



International masterclass



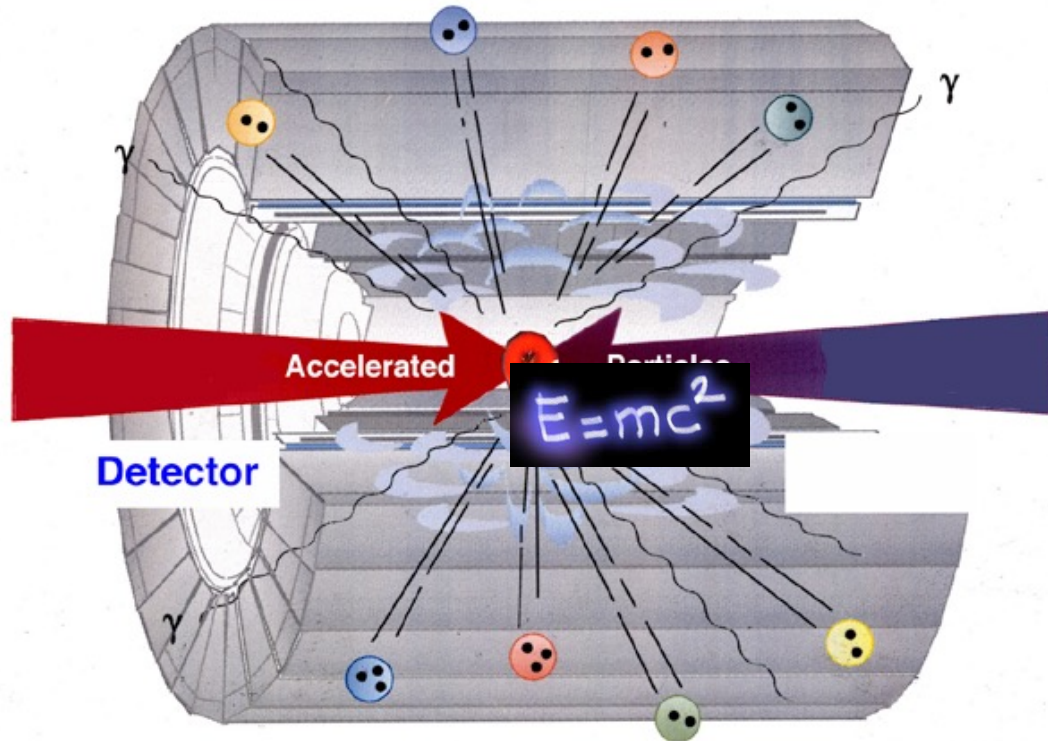
L'esperimento ALICE e introduzione all'analisi dati

Bari, 14/03/2025

Prof. Giacomo Volpe
Università & INFN, Bari



Fisica delle particelle



Obiettivo: studiare le proprietà della materia

Metodologia:

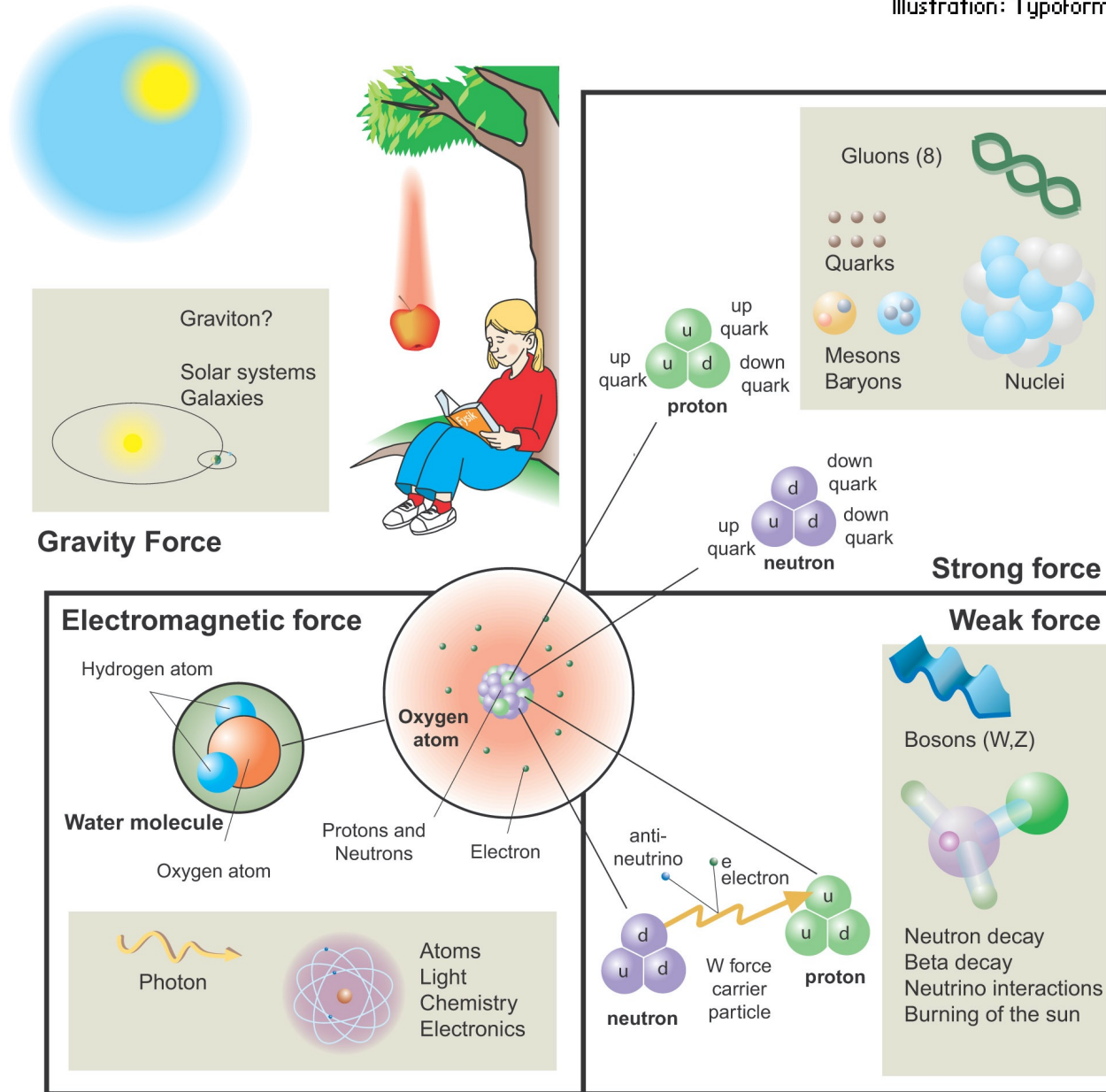
Concentrazione di energia nelle particelle (per mezzo di acceleratori)

- Collisioni di particelle;
- produzione delle condizioni dell'universo dei primi istanti dopo il big bang
- Creazione di nuove particelle

Identificazione delle particelle create attraverso i rivelatori

Interazioni fondamentali

Illustration: Typoform



Costituenti della materia

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

BOSONS			force carriers spin = 0, 1, 2, ...		
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.4	-1			
W⁺	80.4	+1			
Z⁰	91.187	0			

Materia ordinaria

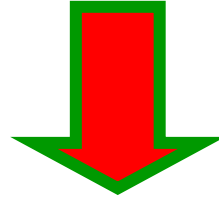
Perché accelerare le particelle?!

Per vedere il mondo microscopico non possiamo usare gli occhi

Ci dobbiamo servire di altri strumenti

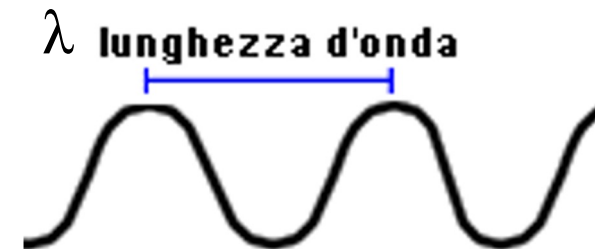
riconosco parti con dimensioni ~ dimensione della sonda

Per vedere le particelle devo avere “sonde” piccolissime



Particelle stesse

dualismo onda-corpuscolo: le particelle si comportano come onde e la loro dimensione è la lunghezza d'onda associata



$\lambda \sim 1/p$ p è la quantità di moto (proporzionale all'energia)

Perché accelerare le particelle?!

Per vedere il mondo microscopico non possiamo usare gli occhi

Ci dobbiamo servire di altri strumenti

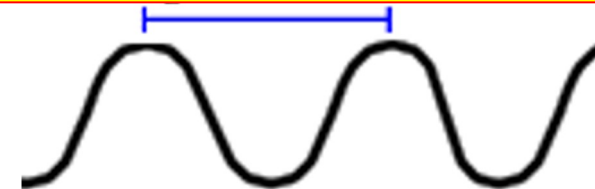
riconosco parti con dimensioni \sim dimensione della sonda

Se voglio vedere oggetti piccoli $\rightarrow \lambda$ PICCOLA \rightarrow particelle con GRANDE ENERGIA

ACCELERATORI:

PIU' POTENTI SONO \rightarrow PIU' VEDONO IL PICCOLO

comportano come onde e la loro dimensione è la lunghezza d'onda associata



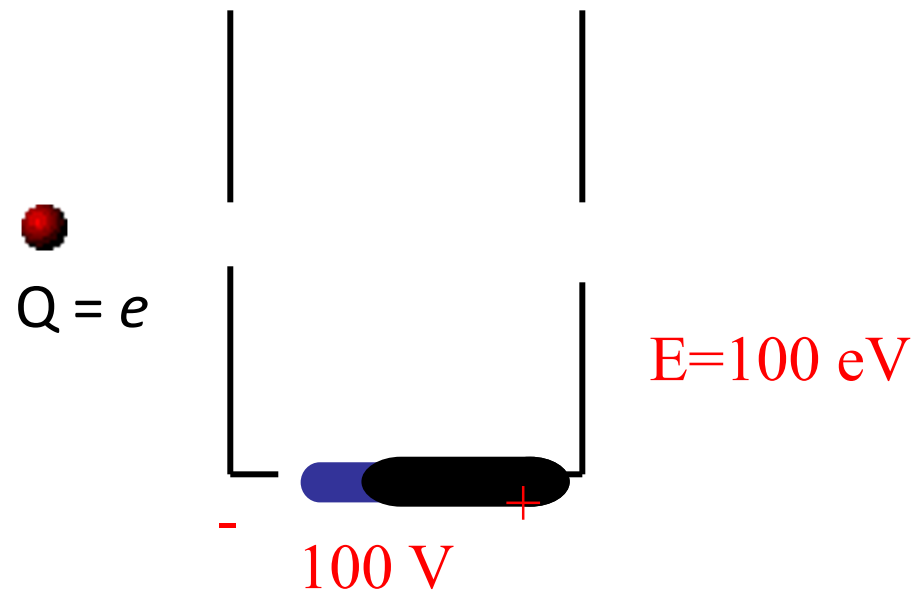
$\lambda \sim 1/p$ p è la quantità di moto (proporzionale all'energia)

Acceleratori: come funzionano

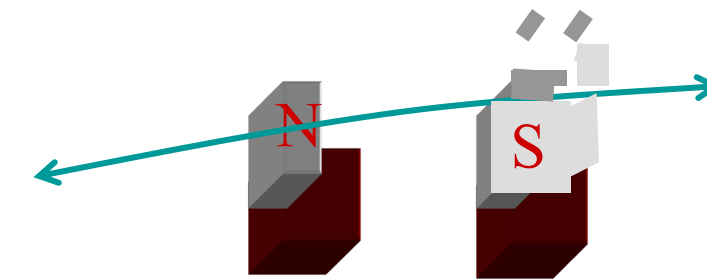
particelle prodotte riscaldando filamenti (**elettroni**) o per ionizzazione (es H senza e^- = **protone**) o con urti (**antiparticelle**)

particelle corrono dentro dei tubi

Campi elettrici per accelerare



Campi magnetici per curvare, trasportare e confinare

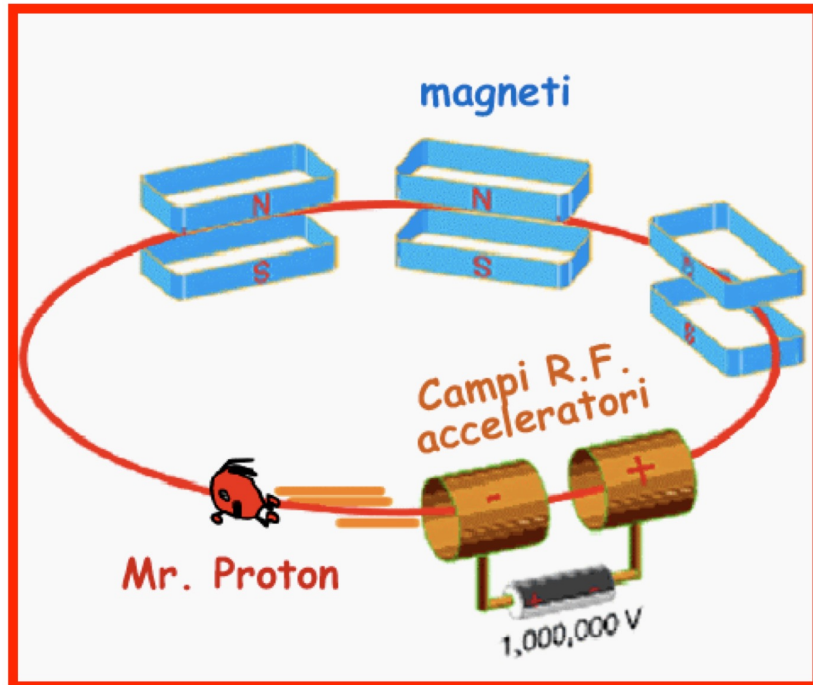
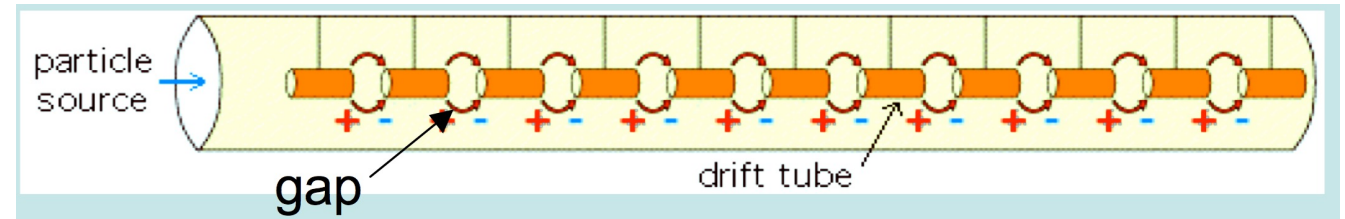


Traiettorie circolari

Acceleratori

Acceleratori lineari:

- Le particelle vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da *elettrodi susseguenti*.
- La tensione applicata è variabile nel tempo (sinusoidale) ad una sequenza di *tubi di drift*. Le particelle vengono accelerate in corrispondenza dei *gaps* (LINAC).

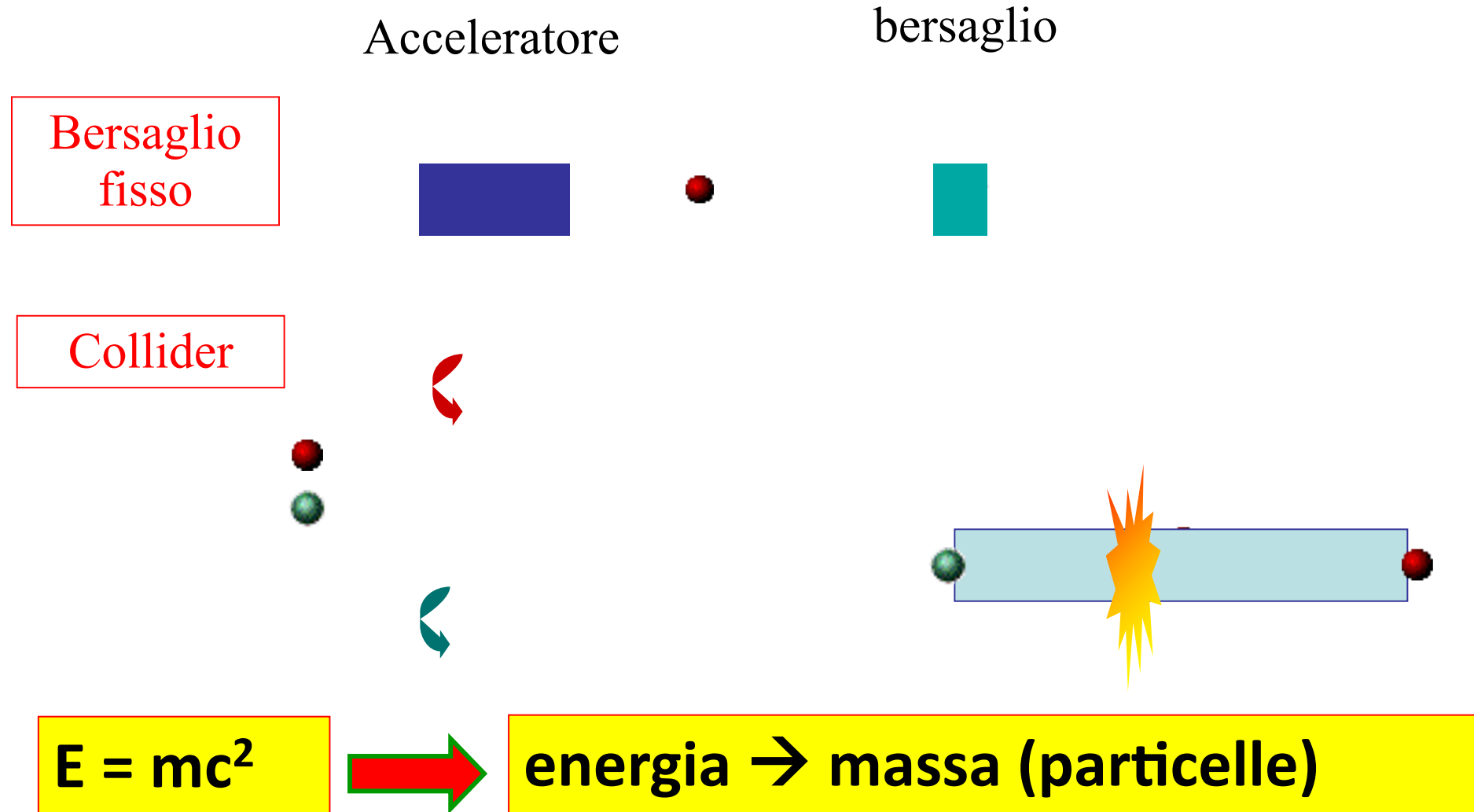


Acceleratori circolari:

- le particelle si muovono lungo una traiettoria circolare, passando molte volte nella stessa cavità a radiofrequenza.
- Il campo magnetico B è diretto verticalmente; il raggio di curvatura dipende dall'energia e dalla carica della particella.

$$dp/dt = qv \times B$$

Acceleratori: a bersaglio fisso e collisionatori



Nei collisionatori l'energia a disposizione per la creazione di nuove particelle è maggiore che nelle collisioni a bersaglio fisso!!

Che cosa è il CERN

Organizzazione europea per la ricerca nucleare

Il CERN è il più grande laboratorio al mondo di **fisica delle particelle**

- Il termine CERN deriva dal francese ***Conseil européen pour la recherche nucléaire***
- Il laboratorio nasce dopo la Seconda Guerra Mondiale, quando l'Europa vuole mettersi al pari degli Stati Uniti d'America in ambito di ricerca scientifica
- Nel **1952** un consiglio di scienziati di 12 Paesi si riunisce per mettere in atto questo desiderio
- Il **29 settembre 1954** il desiderio prende vita e nasce il CERN

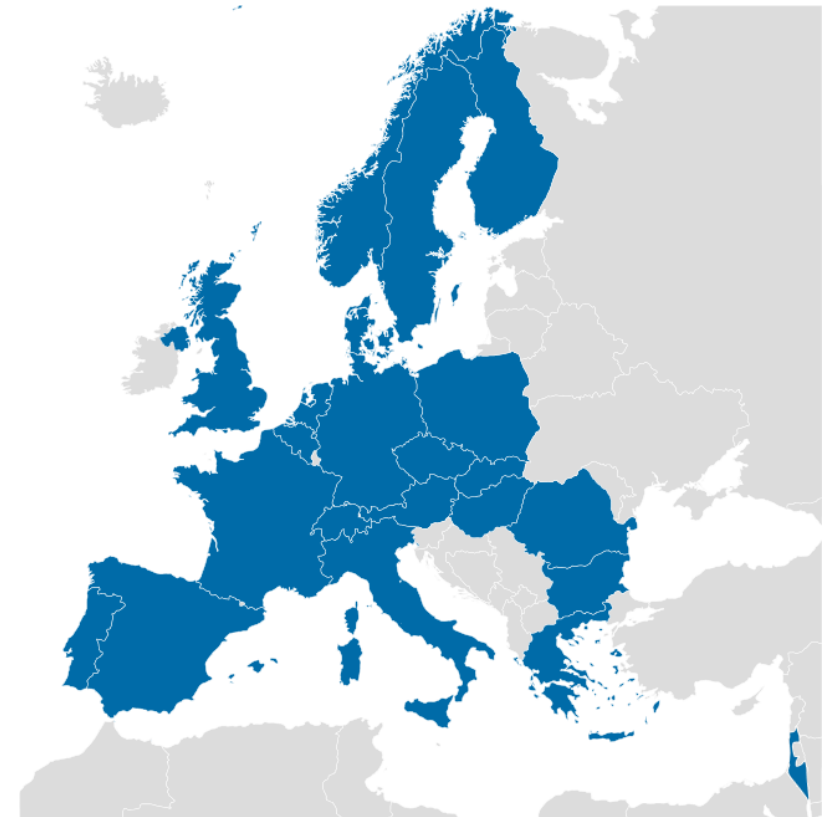
Che cosa è il CERN

I Paesi **fondatori** del CERN sono:

Belgio, Danimarca, Francia, Germania, Grecia, **Italia**, Jugoslavia (esce nel 1961), Norvegia, Paesi Bassi, Regno Unito, Svezia, Svizzera

Oggi i Paesi membri sono 22

Ci sono inoltre alcuni Paesi osservatori, dei quali alcuni extraeuropei: Federazione Russa, Giappone, India, Israele, Stati Uniti, Turchia, Commissione Europea, UNESCO



