

# Les collisions d'ions lourds ultra-relativistes

---

Bruno ESPAGNON

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Université Paris-Sud



## PLAN :

- ✓ Matière nucléaire et Plasma de Quarks et de Gluons (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 ?

# 1<sup>ère</sup> partie

---

Matière nucléaire et  
Plasma de Quarks et de  
Gluons (QGP)

## 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 muon d'ALICE
  - ✓ La vie d'une expérience sur collisionneur.
  - ✓ Le futur ?

# Notions fondamentales.

# Composition of matter Structure de la matière

The ratio in size between Carlo and a quark is the same as that between the Universe and the Earth.  
Le rapport de taille entre Carlo et un quark est le même qu'entre l'Univers et la Terre.

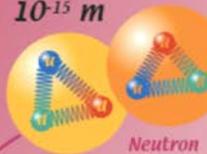
Quarks never exist alone, gluons bind them to one another with the strong force.  
Les quarks n'existent jamais seuls, les gluons les lient entre-eux grâce à la force forte.

ALICE's field of study  
Domaine d'étude d'ALICE

$< 10^{-19} m$   
0,000 000 000 000 000 000 1

Quark

$10^{-15} m$



Proton

Neutron

$10^{-14} m$



Oxygen nucleus  
Noyau d'oxygène

$10^{-10} m$



Oxygen atom  
Atome d'oxygène

$10^{-9} m$

one millionth of a millimetre  
un millièmième de millimètre



Water molecule  
Molécule d'eau

$10^{-4} m$

one tenth of a millimetre  
un dixième de millimètre



Cell  
Cellule

1 m



Carlo

$10^7 m$



Earth  
Terre

$> 10^{26} m$   
100 000 000 000 000 000 000 000 000

Visible Universe  
Univers visible



If an atom were the size of a football field, the nucleus, in the centre of the field, would be the size of a chickpea and the electron would be smaller than a fleck of dust in the air.

Si l'atome avait la taille d'un terrain de football, le noyau, placé au centre du terrain, aurait la taille d'un pois chiche et l'électron serait moins perceptible qu'une poussière dans l'air.

Even in vacuum, quarks and antiquarks are continuously created and destroyed.

Même dans le vide, quarks et antiquarks se créent et s'annihilent continuellement.

## Puissances de 10 !

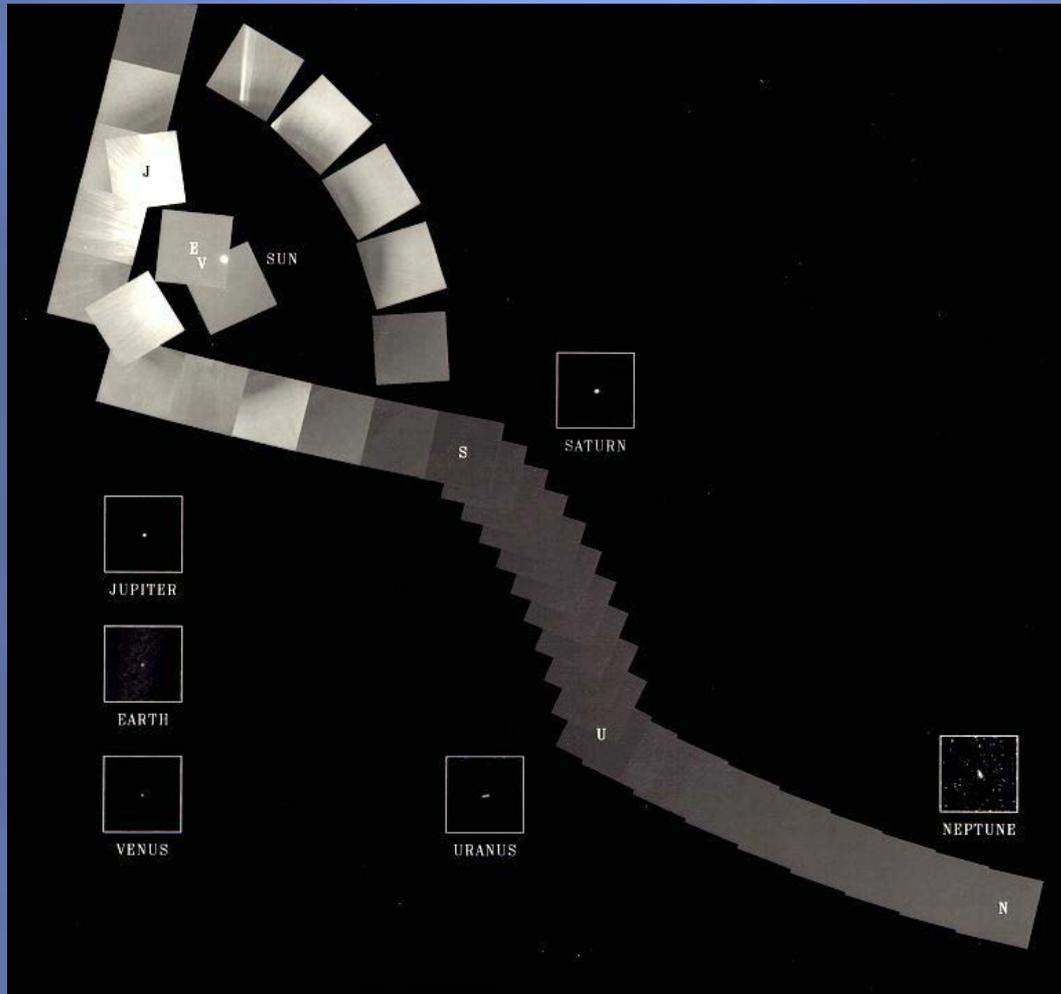


Image du système solaire prise par Voyager 1 en 1990 à ~6 milliards de km  
(actuellement à 20,9 milliards de km du Soleil)

# Les constituants élémentaires

Charges

## Leptons

0

Electron Neutrino  
Mass  $\sim 0$

Muon Neutrino  
 $\sim 0$

Tau Neutrino  
 $\sim 0$

-1

Electron  
0.511 MeV

Muon  
105.7

Tau  
1777

Les fermions (spin  $\frac{1}{2}$ )  
+ leurs anti-particules

## Quarks

+2/3

Up  
2.5



Charm  
1270

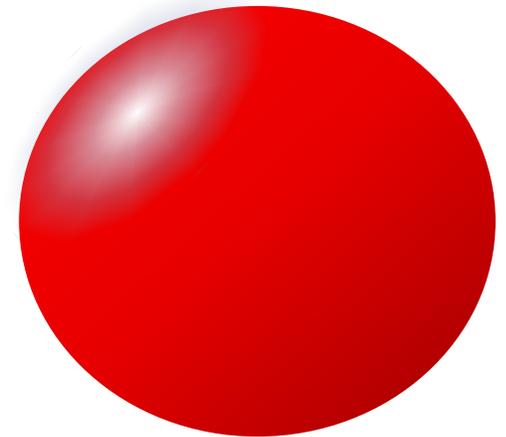
Top  
171 000

-1/3

Down  
5

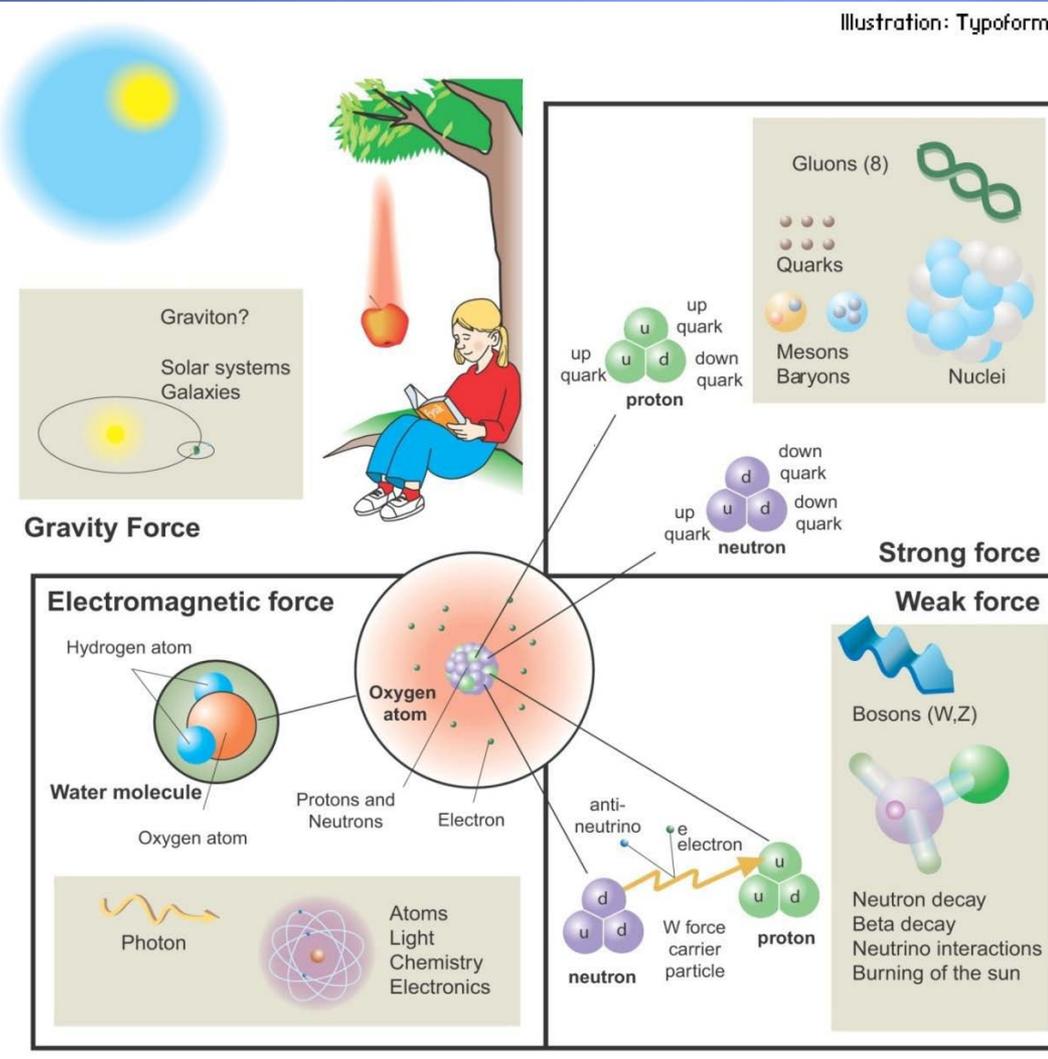
Strange  
104

Bottom  
4200



# Les interactions fondamentales

Illustration: Typoform



	Bosons (spin entier)
Forte	8 gluons
Electromagnétique	Photon
Faible	3 bosons : $W^+$ , $W^-$ , $Z^0$
gravitation	Graviton ?
	Higgs

## Un peu de vocabulaire...

Les leptons (du grec "leptos" = "léger") : insensibles à l'interaction forte. Ne semblent pas avoir de structure interne.

Ce sont des fermions (spin demi-entier).

Ex : électron, muon, neutrino

Les hadrons (du grec "adros" = "fort") : sensibles à l'interaction forte.

Les baryons (du grec "barys" = "lourd") :  
3 quarks

Ce sont des fermions (spin demi-entier)

Ex : p, n,  $\Delta$ ,  $\Lambda$ ...

