

Collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes

Première partie

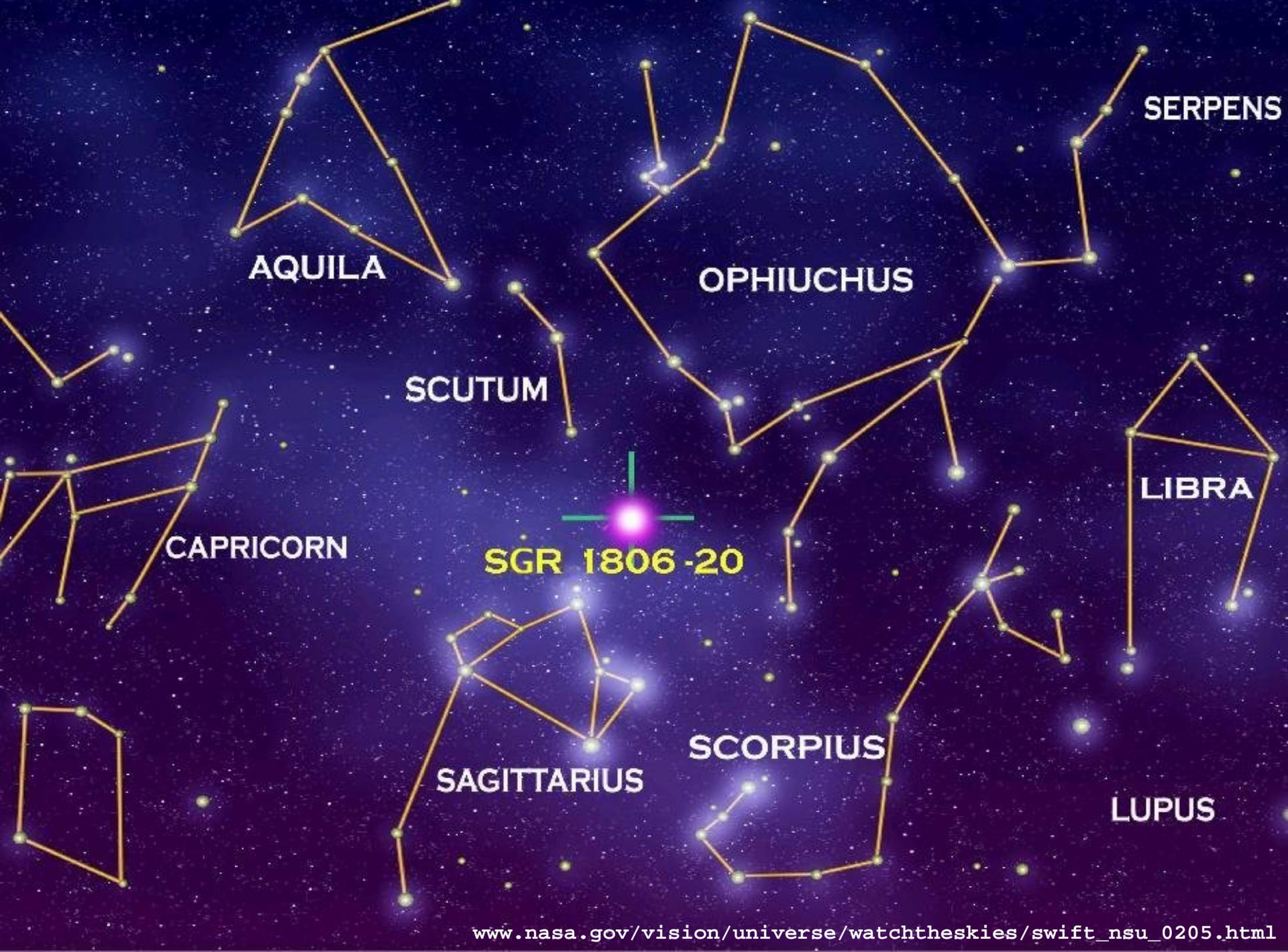
NA35 6.4 TeV

$^{32}\text{S} + \text{Au}$



27 décembre 2004 : le tsunami électromagnétique

- **une vague de rayon γ géante traverse notre galaxie**
 - en 0.2 s l'énergie diffusée par le Soleil en 250 000 ans
 - perturbe l'ionosphère et les communications radio sur Terre
 - détectée simultanément par ~ 15 satellites et télescopes
- **origine : un tremblement d'étoile à neutrons**



AQUILA

SERPENS

OPHIUCHUS

SCUTUM

LIBRA

CAPRICORN

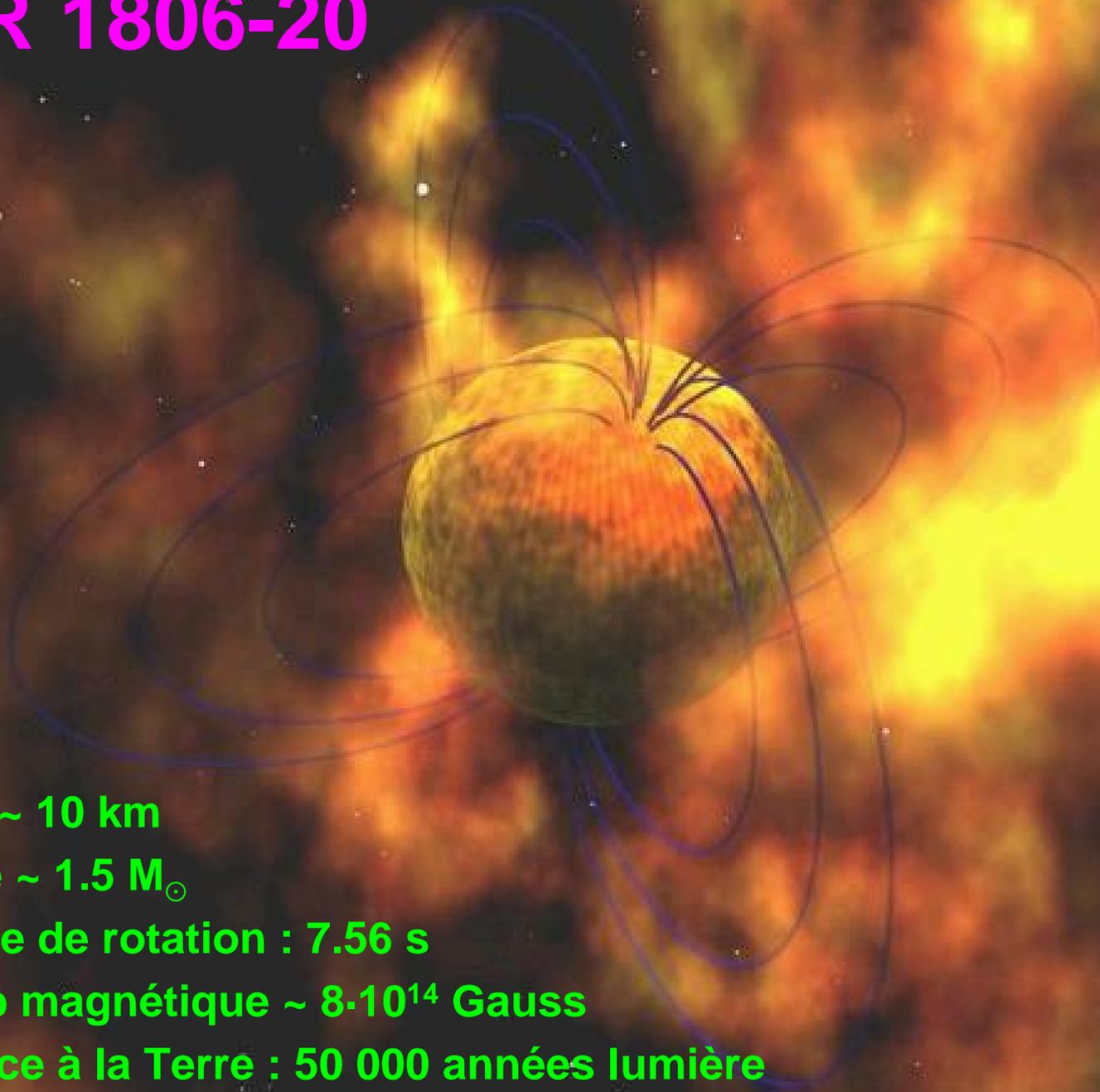
SGR 1806-20

SCORPIUS

SAGITTARIUS

LUPUS

SGR 1806-20



- rayon ~ 10 km
- masse ~ 1.5 M_⊙
- période de rotation : 7.56 s
- champ magnétique ~ 8·10¹⁴ Gauss
- distance à la Terre : 50 000 années lumière



+ ABOUT NASA

+ NEWS & EVENTS

+ MULTIMEDIA

+ MISSIONS

+ Home

FEATURE

Cosmic Explosion Among the Brightest in Recorded History

Scien
lit un

Last Updated: Friday, 18 February, 2005, 19:10 GMT

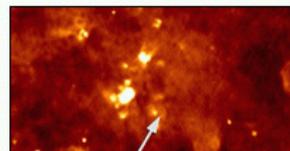
E-mail this to a friend

Printable version

Huge 'star-quake' rocks Milky Way

Astronomers say they have been stunned by the amount of energy released in a star explosion on the far side of our galaxy, 50,000 light-years away.

The flash of radiation on 27 December was so powerful that it



Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

2005 Press Releases

CFA HOME

CFA SEARCH

CONTACT CFA

Space Science

European Space Agency

Release No.: 05-06

For Release: Embargoed for 2:00 p.m. EST, Friday, February 18, 2005

Note to editors: High-resolution images and animations to accompany this release will be posted online at <http://www.cfa.harvard.edu/press/pr0506image.html>

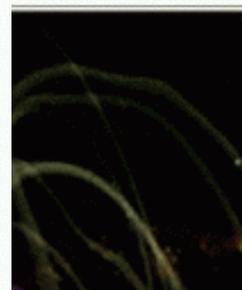
Blast Affected Earth From Halfway Across The Milky Way

Cambridge, MA--Forget "Independence Day" or "War of the Worlds." A monstrous cosmic explosion last December showed that the earth is in more danger from real-life space threats than from hypothetical alien invasions.

Cluster and Double Star see star crack during massive 'starquake'

21 September 2005

Unique data obtained by ESA's Cluster and the joint Chinese/ESA Double Star missions provided the first evidence of cracks on a neutron star's crust. The cracks were caused during the initial phase of the biggest 'starquake' on a neutron star ever recorded.



AUSTRALIA TELESCOPE NATIONAL FACILITY

Parkes Narrabri Mopra Tidbinbilla VLBI SKA MNRF



Home The ATNF News What's On Observers Research Technology Outreach Resources Contact Search Internal

Monster star blast 'brighter than full Moon'

Embargoed until 0600 AEDT 19 February 2005 (1900 GMT 18 February)

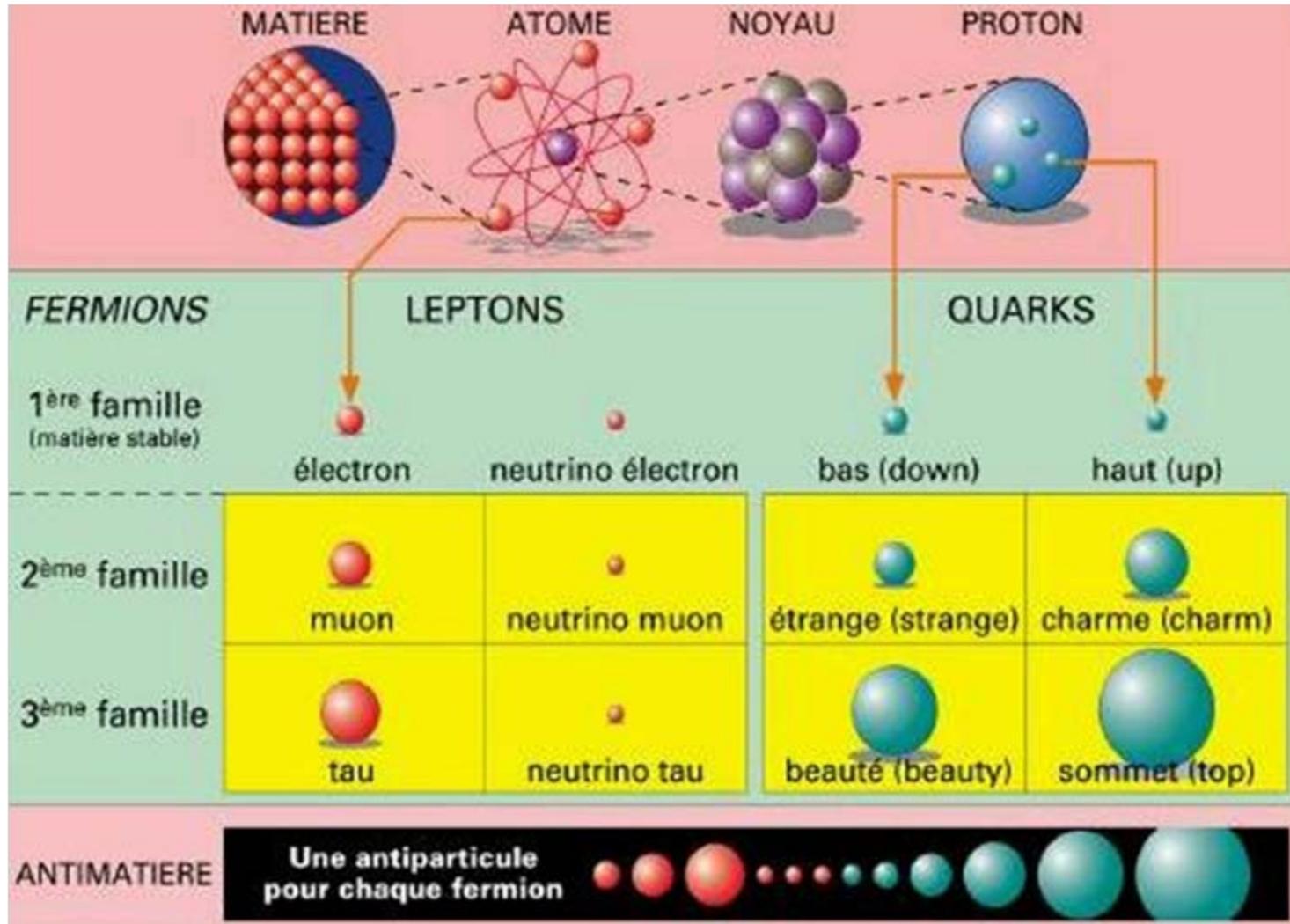
Collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes

- **Accélérer des noyaux lourds à la vitesse de la lumière**
- **Les fracasser sur d'autres noyaux**
- **Pour tenter de créer en laboratoire un nouvel état ultra-chaud et ultra-dense de la matière : le Plasma de Quarks et de Gluons (QGP)**
- **L'étude du QGP devrait permettre de remonter le temps 10^{-6} sec. après le Big Bang et d'explorer le coeur des étoiles à neutrons**

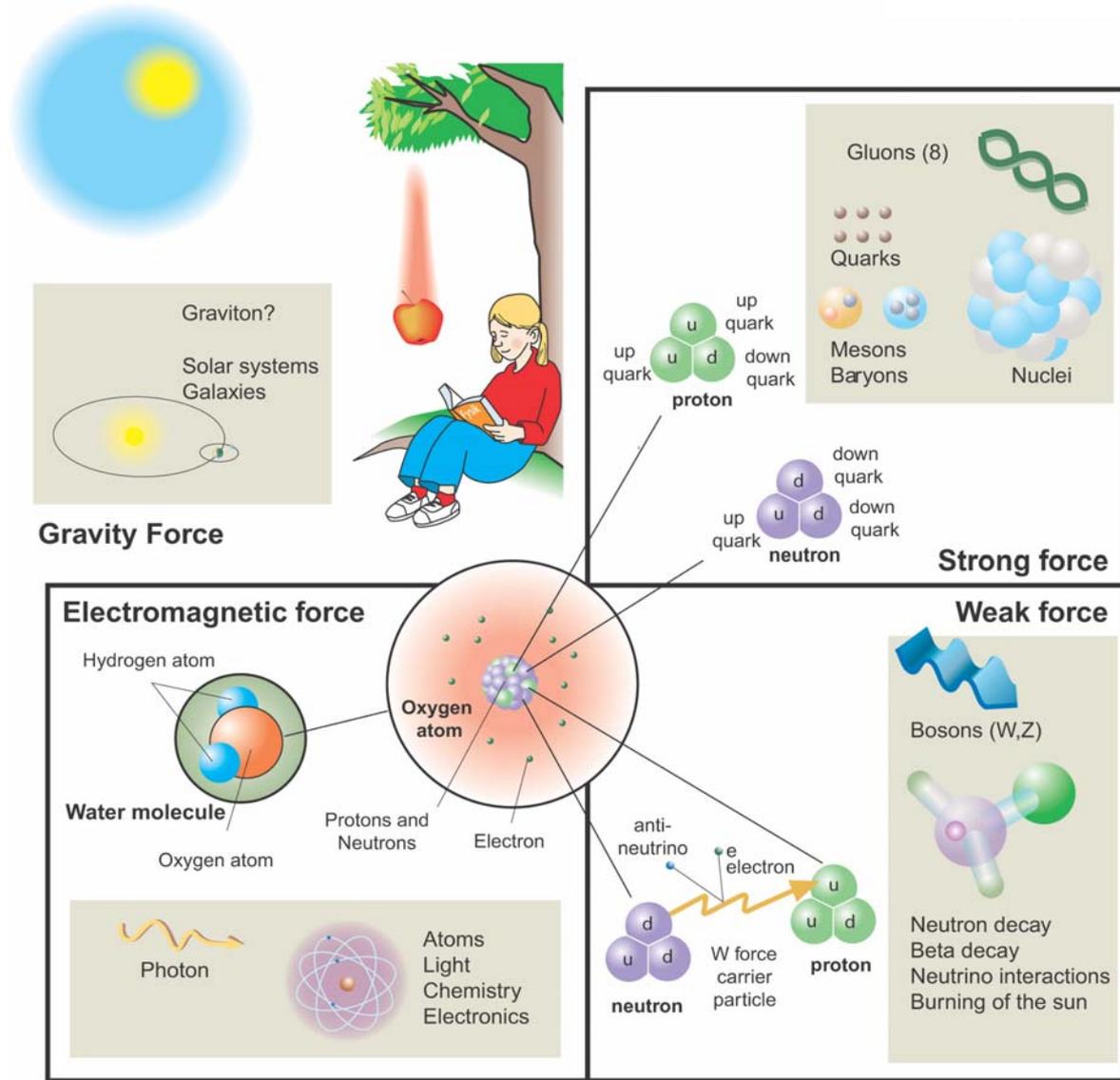
la chasse a commencé il y a 30 ans et se poursuit aujourd'hui...

- **Matière nucléaire et QGP**
 - **QGP & collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes**
 - **Signatures attendues du QGP**
- **Recherche expérimentale du QGP**
 - **Le passé : l'ère SPS**
 - **Le présent : l'ère RHIC**
- **Le futur : l'ère LHC**
 - **Le QGP au LHC**
 - **L'expérience ALICE**

Préambule. 1) constituants élémentaires



Préambule. 2) interactions fondamentales

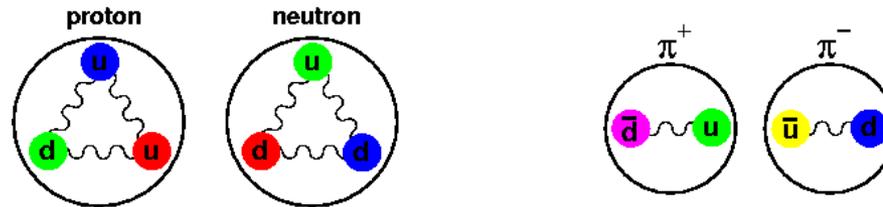
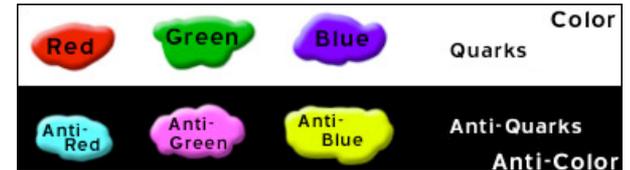


<http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/public.html>

Préambule. 3) les particules selon QCD

(QCD = ChromoDynamique Quantique : théorie de l'interaction forte)

- chaque quark porte une charge de couleur **R**, **V** ou **B**
- les anti-quarks portent l'anti-couleur correspondante
- les quarks sont confinés dans les hadrons (incolores)
- les hadrons se composent de baryons (3 quarks) et de mésons (1 quark & 1 anti-quark)

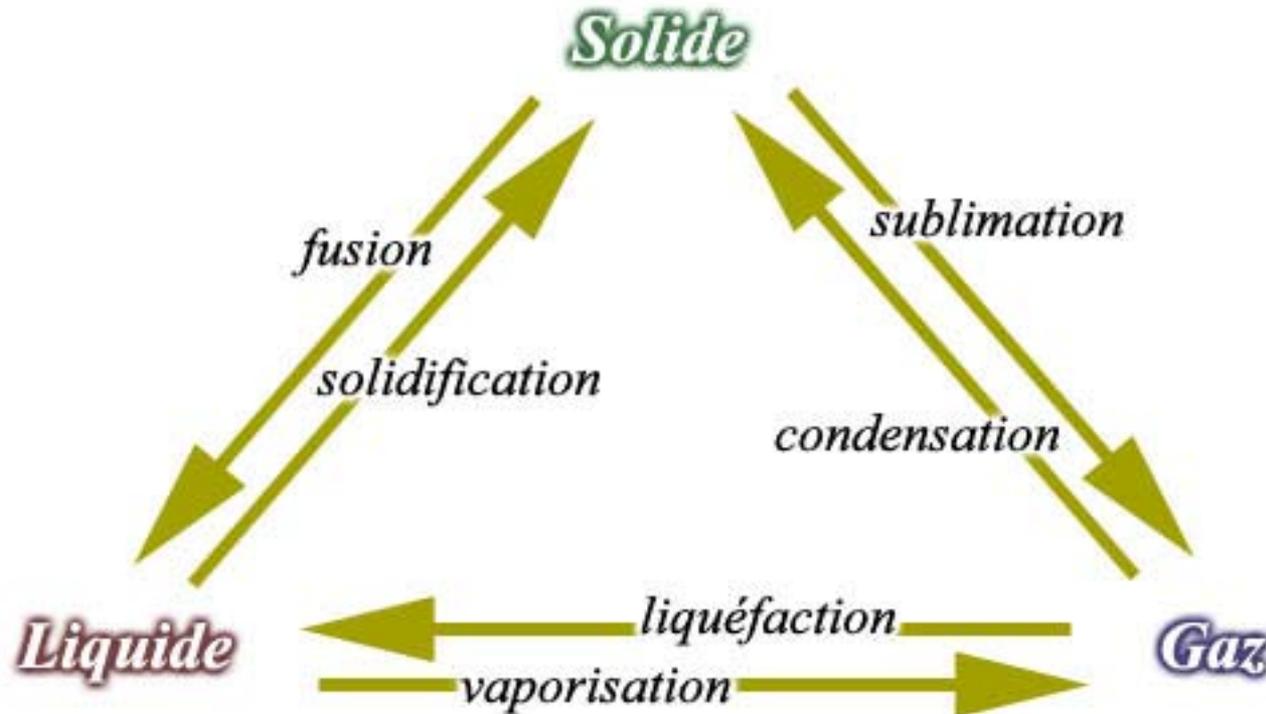


- l'interaction entre deux quarks se fait par un gluon
- il est impossible d'isoler une charge de couleur car l'intensité de l'interaction forte augmente avec la distance entre les quarks



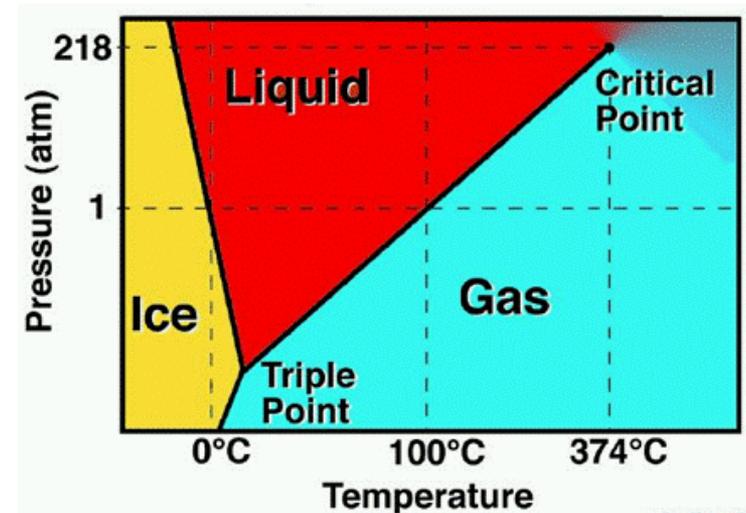
“les quarks sont liés par un ressort incassable et détendu à faible distance”

Phases et transitions de phases de la matière ordinaire



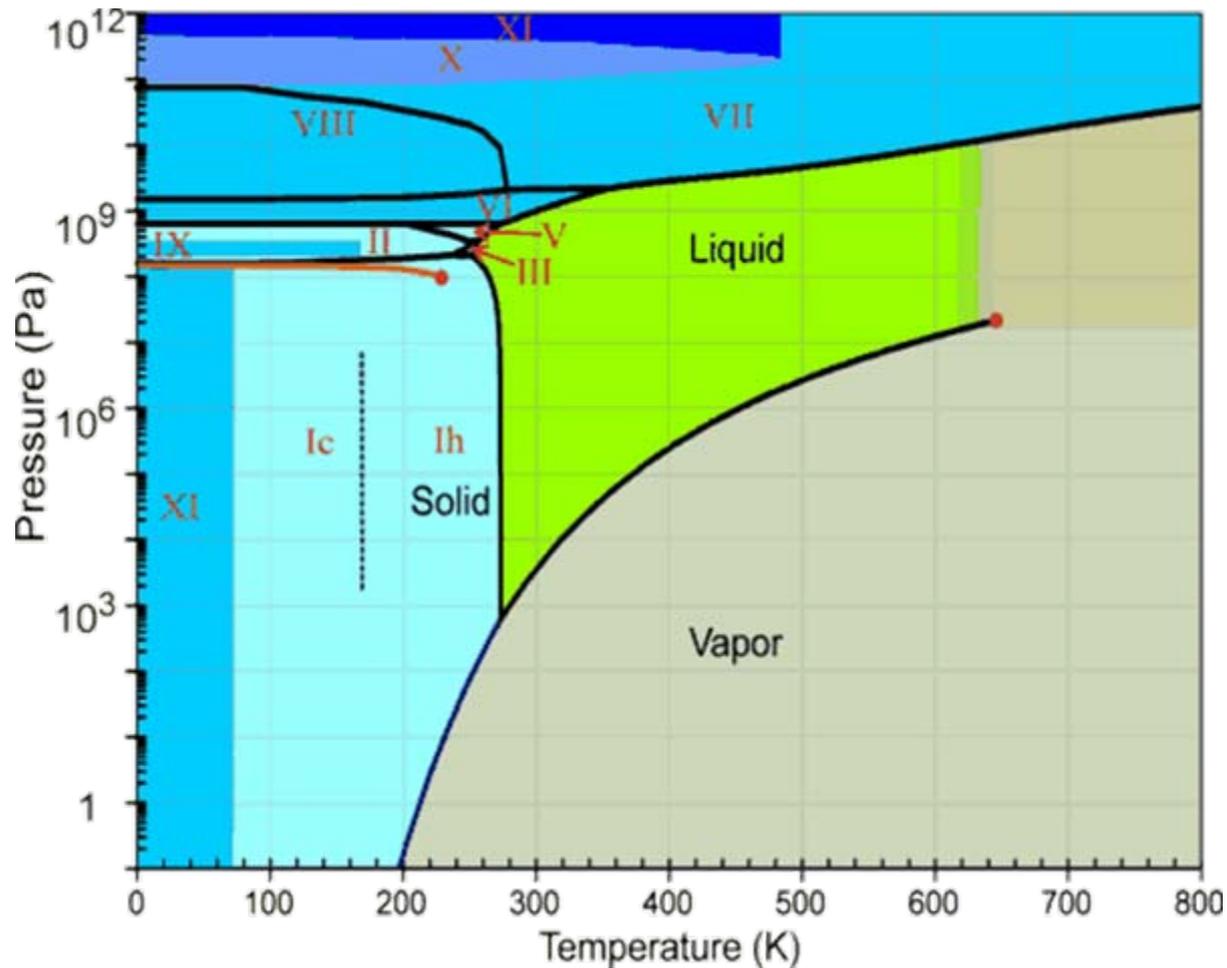
d'autres phases moins communes : plasma, superfluidité, supraconductivité, ferromagnétisme, paramagnétisme, arrangements cristallins...

diagramme de phases : décrit, dans un plan défini par deux variables macroscopiques, les régions d'existence des différentes phases d'un système

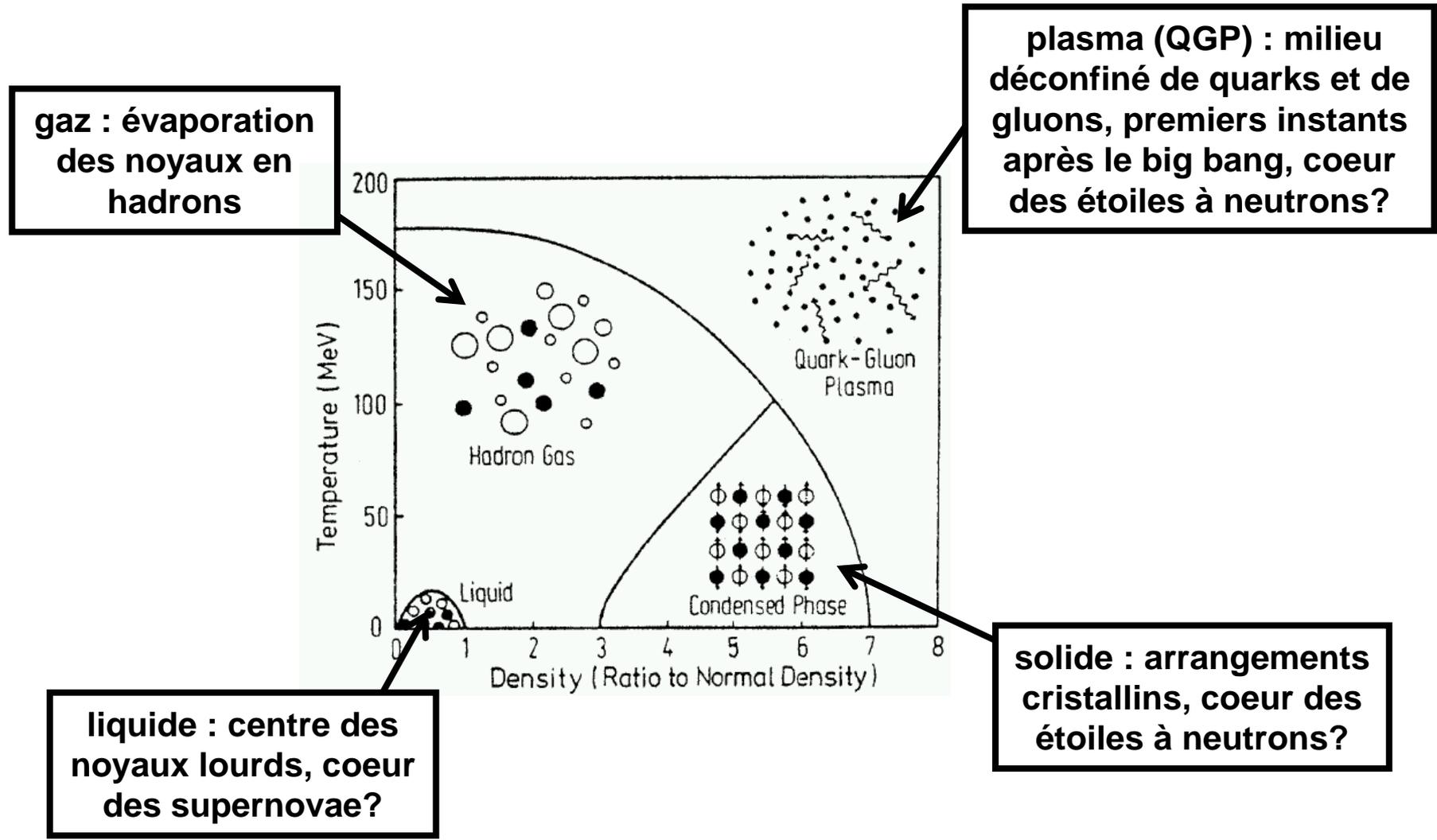


- **point triple : coexistence des 3 phases**
- **point critique : au delà de ce point il n'y a plus de distinction entre gaz et liquide (dans le cas de l'eau, on parle de fluide), on passe d'une phase à l'autre sans transition (crossover)**
- **transition de phase du 1^{ier}/2^{ième} ordre : changement de phase avec (sans) coexistence entre les 2 phases**
- **une transition de phase s'accompagne d'un comportement critique de certaines variables**
- **équation d'état : relation entre variables macroscopiques, telles que température, pression, densité, qui permet de prédire la phase (l'état) d'un système → l'équation d'état est à la base du diagramme de phases**

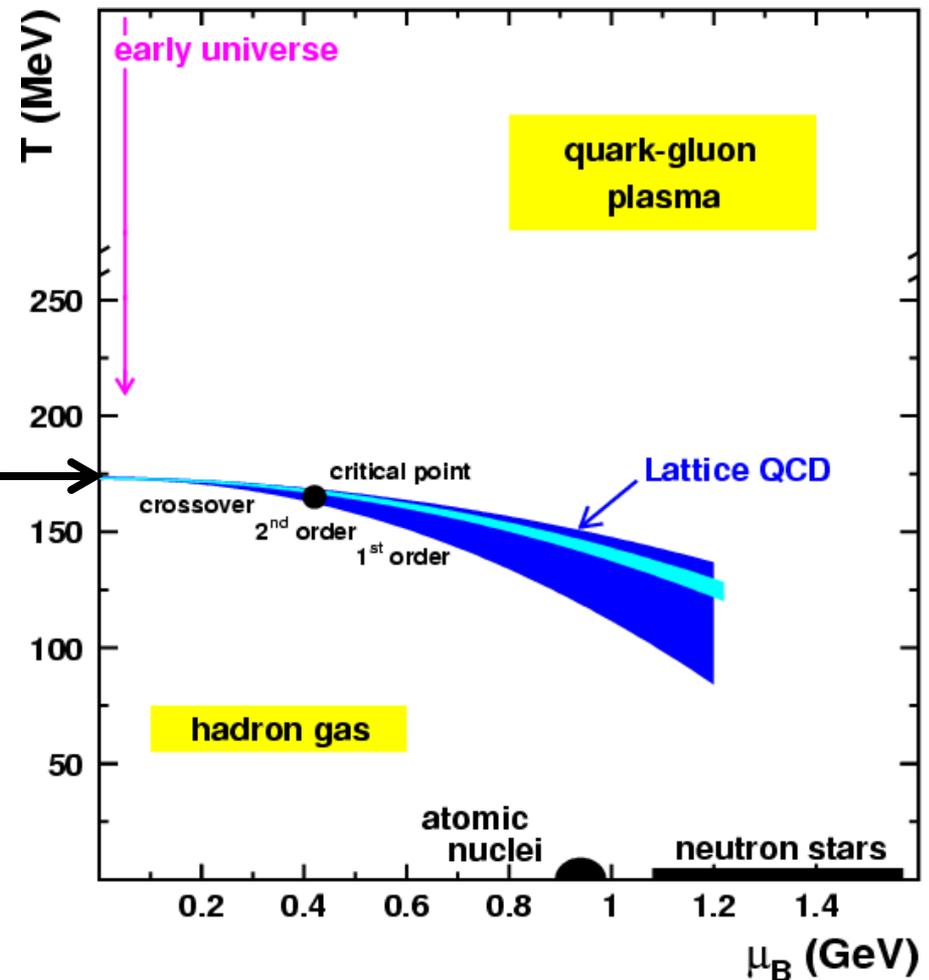
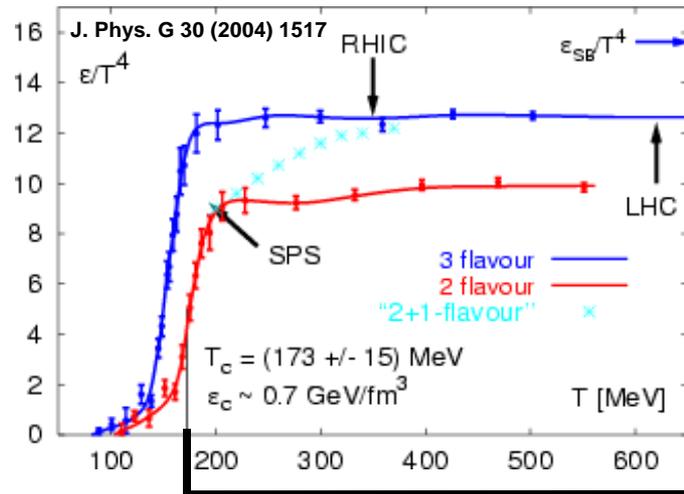
Parenthèse : la structure de l'eau n'est pas simple



Phases (supposées) de la matière nucléaire



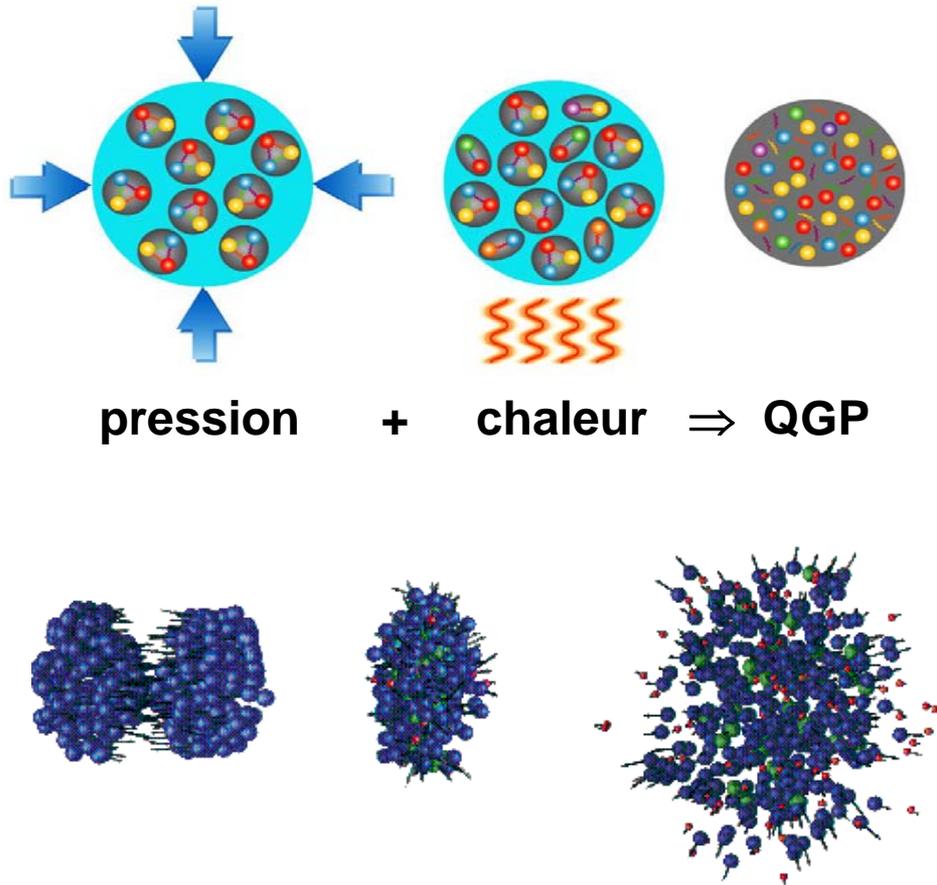
Ce que prédit la théorie (QCD)



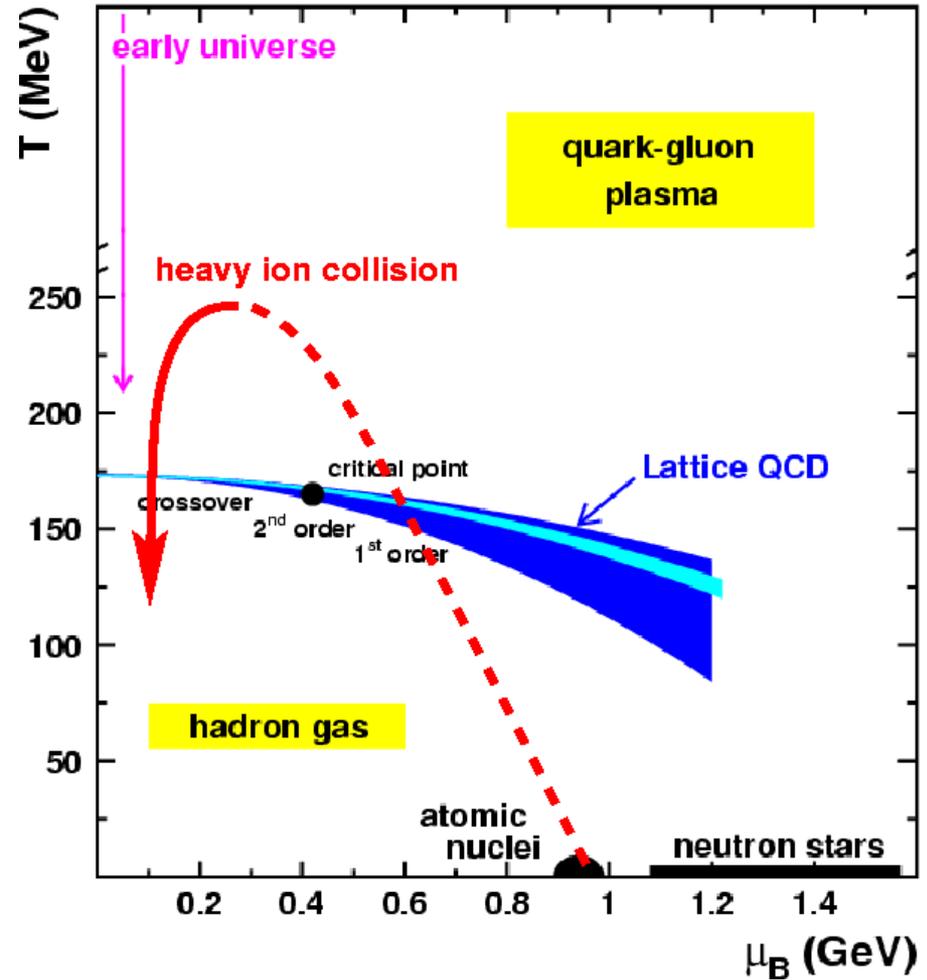
- Pour $\mu_B = 0$:
 - $T = 173 \pm 15 \text{ MeV} = 10^{12} \text{ K}$ ($T_{\text{soleil}} = 10^8 \text{ K}$)
 - $\varepsilon = 0.7 \pm 0.3 \text{ GeV/fm}^3$
 - transition du style “crossover”
- Pour $\mu_B > 0$:
 - grandes incertitudes en température
 - ordre de la transition inconnu
 - existence d’un point critique
- rest. sym. chirale coïncide avec déconf.
- le QGP n’est pas un gaz idéal

μ_B = potentiel chimique baryonique
 $\sim N(\text{baryons}) - N(\text{antibaryons})$

