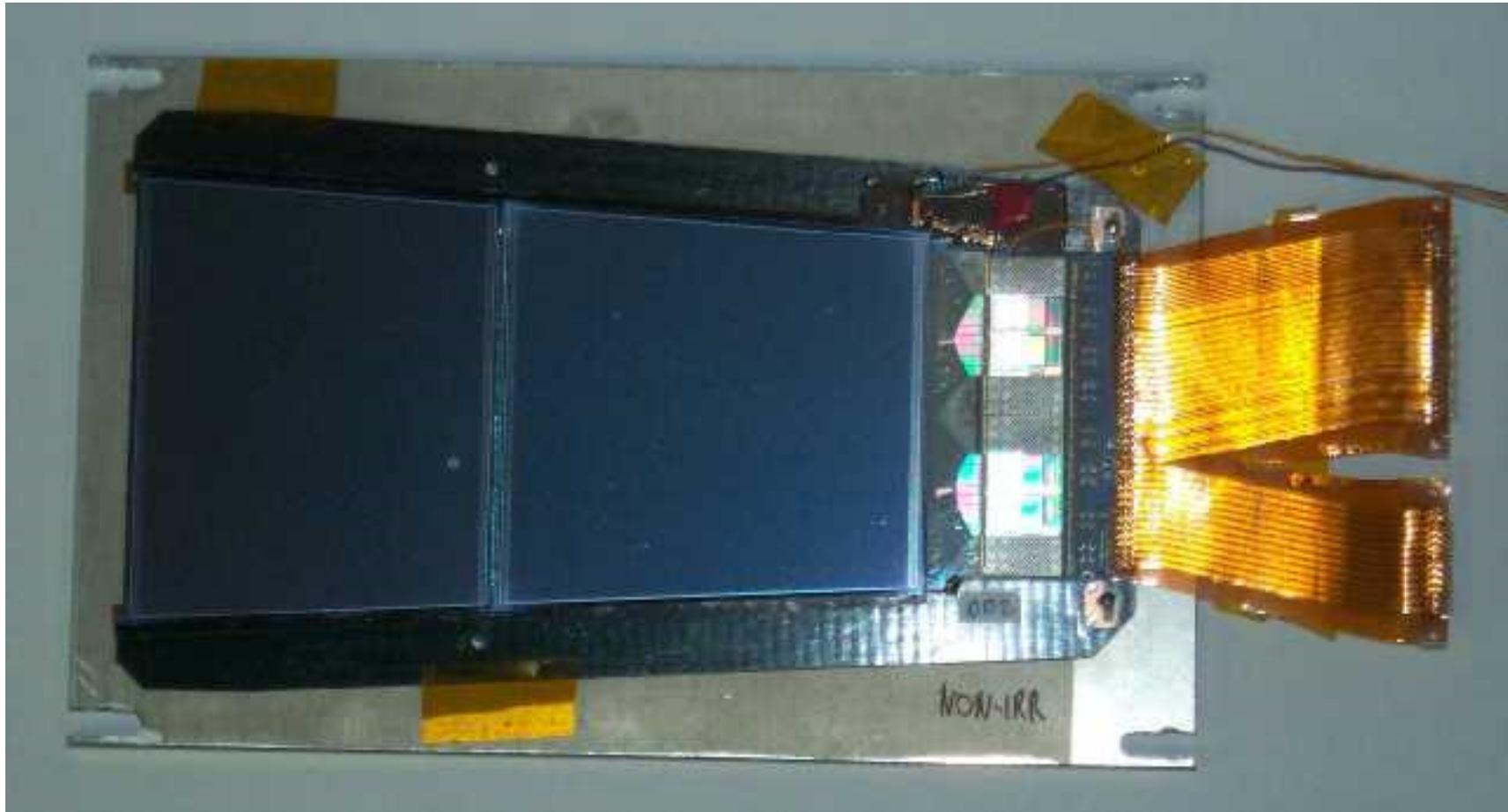


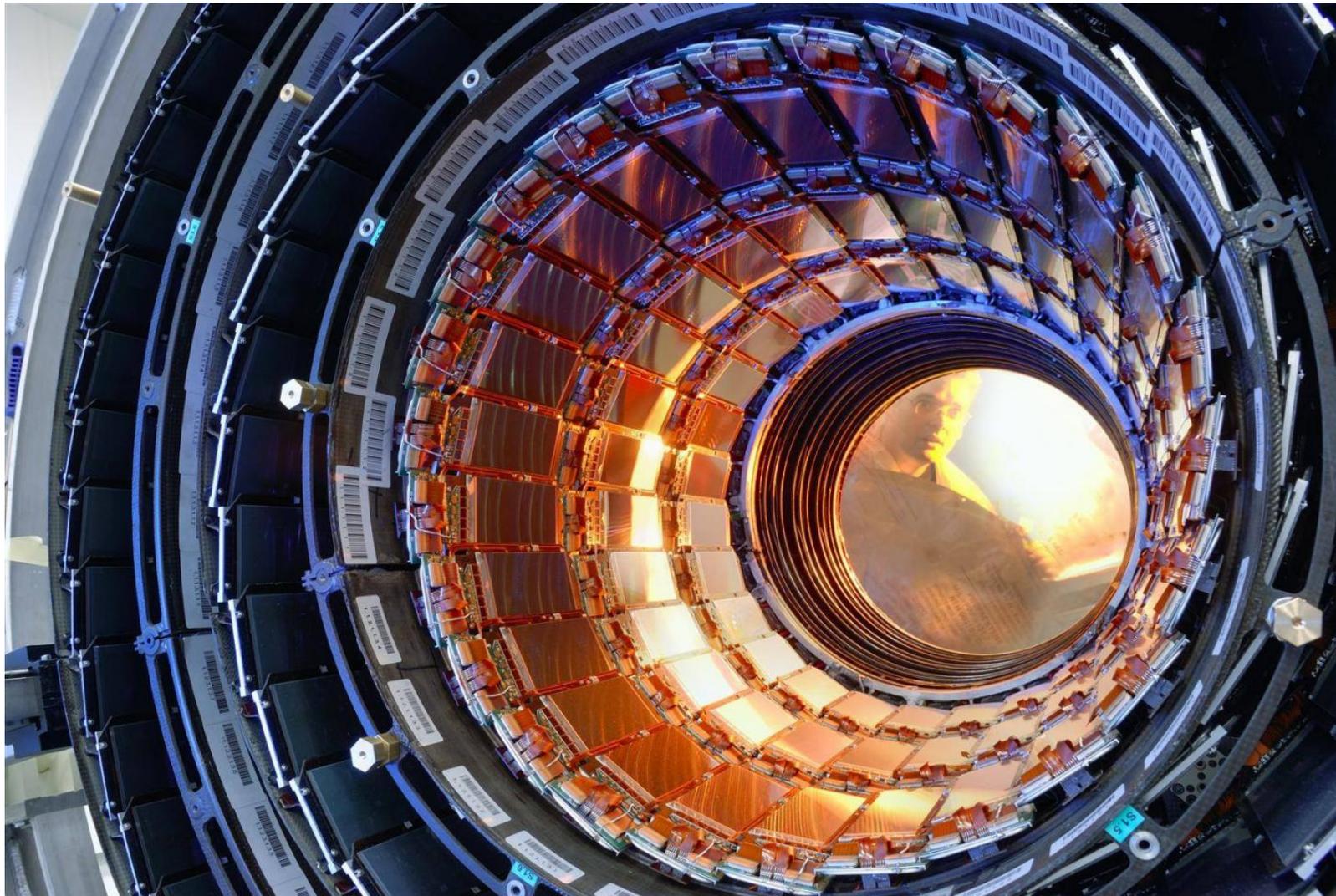
Sensore tipico: Migliaia di strisce, area totale  $\sim 10 \times 10 \text{ cm}^2$   
 Nei grandi esperimenti: Migliaia di sensori  
*Milioni di elementi individuali*



Evento di produzione di un quark Top al Tevatron (CDF):  
Tracce nel rivelatore di vertice a microstrisce di Si

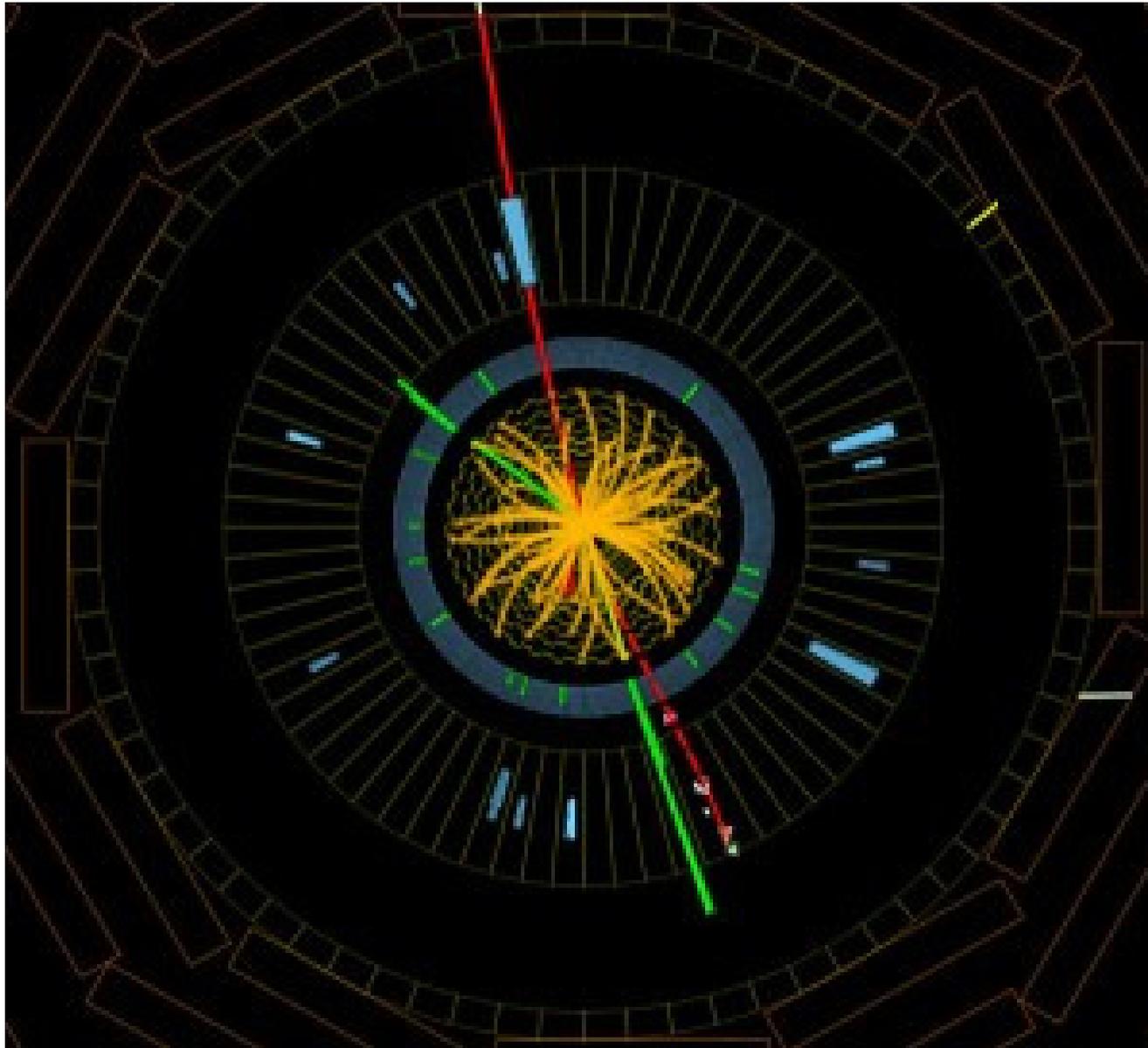
# Rivelatore a microstrisce di silicio per l'esperimento CMS





