Introduzione ai rivelatori di particelle

INFN Pisa

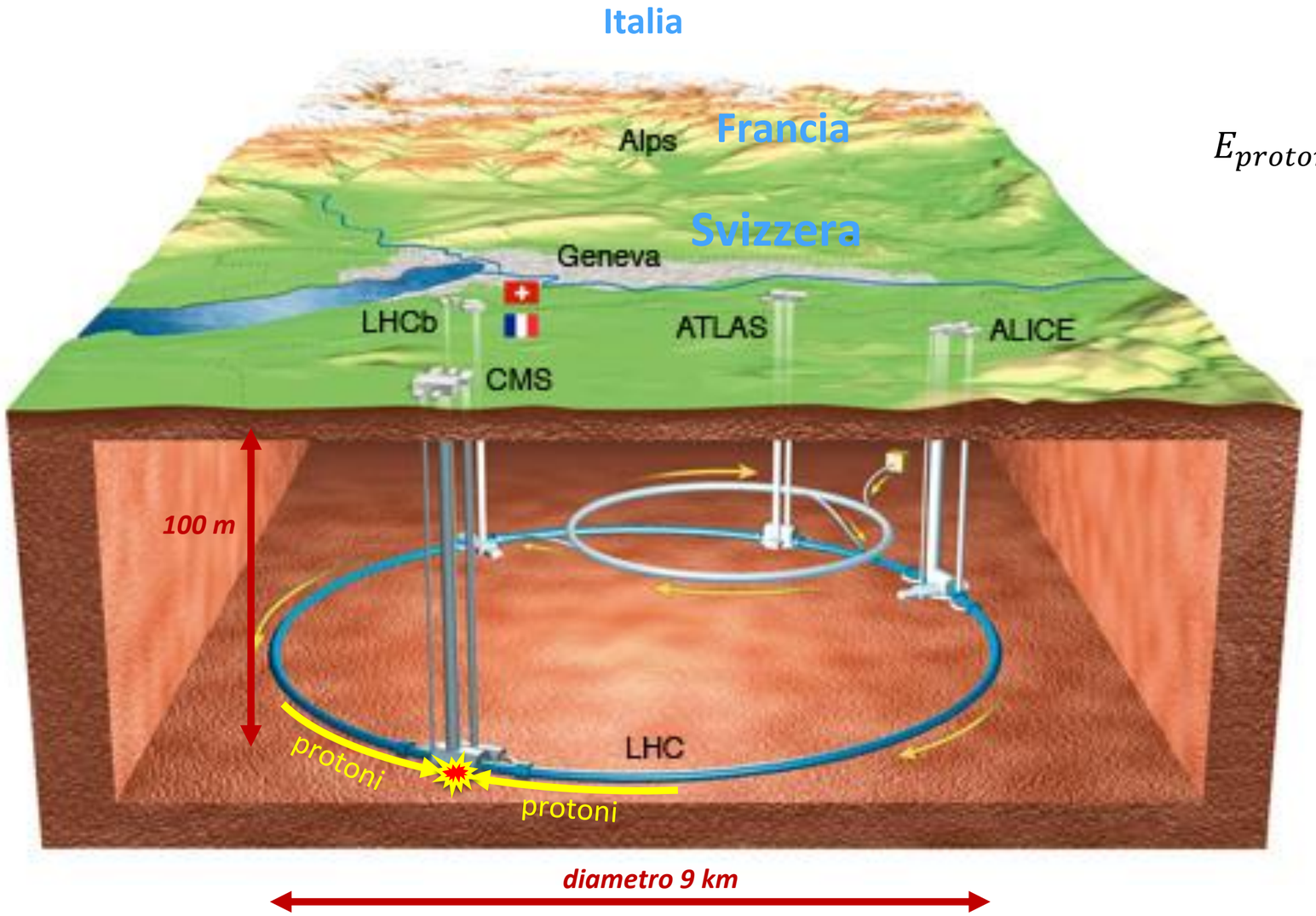
Matteo Rama

INFN Pisa

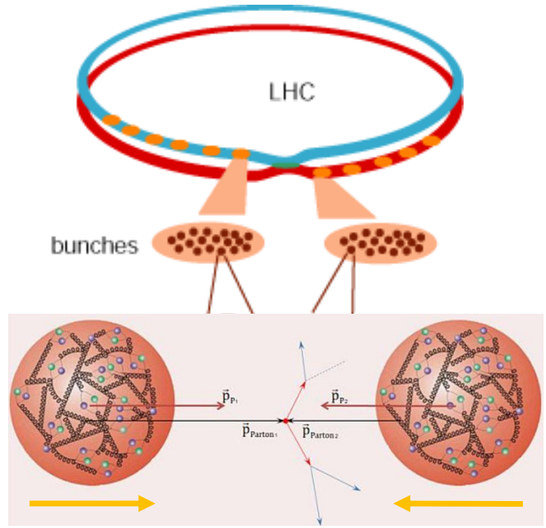
Masterclass di LHCb

12 Marzo 2025

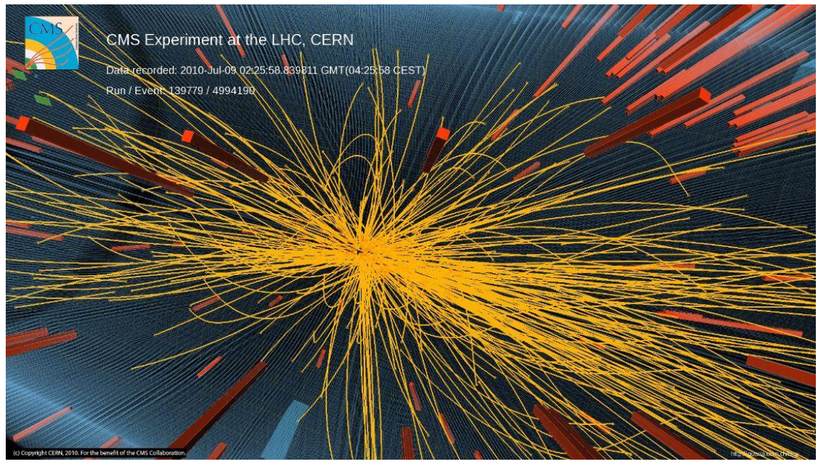
Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN



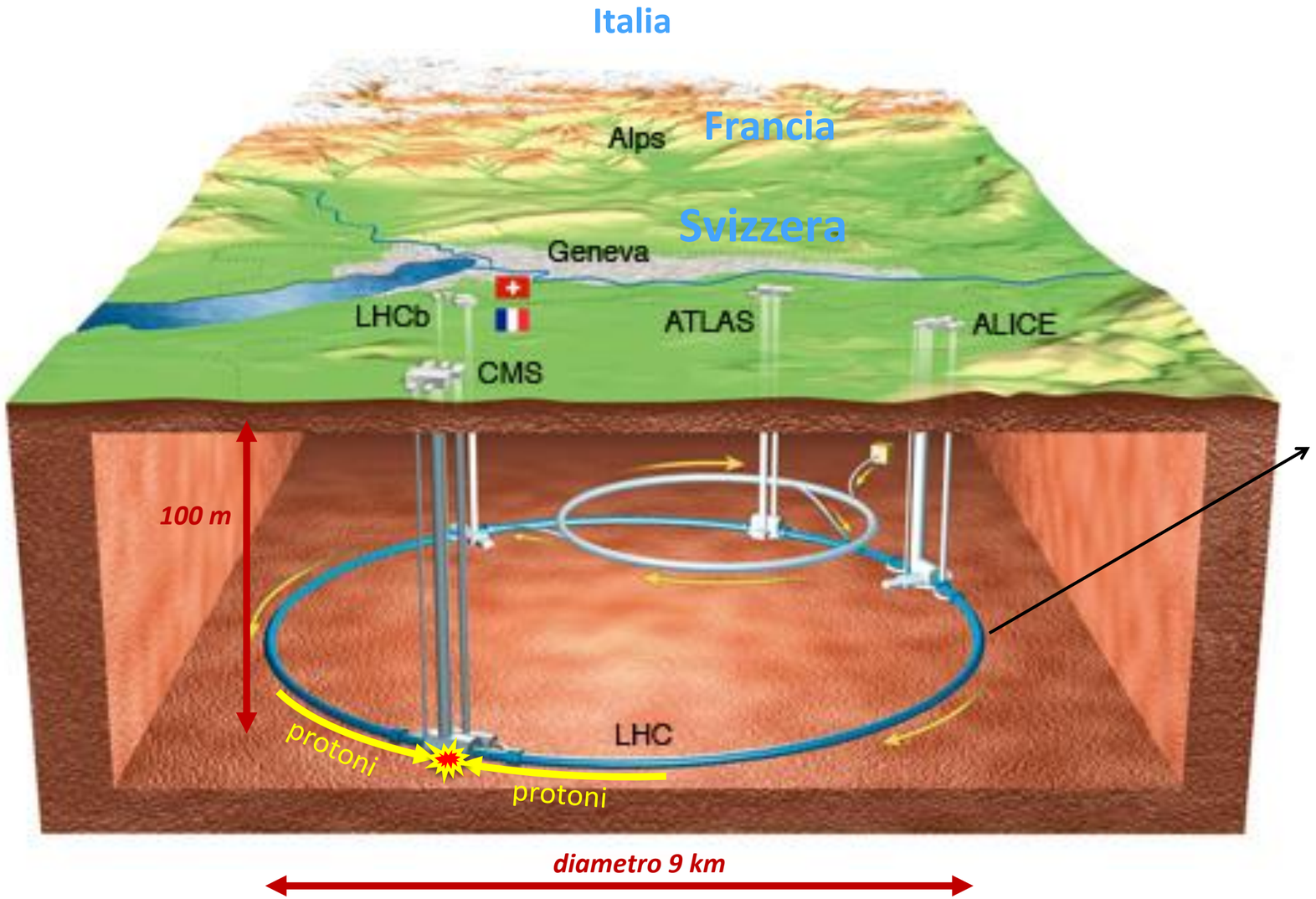
$$E_{proton} = 7\ TeV$$



I protoni si disintegrano creando un mare di nuove particelle

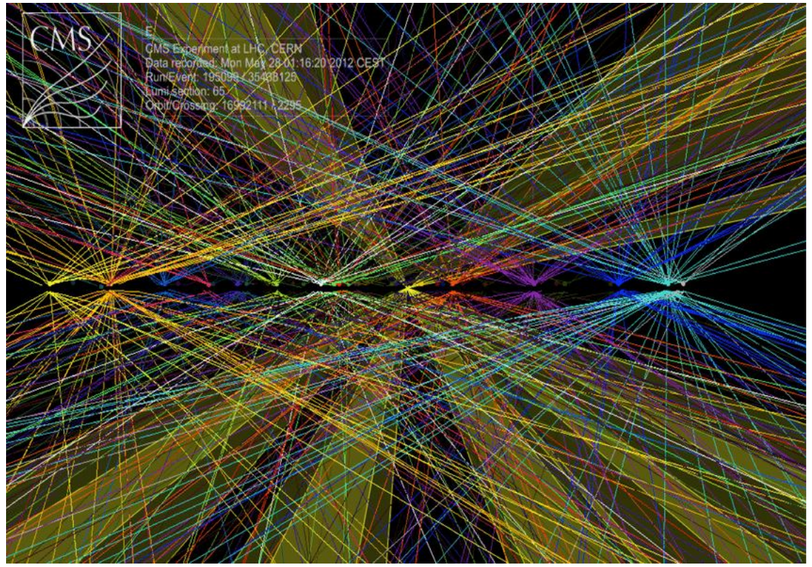


Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN



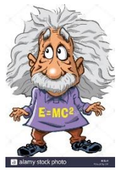
All’interno del tunnel

Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN

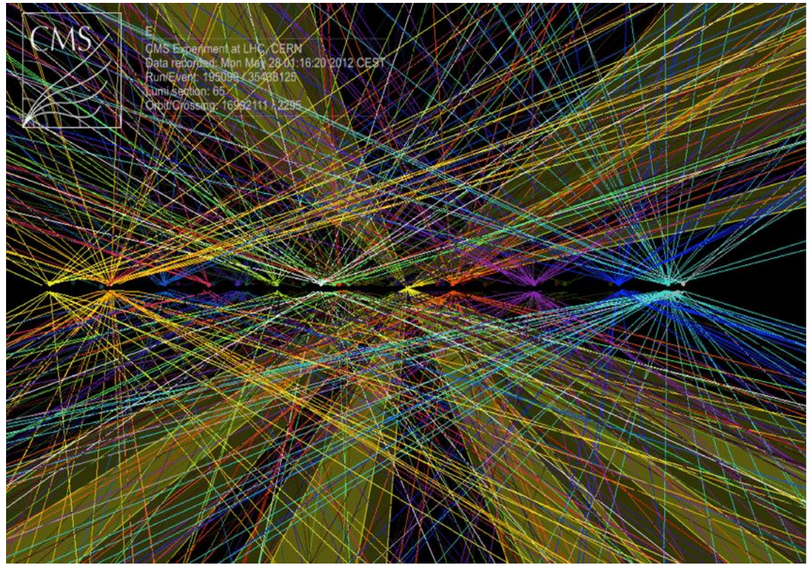


finestra temporale di 25 ns

- **Collisioni** tra pacchetti di protoni **ogni 25 ns**
  (1ns = 1 miliardesimo di secondo)
- Equazione di Einstein $\boldsymbol{E = mc^2}$: l'**energia** dei protoni è **convertita in massa,** creando particelle che un attimo prima non esistevano
- **Centinaia** di nuove particelle create in ogni collisione
- Molti tipi di particelle:
  - **Leptoni**: $e^{\pm}, \mu^{\pm}, \tau^{\pm}$, neutrini
  - **Adroni**: particelle composte da quarks e anti-quarks
  - **Bosoni vettori**: tra cui il più noto è il fotone



Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN

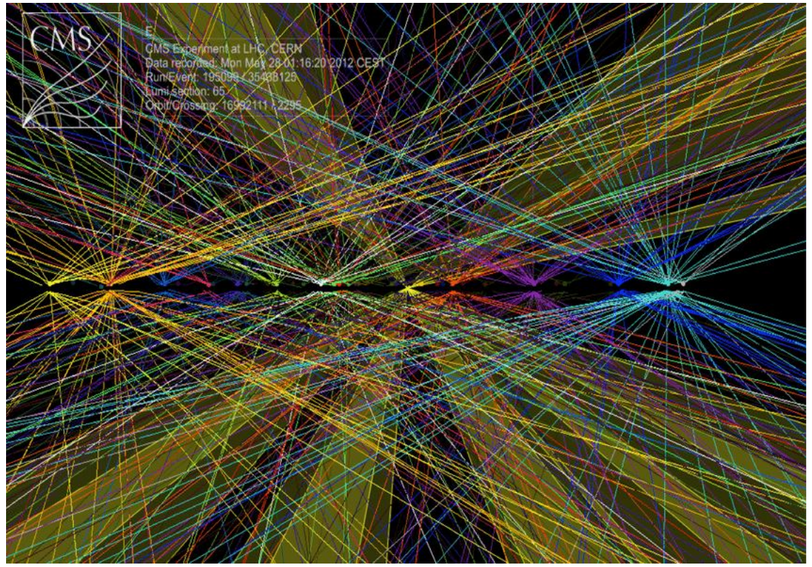


finestra temporale di 25 ns

- **Collisioni** tra pacchetti di protoni **ogni 25 ns**
  (1ns = 1 miliardesimo di secondo)
- Equazione di Einstein $\boldsymbol{E = mc^2}$: l'**energia** dei protoni è **convertita in massa,** creando particelle che un attimo prima non esistevano
- **Centinaia** di nuove particelle create in ogni collisione
- Molti tipi di particelle:
  - **Leptoni**: $e^{\pm}, \mu^{\pm}, \tau^{\pm}$, neutrini
  - **Adroni**: particelle composte da quarks e anti-quarks
  - **Bosoni vettori**: tra cui il più noto è il fotone

- In ogni collisione **vengono cercate le particelle considerate interessanti** (tipicamente da 2 a 5)
- Occorre quindi **"misurarle" tutte**

Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN



finestra temporale di 25 ns

- **Collisioni** tra pacchetti di protoni **ogni 25 ns**
  (1ns = 1 miliardesimo di secondo)
- Equazione di Einstein $\boldsymbol{E = mc^2}$: l'**energia** dei protoni è **convertita in massa,** creando particelle che un attimo prima non esistevano
- **Centinaia** di nuove particelle create in ogni collisione
- Molti tipi di particelle:
  - **Leptoni**: $e^{\pm}, \mu^{\pm}, \tau^{\pm}$, neutrini
  - **Adroni**: particelle composte da quarks e anti-quarks
  - **Bosoni vettori**: tra cui il più noto è il fotone

- In ogni collisione **vengono cercate le particelle considerate interessanti** (tipicamente da 2 a 5)
- Occorre quindi **"misurarle" tutte**

→ **rivelatore di particelle**

Cosa è un rivelatore di particelle

Un **rivelatore di particelle** in un esperimento all'**LHC** del **CERN** è un dispositivo complesso progettato per tracciare e identificare le particelle prodotte nelle collisioni tra protoni

Principio di funzionamento: la particella, attraversando il rivelatore, lascia una «traccia» del suo passaggio

Un rivelatore è progettato in modo da:

1. Riconoscere che tipo di particella ha prodotto una certa traccia
2. Ricostruire la traiettoria e misurare la quantità di moto di ogni particella (se possibile)
3. Tutto questo **40 milioni di volte al secondo**

Cosa è un rivelatore di particelle

Un **rivelatore di particelle** in un esperimento all'**LHC** del **CERN** è un dispositivo complesso progettato per tracciare e identificare le particelle prodotte nelle collisioni tra protoni

Principio di funzionamento: la particella, attraversando il rivelatore, lascia una «traccia» del suo passaggio

Un rivelatore è progettato in modo da:

1. Riconoscere che tipo di particella ha prodotto una certa traccia
2. Ricostruire la traiettoria e misurare la quantità di moto di ogni particella (se possibile)
3. Tutto questo **40 milioni di volte al secondo**

Le particelle "visibili" sono:

- γ: fotoni
- $e^{\pm}$: elettroni e positroni
- $\mu^{\pm}$: muoni
- $\pi^{\pm}$: pioni
- $K^{\pm}$: kaoni
- $p/\bar{p}$: protoni
- $n/\bar{n}$: neutroni

Cosa è un rivelatore di particelle

Un **rivelatore di particelle** in un esperimento all'**LHC** del **CERN** è un dispositivo complesso progettato per tracciare e identificare le particelle prodotte nelle collisioni tra protoni

Principio di funzionamento: la particella, attraversando il rivelatore, lascia una «traccia» del suo passaggio

Un rivelatore è progettato in modo da:

1. Riconoscere che tipo di particella ha prodotto una certa traccia
2. Ricostruire la traiettoria e misurare la quantità di moto di ogni particella (se possibile)
3. Tutto questo **40 milioni di volte al secondo**

Ognuno di noi possiede due rivelatori di particelle elementari

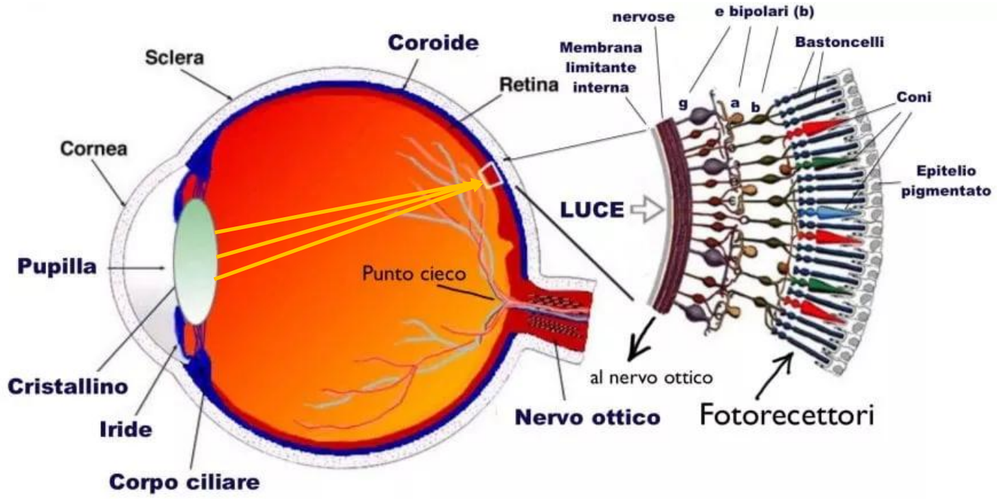
Le particelle "visibili" sono:

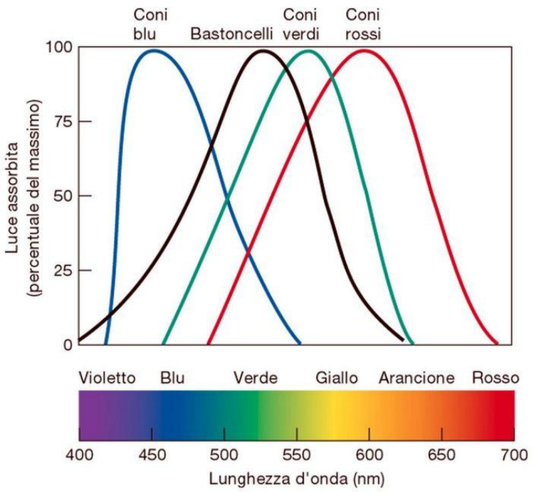
- γ: fotoni
- $e^{\pm}$: elettroni e positroni
- $\mu^{\pm}$: muoni
- $\pi^{\pm}$: pioni
- $K^{\pm}$: kaoni
- $p/\bar{p}$: protoni
- $n/\bar{n}$: neutroni

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

fotoni (luce)





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

h= costante di Planck
c= velocità della luce

rosso: 1.8 eV
violetto: 3.1 eV

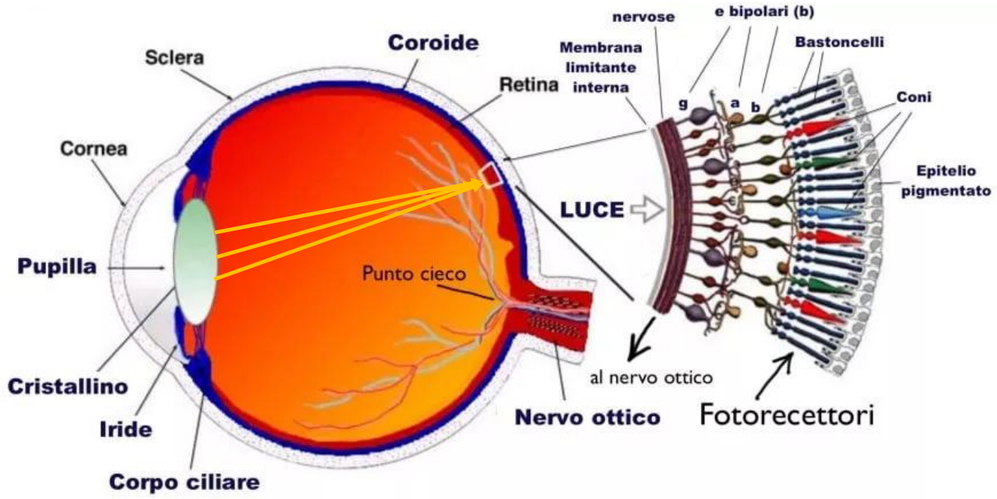
NB: 1 eV = 1.6 10^{-19} J

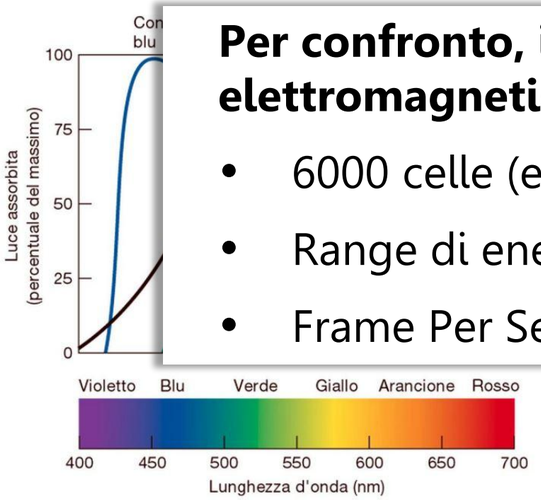
Occhio umano

- 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

↓

fotoni (luce)





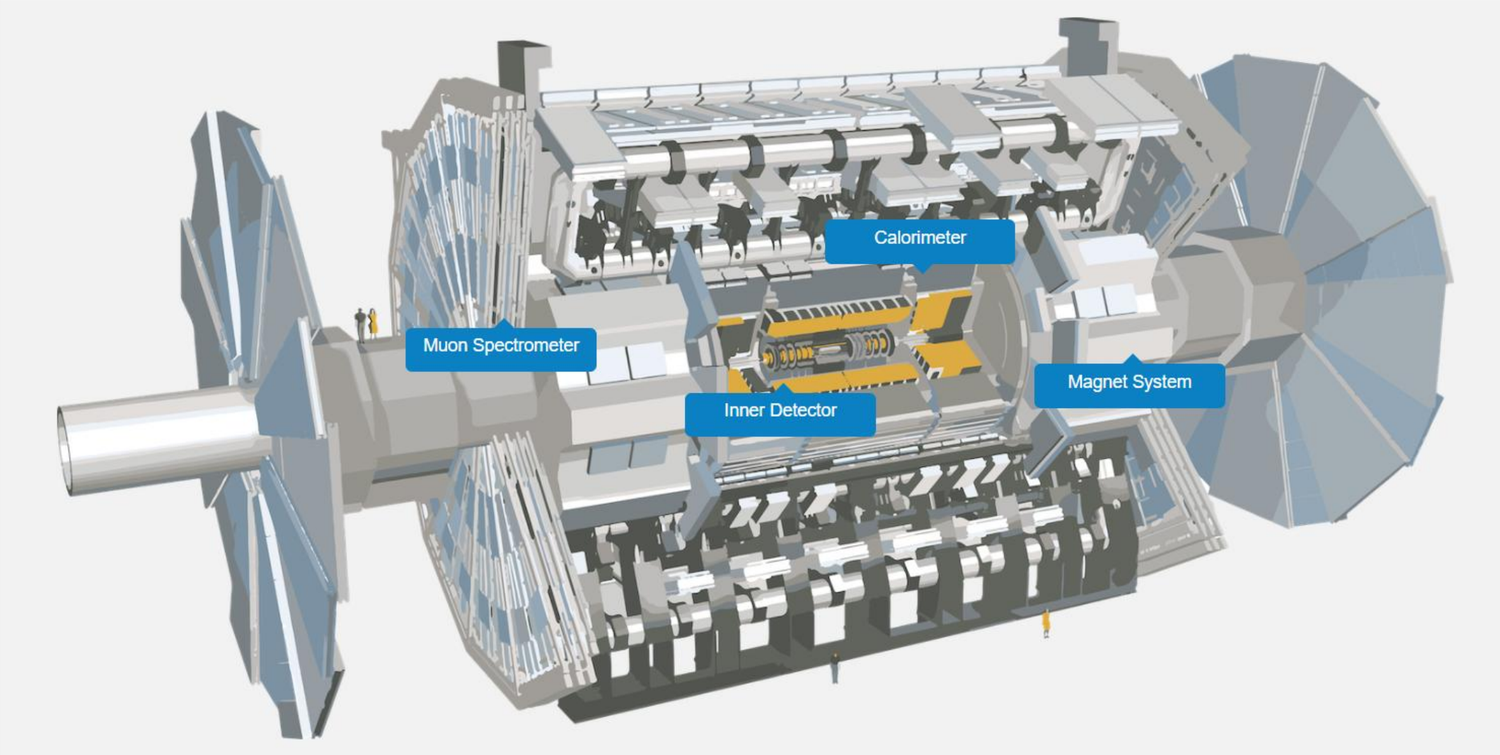
Per confronto, il calorimetro elettromagnetico del rivelatore LHCb:

