

FISICA con gli IONI PESANTI al LHC: L'esperienza ALICE

Indice

- Introduzione alla Fisica con gli ioni pesanti ad Alta Energia
- L'esperimento ALICE
- La Fisica con ALICE

Scopo dell'esperimento

- Capire una proprietà basilare delle interazioni forti: (de)confinamento
- Testare le condizioni della transizione di fase dal plasma di quark e gluoni (QGP) agli adroni (transizione avvenuta nell'Universo primordiale alcuni μsec dopo il Big Bang)
- Studiare il diagramma di fase della materia: produrre e studiare il QGP

Calcoli QCD

La teoria delle interazioni forti (QCD) predice che in condizioni estreme di densità e temperatura la materia passi ad un nuovo stato in cui i quark e i gluoni non sono più confinati all'interno di particelle composte quali protoni e neutroni.

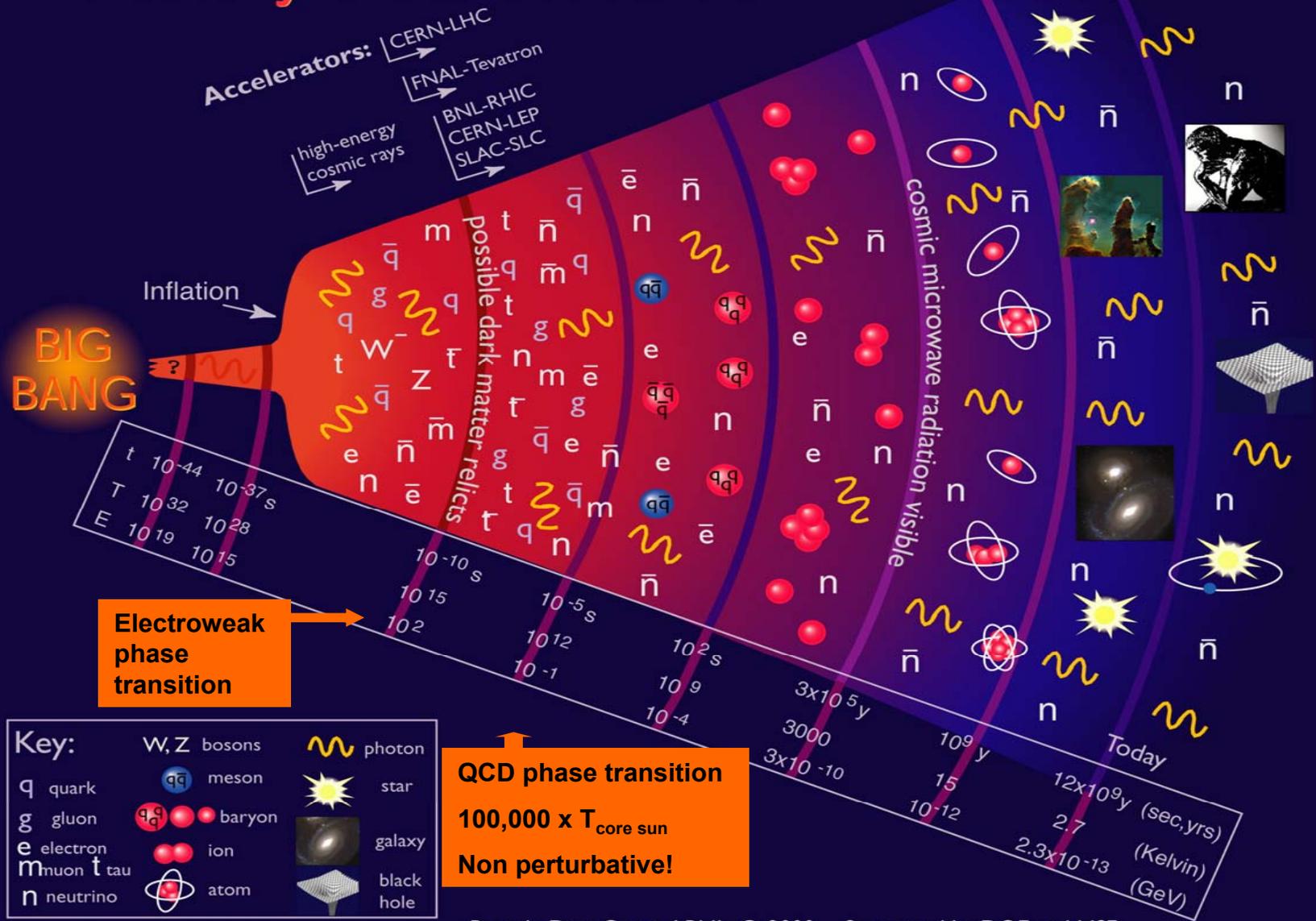
Tale transizione dovrebbe avvenire quando la temperatura eccede un valore critico di 2000 miliardi di gradi (*100000 volte la temperatura all'interno del sole*)

Transizione al QGP per certi valori di pressione e densità di energia:

$$T_c = 175 \pm 15 \text{ MeV}; \quad \varepsilon_c = 0.7 \pm 0.2 \text{ GeV/fm}^3$$

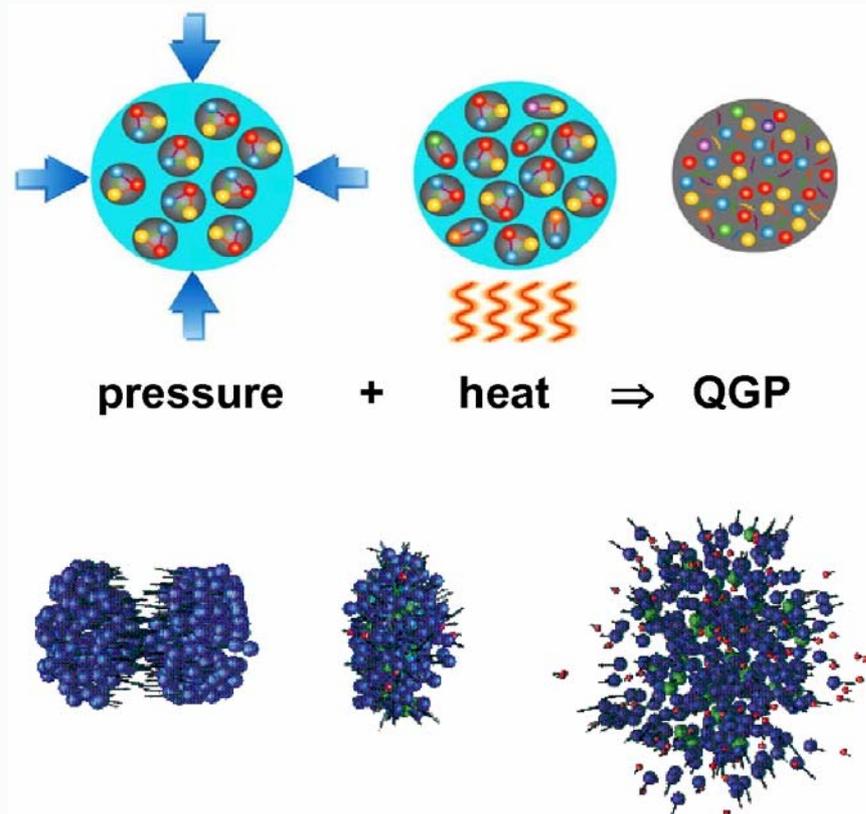
M. Cheng et al., Phys. Rev. D77 (2008) 014511

History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

QGP in laboratorio



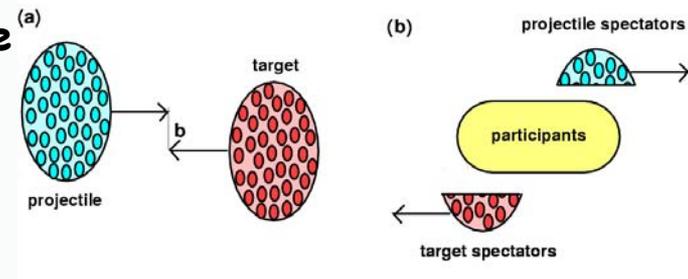
Parametri importanti : Energia del proiettile e centralita' dell'urto

Centralita' dell'urto

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

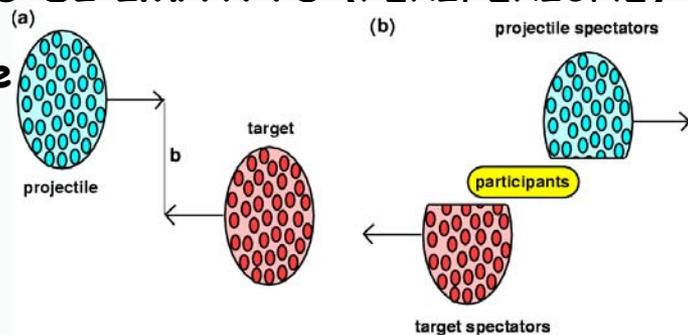
- COLLISIONI CON PICCOLO PARAMETRO DI IMPATTO (CENTRALI)**

- Molti nucleoni coinvolti nell'interazione
- Molte collisioni tra nucleoni
- Grande volume di interazione
- Molte particelle prodotte



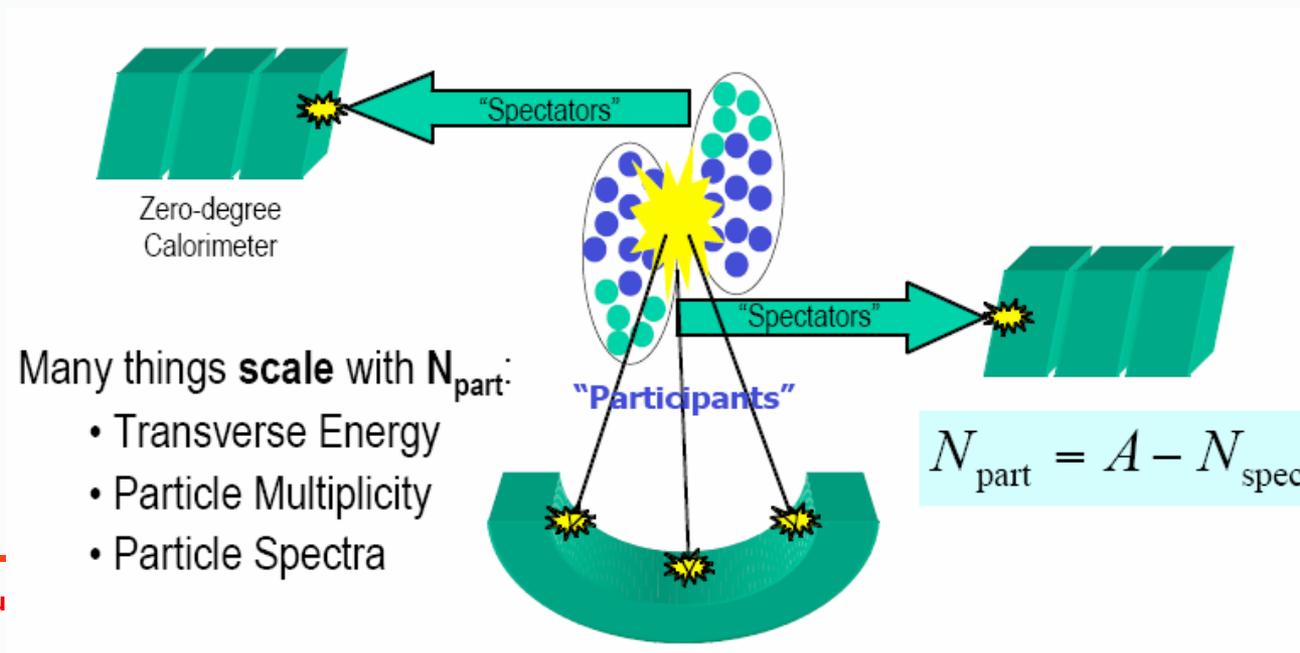
- COLLISIONI CON GRANDE PARAMETRO DI IMPATTO (PERIFERICHE)**

- Pochi nucleoni coinvolti nell'interazione
- Poche collisioni tra nucleoni
- Piccolo volume di interazione
- Poche particelle prodotte

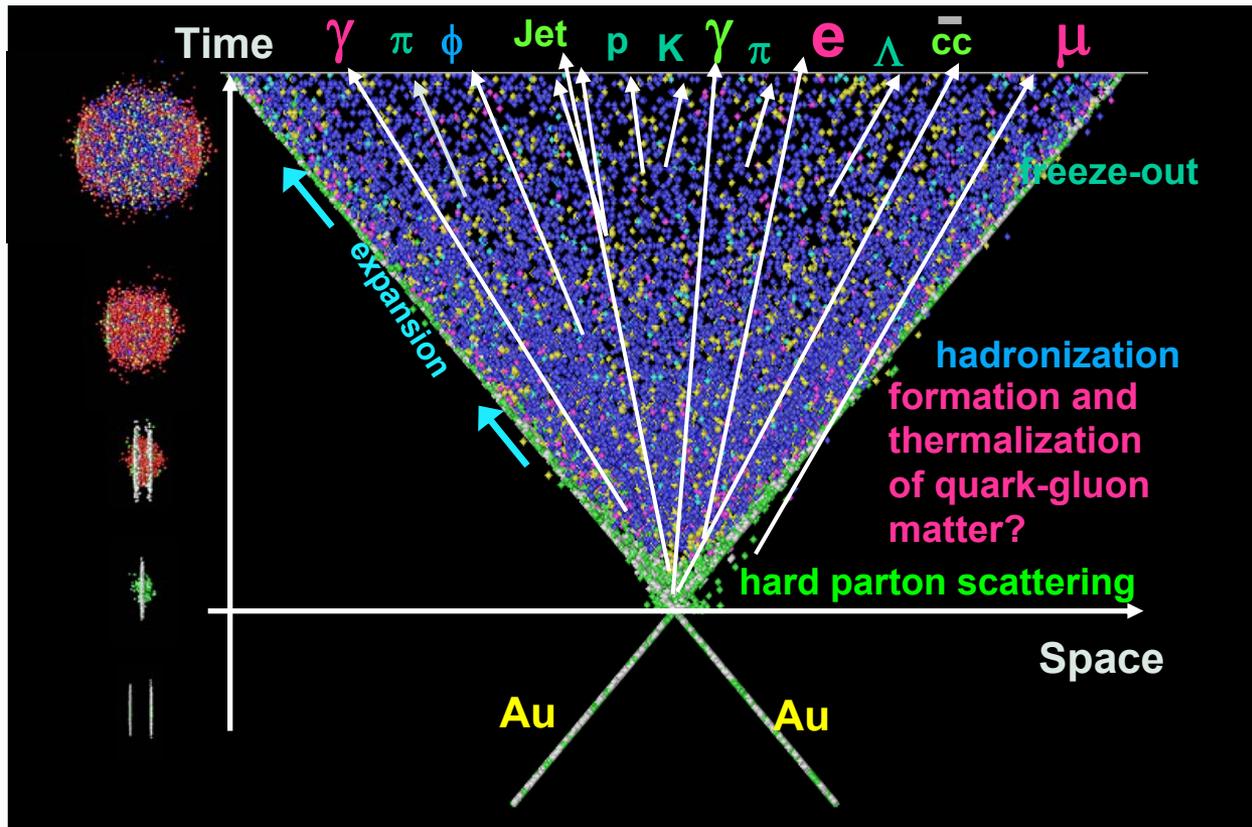


“Misurare” la centralità

- Due strategie sperimentali per stimare il parametro di impatto di una collisione tra ioni pesanti
 - Misurare variabili legate all’energia depositata nella regione di interazione di energia (proporzionali a N_{part})
 - molteplicità di particelle cariche, energia trasversa
 - Misurare l’energia gli adroni che proseguono lungo la direzione del fascio (proporzionale a N_{spect})
 - calorimetri adronici a zero gradi (ZDC)

