

Secondo il programma, vi parlerò di

Fisica di ALICE e prospettive ioni pesanti

IN 15 MINUTI ???

È ovviamente impossibile, anche risparmiando sulle preposizioni come nel titolo.

Per chi fosse, nonostante tutto, interessato alla materia

... let's then start with some references

- ALICE Physics Performance Report:
 - Volume 1: F. Carminati et al., J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 30 (2004) 1517
 - Volume 2: B. Alessando et al., J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 32 (2006) 1295
- ALICE Detector technical paper:
 - K. Aamodt et al., The ALICE Experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08002.

- <http://aliceinfo.cern.ch/>

Si è appena concluso (22-24 aprile) un **CORSO DI FORMAZIONE** sulla “fisica di ALICE” e sulle tematiche affini

- Slides delle lezioni di Quark Matter Italia 2009 in Indico e referenze lì citate:

[Home](#) > [Strutture INFN](#) > [Roma1](#) > [Attivita' della Sezione di Roma dell'INFN](#) > [Formazione](#) > Corsi per il personale ricercatore

Cannibalizzate per questa presentazione

Come minimo, bisognerebbe trattare a vol d' uccello:

- Di che fisica si tratta ?
- Che cosa abbiamo capito e come ?
- Che cos' altro vogliamo sapere e come ?



- Passato e presente degli esperimenti
 - SPS
 - RHIC



- Temi caldi: **flow, jet quenching, ...**



- **Il futuro**
 - RHIC upgrade e LHC
 - Altri esperimenti (SHINE, CBM)

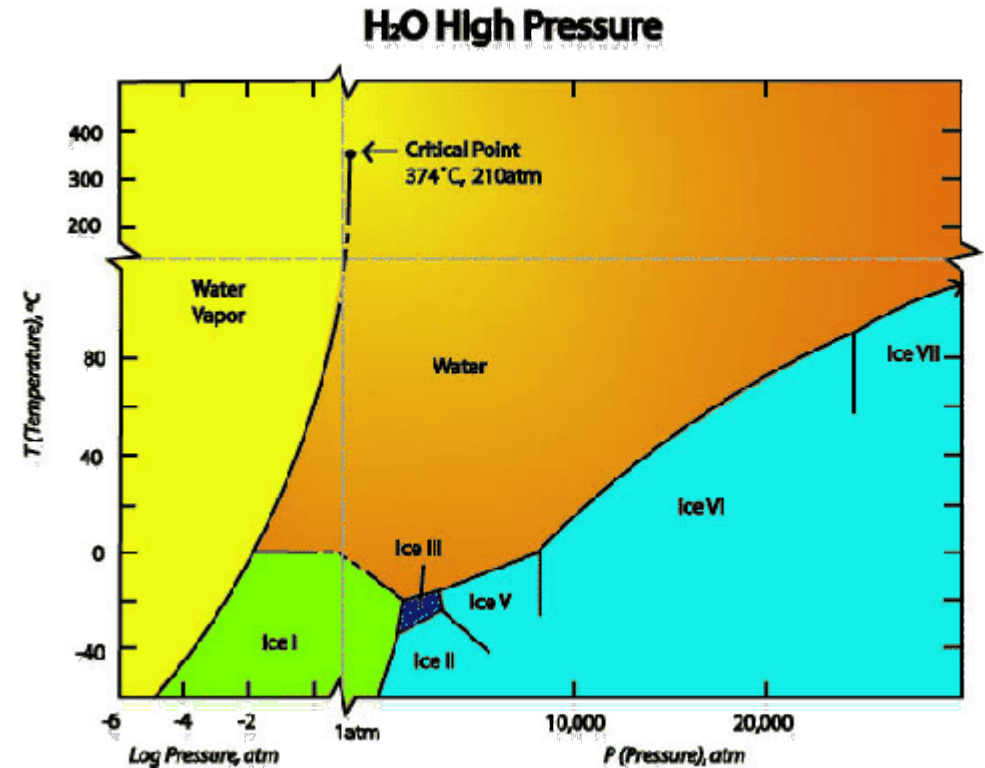
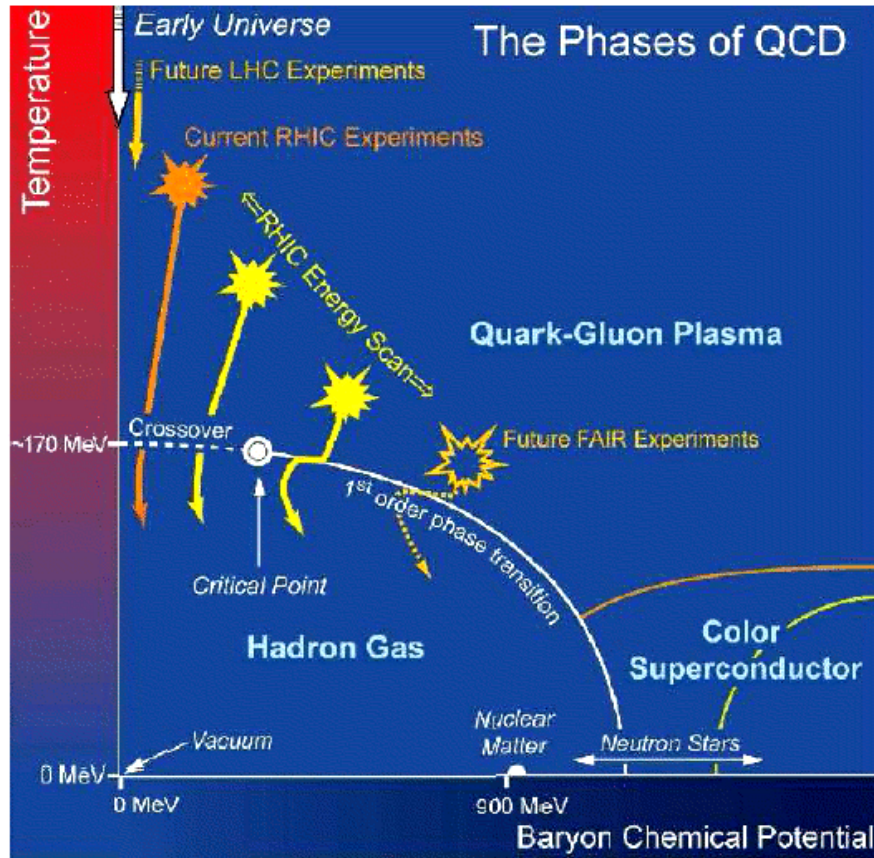
Ho quindi preparato queste slide secondo tale **scheletrico** schema.

Nonostante questo, non ho modo di presentarvene davvero, in modo sensato e coerente, neppure una parte.

E quindi .. ve le mostrerò una dopo l' altra, leggendone i titoli, e soffermandomi al massimo su **qualche figura**.




QCD phase diagram



Vogliamo capire come **fenomeni collettivi e proprietà macroscopiche** della materia fortemente interagente emergano dalle interazioni fondamentali

- Qual'è l' equazione di stato della QCD ?
- Quali sono le proprietà della materia in condizioni estreme di densità e di temperatura ?
 - gradi di libertà
 - viscosità
 - conducibilità termica
 - trasporto dei numeri quantici conservati
- Quali sono i meccanismi microscopici della dinamica di non-equilibrio e della termalizzazione ?
 - perdita di energia dei partoni
 - instabilità di plasma
- Come procede l' adronizzazione ? Come cambia nella materia densa ?

Predizioni dalla QCD:

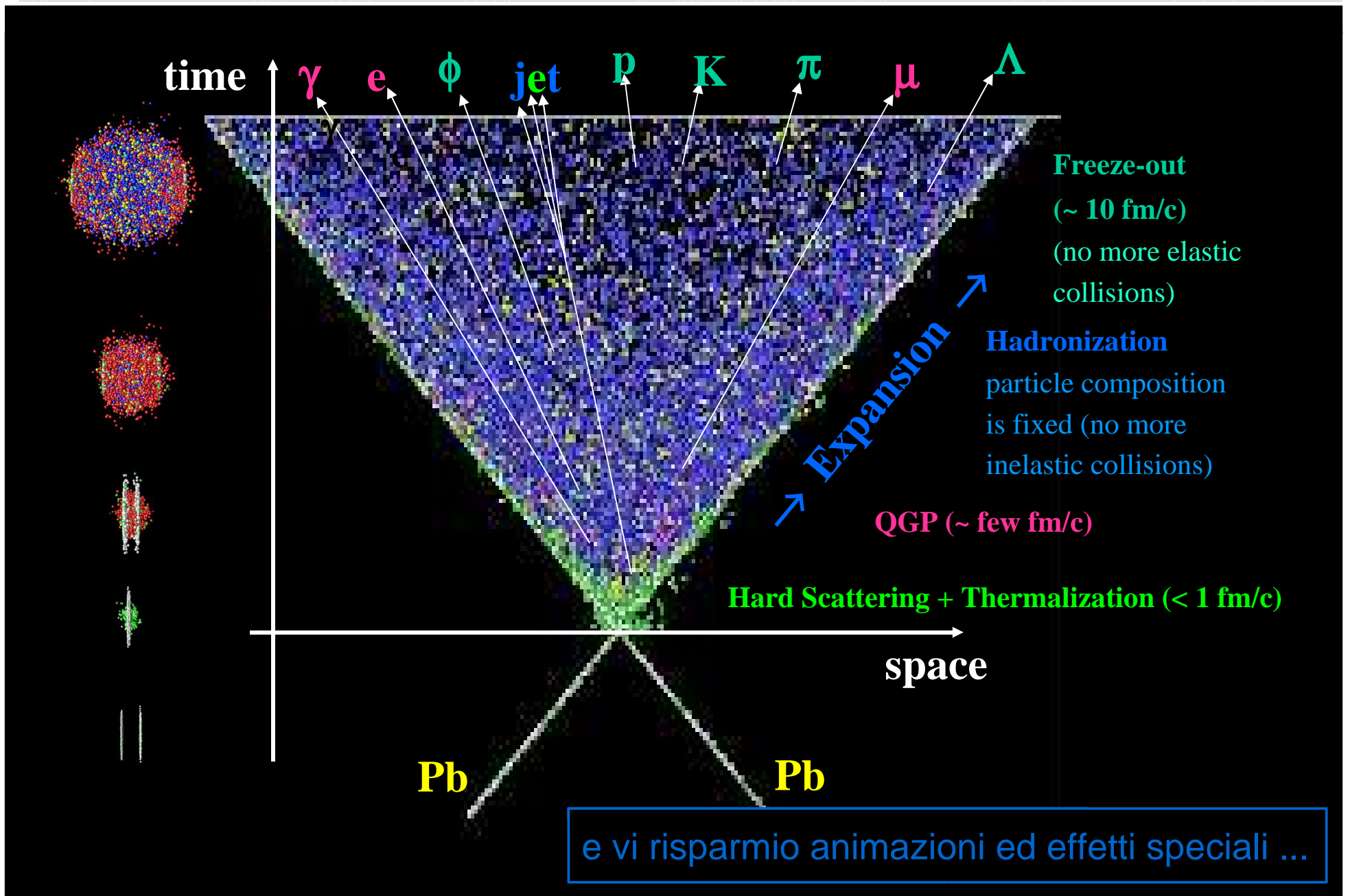
- metodi non perturbativi
 - Lattice 
 - Effective lagrangians
 - Chiral lagrangians
 - Heavy quark effective theories
 - AdS/CFT correspondence
 -
 - QCD sum rules
 - Potential models (quarkonium)
 - metodi perturbativi
 - Basati sulla asymptotic freedom, poco applicabili agli HI (fino a tempi recenti)
- Predicts a rapid transition, with correlated deconfinement and chiral restoration
Energy density increases sharply by the latent heat of deconfinement
Recent predictions on the critical endpoint

- Precursore: Fermi
- Successore: Landau
- Prototipo : Bjorken
- Attualmente : **Idrodinamica** viscosa

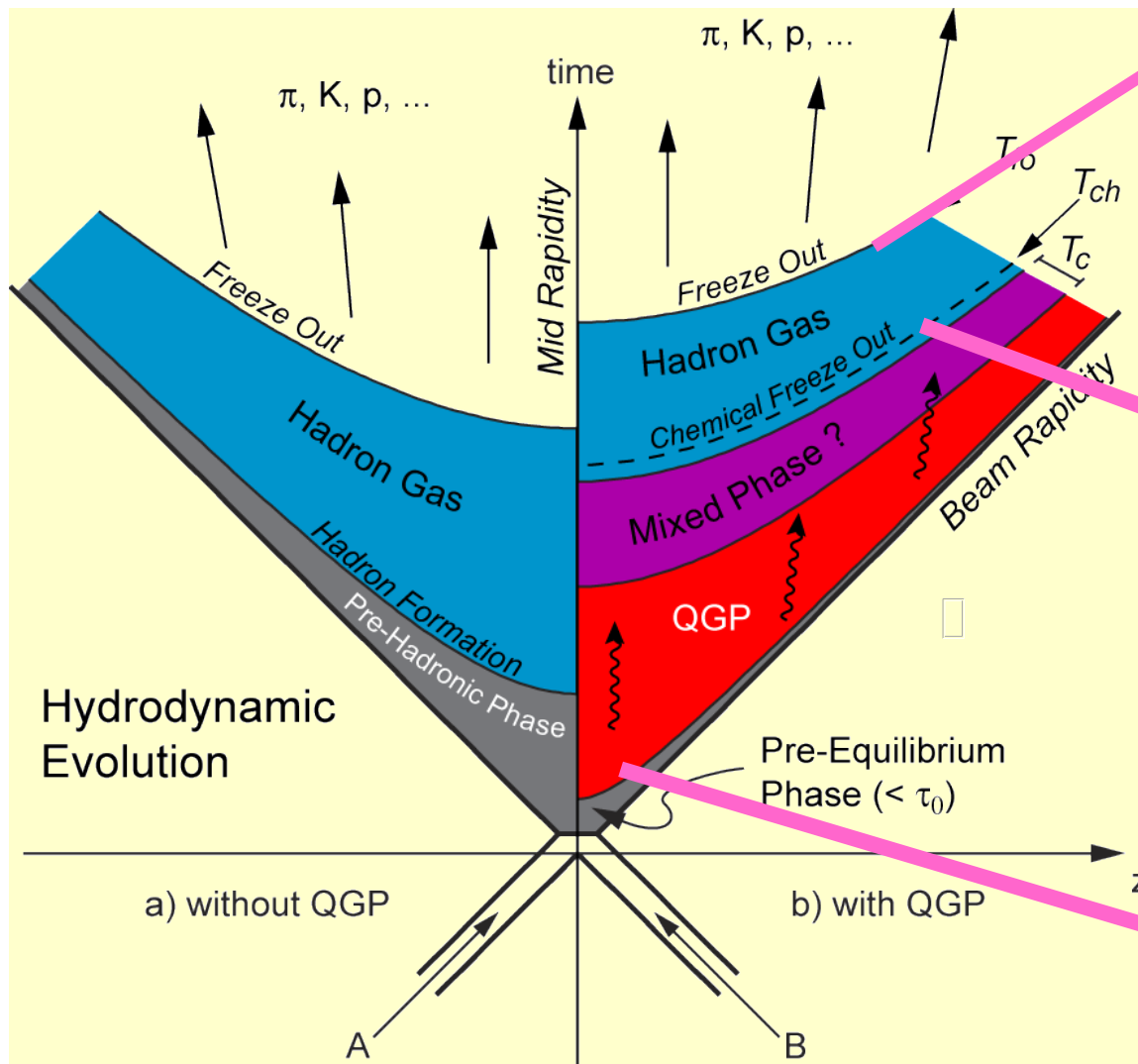
Perchè idrodinamica nelle collisioni di HI ? Transizioni di fase, termodinamica \Leftrightarrow fenomeni adiabatici, cambiamenti che avvengono infinitamente lentamente. Ma noi creiamo una “esplosione” molto **veloce** e **violenta** di particelle !

