

Rivelatori di particelle



INFN Pisa

Matteo Rama

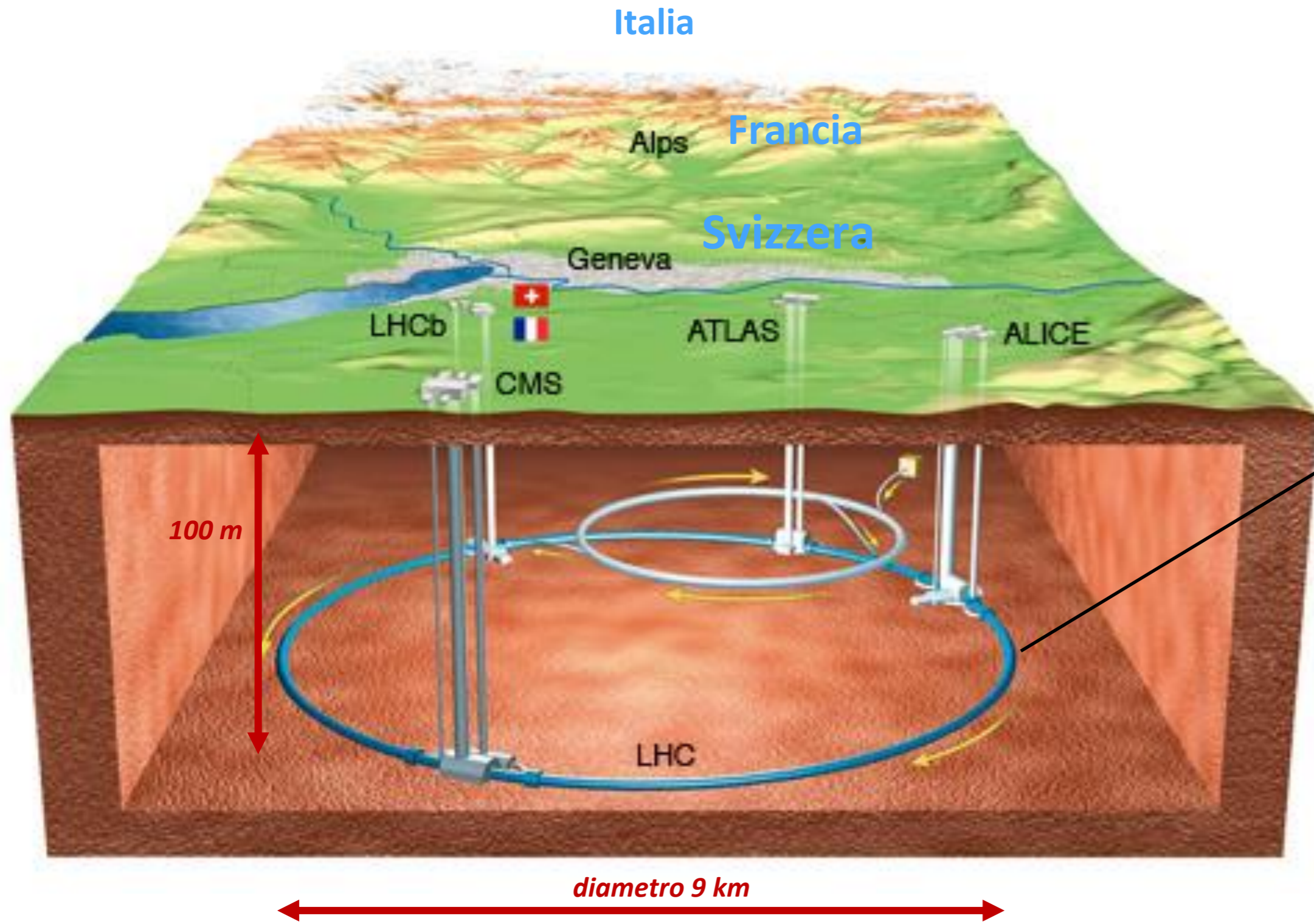
INFN Pisa

Masterclass di LHCb

18 Marzo 2024



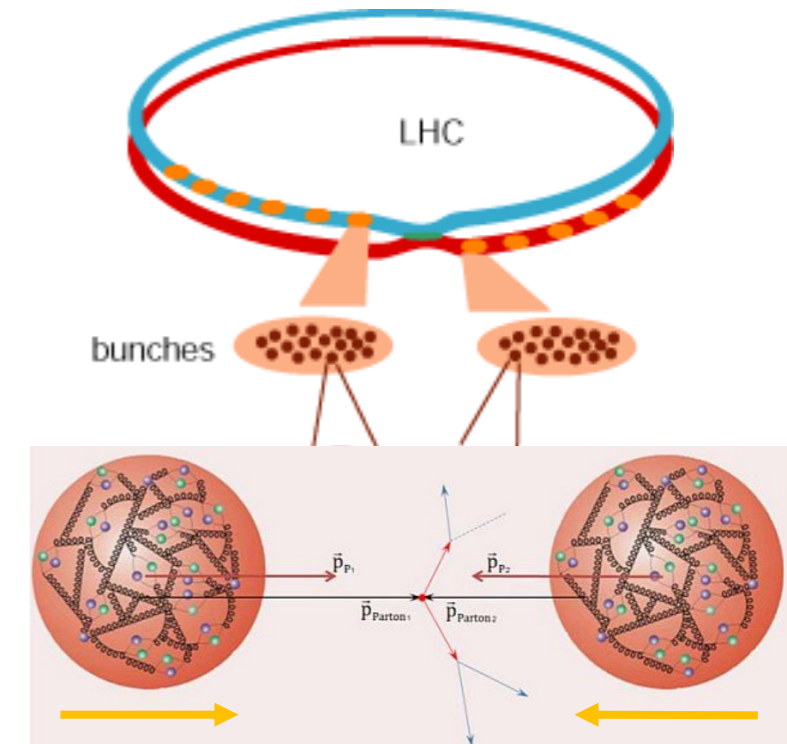
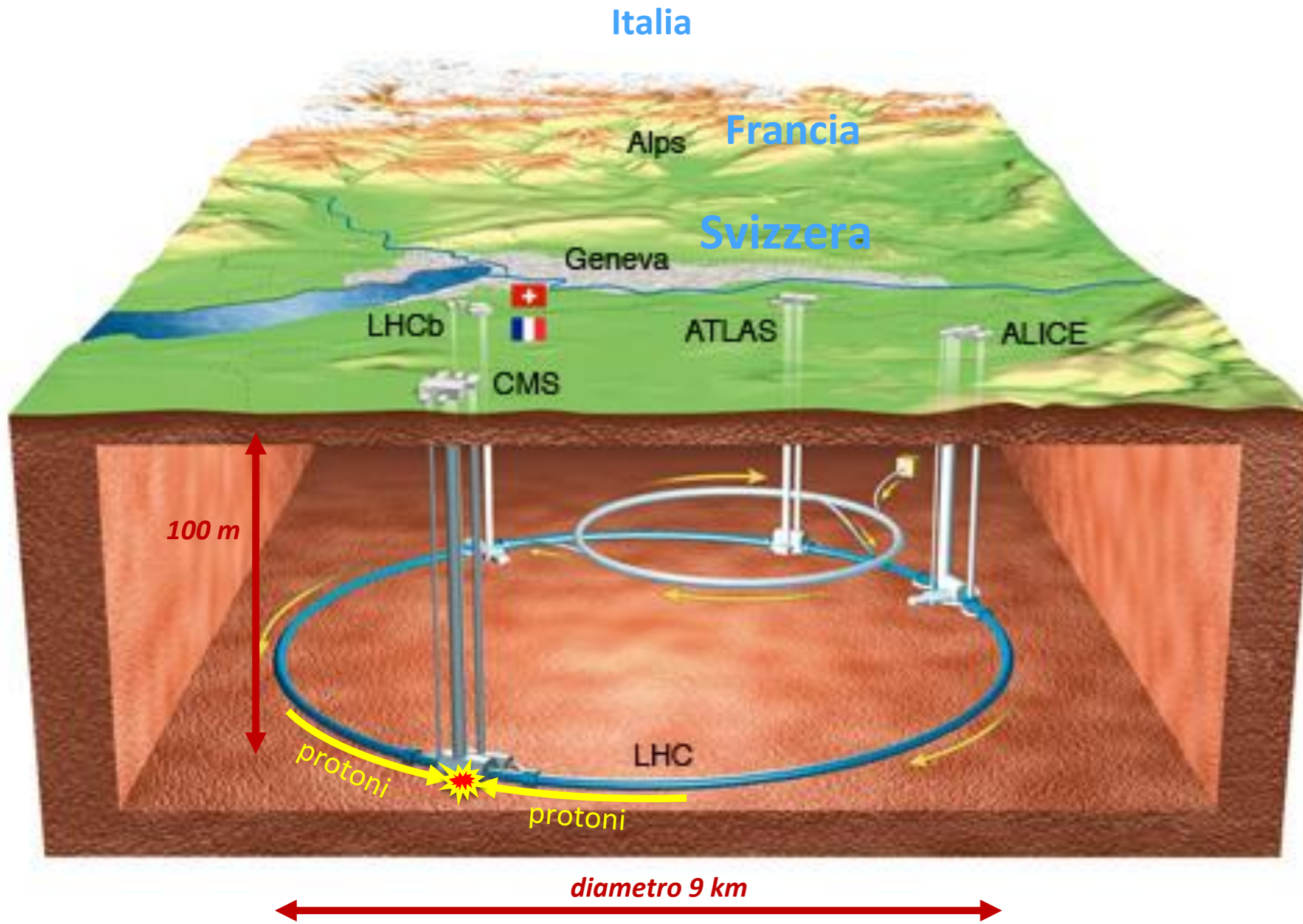
Il Large Hadron Collider (LHC)



