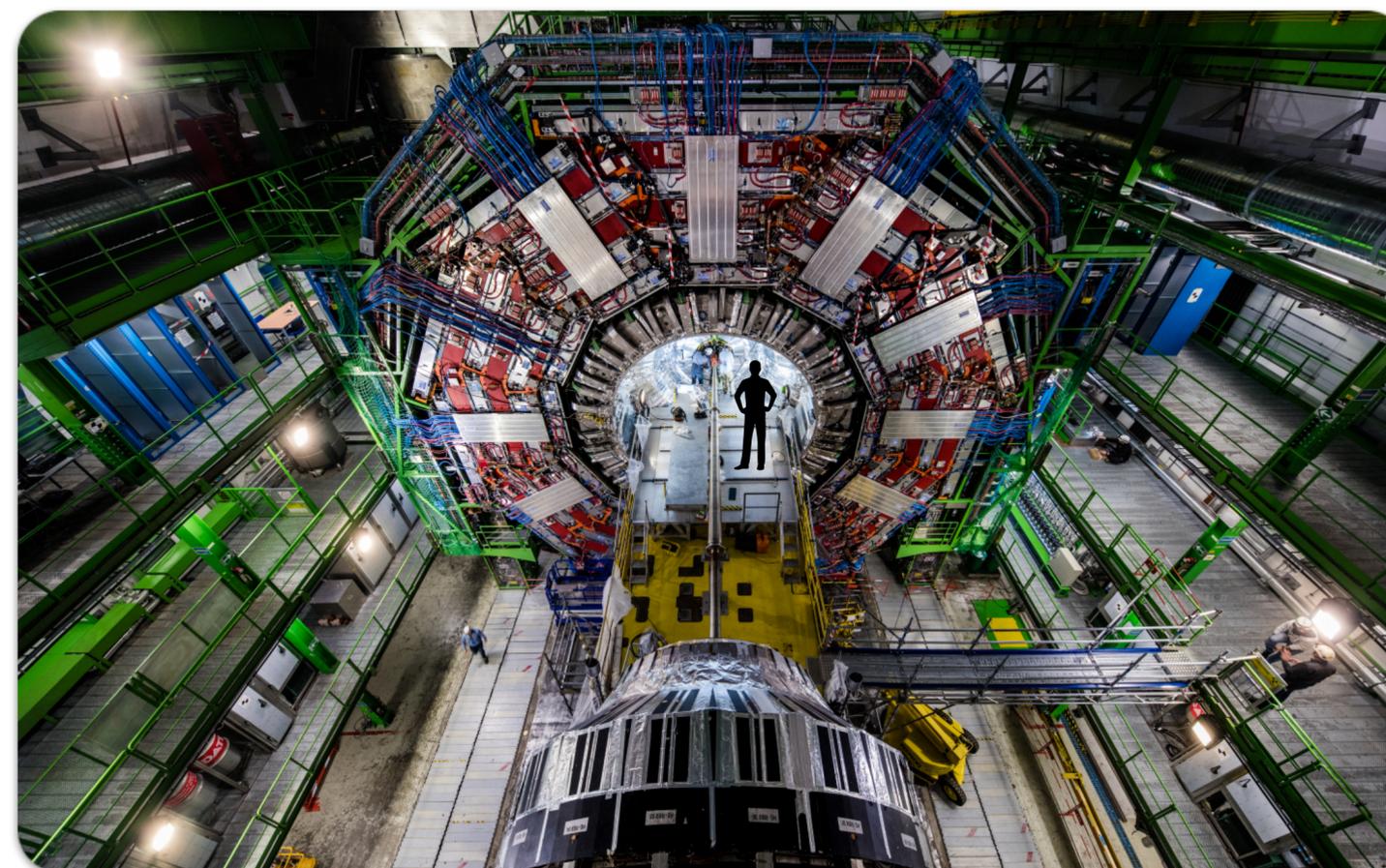
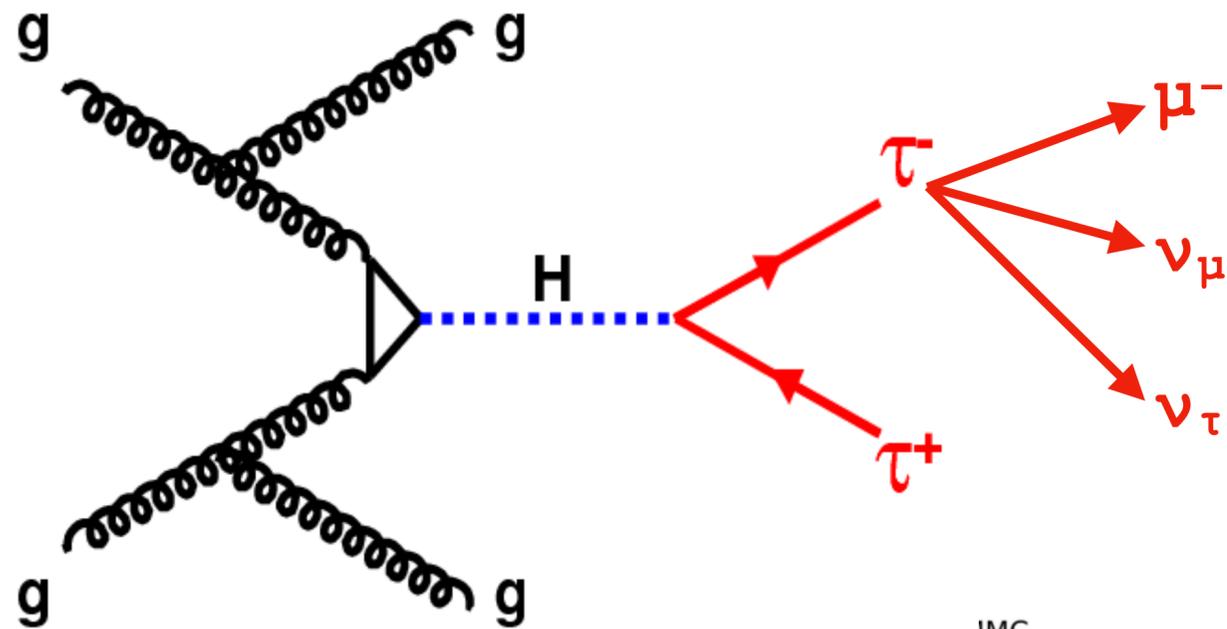


Viaggio al centro dell'esperimento CMS ...
in regioni di spazio-tempo microscopiche



Mauro Dinardo, Università degli Studi di Milano Bicocca and INFN
per il gruppo CMS - Pixel, MiB



Esempio decadimento Higgs: $H \rightarrow \tau \tau (\mu \nu_{\mu} \nu_{\tau})$

Tipicamente interessa misurare la **massa invariante** (m_0 , ma non solo) della particella che ha generato il decadimento

(H) \rightarrow **bilancio energetico**: $m^2_0 c^4 = E^2 + (pc)^2$

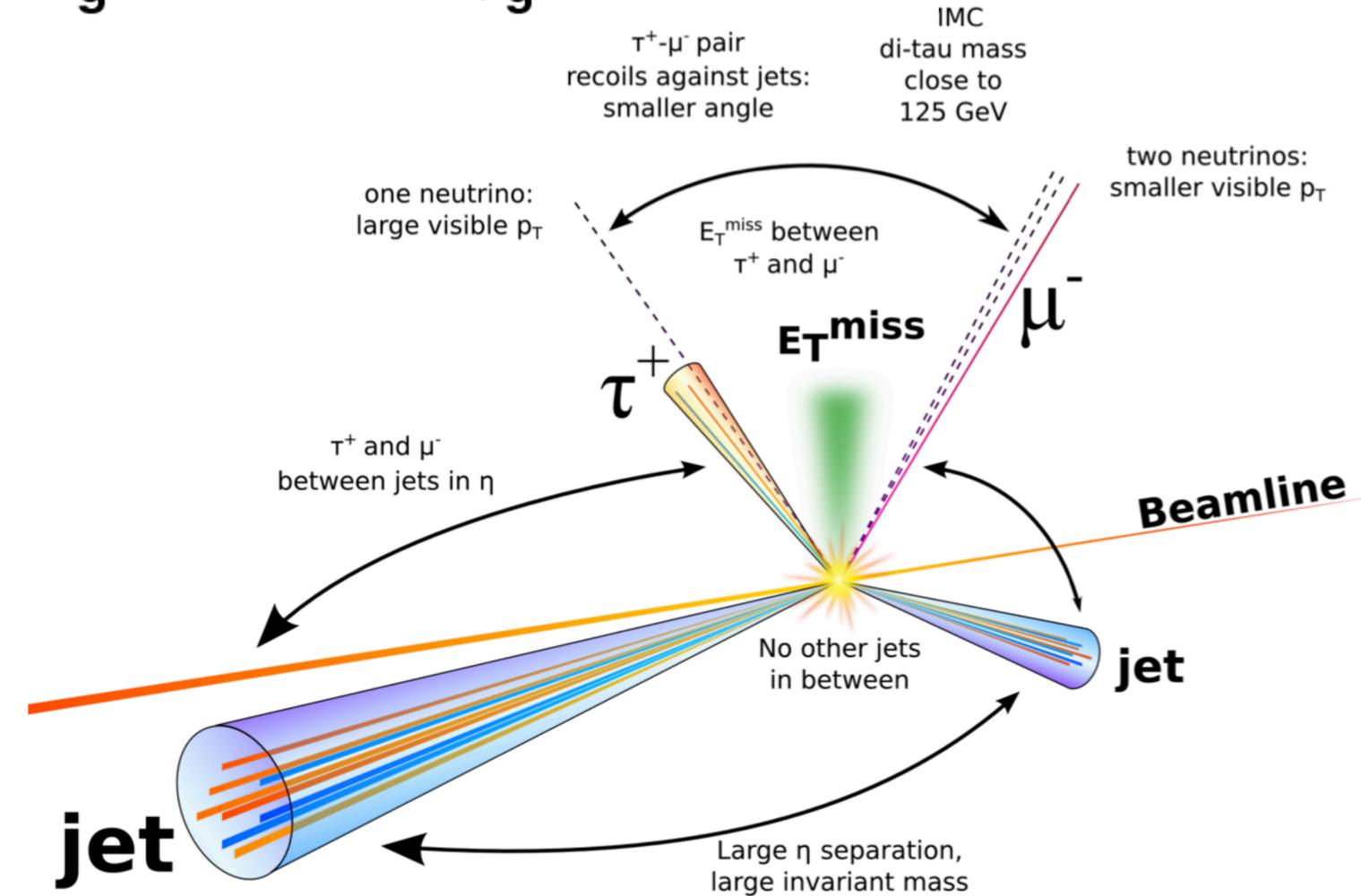
Massa invariante, carica, spin, parità, etc... =

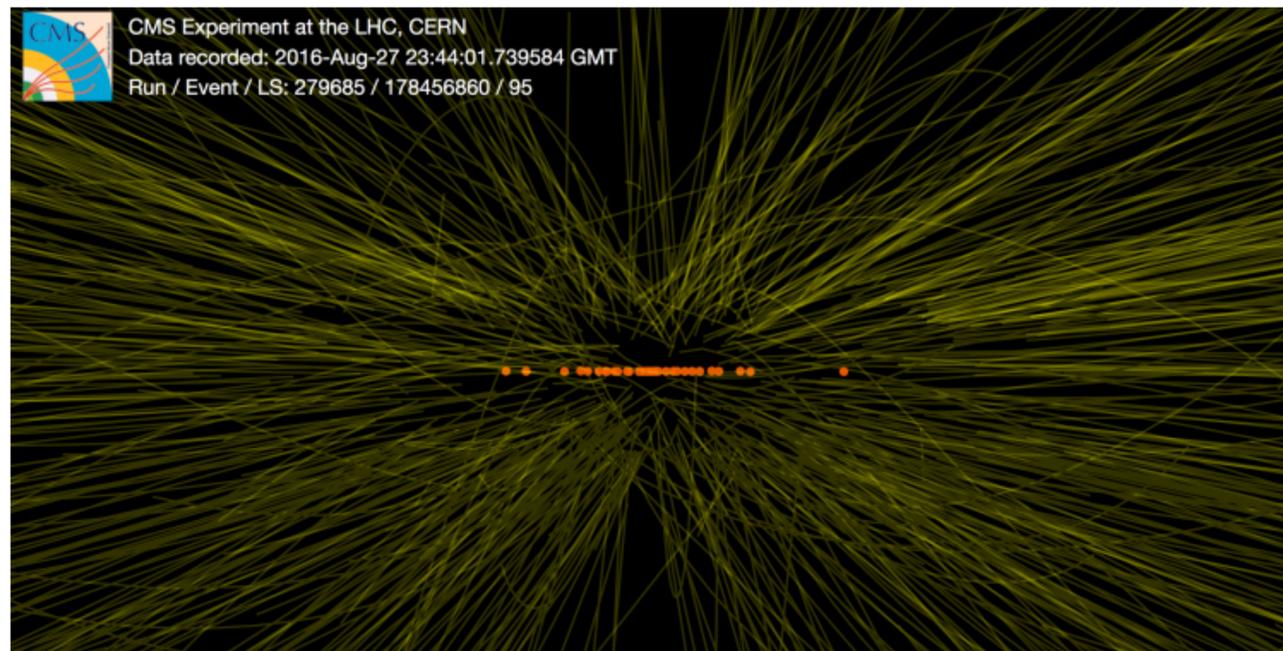
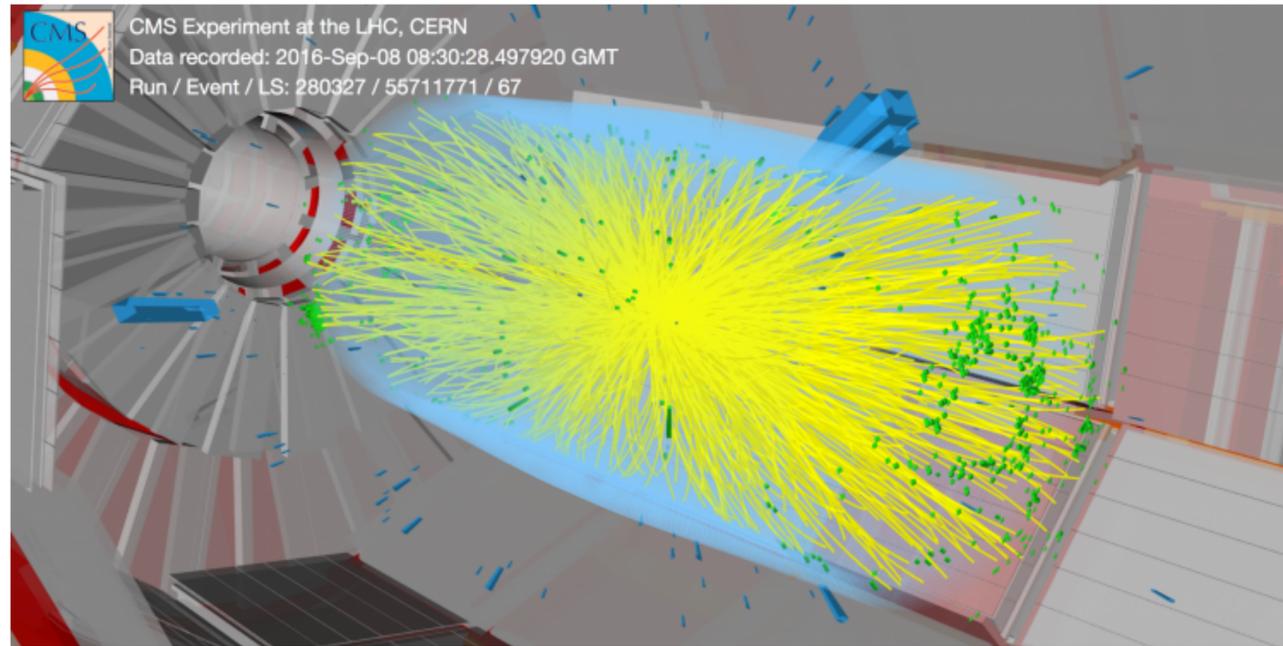


Il rivelatore deve quindi essere in grado di:

- **Misurare momento** \rightarrow tracciatore
- **Misurare energia** \rightarrow calorimetro, i.e. rivelatore che converte tutta l'energia delle particelle in qualcosa di misurabile, e.g. luce
- **Identificare particelle** \rightarrow e.g. μ , τ , ma anche adroni con quark beauty (b)
- **Essere ermetico** \rightarrow misurare energia mancante (e.g. ν)

