



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



# Metodi sperimentali in fisica delle alte energie

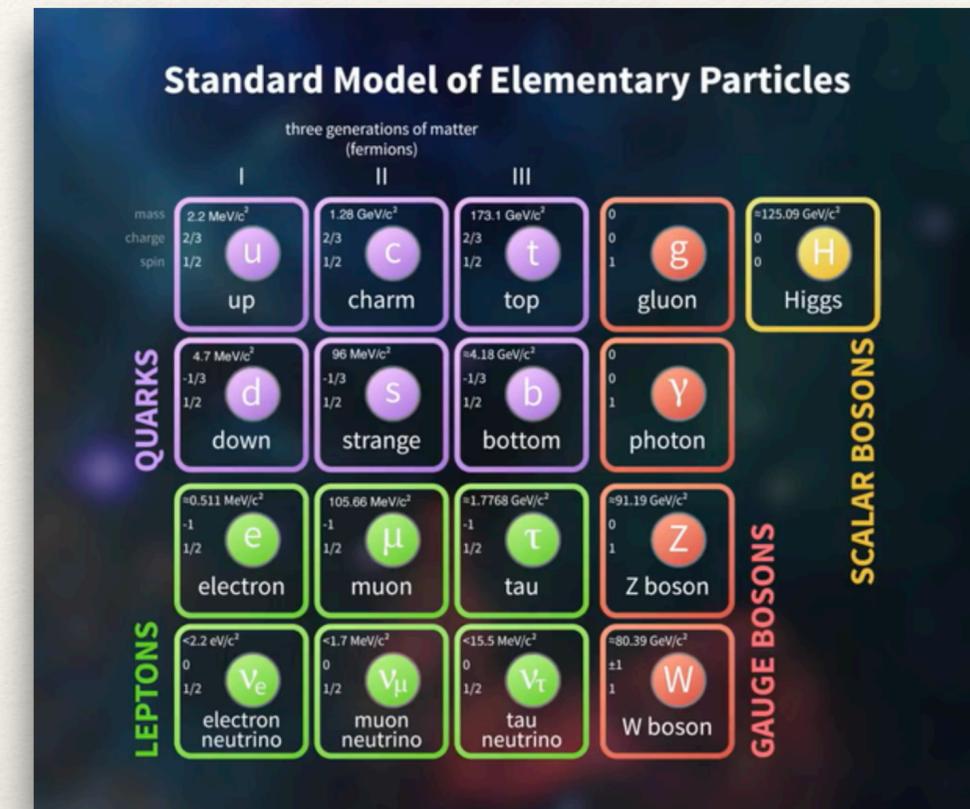
Antonio Paladino - 2025/03/19  
Belle II International Masterclass

# Il nostro universo

Il Modello Standard è in grado di spiegare gran parte dei fenomeni che osserviamo...

... ma è anche evidente che manca qualcosa nel Modello Standard!

- ◉ L'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo non è spiegata.
- ◉ Il 95% dell'universo è composto da "energia oscura" e "materia oscura".

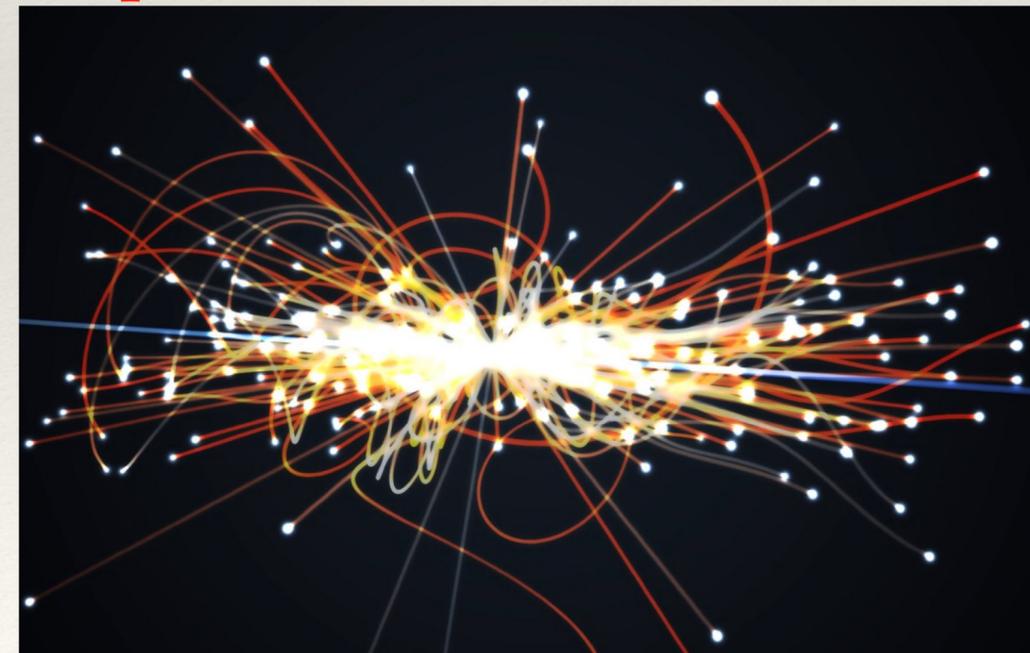


Come cercare i pezzi mancanti del nostro puzzle?

Osservazioni astrofisiche



Riprodurre eventi in laboratorio

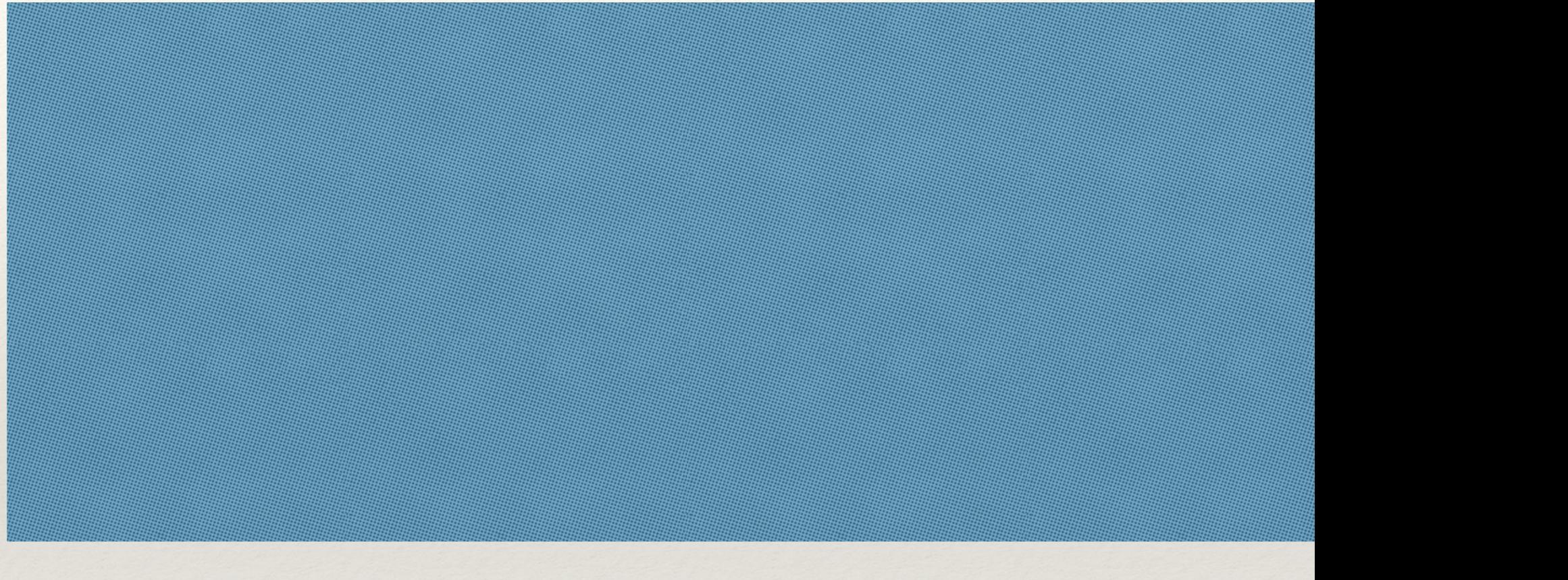


# Come riprodurre eventi in laboratorio?

- ◉ Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?

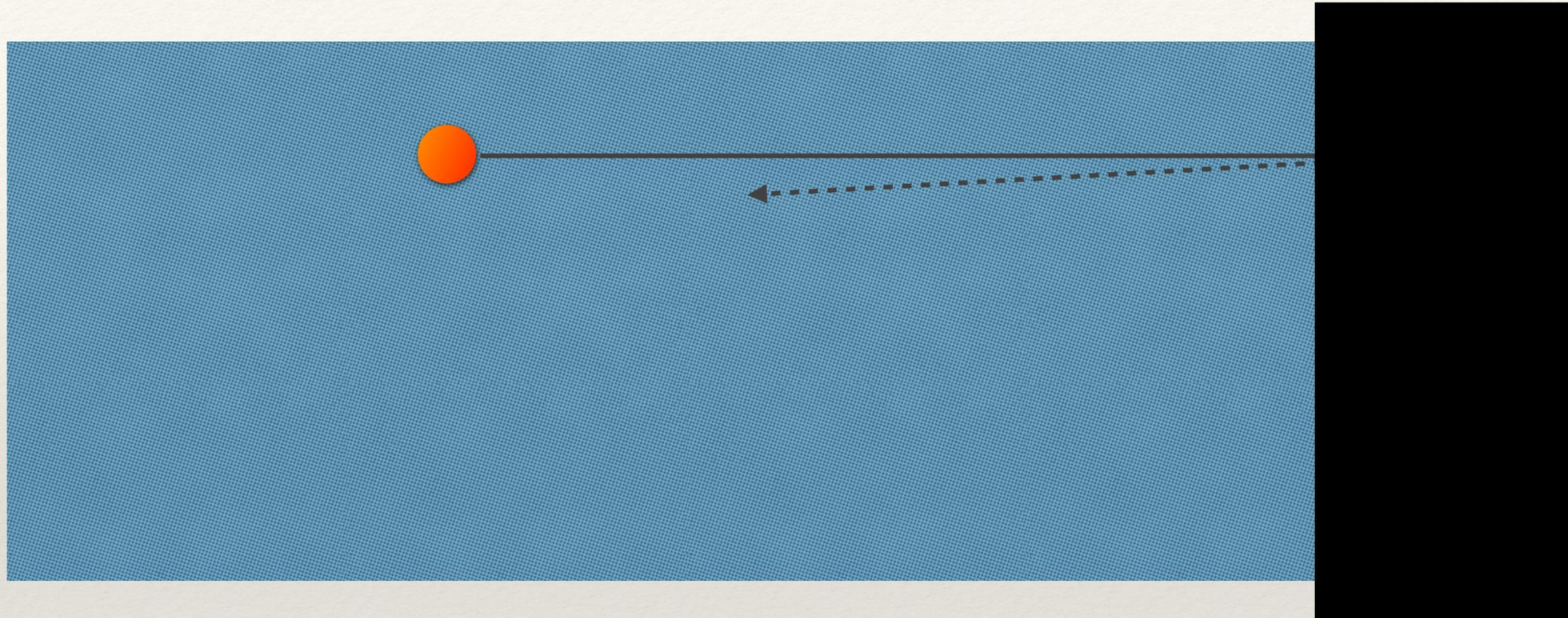
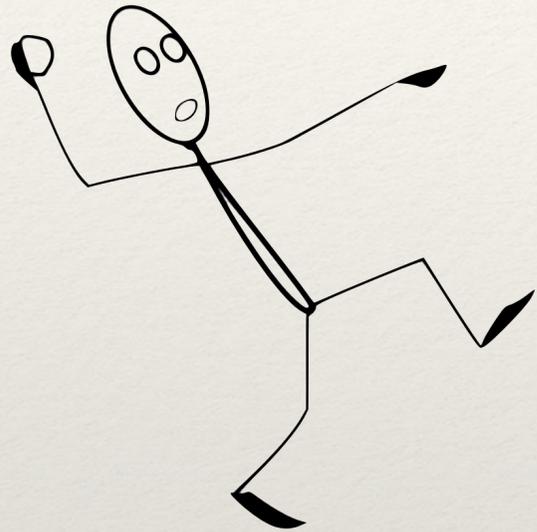
# Come riprodurre eventi in laboratorio?

- ◉ Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?



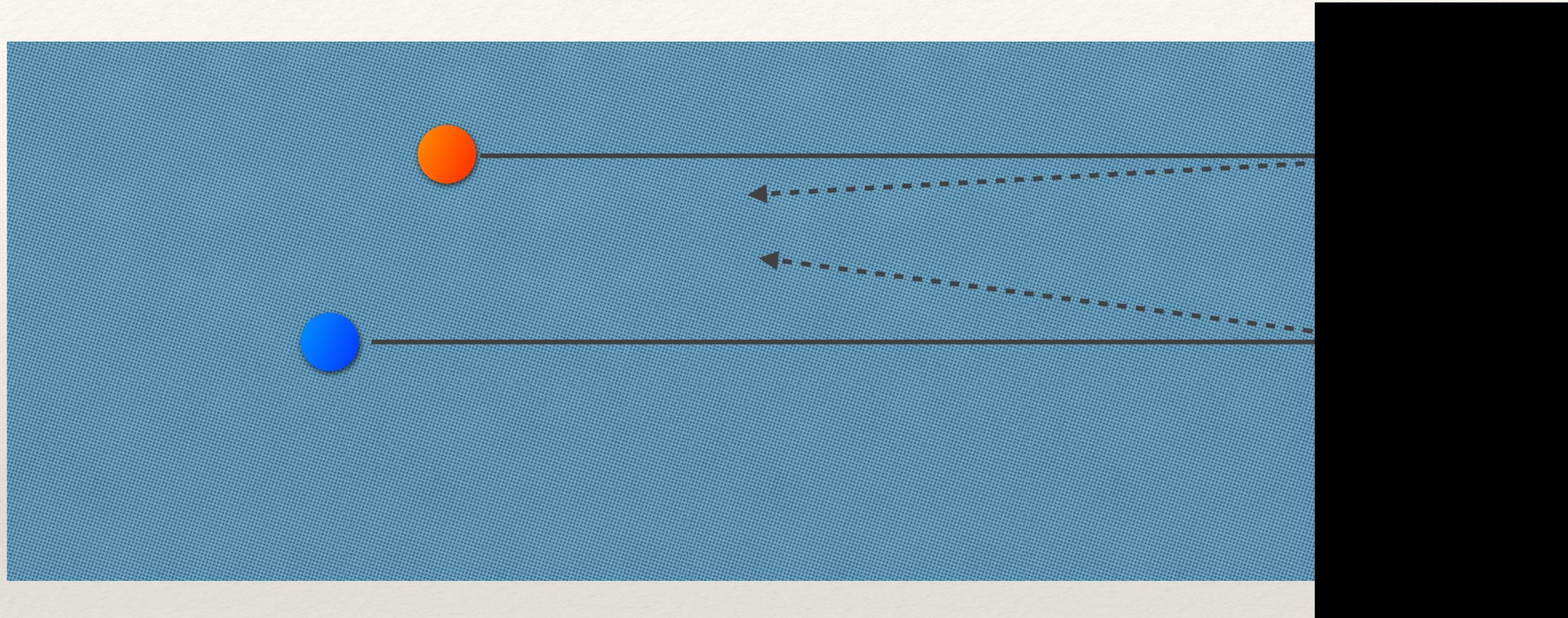
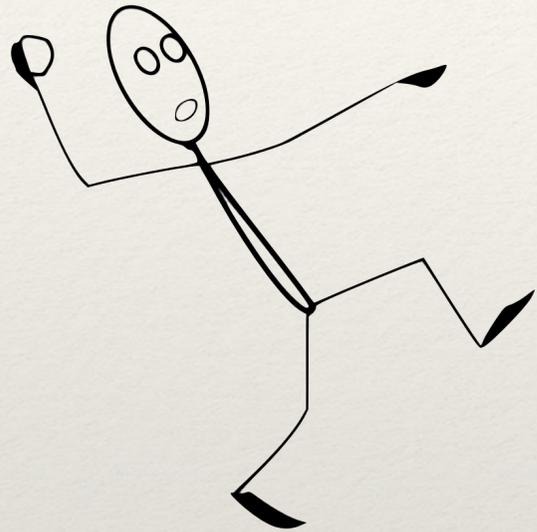
# Come riprodurre eventi in laboratorio?

- ◉ Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?



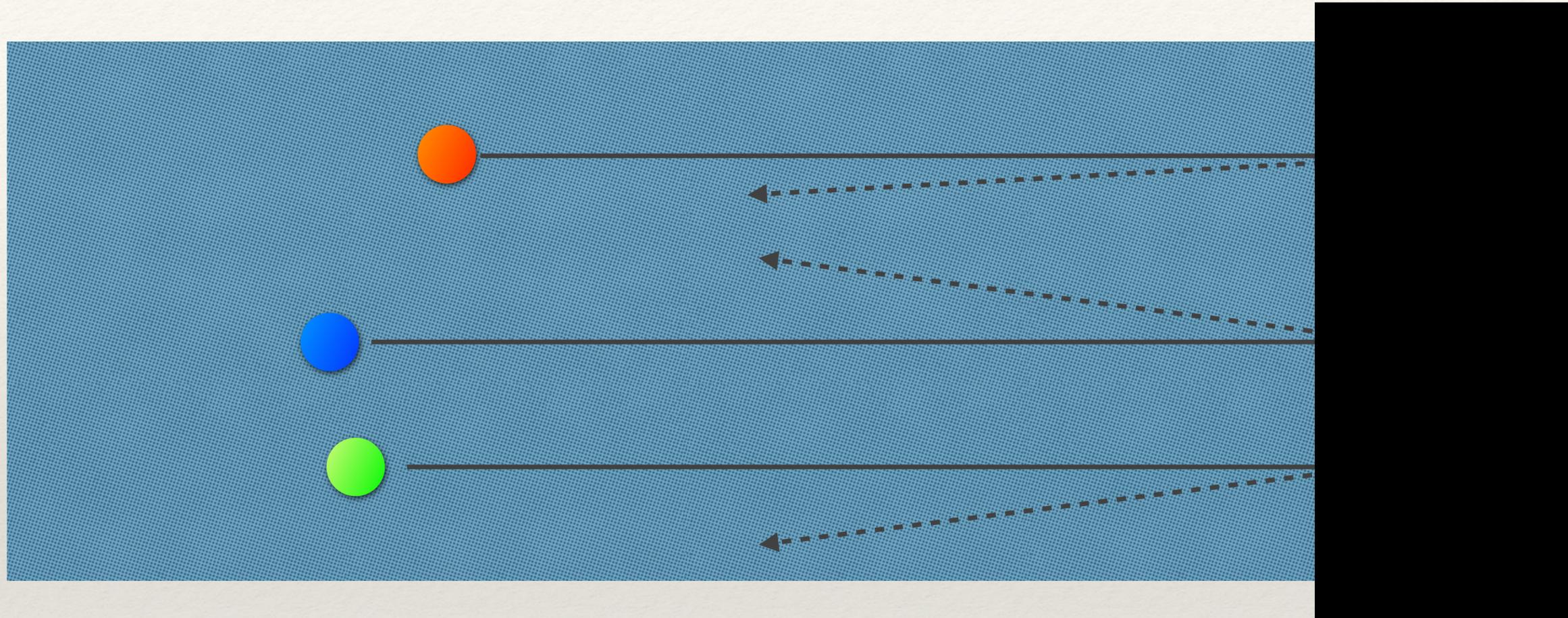
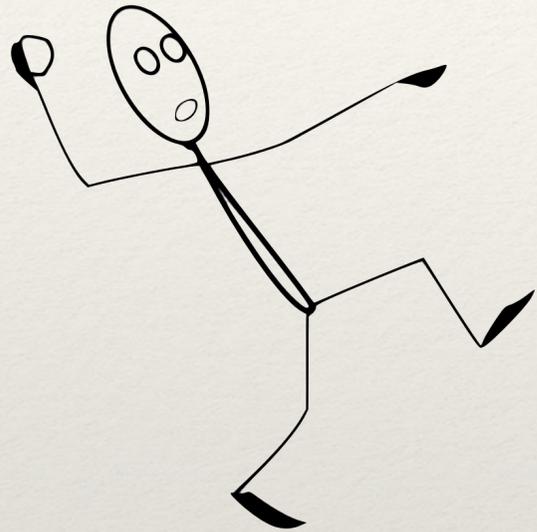
# Come riprodurre eventi in laboratorio?

- Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?



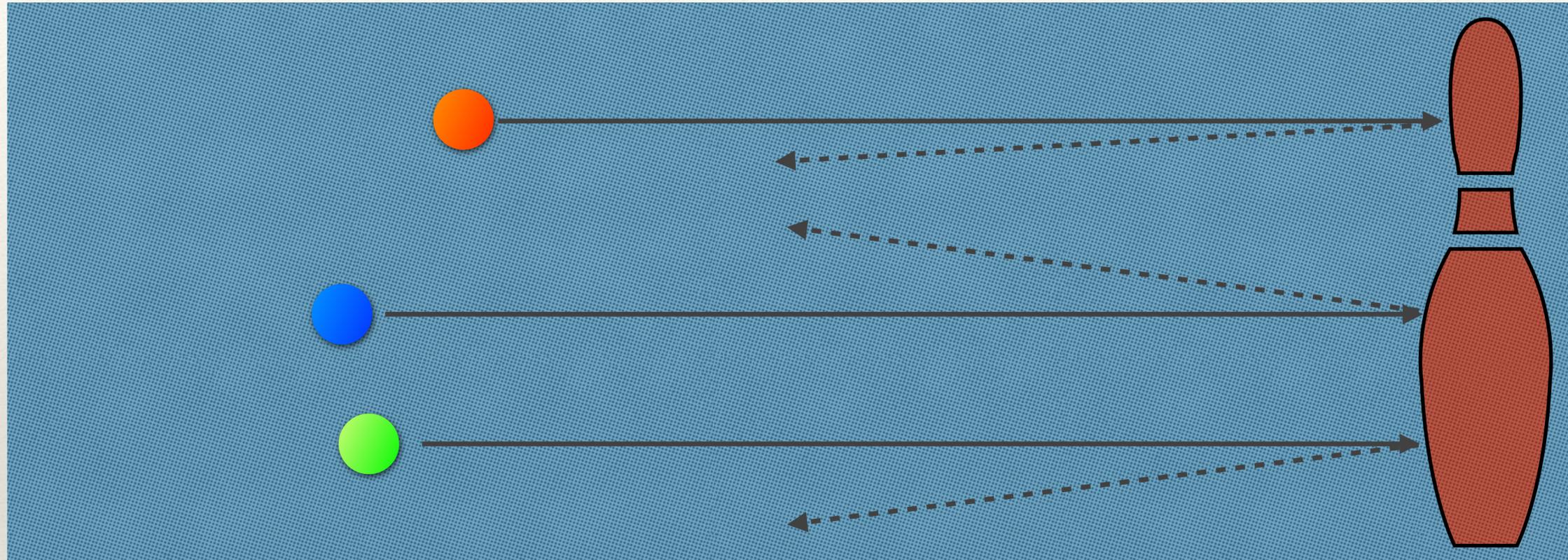
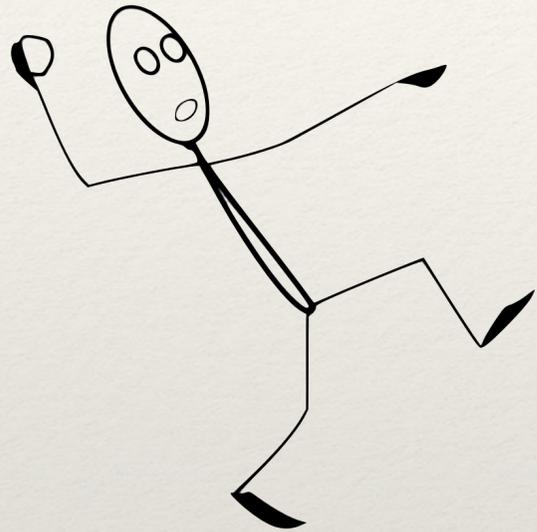
# Come riprodurre eventi in laboratorio?

- ◉ Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?



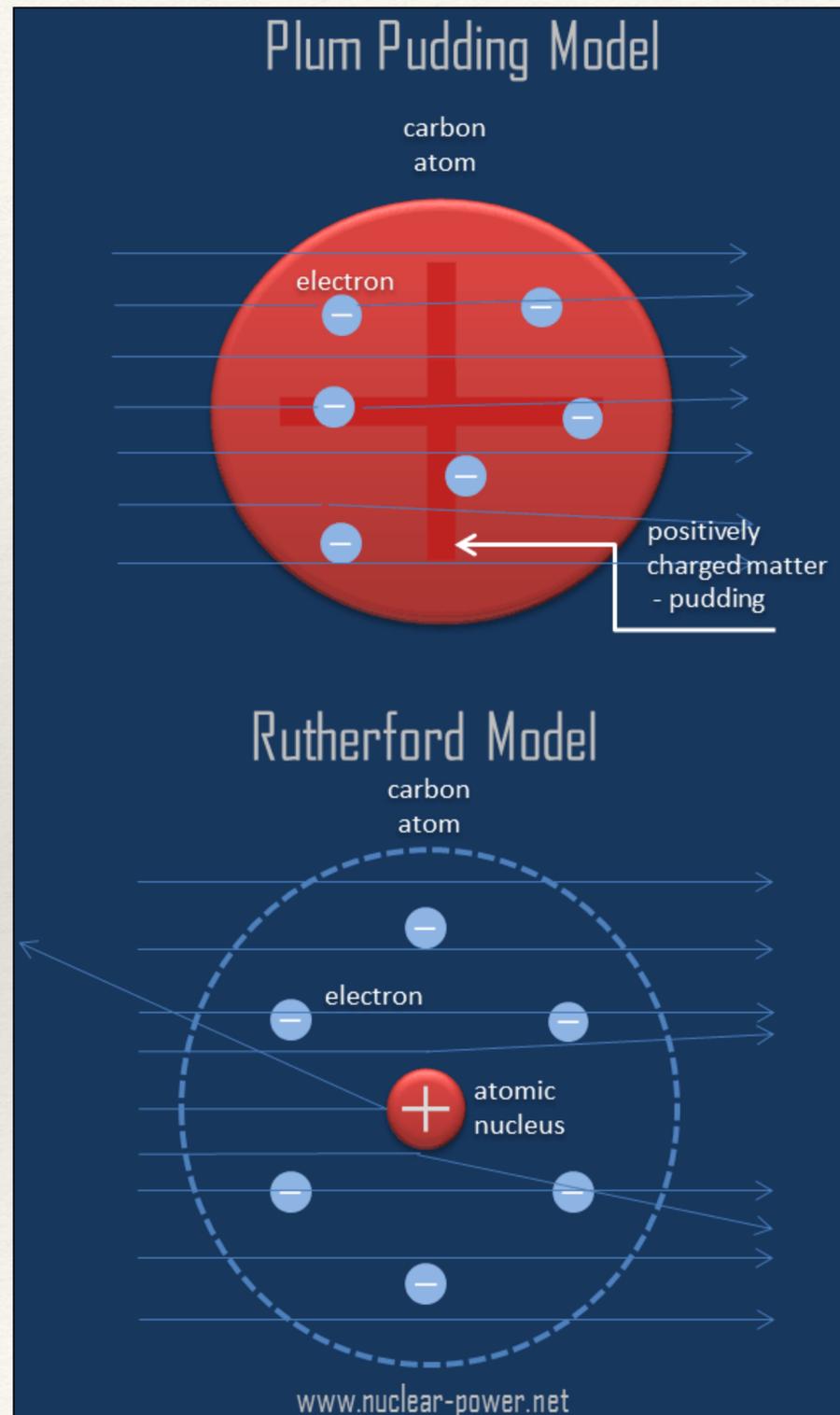
# Come riprodurre eventi in laboratorio?

- Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?

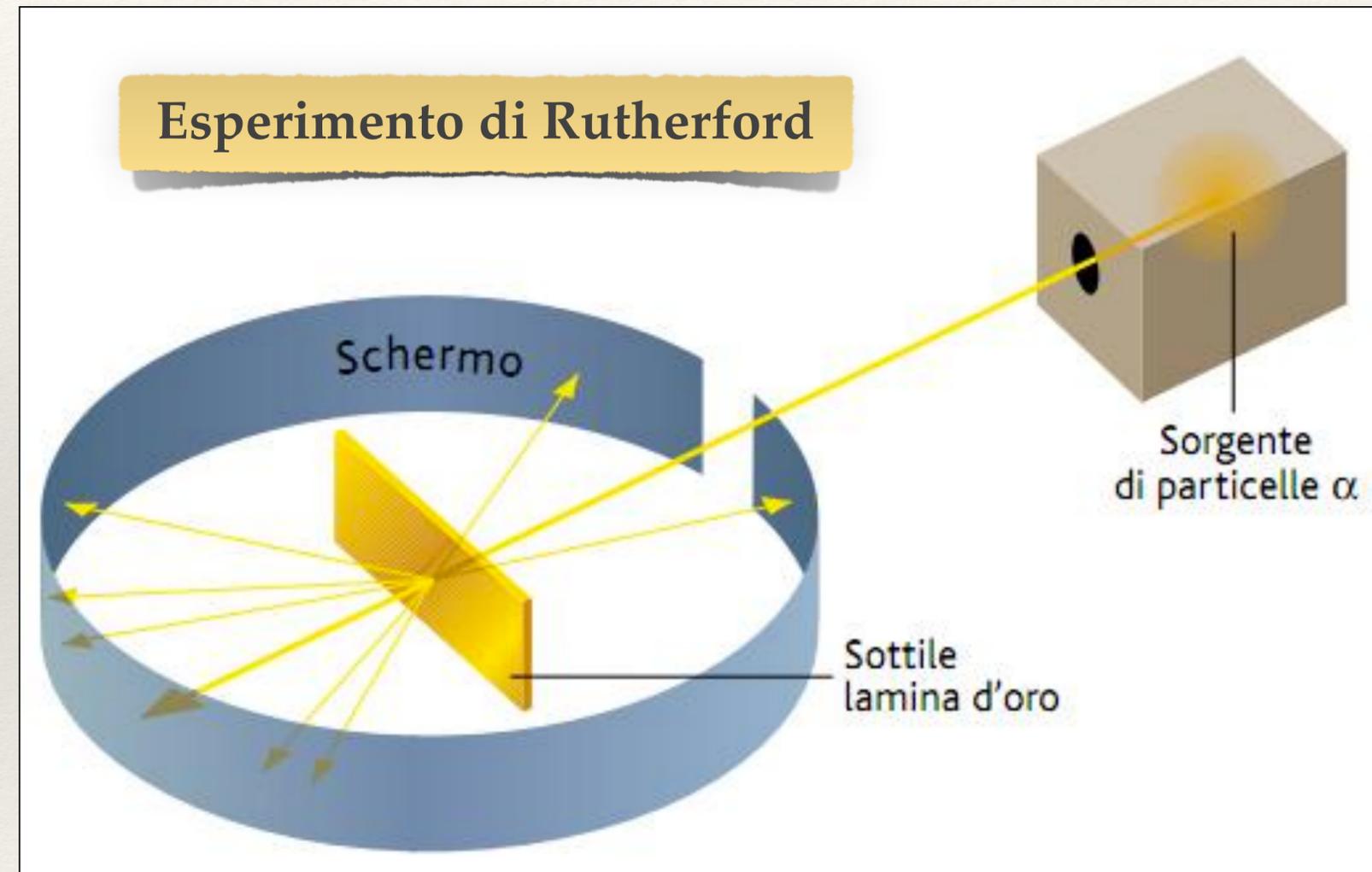


- Dalla direzione con cui le palline rimbalzano, possiamo capire la forma dell'oggetto.
- Che altre informazioni possiamo ricavare? Ad esempio il materiale dell'oggetto nascosto.
- Più lanci effettuiamo, più completa sarà la conoscenza dell'oggetto.
- Vogliamo quindi avere la possibilità di osservare tanti eventi, quando e dove vogliamo.

# Applicazione: l'esperimento di Rutherford



- ◉ Tra il 1908 e il 1913, Geiger e Marsden, diretti da Rutherford, condussero una serie di esperimenti per capire la struttura atomica.

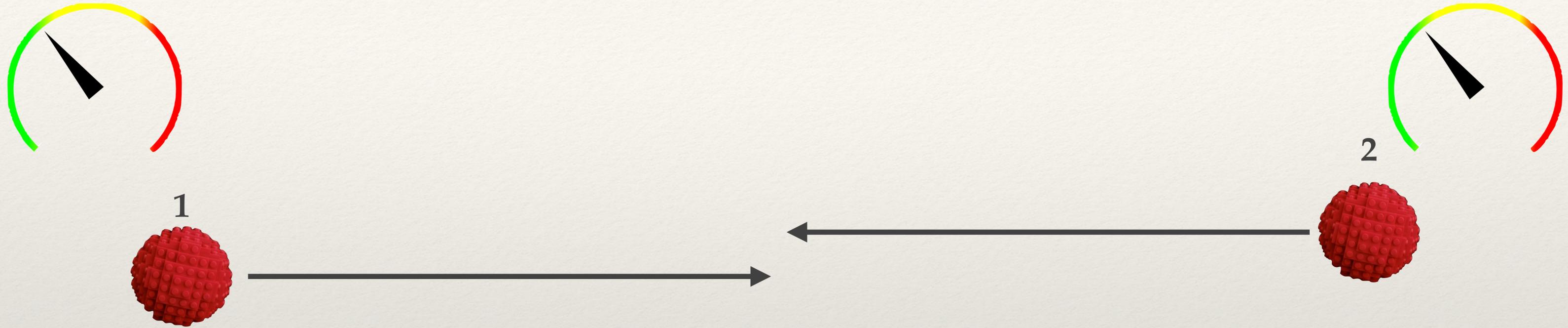


# Perché riprodurre eventi in laboratorio?

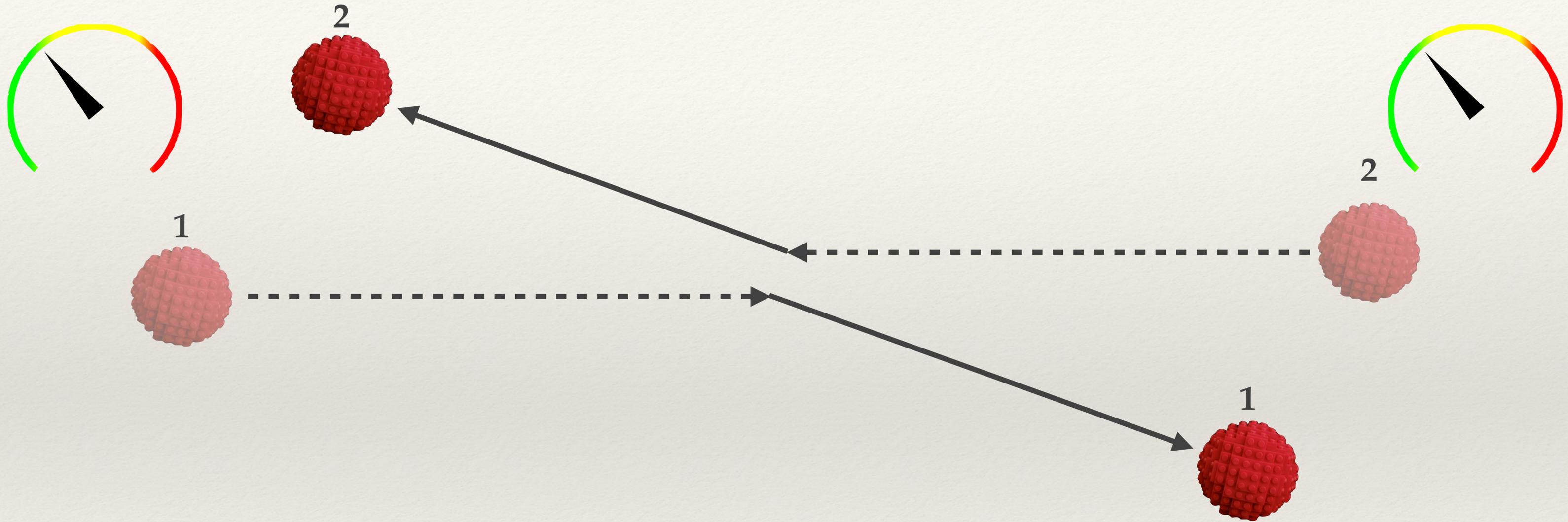
E se facessimo  
scontrare due proiettili  
fra loro?