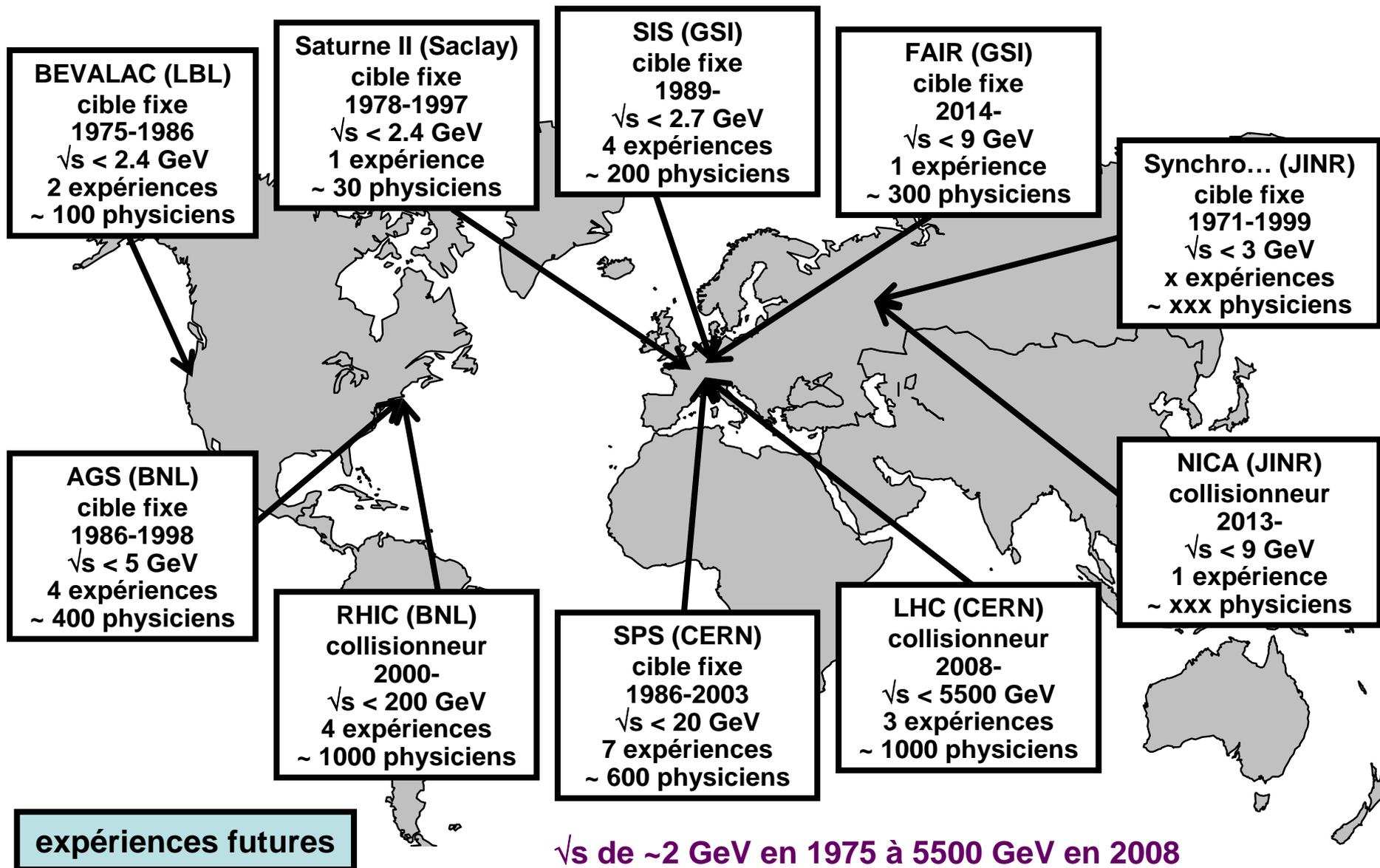
Recréer le QGP en laboratoire : les collisions d'ions lourds relativistes



paramètres clefs : énergie de bombardement, centralité de la collision, impulsion transverse



1975-2008 : 33 ans de collisions d'ions lourds



Evolution du diagramme de phase en 33 ans

1975

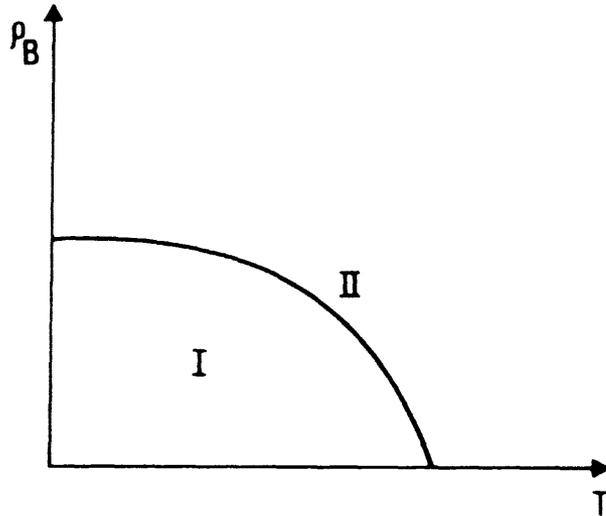
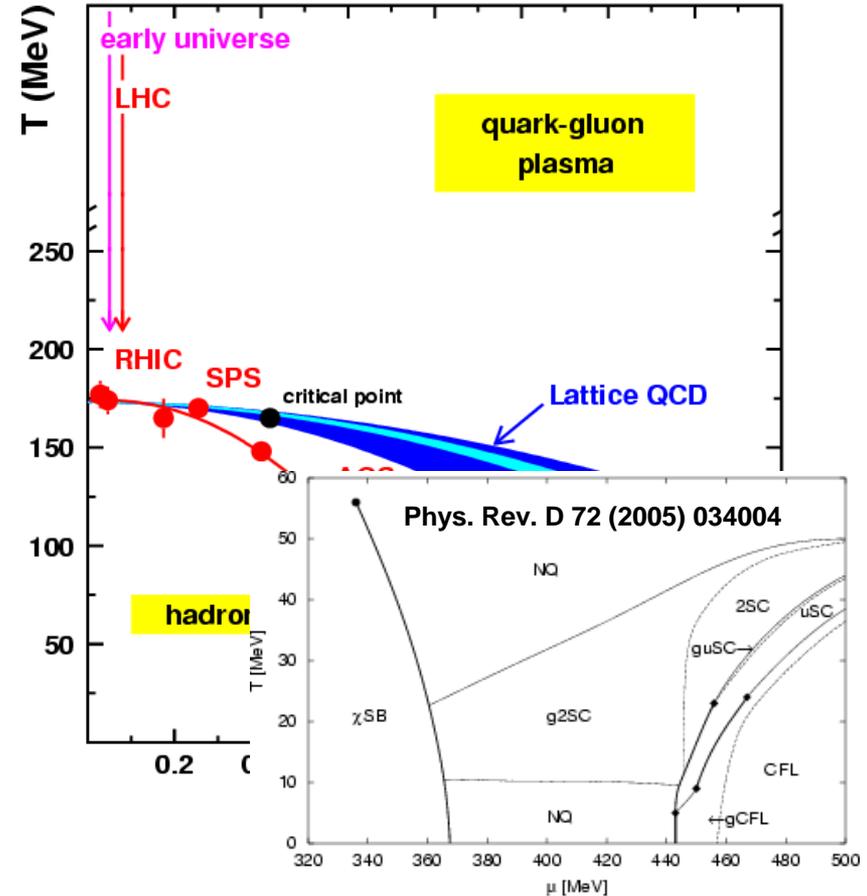


Fig. 1. Schematic phase diagram of hadronic matter. ρ_B is the density of baryonic number. Quarks are confined in phase I and unconfined in phase II.

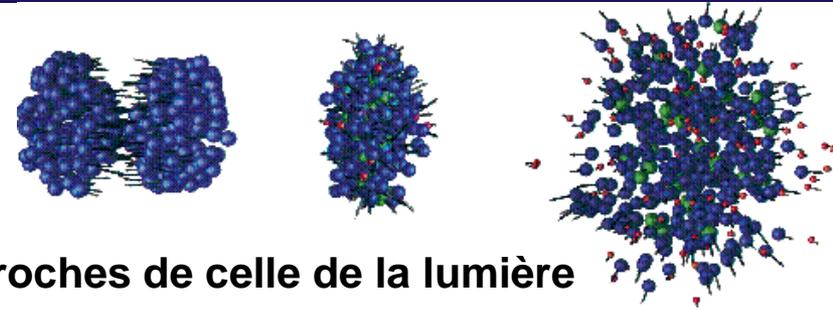
“...we expect a phase diagram of the kind indicated in Fig.1. The true phase diagram may actually be substantially more complex...”

N. Cabibbo & G. Parisi (1975)

2008

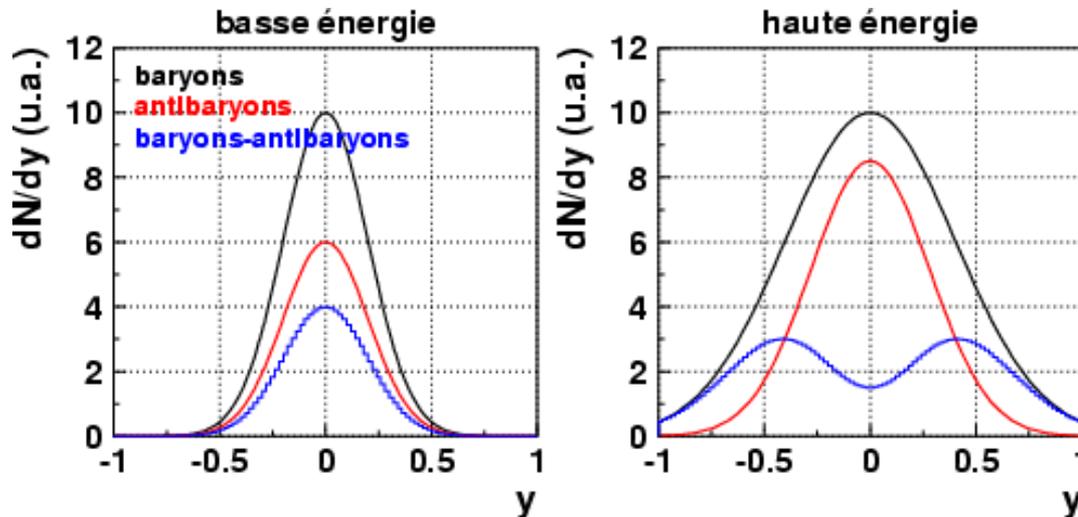


Collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes : concepts de base



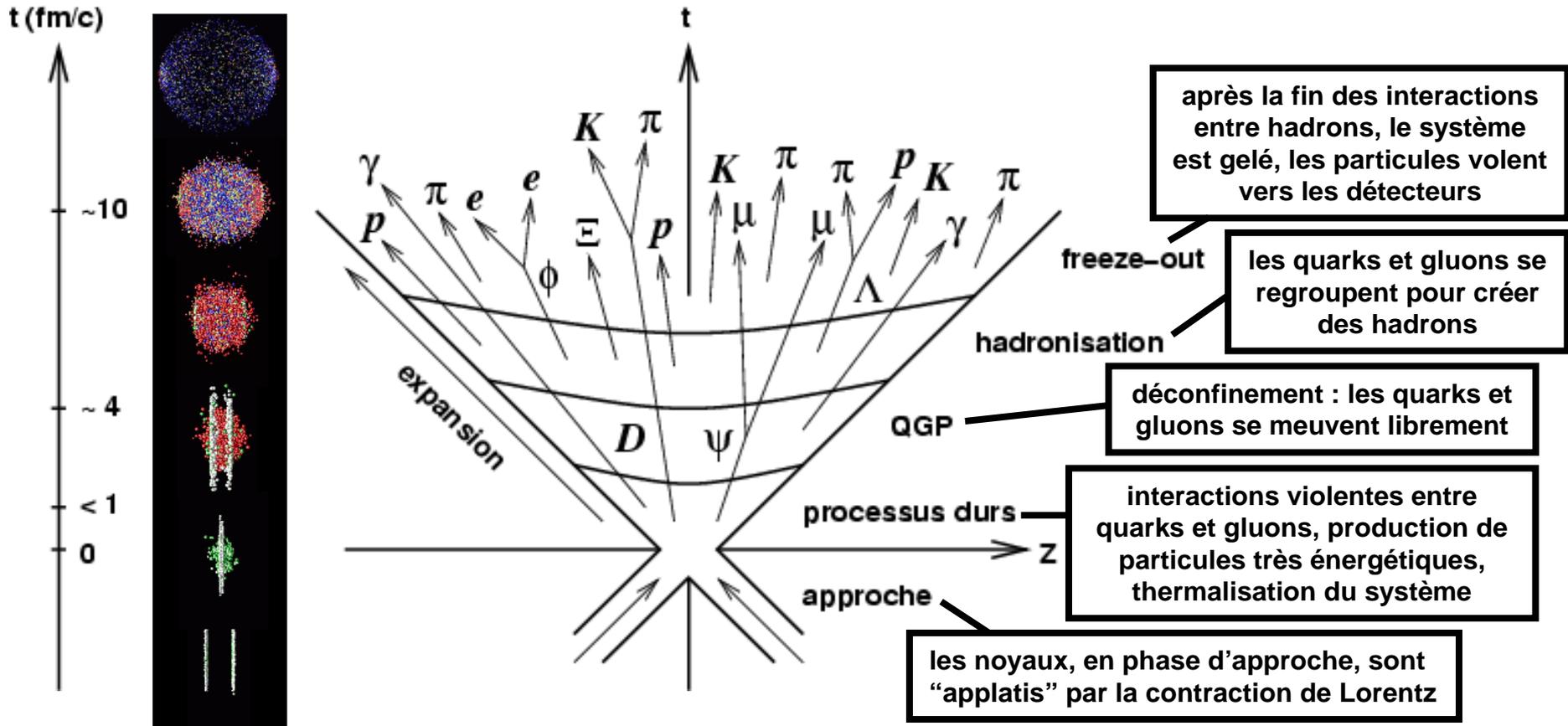
- Les noyaux sont accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière
- Lors de la collision, l'énergie cinétique des noyaux incidents est transférée au système par de multiples collisions entre quarks, gluons et nucléons
- Le système s'échauffe, se comprime, libère de l'énergie en produisant des particules, puis se détend, se refroidit et se désagrège

plus l'énergie de bombardement est élevée, plus les noyaux sont "transparents" et plus le potentiel chimique baryonique μ_B est proche de zero



- y = rapidité : équivalent de la vitesse longitudinale en régime non relativiste
- $\mu_B \sim N(\text{baryons}) - N(\text{antibaryons})$

Evolution spatio-temporelle d'une collision d'ions lourds (ultra-)relativistes



1 fm/c = 10^{-23} s

1 fm = 10^{-15} m

- la collision comprend quatre grandes étapes distinctes
- principe de l'étude du QGP : on utilise les particules produites pour sonder les propriétés du système formé lors de la collision

Les particules produites

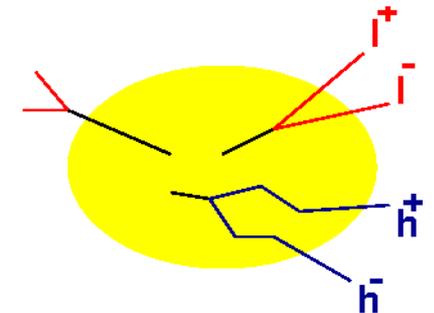
photons (γ), leptons (e, μ) et hadrons

		unflavored	strange	charm	bottom
hadrons	mésons	$\pi^+(u\bar{d})$	$K^+(u\bar{s})$	$D^+(c\bar{d})$	$B^+(u\bar{b})$
		$\rho^+(u\bar{d})$	$K_s^0(d\bar{s})$	$D^0(c\bar{u})$	$B^0(d\bar{b})$
		$\phi(s\bar{s})$		$D_s^+(c\bar{s})$	$B_s^0(s\bar{b})$
				$J/\psi(c\bar{c})$	$\Upsilon(b\bar{b})$
	
	baryons	$p(uud)$	$\Lambda(usd)$	$\Lambda_c^+(udc)$	$\Lambda_c^0(udb)$
		$n(udd)$	$\Sigma^+(uus)$	$\Sigma_c^0(ddc)$	$\Xi_b^0(usb)$
		$\Delta^0(udd)$	$\Xi^+(dss)$	$\Xi_c^+(usc)$	$\Xi_b^-(dsb)$
			$\Omega^-(sss)$	$\Omega_c^0(ssc)$	
	

plus anti-particules et états excités

- A part une certaine hiérarchie de masse, des particules sont produites tout au long de la collision
- Certaines particules sont stables, d'autres se désintègrent à différents instants de la collision
- Certaines particules se désintègrent en cascade (difficile à reconstruire)
- Certaines particules sont régénérées au cours de la collision
- Certaines particules subissent des interactions avec d'autres particules au cours de la collision

exemple de “particule intéressante” : particule lourde (produite uniquement au début de la collision), se désintégrant rapidement (dans le QGP) en leptons (qui ne subissent pas d'interactions avec d'autres particules)



Identifier les particules produites

la plupart des particules sont identifiées par la mesure de leur masse

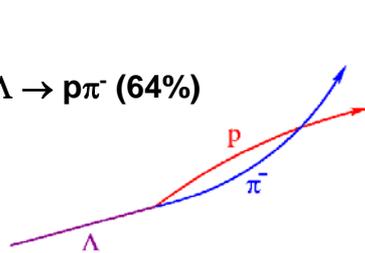
- **Mesures directes :**

les particules "stables" (π , K, p...) traversent les détecteurs

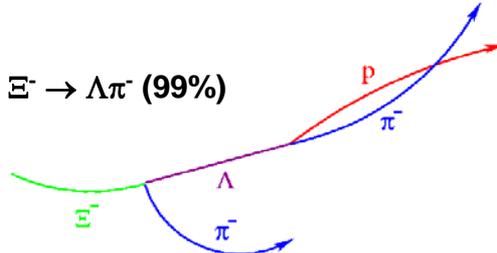
- **Mesures indirectes :**

reconstruction des particules instables

$$\Lambda \rightarrow p\pi \quad (64\%)$$



$$\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^- \quad (99\%)$$



- **Le cas particulier des dileptons :**

sources multiples, faibles rapports d'embranchement

$$\pi^0 \rightarrow l^+l^- \gamma \quad (1 \%)$$

$$\eta \rightarrow l^+l^- \gamma \quad (1.10^{-3}\%)$$

$$\rho \rightarrow l^+l^- \quad (5.10^{-5}\%)$$

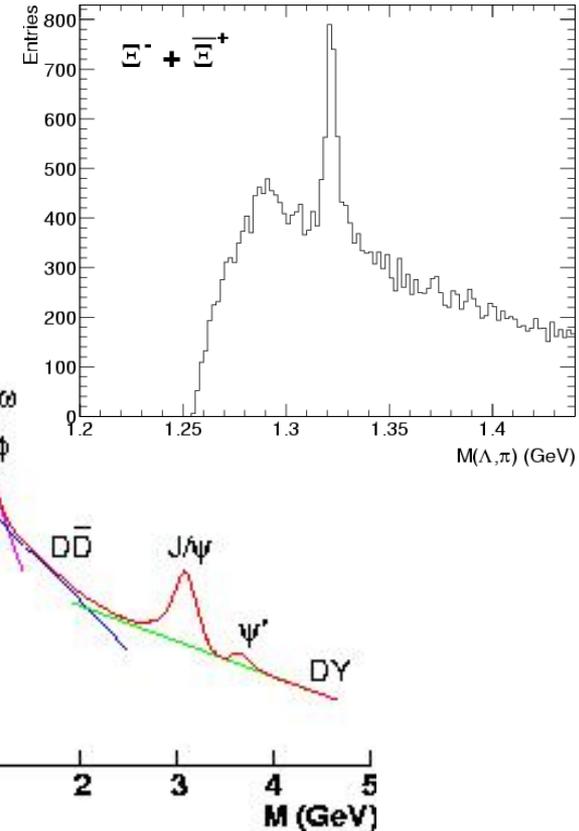
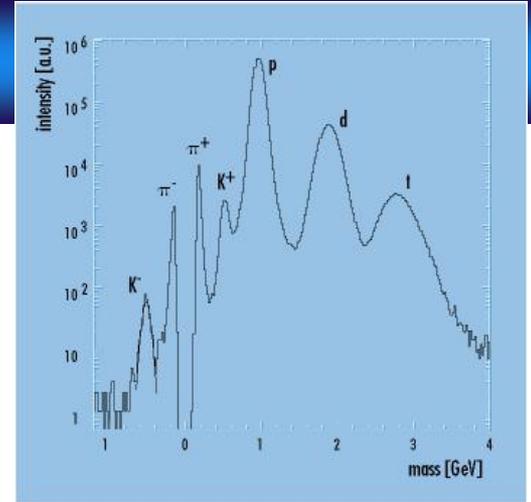
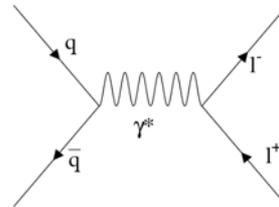
$$\omega \rightarrow l^+l^- \quad (7.10^{-5}\%)$$

$$\phi \rightarrow l^+l^- \quad (3.10^{-4}\%)$$

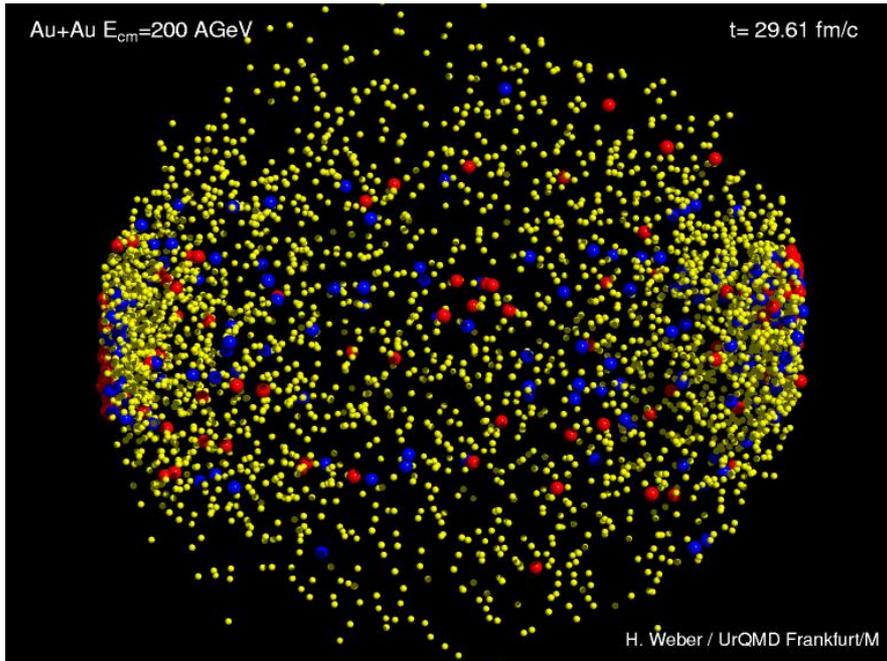
$$J/\psi \rightarrow l^+l^- \quad (5.9\%)$$

$$\psi' \rightarrow l^+l^- \quad (7.10^{-3}\%)$$

$$D \rightarrow l X \quad (10 \%)$$

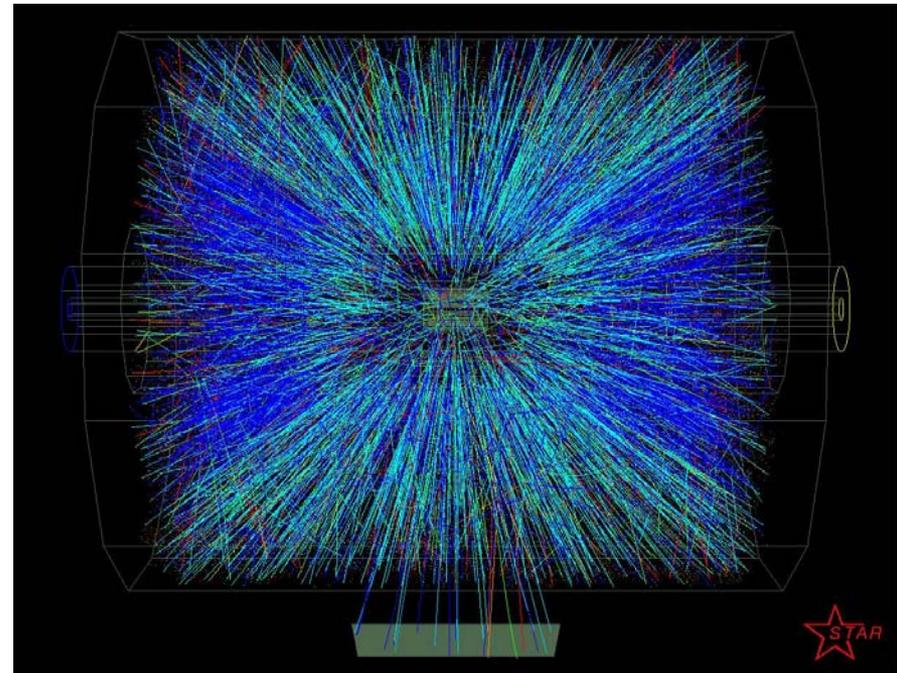


Pas si simple...



← une collision d'ions
lourds simulée

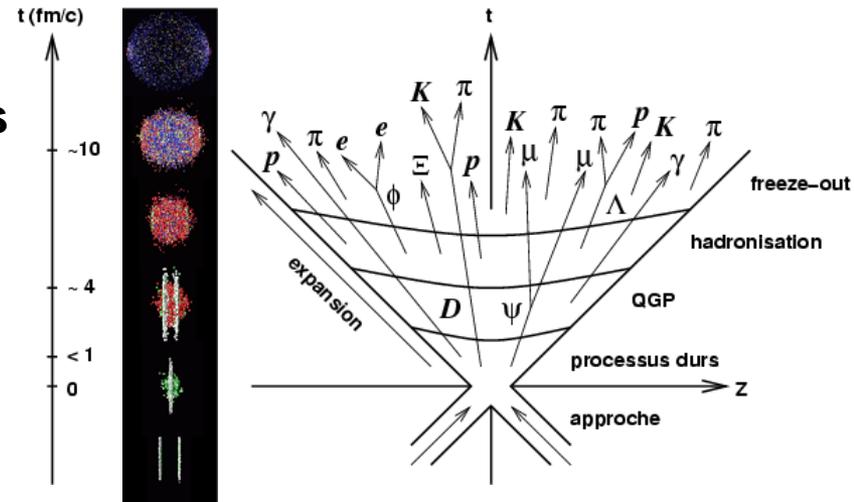
la même collision vue "en
réalité" dans le détecteur →



movies

Encore plus compliqué

- L'environnement est hostile (jusqu'à 30000 particules produites par collision)
- Les collisions intéressantes sont souvent très rares
- Le temps de vie du système est extrêmement court
- La taille du système est ridiculement petite
 - ⇒ difficile de décrire le système avec des grandeurs macroscopiques
- Les signaux du QGP sont noyés dans les signaux de la phase hadronique plus étendue dans l'espace et le temps
- Les signaux du QGP peuvent être détruits ultérieurement lors de la collision
- Les mesures sont indirectes
- Les mesures sont moyennées sur le temps



1. Mesurer une observable

- dont la valeur est supposée (d'après des arguments théoriques) être différente selon que l'on a formé un QGP ou non. Terrain de chasse : collisions AA centrales

2. Valider la mesure

- en comparant l'observable aux prédictions théoriques avec et sans formation de QGP
- en comparant l'observable à la même observable mesurée en mode pp (pas de QGP) et pA et AA périphérique (effets nucléaires "froids") puis extrapolée à AA central

3. Conforter le résultat

- répéter 1. et 2. avec autant d'observables que possible

4. Dédire les propriétés du QGP

- affiner les modèles théoriques et re-itérer les comparaisons

D'où une complexité supplémentaire

les interprétations nécessitent des concepts phénoménologiques

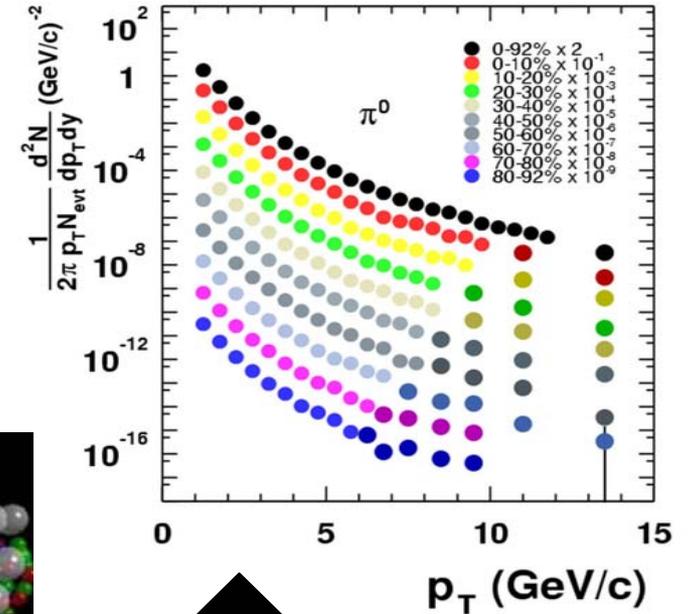
théorie fondamentale (QCD)

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{q}_f (i \not{D} + m_f) q_f$$

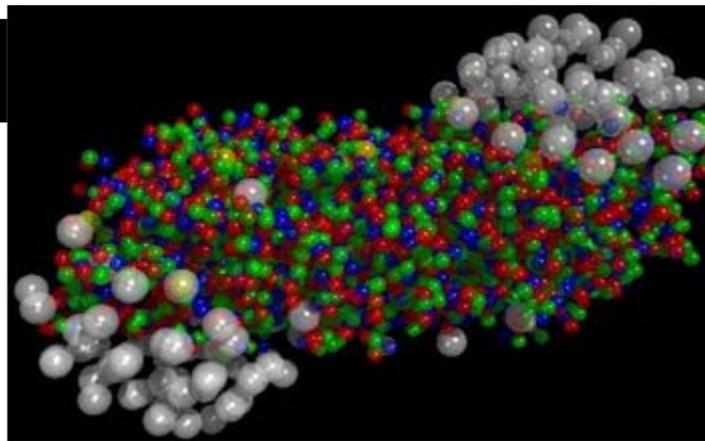
where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$
and $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$



mesures expérimentales



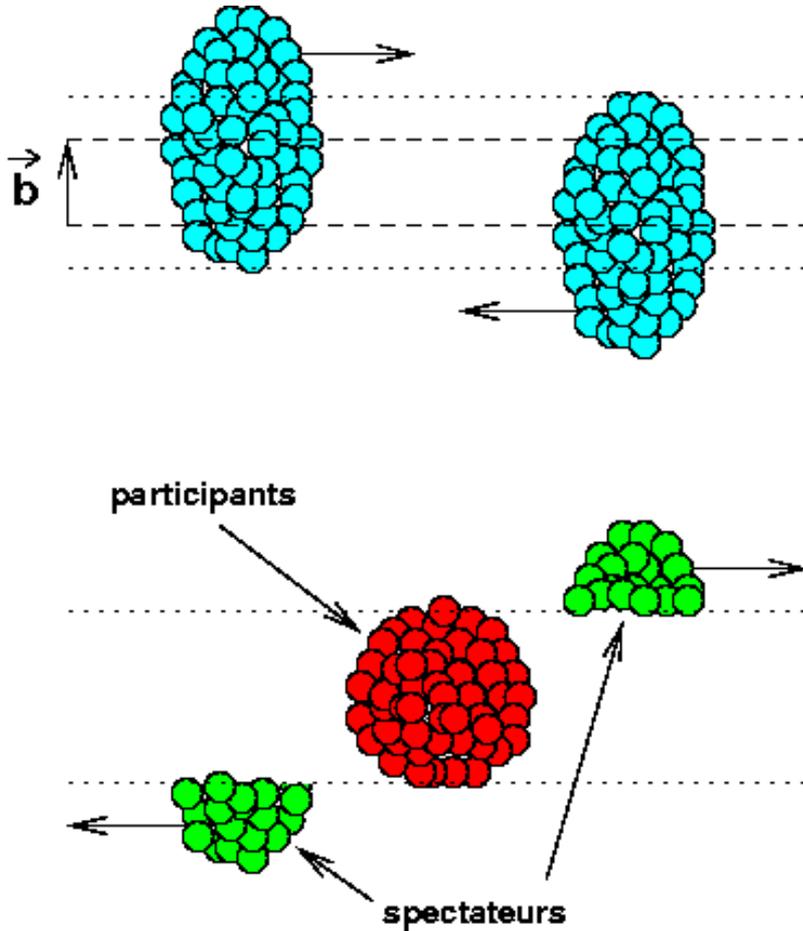
modélisation de la collision



comprendre et décrire l'évolution spatio-temporelle de la collision

- **Grandeurs caractéristiques de la collision dans son ensemble**
 - **Energie de bombardement** : contrôle l'énergie et la température déposées dans le système. Permet de naviguer dans le diagramme de phases
 - **Centralité** : (transparent suivant)
- **Grandeurs caractéristiques des particules détectées**
 - **Taux de production** : renseigne sur la nature et les propriétés thermodynamiques du système
 - **Moment transverse (p_t)** : impulsion de la particule dans la direction perpendiculaire au faisceau. Plus p_t est grand et plus la particule a été produite tôt dans la collision

La centralité de la collision



- la centralité est déterminée par le paramètre d'impact b reliant les lignes de vol des 2 noyaux passant par leur centre
- b est estimé expérimentalement par la mesure du nombre de spectateurs ou de l'énergie ou du nombre de particules dans la direction transverse
- plus b est faible, plus la collision est centrale ("violente") et plus la densité d'énergie et la température augmentent

Signatures du QGP

modification des
résonances légères

suppression
des résonances
lourdes

augmentation
de l'étrangeté

production
de photons

**sondes
dures**

**sondes
molles**

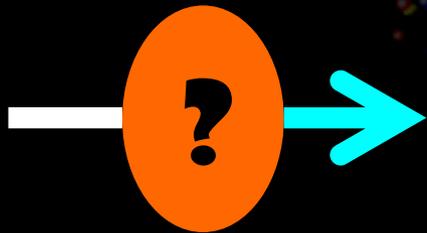
basées sur des
particules produites
en début de collision

basées sur des
particules produites
en fin de collision

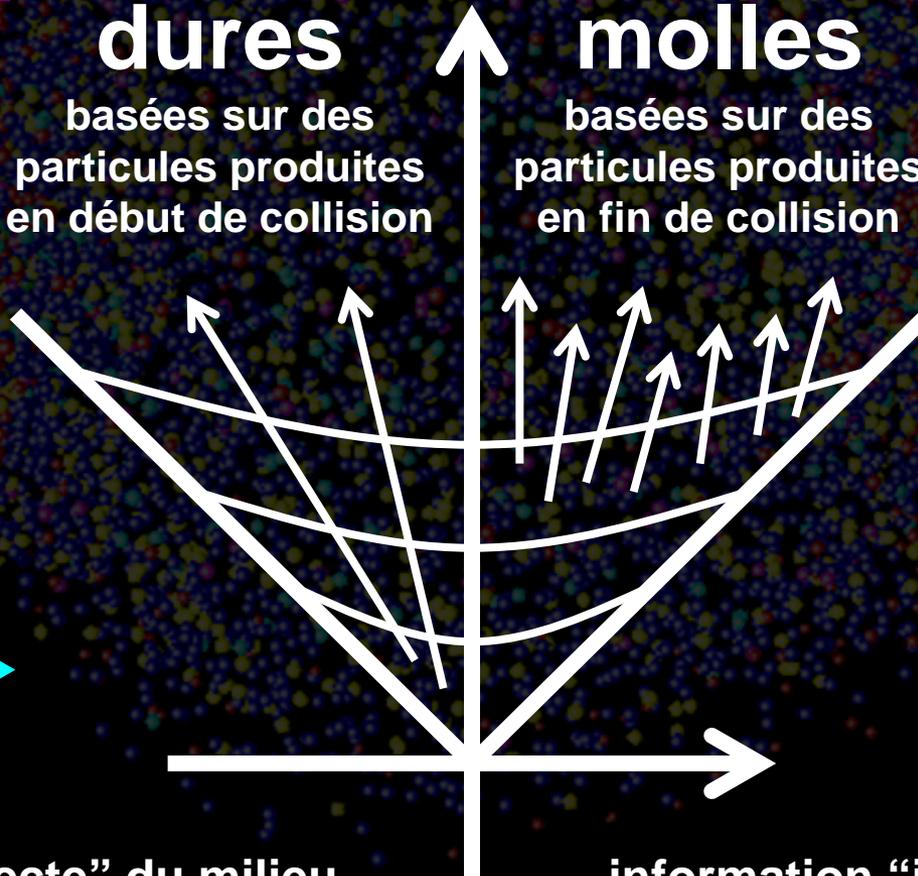
amplitude
du flow

jet
quenching

..etc



information "directe" du milieu



information "indirecte" du milieu

information "directe" du milieu

Signatures du QGP 1) augmentation de l'étrangeté (sonde molle)

motivation : la production d'étrangeté est plus facile (moins coûteuse) et plus rapide dans un QGP que dans un gaz hadronique

$(\Lambda(uds), \Xi(dss), \Omega(sss))$

QGP		gaz hadronique (GH)	
réaction	E_{seuil}	réaction	E_{seuil}
$g + g \rightarrow s + \bar{s}$	300	$N + N \rightarrow N + N + K + \Lambda$	700
$q + \bar{q} \rightarrow s + \bar{s}$	300	$N + N \rightarrow N + N + \Lambda + \bar{\Lambda}$	2200
		$N + N \rightarrow N + N + \Xi + \bar{\Xi}$	2600
		$N + N \rightarrow N + N + \Omega + \bar{\Omega}$	3300
		$\pi + N \rightarrow K + \Lambda$	540
		$\pi + \Lambda \rightarrow K + \Xi$	560
		$\pi + \Xi \rightarrow K + \Omega$	710

$$\Omega / \Xi \Big|_{\text{QGP}} \sim \Xi / \Lambda \Big|_{\text{QGP}}$$

$$\Omega / \Xi \Big|_{\text{GH}} < \Xi / \Lambda \Big|_{\text{GH}}$$

$$\Xi / \Lambda \Big|_{\text{QGP}} > \Xi / \Lambda \Big|_{\text{GH}}$$

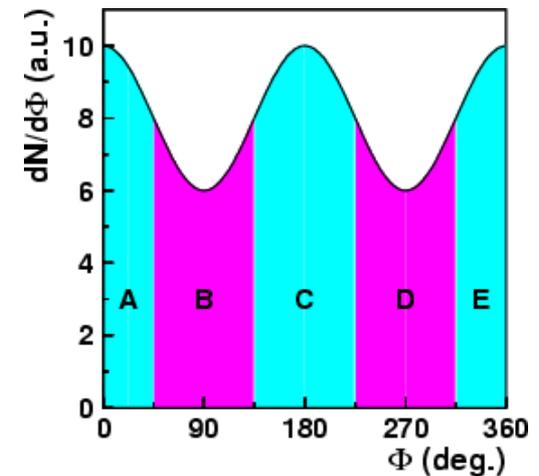
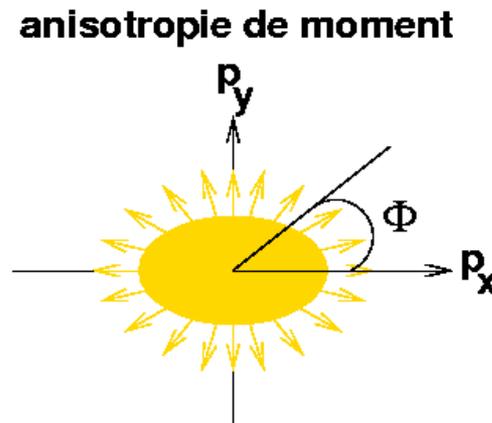
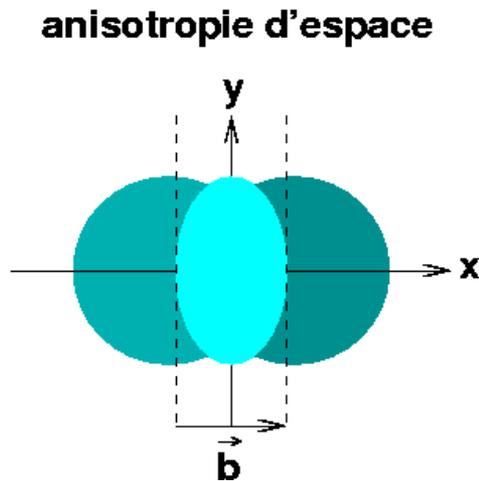
$$\Omega / \Xi \Big|_{\text{QGP}} > \Omega / \Xi \Big|_{\text{GH}}$$

E_{seuil} (en MeV) = masses état final – masses état initial

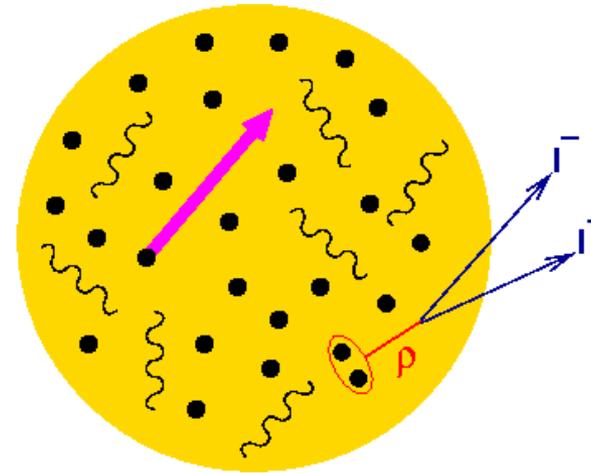
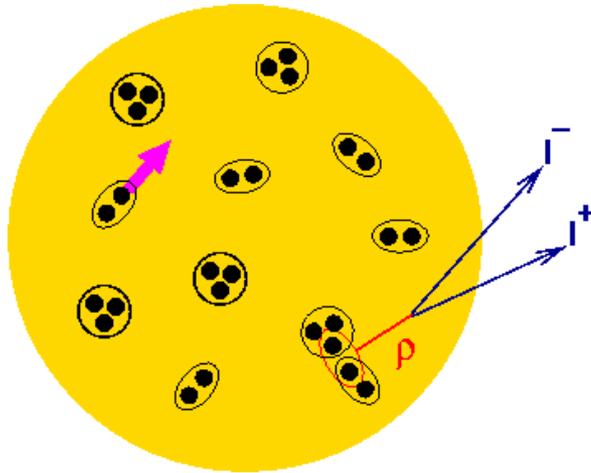
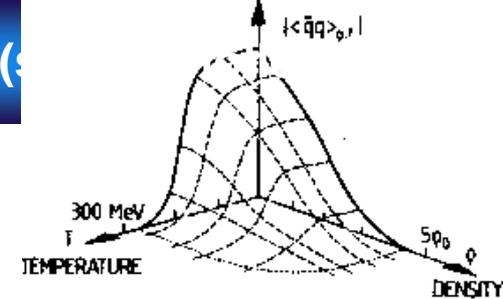
en combinant les relations, il vient : $\frac{\Omega / \Xi \Big|_{\text{QGP}}}{\Omega / \Xi \Big|_{\text{GH}}} > \frac{\Xi / \Lambda \Big|_{\text{QGP}}}{\Xi / \Lambda \Big|_{\text{GH}}} > 1$

Signatures du QGP 2) caractéristique du flow (sonde molle)

flow : écoulement collectif de la matière dans des directions privilégiées; résulte de la pression accumulée dans le système



- l'anisotropie (initiale) d'espace produit un gradient de pression plus grand dans la direction x que dans la direction y
- l'amplitude mesurée (i.e. finale) du flow elliptique ($v_2 = (A+C+E)/(B+D)$) est représentative du gradient de pression initial (i.e. de la densité du système)



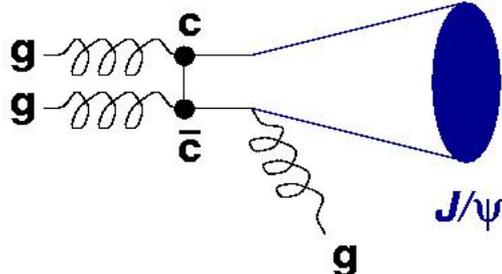
**GH : quarks emprisonnés dans les hadrons
faible mobilité \Leftrightarrow grande masse effective**

**QGP : quarks et gluons libres
grande mobilité \Leftrightarrow faible masse effective**

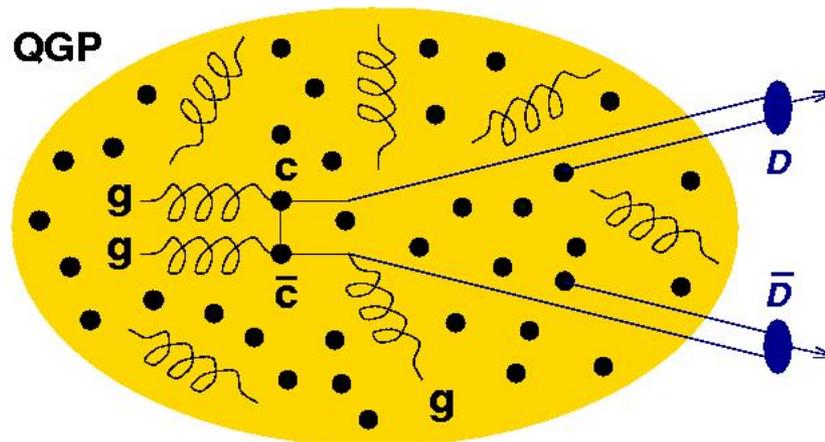
**\Rightarrow diminution de la masse des résonances de saveur légère dans un QGP
(attendue uniquement pour les résonances produites et se désintégrant dans le QGP)**

Signatures du QGP 4) suppression des résonances lourdes (sonde dure)

vide



QGP



deux gluons fusionnent en une paire $c\bar{c}$. Après un certain temps, et avec l'aide d'un autre gluon, le J/ψ est formé.

