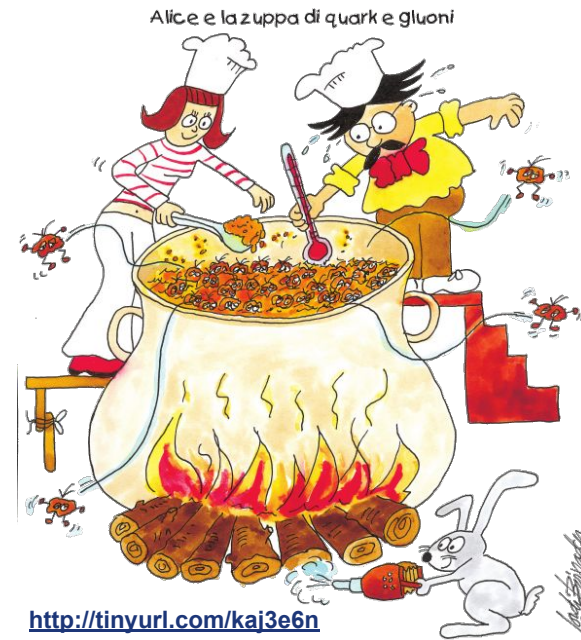


L'esperienza ALICE

2026 ALICE Masterclass

Sofia Tomassini
Sofia Strazzi
Gaia Fabbri,
Marta Razza,
Pietro Antonioli
Francesca Ercolessi

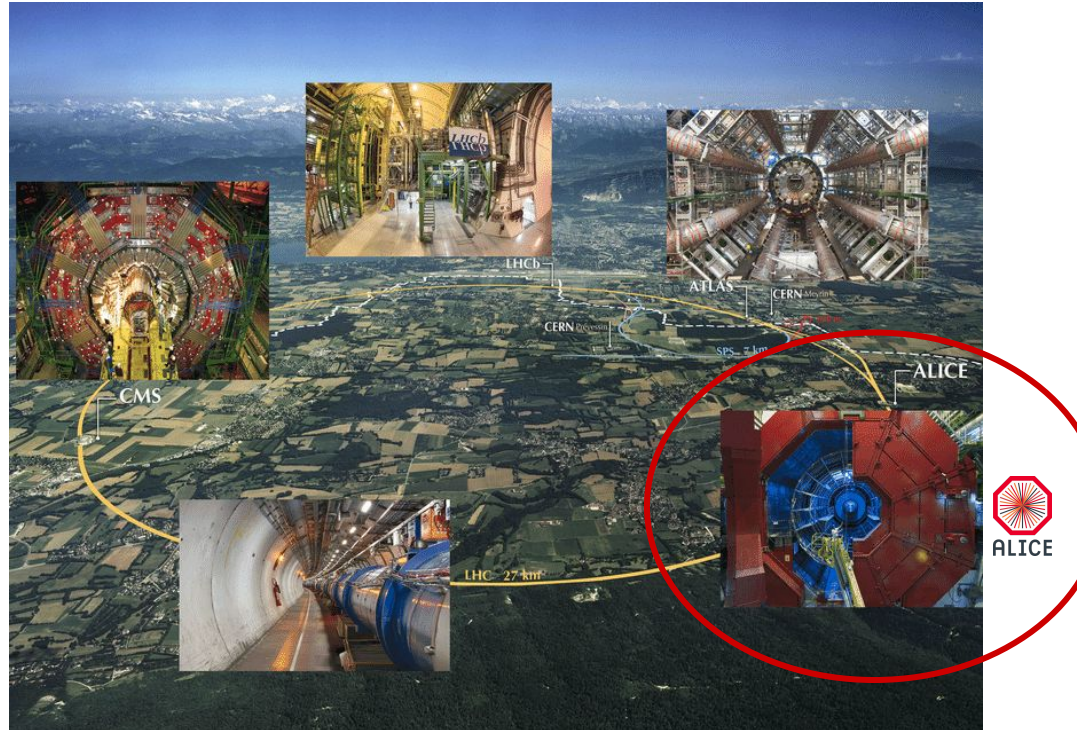


L'acceleratore LHC

Il *Large Hadron Collider* (LHC) è un acceleratore di adroni lungo circa **27 km** di circonferenza

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)

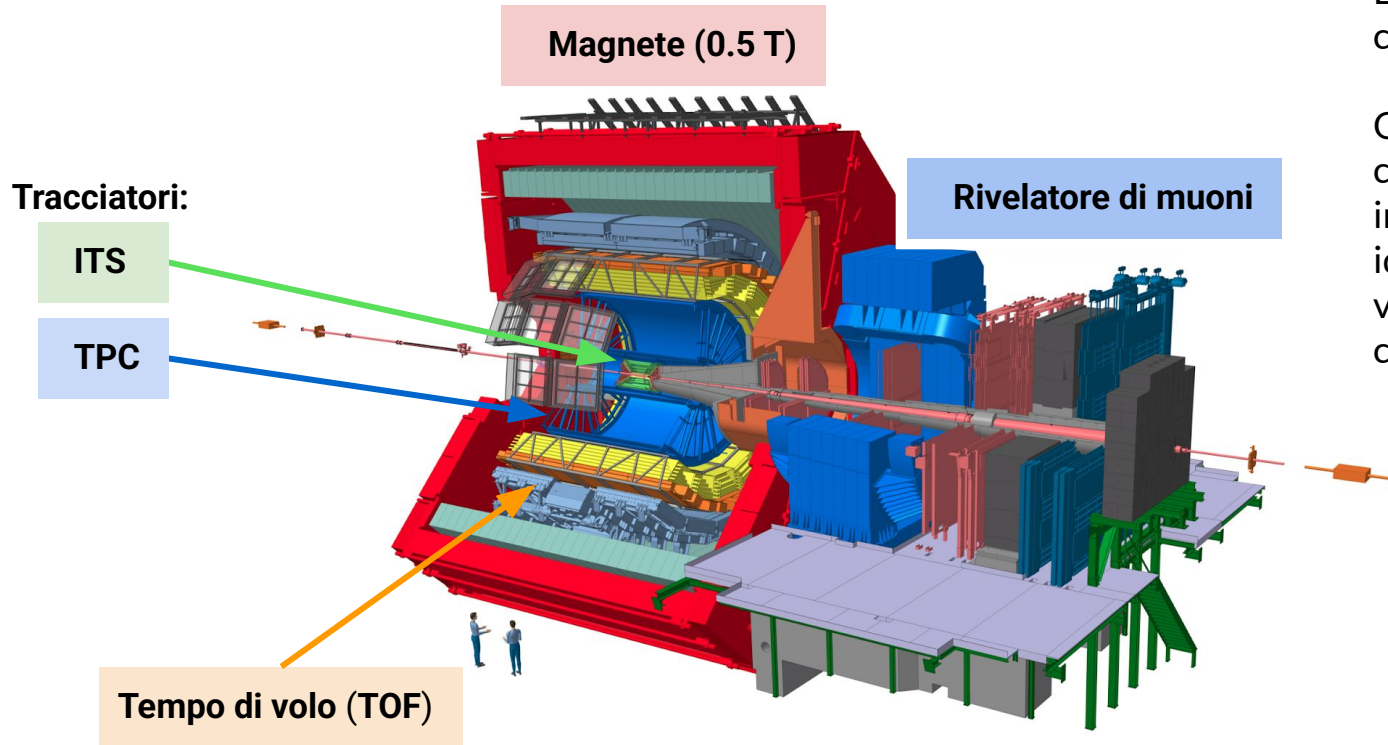


ALICE

A JOURNEY OF DISCOVERY



L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

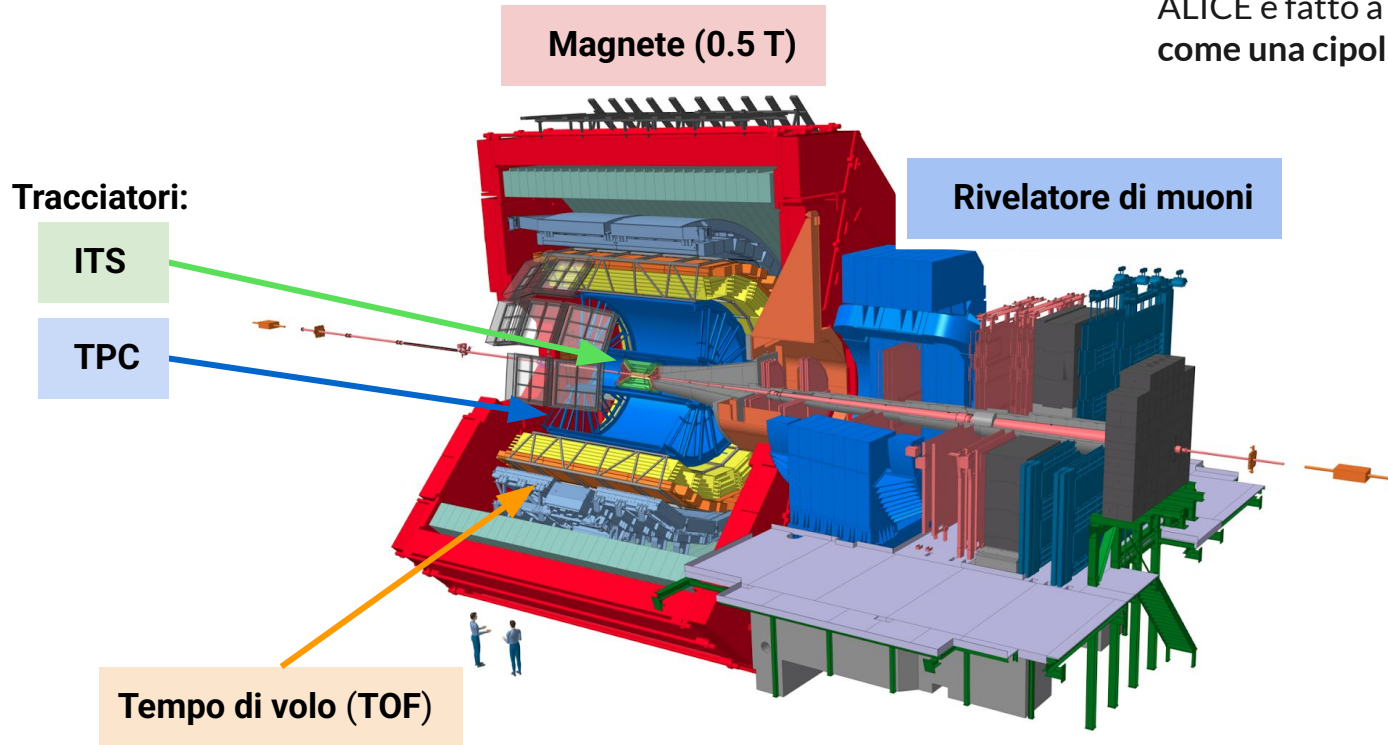


L'esperimento ALICE è composto da vari rivelatori

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

L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

Come gli altri grandi esperimenti a LHC, ALICE è fatto a strati concentrici, come una cipolla

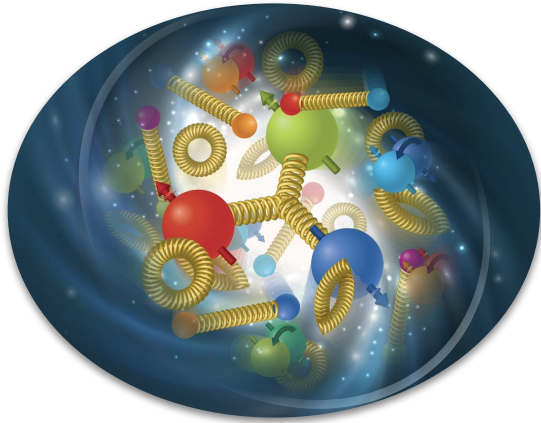


perchè vogliamo misurare **diverse proprietà** di ogni particella (massa, velocità, tempo di decadimento...)

Big (little) BANG!

Una collisione fra ioni pesanti produce uno stato di materia molto denso e caldo...

chiamiamo questo stato **Quark Gluon Plasma (QGP)**



<https://videos.cern.ch/record/2296848>

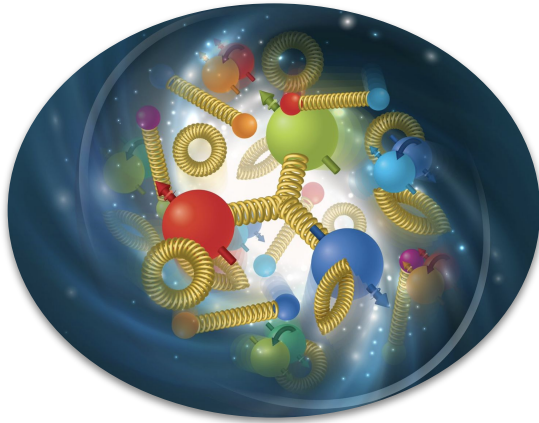
Big (little) BANG!

Una collisione fra ioni pesanti produce uno stato di materia molto denso e caldo...

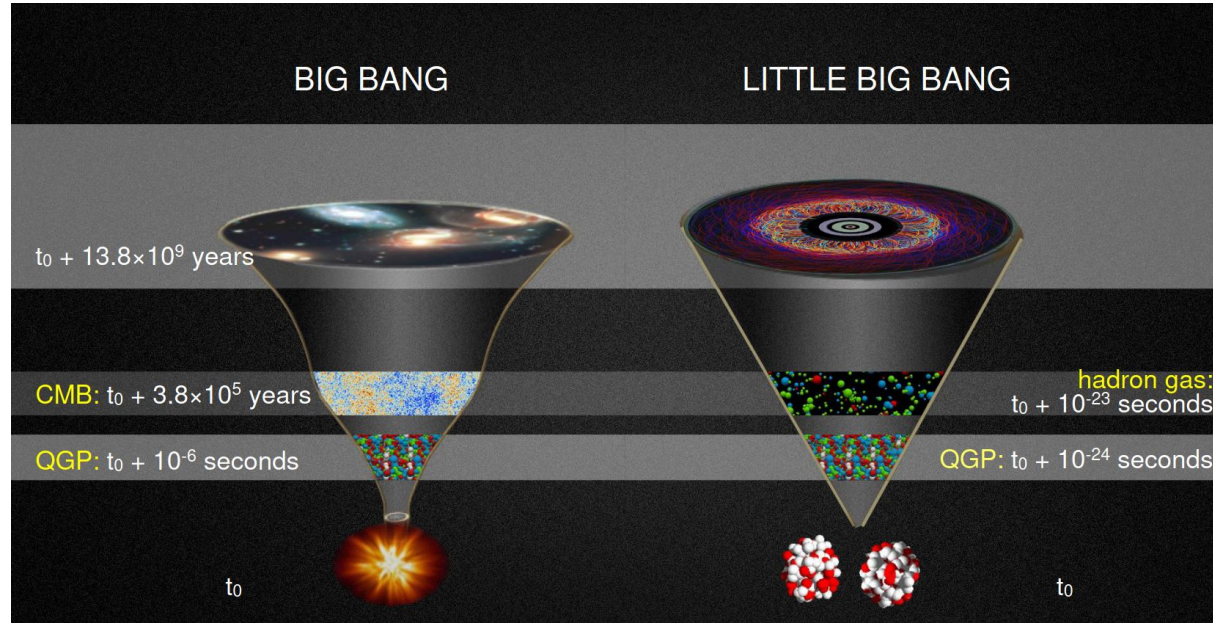
chiamiamo questo stato **Quark Gluon Plasma (QGP)**

... ed è simile all'Universo qualche istante dopo il Big Bang!

