



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Metodi sperimentali in fisica delle alte energie

Antonio Paladino - 2023/03/23
Belle II International Masterclass

OUTLINE

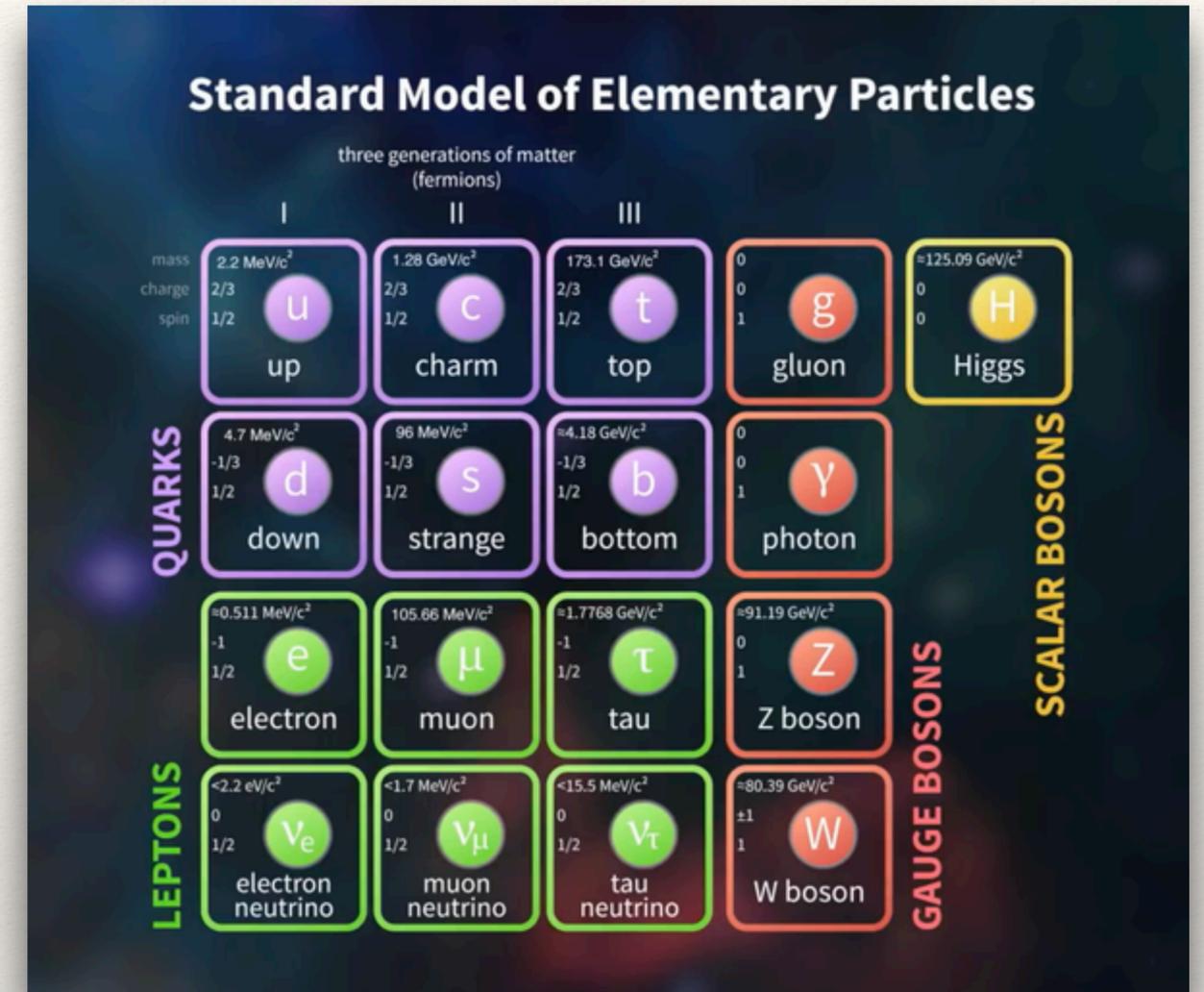
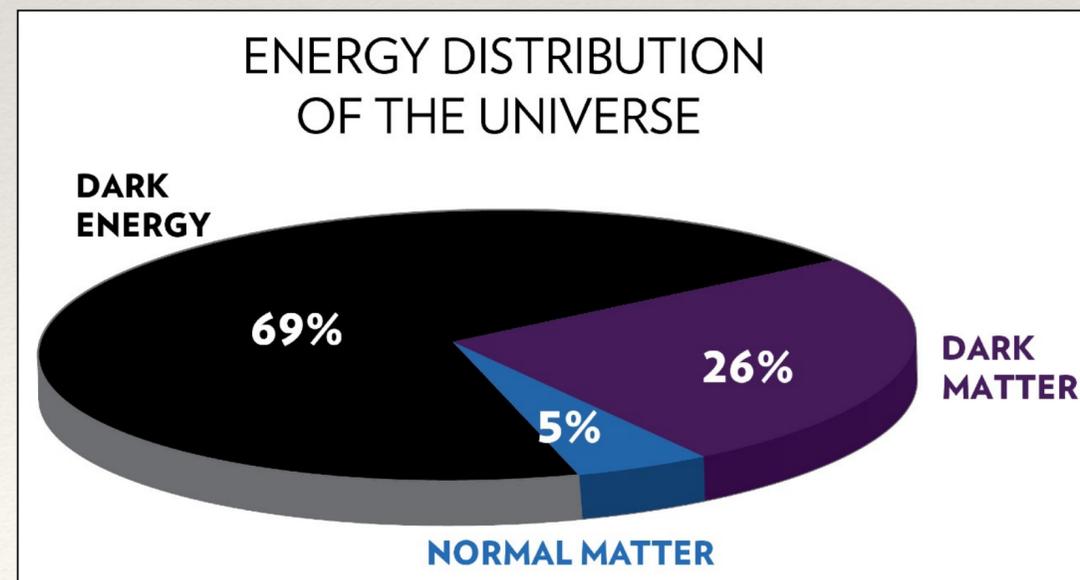
- ◉ Motivazioni per gli esperimenti di fisica delle alte energie
- ◉ Interazione fra particelle
- ◉ L'acceleratore SuperKEKB
- ◉ Il detector Belle II e i suoi componenti
- ◉ Ricostruzione di un evento di fisica

Il nostro universo

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

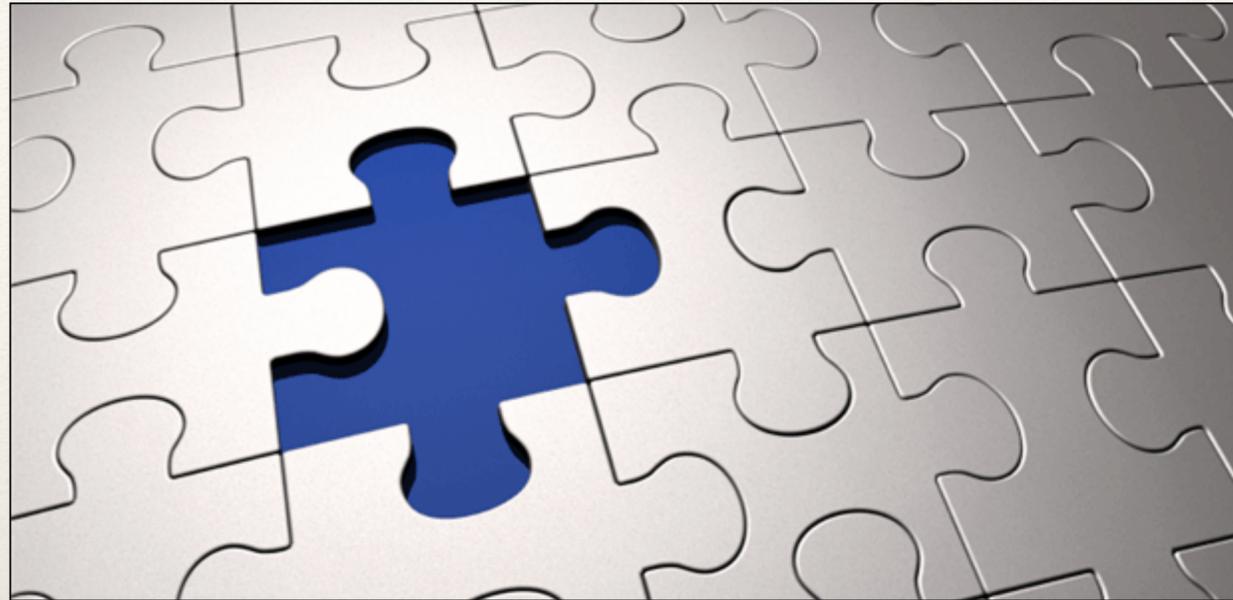
- ✓ Le particelle elementari e le loro interazioni fondamentali.
- ✓ Stati legati di mesoni e barioni.
- ✓ Larghezze di decadimento.
- ✓ Anche alcune piccole “anomalie” sono previste dal Modello Standard e sono correttamente osservate.

... 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 ...

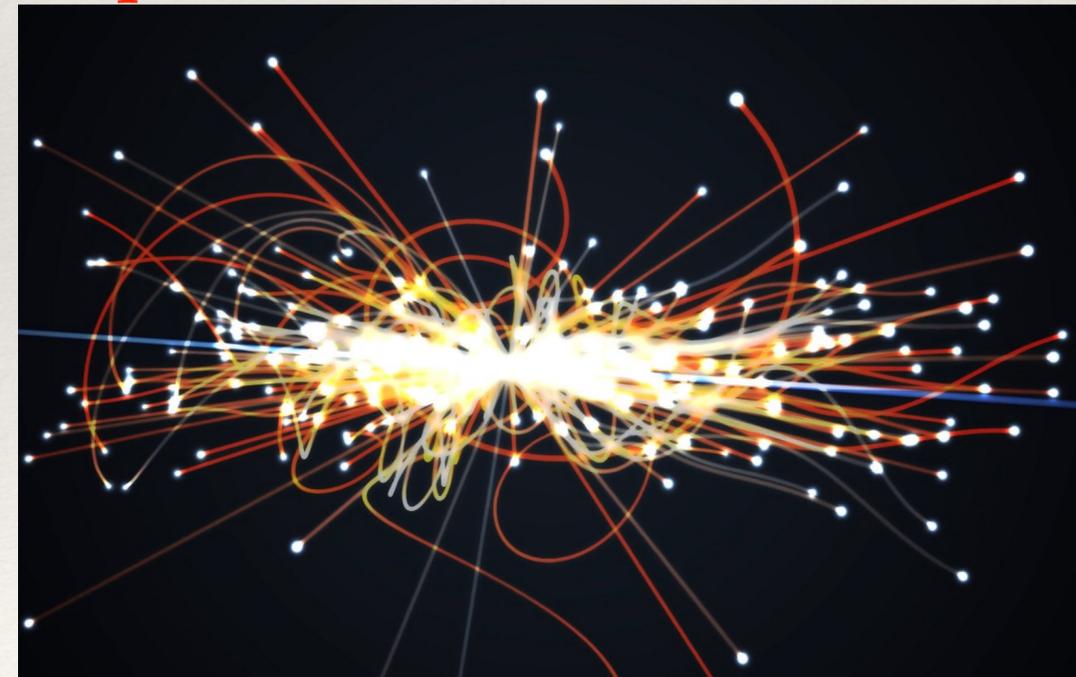


... ma come cercare i pezzi mancanti?

Osservazioni astrofisiche



Riprodurre eventi in laboratorio

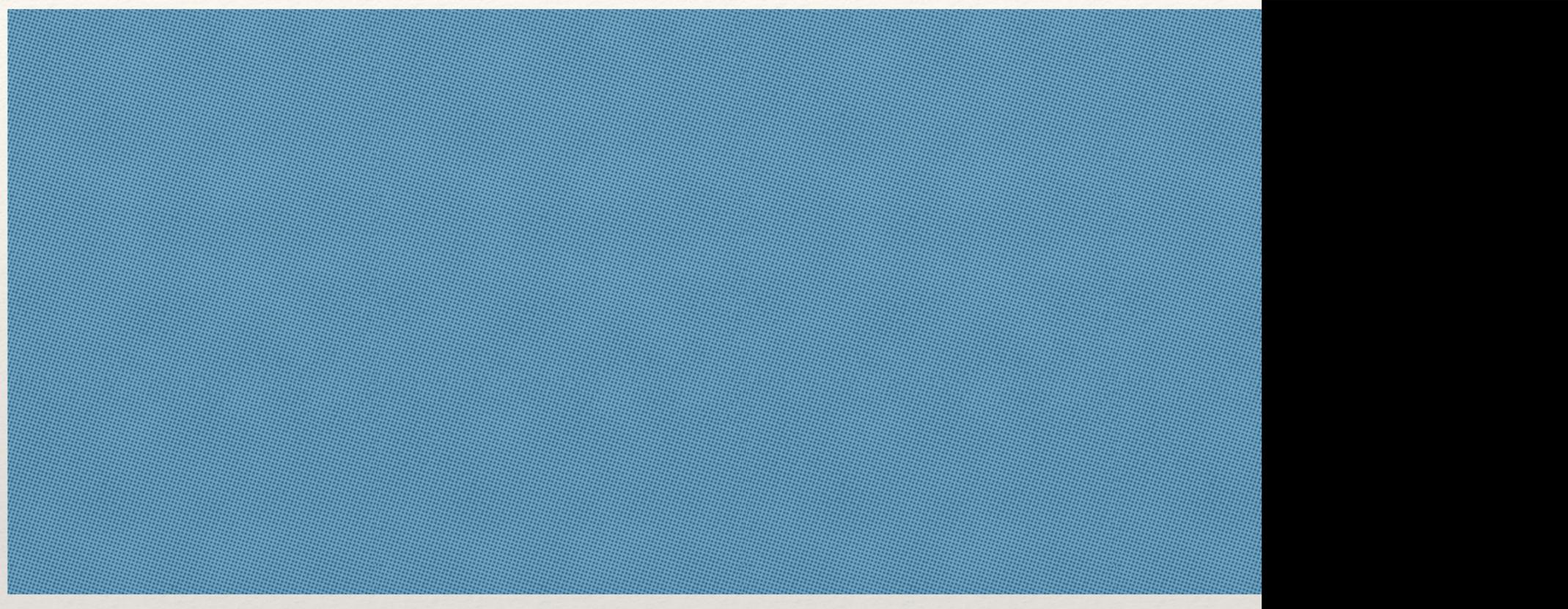


Come riprodurre eventi in laboratorio?

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

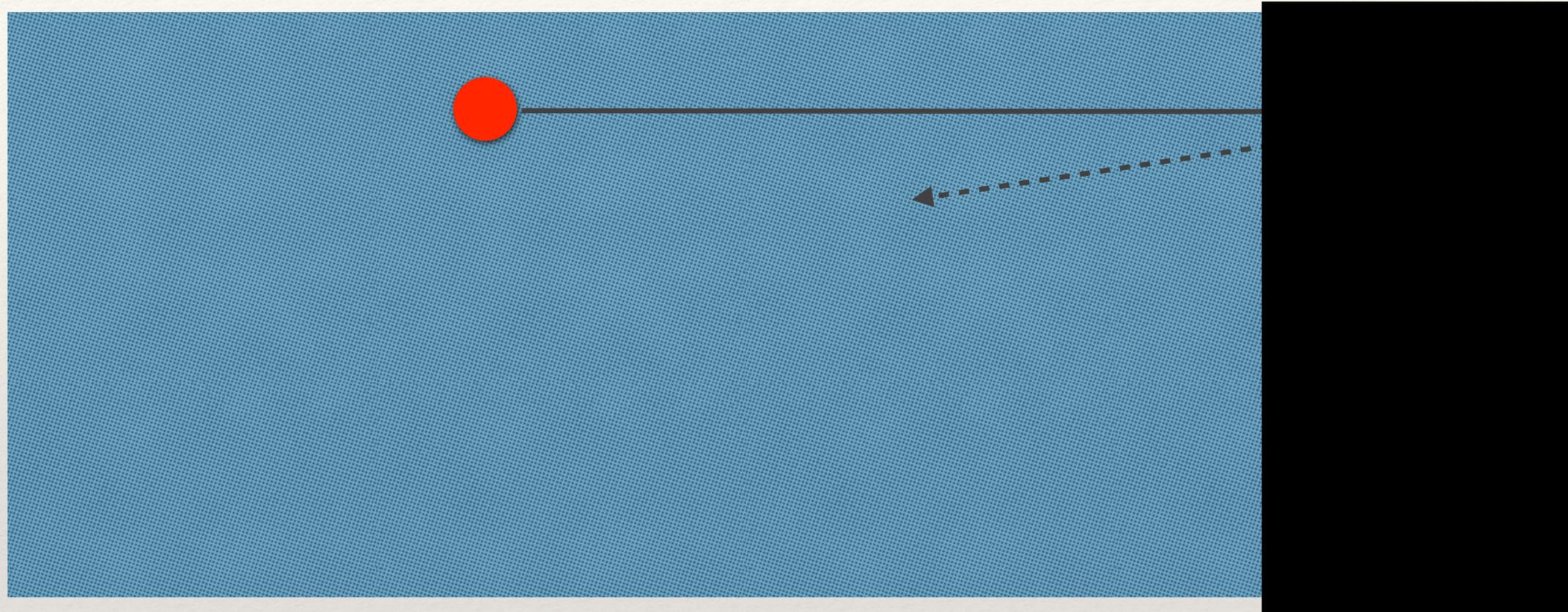
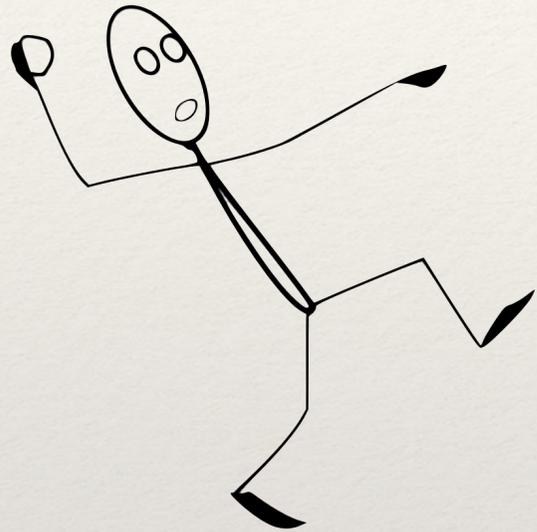
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