Les nucléons :  
protons et neutrons

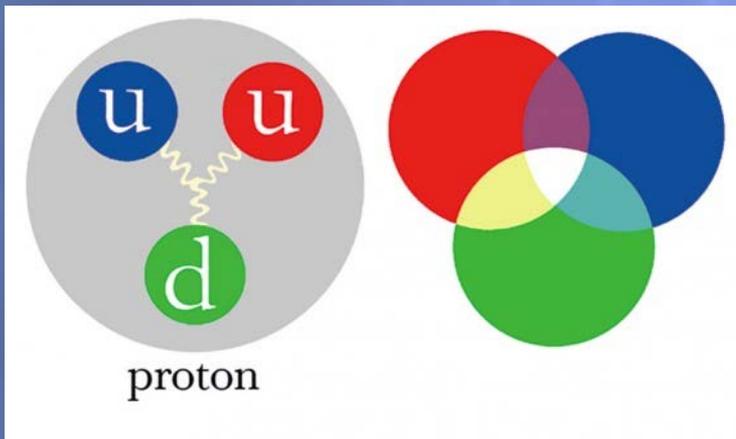
Les mésons (du grec "méson" = "moyen") : composés d'un quark et d'un antiquark

Ce sont des bosons (spin entier)

Ex :  $\pi$ ,  $\omega$ ,  $\rho$ , D, J/ $\psi$ ...

## Quelques notions sur l'interaction forte

- Les quarks portent une charge de couleur : Rouge, Vert, Bleu
- Les anti-quarks portent l'anti-couleur correspondante
- La combinaison de ces couleurs dans les hadrons doit être incolore
- Les hadrons se déclinent en baryons (3 quarks) et mésons (1 quark et 1 anti-quark)
- Ils ont une charge entière



En jouant avec les 6 quarks, les différentes couleurs et les différents états spectroscopiques on obtient toute une zoologie des particules

### Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.  
There are about 120 types of baryons.

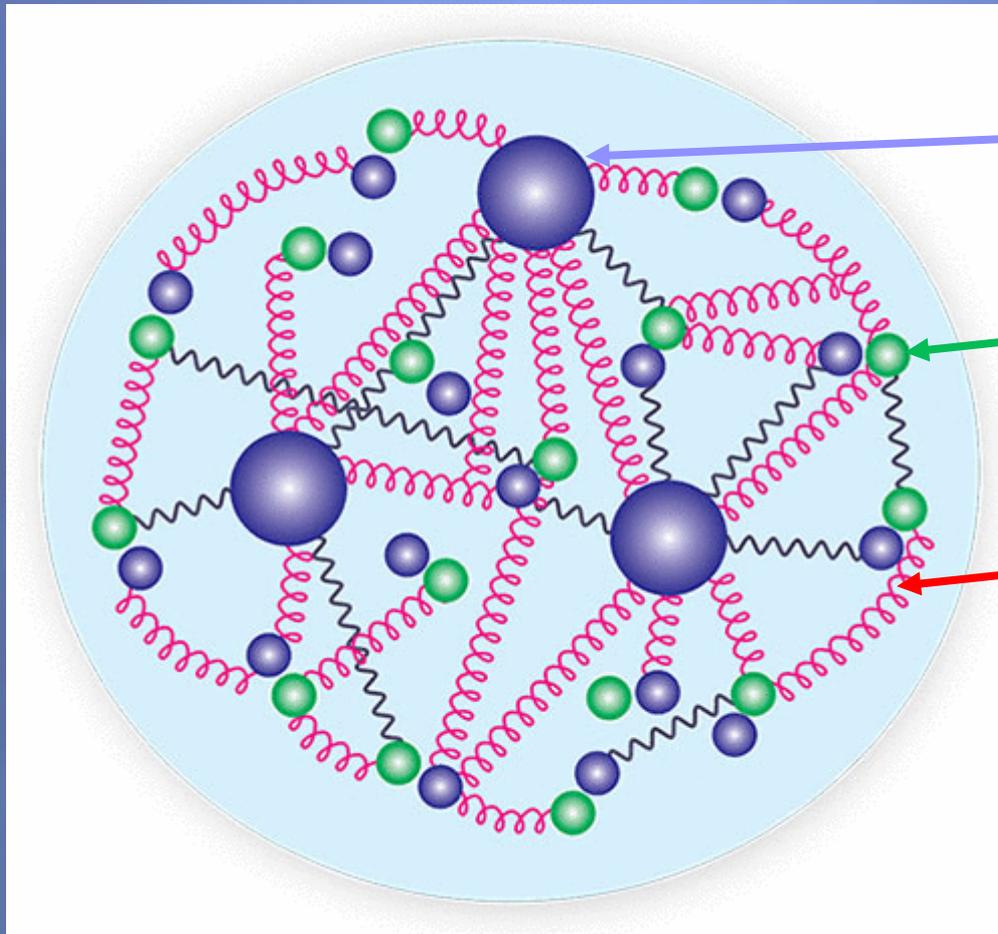
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1.672	3/2

### Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.  
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

# Les hadrons sont des objets complexes !



Quarks de valence

Quarks de la mer

Gluons

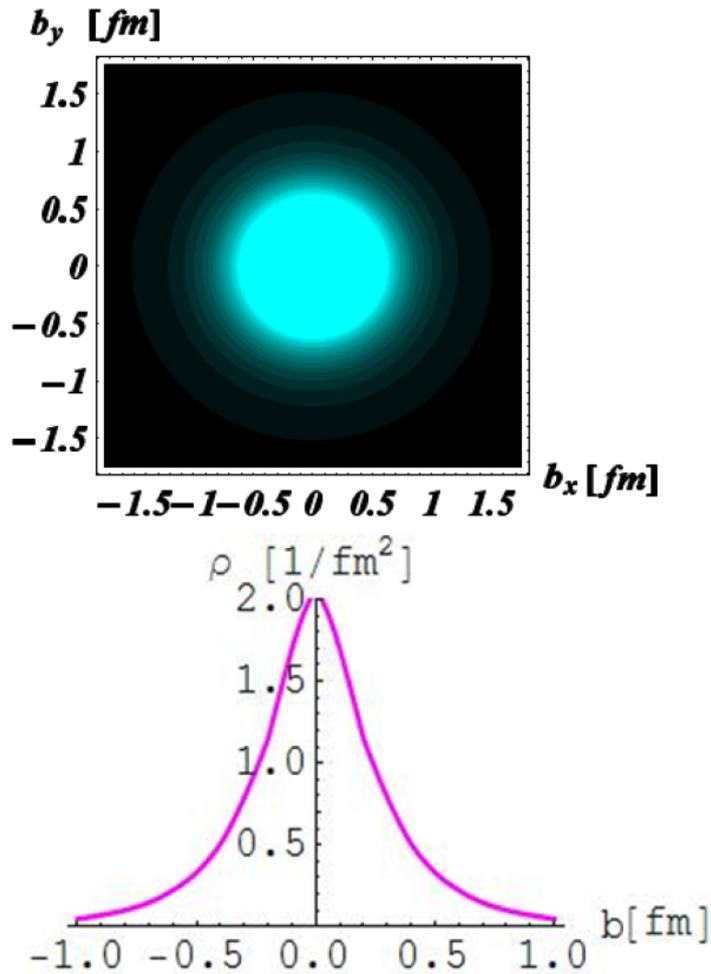


Figure 2.3: Upper panel: quark transverse charge density in an unpolarized proton [45]. Lower panel:  $\rho(b_{\perp})$  [43] using the Fourier transform of the FFs parametrization of [47].

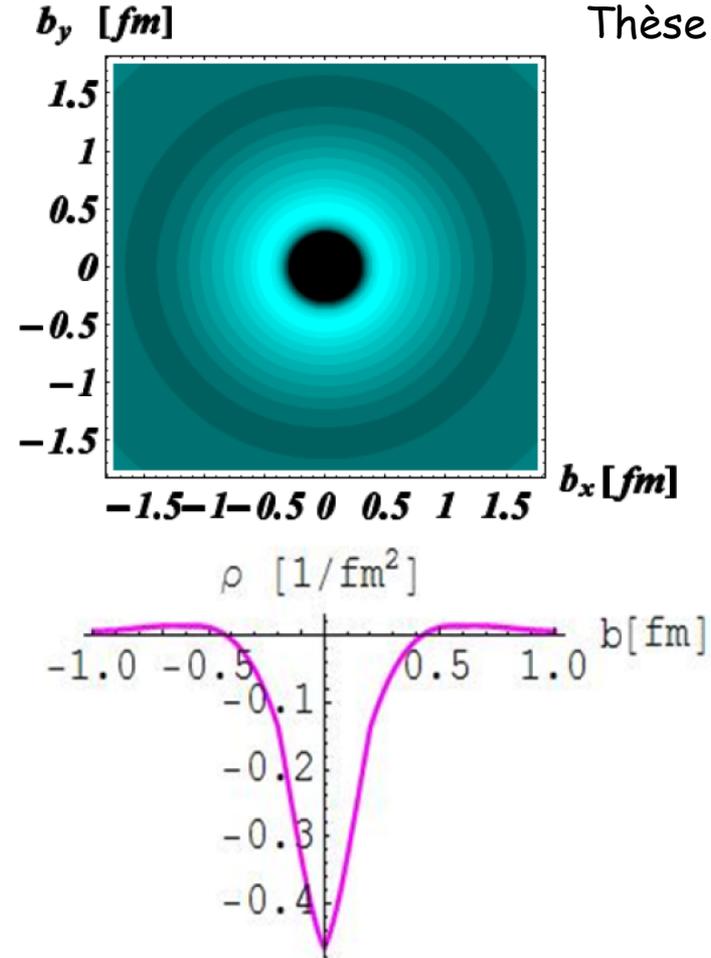
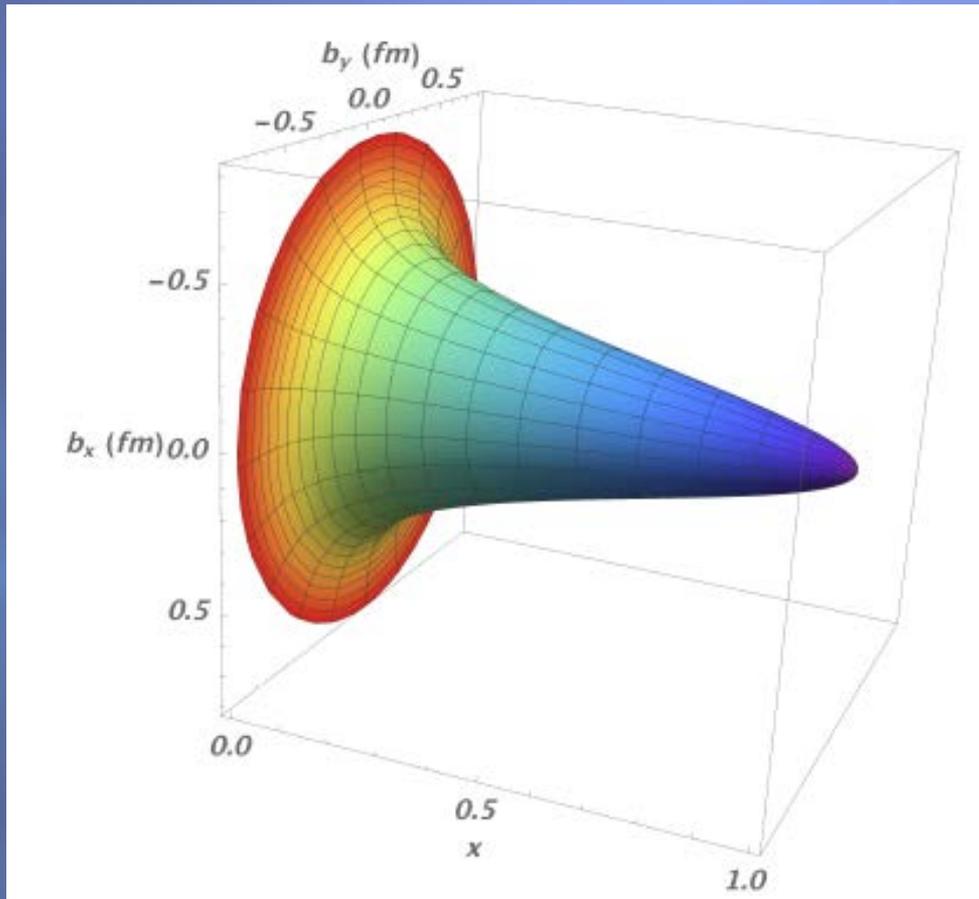
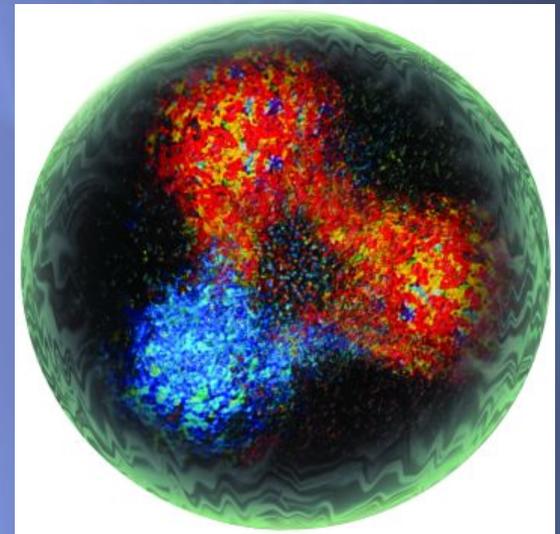


