



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Metodi sperimentali in fisica delle alte energie

Antonio Paladino - 2021/03/17
Belle II International Masterclass

OUTLINE

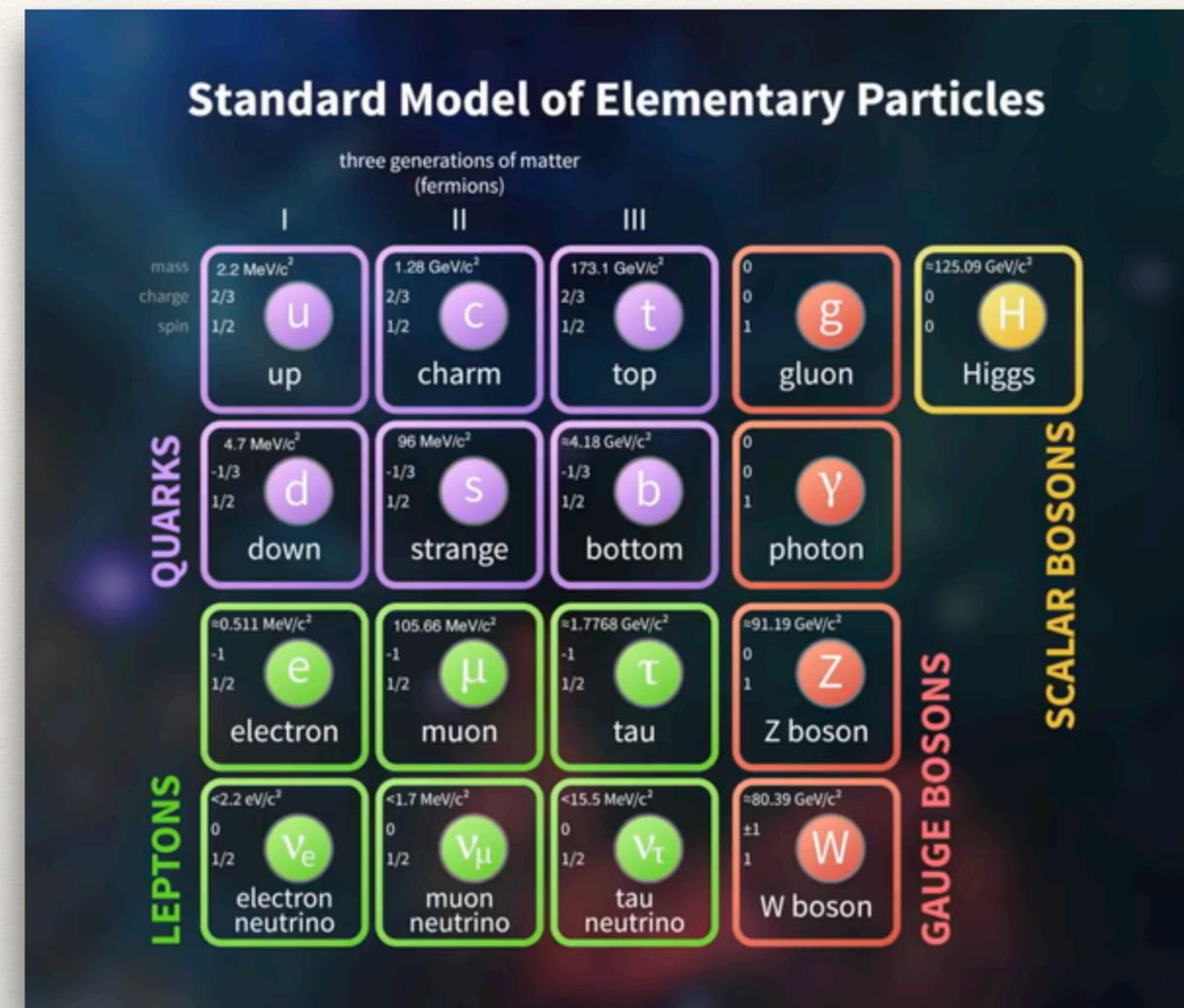
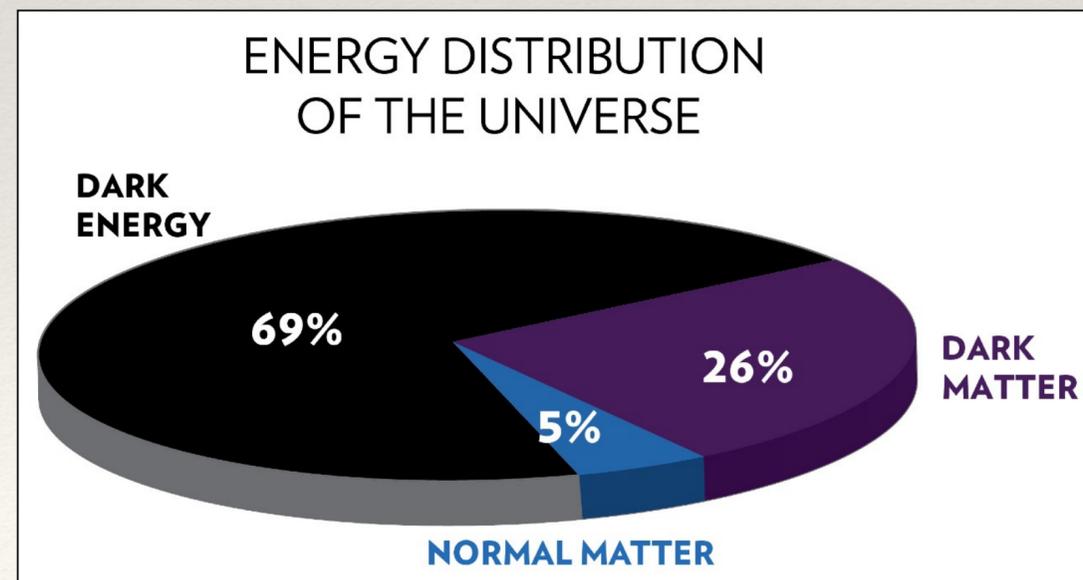
- ◉ Motivazioni per gli esperimenti di fisica delle alte energie
- ◉ Interazione fra particelle
- ◉ L'acceleratore SuperKEKB
- ◉ Il detector Belle II e i suoi componenti
- ◉ Ricostruzione di un evento di fisica

Il nostro universo

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

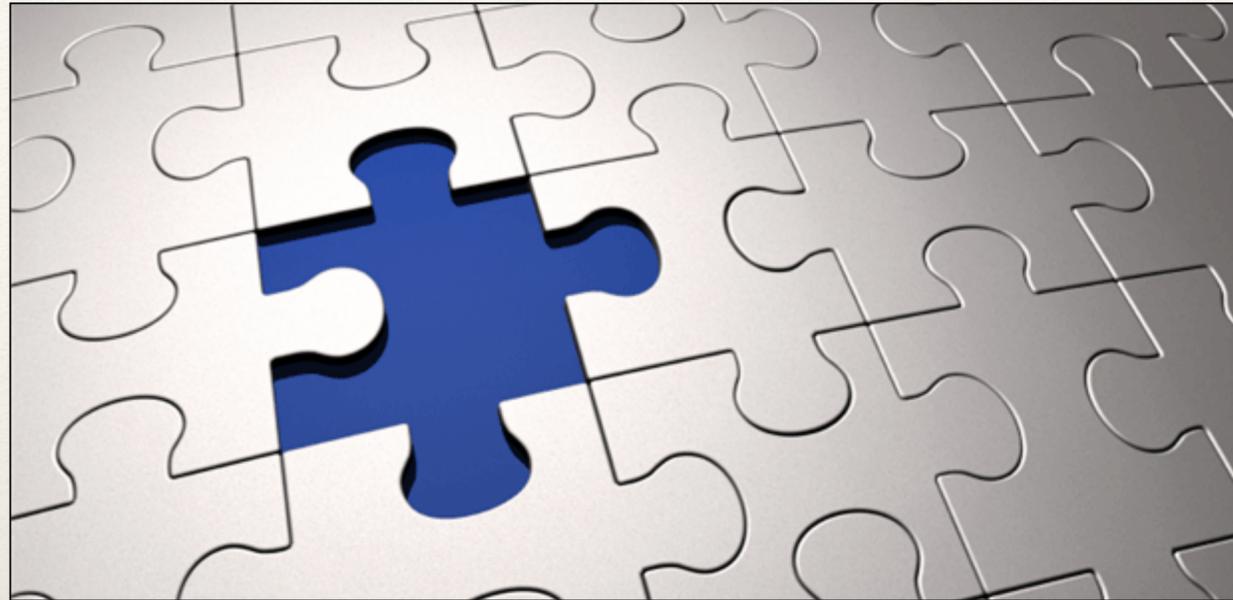
- ✓ Le particelle elementari e le loro interazioni fondamentali.
- ✓ Stati legati di mesoni e barioni.
- ✓ Larghezze di decadimento.
- ✓ Anche alcune piccole “anomalie” sono previste dal Modello Standard e sono correttamente osservate.

... 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 ciò che oggi chiamiamo “energia oscura” e “materia oscura”.

... manca qualcosa ...

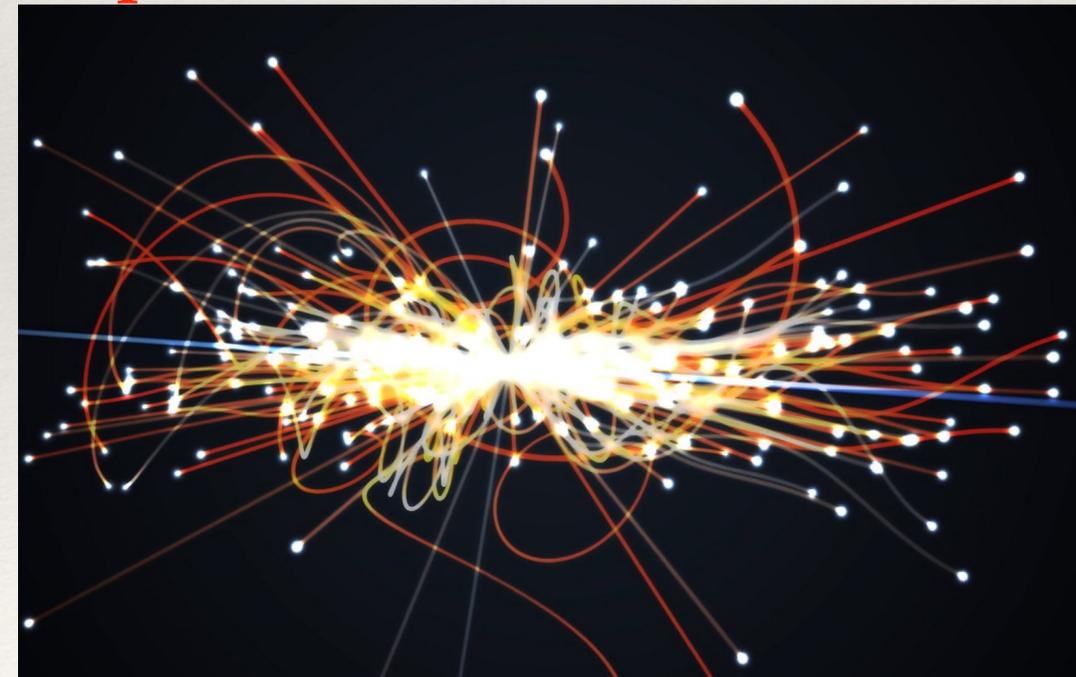


... ma come cercare i pezzi mancanti?

Osservazioni astrofisiche



Riprodurre eventi in laboratorio

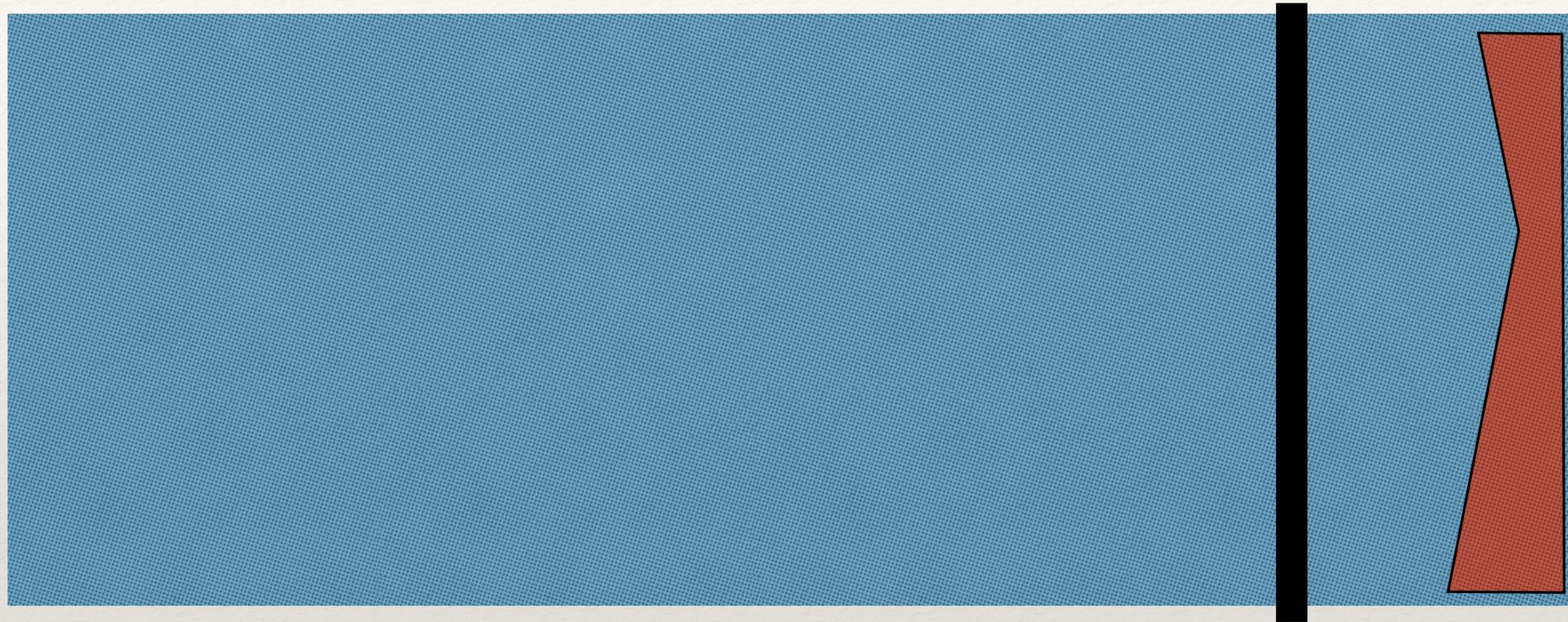


Come riprodurre eventi in laboratorio?

