

Les collisions d'ions lourds ultra-relativistes

Bruno ESPAGNON

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Université Paris-Sud

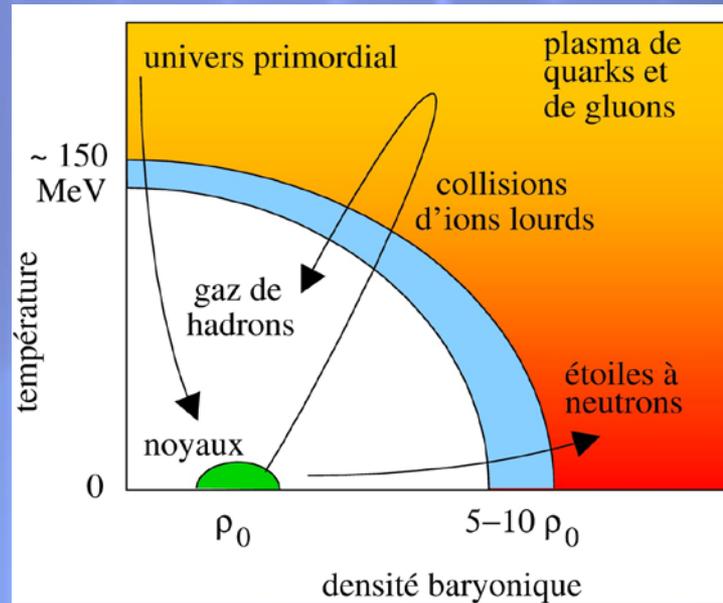


2^{ème} partie

Recherche expérimentale
du QGP

Résumé de l'épisode précédent...

- Les hadrons sont des objets extrêmement complexes
- 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, a priori, de produire le QGP
- Environnement extrêmement complexe, interprétations difficiles
- Plusieurs signatures du QGP prédites par les approches théoriques



PLAN :

- ✓ Matière nucléaire et QGP.
 - ✓ Notions fondamentales
 - ✓ QGP et collisions d'ions lourds ultra-relativistes
 - ✓ Sonder le QGP
- ✓ Recherche expérimentale du QGP
 - ✓ Les accélérateurs
 - ✓ Expériences passées et présentes.
 - ✓ Quels résultats ? Quelques résultats...
- ✓ De la physique au détecteur
 - ✓ Un exemple concret avec le spectromètre à muons d'ALICE
 - ✓ La vie d'une expérience sur collisionneur.
 - ✓ Le futur ?

Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes

Accélérateurs pour les ions lourds ultra-relativistes : CERN



Le SPS (cible fixe) :

- 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

Le LHC (collisionneur) :

profondeur moyenne : 100 mètres, circonférence : 27 km, 9593 aimants

énergie de faisceau : 2,75/7 TeV Pb/proton (= 99.9999991 % de la vitesse de la lumière)

2808 paquets, 10^{11} protons/paquet, 11245 tours/s, 600 millions de collisions/s, 4 détecteurs

Energie du LHC

Énergie pour 1 faisceau pp = 360 MJ

= porte avion de 20000 tonnes à 20 km/h

... ou bien énergie suffisante pour faire fondre
500 kg de cuivre

... ou 77,4 kg de TNT

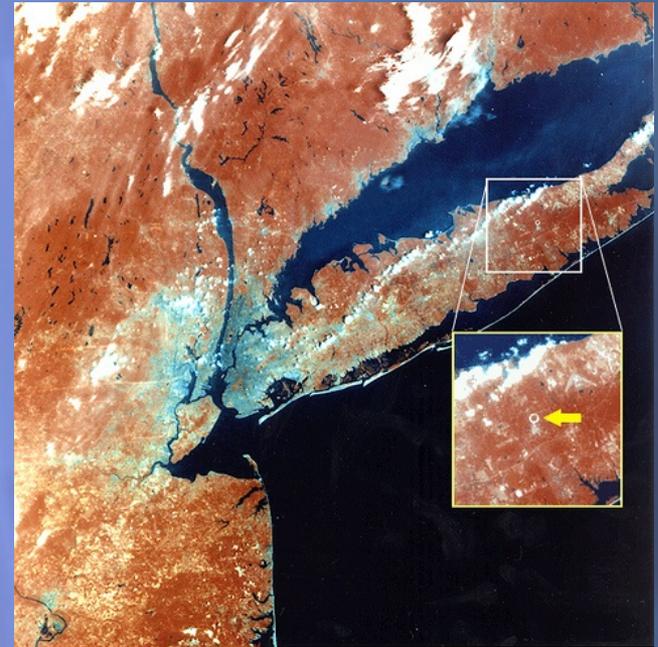
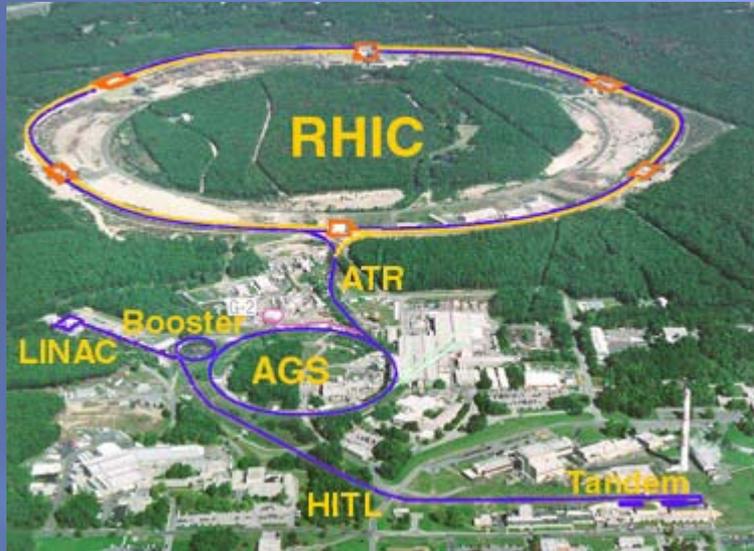
Bref ~ 280 fois l'énergie du Tevatron



www.netmarine.net

Photo © Luc Beneteau

Accélérateurs pour les ions lourds ultra-relativistes : Brookhaven National Laboratory



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 3-100 AGeV ($L = 2 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 6 points d'interaction, 4 expériences ions lourds, mise en service : 2000

Comparaison de quelques accélérateurs pour les ions lourds ultra-relativistes

SPS@CERN - Cible fixe - années 80-90
pp, pA, SU, OU, InIn, PbPb

$\sqrt{s} \approx 20 \text{ GeV}$

"Seulement" $\sim \times 10$ pour
 $\varepsilon, V, \tau_{QGP}$

$\times 10$

RHIC@BNL - Collisionneur - 2000-...
dAu, CuCu, AuAu, UU

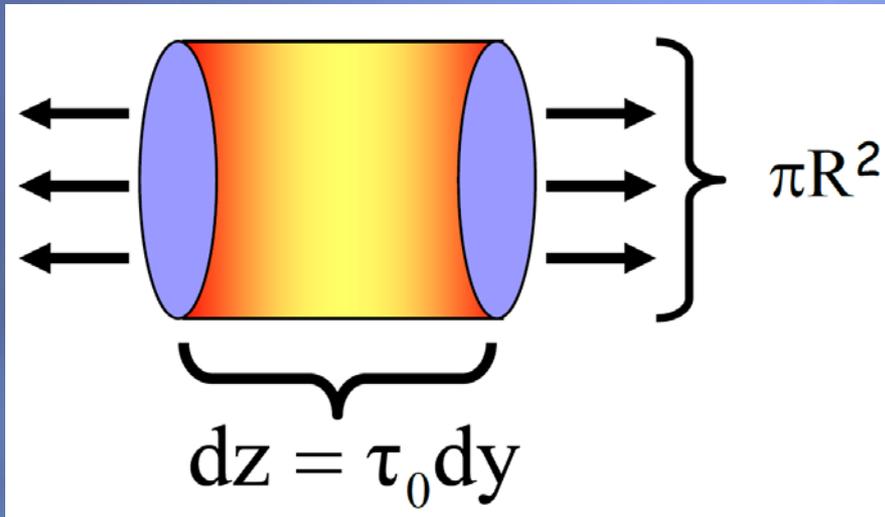
$\sqrt{s} = 7 \dots 200 \text{ GeV}$

$\times \sim 25$

LHC@CERN - Collisionneur - 2010-...
pp, pPb, PbPb

$\sqrt{s} = 2,76 \dots 5,02 \text{ TeV}$

Densité d'énergie atteinte dans les collisions



Estimation de la densité d'énergie atteinte à partir de la mesure de l'énergie transverse E_T des particules

Scénario d'expansion de Bjorken

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

Modélisation simpliste qui de plus dépend de τ_0 temps de formation du plasma.

y = rapidité : équivalent de la vitesse longitudinale en régime non relativiste

Comparaison de quelques accélérateurs pour les ions lourds ultra-relativistes

	SPS	RHIC	LHC
$s^{1/2}(\text{GeV})$ (max)	19	200	5500
$dN_{ch}/d\eta$	400	600	1600 (à 2,76 TeV)
τ_v			10 (à 2,76 TeV)
ε (GeV/fm ³) $\tau_{0=1\text{fm}/c}$	2,5	5	15
τ_0 (fm/c)	~1	~0,5	<0,2

Matière sous des conditions extrêmes

$\varepsilon > 15 \text{ GeV/fm}^3$

~ 50 fois le cœur d'une étoile à neutrons
(~30 milliards de tonnes/cm³)

τ_v ~10 protons confinés dans le volume d'un seul !

Température $> 2 \times 10^{12} \text{ }^\circ\text{K}$

$> 100,000$ fois la température au centre du soleil !