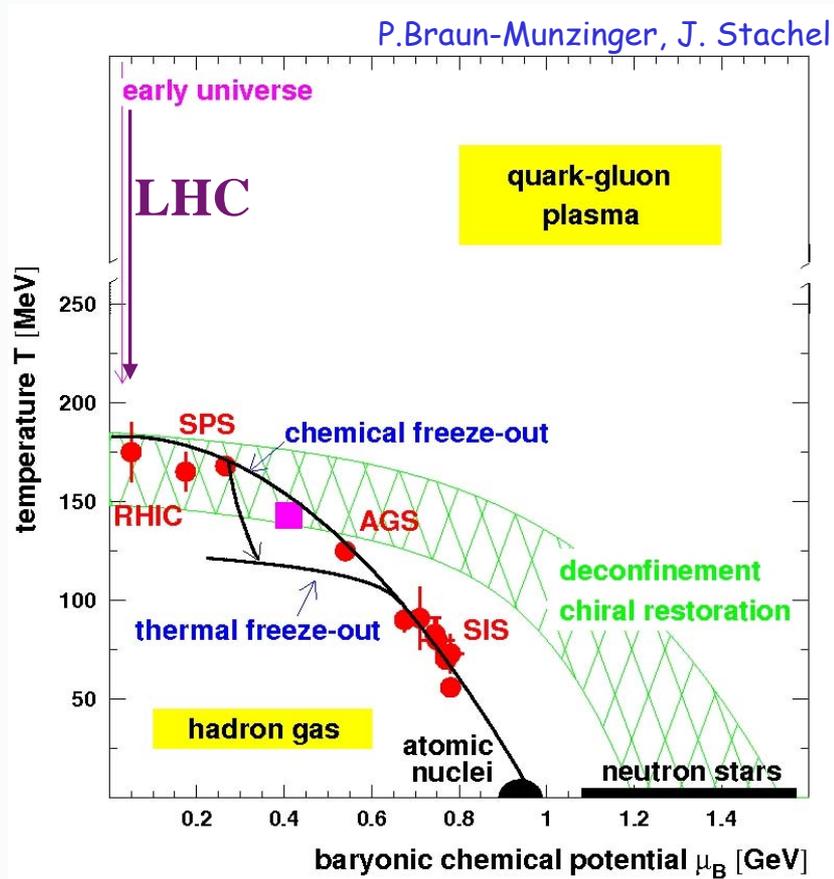


Evoluzione schematica spazio-temporale



Diverse osservabili sensibili a diversi stadi della reazione

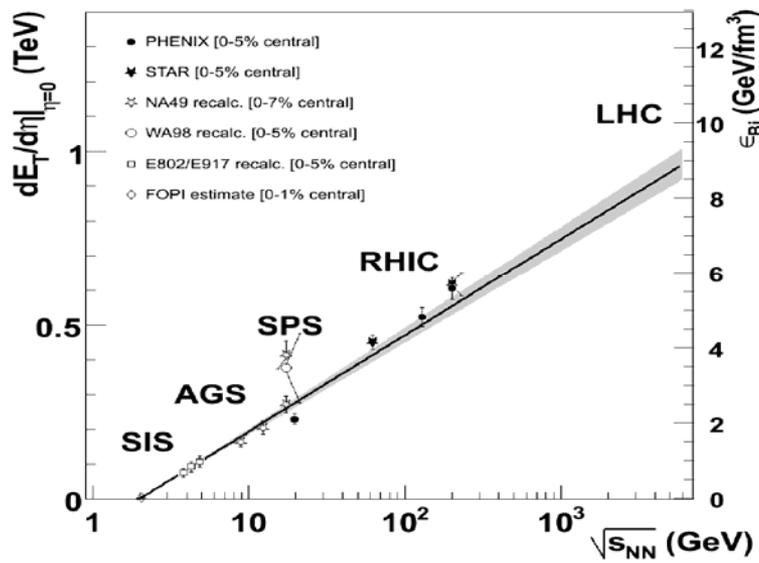
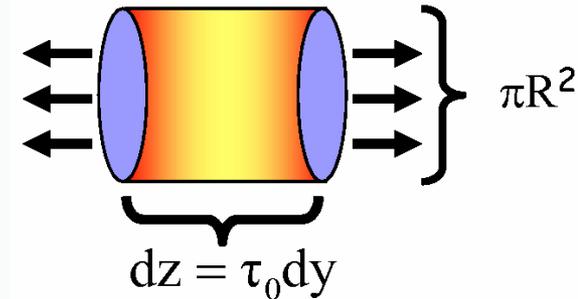
Diagramma di fase della materia



Transizione dalla materia adronica alla
materia di quark

Densita' di energia: stima di Bjorken

$$\varepsilon_{Bj} = \frac{1}{\pi R^2} \frac{1}{\tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$



A partire dal SPS in su la densita' di energia e' sopra il valore di transizione predetto da calcoli sul reticolo

Tipi di osservabili

- Hard:

- processi ad alto impulso trasferito, possibili all'inizio della collisione, quando l'energia non si è ancora degradata
- rate di produzione calcolabile in termini di QCD perturbativa
 - produzione di heavy flavours (open charm e beauty, quarkonia)
 - Jet
- sono sensibili alle fasi successive della collisione (jet quenching, soppressione degli stati di quarkonio)

- Fotoni diretti:

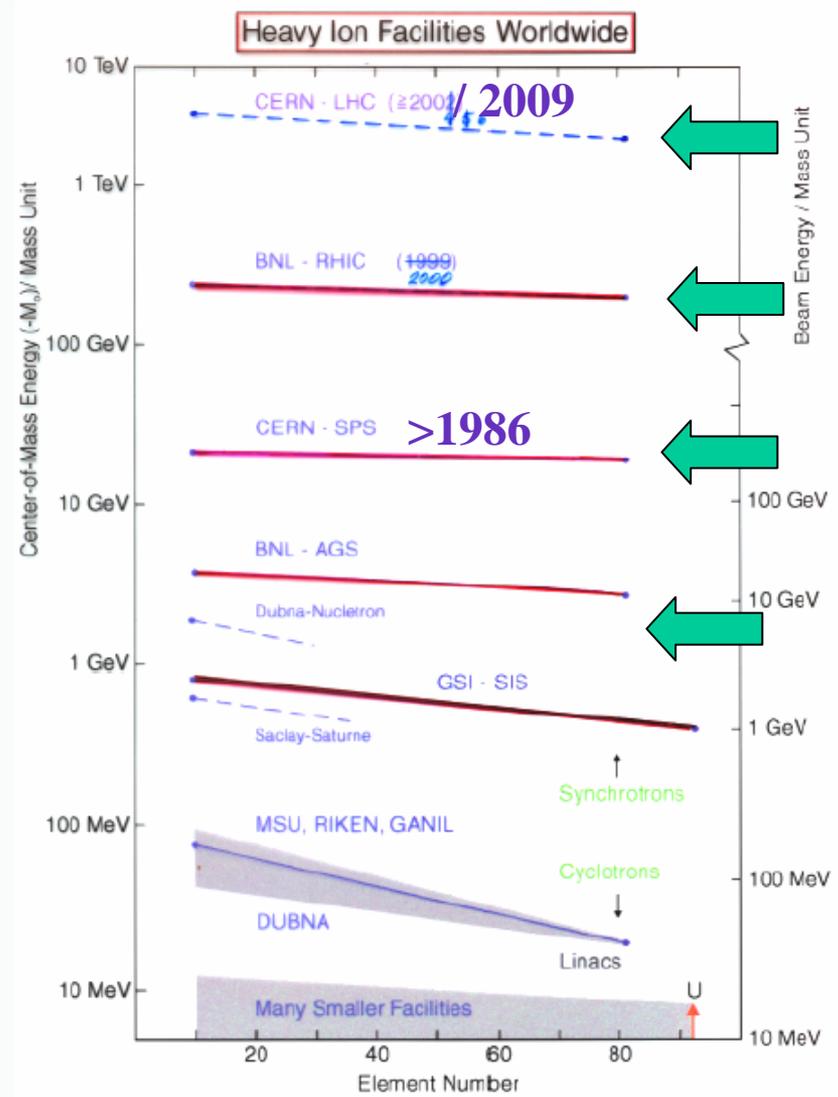
- emessi dal plasma (sia reali che virtuali, osservabili come coppie di leptoni di segno opposto). Sono *early probes*, ma il fondo di fotoni prodotti nelle fasi successive ne rende ardua la rivelazione

- Soft:

- rappresentano la maggior parte delle osservabili (adroni con quark leggeri, flow, molteplicità, spettri in momento ed energia)
- sono prodotti nelle ultime fasi della collisione

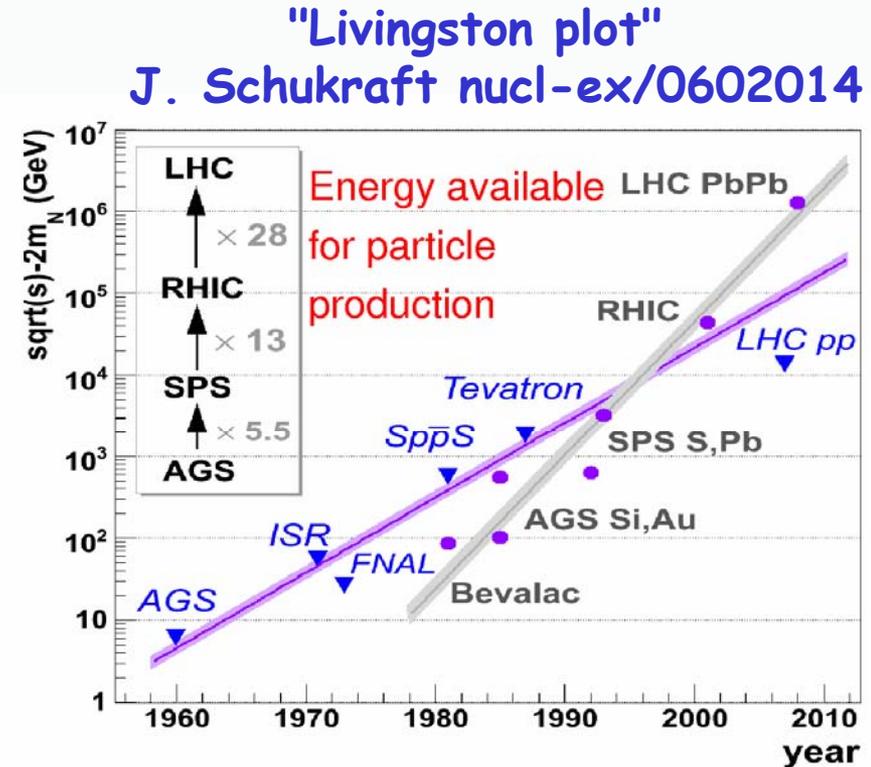
Un po' di storia

- programmi sperimentali con fasci di ioni ad Alta Energia attivi da piu' di 20 anni
- 4 laboratori realmente a alta energia: AGS, SPS, RHIC e LHC
- Due comunita' riunite:
 - fisici delle particelle
 - fisici nucleari



Cronologia degli esperimenti con ioni pesanti

- **Bevalac (LBL)**
 - Bersaglio fisso (1975-1986) $\sqrt{s} < 2.4 \text{ GeV}$
- **SIS (GSI)**
 - Bersaglio fisso (1989-) $\sqrt{s} < 2.7 \text{ GeV}$
- **AGS (BNL)**
 - Bersaglio fisso (1986-1998) $\sqrt{s} < 5 \text{ GeV}$
- **SPS (CERN)**
 - Bersaglio fisso (1986-2003) $\sqrt{s} < 20 \text{ GeV}$
- **RHIC (BNL)**
 - collisionatore (2000-) $\sqrt{s} < 200 \text{ GeV}$
- **LHC (CERN)**
 - collisionatore (2008-) $\sqrt{s} < 5500 \text{ GeV}$

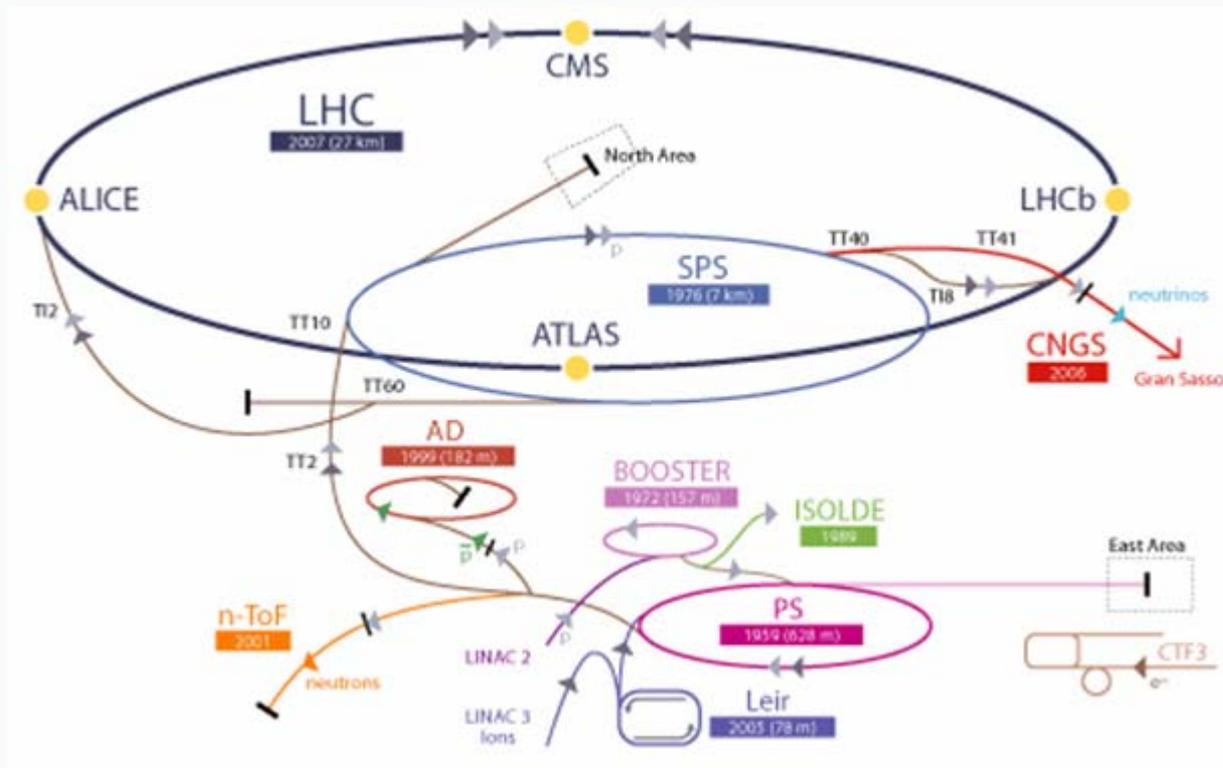


Raddoppio dell'energia ogni ~4
(1.7) anni per fasci di p (ioni)

Paragone tra vari acceleratori di ioni pesanti

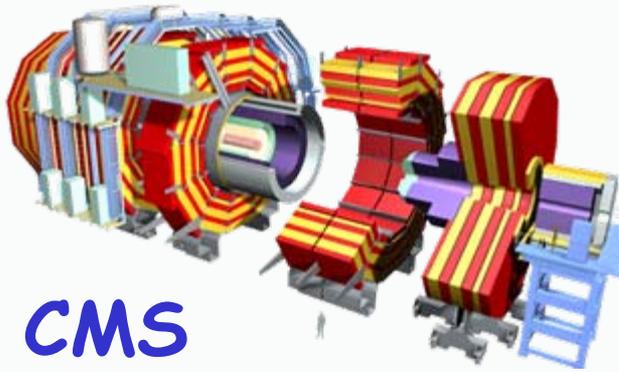
		SPS	RHIC	LHC
Energia	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	17	200	5500
Molteplicita'	dN_{ch}/dy	430	730	1000-4000
Temperatura critica	T/T_c	1.1	1.9	3.0-4.7
Densita' di energia	ε (GeV/fm ³)	3	5	15-60
Tempo	τ_{QGP} (fm/c)	≤2	2-4	≥10
volume	V_f (fm ³)	few 10³	few 10⁴	few 10⁵

