

反 D 中間子と核子のエキゾチックな束縛状態と散乱状態の解析

山口康宏¹, 大古田俊介¹, 安井繁宏², 保坂淳¹

¹ 大阪大学 RCNP, ² KEK 素核研

我々は重いフレーバーを含む中間子である反 D メソンまたは B メソンと核子の系におけるエキゾチックな束縛状態と散乱状態の解析を行う。ヘビークォーク領域ではストレンジネス領域とは違い、擬スカラーメソン (\bar{D}, B) とベクターメソン (\bar{D}^*, B^*) の質量差がとても小さい。これによって、 $\bar{D}-N$ 系に \bar{D}^*-N がチャンネル結合することができ、系の相互作用に π 交換相互作用が出現する。特に、ある角運動量 L をもつ $\bar{D}-N$ と角運動量 $L+2$ をもつ \bar{D}^*-N が混合することによりテンソル力が現れ、系に強力な引力を引き起こす。これはすでに重陽子の系で知られているもので、ヘビーマソン-核子系でも π 交換力が支配的に働く束縛状態を形成することが期待できる。この小さな質量差はヘビークォーク領域に現れる新たな対称性から来るもので、それをヘビークォーク対称性と言う。

このとき、 \bar{D} メソンや B メソンは反ヘビークォーク (\bar{c}, \bar{b}) とライトクォークで構成されているため、 $\bar{D}-N$ 束縛状態はクォーク-反クォークによる対消滅が起きない。よって、少なくとも構成粒子が 5 つ必要なエキゾチックハドロンである。本研究では、ヘビークォーク領域に現れる新たな特徴に着目し、ヘビーマソン-核子の束縛状態、共鳴状態の解析を行う。これによって、分子状態としてのエキゾチックハドロンを探索する。粒子間の相互作用として、ヘビークォーク対称性に基づいたパイオン、ベクターメソン交換相互作用を用いる。閾値近傍の物理のため、問題を非相対論的に取扱い、シュレディンガー方程式を解くことによって束縛状態と共鳴状態の解析を行う。

パイオン交換で形成される重いメソン分子状態 の系統的な解析

阪大 RCNP, KEK 素核研^A

大古田 俊介, 山口 康宏, 安井 繁宏^A, 保坂 淳

Systematic analysis of the heavy meson molecular states
formed by pion exchange

Osaka Univ. RCNP, KEK^A

S.Okoda, Y.Yamaguchi, S.Yasui^A, A.Hosaka

近年、 $X(3872)$ や $Y(3940)$ の発見により従来のクォーク描像では記述することが困難なエキゾチックハドロンへの関心が高まっている。特に最近になって電荷を持ったボトムウムライクな粒子 Z_b が Belle により報告された。これらの状態は重い 2 中間子の閾値に極めて近いことから、2 中間子分子状態である可能性が示唆される。

クォーク質量が重い領域では、ヘビークォーク対称性が良い近似で成り立ち、その対称性から予期されるように、重い擬スカラーメソンとベクトルメソンは近似的に縮退している。その効果の帰結として、この系ではパイオン交換によるテンソル力が大きな引力をもたらす。そのためクォーク質量が重い領域では、軽い領域では見られなかったエキゾチックな粒子状態が予期される。

我々はこれらの状況を踏まえ、重いメソン分子状態の束縛状態と共鳴状態を全角運動量 J , パリティ P , チャージパリティ C によって分類し、系統的な解析を行なった。

特に Z_b と呼ばれる 2 つの共鳴状態が、 $IG(JP)=1^+(1^+)$ の量子数を持つ $B\text{-}B^*$ 及び $B^*\text{-}B^*$ メソン分子状態の束縛状態として解釈出来得ることを示す。

またエキゾチックな量子数を持ったメソン分子状態 (DD 及び BB) の可能性についても議論する。

4 クォークスカラー状態の $\pi\pi$ 散乱への影響

星野紘憲、原田正康、馬永亮¹

¹ 名古屋大学 クォーク・ハドロン理論研究室 (H研) D2

教科書でクォーク模型の説明を見ると、湯川博士が発見した π 中間子に代表される「中間子」は「2つのクォーク (正確にはクォークと反クォーク)」から構成されると書かれています。これは本当でしょうか？

クォークはカラーという量子数を持つため、強い相互作用を及ぼしあいます。この強い相互作用によってハドロンの質量が生成されたり、クォークの閉じ込めが起こります。ハドロン^{#1}はカラー^{#2}を持つクォーク達が集まって、全体として「白^{#3}」であるような状態です (電磁気で+と-の電荷が一緒になって0電荷に見える事に対応します)。

それでは例えば中間子を例にとって見た場合、2クォークの状態以外に白であるような状態が存在するのでしょうか？ … 答えはイエス! です。一般に4つ、6つ、8つ…のクォーク (正確にはクォークと反クォーク) でも「白」状態を作る事が可能です。

では実際にこのような状態 (エキゾチックな状態) が存在するのでしょうか? この疑問に対するヒントが2つの π 中間子の散乱から得られます。

本研究では有効ラグランジアンとして2, 4クォーク状態を含めた線形シグマ模型考えます。これは中間子の相互作用に微分を含まない模型です。この模型を用いて $\pi\pi$ 散乱を考えます。 $\pi\pi$ 散乱の中間状態として σ 中間子が現れるのですが、この σ を普通の中間子、つまり2クォーク状態であると考えると、 $\pi\pi$ 散乱をうまく説明できません。しかし、2クォーク状態に加えて4クォーク状態を考えることで、この実験は良く説明する事ができます。

^{#1} π 中間子や σ 中間子などの「中間子」および、陽子や中性子などの「バリオン」を総称して「ハドロン」と呼びます。

^{#2} クォークのカラーは光の三原色に対応して赤、緑、青と名付けられています。

^{#3} 例えば普通のバリオンの場合 (赤+緑+青) = 白や、普通の中間子 (赤+反赤) = 白です。反カラーとは反クォークのカラーを意味しており、光の色で例えるならば、反赤に対応する色は赤の補色である水色です。

Signature of strange dibaryon in kaon-induced reaction

大西祥太^A, 池田陽一^B, 鎌野寛之^C, 佐藤透^A
阪大理^A, 東工大理^B, 阪市大理^C

$K^{\text{bar}}NN-\pi\Sigma N$ 系における 3 粒子共鳴 (ストレンジダイバリオン) について変分法[1]やチャンネル結合 Faddeev 方程式を用いた方法[2,3]により研究されてきた。これらの研究はいずれも KNN より軽いストレンジダイバリオンの存在を示唆している。最近は光子や K 中間子を用いた反応実験によりストレンジダイバリオンの存在や共鳴エネルギーが調べられようとしている。

本研究ではチャンネル結合 Faddeev 方程式を用いてストレンジダイバリオン生成反応を調べることが目的である。[2,3]では振幅の非物理複素エネルギー平面上における極から共鳴エネルギーを得ている。一方共鳴生成反応を解析するためには実エネルギーの散乱振幅を求めることが必要となるが、実エネルギーの AGS 方程式の粒子交換カーネルには三日月型の特異性が現れることがよく知られている。ここでは鎌田らの開発したパデ近似により解析接続する方法[4]を用いてこの特異性を処理した。今回は共鳴生成反応の研究の第 1 段階として $K^{\text{bar}}NN-\pi\Sigma N$ 系の AGS 方程式における準 2 粒子散乱振幅と共鳴の効果について報告する。

- [1]T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Rev. C 76 (2007), 045201.
- [2]Y. Ikeda and T. Sato, Phys. Rev. C 79 (2009), 035201.
- [3]Y. Ikeda, H. Kamano and T. Sato, Prog. Theor. Phys. 124 (2010), 533.
- [4]H. Kamada, Y. Koike and W. Glökle, Theor. Phys. 109 (2003), 869.