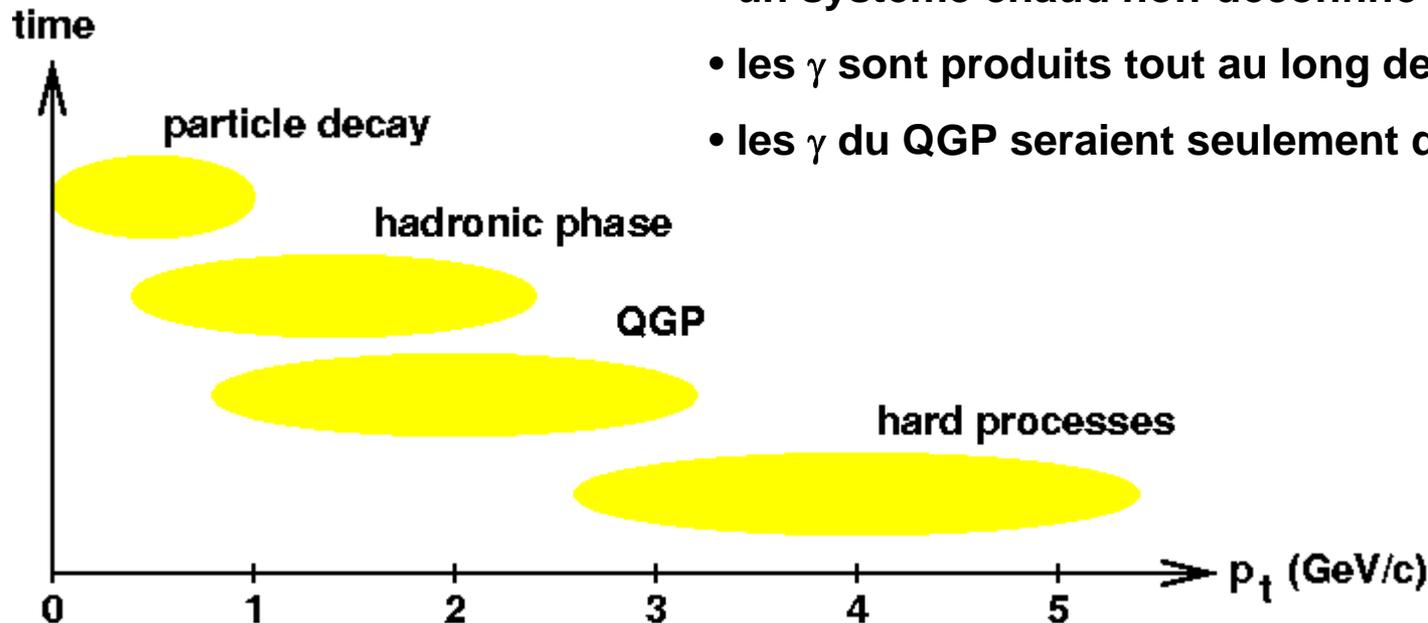
à cause de la présence d'autres quarks, les deux quarks c ne se voient plus. Ils se couplent à des quarks légers pour former des mésons D . Le J/ψ est supprimé.

plus la collision est centrale, plus la densité d'énergie est grande,
plus les quarks c sont écrantés

⇒ on s'attend donc à mesurer de moins en moins de J/ψ dans les collisions de plus en plus centrales

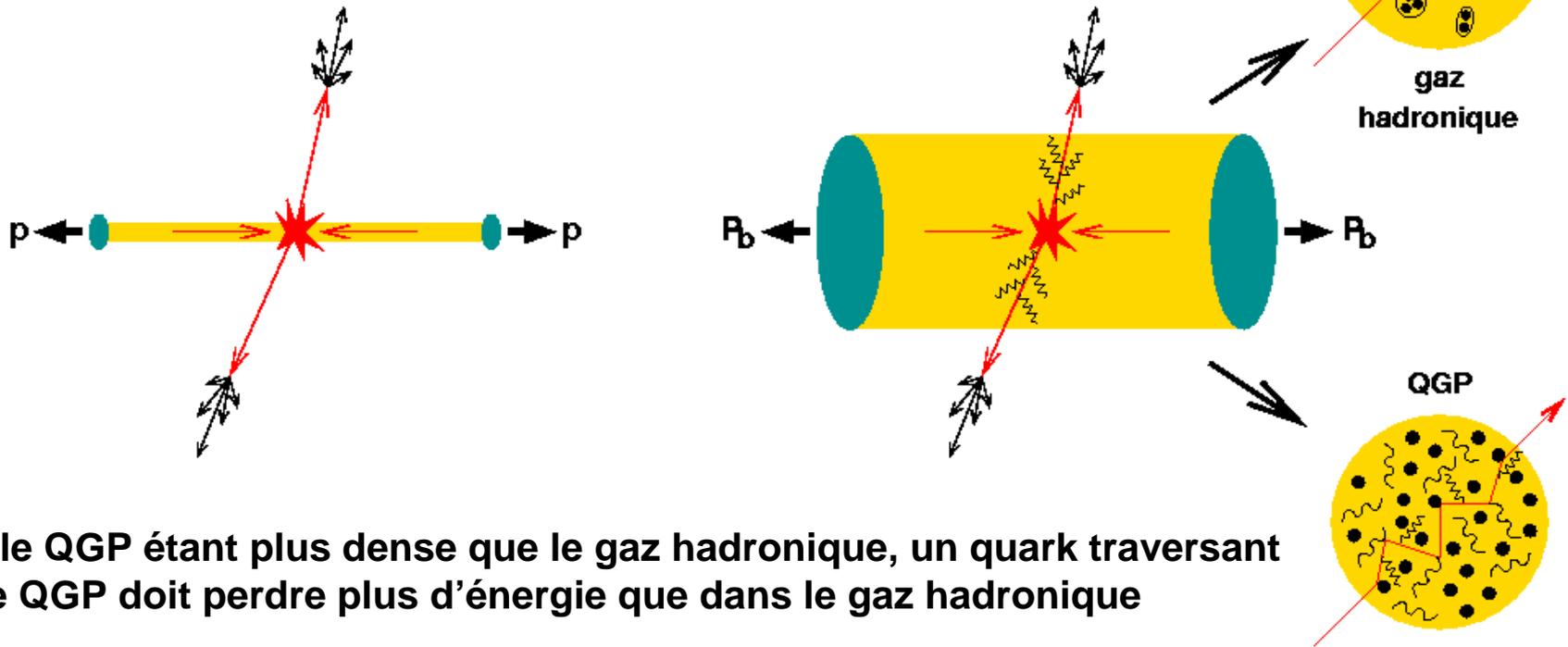
Signatures du QGP 5) production de photons (sonde dure)

- principe : tout système “chaud” rayonne des photons thermiques (γ) avec un taux proportionnel à T^4
- mesure très intéressante :
 - accès direct à la température du QGP
 - les γ ne subissent pas l'interaction forte
- mesure très délicate :
 - difficile expérimentalement (bruit de fond)
 - un système chaud non-déconfiné produit aussi des γ
 - les γ sont produits tout au long de la collision
 - les γ du QGP seraient seulement quelques % du total



Signatures du QGP 6) jet quenching (sonde dure)

- les quarks de grands p_t , produits au tout début de la collision, perdent de l'énergie par effet radiatif et par collision avec les constituants du milieu



- le QGP étant plus dense que le gaz hadronique, un quark traversant le QGP doit perdre plus d'énergie que dans le gaz hadronique
- le QGP doit donc engendrer une suppression des particules de grand p_t (jet quenching)

- **Analogie phases matière nucléaire – phases matière ordinaire**
- **Le QGP est une prédiction de la chromodynamique quantique (QCD)**
- **Importance en cosmologie et astrophysique**
- **Les collisions d'ions lourds permettent, à priori, de produire le QGP**
- **Environnement extrêmement complexe, interprétations difficiles**
- **Plusieurs signatures du QGP prédites par les approches théoriques**

Collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes

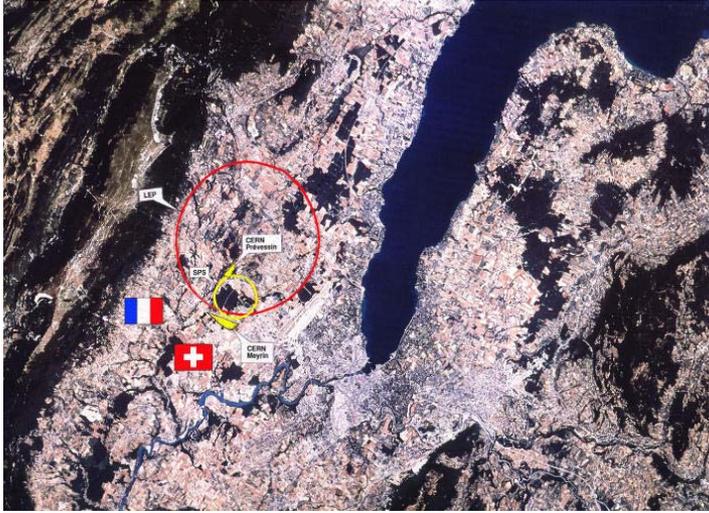
Deuxième partie

Résumé de l'épisode précédent

- **Analogie phases matière nucléaire – phases matière ordinaire**
- **Le QGP est une prédiction de la chromodynamique quantique (QCD)**
- **Importance en cosmologie et astrophysique**
- **Les collisions d'ions lourds permettent, à priori, de produire le QGP**
- **Environnement extrêmement complexe, interprétations difficiles**
- **Plusieurs signatures du QGP prédites par les approches théoriques**

- **Matière nucléaire et QGP**
 - QGP & collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes
 - Signatures attendues du QGP
- **Recherche expérimentale du QGP**
 - Le passé : l'ère SPS
 - Le présent : l'ère RHIC
- **Le futur : l'ère LHC**
 - Le QGP au LHC
 - L'expérience ALICE

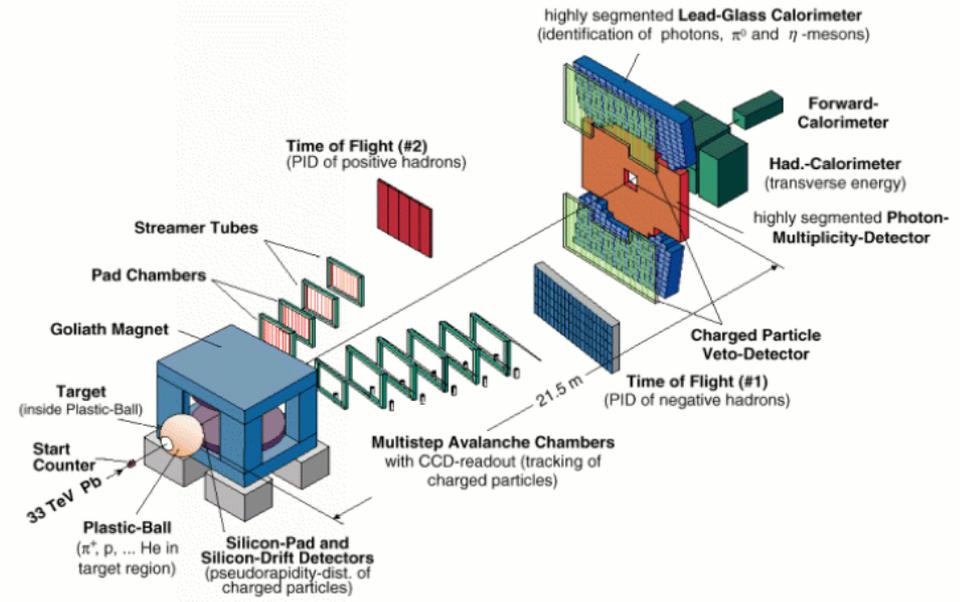
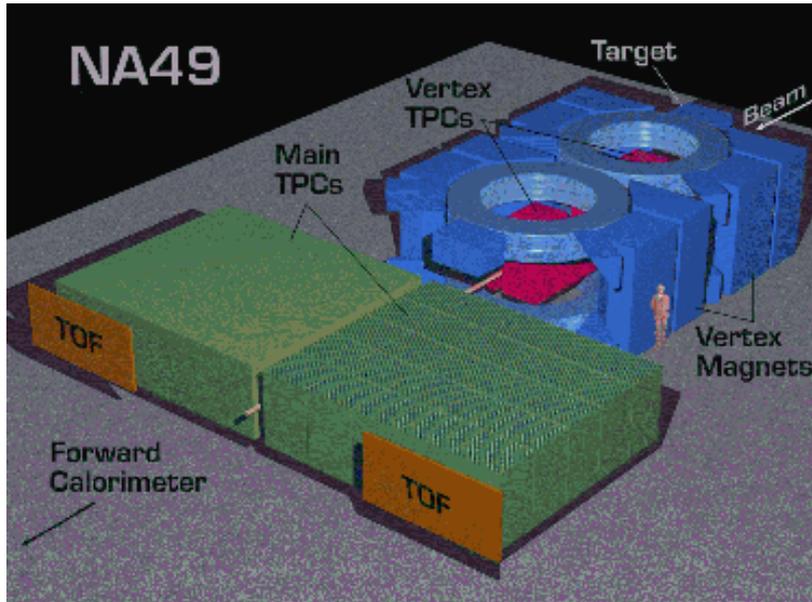
Super Proton Synchrotron (CERN)



Un des nombreux accélérateurs du CERN

- 6.3 km de circonférence, injecteur du LHC
- protons jusqu'à 450 GeV (10^9 par sec), Pb jusqu'à 158 AGeV (10^7 par sec)
- 2 sites expérimentaux, 7 expériences ions lourds, mise en service : 1976

Les expériences ions lourds au SPS (I)



NA49

102 physiciens, 13 instituts, 21 pays

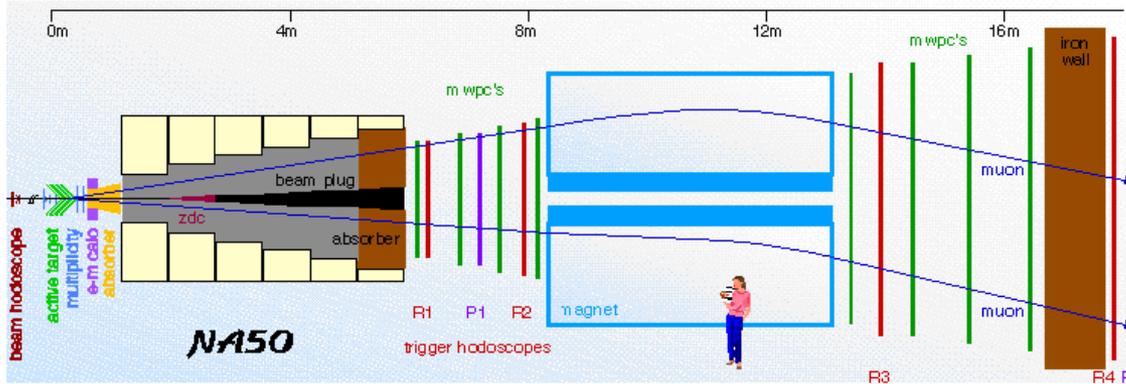
hadrons

WA98

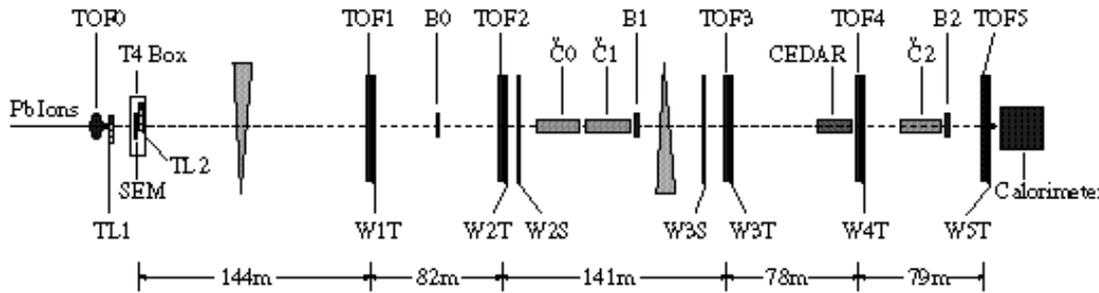
172 physiciens, 21 instituts, 11 pays

photons

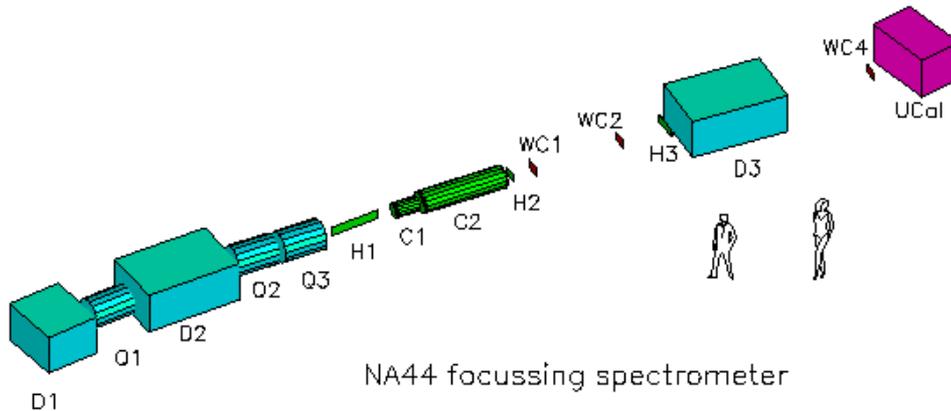
Les expériences ions lourds au SPS (II)



NA50
105 physiciens, 14 instituts, 7 pays
muons

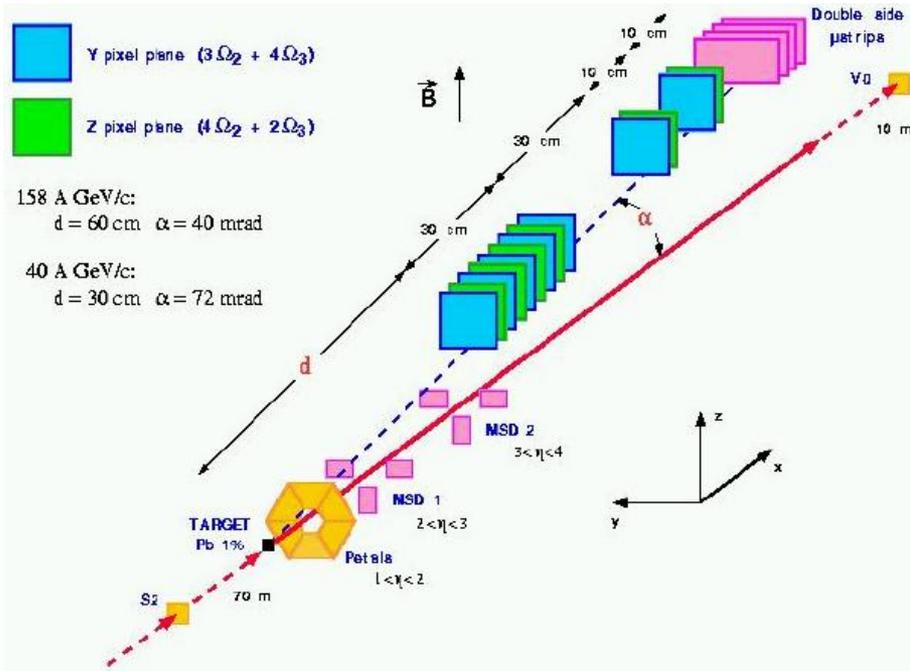


NA52
26 physiciens, 5 instituts, 3 pays
strangelets



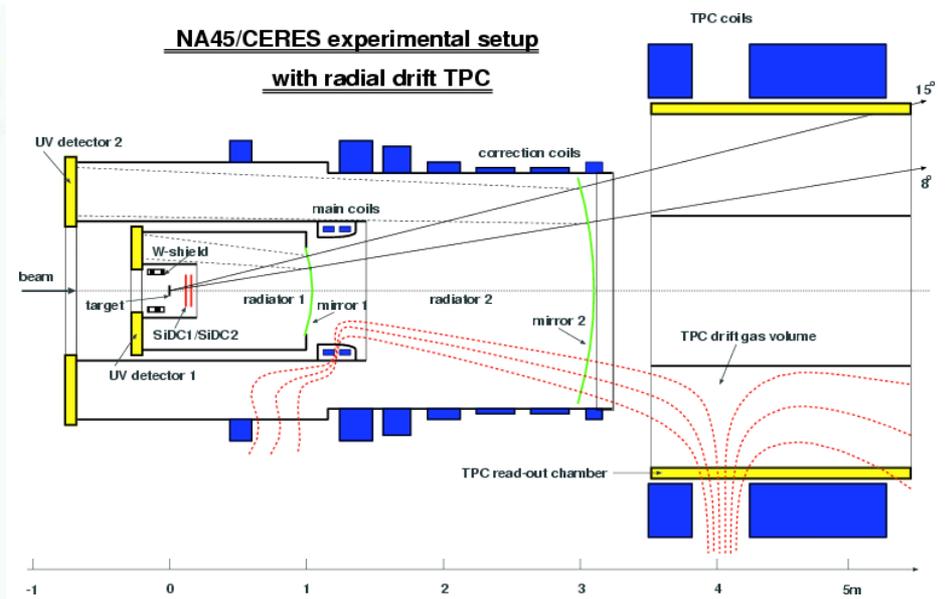
NA44
92 physiciens, 11 instituts, 6 pays
part. chargées, corrélations

Les expériences ions lourds au SPS (III)



NA57

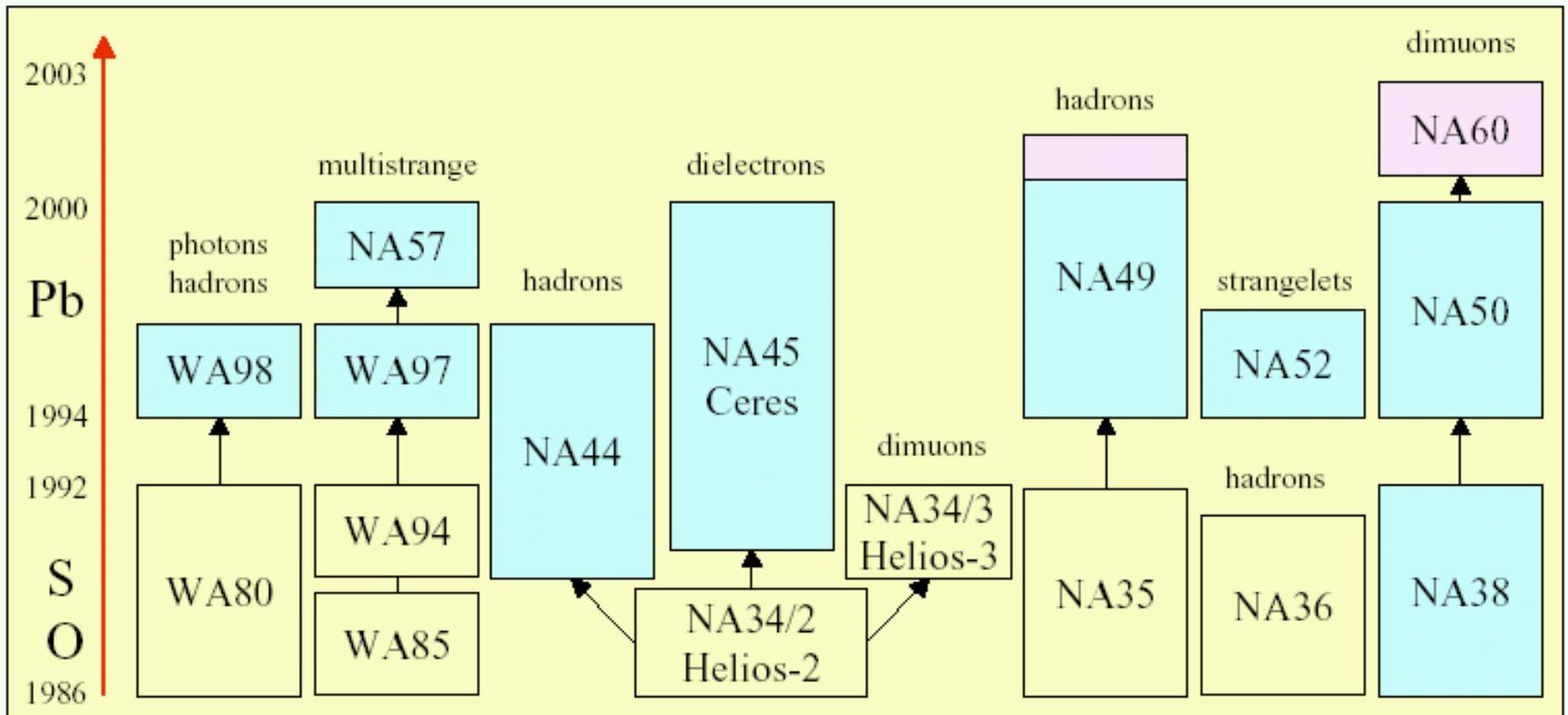
79 physiciens, 19 instituts, 10 pays
baryons étranges



NA45

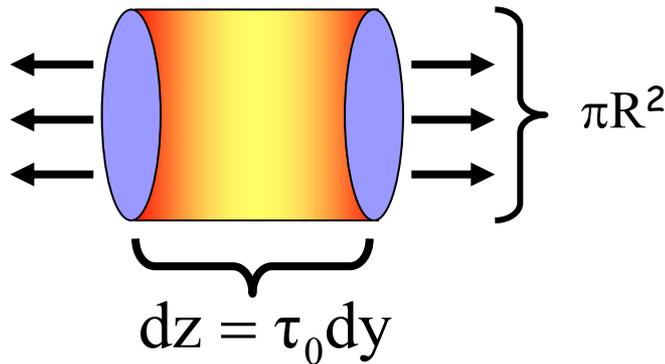
54 physiciens, 9 instituts, 6 pays
électrons

Le programme ions lourds du SPS



1) Densité d'énergie atteinte dans la collision

principe : estimer la densité d'énergie atteinte dans la collision
à partir de l'énergie transverse E_t des particules (mesurée)



“scenario d'expansion de Bjorken”

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

système	énergie (AGeV)	ε (GeV/fm ³)
S+S	200	1.0
S+Au	200	2.0
Pb+Pb	158	2.5

les densités d'énergie atteintes dans les collisions S+Au et Pb+Pb sont supérieures à la densité critique ($\varepsilon_c = 0.7 \text{ GeV/fm}^3$)

⇒ le système vient probablement de la zone déconfinée

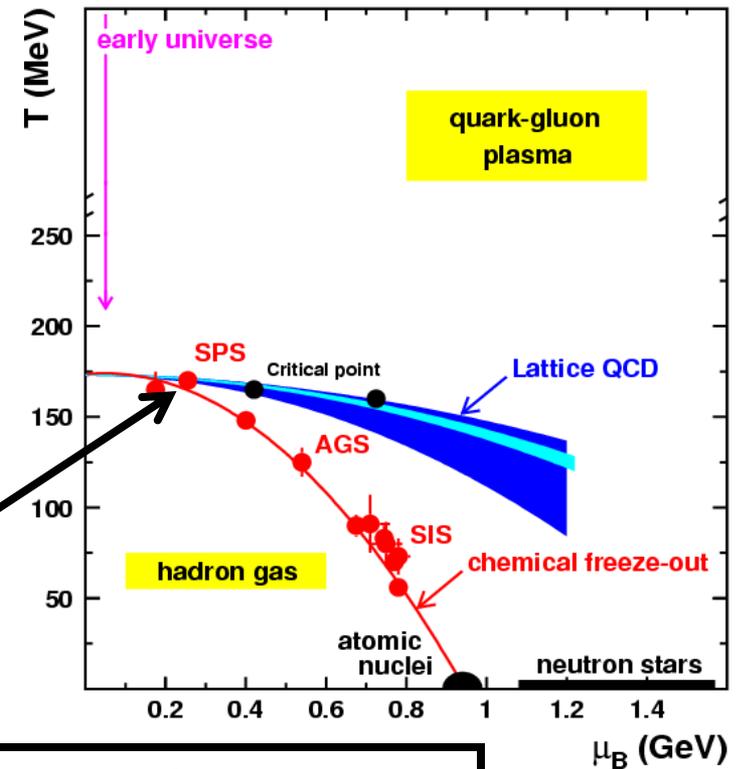
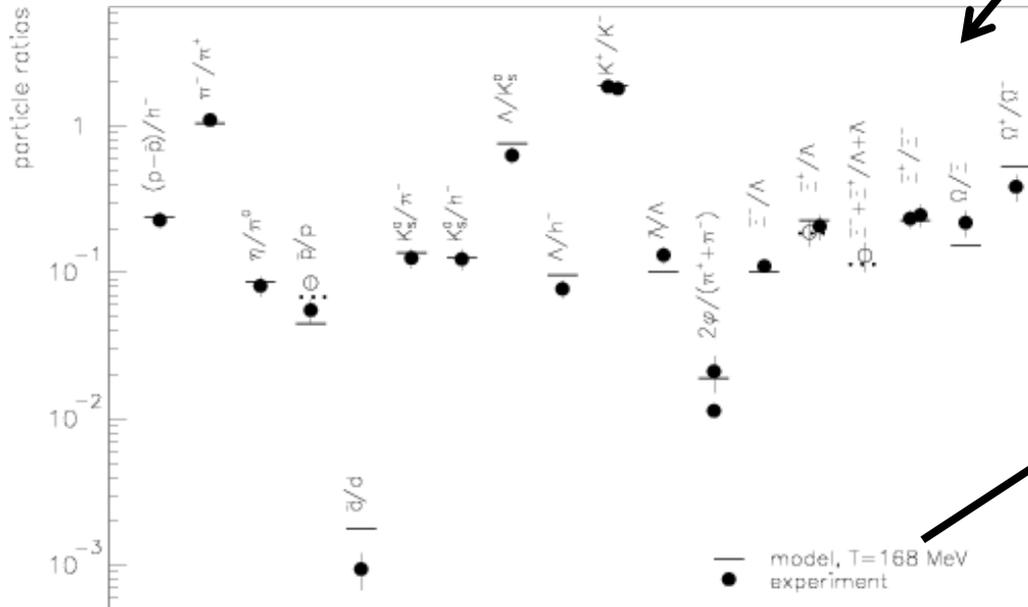
remarques : modélisation simpliste, $\varepsilon > \varepsilon_c$ est une condition nécessaire mais pas suffisante pour le déconfinement

2) Coordonnées du freeze-out dans le diagramme des phases

postulat : les particules sont produites selon les lois de la thermodynamique statistique

→ le taux de production d'une particule dépend de sa masse et de la température du système

ajustement des taux de production de particules mesurés avec un modèle thermique (2 param. : T_f, μ_B)

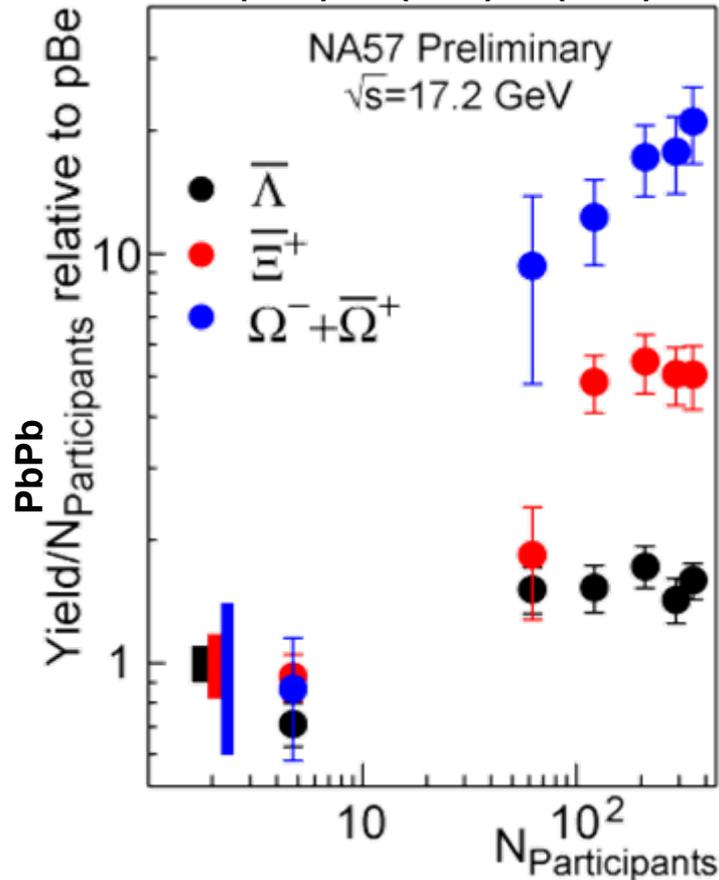


la température de freeze-out coïncide avec la température critique
 ⇒ le système vient probablement de la zone déconfinée

3) Augmentation de l'étrangeté

rappel : on veut vérifier que : $\frac{\Omega / \Xi|_{\text{QGP}}}{\Omega / \Xi|_{\text{GH}}} > \frac{\Xi / \Lambda|_{\text{QGP}}}{\Xi / \Lambda|_{\text{GH}}} > 1$

$\Omega(sss), \Xi(ssd), \Lambda(uds)$



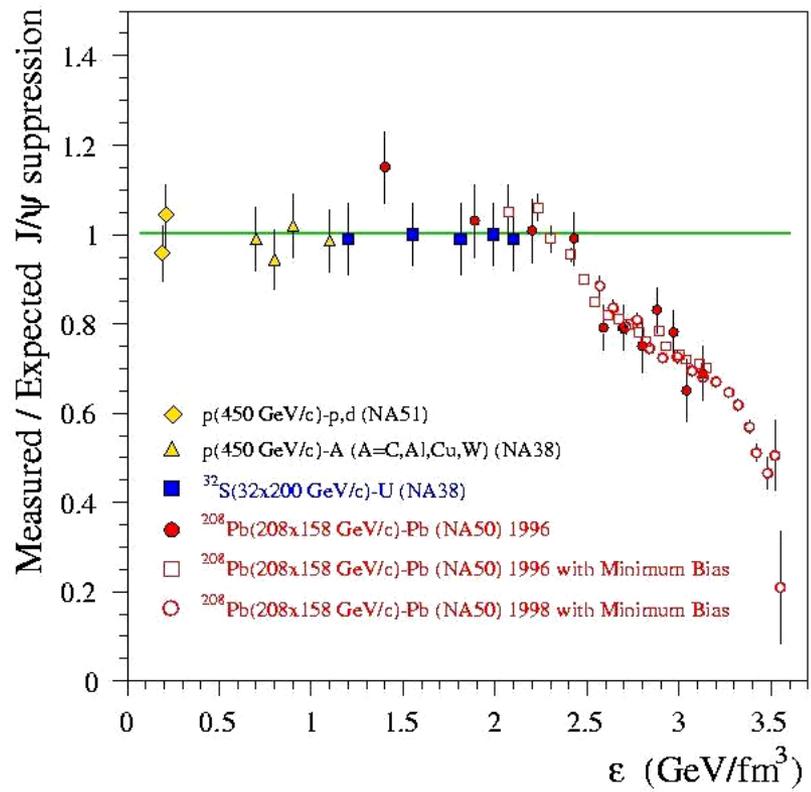
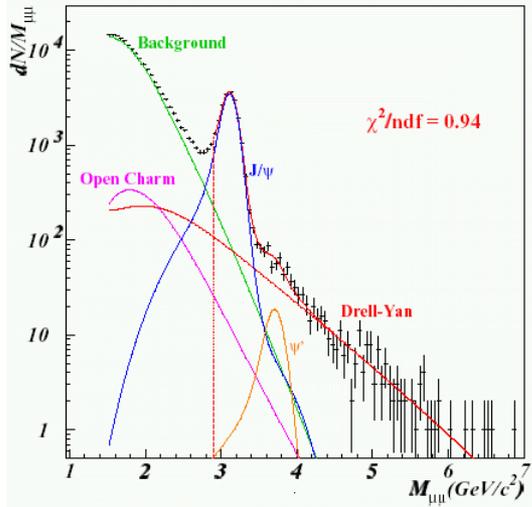
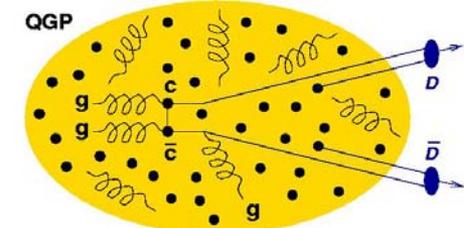
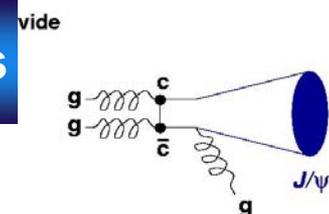
$$\frac{\Omega / \Xi|_{\text{PbPb}}}{\Omega / \Xi|_{\text{pBe}}} = \frac{\Omega_{\text{PbPb}} / \Omega_{\text{pBe}}}{\Xi_{\text{PbPb}} / \Xi_{\text{pBe}}} \approx \frac{20}{5} = 4$$

$$\frac{\Xi / \Lambda|_{\text{PbPb}}}{\Xi / \Lambda|_{\text{pBe}}} = \frac{\Xi_{\text{PbPb}} / \Xi_{\text{pBe}}}{\Lambda_{\text{PbPb}} / \Lambda_{\text{pBe}}} \approx \frac{5}{1.5} = 3.3$$

- dans les collisions centrales PbPb, la hiérarchie de production des baryons multi-étranges est compatible avec ce que l'on s'attend à observer dans un QGP
- le nombre de Ω croît plus vite que le nombre de participants (i.e. les collisions PbPb ne sont pas des superpositions de collisions pp)

note : beaucoup plus complexe dans les détails

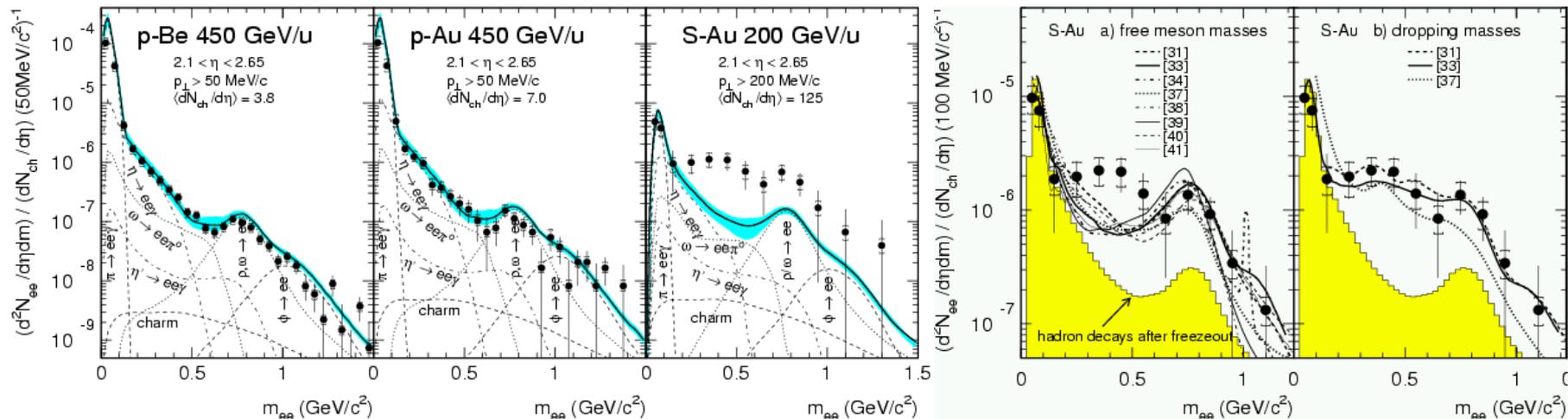
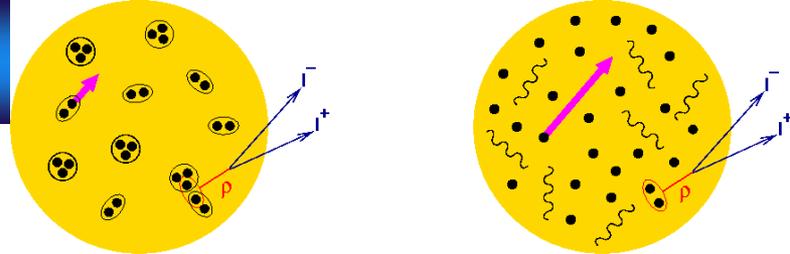
4) Suppression des résonances lourdes



← comportement attendu en l'absence de QGP

- les collisions pp, pA, SU et PbPb périphériques sont en accord avec le scénario de gaz hadronique
- dans les collisions PbPb semi-centrales et centrales, le profil de suppression est compatible avec la formation du QGP

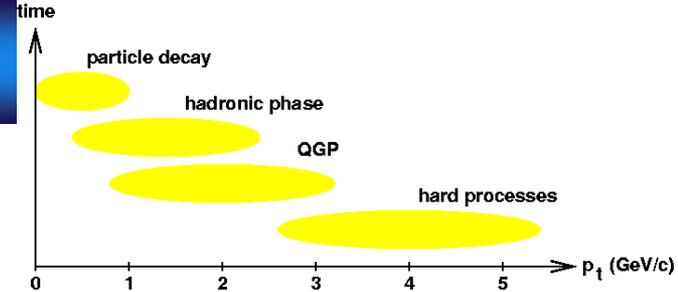
5) Modification des résonances légères



- pBe : les mesures sont en accord avec la somme des sources connues
- pAu : les mesures sont en accord avec la somme des sources connues
- SAu : les mesures excèdent la somme des sources connues ($\times 5$ $0.2 < m < 1.5$ GeV)
 - 8 modèles différents sans “effets de milieu” sous-estiment les mesures
 - 3 modèles différents avec diminution des masses reproduisent les mesures

remarque : les collisions AA purement hadroniques ne sont pas des superpositions de collisions pA

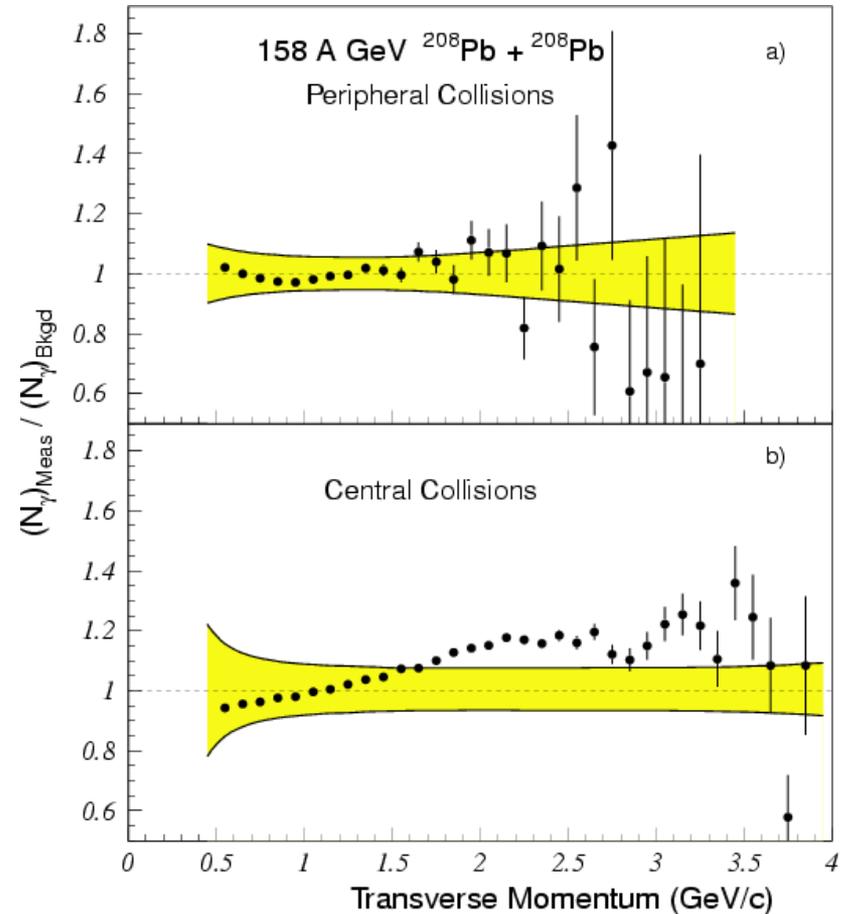
6) Photons



Principe :

1. Mesurer (tous) les photons
2. Estimer leur taux sans formation de QGP
3. Faire le rapport de la mesure sur l'estimation
4. Prendre en compte les erreurs statistiques (barres verticales) et systématiques (bandes jaunes)

excès d'environ 10% à haut p_t
dans les collisions centrales
correspondrait à $T_{\text{QGP}} \sim 340 \text{ MeV}$

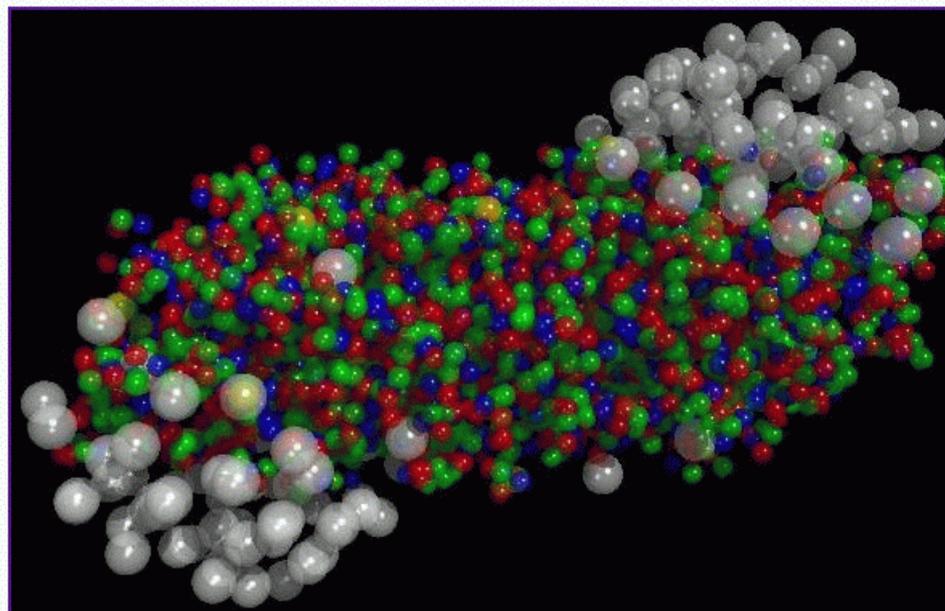




Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
European Organization for Nuclear Research

PRESS RELEASE

Un nouvel état de la matière créé au CERN



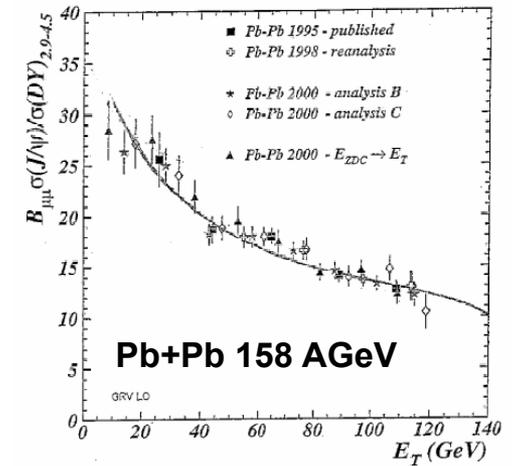
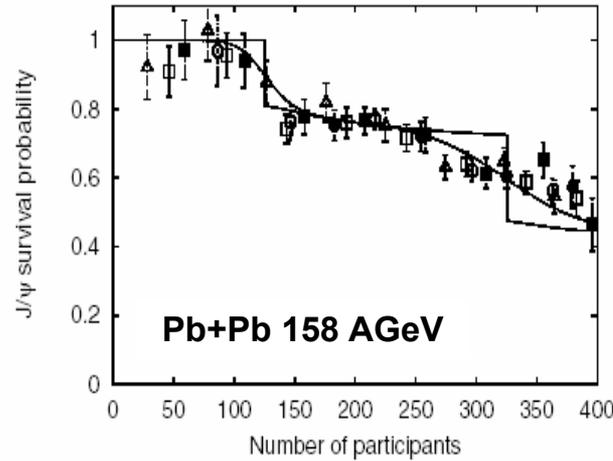
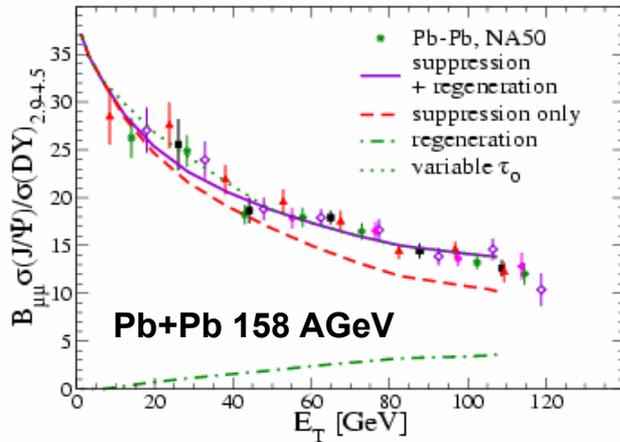
Lors d'un séminaire spécial qui s'est tenu le 10 février, les porte-parole des expériences constituant le programme des ions lourds du CERN* ont présenté des preuves décisives de l'existence d'un nouvel état de la matière dans lequel les quarks, au lieu d'être confinés dans des particules plus complexes, comme les protons et les neutrons, sont déliés et se déplacent librement.