# Interazione fra proiettili

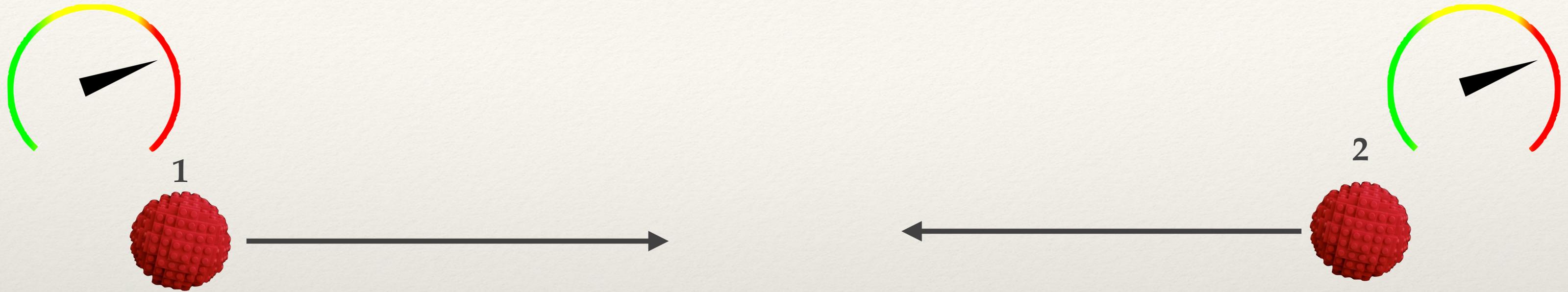


# Interazione fra proiettili

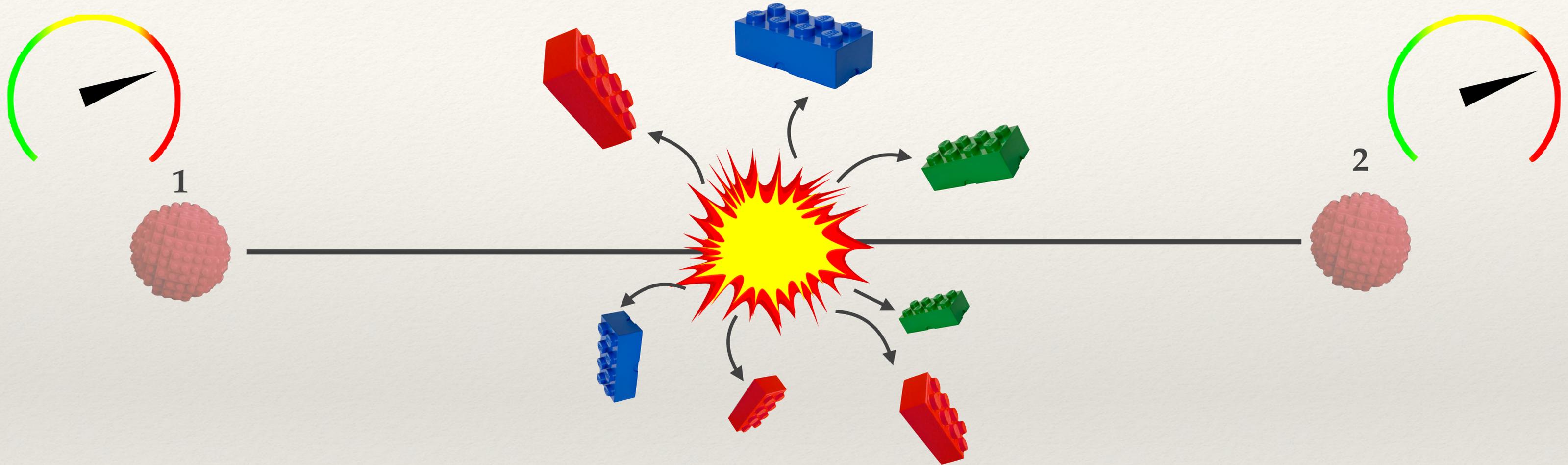


I proiettili possono essere semplicemente deviati dalla loro direzione iniziale, rimanendo intatti.

# Interazione fra proiettili

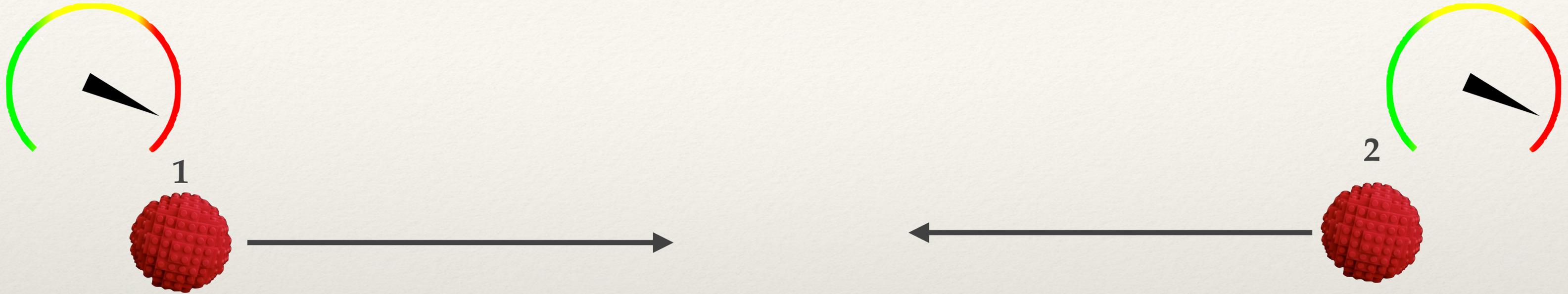


# Interazione fra proiettili

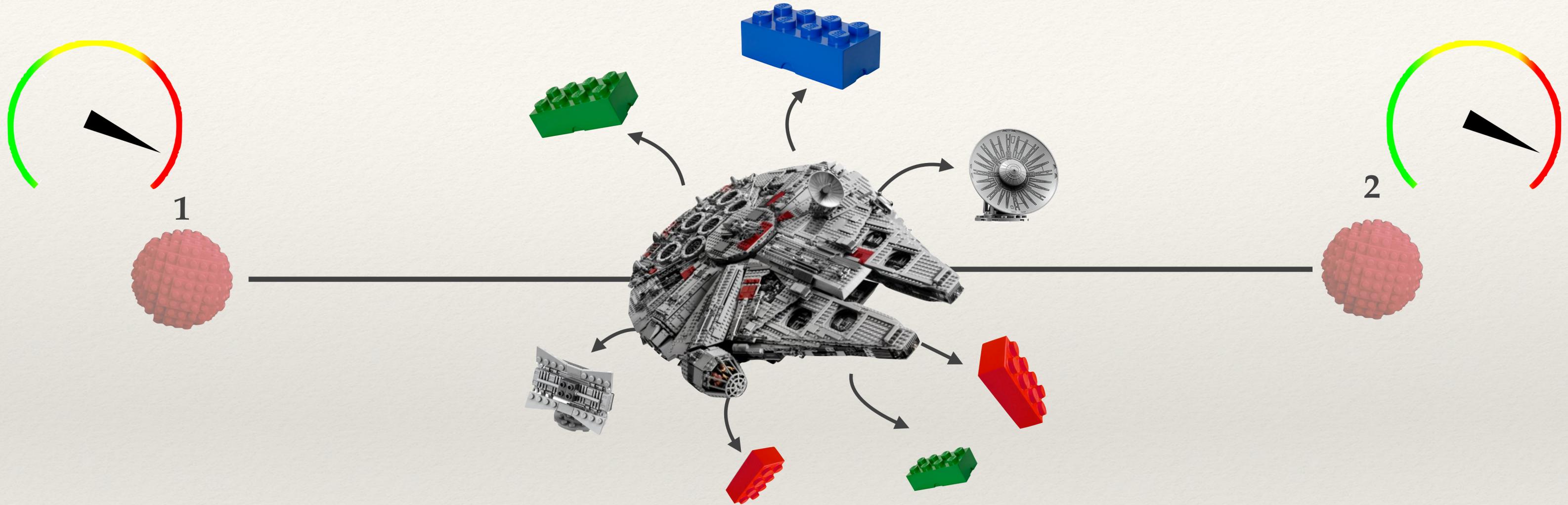


Con la giusta dose di energia, possiamo “rompere” i proiettili e scoprirne i componenti.

# Interazione fra proiettili

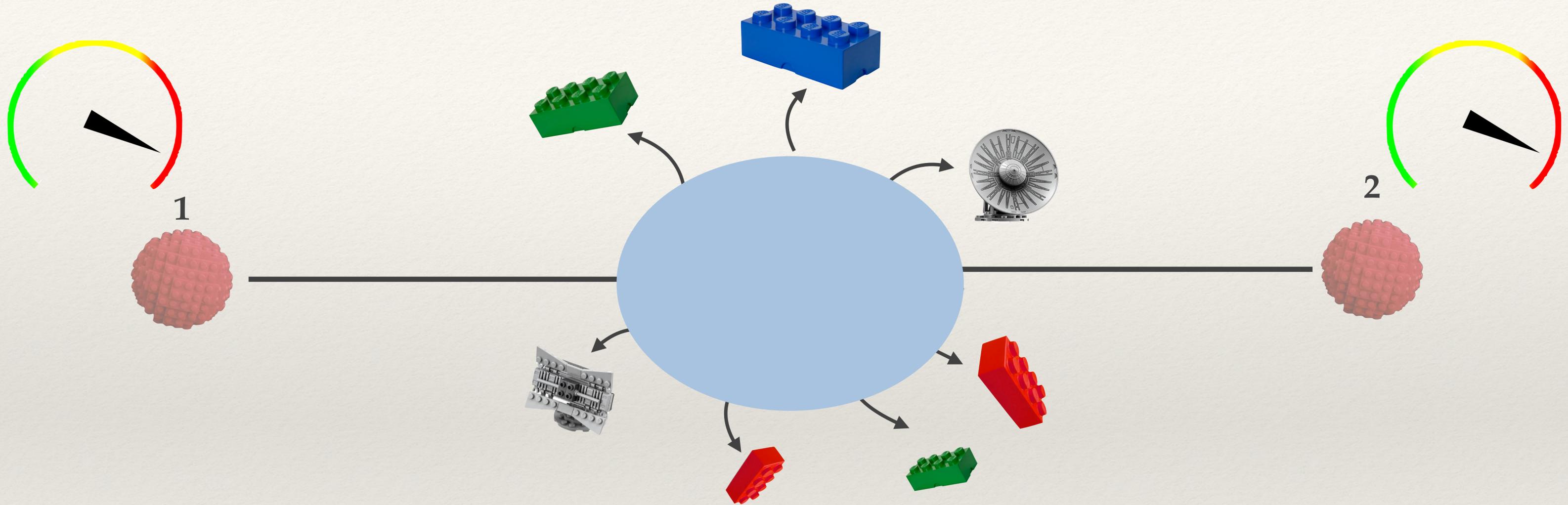


# Interazione fra proiettili



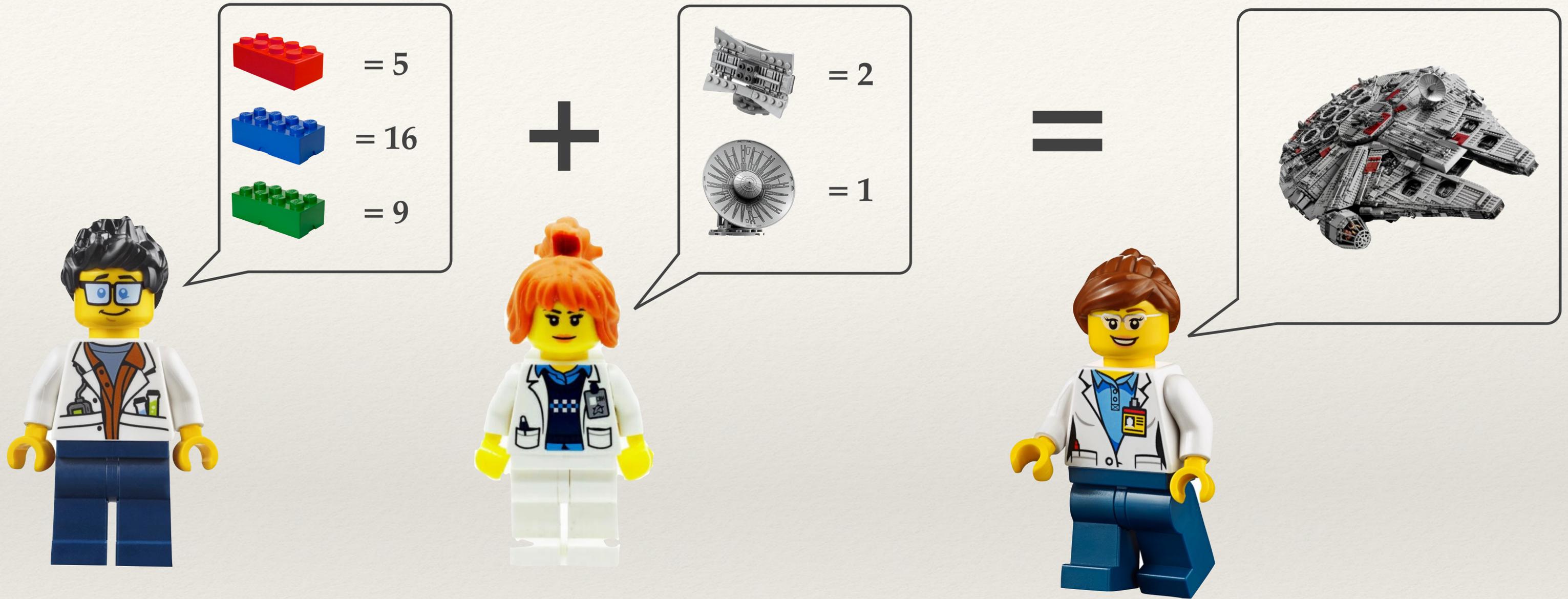
Aumentando ancora l'energia dei proiettili, si possono creare oggetti più grandi e complessi, che però sopravvivono troppo poco per essere osservati. Possiamo risalire alla struttura generata solo osservando i "pezzi" in cui si è separata.

# Interazione fra proiettili



Aumentando ancora l'energia dei proiettili, si possono creare oggetti più grandi e complessi, che però sopravvivono troppo poco per essere osservati. Possiamo risalire alla struttura generata solo osservando i "pezzi" in cui si è separata.

# Interazione fra proiettili



Aumentando ancora l'energia dei proiettili, si possono creare oggetti più grandi e complessi, che però sopravvivono troppo poco per essere osservati. Possiamo risalire alla struttura generata solo osservando i "pezzi" in cui si è separata.

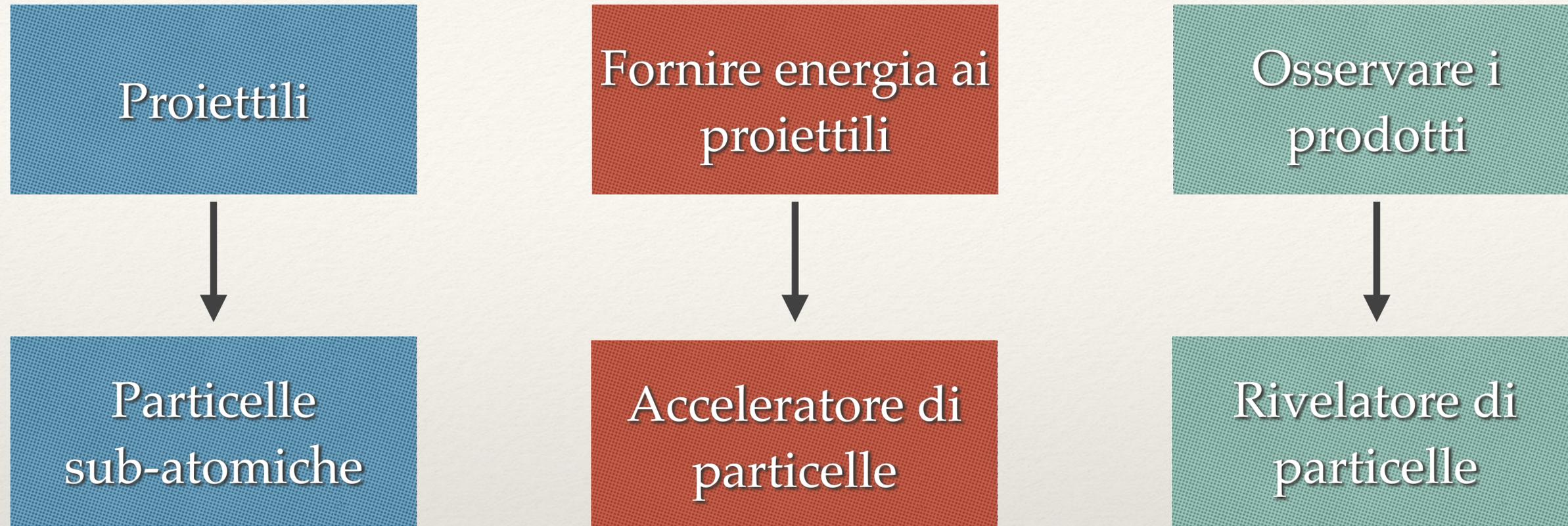
# Come riprodurre eventi in laboratorio?

Proiettili

Fornire energia ai  
proiettili

Osservare i  
prodotti

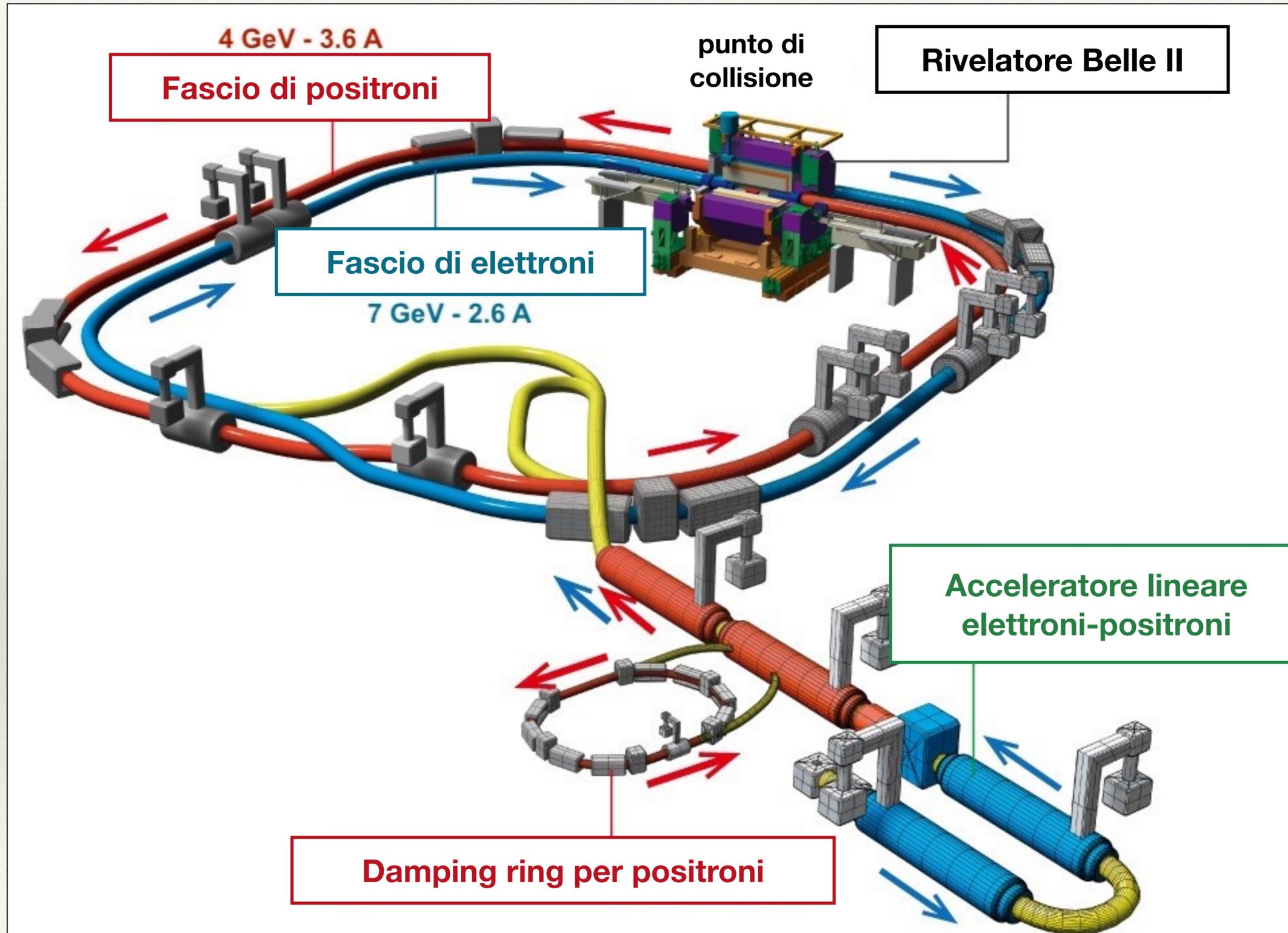
# Come riprodurre eventi in laboratorio?