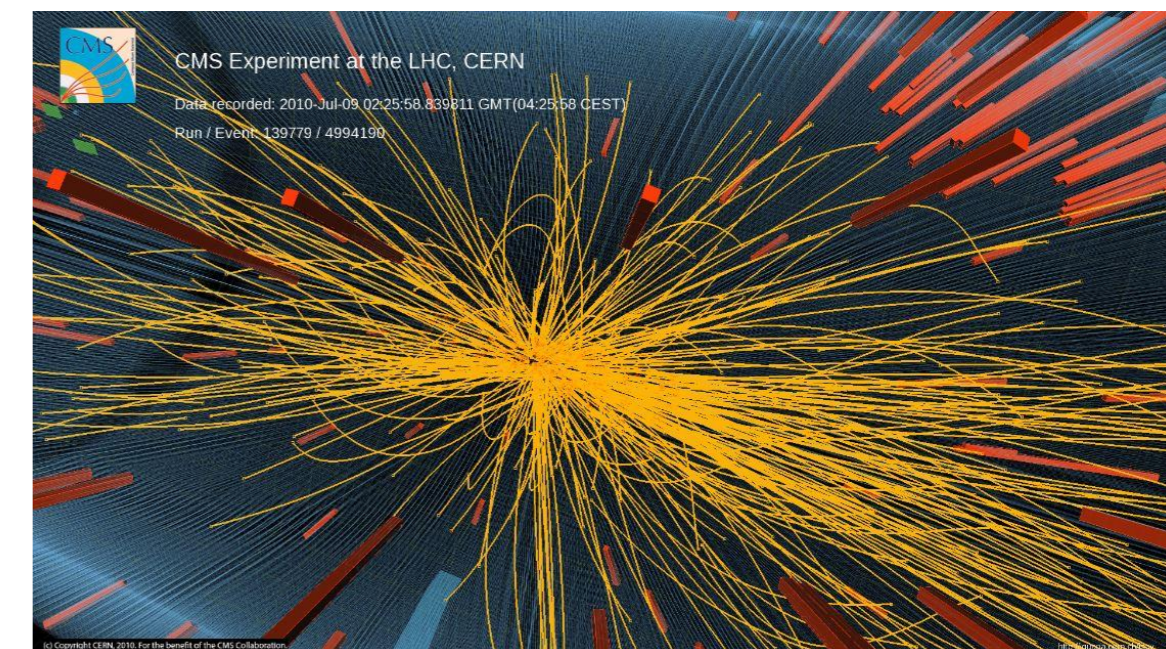
All'interno del tunnel



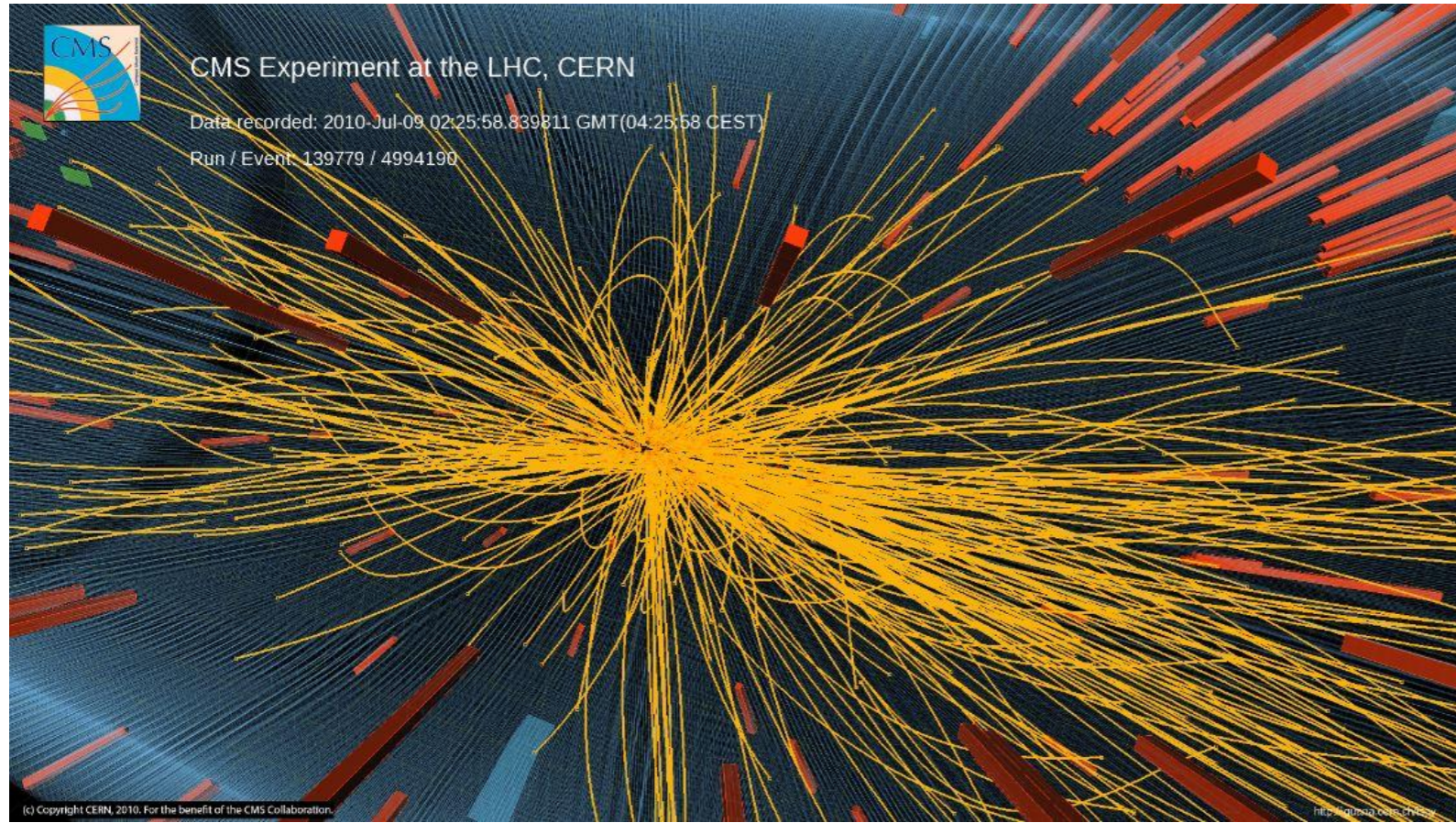
Il Large Hadron Collider (LHC)



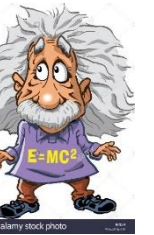
I protoni si disintegrano creando un mare di nuove particelle



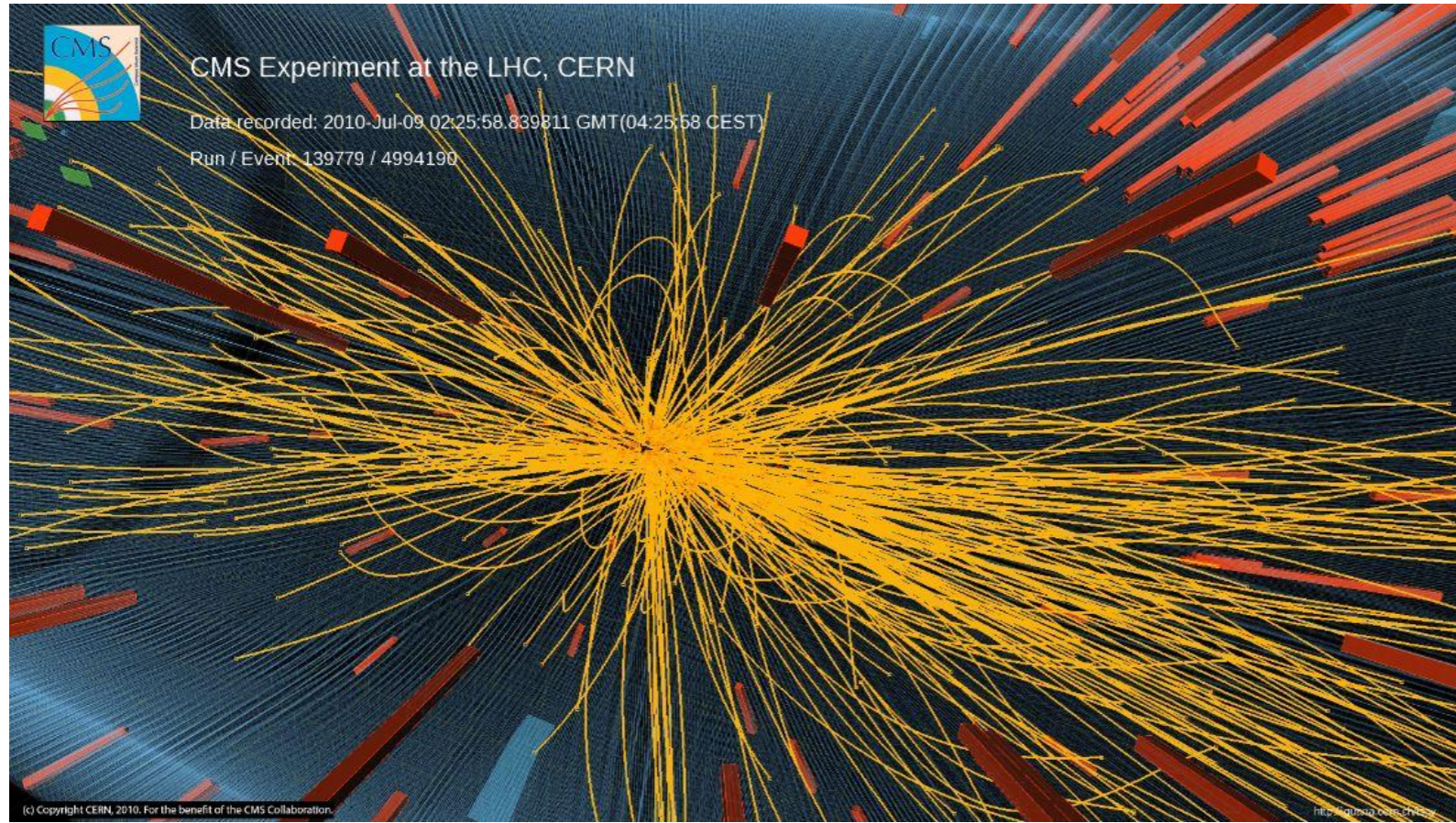
Il Large Hadron Collider (LHC)



- **Collisioni** protone – protone **ogni 25 ns** (1ns = 1 miliardesimo di secondo)
- Centinaia di nuove particelle create in ogni collisione
- Le nuove particelle sono create grazie all'equazione di Einstein $E = mc^2$: l'**energia** dei protoni è **convertita in massa** che un attimo prima non esisteva
- Moltissimi tipi di particelle in ogni collisione:
 - **Leptoni**: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm , neutrini
 - **Adroni**: particelle composte da quarks e anti-quarks
 - **Bosoni vettori**: tra cui il più noto è il fotone

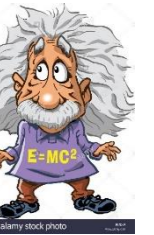


Il Large Hadron Collider (LHC)

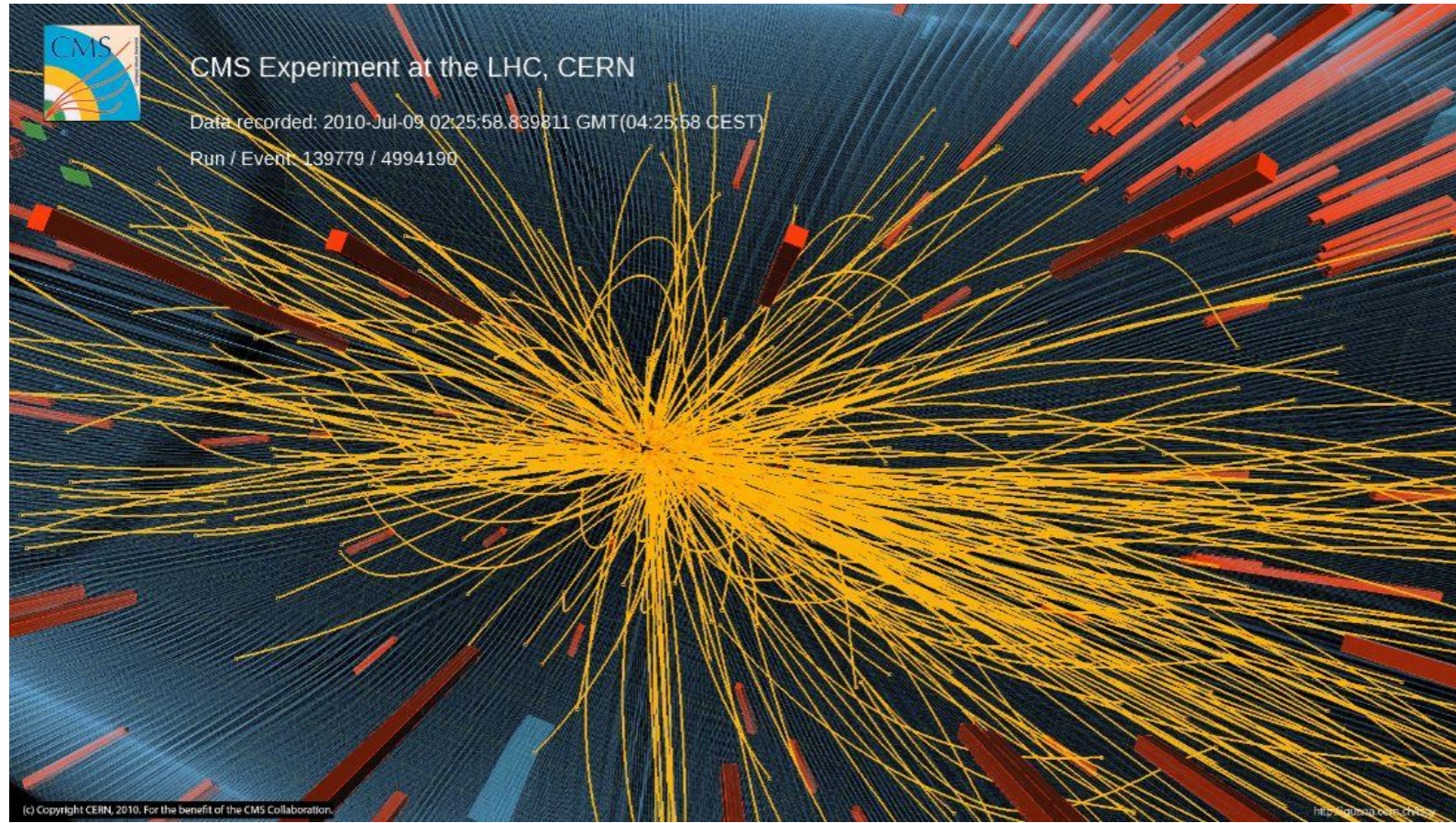


- In ogni collisione vengono cercate le particelle che interessano (spesso non più di 4 o 5)
- Per fare questo occorre “misurarle” tutte quante
- Vuol dire **cercare un ago in un pagliaio 30 milioni di volte al secondo**

- **Collisioni** protone – protone **ogni 25 ns** (1ns = 1 miliardesimo di secondo)
- Centinaia di nuove particelle create in ogni collisione
- Le nuove particelle sono create grazie all’equazione di Einstein $E = mc^2$: l’**energia** dei protoni è **convertita in massa** che un attimo prima non esisteva
- Moltissimi tipi di particelle in ogni collisione:
 - **Leptoni:** e^\pm, μ^\pm, τ^\pm , neutrini
 - **Adroni:** particelle composte da quarks e anti-quarks
 - **Bosoni vettori:** tra cui il più noto è il fotone

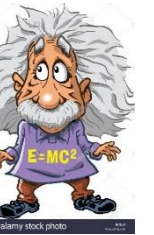


Il Large Hadron Collider (LHC)



- In ogni collisione vengono cercate le particelle che interessano (spesso non più di 4 o 5)
- Per fare questo occorre “misurarle” tutte quante
- Vuol dire **cercare un ago in un pagliaio 30 milioni di volte al secondo**

- **Collisioni** protone – protone **ogni 25 ns** (1ns = 1 miliardesimo di secondo)
- Centinaia di nuove particelle create in ogni collisione
- Le nuove particelle sono create grazie all’equazione di Einstein $E = mc^2$: l’**energia** dei protoni è **convertita in massa** che un attimo prima non esisteva
- Moltissimi tipi di particelle in ogni collisione:
 - **Leptoni**: e^\pm, μ^\pm, τ^\pm , neutrini
 - **Adroni**: particelle composte da quarks e anti-quarks
 - **Bosoni vettori**: tra cui il più noto è il fotone



