

Physique des ions lourds ultra-relativistes : étude du plasma de quarks et de gluons

De la Physique au Détecteur
École thématique in2p3
24 novembre - 29 novembre 2024
Fréjus - France

Cynthia Hadjidakis
IJCLab (Orsay)

Objets d'études : structure interne du nucléon et des noyaux et plasma de quarks et de gluons
Expérimentatrice pour : CLAS/JLab, puis HERMES/DESY, puis ALICE/LHC

Merci à Bruno Espagnon pour les supports de cours

Sommaire

I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)

1. Notions fondamentales et interaction forte
2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
3. Sonder le QGP en laboratoire

II. De la physique au détecteur

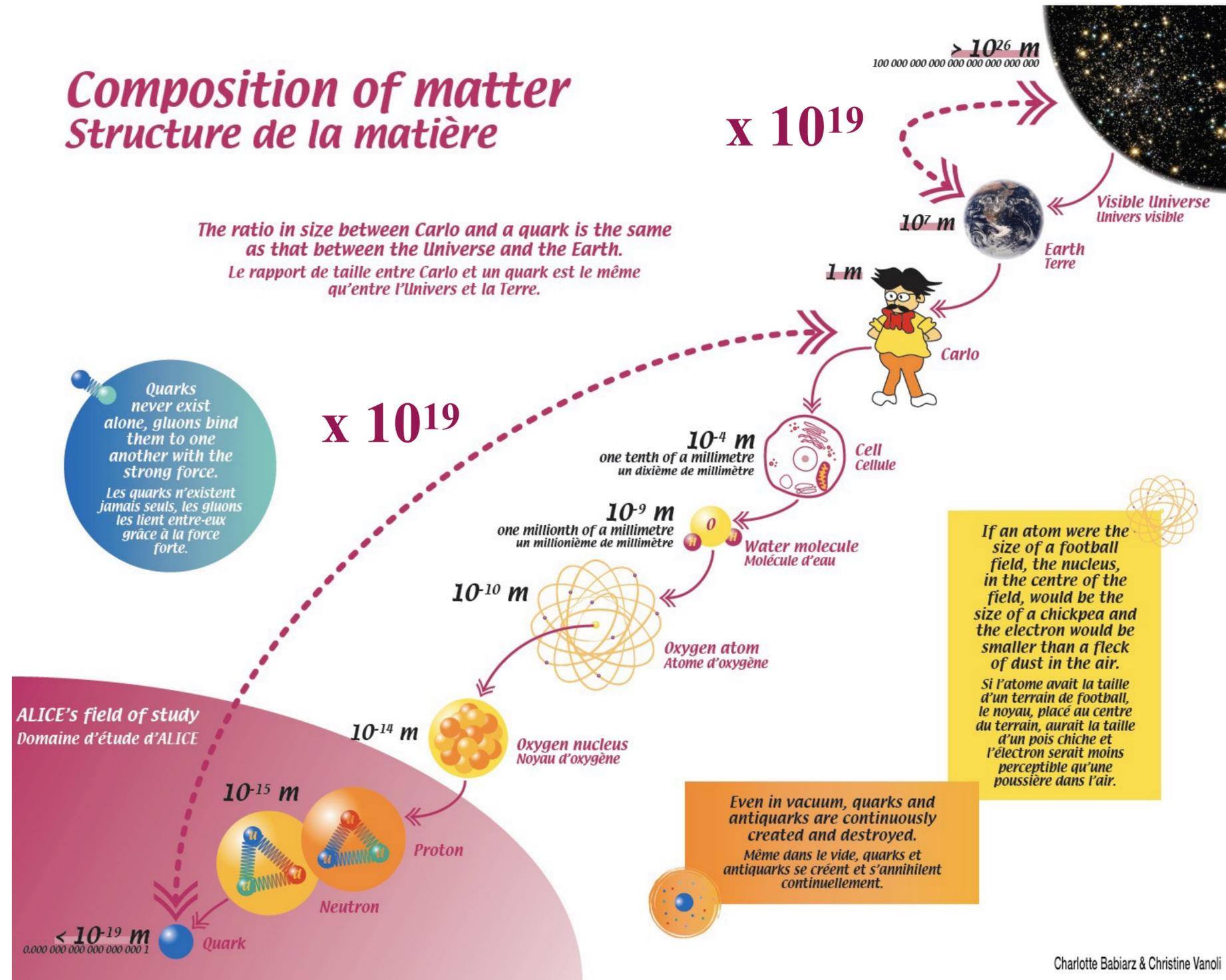
1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
2. Expériences passées et présentes
3. L'expérience ALICE et le spectromètre à muons
4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience

III. Résultats et expériences futures

1. Des données aux résultats
2. Des résultats à la théorie
3. Upgrade et expériences futures

Structure de la matière

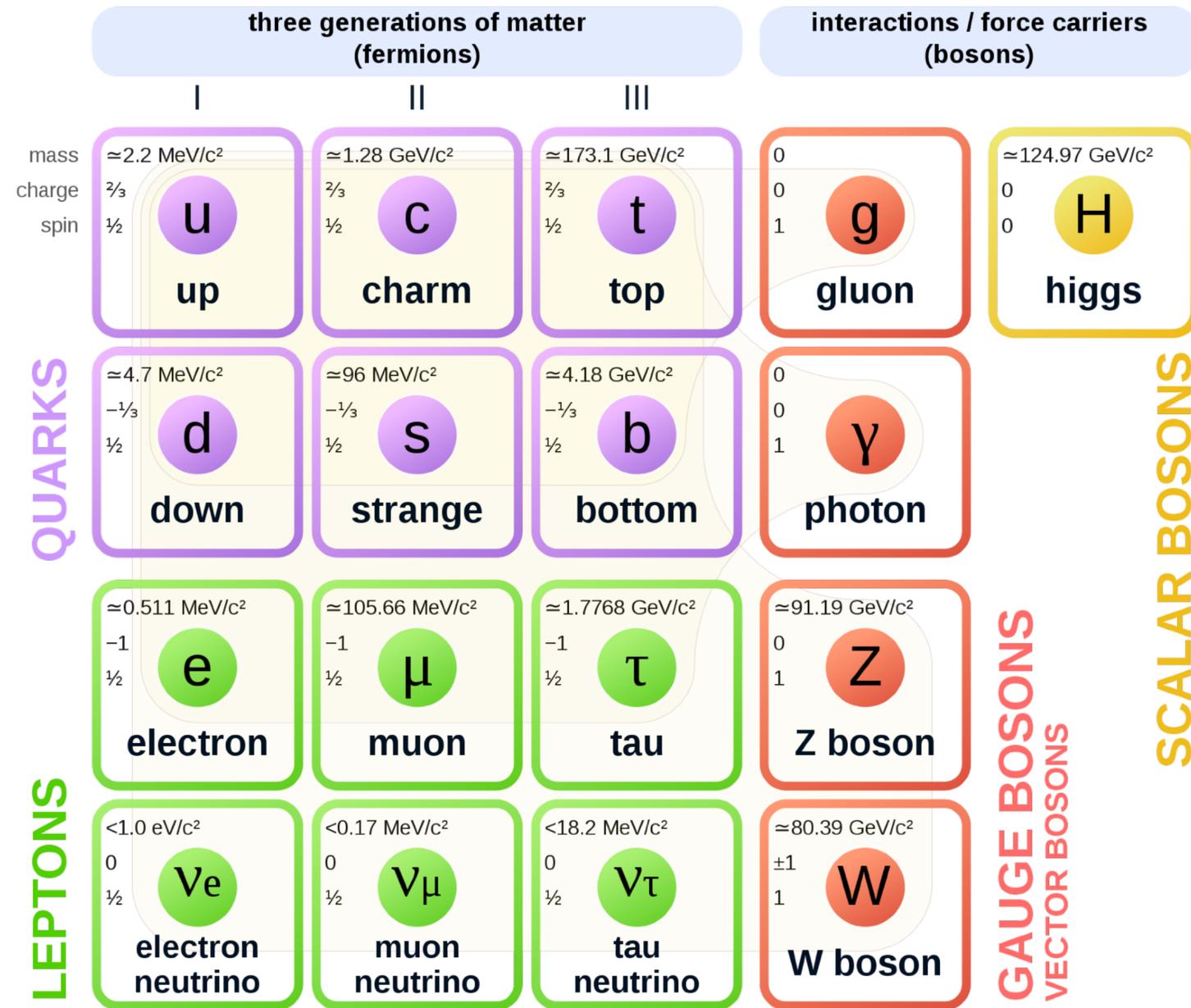
Composition of matter Structure de la matière



Charlotte Babiarz & Christine Vanoli

Les constituants élémentaires

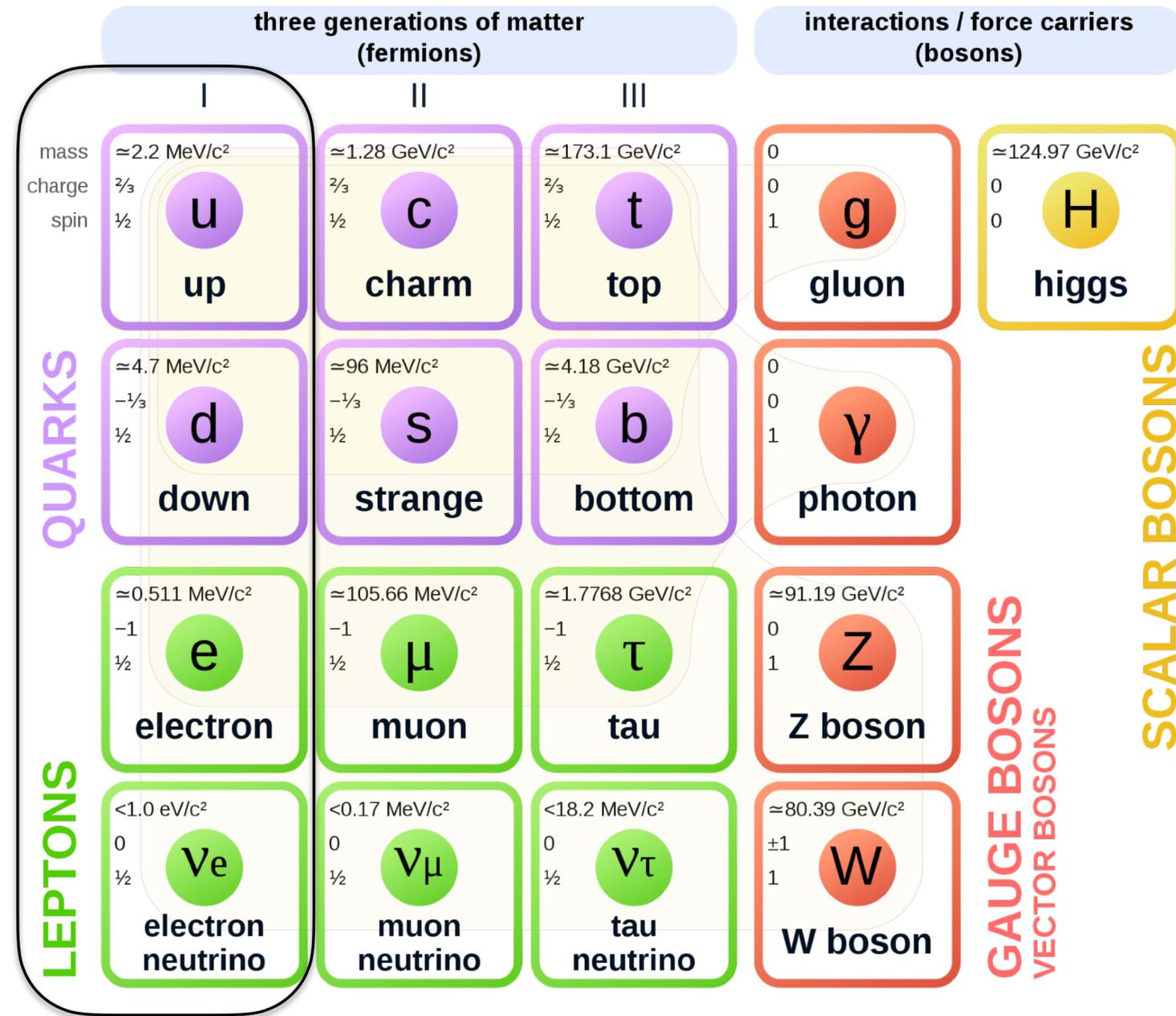
Standard Model of Elementary Particles



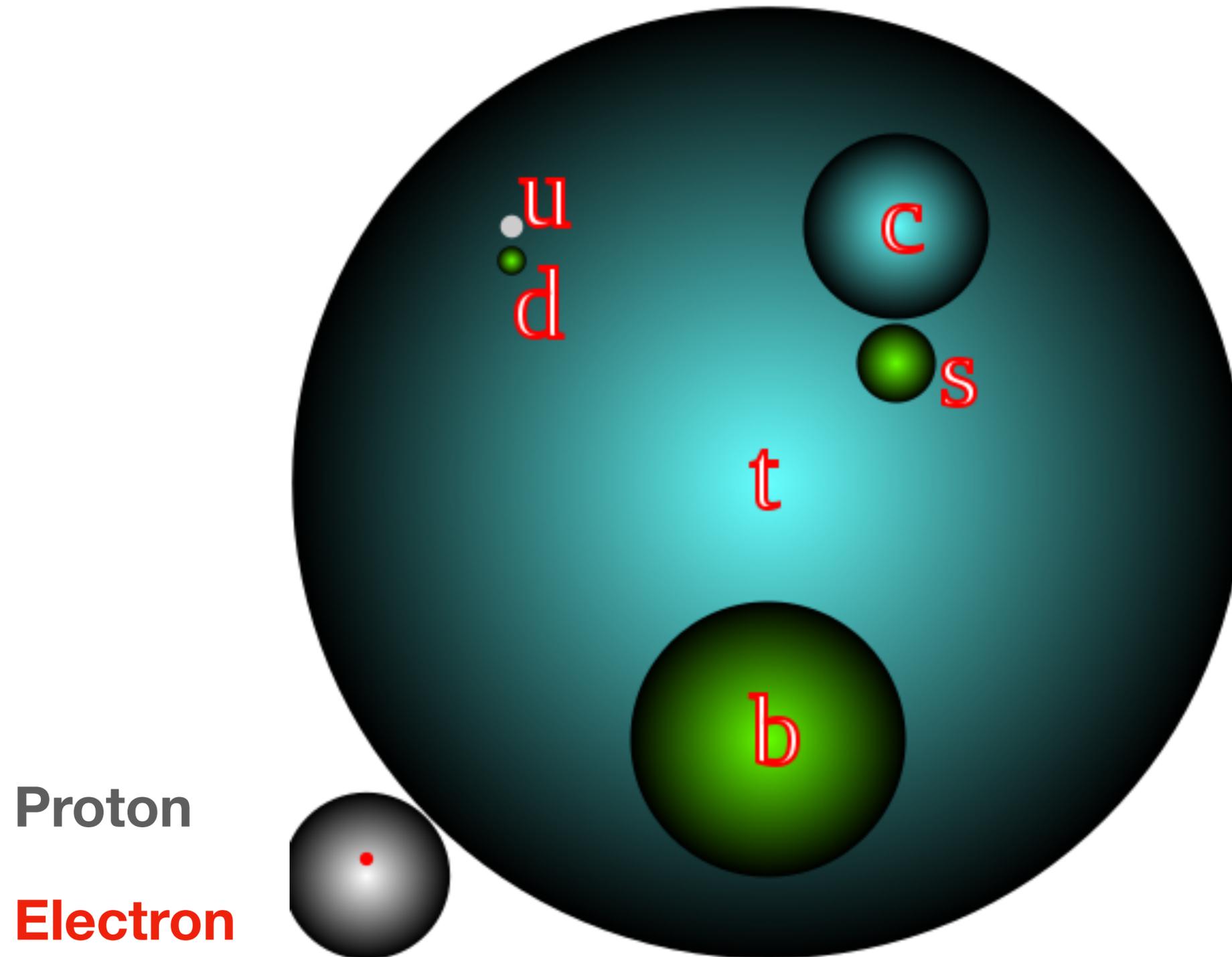
Les constituants élémentaires

Standard Model of Elementary Particles

I: matière stable



Masse des quarks

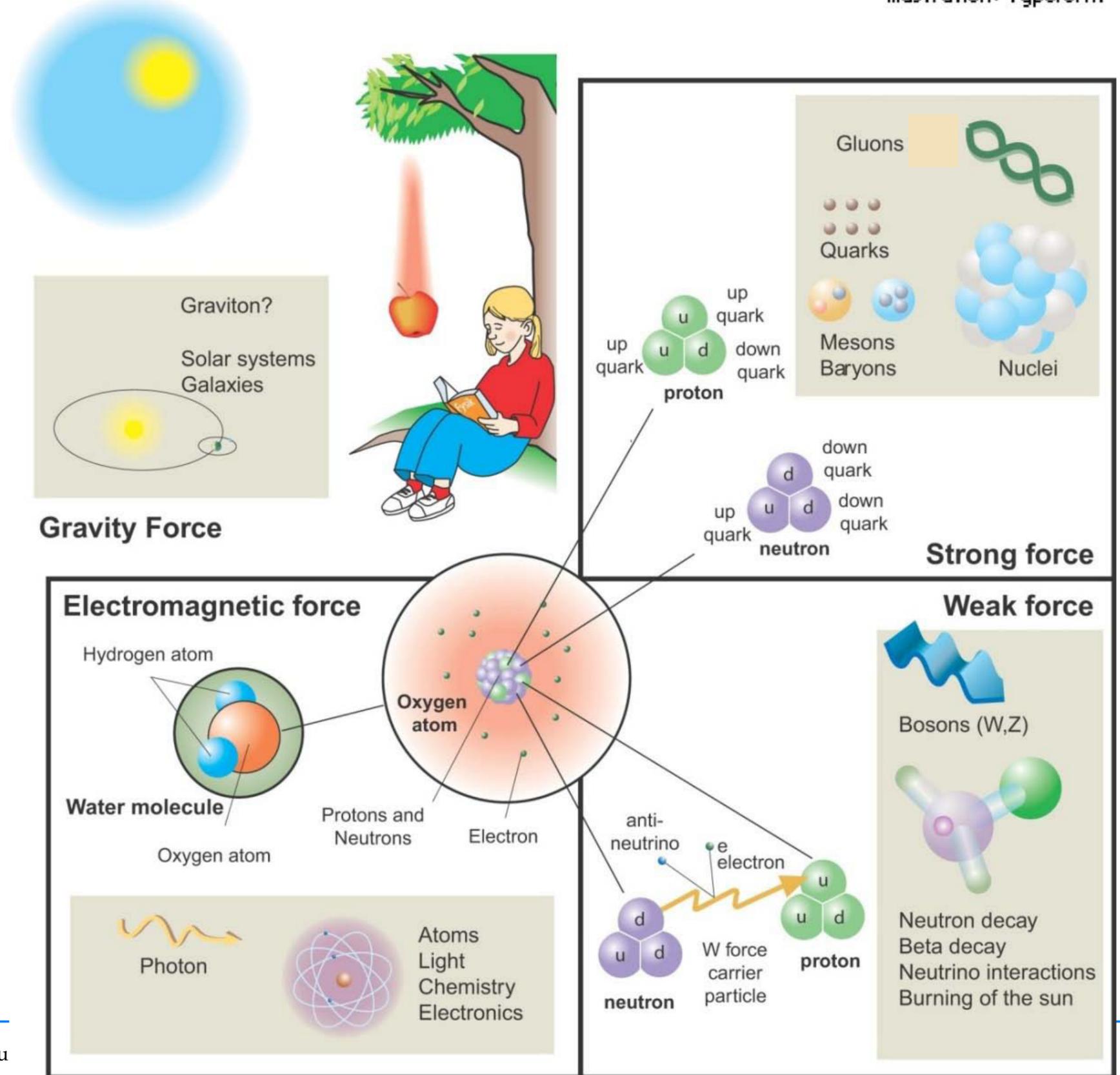


Credits : [website](#)

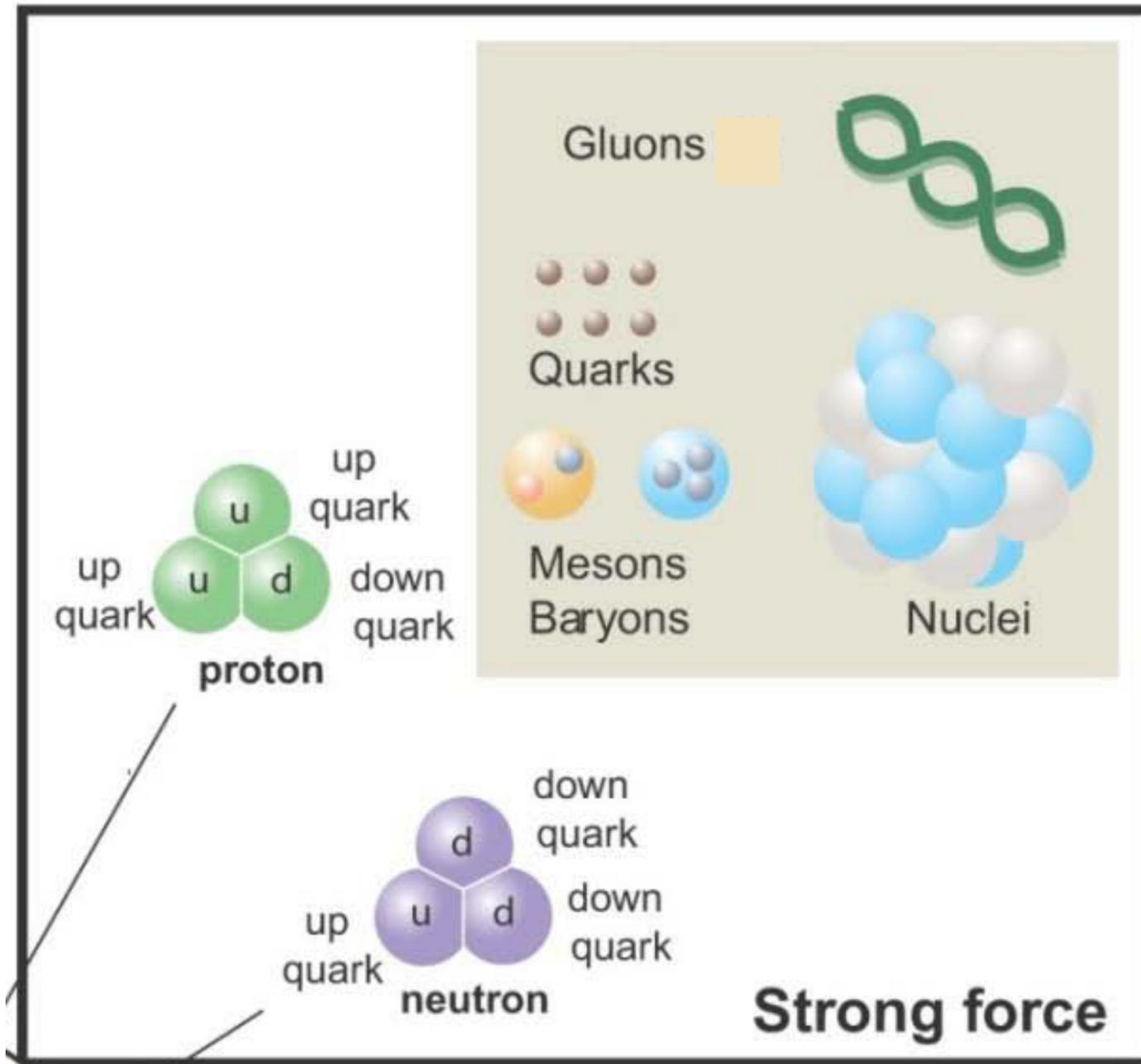
Les interactions fondamentales

Illustration: Typoform

Interactions	Médiateurs: bosons
Forte	gluons
Electromagnétique	photon
Faible	3 bosons : W^+ , W^- , Z^0
Gravitation	graviton ?



Zoom sur l'interaction forte



Les **leptons** (du grec "leptos" = "léger") sont insensibles à l'interaction forte.

Ne semblent pas avoir de structure interne.

Ex : électron, muon, neutrino

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

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

Ex : p , n , Δ , Λ ...

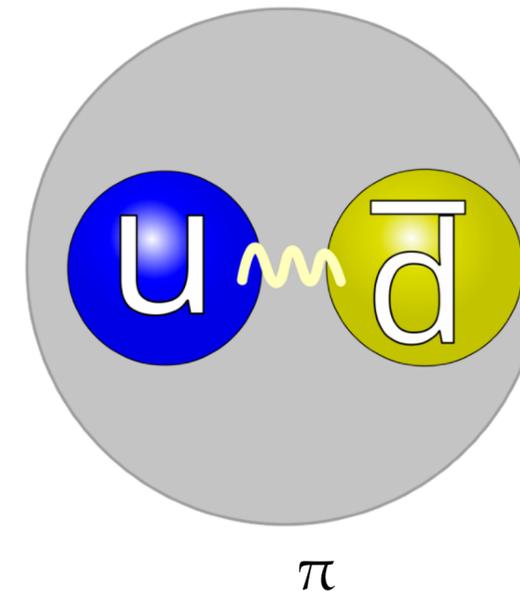
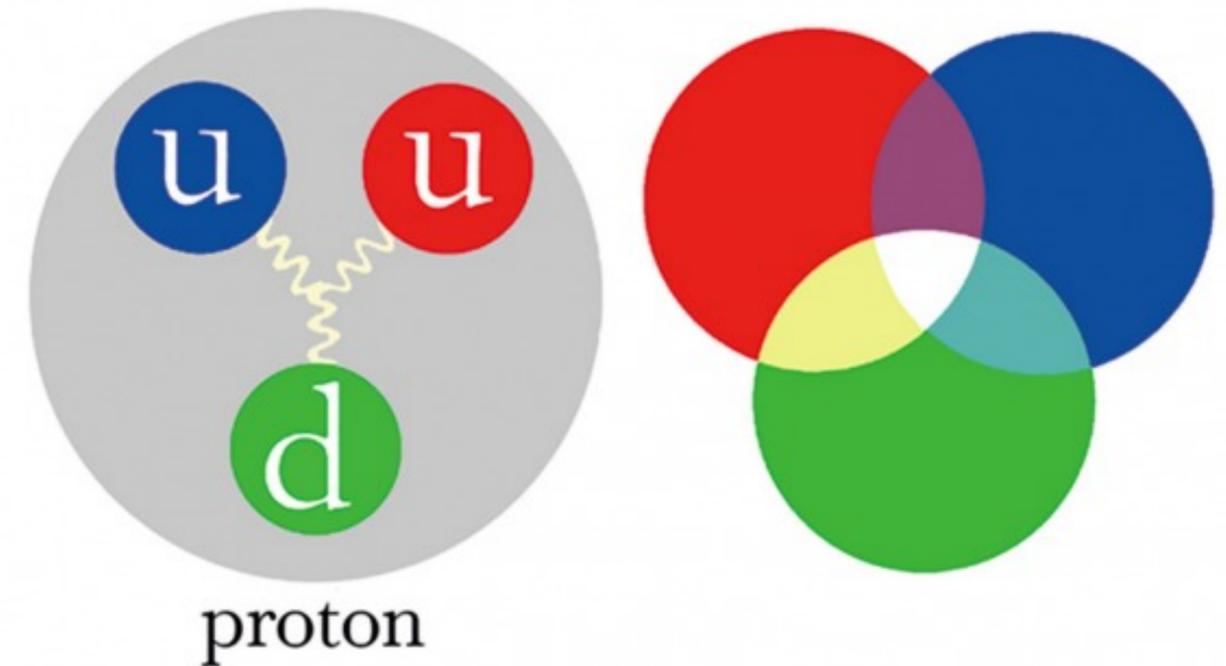
- **mésons** (du grec "mésos" = "moyen") : quarks et antiquark

Ex : π , ω , ρ , D , J/ψ ...

Interaction forte : la charge de couleur

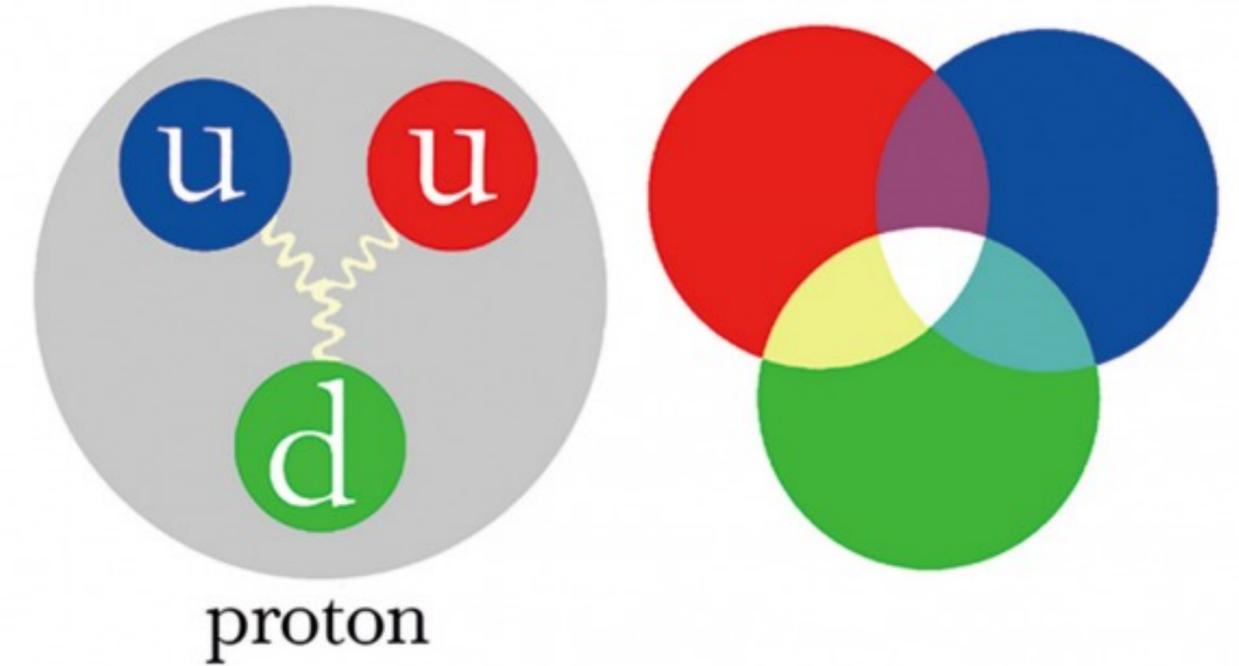
Charge de couleur :

- Les quarks portent une charge de couleur : **ROUGE**, **VERT** ou **BLEU**
- Les anti-quarks portent l'anti-couleur correspondante
- La combinaison de ces couleurs dans les hadrons doit être **INCOLORE**
- Ex. :
 - proton = **ROUGE** + **VERT** + **BLEU**
 - π = **BLEU** + **ANTI-BLEU**



Interaction forte: les gluons et la charge de couleur

Les gluons sont les médiateurs de l'interaction forte, entre charges de couleur. Les gluons ont la particularité de porter aussi une couleur et donc d'interagir avec eux-mêmes !



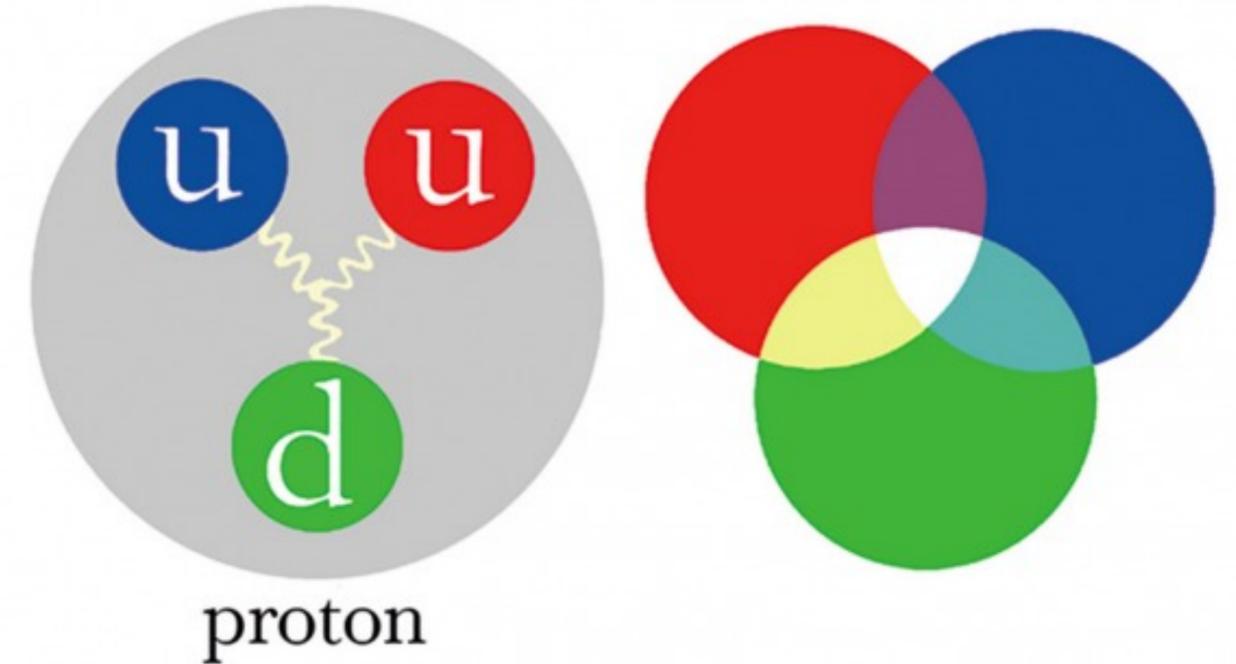
Interaction forte: les gluons et la charge de couleur

Les gluons sont les médiateurs de l'interaction forte, entre charges de couleur. Les gluons ont la particularité de porter aussi une couleur et donc d'interagir avec eux-mêmes !