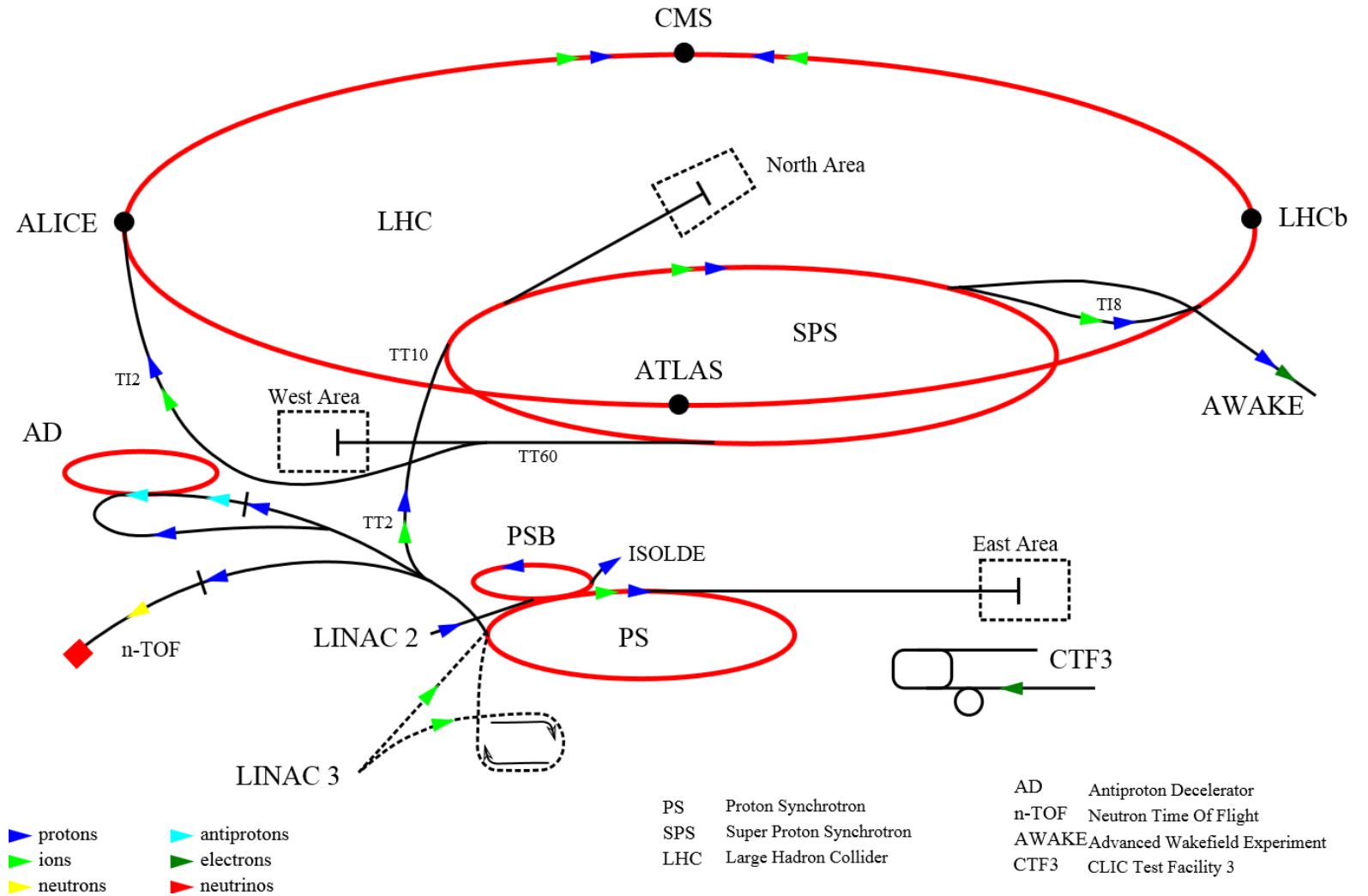
Che cosa è il CERN

Il CERN ha sede presso la città svizzera di **Ginevra**, nel Comune di **Meyrin**, al confine con la Francia



Gli acceleratori del CERN

Al CERN ci sono **7 acceleratori**, costruiti nel corso del tempo
 Oggi essi fanno da 'iniettori' l'uno per l'altro

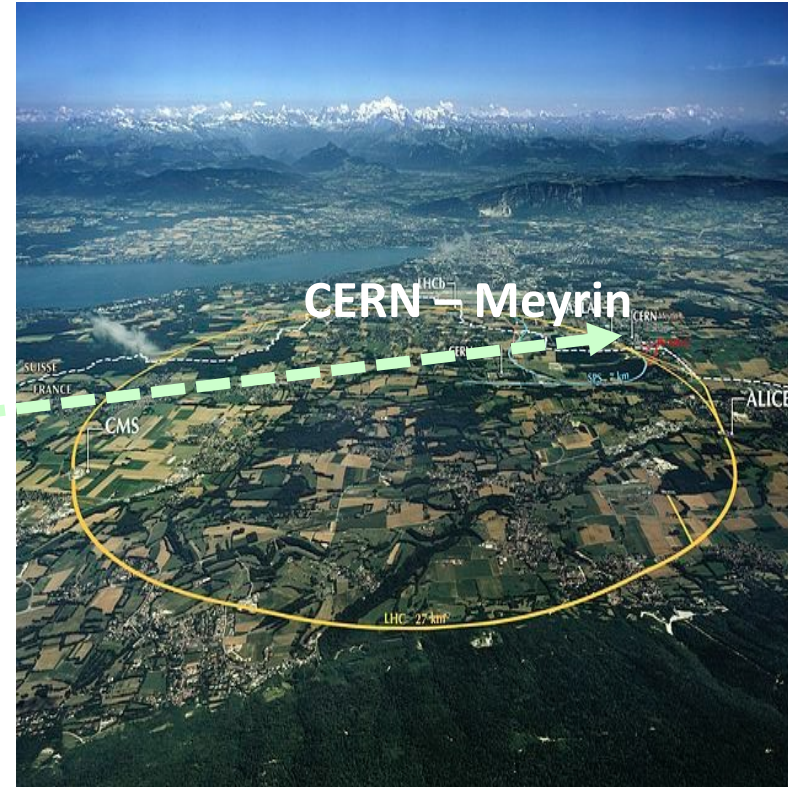


CERN ed LHC



CERN – Meyrin

- > sito scelto da un referendum cantonale nel 1953
- > I lavori iniziarono a Meyrin il 17 maggio 1954

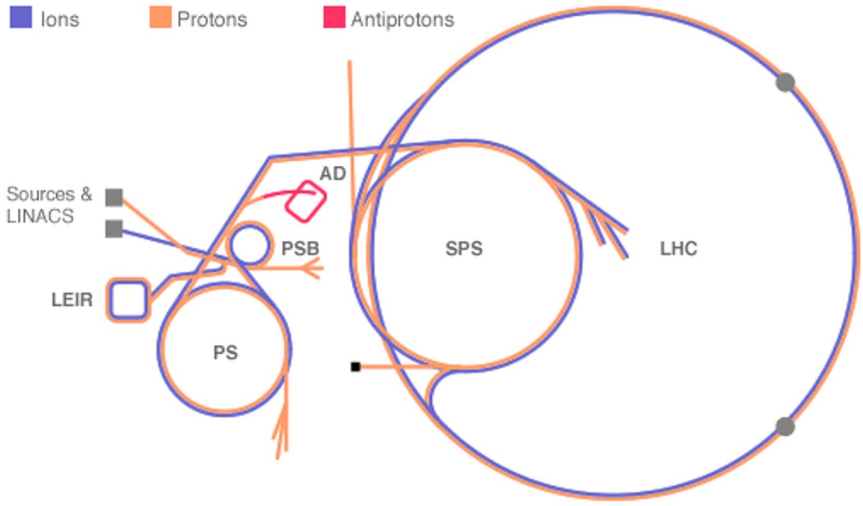


LHC collider

Lo statuto del CERN dichiara esplicitamente l'estraneità a qualunque programma di ricerca per fini militari (e ogni risultato sarebbe stato liberamente accessibile a tutti)

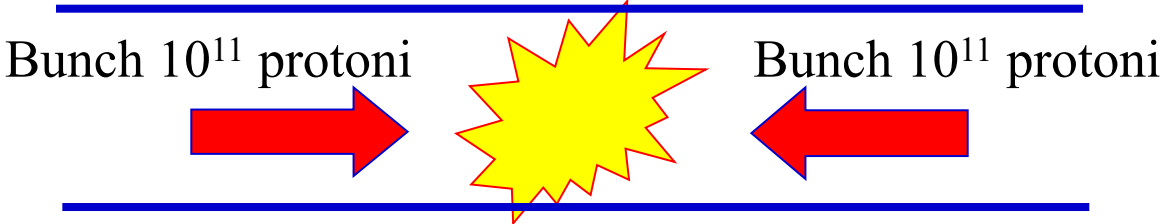


LHC



CERN

Beam pipe



2010: $3 \cdot 10^6$ urti/s

$E = 7 \text{ TeV}$ (\sim eurostar a 200 km/h)

$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$



- I costi di LHC: ≈ 4.5 miliardi di euro + esperimenti ≈ 1.5 miliardi di euro.
- Consumo energetico di LHC: 180 MW (= 180000 famiglie del cantone di Ginevra)
- Quantità di elio necessaria per raffreddare I magneti superconduttori di LHC e la sua temperatura: 120 tons a $1.9 \text{ K} = -271.25 \text{ }^\circ\text{C}$ (2.7 K temperatura dello spazio intergalattico)
- Velocità dei protoni dentro LHC: 99.999999% di c (6.5 TeV/fascio), 3 m/s in meno rispetto alla luce nel vuoto.

2010: $3 \cdot 10^6$ urti/s

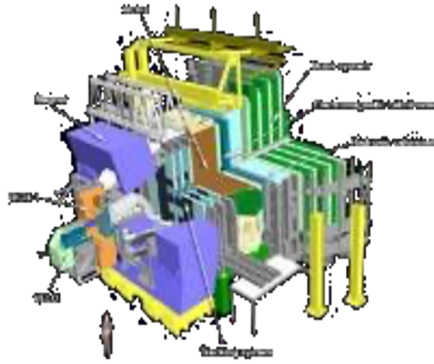
$E = 7 \text{ TeV}$ (\sim eurostar a 200 km/h)

$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

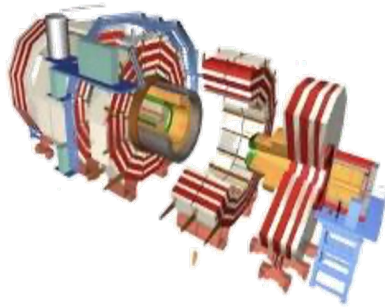


LHC e gli esperimenti

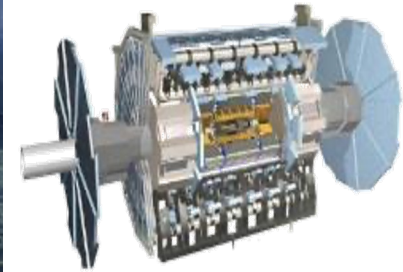
LHCb



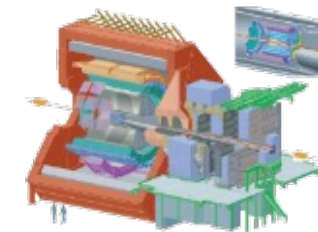
CMS



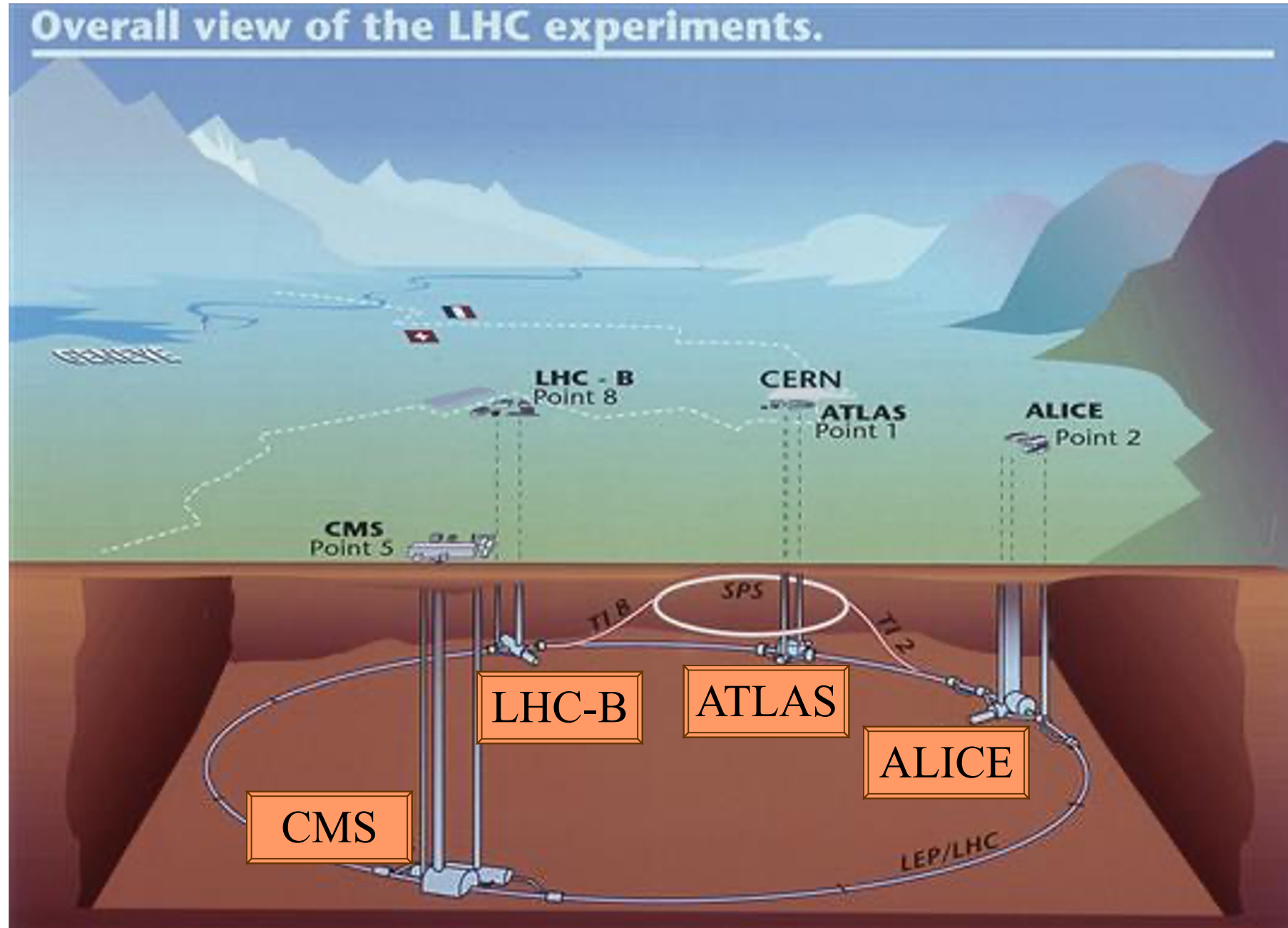
ATLAS



ALICE



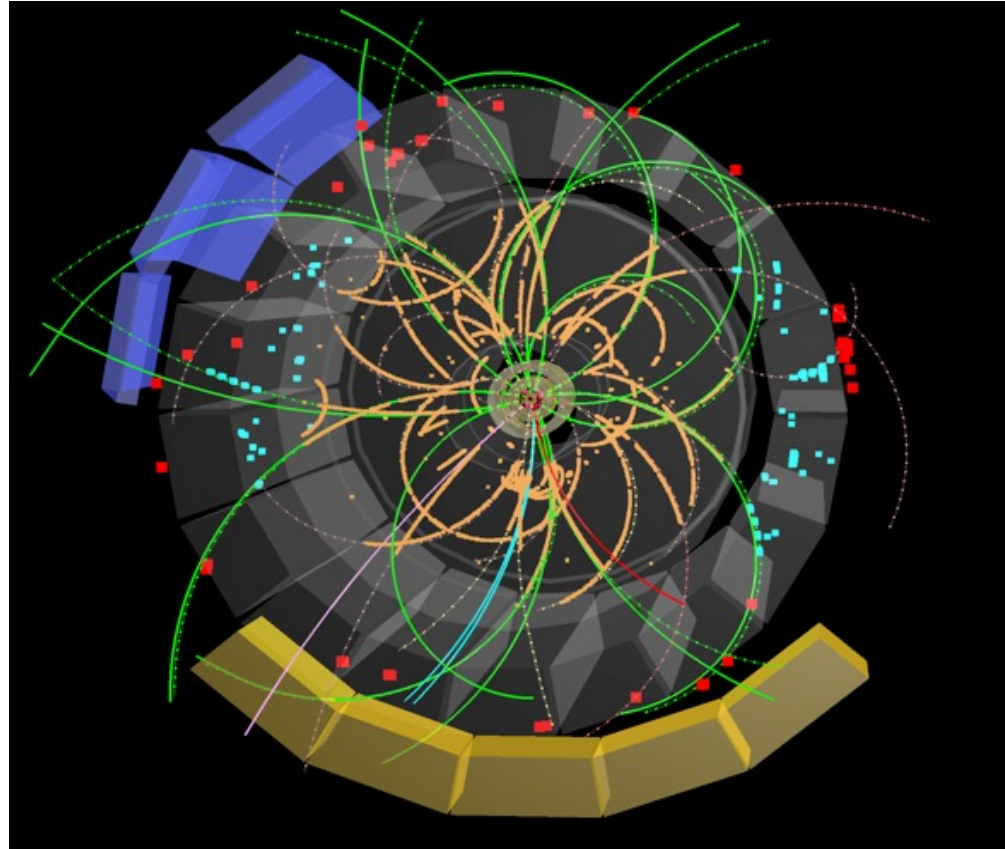
I 4 esperimenti di LHC



LHC e gli esperimenti



UN urto ad LHC



Centinaia di particelle prodotte: **ricostruirle** e **riconoscerle**

- ❑ apparati molto grandi → separo le varie particelle
- ❑ struttura a “cipolla” → in ogni strato lasciano un segnale

Rivelatori di particelle

Cosa dobbiamo sapere di ogni particella?

TUTTO !!

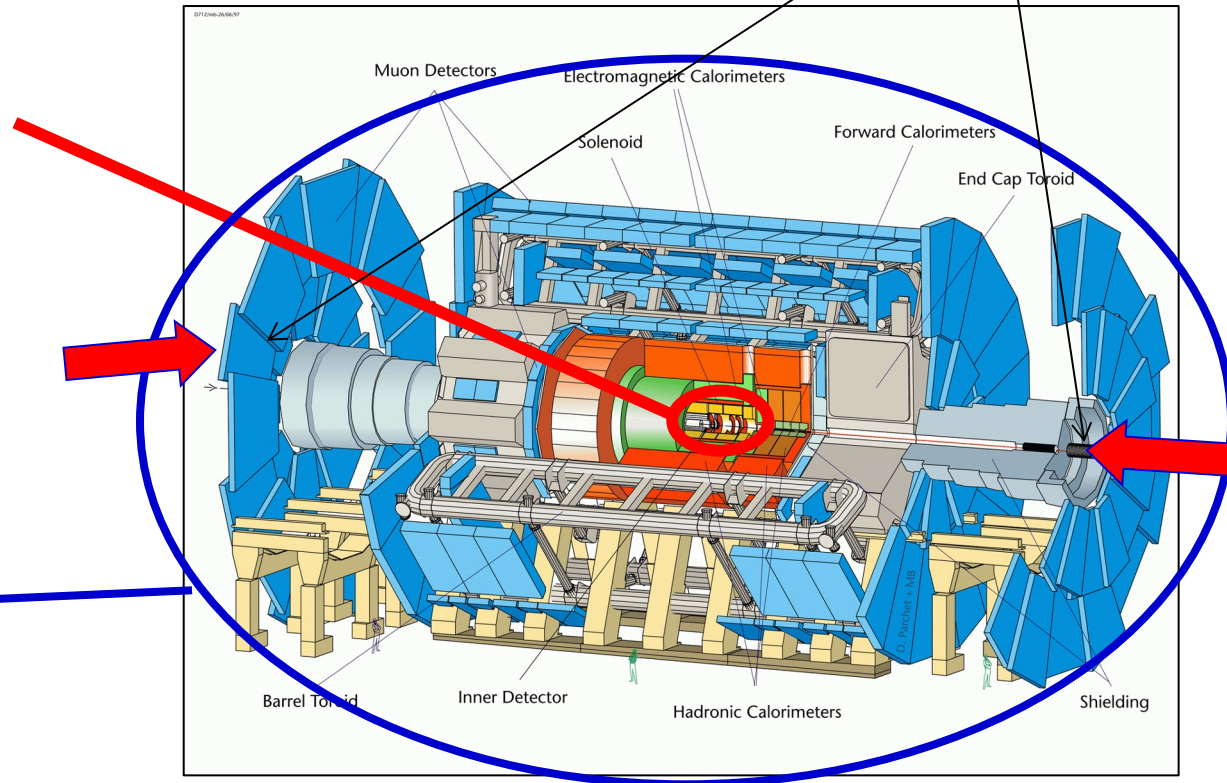
Beam pipe e
protoni

cinematica → tracciatori

- Posizione
- Direzione del moto
- Energia/impulso
- tempo di vita

Identificazione

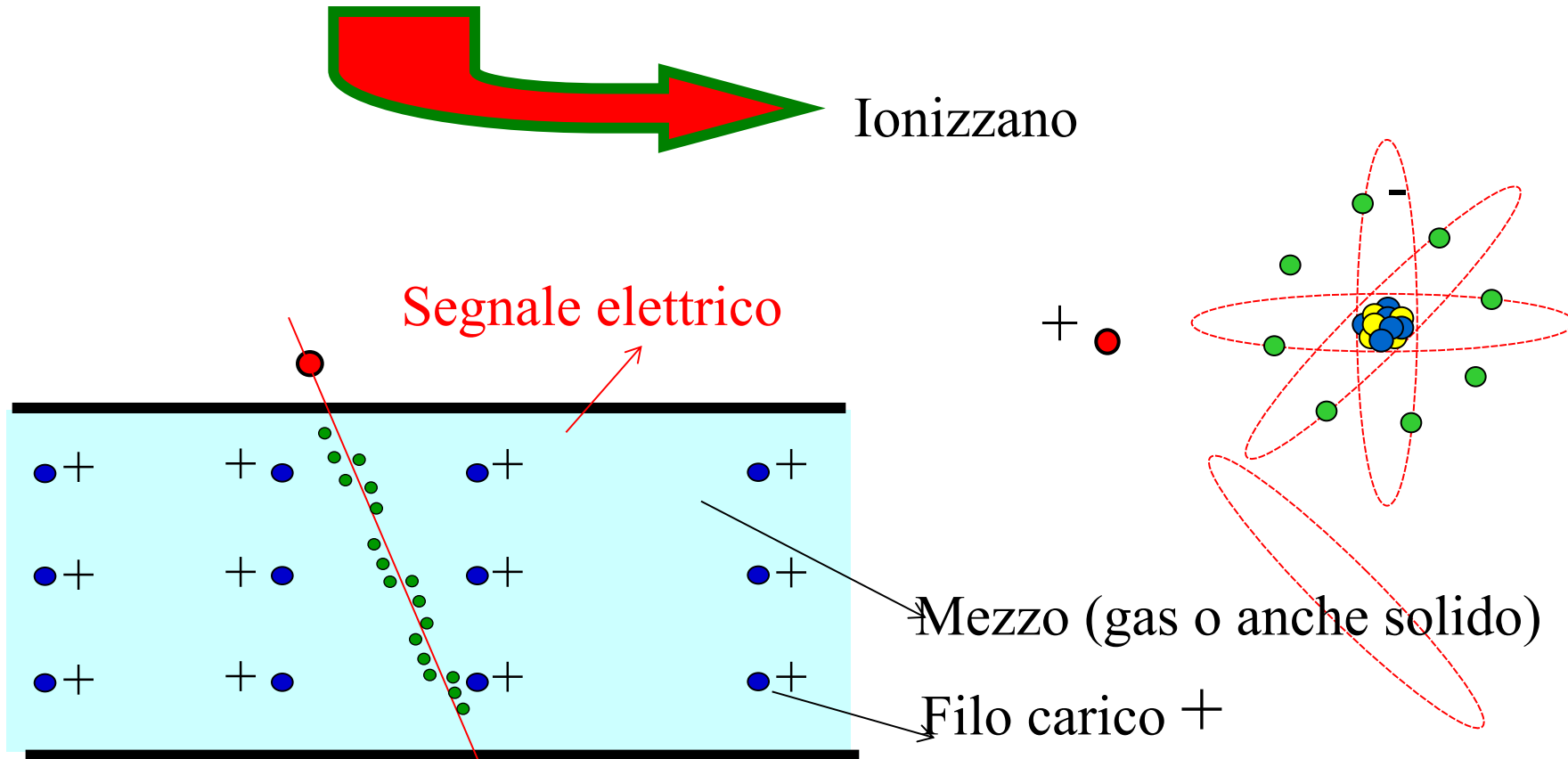
- Tipo di particella



Rivelatori di particelle

La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

Particelle cariche: se attraversano un mezzo incontrano atomi \rightarrow forza di Coulomb



Rivelatori di particelle

- Essi “vedono” le particelle prodotte dalle collisioni fascio-fascio o fascio-gas
- La rivelazione è basata sull’interazione delle particelle con la materia e la produzione di un segnale elettrico
- Esistono vari tipi di rivelatori:
 - a stato solido (semiconduttori);
 - a gas;
 - scintillatori.....
- Essi forniscono informazioni riguardanti:
 - L’energia della particella (calorimetri)
 - Il tipo di particella (identificazione)
 - La traiettoria della particella (tracciatori)

Misura della quantità di moto (o impulso)

La **quantità di moto o impulso** (\mathbf{p}) è la grandezza fisica associata alla **velocità** (\mathbf{v}) e alla **massa** (m) di un oggetto.

$$\vec{\mathbf{p}} = (\vec{\mathbf{p}}_x + \vec{\mathbf{p}}_y + \vec{\mathbf{p}}_z) = m\vec{\mathbf{v}} \text{ (meccanica classica)}$$

L'**energia cinetica** (energia legata alla velocità):

$$E_k = \left(\frac{1}{2} m v^2\right) \text{ (meccanica classica)}$$

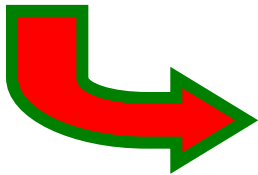
All'interno di LHC il campo elettrico accelera i protoni! Ciascun fascio di protoni a 7 TeV ha la stessa energia di un TGV di 400 t alla velocità di 150 Km/h!! Energia sufficiente per fondere 500 Kg di rame.