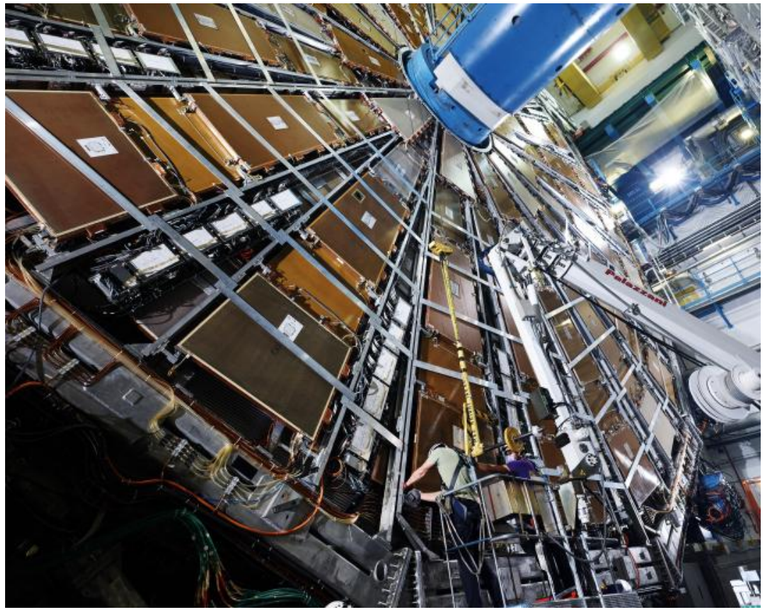
- 6000 celle (equivalente dei coni)
- Range di energia: [10^6,10^{11}] eV
- Frame Per Second: 40 milioni

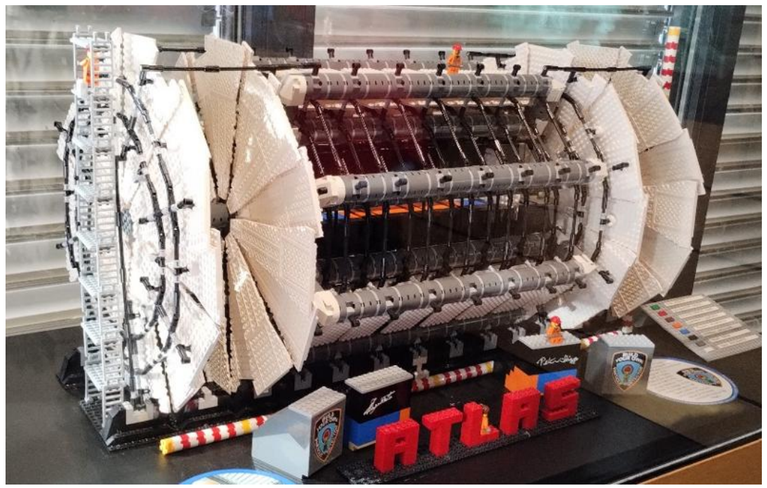
violetto: 3.1 eV

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

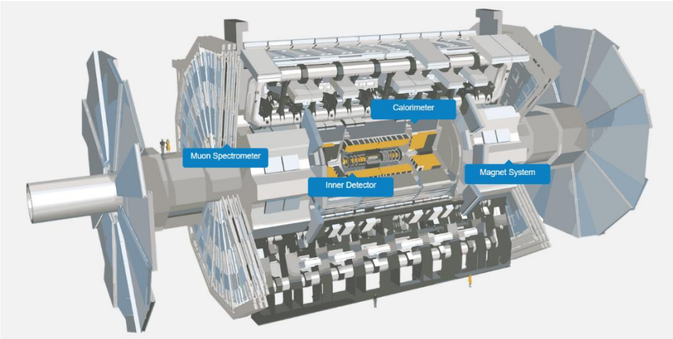
Esempio: rivelatore ATLAS

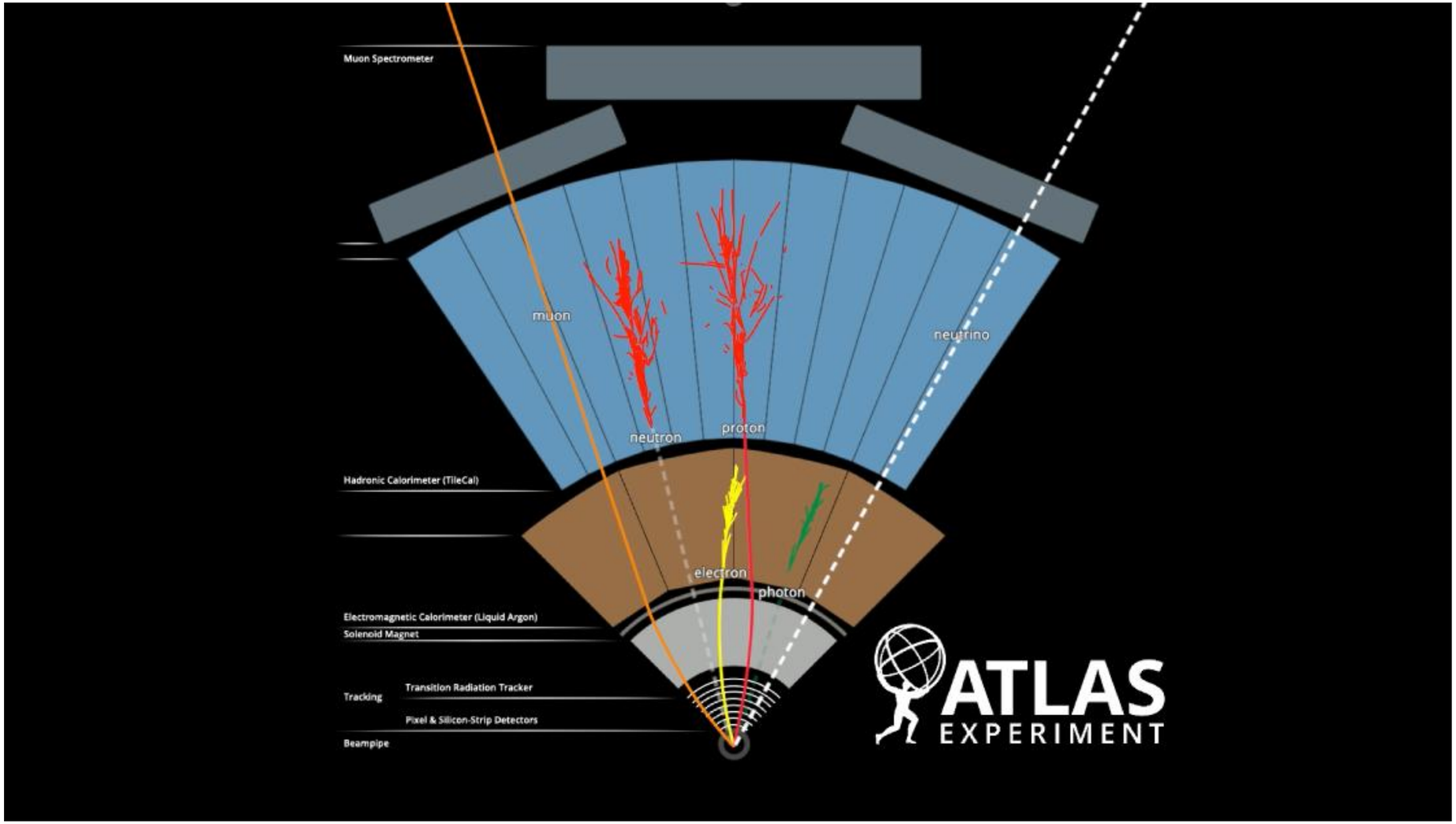




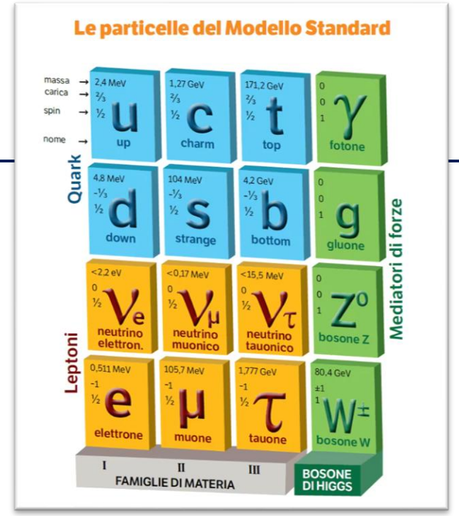


Esempio: rivelatore ATLAS



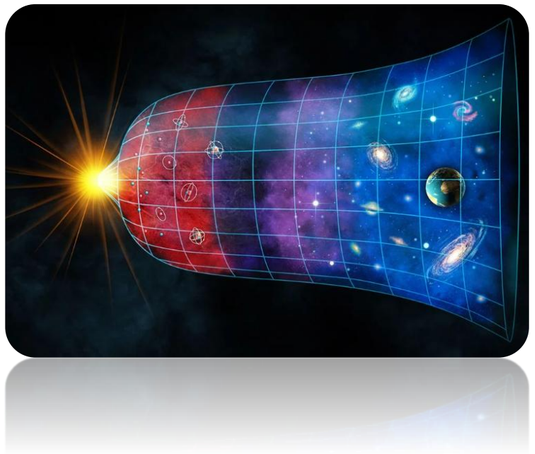


L’esperimento LHCb



Il **Modello Standard** delle particelle elementari descrive **3** delle 4 **forze fondamentali** attualmente conosciute

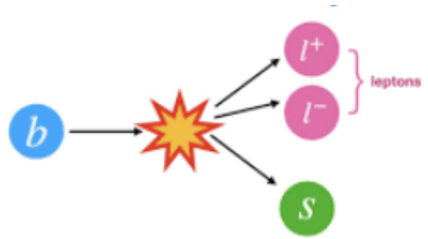
Ha collezionato **successi straordinari**. Esempio: esistenza del bosone di Higgs, scoperto nel 2012 al CERN
Tuttavia presenta alcune limitazioni note. Per esempio: **non spiega l’asimmetria materia –antimateria osservata nell’Universo**



L’esperimento LHCb e’ uno dei principali esperimenti del CERN.