# Come riprodurre eventi in laboratorio?

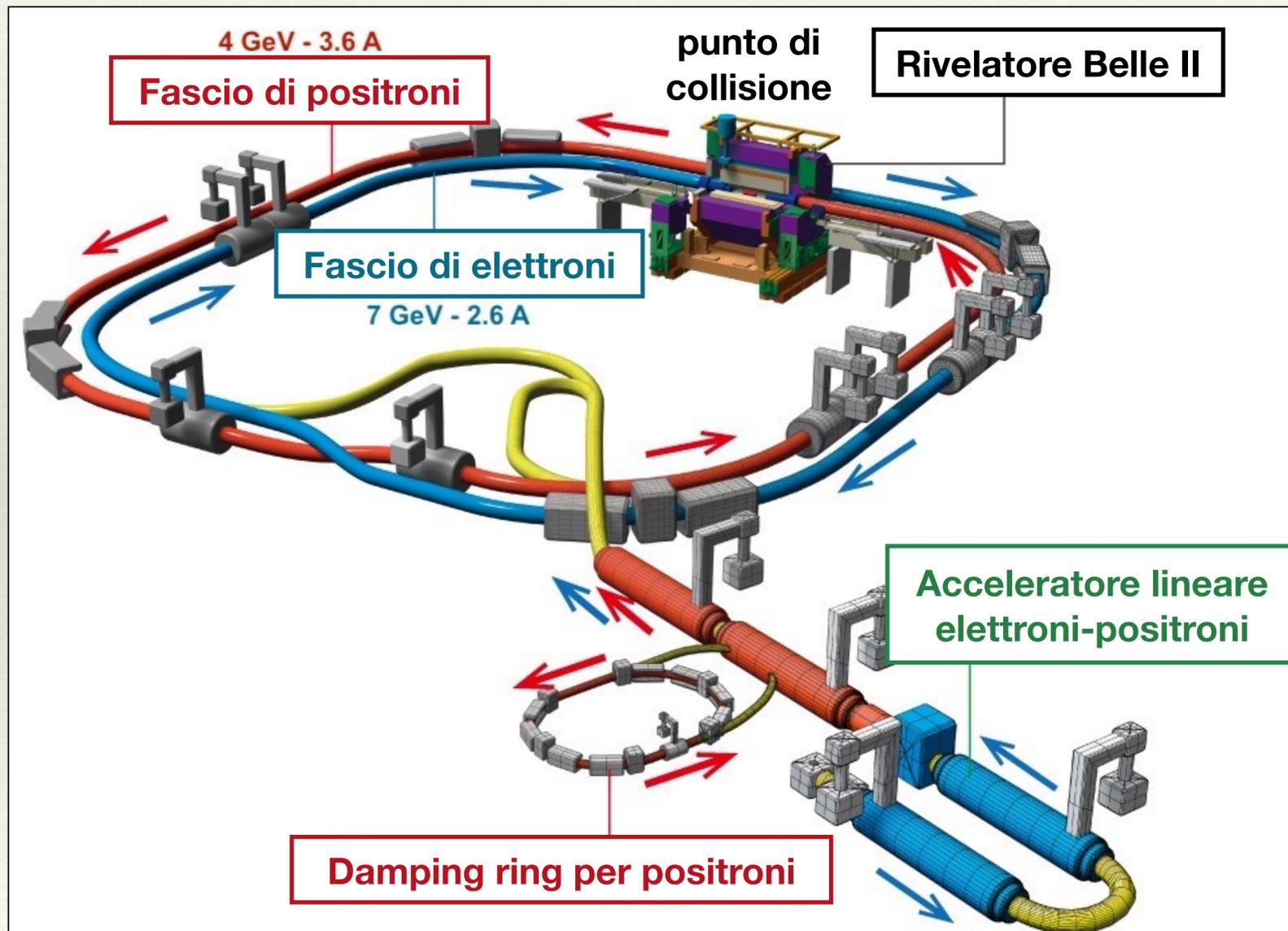


# L'acceleratore SuperKEKB



# L'acceleratore SuperKEKB

- SuperKEKB è un **collisore asimmetrico di elettroni e positroni**, che circolano in due anelli di 3 km di circonferenza, e si incontrano in un punto, chiamato punto di interazione, dove avvengono le collisioni.
- La sua luminosità di progetto,  $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , è la più alta mai progettata.



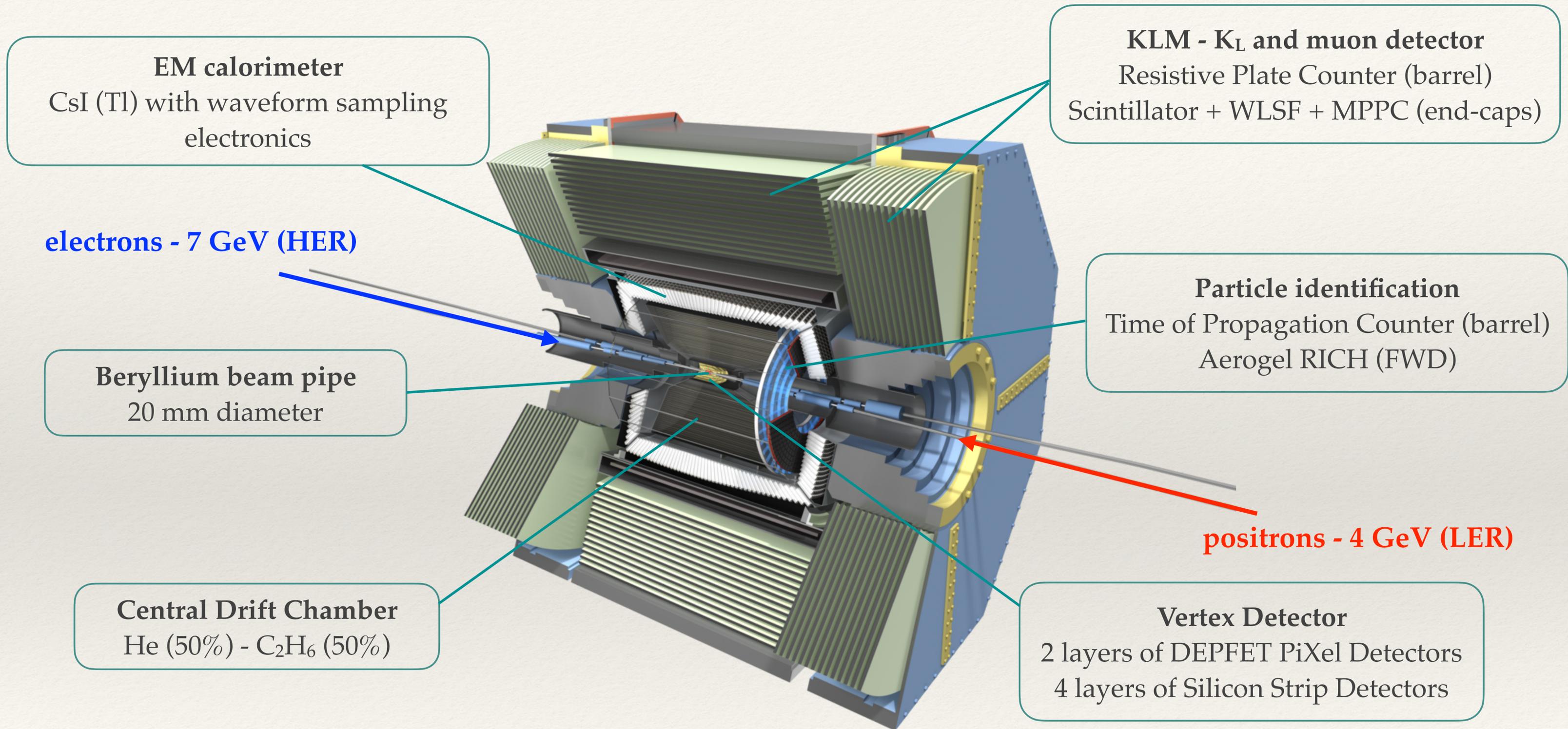
In un acceleratore, si usano campi elettrici e magnetici per far circolare i fasci di particelle nei due anelli:

- Il **campo elettrico** serve ad accelerare le particelle e ad aumentare la loro energia. Le particelle si muovono ad una velocità prossima a quella della luce, quindi sono in grado di percorrere l'intera circonferenza circa 100.000 volte in un secondo.

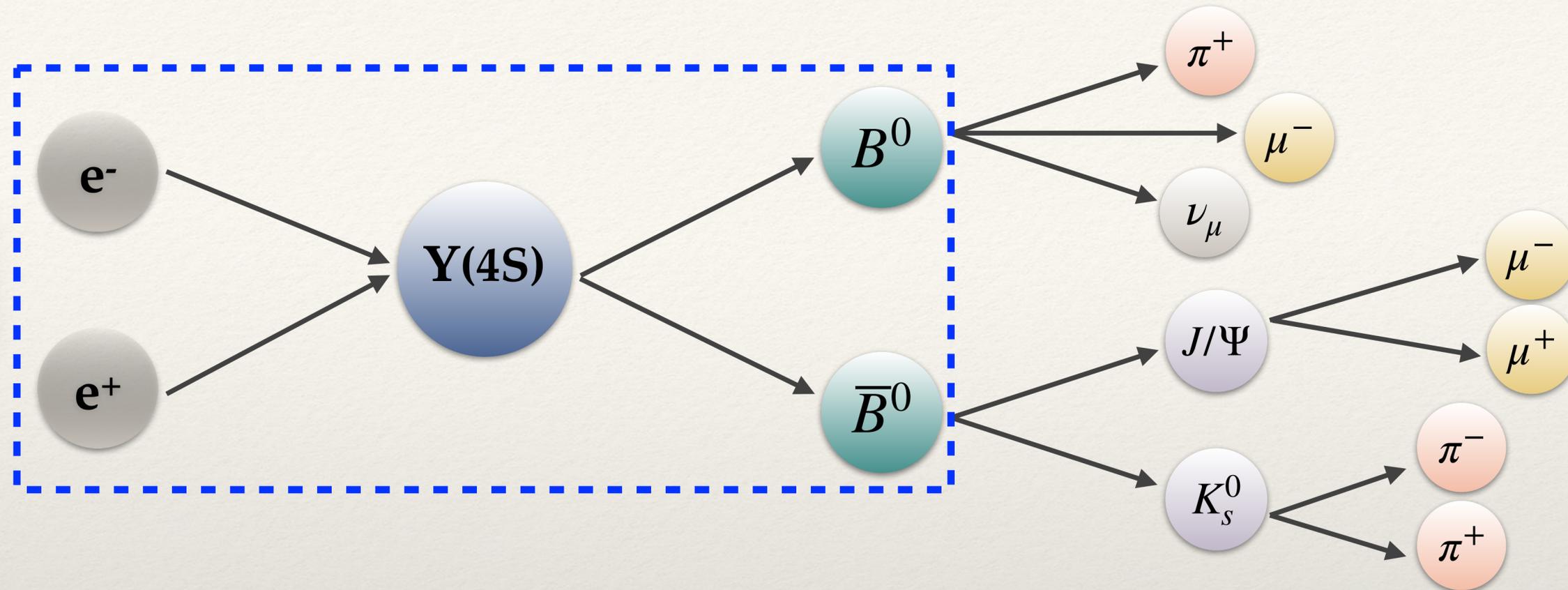
- Il **campo magnetico** si usa per deviare le particelle e far percorrere loro una traiettoria curva.

Ogni fascio è diviso in "bunch", pacchetti che possono contenere fino a 10 miliardi di particelle. In SuperKEKB ogni fascio è composto da 2500 bunch.

# Il rivelatore Belle II

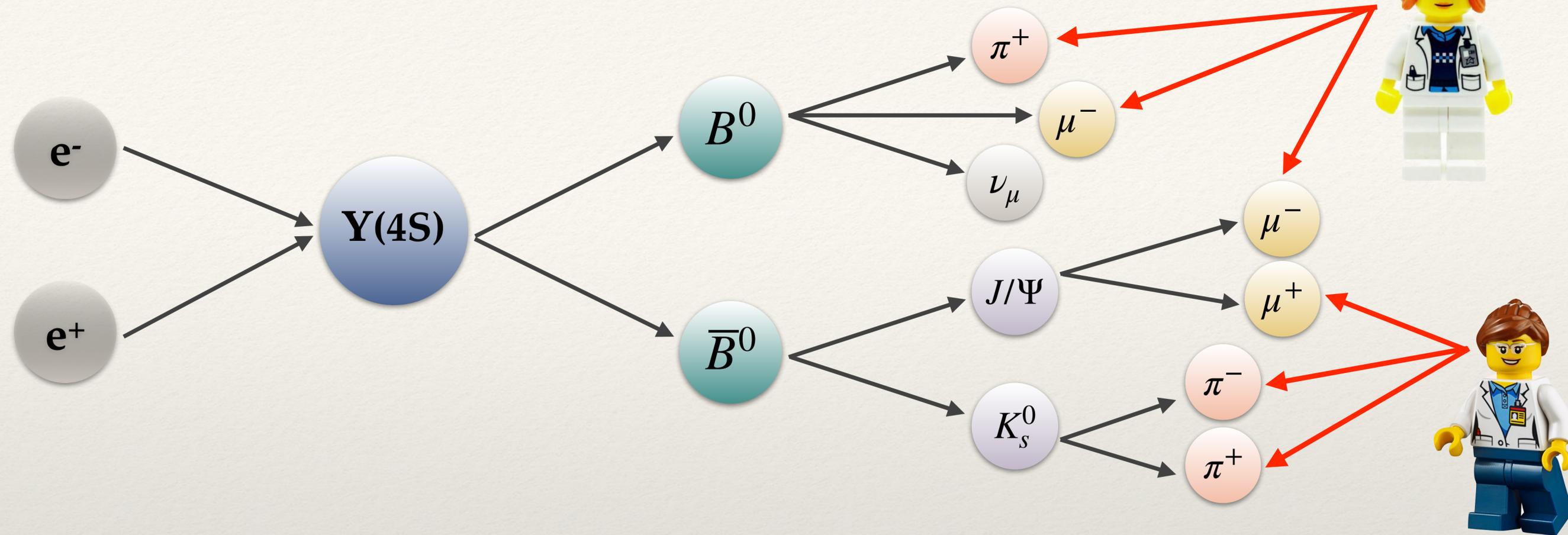


# Ricostruzione di un evento



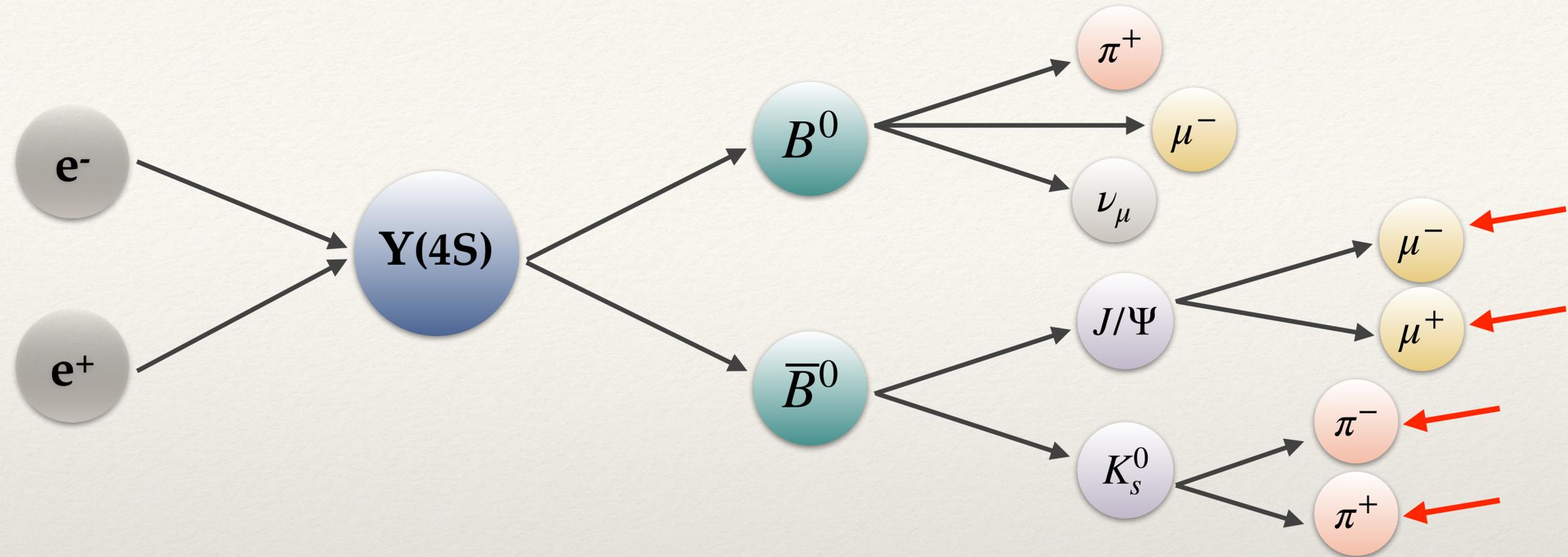
- I mesoni  $B^0$  e  $\bar{B}^0$  possono decadere in tanti modi diversi, e **non sappiamo a priori** quale sia il modo per ogni singolo evento.

