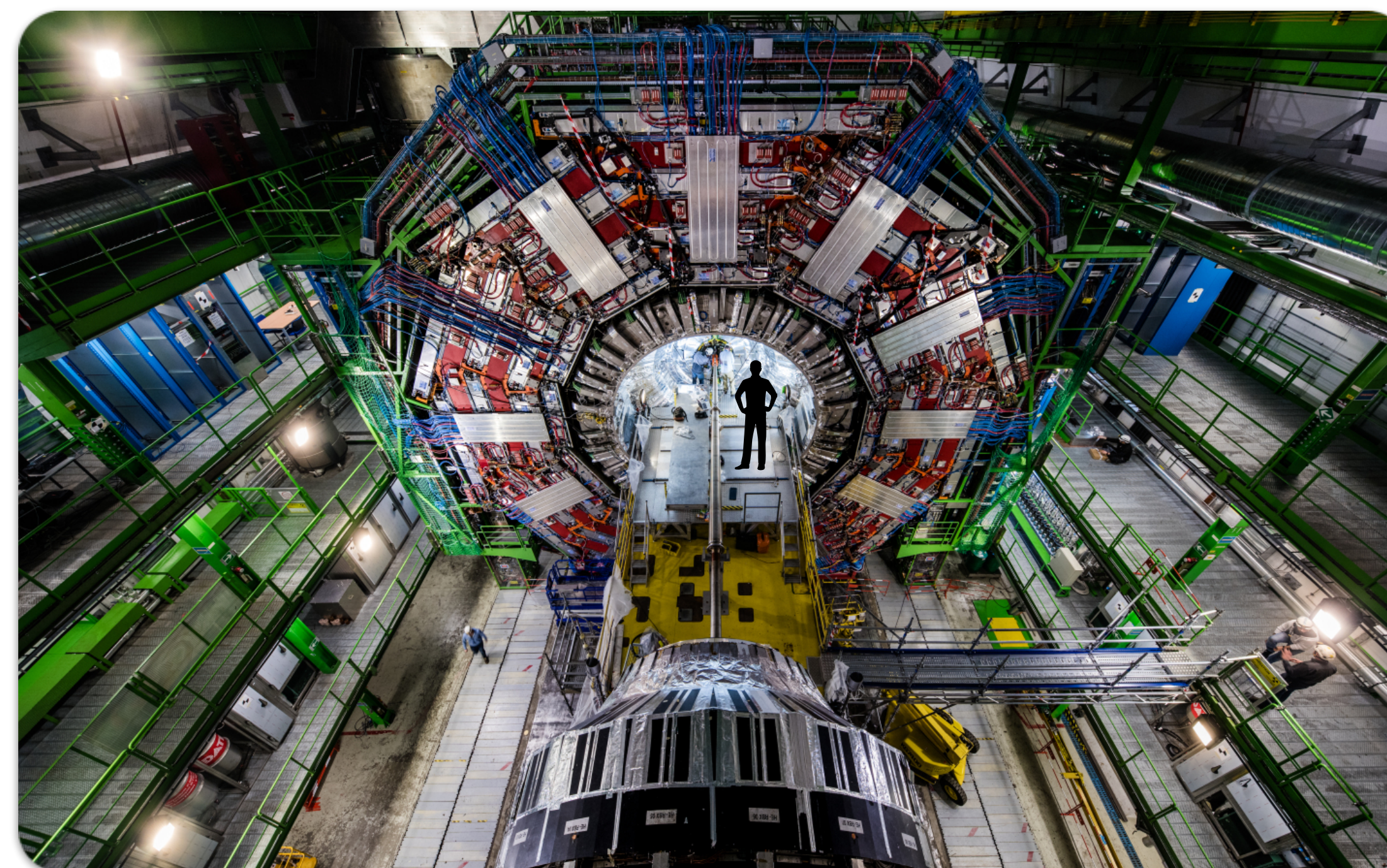
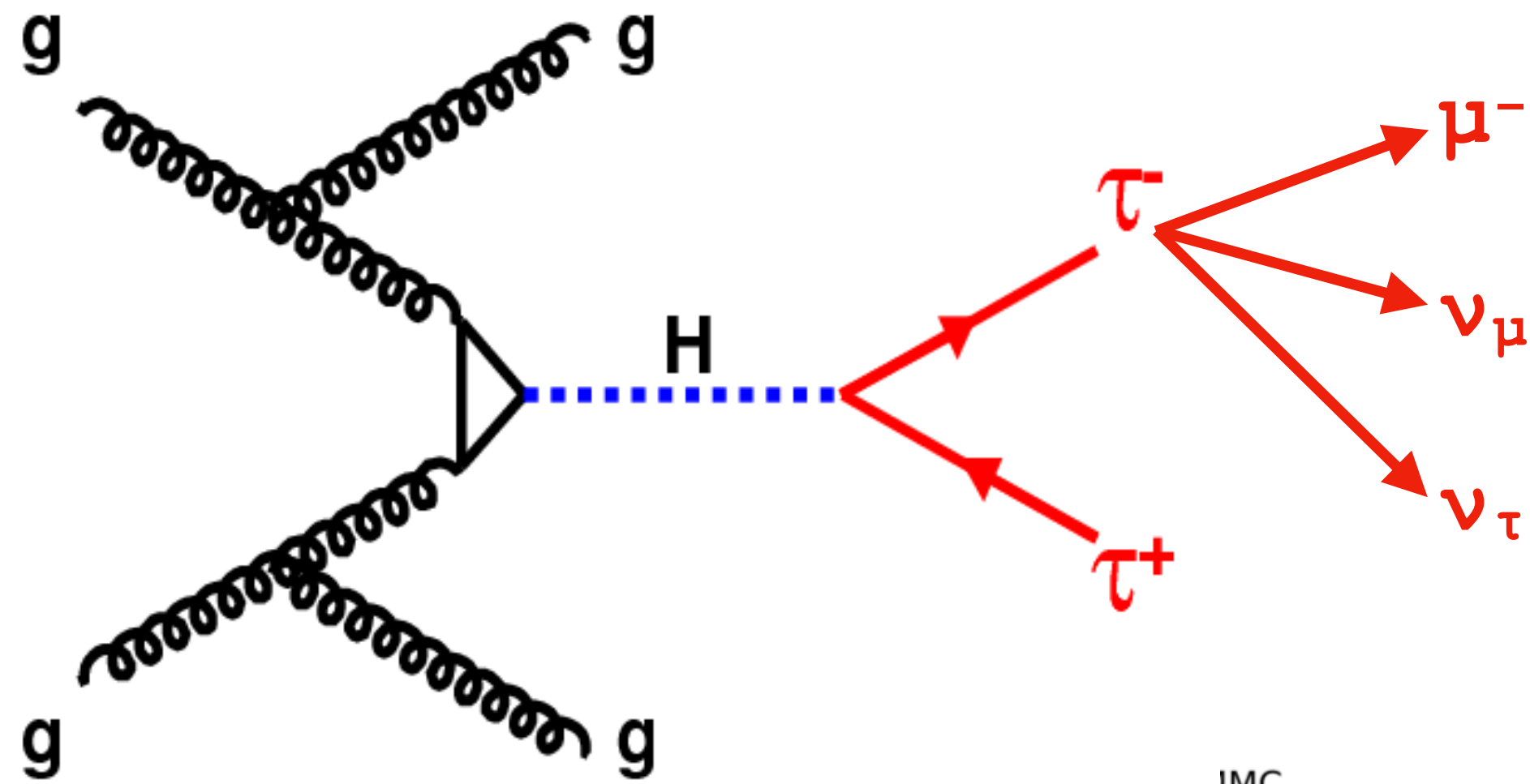


Viaggio al centro dell'esperimento CMS ...  
in regioni di spazio-tempo microscopiche



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

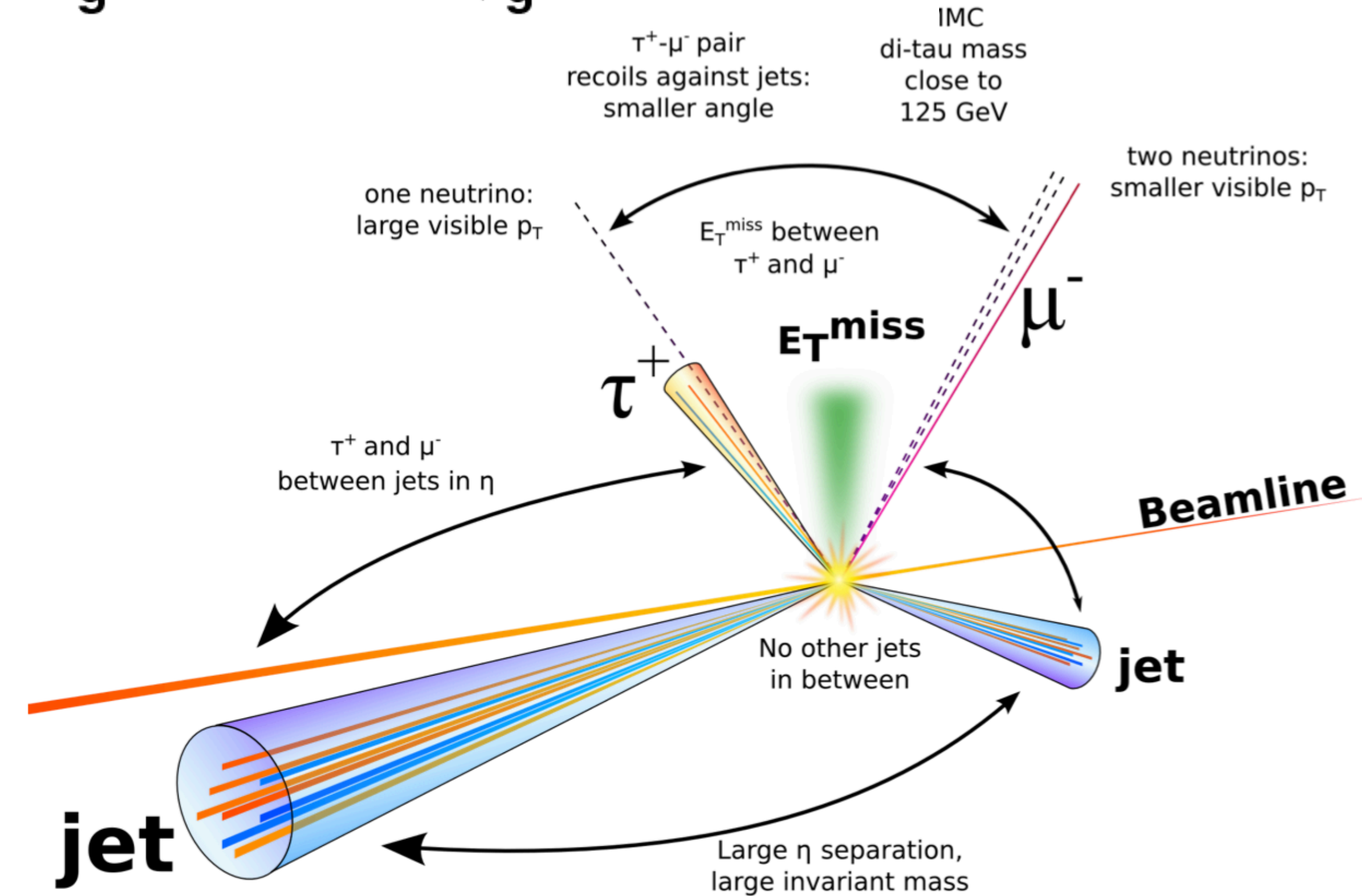
**Massa invariante**, carica, spin, parità, etc... =

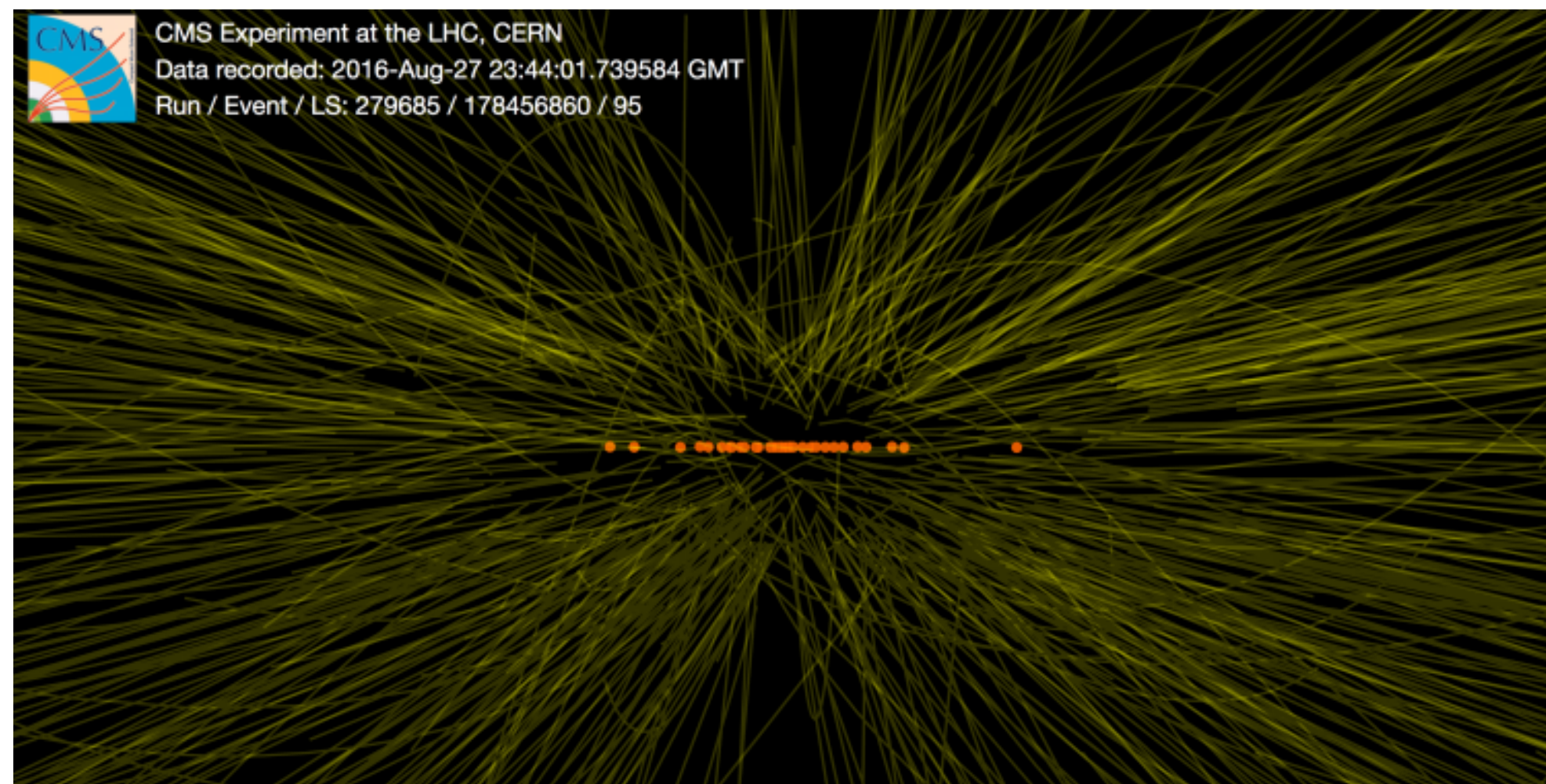
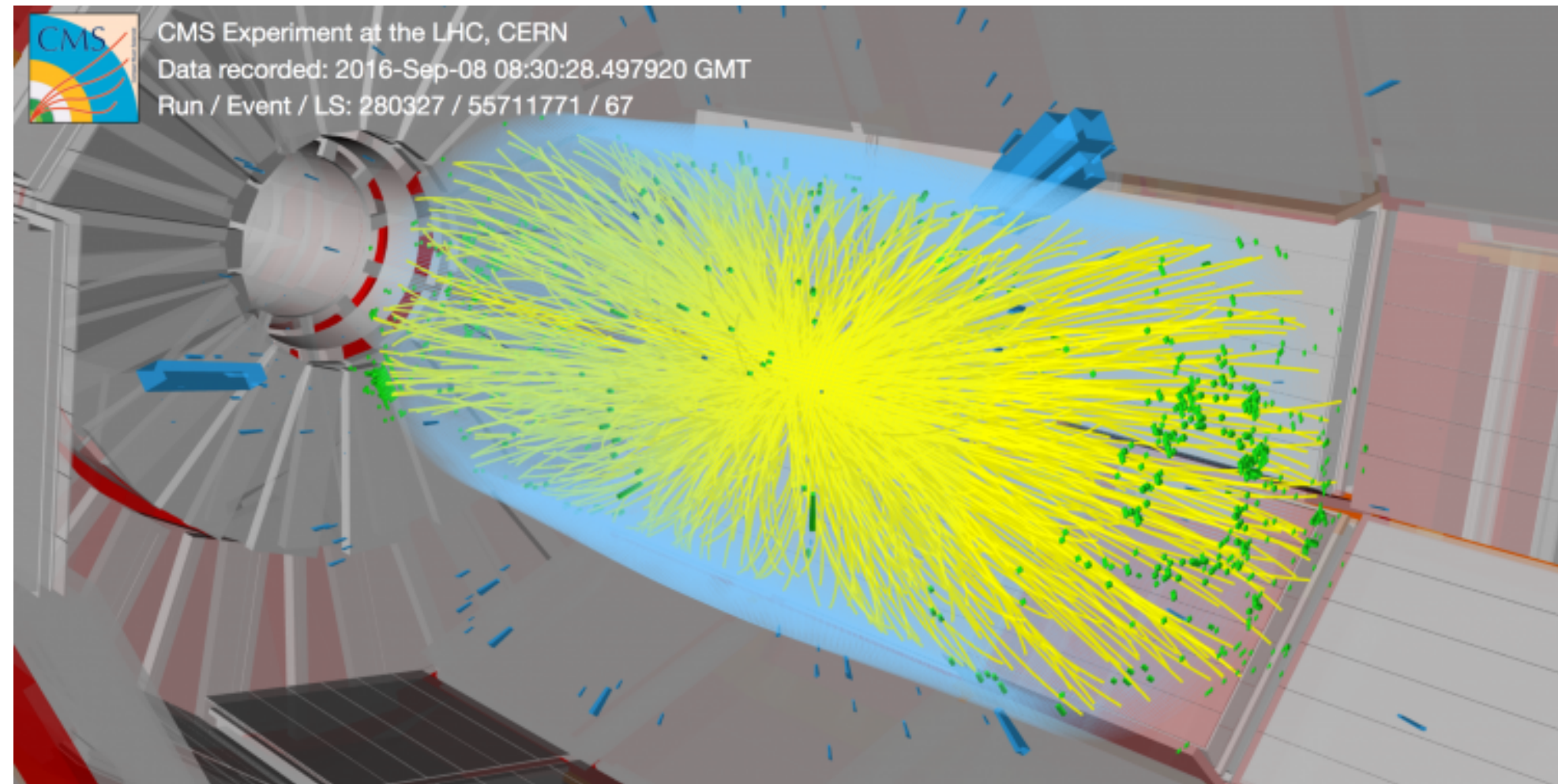


Il rivelatore deve quindi essere in grado di:

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

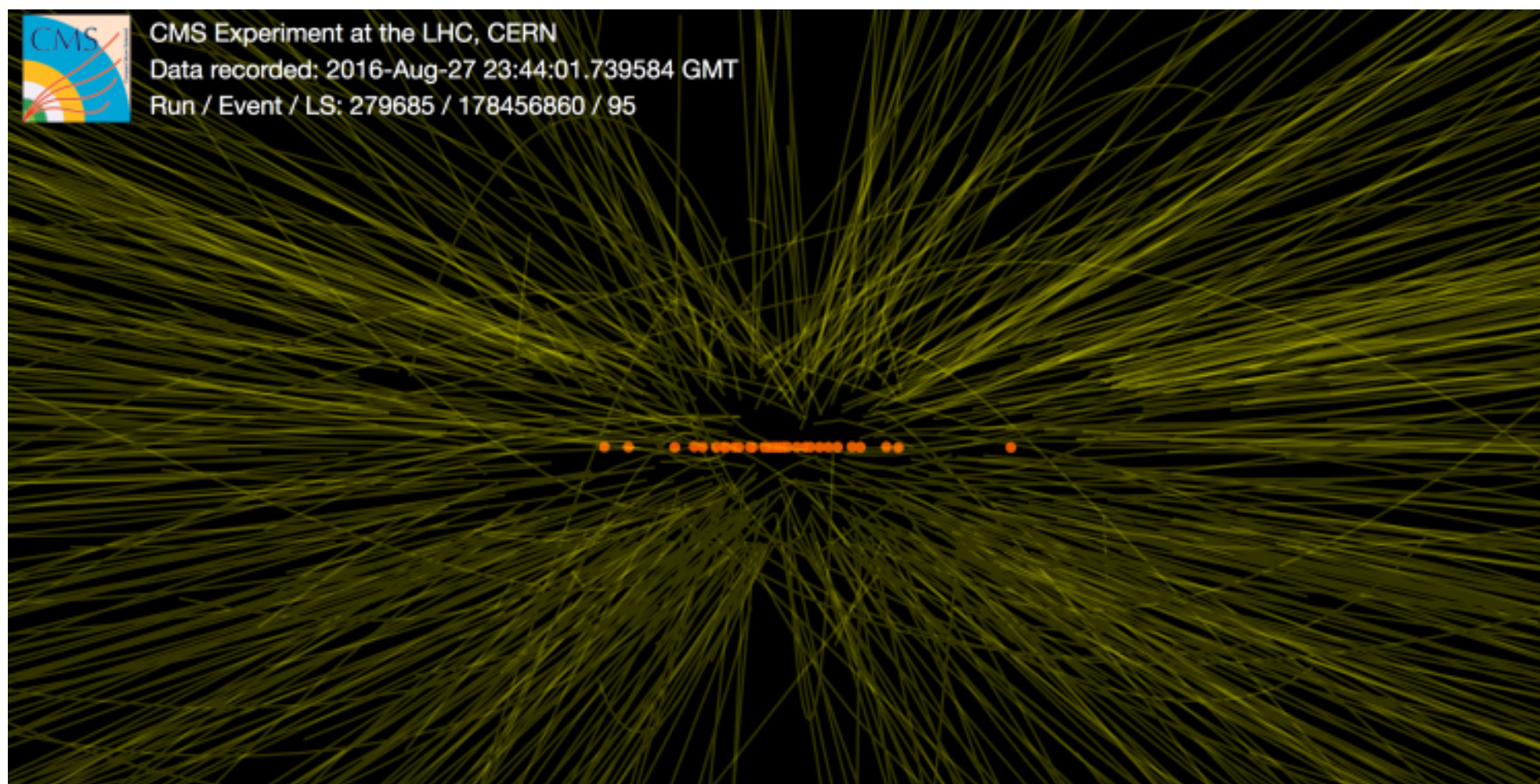
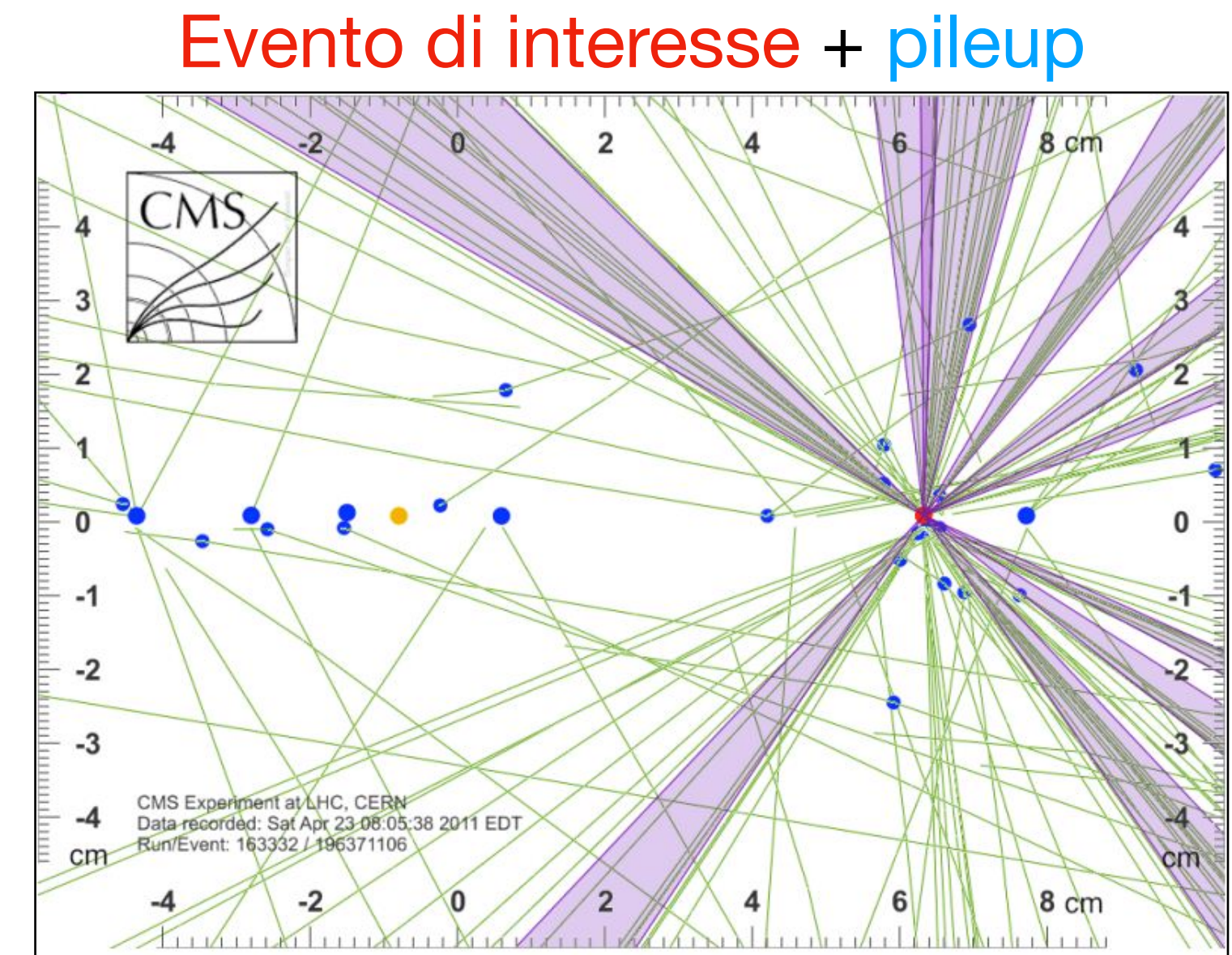
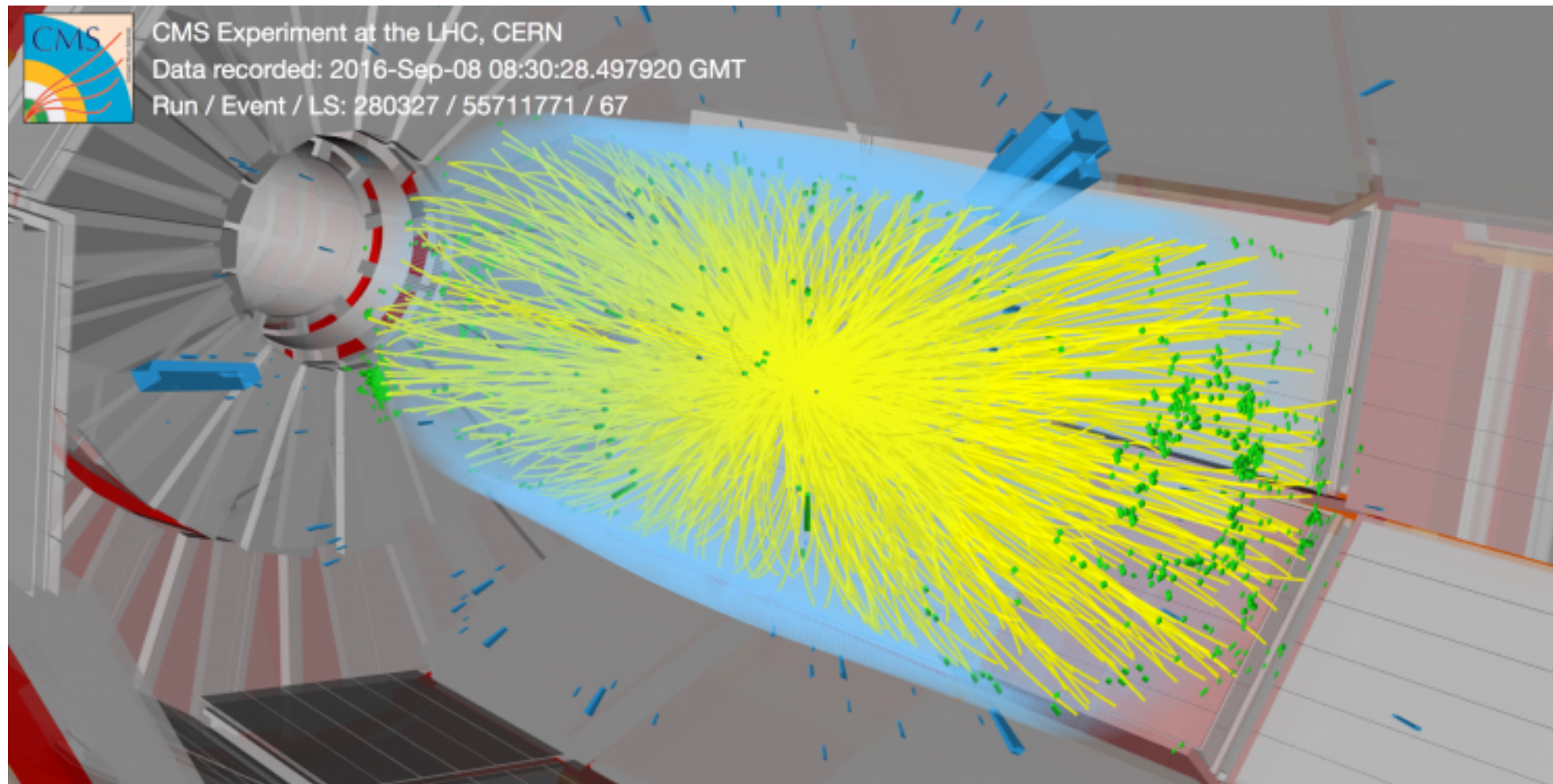
*Peccato che a LHC questi eventi siano nascosti ... infatti le collisioni assomigliano di più a questa ...*





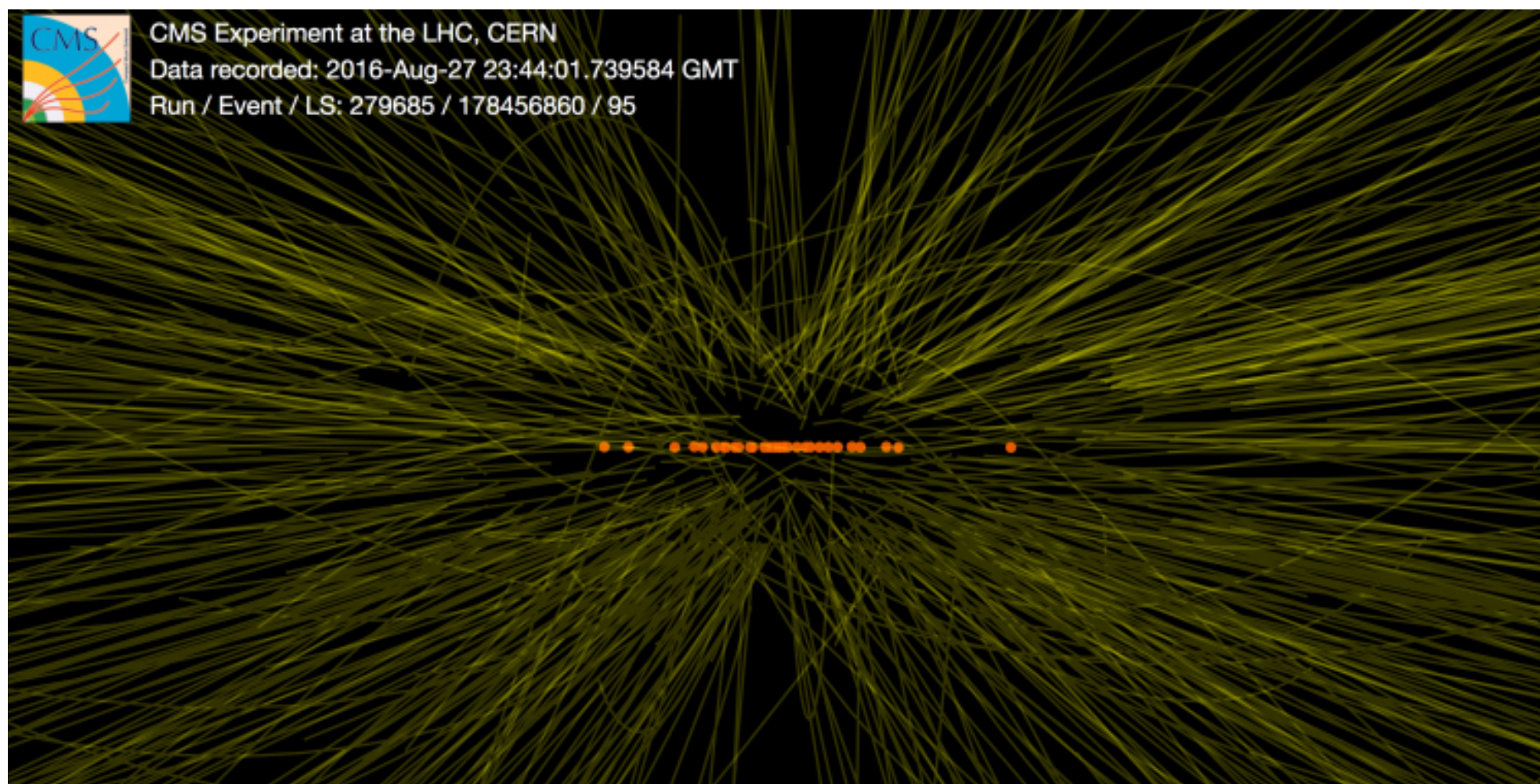
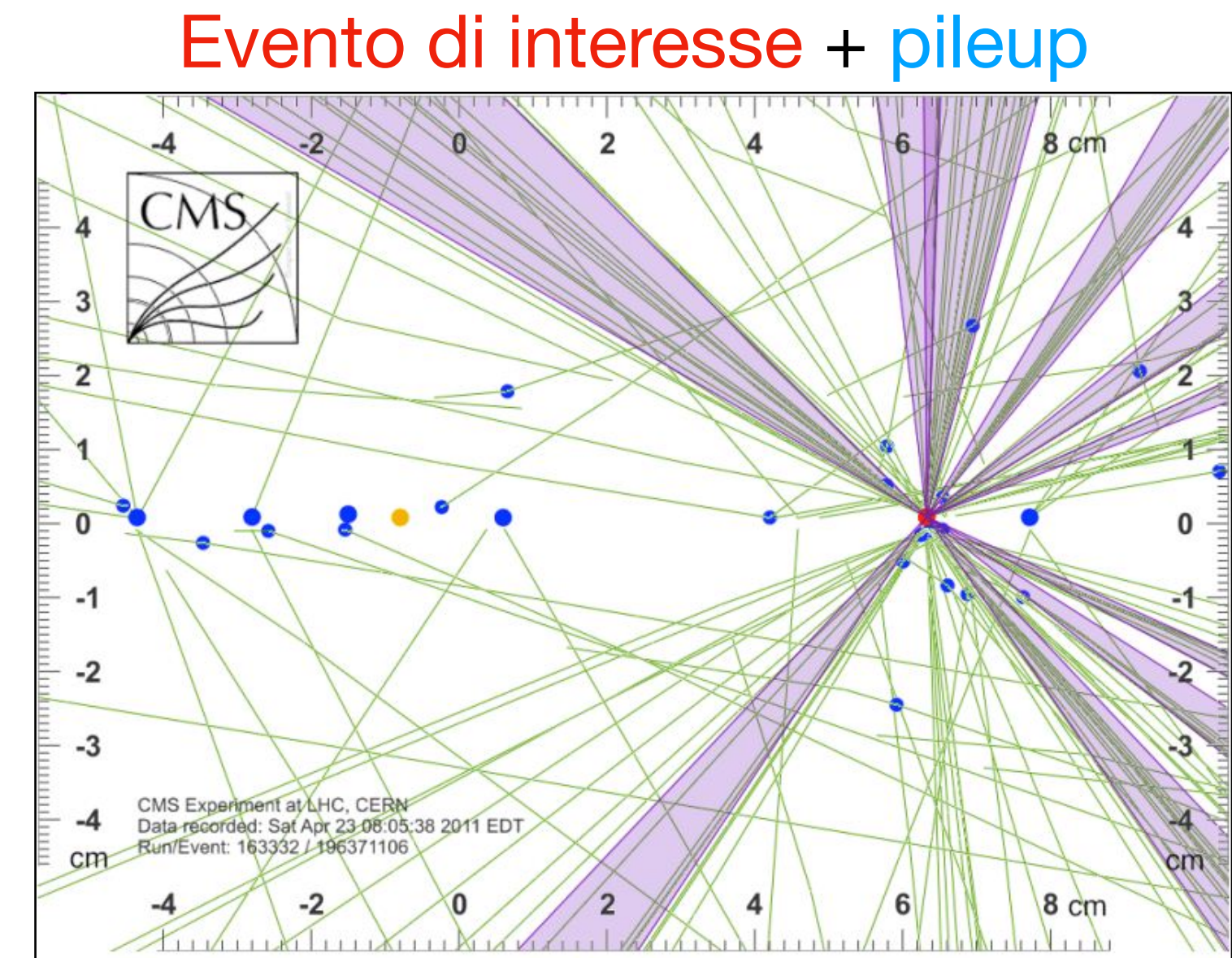
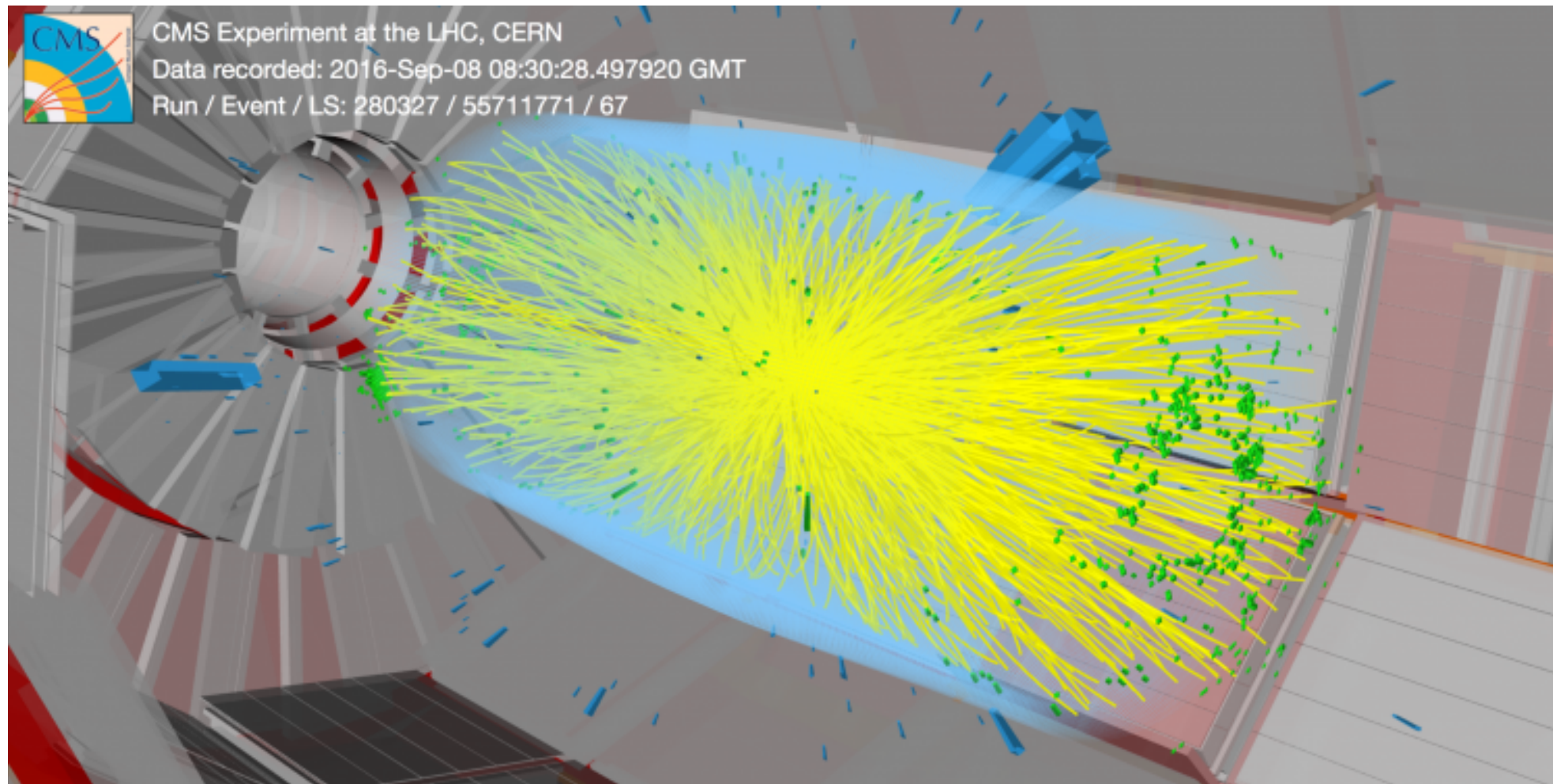
**86** eventi di pileup ... tutti risolti

Ad ogni incrocio dei pacchetti di protoni, *bunch*, avvengono più collisioni  $pp$  (*pileup*)  $\rightarrow$   **$\sim 1000$**  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*)  $\rightarrow$   **$\sim 1000$**  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

Solenoide

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,  $\tau$ -jet)

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



Connecting the dots...

