

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG



Calcul de section efficace dans le cadre du modèle de Nambu et Jona-Lasinio

Présenté par :
David Fuseau

Supervisé par :
Jörg Aichelin

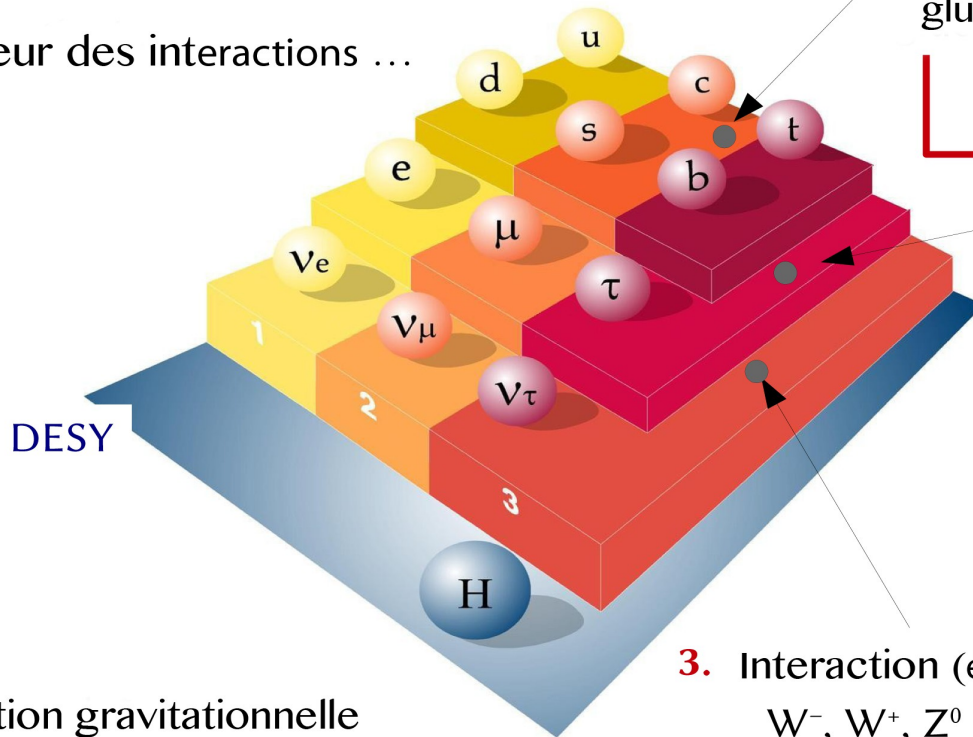


Sommaire

- Le Modèle Standard
- Interaction forte et QCD
- Le modèle de Nambu et Jona-Lasinio
- Sections efficaces d'hadronisation
- Conclusion

Interactions et matière

Bosons,
vecteur des interactions ...



1. Interaction forte
gluons

Intensité : 1

Forte (couleur) spin = 1		Charge électrique
Nom	Masse GeV/c ²	
g gluon	0	0

2. Interaction électromagnétique
photons

Intensité : $\approx 1/137$

Unification Électro-faible spin = 1		charge Électrique
Nom	Masse GeV/c ²	
γ photon	0	0
W⁻	80.39	-1
W⁺	80.39	+1
W bosons		
Z⁰	91.188	0
Z boson		

4. Interaction gravitationnelle
graviton

Intensité : $< 10^{-30}$

3. Interaction (électro) faible
W⁻, W⁺, Z⁰

Intensité : $\approx 10^{-5}$

Interaction forte et QCD

L'interaction forte est décrite par la chromodynamique quantique

Chromodynamique quantique : Théorie quantique des champs.

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \underbrace{i\delta_{ij}\bar{\psi}_q^i\gamma^\mu\partial_\mu\psi_q^j}_{\text{terme } Qk(\text{CIN})} + \underbrace{g_s\bar{\psi}_q^i\gamma^\mu t_{ij}^a A_\mu^a\psi_q^j}_{\text{terme } QkGl} - \underbrace{m_q\bar{\psi}_q^i\psi_{q,i}}_{\text{terme } M} - \underbrace{\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}}_{\text{terme } Gl(\text{CIN})}$$

free parameters, not given by QCD

$$\text{où : } F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g_s f^{abc} \frac{A_\mu^b A_\nu^c}{}$$

