

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^{ère} 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.

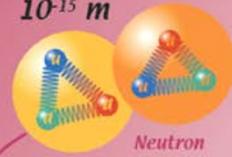
Quarks never exist alone, gluons bind them to one another with the strong force.
Les quarks n'existent jamais seuls, les gluons les lient entre-eux grâce à la force forte.

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

$< 10^{-19} \text{ m}$
0.000 000 000 000 000 001

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



Water molecule
Molécule d'eau

10^{-4} m



Cell
Cellule

1 m



Carlo

10^7 m



Earth
Terre

$> 10^{26} \text{ m}$
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 !

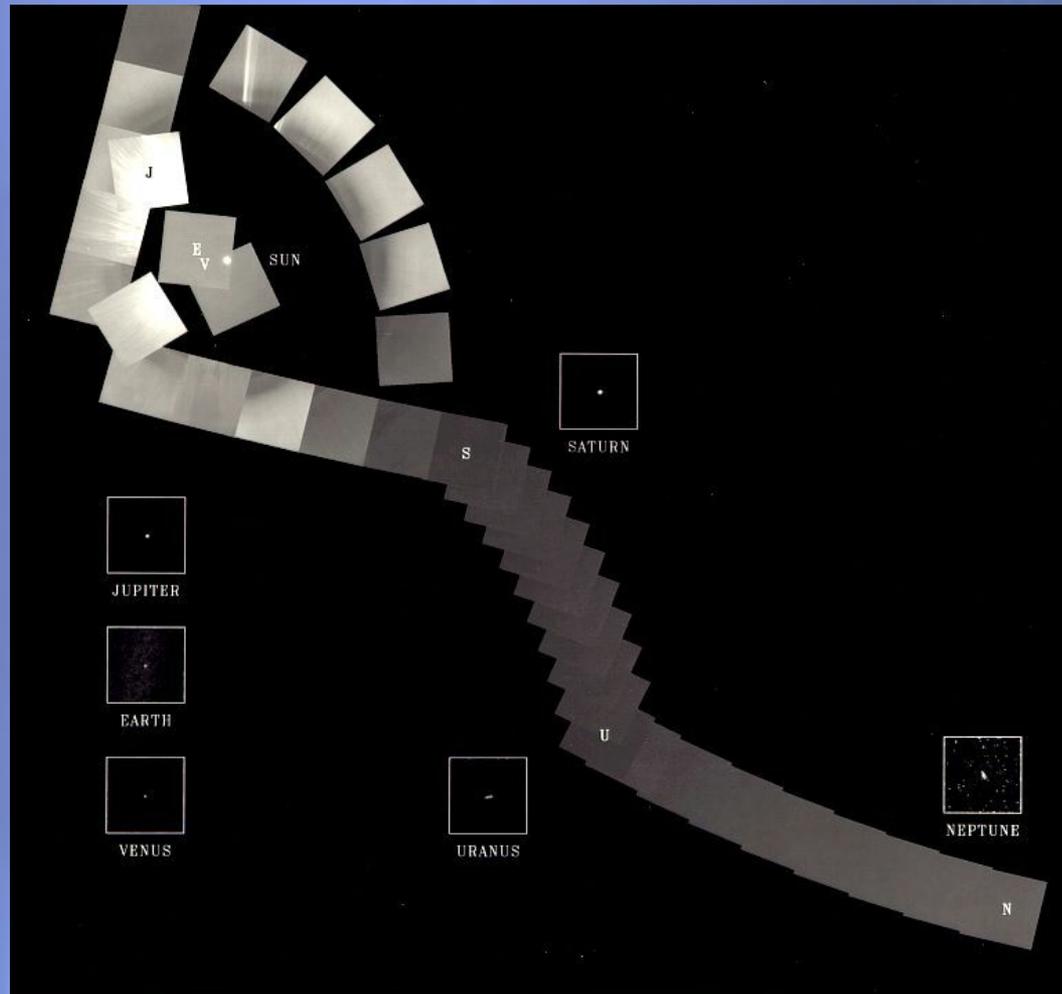


Image du système solaire prise par Voyager 1 en 1990 à ~6 milliards de km

Les constituants élémentaires

Charges

Leptons

0

Electron Neutrino
Mass ~ 0

Muon Neutrino
 ~ 0

Tau Neutrino
 ~ 0

-1

Electron
0.511 MeV

Muon
105.7

Tau
1777

Les fermions
+ leurs anti-particules

Quarks

+2/3

Up
2.5

Charm
1270

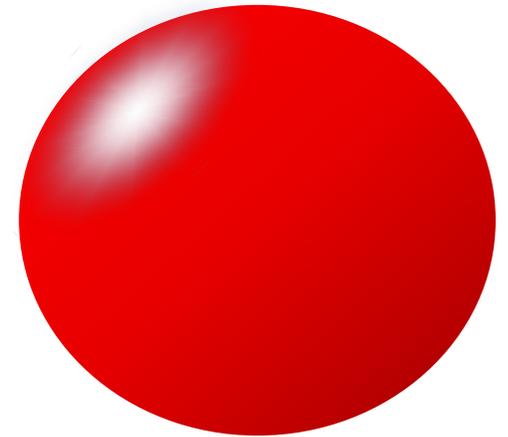
Top
171 000

-1/3

Down
5

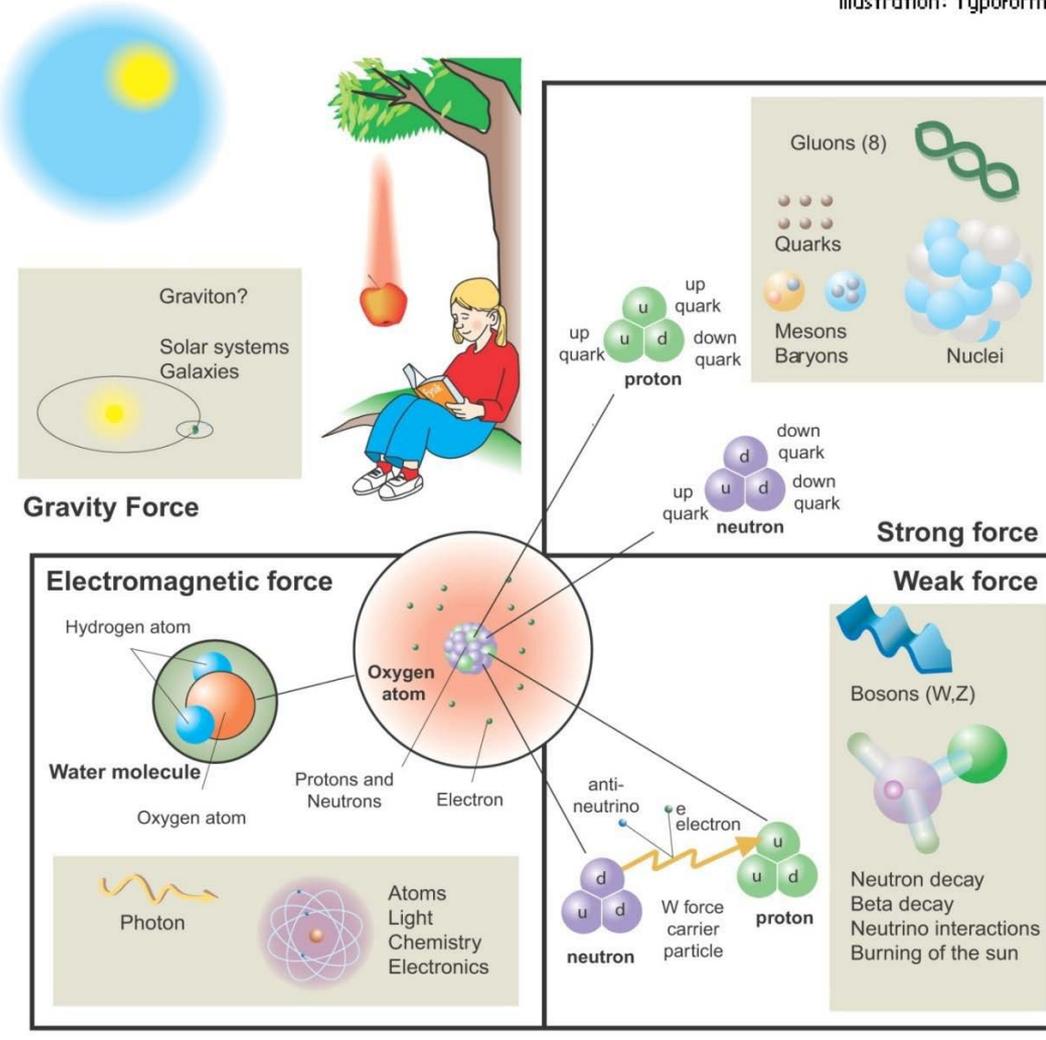
Strange
104

Bottom
4200



Les interactions fondamentales

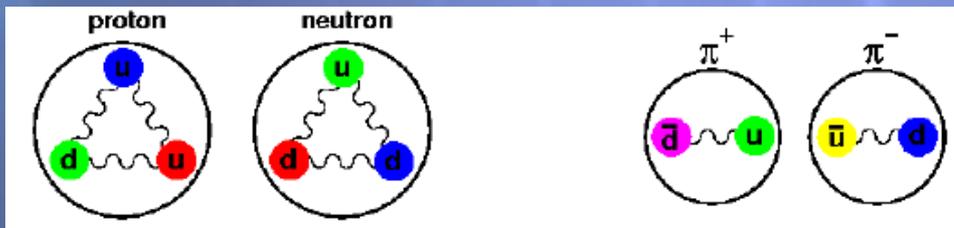
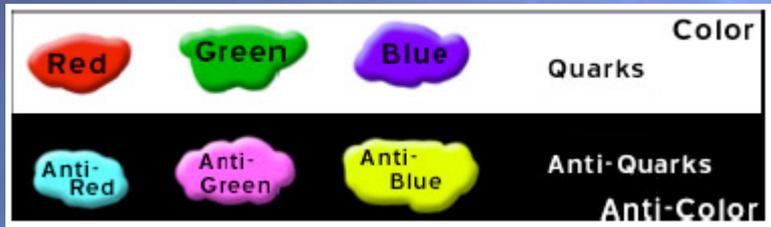
Illustration: Typoform



	Bosons
Forte	8 gluons
Electromagnétique	Photon
Faible	3 bosons : W^+ , W^- , Z^0
gravitation	Graviton ?