Figure 2.4: Upper panel: quark transverse charge density in an unpolarized neutron [45]. Lower panel:  $\rho(b_{\perp})$  [43] using the Fourier transform of the FFs parametrization of [47].

# Tomographie du nucléon à JLab



Tomographie du proton !  
"impulsion (longitudinale) -  
position (transverse)"



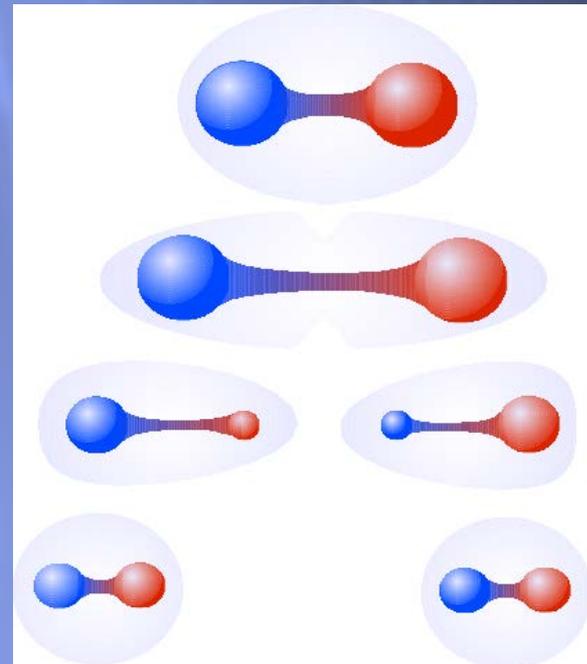
## Quelques notions sur l'interaction forte

L'interaction entre charges de couleur, et donc entre quarks, se fait par l'intermédiaire de gluons. Ils ont la particularité de porter aussi une couleur et donc d'interagir avec eux-mêmes ! C'est une particularité importante de l'interaction forte qui lui donne ses caractéristiques si particulières.

Il est impossible d'isoler une charge de couleur. L'intensité de l'interaction forte augmente avec la distance.

Les quarks sont donc confinés dans les hadrons.

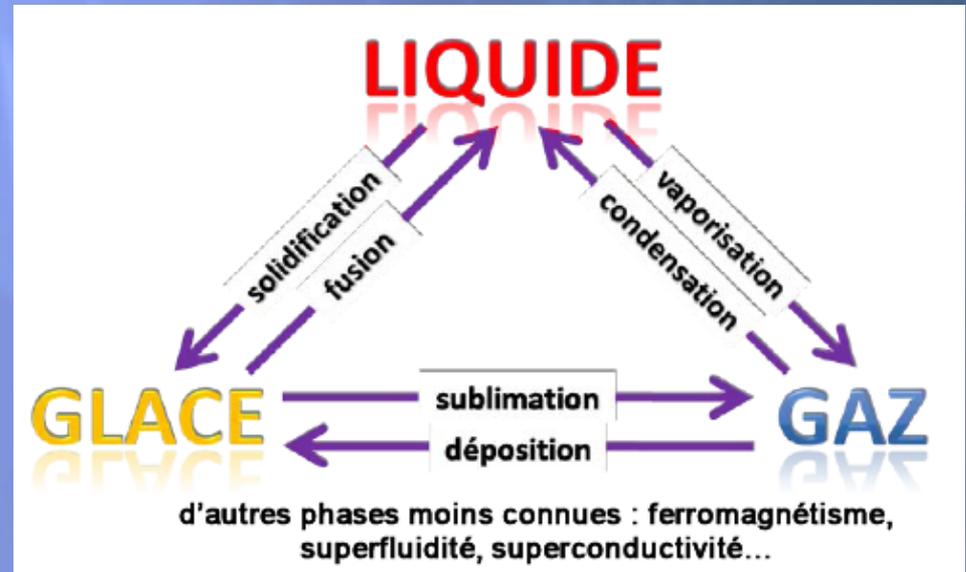
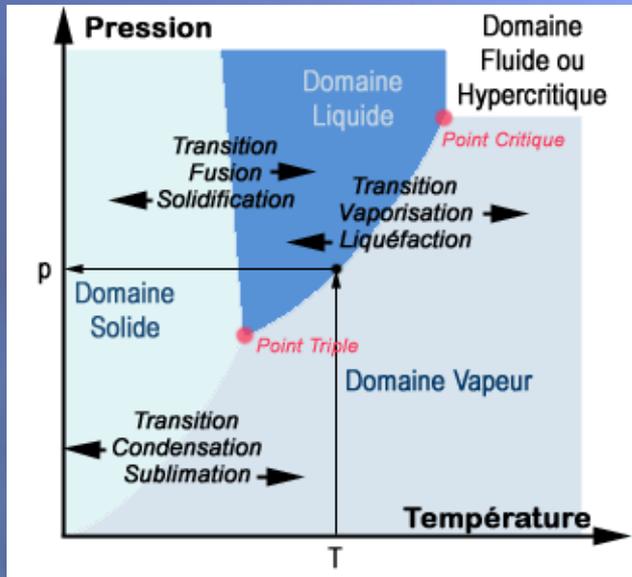
L'interaction forte est décrite par une théorie : la Chromo-Dynamique Quantique (QCD)



QGP et collisions d'ions lourds  
ultra-relativistes.

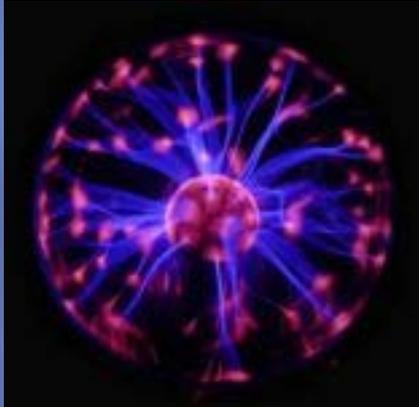
# Transition de phase de la matière nucléaire

Un diagramme de phase décrit, habituellement dans un plan défini par deux variables macroscopiques, les régions d'existence des différentes phases (ou états) d'un système.



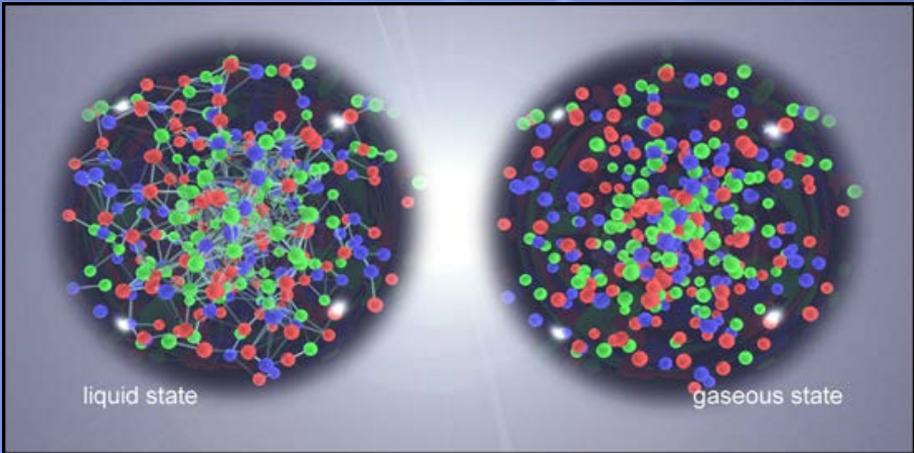
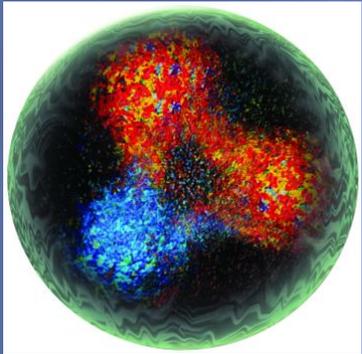
- Une transition de phase est une transformation d'un système d'une phase à une autre
- Cette transition de phase peut être du 1<sup>er</sup> ordre (coexistence entre les 2 phases) comme par exemple lors de l'ébullition de l'eau à pression atmosphérique, ou du 2<sup>ème</sup> ordre (sans coexistence entre les deux phases)
- Le point triple désigne la coexistence des 3 phases (ex : 0,01° C - 6,11 mbar pour l'eau)
- Le point critique correspond au point au-delà duquel il n'y a plus de distinction entre gaz et liquide (dans le cas de l'eau on parlera de fluide). On passe d'une phase à l'autre sans transition ("crossover"). Pour l'eau : 374 ° C - 220 bars.

# Transition de phase de la matière nucléaire

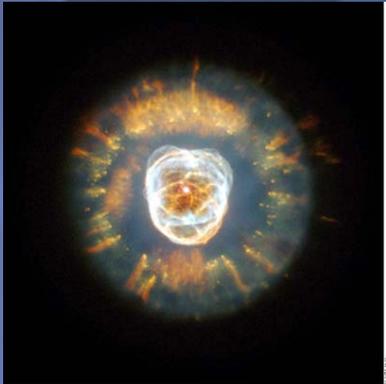


Solide                      Liquide                      Gaz                      Plasma

Température →



QGP ?



