

L'esperimento ALICE

2025 ALICE Masterclass

Pietro Antonioli
Francesca Ercolessi
Nicola Rubini
Giovanni Malfattore
Sofia Tomassini

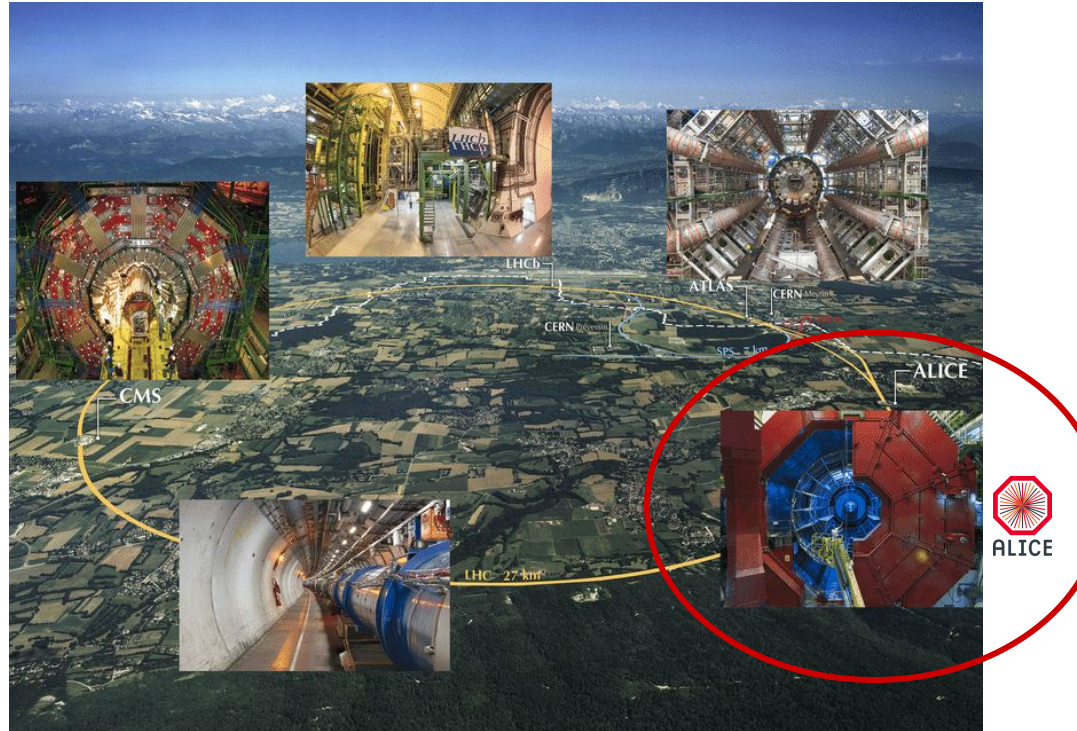


L'acceleratore LHC

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**



L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

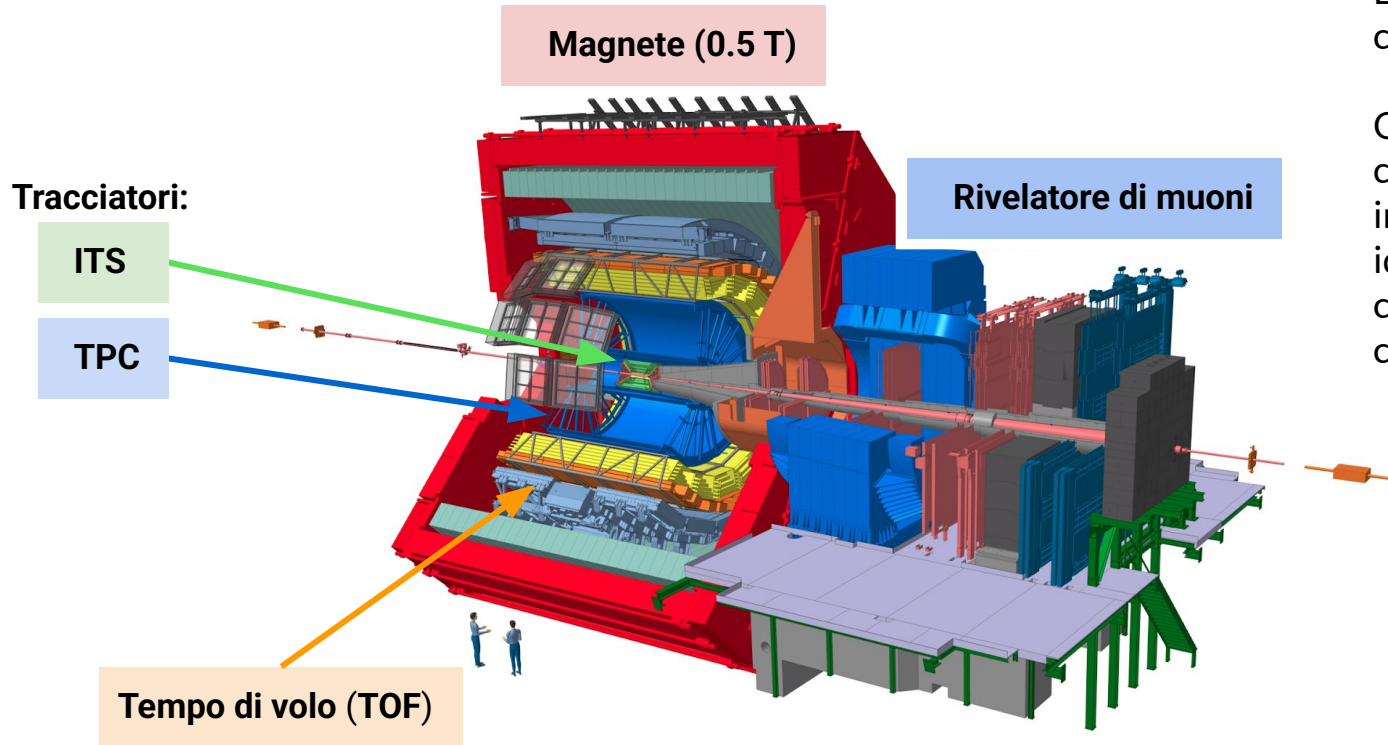


ALICE

A JOURNEY OF DISCOVERY



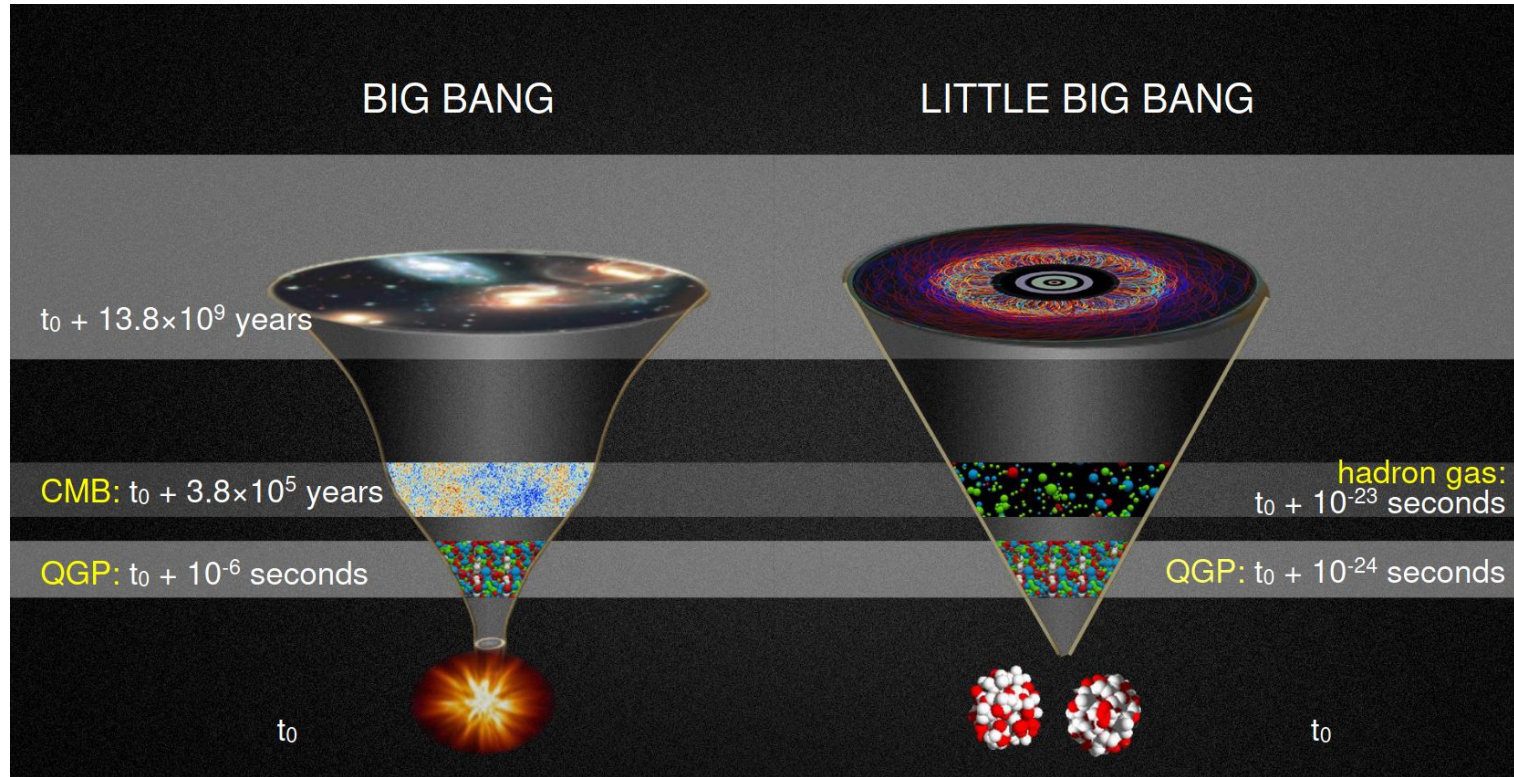
L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)



L'esperimento ALICE è composto da vari rivelatori

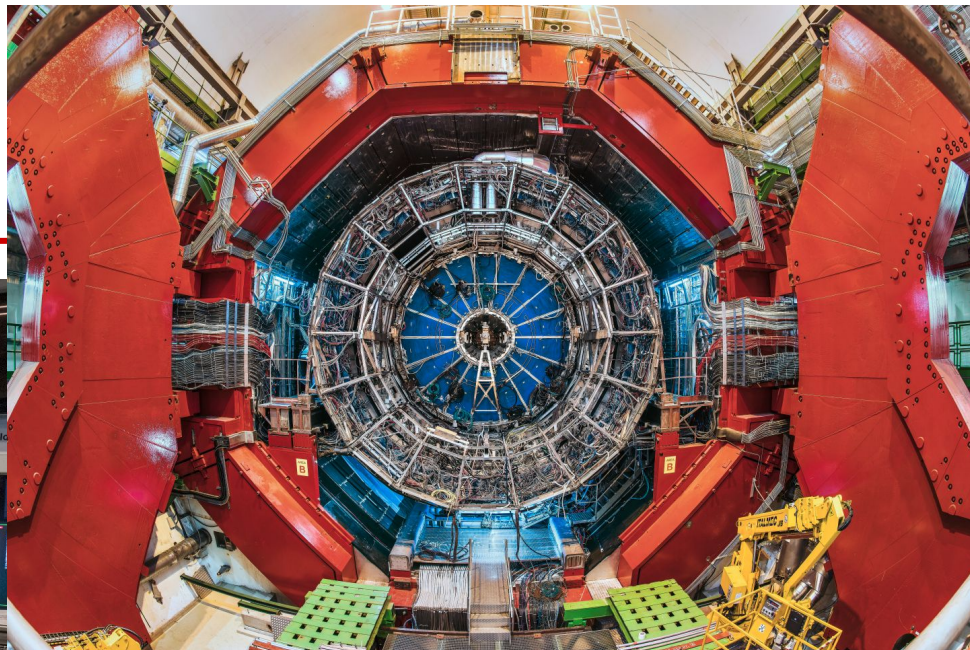
Ognuno di questi contribuisce a fornire informazioni chiave per identificare le particelle che vengono create nelle collisioni

Big (little) BANG!



ALICE da vicino

ALICE control room



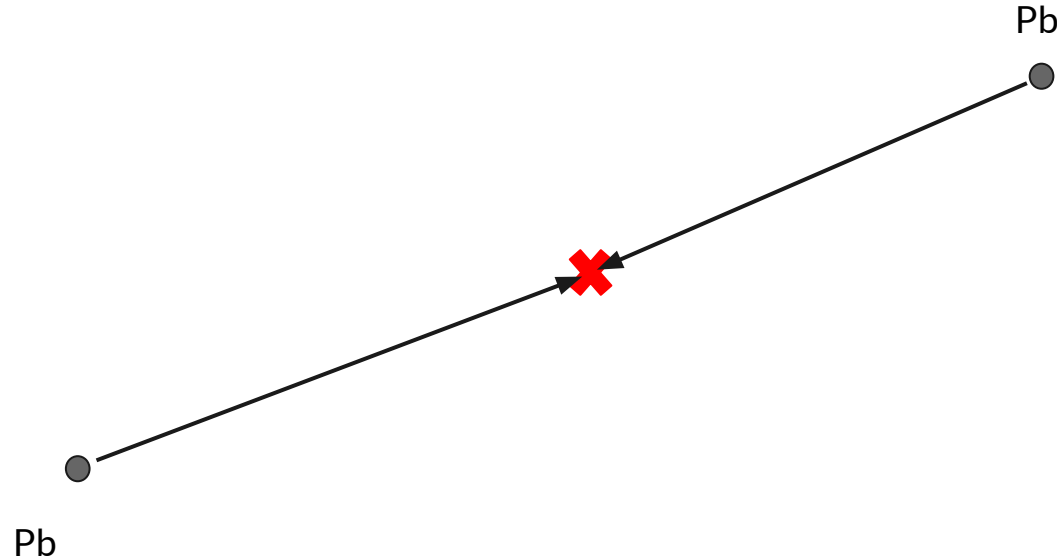
ALICE cavern

ALICE da vicino

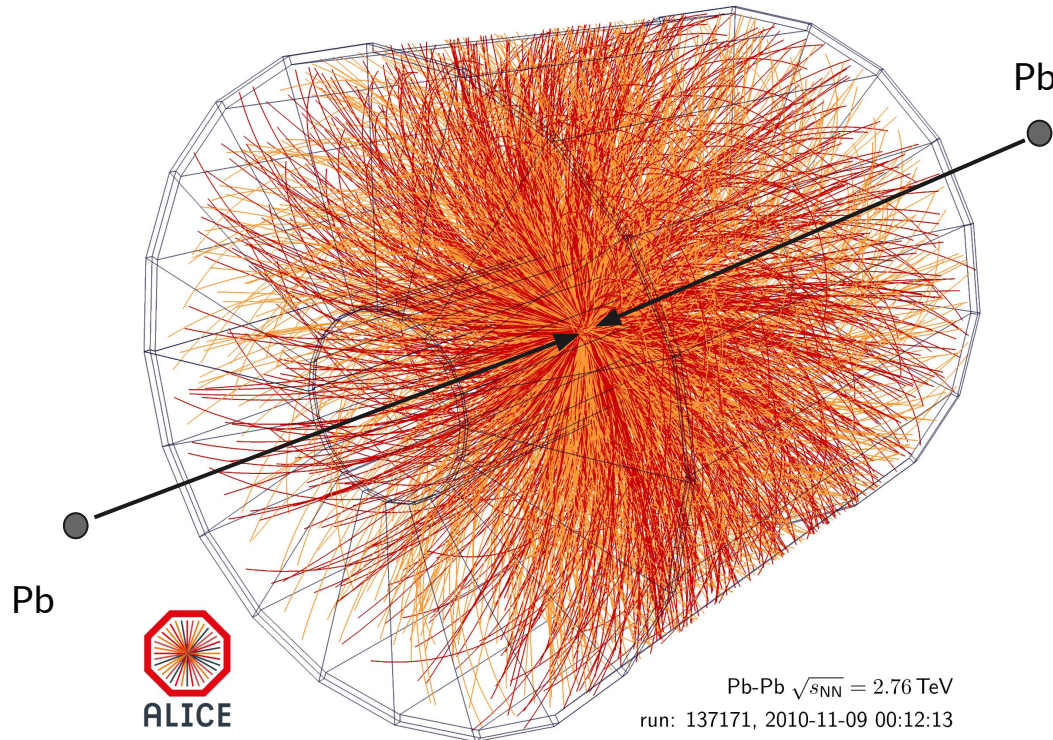


Flying over ALICE: <https://www.youtube.com/watch?v=yWBWzIUcNpw>

Come si presentano i prodotti di questa collisione?