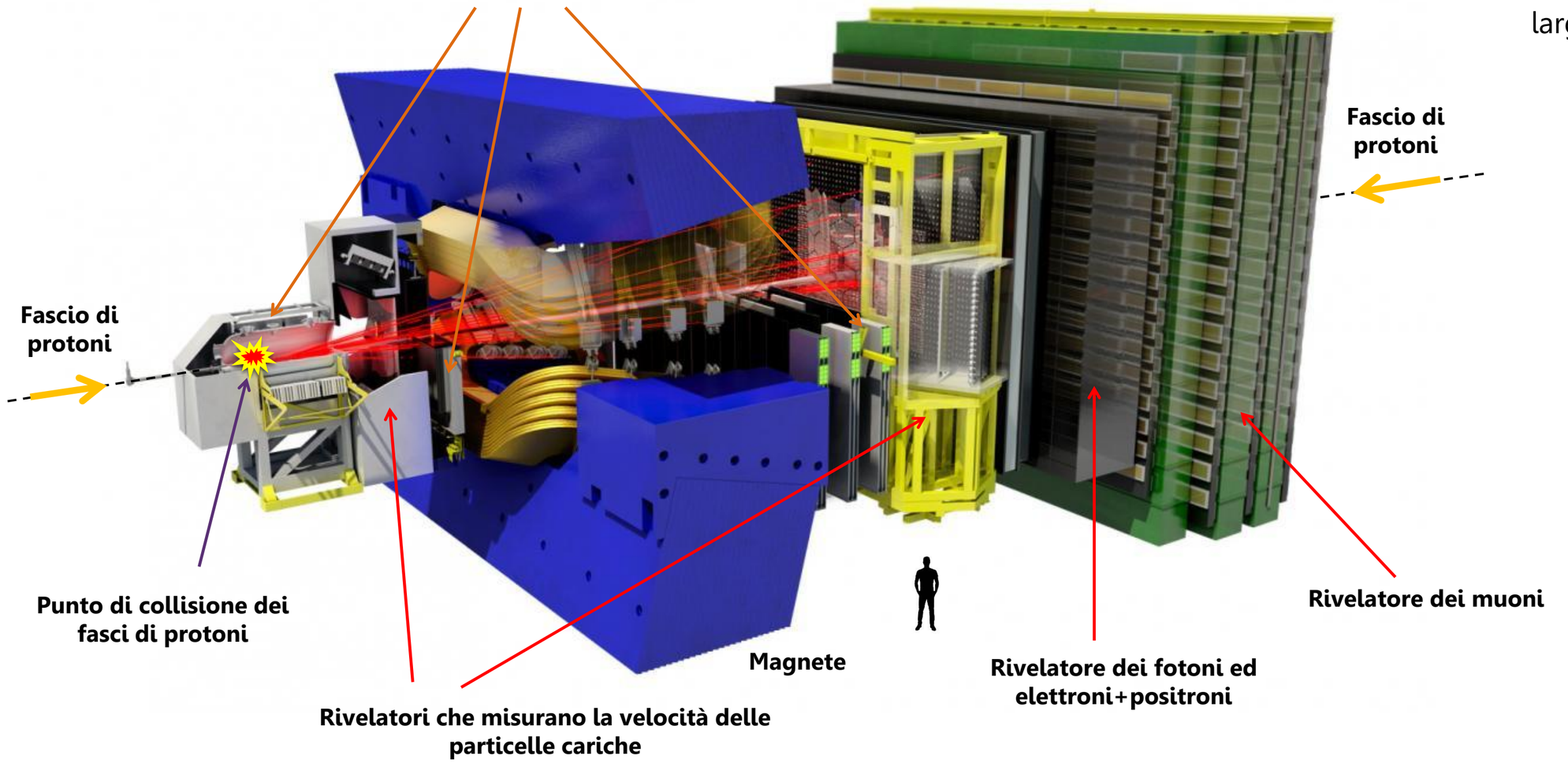
Obiettivi principali:

- **Studiare l’asimmetria tra materia e antimateria** per comprendere l’origine della prevalenza della materia nell’Universo
- Analizzare il comportamento e i decadimenti dei **quarks beauty e charm** per testare il Modello Standard e **cercare segnali di Nuova Fisica**

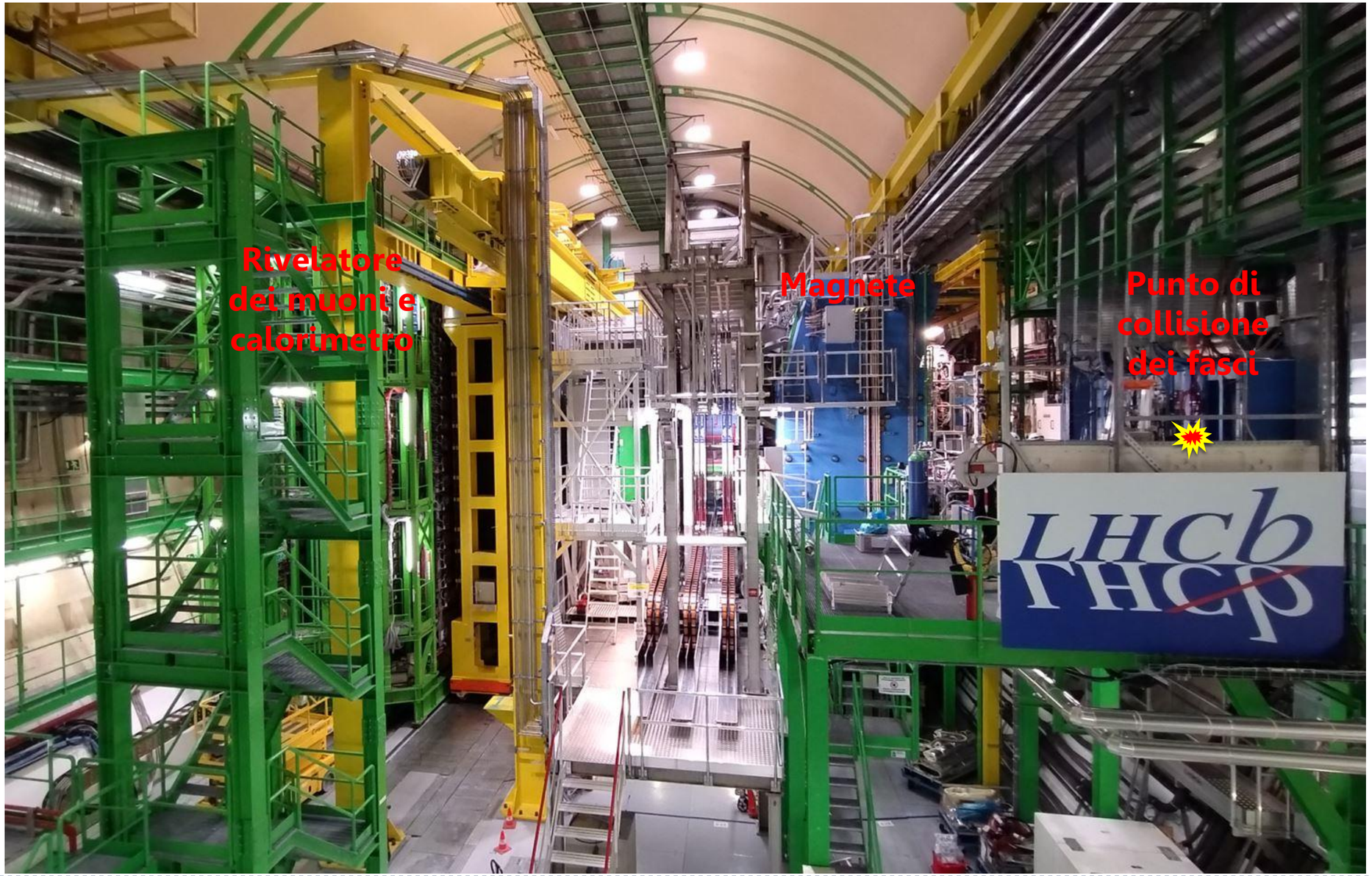


Il rivelatore di particelle dell'esperimento LHCb

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



Il rivelatore di particelle dell'esperimento LHCb



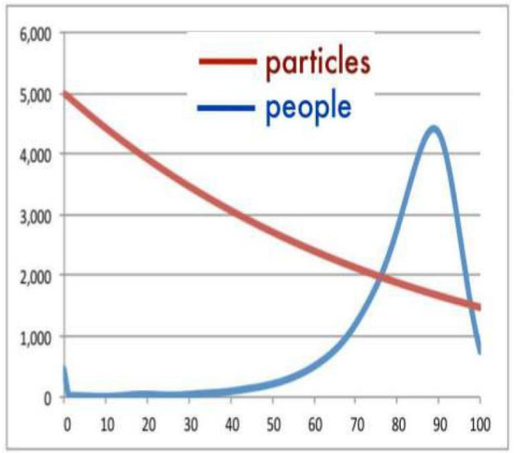
Il mesone D^0

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: circa 2 volte la massa del protone (1864 MeV/c^2)
Vita media: 0.4 millesimi di miliardesimo di secondo (0.4 ps)

1 MeV/c^2 = 1.7×10^{-30} kg



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

$\tau_{D^0} = 0.0000000000004\ s$

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

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

- $\boldsymbol{t}$ = tempo trascorso tra la creazione e la disintegrazione della particella
- $\boldsymbol{\tau}$ = vita media della particella

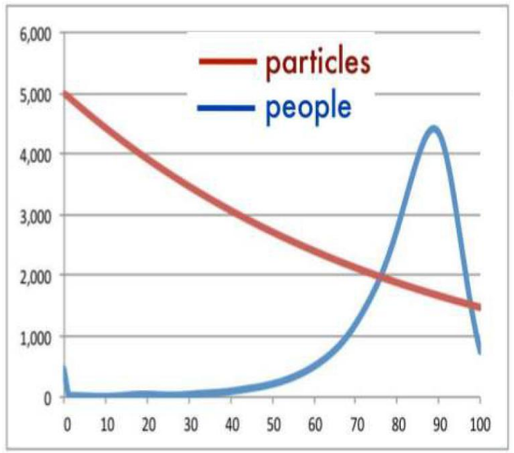
Il mesone D^0

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: circa 2 volte la massa del protone (1864 MeV/c^2)
Vita media: 0.4 millesimi di miliardesimo di secondo (0.4 ps)

1 MeV/c^2 = 1.7×10^{-30} kg



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

$\tau_{D^0} = 0.0000000000004\ s$

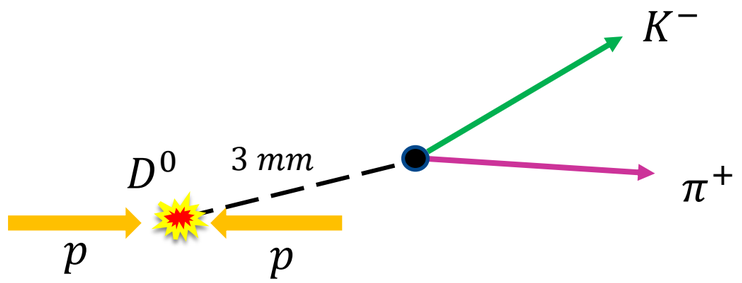
Se prendiamo un insieme di mesoni D^0 e guardiamo dopo quanto tempo decadono, osserviamo un **andamento esponenziale**:

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

- $\boldsymbol{t}$ = tempo trascorso tra la creazione e la disintegrazione della particella
- $\boldsymbol{\tau}$ = vita media della particella

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

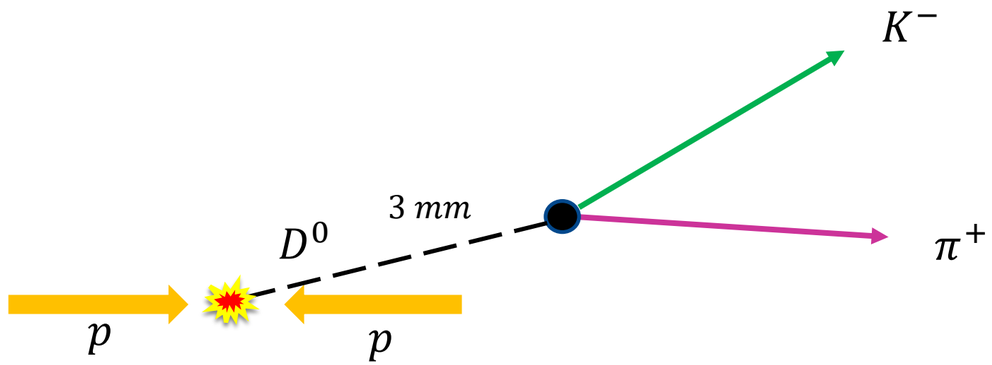
$$D^0 \rightarrow K^-\pi^+$$



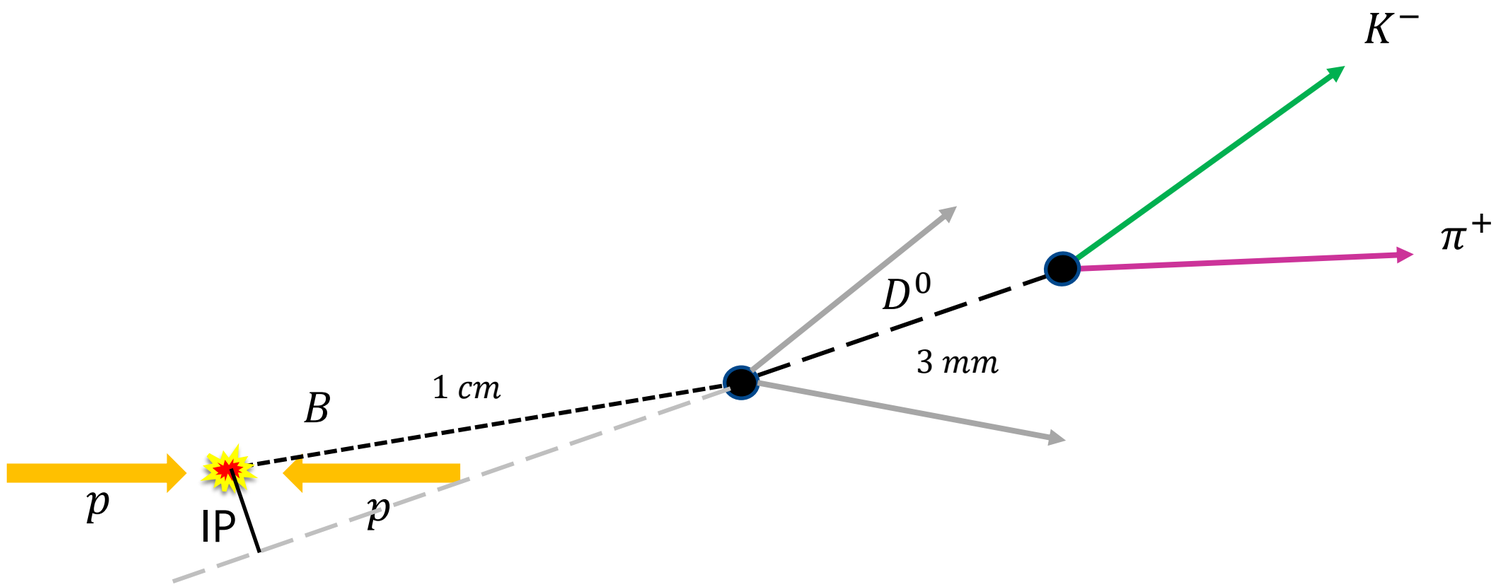
Il mesone D^0 è rivelato ricostruendo le tracce lasciate nel rivelatore dai mesoni K^- e π^+