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

the particle zoo

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

see the full list on <http://pdg.lbl.gov>

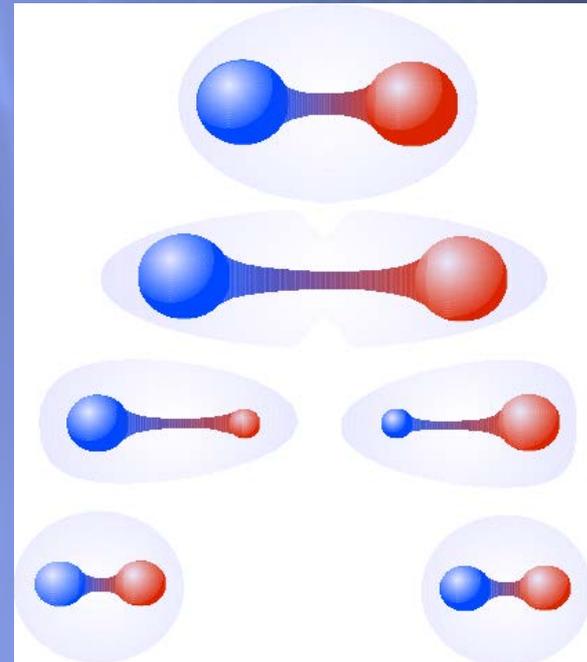
Quelques notions sur l'interaction forte

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.

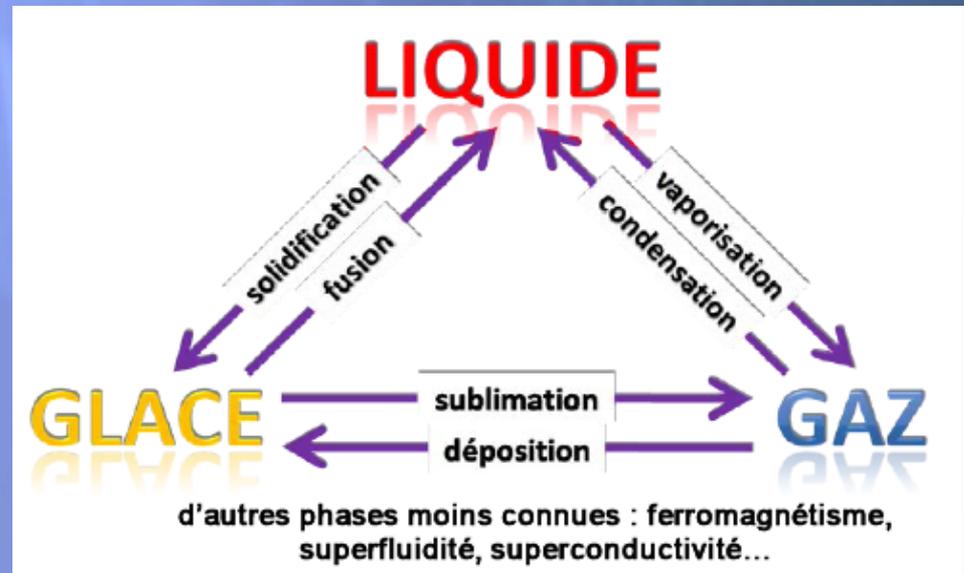
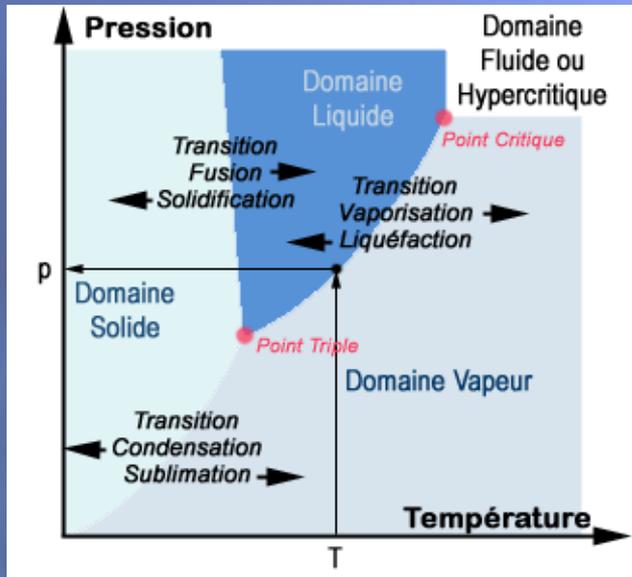
Les quarks sont donc confinés dans les hadrons.

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



Transition de phase de la matière nucléaire

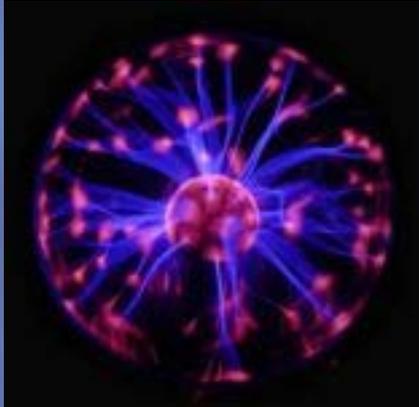
Un diagramme de phase décrit, habituellement dans un plan défini par deux variables macroscopiques, les régions d'existence des différentes phases (ou états) d'un système.



- Une transition de phase est une transformation d'un système d'une phase à une autre
- Cette transition de phase peut être du 1^{er} ordre (coexistence entre les 2 phases) comme par exemple lors de l'ébullition de l'eau à pression atmosphérique, ou du 2^{ème} 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.

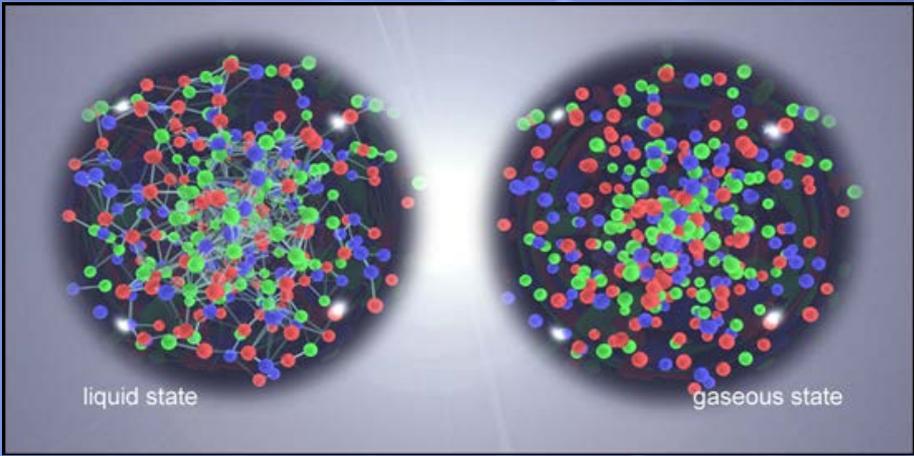
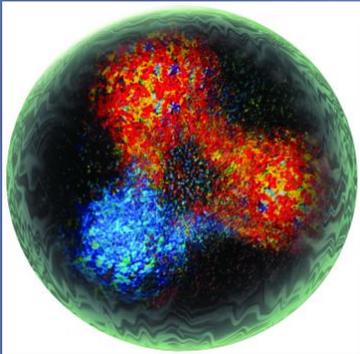
QGP et collisions d'ions lourds
ultra-relativistes.

Transition de phase de la matière nucléaire



Solide Liquide Gaz Plasma

Température →



QGP ?



Transition de phase de la matière nucléaire

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

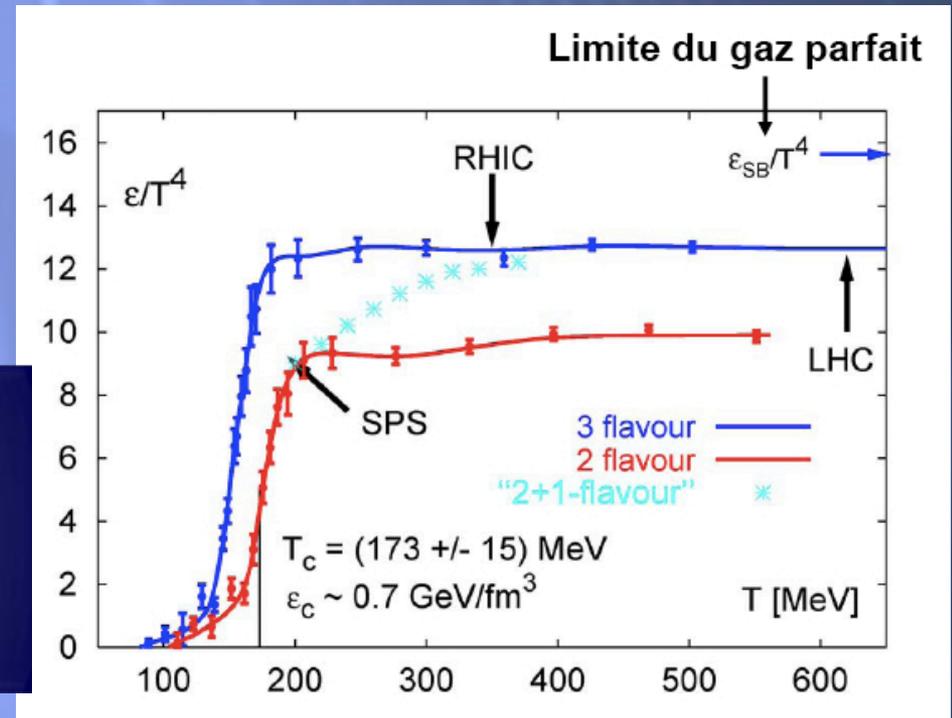
where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + i f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$
and $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