Come si presentano i prodotti di questa collisione?

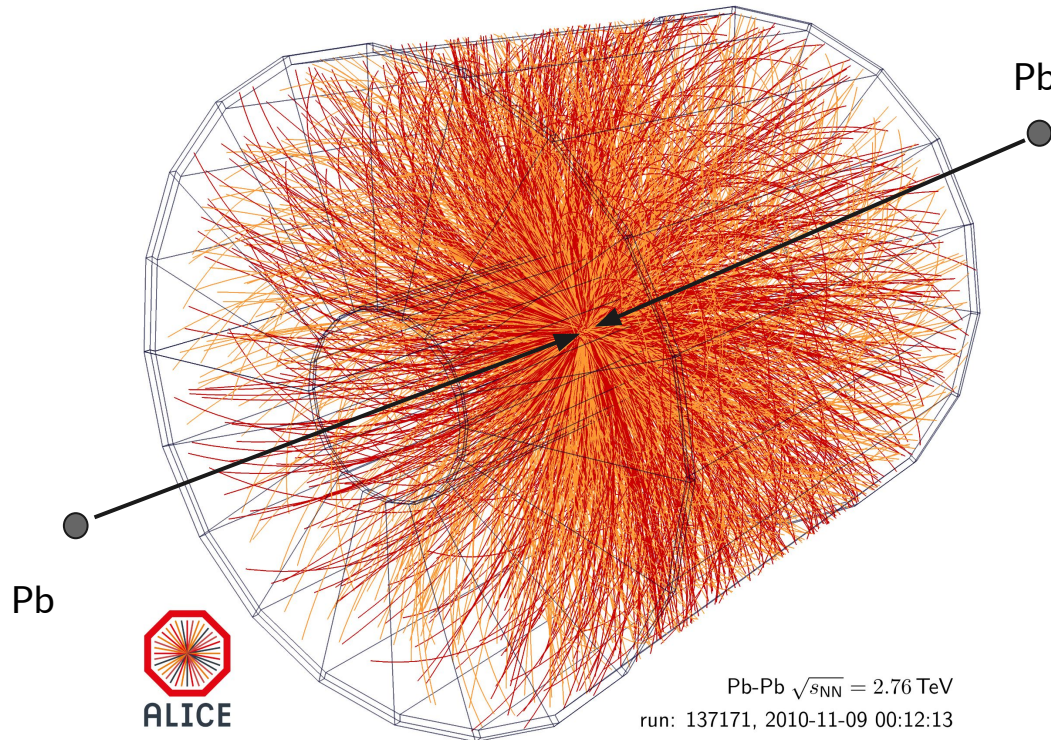


Event display:
migliaia di tracce!

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

Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
run: 137171, 2010-11-09 00:12:13

Come si presentano i prodotti di questa collisione?

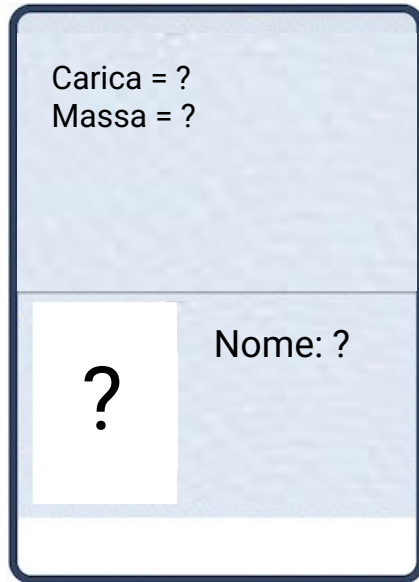


Event display:
migliaia di tracce!

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:

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

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:

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

$$\beta = v/c$$

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 10⁻¹⁹ 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 / velocità² = eV/c²

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:

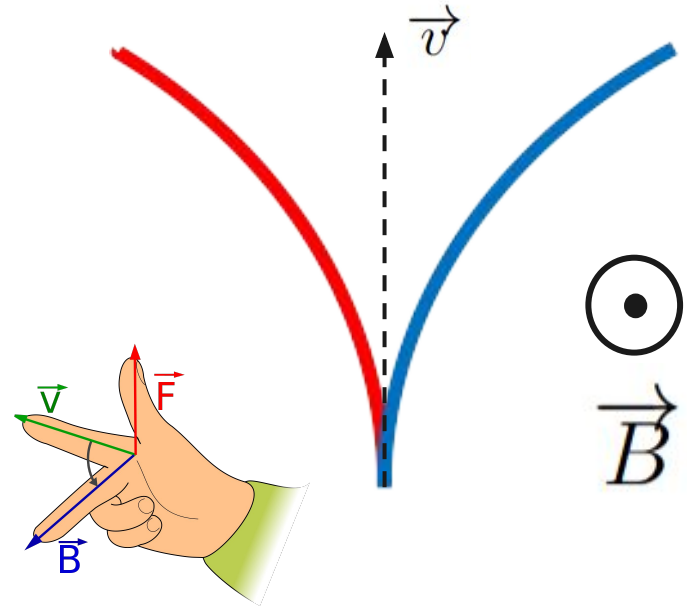
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La forza è sempre ortogonale al campo magnetico e alla velocità

Il segno della carica decide il verso della forza

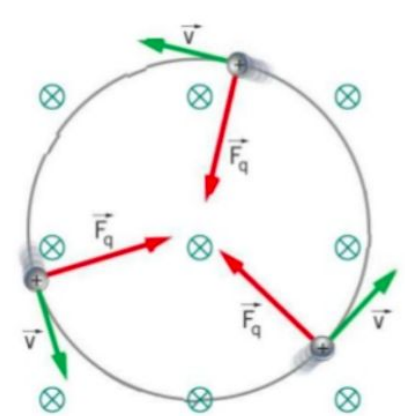
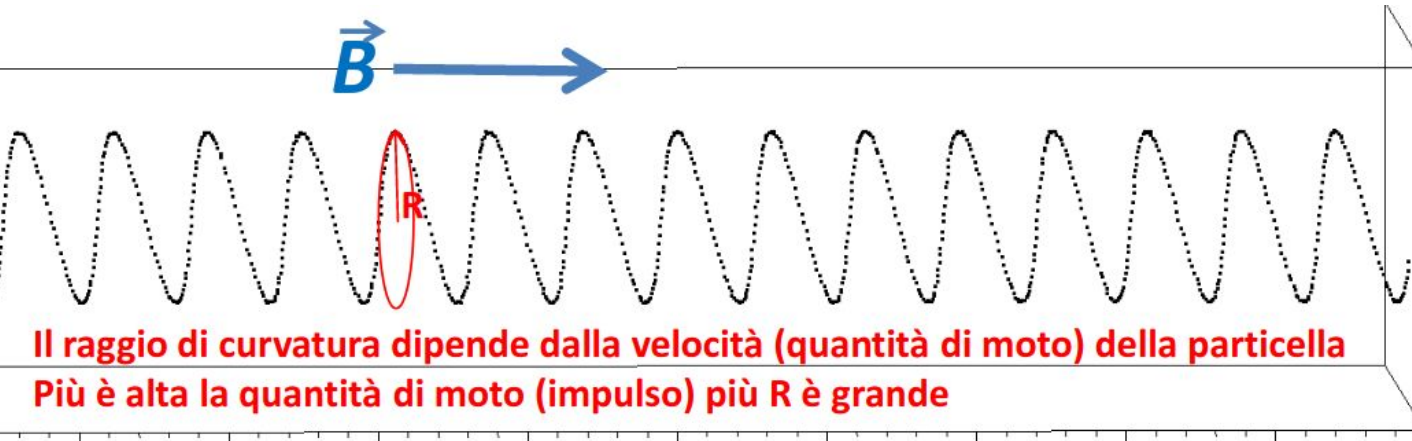
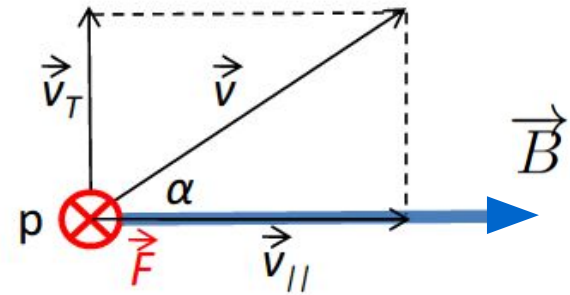
Particella con carica **negativa**

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

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

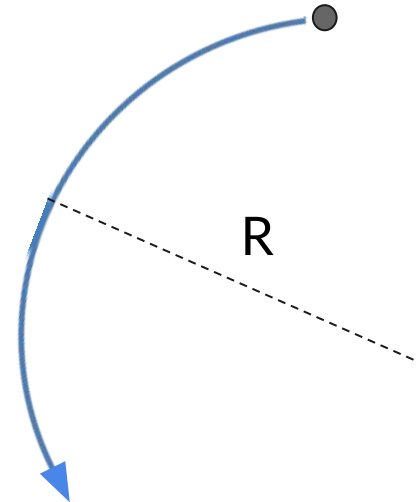
Forza di Lorentz

Se misuro ...

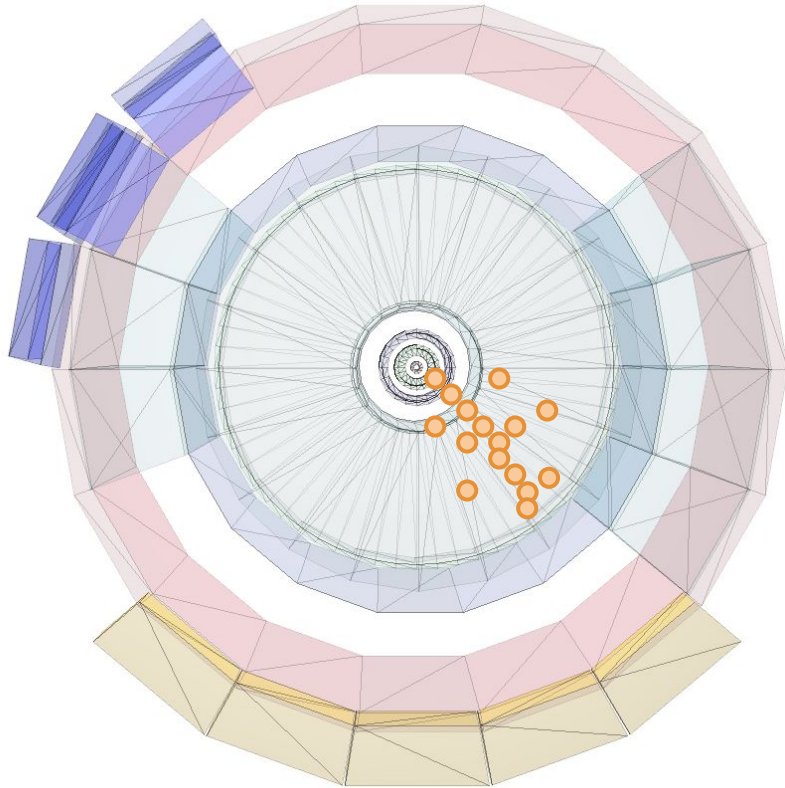
$$R = \frac{p_T}{0.3B}$$

... ricavo

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



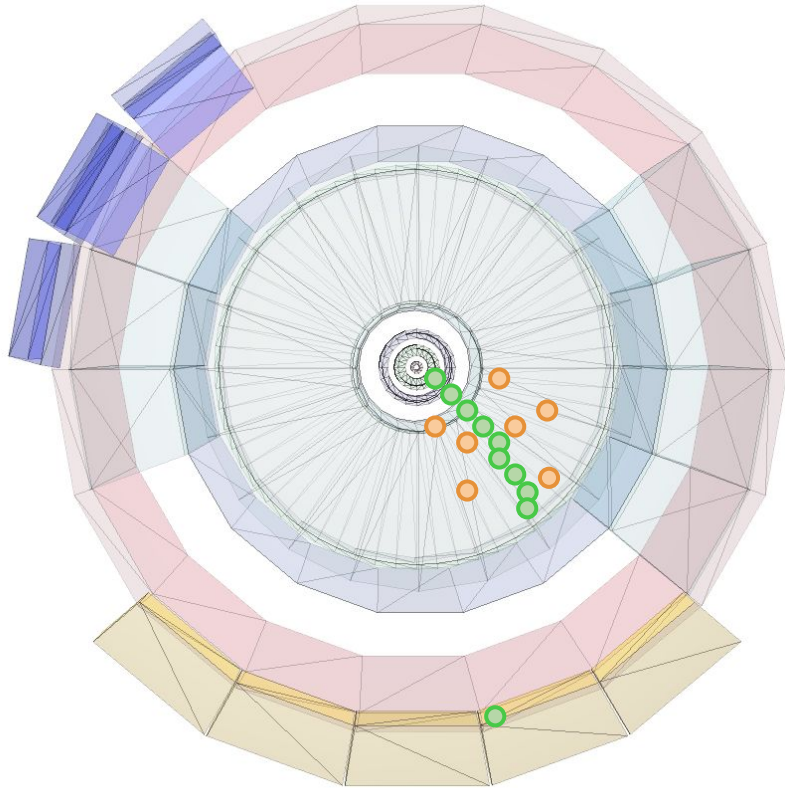
Ricostruzione delle tracce in ALICE



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

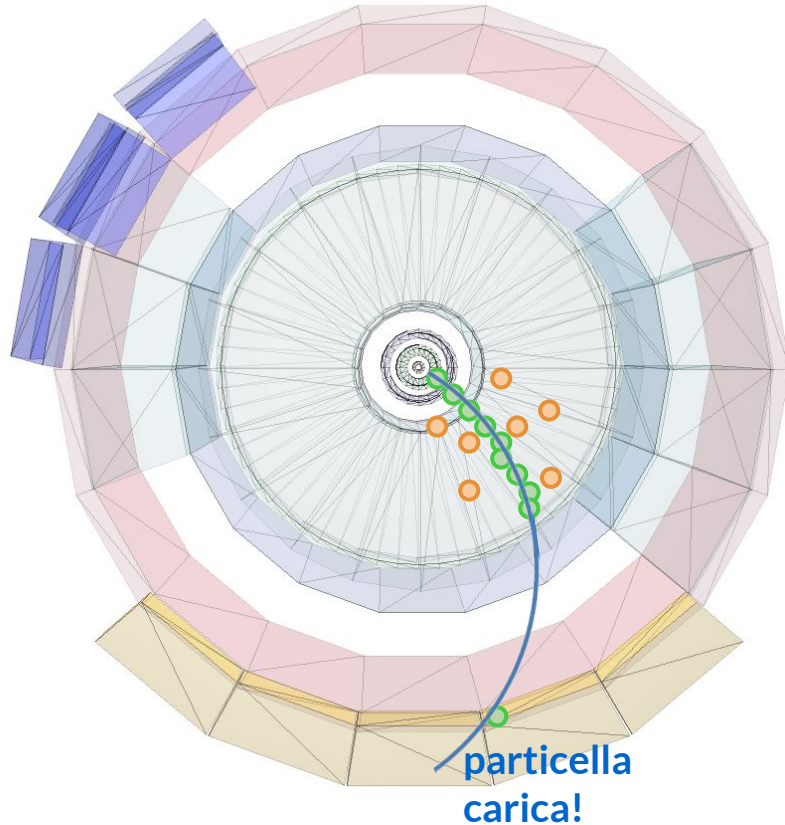
Ricostruzione delle tracce in ALICE



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

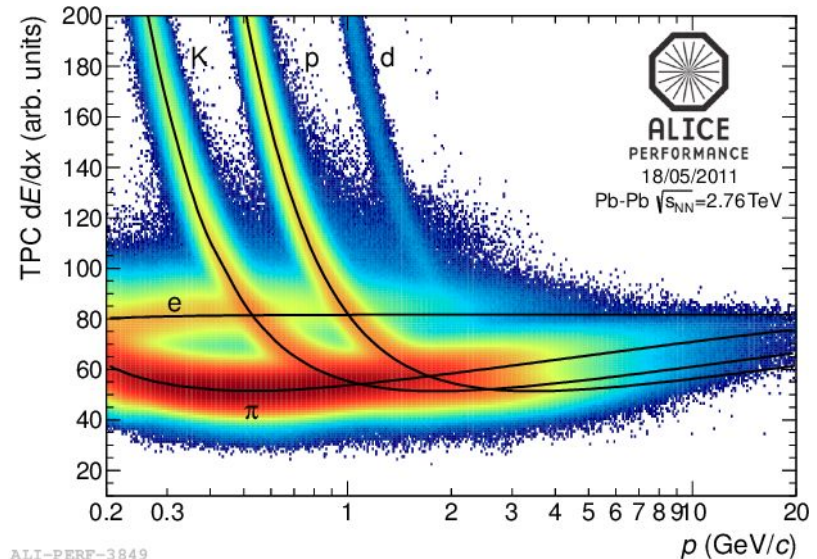
$$p_T = R \cdot 0.3 \cdot B$$

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:

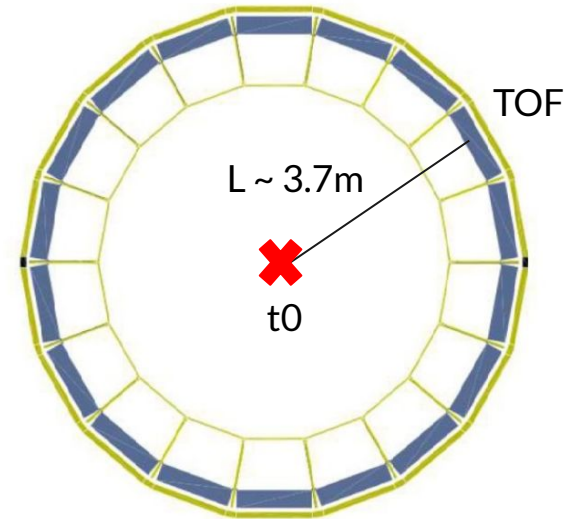
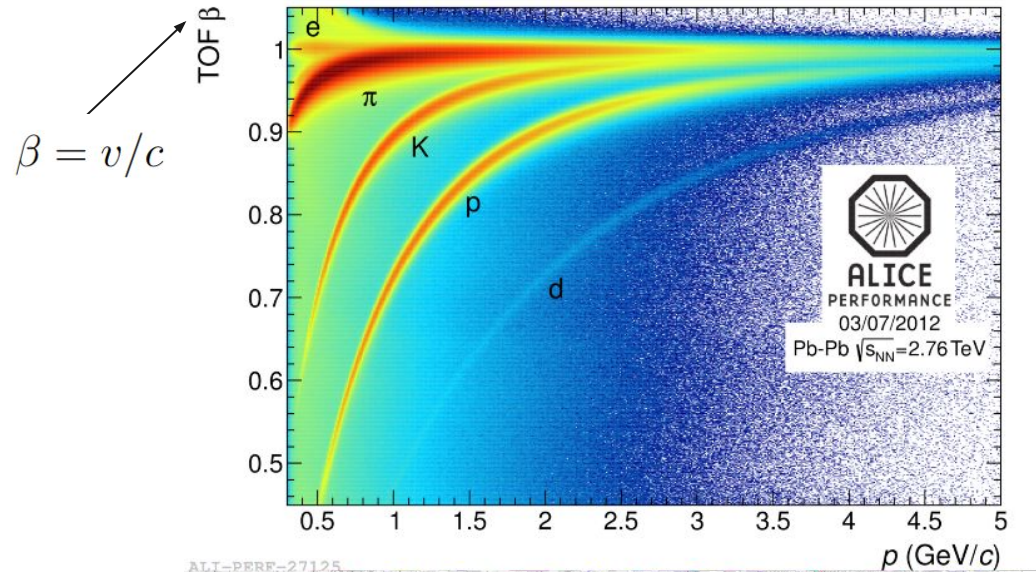
- **Perdita di energia** nel materiale del rivelatore da una particella
- **Tempo di volo:** misura diretta della velocità
- **Emissione di luce Cherenkov:**
la velocità della luce in un materiale dipende dall'indice di rifrazione, se la particella si muove più veloce di c/n emette un cono di luce



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)



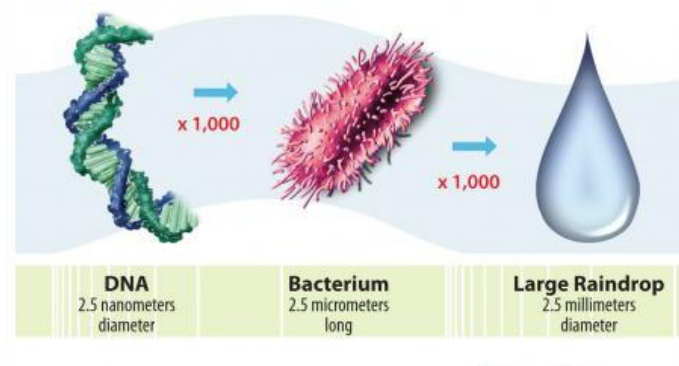
E perche' importa?



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

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

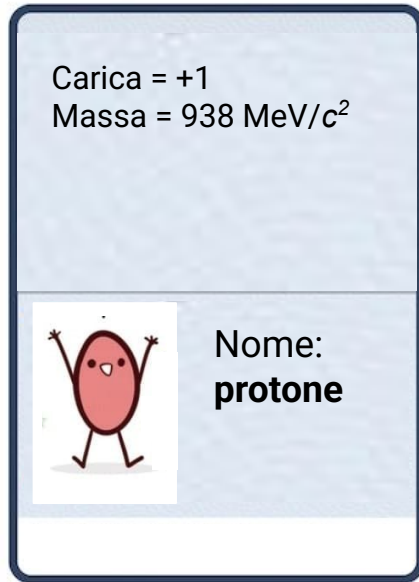
Se viaggiate ai **130 km/h** (~ 36 m/s) percorrete **2 nm**



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

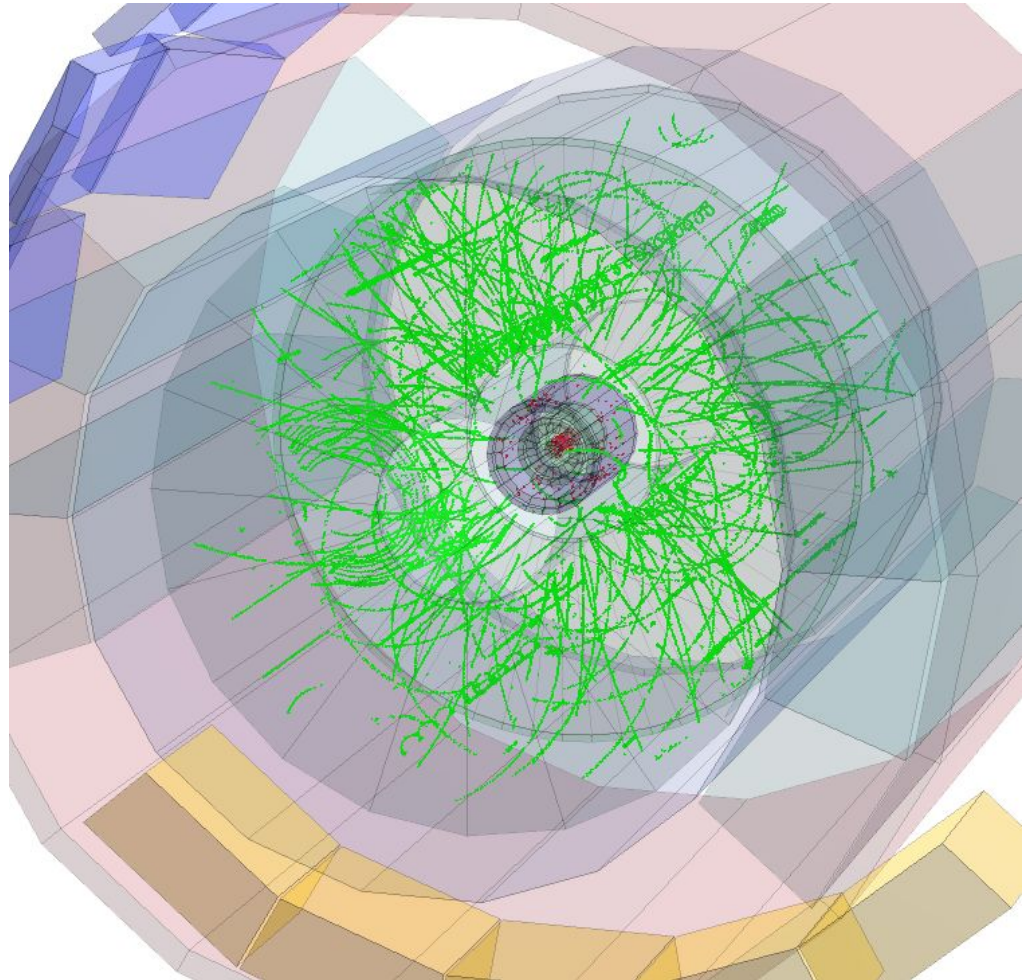
$$m = \frac{p}{\beta \cdot \gamma \cdot c}$$

$$\beta = v/c$$

Event display

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

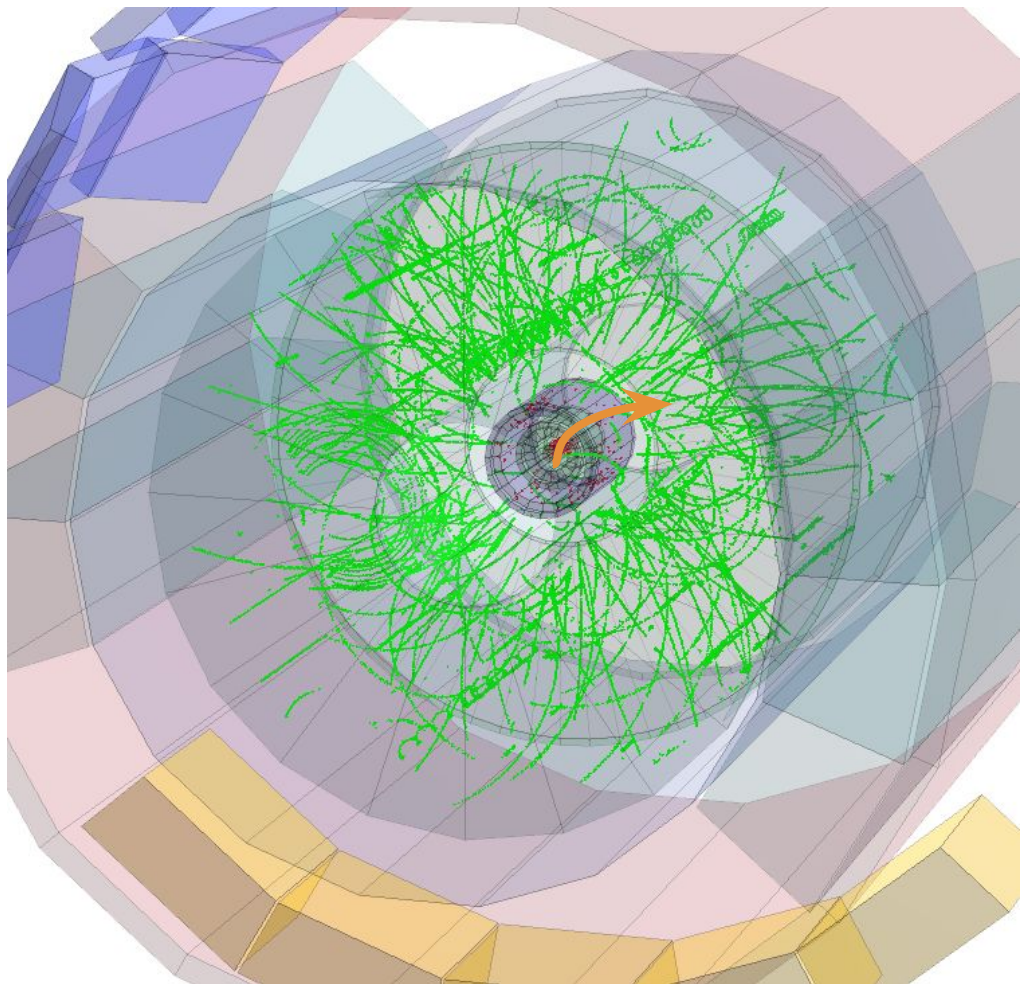
- in **rosso** i segnali misurati dal tracciatore interno (ITS, *Inner Tracking System*)
- in **verde** i segnali misurati dal tracciatore principale (TPC, *Time Projection Chamber*)



Event display

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

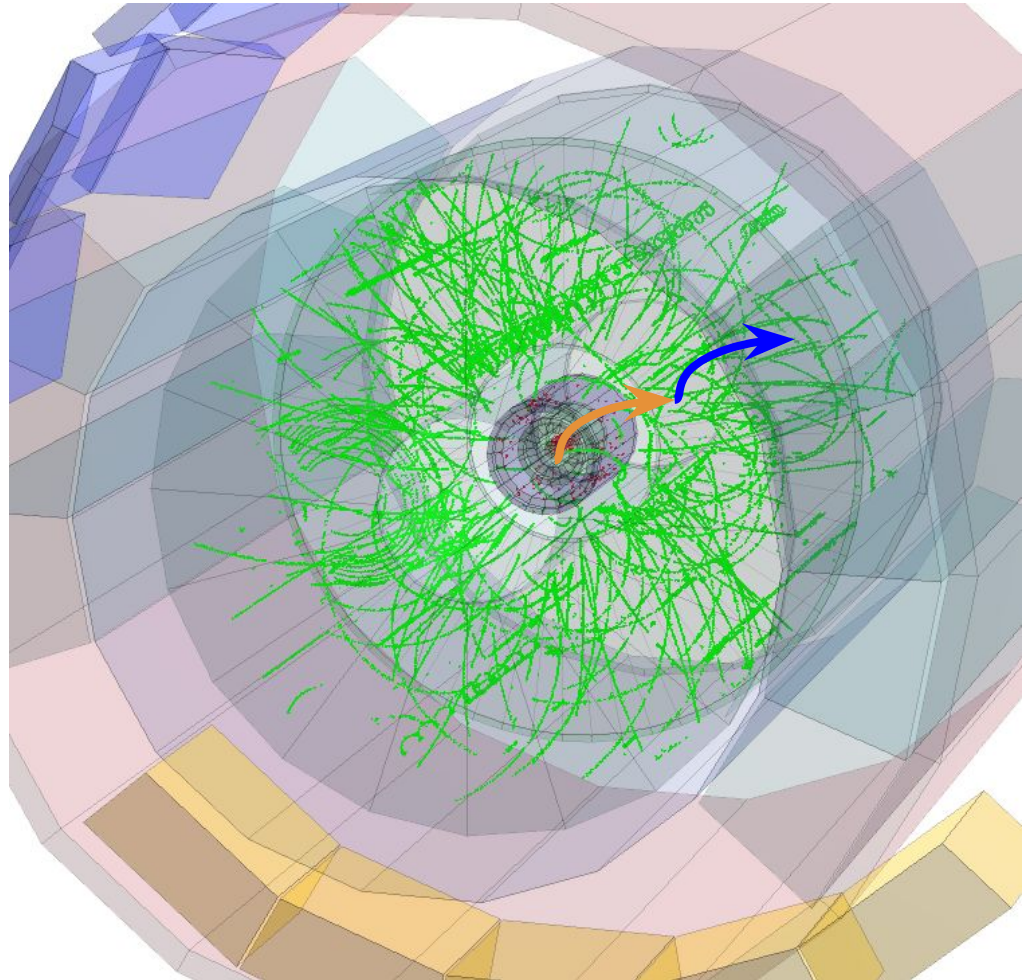
- **Particelle primarie:** archi che puntano al “vertice primario” (dove è avvenuta la collisione)



