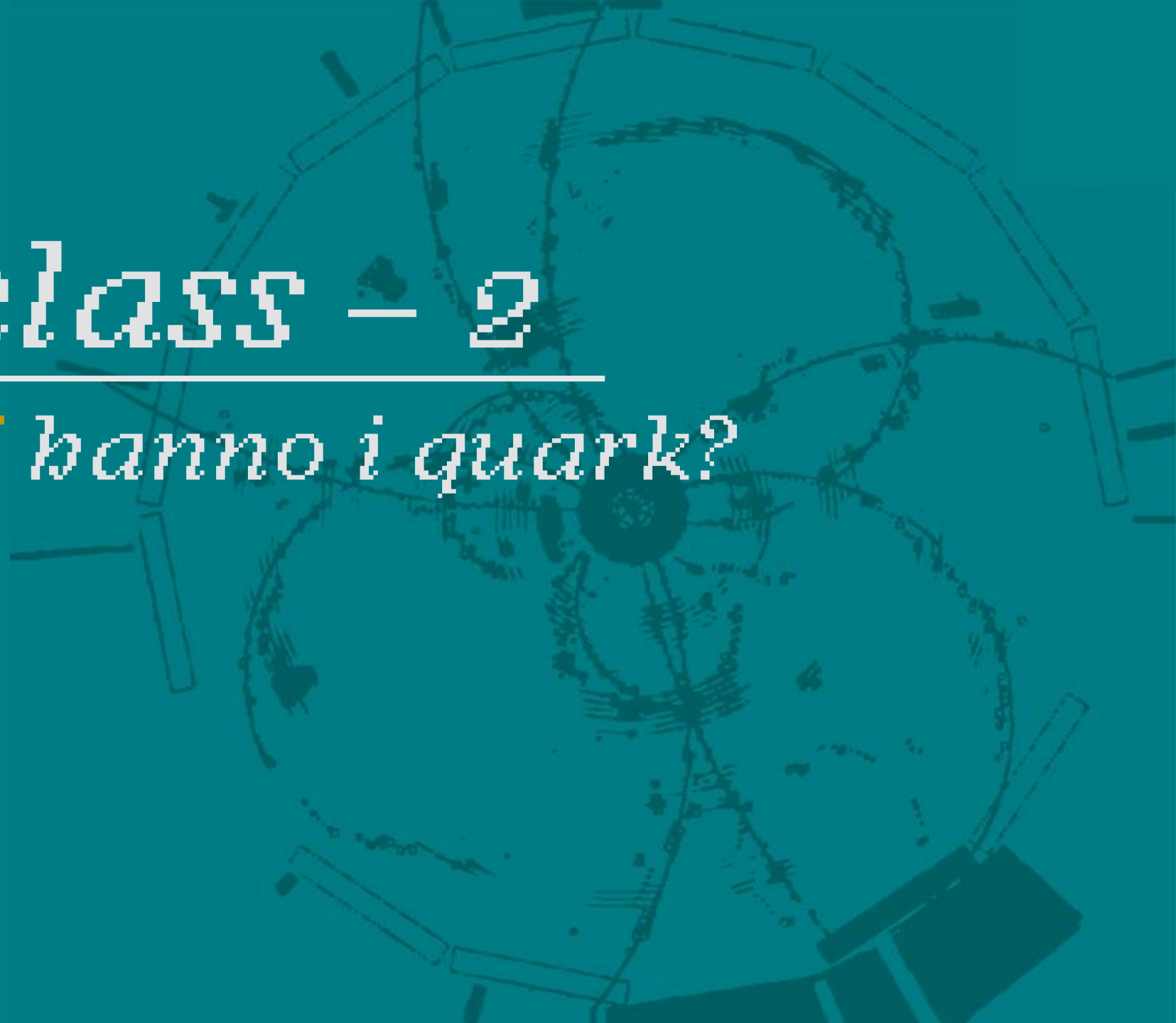


Masterclass – 2

Quanti colori hanno i quark?



Come facciamo a vedere queste
famose *particelle*?

Per vederle, bisogna crearle!

Esempio: dobbiamo creare una particella X con massa nota m_x :

- Vogliamo usare l'equivalenza tra **energia e massa** $E = m_x c^2$
- Dobbiamo avere a disposizione un'energia E

Per vederle, bisogna crearle!

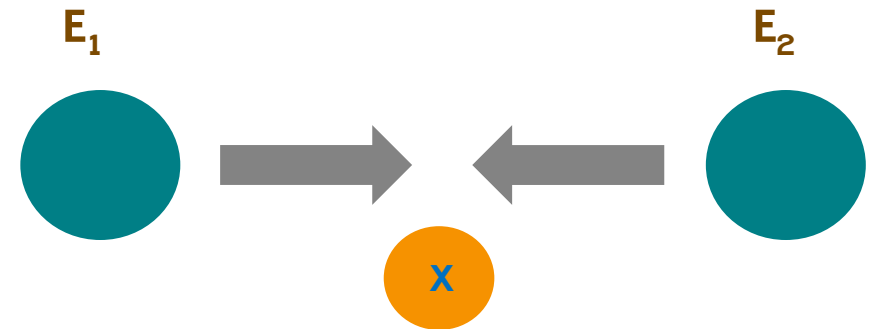
Esempio: dobbiamo creare una particella X con massa nota m_x :

- Vogliamo usare l'equivalenza tra **energia e massa** $E = m_x c^2$
- Dobbiamo avere a disposizione un'energia E

Qual è l'idea?

Facciamo collidere due particelle con due energie E_1 e E_2 , la cui somma è E

- $E = E_1 + E_2$
- Trasformiamo l'energia in massa



Per vederle, bisogna crearle!

Esempio: dobbiamo creare una particella X con massa nota m_x :

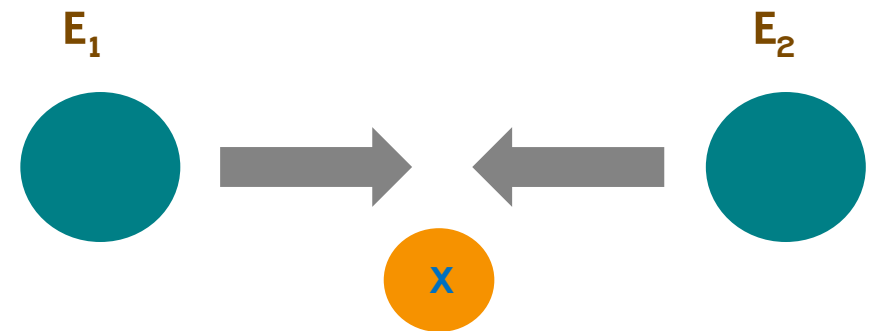
- Vogliamo usare l'equivalenza tra **energia e massa** $E = m_x c^2$
- Dobbiamo avere a disposizione un'energia E

Qual è l'idea?

Facciamo collidere due particelle con due energie E_1 e E_2 , la cui somma è E

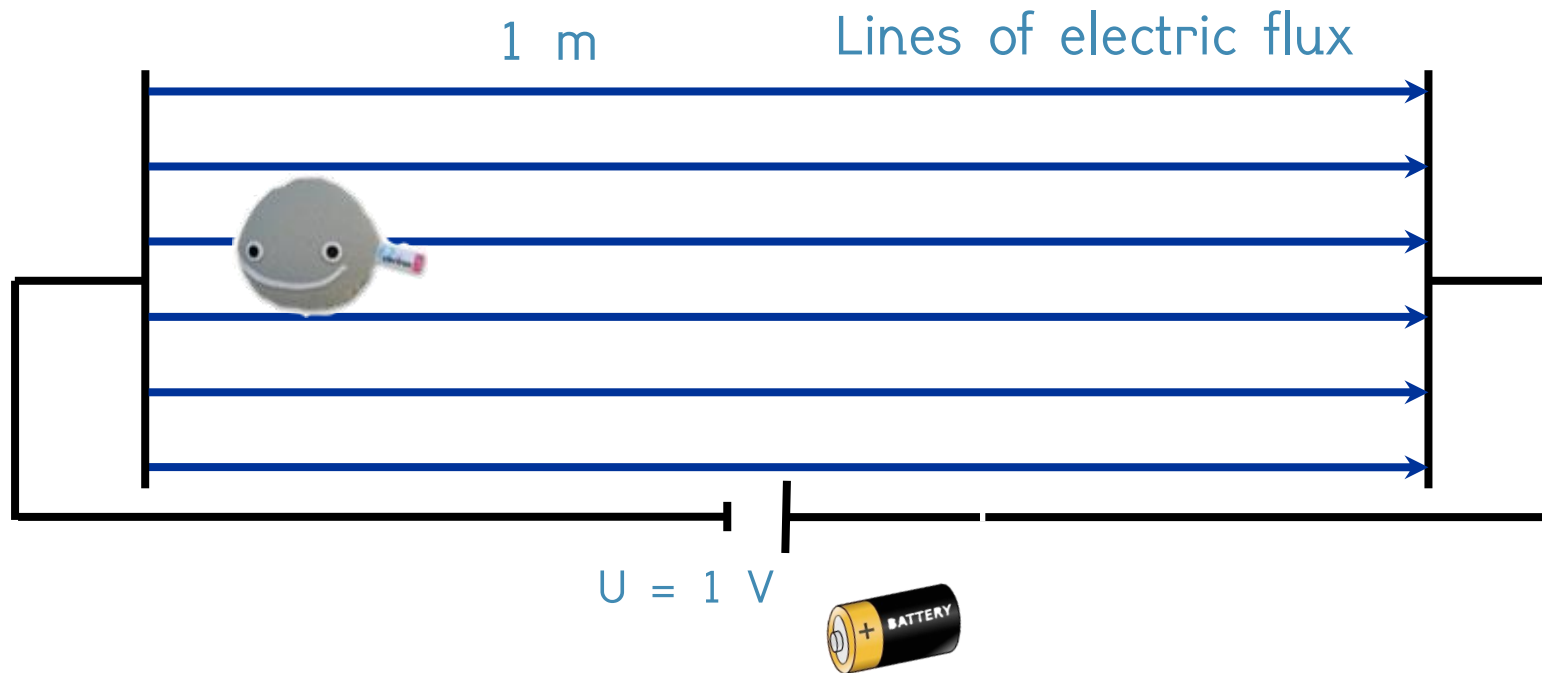
- $E = E_1 + E_2$
- Trasformiamo l'energia in massa

Problema: Dobbiamo accelerarle



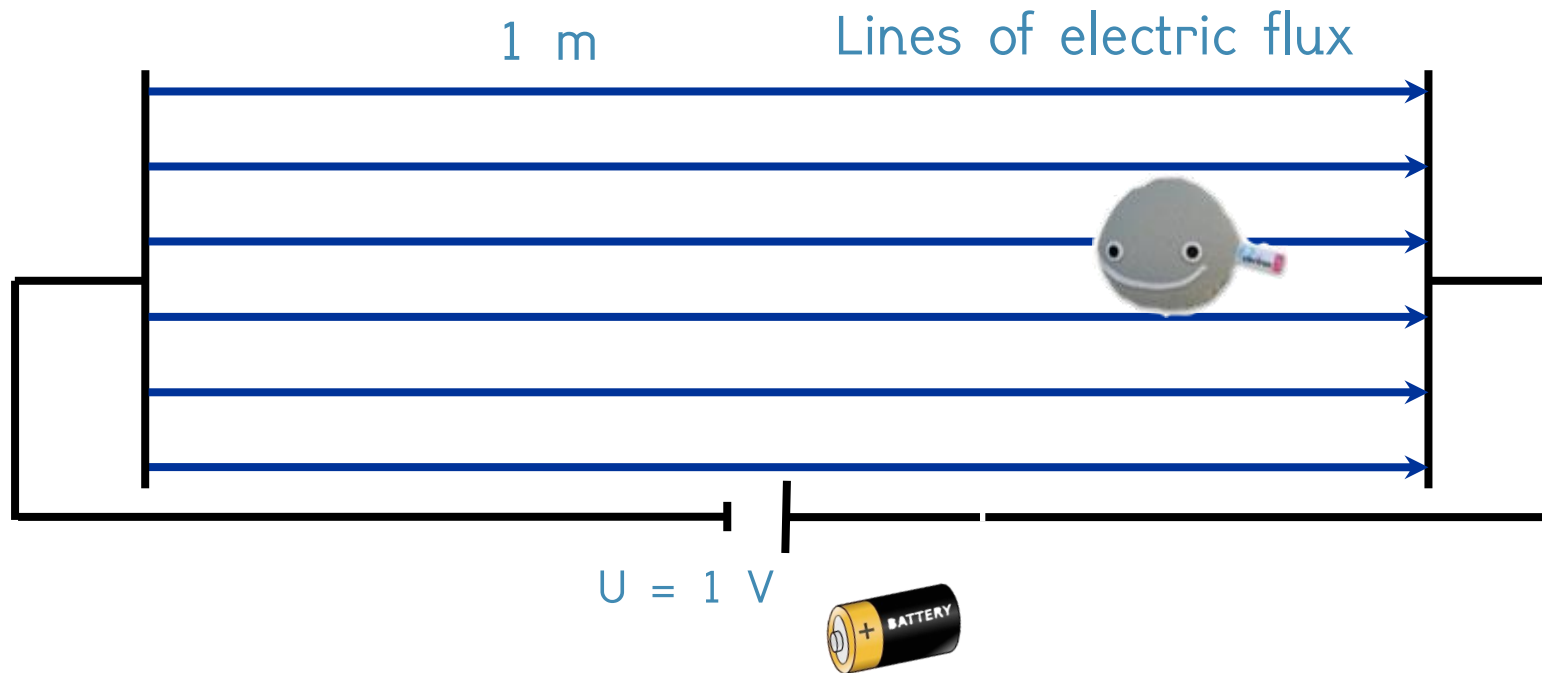
Accelerazione delle particelle

Se creiamo un **campo elettrico**, tutte le particelle cariche (come gli elettroni) sono accelerate lungo il flusso del campo



Accelerazione delle particelle

Se creiamo un **campo elettrico**, tutte le particelle cariche (come gli elettroni) sono accelerate lungo il flusso del campo



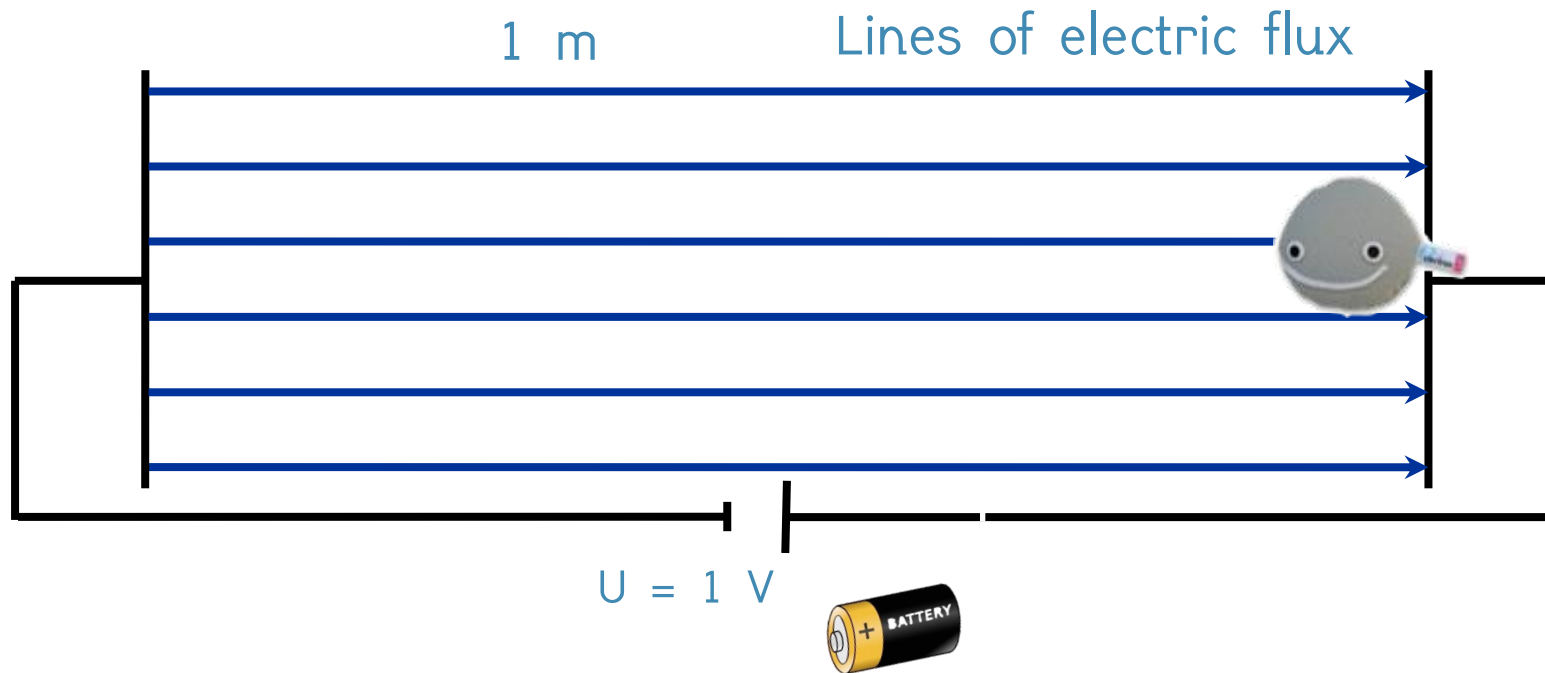
Accelerazione delle particelle

Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV$$

Diagram illustrating the variables in the equation $E = -qV$:

- $-e$ (charge of an electron) is indicated by a blue arrow pointing to $-q$.
- 1 V (1 Volt) is indicated by a blue arrow pointing to V .

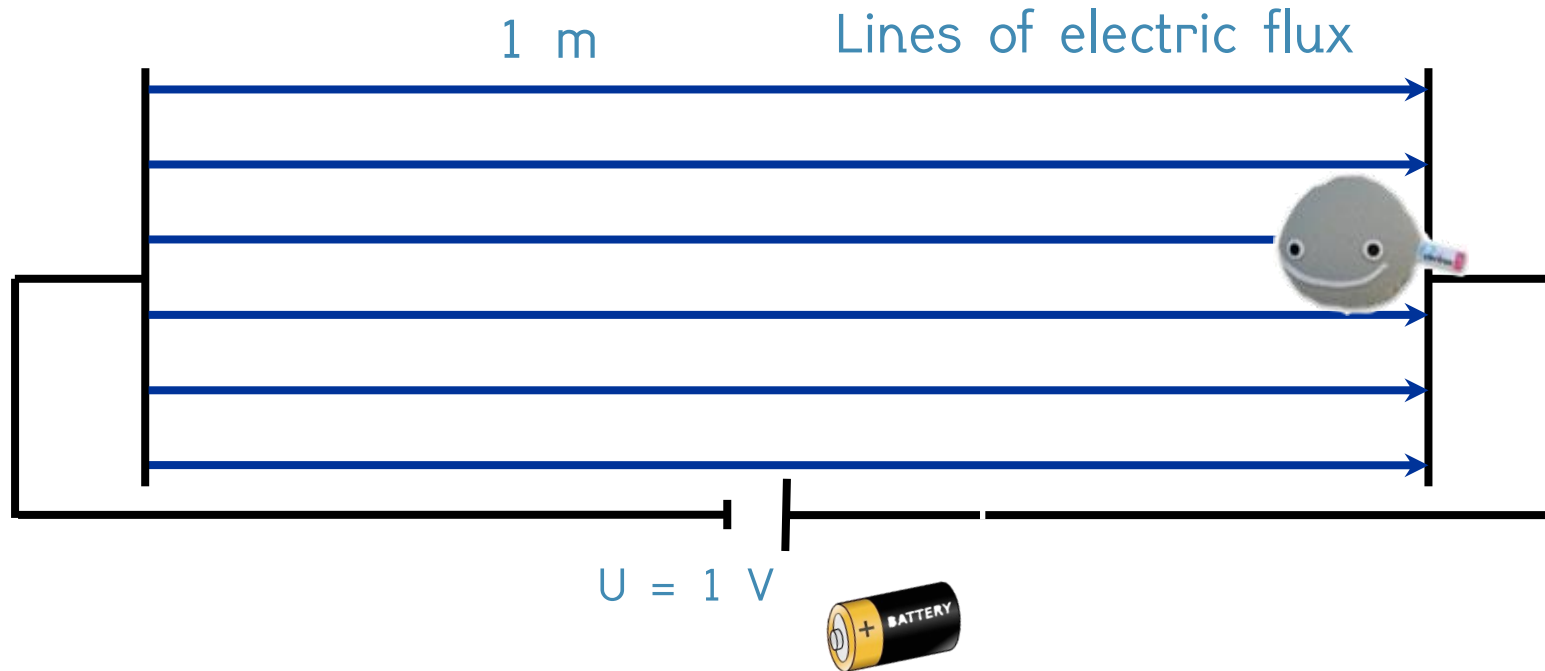


Accelerazione delle particelle

Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV = 1 \text{ eV}$$

$-e$ 1 V

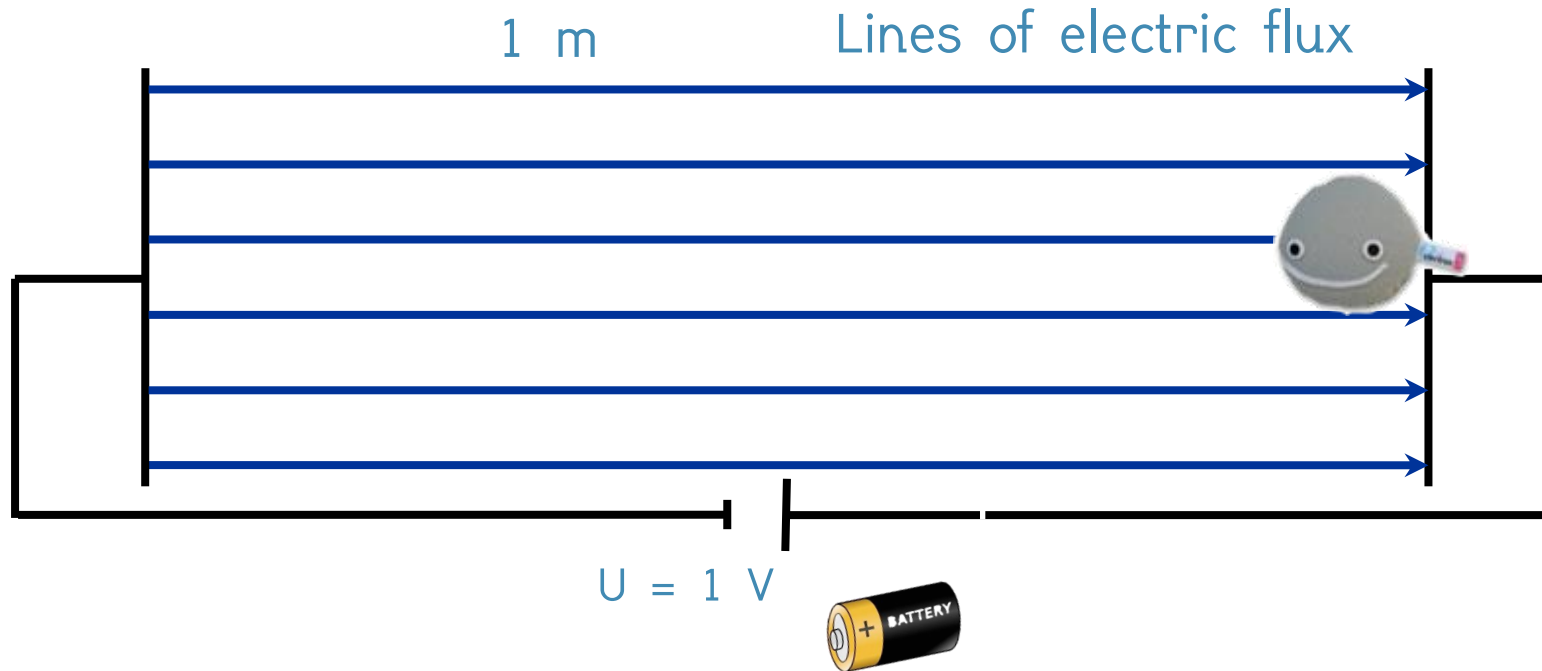


Accelerazione delle particelle

Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV = 1 \text{ eV}$$

Come possiamo avere più *energia*?

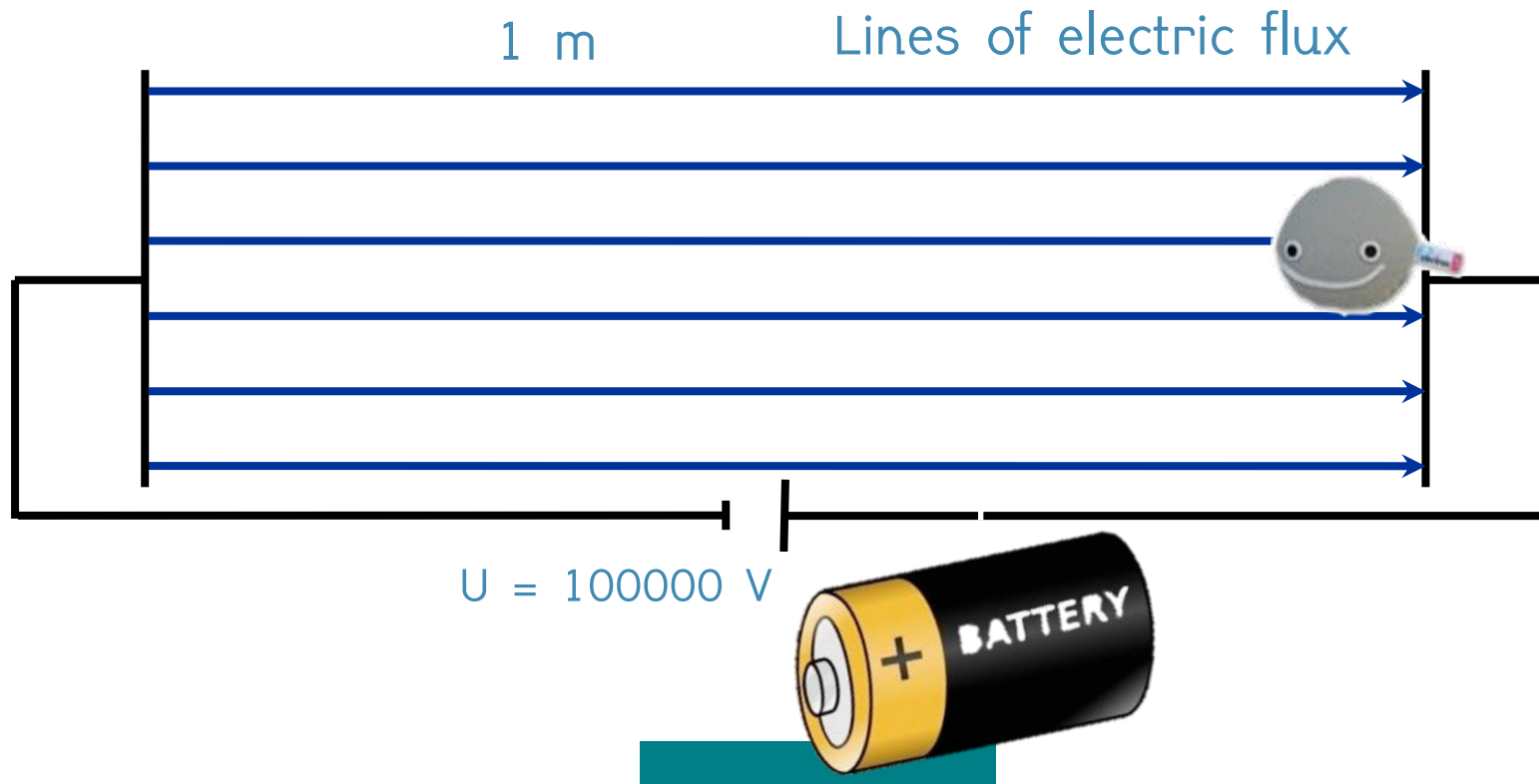


Accelerazione delle particelle

Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV = 100 \text{ keV}$$

Come possiamo avere più *energia*?

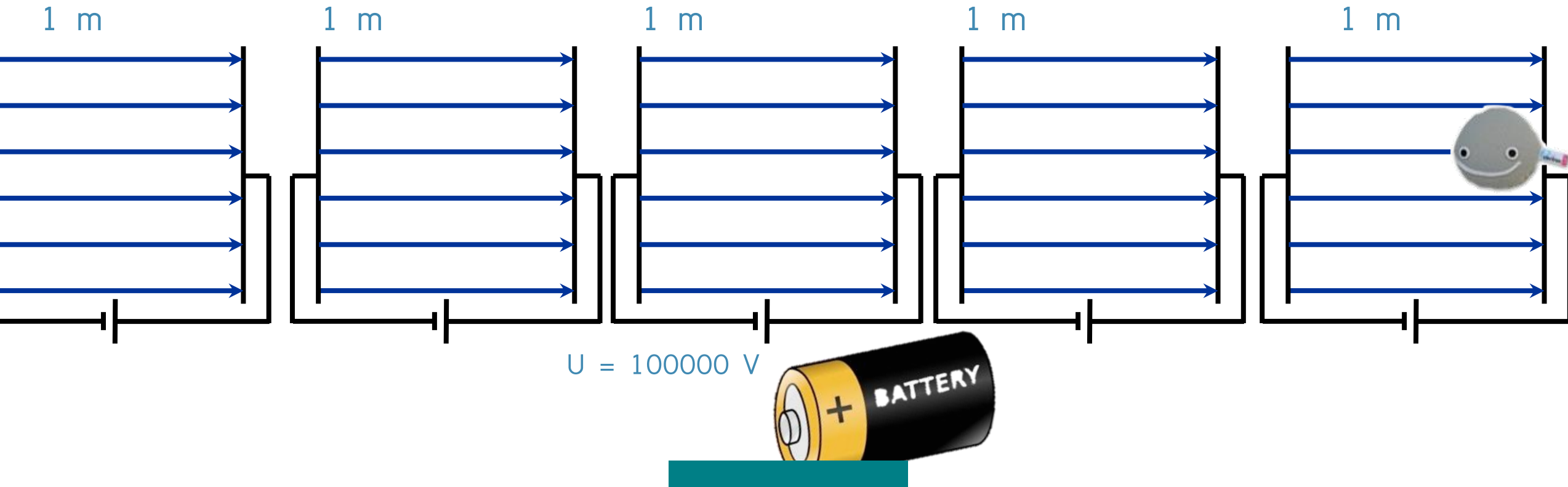


Accelerazione delle particelle

Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV = 100 \text{ keV}$$

Come possiamo avere più *energia* in uno spazio più piccolo?

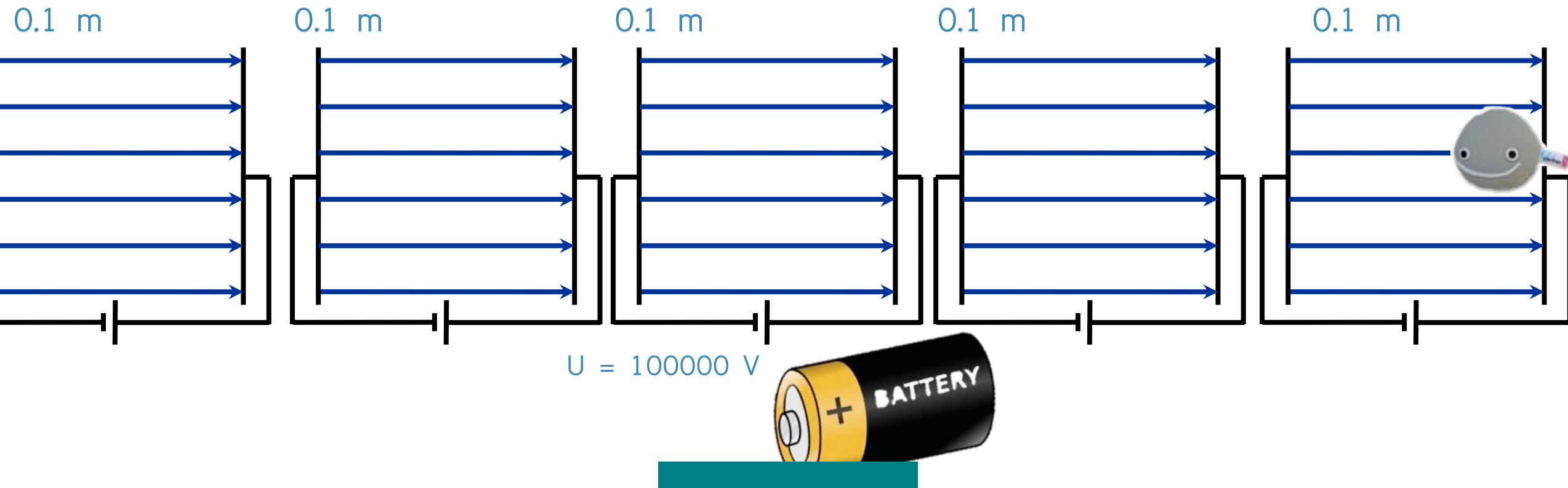


Accelerazione delle particelle

Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV = 100 \text{ keV}$$

Così in un metro abbiamo un ΔE 10 volte più grande



Accelerazione delle particelle

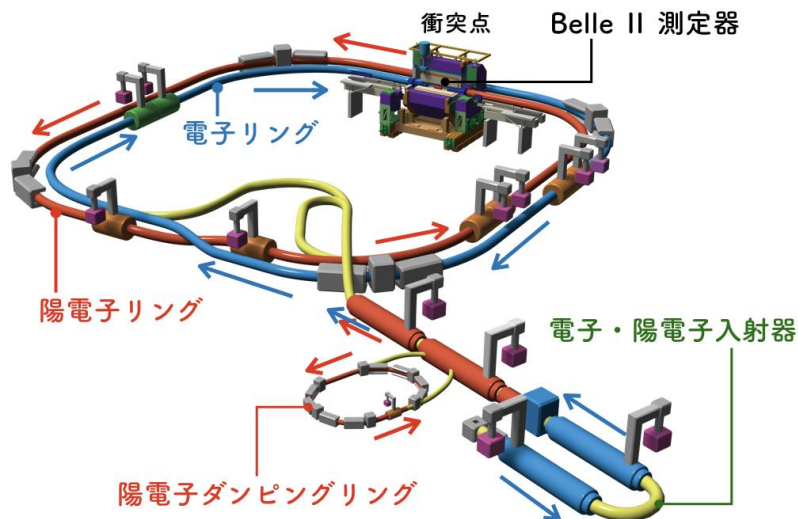
Che energia abbiamo ottenuto con queste condizioni?

$$E = -qV = 100 \text{ keV}$$

Conoscete esempi di acceleratori così?