Le professeur Luciano Maiani, Directeur général du CERN, a déclaré: "Les données combinées provenant des sept expériences du programme des ions lourds du CERN ont donné une image claire d'un nouvel état de la matière. Ce résultat vérifie une importante prédiction de la théorie actuelle des forces fondamentales entre les quarks. Elle marque aussi un progrès important de notre compréhension de l'évolution de l'Univers à ses premiers instants." Nous tenons maintenant la preuve de l'existence d'un nouvel état de la matière dans lequel les quarks et les gluons ne sont pas confinés. Reste maintenant un territoire entièrement nouveau à explorer, celui des propriétés physiques du plasma de quarks et de gluons. Tel est le défi que devront relever le collisionneur d'ions lourds relativistes au Laboratoire national de Brookhaven et plus tard le grand collisionneur de hadrons du CERN."

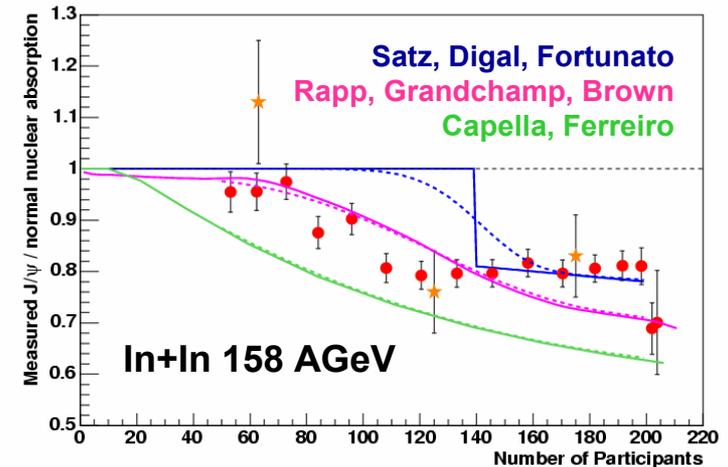
- **Pas de preuves irréfutables de l'observation du QGP :**
 - chaque mesure, prise individuellement, peut être expliquée dans la plupart des cas par un scénario purement hadronique**
- **Les effets observés dévient, pour la plupart, des scénarios hadroniques standard par, au plus, quelques dizaines de %**
- **Une signature par expérience (pas de corrélations possibles)**
- **C'est l'ensemble des observations qui incite à penser qu'on est au delà d'un scénario purement hadronique**
- **Le contexte politique oblige la diffusion du communiqué**
- **Certains aspects des données expérimentales ne sont pas encore bien compris**

La suppression du J/ψ actualisée

en 2000, 3 modèles de QGP reproduisent les données dans les collisions Pb+Pb à 158 AGeV

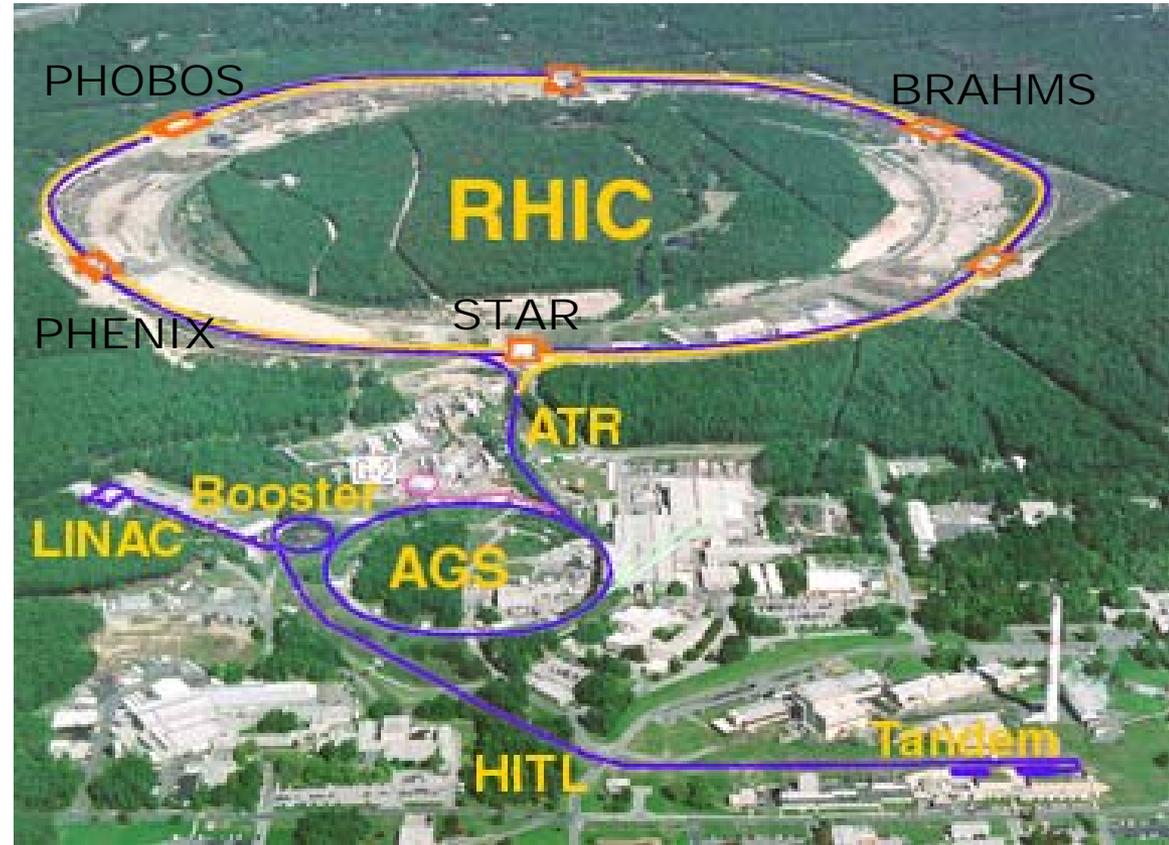


- en 2005, aucun de ces 3 modèles ne reproduit les données dans les collisions In+In à 158 AGeV
- même “genre” de conclusions “troublantes” pour d’autres signatures...



- **Matière nucléaire et QGP**
 - **QGP & collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes**
 - **Signatures attendues du QGP**
- **Recherche expérimentale du QGP**
 - **Le passé : l'ère SPS**
 - **Le présent : l'ère RHIC**
- **Le futur : l'ère LHC**
 - **Le QGP au LHC**
 - **L'expérience ALICE**

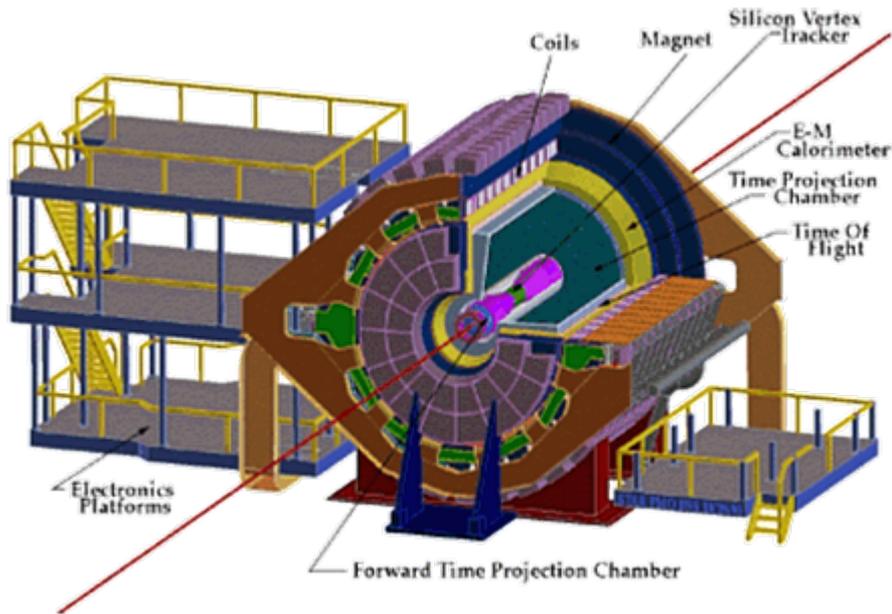
Relativistic Heavy Ion Collider (BNL)



Collisionneur spécialement dédié à la mise en évidence et à l'étude du QGP

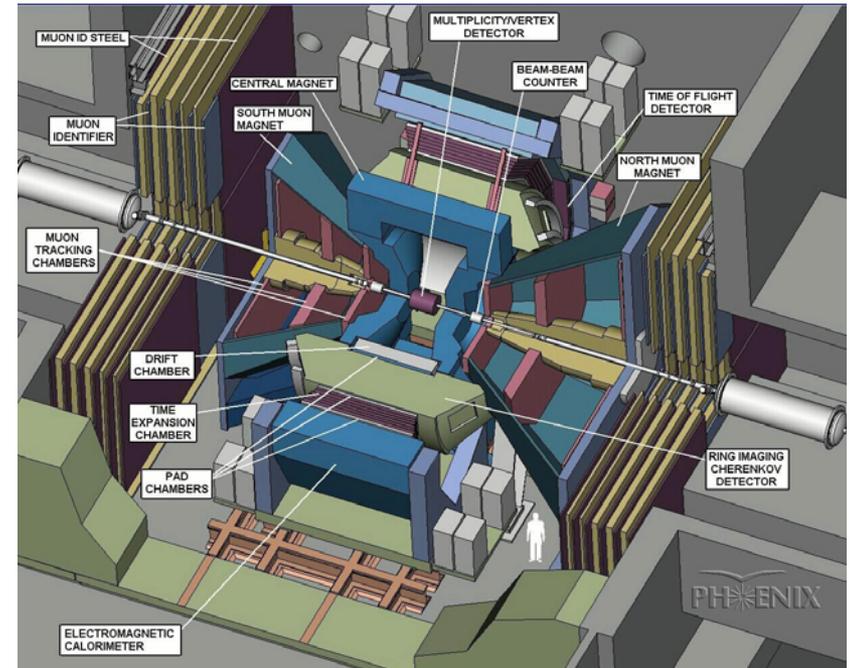
- 2 anneaux concentriques, 1740 aimants supraconducteurs, 3.8 km de circonférence
- accélère protons 30-250 GeV ($L = 1.4 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), Au 30-100 AGeV ($L = 2 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 6 points d'interaction, 4 expériences ions lourds, mise en service : 2000

Les détecteurs du RHIC (I)



STAR

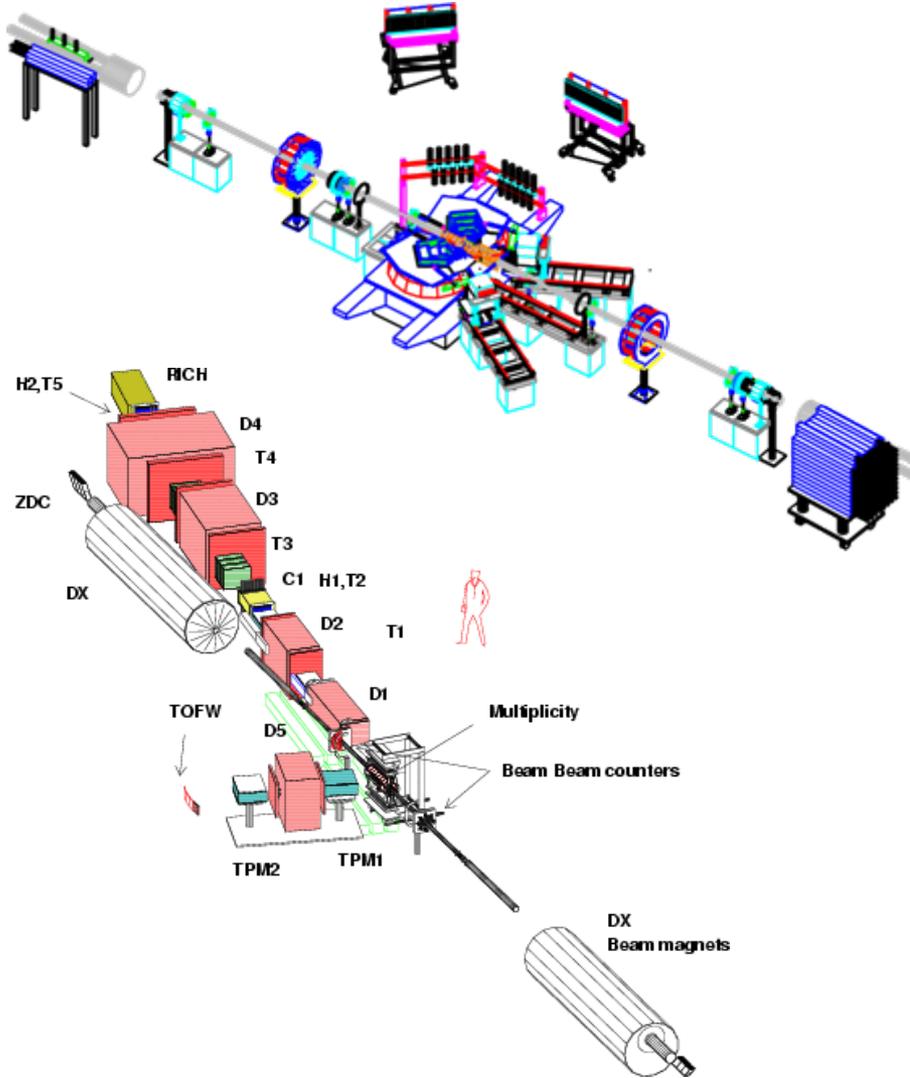
540 physiciens, 51 instituts, 12 pays
hadrons



PHENIX

430 physiciens, 56 instituts, 12 pays
leptons, photons

Les détecteurs du RHIC (II)



PHOBOS
100 physiciens, 8 instituts, 3 pays
hadrons

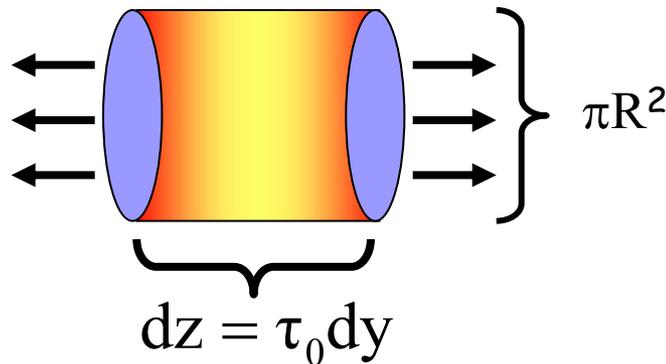
BRAHMS
50 physiciens, 10 instituts, 5 pays
hadrons

Le programme ions lourds au RHIC

Run	Année	Système	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)
01	2000	Au+Au	130
02	2001-2002	Au+Au p+p	19 / 200 200
03	2002-2003	d+Au p+p	200 200
04	2003-2004	Au+Au	62.4 / 200
05	2005	Cu+Cu p+p	22.4 / 62.4 / 200 200
06	2006	p+p	62.4 / 200
07	2007	Au+Au	200
08	2007-2008	d+Au p+p	200 200 / 500

1) Densité d'énergie atteinte dans la collision

même démarche qu'au SPS : estimer la densité d'énergie atteinte dans la collision à partir de l'énergie transverse E_t des particules (mesurée)



“scenario d'expansion de Bjorken”

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

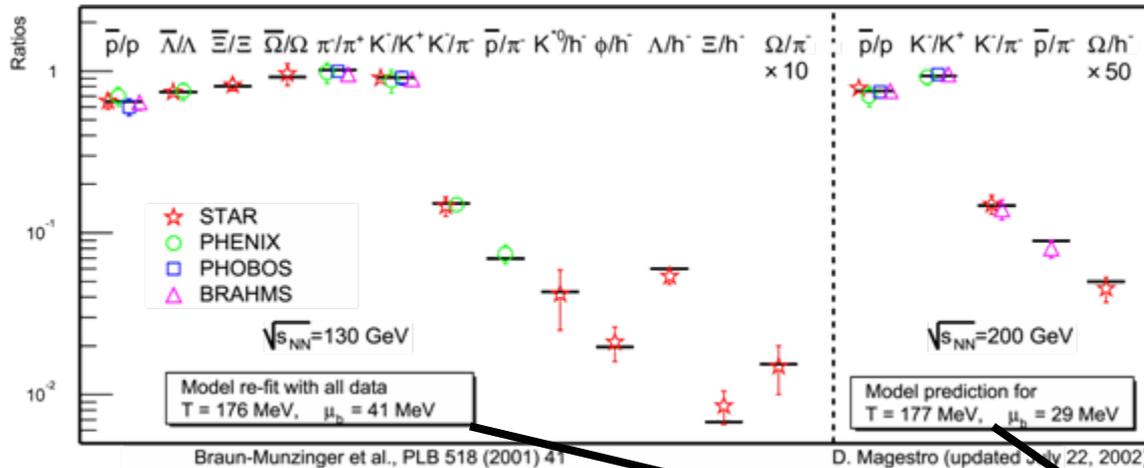
systeme	\sqrt{s} (AGeV)	ε (GeV/fm ³)
Au+Au	200	4.6

même conclusion qu'au SPS
les densités d'énergie atteintes dans sont supérieures à la densité critique
⇒ le système vient probablement de la zone déconfinée

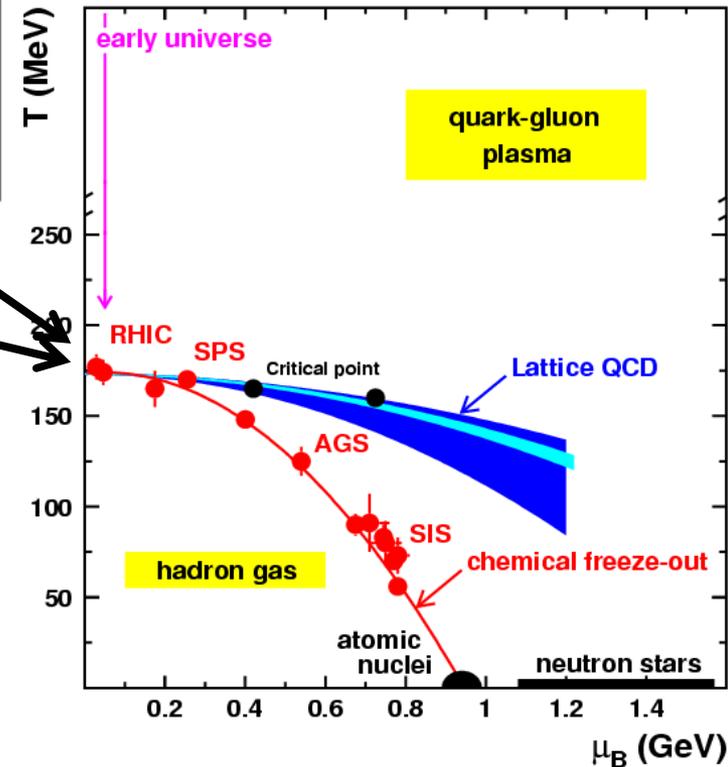
remarque : $\varepsilon_{RHIC} > \varepsilon_{SPS}$ (logique)

2) Coordonnées dans le diagramme de phases

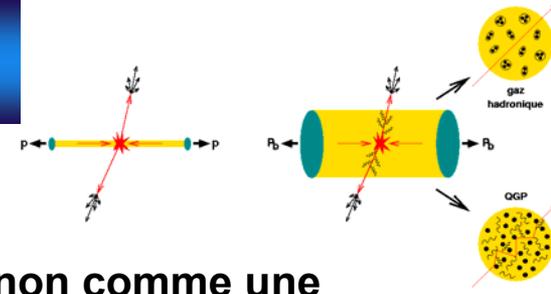
même démarche qu'au SPS



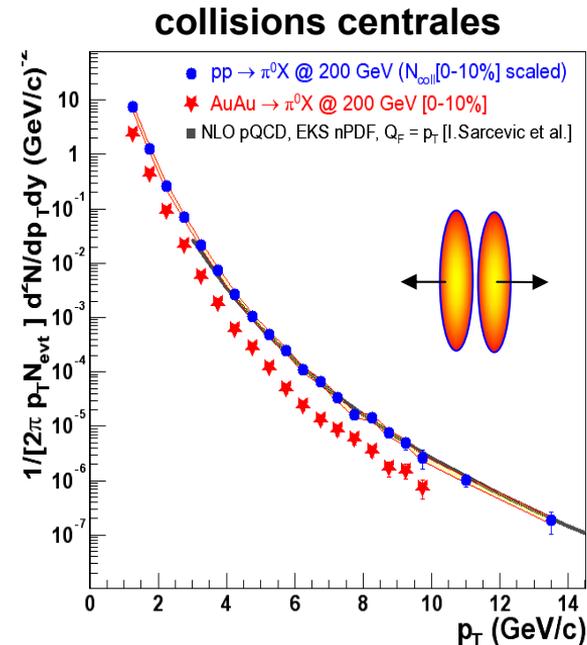
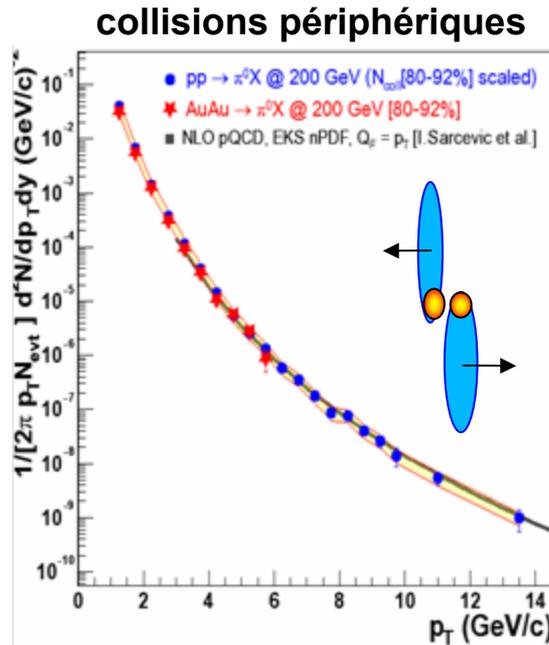
même conclusion qu'au SPS :
la température de freeze-out coïncide
avec la température critique
⇒ le système vient probablement de
la zone déconfinée



3) Jet quenching (I)



principe : vérifier si les collisions AA se comportent ou non comme une superposition de collisions pp en terme de taux de particules produites



- collisions périphériques : le taux de production de particules est en accord avec les collisions pp (extrapolées) et les prédictions théoriques
- collisions centrales : déficit de particules de grand p_T par rapport aux collisions pp (extrapolées) et aux prédictions théoriques i.e. jet quenching

4) Jet quenching (II)

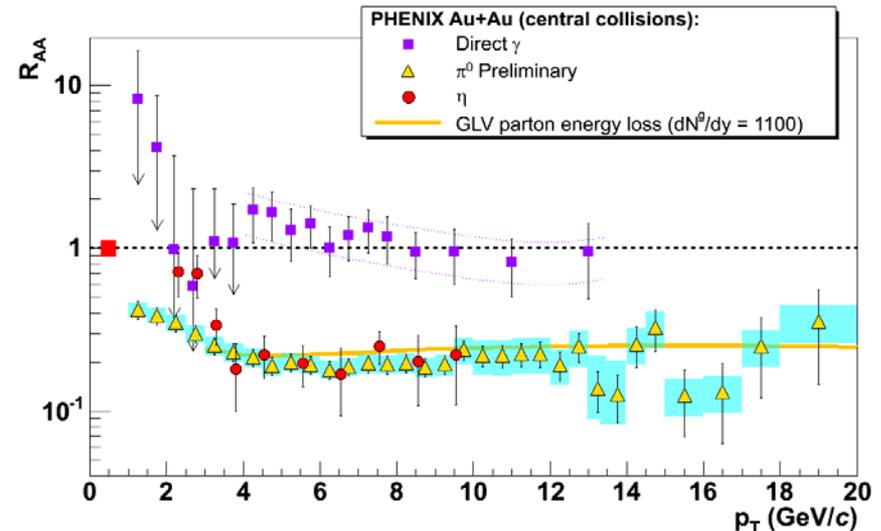
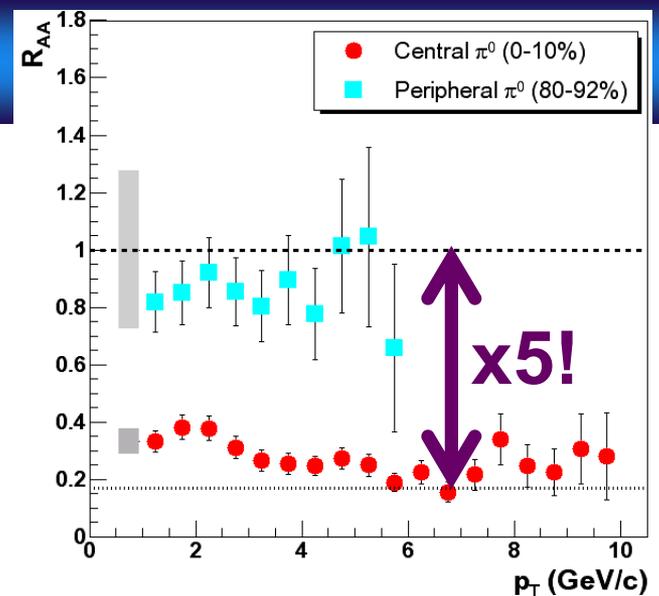
facteur de modification nucléaire

$$R_{AA} = \frac{dN/dp_t|_{AA}}{dN/dp_t|_{pp} \times N_{col}}$$

R_{AA} permet de facilement mettre en évidence d'éventuelles différences du comportement observé par rapport au comportement attendu ($R_{AA} = 1$)

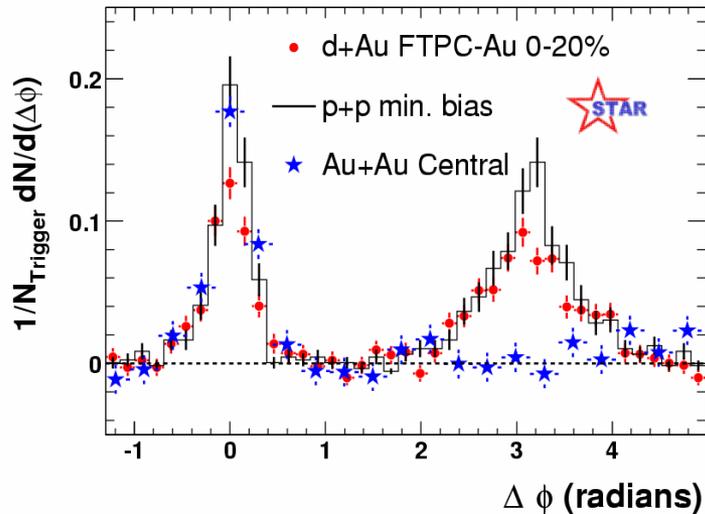
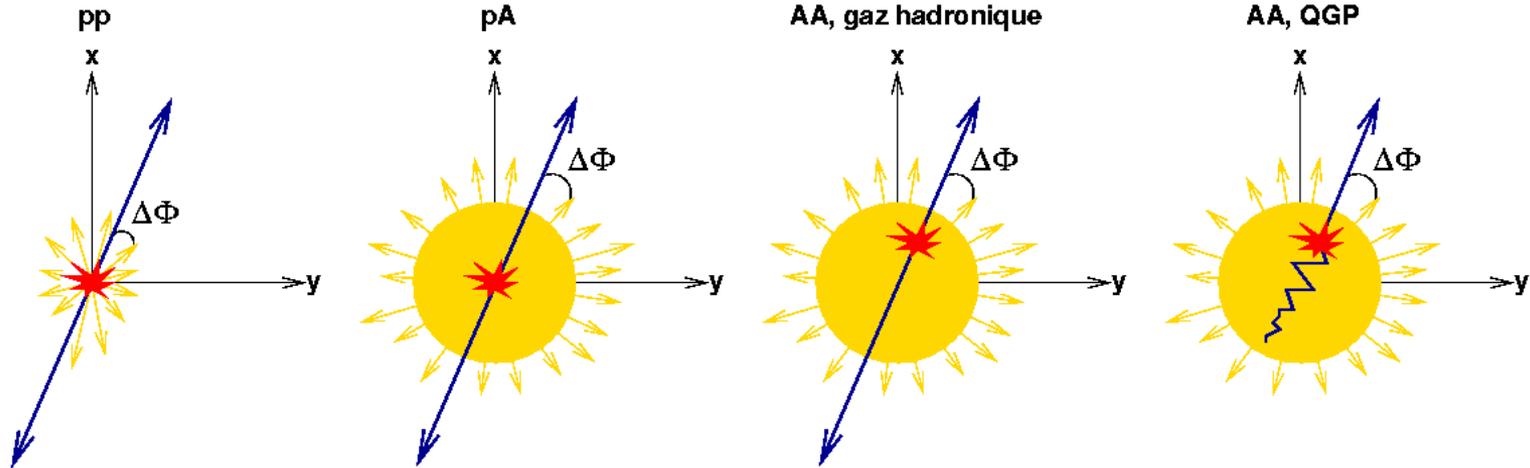
confirmation des observations :

- pas de suppression des particules de grand p_t dans les collisions périphériques
- suppression des particules de grand p_t dans les collisions centrales
- pas de suppression des photons dans les collisions (centrales)



5) Jet quenching (III)

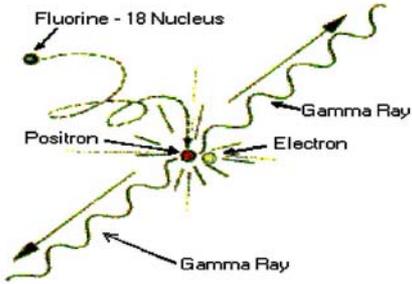
les particules de grand p_t étant, par conservation du moment, produites par 2 et émises dos à dos, on utilise l'une des particules pour étudier l'autre



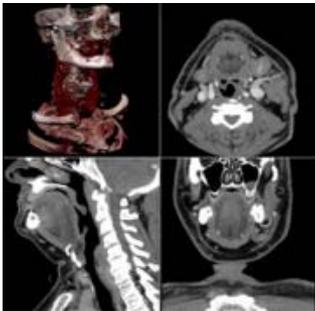
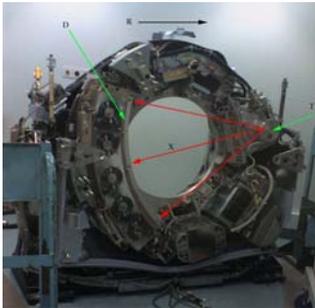
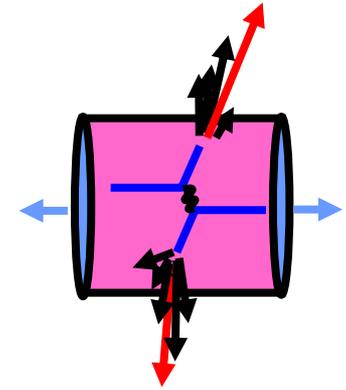
⇒ dans chaque collision, on isole la particule de grand p_t et on regarde sa différence en azimuth ($\Delta\Phi$) avec toutes les autres particules

au contraire des collisions pp et pA, dans les collisions centrales AA, la particule traversant le milieu est "absorbée" i.e. jet quenching

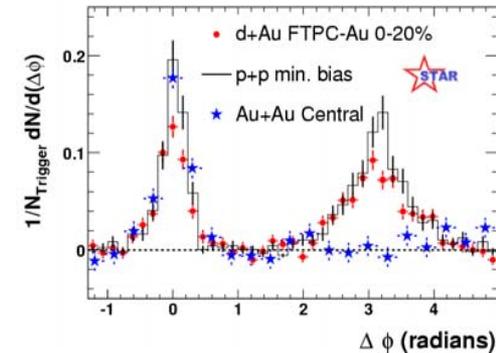
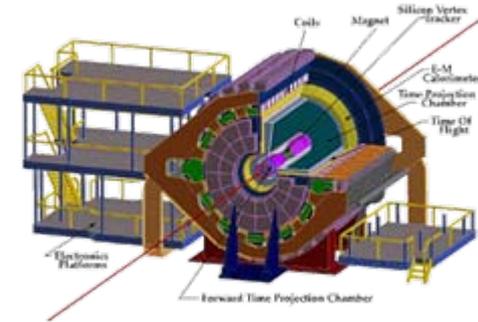
PET versus JET (Positron Emission Tomography versus Jet Energy-loss Tomography)



<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tomographie>
 La tomographie est une technique qui consiste à reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures déportées à l'extérieur de l'objet... Le résultat est une reconstruction de certaines propriétés de l'intérieur de l'objet, selon le type d'information que fournissent les capteurs.



