

# L'esperienza ALICE

## 2023 ALICE Masterclass

Pietro Antonioli  
Francesca Ercolessi  
Nicolò Jacazio  
Giovanni Malfattore  
Sofia Strazzi



# L'acceleratore LHC

Il *Large Hadron Collider* (LHC) è un acceleratore di adroni che si estende per circa 27 km

Gli adroni si muovono ad una velocità prossima a quella della luce in direzioni opposte e vengono fatti scontrare in 4 punti di collisione, in cui sono localizzati i 4 esperimenti:

- ATLAS
- CMS
- LHCb
- **ALICE**



ALICE

# L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)



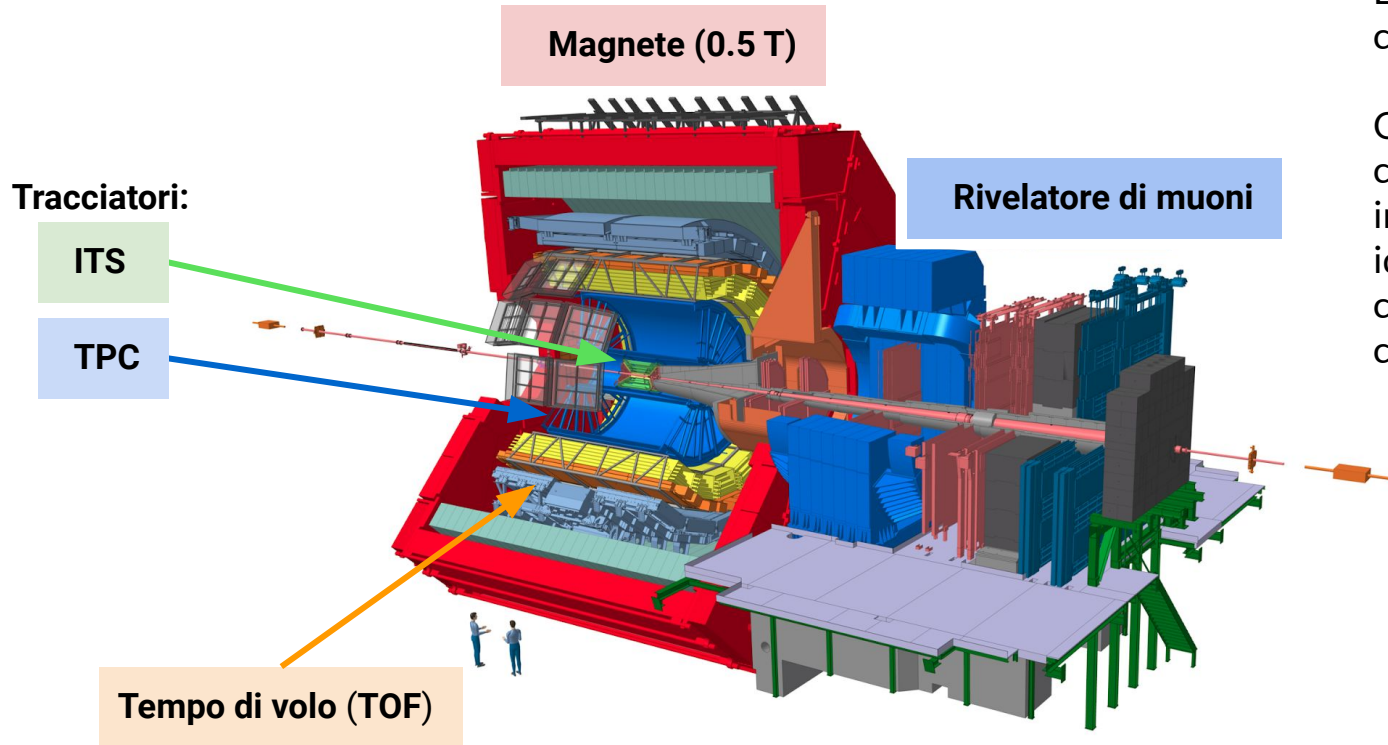
# ALICE

A JOURNEY OF DISCOVERY



**Curiosity often leads to trouble.**

# L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)



L'esperimento ALICE è composto da vari rivelatori

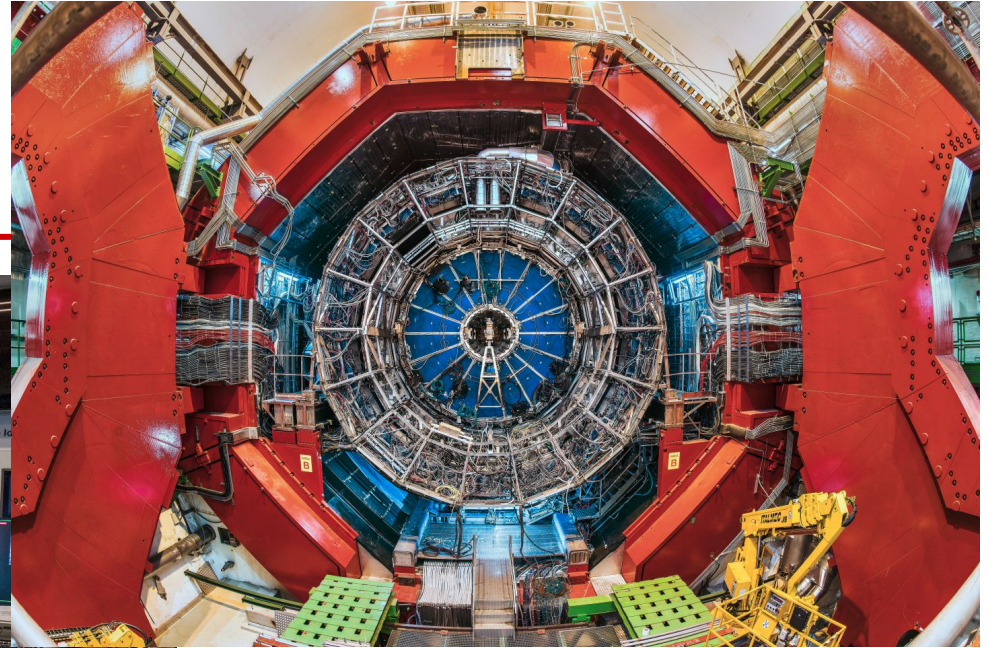
Ognuno di questi contribuisce a fornire informazioni chiave per identificare le particelle che vengono create nelle collisioni

# ALICE da vicino

---

ALICE control room

---



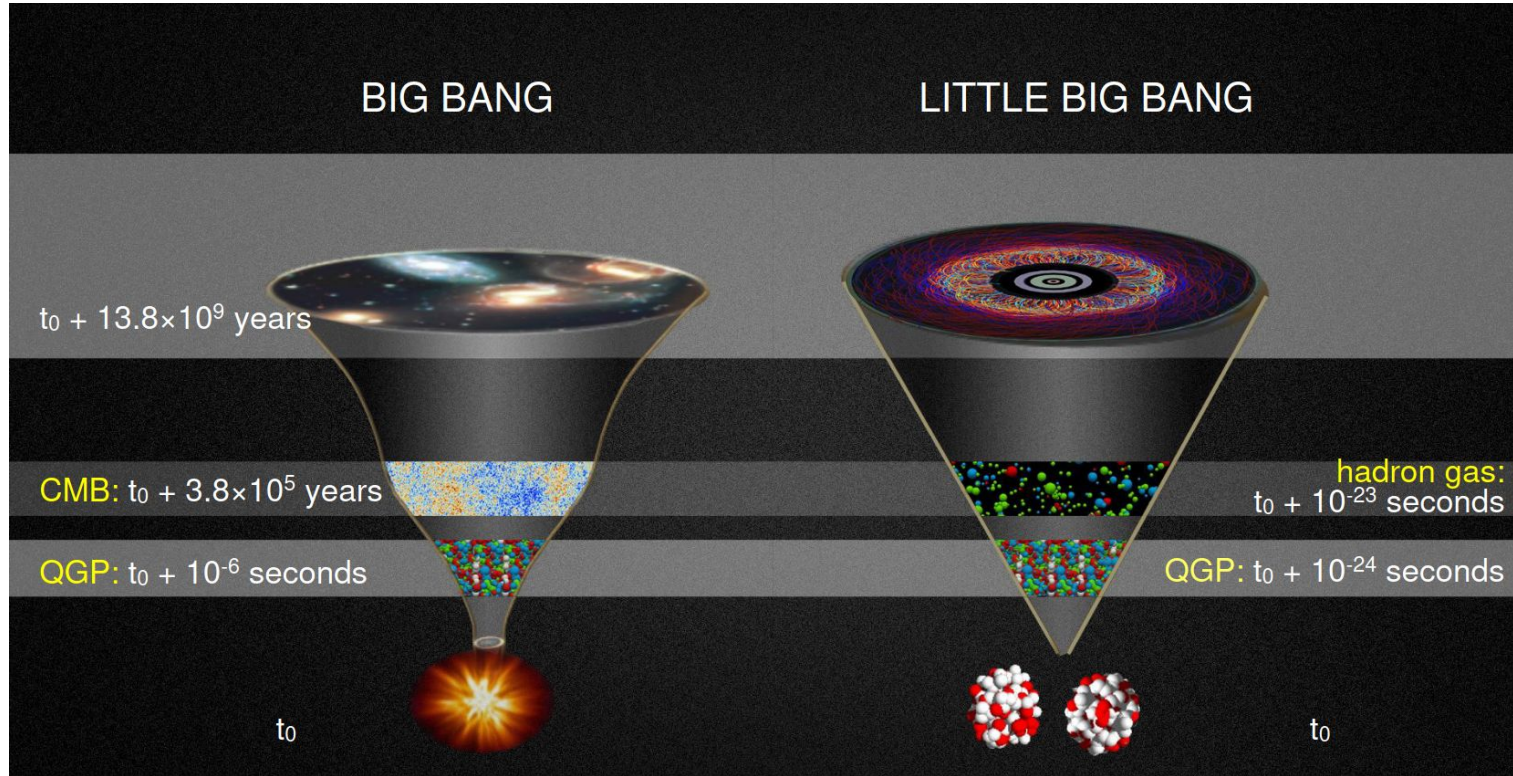
ALICE cavern

# ALICE da vicino

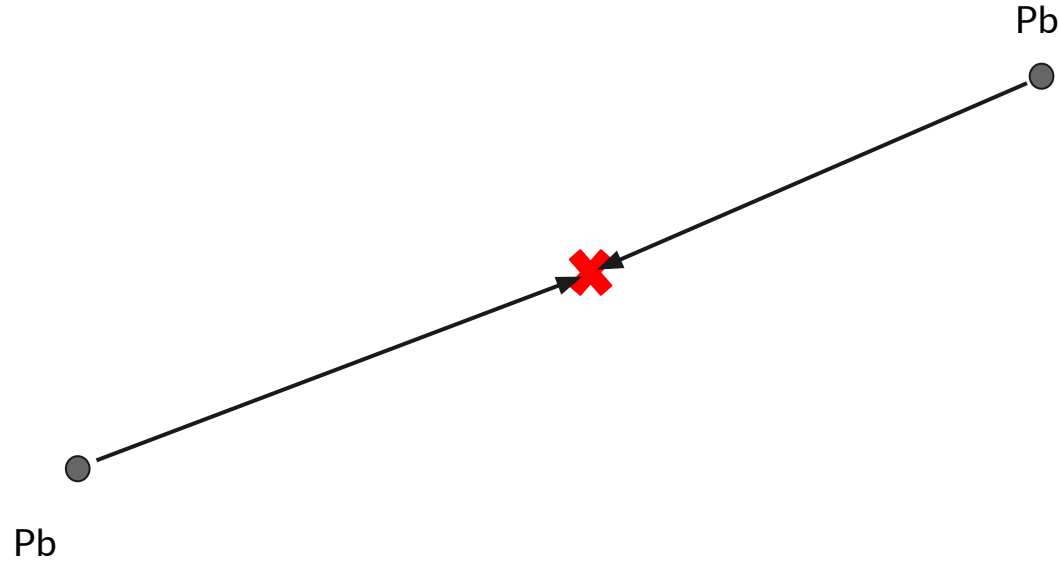


Flying over ALICE: <https://www.youtube.com/watch?v=yWBWzIUCNpw>

# Big (little) BANG!

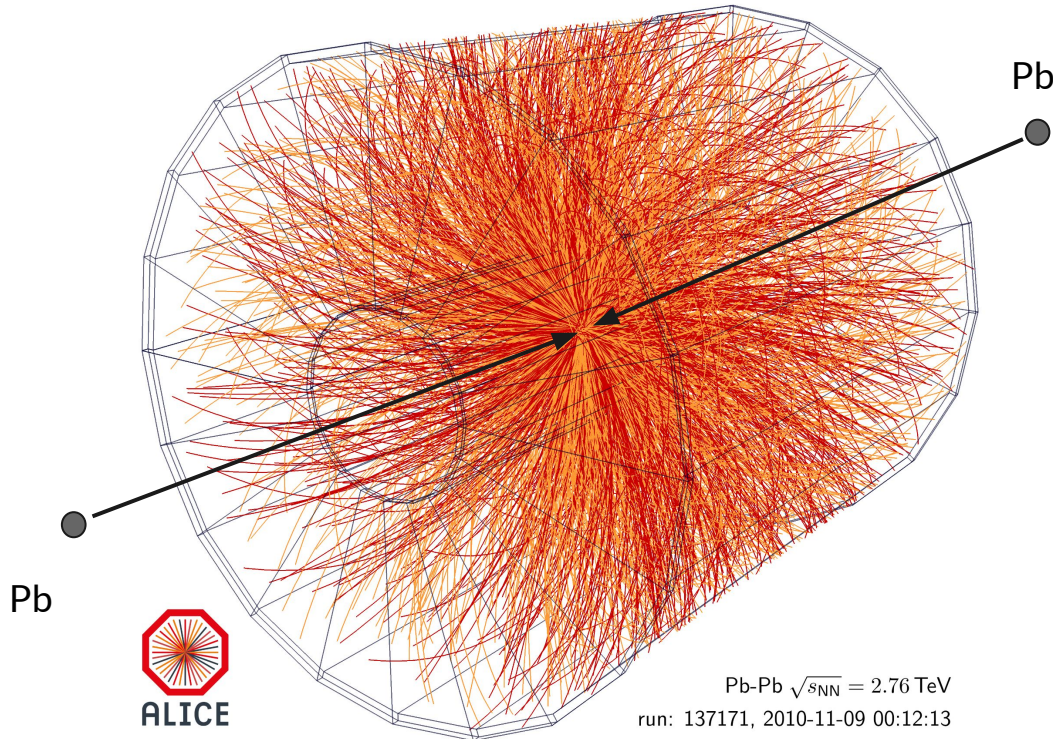


# Come si presentano i prodotti di questa collisione?





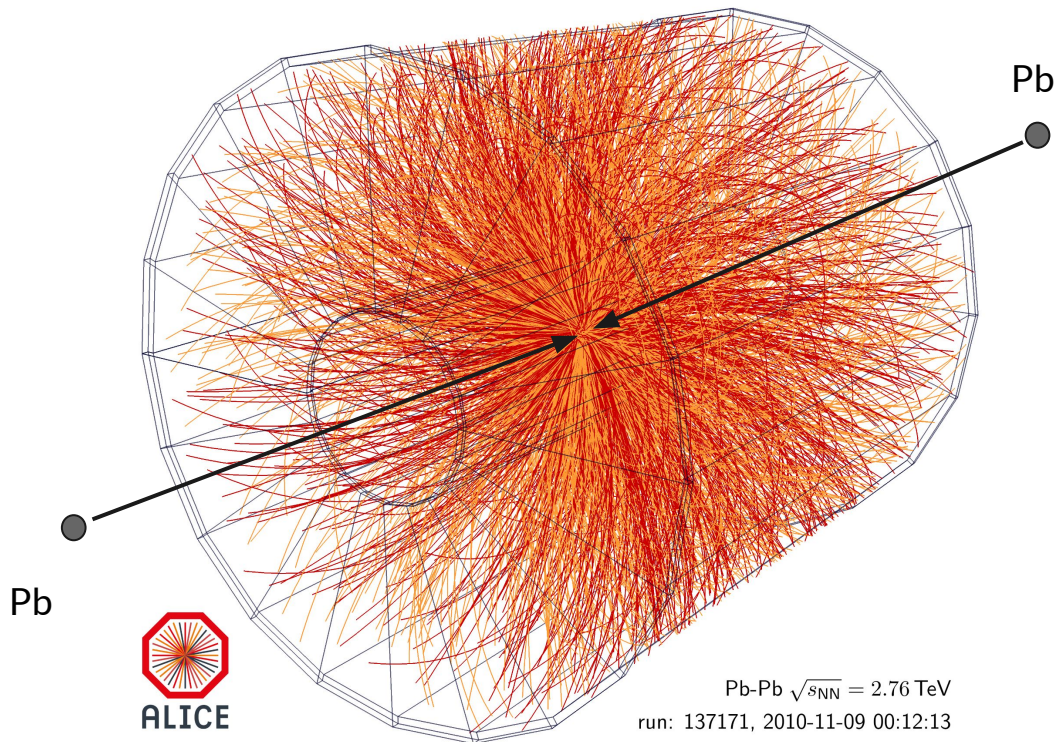
# Come si presentano i prodotti di questa collisione?