La sua massa si ottiene imponendo la conservazione di energia e quantità di moto

Meccanismi di produzione del mesone D^0



Produzione diretta

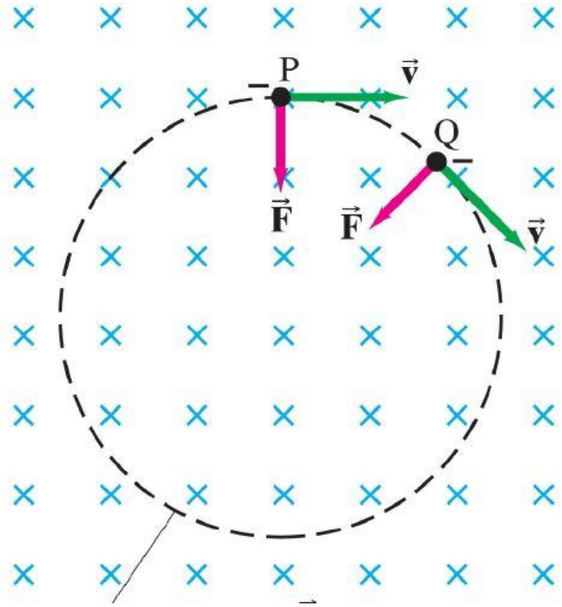


Produzione secondaria dal decadimento di un mesone B

IP=parametro d'impatto

Forza di Lorentz

Il campo magnetico è entrante nel foglio



Traiettoria dell'elettrone

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

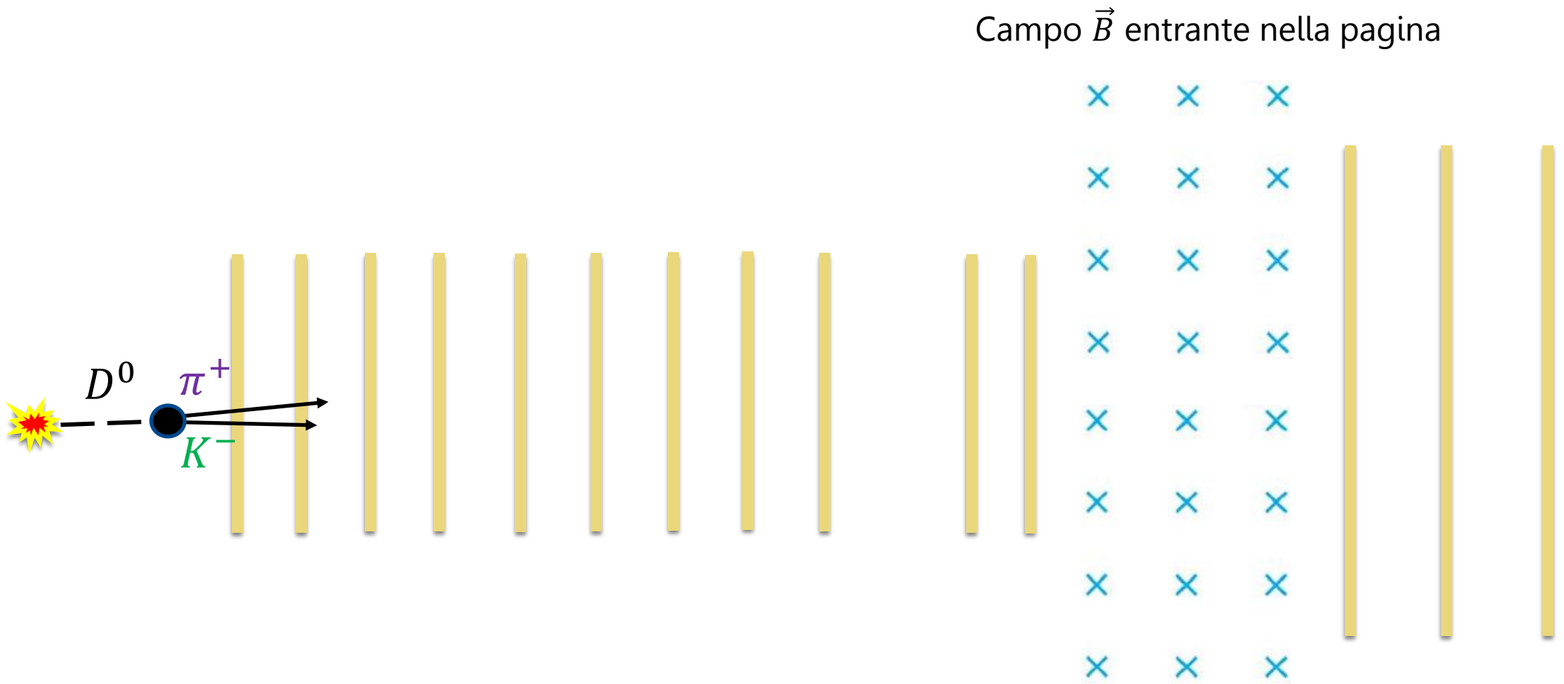
q= carica della particella
$\vec{v}$ = velocità della particella
$\vec{B}$ = vettore di induzione magnetica

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

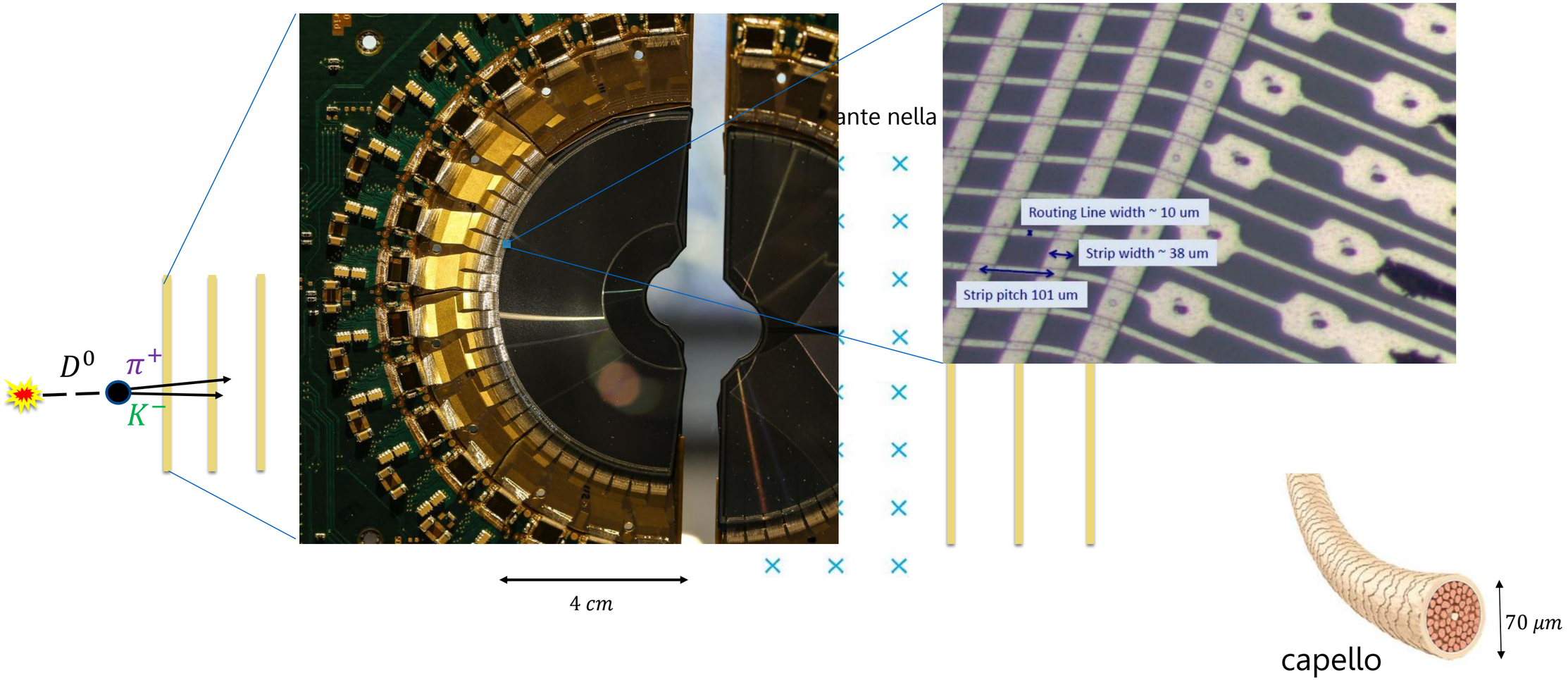
$$m\frac{v^2}{R} = q\,v\,B \quad \longrightarrow \quad mv = qBR$$

Conoscendo B e misurando il raggio R della traiettoria, **si misura la quantità di moto della particella** (detta anche **impulso**)