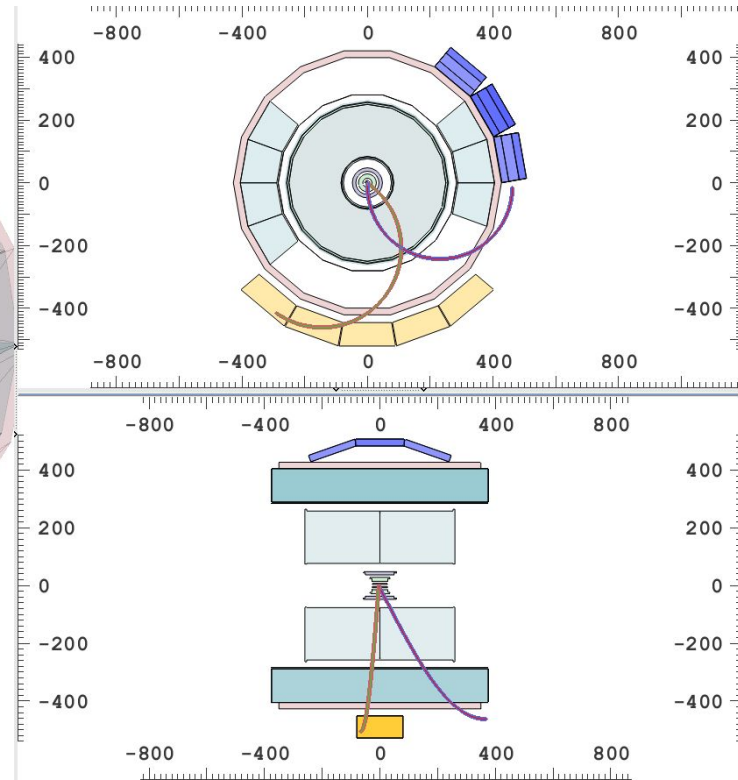
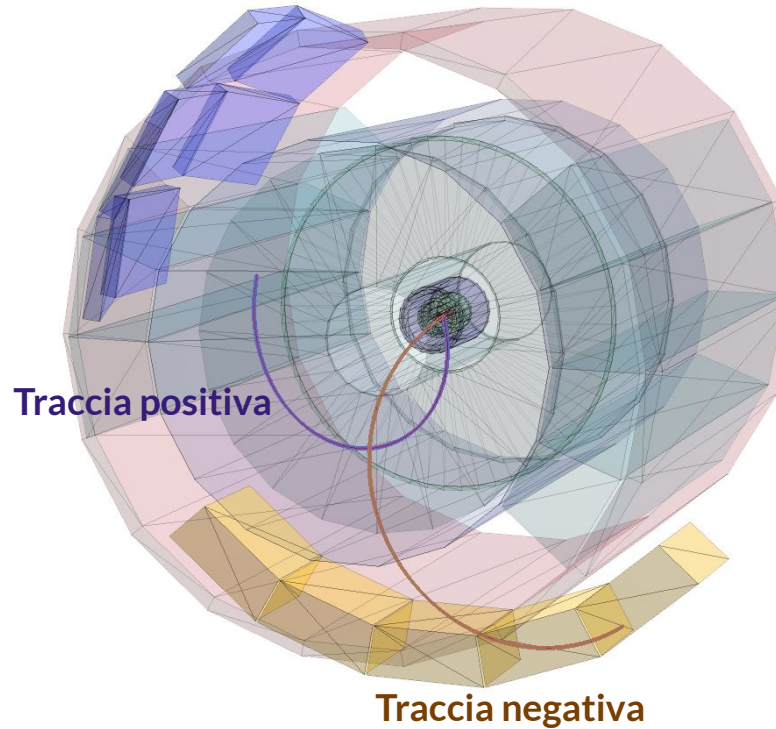
Event display

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 charge spin $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs
QUARKS $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	0 1 Z Z boson	
LEPTONS $< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	
			GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	

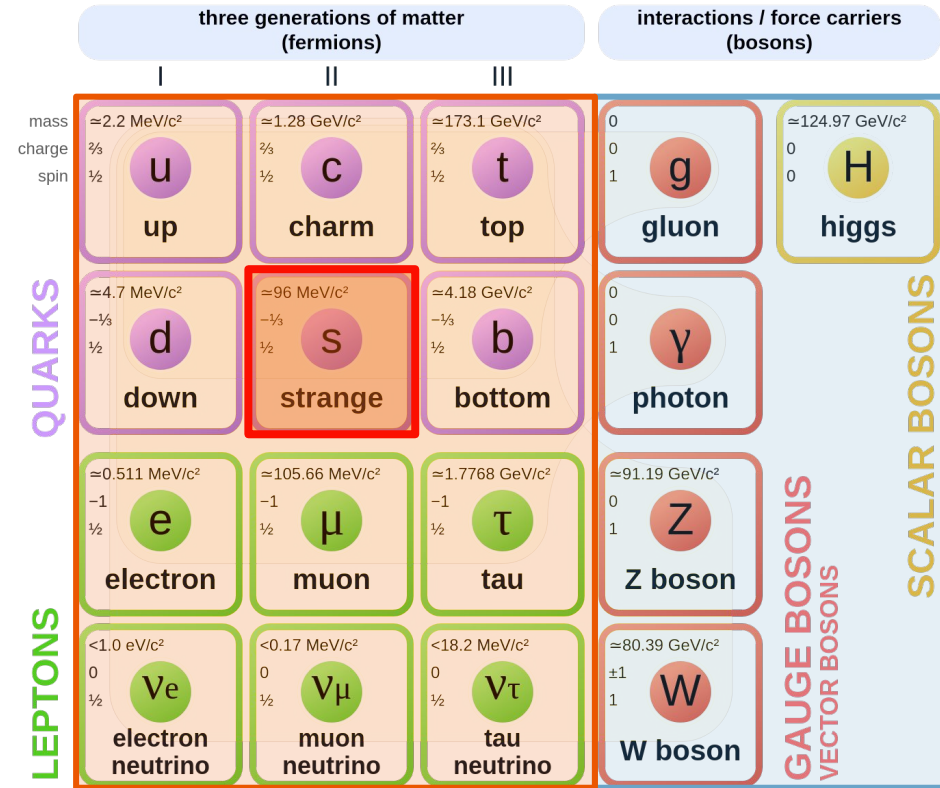
Modello Standard

Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari**!

Standard Model of Elementary Particles

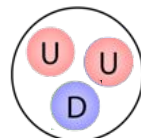
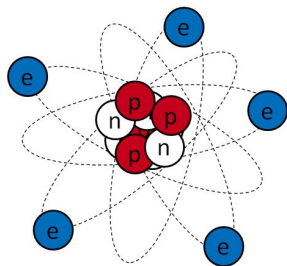


Modello Standard

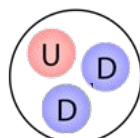
Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

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



Proton



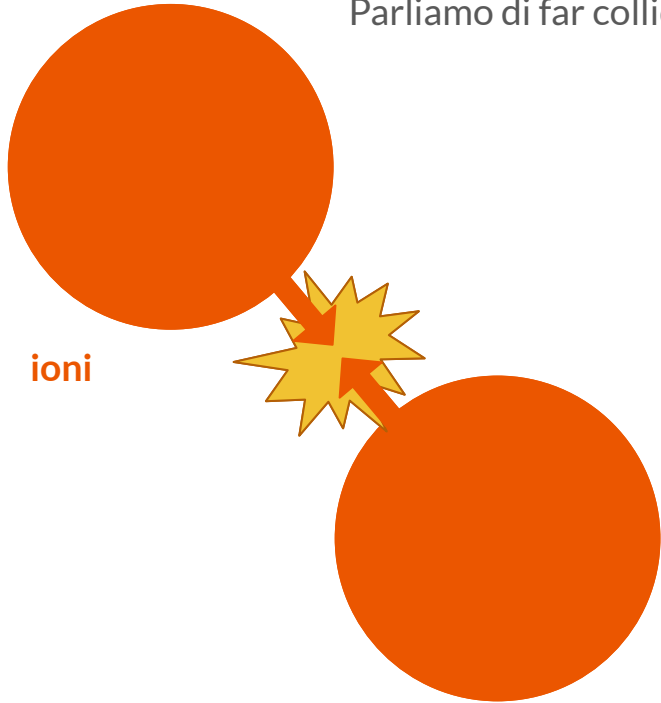
Neutron

Standard Model of Elementary Particles

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

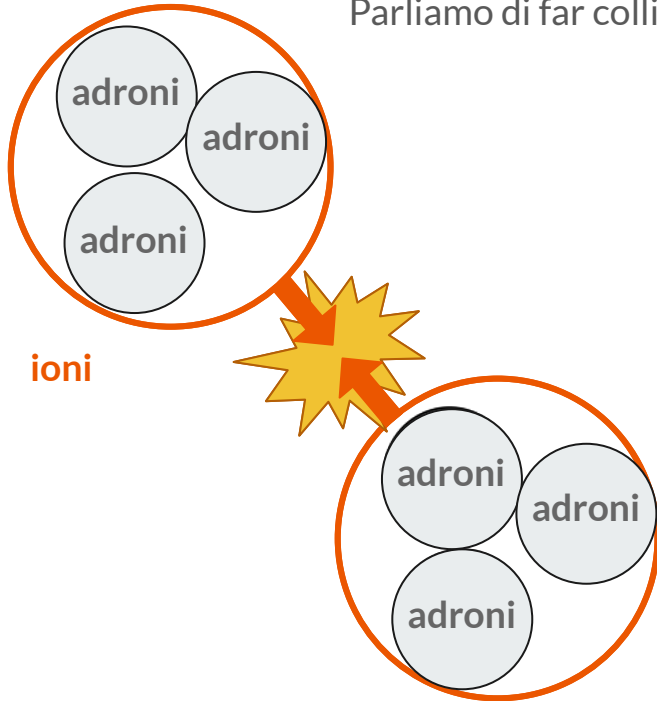
Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

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



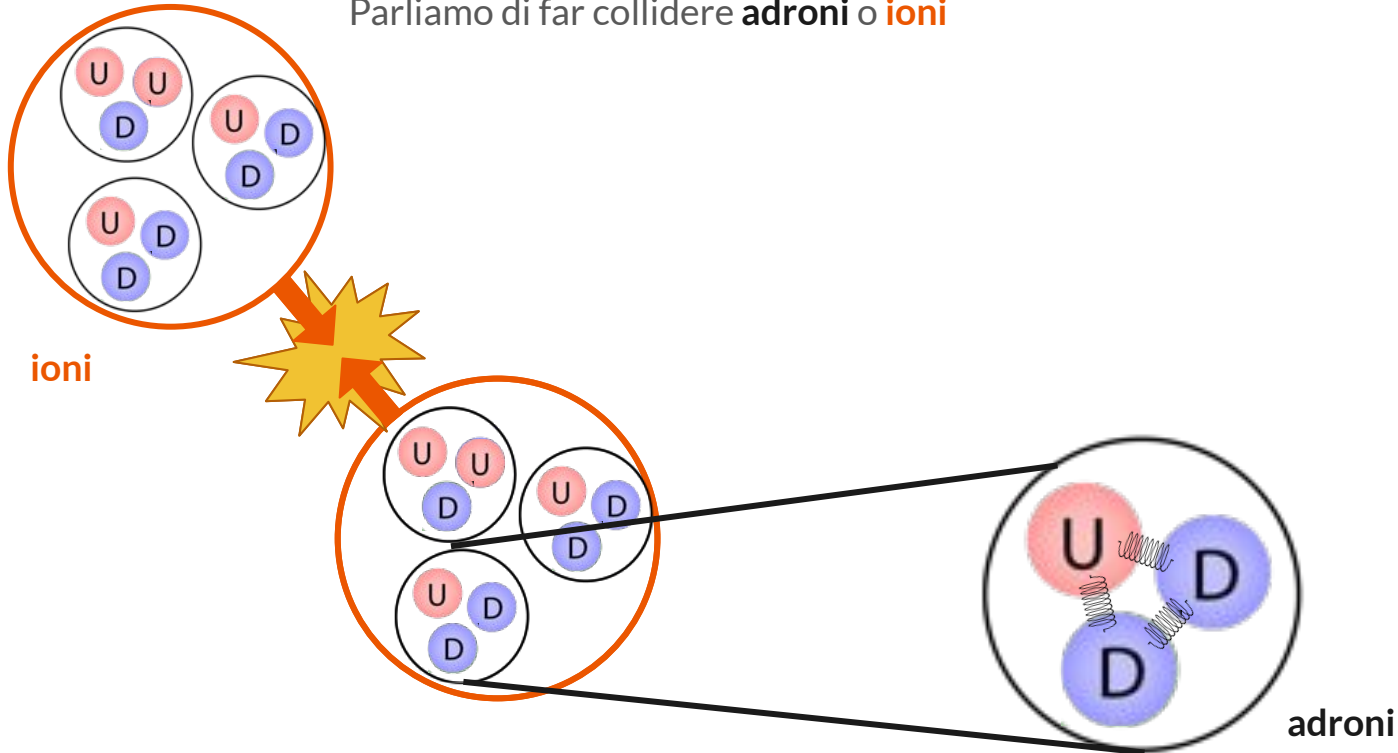
Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

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



Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

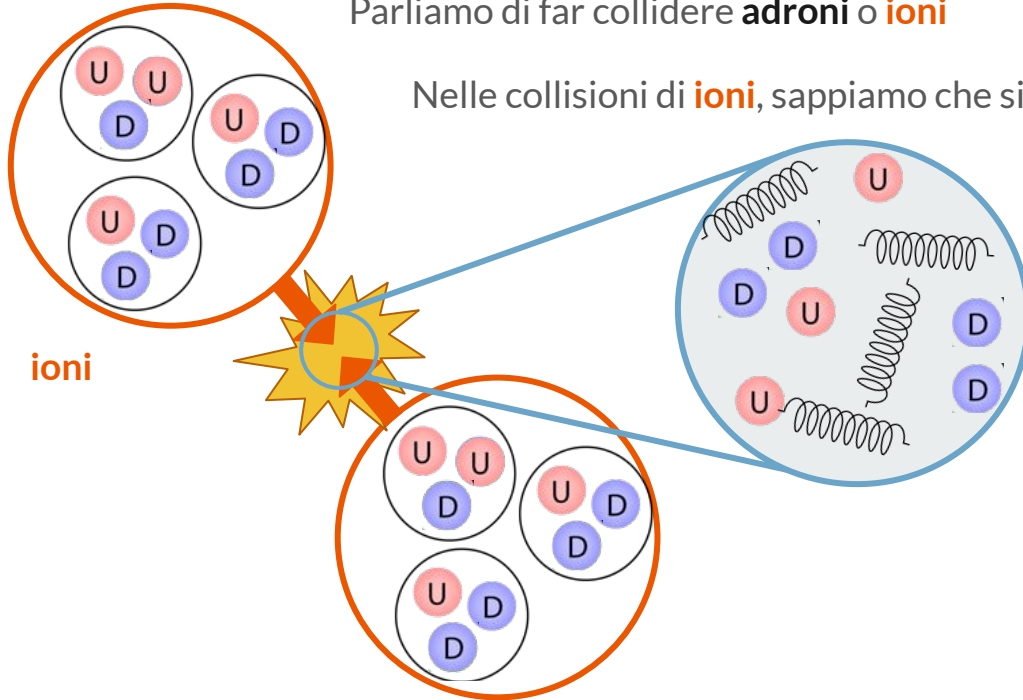
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**



Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

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

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



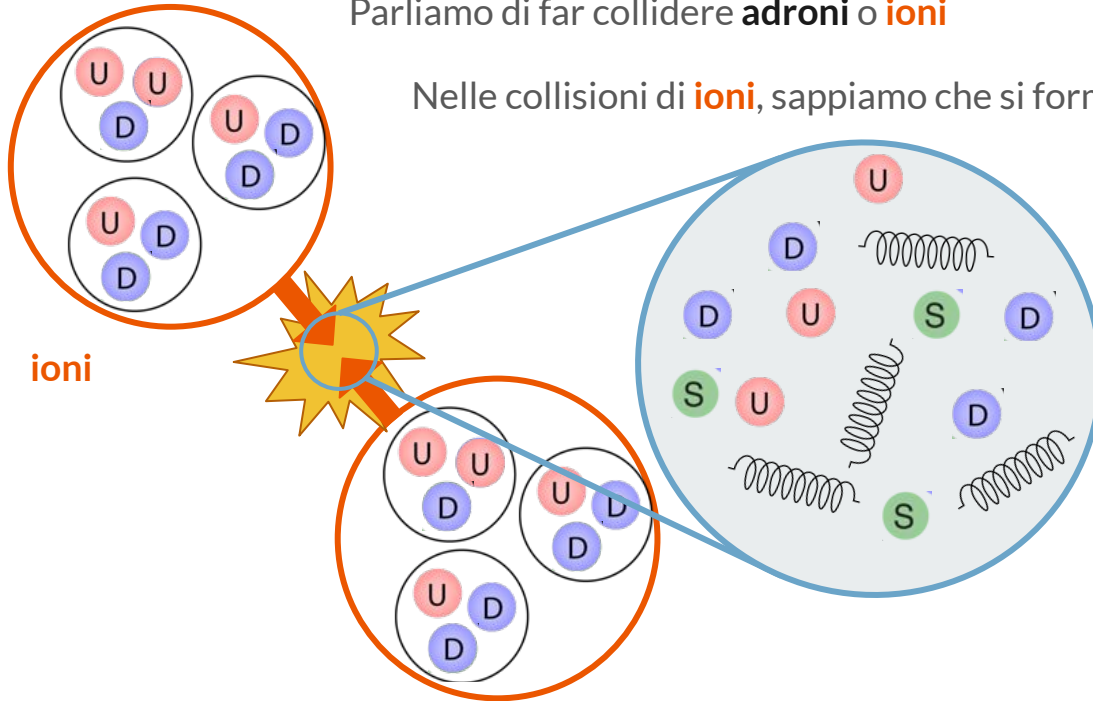
Standard Model of Elementary Particles

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

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**

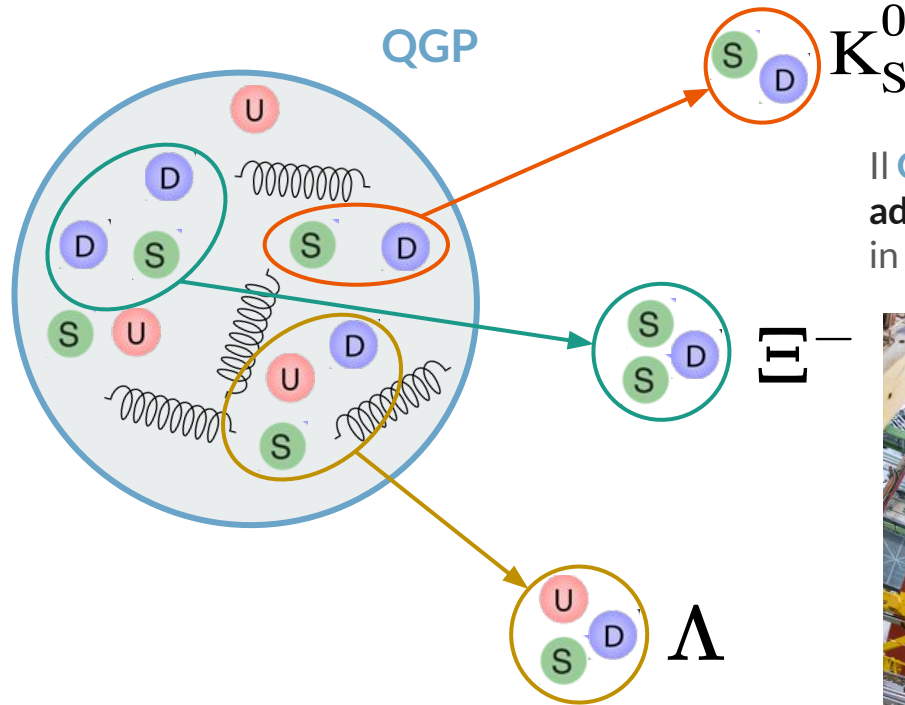
Si parla di “deconfinamento”

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		
QUARKS	$m \approx 2.2 \times 10^{-36}$ kg charge $+\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ U up	$m \approx 1.28 \times 10^{-36}$ kg charge $+\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	$m \approx 173.1 \times 10^{-36}$ kg charge $+\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top	$m = 0$ charge 0 spin 1 g gluon	$m = 124.97 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H higgs
	$m \approx 2.7 \times 10^{-36}$ kg charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ D down	$m \approx 96 \times 10^{-36}$ kg charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ S strange	$m \approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ b bottom	$m = 0$ charge 0 spin 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	LEPTONS	$m \approx 5.11 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ e electron	$m \approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ μ muon	$m \approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ τ tau	
$m < 1.0 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino		$m < 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$m < 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$m \approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson	

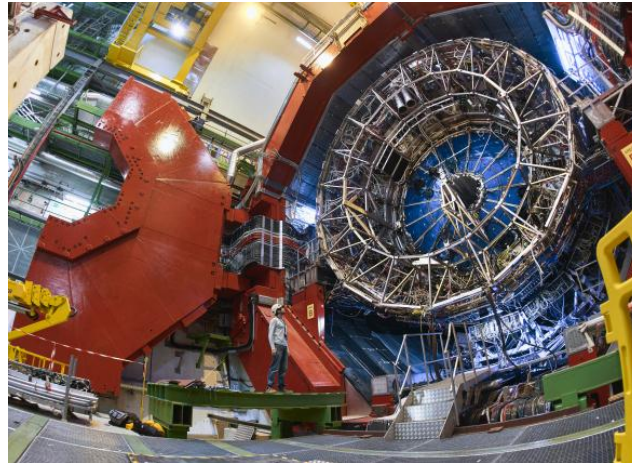
Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma



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

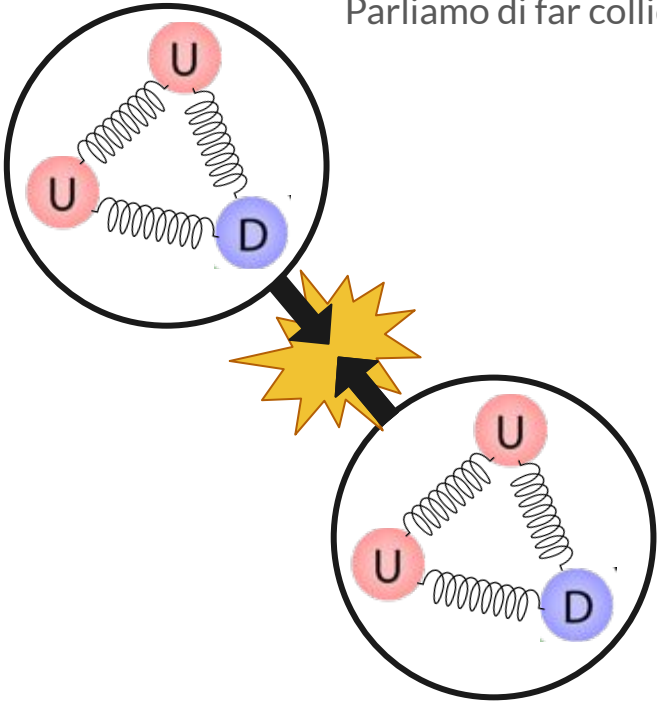
Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I			II			III	
mass	≈2.2	≈1.28	≈173.1	0		≈124.97	
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0		0	
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		1	
QUARKS	U	c	t	g	H	SCALAR BOSONS	
	charm	top	gluon	higgs			
	D	S	b	γ			
	down	strange	bottom	photon			
LEPTONS	e	μ	τ	Z	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS		
	electron	muon	tau	Z boson			
	ν _e	ν _μ	ν _τ	W			
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson			



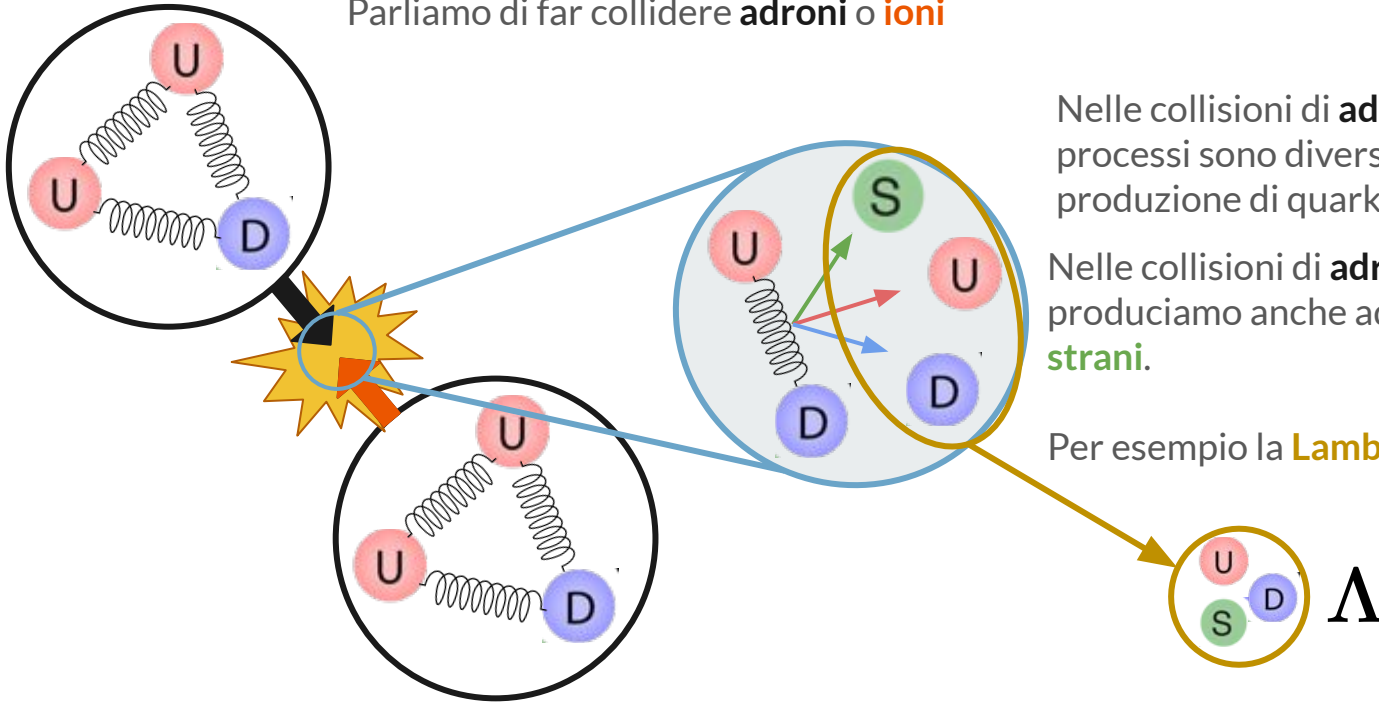
Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

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



Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

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



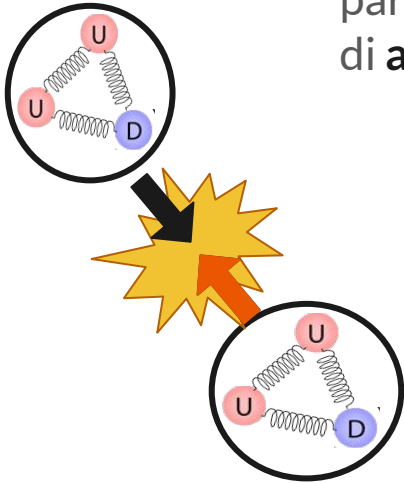
Nelle collisioni di **adroni** i processi sono diversi per la produzione di quark **strani**.

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

Per esempio la **Lambda**

Collisioni adroniche: Aumento di stranezza

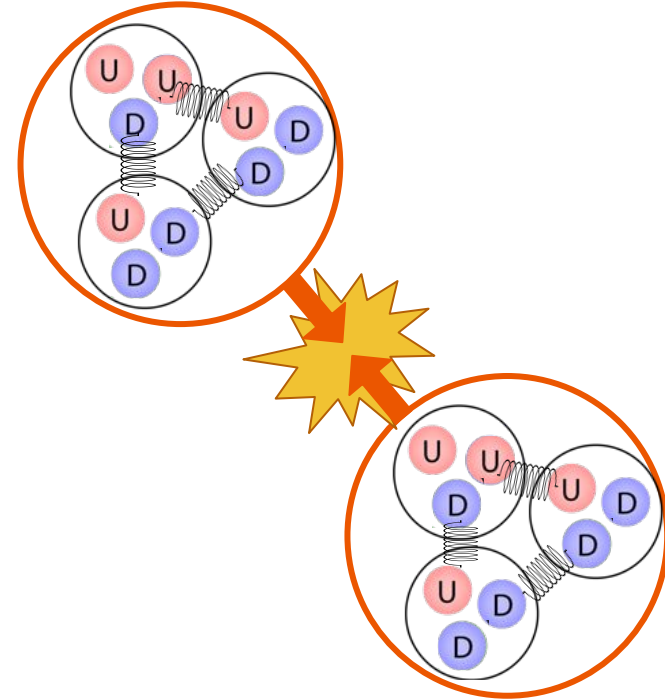
adrone



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

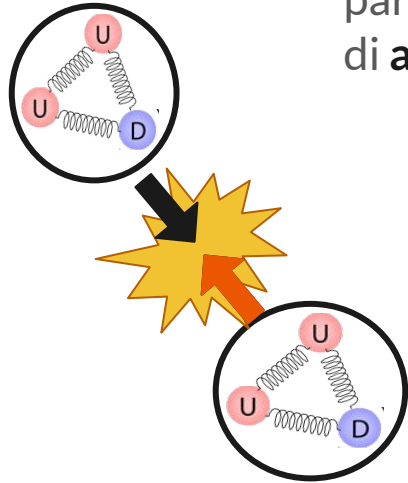
Possiamo paragonarli?

ioni



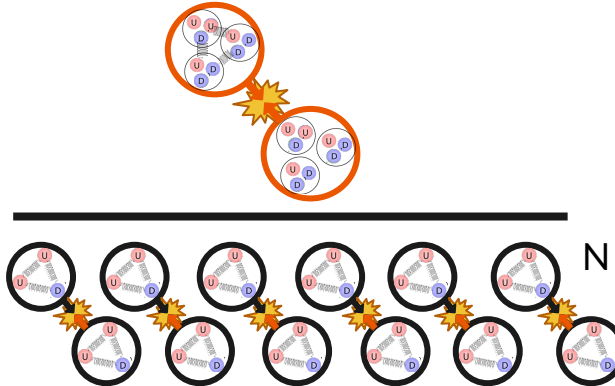
Collisioni adroniche: Aumento di stranezza

adrone

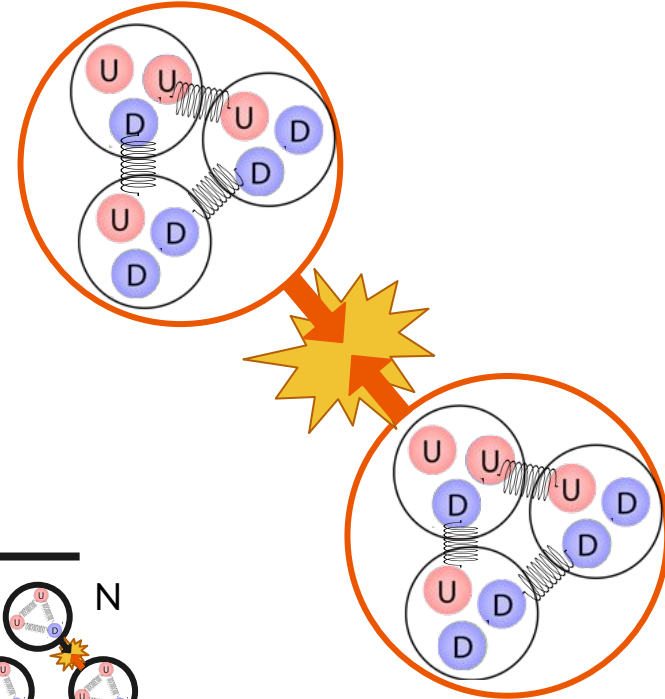


Come cambia la produzione di
particelle **strane** tra collisioni
di **adroni** e collisioni di **ioni**?

