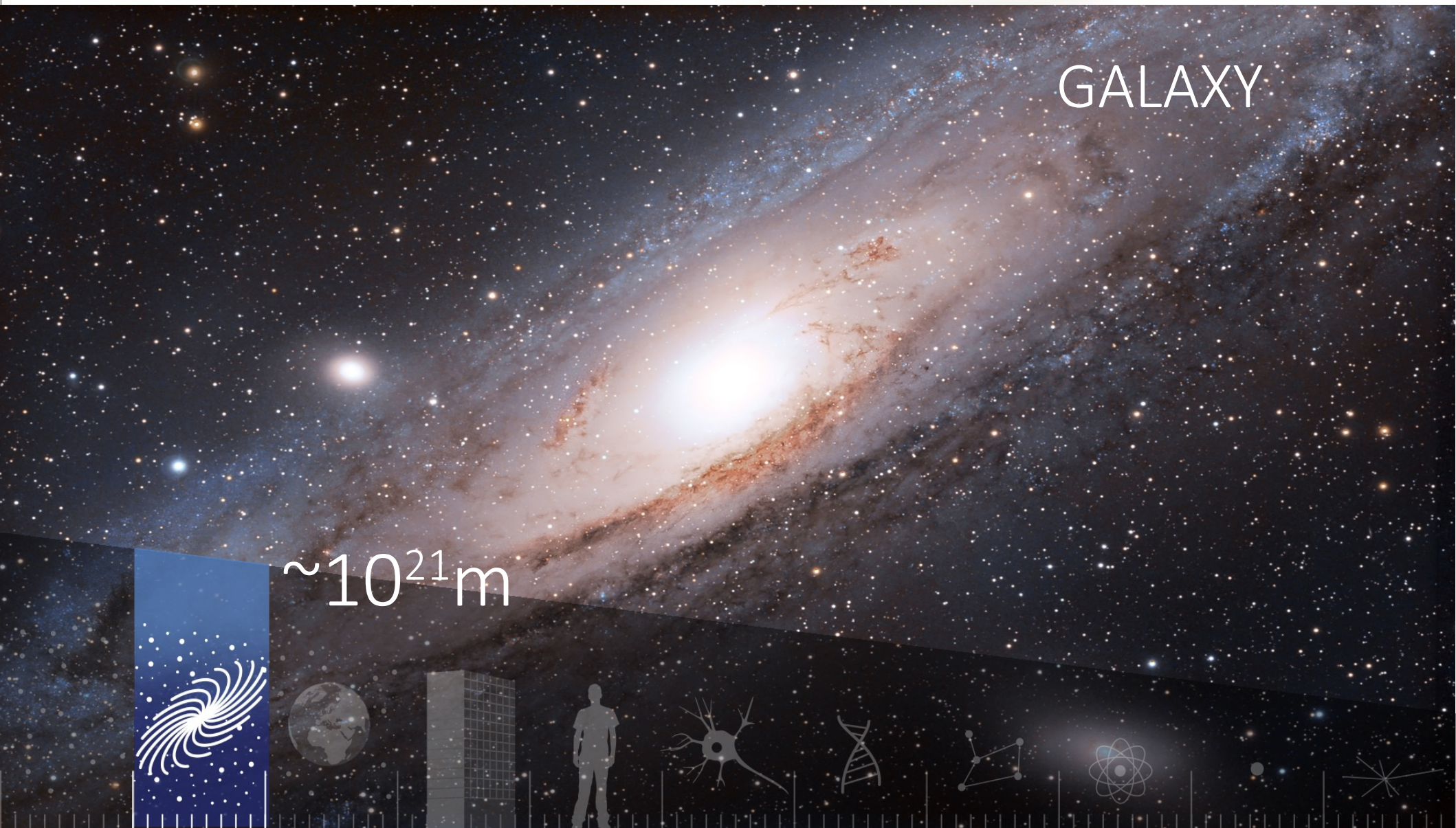
Alla ricerca di particelle strane in ALICE

Ramona Lea
Dipartimento Di Fisica, Università di Trieste e INFN, Sezione Trieste
Master Class 2015
Trieste 27/02/15

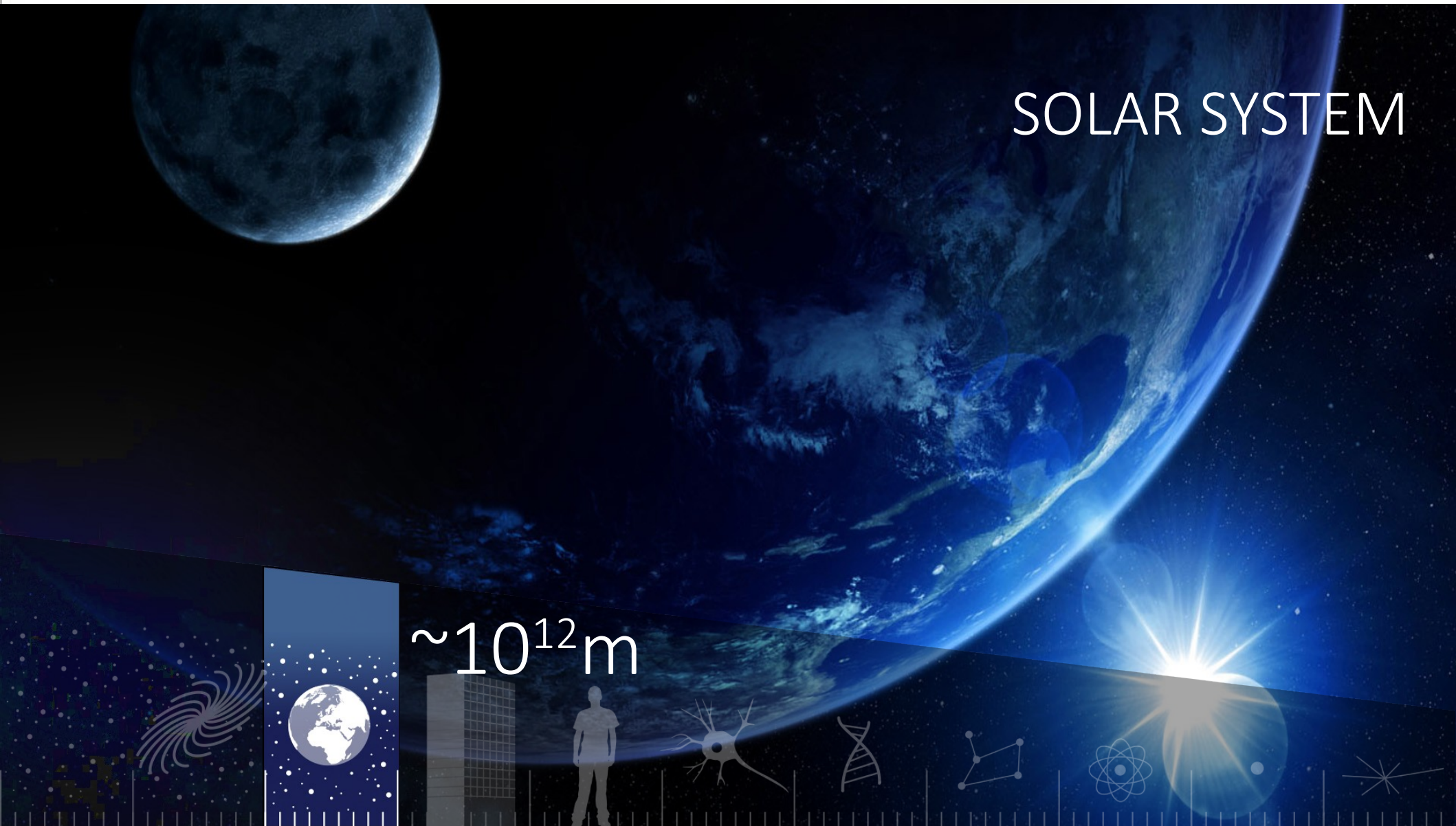
Un problema di dimensioni...

Dal molto grande ...

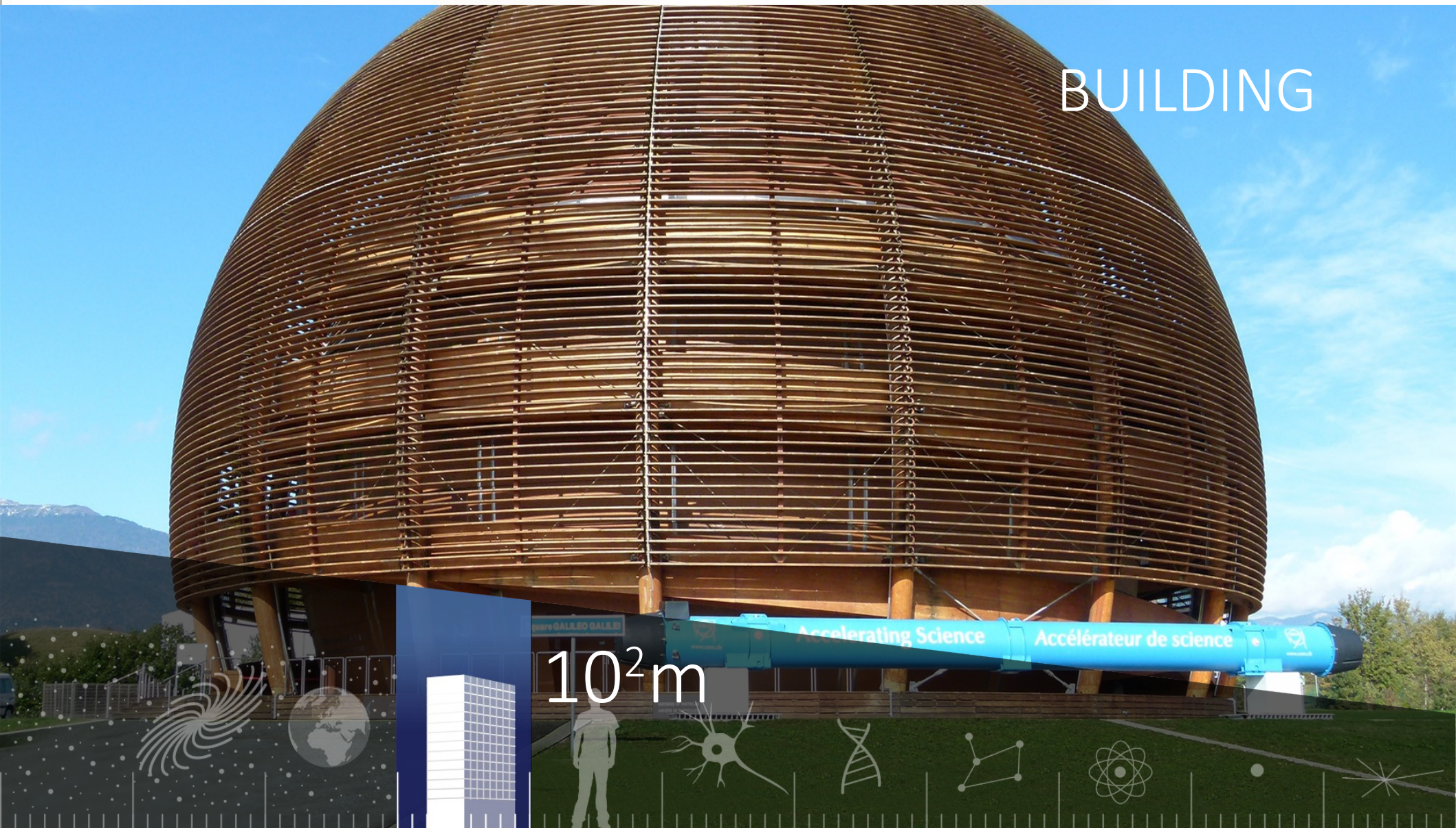
Un problema di dimensioni...



Un problema di dimensioni...

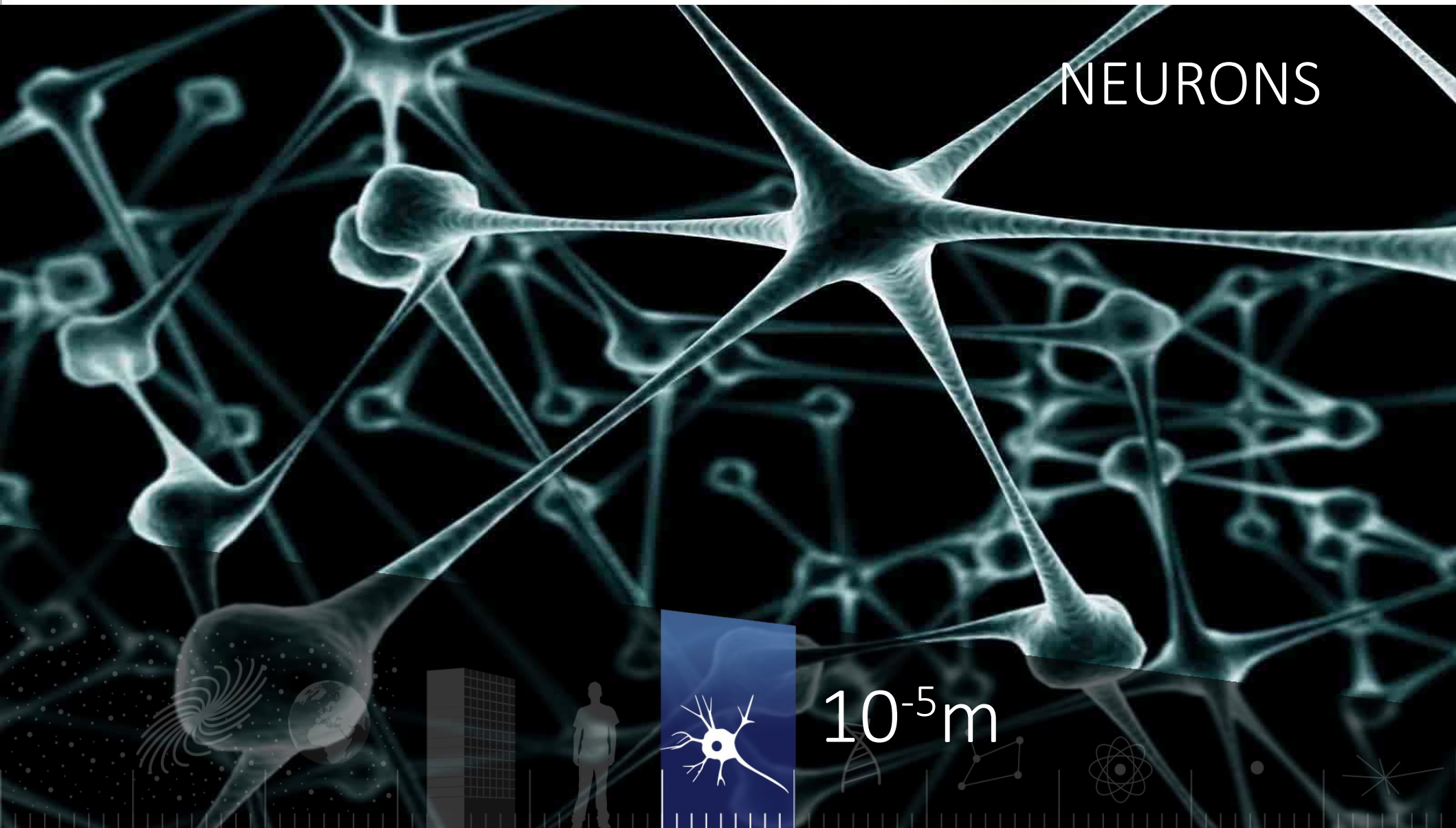


Un problema di dimensioni...



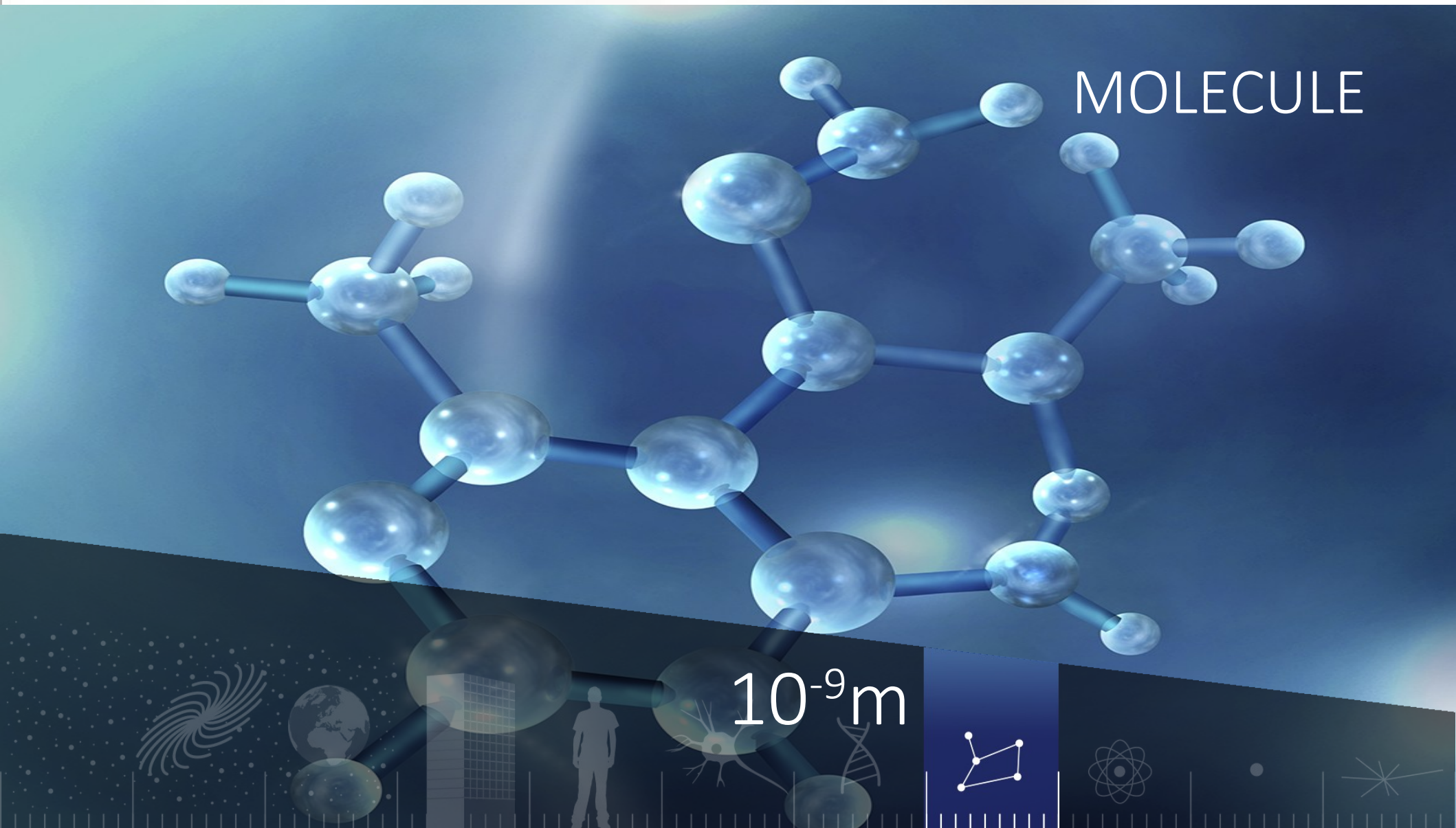
Un problema di dimensioni...

Un problema di dimensioni...

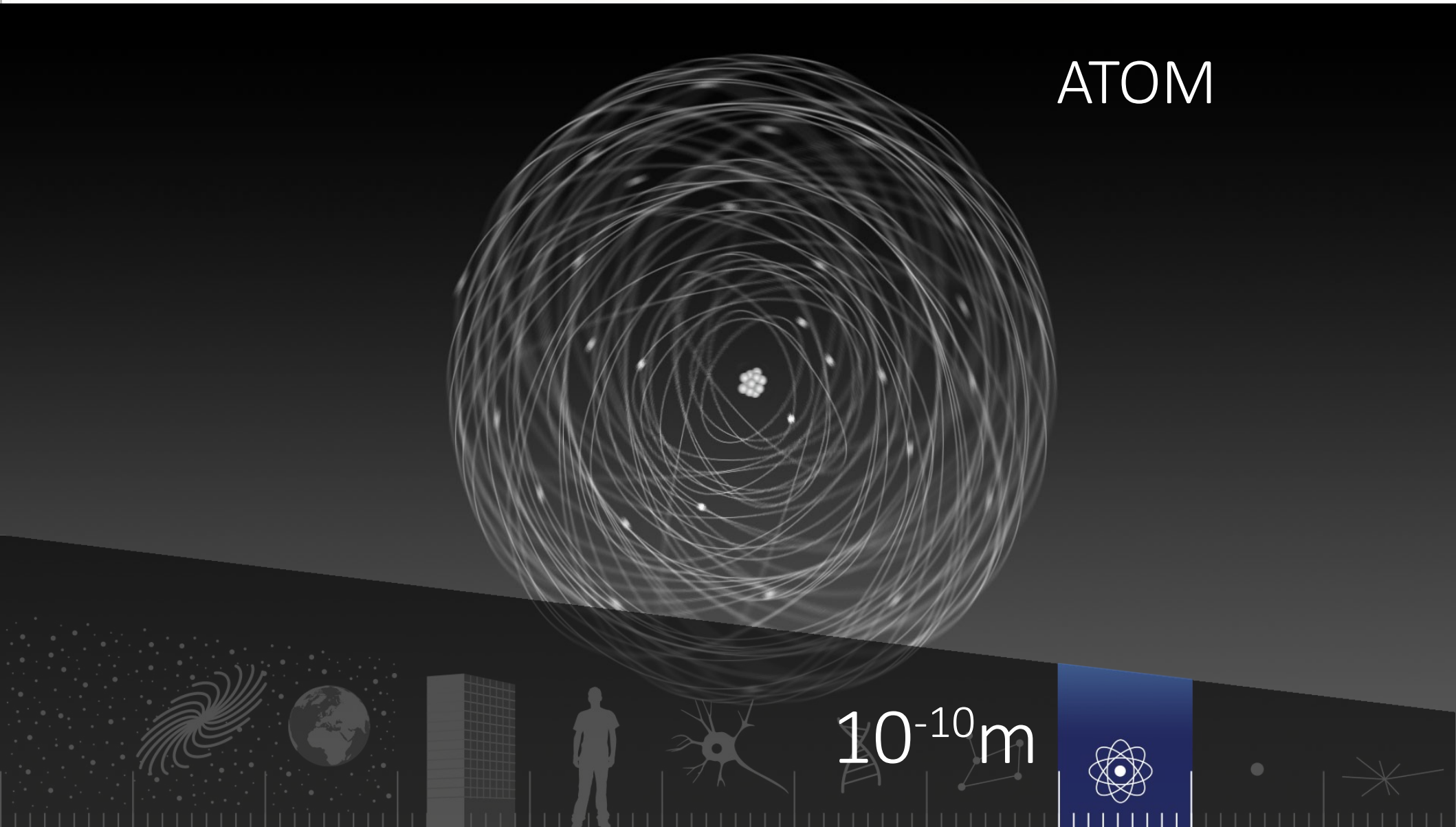


Un problema di dimensioni...