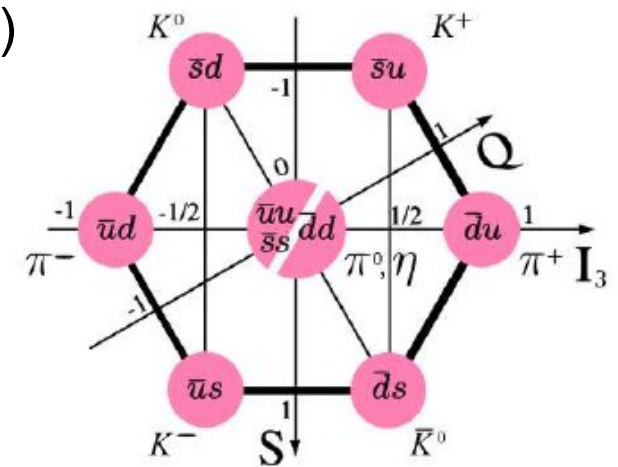
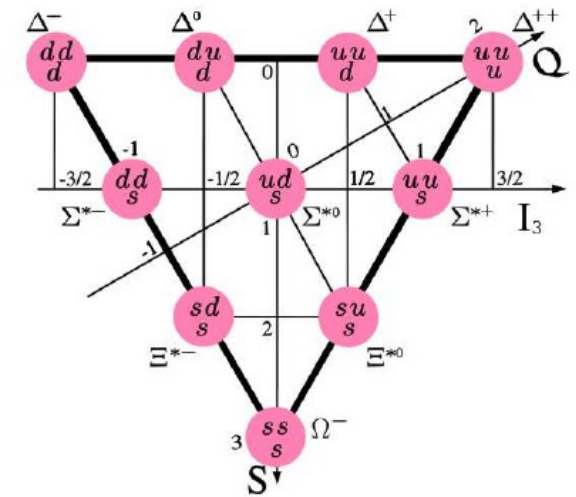
$$g_s^2 = 4\pi\alpha_s$$

non-abelian term, for gg coupling...

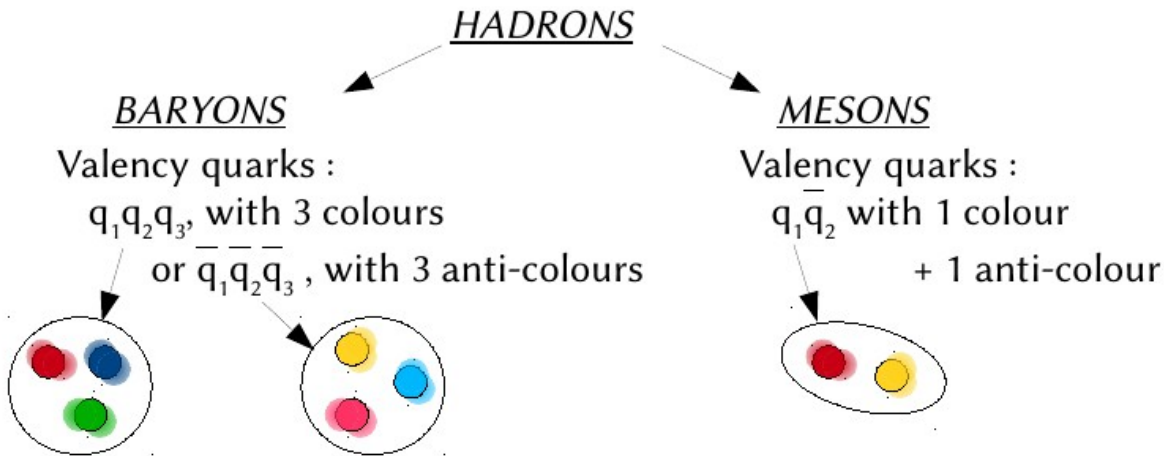
Lagrangien invariant sous une transformation de jauge SU(3)
→ gluons vecteur d'interaction

Symétries

- Symétrie de couleur $SU_c(3)$
 - Charge = 3 couleurs : rouge, bleu, vert
 - 8 gluons d'interaction colorés
- Symétrie de saveur $SU_f(3)$ ou $SU_f(2)$
 - Modèle des quarks et structure des hadrons
- Symétrie chirale $SU_v(3) \times S_{UA}(3) = SU_L(3) \times SU_R(3)$
 - Distingue les particules gauches des droites
 - Symétrie brisée
- Symétrie $Z(3)$:
 - Symétrie responsable du confinement