Per questo possiamo immaginare una collisione come un *piccolo* Big Bang

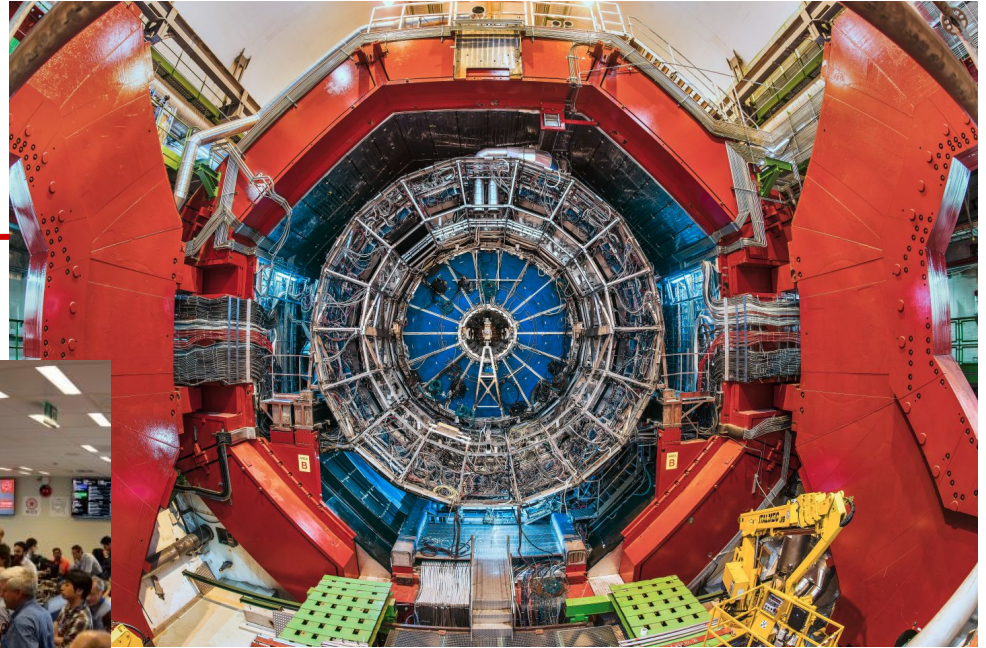


<https://videos.cern.ch/record/2296848>



ALICE da vicino

ALICE control room



ALICE cavern

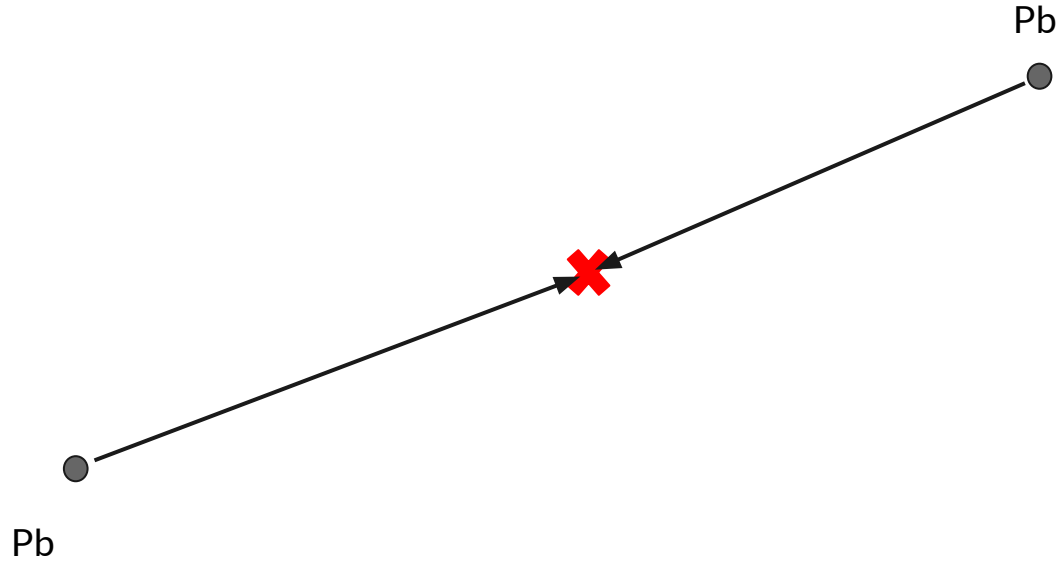
[Flying over ALICE](#)

ALICE da vicino

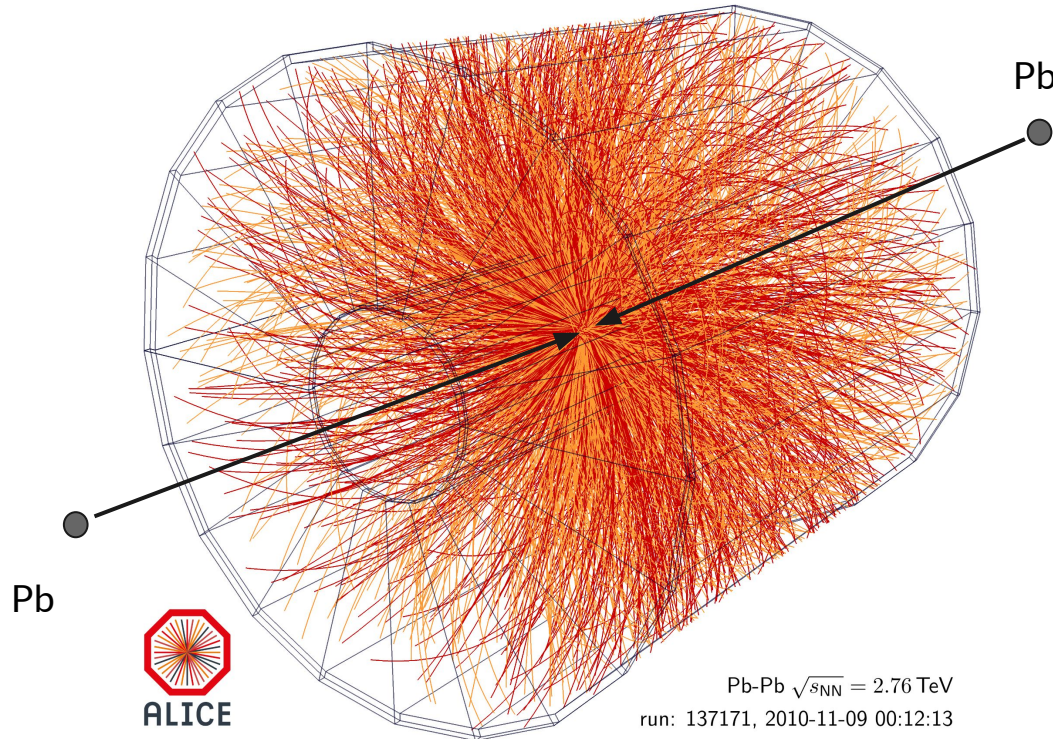


Flying over ALICE: <https://www.youtube.com/watch?v=yWBWzIUCNpw>

Come si presentano i prodotti di questa collisione?



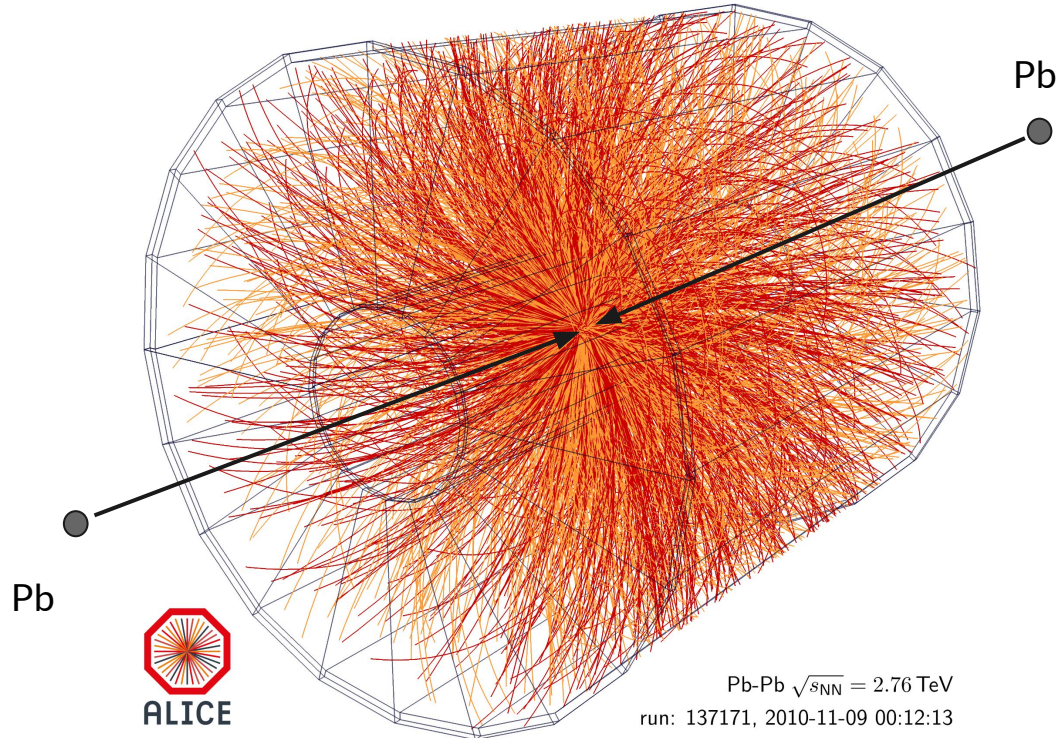
Come si presentano i prodotti di questa collisione?



Event display:
migliaia di tracce!

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

Come si presentano i prodotti di questa collisione?

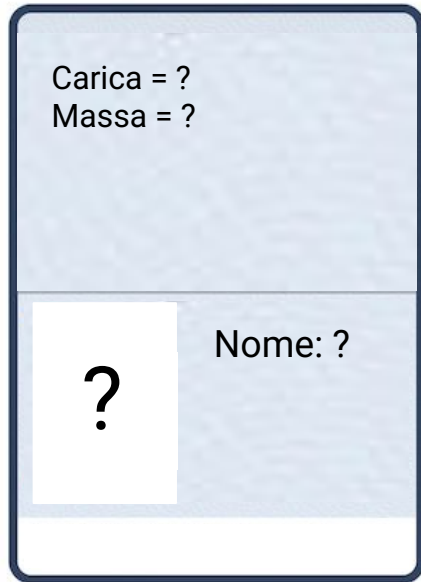


Event display:
migliaia di tracce!

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



Cosa significa identificare una particella



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

carica:

misura diretta → misurando la **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 utilizziamo 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 utilizziamo 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 \mathbf{B} è soggetta alla **Forza di Lorentz**:

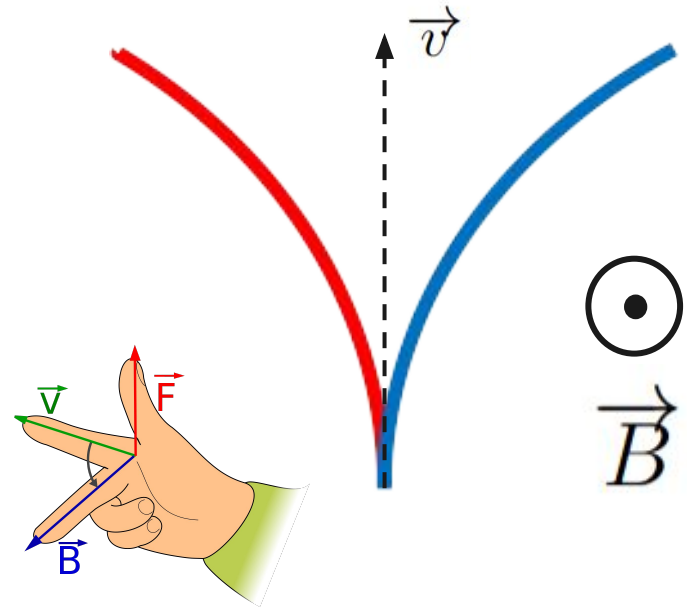
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La forza è sempre ortogonale al campo magnetico e alla velocità

Il segno della carica decide il verso della forza

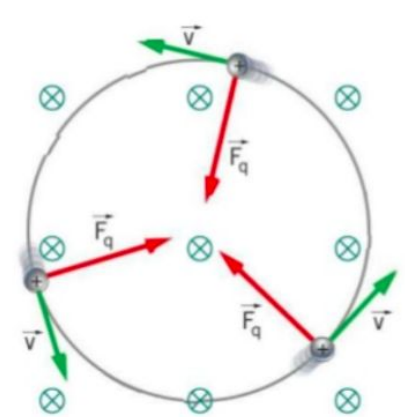
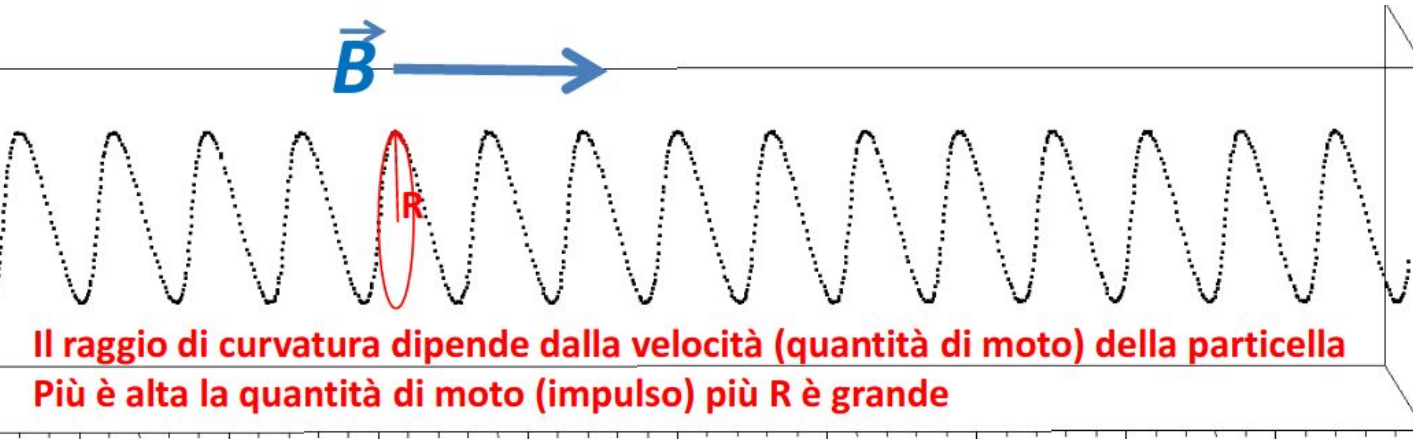
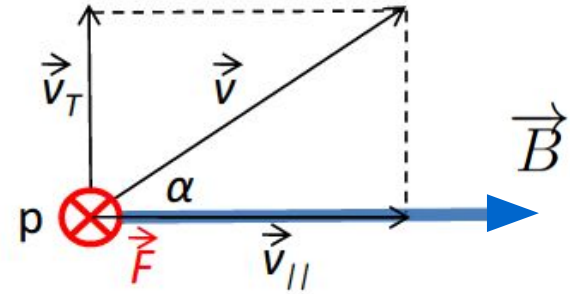
Particella con carica **negativa**

Particella con carica **positiva**



Il moto elicoidale

- moto circolare uniforme nella componente perpendicolare a B
- moto uniforme nella proiezione parallela a 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

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

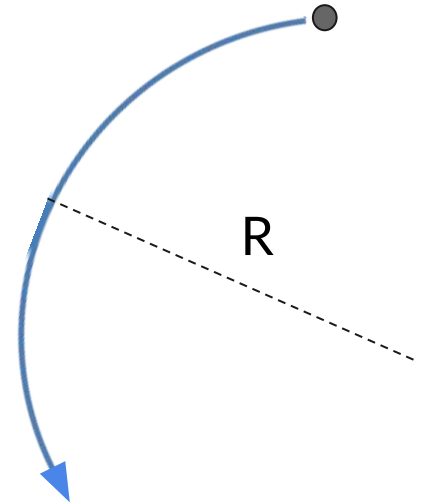
Forza di Lorentz

Se misuro ...

$$R = \frac{p_T}{q \cdot B}$$

... ricavo

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



Ricostruzione delle tracce in ALICE



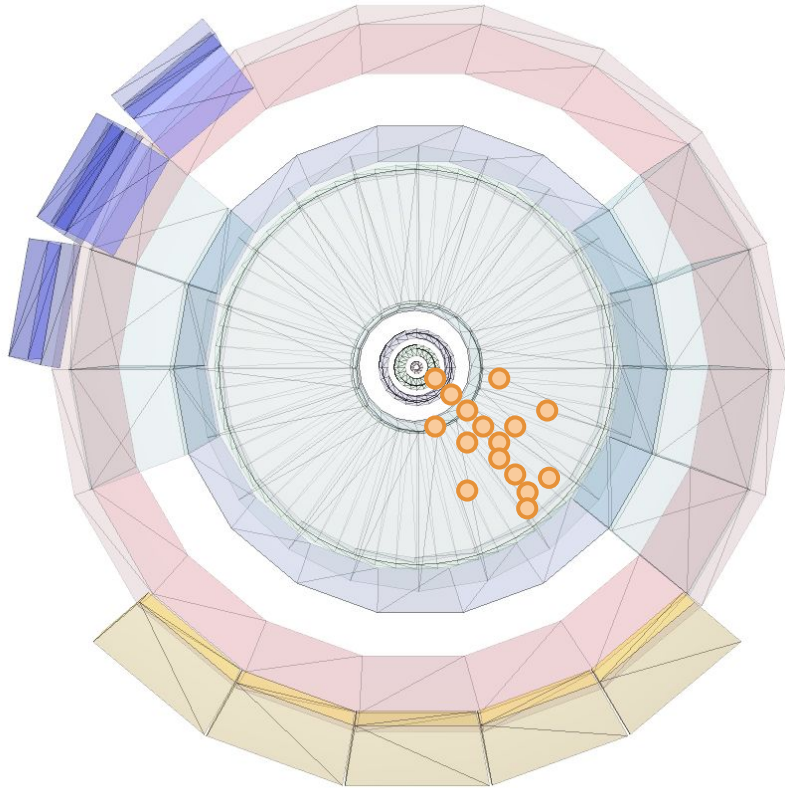
come possiamo capire dove e quale particella è passata nel rivelatore?

