

核媒質中におけるカイラル対称性の 部分的（不完全）回復と中間子の性質

D. Jido
(Tokyo Metropolitan University)



首都大学東京

TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

核媒質中におけるカイラル対称性の 部分的（不完全）回復と中間子の性質

D. Jido

(Tokyo Metropolitan University)

Frequently asked question (FAQ)的なことについて
とりとめのない話をします



首都大学東京

TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

D. Jido

KEK東海キャンパス

8.5-6, 2013

Motivation

なぜ、原子核中のハドロンの性質を研究するのか

核物理として、強い相互作用の多体系の研究

ハドロン物理として、量子色力学の研究

クォーク閉じ込めの機構 → ハドロン分光、エキゾチックハドロン

カイラル対称性の自発的破れ

ハドロン物理の多くのことを説明

軽い π 中間子 質量生成機構

カレント代数 低エネルギー定理

GT relation

GOR relation

TW relation

実際に対称性の自発的破れが起きていることは間違いないと思われる。

相転移現象であることを（現象論的に）証明したい

完全に回復させるより（経済的な） **部分的（不完全）回復の証明**

Mass modification

mass modification とは何でしょう？

真空中の質量

量子力学的には $H = H_0 + V$ free Hamiltonian H_0 で「規定」されている
相互作用がなくなるような無限遠方での静止エネルギー

Mass modification

mass modification とは何でしょう？

真空中の質量

量子力学的には $H = H_0 + V$ free Hamiltonian H_0 で「規定」されている

相互作用がなくなるような無限遠方での静止エネルギー

媒質中の質量（まずは一様無限系を考える。infinite matter）

粒子は、媒質と相互作用の結果、「性質」が変わる。→ 質量も変化

**無限系では、媒質との相互作用を切ることはできないので、
相互作用をくりこんだ形で、質量が定義される。**

場の理論的には $m^2 = m_0^2 + \Sigma(m^2)$ によって相互作用の結果として得られる
自己エネルギー

量子力学的には $H = H_0^* + V^*$ 準粒子に対する free Hamiltonian で規定

準粒子：媒質との相互作用をくりこんだ粒子 (V^* には媒質との相互作用は含まれない)

**結局、媒質中の質量を知ること、粒子と媒質の相互作用を決めること
質量は相互作用を知る上での一つの指標となる量**

Hadrons in nuclei

媒質中の質量変化と原子核中の束縛状態（引力）の関係は？

今度は、有限核物質系（原子核）におけるハドロンを考える

媒質中の質量変化は、結局は、媒質との相互作用

$$m^2(\rho) = m_0^2 + \Sigma(m^2, \rho)$$

質量が減る（増える）ということは、相互作用は引力（斥力）

空間的に有限に広がった媒質 = 位置によって密度が変化する

$$\Sigma(\rho) \rightarrow \Sigma(\rho(r)) \quad \text{局所密度近似}$$

媒質との相互作用は、有限系では“ポテンシャル”として与えられる

（ポテンシャル描像が有効な場合には）

引力ポテンシャルがあれば、束縛状態が形成される可能性がある

束縛状態スペクトル $\rightarrow$ ポテンシャル $\rightarrow$ 相互作用（= 質量変化）

不変質量スペクトル $\rightarrow$ 相互作用（= 質量変化）

Mesons in nuclear medium

媒質中の質量変化が核多体論で説明できたら、部分的回復はいらない？

ハドロンと媒質との相互作用を知る核物理的興味

多体効果によって質量や幅は変化する

ex. mass shift

$$mN \rightarrow mN$$

$$mN \rightarrow B^*$$

width

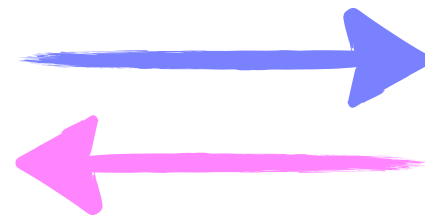
$$mN \rightarrow \pi N$$

$$mNN \rightarrow NN$$

核媒質中の質量変化は、核多体論（ハドロン有効理論）で記述できる
ただし、変化量を定量的に予言することは難しだろう

全てのハドロン相互作用は、クォーク・グルーオン動力学の結果
"quark-hadron duality"

ハドロン物理量



クォーク・グルーオン
による表現

大抵は、単純な対応関係がない。時々、きれいな関係式がある $m_\pi^2 f_\pi^2 = -2m_q \langle \bar{q}q \rangle$

より基本的で普遍的な量を、媒質との相互作用から得られるととても面白い

ex. quark condensate $\langle \bar{q}q \rangle$

In-medium chiral effective theory

idea 相互作用のない核物質 (Fermi gas) を用意

Oller, PRC65, 025204 (02)

