

La Physique des Extrêmes, École d'été de Physique e2φ, Clermont-Ferrand, 25-28 août 2014



# Le plasma de quarks-gluons

Philippe Rosnet



Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand



#### Alice et la soupe de quarks et de gluons



#### Plongeon dans l'infiniment petit : découverte du monde des quarks

#### L'interaction forte : de la couleur au plasma de quarks-gluons

#### Voyage au pays d'ALICE : la transformation du plomb

#### Une fenêtre sur l'Univers : une soupe de particules extrêmement chaude

#### Plongeon au cœur de la matière



# Mise en évidence du noyau atomique

#### Expérience de Rutherford (1911)

- Diffusion élastique de particules  $\alpha$  (noyau <sup>4</sup>He) sur une feuille de plomb
- Certaines particules sont fortement déviées, comme si elles se heurtaient à un centre de charge au cœur de l'atome : le **noyau atomique**



- Découverte du neutron en 1932 (J. Chadwick, Nobel 1935)
- Particules élémentaires dans les années 30 : proton, neutron, électron et neutrino

#### Le zoo des particules

Découverte (dans les années 1950) de dizaines de particules sensibles aux forces nucléaires, appelées **hadrons**, dont certaines au comportement étrange car toujours produites par paires

Les baryons $B = 1$							
Genre	Nom	Symbole	Ι	I <sub>3</sub>	S	Y = S + B	Q( e )
Baryons non étranges	Nucléon (spin 1/2)	Р	1/2	1/2	0	1	1
		N		-1/2			0
		Λ٥	0	0	-1	0	0
		$\Sigma^+$		1			1
Baryons	Hypérons	$\Sigma^0$	1	0	-1	0	0
étranges	(spin 1/2)	$\Sigma^{-}$		-1			-1
		Ξ		1/2			0
			1/2		-2	-1	
		Ξ-		-1/2			-1
	spin 3/2	Ω-	0	0	-3	-2	-1

Les mésons $B = 0$								
Nom	Symbole	Ι	$I_3$	S	Y = S + B	$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$		
	$\pi^+$		1			1		
Pions (spin zéro)	$\pi^0$	1	0	0	0	0		
	$\pi^{-}$		-1			-1		
Mésons êta (spin zéro)	η	0	0	0	0	0		
	<i>K</i> +	1/9	1/2	1	1	1		
Kaons	K <sup>0</sup>	1/2	-1/2			0		
(spin zéro)	$\overline{K^0}$		1/2			0		
	K-	1/2	-1/2	-1	1	-1		

Nombres quantiques conservés Charge électrique QNombre baryonique BÉtrangeté S

conservés
$$\pi^ p$$
 $\rightarrow$  $\Lambda^0$  $K^+$  $\pi^-$ lectrique  $Q$ = $-1$  $+1$ = $0$  $+1$  $-1$ ryonique  $B$ = $0$  $+1$ = $+1$  $0$  $0$ Étrangeté  $S$ = $0$  $0$ = $-1$  $+1$  $0$ 

#### **Construction des hadrons**

Classification des hadrons basée sur leurs nombres quantiques (M. Gell-Mann et Y. Ne'eman, 1961)



## **Composition en quarks des nucléons**



d

			$\boldsymbol{u}$	$\boldsymbol{u}$	/	
Charge	=	$\frac{2}{3}$ -	$-\frac{1}{3}$ -	$-\frac{1}{3}$	=	0

## Découverte des quarks

Relation de de Broglie (1924, Nobel 1929) : Pour améliorer la résolution de la particule sonde, il faut augmenter son énergie



Expérience du SLAC (1969, Nobel 1990)

- Diffusion d'électrons sur des protons (cible d'hydrogène) à l'aide d'un accélérateur linéaire de 3 km
- Le proton n'est pas ponctuel et possède un rayon de charge moyen

$$= 0.877 \pm 0.005 \text{ fm} [PDG2012]$$

et est constitué de trois briques plus élémentaires



#### Encore des quarks...

Hypothèse d'un 4<sup>ème</sup> type de **quark dit « charmé » c** pour résoudre un problème théorique (S. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani, 1970)

 $\rightarrow$  Découverte expérimentale (1974) d'un nouveau méson  $J/\psi = |c\bar{c}\rangle$ 