- diversi segnali sono stati rivelati nei **tracciatori**

possiamo pensare a questi segnali come a impronte lasciate sulla neve da animali selvatici...

a partire da queste impronte, tracce, possiamo capire chi le ha lasciate, e dove è passato esattamente!!!

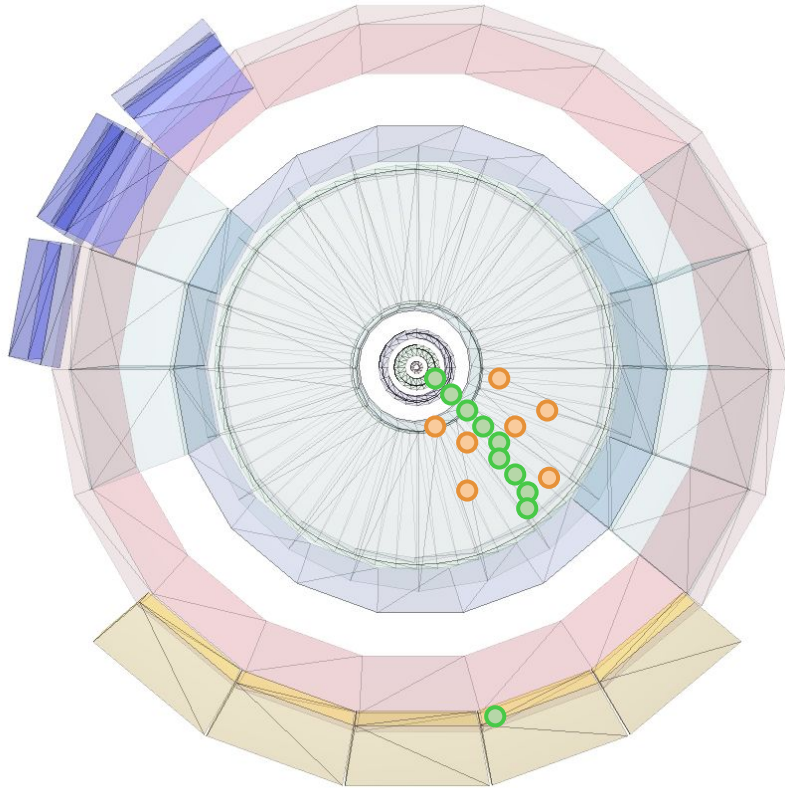
Ricostruzione delle tracce in ALICE



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

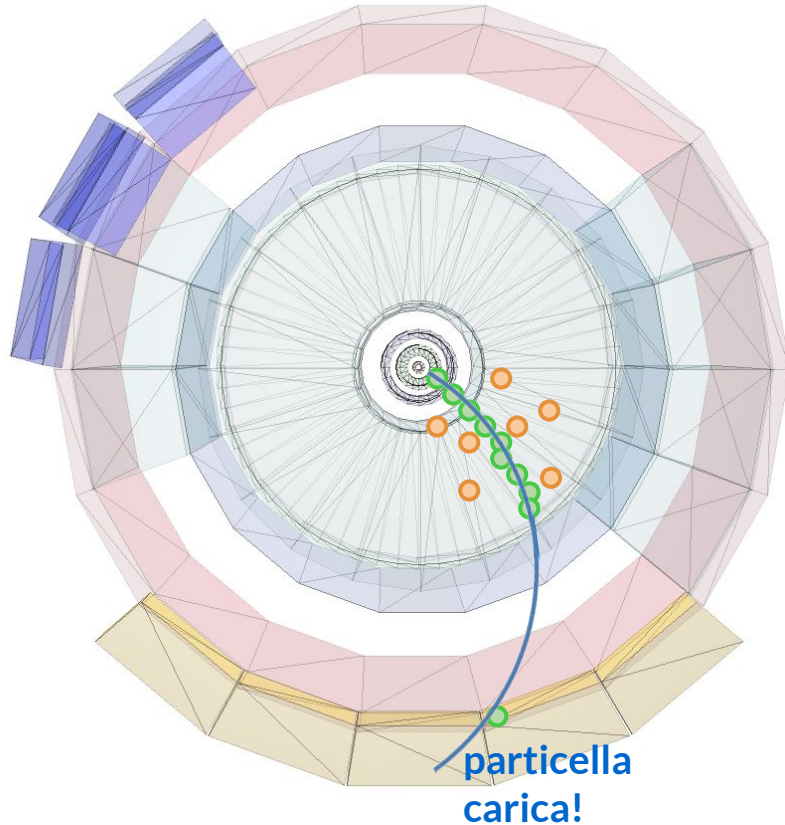
Ricostruzione delle tracce in ALICE



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

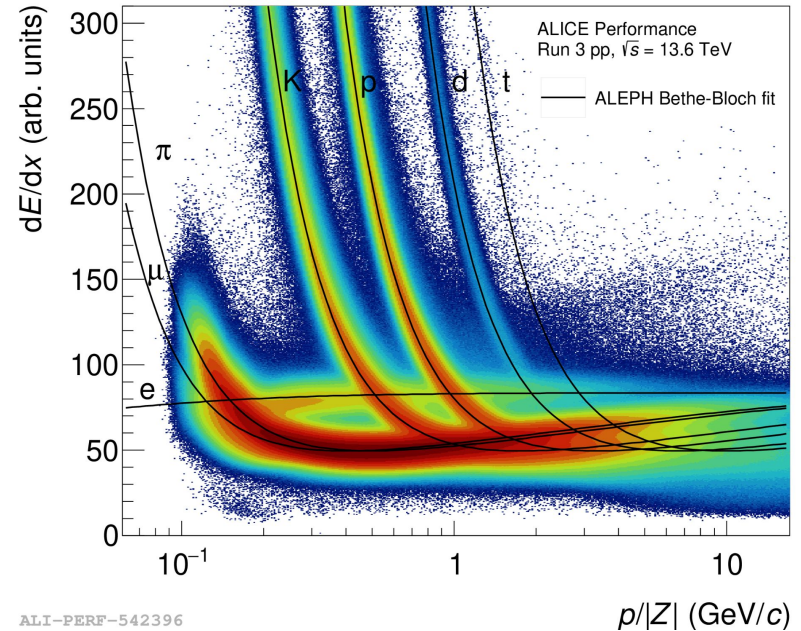
$$p_T = q \cdot B \cdot R$$

Come si misura la velocità della particella

A parità di impulso particelle diverse si muovono a velocità diversa

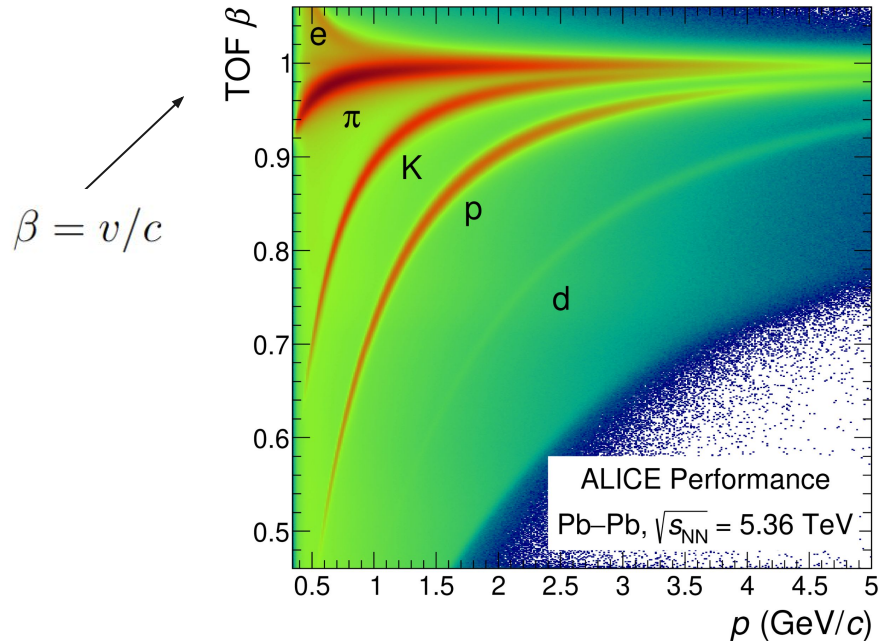
Le principali tecniche che sfrutta ALICE per misurare la velocità sono:

- **Perdita di energia** nel materiale del rivelatore da una particella
- **Tempo di volo:** misura diretta della velocità
- **e altre...**

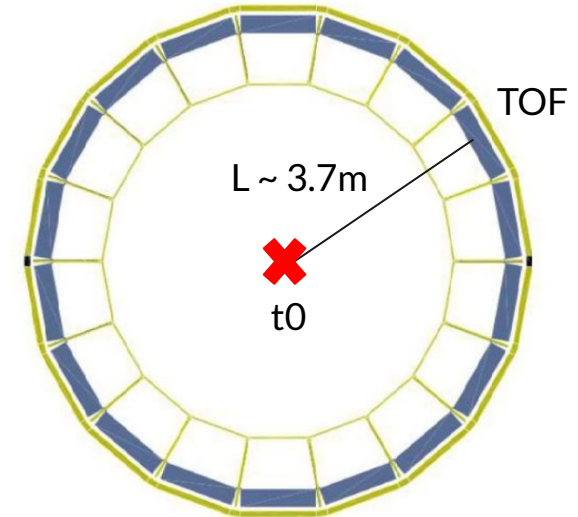


Rivelatore a tempo di volo TOF

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)



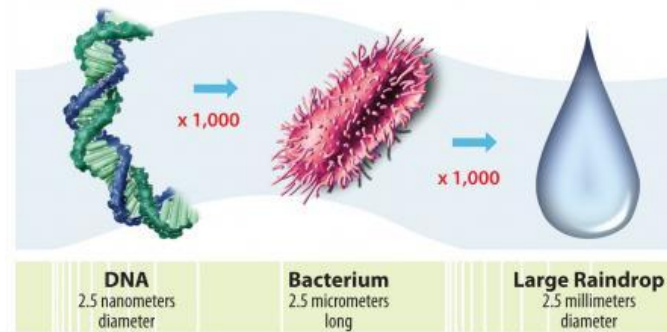
E perche' importa?



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

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

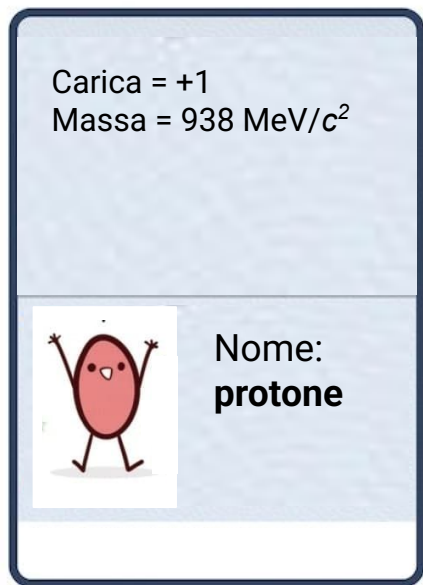
Se viaggiate ai **130 km/h** (~36 m/s) percorrete **2 nm**



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

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

$$\beta = v/c$$

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
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS (left side, vertical text)

LEPTONS (left side, vertical text)

GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (bottom right, vertical text)

SCALAR BOSONS (right side, vertical text)

Modello Standard

Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari**!

Standard Model of Elementary Particles

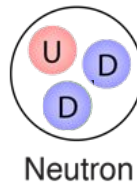
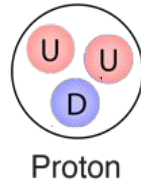
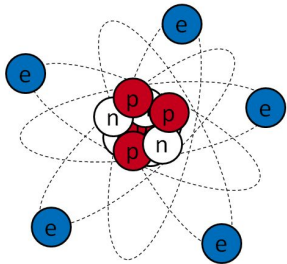
		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
mass	≈2.2 MeV/c ²	≈1.28 GeV/c ²	≈173.1 GeV/c ²	0	≈124.97 GeV/c ²	
	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	
charge	u	c	t	g	H	
	up	charm	top	gluon	higgs	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

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

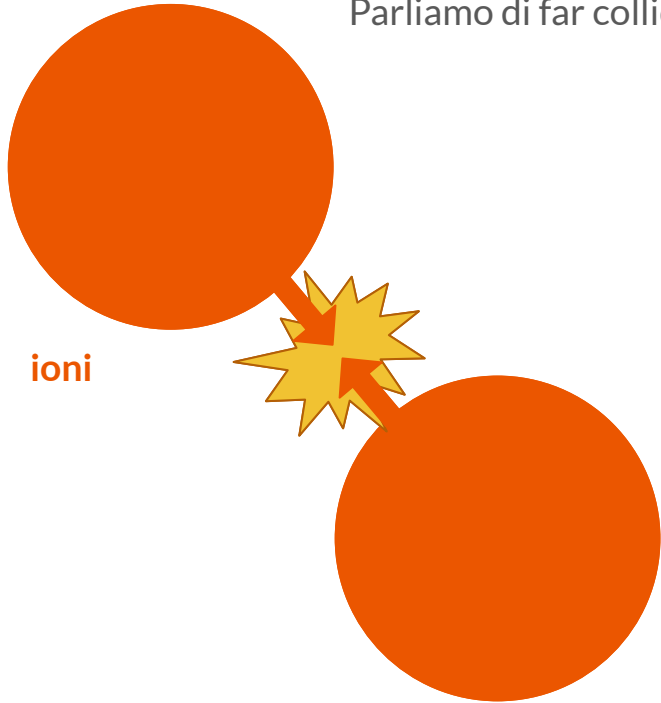
		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$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

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

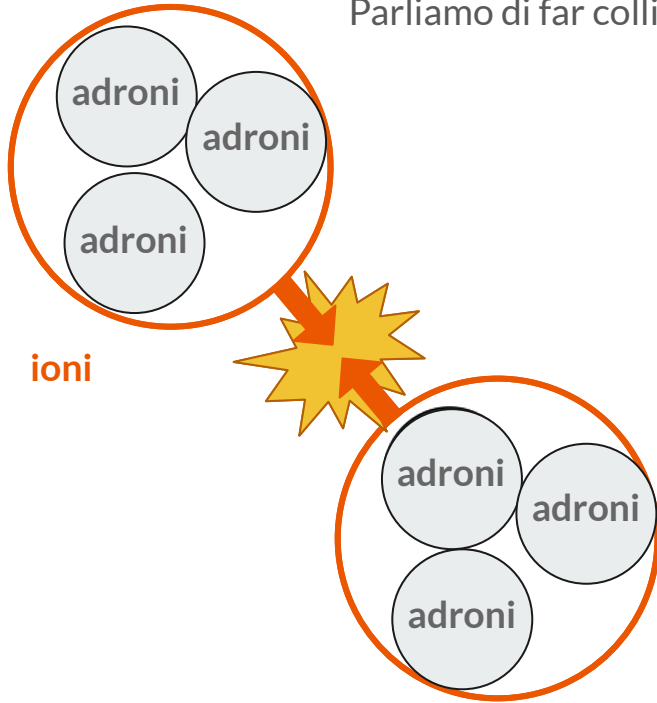
Cosa accade in una collisione adronica?