# Ricostruzione di un evento



- ◉ I mesoni  $B^0$  e  $\bar{B}^0$  possono decadere in tanti modi diversi, e **non sappiamo a priori** quale sia il modo per ogni singolo evento.
- ◉ Possiamo solo osservare i segnali prodotti dalle particelle che derivano dai decadimenti, e ricostruire la loro storia andando indietro nel tempo fino a ricostruire il punto in cui la particella originaria è decaduta.

# Ricostruzione di un evento



- ◉ I mesoni  $B^0$  e  $\bar{B}^0$  possono decadere in tanti modi diversi, e **non sappiamo a priori** quale sia il modo per ogni singolo evento.
- ◉ Possiamo solo osservare i segnali prodotti dalle particelle che derivano dai decadimenti, e ricostruire la loro storia andando indietro nel tempo fino a ricostruire il punto in cui la particella originaria è decaduta.
- ◉ Nell'evento rappresentato, possiamo ricostruire il cammino delle particelle  $\mu^-$  e  $\mu^+$  e risalire alla particella  $J/\psi$ , poi ricostruire il cammino delle particelle  $\pi^-$  e  $\pi^+$  e risalire alla particella  $K_s^0$ , e infine risalire al vertice di decadimento del mesone  $\bar{B}^0$ .

# Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

Traiettoria

Carica

Quantità  
di moto

Tipo

Energia

# Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

Traiettoria

Carica

Quantità  
di moto

Tipo

Energia

Sistema di tracciatura

Sistemi di  
identificazione

Calorimetro

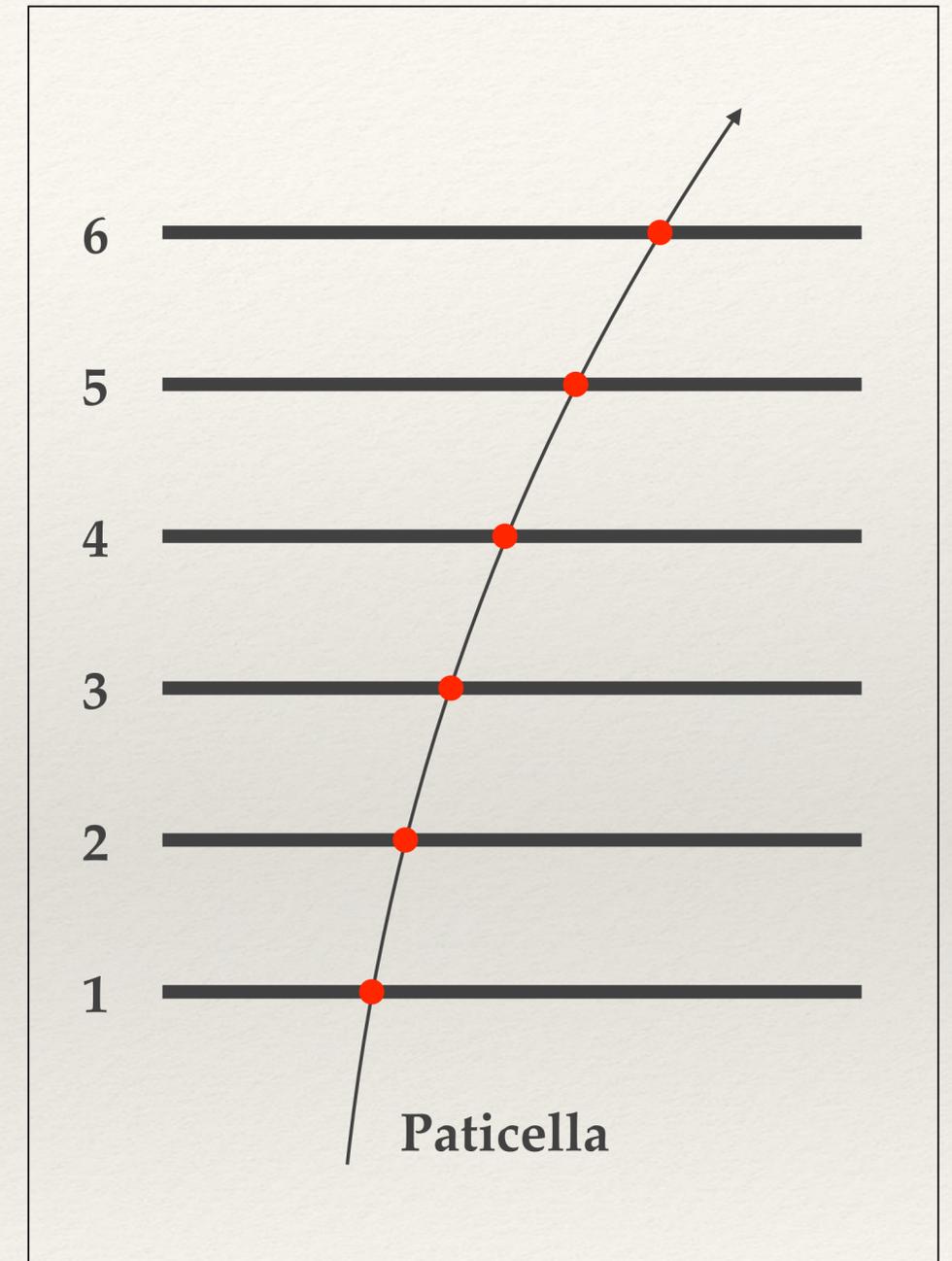
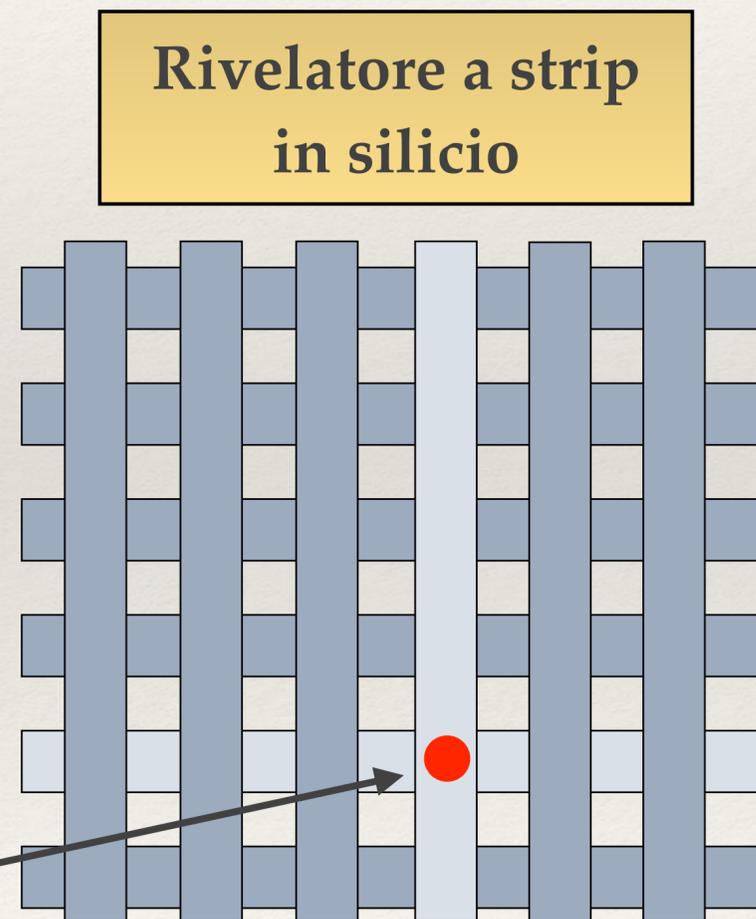
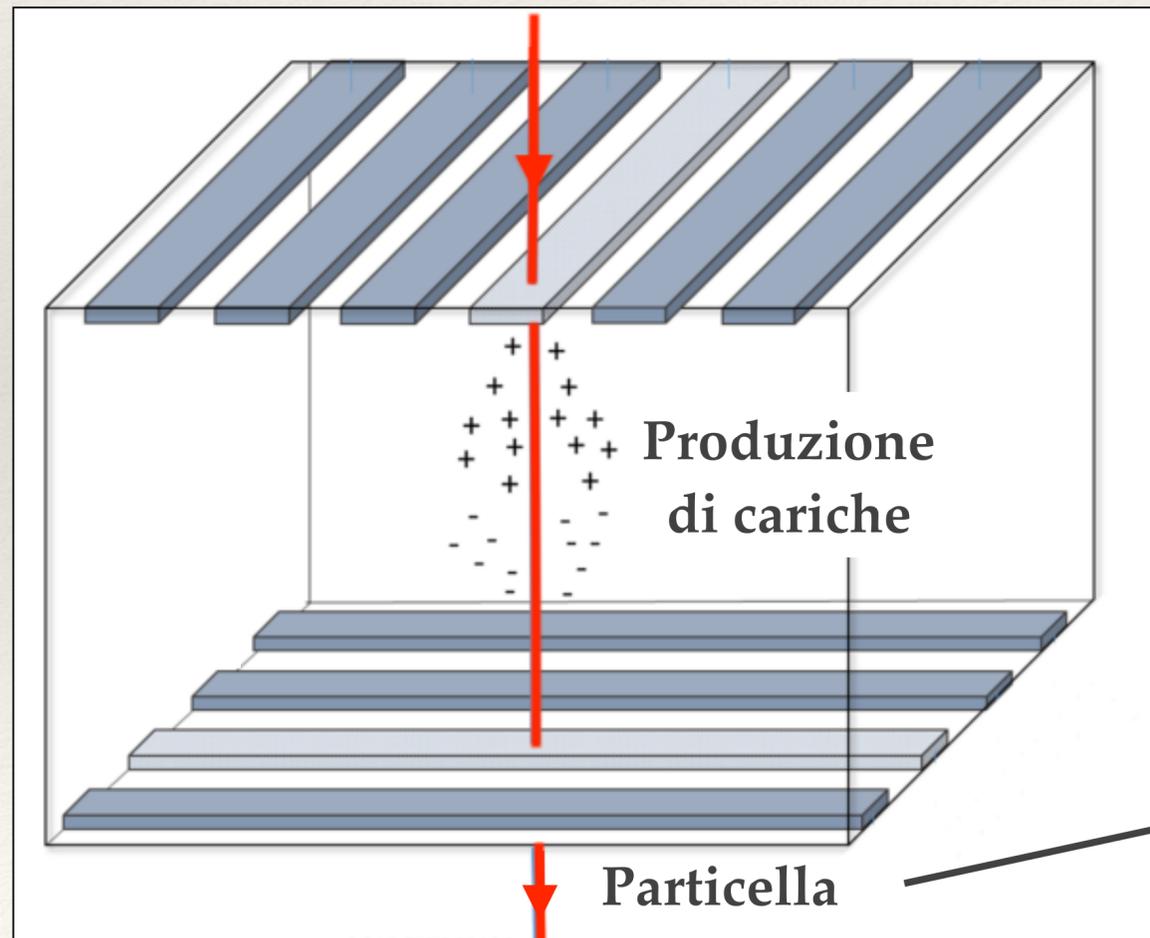
VXD - CDC

TOP - ARICH

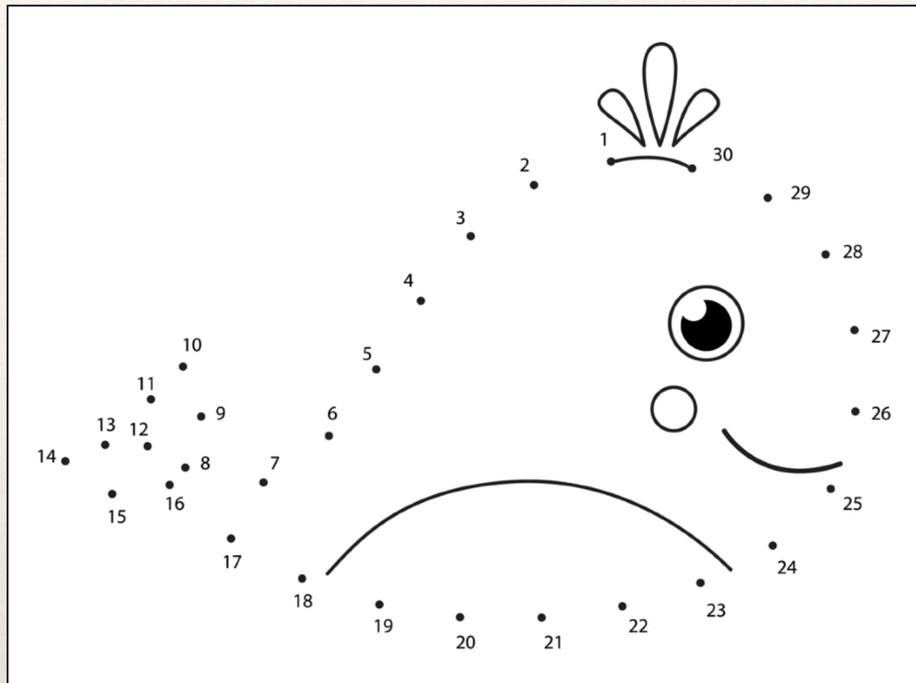
ECL

# Tracciatura delle particelle

- Una particella carica rilascia energia quando attraversa un mezzo.
- Vengono prodotte cariche elettriche, che generano un segnale elettrico.
- Si ottiene la posizione in cui la particella ha attraversato il materiale.
  - Detector al silicio (rivelatore di vertice).
  - Detector a gas (camera a deriva).

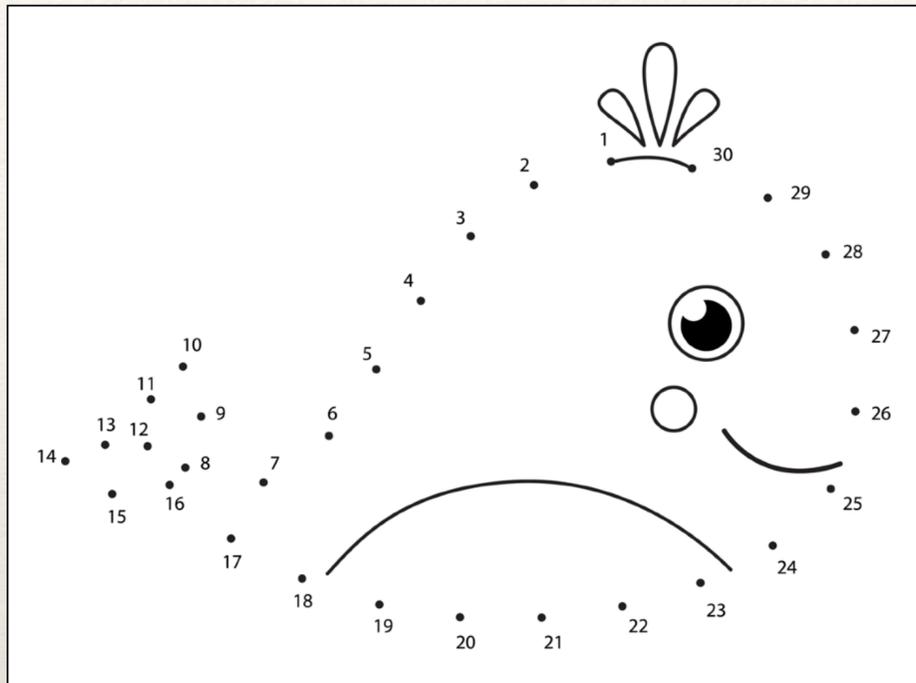


# Come ricavare la traiettoria di una particella



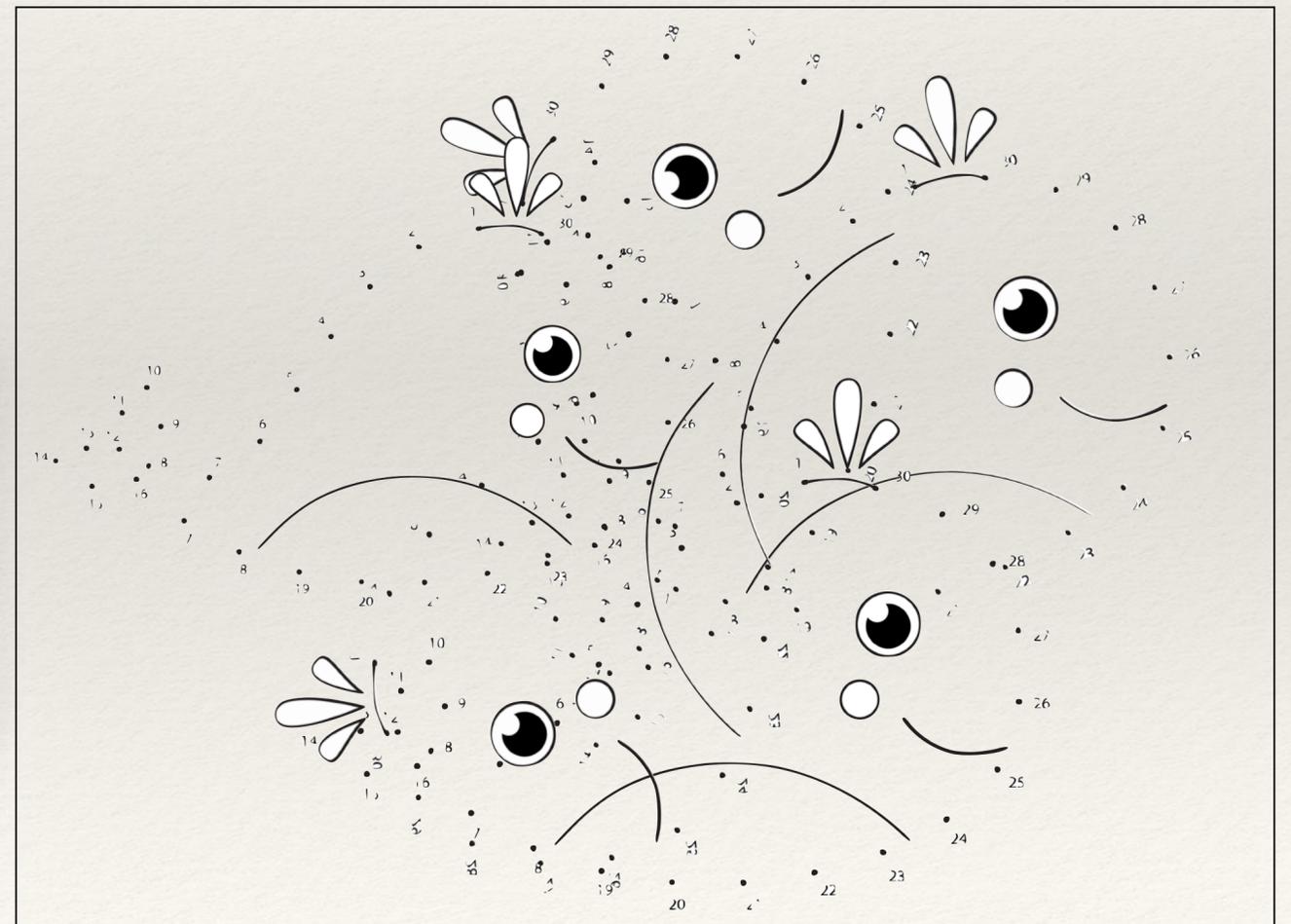
Avendo un punto nello spazio per ogni layer, è sufficiente unire i puntini per ottenere la traiettoria della particella. Sembra facile...