# Transition de phase de la matière nucléaire

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{\psi}_f (i \not{\partial} D_\mu + m_f) \psi_f$$

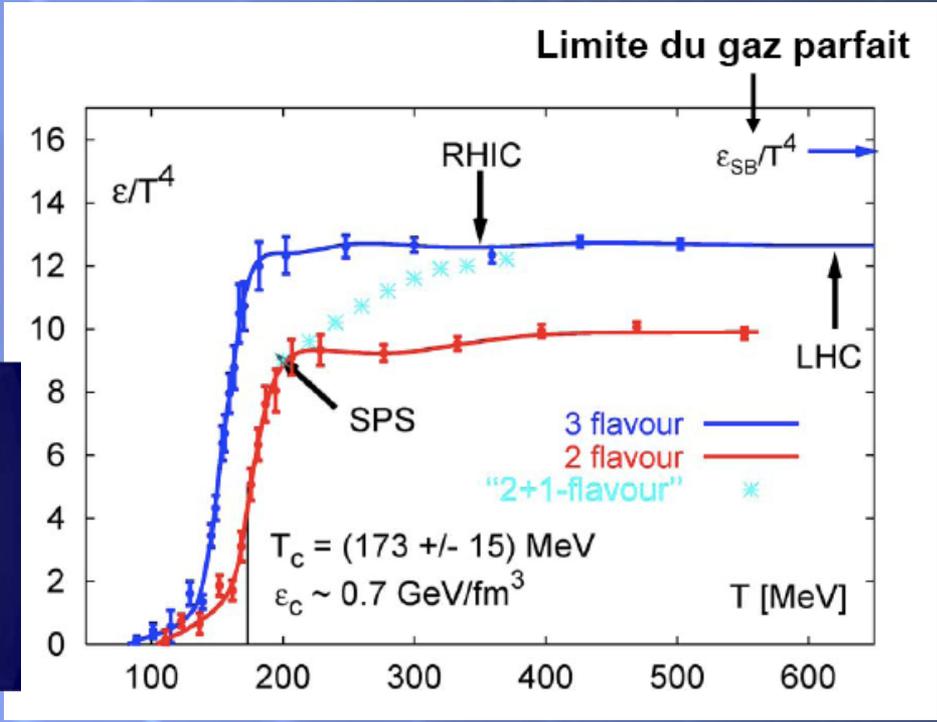
where  $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$   
and  $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

Théorie fondamentale : QCD



1 MeV =  $10^6$  eV  $\approx$  12 Milliards de degrés K  $\sim$  600 fois la température interne du soleil  
 173 MeV  $\approx$  2000 Milliards de degrés K  $\sim$  100000 fois la  $t^\circ$  interne du soleil  
 Densité d'énergie de  $0,7 \text{ GeV/fm}^3$  à comparer au noyau atomique qui est à  $0,15 \text{ GeV/fm}^3$

1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J, 1 fm =  $10^{-15}$  m



Calculs de QCD sur réseau

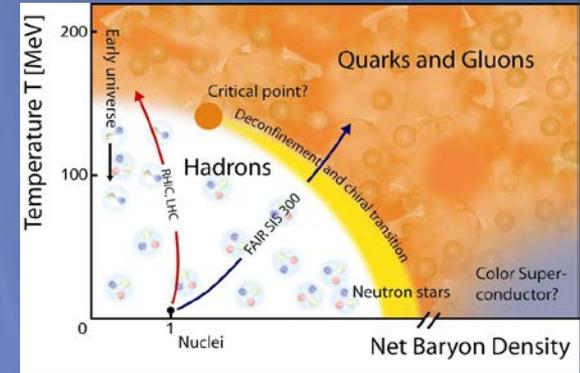


# But scientifique

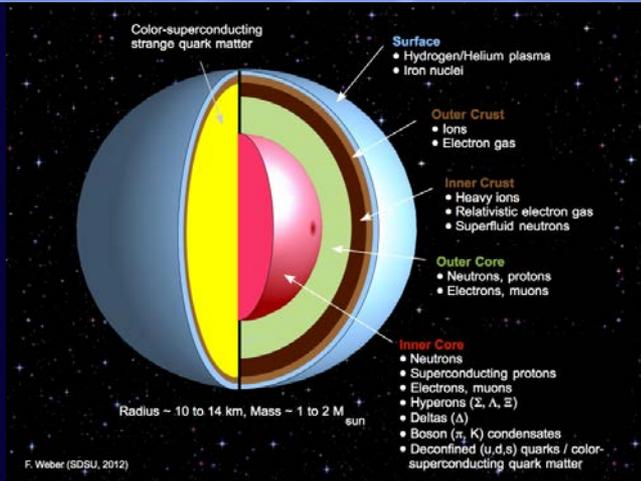
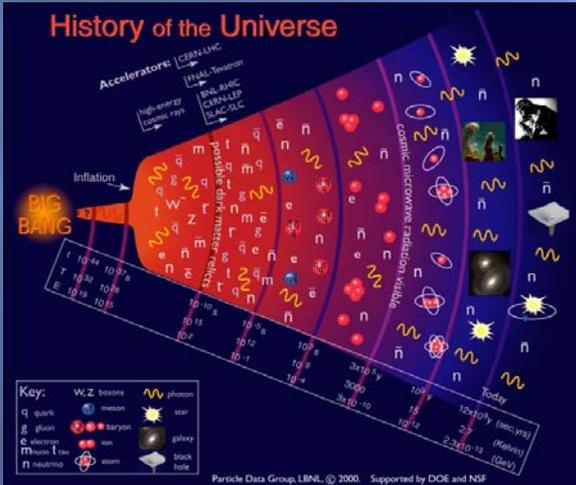
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{\psi}_f (i \not{D} - m_f) \psi_f$$

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

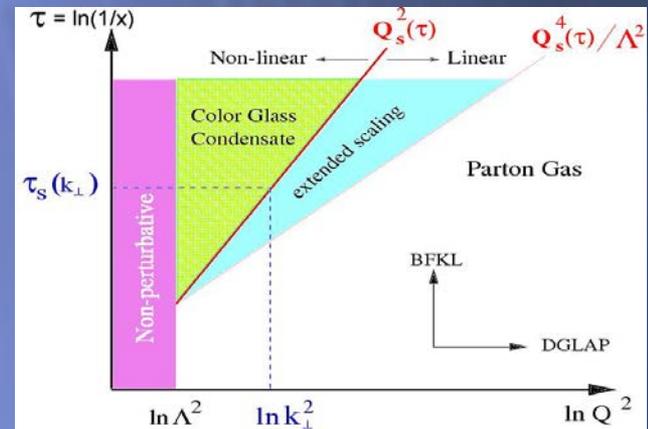
Etudier les propriétés de base de l'interaction forte  
Déconfinement - brisure de la symétrie chirale



Etudier le diagramme de phase de la matière nucléaire



Comprendre les premiers instants de l'évolution de notre Univers et certains phénomènes astrophysiques (GRB, CDM, ...)



Etudier la dynamique des partons à petit x et haute densité (CGC)

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

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

Etudier les propriétés de base de l'interaction forte  
Déconfinement - brisure de la symétrie chirale

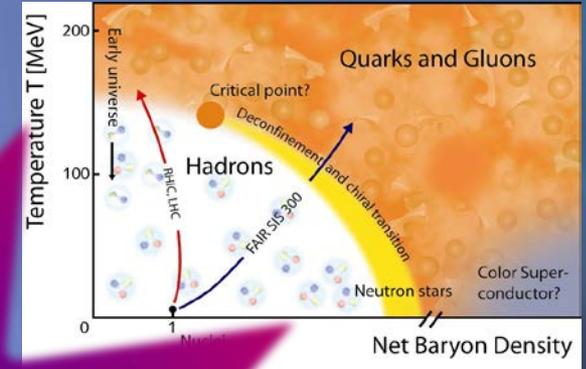
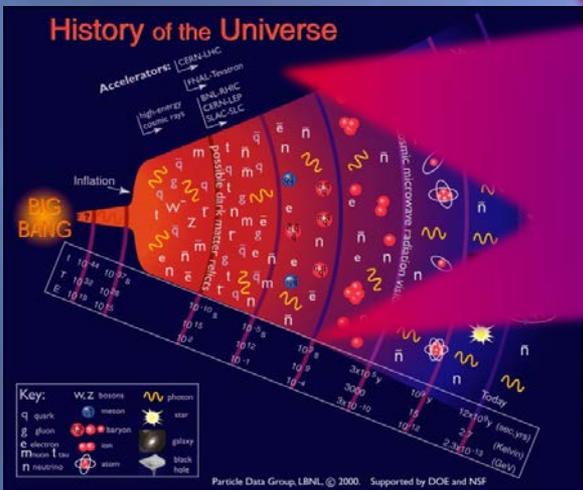
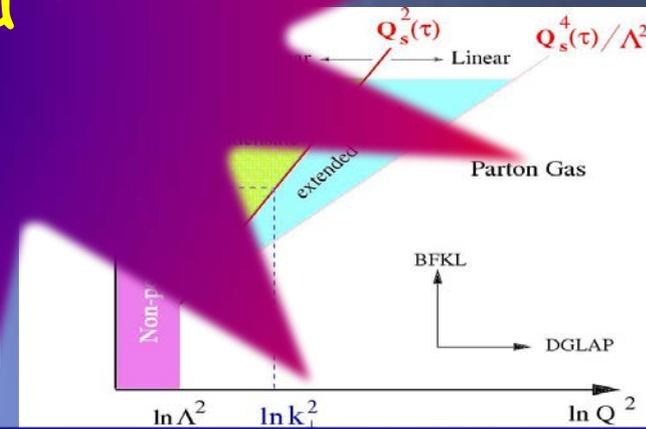