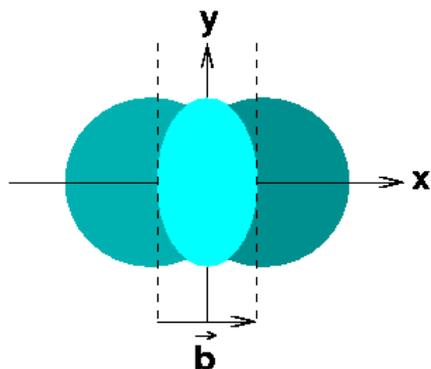
PET	JET
sonde	
γ , $E = 511 \text{ keV}$	jet, énergie variée
milieu sondé	
statique	en expansion
interaction sonde-milieu	
non	oui
volume reconstruit	
géom., $\sim 5 \text{ mm}^3$	multi-dim., $\sim 5 \text{ fm}^3$



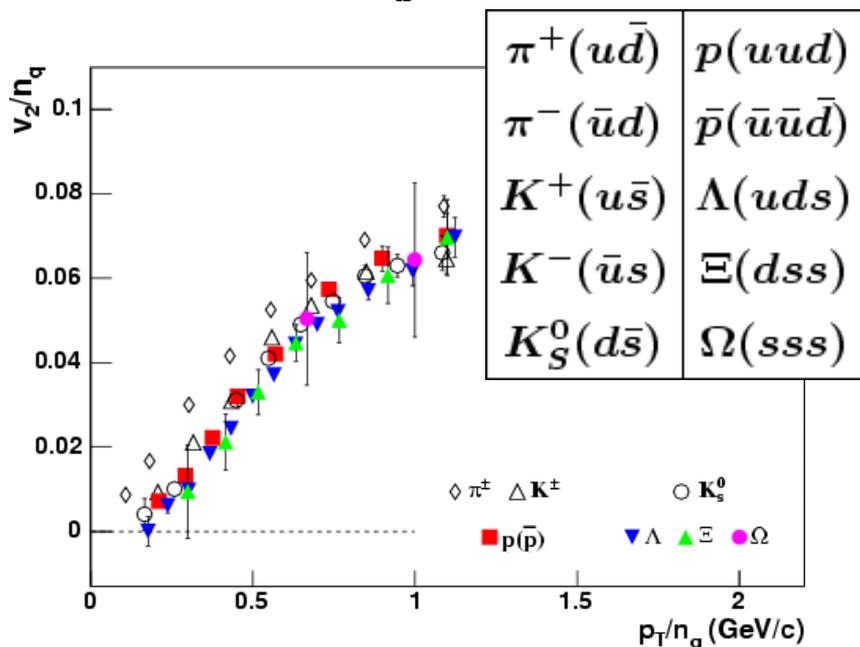
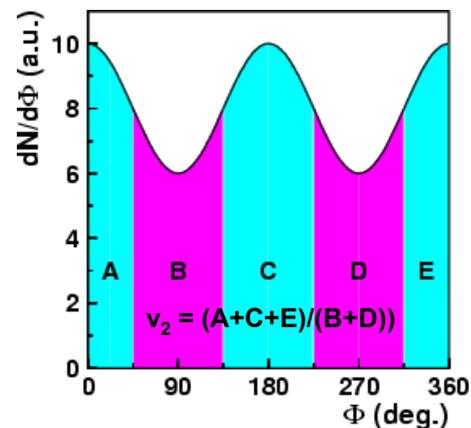
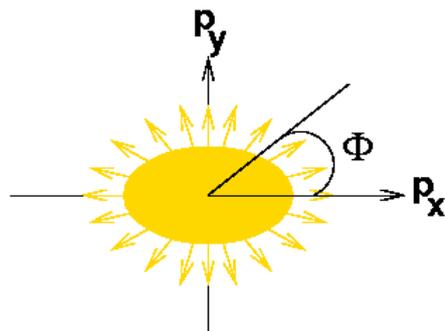
P. Levai, Hirscheegg 2005

6) Flow

anisotropie d'espace



anisotropie de moment

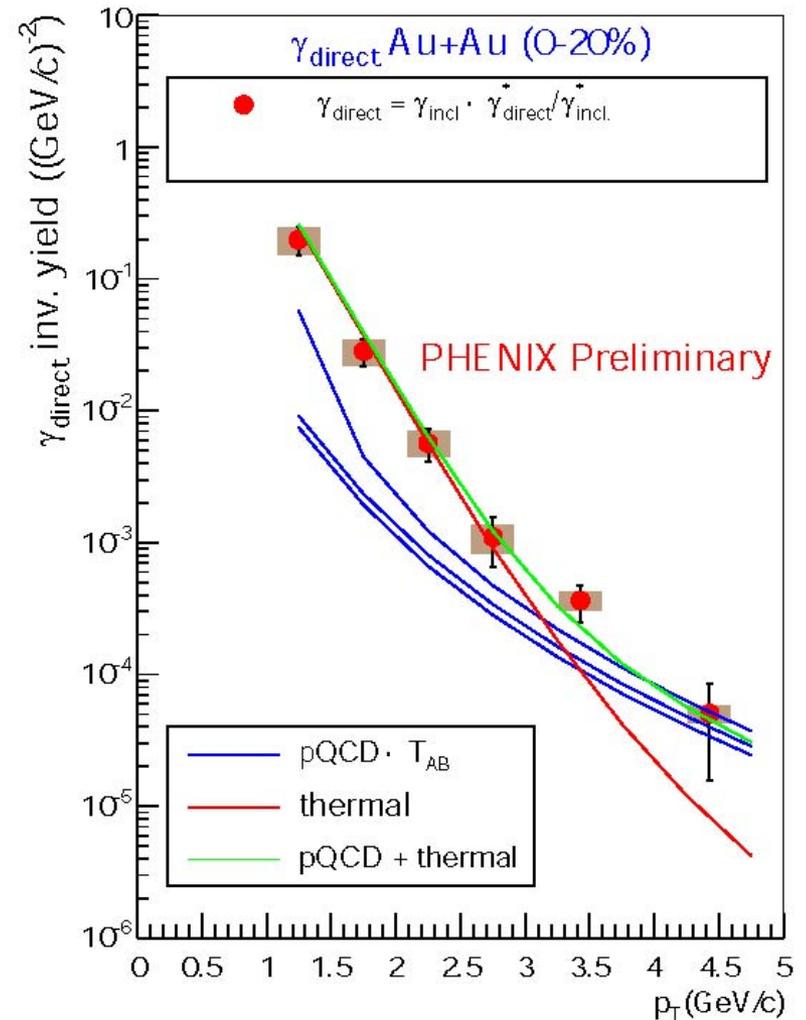


après normalisation au nombre de quarks,
le flow des particules produites est
indépendant du nombre et de la nature
des quarks qu'elles contiennent

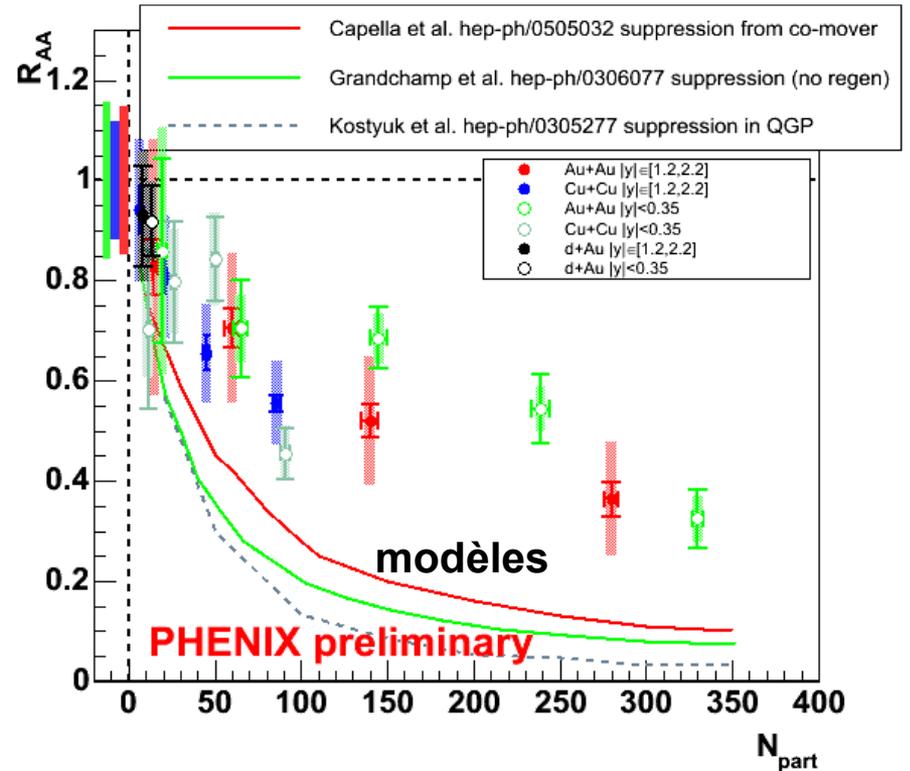
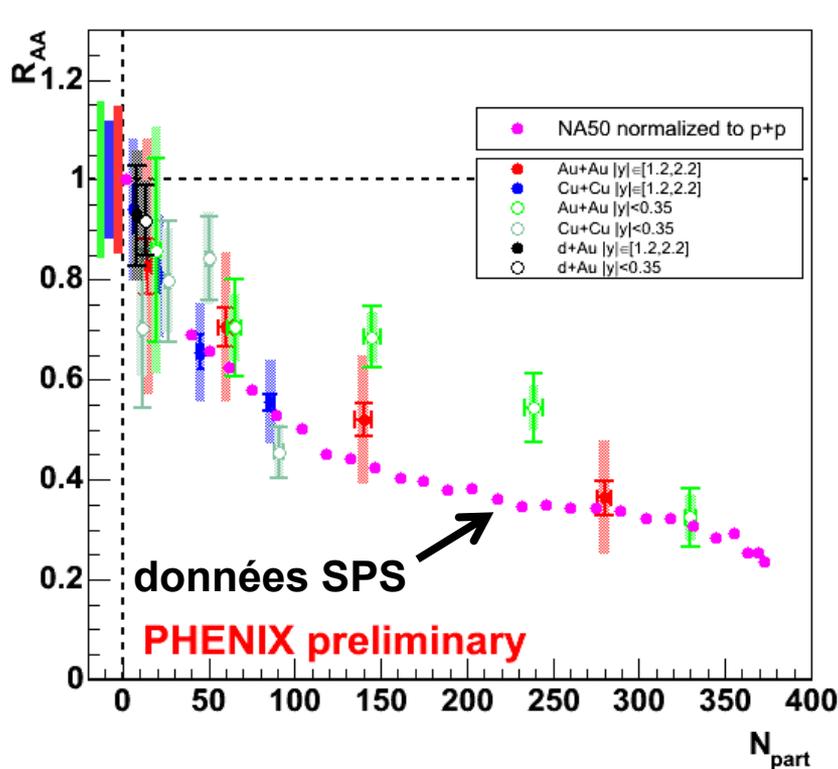
⇒ la compression initiale du système a
lieu au niveau des quarks et non pas au
niveau des hadrons

7) Photons

- Excès de photons par rapport aux sources attendues
- En accord avec un rayonnement thermique



8) Suppression du J/ψ



- suppression du J/ψ à RHIC \sim suppression du J/ψ à SPS (alors que $\epsilon_{RHIC} > \epsilon_{SPS}$!)
- les modèles qui “marchent” à SPS surestiment la suppression à RHIC (puisque $\epsilon_{RHIC} > \epsilon_{SPS}$!)

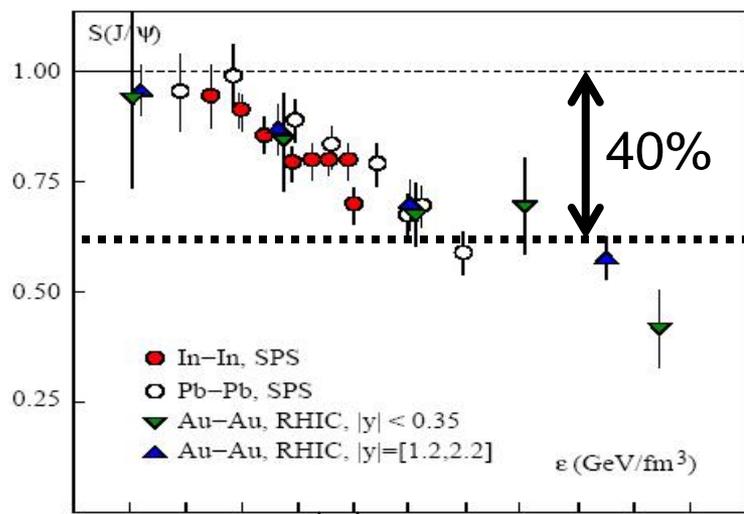
Suppression du J/ψ : première interprétation possible

calculs théoriques de la densité d'énergie de dissociation des résonances

résonance	ψ'	χ_c	J/ψ
ε_d (GeV/fm ³)	2.2	2.5	27

“feed-down” des états excités : (mesures pA, HERA-B, cf. PDG)

sur 100 J/ψ mesurés, 60 sont produits directement et 30(10) viennent de la désintégration du $\chi_c(\psi')$



conclusions : à SPS et à RHIC

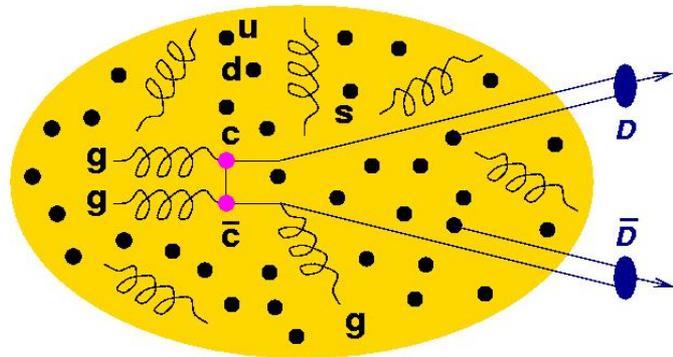
- la densité d'énergie atteinte n'est pas suffisante pour supprimer le J/ψ
- la suppression observée du J/ψ résulte uniquement de la suppression du ψ' et du χ_c

$\varepsilon_d(\psi')$ $\varepsilon_d(\chi_c)$

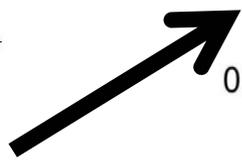
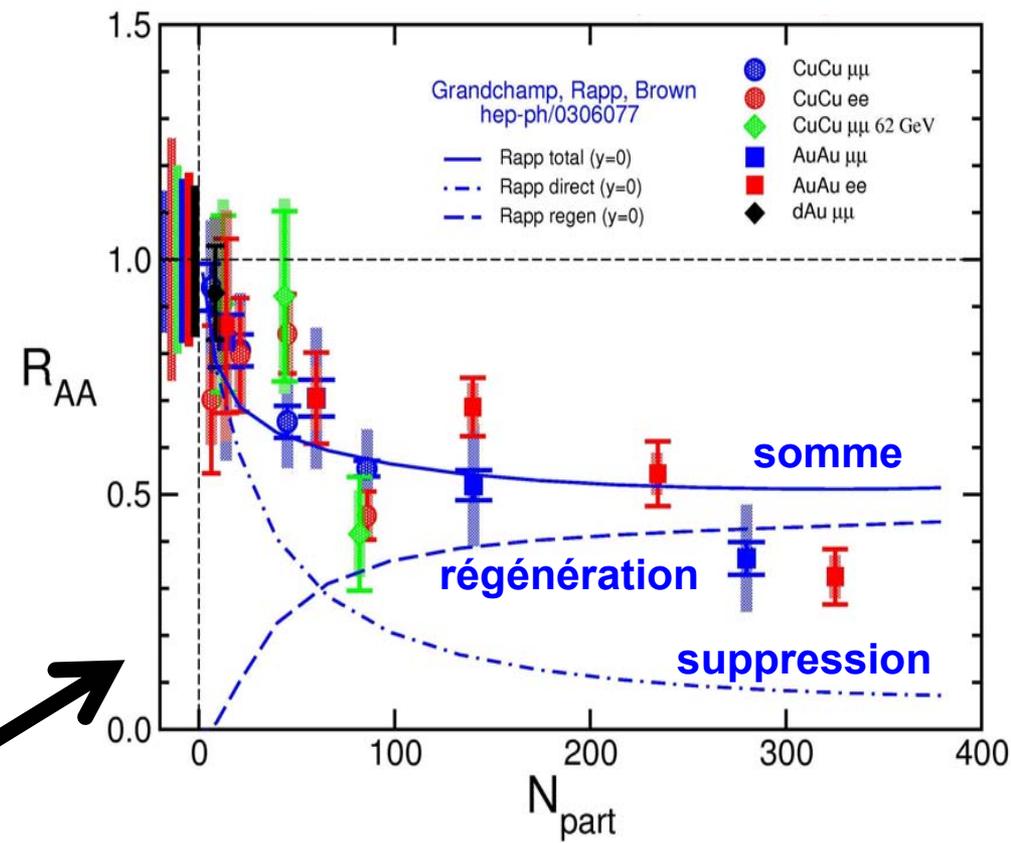
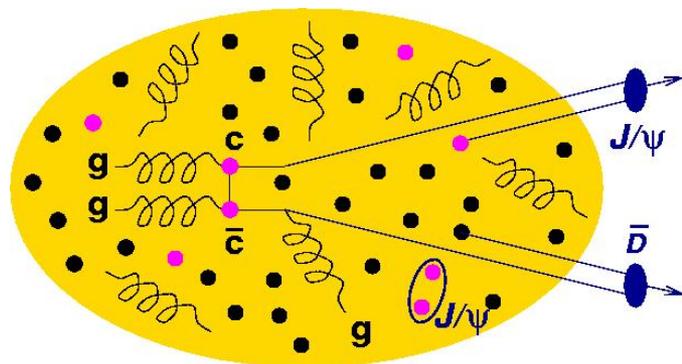
$\varepsilon_d(J/\psi)$

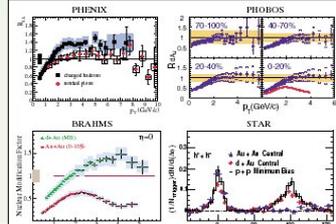
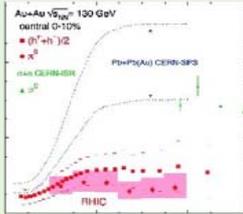
Suppression du J/ψ : deuxième interprétation possible

SPS : $N_{cc} \sim 0.2$ / collision
 → suppression de J/ψ



RHIC : $N_{cc} \sim 10$ / collision
 → suppression ET régénération de J/ψ





SCIENTIFIC
AMERICAN

MAY 2008
WWW.SCIAM.COM

Quark Soup

PHYSICISTS RE-CREATE
THE LIQUID STUFF OF
THE EARLIEST
UNIVERSE

24/11/2008 :

- 1310 entrées sur <http://www.spires.slac.stanford.edu>
- 107 Phys. Rev. Lett. & 77 Phys. Rev. C
- 4 “papiers blancs”

Quark-gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment

I. Arsene¹, I.G. Bearden², D. Beavis³, C. Besliu⁴, B. Budick⁵, H. Bøggild⁶, C. Chasman⁷, C.H. Christensen⁸, P. Christiansen⁹, J. Cibor¹⁰, R. Debbe¹¹, E. Enger¹², J.J. Gaardhøje¹³, M. Germinario¹⁴, O. Hansen¹⁵, A. Holm¹⁶, A.K. Holme¹⁷, K. Hagel¹⁸, H. Ito¹⁹, E. Jakobsen²⁰, A. Jipa²¹, F. Jundt²², J.L. Jorde²³, C.E. Jørgensen²⁴, R. Karabowicz²⁵, E.J. Kim²⁶, T. Koziak²⁷, T.M. Larsen²⁸, J.H. Lee²⁹, Y.K. Lee³⁰, S. Lindahl³¹, G. Lovhøiden³², Z. Majka³³, A. Makeyev³⁴, M. Mikelsen³⁵, M.J. Murray³⁶, J. Natowitz³⁷, B. Neumann³⁸, B.S. Nielsen³⁹, D. Ouerdane⁴⁰, R. Planeta⁴¹, F. Rami⁴², C. Ristea⁴³, O. Riste⁴⁴, D. Röhrlich⁴⁵, B.H. Samsel⁴⁶, D. Sandberg⁴⁷, S.J. Sanders⁴⁸, R.A. Schetz⁴⁹, P. Staszul⁵⁰, T.S. Tvetter⁵¹, F. Videbæk⁵², R. Wada⁵³, Z. Yin⁵⁴, I.S. Zuga⁵⁵

¹ Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA
² Institut de Recherches Subatomiques et Université Louis Pasteur, Strasbourg, France
³ Institute of Nuclear Physics, Kraków, Poland
⁴ Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA
⁵ M. Smolch-Nawalski Institute of Physics, Jagiellonian University, Kraków, Poland
⁶ New York University, NY 10003, USA
⁷ Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, 2100 Copenhagen, Denmark
⁸ Boston Alumnus, College Station, TX 77843, USA
⁹ University of Bergen, Department of Physics, Bergen, Norway
¹⁰ University of Bucharest, Romania
¹¹ University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹² University of Oslo, Department of Physics, Oslo, Norway
Received 15 October 2004; received in revised form 26 January 2005; accepted 24 February 2005
Available online 10 March 2005

Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration

K. Adcox¹, S.S. Adler², S. Afanasiev³, C. Aidala⁴, N.N. Ajitanand⁵, Y. Akiba^{6,7,8}, A. Al-Jamal⁹, J. Alexander¹⁰, R. Amirkhan¹¹, K. Aoki^{12,13}, L. Aphecetche¹⁴, Y. Arai¹⁵, R. Armentarici¹⁶, S.H. Aronson¹⁷, R. Averbeck¹⁸, T.C. Awes¹⁹, R. Azmoun²⁰, V. Babintsev²¹, A. Baldissari²², K.N. Barish²³, P.D. Barnes²⁴, J. Barrette²⁵, B. Bassalleck²⁶, S. Bathé²⁷, S. Batsoulis²⁸, V. Baublis²⁹, F. Bauer³⁰, A. Bazilevsky^{31,32}, S. Belikov^{33,34}, F.G. Bellaiche³⁵, S.T. Belyaev³⁶, M.J. Bennett³⁷, Y. Berdnikov³⁸, S. Bhagavathula³⁹, M.T. Bjornadal⁴⁰, J.G. Boissevain⁴¹, H. Borel⁴², S. Borenstein⁴³, S. Botelho⁴⁴, M.L. Brooks⁴⁵, D.S. Brown⁴⁶, N. Bruner⁴⁷, D. Bucher⁴⁸, H. Buesching^{49,50}, V. Bumazhnikov⁵¹, G. Bunce^{52,53}, J.M. Burward-Hoy^{54,55}, S. Butsyk^{56,57}, X. Camard⁵⁸, T.A. Carey⁵⁹, J.-S. Chai⁶⁰, P. Chand⁶¹, J. Chang⁶², W.C. Chang⁶³, L.L. Chavez⁶⁴, S. Chemichenko⁶⁵, C.Y. Chi⁶⁶, J. Chiba⁶⁷, M. Chiu⁶⁸, J.J. Choi⁶⁹, J. Choi⁷⁰, R.K. Choudhury⁷¹, T. Christ⁷², T. Chujo^{73,74}, M.S. Chung^{75,76}, P. Chung⁷⁷, V. Ciencialo⁷⁸, C.R. Clevon⁷⁹, Y. Cobic⁸⁰, B.A. Cole⁸¹, M.P. Comets⁸², P. Constantin⁸³, M. Csanád⁸⁴, T. Csörgő⁸⁵, J.P. Cussonneau⁸⁶, D. d'Enterria⁸⁷, T. Dahms⁸⁸, K. Das⁸⁹, G. David⁹⁰, F. Deák⁹¹, H. Delgado⁹², A. Denisov⁹³, A. Deshpande^{94,95}, E.J. Desmond⁹⁶, A. Devismes⁹⁷, O. Dietzsch⁹⁸, B.V. Dinesh⁹⁹

0173-0474/\$ - see front matter © 2005 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.nuclphysa.2005.03.086

The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC

PHOBOS Collaboration
B.B. Back¹, M.D. Baker², M. Ballintijn³, D.S. Barton⁴, B. Becker⁵, R.R. Betts⁶, A.A. Bickley⁷, R. Bindel⁸, A. Budzanowski⁹, W. Busza¹⁰, A. Carroll¹¹, Z. Chai¹², M.P. Decowski¹³, E. Garcia¹⁴, T. Gburek¹⁵, N.K. George¹⁶, K. Gulbrandsen¹⁷, S. Gushue¹⁸, C. Halliwell¹⁹, J. Hamblen²⁰, A.S. Harrington²¹, M. Haue²², G.A. Heintzelman²³, C. Henderson²⁴, D.J. Hofman²⁵, R.S. Hollis²⁶, R. Holytski²⁷, B. Holzman²⁸, A. Jordanov²⁹, E. Johnson³⁰, J.L. Kane³¹, J. Katzy³², N. Khan³³, W. Kucewicz³⁴, P. Kulich³⁵, C.M. Kuo³⁶, J.W. Lee³⁷, W.T. Lin³⁸, S. Manly³⁹, D. McLeod⁴⁰, A.C. Mignerey⁴¹, R. Nouicer⁴², A. Oliszewski⁴³, R. Pak⁴⁴, J.C. Park⁴⁵, H. Peggeler⁴⁶, C. Reed⁴⁷, L.P. Rensberg⁴⁸, M. Reuter⁴⁹, C. Roland⁵⁰, G. Roland⁵¹, L. Rosenberg⁵², J. Sagerer⁵³, P. Sacin⁵⁴, P. Sawicki⁵⁵, H. Seals⁵⁶, I. Sedykh⁵⁷, W. Skulski⁵⁸, C.E. Smith⁵⁹, M.A. Stankiewicz⁶⁰, P. Steinberg⁶¹, G.S.F. Stephens⁶², A. Sukhanov⁶³, J.-L. Tang⁶⁴, M.B. Tonjes⁶⁵, A. Trzupek⁶⁶, C.M. Vale⁶⁷, G.J. van Nieuwenhuizen⁶⁸, S.S. Vaurynovich⁶⁹, R. Verdie⁷⁰, G.I. Veres⁷¹, E. Wenger⁷², F.L.H. Wolfs⁷³, B. Wosiek⁷⁴, K. Woźniak⁷⁵, A.H. Wuosmaa⁷⁶, B. Wyslouchy⁷⁷, J. Zhang⁷⁸

¹ Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439-4843, USA
² Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, USA
³ Institute of Nuclear Physics, Kraków, Poland
⁴ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139-4307, USA
⁵ National Central University, Chungli, Taiwan
⁶ University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607-7009, USA
⁷ University of Maryland, College Park, MD 20742, USA
⁸ University of Rochester, Rochester, NY 14627, USA
Received 15 October 2004; received in revised form 28 March 2005; accepted 30 March 2005
Available online 13 April 2005

Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions

STAR Collaboration
J. Adams¹, M.M. Aggarwal², Z. Ahammed³, J. Amornett⁴, B.D. Anderson⁵, D. Arhipkipkin⁶, G.S. Averichev⁷, S.K. Badyal⁸, Y. Bai⁹, J. Balewski¹⁰, O. Barannikov¹¹, L.S. Barnby¹², J. Baudot¹³, S. Bekele¹⁴, V.V. Belaga¹⁵, A. Bellinger-Laurikainen¹⁶, R. Bellwied¹⁷, J. Berger¹⁸, B.I. Bezverkhny¹⁹, S. Bharadwaj²⁰, A. Bhasin²¹, A.K. Bhati²², V.S. Bhatia²³, H. Bichsel²⁴, J. Bielcik²⁵, J. Bielcikova²⁶, A. Billmeier²⁷, L.C. Bland²⁸, C.O. Blyth²⁹, B.E. Bonner³⁰, M. Botje³¹, A. Boucham³², J. Bouchet³³, A.V. Brandin³⁴, A. Bravar³⁵, M. Bystersky³⁶, R.V. Cadman³⁷, X.Z. Cai³⁸, H. Caines³⁹, M. Calderón de la Barca Sánchez⁴⁰, J. Castillo⁴¹, O. Catu⁴², D. Cebra⁴³, Z. Chajec⁴⁴, P. Chaloupka⁴⁵, S. Chattopadhyay⁴⁶, H.F. Chen⁴⁷, Y. Chen⁴⁸, J. Cheng⁴⁹, M. Cheeny⁵⁰, A. Chikanian⁵¹, W. Christie⁵², J.P. Coffin⁵³, T.M. Cormier⁵⁴, J.G. Cramer⁵⁵, H.J. Crawford⁵⁶, D. Das⁵⁷, S. Das⁵⁸, M.M. de Moura⁵⁹, T.G. Dedovich⁶⁰, A.A. Derevshikov⁶¹, L. Didenko⁶², T. Dietel⁶³, S.M. Dogra⁶⁴, W.J. Dong⁶⁵, X. Dong⁶⁶, J.E. Draper⁶⁷, F. Du⁶⁸, A.K. Dubey⁶⁹, V.B. Dunin⁷⁰, J.C. Dunlop⁷¹, M.R. Dutta Mazumdar⁷², V. Eckardt⁷³, W.R. Edwards⁷⁴, L.G. Efimov⁷⁵, V. Emelianov⁷⁶, J. Engelage⁷⁷, G. Eppley⁷⁸, B. Erasmus⁷⁹, M. Estienne⁸⁰, P. Fachine⁸¹, J. Faivre⁸², R. Fatemi⁸³, J. Fedorisin⁸⁴, K. Filimonov⁸⁵, P. Filipi⁸⁶, E. Finch⁸⁷, V. Fine⁸⁸

0173-0474/\$ - see front matter © 2005 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.nuclphysa.2005.03.083

RHIC Scientists Serve Up “Perfect” Liquid

New state of matter more remarkable than predicted -- raising many new questions

April 18, 2005

TAMPA, FL -- The four detector groups conducting research at the [Relativistic Heavy Ion Collider](#) (RHIC) -- a giant atom “smasher” located at the U.S. Department of Energy’s Brookhaven National Laboratory -- say they’ve created a new state of hot, dense matter out of the quarks and gluons that are the basic particles of atomic nuclei, but it is a state quite different and even more remarkable than had been predicted. In [peer-reviewed papers](#) summarizing the first three years of RHIC findings, the scientists say that instead of behaving like a gas of free quarks and gluons, as was expected, the matter created in RHIC’s heavy ion collisions appears to be more like a liquid. ⇒ **sQGP**

“Once again, the physics research sponsored by the Department of Energy is producing historic results,” said Secretary of Energy Samuel Bodman, a trained chemical engineer. “The DOE is the principal federal funder of basic research in the physical sciences, including nuclear and high-energy physics. With today’s announcement we see that investment paying off.”

“The truly stunning finding at RHIC that the new state of matter created in the collisions of gold ions is more like a liquid than a gas gives us a profound insight into the earliest moments of the universe,” said Dr. Raymond L. Orbach, Director of the DOE Office of Science.

Also of great interest to many following progress at RHIC is the emerging connection between the collider’s results and calculations using the methods of string theory, an approach that attempts to explain fundamental properties of the universe using 10 dimensions instead of the usual three spatial dimensions plus time.



Secretary of Energy
Samuel Bodman

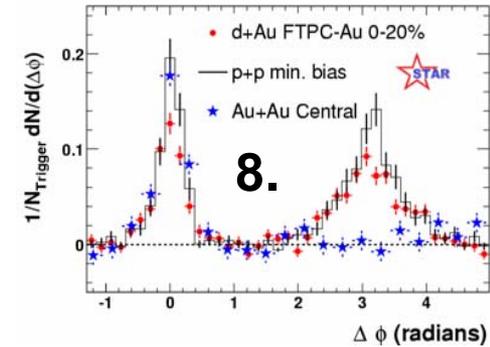
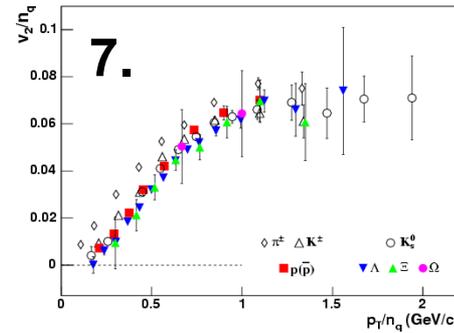
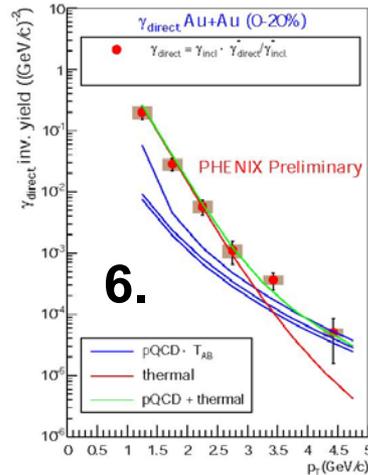
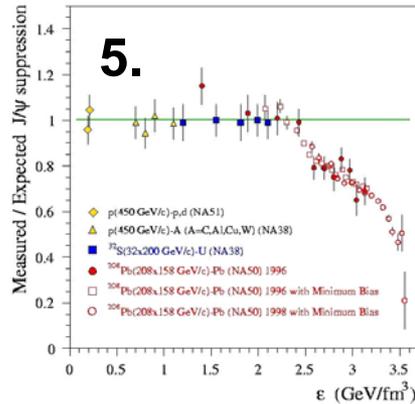
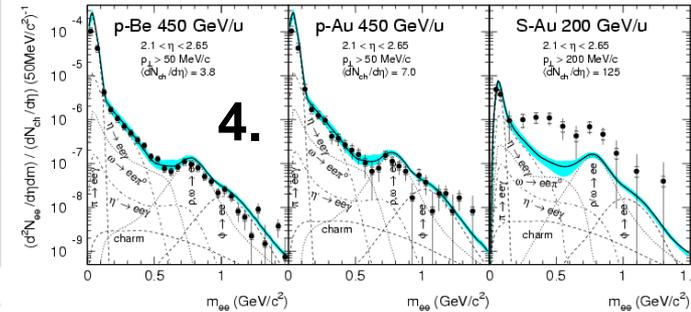
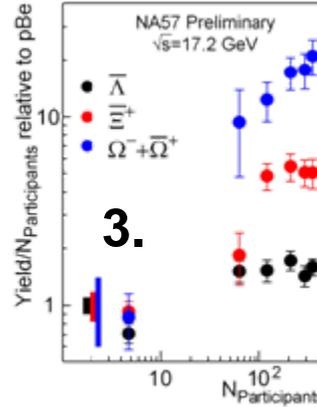
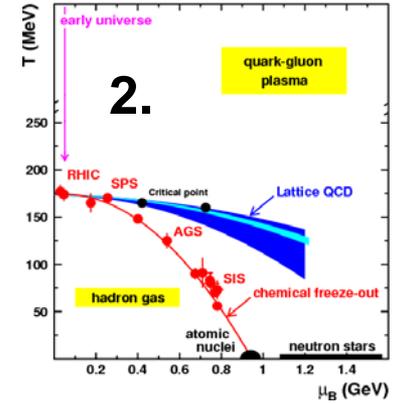
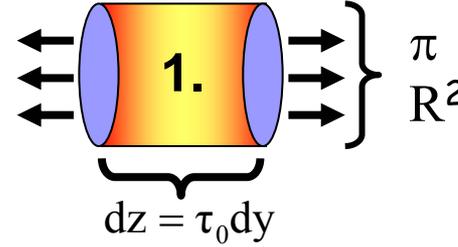
“The finding of a nearly perfect liquid in a laboratory experiment recreating the conditions believed to have existed a few microseconds after the birth of the universe is truly astonishing,” said Praveen Chaudhari, Director of Brookhaven Lab. “The four RHIC collaborations are now collecting and analyzing very large new data sets from the fourth and fifth years of operation, and I expect more exciting and intriguing revelations in the near future.”

<http://www.bnl.gov/rhic>

Résumé (très succinct) des résultats SPS & RHIC

le système produit par collisions d'ions lourds :

1. a une densité d'énergie $> \epsilon_c$
2. a une température au freeze-out $\sim T_c$
3. surproduit de l'étrangeté
4. modifie résonances légères
5. dissout les résonances lourdes
6. rayonne des photons
7. a des degrés de liberté partoniques
8. absorbe les jets



comportement attendu d'un plasma de quarks et de gluons

Pourquoi étudier le QGP au LHC?

- la **RECHERCHE** du QGP est essentiellement finie (deuxième cours)
- la **DECOUVERTE** du QGP est en cours à RHIC avec des résultats impressionnants et des surprises (deuxième cours)
- la **MESURE** des caractéristiques du QGP a tout juste commencé

QGP @ LHC versus RHIC = Z/W @ LEP versus SppS

**le LHC est l'endroit idéal pour produire et étudier le QGP
(troisième cours)**

A long, brightly lit tunnel, likely a particle accelerator, with a large blue cylindrical structure in the foreground. The tunnel is lined with pipes and lights, and the floor is a light-colored concrete. The perspective is from the end of the tunnel, looking down its length.

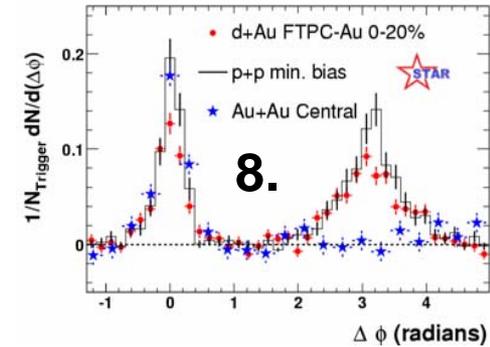
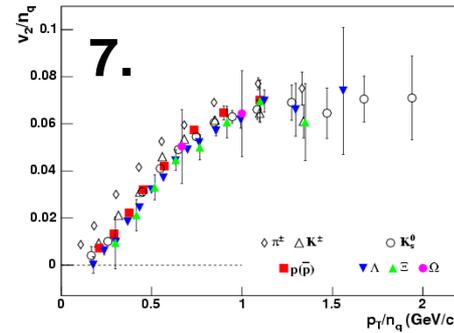
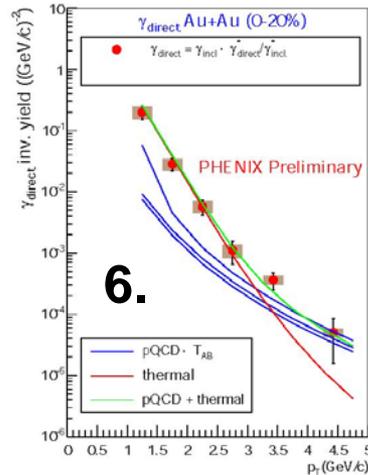
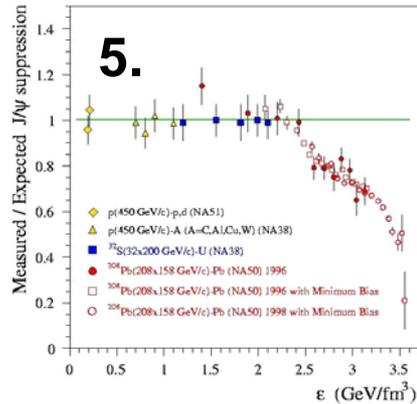
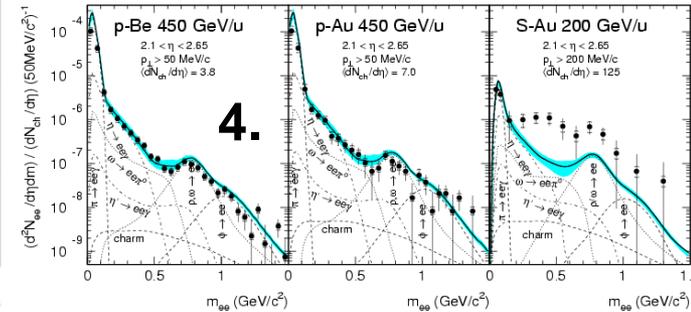
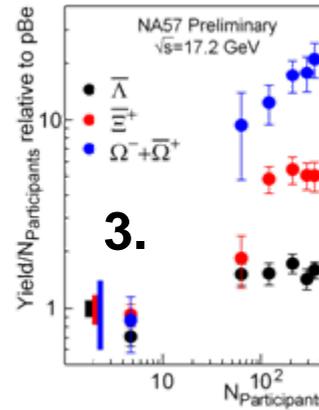
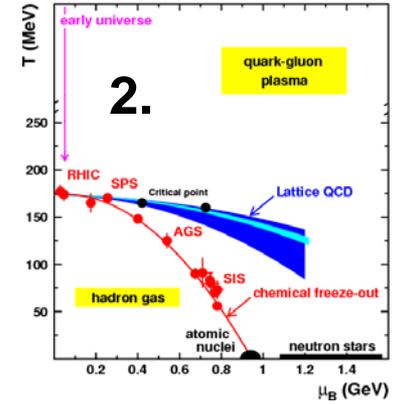
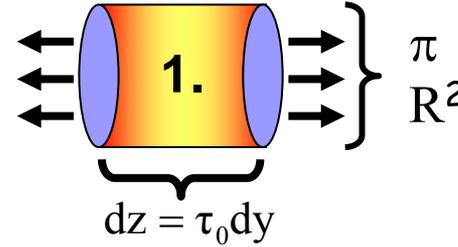
Collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes

Troisième partie

Résumé (très succinct) des résultats SPS & RHIC

le système produit par collisions d'ions lourds :

1. a une densité d'énergie $> \epsilon_c$
2. a une température $> T_c$
3. surproduit de l'étrangeté
4. modifie résonances légères
5. dissout les résonances lourdes
6. rayonne des photons
7. a des degrés de liberté partoniques
8. absorbe les jets



comportement attendu d'un plasma de quarks et de gluons

Pourquoi étudier le QGP au LHC?

- la **RECHERCHE** du QGP est essentiellement finie (deuxième cours)
- la **DECOUVERTE** du QGP est en cours à RHIC avec des résultats impressionnants et des surprises (deuxième cours)
- la **MESURE** des caractéristiques du QGP a tout juste commencé

QGP @ LHC versus RHIC = Z/W @ LEP versus SppS

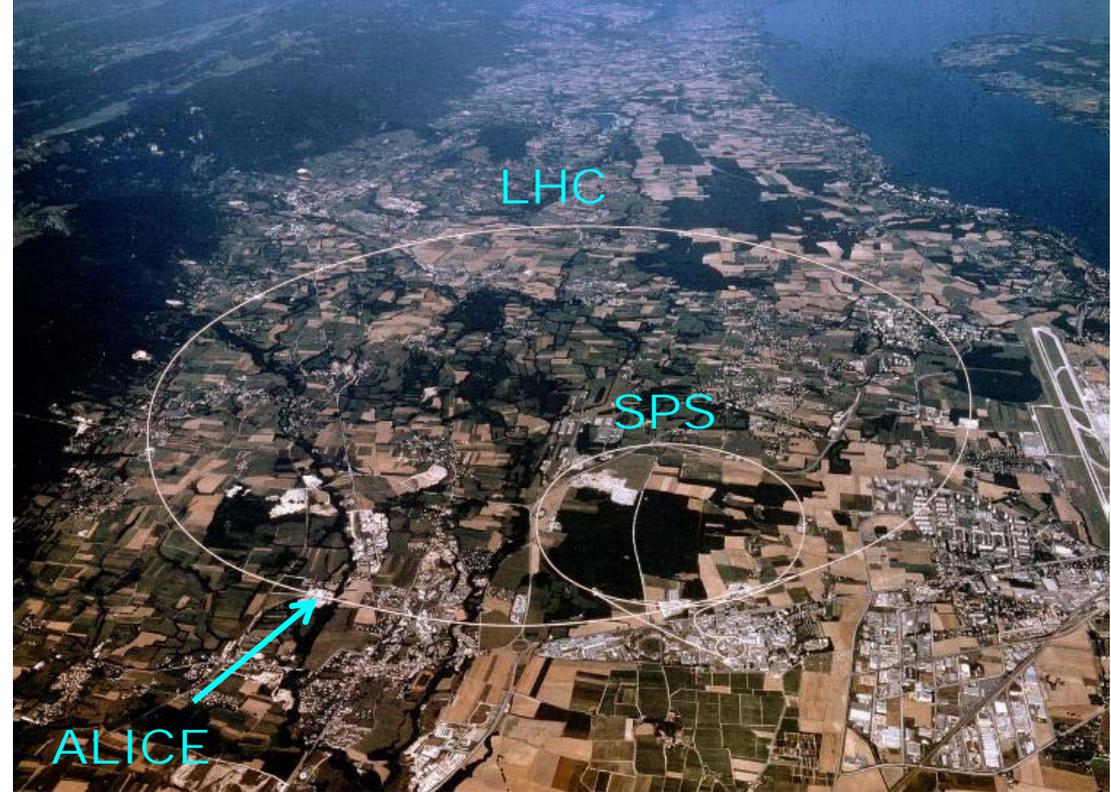
le LHC est l'endroit idéal pour produire et étudier le QGP

- **Matière nucléaire et QGP**
 - **QGP & collisions d'ions lourds (ultra-)relativistes**
 - **Signatures attendues du QGP**
- **Recherche expérimentale du QGP**
 - **Le passé : l'ère SPS**
 - **Le présent : l'ère RHIC**
- **Le futur : l'ère LHC**
 - **Le QGP au LHC**
 - **L'expérience ALICE**

Large Hadron Collider (CERN)



**Collisionneur
spécialement dédié à
la recherche du Higgs**



- 2 anneaux concentriques, 5000 aimants supraconducteurs, 27 km de circonférence
- protons jusqu'à 7 TeV ($L = 1 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), Pb jusqu'à 2.75 ATeV ($L = 5 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 4 points d'interaction, 4 expériences dont 1 dédiée ions lourds, mise en service : 2009

Collisions d'ions lourds & QGP au LHC

le plus grand saut en énergie de l'histoire des ions lourds

machine	SPS	RHIC	LHC
\sqrt{s} (GeV)	17	200	5500
N_{ch}	1000	4000	50 000
τ^0_{QGP} (fm/c)	1	0.2	0.1
T/T_c (τ^0_{QGP})	1.1	1.9	3.0-4.2
$\varepsilon[1 \text{ fm/c}]$ (GeV/fm ³)	3	5	15-60
τ_{QGP} (fm/c)	≤ 2	2-4	≥ 10
τ_f (fm/c)	~ 10	20-30	30-40
V_f (fm ³)	$\sim 10^3$	$\sim 10^4$	$\sim 10^5$
μ_B (MeV)	250	20	1
processes	soft \rightarrow semi-hard \rightarrow hard		

= 0.18 mJ

\Rightarrow faster

\Rightarrow hotter

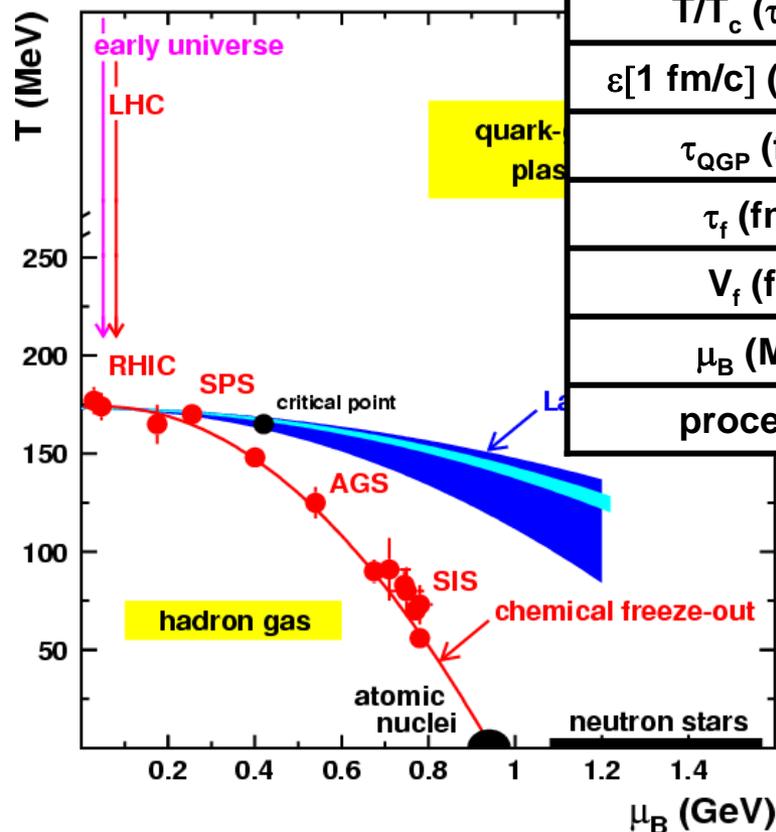
\Rightarrow denser

\Rightarrow longer

\Rightarrow bigger

\Rightarrow cleaner

\Rightarrow harder

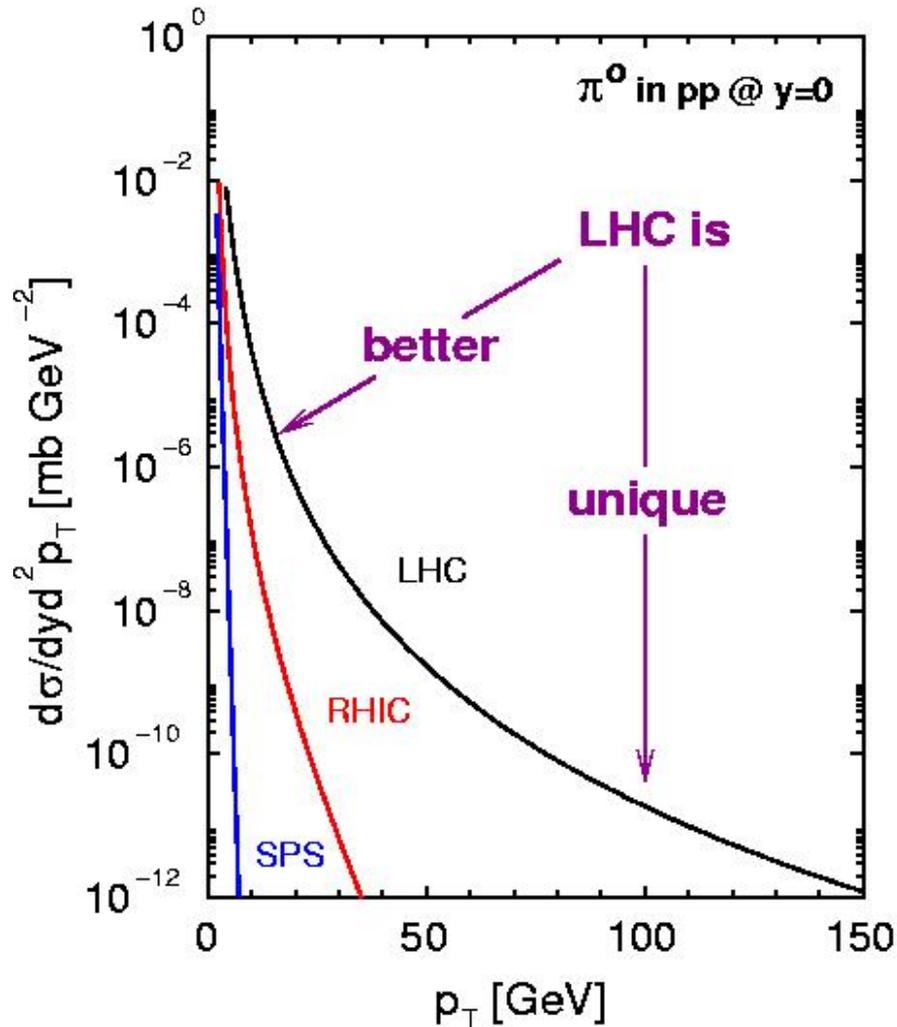


densité d'énergie, volume & tps de vie du QGP
 $\times 10(4)$ du SPS(RHIC) au LHC