*Event display:*  
migliaia di tracce!

Come riconoscere per ognuna  
queste tracce di quale  
particella di tratta?

# Come si presentano i prodotti di questa collisione?

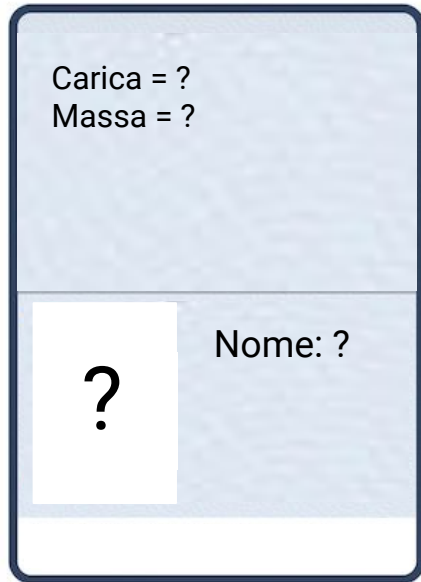


*Event display:*  
migliaia di tracce!

Come riconoscere per ognuna  
queste tracce di quale  
particella di tratta?



# Cosa significa identificare una particella



Per identificare una particella dobbiamo conoscerne *carica* e *massa*

***carica:***

misura diretta → curvatura della traccia nel campo magnetico

***massa:***

misura indiretta → tramite **impulso** e **velocità** della particella

# Impulso di una particella

Per “impulso” intendiamo la quantità di moto di una particella che in fisica classica è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Quando però il modulo della velocità  $v$  è vicino alla velocità della luce  $c$  gli effetti relativistici non sono trascurabili e la formula corretta è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

$$\beta = v/c$$

In fisica delle particelle lavoriamo utilizzando un'unità di misura più “comode”

- Energia = espressa in elettronvolt (eV) o suoi multipli (keV, MeV, GeV)

Energia acquisita da un elettrone che si muove nel vuoto tra due punti tra i quali c'è una differenza di potenziale elettrostatico di 1 volt. **1eV ~ 1,6 x 10<sup>-19</sup> J**

# Impulso di una particella

Per “impulso” intendiamo la quantità di moto di una particella che in fisica classica è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Quando però il modulo della velocità  $v$  è vicino alla velocità della luce  $c$  gli effetti relativistici non sono trascurabili e la formula corretta è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

$$\beta = v/c$$

In fisica delle particelle lavoriamo utilizzando un'unità di misura più “comode”

- Energia = espressa in elettronvolt (eV) o suoi multipli (keV, MeV, GeV)
- Impulso = Energia / velocità = eV/c
- Massa = Energia / velocità<sup>2</sup> = eV/c<sup>2</sup>

# Particella carica in un campo magnetico

Una particella carica (per esempio un protone) che si muove all'interno di un campo magnetico  $\vec{B}$  è soggetta alla Forza di Lorentz:

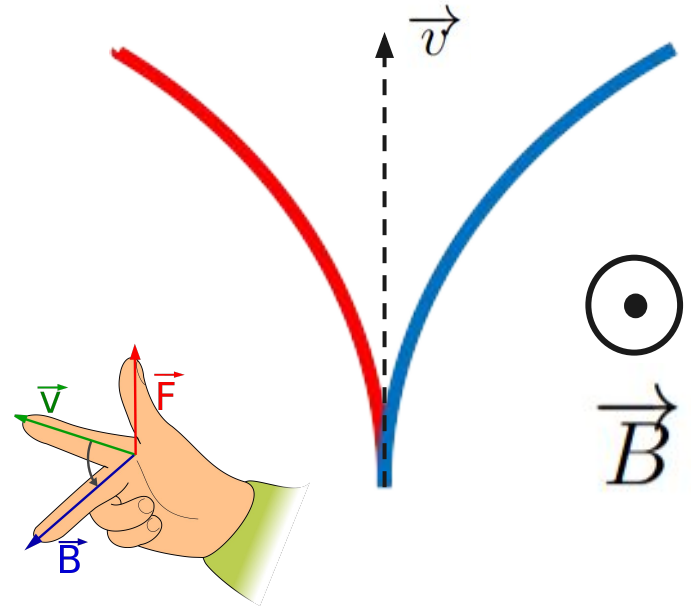
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La forza è sempre ortogonale al campo magnetico e alla velocità

Il segno della carica decide il verso della forza

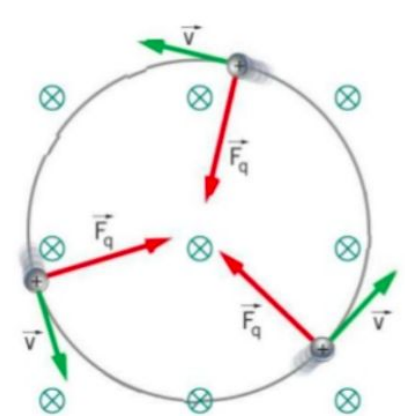
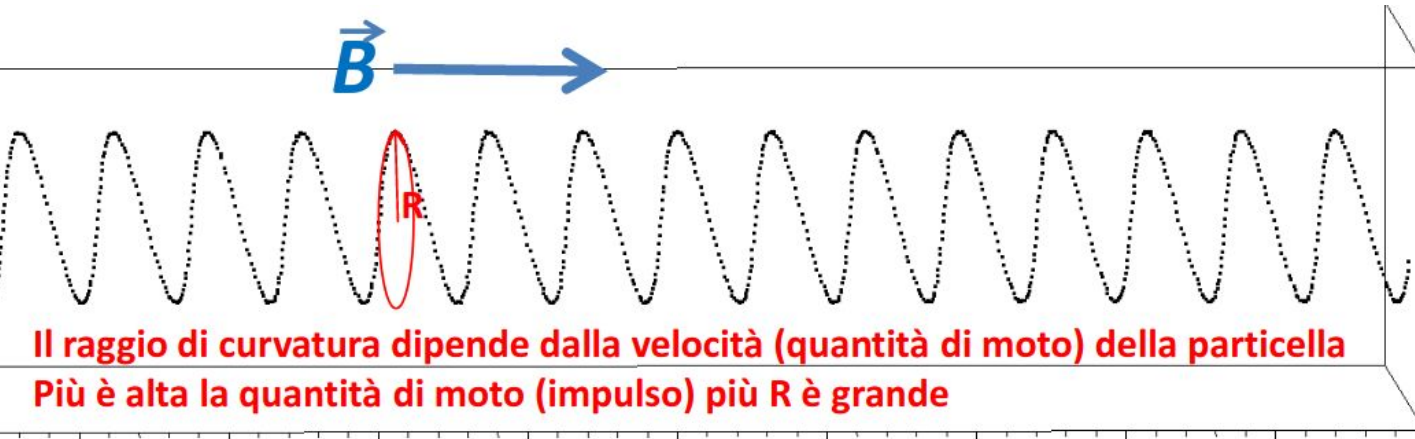
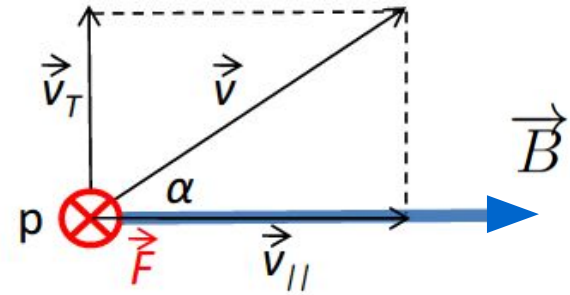
Particella con carica **negativa**

Particella con carica **positiva**



# Il moto elicoidale

- moto circolare uniforme nella proiezione perpendicolare a  $\vec{B}$
- moto uniforme lungo  $\vec{B}$



# Come si misura l'impulso della particella

La traiettoria di una particella carica all'interno di un campo magnetico è **elicoidale**

NB: normalmente le particelle prodotte nella collisione hanno impulsi elevati  $\rightarrow R \gg 1$  m, maggiore delle dimensioni del rivelatore (qualche metro), quindi percorrono solo un arco all'interno dell'esperimento

Il raggio di curvatura del moto circolare dovuto alla forza di Lorentz si ricava dalla relazione:

Forza centripeta

$$\frac{mv^2}{R} \hat{r} = \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

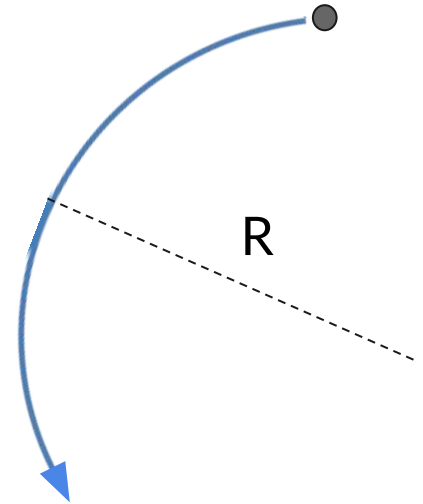
Forza di Lorentz

Se misuro ...

$$R = \frac{p_T}{0.3B}$$

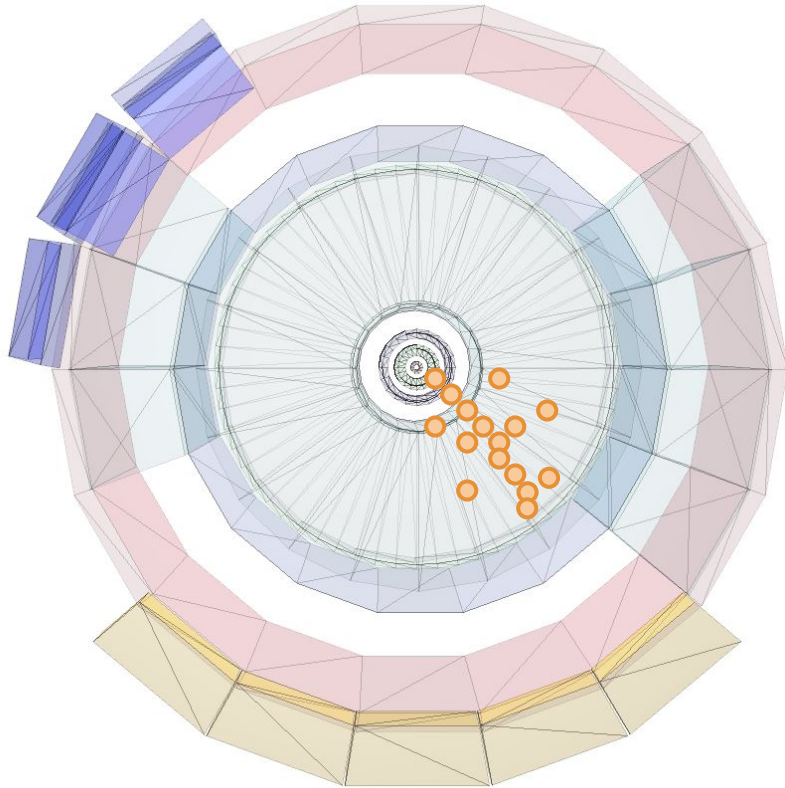
... ricavo

Con  $p_T$  espresso in GeV/c, B in Tesla.





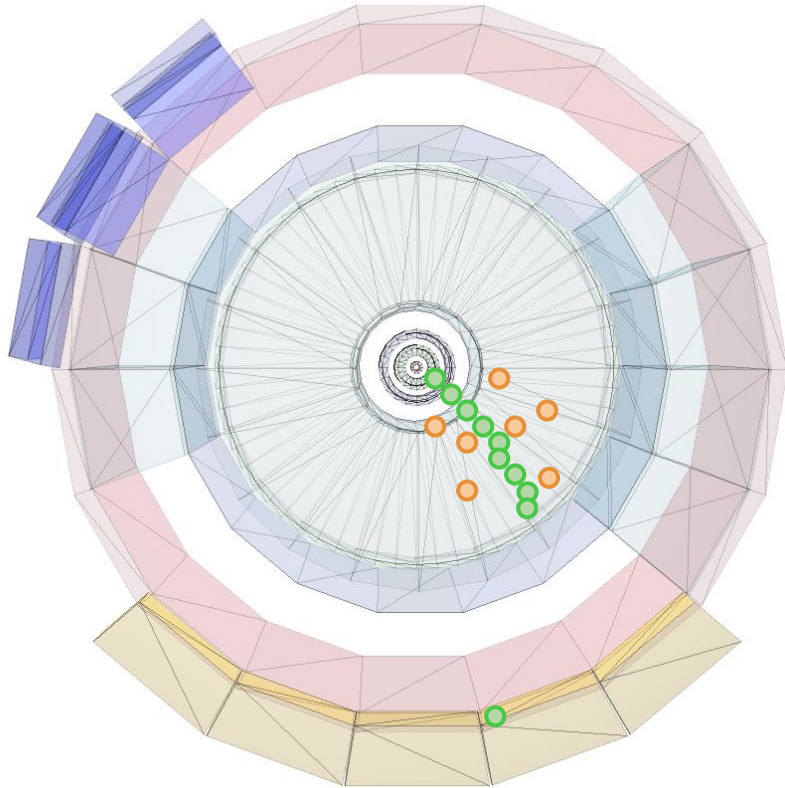
# Ricostruzione delle tracce in ALICE



Al passaggio di un particella:

- diversi segnali sono stati rivelati nei tracciatori
- i segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi ... per esempio con una traiettoria curva

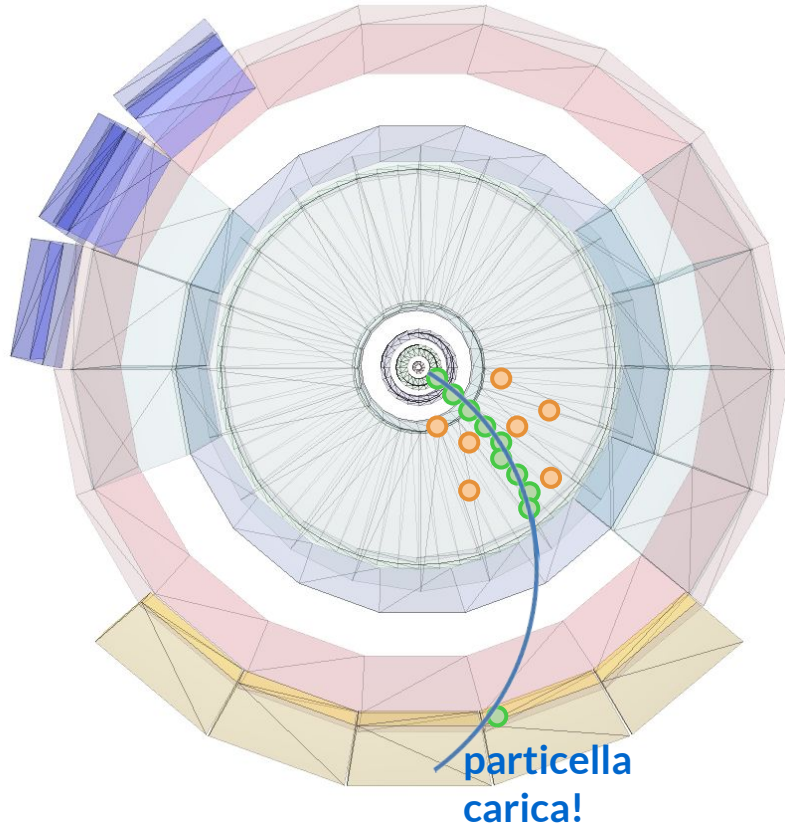
# Ricostruzione delle tracce in ALICE



Al passaggio di un particella:

- diversi segnali sono stati rivelati nei tracciatori
- i segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi ... per esempio con una traiettoria curva

# Ricostruzione delle tracce in ALICE



Al passaggio di un particella:

- diversi segnali sono stati rivelati nei tracciatori
- i segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi ... per esempio con una traiettoria curva
- una traccia ricostruita che viene dal vertice interno è associata ad una particella carica
- dal raggio di curvatura si ricava l'impulso

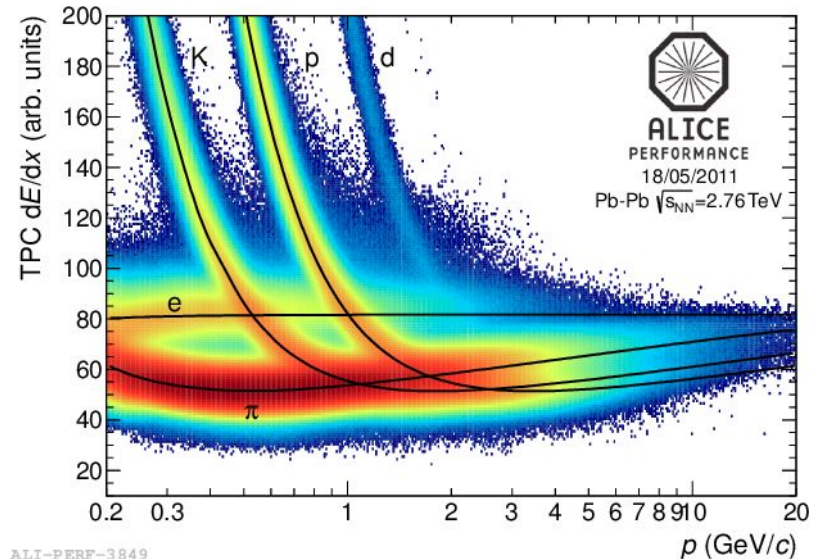
$$p_T = R \cdot 0.3 \cdot B$$

# Come si misura la velocità della particella

A parità di impulso particelle diverse si muovono a velocità diversa

Le tecniche che sfrutta ALICE per misurare la velocità principali sono:

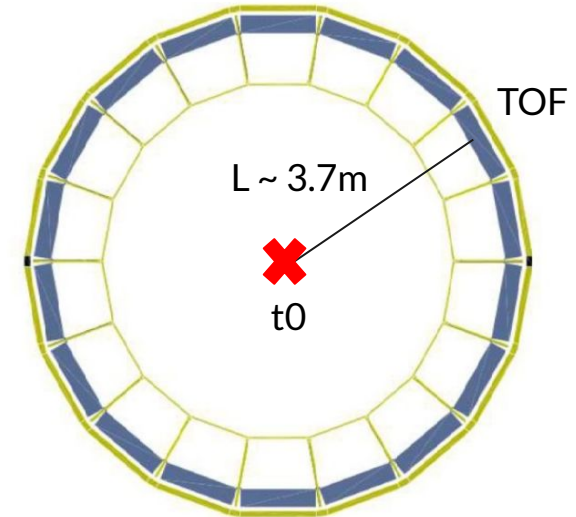
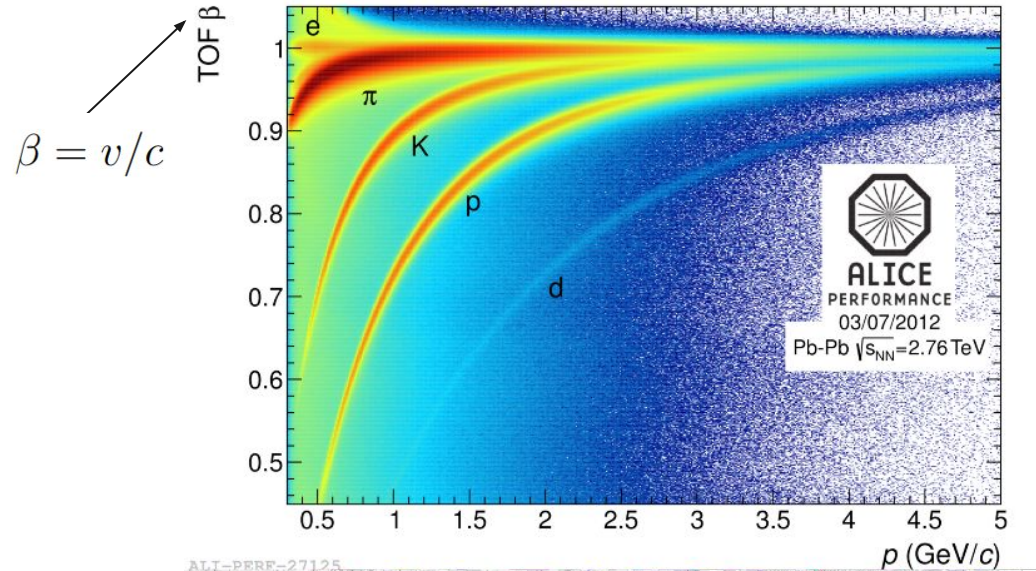
- **Perdita di energia** nel materiale del rivelatore da una particella
- **Tempo di volo:** misura diretta della velocità
- **Emissione di luce Cherenkov:** la velocità della luce in un materiale dipende dall'indice di rifrazione, se la particella si muove più veloce di  $c/n$  emette un cono di luce



# Rivelatore a tempo di volo TOF

Misura il **tempo di volo**: tempo impiegato da una particella per percorrere la distanza tra il vertice di interazione e la superficie del rivelatore

$$v = \frac{L}{t_{TOF}}$$



# Quanto preciso?



Il TOF raggiunge **risoluzioni temporali di 56ps!**

Un campo da pallavolo in cui sai quando la palla cade a terra con una precisione di 0.000000000056 secondi (56 ps)

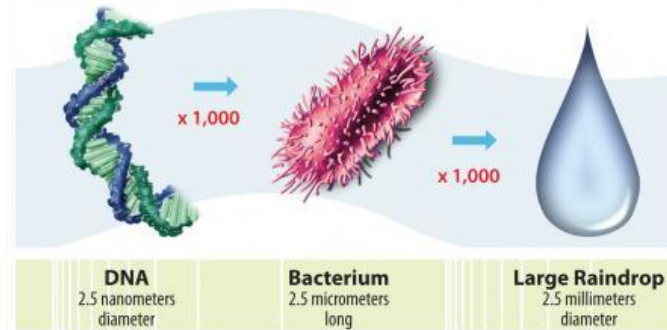
# E perche' importa?



Il TOF raggiunge **risoluzioni temporali di 56ps!**

Se state viaggiando ai **50 km/h** ( $\sim 14$  m/s) in **56 ps** percorrete  **$\sim 0.8$  nm**

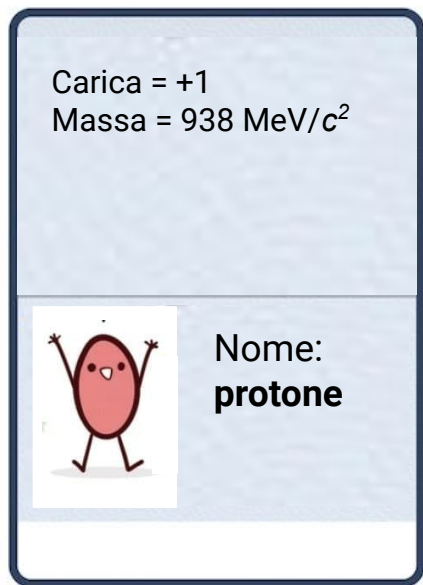
Se viaggiate ai **130 km/h** ( $\sim 36$  m/s) percorrete **2 nm**



Se state viaggiando alla **velocità della luce** percorrete **1.6 cm** (10 milioni di volte la distanza percorsa dall'automobile!)

Fondamentale avere la migliore precisione possibile!

# Cosa significa identificare una particella



Per identificare una particella dobbiamo conoscerne *carica* e *massa*

***carica:***

misura diretta → curvatura della traccia nel campo magnetico

***massa:***

misura indiretta → tramite **impulso** e **velocità** della particella

$$m = \frac{p}{\beta \cdot \gamma \cdot c}$$

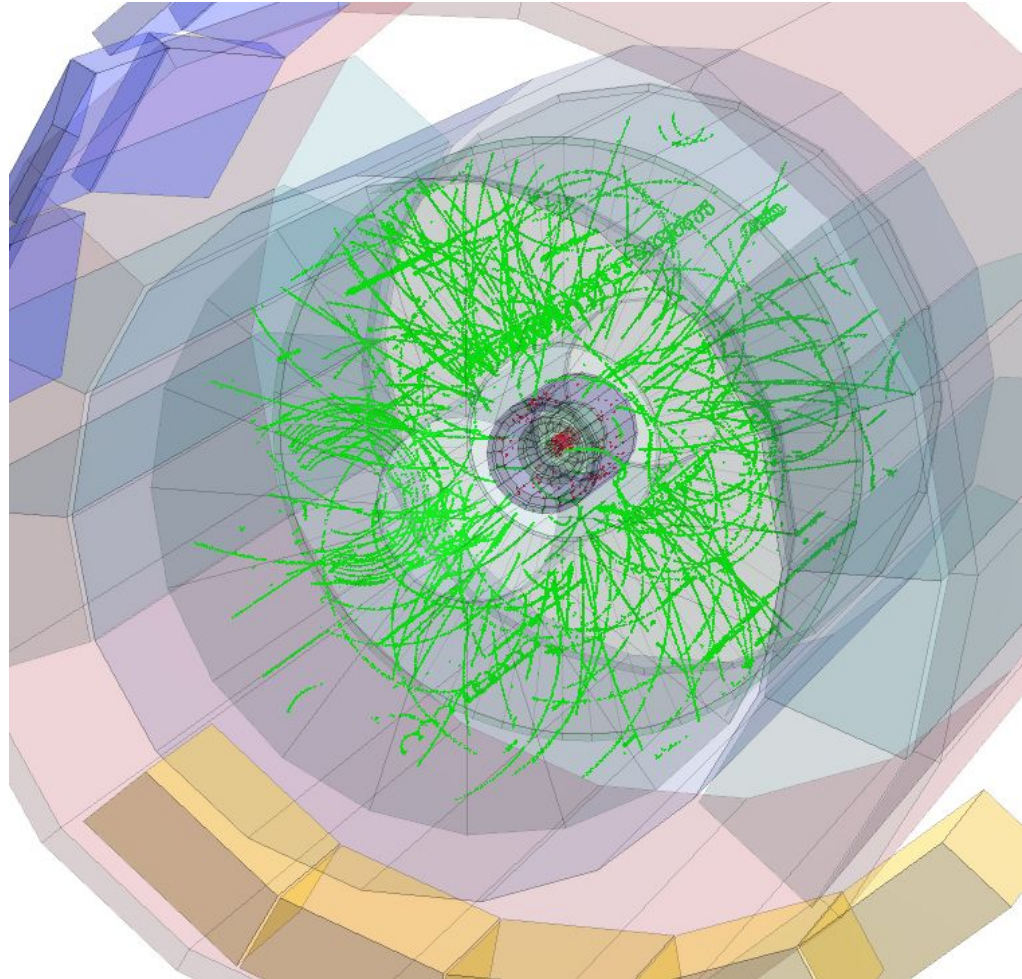
$$\beta = v/c$$



# Event display

*Event display* = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

- in **rosso** i segnali misurati dal tracciatore interno (ITS, *Inner Tracking System*)
- in **verde** i segnali misurati dal tracciatore principale (TPC, *Time Projection Chamber*)