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

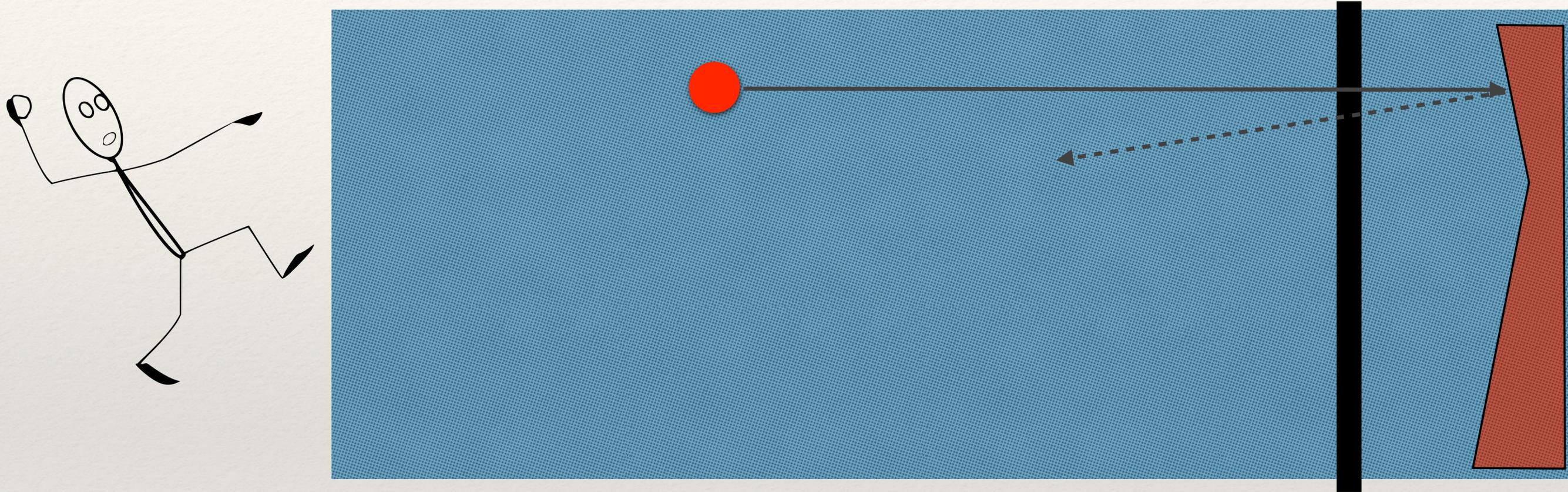
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



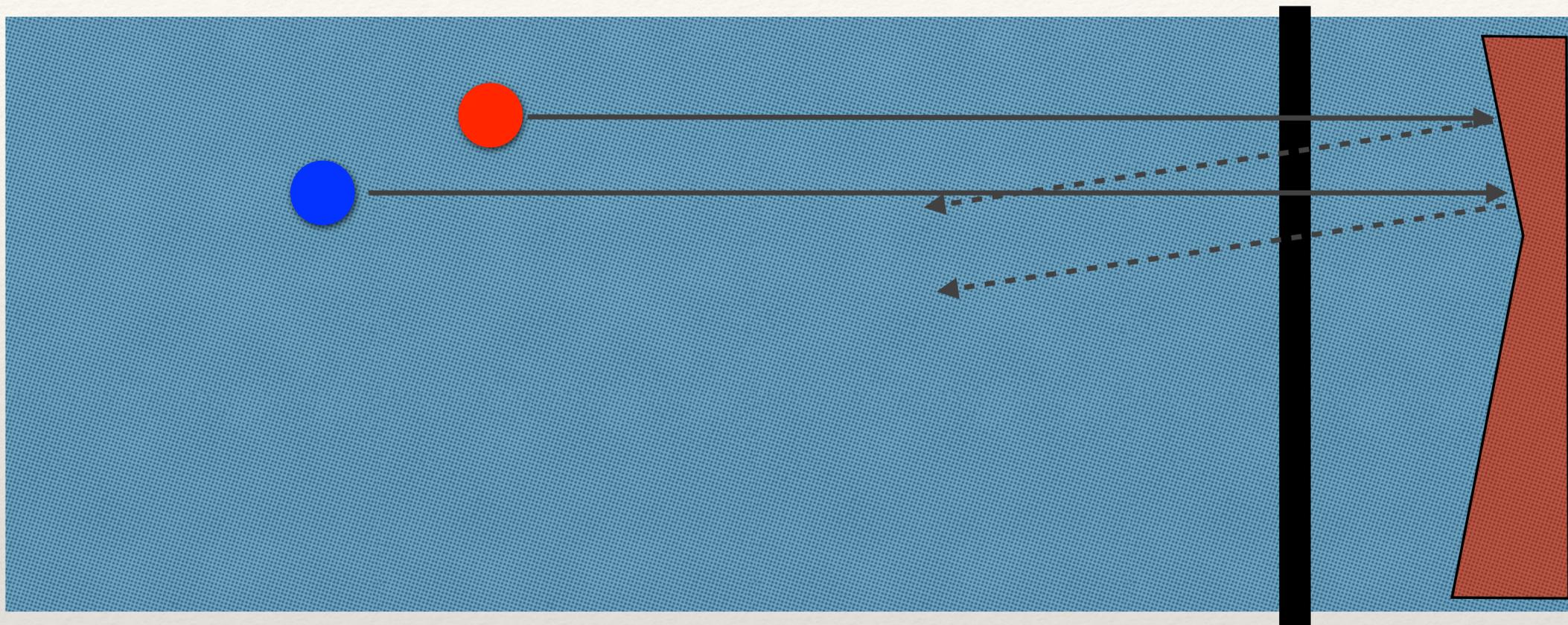
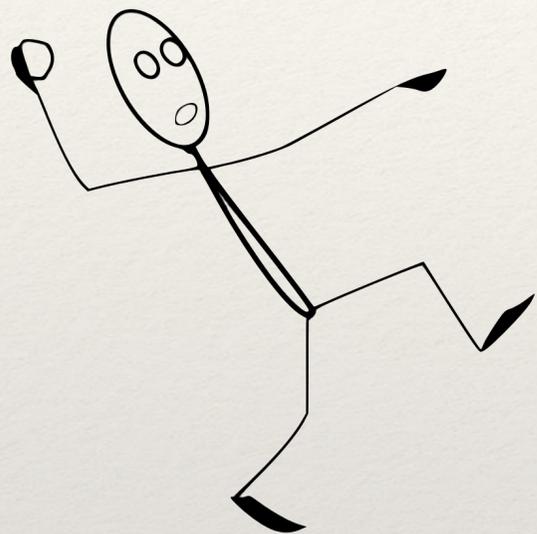
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



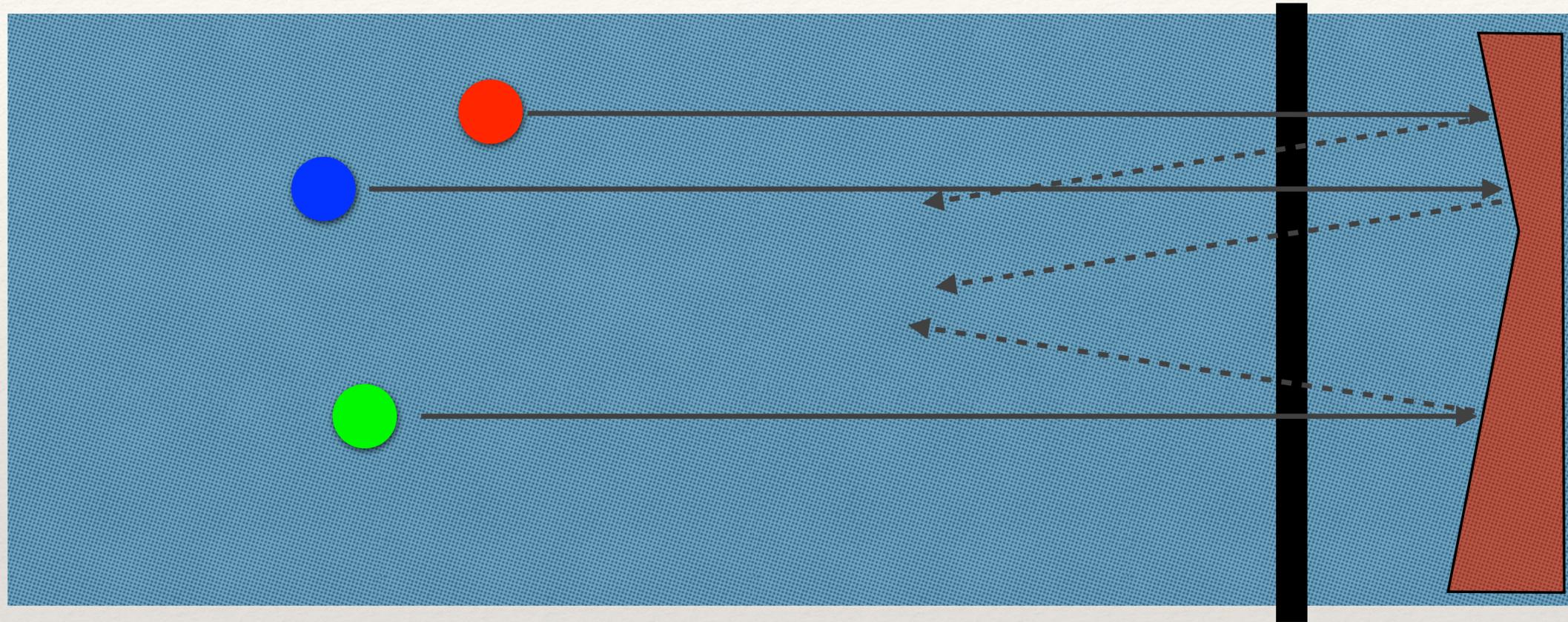
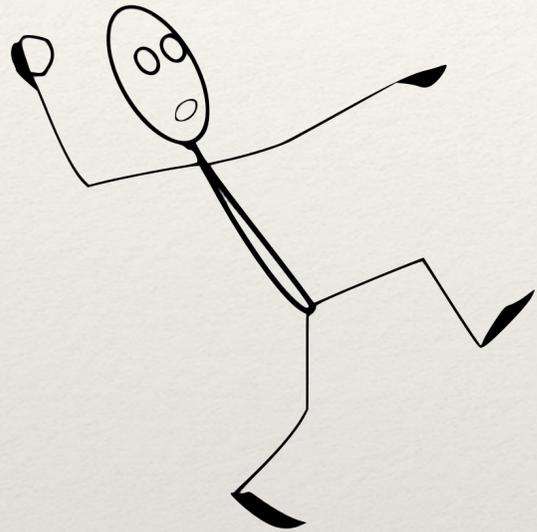
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



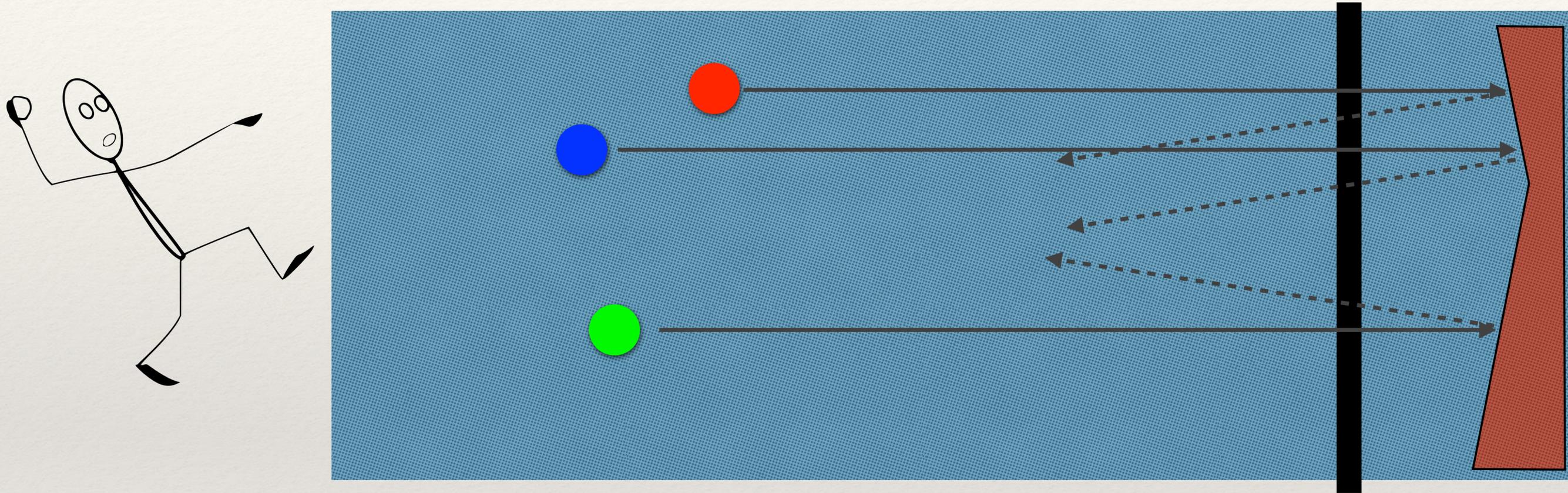
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



Come riprodurre eventi in laboratorio?

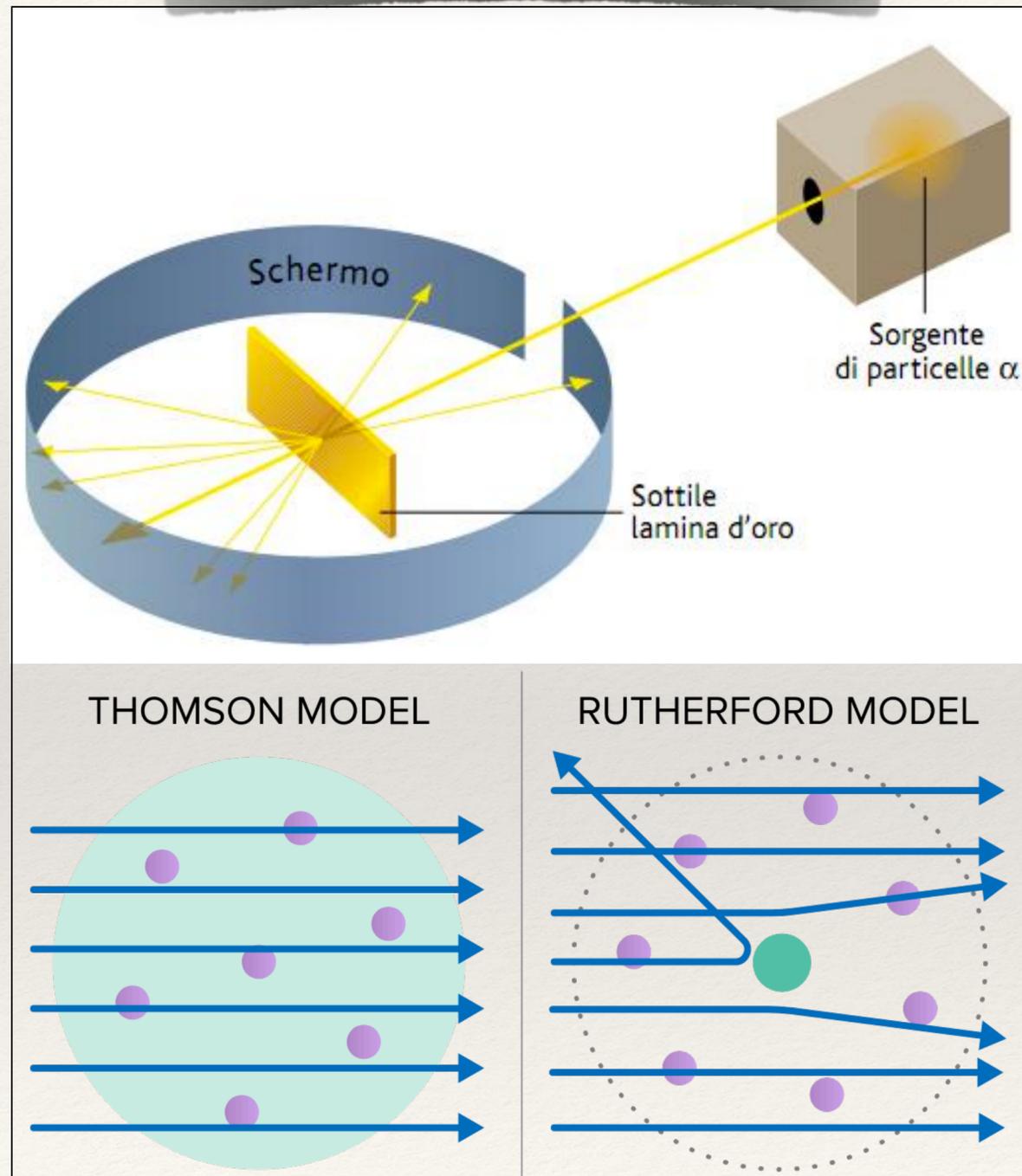
- Come possiamo capire la forma di un oggetto che non possiamo vedere?