SuperKEKB

- Un acceleratore che sta in una research area chiamata KEK a Tsukuba in Giappone
 - circa 80 km a nord di Tokyo
- Sono accelerati positroni in un verso e elettroni nell'altro. Positroni fino a 4 GeV, elettroni fino a 7 GeV
- Dopo l'accelerazione, i fasci di particelle vengono fatti girare lungo un cerchio con una circonferenza di **3 km**



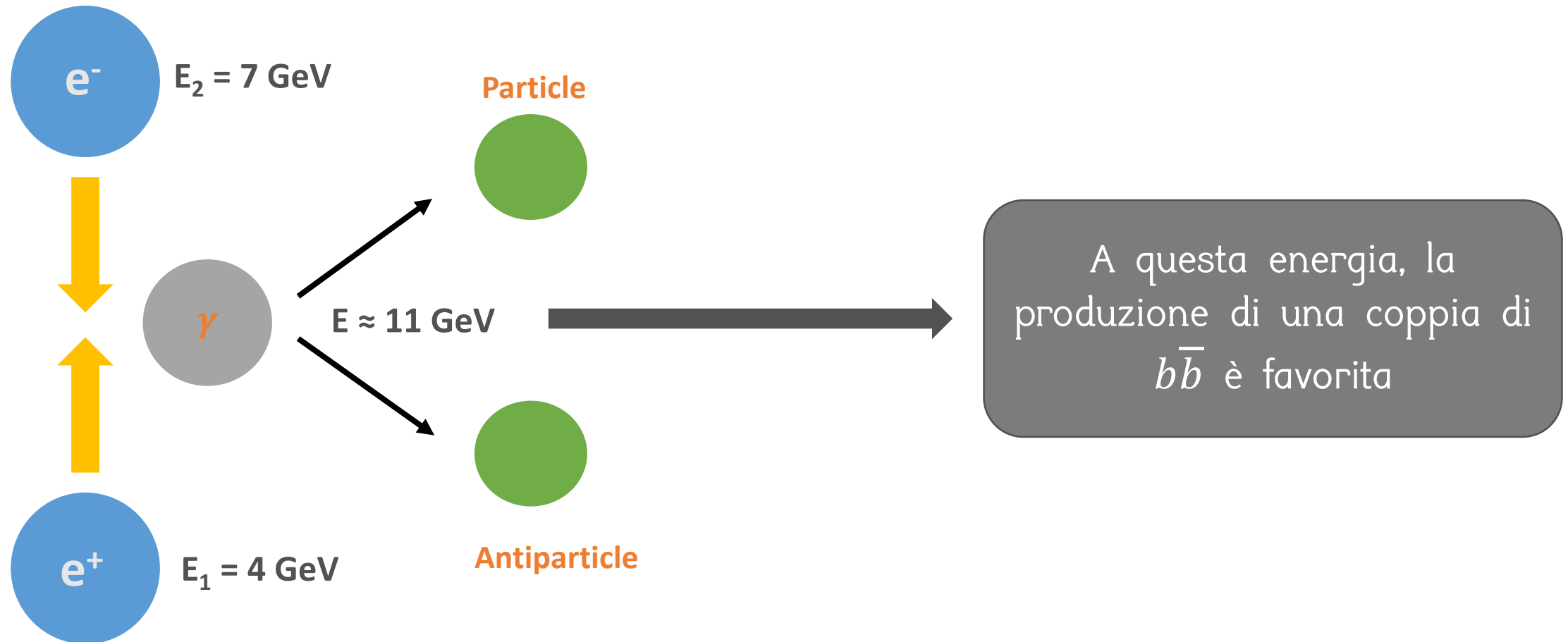
KEK durante la
Sakura
桜



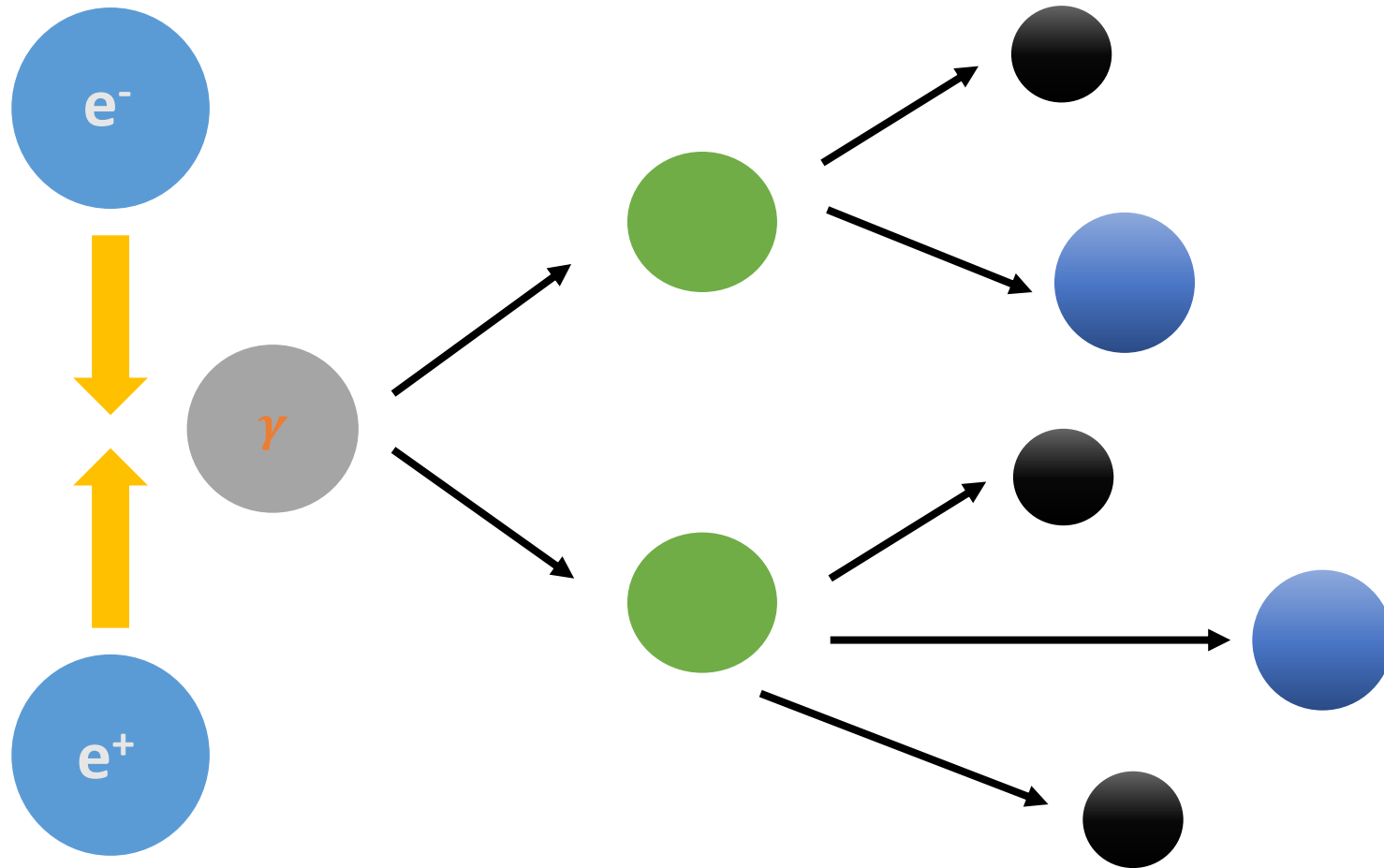
SuperKEKB

- Un acceleratore che sta in una research area chiamata KEK a Tsukuba in Giappone
 - circa 80 km a nord di Tokyo
- Sono accelerati positroni in un verso e elettroni nell'altro. Positroni fino a 4 GeV, elettroni fino a 7 GeV
- Dopo l'accelerazione, i fasci di particelle vengono fatti girare lungo un cerchio con una circonferenza di **3 km**
- La velocità degli elettroni e dei positroni è altissima:
 $\frac{v}{c} \approx 0.999999999$.
- Vuol dire che in un'ora un elettrone arriverebbe su Giove
- Per aumentare la probabilità di collisione, si usano quadrupoli magnetici, per rendere i fasci più stretti possibili (squeezing)

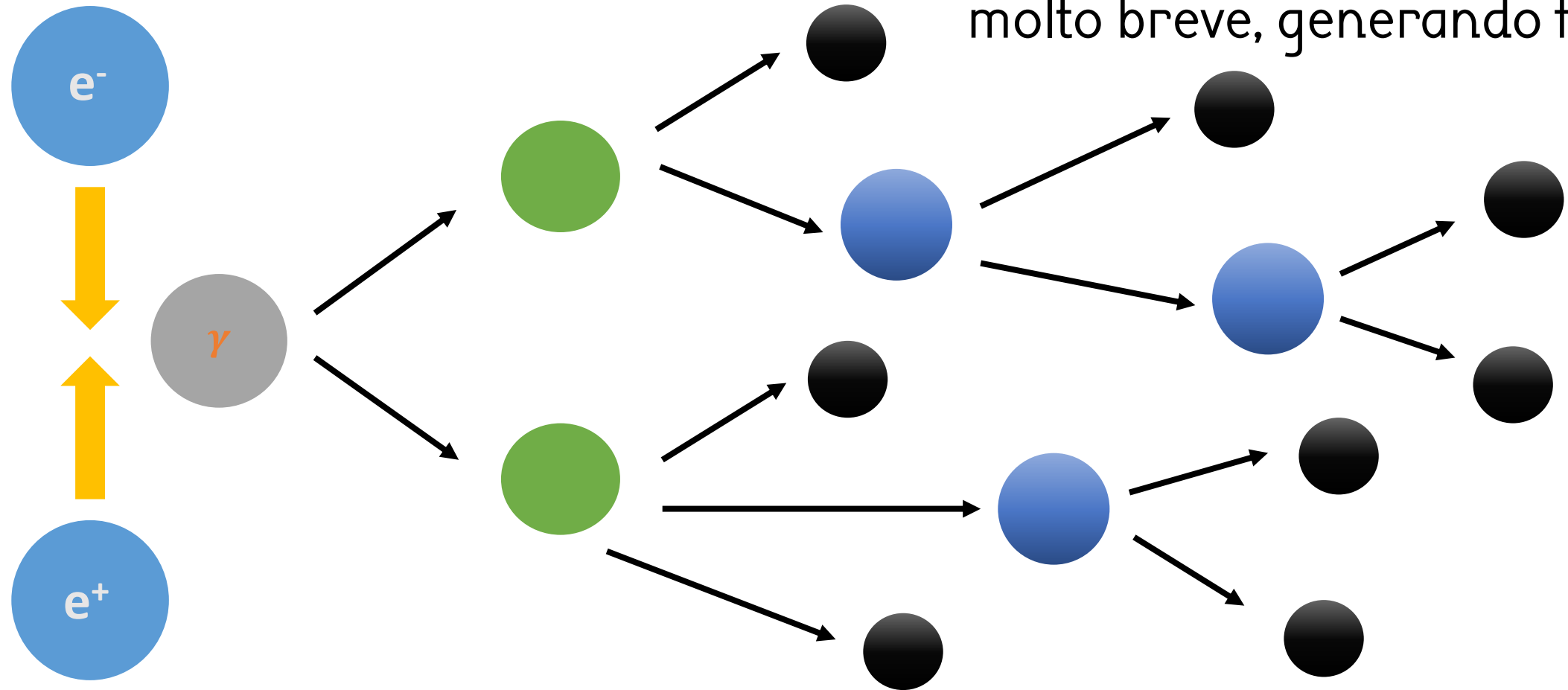
Cosa succede nella collisione?



Cosa succede nella collisione?

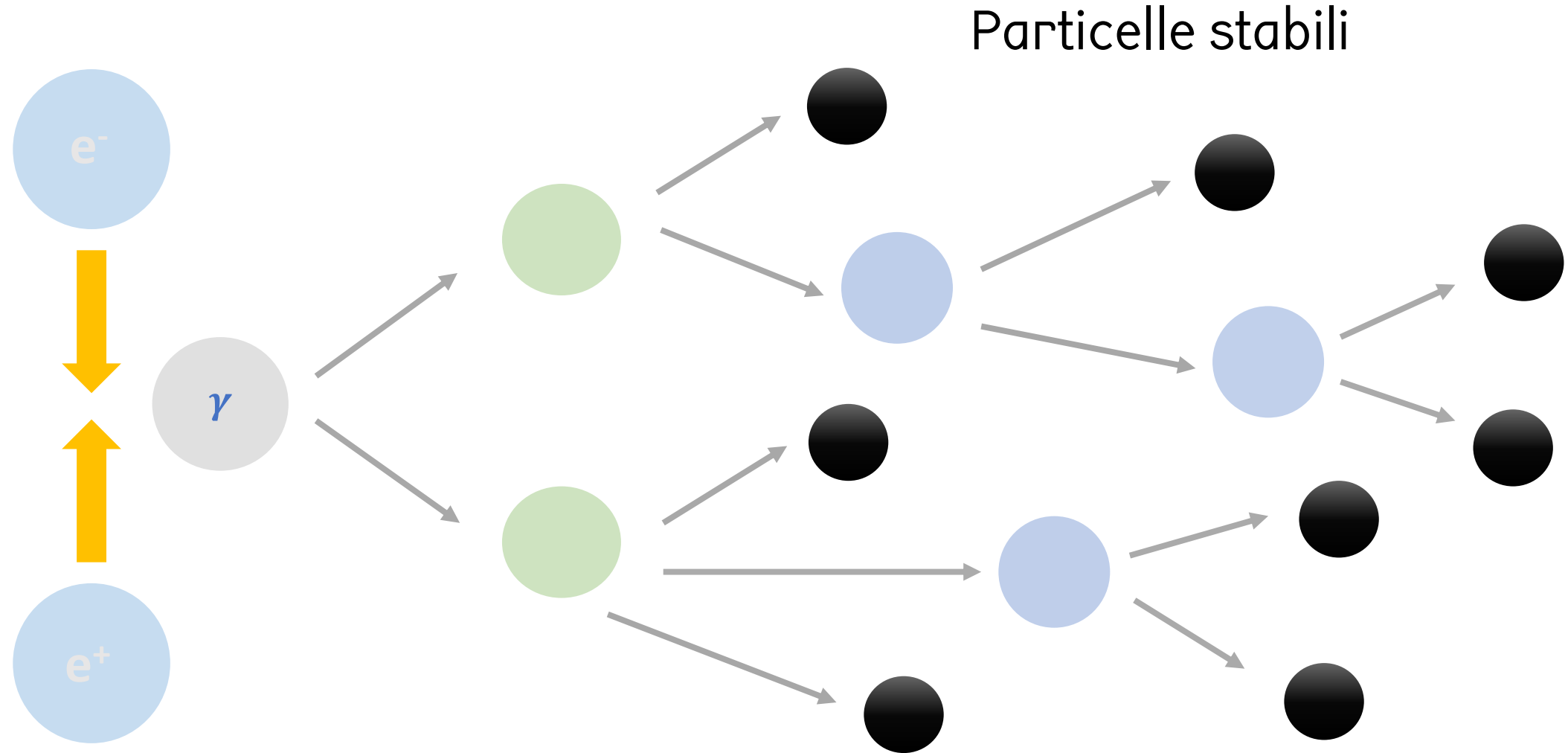


Cosa succede nella collisione?



Non tutte le particelle stabili,
alcune muoiono in un tempo
molto breve, generando figli

Quali particelle vediamo?



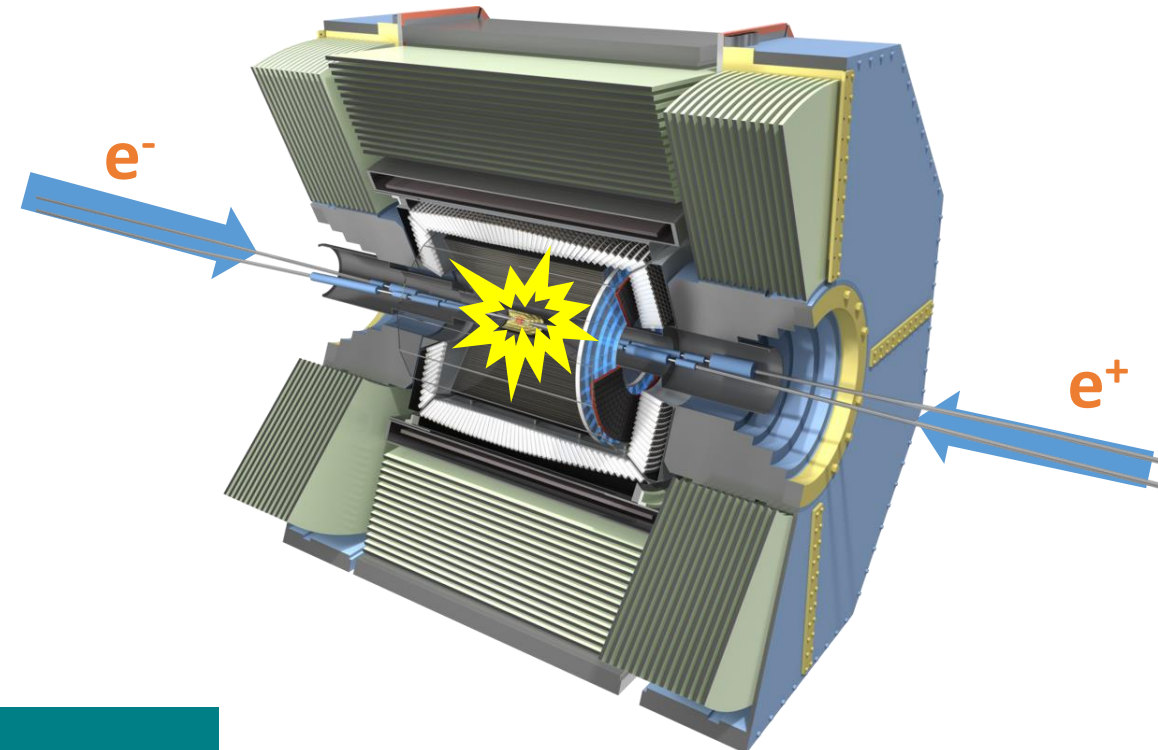
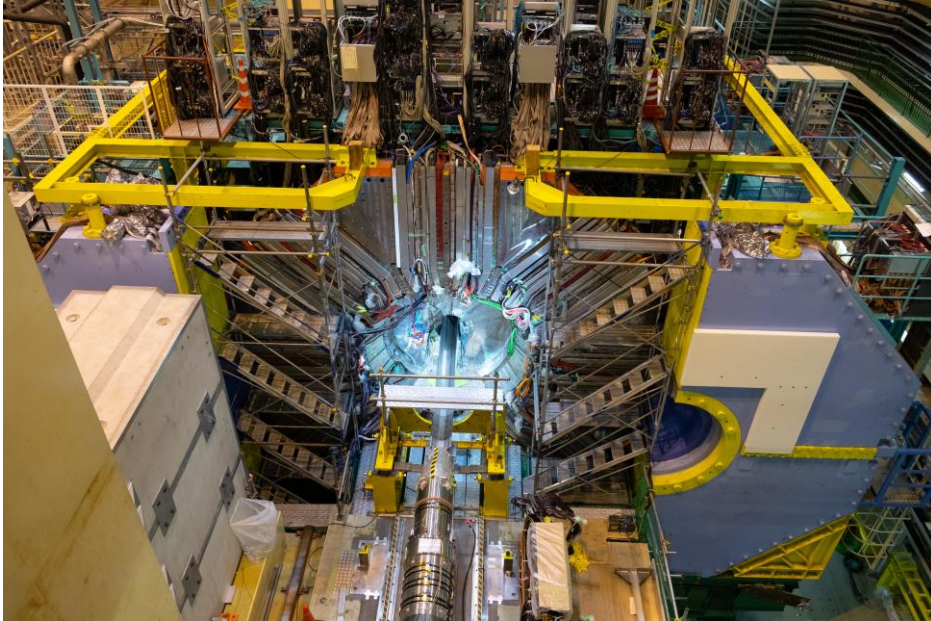
Cosa vediamo effettivamente?

- Immagina uno scontro tra due macchine
 - i **rottami** volano in giro e si fermano da qualche parte
 - La velocità dell'auto può essere dedotta dalla **distanza** dei rottami dalle auto e dal loro **colore**



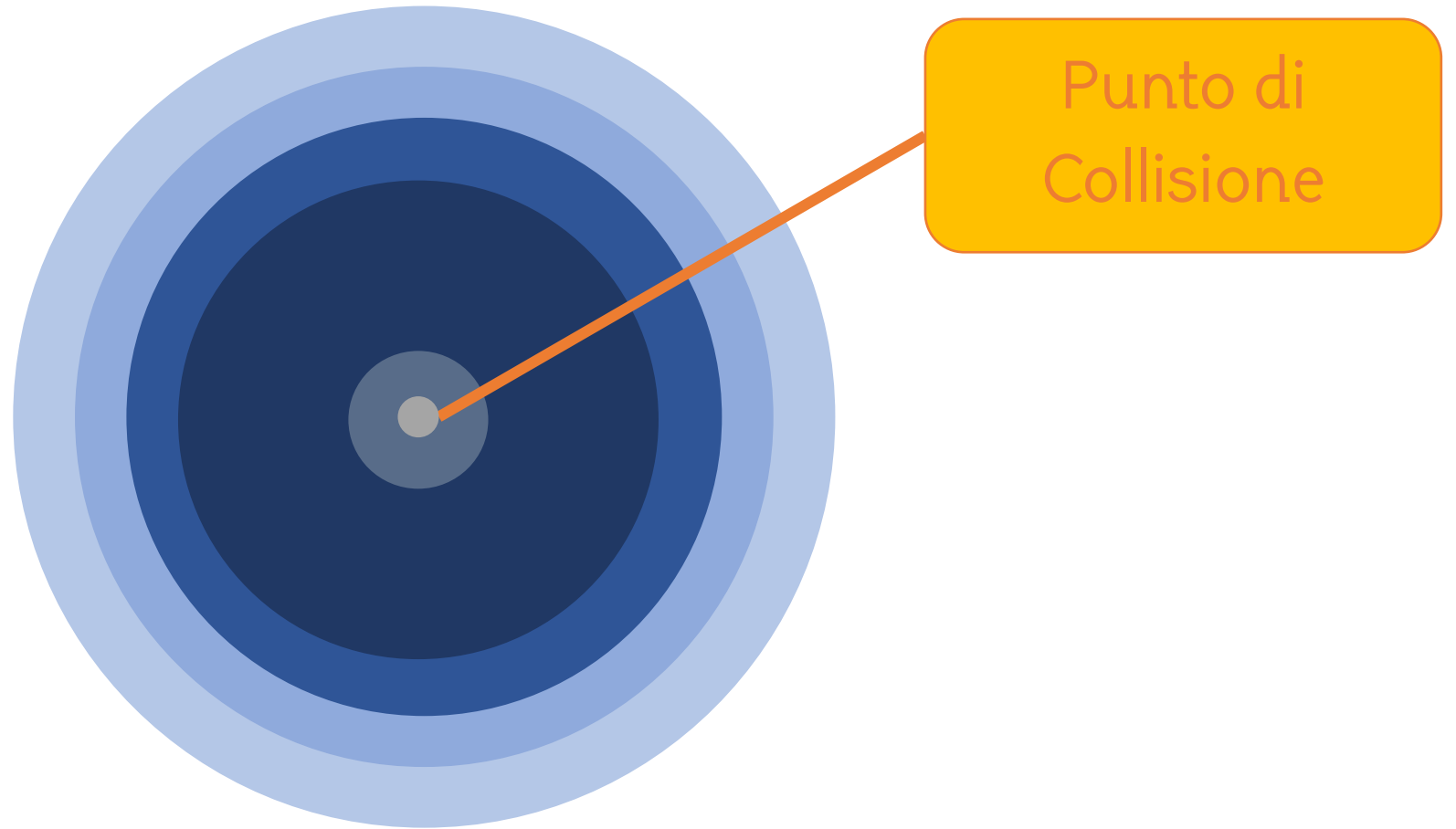
Il rivelatore di Belle II: una macchina fotografica di collisioni

- Il rivelatore è costruito attorno il punto di collisione
- Noi **non** vediamo le particelle
- È necessario ricostruirle a partire da tante piccole informazioni
- Combinando le informazioni in una rete neurale (Machine Learning), riusciamo a capire che tipo di particella è passata.



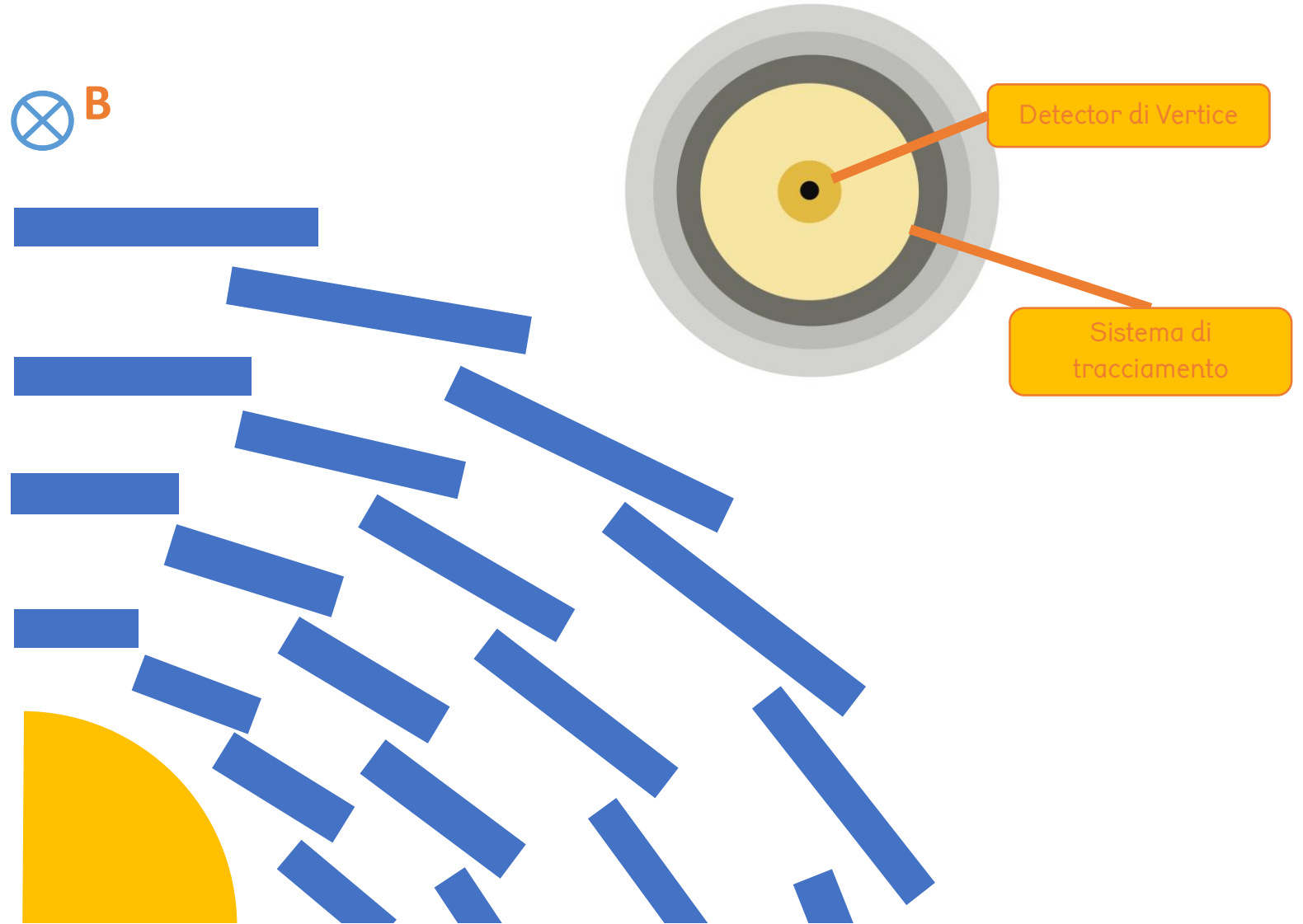
E da dove arrivano questi segnali?