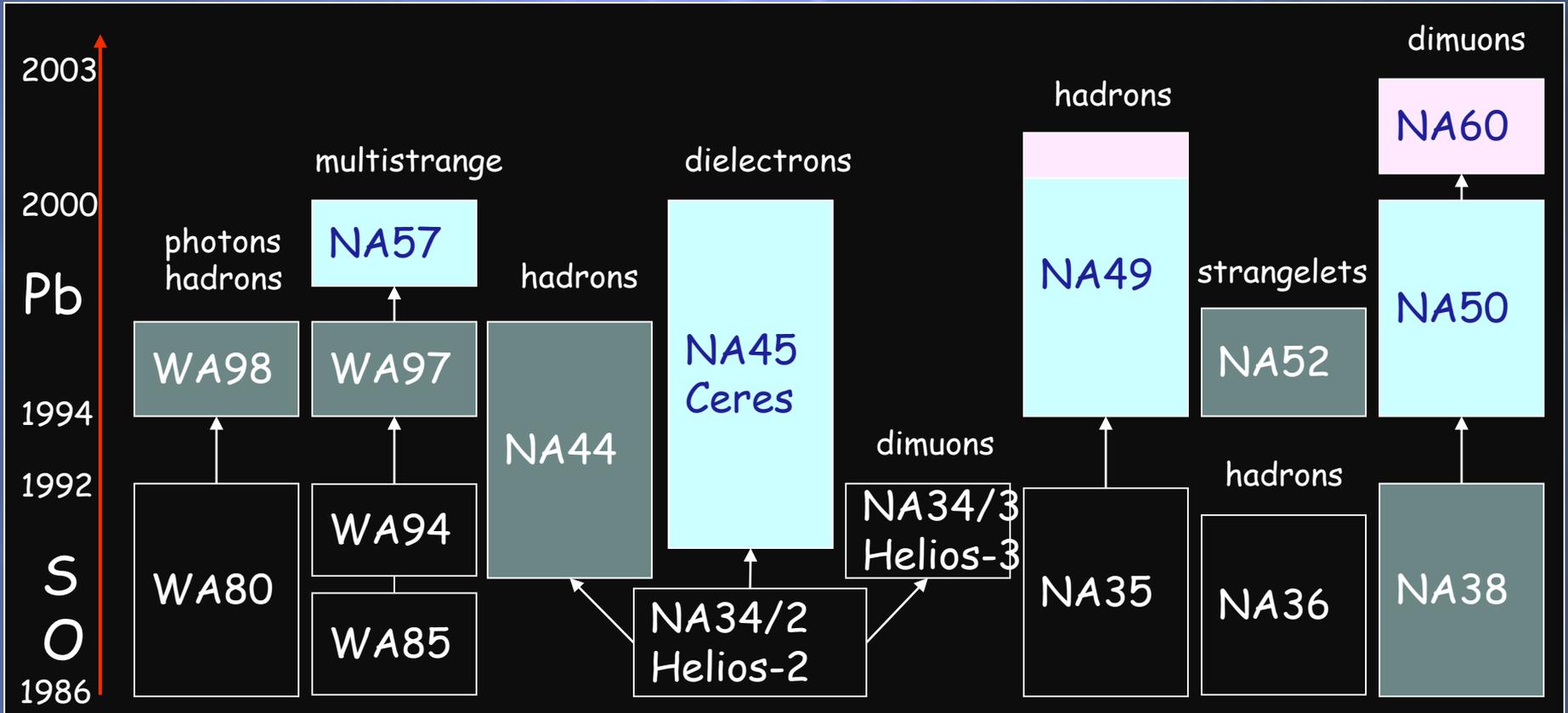
$1 \text{ fm}/c \sim 3.10^{-24} \text{ s}$

Les expériences passées et présentes

Les expériences ions lourds du SPS

- 1986 - 1987 : Oxygène @ 60 & 200 GeV/nucléon
- 1987 - 1992 : Soufre @ 200 GeV/nucléon
- 1994 - 2000 : Plomb @ 40, 80 & 158 GeV/nucléon
- 2002 - 2003 : Indium et plomb @ 158 GeV/nucléon
- Densité d'énergie de 1 à 2,5 GeV/fm³ ($\tau_0=1\text{fm}/c$)

Et aussi faisceau de protons comme références dans les collisions p-A

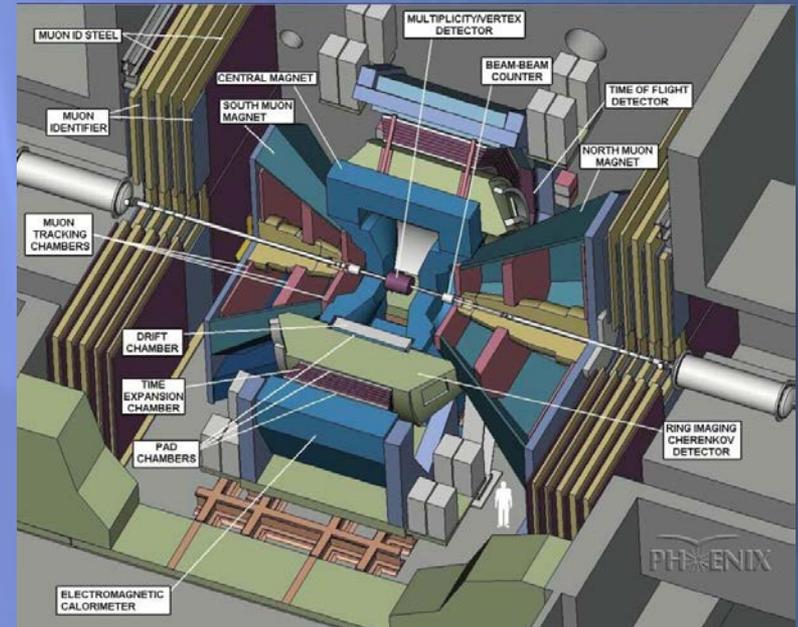
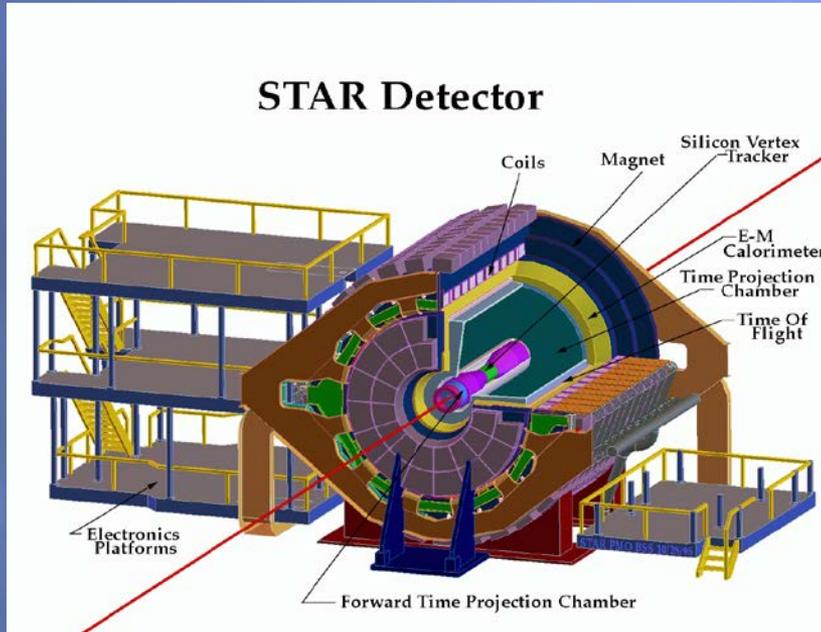


Les expériences ions lourds du RHIC

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
09	2008-2009	p+p	200 / 500
10	2009-2010	Au+Au	200 / 62 / 39 / 11,5 / 7,7
11	2011	Au+Au p+p	200 / 27 / 20 500
12	2012	Cu+Au U+U p+p	200 193 500 / 200
13	2013	p+p	500
14	2014	Au+Au h+Au	200/15 ~ 200
15	2015	p+p (polarisé) P+Au, p+Al (polarisé)	~200
16	2016	Au+Au d+Au	200 ~200, 62, 20, 40
17	2017	p+p (polarisé) Au+Au	500 54

Les détecteurs des expériences RHIC

Expériences plus généralistes sur collisionneur



STAR
620 collaborateurs, 63 instituts, 13 pays
hadrons

PHENIX
430 collaborateurs, 56 instituts, 12 pays
leptons, photons

Les expériences ions lourds du LHC

Expériences sur collisionneur, seulement 1 mois de prise de données dédiées aux ions lourds.

Démarrage du LHC fin 2009 en pp

Premiers faisceaux d'ions lourds Pb+Pb fin 2010 à $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ TeV

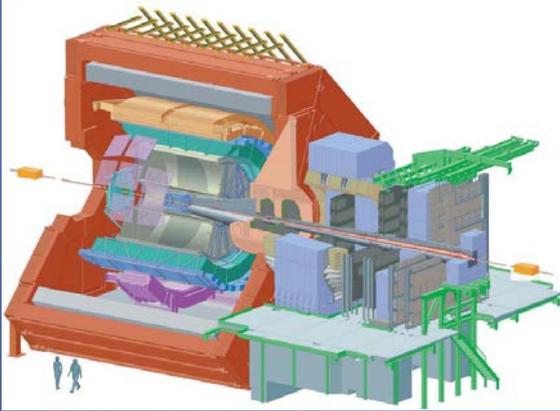
Premier faisceau p+Pb début 2013 à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV

Augmentation de l'énergie :

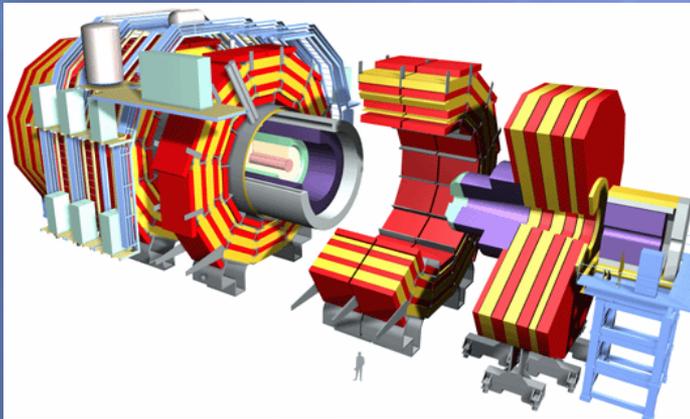
Collisions pp à $\sqrt{s} = 13$ TeV en 2015

Collisions Pb+Pb fin 2015 à $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV

Les détecteurs des expériences LHC



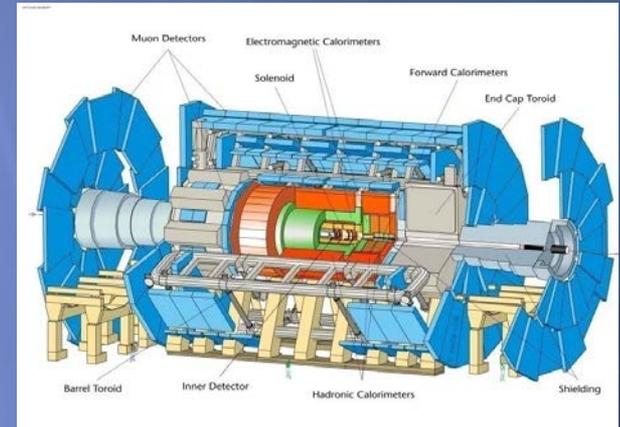
ALICE : l'expérience dédiée ions lourds
1800 signataires, 38 pays, 182 instituts