Diagramme de phase de

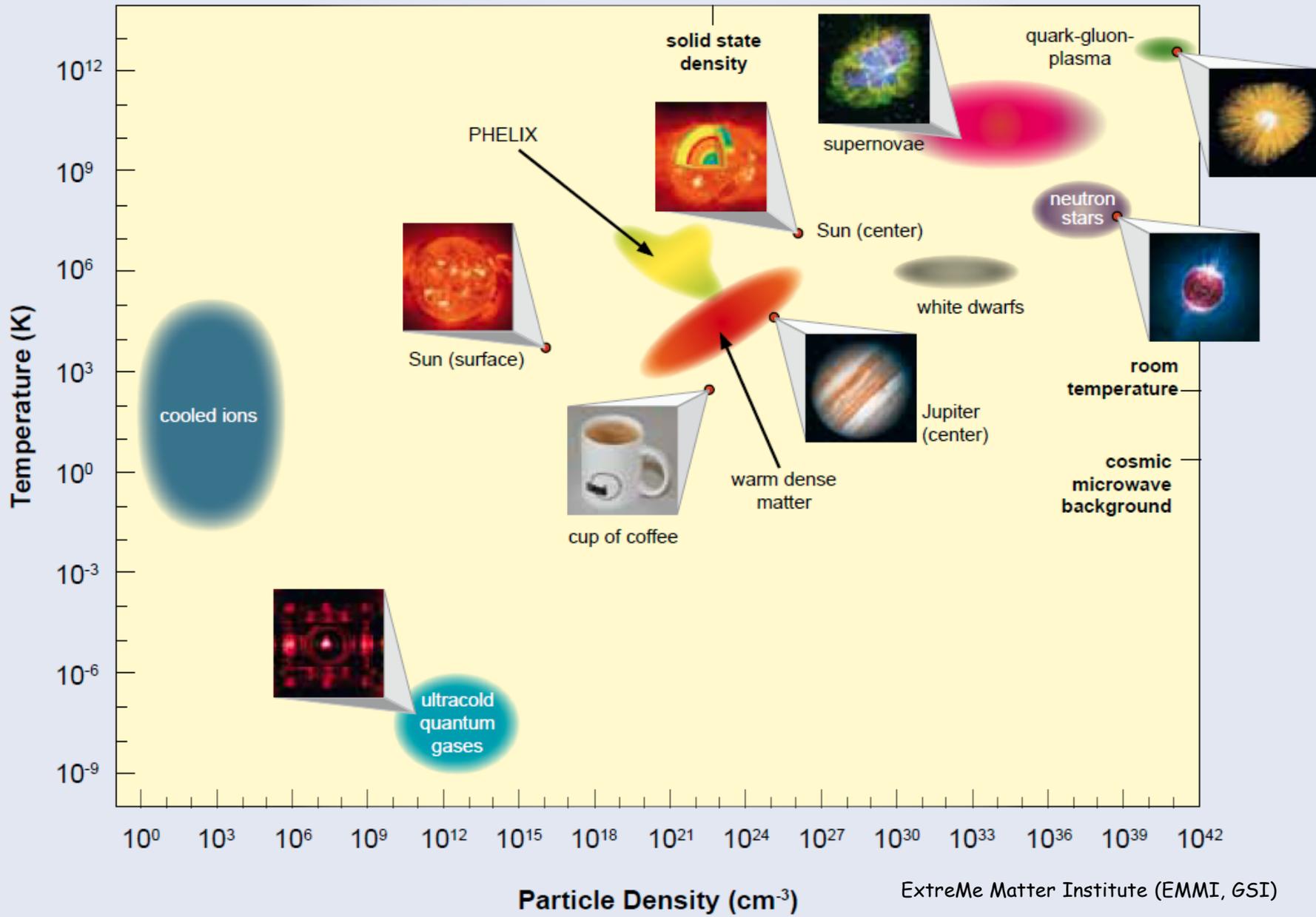
Des conditions extrêmes à atteindre



Comprendre les premiers instants de l'évolution de notre Univers et certains phénomènes astrophysiques (GRB, CDM, ...)

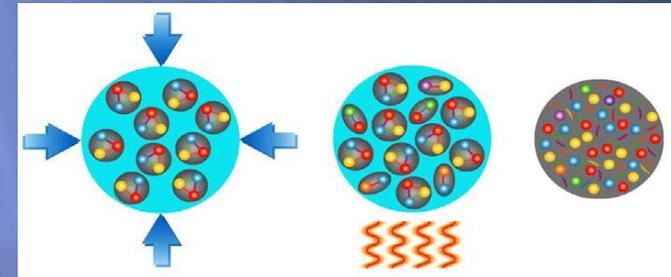
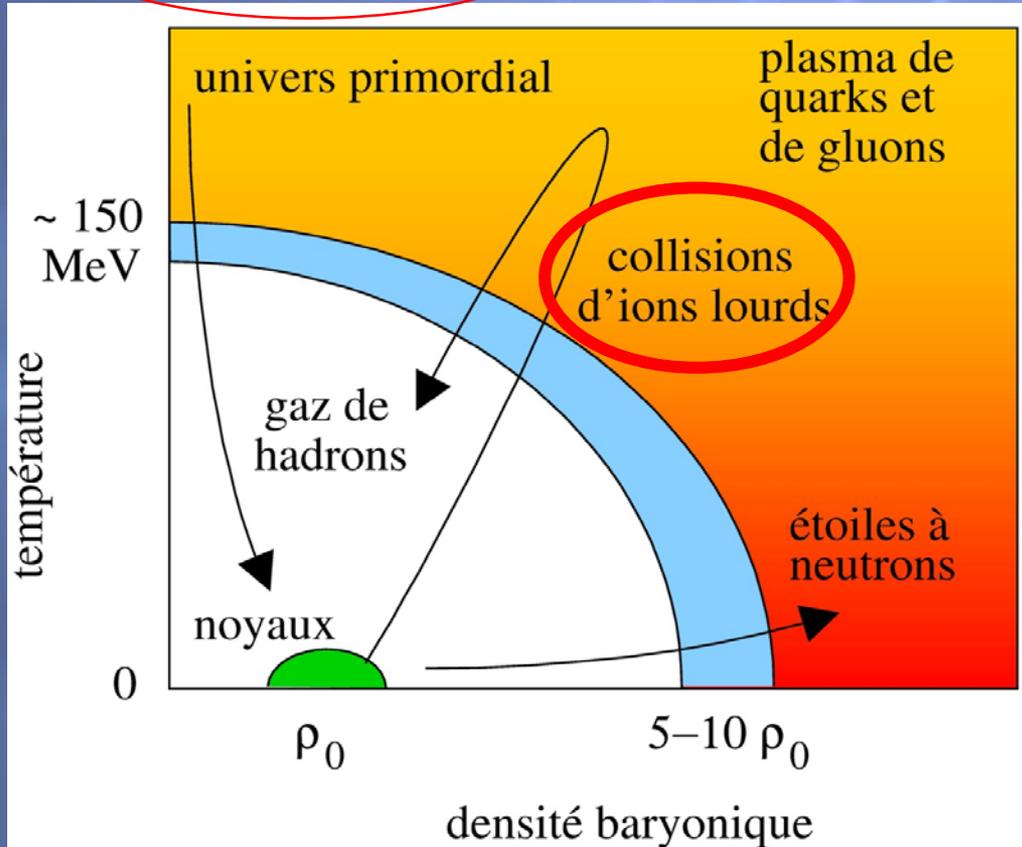


Etudier la dynamique des partons à petit x et haute densité (CGC)



A faible densité  
chauffer

En augmentant la densité d'énergie



Pression + Chaleur = QGP

A faible température  
augmenter la densité

1 TeV =  $10^{12}$  eV = énergie d'un moustique lancé à 40 cm/s !!!

L'énergie d'un proton au LHC = 14 TeV soit une escadrille de moustiques...

Energie dérisoire à notre échelle mais concentrée dans le volume d'un proton soit 30 000 milliards de fois plus petit que l'atome d'hydrogène !

-> densité d'énergie énorme, bien supérieure à celle nécessaire pour atteindre un QGP

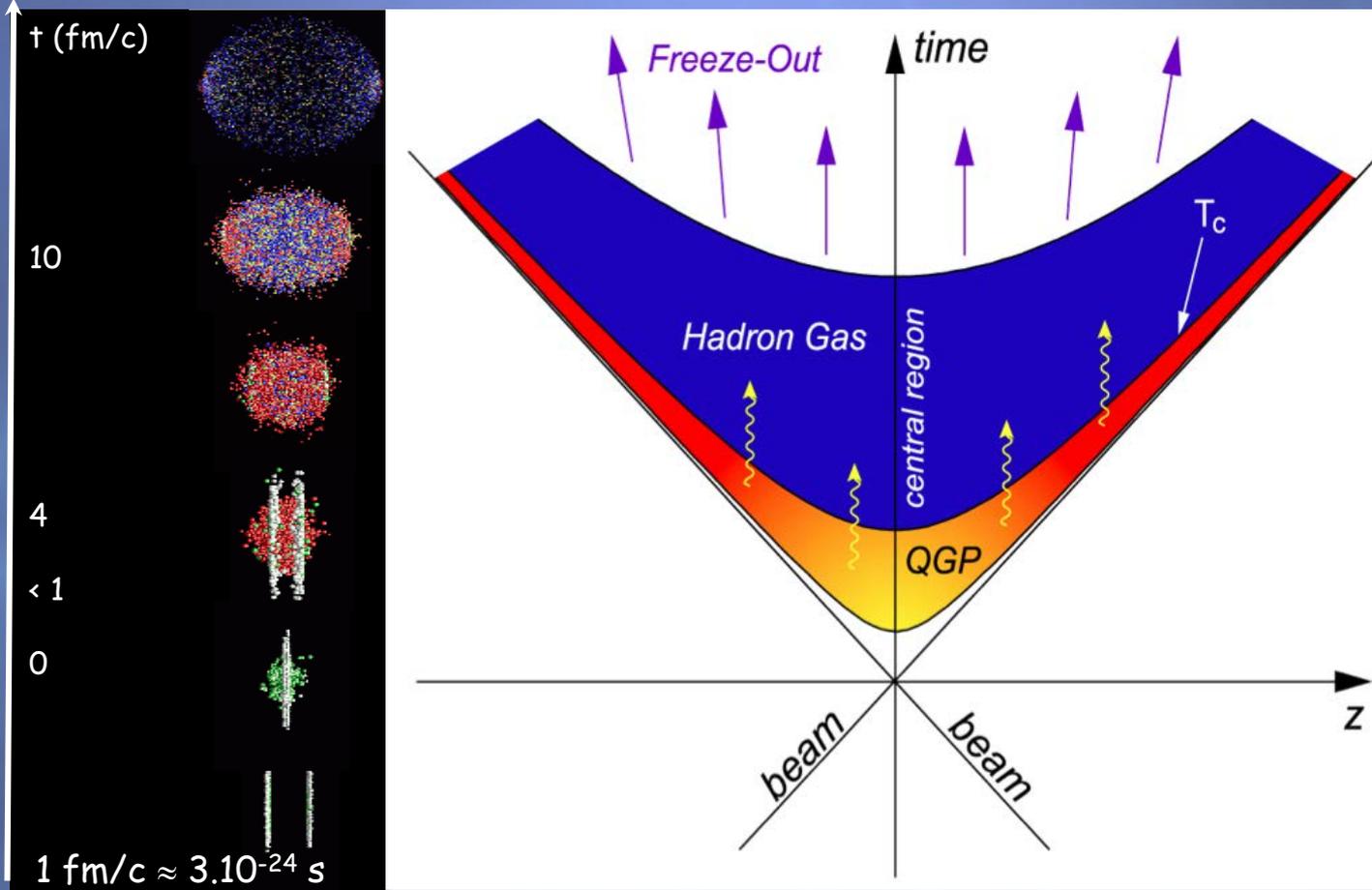
Oui mais ce n'est pas la seule contrainte à prendre en considération...

Le temps de formation du milieu formé, son temps de vie, son volume sont autant de paramètres importants à prendre en compte. N'oublions pas non plus que c'est un système dynamique qui évolue dans le temps.

-> on va donc faire entrer en collisions des noyaux les plus gros possibles, à la plus haute énergie possible pour avoir des conditions favorables à la formation d'un QGP.

On pourra faire varier la taille des noyaux et/ou l'énergie pour changer les conditions initiales.