Les gluons portent :

- une couleur : **ROUGE**, **VERT** ou **BLEU**
- une anti-couleur : **ANTI-ROUGE**, **ANTI-VERT** ou **ANTI-BLEU**

Combien de combinaison possibles et donc de gluons ?



Interaction forte: les gluons et la charge de couleur

Les gluons sont les médiateurs de l'interaction forte, entre charges de couleur. Les gluons ont la particularité de porter aussi une couleur et donc d'interagir avec eux-mêmes !

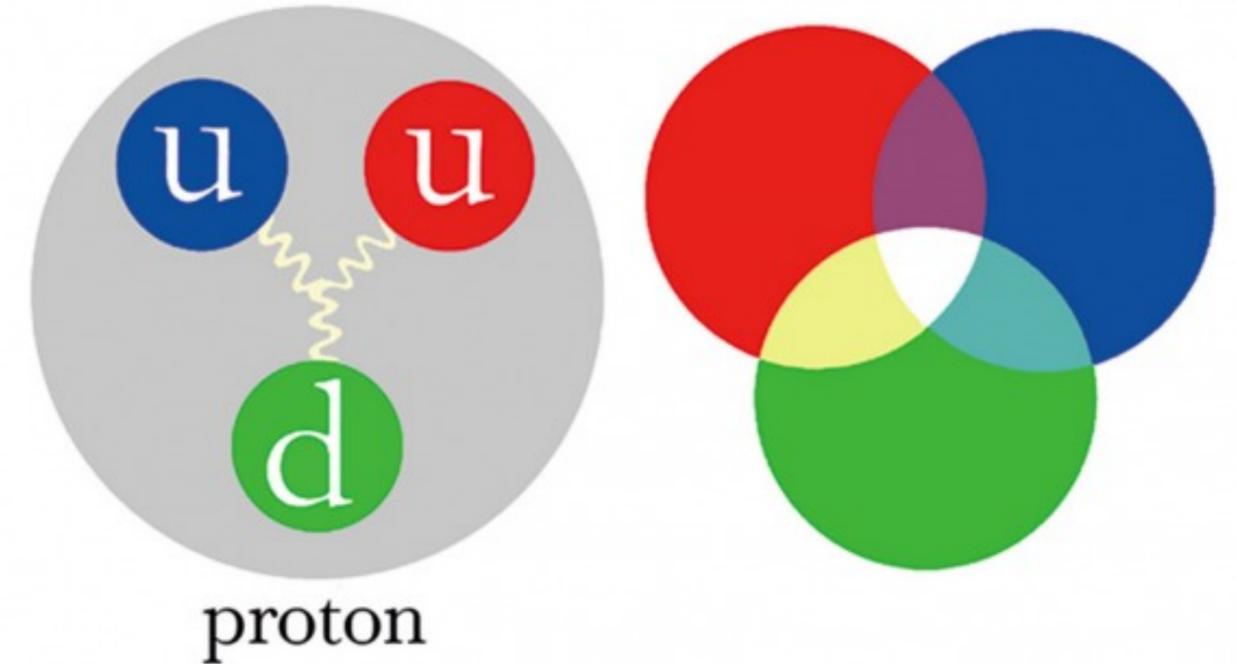
Les gluons portent :

- une couleur : **ROUGE**, **VERT** ou **BLEU**
- une anti-couleur : **ANTI-ROUGE**, **ANTI-VERT** ou **ANTI-BLEU**

Combien de combinaison possibles et donc de gluons ?

8 gluons !

- 9 combinaisons possibles: **$R\bar{R}$** , **$R\bar{V}$** , **$R\bar{B}$** , **$V\bar{R}$** , **$V\bar{V}$** , **$V\bar{B}$** , **$B\bar{R}$** , **$B\bar{V}$** , **$B\bar{B}$**
- Mais la combinaison de couleur neutre n'interagit pas par interaction forte : **$R\bar{R}+V\bar{V}+B\bar{B}$**
- **$9 - 1 = 8$ gluons**



Zoologie de particules

En jouant avec les 6 quarks, les différentes couleurs et les différents états spectroscopiques, on obtient toute une zoologie de particules, référencées dans le Particle Data Group



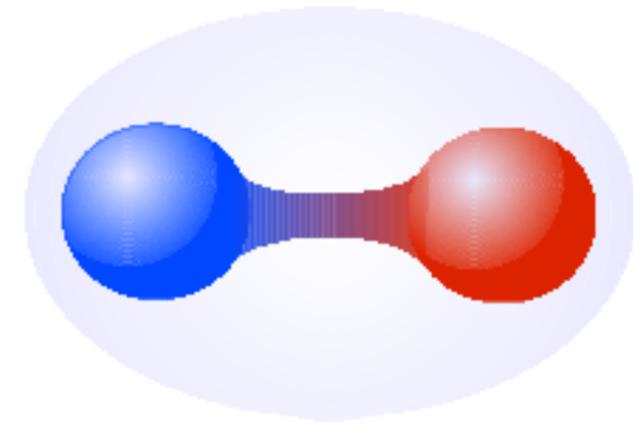
Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	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^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Portée de l'interaction forte

Caractéristiques de l'interaction forte :

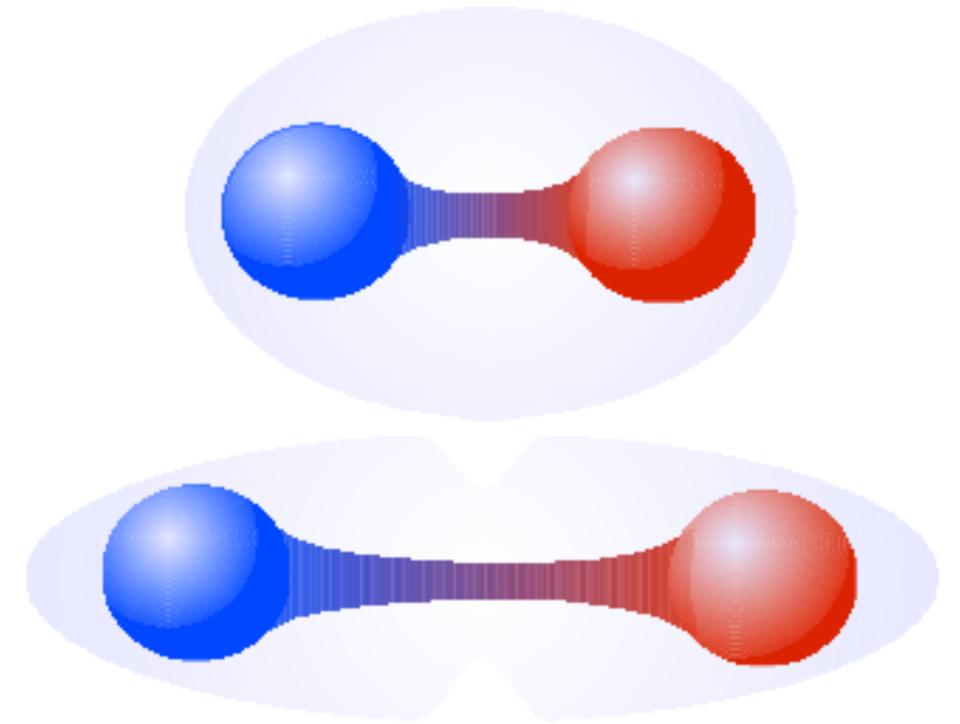
- **À basse énergie / grande distance** entre quarks / gluons
 - Augmentation de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont confinés dans les hadrons
 - Si on sépare deux quarks, la force de l'interaction forte augmente lors de la séparation et lorsqu'il y a assez d'énergie en jeu, une nouvelle paire de quark-antiquark se crée !
 - Une charge de couleur ne peut pas être isolée.
- **À haute énergie / petite distance**
 - Diminution de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont (quasi) libre de se déplacer
 - On parle de « liberté asymptotique »



Portée de l'interaction forte

Caractéristiques de l'interaction forte :

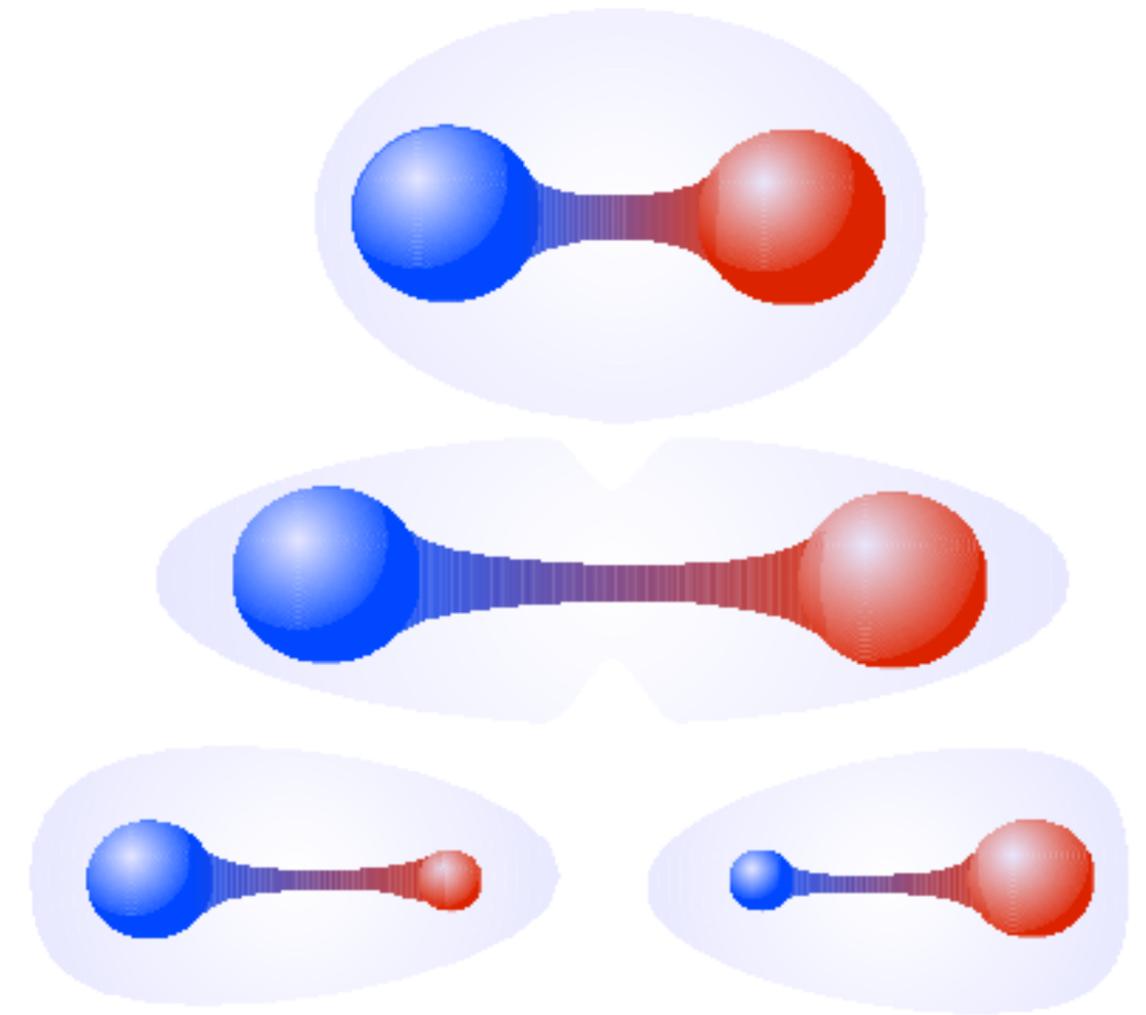
- **À basse énergie / grande distance** entre quarks / gluons
 - Augmentation de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont confinés dans les hadrons
 - Si on sépare deux quarks, la force de l'interaction forte augmente lors de la séparation et lorsqu'il y a assez d'énergie en jeu, une nouvelle paire de quark-antiquark se crée !
 - Une charge de couleur ne peut pas être isolée.
- **À haute énergie / petite distance**
 - Diminution de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont (quasi) libre de se déplacer
 - On parle de « liberté asymptotique »



Portée de l'interaction forte

Caractéristiques de l'interaction forte :

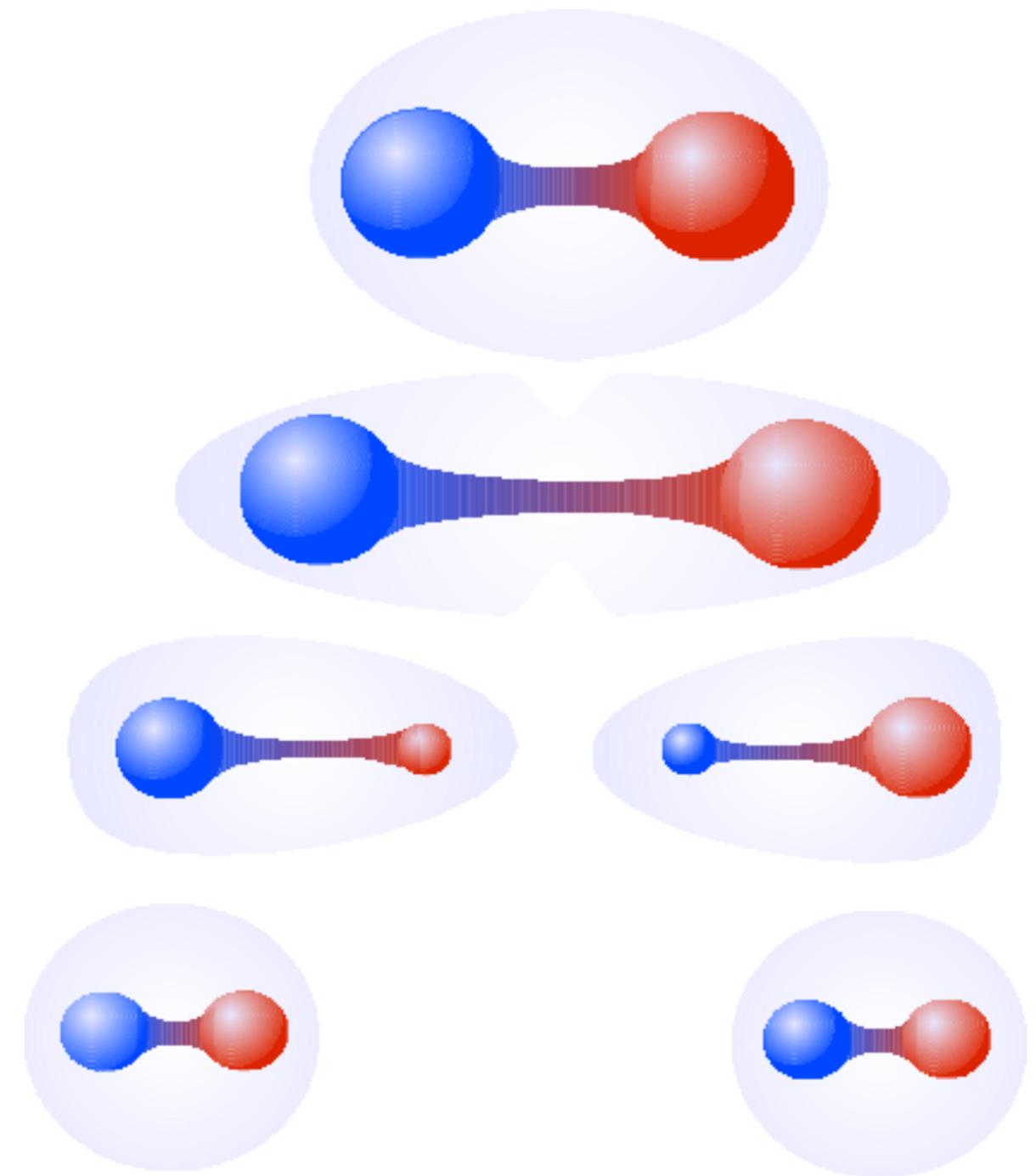
- **À basse énergie / grande distance** entre quarks / gluons
 - Augmentation de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont confinés dans les hadrons
 - Si on sépare deux quarks, la force de l'interaction forte augmente lors de la séparation et lorsqu'il y a assez d'énergie en jeu, une nouvelle paire de quark-antiquark se crée !
 - Une charge de couleur ne peut pas être isolée.
- **À haute énergie / petite distance**
 - Diminution de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont (quasi) libre de se déplacer
 - On parle de « liberté asymptotique »



Portée de l'interaction forte

Caractéristiques de l'interaction forte :

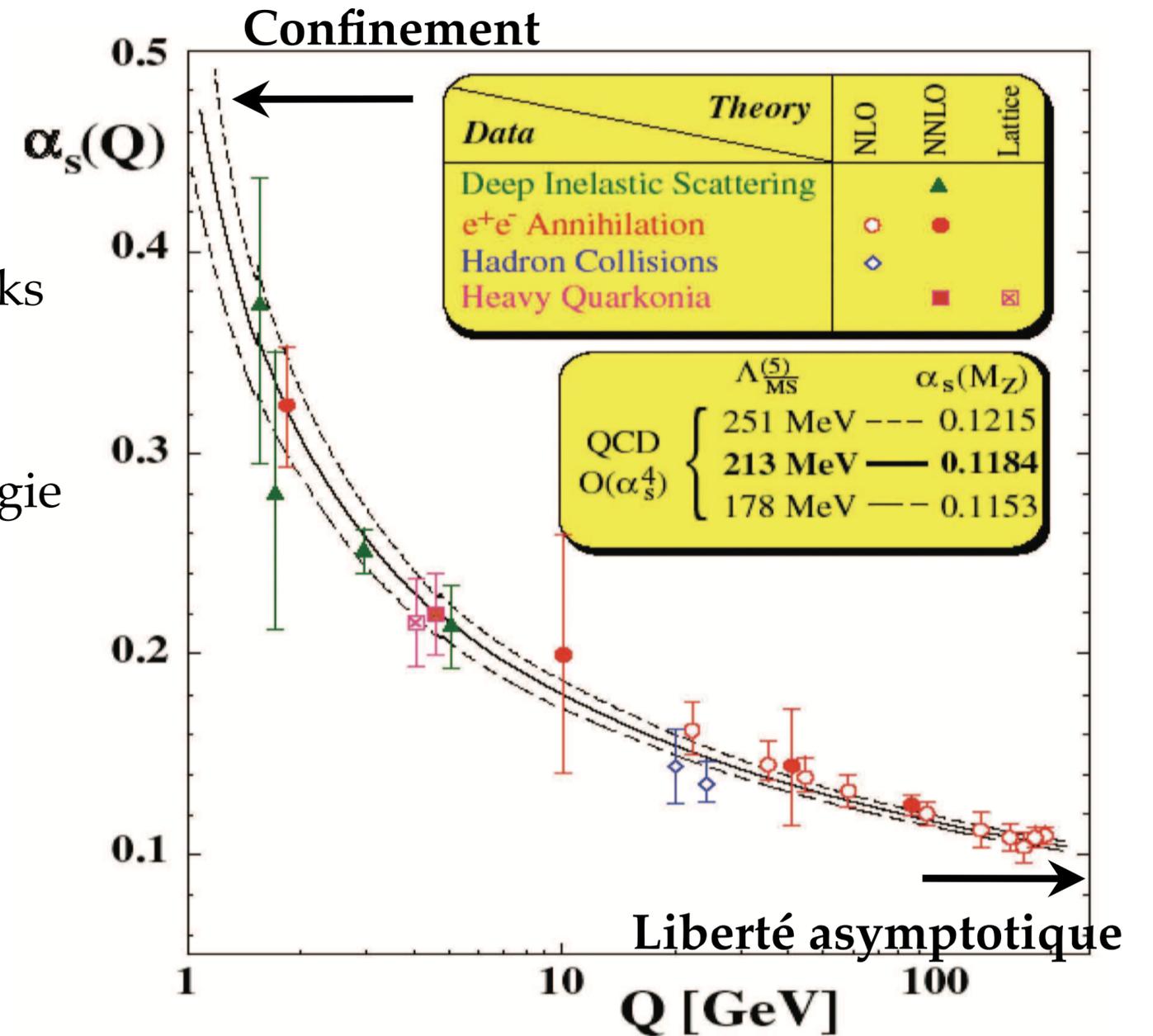
- **À basse énergie / grande distance** entre quarks / gluons
 - Augmentation de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont confinés dans les hadrons
 - Si on sépare deux quarks, la force de l'interaction forte augmente lors de la séparation et lorsqu'il y a assez d'énergie en jeu, une nouvelle paire de quark-antiquark se crée !
 - Une charge de couleur ne peut pas être isolée.
- **À haute énergie / petite distance**
 - Diminution de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont (quasi) libre de se déplacer
 - On parle de « liberté asymptotique »



Portée de l'interaction forte

Caractéristiques de l'interaction forte :

- **À basse énergie / grande distance** entre quarks/gluons
 - Augmentation de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont confinés dans les hadrons
 - Si on sépare deux quarks, la force de l'interaction forte augmente lors de la séparation et lorsqu'il y a assez d'énergie en jeu, une nouvelle paire de quark-antiquark se crée !
 - Une charge de couleur ne peut pas être isolée.
- **À haute énergie / petite distance**
 - Diminution de l'intensité de l'interaction forte : les quarks sont (quasi) libre de se déplacer
 - On parle de « liberté asymptotique »



« Constante » de couplage de l'interaction forte, α_s , dépend de l'énergie/distance mise en jeu

Interaction forte : théorie de la QCD

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

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{\psi}_j (i\gamma^\mu D_\mu + m_j) \psi_j$$

where $G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$

and $D_\mu = \partial_\mu + it^a A_\mu^a$

Sommaire

I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)

1. Notions fondamentales et interaction forte
2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
3. Sonder le QGP en laboratoire

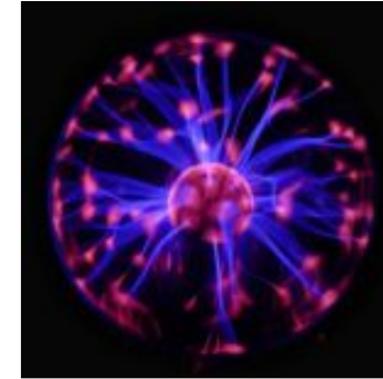
II. De la physique au détecteur

1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
2. Expériences passées et présentes
3. L'expérience ALICE et le spectromètre à muons
4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience

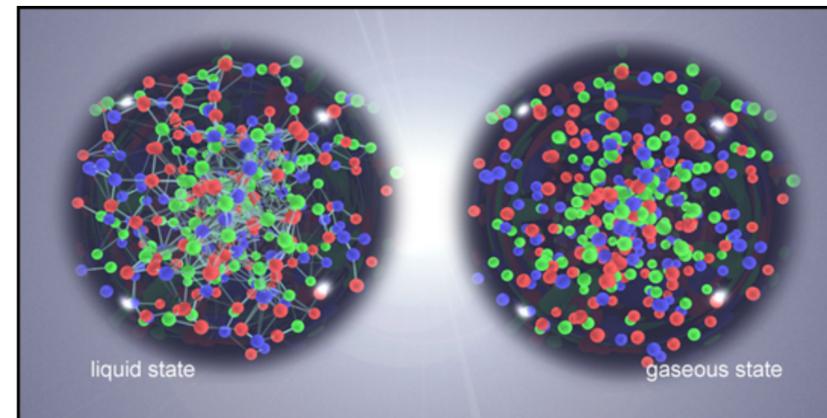
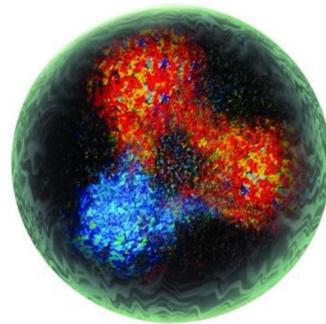
III. Résultats et expériences futures

1. Des données aux résultats
2. Des résultats à la théorie
3. Upgrade et expériences futures

Les phases de la matière nucléaire



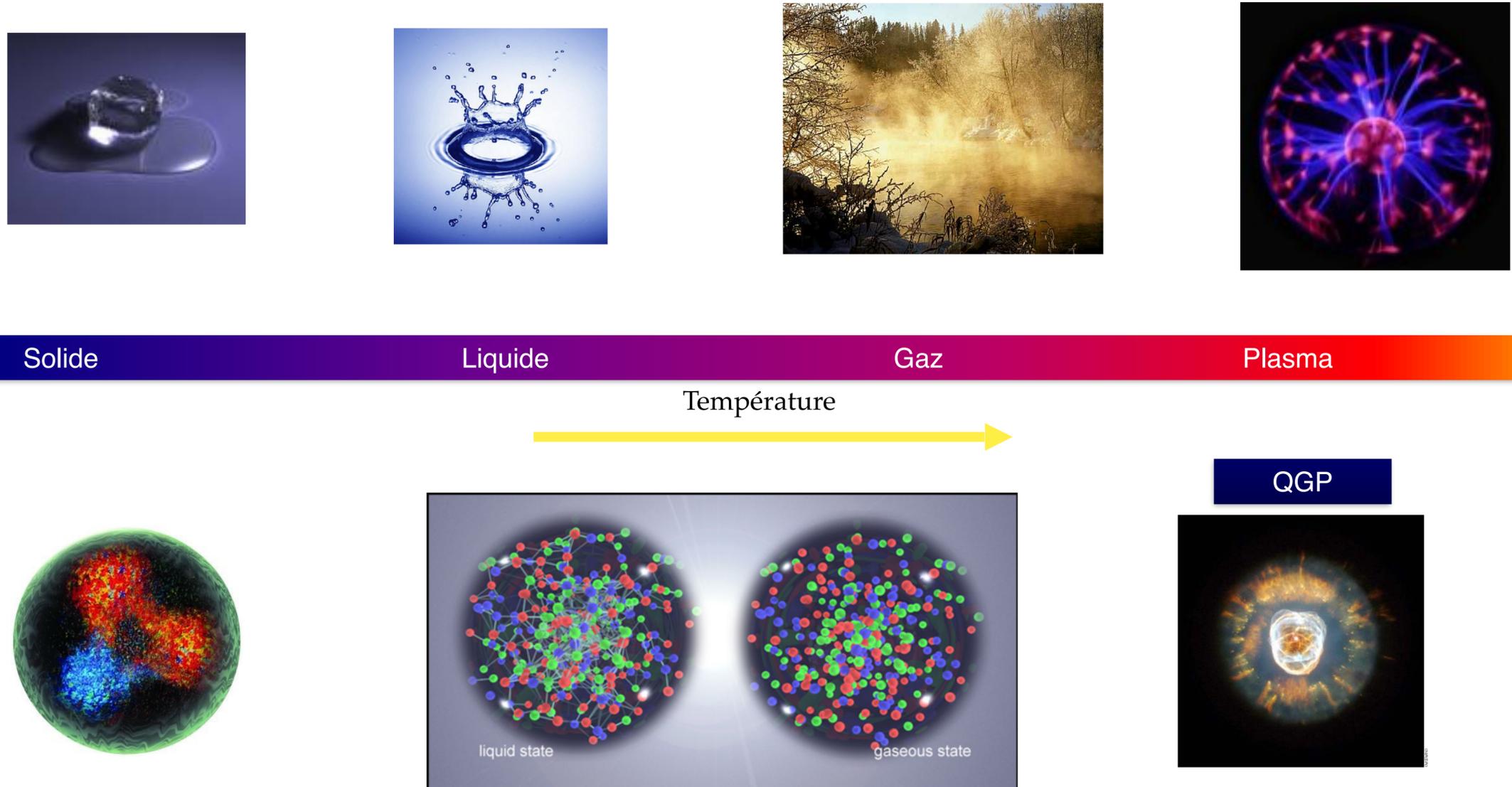
Température



QGP

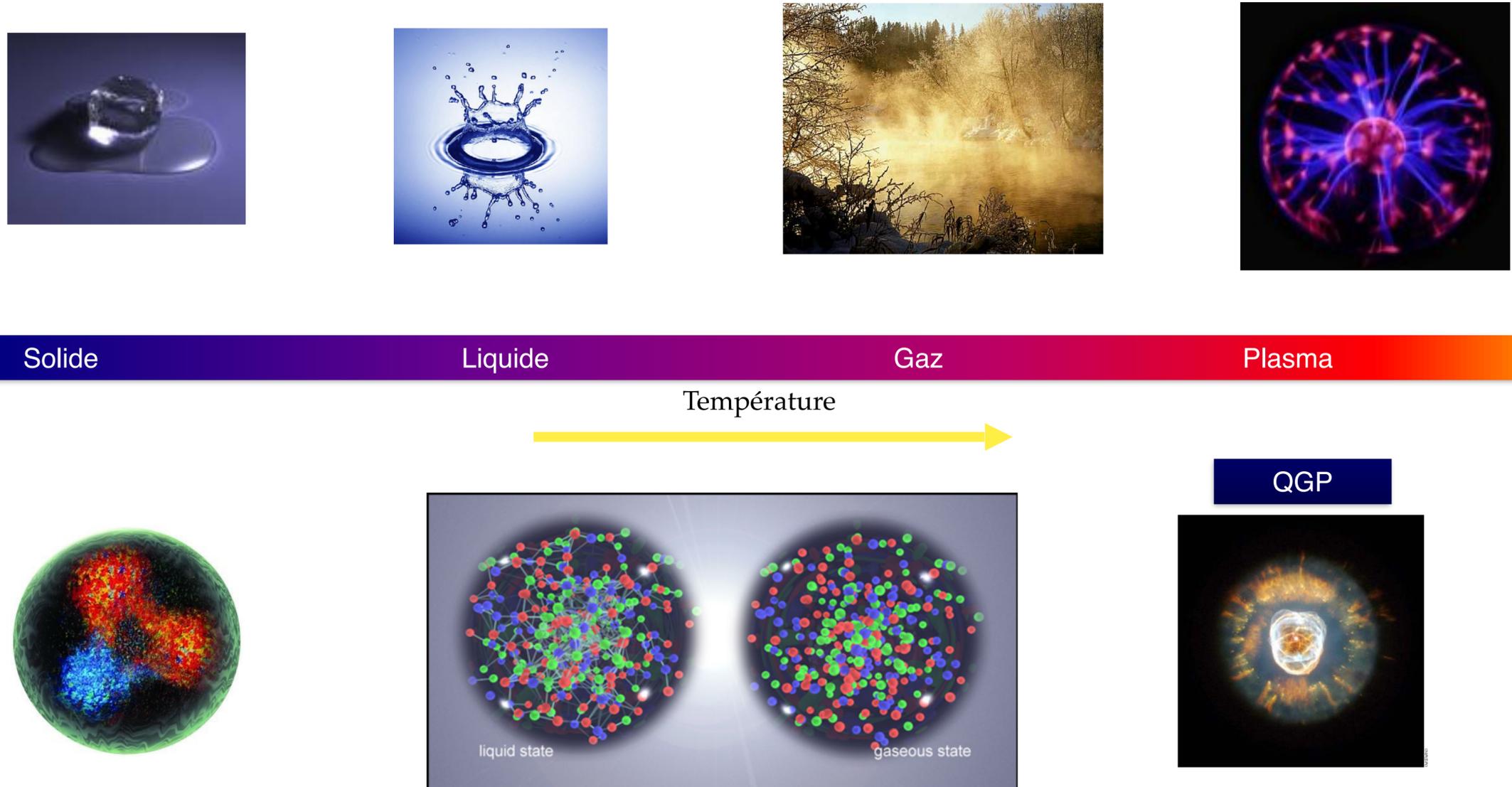


Les phases de la matière nucléaire



À haute énergie / température, les quarks et les gluons sont (presque) libres

Les phases de la matière nucléaire



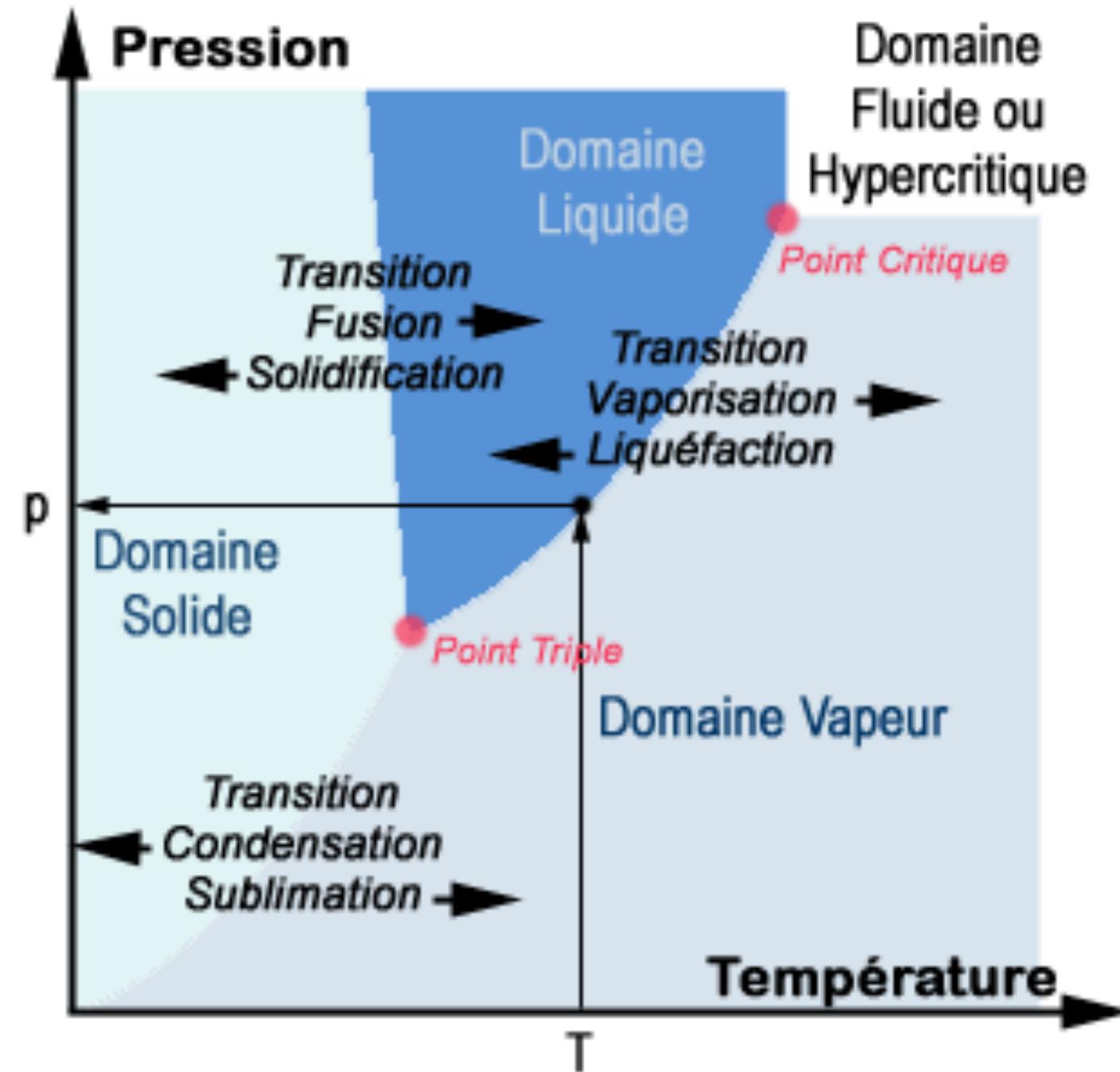
À haute énergie / température, les quarks et les gluons sont (presque) libres