→ **rivelatore di particelle**

Cosa è un rivelatore di particelle

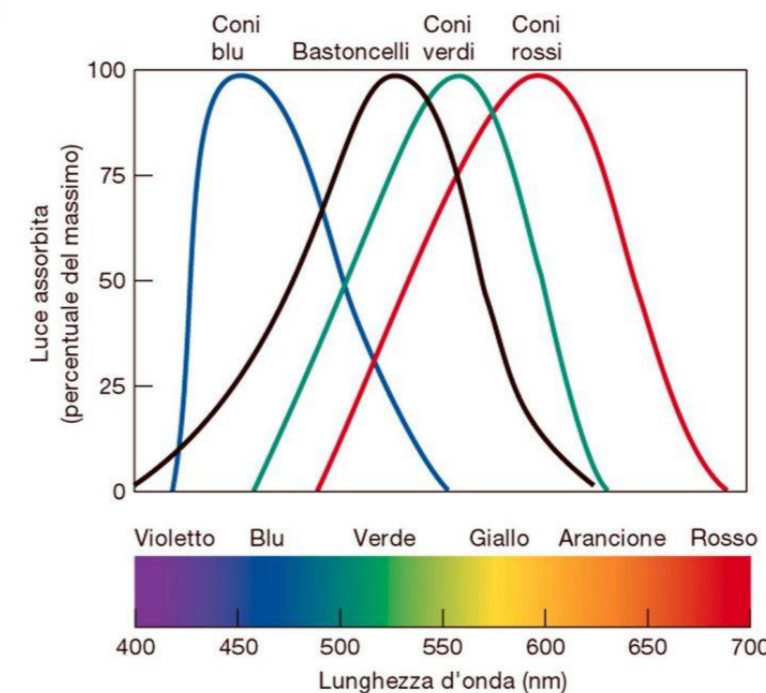
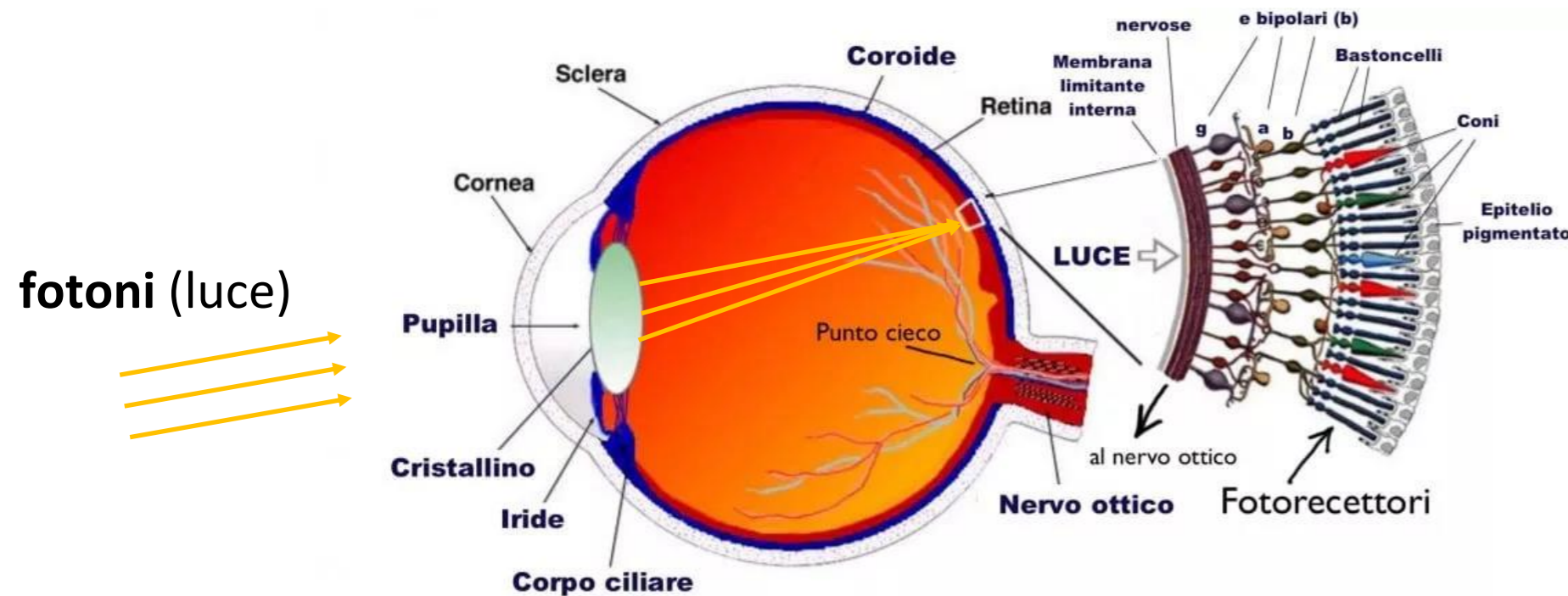
Ognuno di noi possiede due rivelatori di particelle elementari

Cosa è un rivelatore di particelle



Occhio umano:

- 3 tipi di coni sensibili a lunghezze d'onda diversa: 430, 550, 600 nm
- 6 milioni di coni (ottima risoluzione spaziale!)
- Range di energia: [1.8,3.1] eV
- Frame Per Second: 200 max



$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

h = costante di Planck
 c = velocità della luce

rosso: 1.8 eV

violetto: 3.1 eV

NB: 1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

Cosa è un rivelatore di particelle



Occhio umano:

- 3 tipi di coni sensibili a lunghezze d'onda diversa: 430, 550, 600 nm
- 6 milioni di coni (ottima risoluzione spaziale!)
- Range di energia: [1.8,3.1] eV
- Frame Per Second: 200 max

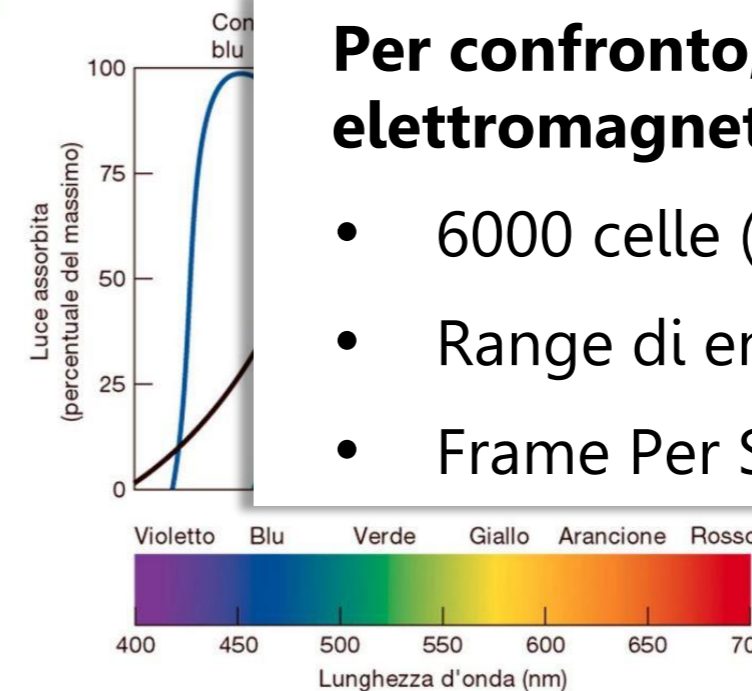
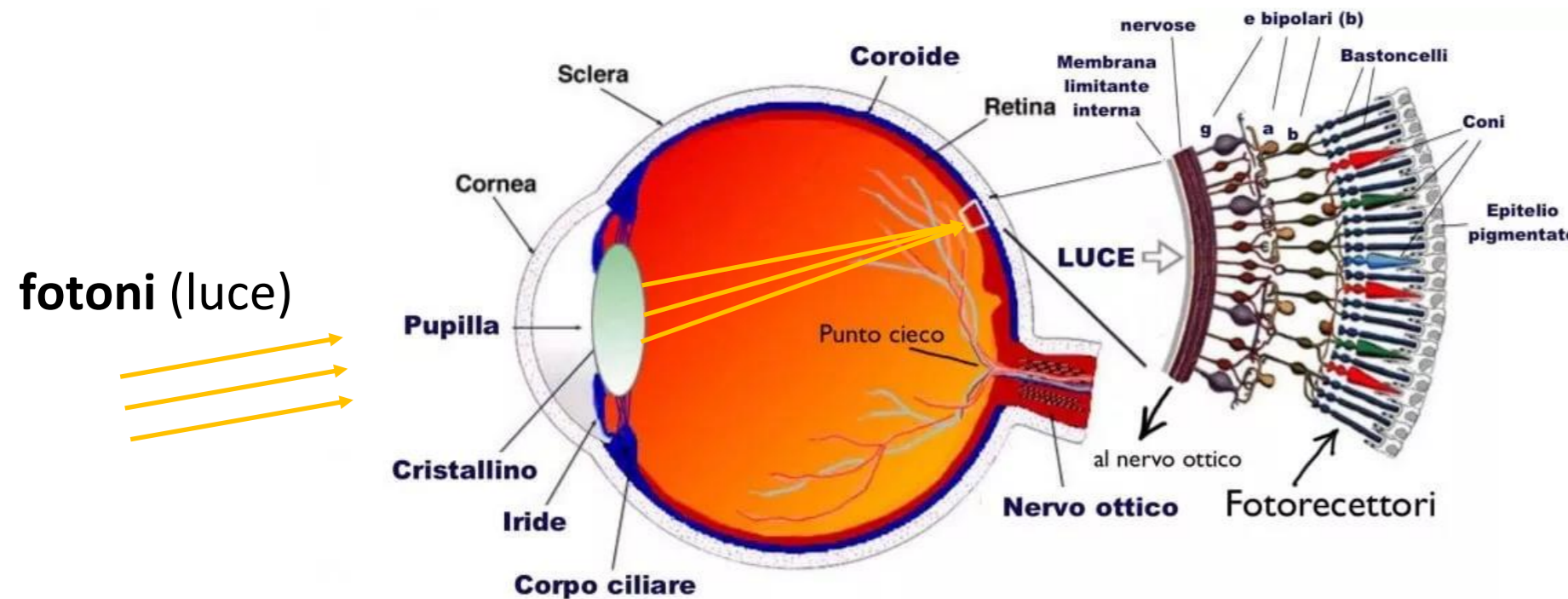


Per confronto, il calorimetro elettromagnetico del rivelatore LHCb:

- 6000 celle (equivalente dei coni)
- Range di energia: [10⁶,10¹¹] eV
- Frame Per Second: 40 milioni