- environnement totalement nouveau
- meilleures conditions pour l'étude du QGP

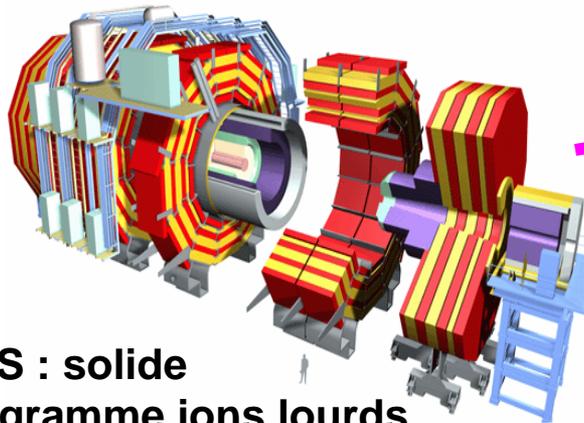
J. Schukraft, Nucl. Phys. A 698 (2002) 287

Illustration en un plot de ce qui change au LHC

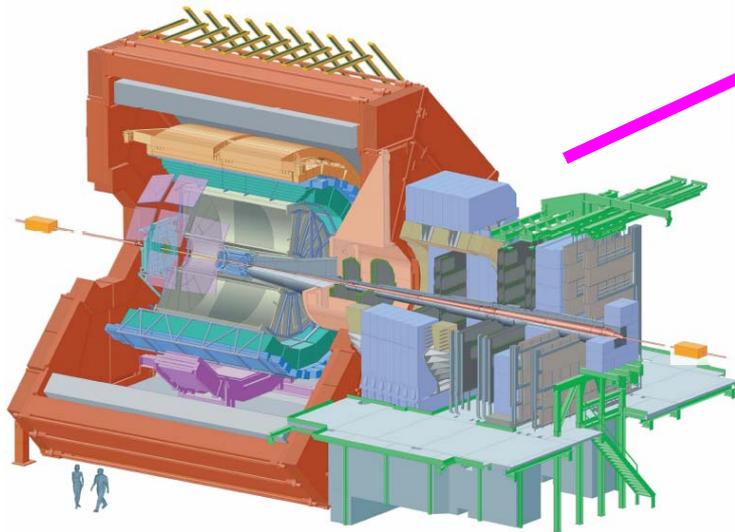


Gains quantitatifs et qualitatifs similaires sur l'ensemble des observables

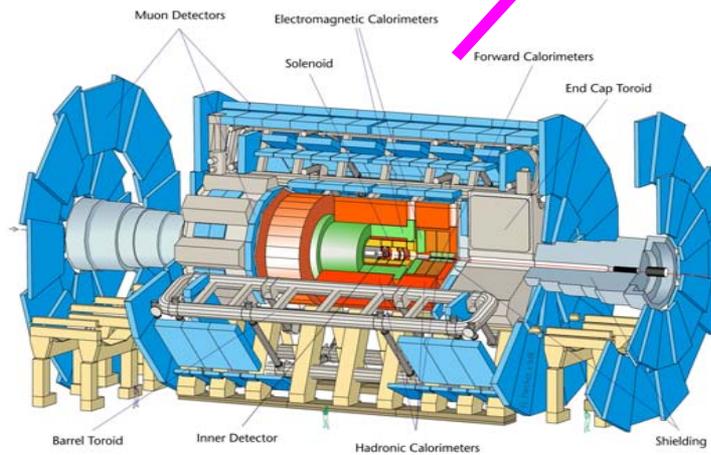
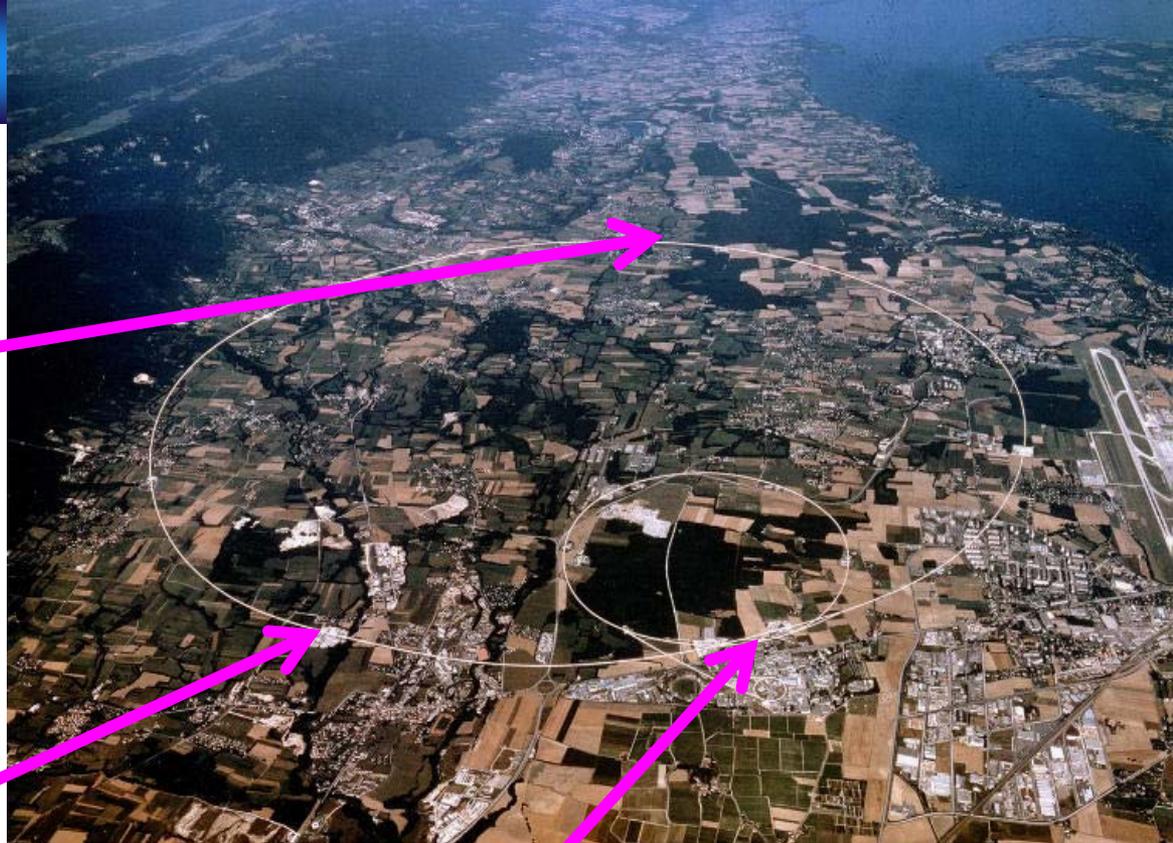
Ions Lourds au LHC



CMS : solide programme ions lourds



ALICE : l'expérience dédiée ions lourds

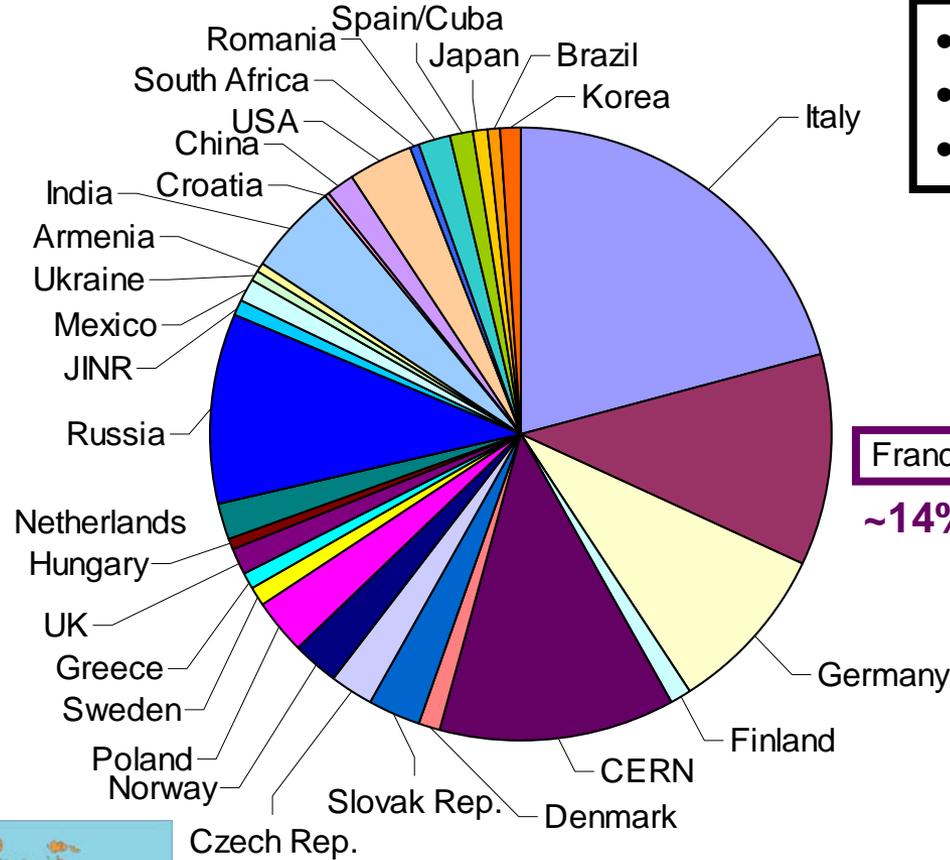


ATLAS : lettre d'intention ions lourds (2004)

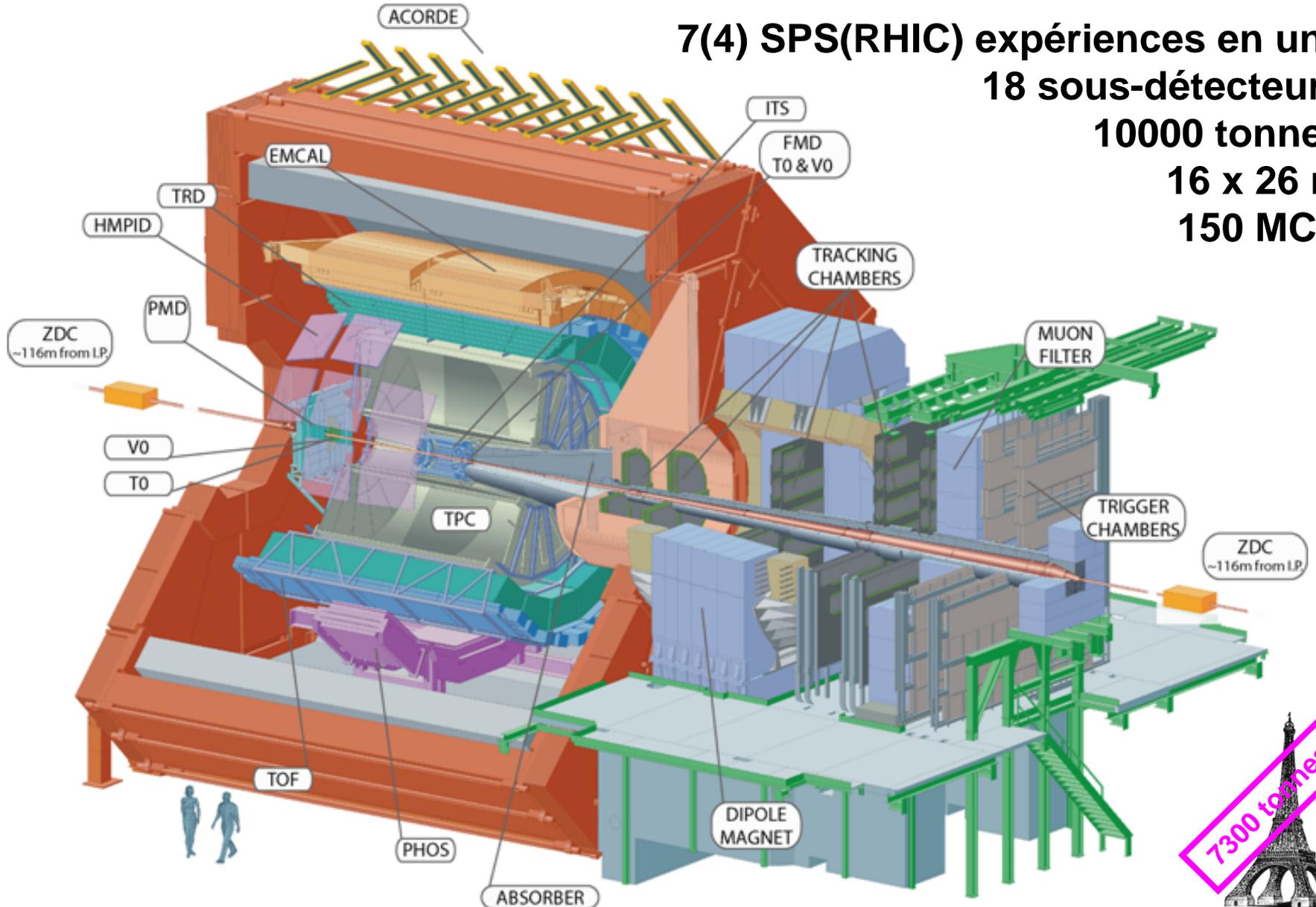
La collaboration ALICE

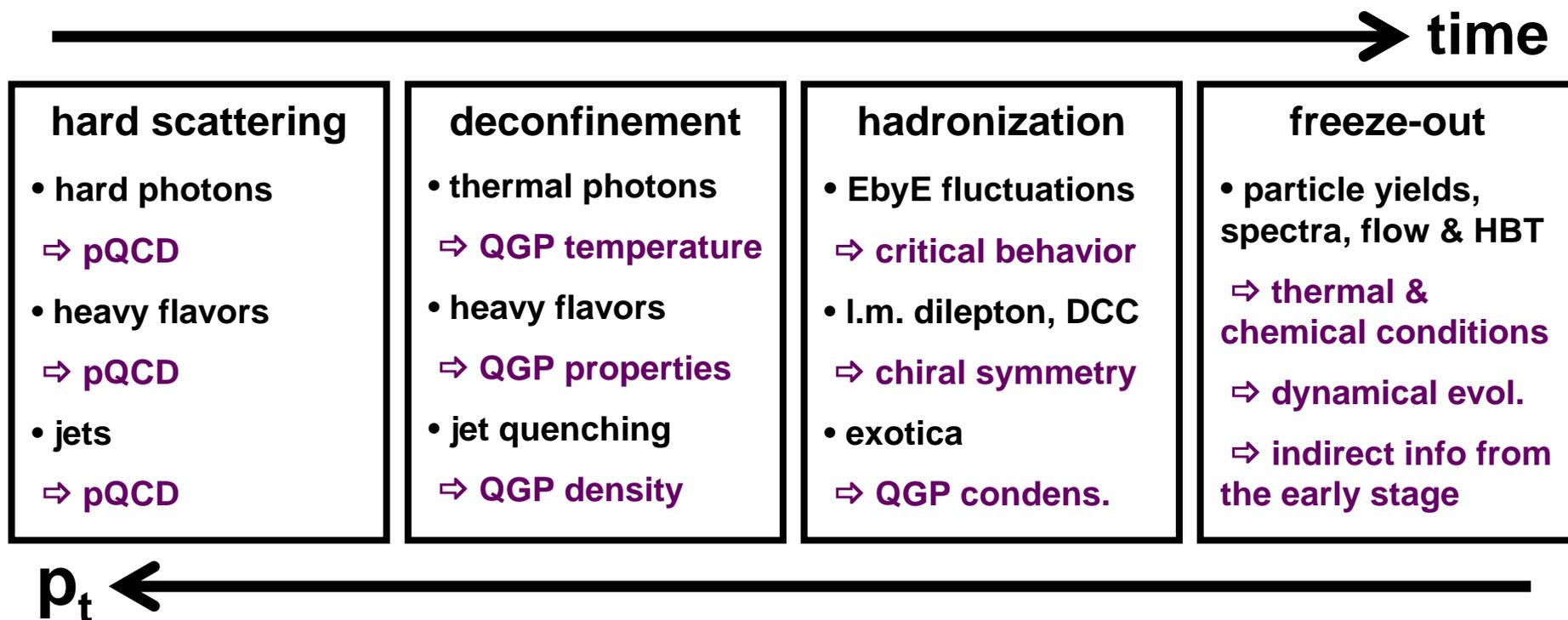
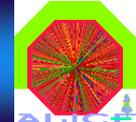


- 1000 membres
- 100 instituts
- 30 pays



ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

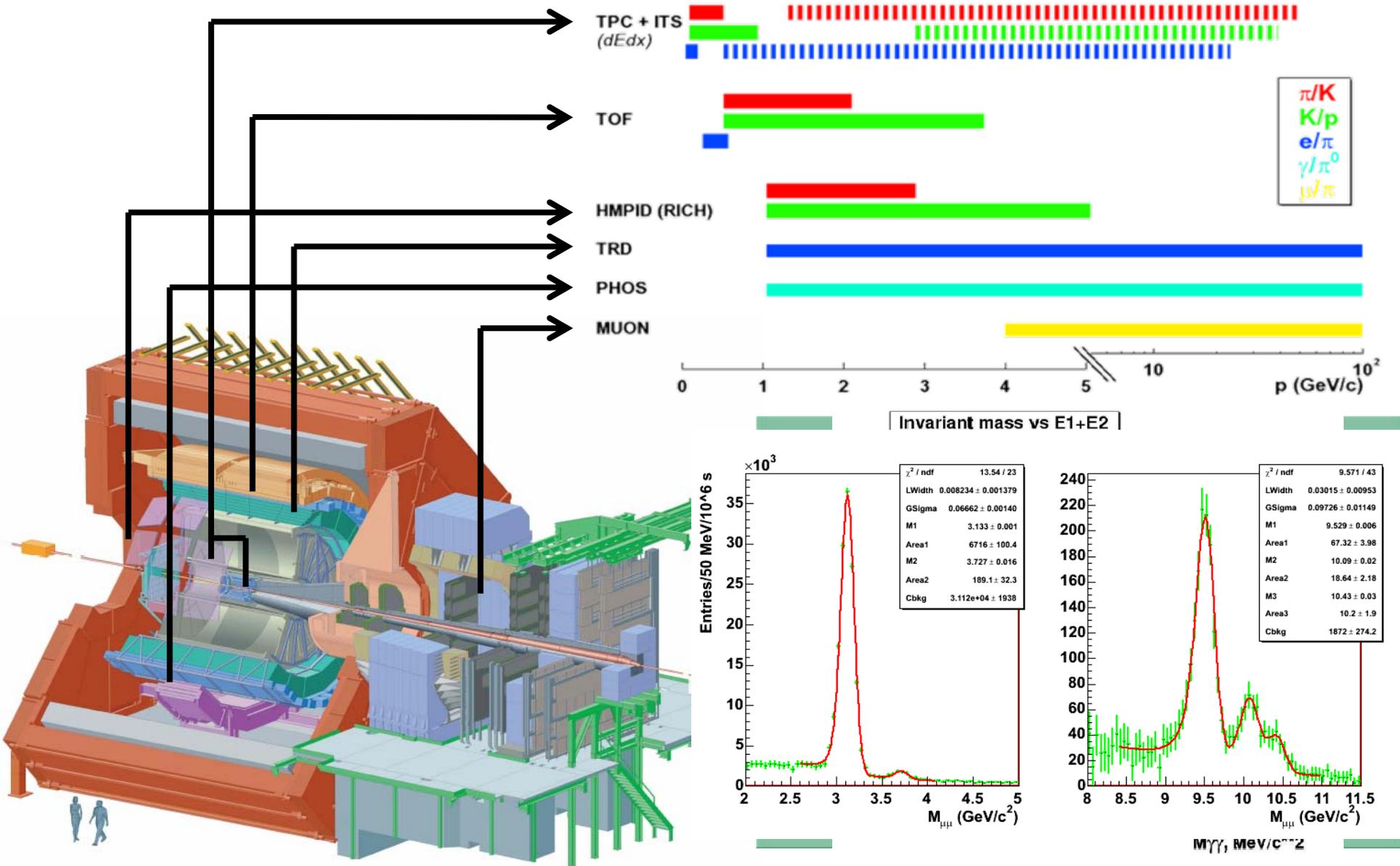




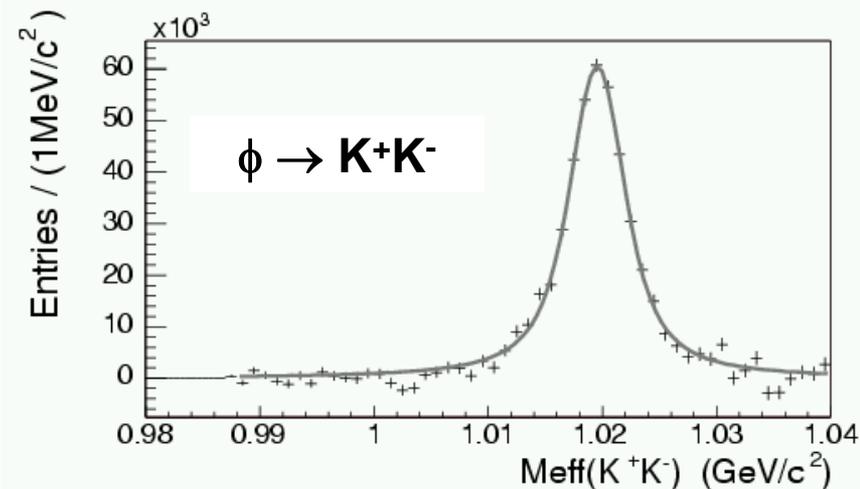
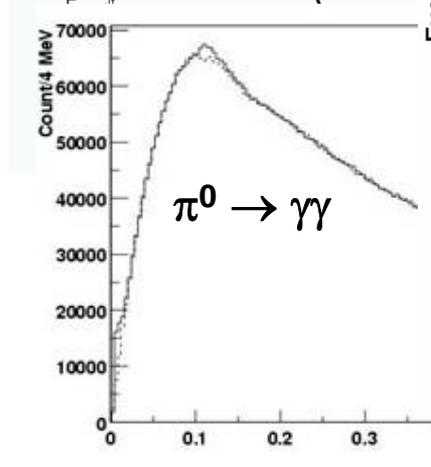
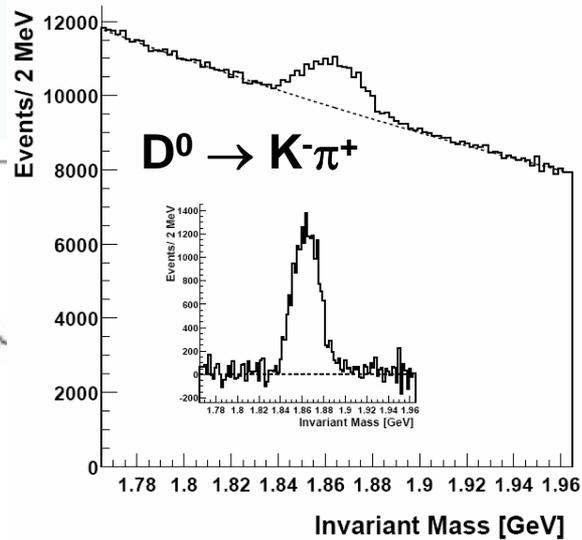
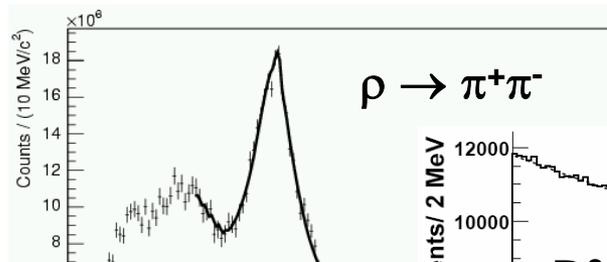
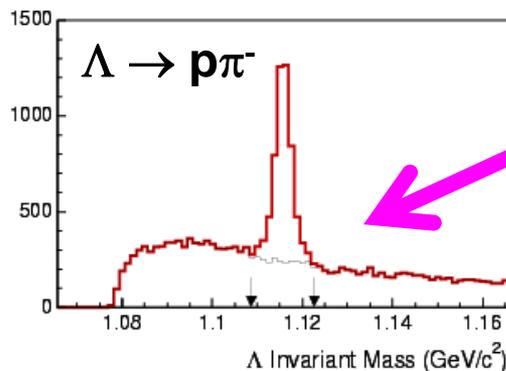
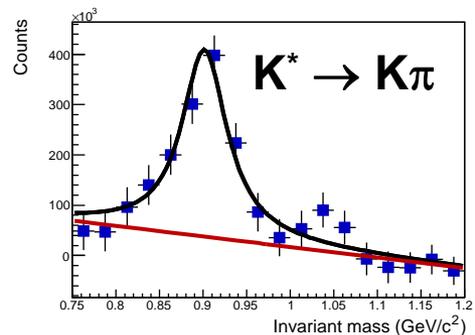
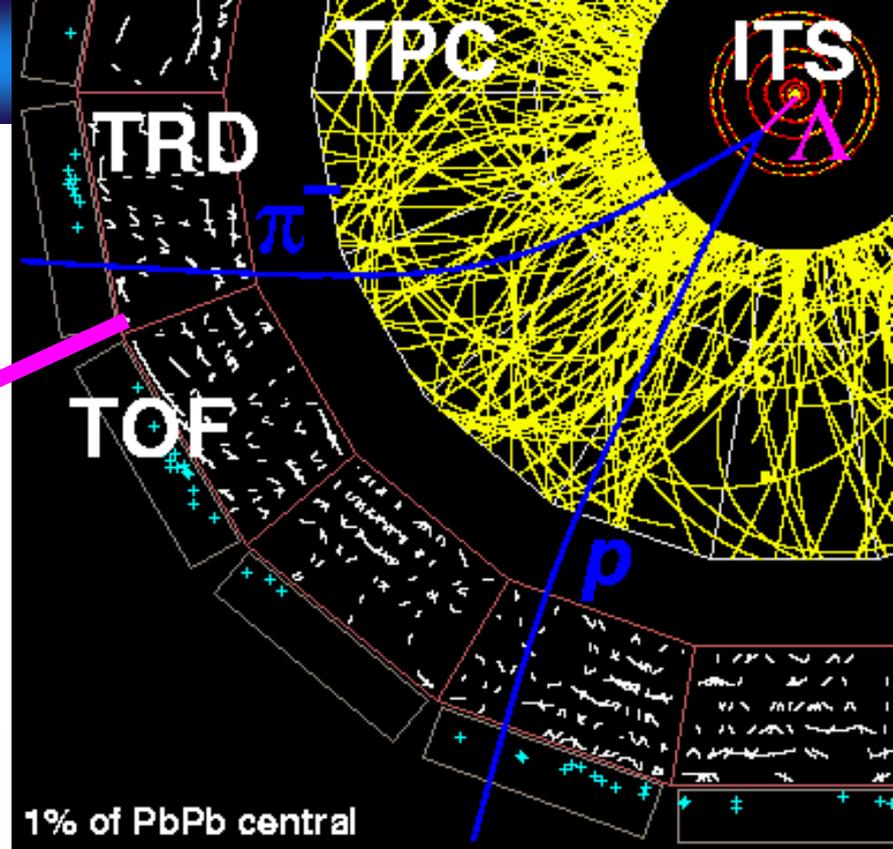
ALICE est conçu pour explorer un grand domaine en p_t et pour corréler la plupart des signaux

grandes acceptance et granularité, triggers sélectifs, bonne efficacité de tracking, grande couverture en moment, reconstruction des vertex secondaires, identification des hadrons, leptons & photons

Identification des particules "stables"

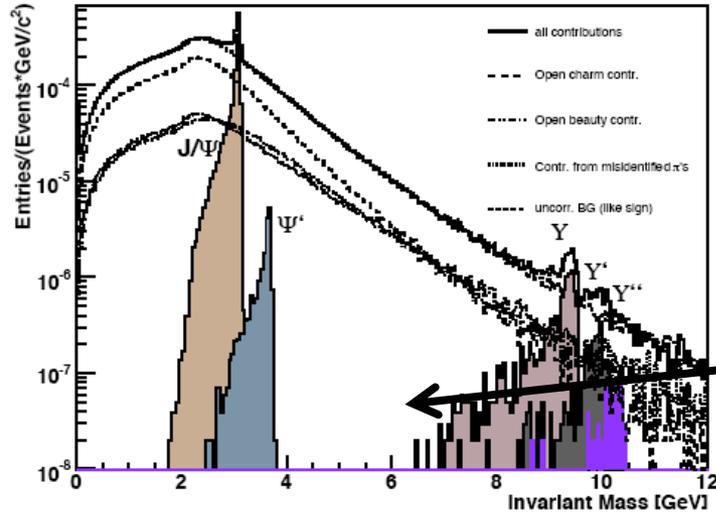
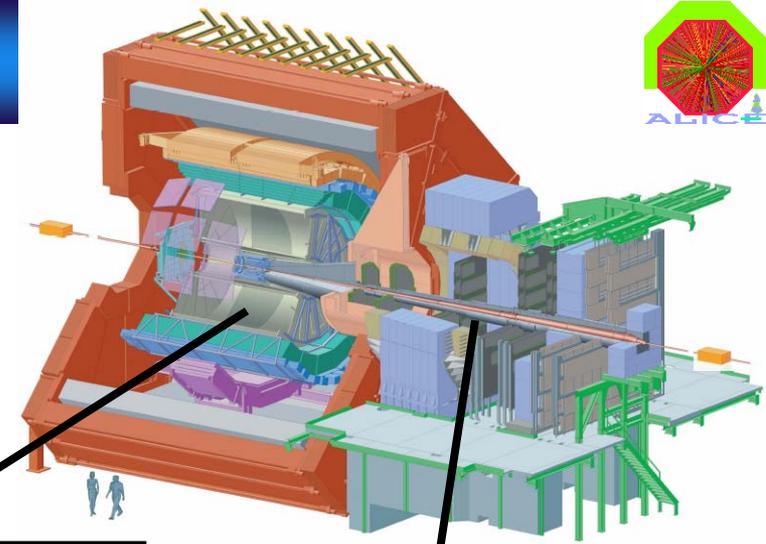


Reconstruction des résonances



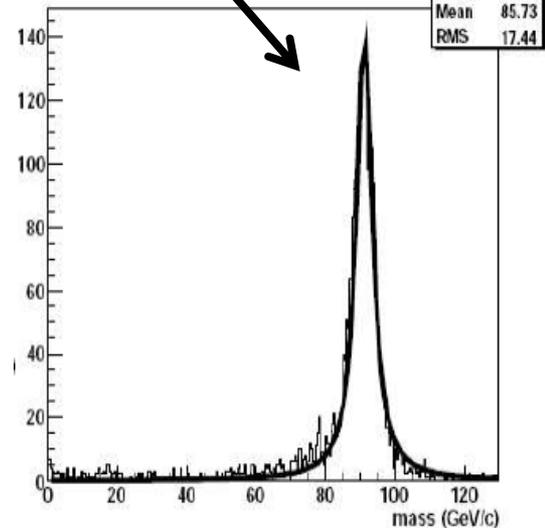
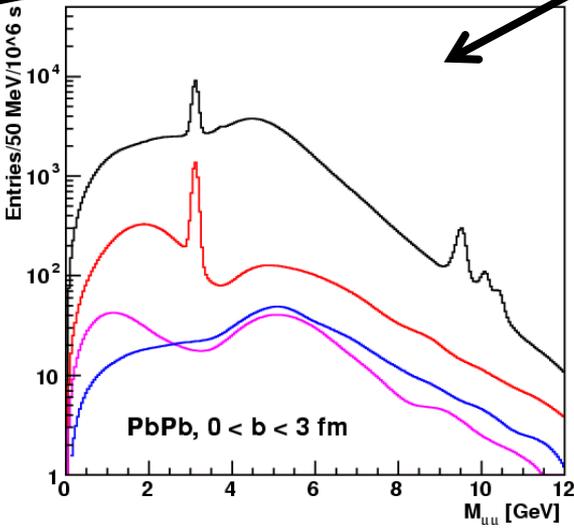
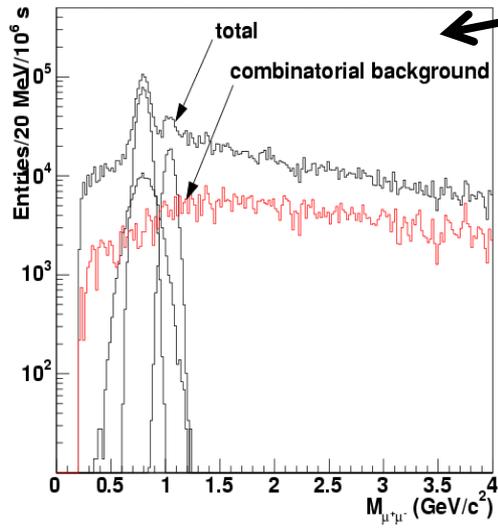
etc...

Mesure des dileptons

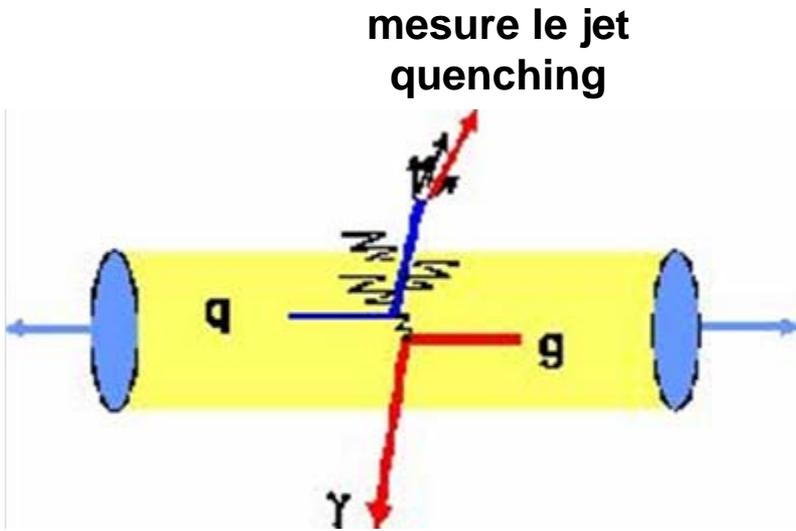


$\rho, \omega, \phi, J/\psi, \psi', \Upsilon, \Upsilon', \Upsilon'', Z^0, W^\pm, \text{charm, bottom} \rightarrow e^+e^-$

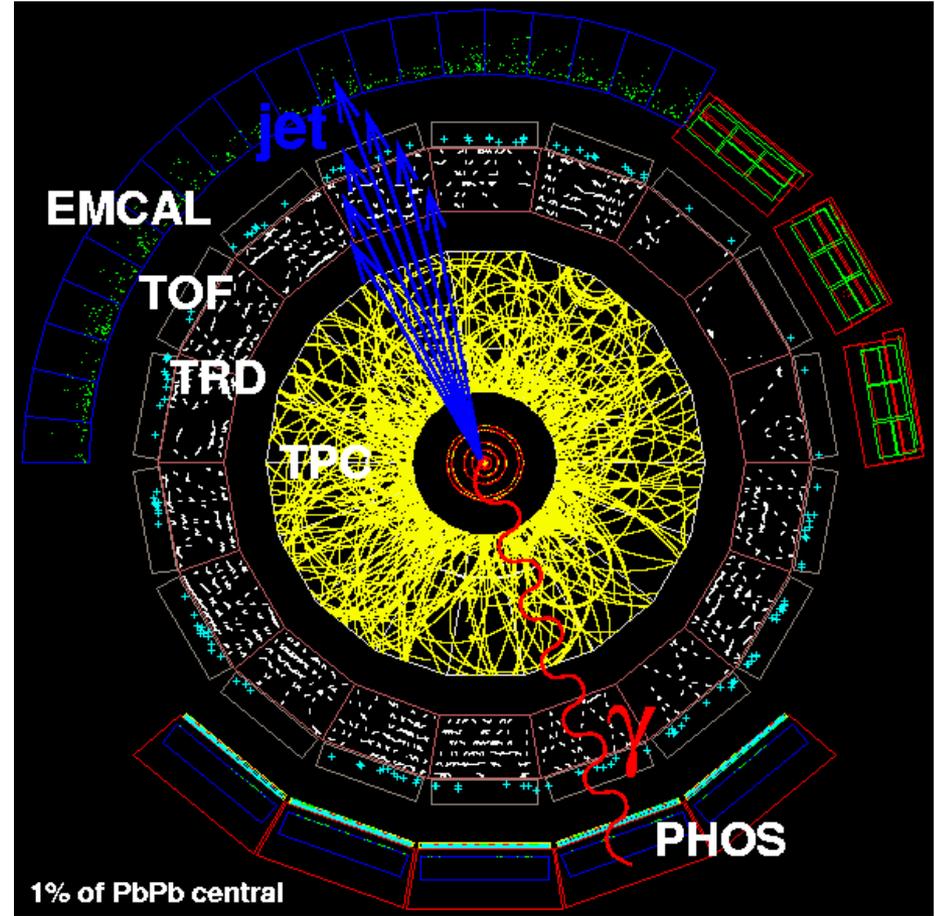
$\rho, \omega, \phi, J/\psi, \psi', \Upsilon, \Upsilon', \Upsilon'', Z^0, W^\pm, \text{charm, bottom} \rightarrow \mu^+\mu^-$



calibration directe du jet quenching



mesure l'énergie initiale
du parton opposé



reconstruction utilise informations
combinées de

PHOS/ITS/TPC/TRD/TOF/EMCAL

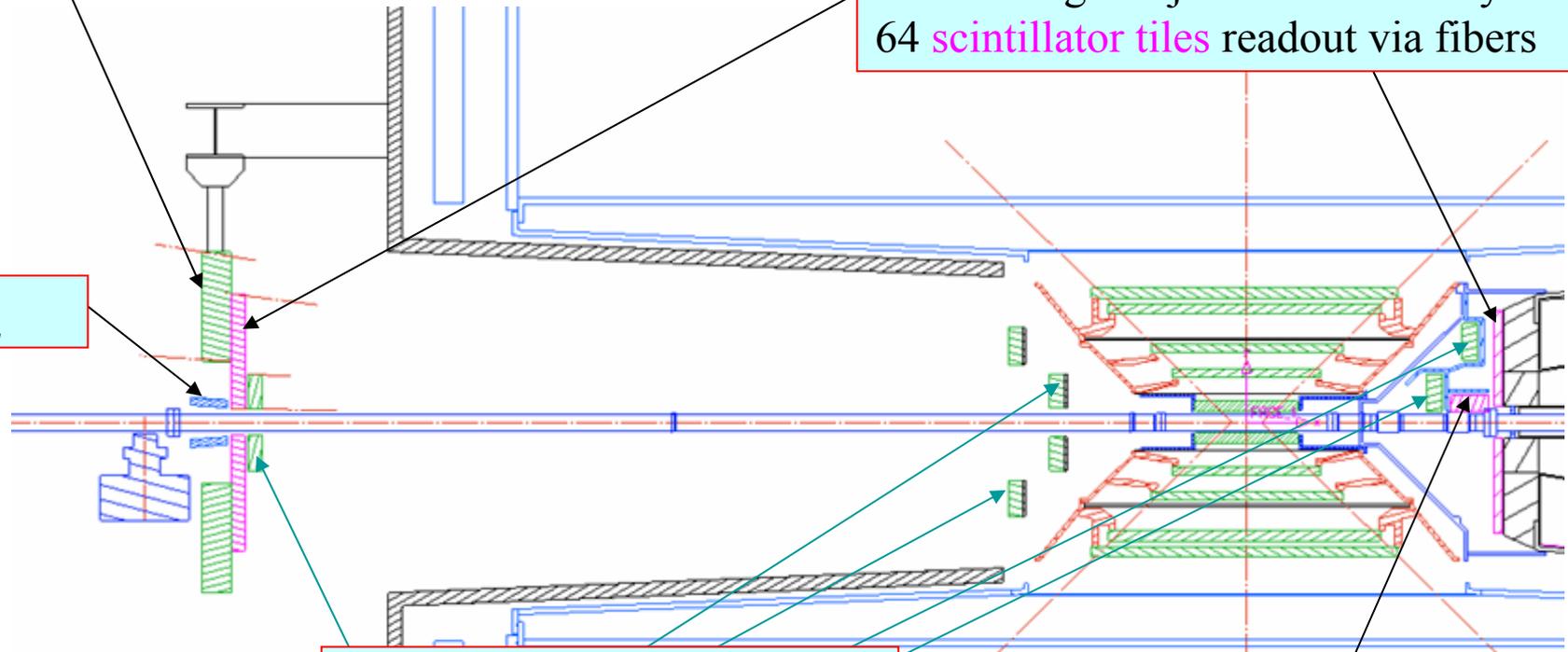
Détecteurs à petit angle



PMD Pre-shower detector $2.3 < \eta < 3.5$, N_{charged} and N_{photons} (**DCC's**)

V0 $1.6 < |\eta| < 3.9$ **Interaction** trigger (beam-gas rejection), centrality trigger and beam-gas rejection. Two arrays of 64 **scintillator tiles** readout via fibers