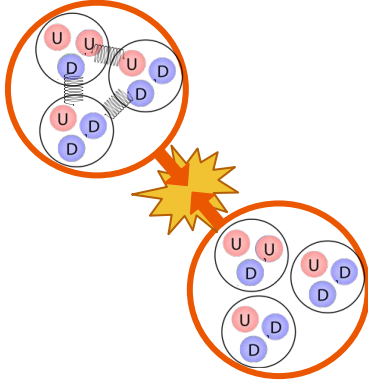
Possiamo paragonarli?



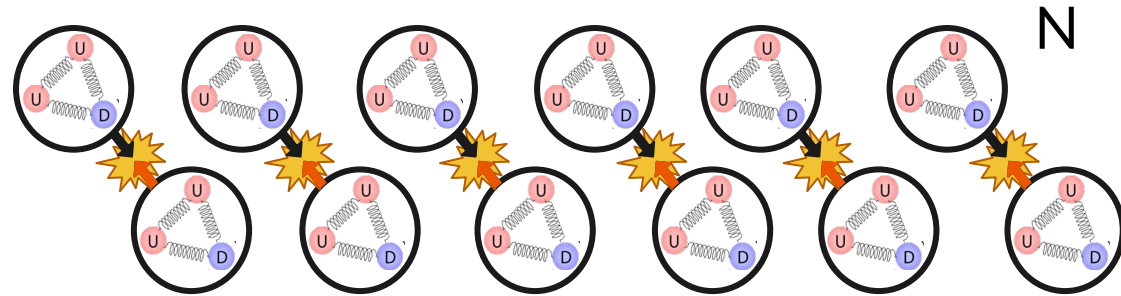
ioni



Collisioni adroniche: Aumento di stranezza



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

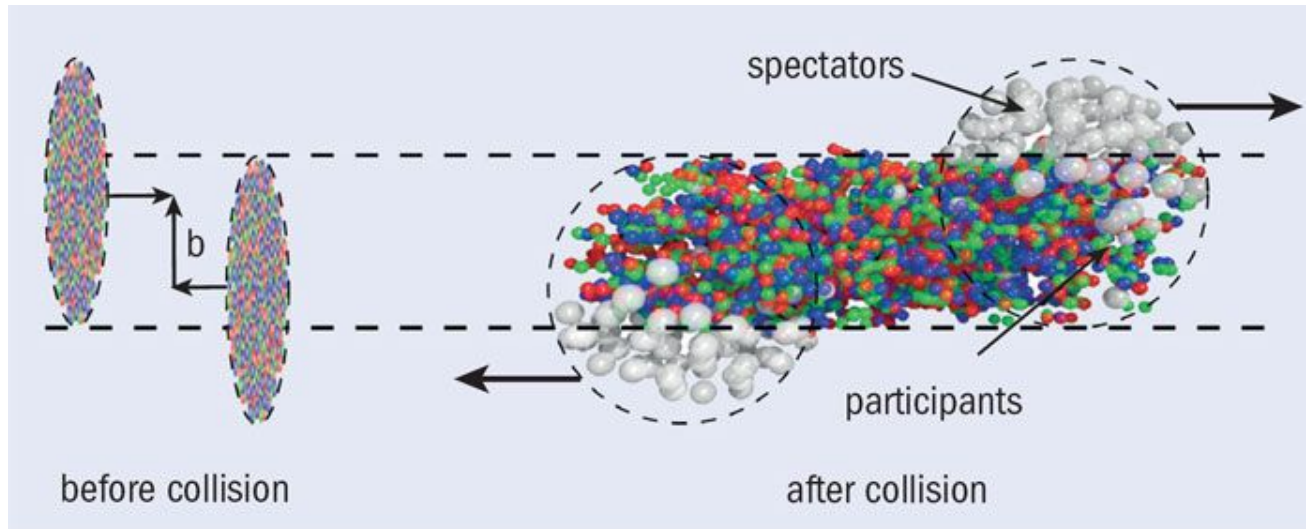


$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} = 1$$

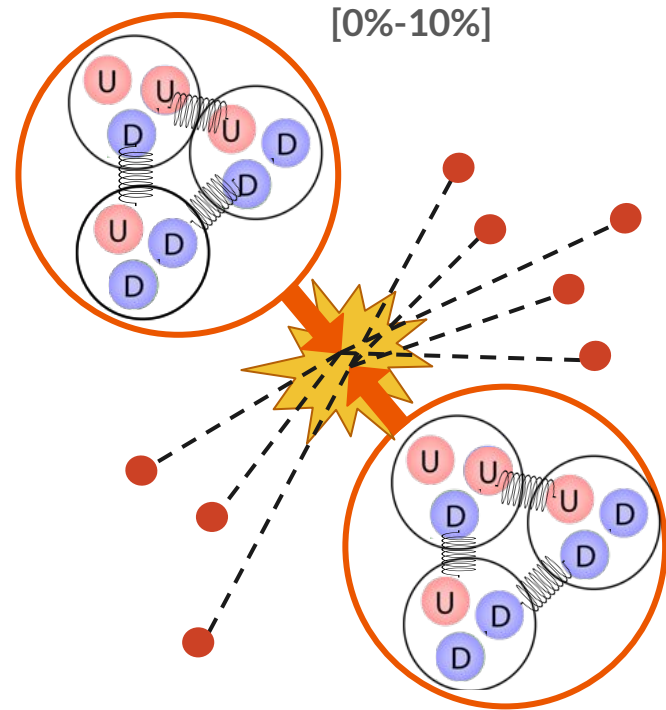
N = numero di partecipanti

Quando due ioni Pb collidono

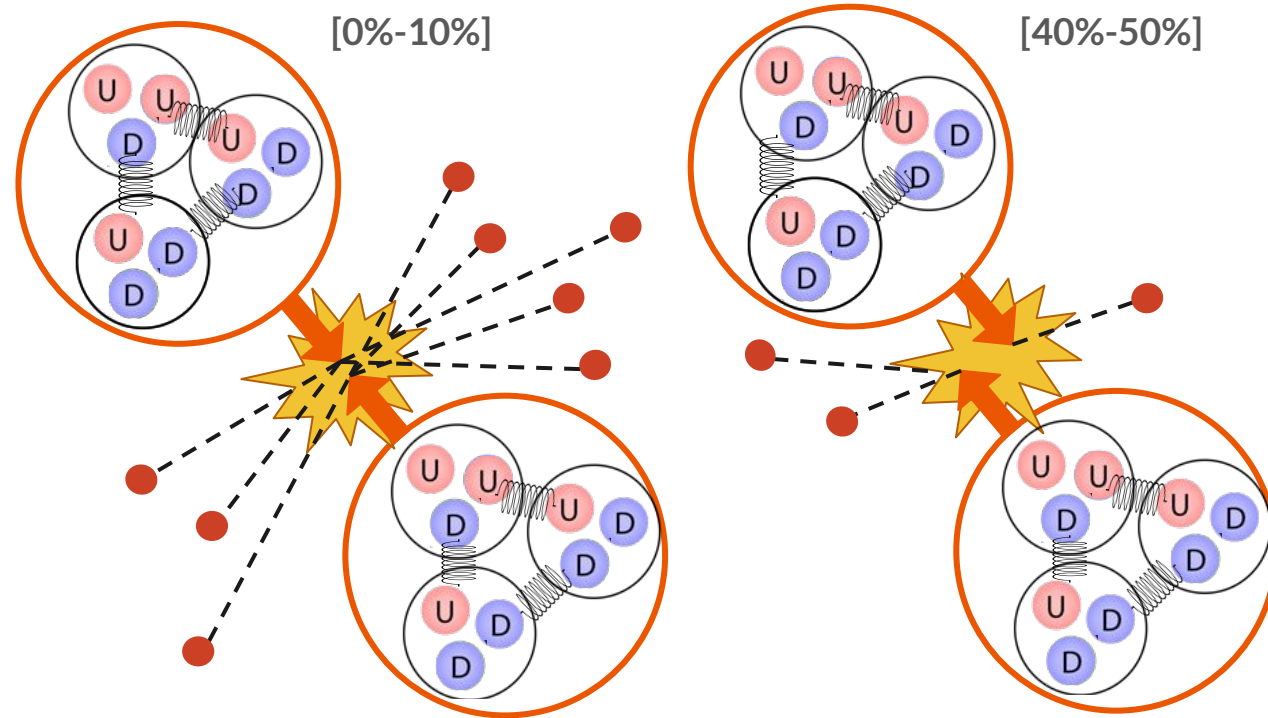
- solo i nucleoni nella zona che si sovrappone collidono e producono QGP: sono i **PARTECIPANTI**
- gli altri continuano a muoversi senza collidere: sono gli **SPETTATORI**



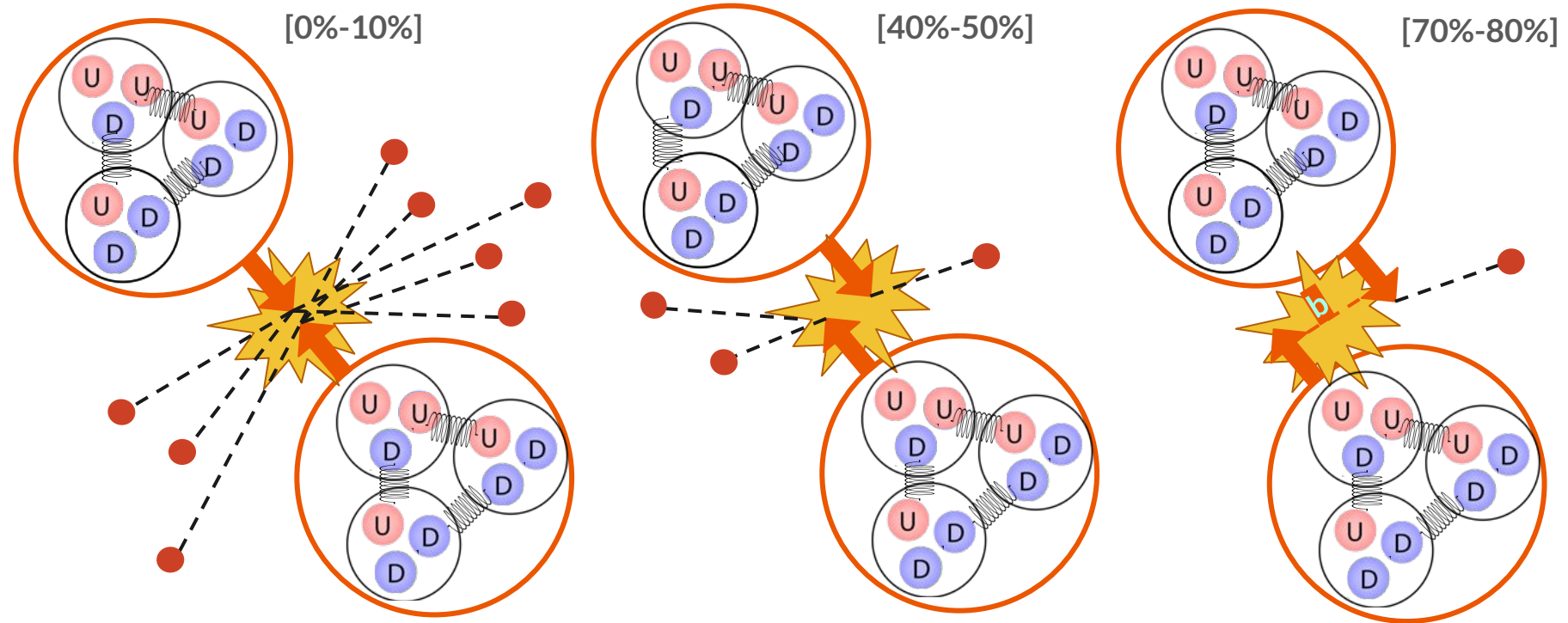
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



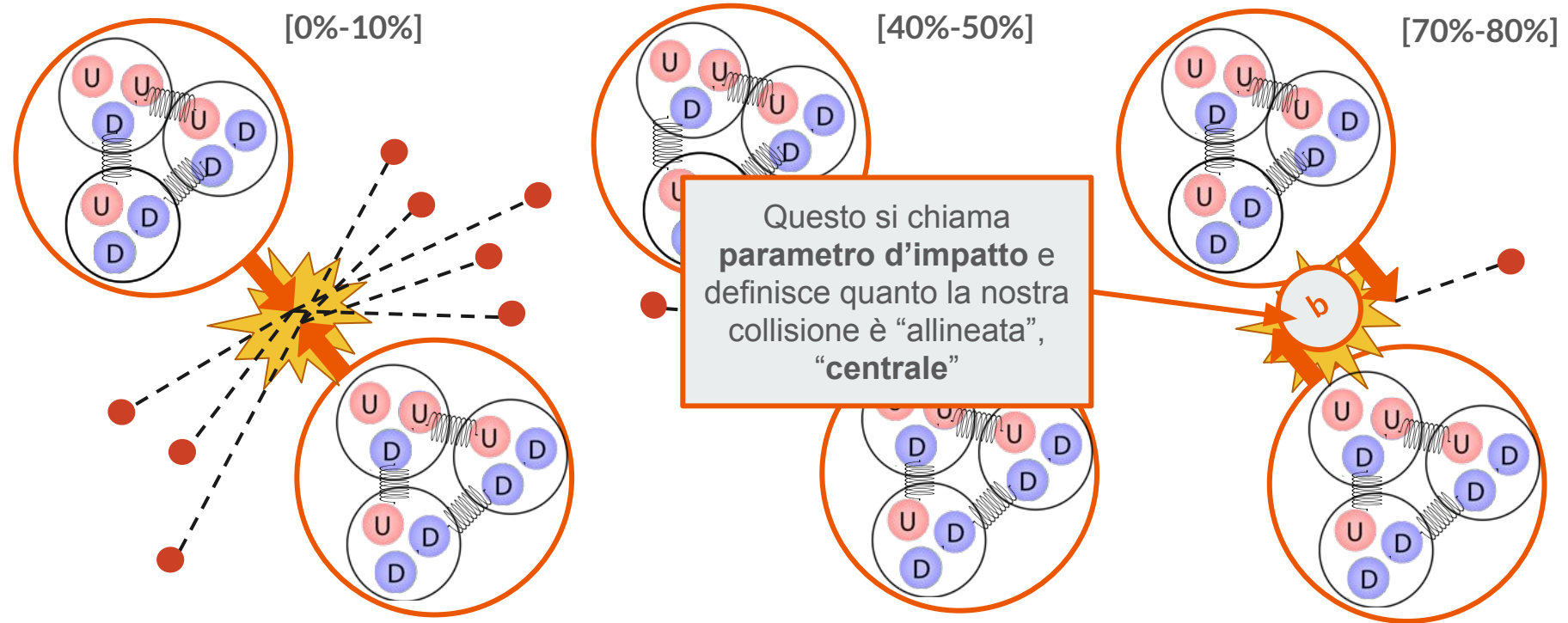
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



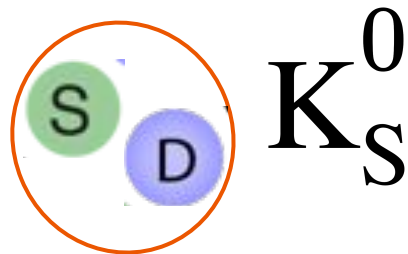
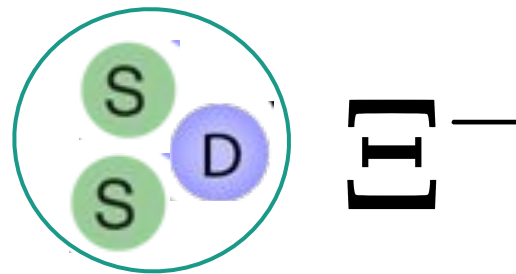
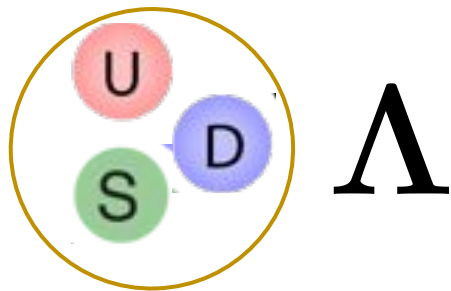
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?