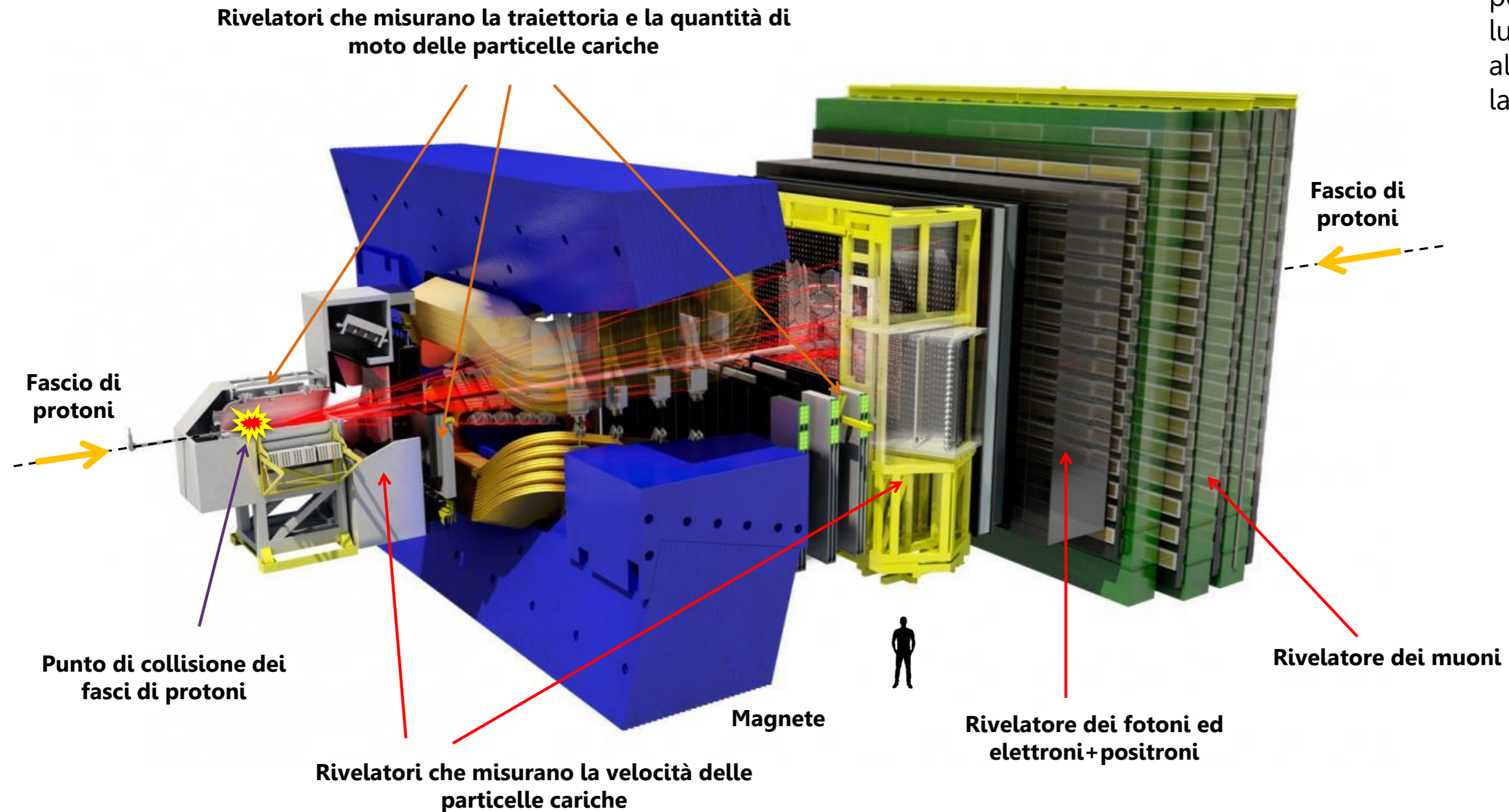
violetto: 3.1 eV

NB: 1 eV = 1.6 10⁻¹⁹ J

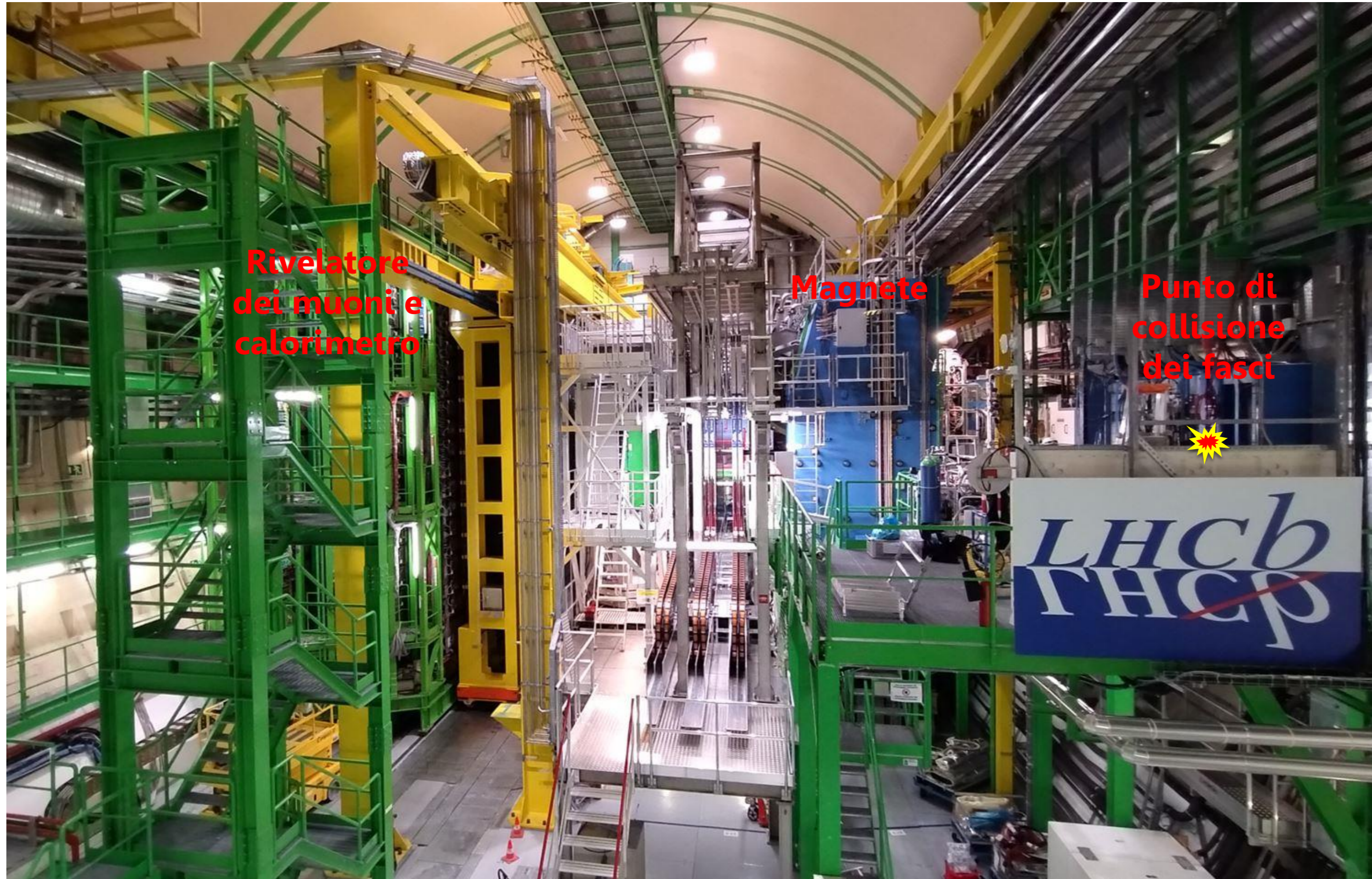


Il rivelatore di particelle dell'esperimento LHCb

peso: 5600 tonnellate
lunghezza: 20 m
altezza: 10 m
larghezza: 13 m



Il rivelatore di particelle dell'esperimento LHCb



Il mesone D^0

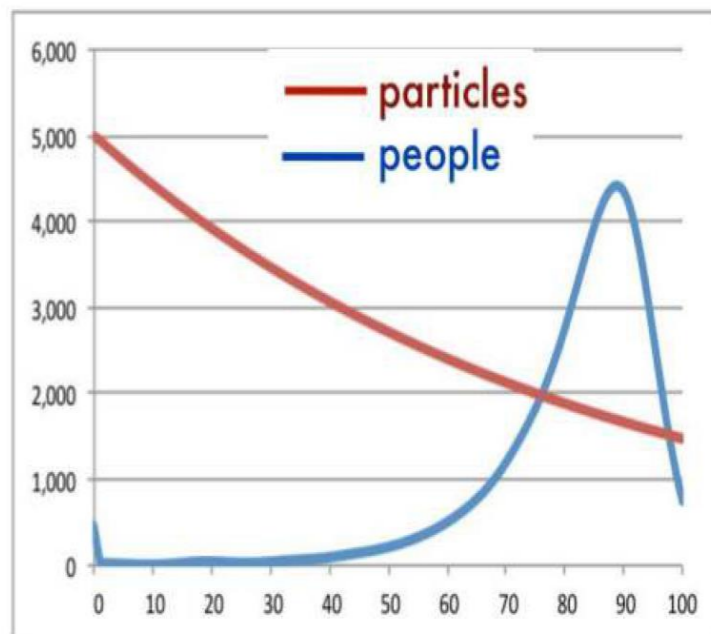
Nell'esercizio che farete oggi cercherete la particella D^0 nei dati veri provenienti dal rivelatore LHCb

Carta d'identità

Struttura interna: quark 'charm' + anti-quark 'up'

Massa: 2 volte la massa del protone (1865 MeV)

Vita media: 0.4 millesimi di miliardesimo di secondo (0.4 ps)



$\tau_{umano} \sim 80 \text{ anni}$

$\tau_{D^0} = 0.00000000000004 \text{ s}$

Se prendiamo un insieme di mesoni D^0 e guardiamo dopo quanto tempo decadono, osserviamo un andamento esponenziale:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

- t = tempo trascorso tra la creazione e la disintegrazione della particella
- τ = vita media della particella

Il mesone D^0

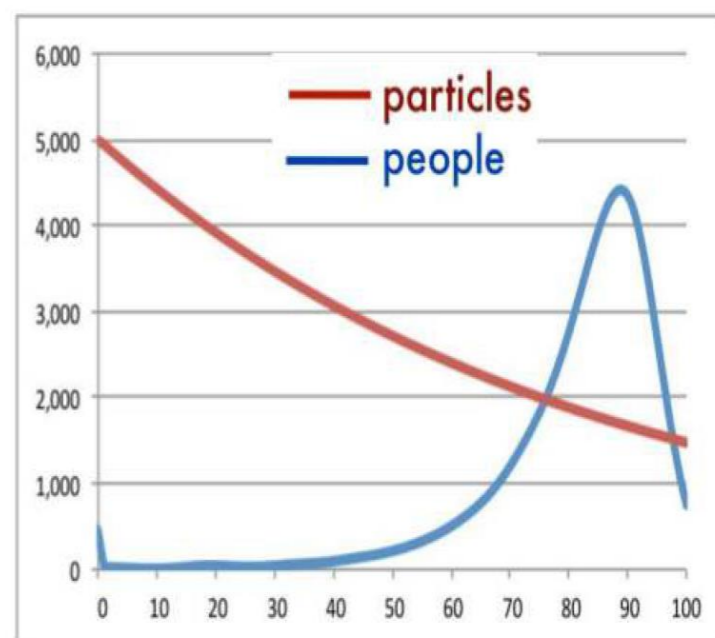
Nell'esercizio che farete oggi cercherete la particella D^0 nei dati veri provenienti dal rivelatore LHCb

Carta d'identità

Struttura interna: quark 'charm' + anti-quark 'up'

Massa: 2 volte la massa del protone (1865 MeV)

Vita media: 0.4 millesimi di miliardesimo di secondo (0.4 ps)



$\tau_{umano} \sim 80 \text{ anni}$

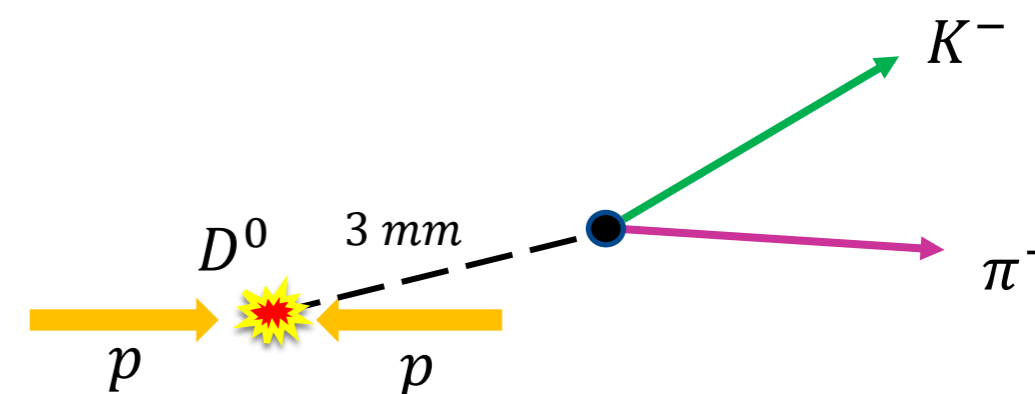
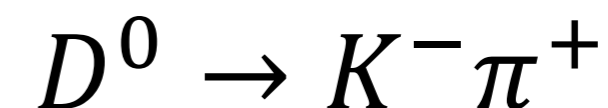
$\tau_{D^0} = 0.00000000000004 \text{ s}$

Se prendiamo un insieme di mesoni D^0 e guardiamo dopo quanto tempo decadono, osserviamo un andamento esponenziale:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

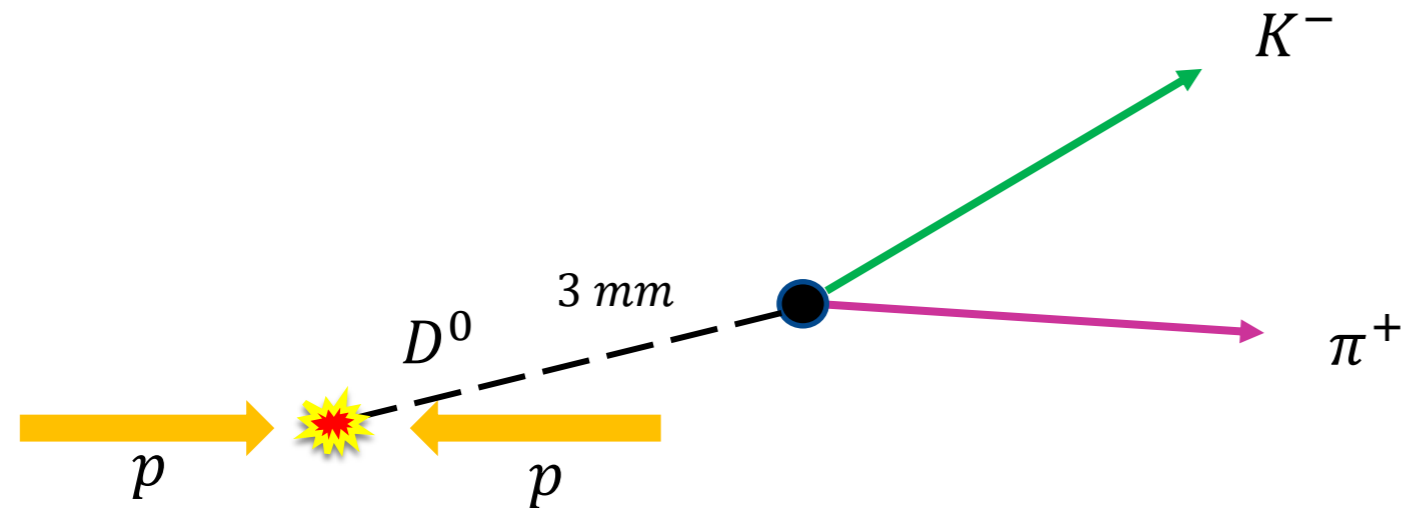
- t = tempo trascorso tra la creazione e la disintegrazione della particella
- τ = vita media della particella

Il mesone D^0 percorre circa 3 mm prima di decadere nella coppia di mesoni K^- e π^+

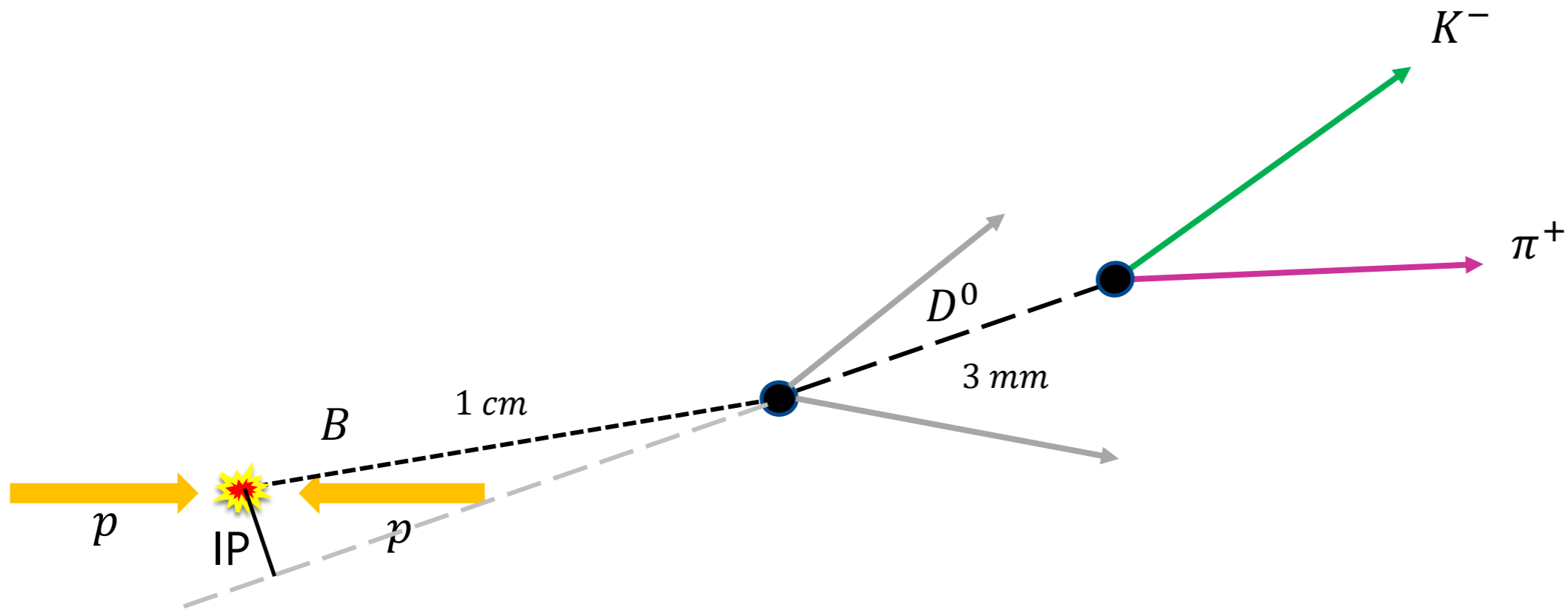


Il mesone D^0 è rivelato ricostruendo le tracce lasciate nel rivelatore dai mesoni K^- e π^+