Théorie fondamentale : QCD



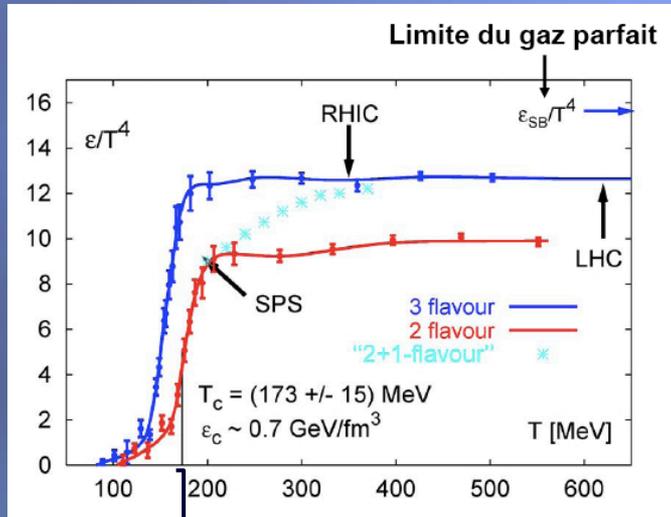
1 MeV = 10^6 eV \approx 12 Milliards de degrés K \sim
600 fois la température interne du soleil
173 MeV \approx 2000 Milliards de degrés K \sim
100000 fois la t° interne du soleil
Densité d'énergie de $0,7 \text{ GeV/fm}^3$ à comparer
au noyau atomique qui est à $0,15 \text{ GeV/fm}^3$

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

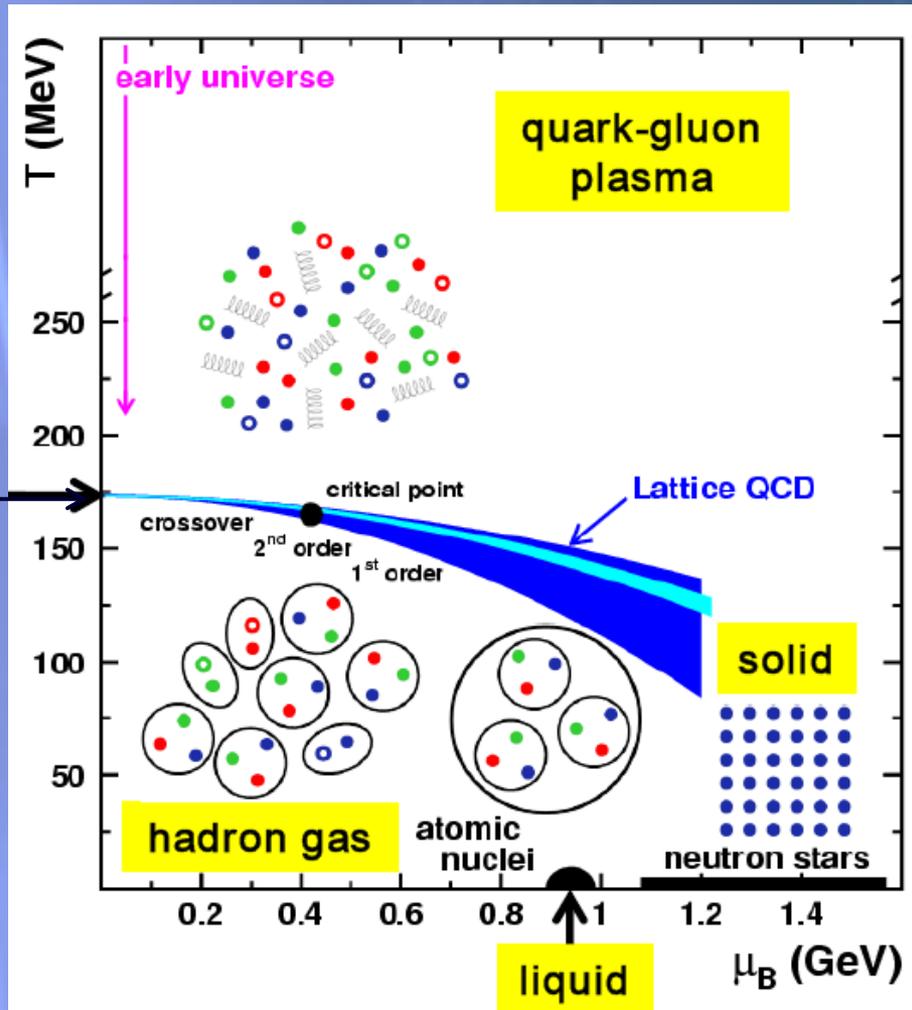


Calculs de QCD sur réseau

Transition de phase de la matière nucléaire



- ✓ Pour $\mu_B = 0$:
 - $T = 173 \text{ MeV} \approx 2.10^{12} \text{ K}$ ($T_{\text{soleil}} \approx 2.10^8 \text{ K}$)
 - $\epsilon = 0,7 \text{ GeV/fm}^3$
 - transition de type "crossover"
- ✓ Pour $\mu_B > 0$:
 - grande incertitude en température
 - ordre de la transition inconnu
 - existence d'un point critique
- ✓ Restauration de la symétrie chirale coïncide avec le déconfinement
- ✓ Le QGP n'est pas un gaz idéal



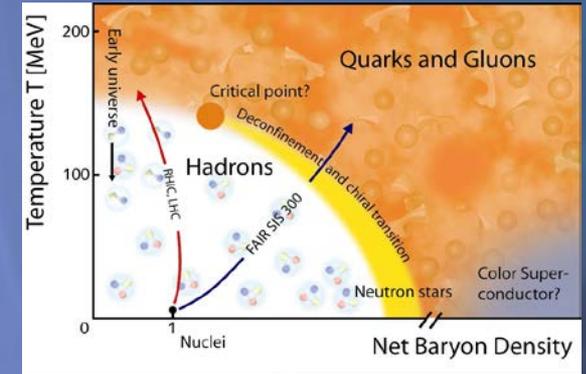
$\mu_B = \text{potentiel chimique baryonique}$
 $\sim N(\text{baryons}) - N(\text{antibaryons})$

But scientifique

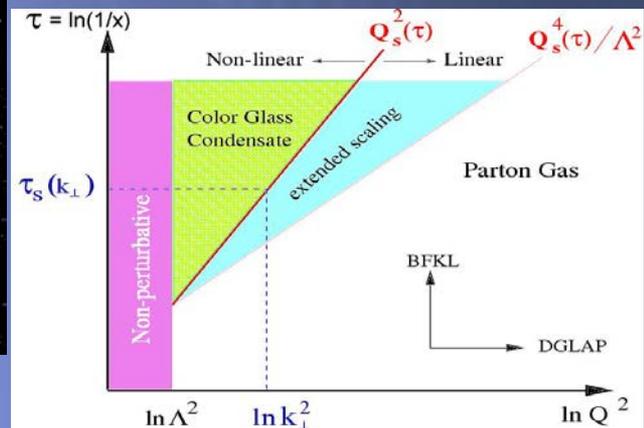
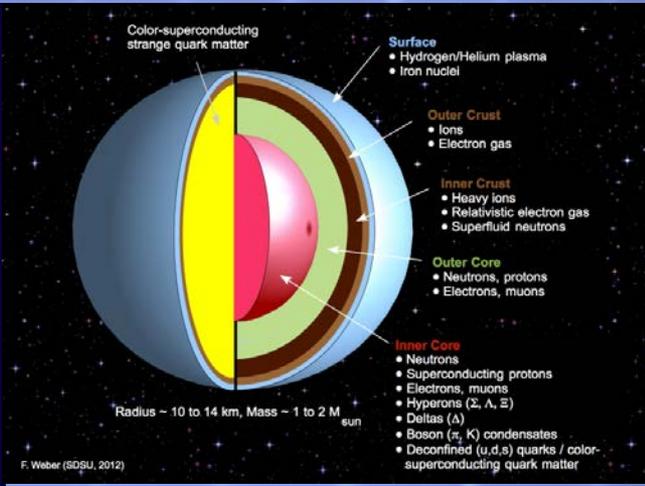
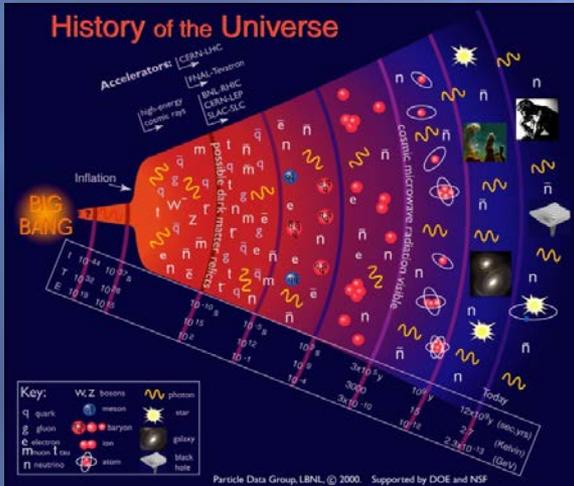
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{\psi}_f (i \not{D} - m_f) \psi_f$$

where $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + ig_s^a A_\mu^b A_\nu^c$
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 $G_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + ig_s^a A_\mu^b A_\nu^c$
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