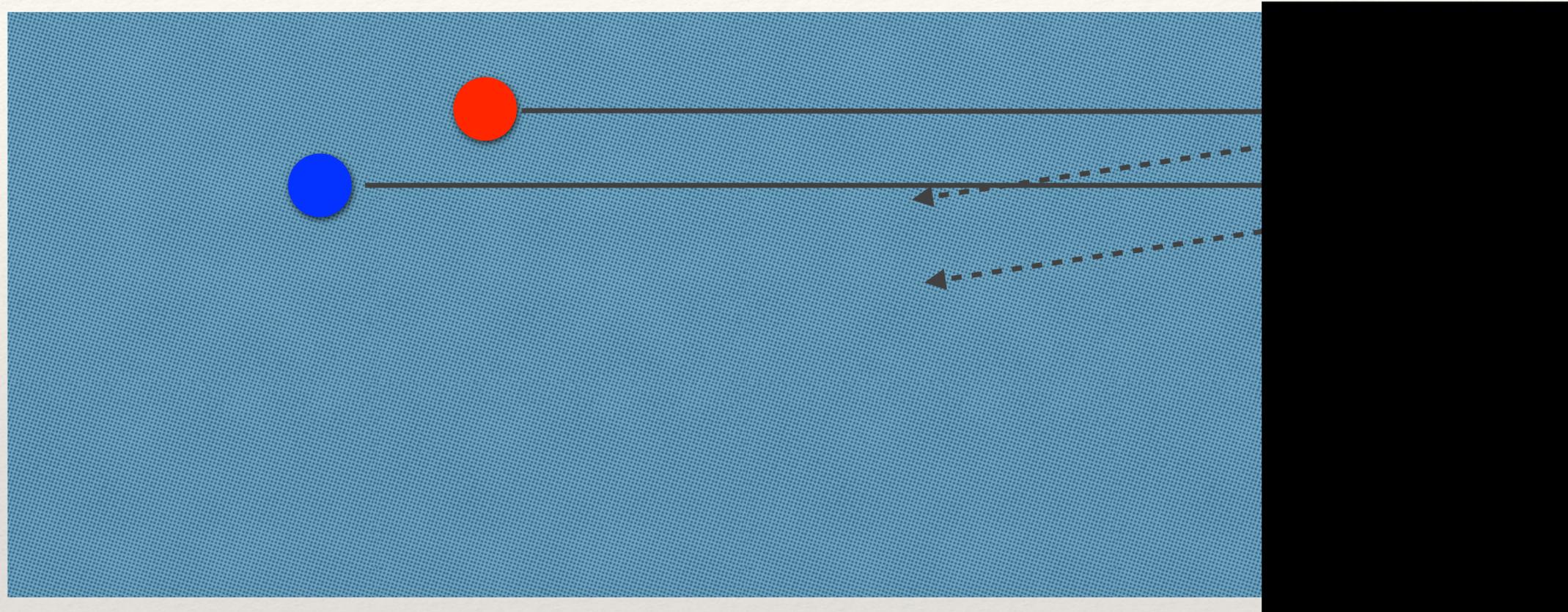
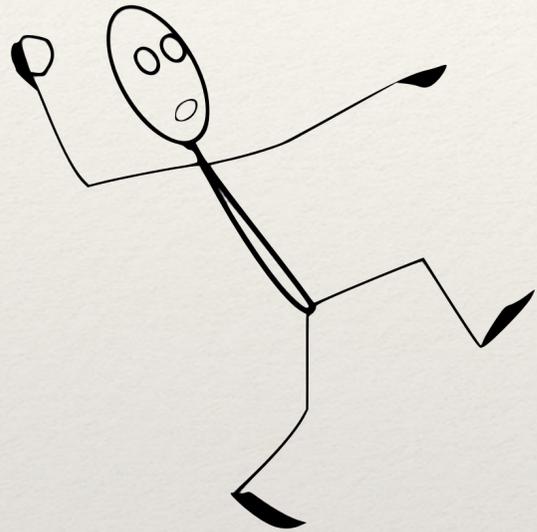
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



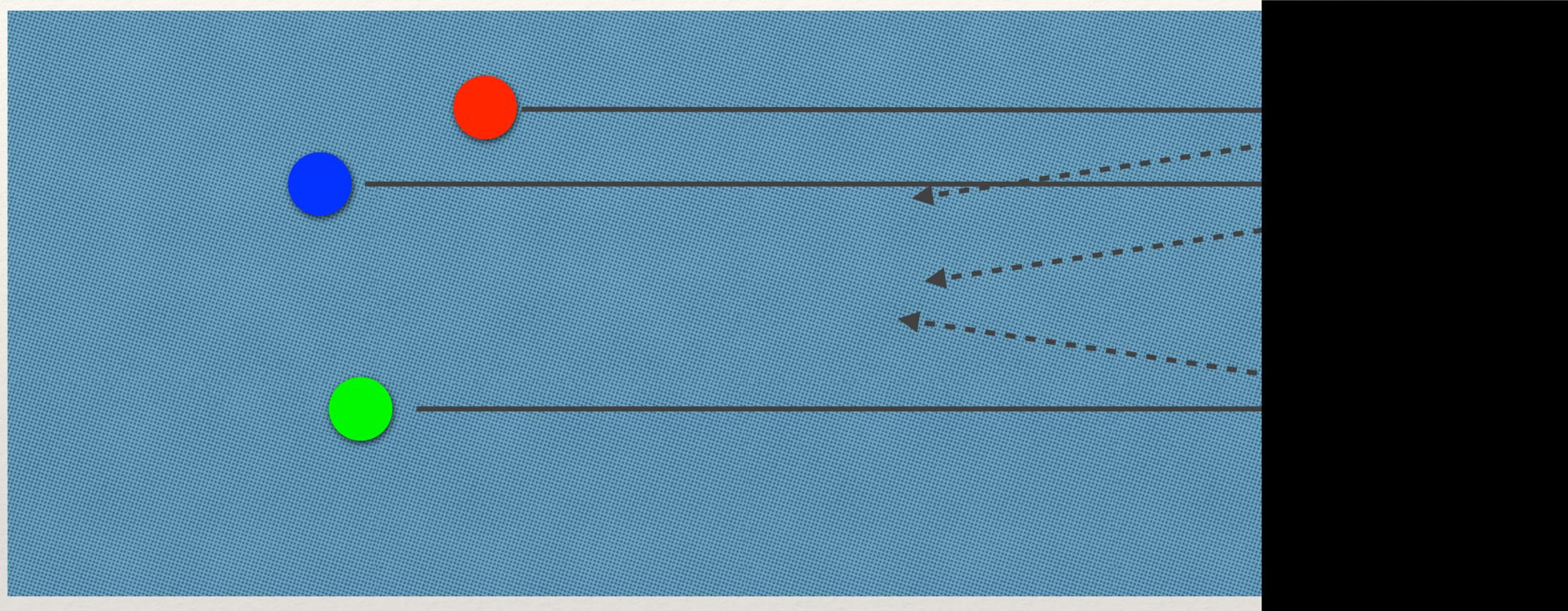
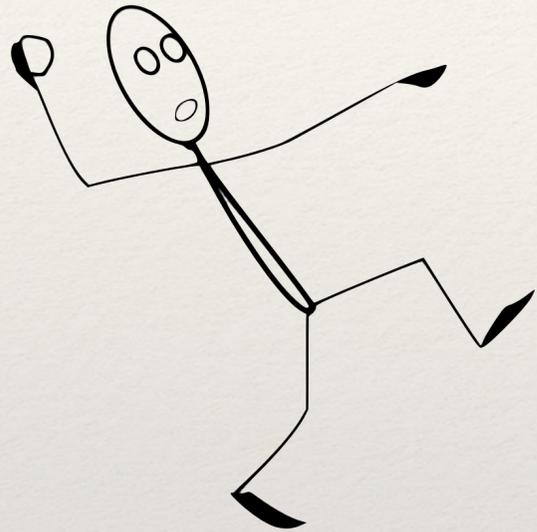
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



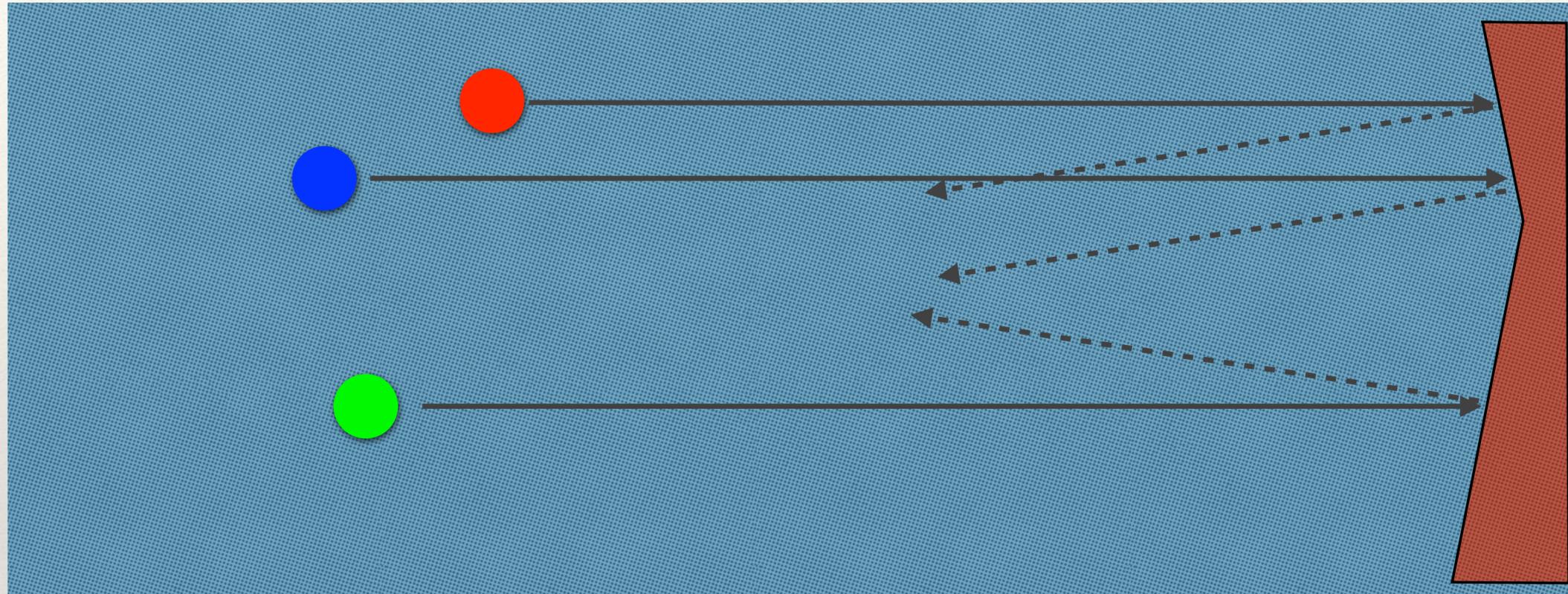
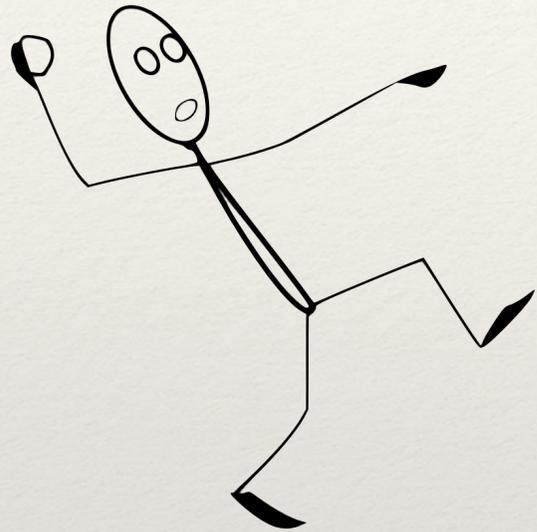
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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



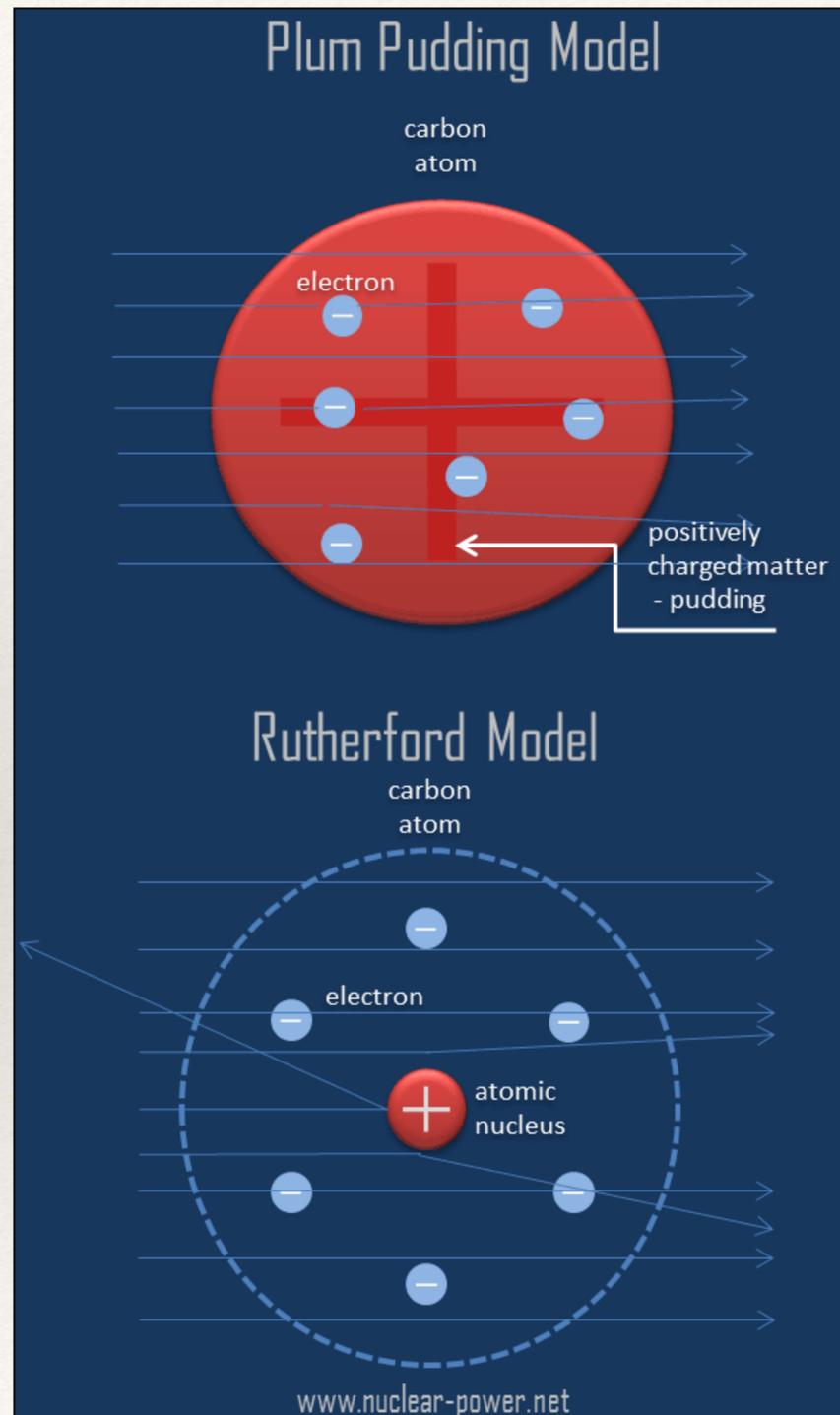
Come riprodurre eventi in laboratorio?

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

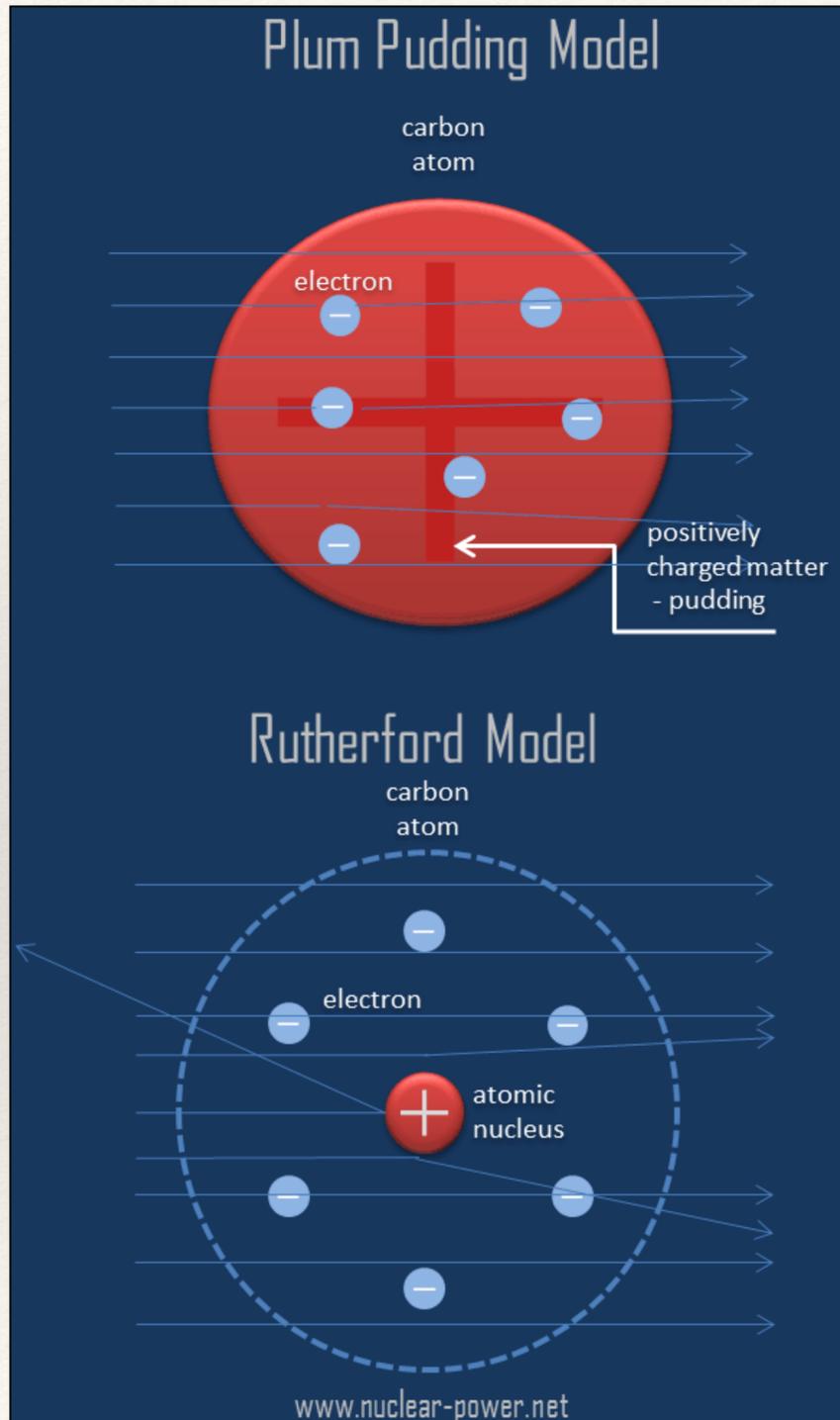


- Dalla direzione con cui le palline rimbalzano, possiamo capire la forma dell'oggetto.
- Che altre informazioni possiamo ricavare? Ad esempio il materiale dell'oggetto nascosto.
- Più lanci effettuiamo, più completa sarà la conoscenza dell'oggetto.
- Vogliamo quindi avere la possibilità di osservare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