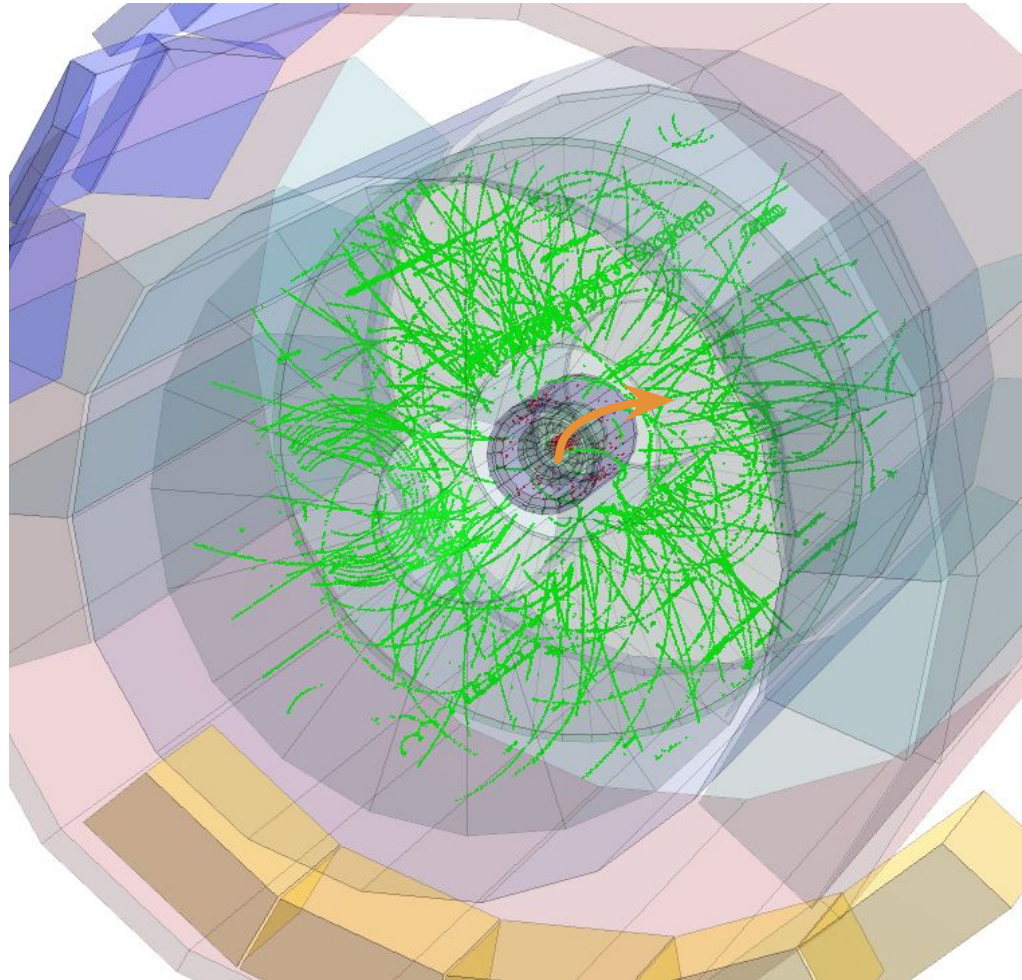


# Event display



*Event display* = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

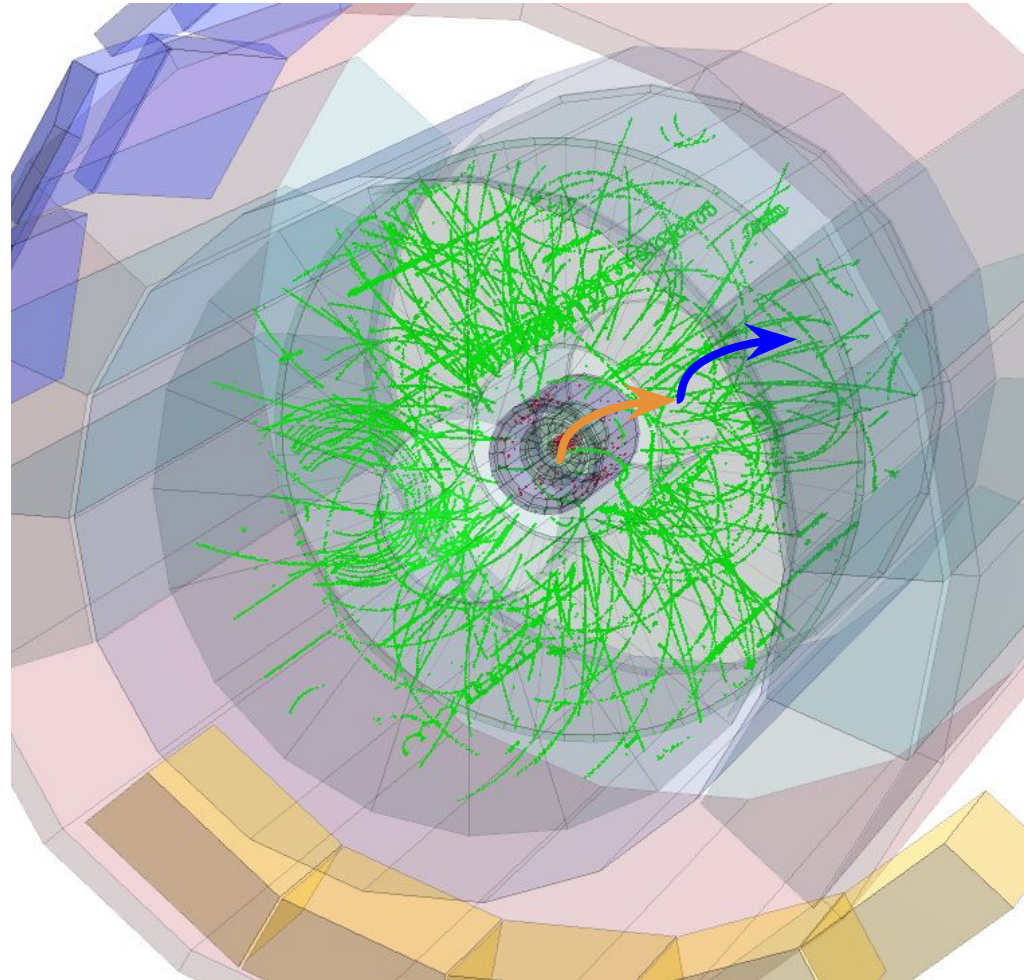
- **Particelle primarie:** archi che puntano al “vertice primario” (dove è avvenuta la collisione)



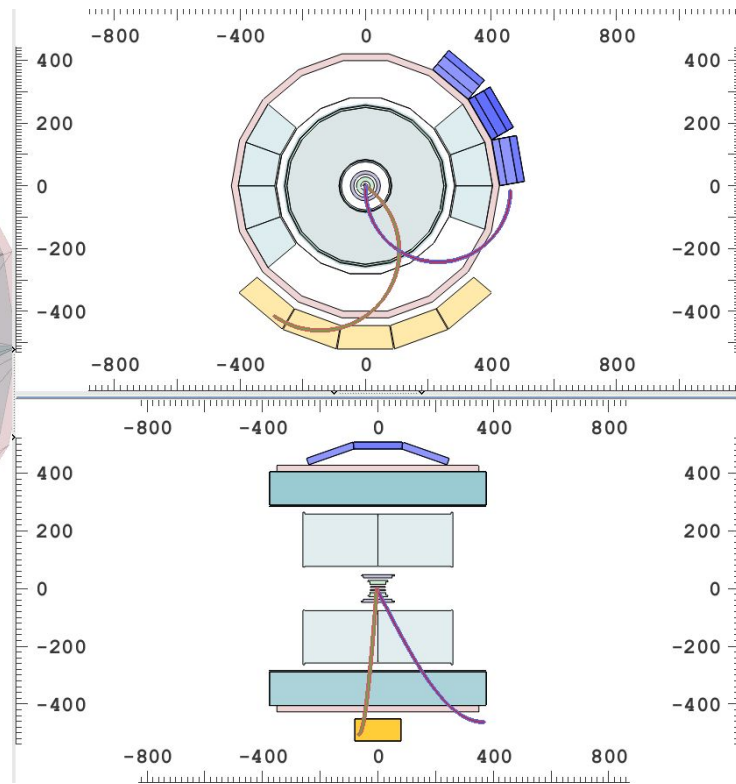
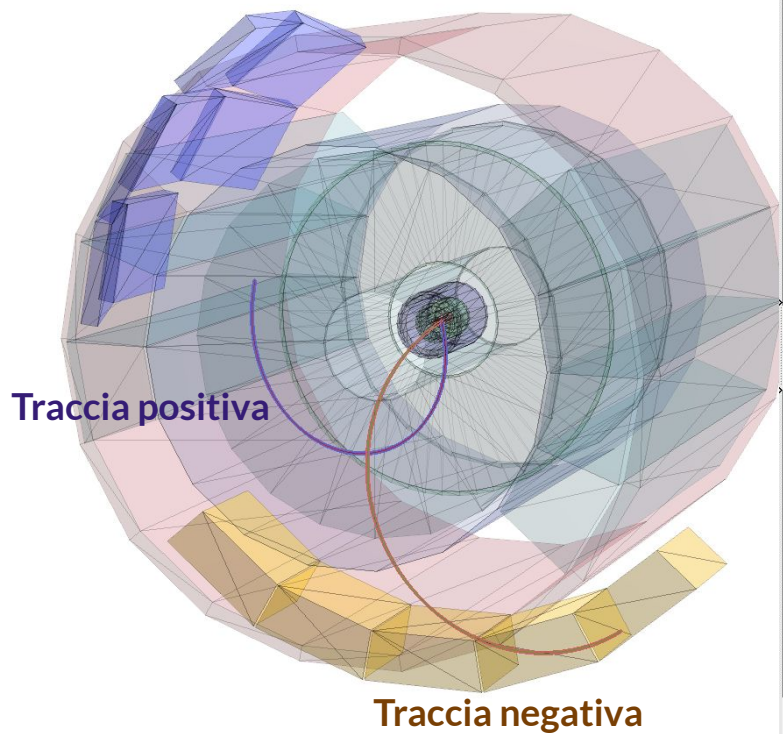
# Event display

*Event display* = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

- **Particelle primarie:**  
archi che puntano al “vertice primario” (dove è avvenuta la collisione)
- **Particelle secondarie:**  
archi che partono più esternamente da un “vertice secondario” (dove è avvenuto un decadimento)



# Event display



# Che "strana" la fisica! Fisica nei collisionatori



## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

**QUARKS** (left side label)

**LEPTONS** (left side label)

**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (bottom center label)

**SCALAR BOSONS** (right side label)

# Modello Standard

Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari**!

## Standard Model of Elementary Particles

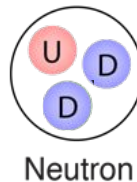
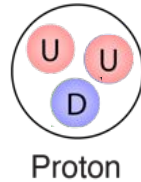
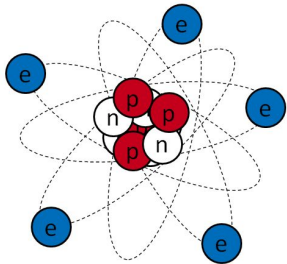
		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
LEPTONS		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$		
	0	0	0	$\pm 1$		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson		
						<b>GAUGE BOSONS</b> VECTOR BOSONS
						<b>SCALAR BOSONS</b>

# Modello Standard

Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari**!  
Ma quante sono? Nella **materia ordinaria** solo tre...



## Standard Model of Elementary Particles

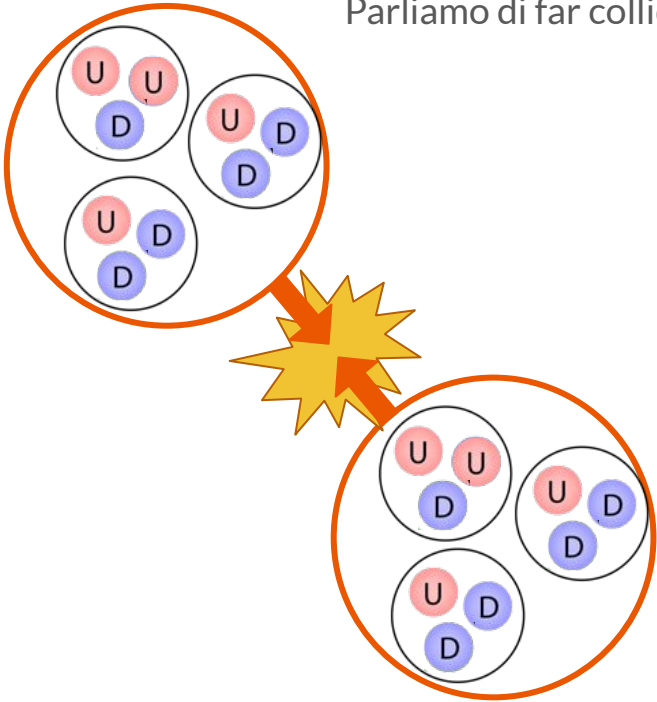
	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
<b>LEPTONS</b>	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	0	1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\pm 1$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS**

**SCALAR BOSONS**

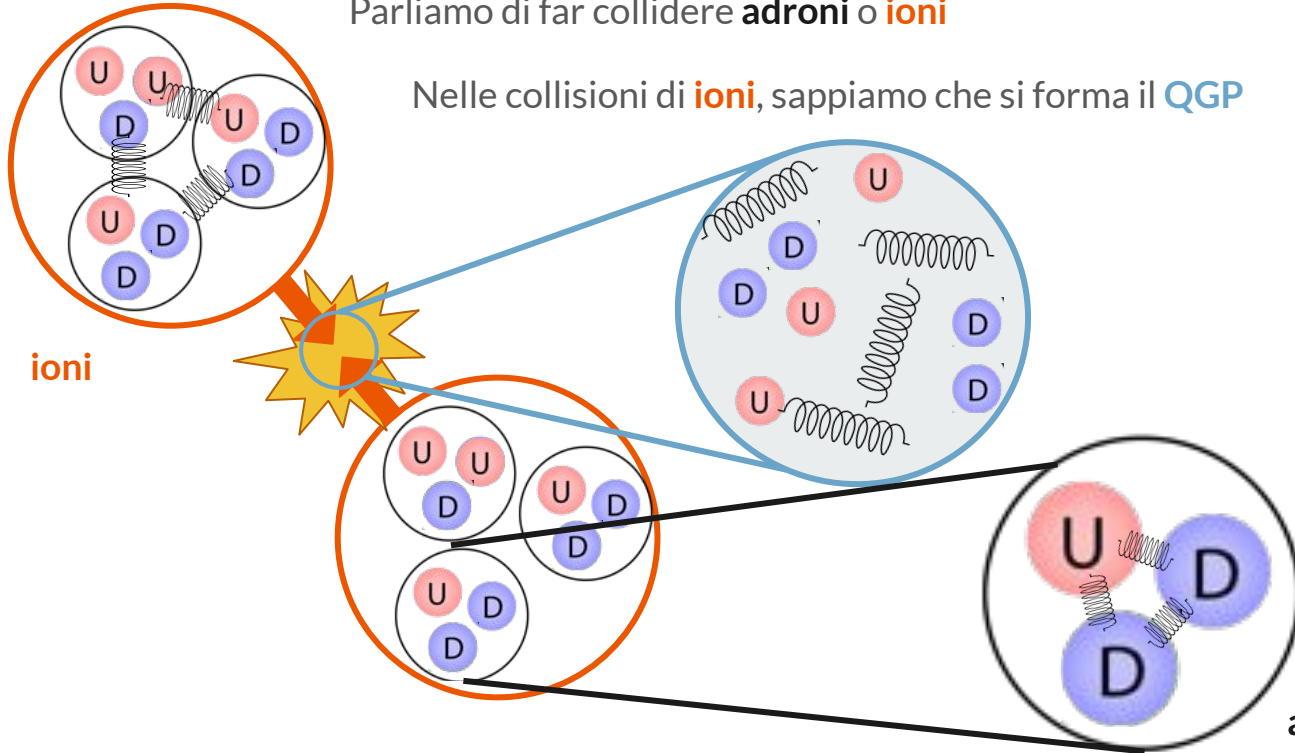
# Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**





# Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma



Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Nelle collisioni di **ioni**, sappiamo che si forma il **QGP**

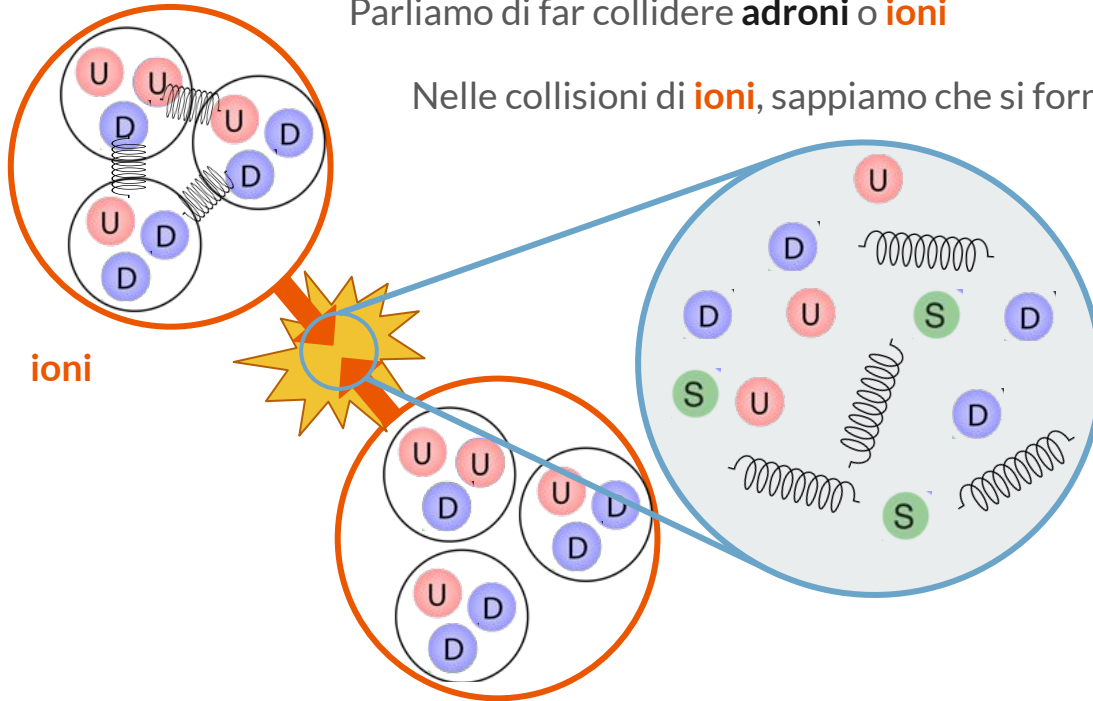
## Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	=2.2 MeV/c <sup>2</sup>	=1.28 GeV/c <sup>2</sup>	=173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson
				<b>H</b> higgs

QUARKS: u, c, t, d, s, b  
 LEPTONS: e, μ, τ, ν<sub>e</sub>, ν<sub>μ</sub>, ν<sub>τ</sub>  
 GAUGE BOSONS: g, γ, Z, W  
 SCALAR BOSONS: H

adroni

# Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma



Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Nelle collisioni di **ioni**, sappiamo che si forma il **QGP**

**QGP**

Il **QGP** è un agglomerato di **quark** e **gluoni** slegati tra loro, diversamente da come sono negli **adroni**  
Si parla di “**deconfinamento**”

Nel **QGP** si formano anche quark, come il quark **strange** che **non sono presenti** nello stato iniziale, cioè negli **adroni** o **ioni** che facciamo collidere.