Il detector è costruito attorno il punto di collisione: principio della cipolla



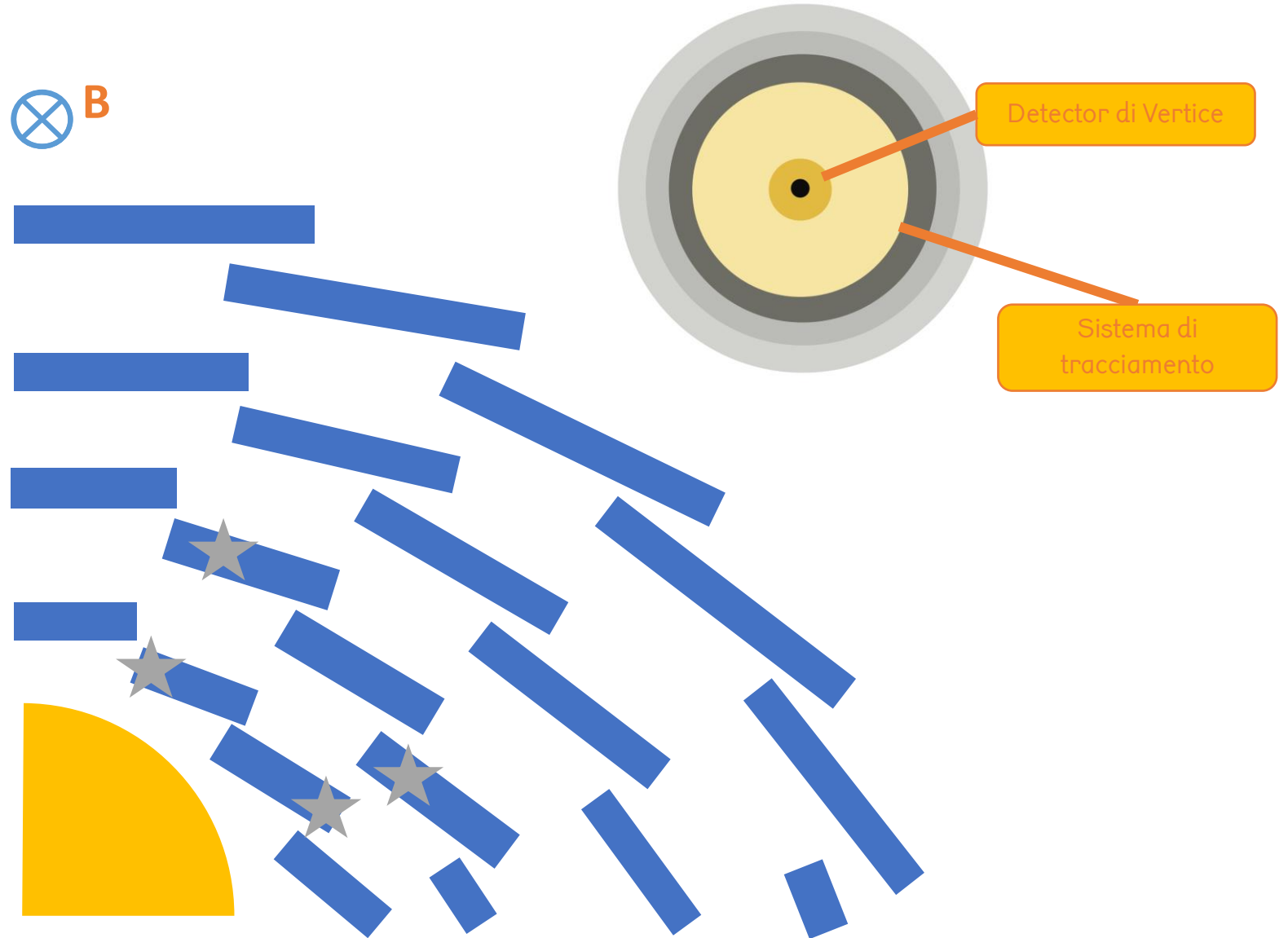
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici



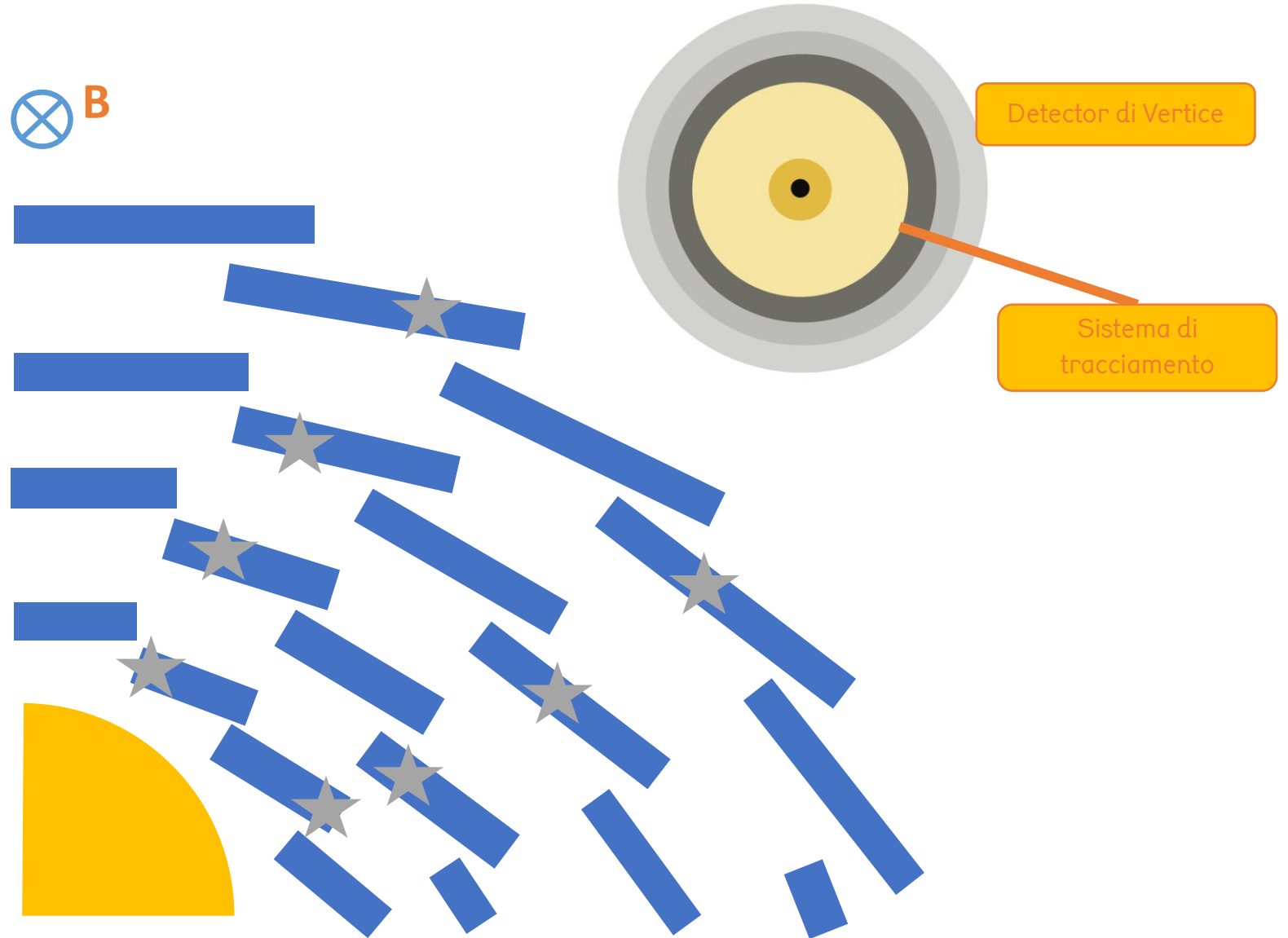
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici



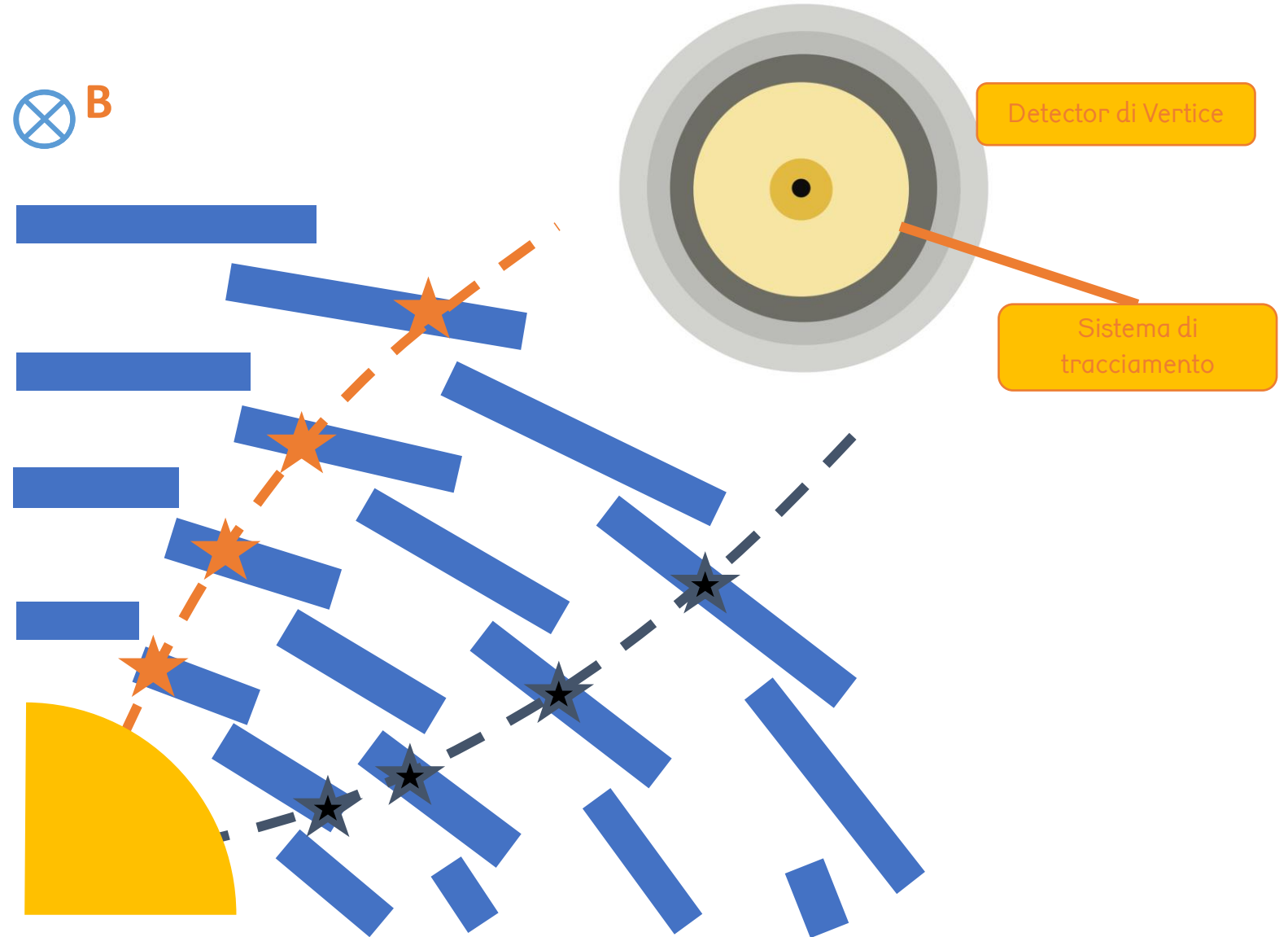
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici



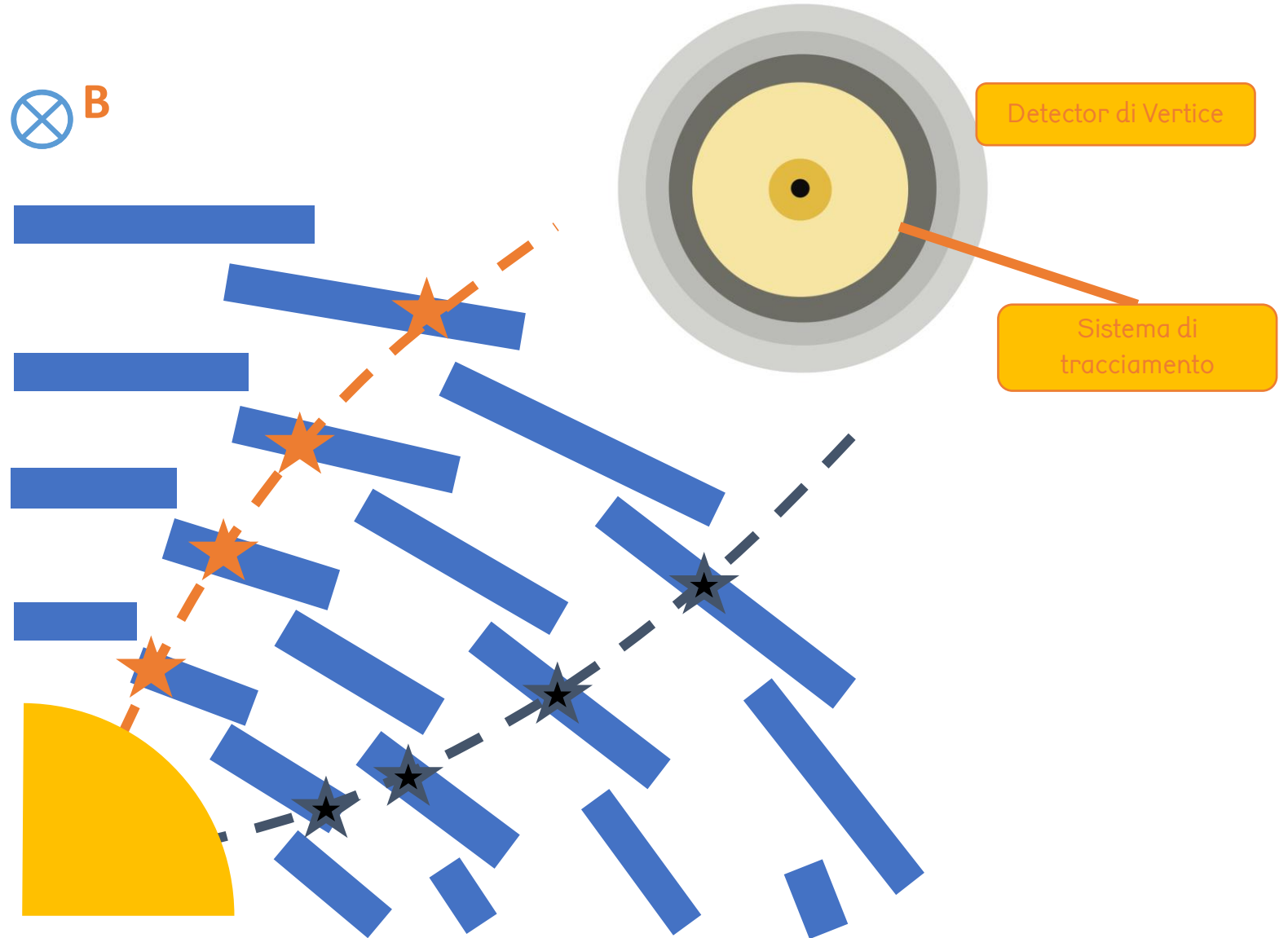
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici
- Da quelle, possiamo ricostruire le tracce



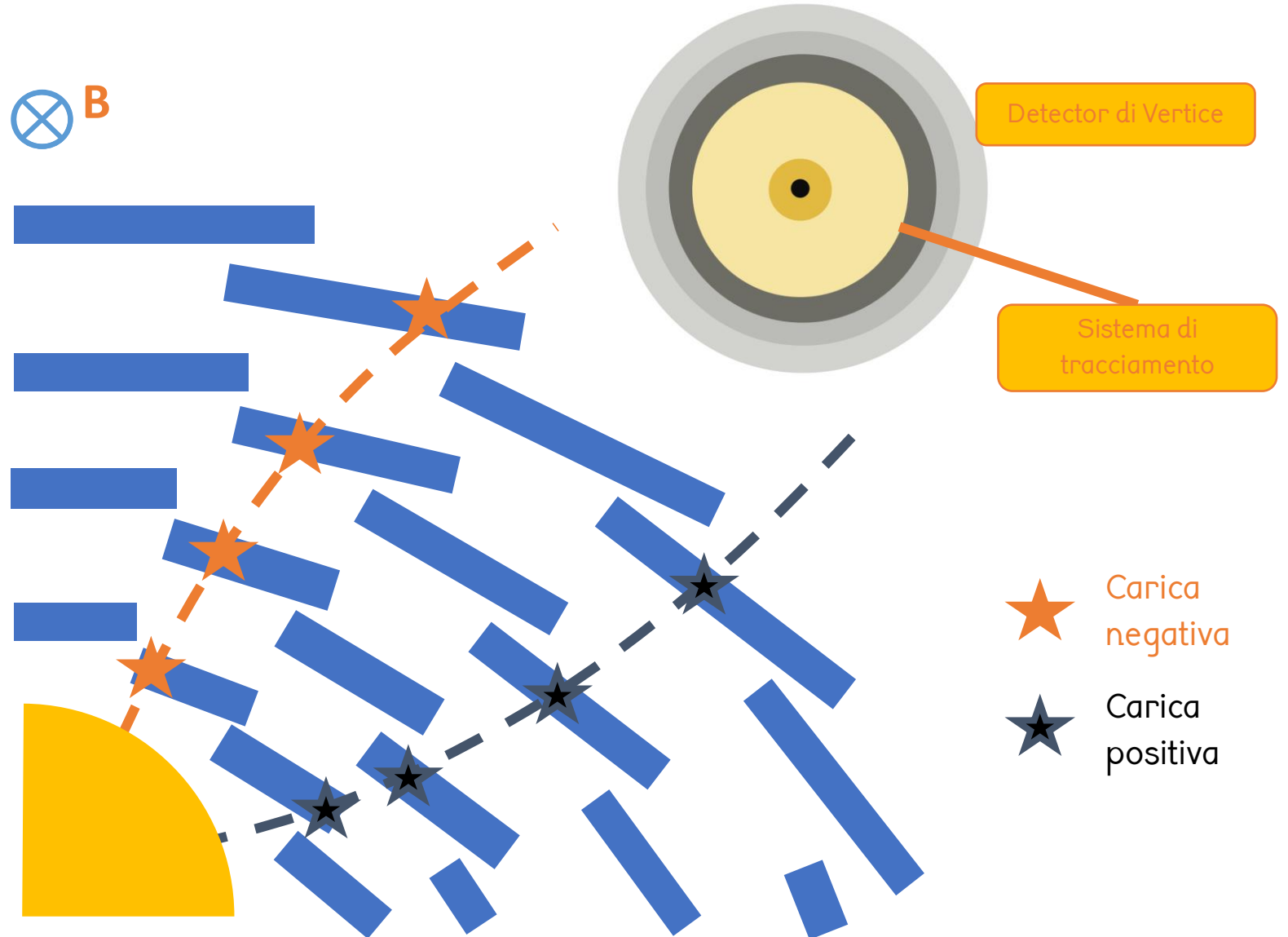
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici
- Da quelle, possiamo ricostruire le tracce
- Qual è la carica della particella **arancione**?



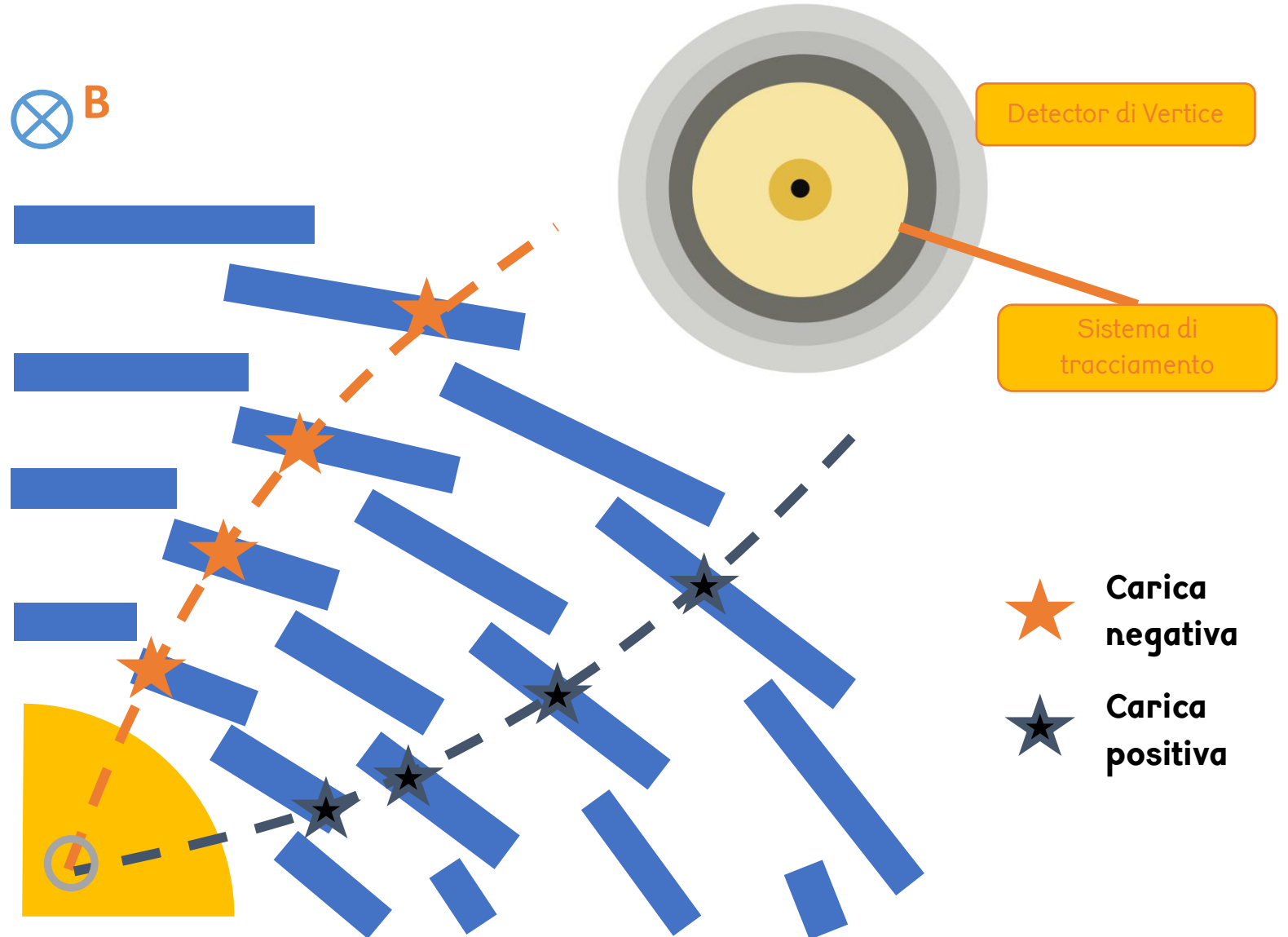
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici
- Da quelle, possiamo ricostruire le tracce
- Qual è la carica della particella **arancione**?



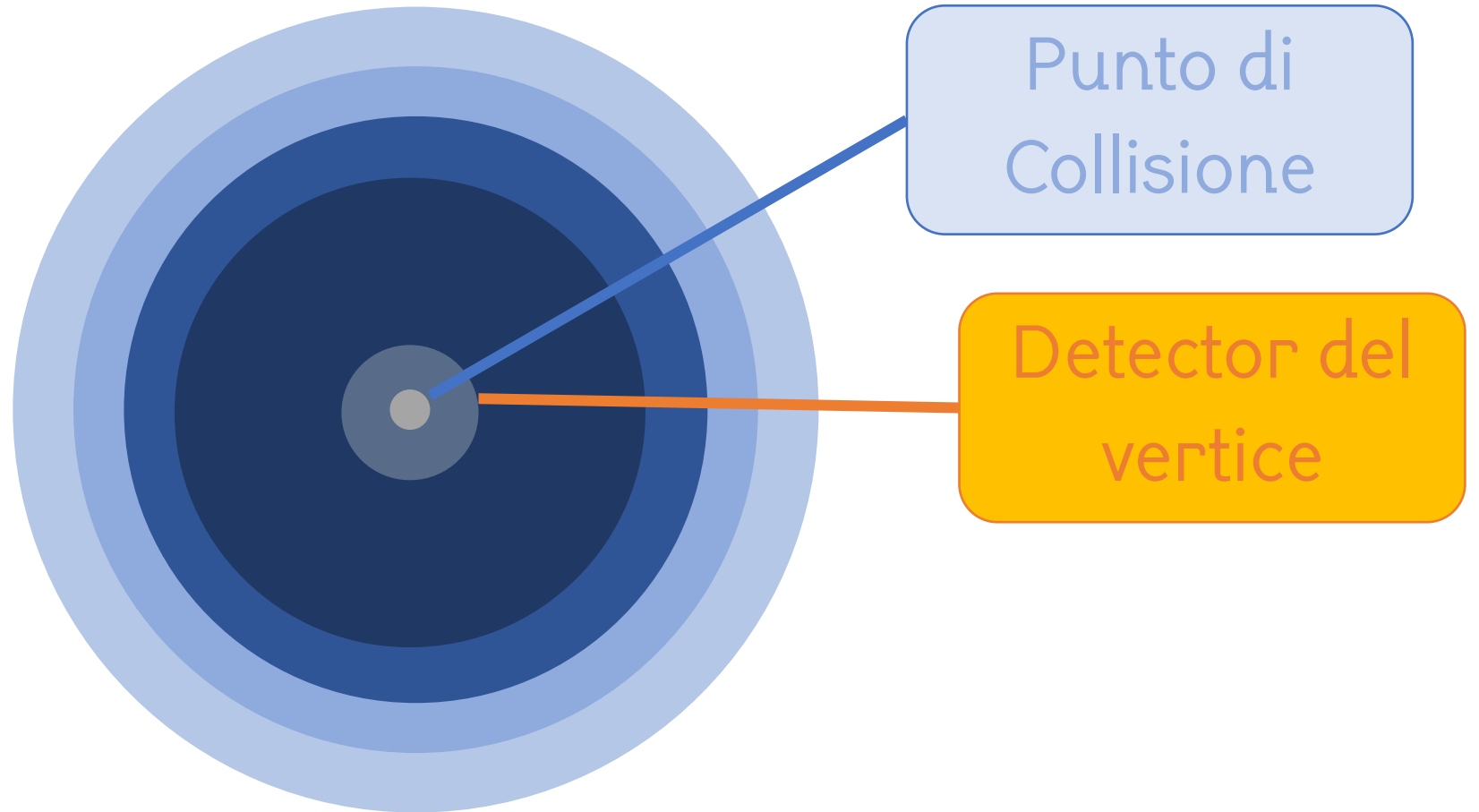
Rilevatore di vertici e tracce

- Le particelle con carica elettrica rilasciano segnali elettrici
- Da quelle, possiamo ricostruire le tracce
- Possiamo anche ricostruire il **vertice**



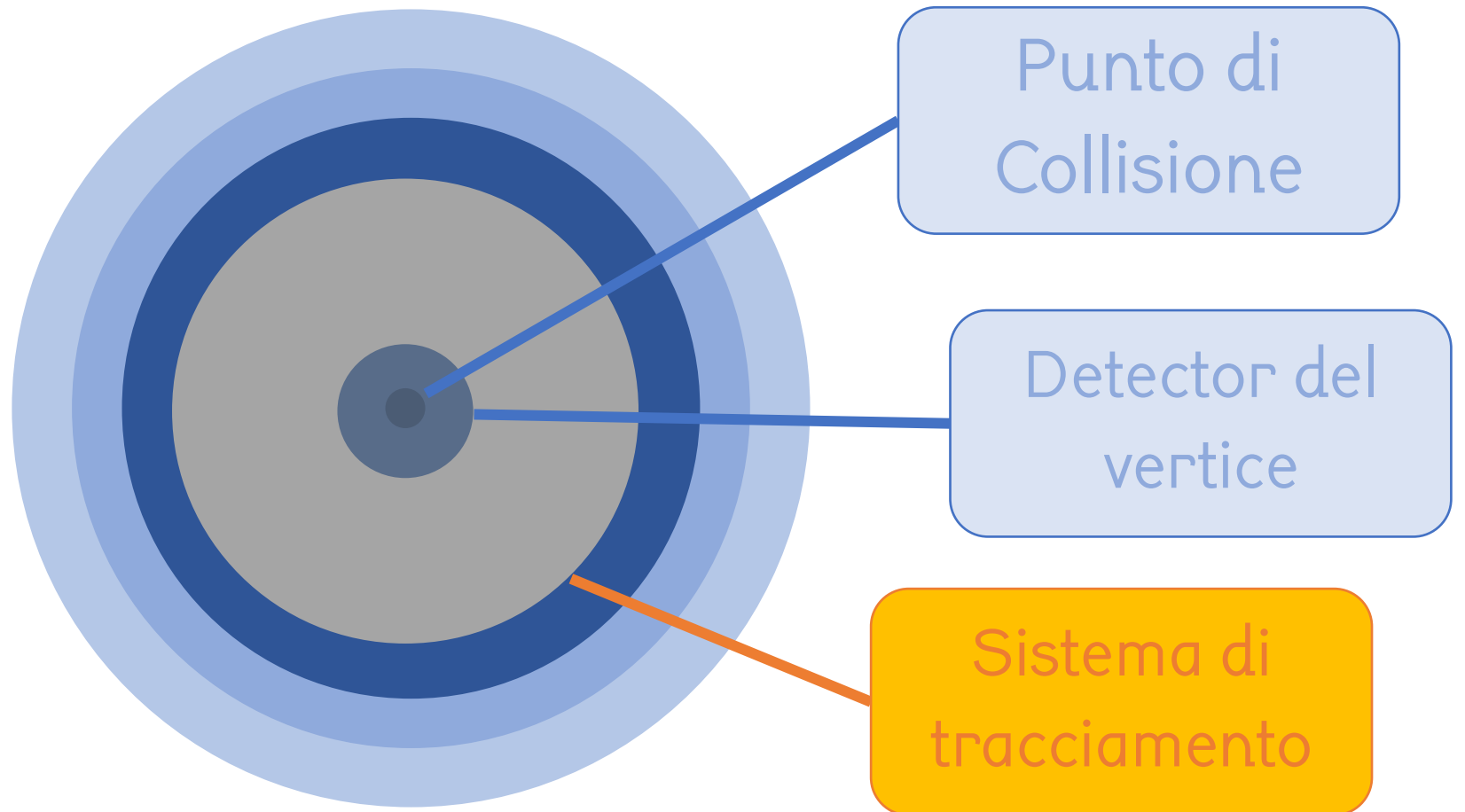
E da dove arrivano questi segnali?

Il detector è costruito attorno il punto di collisione: principio della cipolla



E da dove arrivano questi segnali?

Il detector è costruito attorno il punto di collisione: principio della cipolla



Identificazione delle particelle

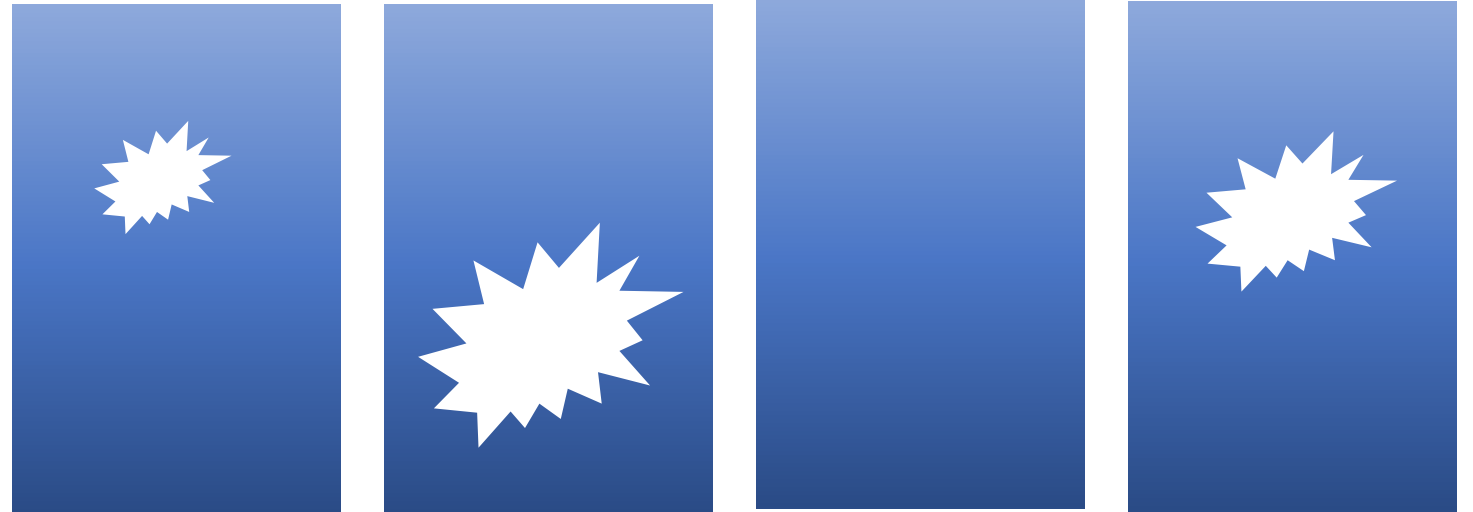
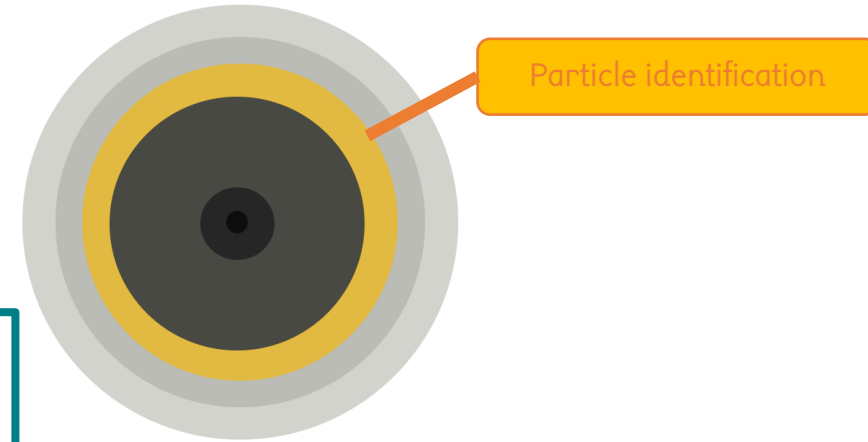
Le particelle hanno masse differenti

La stessa velocità porta ad avere diversi momenti: $p = mv$

- Esempio:

- Palla da **calcio**, da **tennis**, da **golf** o da **ping pong** colpiscono una finestra
- Stessa velocità, danni differenti

Quale palla è responsabile di questi danni?



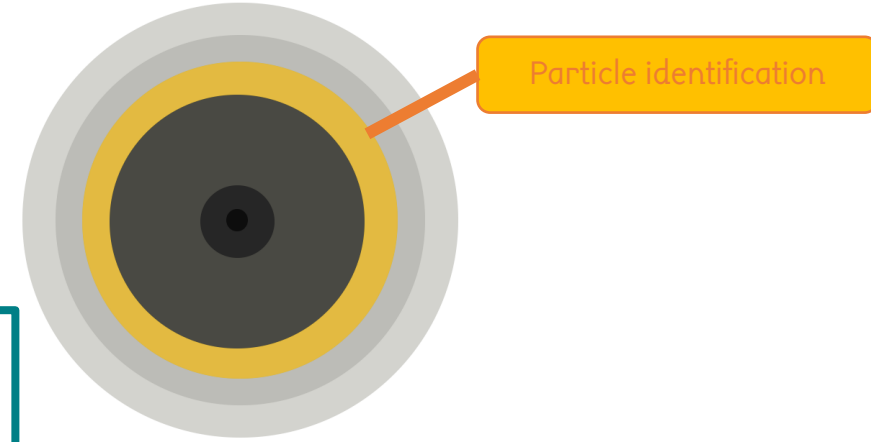
Identificazione delle particelle

Le particelle hanno masse differenti
La stessa velocità porta ad avere diversi
momenti: $p = mv$

- Esempio:

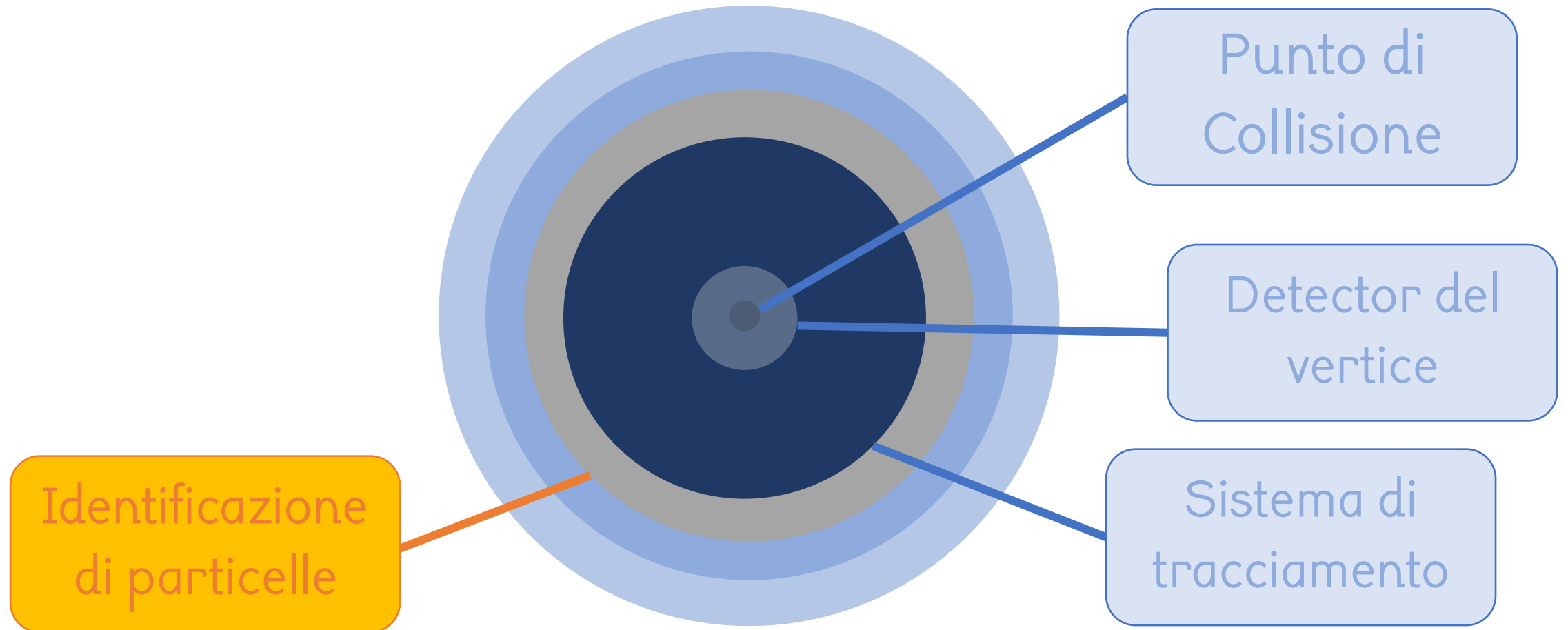
- Palla da **calcio**, da **tennis**, da **golf** o da **ping pong** colpiscono una finestra
- Stessa velocità, danni differenti

Quale palla è responsabile di questi danni?