Tracciatore centrale di CMS: 250 m<sup>2</sup> di silicio  
75 milioni di elementi sensibili individuali

# Esempio: Evento Higgs ricostruito (CMS)



## Limiti degli spettrometri magnetici:

*Solo particelle cariche*

*Perdita di precisione ad alta energia*

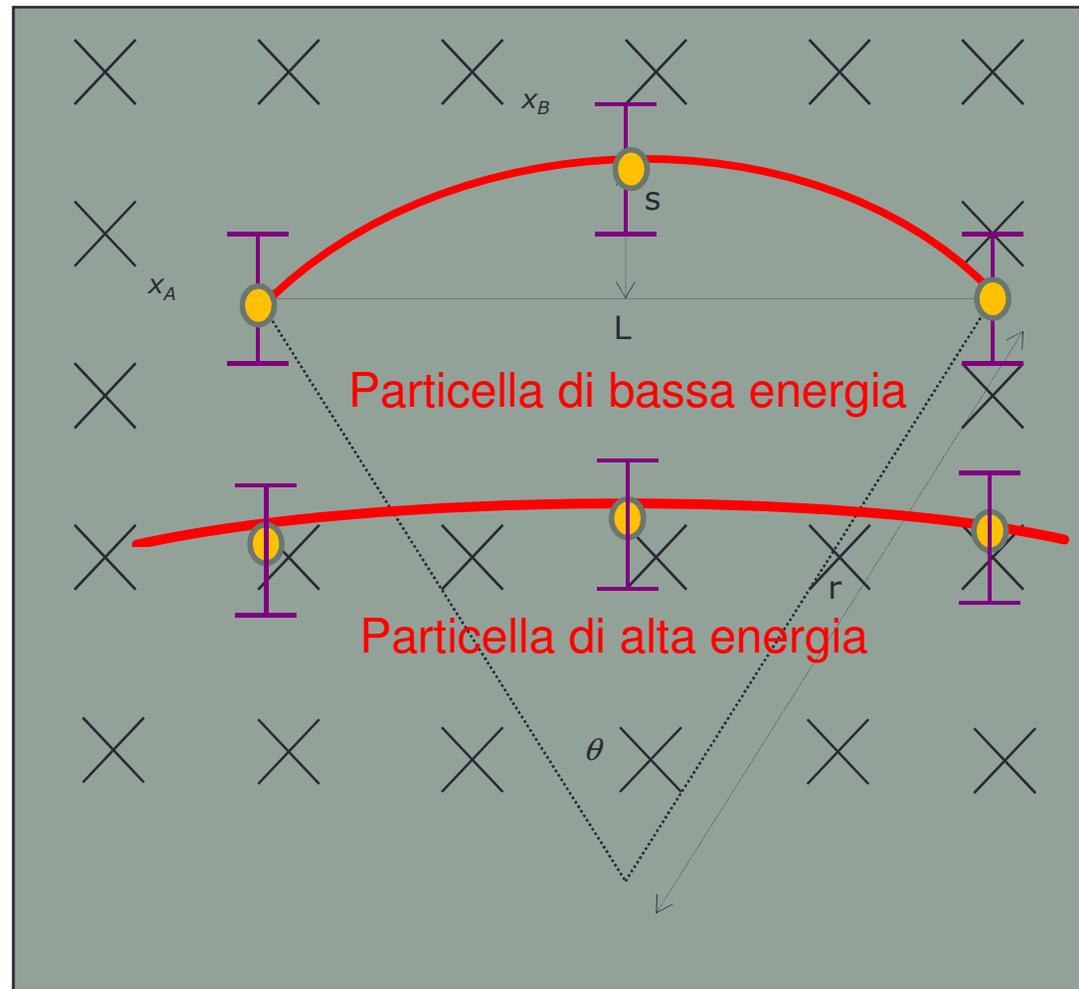


Punto misurato  
con errore di misura

Raggio della circonferenza  
che passa per i punti:

$$r \propto E$$

Ad energia elevata  
l'imprecisione sui punti  
misurati rende molto incerta  
la misura del raggio  
dell'orbita, e quindi la  
misura dell'energia



*Calorimetro*: blocco di materiale strumentato che risponde in maniera proporzionale all'energia  $E$  della particella che lo attraversa.

Usato essenzialmente per misurare  $E$ , ma anche posizione e tempo

Può anche fornire informazioni sul tipo di particella che lo attraversa: infatti particelle di tipo diverso danno una risposta diversa quando attraversano un calorimetro.

Vantaggio principale: *Precisione della misura migliora con  $E$*

Svantaggio principale: Misurare l'energia di una particella tramite un calorimetro è un *metodo distruttivo*, poiché la particella viene assorbita dal calorimetro

→Sta quasi alla fine degli apparati sperimentali

## Processi elettromagnetici ad alta energia

### *Radiazione di frenamento*

Principio base: *Ogni carica elettrica in moto accelerato irraggia onde elettromagnetiche*

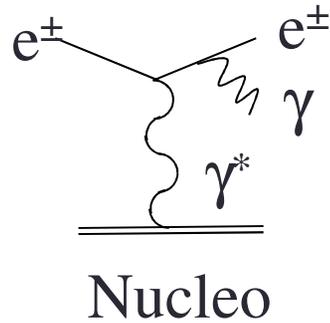
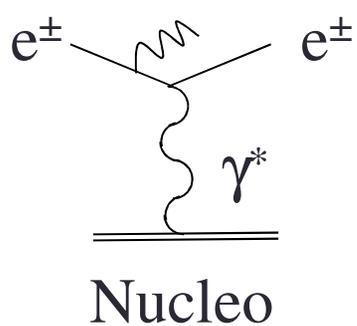
Elettrone/Positrone in moto vicino a un nucleo atomico  
→ Emissione di fotoni di alta energia (raggi gamma)

### *Conversione in coppie $e^+ e^-$*

Principio base:  $E = mc^2$  *equivalenza massa-energia*

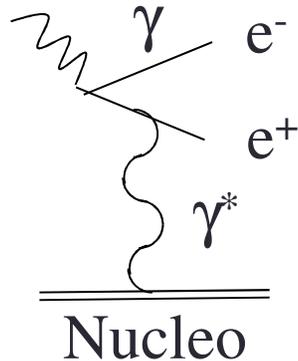
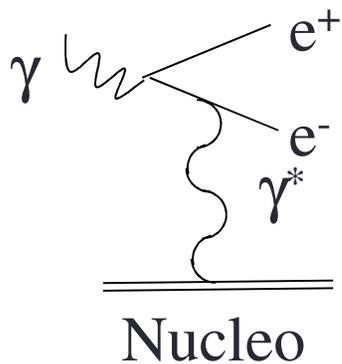
Gamma in moto vicino a un nucleo atomico  
→ Materializzazione con comparsa di una coppia elettrone-positrone