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
I	II	III		
mass GeV/c <sup>2</sup> 2.2	=1.28 GeV/c <sup>2</sup>	=173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	=124.97 GeV/c <sup>2</sup>
charge 2/3	2/3	2/3	0	0
spin 1/2	1/2	1/2	1	0
<b>U</b>	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
4.2	=96.1	=4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	0
-1/3	-1/3	-1/3	0	0
1/2	1/2	1/2	1	1
<b>D</b>	<b>S</b>	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
0.511 MeV/c <sup>2</sup>	=105.66 MeV/c <sup>2</sup>	=1.7768 GeV/c <sup>2</sup>	=91.19 GeV/c <sup>2</sup>	
0	-1	-1	0	1
1/2	1/2	1/2	1	1
<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<1.0 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<18.2 MeV/c <sup>2</sup>	=80.39 GeV/c <sup>2</sup>	
0	0	0	±1	±1
1/2	1/2	1/2	1	1
<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

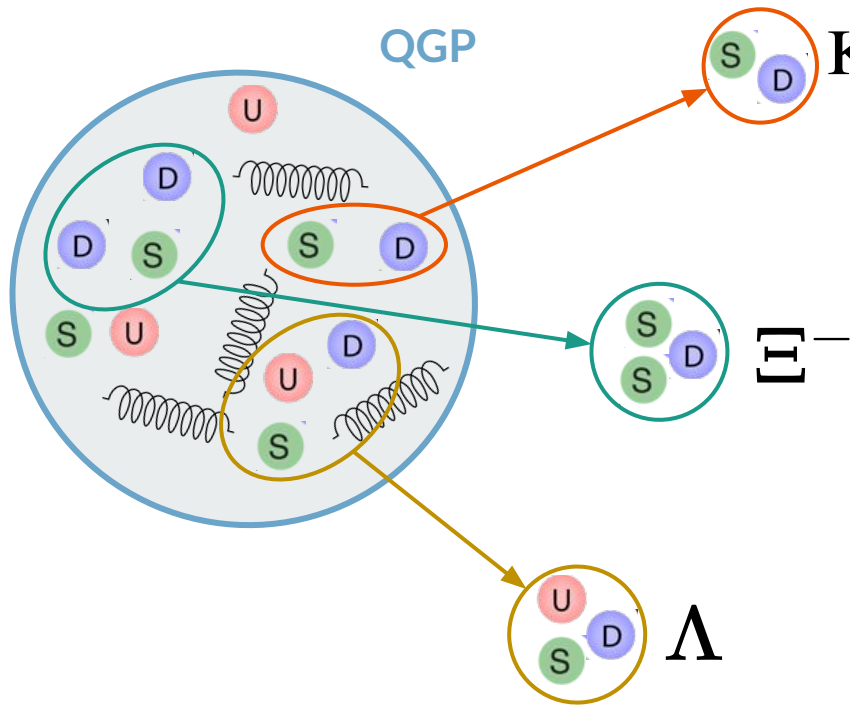
QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

# Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

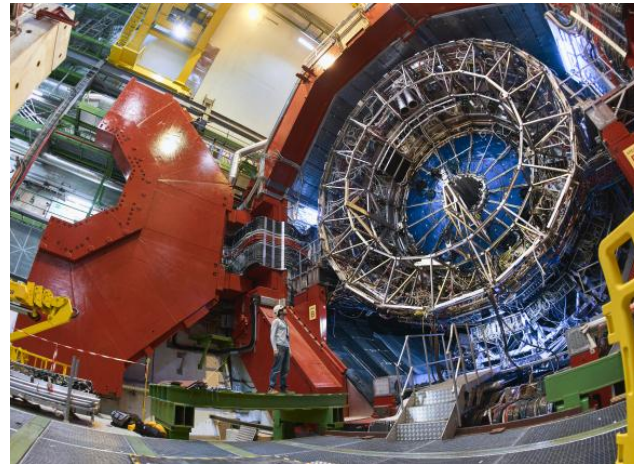


Il **QGP** produce diversi **adroni strani** che vediamo in uscita dalla collisione!

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	=2.2 MeV/c <sup>2</sup>	=1.28 GeV/c <sup>2</sup>	=173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	=124.97 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
<b>QUARKS</b>	<b>U</b>	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>D</b>	<b>S</b>	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

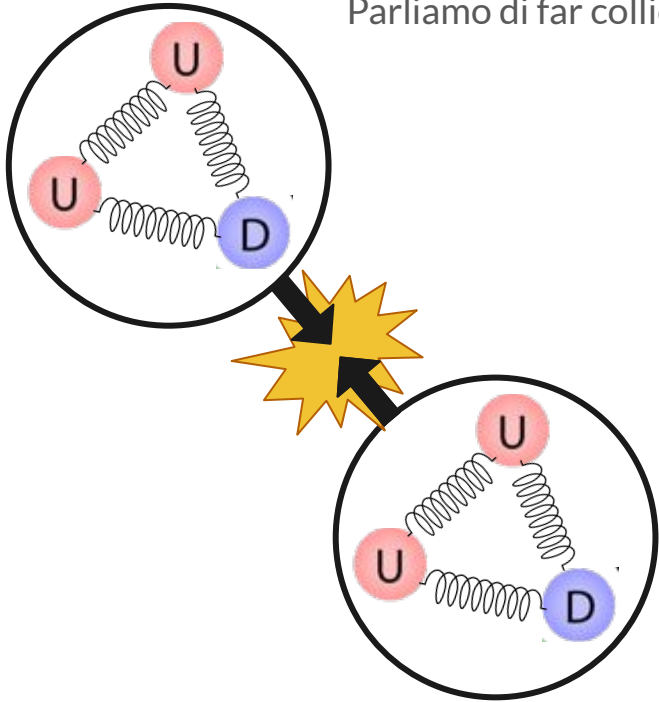
**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (Z, W)  
**SCALAR BOSONS** (H)



# Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

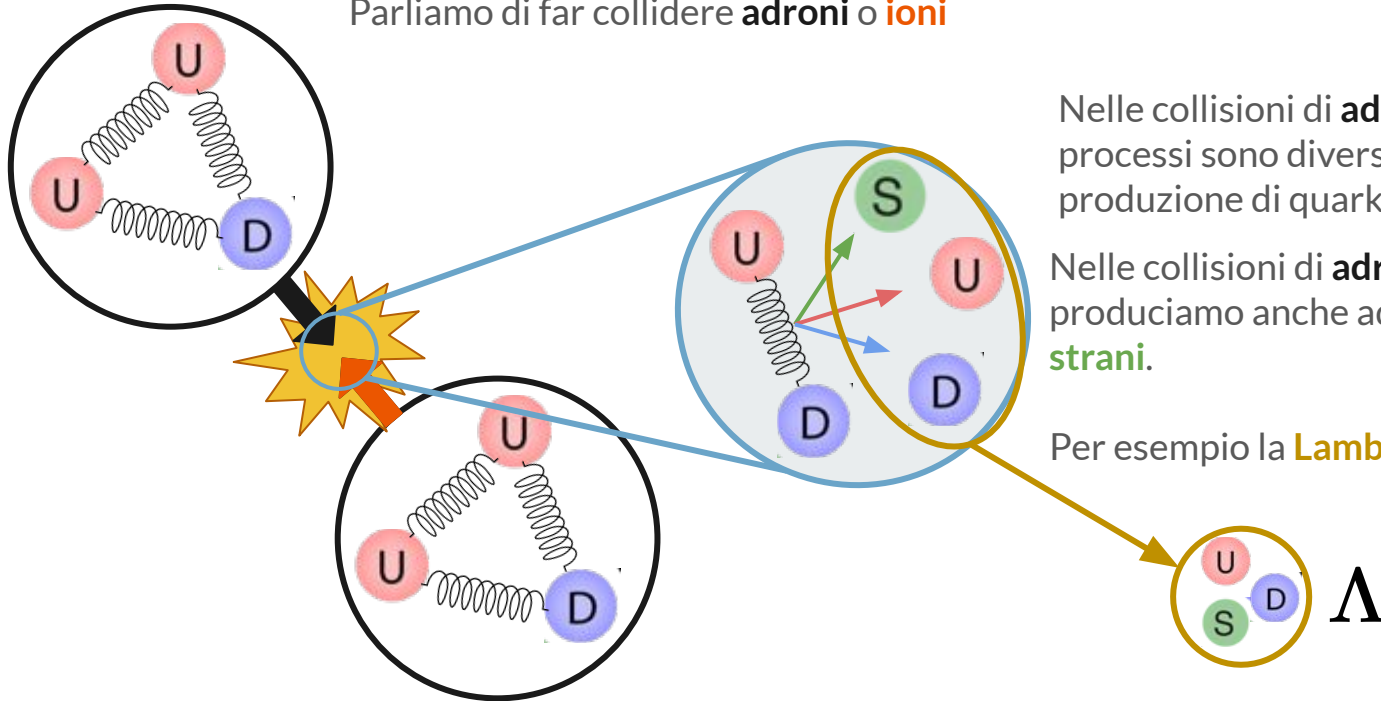


Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**



# Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

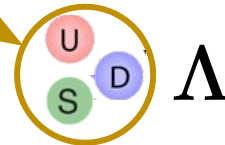
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**



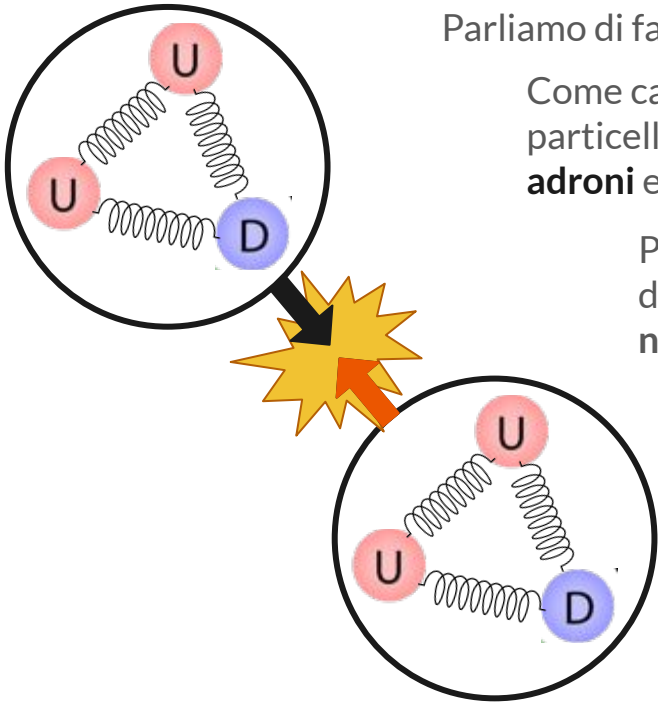
Nelle collisioni di **adroni** i processi sono diversi per la produzione di quark **strani**.

Nelle collisioni di **adroni** produciamo anche adroni **strani**.

Per esempio la **Lambda**



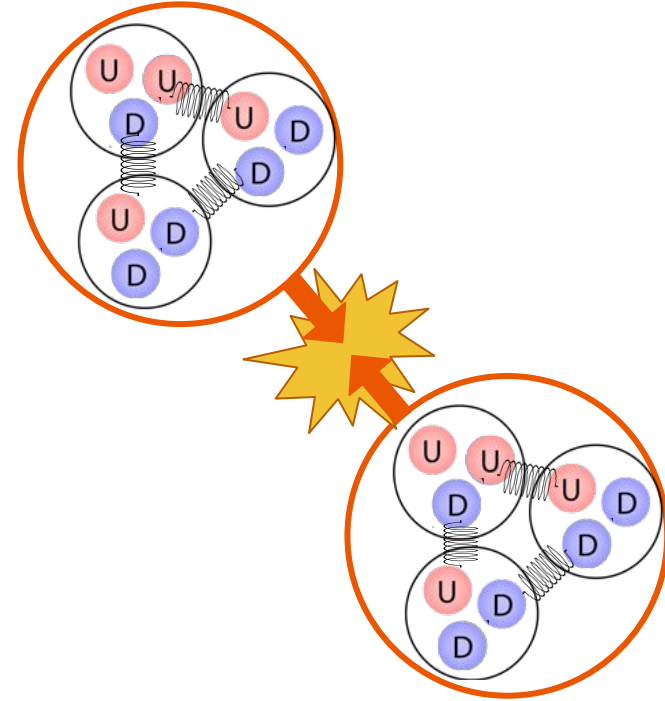
# Collisioni adroniche: Aumento di stranezza



Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Come cambia la produzione di particelle **strane** tra collisioni di **adroni** e collisioni di **ioni**?

Possiamo paragonare la produzione di particelle **strane** scalando per il numero di partecipanti... cioè?

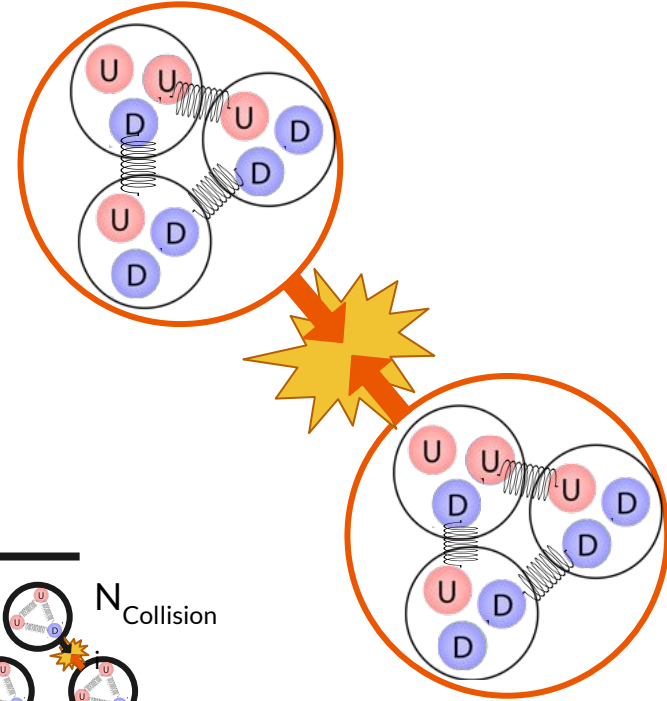
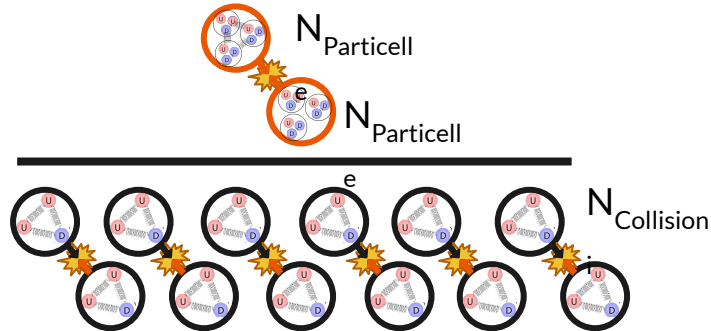
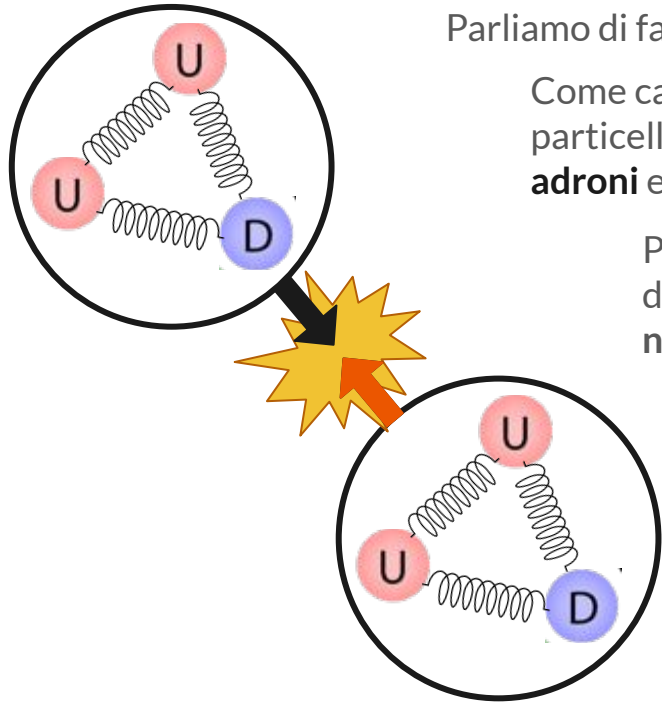


# Collisioni adroniche: Aumento di stranezza

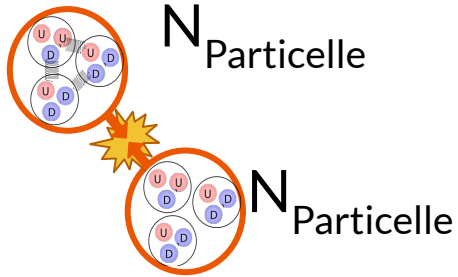
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Come cambia la produzione di particelle **strane** tra collisioni di **adroni** e collisioni di **ioni**?