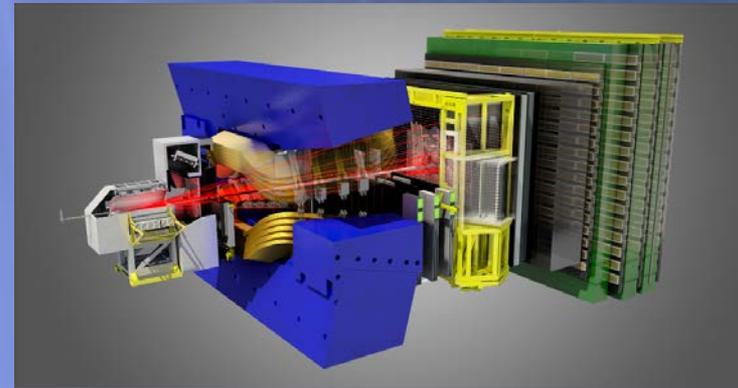
CMS : solide programme ions lourds
3000 signataires, 40 pays, 200 instituts

Bruno Espagnon

De la physique aux données
Ecole IN2P3



ATLAS : lettre d'intention ions lourds (2004)
Plus de 3000 signataires, 38 pays, 182 instituts



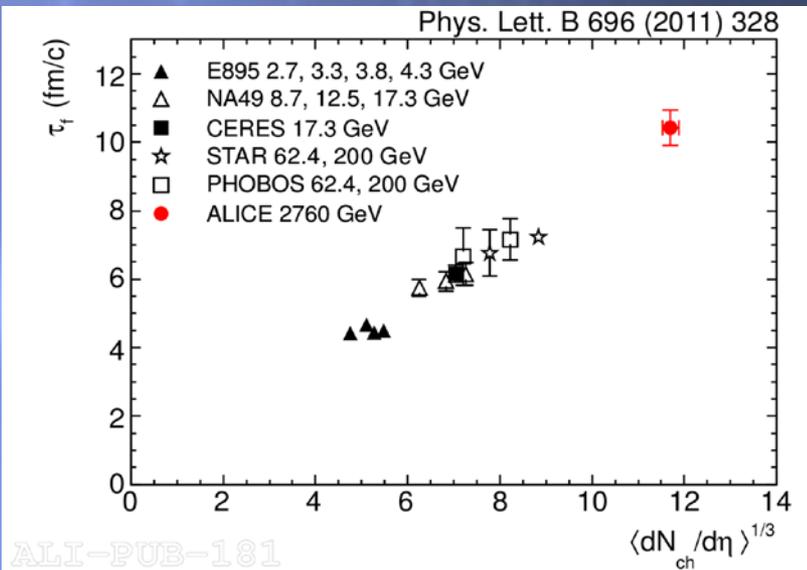
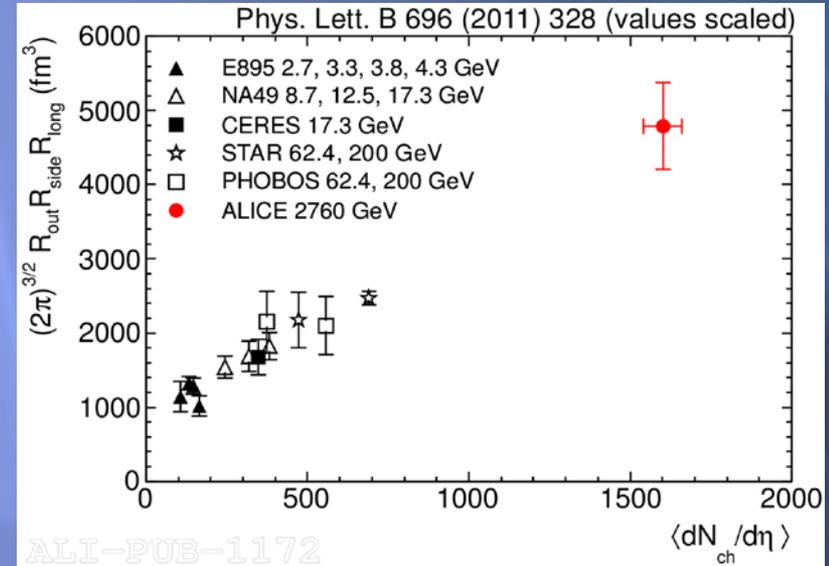
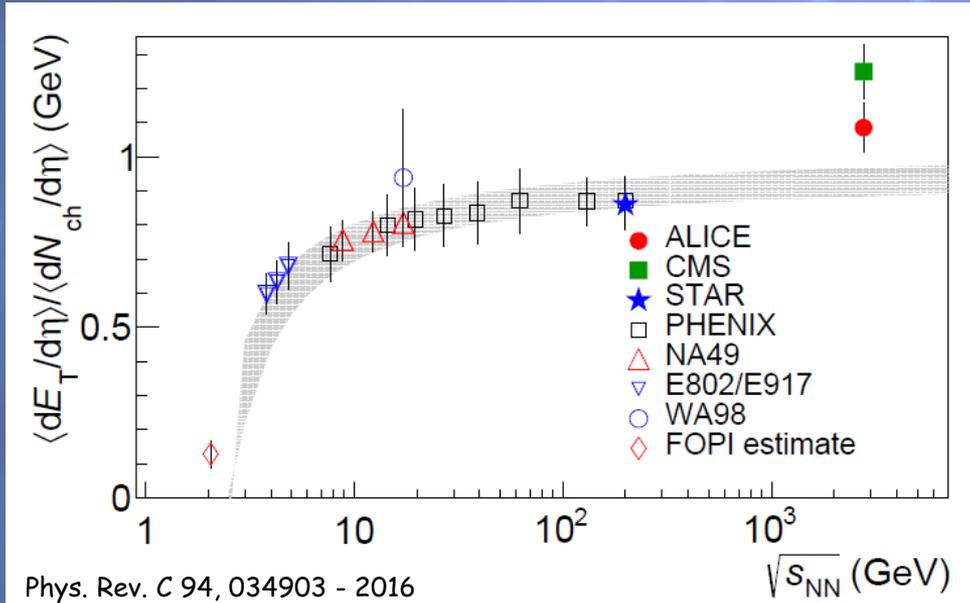
LHCb : programme ions lourds (p-Pb)
700 signataires, 15 pays, 52 instituts

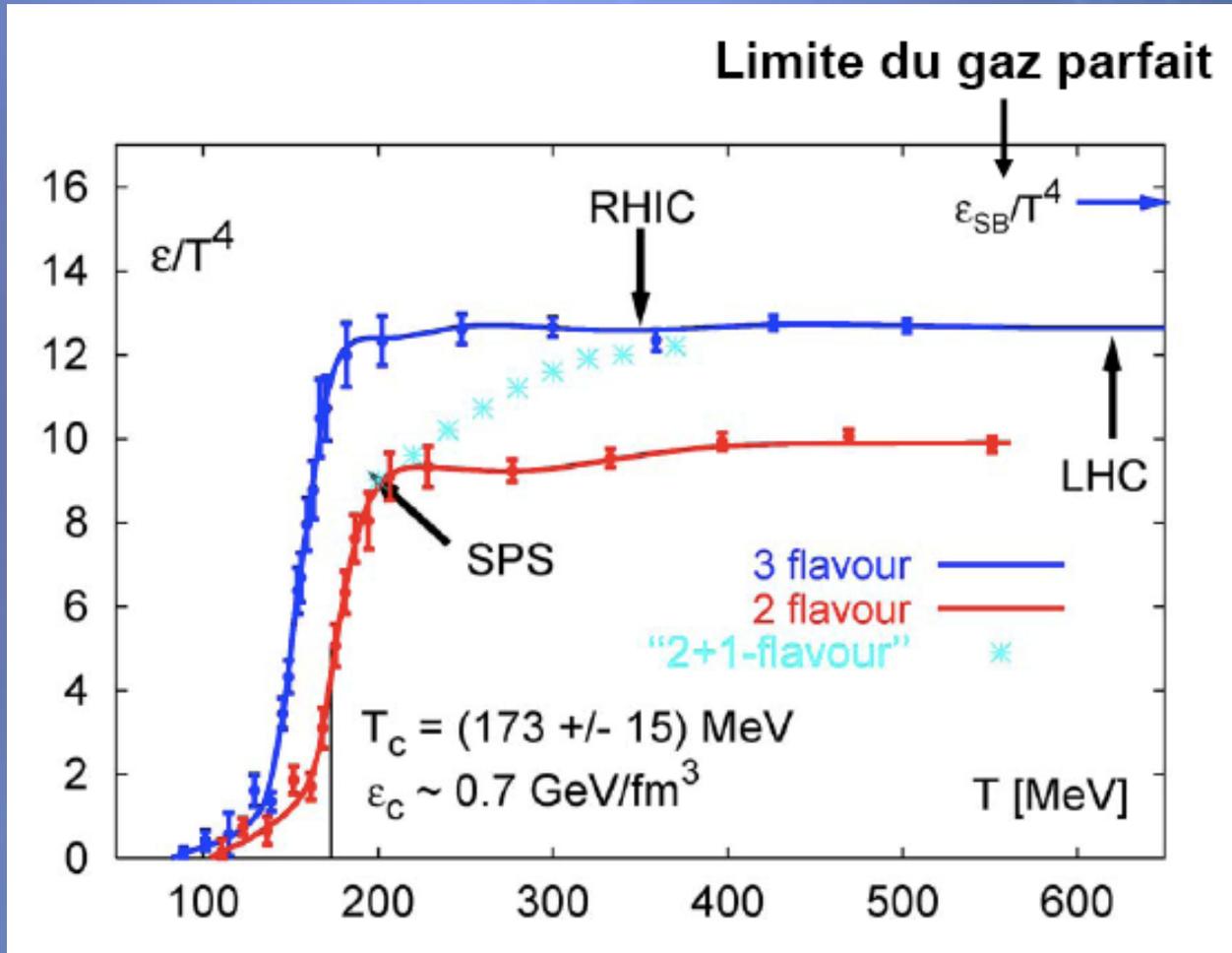
Quels résultats ?
Quelques résultats...