#### Classification des hadrons (u, d, s, c)



## Tableau des particules de matière





#### L'interaction forte : de la couleur au plasma de quarks-gluons

#### Voyage au pays d'ALICE : la transformation du plomb

#### Une fenêtre sur l'Univers : une soupe de particules extrêmement chaude

# Pourquoi les quarks sont-ils colorés?

Principe d'exclusion de Pauli (1925, Nobel 1945) Dans un système physique, deux fermions (particules de spin demi-entier) ne peuvent pas être dans le même état quantique

Anomalie du  $\Delta^{++} = |uuu\rangle$ Spin S = 3/2  $\rightarrow$  états de  $\Delta^{++}$  où les quarks u (de spin S = 1/2) sont tous dans le même état quantique

$$\Delta^{++}(S_z = +3/2) = |u \uparrow u \uparrow u \uparrow u \uparrow \rangle + 3/2$$

**Hypothèse de la couleur** (Greenberg, 1964) Les quarks portent un nombre quantique de couleur – rouge (R), vert (V) ou bleu (B) – qui différencie l'état quantique des trois u :  $\Delta^{++} = |u_R u_V u_B\rangle$ 

$$\Delta^{++}(S_z = -3/2) = |u \downarrow u \downarrow u \downarrow u \downarrow \rangle + -3/2$$

+ +1/2+ -1/2

## La chromodynamique quantique

L'état quantique d'un quark est une superposition des états de couleur



Une transformation locale engendre une non invariance globale de la couleur du système  $\longrightarrow \Delta^{++}$  ?!?



Deux transformations locales connectées assurent une invariance globale de la couleur du système → invariance de jauge

L'invariance globale de la couleur d'un système de quarks nécessite un « échange » de couleur entre les quarks :

- **couleur** = charge source de l'interaction forte entre quarks
- médiateurs d'échange « transportant la couleur » = gluons (8)

sans masse
de spin 1

Comme le photon pour la QED

• la théorie est la ChromoDynamique Quantique (ou QCD)

## Neutralité des hadrons

#### **Confinement des quarks**

Les quarks interagissent très fortement → pas de quark isolé dans la nature, uniquement confinés par paquets dans les hadrons

#### Neutralité des hadrons

Les hadrons sont observés expérimentalement car ils interagissent moins fortement : neutres de couleur = **blancs** 

➔ portée de l'interaction forte ~ 1 fm

**Quark** = couleur (rouge, vert, bleu)



**Antiquark** = anticouleur représentée par la couleur complémentaire (cyan, magenta, jaune)



## La preuve par l'expérience

#### Section efficace $\sigma$

Quantité caractéristique de l'interaction entre deux particules proportionnelle à la probabilité d'interaction

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} = 3\sum_q e_q^2 \quad \text{avec} \quad 3 = \text{nombre de couleurs}$$

Υ 10  $J/\psi$  $\psi(2S)$ Les piques sont des Zétats résonants 10 u + d + s + c = 3.33 $\boldsymbol{R}$ 10 1 -s = 23.67|u+d|u + d + s + c + b =-1 10 10<sup>2</sup> 10  $\sqrt{s}$  [GeV] (énergie dans le centre de masse)

 $e_q = \text{charge \'electrique du quark } q$ 

## Une manifestation des gluons (1979)



## Représentation graphique des interactions

Lagrangien de la QCD en théorie quantique des champs

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \frac{1}{4g^2} \left( \mathcal{G}_{\mu\nu} \mathcal{G}_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \overline{g}_{i} \left( i \partial^{\mu} \mathcal{D}_{\mu} + \mathcal{M}_{i} \right) \overline{g}_{i} \right) \text{ quark} \\ \text{where } \mathcal{G}_{\mu\nu}^{\alpha} &= \partial_{\mu} \mathcal{P}_{\nu}^{\alpha} - \partial_{\mu} \mathcal{P}_{\mu}^{\alpha} + \mathcal{G}_{\mu\nu}^{\alpha} \mathcal{P}_{\mu} \left( \mathcal{P}_{\mu}^{\alpha} \right) \text{ gluon} \\ \text{and } \mathcal{D}_{\mu} &= \partial_{\mu} + i t^{\alpha} \mathcal{P}_{\mu}^{\alpha} \end{aligned}$$

Diagrammes de Feynman (Prix Nobel de Physique 1965)