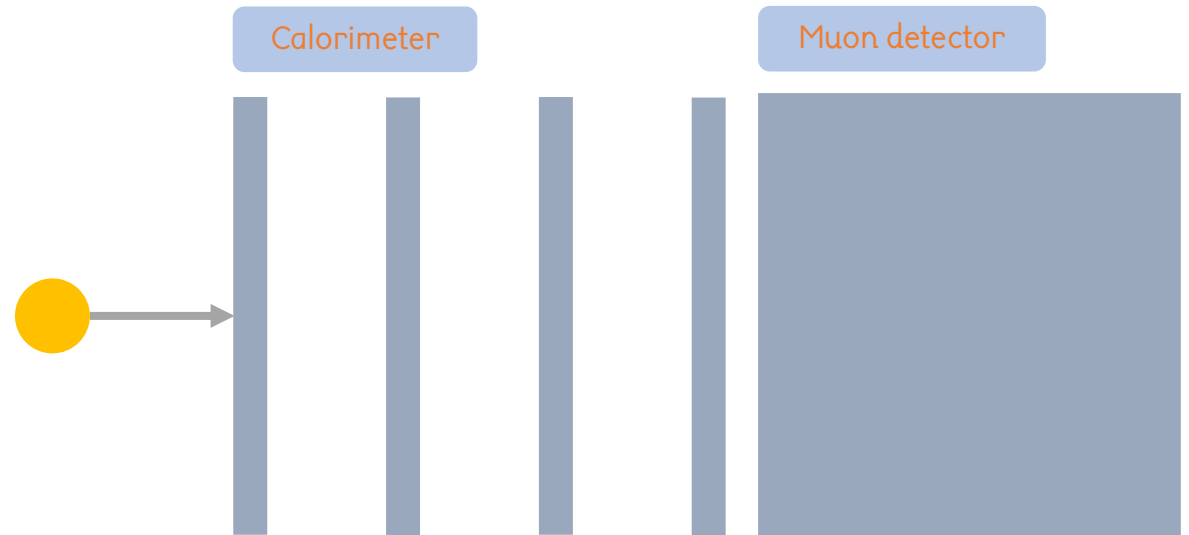
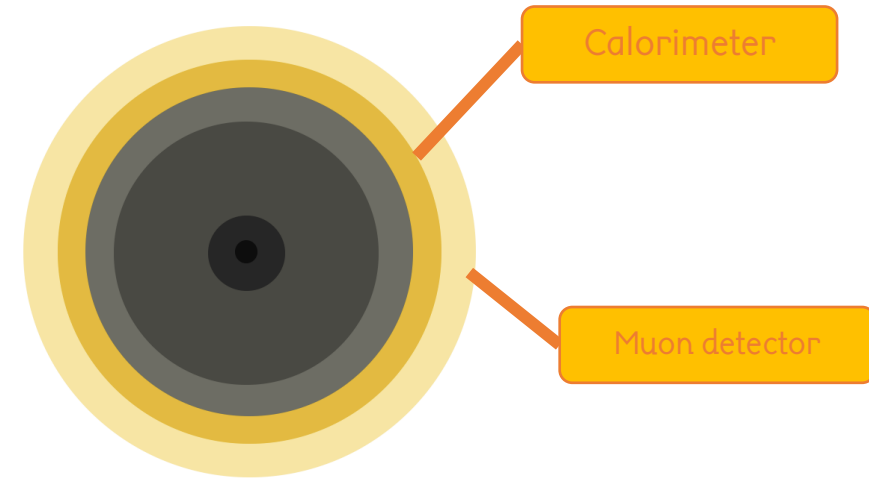
E da dove arrivano questi segnali?

Il detector è costruito attorno il punto di collisione: principio della cipolla



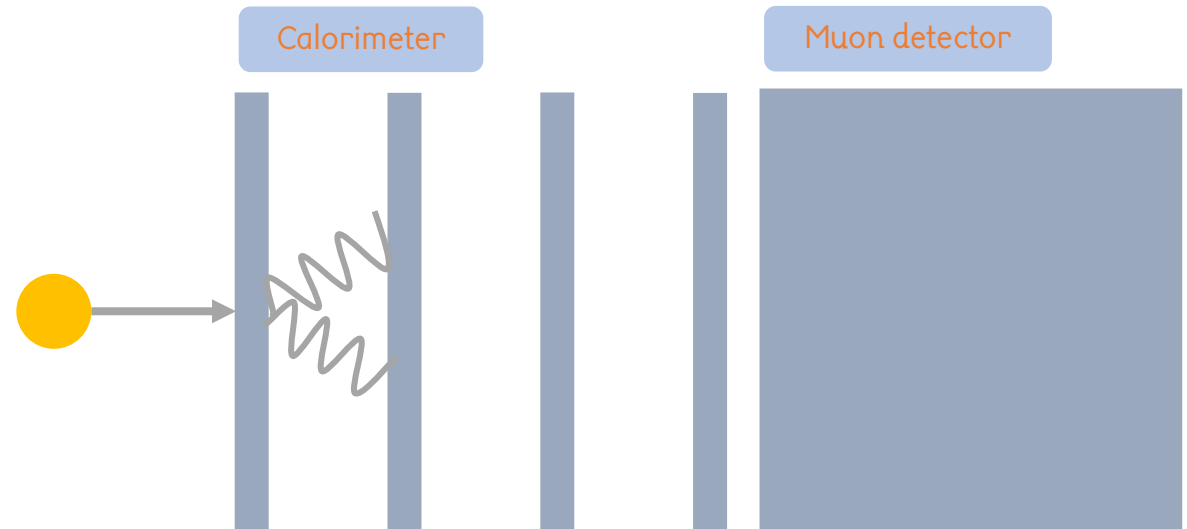
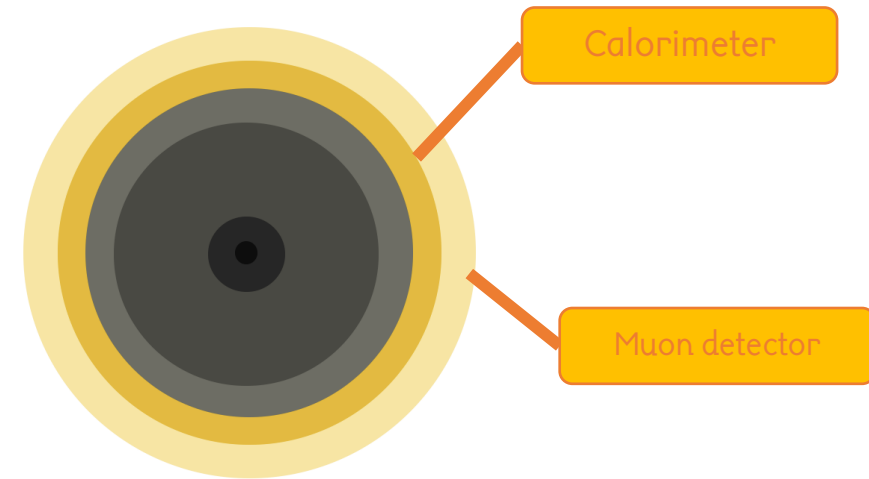
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia



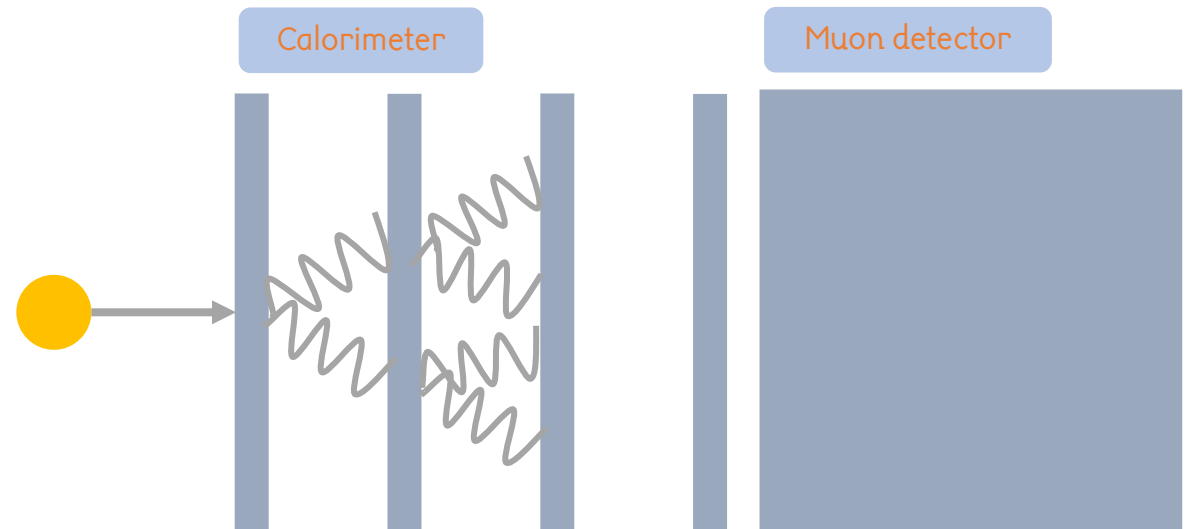
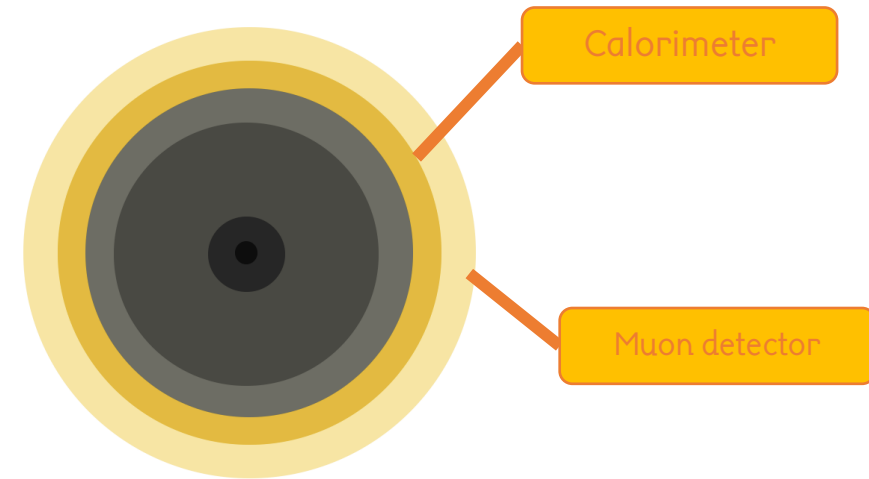
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia



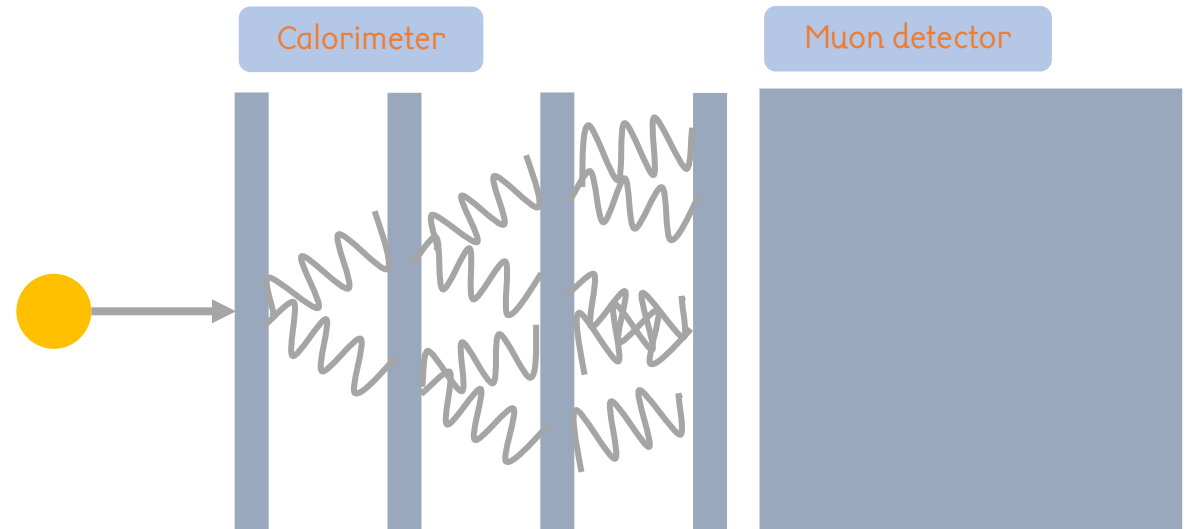
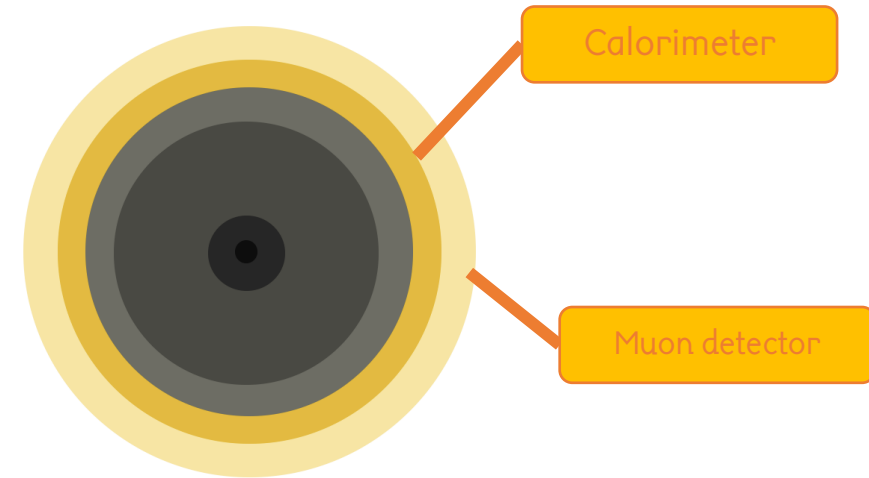
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia



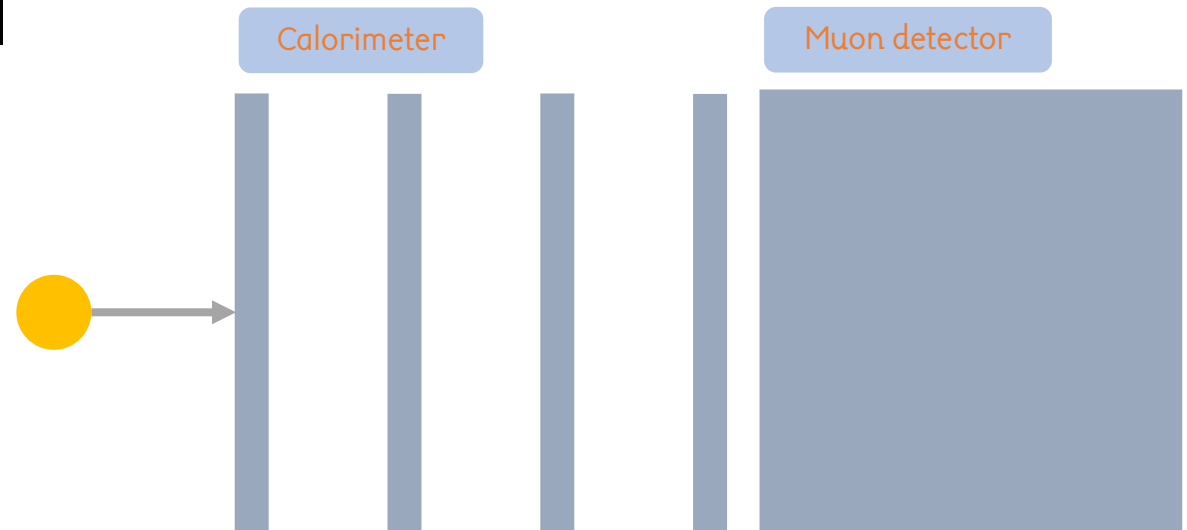
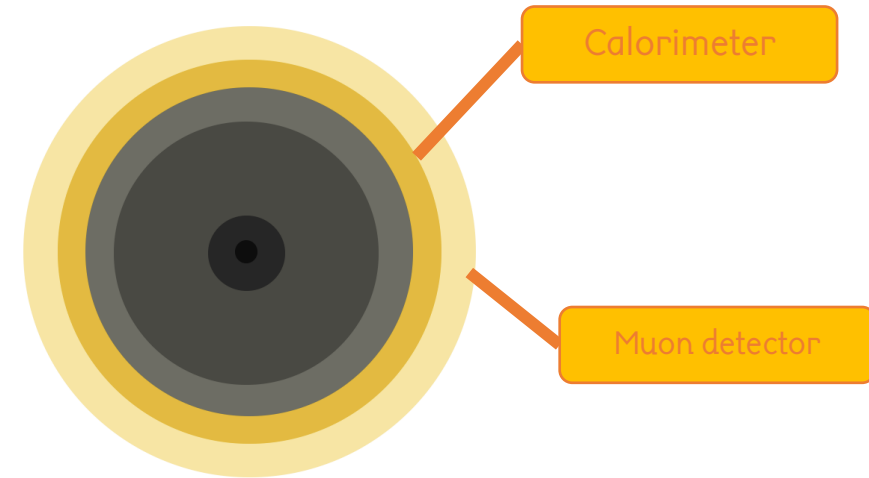
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia
 - E sono stoppate qua



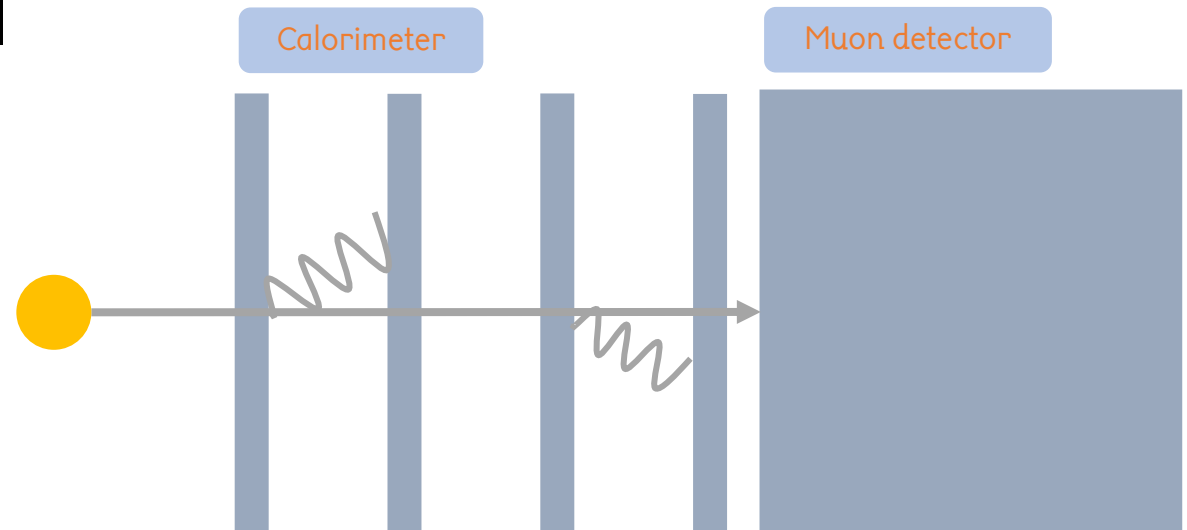
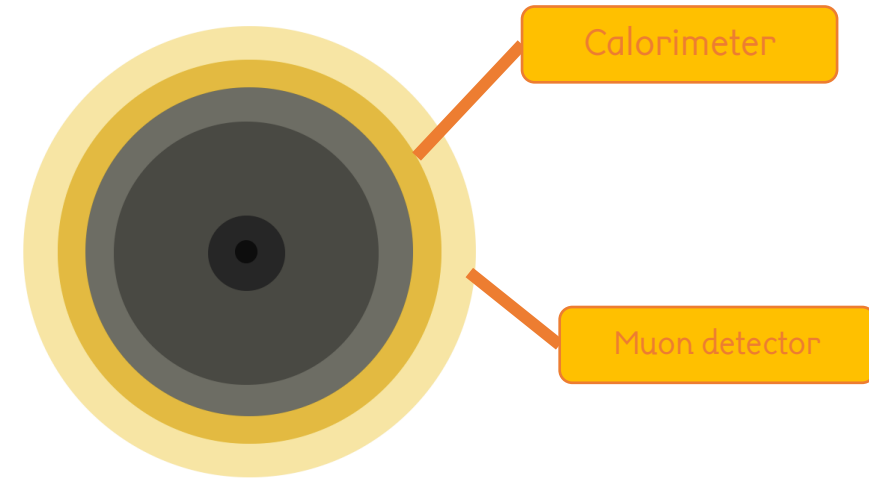
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia
 - E sono stoppate qua
- Detector di muoni:
 - I muoni interagiscono pochissimo con il calorimetro e lo oltrepassano



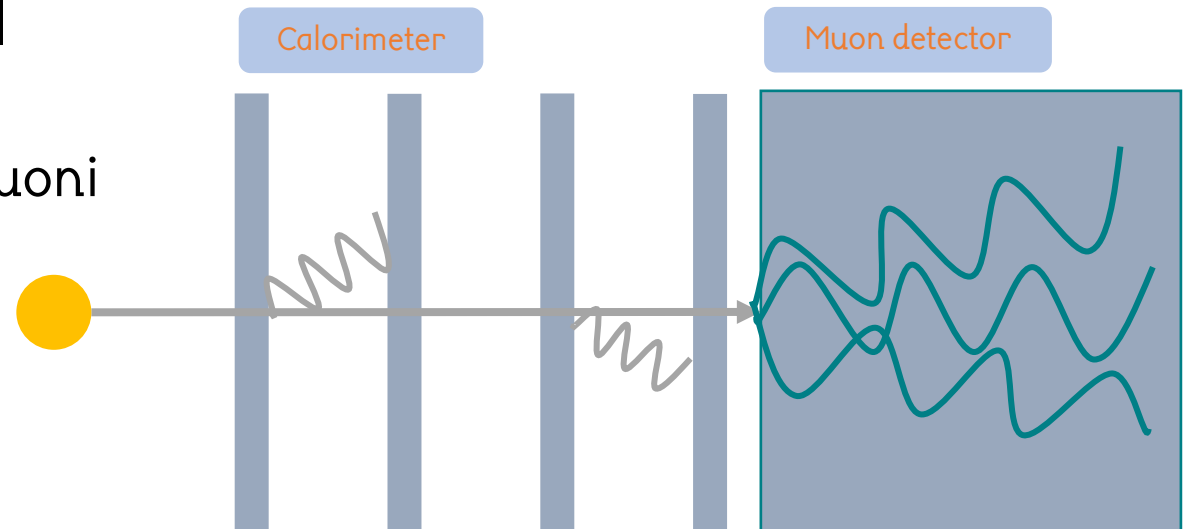
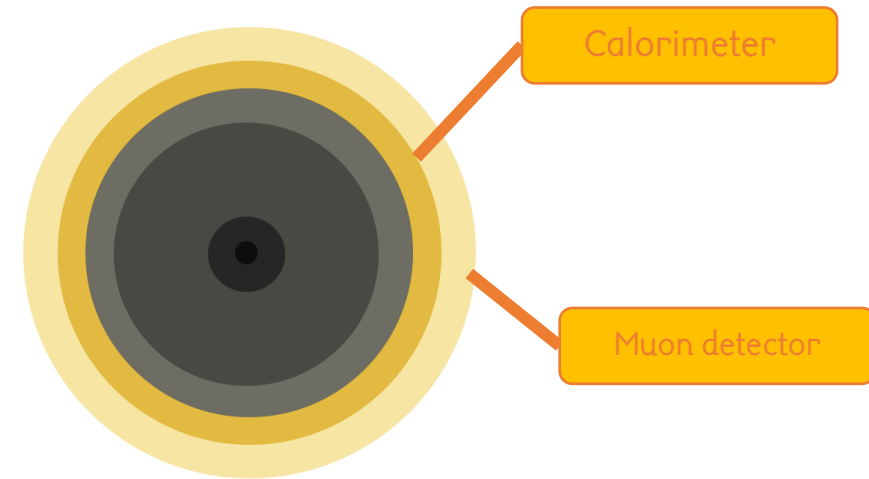
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia
 - E sono stoppate qua
- Detector di muoni:
 - I muoni interagiscono pochissimo con il calorimetro e lo oltrepassano



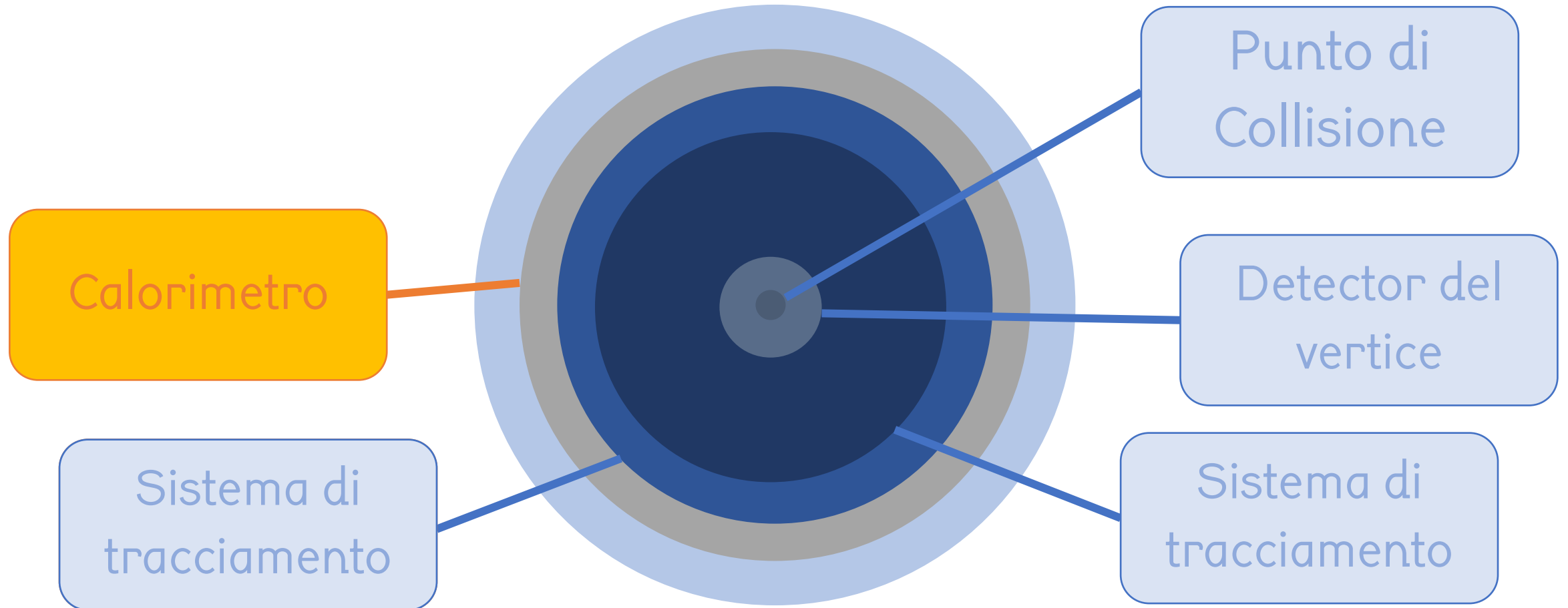
Calorimetro e Detector di muoni

- Calorimetro:
 - La maggior parte delle particelle rilasciano la loro completa energia
 - E sono stoppate qua
- Detector di muoni:
 - I muoni interagiscono pochissimo con il calorimetro e lasciano il calorimetro
 - Lasciano il segnale nel detector per i muoni



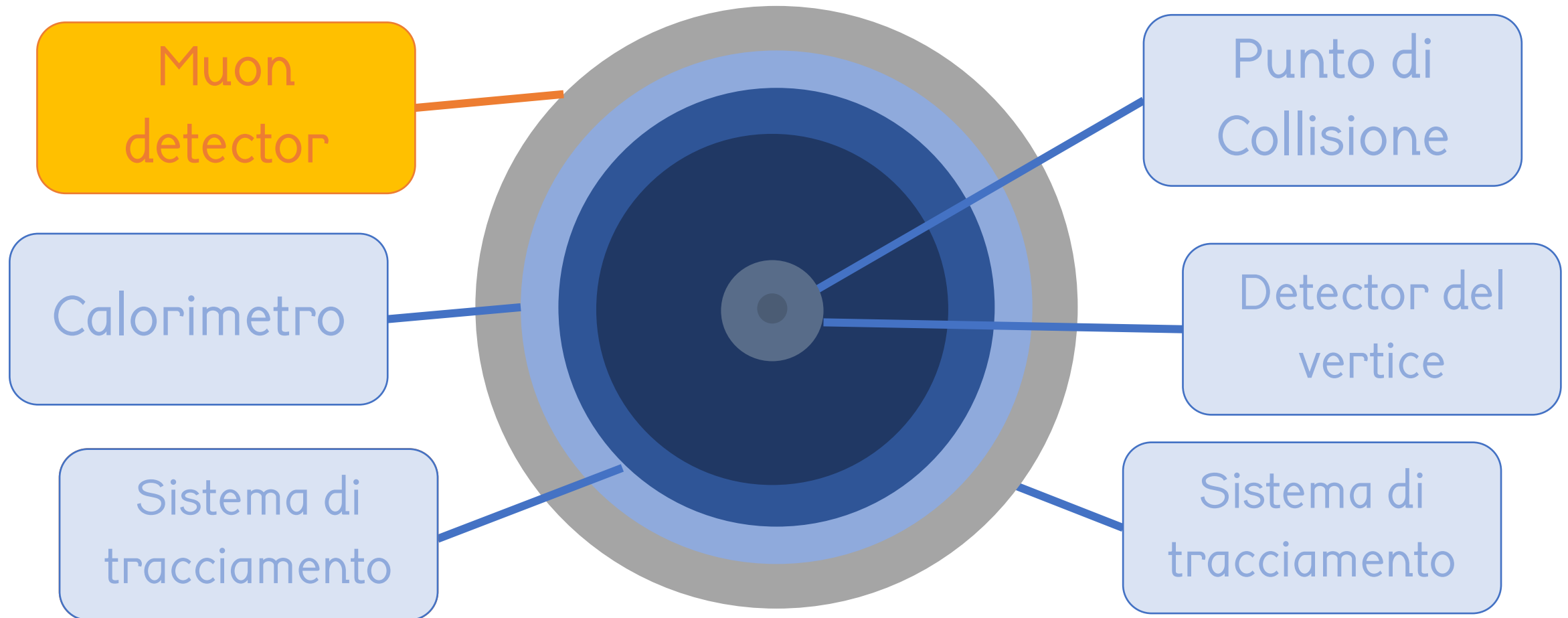
E da dove arrivano questi segnali?

Il detector è costruito attorno il punto di collisione: principio della cipolla



E da dove arrivano questi segnali?

Il detector è costruito attorno il punto di collisione: principio della cipolla



Ed ora ... primo quiz!

Quanti *colori* hanno i quark?

Quanti colori hanno i quark?

Stamattina abbiamo visto come calcolare il valore R e come calcolare il numero dei colori di quark

Quanti colori hanno i quark?

Stamattina abbiamo visto come calcolare il valore R e come calcolare il numero dei colori di quark

$$R = \frac{N(u \ d \ s \ c)}{\frac{1}{2} \cdot [N(\mu) + N(\tau)]} = N_c \cdot \frac{10}{9}$$

Quanti colori hanno i quark?