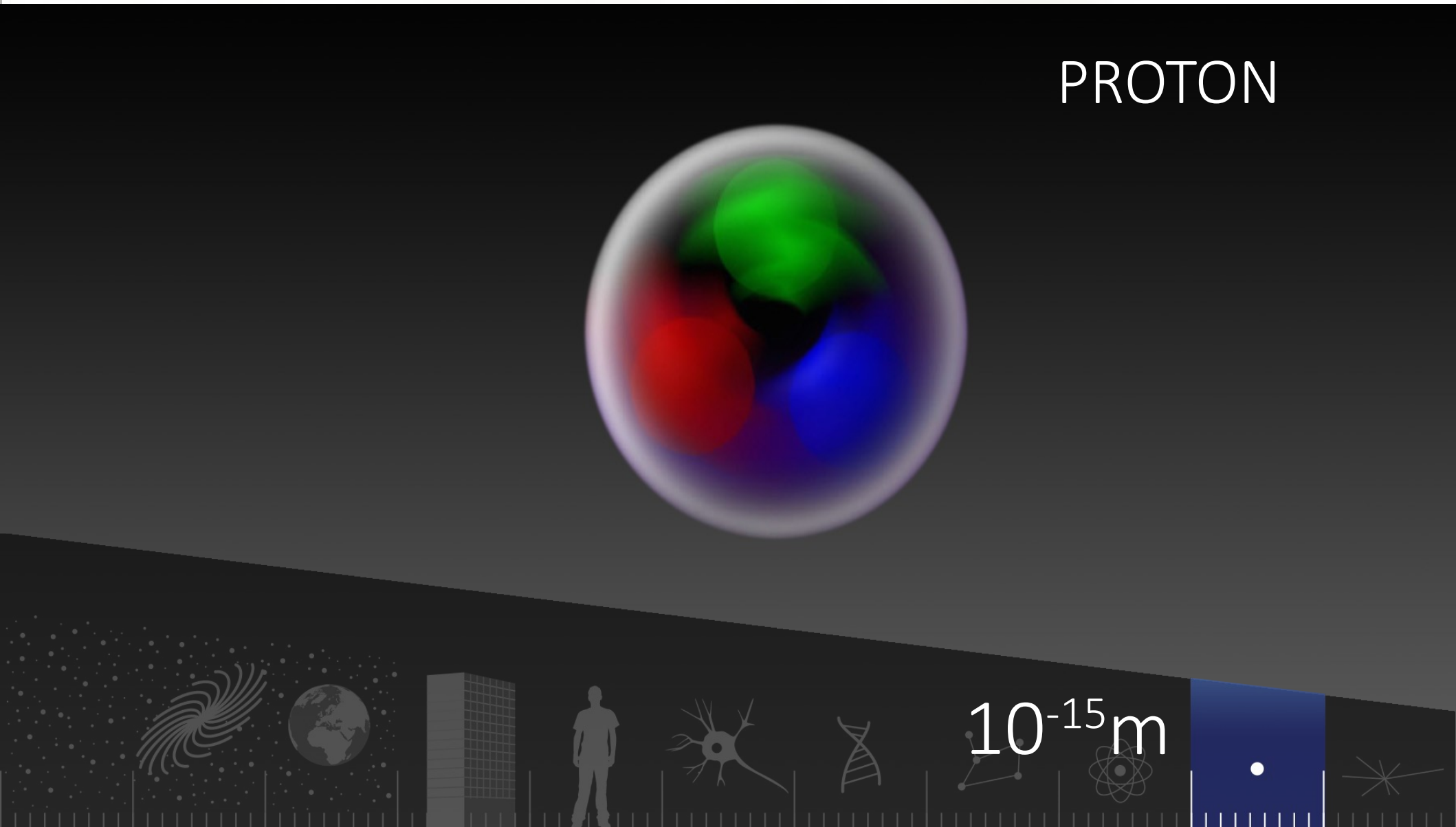
Un problema di dimensioni...



Un problema di dimensioni...

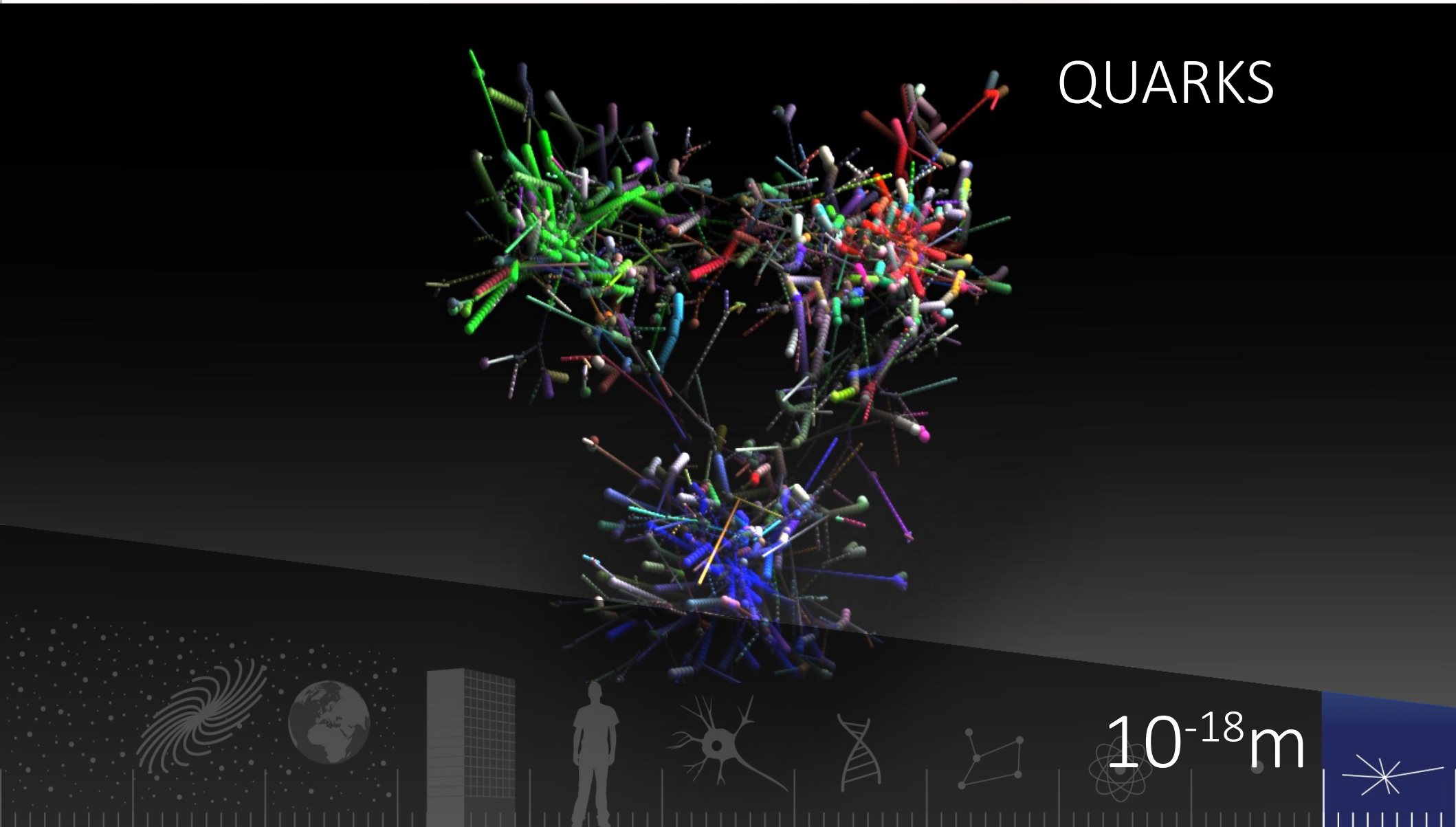


Un problema di dimensioni



Un problema di dimensioni...

Al molto piccolo ...



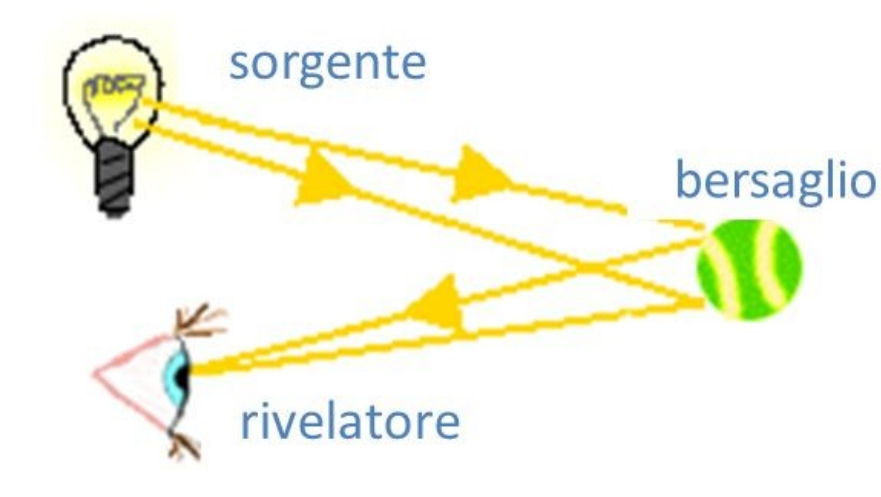
Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ci serve un "Rivelatore"

Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

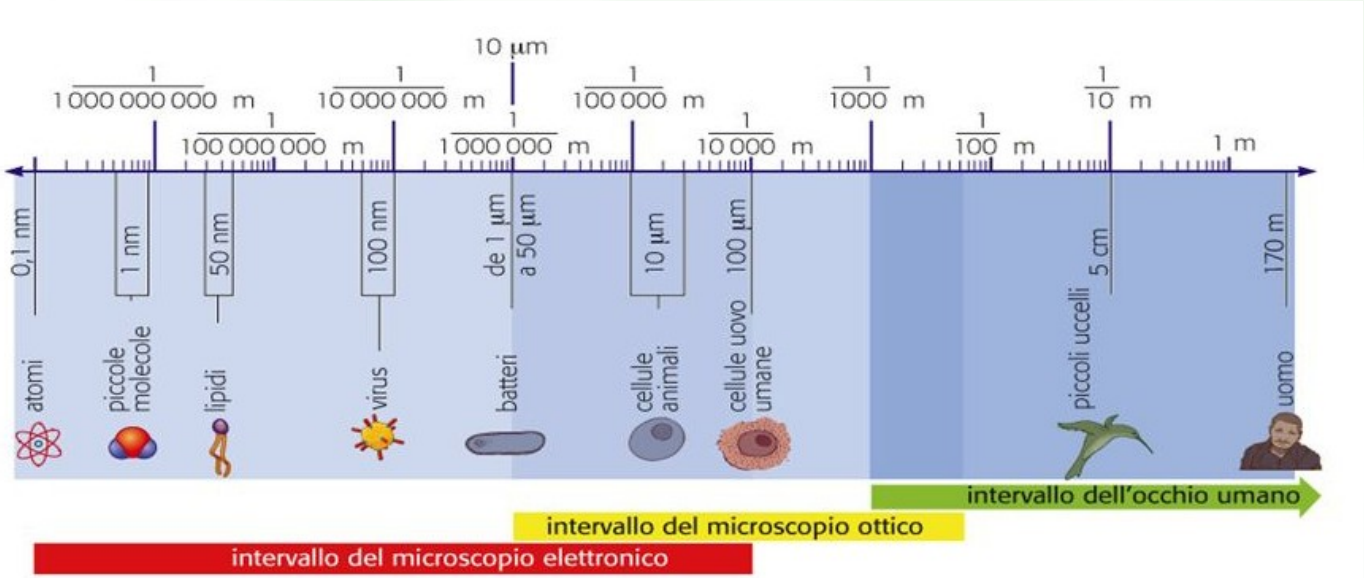
- Ci serve un "Rivelatore"
- Cos'è un rivelatore?
  - Il rivelatore più famigliare: l'occhio
  - Ma l'occhio umano riesce a vedere fino a ~ 10^{-2} cm

L'occhio umano è un rivelatore di particelle: i fotoni



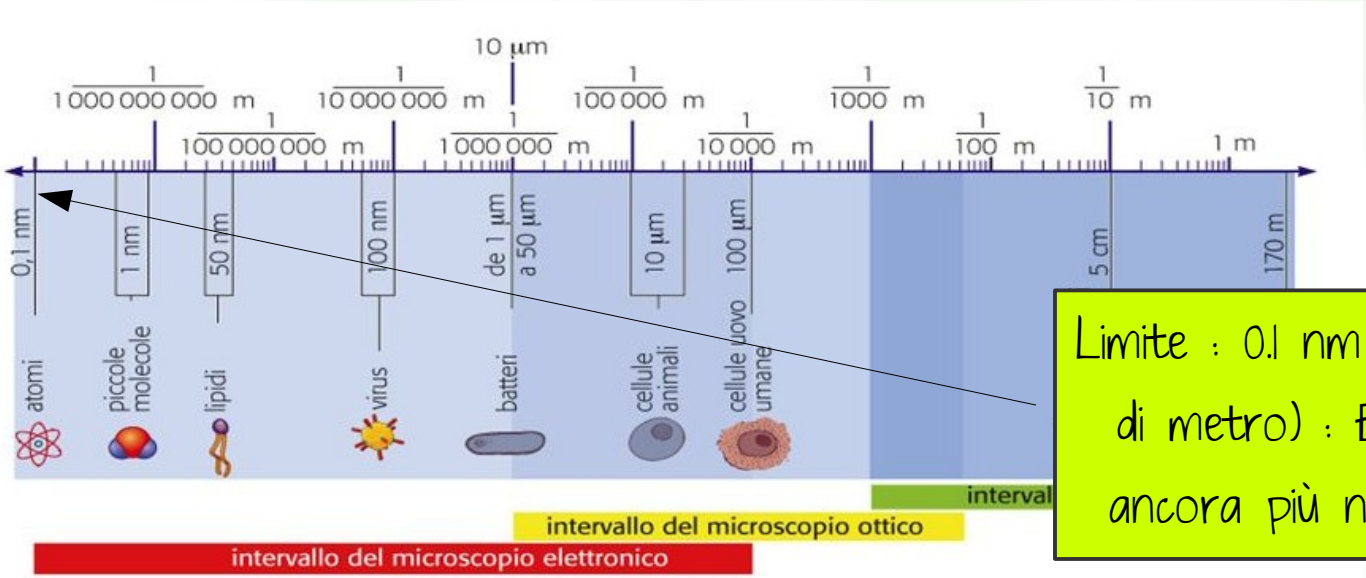
Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ci serve un "Rivelatore"
- Cos'è un rivelatore?
  - Il rivelatore più famigliare: l'occhio
  - Ma l'occhio umano riesce a vedere fino a ~ 10^{-2} cm
- E per vedere più nel dettaglio?
  - Microscopi (ottici, a scansione elettronica, ...)



Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ci serve un "Rivelatore"
- Cos'è un rivelatore?
  - Il rivelatore più famigliare: l'occhio
  - Ma l'occhio umano riesce a vedere fino a ~ 10^{-2} cm
- E per vedere più nel dettaglio?
  - Microscopi (ottici, a scansione elettronica, ...)



Limite : 0.1 nm (0.1 miliardesimi di metro) : E per vedere ancora più nel dettaglio???

Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ma se vogliamo vedere ancora **più nel dettaglio??**
  - Dobbiamo usare un pizzico di **meccanica quantistica**:

Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ma se vogliamo vedere ancora **più nel dettaglio??**
  - Dobbiamo usare un pizzico di **meccanica quantistica**:
    - Una particella si comporta anche come un'onda (cioè come la luce): la sua lunghezza d'onda è tanto più piccola quanto più è grande la sua energia!

$$\boxed{E = h\nu} \qquad \boxed{\nu = E/h} \qquad \boxed{\lambda = c/\nu = hc/E}$$

$h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s

Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ma se vogliamo vedere ancora **più nel dettaglio??**
  - Dobbiamo usare un pizzico di **meccanica quantistica**:
    - Una particella si comporta anche come un'onda (cioè come la luce): la sua lunghezza d'onda è tanto più piccola quanto più è grande la sua energia!

$$E = h\nu \qquad \nu = E/h \qquad \lambda = c/\nu = hc/E$$

    - Lunghezza d'onda piccola = capacità di "infilarsi" in spazi piccoli = possibilità di esplorare cose piccole!

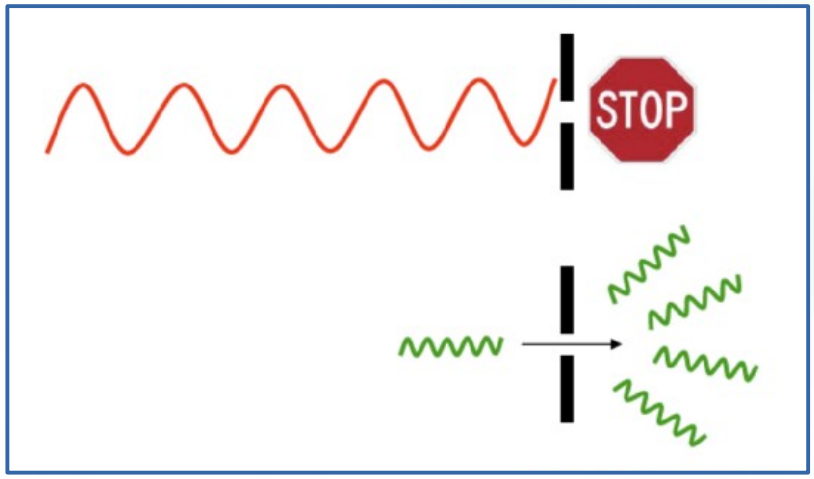
$h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s

Come possiamo vedere il "molto piccolo"?

- Ma se vogliamo vedere ancora **più nel dettaglio??**
  - Dobbiamo usare un pizzico di **meccanica quantistica**:
    - Una particella si comporta anche come un'onda (cioè come la luce): la sua lunghezza d'onda è tanto più piccola quanto più è grande la sua energia!

$$E = h\nu \qquad \nu = E/h \qquad \lambda = c/\nu = hc/E$$

- Lunghezza d'onda piccola = capacità di "infilarsi" in spazi piccoli = possibilità di esplorare cose piccole!



Più è microscopico il mondo che vogliamo esplorare, più deve essere **grande l'energia** delle particelle che usiamo per osservarlo

$h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s

Unità di misura

La carica elettrica Q delle particelle subatomiche è quantizzata:

$$Q = Ne \quad [e = 1.6 \times 10^{-19}\ C]$$

Vedremo che il modo di dare energia alle particelle si basa sui campi elettrici ed avremo in genere a che fare con <u>differenze di potenziale</u>, che si misurano in **Volt**.

Una carica Q che passa per una differenza di potenziale V, ottiene un'energia

$$E = Q \cdot V$$

Unità di misura

La carica elettrica Q delle particelle subatomiche è quantizzata:

$$Q = Ne \quad [e = 1.6 \times 10^{-19}\ C]$$

Vedremo che il modo di dare energia alle particelle si basa sui campi elettrici ed avremo in genere a che fare con <u>differenze di potenziale</u>, che si misurano in **Volt**.

Una carica Q che passa per una differenza di potenziale V, ottiene un'energia

$$E = Q \cdot V$$

Domanda: qual è il metodo più diretto di misurare le energie in questo ambito ?

Unità di misura

La carica elettrica Q delle particelle subatomiche è quantizzata:

$$Q = Ne \quad [e = 1.6 \times 10^{-19}\ C]$$

Vedremo che il modo di dare energia alle particelle si basa sui campi elettrici ed avremo in genere a che fare con <u>differenze di potenziale</u>, che si misurano in **Volt**.

Una carica Q che passa per una differenza di potenziale V, ottiene un'energia

$$E = Q \cdot V$$

Domanda: qual è il metodo più diretto di misurare le energie in questo ambito ?

Semplice! Basta esprimerle come prodotto di carica per potenziale.
Noi abbiamo una "unità di misura"della carica [e], e misuriamo il potenziale in Volt. Quindi la nostra unità di misura dell'energia sarà: **elettron-Volt (eV)**
elettronVolt = <u>energia di una particella di carica "e" accelerata dalla d.d.p di 1 Volt!</u>

$$1\ eV = (1.6 \cdot 10^{-19}\ C) \cdot (1\ V) = 1.6 \cdot 10^{-19}\ J$$

Elettron Volt

1 eV è l'energia cinetica acquistata da un elettrone sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 Volt : Quanto è grande un eV?

1 eV rappresenta un'energia molto piccola
$1\ eV = 1V \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}\ C = 1.602 \cdot 10^{-19}$ joule

10^{12} eV = TeV
10^{9} eV = GeV
10^{6} eV = MeV
10^{3} eV = keV

Elettron Volt

1 eV è l'energia cinetica acquistata da un elettrone sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 Volt : Quanto è grande un eV?

1 eV rappresenta un'energia molto piccola
1 eV = 1V · $1.602 \cdot 10^{-19}$ C = $1.602 \cdot 10^{-19}$ joule

10^{12} eV = TeV
10^{9} eV = GeV
10^{6} eV = MeV
10^{3} eV = keV

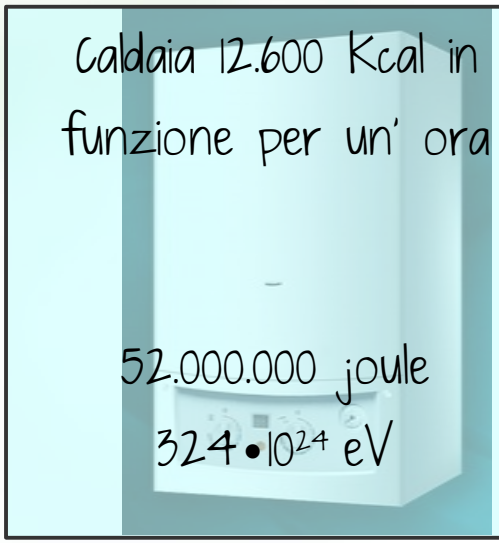
Lampadina da 100 W accesa per 1 ora

360.000 joule
$2.24 \cdot 10^{24}$ eV

Auto da corsa v = 370 Km/h

4.500.000 joule
$28. \cdot 10^{24}$ eV

Caldaia 12.600 Kcal in funzione per un' ora



52.000.000 joule
$324 \cdot 10^{24}$ eV

Energia a LHC :14 TeV sono tanti?

Dipende dalla scala a cui ci si trova:

Un'ape (M_{ape} = 1 g) che si muove alla velocità V_{ape} = 1 m/s ha un'energia

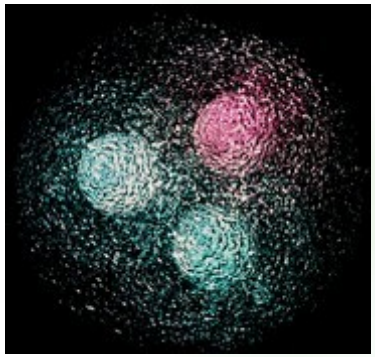
E_{ape} = 10^{-3} J = 6250 TeV

Energia a LHC :14 TeV sono tanti?

Dipende dalla scala a cui ci si trova:

Un'ape (M_{ape} = 1 g) che si muove alla velocità V_{ape} = 1 m/s ha un'energia

E_{ape} = 10^{-3} J = 6250 TeV



Un protone al Large Hadron Collider ha un'energia di **$E_{protone}$ = 7 TeV**

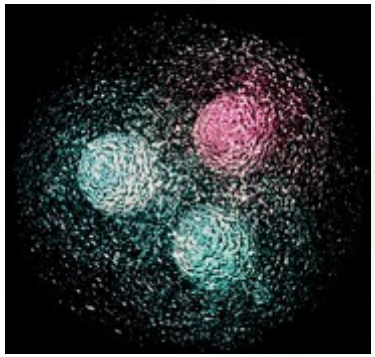
L'energia dell'ape in volo è molto maggiore di quella di un protone a LHC!

Energia a LHC :14 TeV sono tanti?

Dipende dalla scala a cui ci si trova:

Un'ape (M_{ape} = 1 g) che si muove alla velocità V_{ape} = 1 m/s ha un'energia

E_{ape} = 10^{-3} J = 6250 TeV



Un protone al Large Hadron Collider ha un'energia di **$E_{protone}$ = 7 TeV**

L'energia dell'ape in volo è molto maggiore di quella di un protone a LHC!

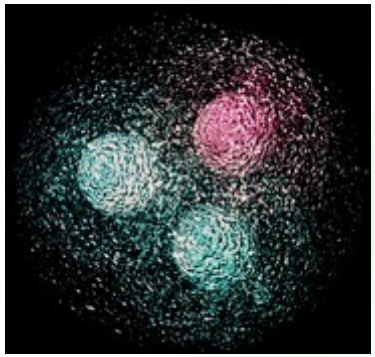
MA:
A LHC ogni 25 ns (→ 40 milioni di volte al secondo!) si scontrano 10^{14} protoni → E_{LHC} ~ 10^{8}J che come energia corrisponde a quella nel punto di impatto di 2 camion di M_{camion} = 100 tonnellate che si scontrano viaggiando a V_{camion} = 120 Km/h in un volume molto piccolo (sfera di raggio 10^{-15} m)

Energia a LHC :14 TeV sono tanti?

Dipende dalla scala a cui ci si trova:

Un'ape (M_{ape} = 1 g) che si muove alla velocità V_{ape} = 1 m/s ha un'energia

E_{ape} = 10^{-3} J = 6250 TeV



Un protone al Large Hadron Collider ha un'energia di **$E_{protone}$ = 7 TeV**

L'energia dell'ape in volo è molto maggiore di quella di un protone a LHC!