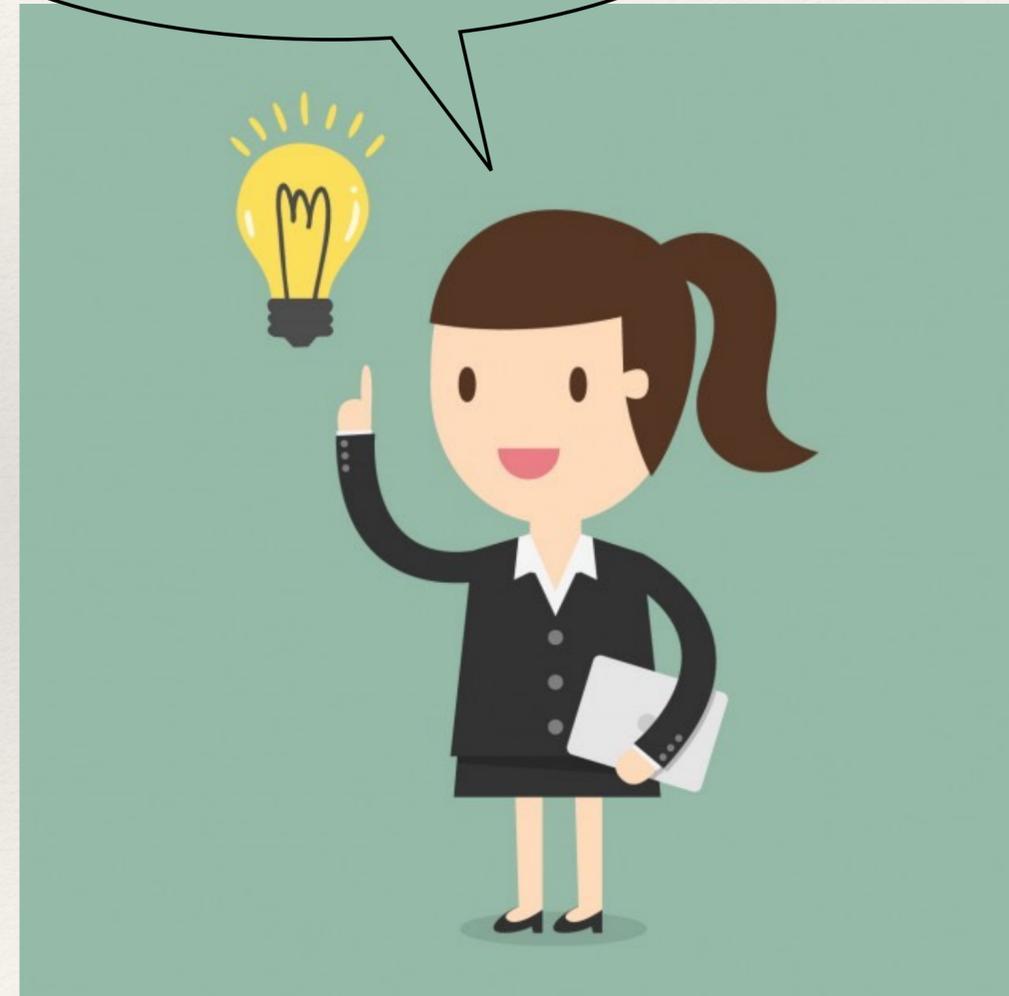
- Dalla direzione con cui le palline rimbalzano, possiamo capire la forma dell'oggetto.
- Che altre informazioni possiamo ricavare? Ad esempio il materiale dell'oggetto nascosto.
- Più lanci effettuiamo, più completa sarà la conoscenza dell'oggetto.
- Vogliamo quindi avere la possibilità di osservare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

Perché riprodurre eventi in laboratorio?

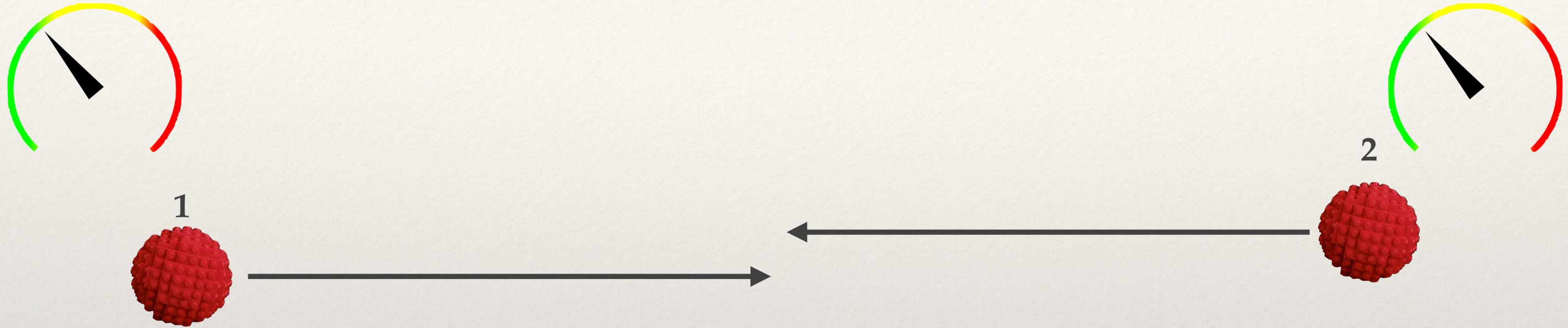
Esperimento di Rutherford



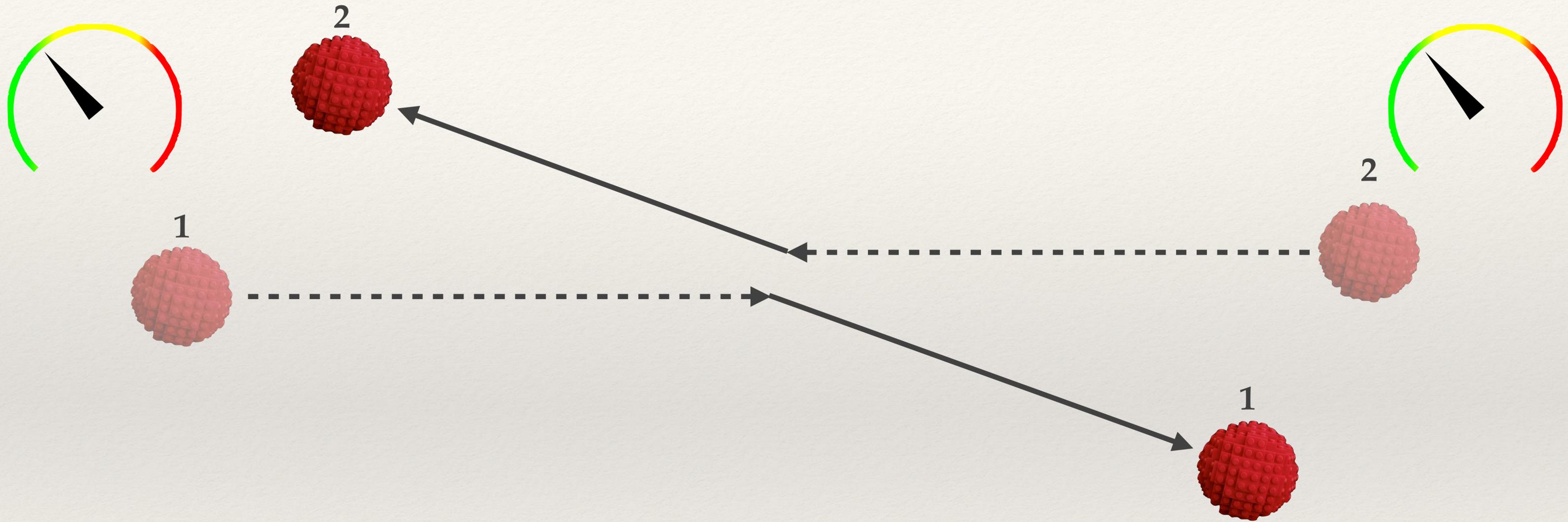
E se facessimo
scontrare due proiettili
fra loro?



Interazione fra proiettili

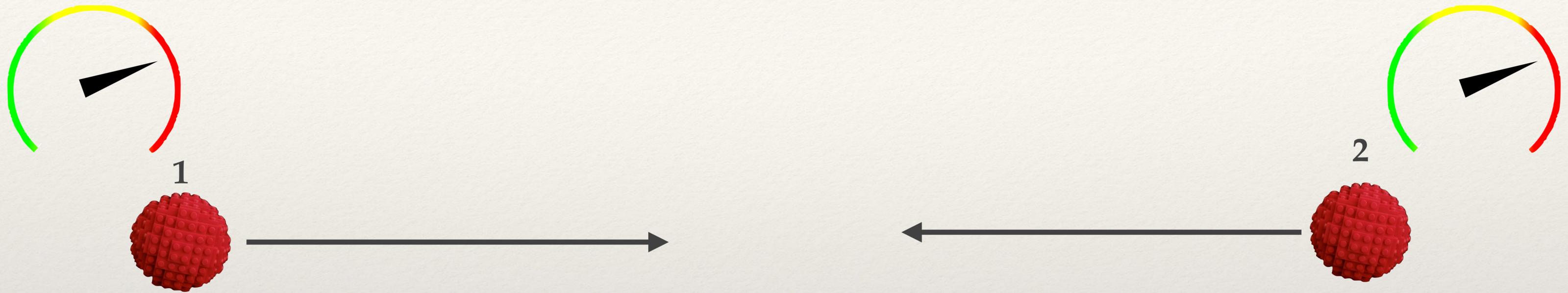


Interazione fra proiettili

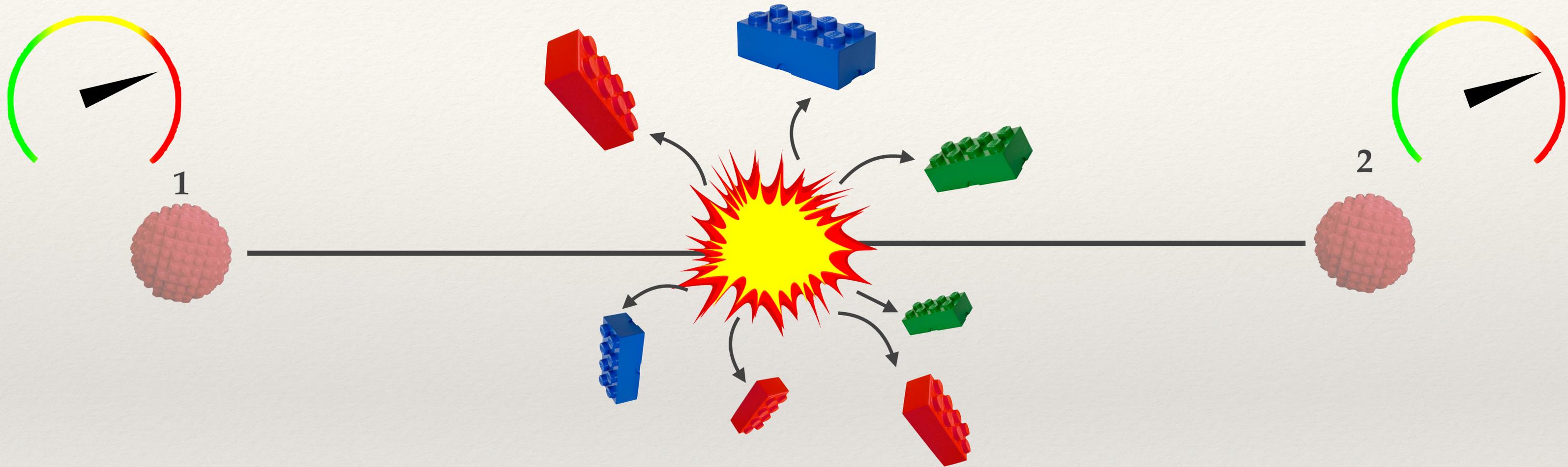


I proiettili possono essere semplicemente deviati dalla loro direzione iniziale, rimanendo intatti.

Interazione fra proiettili

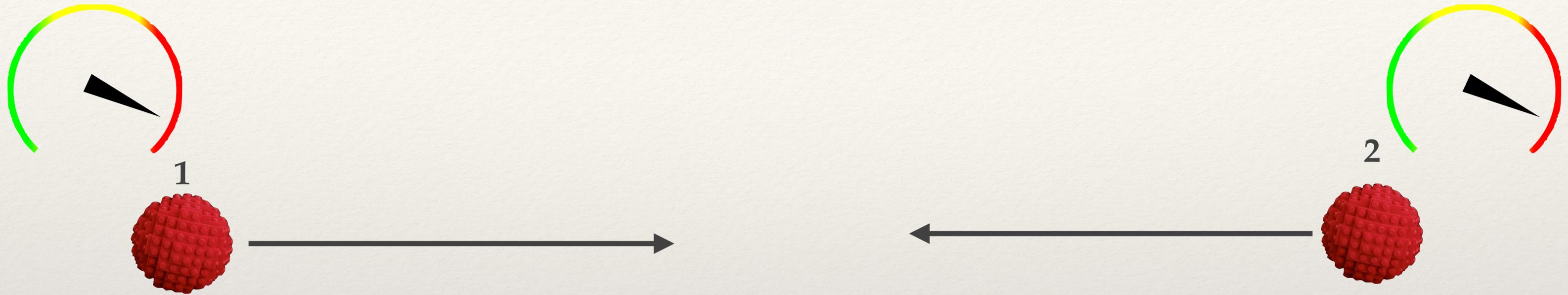


Interazione fra proiettili

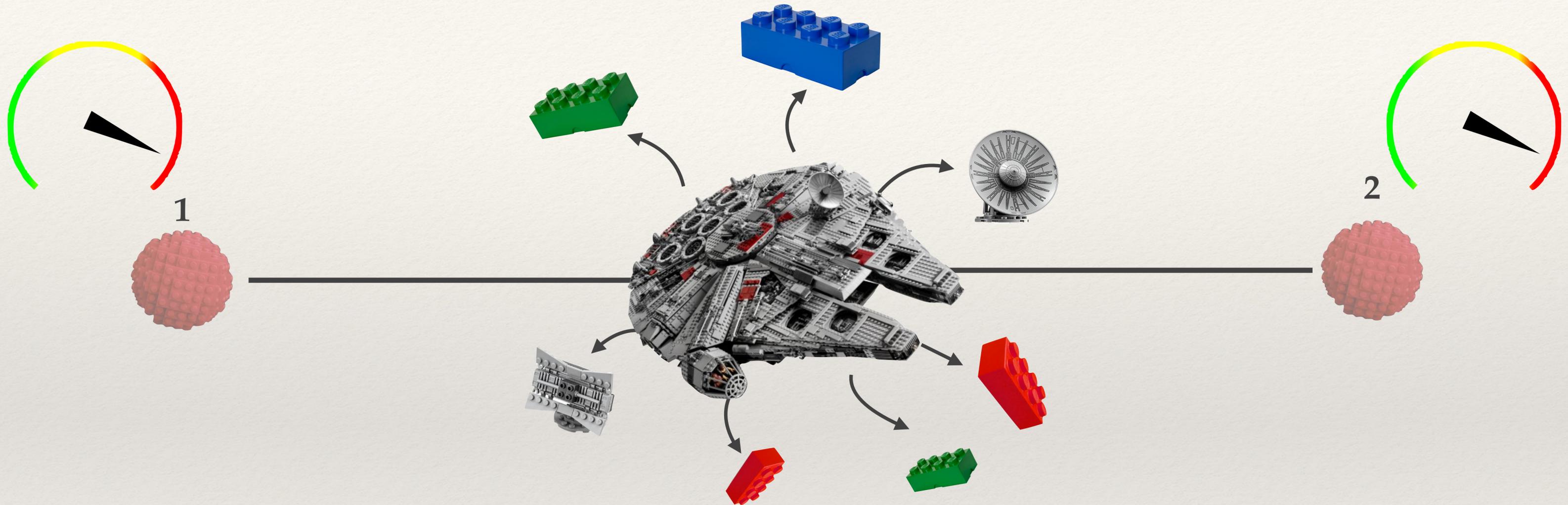


Con la giusta dose di energia, possiamo “rompere” i proiettili e scoprirne i componenti.