Meccanismi di produzione del mesone D^0



Produzione diretta

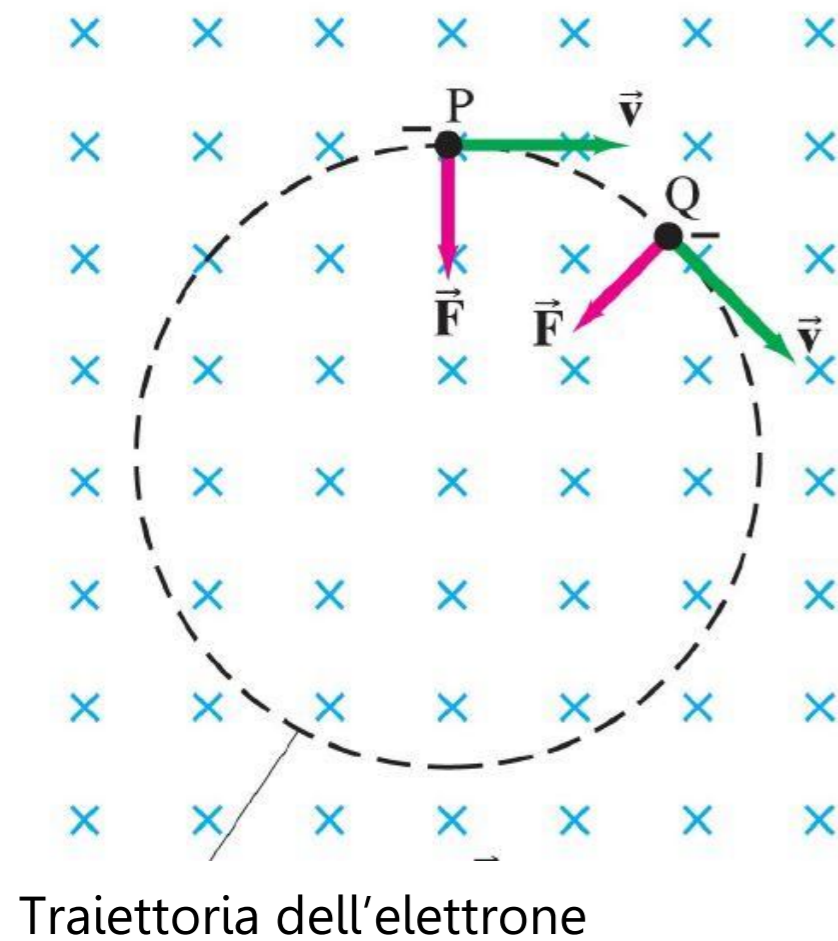


Produzione secondaria dal decadimento di un mesone B

IP=parametro d'impatto

Forza di Lorentz

Il campo magnetico è entrante nel foglio



$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

q = carica della particella

\vec{v} = velocità della particella

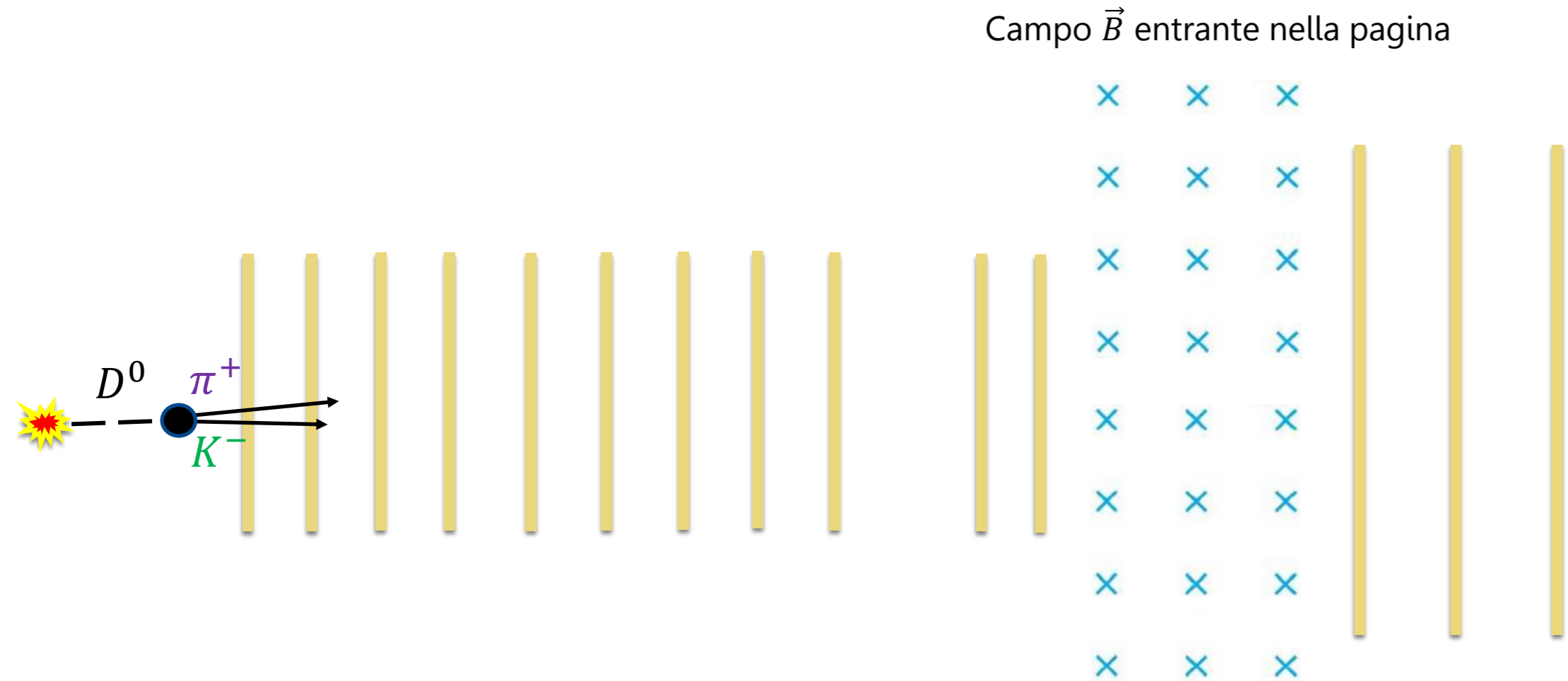
\vec{B} = vettore di induzione magnetica

Una particella carica con velocità perpendicolare ad un campo magnetico uniforme percorre una traiettoria circolare

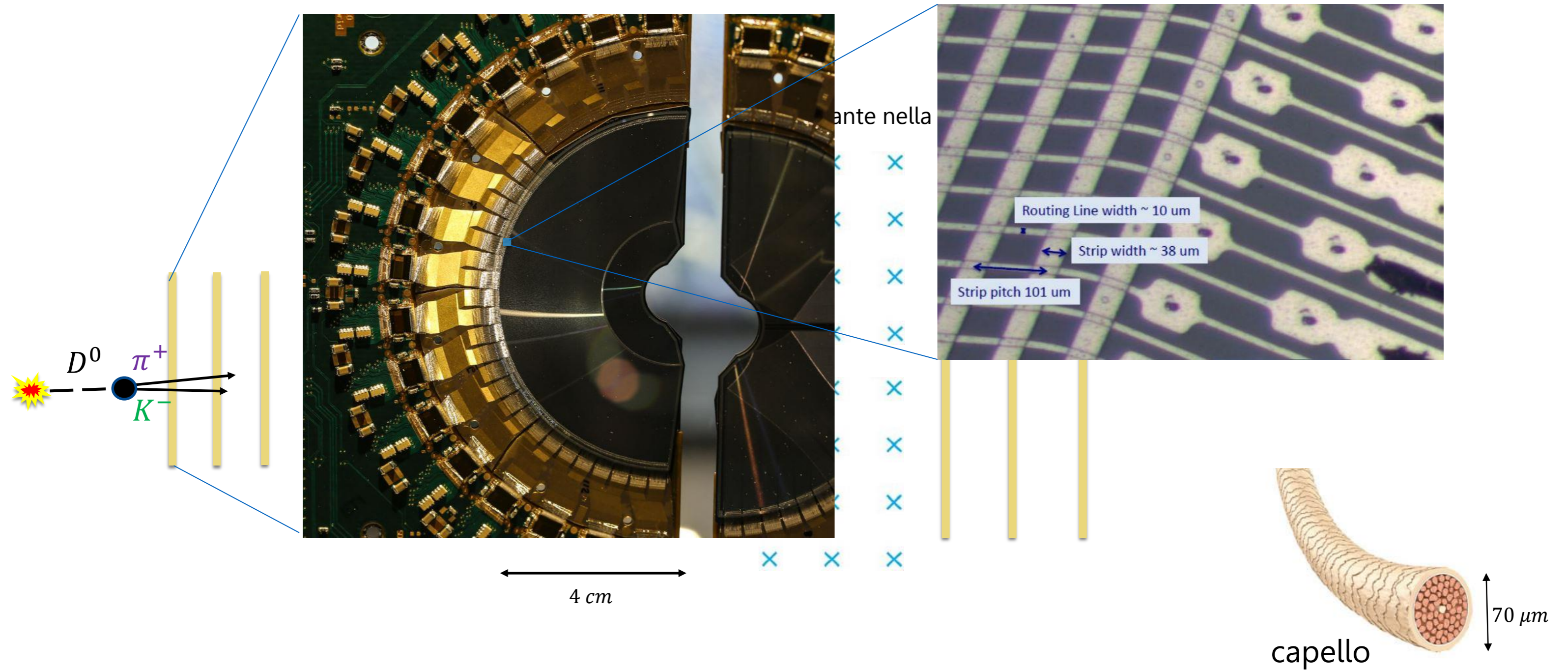
$$m \frac{v^2}{R} = q v B \quad \longrightarrow \quad m v = q B R$$

Conoscendo B e misurando il raggio R della traiettoria, si misura la quantità di moto della particella

Tracciatore delle particelle cariche



Tracciatore delle particelle cariche



Tracciatore delle particelle cariche

ante nella

Routing Line width ~ 10 μm

Strip width ~ 38 μm

Strip pitch 101 μm

4 cm

300 μm

Semiconduttore al silicio

$V > 0$

Al

Al

SiO₂

p⁺-Si

n-Si

n⁺-Si

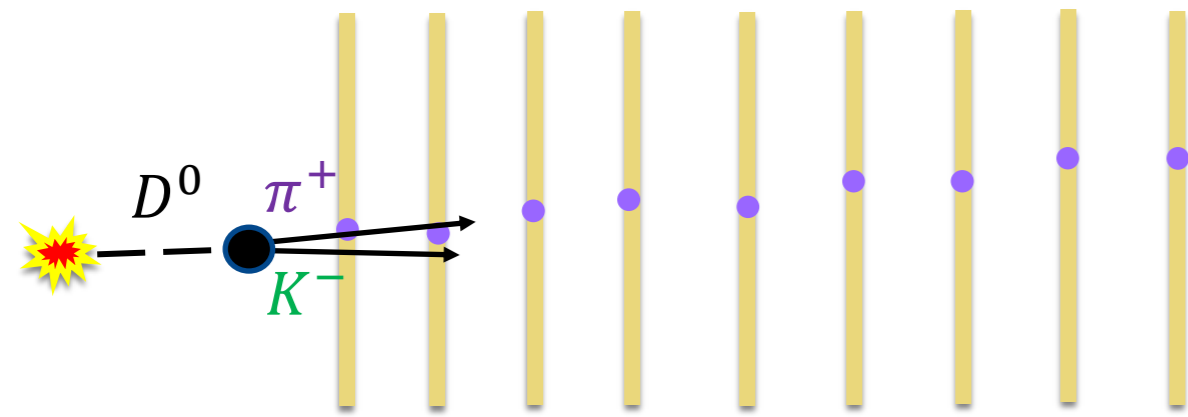
D^0

π^+

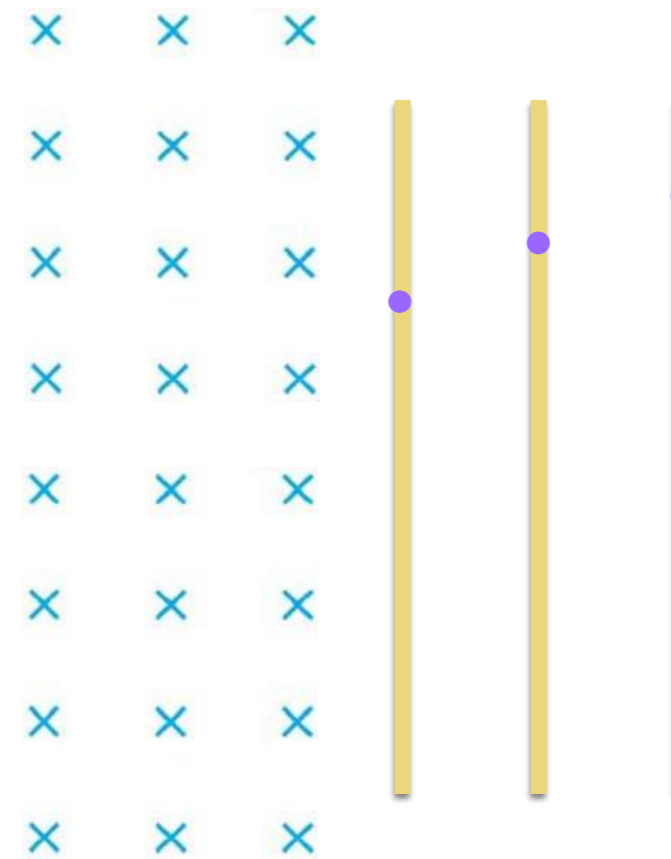
K^-

Tracciatore delle particelle cariche

Il **pione** attraversa gli strati del tracciatore lasciando un segnale in corrispondenza del suo passaggio