Misura della quantità di moto (impulso)


Eseguita dal tracciatore con il campo magnetico

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

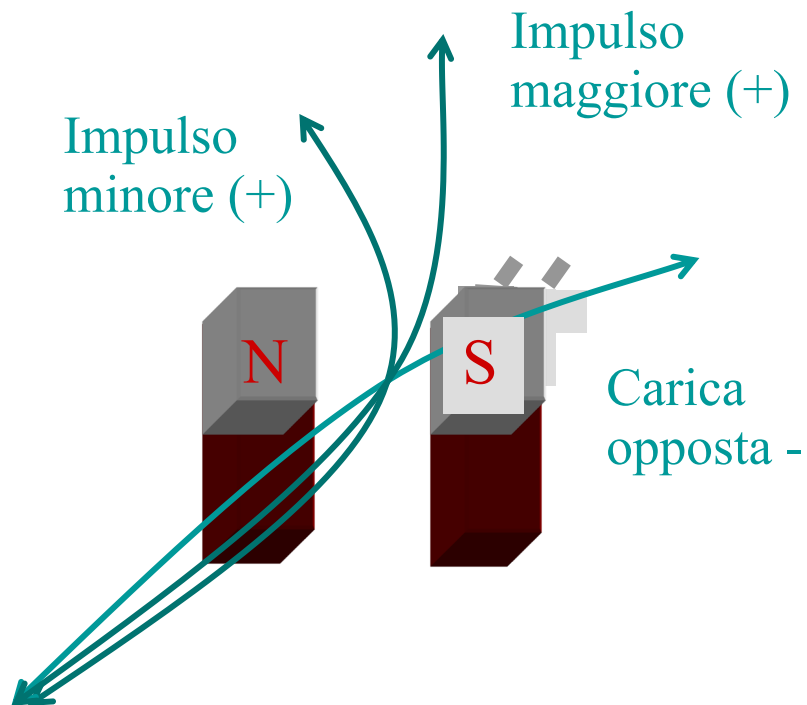
Tra una carica ed un campo magnetico si esercita una forza (*forza di Lorentz*)


$$r = \frac{mv}{qB}$$

Raggio di curvatura

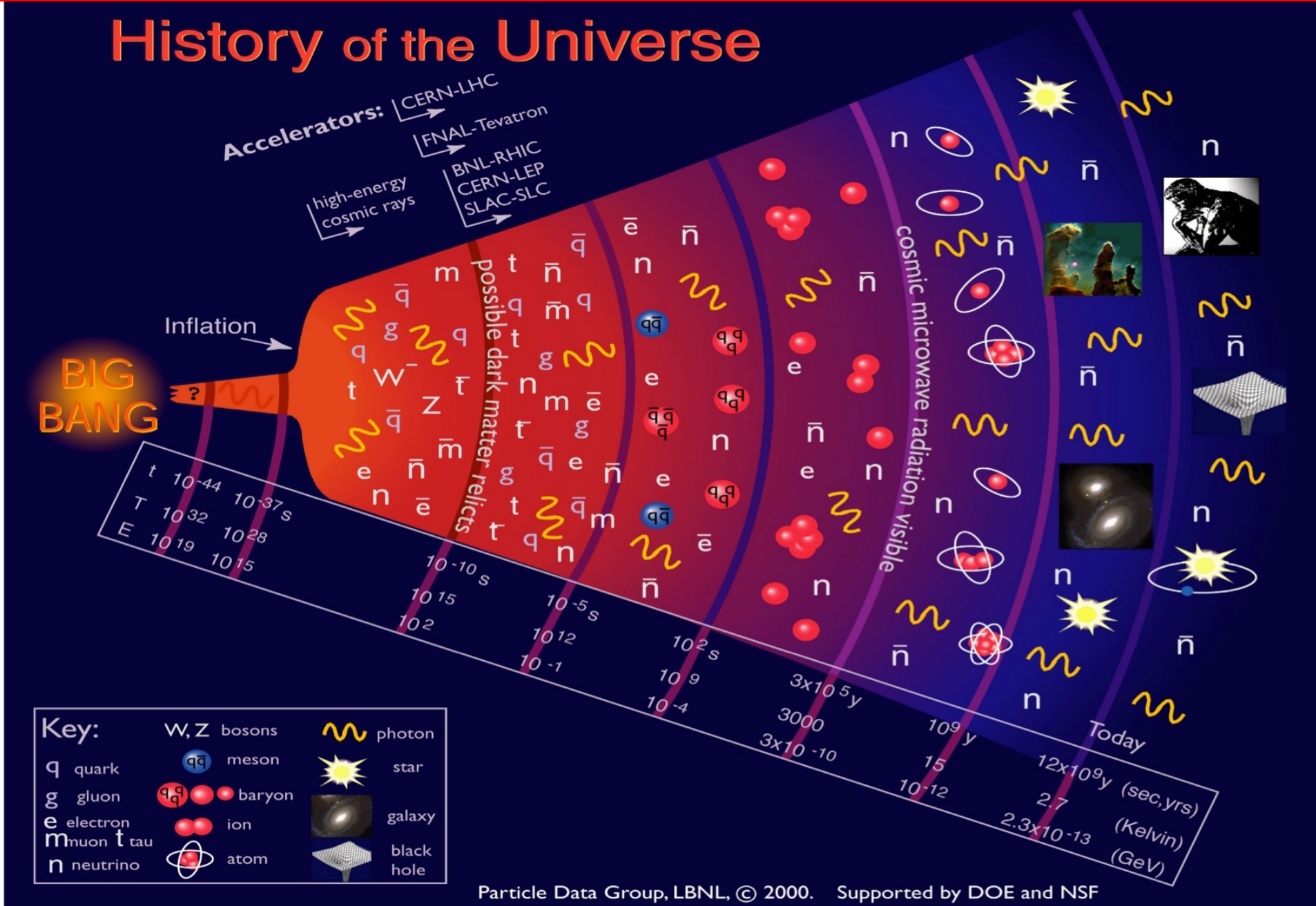


modulo dell'impulso mv e la carica q



13.7 miliardi di anni fa l'universo si è creato nel Big Bang

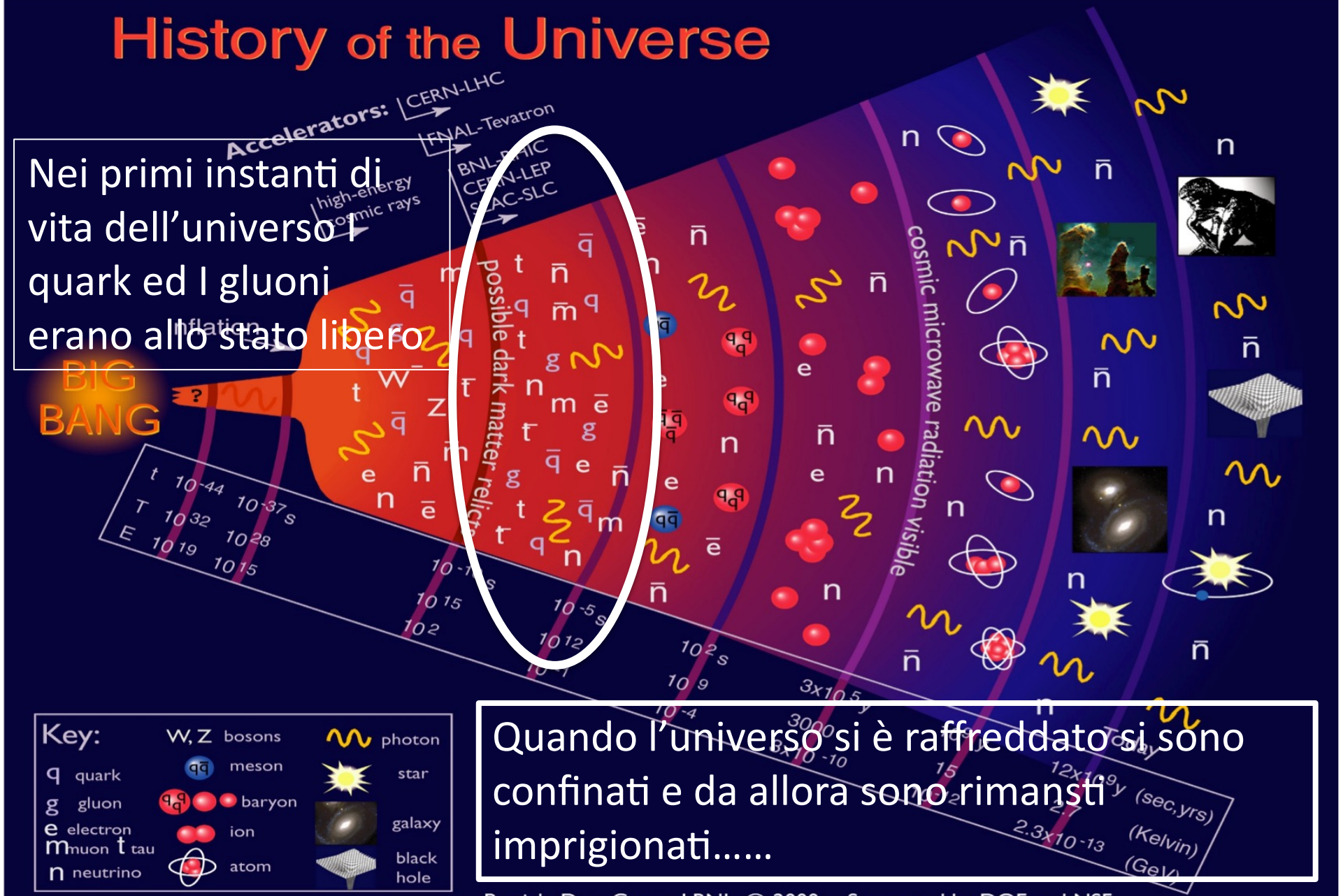
History of the Universe



13.7 miliardi di anni fa l'universo si è creato nel Big Bang

History of the Universe

Nei primi istanti di vita dell'universo i quark ed i gluoni erano allo stato libero



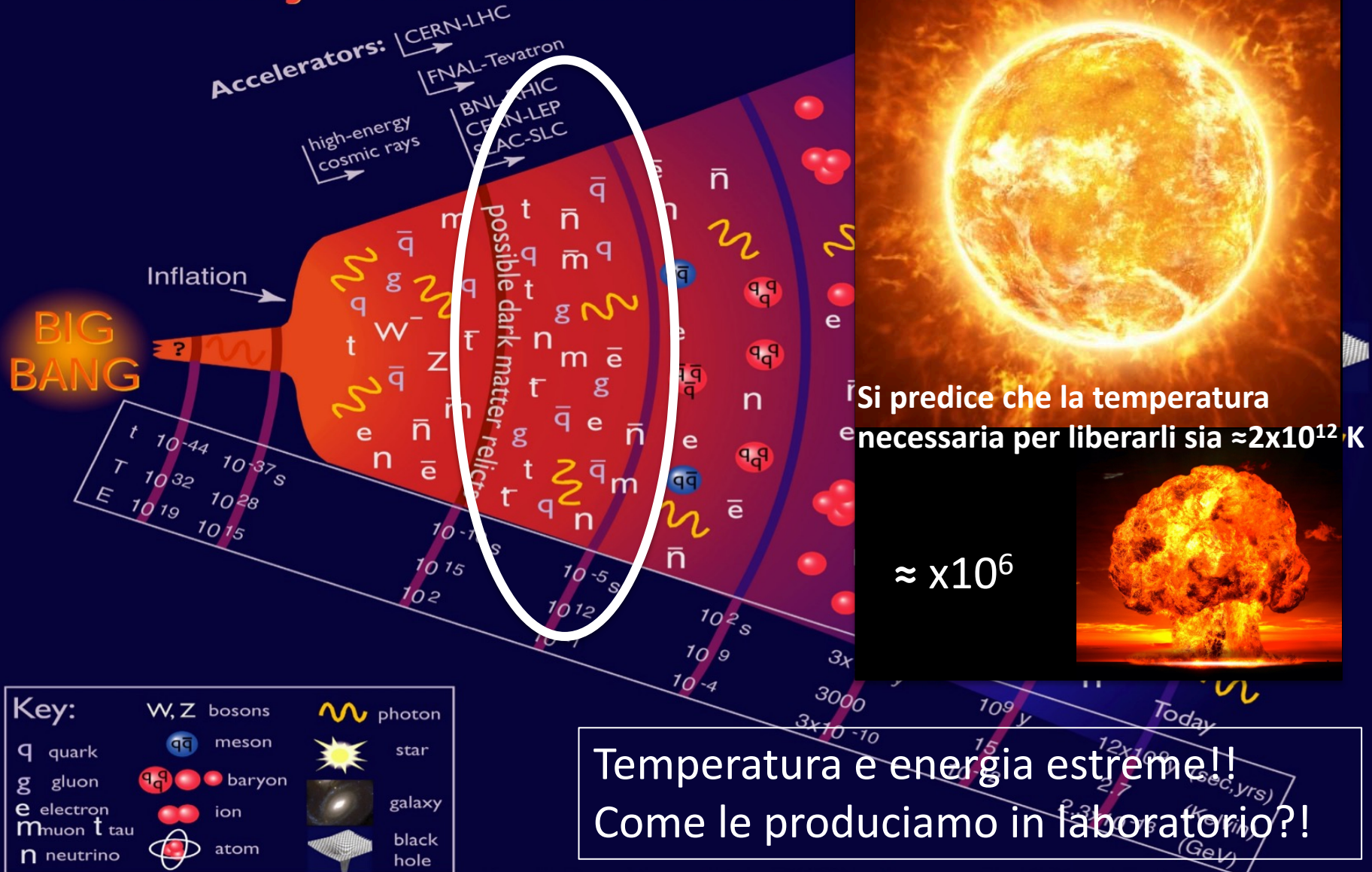
Quando l'universo si è raffreddato si sono confinati e da allora sono rimasti imprigionati.....

Key:

W, Z bosons	meson	photon
quark	baryon	star
gluon	ion	galaxy
electron	atom	black hole
muon		
tau		
neutrino		

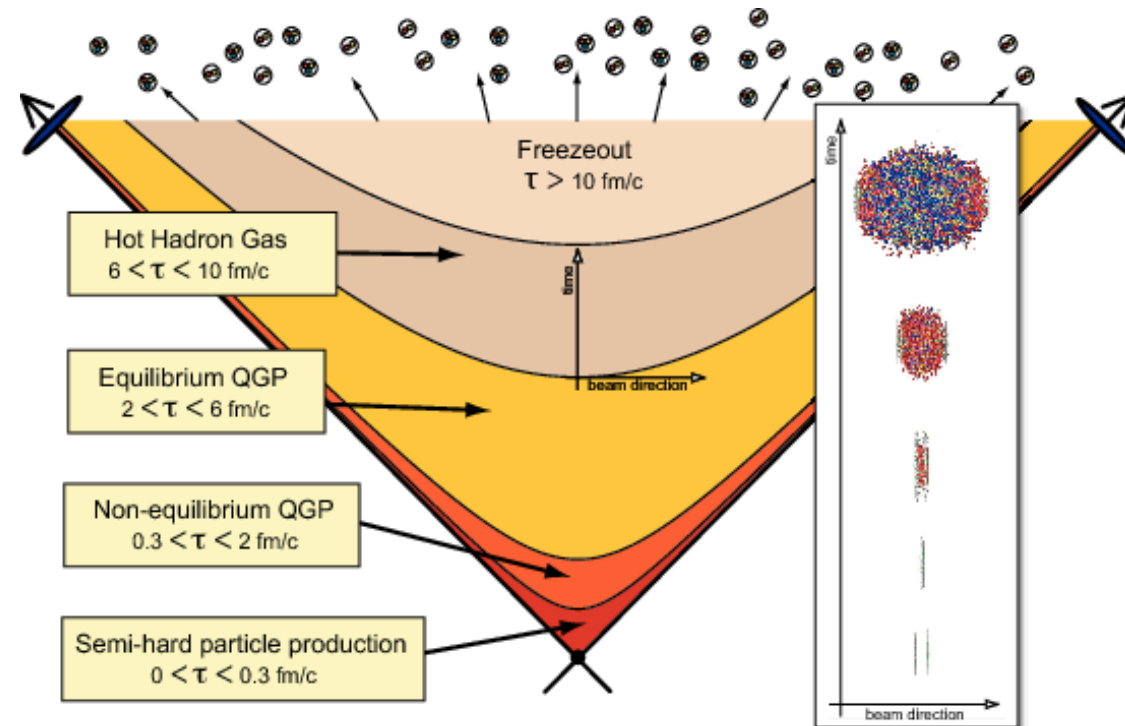
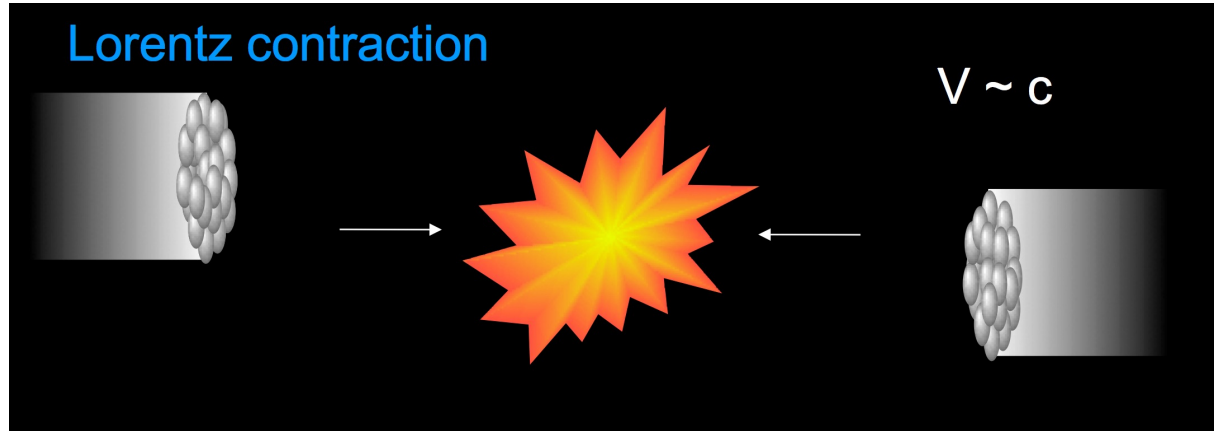
13.7 miliardi di anni fa l'universo si è creato nel Big Bang

History of the Universe

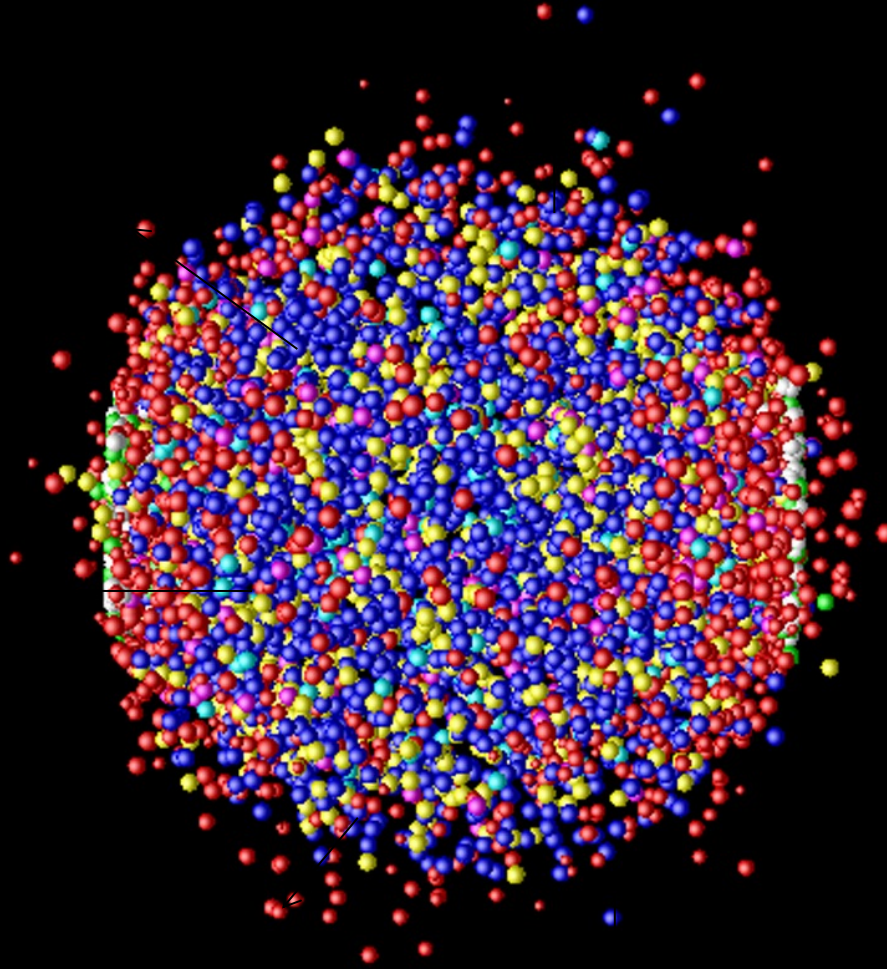


Come “fondiamo” la materia nucleare in laboratorio?!

Collisioni di nuclei pesanti relativistici



L'esperimento ALICE: Il mini Big Bang!