Interazione fra proiettili

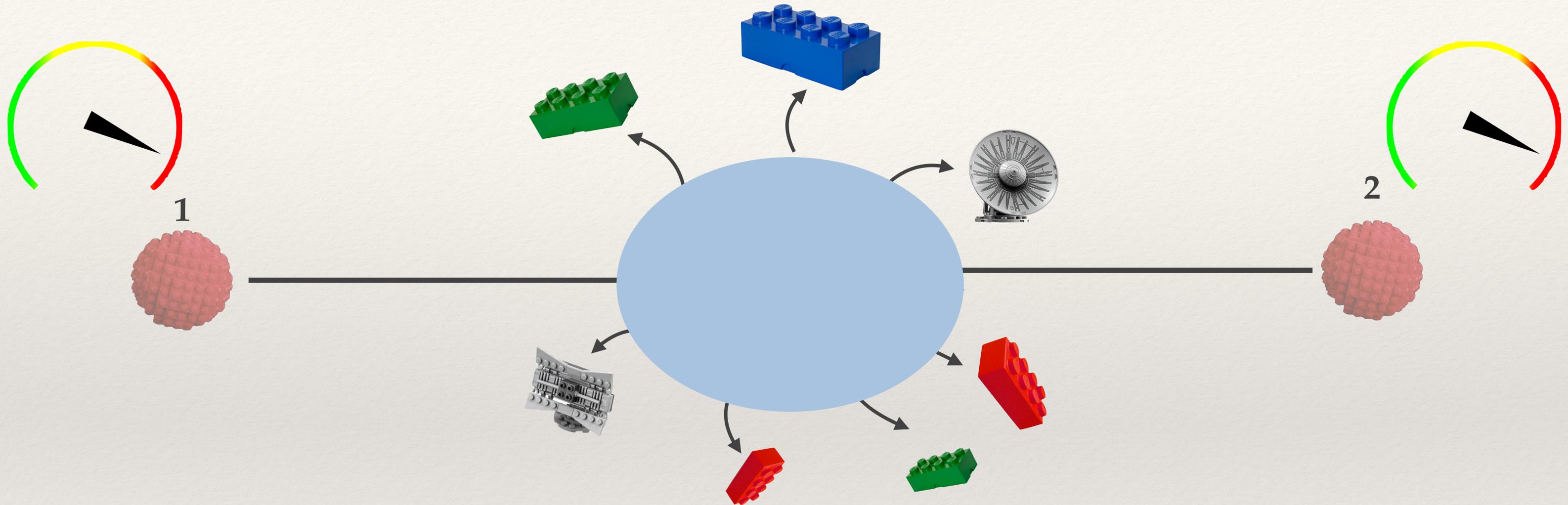


Interazione fra proiettili



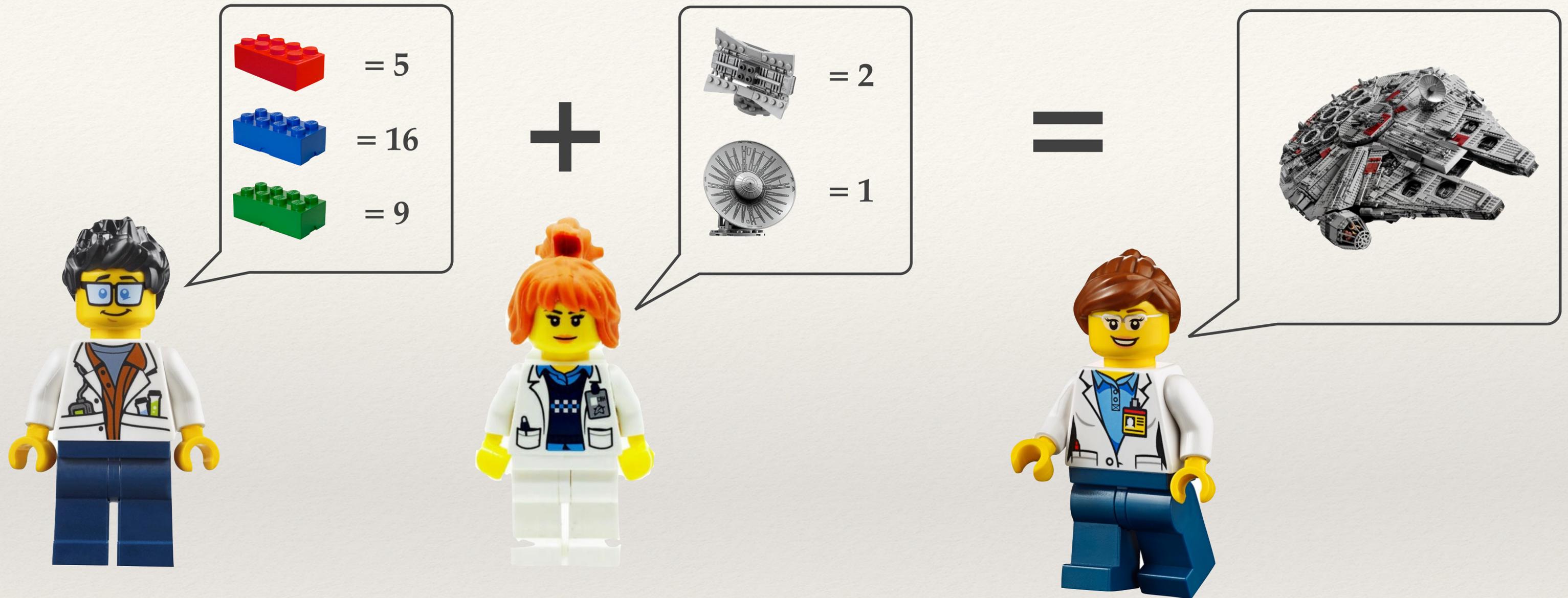
Aumentando ancora l'energia dei proiettili, si possono creare oggetti più grandi e complessi, che però sopravvivono troppo poco per essere osservati. Possiamo risalire alla struttura generata solo osservando i "pezzi" in cui si è separata.

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.

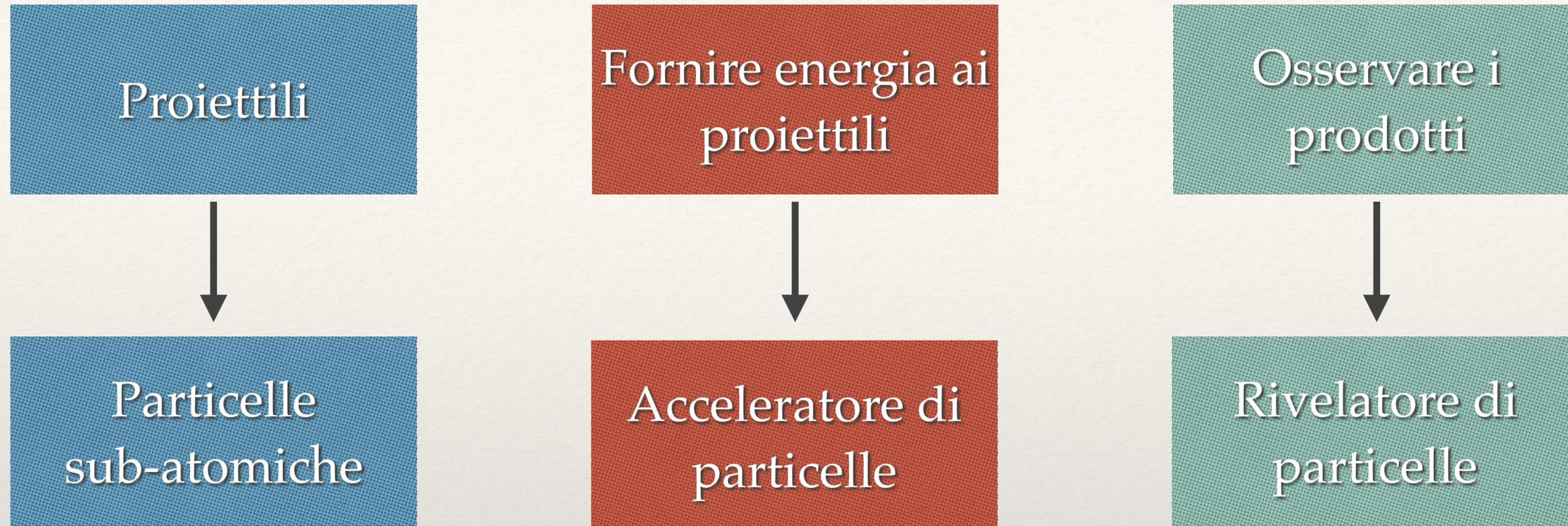
Come riprodurre eventi in laboratorio?

Proiettili

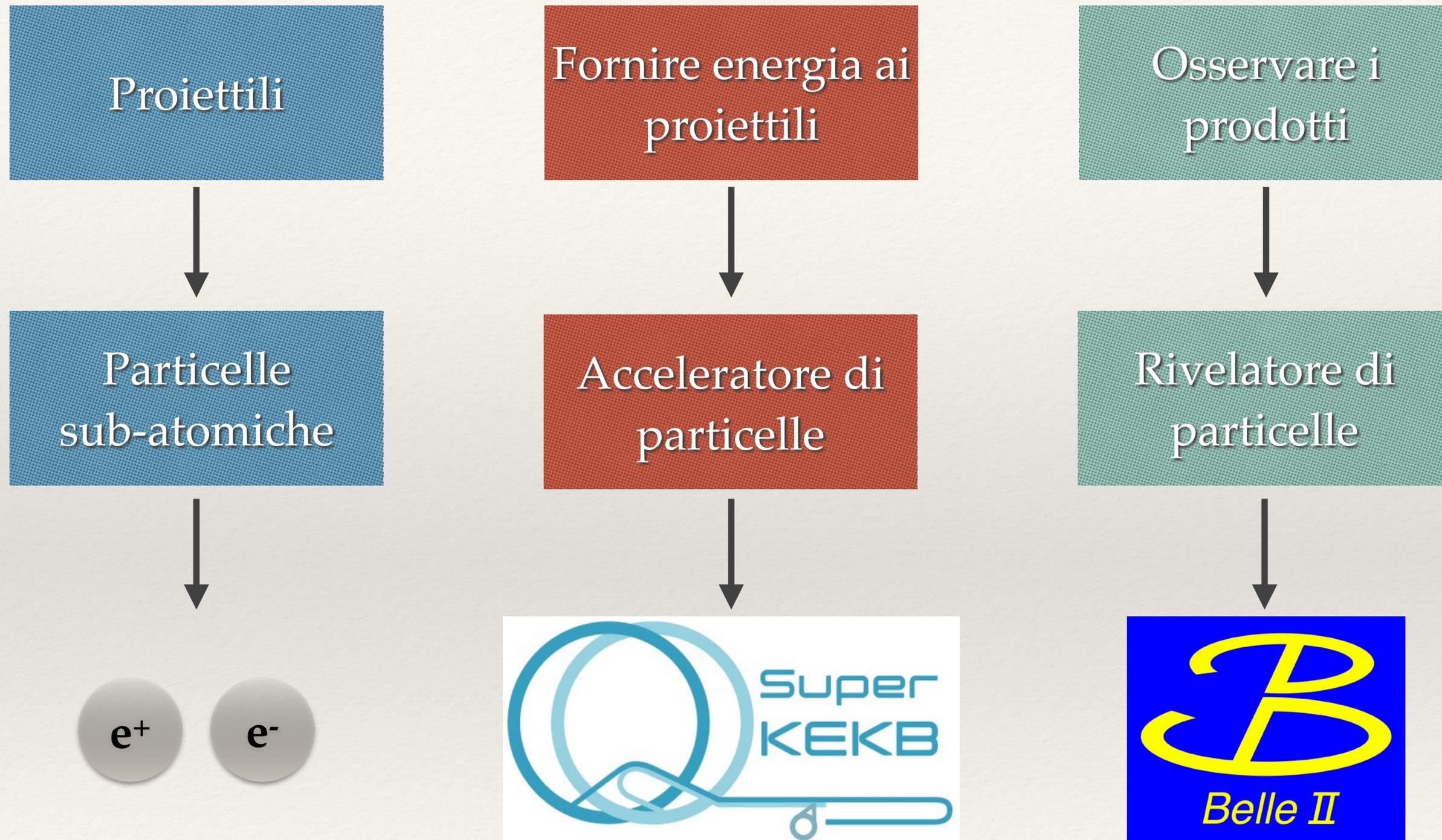
Fornire energia ai
proiettili

Osservare i
prodotti

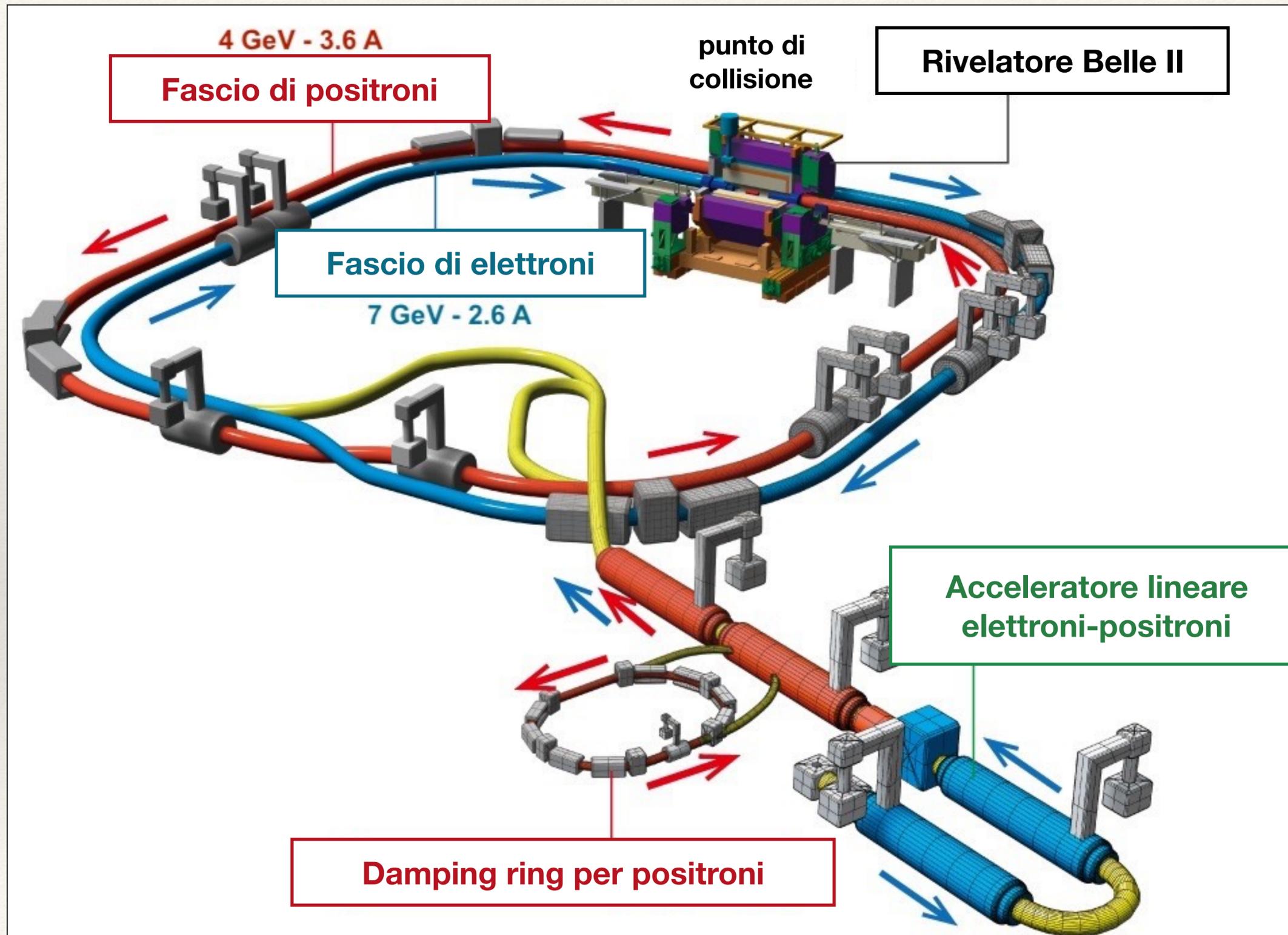
Come riprodurre eventi in laboratorio?



Come riprodurre eventi in laboratorio?