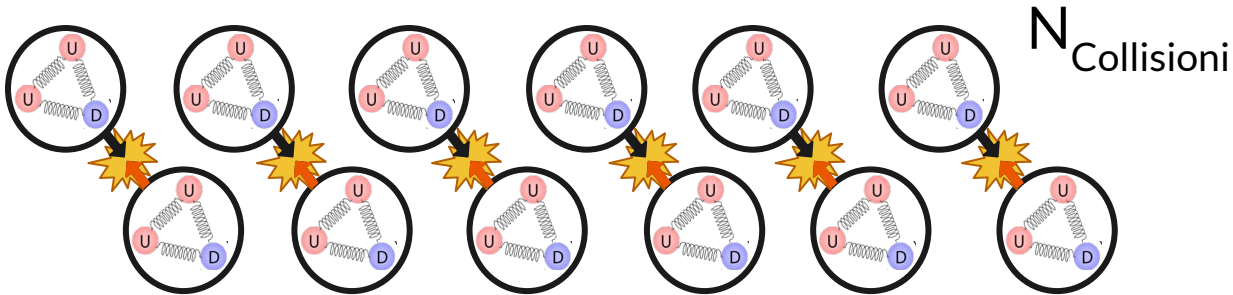
Possiamo paragonare la produzione di particelle **strane** scalando per il numero di partecipanti... cioè?



# Collisioni adroniche: Aumento di stranezza



$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} > 1$$



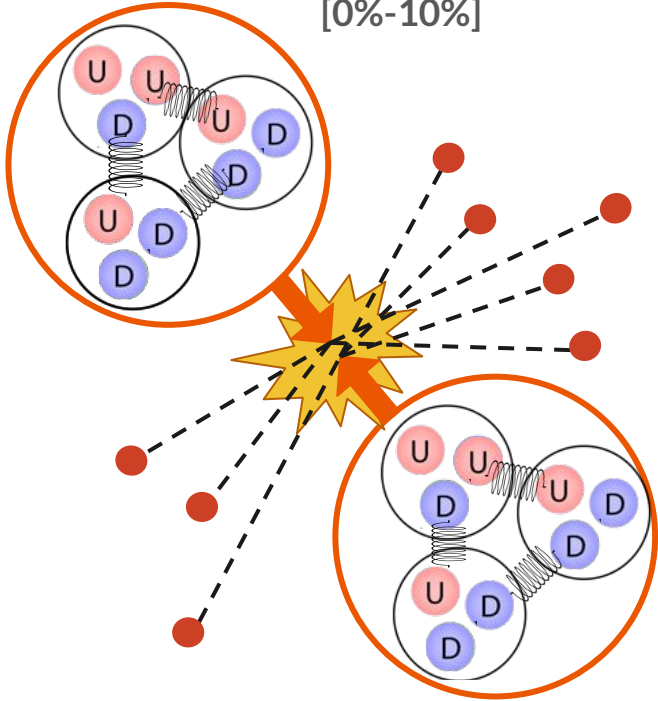
$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} = 1$$



# Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



[0%-10%]

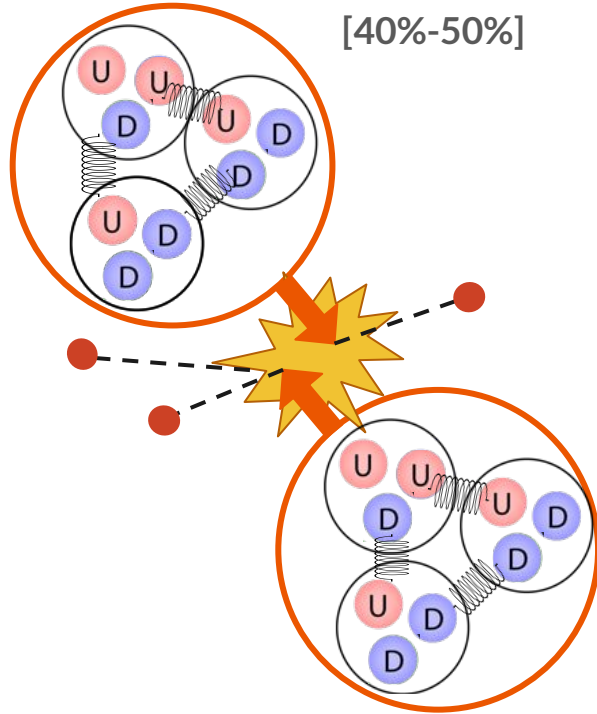
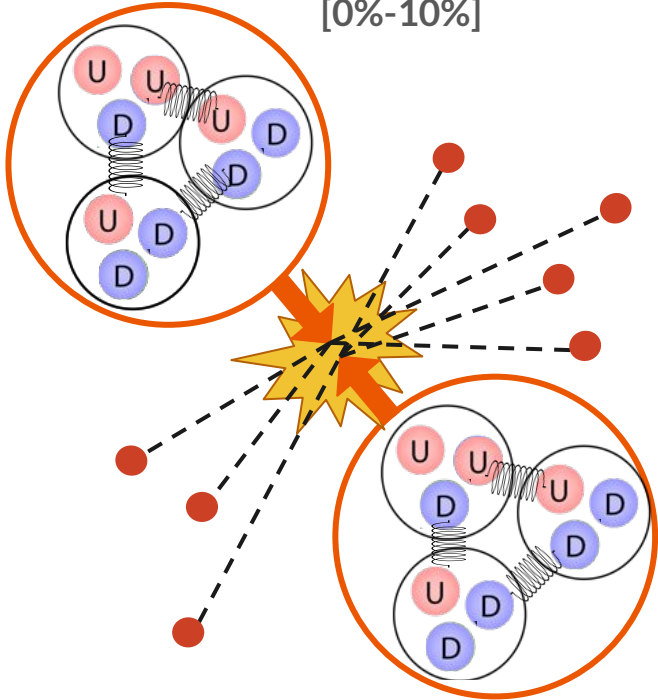


# Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



[0%-10%]

[40%-50%]



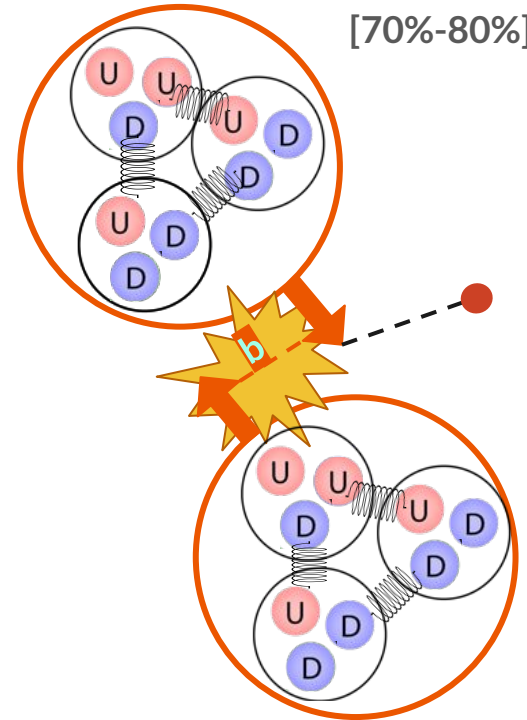
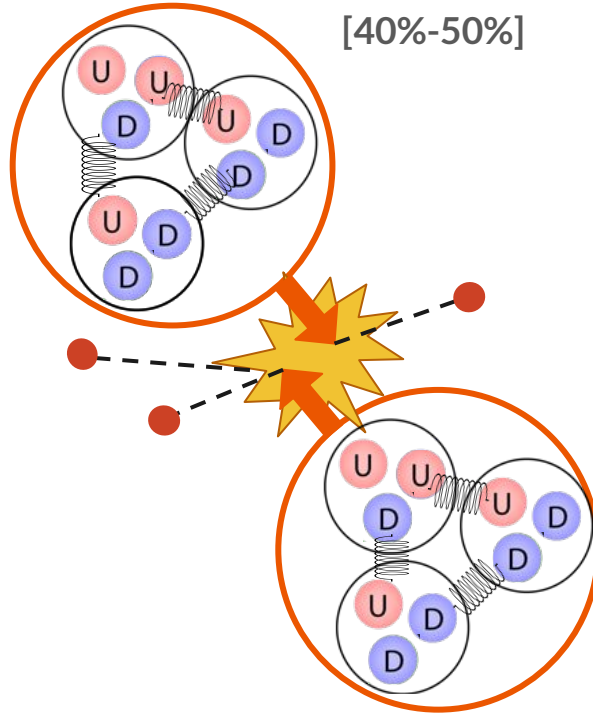
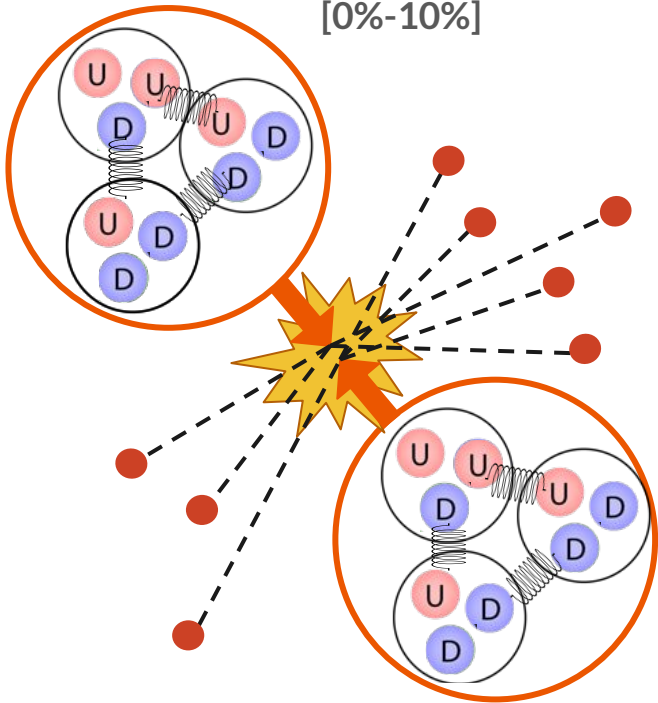
# Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



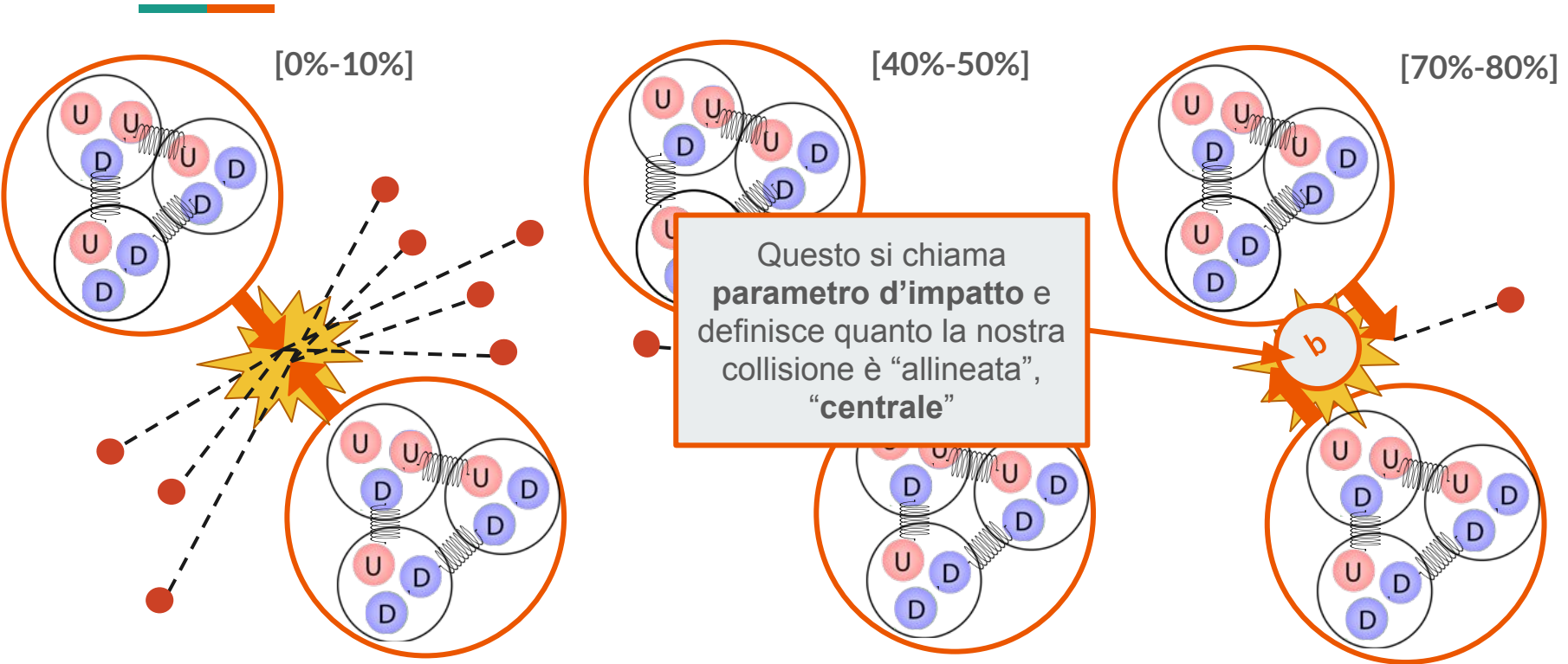
[0%-10%]

[40%-50%]

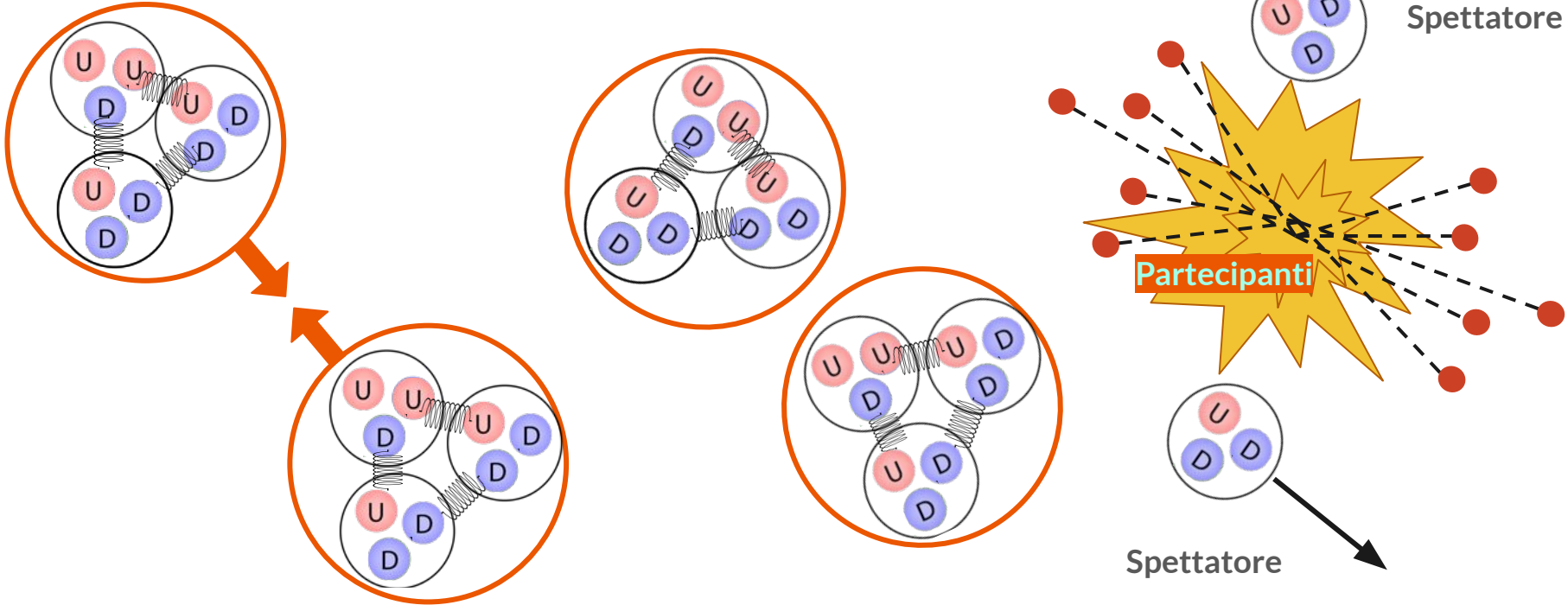
[70%-80%]