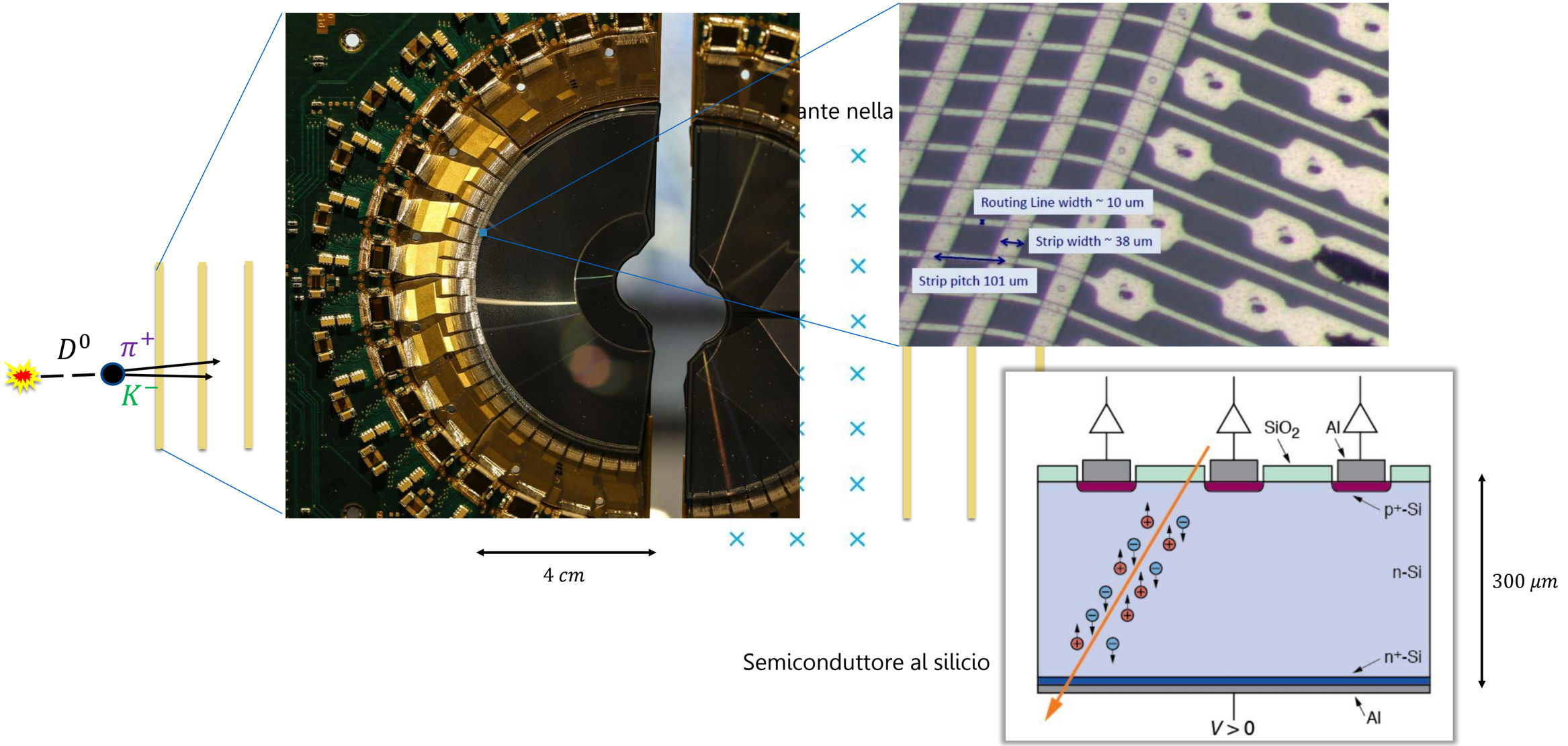
Tracciatore delle particelle cariche



Tracciatore delle particelle cariche



Tracciatore delle particelle cariche

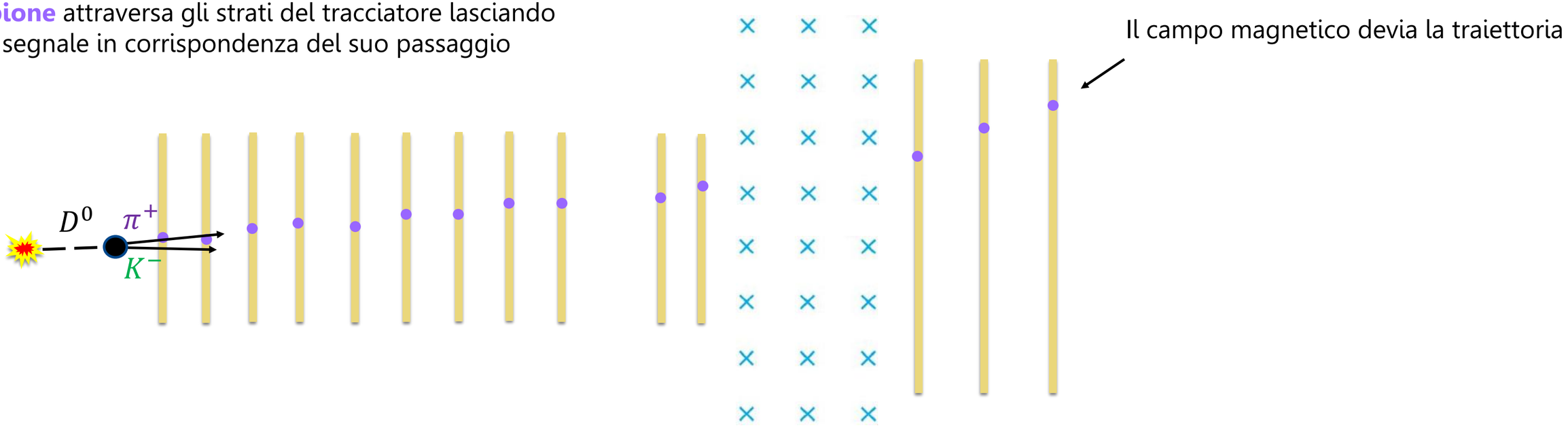


Tracciatore delle particelle cariche

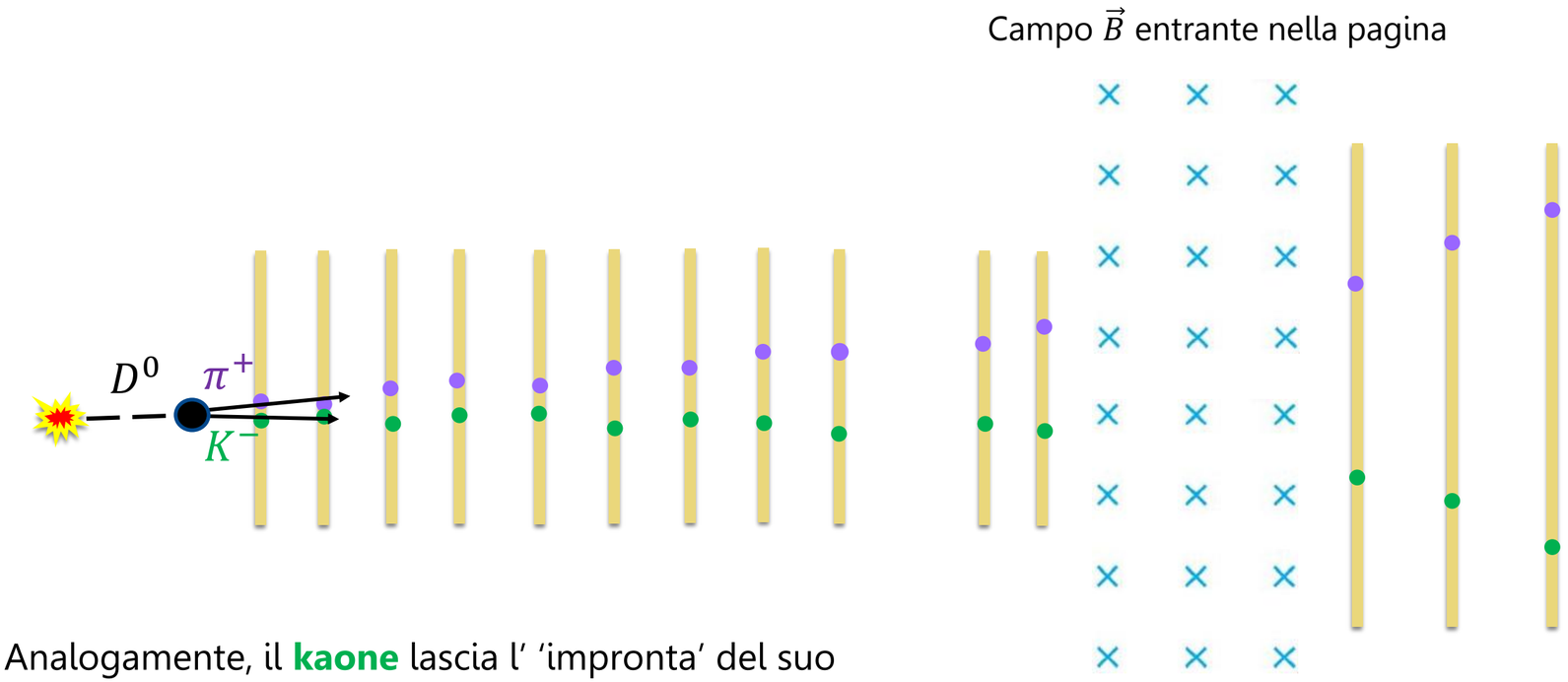
Il **pione** attraversa gli strati del tracciatore lasciando un segnale in corrispondenza del suo passaggio

Campo $\vec{B}$ entrante nella pagina

Il campo magnetico devia la traiettoria



Tracciatore delle particelle cariche

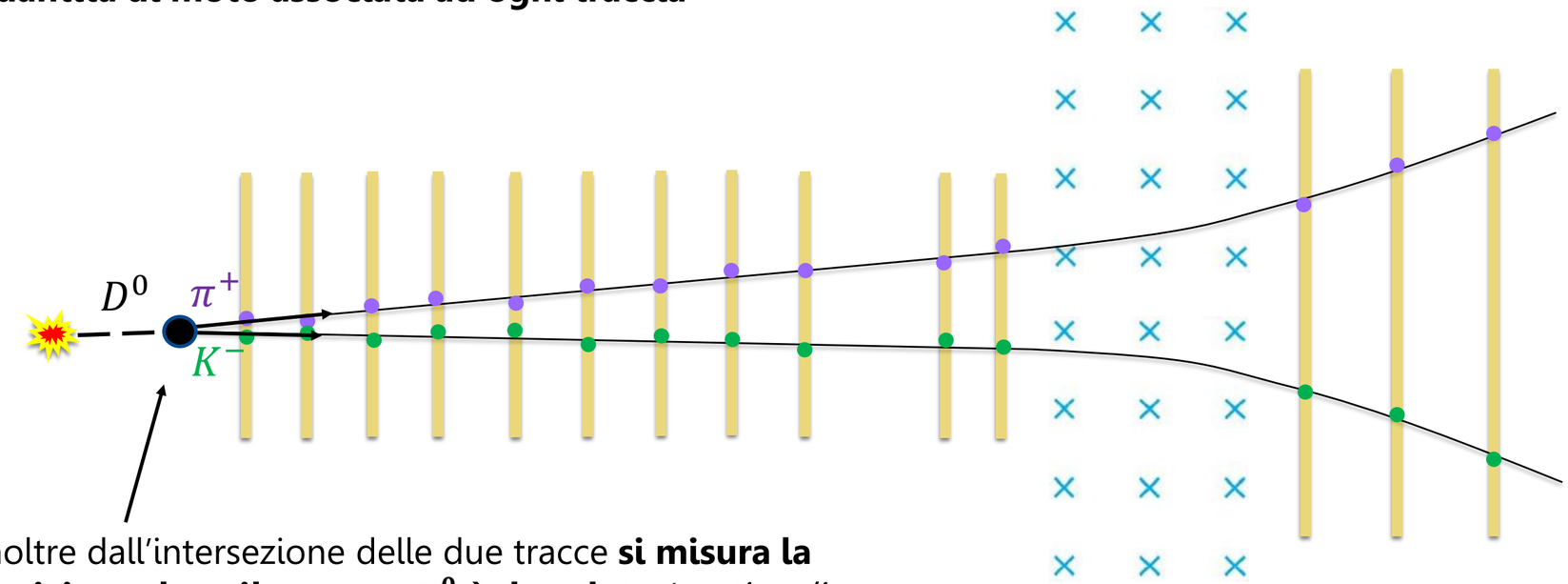


Analogamente, il **kaone** lascia l' 'impronta' del suo passaggio nel tracciatore.

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**

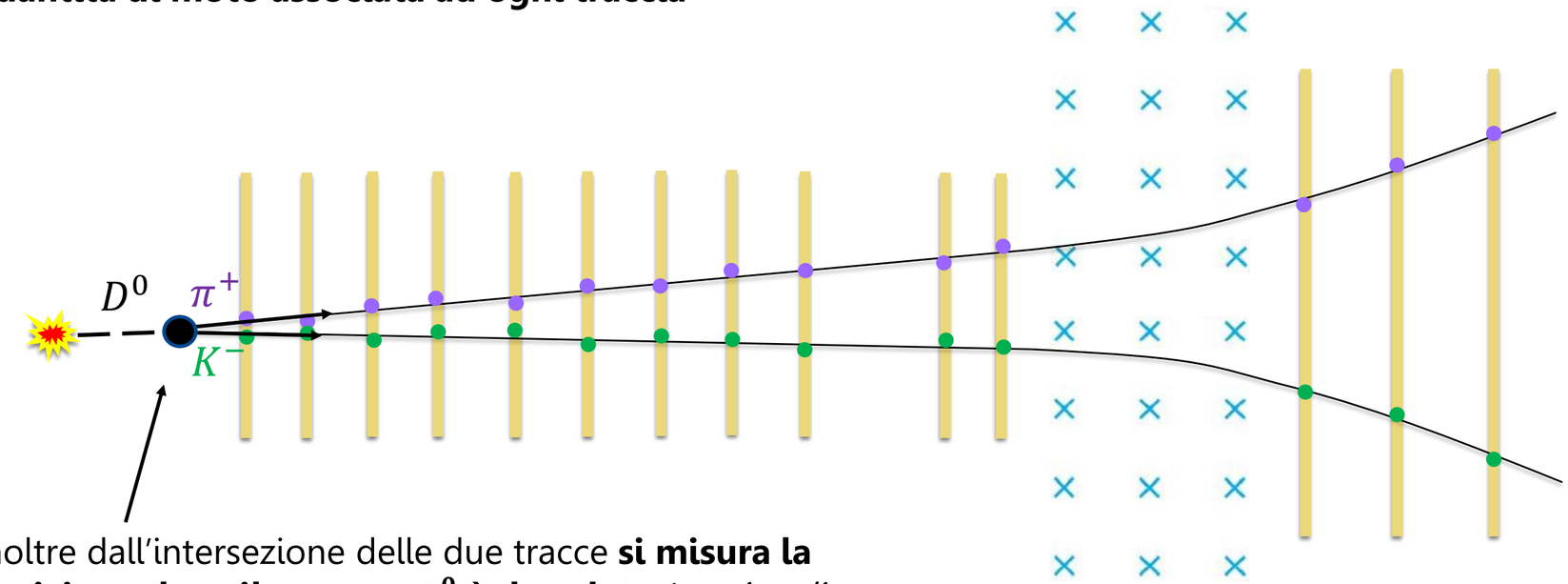


Inoltre dall'intersezione delle due tracce **si misura la posizione dove il mesone D^0 è decaduto** (*vertice di decadimento*)

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**



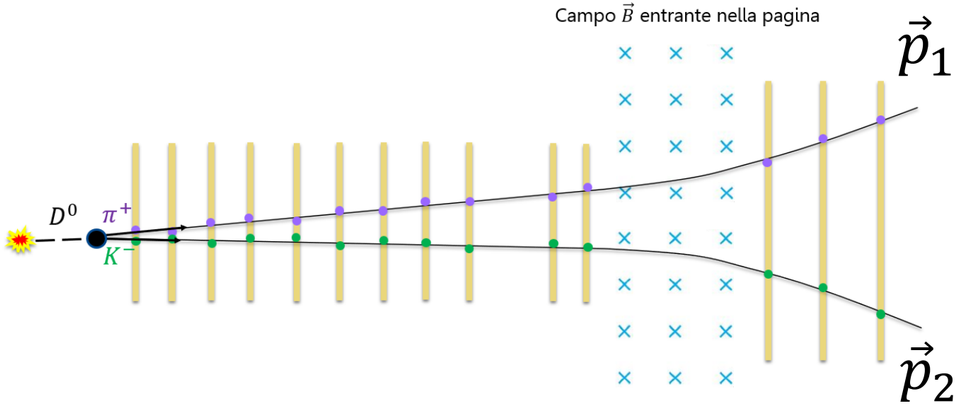
Inoltre dall'intersezione delle due tracce **si misura la posizione dove il mesone D^0 è decaduto** (*vertice di decadimento*)

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**

Identificazione del tipo di particella

Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche

Ma **come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro?**

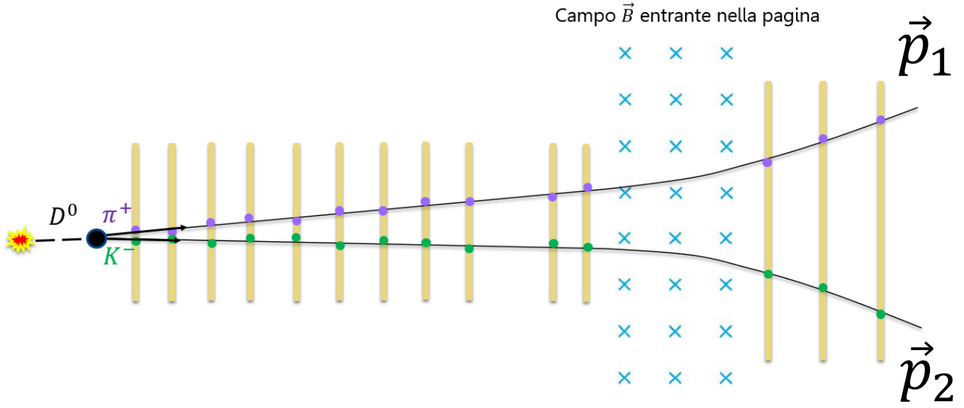


Identificazione del tipo di particella

Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche

Ma **come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro?**

Misurando la massa: ma come?