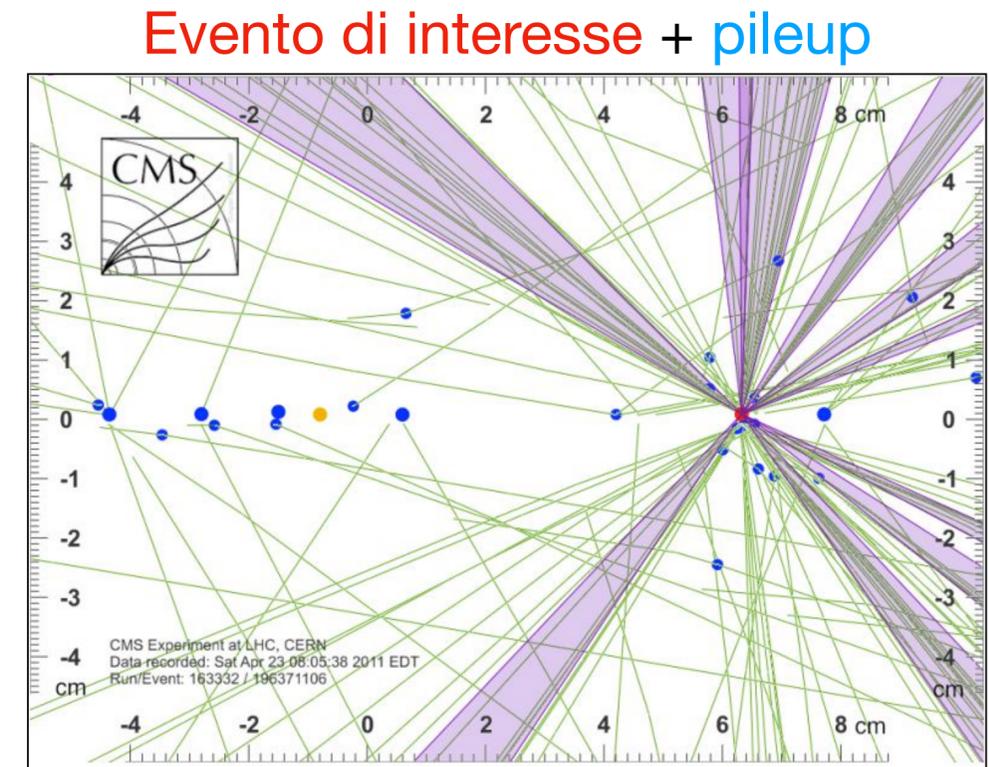
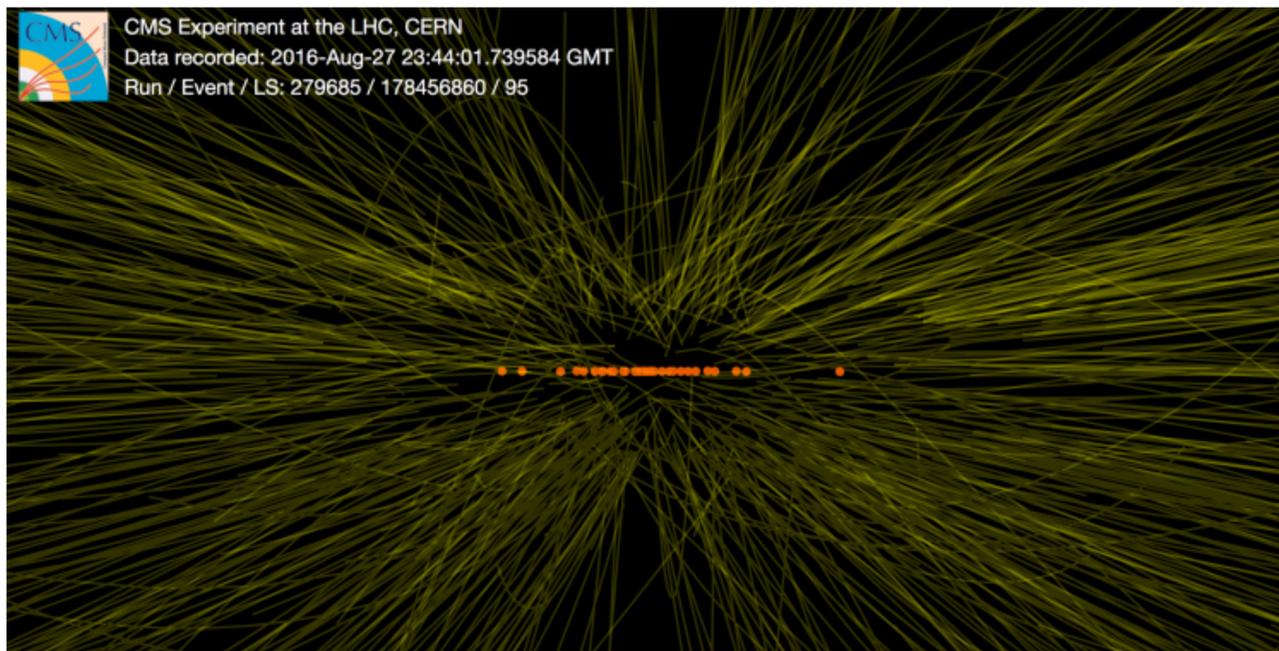
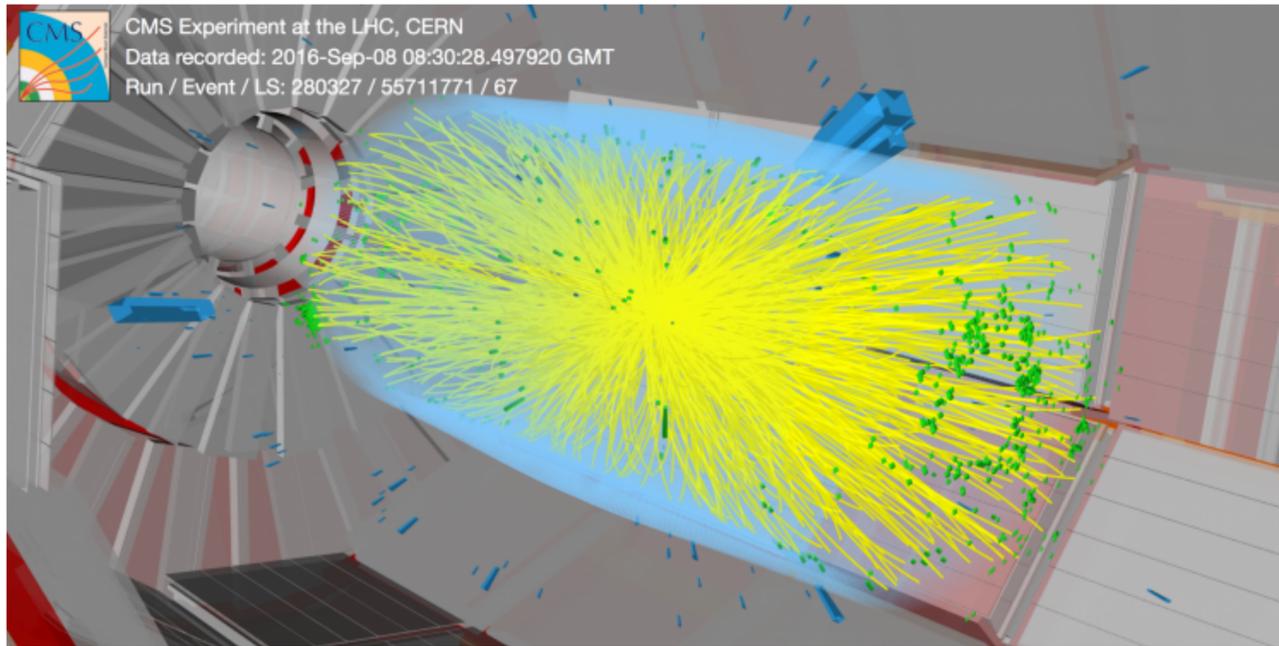
Peccato che a LHC questi eventi siano nascosti ... infatti le collisioni assomigliano di più a questa ...





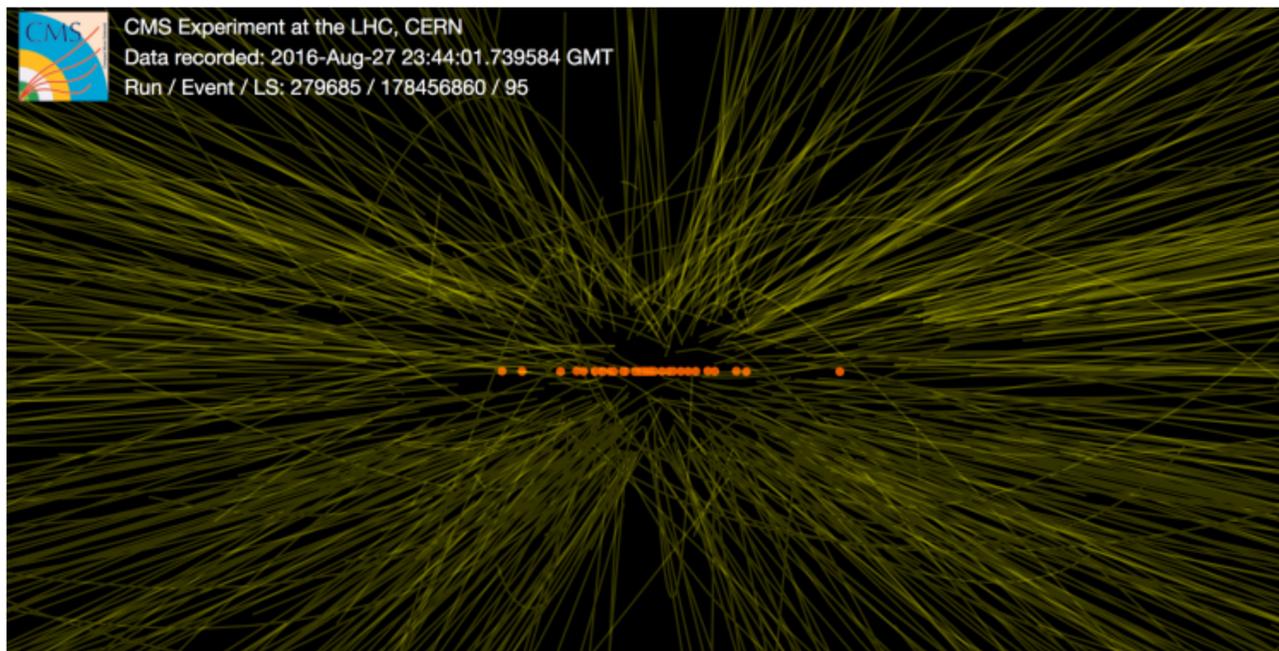
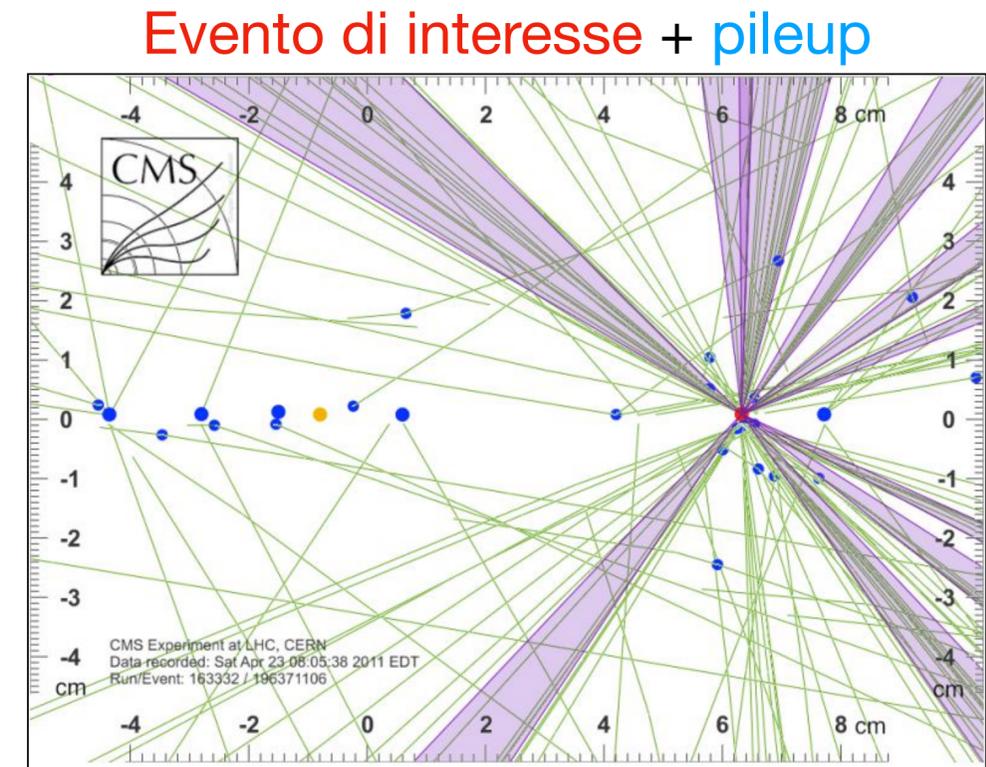
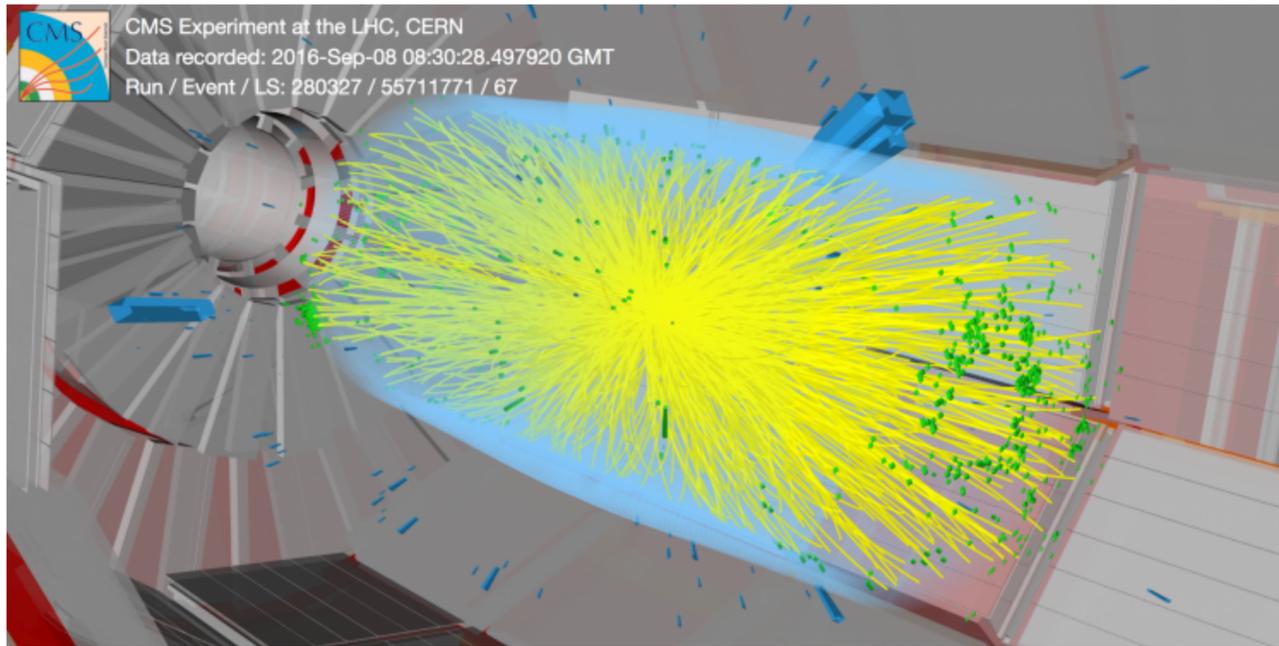
86 eventi di pileup ... tutti risolti

Ad ogni incrocio dei pacchetti di protoni, *bunch*, avvengono più collisioni pp (*pileup*) \rightarrow **~ 1000** particelle che attraversano l'esperimento \rightarrow come trovare **l'evento di interesse**?



86 eventi di pileup ... tutti risolti

Ad ogni incrocio dei pacchetti di protoni, *bunch*, avvengono più collisioni pp (*pileup*) \rightarrow **~ 1000** particelle che attraversano l'esperimento \rightarrow come trovare **l'evento di interesse**?



*E` come cercare il famoso ago nel pagliaio ... voi cosa usereste? Io utilizzerei un magnete ... ad **LHC** si utilizzano **CMS** e **ATLAS***

- E` necessaria una risoluzione molto spinta \rightarrow alta granularità
- Inoltre, quanti incroci di *bunch* avvengono al secondo?

40 Milioni \rightarrow alta frequenza

86 eventi di pileup ... tutti risolti

CMS è una gigantesca “cipolla” in corrispondenza dell’incrocio dei *bunch* dell’acceleratore più potente al mondo (**LHC**)

Ogni **strato** è un diverso **sotto-rivelatore**

Ogni **sotto-rivelatore** misura proprietà diverse delle particelle che lo attraversano

- Traiettoria e momento
- Posizione vertice di produzione/decadimento
- Energia
- Identificazione: elettroni, fotoni, adroni, muoni



Pixel tracker

Strip tracker

Calorimetro
elettromagnetico

Calorimetro adronico

Solenoid

Rivelatore di muoni



- misurare traiettoria e momento (trasverso, p_T) particelle cariche
- misurare posizione vertici di produzione (e decadimento)
- agevolare misure calorimetriche (“particle-flow”)
- identificare particelle instabili (e.g. b-jet, τ -jet)

Alta granularità, veloce, leggero → “**misurare senza perturbare**”



Connecting the dots...