L' idrodinamica e' una teoria effettiva dove il parametro che è “piccolo” è il tempo di termalizzazione rispetto all' evoluzione macroscopica del sistema. Gli “ingredienti” (EoS, coefficienti di trasporto) sono calcolabili dalla termodinamica di equilibrio.

HI physics: space-time evolution of the collision (I)



HI physics: space-time evolution of the collision (II)



.. anzi, ve la faccio vedere in modo schematico

- Thermal freeze-out
 - Elastic interactions cease
 - Particle dynamics (“momentum spectra”) fixed

T_{fo} (RHIC) ~ 110-130 MeV
- Chemical freeze-out
 - Inelastic interactions cease
 - Particle abundances (“chemical composition”) are fixed (except maybe resonances)

T_{ch} (RHIC) ~ 170 MeV
- Thermalization time
 - System reaches local equilibrium

t_{eq} (RHIC) ~ 0.6 fm/c

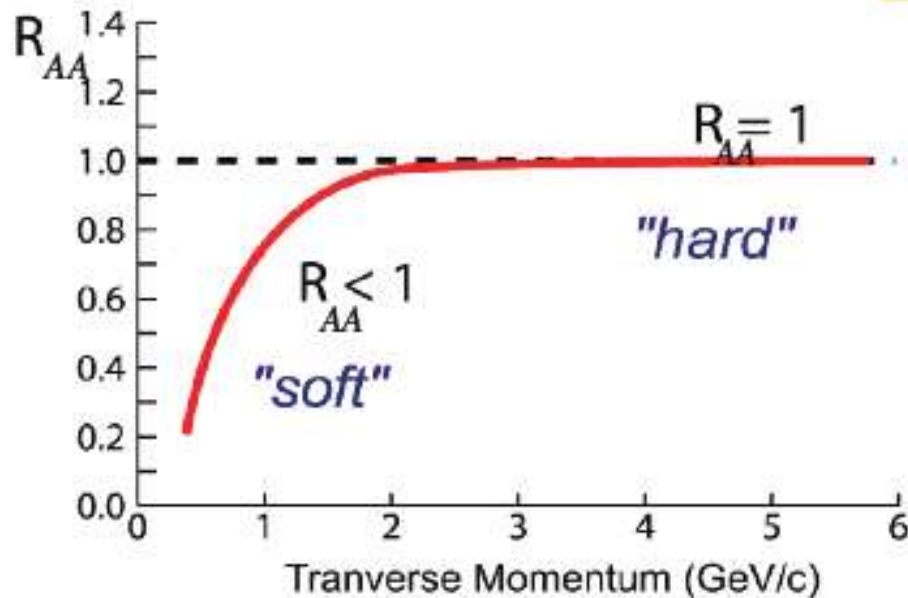
Ovviamente, usiamo tutte le variabili e grandezze che conoscete. Se parlo di impulso trasverso, tutti sanno di cosa sto parlando. Ma ci sono grandezze specifiche della fisica degli ioni:

- ▶ v_2 Fourier coefficient of azimuthal anisotropies, “flow”
- ▶ R_{AA} 1 if yield = perturbative value from initial parton-parton flux
- ▶ T Temperature (MeV)
- ▶ μ_B Baryon chemical potential (MeV) ~ net baryon density
- ▶ η Viscosity (MeV^3) *indirectly inferred from R_{AA} and v_2*
- ▶ s Entropy density ~ “particle” density
- ▶ ε Energy density (Bjorken 1983)

$R_{AA} = \text{medium/vacuum}$

$$R_{AA}(p_T) = \frac{d^2 N^{AA} / dp_T d\eta}{T_{AA} d^2 \sigma^{NN} / dp_T d\eta}$$

$$\langle N_{\text{binary}} \rangle / \sigma_{\text{inel}}^{p+p}$$



no medium effects:

$R_{AA} < 1$ in regime of soft physics

$R_{AA} = 1$ at high- p_T where hard scattering dominates

Suppression:

$R_{AA} \ll 1$ at high- p_T

Elliptic flow coefficient $dn/d\phi \sim 1 + 2 v_2(p_T) \cos(2\phi) + \dots$

dove l'angolo di azimuth viene misurato rispetto al piano d'interazione

Il “flow” agisce negli stadi iniziali

Correlazione tra coordinate and momenti \Rightarrow l'asimmetria azimutale della regione di interazione viene trasportata nello stato finale; particelle vicine si muovono con velocità simili in direzioni simili.

Il “flow” si origina in un mezzo (interagente) con un gradiente di pressione. Date delle condizioni al contorno, il profilo del “flow” dipende dalla EoS e dalla viscosità η del fluido. Nell'idrodinamica del liquido perfetto: $\eta = 0$ (viscosità nulla), $\lambda = 0$ (fortemente interagente)

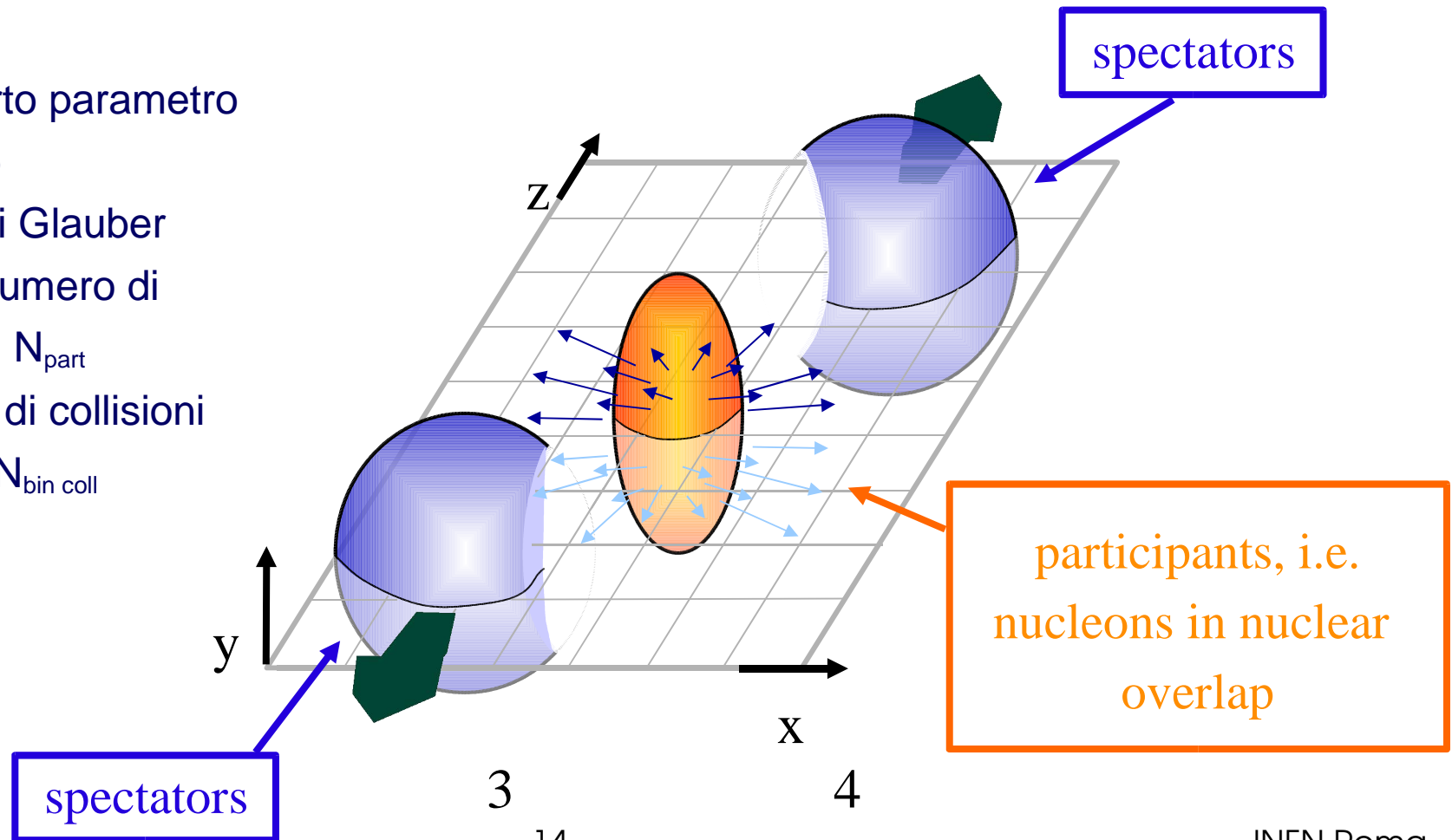
Centralità \rightarrow parametro d' impatto (b)

“central” $\Rightarrow b \sim 0$

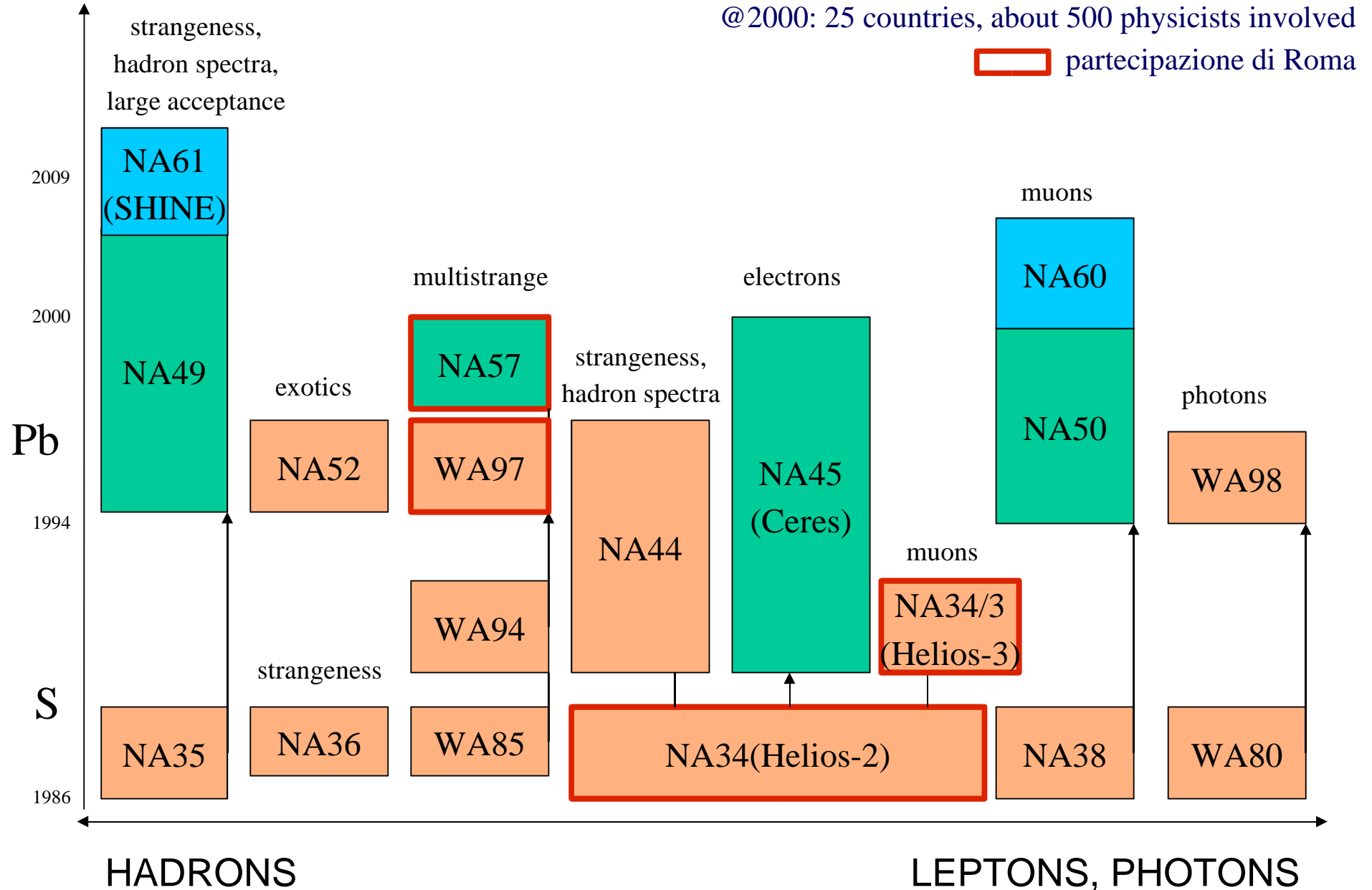
“peripheral” $\Rightarrow b \sim b_{\max}$