## Diagrammi di Feynman: Radiazione di frenamento



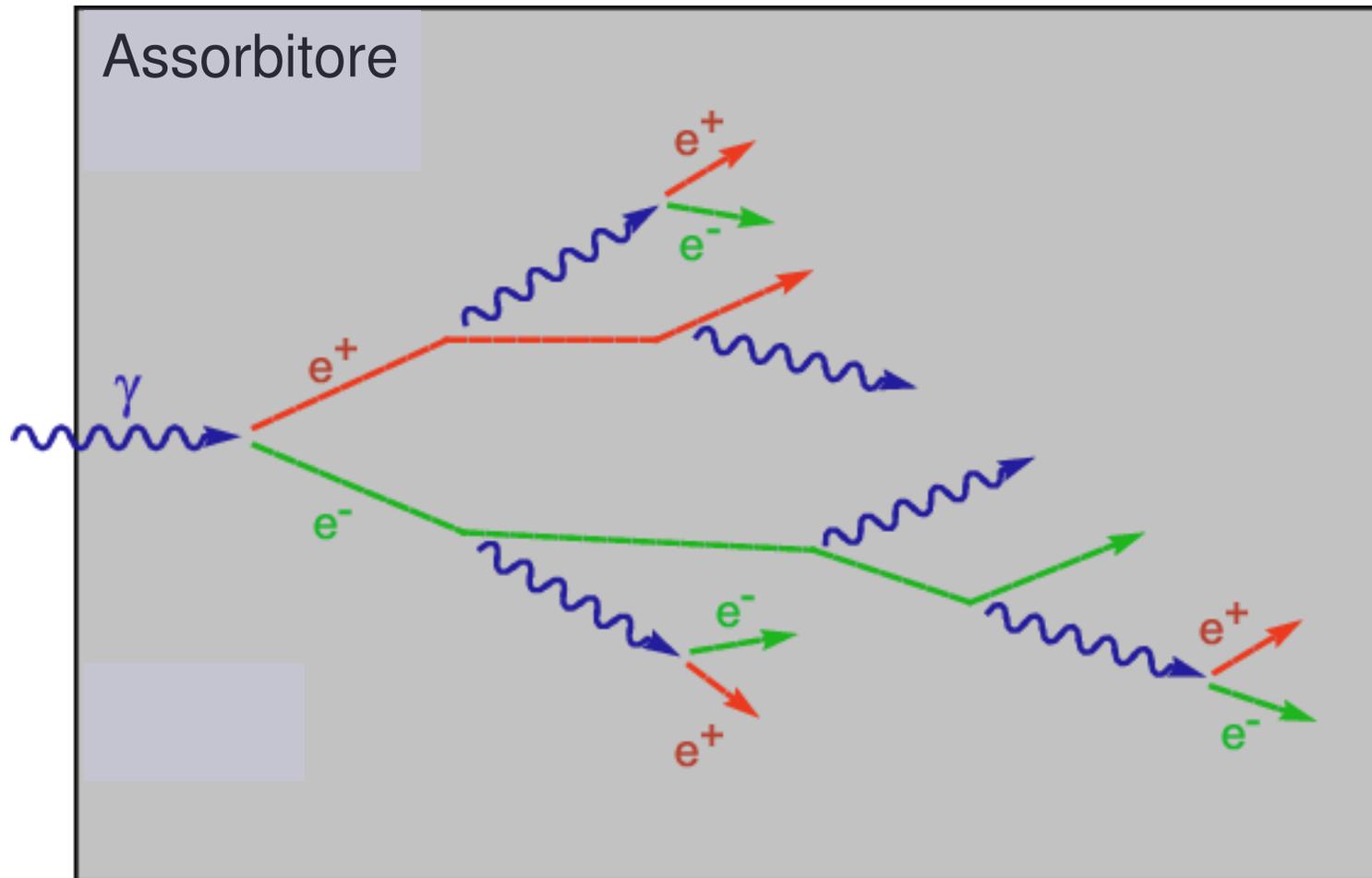
$e^-, e^+$  emettono un raggio gamma prima o dopo l'interazione col nucleo

## Diagrammi di Feynman: Produzione di coppie



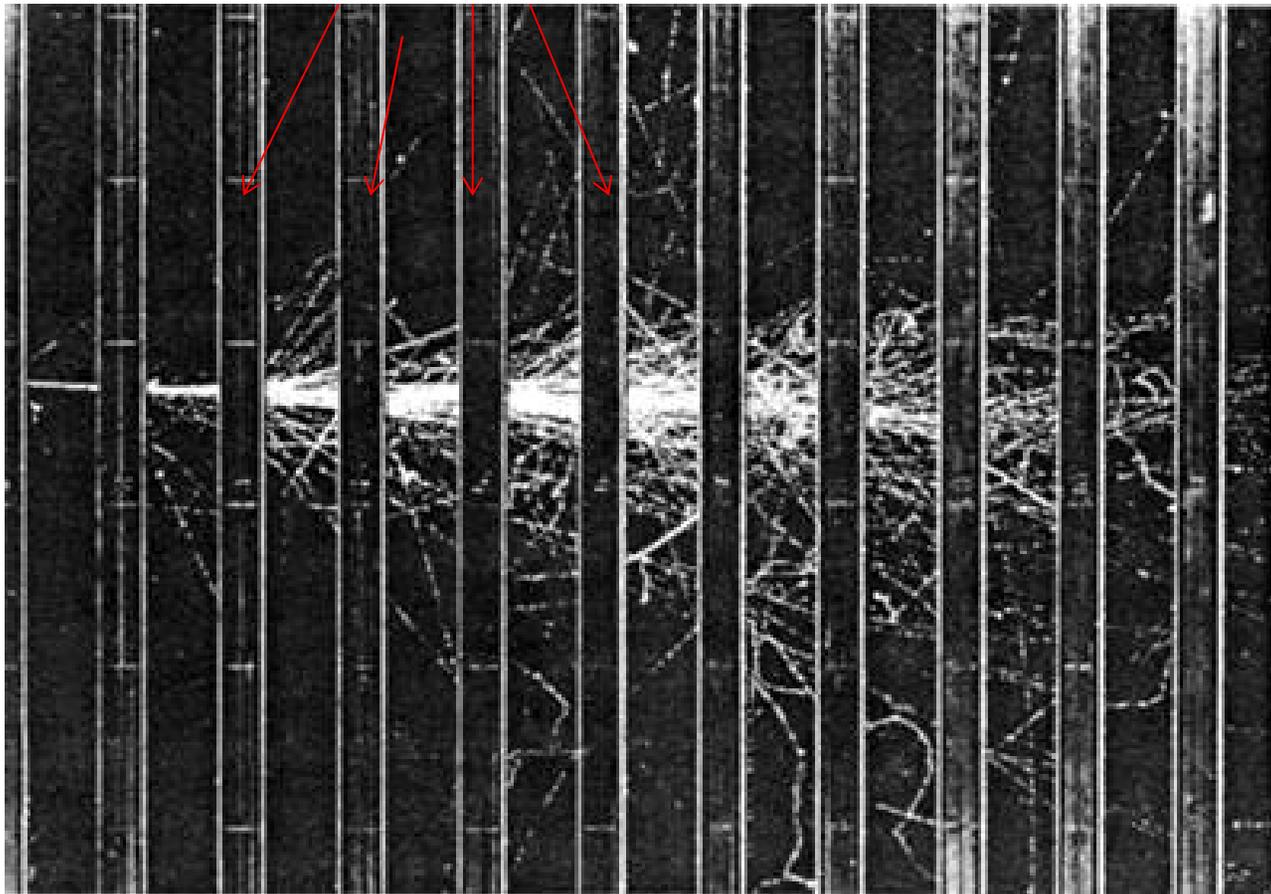
Il raggio gamma converte in una coppia  $e^+e^-$ , e uno dei due interagisce col nucleo

## Moltiplicazione a cascata di elettroni/positroni/gamma: Processo a catena fra irraggiamento e conversione



Abbastanza facile capire cosa succede se si ha un  $e^\pm$  o gamma che attraversa del materiale.

Strati densi



Cascata, o sciame elettromagnetico

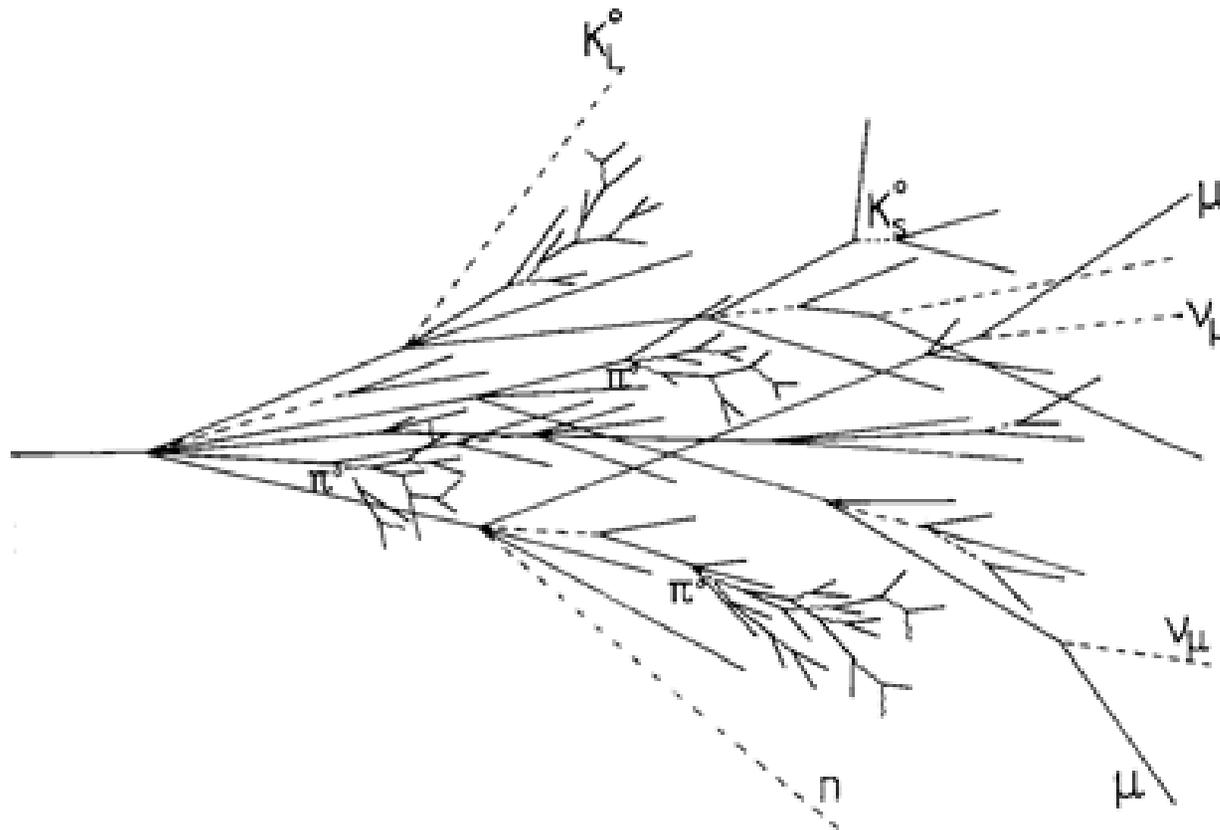
In uno sciame elettromagnetico:  
Rilascio di ionizzazione e scintillazione da parte  
della componente carica