## Principi di misura del tracciatore:

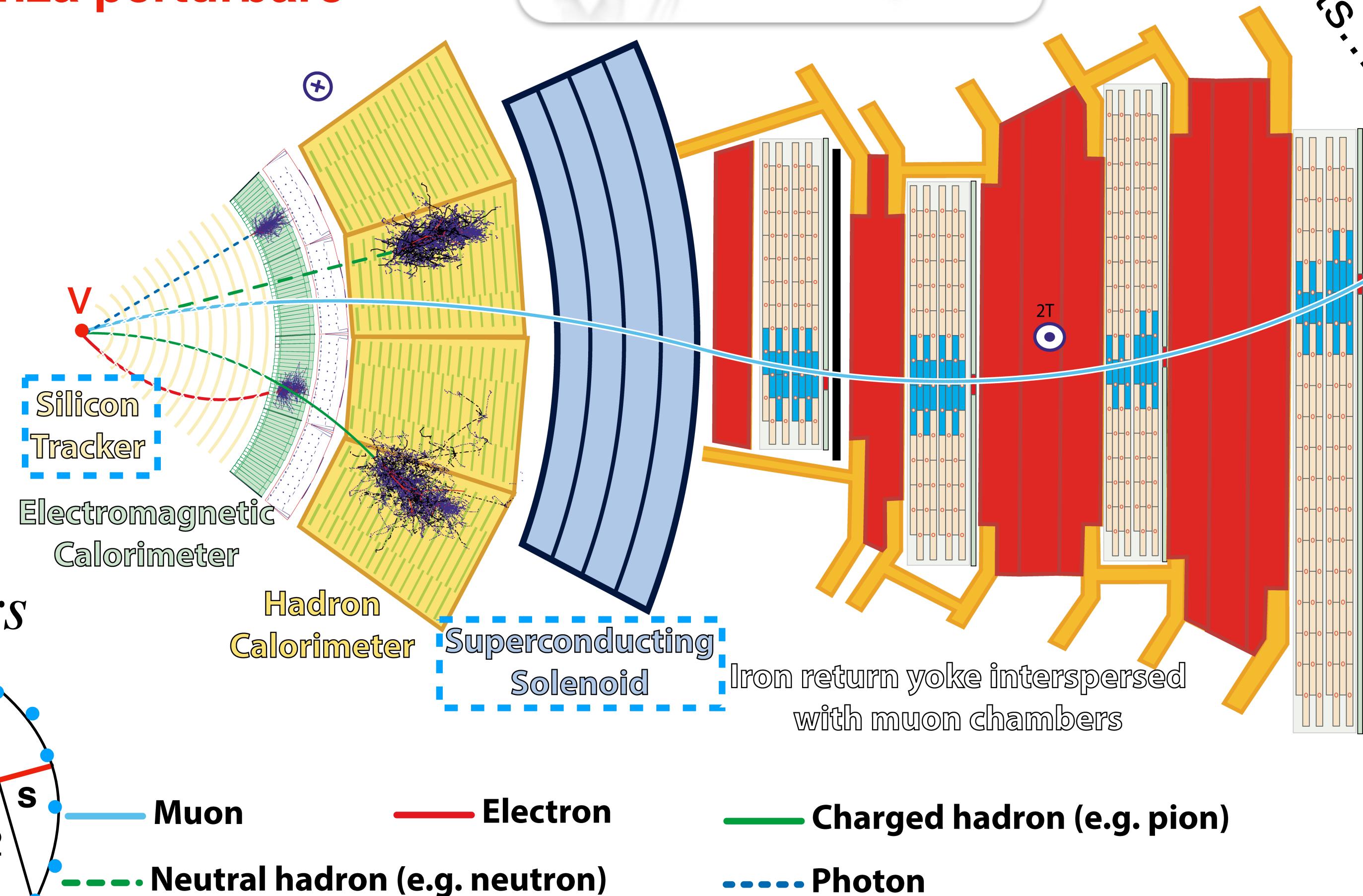
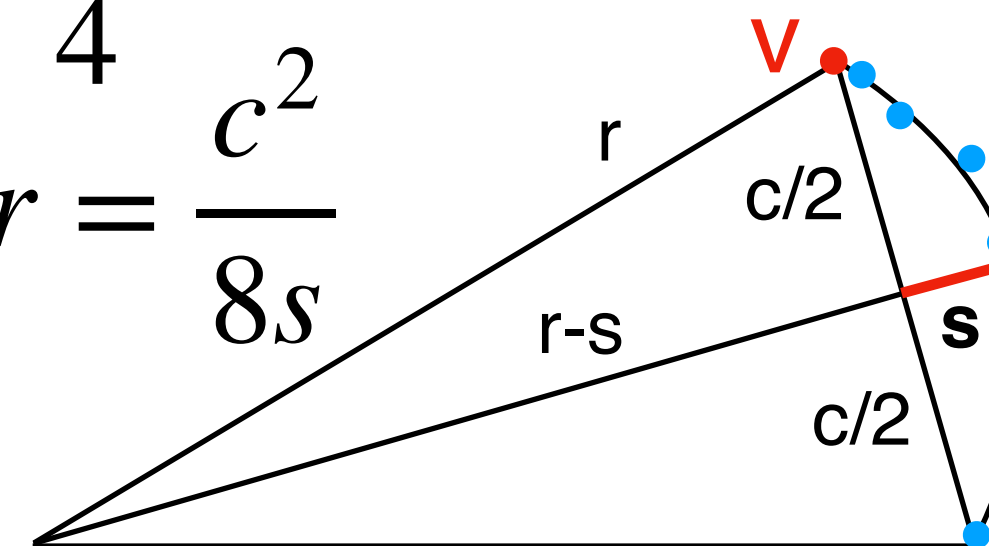
- campionare traiettoria (*and connect the dots*)
- sfruttare forza di Lorentz

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

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:

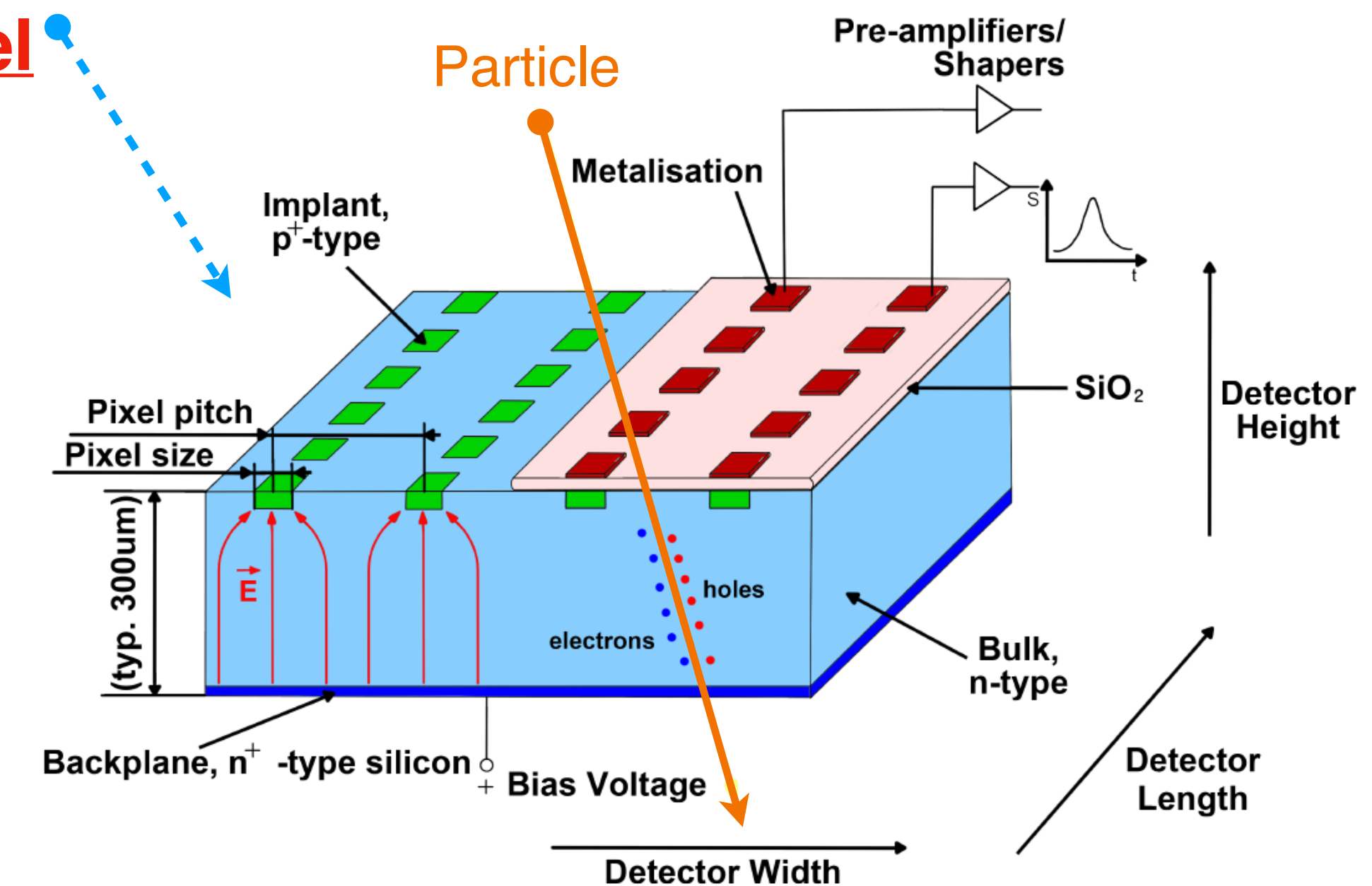
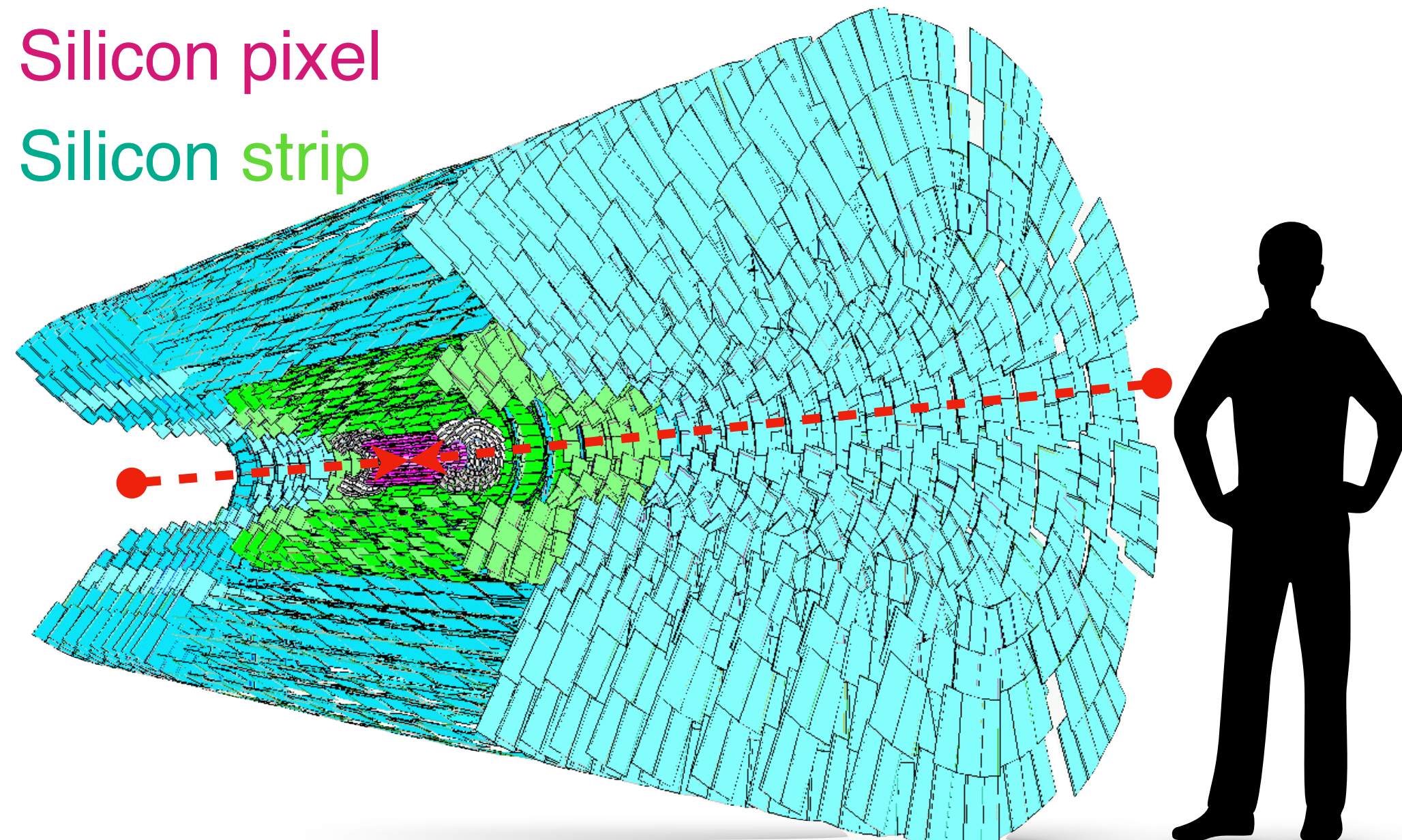
- alto grado di miniaturizzazione → **alta granularità**
- facilità creazione coppie  $e-h$  (3.6 eV) → **alto segnale**
- **basso rumore**
- alta mobilità portatori + alto campo elettrico per deriva & raccolta → **veloci**

**Il tracciatore di CMS (210 m<sup>2</sup> Silicio) ... alcuni numeri:**

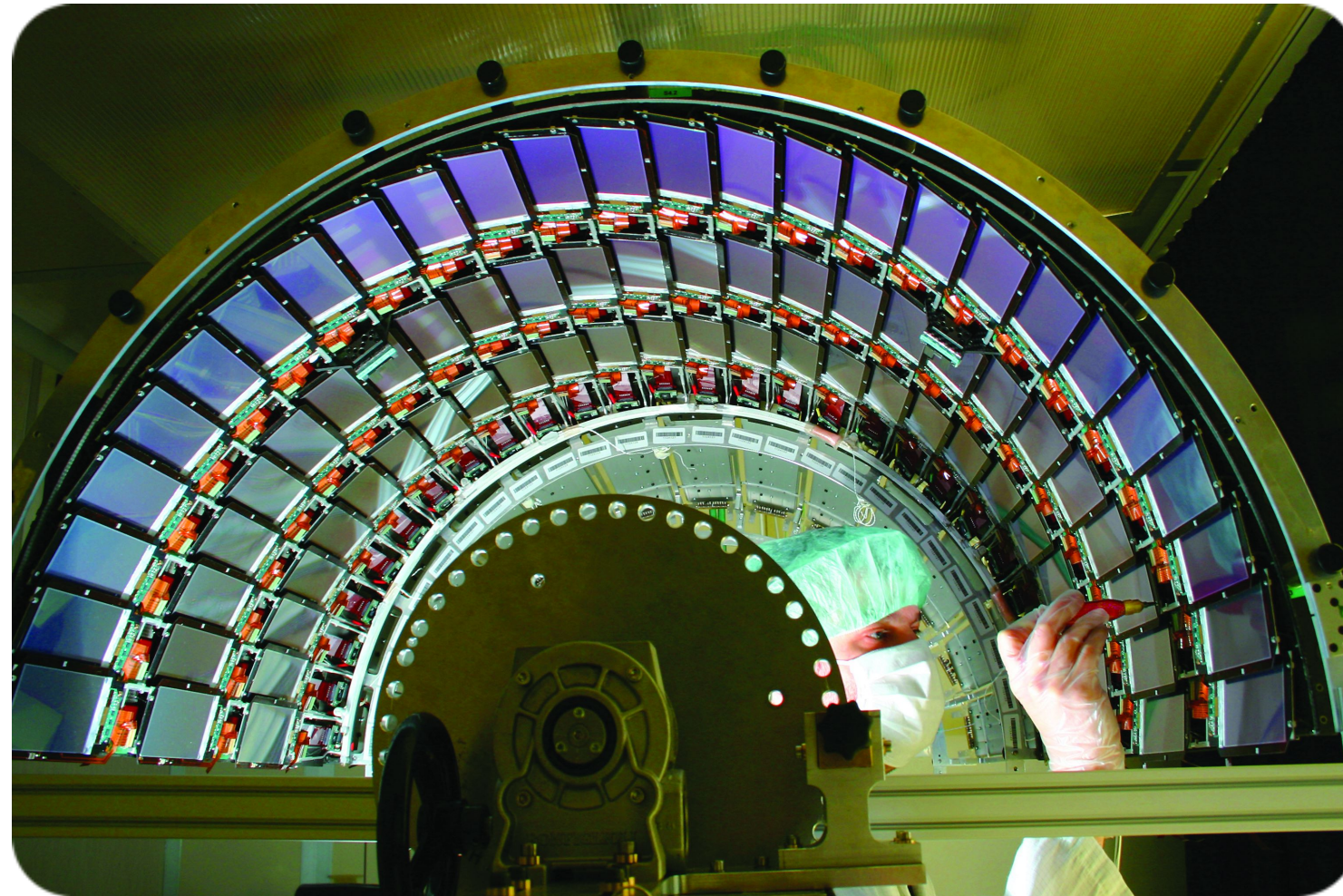
- 10 strati *barrel* + 18 *dischi* di **Silicon strip**, 80-205  $\mu\text{m}$ : **11 M strip**
- 4 strati *barrel* + 6 *dischi* di **Silicon pixel**, 100x150  $\mu\text{m}^2$ : **124 M pixel**