Les calculs de QCD sur réseau (lattice QCD) prédisent une transition de phase de la matière nucléaire ordinaire vers un plasma de quarks et du gluons

Transition de phase: exemple de l'eau

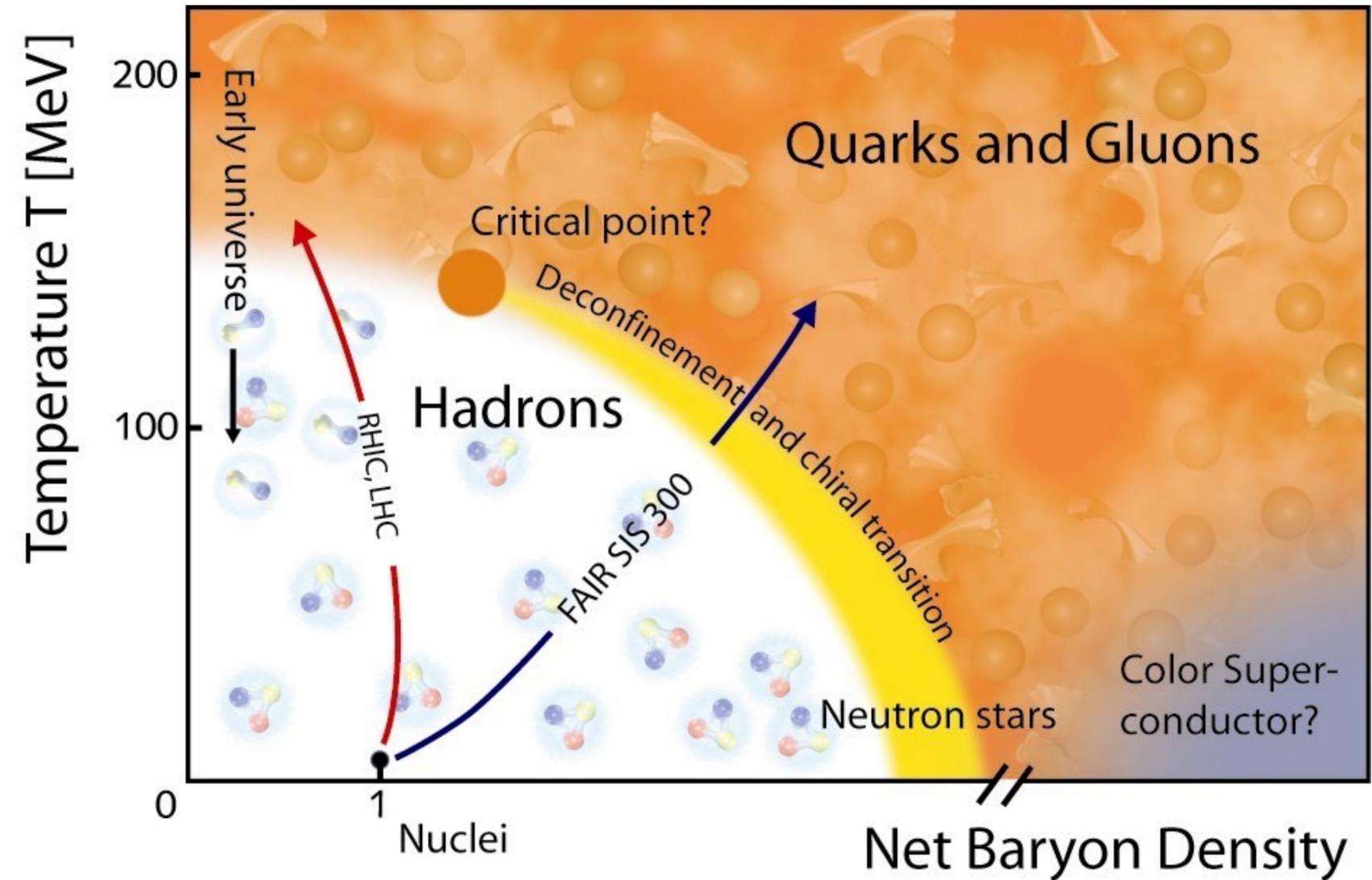
Diagramme de phase : régions d'existence des différentes phases (ou états) d'un système (en fonction de la pression et de la température pour l'eau)

- **Transition de phase** : passage d'une phase à une autre
- **Transition de phase du 1^{er} ordre** : pas de coexistence entre les deux phases, transition abrupte
- **Point critique** : 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 abrupte mais de façon continue (« cross-over »).



Le diagramme de phase de la matière nucléaire

✓ Temperature vs Densité baryonique nette = densité baryon - anti-baryon ou potentiel chimique baryonique μ_B

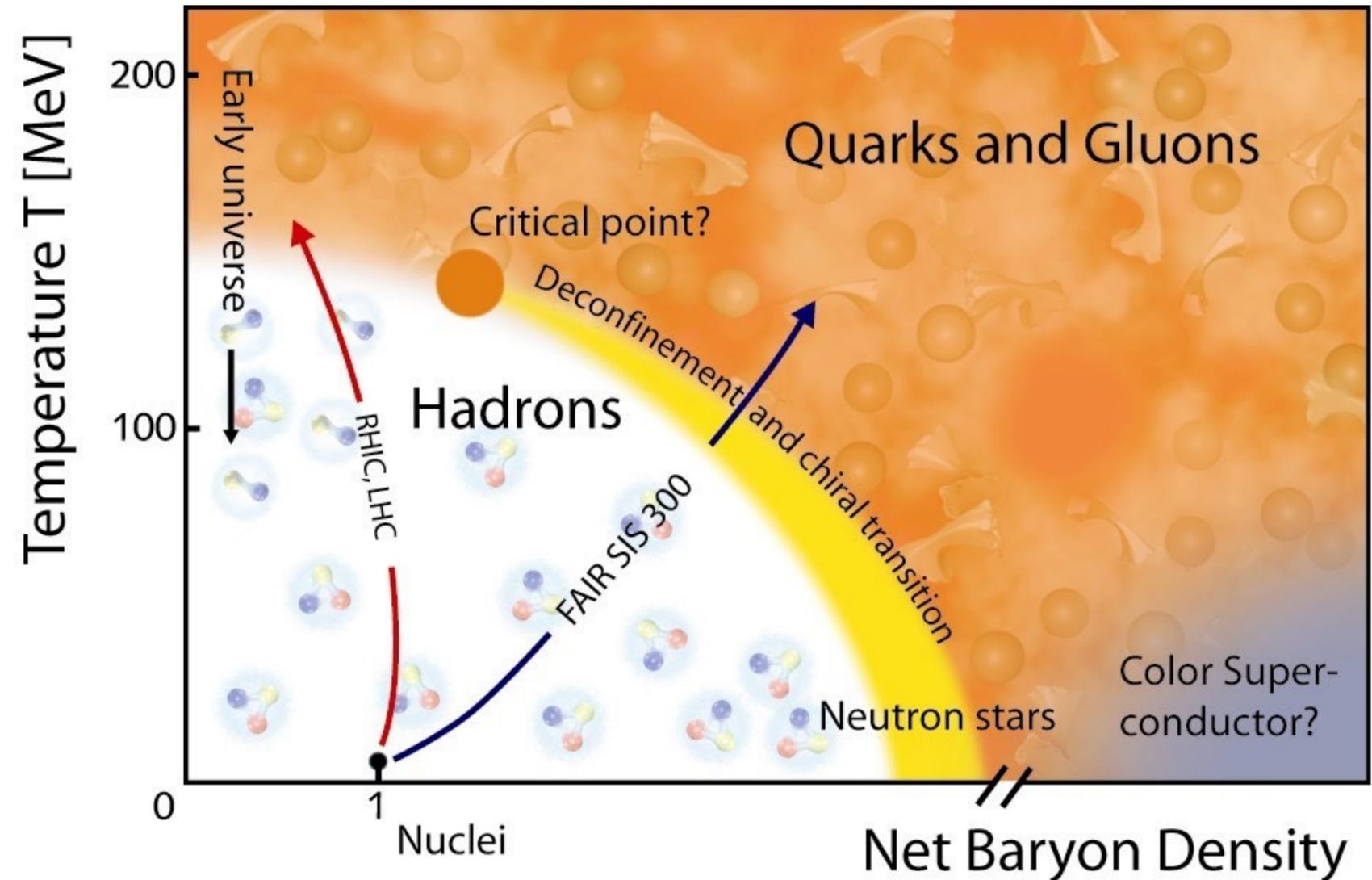


Le diagramme de phase de la matière nucléaire

✓ Temperature vs Densité baryonique nette = densité baryon - anti-baryon ou potentiel chimique baryonique μ_B

✓ Pour $\mu_B = 0$, transition de phase :

- Pour $T_c = 156 \text{ MeV}^*$
- T_c : environ 1900 Milliards de degré K $\sim 10^5$ fois la température au centre du soleil
- Transition de type « cross-over » entre la matière confinée et déconfinée (QGP)



* : $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \approx 12 \text{ Milliards de degrés K}$
 ~ 800 fois la température au centre du soleil

Le diagramme de phase de la matière nucléaire

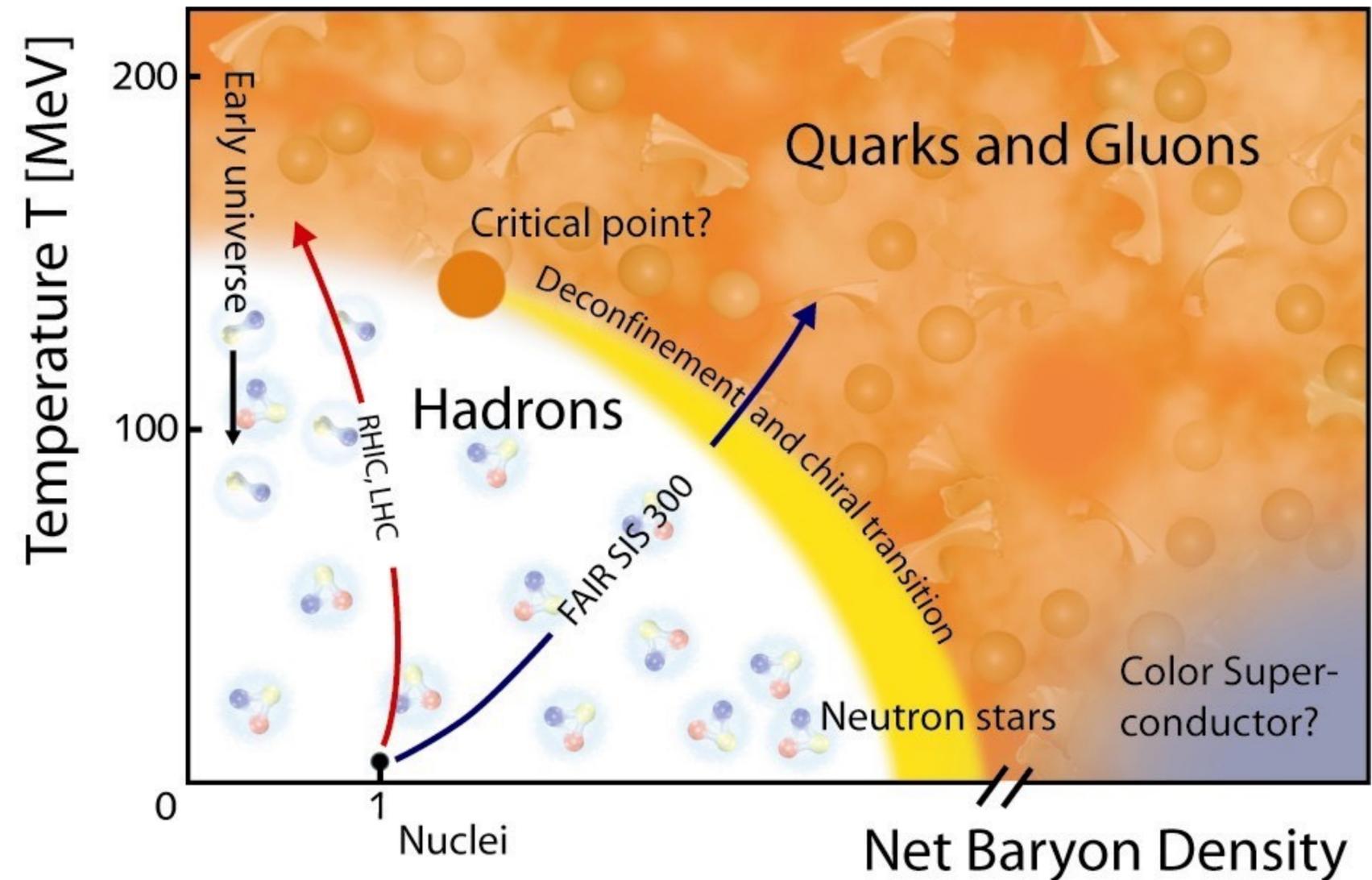
✓ Temperature vs Densité baryonique nette = densité baryon - anti-baryon ou potentiel chimique baryonique μ_B

✓ Pour $\mu_B = 0$, transition de phase :

- Pour $T_c = 156 \text{ MeV}^*$
- T_c : environ 1900 Milliards de degré K $\sim 10^5$ fois la température au centre du soleil
- Transition de type « cross-over » entre la matière confinée et déconfinée (QGP)

✓ Pour $\mu_B > 0$, transition de phase :

- Grande incertitude en température
- Ordre de la transition inconnu
- Existence d'un point critique



* : $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \approx 12 \text{ Milliards de degrés K}$
 ~ 800 fois la température au centre du soleil

Le diagramme de phase de la matière nucléaire

✓ Temperature vs Densité baryonique nette = densité baryon - anti-baryon ou potentiel chimique baryonique μ_B

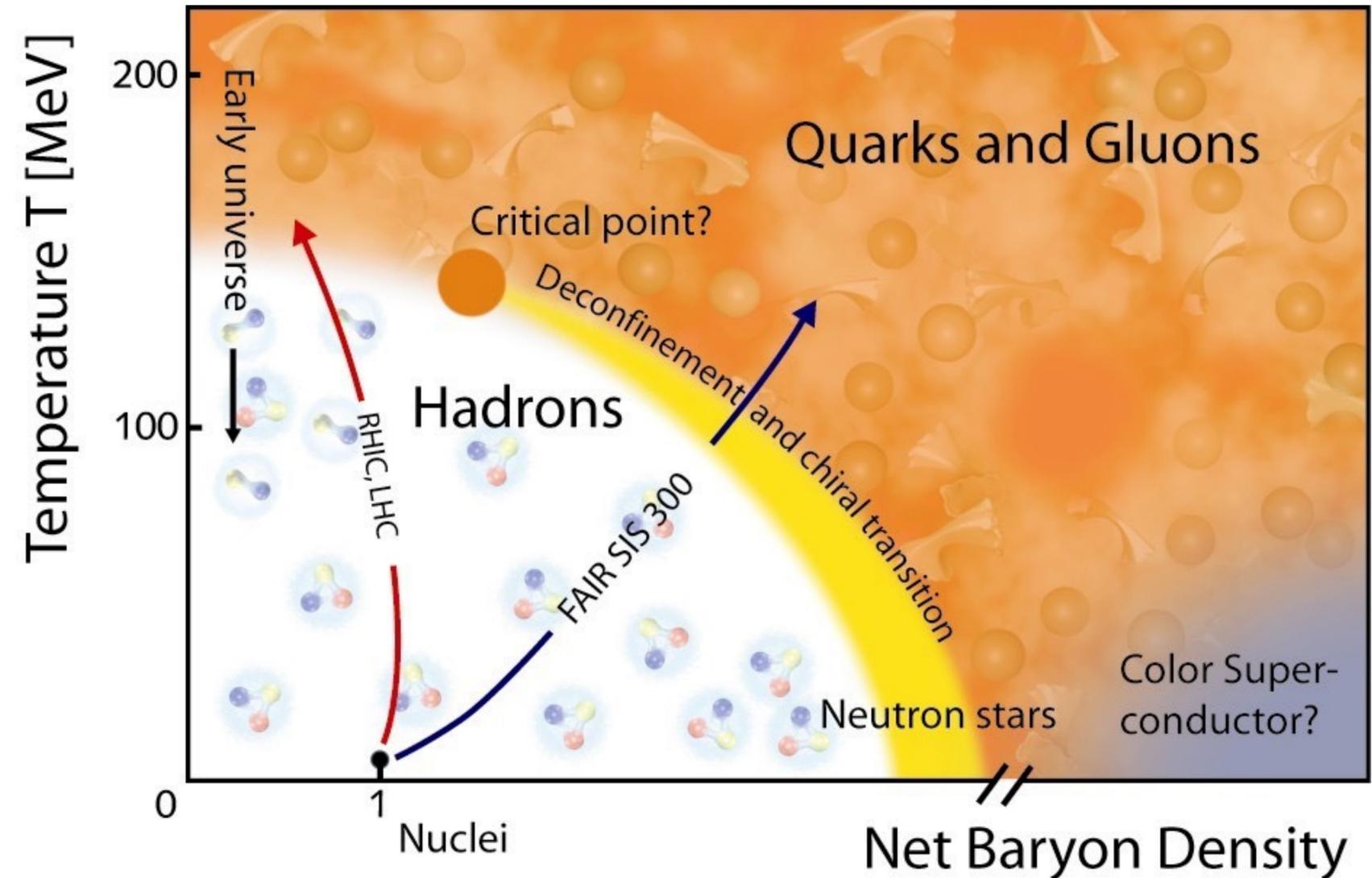
✓ Pour $\mu_B = 0$, transition de phase :

- Pour $T_c = 156 \text{ MeV}^*$
- T_c : environ 1900 Milliards de degré K $\sim 10^5$ fois la température au centre du soleil
- Transition de type « cross-over » entre la matière confinée et déconfinée (QGP)

✓ Pour $\mu_B > 0$, transition de phase :

- Grande incertitude en température
- Ordre de la transition inconnu
- Existence d'un point critique

✓ Le QGP aurait existé au tout début de l'Univers et il pourrait se trouver au coeur des étoiles à neutrons



* : $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \approx 12 \text{ Milliards de degrés K}$
 ~ 800 fois la température au centre du soleil

QGP : motivations scientifiques

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{\psi}_j (i\gamma^\mu D_\mu + m_j) \psi_j$$

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 $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

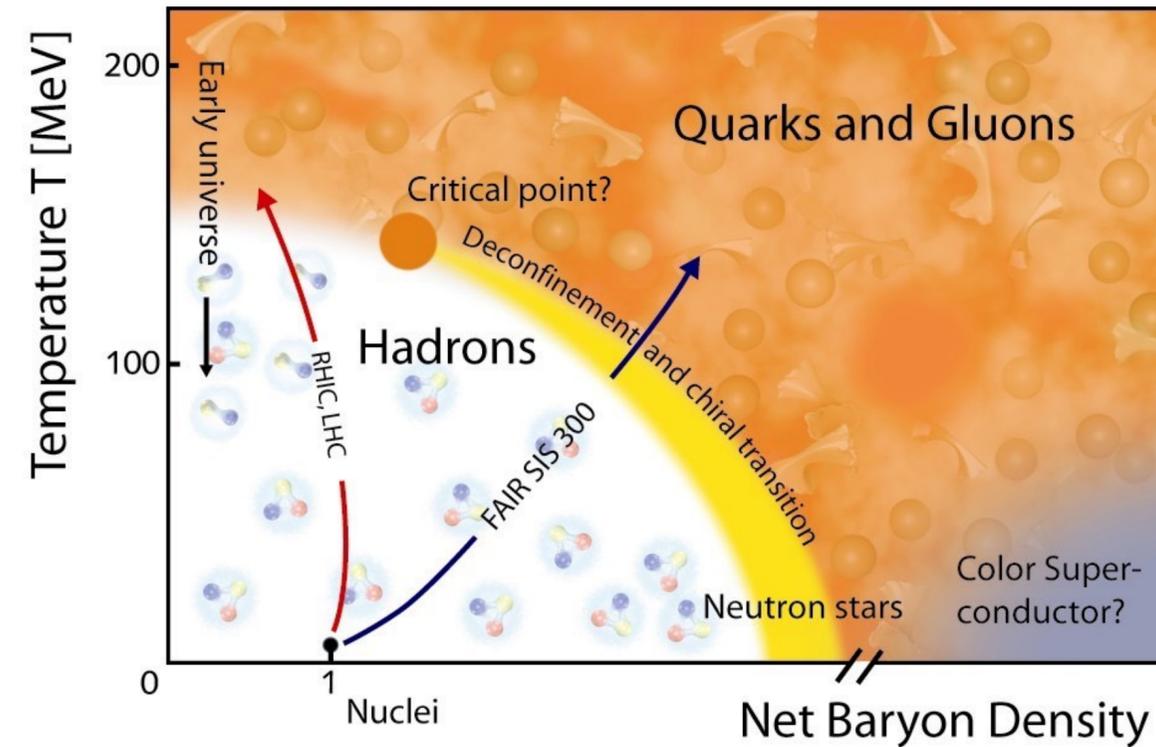
Étudier les propriétés de base de l'interaction forte et le déconfinement

QGP : motivations scientifiques

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{\psi}_j (i\gamma^\mu D_\mu + m_j) \psi_j$$

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 $D_\mu \equiv \partial_\mu + i\tau^a A_\mu^a$

Étudier les propriétés de base de l'interaction forte et le déconfinement



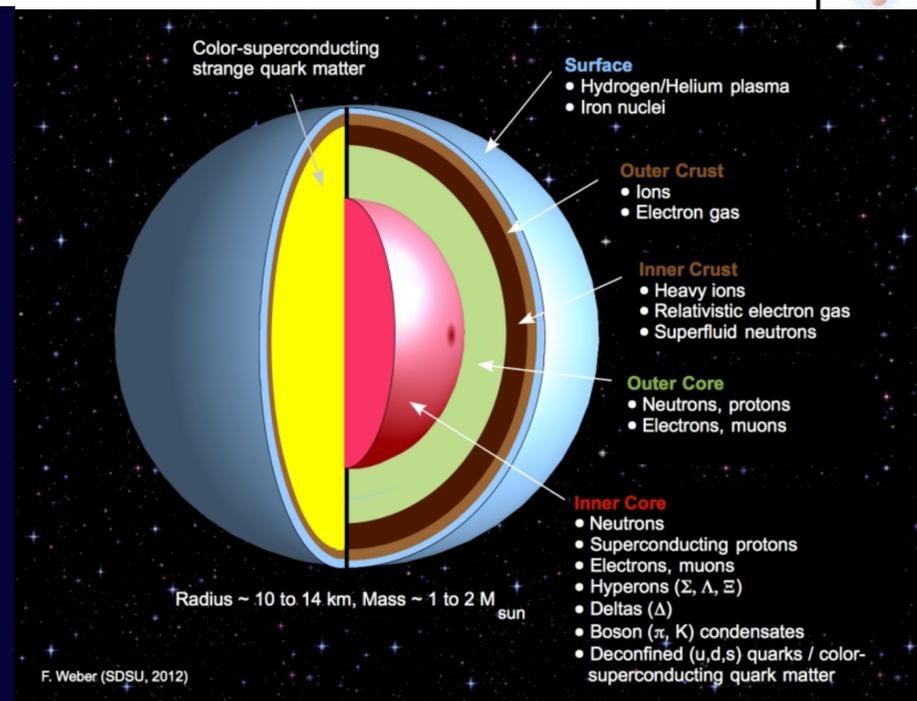
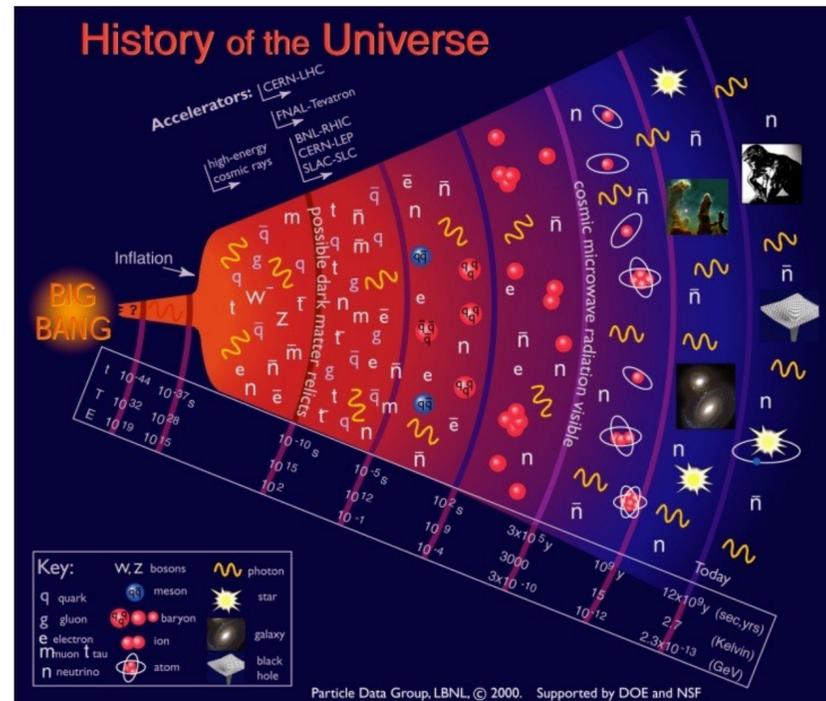
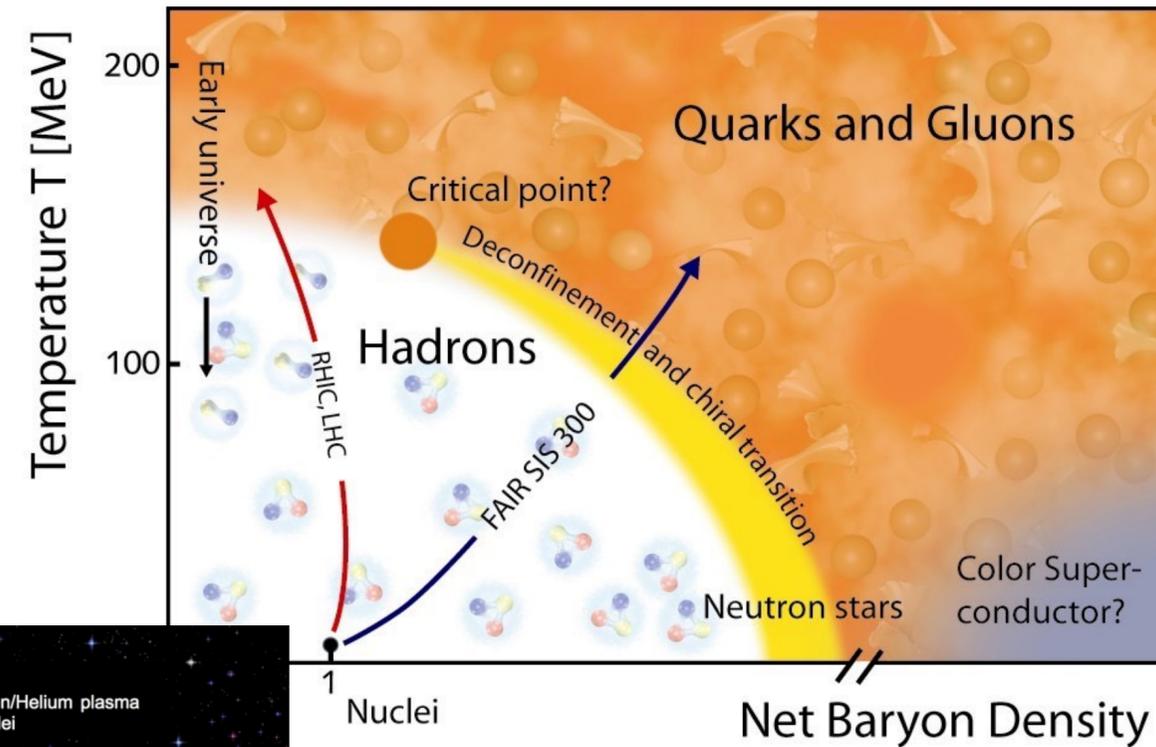
Étudier le diagramme de phase de la matière nucléaire

QGP : motivations scientifiques

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{\psi}_f (i\gamma^\mu D_\mu + m_f) \psi_f$$

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 $D_\mu \equiv \partial_\mu + ig A_\mu^a$

Étudier les propriétés de base de l'interaction forte et le déconfinement



Étudier le diagramme de phase de la matière nucléaire

Comprendre les premiers instants de l'évolution de notre Univers et certains phénomènes astrophysiques (fusion d'étoiles à neutron, ...)