Il complesso degli acceleratori del CERN

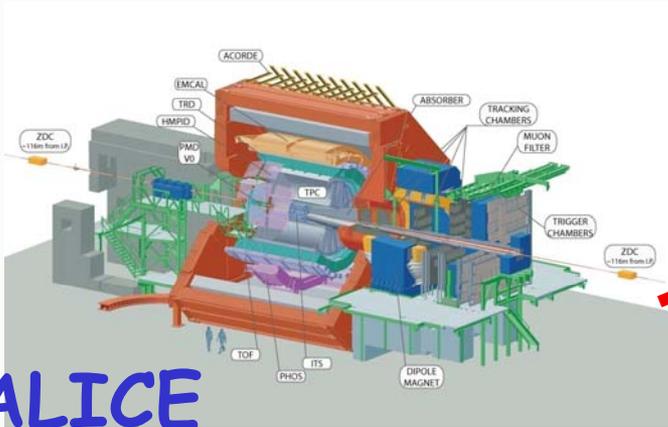


LINAC2- BOOSTER-PS-SPS-LHC

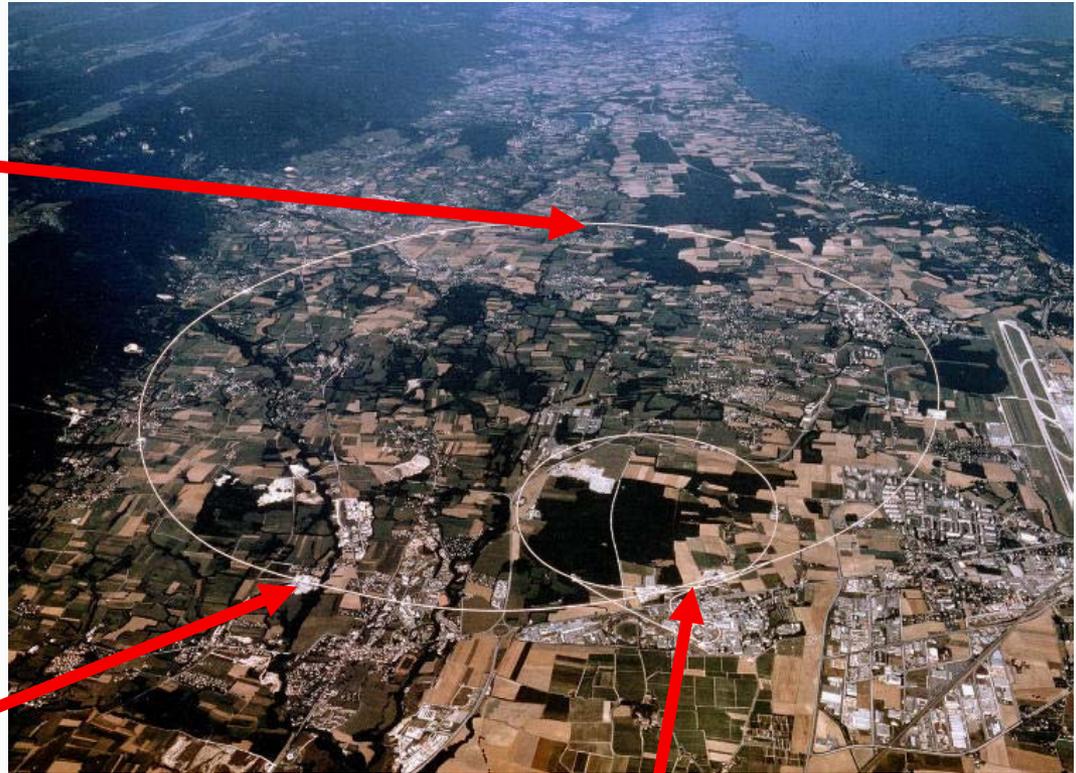
The Large Hadron Collider



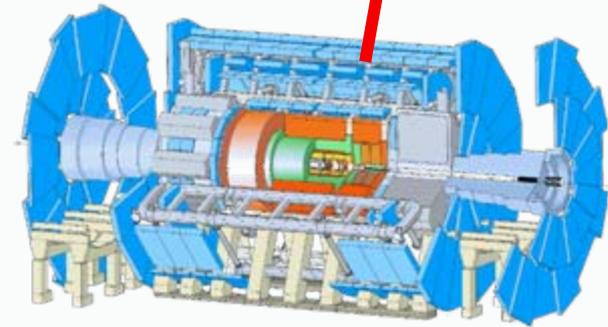
CMS



ALICE



$p+p @ 14 \text{ TeV}$
 $Pb+Pb @ 5.5A \text{ TeV}$



ATLAS

LHC come collisionatore di ioni

- Condizioni di funzionamento per un 'tipico' anno:

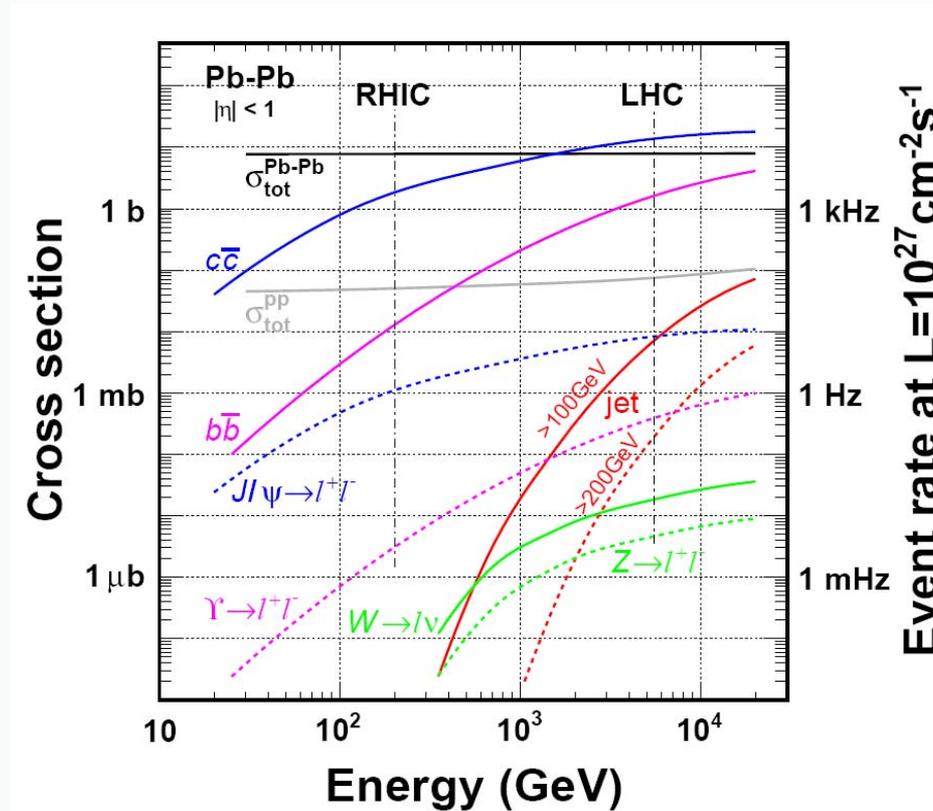
Collision system	$\sqrt{s_{NN}}$ (TeV)	L_0 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\langle L \rangle / L_0$ (%)	Run time (s/year)	σ_{inel} (b)
PbPb	5.5	10^{27}	70-50	10^6 **	7.7

** $\int L dt \sim 0.5 \text{ nb}^{-1}/\text{year}$

- + altri sistemi : pA, ioni leggeri (Sn, Kr, Ar, O)

Un salto di un fattore 28 in energia rispetto a RHIC
(RHIC era un fattore 10 rispetto al SPS)

Collisioni di ioni pesanti a LHC



Si prevede un aumento delle sezioni d'urto di processi elementari di fattori
 ~ 10 (cc)
 ~ 10² (bb)

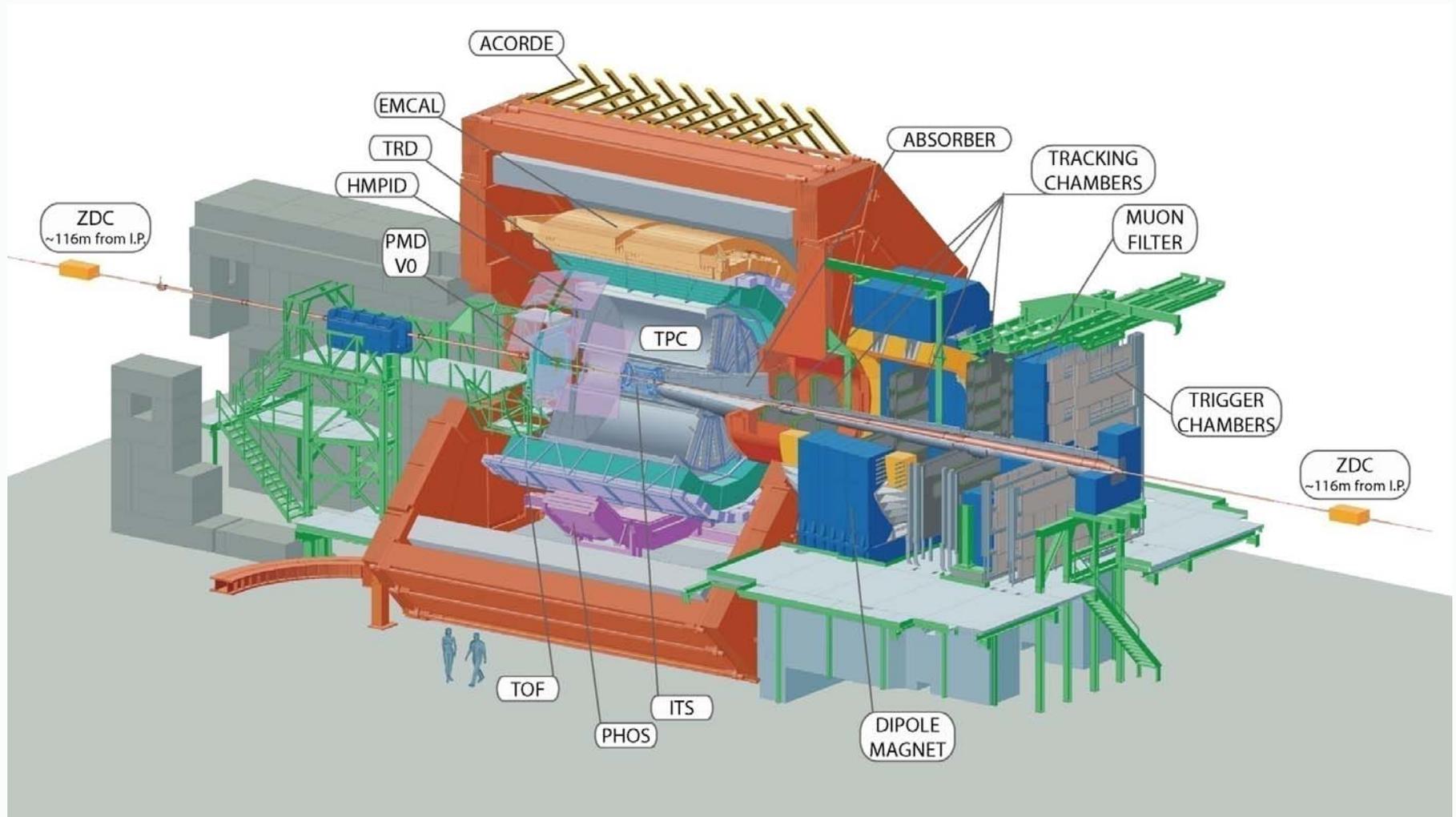
Piano di lavoro a LHC

- **Primo 'run' corto a bassa luminosita'**
(1/20 del valore nominale)
 - **autunno 2009**
- **Gli anni seguenti** (1HI 'anno' = 10^6 s)
 - **2 - 3 anni Pb-Pb** $\mathcal{L} \sim 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - **1 anno p - (p, d or α)** $\mathcal{L} \sim 10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - **1 anno ioni leggeri (Ar-Ar)** $\mathcal{L} \sim \text{da } 10^{27} \text{ a } 10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

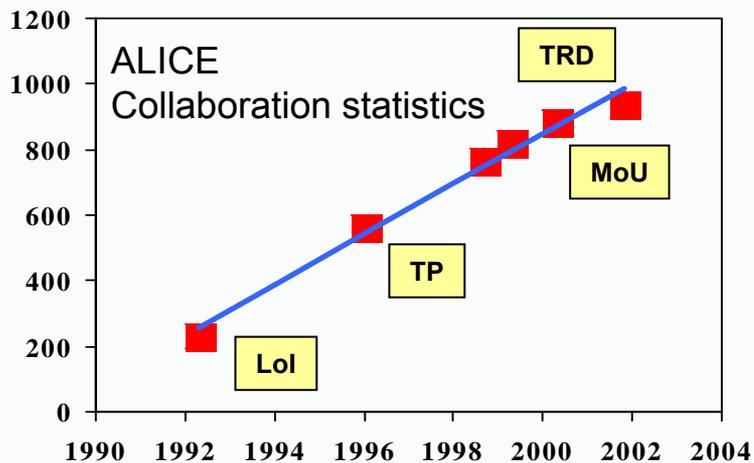
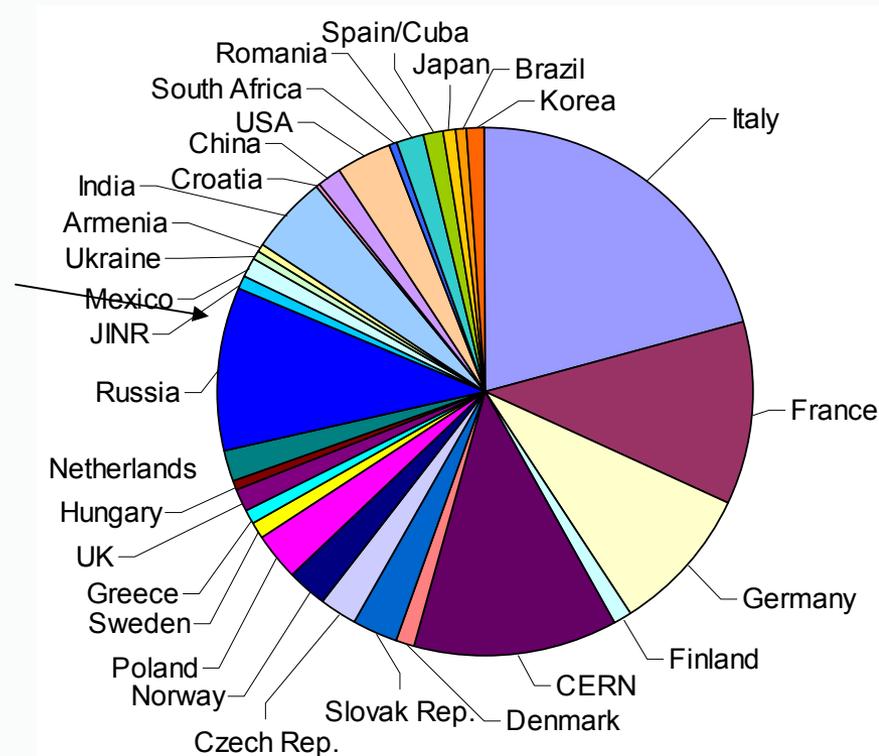
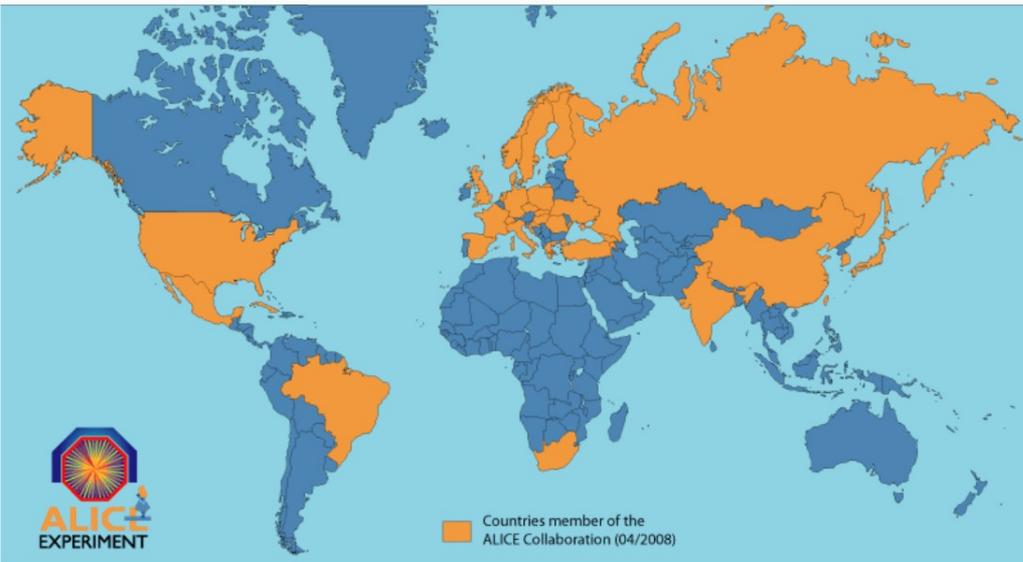
Problemi fisici studiati da ALICE