Silicon pixel

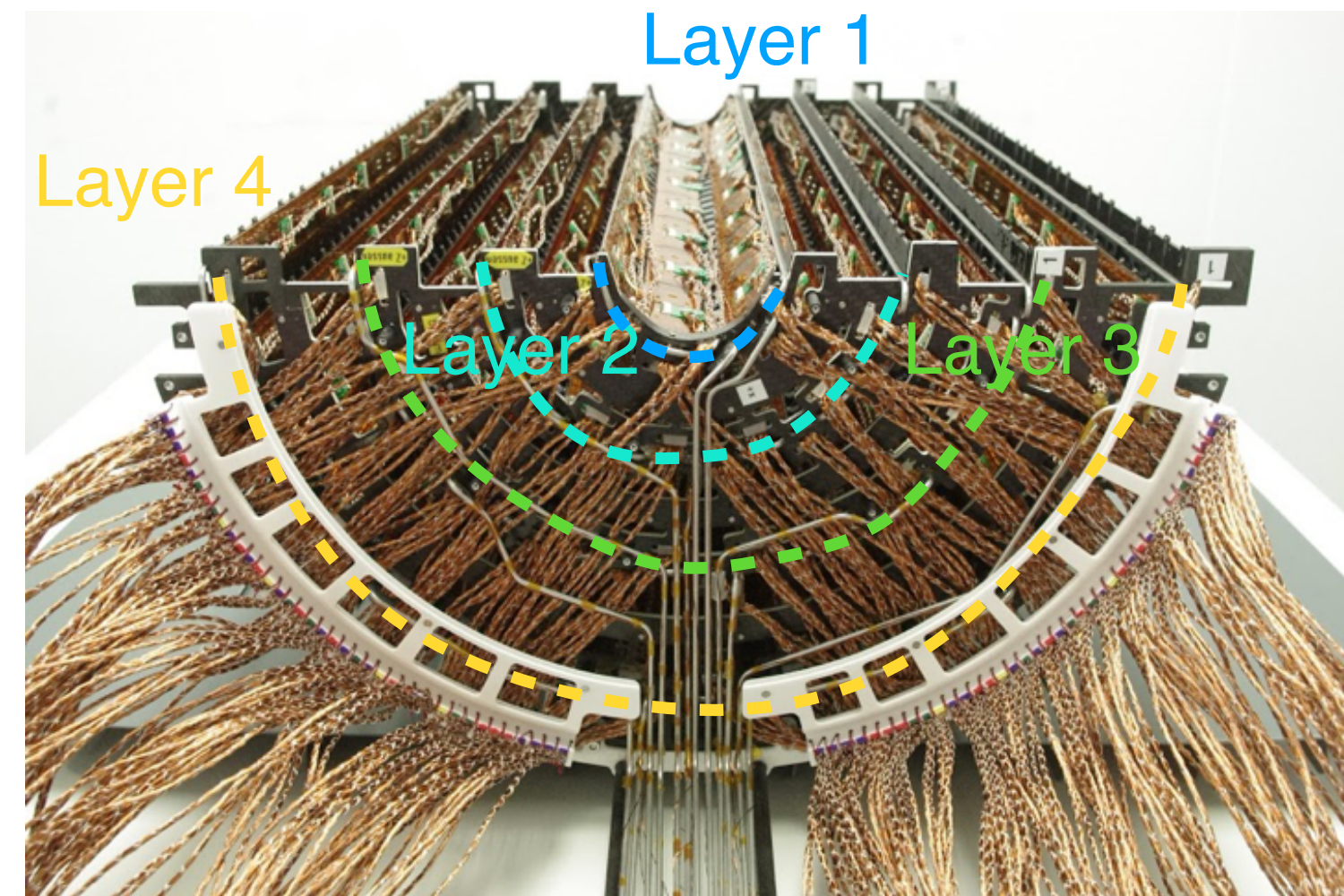
Silicon strip



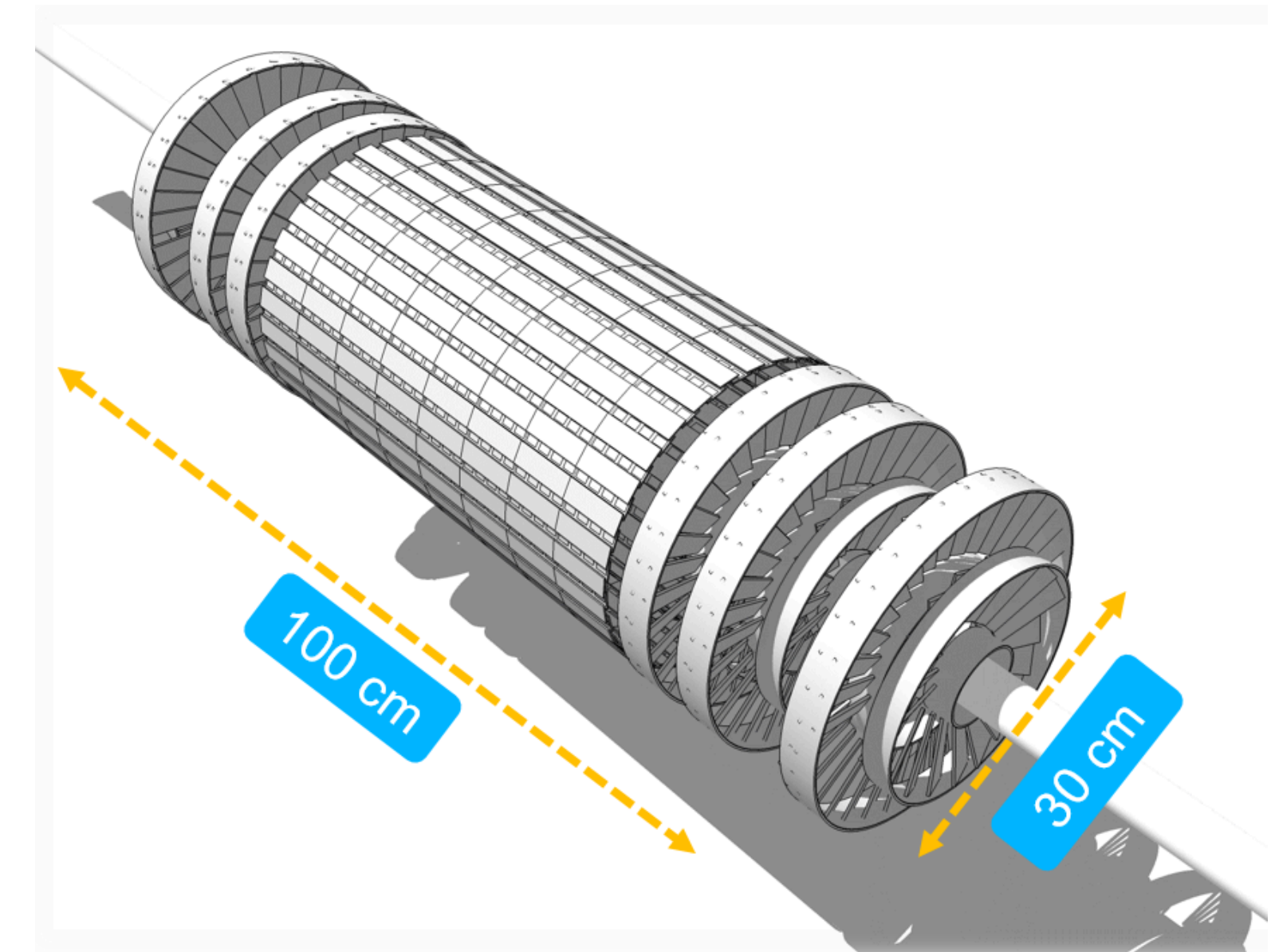




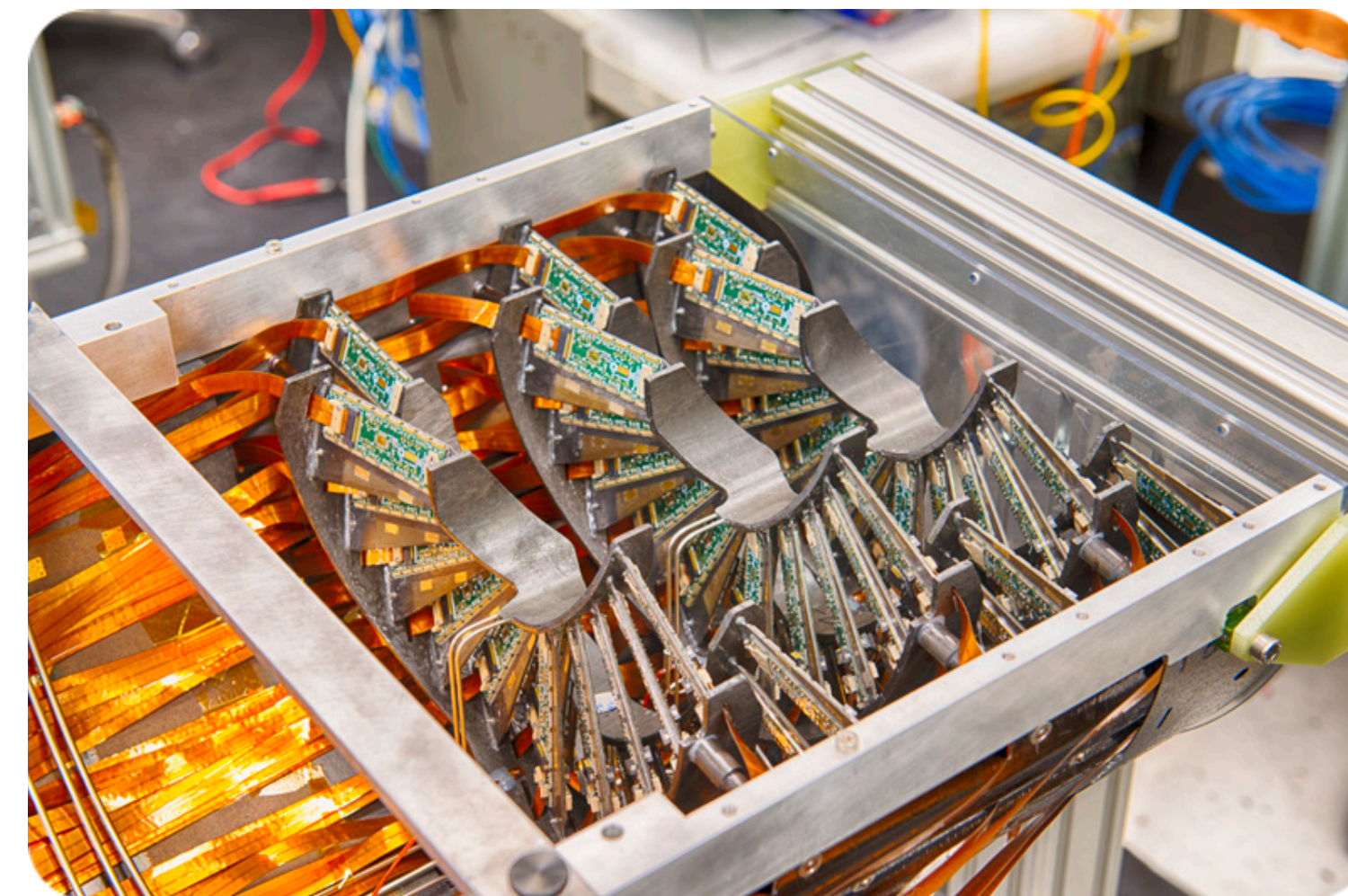
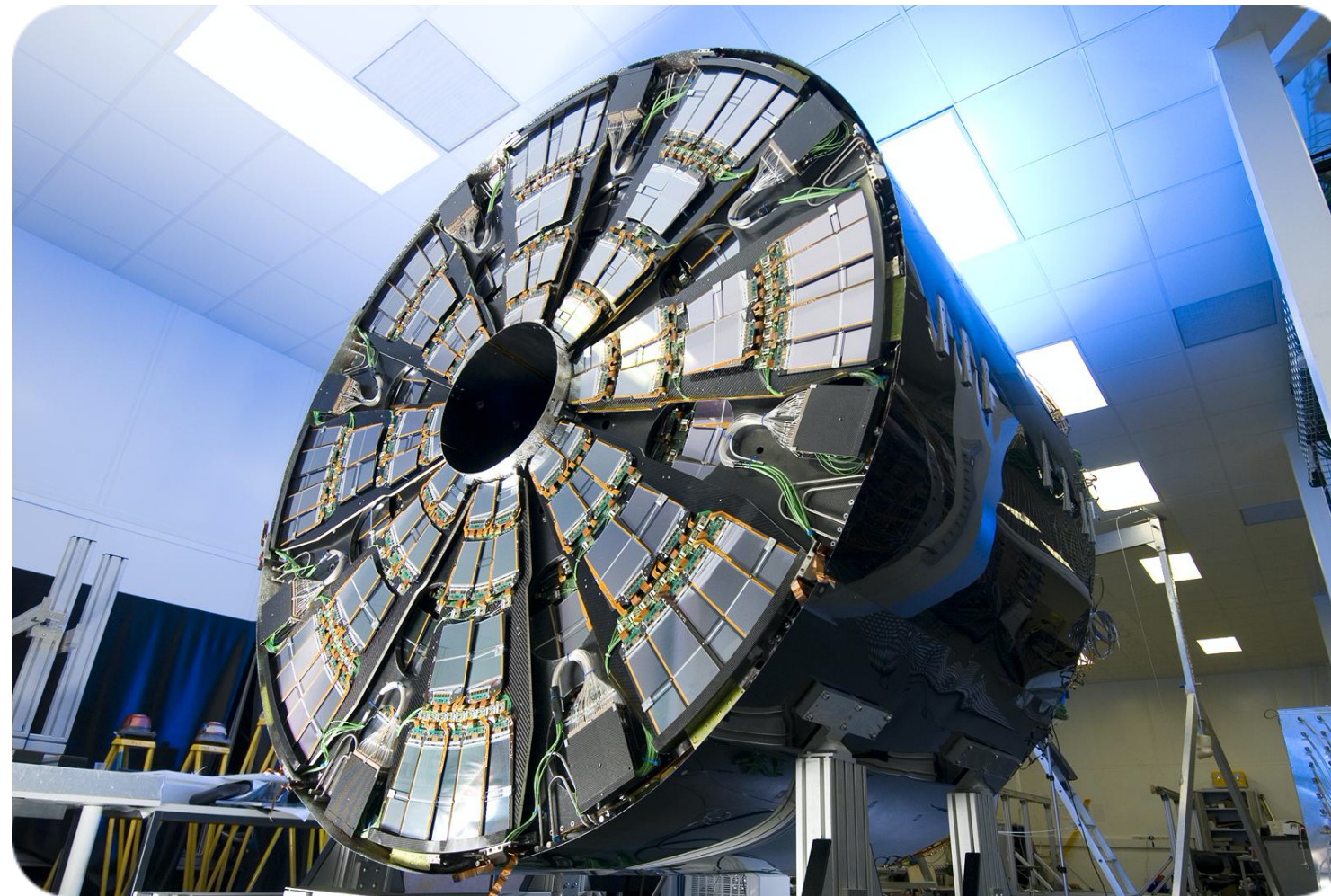
Rivelatore a strip



Rivelatore a pixel



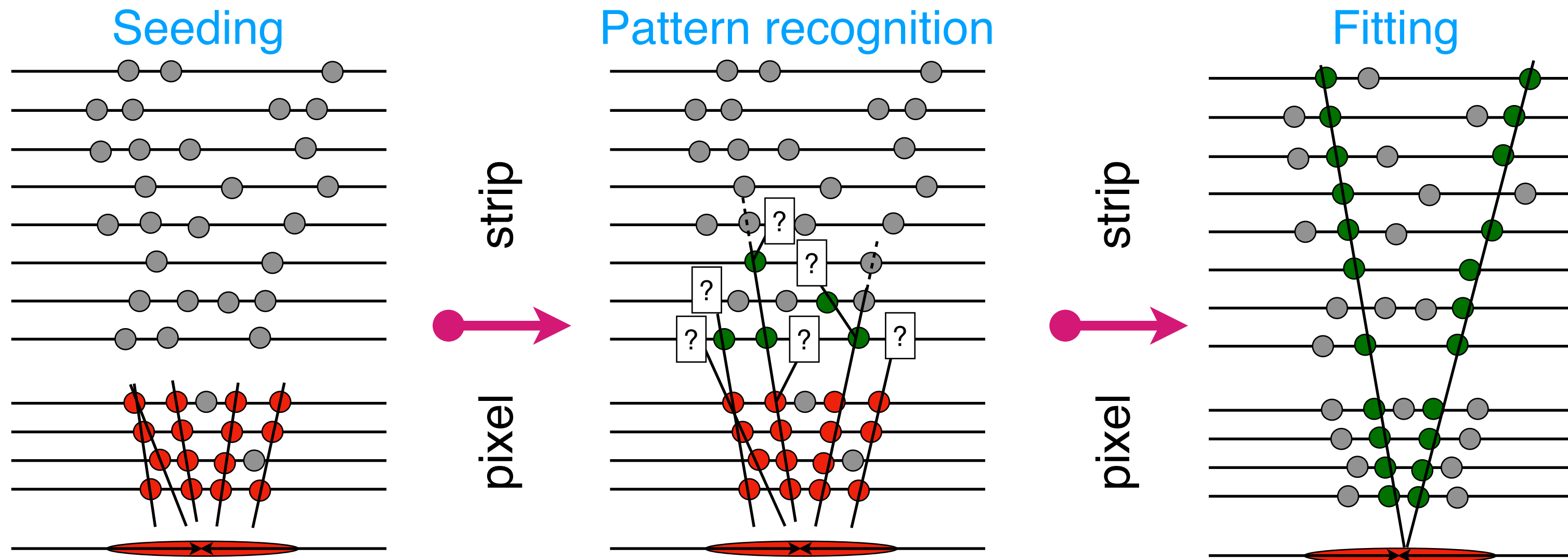
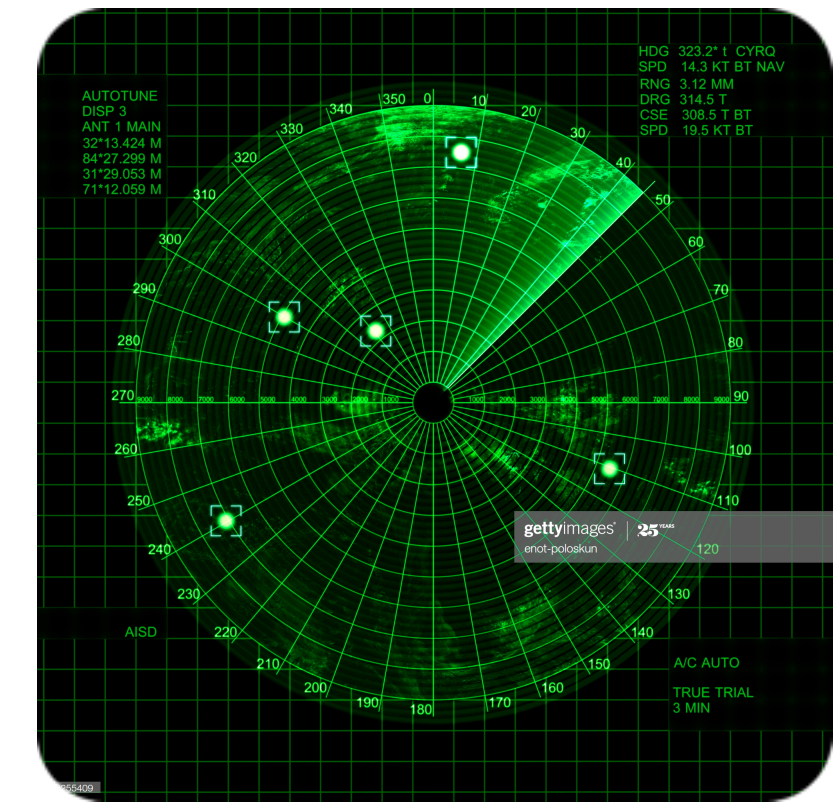
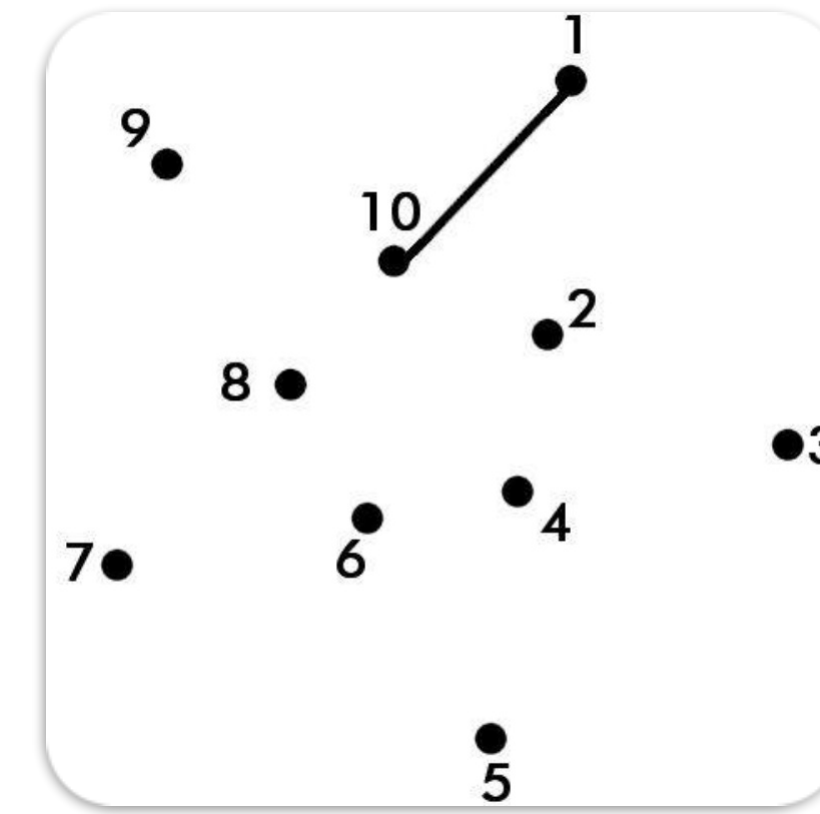
Disegno rivelatore a pixel