MA:
A LHC ogni 25 ns (→ 40 milioni di volte al secondo!) si scontrano 10^{14} protoni → E_{LHC} ~ 10^{8}J che come energia corrisponde a quella nel punto di impatto di 2 camion di M_{camion} = 100 tonnellate che si scontrano viaggiando a V_{camion} = 120 Km/h in un volume molto piccolo (sfera di raggio 10^{-15} m)

Dove troviamo particella ad alta energia?

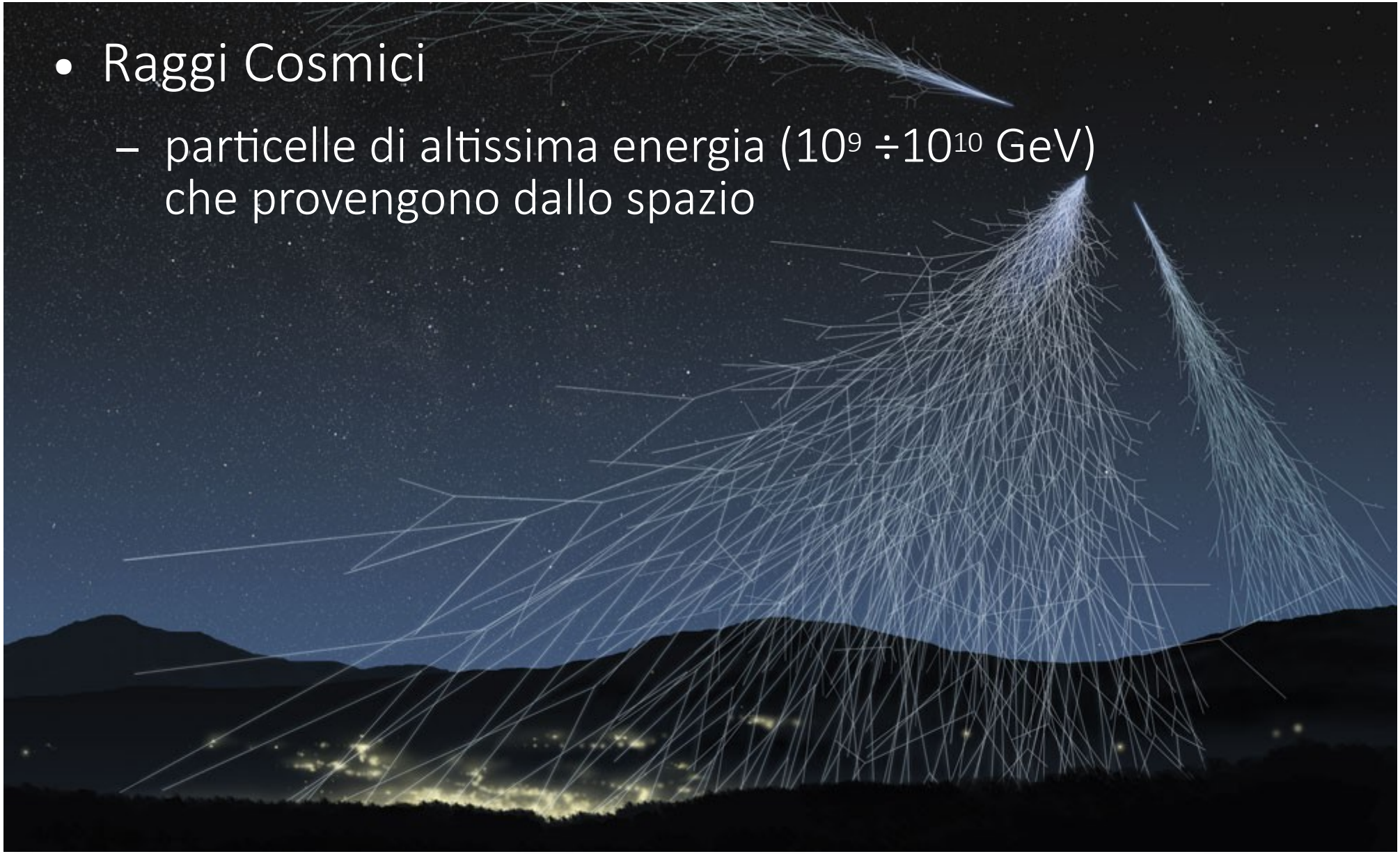
- Sorgenti radioattive:
  - nuclei pesanti (= con molti protoni e neutroni) che hanno una struttura instabile ed emettono particelle

Dove troviamo particella ad alta energia?

- Sorgenti radioattive:
  - nuclei pesanti (= con molti protoni e neutroni) che hanno una struttura instabile ed emettono particelle

- PRO : energia ben definita ma non troppo alta (alcuni MeV)
- CONTRO : difficoltà a ottenere un “fascio”di particelle collimato

Dove le troviamo le particella ad alta energia?



- Raggi Cosmici
  - particelle di altissima energia ($10^9 \div 10^{10}$ GeV) che provengono dallo spazio

Dove le troviamo le particella ad alta energia?

- Raggi Cosmici
  - particelle di altissima energia ($10^9 \div 10^{10}$ GeV) che provengono dallo spazio

•PRO : energia molto superiore a quelle ottenibili con qualsia macchina umana
•CONTRO :intensità (= numero di particelle che arrivano nell'unità di tempo) troppo piccola

Dove le troviamo le particella ad alta energia?

- Raggi Cosmici
  - particelle di altissima energia ($10^9 \div 10^{10}$ GeV) che provengono dallo spazio

•PRO : energia molto superiore a quelle ottenibili con qualsia macchina umana
•CONTRO :intensità (= numero di particelle che arrivano nell'unità di tempo) troppo piccola

Come possiamo unire alta intensità, fasci di particelle ed energia ben determinata?

→ Acceleratori di particelle!

Come funziona un acceleratore di particelle?

2° principio di Newton: l'accelerazione è conseguenza di una forza:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

Energia cinetica (= di movimento) di una particella:

$$E = 1/2\ mv^2$$

"accelerare "una particella = a darle energia.

Come funziona un acceleratore di particelle?

2° principio di Newton: l'accelerazione è conseguenza di una forza:

$$F = ma$$

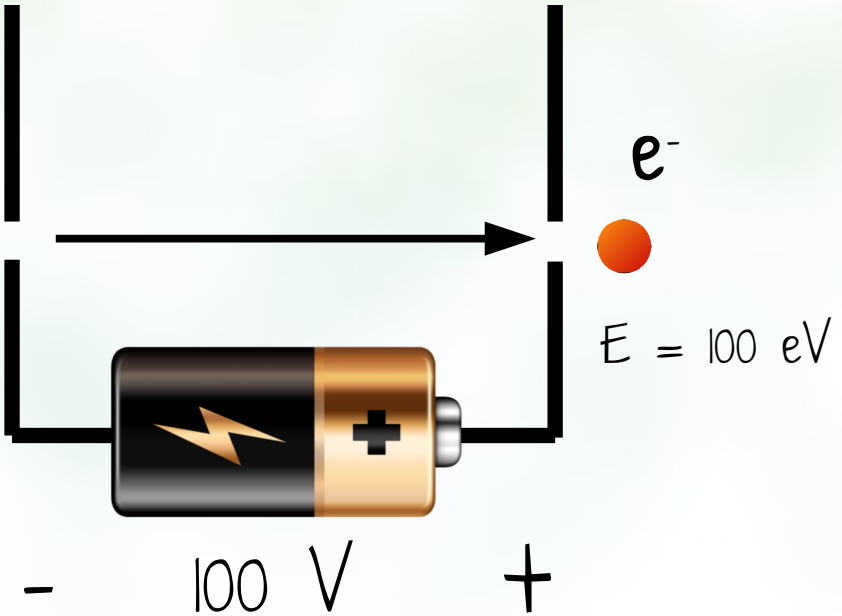
Energia cinetica (= di movimento) di una particella:

$$E = 1/2\ mv^2$$

"accelerare "una particella = a darle energia.

Come posso dare energia a una particella?

I nuclei atomici e molte particelle subnucleari posseggono una carica elettrica. Possiamo accelerarle facendole passare attraverso un campo elettrico!



Come funziona un acceleratore di particelle?

La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \underbrace{q\left(\vec{E}\right.}_{\text{Accelerazione}} + \underbrace{\left.\vec{v} \times \vec{B}\right)}_{\text{Curvatura e focheggiamento}}$$

$\vec{p} = Impulso$

$q = carica\ elettrica$

$\vec{E} = campo\ elettrico$

$\vec{B} = campo\ magnetico$

Come funziona un acceleratore di particelle?

La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

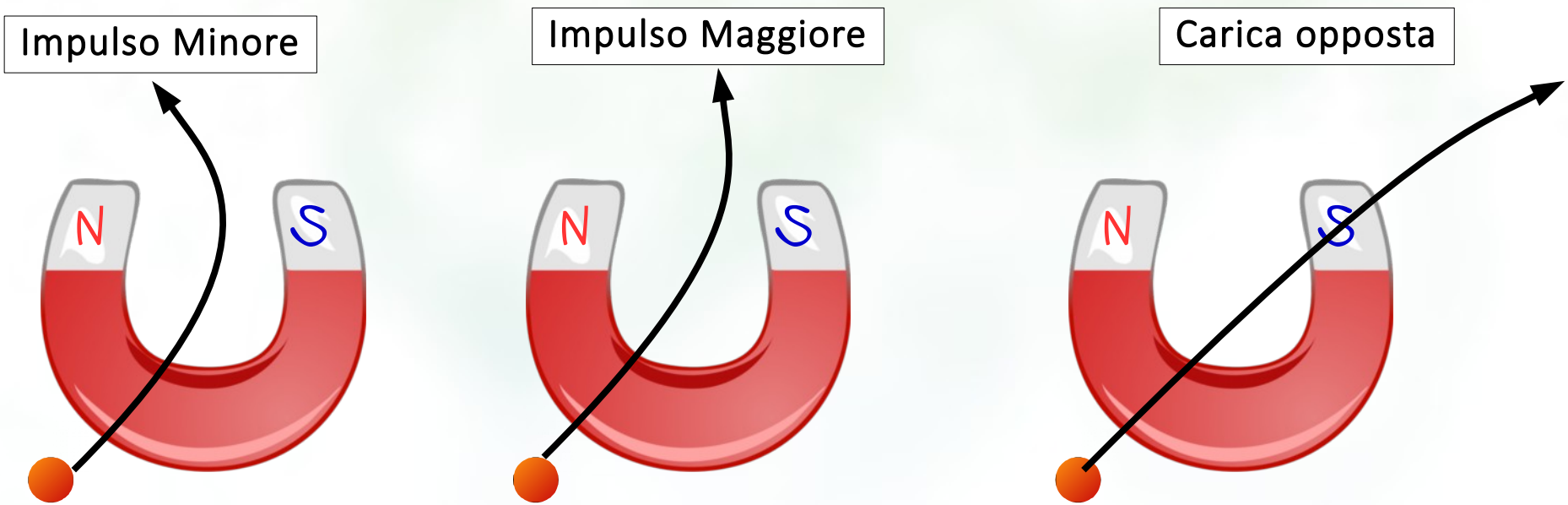
$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \underbrace{q\left(\vec{E}\right.}_{\text{Accelerazione}} + \underbrace{\left.\vec{v} \times \vec{B}\right)}_{\text{Curvatura e focheggiamento}}$$

$\vec{p} = Impulso$

$q = carica\ elettrica$

$\vec{E} = campo\ elettrico$

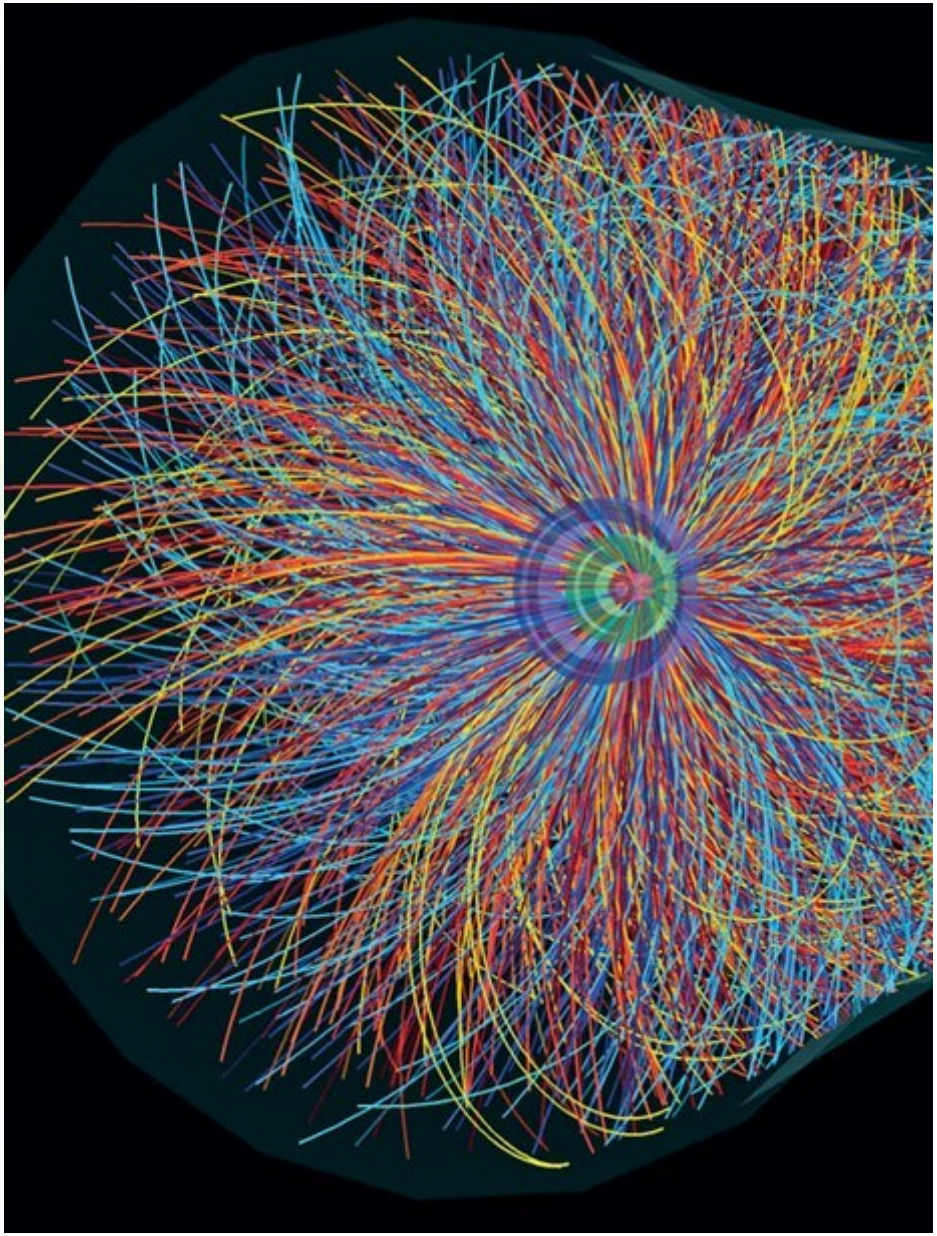
$\vec{B} = campo\ magnetico$



Nuove particelle!

- Le particelle vengono studiate facendo urtare tra loro altre particelle (elettroni, protoni, nuclei atomici) o in modalità bersaglio fisso o in modalità collider
- Nelle collisioni ad alte energie nuove particelle vengono prodotte : ciò avviene perché c'è equivalenza fra massa ed energia (Einstein):

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$



Che particelle sono prodotte nelle collisioni

Dipende dall'energia delle particelle che si scontrano:

- più alta è l'energia della collisione, più particelle e di più alta massa possono essere prodotte

Che particelle sono prodotte nelle collisioni

Dipende dall'energia delle particelle che si scontrano:

- più alta è l'energia della collisione, più particelle e di più alta massa possono essere prodotte

La maggior parte delle particelle elementari sono **“instabili”**, cioè dopo un certo periodo di tempo si disintegrano spontaneamente in particelle più leggere (si dice che “decadono”).

Che particelle sono prodotte nelle collisioni

Dipende dall'energia delle particelle che si scontrano:

- più alta è l'energia della collisione, più particelle e di più alta massa possono essere prodotte

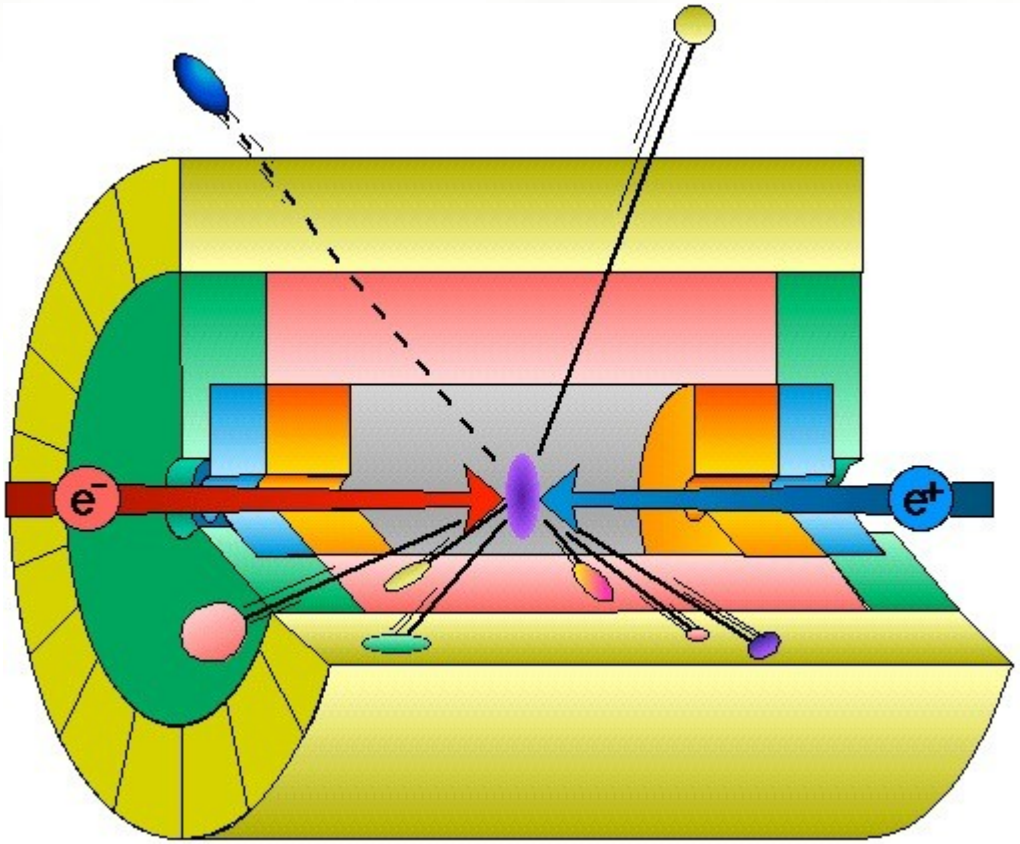
La maggior parte delle particelle elementari sono **"instabili"**, cioè dopo un certo periodo di tempo si disintegrano spontaneamente in particelle più leggere (si dice che "decadono").

Dal punto di vista sperimentale si definiscono:

- **particelle "stabili"**: vivono abbastanza a lungo da poter essere in principio rivelate
  - elettroni (simbolo e)
  - muoni (simbolo μ), sono come gli elettroni ma 200 volte più pesanti
  - adroni carichi e neutri (particelle composte da quark, che "sentono" la forza nucleare forte, come per esempio i protoni e i neutroni)
  - fotoni (simbolo γ)
  - neutrini (simbolo ν), sono come gli elettroni, ma neutri e molto più leggeri
- **particelle "instabili"**: decadono prima di interagire col rivelatore, ma possono essere "ricostruite" a partire dalle particelle figlie stabili

Rivelatori di particelle

Facendo urtare due particelle e viene fuori un sacco di roba...
Cosa ci interessa misurare? E come ricaviamo le informazioni?



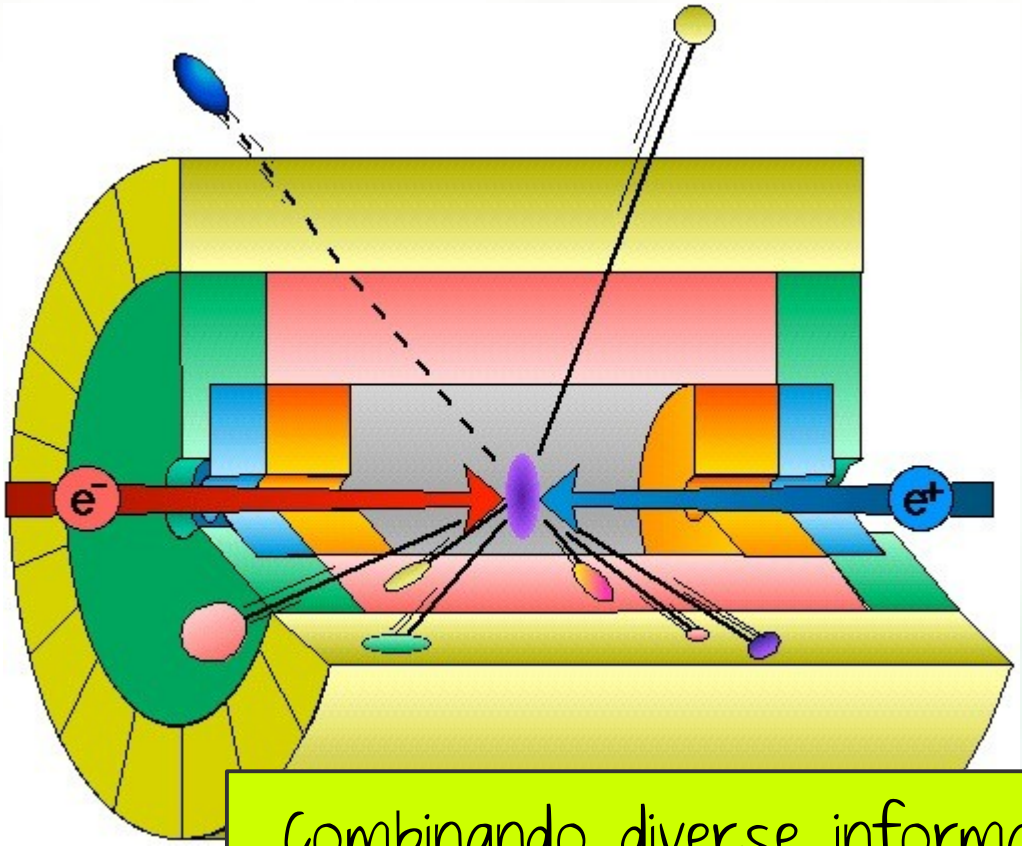
Cosa ci interessa misurare:

- Posizione e direzione del moto
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso
- Massa
- Tempi di vita
- ...

Di (tutte) le particelle create nella collisione

Rivelatori di particelle

Facendo urtare due particelle e viene fuori un sacco di roba...
Cosa ci interessa misurare?e come ricaviamo le informazioni?