- **Caratterizzazione degli eventi**
misura della molteplicita' di particelle cariche prodotte, centralita'
- **Proprieta' del mezzo caldo e denso (dinamica dell'adronizzazione)**
misura del rapporto del numero di adroni prodotti
- **Descrizione nello spazio-tempo della formazione del mezzo caldo e denso ('fireball')**
misura delle asimmetrie azimutali delle particelle prodotte (flow)
- **Produzione di quark pesanti**
misura della produzione di mesoni composti da charm (cc) e da bottom (bb)
- **Perdita di energia dei quark nel plasma**
ricostruzione dei Jet di particelle, Jet quenching, misura delle distribuzioni di quantita' di moto trasversa delle particelle
- **Studio delle fluttuazioni**
analisi evento per evento

ALICE: l' esperimento dedicato alla Fisica degli ioni pesanti



La collaborazione ALICE

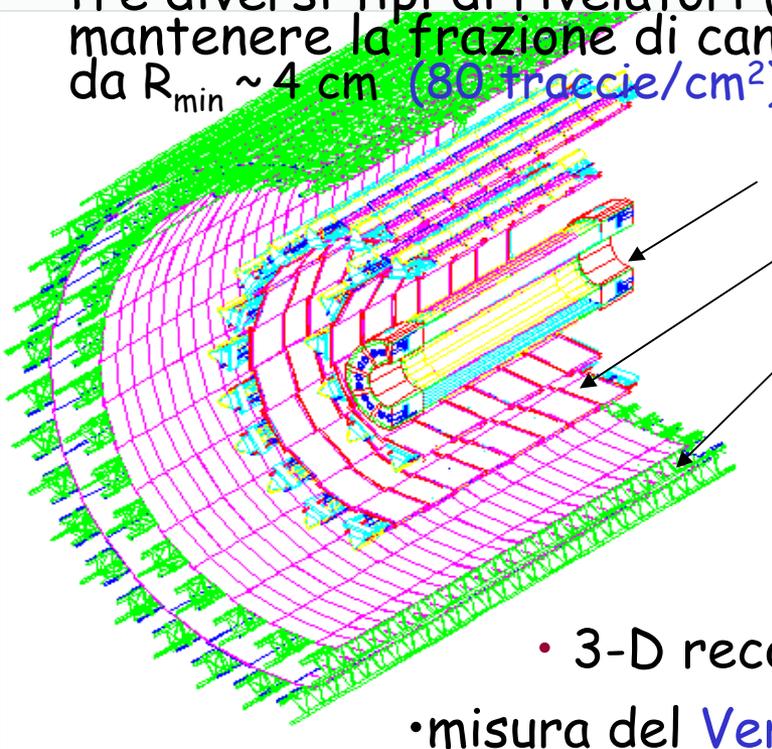


> 1000 fisici
 ~ 30 paesi
 ~ 100 istituti

Il sistema di tracciamento interno

6 strati di rivelatori al silicio per il tracciamento: copre un intervallo angolare di circa 45 gradi

- Tre diversi tipi di rivelatori (tre diverse tecnologie impiegate) per mantenere la frazione di canali occupati costante entro il $\sim 2\%$ da $R_{\min} \sim 4 \text{ cm}$ (80 tracce/cm^2) a $R_{\max} \sim 40 \text{ cm}$ ($< 1 \text{ traccia/cm}^2$)



SPD-Silicon Pixel

SDD-Silicon drift

SSD -Silicon Strip

$\sim 12.5\text{M}$ canali,

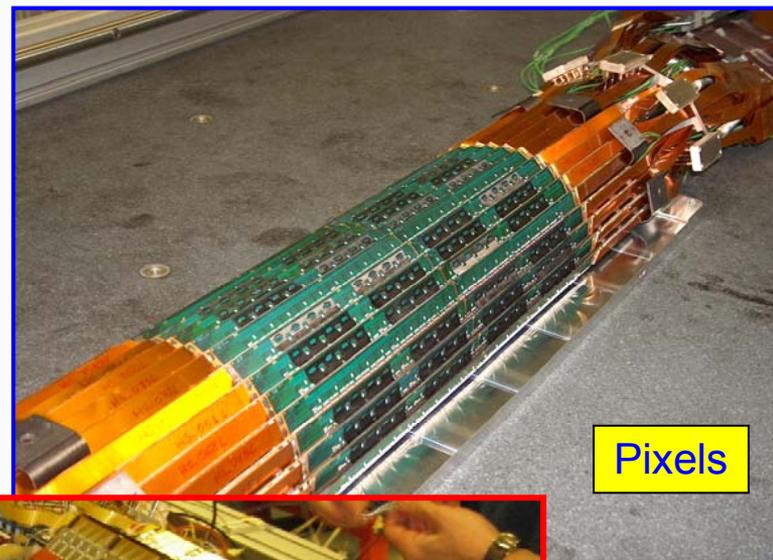
Lettura analogica
Per misura della
perdita di
energia dE/dx

- 3-D reconstruction ($< 100\mu\text{m}$) del Vertice Primario
- misura del Vertice Secondario (Hyperons, mesoni D and B)
- Identificazione di particelle via dE/dx per $p < 1 \text{ GeV}$
- Ricostruzione di tracce con piccola quantita' di moto ($< 100\text{MeV}$)

L'assemblaggio del tracciatore



Strips



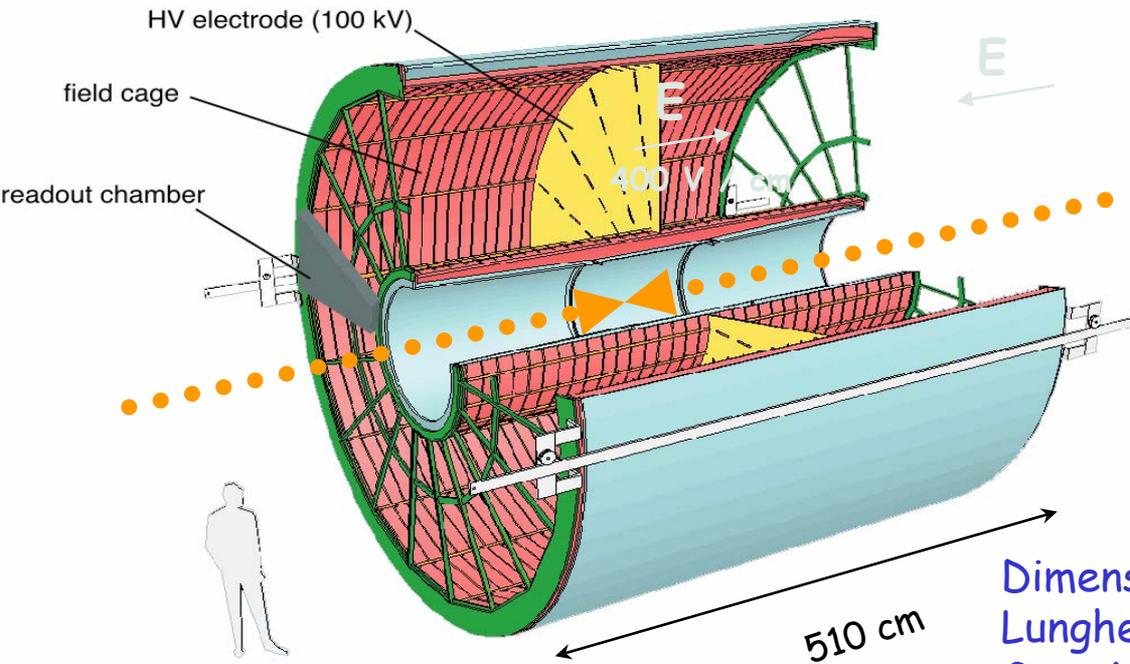
Pixels



Drift

La camera a proiezione temporale (TPC)

Rivelatore di tracciamento principale (per le particelle cariche)



- poco materiale
- alta densita' di tracce
- ...

Dimensione radiale: $845 < r < 2466$ mm
Lunghezza: 2×2500 mm
Gas: Ne-CO₂-N₂ (86/9/5)
Volume gas : 95 m³
557568 canali di lettura

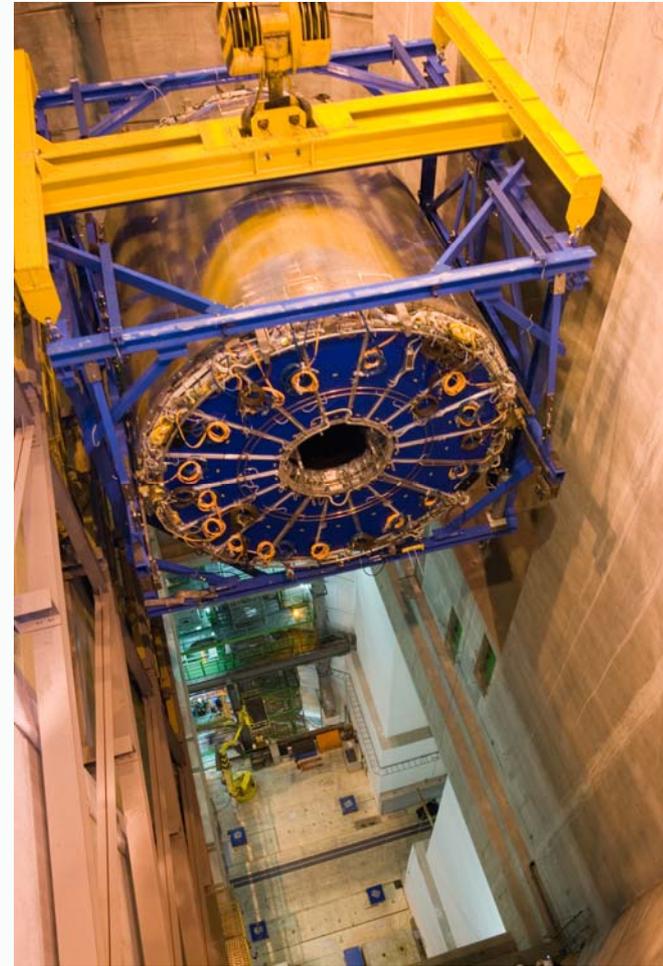
La TPC



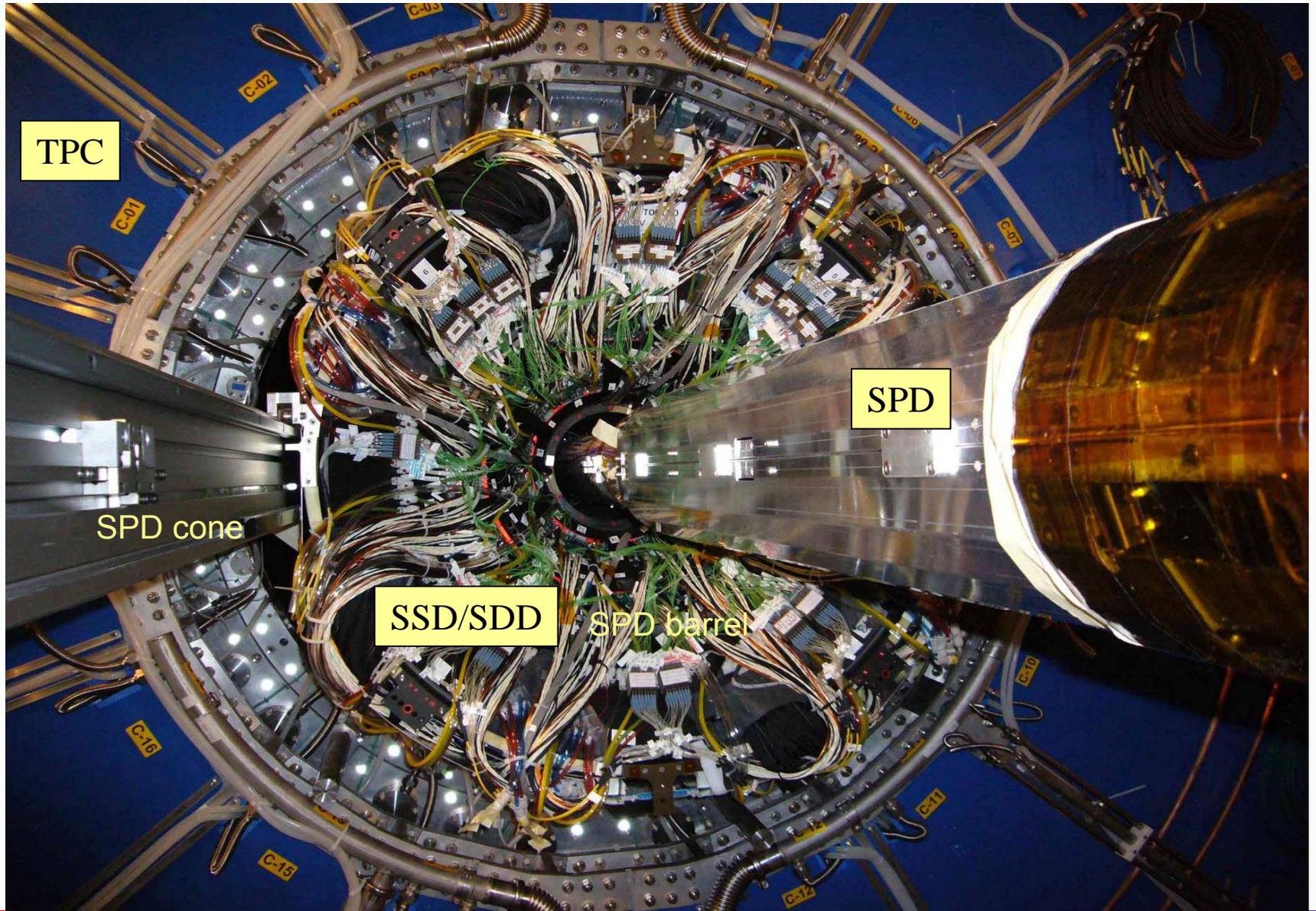
Installazione della TPC



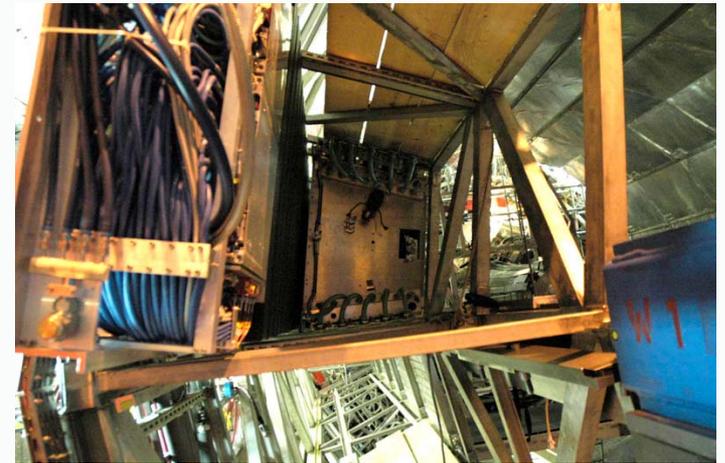
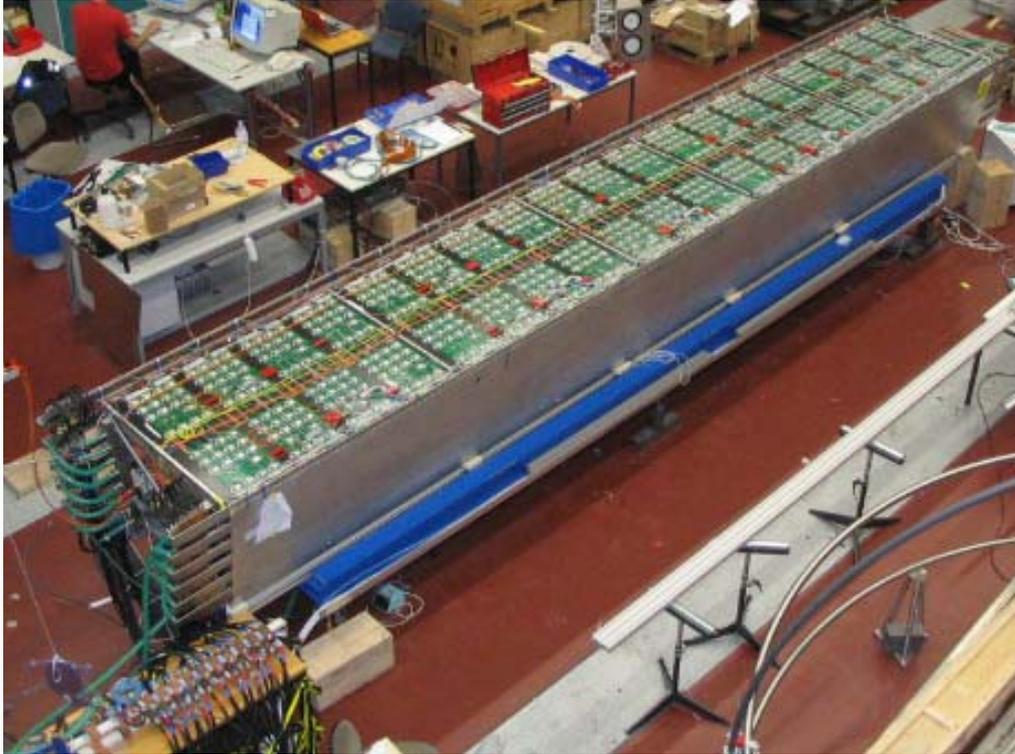
gennaio 2007