# Les collisions d'ions lourds Ultra-Relativistes : évolution spatio-temporelle



après la fin des interactions entre hadrons, le système est gelé, les particules volent vers les détecteurs

les quarks et gluons se regroupent pour créer des hadrons

déconfinement : les quarks et les gluons se meuvent librement

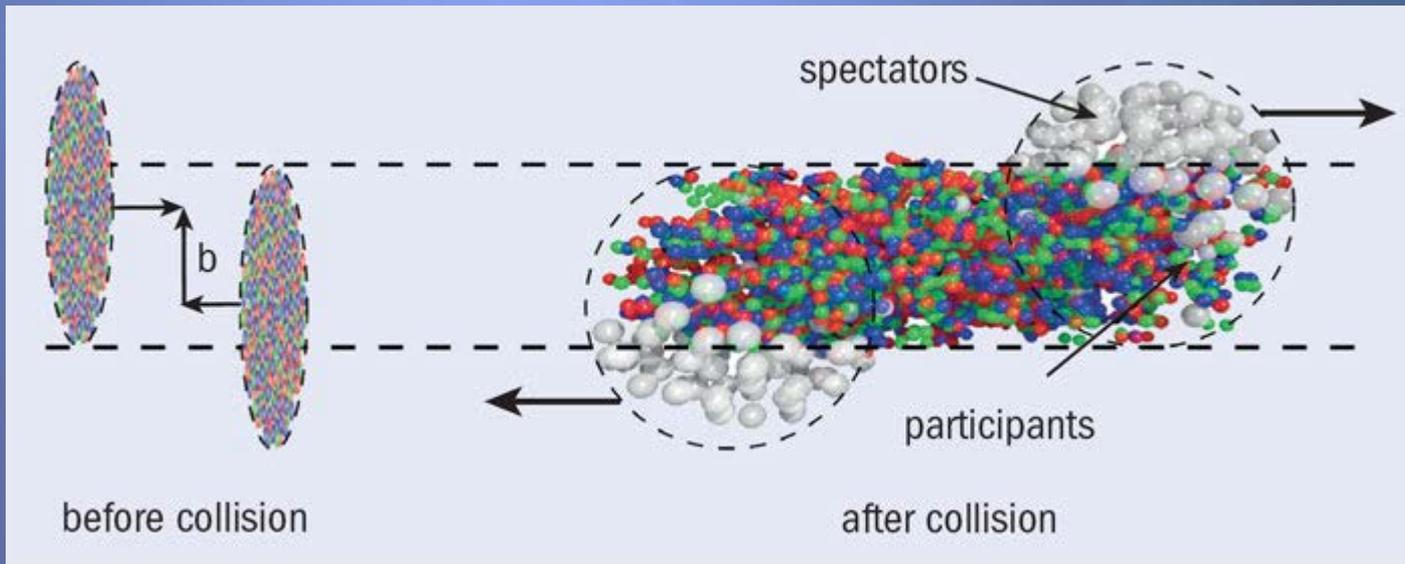
interactions violentes entre quarks et gluons, production de particules très énergétiques, thermalisation du système

les noyaux, en phase d'approche, sont "aplatis" par la contraction de Lorentz

- 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

- **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 ( $p_{\perp}$ ) : impulsion de la particule dans la direction perpendiculaire au faisceau. Plus  $p_{\perp}$  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, le volume, le temps de vie et la température augmentent

# Les particules produites

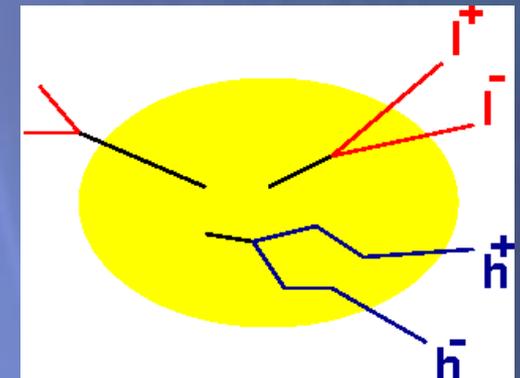
photons ( $\gamma$ ), leptons ( $e, \mu$ ) et hadrons

		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	$p( uud )$	$\Lambda( uds )$	$\Lambda_c^+( udc )$	$\Lambda_c^0( udb )$
		$n( udd )$	$\Sigma^+( uus )$	$\Sigma_c^0( ddc )$	$\Xi_b^0( usb )$
		$\Delta^0( udd )$	$\Xi^+( dss )$	$\Xi_c^+( usc )$	$\Xi_b^-( dsb )$
			$\Omega^-( sss )$	$\Omega_c^0( ssc )$	
		...	...	...	...

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

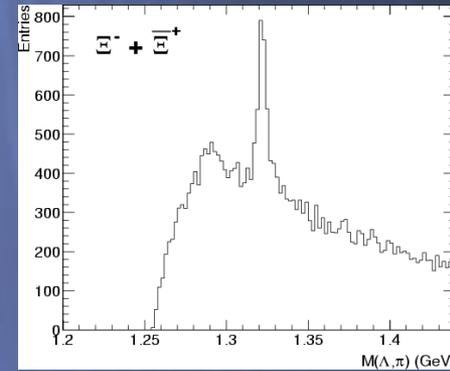
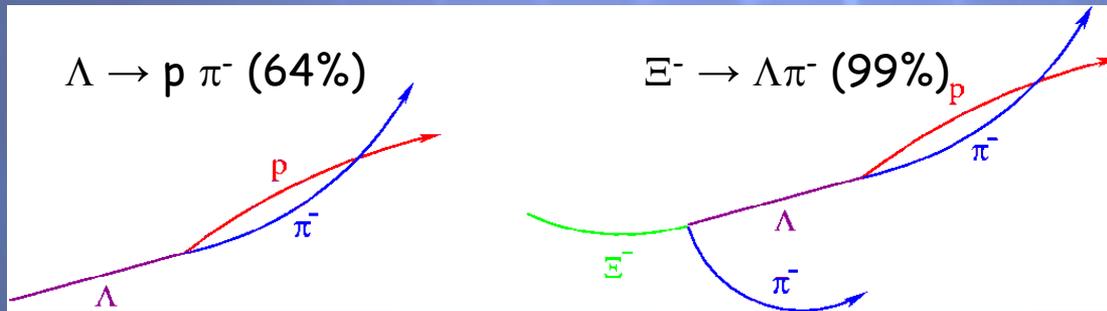
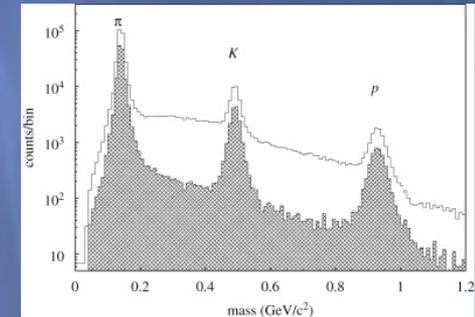
exemple de "particule intéressante" : particule lourde (produite uniquement au début de la collision), se désintégrant rapidement (dans le QGP) en leptons (qui ne subissent pas d'interactions avec d'autres particules)



# Identification des particules produites...

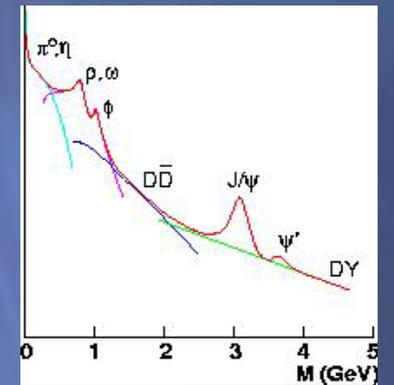
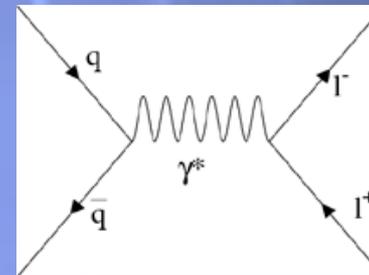
La plupart des particules sont identifiées par la mesure de leur masse

- Mesures directes : les particules " stables" ( $\pi$ ,  $K$ ,  $p$ ...) traversent les détecteurs
- Mesures indirectes : reconstruction des particules instables

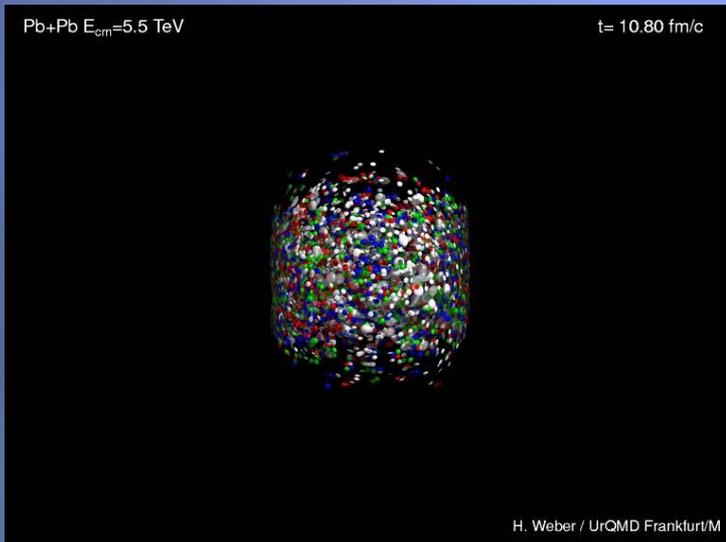


• Le cas particulier des dileptons : sources multiples, faibles rapports d'embranchement

- |   |   |
|---|---|
| $\pi^0 \rightarrow l^+l^- \gamma$ (1 %)                 | $\phi \rightarrow l^+l^-$ ( $3 \cdot 10^{-4}$ %)  |
| $\eta \rightarrow l^+l^- \gamma$ ( $1 \cdot 10^{-3}$ %) | $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ (5.9%)                |
| $\rho \rightarrow l^+l^-$ ( $5 \cdot 10^{-5}$ %)        | $\psi' \rightarrow l^+l^-$ ( $7 \cdot 10^{-3}$ %) |
| $\omega \rightarrow l^+l^-$ ( $7 \cdot 10^{-5}$ %)      | $D \rightarrow l X$ (10 %)                        |