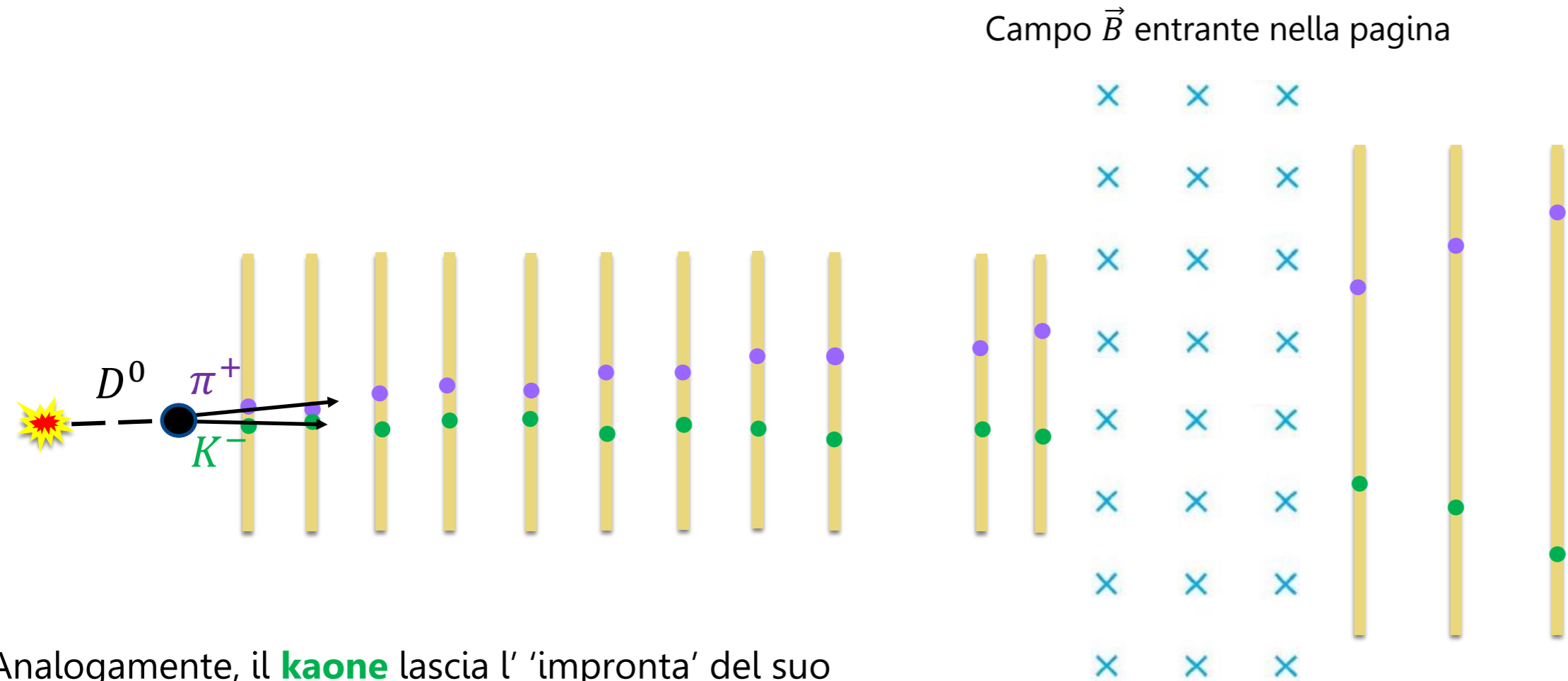
Campo \vec{B} entrante nella pagina



Il campo magnetico devia la traiettoria



Tracciatore delle particelle cariche



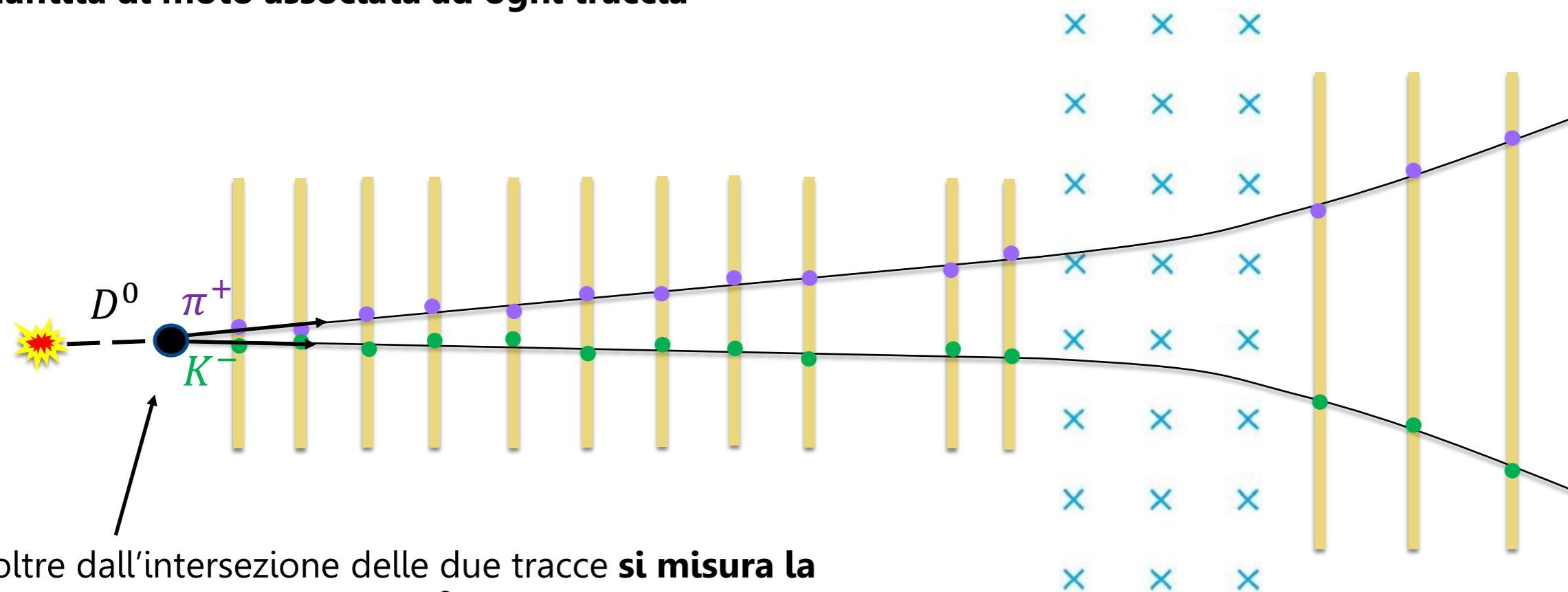
Analogamente, il **kaone** lascia l' 'impronta' del suo passaggio nel tracciatore.

Misura della quantità di moto e del vertice di decadimento

Con appositi **algoritmi** vengono ricostruite le tracce delle particelle a partire dagli hits misurati

Conoscendo il campo magnetico **viene misurata la quantità di moto associata ad ogni traccia**

Campo \vec{B} entrante nella pagina



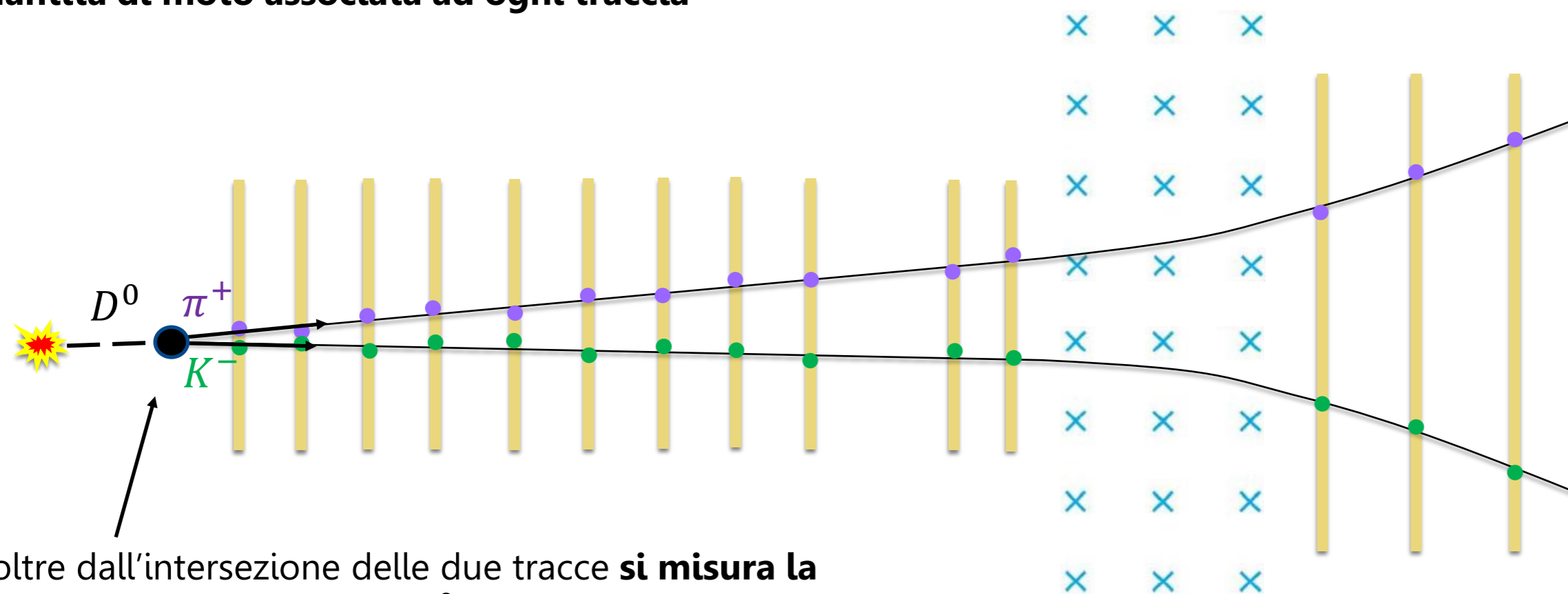
Inoltre dall'intersezione delle due tracce **si misura la posizione dove il mesone D^0 è decaduto** (*vertice di decadimento*)

Misura della quantità di moto e del vertice di decadimento

Con appositi **algoritmi** vengono ricostruite le tracce delle particelle a partire dagli hits misurati

Conoscendo il campo magnetico **viene misurata la quantità di moto associata ad ogni traccia**

Campo \vec{B} entrante nella pagina



Inoltre dall'intersezione delle due tracce **si misura la posizione dove il mesone D^0 è decaduto** (*vertice di decadimento*)

NOTA BENE: La misura del passaggio delle particelle dal tracciatore è affetta da un'incertezza sperimentale. Di conseguenza anche **la misura della quantità di moto e della posizione del vertice di decadimento del D^0 sono affette da incertezze sperimentali**

Emissione di luce Cherenkov

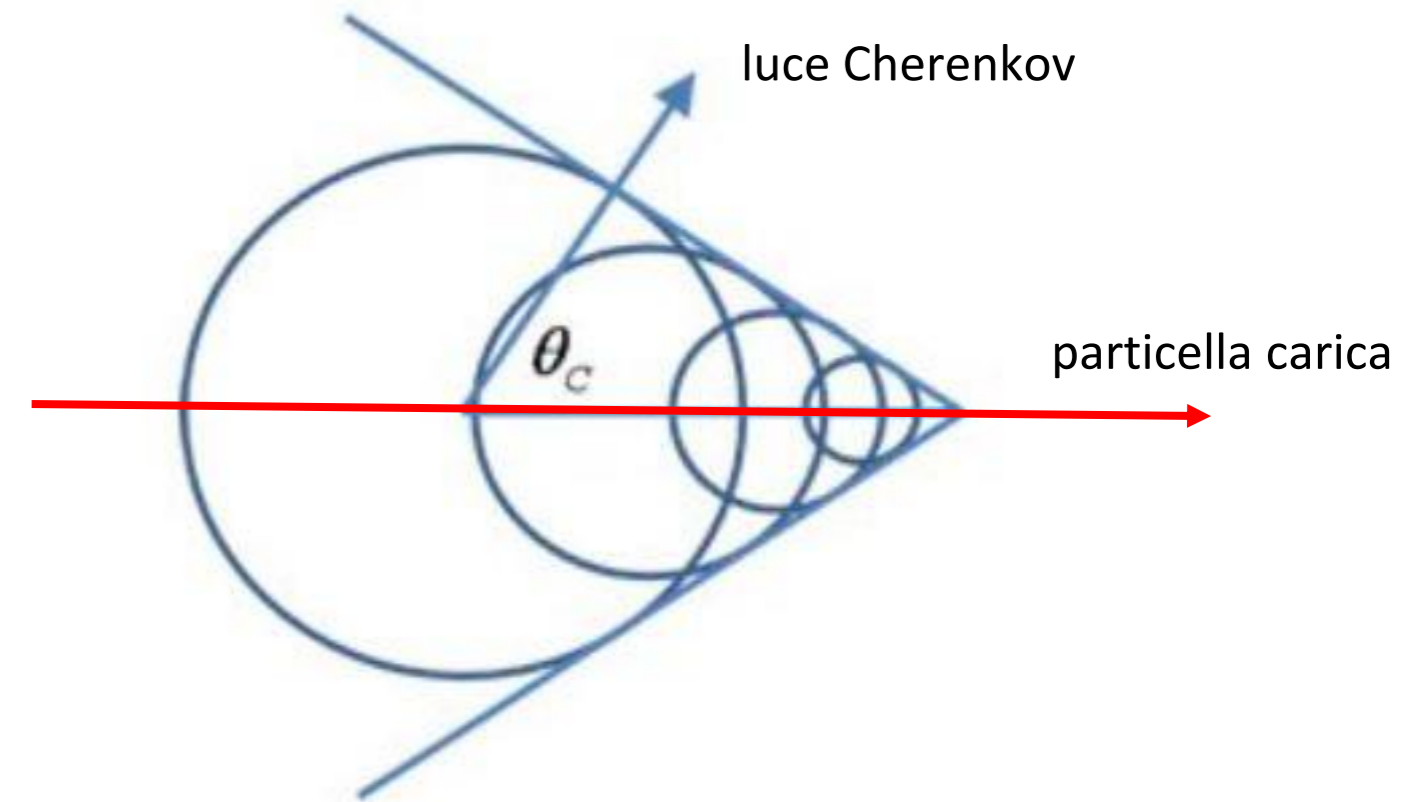
Quando una particella carica attraversa un certo mezzo (per esempio un gas, o acqua) con una velocità maggiore della velocità della luce in quel mezzo, emette radiazione elettromagnetica.