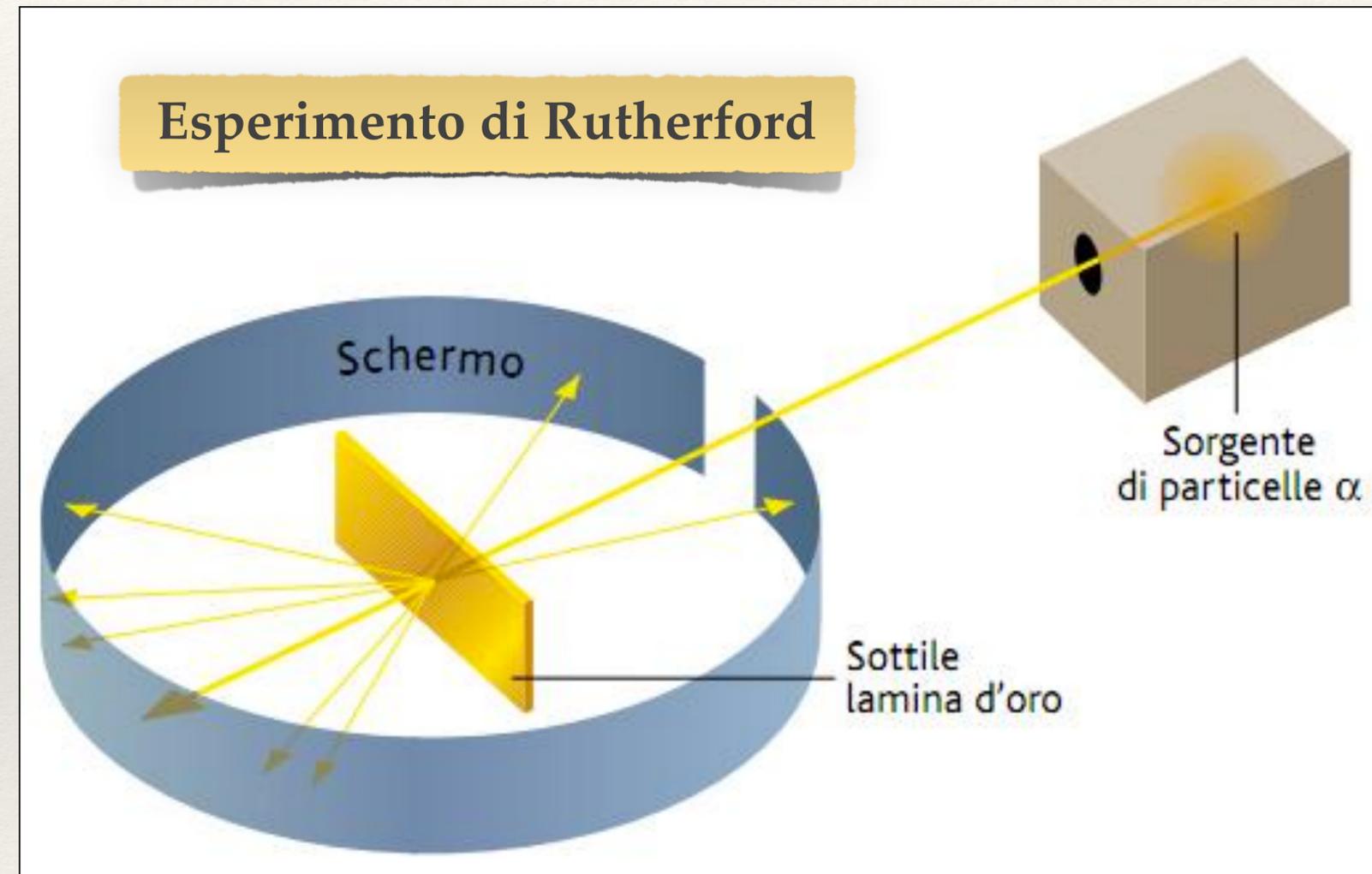
Applicazione: l'esperimento di Rutherford



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.

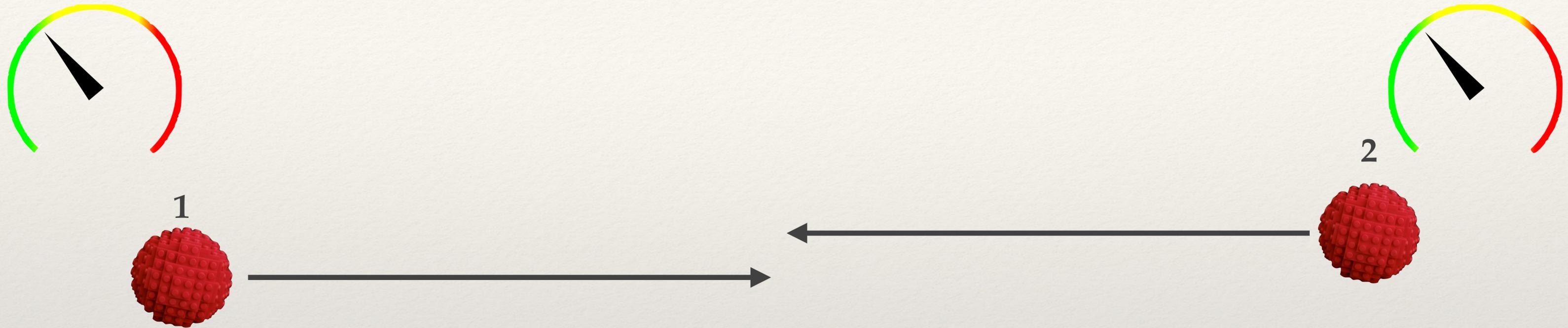


Perché riprodurre eventi in laboratorio?

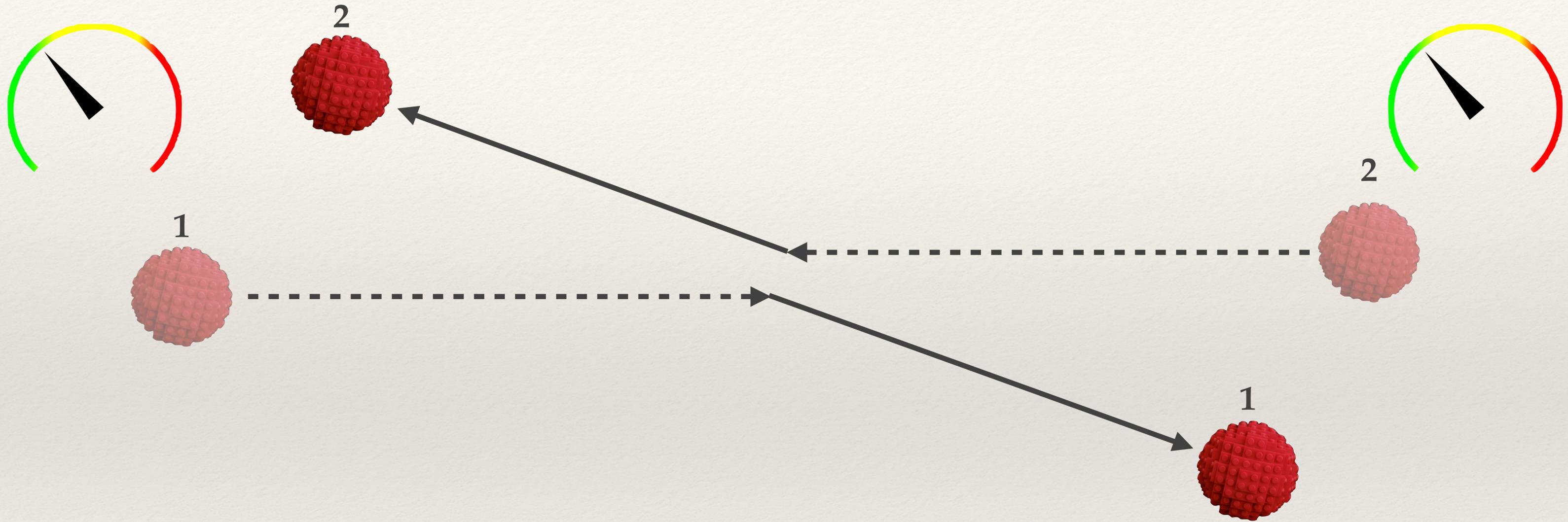
E se facessimo
scontrare due proiettili
fra loro?



Interazione fra proiettili

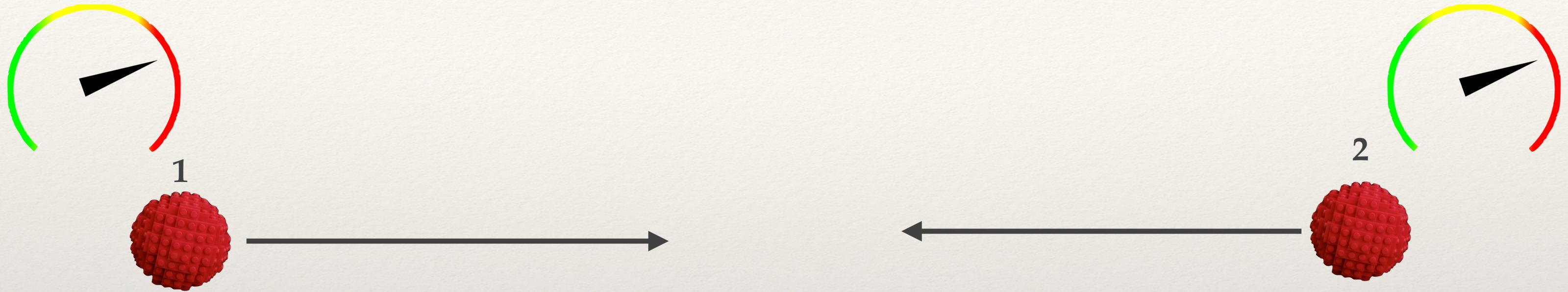


Interazione fra proiettili

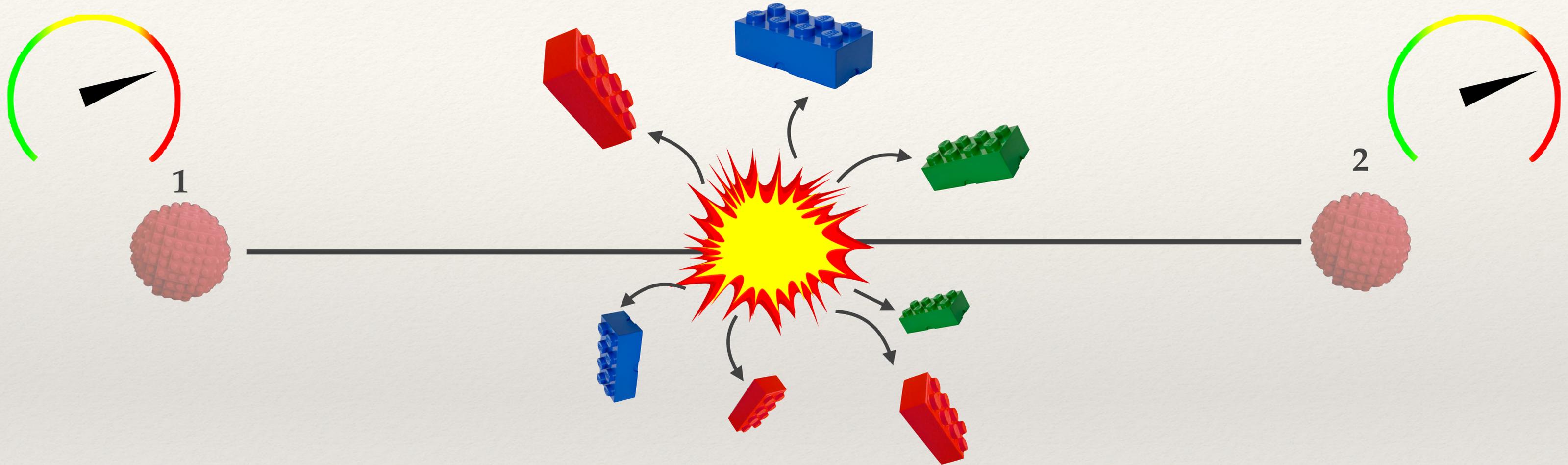


I proiettili possono essere semplicemente deviati dalla loro direzione iniziale, rimanendo intatti.

Interazione fra proiettili

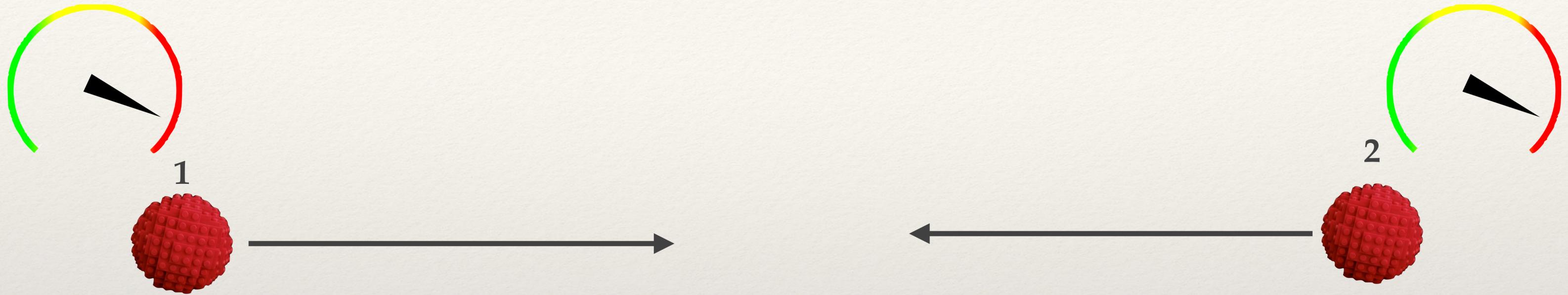


Interazione fra proiettili

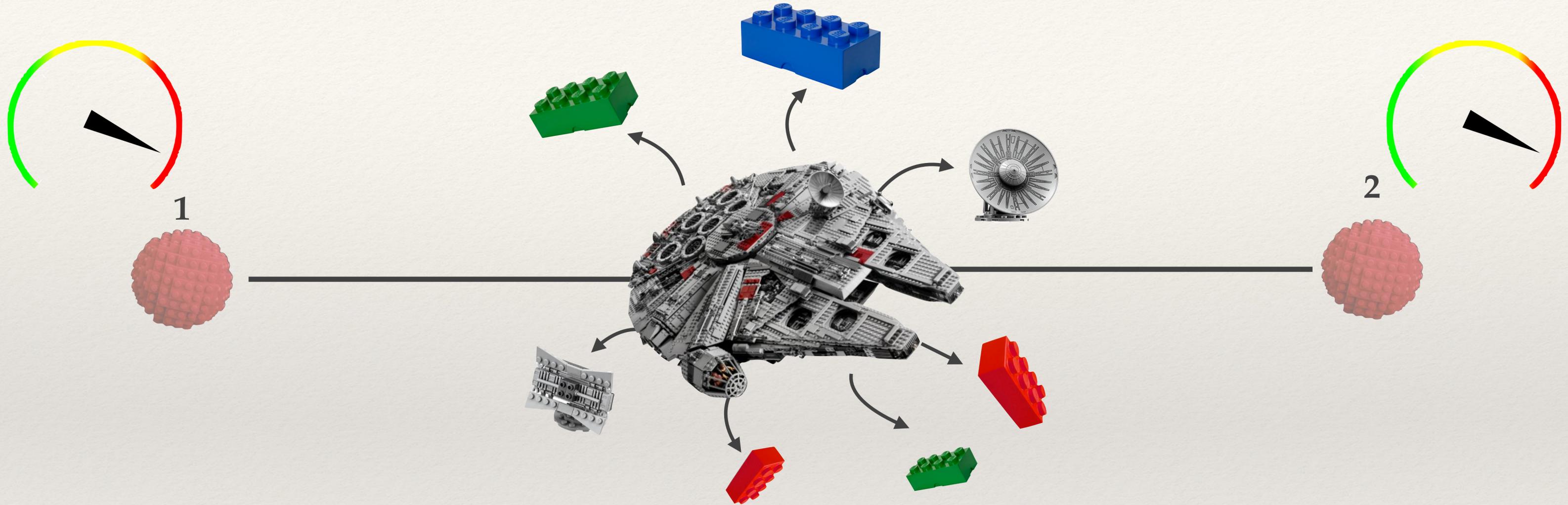


Con la giusta dose di energia, possiamo “rompere” i proiettili e scoprirne i componenti.

Interazione fra proiettili

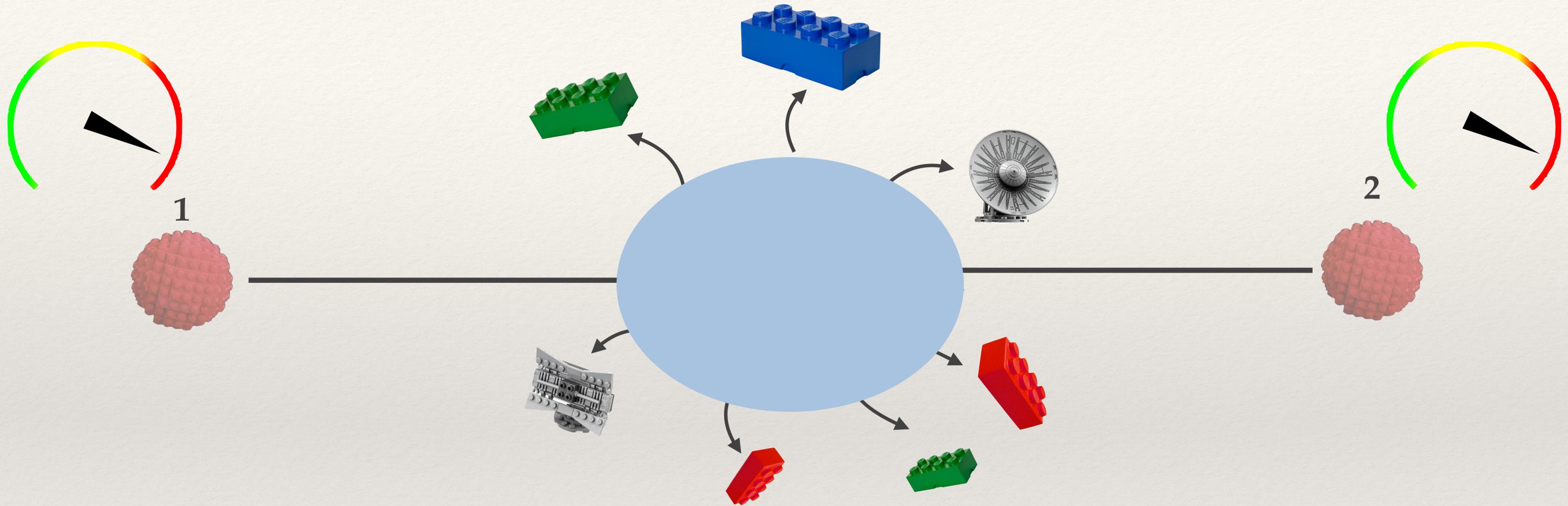


Interazione fra proiettili



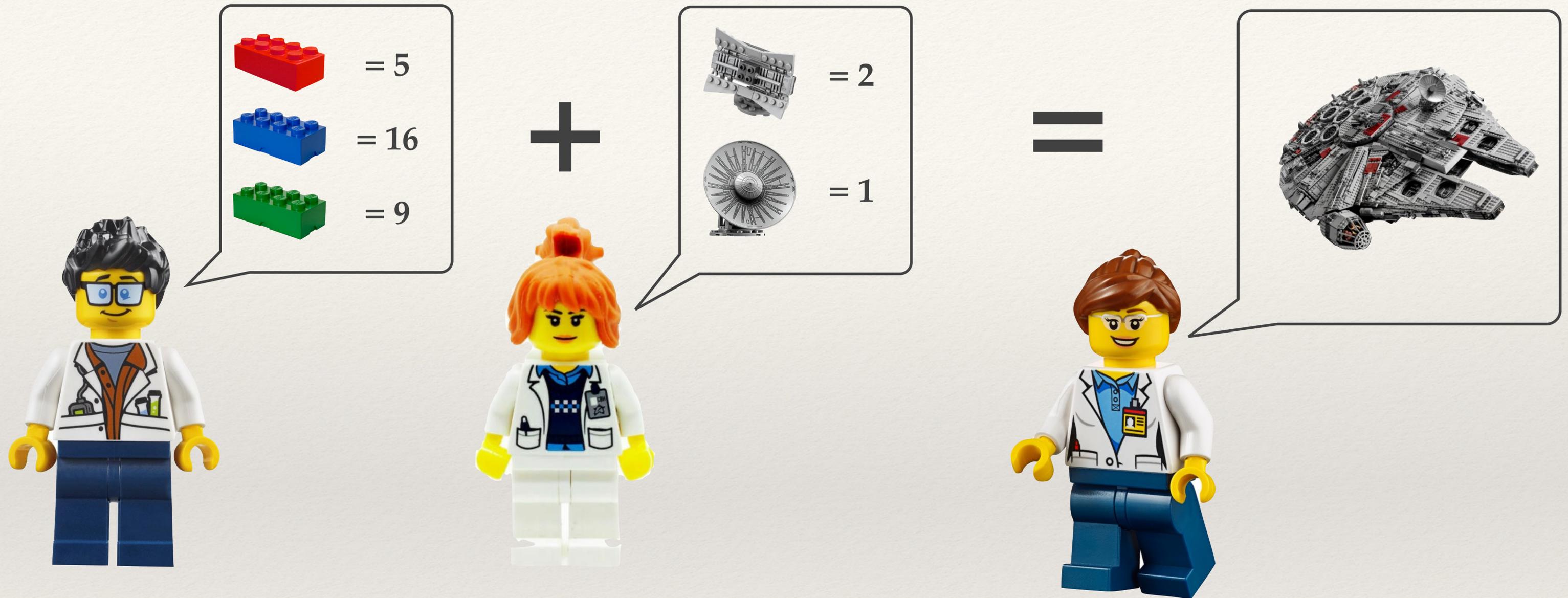
Aumentando ancora l'energia dei proiettili, si possono creare oggetti più grandi e complessi, che però sopravvivono troppo poco per essere osservati. Possiamo risalire alla struttura generata solo osservando i "pezzi" in cui si è separata.