Sommaire

I. Matière nucléaire et le plasma de quarks et de gluons (QGP)

1. Notions fondamentales et interaction forte
2. Les phases de la matière nucléaire et le QGP
3. Sonder le QGP en laboratoire

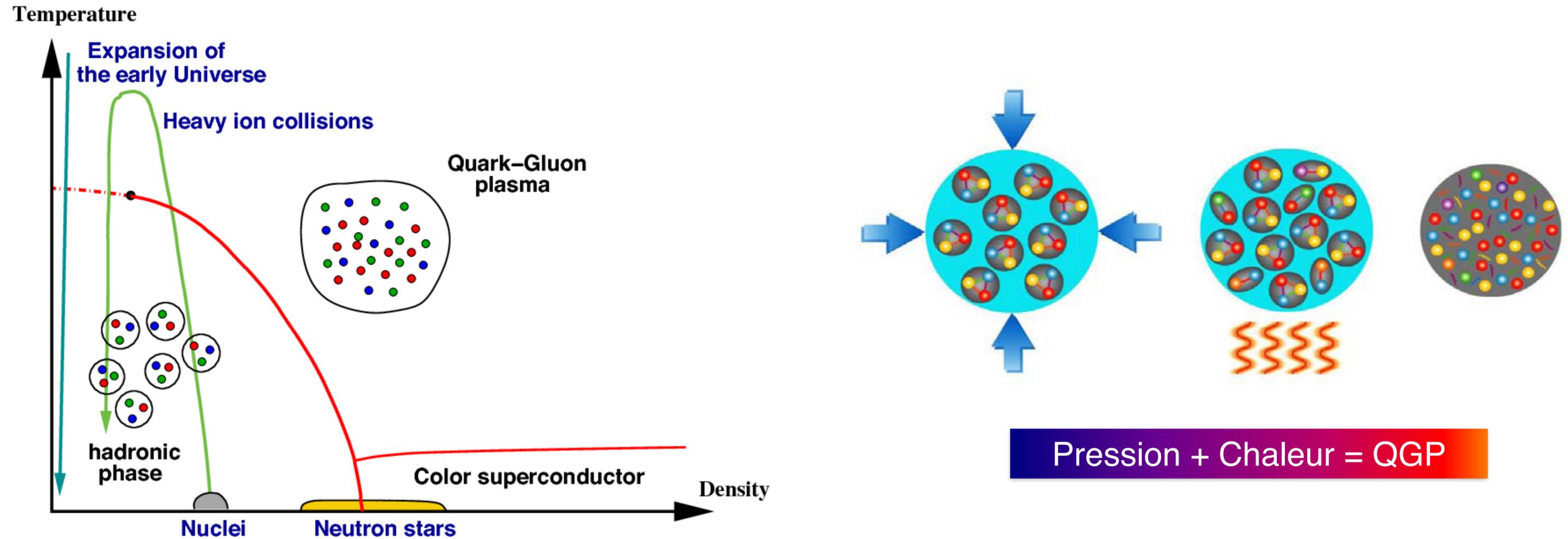
II. De la physique au détecteur

1. Les accélérateurs d'ions lourds ultra-relativistes
2. Expériences passées et présentes
3. L'expérience ALICE et le spectromètre à muons
4. La vie d'un(e) physicien(ne) sur une expérience

III. Résultats et expériences futures

1. Des données aux résultats
2. Des résultats à la théorie
3. Upgrade et expériences futures

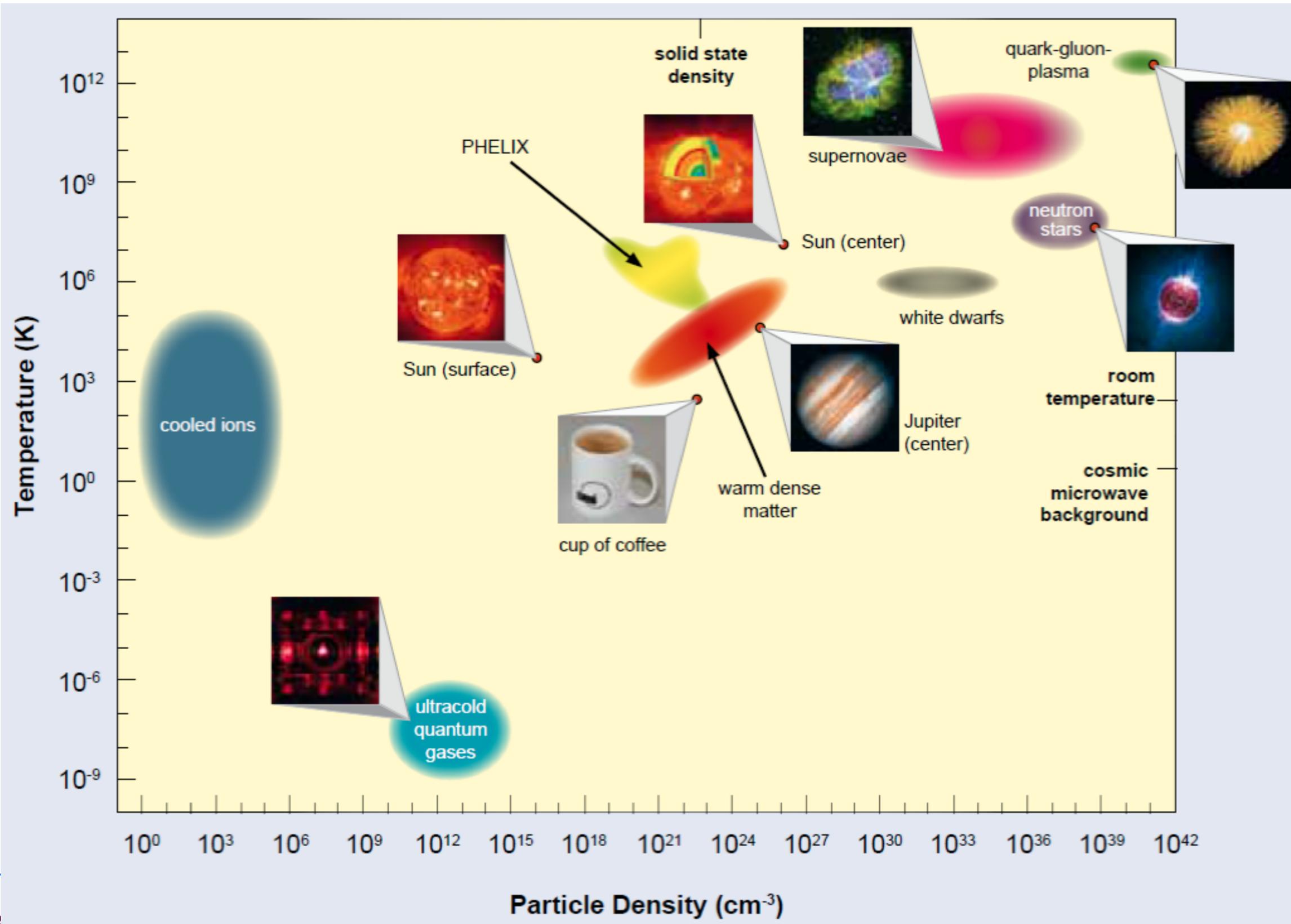
Comment recréer le QGP en laboratoire ?



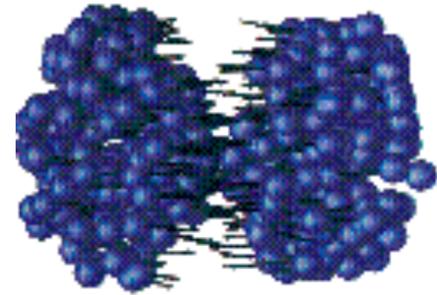
En augmentant la densité d'énergie :

- soit en chauffant la matière nucléaire
- soit en la compressant

Des conditions extrêmes à atteindre



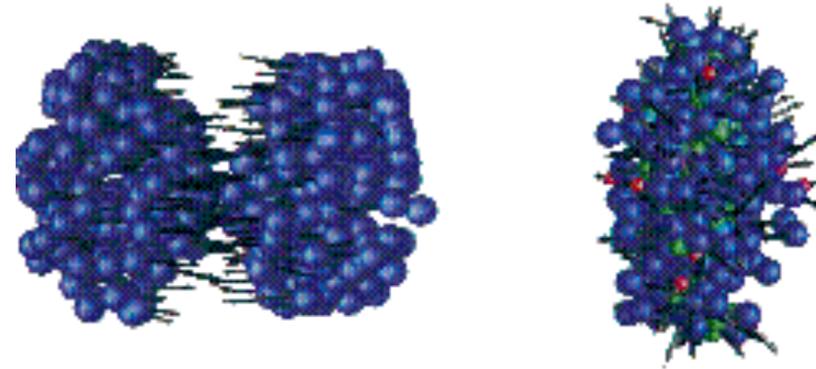
Collisions d'ions lourds ultra-relativistes



Temps (collision) →

- Les noyaux sont accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière
 - Remarque : ions ultra-relativistes contractés le long de l'axe du faisceau (relativité, contraction de Lorentz) → ils apparaissent comme des « pancakes »

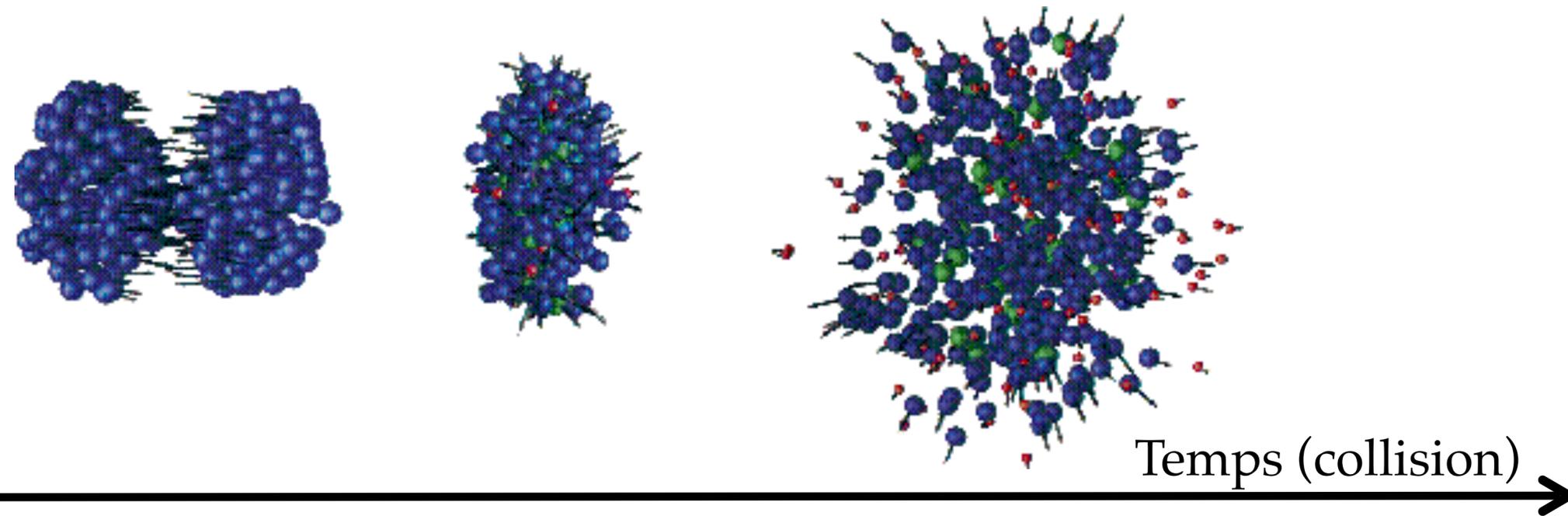
Collisions d'ions lourds ultra-relativistes



Temps (collision) →

- Les noyaux sont accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière
 - Remarque : ions ultra-relativistes contractés le long de l'axe du faisceau (relativité, contraction de Lorentz) → ils apparaissent comme des « pancakes »
- Lors de la collision, l'énergie cinétique des noyaux incidents est transférée au système par de multiples collisions entre nucléons, quarks et gluons

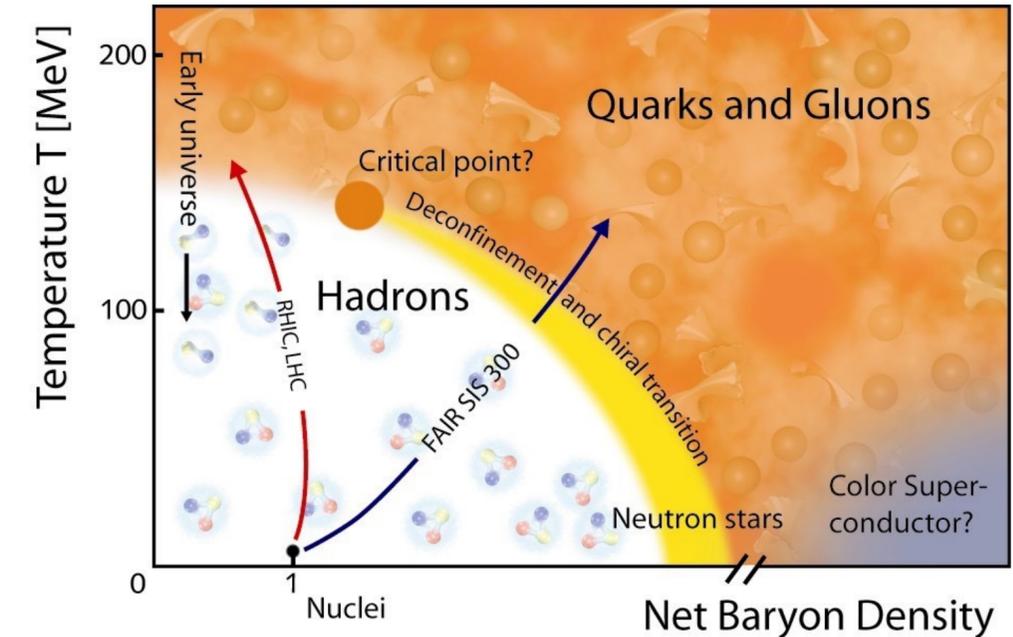
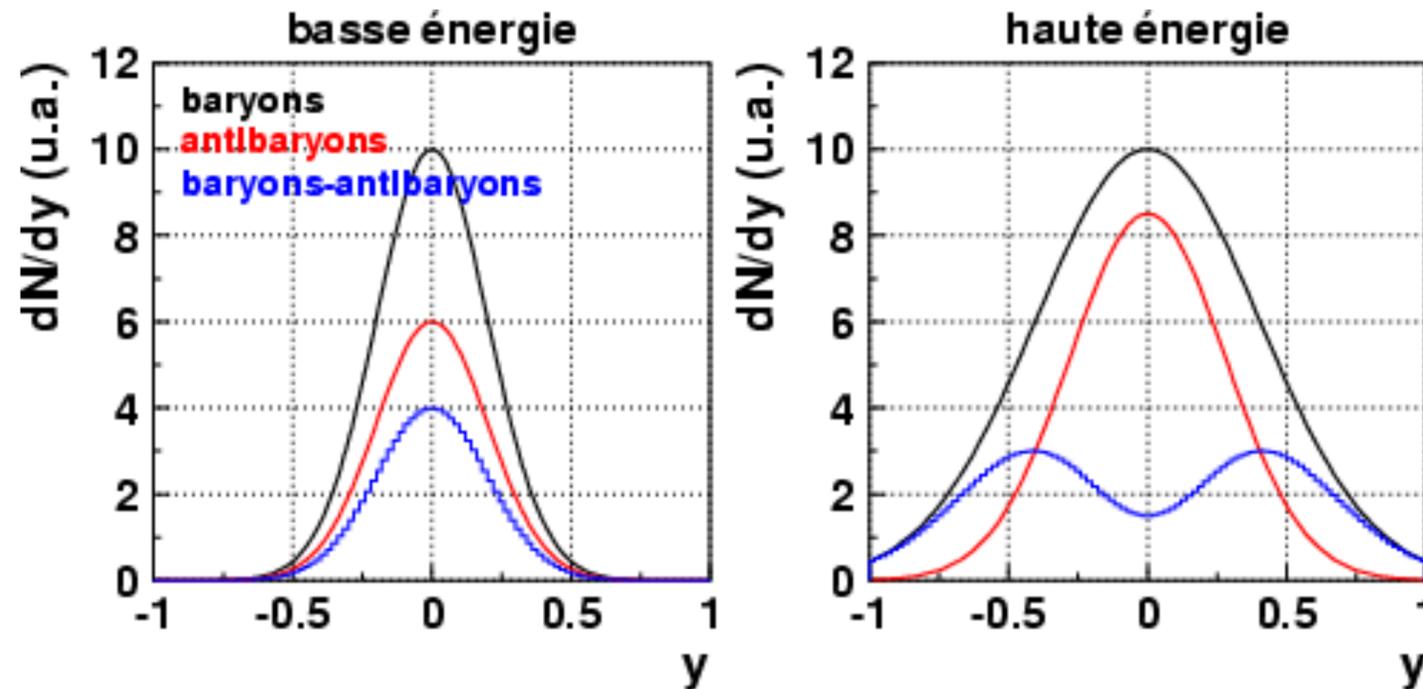
Collisions d'ions lourds ultra-relativistes



- Les noyaux sont accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière
 - Remarque : ions ultra-relativistes contractés le long de l'axe du faisceau (relativité, contraction de Lorentz) → ils apparaissent comme des « pancakes »
- Lors de la collision, l'énergie cinétique des noyaux incidents est transférée au système par de multiples collisions entre nucléons, quarks et gluons
- Le système s'échauffe, se comprime, libère de l'énergie en produisant des particules, puis se détend, se refroidit et se désagrège

Collisions d'ions lourds ultra-relativistes

Plus l'énergie de collision est élevée, plus les noyaux sont "transparents" et plus la densité baryonique nette (baryons - antibaryons) est proche de zéro.

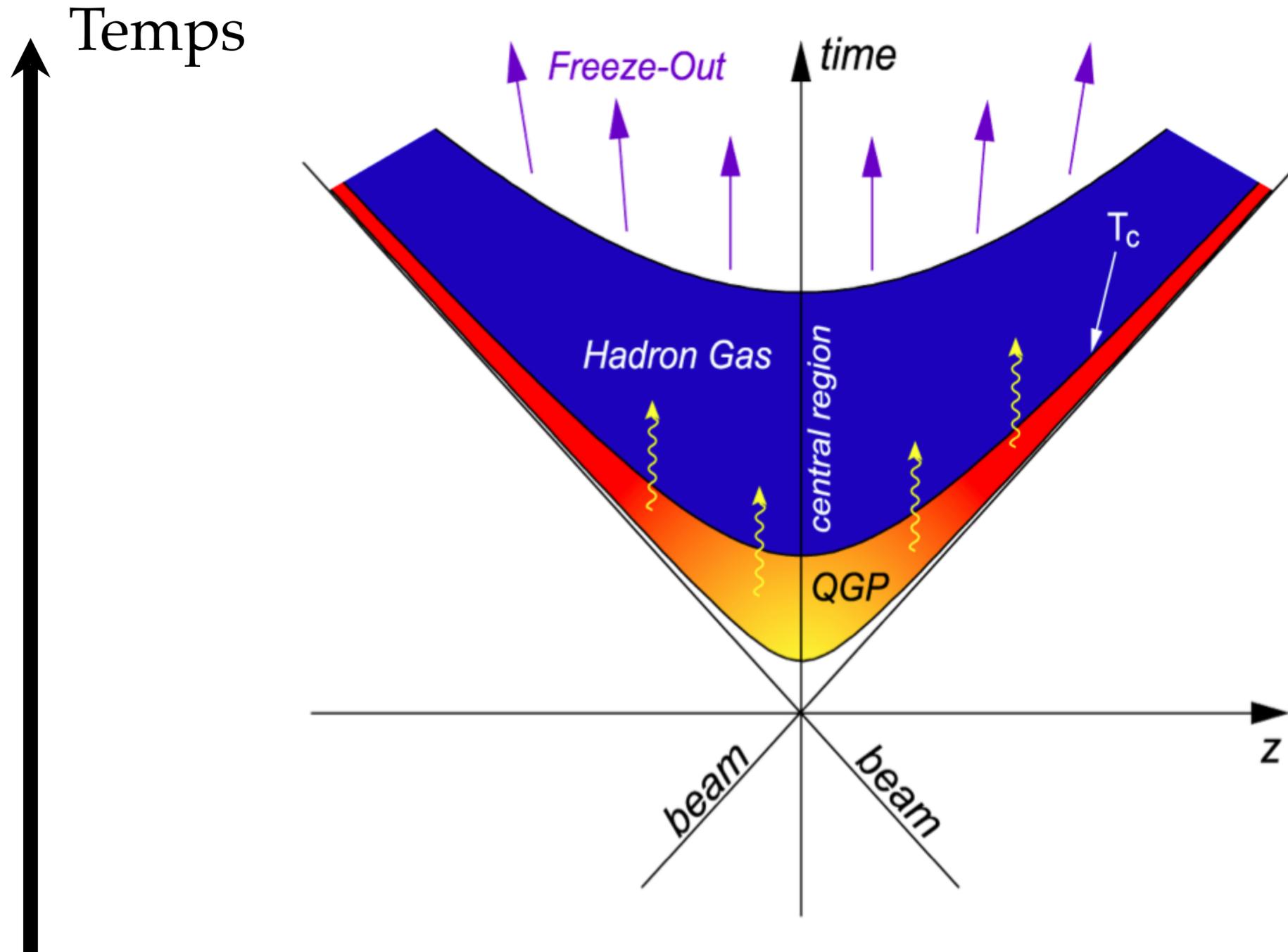


- y = rapidité : équivalent de la vitesse longitudinale en régime non relativiste

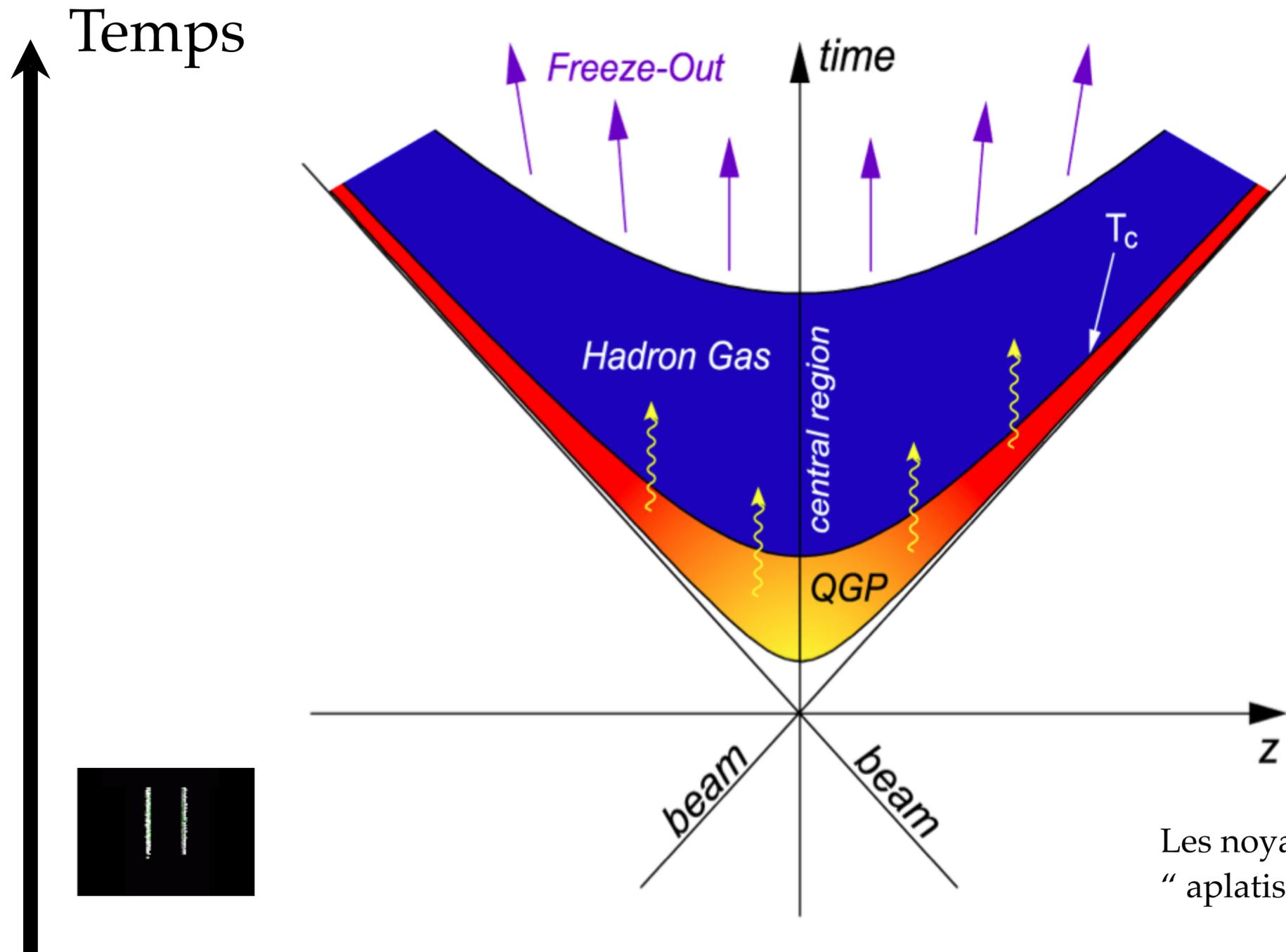
$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z c}{E - p_z c}$$

- Densité baryonique nette $\sim N(\text{baryons}) - N(\text{antibaryons})$
- Au LHC : densité baryonique nette ou potentiel chimique baryonique $\mu_B \sim 0$

Evolution spatio-temporelle d'une collision

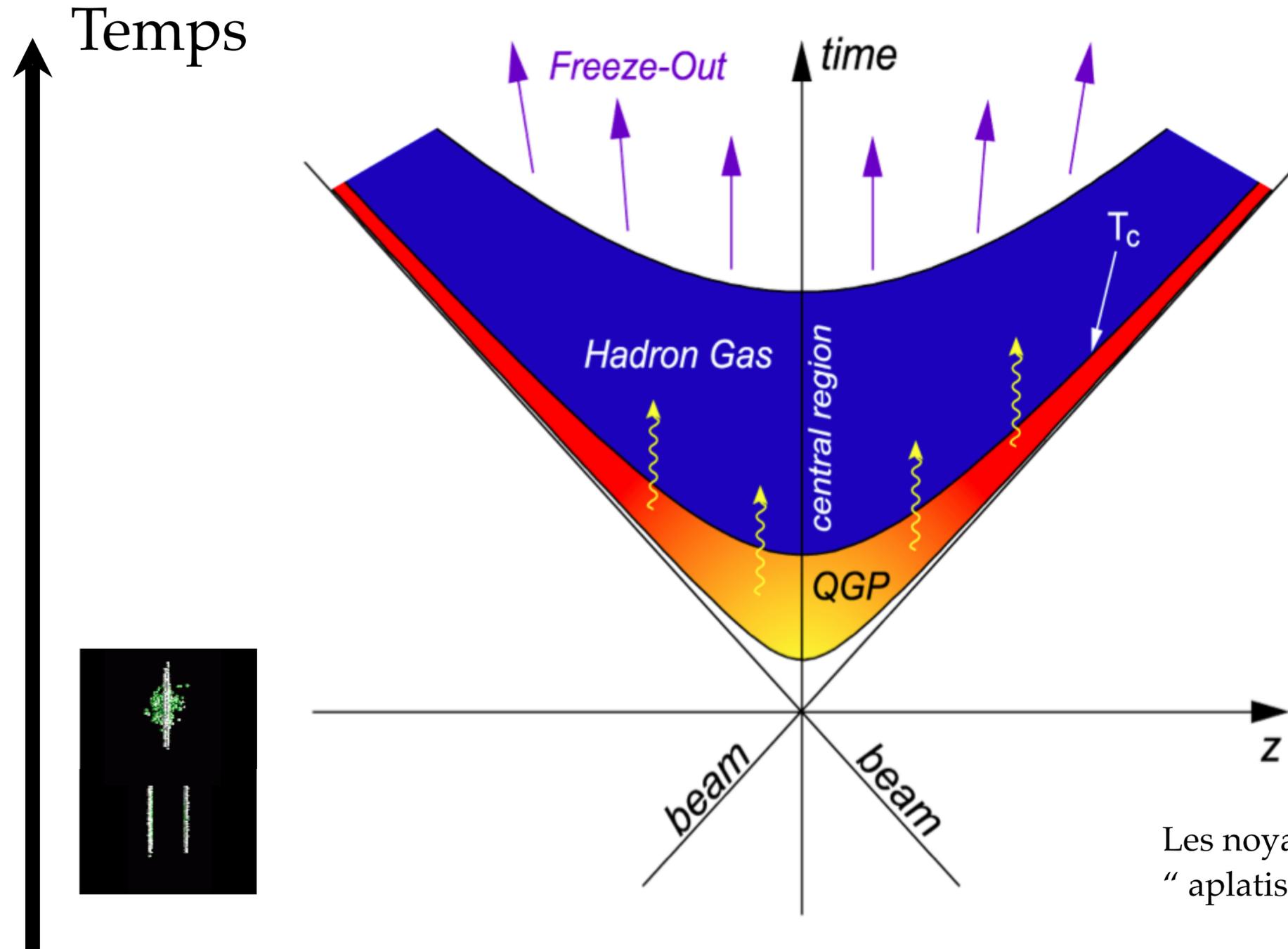


Evolution spatio-temporelle d'une collision



Les noyaux, en **phase d'approche**, sont "aplatis" par la contraction de Lorentz.