1. Gli ioni di piombo (materia ordinaria) accelerati sono fatti collidere tra loro

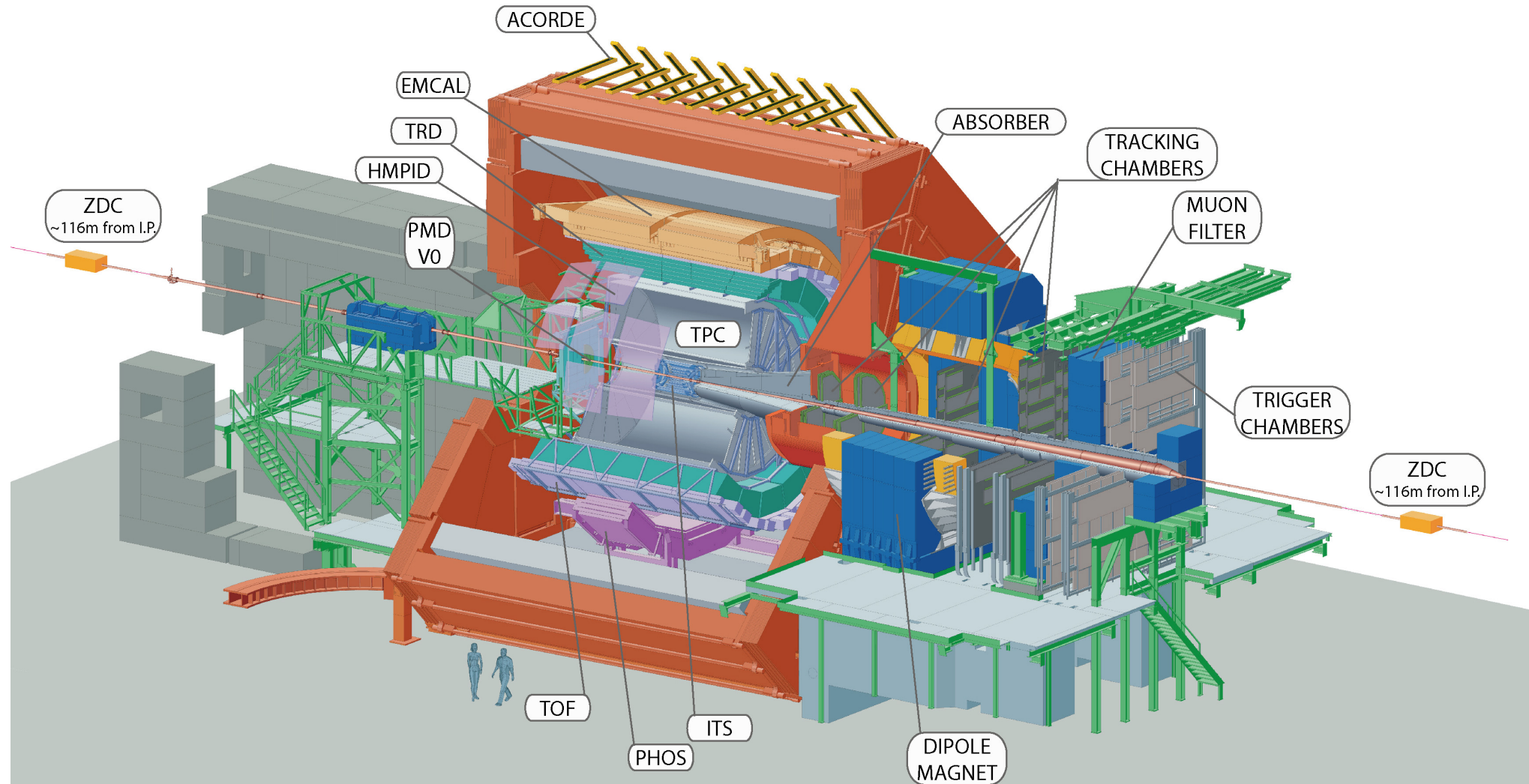
2. L'energia di collisione si materializza in quark e gluoni.

3. I quark e gluoni de-confinati risentono dell'interazione forte: questo è il QGP! La zuppa si muove poi verso l'equilibrio.

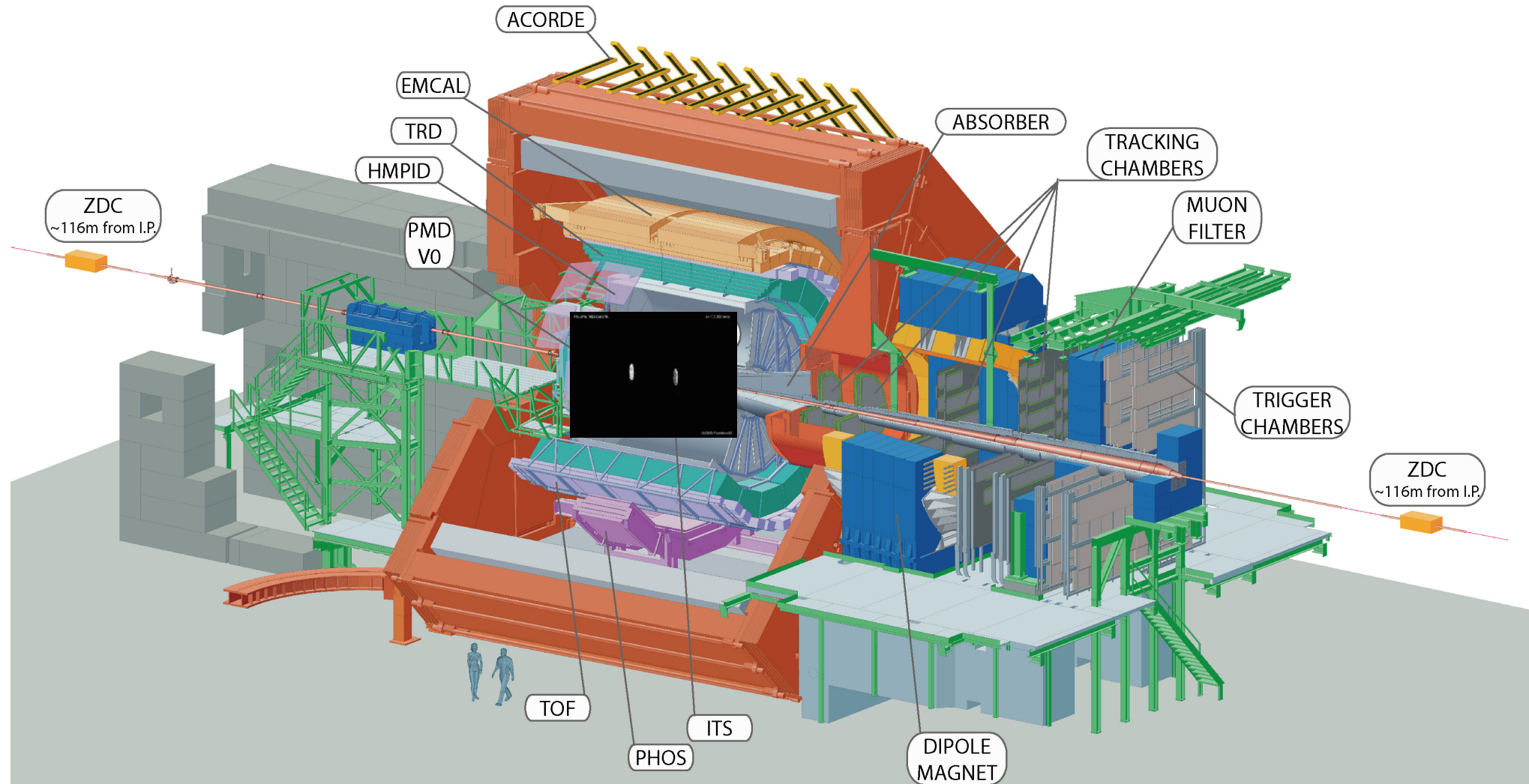
4. Il plasma si diluisce e si raffredda.

5. Quark e gluoni condensano per formare adroni, tra cui anche i protoni: la materia ordinaria!

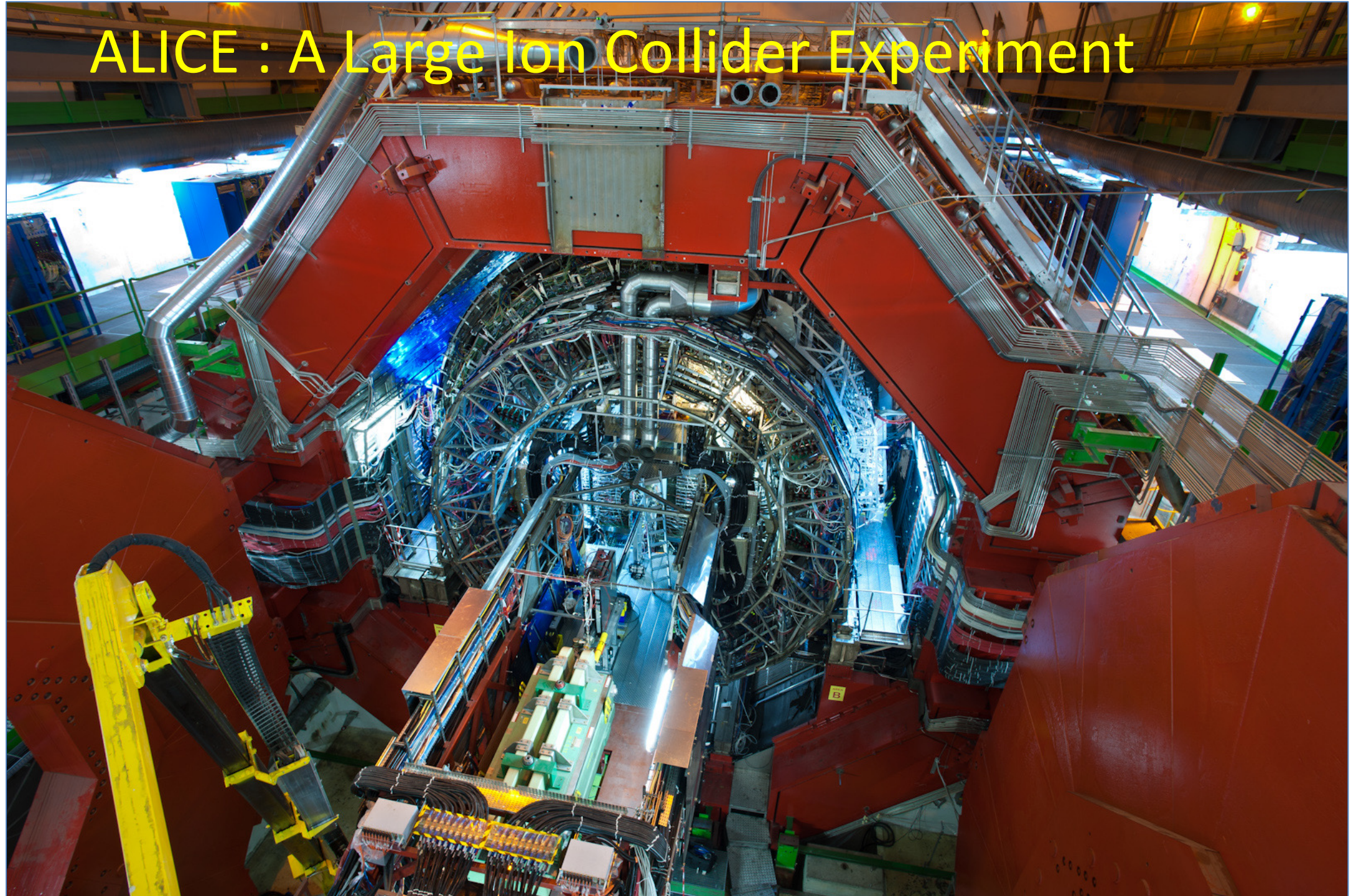
ALICE setup



ALICE setup



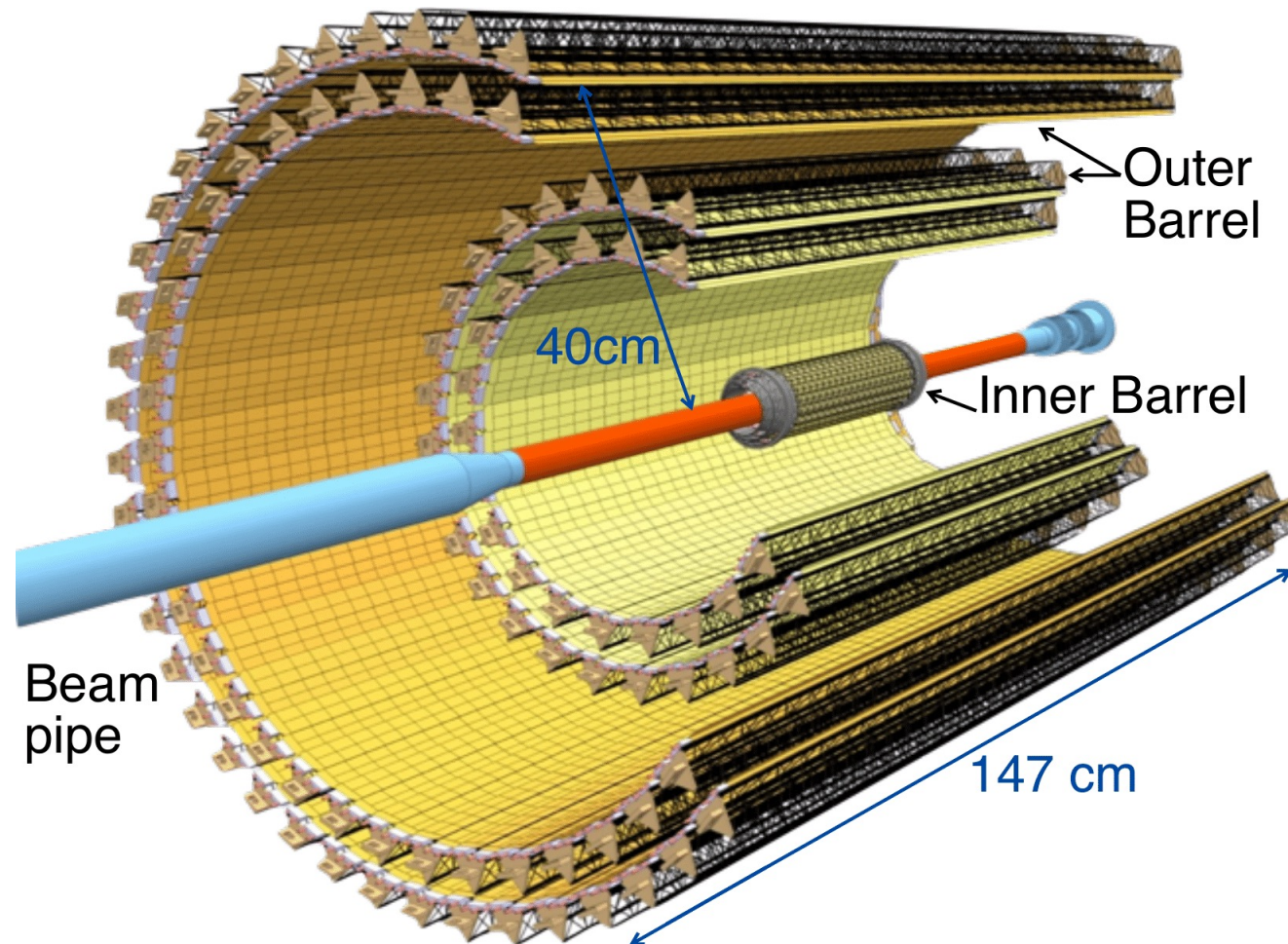
ALICE : A Large Ion Collider Experiment



Tracciatore interno (ITS)

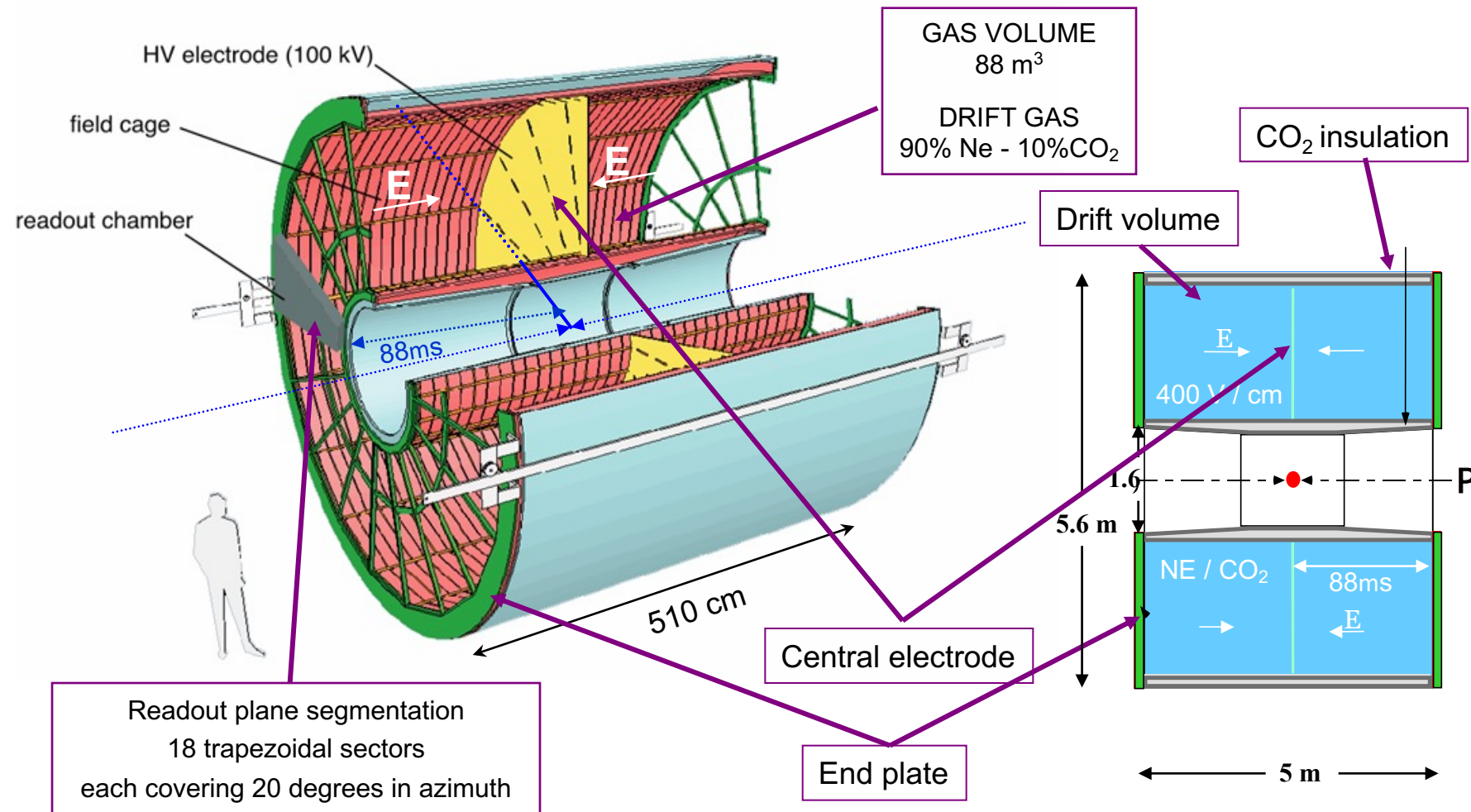
Tracciatore

Sette strati di *Monolithic Active Pixel Sensors*

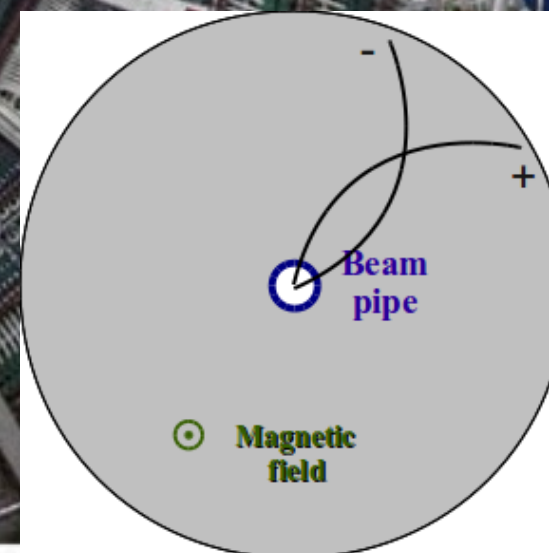
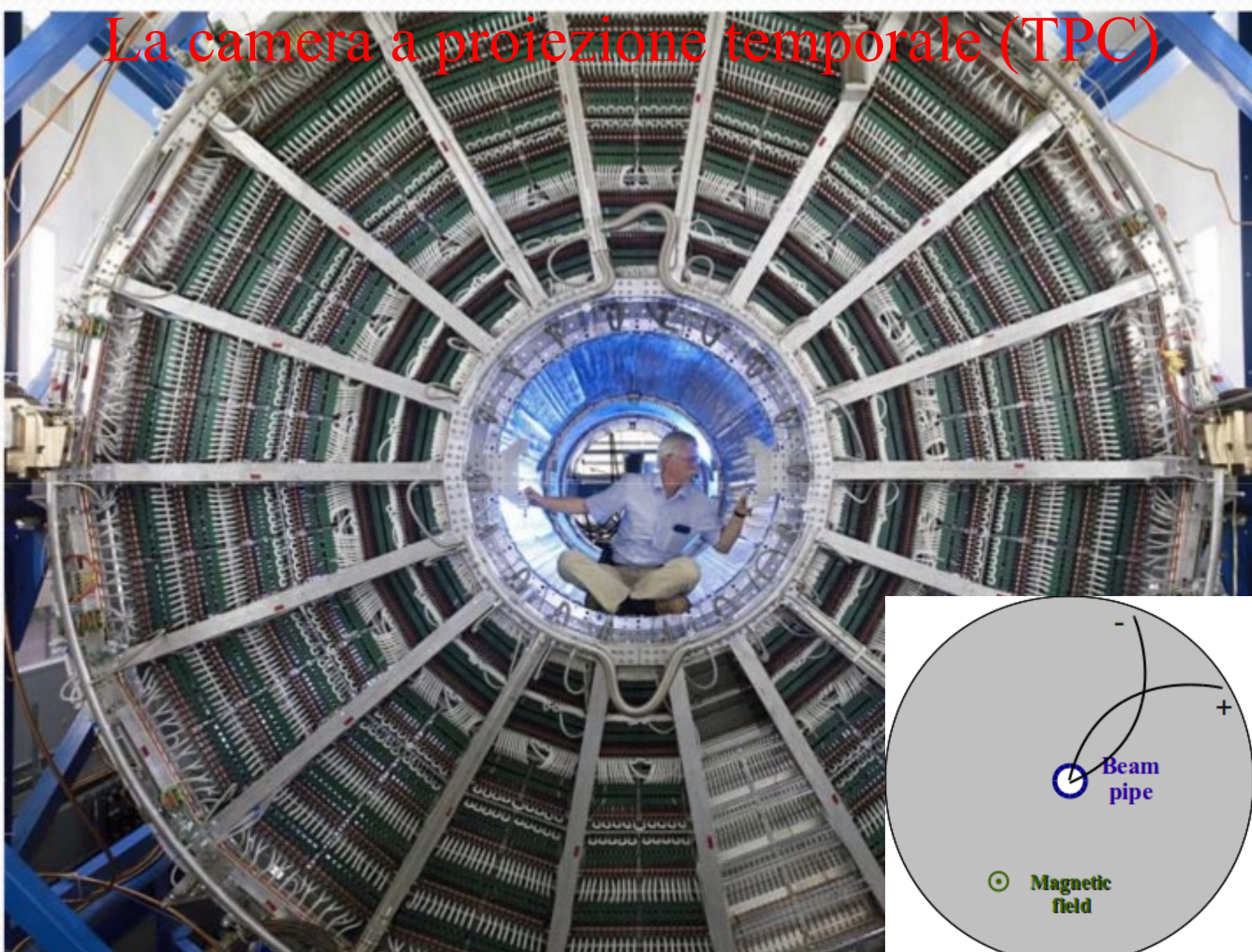


La camera a proiezione temporale (TPC)