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.

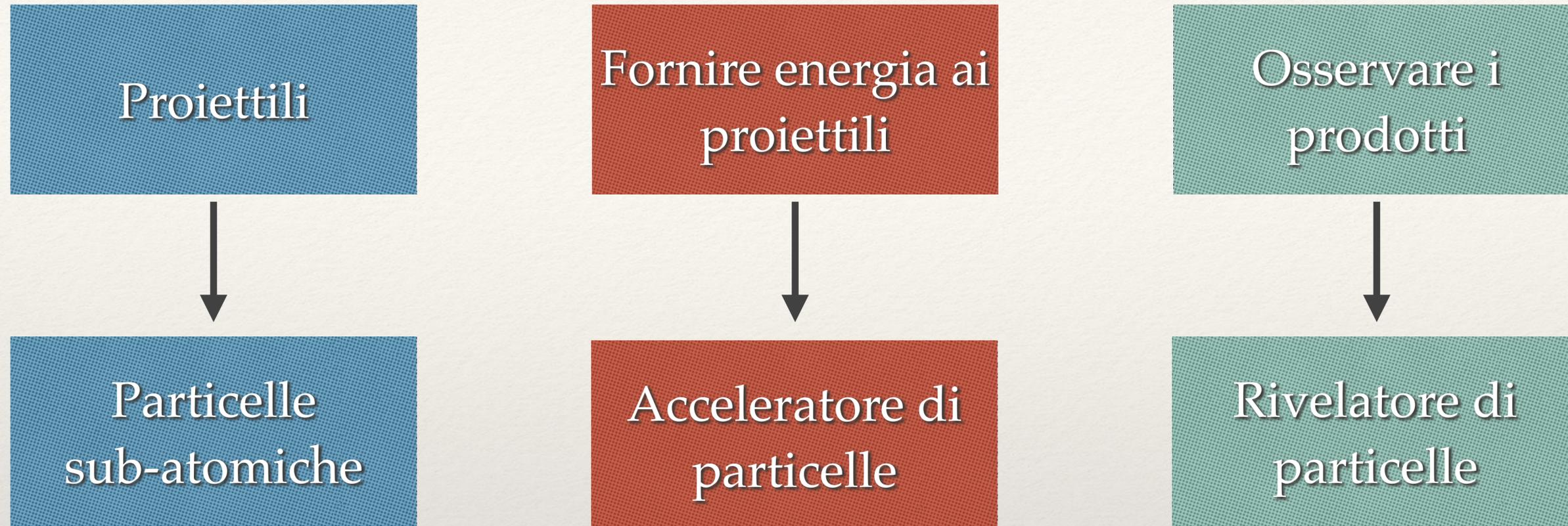
Come riprodurre eventi in laboratorio?

Proiettili

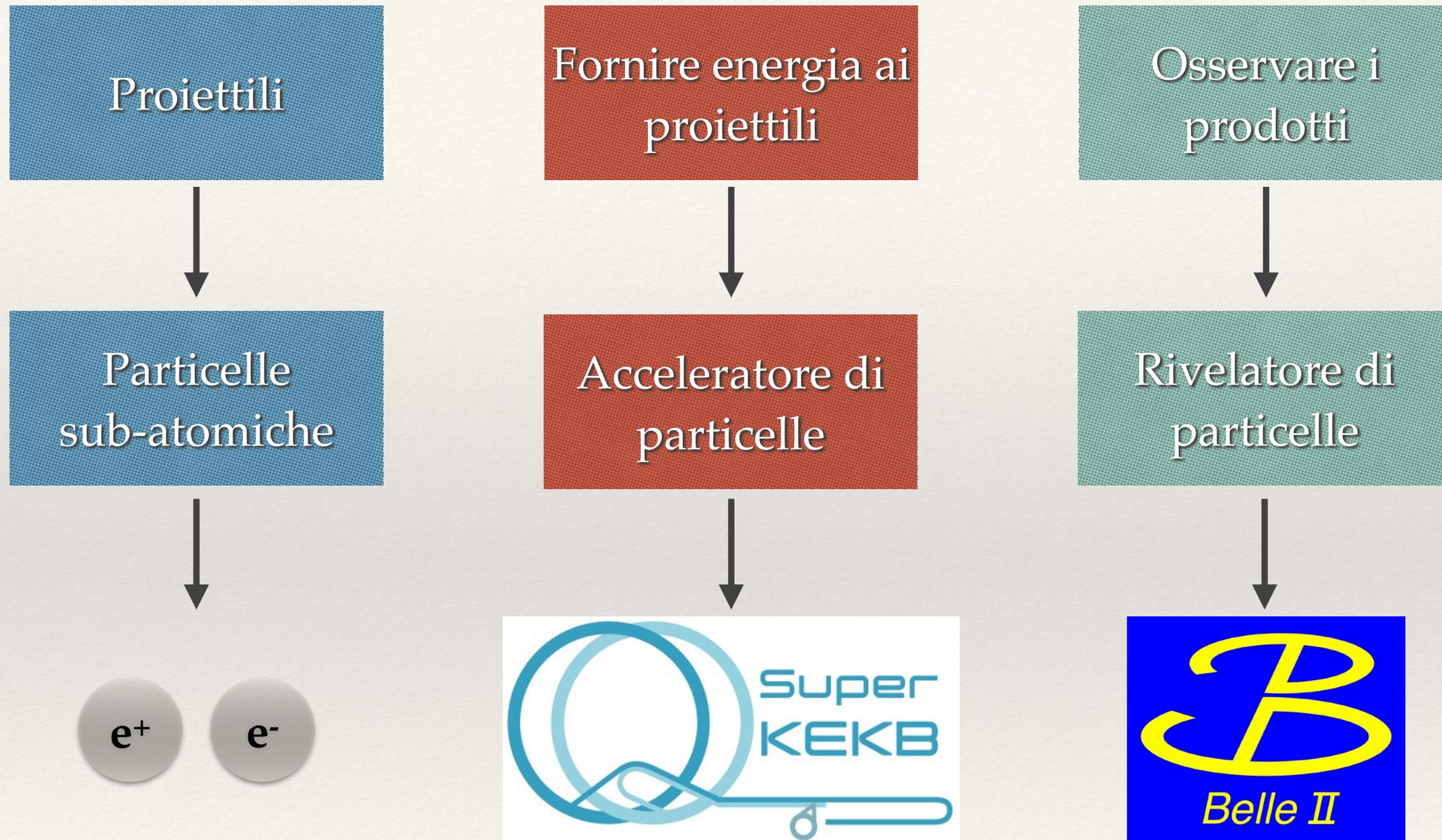
Fornire energia ai
proiettili

Osservare i
prodotti

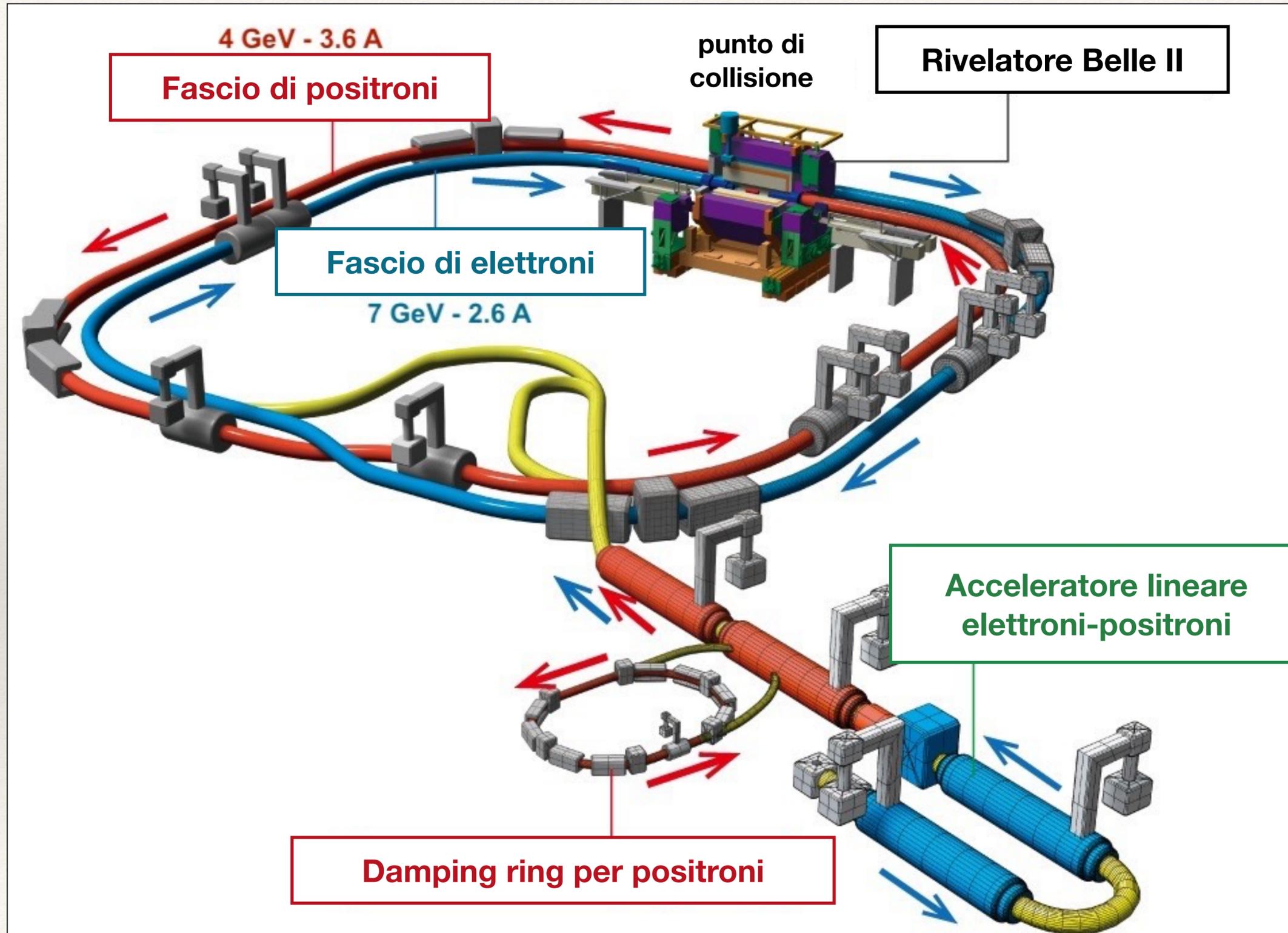
Come riprodurre eventi in laboratorio?



Come riprodurre eventi in laboratorio?

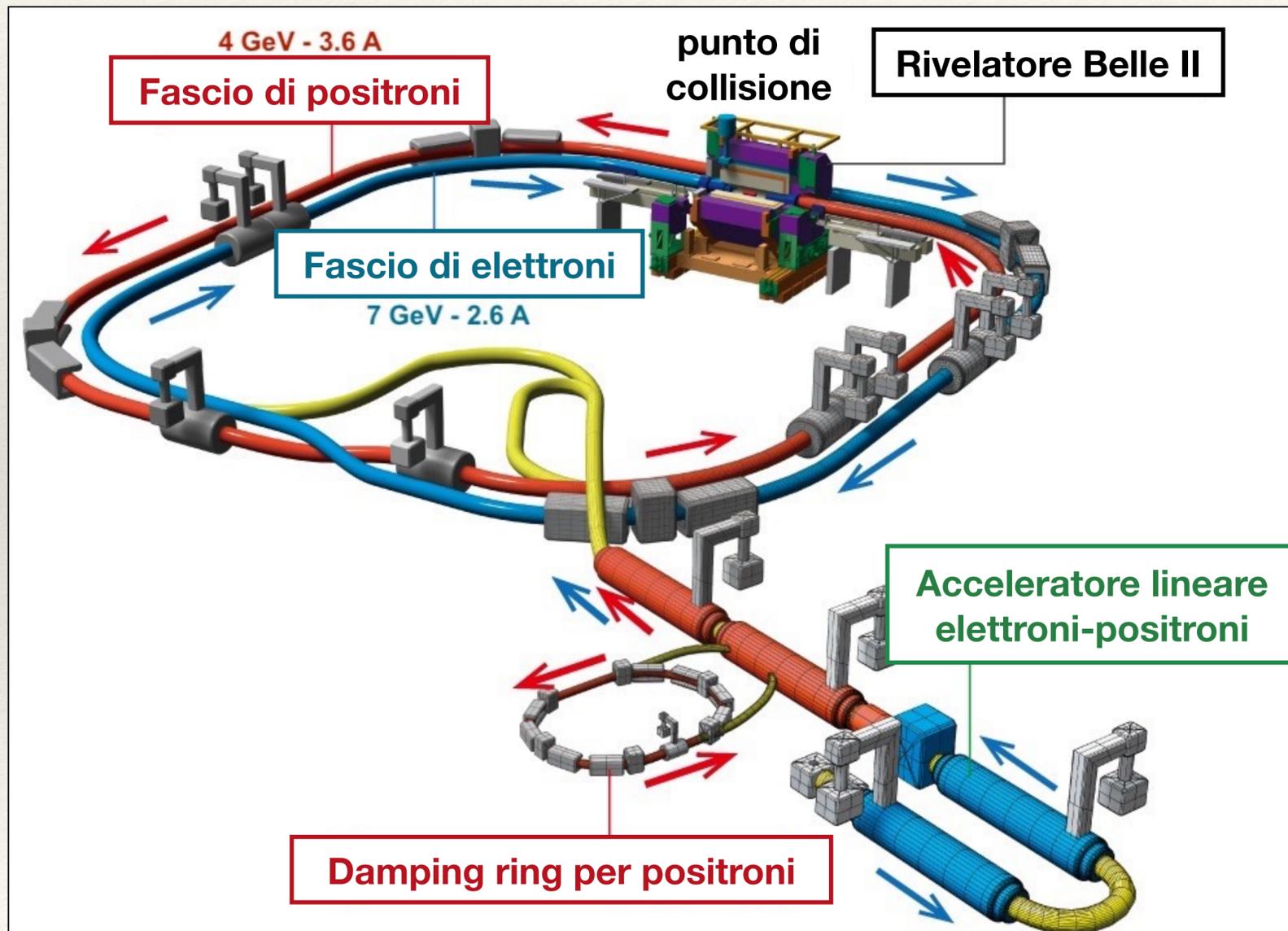


L'acceleratore SuperKEKB



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.