相互作用は全て、真空中のカイラル有効理論で与えられる

フェルミ運動量 (密度) とカイラルの展開

カイラル有効理論：QCDとの関係が見易い

真空中の物理量が input となる

$$m^2 = m_0^2 + \Sigma(m^2) \quad \Sigma(m^2) \text{を真空中の物理量で計算}$$

核物質ができるかどうかは別にして、in medium の物理量が計算できる

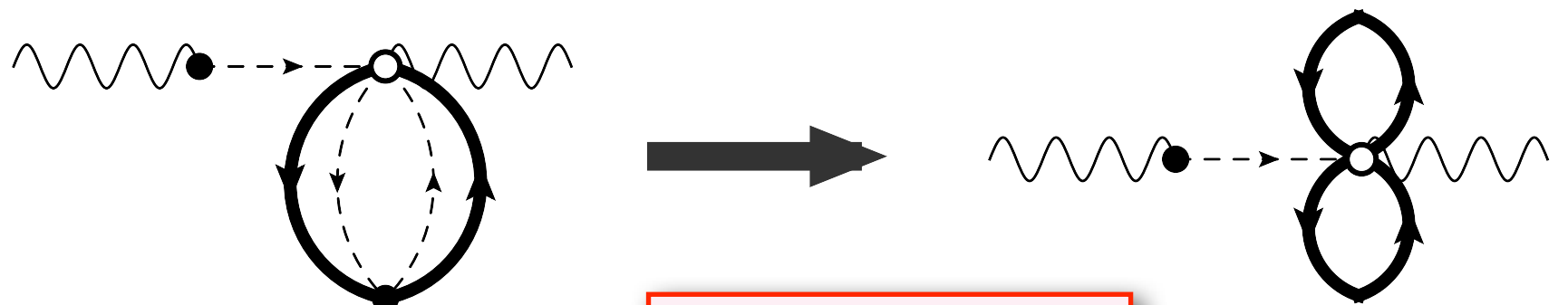
真空中での πN 相互作用を input とすると。。。

計算できるのは、 k_f^5 まで、つまり密度の5/3乗まで

ρ^2 のダイアグラムから発散がでてくる

→ 理論を well-defined にするために、NN相互作用を導入

**高次の密度補正には
多核子関連の情報が
必要**



S. Goda, DJ, in preparation

pion in nuclear medium

核媒質中の π 中間子と部分的回復との関連は？

f_π が核媒質中で小さくなる。その他の物理量は？

キーワードは波動関数の規格化 (wave function renormalization)

カイラル有効理論は、カイラル対称性と整合性を保ったまま、力学的自由度を

角度方向： π モード

動径方向： σ モード

に分けられることに基づいている

角度変数は**無次元**、 π 場は**質量次元**

$$U = \exp \left[i \frac{\vec{\pi} \cdot \vec{\tau}}{f} \right]$$

π 場を規格化するために、質量次元の量が必要。

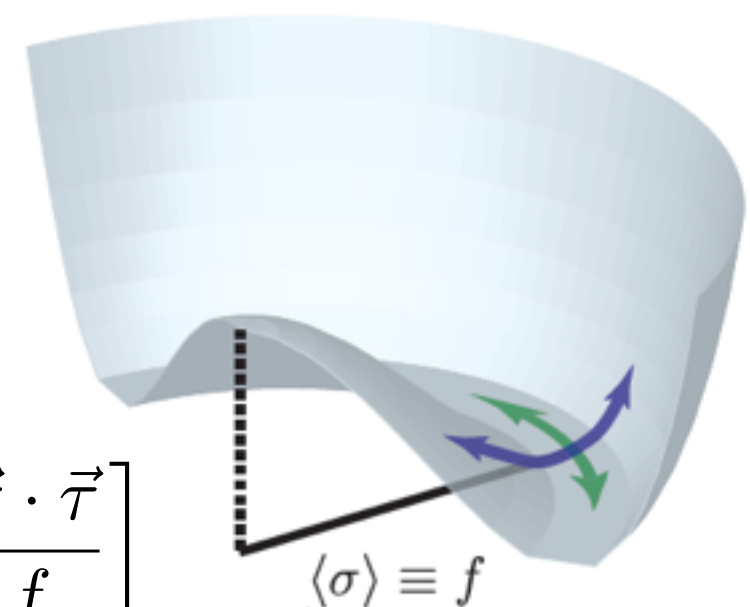
カイラル極限での質量次元の量は、カイラル凝縮のみ。

部分的回復に伴って、 **π 波動関数の再規格化が必要**。

波動関数が変われば、様々な量が変わる

$\pi\pi$ 散乱長、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の寿命、など

S. Goda, DJ, in progress



DJ, Hatsuda, Kunihiro,
PLB 670 (2008), 109.