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



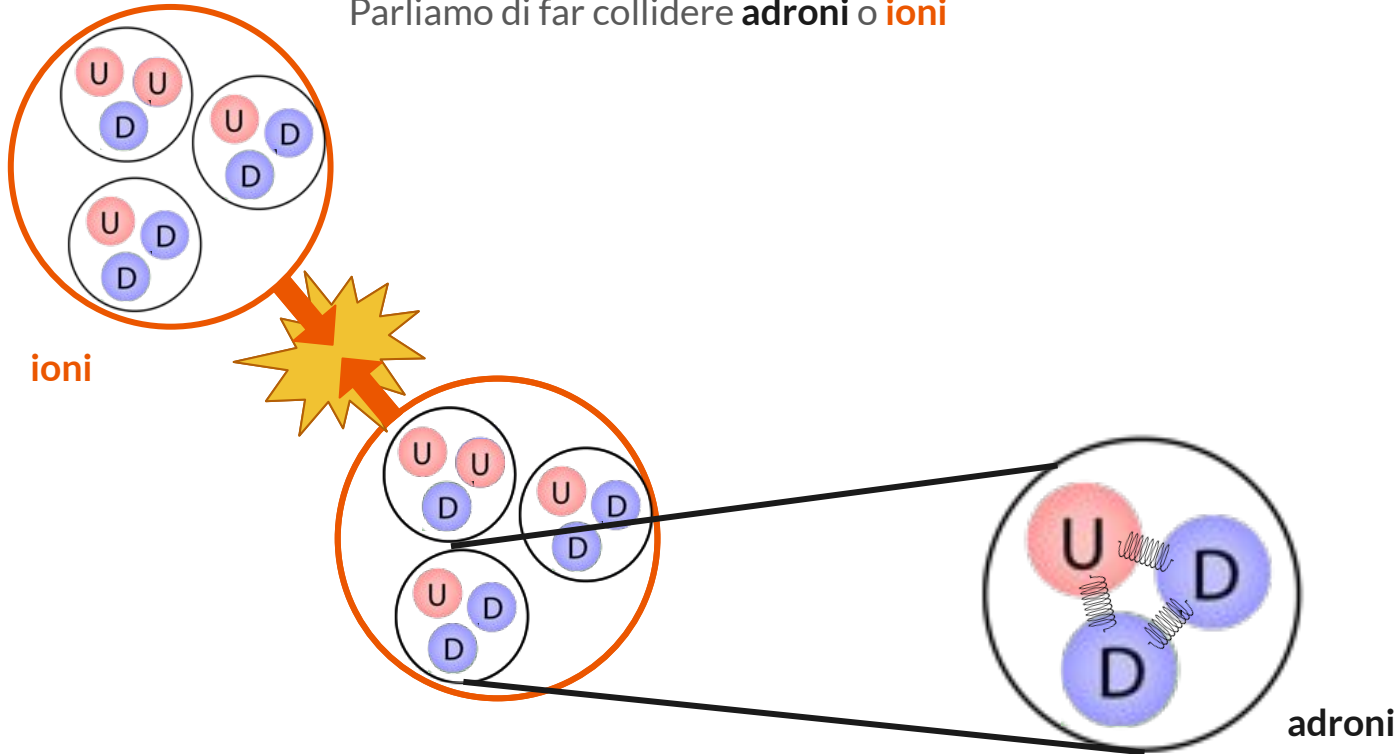
Cosa accade in una collisione adronica?

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



Cosa accade in una collisione adronica?

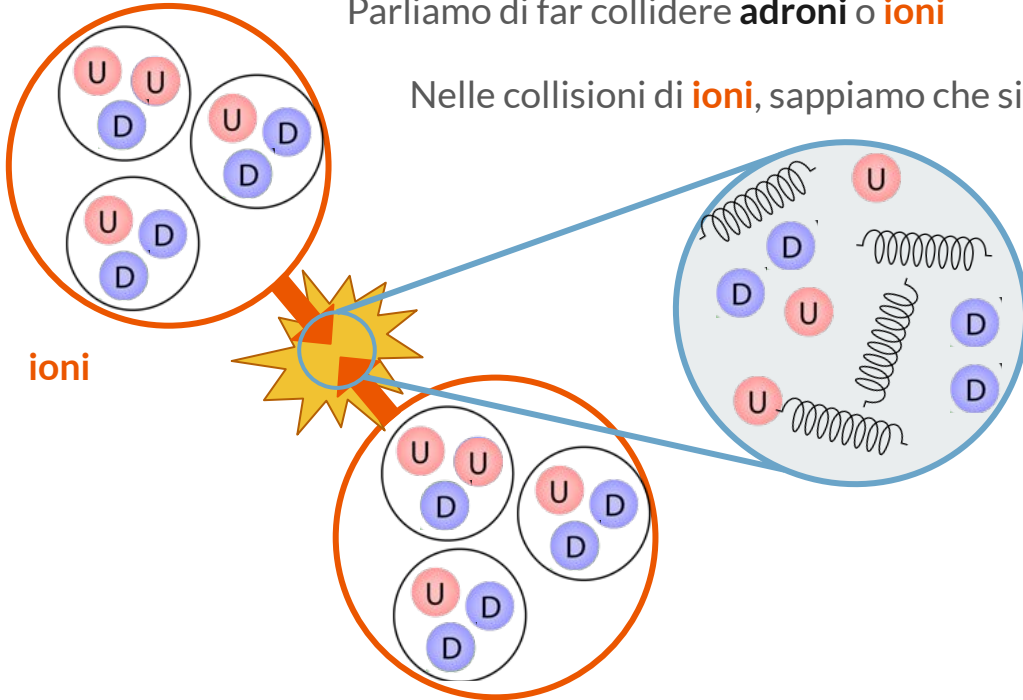
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**



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	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$			0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs		
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon			
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0			
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0			
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson			
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			
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W 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	1			
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson			

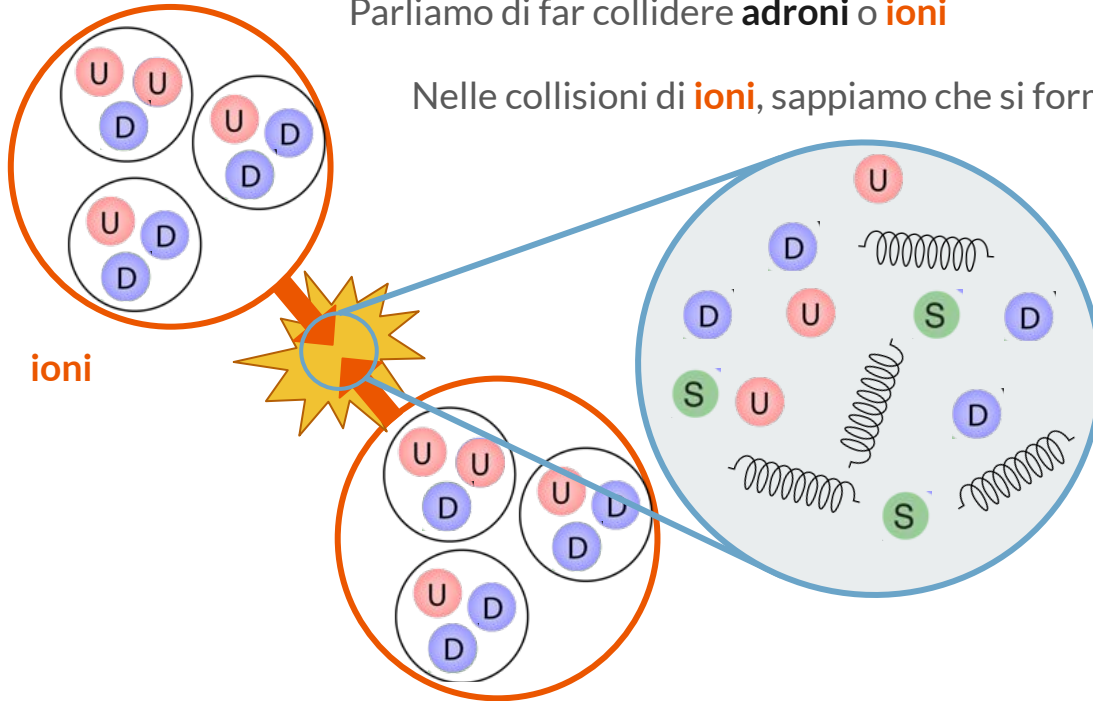
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

Si forma 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**”

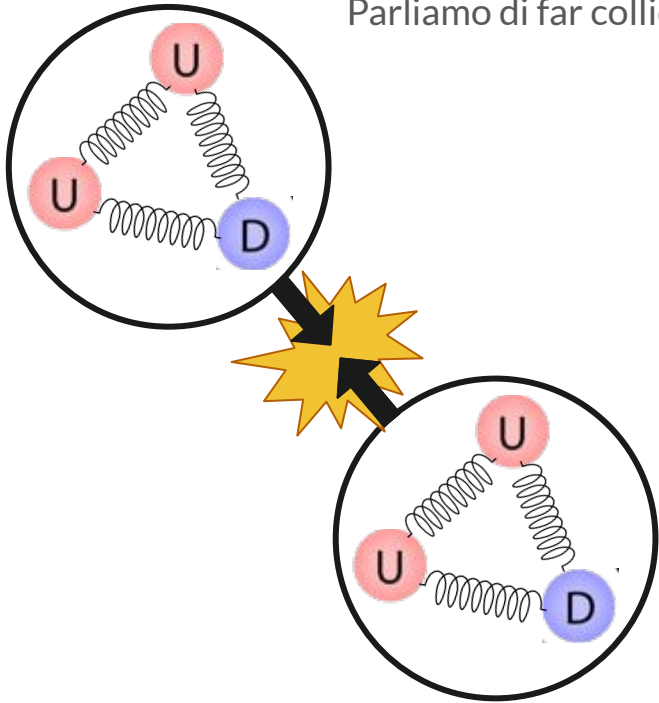
Nel **QGP** si formano anche quark, come il quark **strange** che **non sono presenti** nello stato iniziale, cioè negli **adroni** o **ioni** che facciamo collidere.

Standard Model of Elementary Particles

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

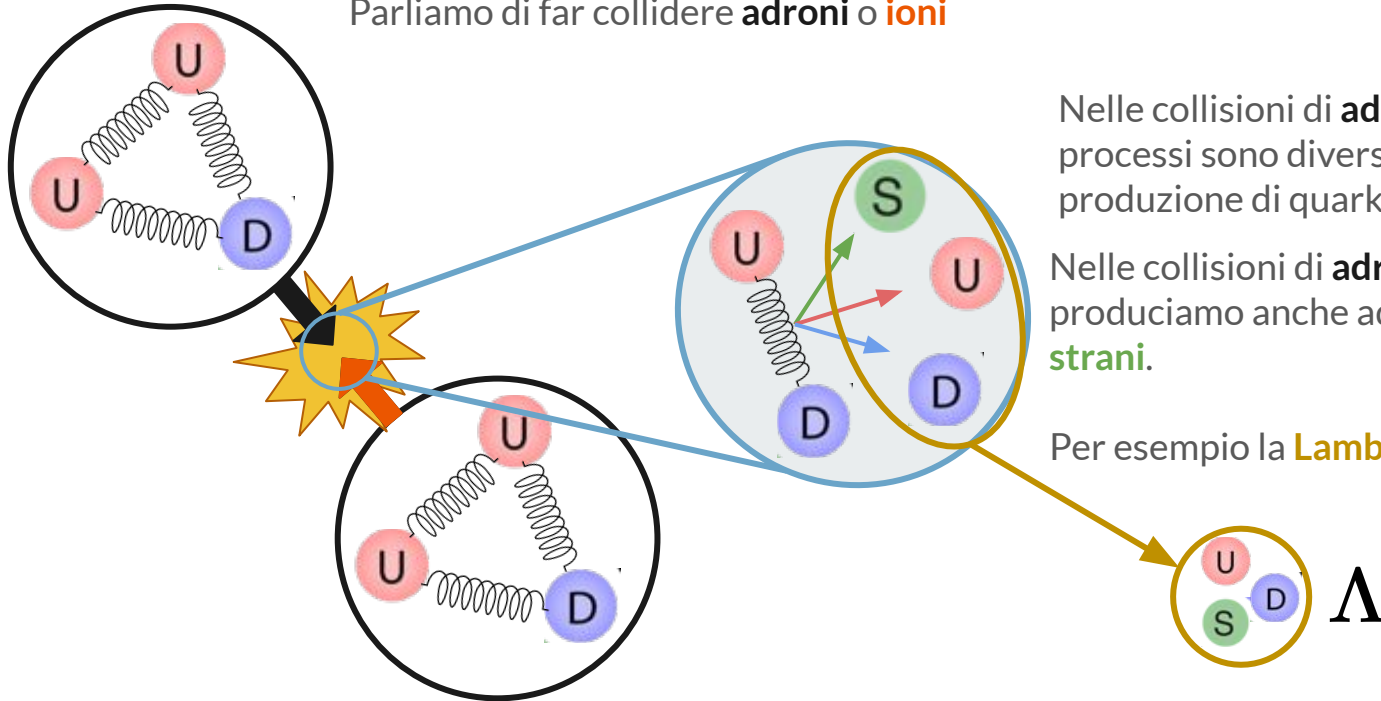
Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

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



Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

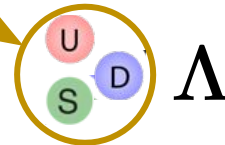
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**



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

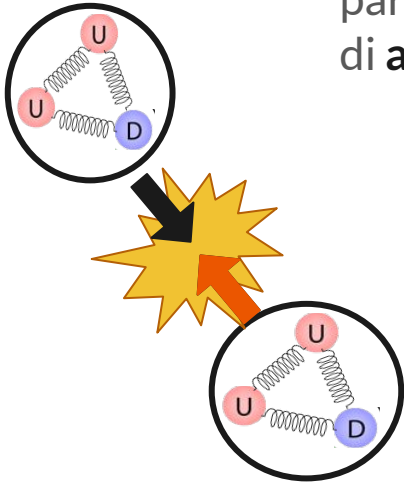
Nelle collisioni di **adroni** produciamo anche adroni **strani**.