Stamattina abbiamo visto come calcolare il valore R e come calcolare il numero dei colori di quark

$$R = \frac{N(u\ d\ c\ s)}{\frac{1}{2} \cdot [N(\mu) + N(\tau)]} = N_c \cdot \frac{10}{9}$$

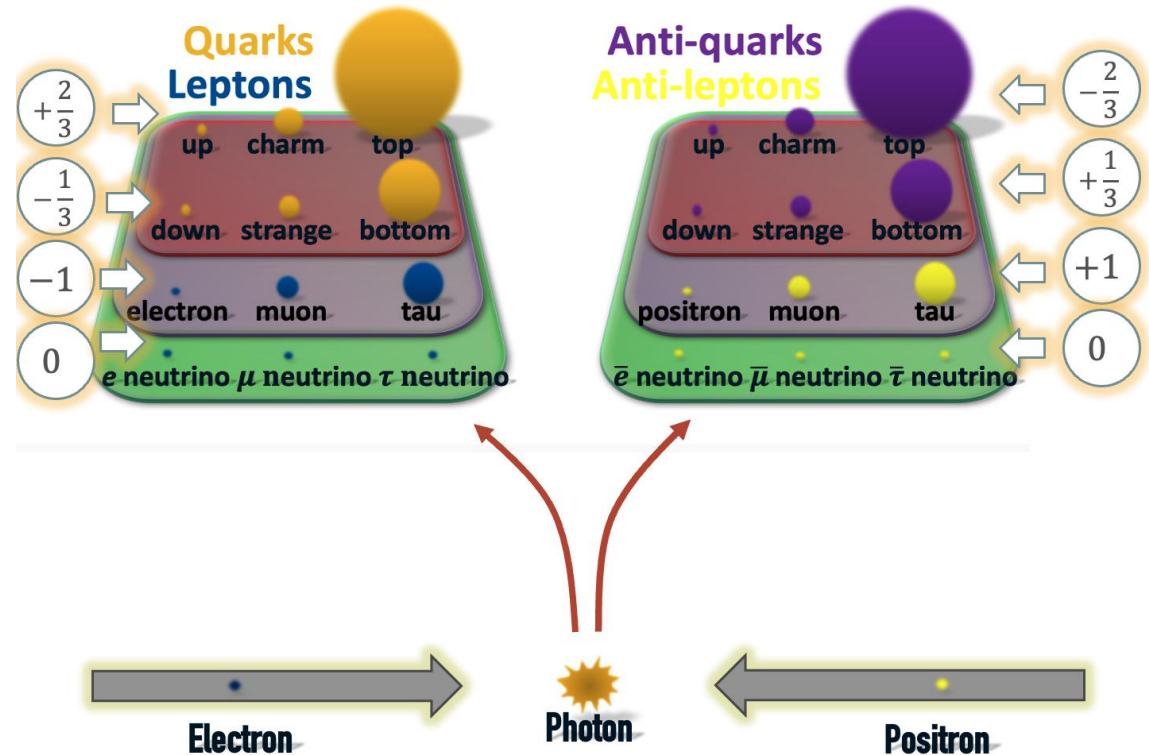
Per misurare il numero di colori, dobbiamo contare il numero di processi differenti

Quindi:

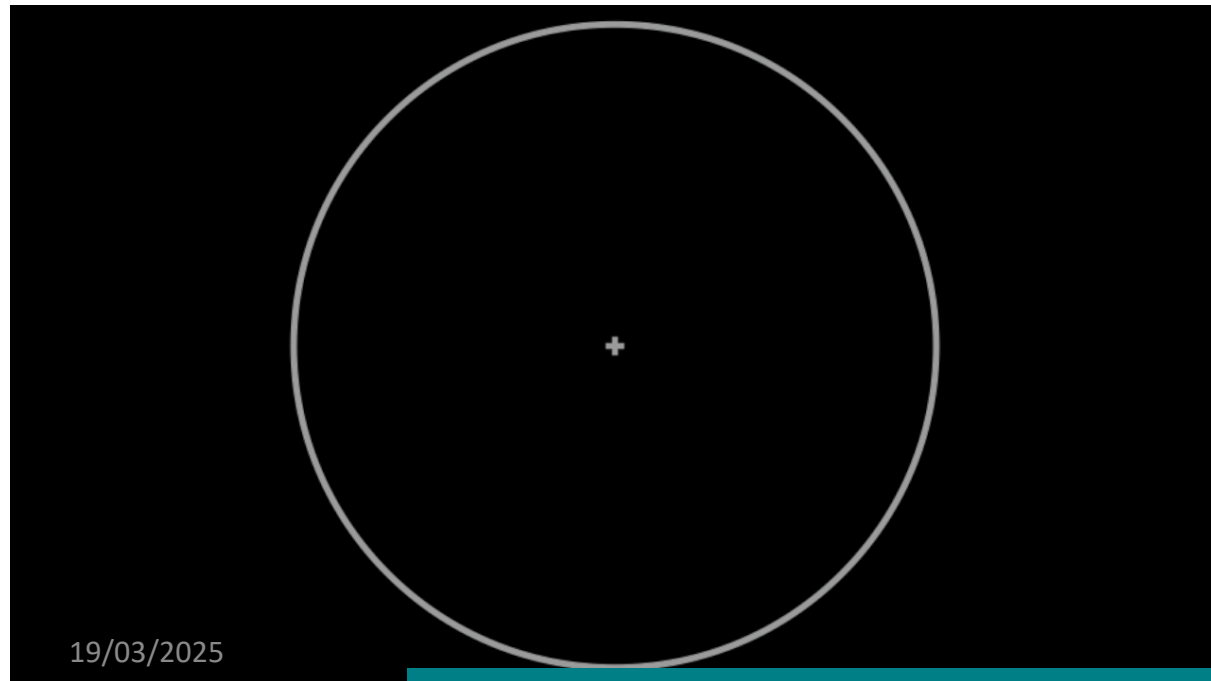
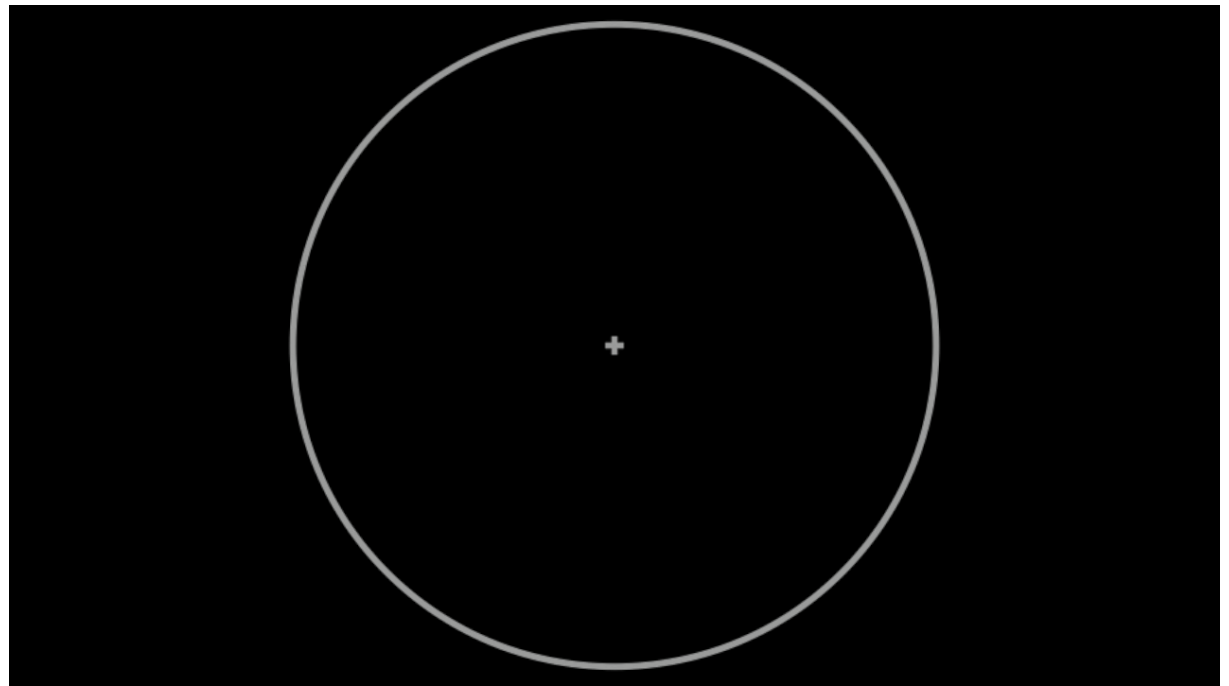
Dobbiamo imparare come distinguere i processi uni dagli altri attraverso i detector.

Cosa succede davvero?

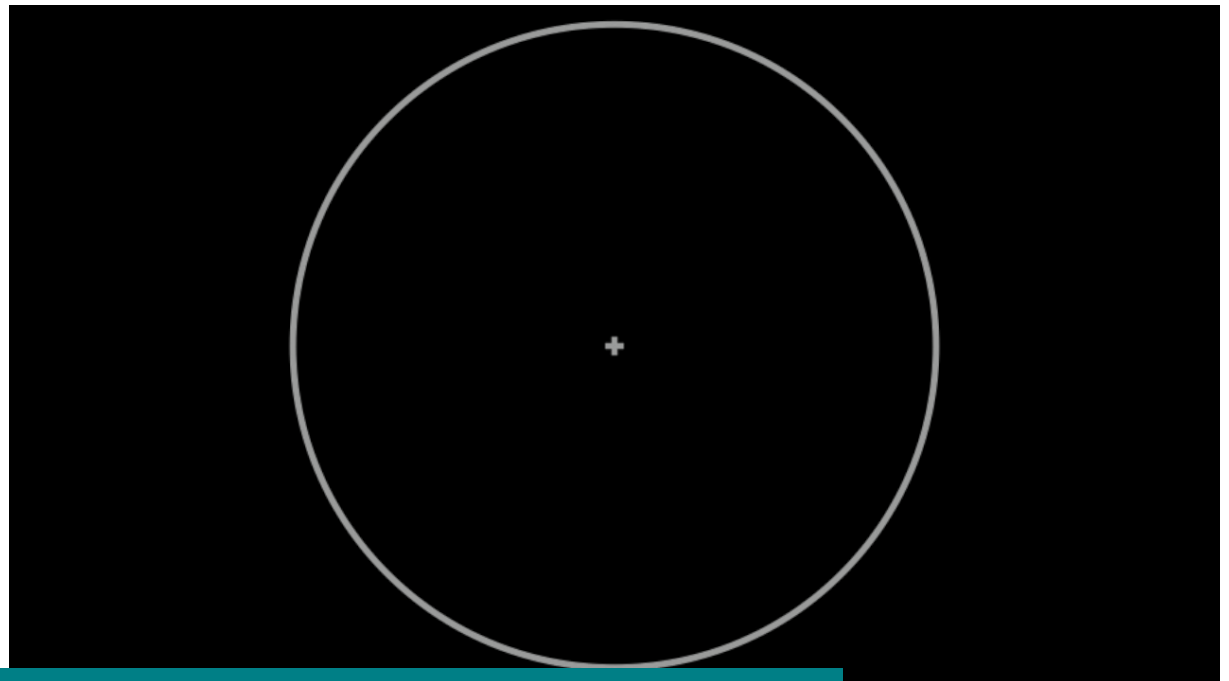
- $e^+e^- \rightarrow$ “energia pura” $\rightarrow$ particella/antiparticella
- Coppia di leptoni:
 - Eventi **Elettone-positrone**
 - Eventi **Muone-antimuone**
 - Eventi **Tau-antitau**
- Coppia di quark:
 - Eventi **quark-antiquark** leggeri
 - Eventi **$b\bar{b}$** quark



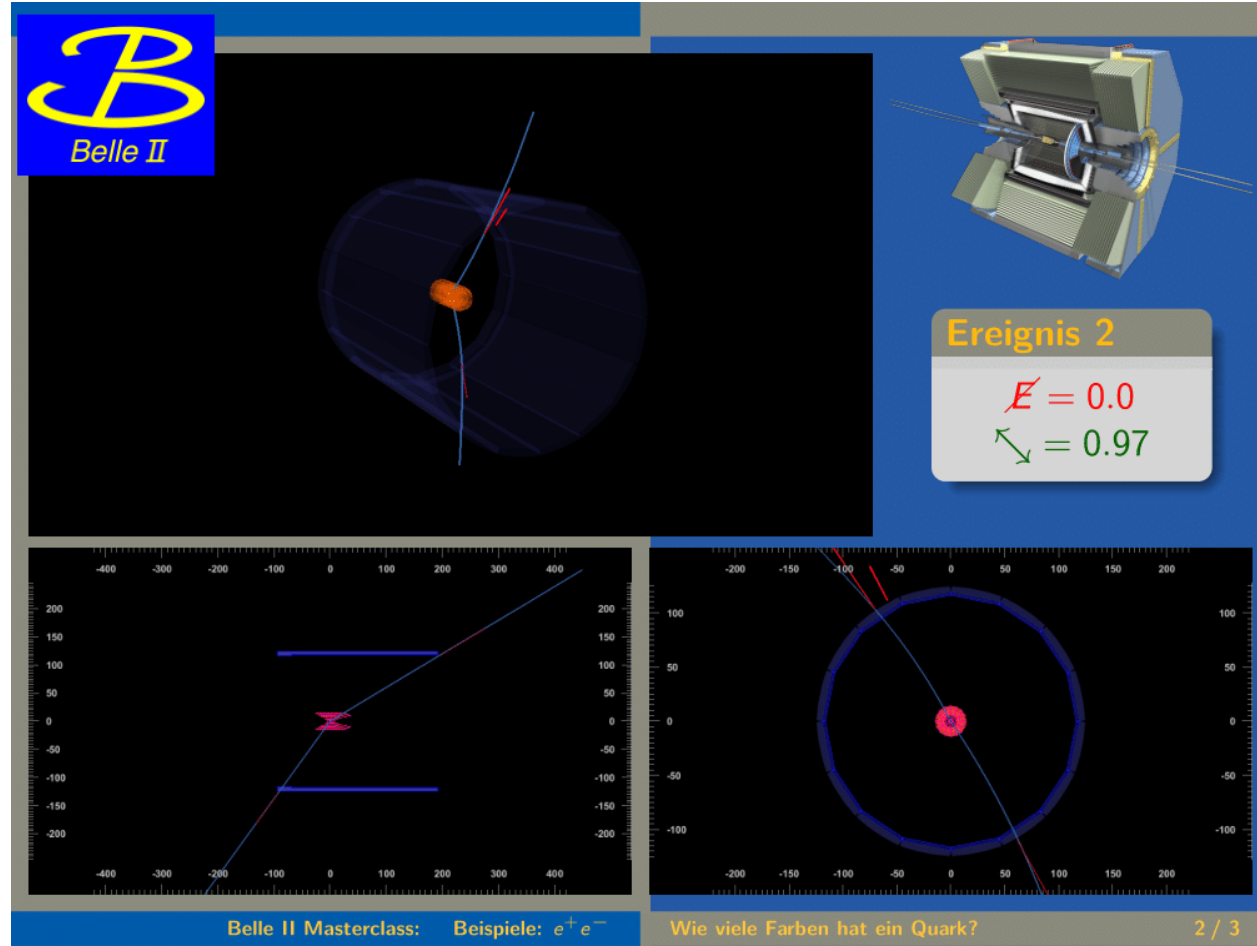
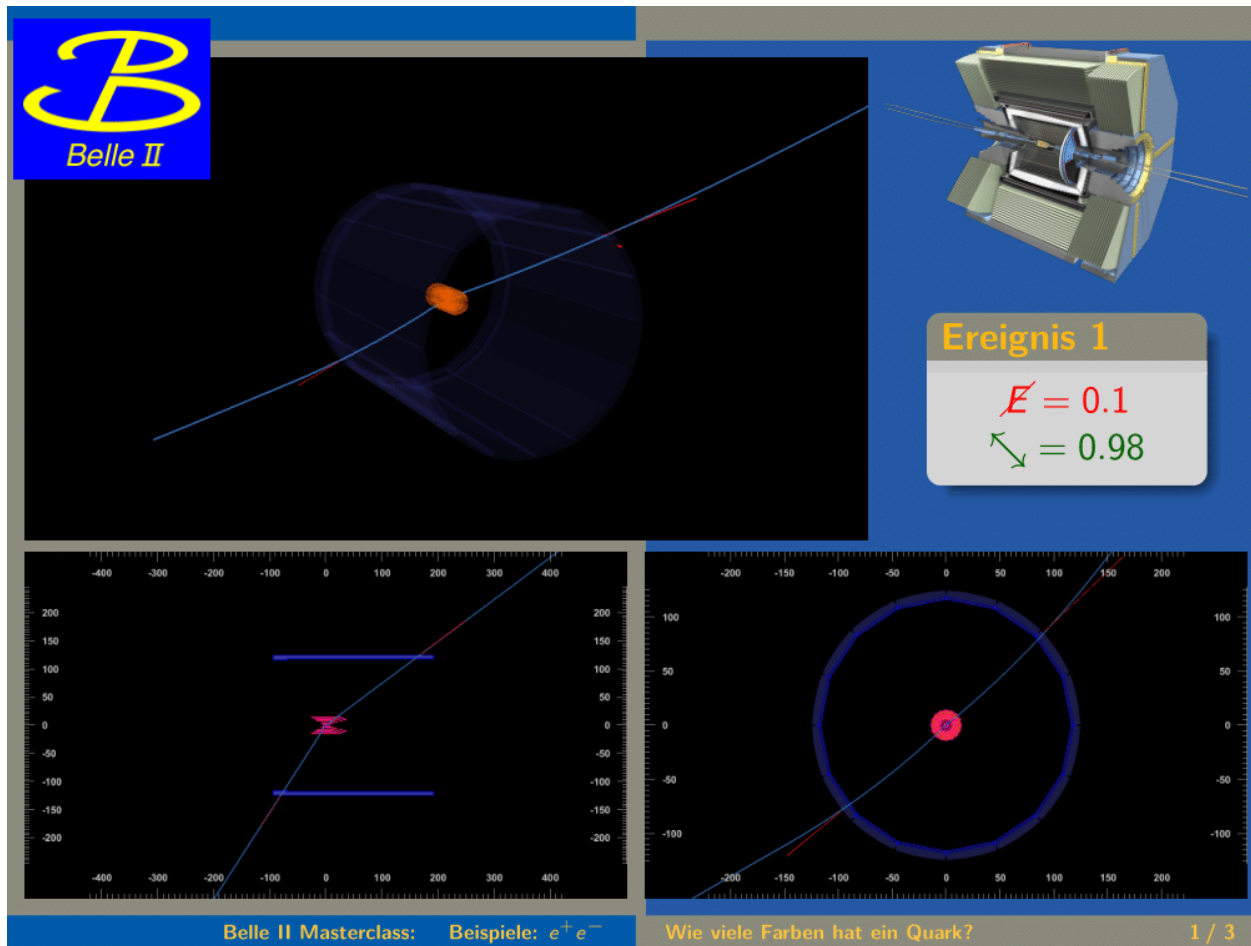
Eventi elettrone positrone



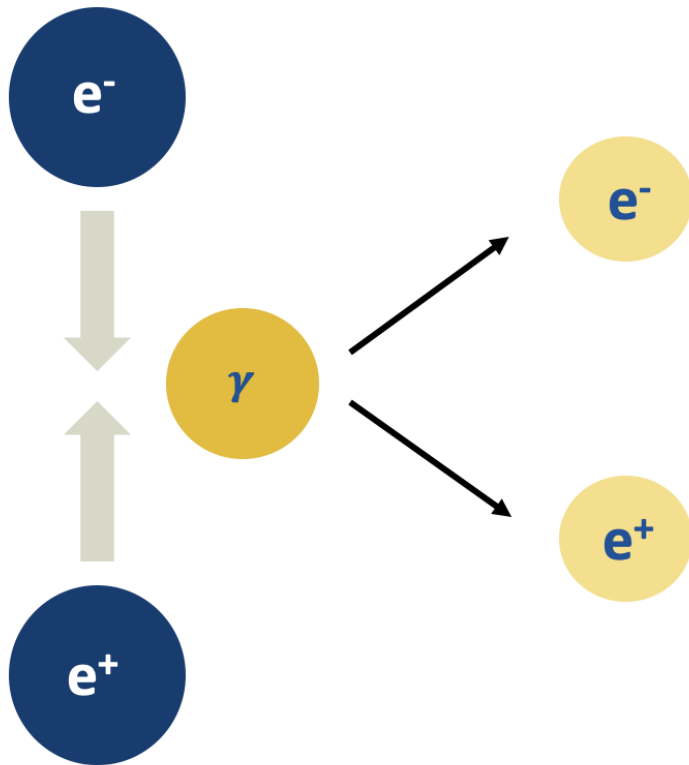
19/03/2025



Eventi elettrone positrone



Eventi elettrone positrone



- **Due tracce** chiaramente visibili
- Depositi di energia nel calorimetro (segnali in **rosso** vicini alla traccia)

Eventi elettrone positrone

Perché gli eventi elettroni–positroni mancano in questa equazione del valore R ?

$$R = \frac{N(\text{light quarks})}{\frac{1}{2} \cdot [N(\mu) + N(\tau)]} = N_c \cdot \frac{10}{9}$$

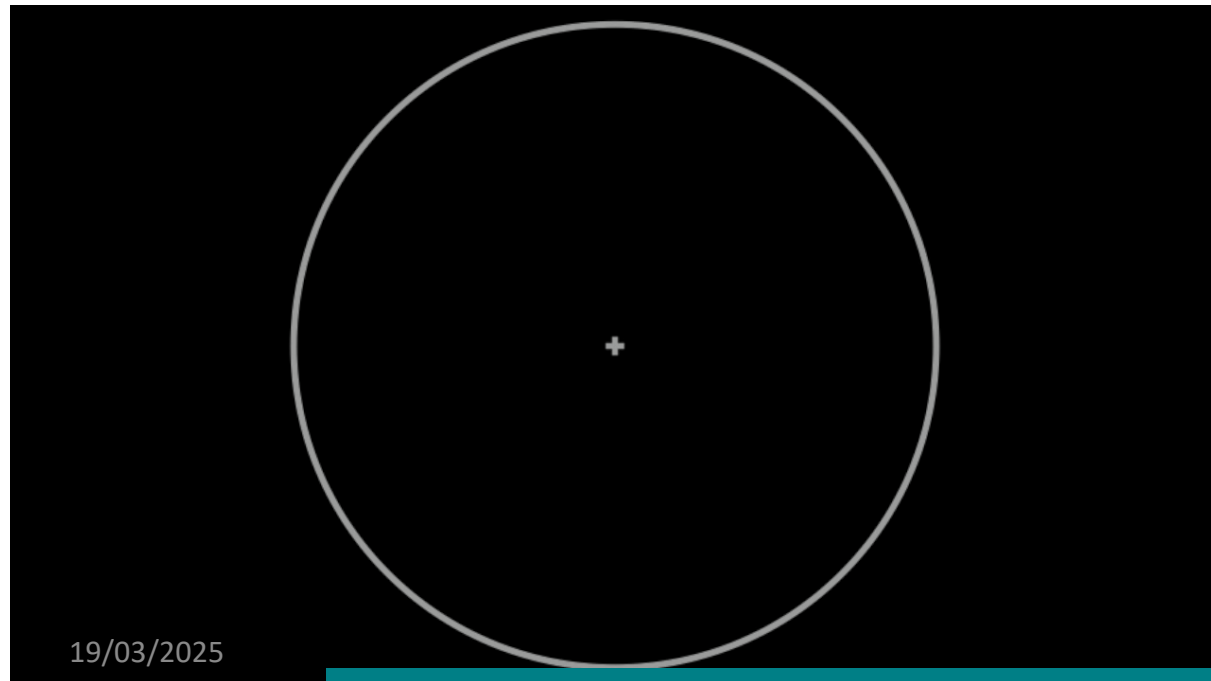
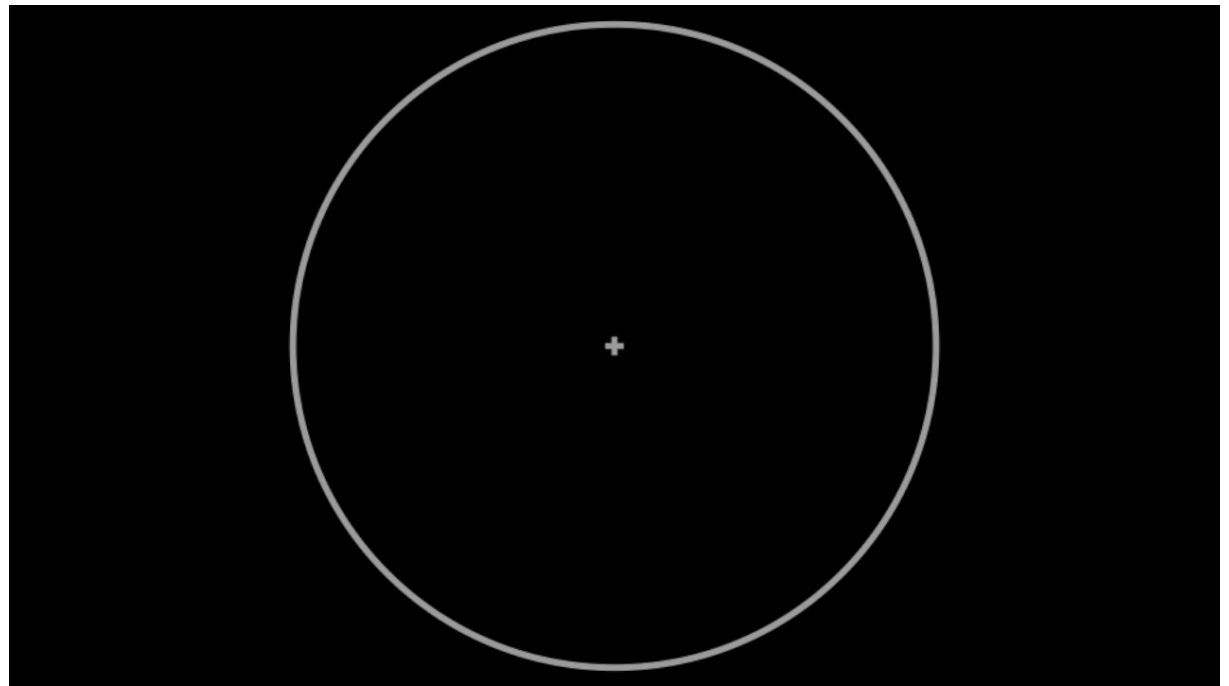
Eventi elettrone positrone

Perché gli eventi elettroni-positroni mancano in questa equazione del valore R ?

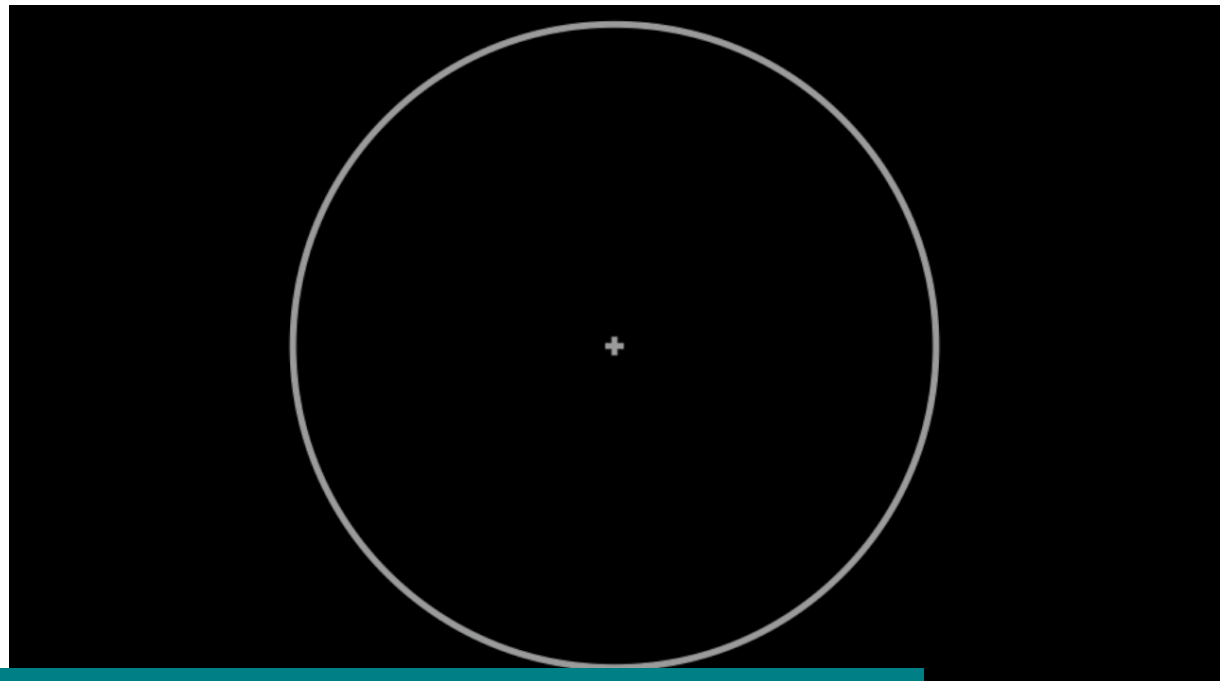
$$R = \frac{N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \bar{u}u, \bar{d}d, \bar{s}s, \bar{c}c)}{\frac{1}{2} [N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) + N(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+\tau^-)]}$$

→ Gli eventi elettrone – positrone accadono con una frequenza molto più grande rispetto ai leptoni più pesanti perché lo stato iniziale è uguale allo stato finale

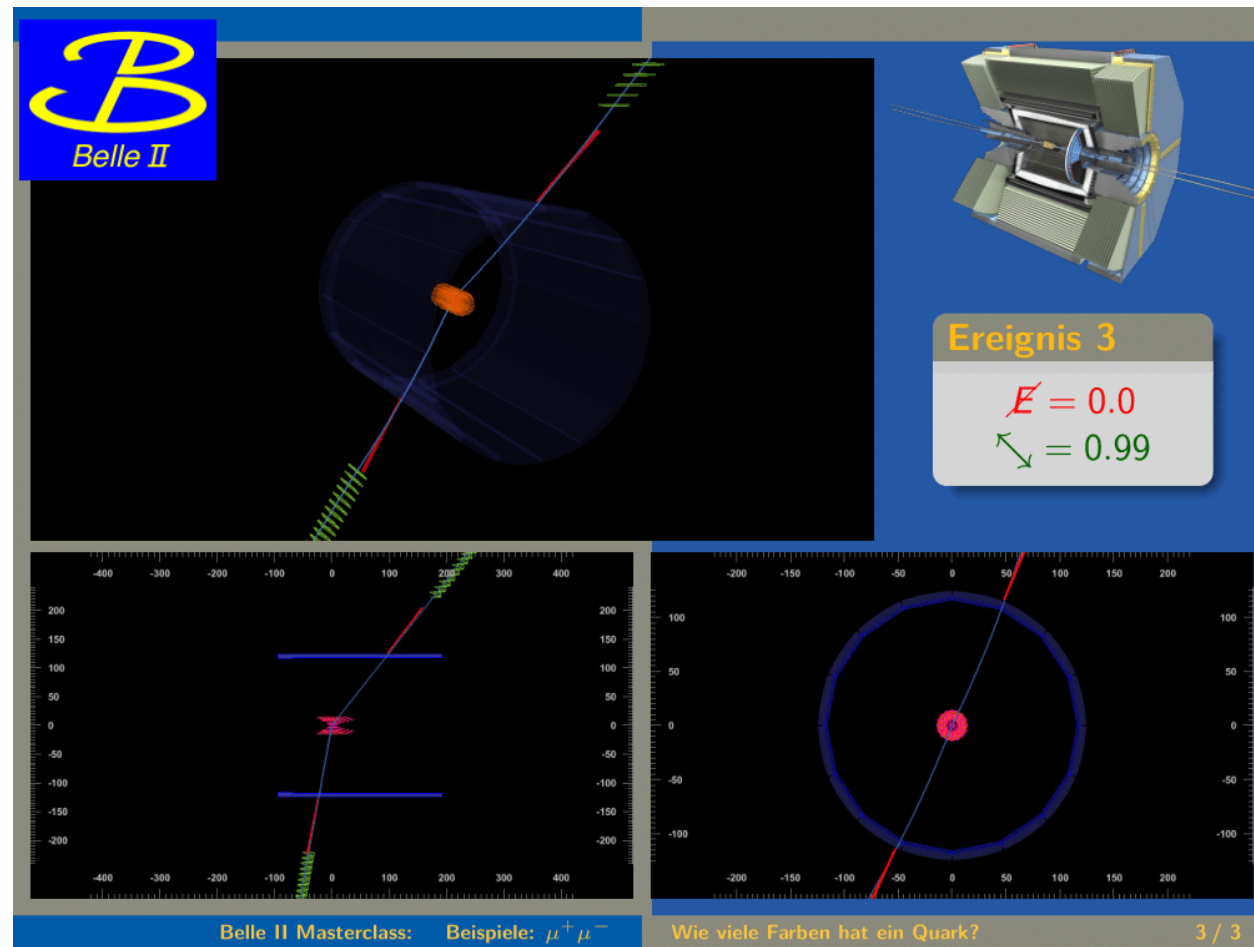
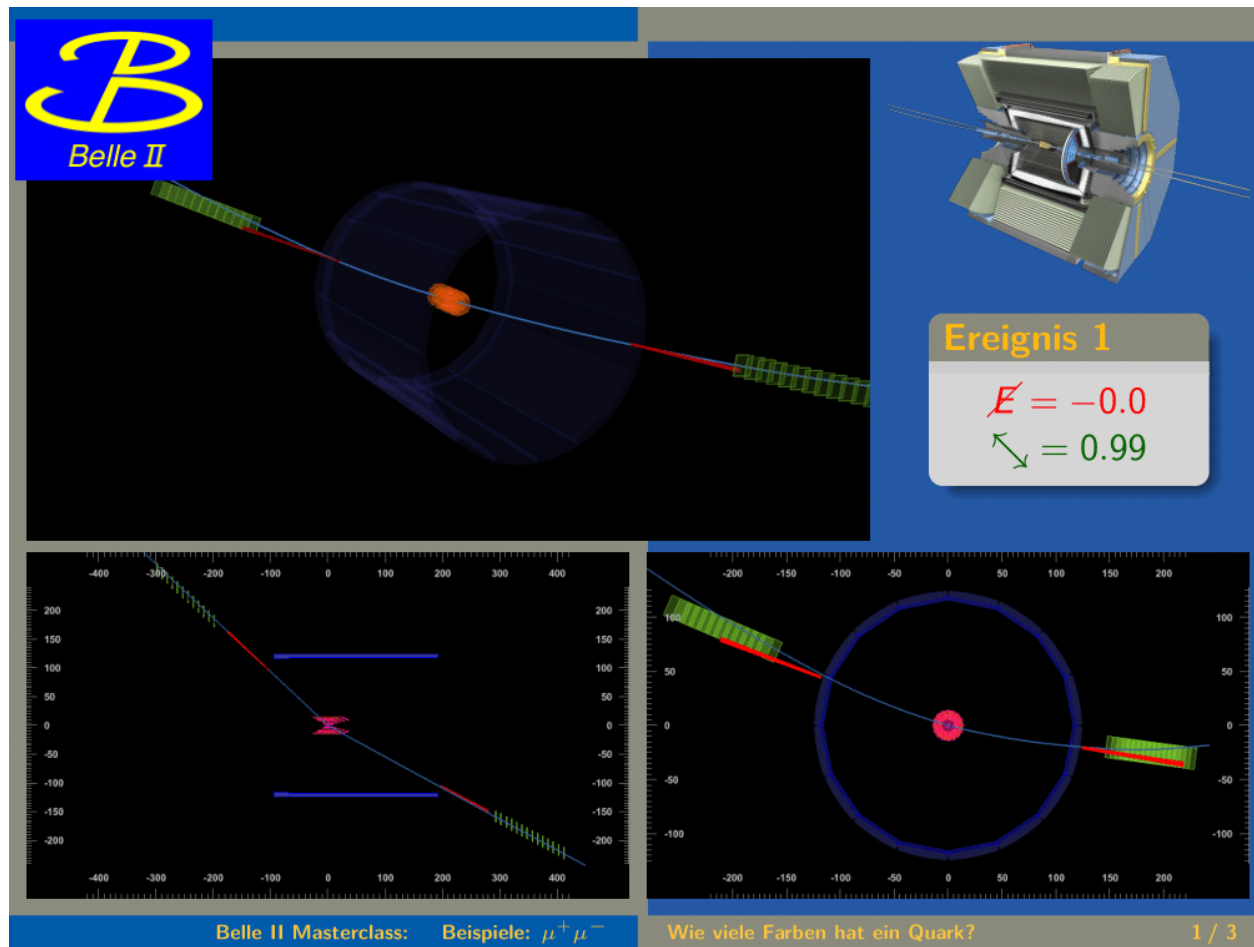
Eventi muone antimuone