格子 QCD によるエキゾチックハドロンの解析

若山将征^A , 野中千穂^A

名古屋大学大学院理学研究科 クォーク・ハドロン理論研究室^A

2003 年以降、SPing-8 の LEPS によるペンタクォークの候補である Θ^+ や KEK の Belle 実験によるテトラクォークの候補と考えられる X(3872) を先駆けに、エキゾチックハドロンと呼ばれる新種のハドロン現象がいくつも報告されるようになった。

また、u,d,s クォークから成る軽いスカラー中間子も 2 クォークから成る通常のクォーク模型だけでは質量スペクトルを説明することが困難であり、エキゾチックハドロンである可能性が示唆されている。一方、この軽いスカラー中間子はハドロンの質量生成機構と深く関わっているとされるシグマ中間子を含むが、質量の生成機構は中間子が 2 クォークから成る描像をもとに構成されている。そのため、エキゾチックハドロンとしての軽いスカラー中間子とハドロンの質量の生成機構との関係がどのようなになっているのかを調べるのは興味深く重要なことである。

今回の講演では、格子 QCD を用いて、軽いスカラー中間子がエキゾチックハドロンとして解釈可能であるかどうかについて説明する。

具体的には、2 つのパイ中間子からなる状態の束縛エネルギーを異なる格子サイズで測定し、この束縛エネルギーが格子サイズ依存性を持つかどうかを調べる。有限体積中において、4 クォーク状態の質量と 2 つのパイ中間子の質量の差は、もし散乱状態ならば、体積の逆数に比例する。従って、計算した束縛エネルギーが格子サイズ依存性を持てば、散乱状態であるとみなし、逆に格子サイズ依存性を持たなければ、エキゾチックハドロン状態であるとみなし、軽いスカラー中間子の格子サイズ依存性がどのようなになっているかを調べていく。

参考文献

- [1] Mark Alford and R.L. Jaffe, Nucl. Phys. B **578**, 367-382 (2000)
- [2] R. Gupta, A. Patel and S. Sharpe, Nucl. Phys. B **383**, 309 (1992)
- [3] M. Fukugita et al., Phys. Rev. D **52**, 3003 (1995)

QCD 和則による核子のスペクトル関数のベイズ推定

東京工業大学 大谷 圭介

共同研究者 Philipp Gubler, 岡 真

QCD sum rule による解析はこれまでに多くのハドロンの性質を再現する事に成功してきた。従来、QCD sum rule を用いて質量スペクトルを解析する際にはスペクトル関数の形を'pole+continuum'の形に仮定して行う必要があったが、最近、ベイズ推定に基づいた Maximum entropy method と呼ばれる手法を用いることで、スペクトル関数の形を仮定せずに解析を行う手法が作られた。

本研究は、この新しい手法を用いて核子の質量スペクトルの解析を行ったものである。研究の結果は、通常、核子の解析に用いられてきた QCD sum rule の一種である Borel sum rule ではなく、Gaussian sum rule を用いることで核子の質量スペクトルの解析に成功した。

また、解析の結果得られた質量スペクトルが核子の正、負パリティどちらの状態に対応しているのかを明確にするために、パリティ射影を用いた解析も行った。

格子 QCD による非摂動現象に寄与するグルーオン成分の研究：ディラック固有モードを用いたゲージ不変な枠組みでの解析

京大理 権業慎也, 入谷匠, 菅沼秀夫

Study of relevant gluon component for non-perturbative phenomena from lattice QCD:
Gauge-invariant analysis in terms of Dirac eigen-modes

Kyoto Univ. Shinya Gongyo, Takumi Iritani, Hideo Suganuma

量子色力学(QCD)の低エネルギー領域においては、クォークの閉じ込めやカイラル対称性の破れといった非摂動的現象が生じる。これまでにこれらの非摂動的現象の間にはなんらかの関係があることが示唆されてきた。例えば、有限温度のQCDにおいては閉じ込め・非閉じ込め相転移やカイラル相転移がおこるが、両者の相転移温度がほぼ一致することが明らかにされた[1]。他にも菅沼・佐々木・土岐は、双対ギンツブルグ・ランダウ理論で閉じ込めを与えるモノポール凝縮の寄与がカイラル対称性の破れに関しても支配的な寄与をすることを指摘した[2]。

本研究では、ディラック固有値、つまり $\gamma_\mu D_\mu = \gamma_\mu(\partial_\mu + igA_\mu)$ の固有値の紫外側や赤外側を切断し制限することにより得られたリンク変数を用いて、閉じ込めに主要な寄与を与えるグルーオンの成分を調べる。この新たな方法ではクォークの閉じ込めがどの(エネルギー)スケールのグルーオンによって引き起こされるかをゲージ不変かつ定量的に調査することができる。一方、カイラル対称性の破れは、Banks-Casher関係式[3]

$$\langle \bar{q}q \rangle = - \lim_{m \rightarrow 0} \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{\pi}{V} \langle \rho(0) \rangle \quad (1)$$

($\rho(\lambda)$:ディラック固有値の分布関数)を通して、直接ディラック固有値と関係づけられる。このため、この手法ではカイラル対称性の破れと閉じ込めの関係が議論できる。さらにディラック固有値は、Atiyah-Singerの指数定理[4]

$$Q = \frac{g^2}{16\pi^2} \int d^4x \text{Tr} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu} = \nu_R - \nu_L \quad (2)$$

(ν_R, ν_L :ディラック固有値の右巻き・左巻きのゼロモードの数)を通して、トポロジカル・チャージと関係づけられるため、トポロジカル・チャージとの関係も議論できる。

ここでの新しい方法の詳細とともに、格子QCDモンテカルロ計算により数値的に解析した結果を発表する。

参考文献

- [1] F.Karsch, Lect. Notes Phys. 583 (2002) 209.
- [2] H.Suganuma, S.Sasaki, H. Toki Nucl. Phys. B435 (1995) 207.
- [3] T.Banks, A.Casher Nucl. Phys. B169 (1980) 103.
- [4] M.F.Atiyah, I.M.Singer, Proc. Nat. Acad. Sci. 81, (1984) 2597.