# Come ricavare la traiettoria di una particella



Avendo un punto nello spazio per ogni layer, è sufficiente unire i puntini per ottenere la traiettoria della particella. Sembra facile...

... se i puntini fanno tutti parte della stessa traiettoria. Se ci sono decine di particelle, il problema si complica, e non è facile assegnare i puntini alla traiettoria giusta.



# Campo magnetico

- ◉ Una particella carica è soggetta alla forza di Lorentz:

$$\vec{F}_L = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

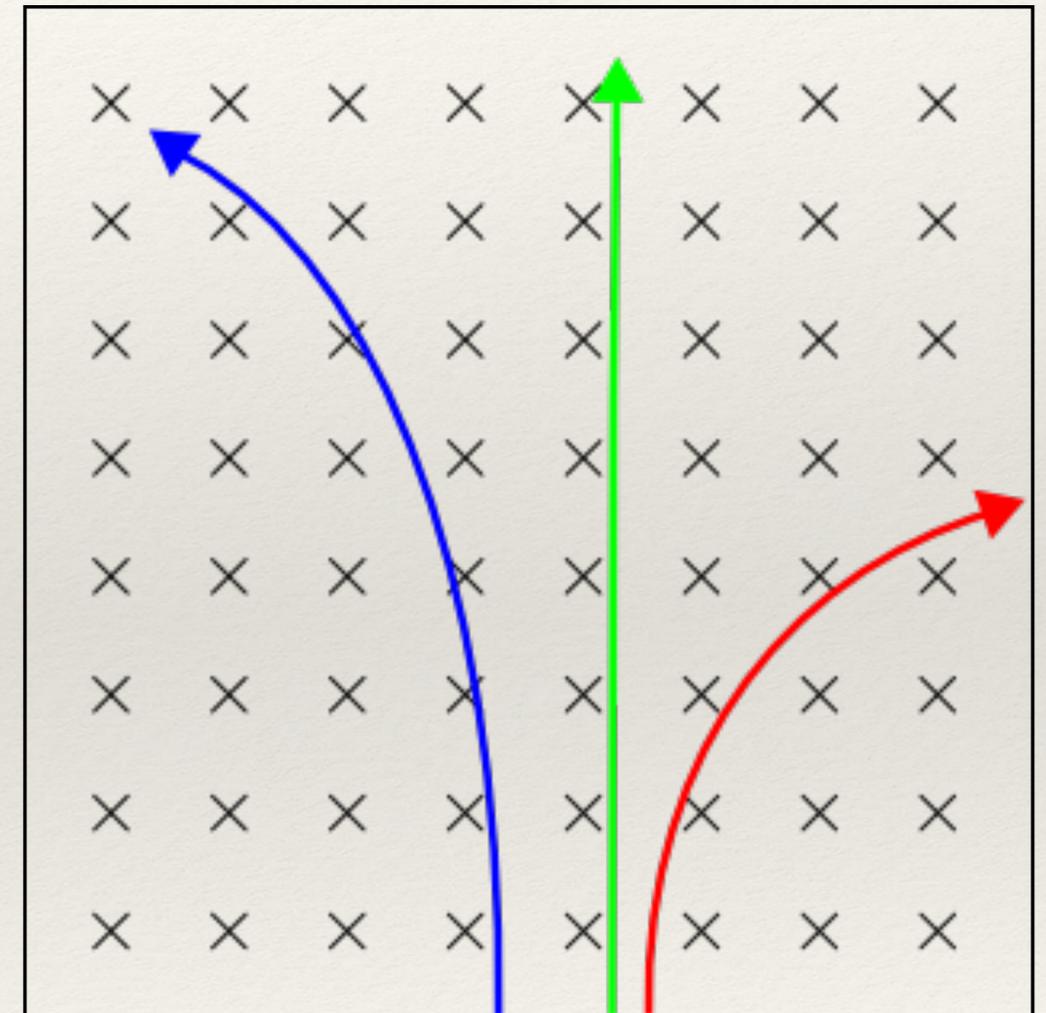
- ◉ La presenza di un campo magnetico determina l'azione di una forza che fa curvare la traiettoria della particella.

# Campo magnetico

- Una particella carica è soggetta alla forza di Lorentz:

$$\vec{F}_L = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- La presenza di un campo magnetico determina l'azione di una forza che fa curvare la traiettoria della particella.
  - Se cambia il segno della carica, cambia il verso della forza: la traiettoria è curvata nel verso opposto.

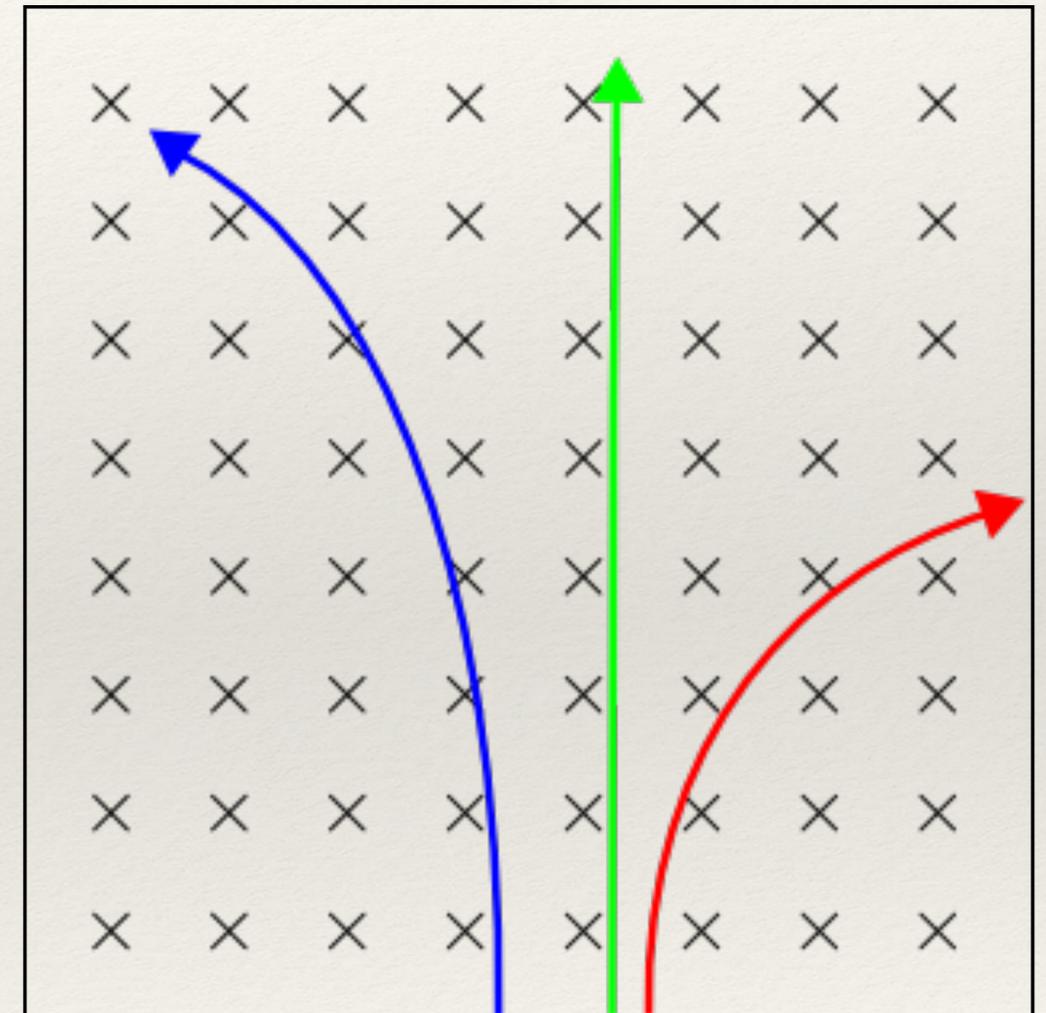


# Campo magnetico

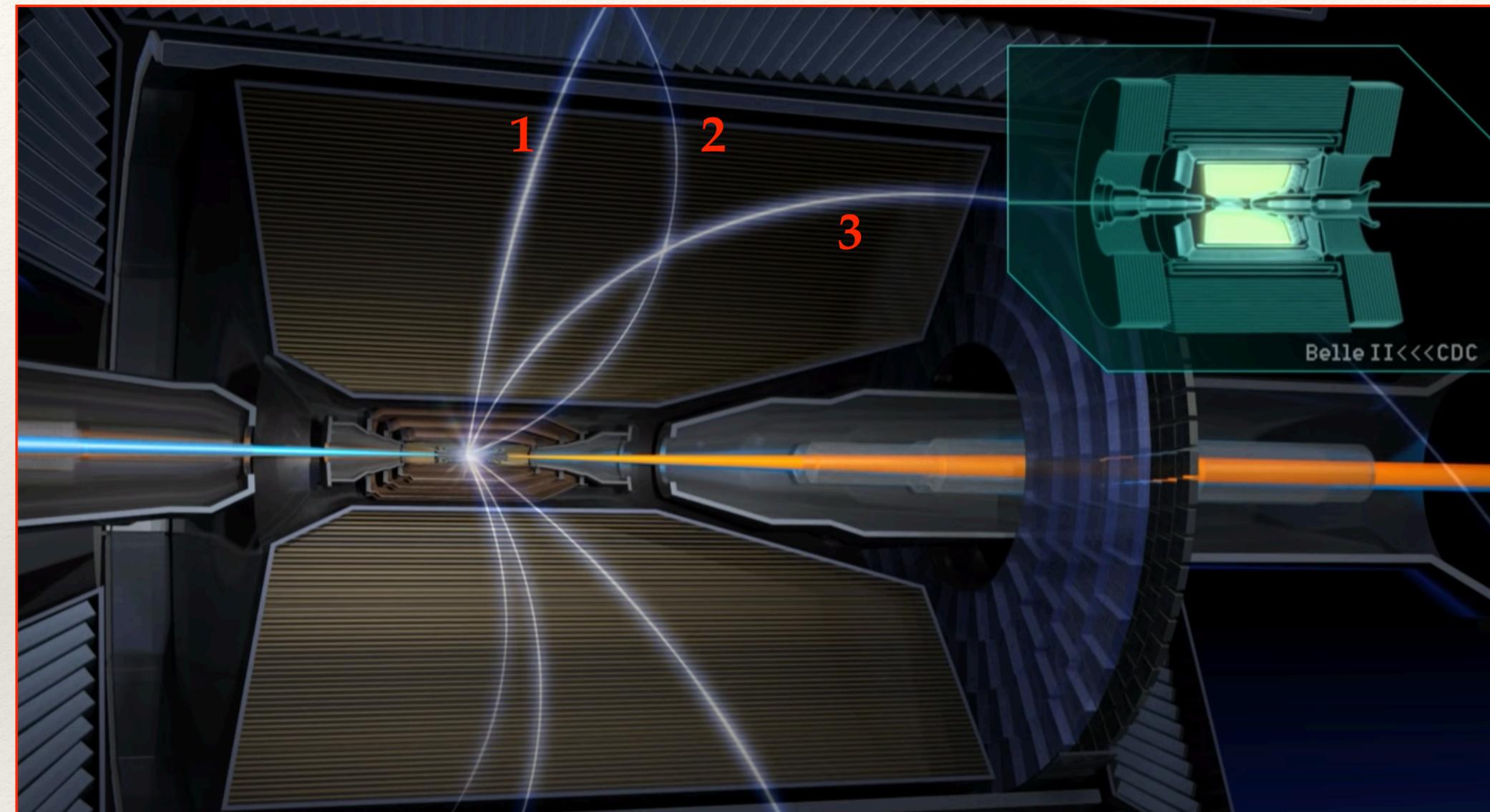
- Una particella carica è soggetta alla forza di Lorentz:

$$\vec{F}_L = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- La presenza di un campo magnetico determina l'azione di una forza che fa curvare la traiettoria della particella.
  - Se cambia il segno della carica, cambia il verso della forza: la traiettoria è curvata nel verso opposto.
- Al variare della quantità di moto trasverso (o impulso, momentum in inglese) della particella carica,  $\vec{p}_t = m\vec{v}_t$ , varia il raggio di curvatura della traiettoria.
  - Misurando il raggio di curvatura, si può misurare l'impulso trasverso:  $R_c = \frac{p_t}{qB}$



# Sistema di tracciatura di Belle II



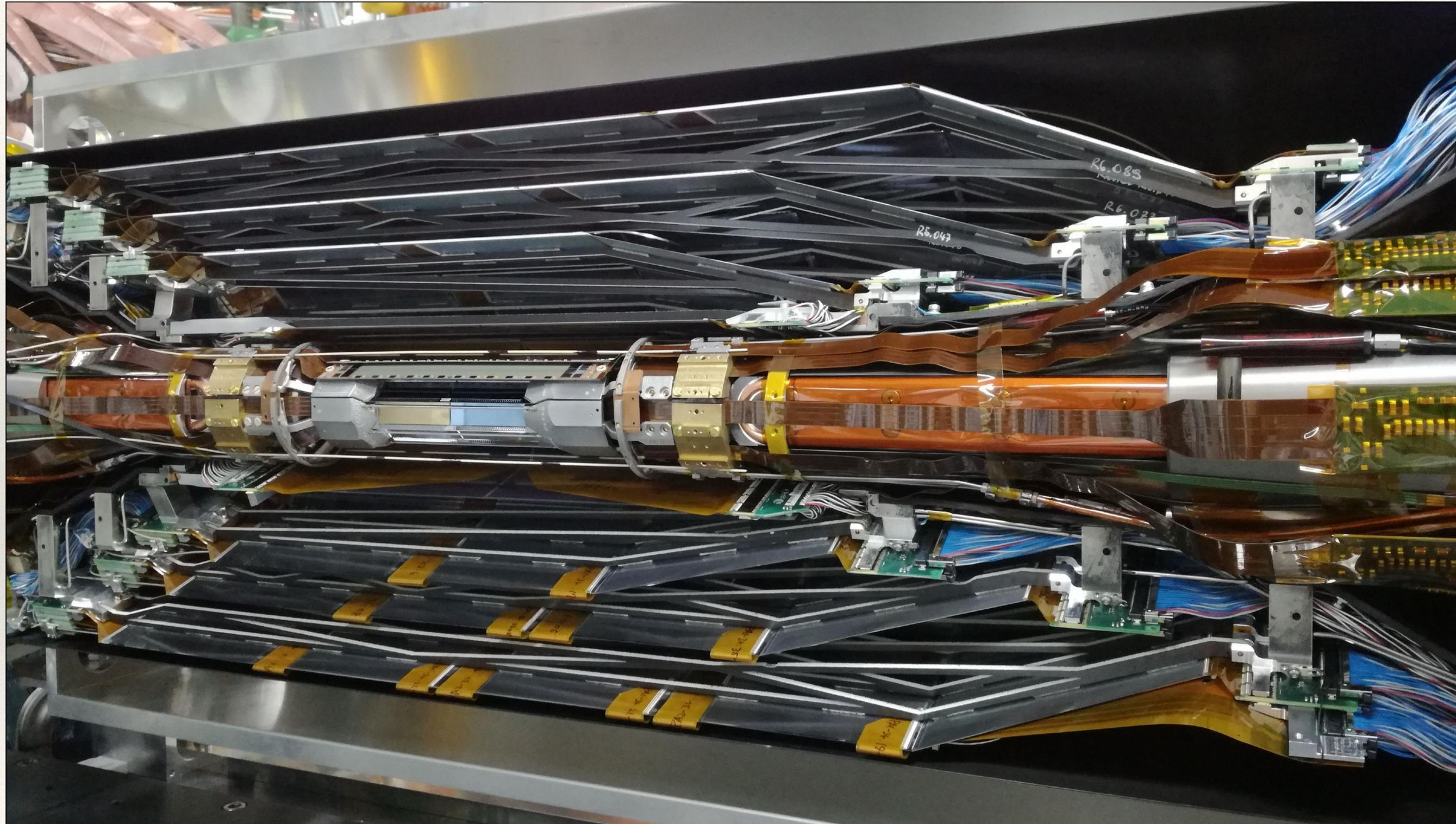
## VXD

- ◉ 6 layer, 2 di pixel, 4 di strip.
- ◉ Precisione del centesimo di millimetro.
- ◉ Raggio tra 14 mm e 135 mm.
- ◉ Superficie totale in silicio: 1.25 m<sup>2</sup>.

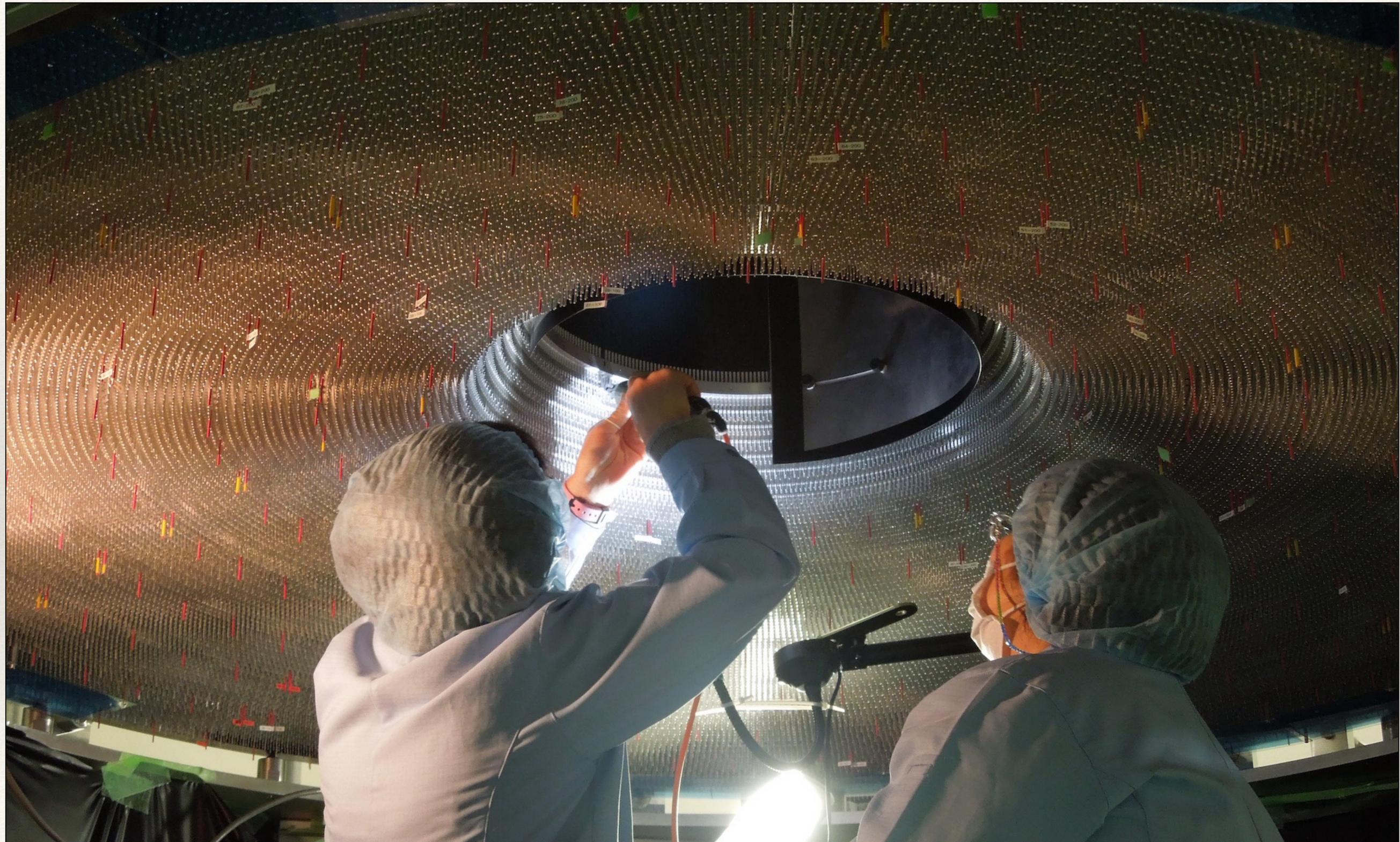
## CDC

- ◉ Raggio tra 160 mm e 1130 mm.
- ◉ Composta da 56576 fili!
- ◉ Riempita con un gas a base di elio.