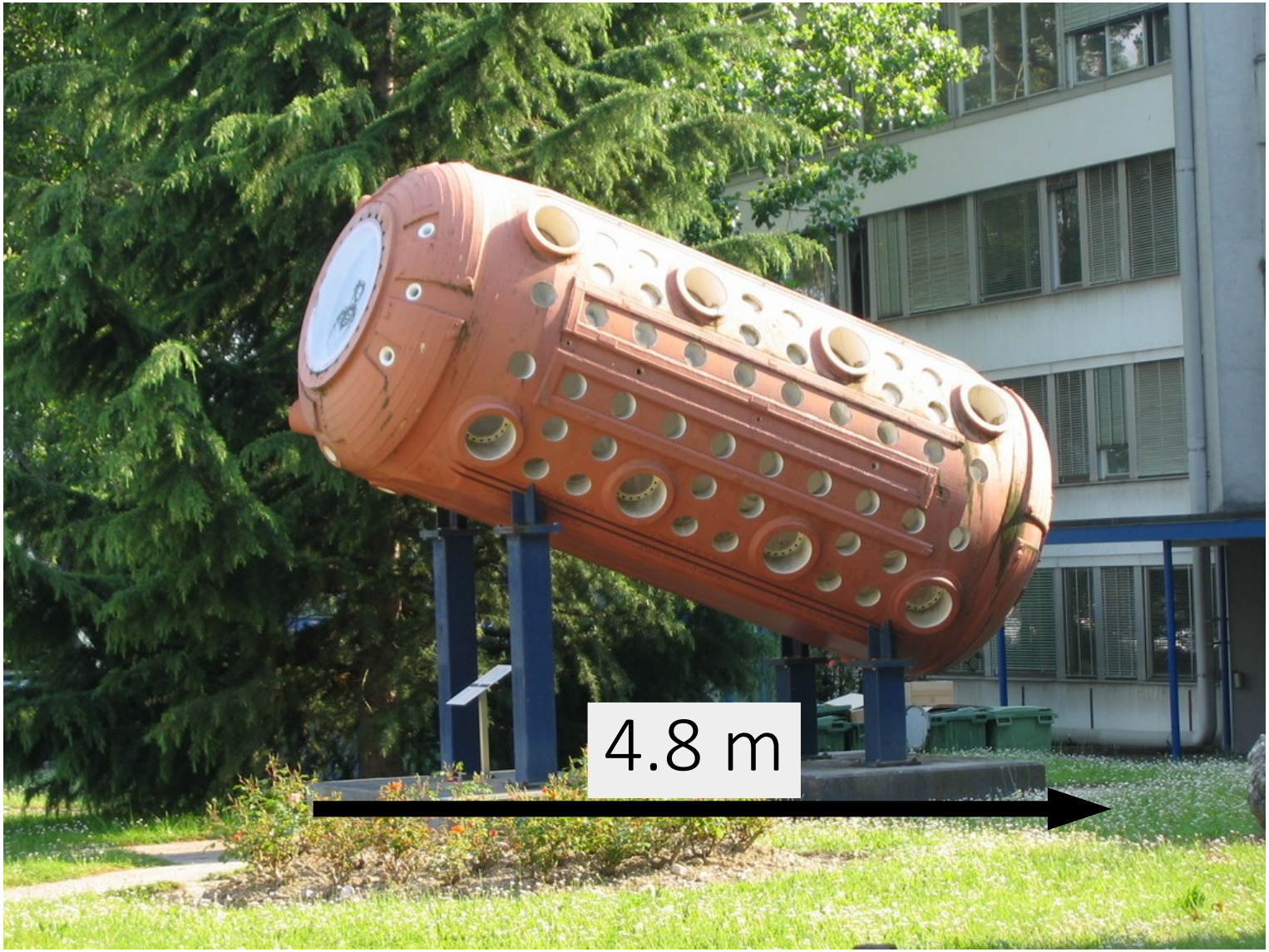
Cosa ci interessa misurare:

- Posizione e direzione del moto
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso
- Massa
- Tempi di vita
- ...

Di (tutte) le particelle create nella collisione

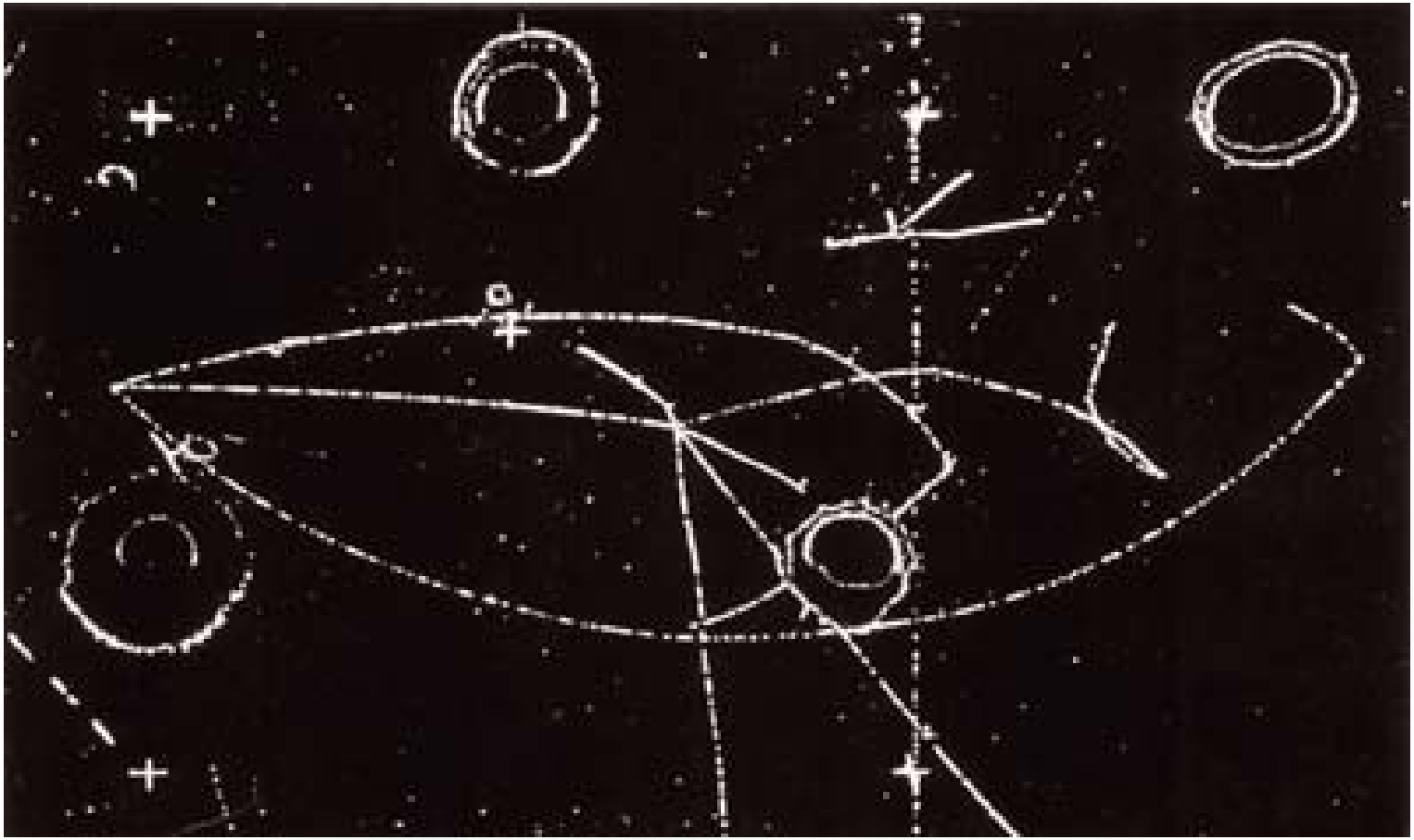
Combinando diverse informazioni misurate è possibile identificare (quasi) tutte le particelle!

Rivelatori Visualizzanti



Gargamelle- CERN

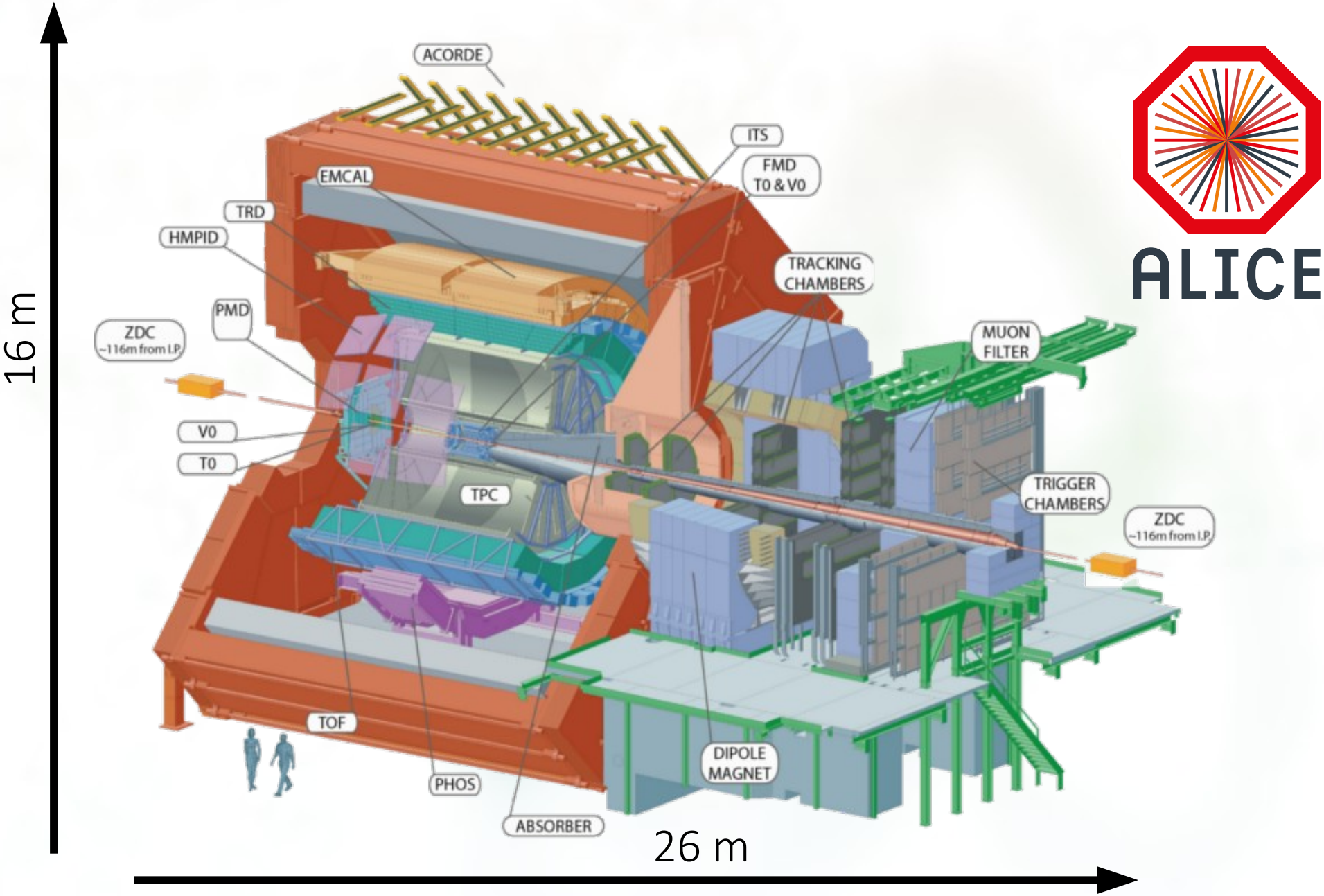
Rivelatori Visualizzanti



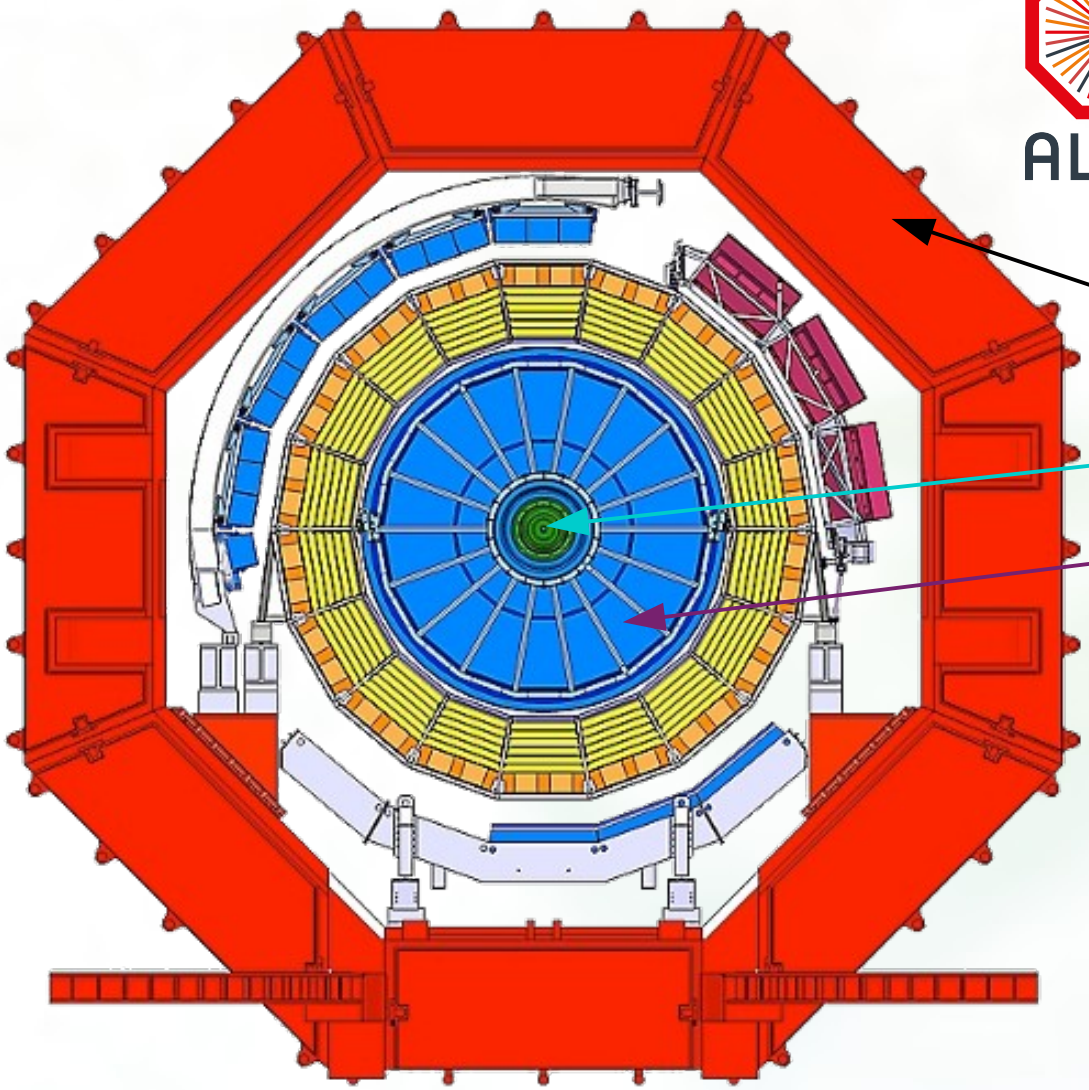
I rivelatori di questo tipo sono ottimi, ma lenti. Non si possono usare con elevati rate di collisione

Gargamelle- CERN

ALICE: A Large Ion Collider Experiment



ALICE: A Large Ion Collider Experiment

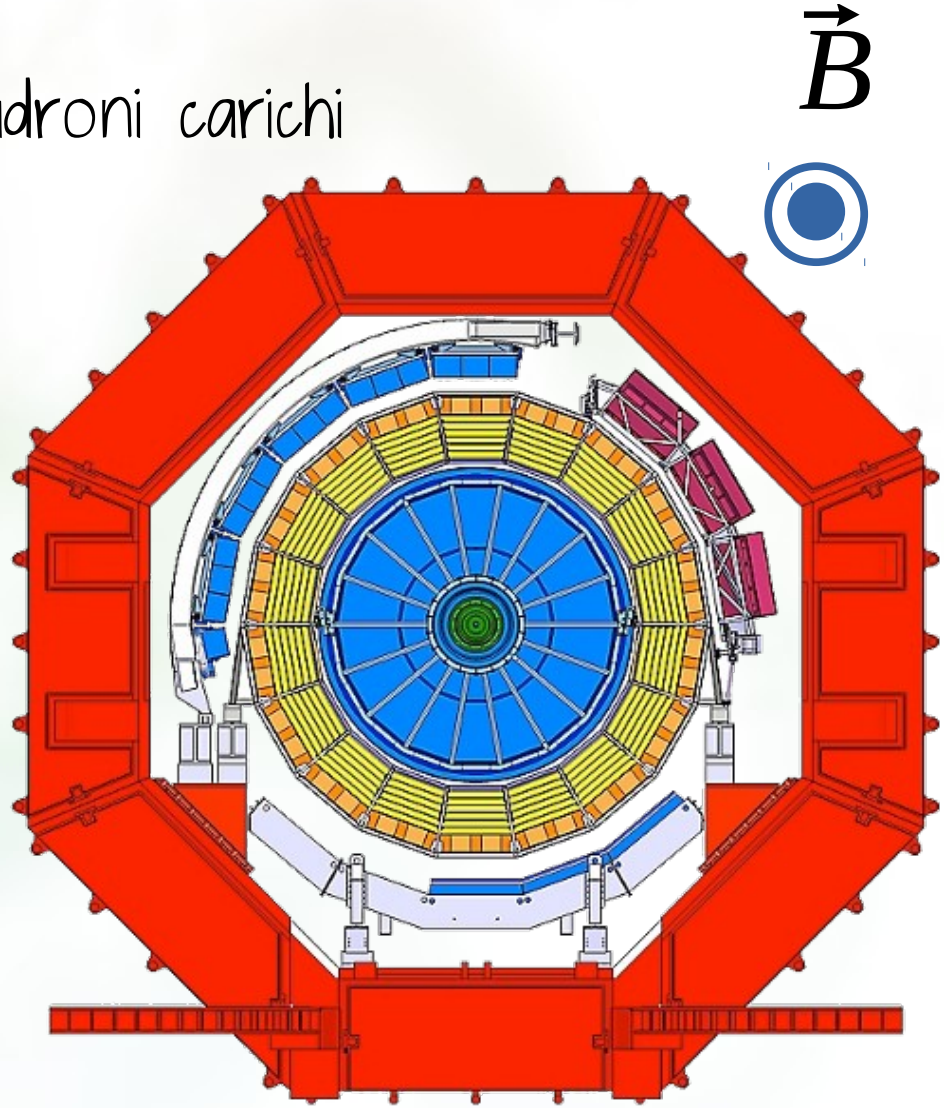


- Magnete : Crea un campo magnetico solenoidale di 0.5 T
- Tracciatore interno (ITS) : 6 strati di rivelatori al silicio
- Camera a proiezione temporale(TPC): rivelatore a gas che funziona come un tracciatore e può essere utilizzato per identificare le particelle

Misura dell'impulso e della caria elettrica delle particelle cariche

Elettroni, muoni, adroni carichi

Per misurare il momento e la carica di elettroni muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:



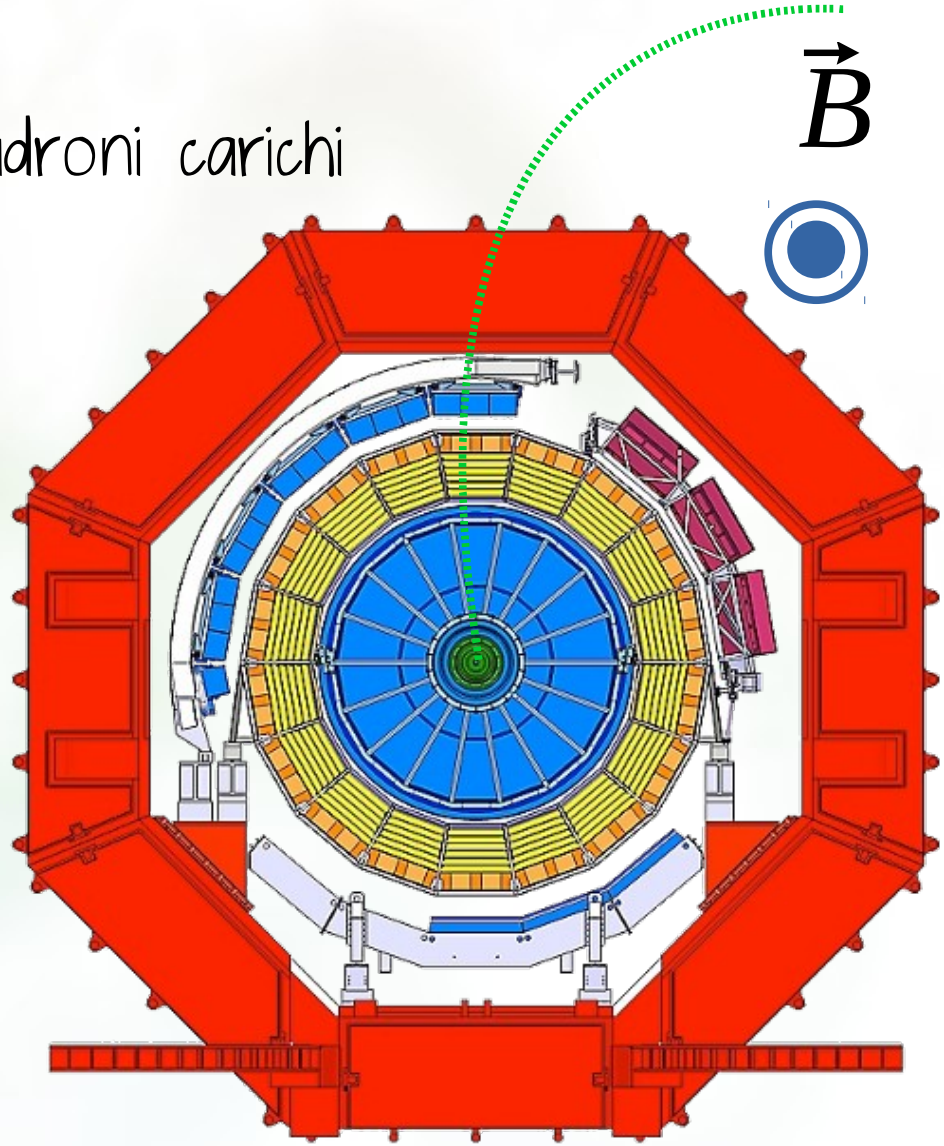
Misura dell'impulso e della caria elettrica delle particelle cariche

Elettroni, muoni, adroni carichi

Per misurare il momento e la carica di elettroni muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:

- una particella carica, attraversando un campo magnetico **B**, percorre una traiettoria curva; se **B** è uniforme e perpendicolare alla direzione della particella, la traiettoria è una circonferenza di <u>raggio R</u> proporzionale al momento ***p*** :

$$p = 0.3\ \mathbf{B}R$$



Misura dell'impulso e della caria elettrica delle particelle cariche

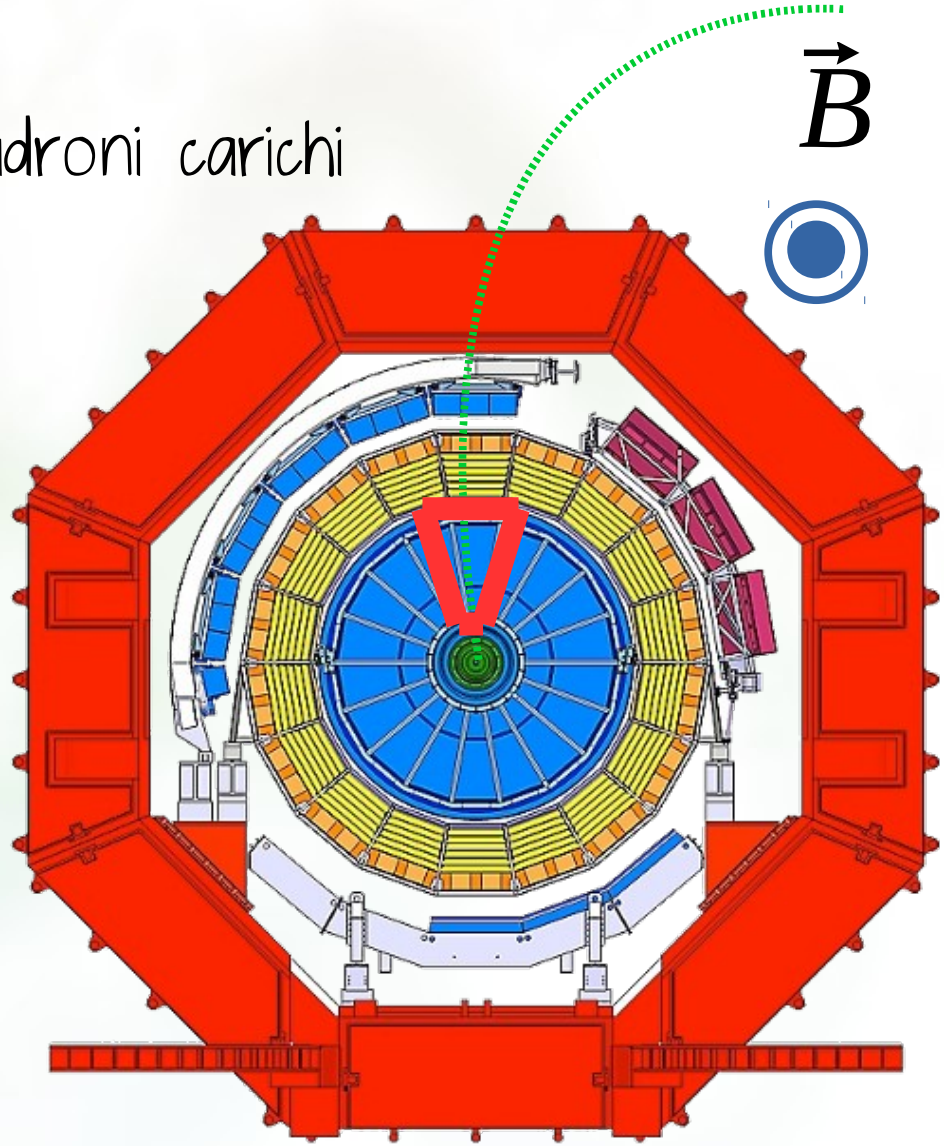
Elettroni, muoni, adroni carichi

Per misurare il momento e la carica di elettroni muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:

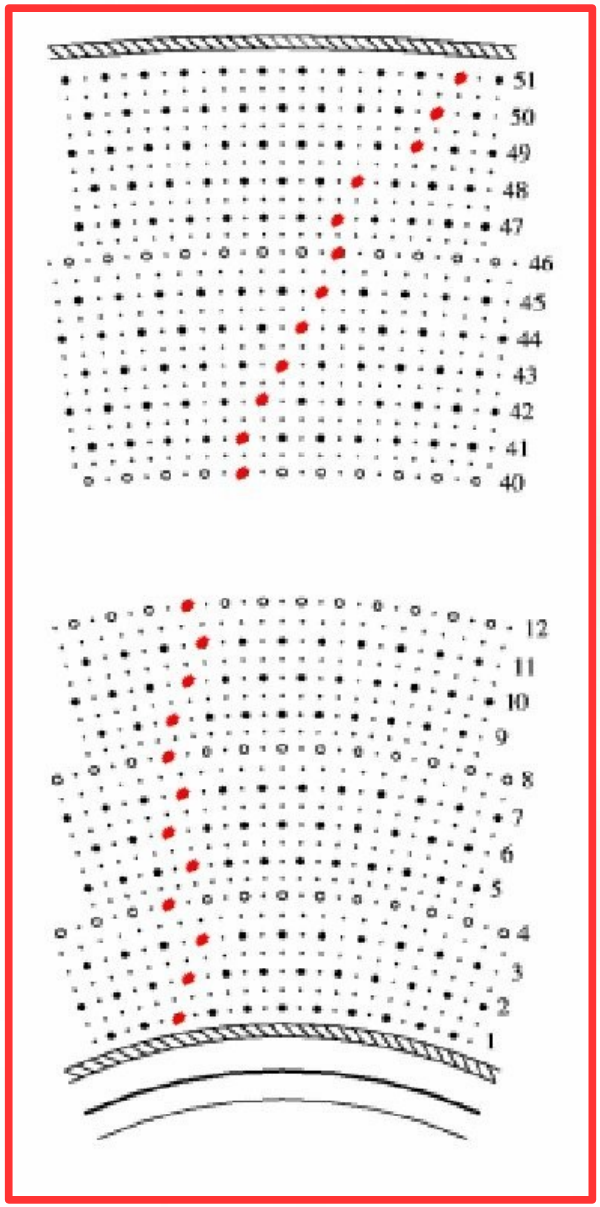
- una particella carica, attraversando un campo magnetico **B**, percorre una traiettoria curva; se **B** è uniforme e perpendicolare alla direzione della particella, la traiettoria è una circonferenza di <u>raggio R</u> proporzionale al momento ***p*** :

$$p = 0.3\ \mathbf{B}R$$

- attraversando materiali non troppo densi, le particelle cariche rilasciano lungo il loro percorso piccole quantità di energia che possono essere rivelate



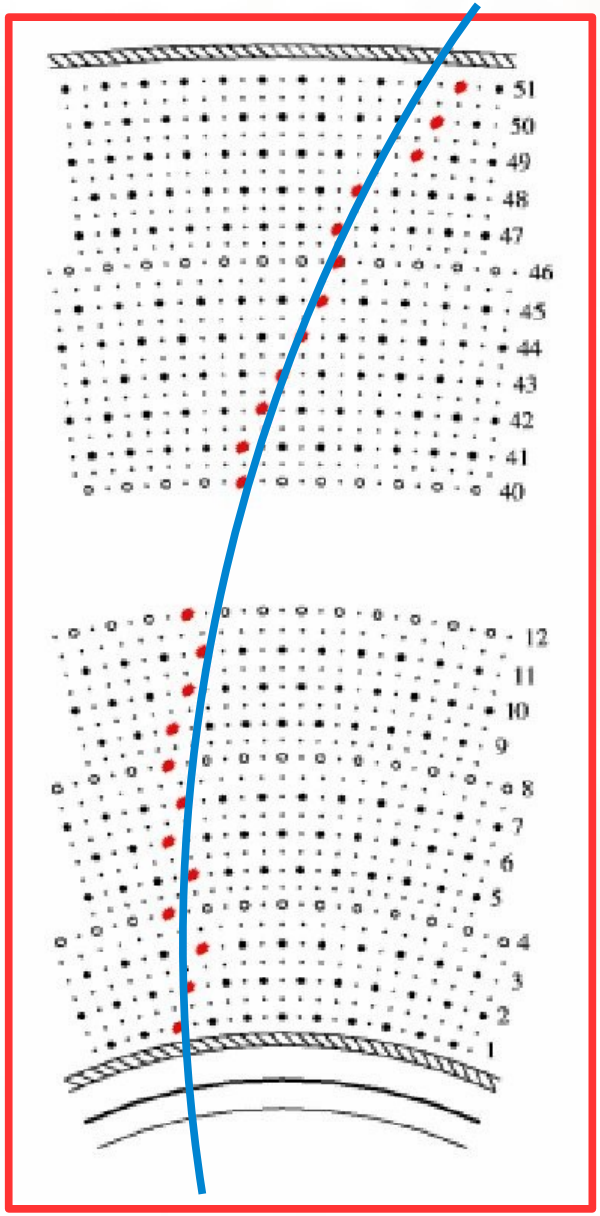
Misura dell'impulso e della caria elettrica delle particelle cariche



Elettroni, muoni, adroni carichi

- Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne ricostruiamo la traiettoria o "traccia": una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione ("tracciatori") indicano dove la particella carica è passata;
- cerchiamo l'arco di circonferenza che meglio approssimi i punti misurati e ne determiniamo il raggio;
- la carica della particella è data dal verso di curvatura della traiettoria, orario o antiorario.

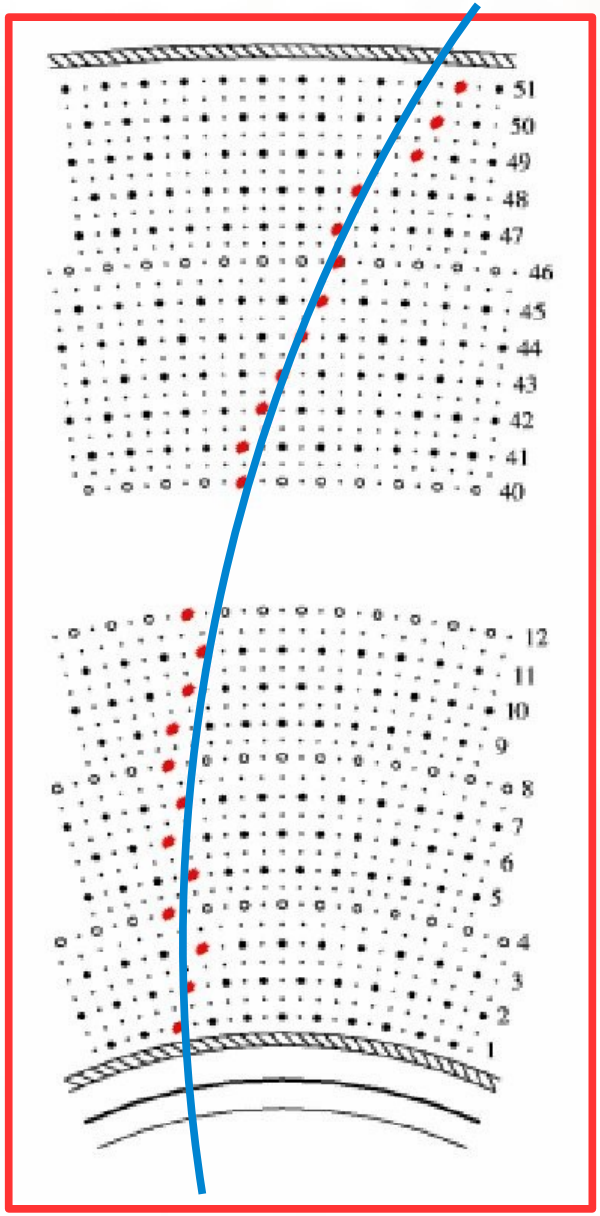
Misura dell'impulso e della caria elettrica delle particelle cariche



Elettroni, muoni, adroni carichi

- Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne ricostruiamo la traiettoria o "traccia": una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione ("tracciatori") indicano dove la particella carica è passata;
- cerchiamo l'arco di circonferenza che meglio approssimi i punti misurati e ne determiniamo il raggio;
- la carica della particella è data dal verso di curvatura della traiettoria, orario o antiorario.

Identificazione di particella

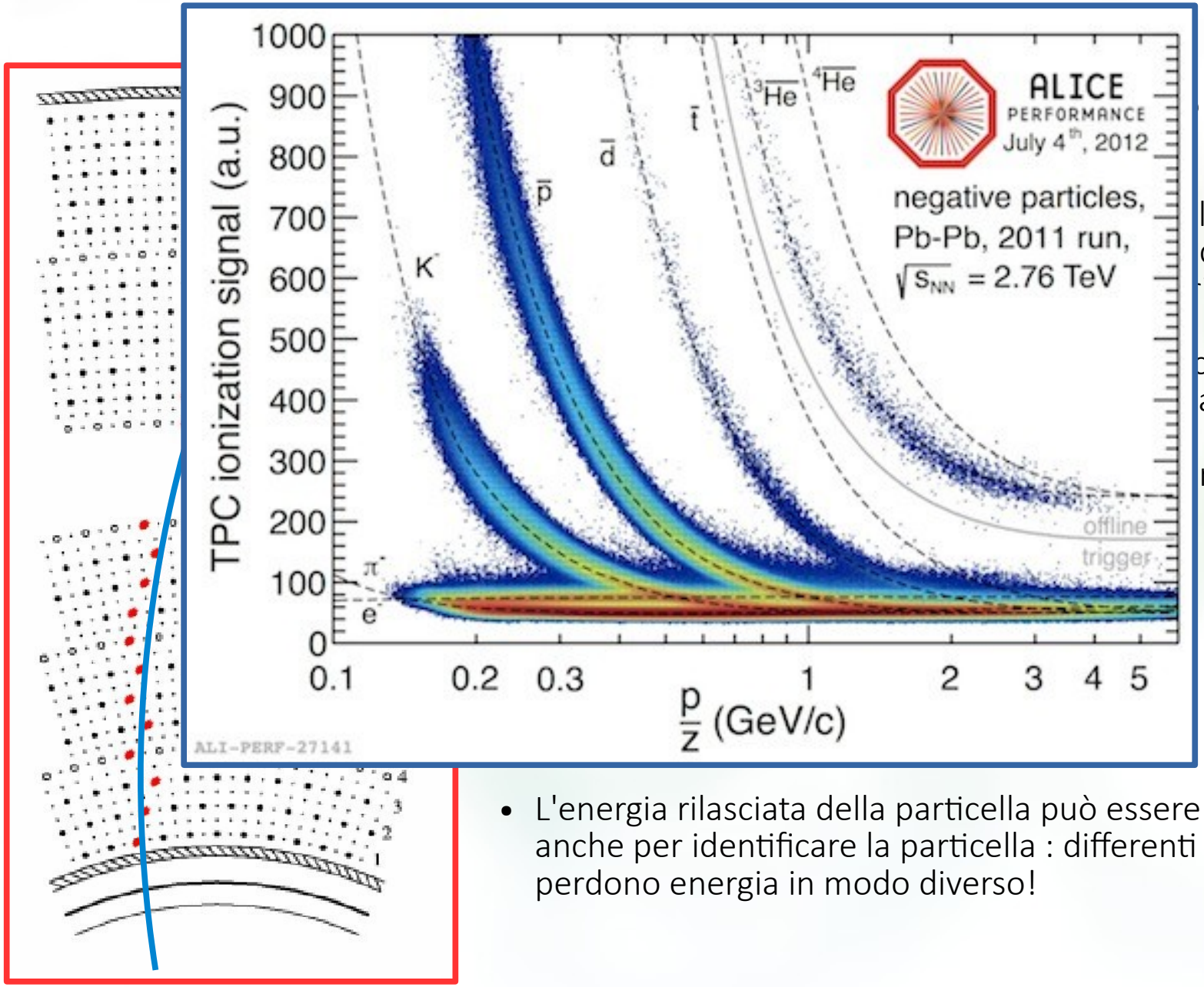


Elettroni, muoni, adroni carichi

- Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne ricostruiamo la traiettoria o “traccia”: una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione (“tracciatori”) indicano dove la particella carica è passata;
- cerchiamo l'arco di circonferenza che meglio approssimi i punti misurati e ne determiniamo il raggio;
- la carica della particella è data dal verso di curvatura della traiettoria, orario o antiorario

- L'energia rilasciata della particella può essere usata anche per identificare la particella : differenti particelle perdono energia in modo diverso!

Identificazione di particella



adroni carichi

llisione
costruiamo
i disposti

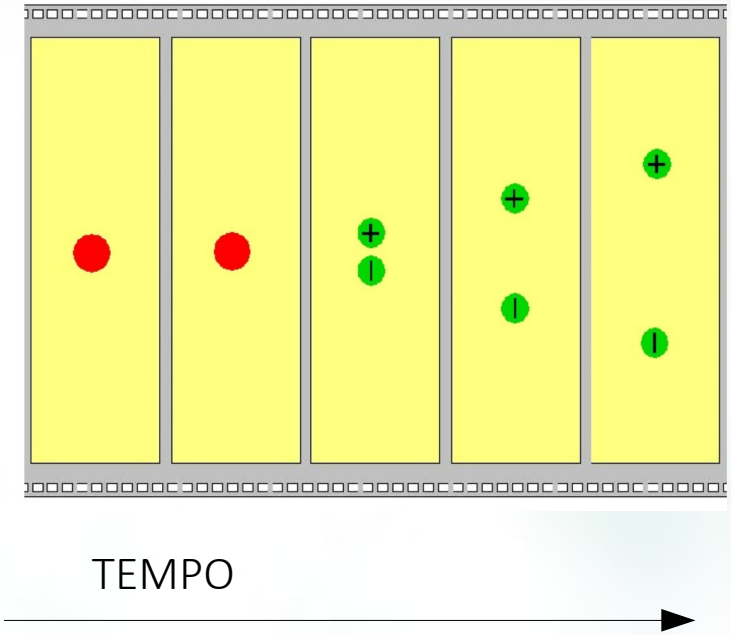
ca è passata;
approssimi i

rvatura

- L'energia rilasciata della particella può essere usata anche per identificare la particella : differenti particelle perdono energia in modo diverso!

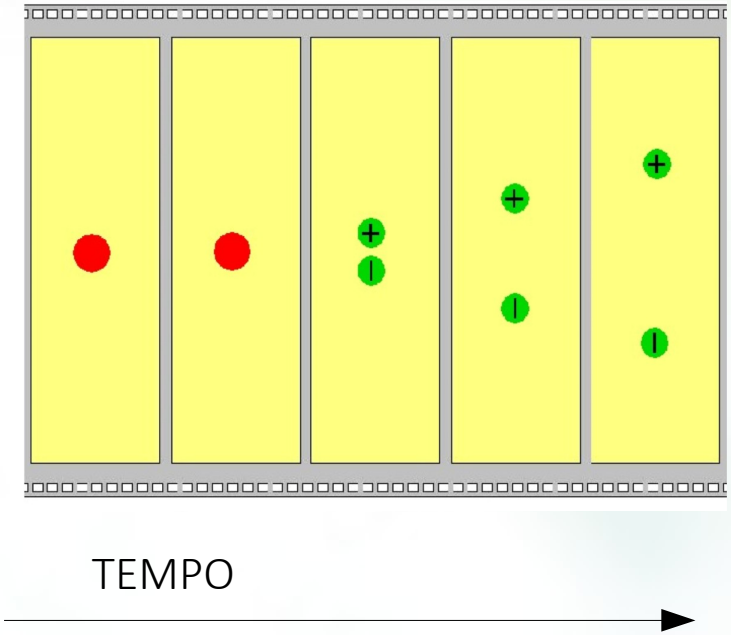
E le particella instabili?

- Le particelle instabili decadono (quasi) immediatamente in particelle più leggere ("particelle figlie") prima di poter essere rivelate
- Sfruttando le leggi di conservazione nei processi di decadimento (momento, energia, carica elettrica ...), è possibile determinare le caratteristiche della particella instabile a partire dalle particelle figlie



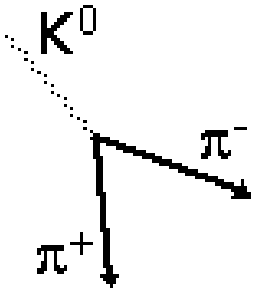
E le particella instabili?

- Le particelle instabili decadono (quasi) immediatamente in particelle più leggere ("particelle figlie") prima di poter essere rivelate
- Sfruttando le leggi di conservazione nei processi di decadimento (momento, energia, carica elettrica ...), è possibile determinare le caratteristiche della particella instabile a partire dalle particelle figlie



Esempio

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

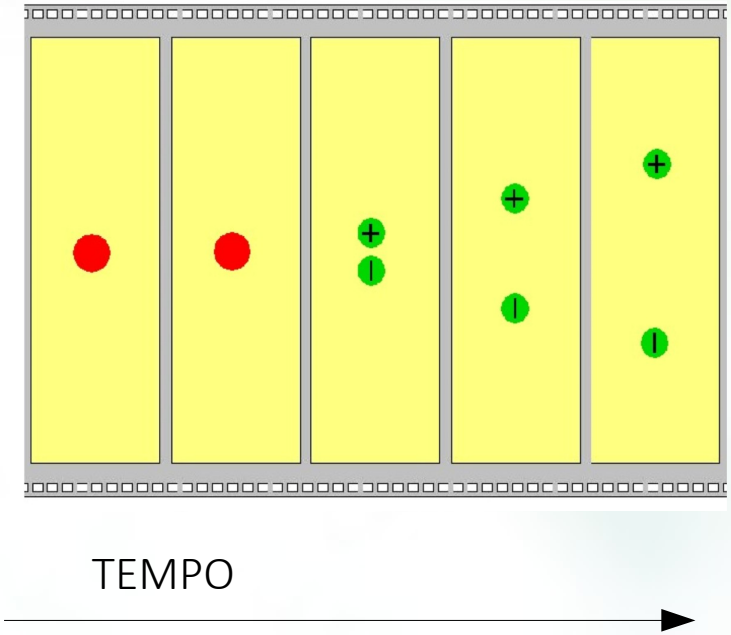


carica della K^0 : $Q = 0$
Carica delle figlie $Q = +1-1 = 0$

massa della K^0 :
$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1E_2 - \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2)$

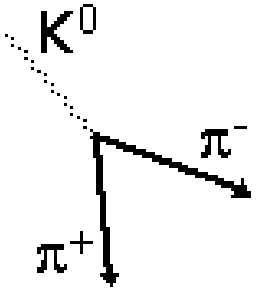
E le particella instabili?

- Le particelle instabili decadono (quasi) immediatamente in particelle più leggere ("particelle figlie") prima di poter essere rivelate
- Sfruttando le leggi di conservazione nei processi di decadimento (momento, energia, carica elettrica ...), è possibile determinare le caratteristiche della particella instabile a partire dalle particelle figlie



Esempio

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

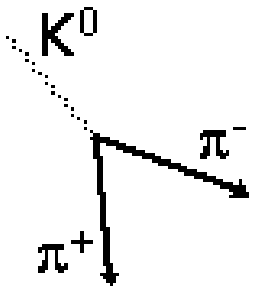


carica della K^0 : $Q_0 = 0$
Carica delle figlie $Q = +1-1 = 0$

massa della K^0 :
$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1E_2 - \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2)$

Massa invariante

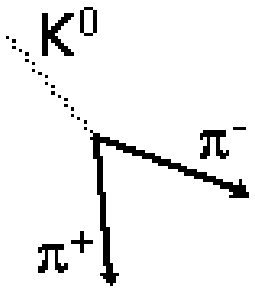
$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$



$A \rightarrow B + C$

Massa invariante

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



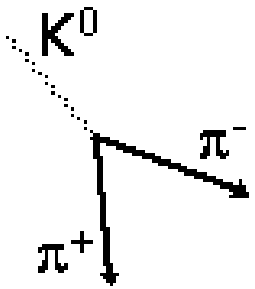
$A \rightarrow B + C$

Conservazione dell'energia:	$E_{K^0} = E_{\pi^+} + E_{\pi^-}$
Conservazione dell'impulso:	$\vec{p}_{K^0} = \vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^+}$
Conservazione della carica:	$Z_{K^0} = Z_{\pi^+} + Z_{\pi^+}$
Dalla relatività:	$E^2 = p^2 + m^2$

Supponendo $c = 1$

Massa invariante

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



$A \rightarrow B + C$

Conservazione dell'energia:	$E_{K^0} = E_{\pi^+} + E_{\pi^-}$
Conservazione dell'impulso:	$\vec{p}_{K^0} = \vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^+}$
Conservazione della carica:	$Z_{K^0} = Z_{\pi^+} + Z_{\pi^+}$
Dalla relatività:	$E^2 = p^2 + m^2$

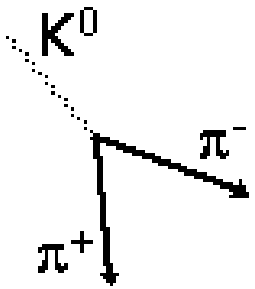
Supponendo $c = 1$

Ricaviamo

$$m^2 = E^2 - p^2 = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

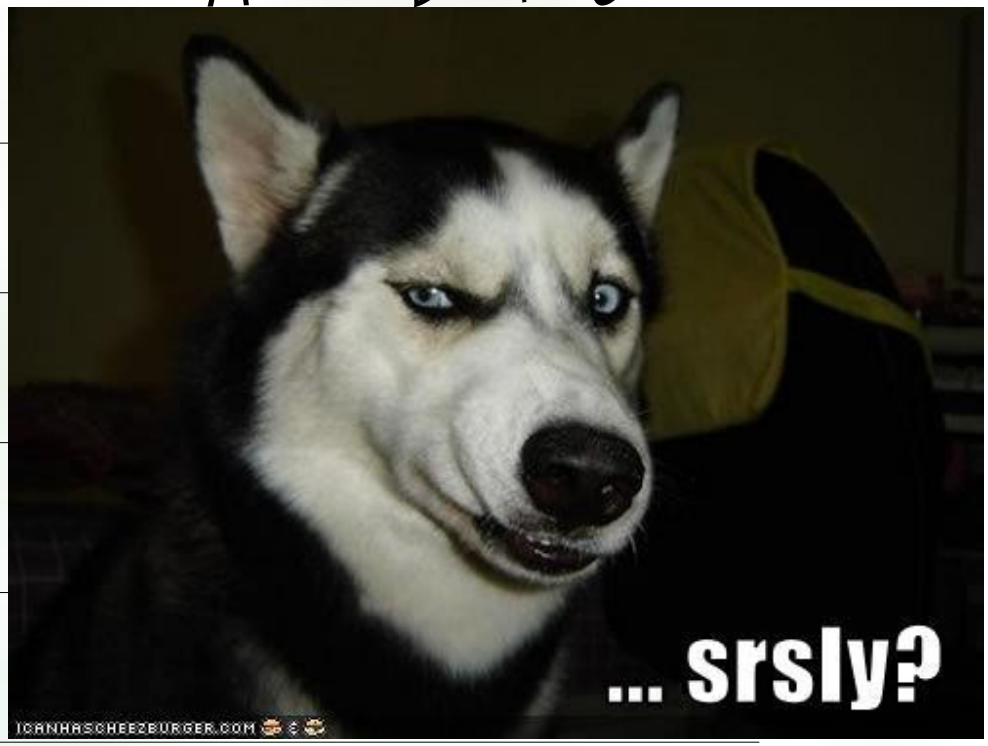
Massa invariante

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



$A \rightarrow B + C$

Conservazione dell'energia:	
Conservazione dell'impulso:	
Conservazione della carica:	
Dalla relatività:	