低エネルギー重イオン衝突の反応機構

岩田 順敬 (GSI, Darmstadt)

重心系で一核子あたり数 MeV のエネルギーで起こる低エネルギー重イオン衝突について論じる。低エネルギー重イオン衝突では衝突する原子核が必ずしも融合するとは限らず、また分裂・分解するとも限らない。反応の詳細とそれによる生成物は衝突径数や反応系の質量などに依存してまったく異なったものとなる。つまり、どのような元素(chemical element)が反応生成物として合成されるかということを議論する上で、低エネルギー重イオン衝突の反応機構に関する研究は重要な意味を持つ。このレビュートークでは、元素の起源を解明するという主題のもとで、荷電平衡化機構をはじめとした低エネルギー重イオン衝突の反応機構について解説する。時間に依存した微視的理論の枠組みについて、理論の歴史的な進展を踏まえつつ現状で成功している点とそうでない点を示した上で、いくつかのグループで行われている先端の研究について紹介する。

タイトル：炭素同位体におけるシェル・クラスター構造の分析

発表者氏名：牟田 啓太郎

所属：京都大学・物理学第二教室

共同研究者：板垣 直之

所属：京都大学・基礎物理学研究所

概要：

炭素同位体における基底状態付近のクラスター・シェル競合を計算し、励起状態におけるクラスター状態の発現を議論する。安定な炭素である ^{12}C は、 3α クラスターの成分と殻模型的な成分の両方を持つことが知られている [1]。我々はこれらの競合を取り扱うために波動関数内に α の崩れの度合いを表すパラメータを導入し、クラスター・シェル競合をモデル化してきた [2, 3]。また、中性子数の増加と共に、炭素同位体の基底状態ではシェル模型の成分が増加することも示してきた [4]。これは ^{16}C の観測された小さな変形と対応している。しかし、そのような場合でも、励起状態にはクラスターを主成分とする状態が現れ、中性子過剰核における幾何学的クラスター状態の発現 [4, 5] が示唆されている。今回は ^{16}C より先の炭素同位体を念頭に、基底状態におけるクラスター・シェル競合と、励起状態におけるクラスター構造の出現を分析する。また、クラスター状態を同定するための物理量として E0 遷移確率に焦点をあてる。低い励起状態である 2^+ 状態のエネルギーの同位体依存性、及びその状態への E2 遷移確率についても議論する。

[1] N. Itagaki, S. Aoyama, K. Ikeda, and S. Okabe, Phys. Rev. C 70 054307 1-6 (2004).

[2] N. Itagaki, H. Masui, M. Ito, and S. Aoyama, Phys. Rev. C 71 064307 1-6 (2005).

[3] N. Itagaki, M. Ploszajczak, and J. Cseh, Phys. Rev. C 83 014302 1-12 (2011).

[4] H. Masui and N. Itagaki, Phys. Rev. C 75 054309 1-5 (2007).

[5] N. Itagaki, T. Otsuka, K. Ikeda, and S. Okabe, Phys. Rev. Lett. 92 142501 1-4 (2004).

Skyrme 力を用いた多スレーター行列式による軽い核の励起構造計算

福岡 佑太

筑波大学 原子核理論研究室

共同研究者： 船木 靖郎, 矢花 一浩, 中務 孝

軽い核では低エネルギーの励起スペクトルに様々なクラスター状態が現れる。このような核では様々な相関を取り入れて原子核の構造を記述することに興味を持たれる。自己無撞着な平均場模型は核図表の広い範囲にわたって原子核の記述に成功した理論であるが、単純な平均場理論ではクラスター状態をうまく記述できない。そこで我々は平均場を拡張することで、統一的な方法で様々な低励起状態を記述することに興味を持っている。

この目的のため我々のグループで開発した方法[1]を用いた。この方法は3つの手順に分けることができる。まず一つ目に異なった相関を持つ状態を複数のスレーター行列式を、虚時間発展を用いることで準備する。そしてそのスレーター行列式をパリティと角運動量について射影を行う。最後に射影した状態を重ね合わせる配位混合計算を行う。

計算の一例として炭素 12 の結果を図 1 に示した。図 1 では計算値と実験値のエネルギースペクトルを比較している。図から分かるように基底状態バンド($0^+, 2^+, 4^+$ の一番下の準位)は実験とよく一致しているのが見て取れる。2 番目の 0^+ はホイル状態として知られているが、この準位についても実験とのよい一致が見られた。しかし、我々の計算ではホイル状態の半径が基底状態からあまり変化せず、他のクラスター模型とは矛盾する結果が得られた。この原因を理解する為に、論文[2]で用いられたクラスター模型の波動関数を使って計算を行った。しかしながら、こうして加えた状態は我々の計算にエネルギーが高すぎて混じってこなかった。

今回の講演では上記で述べたことについての詳細を話す。また時間が許せばいくつか他の核についての計算も示す。

参考文献

[1] S. Shinohara, et al., Phys. Rev. C 74, 054315 (2006).

[2] E. Uegaki, et al., Prog. Theor. Phys. 574 (1977).

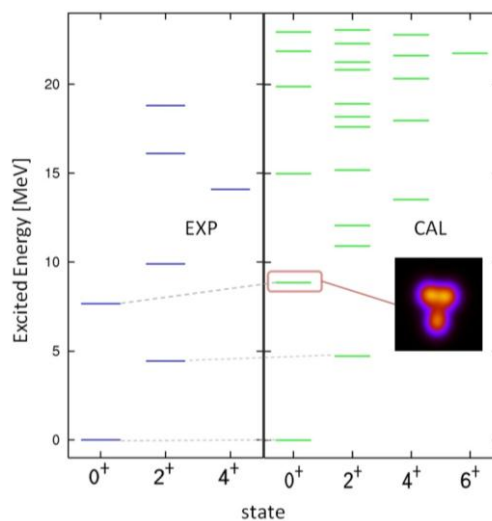


図 1. 炭素 12 の励起スペクトル
左は実験値で右が今回の計算で 45 個のスレーター行列式を重ね合わせることで得られたスペクトル図である。

Unique な第一禁止遷移における quenching factor の計算

那須 淳弥、武藤一雄

東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻

二重ベータ崩壊は比較的重い原子核が起こす現象であるが、この現象の予言には正確な理論的な核行列要素の計算が欠かせない。

有限なモデル空間で行う核構造の計算(QRPA、Shell model)においては結合の renormalization として、モデル空間と空間外との結合の効果を取り入れた有効演算子を用い、その第一次近似として結合定数を有効値で置き換えるという事を行う。実際に $0^+ \rightarrow 1^+$ の Gamow-Teller 遷移においては有効値の quenching が起こるという事が分かっているが、その他の遷移の型についてはこれに関する系統的な計算はこれまでにあまりない。

しかしながら重い原子核では unique な第一禁止遷移($0^+ \rightarrow 2^-$)が軽い原子核に比べて効くようになるため、質量数の多いベータ崩壊を起こす原子核を扱う場合には quenching の議論が重要になってくると考えられる。

近年実験データが比較的そろって来ている事もあり、我々は最終的な目標として 0ν mode の二重ベータ崩壊の原子核の遷移行列をより正確に評価する事を見込み、上記についての計算を行った。

本研究では重い閉殻の原子核を扱うのに適した、BCS model 計算から準粒子を定義した上で RPA 計算を行う方法である renormalized QRPA(Quasi-particle Random Phase Approximation)を用いて計算を行う。

中性子過剰核における中性子対移行:弱束縛配位と集団性

下山 裕考^{*}、松尾 正之

新潟大学自然科学研究科 原子核理論研究室

近年では不安定核に対する対移行の研究が行われるようになってきた [1,2,3]。不安定核の、特に中性子過剰領域では、中性子ハロー・スキンといった低密度現象や弱束縛な中性子の存在などが確認され、対移行の研究においても安定核とは異なる特徴をもつことが期待されるからである。中性子物質における対相関の性質として、密度が $1/10$ になるとペアリングギャップが大きくなると考えられる。中性子過剰核の表面は低密度で中性子が分布しているため、対相関も強くなっていると予想できる。よって、我々は核表面付近で二中性子が対を組むなら、外場からの応答で対の付加や除去が起こると考えた。