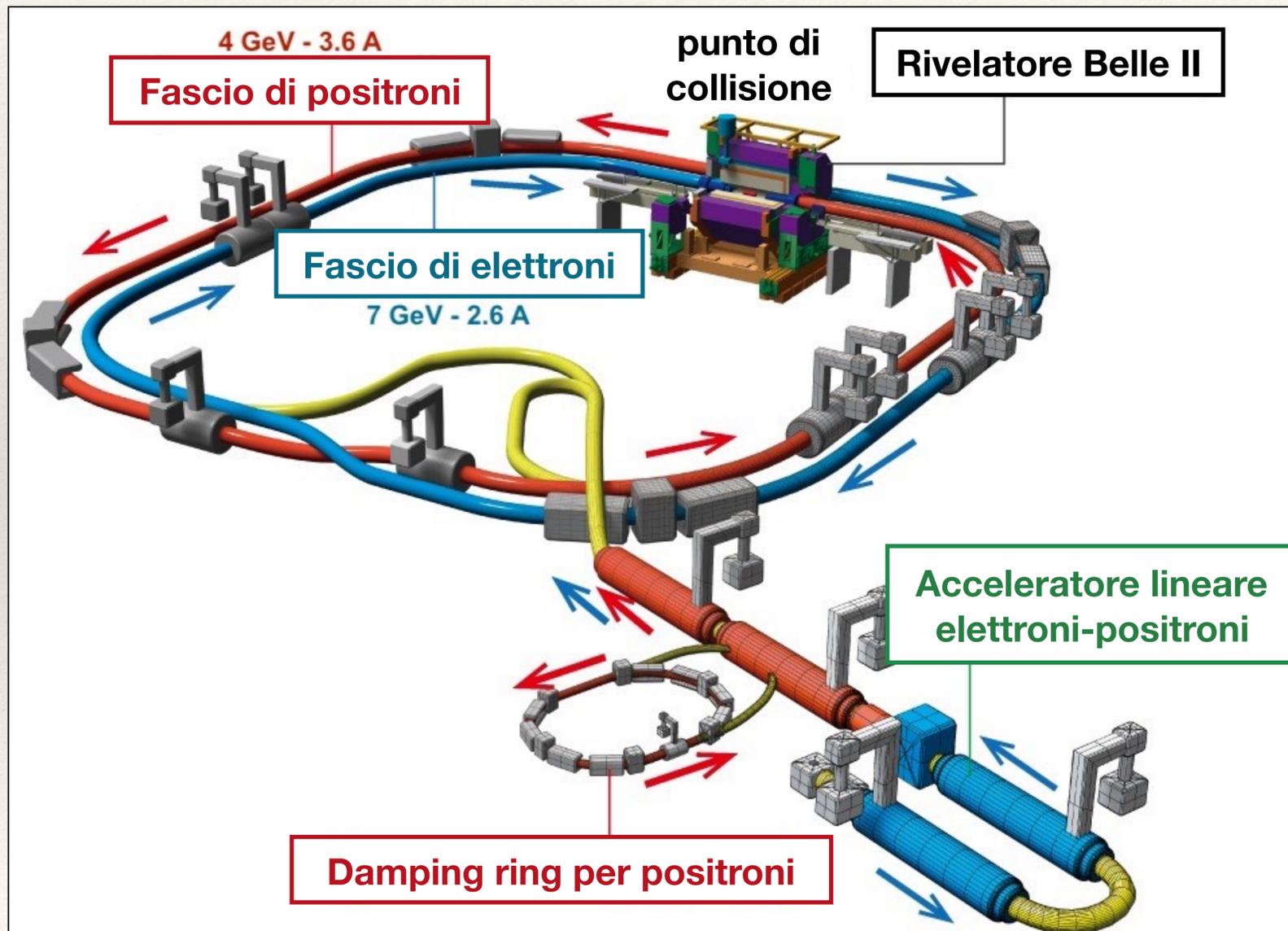


L'acceleratore SuperKEKB



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.

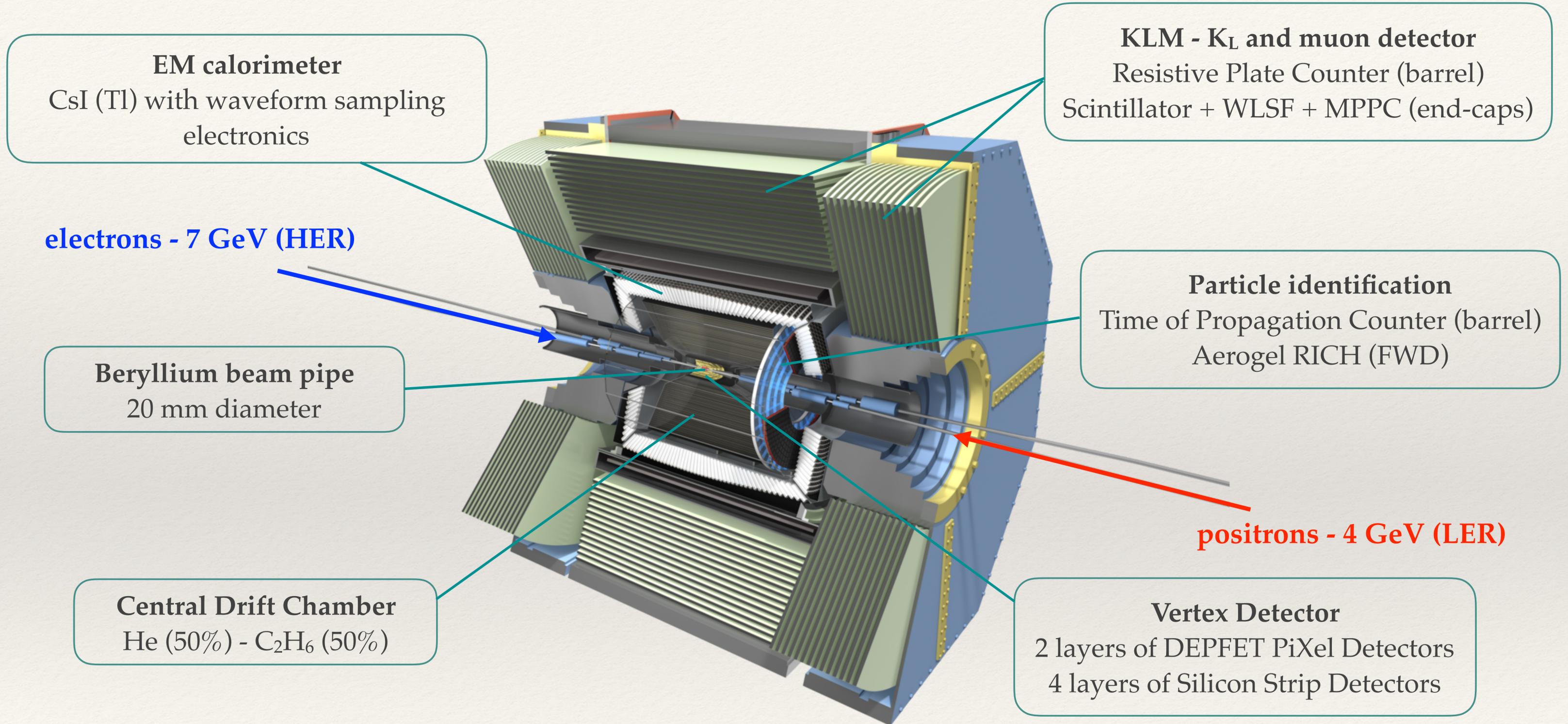


In un acceleratore, si usano campi elettrici e magnetici per far circolare i fasci di particelle nei due anelli:

- 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. Ogni fascio è composto da 2500 bunch.

Il rivelatore Belle II



EM calorimeter
CsI (Tl) with waveform sampling electronics

electrons - 7 GeV (HER)

Beryllium beam pipe
20 mm diameter

Central Drift Chamber
He (50%) - C₂H₆ (50%)

KLM - K_L and muon detector
Resistive Plate Counter (barrel)
Scintillator + WLSF + MPPC (end-caps)

Particle identification
Time of Propagation Counter (barrel)
Aerogel RICH (FWD)

positrons - 4 GeV (LER)

Vertex Detector
2 layers of DEPFET PiXel Detectors
4 layers of Silicon Strip Detectors

Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

Traiettoria

Carica

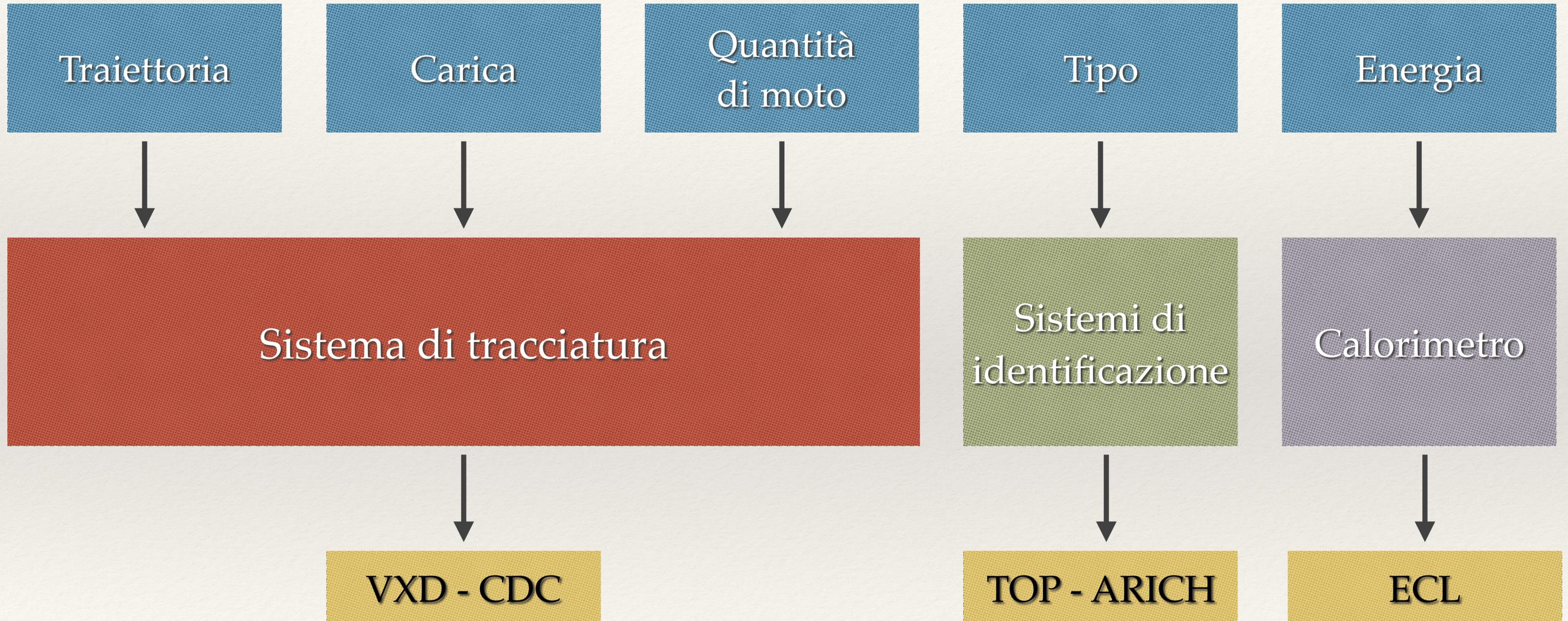
Quantità
di moto

Tipo

Energia

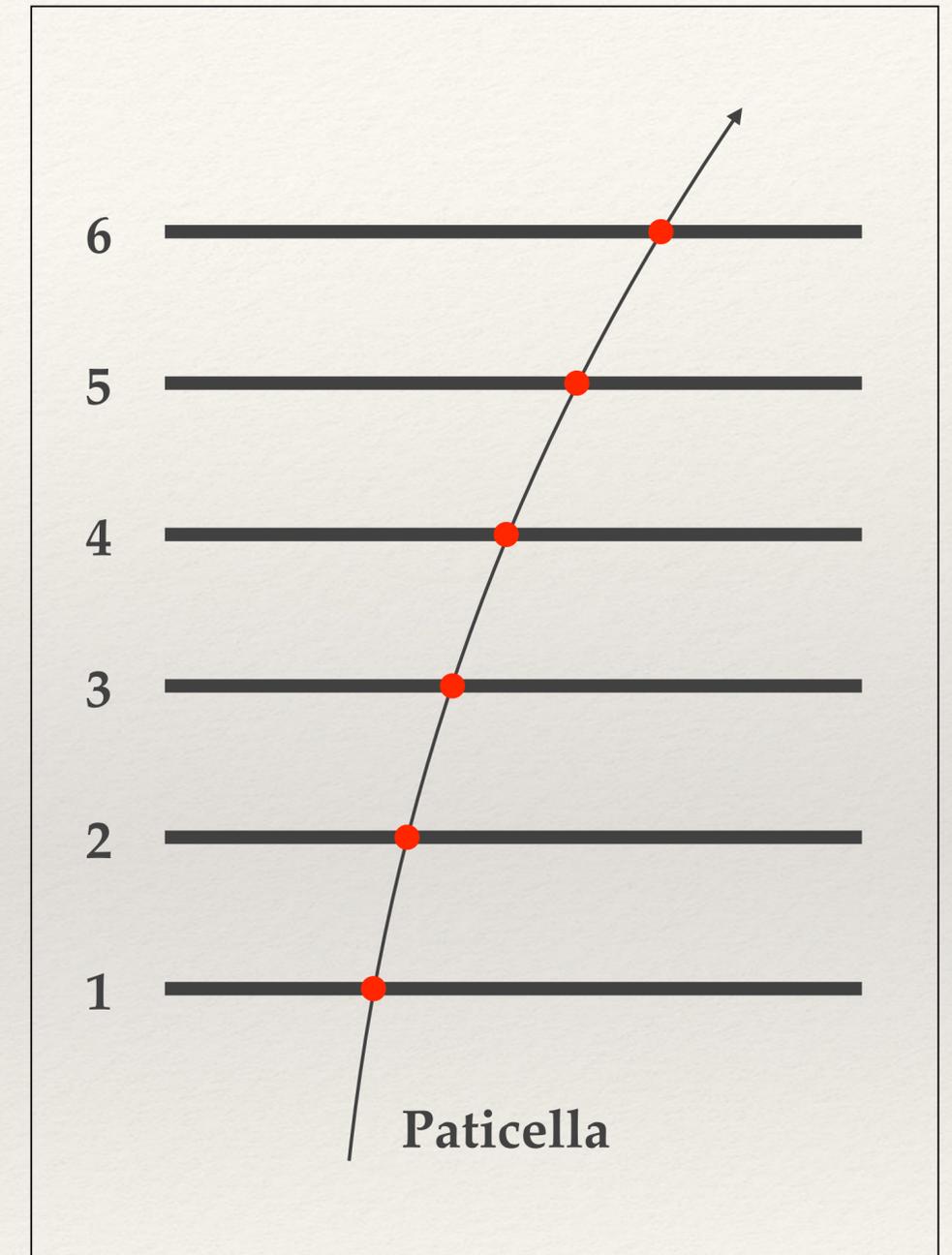
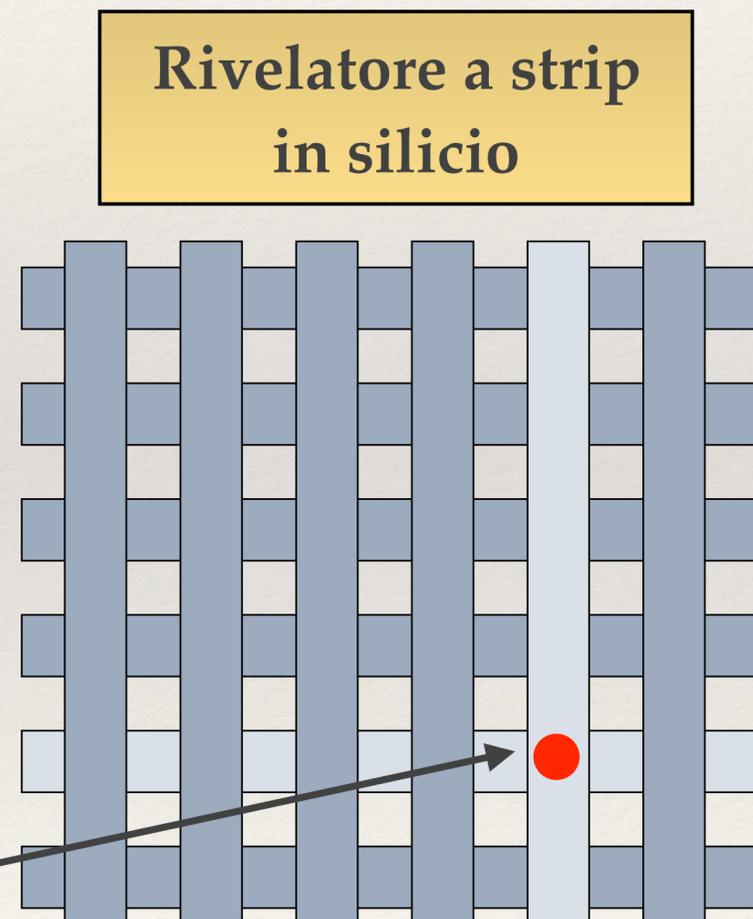
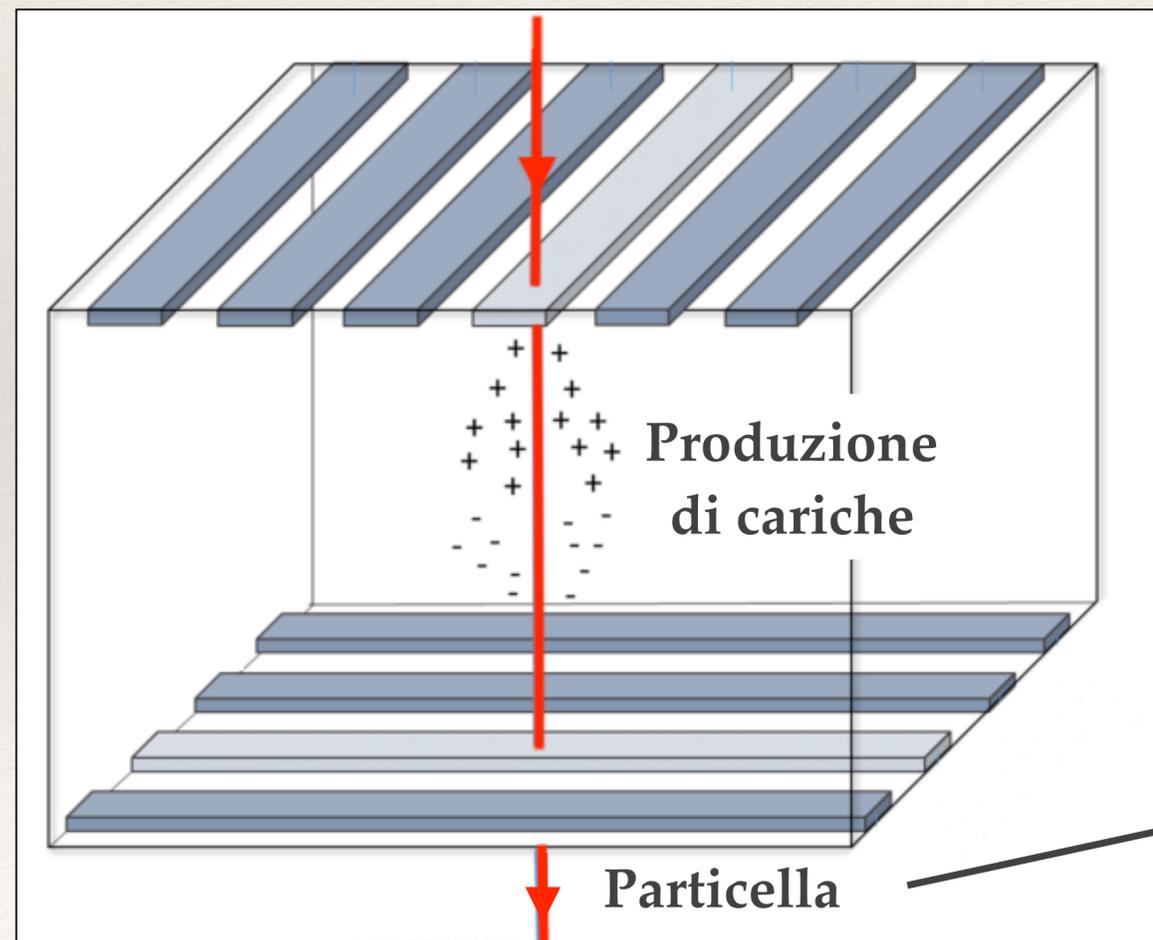
Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