Il numero degli spettatori puo essere (viene) misurato (zero degree calo's)

Dato un certo parametro d' impatto b il modello di Glauber fornisce il numero di partecipanti N_{part} e il numero di collisioni elementari $N_{\text{bin coll}}$



HI experiments at the SPS



- Strangeness enhancement due to chiral symmetry restoration predicted in 1982 (Rafelski, Müller) + stronger enhancement for multistrange particles due to recombination predicted in 1986 (Koch, Müller, Rafelski)
⇒ **Observata da WA97 e NA57**
- J/ψ suppression in AA collisions due to Debye screening predicted in 1986 (Matsui, Satz)
⇒ **Observata da NA50 e NA60**

“The claim of having observed a new state of matter compatible with the QGP largely based on these two experimental findings”

Oggi: Non ci sono “golden signatures” che provino l' esistenza del QGP
Molti “strumenti sperimentali” per seguire l' evoluzione della collisione

HI experiments at the RHIC

RHIC è in funzione dal 2000 a BNL, con collisioni AuAu, dAu, CuCu e pp fino a $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV/A}$ - al RHIC, 4 esperimenti:

- **STAR**
 - Osservabili adroniche
 - Grande accettazione
- **PHENIX**
 - Adroni
 - Fotoni e leptoni

- **PHOBOS**
 - Adroni carichi
 - Particle correlations
- **BRAHMS**
 - Produzione inclusiva di particelle
 - Grande range di rapidità

Running (energy scan)
Being upgraded

Completed

Risultati di RHIC in estrema sintesi: con RHIC siamo davvero entrati nell' era della termodinamica di sistemi fortemente interagenti

- *The colliding nuclei at RHIC are CGC (**saturation**)*
- *The matter produced at RHIC shows strong collective motion and evidence for hydrodynamic behavior with **very small viscosity**. Flow builds up at the partonic level*
- *The matter produced at RHIC is **opaque** to hard probes*

Esiste quella che definiremmo una forte “evidenza circostanziale” dell' esistenza di un mezzo partonico colorato, prodotto nelle fasi iniziali della collisione, che si espande come un liquido quasi ideale

- ▶ Molteplicità al RHIC: molto inferiori a quanto atteso, **saturazione ?**

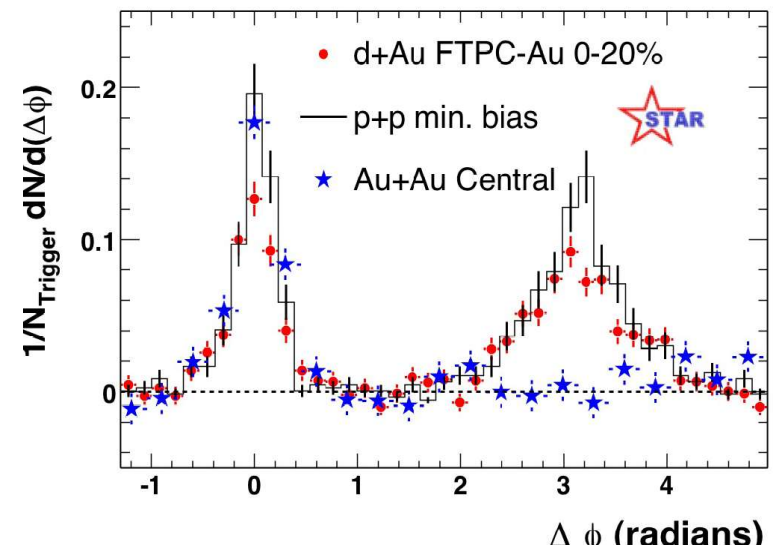
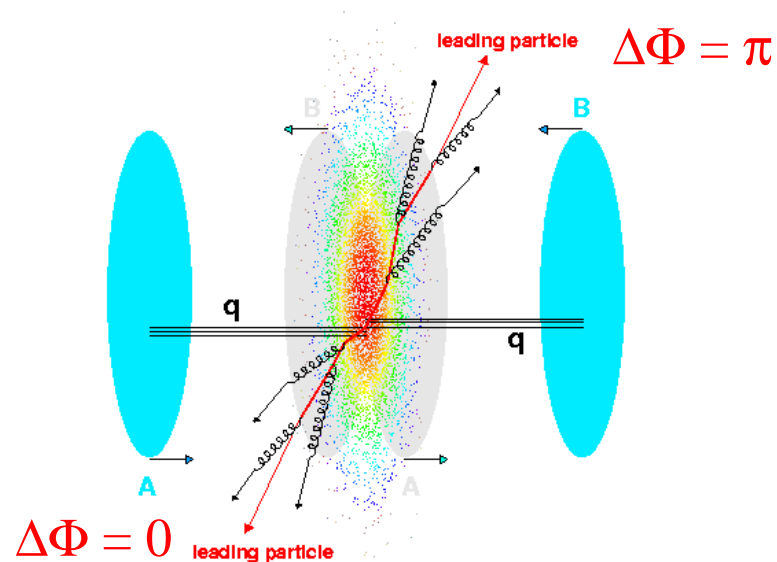
QCD Saturation Physics – Siamo in un regime qualitativamente diverso nel quale le densità di partoni sono massime e la costante di accoppiamento piccola

- ▶ Flow al RHIC: **perfetto !**

La “struttura fine” $v_2(p_T)$ per differenti particelle mostra un buon accordo con l' idrodinamica ideale (“fluido perfetto”)

- ▶ Jet al RHIC: la materia è **opaca !**

Partner in hard scatter completamente assorbito nel mezzo denso



Parliamo soprattutto di PbPb, ma sappiamo che “serviranno” collisioni di ioni più leggeri (Sn, Kr, Ar, O) e collisioni pA ...

Limiti per l'intensità all' LHC:

- Perdite per processi elettromagnetici (caso Pb: ~ 500 barn)

⇒ vita media della luminosità:

1 esperimento	6.7 h	@10h $\langle L \rangle = 0.44 L_0$
2 esperimento	3.7 h	@10h $\langle L \rangle = 0.34 L_0$
3 esperimento	2.7 h	@10h $\langle L \rangle = 0.28 L_0$

- Quench limit vicino alla luminosità nominale ($10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Limiti dall' SPS:

- bunch intensity limit vicino alla luminosità nominale
- ⇒ limita gli schemi possibili per migliorare $\langle L \rangle / L$

$$L_0 \text{ max} = 1.0 \times 10^{27} \text{ per PbPb} \quad 0.6 \times 10^{29} \text{ per ArAr} \quad 2.0 \times 10^{29} \text{ per OO}$$

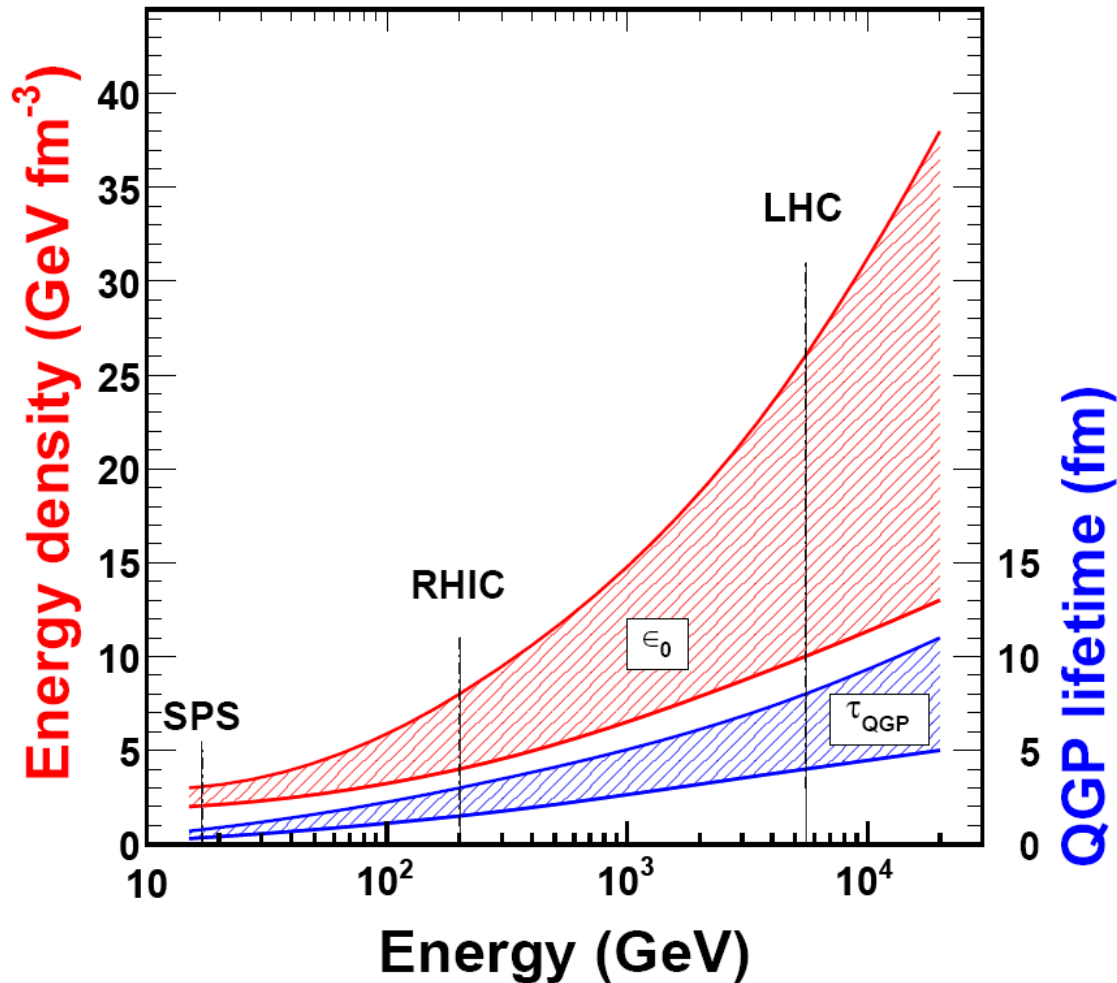
The LHC as an Ion Collider – running plans

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

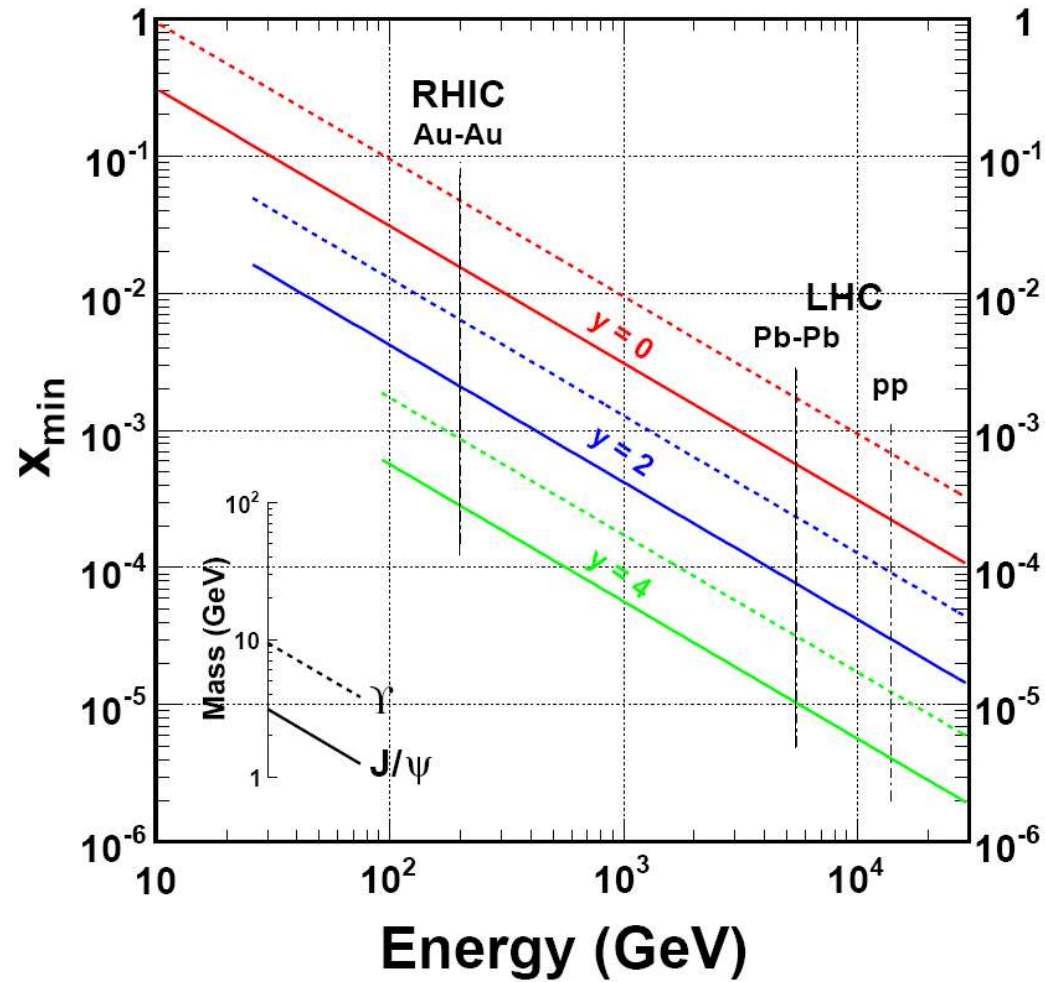
** $\int L dt \sim 0.5 \text{ nb}^{-1}/\text{year}$