Disk 1    Disk 2    Disk 3

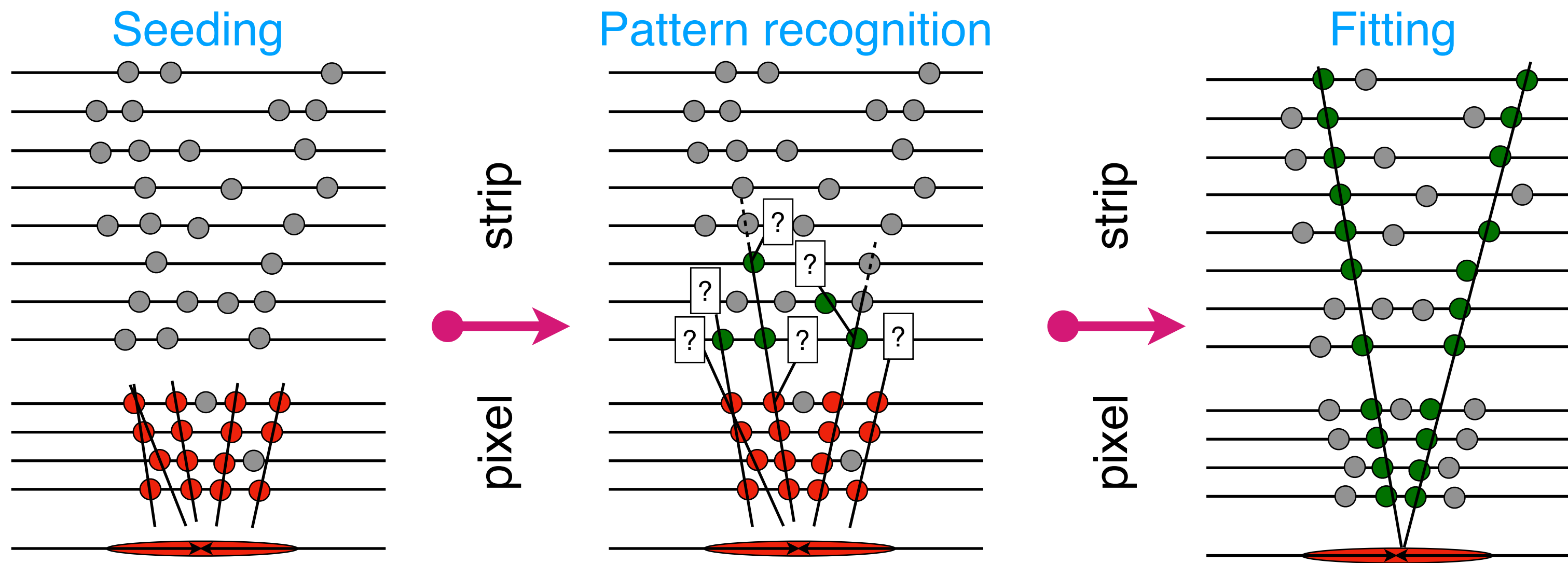
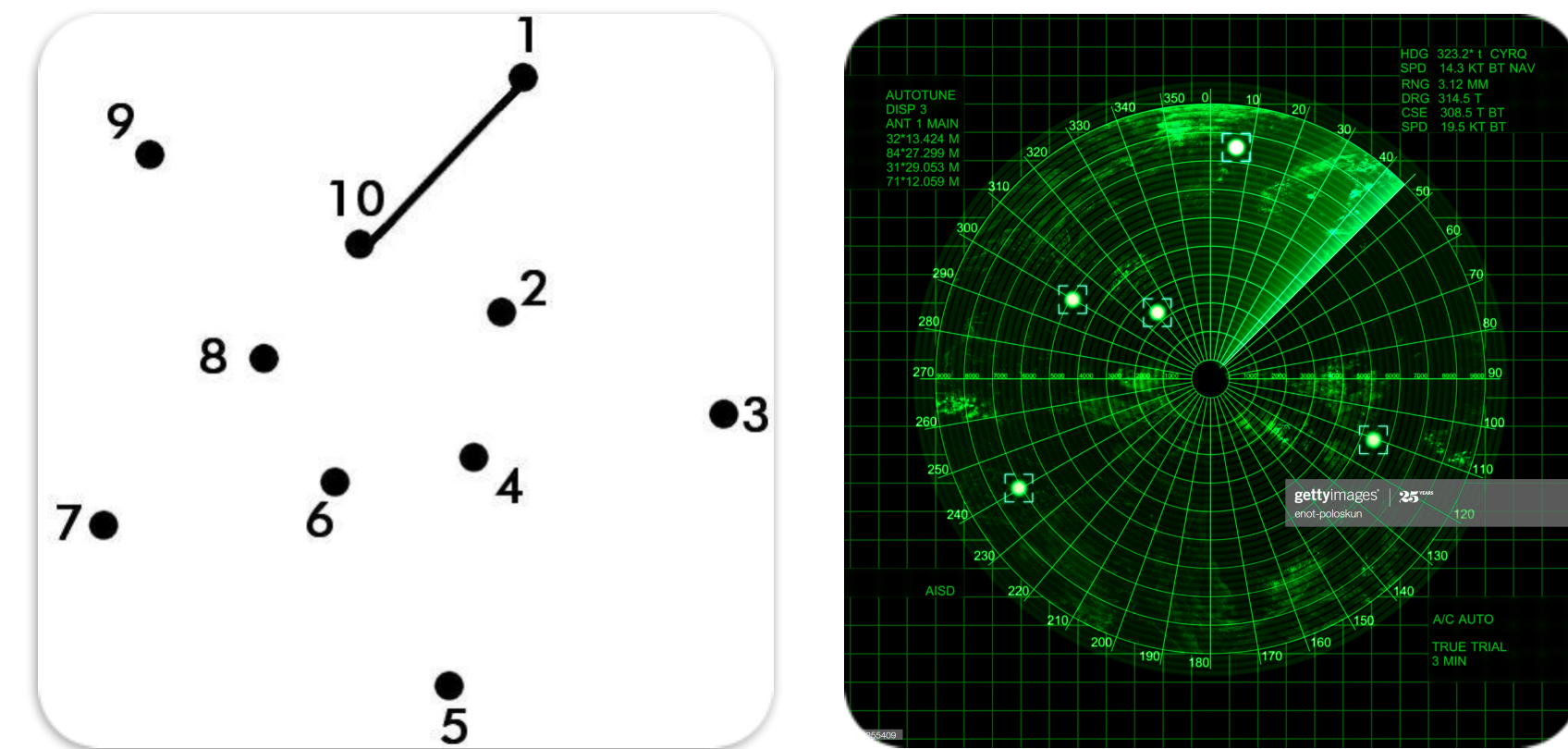
*I punti di misura non sono numerati come nella settimana enigmistica...*

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...*

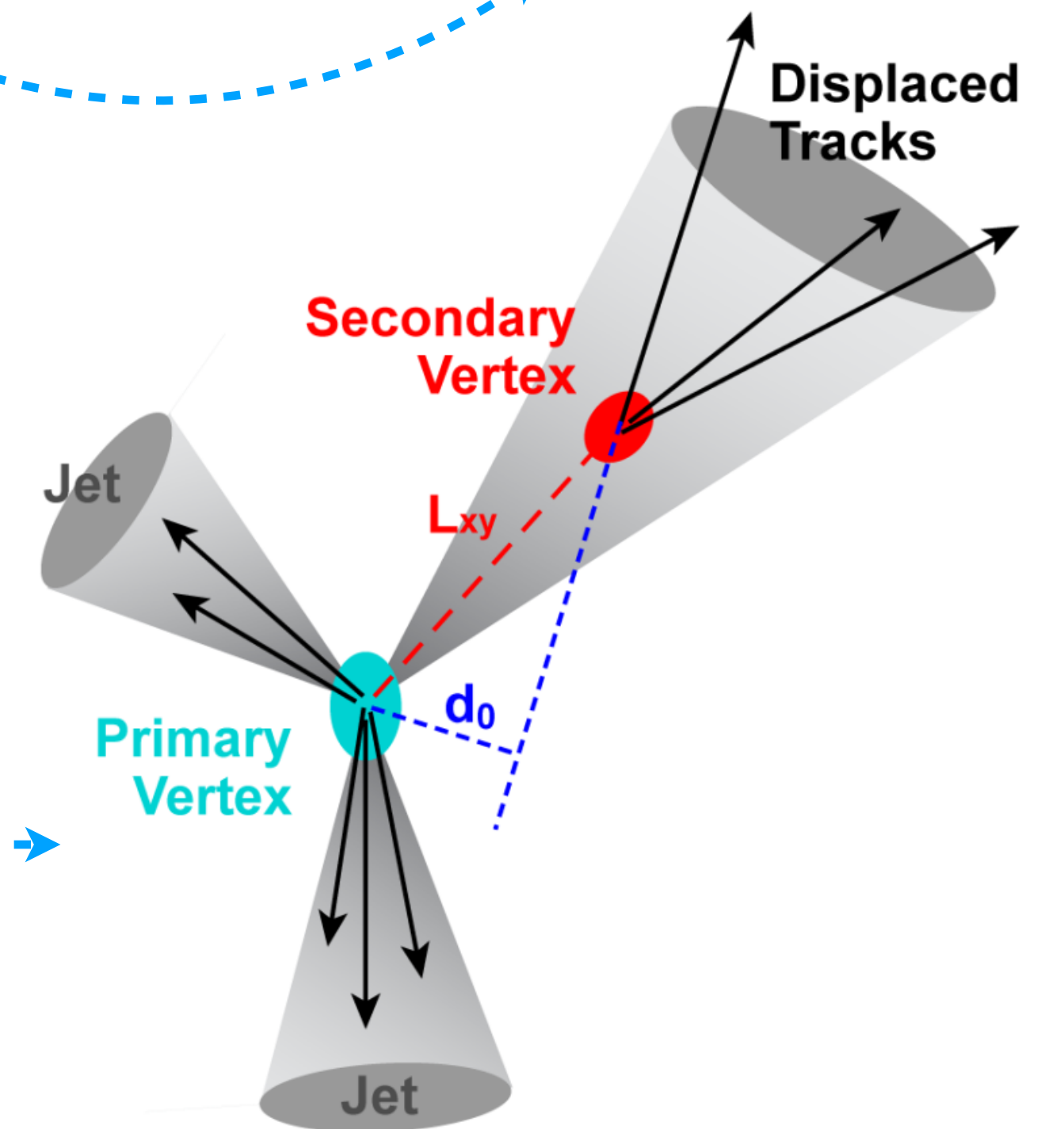
Compito molto complesso → risolto utilizzando **filtro di Kalman**:  
 efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore (algoritmo utilizzato nei radar per seguire la traiettoria di un oggetto in movimento)



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)

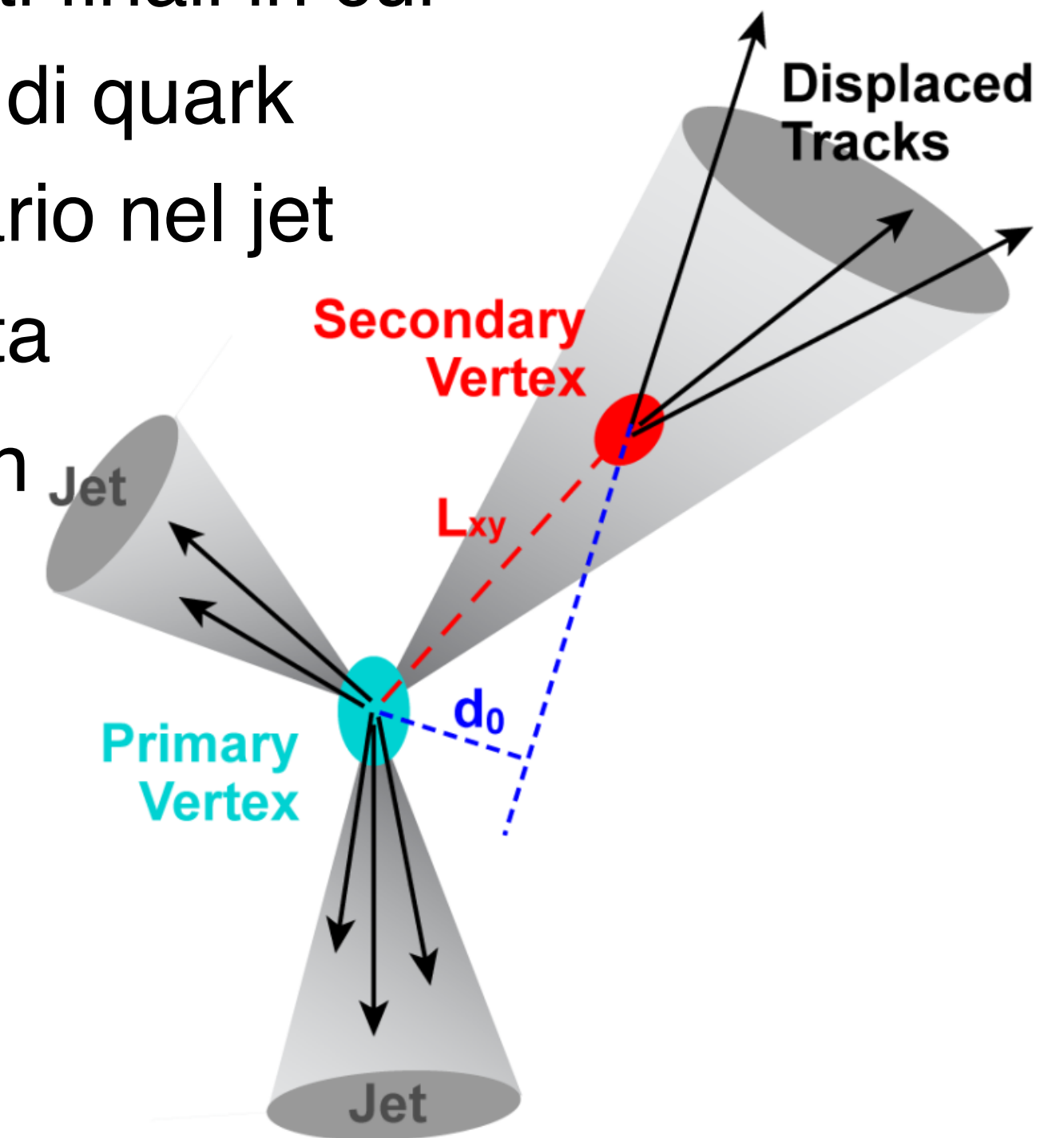


Produzione: *primary vertex*  
 Decadimento: *secondary vertex*

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

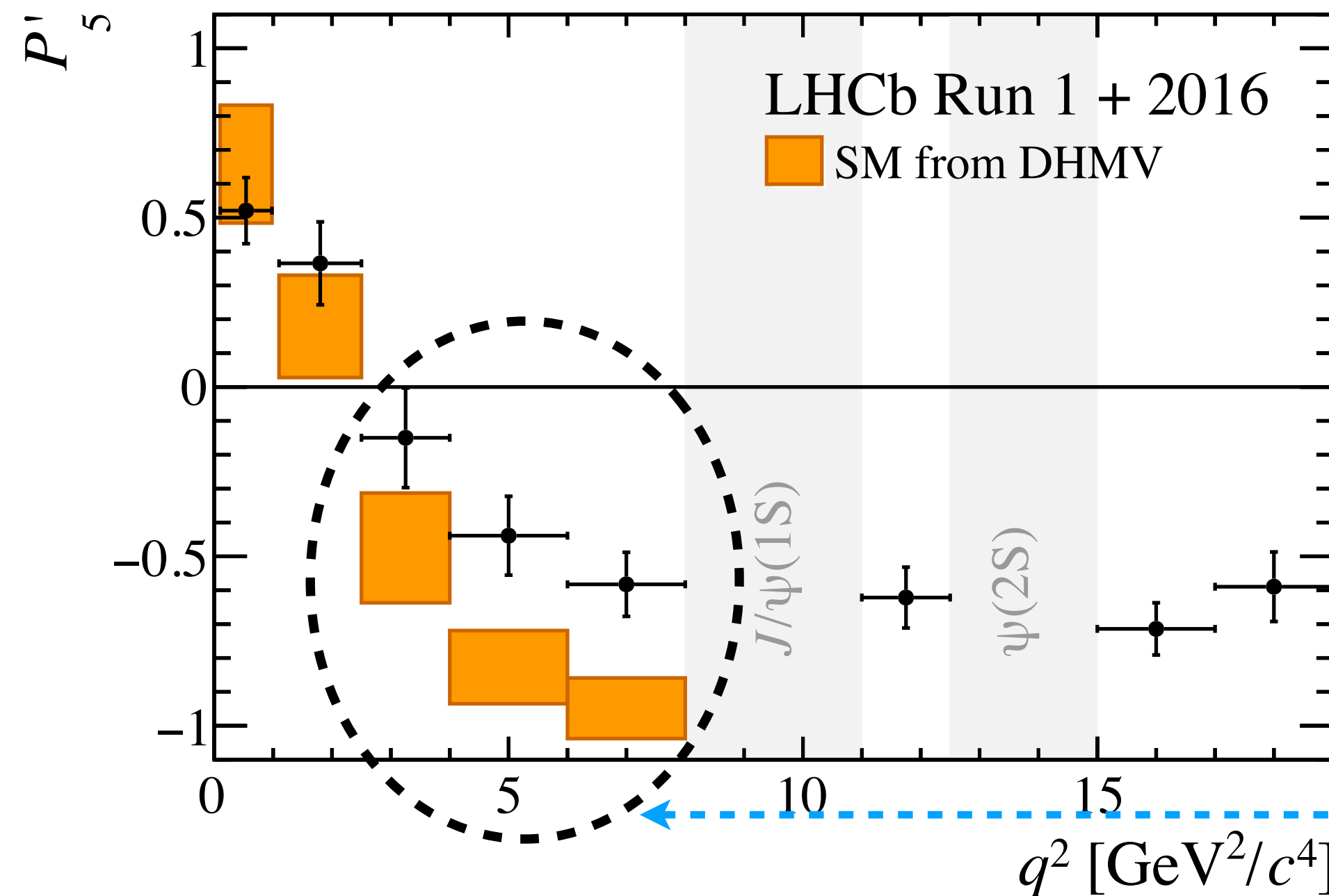
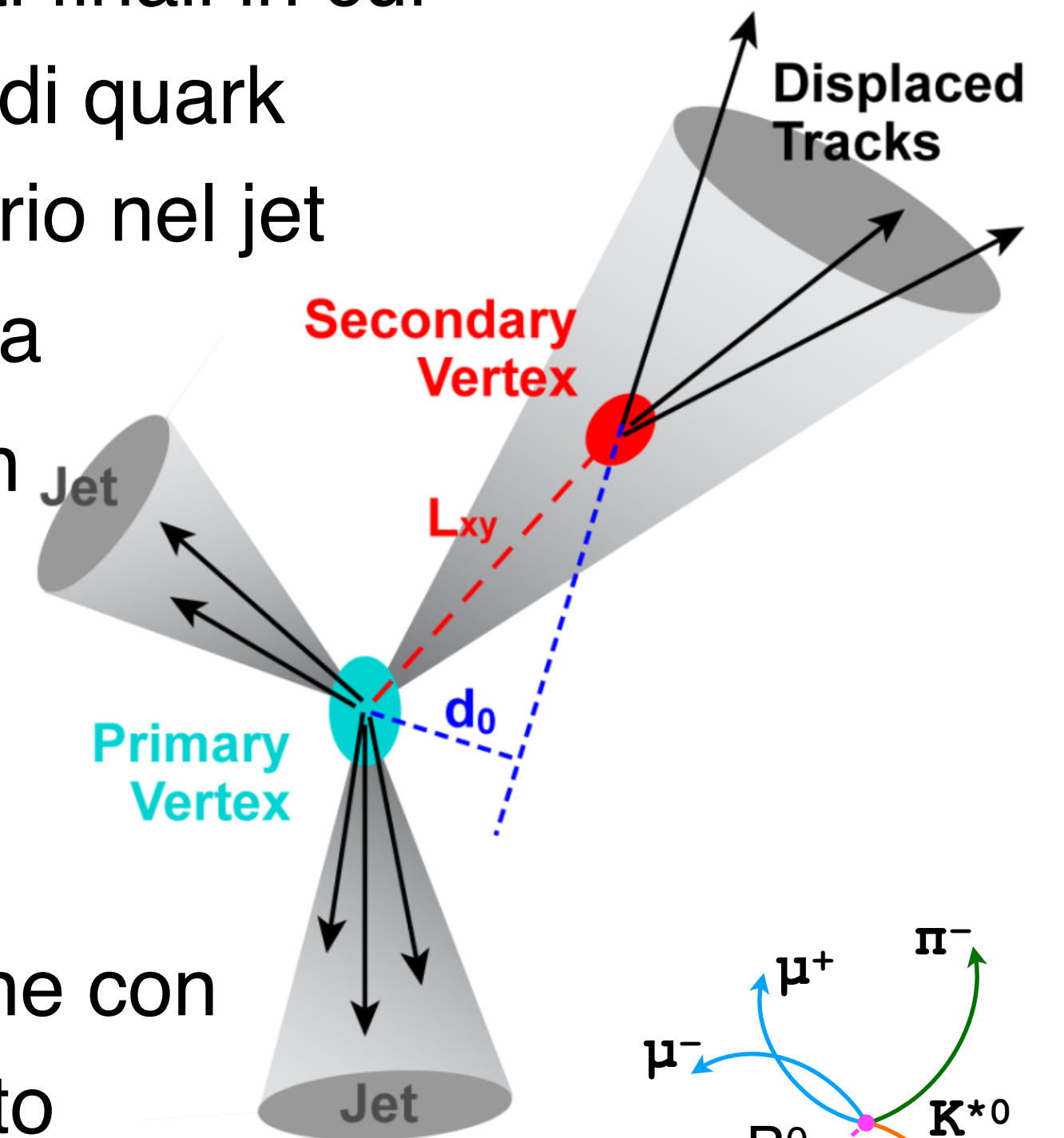
**e.g.:** una delle particelle più interessanti da studiare è il quark top ( $t$ , in particolare in associazione all'Higgs) che decade  $t \rightarrow W b$