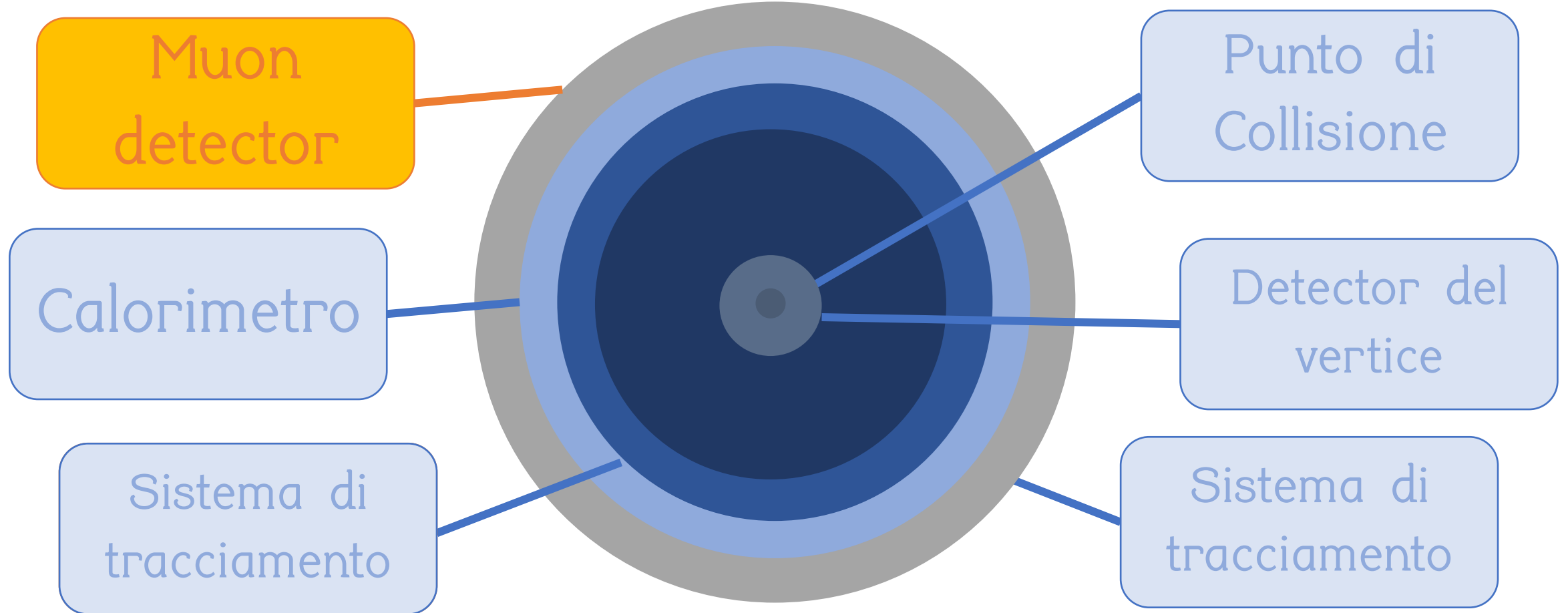
19/03/2025



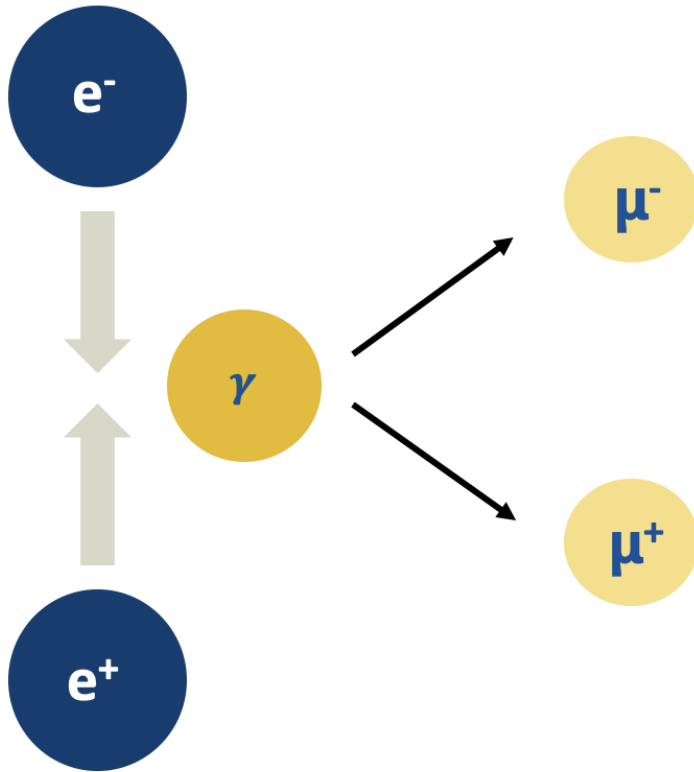
Eventi muone antimuone



E da dove arrivano questi segnali?

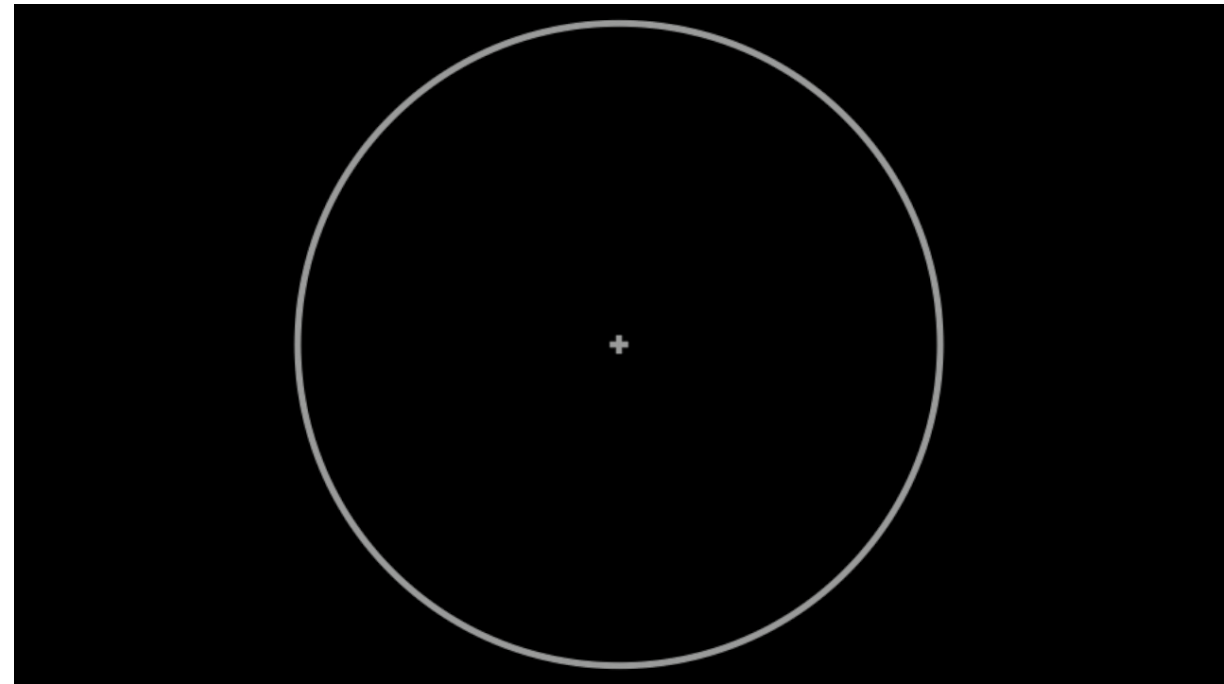
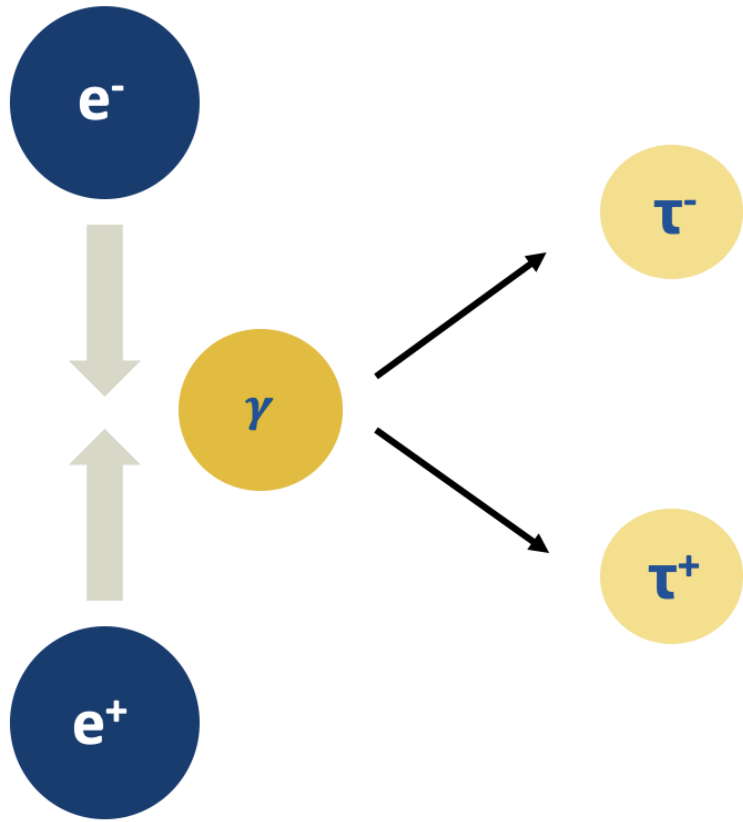


Eventi muone antimuone

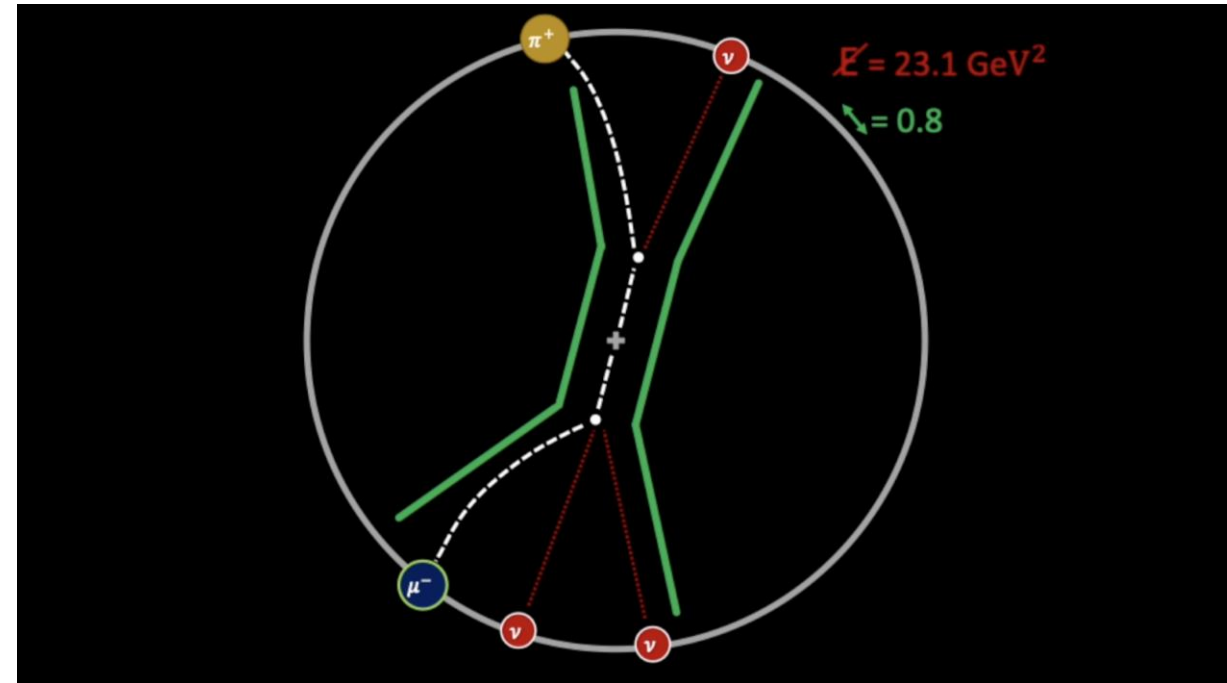
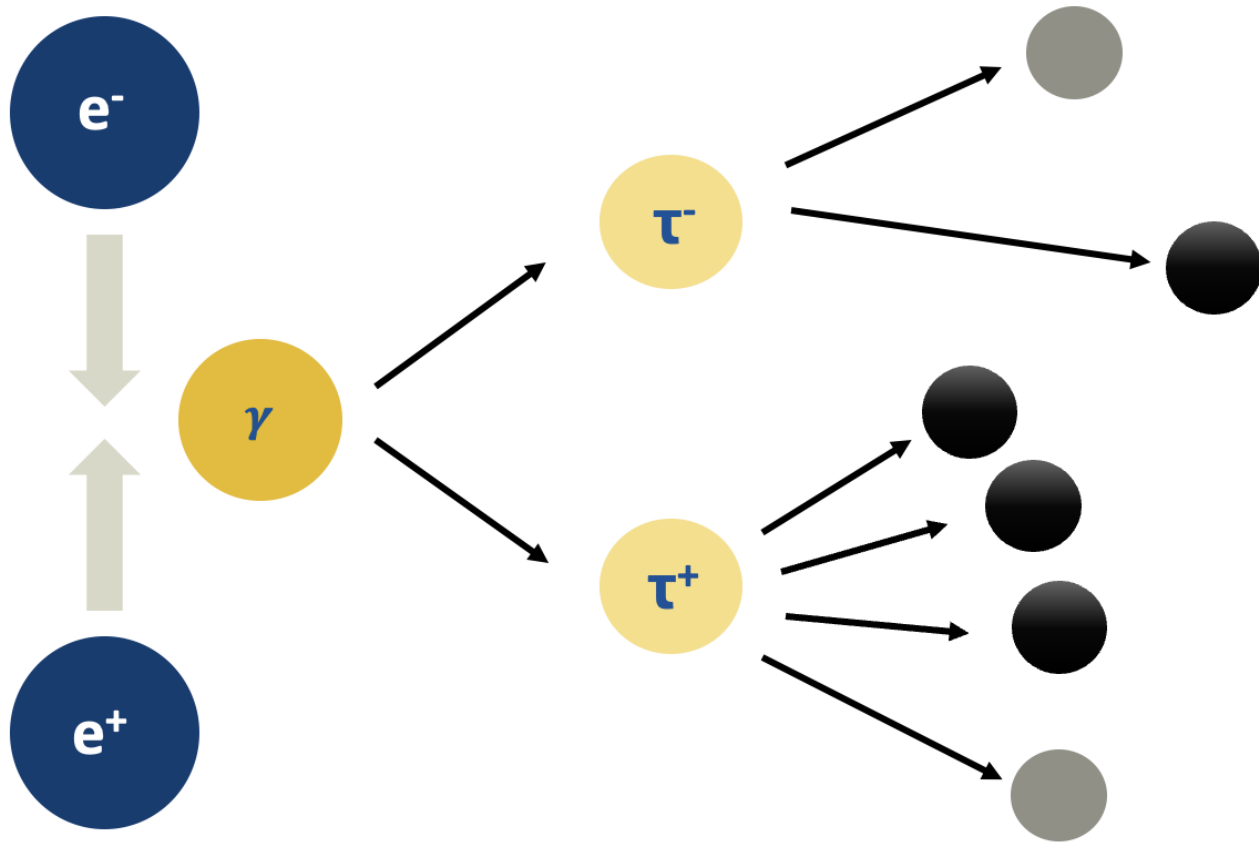


- **Due tracce** chiaramente visibili
- Deposito di energia nel calorimetro (segnale rosso vicino alla traccia)
- Deposito di energia nel detector di muoni (**segnale in verde lungo la traccia più esterna!**)

Eventi tau antitau



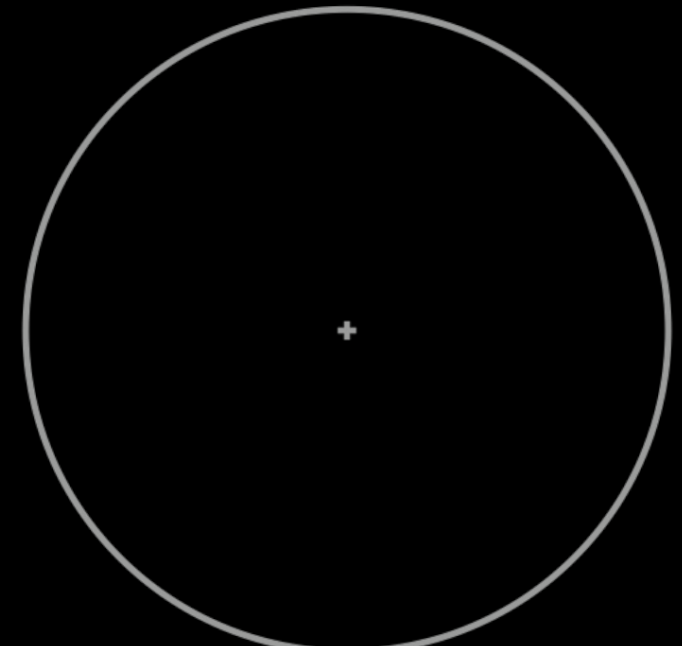
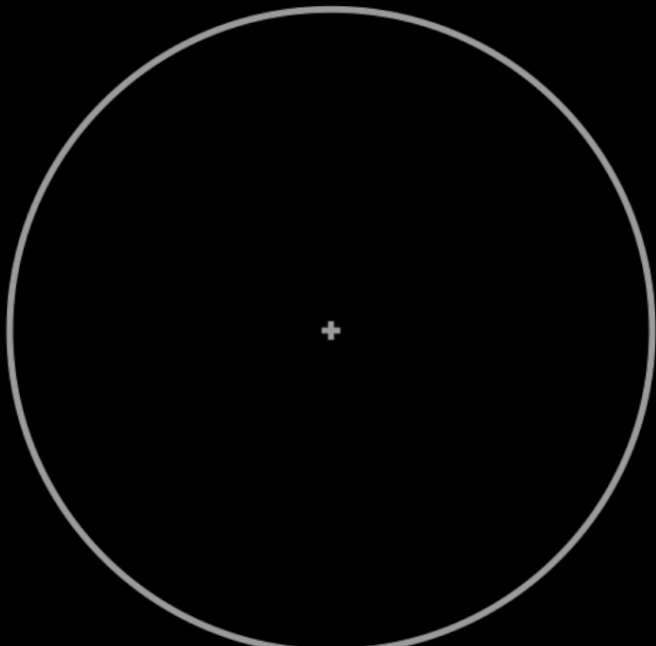
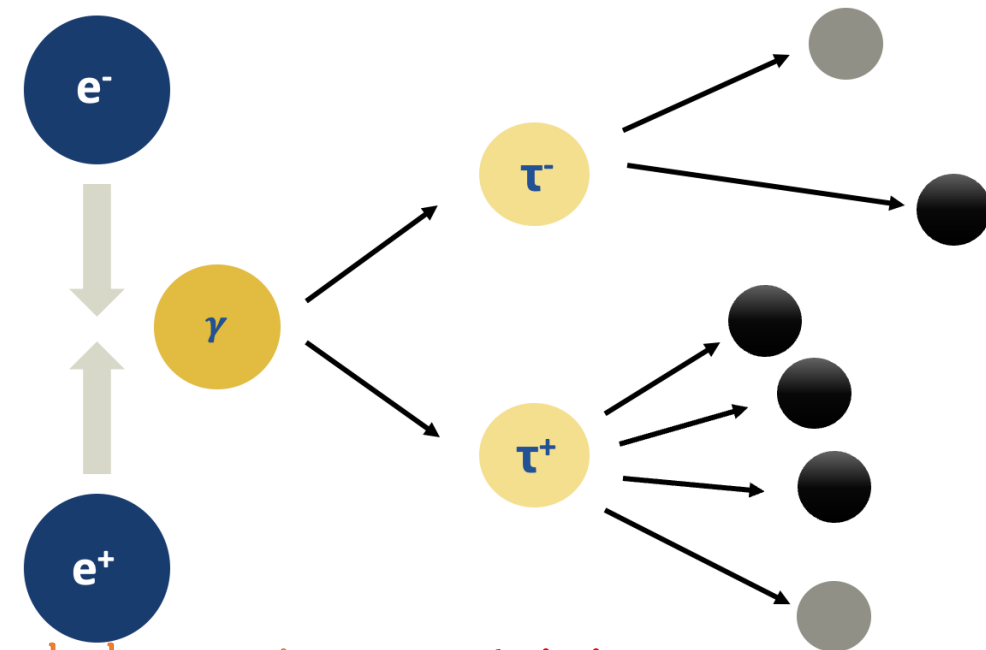
Eventi tau antitau



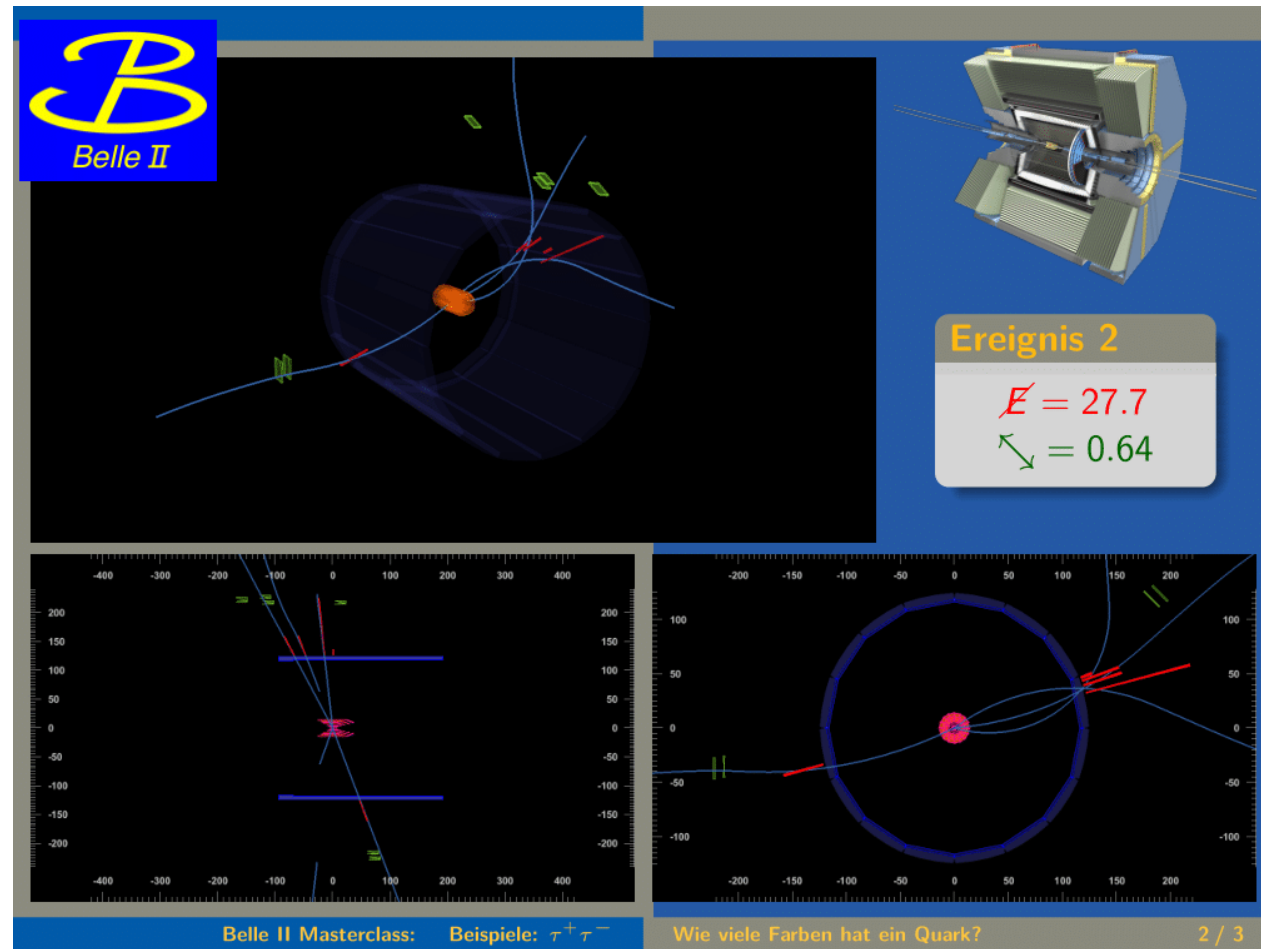
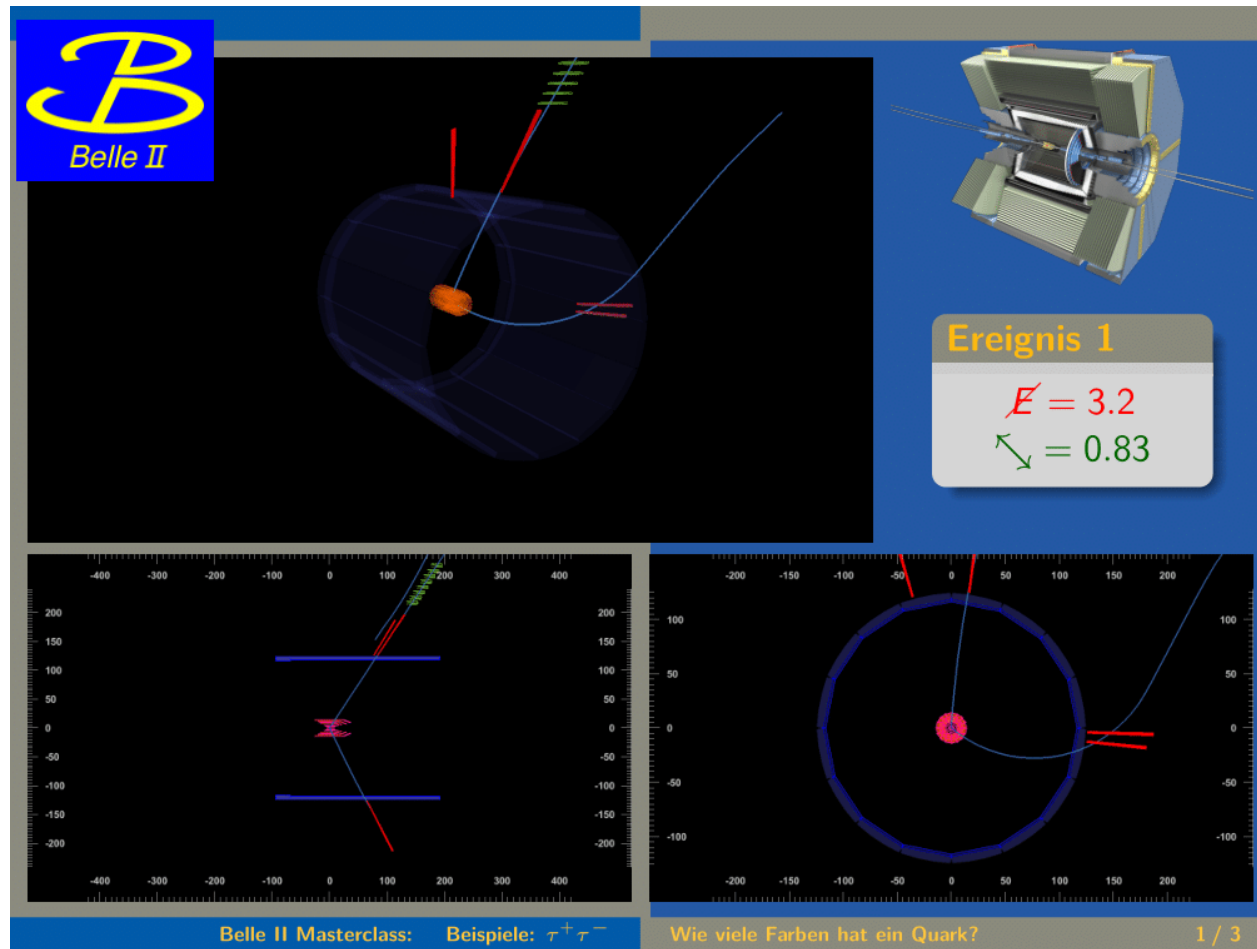
Eventi tau antitau

- I tau **decadono** poco dopo la loro creazione nel detector
- Ci sono molte possibilità di decadimenti
- In leptoni carichi + neutrini