- **PbPb** a bassa luminosita ($\sim 1/20^{\text{mo}}$ del progetto) $L \sim 5 \times 10^{25} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1 anno, sperabilmente a fine 2010
- **PbPb** alla luminosita di progetto $L \sim 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2-3 anni, col proposito di integrare $\sim 1 \text{ nb}^{-1}$
- **pPb** o simili (p, d, ...) $L \sim 10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1 anno
- **ioni “leggeri”** (ArAr, ...) $L \sim n \times 10^{27} - 10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1 anno

Energia: **LHC = 28 × RHIC** RHIC = 10 × SPS



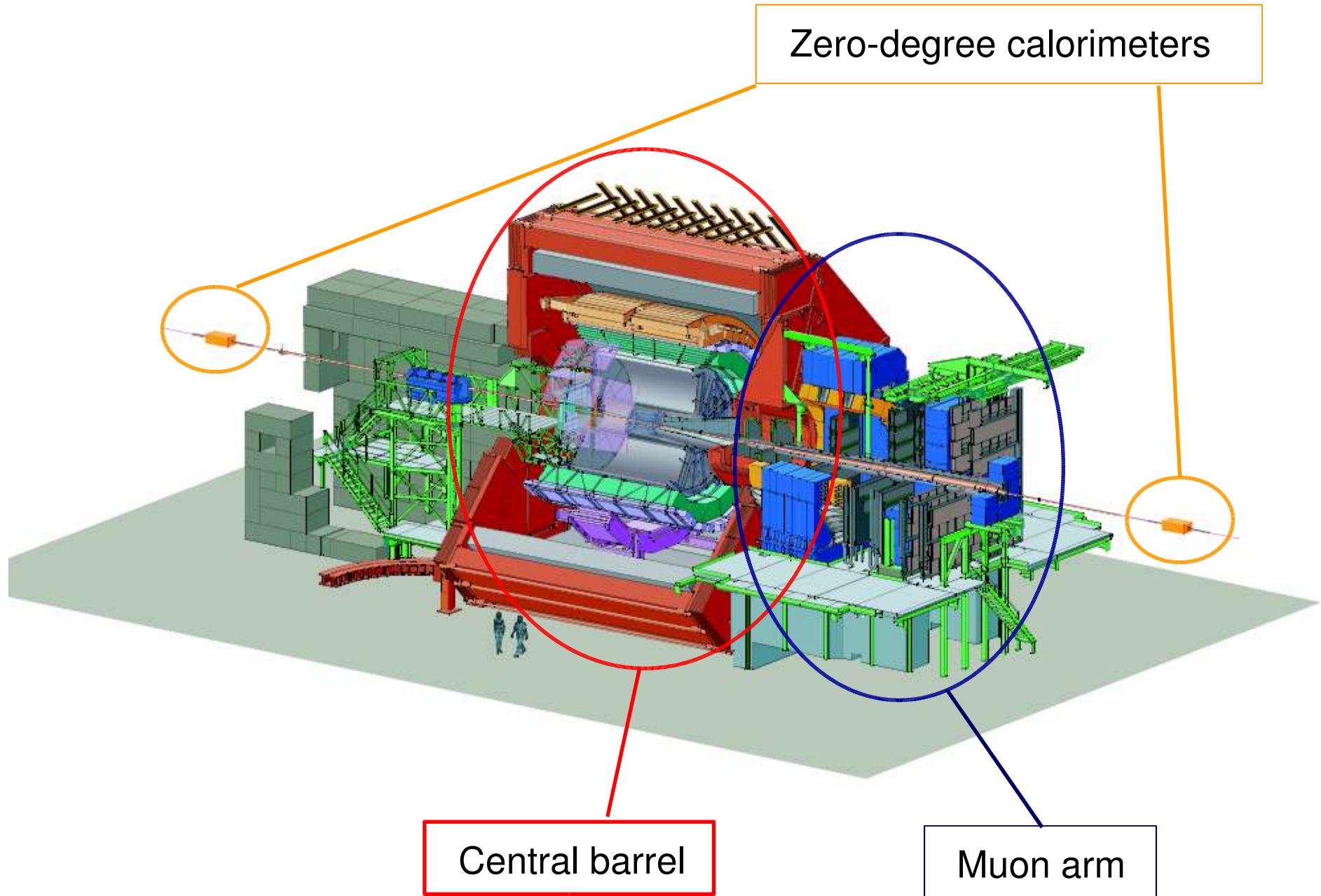
Densità di energia e
QGP lifetime
aumentano
di un **fattore 2 ÷ 3**



Regione a **basso x**
ancora inesplorata

HI @ LHC: the Experimental Challenge

- Experimental constraints (for a **general purpose** experiment)
 - **extreme particle density** ($dN_{ch}/d\eta \sim 1000$ – several thousands)
 - **x 500** compared to pp@LHC; **x 30** compared to ^{32}S @SPS
 - **large dynamic range** in p_t :
 - from very soft (**0.1 GeV**) to fairly hard (**100 GeV**)
 - **hadrons** matter: hadrons are part of the signal, not of the problem
 - secondary vertices, lepton ID, hadron ID
 - **modest** luminosity and interaction **rates**
 - **10 kHz** (Pb-Pb)
- Experimental solutions used in ALICE
 - $dN_{ch}/d\eta$: high **granularity**, **3D** detectors, large **distance** to vertex (+ large DAQ bandwidth)
 - emcal at **4.5 m** (typical is 1-2 m !)
 - p_t **coverage**: **thin** detector, **low mag field** (low p_t), **large lever arm** + **resolution** (large p_t)
 - ALICE: **< 10% X_0** in $r < 2.5$ m (typical is 50-100% X_0), $B =$ **0.5T**, **$BL^2 \sim$ CMS !**
 - **PID**: use of essentially all known technologies
 - dE/dx, Cherenkov & transition rad., TOF, calorimeters, muon filter, topological,
 - **rate**: allows slow detectors (TPC, SDD), moderate radiation hardness

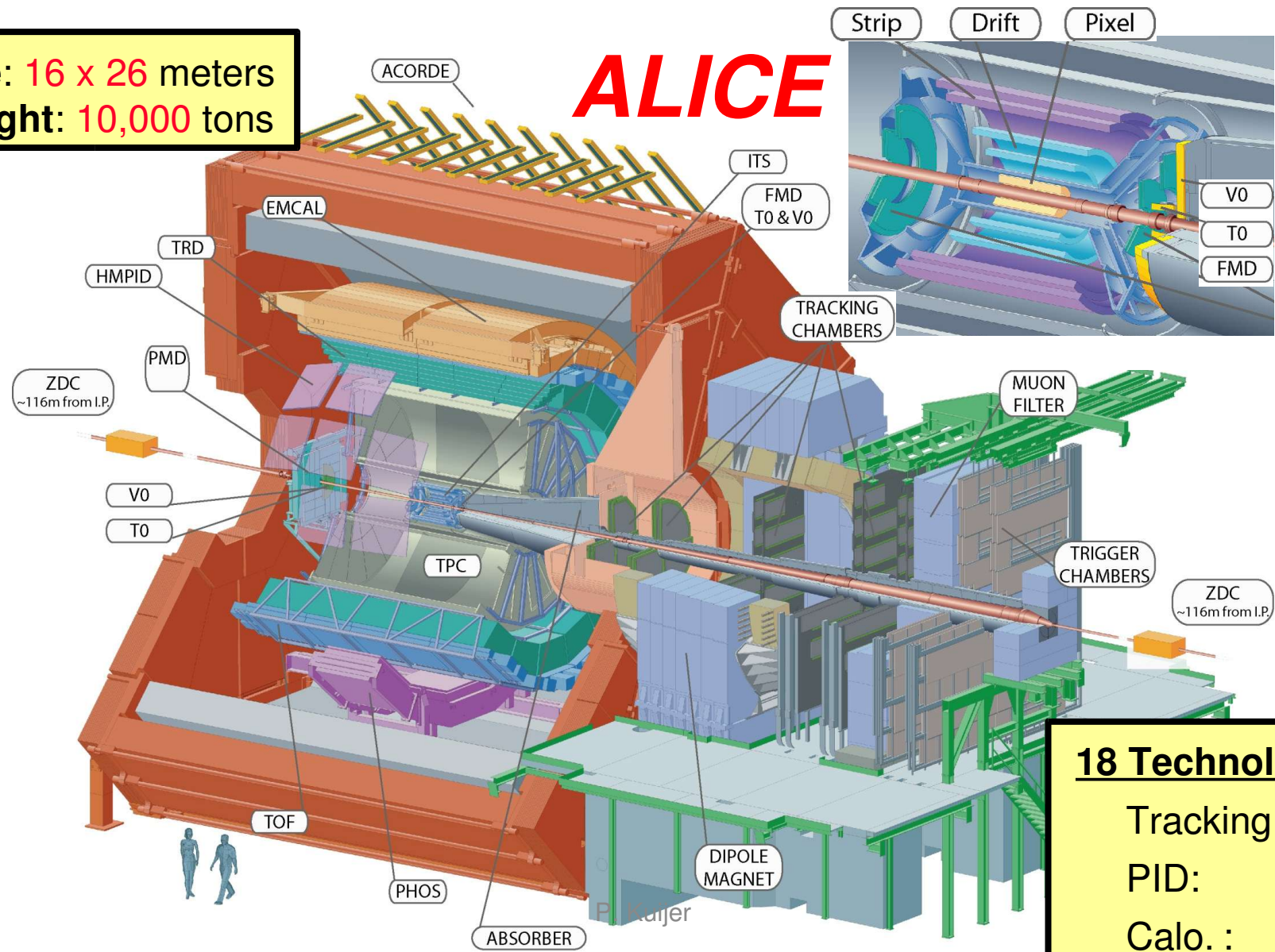


Central barrel

Muon arm

Zero-degree calorimeters

Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tons



18 Technologies

Tracking: 7
 PID: 6
 Calo.: 5

2008/09 shutdown
used for additional
installation/repairs

- Complete - **fully installed & commissioned:**
 - ITS, TPC, TOF, HMPID, MUONS, PMD, V0, T0, FMD, ZDC, ACORDE, *TRIGGER*, *DAQ*
- **Partially completed:**
 - TRD 6-8/18 to be completed by 2009
 - PHOS 3/5 to be completed by 2010
 - EMCAL 2-4/6 to be completed by 2010/11
 - *HLT (High Level Trigger)* (~50%)

At start-up Alice will have **full hadron and muon capabilities** + **partial electron and photon capabilities**

Number of TRD & EMCAL modules depends on access conditions during LHC power test !

ALICE Status

Complete:

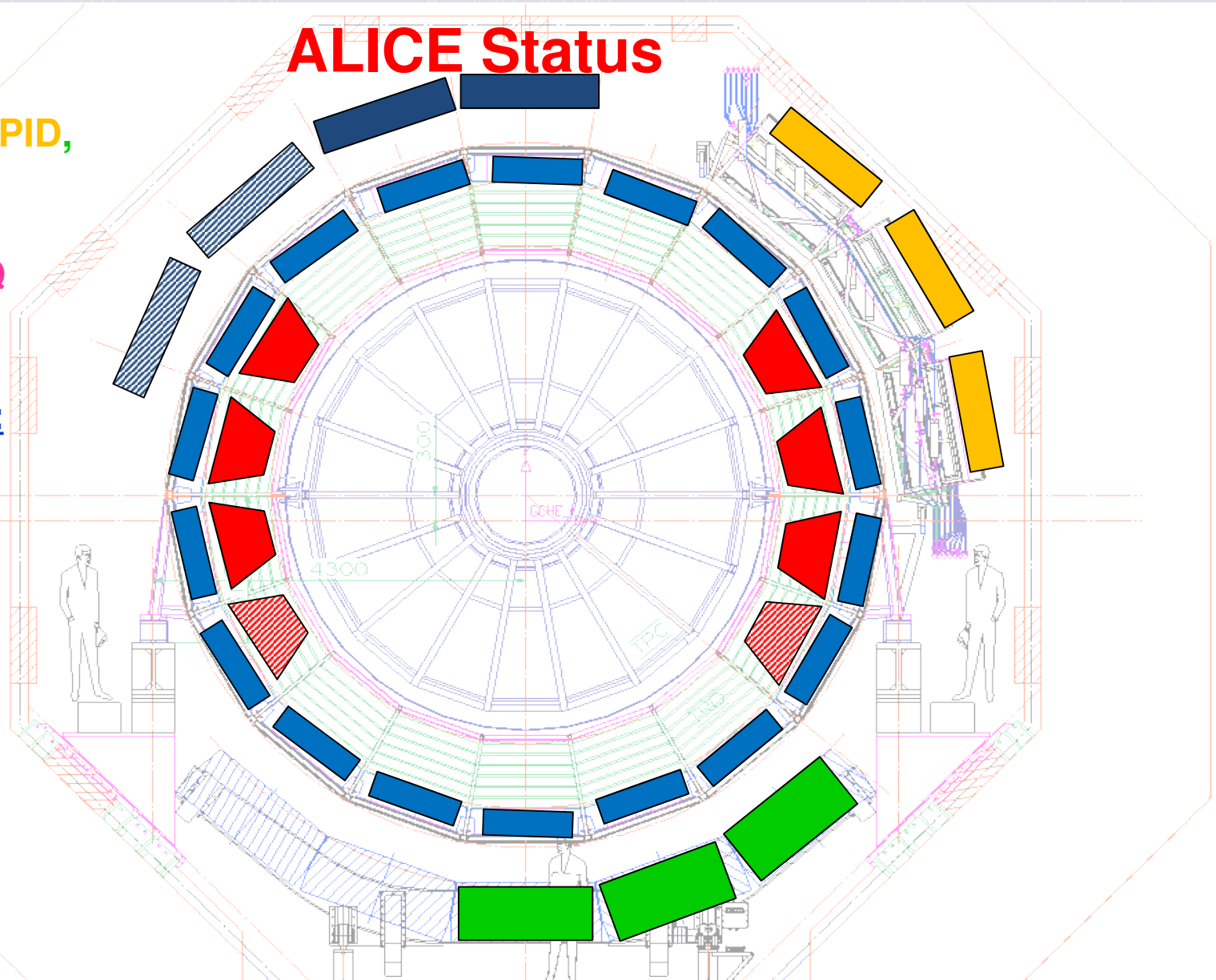
ITS, TPC, TOF, HMPID,
FMD, T0, V0, ZDC,
Muon arm, Acorde
PMD, Trigger, DAQ