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

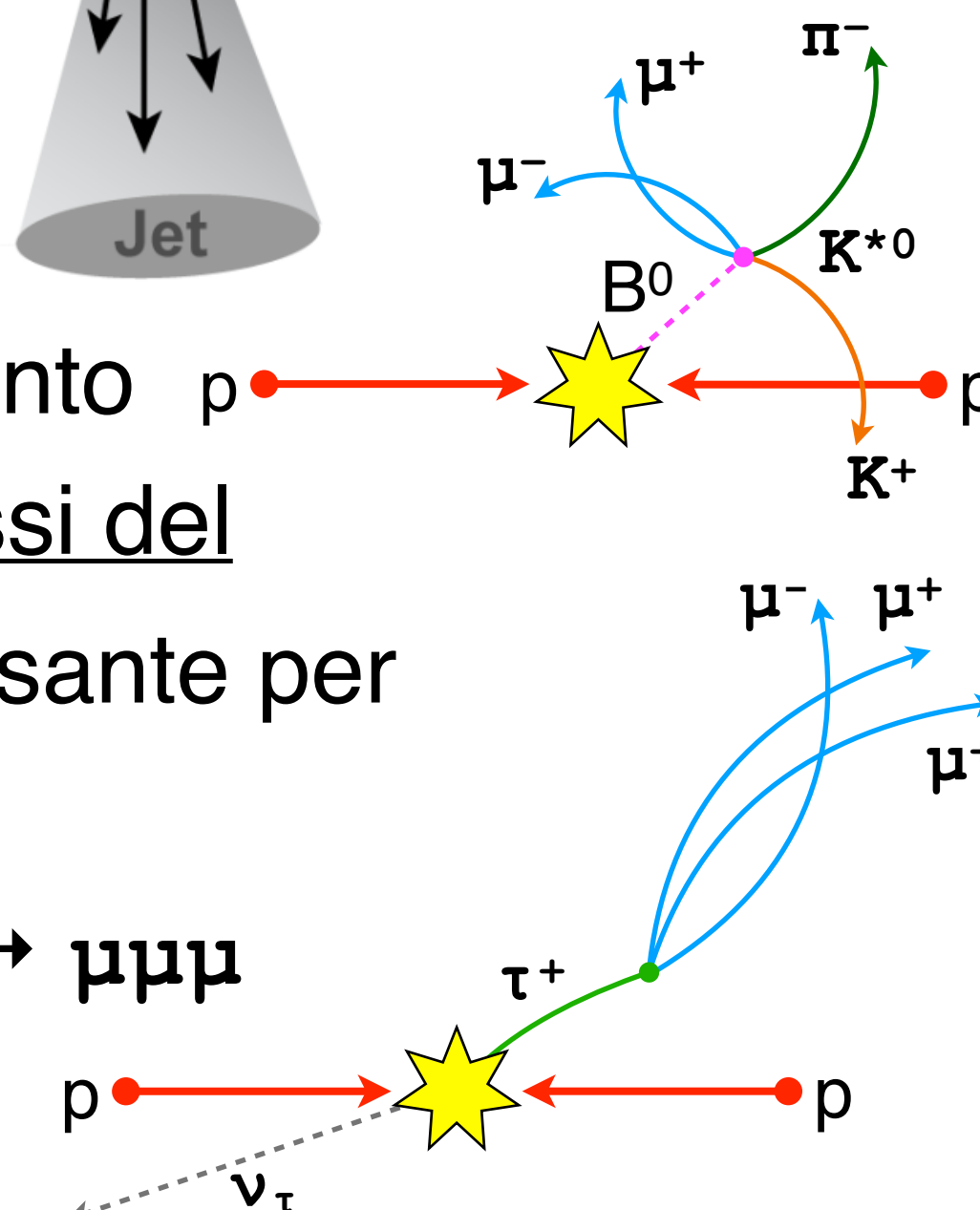
- Il **Modello Standard** prevede che gli adroni costituiti da quark  $b$  e  $c$  abbiano vita media "lunga" (misurata  $\sim ps$ )  $\rightarrow$  dilatata del fattore  $\gamma = E/m_0 \rightarrow$  percorrono un tratto sufficientemente lungo per poter essere rivelati come vertici secondari

**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  $\tau \rightarrow \mu \mu \mu$

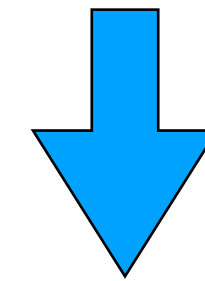


**Lieve discrepanza con MS**

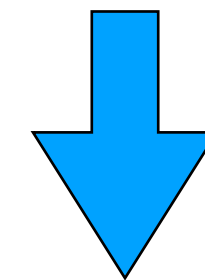
**E se usassimo il tracciatore per aiutare la calorimetria adronica?** Adroni carichi, con momento fino a qualche centinaio di GeV, sono misurati meglio con il tracciatore che con il calorimetro

### 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  $\sim 125\% / \sqrt{E}$

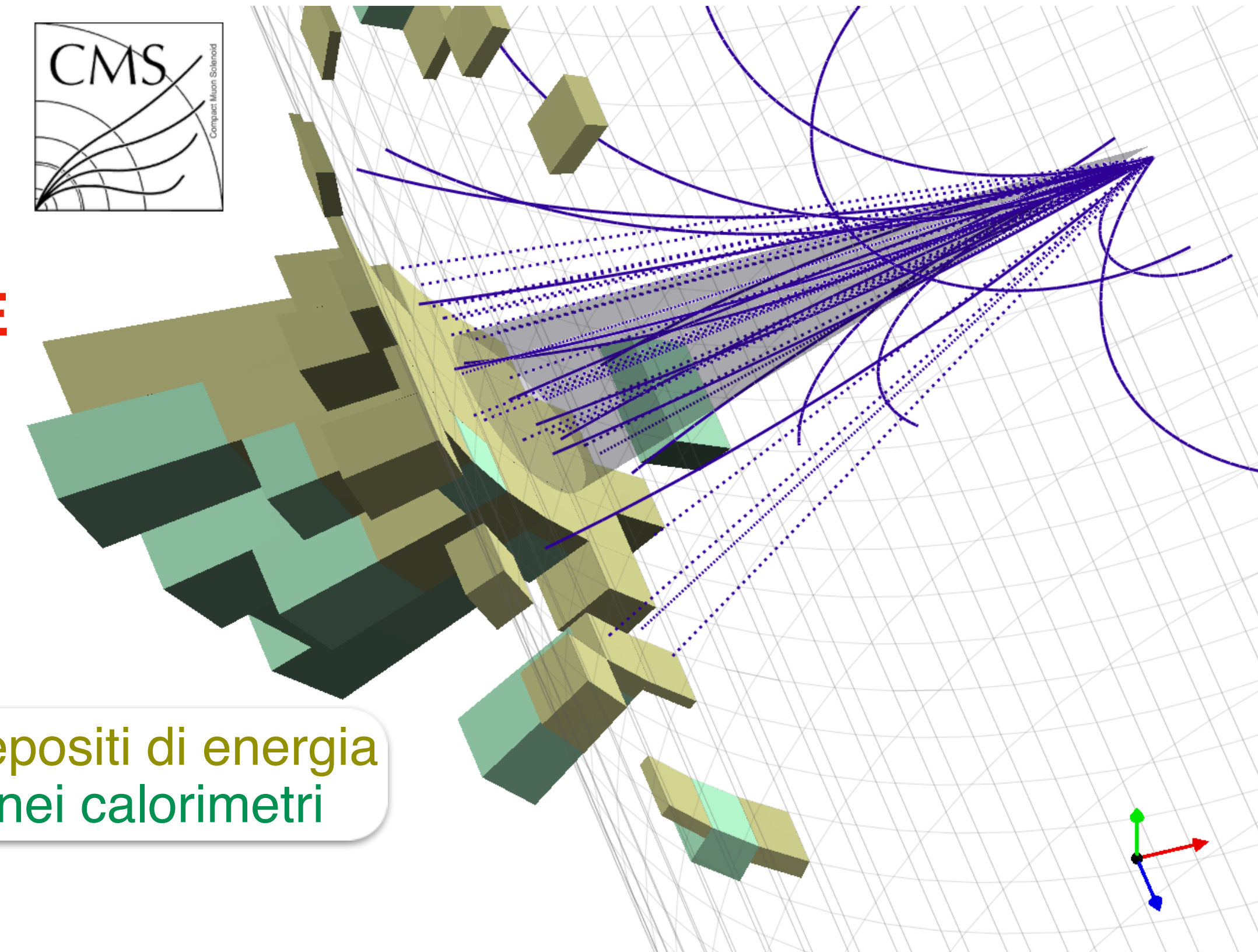
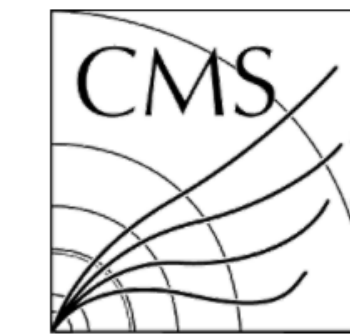


**Separare** adroni **carichi** da **neutri** per rimpiazzare misura calorimetrica con quella del tracciatore



**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

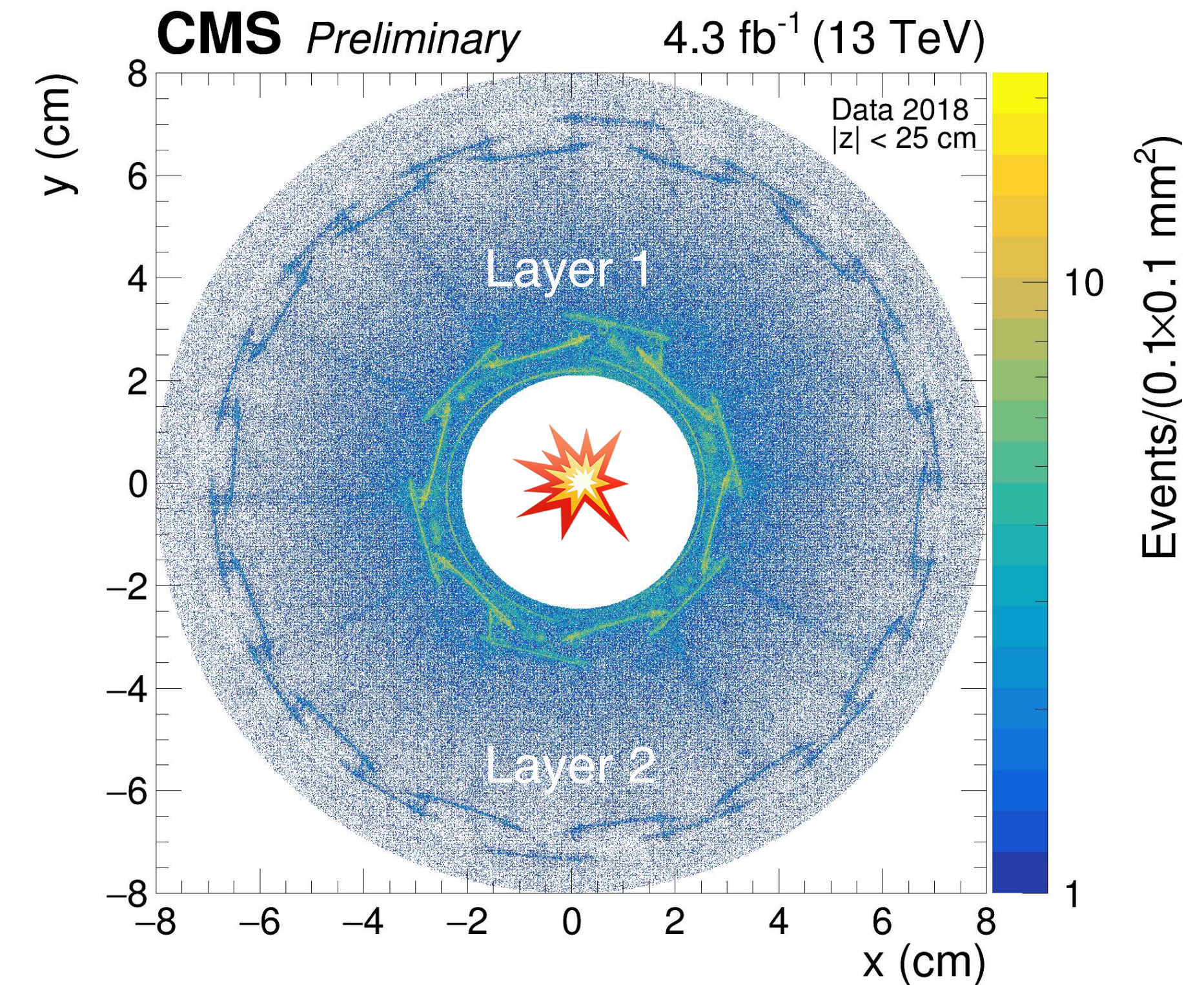
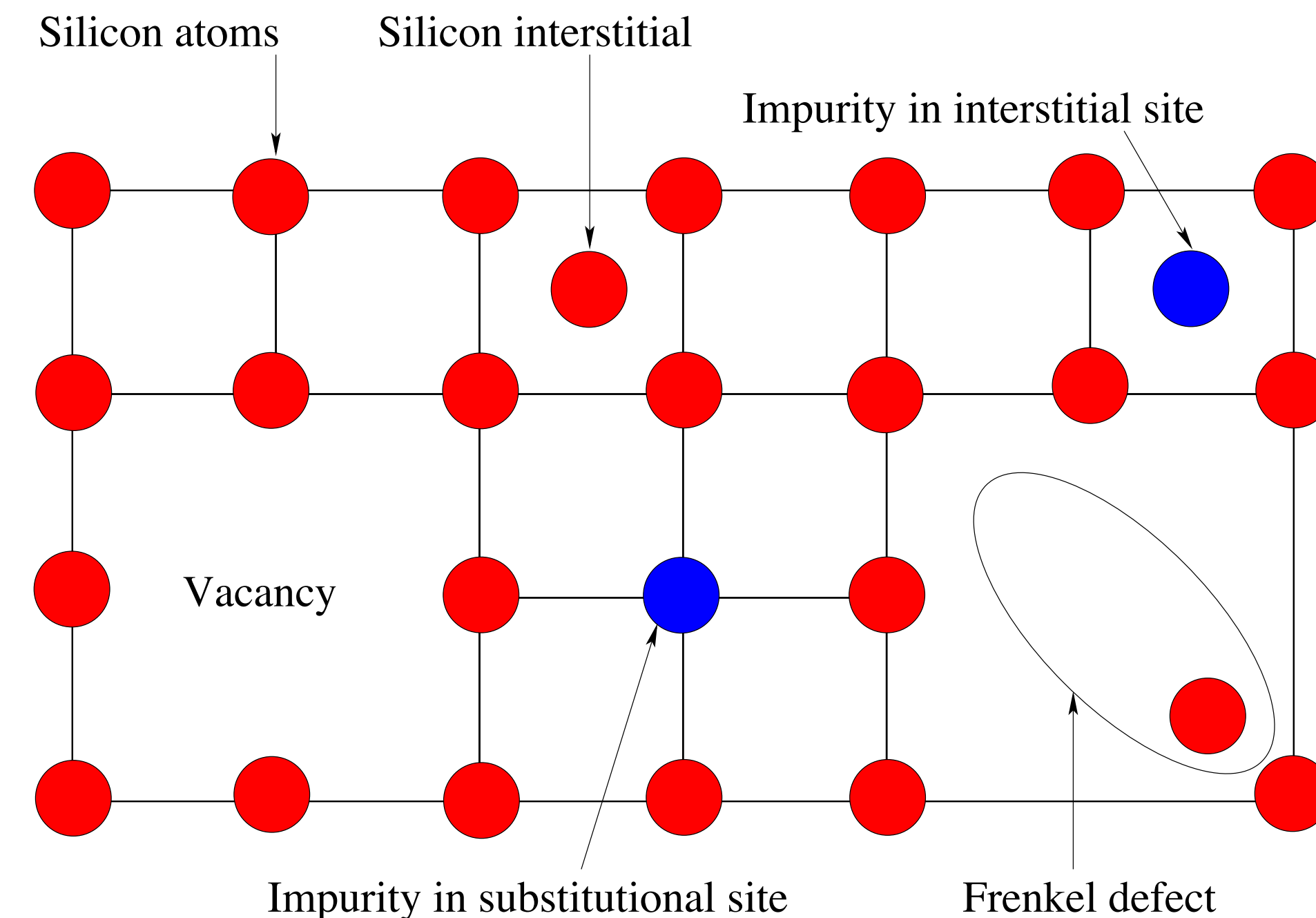
Notevole miglioramento risoluzione energia jet, missing energy, identificazione tau, ...



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?