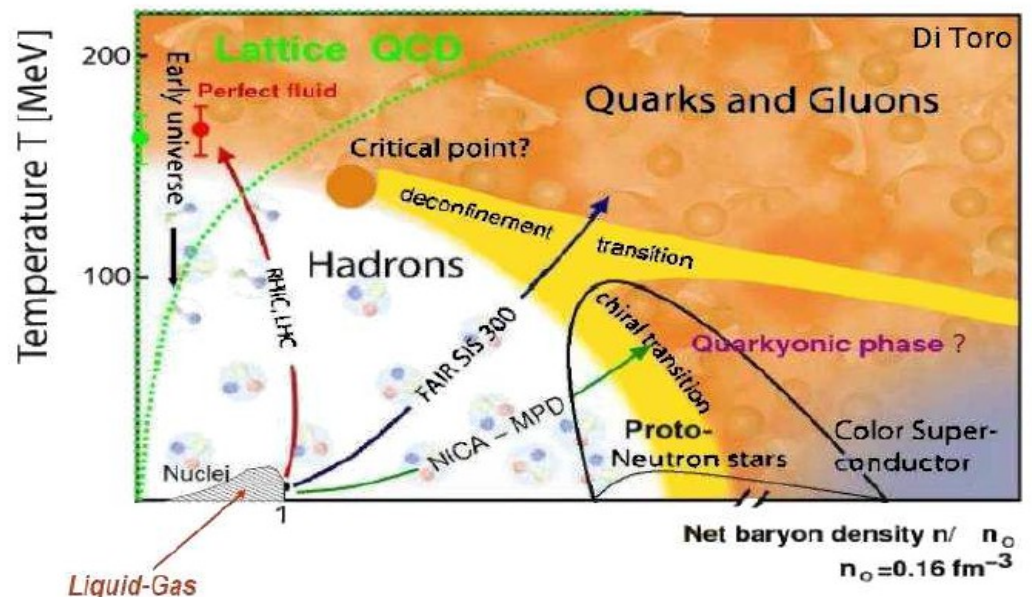


La physique du QGP



- Transition d'une phase hadronique vers une phase QGP
- Quarks et gluons sont les degrés de liberté

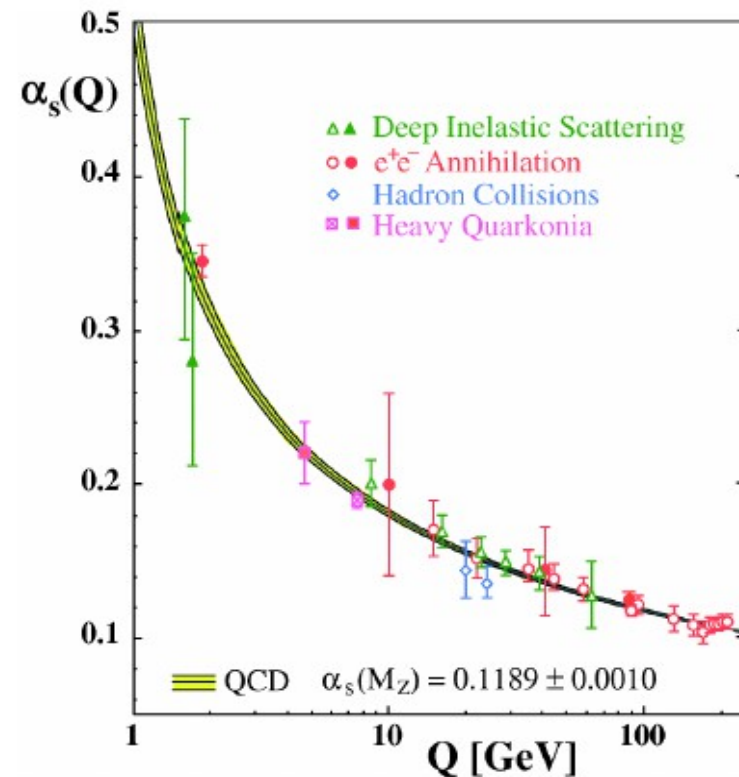
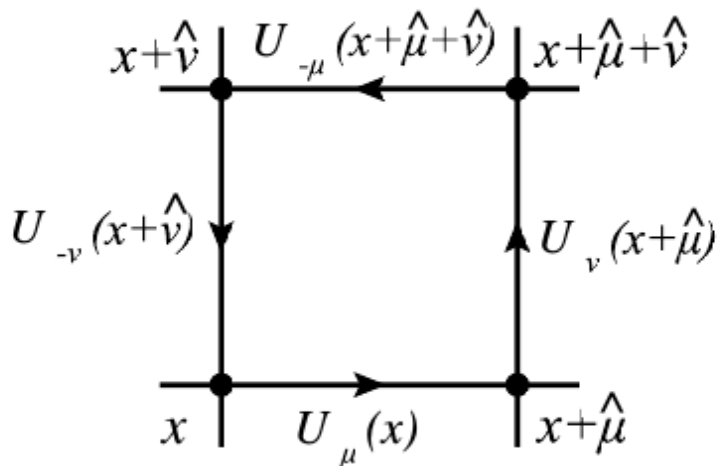
- Différentes expériences pour sonder différentes zones du diagramme de phase de la matière QCD
- Actuellement, RHIC et LHC : haut T et bas μ
- Bientôt, FAIR et NICA : plus bas T et haut μ



pQCD et IQCD

- Liberté asymptotique
 - Développement perturbatif convergent en fonction de la constante de couplage

- Discrétiser l'espace-temps :
 - nœuds du réseau = matière
 - Lien entre nœuds = gluons



Problématiques

Quelle théorie pour décrire le diagramme de phase de la matière QCD à température et potentiel chimique non nuls ?

Quelles observables pour décrire dynamiquement la transition entre la matière hadronique et le QGP à température et potentiel chimique non nuls ?