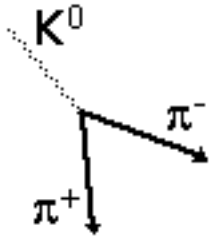


Supponendo $c = 1$

Ricaviamo

$$m^2 = E^2 - p^2 = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

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

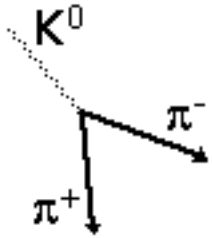


Massa invariante

$$m_{K^0}^2 = E_{K^0}^2 - p_{K^0}^2 = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

$$= E_{\pi^+}^2 + E_{\pi^-}^2 + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} - \vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

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

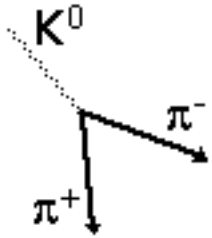


Massa invariante

$$m_{K^0}^2 = E_{K^0}^2 - p_{K^0}^2 = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

$$= E_{\pi^+}^2 + E_{\pi^-}^2 + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} - \vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

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



Massa invariante

$$m_{K^0}^2 = E_{K^0}^2 - p_{K^0}^2 = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

$$= E_{\pi^+}^2 + E_{\pi^-}^2 + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} - \vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

$$\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = Prodotto\ scalare$$

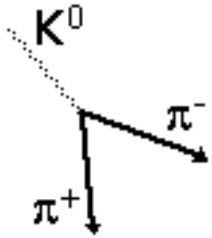
$$\boxed{\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = p_{\pi_x^-}p_{\pi_x^+} + p_{\pi_y^-}p_{\pi_y^+} + p_{\pi_z^-}p_{\pi_z^+}}$$

$$\boxed{\vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = p_{\pi_x^-}^2 + p_{\pi_y^-}^2 + p_{\pi_z^-}^2 = p_{\pi^-}^2}$$

$$\boxed{\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} = p_{\pi_x^+}^2 + p_{\pi_y^+}^2 + p_{\pi_z^+}^2 = p_{\pi^+}^2}$$

$$m_{K^0}^2 = E_{\pi^+}^2 + E_{\pi^-}^2 + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}^{\,2} - \vec{p}_{\pi^-}^{\,2} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

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



Massa invariante

$$m^2_{K^0} = E^2_{K^0} - p^2_{K^0} = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

$$= E^2_{\pi^+} + E^2_{\pi^-} + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} - \vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

$$\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = Prodotto\ scalare$$

$$\boxed{\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = p_{\pi^-_x}p_{\pi^+_x} + p_{\pi^-_y}p_{\pi^+_y} + p_{\pi^-_z}p_{\pi^+_z}}$$

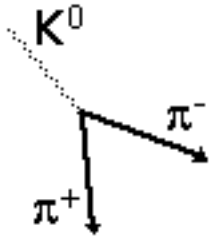
$$\boxed{\vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = p^2_{\pi^-_x} + p^2_{\pi^-_y} + p^2_{\pi^-_z} = p^2_{\pi^-}}$$

$$\boxed{\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} = p^2_{\pi^+_x} + p^2_{\pi^+_y} + p^2_{\pi^+_z} = p^2_{\pi^+}}$$

$$m^2_{K^0} = E^2_{\pi^+} + E^2_{\pi^-} + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}{}^2 - \vec{p}_{\pi^-}{}^2 - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

$$\boxed{m^2_{K^0} = m^2_{\pi^+} + m^2_{\pi^-} + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}}$$

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



Massa invariante

$$m^2_{K^0} = E^2_{K^0} - p^2_{K^0} = \left(E_{\pi^+} + E_{\pi^-}\right)^2 - \left(\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}\right)^2$$

$$= E^2_{\pi^+} + E^2_{\pi^-} + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} - \vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

$$\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = Prodotto\ scalare$$

$$\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = p_{\pi^-_x}p_{\pi^+_x} + p_{\pi^-_y}p_{\pi^+_y} + p_{\pi^-_z}p_{\pi^+_z}$$

$$\vec{p}_{\pi^-}\cdot\vec{p}_{\pi^-} = p^2_{\pi^-_x} + p^2_{\pi^-_y} + p^2_{\pi^-_z} = p^2_{\pi^-}$$

$$\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^+} = p^2_{\pi^+_x} + p^2_{\pi^+_y} + p^2_{\pi^+_z} = p^2_{\pi^+}$$

$$m^2_{K^0} = E^2_{\pi^+} + E^2_{\pi^-} + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - \vec{p}_{\pi^+}{}^2 - \vec{p}_{\pi^-}{}^2 - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

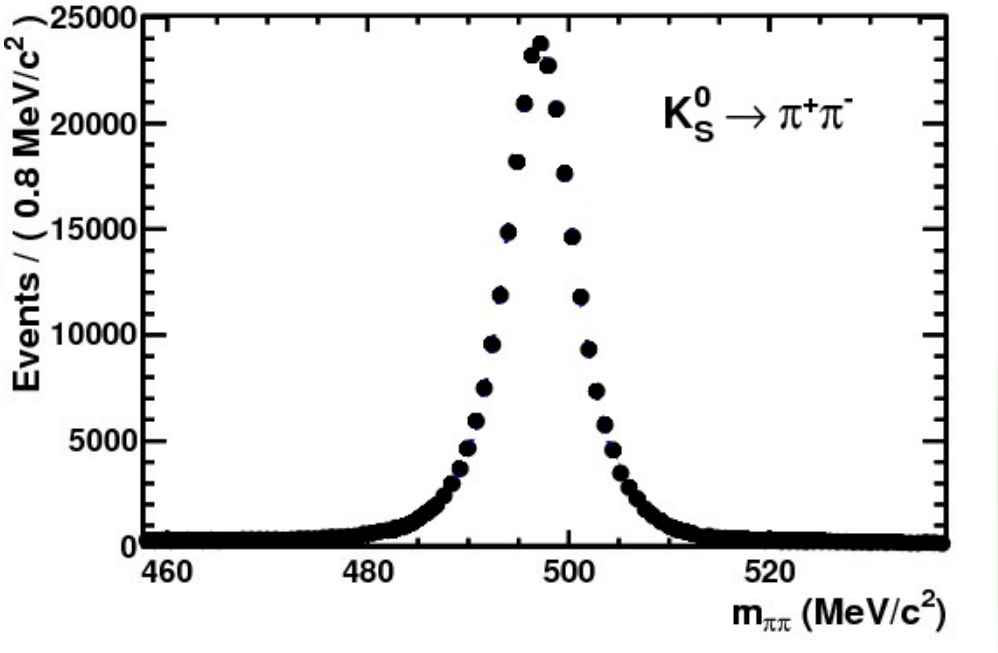
Possiamo calcolare la massa della particella decaduta a partire dalla massa e dalle componenti della quantità di moto delle particelle-figlie!

$$m^2_{K^0} = m^2_{\pi^+} + m^2_{\pi^-} + 2E_{\pi^+}E_{\pi^-} - 2\,\vec{p}_{\pi^+}\cdot\vec{p}_{\pi^-}$$

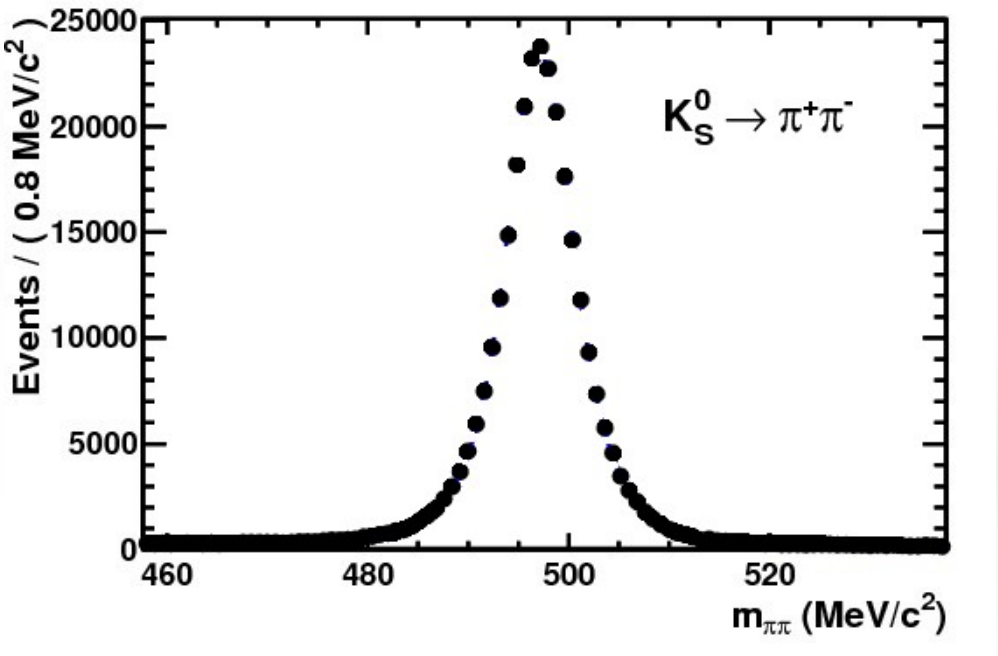
La massa delle particelle figlie è nota!

"Noto" dalla curvatura nel campo magnetico

Massa invariante : Esempio

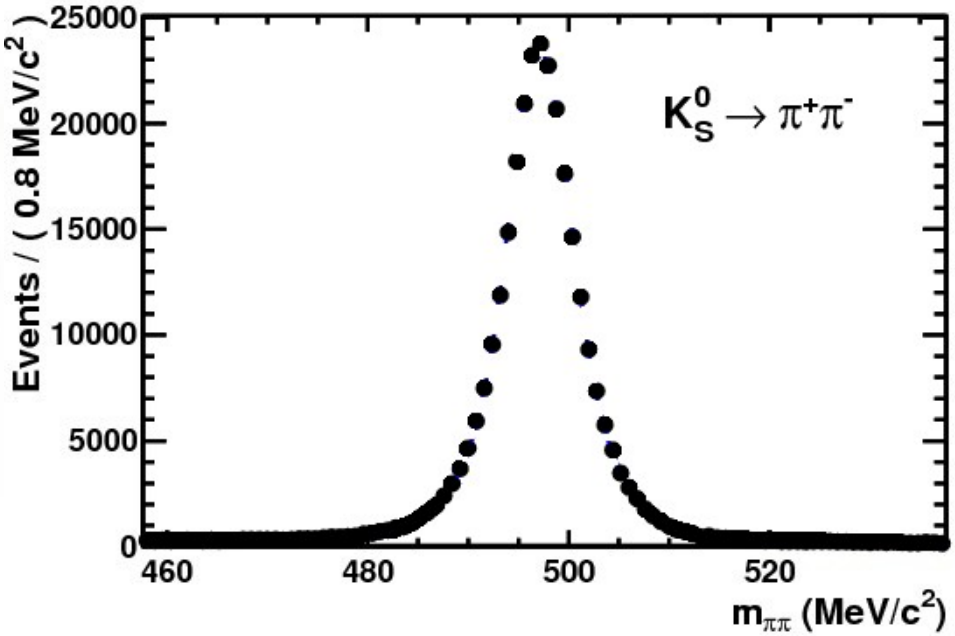


Massa invariante : Esempio



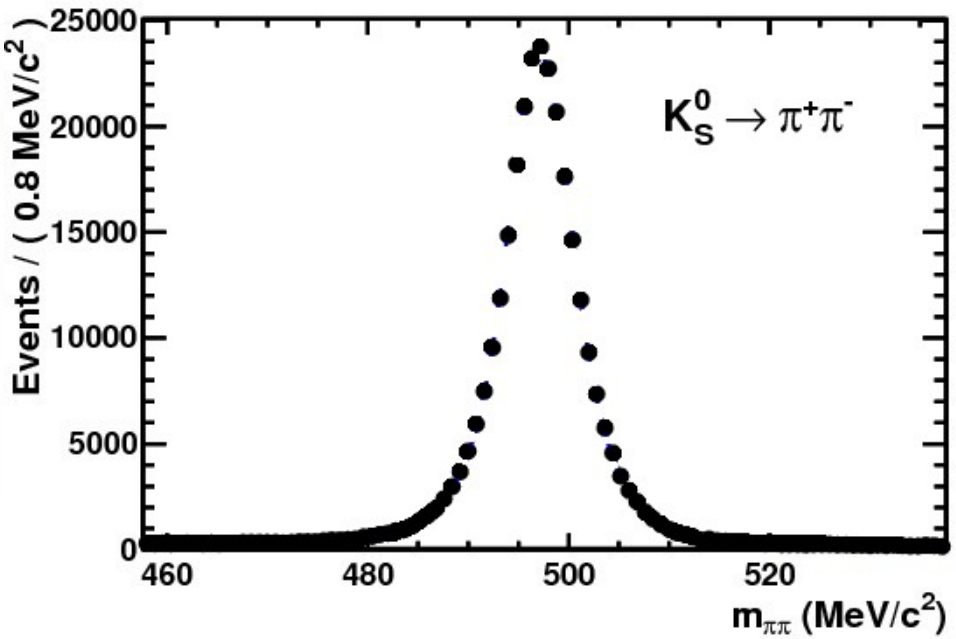
Ma se tutto è “noto” perché vedo una distribuzione che ha questa forma??
(cioè : perché vedo una distribuzione e non un numero??)

Massa invariante : Esempio



Ma se tutto è "noto" perché vedo una distribuzione che ha questa forma??
(cioè : perché vedo una distribuzione e non un numero??)
Perché abbiamo un rivelatore "vero"!
La quantità di moto non è quella "vera" ma quella ricostruita dal rivelatore che è un po' imprecisa...
→ Otteniamo una distribuzione a campana (detta ***gaussiana***)
La larghezza della campana è la "risoluzione" del rivelatore (cioè quanto bene funziona il nostro rivelatore).

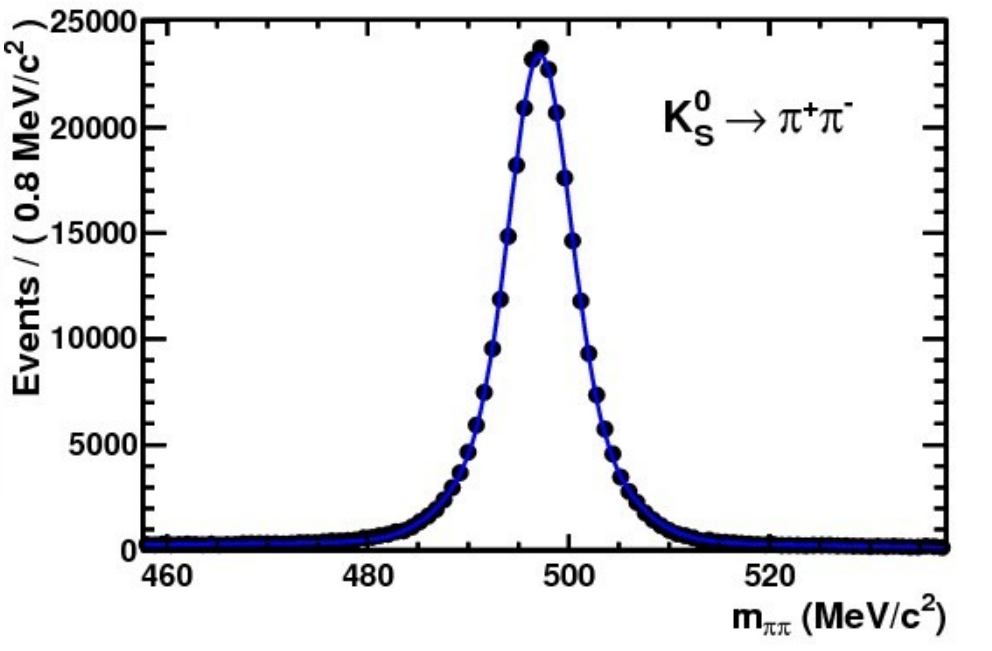
Massa invariante : Esempio



Ma se tutto è "noto" perché vedo una distribuzione che ha questa forma??
(cioè : perché vedo una distribuzione e non un numero??)
Perché abbiamo un rivelatore "vero"!
La quantità di moto non è quella "vera" ma quella ricostruita dal rivelatore che è un po' imprecisa...
→ Otteniamo una distribuzione a campana (detta ***gaussiana***)
La larghezza della campana è la "risoluzione" del rivelatore (cioè quanto bene funziona il nostro rivelatore).

Come facciamo a dire se quello che abbiamo trovato è veramente la particella che stiamo cercando?
Dobbiamo definire una regione di "confidenza" che dipende dalla risoluzione del nostro rivelatore. Ma come ricaviamo la risoluzione?

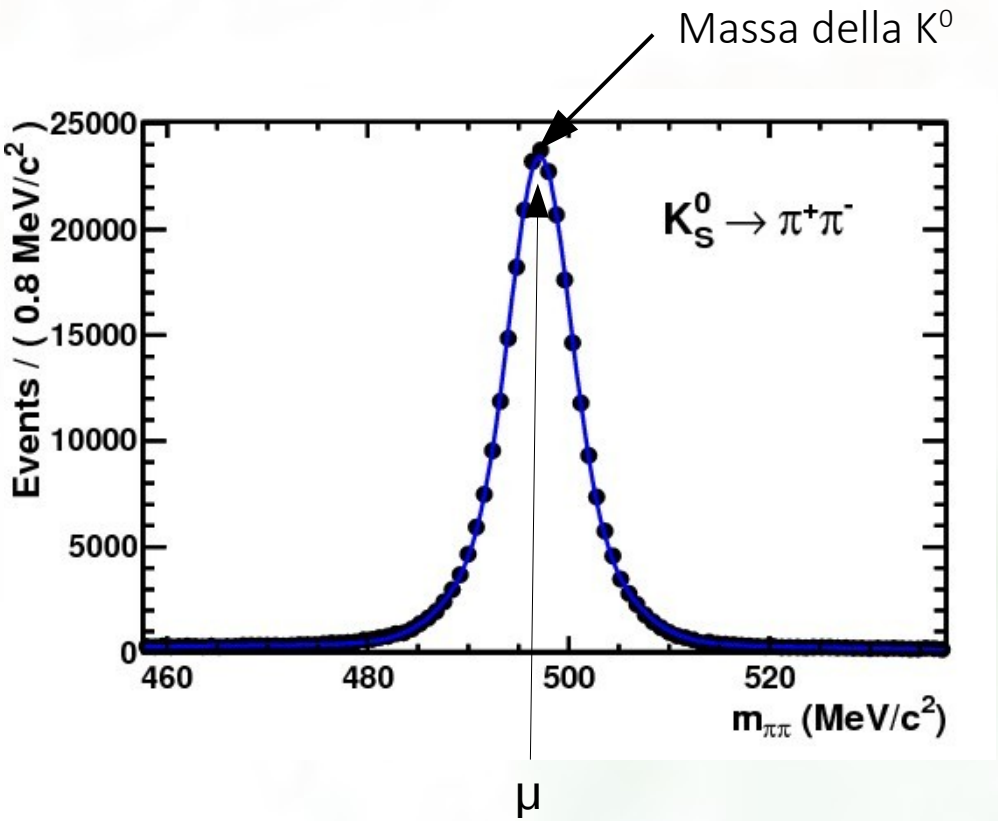
Massa invariante : Esempio



Ma se tutto è "noto" perché vedo una distribuzione che ha questa forma??
(cioè : perché vedo una distribuzione e non un numero??)
Perché abbiamo un rivelatore "vero"!
La quantità di moto non è quella "vera" ma quella ricostruita dal rivelatore che non è ideale...
→ Otteniamo una distribuzione a campana (detta ***gaussiana***)
La larghezza della campana è la "risoluzione" del rivelatore (cioè quanto bene funziona il nostro rivelatore).

Come facciamo a dire se quello che abbiamo trovato è veramente la particella che stiamo cercando?
Dobbiamo definire una regione di "confidenza" che dipende dalla risoluzione del nostro rivelatore. Ma come ricaviamo la risoluzione?
Dobbiamo trovare una funzione che descriva i nostri dati nel modo migliore : dobbiamo fare un "*fit*".