# VXD di Belle II



# CDC di Belle II



# Identificazione delle particelle

$\vec{p} = m\vec{v}$  Non ci dà ancora informazione sull'identità della particella!

# Identificazione delle particelle

$\vec{p} = m\vec{v}$  Non ci dà ancora informazione sull'identità della particella!

- ◉ La velocità della luce nel vuoto, indicata con  $c$ , è la velocità massima raggiungibile.
- ◉ La velocità della luce in un mezzo materiale è:

$$v_l = \frac{c}{n}$$

dove  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo materiale.

- ◉ In acqua:  $n=1.33$   $v_l = 0.75 \cdot c$
- ◉ Se in acqua una particella **carica** ha una velocità maggiore di  $0.75 \cdot c$  avviene l'effetto Cherenkov: la particella genera un cono di luce, simile all'onda d'urto di un aereo supersonico.

# Identificazione delle particelle

$\vec{p} = m\vec{v}$  Non ci dà ancora informazione sull'identità della particella!

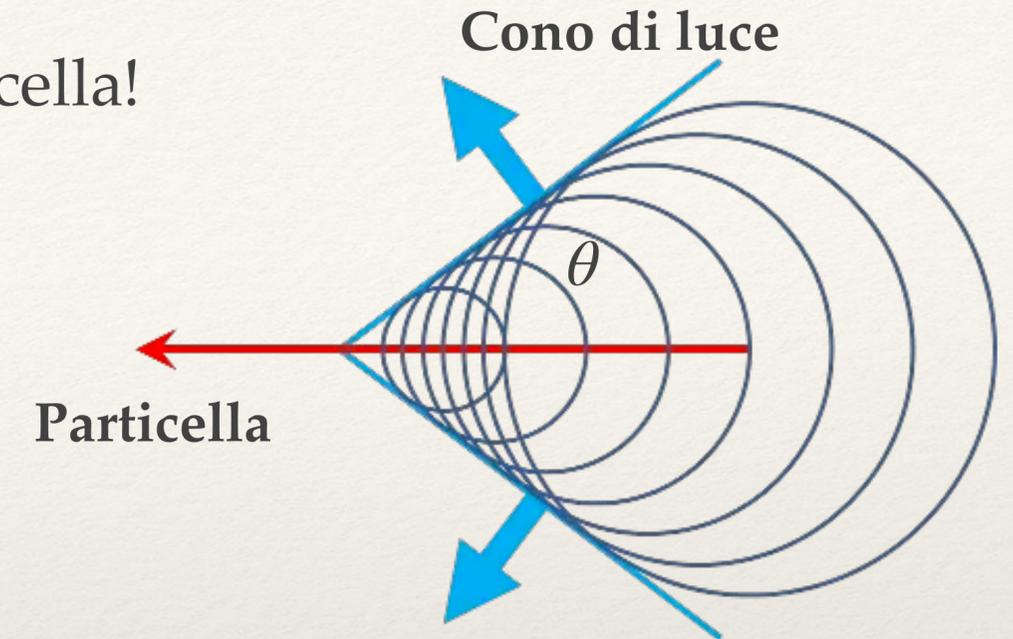
- La velocità della luce nel vuoto, indicata con  $c$ , è la velocità massima raggiungibile.
- La velocità della luce in un mezzo materiale è:

$$v_l = \frac{c}{n}$$

dove  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo materiale.

- In acqua:  $n=1.33$   $v_l = 0.75 \cdot c$
- Se in acqua una particella **carica** ha una velocità maggiore di  $0.75 \cdot c$  avviene l'effetto Cherenkov: la particella genera un cono di luce, simile all'onda d'urto di un aereo supersonico.

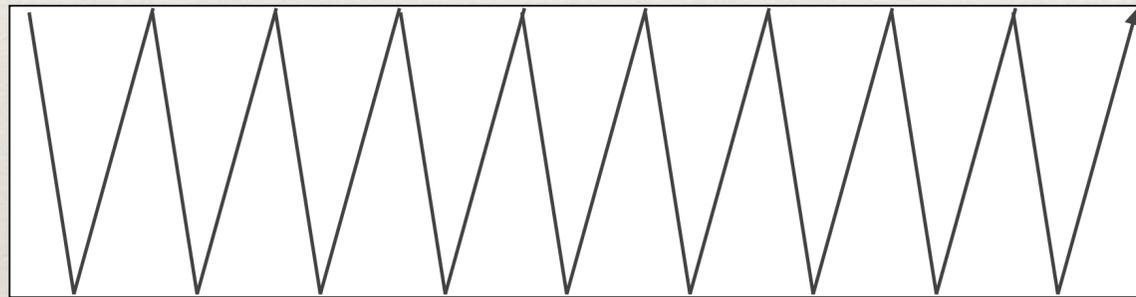
$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad \vec{p} = m\vec{v}$$



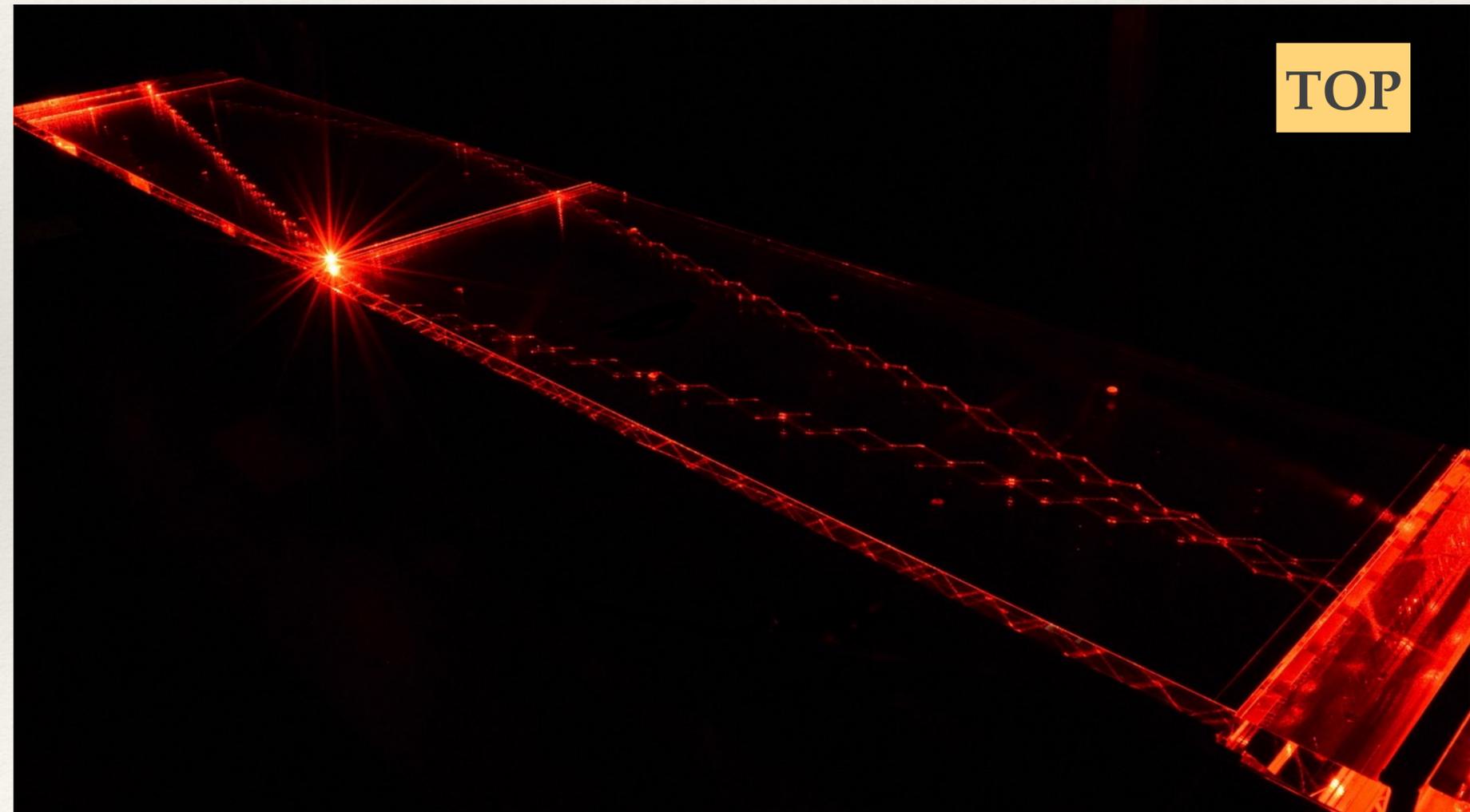
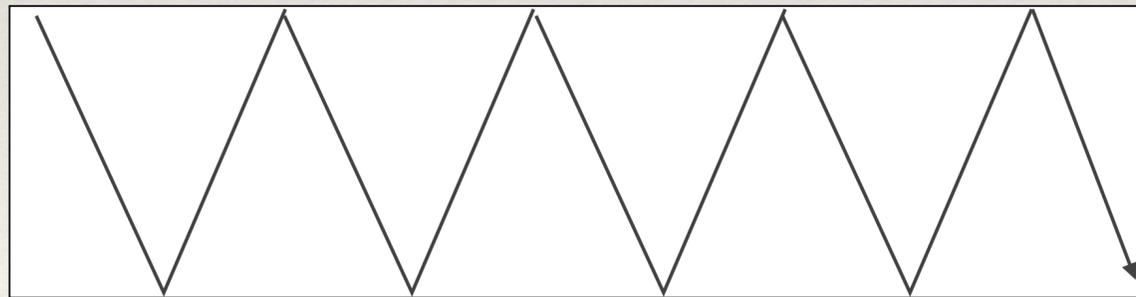
# Detector di identificazione - TOP

Nel detector TOP il tempo di propagazione della luce Cherenkov dipende dall'angolo  $\theta$ . Misurando il tempo di propagazione dei **fotoni** si risale alla velocità della particella incidente.