前回の夏の学校で Continuum QRPA 理論 [4,5] を使い Sn 同位体の低エネルギーの 0^+ 励起状態について調べ、Sn 同位体におけるを中性子対移行の研究から中性子過剰 ($A \geq 132$) 同位体から異常な対振動状態があることが分かった。それは対付加の遷移強度が非常に強く、基底状態間遷移とほぼ同程度である。また、対遷移密度は核の外側まで延びるテールがあり、束縛配位 (p 軌道) が重要な役割をになっていることを示した。

今回さらに高い励起状態を調べると、安定同位体 $^{120-130}\text{Sn}$ でも 10MeV 以上の巨大対振動状態と呼ばれる状態があり、 $A \geq 132$ での異常な対振動状態と似た特徴を持つことがわかった。Hartree-Fock 一粒子エネルギーから安定核領域においても p 軌道は 0 エネルギー付近にあることが分かり、この p 軌道配位によって遷移強度は大きくなり、 $A \geq 132$ の異常な対振動状態と似た特徴を持つと考えられる。ただし、集団性は $A \geq 132$ の同位体に比べて低くなっている。さらに、Sn 同位体以外に Ni 同位体について同様に調べたところ、中性子過剰同位体で弱束縛による特徴が見られたが、 s 軌道であるため集団性が大きくないためと考えられる。

- [1] E. Khan, N. Sandulescu, N. V. Giai, M. Grasso, Phys. Rev. C **69**, 014314 (2004).
- [2] E. Khan, M. Grasso, J. Margueron, Phys. Rev. C **80**, 044328 (2009).
- [3] B. Avez, C. Simenel, Ph. Chomaz, Phys. Rev. C **78**, 044318 (2008).
- [4] M. Matsuo, Nucl. Phys. **A696**, 371 (2001).
- [5] Y. Serizawa, M. Matsuo, Prog. Theor. Phys. **121**, 97 (2009).

Determination of ${}^8\text{B}(p,\gamma){}^9\text{C}$ Reaction Rate from ${}^9\text{C}$ Breakup

九大院理, * 阪大 RCNP

福井徳朗, 緒方一介*, 蓑茂工将, 八尋正信

元素合成過程には、超新星爆発時等に原子核が陽子を捕獲し、陽子過剰な不安定核を経由して急速に重い原子核が作られる rp-process という過程が存在する。その中でも、質量数 8 以上の原子核を形成するための重要な反応として ${}^8\text{B}(p,\gamma){}^9\text{C}$ が注目されており、この反応率を決定することは rp-process の解明のために本質的に重要である。

しかし、一般に天体内で起こる反応は非常に低エネルギーであり、これを実験によって直接再現することは困難である。したがって、 ${}^8\text{B}(p,\gamma){}^9\text{C}$ の反応率を間接的に決定するために、様々な代替反応が提案されてきた [1-3]。

本研究では、代替反応として ${}^{12}\text{C}$ および ${}^{208}\text{Pb}$ を標的核とした ${}^9\text{C}$ 分解反応 (${}^9\text{C}, p+{}^8\text{B}$) を解析し、 ${}^8\text{B}(p,\gamma){}^9\text{C}$ の反応率を本質的に決定する漸近規格化係数 (ANC)、および天体核物理因子 S_{18} を決定する。 ${}^9\text{C}$ には p - ${}^8\text{B}$ の閾値のおよそ 1 MeV 上に共鳴状態が存在する。今回我々は、 ${}^9\text{C}$ を p - ${}^8\text{B}$ の 2 体系とみなし、2 粒子間のチャネルスピン S が反応の間変化しないと仮定する。この仮定により、 ${}^9\text{C}$ の波動関数を共鳴が関与するチャネルスピン成分 ($S = 3/2$) とそうでない成分 ($S = 5/2$) に分け、それぞれの成分から始まる反応を個別に解析することが可能となる。ANC は、従来 2 つの成分が混ざった単一のものしか決定されていなかったが、本研究では 2 つの成分についてそれぞれ個別に ANC を決定する。

(${}^9\text{C}, p+{}^8\text{B}$) の解析には、核力分解と Coulomb 分解、および共鳴状態と非共鳴状態を統一的かつ正確に取り扱うことが可能な連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC)[4,5] を用いる。 p -標的核間、 ${}^8\text{B}$ -標的核間の相互作用には Melbourne の有効相互作用 [6] を用いた微視的光学ポテンシャルを採用する。

本講演では、核力分解と Coulomb 分解の干渉の効果についても言及し、先行研究の結果との比較を行う。

References

- [1] D. Beaumel *et al.*, Phys. Lett. B **514**, 226, (2001).
- [2] L. Trache, F. Carstoiu, A. M. Mukhamedzhanov, and R. E. Tribble, Phys. Rev. C **66**, 035801, (2002).
- [3] T. Motobayashi, Nucl. Phys. A **718**, 101c-108c, (2003).
- [4] M. Kamimura, M. Yahiro, Y. Iseri, Y. Sakuragi, H. Kameyama and M. Kawai, Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 89, 1, (1986).
- [5] N. Austern, Y. Iseri, M. Kamimura, M. Kawai, G. Rawitscher and M. Yahiro, Phys. Rep. **154**, 125, (1987).
- [6] K. Amos, P. J. Dortmans, S. Karataglidis, H. V. von Geramb and J. Raynal, Adv. Nucl. Phys. **25**, 275, (2000).

TDHF 計算による核子移行反応の記述

筑波大物理^A, 筑波大計算セ^B ○ 関澤 一之^A, 矢花 一浩^{A,B}

我々は量子多体系で実現される構造・ダイナミクスを微視的に記述し、定量的に理解することを目指している。本研究では、時間依存 Hartree-Fock 法 (TDHF) を用いた原子核衝突に伴う核子移行反応の解析を行うことで、量子多体系のダイナミクスを微視的に理解することを試みる。

TDHF 計算による原子核衝突の研究は 1970 年代から行われ、現在では計算機の発達に伴い、対称性を全く課さない三次元実空間の計算を実行できるようになった。これまでの TDHF を用いた研究では、主に核融合反応や深部非弾性散乱等、Coulomb 障壁に比べ高い入射エネルギーの衝突に伴う、終状態を特定しない平均化された量についての計算がなされてきた。これに対し、TDHF 計算によって核子移行反応確率を計算するためには、ある衝突径数の衝突に対し、移行核子数毎の反応確率を求める必要がある。

従来、多価イオン衝突に伴う電子移行反応に対し、反応確率を計算する方法が知られている [1,2]。しかし、この方法は 2^N (N は全粒子数) に比例して計算コストが増大してしまうため、この方法を原子核衝突に対して適用した詳しい研究はなされてこなかった。一方、ごく最近、C. Simenel によって粒子数射影演算子を用いた方法が提案された [3]。両者は解析的に等価であるのだが、後者の方が圧倒的に計算コストが少なく、これにより TDHF 計算により重イオン衝突に伴う核子移行反応確率を現実的計算コストで実行することが可能となった。TDHF 計算によって Coulomb 障壁近傍の入射エネルギーによる原子核衝突に伴う多核子移行反応が定量的に記述できるかどうかは、TDHF が核反応機構に関するパラメータを一切含んでいないということもあり、自明ではない。そこで我々は、実験的に多核子移行反応が観測されている $E_{\text{lab}} = 170$ [MeV] の $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ の原子核衝突の TDHF 計算を実行し、得られた終状態の波動関数に対し粒子数射影の方法を適用することによって核子移行反応の断面積を求め、実験値との比較を行った。