Ionizzazione/Scintillazione totale  $\propto$  Energia iniziale

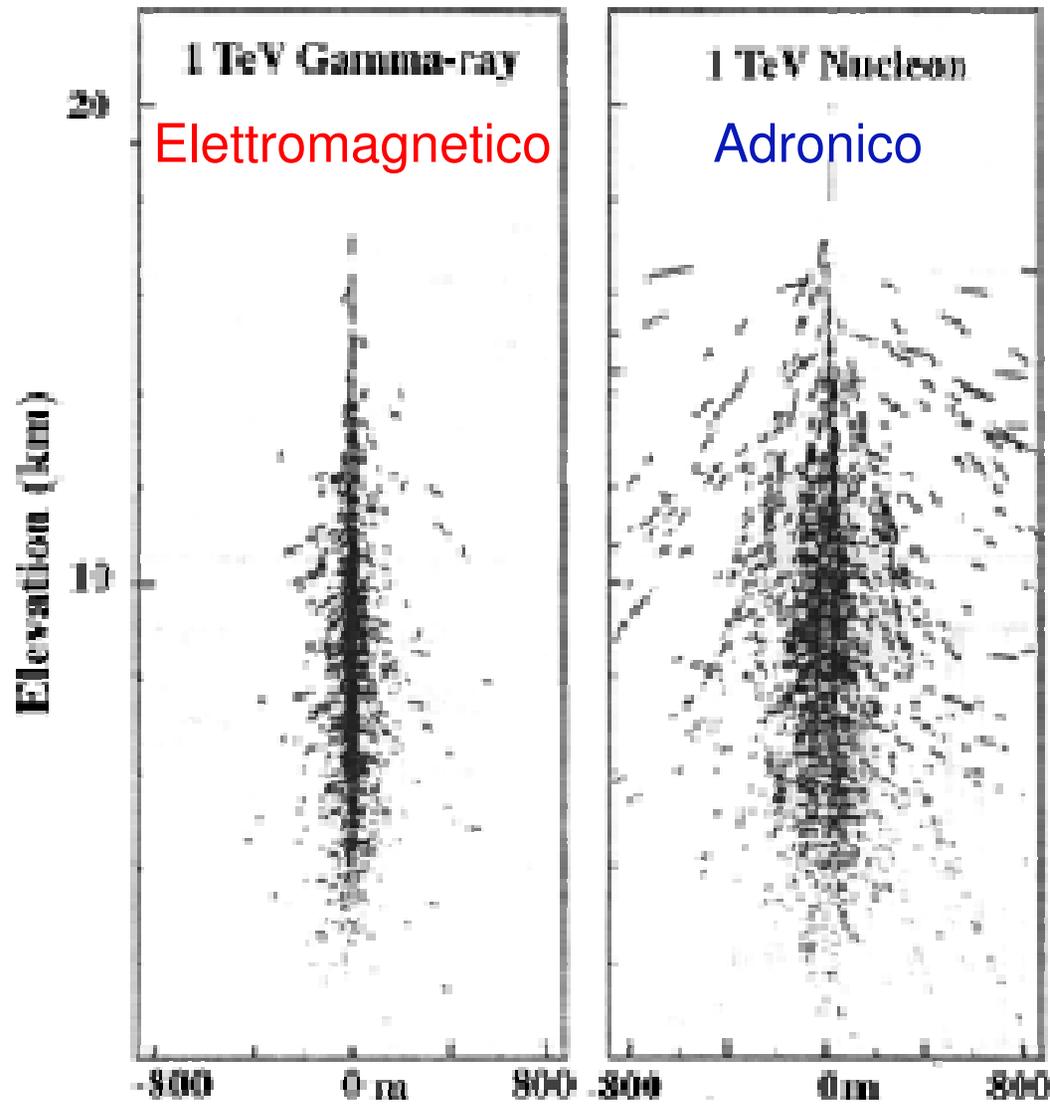
→ Misura della ionizzazione/scintillazione totale  $\equiv$   
Misura dell'energia

Calorimetri elettromagnetici:  
Misurano ionizzazione/scintillazione totale di sciame  
iniziati da elettroni/fotoni di alta energia  
Misure piu' precise ad energie elevate:  
Fluttuazioni statistiche ridotte

Fenomeno simile, con differenze, per assorbimento di particelle soggette all'interazione nucleare (*adroni*):  
Cascata/Sciame adronico



# Confronto fra sciame atmosferici iniziati da raggi cosmici



## Fotomoltiplicatore (PMT)

Il PMT è un dispositivo elettronico che converte un segnale luminoso in un segnale elettrico  
Questo processo avviene principalmente attraverso due stadi

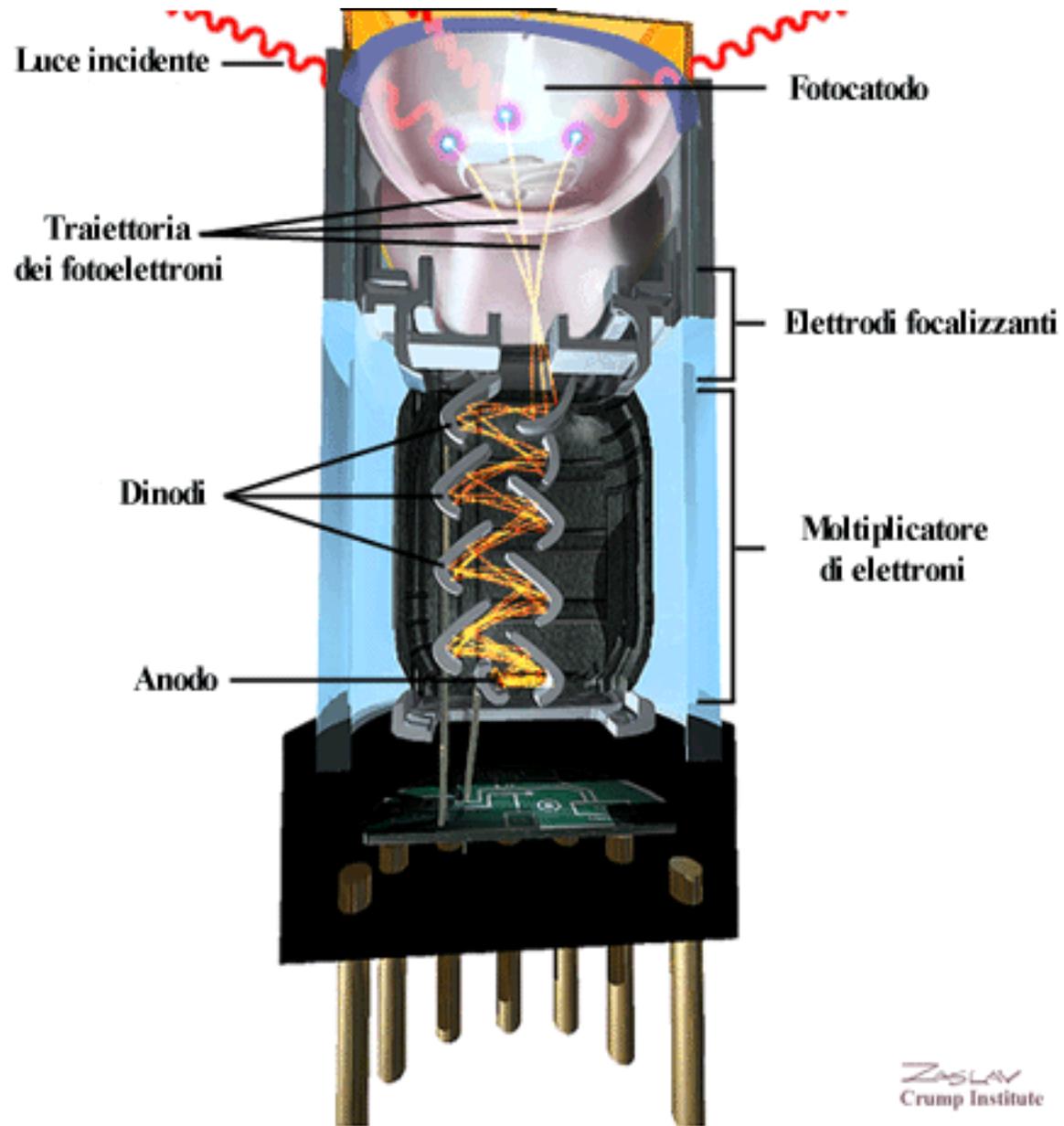
Conversione di un fotone in un elettrone per effetto fotoelettrico

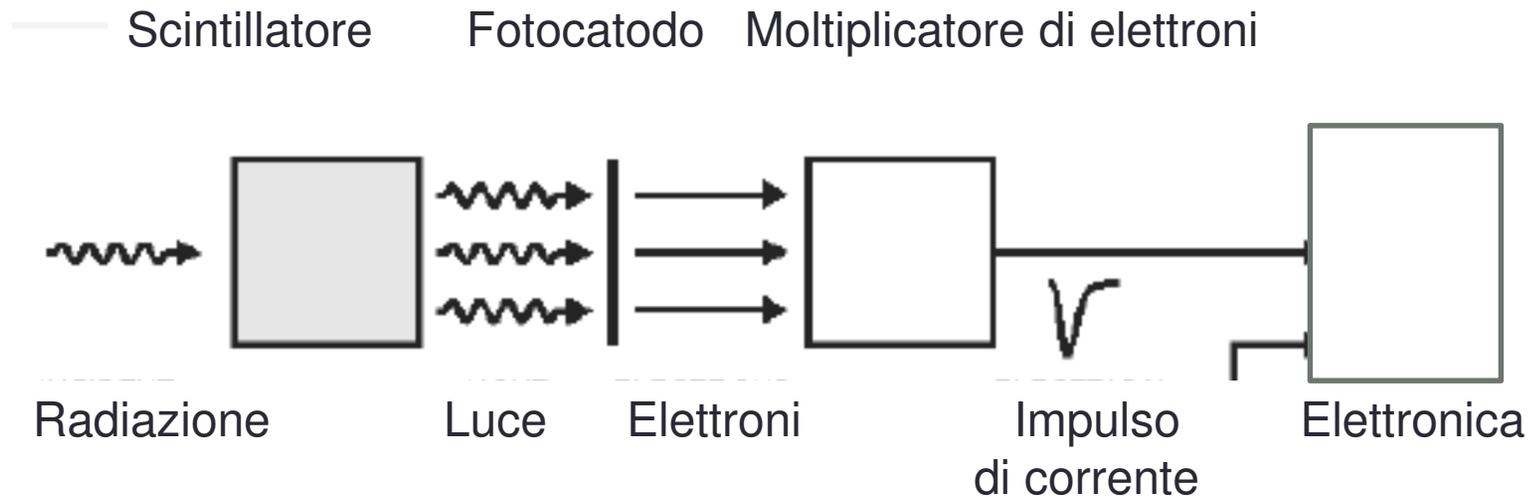


Moltiplicazione del segnale elettrico iniziale



I PMT sono uno **strumento lineare** largamente utilizzato nella fisica delle particelle, spesso abbinati agli scintillatori