Tracciatore/PID

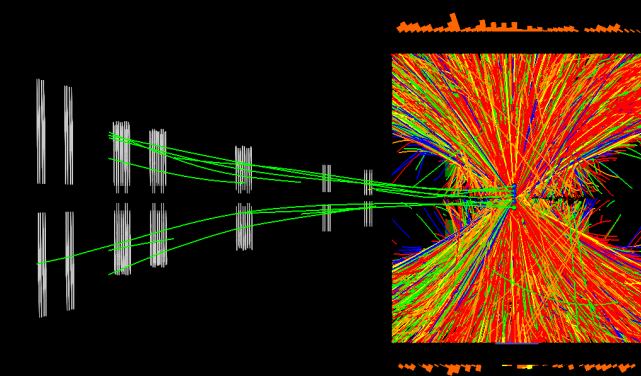
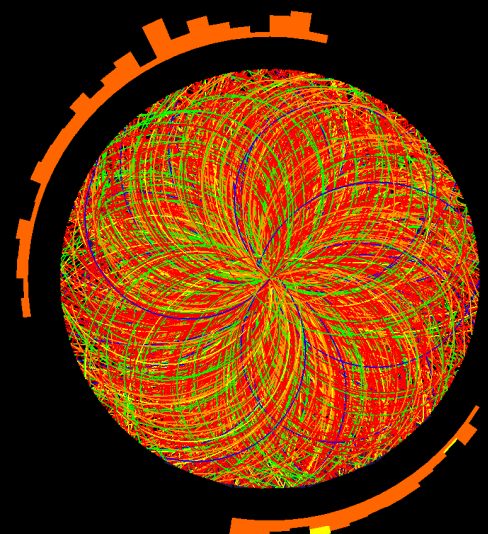
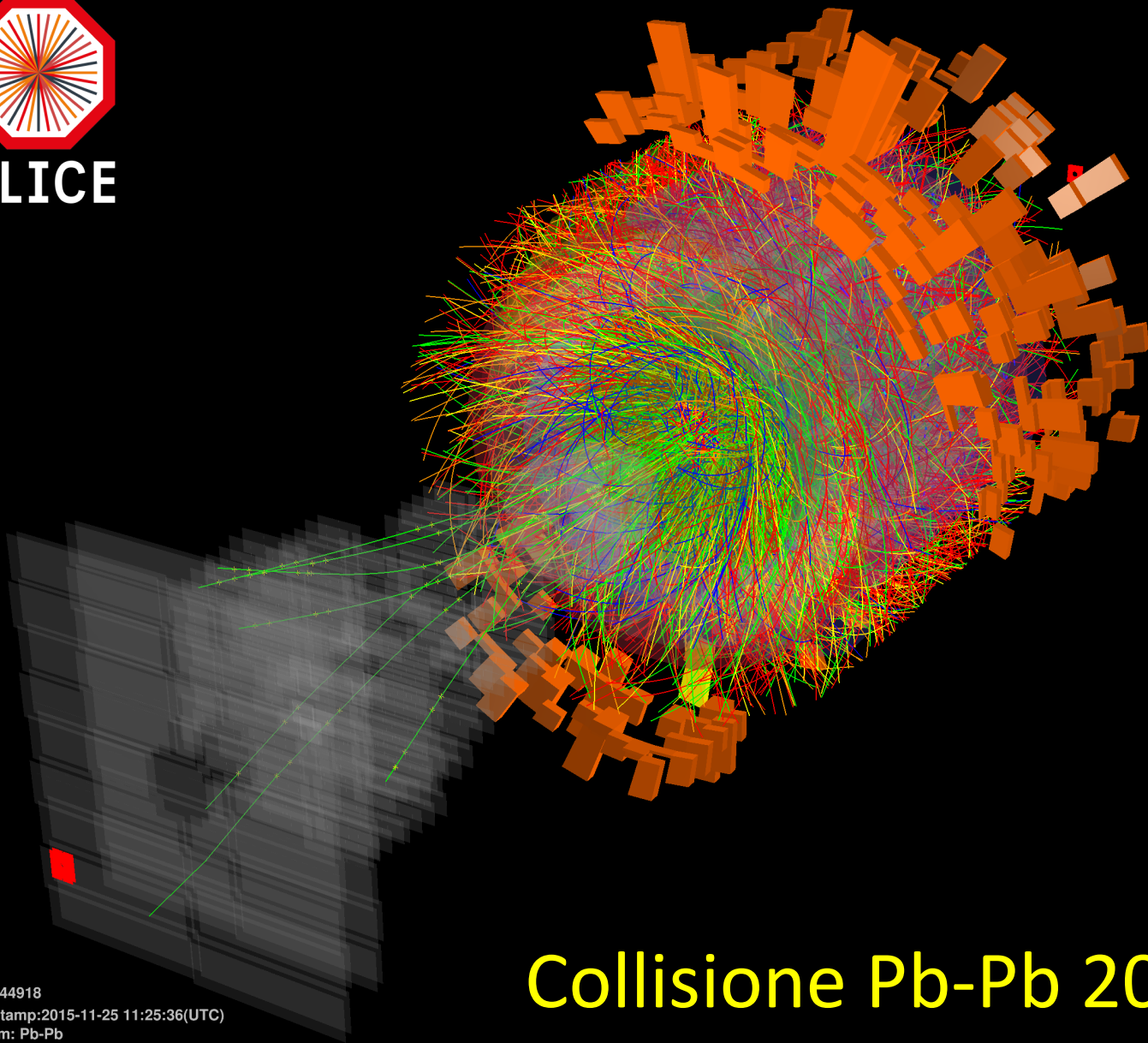


La camera a proiezione temporale (TPC)





ALICE



Run:244918
Timestamp:2015-11-25 11:25:36(UTC)
System: Pb-Pb
Energy: 5.02 TeV

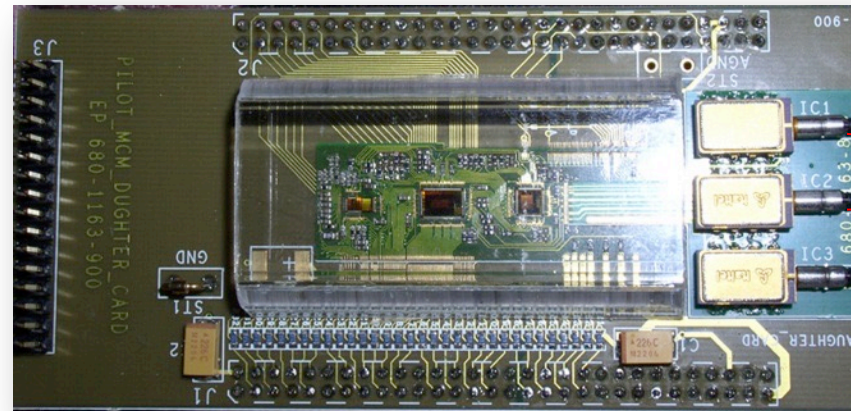
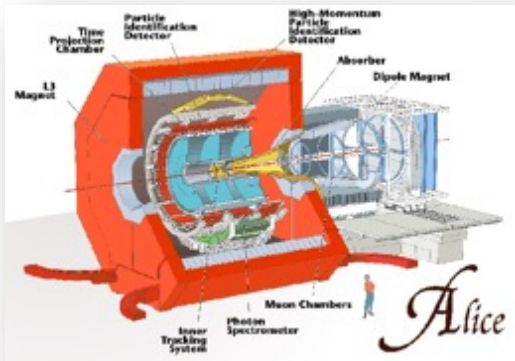
Collisione Pb-Pb 2015

L'esperimento ALICE

- Migliaia di particelle attraversano il rivelatore per ogni collisione;
- Tracciare ogni particella, identificandola una per una, misurandone la quantità di moto, la carica elettrica e la massa;
- Localizzare il punto di origine delle tracce con la precisione del centinaio di micron (milionesimo di metro);
- Archiviare dati con una velocità di 1.2 GB/s (2 CD/s), che significa 1 PB/anno (1PB $\approx 10^{15}$ byte);
- Dare accesso ai dati per eseguirne l'analisi ai circa 1000 fisici sparsi in tutto il mondo.

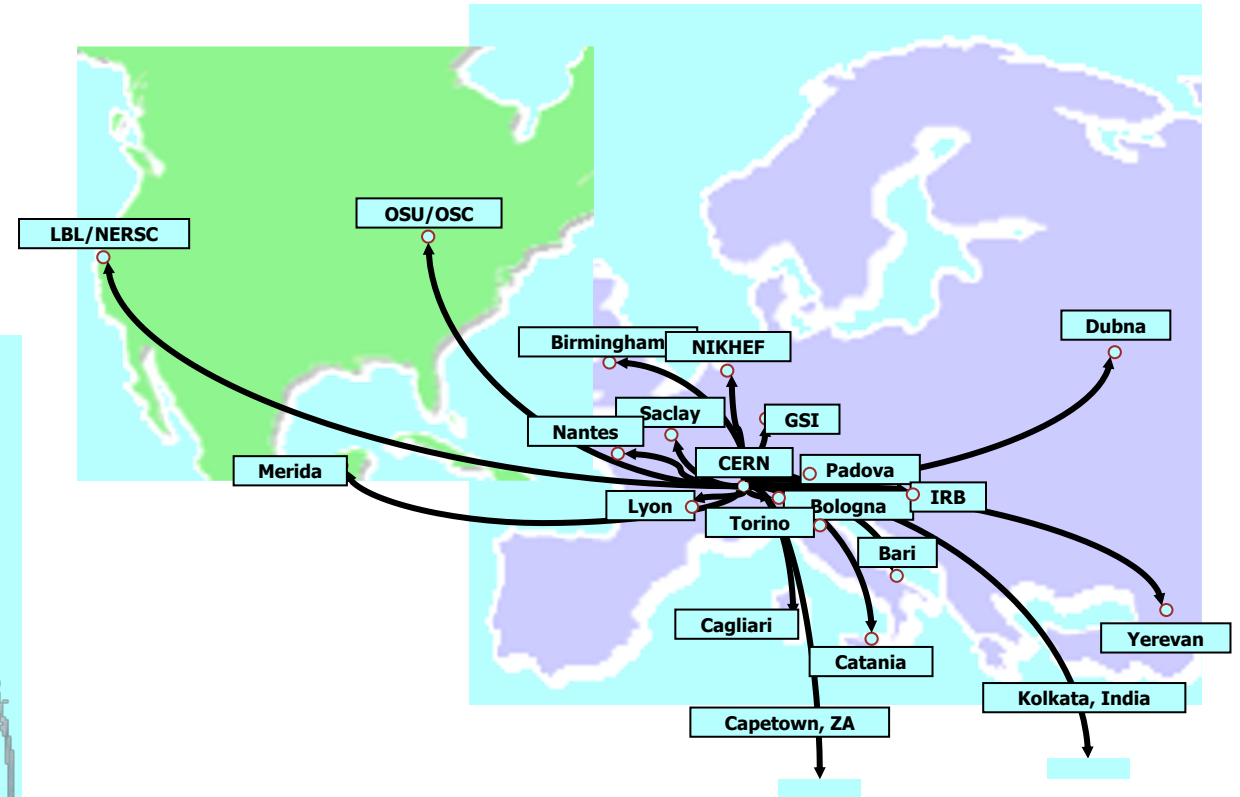
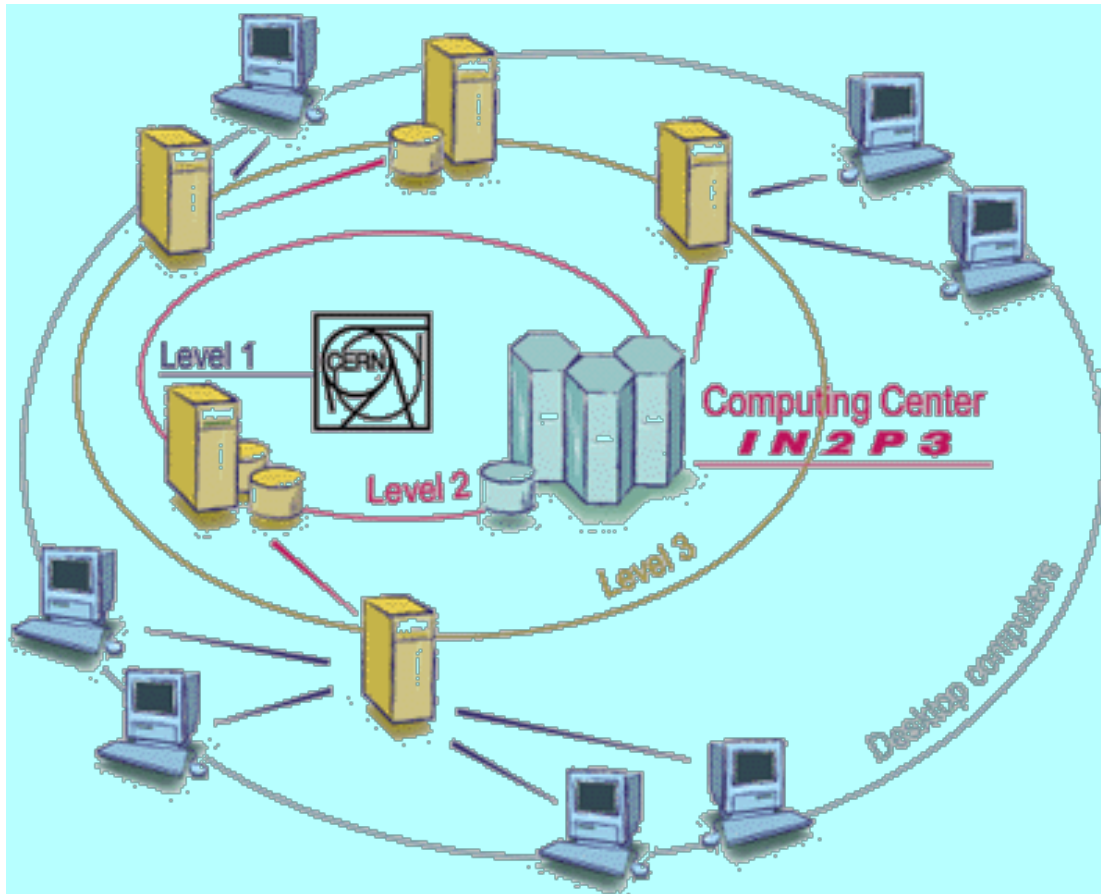
Processamento dei segnali

- Il segnale proveniente da ognuno dei canali di rivelazione (~ 16 milioni) è processato dall'elettronica specializzata (elettronica di Front-End)
- Questi segnali elettrici sono digitalizzati (elettronica di Read-Out) e mandati ai computer.
- Le informazioni sono trasferite su fibra ottica e registrate.



Analisi dati - GRID

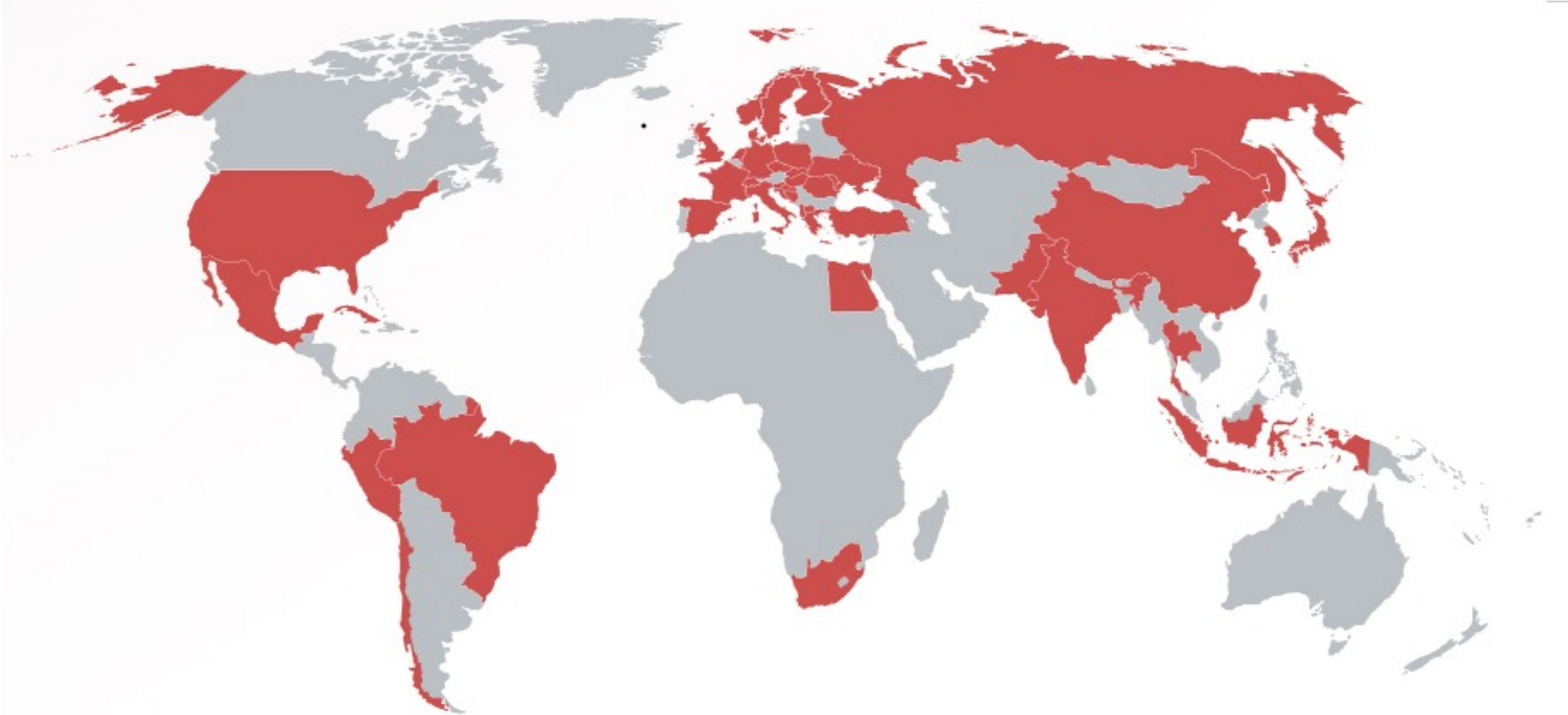
Migliaia di computer nei centri di calcolo sparsi in tutto il mondo sono connessi alla **GRIGLIA (GRID)**. Essi condividono sia la loro capacità di spazio disco sia la potenza di calcolo.



La sala di controllo



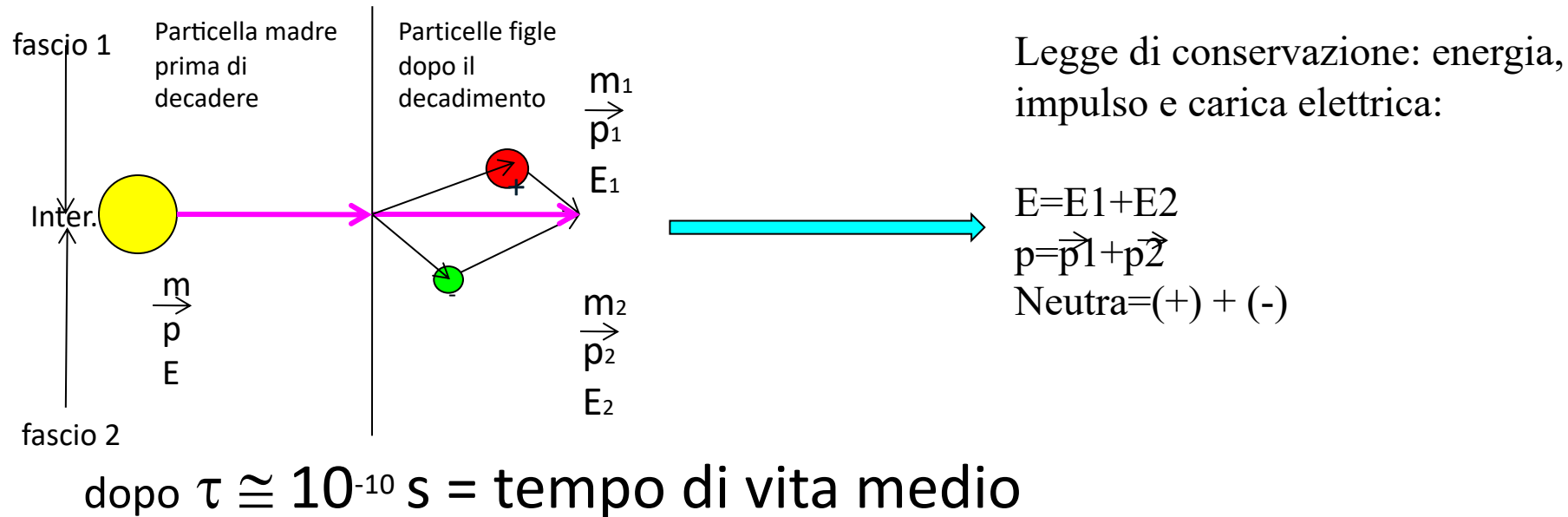
La collaborazione ALICE



37 nazioni, 131 Istituti, più di 1500 membri

Particelle strane

Le particelle strane rappresentano storicamente uno dei primi osservabili nell'ambito della fisica dei nuclei pesanti e per lo studio del QGP. Le particelle strane hanno un tempo di vita molto breve. Dopo il loro decadimento, studiando le particelle figlie, è possibile identificare le particelle madri.



$$\text{Massa invariante: } m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 * E_2) - 2(\vec{p}_1 * \vec{p}_2)$$

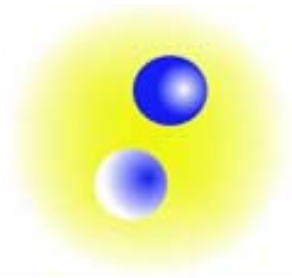
Se i valori di massa, energia ad impulso usati sono quelli di due particelle figlie di una data particella madre, il valore della massa invariante è proprio la massa della particella madre!!

Particelle strane

Particelle (adroni: barioni o mesoni) che contengono un quark strano.

$\pi(u\bar{u})$

$K(d\bar{s})$



$p(uud)$

$n(udd)$

$\Lambda(uds)$



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

$\tau = 0.89 \times 10^{-10} \text{ s}$

2.67 cm dal punto di interazione

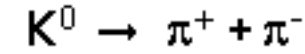
$\Lambda(\text{anti}\Lambda) \rightarrow \pi^-p^+ (\pi^+p^-)$

$\tau = 2.6 \times 10^{-10} \text{ s}$

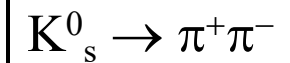
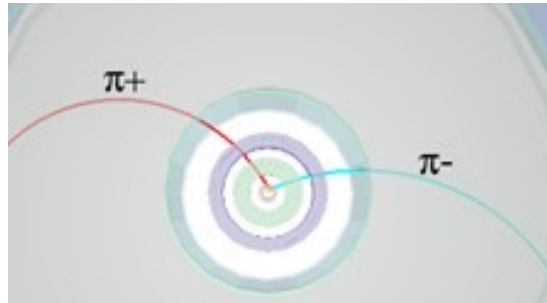
7.2 cm dal punto di interazione

Particelle strane: decadimento delle V0

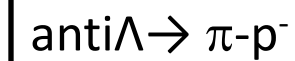
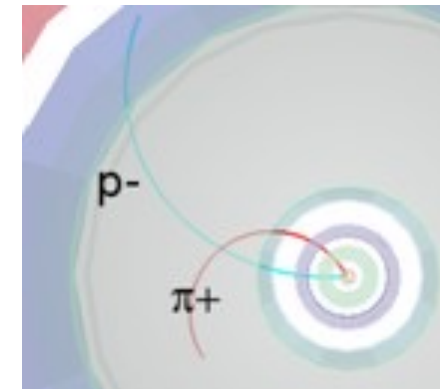
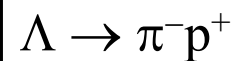
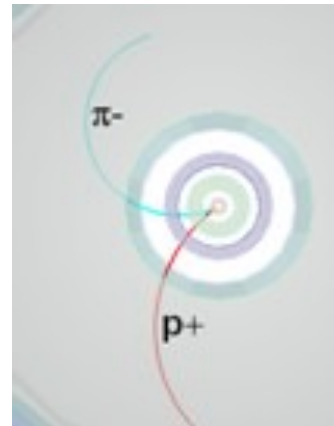
- Una particella neutra (senza traccia) decade in due particelle cariche.
- In presenza di campo magnetico, le due particelle di carica opposta, si muoveranno in direzioni opposte.