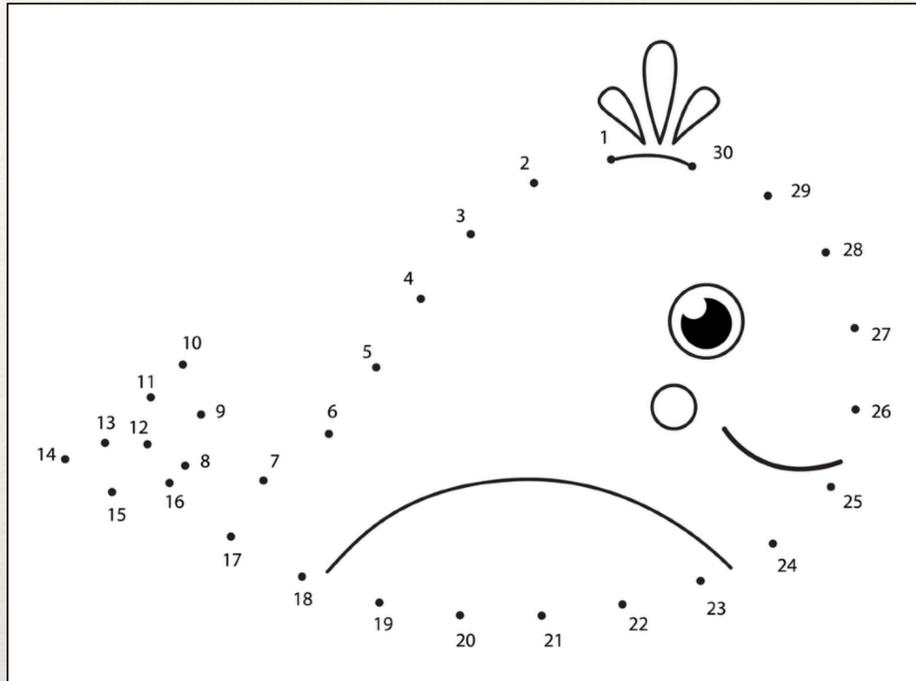


Tracciatura delle particelle

- 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).

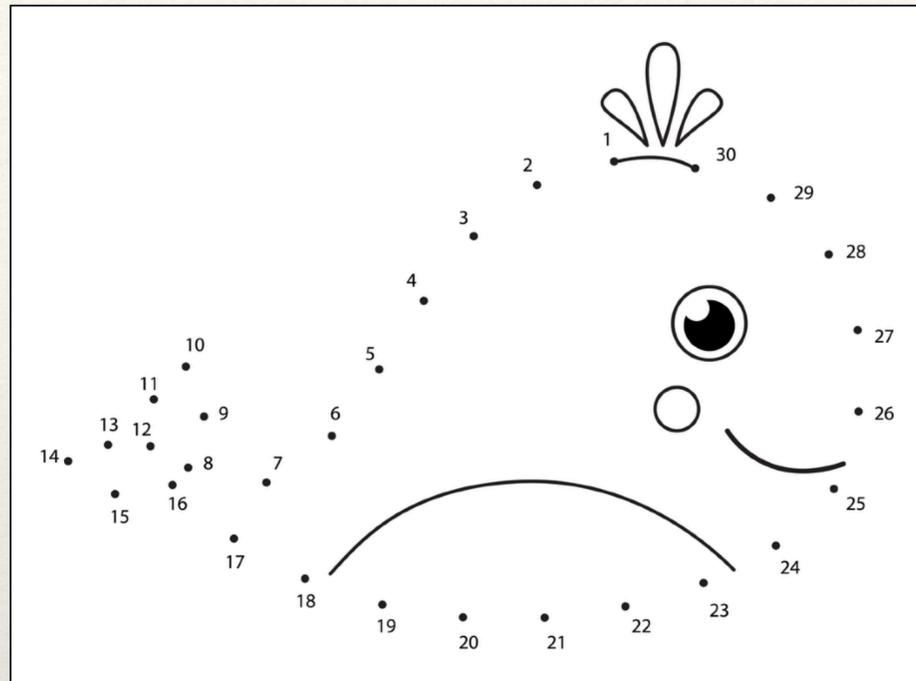


Come ricavare la traiettoria di una particella



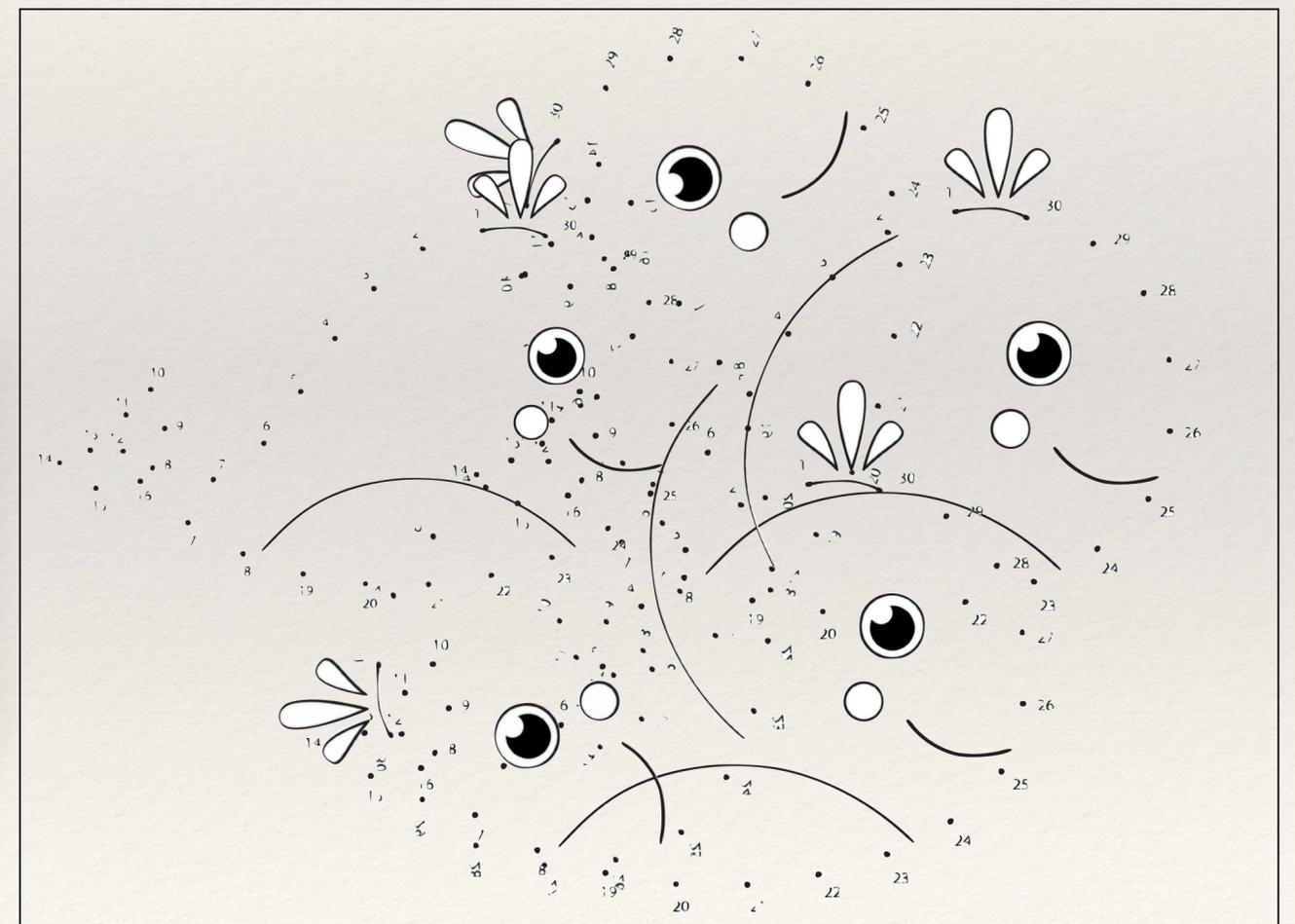
Avendo un punto nello spazio per ogni layer, è sufficiente unire i puntini per ottenere la traiettoria della particella. Sembra facile...

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:

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

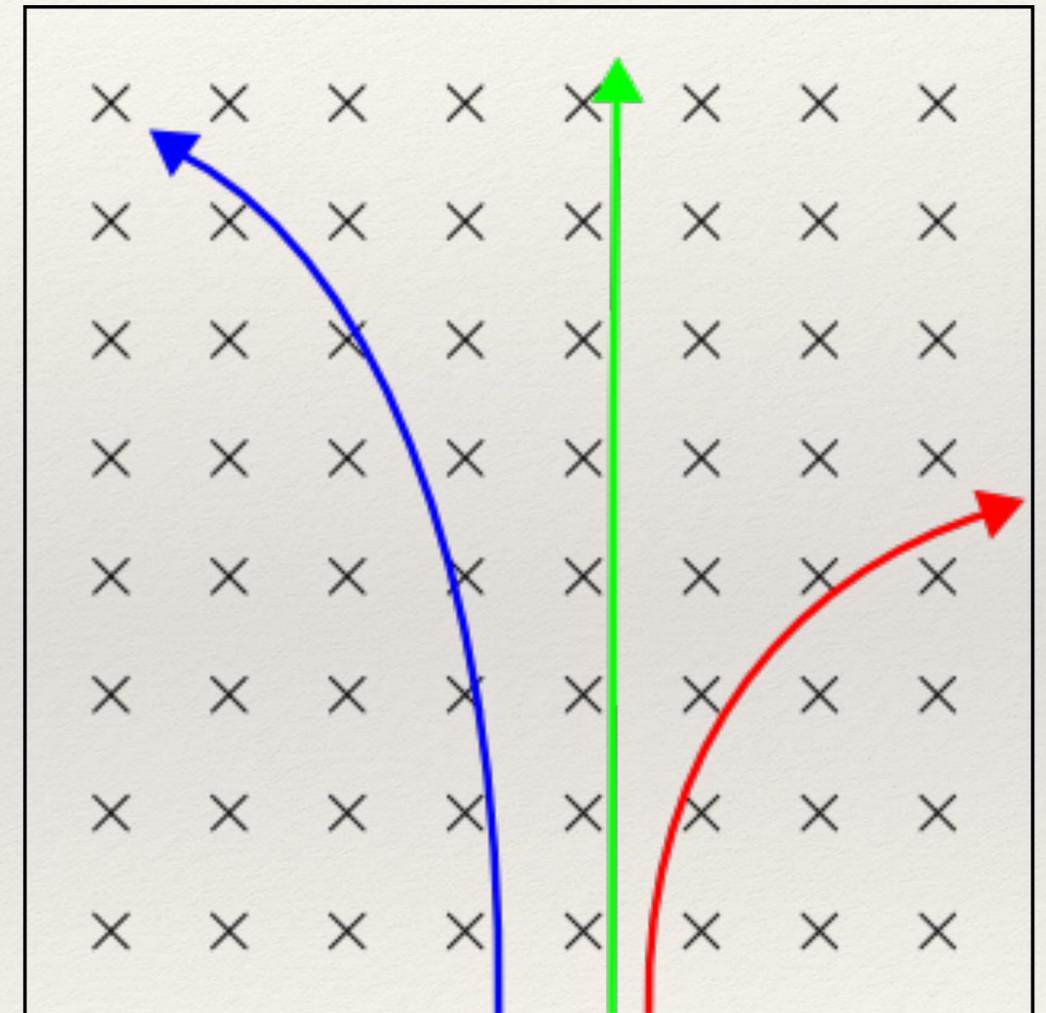
- La presenza di un campo magnetico determina la presenza di una forza che fa curvare la traiettoria della particella.

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 la presenza 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.