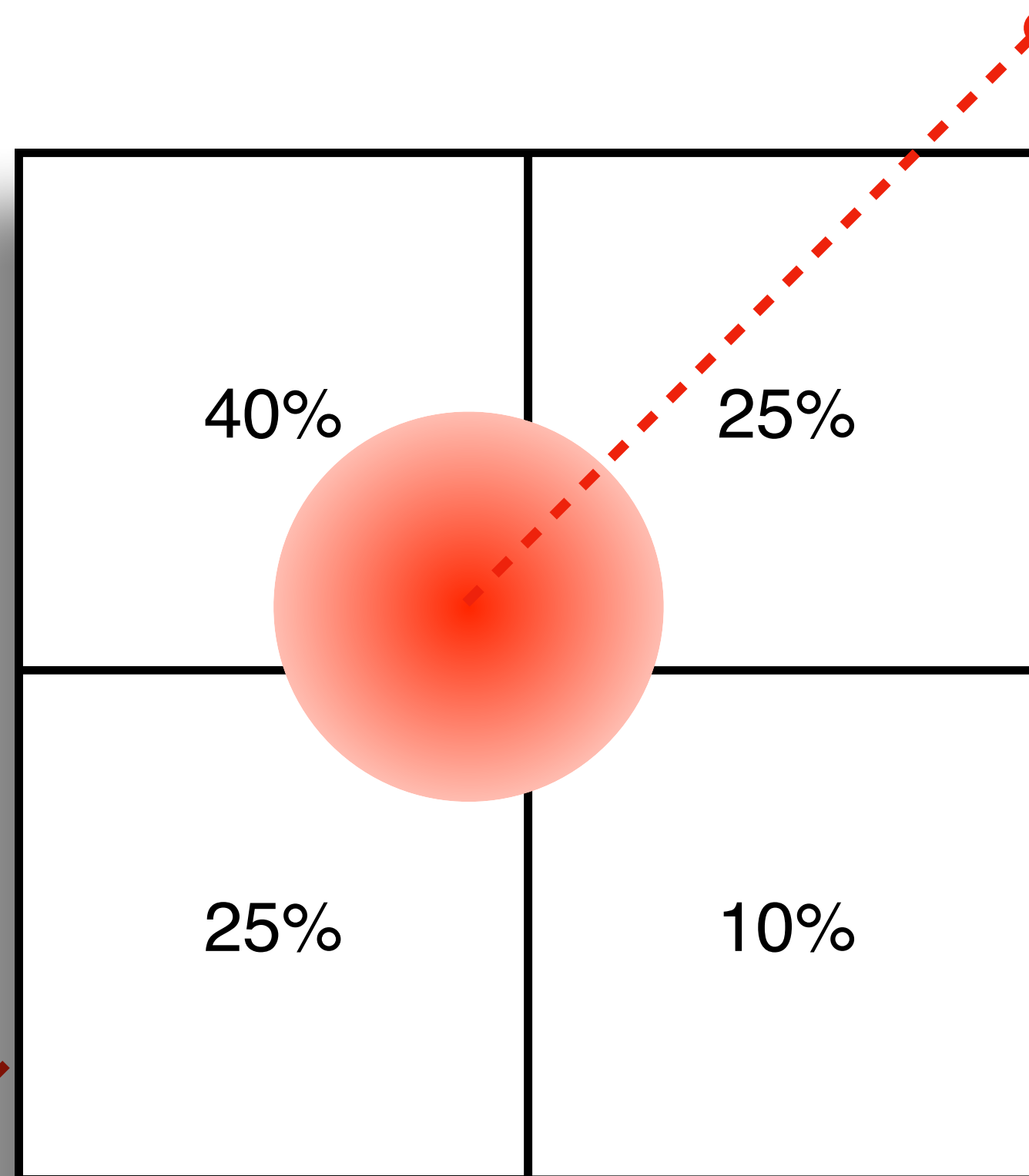
- creano difetti nel cristallo dei sensori → riduzione vita media portatori ( $e-h$ ),  $\sim ns$  → minore libero cammino medio → **-segnale** e **+rumore**
- danneggiano transistor chip di lettura → degradazione amplificazione e range dinamico ADC, riduzione banda passante, aumento potenza



**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:

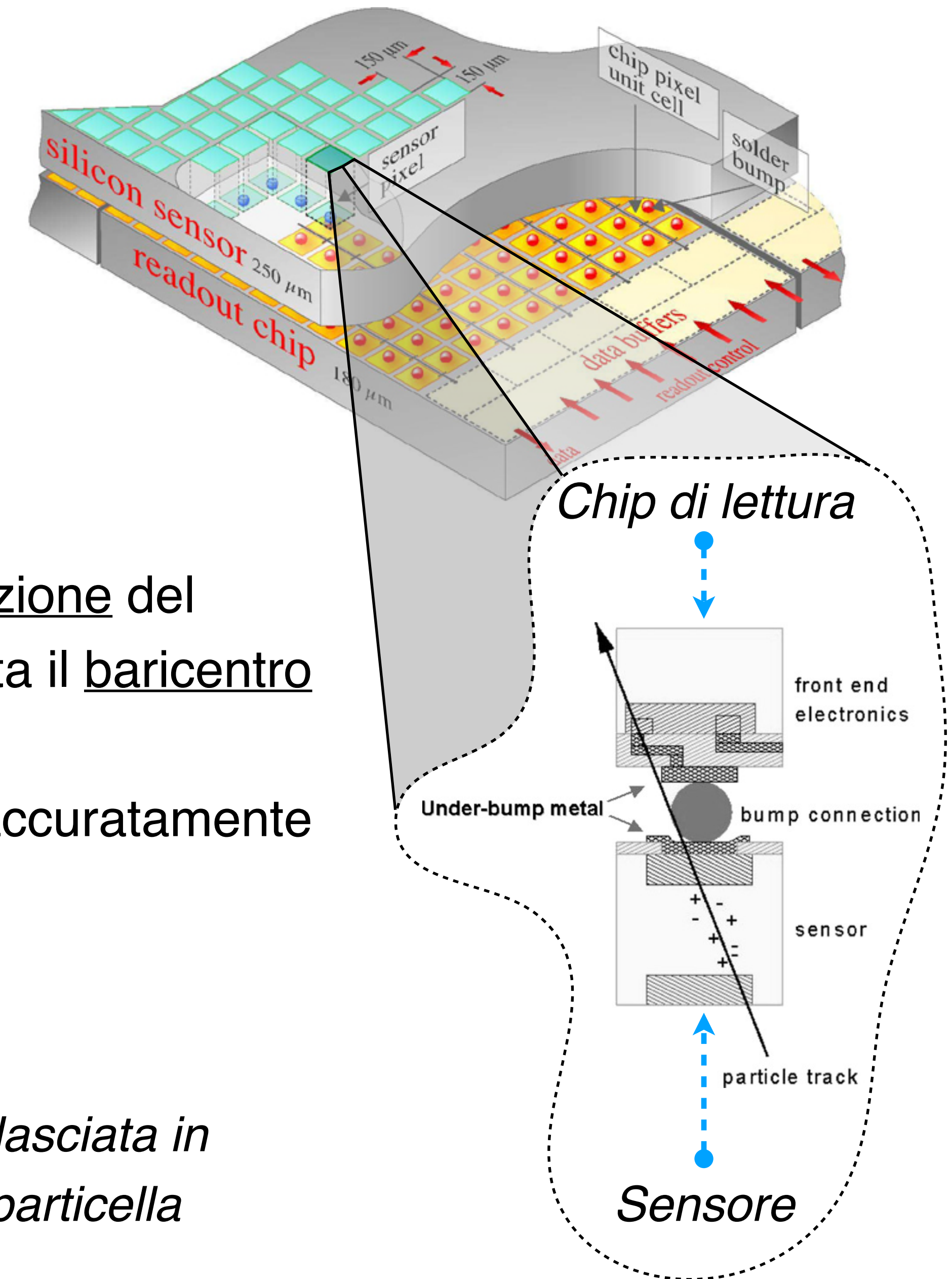
- l'integrazione di più "intelligenza" nel chip di lettura → aumentare elaborazione locale per individuare cluster di pixel, comprimere dati, memorie più ampie, ecc...
- il sistema di controllo, acquisizione dati e calibrazione



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*

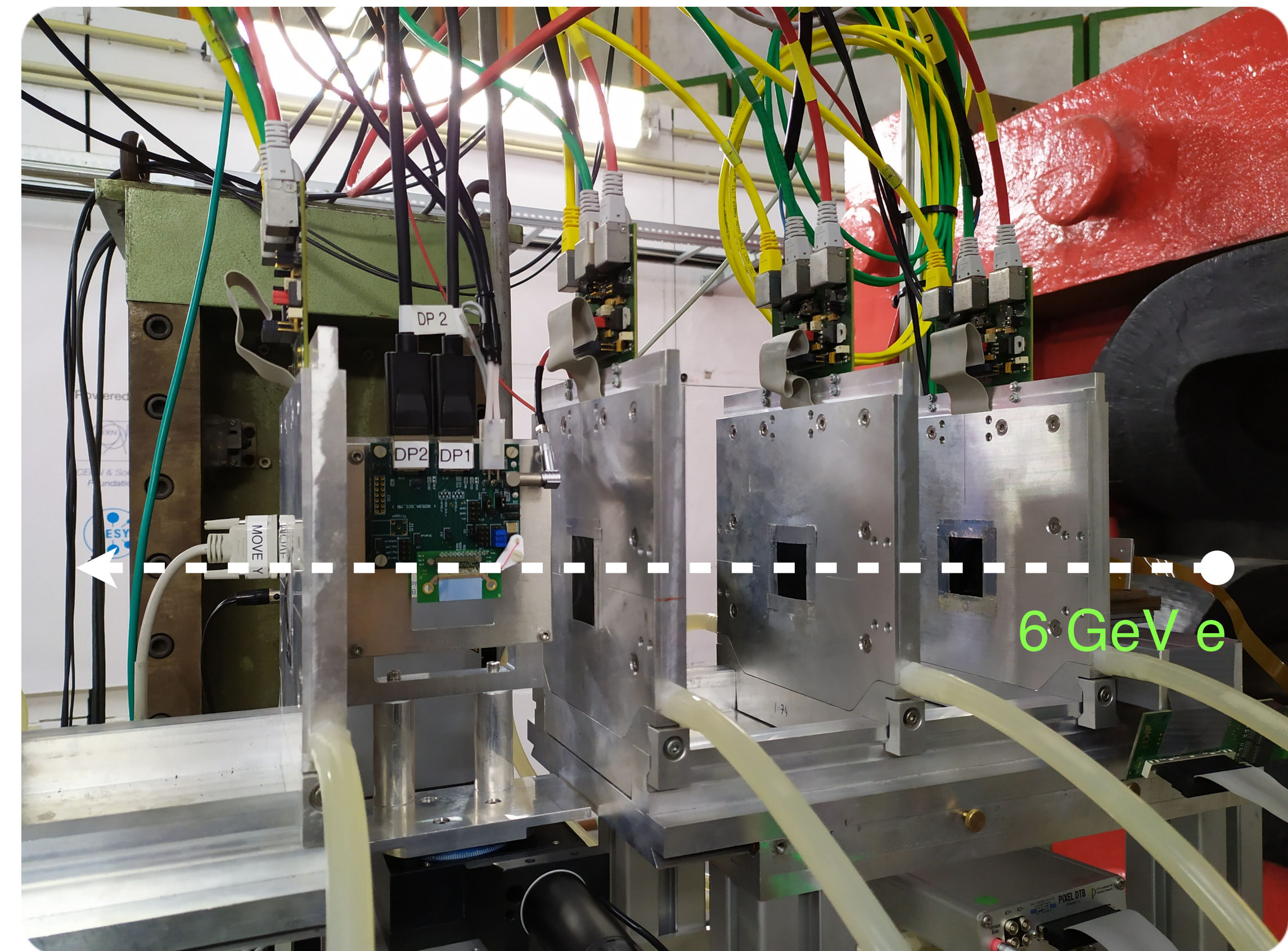
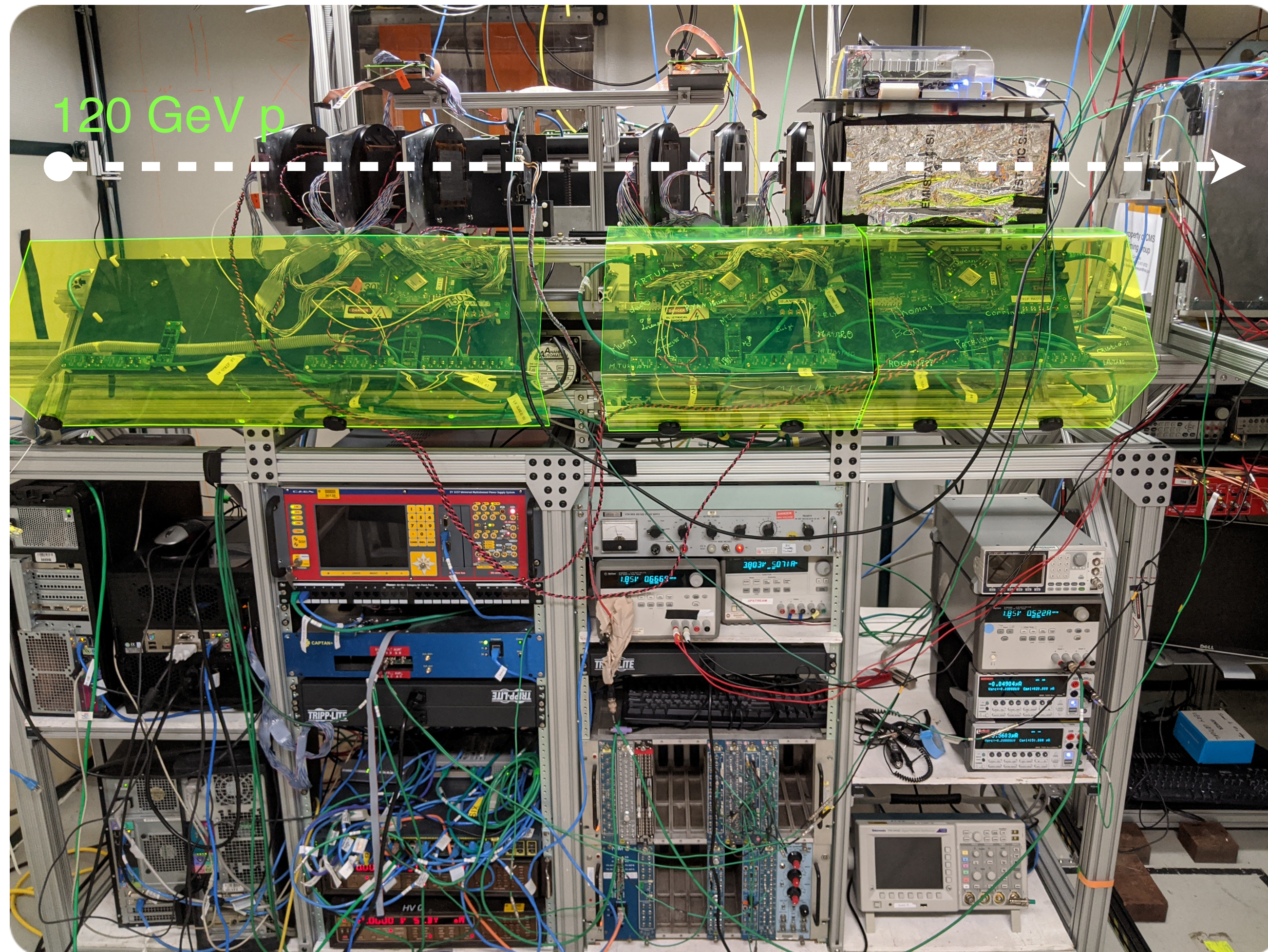
## In Bicocca ci occupiamo di:

- 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)

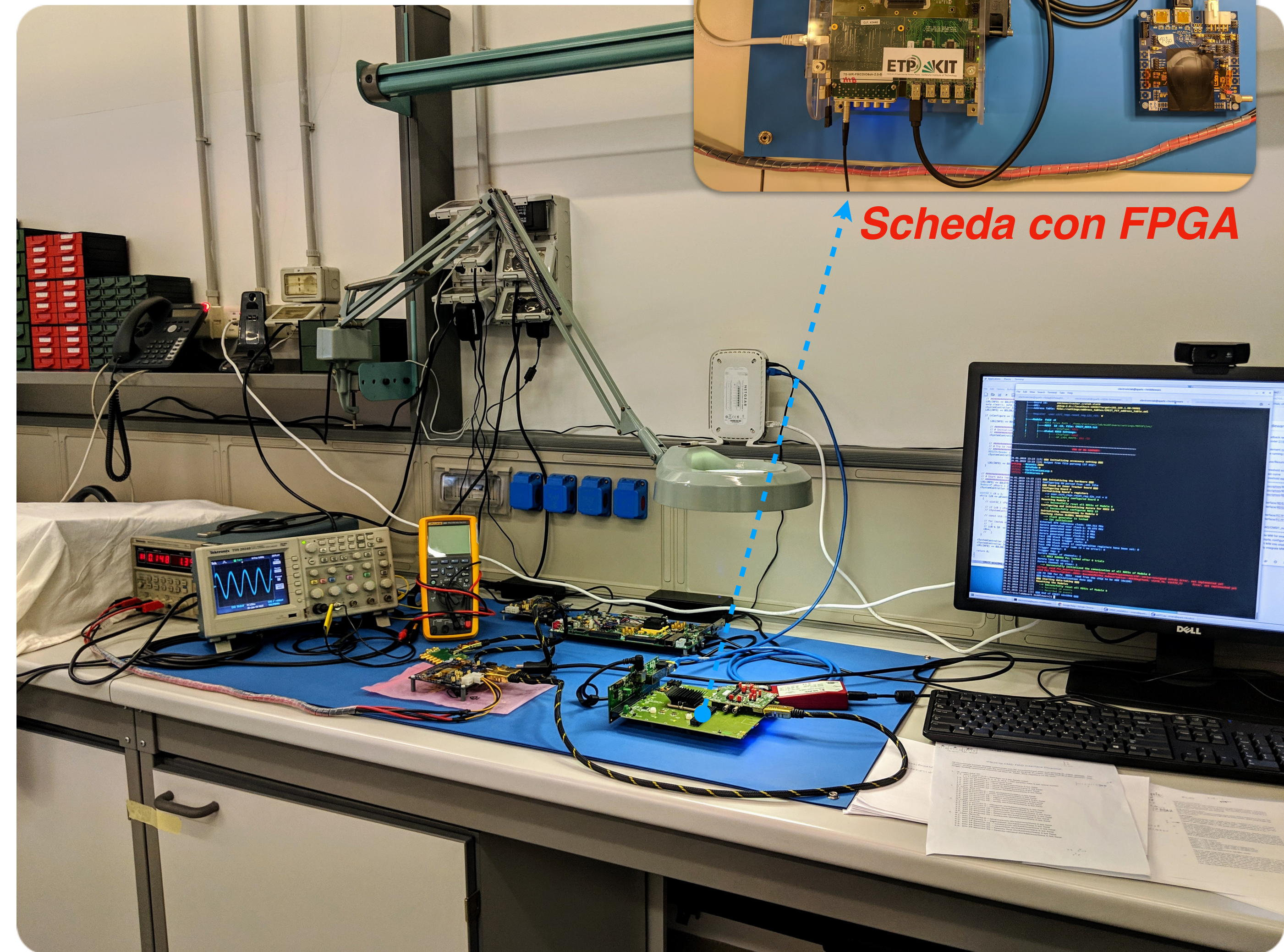
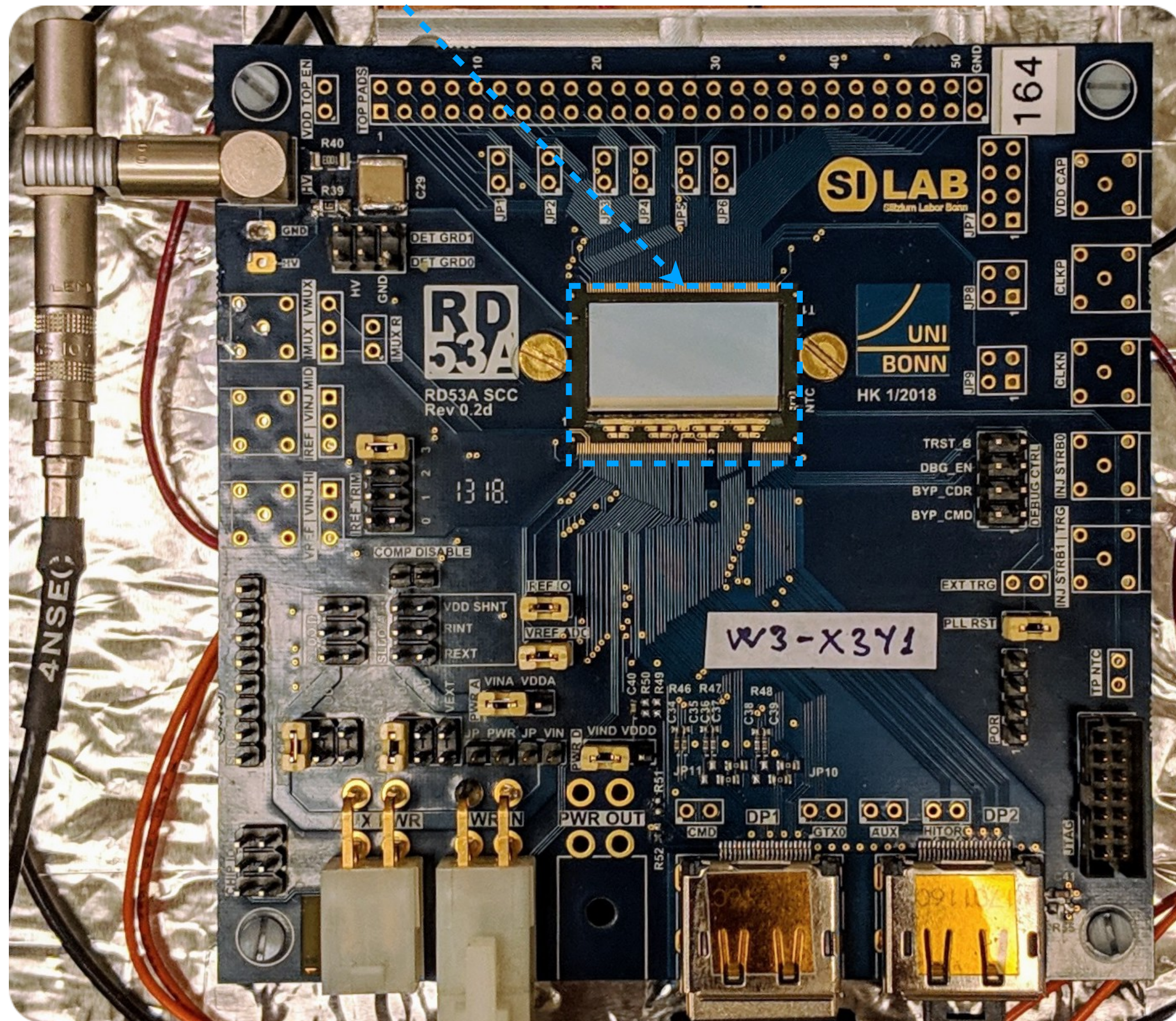
Laboratorio DESY  (Amburgo, Germania)