installazione del tracciatore centrale



TRD assemblaggio e installazione

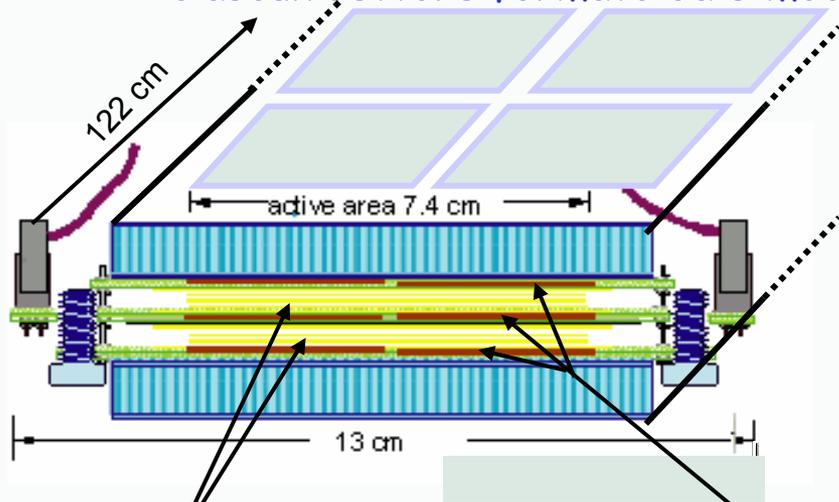


4 Supermoduli sono installati

Il sistema TOF (Time Of Flight)

Rivelatore con una superficie attiva di $\sim 150 \text{ m}^2$ a $R \sim 3.7 \text{ m}$
Copre completamente l'azimuth

- risoluzione temporale $< 100 \text{ ps}$ (10^{-10} s)
 - risoluzione temporale misurata ($\sim 40 \text{ ps}$) con efficienza $> 99\%$
- altissima granularita', $O(10^5)$ canali per mantenere l'occupazione $< 15\%$
 - 1638 strips che formano 18 settori in azimuth;
ciascun settore formato da 5 moduli lungo z



l'elemento basilare TOF:
doppio strato Multigap RPC strip
 $7.4 \times 122 \text{ cm}^2$ area attiva
le strip sono segmentate in 96 canali

2x5 gas gaps
of $250 \mu\text{m}$

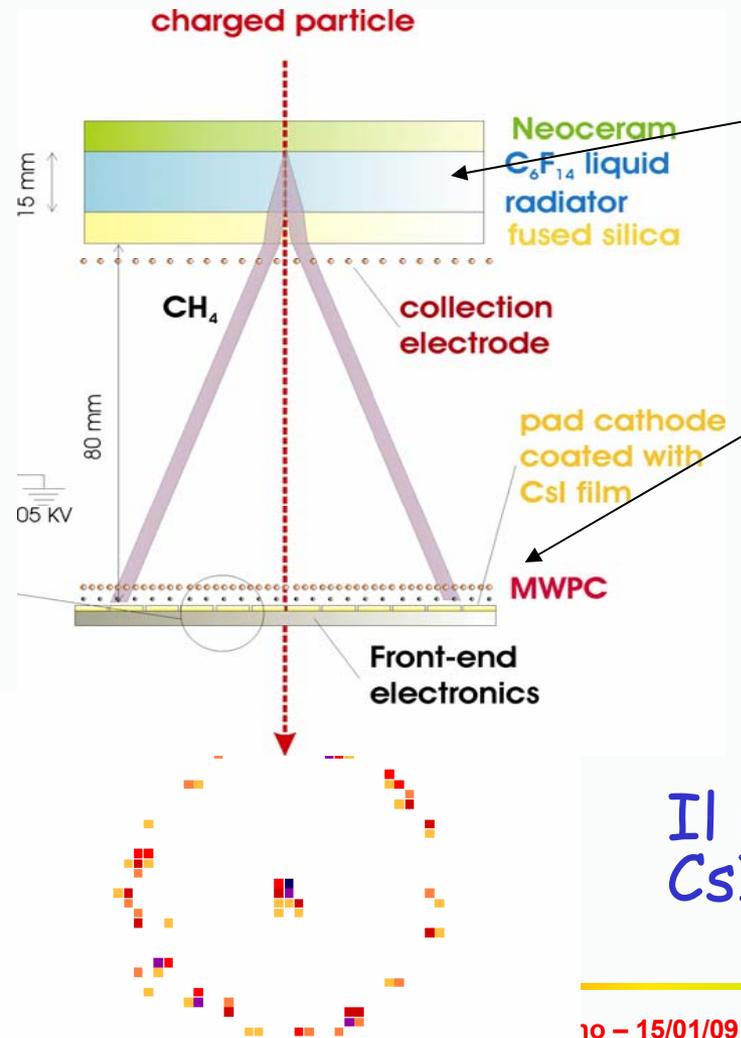
Readout pads
 $3.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$

TOF supermodulo



Il rivelatore HMPID (High Momentum Particle Identification)

Contatore Cerenkov (proximity-focus RICH), ccon superficie attiva $\sim 11 \text{ m}^2$
a $R \sim 4.7 \text{ m}$ dall'asse dei fasci



- **RADIATORE:**

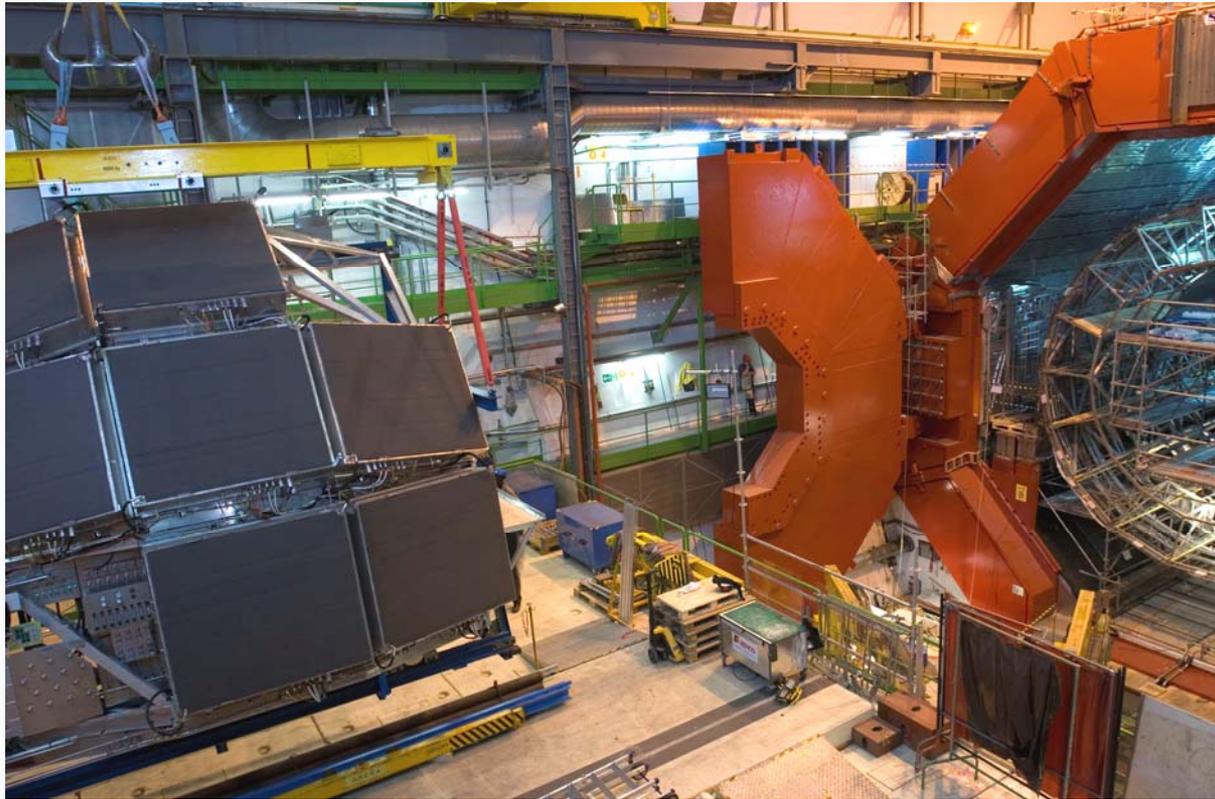
15 mm liquid C_6F_{14} ($n \approx 1.2989$ @ 175 nm),
 $p_{\text{th}} = 1.21 \text{ m (GeV/c)}$

- **rivelazione di FOTONI**

MWPC con CH_4 con lettura analogica
($\sim 160 \times 10^3$ channels), conversione di fotoni su
uno strato di CsI (Q.E. $\approx 25\%$ @ 175 nm)

Il rivelatore utilizza i fotocatodi a
CsI piu' grandi che esistono

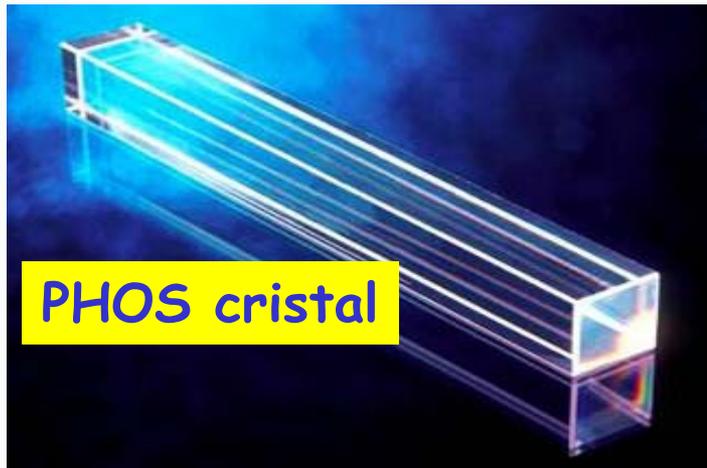
Il rivelatore HMPID durante l'installazione



SPETTROMETRO per FOTONI

- cristalli di PbWO_4 (numero totale di cristalli: 17920)
 - $n = 2.16$, dimensioni: $22 \times 22 \times 180 \text{ mm}^3$
 - $\rho = 8.28 \text{ g/cm}^3$, $R_M = 2.2 \text{ cm}$, $X_0 = 8.9 \text{ mm}$,
- Densi quasi come il piombo e trasparenti come un cristallo per fermare e rivelare l'energia dei fotoni

Il rivelatore PHOS comprende 5 moduli posti a 4.6 m dal punto di intersezione di ALICE



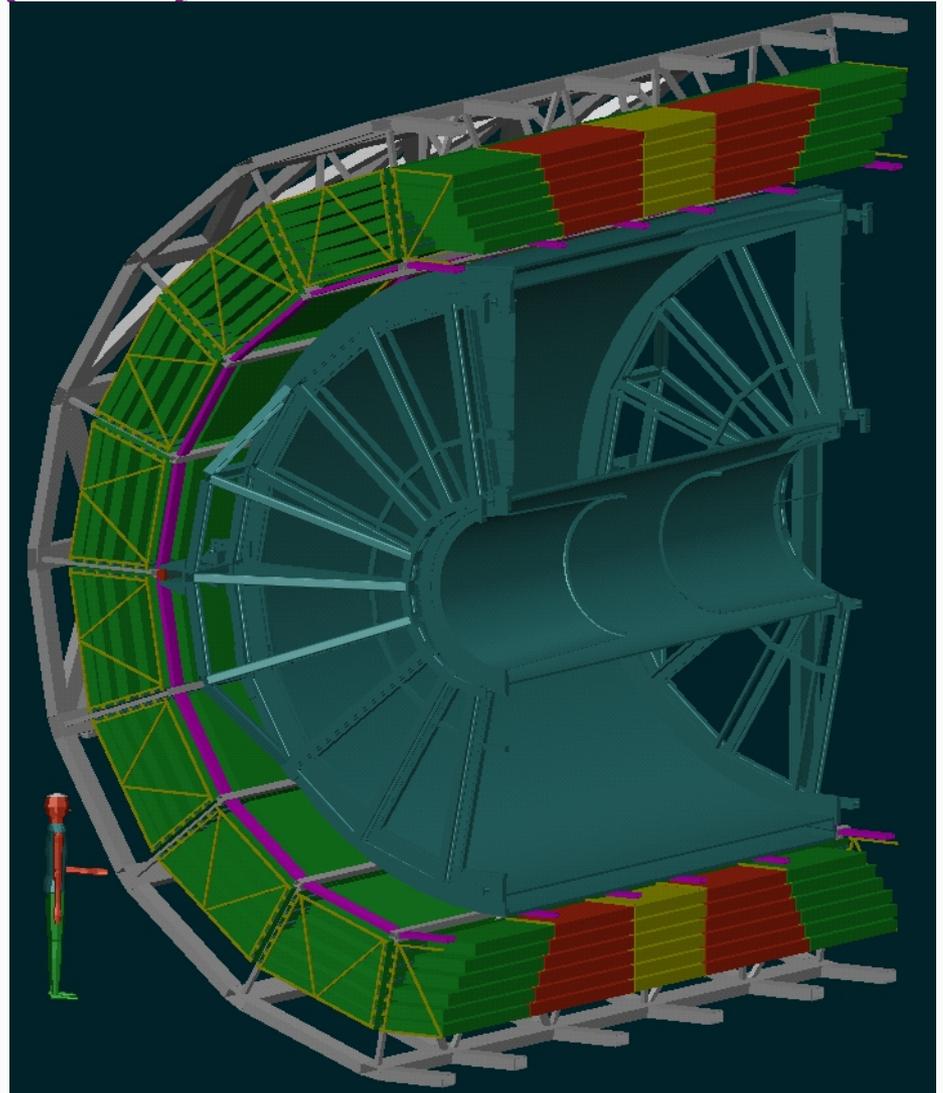
Rivelatore della radiazione di transizione (TRD)