Partial installation:

PHOS(3/5)
6-8/18 TRD
2-4/6 EMCAL

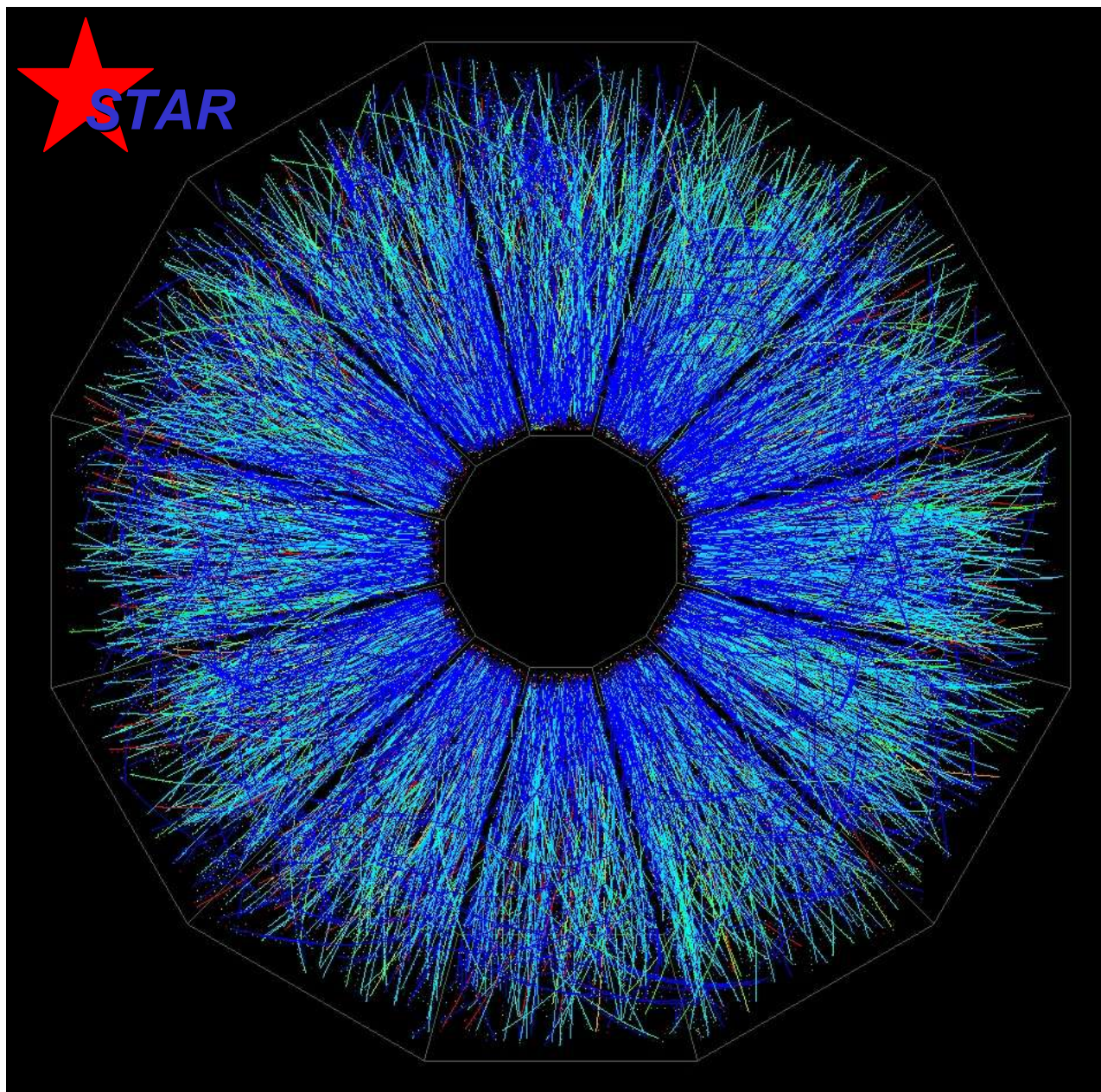
~ 50% HLT

P. Kuijer
QM 2009



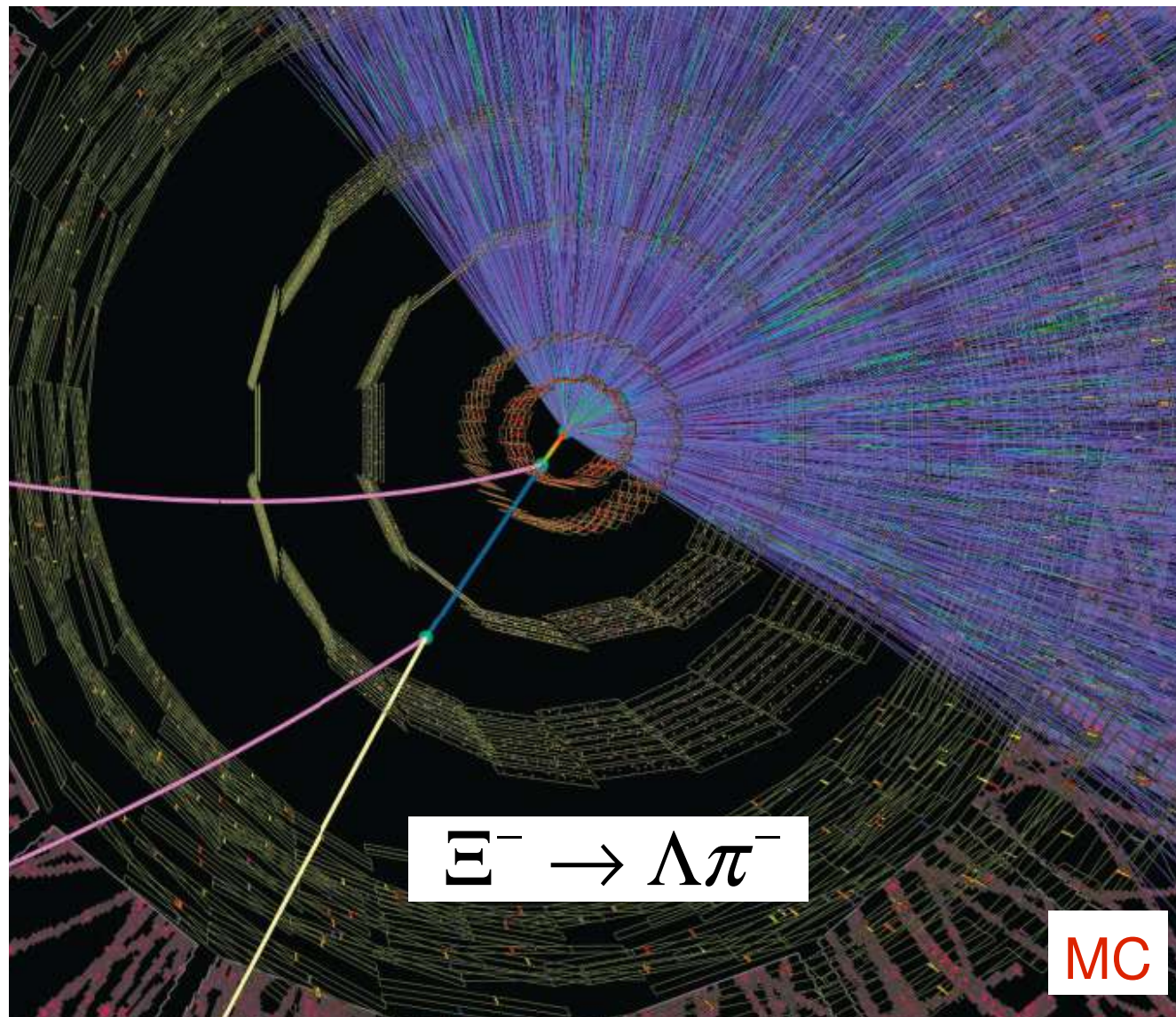
Number of TRD & EMCAL modules depends on access conditions during LHC power test !

HI @ RHIC: A Central Au-Au Event in STAR (~130 GeV/nucleon)



Excellent tracking and vertexing + PID capabilities are the key factors

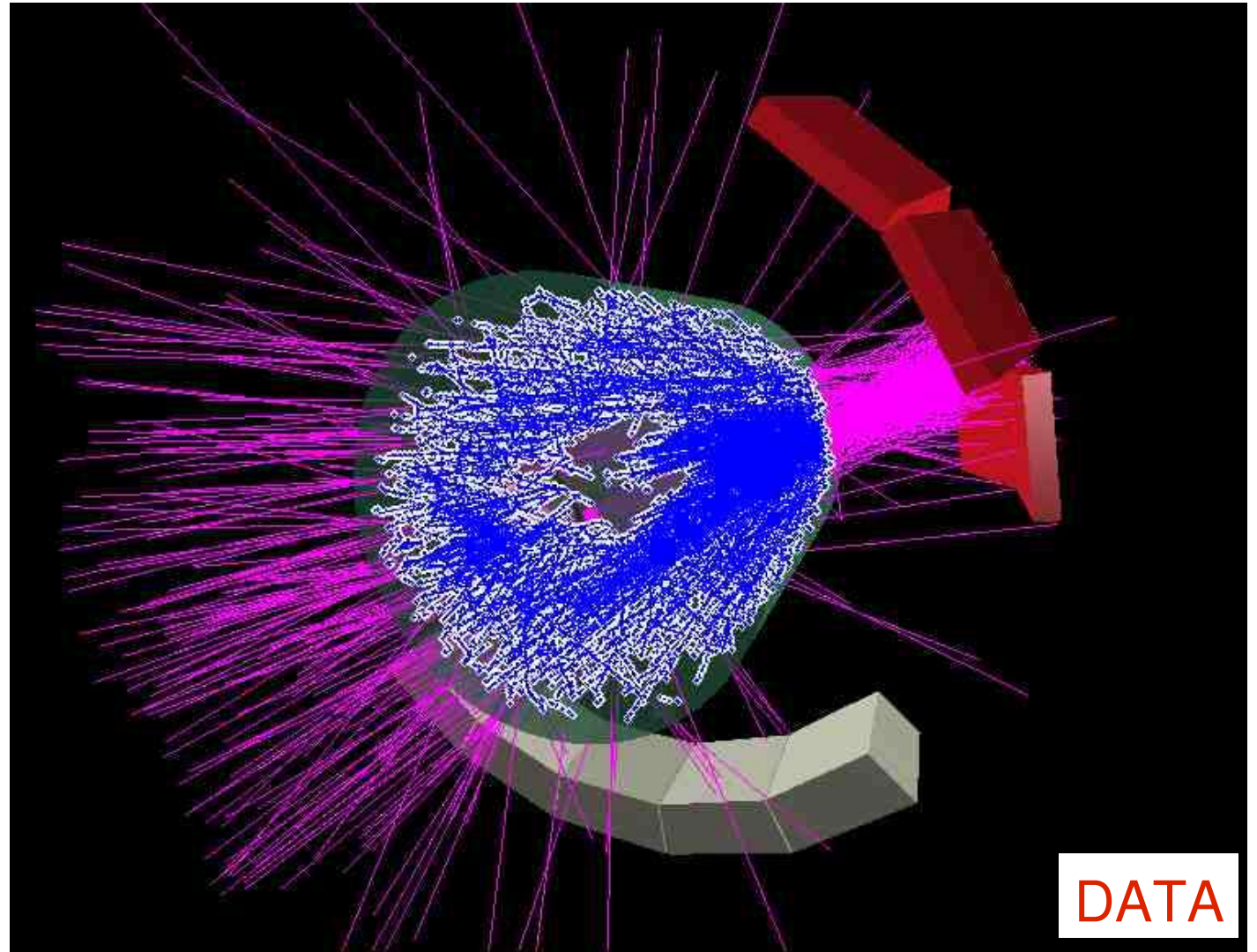
With part of the event removed, the displaced vertices can be seen