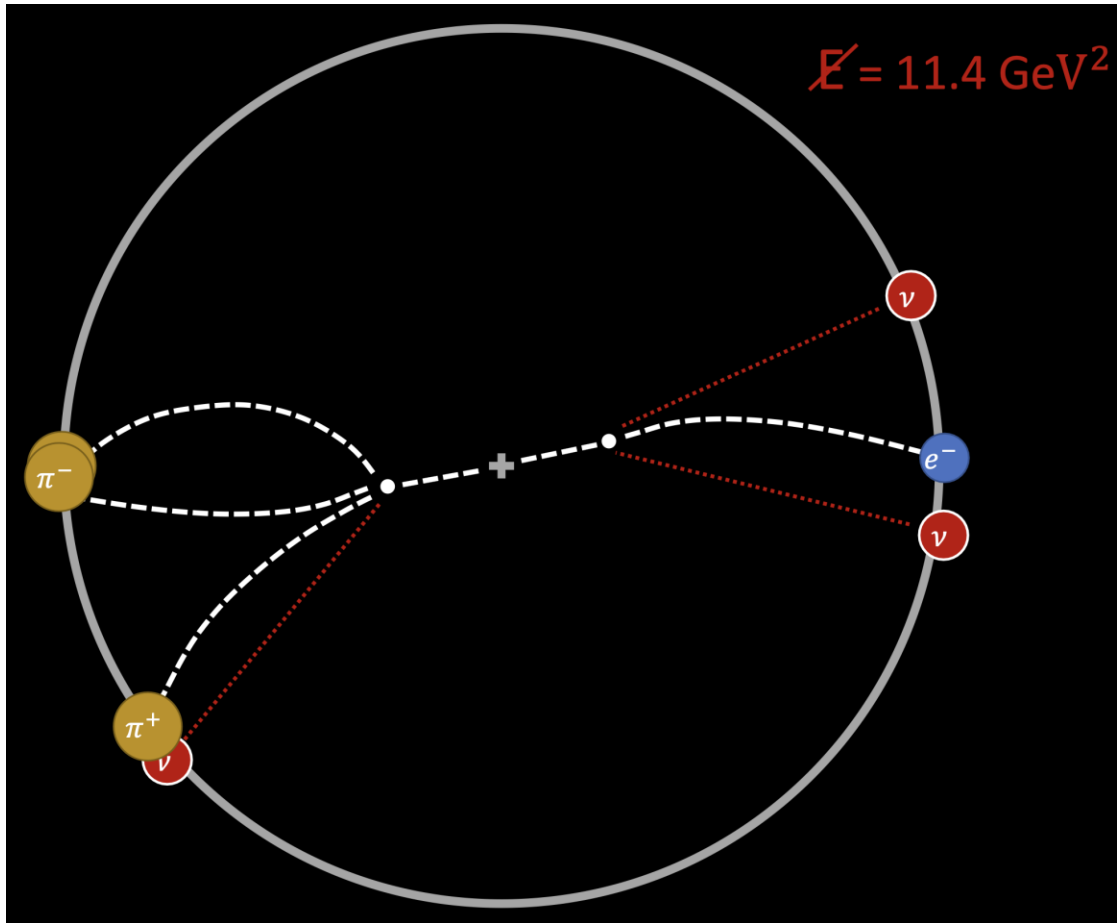
- In quark leggeri + neutrini



Eventi tau antitau

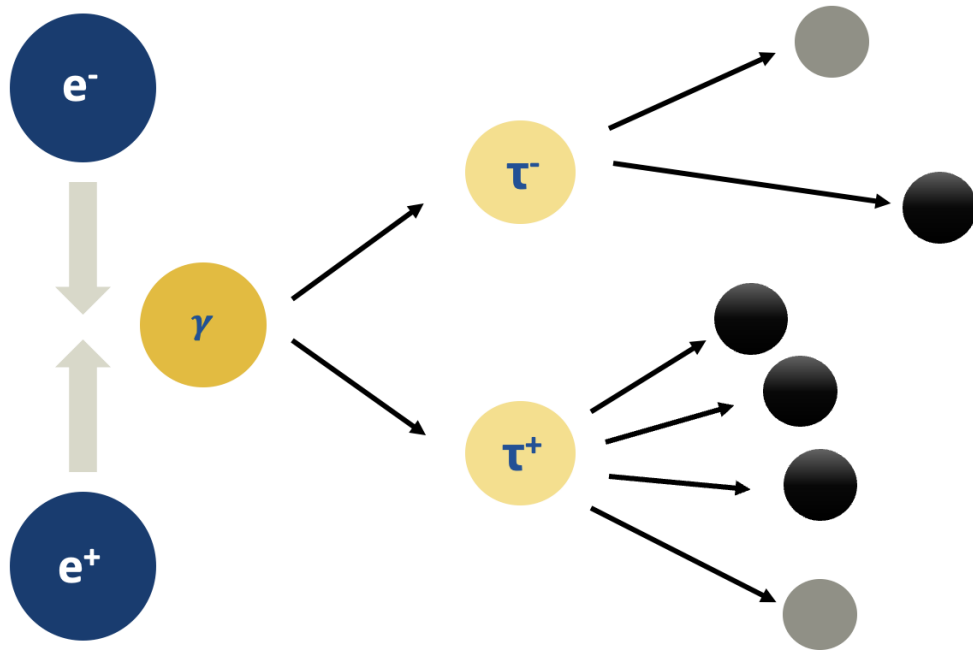


Energia mancante: ~~E~~



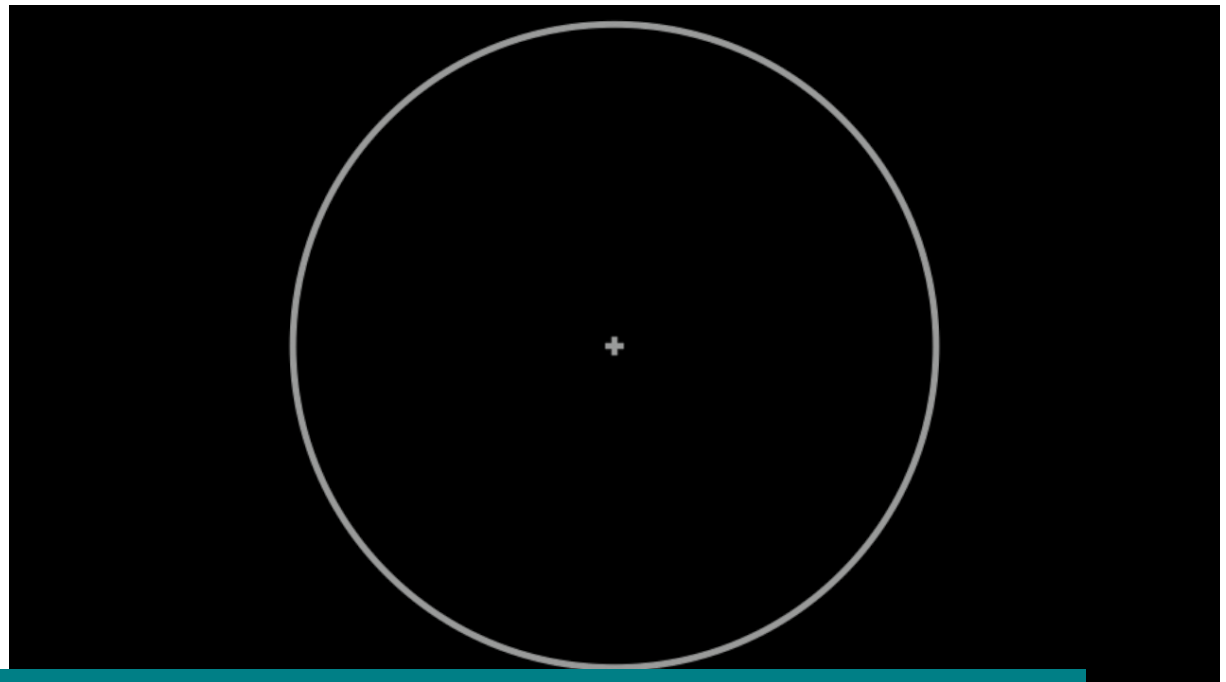
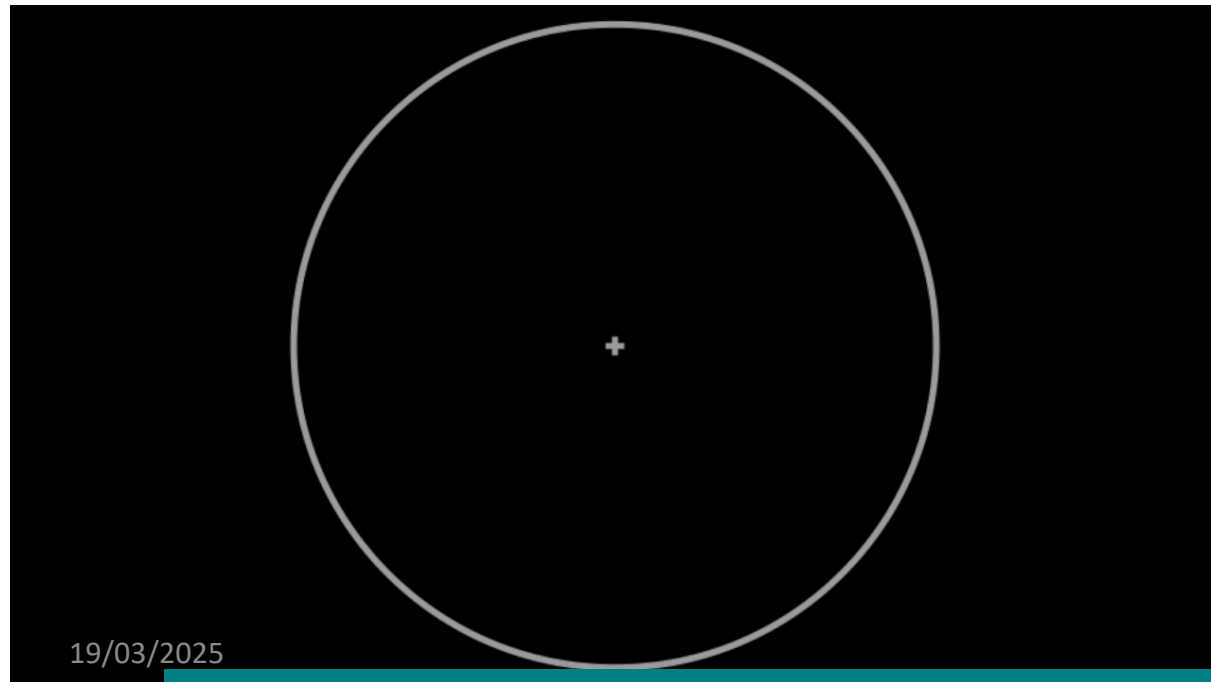
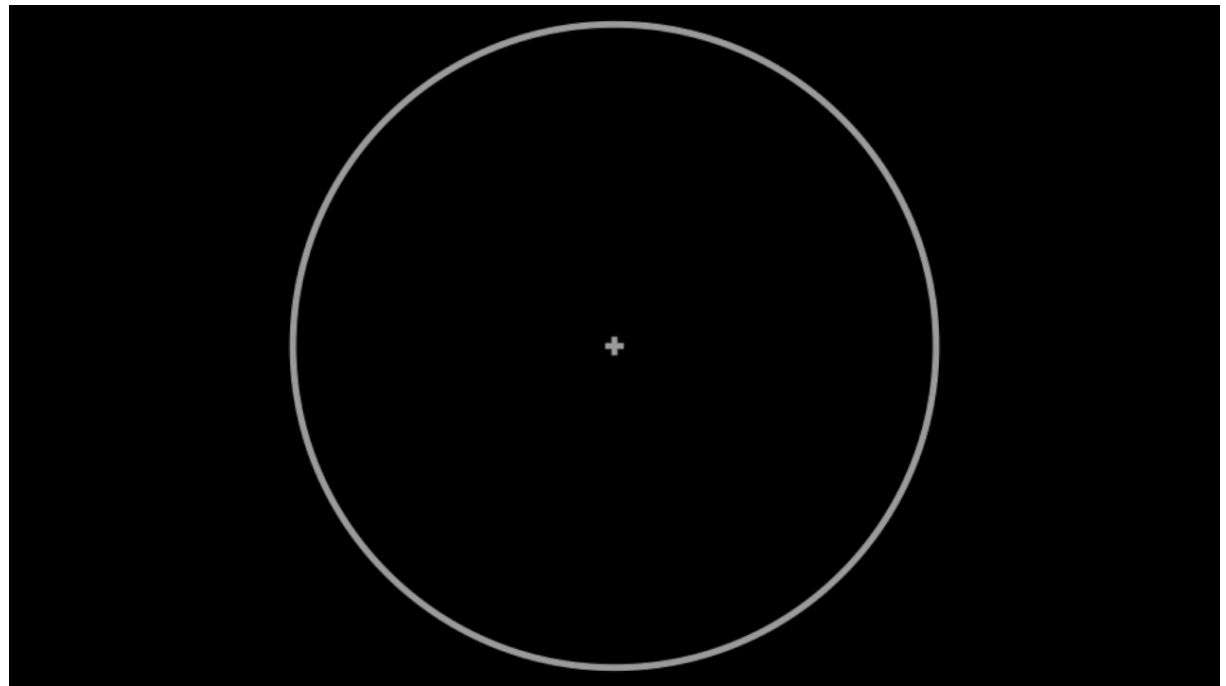
- **I neutrini non interagiscono** e quindi non possono essere rivelati $\rightarrow$ Ci sono particelle mancanti
- Noi sappiamo che l'energia iniziale deve essere uguale a quella finale
- **Conservazione di energia/momento**
 $\rightarrow \cancel{E}$

Eventi tau antitau



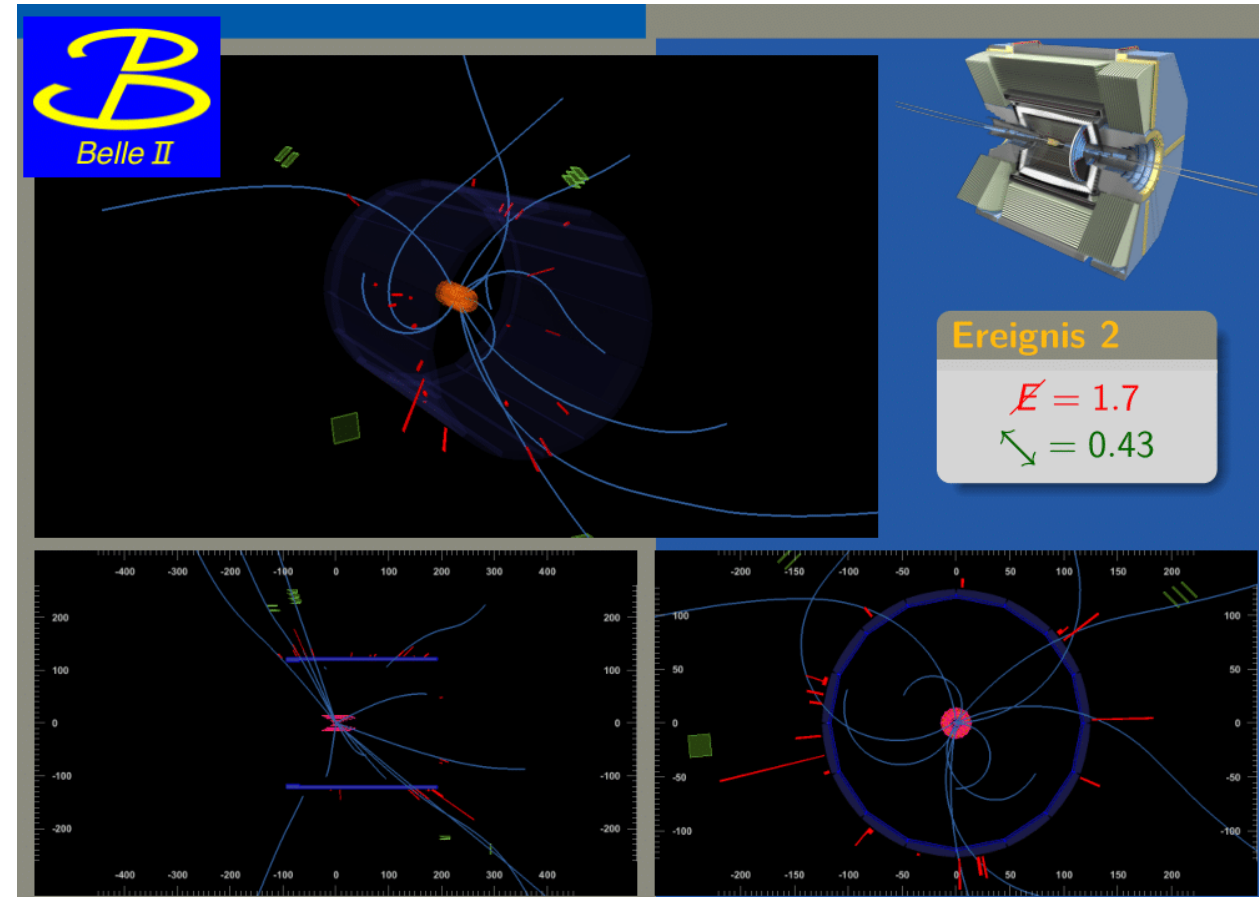
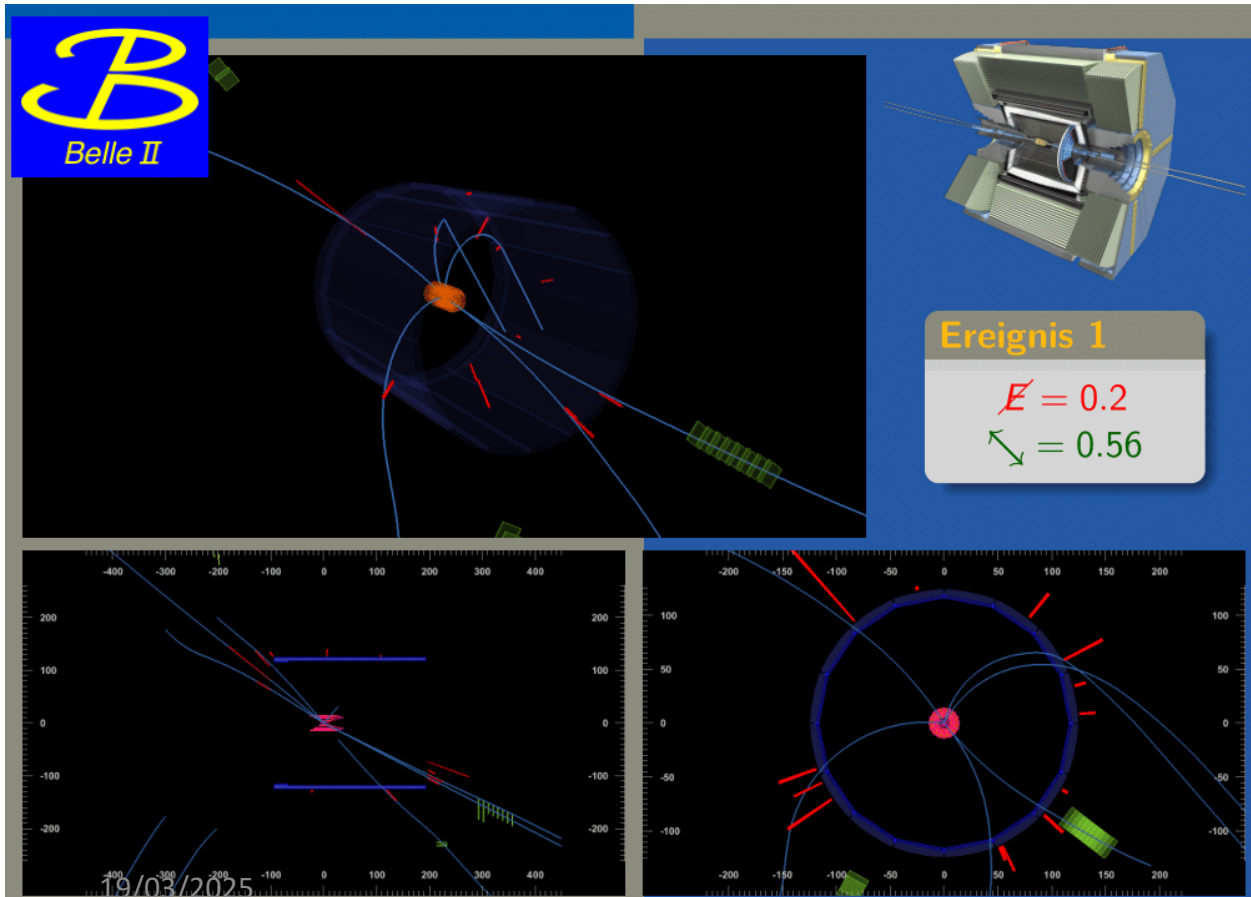
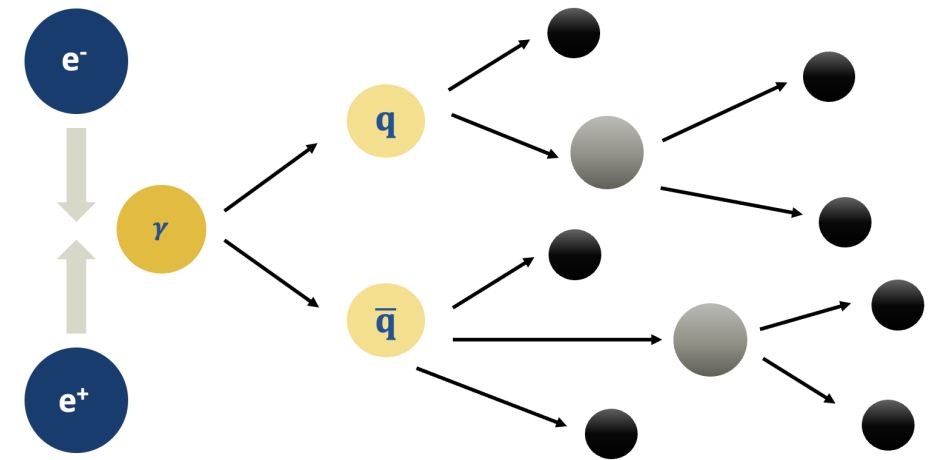
- I decadimenti **non** causano un numero unico di tracce
 - **2 o 4 (+ strutture a forchetta)** sono i più frequenti
- A seconda del decadimento, c'è deposito energetico nel detector di muoni
- **Grande energia mancante** (dovuto dal decadimento in almeno 2 neutrini)

Eventi quark antiquark leggeri

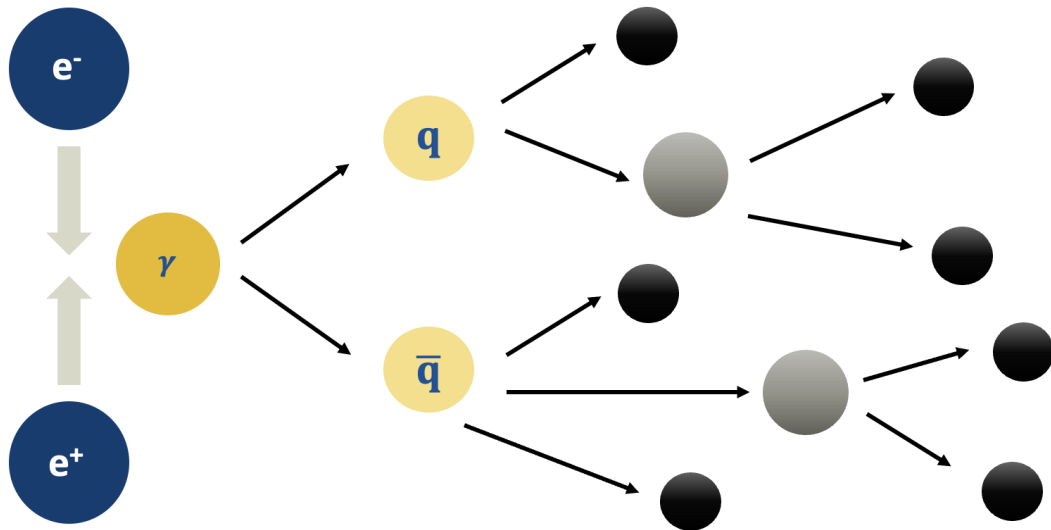


Eventi quark antiquark leggeri

- Hanno molti stati finali possibili

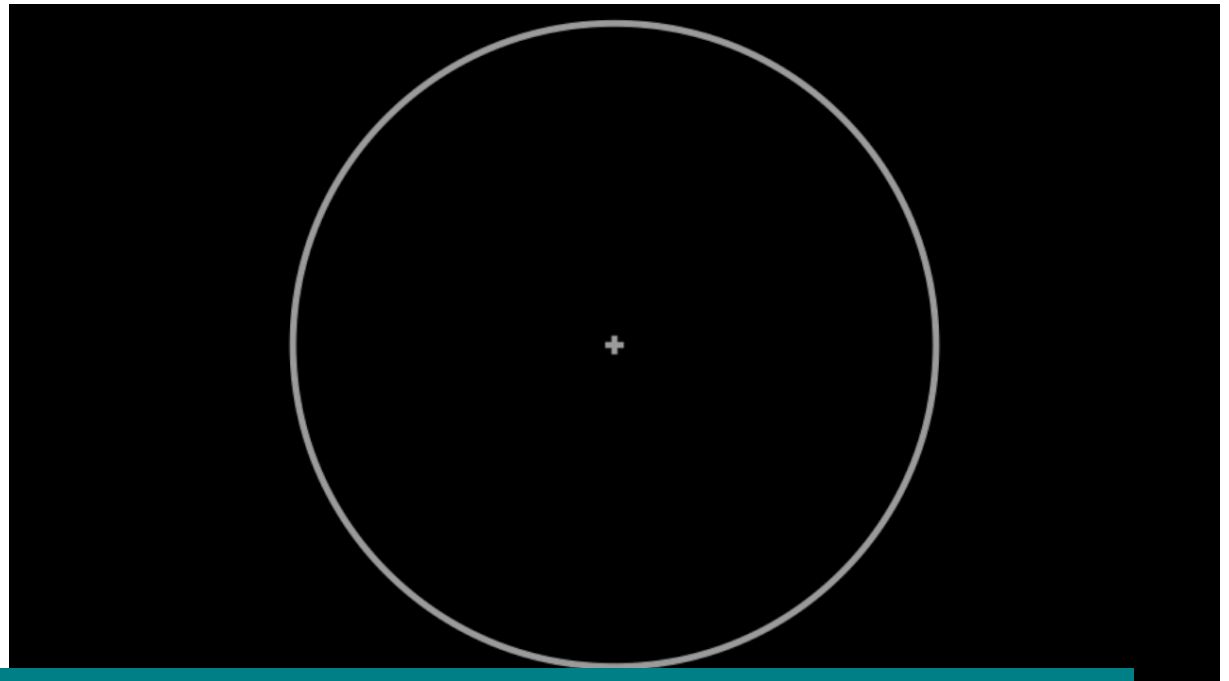
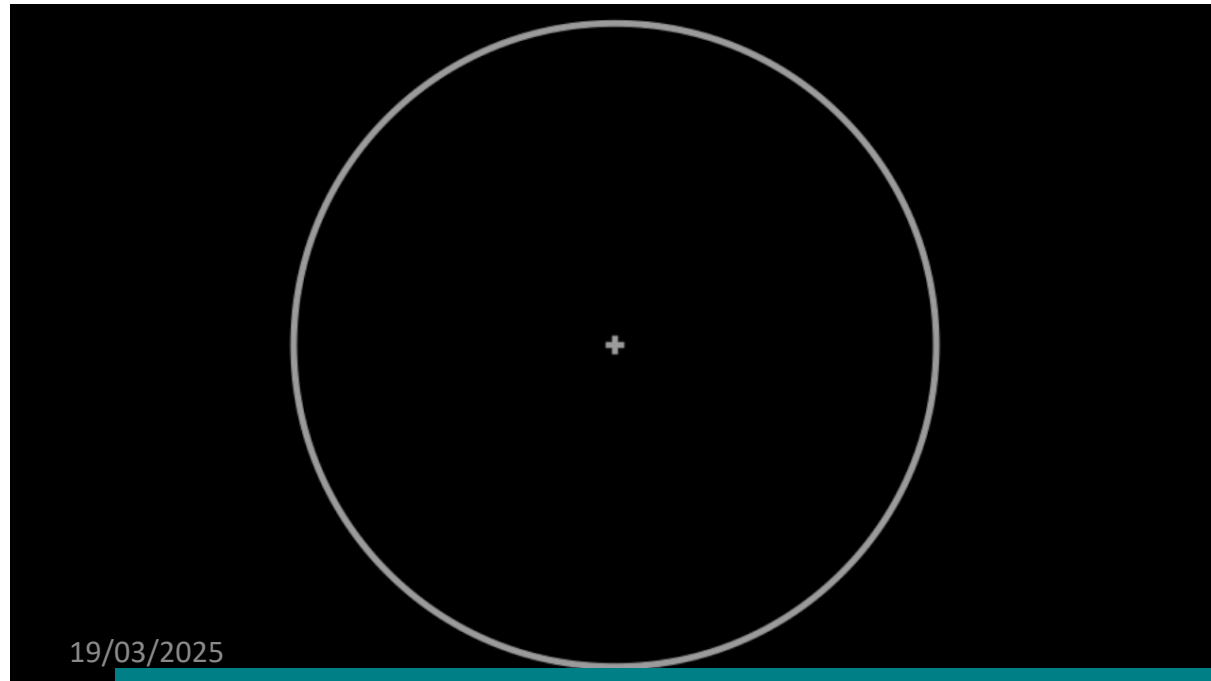
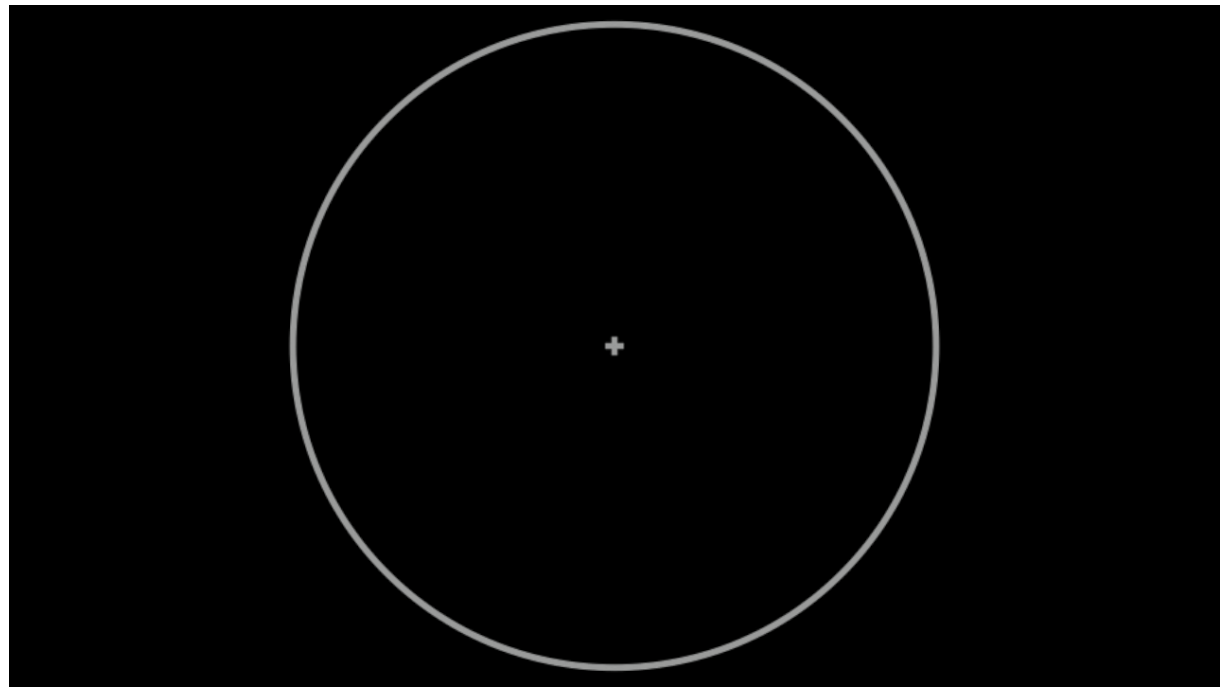