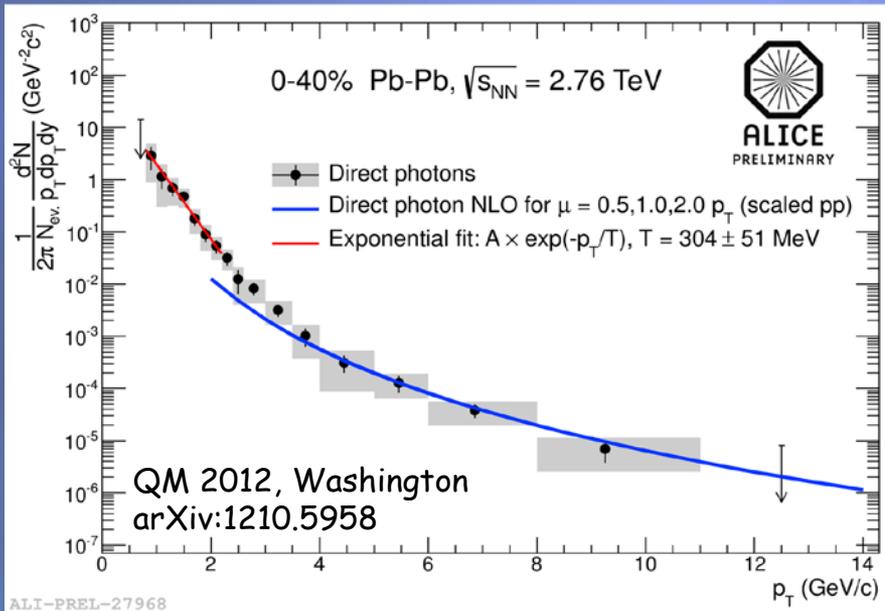
La matière QCD produite @ LHC en 4 plots...

Différence significative par rapport au RHIC (200 GeV)

- Densité d'énergie $\approx 2,3 \times$ RHIC
- Taille : 2 fois / RHIC ($\sim 2x$ volume noyau Pb)
- Temps de vie : 40% plus grand / RHIC ($\sim 3 \cdot 10^{-23}$ s)







La matière QCD la plus chaude, la plus volumineuse et qui a le plus grand temps de vie.

Dans les Pb-Pb collisions les plus centrales à $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, fit exponentiel pour $p_T < 2,2$ GeV/c

penste $\rightarrow T = 297 \pm 12 \pm 41$ MeV

(arXiv:1509.07324v2 - 2016) = la plus haute

température jamais mesurée (pour 0-20%)

(PHENIX : $T = 239 \pm 25 \pm 7$ MeV pour 0-20%

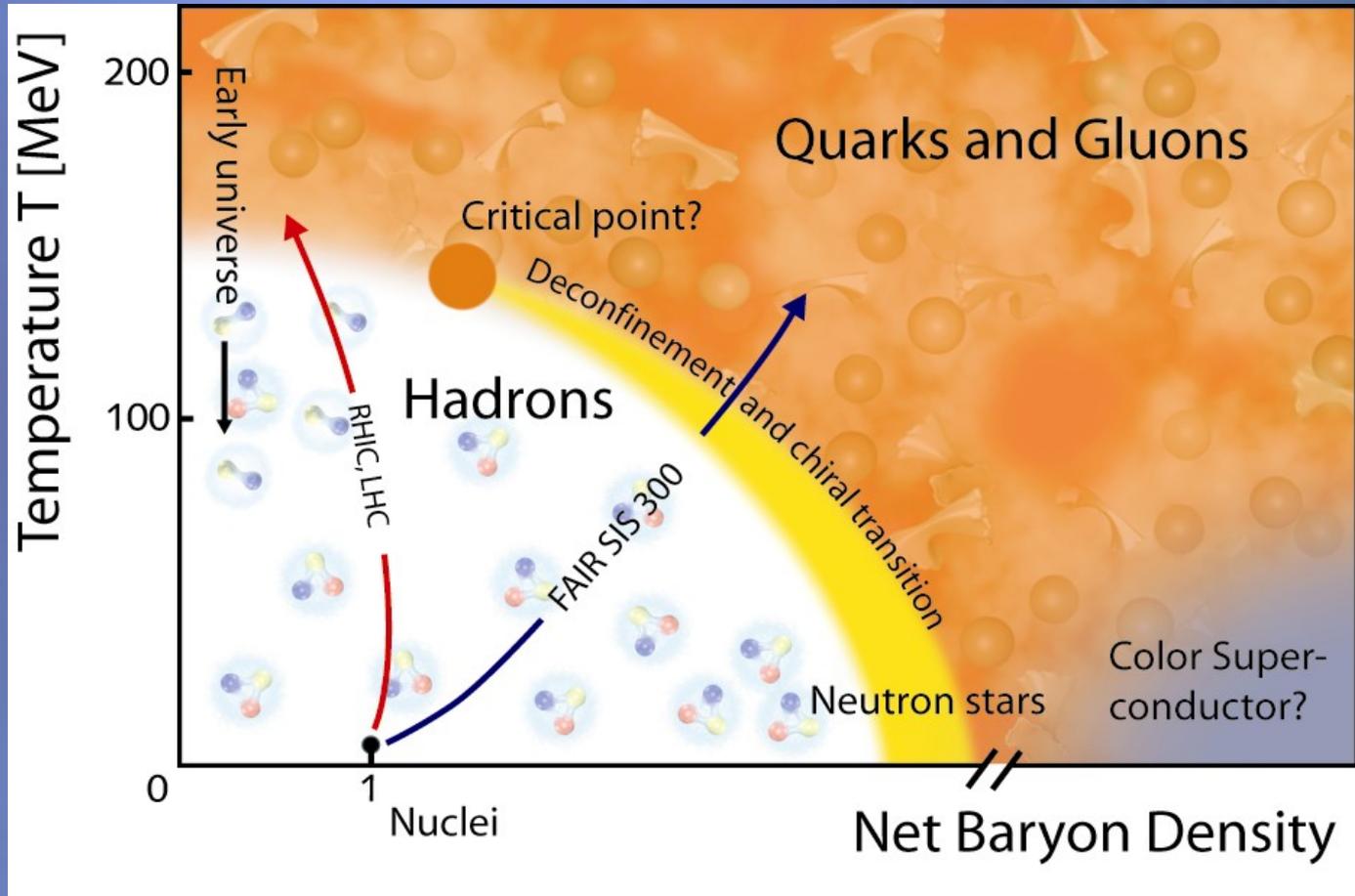
Au-Au à $\sqrt{s_{NN}} = 0,2$ TeV)

2 fois la température critique.

Densité d'énergie estimée à $12 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ (5% collisions les plus centrales) et à $21 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ au cœur de la collisions pour un temps de formation de $1 \text{ fm}/c$

Phys. Rev. C 94, 034903 - 2016

La matière QCD produite @ LHC en 4 plots...

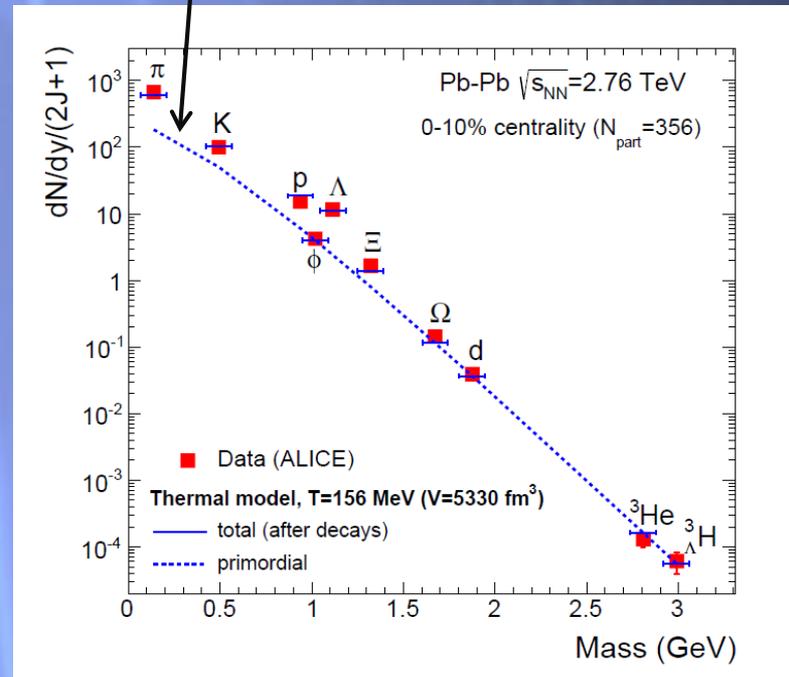
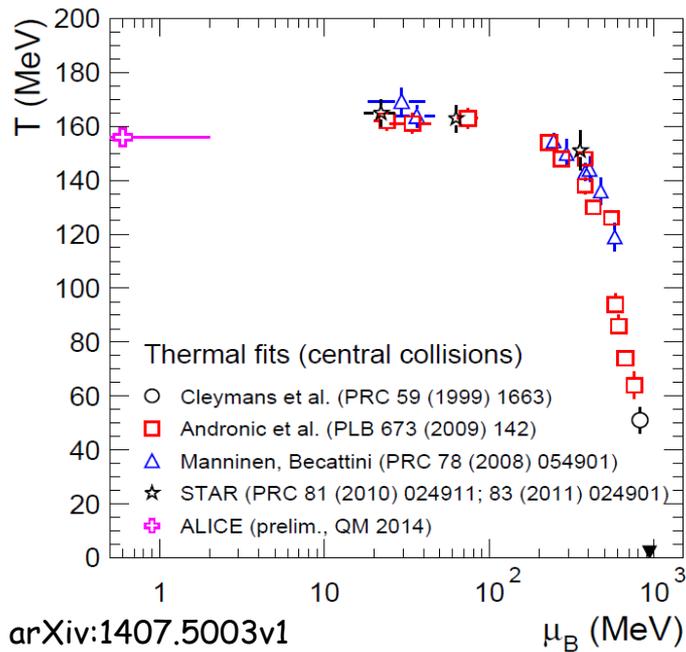


Coordonnées du freeze-out dans le diagramme de phase

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

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

SPS : $T=160$ MeV, $\mu_B = 240$ MeV
 RHIC : $T=162$ MeV, $\mu_B = 24$ MeV
 LHC : $T=156$ MeV, $\mu_B = 0,7$ MeV