#### Les effets du vide quantique



Si  $\alpha_S \ll 1 \rightarrow$  théorie perturbative : possibilité de faire des calculs finis et fiables (sinon la théorie est dite non perturbative)

## Liberté asymptotique

La constante de couplage de l'interaction forte  $\alpha_S$  dépend de l'énergie Q mise en jeu dans la collision



#### **Q** < 1 GeV

→ domaine non perturbatif
 ≈ quarks dans les hadrons
 Calculs utilisant des méthodes
 numériques : QCD sur réseau

Q > 1 GeV
→ domaine perturbatif
≈ collisions à haute énergie

#### Q >> 1 GeV

→ les quarks n'interagissent pratiquement plus avec les gluons = liberté asymptotique (1973, D. Gross, H. Politzer et F. Wilczek, Nobel 2004)

# En résumé : qu'est-ce qu'un proton ?

#### Proton

- Objet constitué de trois quarks dominants (dits de valence) en interaction via des gluons et une mer de paires quark-antiquark
- $m_u$  et  $m_d < 5 \text{ MeV/c}^2 \rightarrow$  la masse du proton provient essentiellement des interactions entre quarks



#### Etude expérimentale du proton

- caractéristiques globales électriques et magnétiques
- → MAMI (Mayence) : contribution du LPC
- distribution interne des quarks, antiquarks et gluons
- → CERN et JLab (Etats-Unis)

### Vers le plasma de quarks-gluons

Un système nucléaire (noyau) soumis à des conditions extrêmes :

- forte pression (état de grande densité)
- très haute température

possèdera un grande densité d'énergie → les quarks deviennent libres

Les nucléons (blancs de couleur) fondent pour former un **milieu coloré** : le **plasma de quarks-gluons** (ou **QGP**)



#### **Diagramme de phase de QCD** (Cabibbo et Parisi, 1975)





#### L'interaction forte : de la couleur au plasma de quarks-gluons

#### Voyage au pays d'ALICE : la transformation du plomb

#### Une fenêtre sur l'Univers : une soupe de particules extrêmement chaude

# Comment recréer en laboratoire le plasma de quarks-gluons ?

Il faut **comprimer et chauffer des paquets de protons et de neutrons** en les envoyant violemment les uns contre les autres : *i.e.* engendrer des collisions de **noyaux atomiques lourds** 

Idée exprimée par le peintre chinois Li Keran en 1989

Nuclei as heavy as bulls through collision generate new states of matter.



# Evolution d'une collision d'ions lourds



# Un programme de recherche mondial



Energie dans le centre de masse nucléon-nucléon ( $\sqrt{s}$ ) de 3 GeV en 1971 à 2760 GeV en 2010

28

## Le Large Hadron Collider ou LHC





Collisions de noyaux de plomb (<sup>208</sup>Pb) avec le LHC au Laboratoire européen pour la physique des particules ou CERN (près de Genève) :

sur 27 km de circonférence à environ 100 m sous terre

avec 2 faisceaux de paquets de 70 millions noyaux de plomb circulant quasiment à la vitesse de la lumière : 11 000 tours par seconde

 grâce à 1200 aimants supraconducteurs (14 m de long pour 35 t) refroidis à -271°C (à l'aide d'hélium liquide)

## Une collision à très haute énergie

Deux particules qui entrent en collision à une vitesse proche de celle de la lumière produisent plusieurs particules par **conversion de l'énergie en matière** :

 $E = m c^2$ 



La collision est étudiée à l'aide des particules produites ⇒ il faut donc les reconstruire avec un détecteur de particules

# ALICE : A Large Ion Collider Experiment



#### **ALICE dans la réalité**



# Une quantité pharaonique de données

#### Dans le détecteur ALICE :

plusieurs milliers
 de collisions par
 seconde

jusqu'à 30 000 particules par collision Pb-Pb Les données enregistrées au LHC pour les trois premières années :

o équivalent à 700 ans de film full-HD

= 3 millions de DVD

o 1 heures de calculs sur un PC pour reconstruire une collision Pb-Pb

#### **Collision plomb-plomb**

# Comment traiter les données ?



## Quelques sondes du QGP



## **Température du QGP**

Rayonnement du QGP à la manière d'un corps noir
→ photons selon la loi de Planck : densité spectrale d'énergie