Principi di misura del tracciatore:

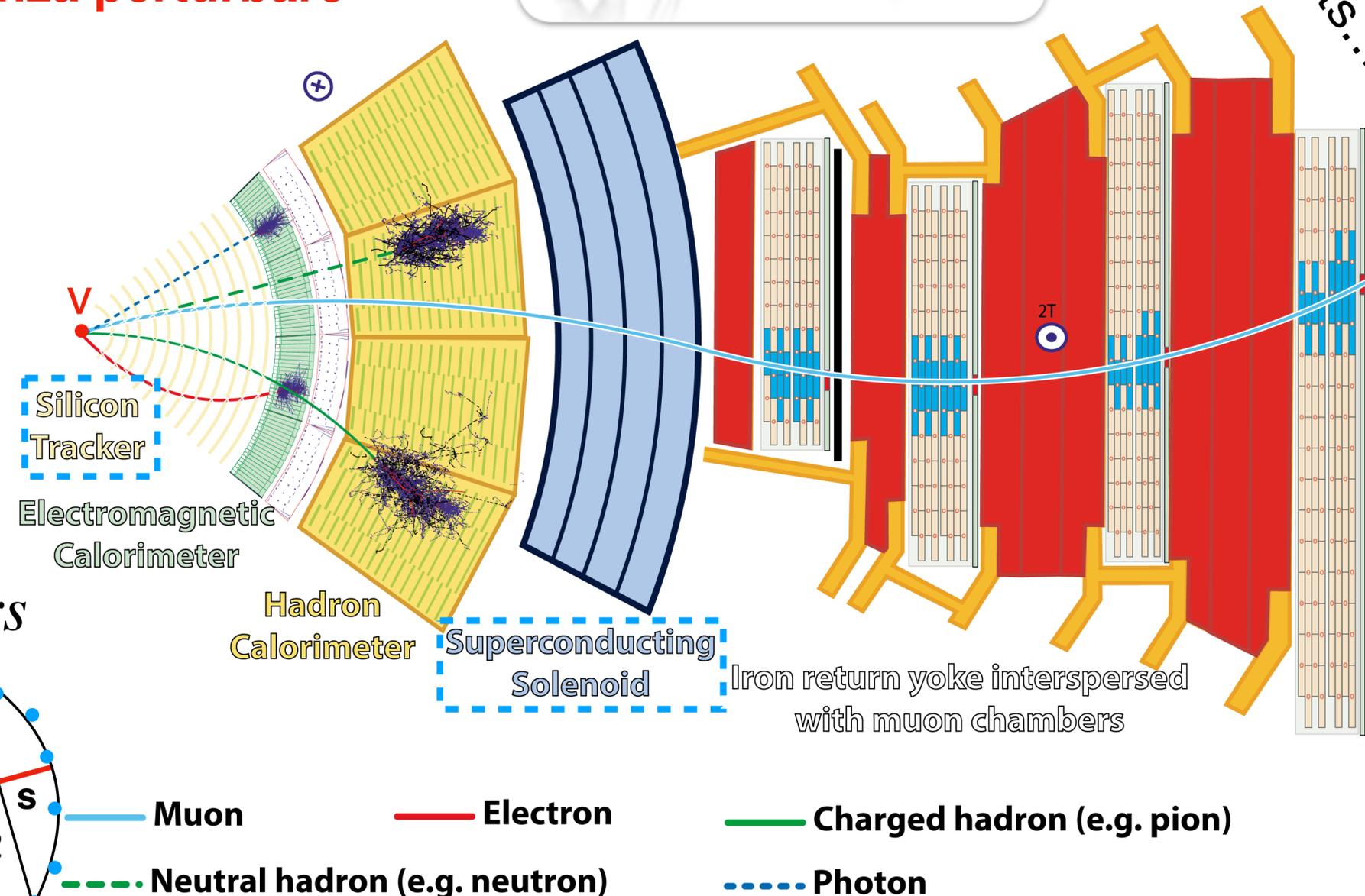
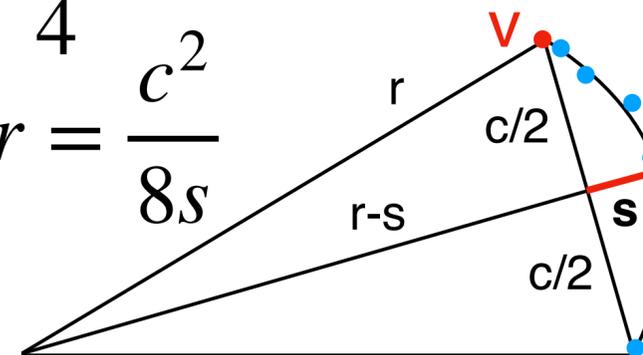
- campionare traiettoria (*and connect the dots*)
- sfruttare forza di Lorentz

$$m \frac{v^2}{r} = qvB \rightarrow p = qBr$$

In particolare viene misurata la **sagitta (S)**:

$$r^2 = (c/2)^2 + (r - s)^2 = \frac{c^2}{4} + r^2 + s^2 - 2rs$$

$$r = \frac{c^2}{8s} + \frac{s}{2} \text{ if } s \ll c \rightarrow r = \frac{c^2}{8s}$$



Si sfruttano le proprietà dei semiconduttori, in particolare del **Silicio**, in configurazione di **giunzione pn** polarizzata inversamente:

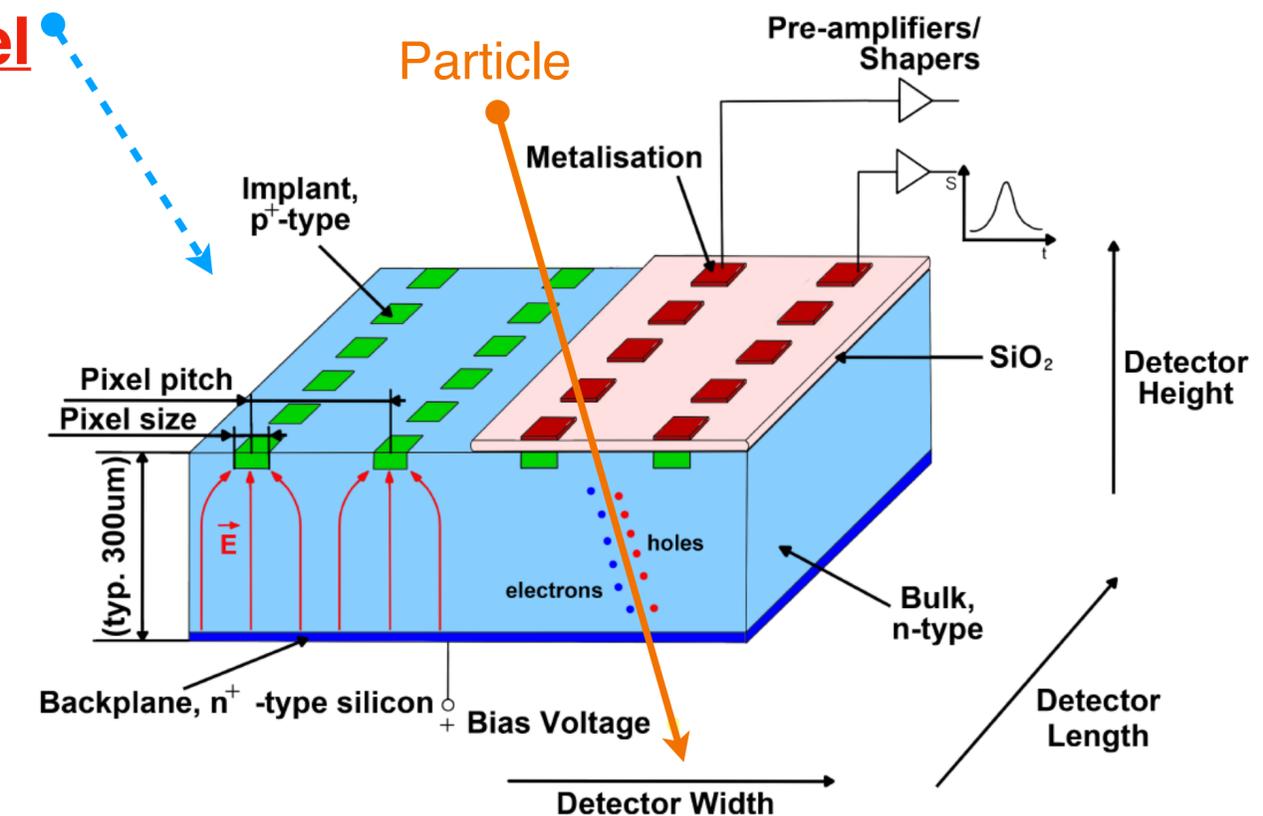
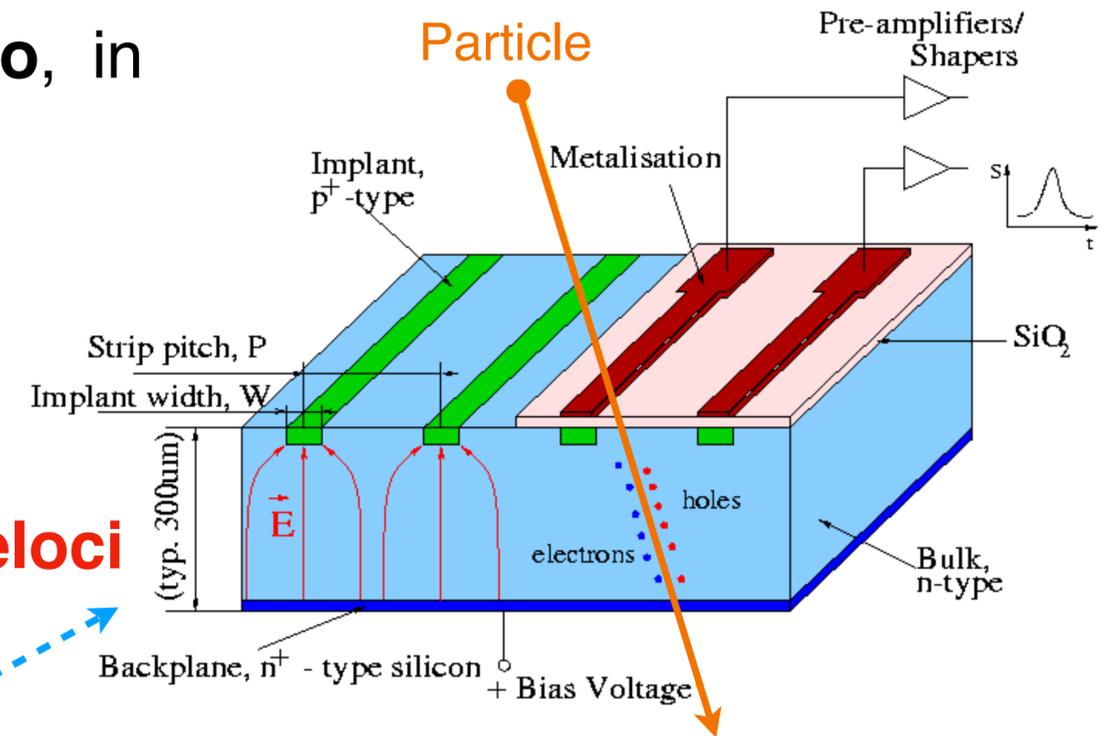
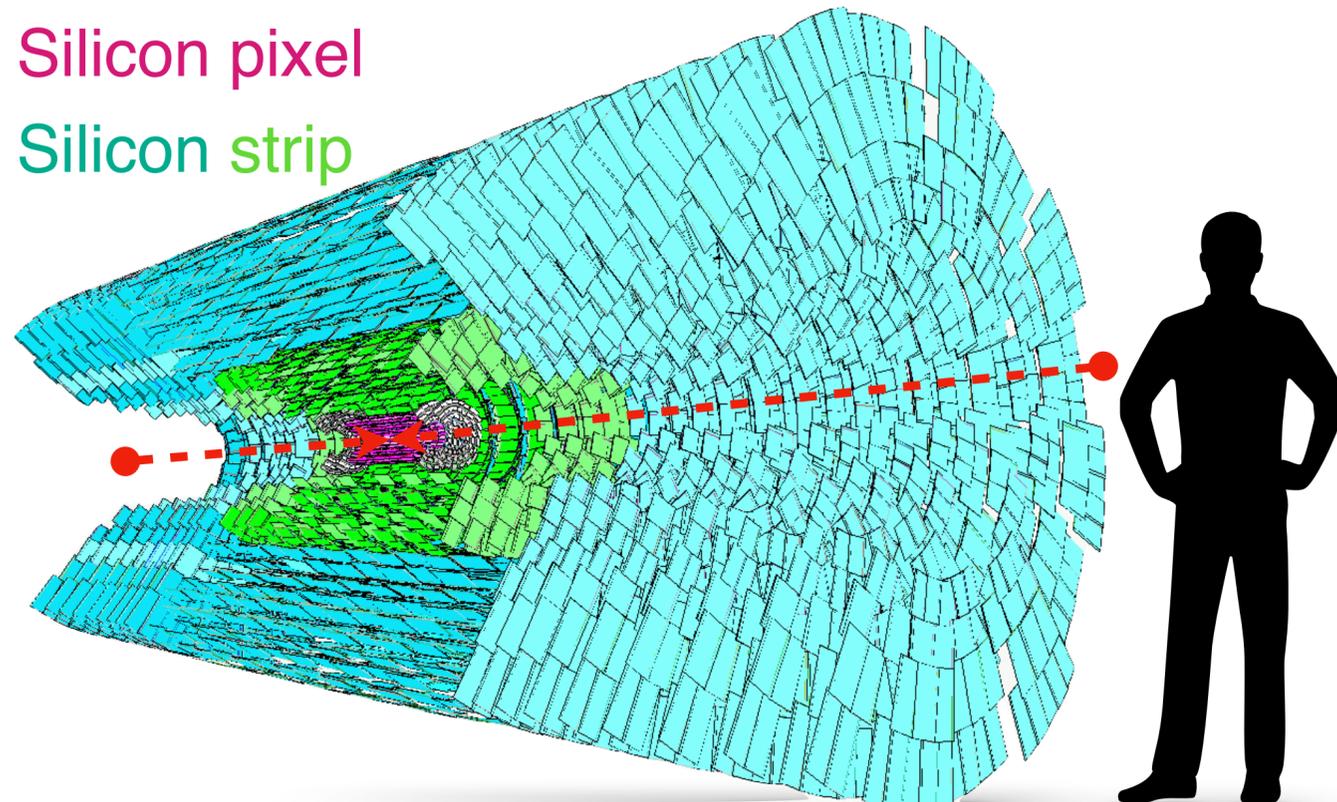
- alto grado di miniaturizzazione → **alta granularità**
- facilità creazione coppie $e-h$ (3.6 eV) → **alto segnale**
- **basso rumore**
- alta mobilità portatori + alto campo elettrico per deriva & raccolta → **veloci**

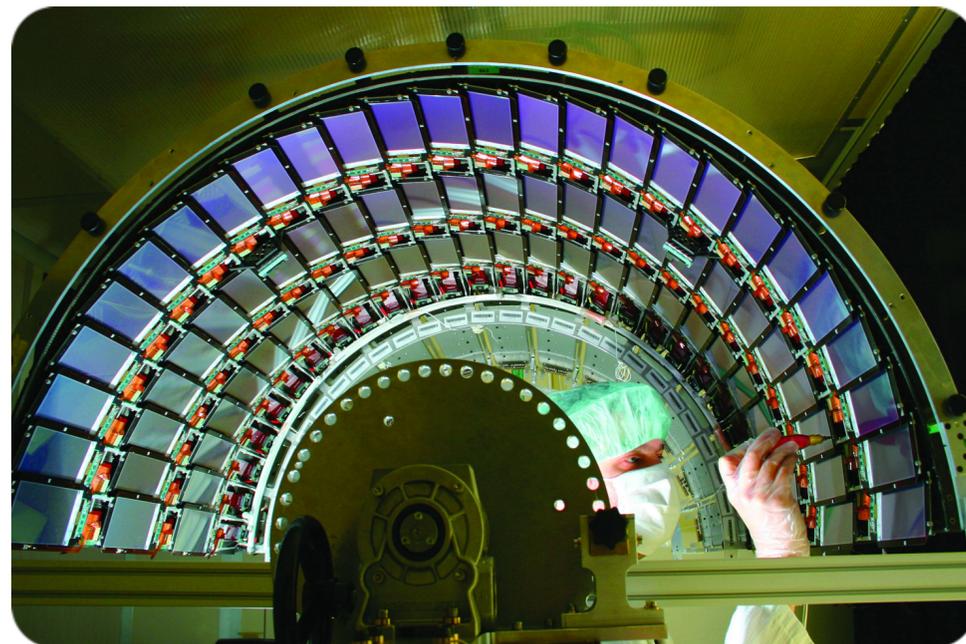
Il tracciatore di CMS (210 m² Silicio) ... alcuni numeri:

- 10 strati *barrel* + 18 *dischi* di **Silicon strip**, 80-205 μm : **11 M strip**
- 4 strati *barrel* + 6 *dischi* di **Silicon pixel**, 100x150 μm^2 : **124 M pixel**