Identificazione del tipo di particella

Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche

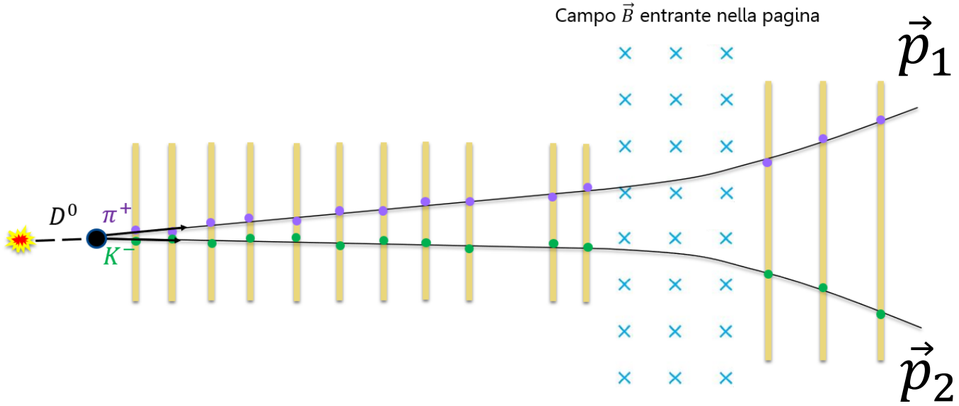
Ma **come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro?**

Misurando la massa: ma come?

Misurando, oltre alla quantità di moto, anche la velocità:

$$\vec{p}_1 = \gamma_1 m_1 \vec{v}_1 \qquad m_1 = \frac{p_1}{\gamma_1 v_1}$$

$$\vec{p}_2 = \gamma_2 m_2 \vec{v}_2 \qquad m_2 = \frac{p_2}{\gamma_2 v_2}$$



$$\gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} \qquad \gamma_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}}$$

correzioni relativistiche

$$\boldsymbol{v} = ??$$

Bisogna **inserire** un **rivelatore capace di misurare la velocità delle particelle cariche**

Emissione di luce Cherenkov

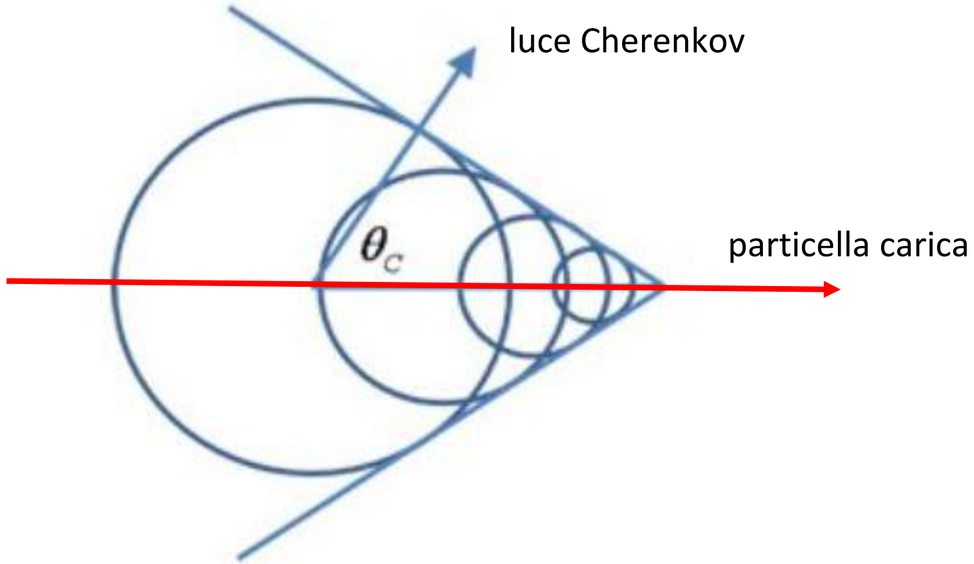
Quando una **particella carica** attraversa un certo mezzo (per esempio un gas, o acqua) con una **velocità maggiore della velocità della luce in quel mezzo**, emette radiazione elettromagnetica.

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

c = velocità della luce nel vuoto

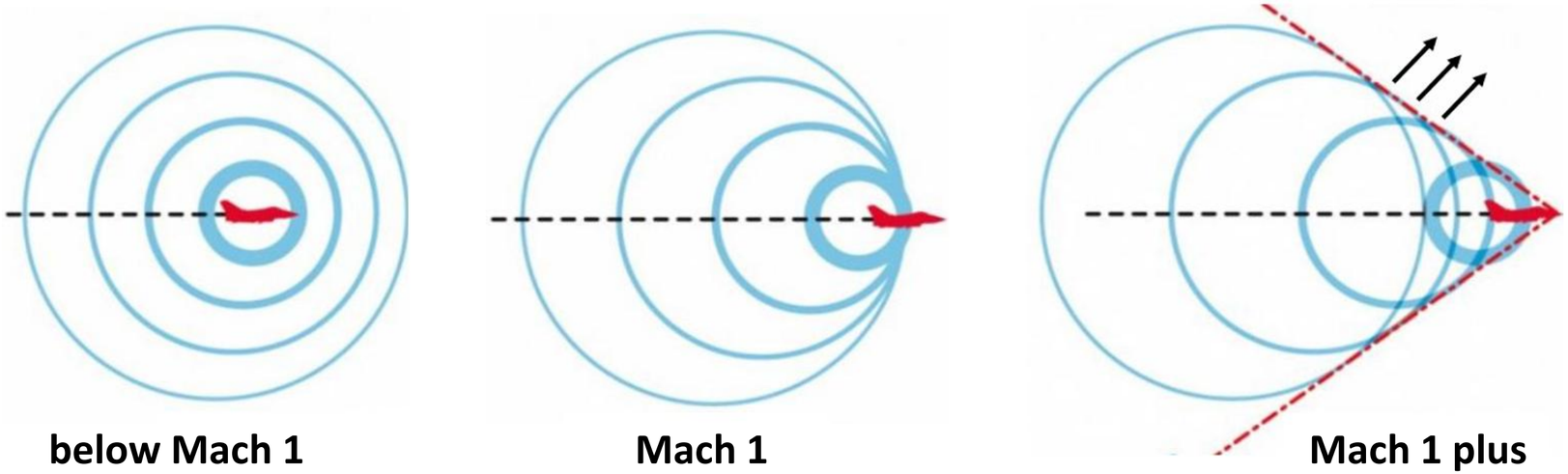
n= indice di rifrazione del mezzo attraversato

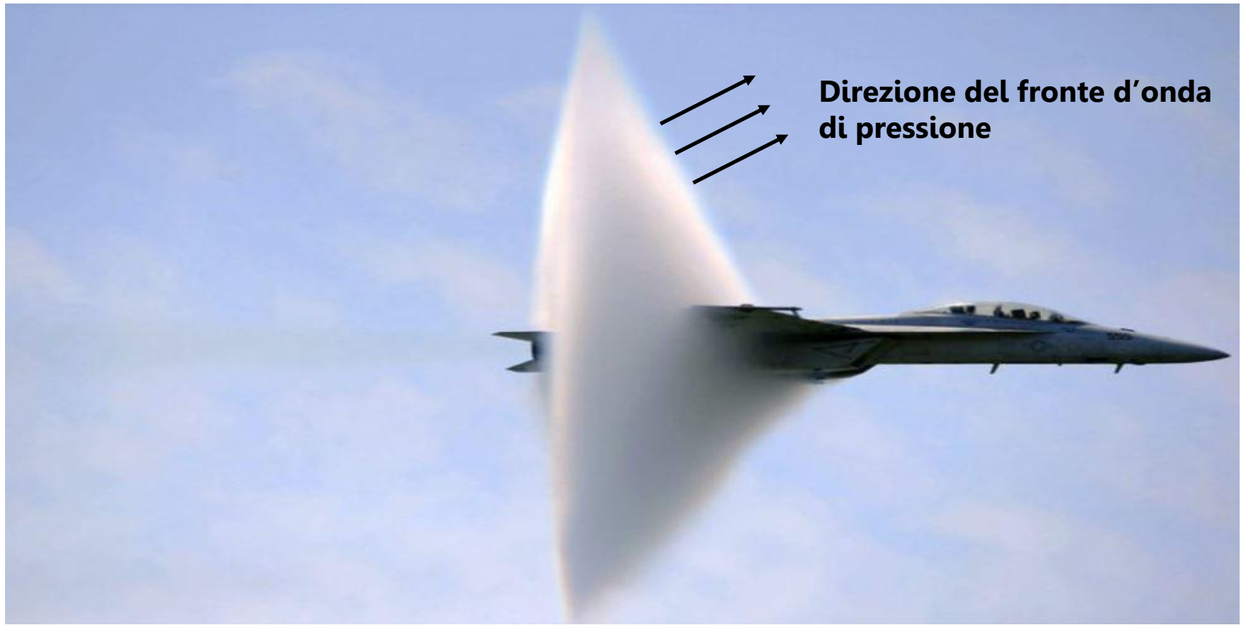
v= velocità della particella nel mezzo attraversato



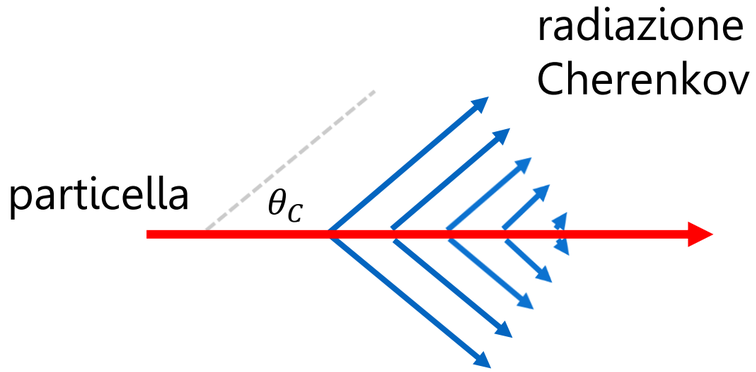
NOTA BENE: Secondo la teoria della relatività di Einstein **nessuna particella può avere una velocità maggiore della velocità della luce *nel vuoto***.