Per esempio la **Lambda**



Come possiamo studiare il QGP? Misuriamo l'*aumento di stranezza*

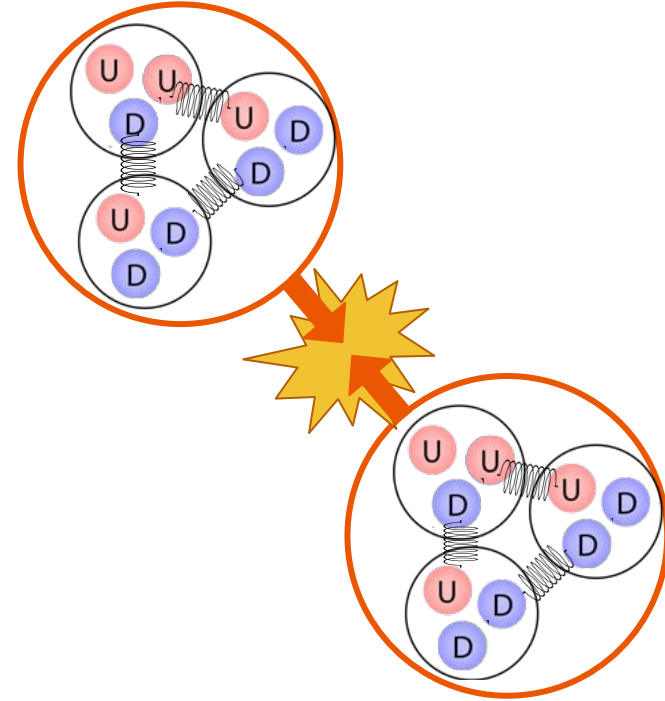
adrone



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

Possiamo paragonarli?

ioni

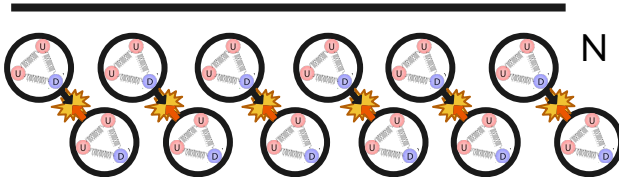
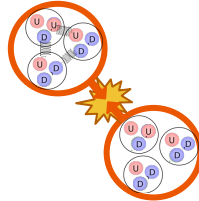
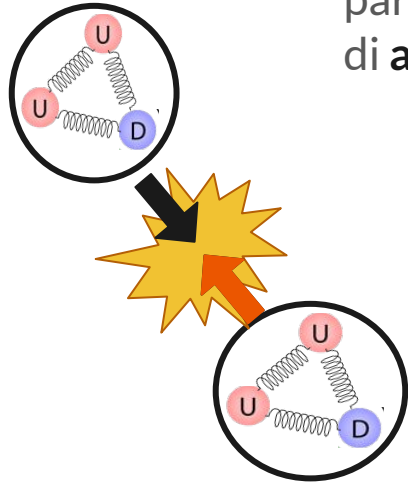


Come possiamo studiare il QGP? Misuriamo l'*aumento di stranezza*

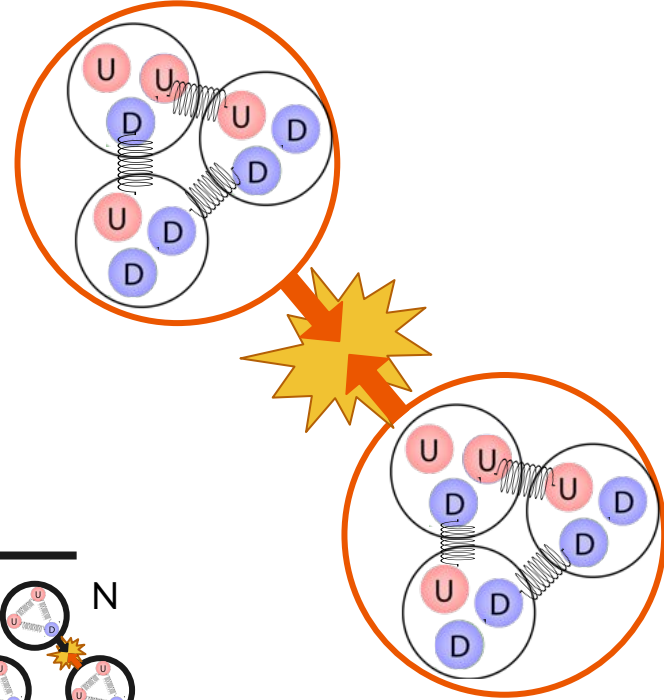
Come cambia la produzione di particelle **strane** tra collisioni di **adroni** e collisioni di **ioni**?

Possiamo paragonarli?

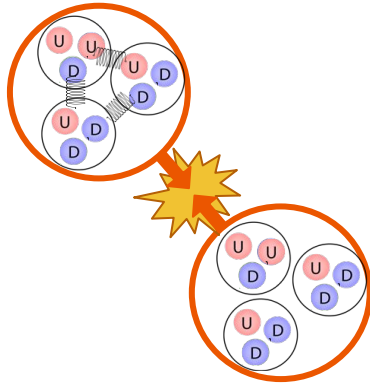
adrone



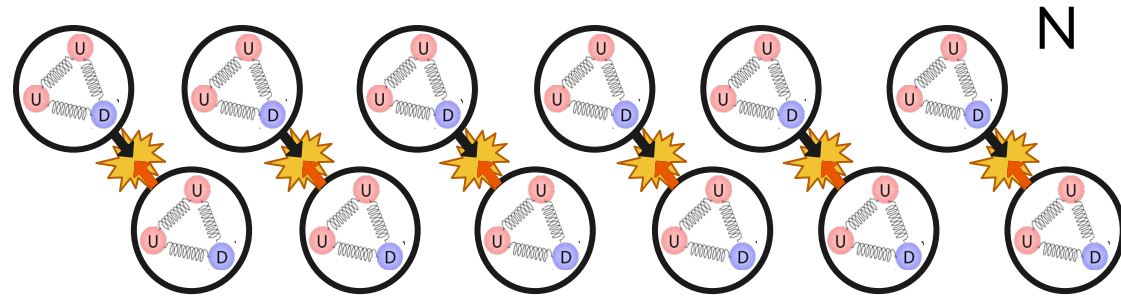
ioni



Misuriamo l'*aumento di stranezza*



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

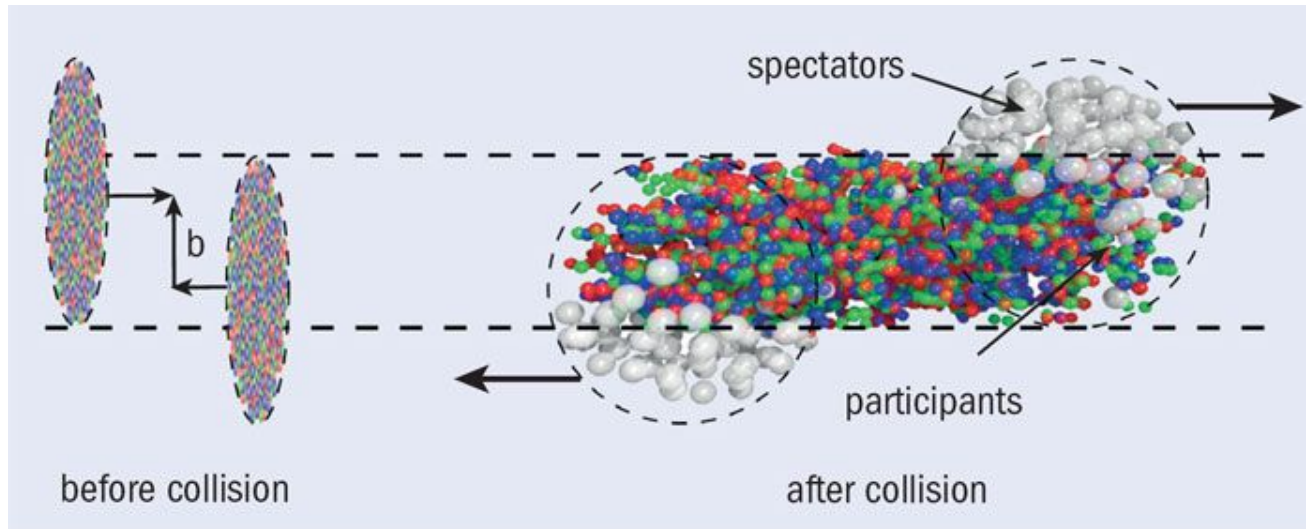


$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} = 1$$

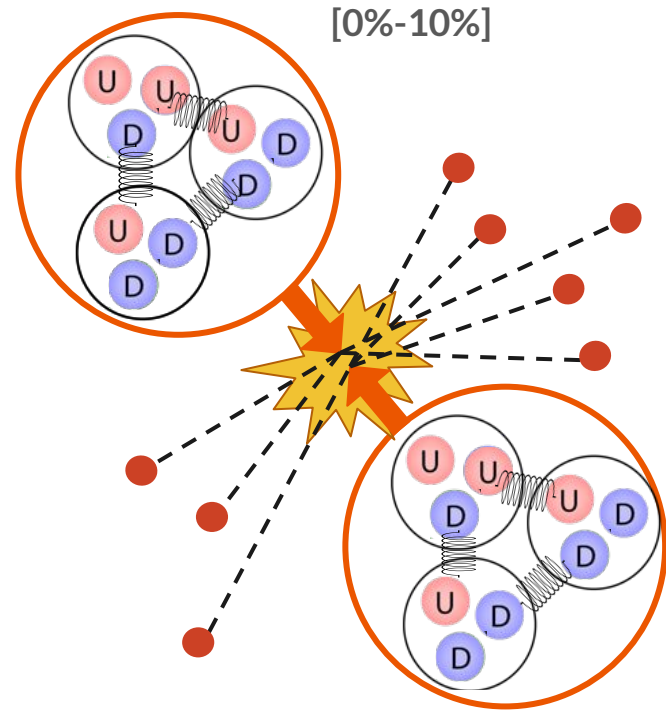
N = numero di partecipanti

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**



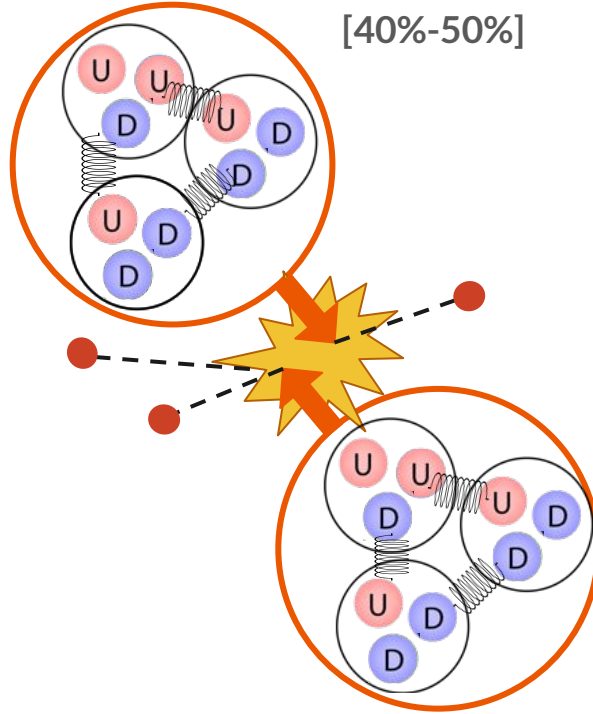
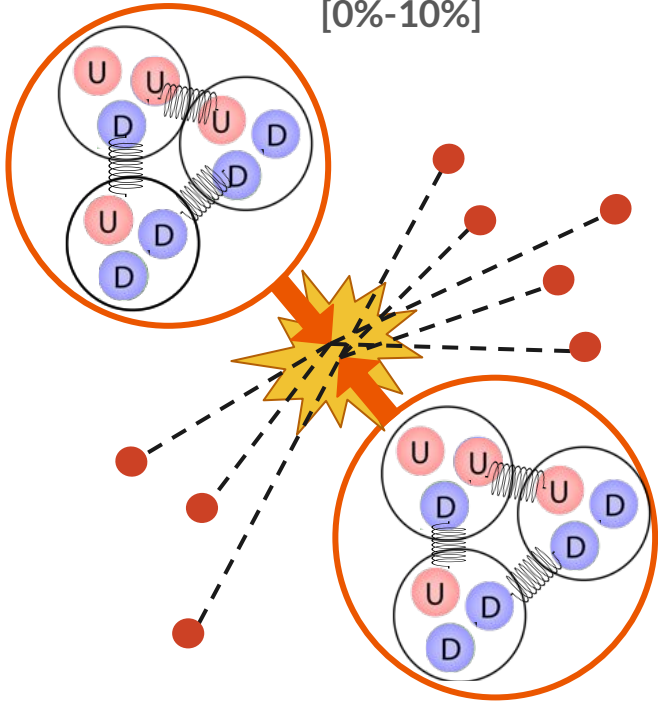
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



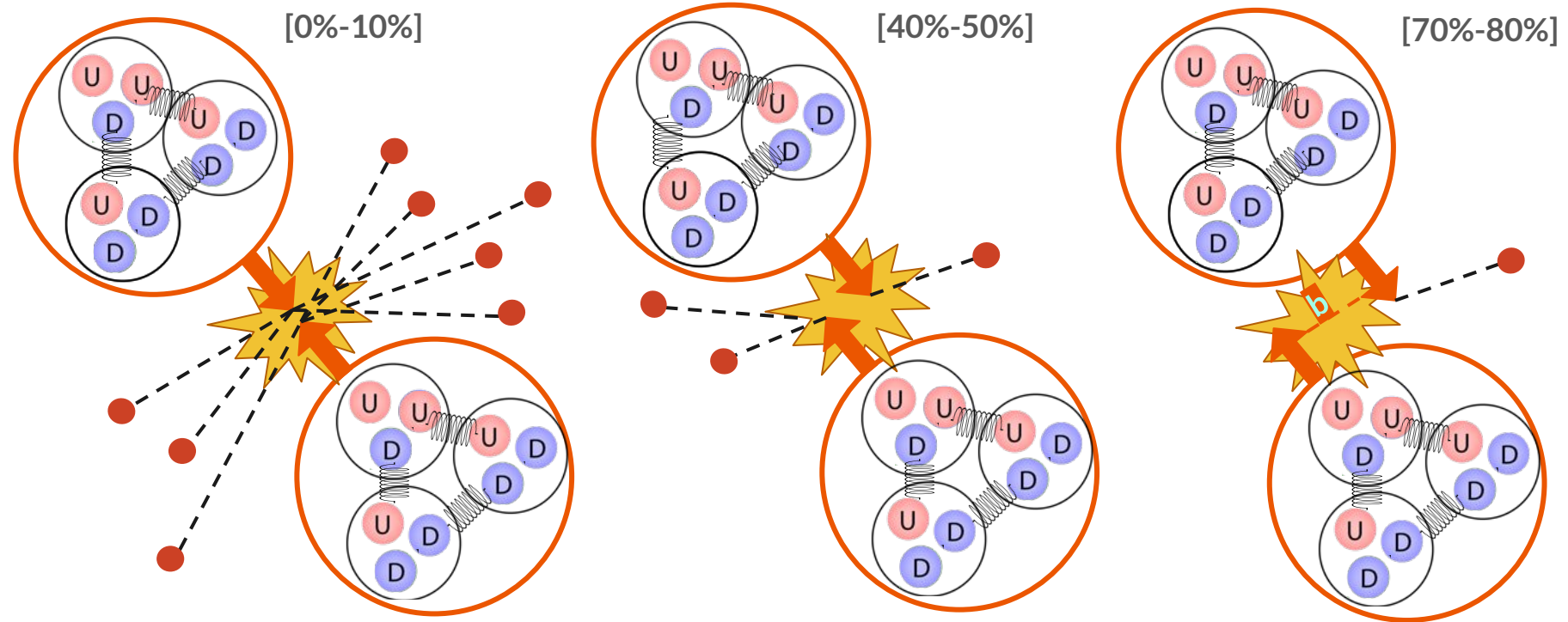
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?