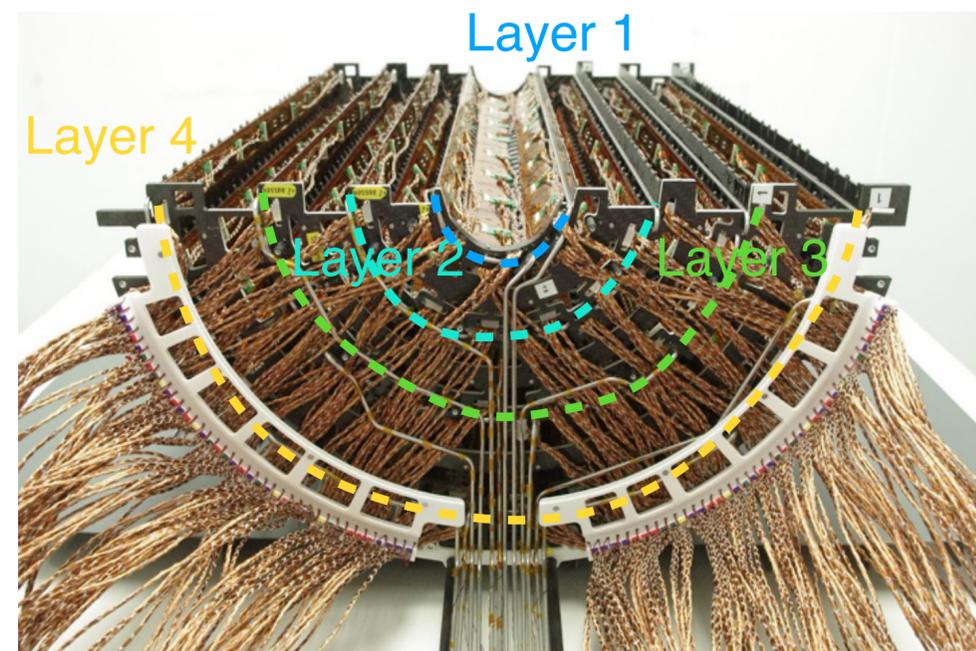
Silicon pixel

Silicon strip

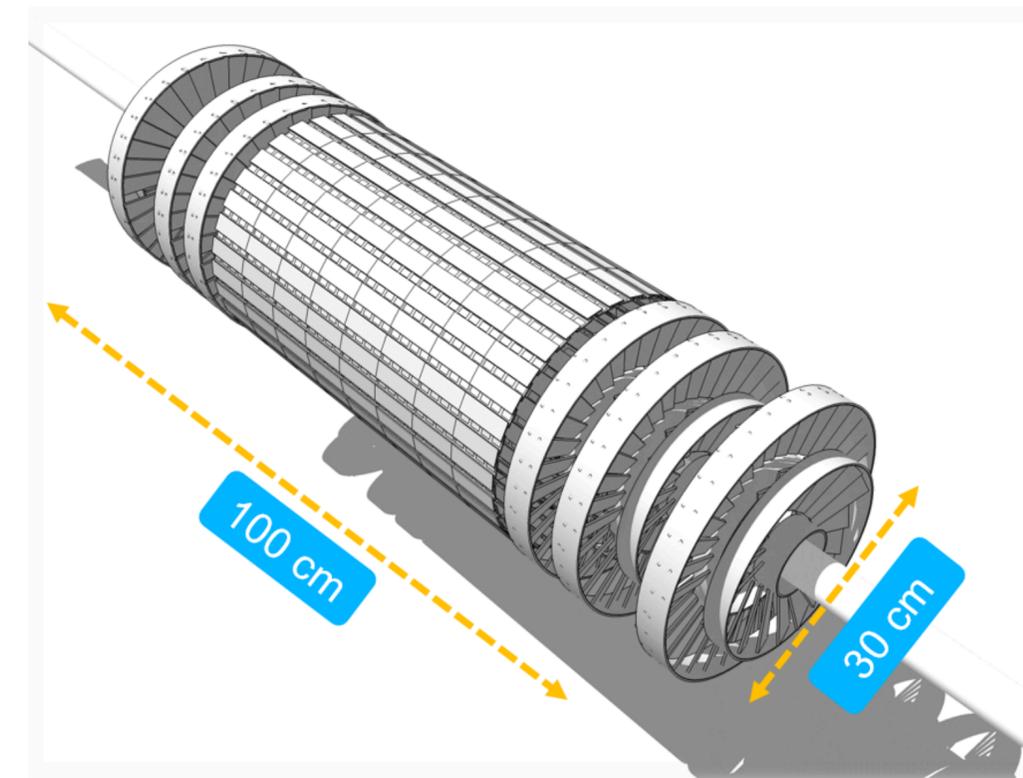




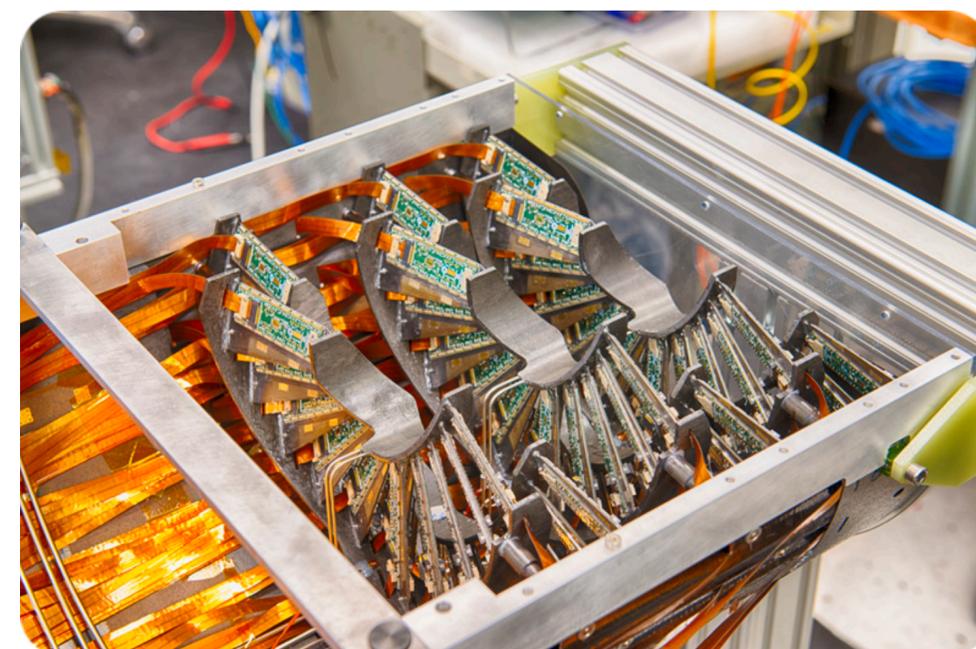
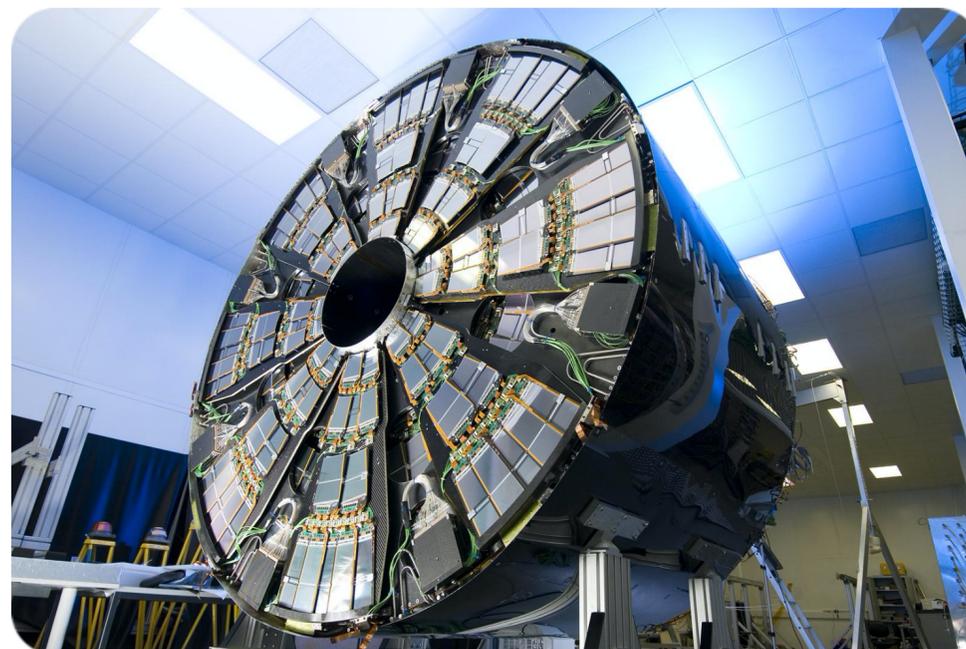
Rivelatore a strip



Rivelatore a pixel



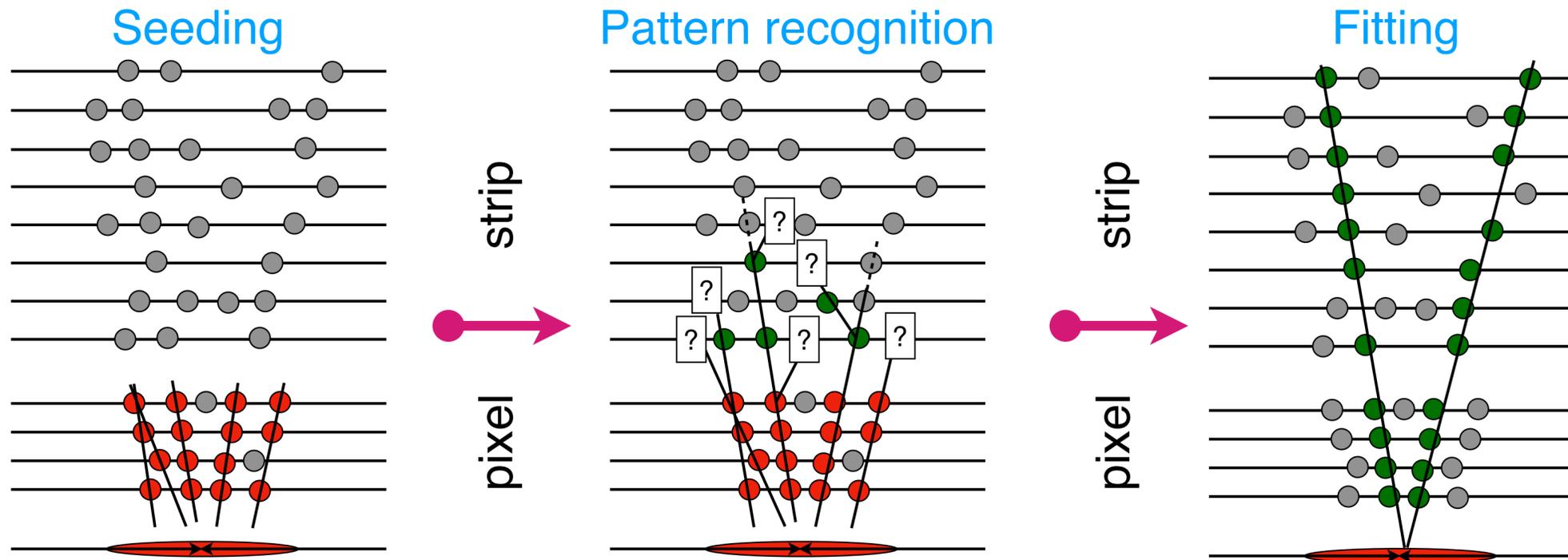
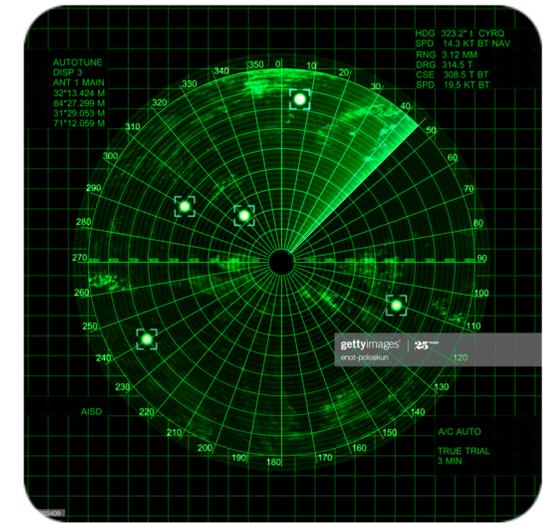
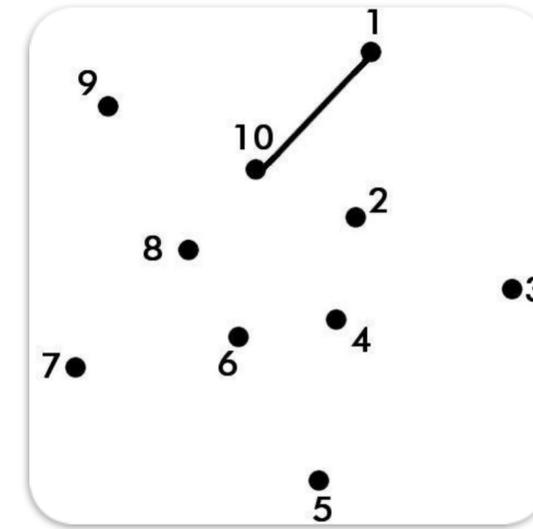
Disegno rivelatore a pixel



Disk 1 Disk 2 Disk 3

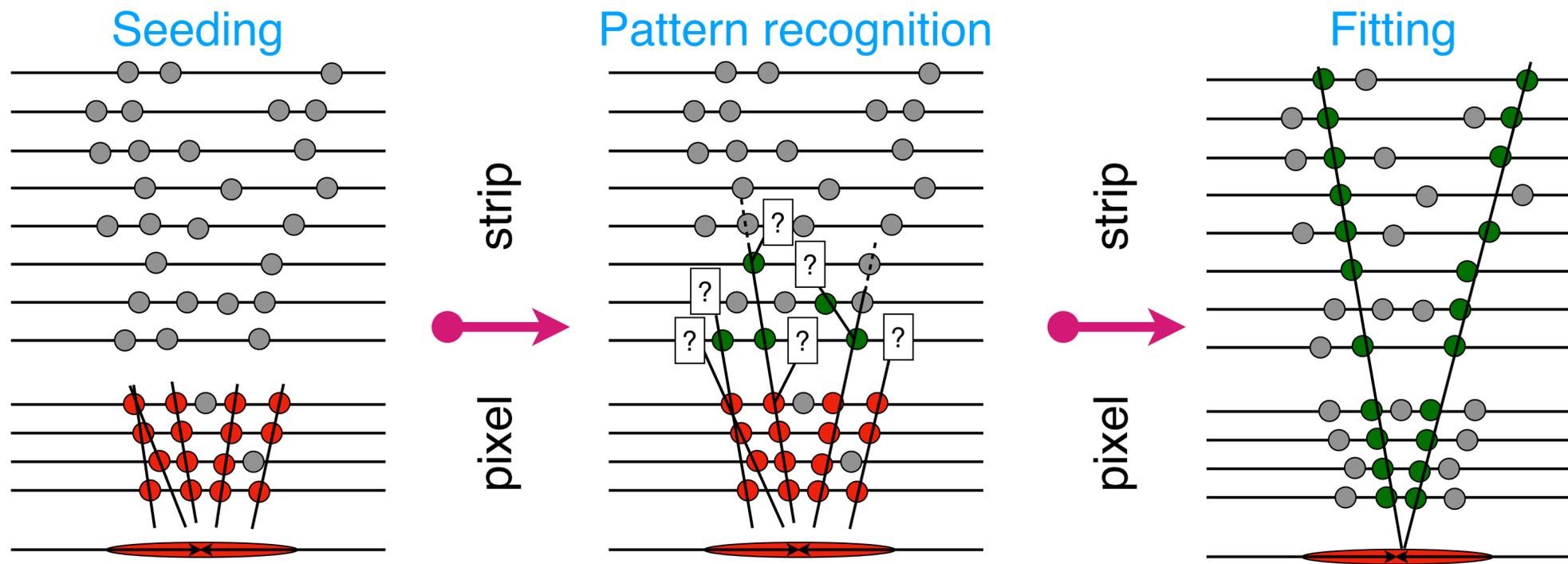
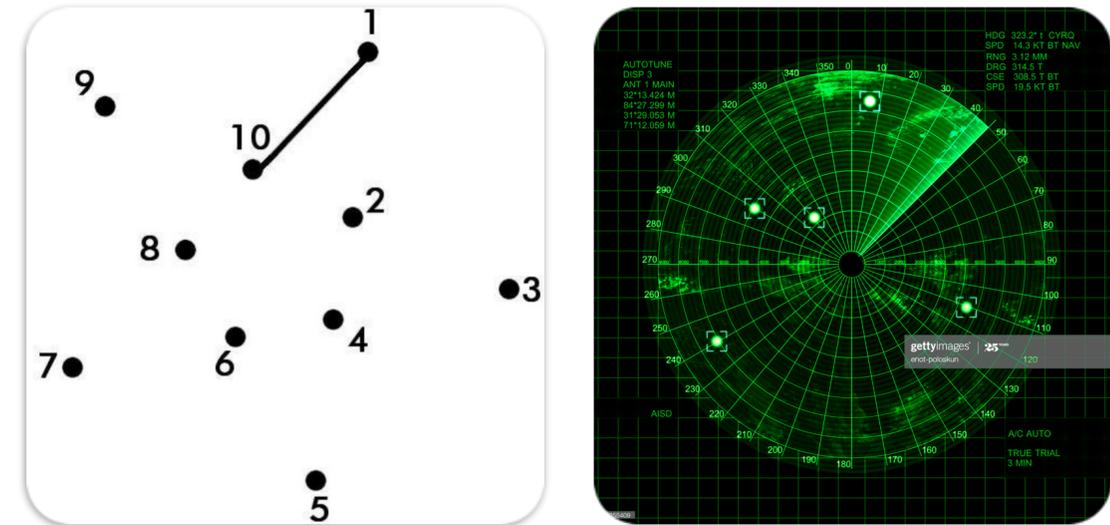
I punti di misura non sono numerati come nella settimana enigmistica...