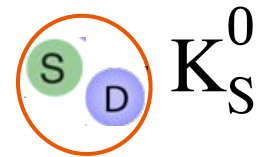
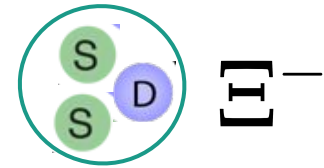
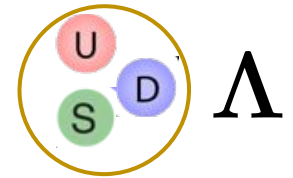
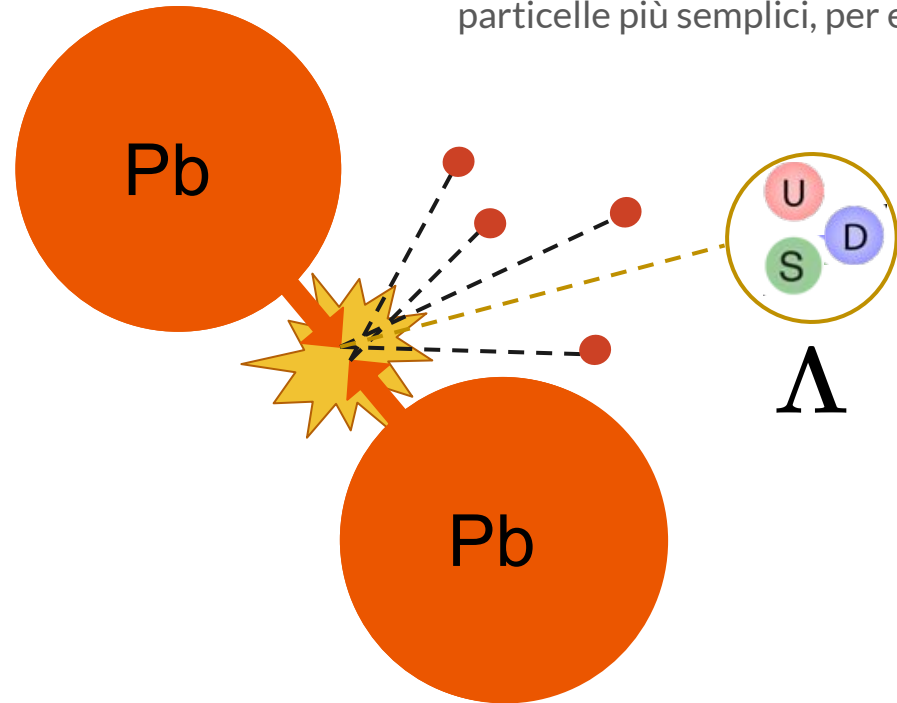


Rivelare le
particelle strane

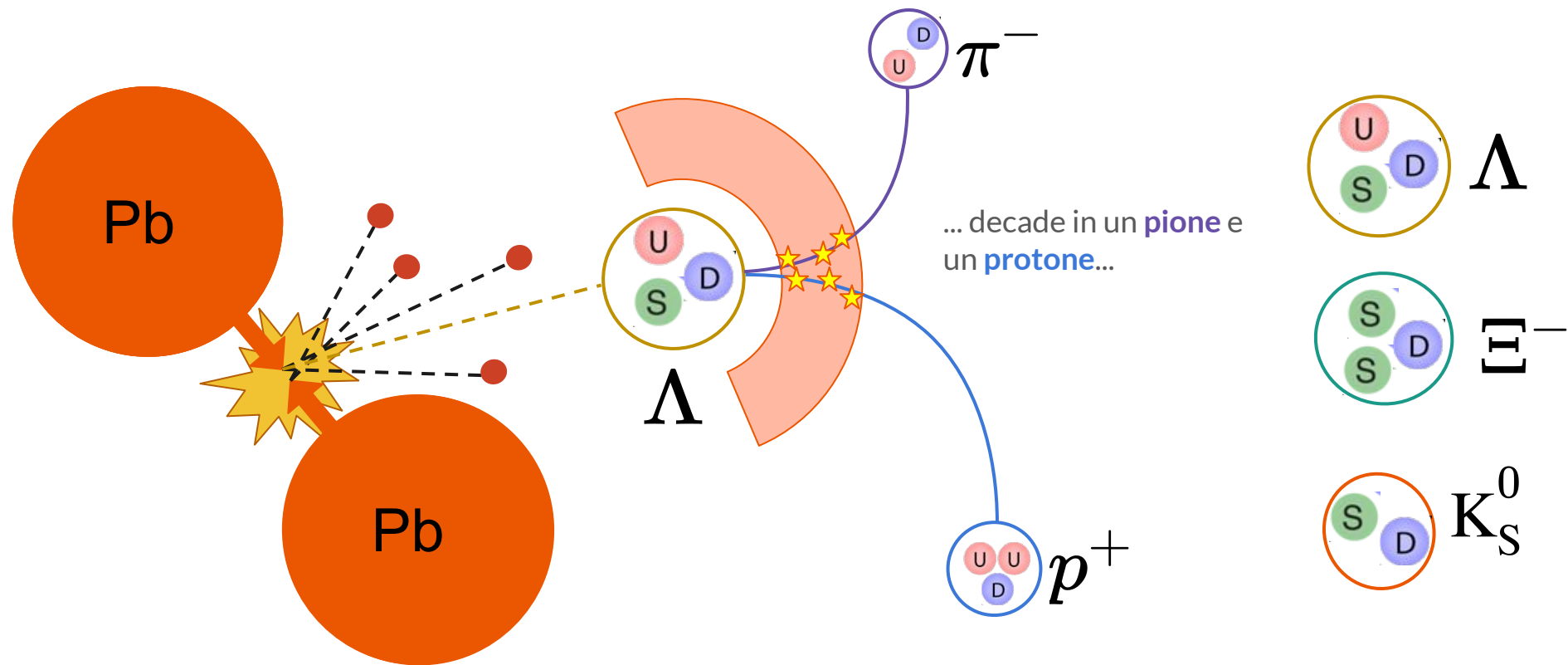


Particelle Strane e come trovarle

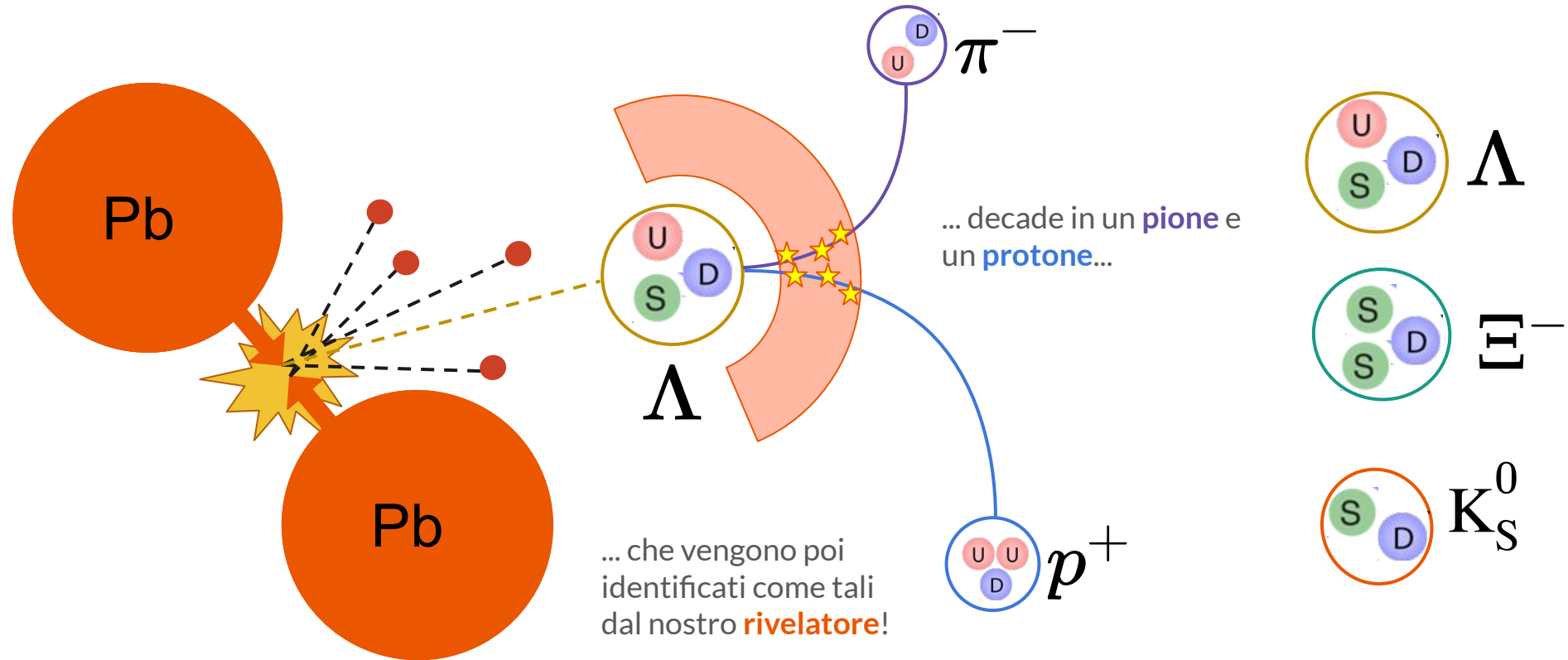
Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...



Particelle Strane e come trovarle

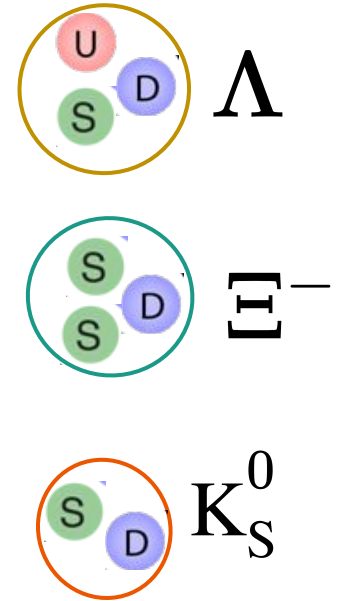
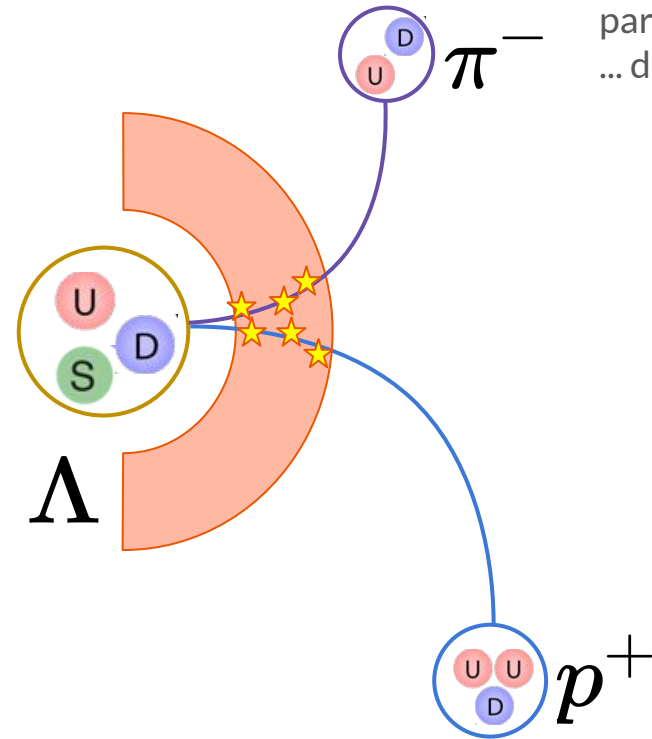


Particelle Strane e come trovarle



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**...



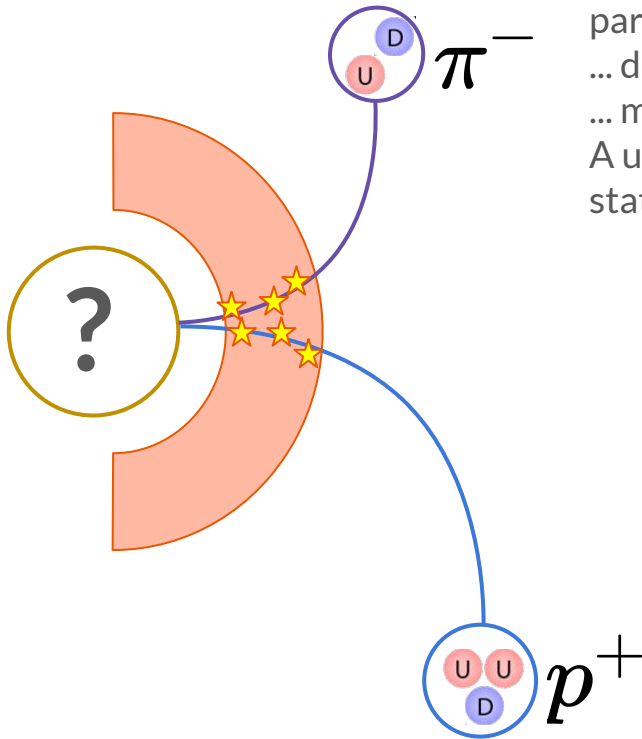
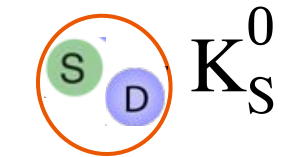
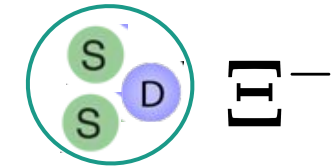
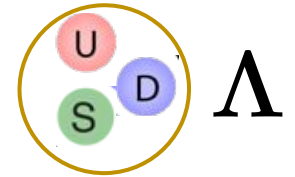
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

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

... decade in un **pione** e un **protone**...

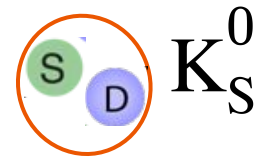
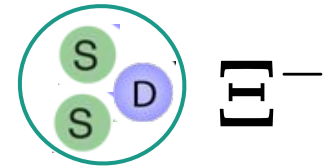
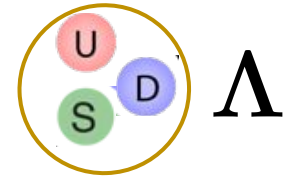
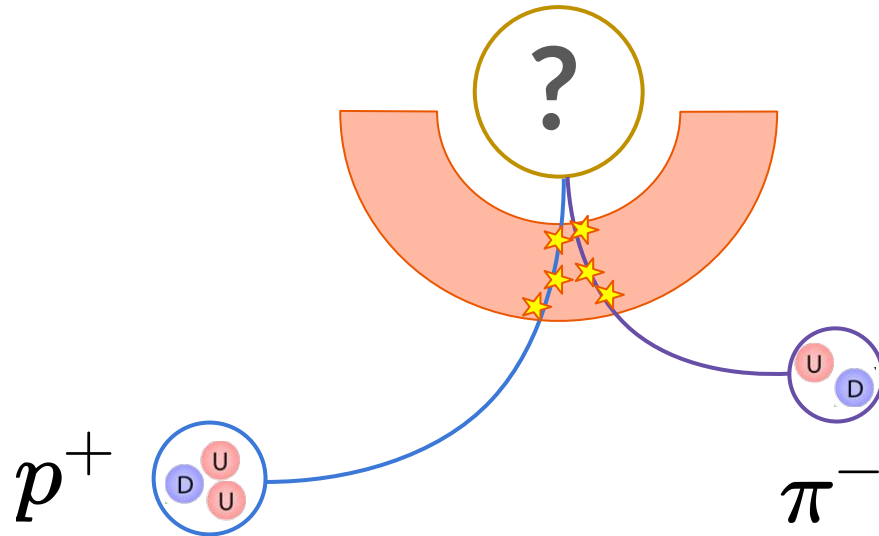
... ma sono veramente da una **Lambda**?