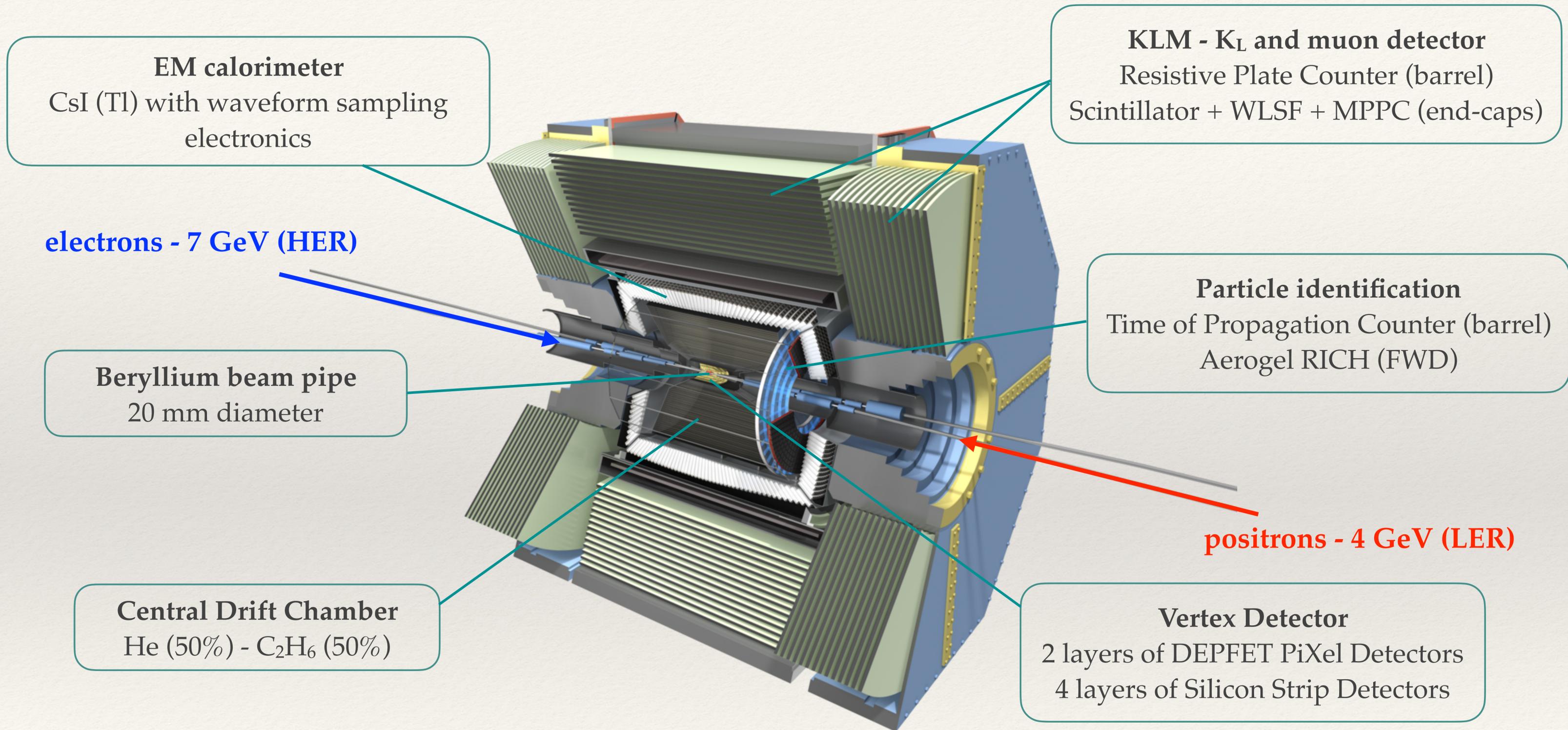
In un acceleratore, si usano campi elettrici e magnetici per far circolare i fasci di particelle nei due anelli:

- ◉ 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



Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

Traiettoria

Carica

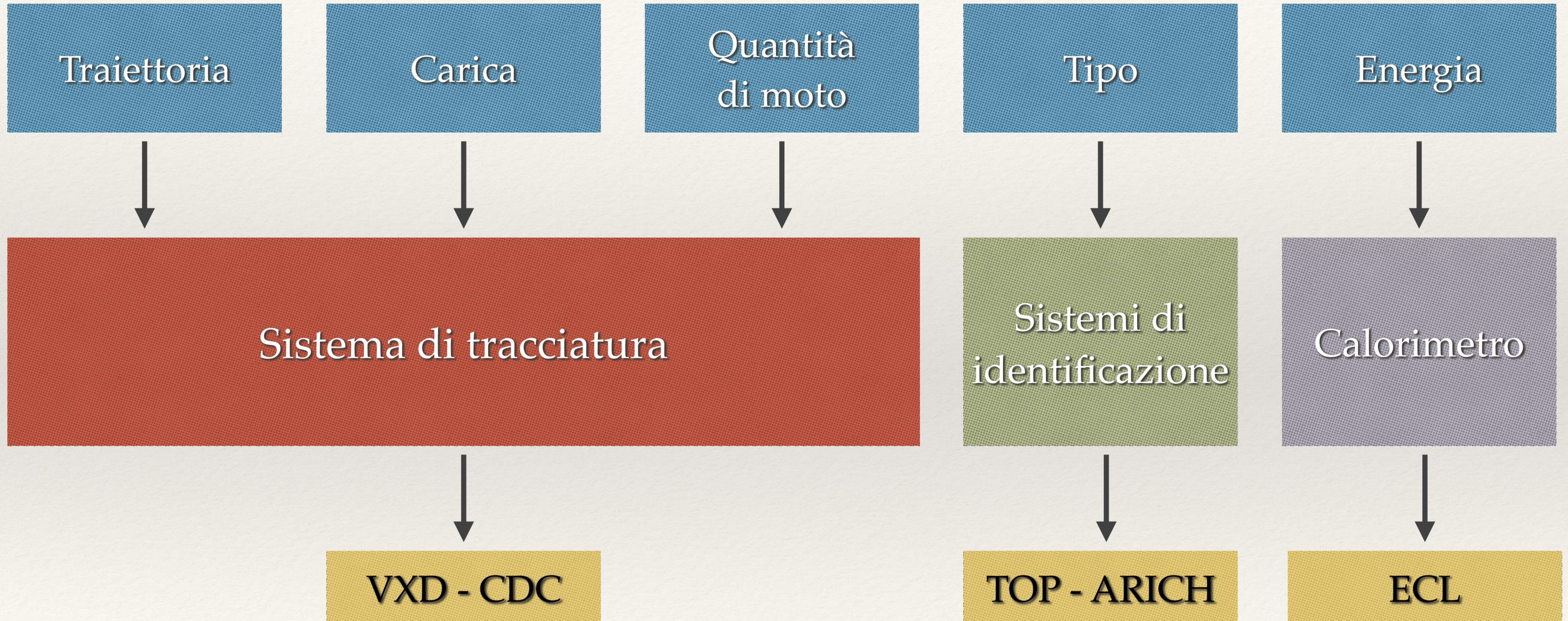
Quantità
di moto

Tipo

Energia

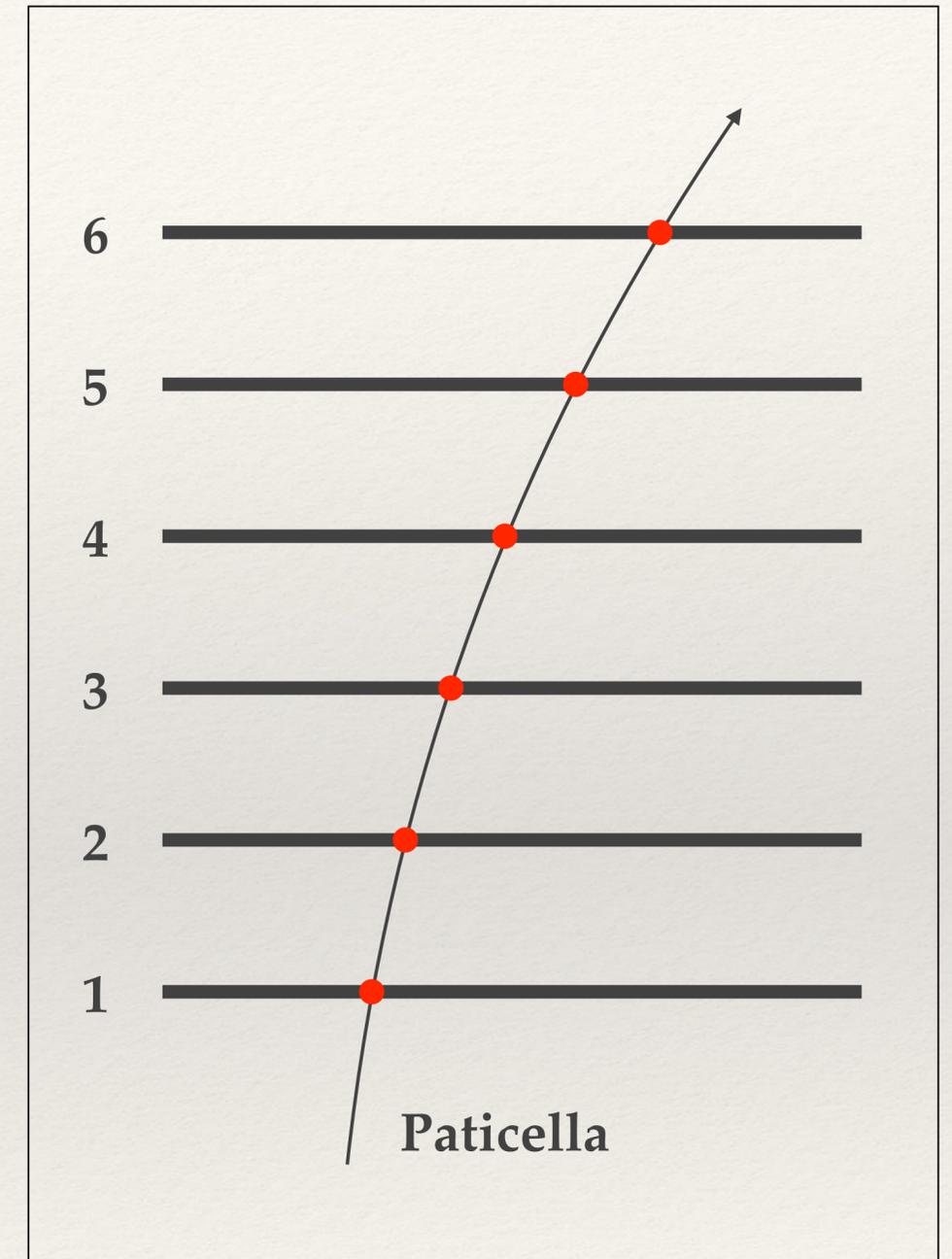
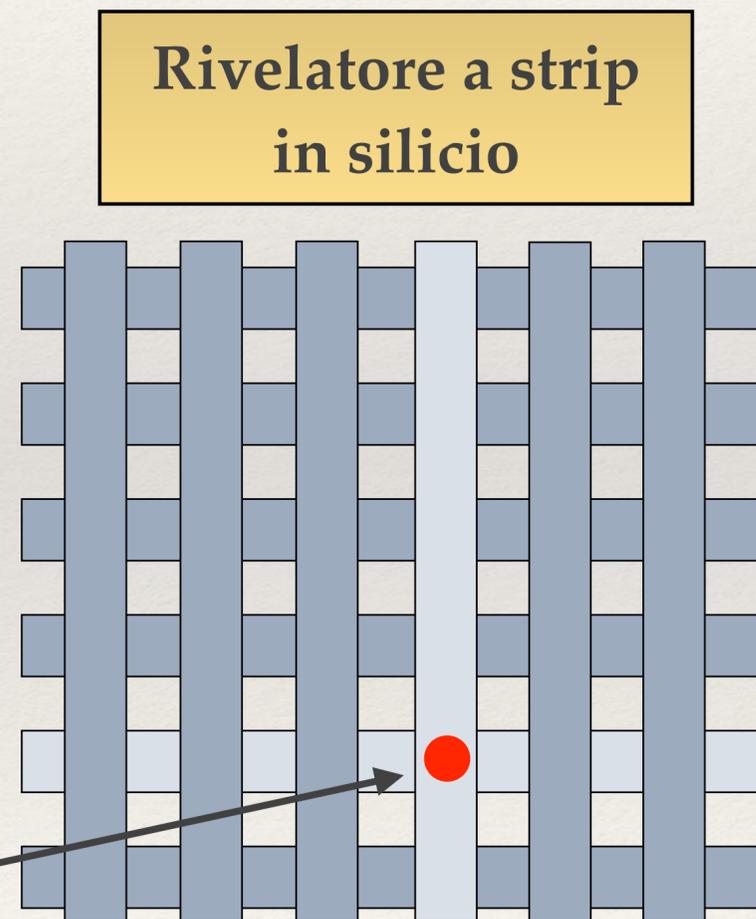
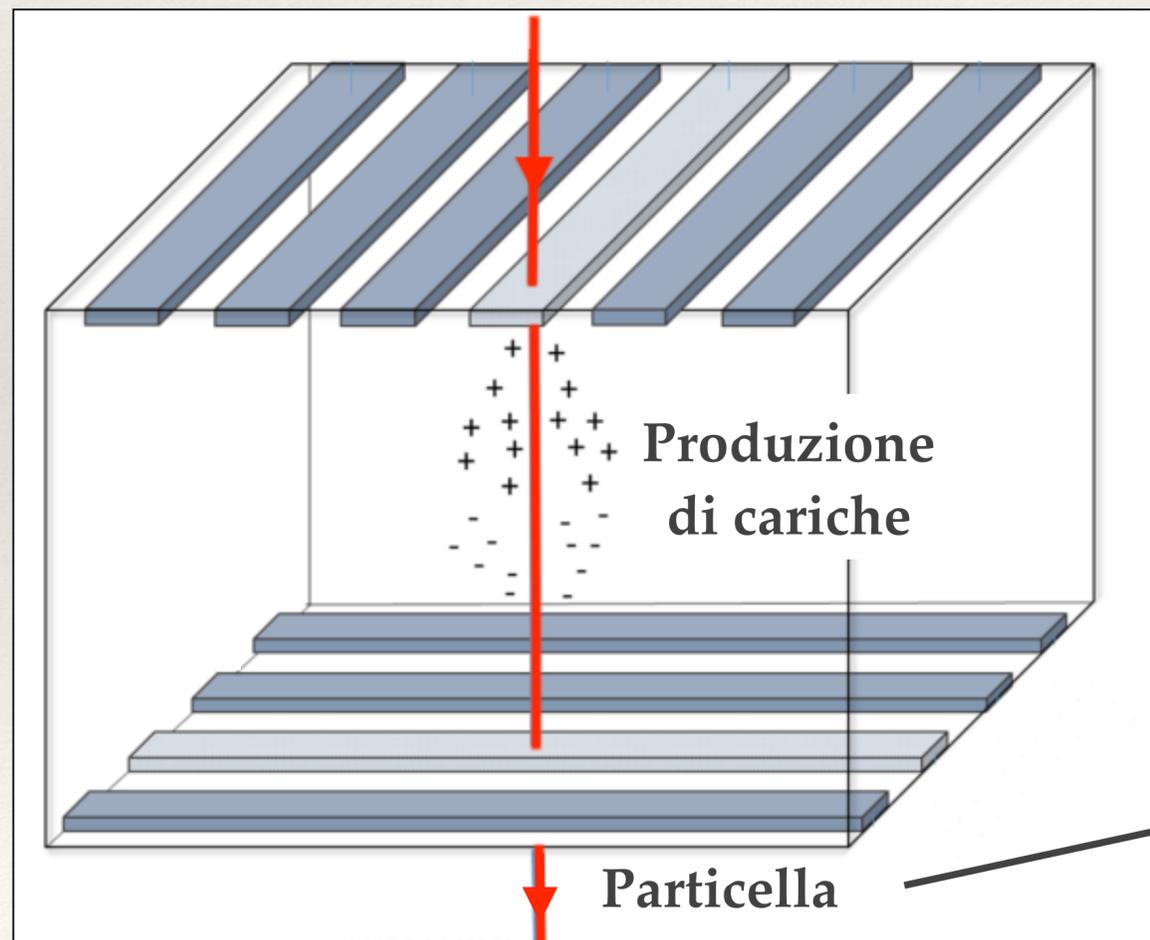
Cosa osservare con un rivelatore?

Di una particella vogliamo conoscere:

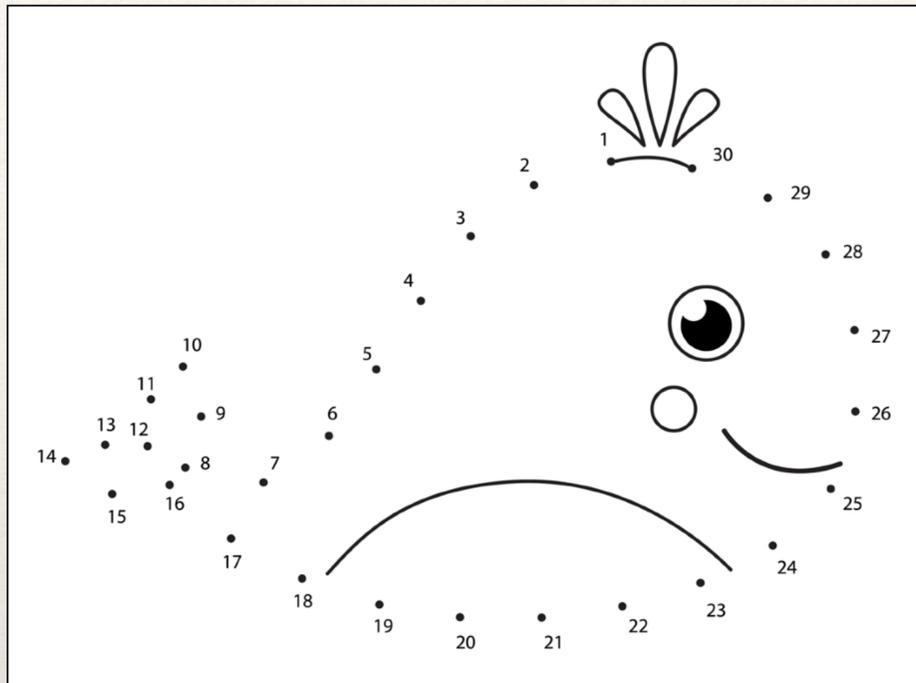


Tracciatura delle particelle

- 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).

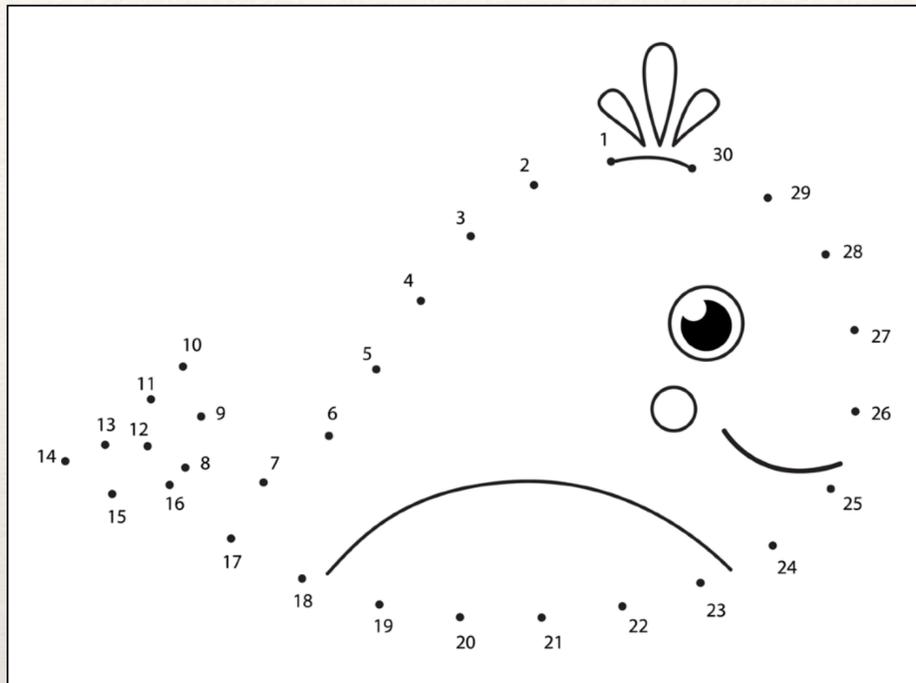


Come ricavare la traiettoria di una particella



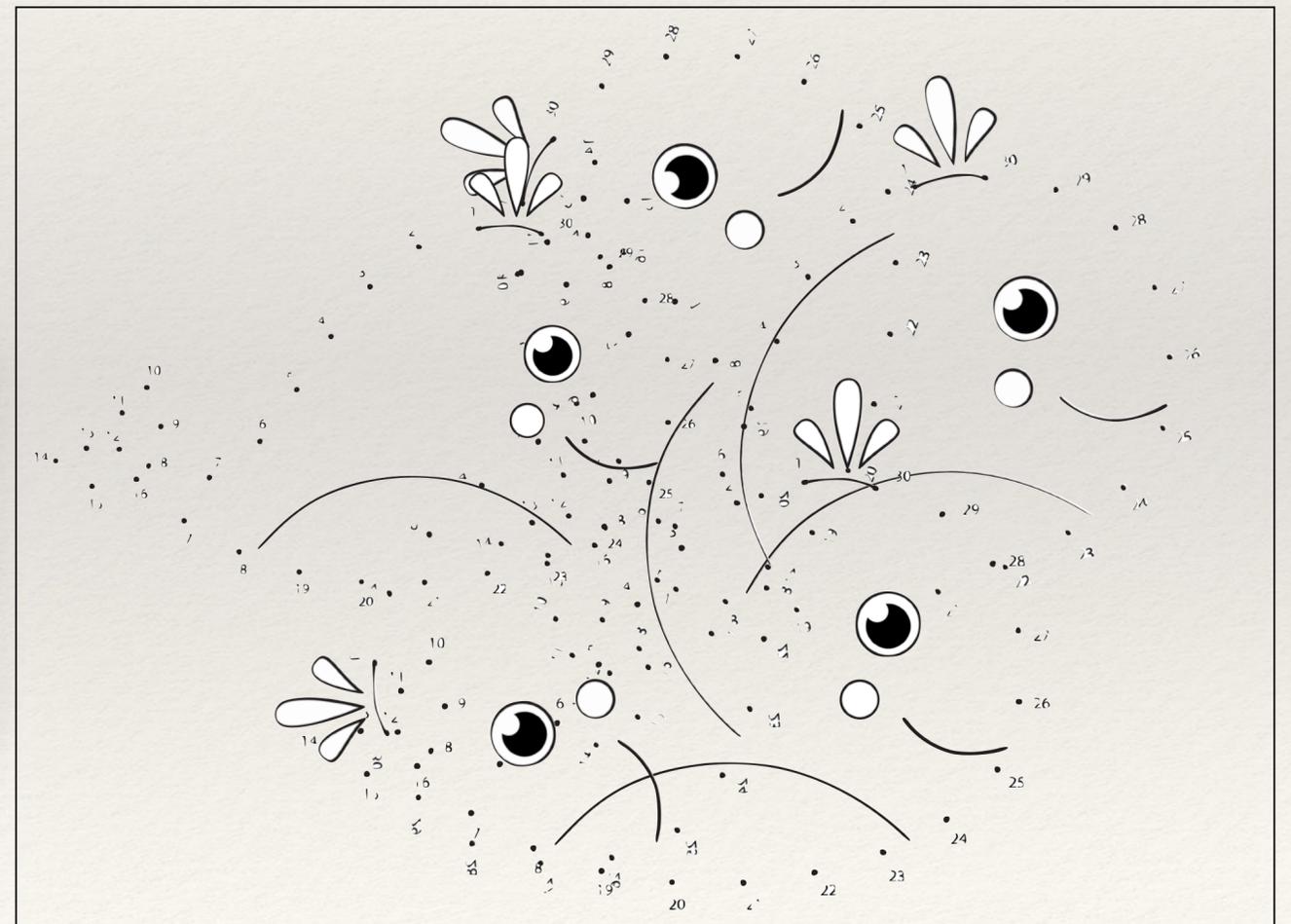
Avendo un punto nello spazio per ogni layer, è sufficiente unire i puntini per ottenere la traiettoria della particella. Sembra facile...