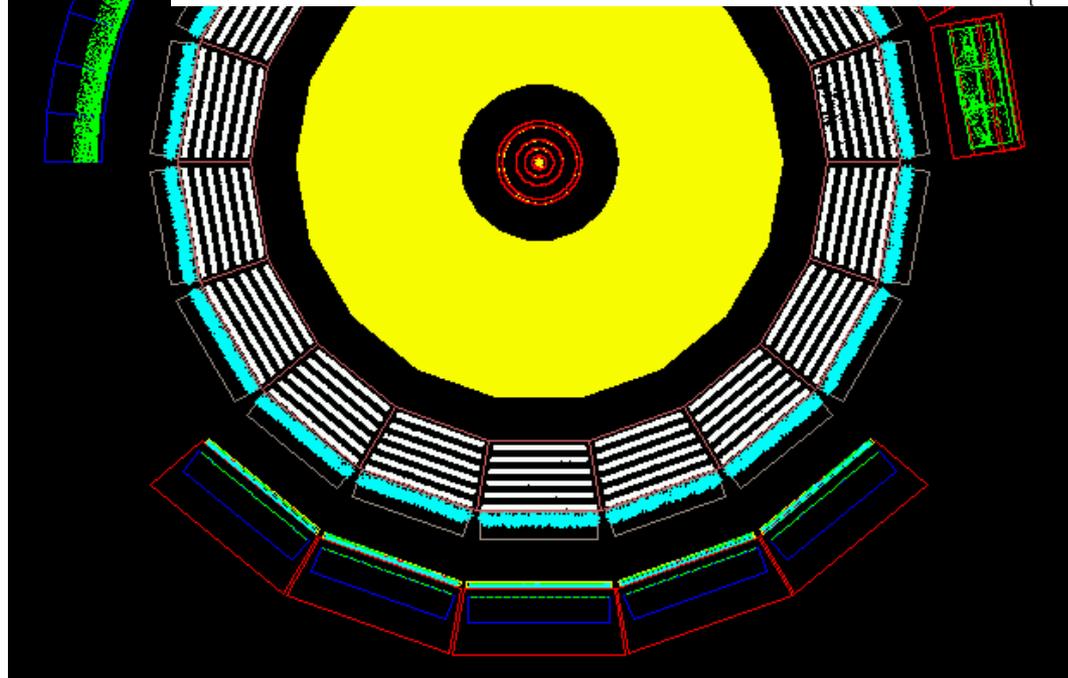
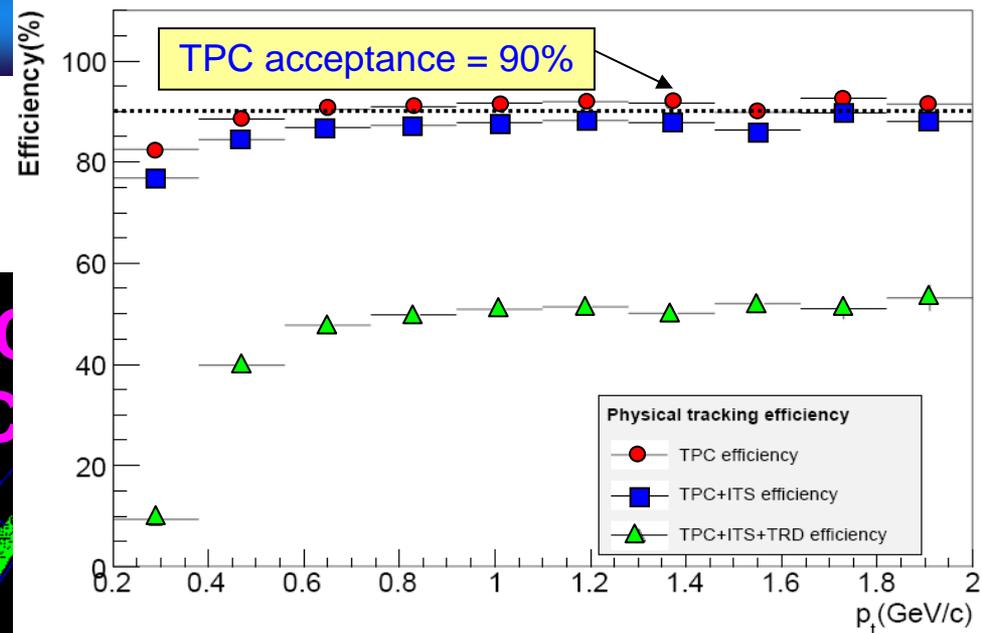
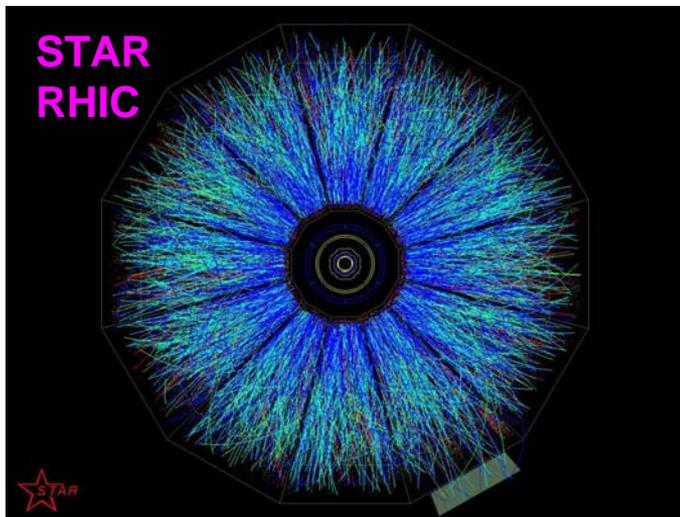
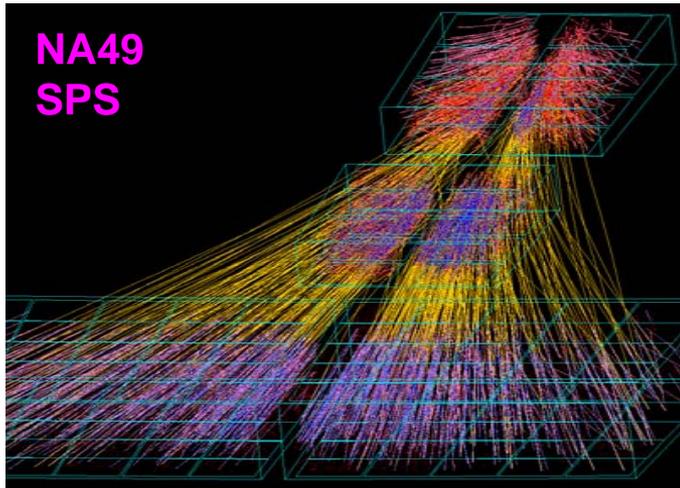
T0_L



FMD: Multiplicity and η dist. $1.6 < \eta < 3$, $-5.4 < \eta < -1.6$ **Silicon strip** disks, 12k analog channels

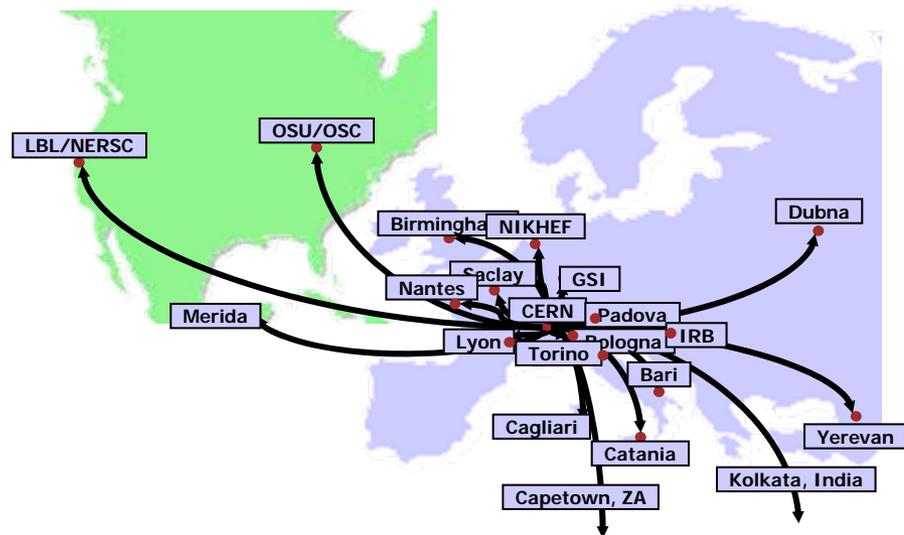
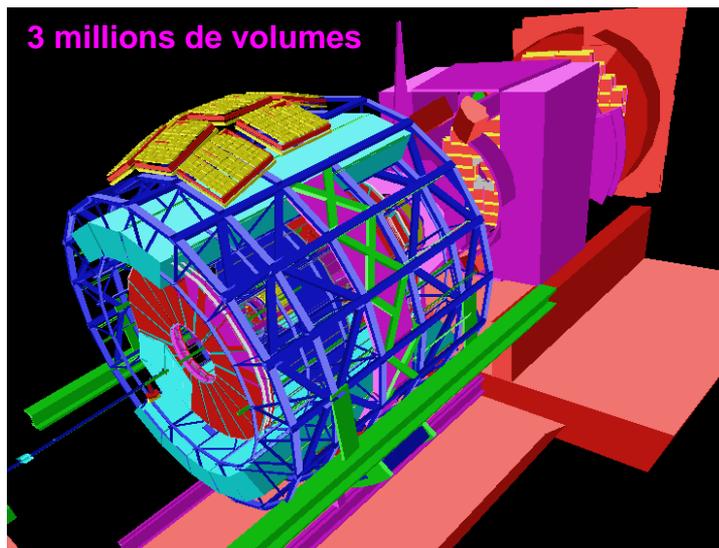
T0_R: $2.6 < |\eta| < 3.3$ **Time** (T_0) for the TOF (~ 50 ps time res.) Two arrays of **12 quartz counters**. Also backup to V0

Ce à quoi il faut s'attendre

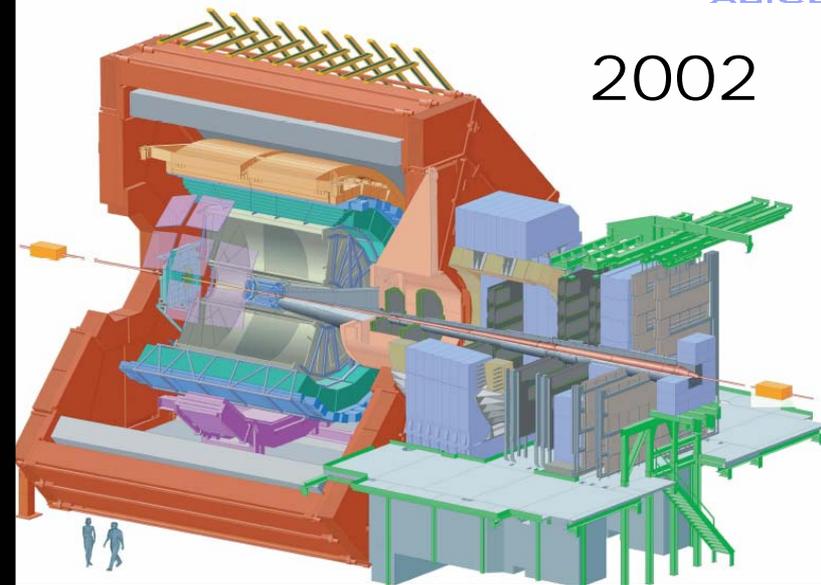
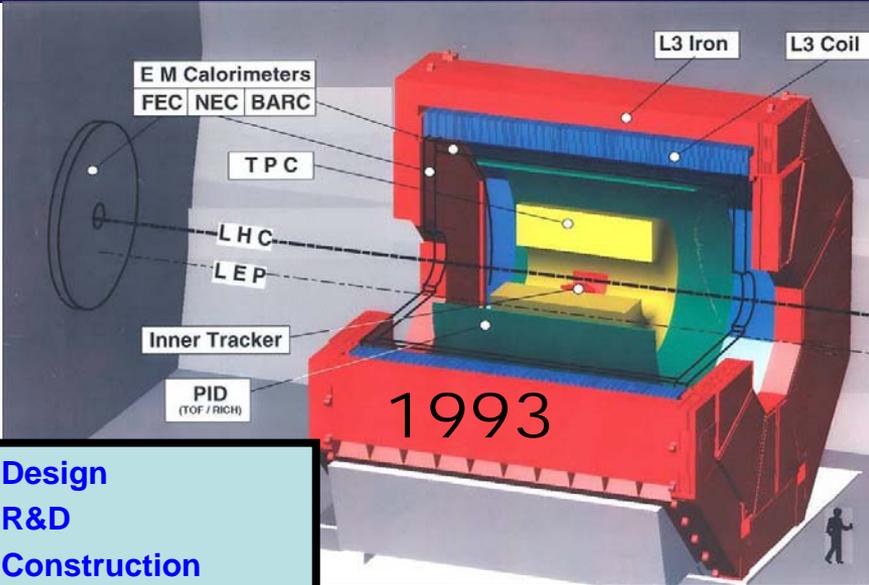




- ALICE utilise ~ toutes les techniques connues de détection de particules
- Jusqu'à 6000 particules par collision dans la partie centrale
- Volume de données produites :
 - en ligne jusqu'à 1.25 GB/s (i.e. 2 CD/s)
 - en un mois : 1 PB (i.e. 1 million de GB ~ 1 pile de CDs de 2 km)
- Software : 900 kLoC (99% C++)
- Traitement et stockage des données distribués à travers le monde



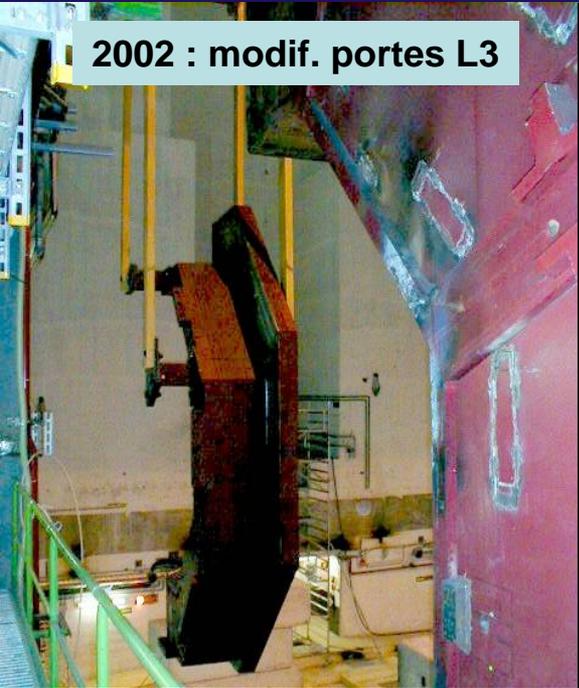
Evolution d'ALICE



- 1990-1996 : Design
- 1992-2002 : R&D
- 2000-2010 : Construction
- 2002-2007 : Installation
- 2002-2009 : Commissioning
- 2009→ : Prises de données



Installation des grandes structures



2002 : modif. portes L3



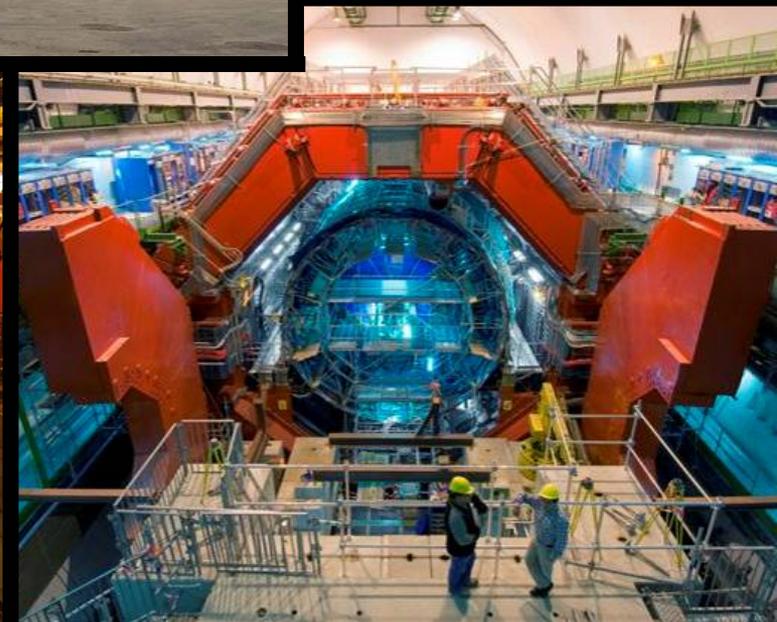
Jan. 2006 : support détecteurs centraux



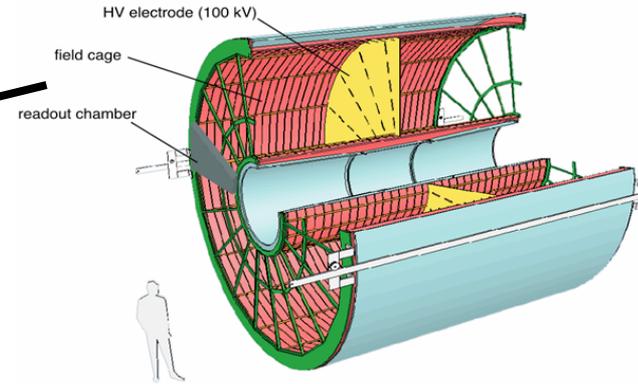
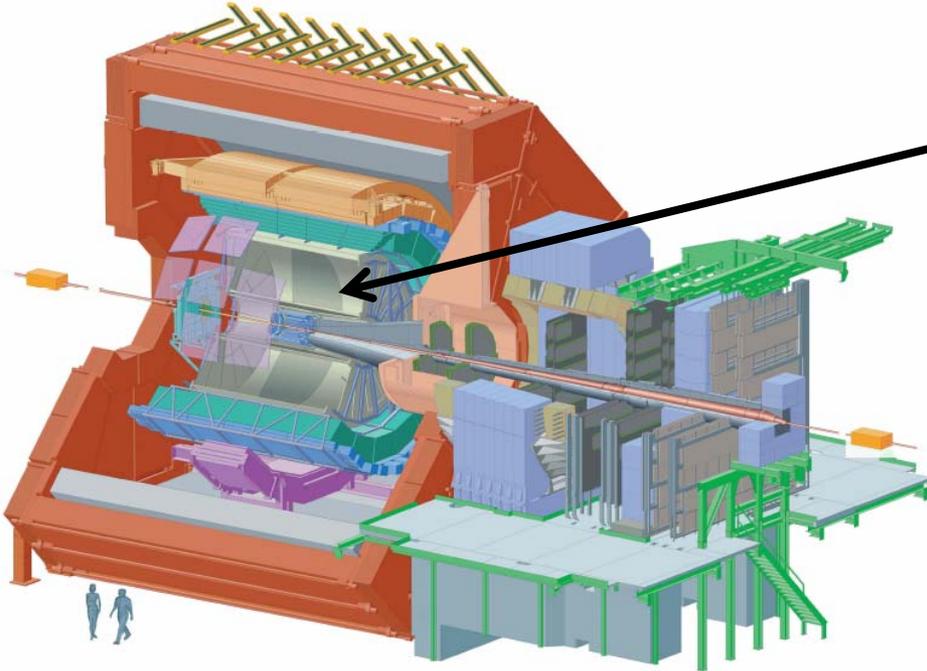
Nov. 2007 : support services détecteurs centraux



Nov. 2007 : support EMCaI



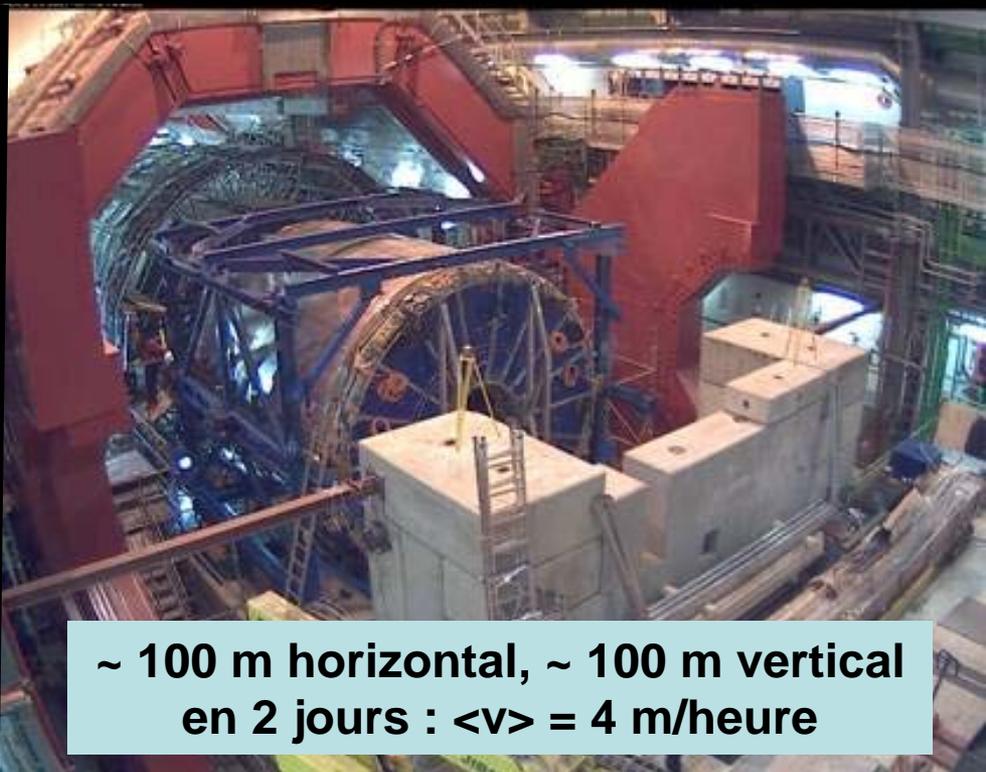
La TPC (la pièce centrale d'ALICE)



- la plus grande au monde
- 510 x 560 cm, 88 m³, 10 tonnes
- 570 k canaux, 80 MB/evt
- 5 ans de const. et d'assemblage

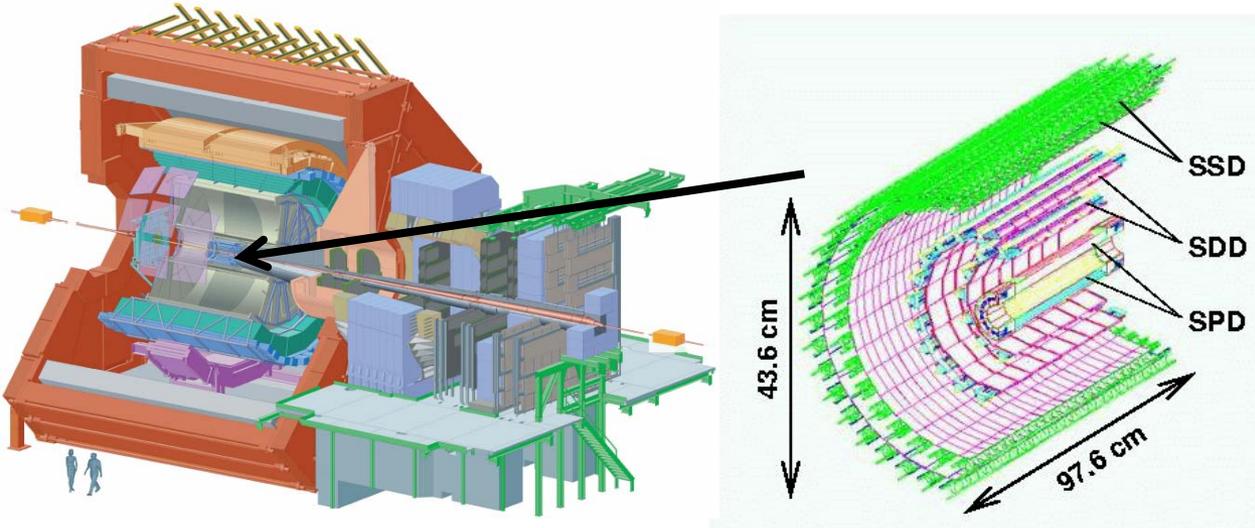


Installation de la TPC (jan. 2007)



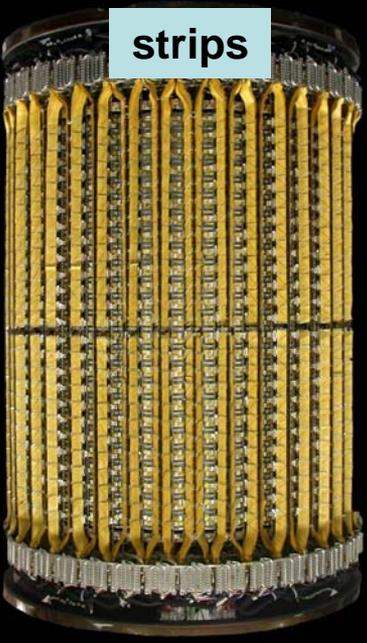
~ 100 m horizontal, ~ 100 m vertical
en 2 jours : $\langle v \rangle = 4$ m/heure

L'ITS (Internal Tracker System)



type	surface	# canaux
SPD (pixel)	0.2 m ²	9.8 M
SDD (drift)	1.3 m ²	1.33 k
SSD (strip)	4.9 m ²	2.6 M

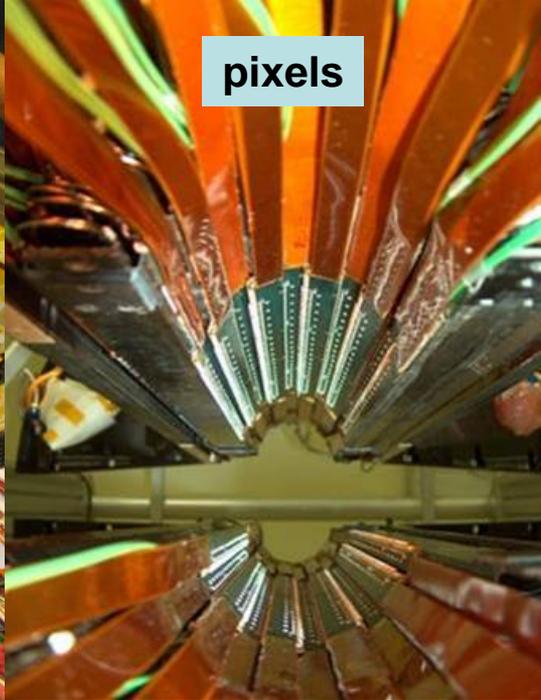
doit pouvoir identifier de l'ordre de 90 particules/cm² par collision toutes les 100 ns



strips



drifts

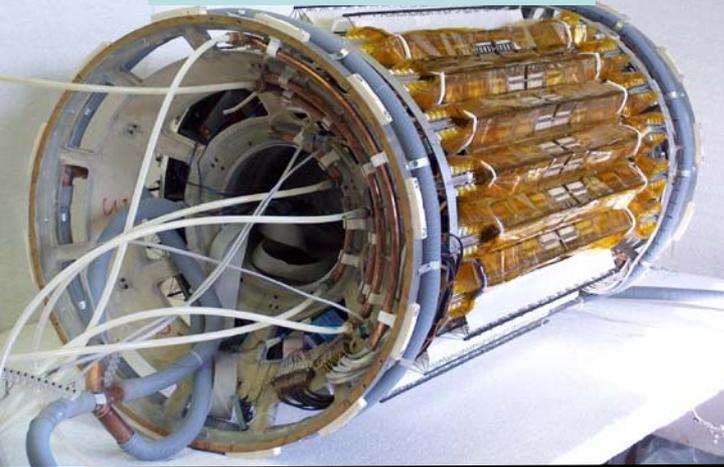


pixels

Installation et câblage de l'ITS



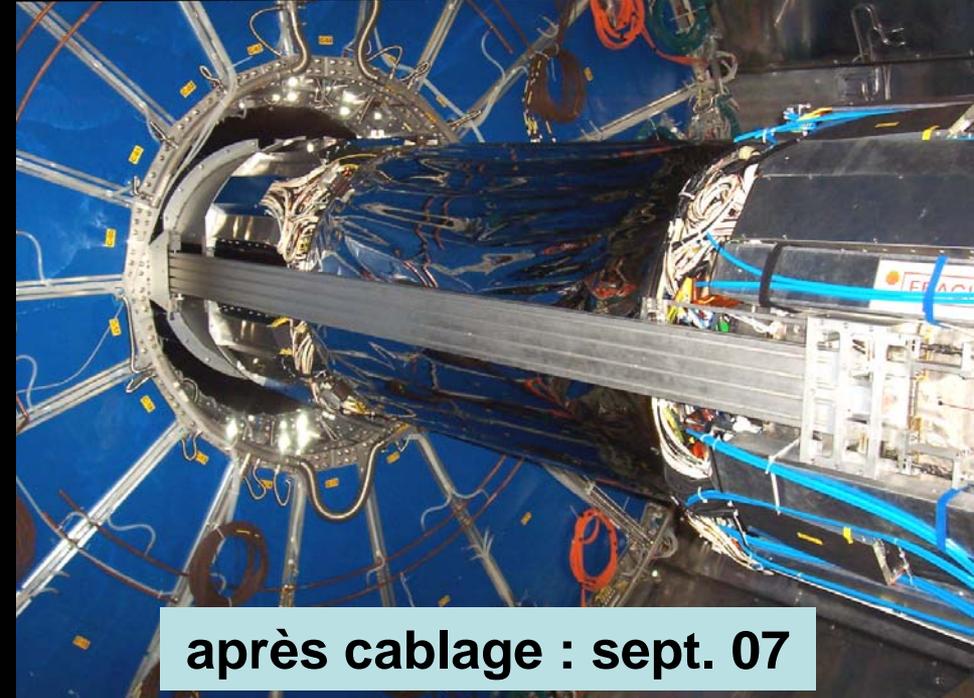
en cours de montage



descente dans la caverne



installation : 15/03/07

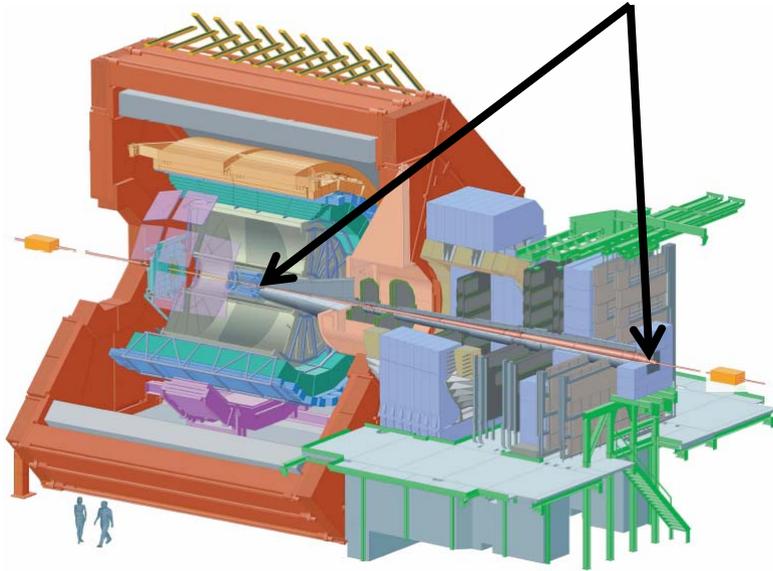


après câblage : sept. 07

Un exemple de réalisation mécanique complexe



L'absorbeur frontal du spectromètre à muons



100 tonnes, 18 m, W, Pb, Fe, graphite, béton...

béton : France, engineering & supervision : CERN,
design : Russie



Polyéthylène :
Italie



Tungstène :
Chine



Plomb : UK



Support : Italie



Graphite : Inde



Acier : Finlande



Aluminium : Arménie

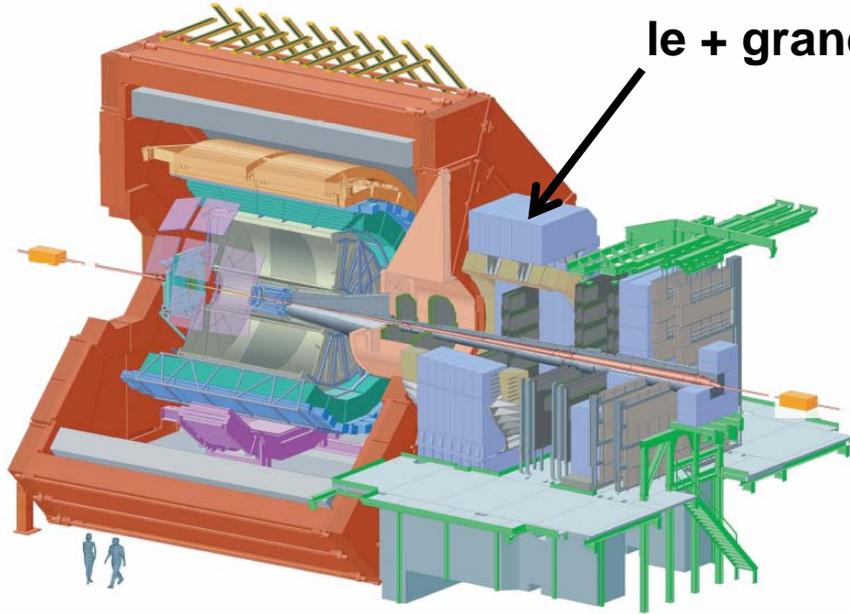


Acier : Inde

Le dipôle du spectromètre à muons (I)



le + grand du monde, 0.7 T, 3 Tm, 4 MW, 800 tonnes



Sept. 2003 : arrivée au CERN des bobines après un "tour de France"



passage difficile sous les ponts



...et dans la caverne

Le dipôle du spectromètre à muons (II)



2002 : assemblage culasse Dubna



2003 : transport culasse Dubna-CERN retardé de 10 mois



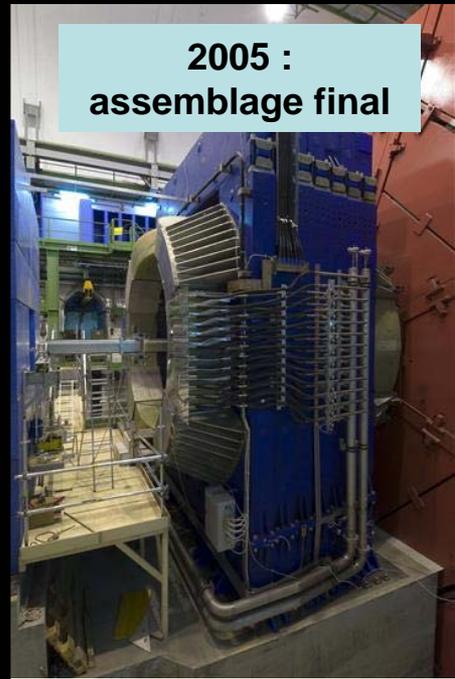
2004 : assemblage test devant L3



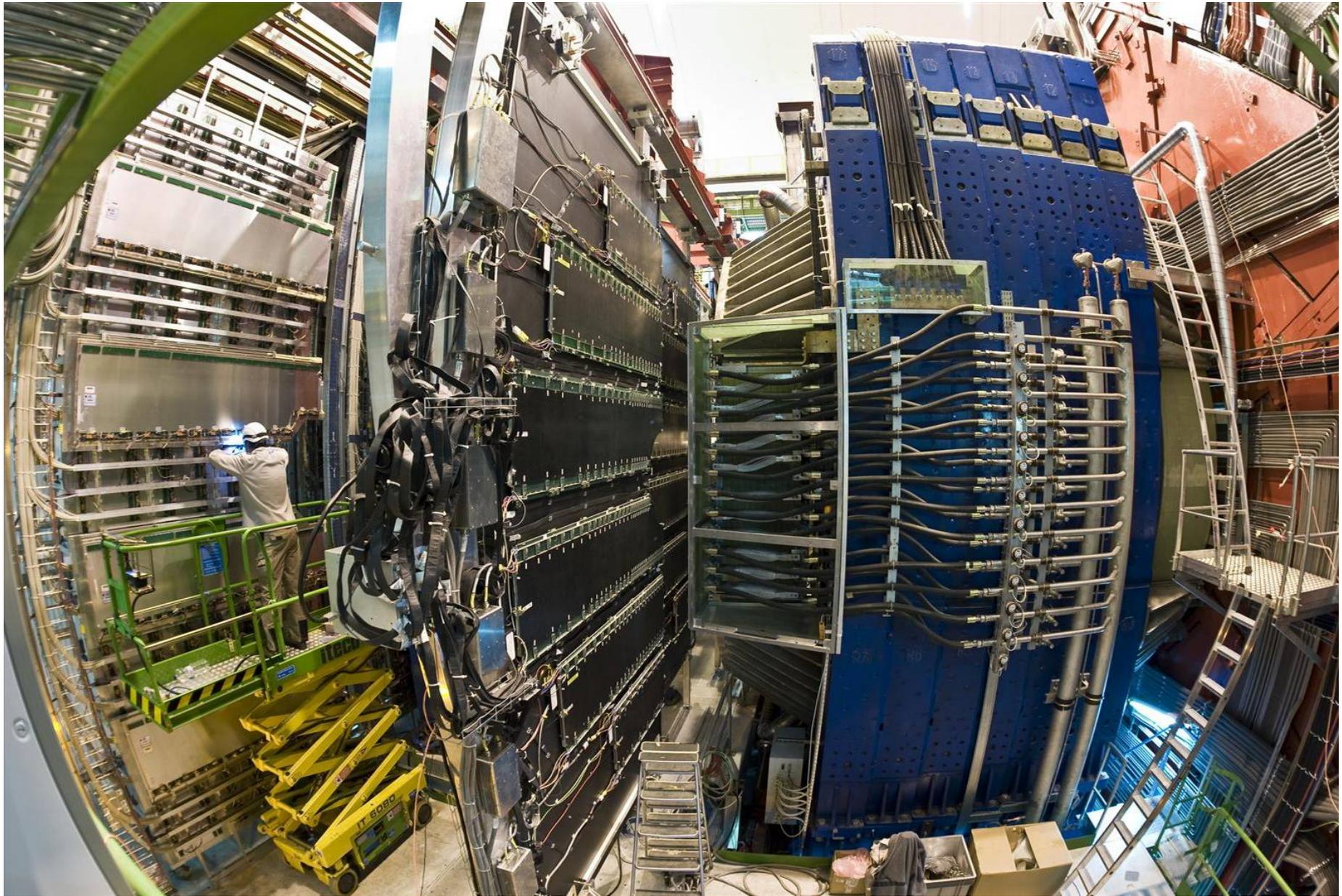
sept. 2004 : fermeture des portes de L3 coté MUON



2005 : assemblage final



Le spectromètre à muons installé (printemps 2008)



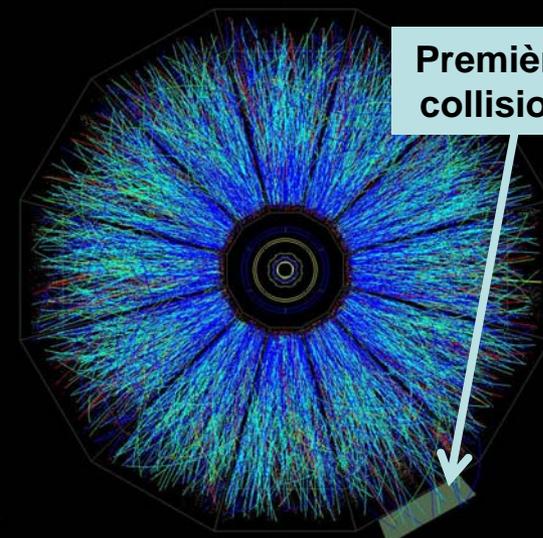
HMPID (High Momentum Particle Identification)



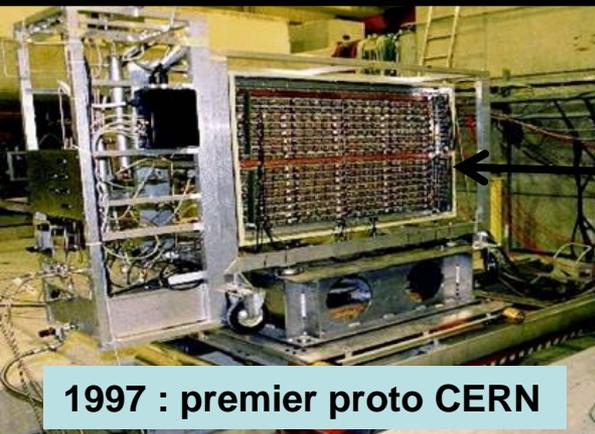
Août 1999 : arrivée au RHIC



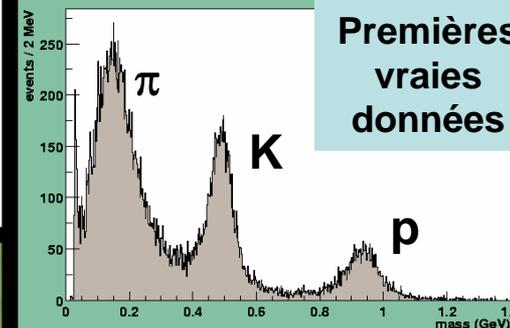
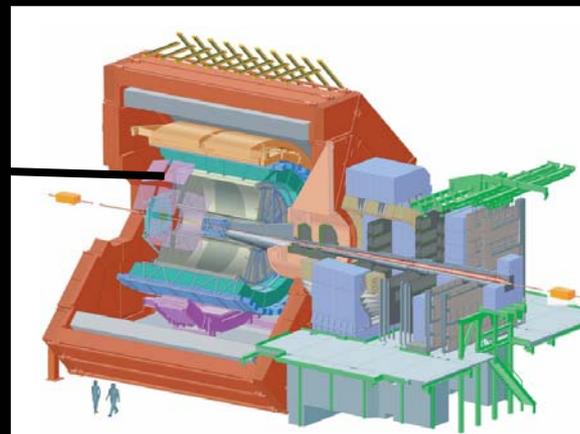
Nov. 1999 : dans STAR