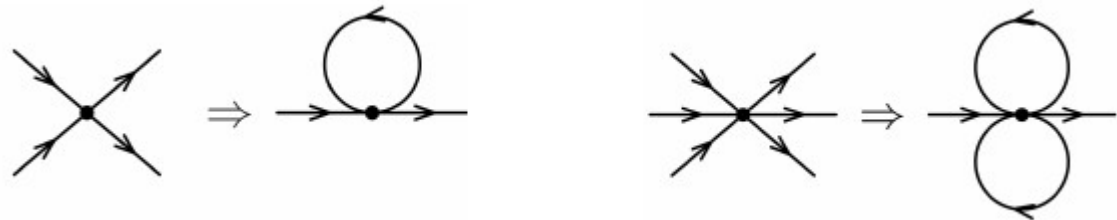
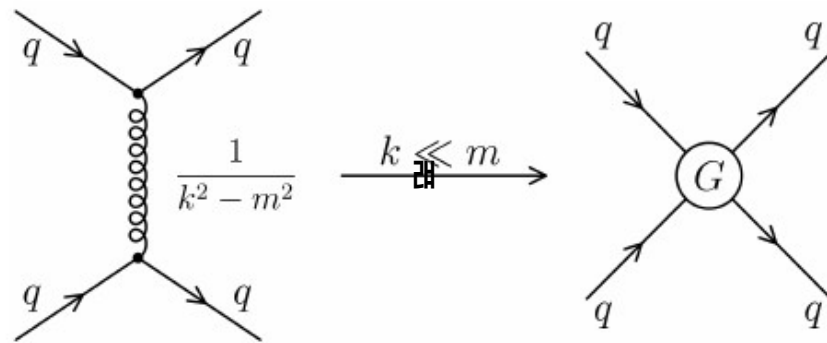
Le modèle de Nambu et Jona-Lasinio

- Un lagrangien simpliste avec toutes les symétries du lagrangien QCD

- Approximations :

- ✓ Interaction de contact

- ✓ Approximation du champ moyen



Lagrangien NJL

- Lagrangien d'une interaction de contact

$$\mathcal{L}_{NJL} = \sum_{k=u,d,s} \bar{\psi}_k (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi_k - G^2 \sum_{a=1}^8 (\bar{\psi}_k \gamma^\mu \lambda^a \psi_k)^2$$

- Transformation de Fierz + terme de t'Hooft + champ moyen

$$\mathcal{L}_{NJL} = \bar{\psi}_k [i\gamma^\mu \partial_\mu + m - 4G_S^2 \langle \bar{\psi}_k \psi_k \rangle + 2K \langle \bar{\psi}_{k'} \psi_{k'} \rangle \langle \bar{\psi}_{k''} \psi_{k''} \rangle] \psi_k - 2G_V^2 \bar{\psi}_k \gamma_\mu \psi_k \langle \bar{\psi}_k \gamma_\mu \psi_k \rangle$$

Masse des quarks

L'équation de Gap

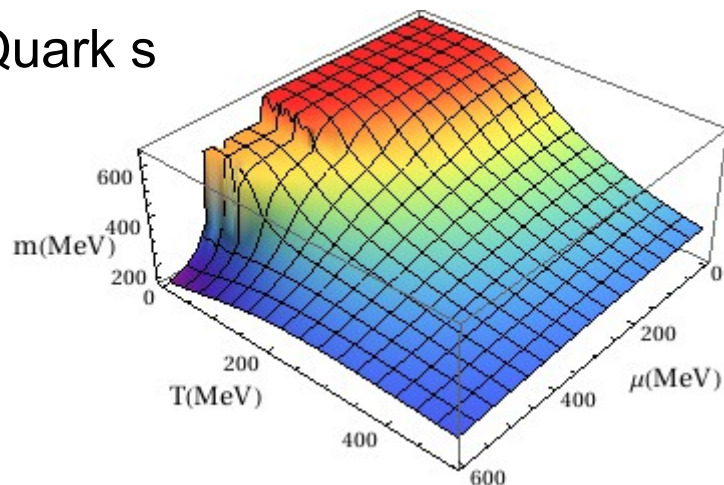
$$M = m - 4G_S^2 \langle \bar{\psi}_k \psi_k \rangle + 2K \langle \bar{\psi}_{k'} \psi_{k'} \rangle \langle \bar{\psi}_{k''} \psi_{k''} \rangle$$

- Deux phases :
 - M = m : phase QGP
 - M ≠ m : phase hadronique
- La valeur du condensat brise la symétrie chirale