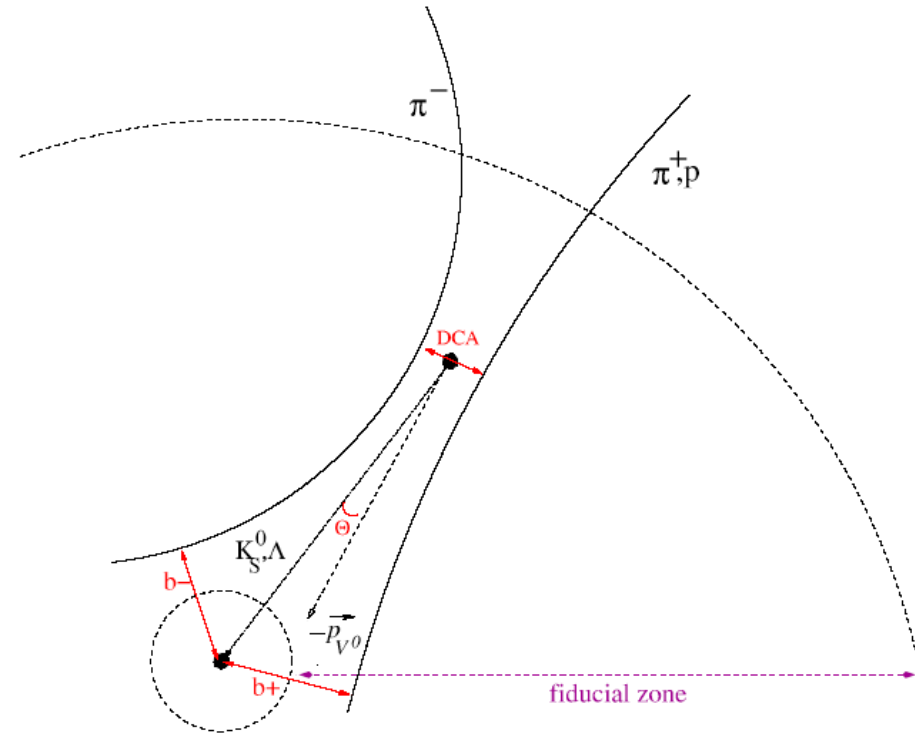
simmetrico



asimmetrico



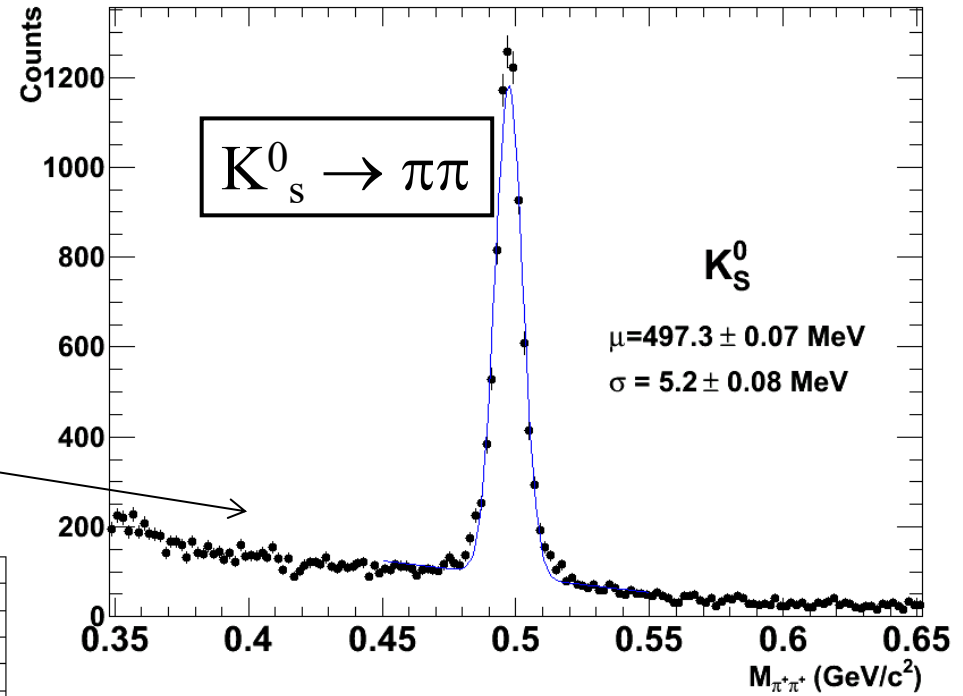
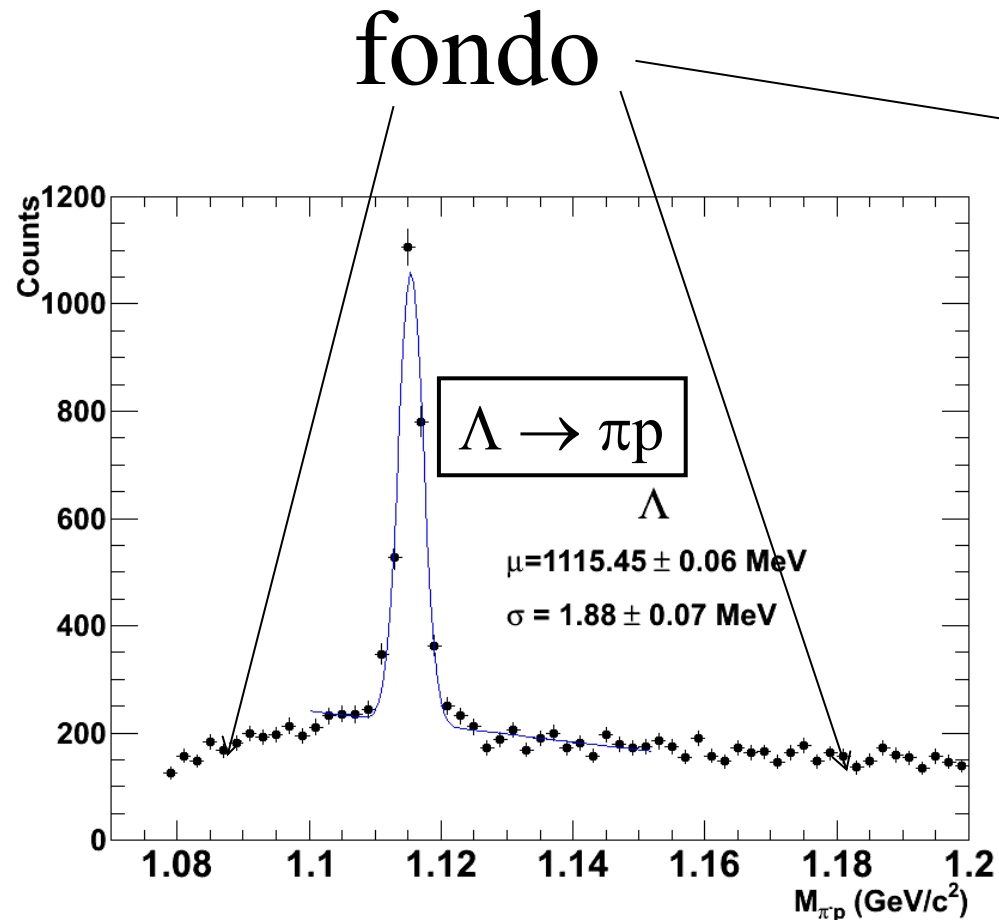
Come troviamo le V_0 ?!



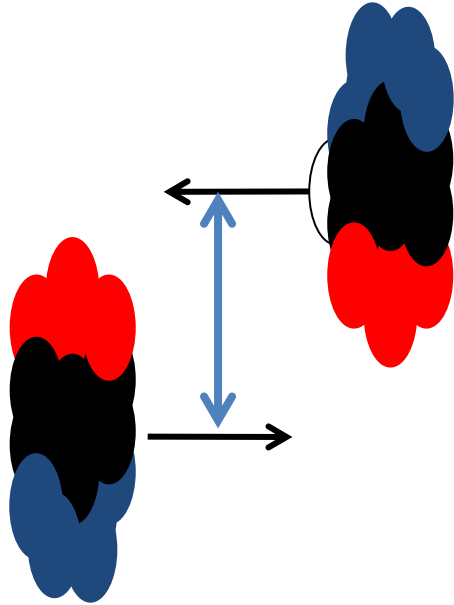
Cerchiamo due tracce che si muovono in direzione opposta, che hanno la stessa origine, che non sia il punto di interazione (collisione).

Distribuzione di massa invariante

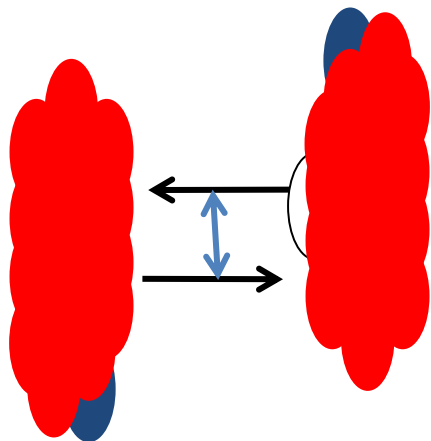
Eventi reali!!!



Geometry of a Pb-Pb collision



- Collisione periferica
 - Grande **distanza** tra i centri dei nuclei
 - Piccolo numero di nucleoni **partecipanti**
 - Poche particelle cariche prodotte (bassa molteplicità)

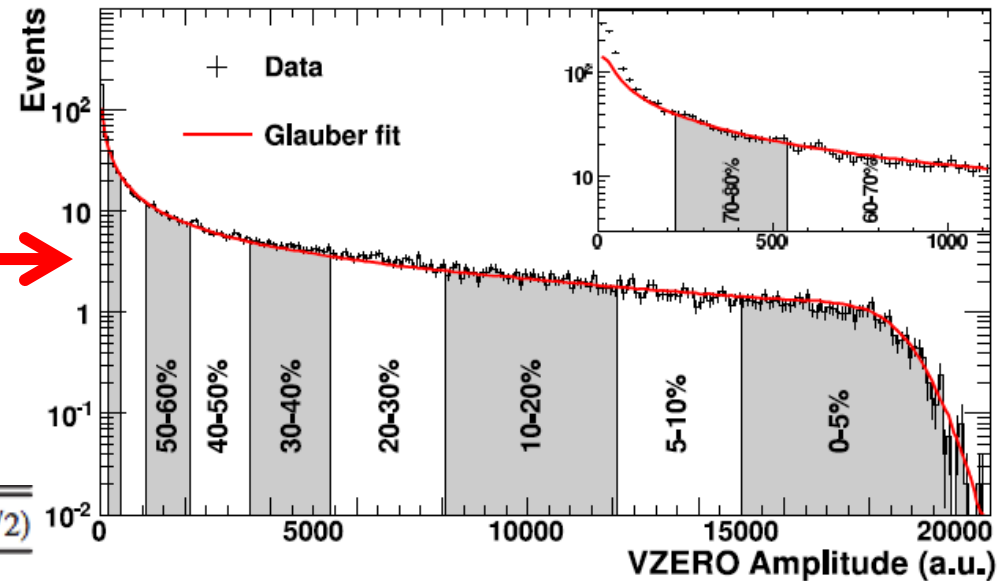


- Collisione centrale
 - Piccola **distanza** tra i centri dei nuclei
 - Alto numero di nucleoni **partecipanti**
 - Molte particelle cariche prodotte (alta molteplicità)

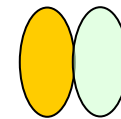
Centralità delle collisioni Pb-Pb

Distribuzione dell'ampiezza di segnale del rivelatore V0 (scintillatore plastico)

linea rossa: descritta dal modello (Glauber)



Centrality	$dN_{ch}/d\eta$	$\langle N_{part} \rangle$	$(dN_{ch}/d\eta)/(\langle N_{part} \rangle/2)$
0%–5%	1601 ± 60	382.8 ± 3.1	8.4 ± 0.3
5%–10%	1294 ± 49	329.7 ± 4.6	7.9 ± 0.3
10%–20%	966 ± 37	260.5 ± 4.4	7.4 ± 0.3
20%–30%	649 ± 23	186.4 ± 3.9	7.0 ± 0.3
30%–40%	426 ± 15	128.9 ± 3.3	6.6 ± 0.3
40%–50%	261 ± 9	85.0 ± 2.6	6.1 ± 0.3
50%–60%	149 ± 6	52.8 ± 2.0	5.7 ± 0.3
60%–70%	76 ± 4	30.0 ± 1.3	5.1 ± 0.3
70%–80%	35 ± 2	15.8 ± 0.6	4.4 ± 0.4



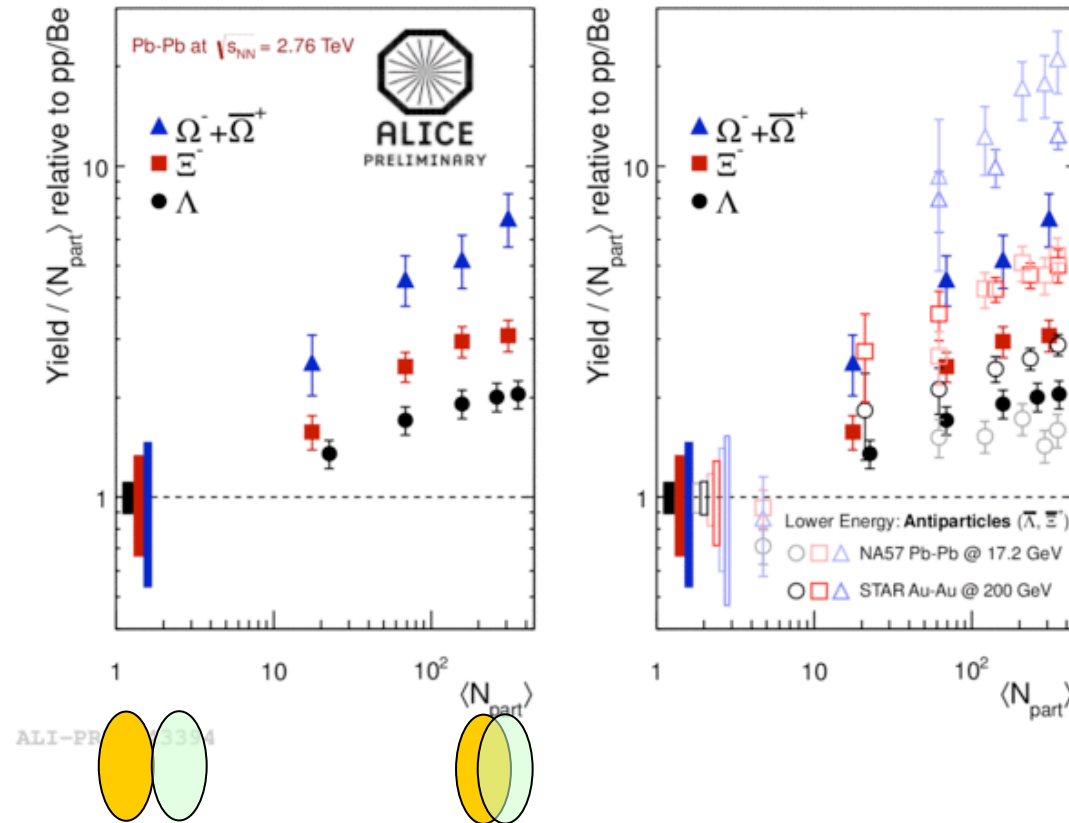
periferica



centrale

Aumento della stranezza

Uno dei primi segnali del QGP!!



La produzione della particelle strane nelle collisioni Pb-Pb è maggiore rispetto a quella delle collisioni pp. L'incremento è maggiore se aumenta il contenuto dei quark strani nell'adrone (Ω ne ha 3, Ξ ne ha 2, Λ 1).

Facciamo l'esercizio!!

backup

Il primo **computer** compare al CERN nel **1959**

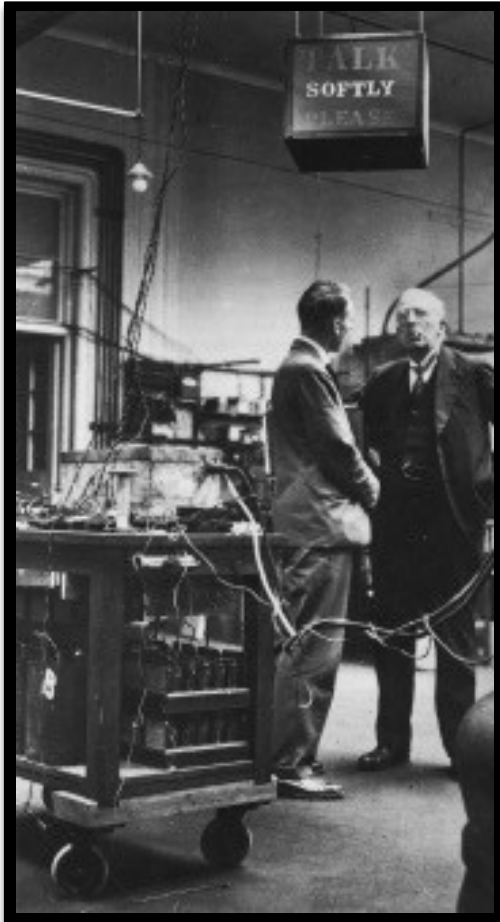
Da allora l'uso dei calcolatori diventa fondamentale

Ma bisogna **mettere in comune le informazioni**:

*Al CERN nasce il **Web!***

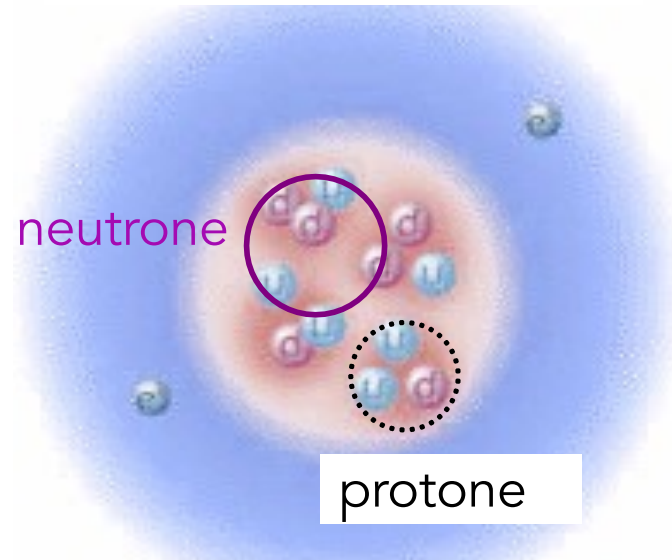
Ernest Rutherford (Brightwater, 1871 – Cambridge, 1937)

gli atomi hanno una struttura

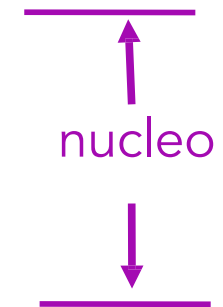


atomo:

1 Angstrom = 10^{-10} m



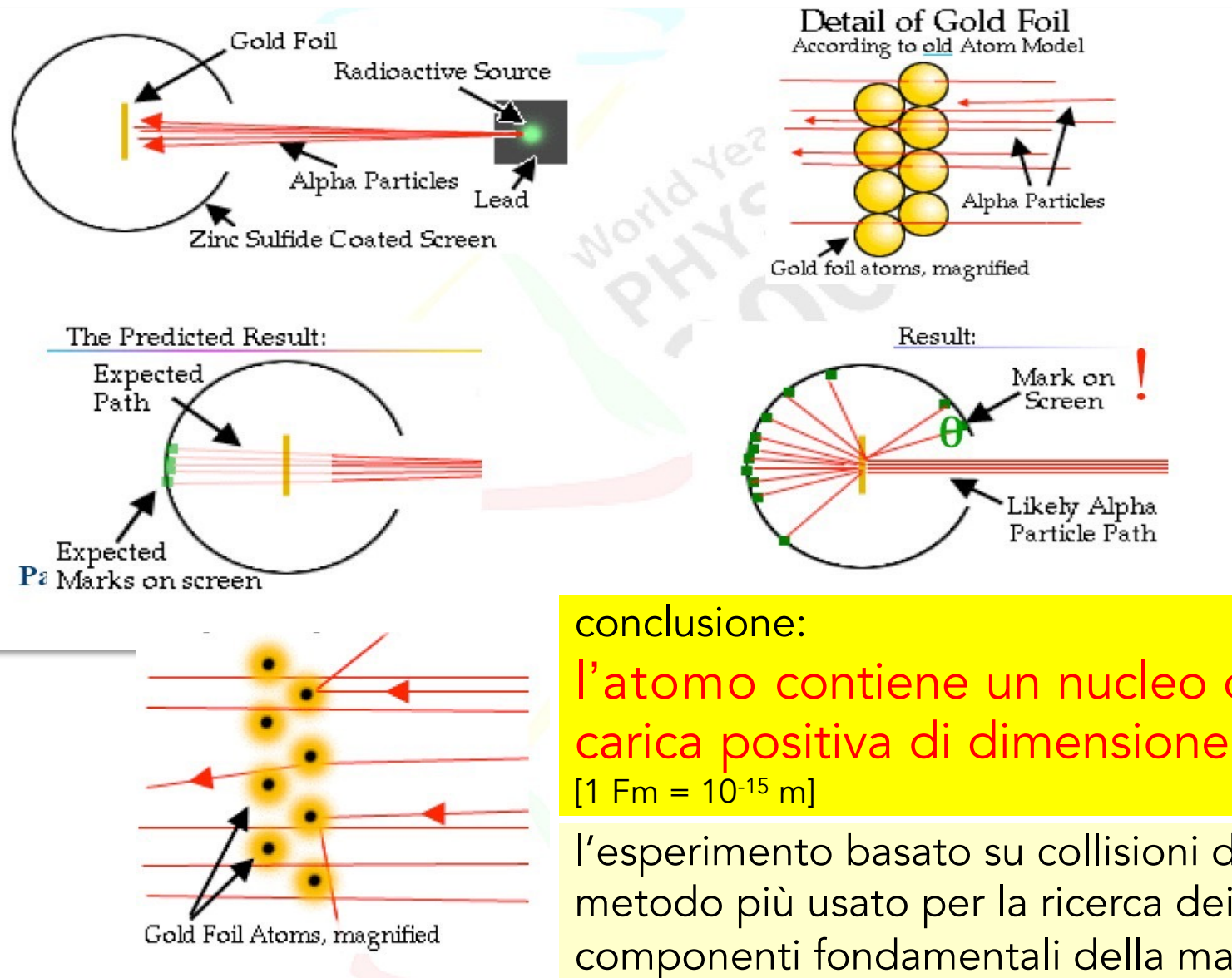
1 Fermi = 10^{-15} m



10 Fermi = 10^{-14} m

gli atomi hanno una struttura

Rutherford



conclusione:

l'atomo contiene un nucleo di carica positiva di dimensione $< 10 \text{ Fm}$

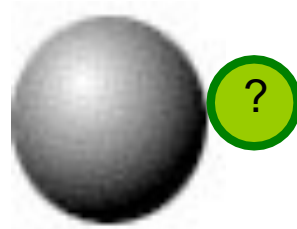
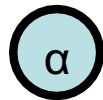
[$1 \text{ Fm} = 10^{-15} \text{ m}$]

l'esperimento basato su collisioni diventa il metodo più usato per la ricerca dei componenti fondamentali della materia

neutrone James Chadwick (1932)