identificazione di elettroni

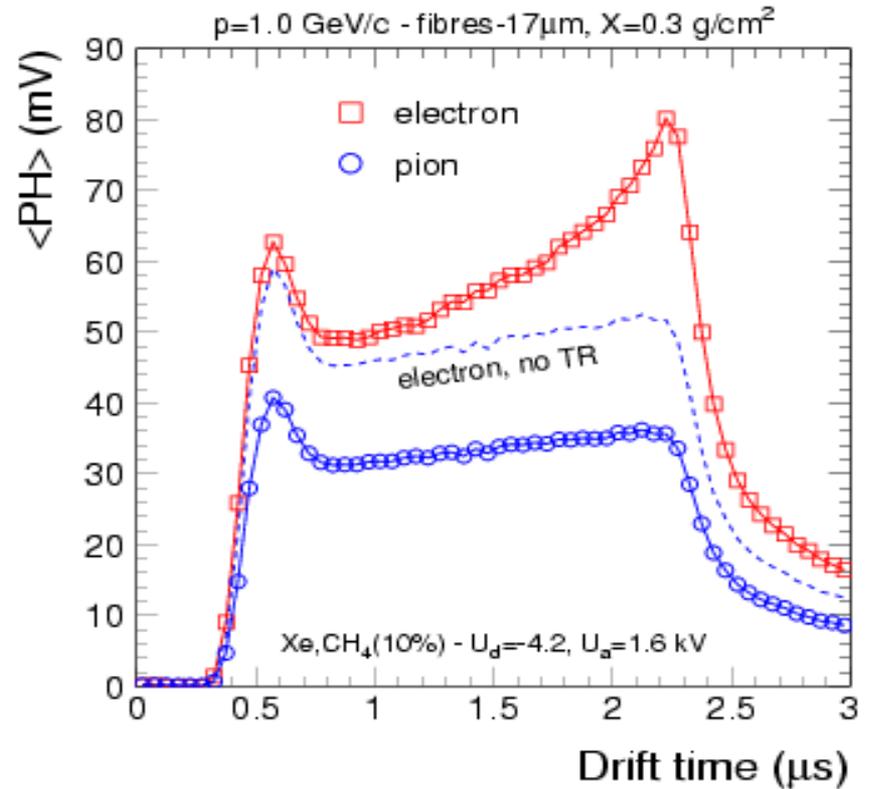
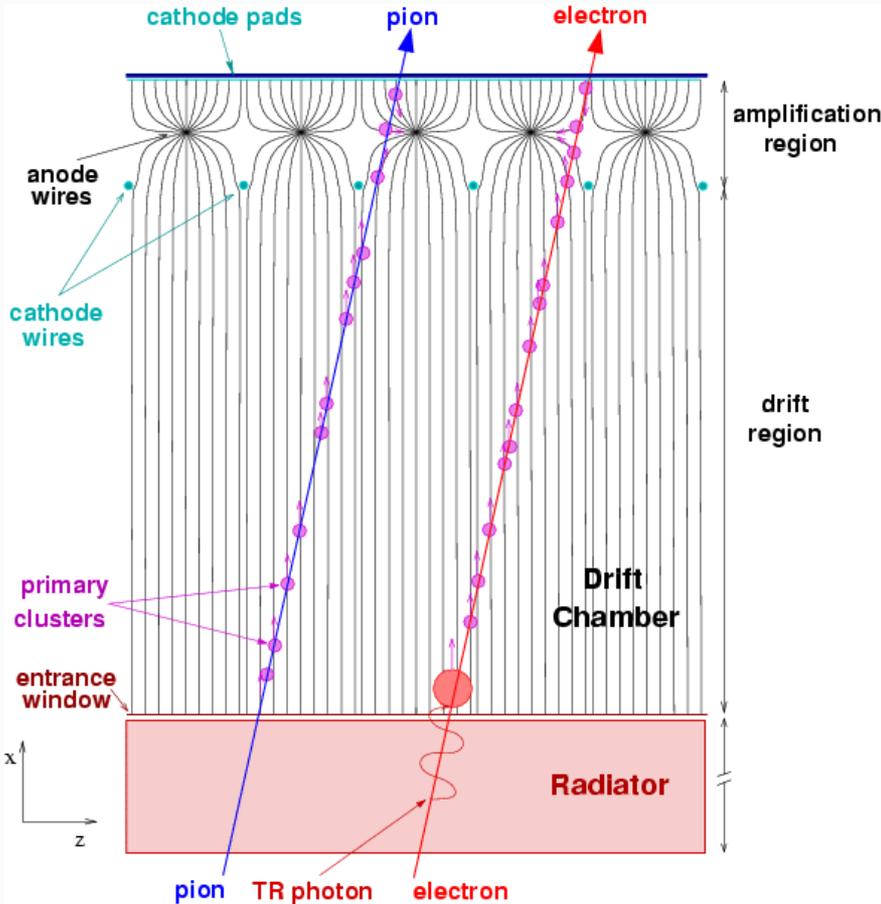
- 18 supermodules
 - 6 strati radiali
 - 5 sezioni longitudinali
- ⇒ 540 camere
⇒ 750 m² area attiva
⇒ 28 m³ di gas

Ciascuna camera:
≈ 1.45 x 1.20 m²
≈ 12 cm di spessore

in totale 1.18 milioni di
canali di informazione

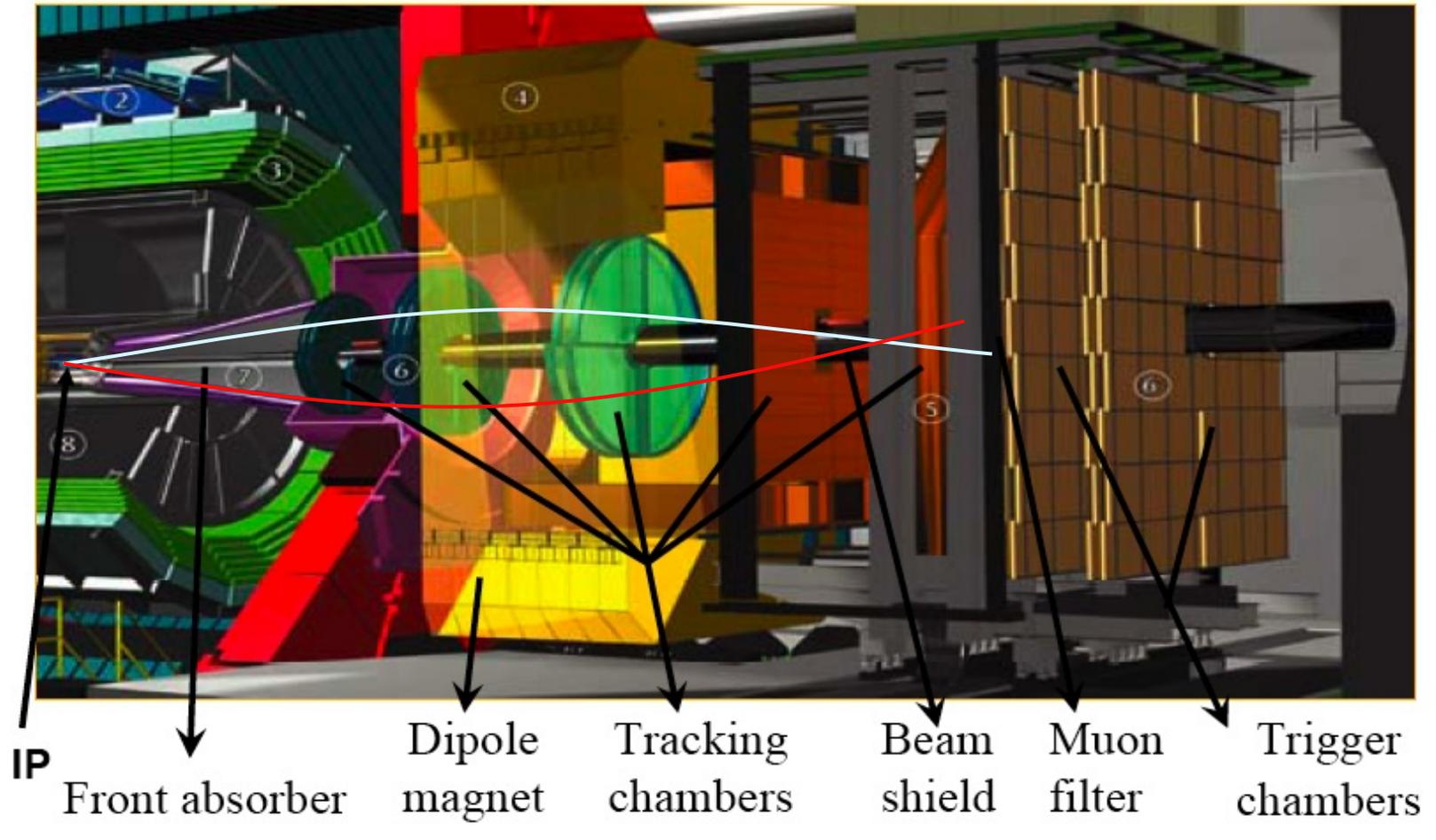


Principio di funzionamento del TRD



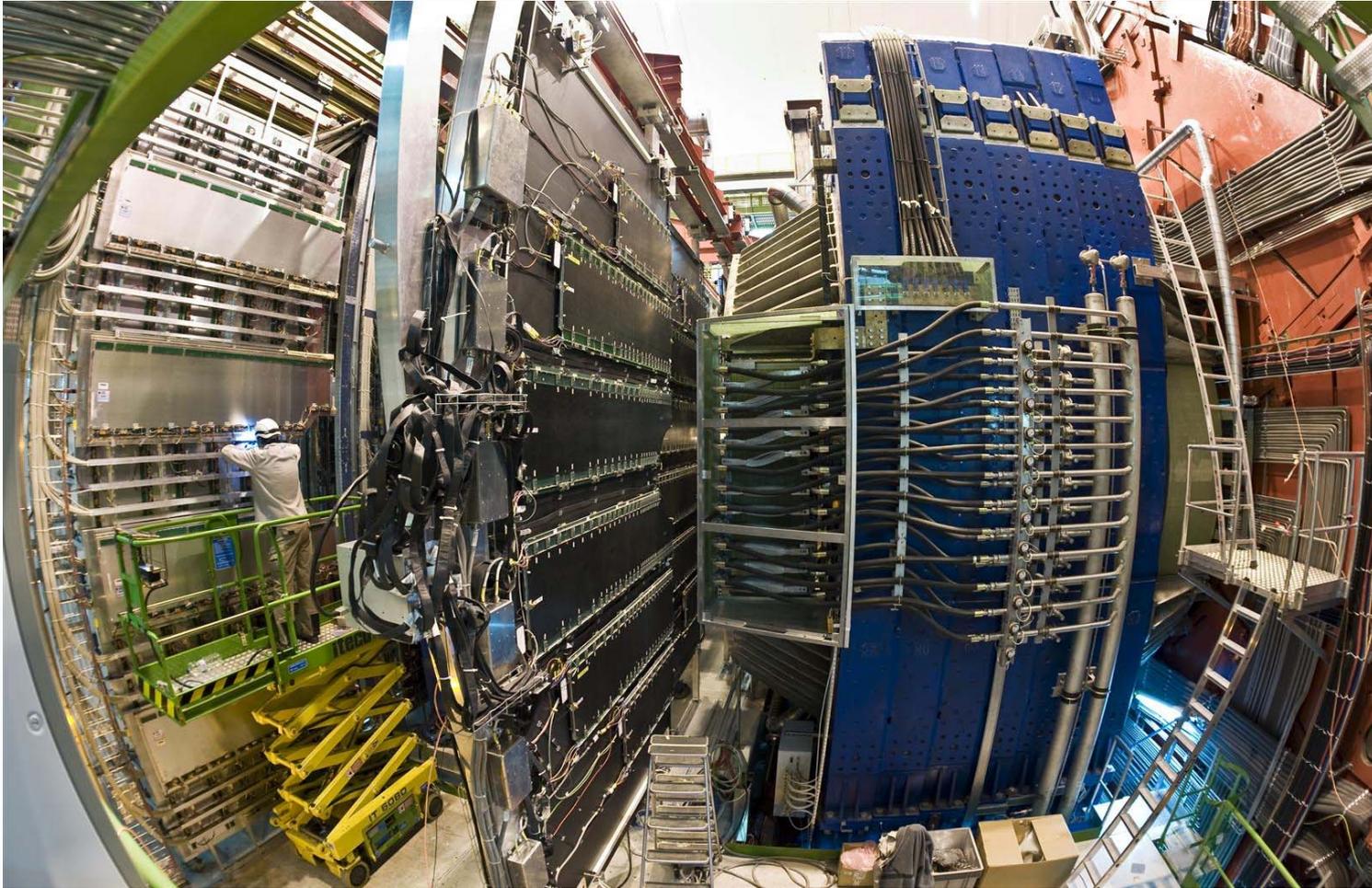
Charged particles at $\gamma > 1000$ give T.R. photons ($< 30\text{KeV}$).
They are absorbed by high-Z gas (Xe, CO_2) mixture

Lo spettrometro per i muoni

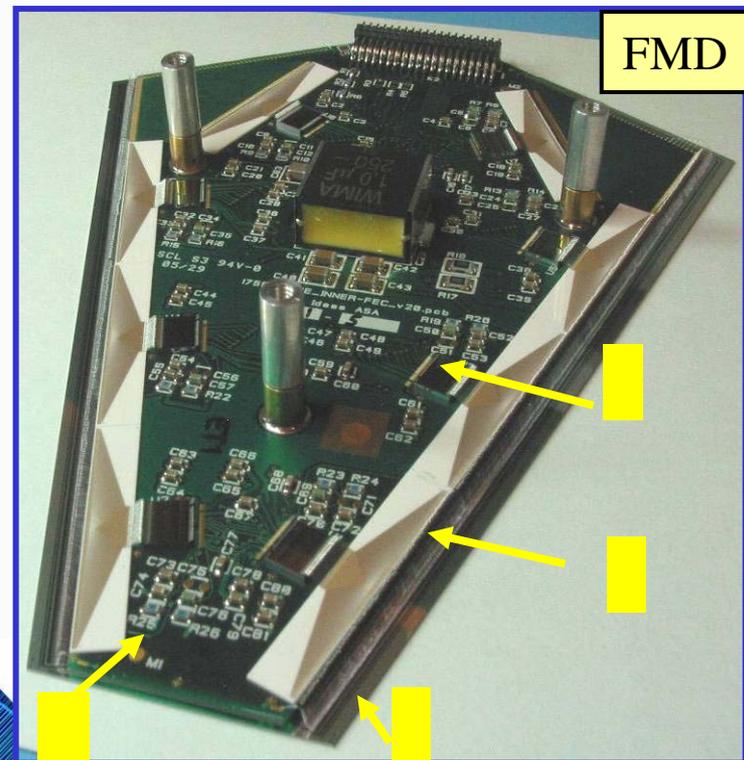
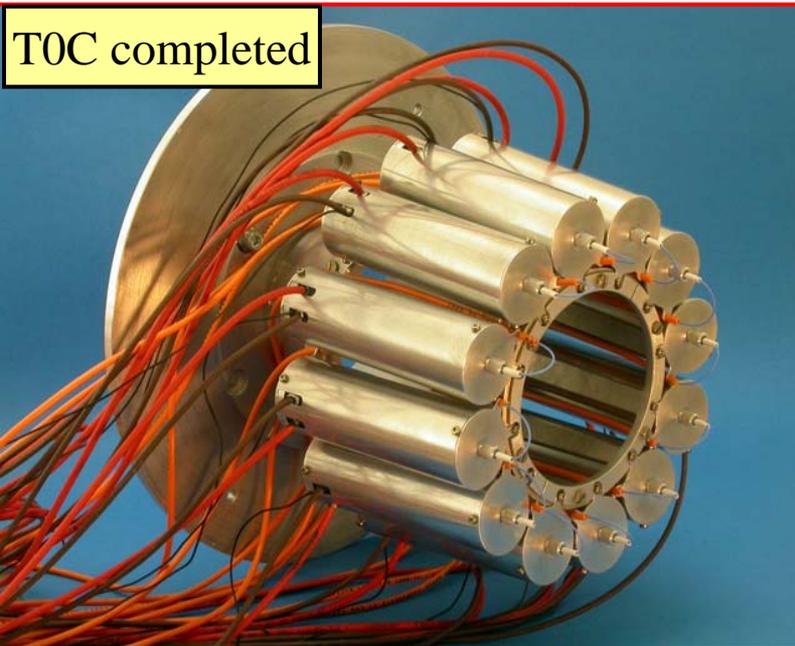


Lo spettrometro serve per misurare la quantità di moto dei muoni provenienti dal decadimento di mesoni $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$