36

QGP

## Densité du QGP

Lors de leur traversée du QGP : perte d'énergie des quarks et des gluons énergétiques proportionnelle à la densité de charges de couleur



énergie des ortionnelle à QGP QGP Rapport de modification nucléaire Marticules

 $R_{AA} = \frac{N_{\rm PbPb}^{\rm particules}}{N_{\rm pp}^{\rm particules}}$ 

Photons et Z (insensibles à
 l'interaction forte) pas affectées

Accord entre expériences pour les hadrons chargés

> Courbes théoriques permettent de déduire la densité de gluons dans le QGP :  $dN_g/dy \approx 2800$ 

## Fluidité du QGP

Asymétrie spatiale de collisions non centrales traduite en asymétrie dans l'espace des impulsions selon la décomposition en série de Fourier :  $E\frac{d^3N}{d^3p} = \frac{1}{2\pi}\frac{d^2N}{p_Tdp_Tdy}\left(1+2\sum_{n=1}^{\infty}v_n\cos(n\varphi)\right)$ 



 $\succ$  Le second coefficient v2 (écoulement elliptique) correspond au rapport du nombre de particules émises dans la direction du petit axe sur le nombre selon la direction du grand axe  $\rightarrow$  quantité fonction de la viscosité



Dépendance en impulsion transverse bien reproduite par les calculs hydrodynamiques qui modélisent un fluide de très faible viscosité

> Le QGP se comporte comme un fluide parfait

## **Température de transition**

Production statistique des hadrons lors du refroidissement du système à la température de transition QGP  $\rightarrow$  gaz hadronique : nombre de hadrons d'espèce *i* 



$$N_{i} = \frac{V}{2\pi^{2}} g_{i} \int_{0}^{+\infty} \frac{\exp(-\frac{E-\mu_{i}}{kT})}{1 \pm \exp(-\frac{E-\mu_{i}}{kT})} p^{2} dp$$

- $g_i$  le nombre de degrés de liberté
- $\mu_i$  le potentiel chimique
- + pour des fermions
- pour des bosons

Bon accord entre données et prédictions théoriques

➢ Résultat de l'ajustement aux données après la transition de phase QGP → hadrons :

- température du système
   T<sub>fo</sub> = 156 MeV
- densité baryonique

 $\mu_{b} = 0 \text{ MeV}$ 

$$\rightarrow \rho_{\rm B} = 0$$

volume du système
 V = 5380 fm<sup>3</sup>



#### L'interaction forte : de la couleur au plasma de quarks-gluons

#### Voyage au pays d'ALICE : la transformation du plomb

#### > Une fenêtre sur l'Univers :

une soupe de particules extrêmement chaude

## **Retour vers le big bang**

# The big Balk

i think

6000 de

300 thousand years

1 thousand million years

3 minutes Transition de QCD :  $QGP \rightarrow hadrons$ ~ 10 µs 10<sup>-43</sup> seconds 10<sup>32</sup> degrees 10<sup>27</sup> degrees 10<sup>15</sup> degrees 10<sup>10</sup> degrees 10<sup>9</sup> degrees radiation positron (anti-electron) particles proton heavy particles neutron carrying meson the weak force hydrogen quark deuterium anti-quark e helium C. electron L lithium

<u>Recombinaison électromagnétique</u> : noyaux +  $e^- \rightarrow$  atomes, ainsi l'Univers devient transparent aux photons et produit le fond diffus cosmologique (CMB)

~ 400 000 ans

15 thousand million years



## L'Univers des quarks et des gluons



Densité baryonique  $\rho_B$ 

#### **Conclusion : la Physique des Extrêmes**



## Pour aller plus loin

Livre sur la physique des particules et la cosmologie

Passeport pour les deux infinis, Dunod, 2<sup>ème</sup> édition, septembre 2013

 Revue en ligne sur la physique des particules <u>http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/</u>

#### Articles sur la QCD et le QGP

- La chromodynamique quantique, La Recherche, n°123, juin 1981
- *Les premières microsecondes de l'Univers*, Pour la science, n°344, juin 2006
- Collisions d'ions lourds avec ALICE au LHC : les trois premières années, Ph. Crochet (LPC), Reflet de la Physique, n°39, mai 2014

 Site Internet sur le projet LHC http://www.lhc-france.fr/