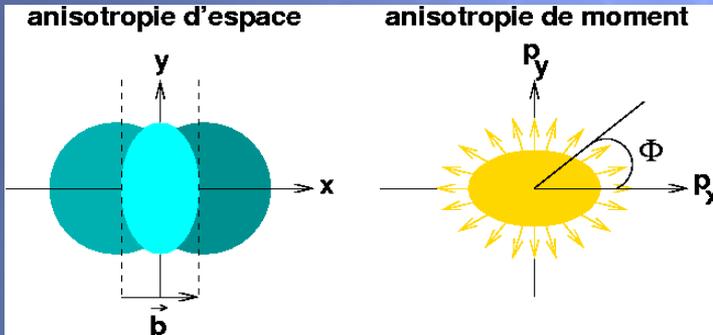
Le flow



Le flow

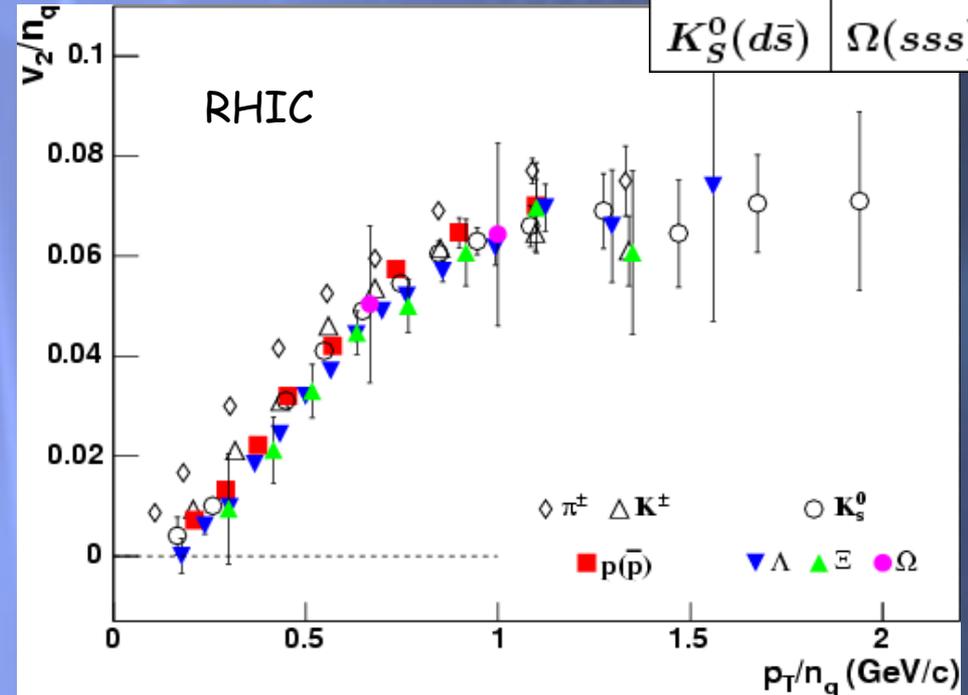
Hydrodynamique : le flow dépend des conditions initiales et des propriétés du fluide

Etude au SPS / RHIC / LHC



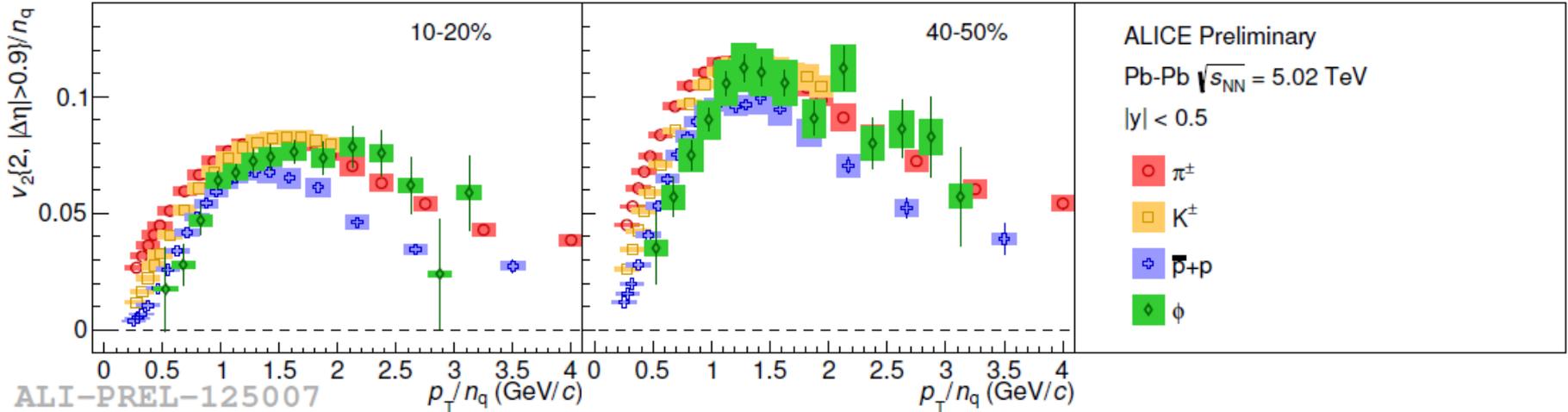
Après normalisation au nombre de quarks, le flow des particules produites est indépendant du nombre et de la nature des quarks qu'elles contiennent
 ⇒ la compression initiale du système a lieu au niveau des quarks et non pas au niveau des hadrons

$\pi^+(u\bar{d})$	$p(uud)$
$\pi^-(\bar{u}d)$	$\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})$
$K^+(u\bar{s})$	$\Lambda(uds)$
$K^-(\bar{u}s)$	$\Xi(dss)$
$K_S^0(d\bar{s})$	$\Omega(sss)$



Le flow

La normalisation par les quarks constituants est approximative aux énergies du LHC.

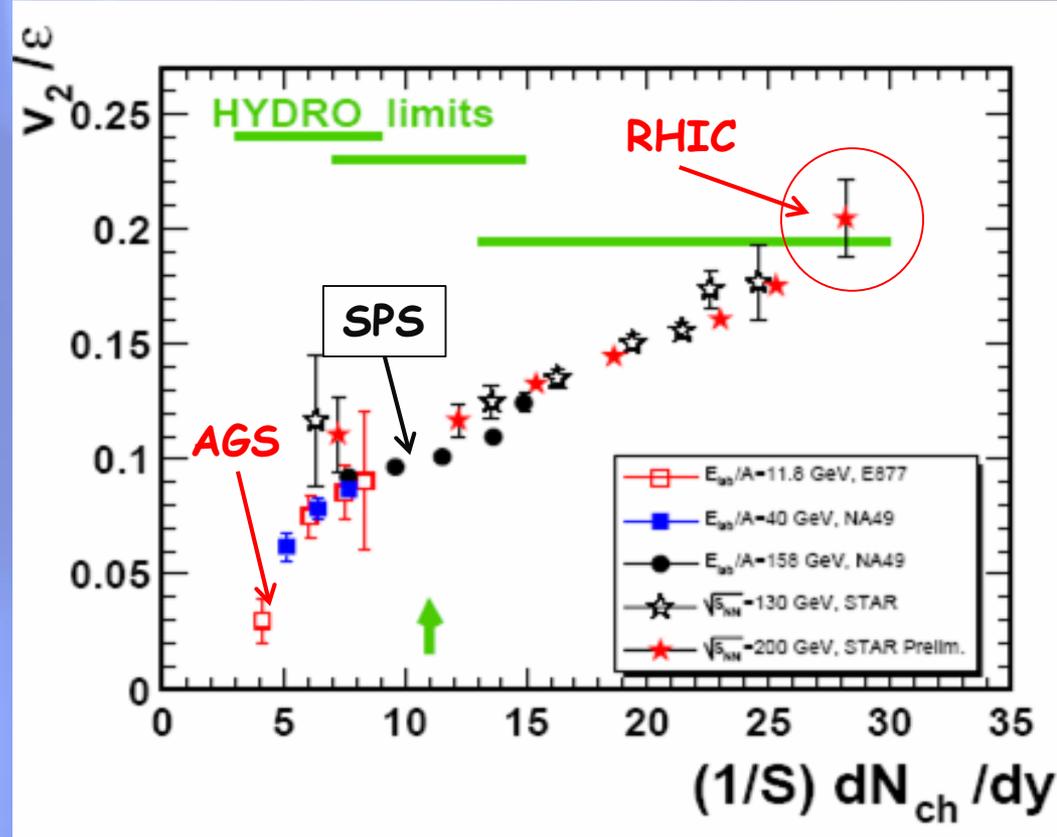
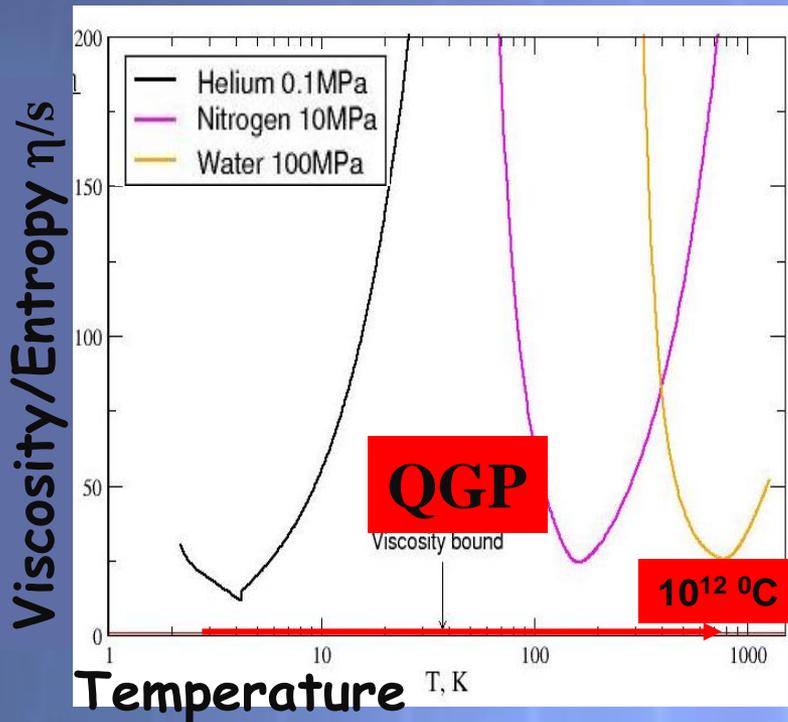


Quark Matter 2017 -R.A. Bertens - ALICE

Le flow

Résultat inattendu : le QGP se comporte comme un fluide parfait
 $\eta/s < 0,2 - 0,4$ pour le QGP au RHIC
 Limite théorique $\eta/s > 1/4\pi$
 (AdS/CFT \leftrightarrow analogue QCD)

BNL Press release, Avril 18, 2005:
 Data = ideal Hydro "Perfect" Liquid
 New state of matter more remarkable than predicted -