本公演では、まず、終状態の多体の波動関数から移行核子数毎の反応確率を計算する方法を紹介する。そして、その方法を TDHF 計算によって求められた終状態の波動関数に適用し、得られた核子移行反応断面積と実験値との比較を行い、それらの結果について議論する。

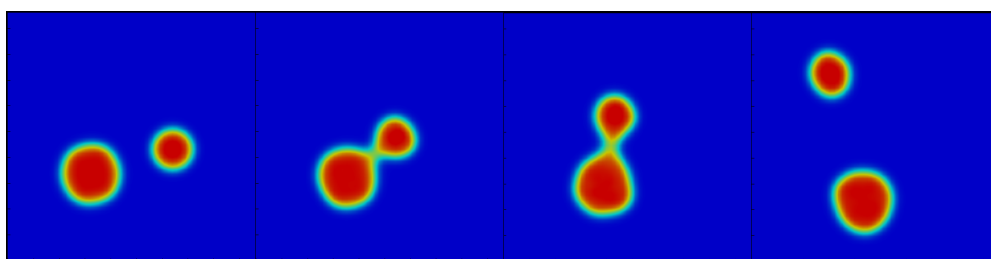


図 1 $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$ 原子核衝突の TDHF 計算における密度分布の時間発展の様子 (xy 平面, 重心系, 左からそれぞれ $t = 0, 20, 40, 100$ [fm/c])

参考文献

- [1] H J Lüdde and R M Dreizler, J. Phys. B 16, 3973 (1983).
- [2] R. Nagano, K. Yabana, T. Tazawa, and Y. Abe, Phys. Rev. A, 62, 062721 (2000).
- [3] C. Simenel, Phys. Rev. Lett. 105, 192701 (2010).

低密度核物質の非一様構造による 3 次元結晶

岡本 稔^{A,B}, 丸山敏毅^B, 巽 敏隆^C, 矢花一浩^{A,D}

筑波大学^A, 日本原子力研究開発機構^B, 京都大学^C, 筑波大学計算科学センター^D

飽和密度以下の中性子物質や超新星物質では、奇妙な形の構造が現れる事は 1980 年代ごろから予言されてきた。その形状がスパゲッティ (棒状)・ラザニア (板状) などに似ている事から、このような非一様構造を原子核のパスタ構造と呼んでいる。パスタ構造は、一様物質とは異なる状態方程式を与えたり、ニュートリノの透過性をはじめとする物質の性質に影響を当ると考えられている。そのため、核物質のパスタ構造は様々な手法を用いて研究されてきた。原子核のパスタ構造の研究の中で良く用いられてきた近似に、空間対称性を仮定する Wigner-Seitz cell 近似がある。これによって全ての計算を 1 次元の計算に帰着させることが可能で、計算時間を大幅に減らす事が出来る。一方、空間対称性を課しているために得られる構造に対して強い制約を与える可能性もある。従来のパスタ構造以外の可能性も指摘されている。

近年の計算機性能の発展に伴って、対称性を課さない空間 3 次元での計算が可能となっている。本研究では相対論的平均場模型を用いて Thomas-Fermi 近似を課した上で零温度・低密度核物質の 3 次元非一様構造の詳細な計算を行なった。

今回の発表では様々な陽子含有率に対して行なった 3 次元の計算による結果と Wigner-Seitz cell 近似を用いた場合との定量的な比較、そして新たに得た核物質の状態方程式について報告する。また、空間 3 次元計算を行なうことによって得られたパスタ原子核とその結晶構造、新たなパスタ構造の可能性についても触れていきたい。

題目 : Chiral Random Matrix Theory の高密度 2 color QCD への応用 (レビュー)

発表者氏名 : 酒井俊太郎

共同研究者 : レビュー発表のため無し

所属 : 京都大学 理学研究科 物理学第二教室 原子核理論研究室

概要 :

カイラルランダム行列理論は QCD のディラック演算子のもつ対称性のみを残してその行列要素をランダムに扱った理論である。

ランダム行列理論から示唆されるようにディラック・スペクトルを平均準位間隔のスケールに変換したもの (ミクロスコピック・ディラック・スペクトラル) は普遍的であると予想され、実際真空では lattice QCD の数値計算により、それが正しく再現されることが確認されている。

本発表は、高密度領域にランダム行列理論を適用した研究をレビューする。

現在のところ、3-color QCD の有限密度領域では第一原理計算は符号問題

のため不可能であるが、低温高密度の QCD ではカラー超伝導といった、低密度とまったく挙動の異なる現象が予想されている。この研究では、(数値計算可能な) 2-color QCD の高密度領域でカイラルランダム行列理論を構成し、それを高密度での chiral Lagrangian と比較することで今回構成したカイラルランダム行列理論によって 2-color 高密度領域が記述できるということを、ランダム行列理論の基礎的な部分を交えながらレビューする。

なお、発表内容は、T. Kanazawa, T. Wettig and N. Yamamoto, "Chiral random matrix theory for two-color QCD at high density," Phys. Rev. D 81, 081701 (2010) のレビューをおこなう。

ランダム行列模型によるカイラル凝縮相及び CFL 相の記述

発表者：山崎加奈子 (東京大学 理学系研究科)

共同研究者：佐野崇 (東京大学 理学系研究科)

有限温度・有限密度 QCD の相構造を解明することは、QCD の重要な課題の一つである。QCD は、カイラル凝縮相、クォーク・グルーオン・プラズマ相、カラー超伝導相など様々な相構造を持つと予想されていて、格子 QCD シミュレーションや有効模型を用いた研究が数多く成されている。格子 QCD シミュレーションは QCD の第一原理計算であるが、有限密度では符号問題により計算が困難になるため、有効模型による解析が重要になる。本研究では、ランダム行列模型を用いて有限温度・有限密度 QCD 相構造の解析を行った。ランダム行列模型は、ディラック演算子をカイラル対称性を持つランダム行列に置き換えた模型であるため、カイラル対称性の破れた相と回復した相を記述することができる。また 2 フレーバーでは、Vanderheyden, Jackson によって、ダイクォーク凝縮相の記述が可能な模型への拡張がされている [1, 2]。我々はこの Vanderheyden-Jackson の模型をさらに 3 フレーバーに拡張し、 u, d, s クォークの質量が等しい場合と、 s クォークの質量が u, d クォークの質量に比べて大きい場合について、温度-化学ポテンシャル平面上にどのような相が現れるかを調べた。また、クォークの質量を大きくしたときに相図がどう変化するかについても調べた。その結果、 u, d, s クォークの質量が等しい場合には、低密度側ではカイラル凝縮相が現れ、高密度側では color-flavor locked (CFL) 相が現れた。また、クォークの質量を大きくするとカイラル凝縮相から CFL 相への相転移線が高密度側にずれるという結果が得られた。 s クォークの質量が u, d クォークの質量に比べて大きい場合は、低密度側ではカイラル凝縮相が現れ、密度を大きくしていくと ud クォークだけが凝縮するダイクォーク凝縮 (2SC) 相が、さらに高密度にすると CFL 相が現れた。本講演では、模型の 3 フレーバーへの拡張方法及びその模型を用いて得られた相図について報告する。

参考文献

- [1] B. Vanderheyden, A. D. Jackson, Phys. Rev. D61, 076004 (2000).
- [2] B. Vanderheyden, A. D. Jackson, Phys. Rev. D62, 094010 (2000).