[0%-10%]

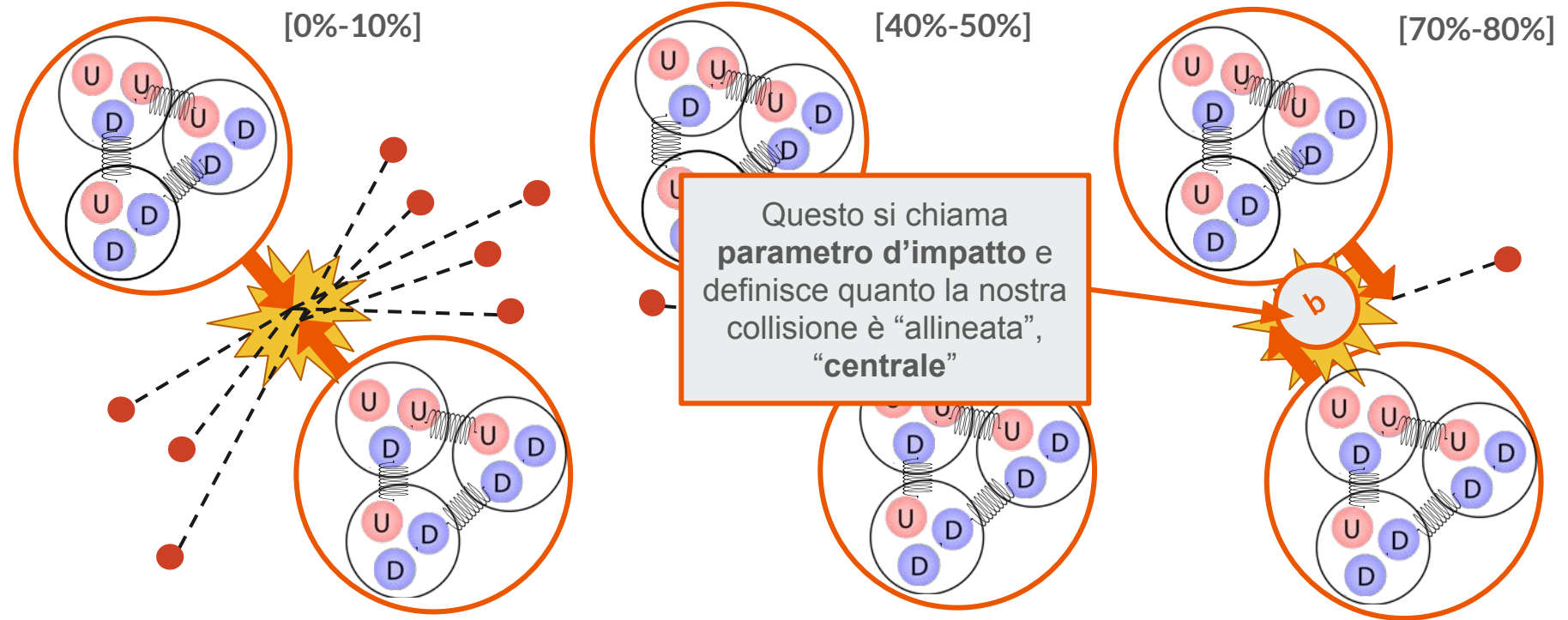
[40%-50%]

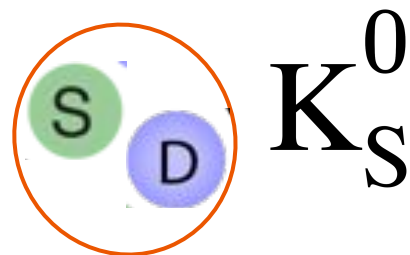
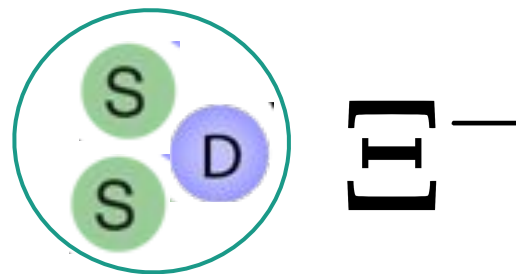
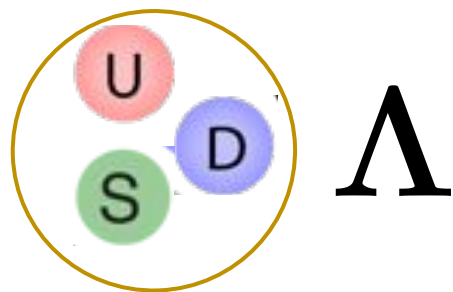


Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?

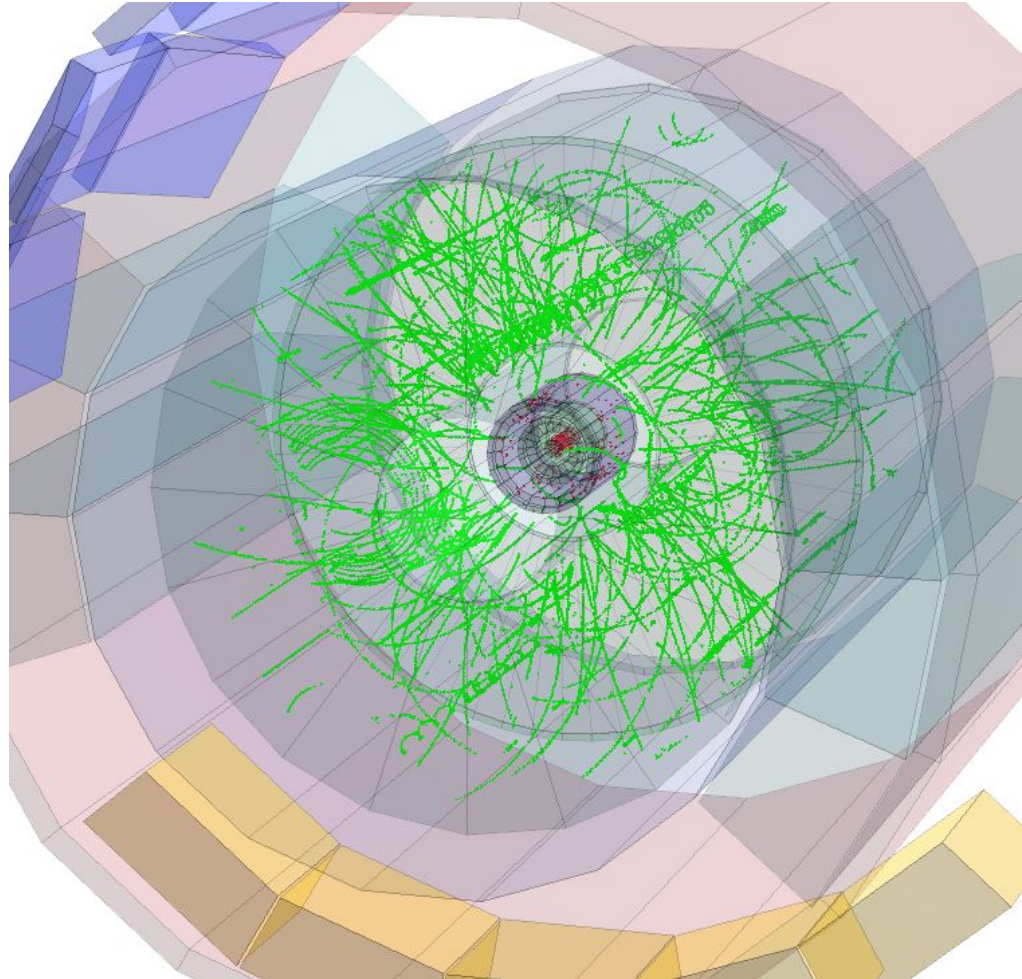




Event display

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

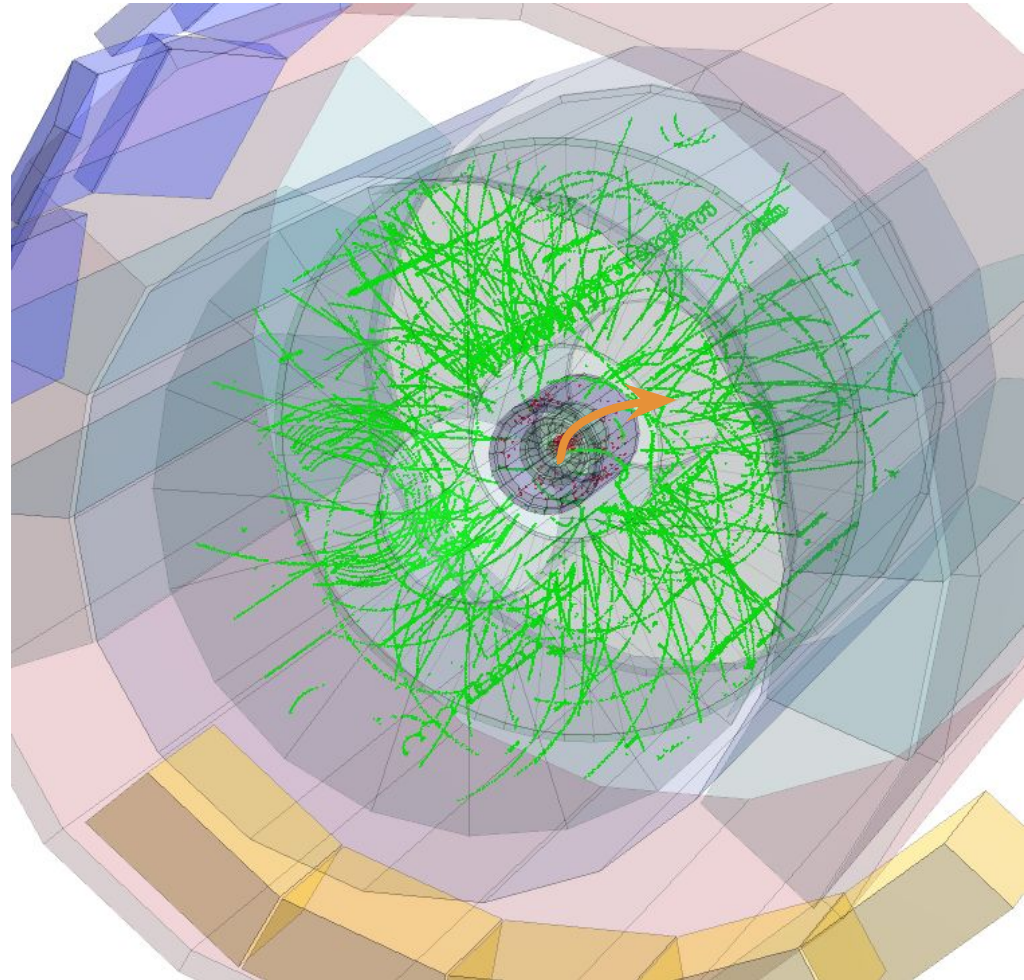
- in **rosso** i segnali misurati dal tracciatore interno (ITS, *Inner Tracking System*)
- in **verde** i segnali misurati dal tracciatore principale (TPC, *Time Projection Chamber*)



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)

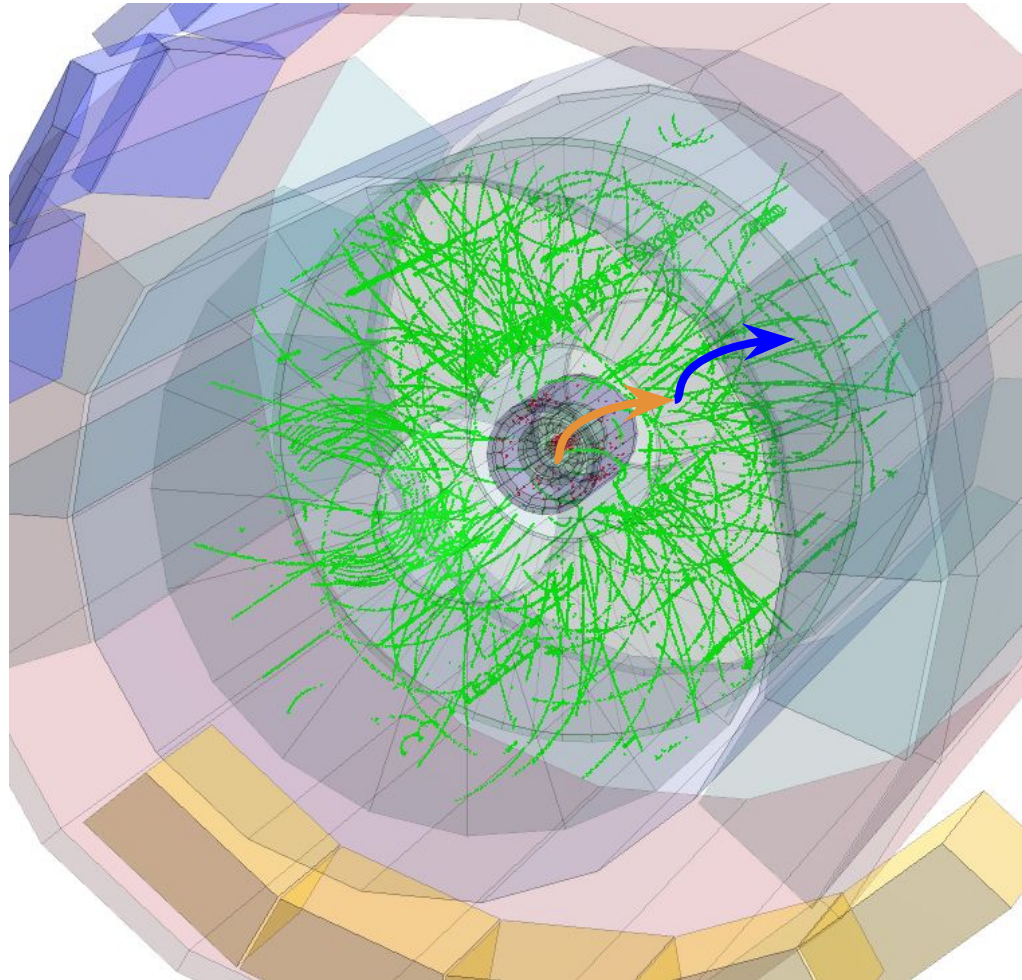


Event display

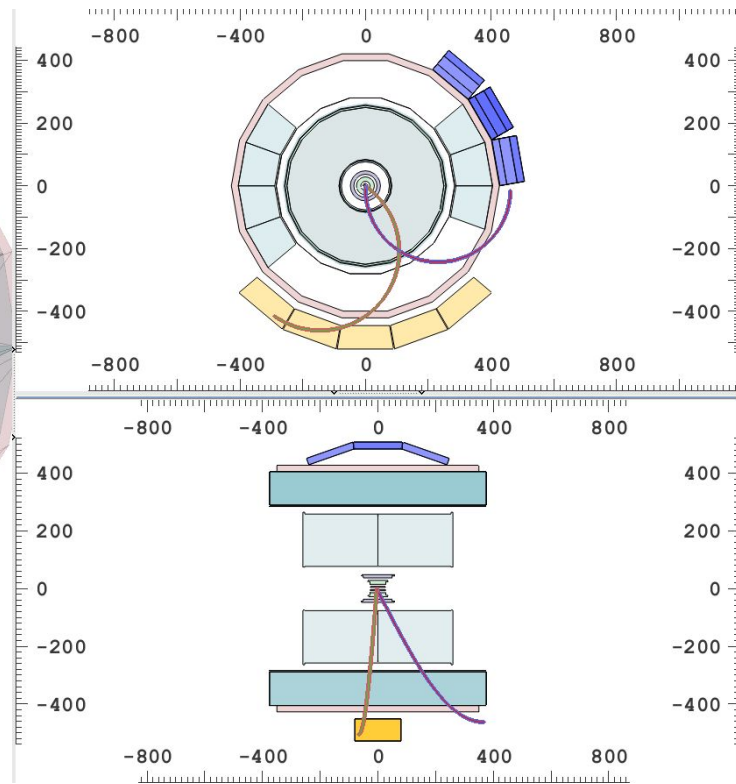
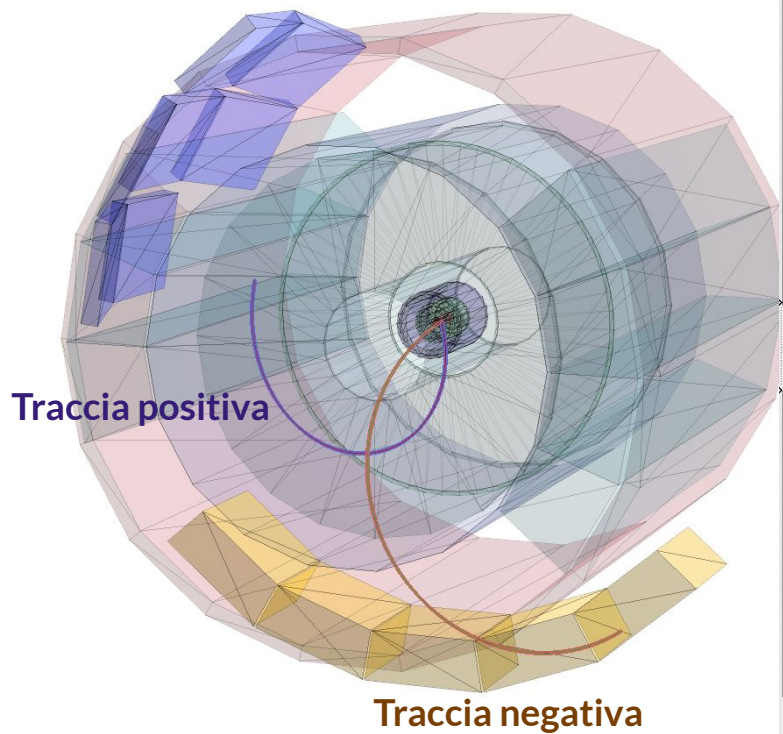
Event display = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