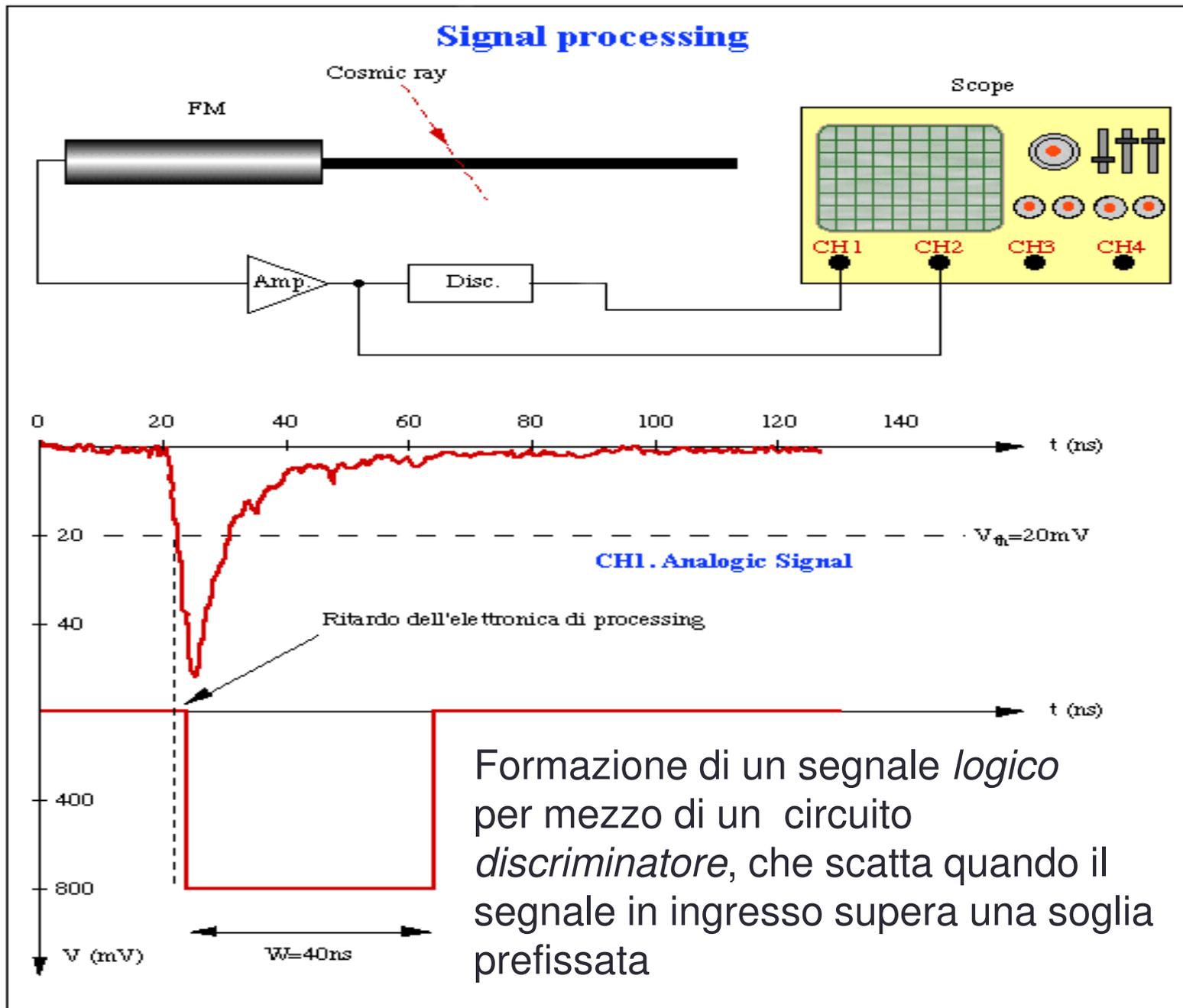




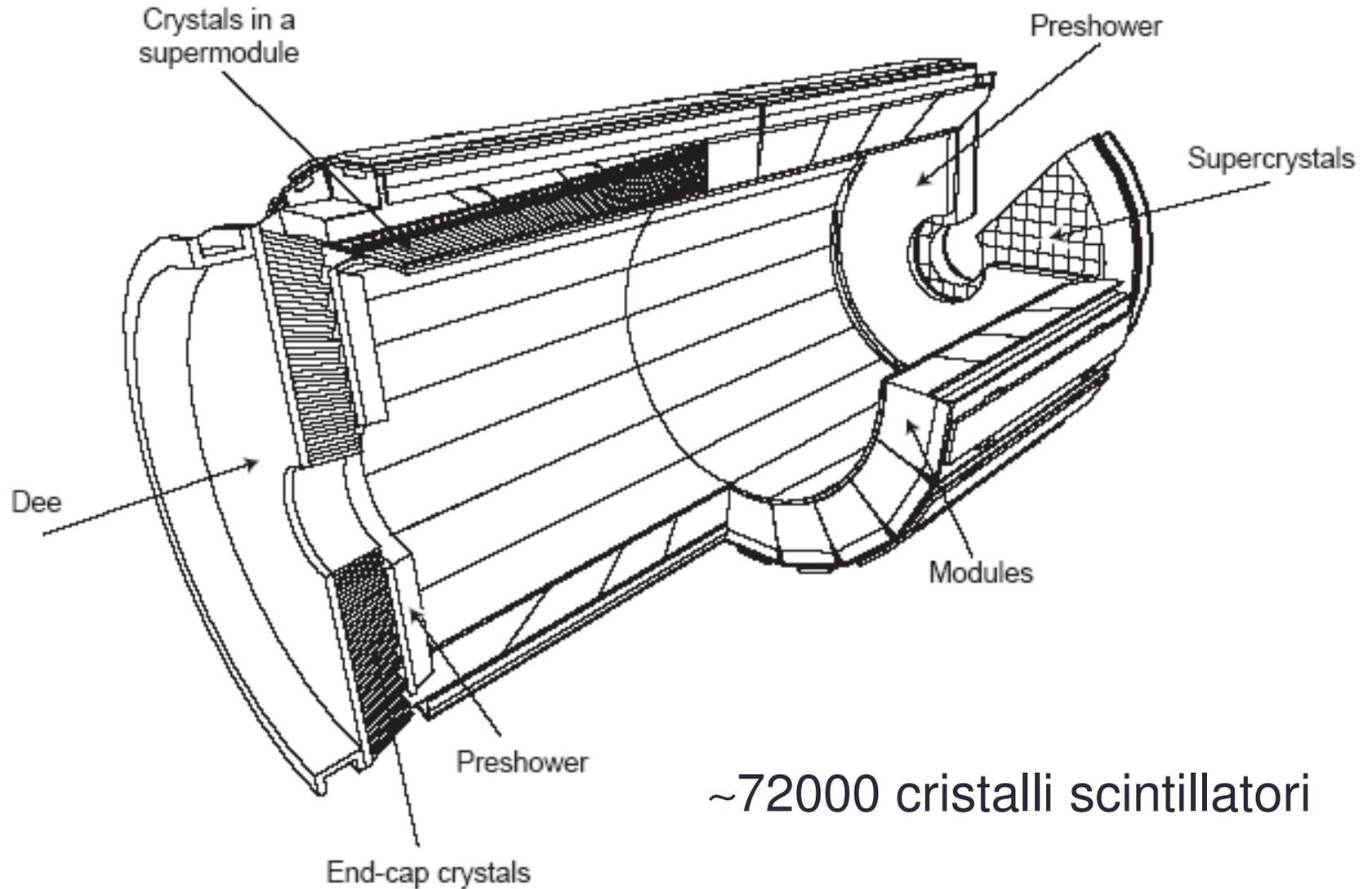
## Conversione

*Energia → Luce → Carica elettrica*

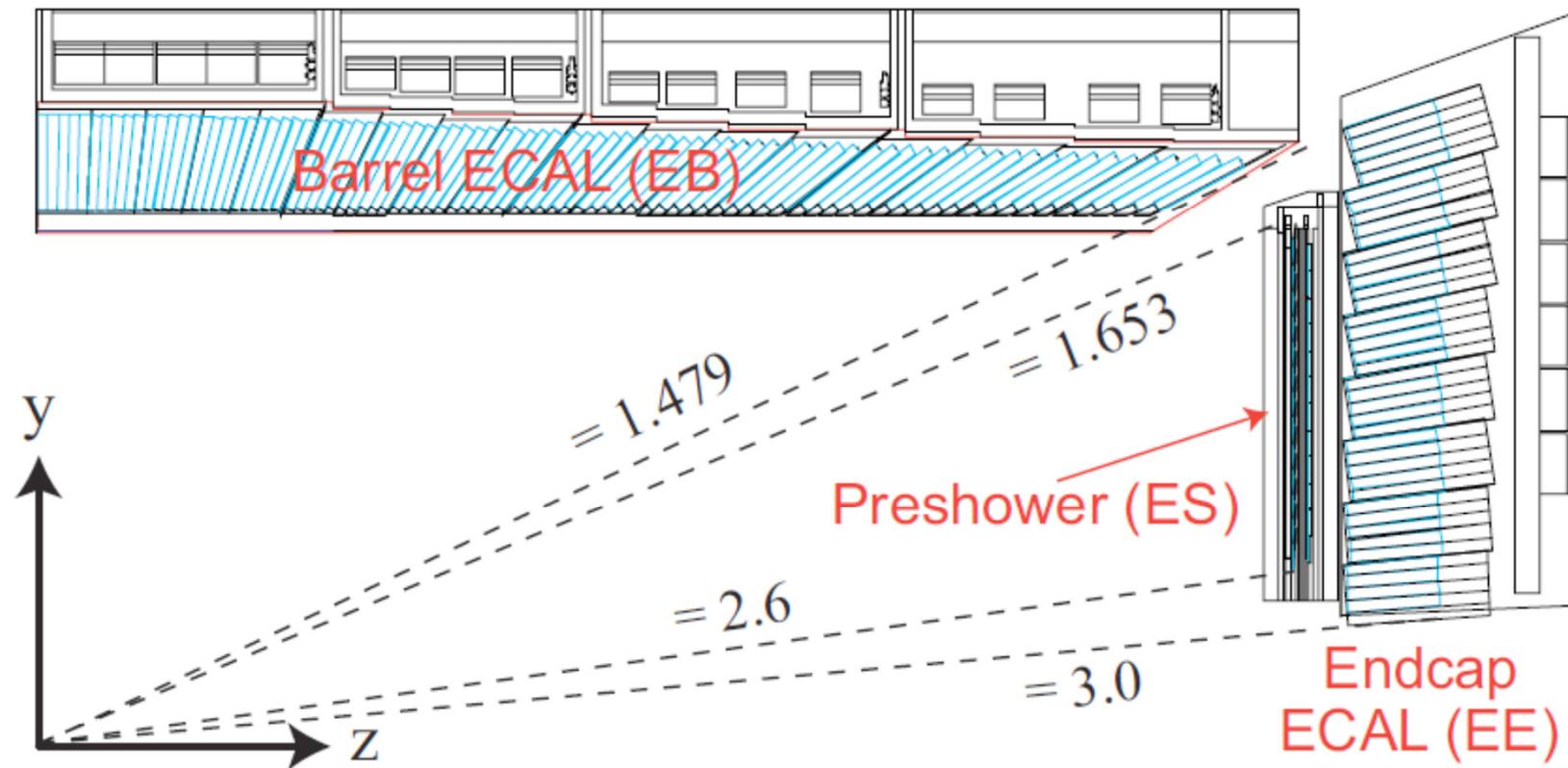
in uno scintillatore+fotorivelatore

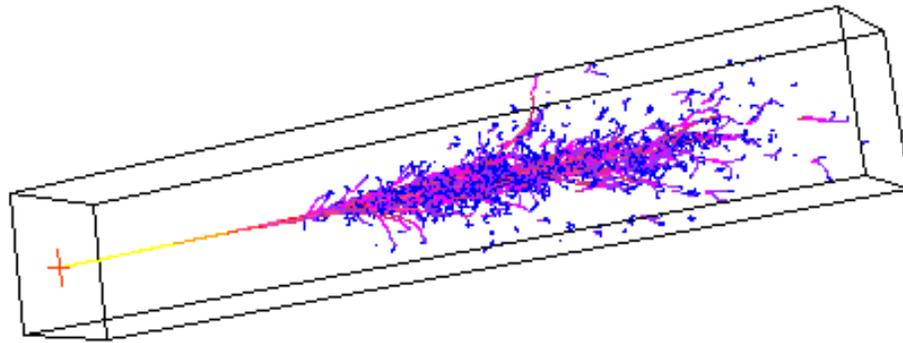


# Calorimetro elettromagnetico di CMS (LHC)

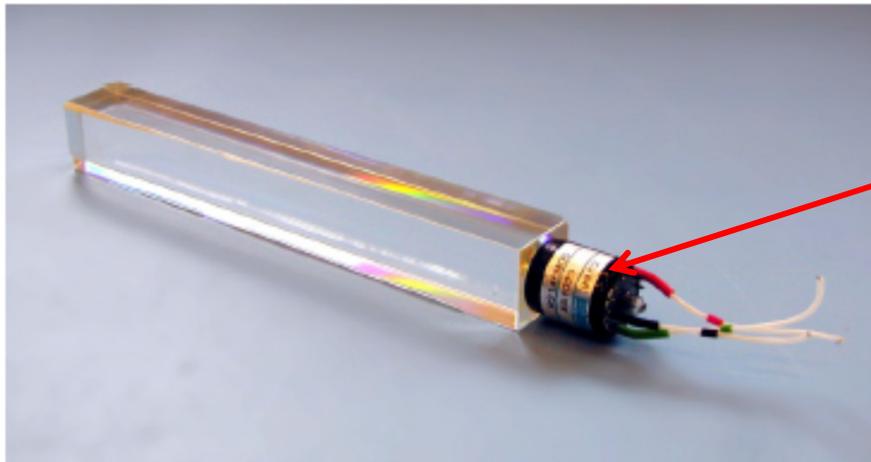


# Sezione longitudinale di un quadrante

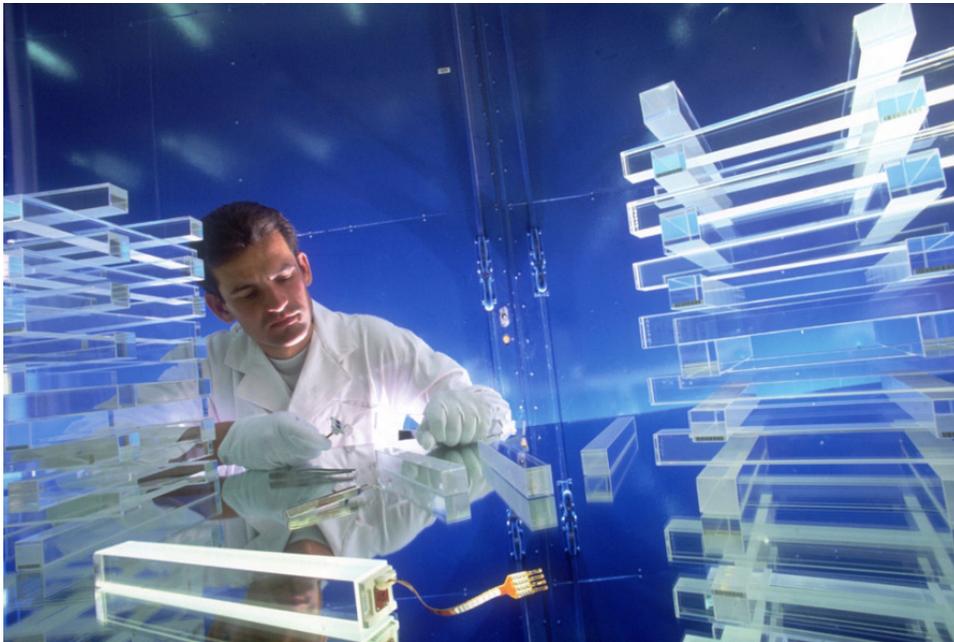