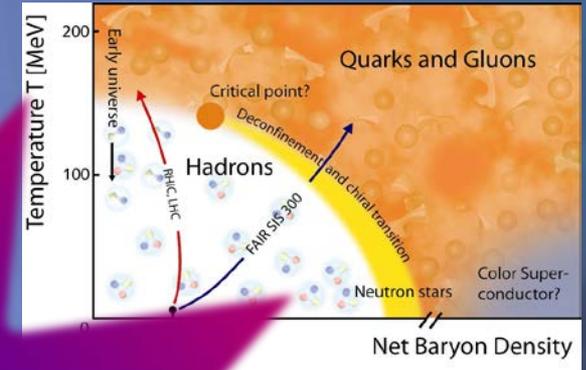
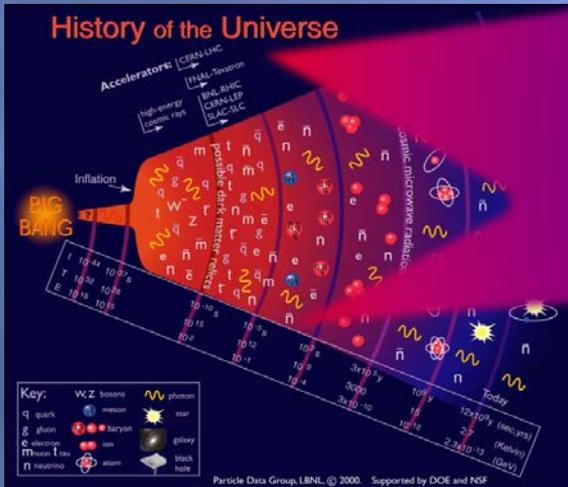
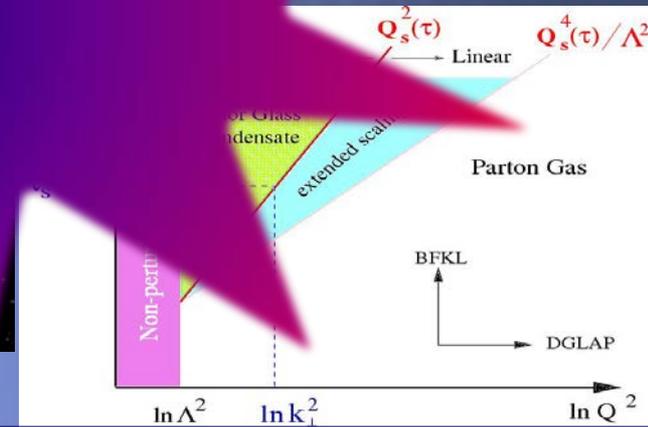


diagramme de phase de

Des conditions extrêmes à atteindre



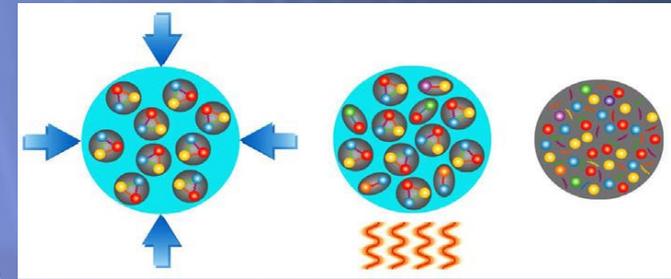
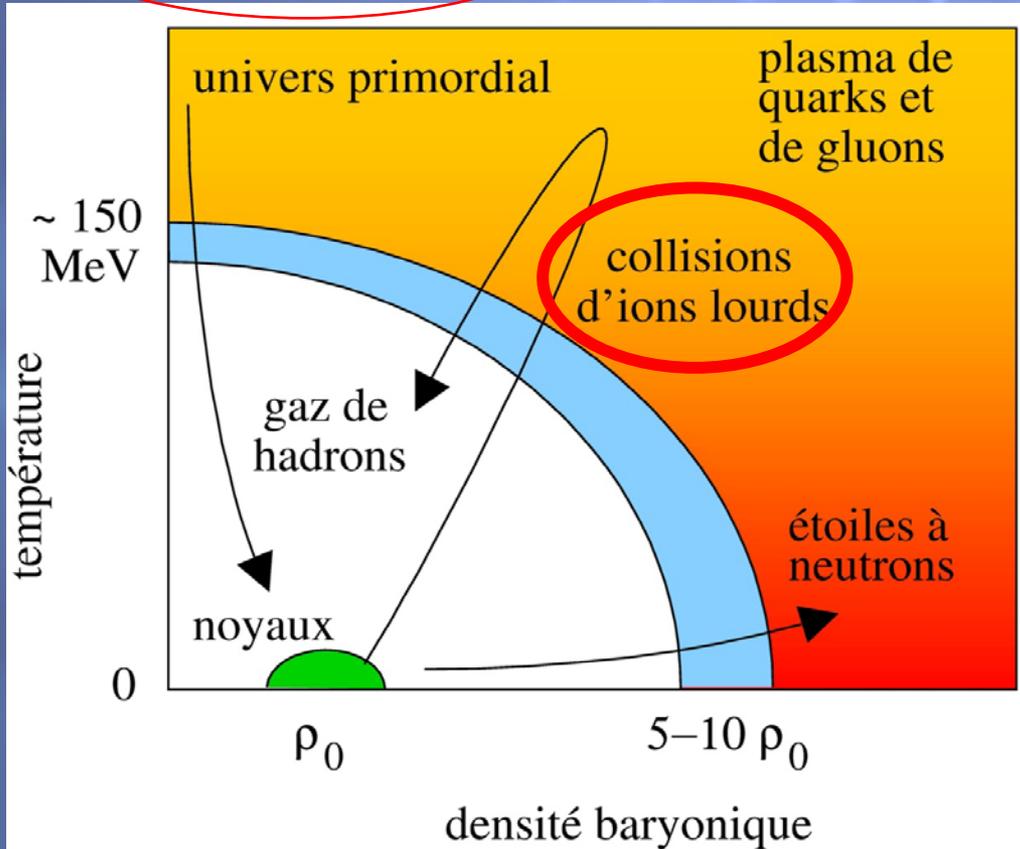
Comprendre les premiers instants de l'évolution
de notre Univers et certains phénomènes
astrophysiques (GRB, CDM, ...)



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...

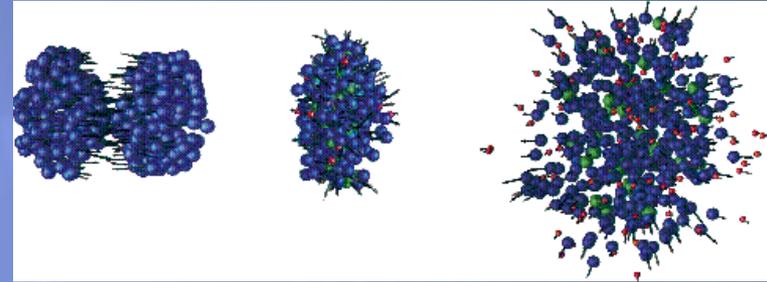
Le temps de formation du milieu formé, son temps de vie, son volume sont autant de paramètres importants à prendre en compte. N'oublions pas non plus que c'est un système dynamique qui évolue dans le temps.

-> 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.

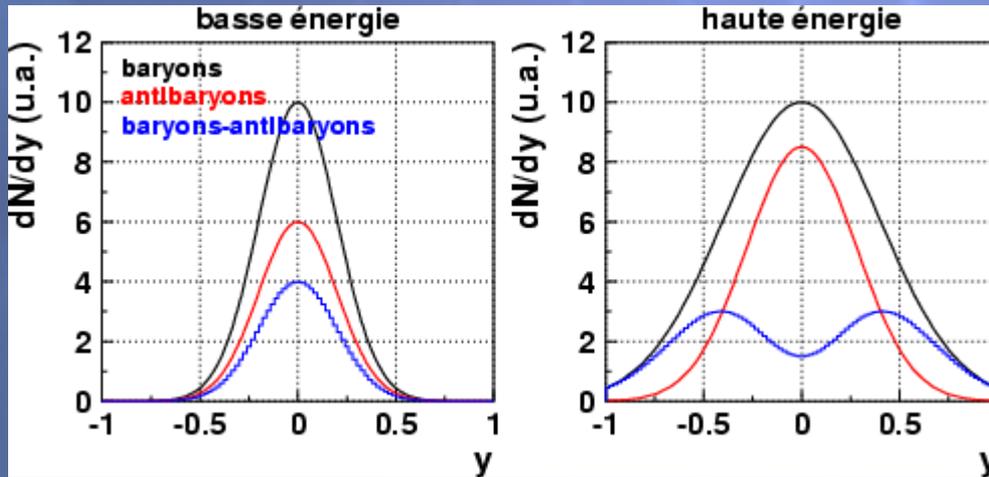
Les collisions d'ions lourds Ultra-Relativistes