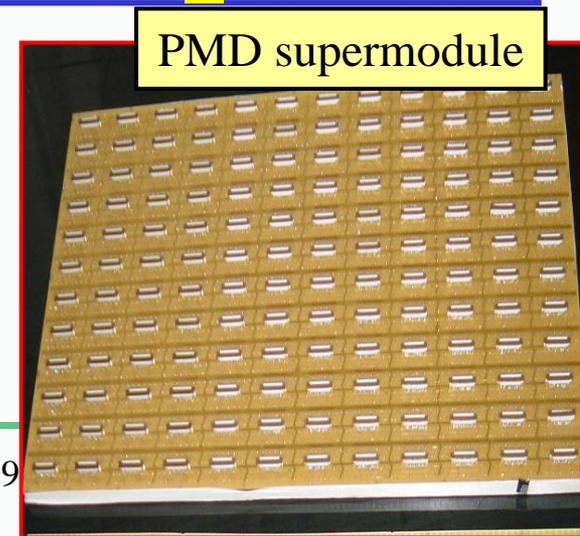
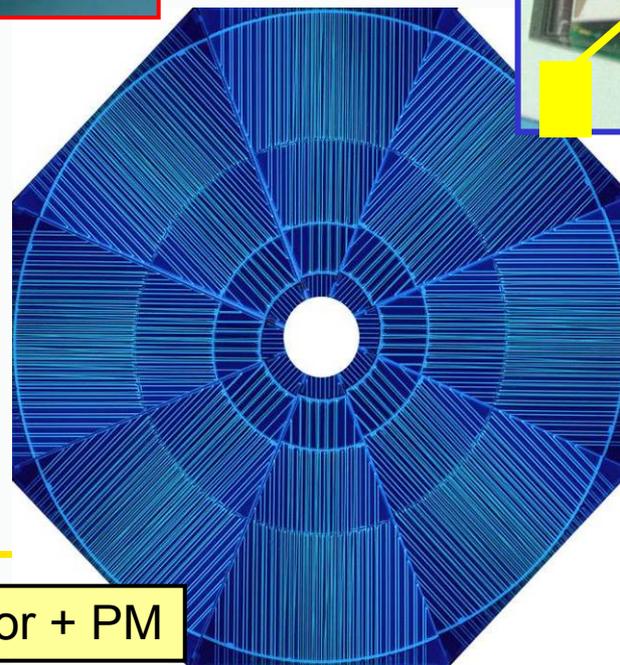
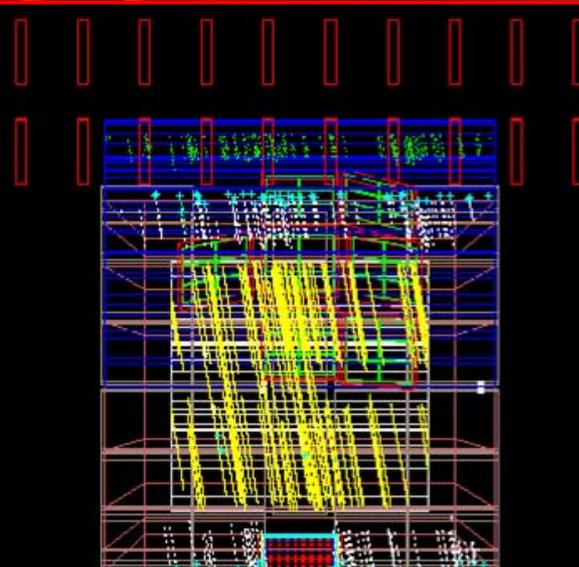
Assemblaggio del rivelatore



Rivelatori in avanti



V0A

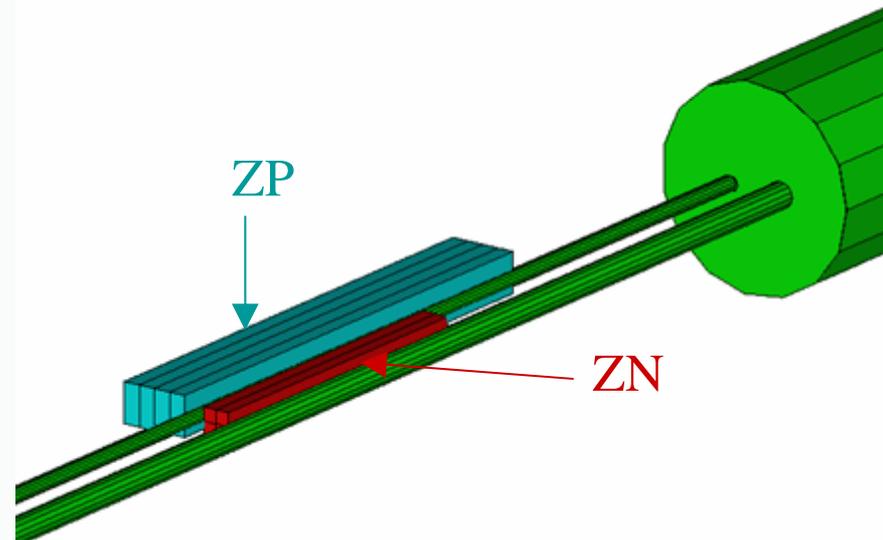
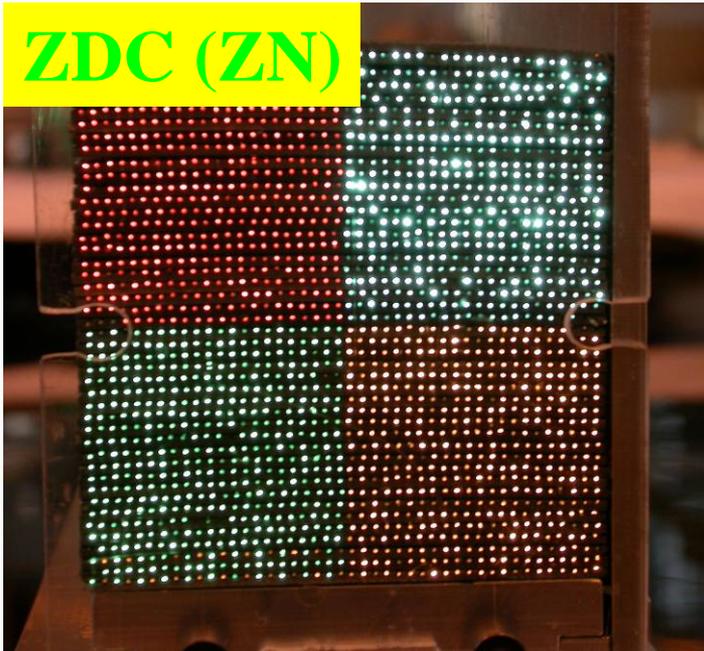


Accorde: large area Scintillator + PM

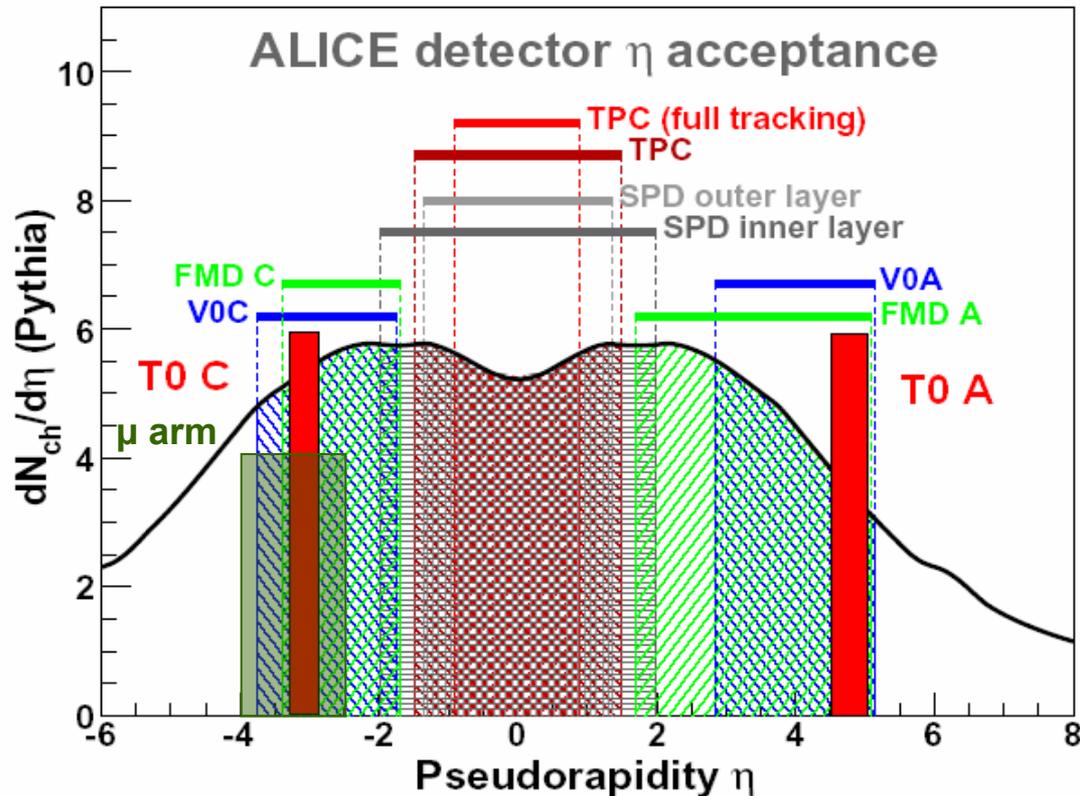
Calorimero a Zero Gradi

- 3 coppie di calorimetri (basati sull'effetto Cerenkov)
 - 2 calorimetri adronici per parte (ZP, ZN) a 113 m dal punto di intersezione dei fasci (IP)
 - 2 calorimetri e.m. posti a circa 8 metri dal IP
- seleziona la centralita' dell'urto
- misura il piano di reazione

	Proton ZDC (ZP)	Neutron ZDC (ZN)	EM ZDC
Dimensions (cm ³)	12x21x150	7x7x100	7x7x21
Absorber	brass	W-alloy	lead
Fibre angle wrt LHC axis	0°	0°	45°
Fibre Ø (µm)	550	365	550



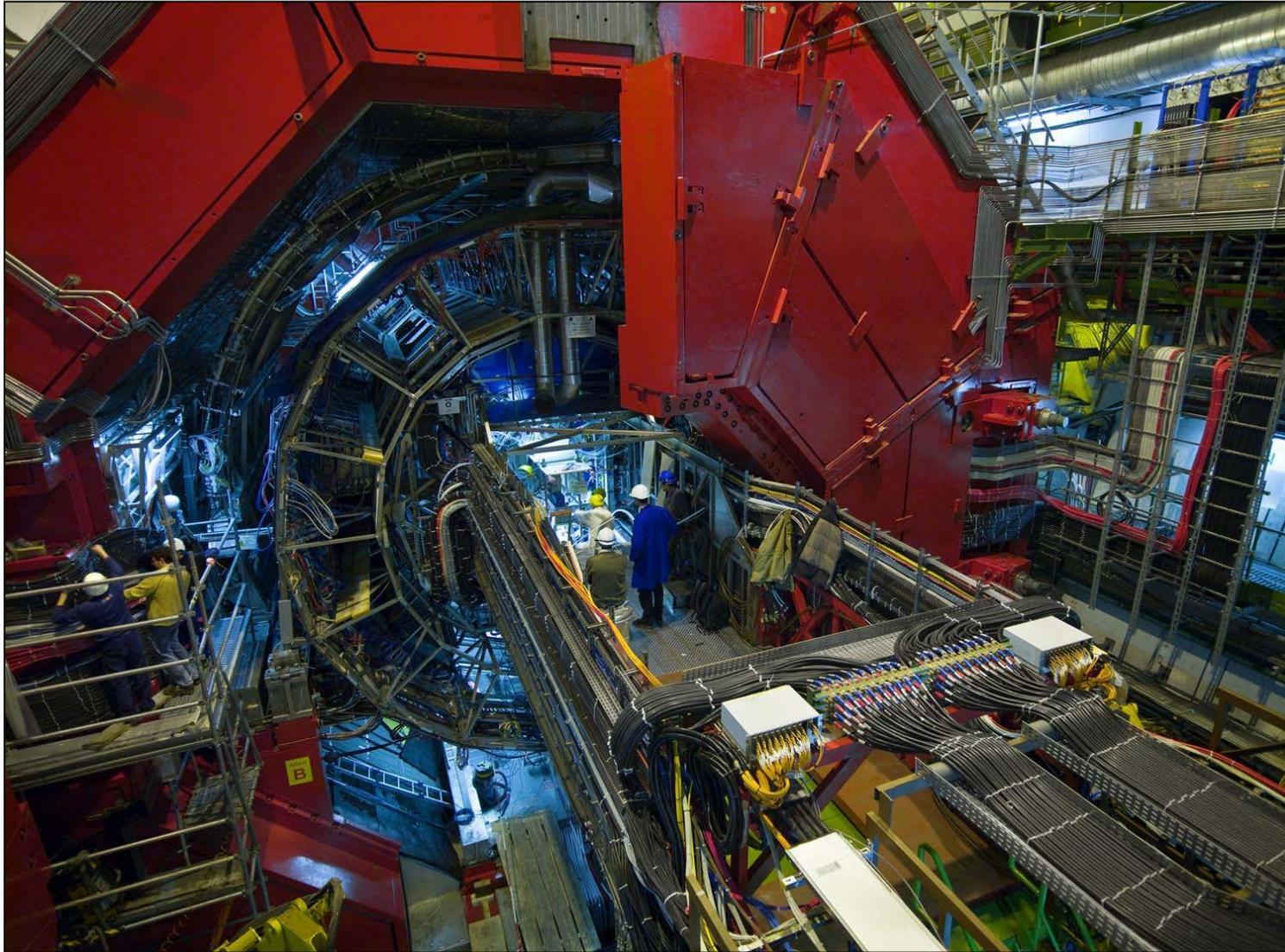
Accettazione delle particelle cariche in ALICE



• **Selezione degli eventi** fornita dal rivelatore **V0**

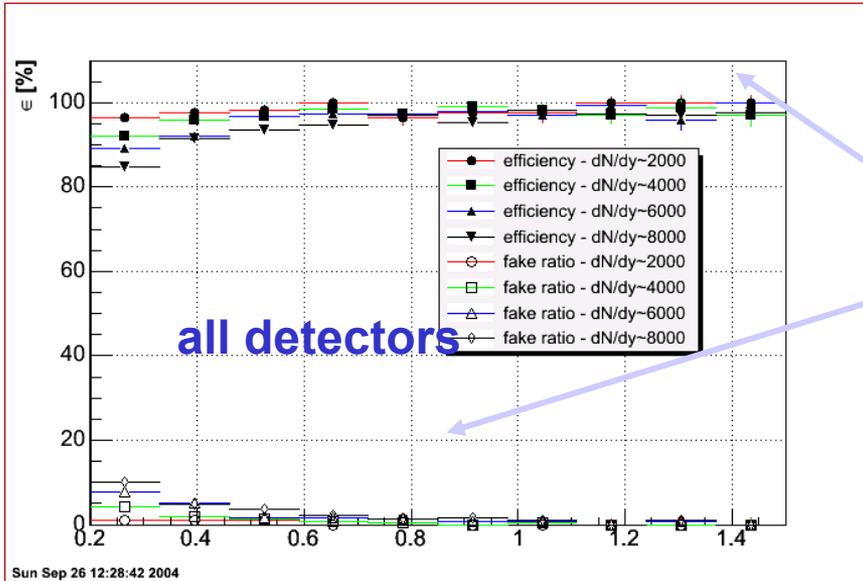
• Ci si aspetta una eccellente misura della molteplicità delle particelle cariche prodotte nella regione centrale grazie ai rivelatori di tracciamento (**ITS + TPC**)

The ALICE EXPERIMENT



Efficienza del tracciamento

- Rappresenta un punto cruciale dell'esperimento:
 - Alta densita' di particelle prodotte nell'interazione!