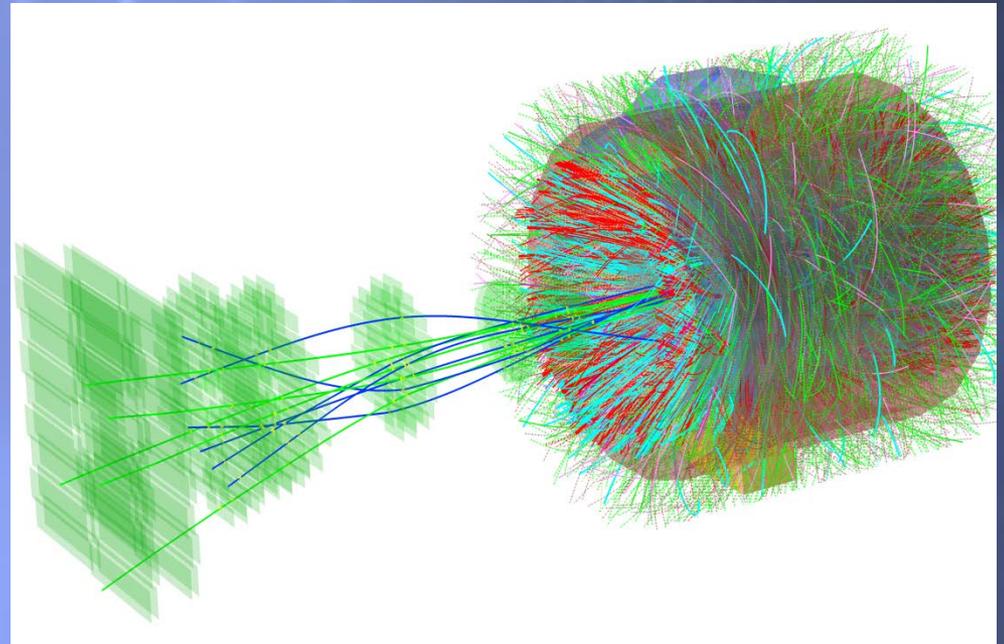


... mais pas aussi simple



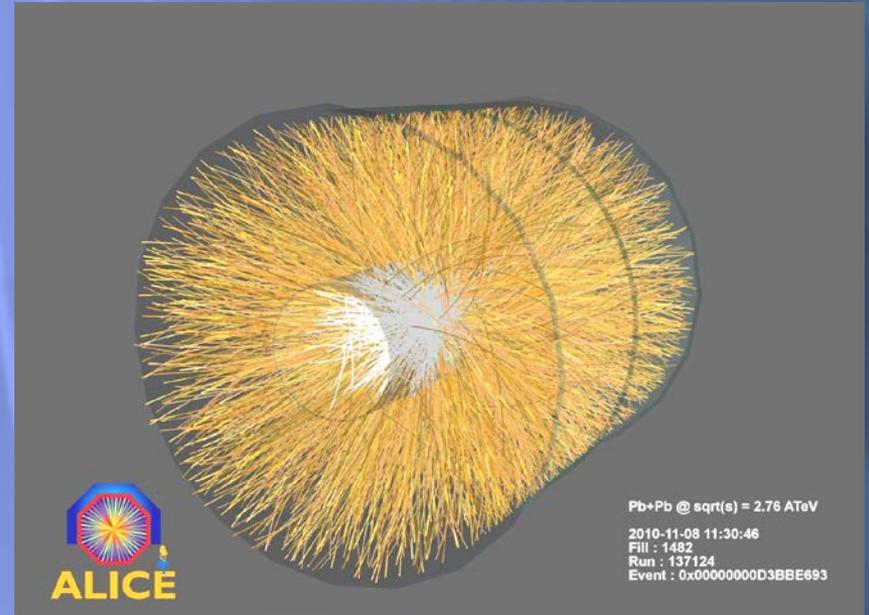
Une collision d'ions lourds simulée  
(Pb-Pb à 5,5 TeV)

Le même type de collisions vue par  
ALICE (Pb-Pb à 2,76 TeV)

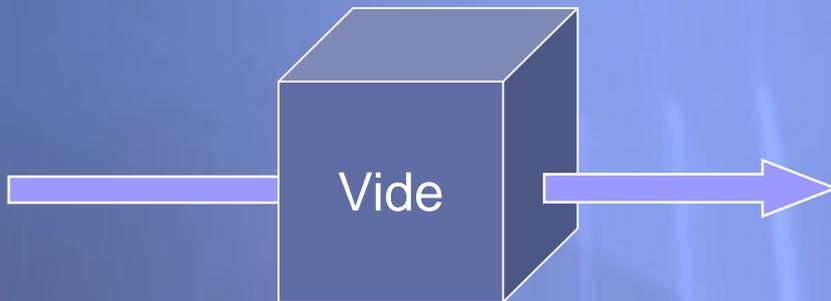


## Difficultés

- environnement hostile (jusqu'à ~17000 particules chargées produites dans les collisions les plus centrales)
- les collisions intéressantes sont souvent rares
- le temps de vie du système est extrêmement court, sa taille est extrêmement 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



## Sonder le QGP



Une bonne "sonde"  
(particule/observable) devrait être :

- bien comprise en collisions p-p



- faiblement affectée par la matière hadronique et de manière bien comprise -> collisions p-A et AA périphériques



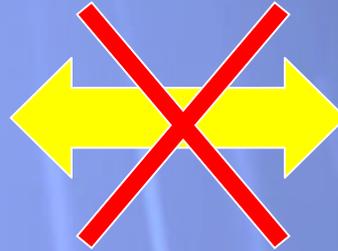
- fortement affectée par le QGP -> collisions AA centrales.

# Dialogue permanent entre théorie et expérience

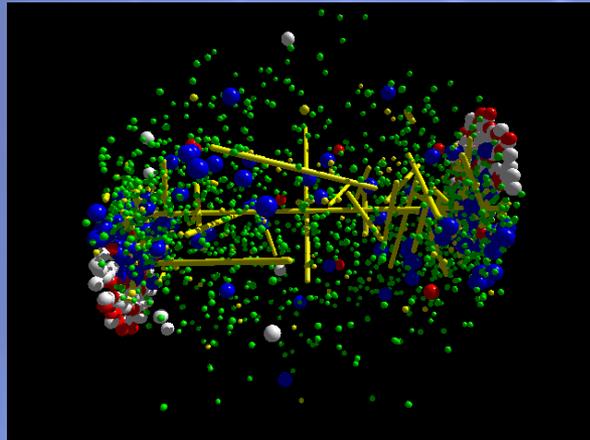
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{\psi}_f (i \not{D} + m_f) \psi_f$$

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

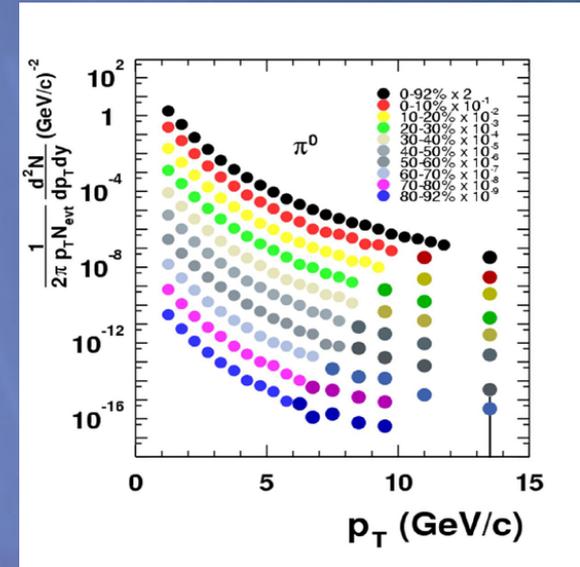
Théorie fondamentale : QCD



Les interprétations nécessitent des concepts phénoménologiques



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



Résultats expérimentaux

# Attention !

Phénoménologie => interprétation en constante évolution !

Les interprétations d'il y a 3 ans ne seront pas forcément celles dans 2 ans...

À consommer de préférence avant le :

JJ / MM / AAAA

À conserver au froid entre 0 et + 6°C.

Sonder le QGP.

# Les sondes du QGP

Suppression de résonances lourdes

## Les sondes dures

-> particules produites en début de collision

## Les sondes molles

-> particules produites en fin de collision

Modification des résonances légères

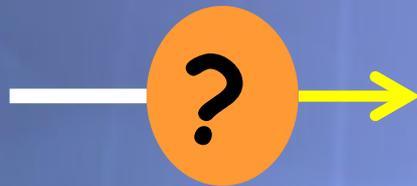
Production de photons

Augmentation de l'étrangeté

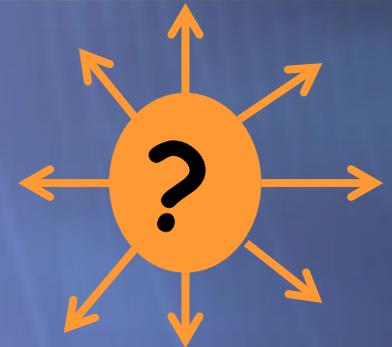
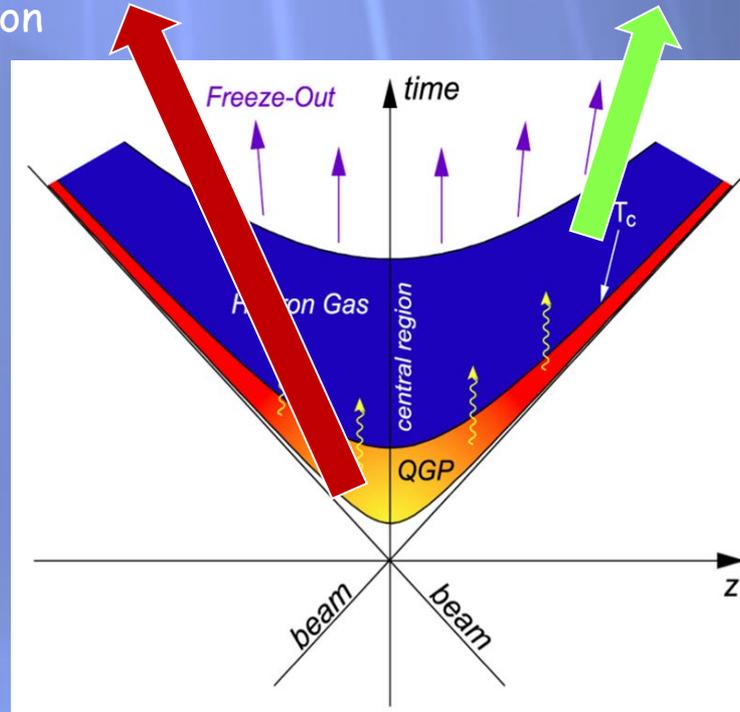
Jet quenching

Flow

Synthèse des hadrons



Informations "directes" du milieu

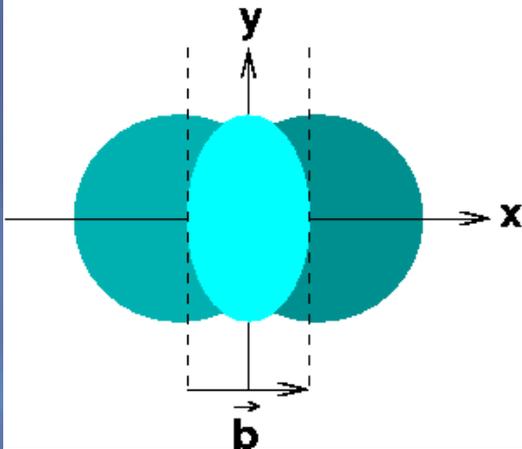


Informations "indirectes" du milieu

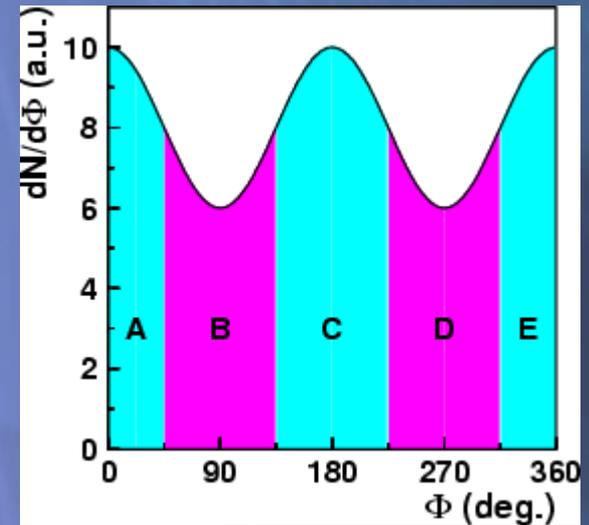
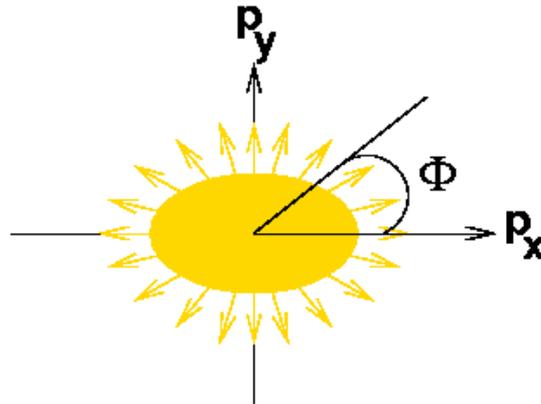
## Les sondes molles : caractérisation du flow