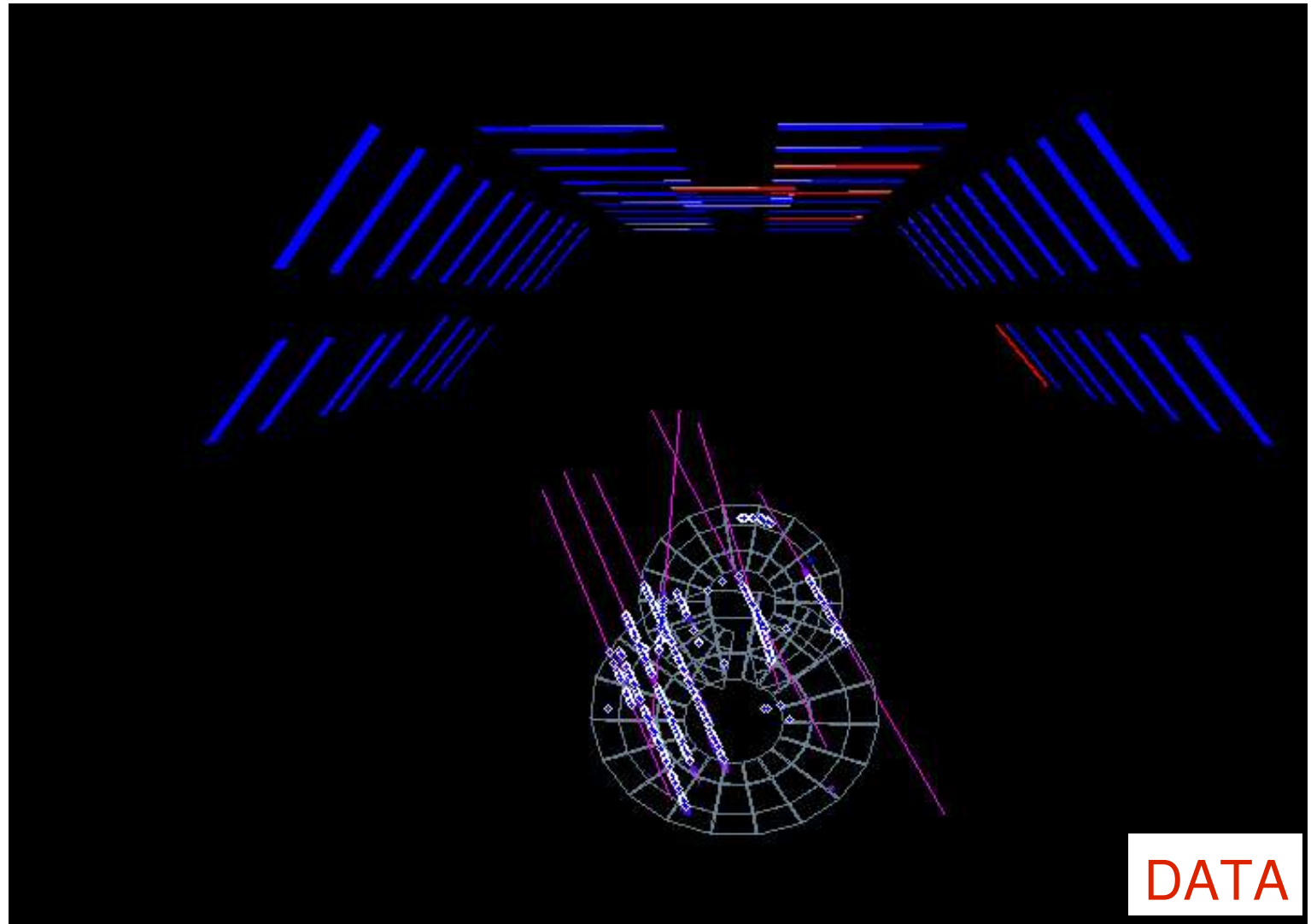
Trigger: SPD

Probably a muon
interaction in the
magnet iron

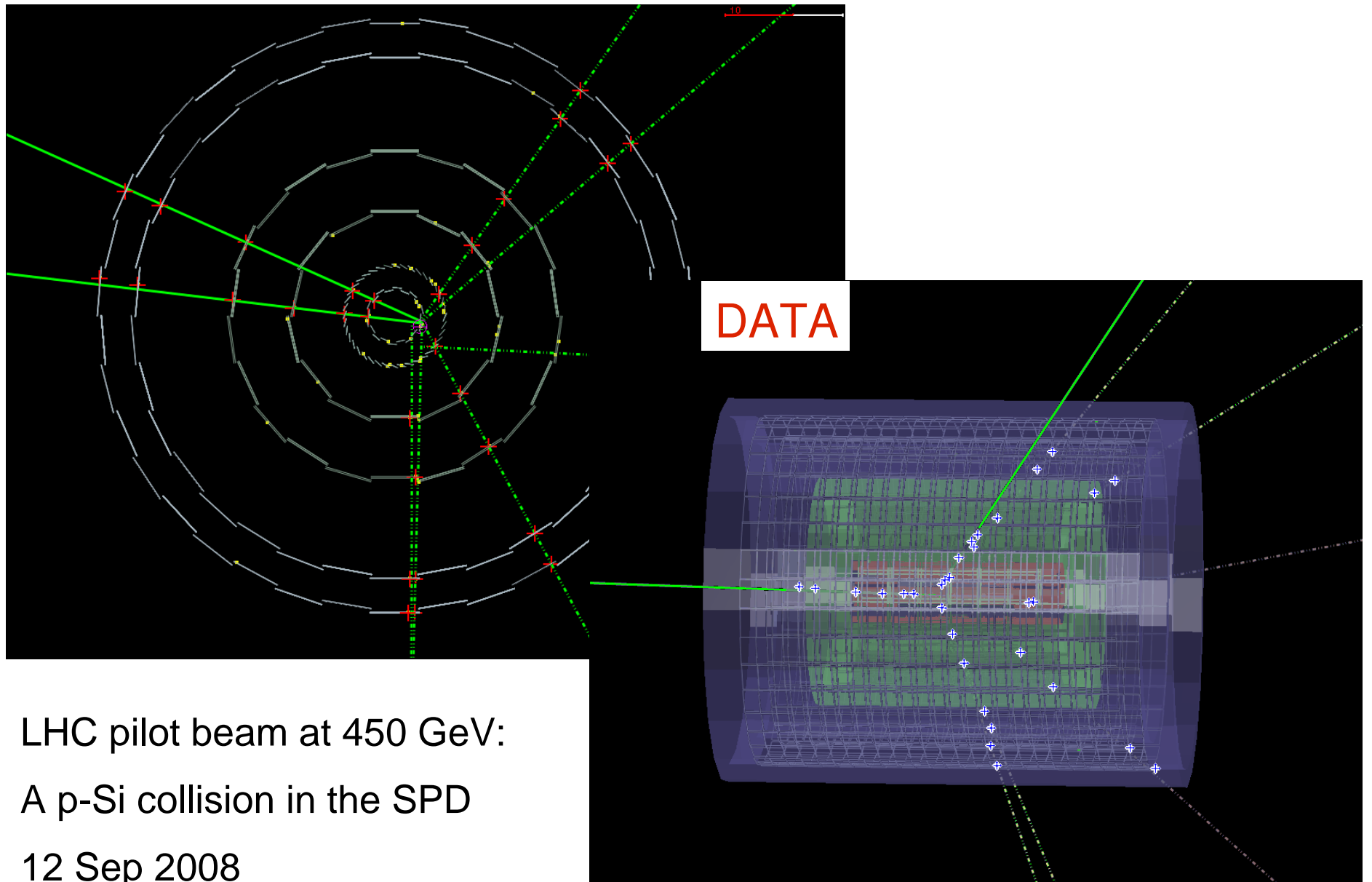
About 350 tracks
reconstructed in the
TPC



Trigger:
ACORDE



A Beam Event in ALICE

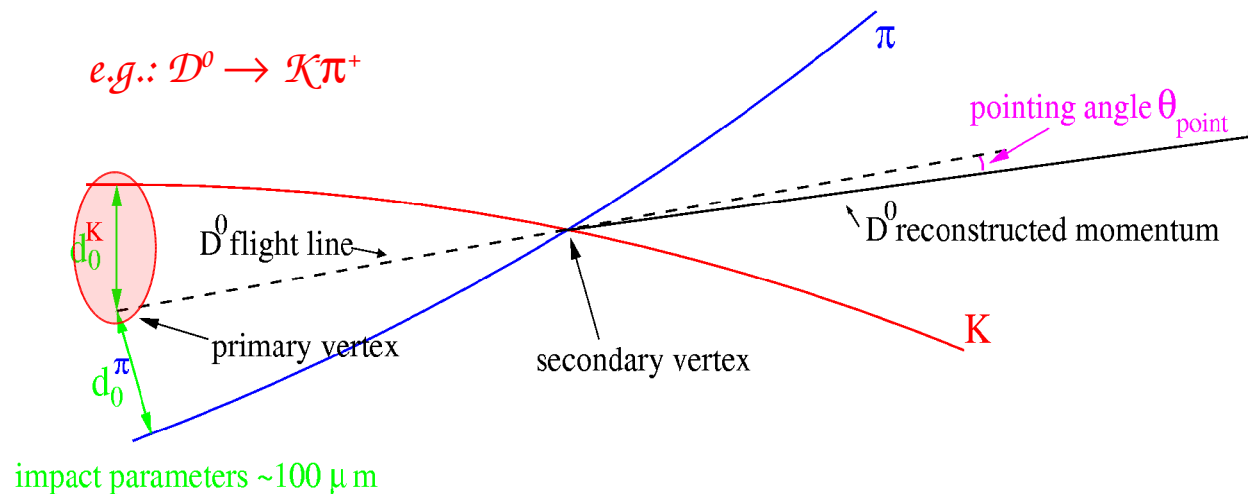


LHC pilot beam at 450 GeV:
A p-Si collision in the SPD
12 Sep 2008

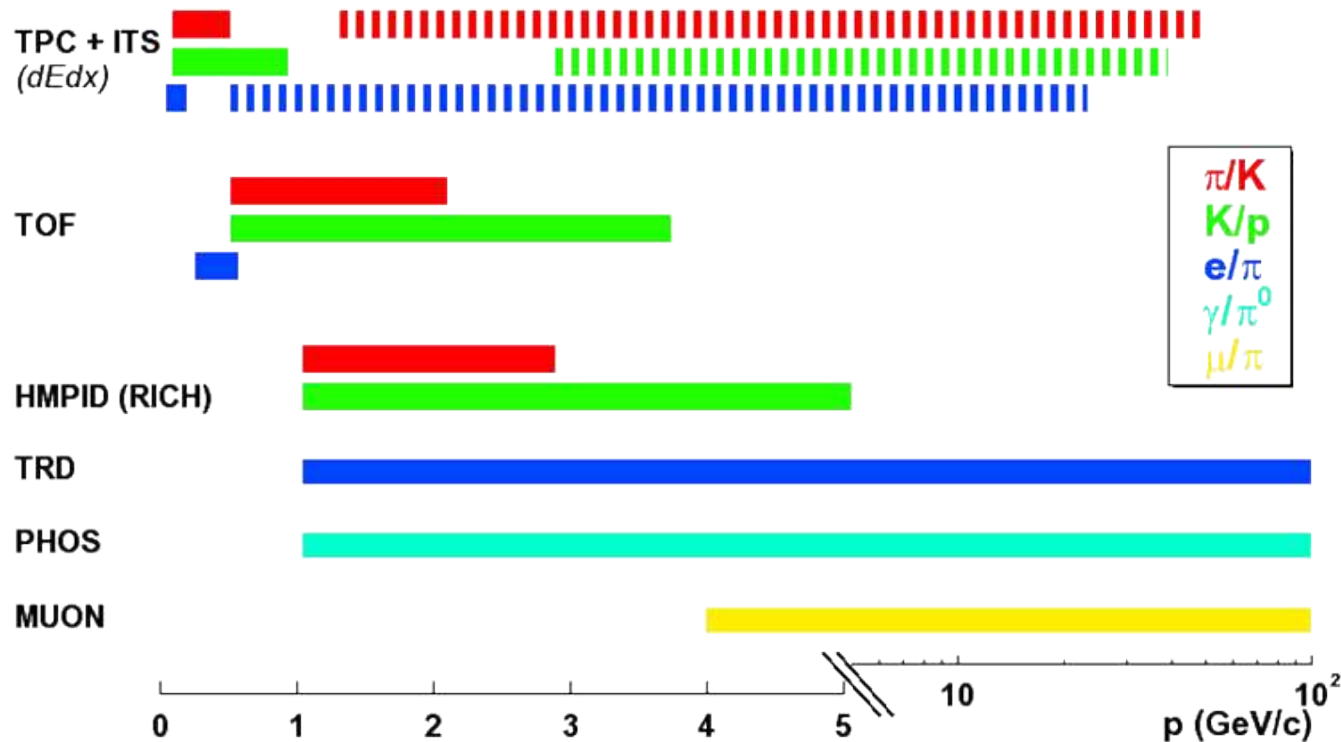
More about tracking in ALICE; impact parameter measurements

- robust and redundant tracking from ~ 100 MeV to 100 GeV
- $\delta p/p < 5\%$ at 100 GeV (ITS+TPC+TRD)
- in conjunction with excellent particle ID

- full reconstruction of D decays
- b/c separation
- control heavy flavour purity of non-photonic sample



Particle id in ALICE



- ‘stable’ hadrons (π , K , p): $100 \text{ MeV} < p < 5 \text{ GeV}$ (few 10 GeV)
 - ◆ dE/dx in silicon (ITS) and gas (TPC) + time-of-flight (TOF) + Cherenkov (RICH)
- decay topologies (K^0 , K^+ , K^- , Λ , ϕ , D)
 - ◆ K and Λ decays beyond 10 GeV
- leptons (e , μ), photons η, π^0
 - ◆ electrons TRD: $p > 1 \text{ GeV}$, muons: $p > 5 \text{ GeV}$, π^0 in PHOS: $1 < p < 80 \text{ GeV}$

Goal: **misura e ricostruzione di tutti gli osservabili !!!!**

- Global observables: **Multiplicities, η distributions**
- Degrees of freedom as function of T: **hadron ratios and spectra, dilepton continuum, direct photons**
- Early state manifestation of collective effects: **elliptic flow**
- Energy loss of partons in quark gluon plasma: **jet quenching, high pt spectra, open charm and open beauty**
- Deconfinement: **charmonium and bottonium spectroscopy**
- Chiral symmetry restoration: **neutral to charged ratios, resonance decays**
- Fluctuation phenomena - critical behavior: **event-by-event particle composition and spectra**
- Geometry of the emitting source: **HBT, impact parameter via zero-degree energy flow**
- pp collisions in a new energy domain

- ❑ fully commissioned detector & trigger
 - ❑ alignment, calibration available from pp
- ❑ **first 10^5 events:** global event properties
 - ❑ multiplicity, rapidity density
 - ❑ elliptic flow
- ❑ **first 10^6 events:** source characteristics
 - ❑ particle spectra, resonances
 - ❑ differential flow analysis
 - ❑ interferometry
- ❑ **first 10^7 events:** high- p_t , heavy flavours
 - ❑ jet quenching, heavy-flavour energy loss
 - ❑ charmonium production
- ❑ yield bulk properties of created medium
 - ❑ energy density, temperature, pressure
 - ❑ heat capacity/entropy, viscosity, sound velocity, opacity
 - ❑ susceptibilities, order of phase transition

