Propriétés de la matière nucléaire dans une approche incluant symétrie chirale et confinement

Élisabeth Massot

Université Lyon 1, IN2P3 CNRS
Institut de Physique Nucléaire de Lyon

Journées de rencontre jeunes chercheurs, Dinard, décembre 2007

Matière Nucléaire

- Saturation de la matière nucléaire : propriétés connues expérimentalement (densité, densité d'énergie, compressibilité...) ;
- Matière nucléaire froide ($T = 0$, densité$\sim$ 0.16 fm^{-3}), matière nucléaire décrite par :
  - les degrés de liberté qui sont des nucléons,
  - interaction portée par des mésons (pion...).

Théorie Effective

Essayer de contraindre les théories de matière nucléaire en les considérant comme des théories effectives de QCD.
Introduire des aspects de QCD dans les modèles effectifs :

- Symétrie chirale ;
- Confinement.

Sommaire

1. Modèle de Walecka
2. Symétrie chirale et confinement
3. Résultats dans la matière nucléaire

Lagrangien de Walecka

- Lagrangien de type Walecka:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \bar{\psi}(i\partial_\mu\gamma^\mu - M)\psi + \frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma - \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - g_\sigma\bar{\psi}\sigma\psi \\ &\quad -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega_\mu\omega^\mu - g_\omega\bar{\psi}\gamma_\mu\omega^\mu\psi\end{aligned}$$

  où $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} = (\partial_\mu\omega_\nu - \partial_\nu\omega_\mu)(\partial^\mu\omega^\nu - \partial^\nu\omega^\mu)$.

- Calcul de l'énergie:

$$\frac{E}{A}[\rho] = \frac{<\phi_0|H|\phi_0>}{\rho} - M$$

  où $|\phi_0> = \prod_{\alpha<F} b_\alpha^\dagger|0>$.

Méthode Self-Consistante

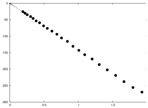
- Équations du mouvement des mésons: $[H,\Pi_x] = 0 \Rightarrow$ $(-\Delta + m_x^2)x = -g_x \bar{\psi} x \psi$.
- Équation de Hartree-Fock:

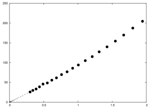
$$\frac{\delta}{\delta \bar{u}_\alpha}\left(< \Phi_0 | H | \Phi_0 > - \sum_\beta E_\beta u_\beta^\dagger u_\beta \right) = 0$$

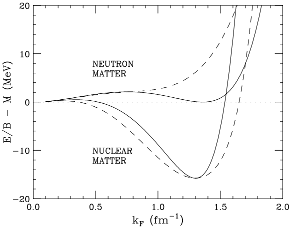
- Équation de Dirac:
  $(i\gamma_\mu \partial^\mu - M - \Sigma)\psi = 0$
  $(\gamma \cdot \mathbf{P}^*(p) + M^*(p))u(p) = \gamma^0 E^*(p) u(p)$

Mécanisme de Saturation

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{\rho}\int_0^{p_F} \frac{4d^3p}{(2\pi)^3}(E^* - M^*) + Vs + Vv$$







Résultat :

- $m_\sigma = 500$MeV, $g_\omega = 13.8$
- $K = 545$MeV

Symétrie Chirale

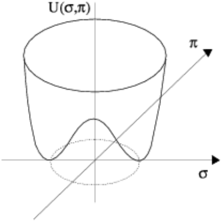
$SU(2)_L \times SU(2)_R$

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_p \\ \psi_n \end{pmatrix}$$

- $\psi_{L,R} = \frac{(1 \pm \psi^5)}{2}\psi$
  $SU(2)_L : \psi_L \rightarrow e^{i\alpha_k \frac{\tau_k}{2}}\psi_L, \psi_R \rightarrow \psi_R$
  $SU(2)_R : \psi_L \rightarrow \psi_L, \psi_R \rightarrow e^{i\alpha_k \frac{\tau_k}{2}}\psi_R$
- Quantités invariantes chirales :
  $M\bar{\psi}\psi = M(\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L) \rightarrow g(\bar{\psi}_L W(x)\psi_R + \bar{\psi}_R W^\dagger(x)\psi_L)$
  où $W(x) = \sigma(x) + i\vec{\tau}\cdot\vec{\pi}(x)$ et
  $trWW^\dagger = \sigma^2 + \vec{\pi}^2$.

Lagrangien Chiral (modèle σ-linéaire)

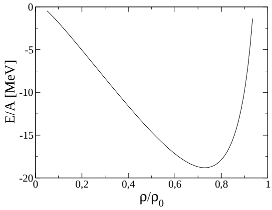
$$\mathcal{L}_{\sigma,\vec{\pi}} = \frac{1}{2}\partial_\mu\sigma\partial^\mu\sigma + \frac{1}{2}\partial_\mu\vec{\pi}\partial^\mu\vec{\pi} - g_0\bar{\psi}(\sigma + i\gamma^5\vec{\pi}\cdot\vec{\tau})\psi - U(\sigma^2+\vec{\pi}^2) + c\sigma.$$

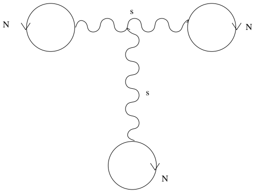


- Symétrie spontanément brisée dans le vide (condensat). Restaurée à haute température.
- Bosons de Goldstone = pions.
- Degré de liberté radial = champ scalaire de la physique nucléaire.

[G. Chanfray, M. Ericson and P. A. M. Guichon, Phys. Rev. C **63** (2001) 055202]

Réponse Nucléonique





κ_{NS} = réponse scalaire du nucléon [P. A. M. Guichon]

$$\delta\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\kappa_{NS}\bar{\psi}s^2\psi$$

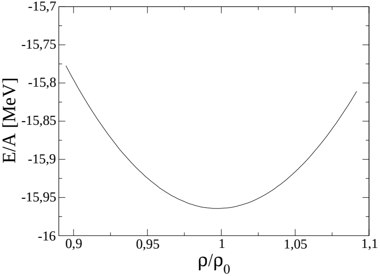
Matière Symétrique

m_s	g_s	C	g_δ	g_ω	g_ρ	g_A
800	10	1,25	1	8	2,65	1,25

$$C = \frac{f_\pi^2}{2M}\kappa_{NS}$$

$$f_\rho/g_\rho = 3.7$$
$$g_\omega = 7.775$$
$$C = 1{,}33$$

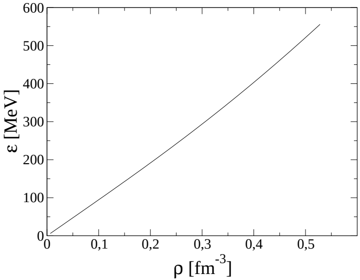
$$\rho/\rho_0 = 1{,}00$$
$$E/A = -15{,}96 \text{ MeV}$$
$$K = 315 \text{ MeV}$$
$$m_s^* = 841 \text{ MeV}$$
$$g_s^* = 6.01$$



Matière Asymétrique

- Matière presque symétrique : $a_{sym} = 29.58$ MeV.
- Étoiles à neutrons :

$$\epsilon = \frac{< H >}{V} + \epsilon_{e^-}$$



Résumé et Perspectives

- Résumé :
  - Méthode self-consistante et mécanisme de saturation,
  - Lagrangien chiral : nécessité d'introduire un effet de confinement, par exemple la réponse nucléonique.
- Perspectives :
  - Regarder les noyaux finis,
  - Étudier le comportement en fonction de la température.