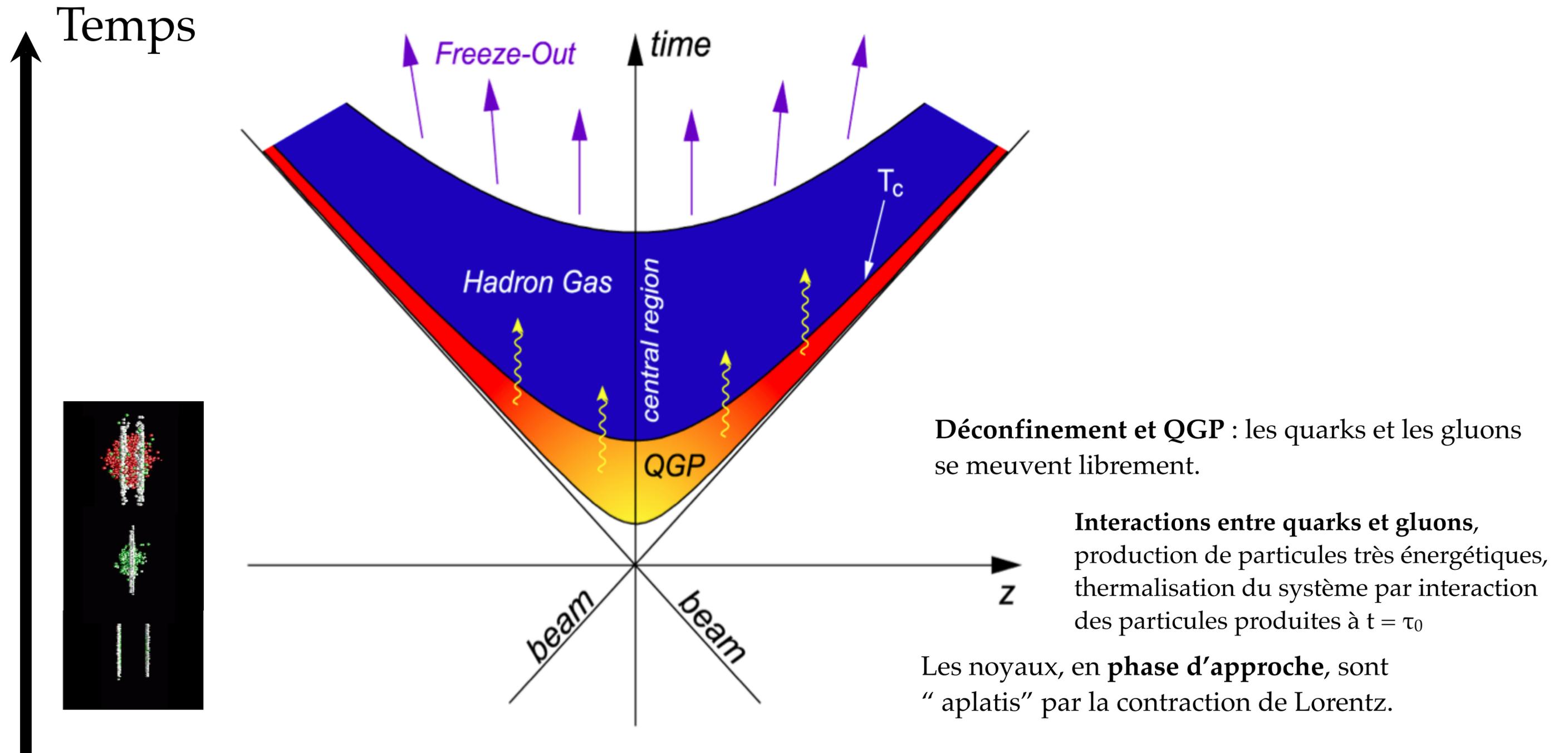
Evolution spatio-temporelle d'une collision



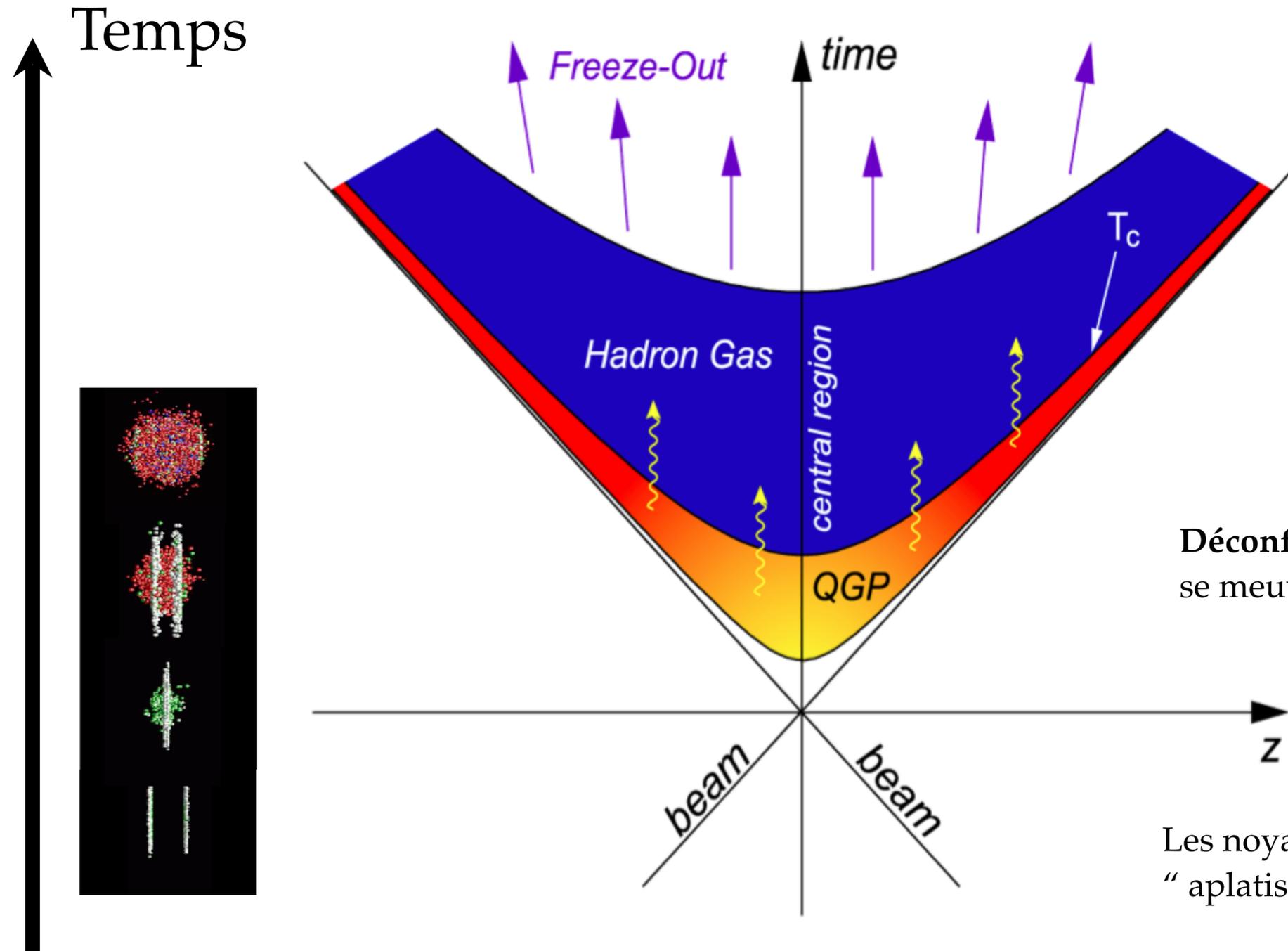
Interactions entre quarks et gluons, production de particules très énergétiques, thermalisation du système par interaction des particules produites à $t = \tau_0$

Les noyaux, en **phase d'approche**, sont "aplatis" par la contraction de Lorentz.

Evolution spatio-temporelle d'une collision



Evolution spatio-temporelle d'une collision



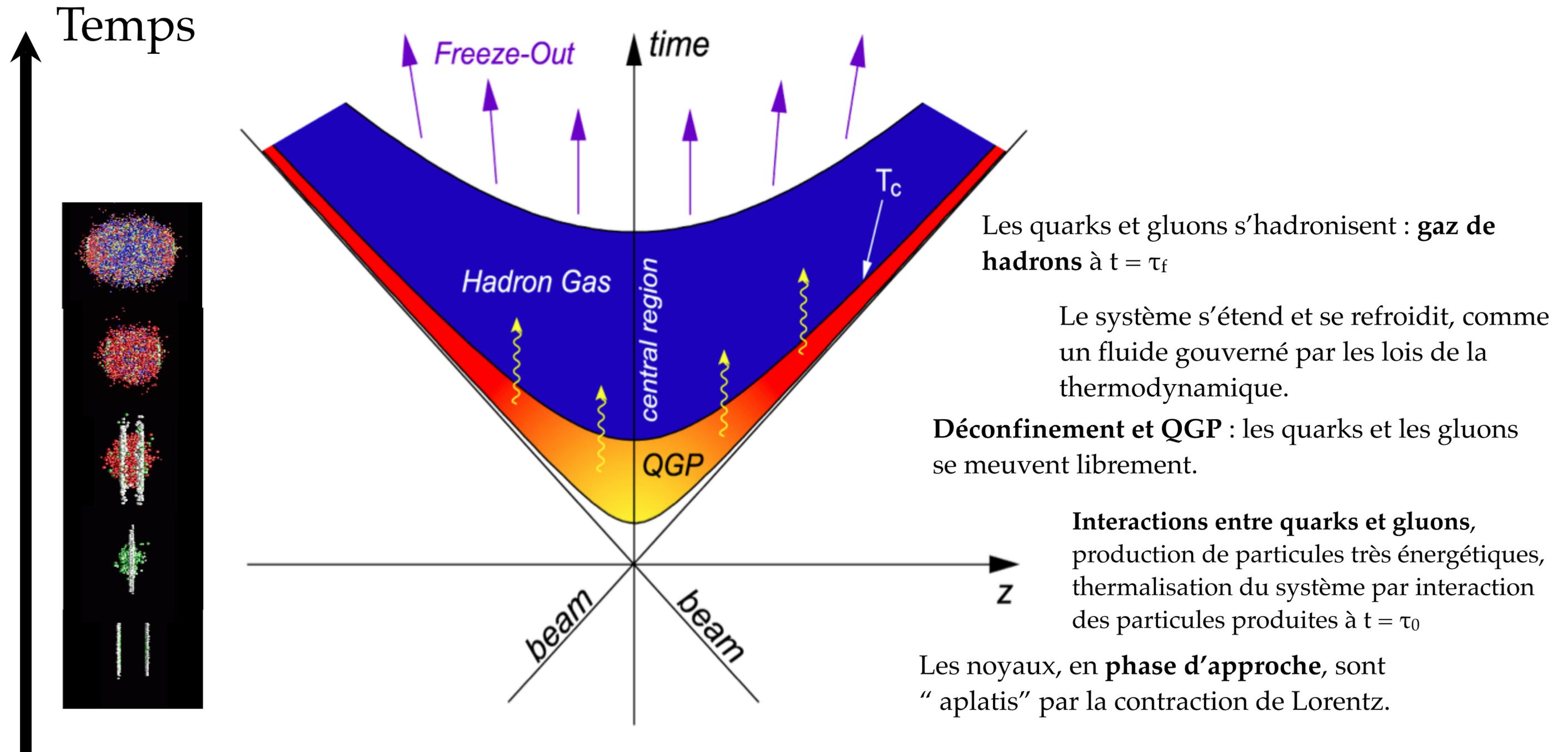
Le système s'étend et se refroidit, comme un fluide gouverné par les lois de la thermodynamique.

Déconfinement et QGP : les quarks et les gluons se meuvent librement.

Interactions entre quarks et gluons, production de particules très énergétiques, thermalisation du système par interaction des particules produites à $t = \tau_0$

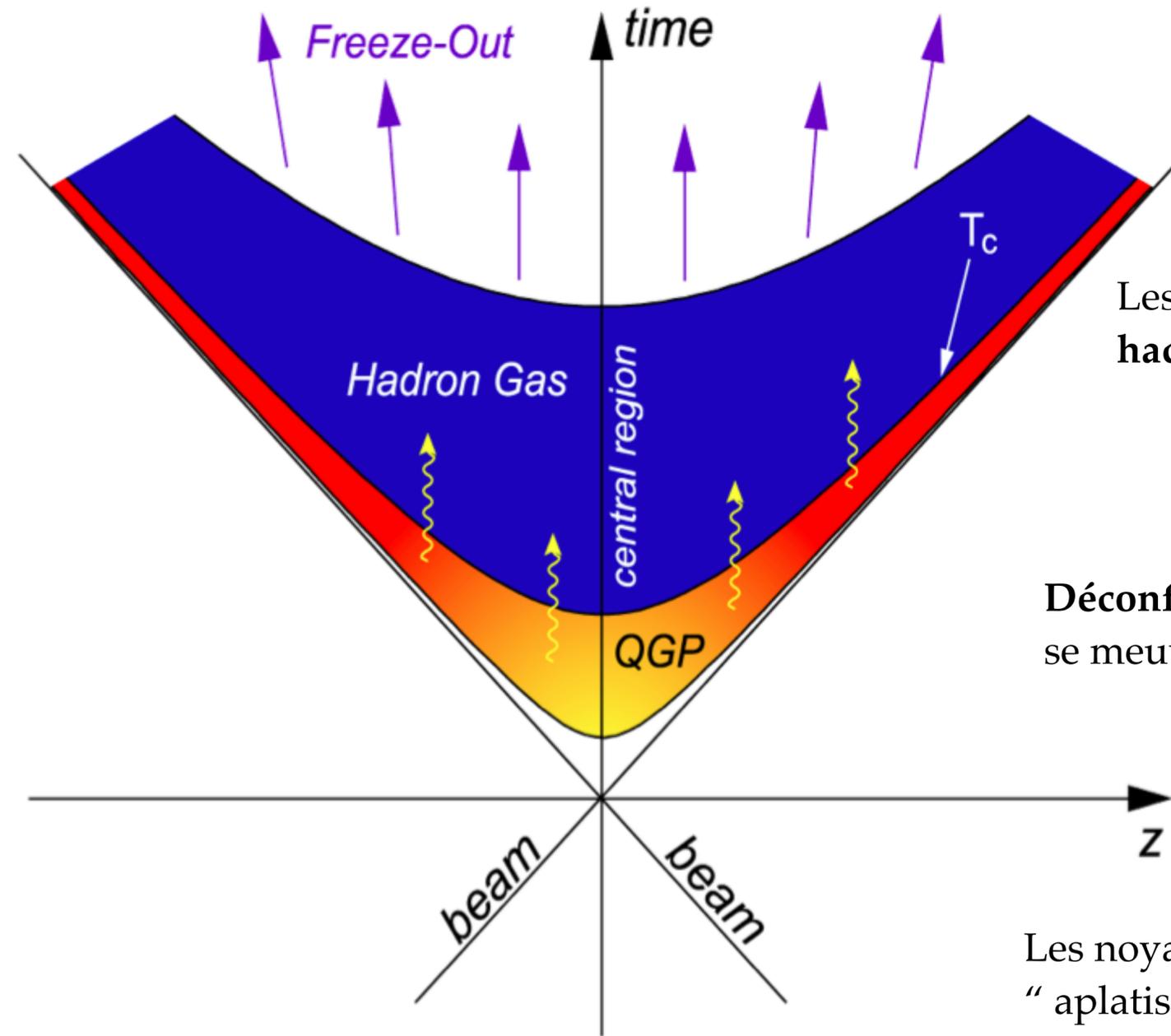
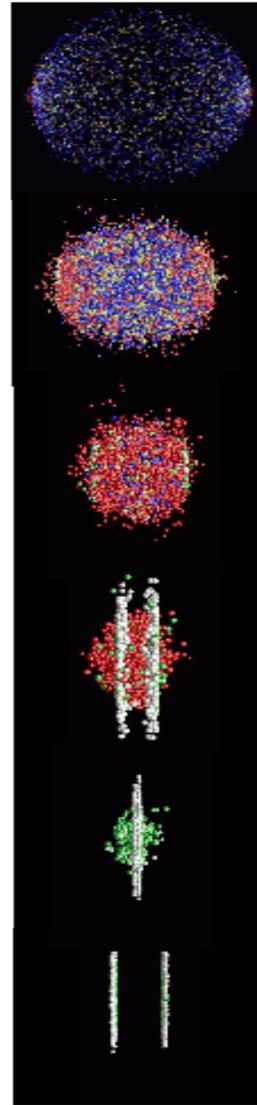
Les noyaux, en **phase d'approche**, sont "aplatis" par la contraction de Lorentz.

Evolution spatio-temporelle d'une collision



Evolution spatio-temporelle d'une collision

Temps



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

Les quarks et gluons s'hadronisent : **gaz de hadrons** à $t = \tau_f$

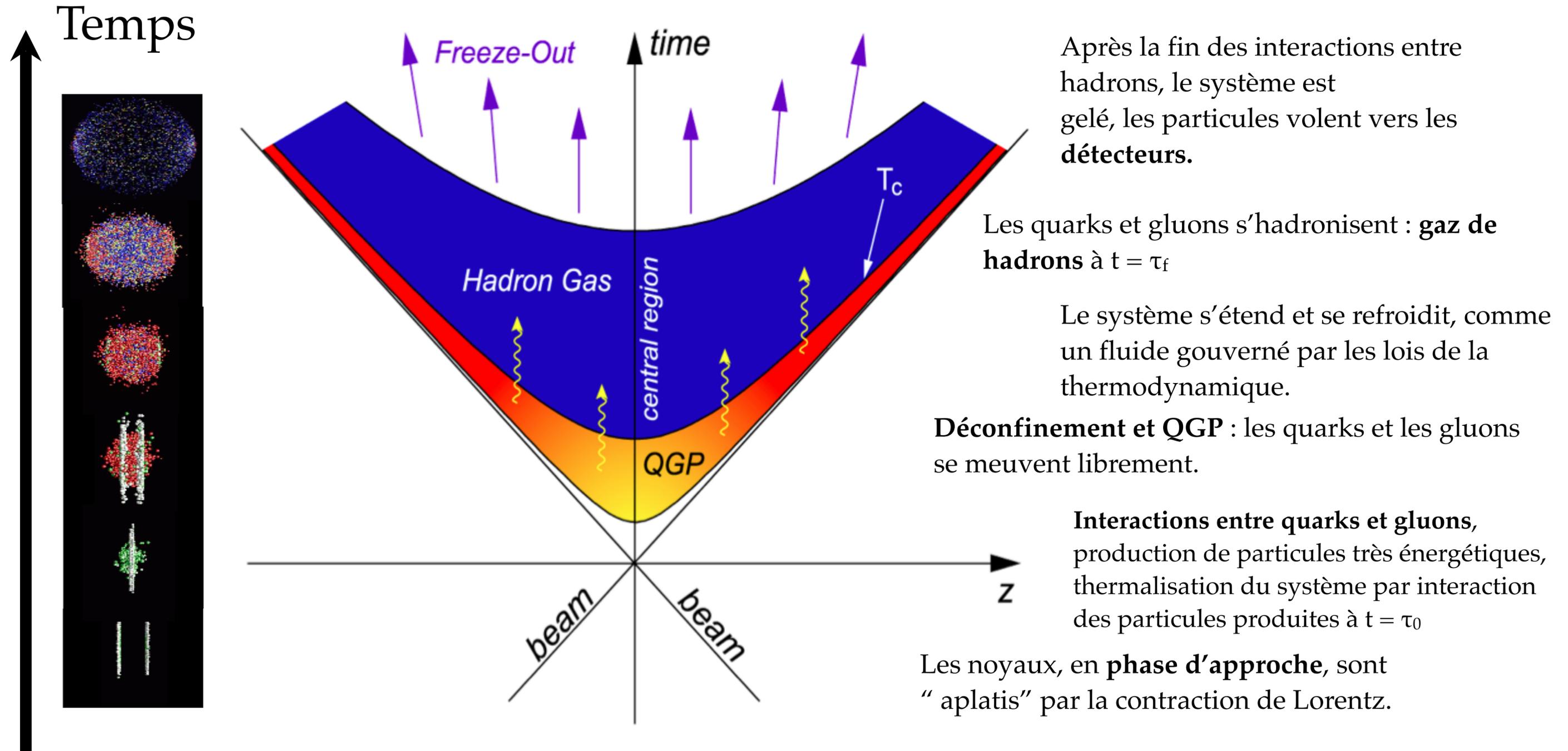
Le système s'étend et se refroidit, comme un fluide gouverné par les lois de la thermodynamique.

Déconfinement et QGP : les quarks et les gluons se meuvent librement.

Interactions entre quarks et gluons, production de particules très énergétiques, thermalisation du système par interaction des particules produites à $t = \tau_0$

Les noyaux, en **phase d'approche**, sont "aplatis" par la contraction de Lorentz.

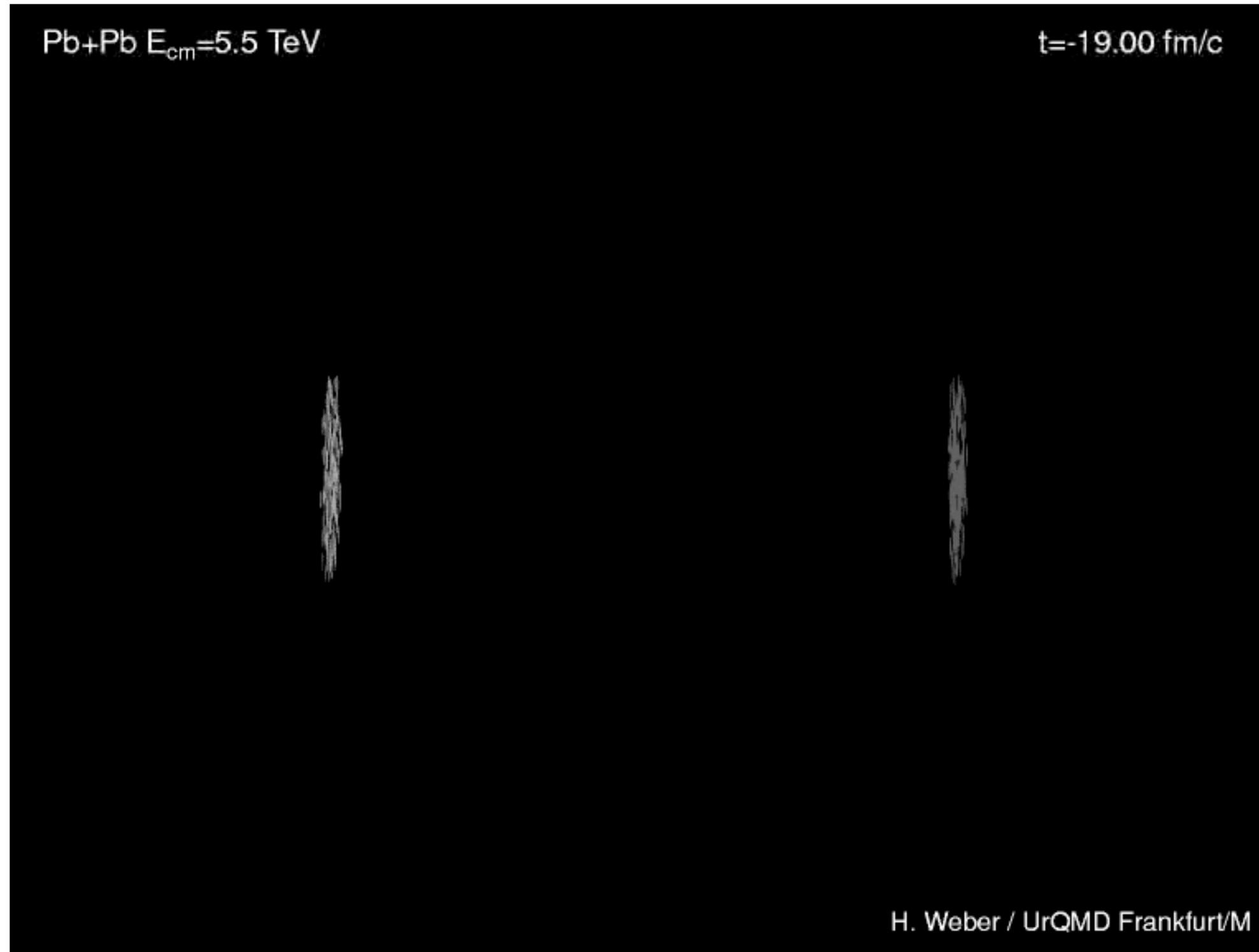
Evolution spatio-temporelle d'une collision



Principe de l'étude du QGP : on utilise les particules produites pour sonder les propriétés du système formé lors de la collision.

Simulation d'une collisions d'ions lourds

Simulation théorique d'une collision

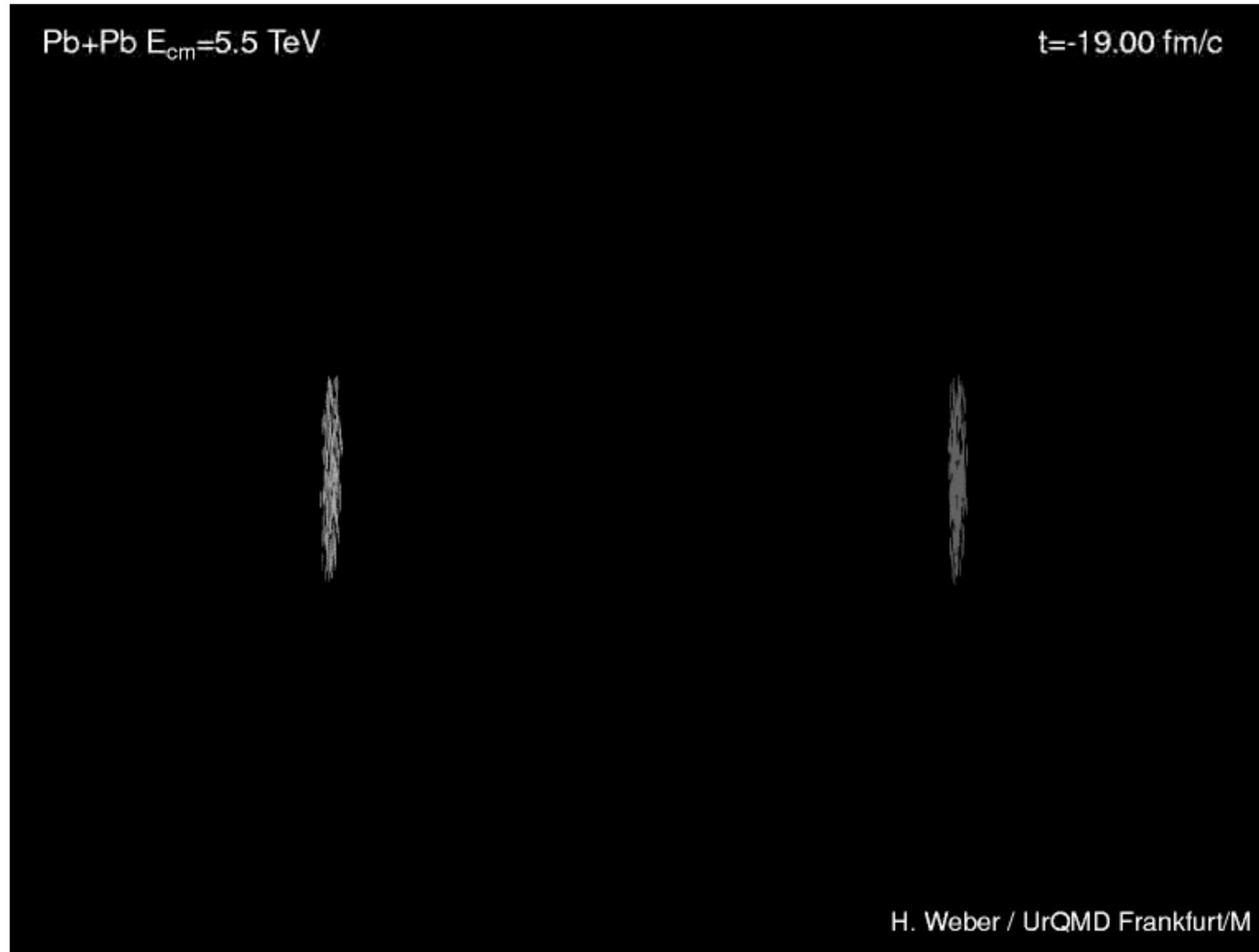


1 fm/c $\sim 3 \cdot 10^{-24}$ s

10 fm/c $\sim 3 \cdot 10^{-23}$ s

Simulation d'une collisions d'ions lourds

Simulation théorique d'une collision

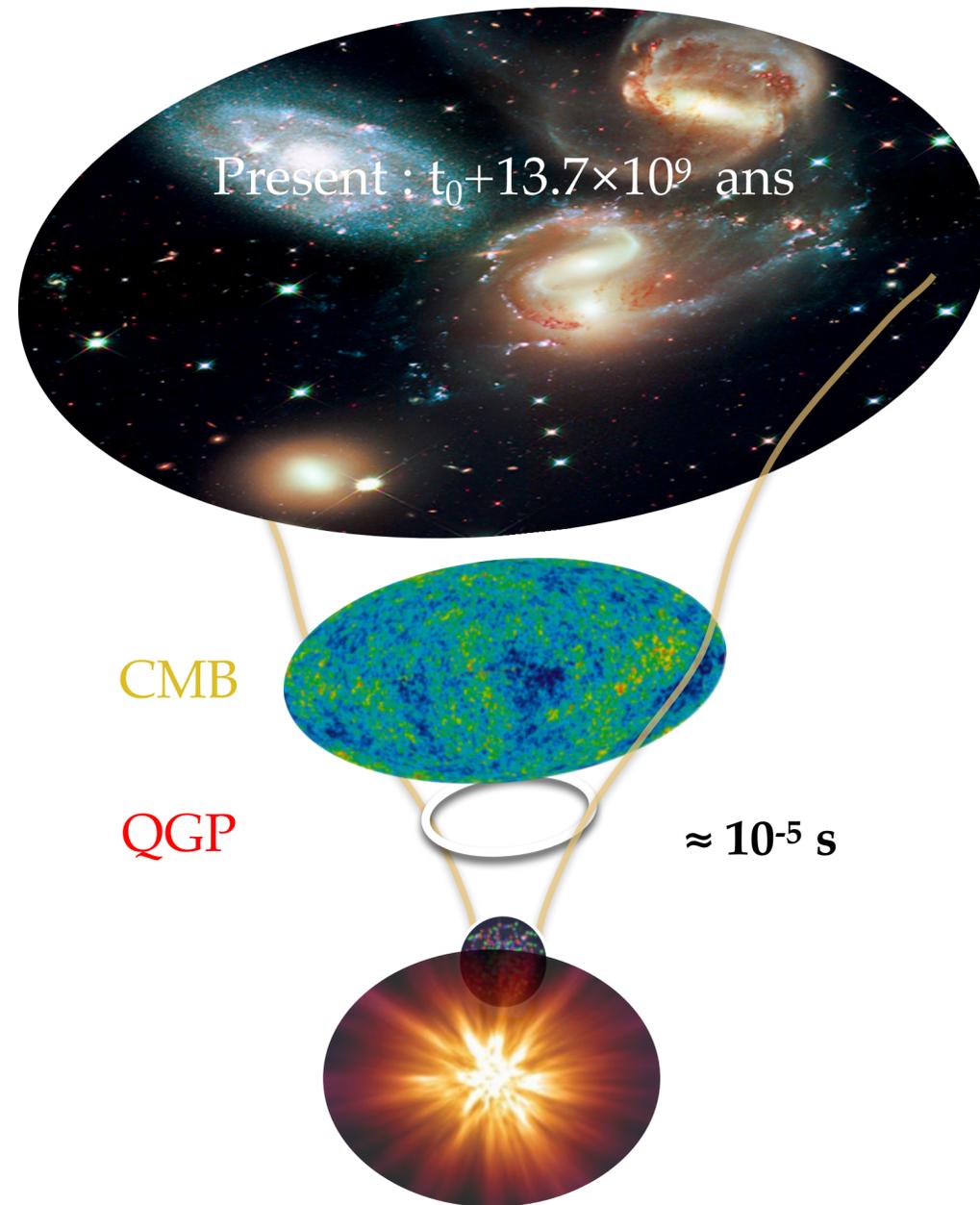


1 fm/c $\sim 3 \cdot 10^{-24}$ s

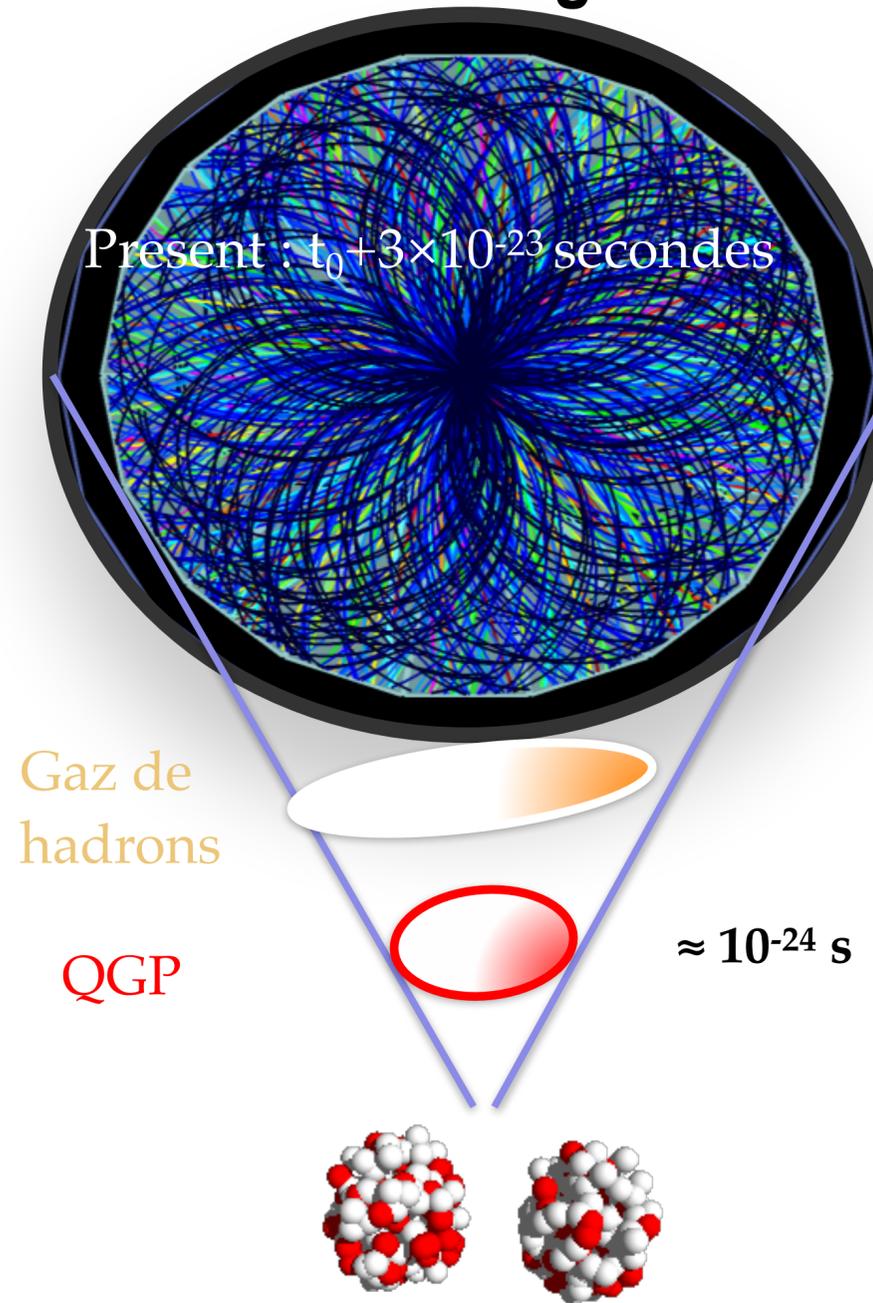
10 fm/c $\sim 3 \cdot 10^{-23}$ s

Big Bang vs Little Bang

Big Bang



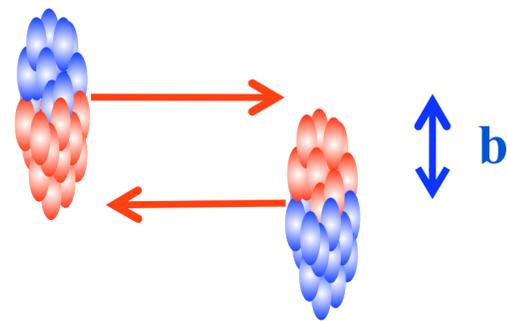
Little Bang



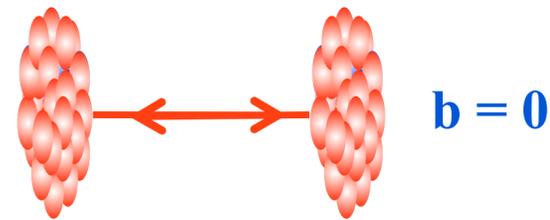
Géométrie d'une collision d'ions lourds

Centralité de la collision : recouvrement de deux noyaux

collision semi-centrale



collision centrale



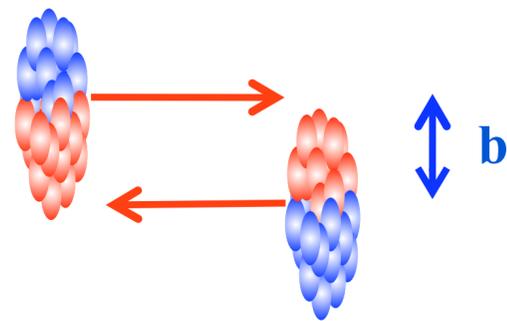
	$N_{\text{part}} = 2$	$N_{\text{coll}} = 1$
	$N_{\text{part}} = 5$	$N_{\text{coll}} = 6$
Pb-Pb cent.	$N_{\text{part}} = 360$	$N_{\text{coll}} = 1500$