Massa invariante : Esempio



Il fit ci da :

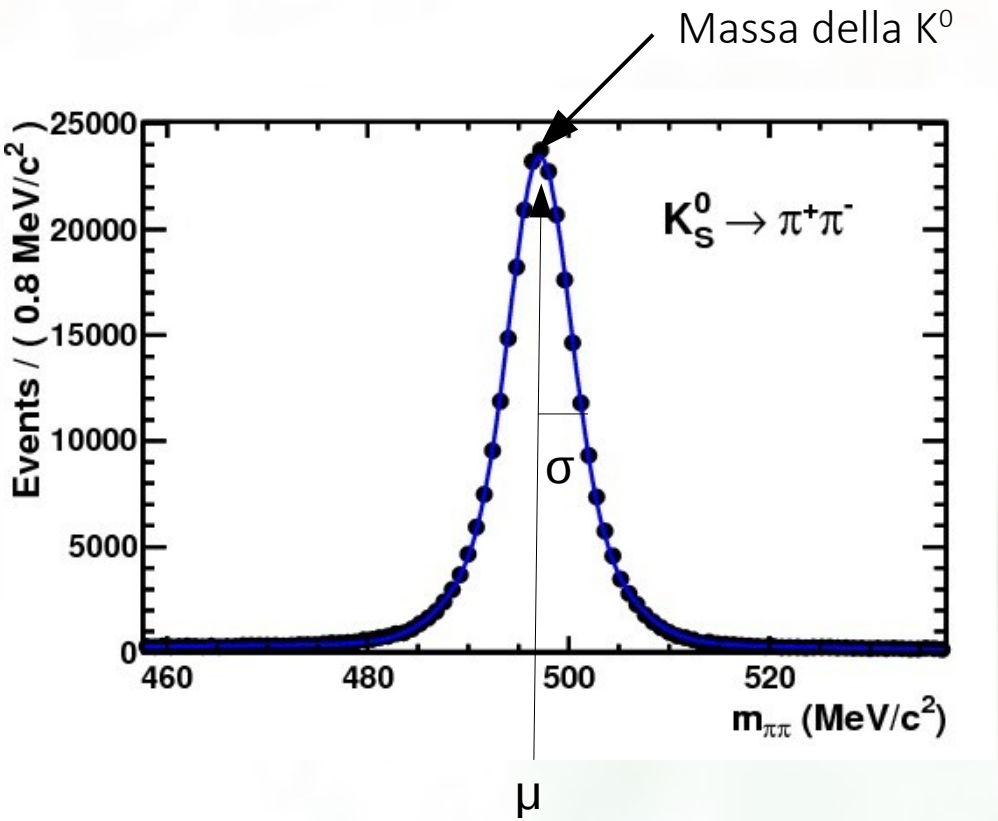
- il **valore centrale** della distribuzione (il valor medio della gaussiana) che corrisponde (se siamo stati bravi) alla massa della particella che stiamo cercando
  - Nel nostro caso (per la K^0) dal *fit* otteniamo :

    $\mu = (497.3 \pm 0.7)$ MeV/c^2

    Che deve essere confrontato con il valore della massa della K^0:

    $\mu = 497.6$ MeV/c^2

Massa invariante : Esempio



Il fit ci da :

- il **valore centrale** della distribuzione (il valor medio della gaussiana) che corrisponde (se siamo stati bravi) alla massa della particella che stiamo cercando
  - Nel nostro caso (per la K^0) dal *fit* otteniamo :

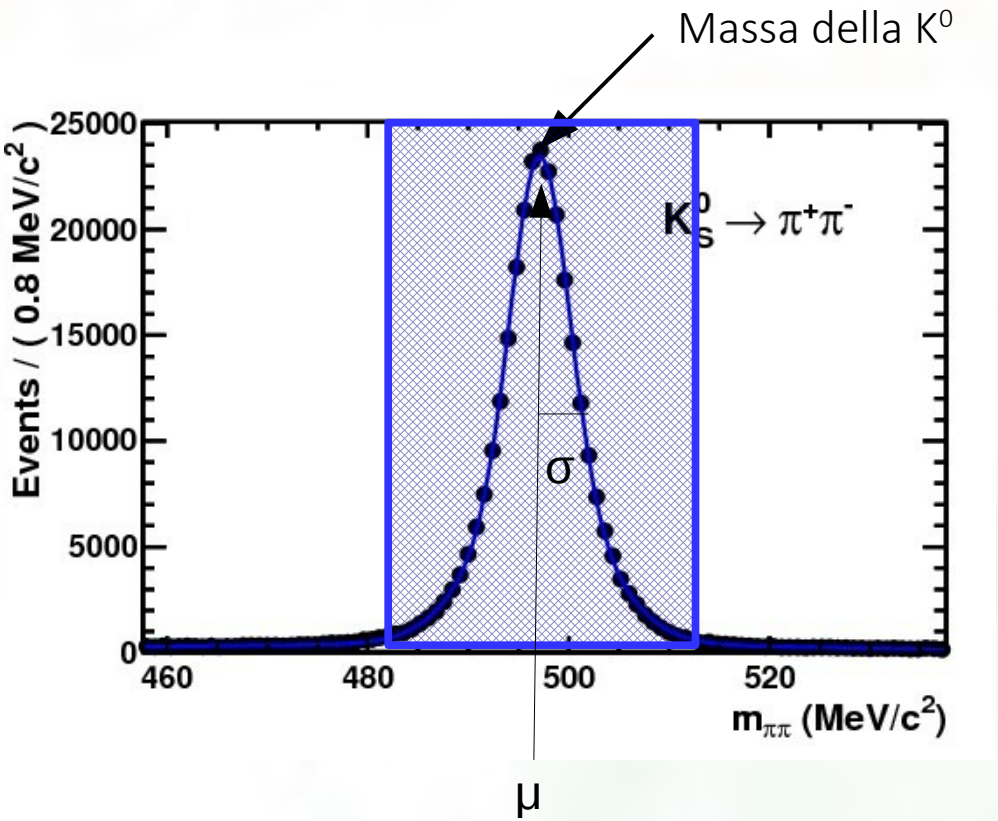
    $\mu = (497.3 \pm 0.7)$ MeV/c²

    Che deve essere confrontato con il valore della massa della K^0:

    $\mu = 497.6$ MeV/c²
- La **larghezza** della gaussiana (la risoluzione): che ci dice quanto bene "funziona" il rivelatore.
  - Nel nostro caso :

    $\sigma = (5.2 \pm 0.08)$ MeV/c²

Massa invariante : Esempio



Il fit ci da :

- il **valore centrale** della distribuzione (il valor medio della gaussiana) che corrisponde (se siamo stati bravi) alla massa della particella che stiamo cercando
  - Nel nostro caso (per la K^0) dal *fit* otteniamo :

    $\mu = (497.3 \pm 0.7)$ MeV/c²

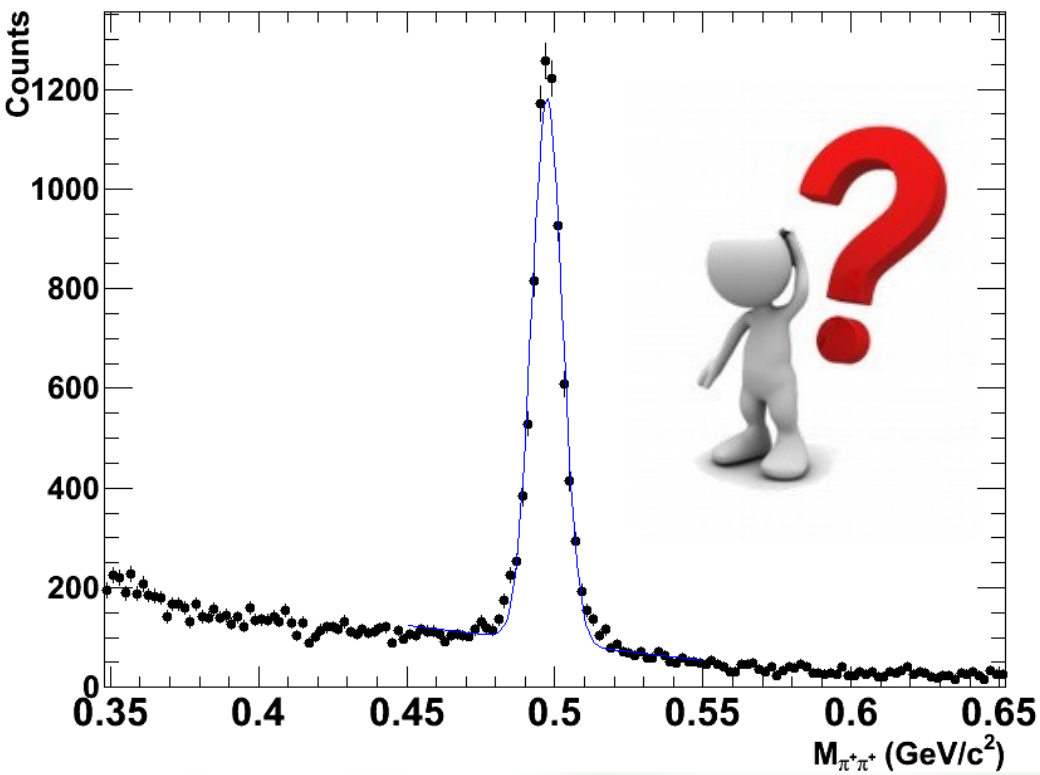
    Che deve essere confrontato con il valore della massa della K^0:

    $\mu = 497.6$ MeV/c²
- La **larghezza** della gaussiana (la risoluzione): che ci dice quanto bene "funziona" il rivelatore.
  - Nel nostro caso :

    $\sigma = (5.2 \pm 0.08)$ MeV/c²

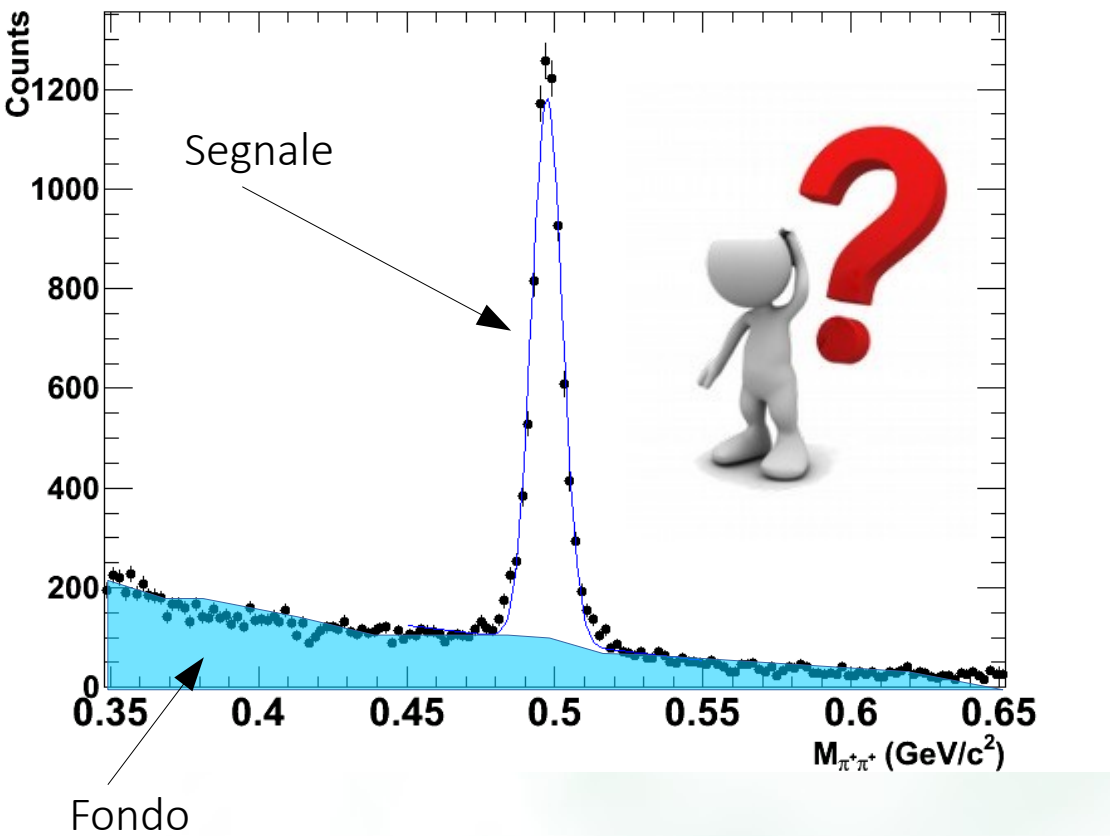
In genere si definisce la regione di confidenza uguale a 3 volte il valore della σ.
Nel nostro caso avremo una regione di confidenza che va da 482 a 513 MeV/c²
E quello che c'è fuori? Semplicemente non è quello che stiamo cercando... Non lo contiamo!

Massa invariante : Esempio 2



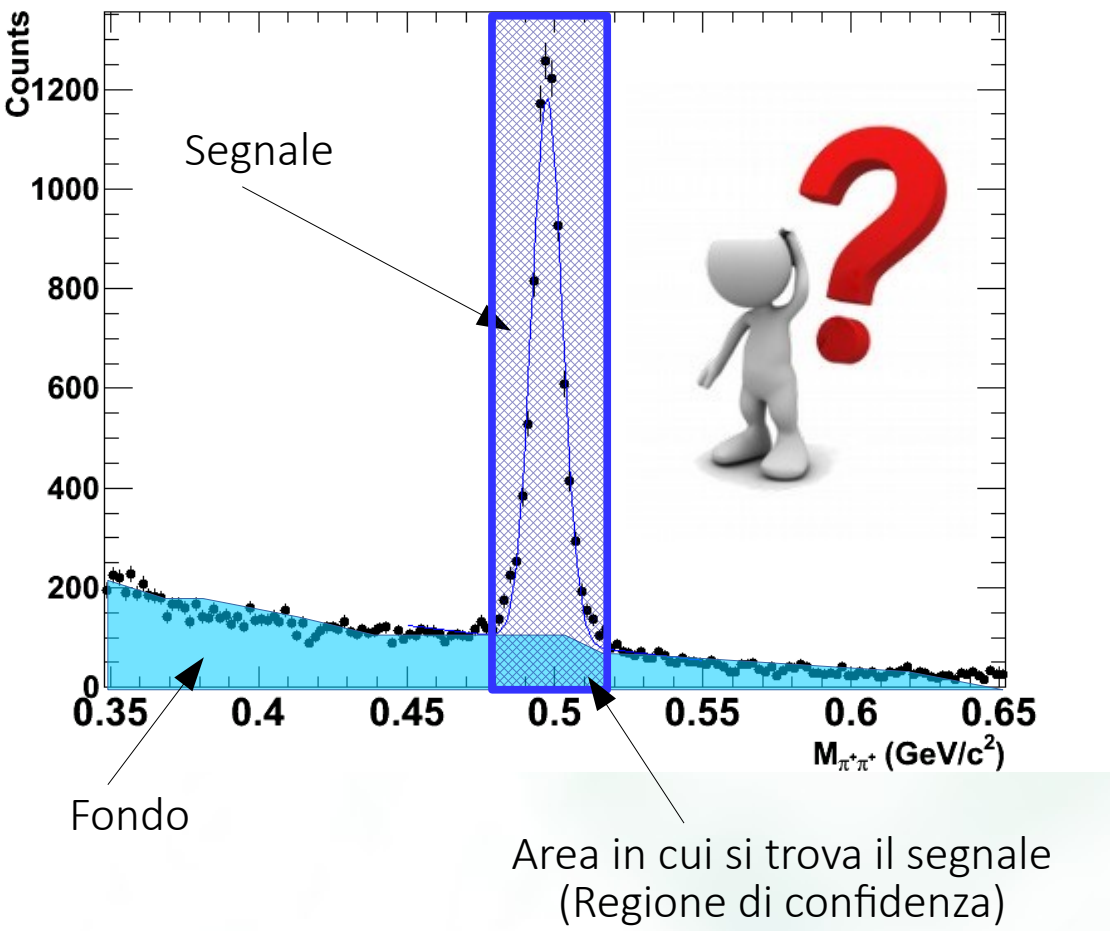
Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta cosi'??

Massa invariante : Esempio 2



Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta cosi'??
Il picco corrisponde alle K^0, e la regione piatta sottostante è il “fondo” originato da combinazioni casuali di pioni che sono stati identificati male.

Massa invariante : Esempio 2



Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta cosi'??
Il picco corrisponde alle K^0, e la regione piatta sottostante è il "fondo" originato da combinazioni casuali di pioni che sono stati identificati male.

In questo caso la funzione usata per descrivere la distribuzione di massa invariante è la **somma** di un polinomio di 2 grado (i.e. una parabola) per descrivere il fondo con una funzione a campana ("gaussiana") per descrivere il segnale

Particelle Strane : Di cosa sono fatte?

Quark

Sapore 1ª Generazione	2ª Generazione	3ª Generazione	Carica Elettrica
up	charm	top	+2/3
down	strange	bottom	-1/3

Anti-Quark

Sapore 1ª Generazione	2ª Generazione	3ª Generazione	Carica Elettrica
up	charm	top	+2/3
down	strange	bottom	-1/3

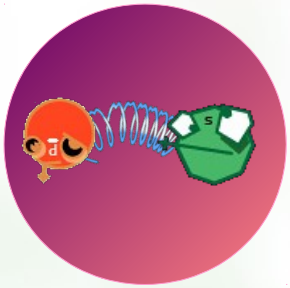
Particelle Strane

Le particelle strane sono particelle che contengono almeno un quark strano. Hanno quindi un numero quantico detto ***stranezza*** che misura il numero di quark strani.

Tra tutte le particelle si distinguono:

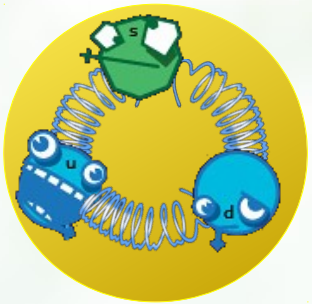
- i **mesoni** (formati da un quark e un antiquark) più leggeri
- i **barioni** (formati da tre quark) più pesanti

Il mesone strano neutro più leggero è la K^0 ($\bar{d}s$);



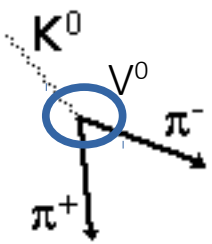
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

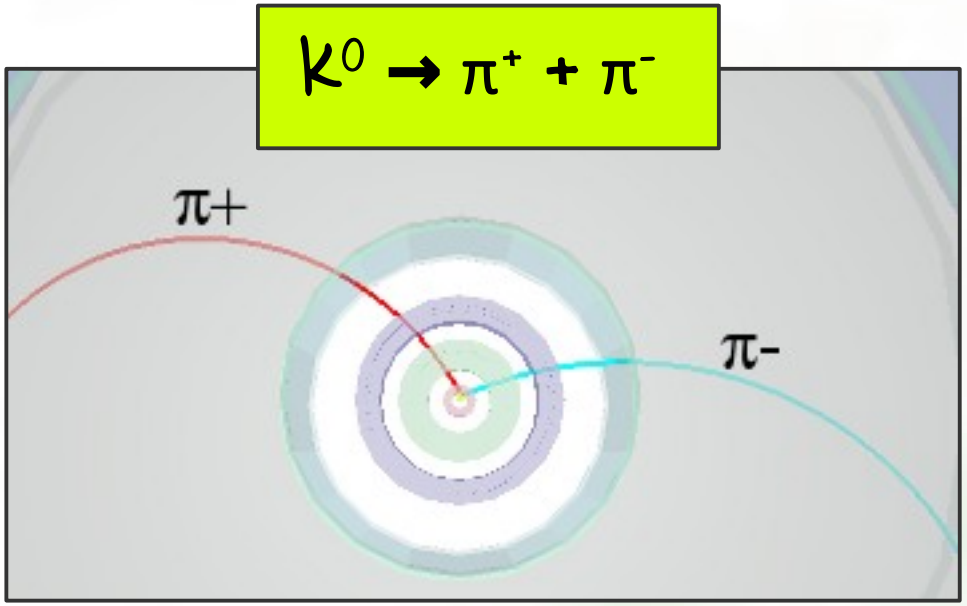


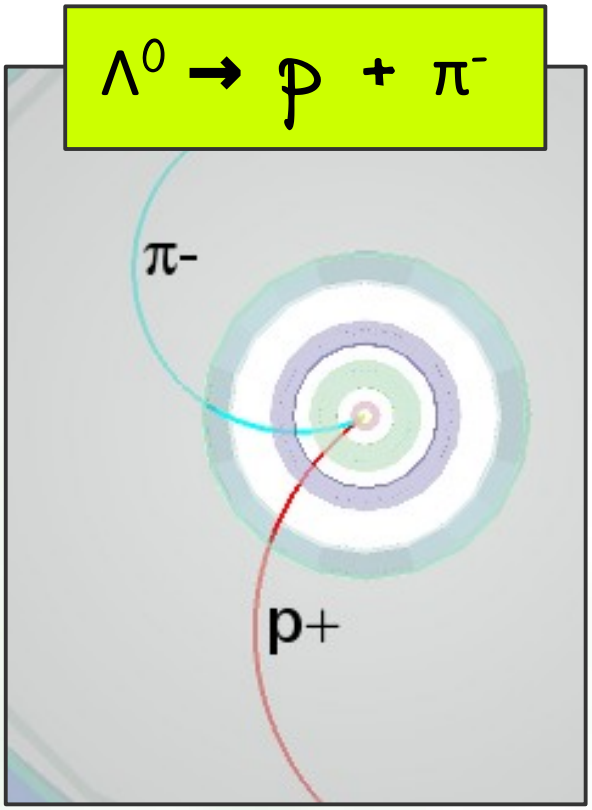
il barione strano neutro più leggero è la Λ (uds)

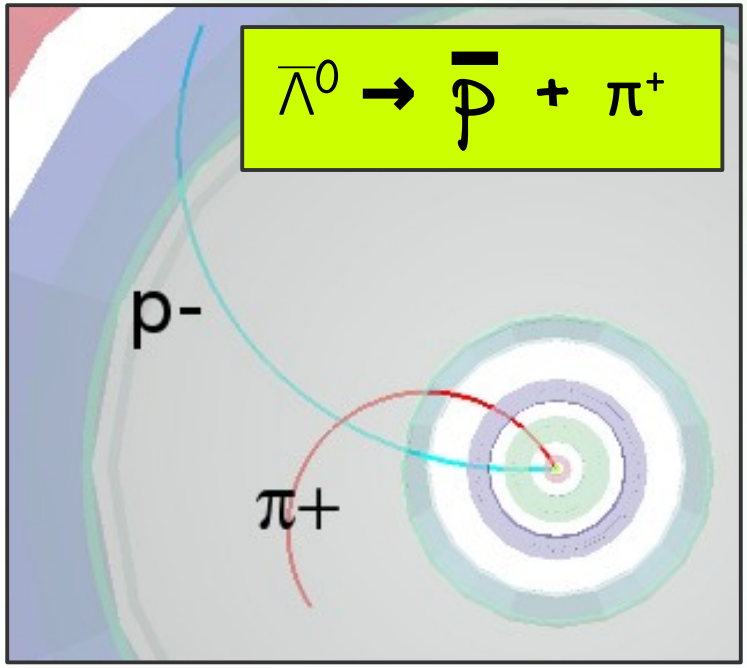
In questi decadimenti la stranezza non è conservata: i prodotti di decadimento sono formati solo da quark up e down.
Questi tipi di decadimento sono detti "deboli": sono processi "lenti" ($\tau \sim 10^{-8} - 10^{-10}$ s)
→ le particelle possono viaggiare qualche cm dal vertice di produzione prima di decadere.
Il vertice di decadimento è viene chiamato **V^0**



Particelle Strane: come si possono "vedere"?

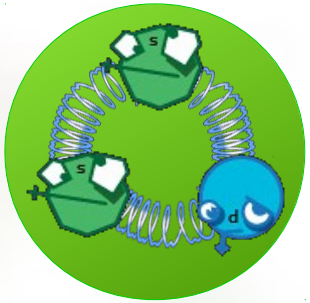






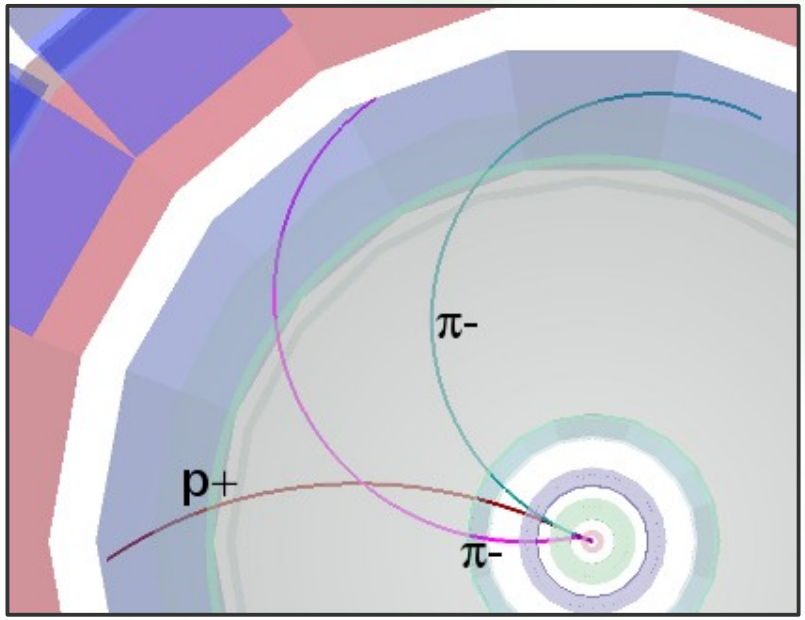
Particelle Strane : Decadimenti a cascata

La particella Ξ^- è formata da 2 quark s e un quark d



$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$$
$$\hookrightarrow p + \pi^-$$

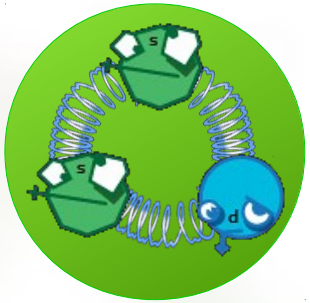
In un primo momento la Ξ^- decade in π^- e Λ; poi a sua volta la Λ decade a sua volta in p e π^-



Il pione iniziale è denominato "bachelor" e nel disegno è in viola

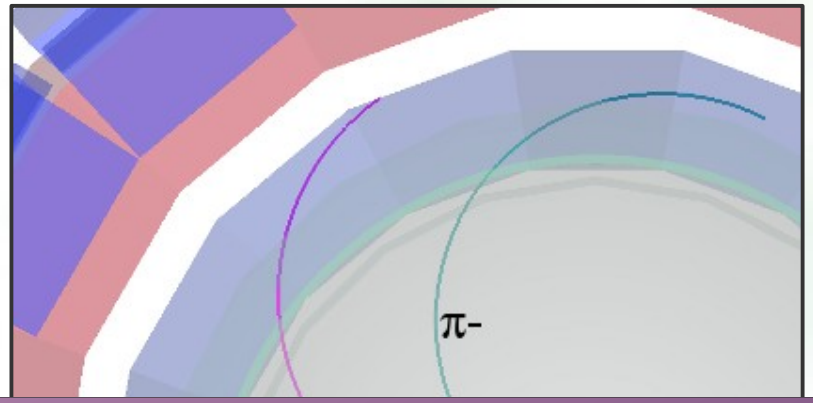
Particelle Strane : Decadimenti a cascata

Il barione Ξ^- è formato da 2 quark s e un quark d.



$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$$
$$\hookrightarrow p + \pi^-$$

In un primo momento la Ξ^- decade in π^- e Λ; poi a sua volta la Λ decade a sua volta in p e π^-



Il pione iniziale è denominato "bachelor" e nel disegno è in viola

Ma perché proprio le particelle strane?