Compito molto complesso → risolto utilizzando **filtro di Kalman**:
efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore (algoritmo utilizzato nei radar per seguire la traiettoria di un oggetto in movimento)



I punti di misura non sono numerati come nella settimana enigmistica...

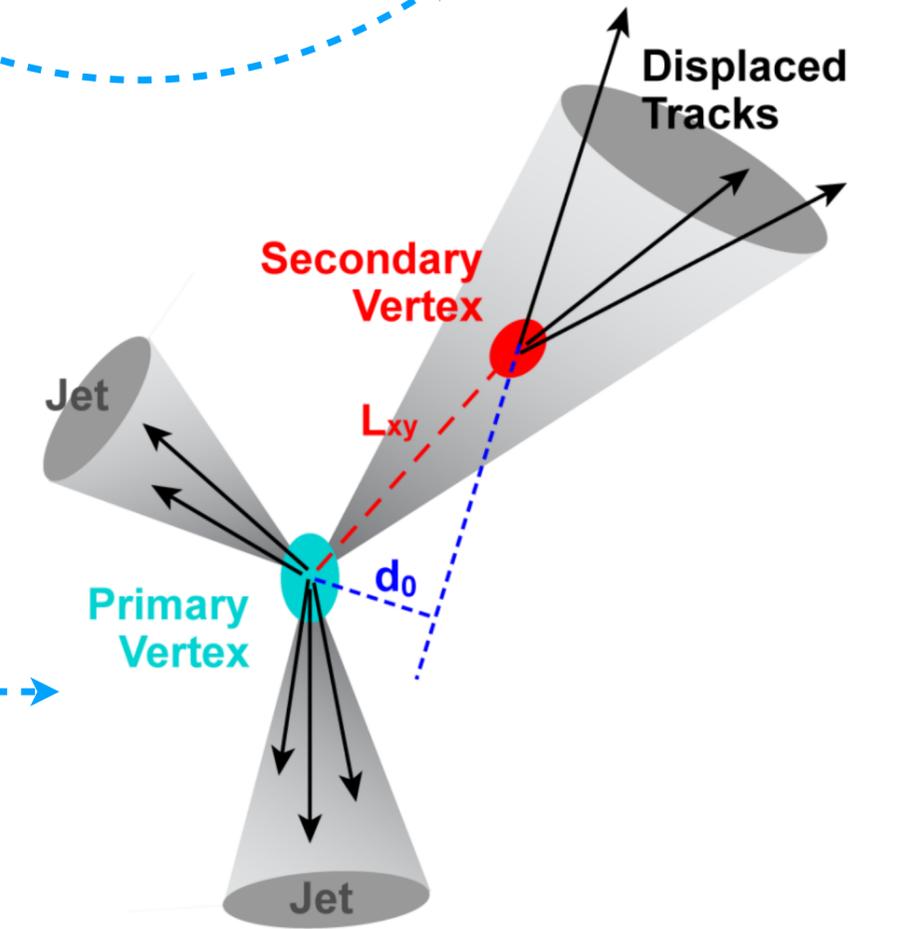
Compito molto complesso → risolto utilizzando **filtro di Kalman**: efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore (algoritmo utilizzato nei radar per seguire la traiettoria di un oggetto in movimento)



Tracce → vertice di produzione/decadimento ... ovunque essi siano

Il rivelatore a pixel riveste un ruolo di primaria importanza:

- fornisce i *seed* per il *pattern recognition*
- è il più prossimo all'interazione → determinante per la risoluzione sulla posizione dei vertici di produzione (e decadimento)

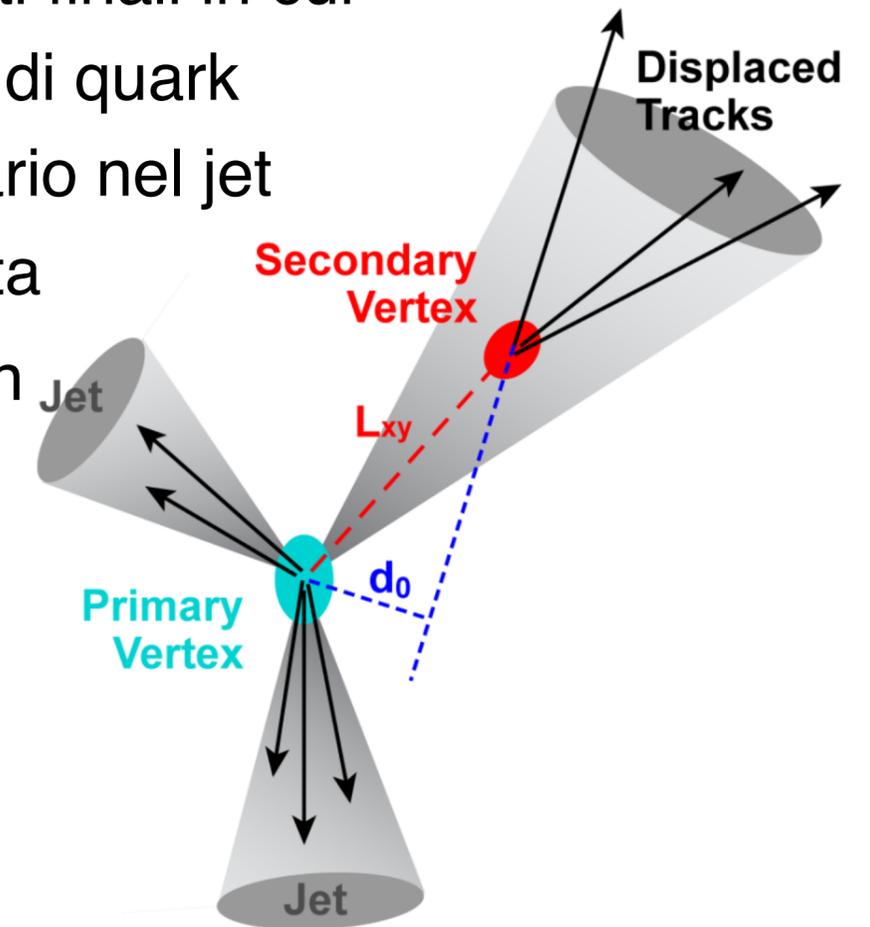


Produzione: *primary vertex*
Decadimento: *secondary vertex*

In generale è fondamentale poter identificare quanto più dettagliatamente gli stati finali in cui decadono le particelle che si vogliono studiare \rightarrow jet causati dall'adronizzazione di quark pesanti, b e c , possono essere riconosciuti dalla presenza di un vertice secondario nel jet

- Il **Modello Standard** prevede che gli adroni costituiti da quark b e c abbiano vita media "lunga" (misurata $\sim ps$) \rightarrow dilatata del fattore $\gamma = E/m_0 \rightarrow$ percorrono un tratto sufficientemente lungo per poter essere rivelati come vertici secondari

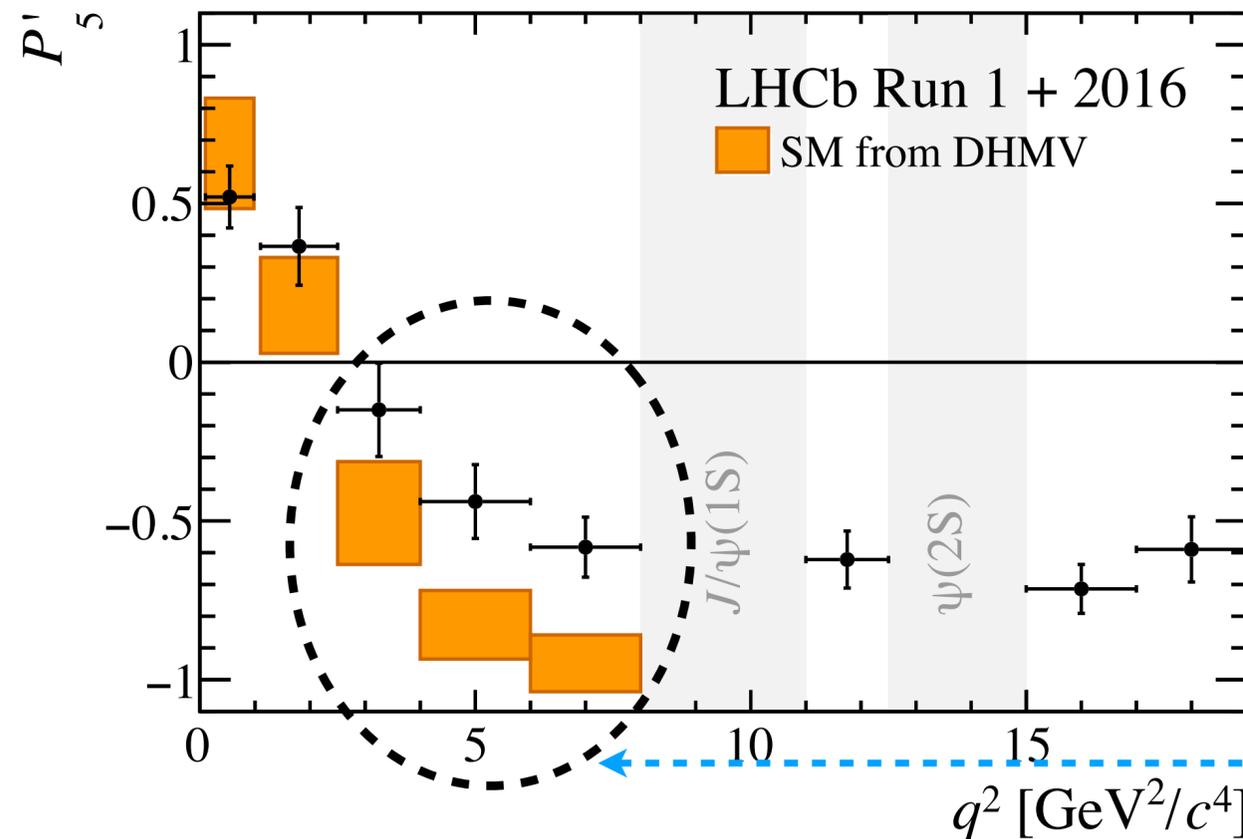
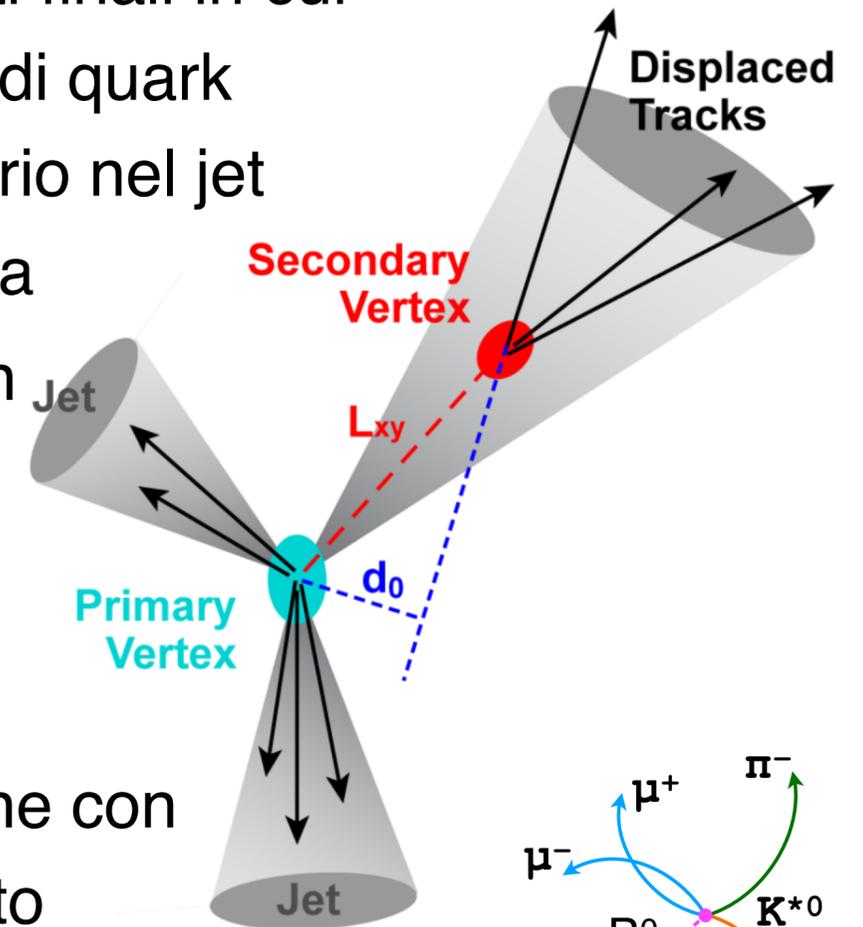
e.g.: una delle particelle più interessanti da studiare è il quark top (t , in particolare in associazione all'Higgs) che decade $t \rightarrow W b$



In generale è fondamentale poter identificare quanto più dettagliatamente gli stati finali in cui decadono le particelle che si vogliono studiare \rightarrow jet causati dall'adronizzazione di quark pesanti, b e c , possono essere riconosciuti dalla presenza di un vertice secondario nel jet

- Il **Modello Standard** prevede che gli adroni costituiti da quark b e c abbiano vita media "lunga" (misurata $\sim ps$) \rightarrow dilatata del fattore $\gamma = E/m_0 \rightarrow$ percorrono un tratto sufficientemente lungo per poter essere rivelati come vertici secondari

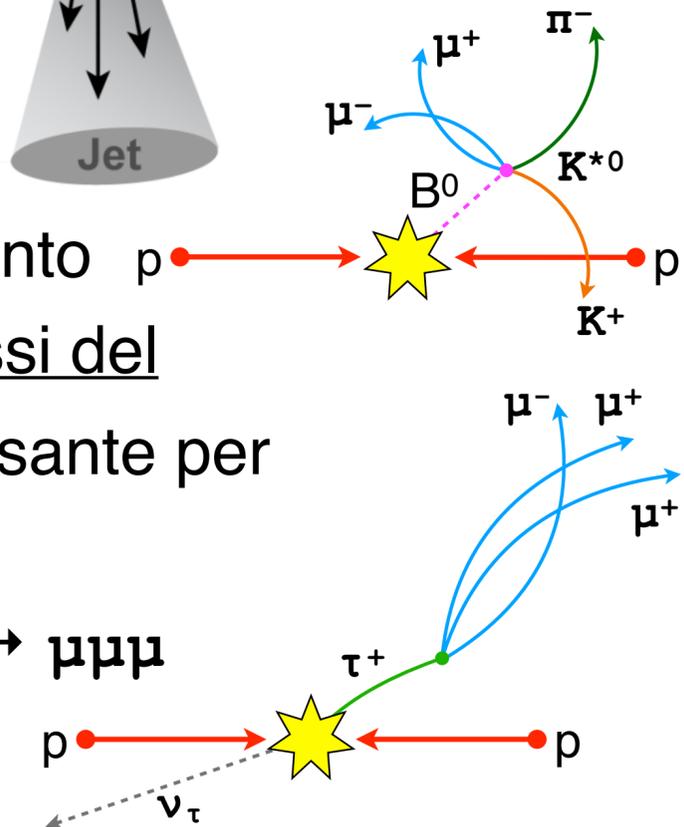
e.g.: una delle particelle più interessanti da studiare è il quark top (t , in particolare in associazione all'Higgs) che decade $t \rightarrow W b$



Un altro esempio notevole di adrone con quark b è il mesone B^0 di cui è stato studiato, tra gli altri, il canale di decadimento $\rho \rightarrow K^{*0} (\mu^+ \mu^-)$ (nel MS spiegato con processi del second'ordine) \rightarrow particolarmente interessante per poter sondare processi fisici sconosciuti

- Sotto lo stesso "cappello" studiamo $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$

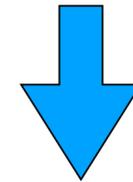
\bullet *Lieve discrepanza con MS*



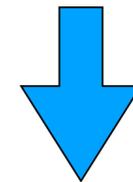
E se usassimo il tracciatore per aiutare la calorimetria adronica? Adroni carichi, con momento fino a qualche centinaio di GeV, sono misurati meglio con il tracciatore che con il calorimetro

Composizione media dei jet:

- **65% adroni carichi** → risoluzione tracker $\sigma(p_T) / p_T \sim \%$
- 25% fotoni/elettroni → calo. EM risoluzione $\sim 3.6\% / \sqrt{E}$
- 10% adroni neutri → calo. adronico risoluzione $\sim 125\% / \sqrt{E}$

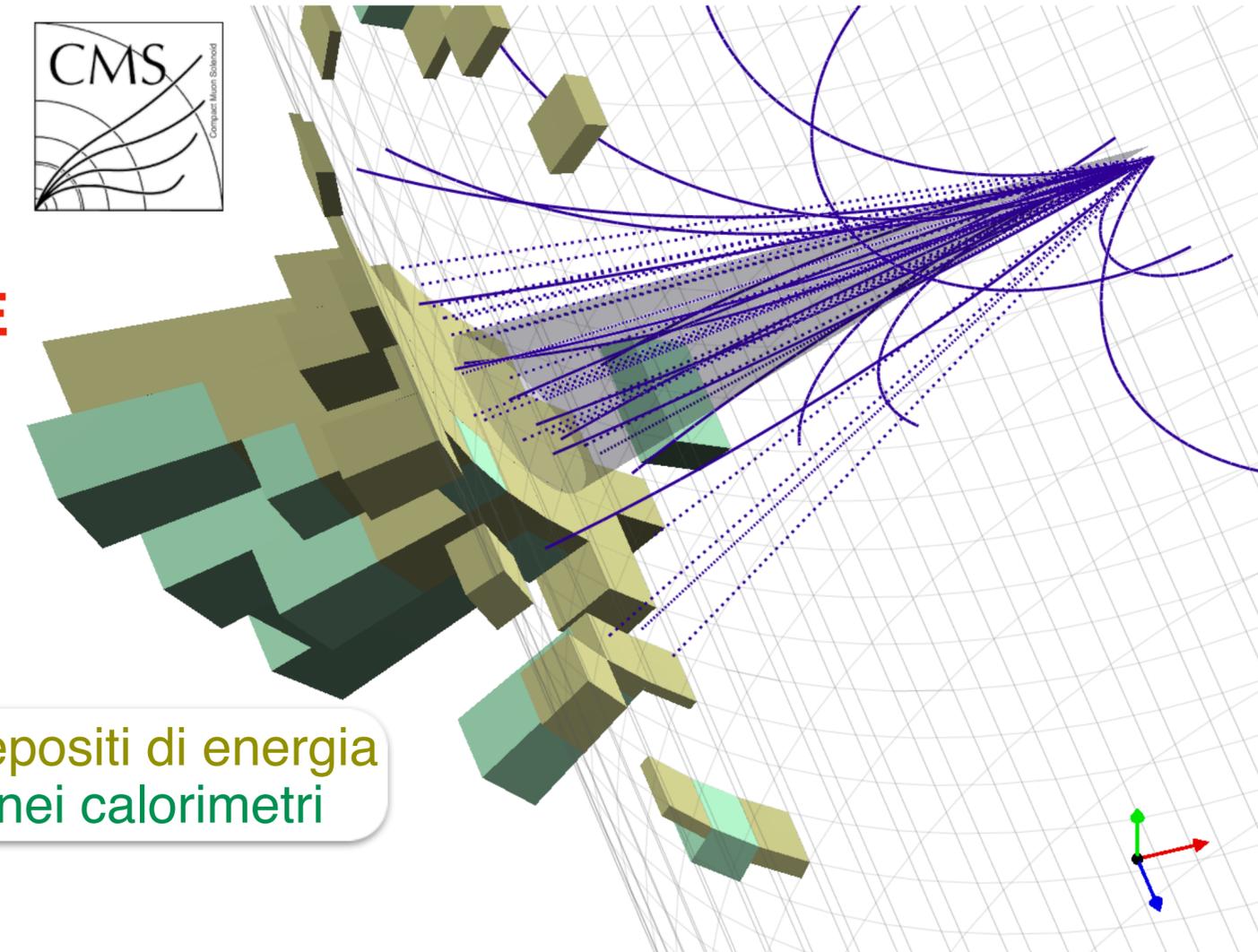
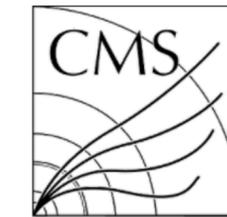


Separare adroni **carichi** da **neutri** per rimpiazzare misura calorimetrica con quella del tracciatore



Per fare questo abbiamo bisogno di:

- **tracciatore ad alta granularità** → separare tracce cariche nel jet
- **elevato campo magnetico** → “aprire” jet e separare componente carica da quella neutra, $\Delta s \propto B \cdot (\Delta p / p^2)$



Depositi di energia
nei calorimetri

Proprietà possedute da CMS

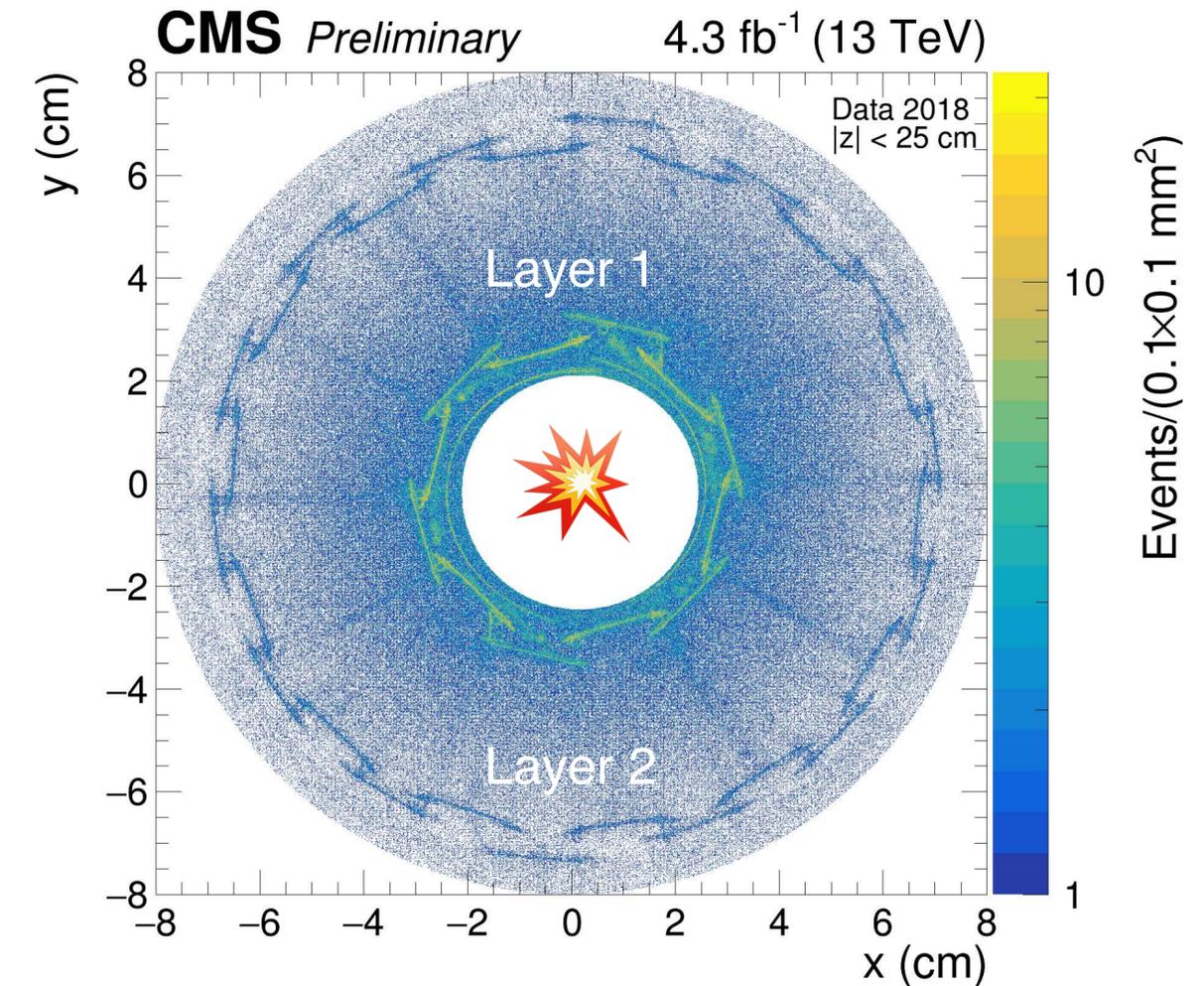
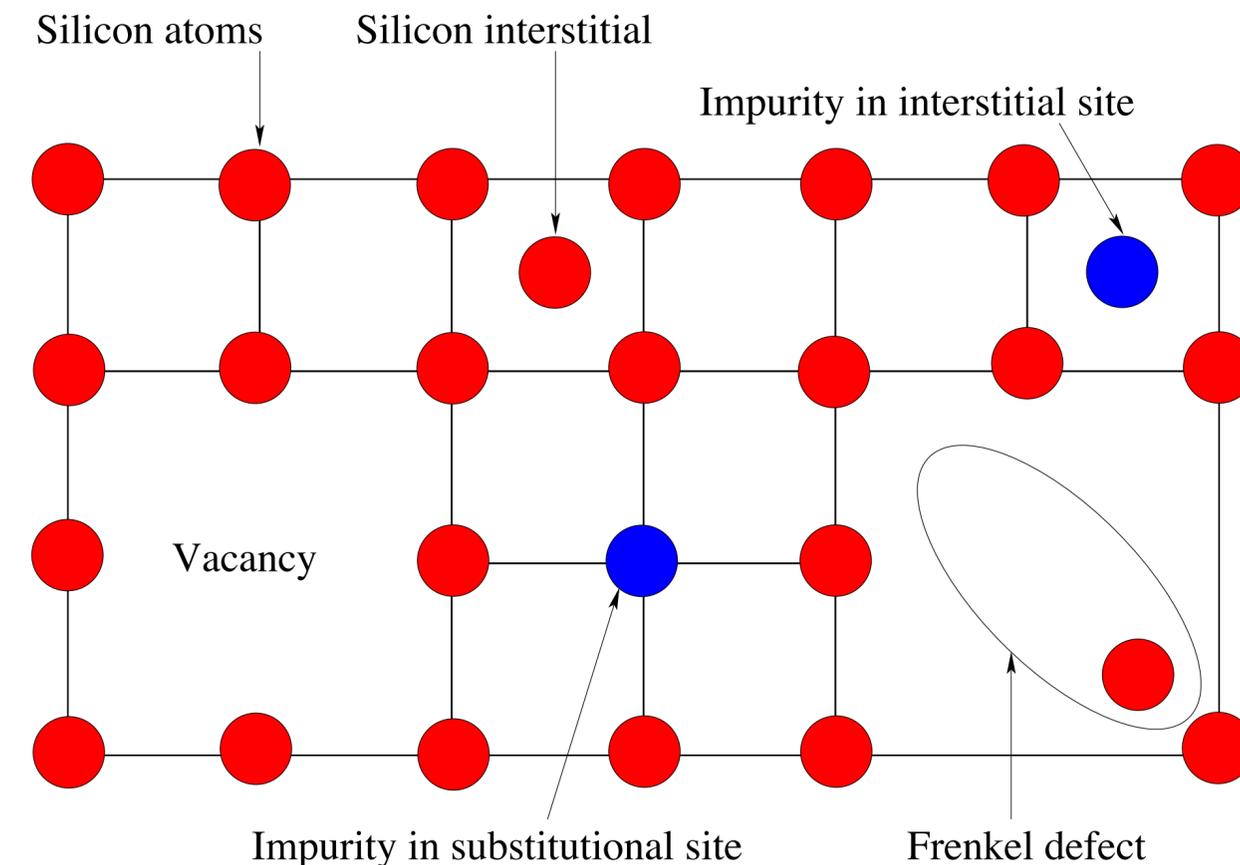
Notevole miglioramento risoluzione energia jet, missing energy, identificazione tau, ...



Il rivelatore a pixel è il più prossimo ai fasci di protoni → investito da un maggiore flusso di particelle altamente energetiche, i.e. **radiazioni 1.2 M Gy/anno** (fondo ~1 mGy/anno), che decrescono con il raggio ($\sim 1/r^2$)

Che effetto hanno le radiazioni sul funzionamento del rivelatore?

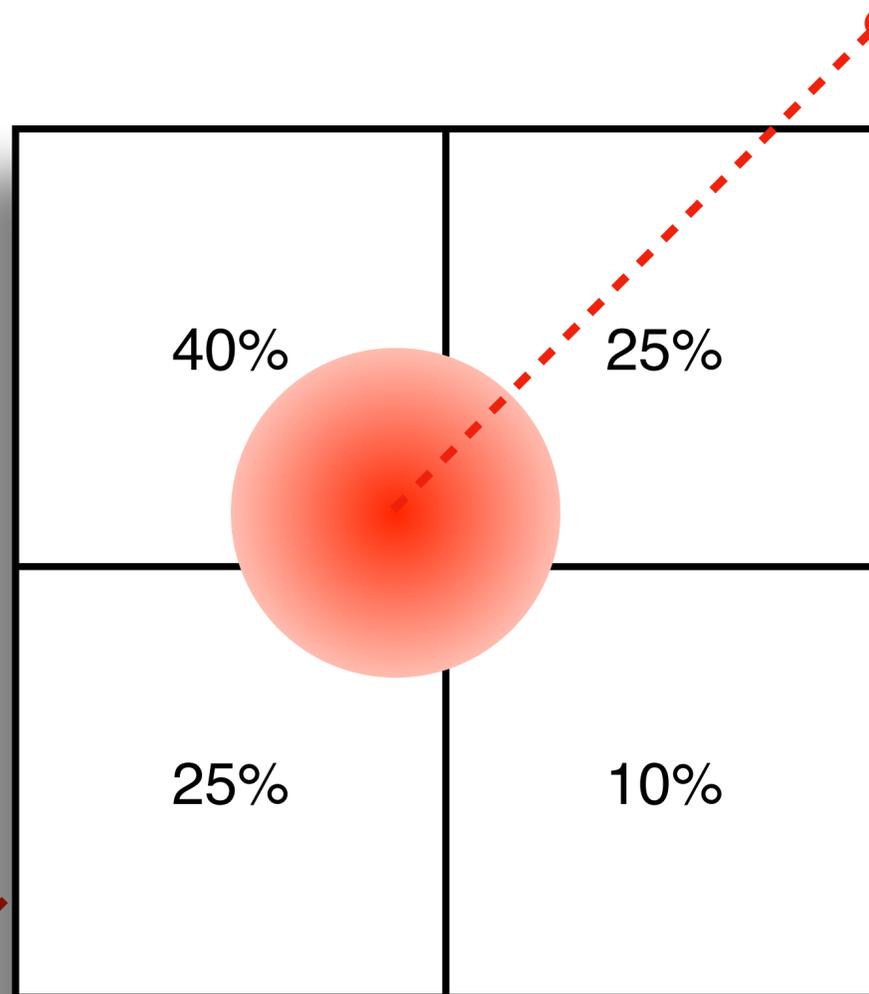
- creano difetti nel cristallo dei sensori → riduzione vita media portatori ($e-h$), $\sim ns$ → minore libero cammino medio → **-segnale e +rumore**
- danneggiano transistor chip di lettura → degradazione amplificazione e range dinamico ADC, riduzione banda passante, aumento potenza



Adrografia: distribuzione vertici di produzione di particelle generate da interazioni nucleari (zoom sui primi 2 pixel barrel). Densità vertici \propto densità materia e numero atomico (Z)

Altre sfide riguardano:

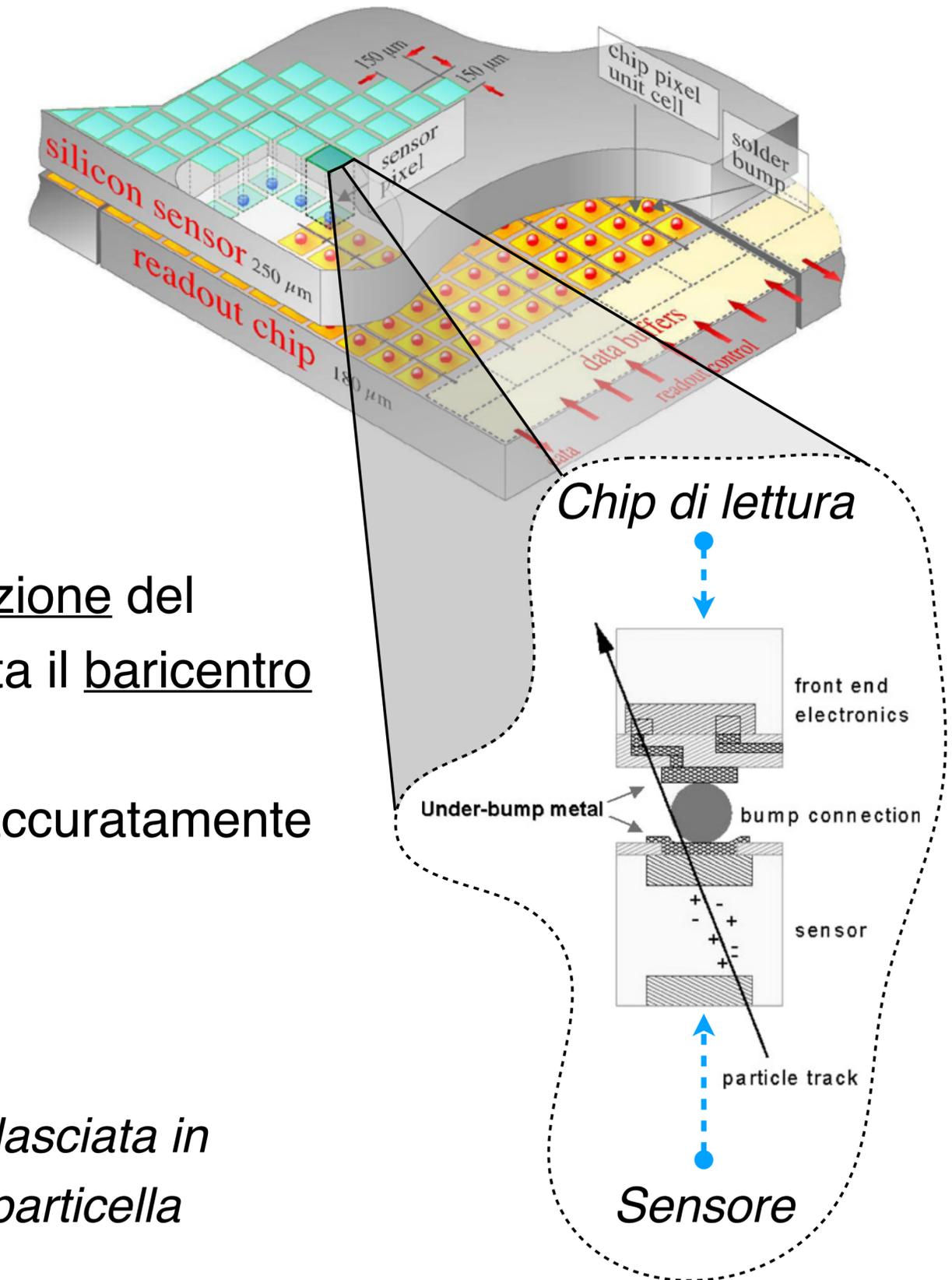
- l'integrazione di più "intelligenza" nel chip di lettura → aumentare elaborazione locale per individuare cluster di pixel, comprimere dati, memorie più ampie, ecc...
- il sistema di controllo, acquisizione dati e calibrazione



Per migliorare la stima della posizione del passaggio della particella si sfrutta il baricentro di carica

- ogni cella deve quindi essere accuratamente calibrata: **$\sim 10^8 - 10^9$ pixel**

Esempio di percentuale di carica rilasciata in quattro pixel dal passaggio di una particella



Past



Future

In Bicocca ci siamo occupati di:

- messa in opera e mantenimento del rivelatore a pixel
- miglioramento del software di ricostruzione delle tracce

L'acceleratore LHC verrà potenziato → **High Luminosity** - LHC

- 14 TeV (rispetto a 13 TeV di LHC), ma soprattutto più collisioni nell'unità di tempo (**x4**) → sarà necessario costruire un rivelatore pixel con caratteristiche ancora più stringenti → *ve ne parlerà tra poco Davide*

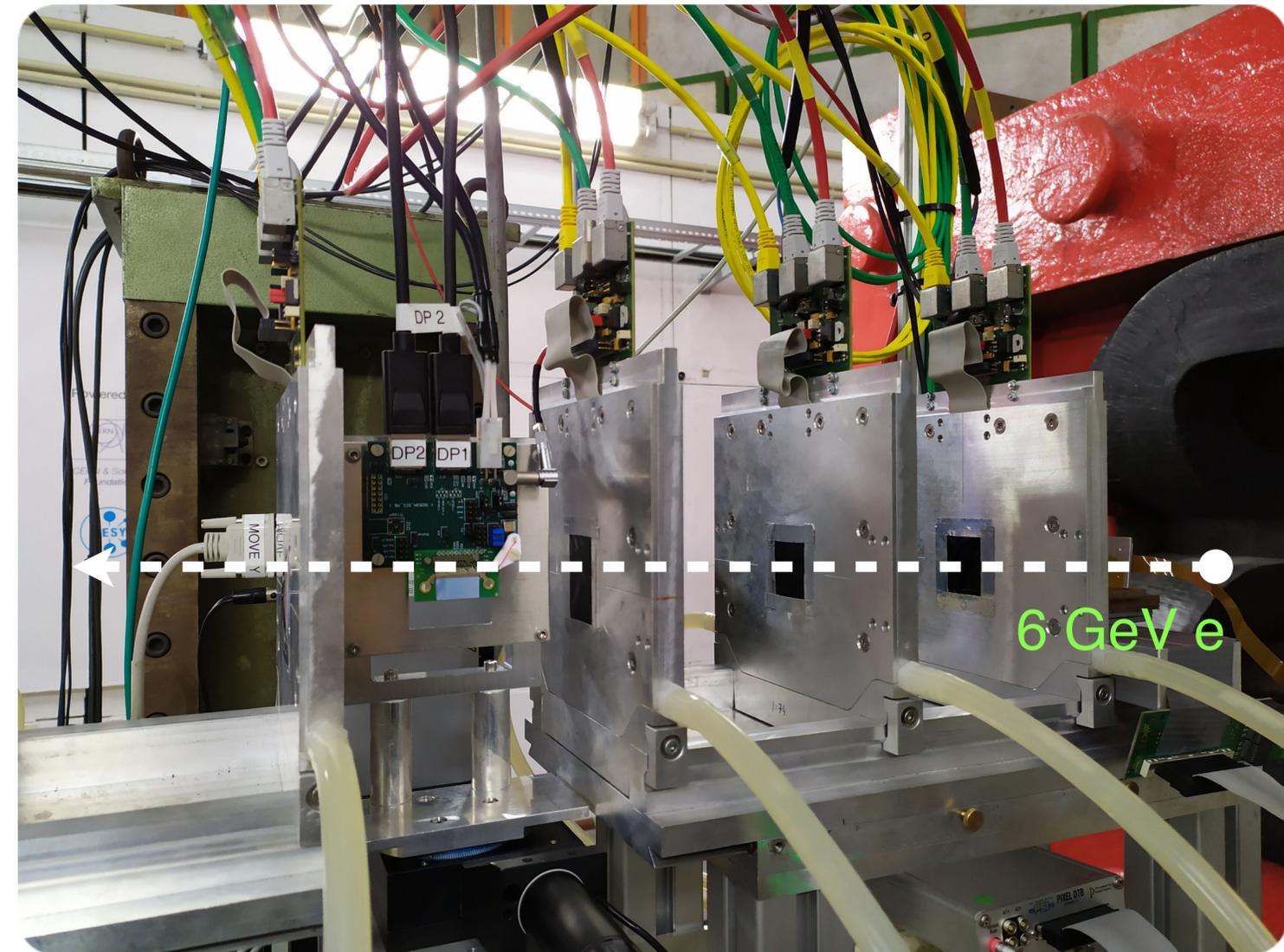
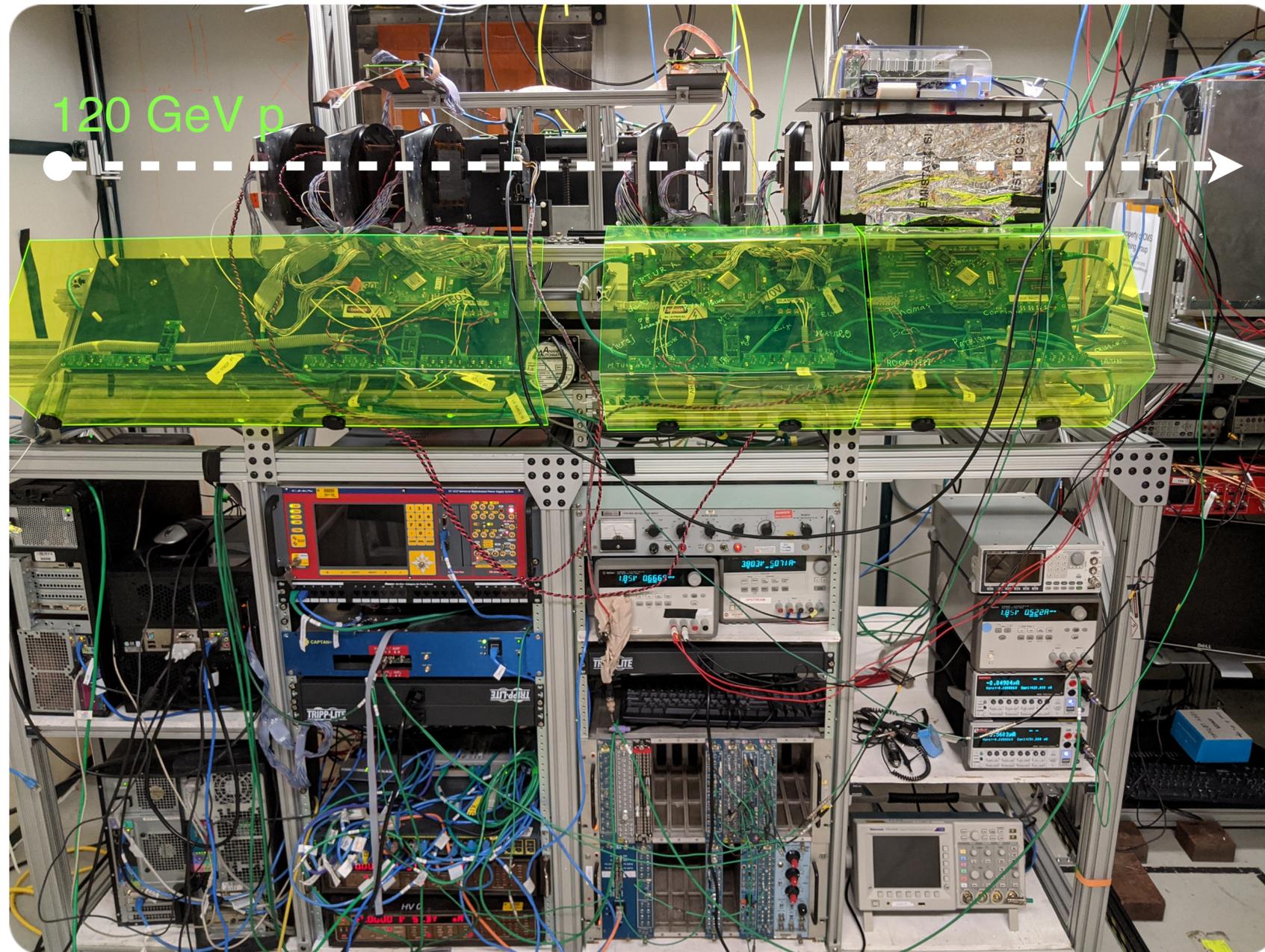
In Bicocca ci occupiamo di:

- ricerca e sviluppo di sensori per il rivelatore a pixel che siano altamente resistenti alle radiazioni
 - progettare nuovi sensori
 - testare sia in laboratorio che con fasci di particelle
- sviluppo del software di controllo, acquisizione dati e calibrazione del nuovo rivelatore a pixel

Test nuovi sensori con fasci di particelle

Laboratorio  **Fermilab** (Chicago, USA)

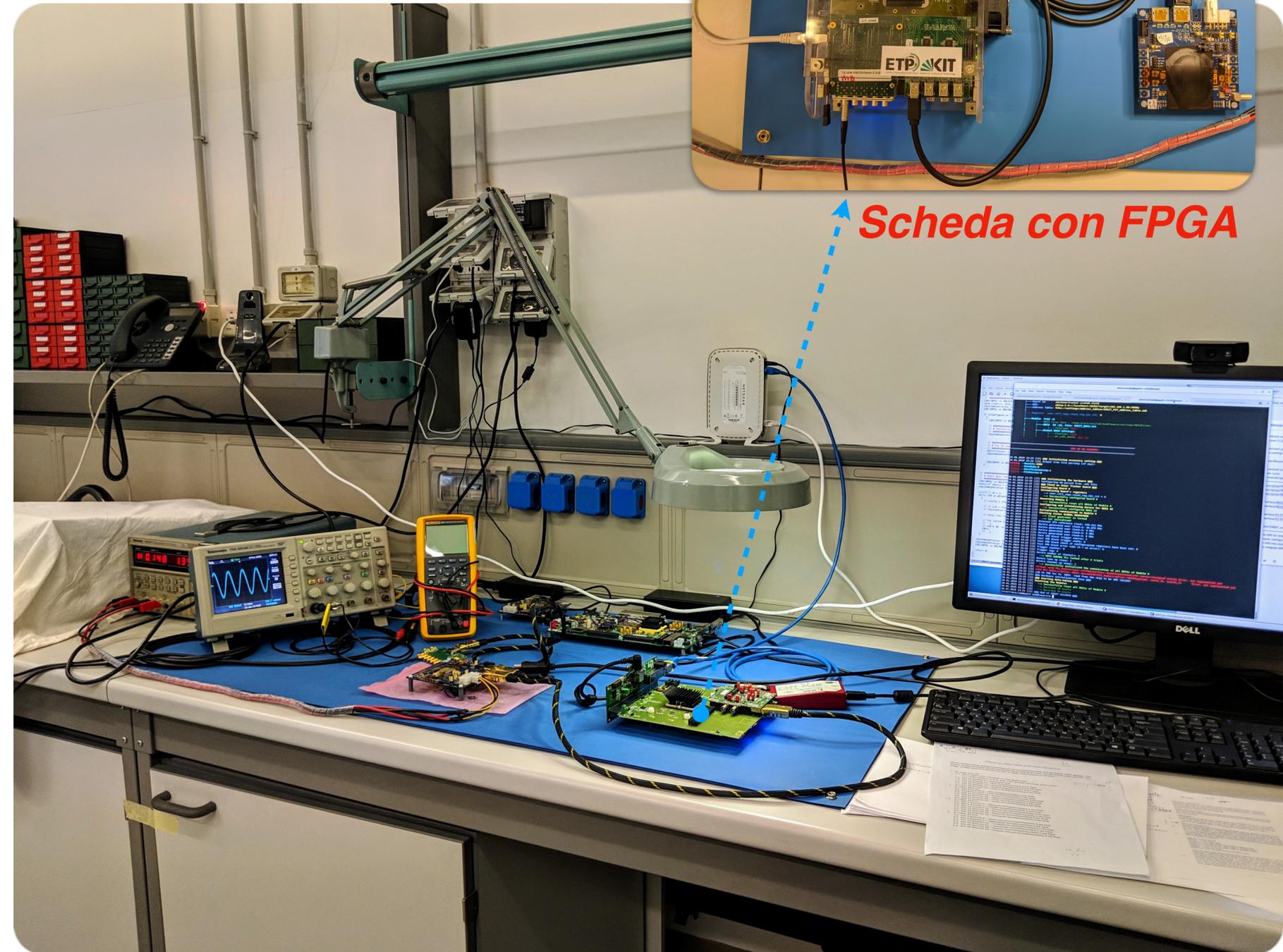
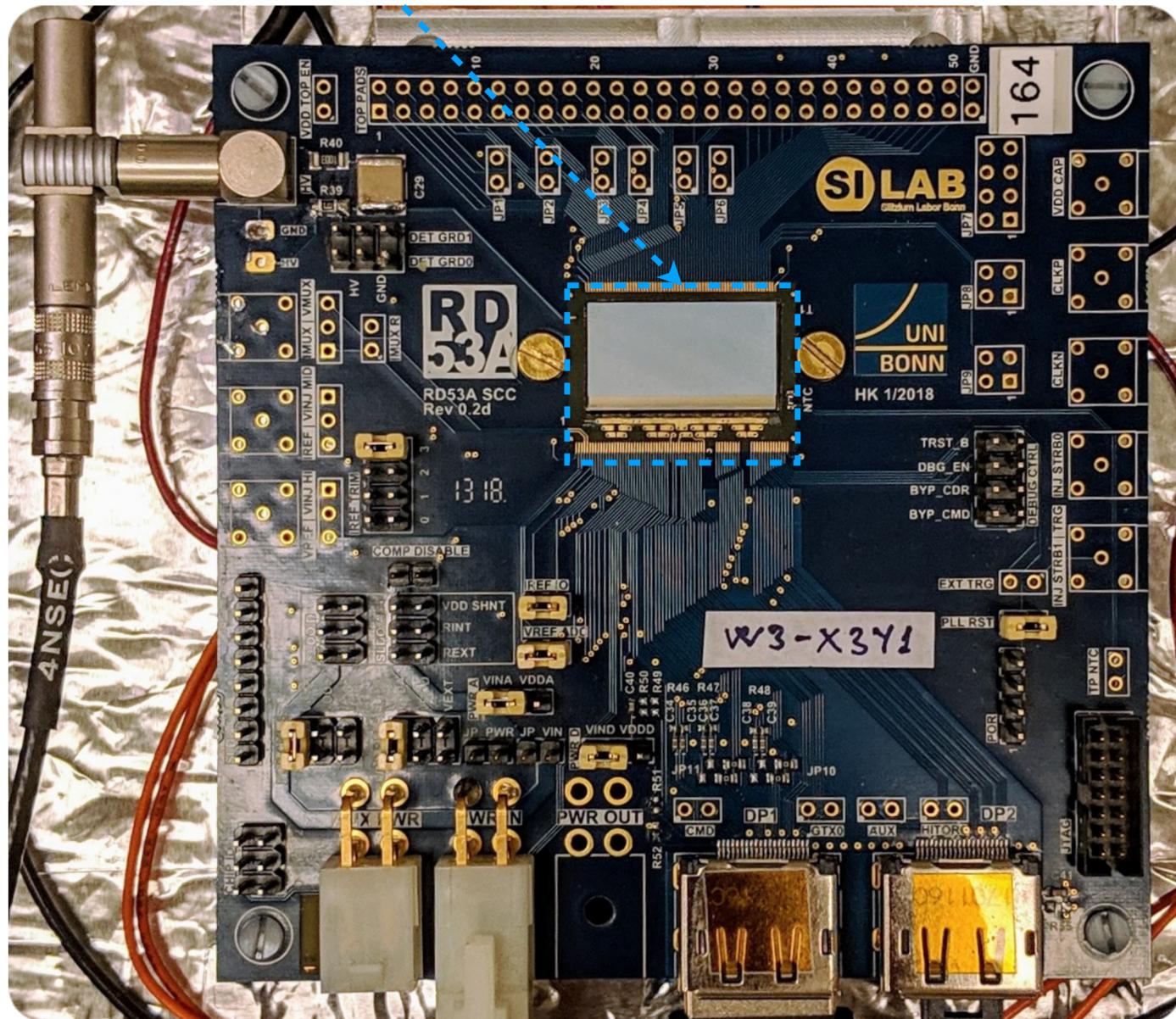
Laboratorio DESY  (Amburgo, Germania)