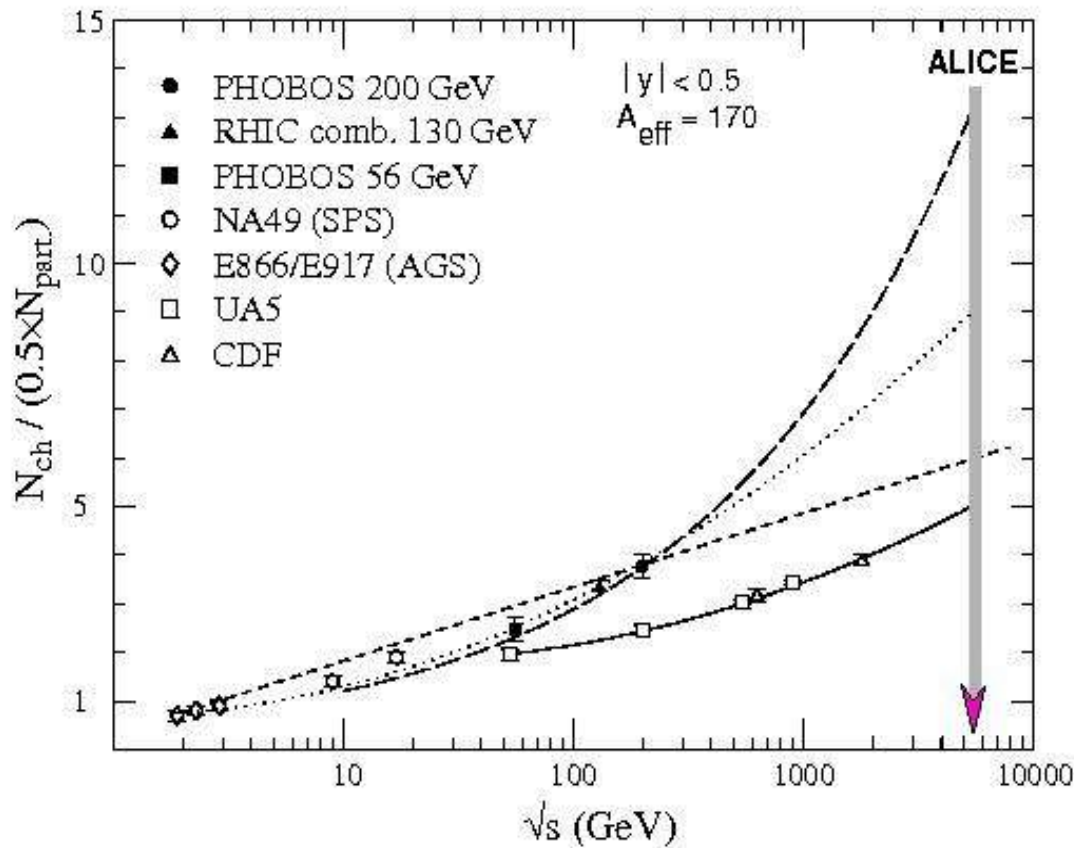
❑ early ion scheme

- ❑ 1/20 of nominal luminosity
- ❑ $\int L dt = 5 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10^6 \text{ s}$
0.05 nb⁻¹ for PbPb at 5.5 TeV
 $N_{pp \text{ collisions}} = 2 \cdot 10^8 \text{ collisions}$
400 Hz minimum-bias rate
20 Hz central (5%)
- ❑ muon triggers:
~ 100% efficiency, < 1kHz
- ❑ centrality triggers:
bandwidth limited
 $N_{PbPbminb} = 10^7 \text{ events (10Hz)}$
 $N_{PbPbcentral} = 10^7 \text{ events (10Hz)}$

Prima stima della densità di energia

Saturation, CGC ?

Distribuzioni di molteplicità da collisioni AuAu, PbPb e pp



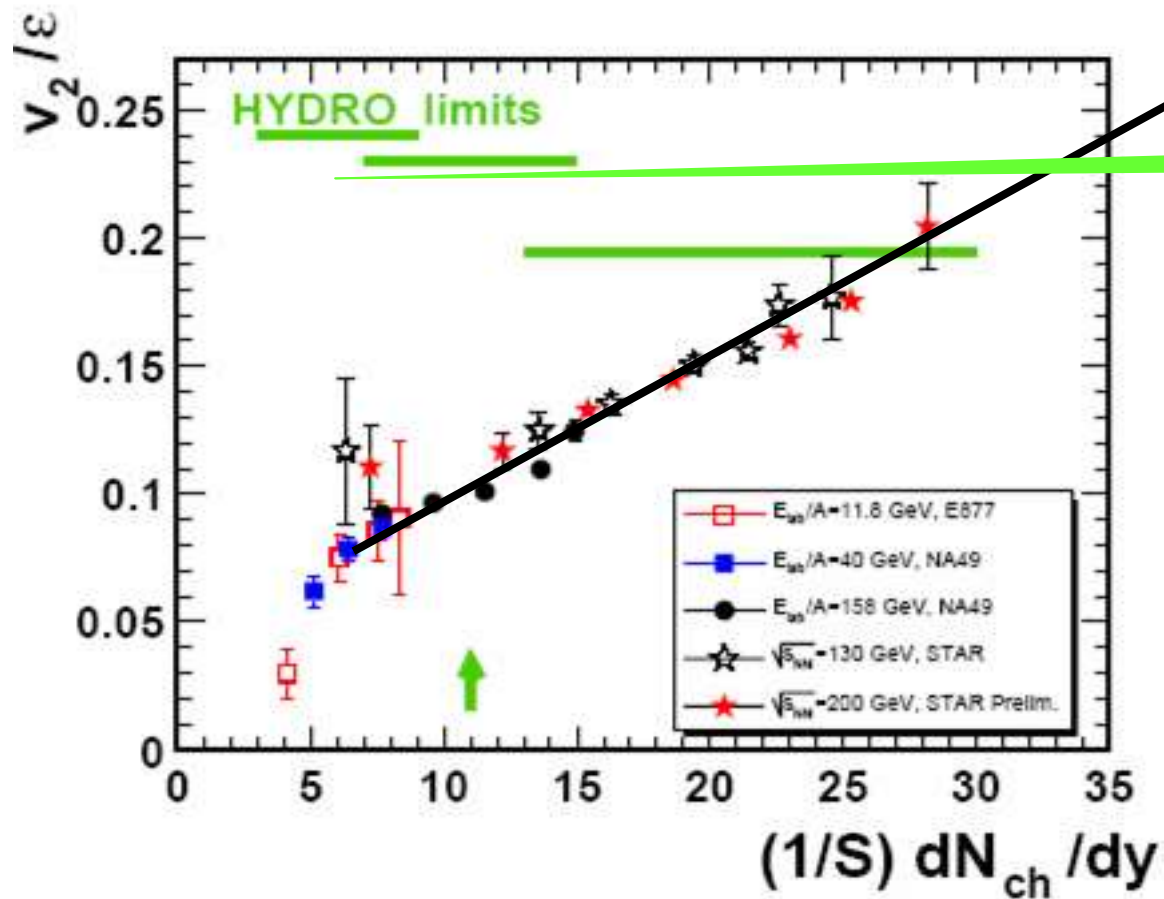
$dN_{\text{ch}}/dy = 2600$

saturation model
Eskola hep-ph/050649

$dN_{\text{ch}}/dy = 1200$

$\ln(\sqrt{s})$ extrapolation

QGP = fluido ideale ? servono 10^5 eventi ...



L' idrodinamica prevede per il flow un modesto incremento

Andamento sperimentale & scaling suggeriscono invece un incremento considerevole

Teoria & Misure \Rightarrow si deve **mappare il diagramma di fase** cercando di coprire la regione più ampia possibile

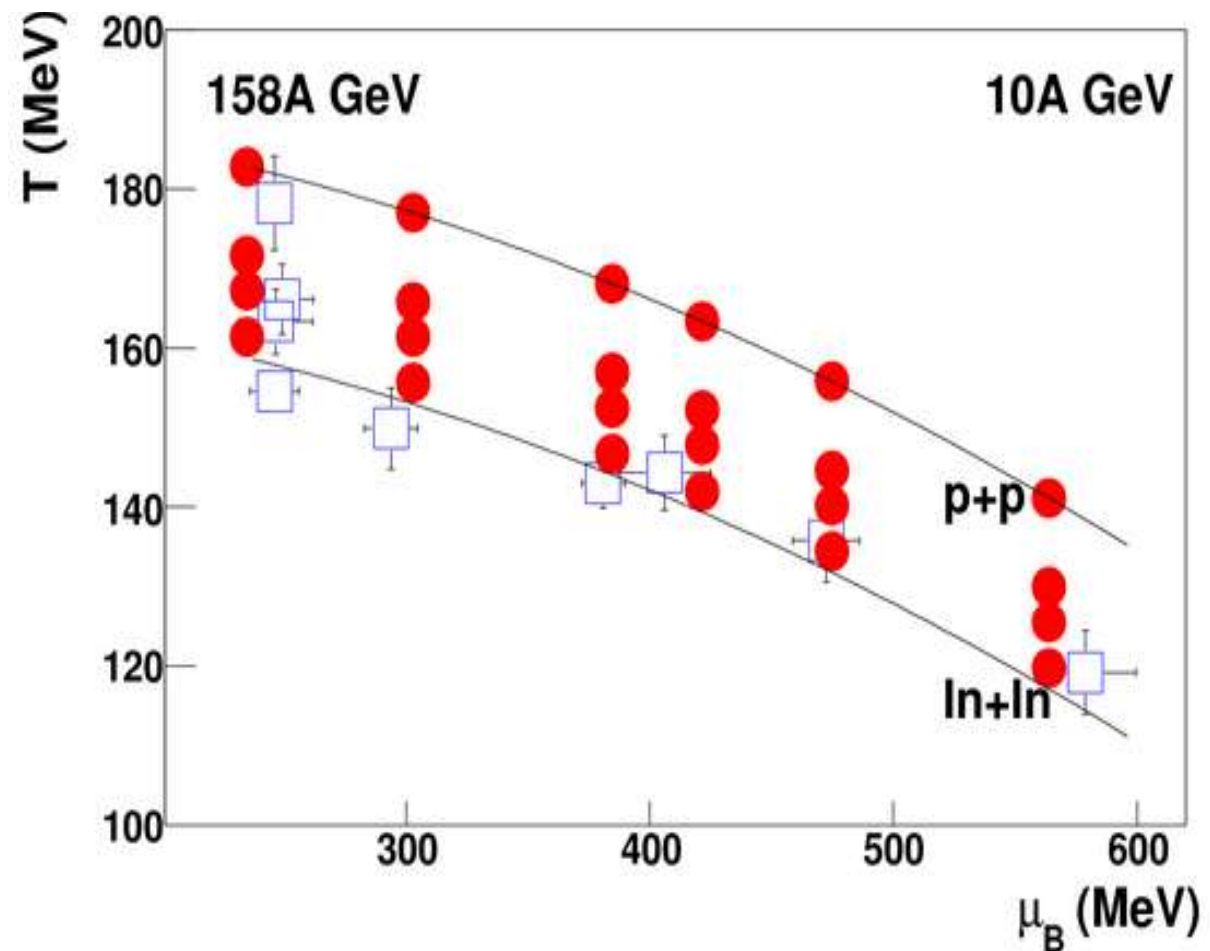
- Draw the QCD phase boundary
- Locate the QCD critical point
- T and μ_B varies with $\sqrt{s_{NN}}$
- T and μ_B measured from spectra and ratios of produced particles

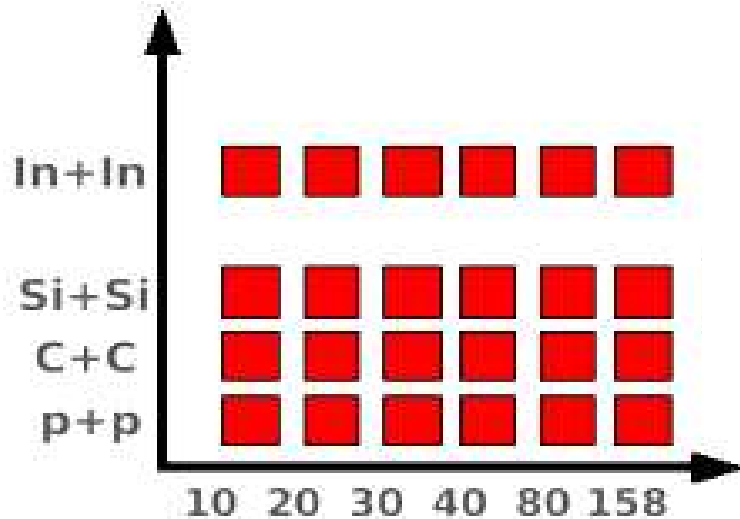
STAR & PHENIX @ RHIC: energy scan + detector upgraded

alla ricerca del punto critico: accettazione uniforme per diverse specie di particelle e per fasci diversi nello stesso apparato sperimentale

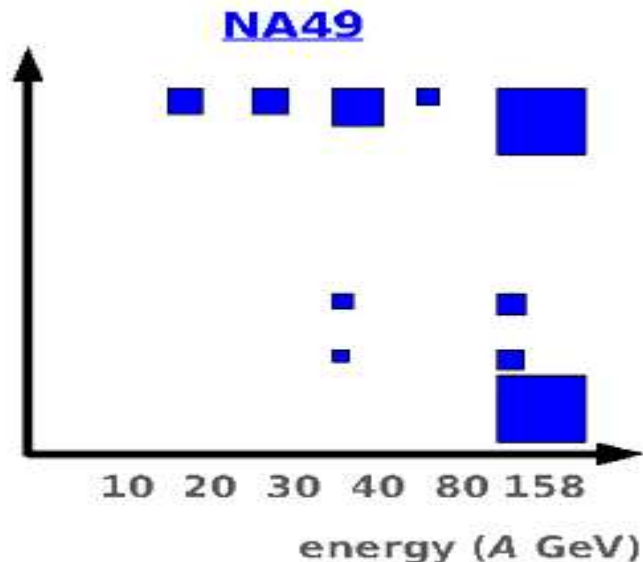
Una differenza significativa tra la temperatura di freeze-out e la temperatura della transizione può condurre ad una diluizione delle signature del punto critico della QCD. Un modo per affrontare il problema è variare le dimensioni degli ioni/del sistema.