ゼロおよび純虚数化学ポテンシャルにおける、 3 フレーバー QCD のクォーク質量依存性

佐々木 崇宏 (九大院理)

境 祐二 (九大院理), 河野 宏明 (佐賀大理工), 八尋 正信 (九大院理)

現在のクォークは核子中に閉じ込められているが、宇宙初期の高温状態では閉じ込めから解放されたプラズマ状態にあった。これらの状態間で起こった相転移を理解するためには、有限温度 (T)・有限クォーク化学ポテンシャル (μ) での QCD 相図を解明する必要がある。しかし、QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算が有限 μ 領域で実行困難であるため、 $T - \mu$ 平面の QCD 相図はまだ確定していない。

QCD 相図の解析には、Polyakov-loop extended Nambu-Jona-Lasinio 模型 (PNJL 模型) などの有効模型が用いられている [1]。このような有効模型を用いる際には、その信頼性を確かめることが重要である。そこで我々は、純虚数化学ポテンシャル領域等における格子 QCD 計算の結果を用いて、模型の妥当性を評価する試みを行っている。このような有効模型を用いることで、有限 μ 領域の QCD 相図に対して信頼性の高い予言ができると期待される。

本研究では、有効模型を評価するための格子計算として、ゼロ化学ポテンシャル領域 [2] と純虚数化学ポテンシャル領域 [3] における相転移次数のクォーク質量依存性に着目した。Entanglement PNJL 模型 [4] を用いてこの依存性を計算した結果、格子計算から得られる質量依存性を定性的に再現できることが分かった [5]。通常の PNJL 模型では同様の振る舞いを再現できないため、EPNJL 模型への拡張は格子計算の再現に対して重要である。

参考文献

- [1] K. Fukushima, Phys. Lett. B **591**, 277 (2004); Phys. Rev. D. **77**, 114028 (2008).
- [2] P. de Forcrand and O. Philipsen, Phys. J. High Energy Phys. **01**, 077 (2007).
- [3] P. de Forcrand and O. Philipsen, Phys. Rev. Latt. **105**, 152001 (2010).
- [4] Y. Sakai, T. Sasaki, H. Kouno and M. Yahiro, Phys. Rev. D **82**, 076003 (2010).
- [5] T. Sasaki, Y. Sakai, H. Kouno and M. Yahiro, arXiv:hep-ph/1105.3959 (2011).

PQM 模型を用いた ブラックホール形成過程・中性子星における QCD 相転移

京大理^A、京大基研^B、沼津高専^C
上田 宏史^A、中野 嵩士^{AB}、Marco Ruggieri^B、
大西 明^B、住吉 光介^C

中性子星の内部では超高密度物質が、超新星爆発・重力崩壊によるブラックホールの形成過程では超高温・高密度物質が生成されるため、クォーク物質の生成が期待されている。コンパクト天体現象では、荷電中性条件からクォーク毎に化学ポテンシャルの異なる非対称核物質 [$\delta\mu = (\mu_d - \mu_u)/2 \neq 0$] が生成される。このため、QCD 相転移を議論するには、アイソスピン化学ポテンシャルを含む 3 次元 ($T, \mu, \delta\mu$) QCD 相図を考える必要がある。

これまで我々は、ベクトル結合を取り入れたポリヤコフ・クォーク・メソン (PQM) 模型 [1] を用いて、3 次元 (温度 T , バリオン化学ポテンシャル μ_B , アイソスピン化学ポテンシャル $\delta\mu$) の QCD 相図を求め、ブラックホール形成過程で生成される物質 [2] の熱的変数 ($T, \mu_B, \delta\mu$) と比較することにより、この現象での QCD 相転移について議論してきた。この結果、ブラックホール形成過程で生成される物質の温度・化学ポテンシャルが QCD 臨界点に達する可能性を示唆した [3]。

今回の発表では、中性子星内部で生成される低温・非対称物質 [4] の QCD 相転移に着目する。現時点での結果として、中性子星の内部で QCD 相転移線の $\delta\mu$ 依存性のため、クォーク物質への相転移が従来考えられていた 1 次相転移ではなく、連続相転移になる可能性があることが分かっており、このことについて議論する予定である。

[1] B. J. Schaefer et al., Phys. Rev. D 76, 074023 (2007) ;

V. Skokov et al., Phys. Rev. D 82, 034029 (2010).

[2] K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki and S. Chiba, Phys. Rev. Lett. 97 091101 (2006).

[3] A. Ohnishi, H. Ueda, T. Z. Nakano, M. Ruggieri, K. Sumiyoshi, arXiv:1102.3753[nucl-th].

[4] A. Ohnishi, D. Jido, T. Sekihara and K. Tsubakihara, Phys. Rev. C 80, 038202 (2009).

発表タイトル [Heavy ion collisions における quark number scaling]

発表者氏名 [市原輝一]

所属 [京都大学 原子核理論]

講演概要

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) における重イオン衝突実験において、QGP (クォーク・グルオン・プラズマ) が実現される。クォークは単独で観測する事はできないので、生成された粒子を観測し、QGP がどのような状態なのかを解析してきた。

RHIC のデータによると、横運動量 PT が高い領域において、粒子生成が陽子-陽子衝突に比べて金-金衝突の方が強く抑制されるという事が示された。これは jet quenching と呼ばれる現象で、高いエネルギーを持ったパートンが、QGP 媒質を通過する際にエネルギーを失うという現象である。さらにこの jet quenching は、メソンの方がバリオンに比べて強く抑制されるという事が判明した。この現象は、従来の描像である、摂動論的 QCD によるパートンが壊れてハドロンが生成されるという fragmentation mechanism では十分に説明できない。

そこで、構成クォーク数に着目した recombination model が考案された。このモデルは、熱化したパートン相において、クォーク・反クォークが再結合するという描像である。この新たなモデルを取り入れる事によって、quark number scaling と呼ばれる、物理量がメソンやバリオンを構成しているクォークの数によってスケールされるという現象がうまく説明される事をみる。

本講演では、recombination model の formalism と、quark number scaling について、R. J. Fries, B. Muller, S. A. Bass and C. Nonaka *PHYSICAL REVIEW C* 68, 044902 (2003) の論文のレビューを行う。

線形シグマ模型を用いた ‘WZW’ 項の構成と 有限温度における $\pi \rightarrow \gamma \gamma$ の解析

発表者：福田恭平 共同研究者：原田正康
所属：名大理

講演概要

現在、QCD 物質の相図の解析が理論と実験の両方から進められている。本研究も QCD 相図の相転移現象を理論的に解析することを目標にしている。特に、カイラルアノマリーを用いた有効模型を使うことによって、ゼロ密度におけるハドロン相から QGP 相への相転移のシグナルを評価した。