La luce viene emessa con un angolo dato da $\cos \theta_c = \frac{c}{n v}$

c = velocità della luce nel vuoto

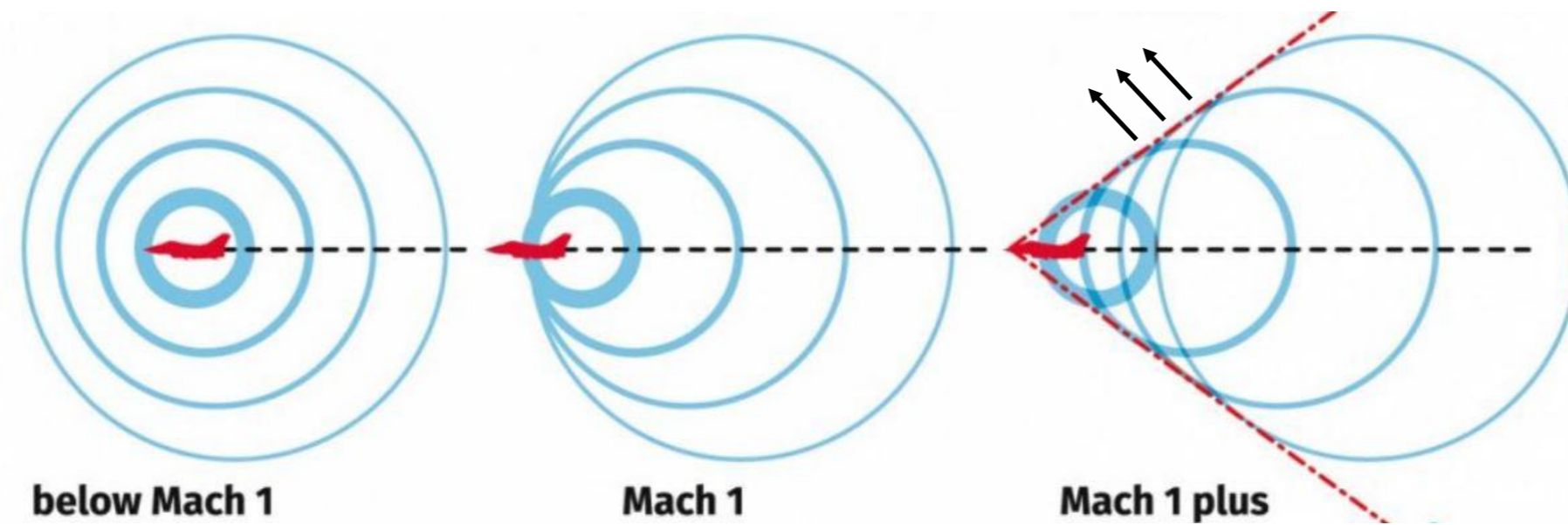
n = indice di rifrazione del mezzo attraversato

v = velocità della particella nel mezzo attraversato

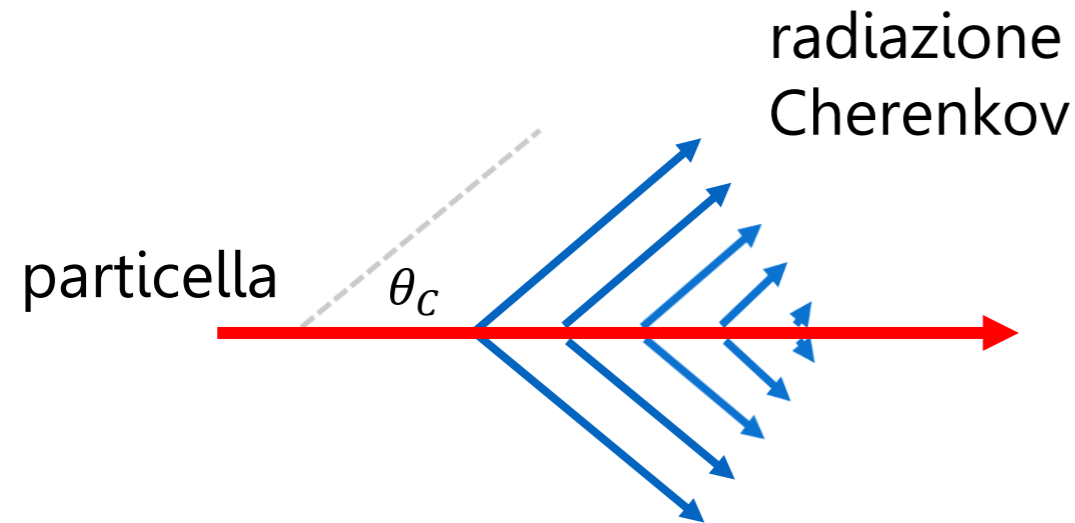


NOTA BENE: Secondo la teoria della relatività di Einstein **nessuna particella può avere una velocità maggiore della velocità della luce *nel vuoto*.**

Analogia con il bang supersonico dei jets

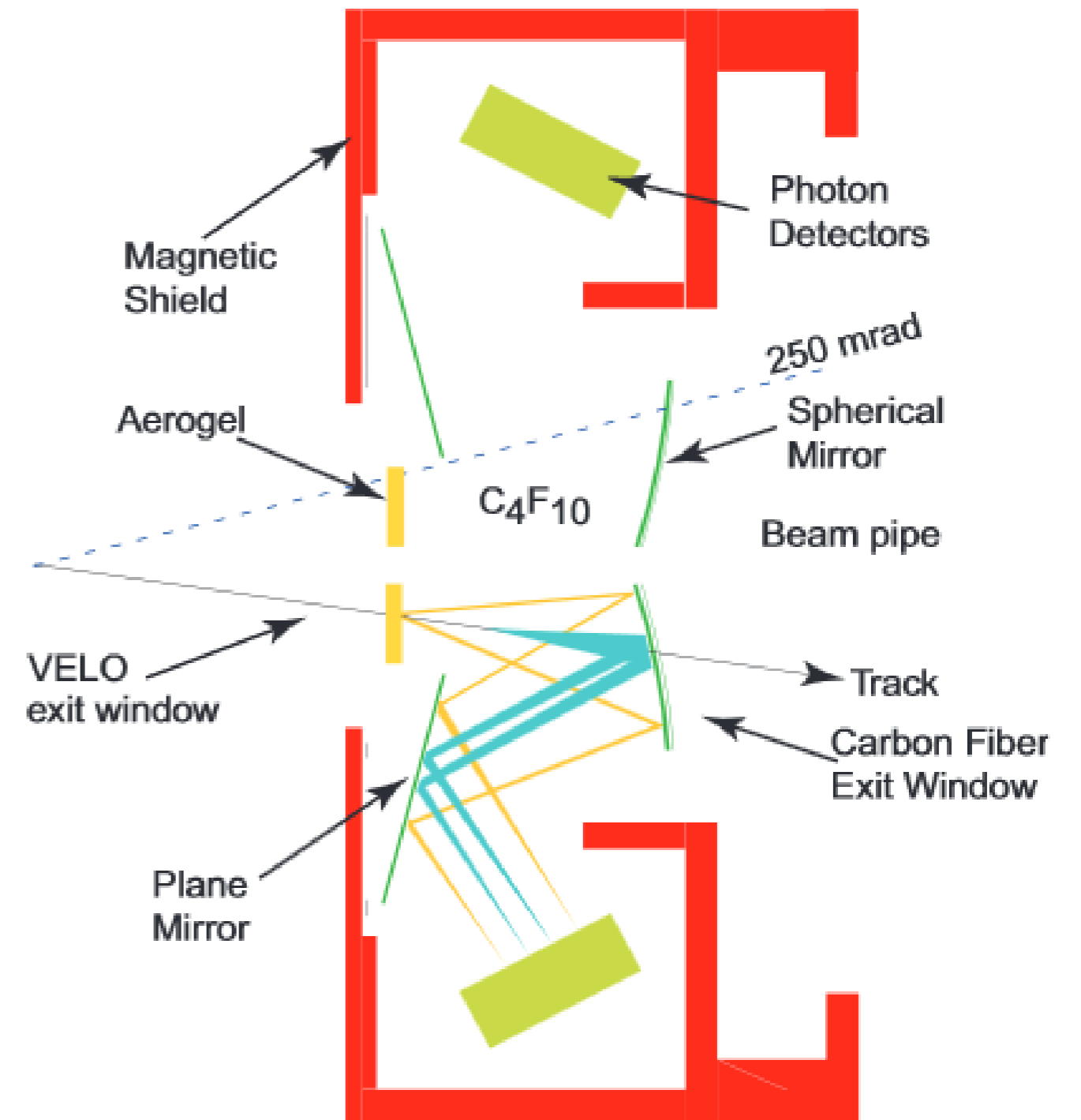


Misura della velocità della particella

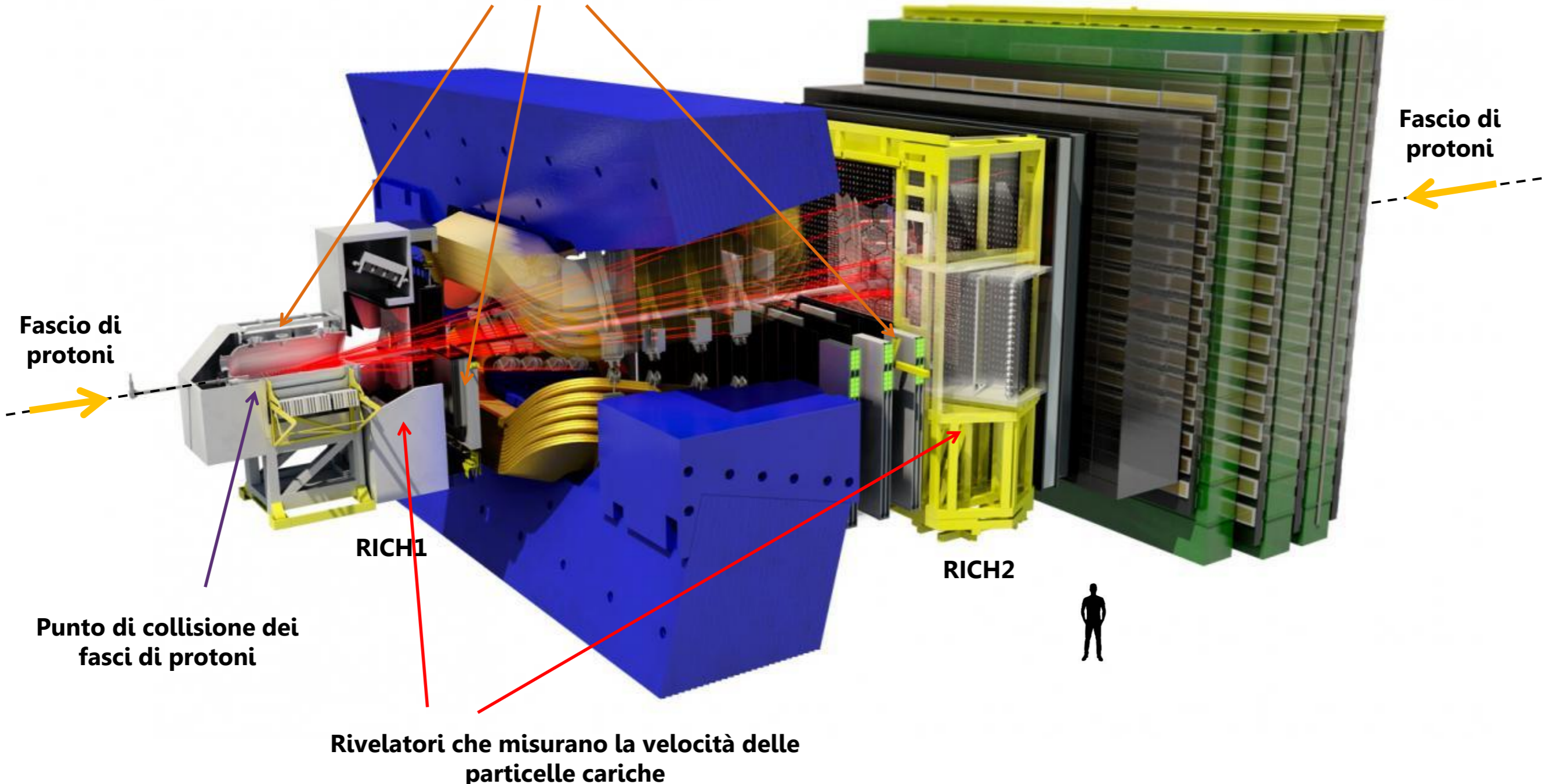


Con uno speciale rivelatore (RICH: **R**ing **I**maging **C**herenkov detector) viene misurato θ_c . Invertendo la relazione

$$\cos \theta_c = \frac{c}{n v} \quad \longrightarrow \quad v = \frac{c}{n \cos \theta_c}$$