- 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



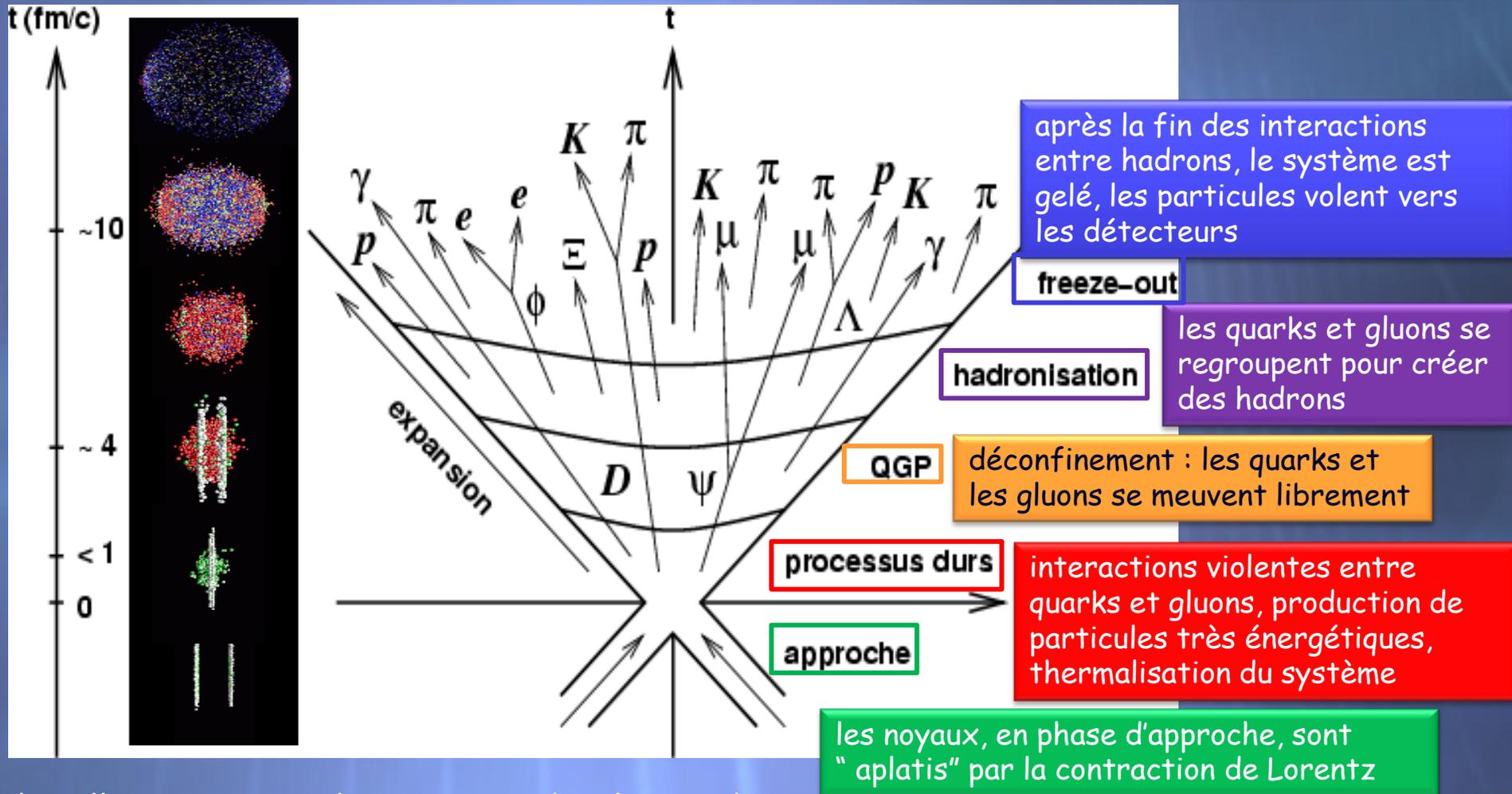
- Le système s'échauffe, se comprime, libère de l'énergie en produisant des particules, puis se détend, se refroidit et se désagrège.

Plus l'énergie de collision est élevée, plus les noyaux sont "transparents" et plus le potentiel chimique baryonique μ_B est proche de zéro.



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

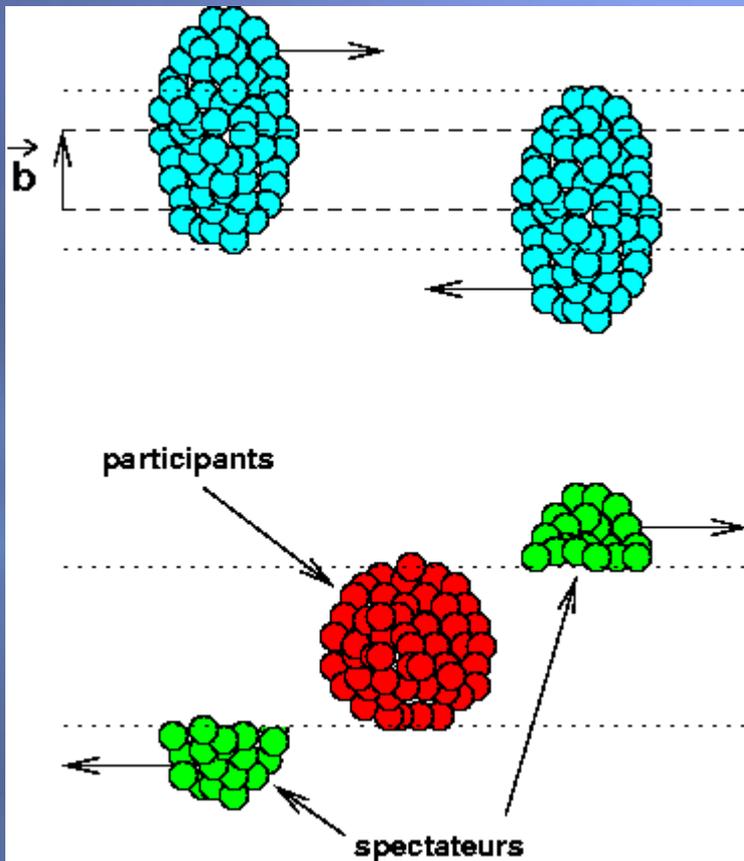
Les collisions d'ions lourds Ultra-Relativistes : évolution spatio-temporelle



- 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

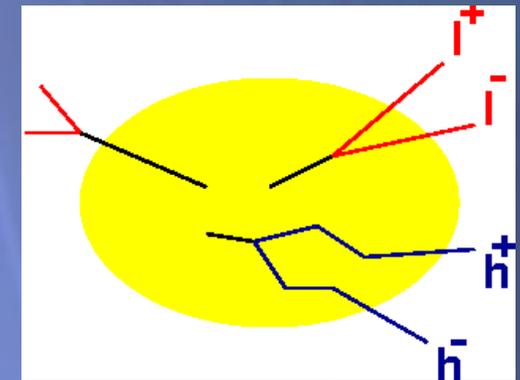
photons (γ), leptons (e, μ) et hadrons

		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	$p(uud)$	$\Lambda(u s d)$	$\Lambda_c^+(u d c)$	$\Lambda_c^0(u d b)$
		$n(u d d)$	$\Sigma^+(u u s)$	$\Sigma_c^0(d d c)$	$\Xi_b^0(u s b)$
		$\Delta^0(u d d)$	$\Xi^+(d s s)$	$\Xi_c^+(u s c)$	$\Xi_b^-(d s b)$
			$\Omega^-(s s s)$	$\Omega_c^0(s s c)$	
	

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

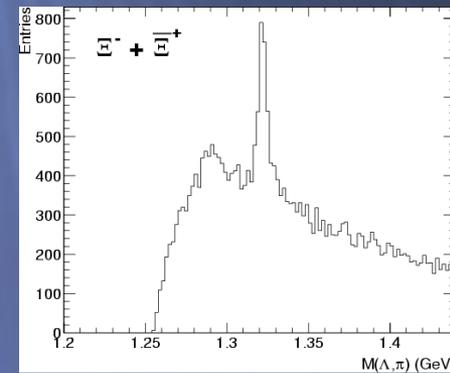
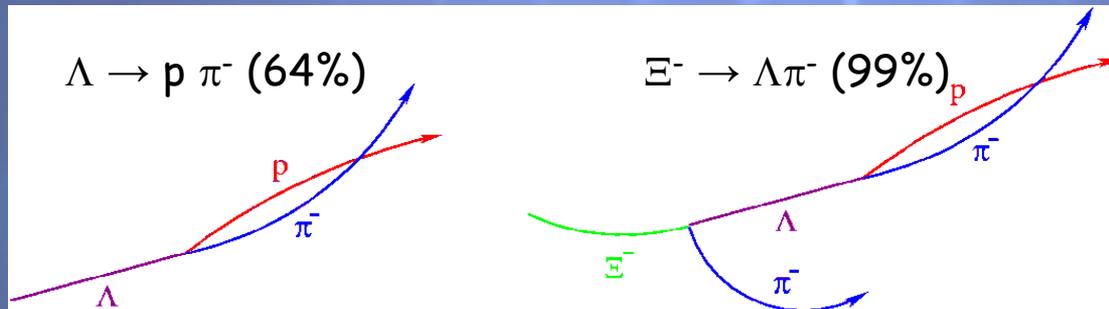
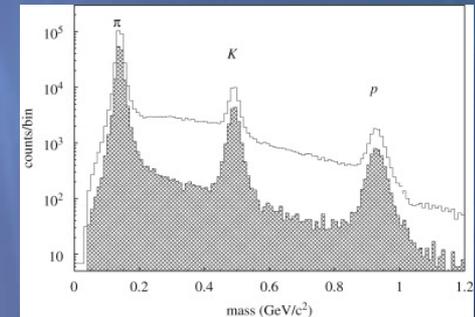
exemple de "particule intéressante" : particule lourde (produite uniquement au début de la collision), se désintégrant rapidement (dans le QGP) en leptons (qui ne subissent pas d'interactions avec d'autres particules)



Identification des particules produites...