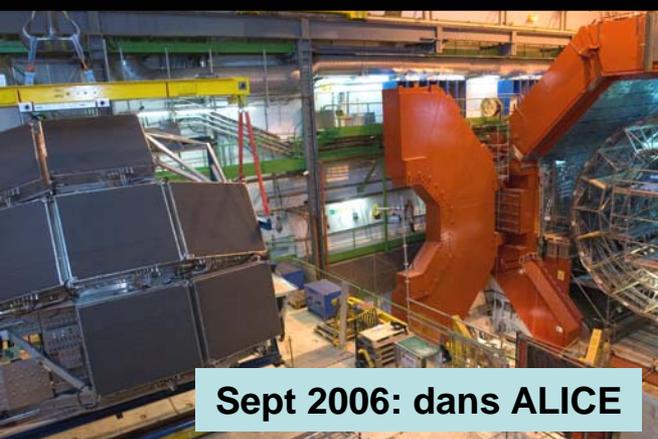
Premières collisions



1997 : premier proto CERN



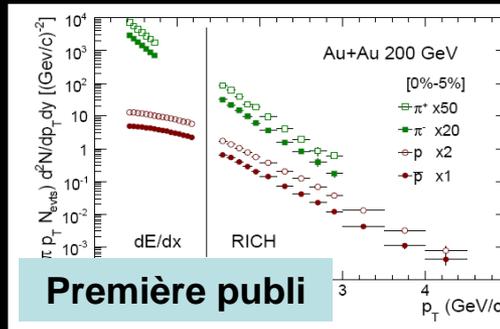
Premières vraies données



Sept 2006: dans ALICE

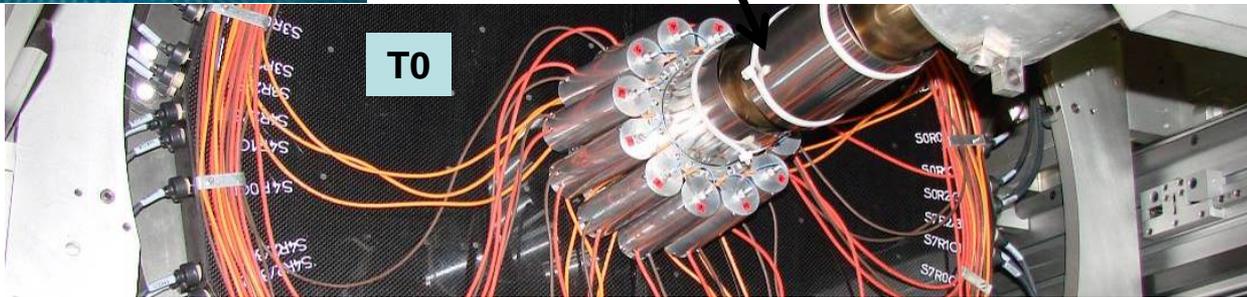
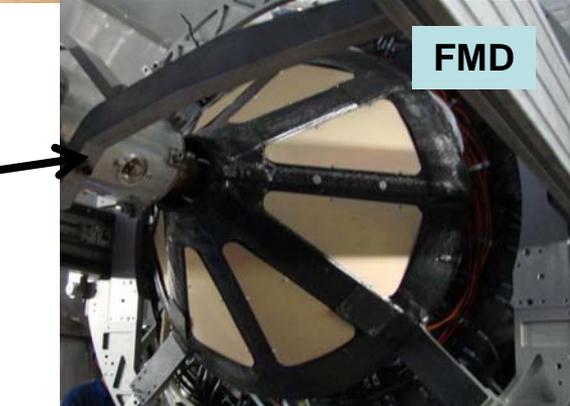
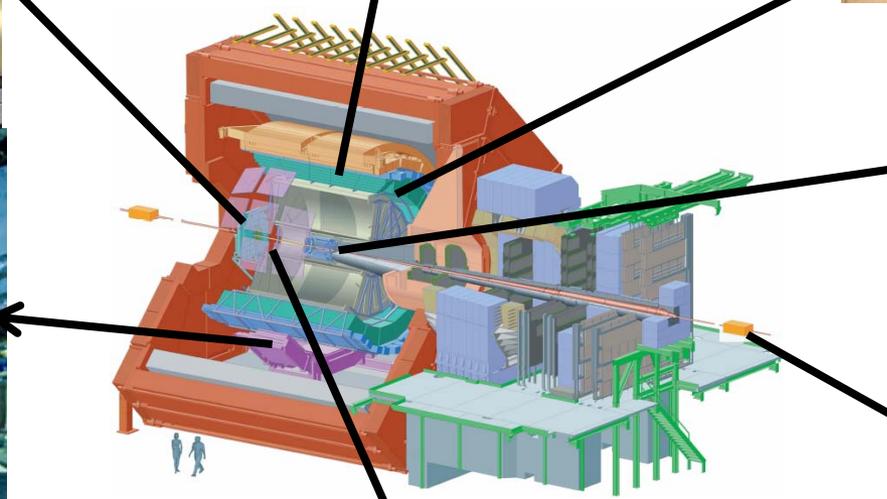
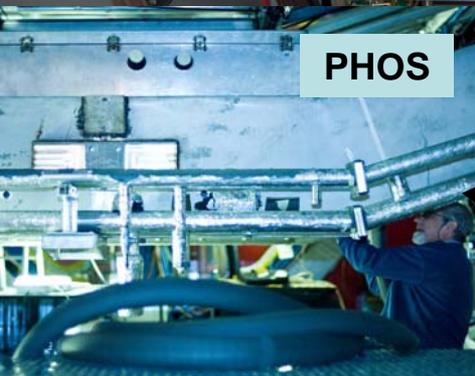
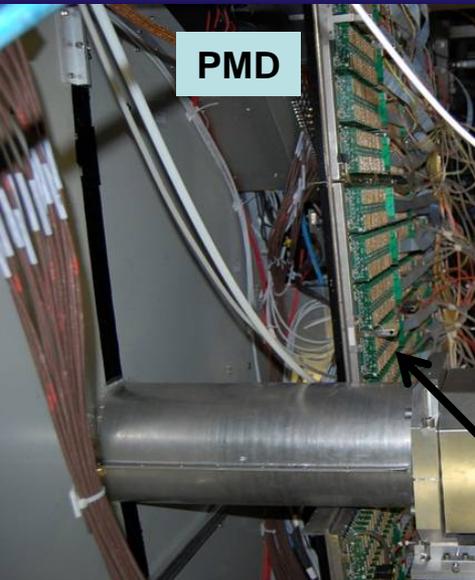


Juillet 2002 : retour au CERN



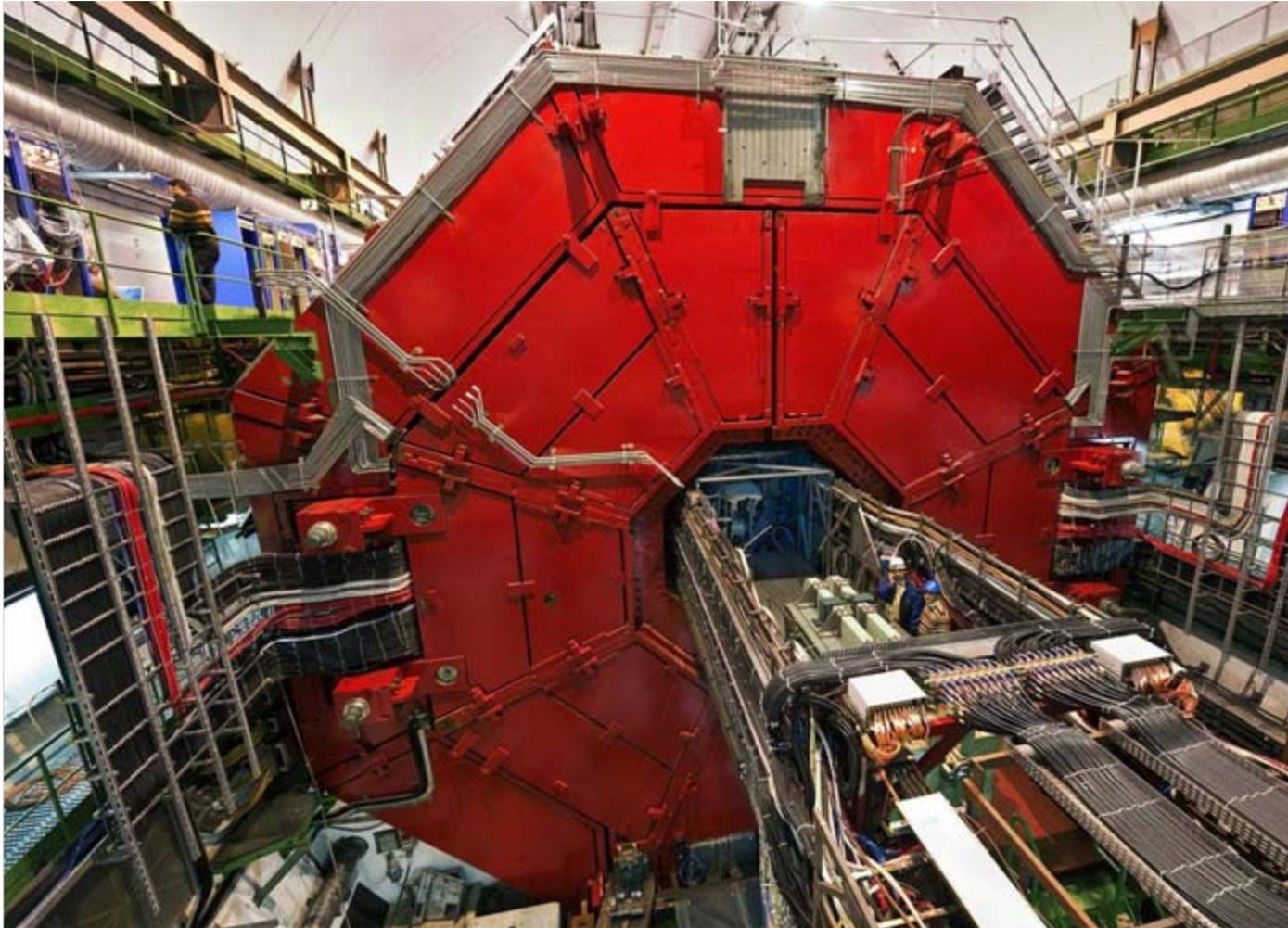
Première publi

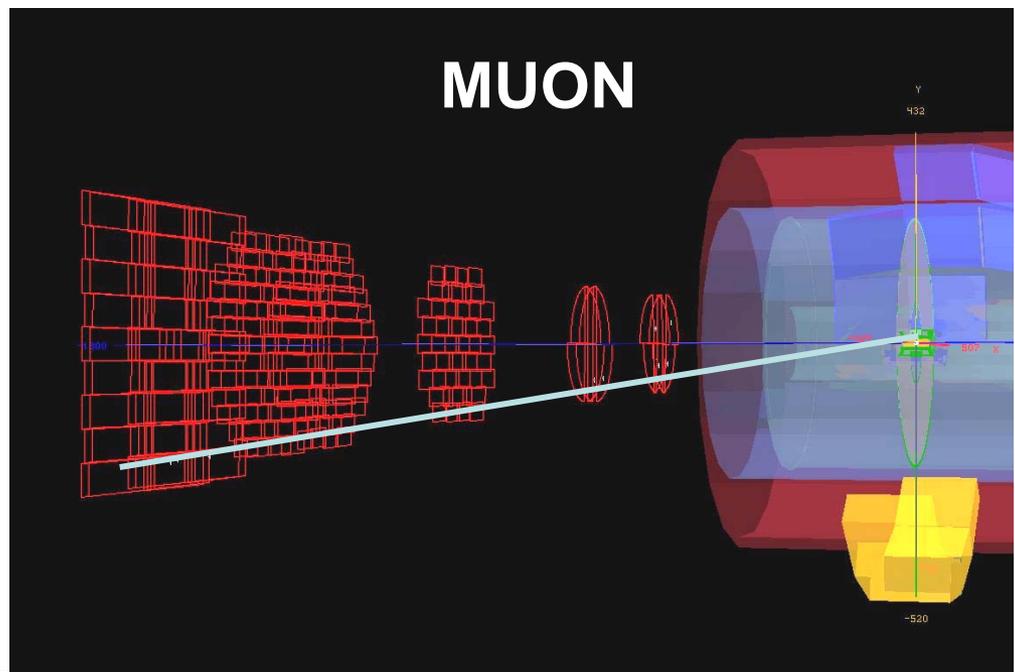
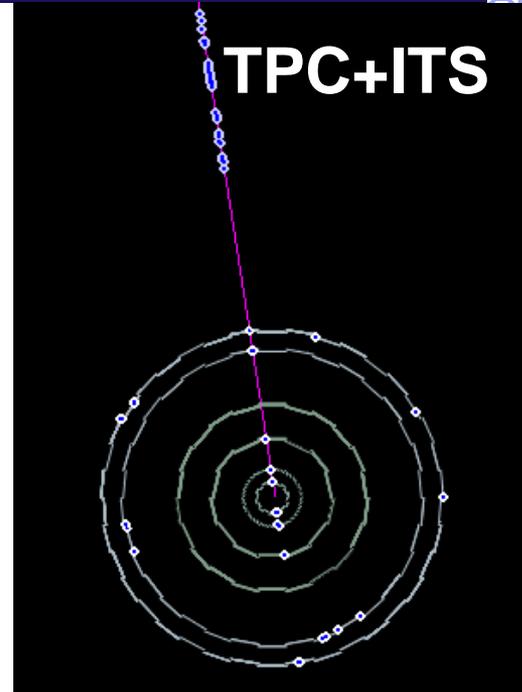
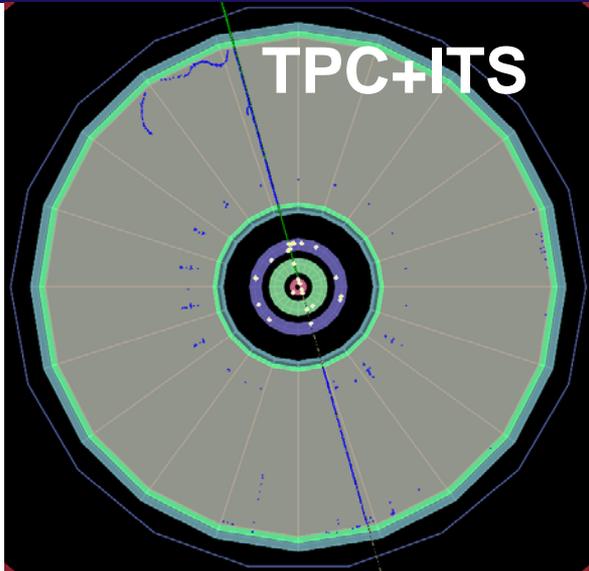
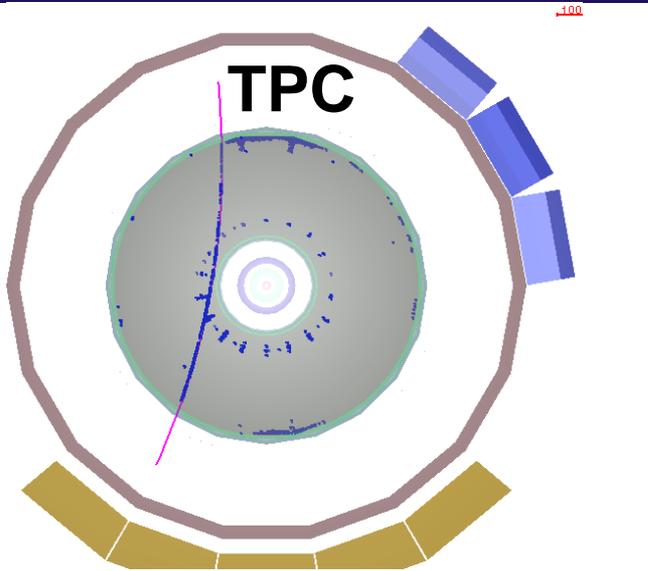
Installation des autres détecteurs

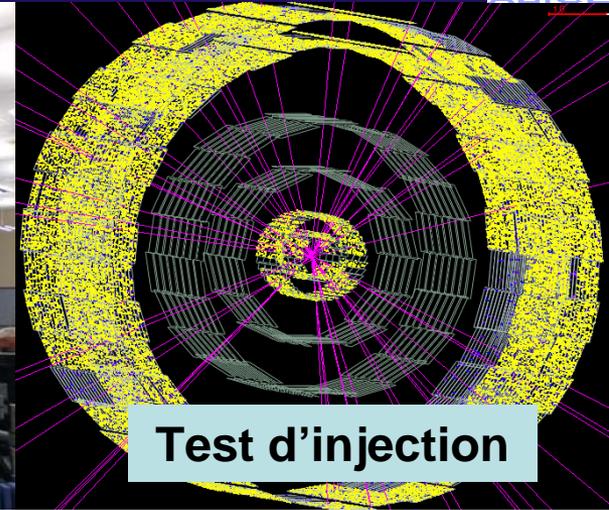
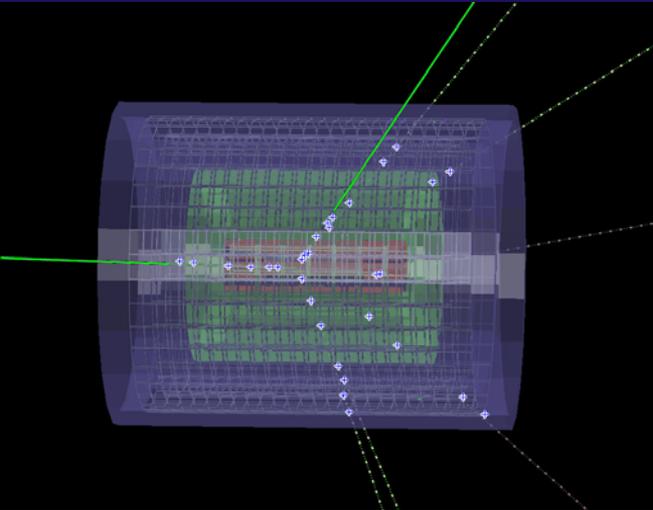




**ITS, TPC, MUON, TOF, HMPID, T0, V0, FMD, PMD, ZDC,
ACCORDE, 1/5 PHOS, 4/18 TRD, 0/6 EMCal**

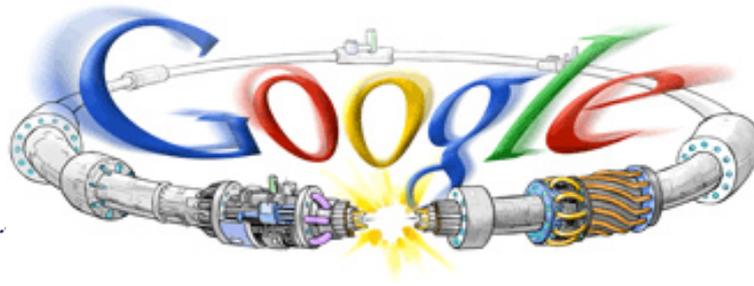
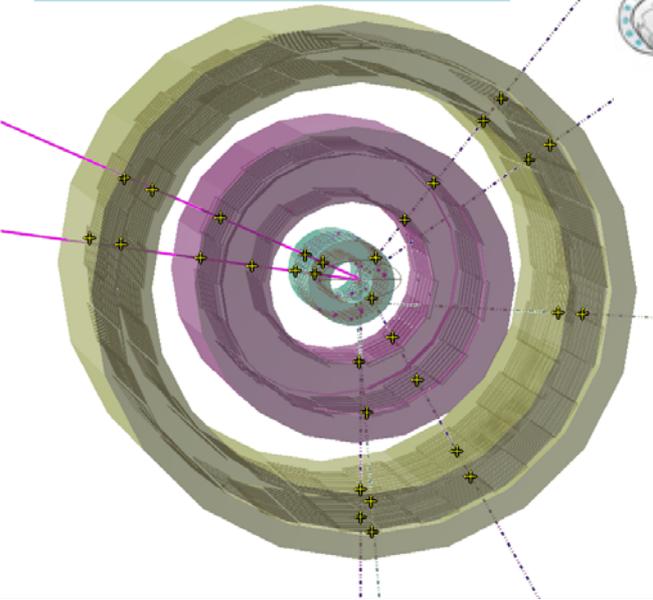




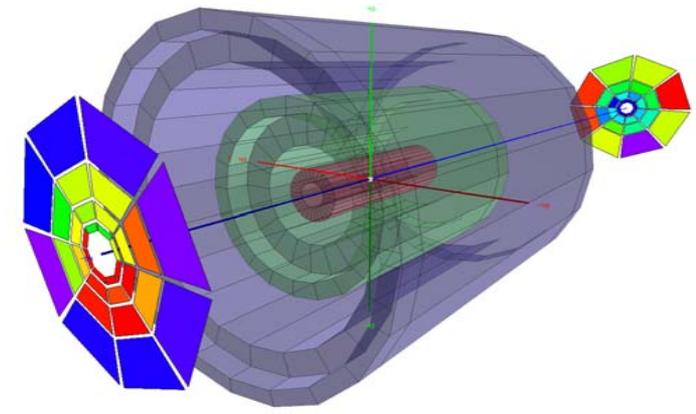
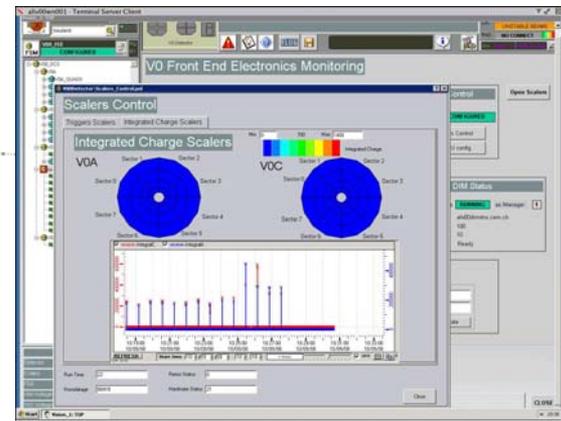


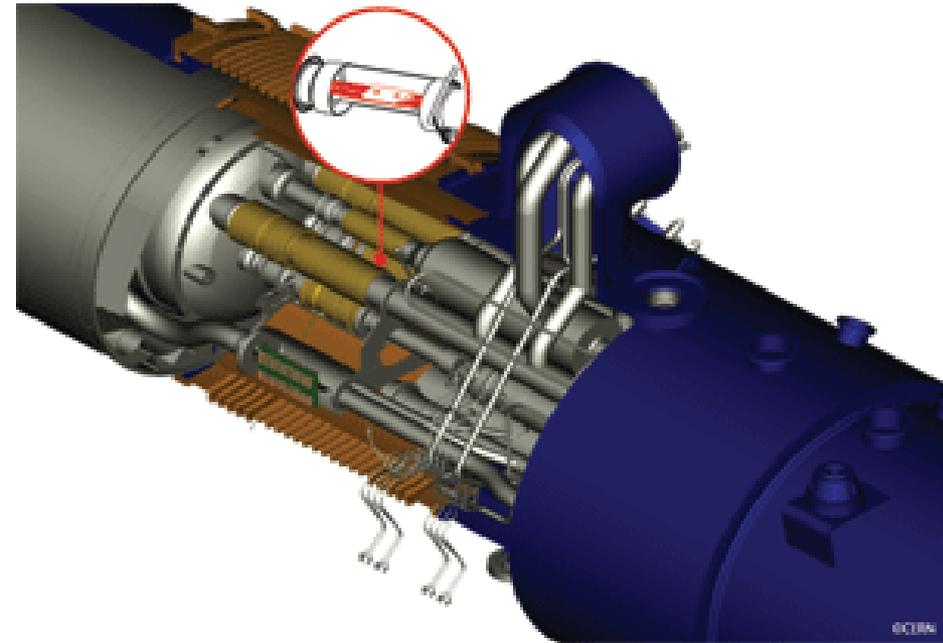
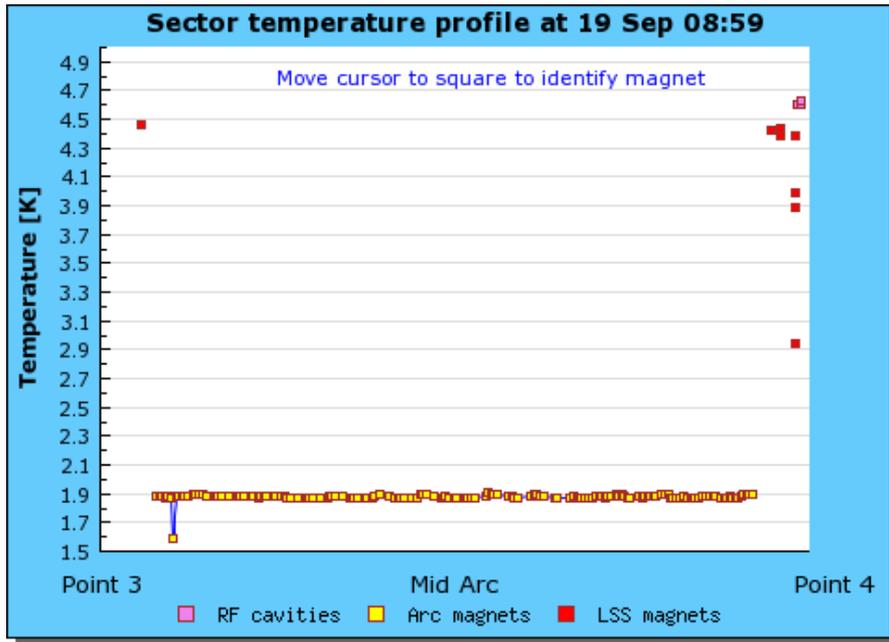
Test d'injection

Collision faisceau-gaz dans l'ITS



Les faisceaux dans les VO





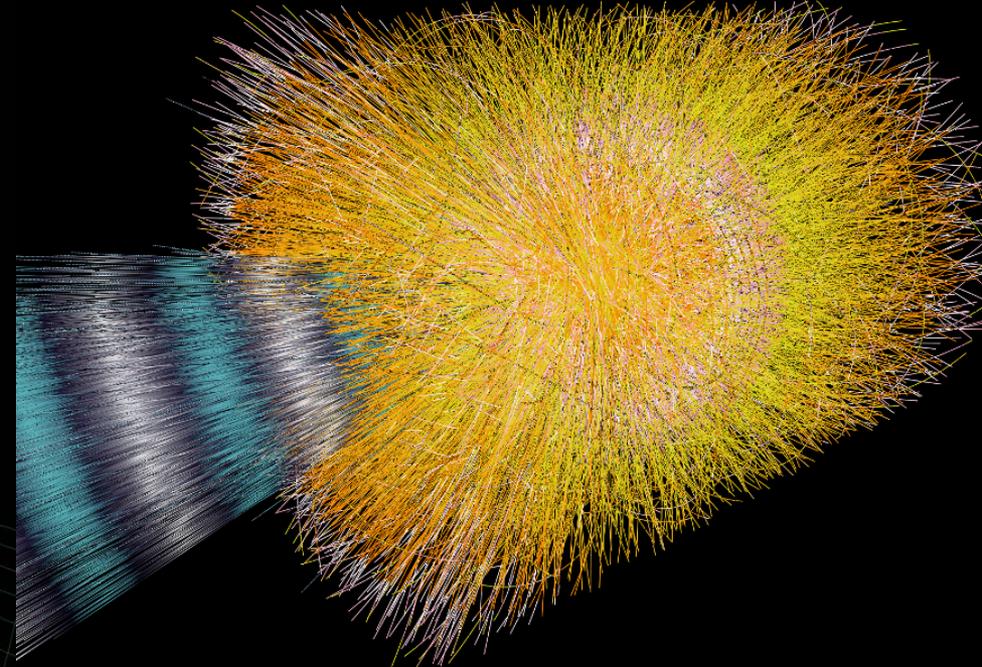
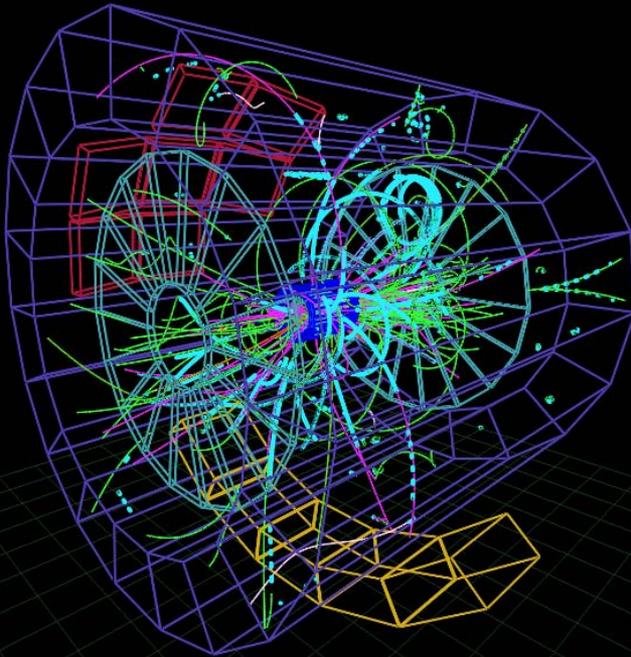
**températures secteur 34
vendredi 19 septembre 2008**

**connexion électrique défectueuse
entre 2 aimants de l'accélérateur**

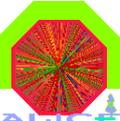
- détériorations mécaniques et fuite d'hélium importante
- arrêt de la machine jusqu'au (et pendant le) shutdown hivernal
- réparations en cours et reprise des activités au printemps 2009

p+p à 14 TeV

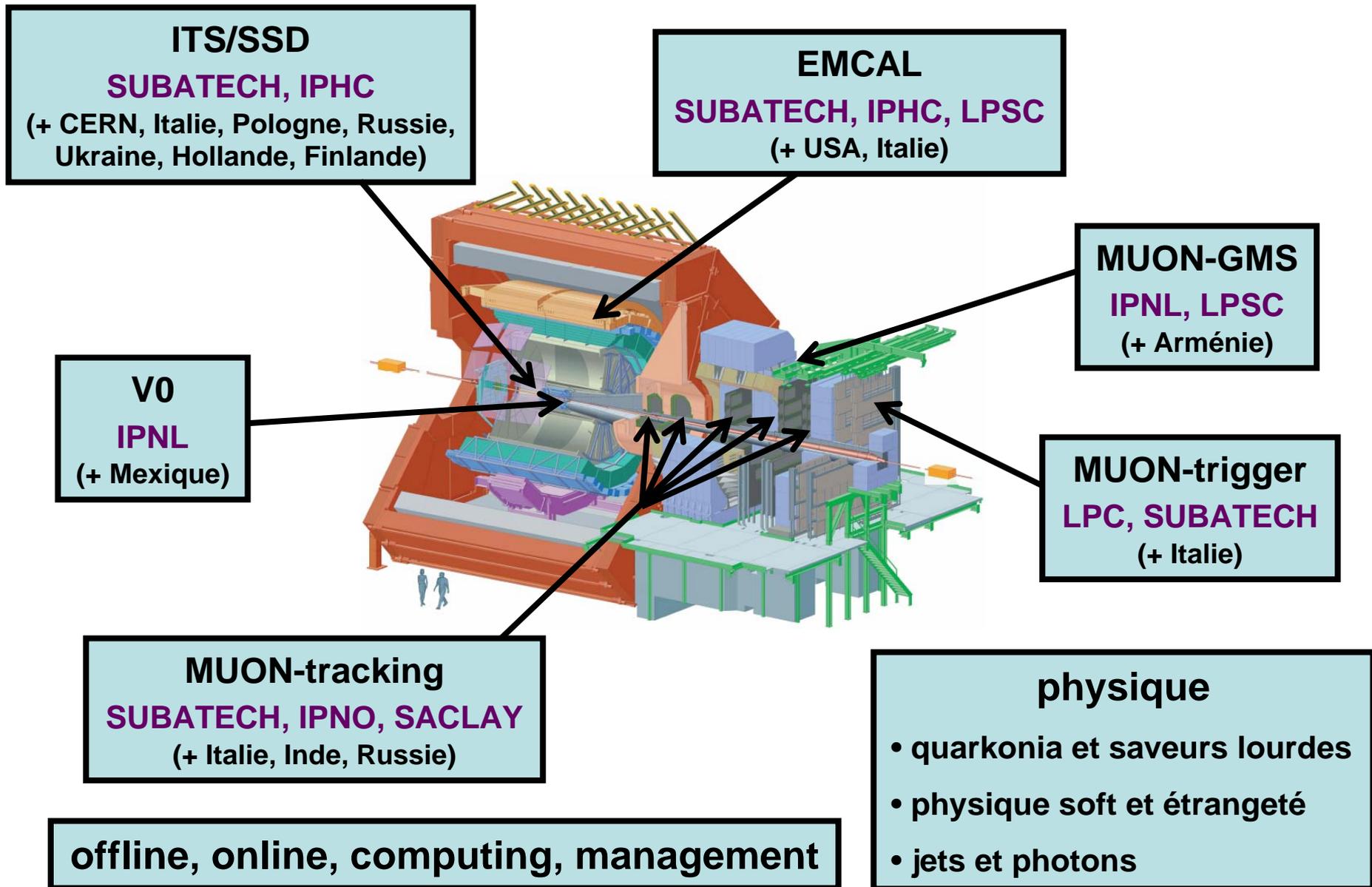
Pb+Pb à 5.5 TeV



Participation française à ALICE (alice-



- 7 laboratoires
- 47 physiciens (~ 24.4 FTE)
- 86 pers. tech. (~ 54.4 FTE)
- budget ~ 7 MEuros

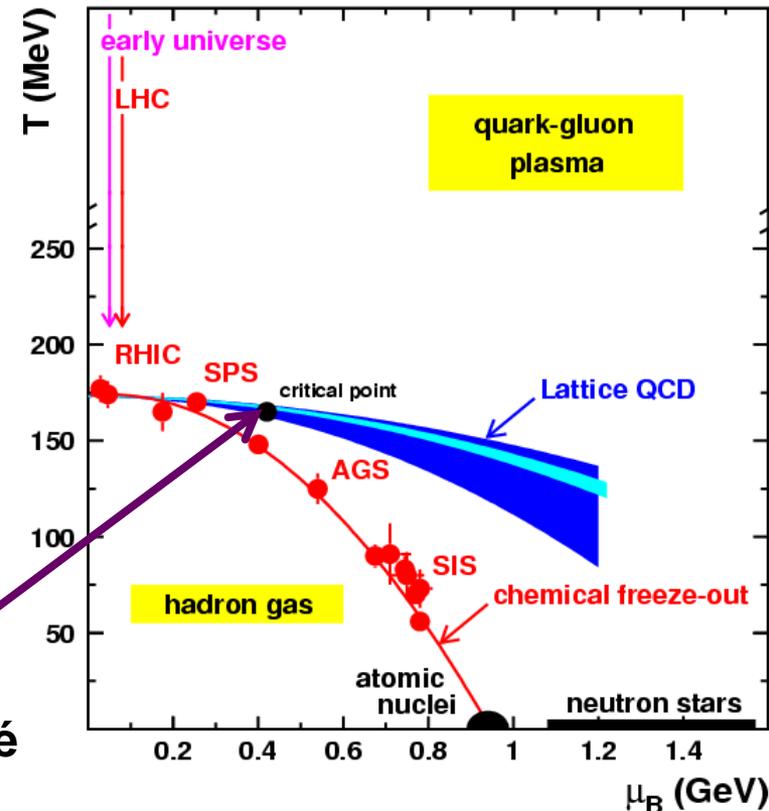


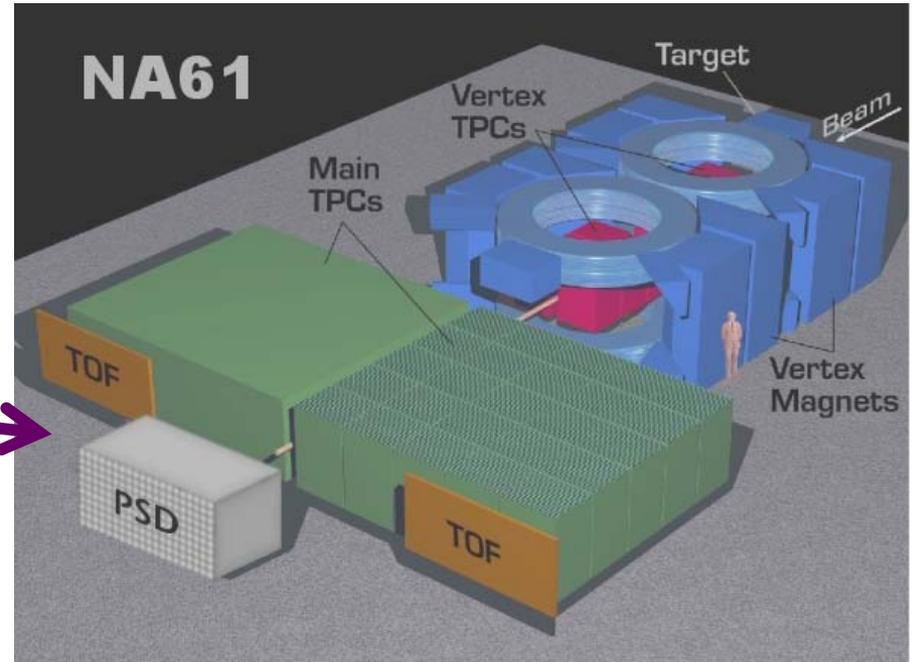
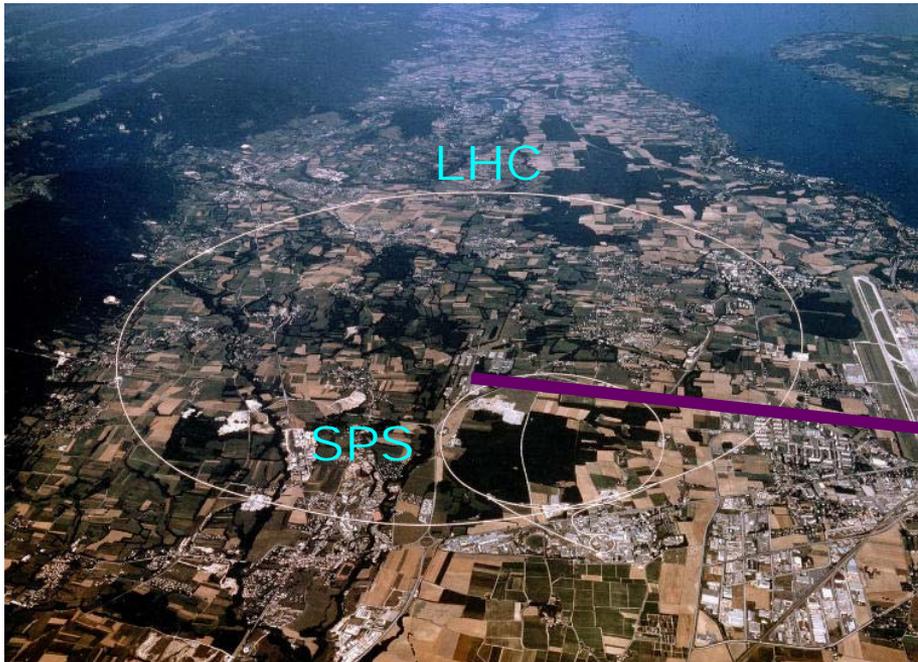
Le futur des ions lourds hors LHC

- STAR & PHENIX @ RHIC-II (BNL, Brookhaven, USA)
- NA61 @ SPS (CERN, Genève, Suisse)
- CBM @ FAIR (GSI, Darmstadt, Allemagne)
- MPD @ NICA (JINR, Dubna, Russie)

points communs :

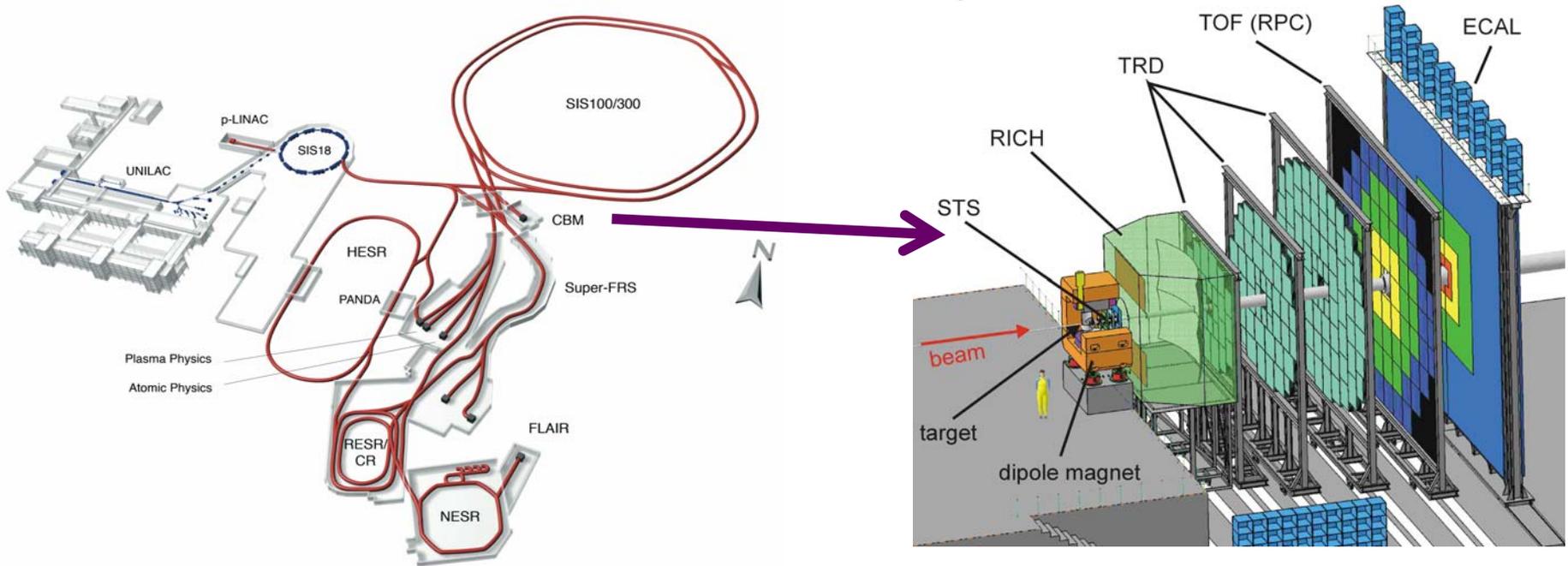
- énergies similaires & plus faibles que celles du LHC (forcément!)
- même buts physiques :
 - recherche & étude du point critique
 - propriétés des hadrons à haute densité





- machine existante (cible fixe) : $5 < \sqrt{s} < 17$ GeV
- upgrade détecteur : beam pipe, PSD, ToF, readout TPC
- taille collaboration : 120 personnes, 25 instituts, 15 pays
- démarrage ~ 2008?
- labos français engagés : LPNHE (2 personnes sur prog. neutrinos)

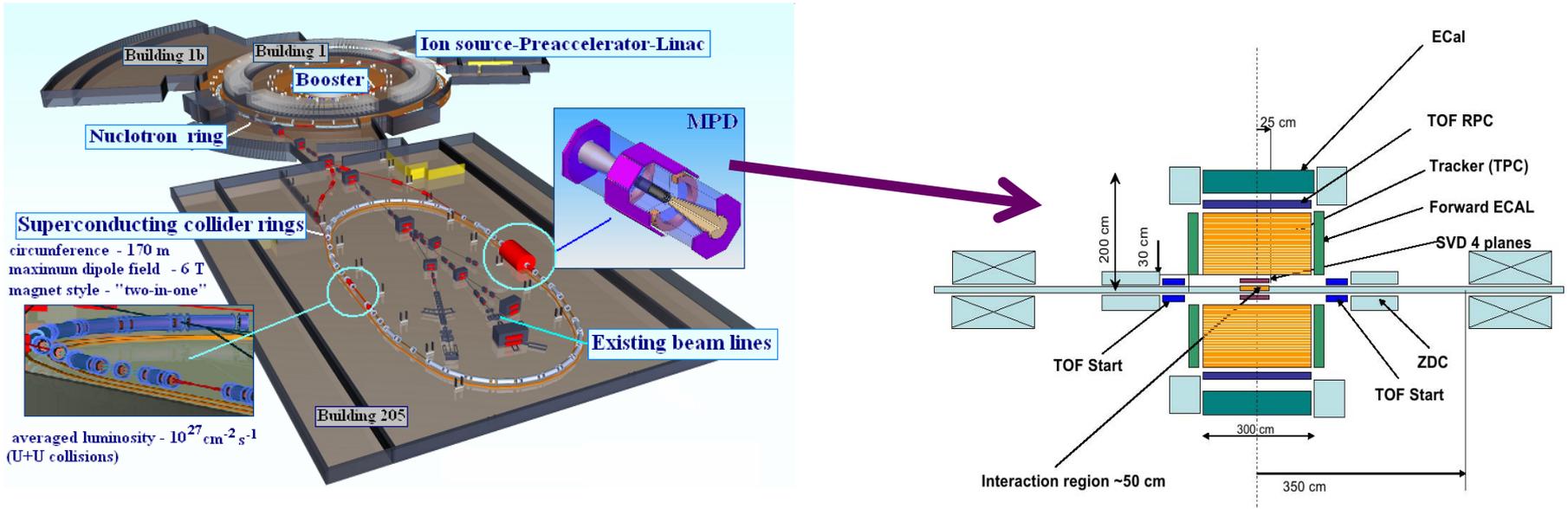
Compressed Baryonic Matter experiment @ Facility for Anti-protons and Ion Research, GSI-Darmstadt, Allemagne



- nouvelle machine (cible fixe) : $4 < \sqrt{s} < 9$ GeV
- nouveau détecteur : VTX, RICH, TRD, MUCH, EMCal, ToF, ZDC
- taille collaboration : 400 personnes, 52 instituts, 15 pays
- démarrage ~ 2015?
- labos français engagés : IPHC (1 physicien, 2-3 thèses)

FAIR = 1.2 Milliards d'Euros!

Multi Purpose Detector @ Nuclotron-based Ion Collider fAcility, JINR-Dubna, Russie



- nouvelle machine (collisionneur) : $4 < \sqrt{s} < 9 \text{ GeV}$
- nouveau détecteur : VTX, TPC, EMCal, ToF, ZDC
- taille collaboration : "groupe de reflexion de 9 personnes du JINR-Dubna"
- démarrage ~ 2013?
- labos français engagés : aucun

- **Le déconfinement des hadrons en un Plasma de Quarks et de Gluons est une prédiction de la ChromoDynamique Quantique**
- **Le QGP aurait existé quelques micro-secondes après le Big Bang et pourrait constituer le coeur des étoiles à neutrons**
- **Les collisions entre ions lourds sont le seul moyen dont on dispose pour tenter de recréer le QGP en laboratoire**
- **Les résultats expérimentaux collectés au SPS et à RHIC indiquent la formation d'un système très chaud & dense dont les caractéristiques sont compatibles avec le comportement attendu d'un QGP**
- **Le LHC offre un environnement totalement nouveau et des conditions expérimentales beaucoup plus favorables pour la formation et l'étude du QGP**
- **Hors LHC, 4 expériences traqueront le point critique du diagramme de phase**