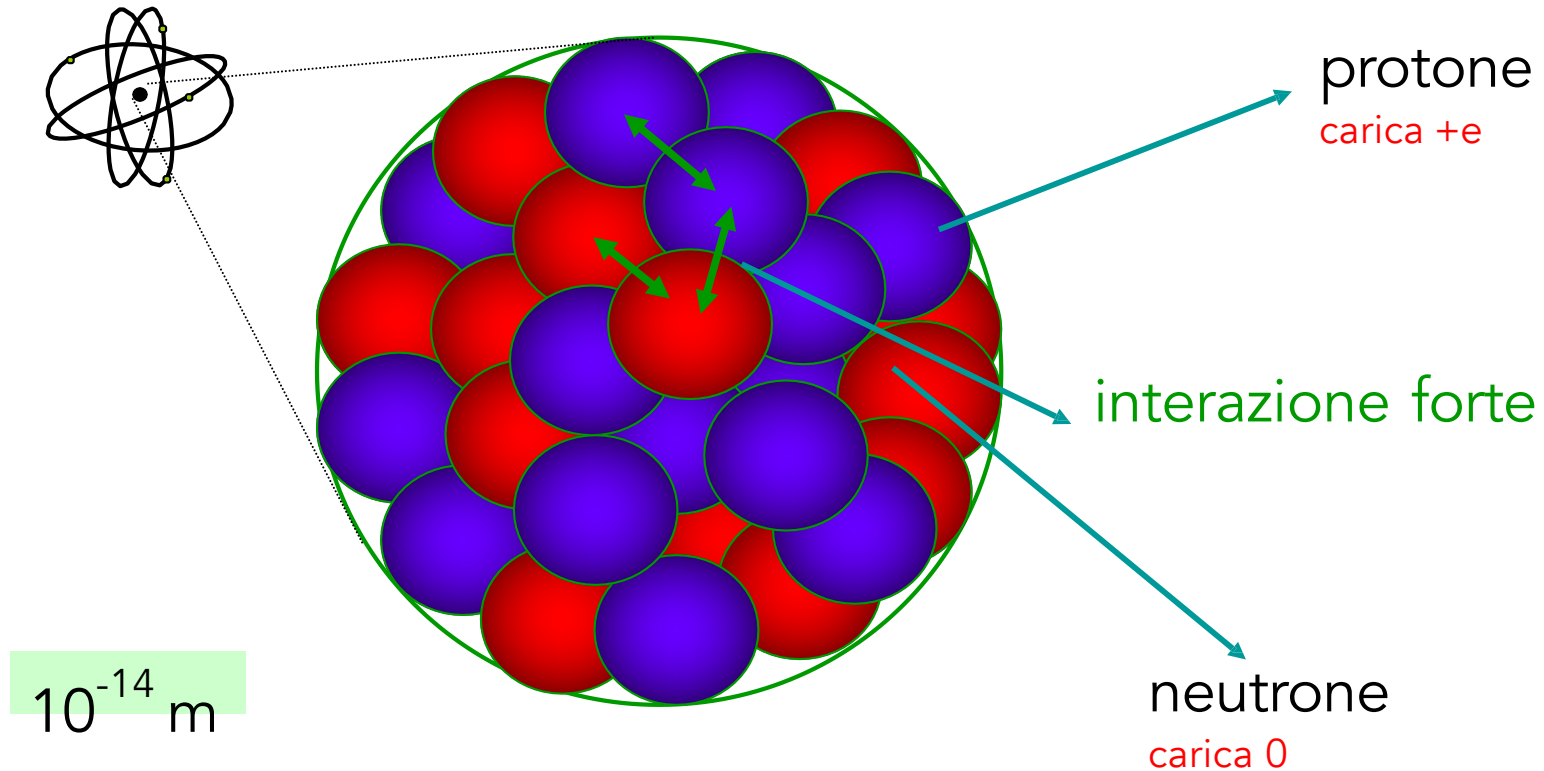
1930 - **Bothe e Becker** bombardano il berillio con particelle alfa: scoprono che dal berillio esce una radiazione neutra molto penetrante. **Frédéric Joliot e Irène Curie** dimostrano che escono delle particelle neutre in grado di espellere i protoni dalla paraffina

1932 - **Chadwick** le identifica come particelle simili ai protoni, ma senza carica elettrica, le chiama "neutroni"



i nuclei sono formati da protoni e neutroni

quindi i nuclei hanno una struttura



l'interazione nucleare «forte» tiene insieme i neutroni e i protoni nel nucleo

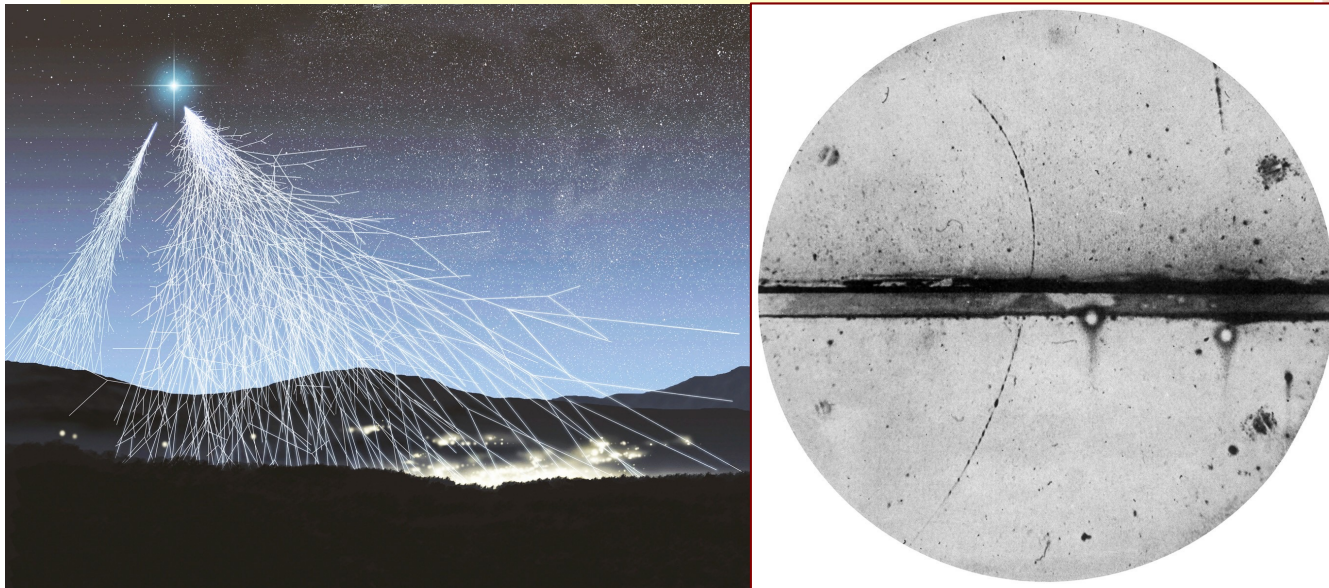
contemporaneamente si scopre l'antimateria

(meccanica quantistica + relatività)

predizione dell'esistenza del positrone (Paul Dirac 1928)

massa del positrone = massa dell'elettrone

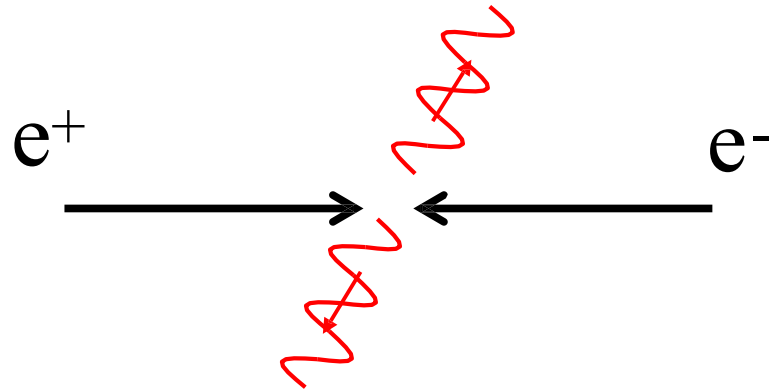
carica del positrone = $+e$ (opposta all'elettrone)



Anderson 1932

osservazione del positrone
(elettrone positivo o antielettrone) nei raggi cosmici

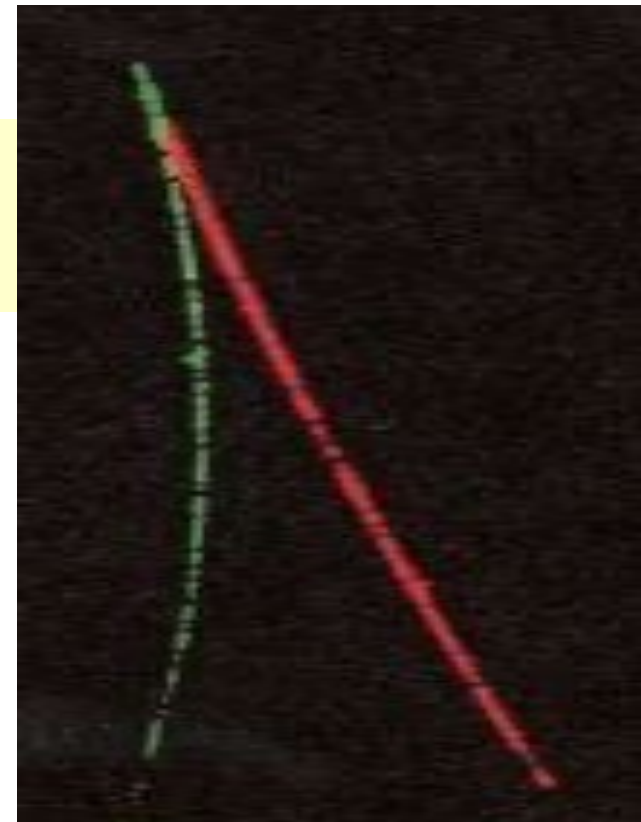
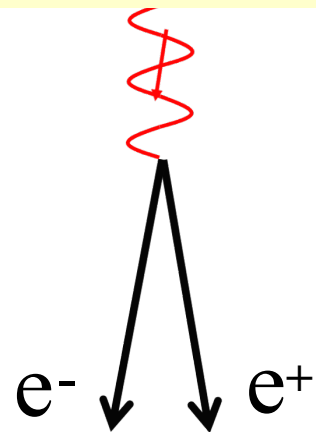
come si evidenzia l'antimateria?



quando una particella e un'antiparticella interagiscono si annichilano producendo energia (luce)

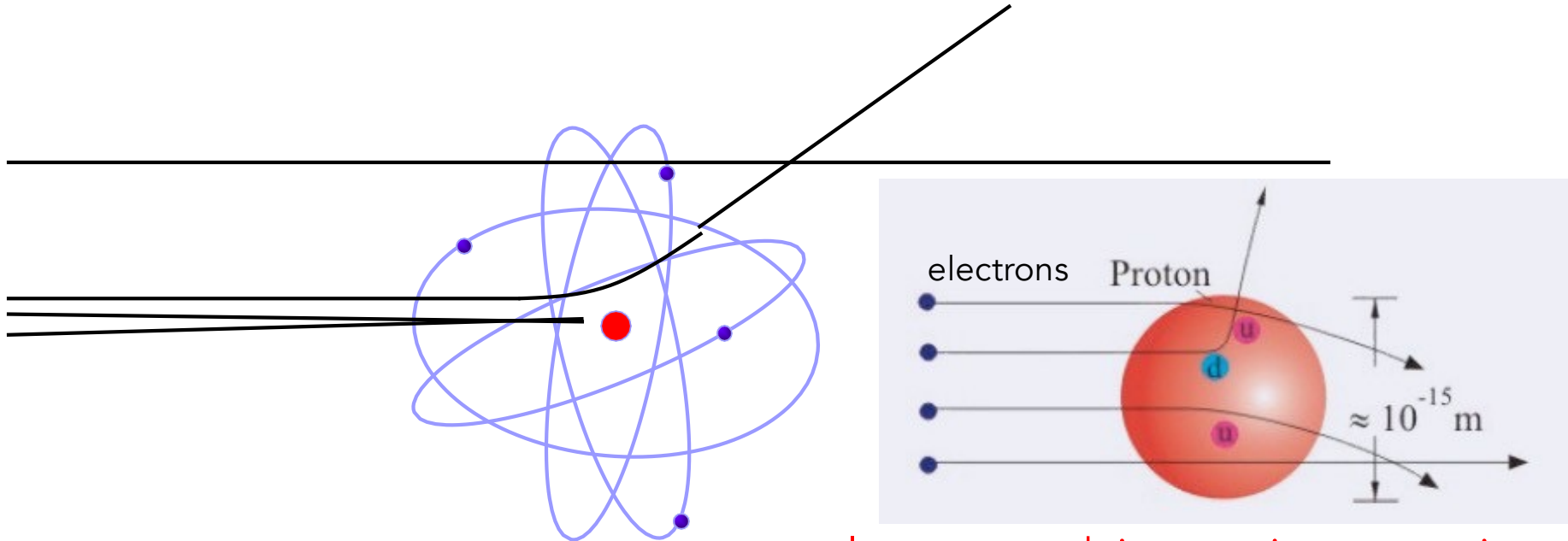
$$E = mc^2$$

processo inverso: un fotone (quanto di luce) può produrre una coppia elettrone – positrone (antielettrone)



anche protoni e neutroni hanno una struttura

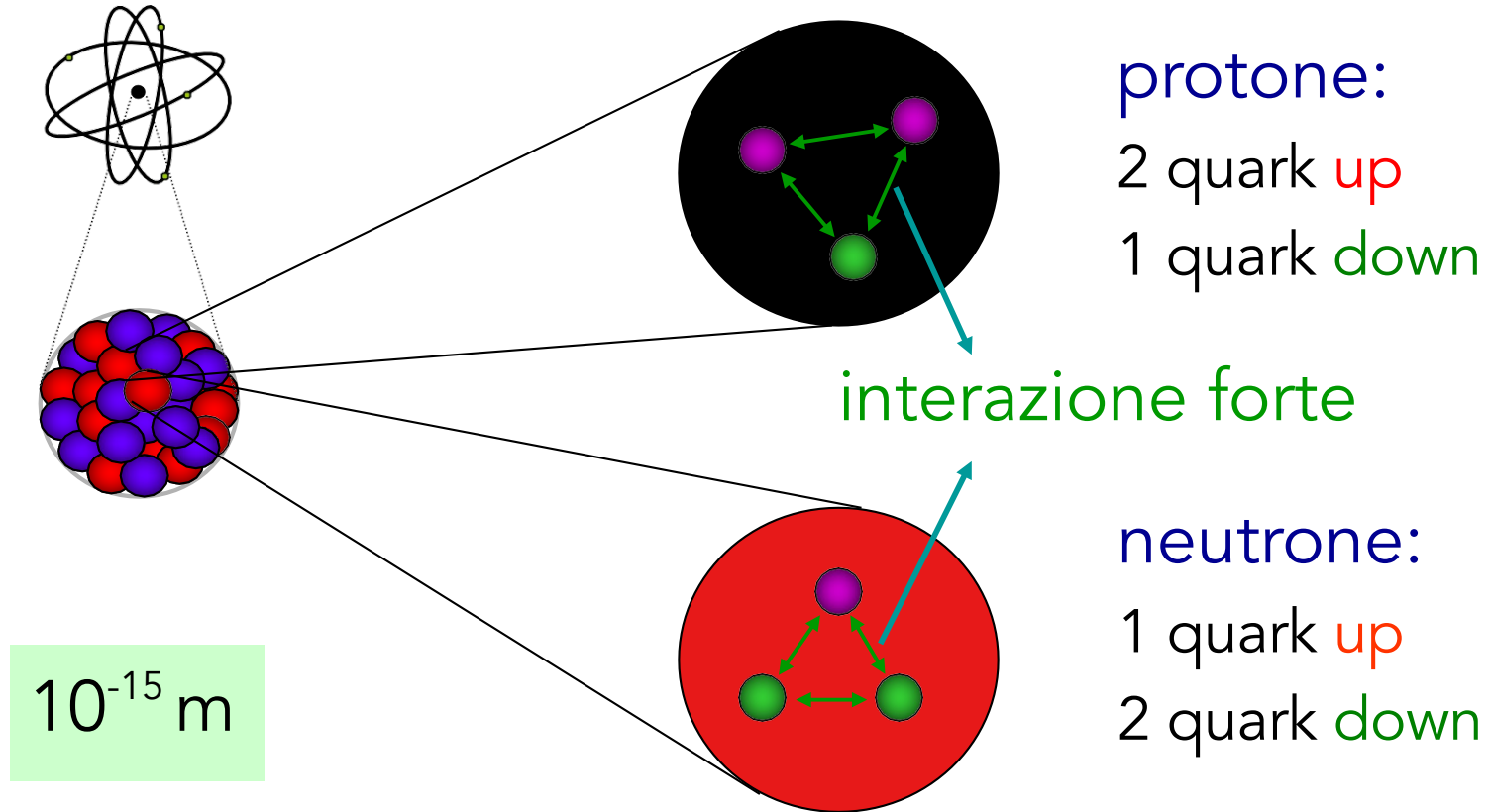
stessa logica dell'esperimento di Rutherford



la struttura dei protoni e neutroni
è stata scoperta usando gli elettroni
come proiettili (1970)

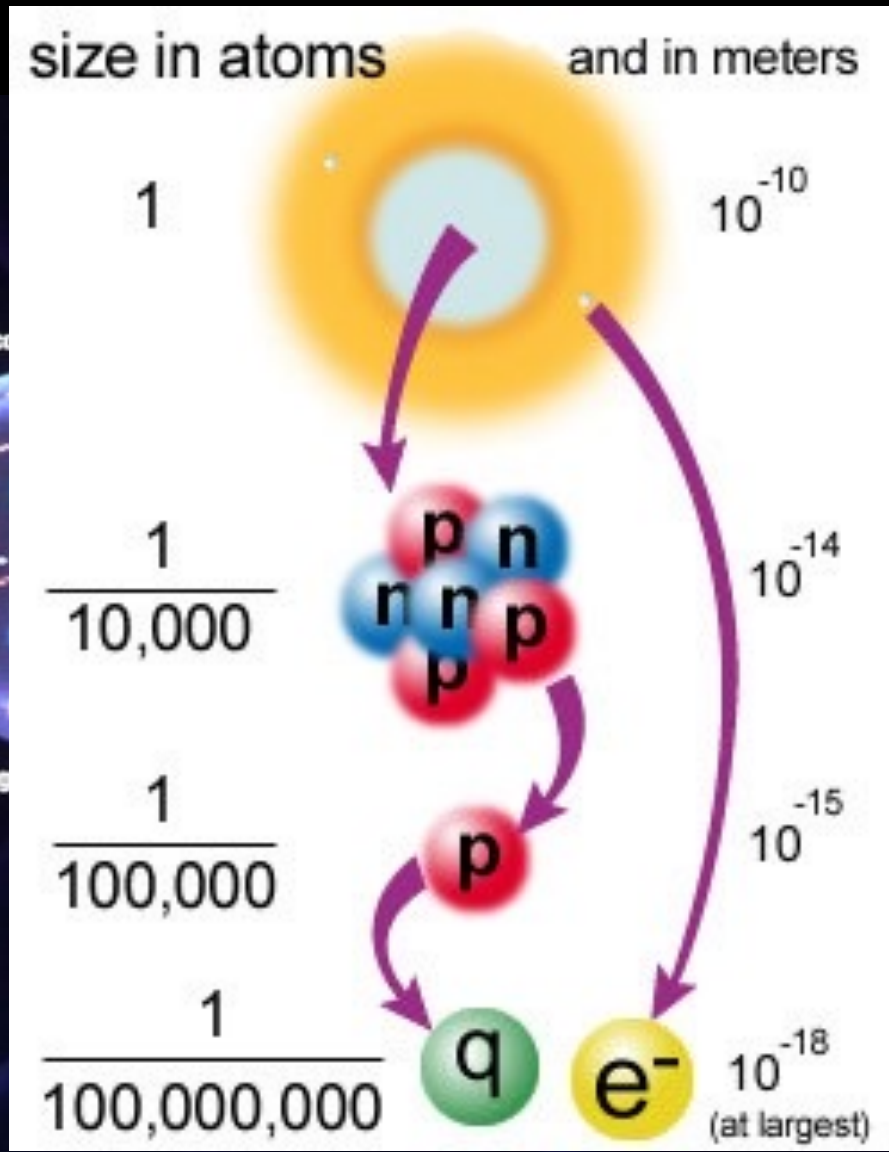
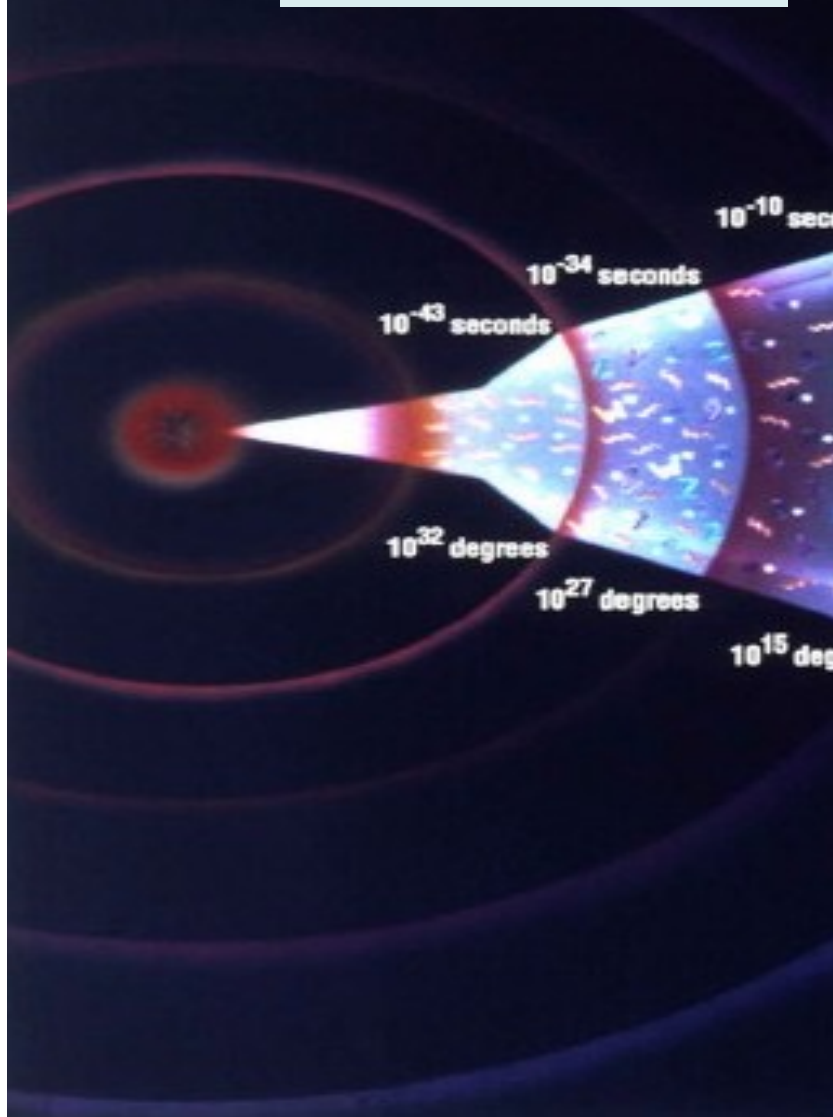
i componenti si chiamano "quark"

struttura dei protoni e dei neutroni



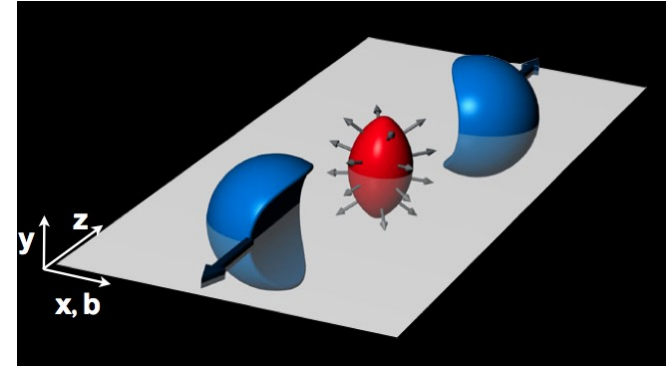
adroni = particelle composte da quark
protoni, neutroni,...

notate le
scale di
lunghezza



A perfect liquid at LHC

- The primordial matter recreated by high energy lead ion collisions at the LHC was initially expected to behave like a gaseous plasma; instead, it appears to behave like a perfect liquid, with coordinated collective motion (“flow”) among the constituent particles.
- This had already been announced by experiments at RHIC.
- The dense matter created by lead collisions flows almost with no friction (like water, which has low viscosity) and not like honey (which has high viscosity)

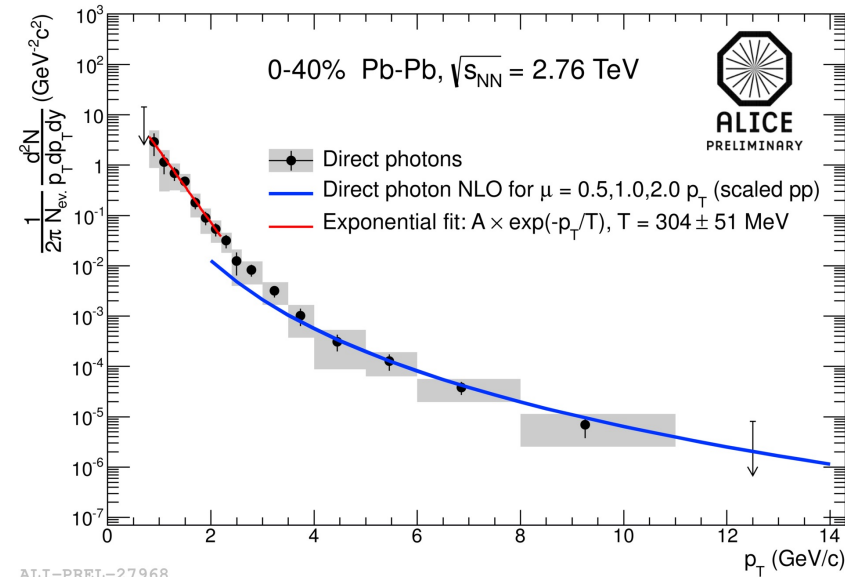


Almond shape: More hadrons are observed parallel to the interaction plane than in the plane perpendicular to it.