K中間子原子

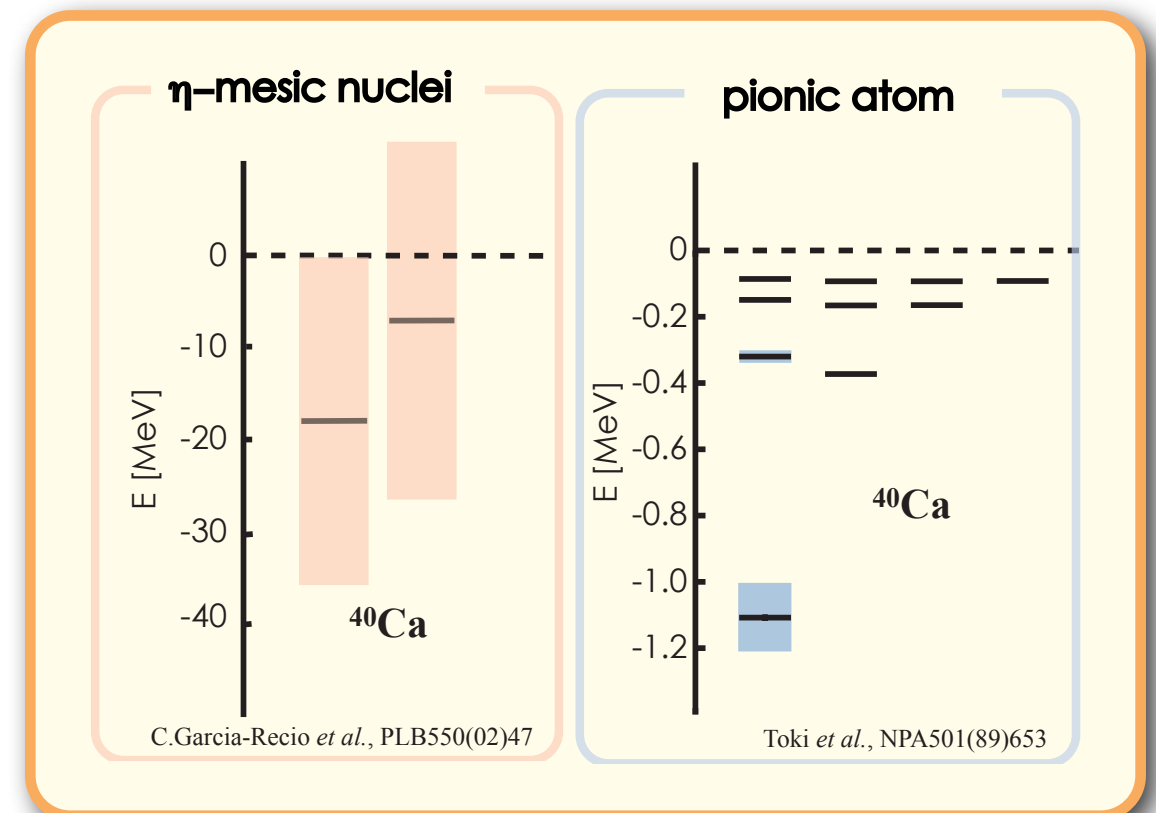
K中間子原子のスペクトラムからK-原子核の相互作用は分かるのか??

もちろん、ひとつの系なので原理的には可能。多くの束縛状態の詳細な分光と系統的研究が必要。

K^- 電磁相互作用で引力
強い相互作用で引力と**強い吸収**

原子的束縛状態 **atomic state**
数100 keV から 数10 keV
クーロンの束縛状態

原子核的束縛状態 **nuclear state**
数10 MeV から 数100 MeV
井戸型的束縛状態



実際の束縛状態では、これらが混ざるし、直交する

pure Coulomb で 1s 状態は、strong 1s がでることによって 2s になる。

角運動量の選択則から、同じ角運動量の状態が強く影響を受ける

atomic state のエネルギーシフトから、nuclear state の数が予想できる? !

定量的な議論が進行中。 N. Ikeno, S. Hirenzaki, DJ

Summary

カイラル対称性の自発的破れ：相転移現象

部分的（不完全）回復による南部理論の現象論的証明

QCDは、ハドロンを通して観測される “quark-hadron duality”

媒質中の性質変化を知る：粒子と媒質の相互作用を決めること

質量は相互作用を知る上での一つの指標となる量

カイラル有効理論：ハドロンとQCDをつなぐ

密度の高次を知るには、NN相関を取り入れる必要がある

有限密度中の π 中間子

南部ゴールドストーンモード：波動関数再規格化

$\pi\pi$ 散乱長、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

K中間子原子

詳細なスペクトル分光で、strong potential の強さが分かる？！