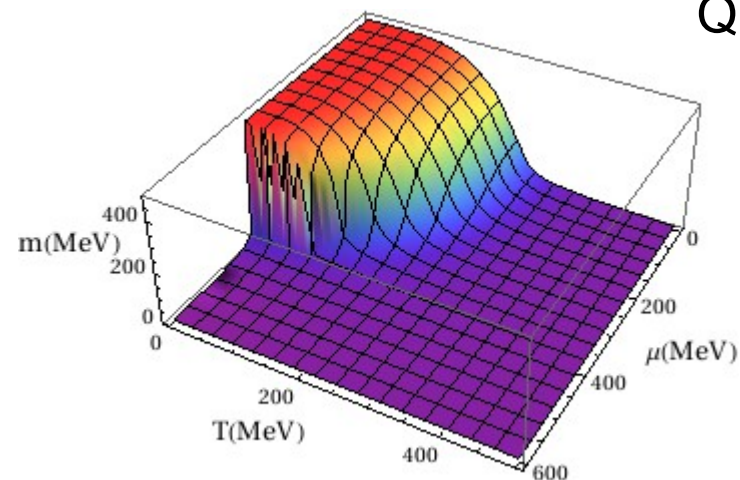
- Fort potentiel chimique, basse température :
 - Transition brutale de première ordre

- Haute température, bas potentiel chimique :
 - Transition douce de type cross over

Quark s



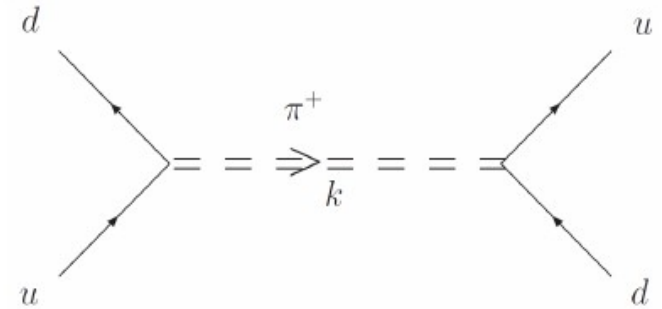
Quarks u et d



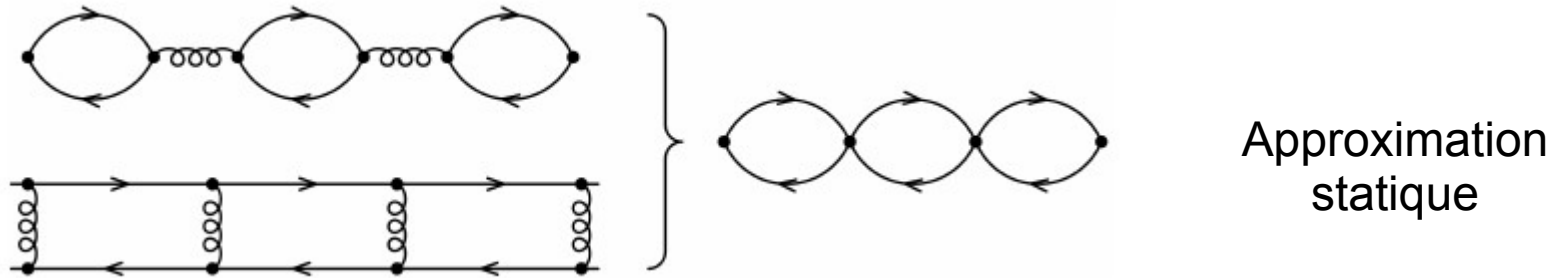
Masse des mésons : Diagrammes

- Propagation des mésons – boson vecteur

$$\frac{-ig_{\pi q\bar{q}}^2}{k^2 - m_{\pi}^2}$$



- Boucles fermioniques : RPA et équation de Bethe-Salpeter



- L'identification des deux donne l'équation pour la masse des mésons

Points forts VS Points faibles

- ✓ Possède toutes les symétries du lagrangien QCD sous forme simplifiée
- ✓ Décrit la matière à potentiel chimique non nul
 - Étoile à neutron

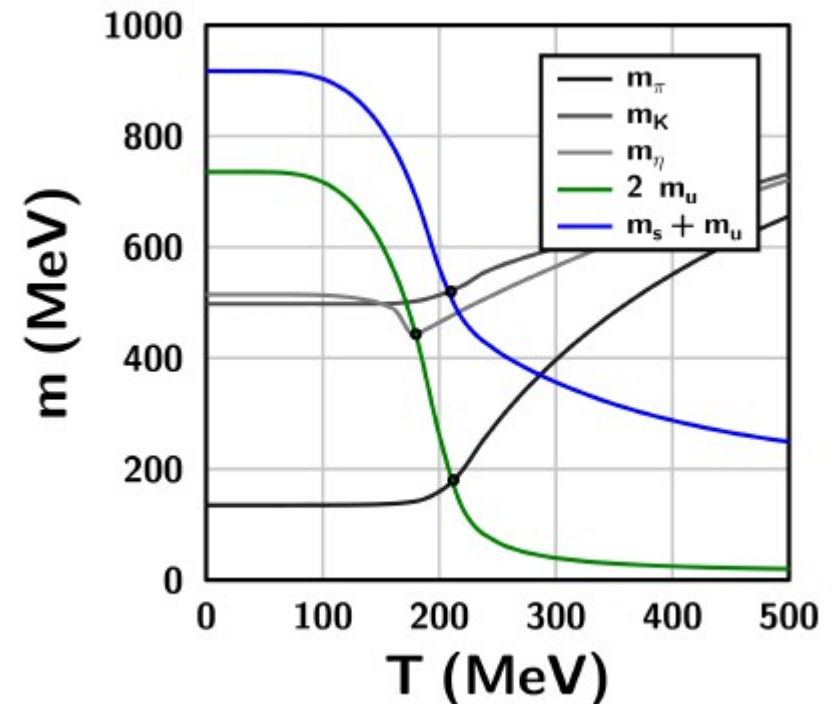
- x Ne traite pas le confinement
- x Non renormalisable
- x Modèle effectif à basse énergie
- x Ne tiens compte que de trois saveurs