Simulazione dello sviluppo di uno sciame nel cristallo  
La componente carica produce un flash di luce di scintillazione

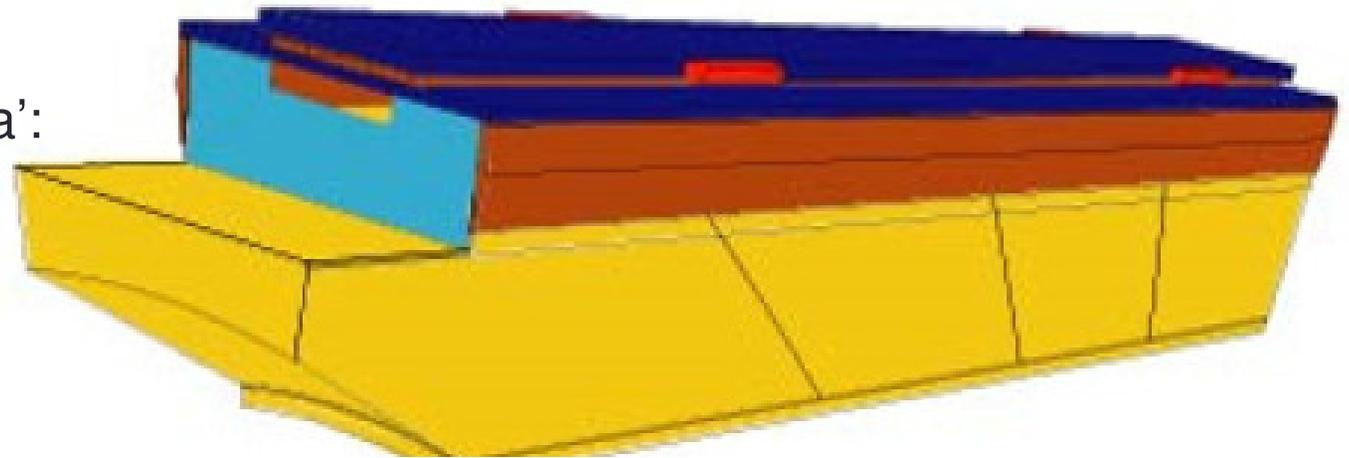


Fotorivelatore:  
Dispositivo a stato solido  
Converte il flash luminoso (durata  $\sim 2-3 \cdot 10^{-9}$  s)  
in un impulso di corrente  
proporzionale alla quantità  
di luce totale