Particelle Strane : Perché le studiamo?

- In una collisione di ioni pesanti si producono tantissime particelle dotate di stranezza (la massa del quark s è solo un po' più grande della massa dei quark u e d)
- In una collisione di ioni pesanti si formano anche molte più particelle rispetto a quelle che si formano in una collisione di protoni

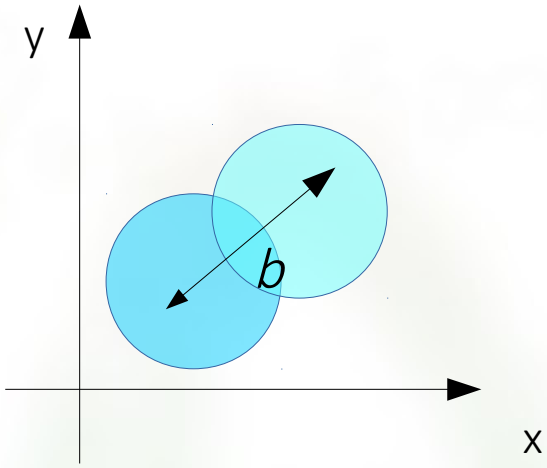
Particelle Strane : Perché le studiamo?

- In una collisione di ioni pesanti si producono tantissime particelle dotate di stranezza (la massa del quark s è solo un po' più grande della massa dei quark u e d)
- In una collisione di ioni pesanti si formano anche molte più particelle rispetto a quelle che si formano in una collisione di protoni
- Vale anche per le particelle strane?
  - Si!
    - L'aumento di stranezza in collisioni A-A rispetto a collisioni pp è stata una delle prime prove della formazione del QGP in collisioni A-A

La centralità

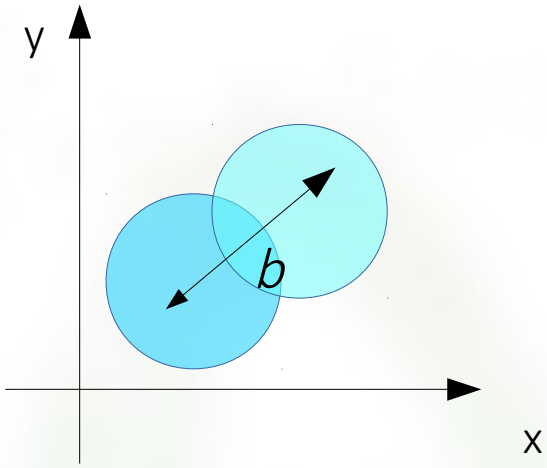
Parametro di impatto *b*: vettore nel piano trasverso definito dai centri dei due nuclei

Il parametro di impatto(b) determina la **centralità** della collisione



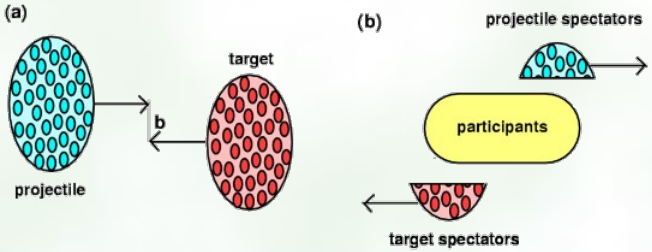
La centralità

Parametro di impatto *b*: vettore nel piano trasverso definito dai centri dei due nuclei

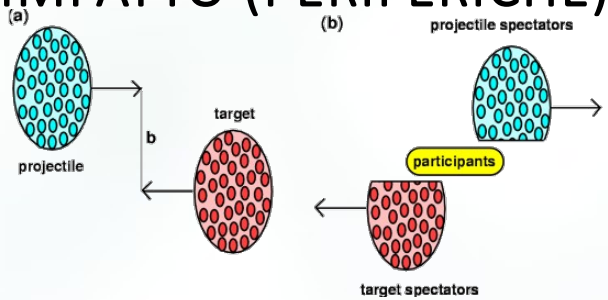


Il parametro di impatto(b) determina la **centralità** della collisione

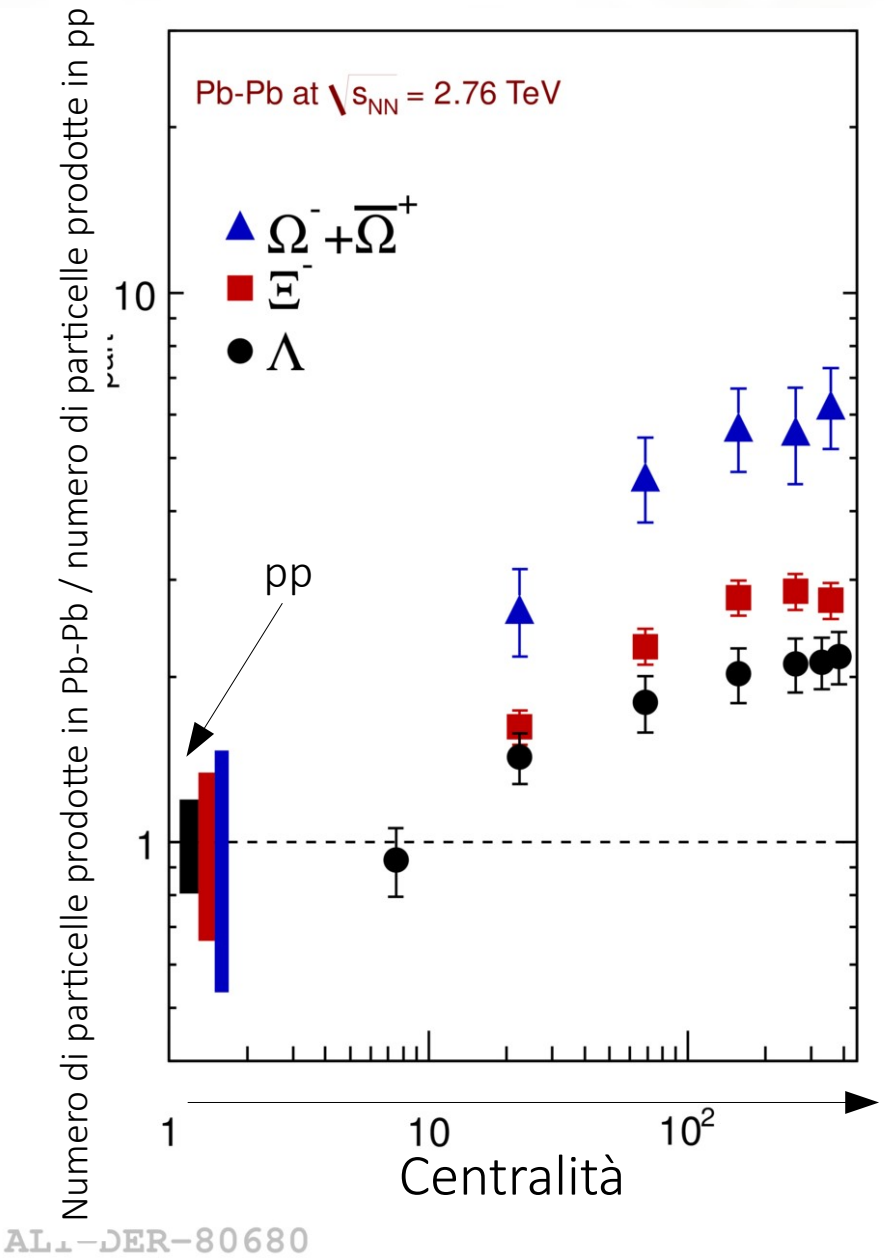
- COLLISIONI CON PICCOLO PARAMETRO DI IMPATTO (CENTRALI)
  - Molti nucleoni coinvolti nell'interazione
  - Molte collisioni tra nucleoni
  - Grande volume di interazione
  - Molte particelle prodotte



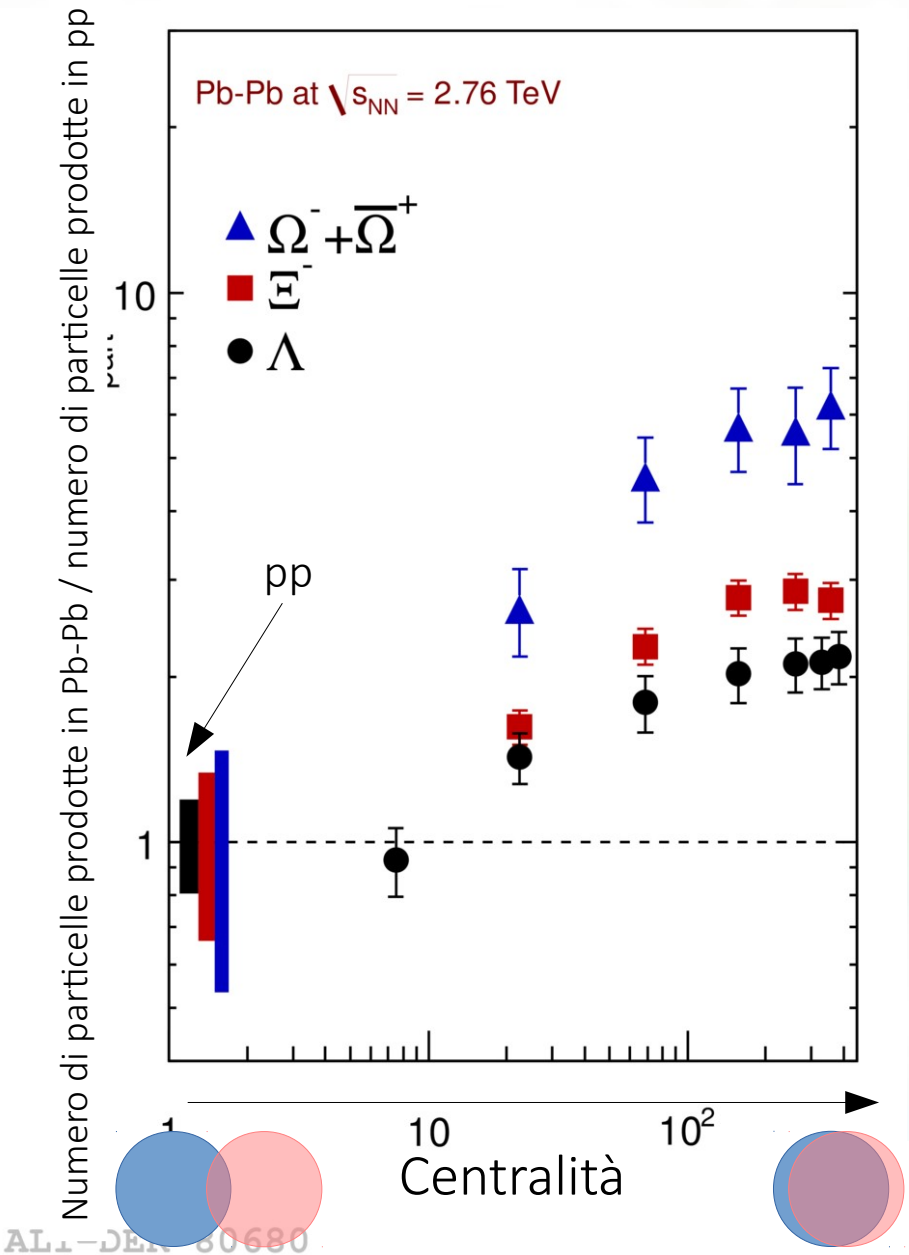
- COLLISIONI CON GRANDE PARAMETRO DI IMPATTO (PERIFERICHE)
  - Pochi nucleoni coinvolti nell'interazione
  - Poche collisioni tra nucleoni
  - Piccolo volume di interazione
  - Poche particelle prodotte



Cosa è stato osservato nei dati?



Cosa è stato osservato nei dati?



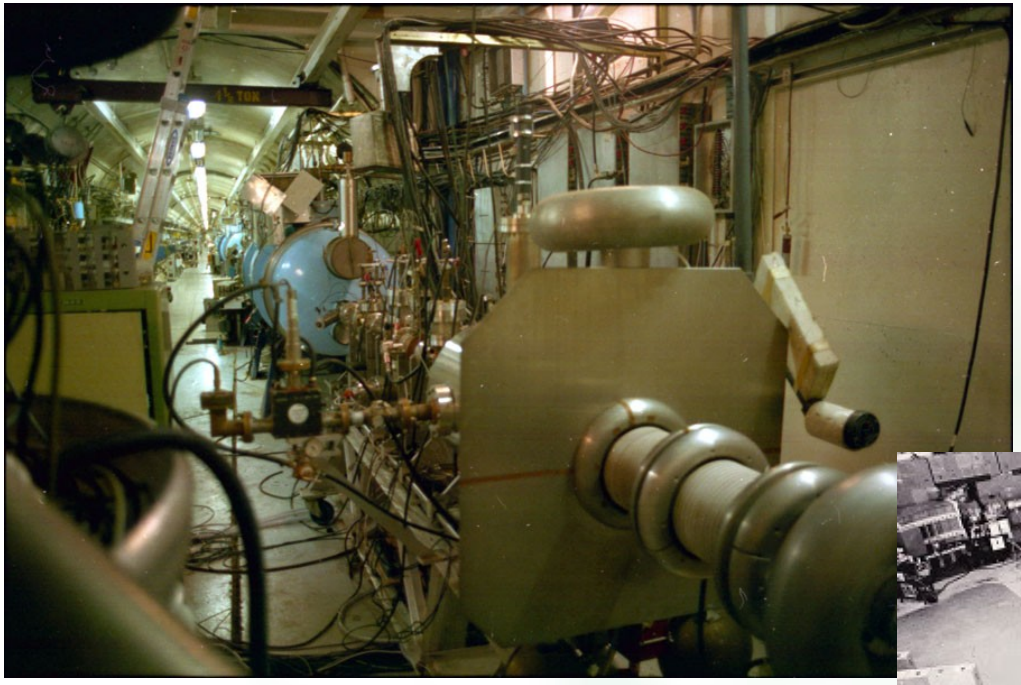
Oggi pomeriggio cercheremo di riprodurre questo risultato!

Esercizio di oggi pomeriggio

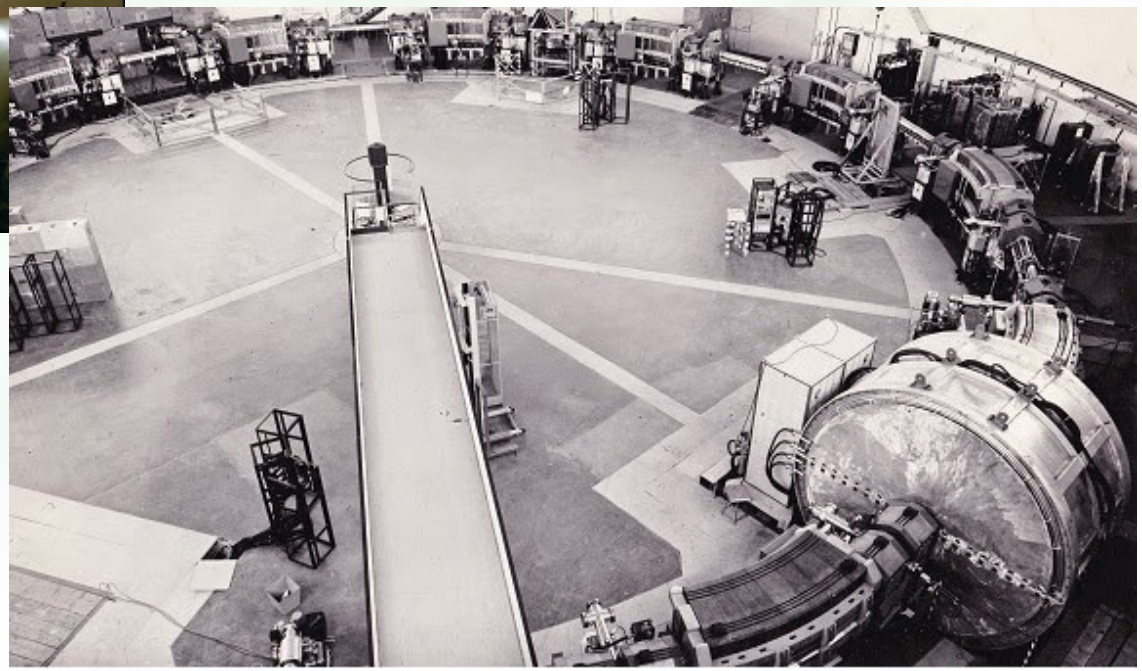
- L'esercizio del pomeriggio è diviso in due parti.
  - Nel primo esercizio analizzerete una serie di eventi con almeno una particella strana:
    - Calcolerete la massa invariante delle particelle figlie per identificare la particelle madre.
  - Nel secondo esercizio avrete a disposizione la massa invariante di tantissime coppie di particelle figlie:
    - Farete dei fit alle distribuzioni di massa invariante e valutete il numero di particelle figlie prodotte in classi di centralità.
- I dettagli e le istruzioni verranno forniti nel pomeriggio

Diversi tipi di acceleratori

Lineari



Circolari



Acceleratori Circolari

Acceleratori Circolari :

- PRO: Le particelle attraversano più volte la stessa cavità. Ad ogni giro tali pacchetti acquistano energia grazie al campo elettrico accelerante (a radiofrequenza)
- CONTRO: perdono energia a causa della RADIAZIONE DI SINCROTRONE EMESSA (a sua volta costituisce una sonda utilizzata in vari campi) nei magneti curvanti.

→ Una particella carica che viaggia lungo una traiettoria curva perde energia

Energia persa per giro

$$U = \frac{4}{3}\pi \frac{r_0}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

ρ = Raggio di curvatura della traiettoria

Più il raggio è grande meno è l'energia persa

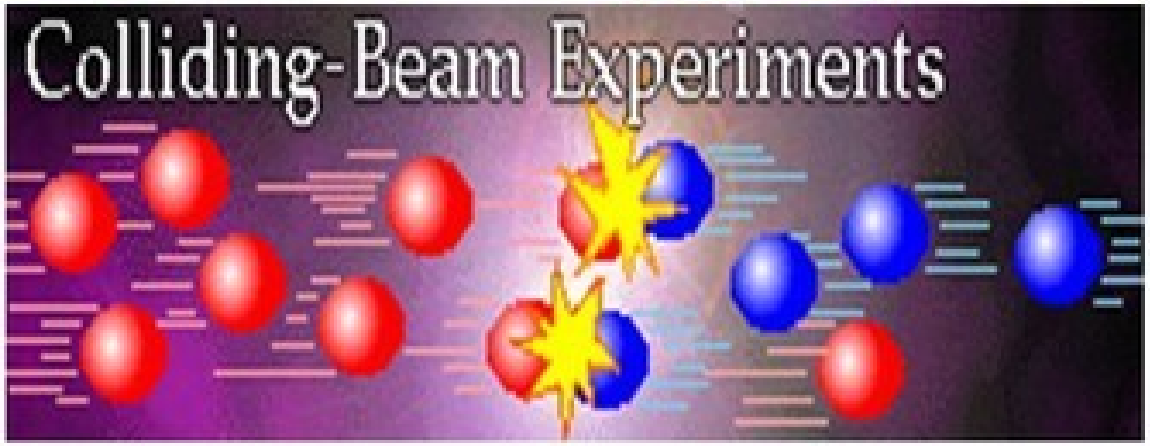
LARGE Hadron Collider

Bersaglio fisso vs Collider

Energia disponibile per la collisione E_F

E_F proporzionale a $\sqrt{E_{Protone}}$

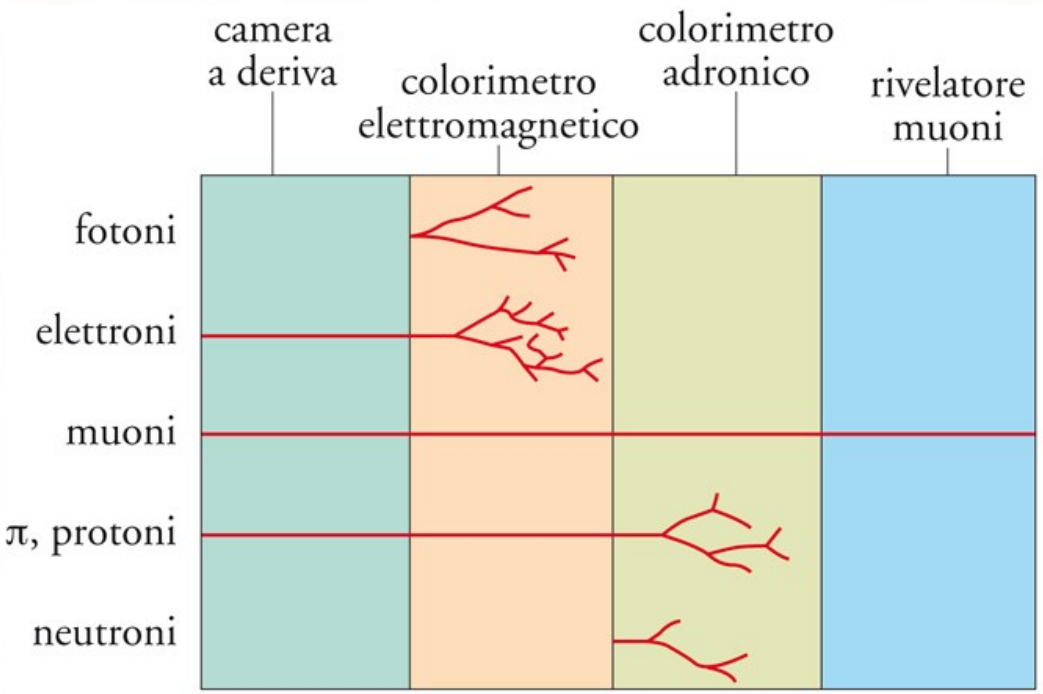
$E_F = 2xE_{Protone}$

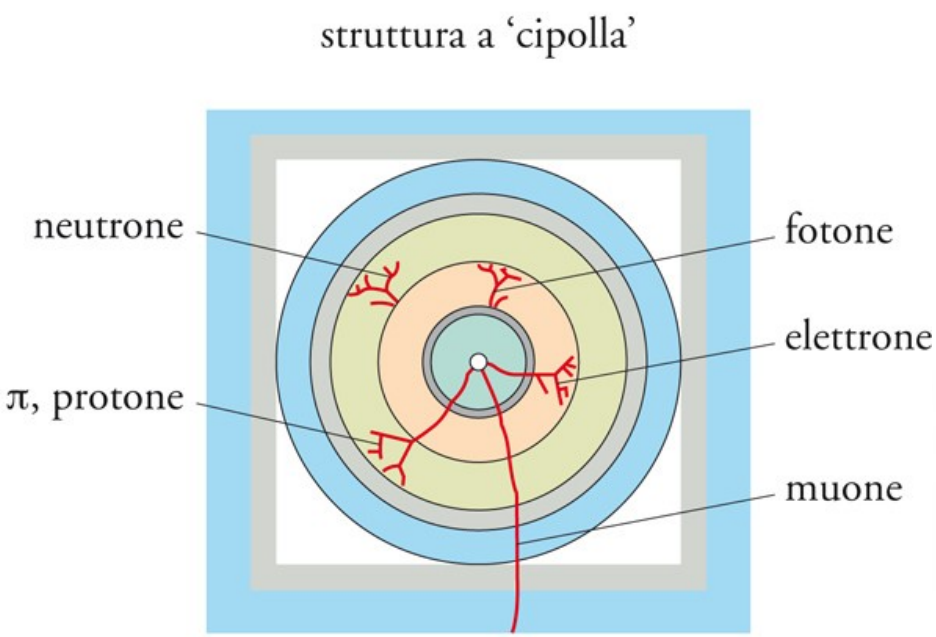


L'energia nel centro di massa prodotta in esperimenti al collider è più grande!

Large Hadron COLLIDER

Rivelatori di particelle attualmente in uso





- **Camera a tracce** : rivela tutte le particelle cariche
- **Calorimetro elettromagnetico** : rivela sciami e.m. prodotti da fotoni, elettroni e positroni
- **Calorimetro adronico**: rivela sciami adronici prodotti da protoni, neutroni e pioni
- **Rivelatori a muoni** : rivela le sole particelle penetranti, i muoni
- Tutti i rivelatori sono immersi immerso in **un campo magnetico**