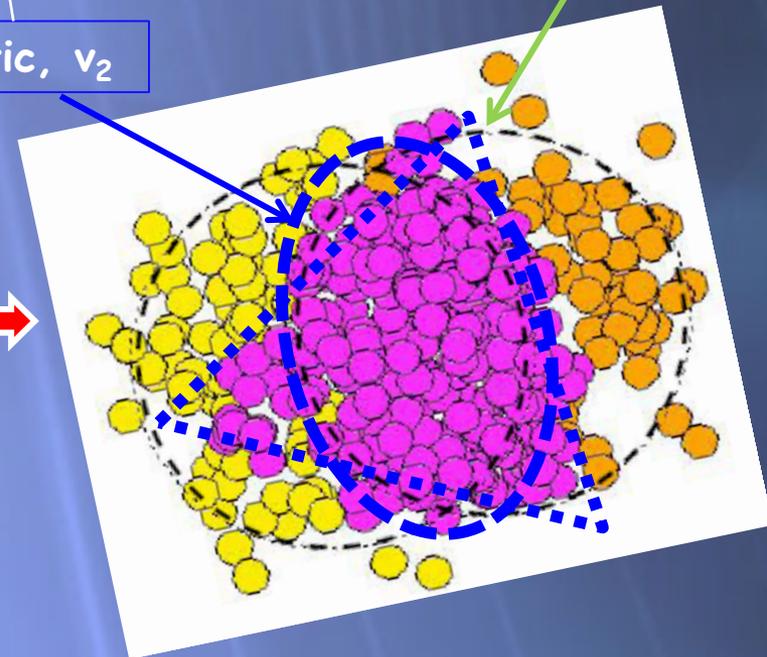
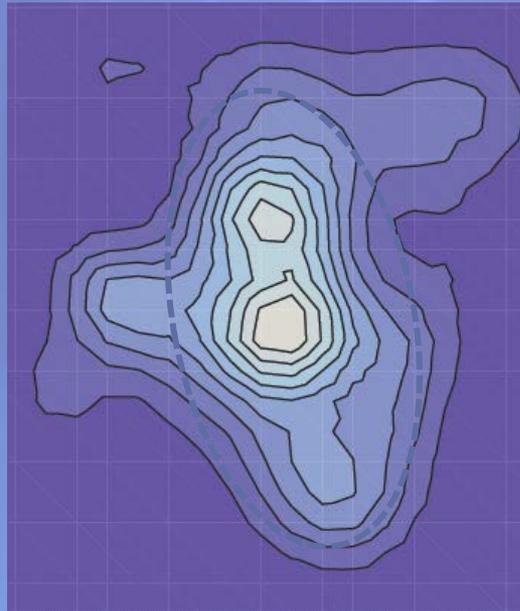
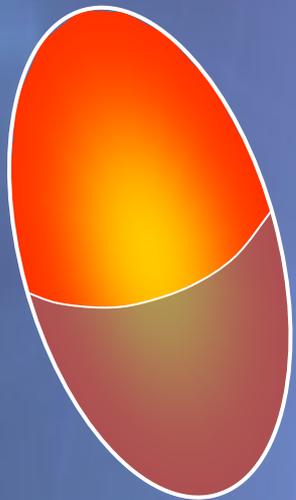
Le flow

Uniquement au LHC : étude des conditions initiales :
Fluctuations événement/événement, pour un paramètre d'impact donné, changent l'excentricité et produisent des déformations d'ordres supérieures.

Série de Fourier: $dN/d\phi = 1 + 2 v_1 \cos(\phi) + 2 v_2 \cos(2\phi) + 2 v_3 \cos(3\phi) + \dots$

Triangular, v_3

Elliptic, v_2



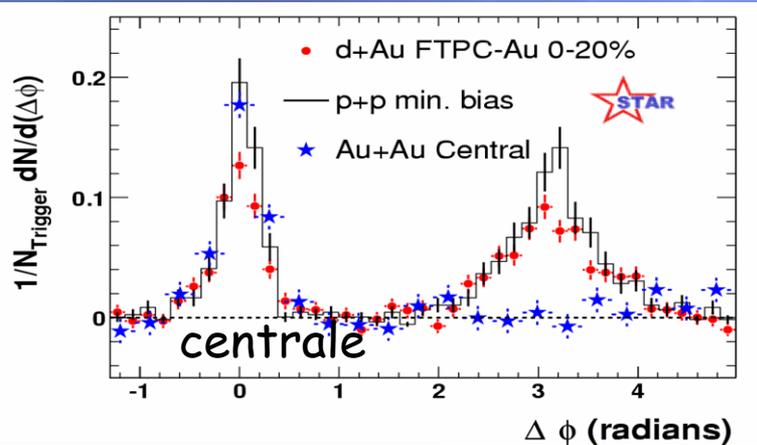
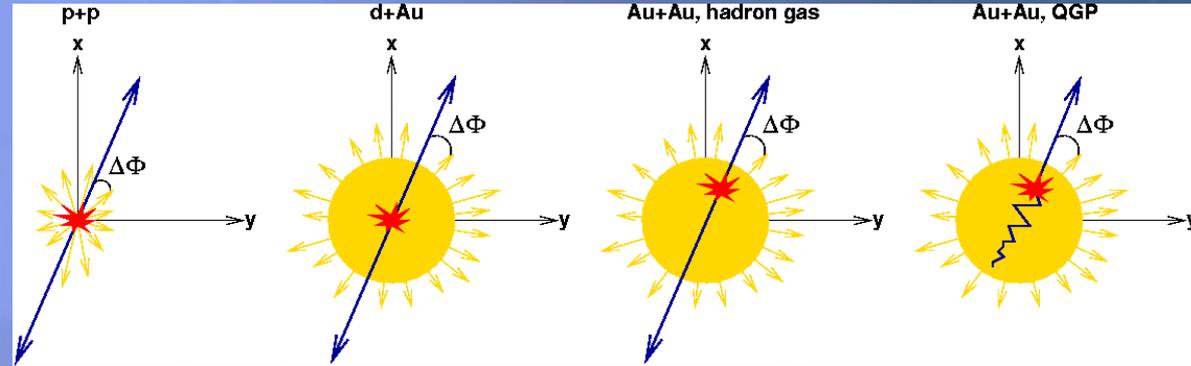
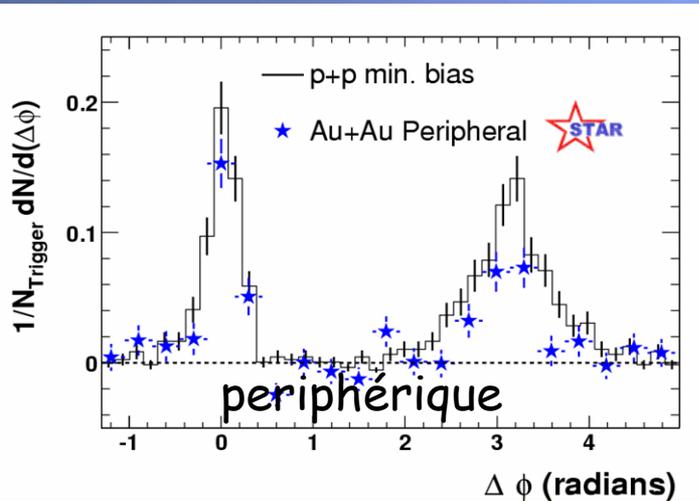
Jet et "Jet" quenching



Jet et "Jet" quenching



Jet et "Jet" quenching



Les particules de grand pt 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 pt et on regarde sa différence en azimut ($\Delta\Phi$) 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

Milieu très "opaque" → sQGP pour **strongly** interacting QGP

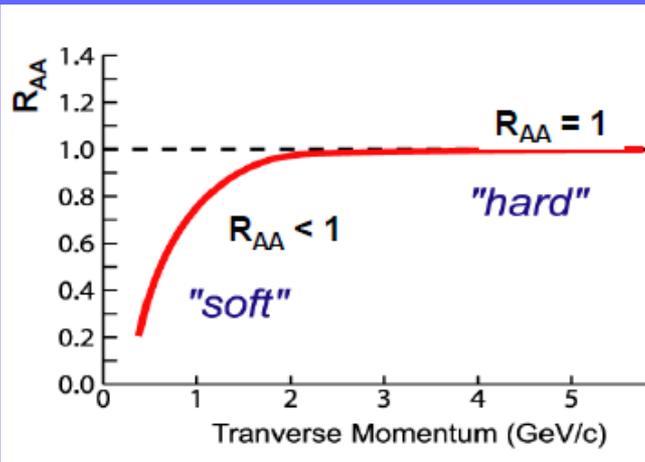
Jet et "Jet" quenching

Etude au RHIC et au LHC (pas assez d'énergie au SPS)

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

Comment comparer les collisions A+A aux collisions p+p ?

R_{AA} le facteur de modification nucléaire pour une centralité donnée



$$R_{AA} = \frac{1}{N_{coll}} \frac{dN_{AA}}{dN_{pp}}$$

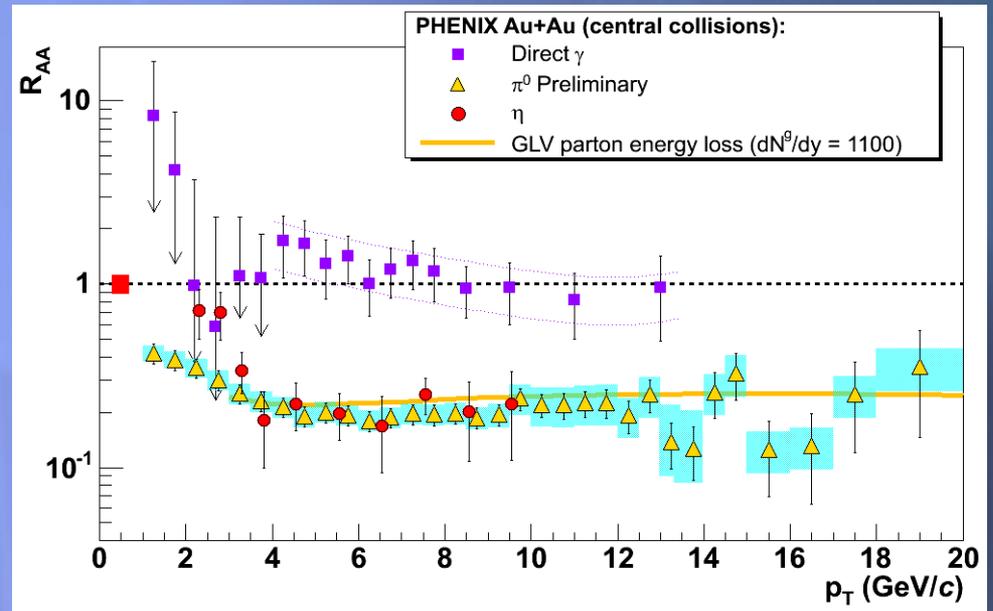
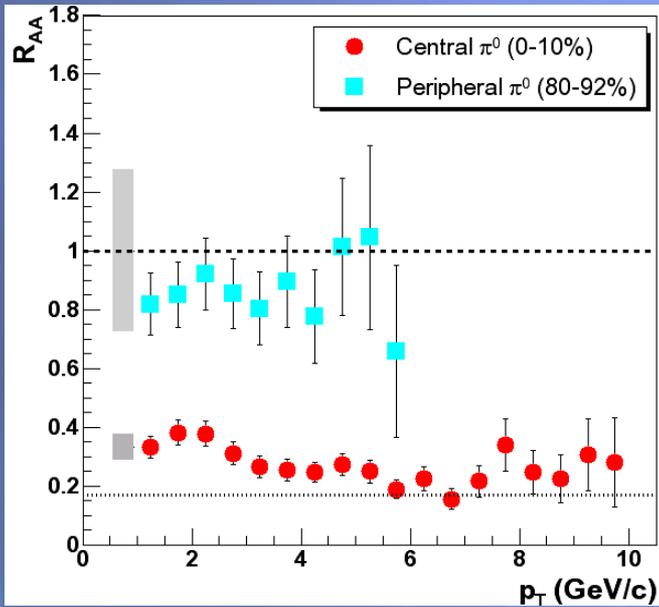
Si le processus étudié se comporte comme une superposition de collisions binaires (binary scaling) :