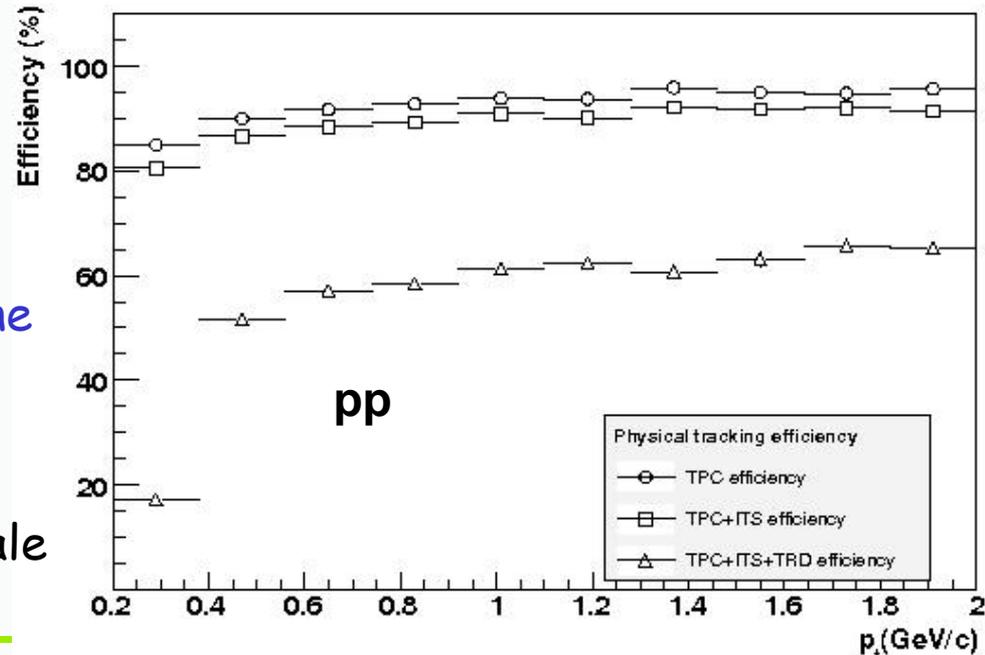


Per una densita' di particelle stimata di qualche migliaio (2000 - 4000)

L'efficienza sta sopra il **90%** e la probabilita' di combinazioni 'false' resta sotto il **5%**

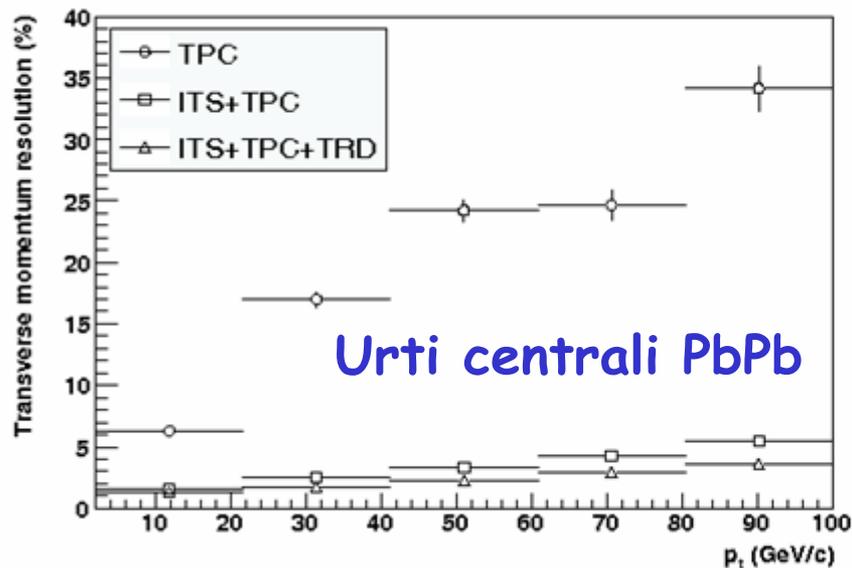
L'efficienza e' naturalmente funzione della quantita' di moto e del tipo di particella

protoni - assorbimento nel materiale

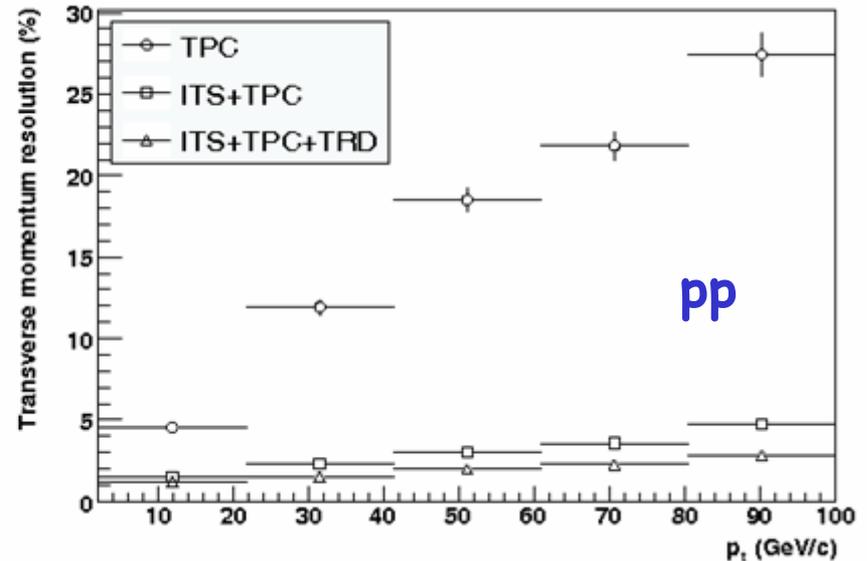


Risoluzione sulla quantita' di moto

Ricostruzione di tracce con $p < 100 \text{ MeV}/c$ fino a $p > 100 \text{ GeV}/c$

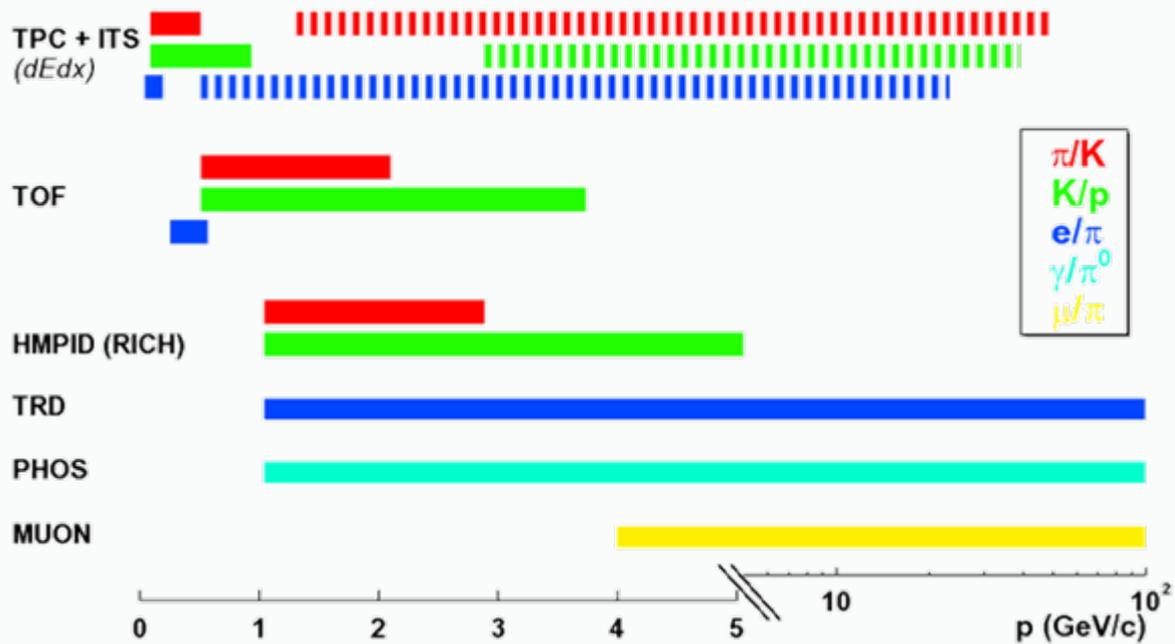


- a bassi valori di p la risoluzione dipende da:
- fluttuazioni di perdita di energia
 - diffusione multipla



- a grandi valori di p la risoluzione dipende da:
- precisione sui punti misurati
 - allineamento e calibrazione

PID in ALICE



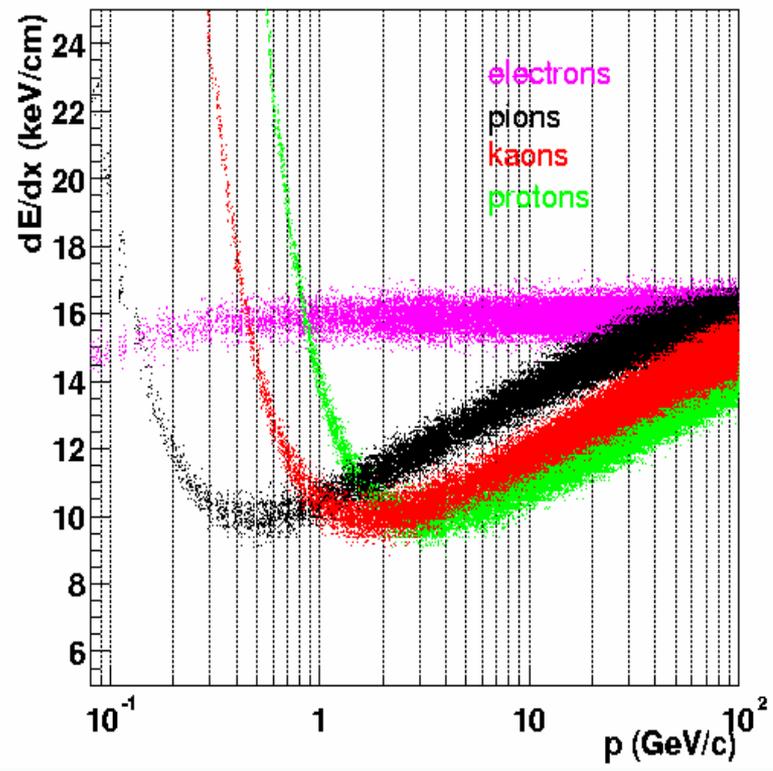
- eccellente identificazione di particelle fino a ~ 50 to $60 \text{ GeV}/c$

- Identificazione di particelle a vita media corta (hyperoni, mesoni D/B) attraverso la rivelazione del vertice secondario

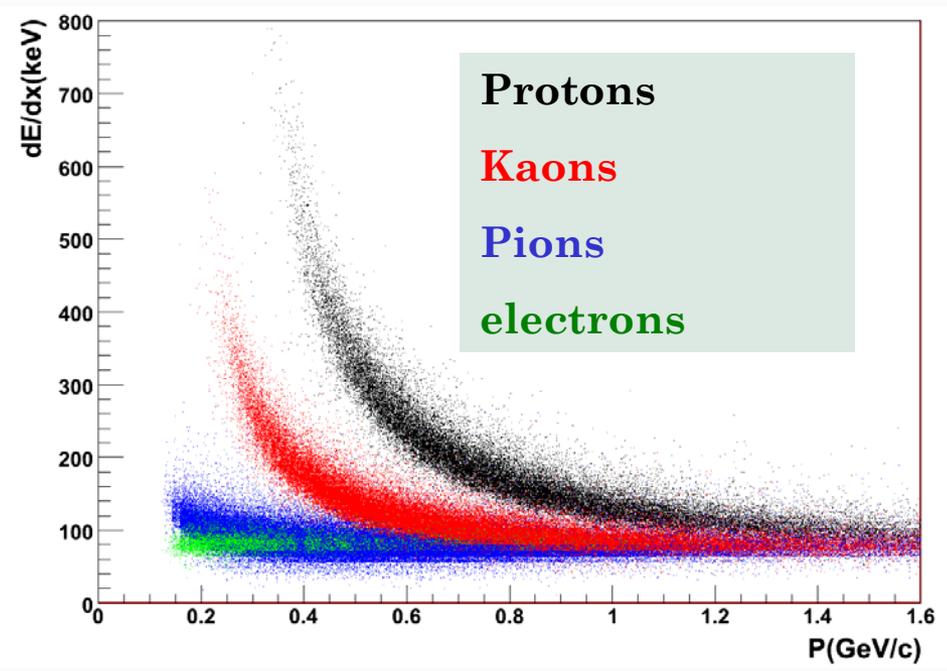
Identificazione di particelle con dE/dx

$$\frac{\overline{\Delta E}}{\Delta x} = 2C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{Zz^2}{A} \rho \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2\gamma^2 \beta^2 m_e c^2 E_{\max}}{I_0^2} \right) - \beta^2 - \frac{\epsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2} \right]$$

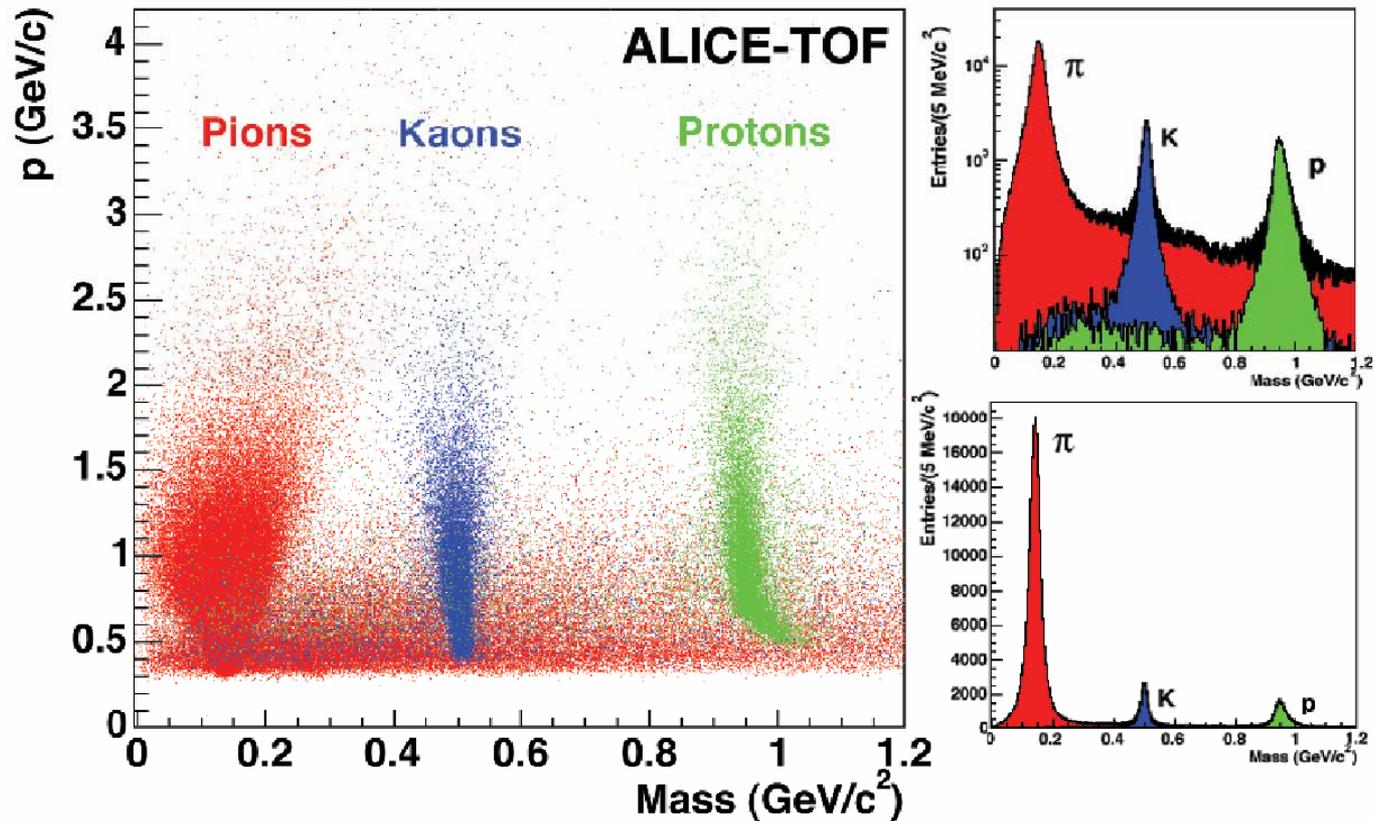
nella TPC



nel ITS



Identificazione di particelle con il TOF



Funzionamento di ALICE

- Prendera' dati pp a 14 TeV.
- Programma iniziale con ioni pesanti:
 - 1-2 anni Pb-Pb
 - 1-2 anni Ar-Ar
- Opzioni future:
 - collisioni pp a 5.5 TeV
 - possibilmente pPb
 - altri sistemi ione-ione