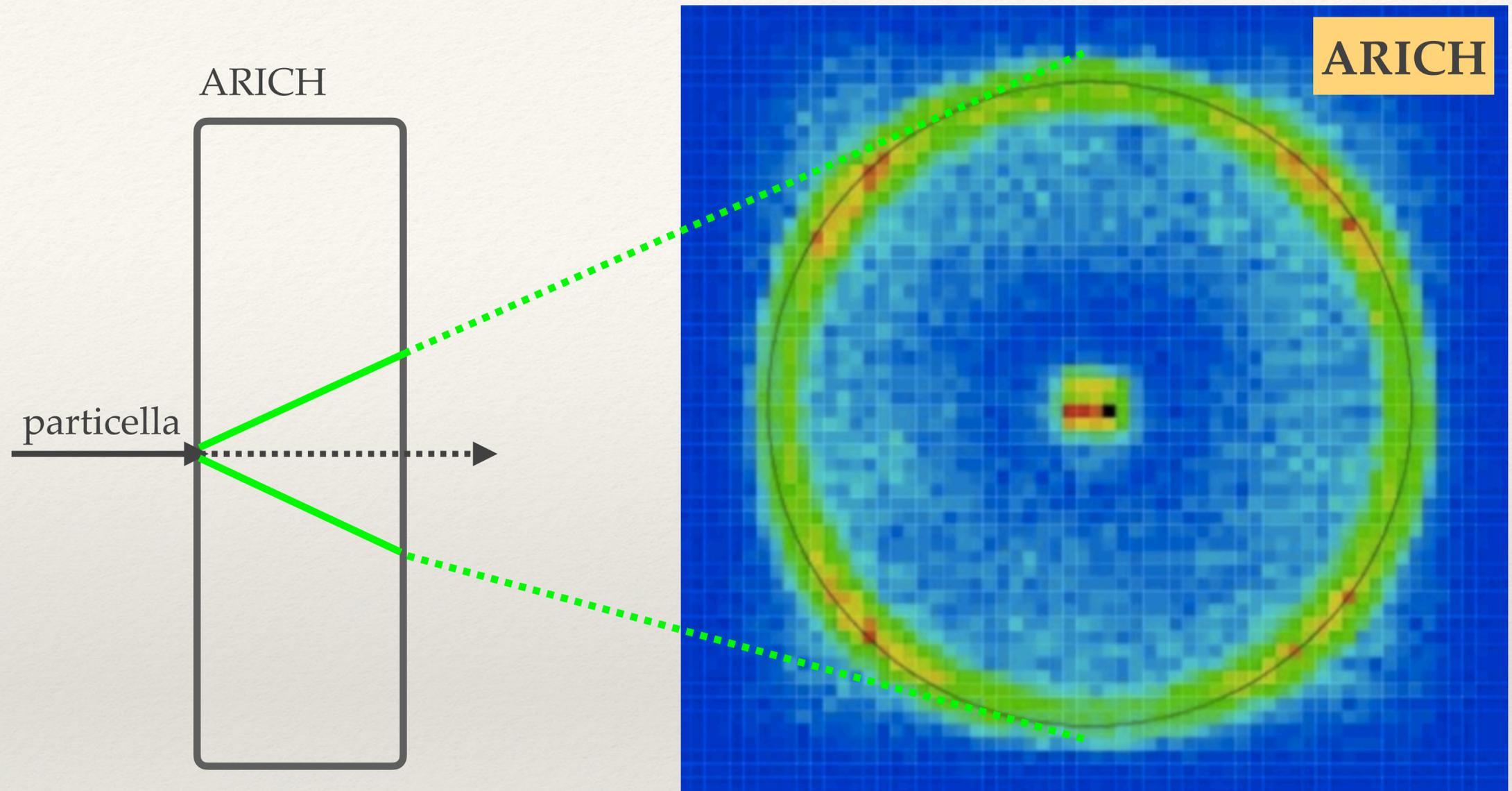
Particella 1



Particella 2

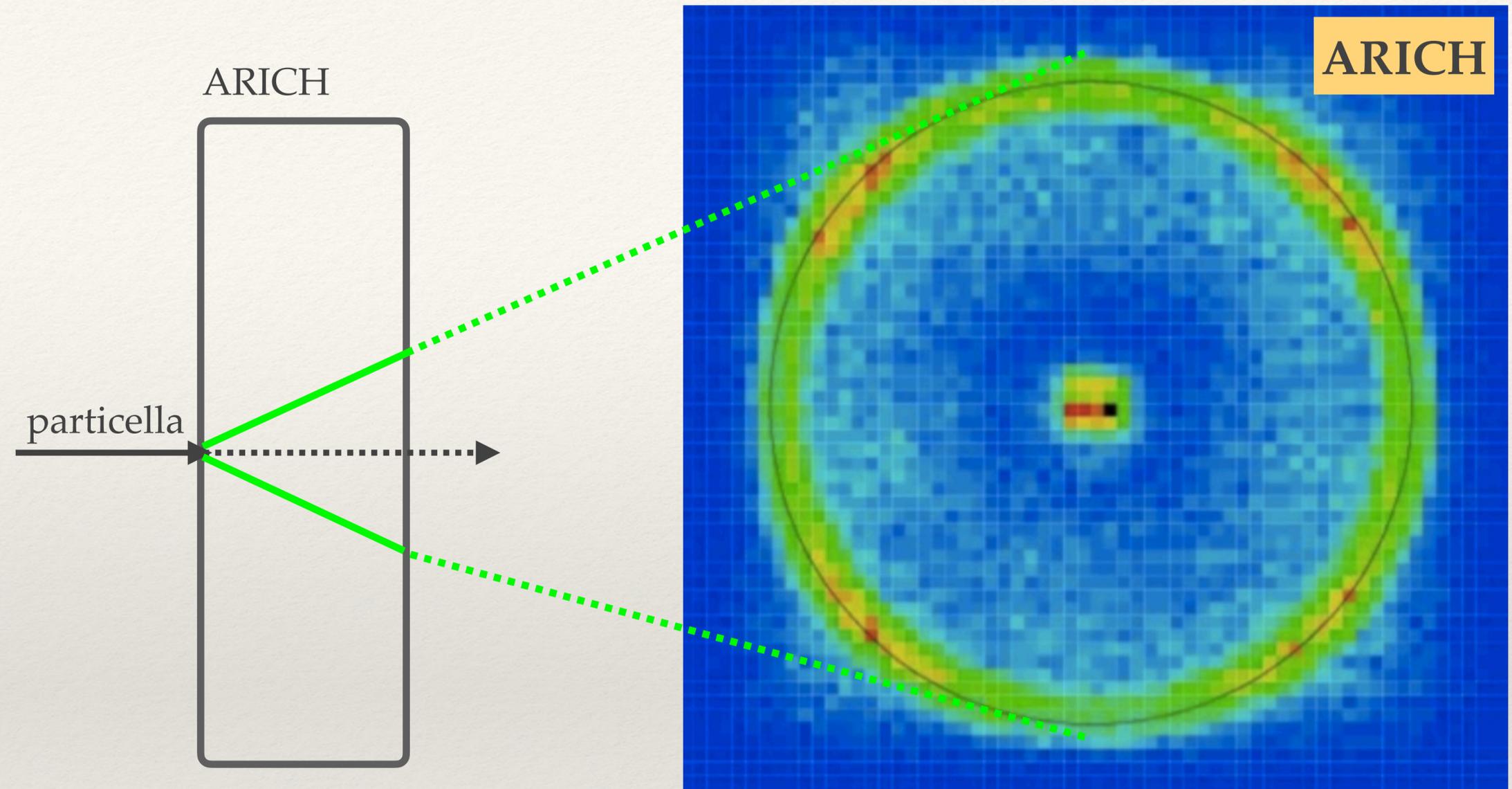
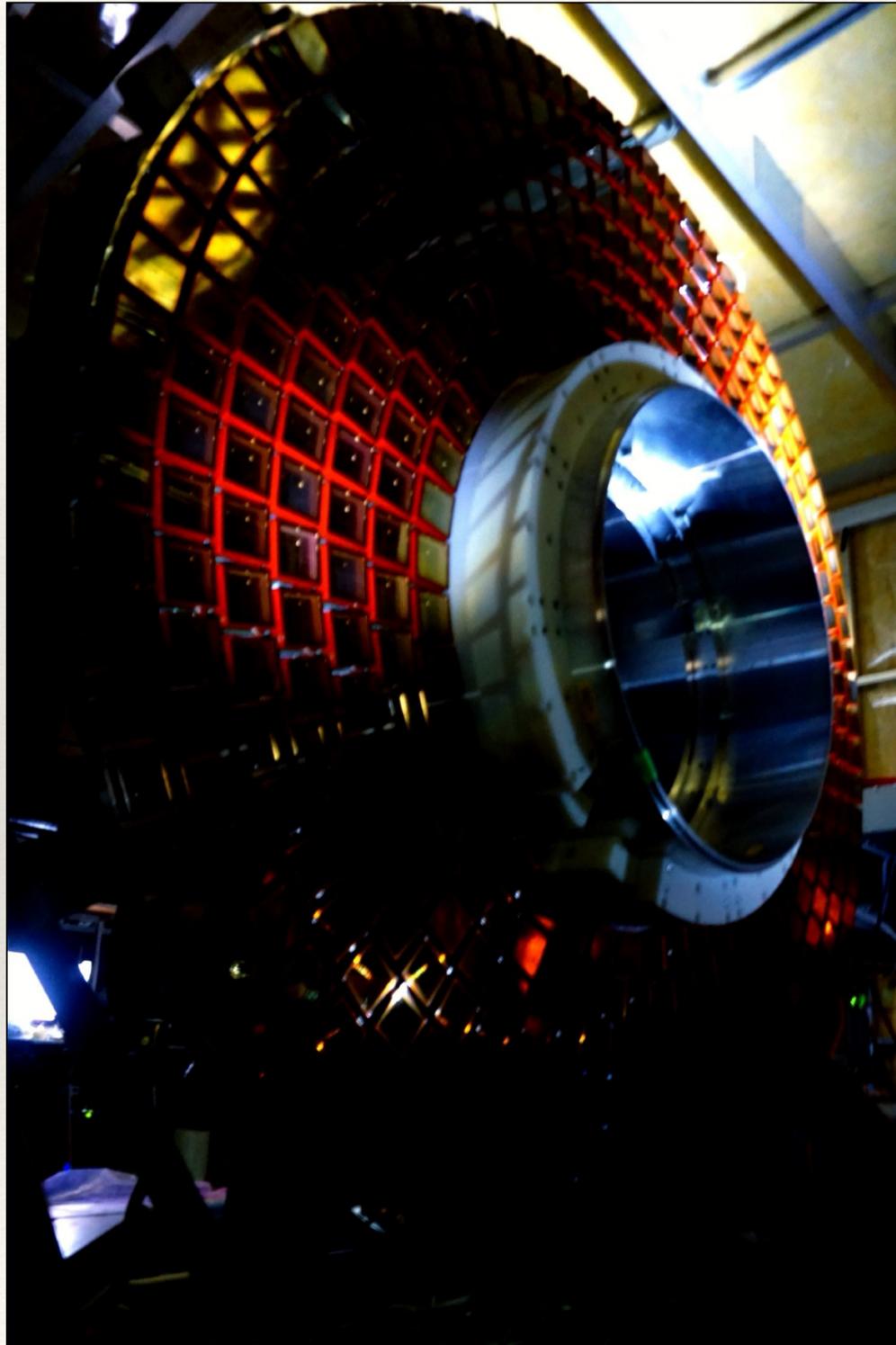


# Detector di identificazione - ARICH



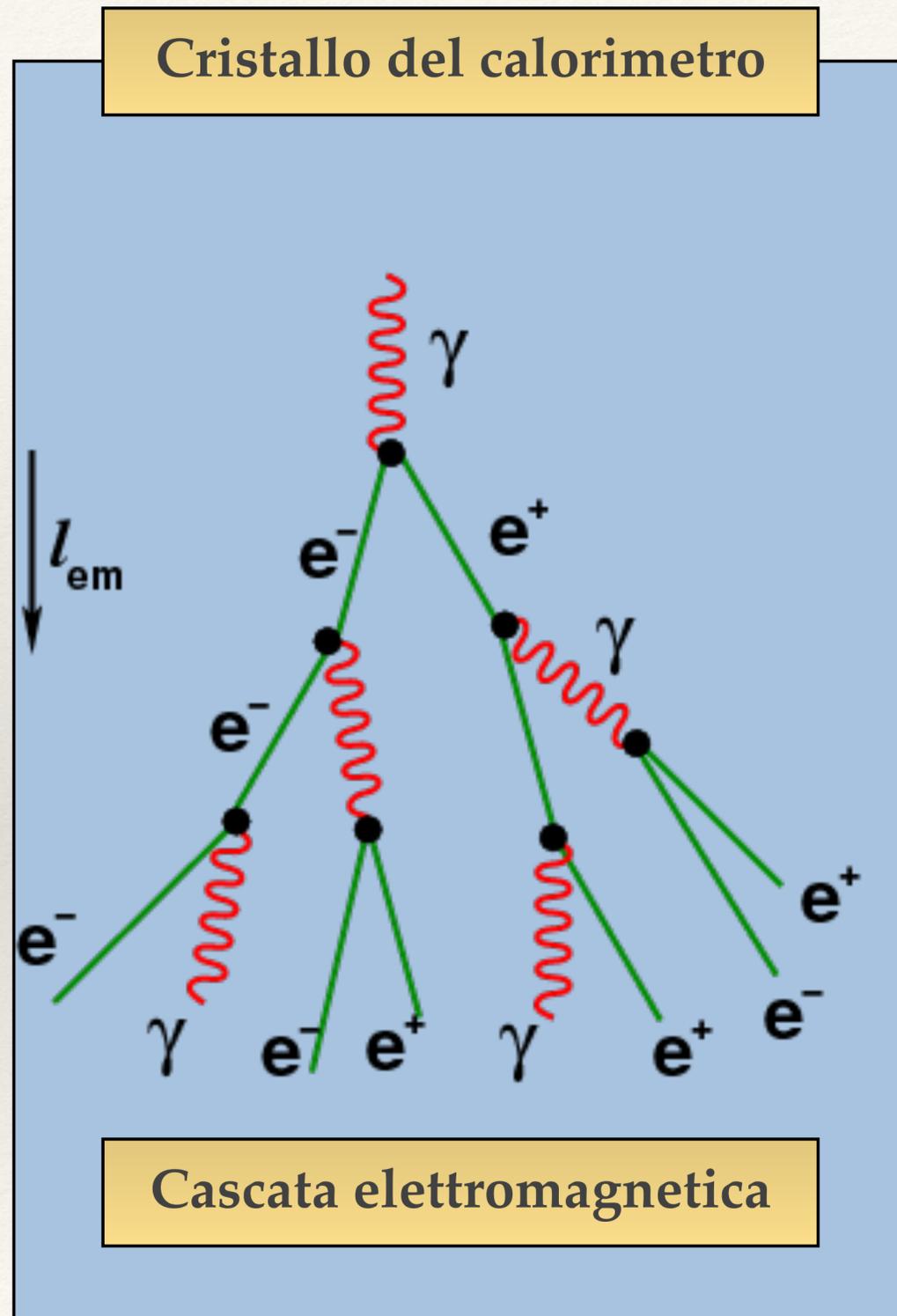
Nel detector ARICH si osservano gli anelli prodotti dal cono di luce Cherenkov, da cui si risale all'angolo  $\theta$  e quindi alla velocità.

# Detector di identificazione - ARICH



Nel detector ARICH si osservano gli anelli prodotti dal cono di luce Cherenkov, da cui si risale all'angolo  $\theta$  e quindi alla velocità.

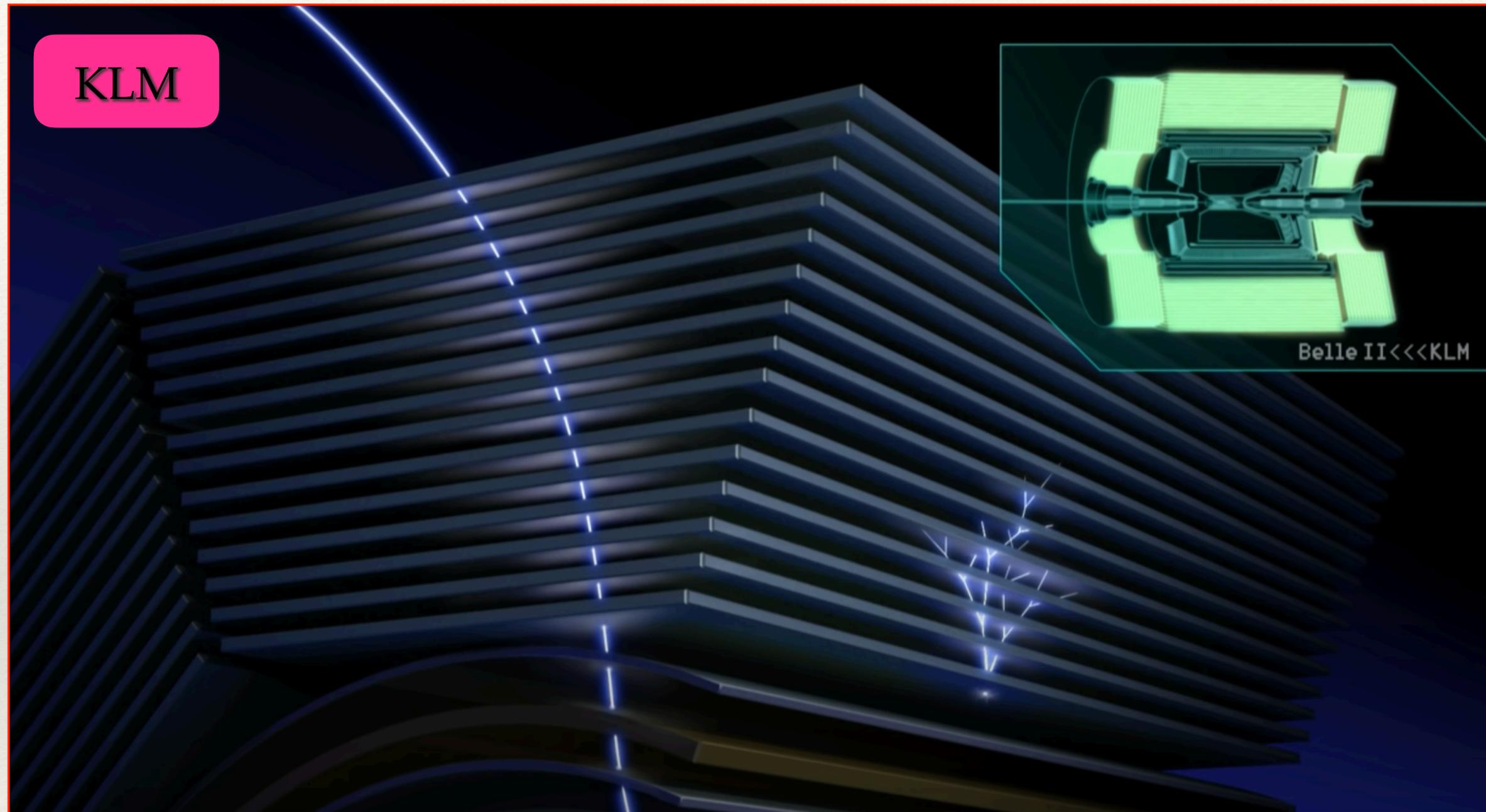
# Misurazione dell'energia: calorimetro



- ◉ Un elettrone, o un fotone (quindi senza carica elettrica!), interagendo con un mezzo materiale abbastanza denso, possono provocare uno sciame (o cascata) elettromagnetico.
- ◉ Misura distruttiva: la particella o il fotone rilasciano tutta la loro energia e vengono completamente assorbiti dal cristallo.
- ◉ Possibilità di rivelare i fotoni.

Il calorimetro di Belle II (ECL) è composto da 8736 cristalli, ognuno di dimensioni  $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{ cm}^3$ , e da solo pesa circa 43 tonnellate.

# Rivelatore di muoni e mesoni K (KLM)



- ◉ Rivela muoni e mesoni  $K_L^0$ , che raggiungono gli strati più esterni del rivelatore.
- ◉ Materiale scintillatore alternato a lastre di materiale denso (ferro).

# Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

Traiettoria

Carica

Quantità  
di moto

Tipo

Energia

Sistema di tracciatura

Sistemi di  
identificazione

Calorimetro

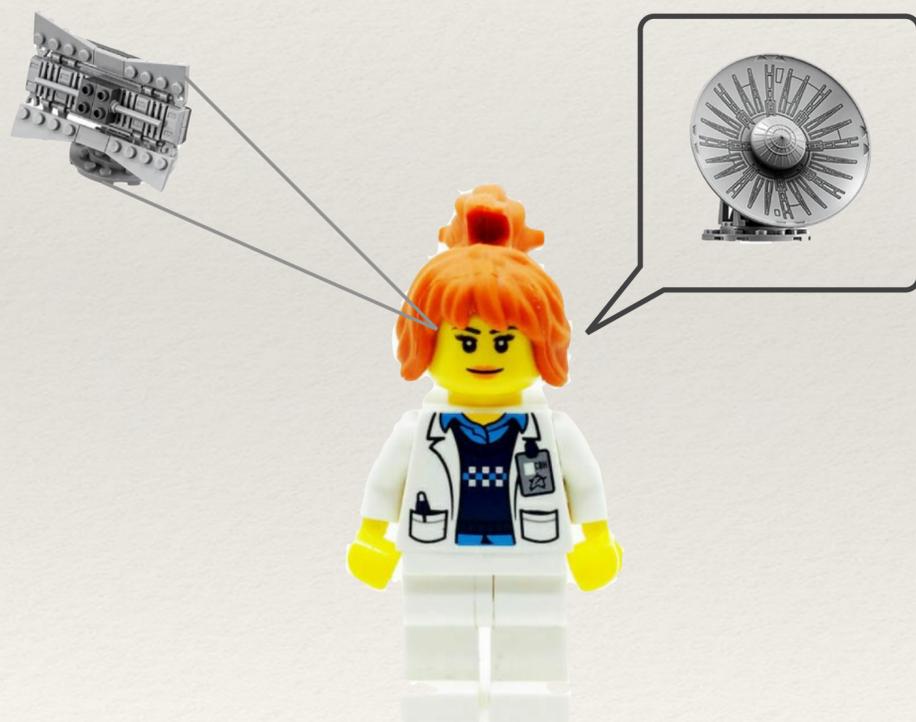
**VXD - CDC**

**TOP - ARICH**

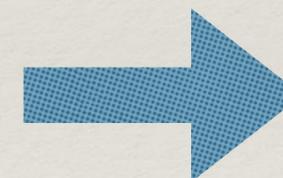
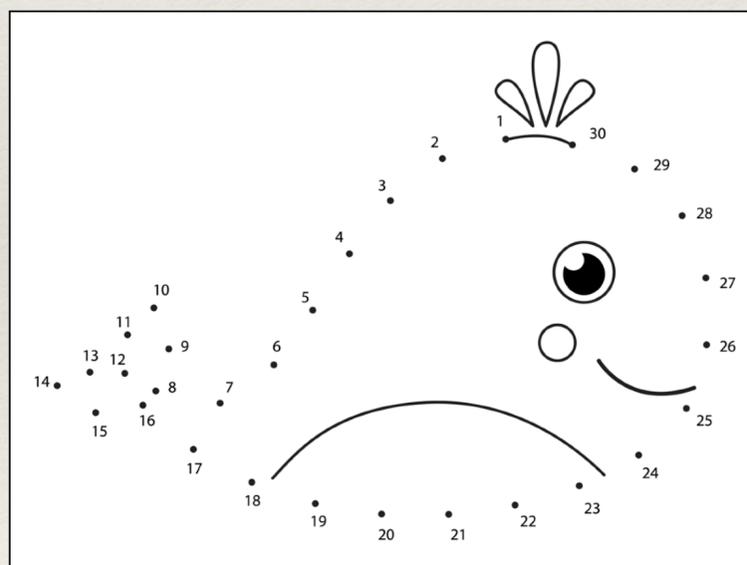
**ECL**

# NOTA: la realtà è (molto) diversa dalla teoria

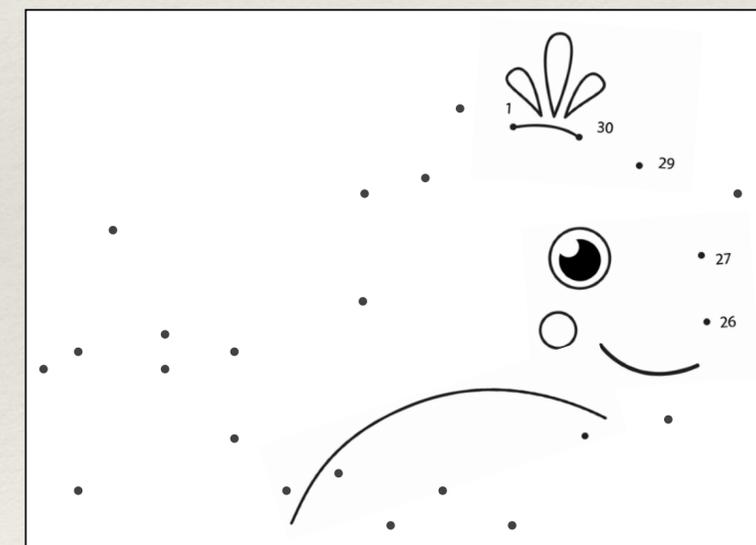
- ◉ Il detector non è un oggetto perfetto e infallibile. Può commettere vari errori:
  - ◉ non vedere uno o più “puntini” della traiettoria e non essere in grado di ricostruirla;
  - ◉ sbagliare il tipo di particella, la sua energia, la sua direzione...
- ◉ La ricostruzione di un decadimento non è immediata, vanno individuati e selezionati i candidati giusti, richiedendo determinate caratteristiche.



Aspettative



Realtà





Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Grazie per l'attenzione

E che la forza sia con voi

(almeno fino alle 17:00)