- **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)

per esempio

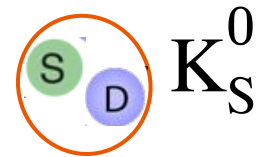
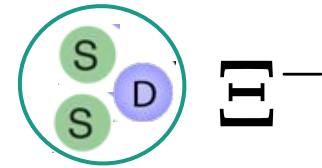
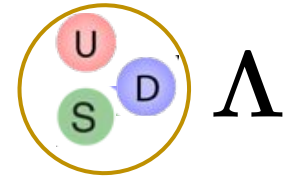
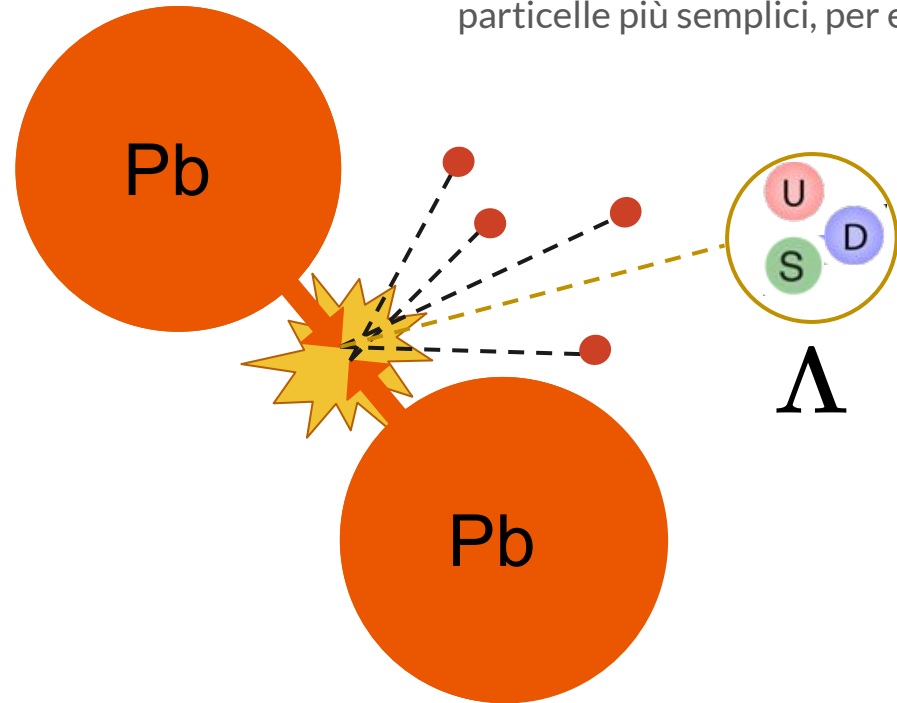


Event display

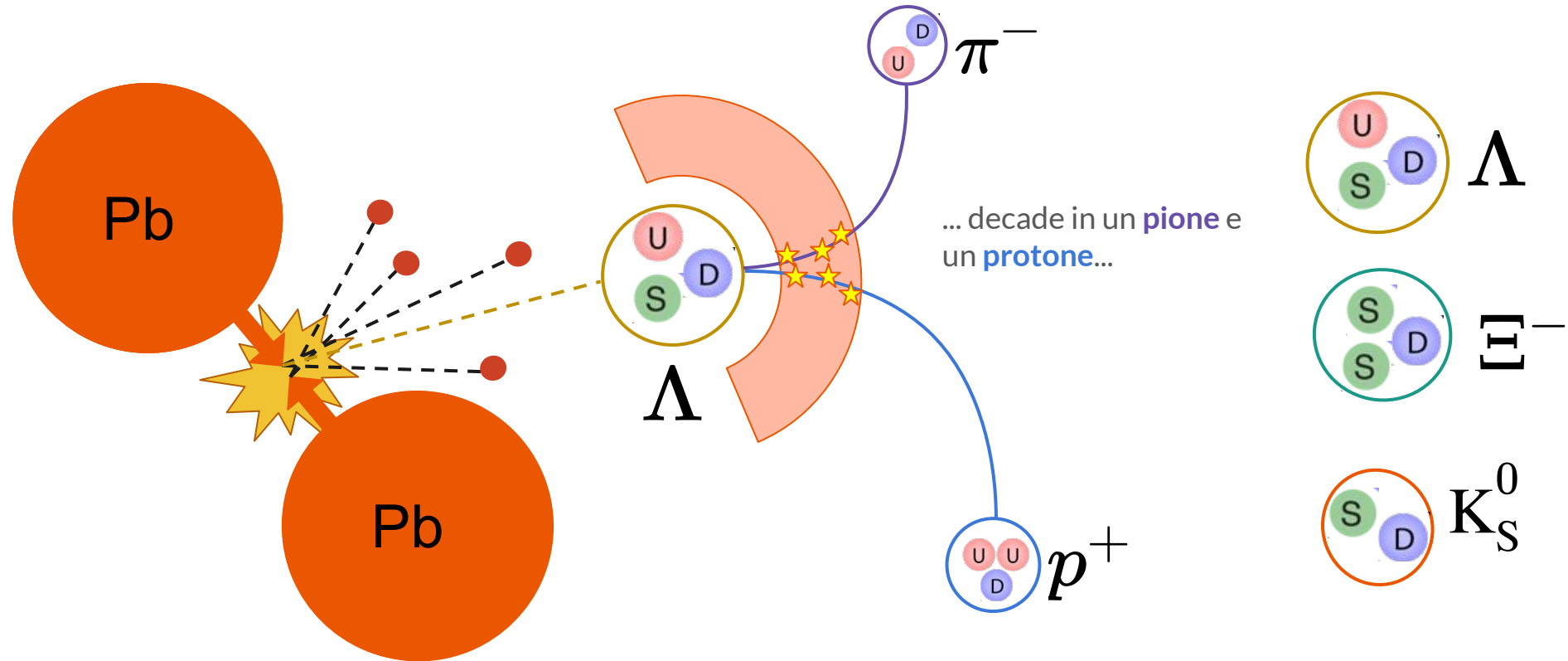


Particelle Strane e come trovarle

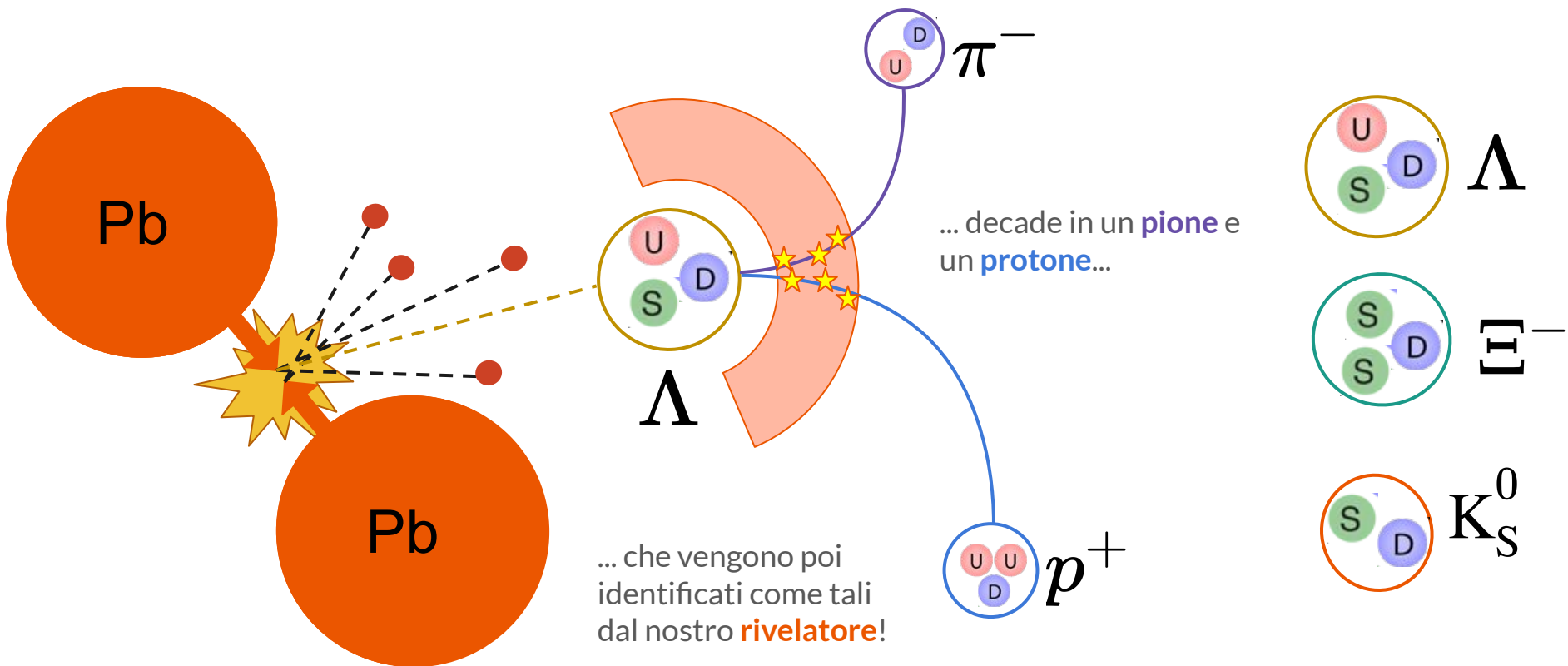
Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...



Particelle Strane e come trovarle

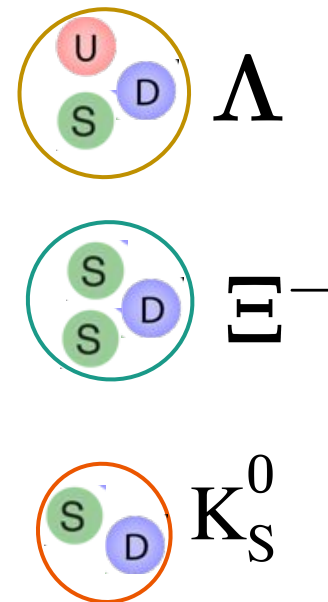
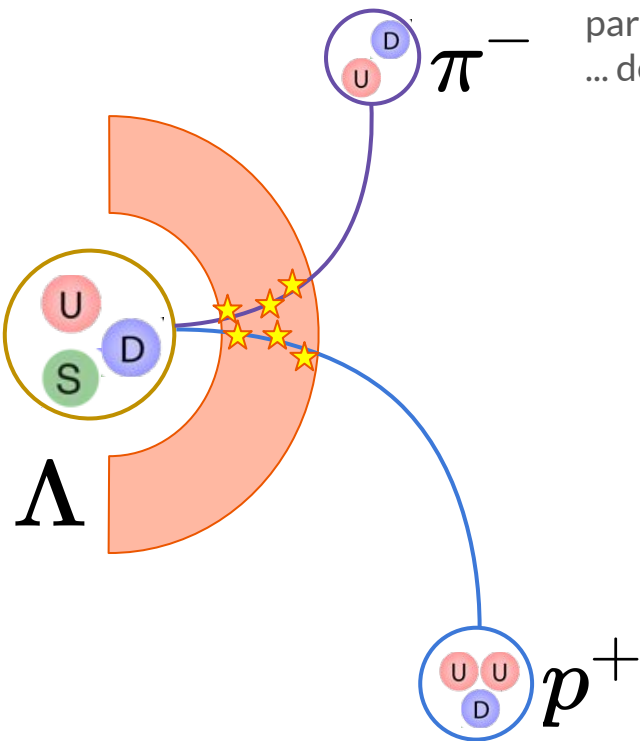


Particelle Strane e come trovarle



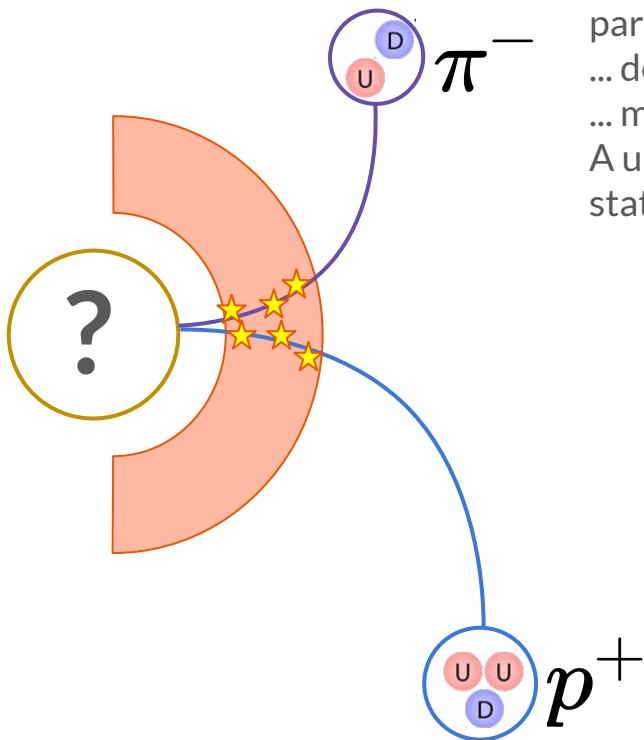
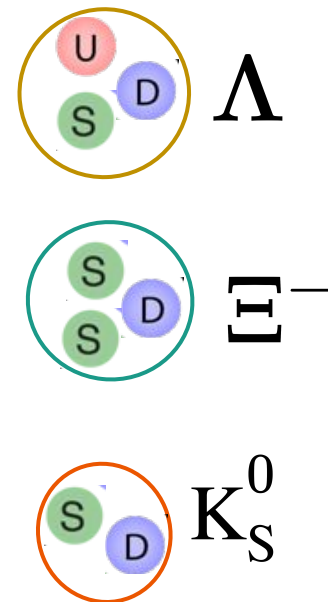
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

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



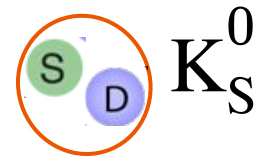
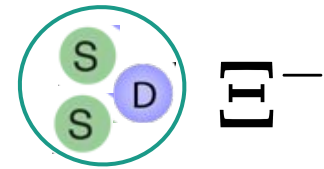
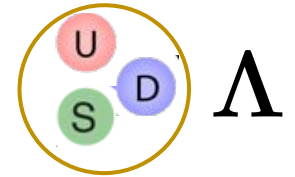
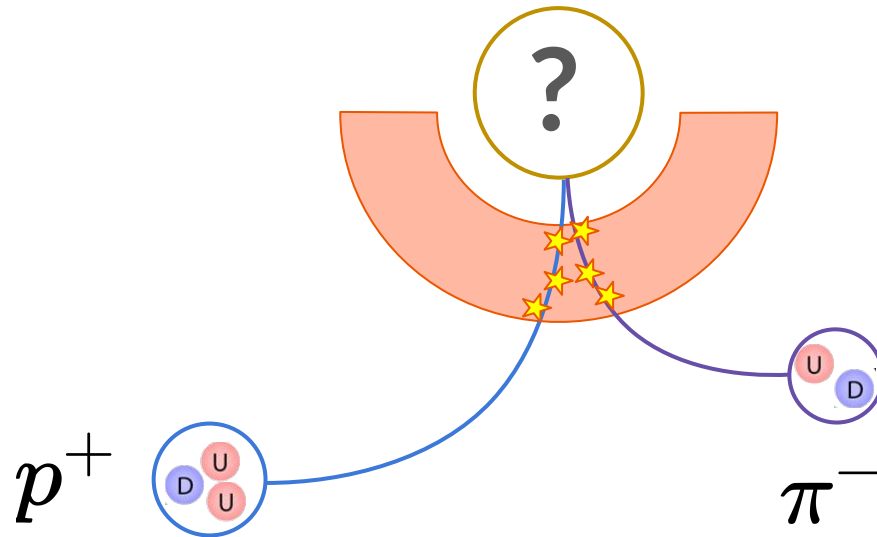
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

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!