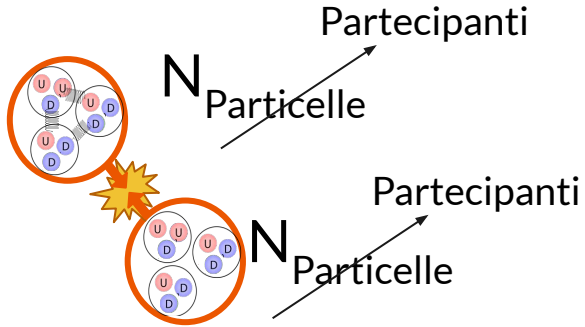
# Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



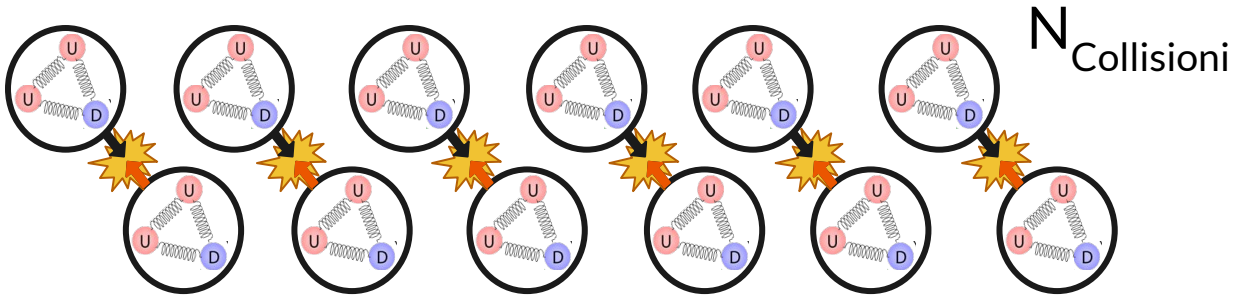
# Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



# Collisioni adroniche: Aumento di stranezza

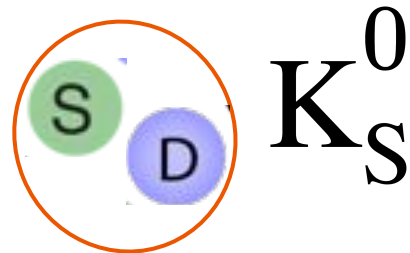
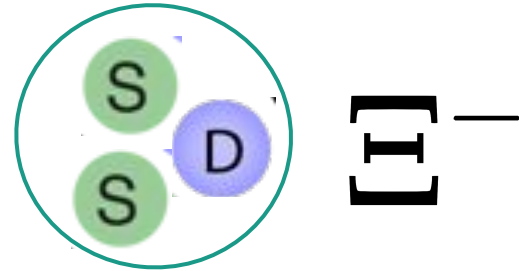
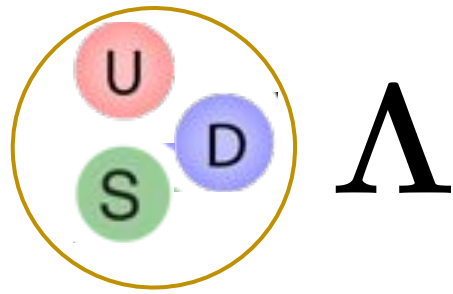


$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} > 1$$



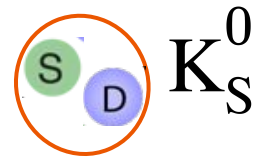
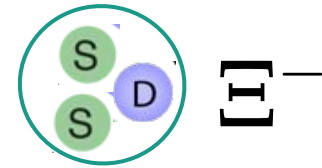
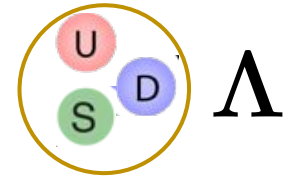
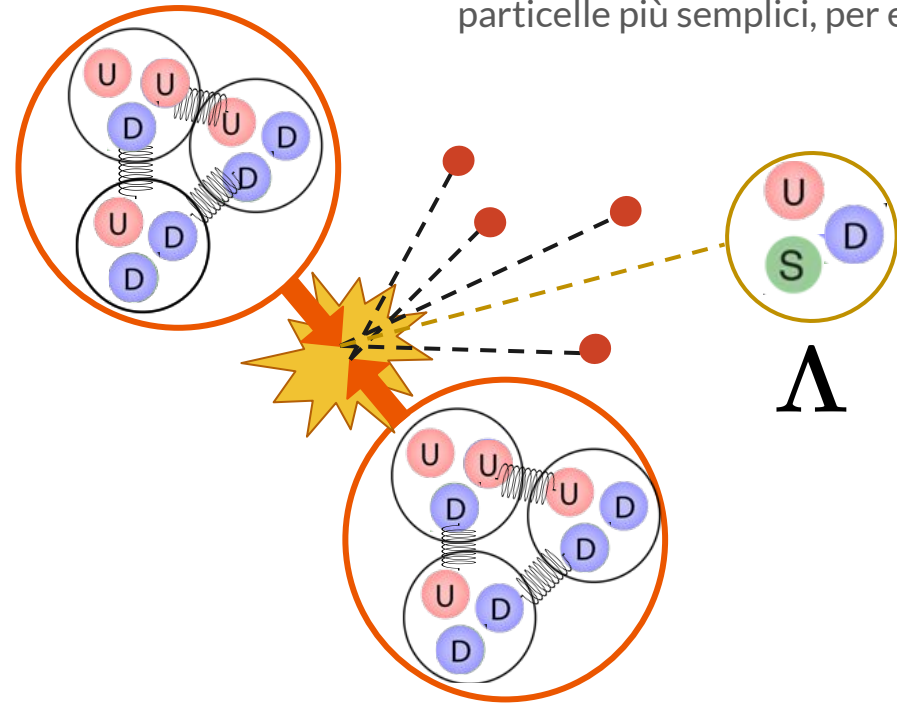
$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} = 1$$

Rivelare le  
particelle strane



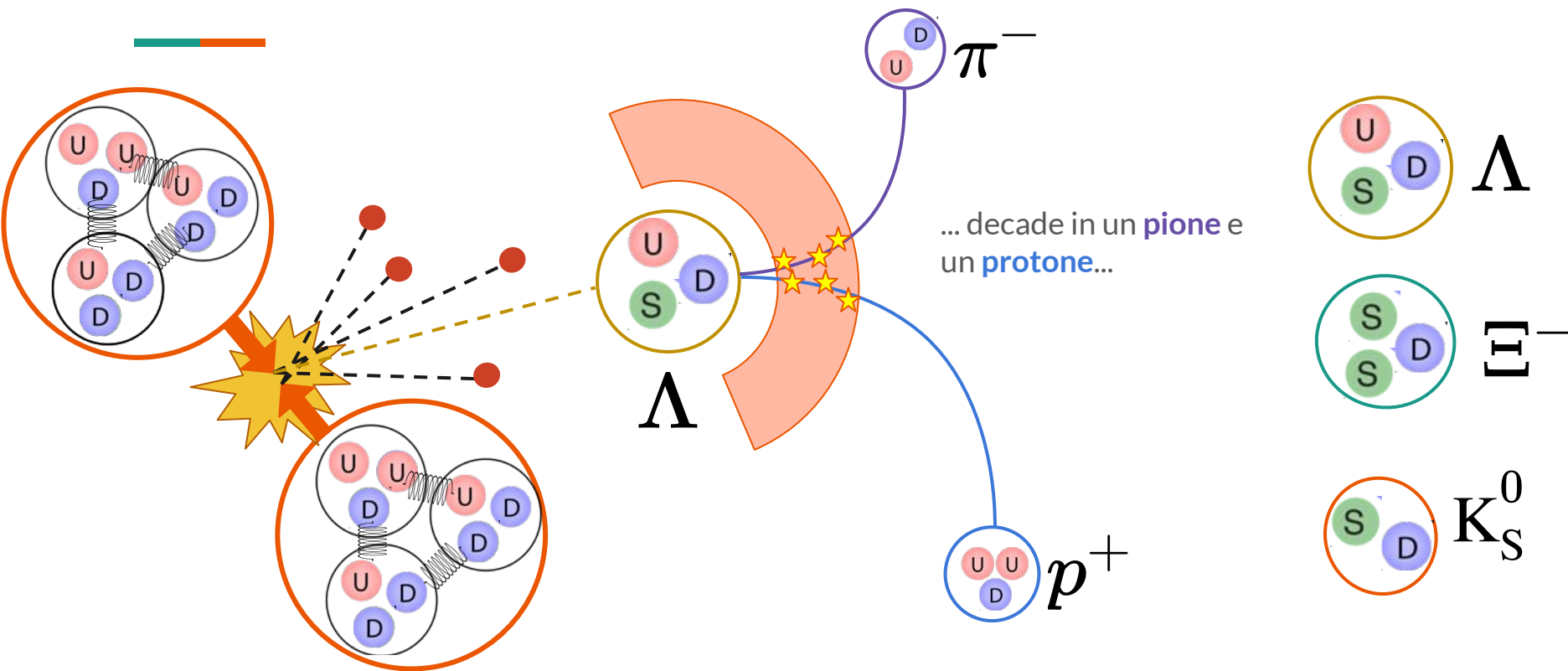
# Particelle Strane e come trovarle

Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...

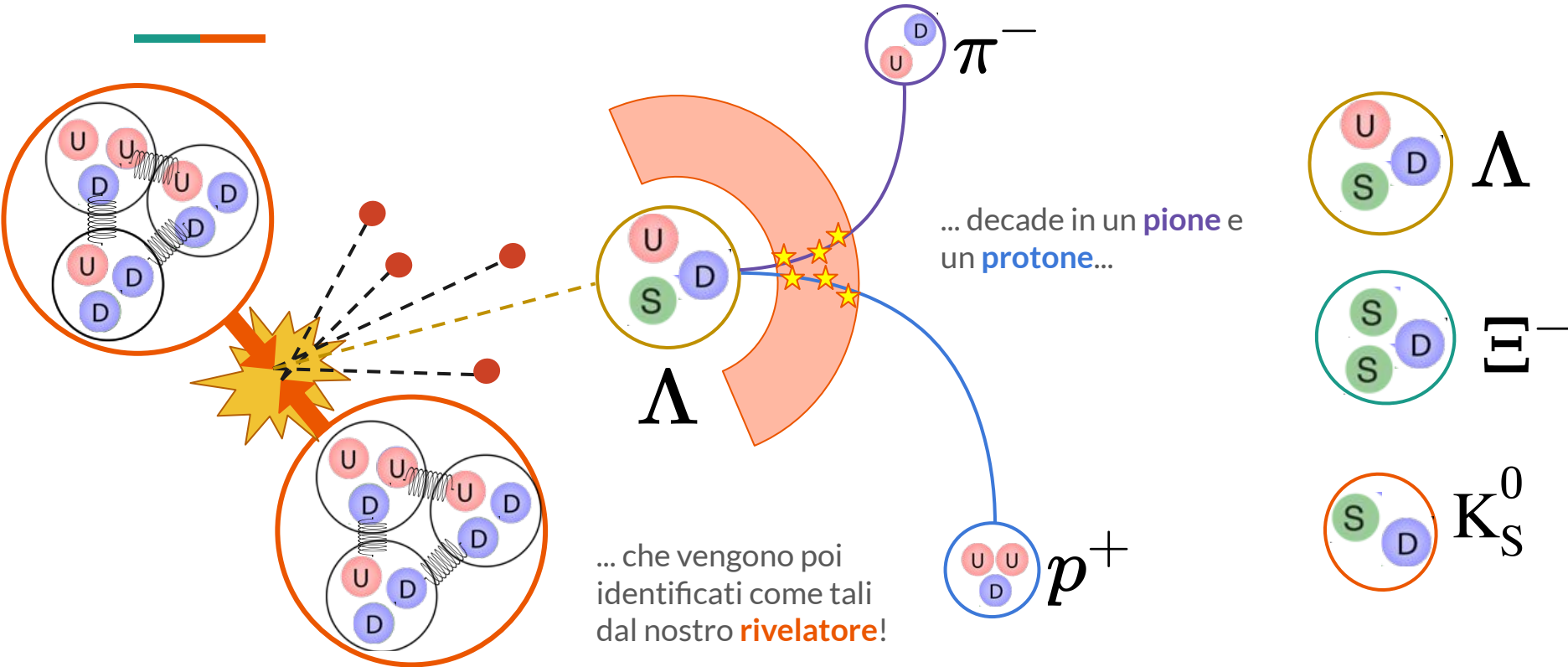




# Particelle Strane e come trovarle

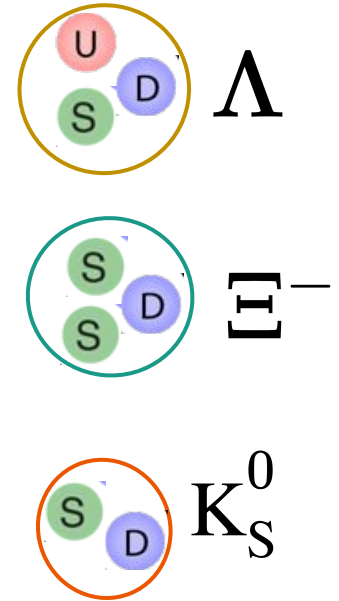
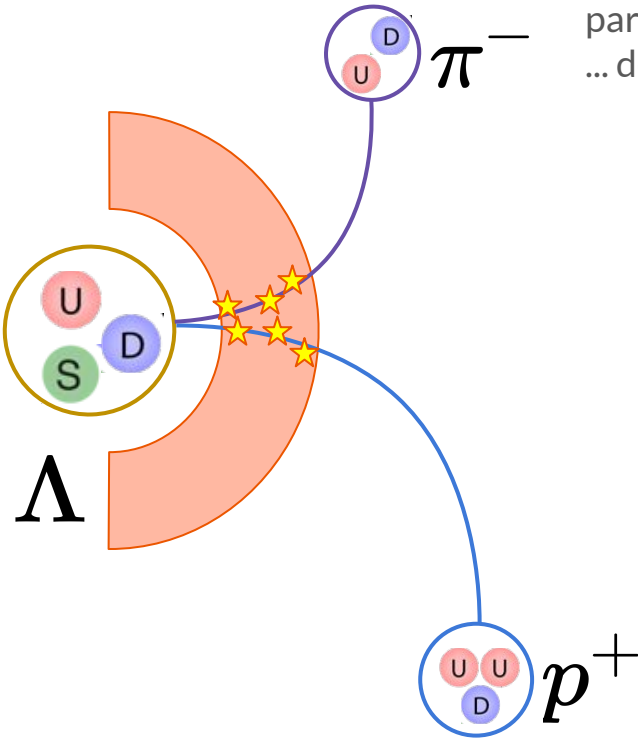


# Particelle Strane e come trovarle

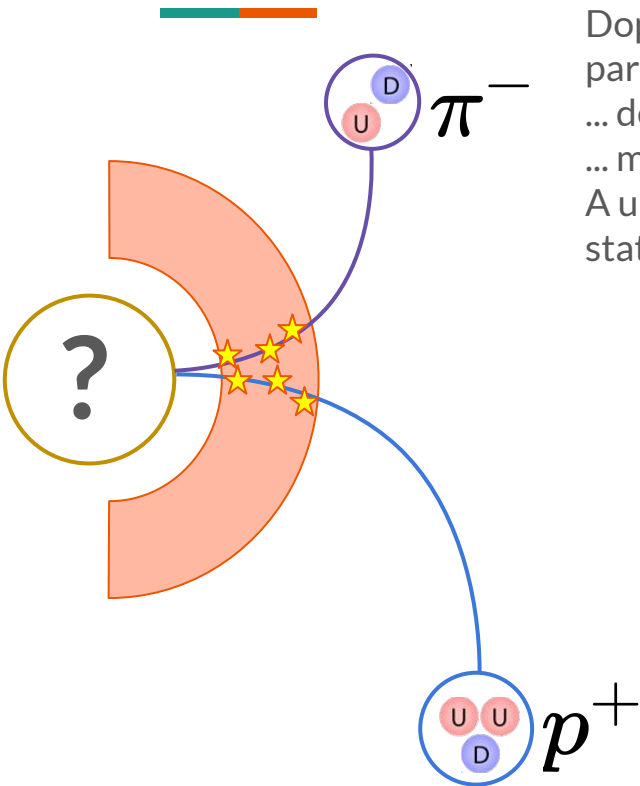


# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

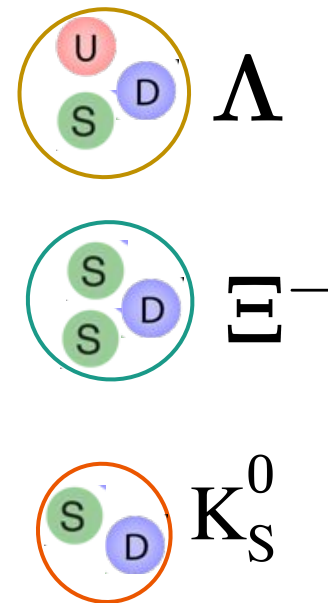
Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...  
... decade in un **pione** e un **protone**...



# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

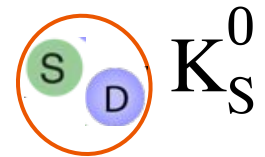
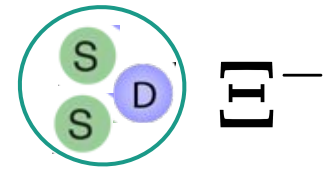
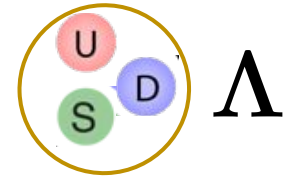
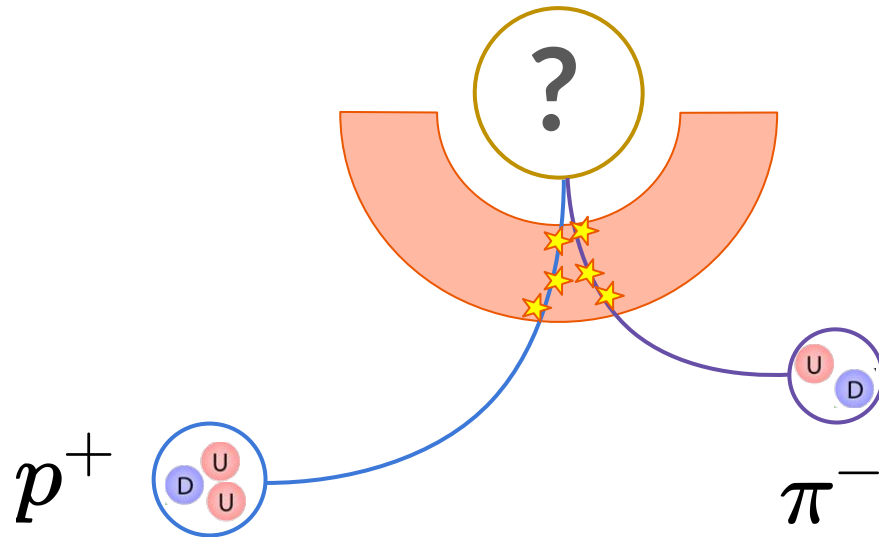


Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...  
... decade in un **pione** e un **protone**...  
... ma sono veramente da una **Lambda**?  
A un primo sguardo non si può capire, però con un po' di statistica lo si può intuire!



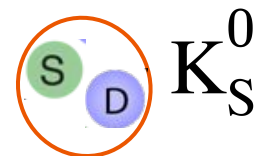
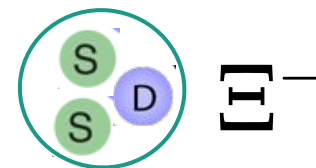
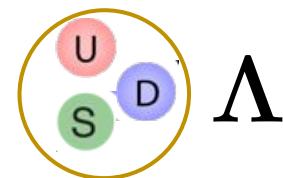
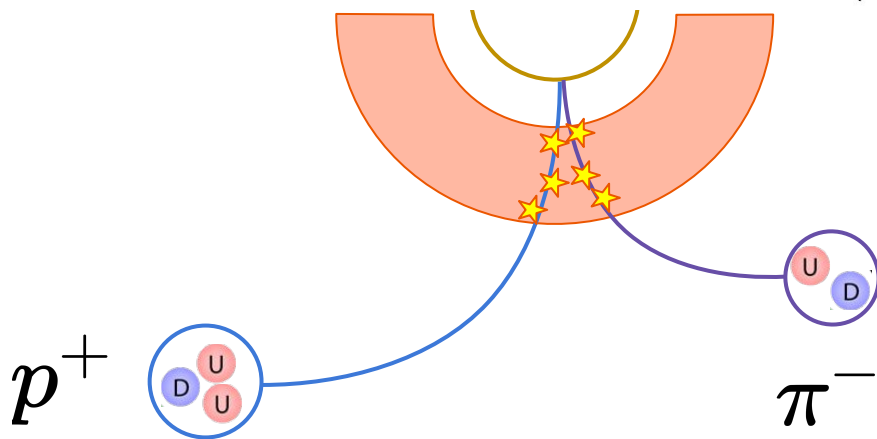
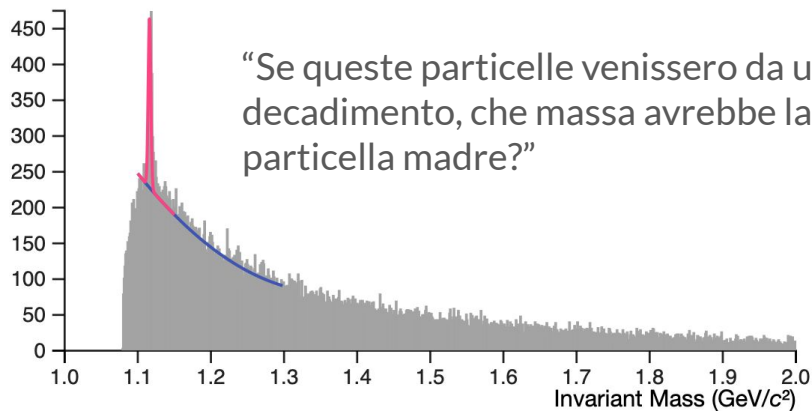
# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

Possiamo combinare le particelle considerando il loro moto in quella che si chiama la **massa invariante**. Questa quantità risponde alla domanda:

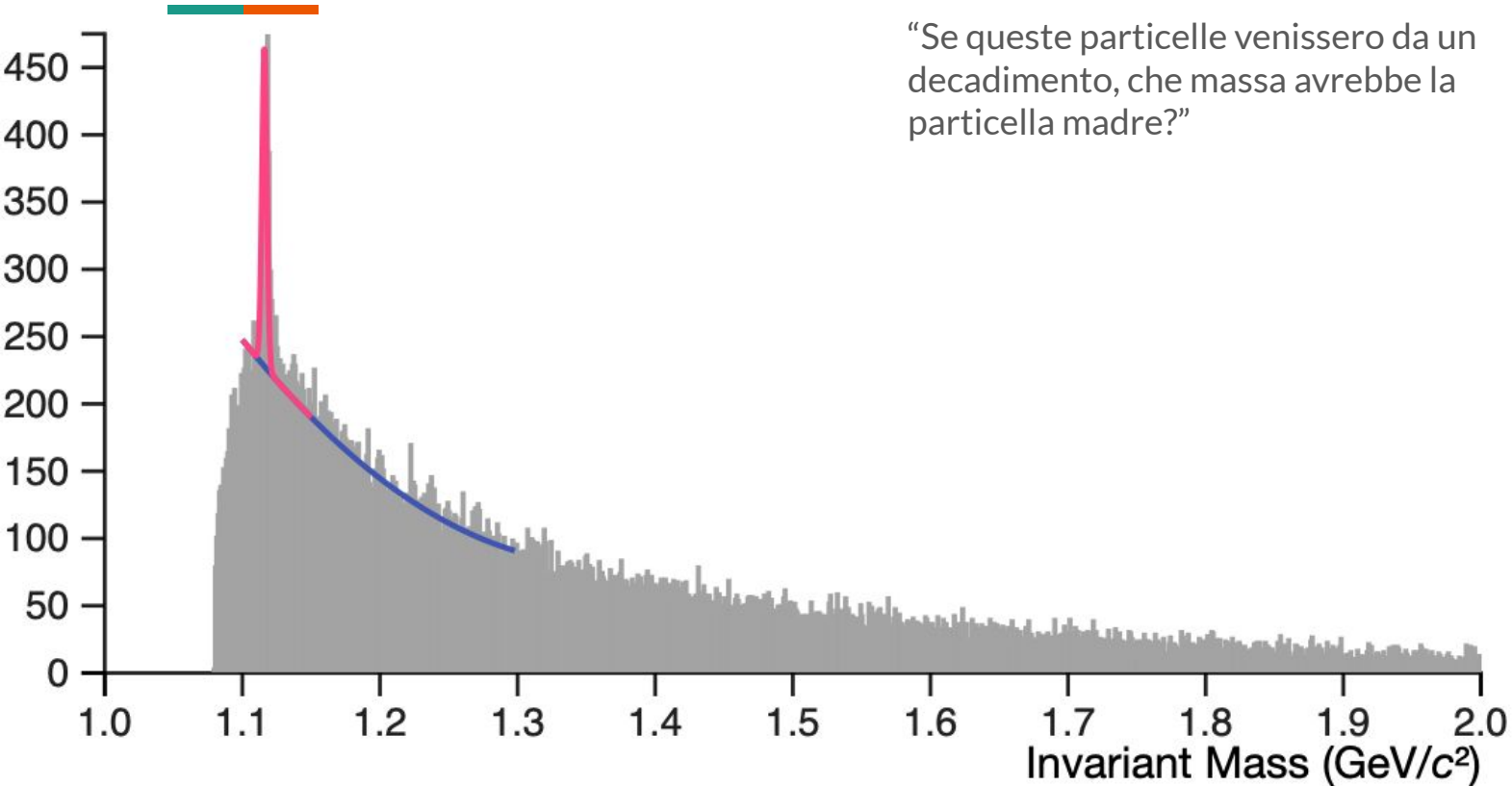


# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

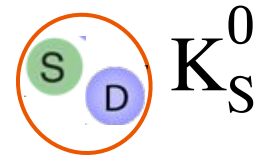
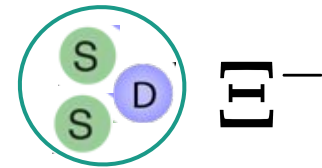
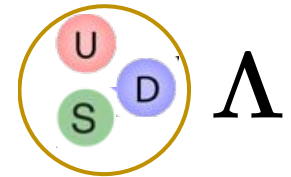
Possiamo combinare le particelle considerando il loro moto in quella che si chiama la **massa invariante**. Questa quantità risponde alla domanda:



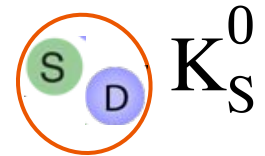
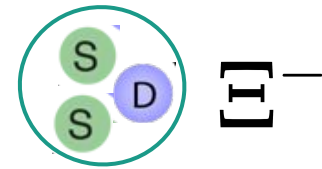
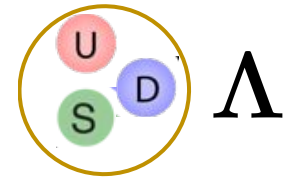
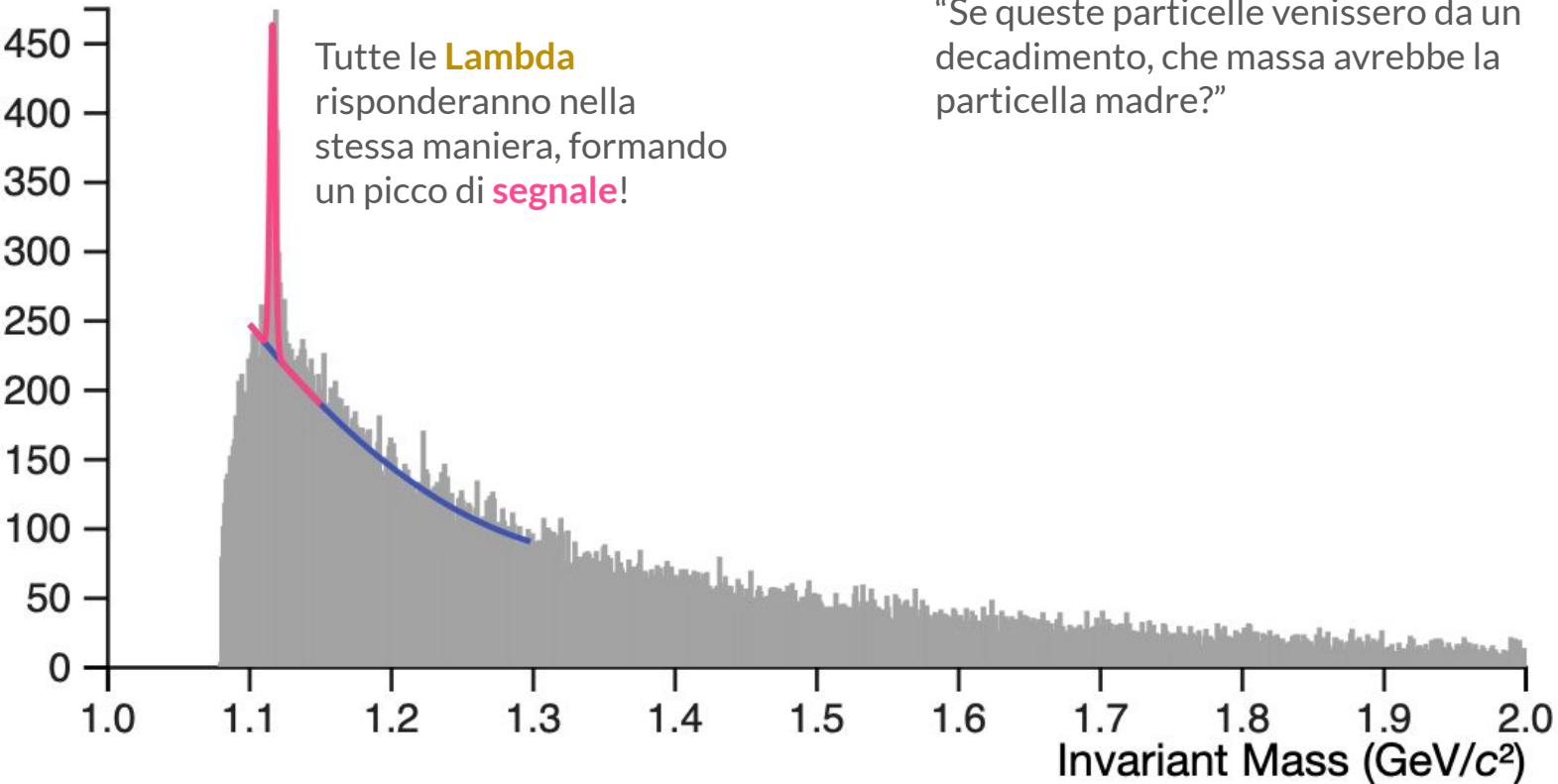
# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



“Se queste particelle venissero da un decadimento, che massa avrebbe la particella madre?”



# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante





# Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