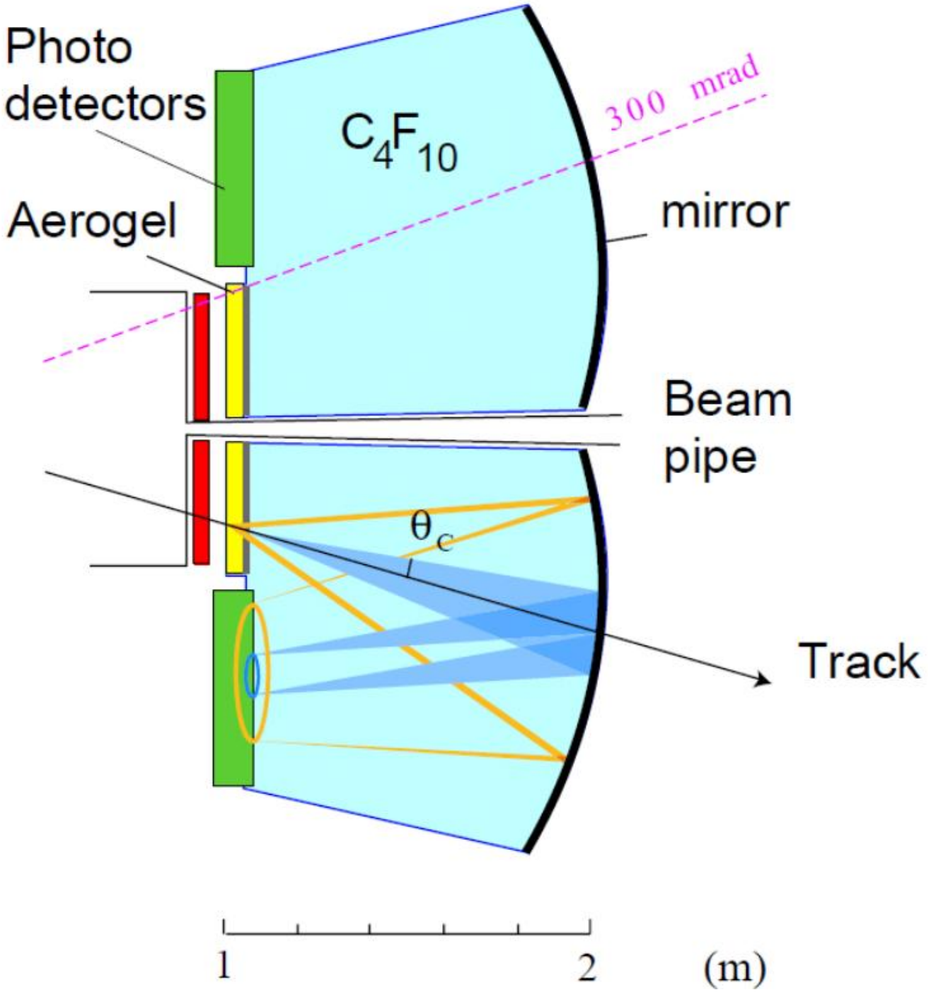
Analogia con il bang supersonico dei jets





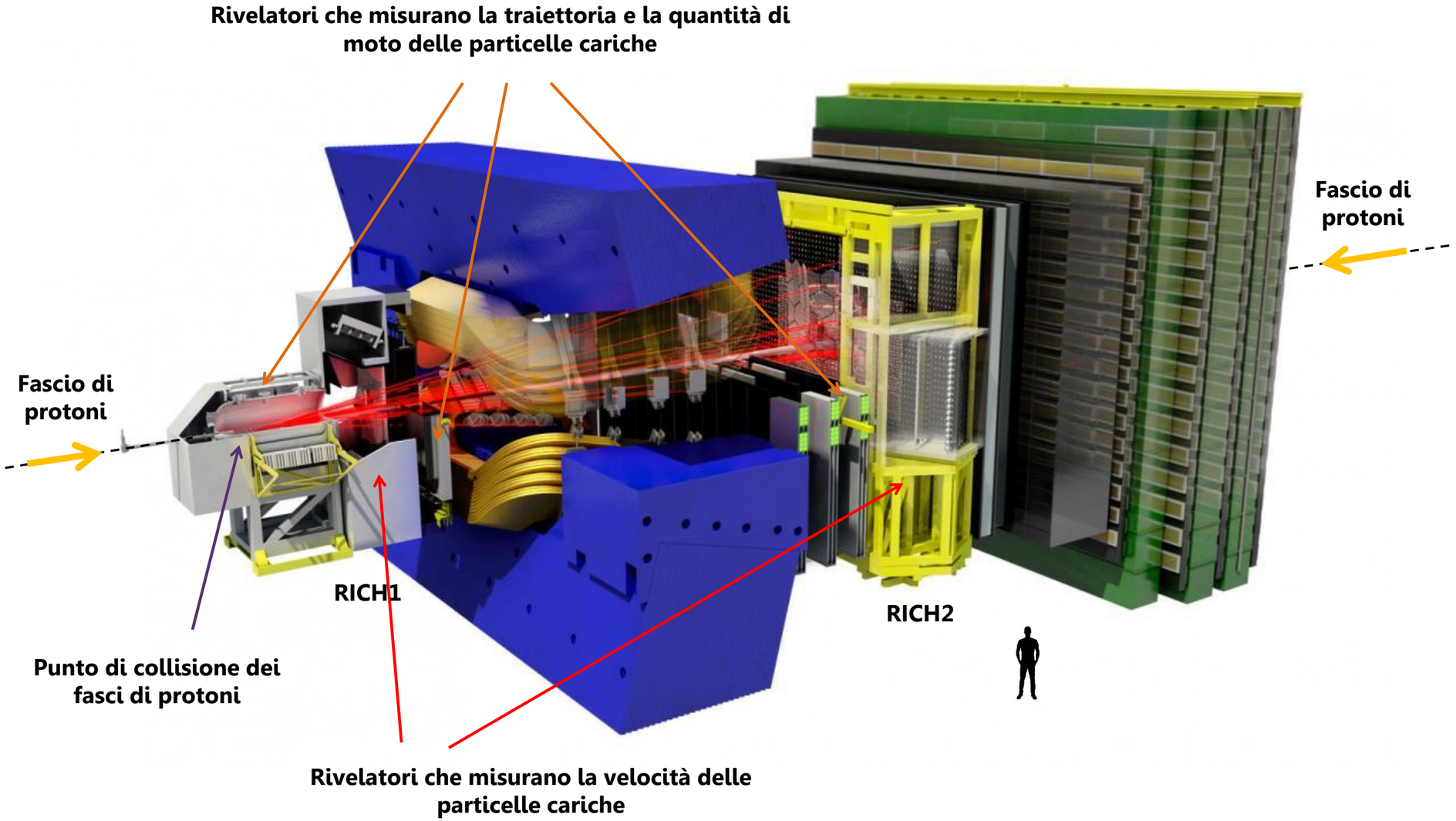
Misura della velocità della particella





Con uno speciale rivelatore (RICH: **R**ing **I**maging **CH**erenkov detector) viene misurato θ_C. Invertendo la relazione

$$\cos\theta_C = \frac{c}{n\,v} \quad \rightarrow \quad v = \frac{c}{n\cos\theta_C}$$


Rivelatori che misurano la traiettoria e la quantità di moto delle particelle cariche
Fascio di protoni
Fascio di protoni
RICH1
RICH2
Punto di collisione dei fasci di protoni
Rivelatori che misurano la velocità delle particelle cariche

Ricapitolando

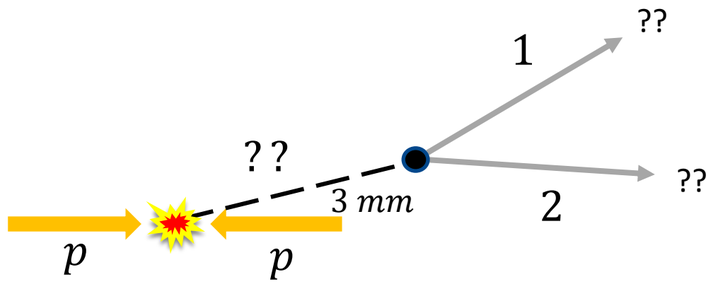
1. Utilizzando i tracker detectors (tracciatori):

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**

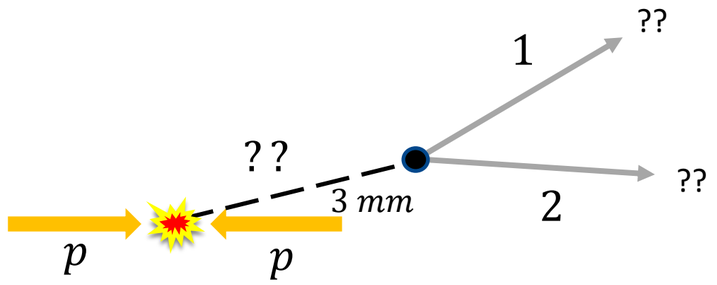


$$p_1 = m_1 v_1$$

$$p_2 = m_2 v_2$$

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



$p_1 = m_1 v_1$

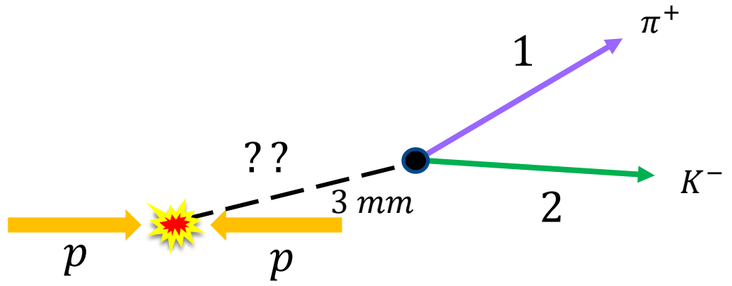
v_1

$p_2 = m_2 v_2$

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**



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

$m_1 = 140$ MeV $\Longrightarrow$ **pione**

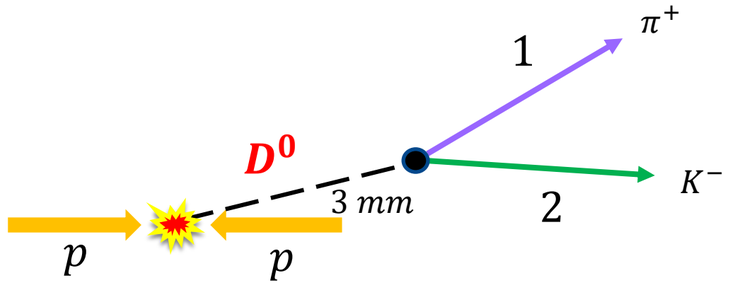
$$\begin{cases} p_2 = m_2 v_2 \\ v_2 \end{cases} \longrightarrow m_2 = \frac{m_2 v_2}{v_2}$$

$m_2 = 500$ MeV $\Longrightarrow$ **kaone**

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**
4. Dalla quantità di moto ed energia del pione e del kaone viene ricostruita la **massa** della particella da cui sono stati generati

$m(\pi^- + K^-) = 1865$ MeV $\Longrightarrow$ **è un mesone D^0!**



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

$m_1 = 140$ MeV $\Longrightarrow$ **pione**

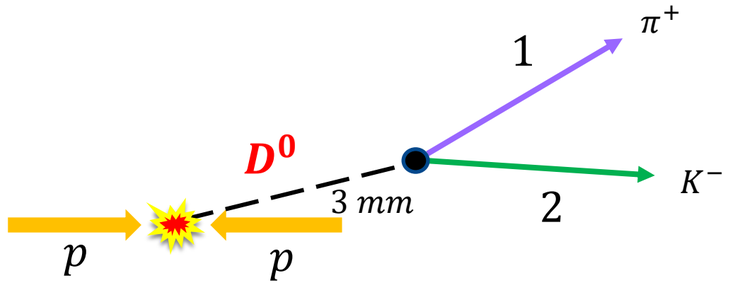
$$\begin{cases} p_2 = m_2 v_2 \\ v_2 \end{cases} \longrightarrow m_2 = \frac{m_2 v_2}{v_2}$$

$m_2 = 500$ MeV $\Longrightarrow$ **kaone**

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**
4. Dalla quantità di moto ed energia del pione e del kaone viene ricostruita la **massa** della particella da cui sono stati generati

   $m(\pi^- + K^-) = 1865$ MeV $\Longrightarrow$ **è un mesone D^0!**
5. 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



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

$m_1 = 140$ MeV $\Longrightarrow$ **pione**

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

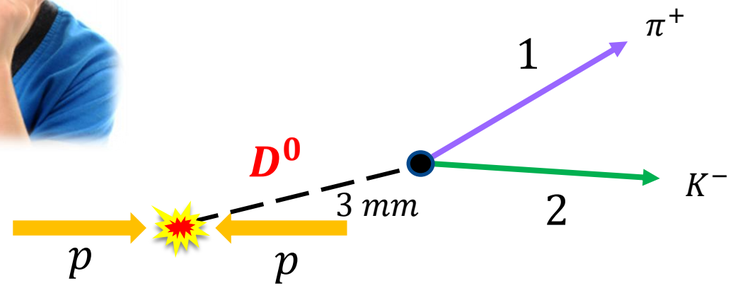
$m_2 = 500$ MeV $\Longrightarrow$ **kaone**

Ricapitolando

Complicato?
Un po', ma vi aiutiamo!

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**
4. Dalla quantità di moto ed energia del pione e del kaone viene ricostruita la **massa** della particella da cui sono stati generati

   $m(\pi^- + K^-) = 1865$ MeV $\Longrightarrow$ **è un mesone D^0!**
5. 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



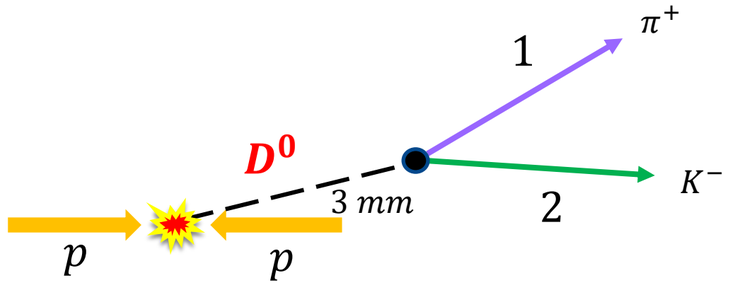
$$\begin{cases} p_1 = m_1 v_1 \\ v_1 \end{cases} \longrightarrow m_1 = \frac{m_1 v_1}{v_1}$$

$m_1 = 140$ MeV $\Longrightarrow$ **pione**

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

$m_2 = 500$ MeV $\Longrightarrow$ **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