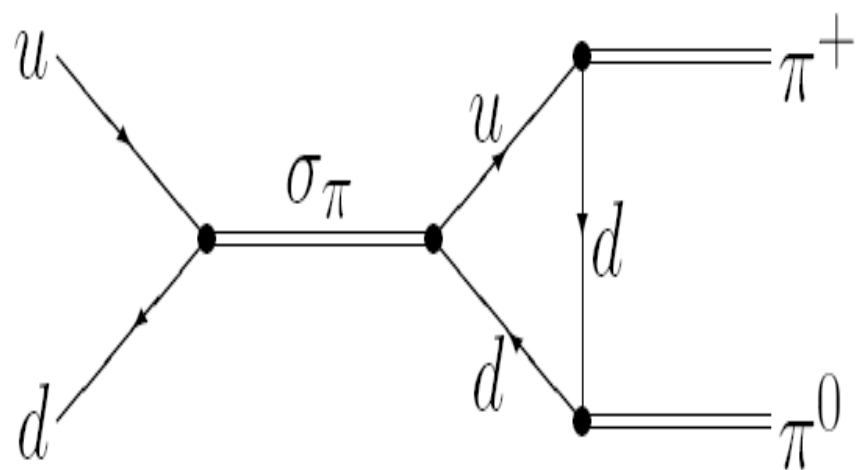
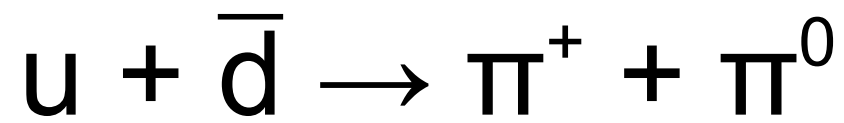
Sections efficaces d'hadronisation

Mésons Vs Quarks

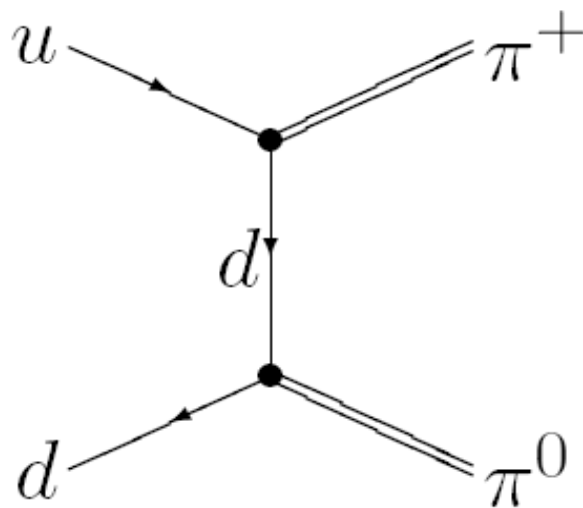
- A basse température :
 - Masse du méson $<$ masse des quarks qui le compose
 - Masse réelle :
Pas de largeur de désintégration
Le méson est stable

- A haute température :
 - Masse du méson $>$ masse des quarks qui le compose
 - Masse complexe :
Largeur de désintégration
Le méson est instable