Eventi quark antiquark leggeri

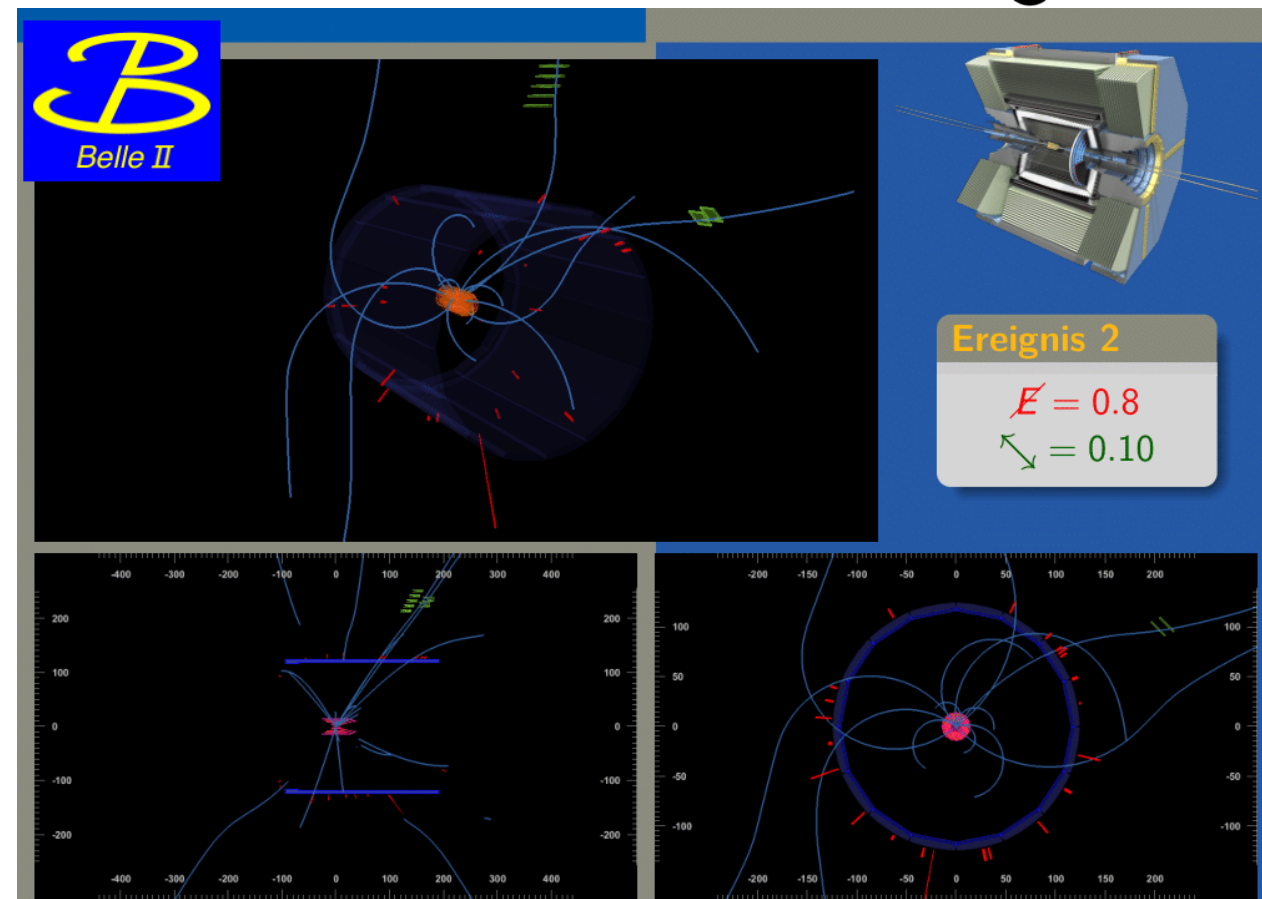
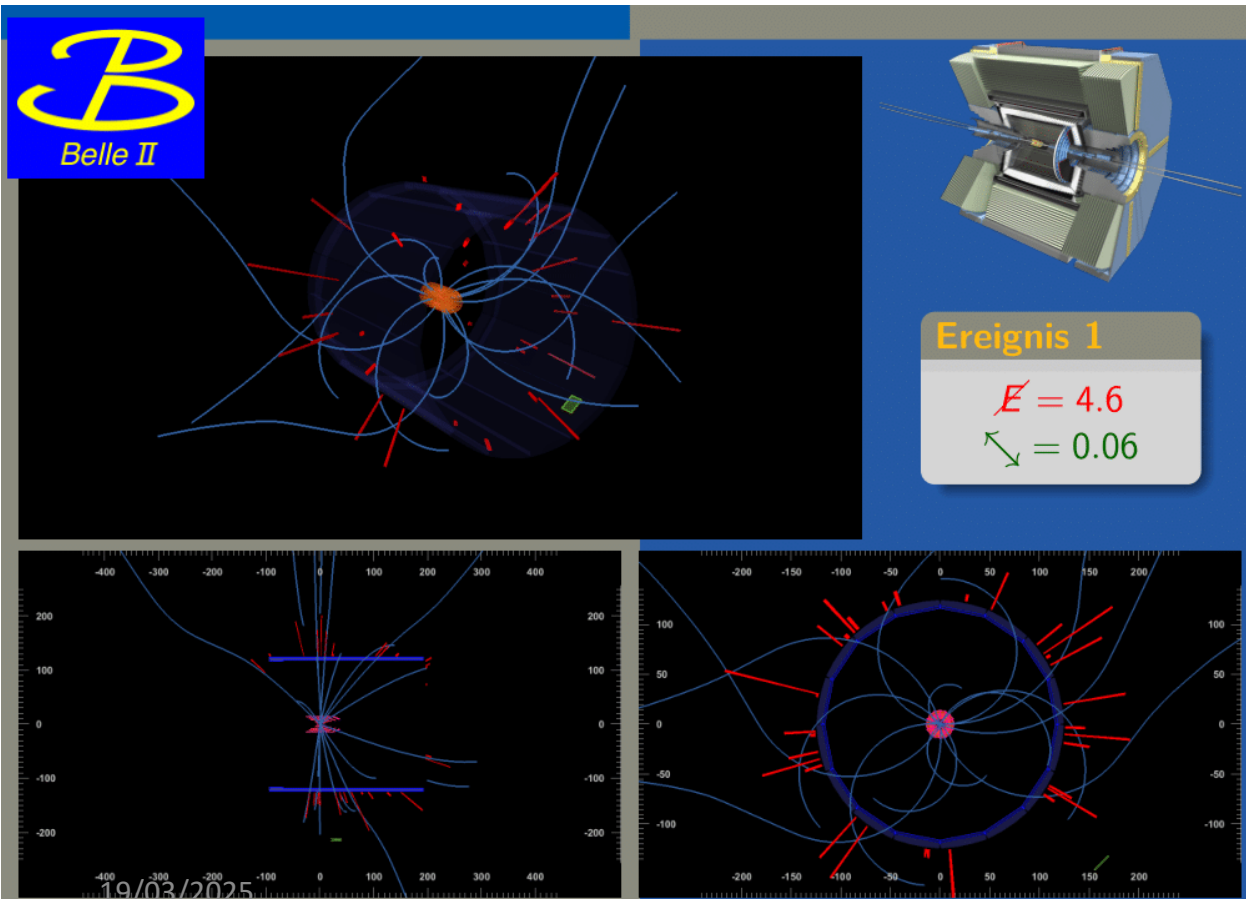
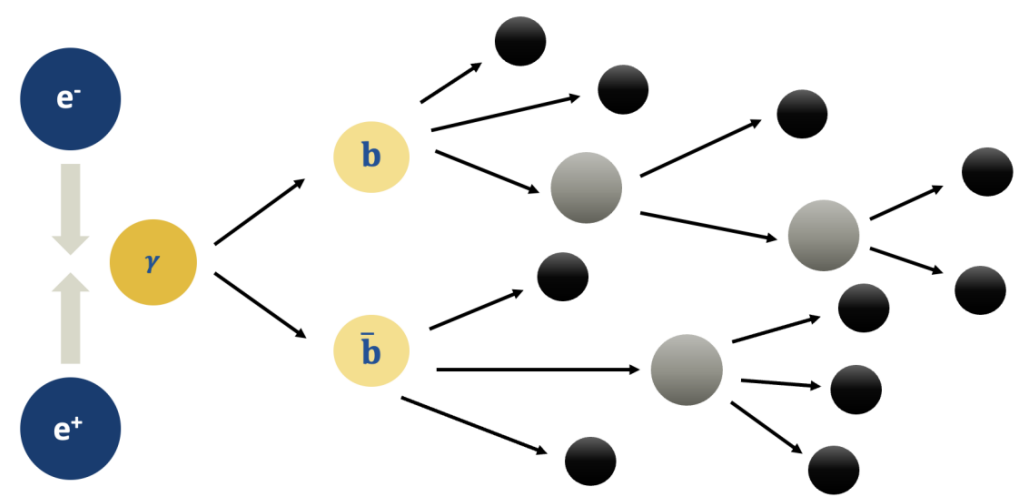


- I decadimenti **non** portano ad un unico numero di tracce
 - Spesso abbiamo un grande numero di tracce
- C'è meno energia mancante dato che non ci sono neutrini
- I decadimenti avvengono in più direzioni rispetto ai leptoni (che spesso formano una linea retta)

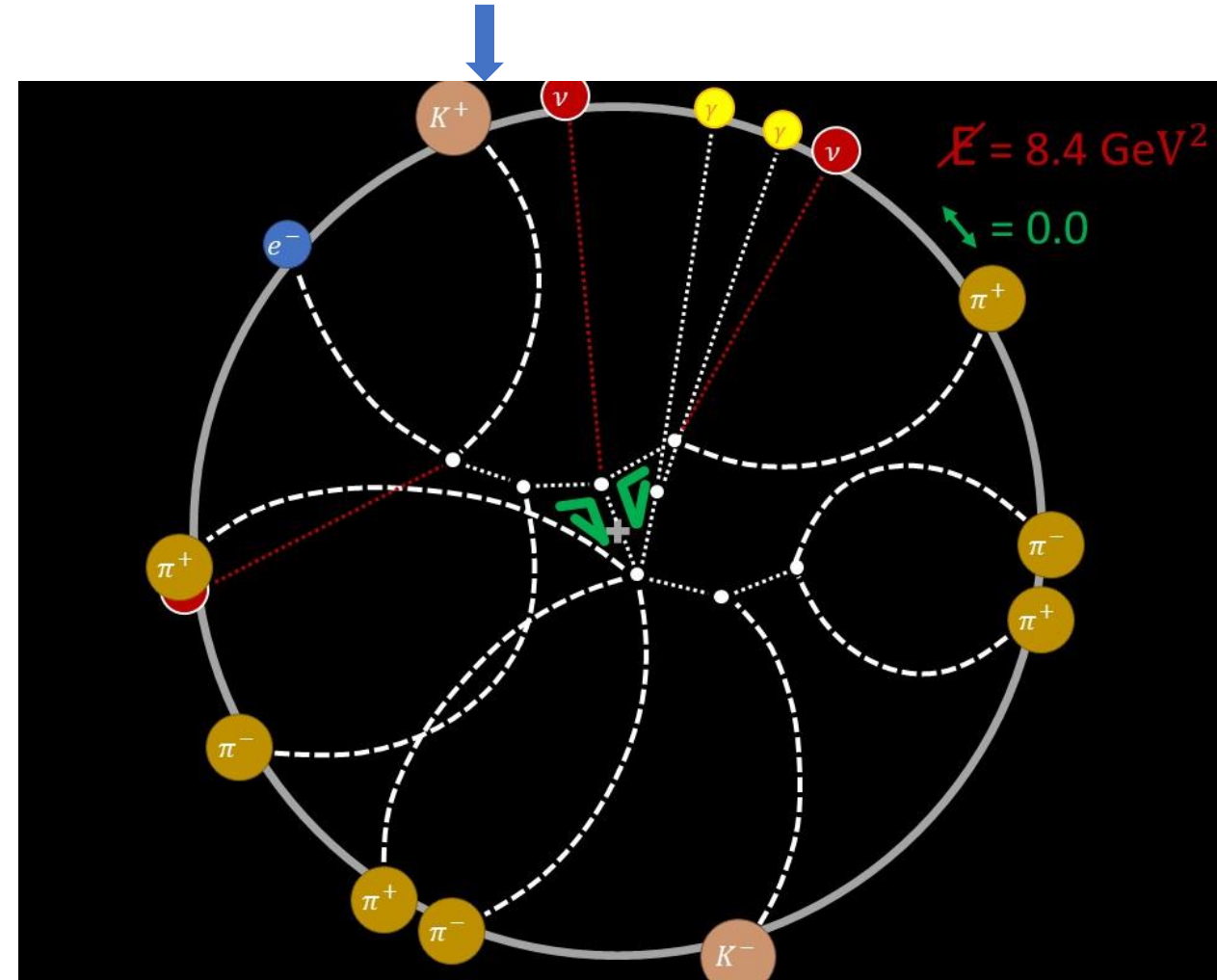
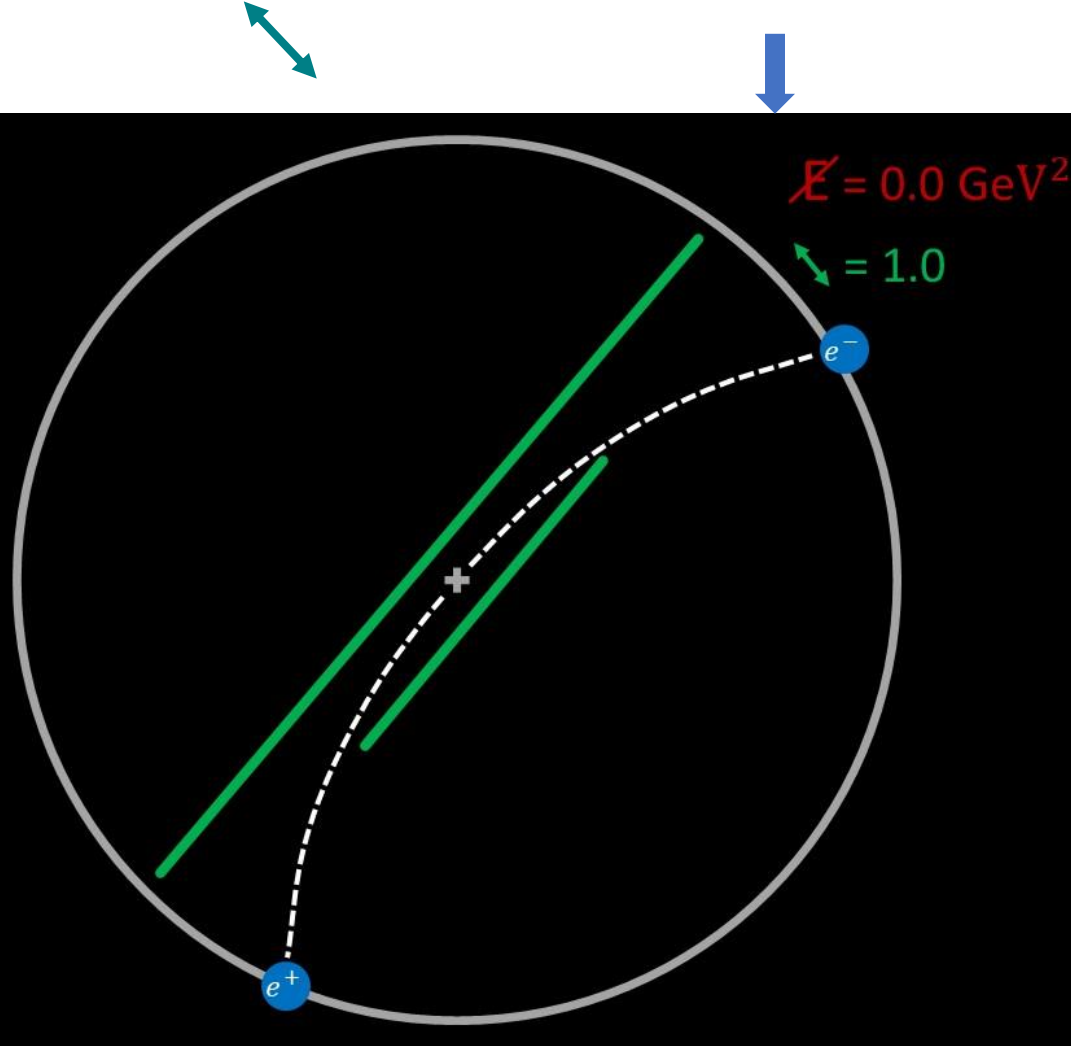
Eventi b anti- b



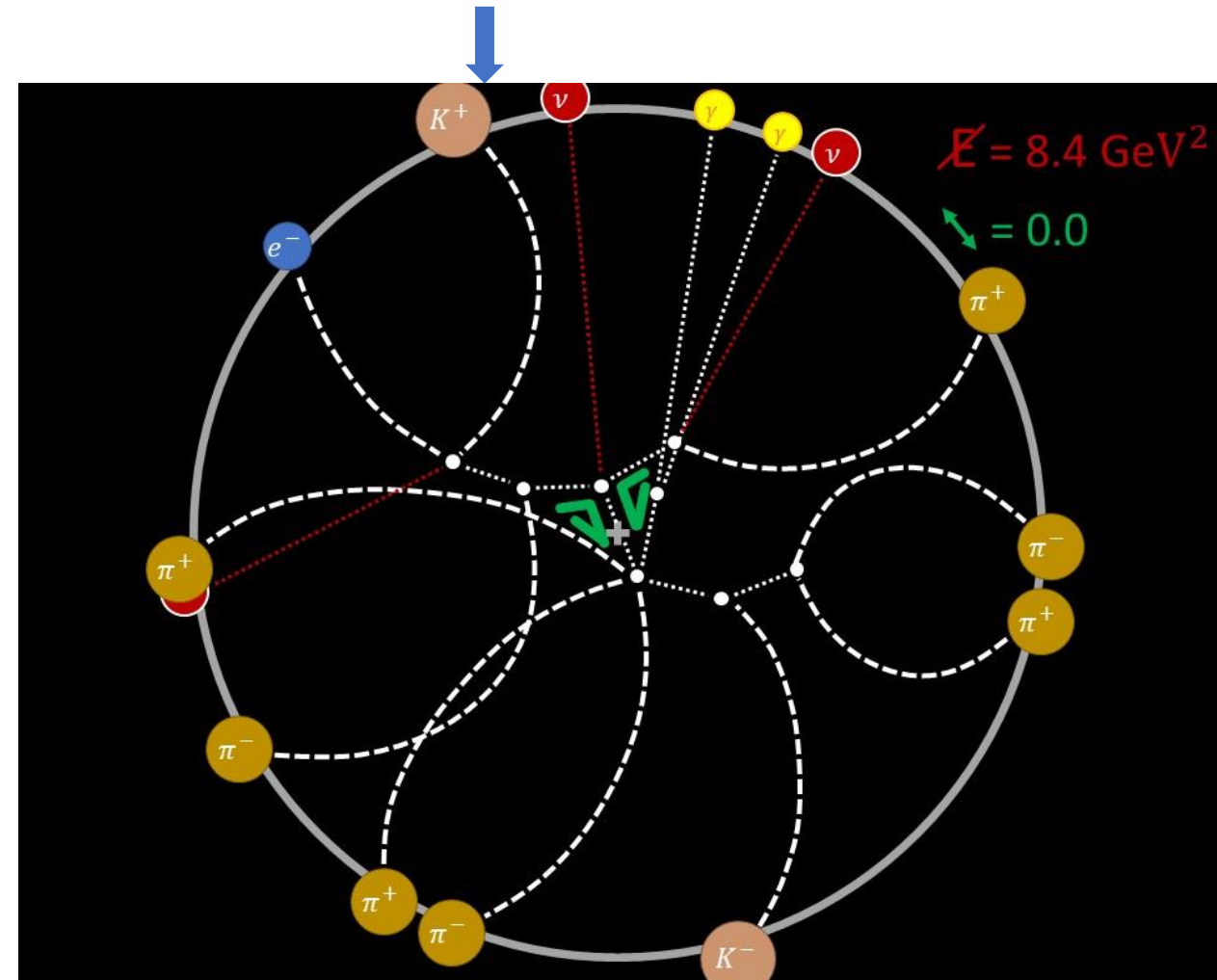
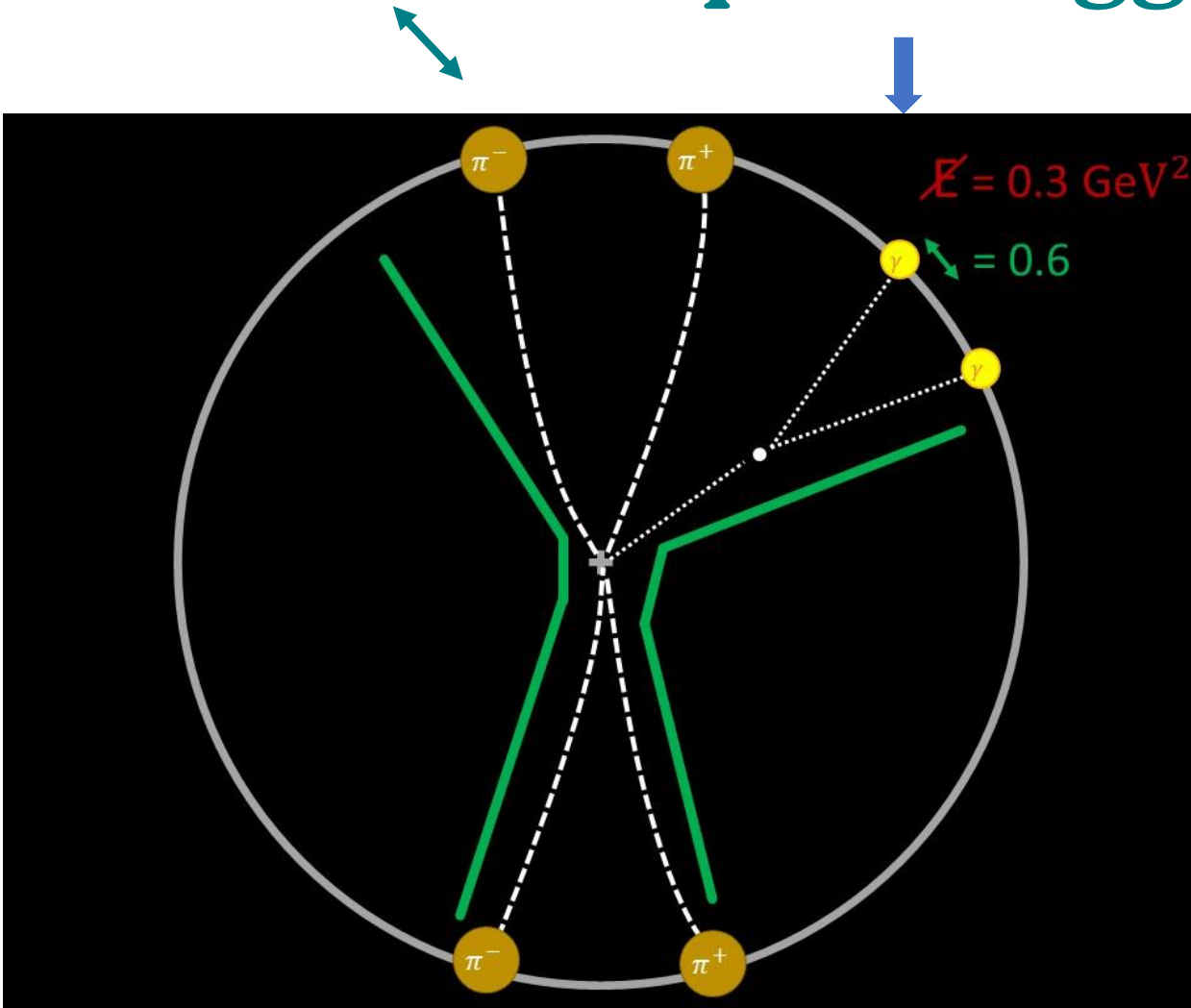
Eventi b anti-b



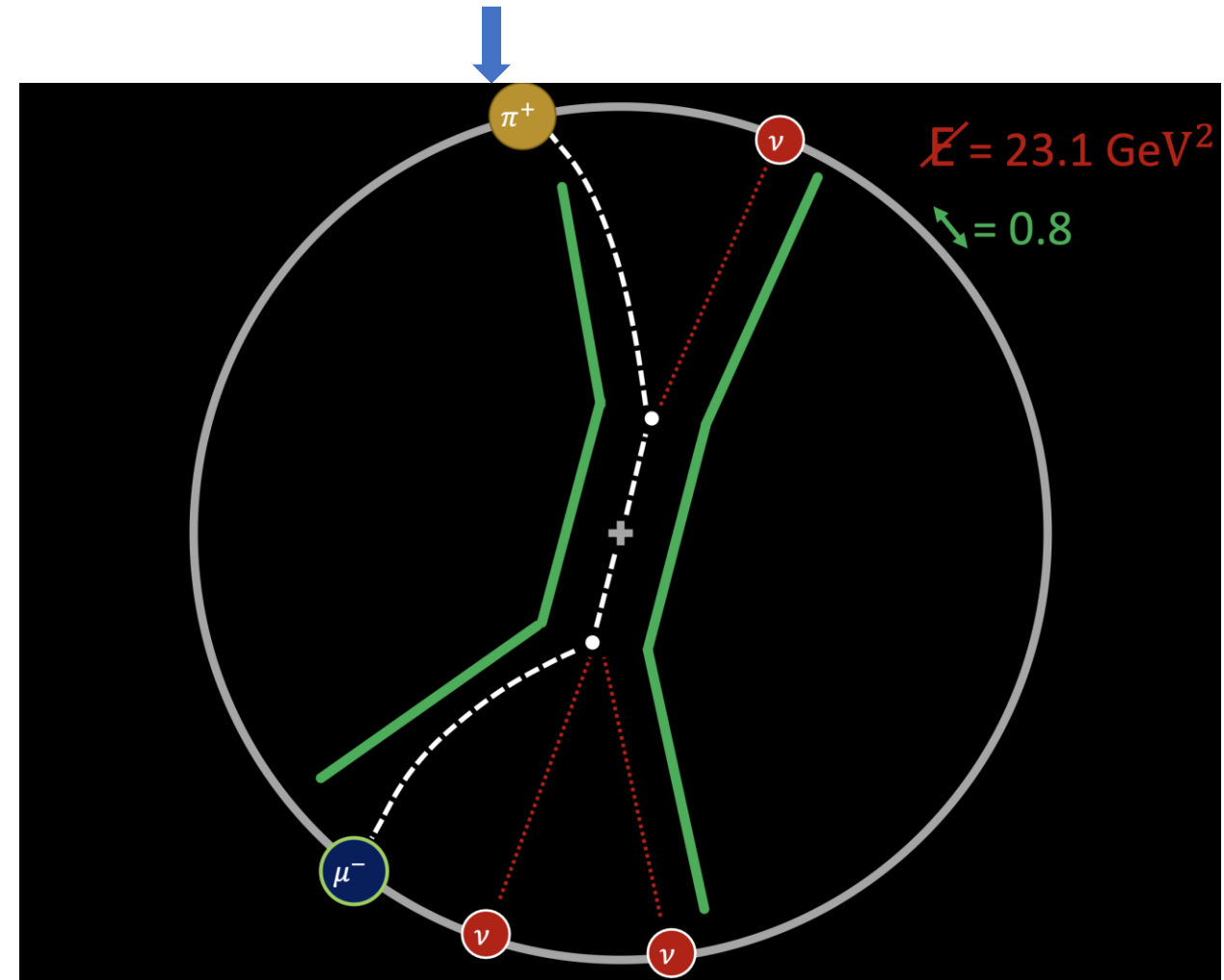
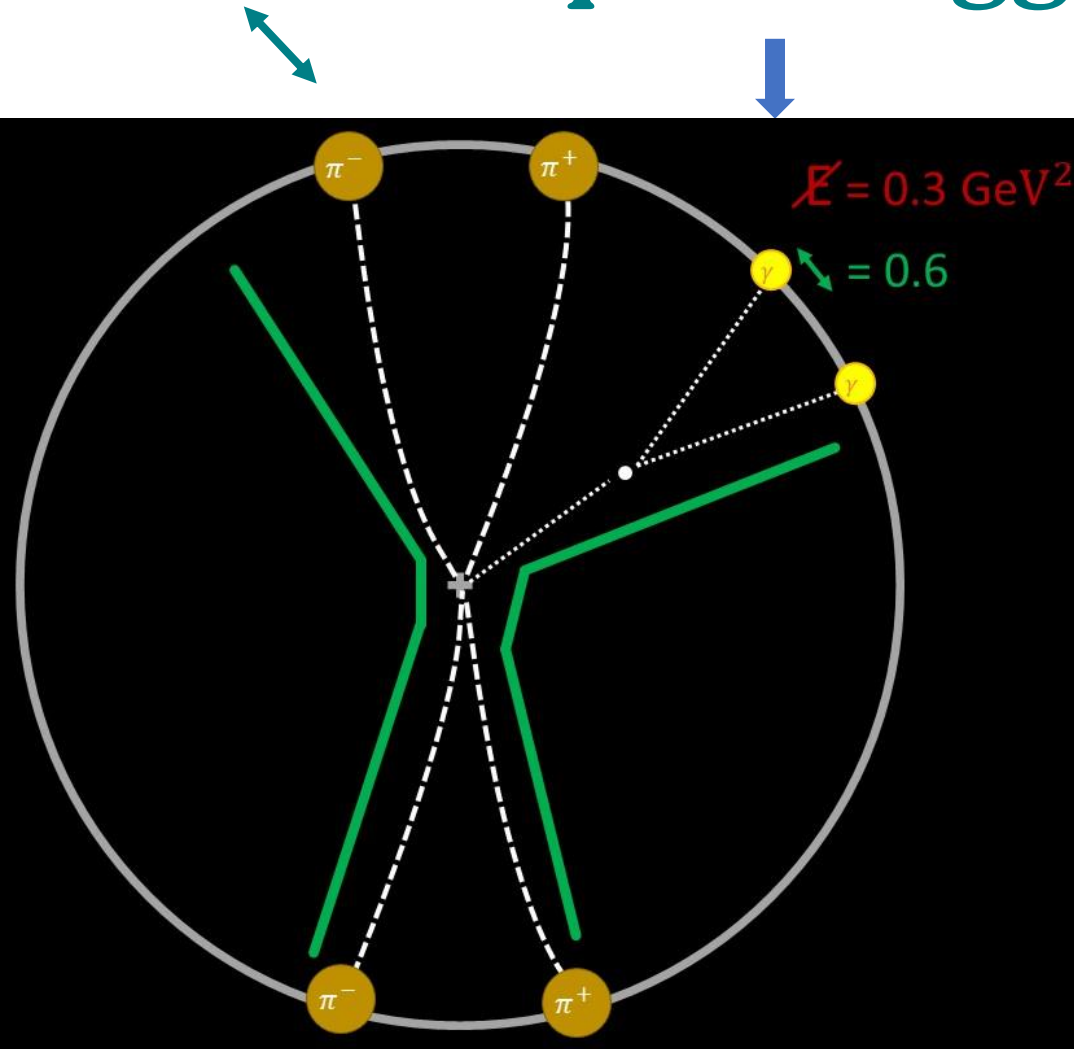
Linearità: Elettrone/Positrone VS b-antib



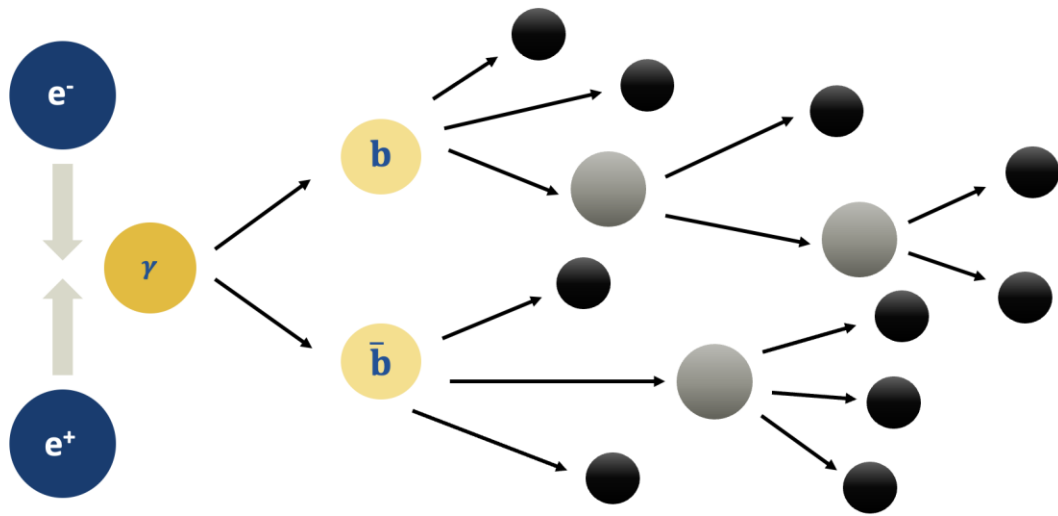
Linearità: quark leggeri VS b-antib



Linearità: quark leggeri VS tau-antitau



Eventi b anti- b



- Particelle più **pesanti** possibili
 - Hanno molte possibilità di decadimenti, con particelle in **tutte le direzioni**
- Energia alta $\rightarrow$ molte particelle $\rightarrow$ **molte tracce**
- **Linearità molto bassa** 

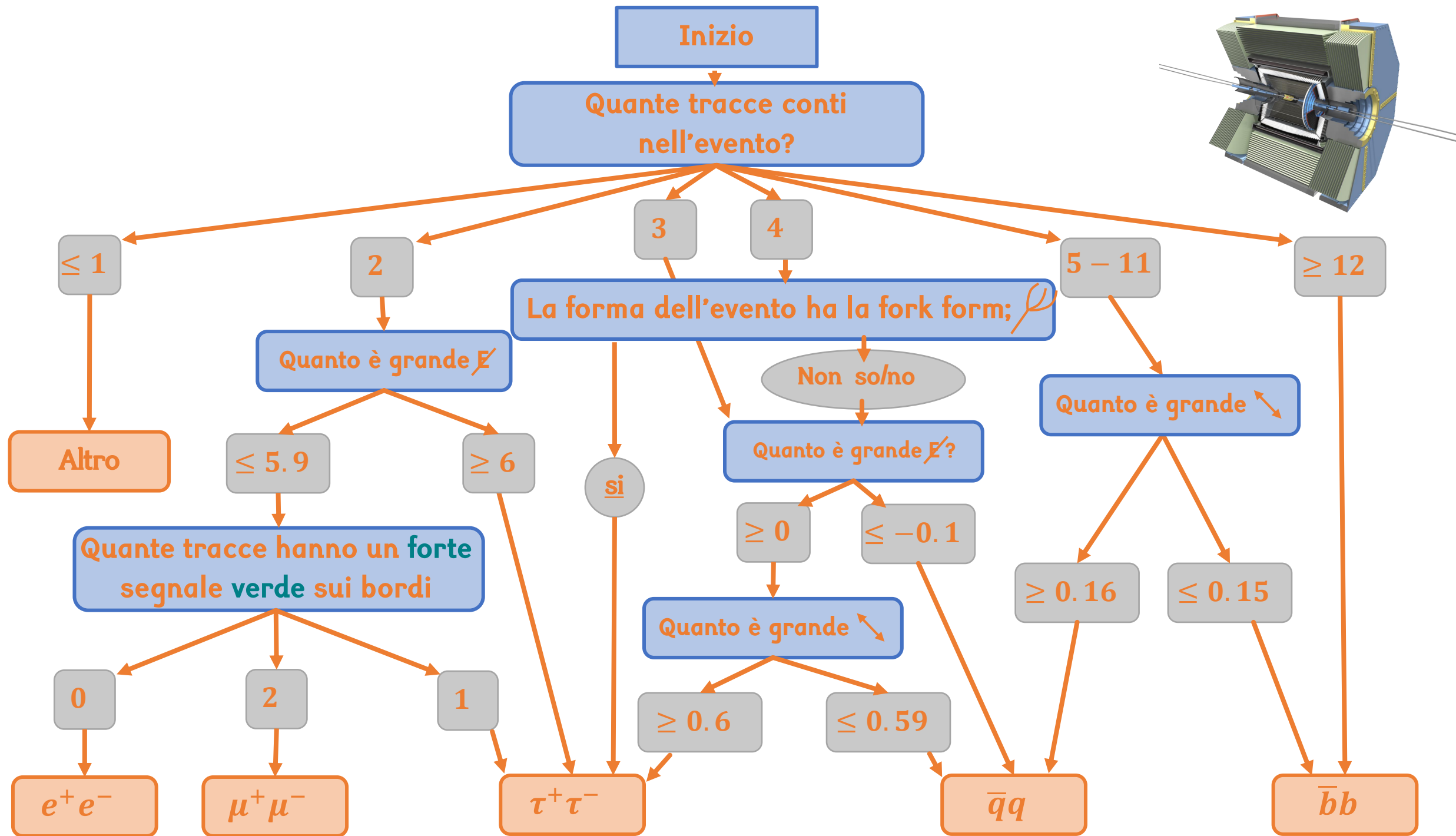
Eventi b anti-b

I quark b e anti-b non sono considerati nell'equazione del valore R

$$R = \frac{N(\text{light quarks})}{\frac{1}{2} \cdot [N(\mu) + N(\tau)]} = N_c \cdot \frac{10}{9}$$

Belle II è una **B factory**: la produzione di pesanti “mesoni B” con quark b viene favorita (non è come gli altri quark leggeri)

Ricapitoliamo



Adesso tocca a te