A un primo sguardo non si può capire, però con un po' di statistica lo si può intuire!



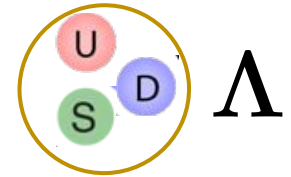
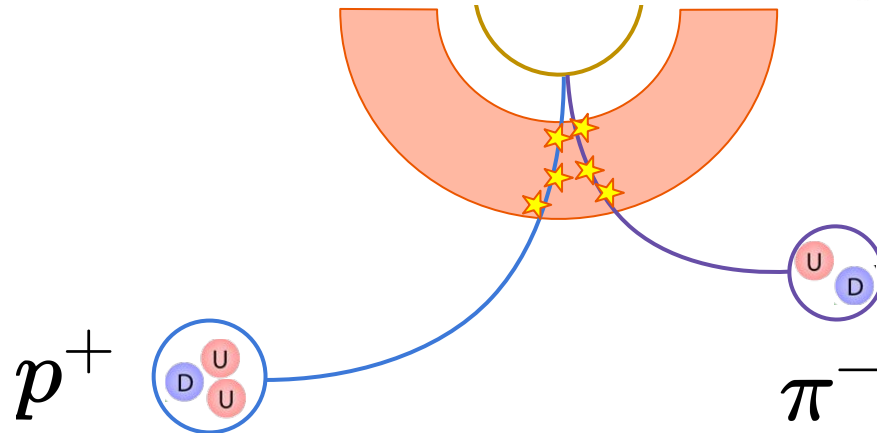
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

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

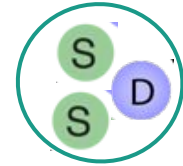


Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

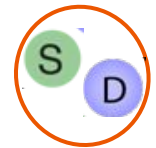
Possiamo combinare le particelle considerando il loro moto in quella che si chiama la **massa invariante**. Questa quantità risponde alla domanda:



Λ

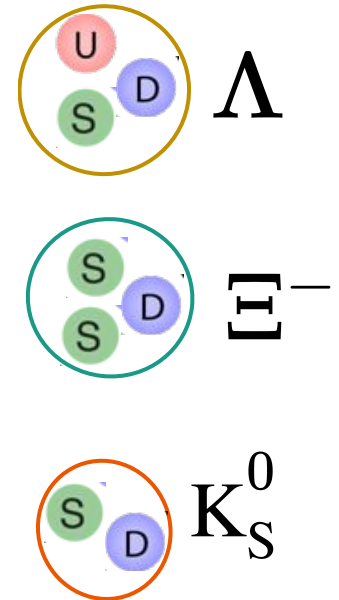
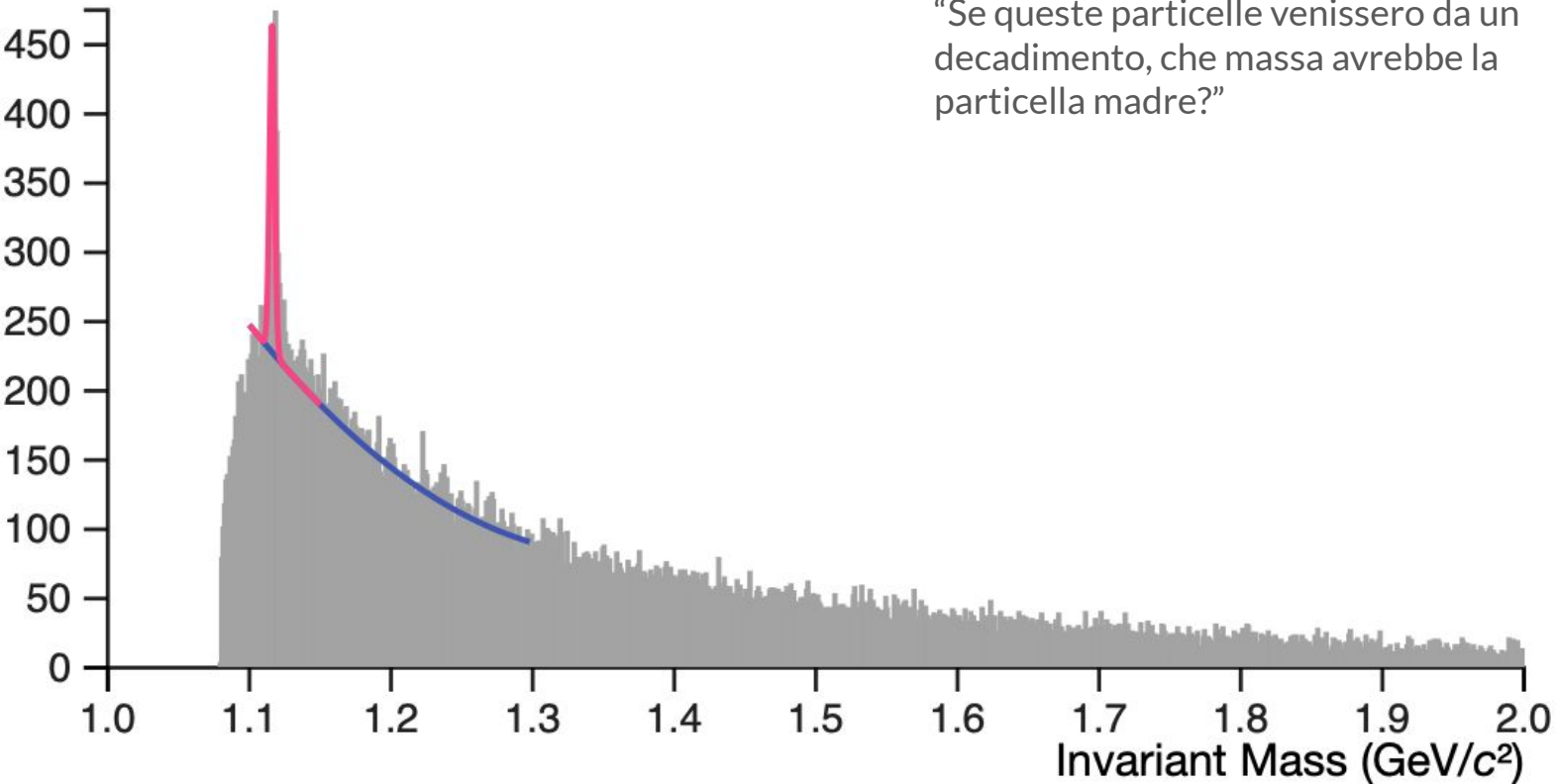


Ξ^-

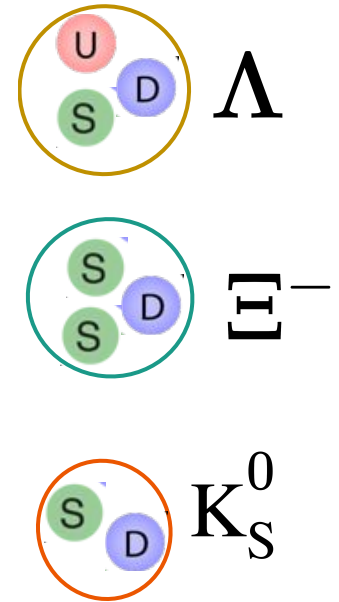
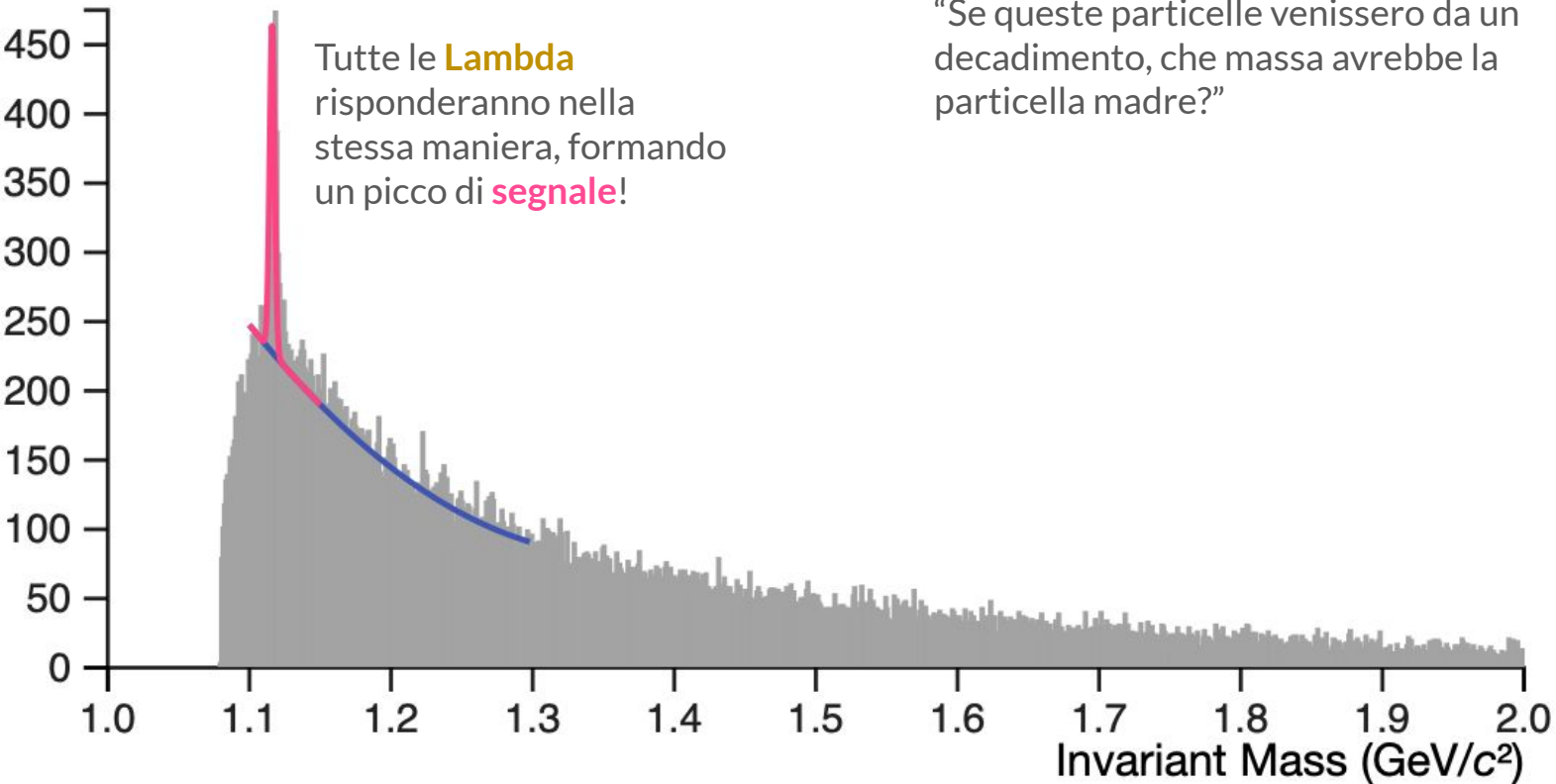


K_S^0

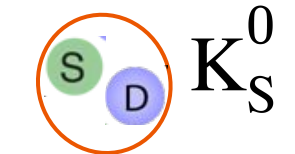
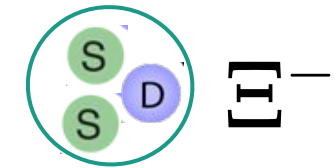
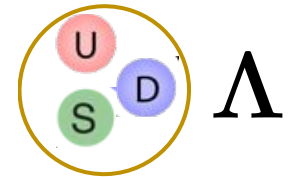
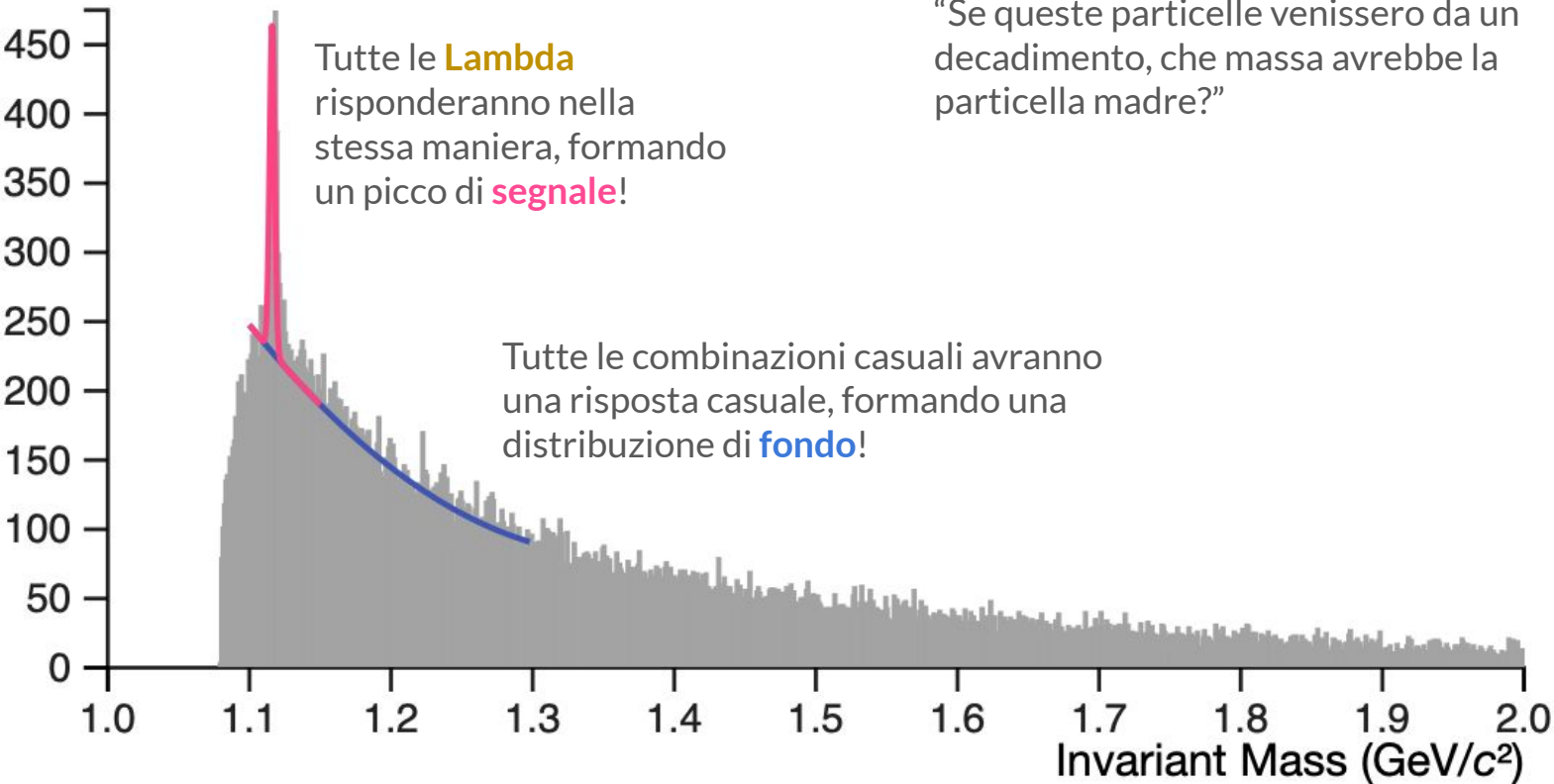
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$

$$\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p} \pi^+$$