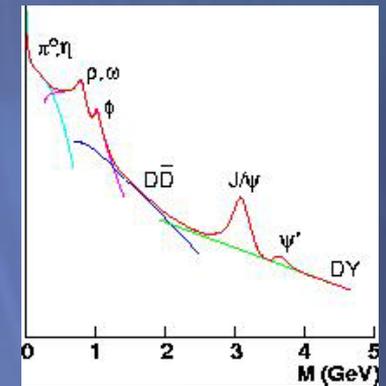
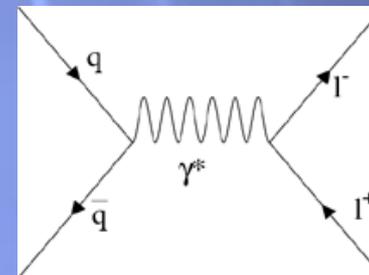
La plupart des particules sont identifiées par la mesure de leur masse

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

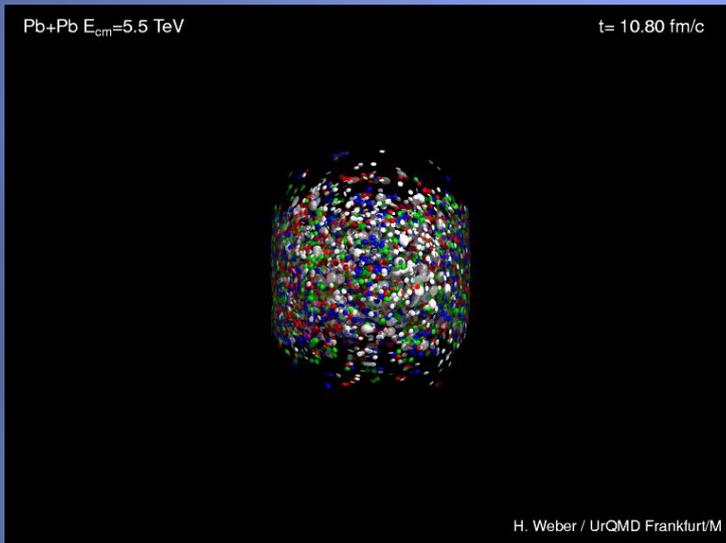


• Le cas particulier des dileptons : sources multiples, faibles rapports d'embranchement

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

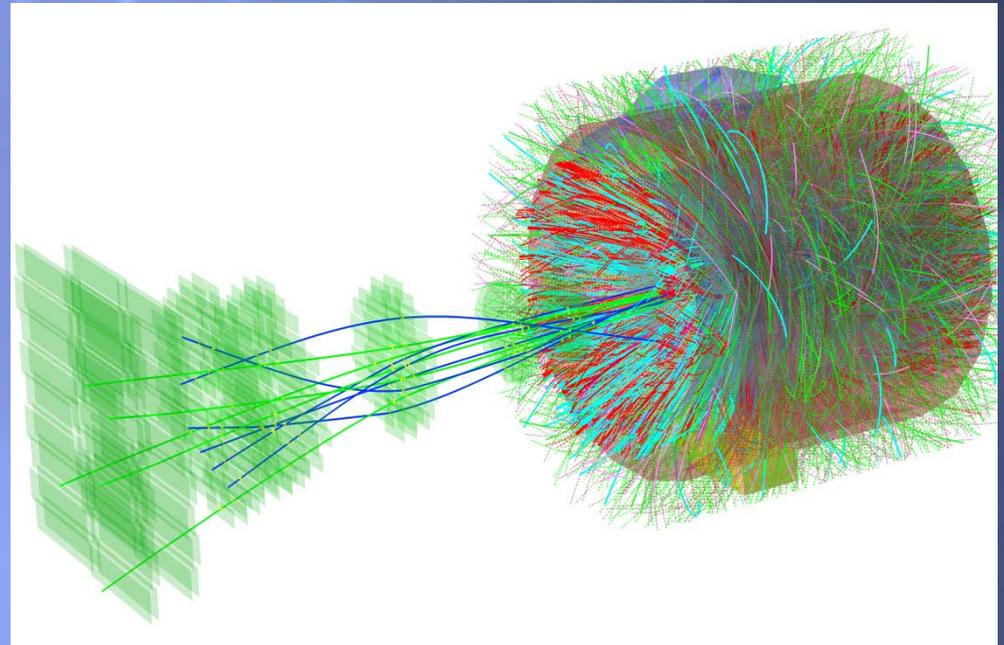


... mais pas aussi simple



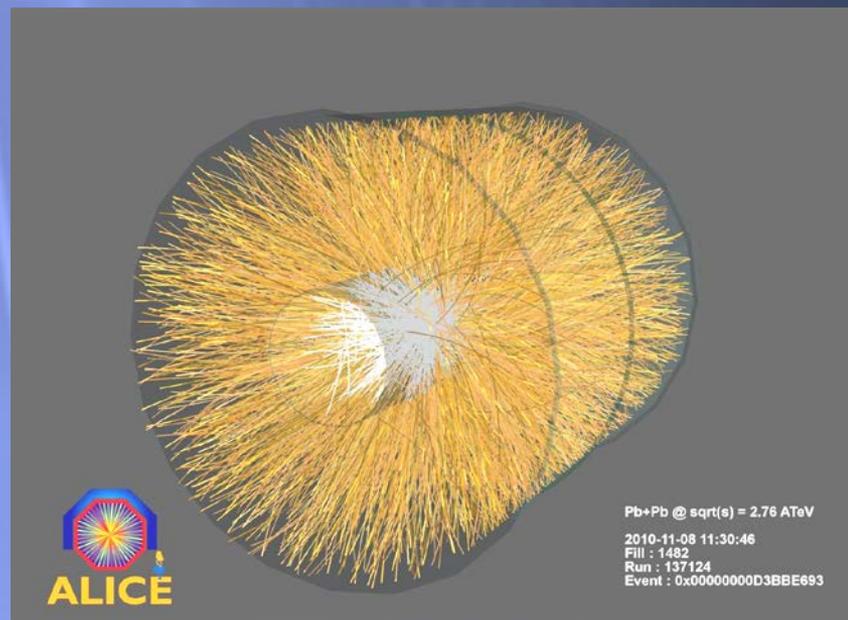
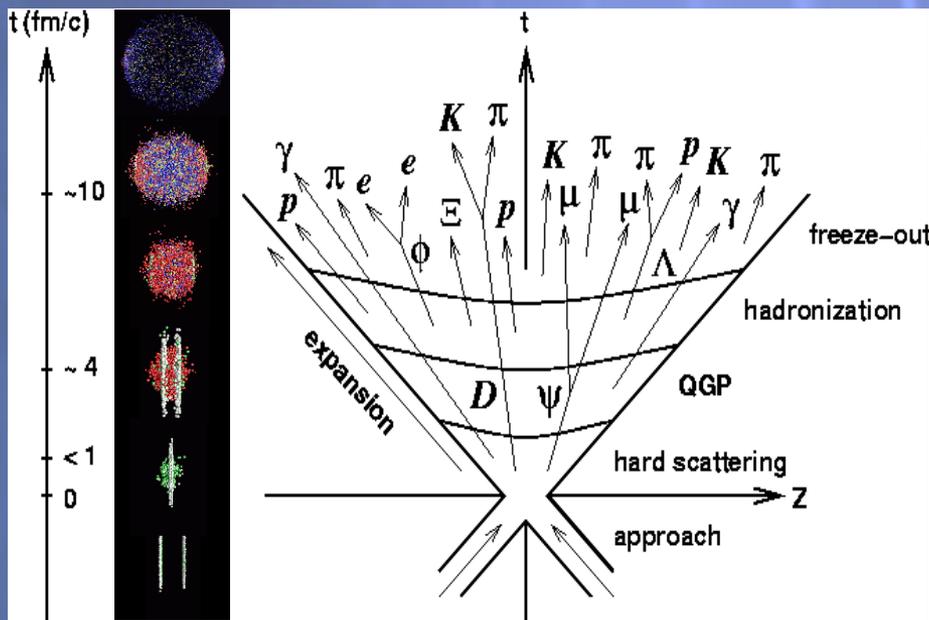
Une collision d'ions lourds simulée
(Pb-Pb à 5,5 TeV)

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



Difficultés

- environnement hostile (jusqu'à 30000 particules produites par collision)
- 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



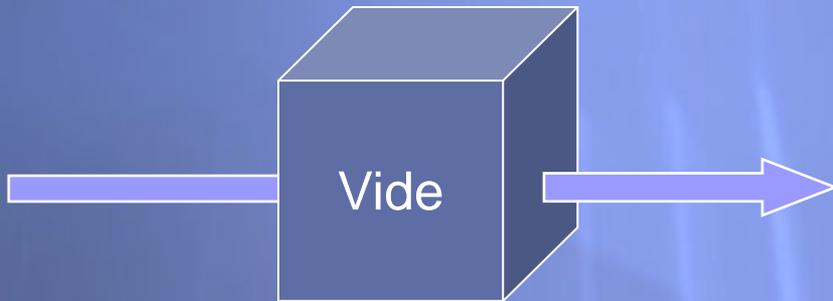
Sonder le QGP

Une bonne sonde 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.