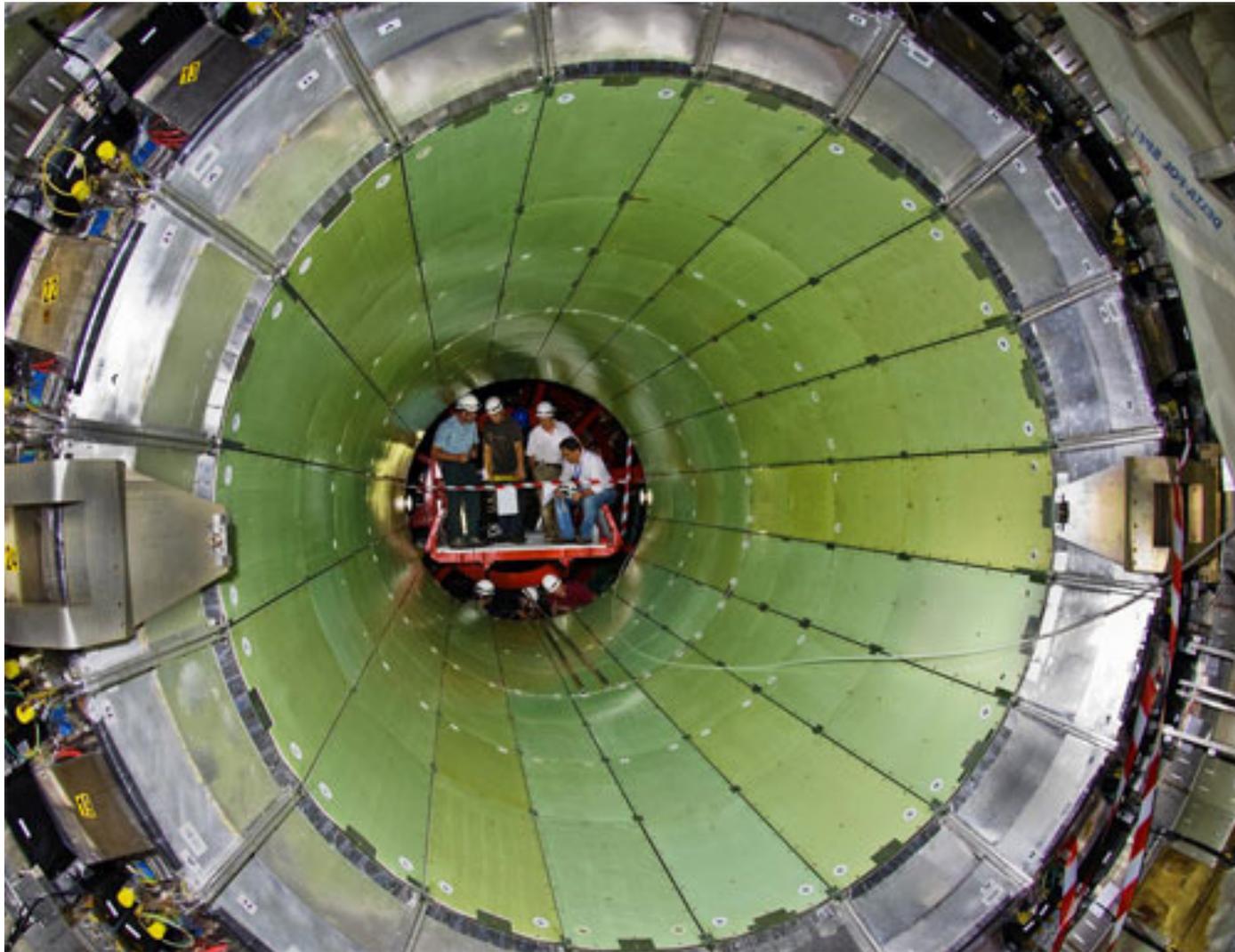


Preparazione e test dei cristalli

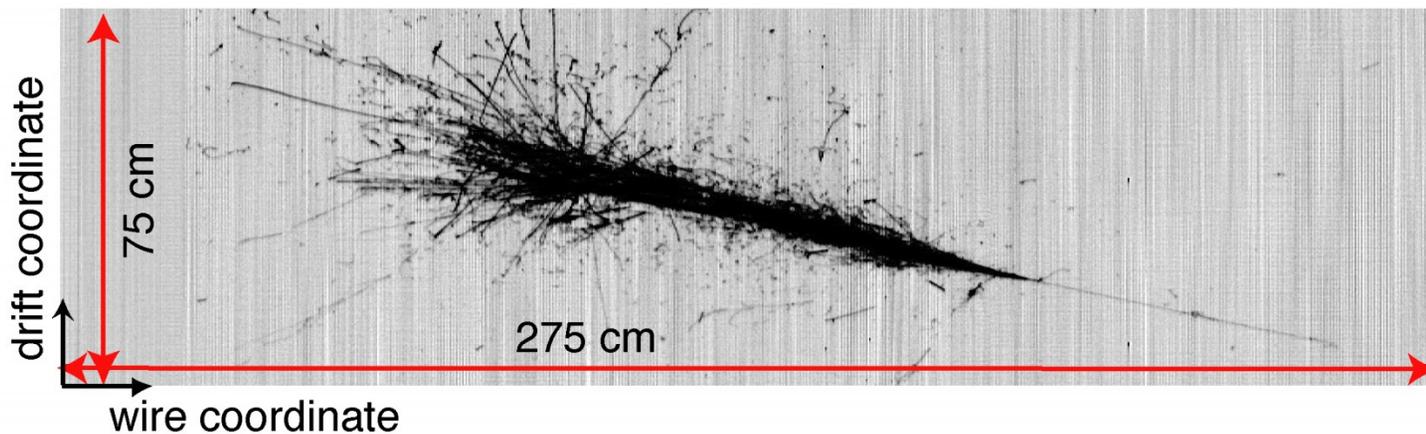
Supermodulo , o 'Bara':  
~2000 cristalli



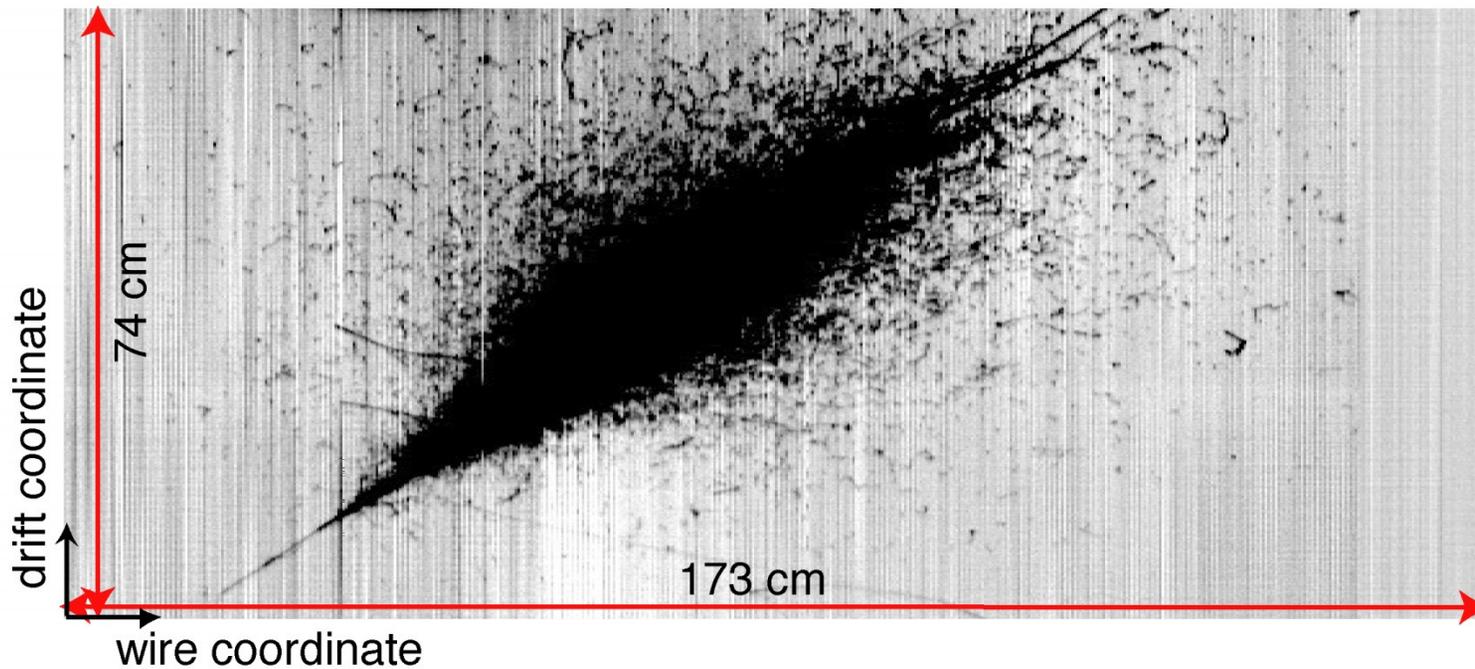
## Calorimetro montato



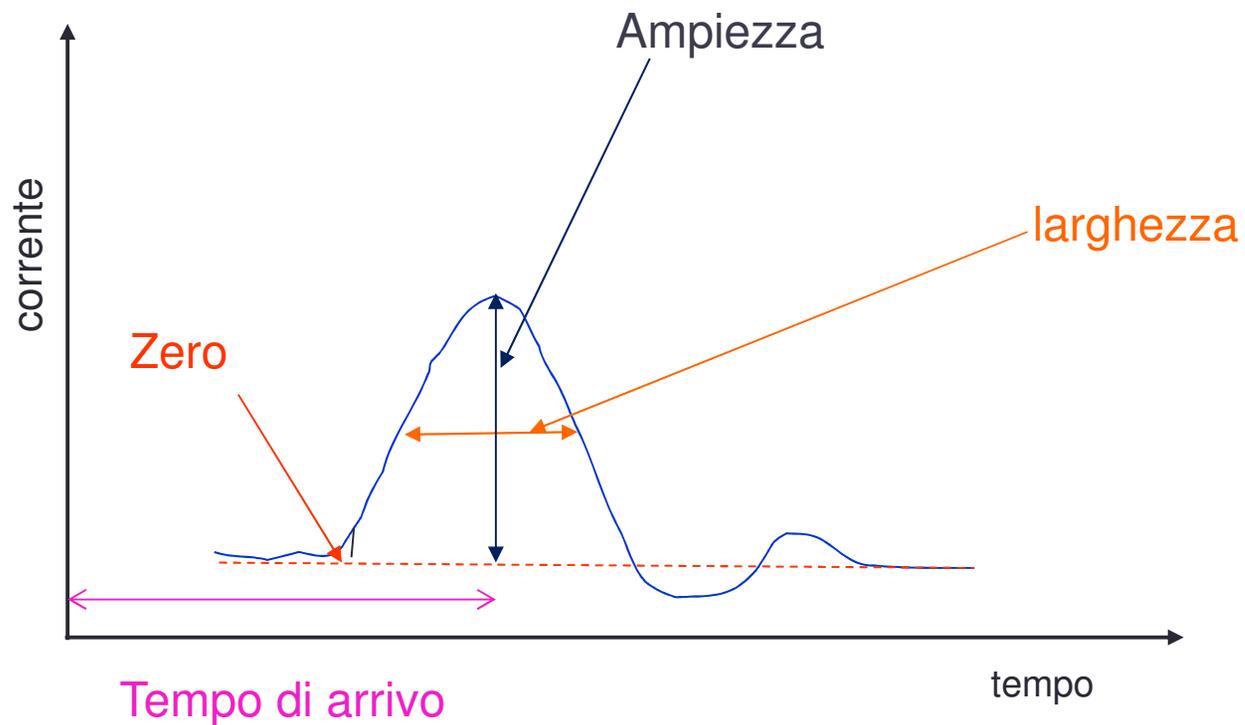
Run 308 Event 7 Collection view



Run 308 Event 332 Collection view



Uscite degli apparati: segnali di natura elettrica. Generalmente l'informazione è sotto forma di impulsi, ovvero brevi variazioni nel tempo di una corrente o di una tensione.