$$R_{AA} = 1$$

Si le binary scaling est brisé:

$$R_{AA} \neq 1$$

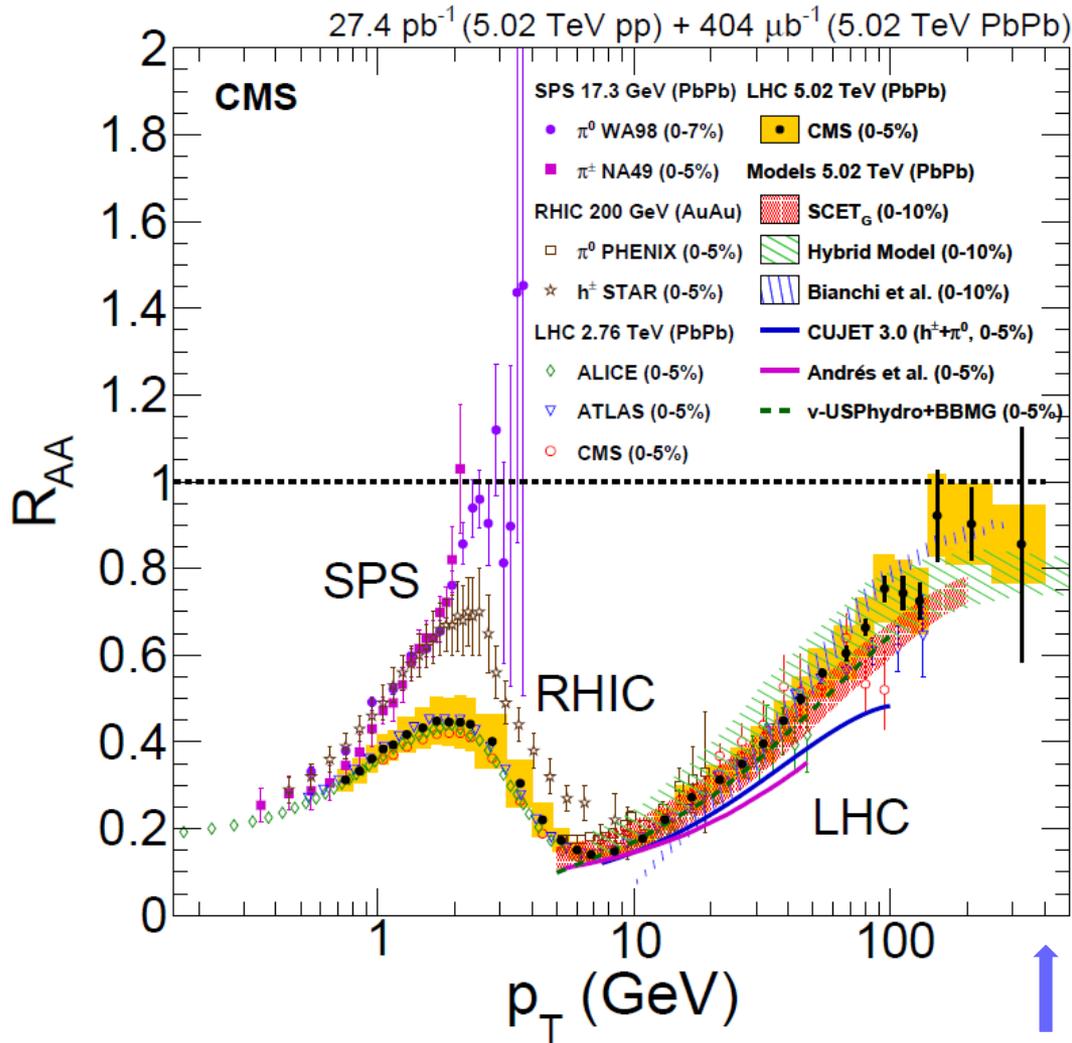
Jet et "Jet" quenching



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)

Jet et "Jet" quenching



Accès à de très grand p_T au LHC
Possibilité à partir de modèles, de quantifier la perte d'énergie des partons dans le milieu créé.

-> déduction des densités de gluons ou des coefficients de transport.

jet quenching measures
'stopping power' of QGP
 $\Delta E \sim f(m) \times c_q \times \hat{q} \times L^2 \times f(E)$

CMS arXiv:1611.01664 - 2017

400 GeV !

Suppression des quarkonia : le cas du J/ψ !



Suppression des quarkonia : le cas du J/ψ !

Le J/ψ est un état $c\bar{c}$ très fortement lié

state	$J/\psi(1S)$	$\chi_c(1P)$	$\psi'(2S)$	$\Upsilon(1S)$	$\chi_b(1P)$	$\Upsilon(2S)$	$\chi_b(2P)$	$\Upsilon(3S)$
T_d/T_c	2.10	1.16	1.12	> 4.0	1.76	1.60	1.19	1.17

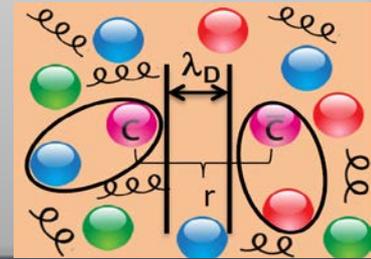
Etat $c\bar{c}$

Etat $b\bar{b}$

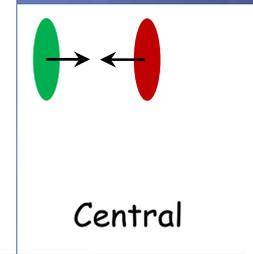
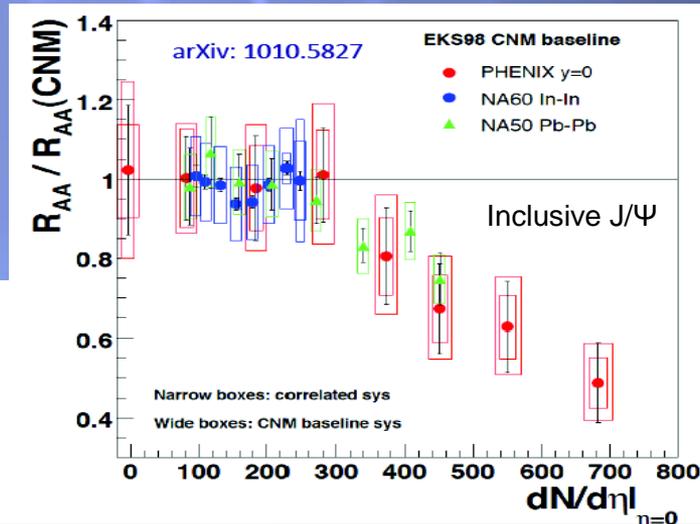
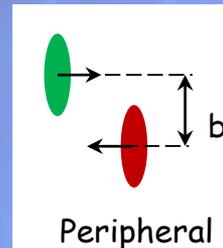
Dans les collisions d'ions lourds ultra-relativistes, à $T \gg T_c$, l'écrantage de Debye est induit par la haute densité de charges de couleurs dans le milieu.

-> La suppression du J/ψ est une signature du déconfinement

T. Matsui and H. Satz, J/ψ Suppression by Quark-Gluon Plasma Formation, Phys. Lett. B178, 416(1986)



Suppression du J/ψ mesurée au SPS et au RHIC ▶

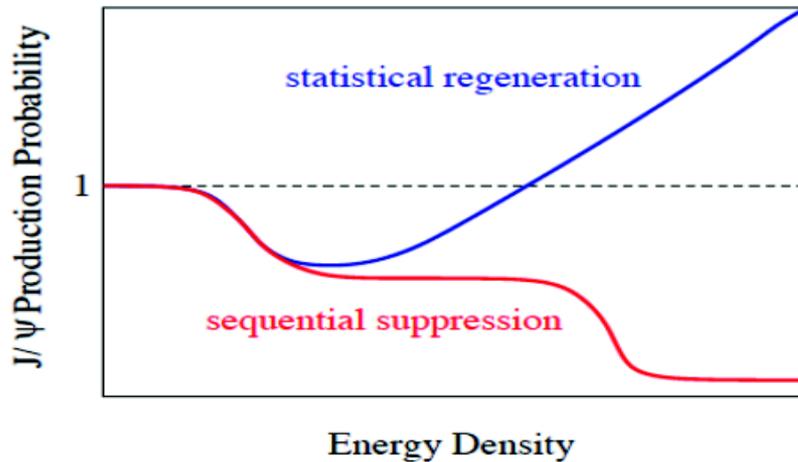
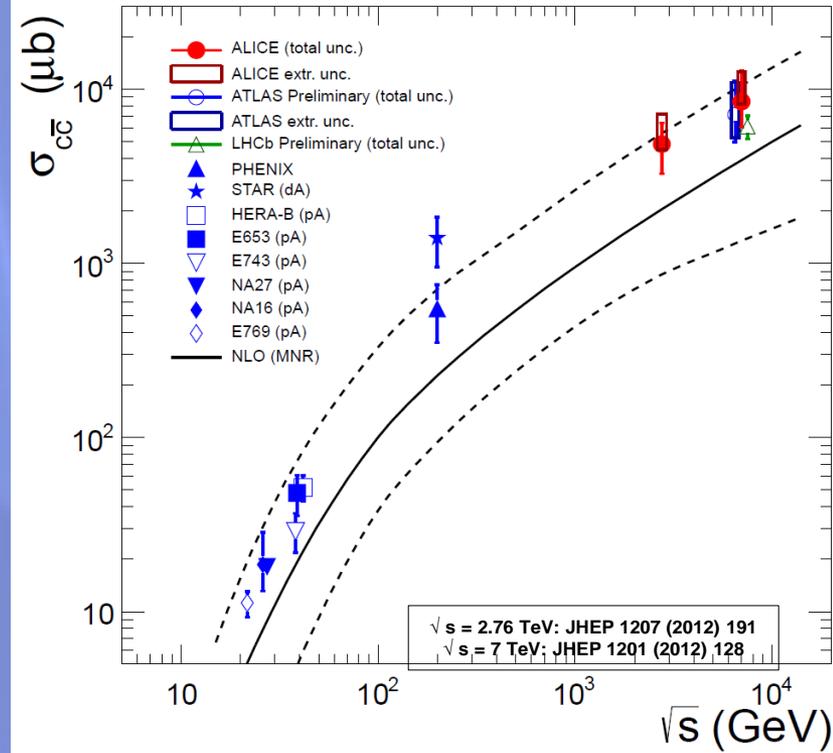


Suppression des quarkonia : le cas du J/ψ !