Flow : écoulement collectif de la matière dans des directions privilégiées.  
Résulte de la pression accumulée dans le système

anisotropie d'espace



anisotropie de moment

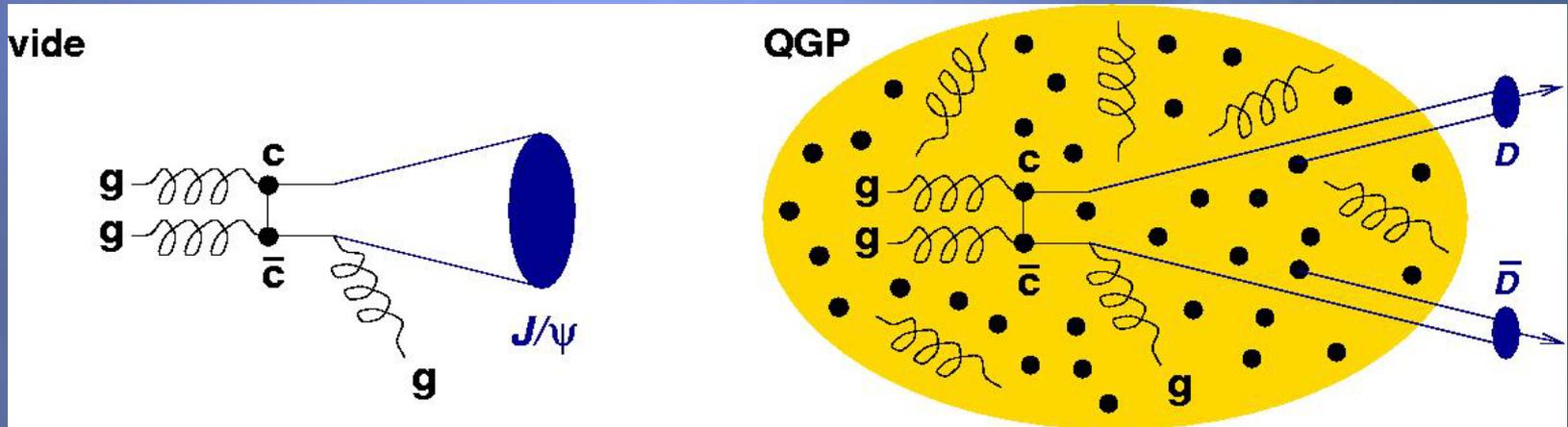


- l'anisotropie (initiale) d'espace produit un gradient de pression plus grand dans la direction x que dans la direction y
- l'amplitude mesurée (i.e. finale) du flow elliptique ( $v_2 = (A+C+E)/(B+D)$ ) est représentative du gradient de pression initial (i.e. de la densité du système)

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

Le flow donne une information sur la thermalisation du milieu et son comportement en terme hydrodynamique.

## Les sondes dures : suppression des résonances lourdes



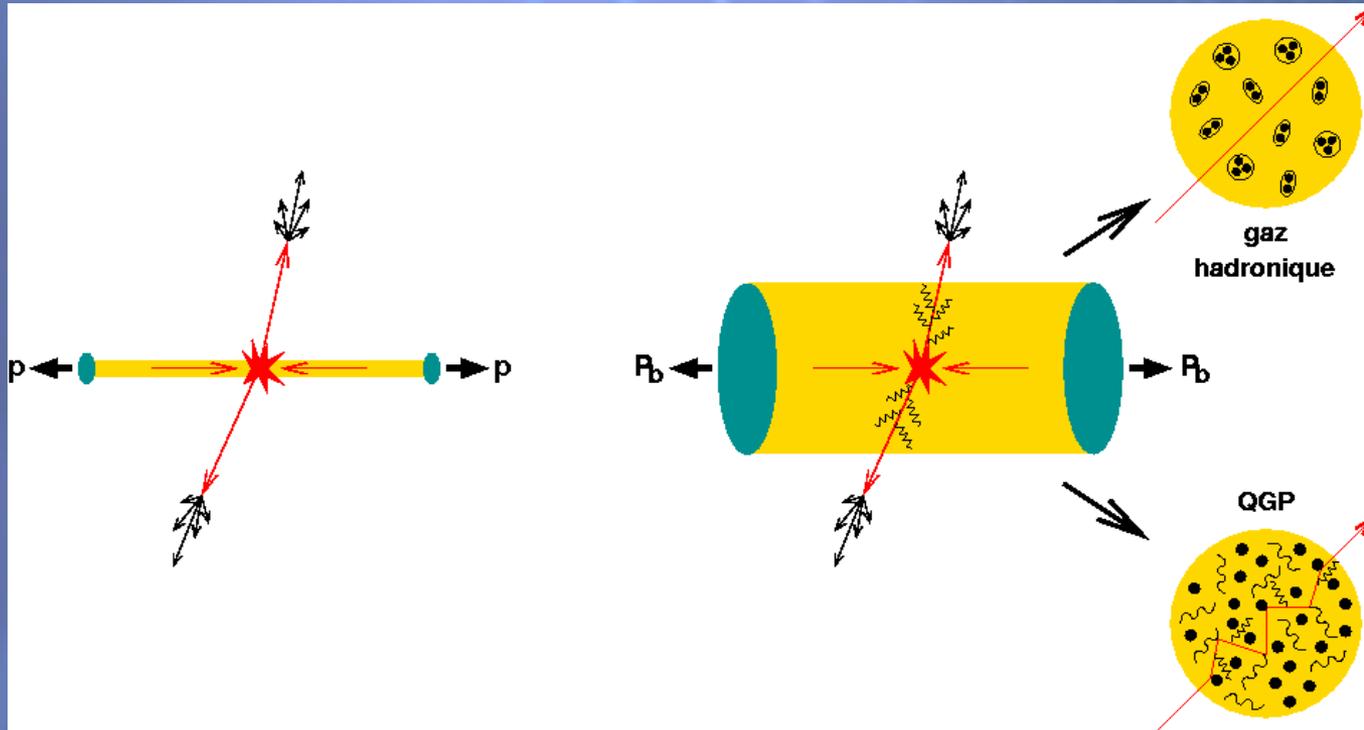
deux gluons fusionnent en une paire  $c\bar{c}$ . Après un certain temps, et avec l'aide d'un autre gluon, le  $J/\psi$  est formé.

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  $J/\psi$  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  $J/\psi$  dans les collisions de plus en plus centrales

## Les sondes dures : jet quenching

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

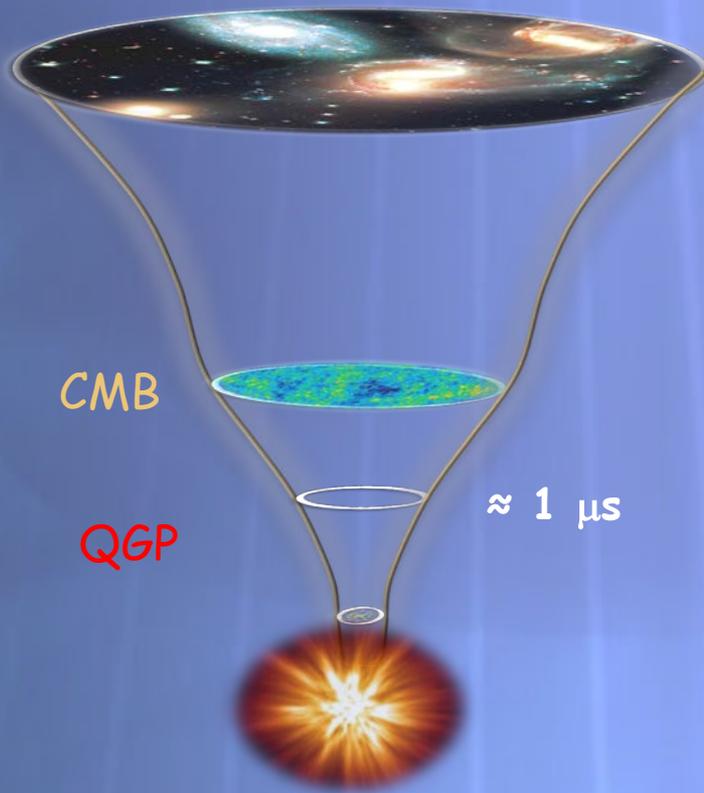


- le QGP étant plus dense que le gaz hadronique, un quark traversant le QGP doit perdre plus d'énergie que dans le gaz hadronique
- le QGP doit donc engendrer une suppression des particules de grand  $p_+$  (jet quenching)

# Big Bang vs Little Bang

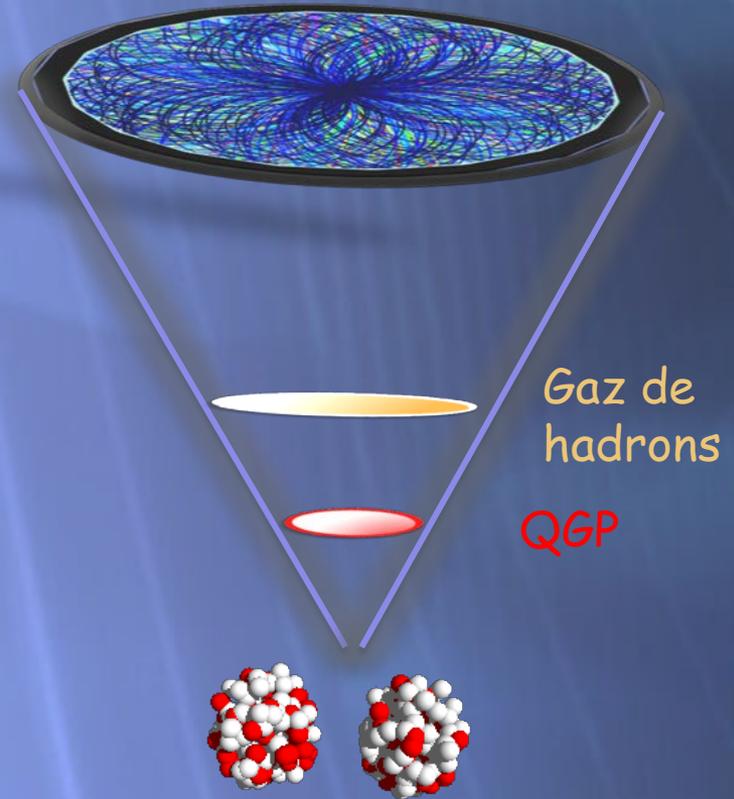
## Big Bang

Present :  $t_0 + 13.7 \times 10^9$  ans



## Little Bang

Present :  $t_0 + 3 \times 10^{-23}$  secondes



Temps

$t_0$

- 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

Le QGP a-t-il été observé auprès des expériences?  
(deuxième cours)

Fin du 1<sup>er</sup> cours.