Sviluppo software di controllo, acquisizione dati e
calibrazione del nuovo rivelatore a pixel

Laboratorio di Milano - Bicocca

Chip di lettura: 80 k pixel in 1x2 cm²

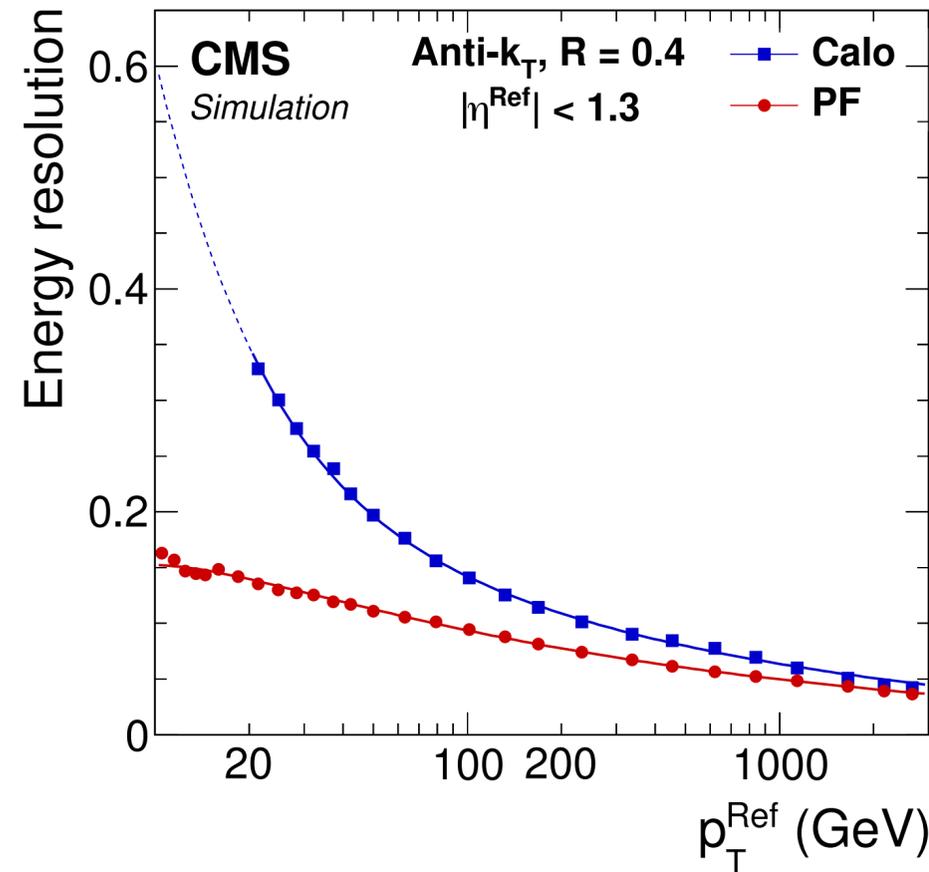


Scheda con FPGA

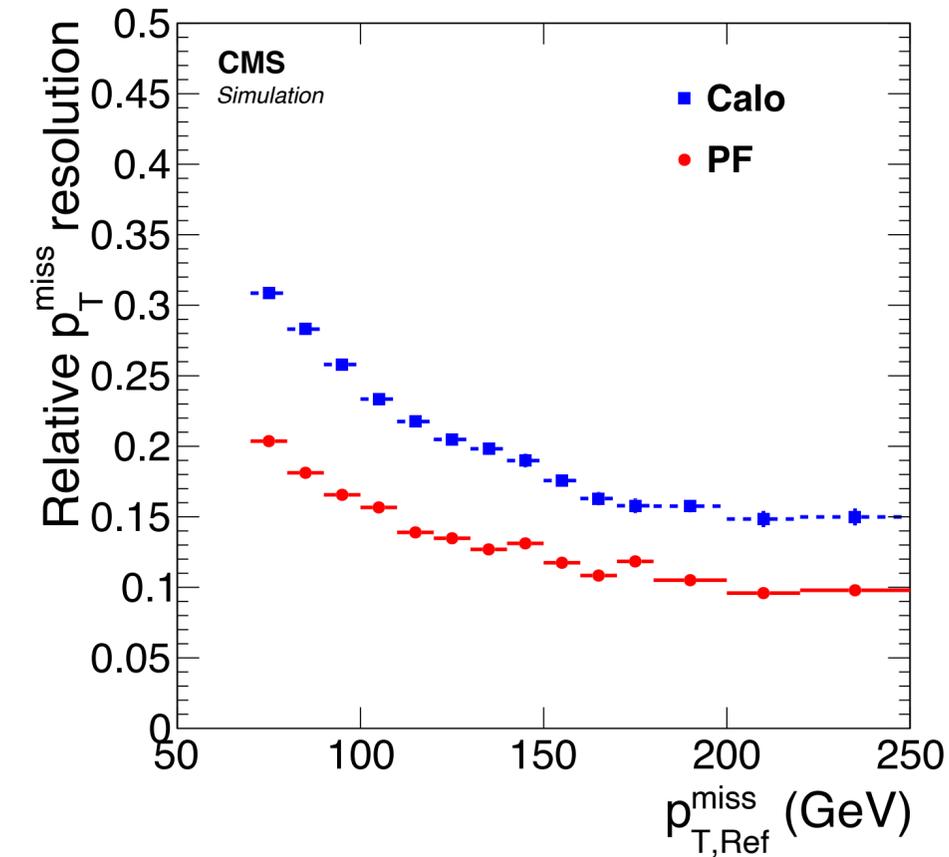


The End

Il **particle flow** impiegato per la prima volta con successo da CMS ad un collider adronico
Funziona veramente? ... giudicate voi ...



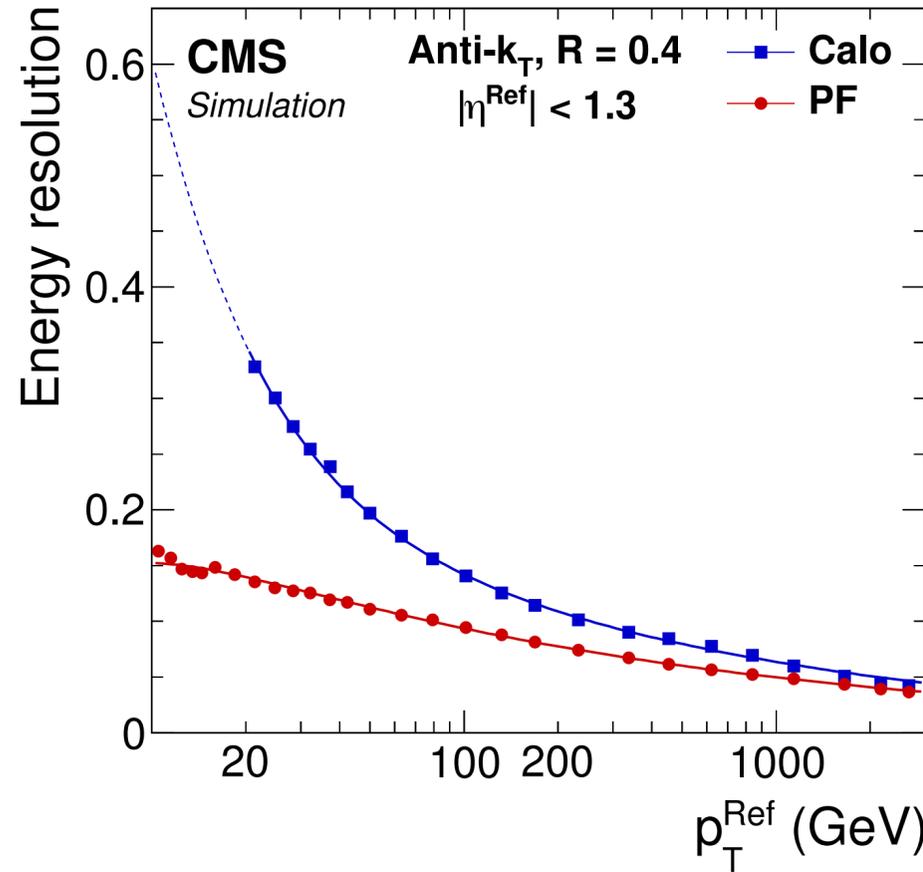
Jet energy resolution in
sample di eventi QCD multijet



Missing energy resolution
in sample di eventi $t\bar{t}$

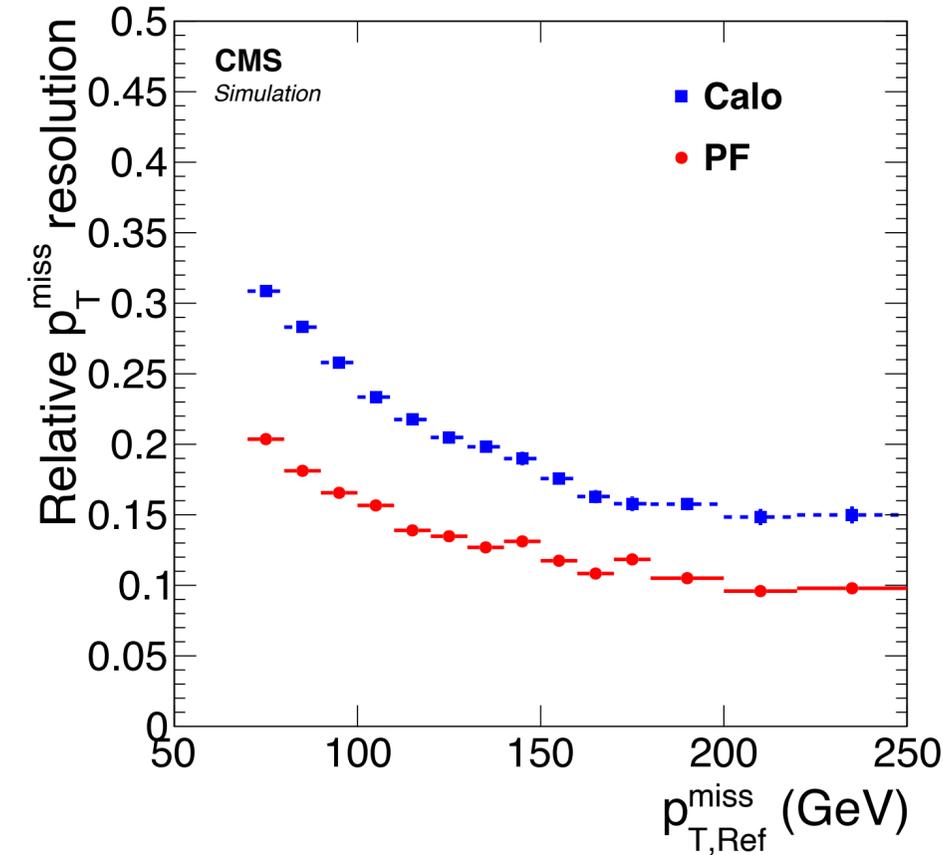
Il **particle flow** impiegato per la prima volta con successo da CMS ad un collider adronico

Funziona veramente? ... giudicate voi ...



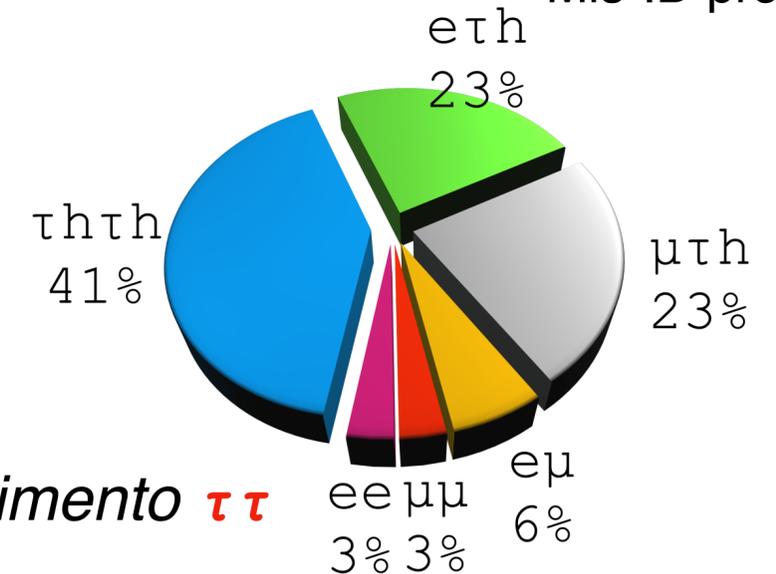
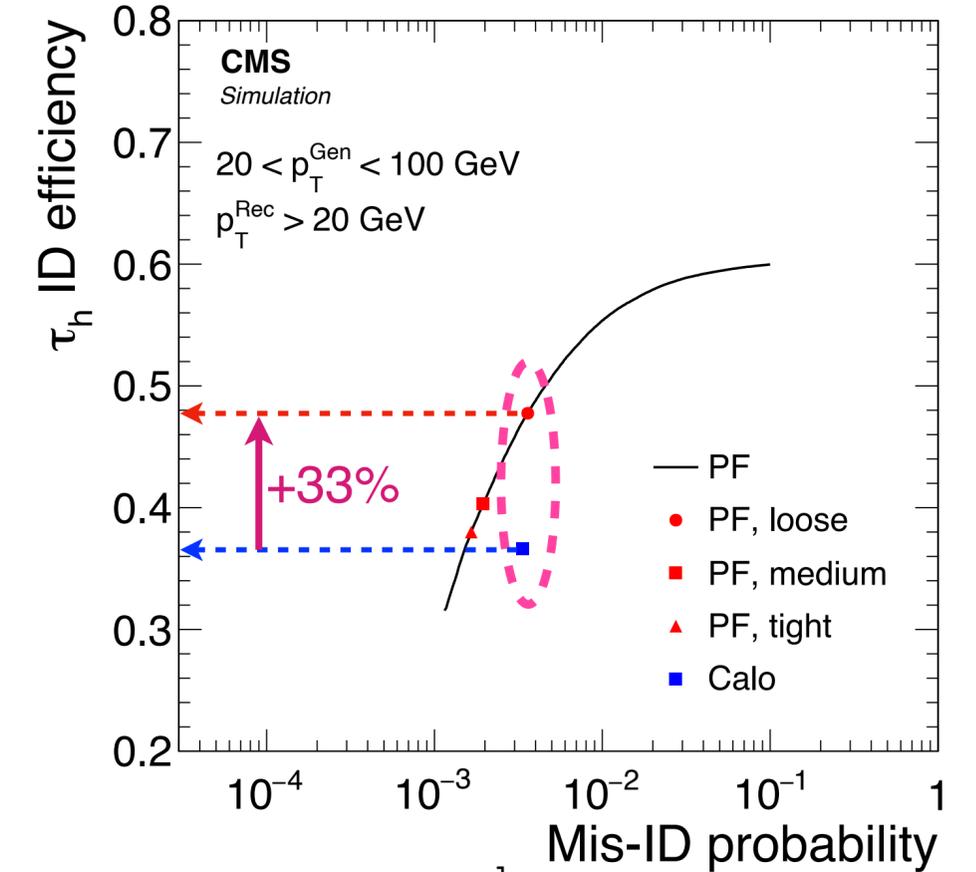
Jet energy resolution in sample di eventi QCD multijet

Notevole miglioramento anche nella ricostruzione dei tau che decadono adronicamente (τ_h), soprattutto per $p_T < 100$ GeV



Missing energy resolution in sample di eventi $t\bar{t}$

Efficienza di identificazione τ_h



Modi decadimento $\tau\tau$