Grand nombre de quarks charm créés dans les collisions centrales Pb-Pb au LHC :
 → recombinaison des c et $c\bar{c}$ durant l'évolution du QGP

→ régénération des charmonia
 Braun-Munzinger, Stachel PLB490(2000)
 Thews et al. PRC62(2000)

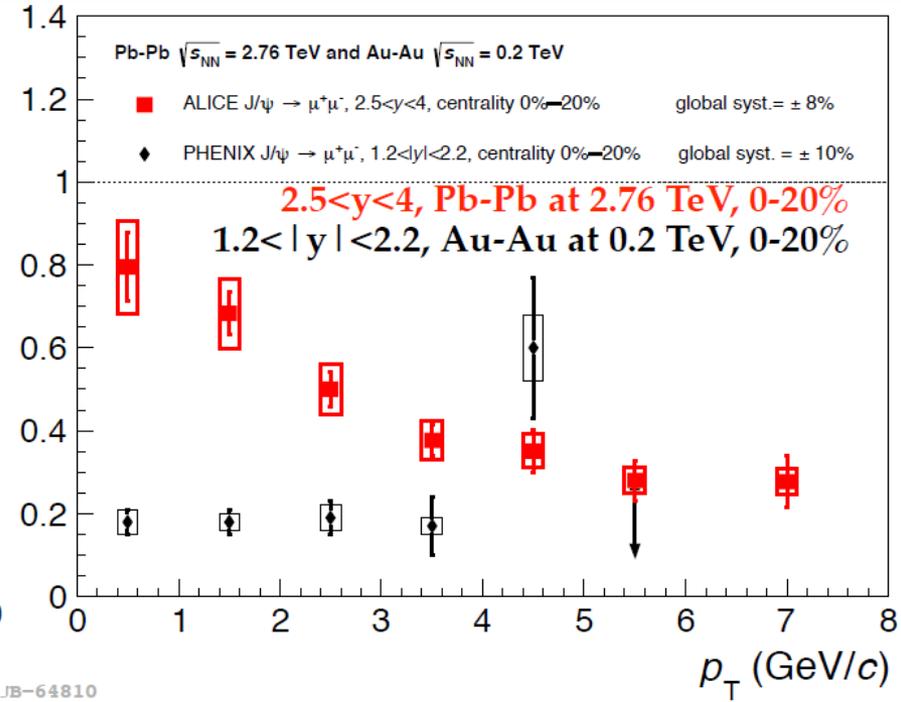
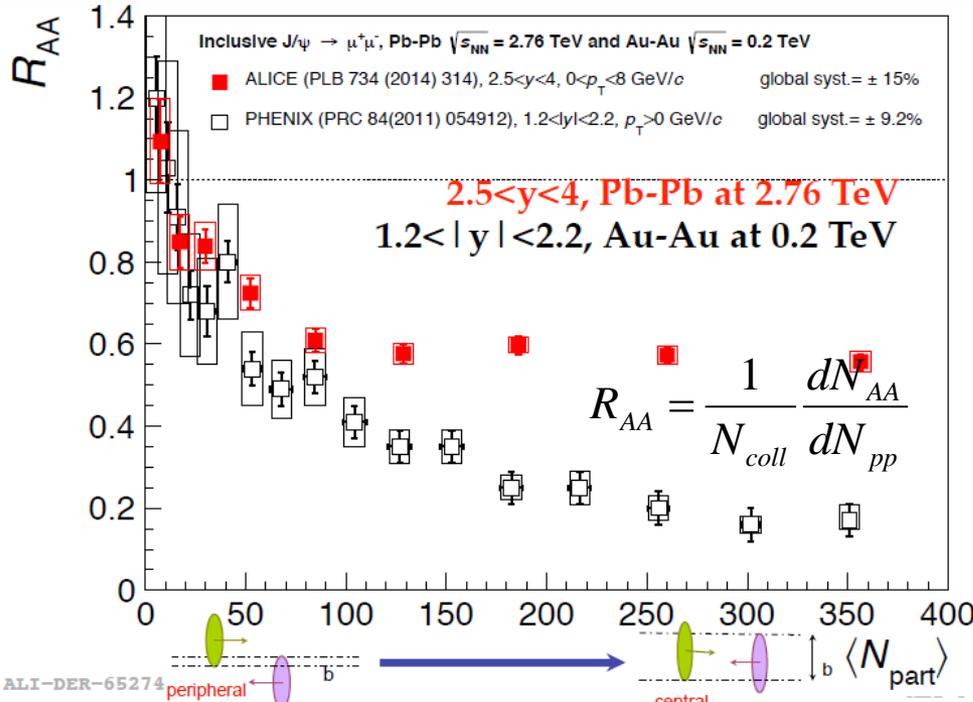
In most central A-A collisions	SPS 20 GeV	RHIC 200 GeV	LHC 2.76 TeV
$N_{c\bar{c}}$ /event	~0.2	~10	~110



Implication de la régénération :

- Augmentation des J/ψ (ou moins de suppression)
- Etat charmonium ne sont plus un thermomètre du QGP
- **évidence de la thermalisation des quarks charm**
- **évidence du déconfinement**

Suppression des quarkonia : le cas du J/ψ !



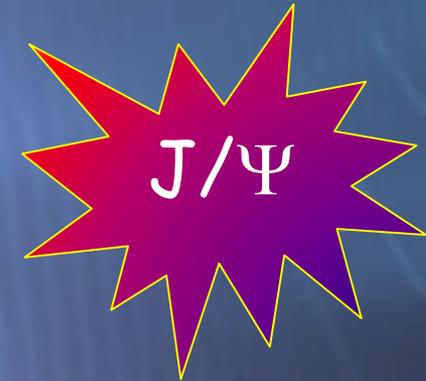
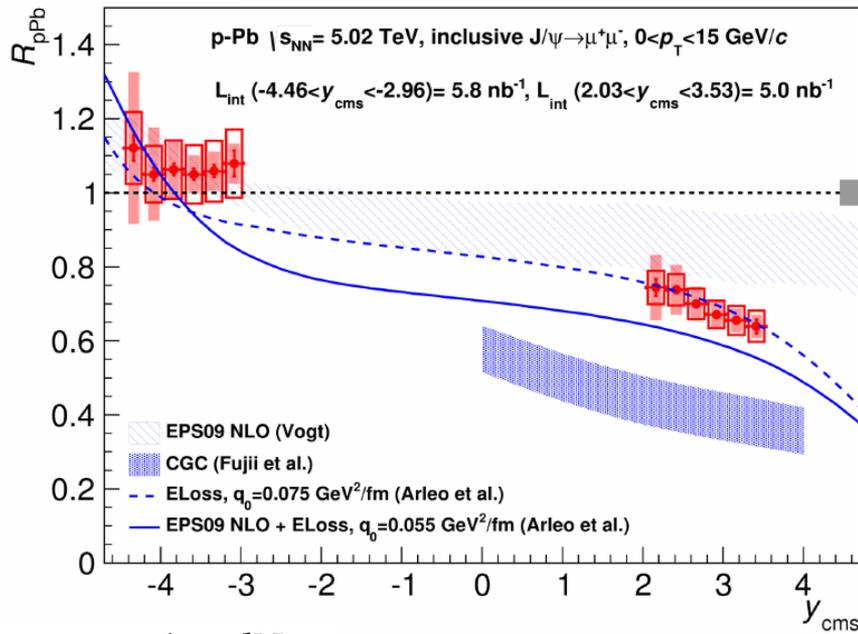
Suppression moins importante au LHC qu'à RHIC !

Comportement très différent à bas p_T

Mesures favorables à un scénario de recombinaison

Nécessitent obligatoirement pour une interprétation correcte de prendre en compte les effets nucléaires froids (sans formation de QGP) -> mesure p+A

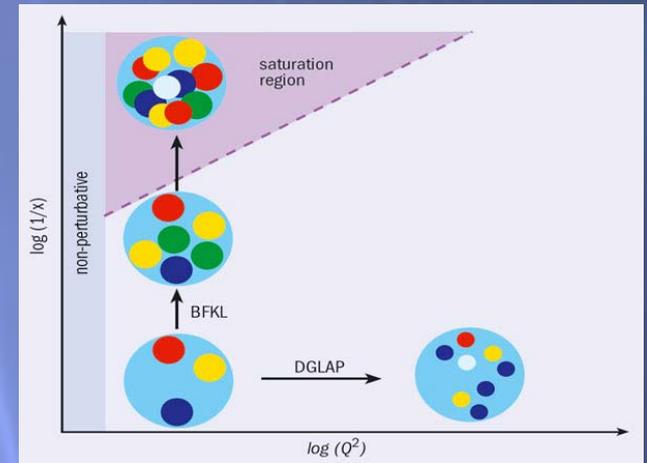
Suppression des quarkonia : le cas du J/ψ !



p-Pb collisions (2013) -> étude des effets nucléaires "froids"

$$R_{AA} = \frac{1}{N_{coll}} \frac{dN_{AA}}{dN_{pp}}$$

Suppression importante à petite impulsion des quarks ($x \sim 10^{-4} - 10^{-5}$) qu'à grande impulsion ($x \sim 10^{-1} - 10^{-2}$)
 Effets de l'état initial et effets nucléaires : résultats en accord avec des modèles incluant de l'effet shadowing avec/sans contribution de perte d'énergie dans la matière nucléaire.



Quelles conclusions tirer ?

Au SPS : recherche du QGP -> un état "QGP-like"

Communiqué de presse du CERN de février 2000 (juste avant le démarrage du RHIC...) -> "Un nouvel état de la matière créé au CERN". Oui mais pas vraiment de preuve irréfutable. Difficulté de corréliser différentes observables ou une même observable dans différents domaines cinématiques. Probablement un état déconfiné mais qu'on ne peut pas encore appeler QGP. Au vu des résultats de RHIC, le SPS s'est approché très près du QGP et a ouvert la route avec des expériences pionnières.

RHIC : découverte et étude d'un QGP : (s)QGP !

Résultats remarquables et inattendus. Possibilité de corréliser différentes observables dans différents domaines cinématiques. Communiqué de presse d'avril 2005 la découverte d'un liquide "parfait"

LHC : étude du QGP.

Résultats également surprenant et inattendus. Possibilité de faire des études plus fines et plus poussées à des régimes jamais atteints.

Fin du 2ème cours.