QCD の性質であるカイラルアノマリーの存在とカイラル対称性の自発的破れから次のような事実がある。一般に中性パイ中間子の崩壊率($g_{\pi\gamma\gamma}$)は低エネルギー極限においてアノマリーの係数とパイ中間子の崩壊定数のみで表すことができる。ただし、これはゼロ温度における議論であって有限温度ではそのまま適用することはできない。実際、 $g_{\pi\gamma\gamma}$ とアノマリーの係数の間の関係は、ゼロ温度で決まっていた関係式からずれてしまう。本研究ではこの一般的な関係式に含まれる未知数を具体的な有効模型を用いて計算する。そのために、まず QCD のカイラルアノマリーを再現する有効模型を構成しなければならない。パイ中間子のみを含む非線形模型の場合、アノマリー方程式を解くことで得られている (WZW 項)。さらに、WZW 項を含む有効模型を有限温度に拡張した計算も行われている。しかし、この模型はハドロン相から QGP 相への相転移を評価するときには不十分である。なぜなら、パイ中間子のカイラルパートナーであるシグマ中間子の影響を取り入れていないからである。本研究はこの問題点を解決するため、パイ中間子とシグマ中間子を含む線形模型をもとにした有効模型の構成を試みた。さらに、構成された有効模型を用いて $g_{\pi\gamma\gamma}$ のゼロ温度からのずれをシグマ中間子の効果を残した形で計算した。また、先行研究の非線形模型における結果と比較して結果が模型に依存するかどうかを調べた。

その結果、相転移のシグナルとして $g_{\pi\gamma\gamma}$ の温度変化があることがわかった。しかし、シグナルとしては変化の度合いが小さいので精密な実験が待たれる。また、シグマ中間子の質量を重くした極限で非線形模型のときの結果と比較した。パイ中間子の崩壊定数については非線形模型のときの結果と一致することが確認されていたが、 $g_{\pi\gamma\gamma}$ については一致しないことがわかった。したがって、中性パイ中間子の崩壊過程に対して低エネルギー定理に対応する低温度定理が存在しないということが確認できた。

QCD sum rule による 有限温度におけるクォークコニウムの MEM 解析

発表者 鈴木 溪
共同研究者 Philipp Gubler, 岡 真
所属 東京工業大学

近年の量子色力学 (QCD) 研究によると、臨界温度以上の高温領域において、カラーに関するデバイ遮蔽効果によりクォーク間に働く遠距離力は遮断され、クォークコニウム (重クォークとその反クォークの束縛状態) がクォークの非閉じ込め状態へ相転移を起こすことが予想されている。重イオン衝突実験において、この現象は、 J/ψ や Υ などのクォークコニウムの収量抑制として観測され、ハドロン物質からのクォーク・グルーオン・プラズマの形成を示唆する証拠として考えられている。

QCD sum rule は QCD の非摂動領域の性質を解析する手法の一つであり、クォーク凝縮やグルーオン凝縮などの演算子積展開 (OPE) とハドロンのスペクトル関数を結びつける関係式から、ハドロン質量や崩壊幅といった物理的な値を引き出すことができる。さらに、クォーク凝縮やグルーオン凝縮は温度依存性・密度依存性が知られているため、これらの値を用いることで、QCD sum rule を有限温度・有限密度におけるハドロンの振る舞いを解析する方法として適用することができる。

本研究では、QCD sum rule の解析に最大エントロピー法 (MEM) を適用し、重クォークのクォークコニウム、特にチャーモニウムとボトモニウムについて、有限温度におけるクォークコニウムのスペクトル関数を解析する。この解析では、ゼロ温度において現れるスペクトル関数のピークに対して、温度依存性を加えることで、ピークが次第に消失していく様子を再現し、チャーモニウム・ボトモニウムの各チャンネル (ベクトル・スカラー・擬スカラー・軸性ベクトル) の消失温度を導出する。

カイラル摂動論から見る核力

柄沢 真太郎 (京大理)

QCD とは quark 間に働く強い力を記述する理論であるが、その漸近的自由性により低エネルギー領域では結合定数が発散してしまうという困難を持っている。このため、QCD の枠組みでは、低エネルギー領域では結合定数の次数による摂動展開を行うことができない。そこで、従来手法とは異なる漸近展開の枠組みが必要になる。Chiral Perturbation(ChPT) とは、S-matrix を運動量で展開する、通常の方法とは異なる低エネルギーでの摂動展開の手法である。また、ChPT を実行するにあたり、土台となる場の理論の構成も重要である。quark 閉じ込め現象のために観測される粒子は hadron になあるが、QCD の枠組みで hadron を直接扱うのは簡単ではない。そこで必要となるのは、QCD の持つ対称性として重要な chiral 対称性を持ち、しかも hadron を基本粒子として扱うような有効場の理論である。今回は、Chiral 対称性とその破れから来る NG boson(pion) 及び核子を基本粒子として記述する、非線形表現に基づいて構成された有効場に ChPT を適用する。これにより核子間に働く力(核力)は、pion exchange(PE) の立場で記述され、高次数では複数の PE も現れる。この描像により、ChPT は中間子理論の自然な拡張であることが暗示される。今回レビューする論文 (D.R.Entem and R.Machleidt PHYSICAL REVIEW C 68,041001(R) Accurate charge-dependent NN potential at 4th order of ChPT) では、ChPT の高次の寄与に加えて、核子間の電磁相互作用による寄与も考慮に入れて計算する。電磁相互作用は、有効場を構成する際に核子相互作用項をゲージ化することで得られる。これらの下で得られた核子間の potential が、実験によって得られた核子間の potential と非常に一致していることを見る。

核物質中のカイラル凝縮

郷田創一郎^{○1} 慈道大介²

¹ 京都大学理学研究科 ² 京都大学基礎物理学研究所

低エネルギー QCD の特徴としてカイラル対称性の自発的破れがあるが、我々は原子核のようなゼロ温度・有限密度とみなせる系で起こるカイラル対称性の部分的回復に注目する。この現象はカイラル対称性の自発的破れに伴うハドロンの質量生成機構の理解に本質的であり、その証拠をハドロンの性質の変化から導きだすことは理論・実験ともに非常に興味深い問題となっている。そのような背景から、近年なされた興味深い実験の 1 つが π 中間子原子の深い束縛状態に関する精密分光実験であり [1]、その束縛エネルギーと崩壊幅から崩壊定数の密度変化が定量的に見積もられた。

今回の研究では、媒質中でのカイラル凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle^* = \langle \bar{u}u + \bar{d}d \rangle^*$ がどのような密度依存性を示すのか、それがどのような物理的過程から来るのかを明らかにする。 $\langle \bar{q}q \rangle^*$ の密度変化を求める先行研究としては、線形密度近似による解析 [2] や、Hellmann-Feynman の定理とカイラル有効理論を用いた解析 [3] などがあるが、我々は $\langle \bar{q}q \rangle^*$ が満たす QCD Ward-高橋恒等式 [4] と媒質中のカイラル摂動論 [5,6] を用いる。この関係式の利点はあらゆる密度中で成り立つこと、更にこの式から π 中間子原子の解析に用いられる散乱長とカイラル凝縮の関係が得られるため、観測量との比較がしやすいと期待されることが挙げられる。また媒質中のカイラル摂動論を用いる理由は、ダイアグラムが組織的に運動量でオーダーカウンティングされており、物理的過程の寄与の大きさを分類できることである。今回の解析により、まずよく知られている線形密度近似の結果を再現し、さらにそれを超えた寄与を得るために解析すべきダイアグラムの分類をおこなった。我々の解析によりカイラル極限においては核物質に対する Goldberger-Treiman 関係式から、カイラル凝縮に媒質効果を与える物理的過程は次の 2 つであることを明らかにした。1 つは核物質が π ループによって準粒子となる効果、もう 1 つは核子間の相関である。このように、我々の解析からも核物質中のカイラル凝縮には π 中間子と核子の多体効果が重要な役割を果たしていることが理解でき、 $\langle \bar{q}q \rangle^*$ を定量的に求めるには、カイラル有効理論を用いて束縛エネルギーのような核物質の性質を再現することが必要不可欠であることが示唆される [3]。すなわちこの解析により、核物質の定量的記述はカイラル対称性の自発的破れと密接に関わるものであることを明らかにした。