- Paramètre d'impact de la collision: b
- Nombre de nucléons participants : N_{part}
- Nombre de nucléons spectateurs
- Nombre de collisions binaires nucleon-nucleon : N_{coll}
- Plus la collision est centrale, plus N_{part} et N_{coll} sont grands

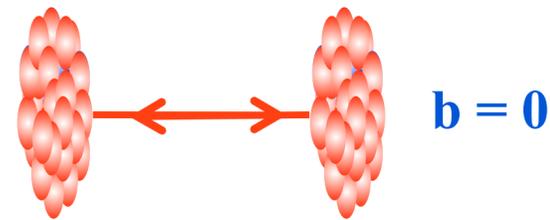
Géométrie d'une collision d'ions lourds

Centralité de la collision : recouvrement de deux noyaux

collision semi-centrale



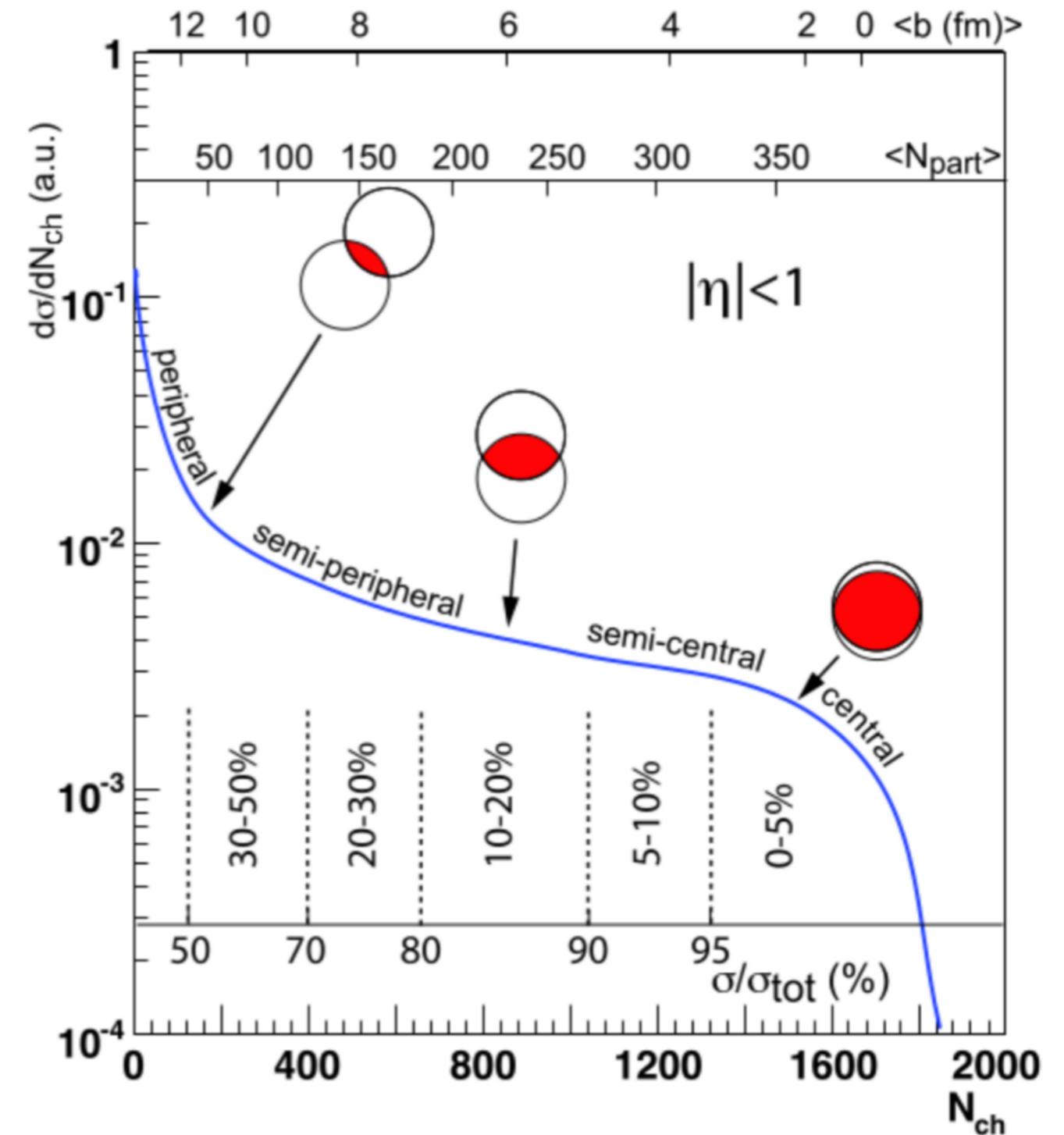
collision centrale



	$N_{\text{part}} = 2$	$N_{\text{coll}} = 1$
	$N_{\text{part}} = 5$	$N_{\text{coll}} = 6$
Pb-Pb cent.	$N_{\text{part}} = 360$	$N_{\text{coll}} = 1500$

- Paramètre d'impact de la collision: b
- **Nombre de nucléons participants** : N_{part}
- **Nombre de nucléons spectateurs**
- Nombre de collisions binaires nucleon-nucleon : N_{coll}
- Plus la collision est centrale, plus N_{part} et N_{coll} sont grands

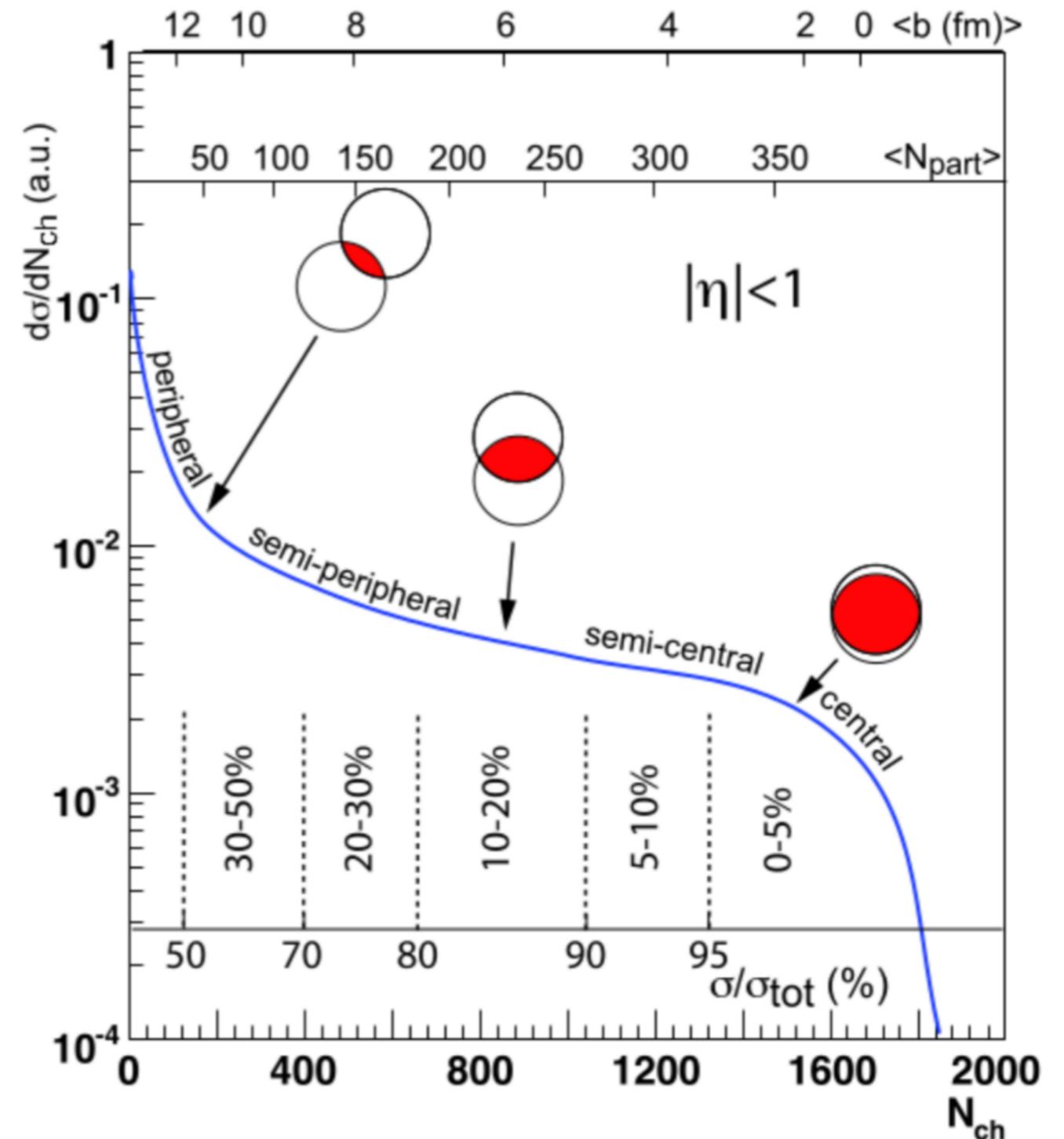
Géométrie d'une collision d'ions lourds



Géométrie d'une collision d'ions lourds

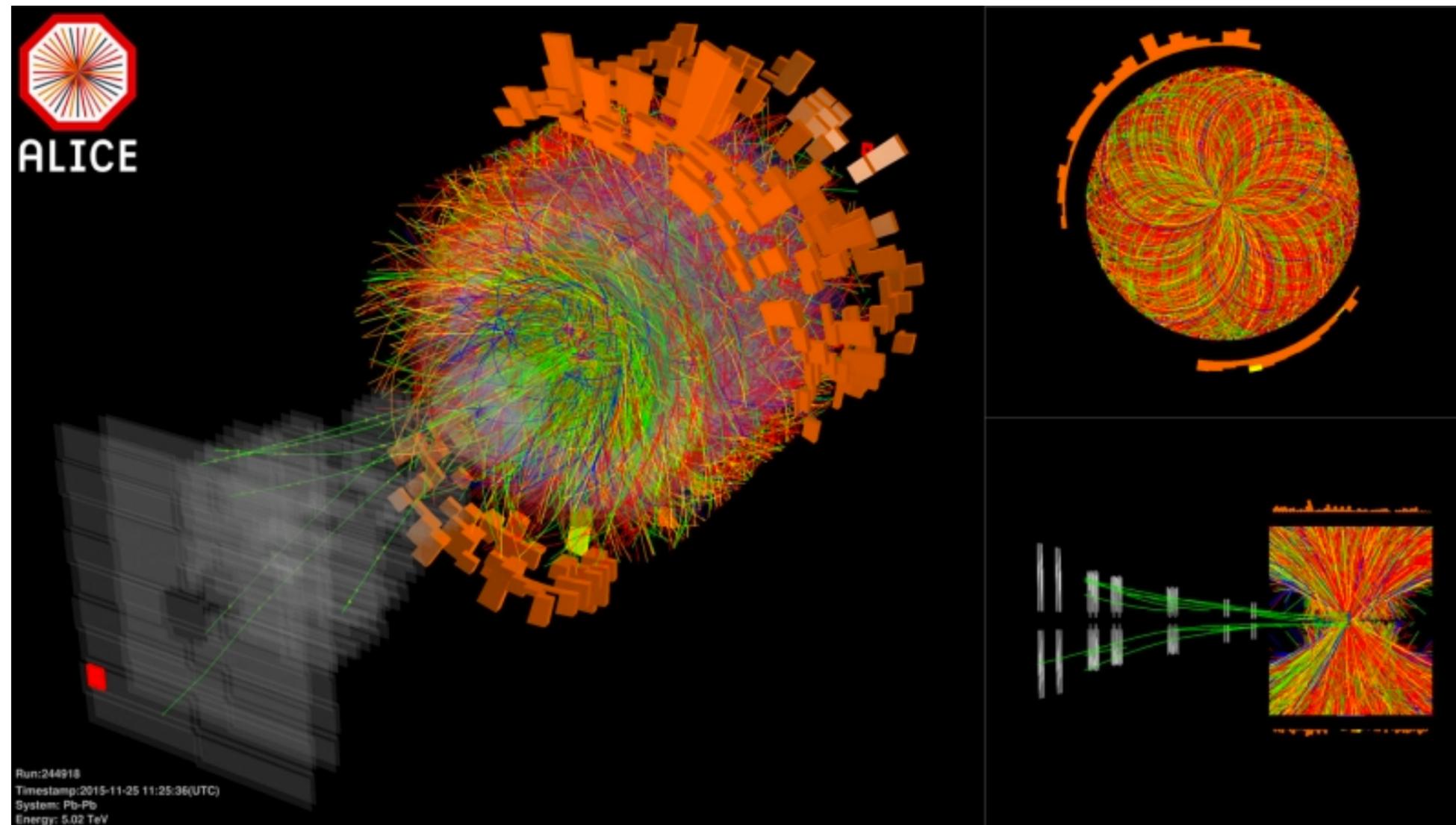
Détermination de la centralité

- On ne peut pas mesurer b , N_{part} et N_{coll} directement
- On mesure expérimentalement la multiplicité de particules produites avec divers détecteurs (particules chargées - π , K , p ... -, spectateurs : neutrons, ...)
- On ajuste le modèle de Glauber aux données, ce qui permet de relier les mesures à b , N_{part} et N_{coll}



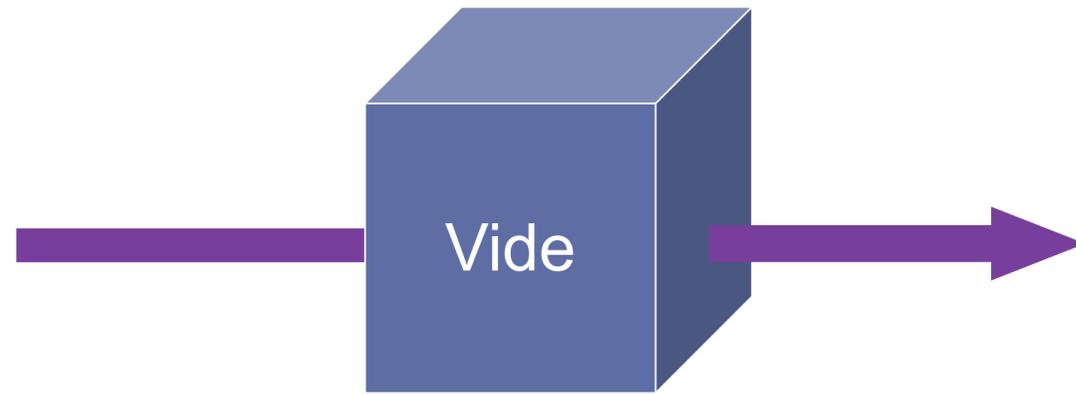
Collision vue par l'expérience ALICE (LHC)

Traces reconstruites par les détecteurs



~20 000 particules chargées sont produites dans 5% des collisions les plus centrales !

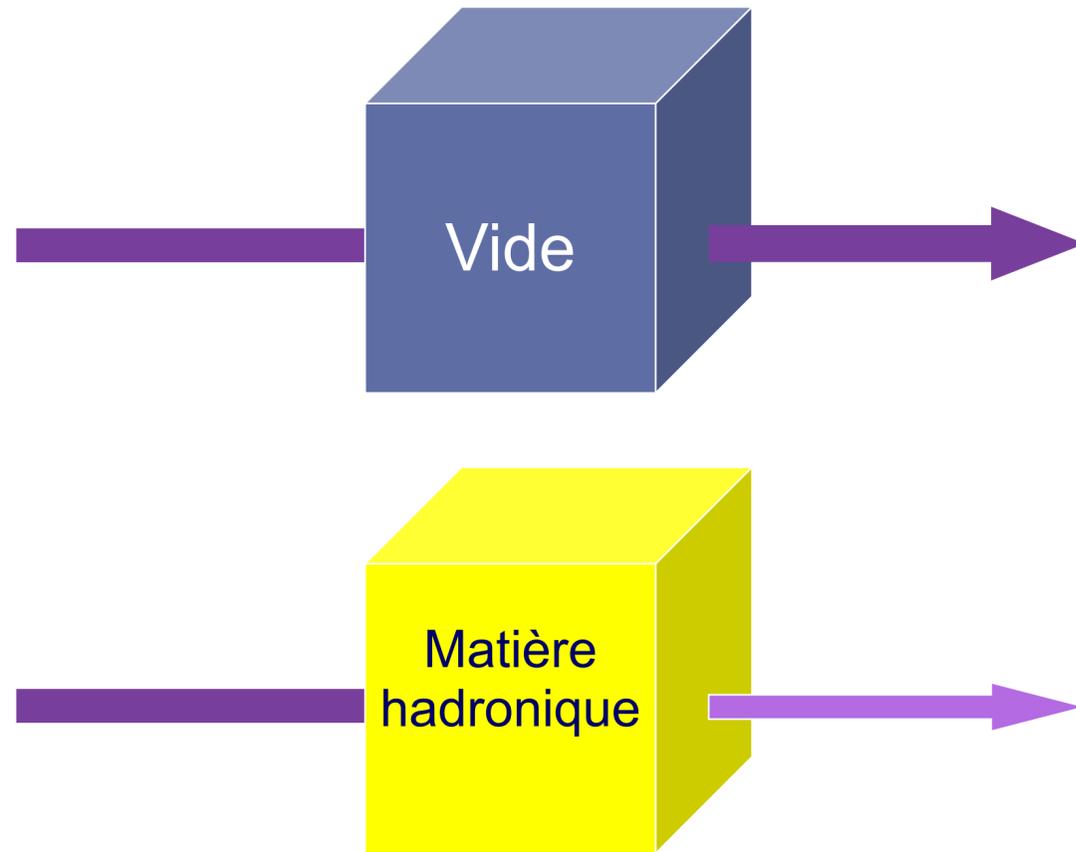
Sonder le QGP avec les particules produites



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

- bien comprise en collisions p-p

Sonder le QGP avec les particules produites

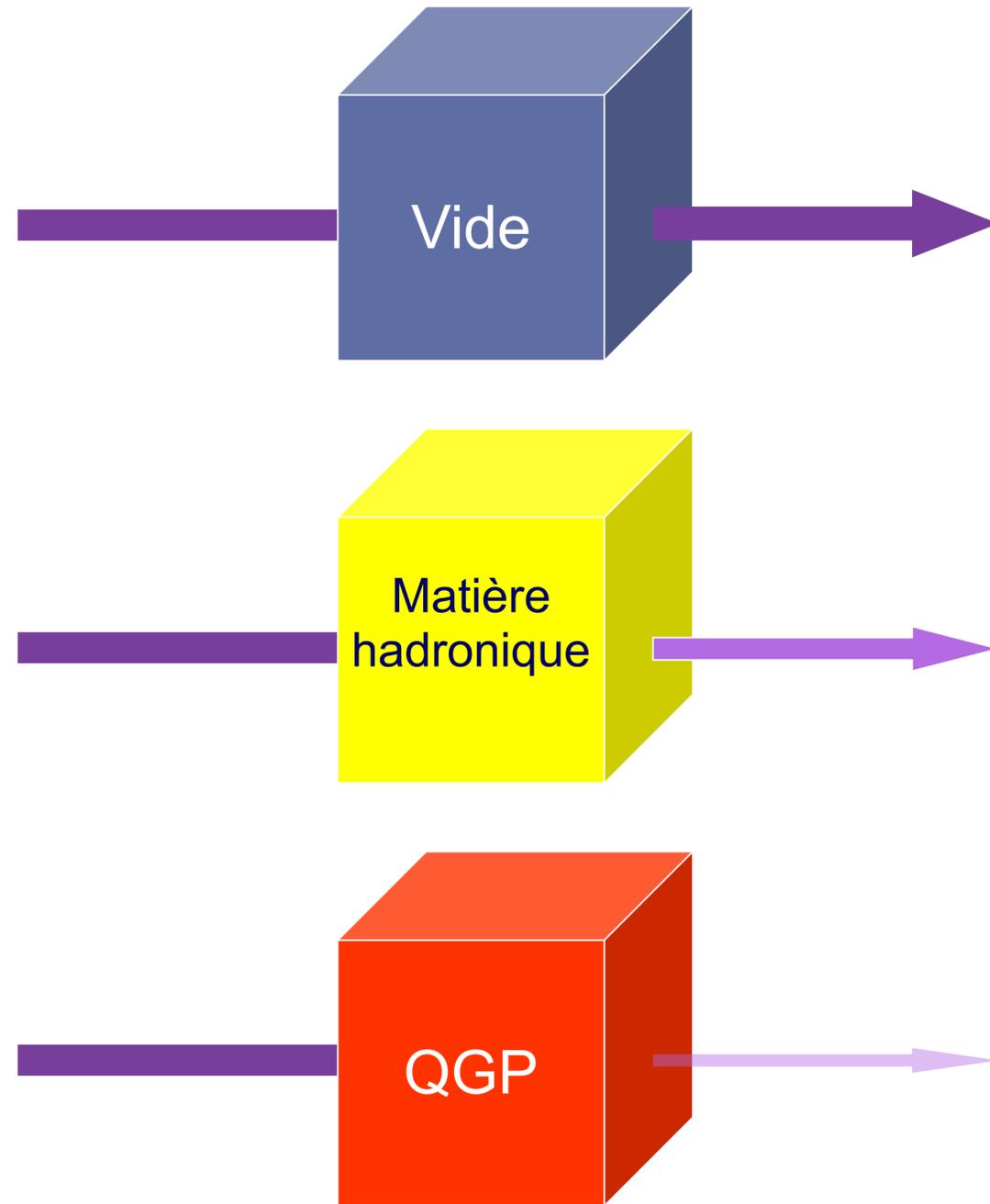


Une bonne "sonde" (particule/observable) devrait être :

- bien comprise en collisions p-p

- faiblement affectée par la matière hadronique/nucléaire standard et bien comprise en collisions p-A et AA périphériques

Sonder le QGP avec les particules produites



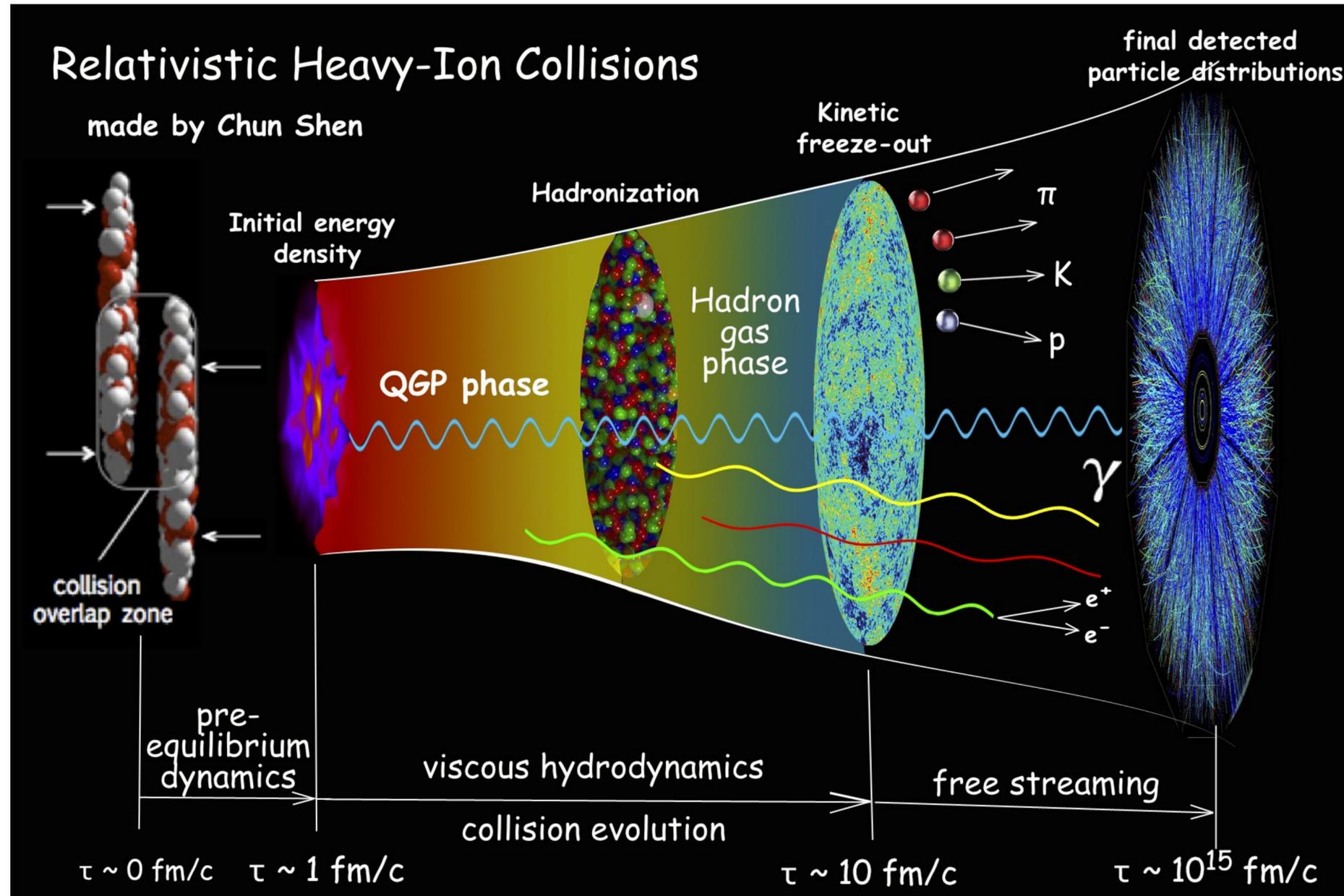
Une bonne "sonde" (particule/observable) devrait être :

- bien comprise en collisions p-p

- faiblement affectée par la matière hadronique/nucléaire standard et bien comprise en collisions p-A et AA périphériques

- fortement affectée par le QGP → collisions AA centrales

Quelques sondes expérimentales du QGP



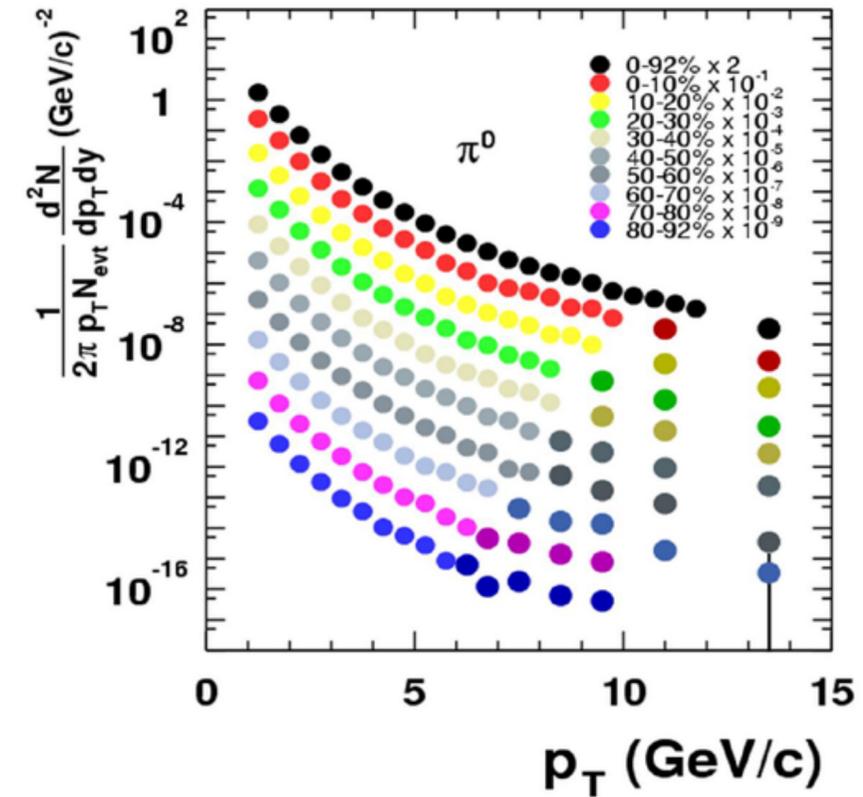
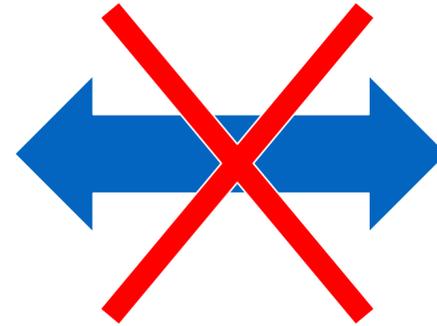
- Rayonnement électromagnétique → température du milieu
- Sondes molles → produite lors de l'hadronisation → expansion du milieu et hadronisation
- Sondes dures : particules de hautes impulsions, jets, quarkonia → produites lors de l'interaction initiale, traverse le milieu formé → opacité du milieu, coefficients de transport et potentiel QCD dans le milieu

But: combiner plusieurs mesures expérimentales pour signer et caractériser le QGP

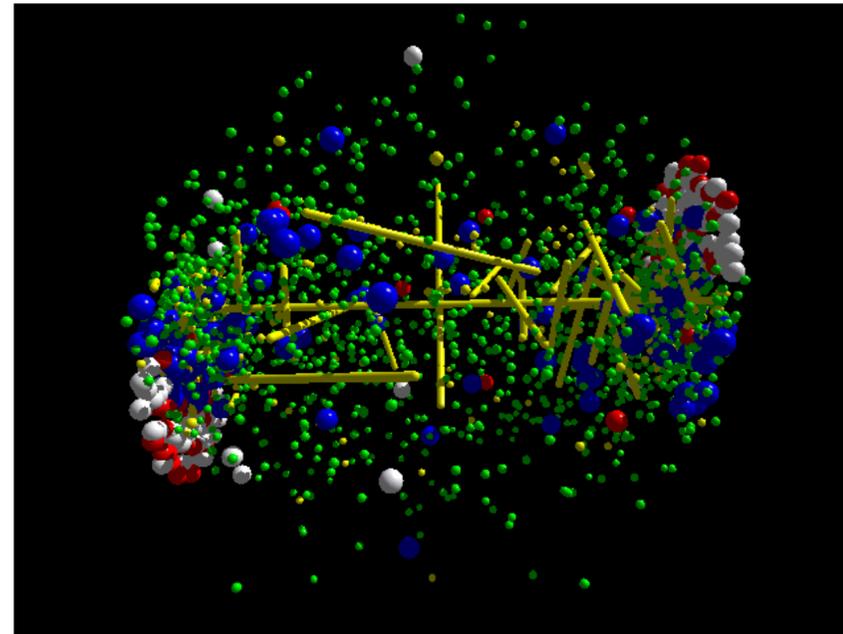
Dialogue permanent théorie/expérience

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4g^2} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_j \bar{\psi}_j (\gamma^\mu D_\mu + m_j) \psi_j$$