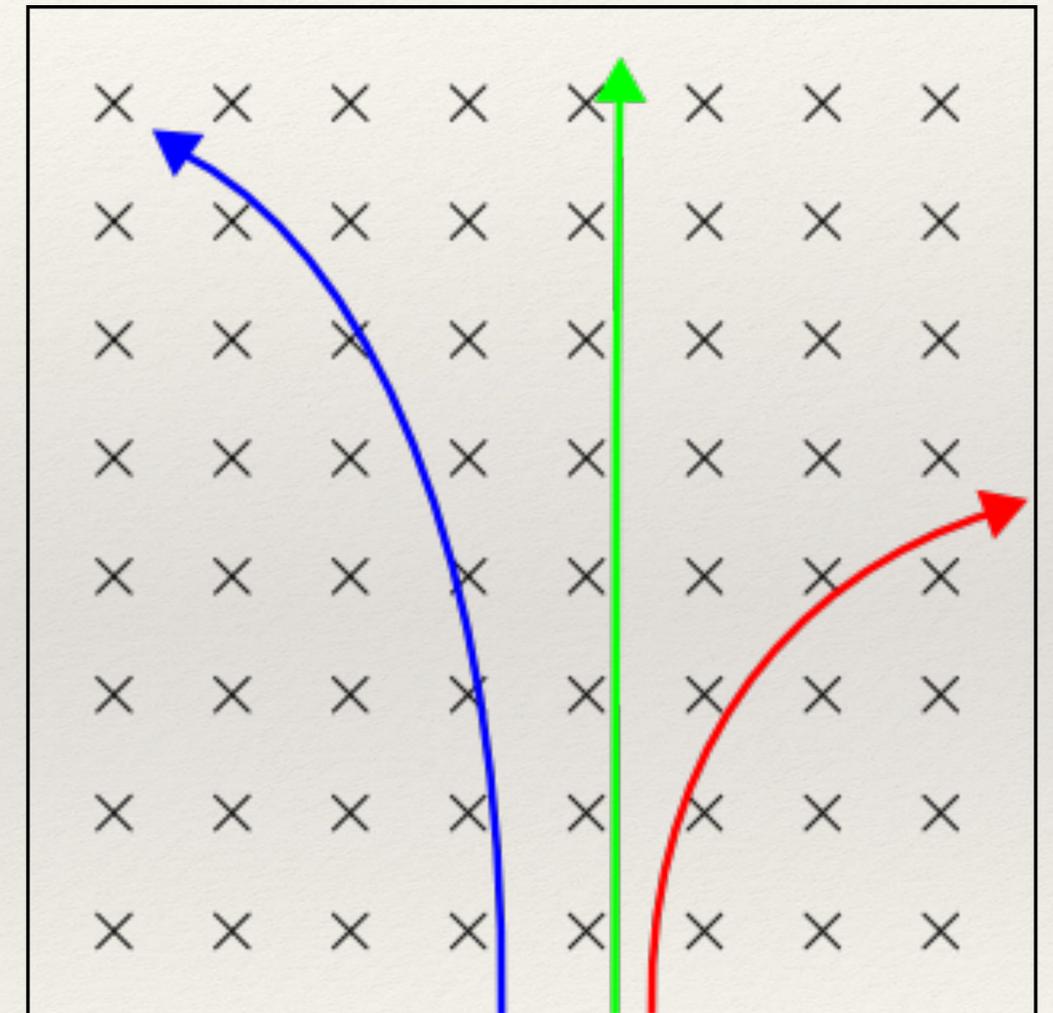


Campo magnetico

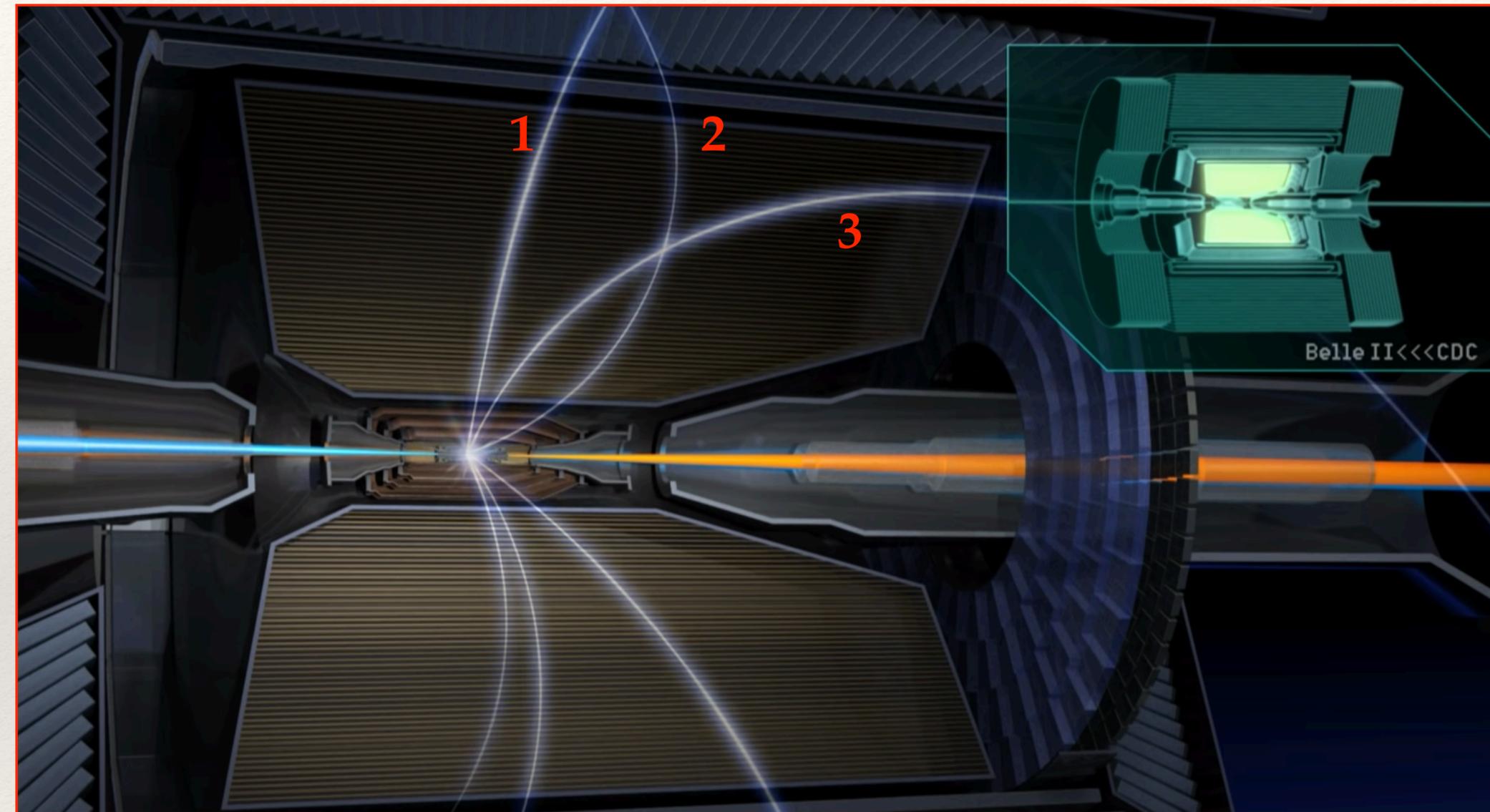
- Una particella carica è soggetta alla forza di Lorentz:

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

- La presenza di un campo magnetico determina la presenza 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 m².

CDC

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

Identificazione delle particelle

- ◉ 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 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

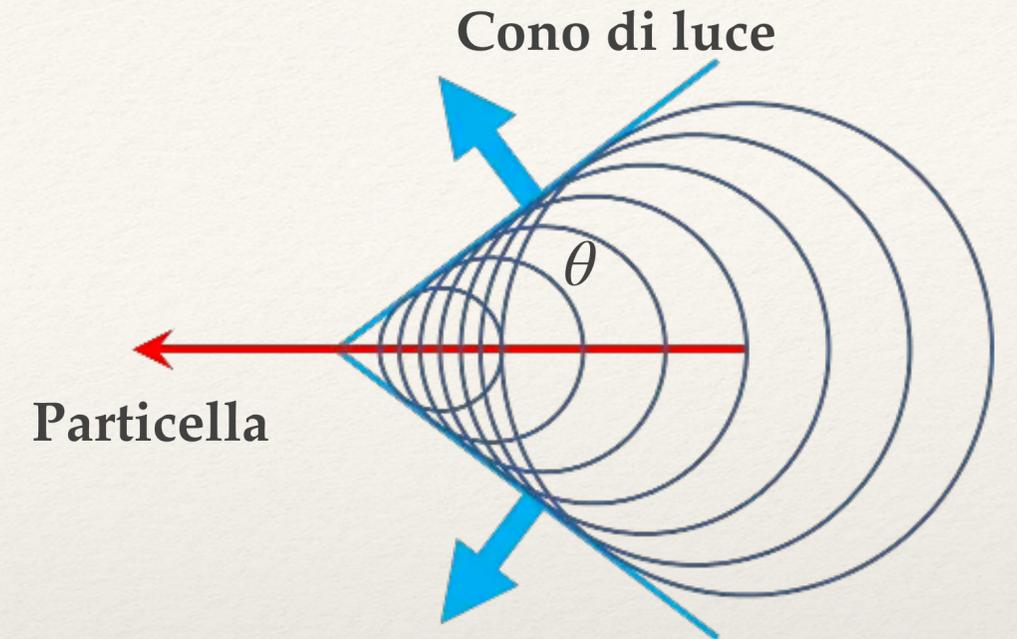
- ◉ La velocità della luce nel vuoto, indicata con c , è la velocità massima raggiungibile.
- ◉ La velocità della luce in un mezzo materiale è:

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

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

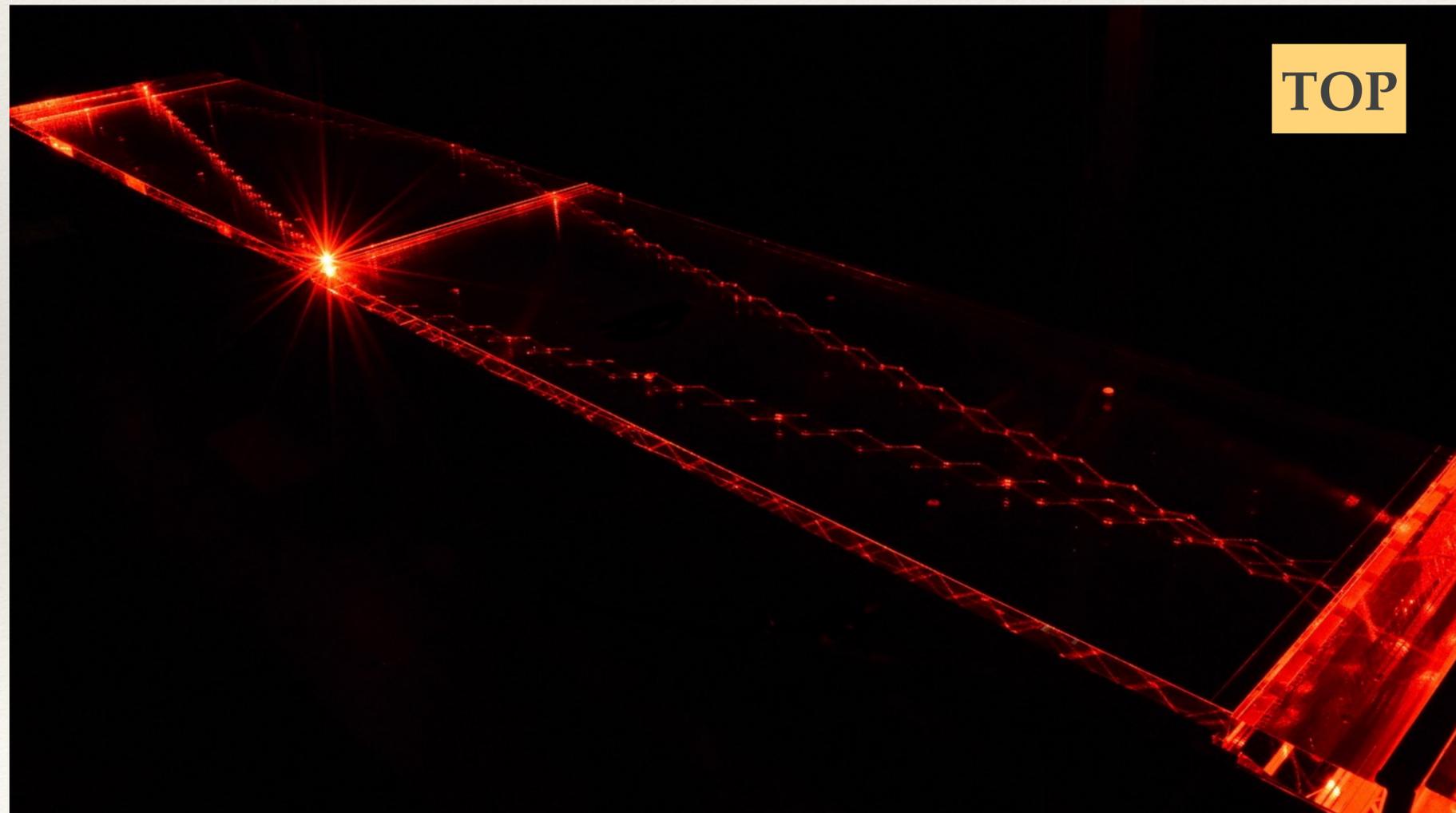
- ◉ In acqua: $n=1.33$ $v_l = 0.75 \cdot c$
- ◉ Se in acqua una particella (**anche neutra!**) ha una velocità maggiore di $0.75 \cdot c$ avviene l'effetto Cherenkov: la particella genera un cono di luce, simile all'onda d'urto di un aereo supersonico.

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

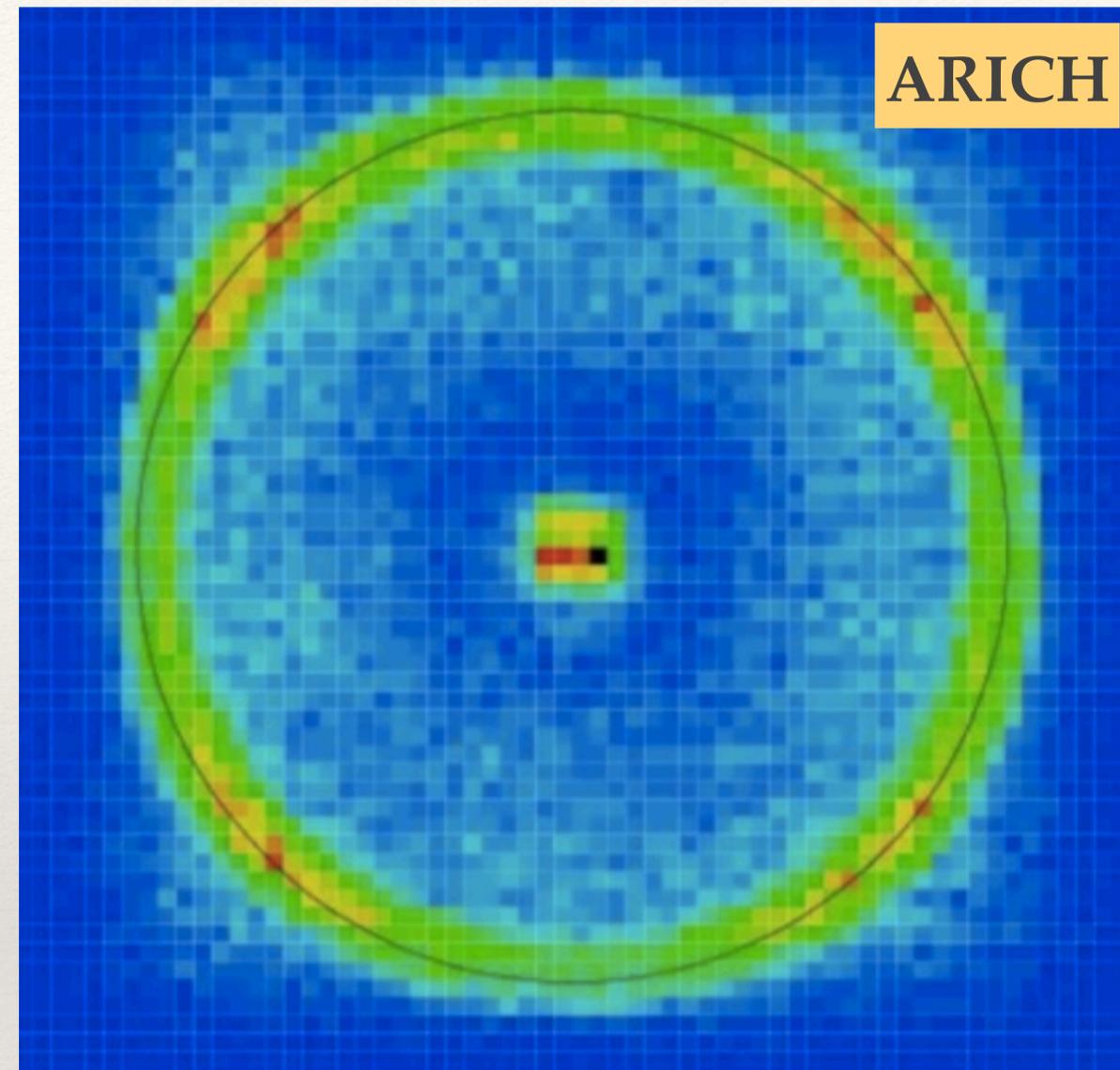


Detector di identificazione (TOP e ARICH)