## Operazioni tipiche sui segnali dei rivelatori

### *Amplificazione*

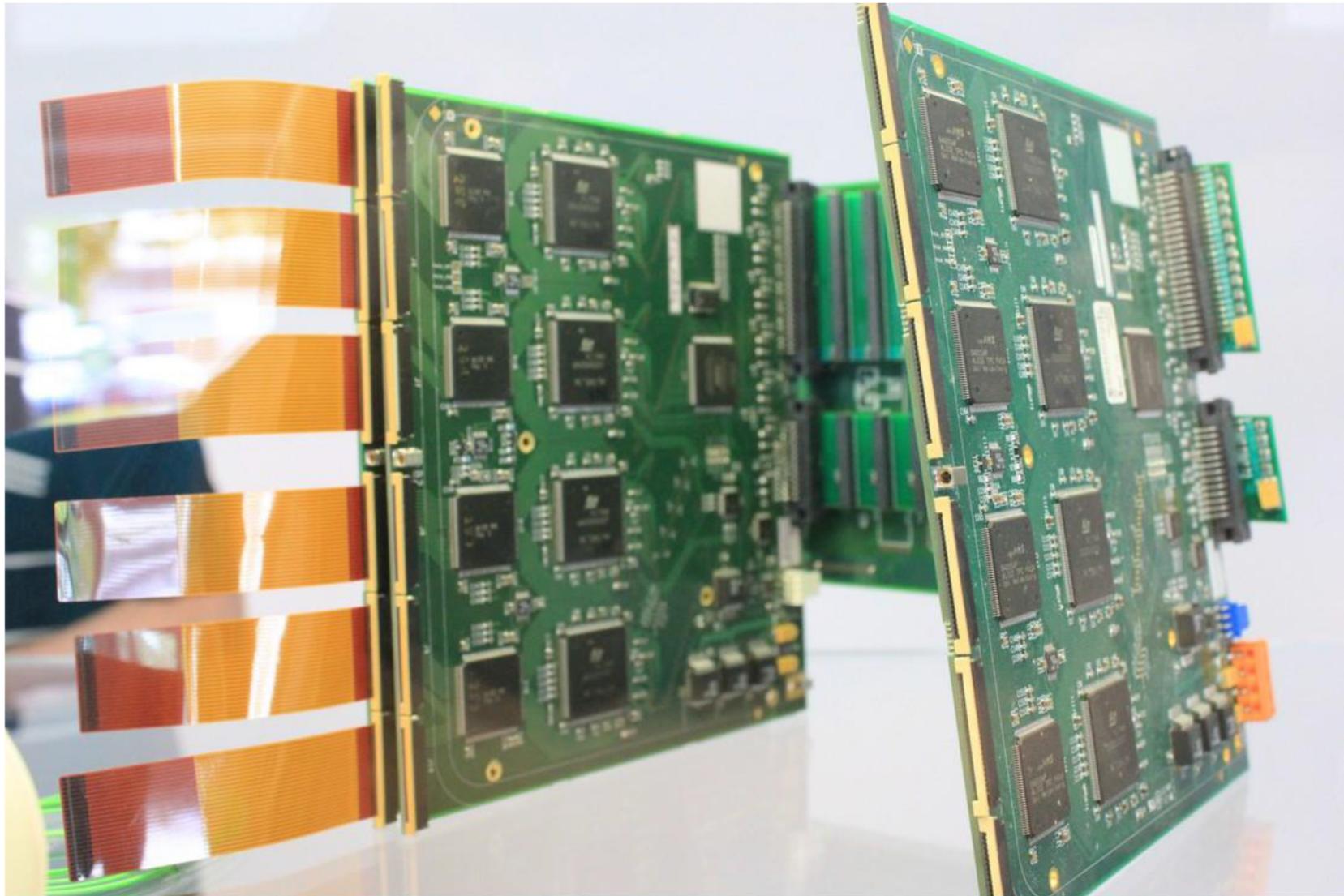
Necessaria perche il livello' dei segnali dei rivelatori di solito e' piccolo  
Elettronica frontale (Analogica, come un amplificatore per chitarra: molto piu' delicata e sensibile)

### *Digitizzazione*

Necessaria per convertire il segnale amplificato in un numero binario, che puo' essere inviato a un computer  
Convertitore analogico-digitale (ADC, come quello in un termometro digitale: molto piu' veloce e accurato)

### *Trattamento digitale dei segnali*

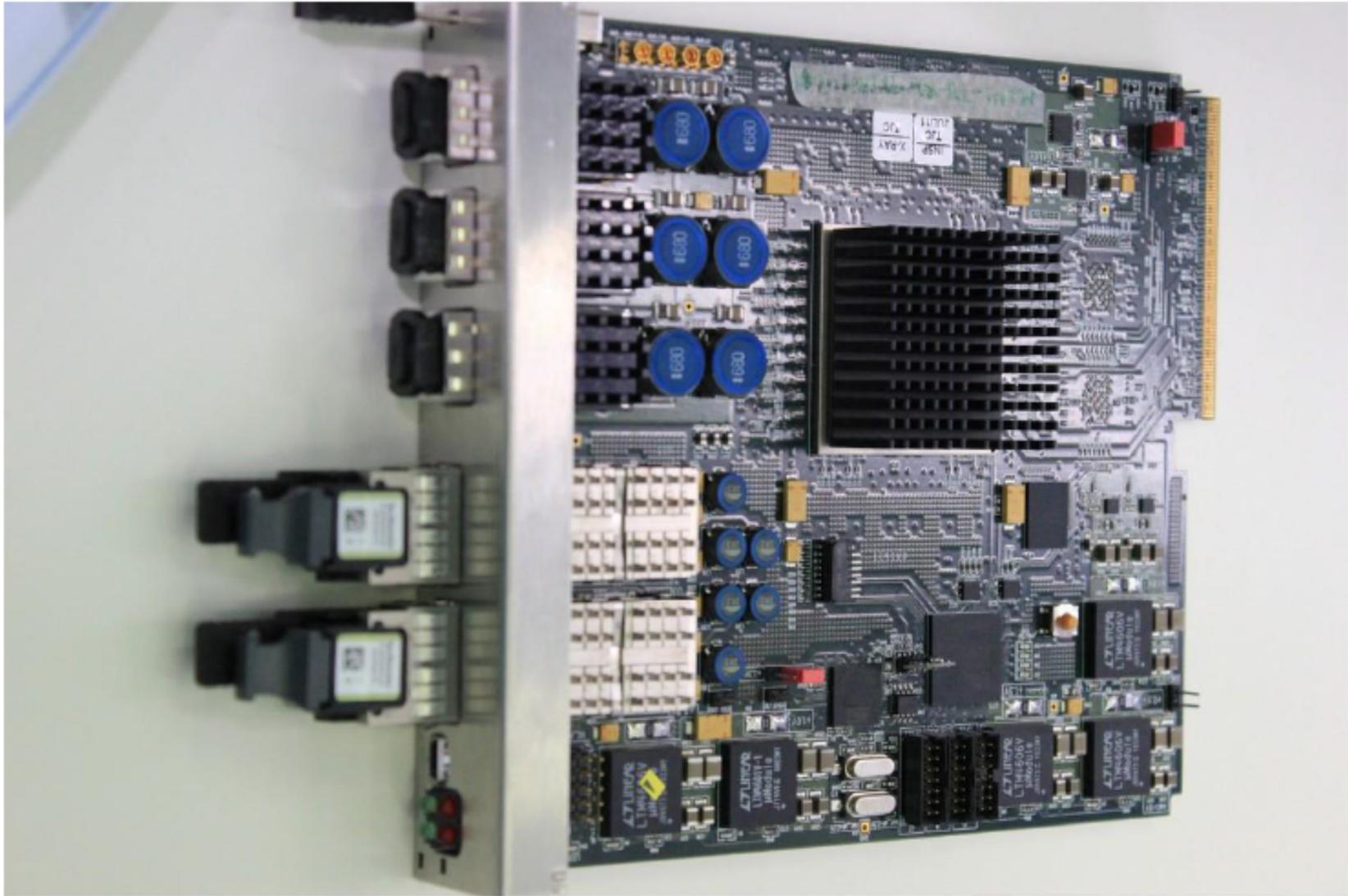
Operazioni logico/aritmetiche svolte sui valori numerici dei segnali  
Circuiti logici, computer (Tutti sanno cos'e'...: molta piu' capacita' di memoria e velocita' di trasferimento dati)



Elettronica frontale (ALICE – CERN)



Convertitori Analogico/Digitali (NA48 – CERN)



Processore Digitale veloce (CMS – CERN)



CERN servizi centrali di calcolo: 25000 processori