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:

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

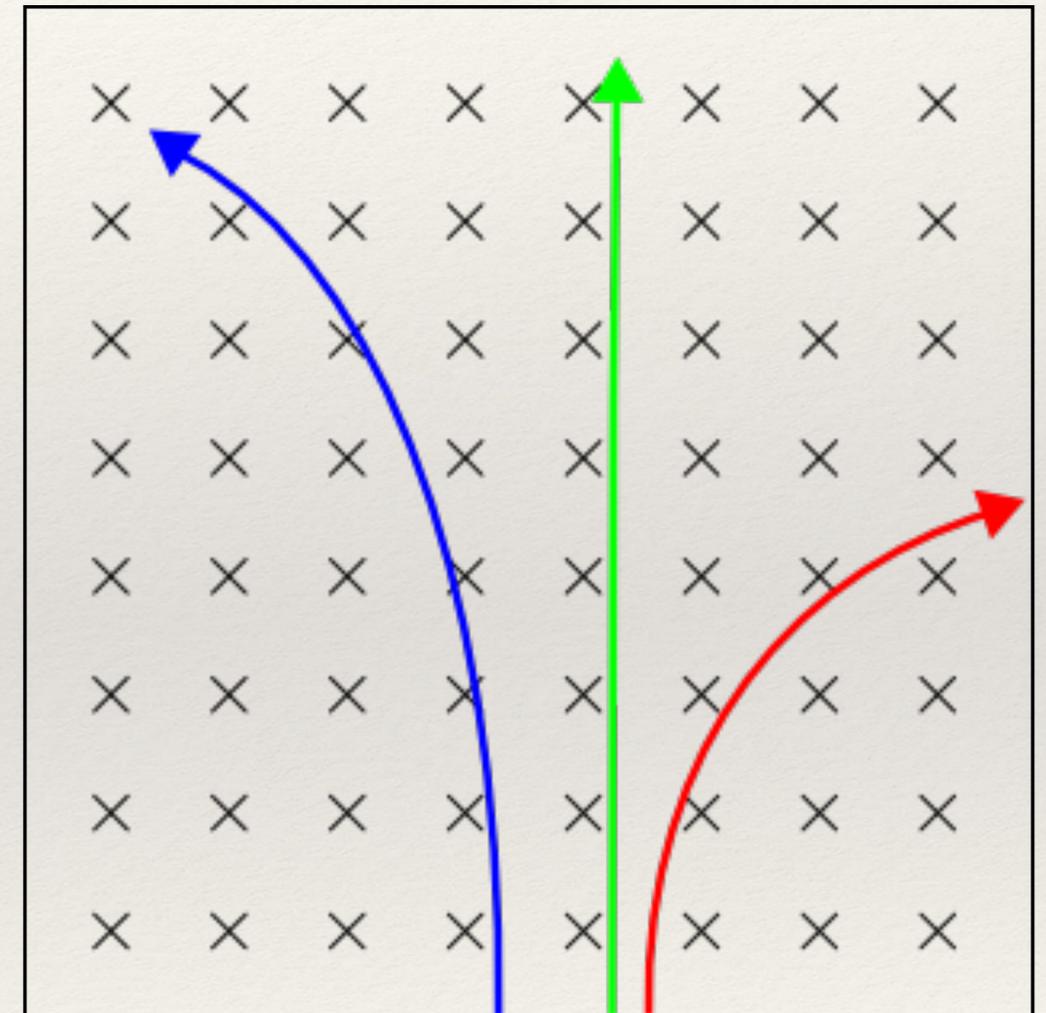
- ◉ La presenza di un campo magnetico determina la presenza di una forza che fa curvare la traiettoria della particella.

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.

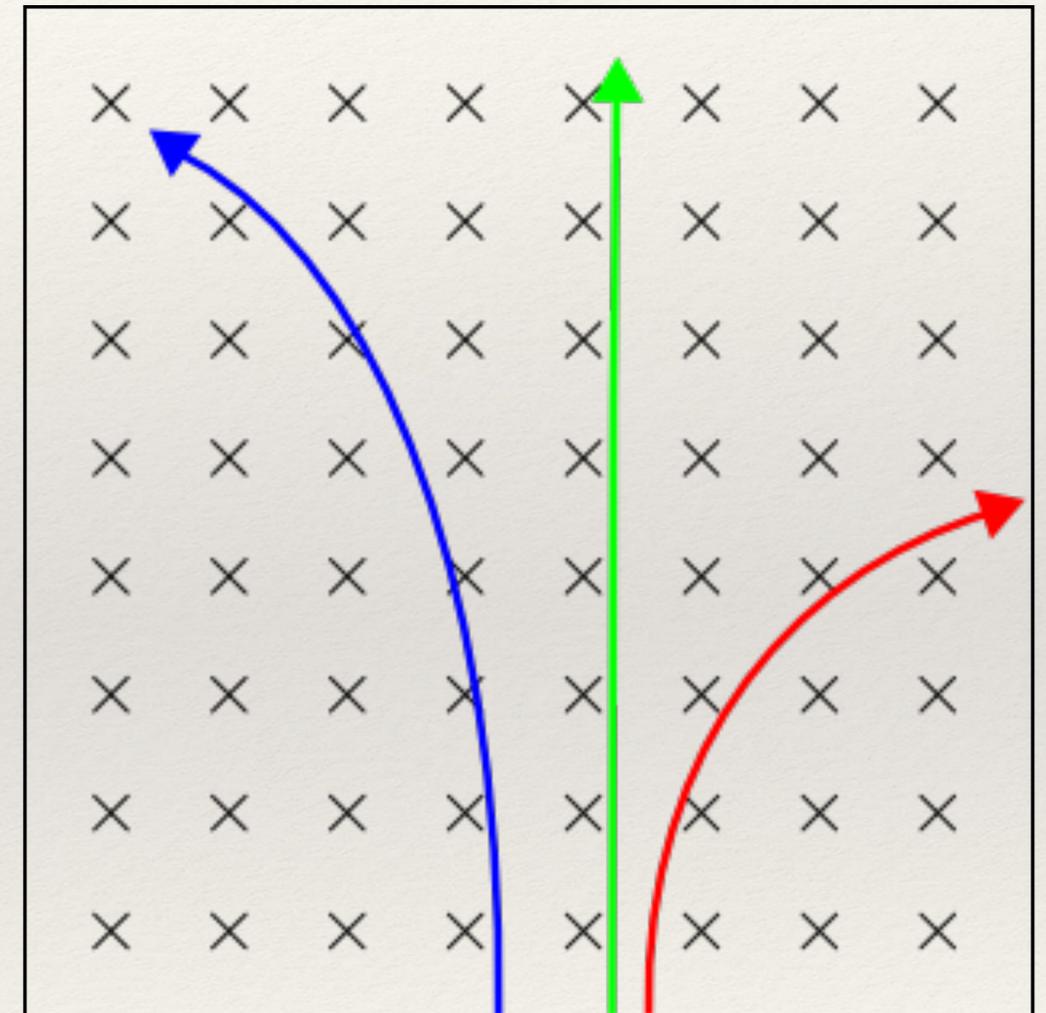


Campo magnetico

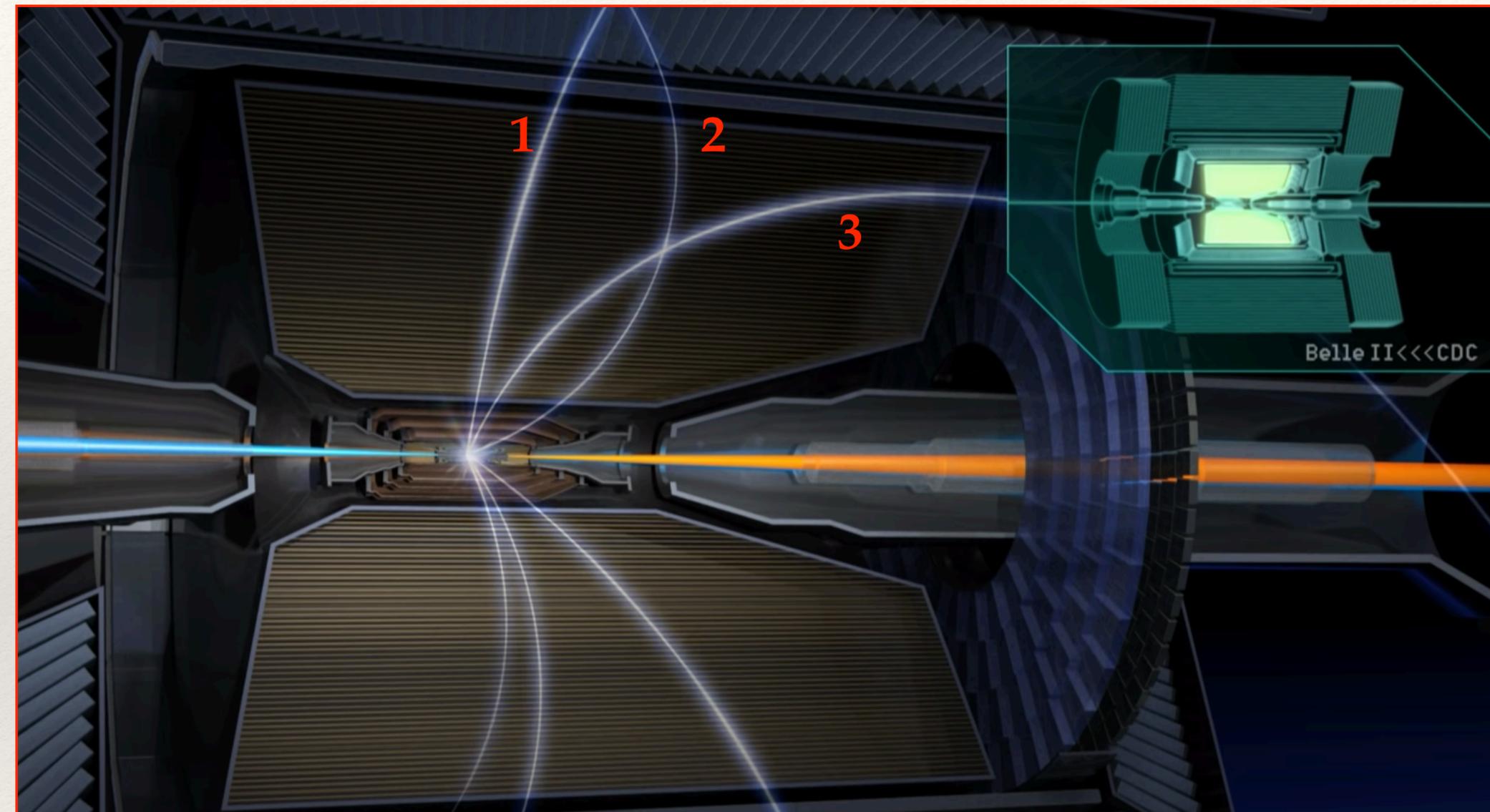
- Una particella carica è soggetta alla forza di Lorentz:

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

- 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



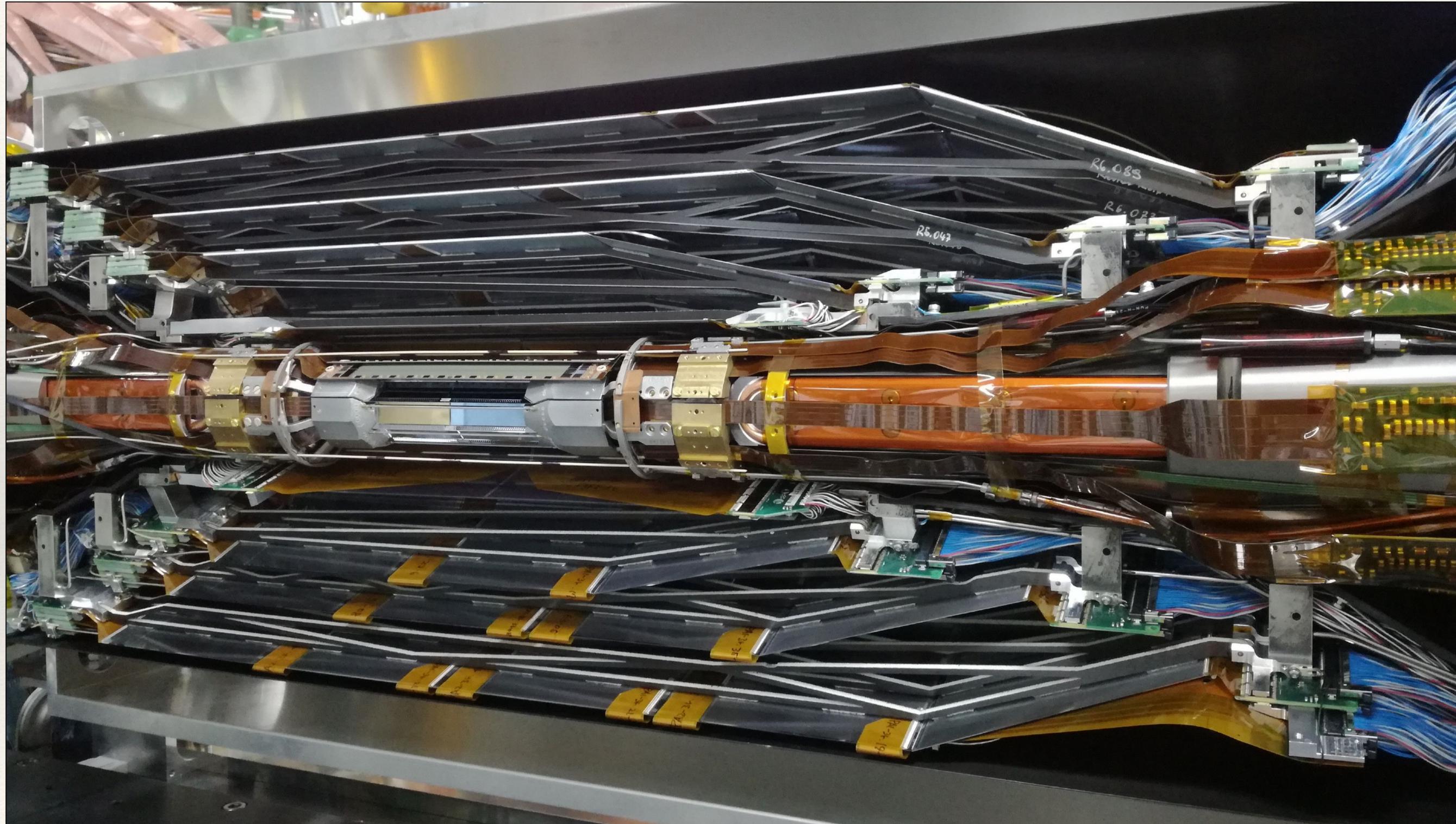
VXD

- ◉ 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.