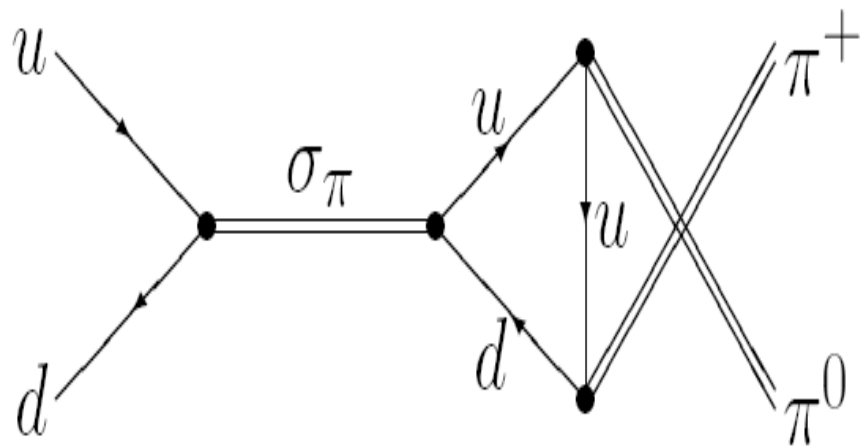




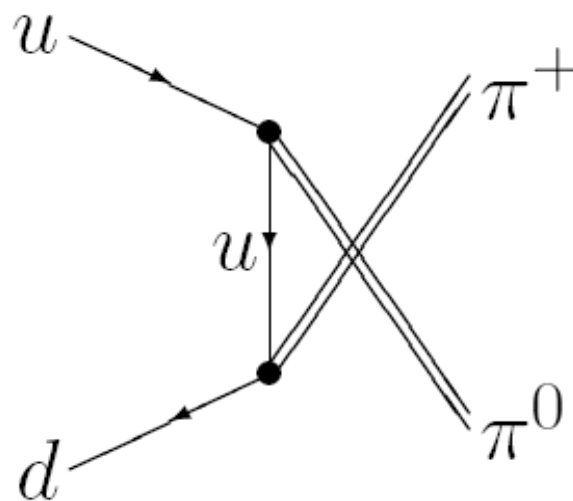
s



t



s'