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



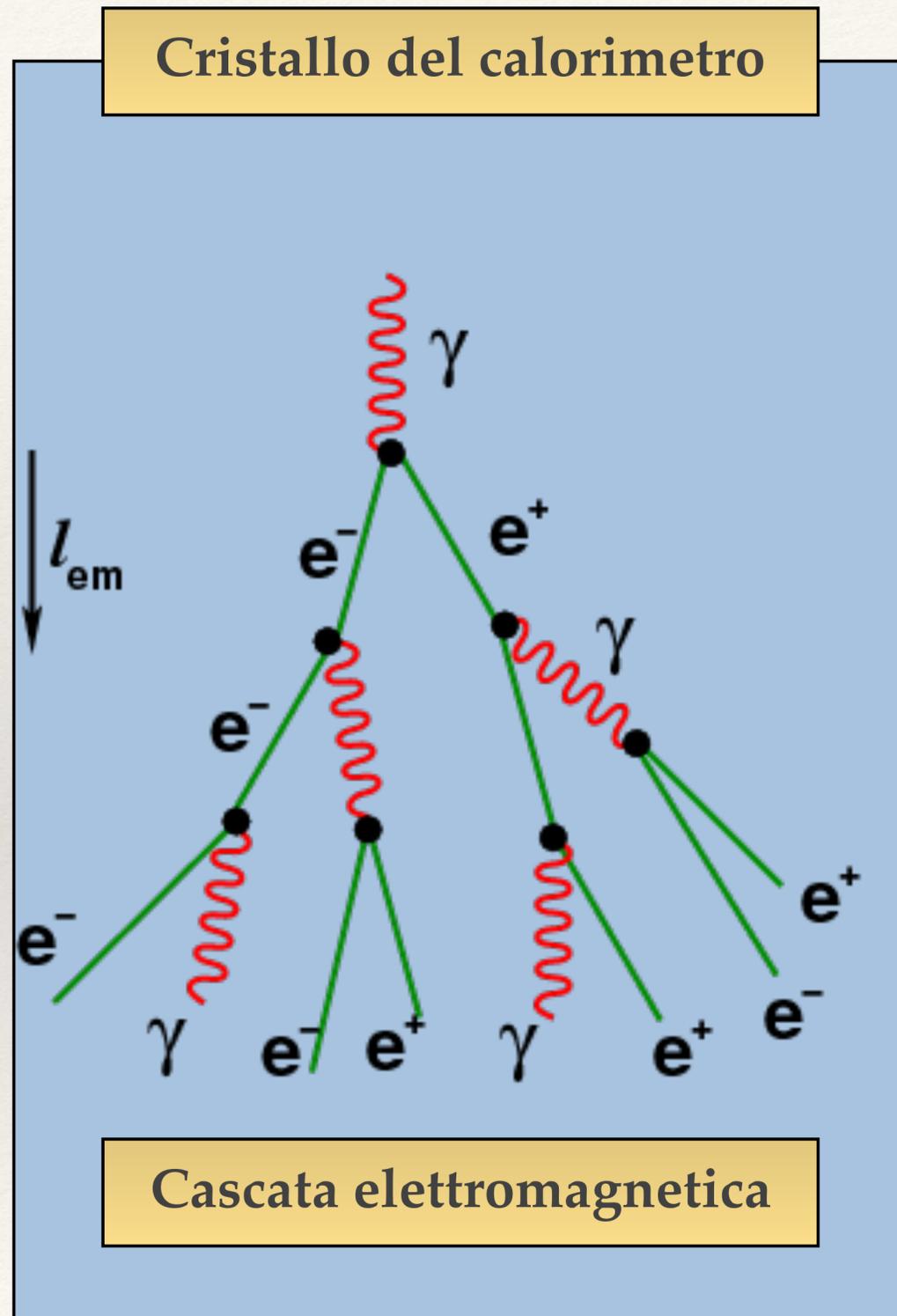
TOP



ARICH

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

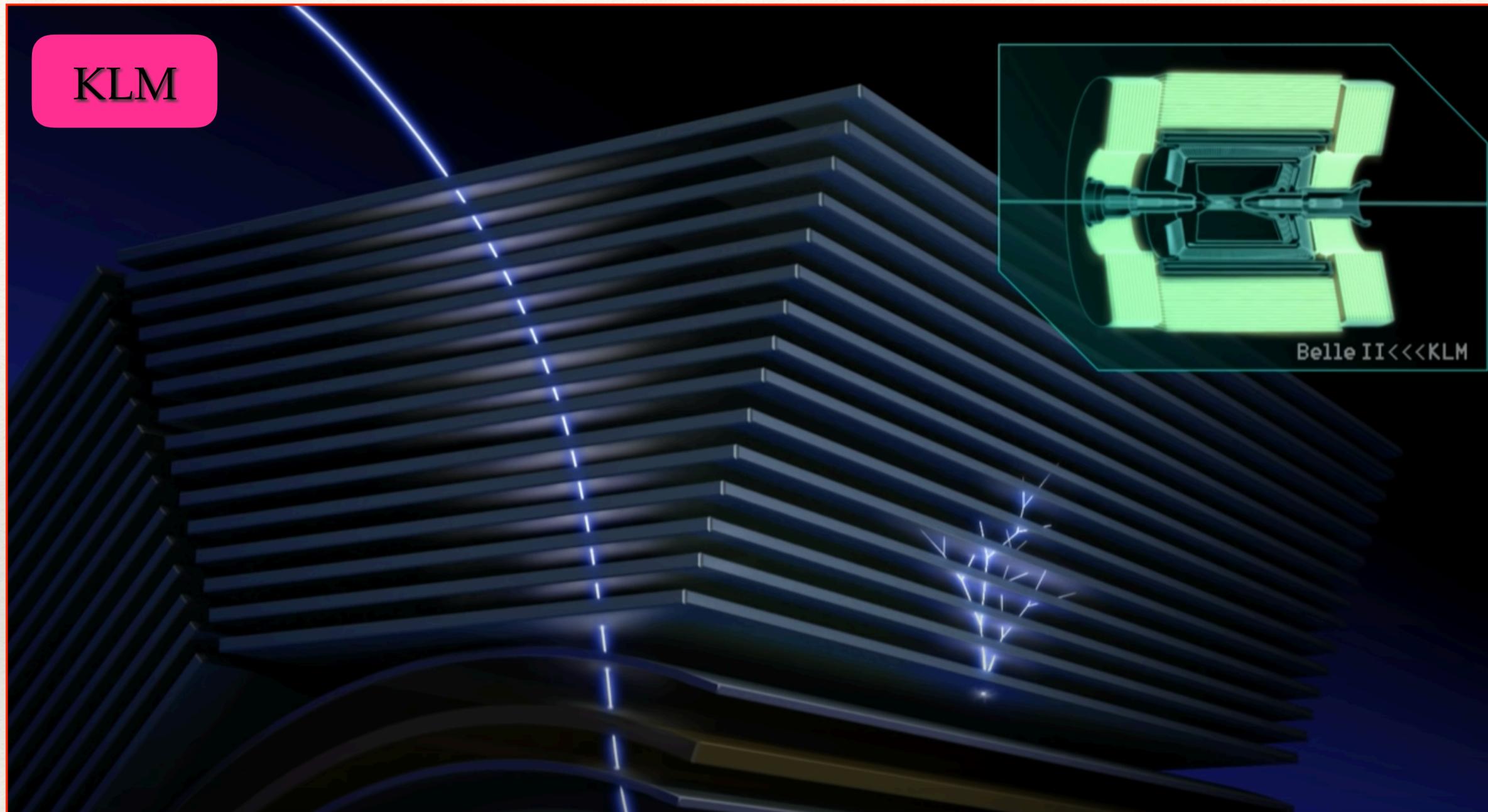
Misurazione dell'energia: calorimetro



- ◉ 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.

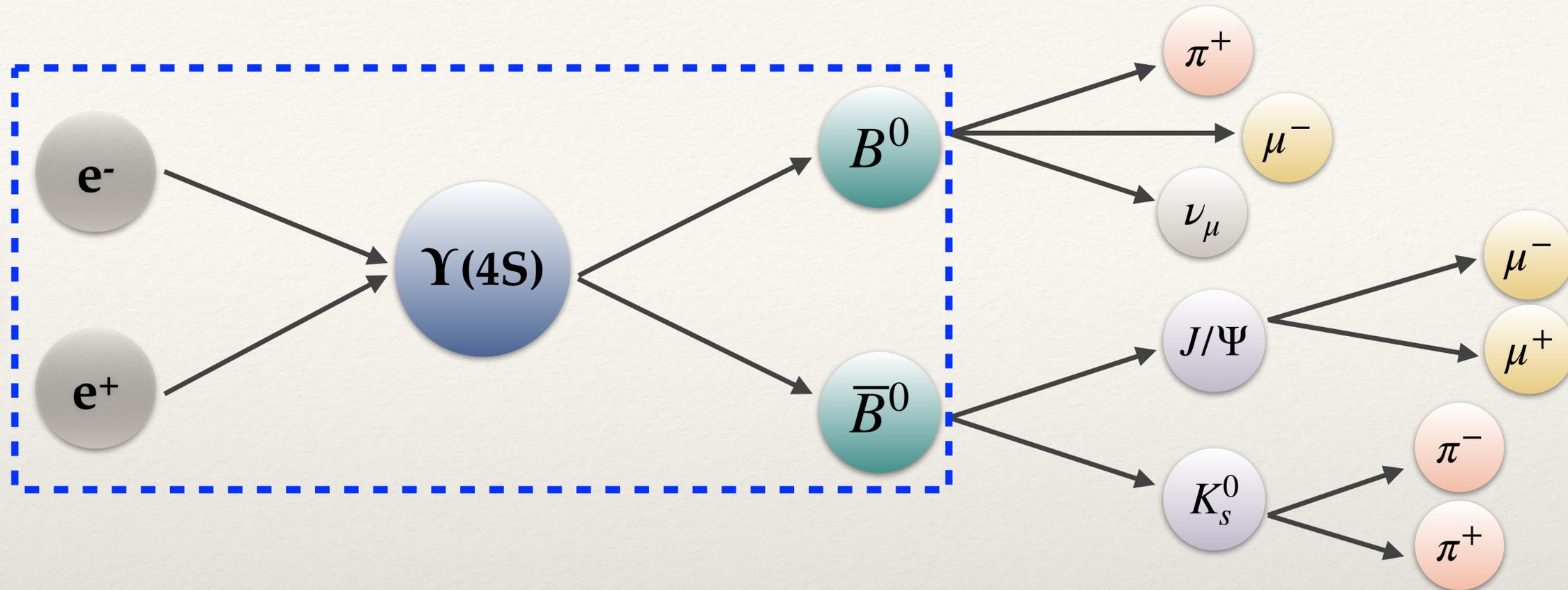
Il calorimetro di Belle II (ECL) è composto da 8736 cristalli, ognuno di dimensioni $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{ cm}^3$, e da solo pesa circa 43 tonnellate.

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).

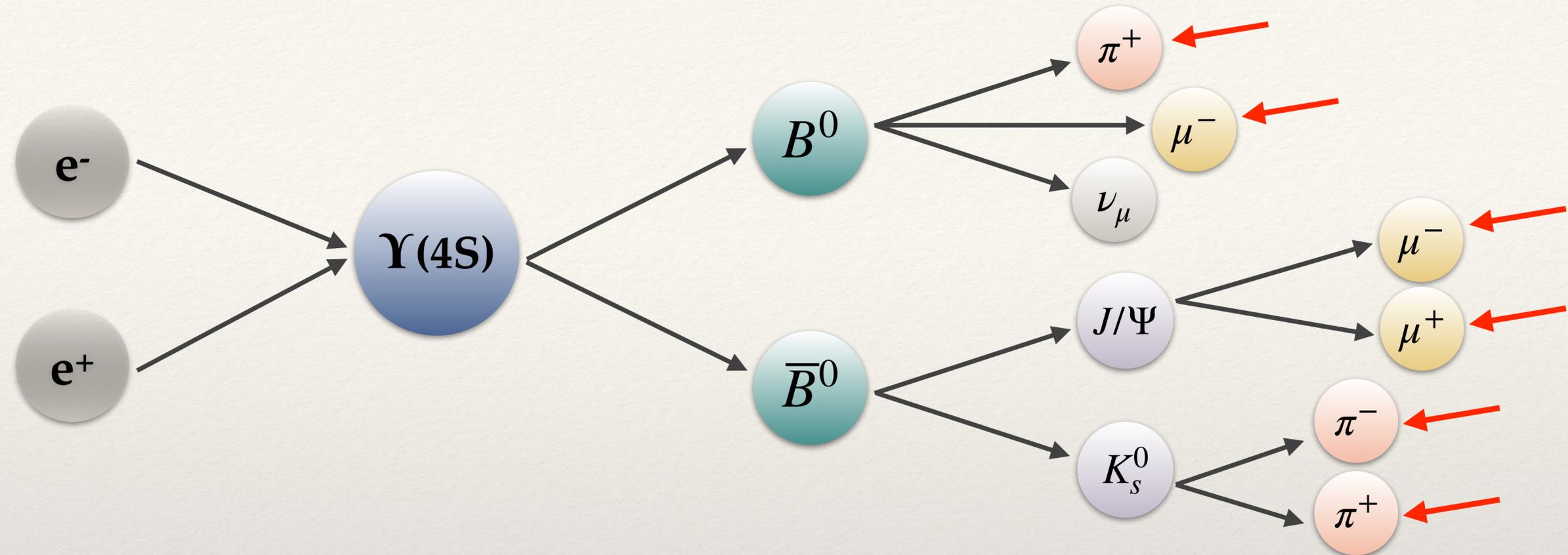
Ricostruzione di un evento



Possibile evento
in SuperKEKB.

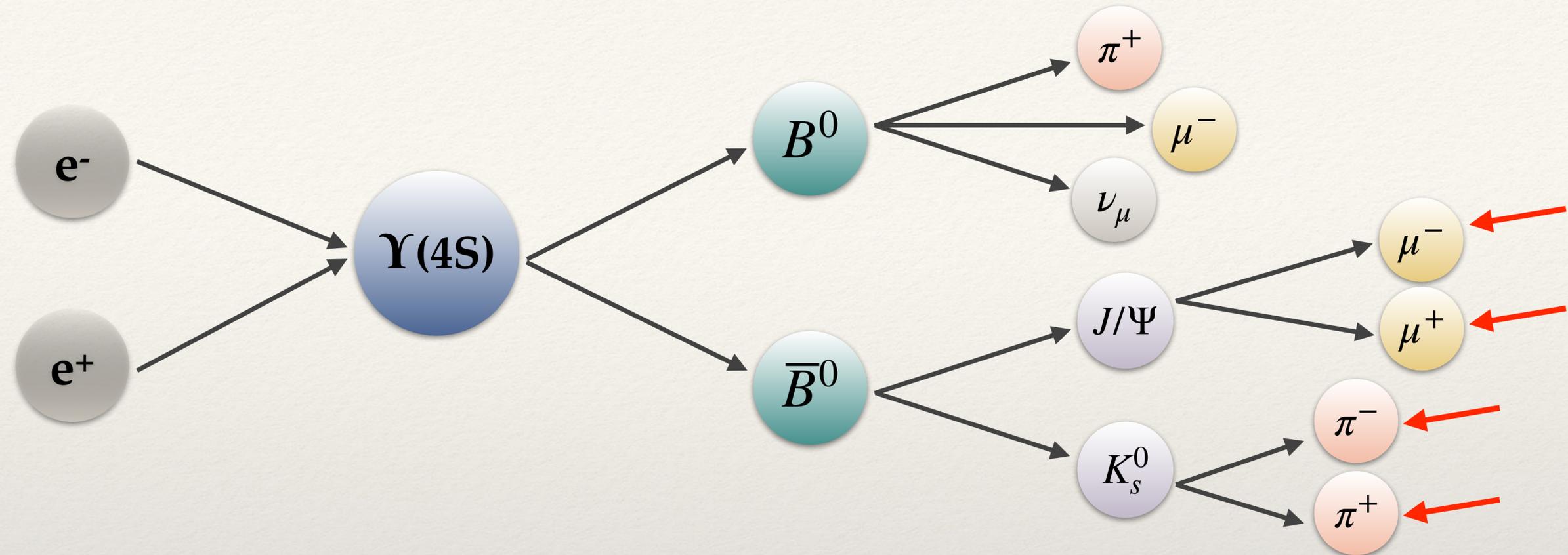
- I mesoni B^0 e \bar{B}^0 possono decadere in tanti modi diversi, e non sappiamo a priori quale sia il modo per ogni singolo evento.

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 μ^- e μ^+ e risalire alla particella J/Ψ , poi ricostruire il cammino delle particelle π^- e π^+ e risalire alla particella K_s^0 , e infine risalire al vertice di decadimento del mesone \bar{B}^0 .



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Grazie per l'attenzione

E che la forza sia con voi

(almeno fino alle 17:00)