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 cm<sup>2</sup>

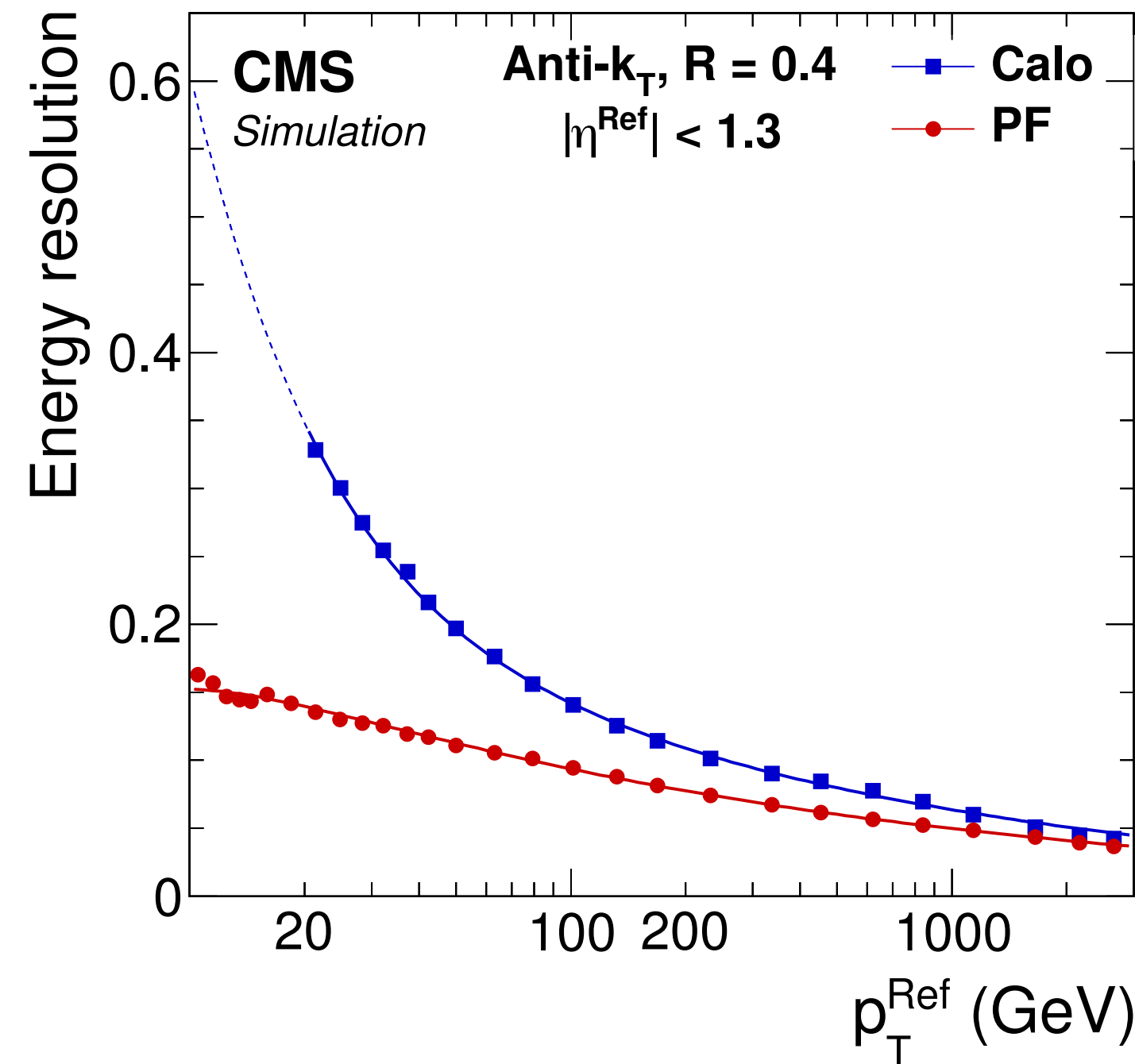


**Scheda con FPGA**

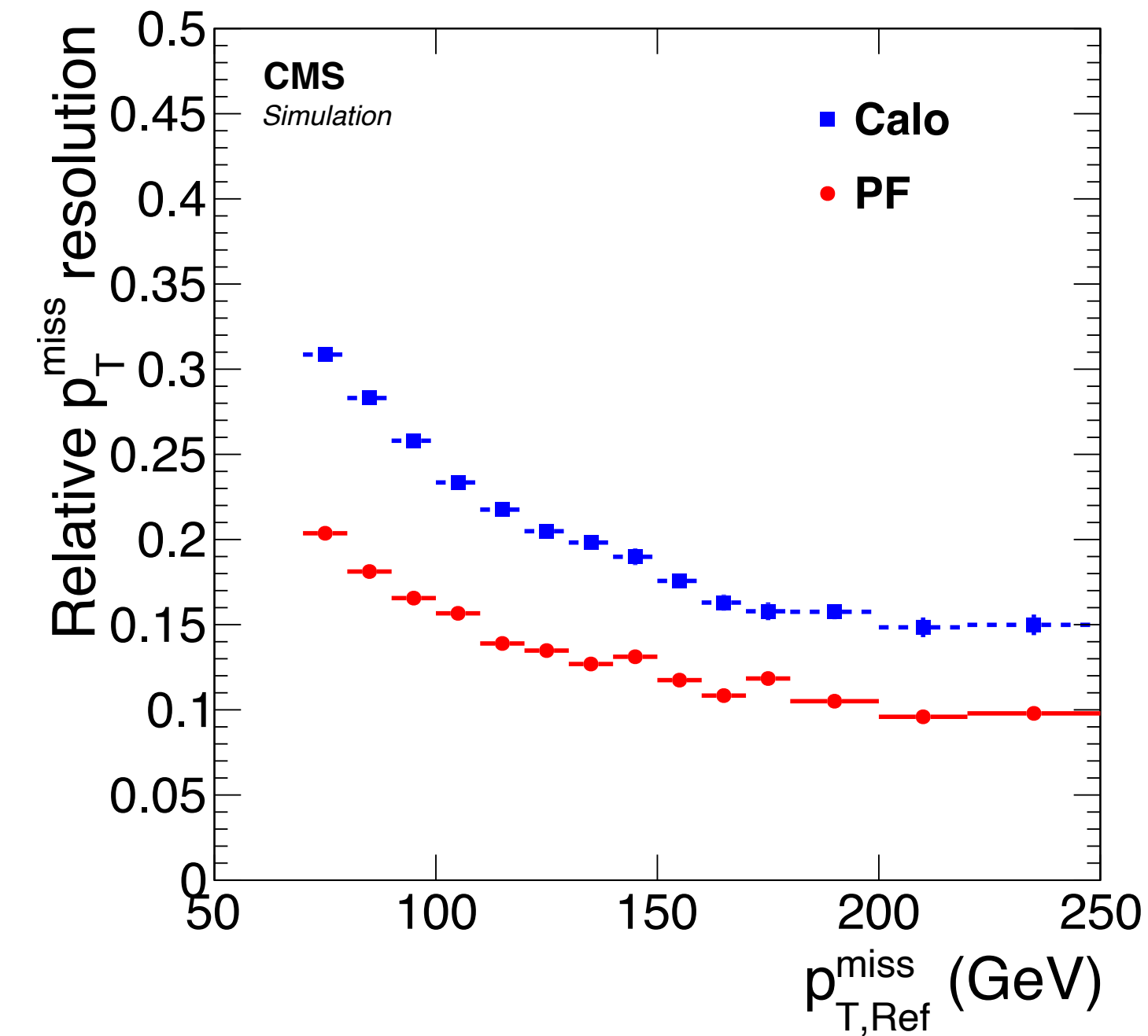


The End

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



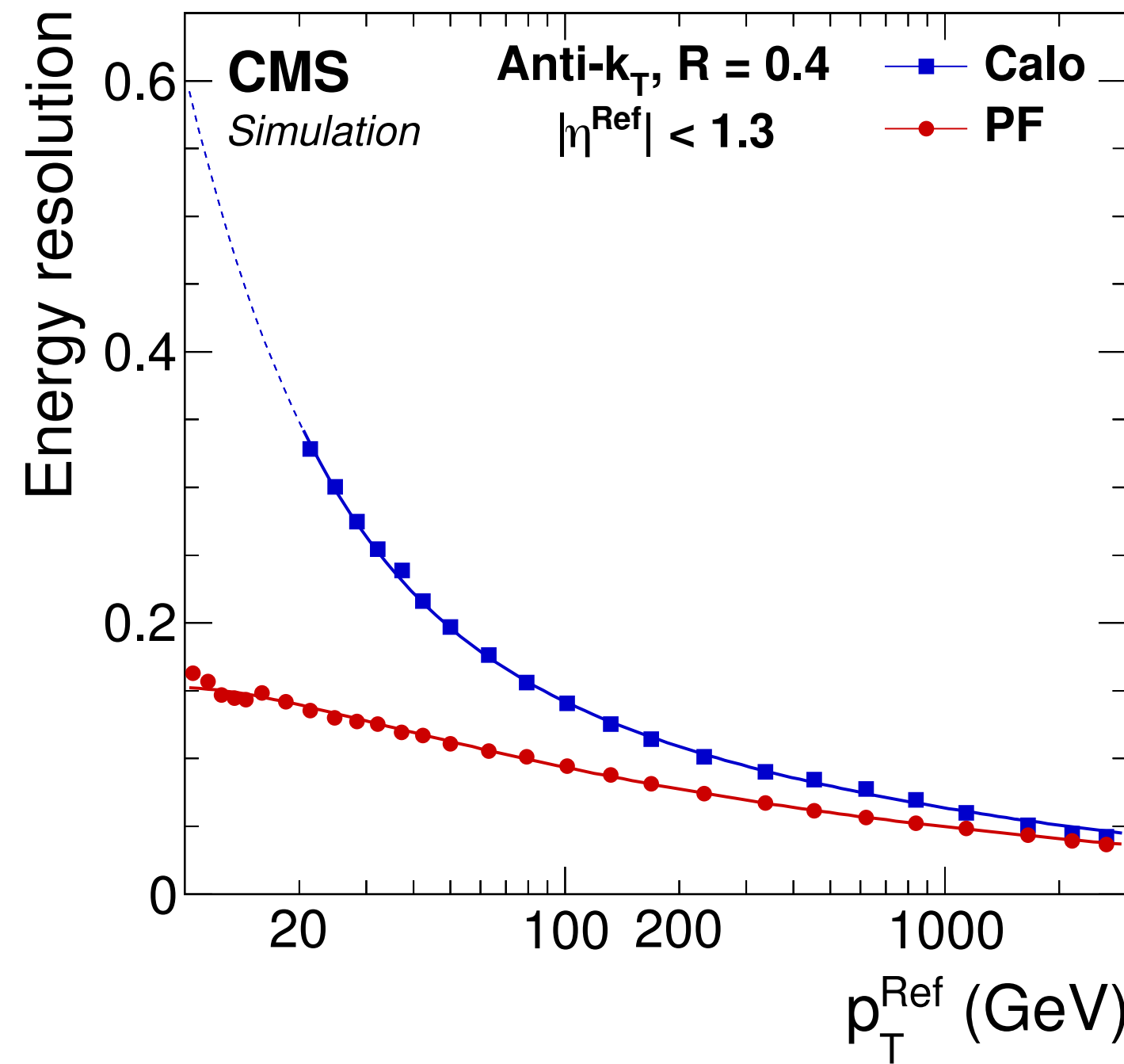
**Jet energy resolution** in  
sample di eventi QCD multijet



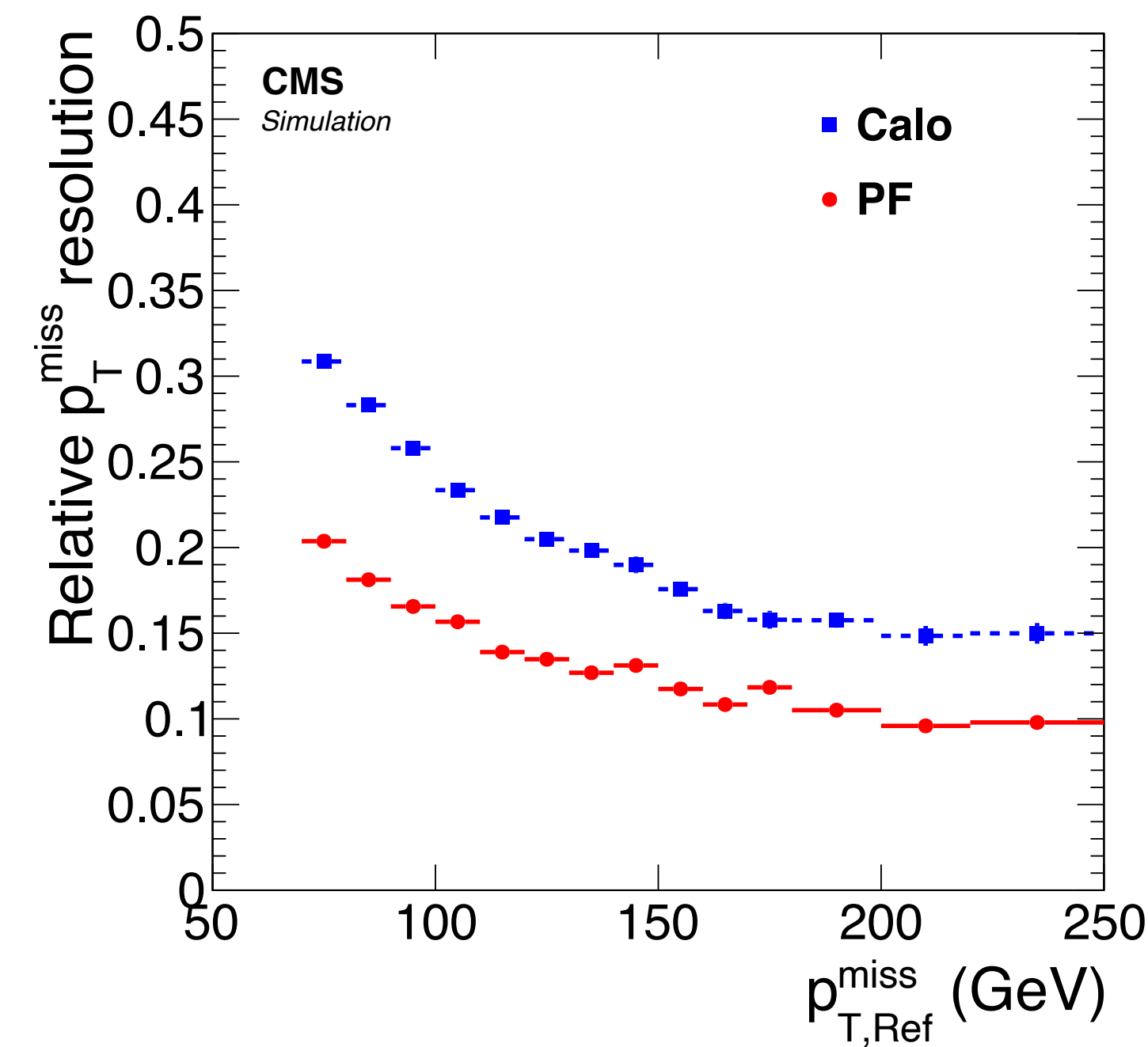
**Missing energy resolution**  
in sample di eventi  $t\bar{t}$

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

**Funziona veramente? ... giudicate voi ...**

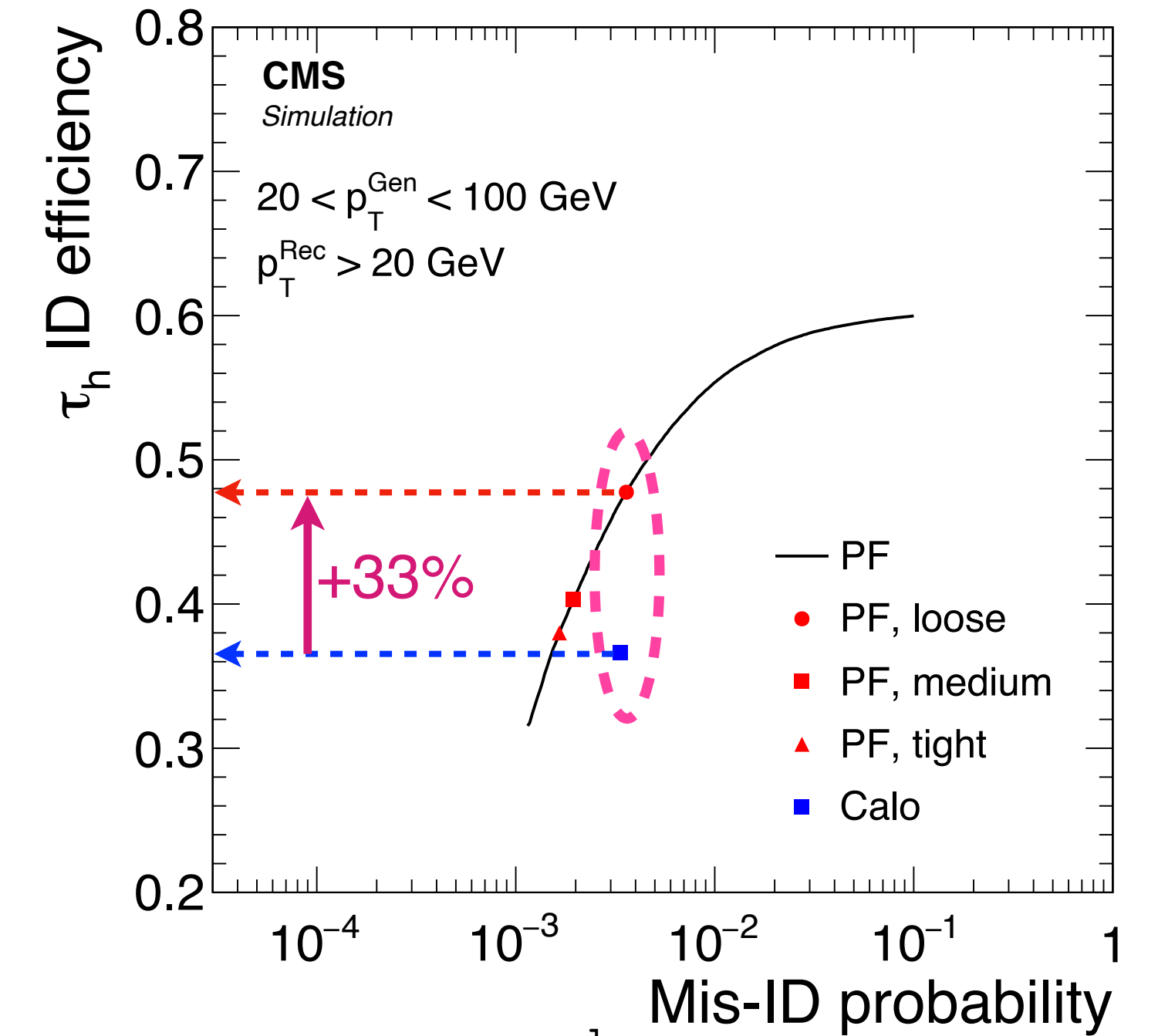


**Jet energy resolution** in sample di eventi QCD multijet



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

**Efficienza di identificazione  $\tau_h$**



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