Stratégie pour étudier le QGP

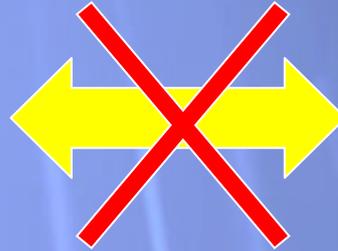
1. Mesurer une observable dont la valeur est supposée (d'après des arguments théoriques) être différente selon que l'on a formé un QGP ou non. Terrain de chasse : collisions AA centrales.
2. Valider la mesure :
 - en comparant l'observable aux prédictions théoriques avec et sans formation de QGP
 - en comparant l'observable à la même observable mesurée en mode pp (pas de QGP) et pA et AA périphériques (effets nucléaires " froids") puis extrapolée à AA centrales
3. Conforter le résultat en répétant 1. et 2. avec autant d'observables que possible
4. Déduire les propriétés du QGP
-> affiner les modèles théoriques et réitérer les comparaisons

Dialogue permanent entre théorie et expérience

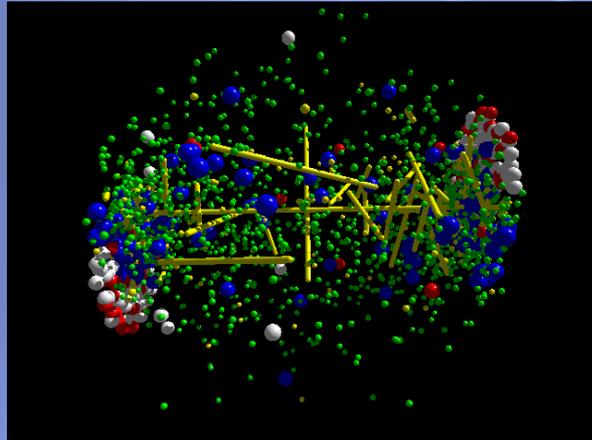
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{\psi}_f (i \not{D} + m_f) \psi_f$$

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

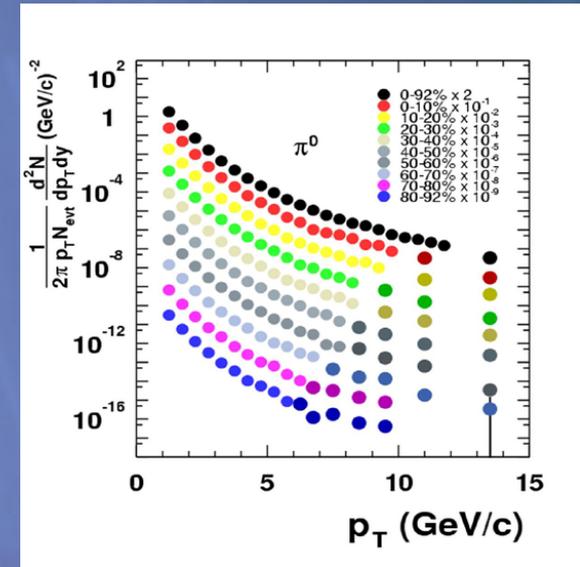
Théorie fondamentale : QCD



Les interprétations nécessitent des concepts phénoménologiques



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



Résultats expérimentaux

Sonder le QGP.

Les sondes du QGP

Suppression de résonances lourdes

Les sondes dures

-> particules produites en début de collision

Production de photons

Jet quenching

Les sondes molles

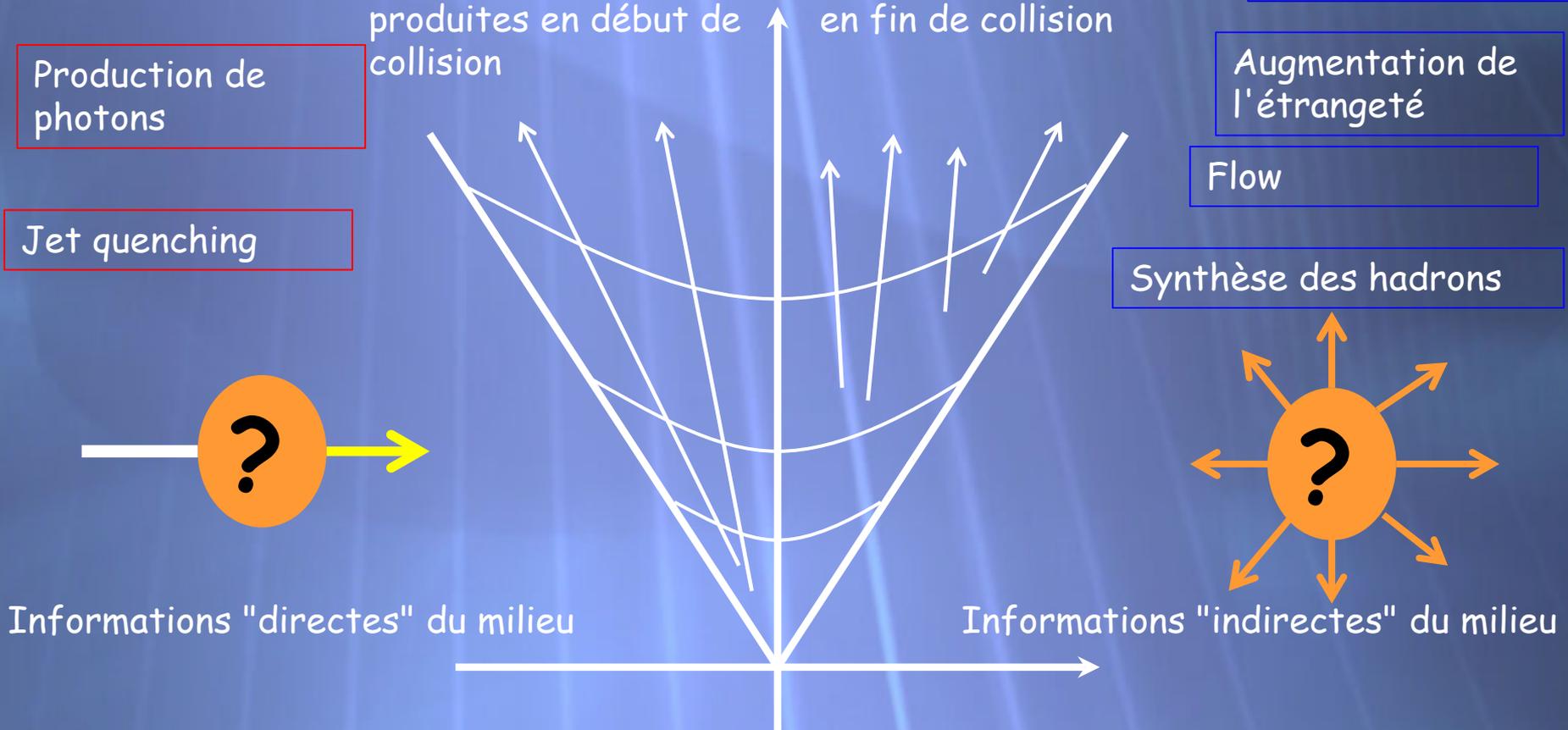
-> particules produites en fin de collision

Modification des résonances légères

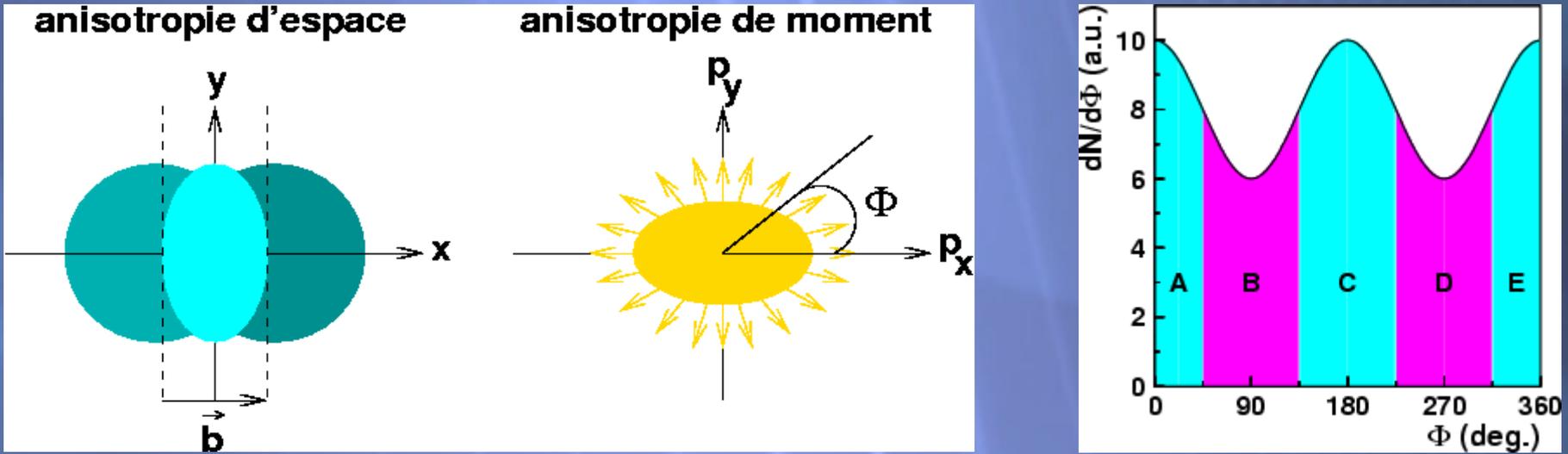
Augmentation de l'étrangeté

Flow

Synthèse des hadrons



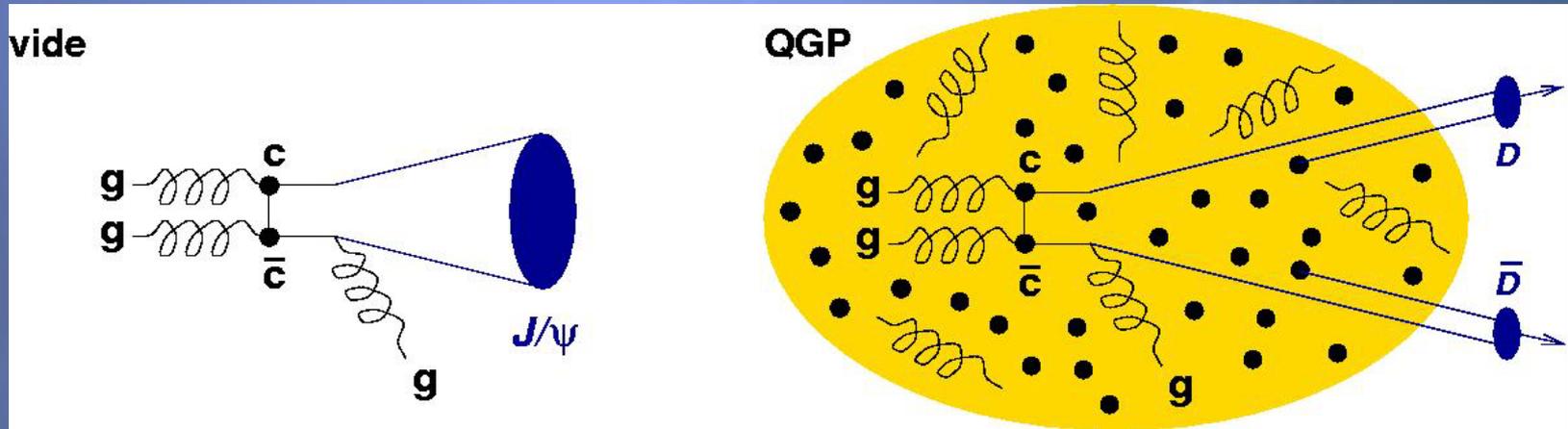
Flow : écoulement collectif de la matière dans des directions privilégiées.
 Résulte de la pression accumulée dans le système