Rivelatori che misurano la traiettoria e la quantità di moto delle particelle cariche



Punto di collisione dei fasci di protoni

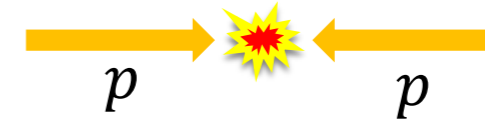
RICH1

RICH2

Rivelatori che misurano la velocità delle particelle cariche

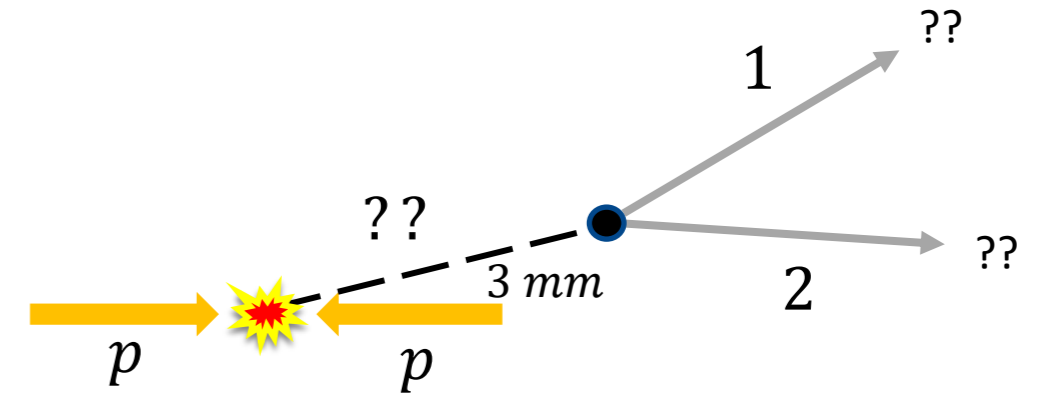
Ricapitolando

1. Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):



Ricapitolando

1. Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):
 - a) viene ricostruita la **traiettoria** delle particelle cariche e il loro punto di intersezione
 - b) viene misurata la loro **quantità di moto**

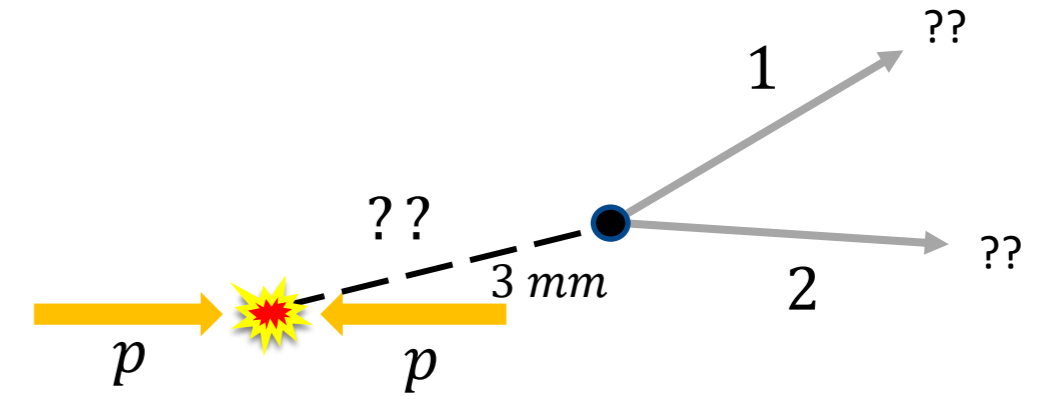


$$p_1 = m_1 v_1$$

$$p_2 = m_2 v_2$$

Ricapitolando

1. Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):
 - a) viene ricostruita la **traiettoria** delle particelle cariche e il loro punto di intersezione
 - b) viene misurata la loro **quantità di moto**
2. Utilizzando i RICH detectors viene misurata **la velocità** delle particelle cariche



$$p_1 = m_1 v_1$$

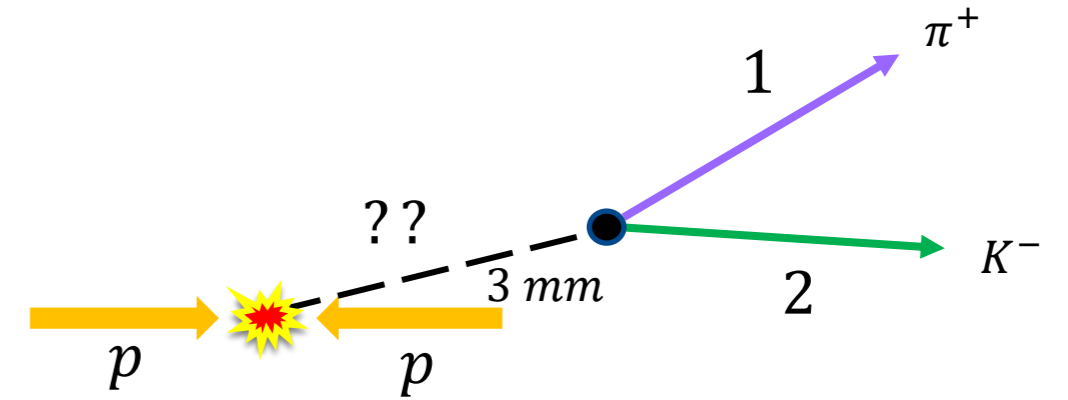
$$v_1$$

$$p_2 = m_2 v_2$$

$$v_2$$

Ricapitolando

1. Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):
 - a) viene ricostruita la **traiettoria** delle particelle cariche e il loro punto di intersezione
 - b) viene misurata la loro **quantità di moto**
2. Utilizzando i RICH detectors viene misurata **la velocità** delle particelle cariche
3. Dalla misura della quantità di moto e della velocità si misura la massa e quindi **si identificano le particelle**



$$\begin{cases} p_1 = m_1 v_1 \\ v_1 \end{cases} \longrightarrow m_1 = \frac{m_1 v_1}{v_1}$$

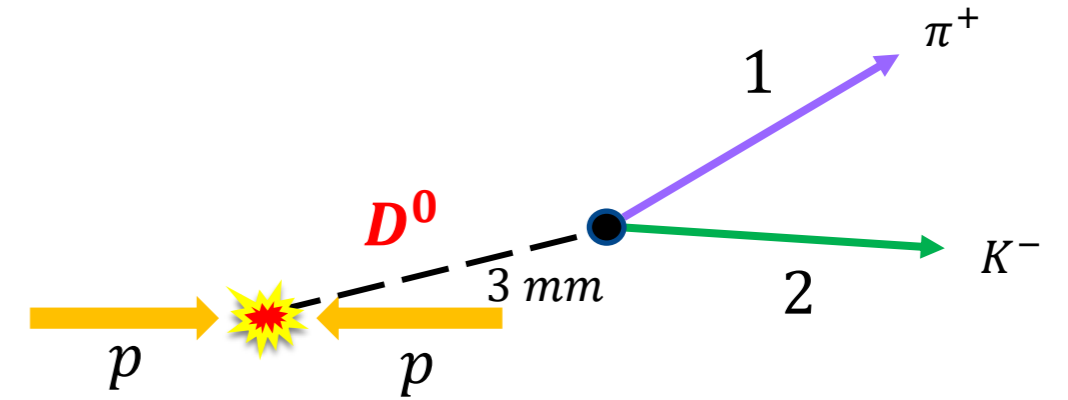
$$m_1 = 140 \text{ MeV} \implies \text{pione}$$

$$\begin{cases} p_2 = m_2 v_2 \\ v_2 \end{cases} \longrightarrow m_2 = \frac{m_2 v_2}{v_2}$$

$$m_2 = 500 \text{ MeV} \implies \text{kaone}$$

Ricapitolando

- Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):
 - viene ricostruita la **traiettoria** delle particelle cariche e il loro punto di intersezione
 - viene misurata la loro **quantità di moto**
- Utilizzando i RICH detectors viene misurata **la velocità** delle particelle cariche
- Dalla misura della quantità di moto e della velocità si misura la massa e quindi **si identificano le particelle**
- Dalla quantità di moto del pione e del kaone viene ricostruita la **massa** della particella da cui sono stati generati
 $m(\pi^- + K^-) = 1865 \text{ MeV} \implies \text{è un mesone } D^0!$



$$\begin{cases} p_1 = m_1 v_1 \\ v_1 \end{cases} \longrightarrow m_1 = \frac{m_1 v_1}{v_1}$$

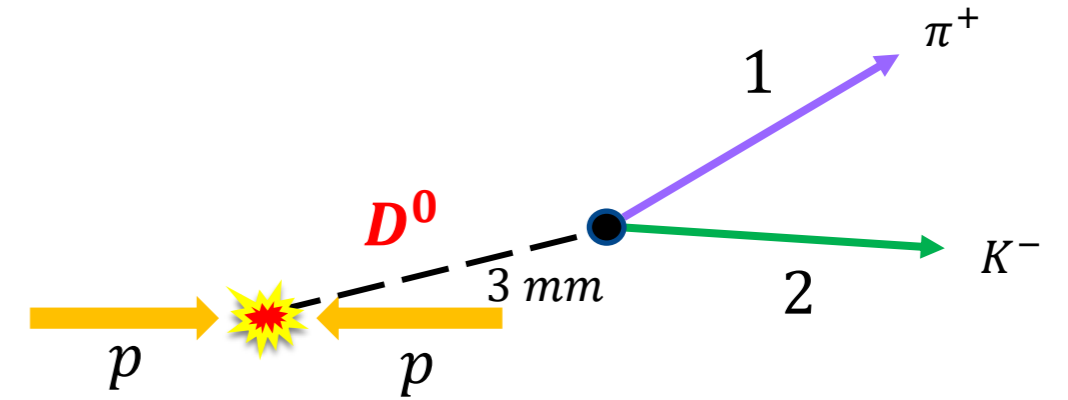
$$m_1 = 140 \text{ MeV} \implies \text{pione}$$

$$\begin{cases} p_2 = m_2 v_2 \\ v_2 \end{cases} \longrightarrow m_2 = \frac{m_2 v_2}{v_2}$$

$$m_2 = 500 \text{ MeV} \implies \text{kaone}$$

Ricapitolando

- Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):
 - viene ricostruita la **traiettoria** delle particelle cariche e il loro punto di intersezione
 - viene misurata la loro **quantità di moto**
- Utilizzando i RICH detectors viene misurata **la velocità** delle particelle cariche
- Dalla misura della quantità di moto e della velocità si misura la massa e quindi **si identificano le particelle**
- Dalla quantità di moto del pione e del kaone viene ricostruita la **massa** della particella da cui sono stati generati
 $m(\pi^- + K^-) = 1865 \text{ MeV} \implies \text{è un mesone } D^0!$
- Infine dalla distanza tra il vertice del D^0 e il vertice primario (3 mm in questo esempio) si ricava il **tempo di decadimento** del D^0



$$\begin{cases} p_1 = m_1 v_1 \\ v_1 \end{cases} \longrightarrow m_1 = \frac{m_1 v_1}{v_1}$$

$$m_1 = 140 \text{ MeV} \implies \text{pione}$$

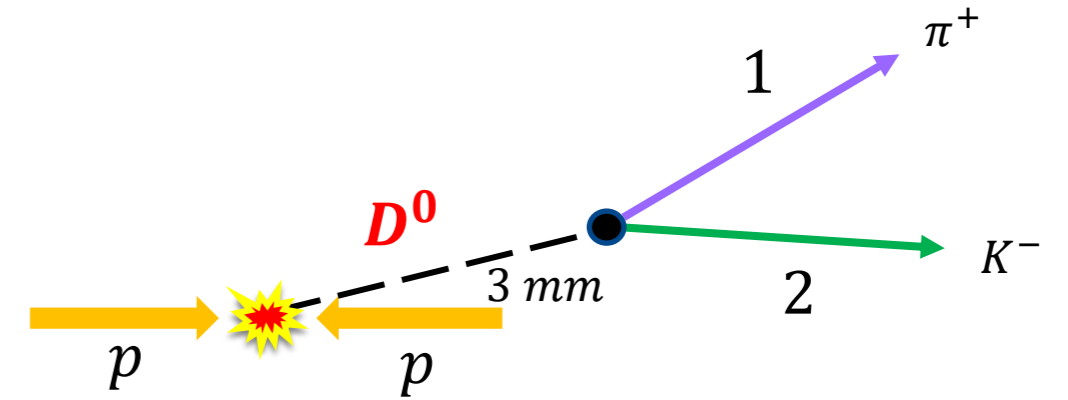
$$\begin{cases} p_2 = m_2 v_2 \\ v_2 \end{cases} \longrightarrow m_2 = \frac{m_2 v_2}{v_2}$$

$$m_2 = 500 \text{ MeV} \implies \text{kaone}$$

Analisi dei dati di LHCb

Dopo la pausa userete dati veri raccolti con il rivelatore dell'esperimento LHCb per:

1. Selezionare mesoni D^0
2. Misurarne la massa e la vita media



BACKUP

STRUTTURA DELLA RETINA