One of the most spectacular results of heavy-ion experiments!!

Highest man-made temperature

- Thermal photons, radiated by the quark gluon plasma (“direct” photons, not coming from decays of hadrons) reflect the temperature of the system.
- The inverse slope of the distribution of these photons suggests that the initial temperature of the system created by lead collisions is some trillion of degrees Kelvin.
- This temperature is 250 000 times higher than the temperature in the core of the sun.
- The hottest piece of matter ever formed.



ALI-PREL-27968

HIGHEST MAN-MADE TEMPERATURE

Tweet 16 | Like | Send | 3 people like this. Be the first of your friends.

FOR THE RECORD

WHO: BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY'S RELATIVISTIC HEAVY ION COLLIDER

WHAT: HIGHEST MAN-MADE TEMPERATURE

WHERE: UNITED STATES

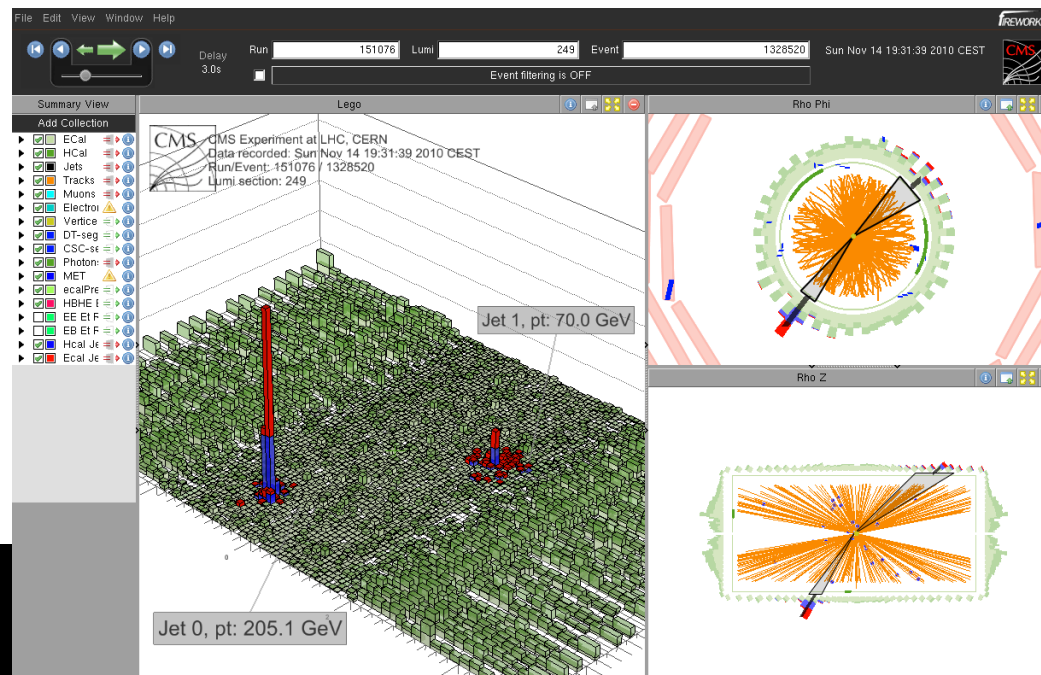
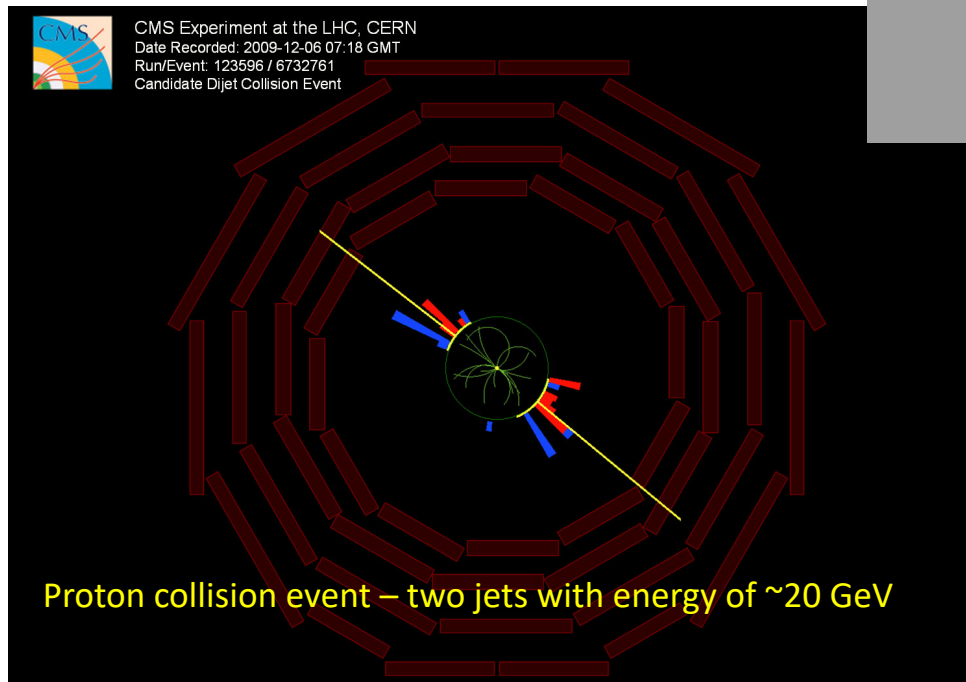
WHEN: 01 JAN 2010

Before heavy ion collisions at LHC

Energy loss (jet quenching)

One of the first announcements from the first lead ion run at LHC, (December 2010).

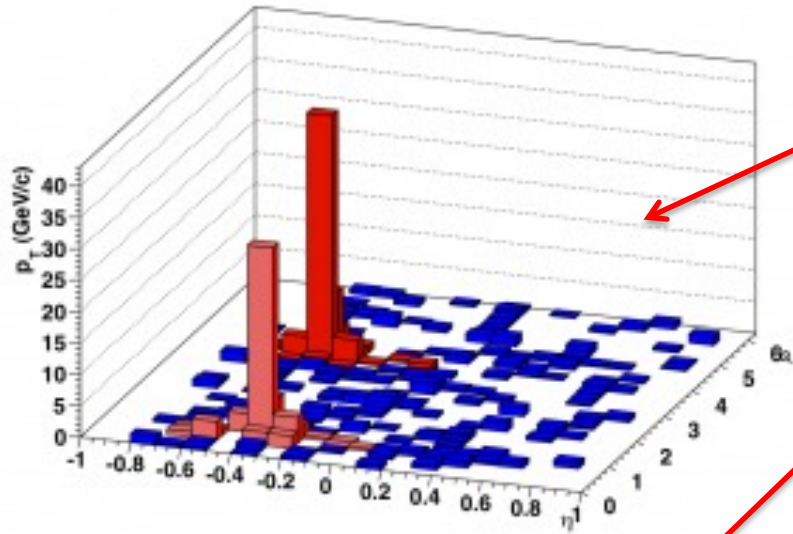
pp collisions: Jets going in opposite directions have \approx equal energies



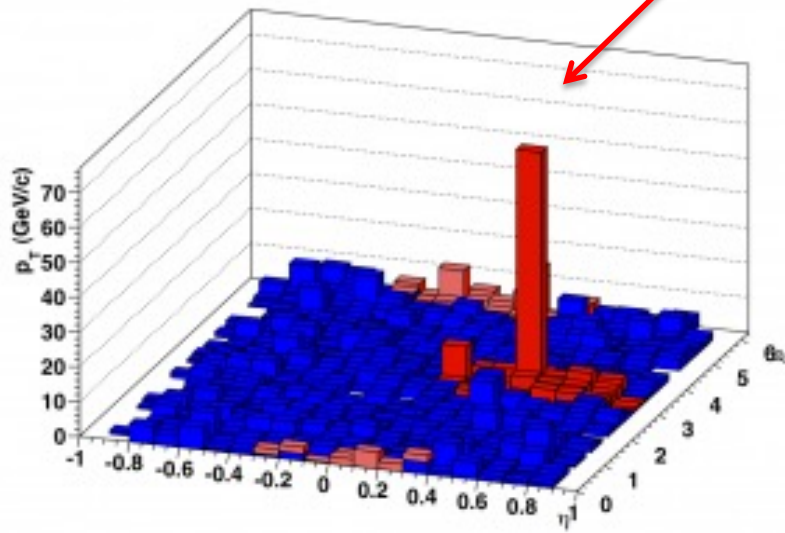
Lead ion collision event:

- One jet has much less energy than the other.
- The jet produced near the QGP surface has high energy whereas the one that traverses the QGP is absorbed and scattered by the dense medium losing big part of its energy.

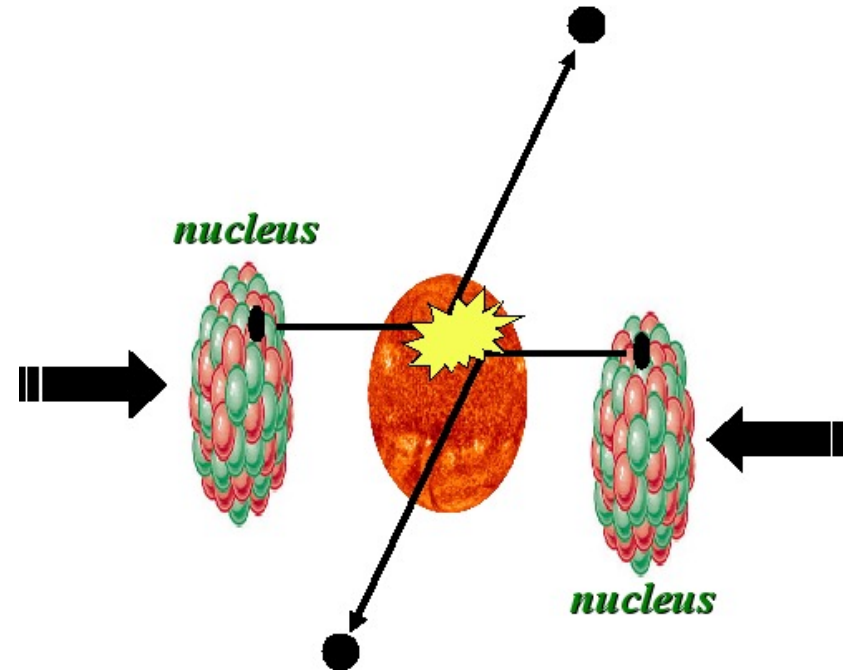
Energy loss (jet quenching)



ALICE – peripheral lead ion collisions-
two jets



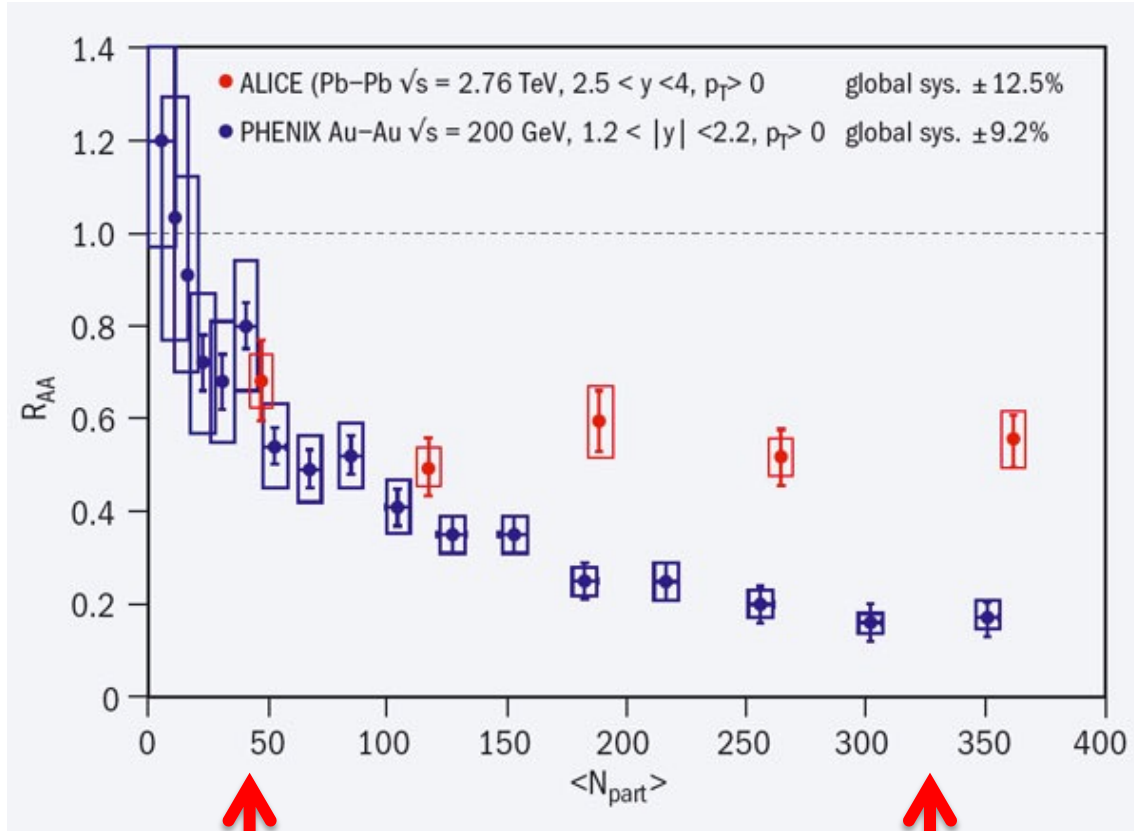
ALICE – central lead ion collisions
1 jet is visible, the other has been
absorbed while travelling through the
QGP and does not come out



The J/ψ mystery

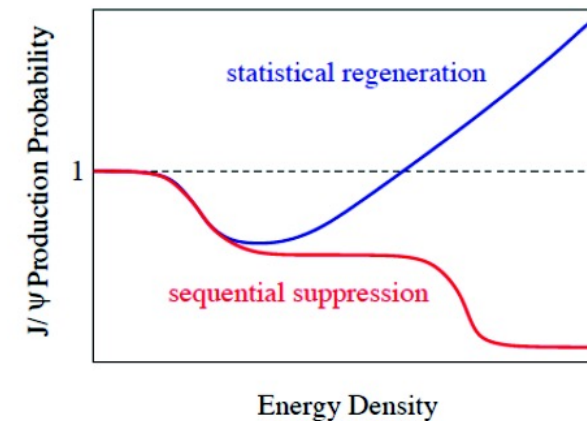
- J/ψ Discovered in 1974, almost simultaneously, at Brookhaven (proton-nuclei collisions) and at SLAC (collisions e^+e^-).
- Bound state of a **c quark and a c anti-quark** (mass 3 GeV).
- The two “object” that make the J/ψ are bound due to strong interaction.
- Inside the quark gluon plasma, due to the high number of free colour charges, the binding between c-quark and c-antiquark becomes weaker, the **pair disintegrates and the J/ψ disappears**.
- Suppression of the observed J/ψ signal (J/ψ $\rightarrow \mu\mu$ and J/ψ $\rightarrow e^+e^-$)
- Suppression depends on QGP temperature.

The J/ψ mystery

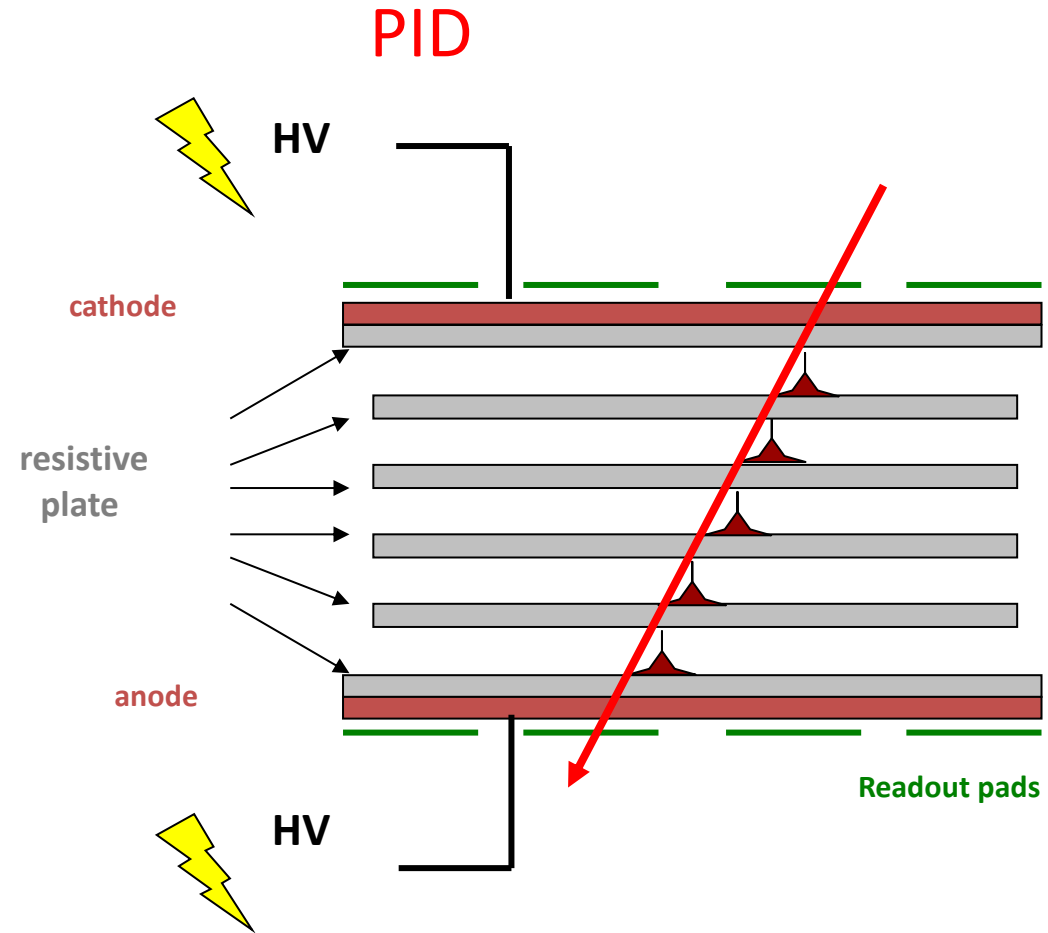


Nuclear modification factor $R_{AA} =$
 number of J/ψ observed in lead ion collisions
 —————
 number of J/ψ observed in proton collisions

- Regeneration of J/ψ at very central collisions
- Two competing phenomena
- Suppression of J/ψ due to interaction with the quark gluon plasma
- Creation of many J/ψ due to the high number of c – anti-c pairs created from the huge collision energy

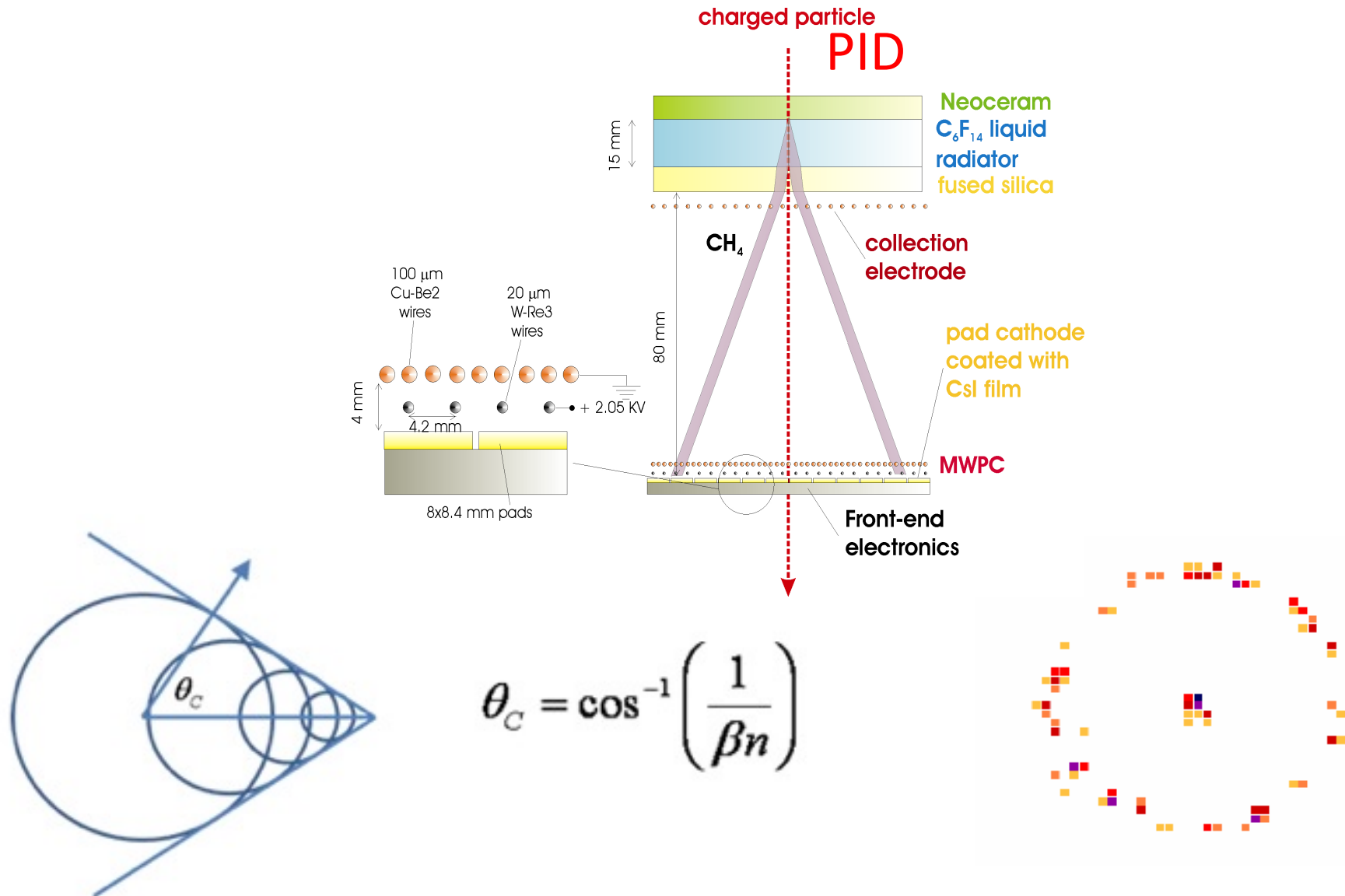


Il rivelatore “Time of Flight” (TOF)



Multigap Resistive Plate Chamber

Il rivelatore "High Momentum Particle Identification" (HMPID)



Il rivelatore V0

Trigger