- 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)

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

Les sondes dures : suppression des résonances lourdes



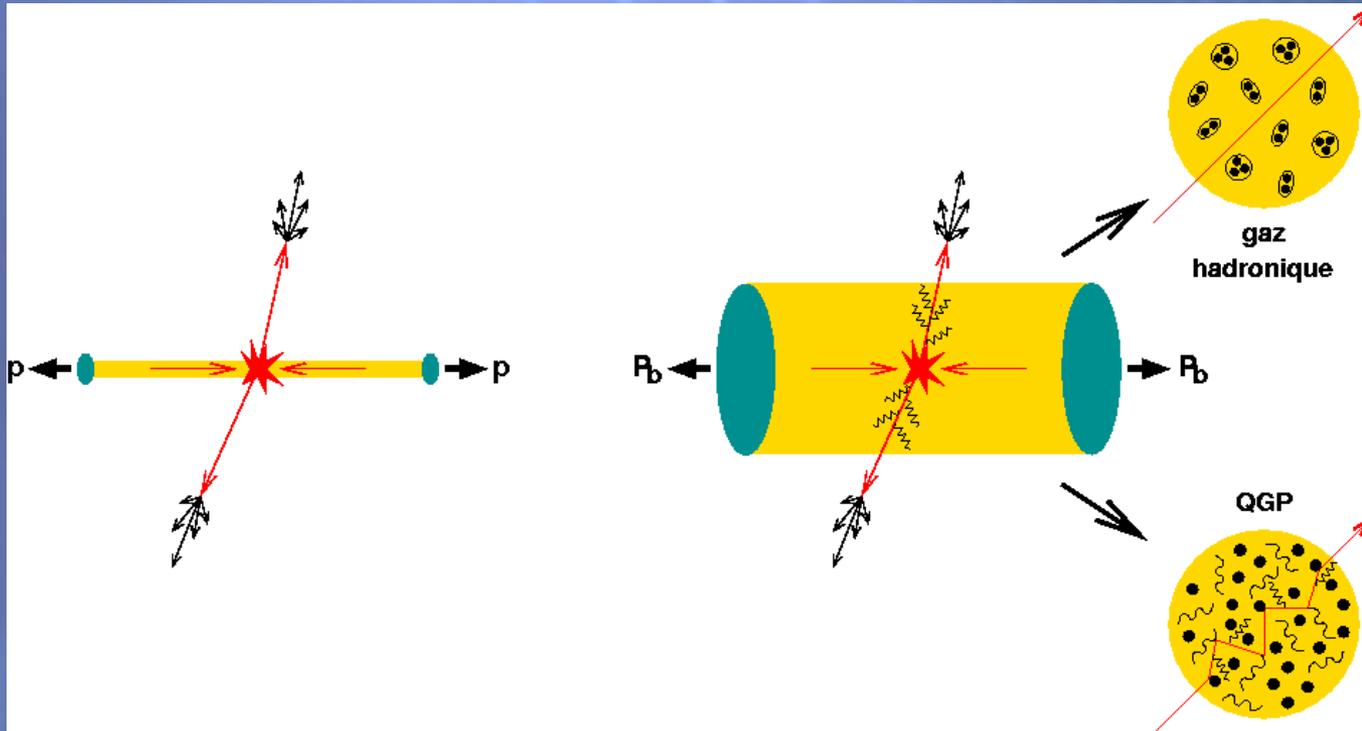
deux gluons fusionnent en une paire $c\bar{c}$. Après un certain temps, et avec l'aide d'un autre gluon, le J/ψ est formé.

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

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

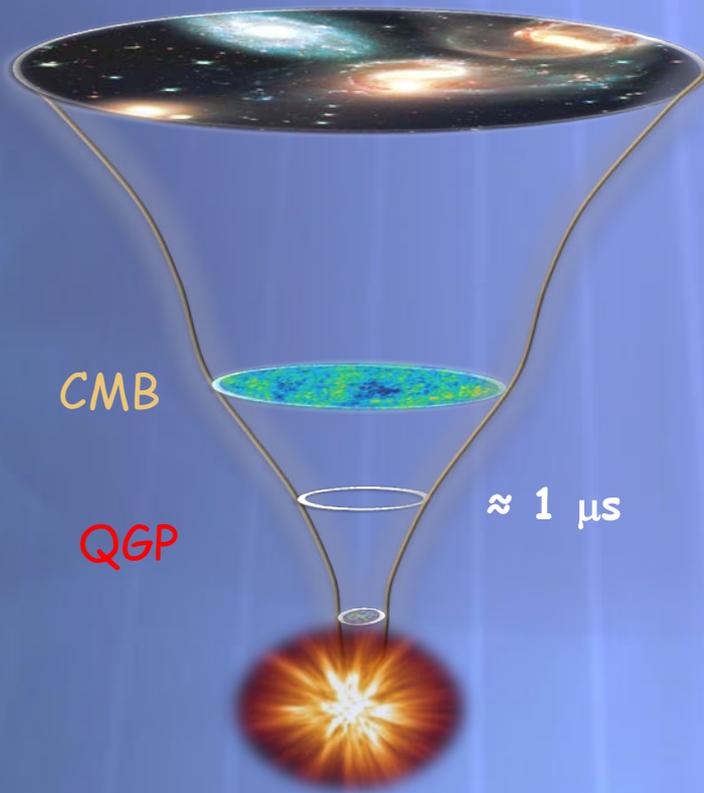


- le QGP étant plus dense que le gaz hadronique, un quark traversant le QGP doit perdre plus d'énergie que dans le gaz hadronique
- le QGP doit donc engendrer une suppression des particules de grand p_+ (jet quenching)

Big Bang vs Little Bang

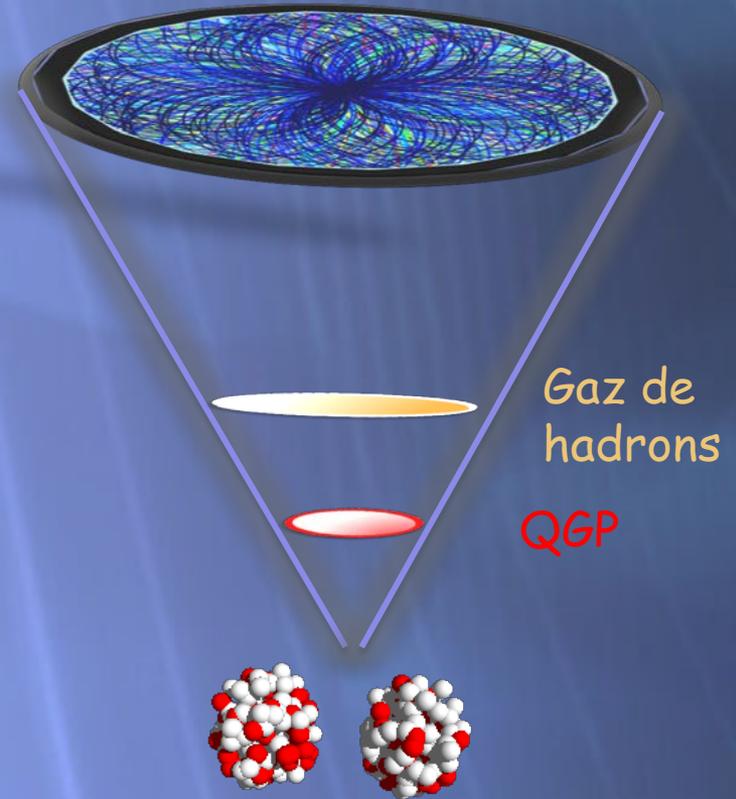
Big Bang

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



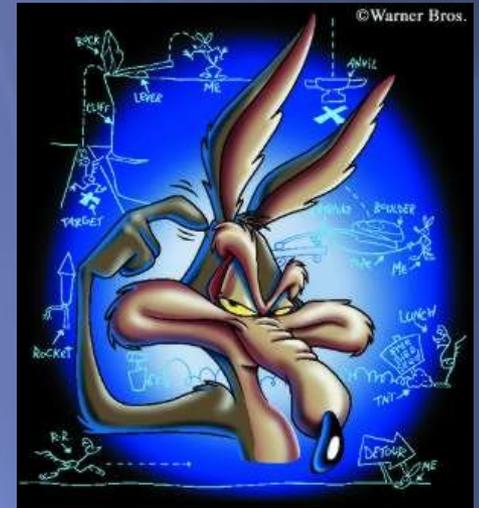
Little Bang

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



- 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^{er} cours.