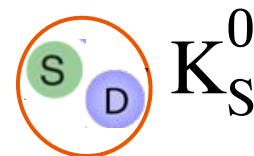
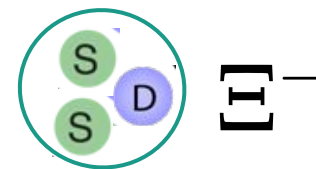
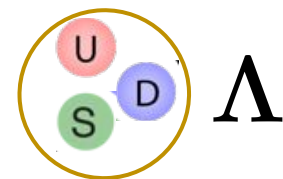
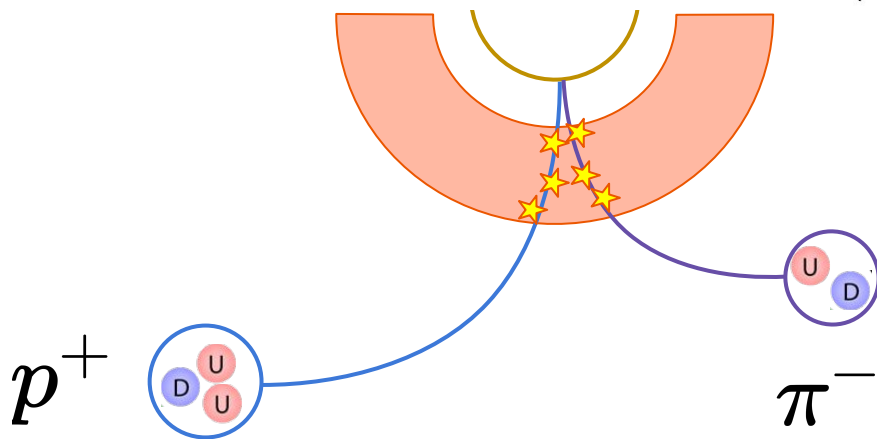
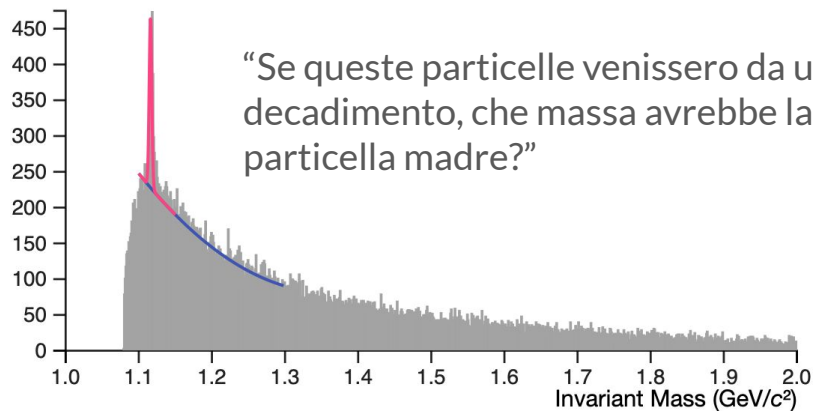
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

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

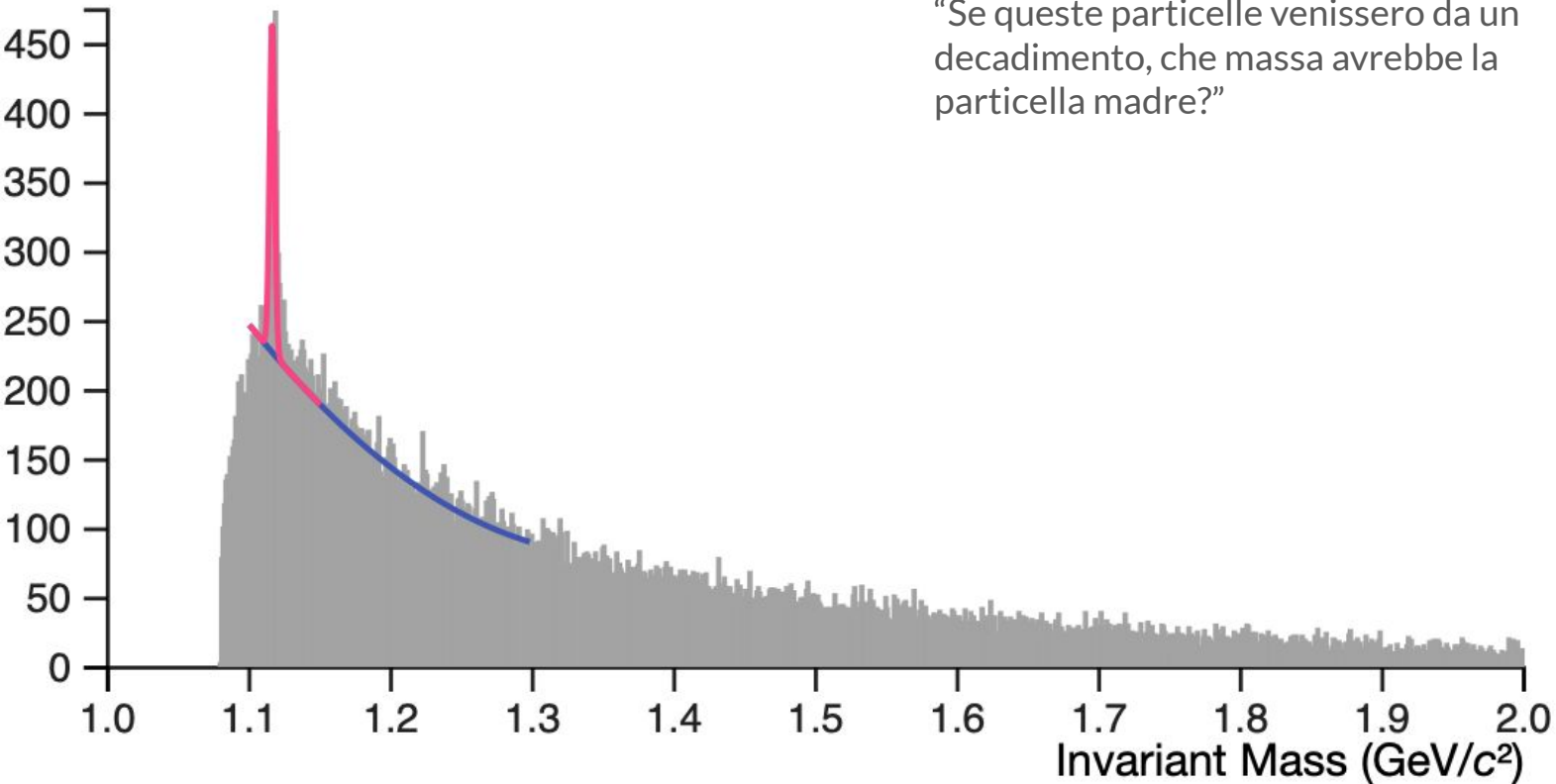


Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

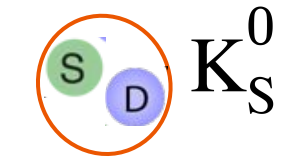
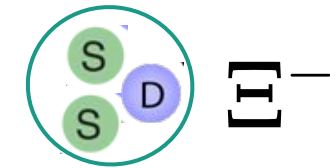
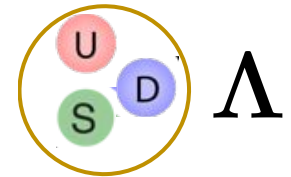
Possiamo combinare le particelle considerando il loro moto in quella che si chiama la **massa invariante**. Questa quantità risponde alla domanda:



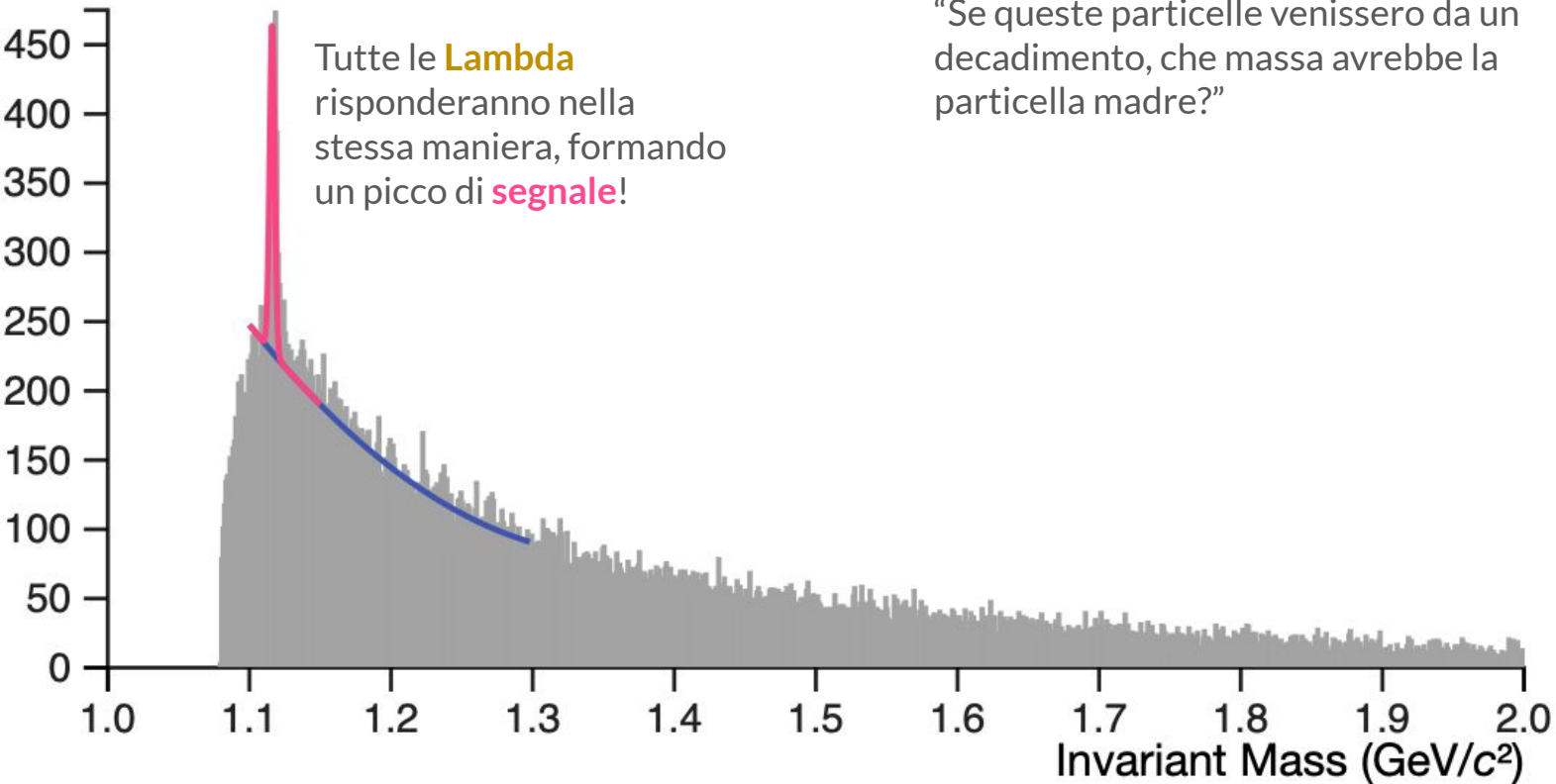
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



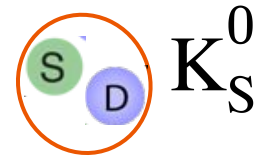
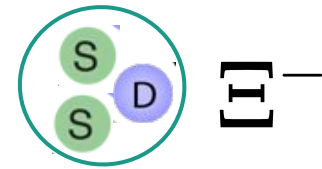
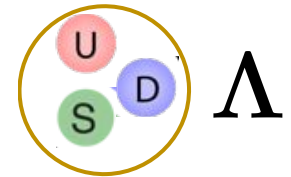
“Se queste particelle venissero da un decadimento, che massa avrebbe la particella madre?”



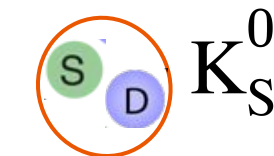
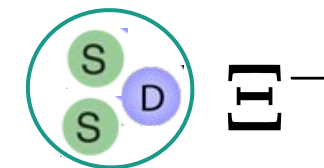
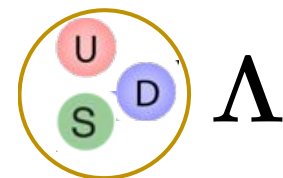
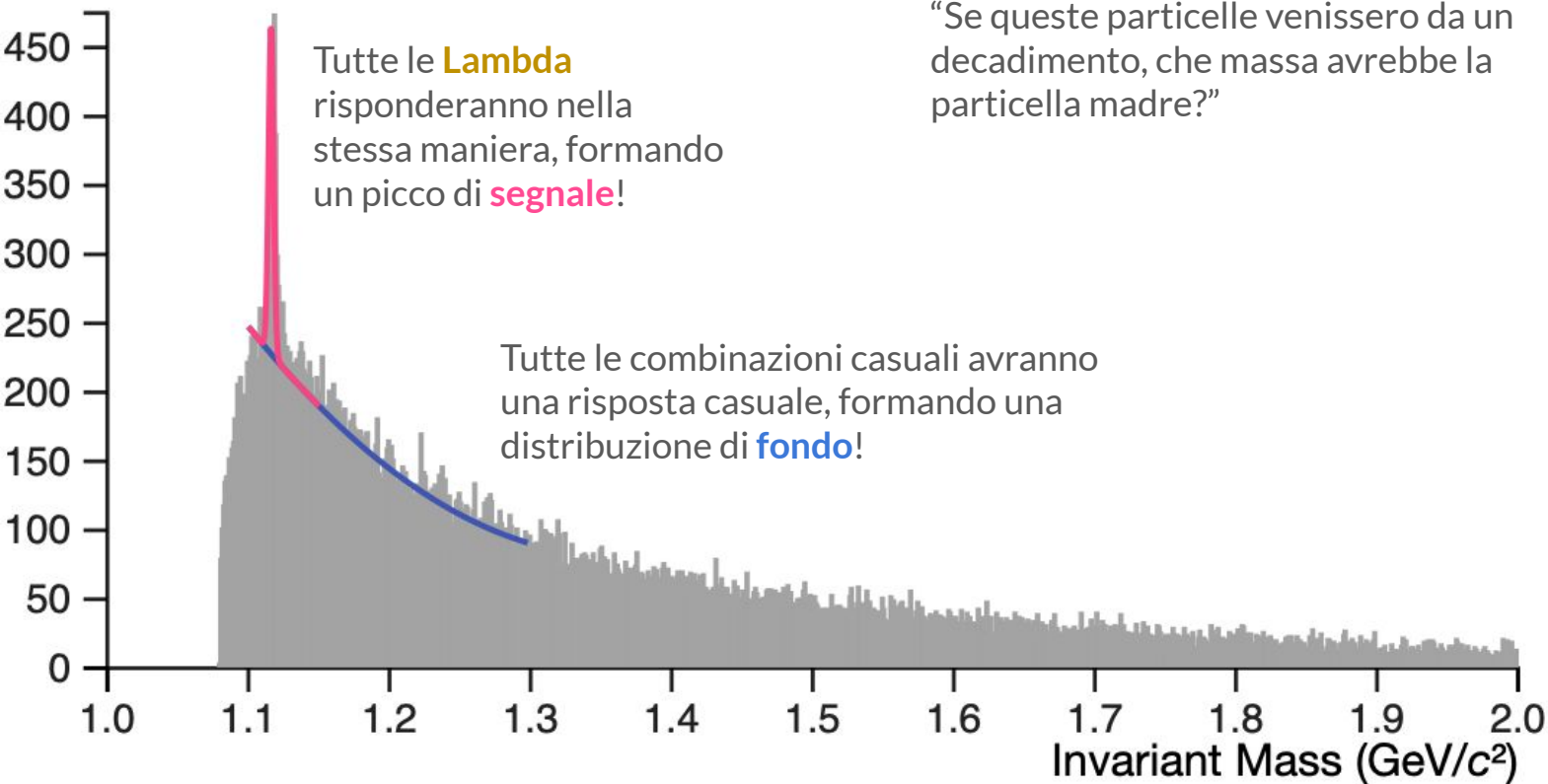
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

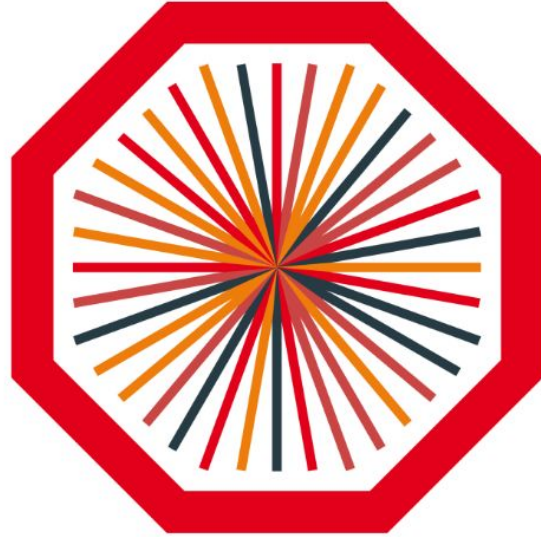


“Se queste particelle venissero da un decadimento, che massa avrebbe la particella madre?”



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante





ALICE

A JOURNEY OF DISCOVERY