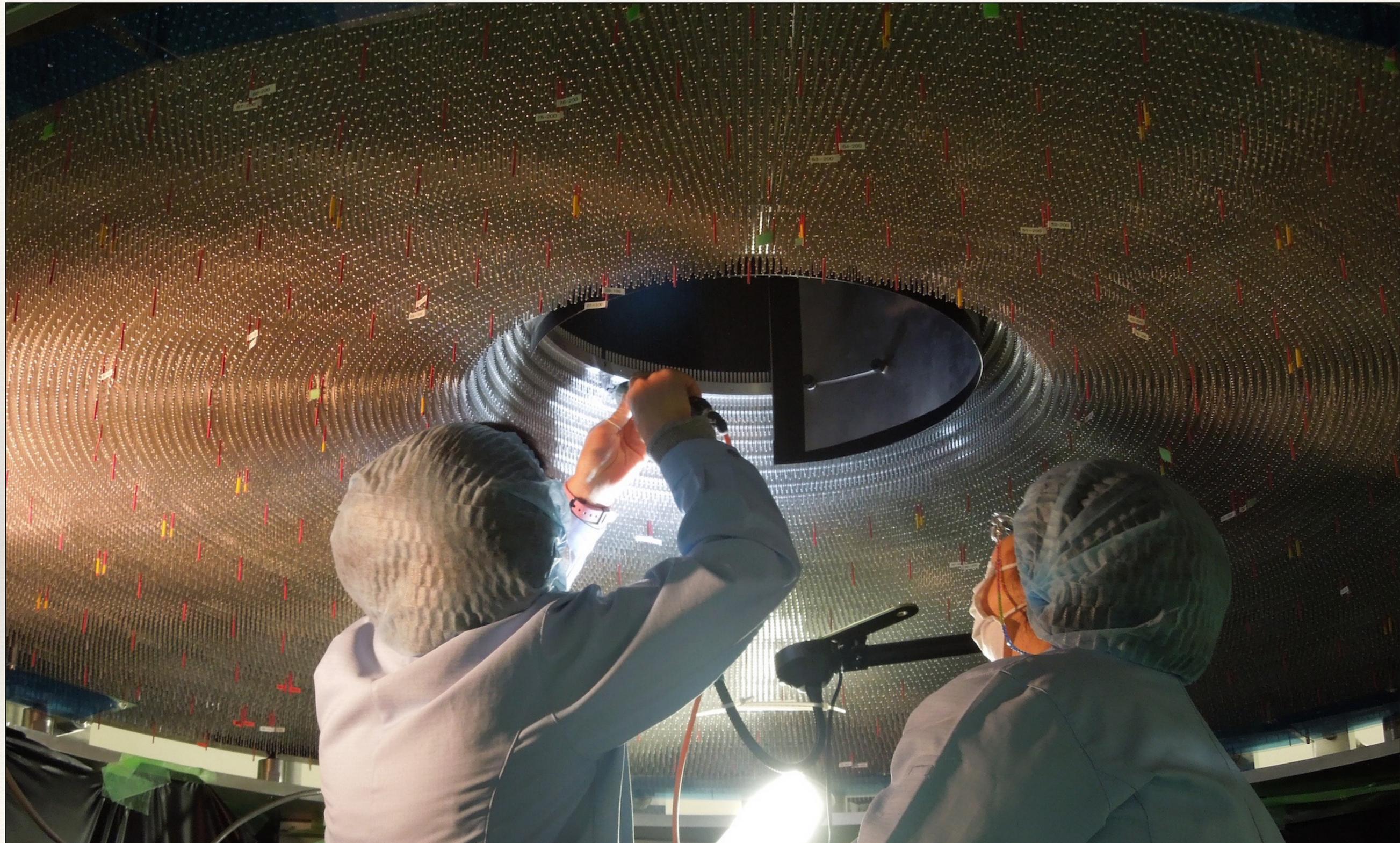
CDC

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

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!

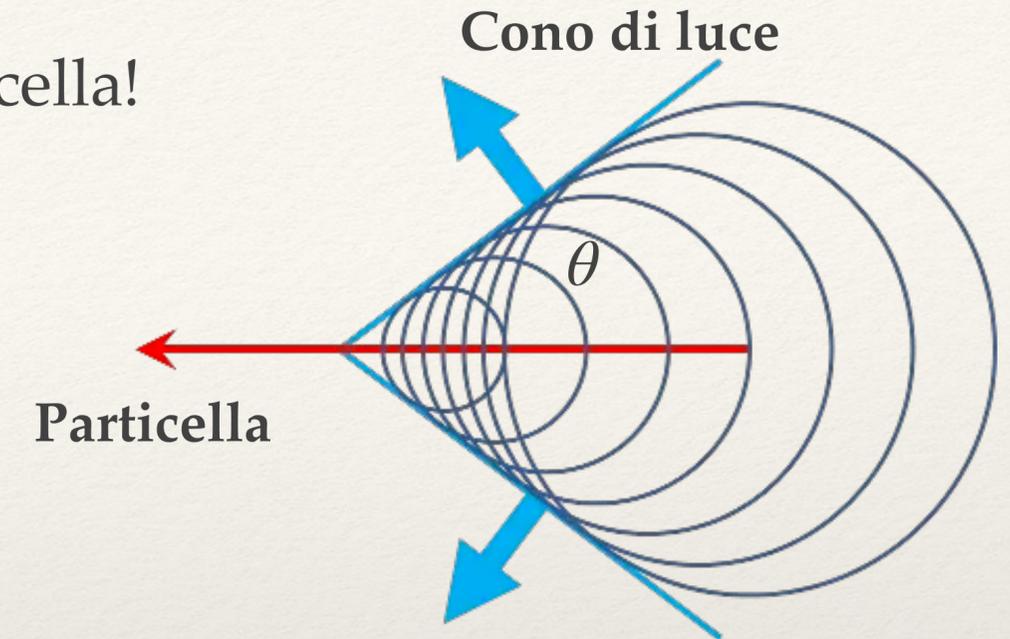
- La velocità della luce nel vuoto, indicata con c , è la velocità massima raggiungibile.
- La velocità della luce in un mezzo materiale è:

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

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.

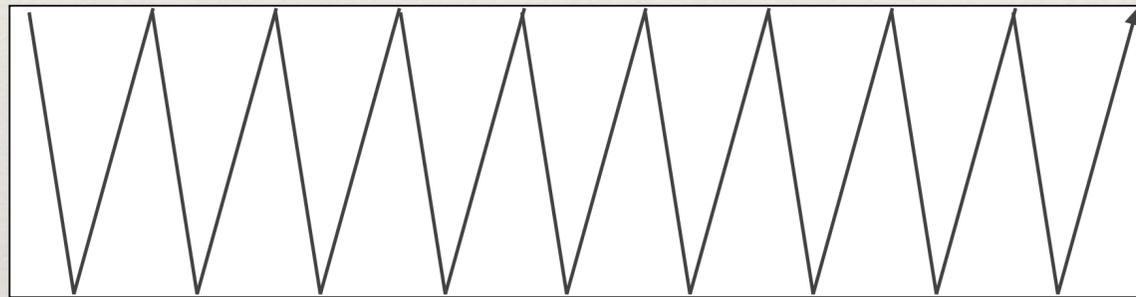
$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad \vec{p} = m \vec{v}$$



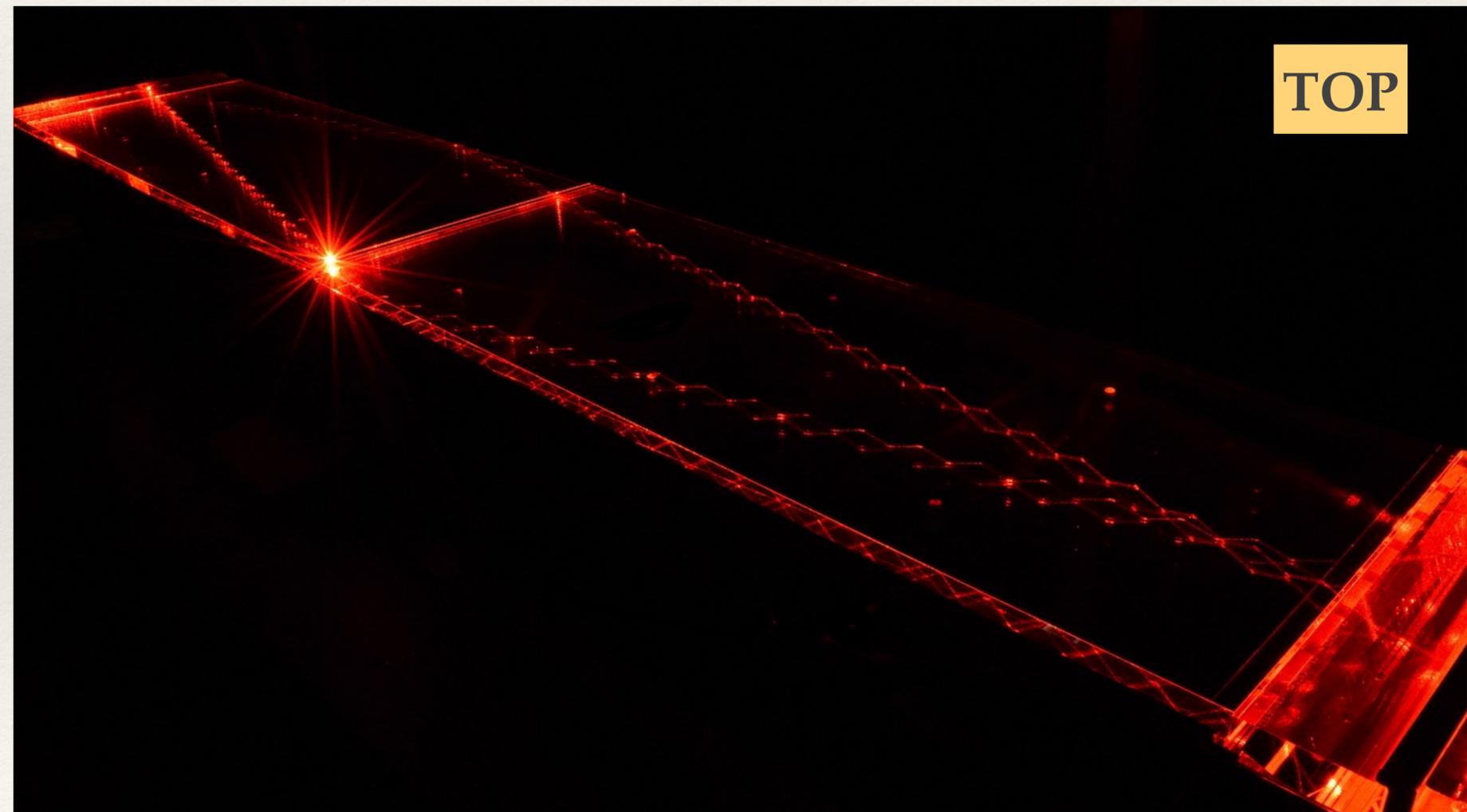
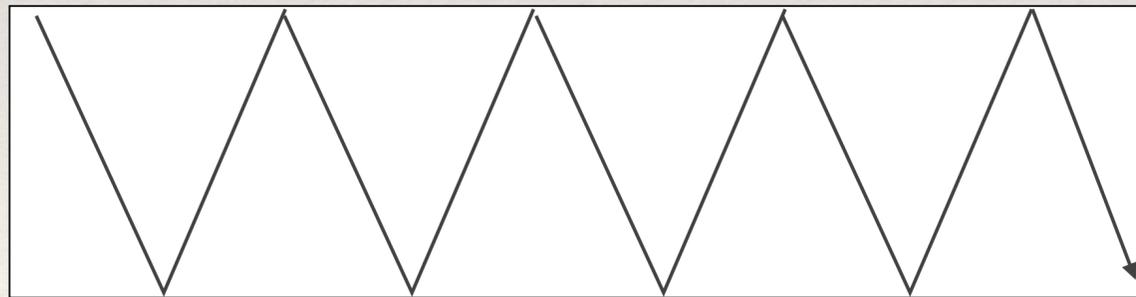
Detector di identificazione - TOP

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

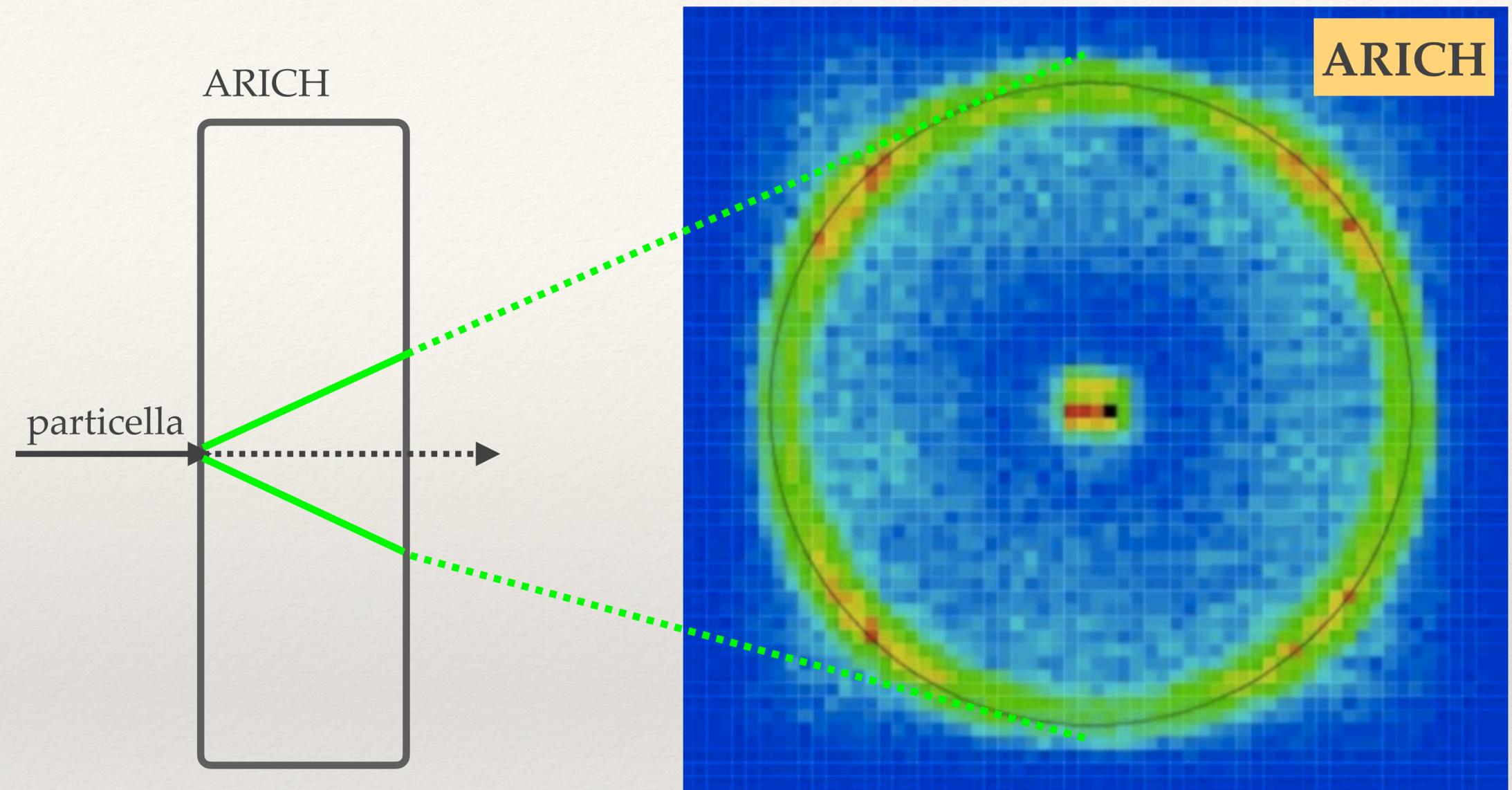
Particella 1



Particella 2

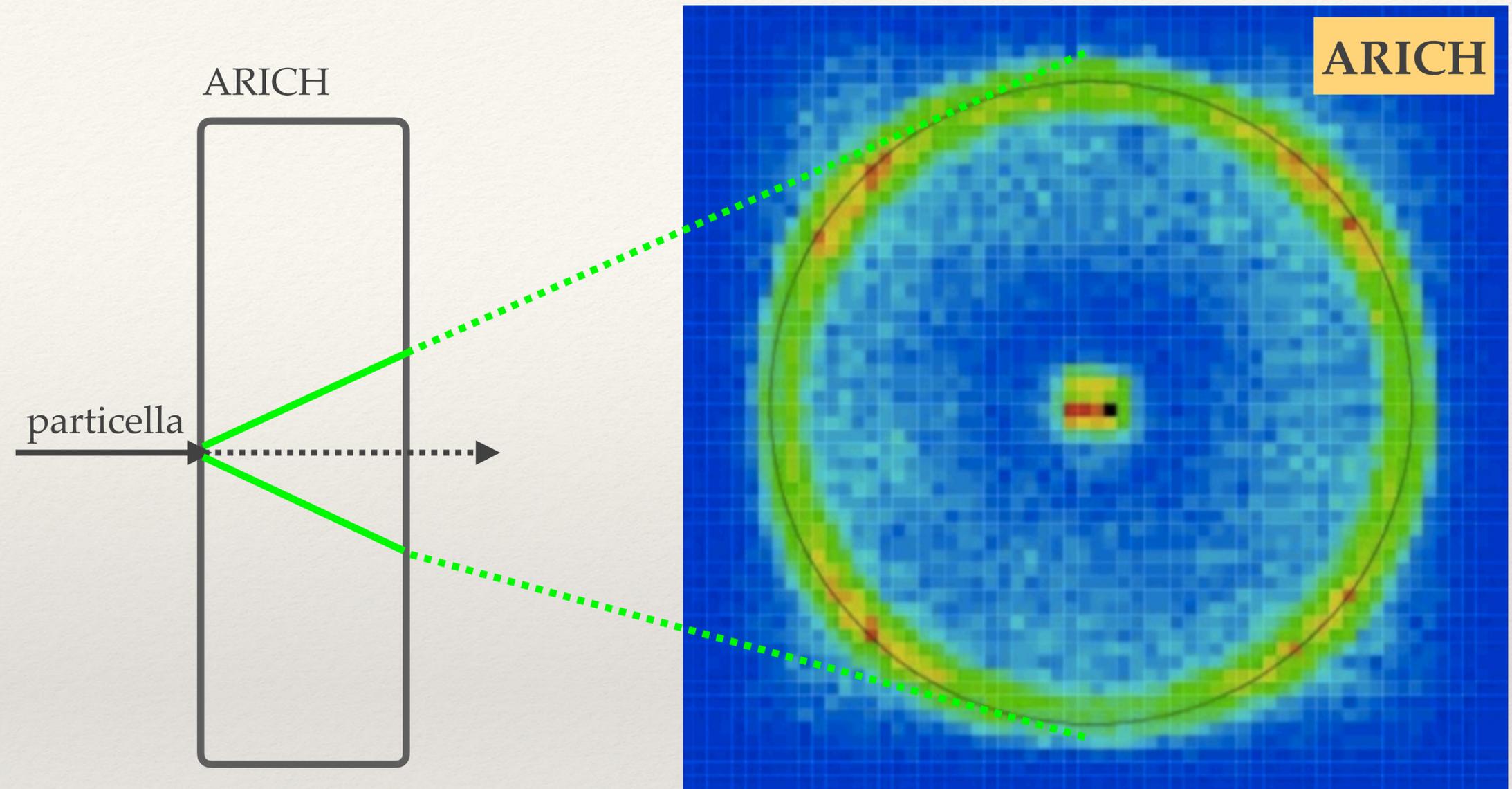
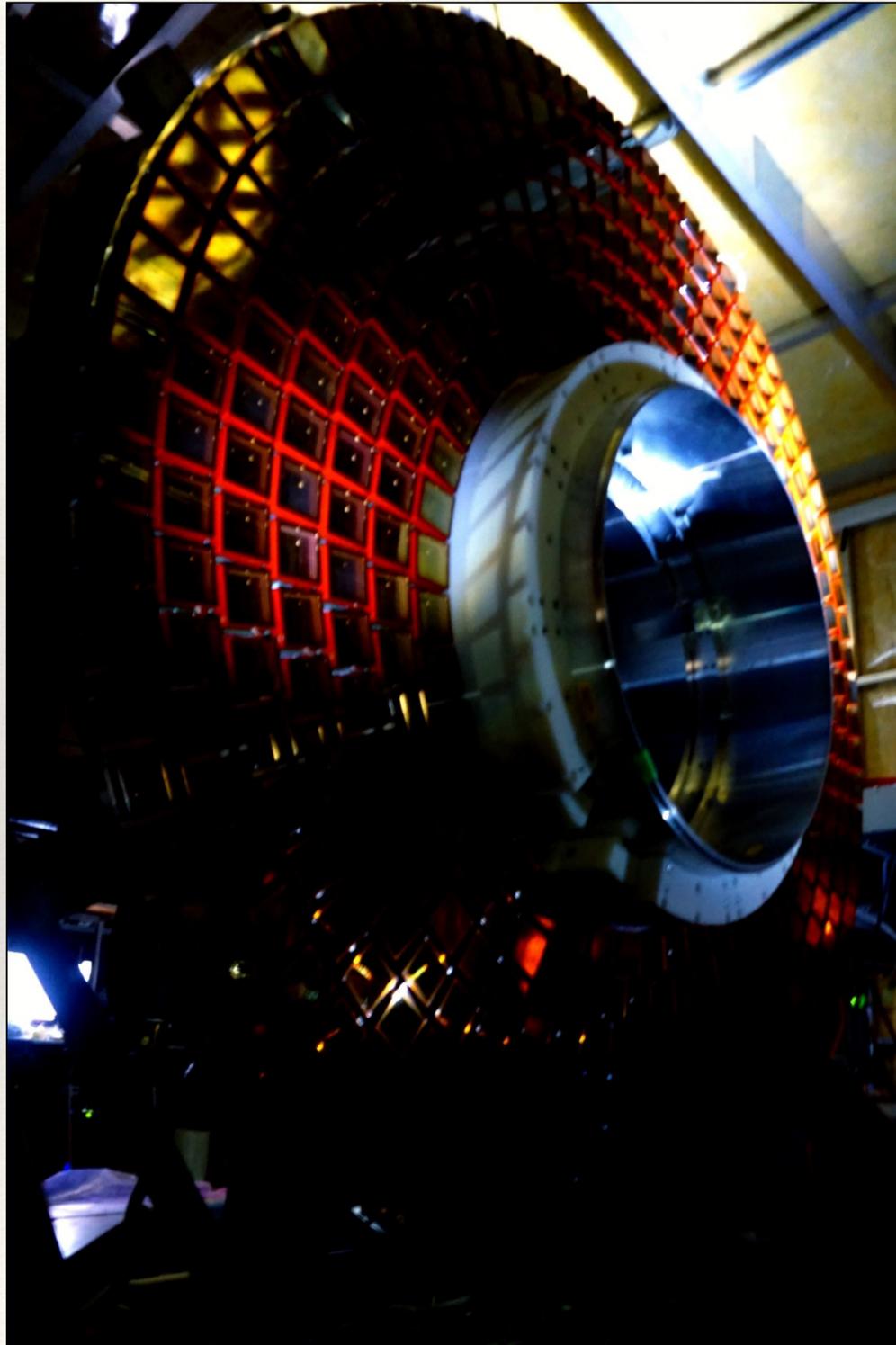