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 $D_\mu \equiv \partial_\mu + i t^a A_\mu^a$

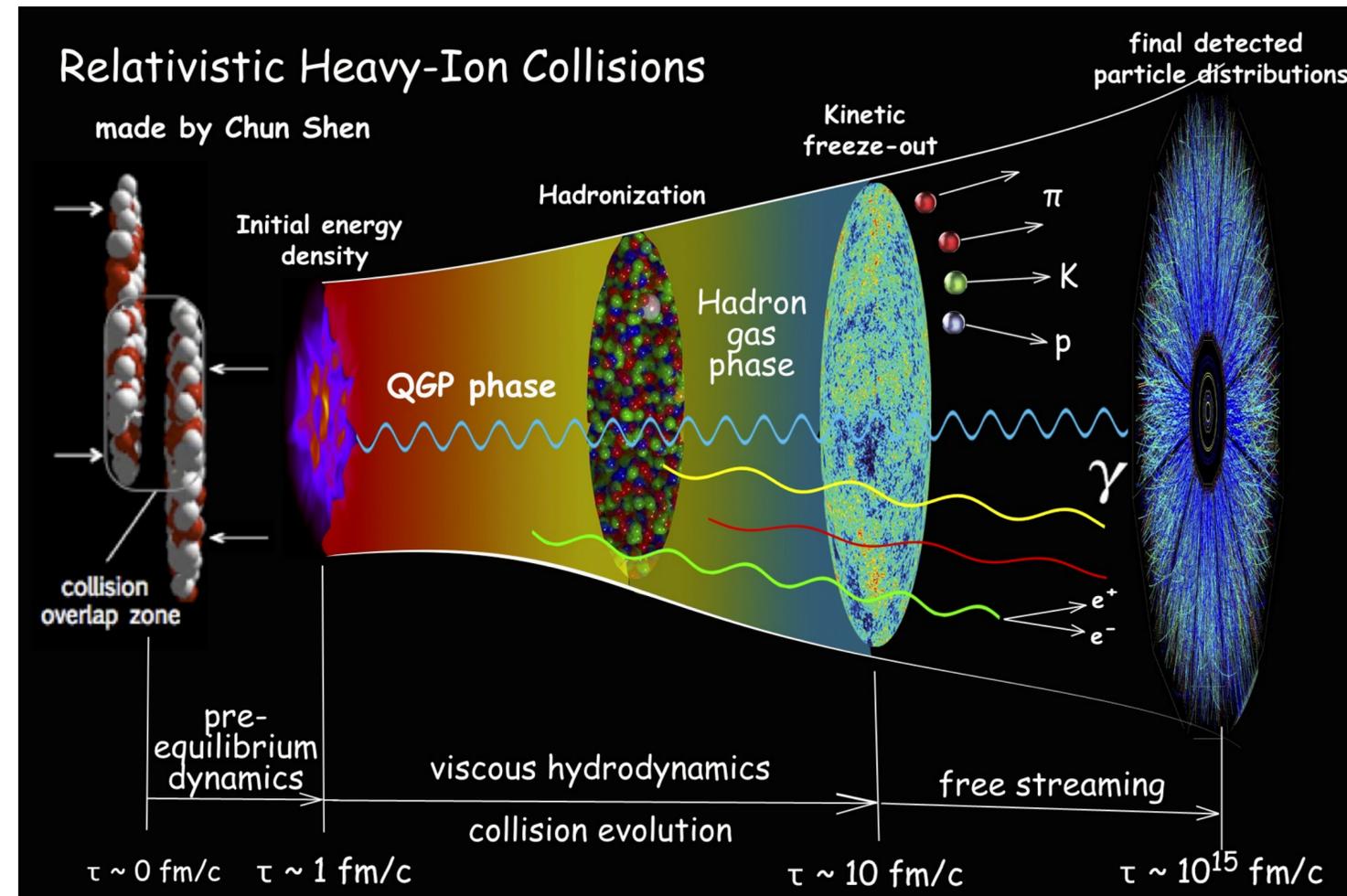


Les interprétations nécessitent des concepts phénoménologiques



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

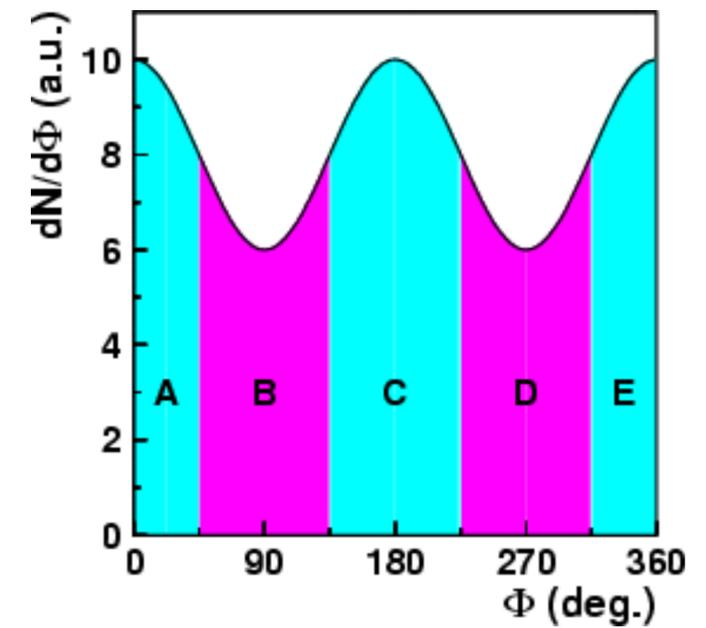
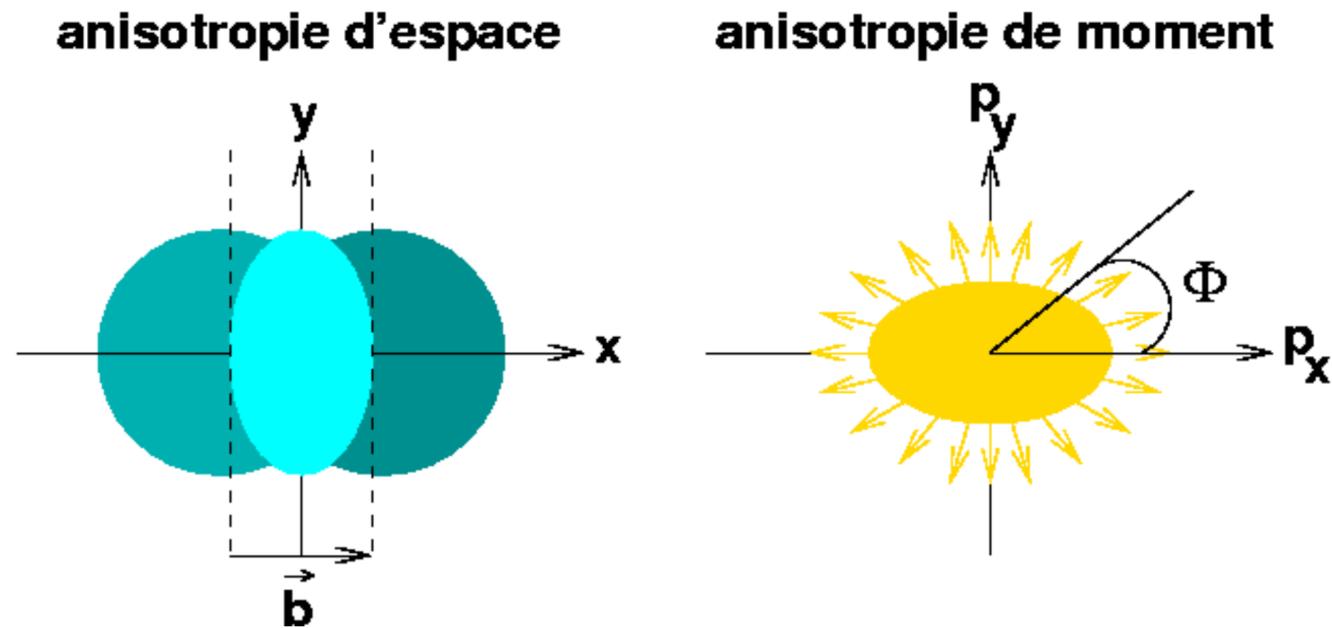
Exemple 1: photons de basses impulsions



- Les photons n'interagissent pas avec les charges de couleur
- La production de photon direct est sensible aux photons thermiques émis par le QGP ou le gas de hadrons et à la température du milieu
- Les photons thermiques sont de basses impulsions (et difficiles à mesurer !)

Exemple 2: le flot de particules

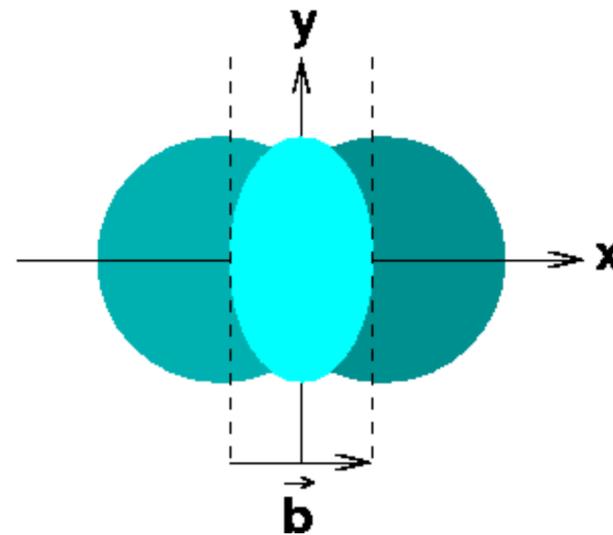
- Flot de particules: écoulement de la matière dans des directions privilégiées et qui résulte de la pression accumulée dans le système



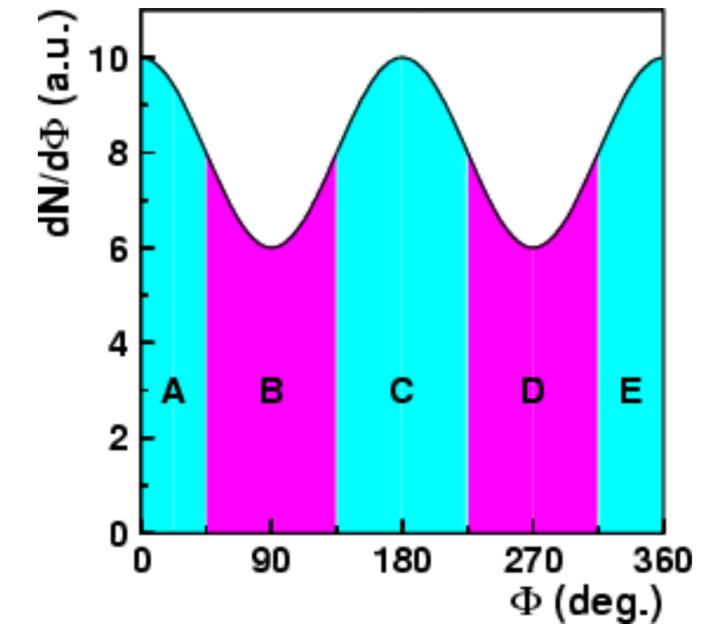
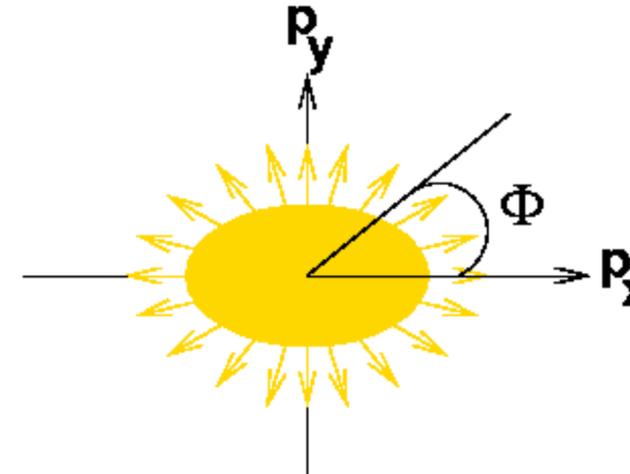
Exemple 2: le flot de particules

- Flot de particules: écoulement de la matière dans des directions privilégiées et qui résulte de la pression accumulée dans le système

anisotropie d'espace



anisotropie de moment

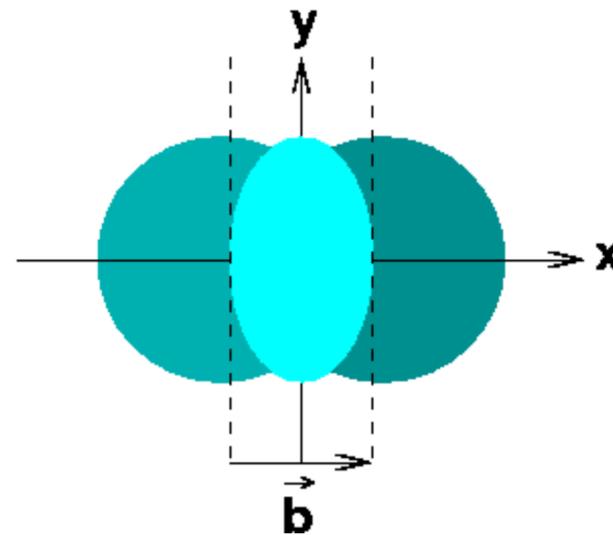


- Collisions non-centrales: l'anisotropie (initiale) d'espace produit, pour un milieu en interaction et en expansion, un gradient de pression plus grand dans la direction x que dans la direction y

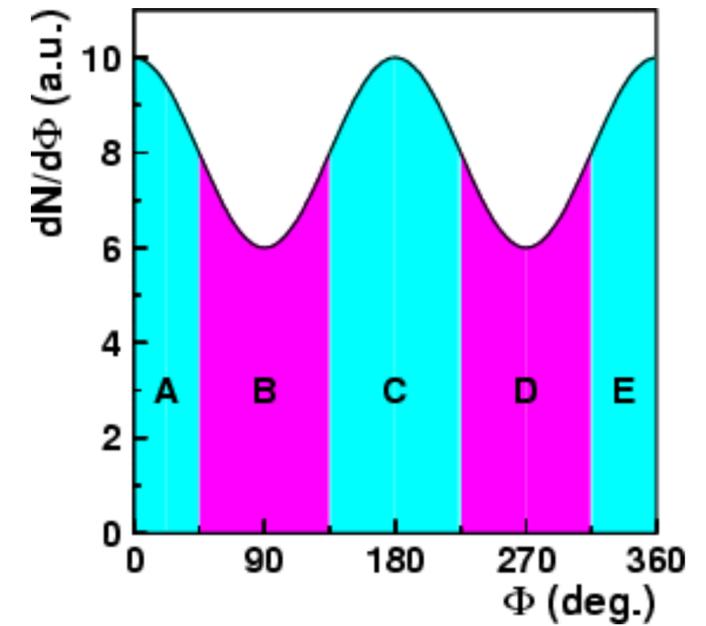
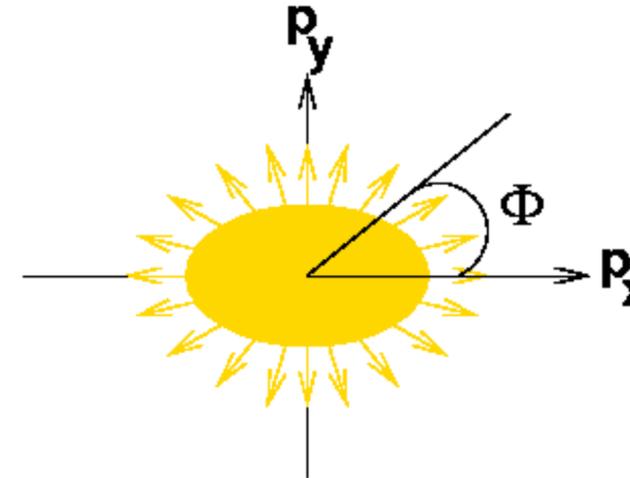
Exemple 2: le flot de particules

- Flot de particules: écoulement de la matière dans des directions privilégiées et qui résulte de la pression accumulée dans le système

anisotropie d'espace



anisotropie de moment



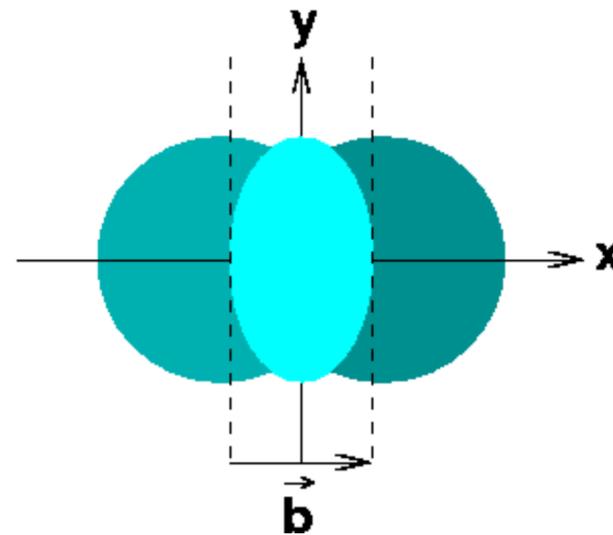
- Collisions non-centrales: l'anisotropie (initiale) d'espace produit, pour un milieu en interaction et en expansion, un gradient de pression plus grand dans la direction x que dans la direction y

- L'amplitude mesurée du flot elliptique ($v_2 = (A+C+E)/(B+D)$) est représentative du gradient de pression initial

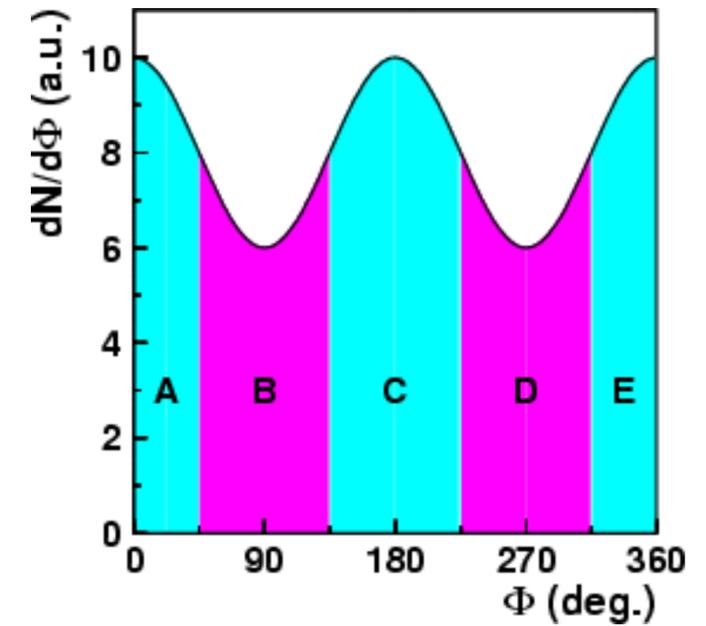
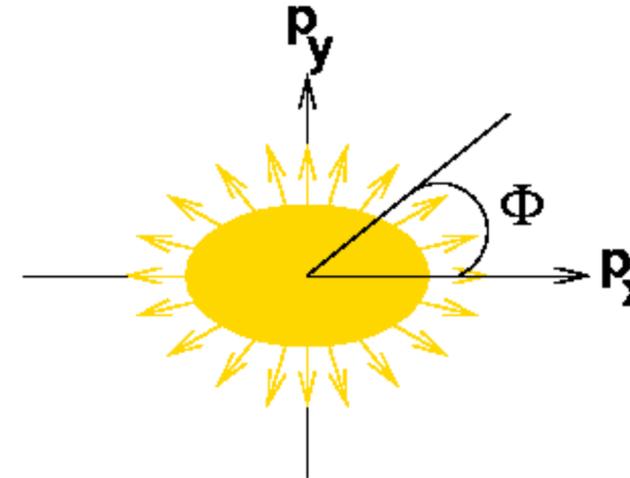
Exemple 2: le flot de particules

- Flot de particules: écoulement de la matière dans des directions privilégiées et qui résulte de la pression accumulée dans le système

anisotropie d'espace



anisotropie de moment



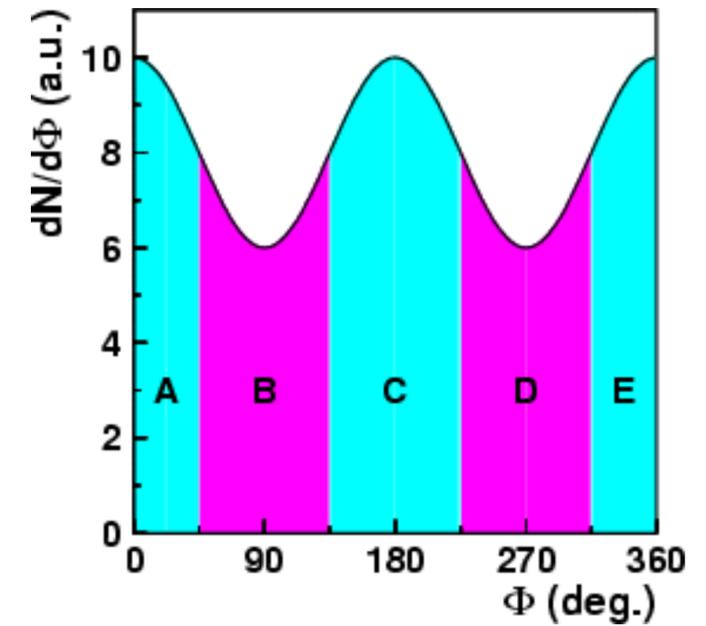
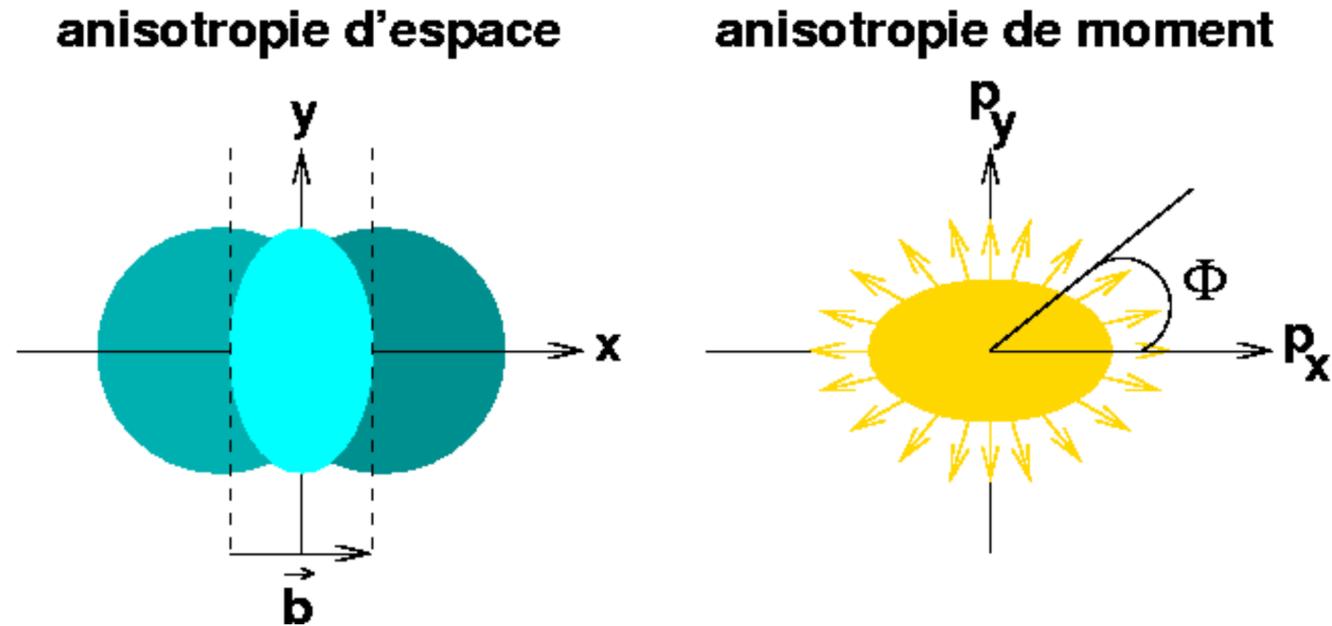
- Collisions non-centrales: l'anisotropie (initiale) d'espace produit, pour un milieu en interaction et en expansion, un gradient de pression plus grand dans la direction x que dans la direction y

- L'amplitude mesurée du flot elliptique ($v_2 = (A+C+E)/(B+D)$) est représentative du gradient de pression initial

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

Exemple 2: le flot de particules

- Flot de particules: écoulement de la matière dans des directions privilégiées et qui résulte de la pression accumulée dans le système



- Collisions non-centrales: l'anisotropie (initiale) d'espace produit, pour un milieu en interaction et en expansion, un gradient de pression plus grand dans la direction x que dans la direction y

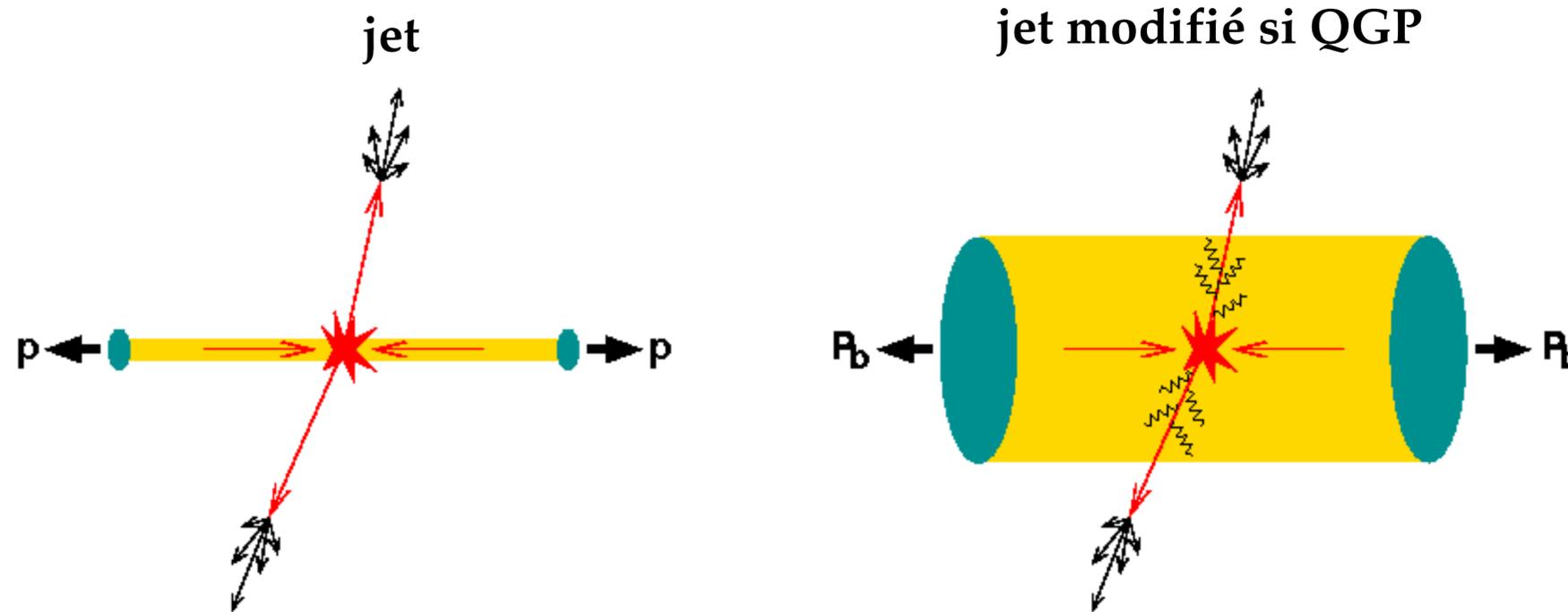
- L'amplitude mesurée du flot elliptique ($v_2 = (A+C+E)/(B+D)$) est représentative du gradient de pression initial

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

Le flot donne une information sur la thermalisation du milieu et son comportement (hydrodynamique)

Exemple 3: production de jets

- Jet = gerbe de particules, provenant d'un quark / gluon de haute impulsion produit lors de la collision
- 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.