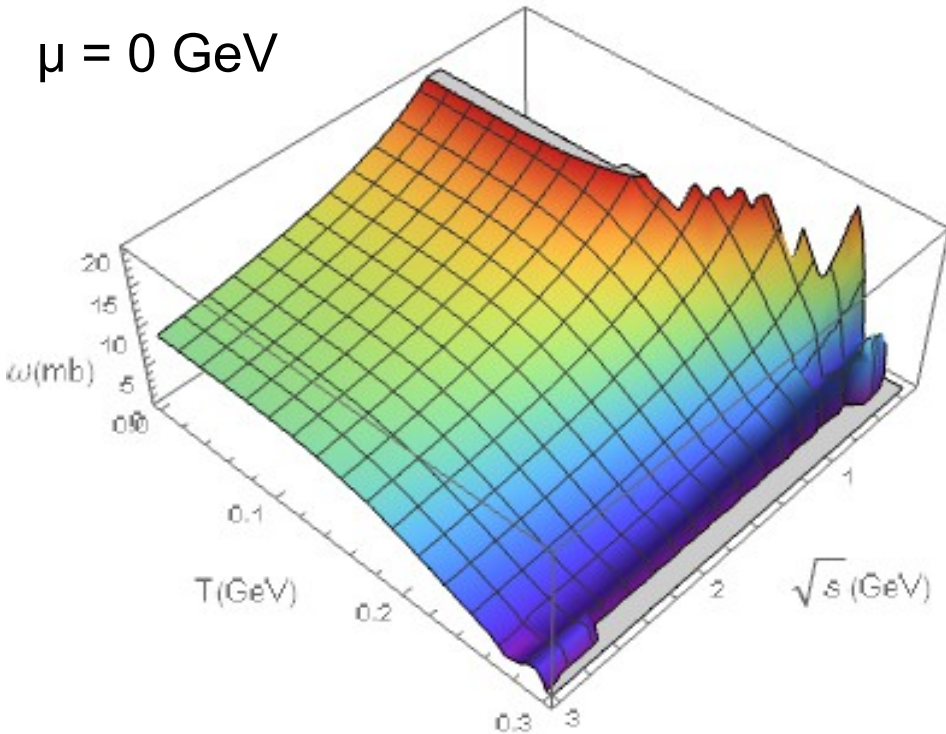


u

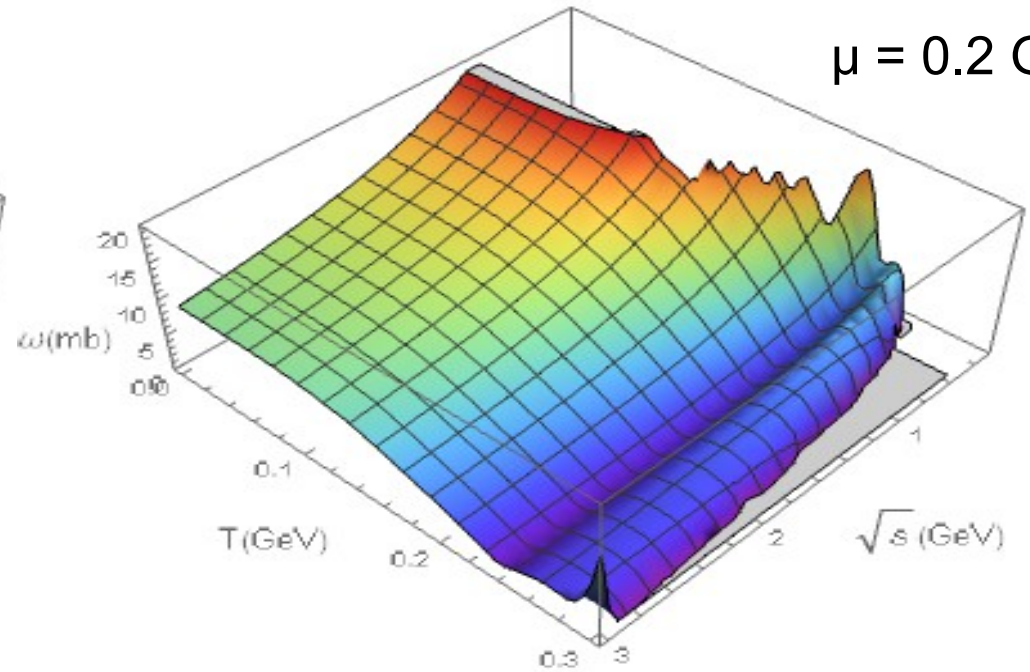
À potentiel chimique fixe

Taux de transition ω : pas de divergences cinématiques

$\mu = 0$ GeV



$\mu = 0.2$ GeV



- A haut T :
 - taux de production de mésons très faible
 - Seuil cinématique abaissé
- A haut \sqrt{s} :
 - La production de mésons baisse
- Avec potentiel chimique :
 - La section efficace diminue plus vite à haut T
 - La transition a lieu plus tôt qu'à $\mu = 0$

Conclusion (1)

- Le modèle NJL :
 - Brisure de la symétrie chirale

- Masse des quarks
- Masse des mésons
- Sections efficaces

A T et μ non nuls

- Section efficace :
 - Étude dynamique de la transition QGP-matière hadronique
 - A haute Température : peu de production de mésons
 - A $\mu \neq 0$: la production de mésons décroît plus vite quand la température augmente

Conclusion (2)

- Application et approfondissement du cours de QCD.
- Prise en main de Mathematica

- Calcul d'élément de matrice
- Cinématique et section efficace
- Théorie des champs à température non nulle

Merci de votre attention

Anomalie UA(1)

- Symétries classiques / symétries quantiques
 - L'action est invariante
 - L'intégrale sur le chemin ne l'est pas.
 - Les fluctuations quantiques brisent la symétrie classique.

- Conséquences :
 - Certaines décroissances sont interdites/autorisées

Modèle PNJL

- On ajoute le gluon :
 - Champ moyen de gluons

$$\phi(\vec{x}) = \frac{\text{Tr}_c \langle\langle L(\vec{x}) \rangle\rangle}{N_c}$$

- Comment ?
 - Boucle de Polyakov

$$L(\vec{x}) = \mathcal{P} \exp\left(-\int_0^\beta d\tau A_0(\vec{x}, \tau)\right)$$

- Rétablit la symétrie de confinement

Transformation de Fierz

- Réarrangement des termes de l'interaction

$$\mathcal{L}_{int} = g_I \Gamma_{ij}^I \Gamma_{kl}^I \bar{\psi}_i \psi_j \bar{\psi}_k \psi_l$$

$$\Gamma_{ij}^I \Gamma_{kl}^I = \sum_M C_M^I \Gamma_{il}^I \Gamma_{kj}^I$$

- On développe le couplage en une combinaison linéaire de tous les couplages possibles

$$-\Gamma_{ij} \Gamma_{kl} = (C^S)_{il} (\mathbb{1})_{kj} + (C^V)_{il} (\gamma_\mu)_{kj} + (C^T)_{il} (\sigma_{\mu\nu})_{kj} + (C^P)_{il} (\gamma_5)_{kj} + (C^A)_{il} (-\gamma_\mu \gamma_5)_{kj}$$

m/n	S	V	T	A	P
S	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$
V	-1	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	1
T	$-\frac{3}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{3}{2}$
A	-1	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	1
P	$-\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{4}$

LQCD : Problème du signe

- Quenched approximation : $\det(M[U]) = 1$
 - M est la matrice d'interaction
 - Valable pour des quarks de masse tendant vers l'infinie (ie quark lourd)
 - Réduit le temps de calcul
 - Approximation non valable pour les quarks légers
- Sans cette approximation, à potentiel chimique non nul :
 - $\det(M[U])$ complexe
 - Simulation Monte Carlo invalide (Densité de probabilité complexe)

C'est le problème du signe

Formalisme de Matsubara

- Ensemble grand canonique :
T, μ
- Température = temps imaginaire
 - Transformée de Fourier
 - Fréquences de Matsubara

$$K = H - \mu N$$

$$t \longrightarrow -i\tau$$

$$\omega_n = \frac{2\pi(n+1)}{\beta} \quad \omega_n = \frac{2\pi n}{\beta}$$

$$\langle \bar{\psi}\psi \rangle = N_c N_f \int_0^\Lambda \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} (1 - f(E + \mu) - f(E - \mu)) \frac{M}{2E}$$