Detector di identificazione - ARICH



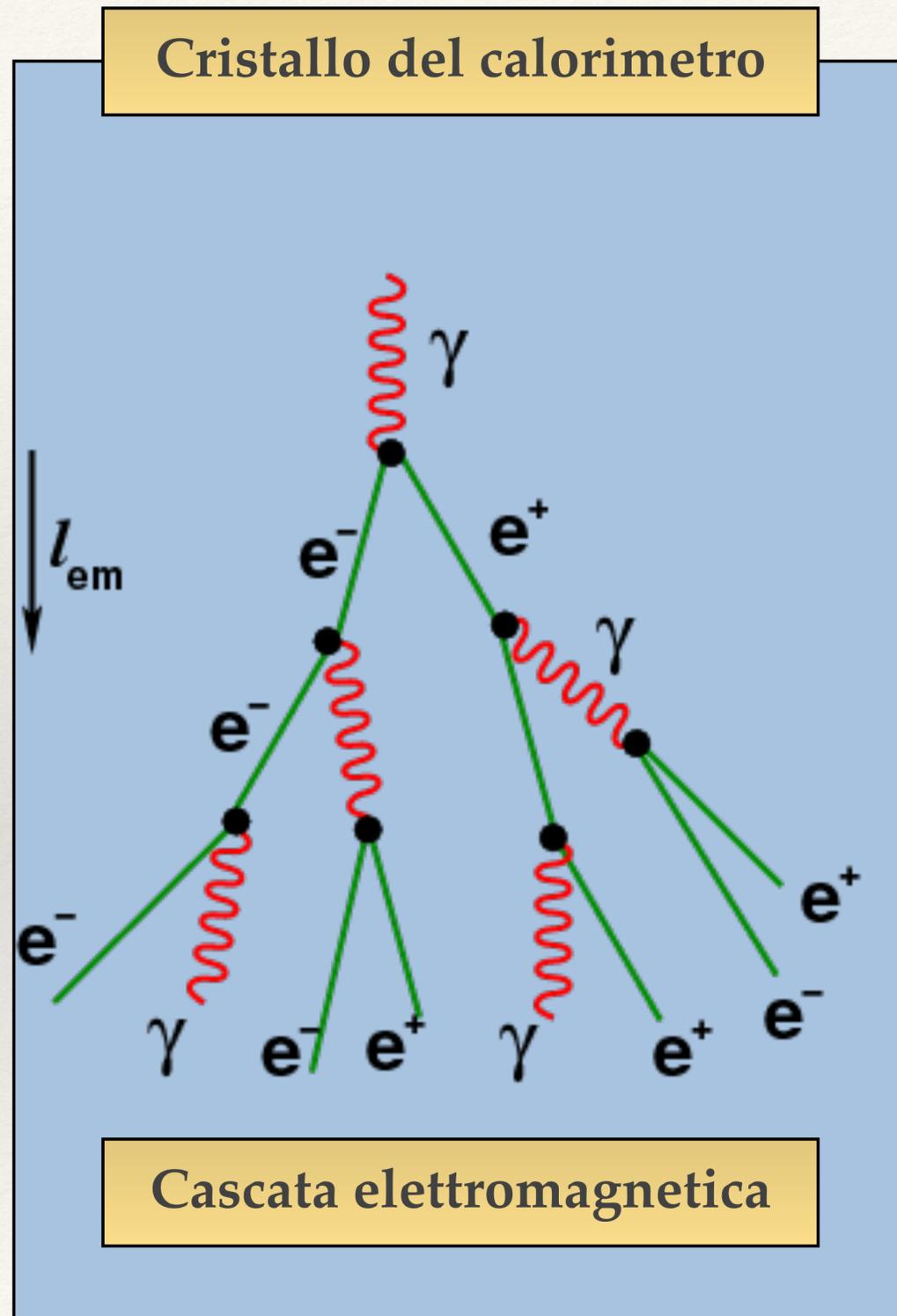
Nel detector ARICH si osservano gli anelli prodotti dal cono di luce Cherenkov, da cui si risale all'angolo θ e quindi alla velocità.

Detector di identificazione - ARICH



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

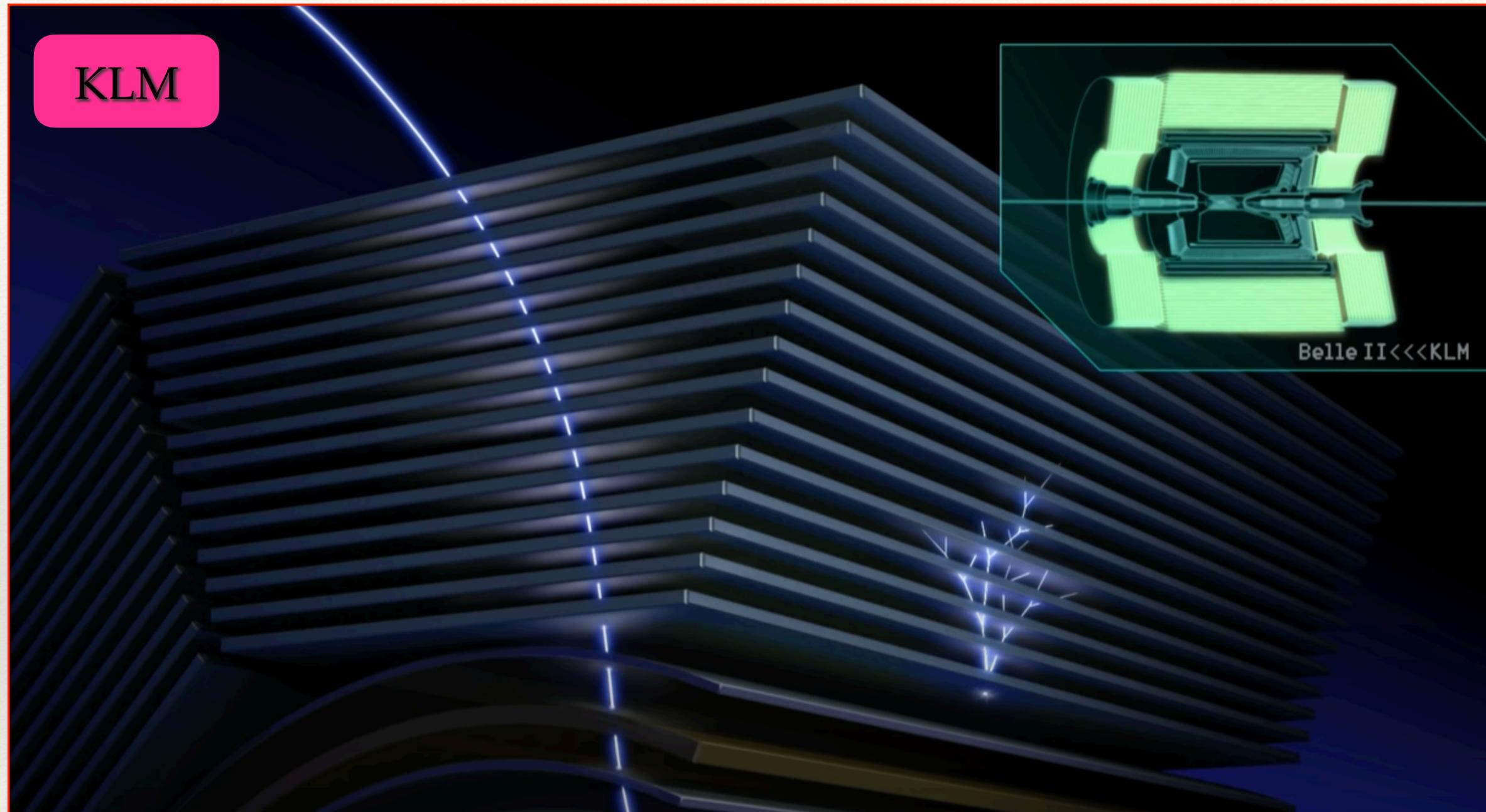
Misurazione dell'energia: calorimetro



- ◉ 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.

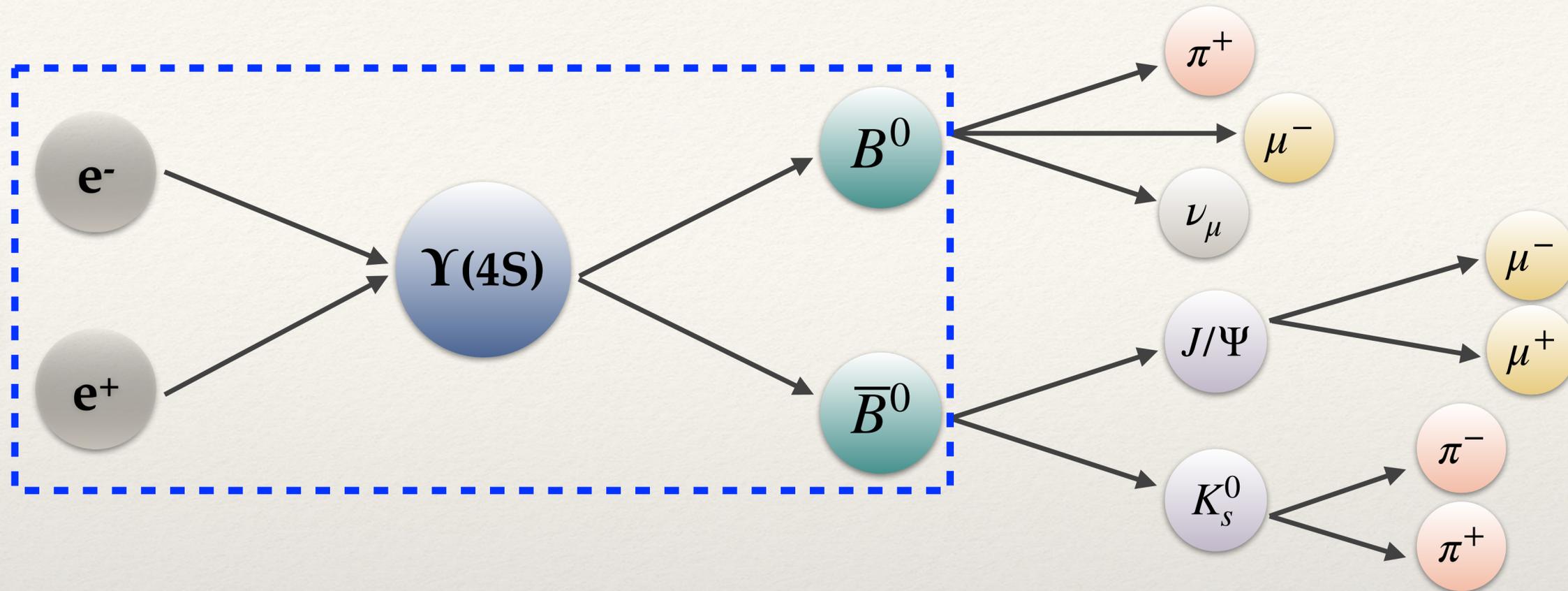
Il calorimetro di Belle II (ECL) è composto da 8736 cristalli, ognuno di dimensioni $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{ cm}^3$, e da solo pesa circa 43 tonnellate.

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).

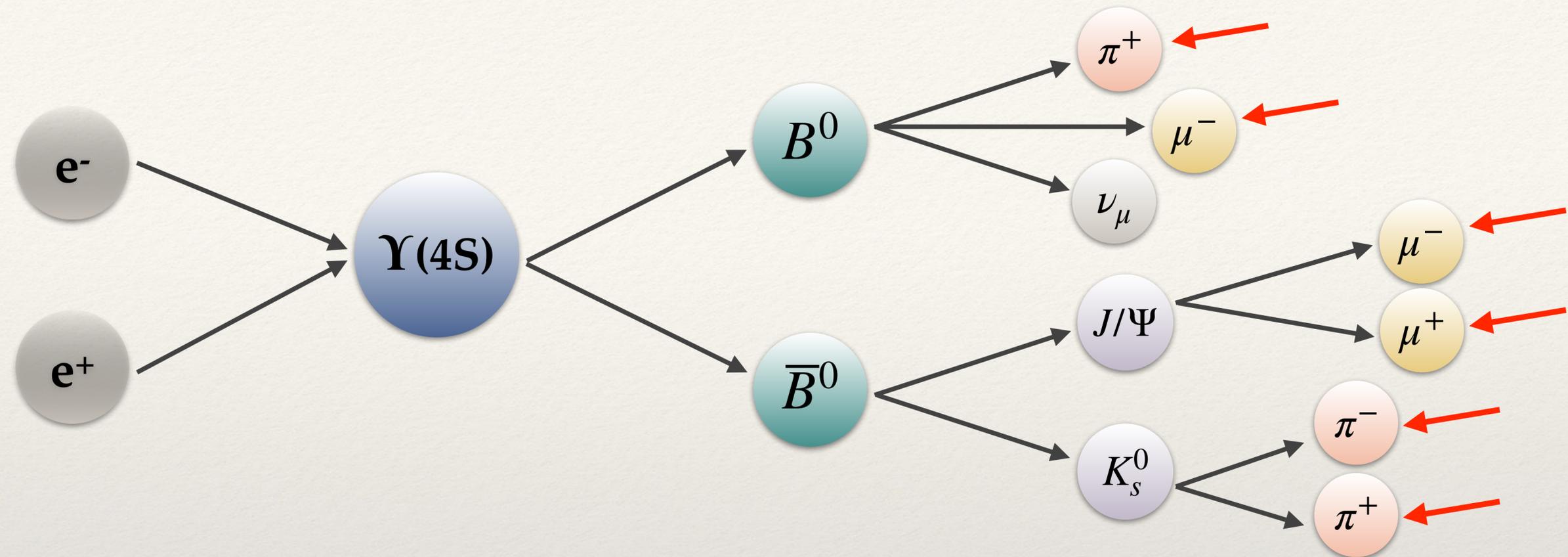
Ricostruzione di un evento



Possibile evento
in SuperKEKB.

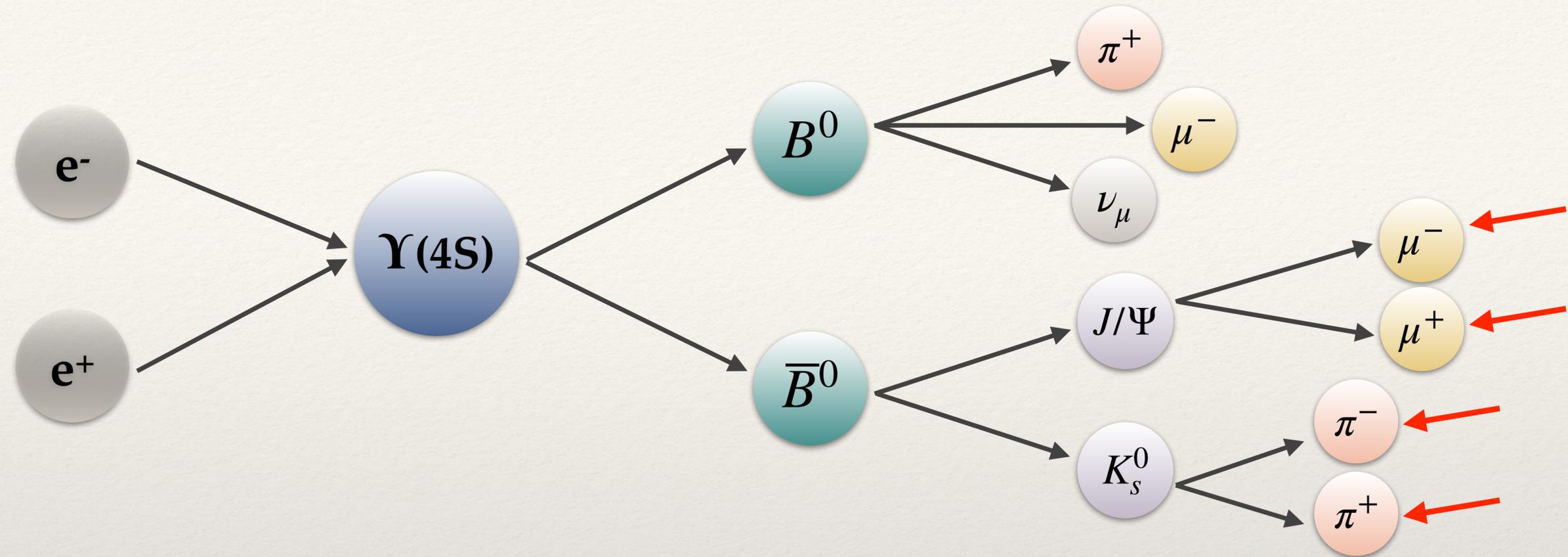
- ◉ I mesoni B^0 e \bar{B}^0 possono decadere in tanti modi diversi, e non sappiamo a priori quale sia il modo per ogni singolo evento.

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)