È il programma dell' esperimento **SHINE**, un erede di NA49



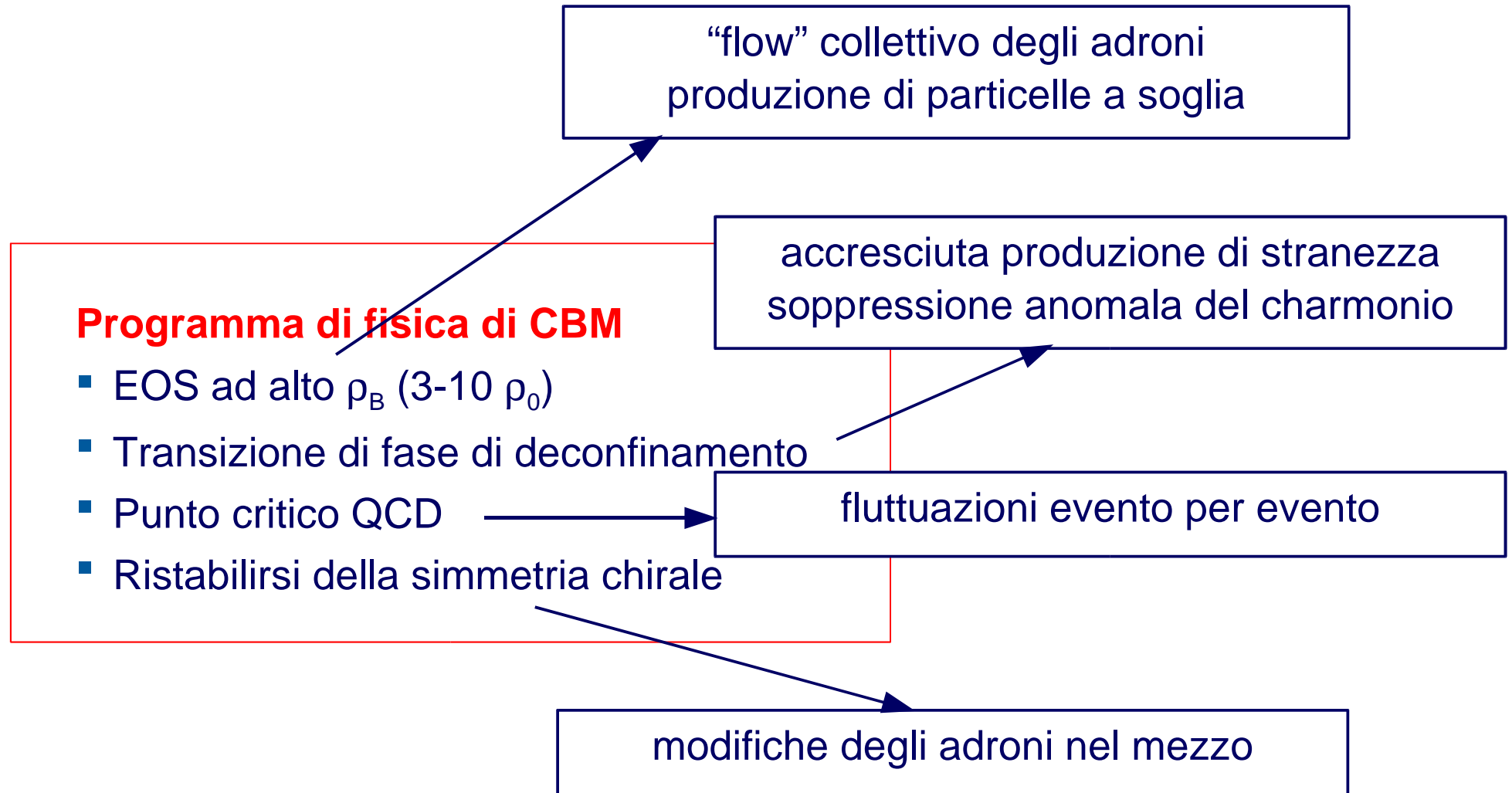


Il programma di **SHINE** è infatti studiare il punto critico e l'onset di vari fenomeni variando le **dimensioni degli ioni**, la **centralità delle collisione** e acquisendo un **adeguato riferimento pp**.



Con un apparato rinnovato:

- calorimetro per gli spettatori (selezione della centralità)
- Forward Time-Of-Flight
- Beam pipe
- velocità del readout della TPC



CBM nel 2017

Energie dei fasci 10-45A GeV
10 settimane di fascio all' anno
interaction rates fino a 10 Mhz

CBM light nel 2015

Au fino a 11A GeV, p fino a 30 GeV
(multistrani, charm in pA)

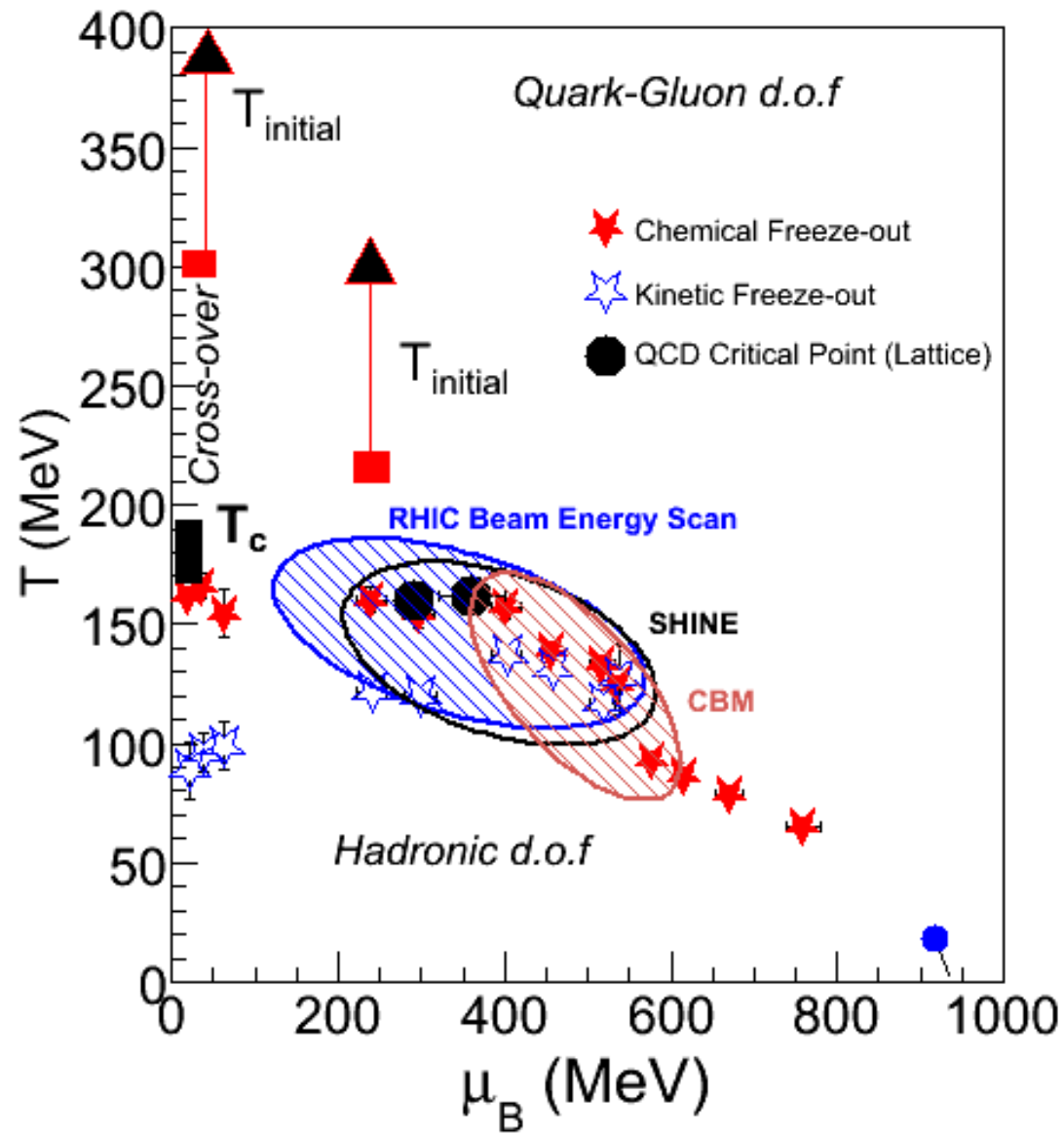
10 settimane di fascio, AuAu a 25A Gev, niente trigger, una rate di interazione e di acquisizione di 25 kHz interaction \Rightarrow alta (*illimitata*) statistica:

- “bulk observables”: $\sim 10^{10-11}$ kaons ...
- coppie di elettroni con bassa massa: 10^6 mesoni ρ , ω , ϕ
- iperoni multistrani: 10^8 Ξ , 10^6 Ω

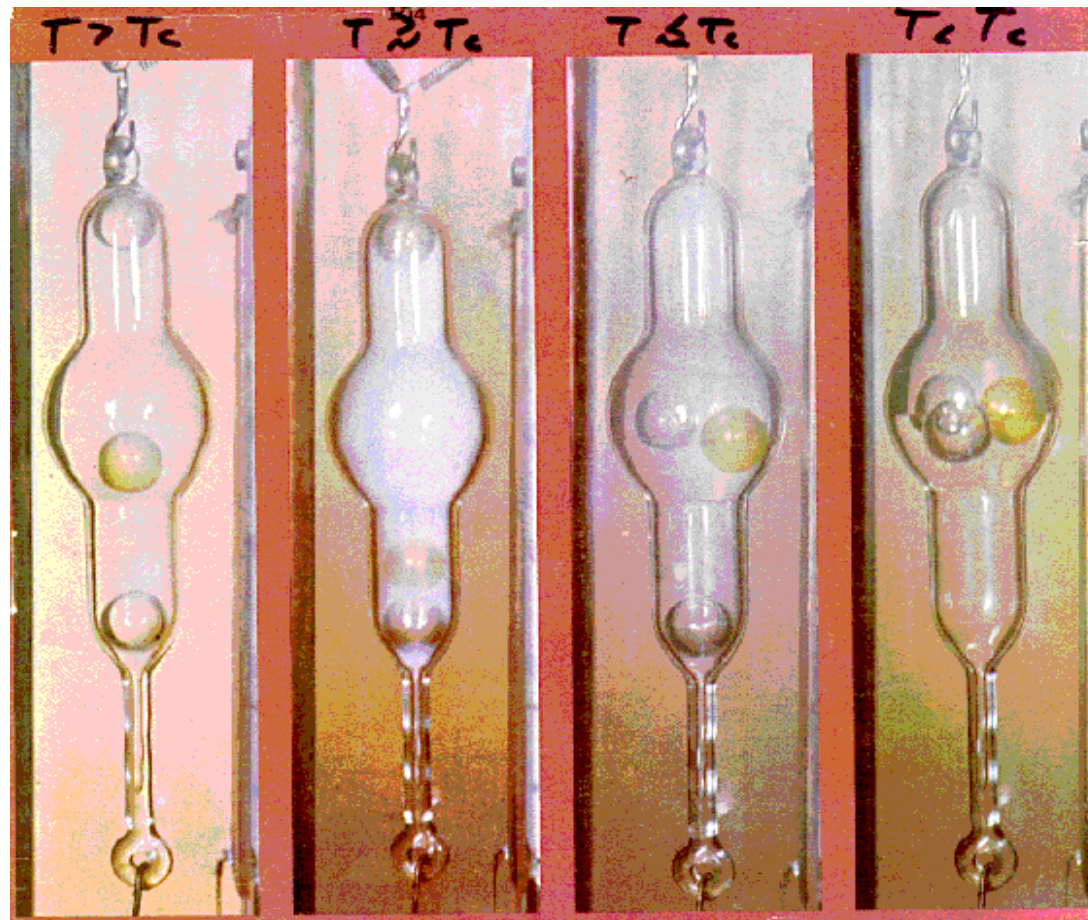
Central Au+Au collision at 25 AGeV 160 p⁻ 400 π⁻ 400 π⁺ 44 K⁺ 13 K⁻

UrQMD + GEANT

- hit densities 1 – 100 (cm² event)⁻¹
- up to 10⁷ Au+Au reactions/sec
- fast and radiation hard detectors
- free-streaming readout electronics
- online event selection (high-level trigger)
- high speed data acquisition
- high precision vertex reconstruction
- identification of leptons and hadrons

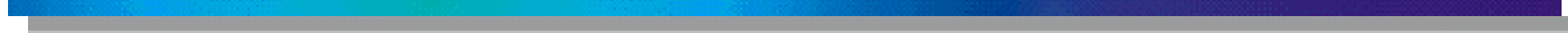


Opalescenza critica osservata nella transizione liquido-gas del CO_2



T. Andrews.
Phil. Trans.
Royal Soc.,
159:575, **1869**

$T > T_c$ $T \sim T_c$ $T < T_c$



LHC will restart in September and run pp@10 TeV without shutdown until fall 2010

- ❑ ALICE detector performs very well in pp
 - ❑ very low-momentum cutoff (<100 MeV/c)
 x_T -regime down to 4×10^{-6}
 - ❑ p_t -reach up to 100 GeV/c
 - ❑ excellent particle identification
 - ❑ efficient minimum-bias trigger
 - ❑ additional triggers

- ❑ first physics in ALICE will be pp
 - ❑ provides important **reference data** for heavy-ion programme
 - ❑ Minimum bias running
- ❑ **unique pp physics** in ALICE e.g.
 - ❑ multiplicity distribution
 - ❑ baryon transport
 - ❑ measurement of charm cross section input to pp QCD physics

- ❑ **start-up**
 - ❑ some collisions at 900 GeV
→ **connect to existing systematics**
- ❑ **pp nominal run**
 - ❑ $\int L dt = 3 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10^7 \text{ s}$
30 pb⁻¹ for pp run at 14 TeV
(->10TeV)
 - $N_{pp \text{ collisions}} = 2 \cdot 10^{12}$ collisions
 - ❑ minimum-bias triggers:
20 events pile-up (TPC)
 $N_{pp \text{ minb}} = 10^9$ collisions
 - ❑ high-multiplicity trigger:
reserved bandwidth ~ 10 Hz
 - ❑ muon triggers:
 $\sim 100\%$ coverage, < 1 kHz
 - ❑ electron trigger:
 $\sim 25\%$ coverage of TRD L1