- En présence de QGP, on s'attend à une suppression des particules de grand p_t et une modification des propriétés des jets produits (**jet quenching**)

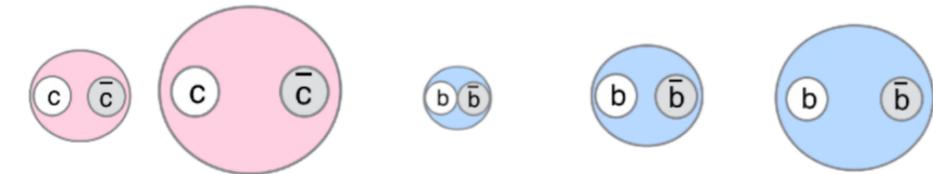
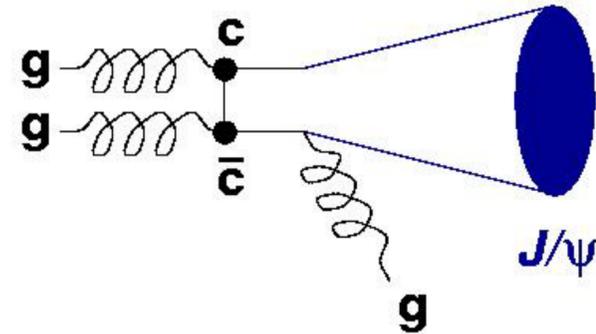
Exemple 4: quarkonia

Quarkonia: $c\bar{c}$ ou $b\bar{b}$

J/ψ : $c\bar{c}$

Υ : $b\bar{b}$

vide



State	J/ψ	ψ'	$\Upsilon(1S)$	$\Upsilon(2S)$	$\Upsilon(3S)$
Mass [GeV]	3.10	3.68	9.46	10.02	10.36
ΔE [GeV]	0.64	0.05	1.10	0.54	0.20
ΔM [GeV]	0.02	0.03	0.06	-0.06	-0.07
r_0 [fm]	0.50	0.90	0.28	0.56	0.78

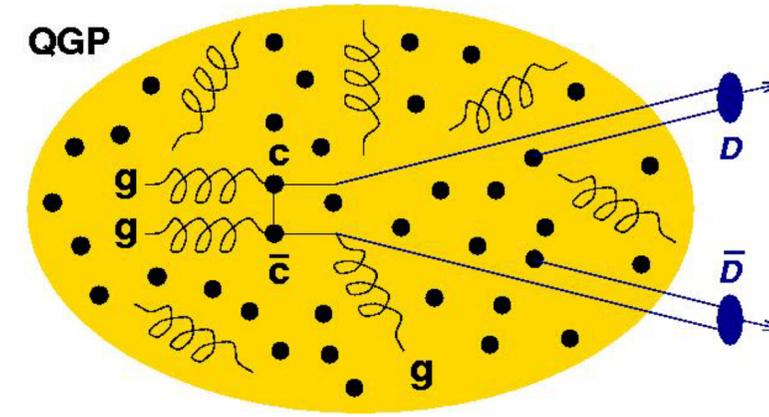
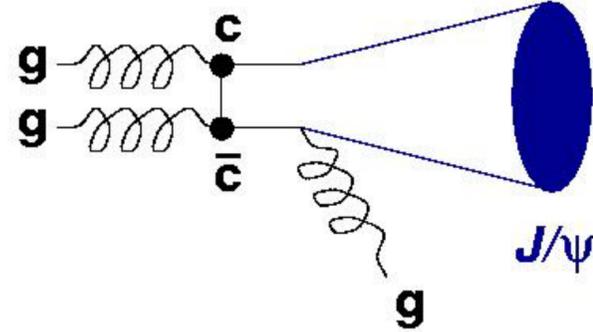
Exemple 4: quarkonia

Quarkonia: $c\bar{c}$ ou $b\bar{b}$

J/ψ : $c\bar{c}$

Υ : $b\bar{b}$

vide



Écrantage de couleur

- en présence de QGP, les deux quarks qui forment le quarkonia ne se « voient » plus à partir d'une température T_D de dissociation : ils sont **écrantés par la présence des autres quarks et gluons**

State	J/ψ	ψ'	$\Upsilon(1S)$	$\Upsilon(2S)$	$\Upsilon(3S)$
Mass [GeV]	3.10	3.68	9.46	10.02	10.36
ΔE [GeV]	0.64	0.05	1.10	0.54	0.20
ΔM [GeV]	0.02	0.03	0.06	-0.06	-0.07
r_0 [fm]	0.50	0.90	0.28	0.56	0.78
T_D/T_c	2.1	1.1	> 4	1.6	1.1

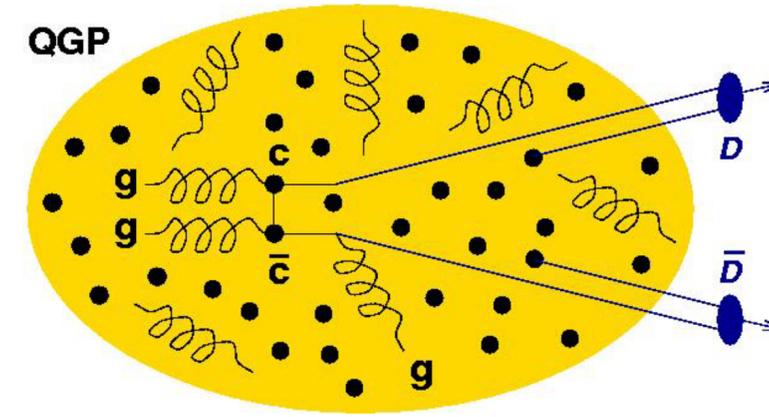
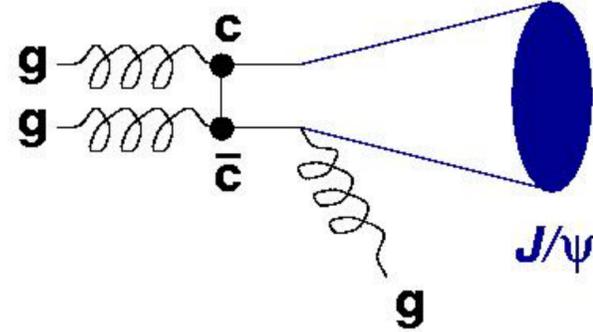
Exemple 4: quarkonia

Quarkonia: $c\bar{c}$ ou $b\bar{b}$

J/ψ : $c\bar{c}$

Y : $b\bar{b}$

vide



Écrantage de couleur

- en présence de QGP, les deux quarks qui forment le quarkonia ne se « voient » plus à partir d'une température T_D de dissociation : ils sont **écrantés par la présence des autres quarks et gluons**
- les quarks se lient ensuite à des quarks légers lors du refroidissement et de l'hadronisation du milieu et forment des mésons charmés (mésons D ou B) : **suppression des quarkonia**

State	J/ψ	ψ'	$\Upsilon(1S)$	$\Upsilon(2S)$	$\Upsilon(3S)$
Mass [GeV]	3.10	3.68	9.46	10.02	10.36
ΔE [GeV]	0.64	0.05	1.10	0.54	0.20
ΔM [GeV]	0.02	0.03	0.06	-0.06	-0.07
r_0 [fm]	0.50	0.90	0.28	0.56	0.78
T_D/T_c	2.1	1.1	> 4	1.6	1.1

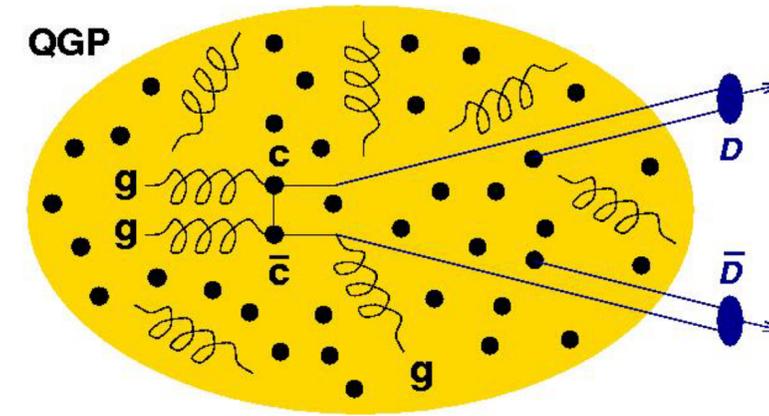
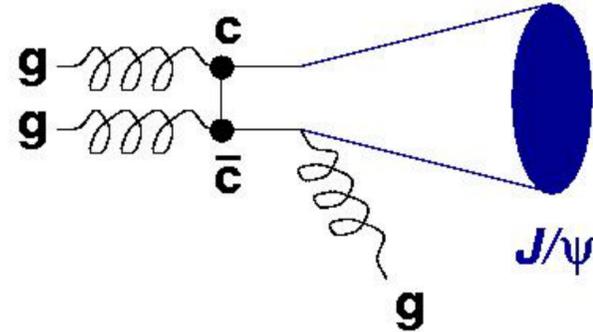
Exemple 4: quarkonia

Quarkonia: $c\bar{c}$ ou $b\bar{b}$

J/ψ : $c\bar{c}$

Y : $b\bar{b}$

vide



Écrantage de couleur

- en présence de QGP, les deux quarks qui forment le quarkonia ne se « voient » plus à partir d'une température T_D de dissociation : ils sont **écrantés par la présence des autres quarks et gluons**
- les quarks se lient ensuite à des quarks légers lors du refroidissement et de l'hadronisation du milieu et forment des mésons charmés (mésons D ou B) : **suppression des quarkonia**
- les quarkonia n'ont pas la même énergie de liaison et T_D : **suppression séquentielle qui dépend de la température du QGP**

State	J/ψ	ψ'	$Y(1S)$	$Y(2S)$	$Y(3S)$
Mass [GeV]	3.10	3.68	9.46	10.02	10.36
ΔE [GeV]	0.64	0.05	1.10	0.54	0.20
ΔM [GeV]	0.02	0.03	0.06	-0.06	-0.07
r_0 [fm]	0.50	0.90	0.28	0.56	0.78
T_D/T_c	2.1	1.1	> 4	1.6	1.1

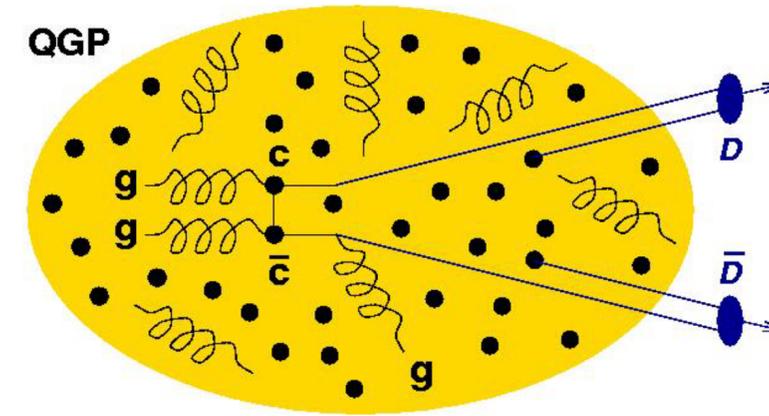
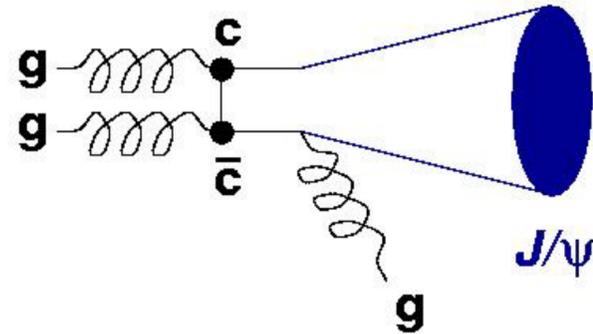
Exemple 4: quarkonia

Quarkonia: $c\bar{c}$ ou $b\bar{b}$

J/ψ : $c\bar{c}$

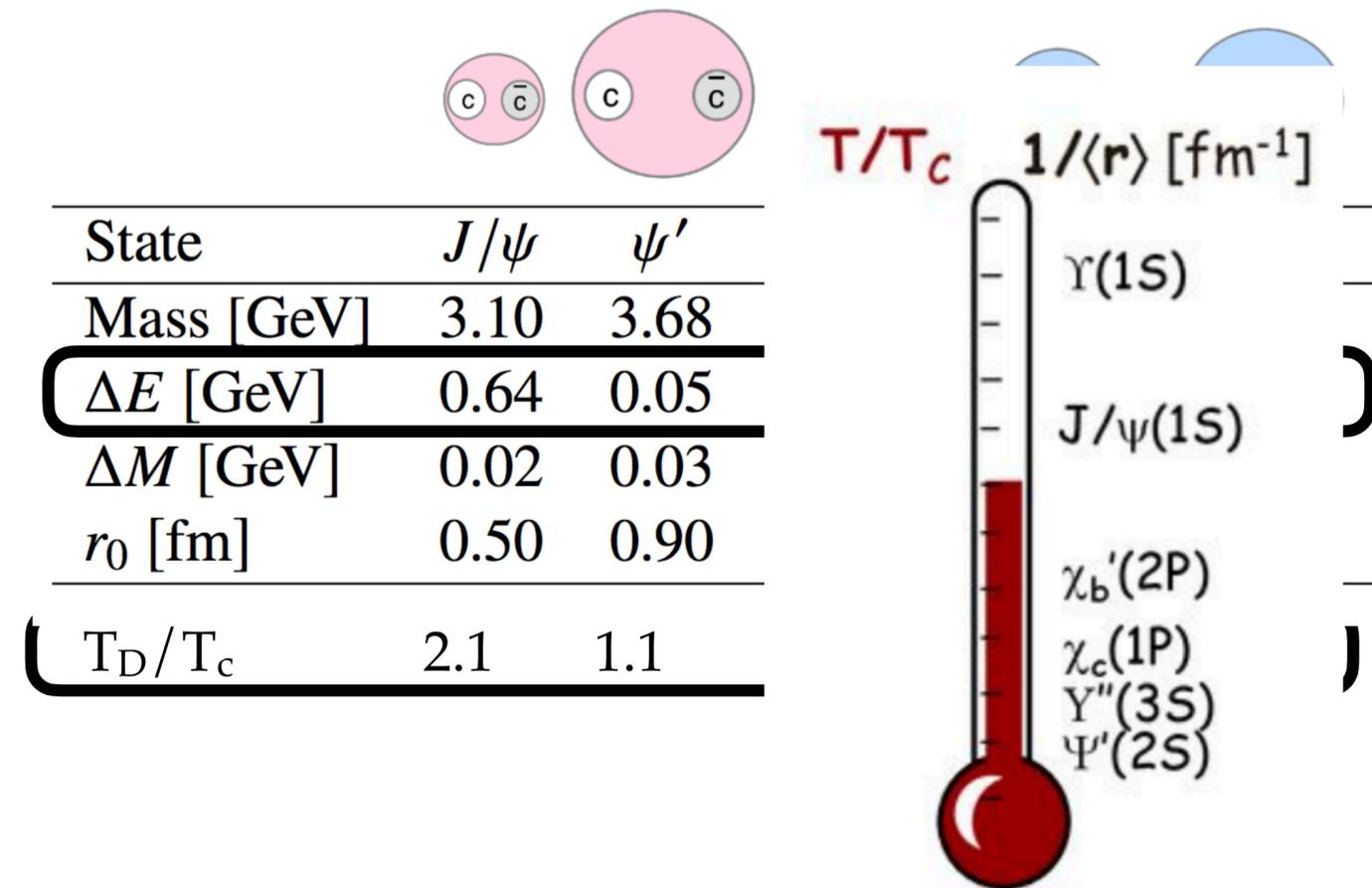
Y : $b\bar{b}$

vide



Écrantage de couleur

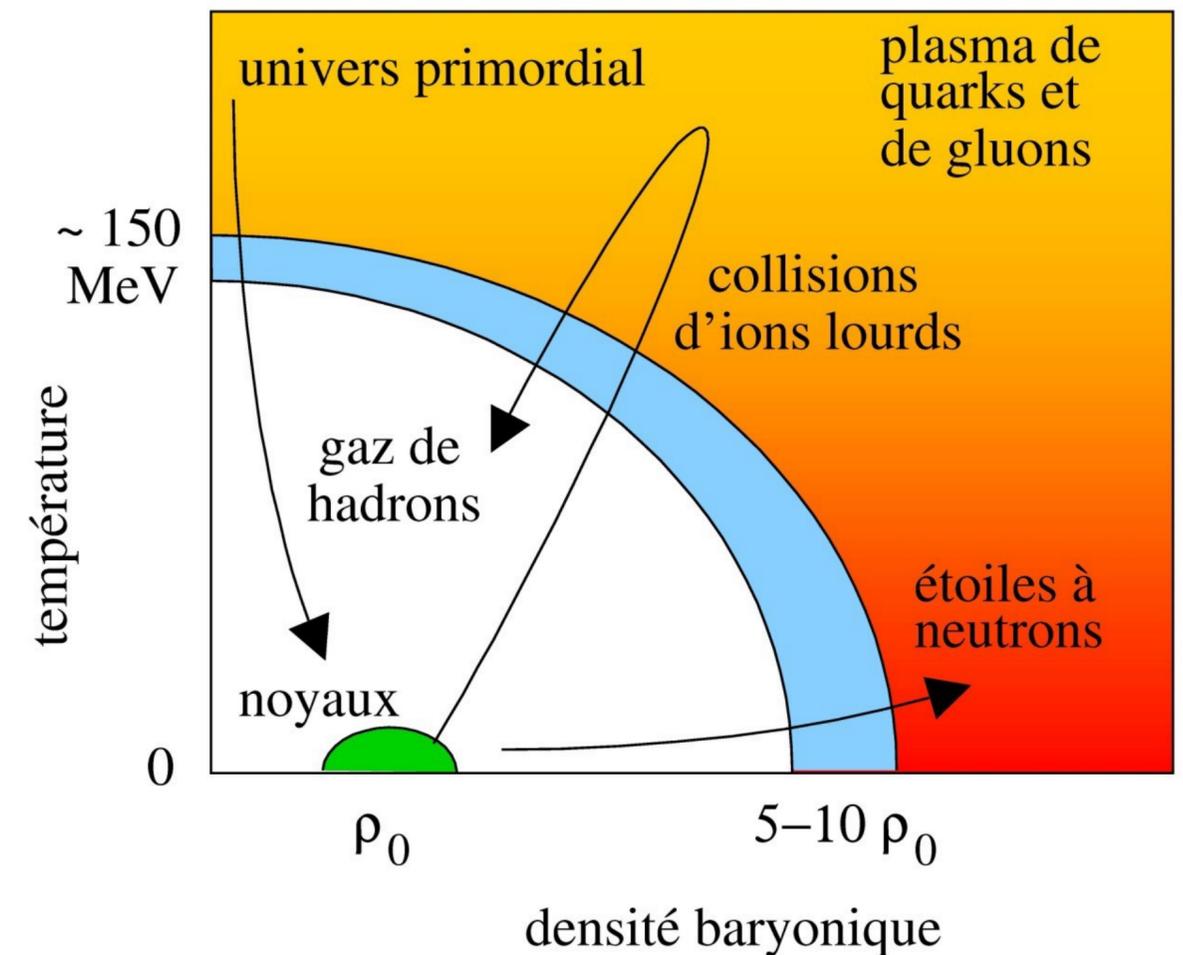
- en présence de QGP, les deux quarks qui forment le quarkonia ne se « voient » plus à partir d'une température T_D de dissociation : ils sont **écrantés par la présence des autres quarks et gluons**
- les quarks se lient ensuite à des quarks légers lors du refroidissement et de l'hadronisation du milieu et forment des mésons charmés (mésons D ou B) : **suppression des quarkonia**
- les quarkonia n'ont pas la même énergie de liaison et T_D : **suppression séquentielle qui dépend de la température du QGP**



Résumé du cours

- Les hadrons sont des objets extrêmement complexes
 - hadrons = quarks et gluons
 - gluons = médiateurs de l'interaction forte
 - l'interaction forte est décrite par la chromodynamique quantique (QCD)
- Le plasma de quarks et de gluons (QGP) est un état de la matière nucléaire obtenu à haute densité / température
 - prédit par la QCD
 - important pour étudier les propriétés de l'interaction forte (confinement)
 - lien avec la cosmologie / astrophysique
- Les collisions d'ions lourds ultra-relativistes permettent de produire le QGP
 - plusieurs signatures du QGP prédites par les approches théoriques

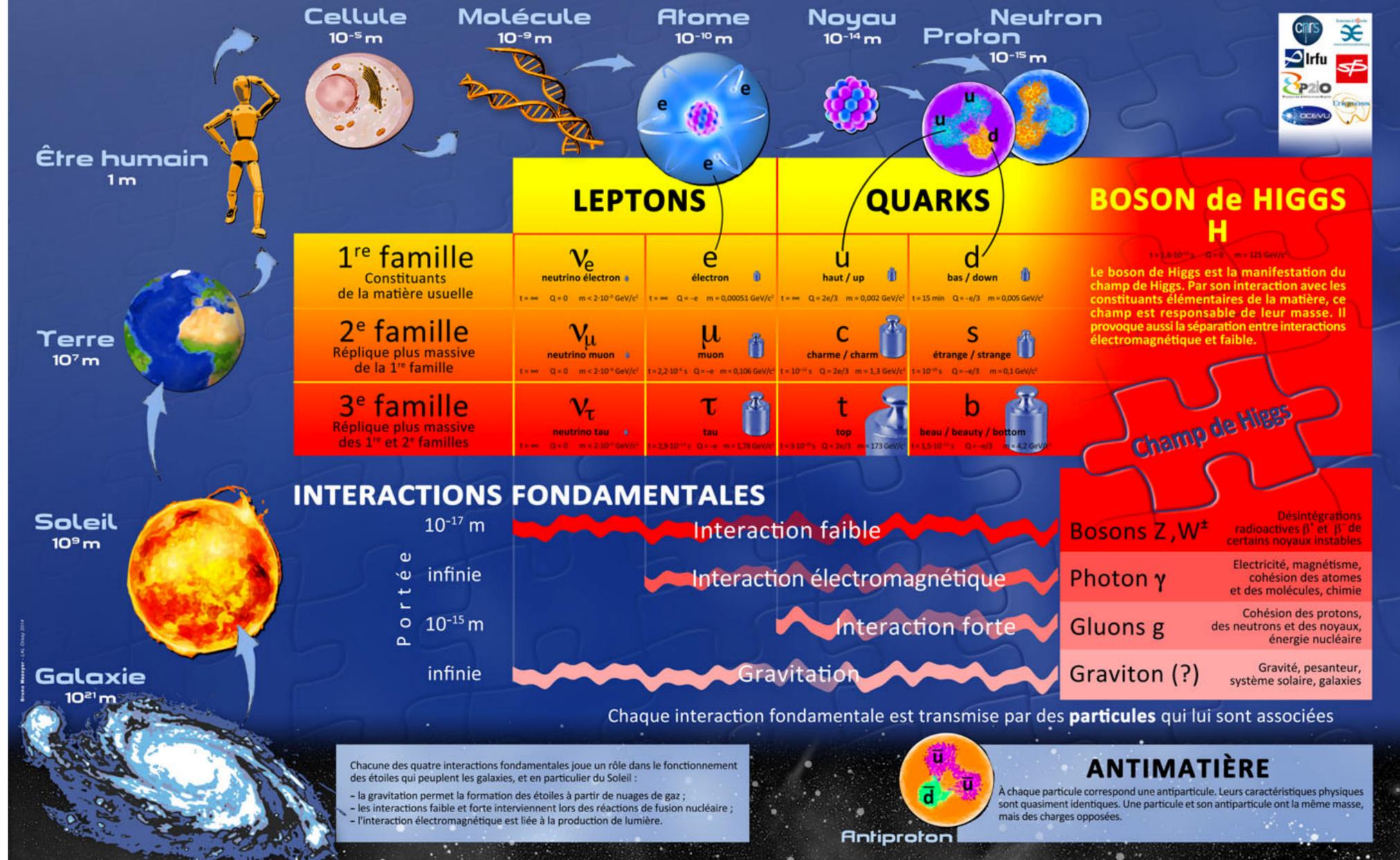
Diagramme de phase de la matière nucléaire



Quels instruments pour recréer et observer le QGP ? (deuxième cours)

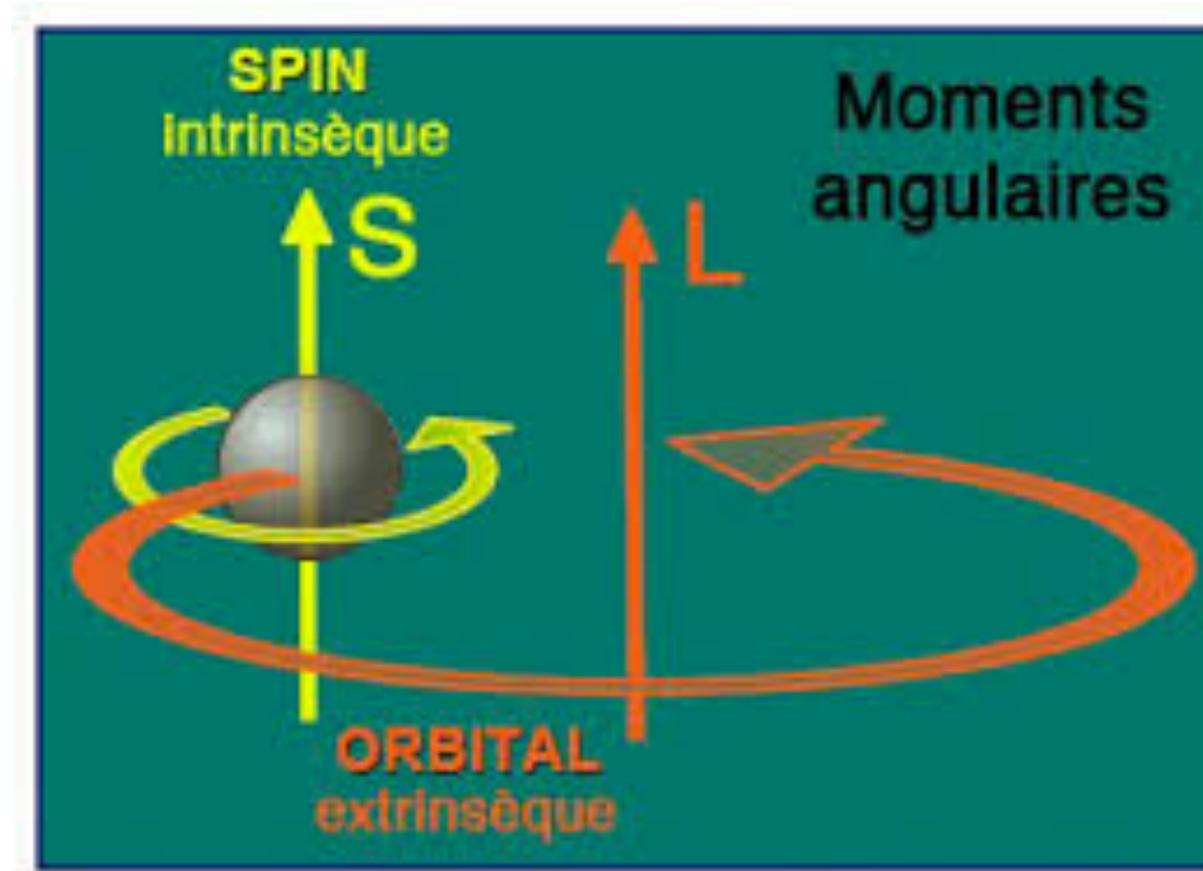
Backup slides

Composants élémentaires de la matière

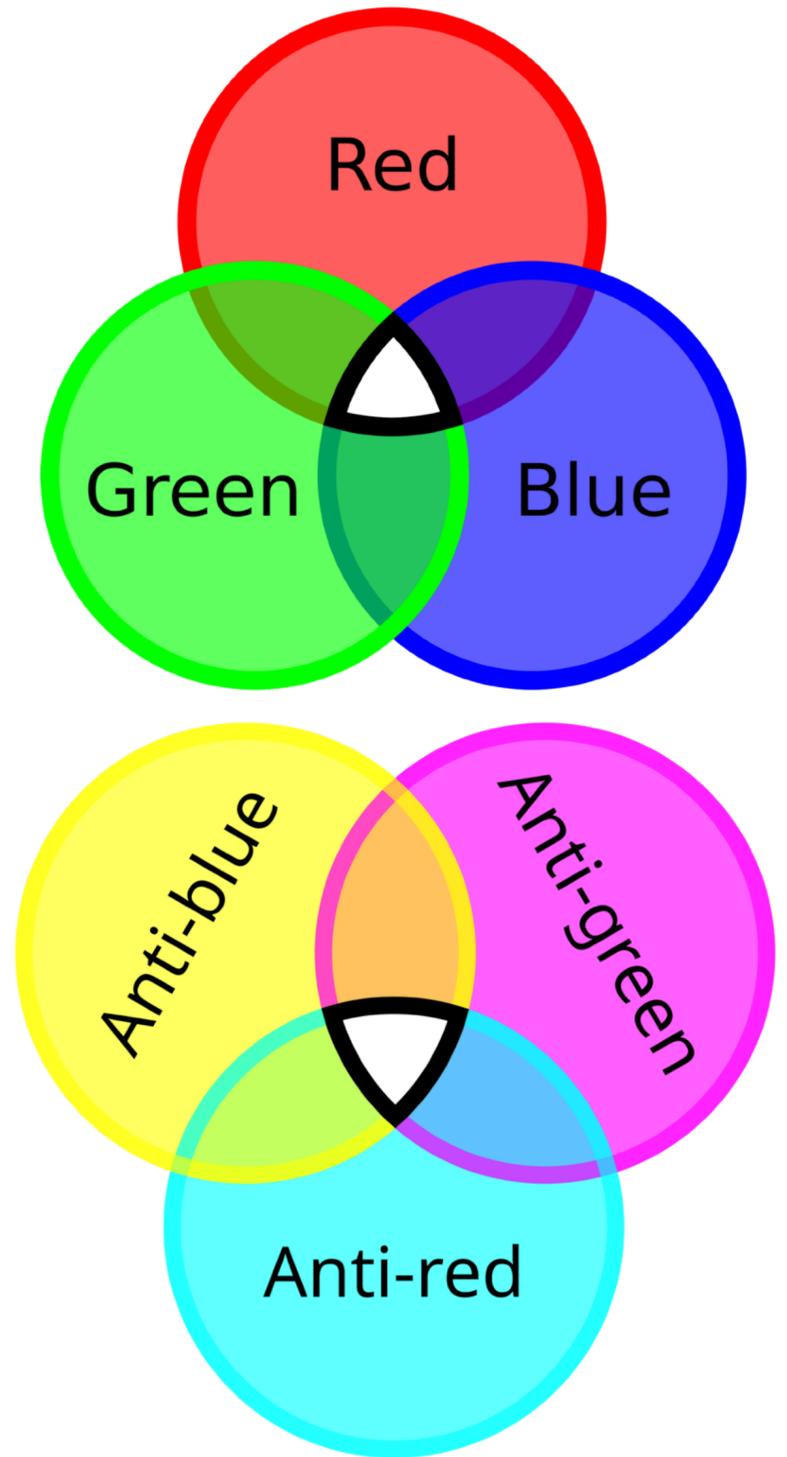
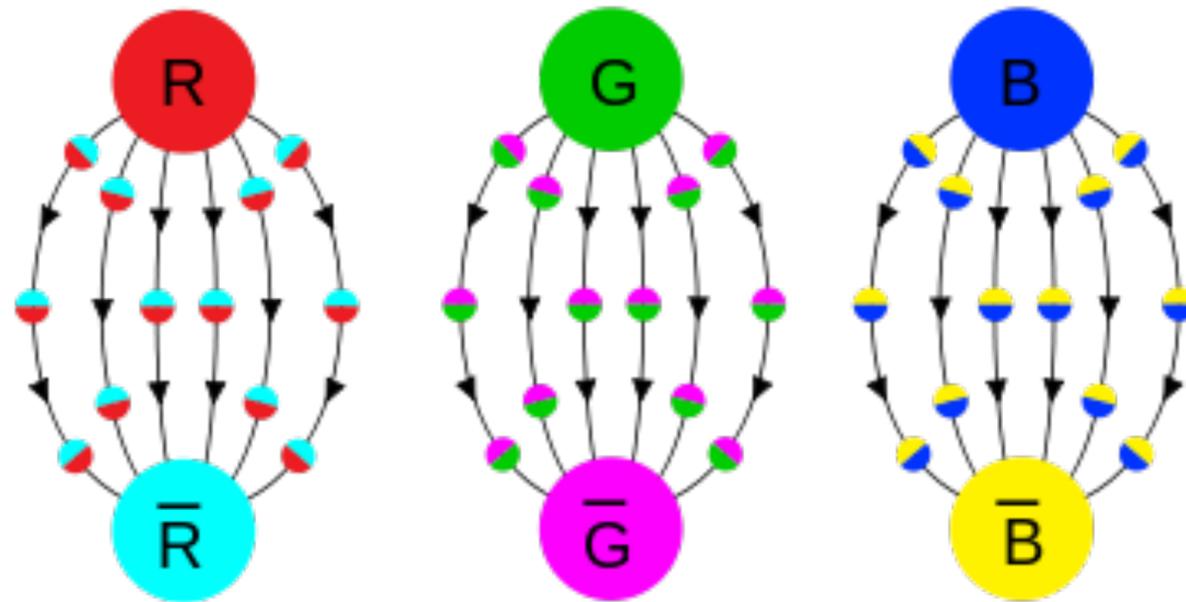
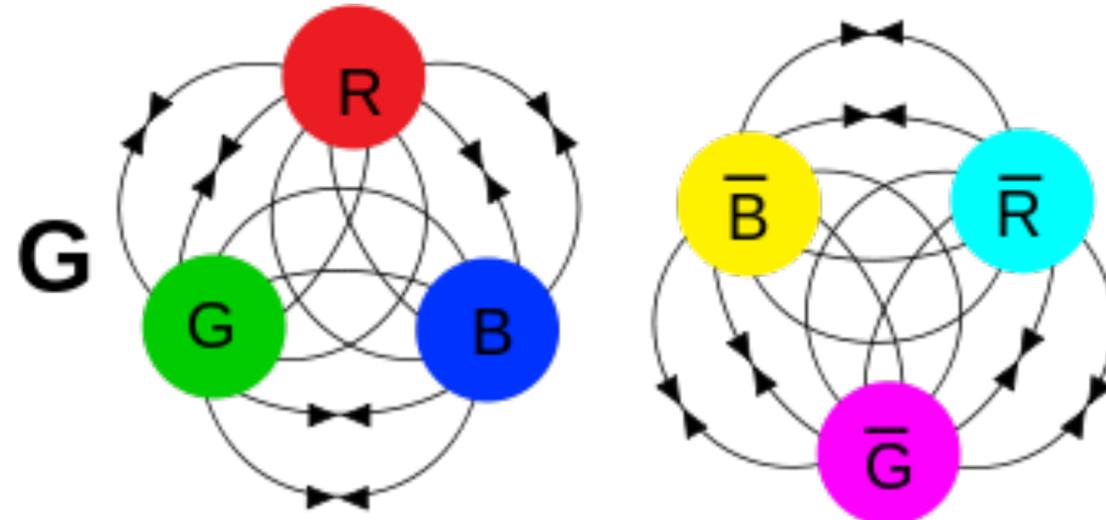
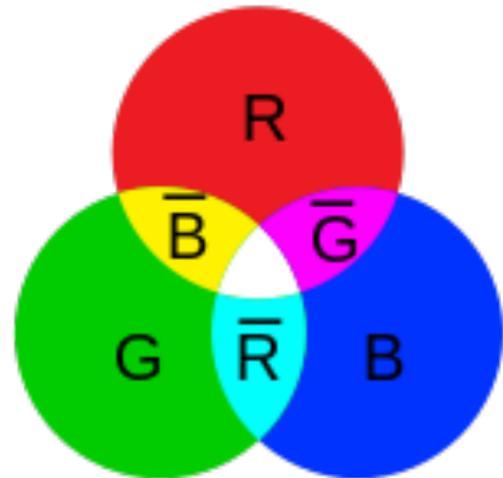


Le spin des particules

To spin : tourner



Charge de couleur



Color superconductor

- State of matter where matter carries colour charge without loss
- Analogous to superconductors that can carry electric charge without loss
- The quarks near the Fermi surface become correlated in Cooper pairs, which condense
- A color superconducting phase has different properties than the « normal » phase of quark matter