参考文献

- [1] K. Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. 92, 072302 (2004)
- [2] E. G. Drukarev and E. M. Levin, Prog. Part. Nucl. Phys. 27, 77 (1991)
- [3] N. Kaiser, P. de Homont and W. Weise, Phys. Rev. C77 (2008) 025204.
- [4] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Lett. B 670 ,109(2008)
- [5] J. A. Oller, Phys. Rev. C 65 ,025204(2002)
- [6] U. G. Meissner, J. A. Oller and A. Wirzba, Annals Phys. 297 ,27(2002)

非一様なカイラル凝縮の構造機構

菅沼瑞奈
東京理科大学

我々の世界で真空と定義されているものはクォーク・反クォークの対で満たされている。南部と Jona-Lasinio が示したように、このクォーク・反クォークの対が凝縮(カイラル凝縮) することによりカイラル対称性は自発的に破れ素粒子は質量を持つ。空間に非一様な結晶構造のような状態をとるほうが、従来考えられてきた構造と比べより安定な状態ではないのかと考えられている(これを chiral density wave ; CDW 相 とよぶ)。

ここでは非一様なカイラル凝縮に着目し正則化の方法として 3次元運動量カットオフを導入し検証をおこなった。南部と Jona-Lasinio の模型(NJL model) を用いて、カイラル凝縮が非一様状態 ; $\langle \bar{\psi}\psi \rangle = \Delta \cos(\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})$, $\langle \bar{\psi}i\gamma_3\tau_3\psi \rangle = \Delta \sin(\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})$ であることを仮定し、有限密度、有限温度のもとでどのような状況下で非一様なカイラル凝縮が実現するかについて言及し、相転移の性質がどのように変わるかについて検証する。

- [1] E. Nakano and T. Tatsumi, Phys. Rev. D **71**, 114006 (2005).
- [2] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. **122**, 345 (1961).
- [3] Jens O. Andersen and Tomas Brauner Phys. Rev. D **81**, 096004 (2010).
- [4] M.Buballa, Phys. Reports 407 (2005) 205-376

Quarkyonic Matter

日高 義将 (理研)

共同研究者: 古城 徹 (RBRC), 福嶋 健二 (慶応大)
Larry McLerran (RBRC, BNL), Robert D. Pisarski (BNL)

高温、高密度の極限状態でのハドロンの性質を明らかにする事はハドロ
ン物理のひとつの大きな課題である。本講演では、低温高密度領域に
注目し、近年 L. McLerran と R. Pisarski らによって新しく提唱された
Quarkyonic 相と呼ばれる相についてレビューする。Quarkyonic は quark
と baryonic の造語であり、quark がフェルミ海を持つほど高密度にもか
かわらず、励起が baryonic (または mesonic) である閉じ込め相的な 2 つの
性質を表す。QCD のカラーが大きい極限においてこの Quarkyonic 相を
定式化し、この高密度でありながら閉じ込め相であるという一見相反す
る状態が実現し得ることを見る。また、Quarkyonic 相でどのようなカイ
ラル対称性が実現しうるか議論し、最近の発展であるカイラル対称性が
非一様に自発的に破れる相についても議論する。

particle-rotor model を用いた ^{31}Ne のクーロン分解の解析

浦田靖子、萩野浩一、佐川弘幸^A 東北大学、会津大学^A

Coulomb dissociation of ^{31}Ne with particle-rotor model

Yasuko Urata, Kouichi Hagino and Hiroyuki Sagawa^A

Tohoku University, University of Aizu^A

密度分布が薄く広がっているハロー構造は、弱束縛中性子過剰核に特徴的な性質であるが、これは valence 中性子が s または p 軌道を占有することによって作られる。ハロー構造を構成する valence 中性子の波動関数が空間的に広がっている結果として、低エネルギー領域での電気双極子 (E1) 遷移が大きくなる。このような励起はソフト E1 励起と呼ばれる。

2009 年に RIBF で、 ^{31}Ne について大きなクーロン分解反応の断面積が測定されたが、これはソフト E1 励起を示唆している。本講演では、このハロー核の候補 ^{31}Ne について議論する。従来の球形の殻模型では、基底状態での ^{31}Ne の 21 番目の中性子は $1f_{7/2}$ 軌道をとる。そのため、 ^{31}Ne を平均場の描像で理解するには、変形したポテンシャル中で valence 中性子が、 s または p 軌道の支配的な一粒子準位を占めることが必要である。そこで Hamamoto によって、変形ポテンシャル中の一粒子準位であるニルソンダイアグラムに基づいた ^{31}Ne の基底状態の議論がなされた。

我々は、 ^{31}Ne が変形して回転する芯核 ^{30}Ne と 1 中性子からなることを想定して particle-rotor model を採用し、Hamamoto のニルソンモデルで無視された芯核 ^{30}Ne の回転励起エネルギーを考慮した計算を行う。実際、 ^{30}Ne は 0.801MeV と 2.24MeV に励起状態が観測されていて、それぞれ 2^+ と 4^+ の状態に対応することが期待される。このモデルによって計算した波動関数に対して E1 励起の断面積を計算し、RIBF の実験結果と比較する。

我々の計算では、芯核の回転励起エネルギーを考慮した結果、変形度 $\beta_2 \sim 0.55$ での $I^\pi=3/2^-$ の配位が除外される。また実験値をよく再現するのは、 $\beta_2 \sim 0.2$ で、 $I^\pi=3/2^-$ の配位である。しかし、大きな変形 ($\beta_2 \sim 0.95$) とオプレート変形 ($\beta_2 \sim 0.35$) での $I^\pi=1/2^+$ の配位の可能性も否定できない。これらの 3 つの配位に対して、終状態で芯核が特定のスピン・パリティをもつものに分解するクーロン分解の断面積の計算も行う。

変分原理に基づく Dirac 方程式の解法

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 谷村雄介, 萩野浩一

変分原理は量子力学の諸問題を解く際に広く利用されている原理である。この原理は、非相対論的なハミルトニアン H の任意の状態についての期待値が、基底状態のエネルギーよりも必ず大きいことを保証している。非相対論的な系において、この原理は1粒子系から多体系まで、また精密計算にも近似計算にも適用が許される汎用性の高い原理である。もちろん、量子多体系として記述される原子核もその例外ではない。

相対論的な系には正のエネルギーと負のエネルギー両方の状態があり、物理的な基底状態は正エネルギーの状態のうち一番エネルギーが小さなものである。非相対論のときと同じようにエネルギーを最小化して基底状態を求めようとする、負のエネルギーの状態が変分の解に混ざることにより、しばしばエネルギーが真の固有値を下回ってしまう。この現象は量子化学の分野において“variational collapse”または“finite basis-set disease”とよばれ、およそ50年前から知られていた。80年代を中心に、原子や分子に対する相対論的 Hartree-Fock 計算の分野で、この問題を避けるための対策について盛んに研究がおこなわれてきた [1, 2]。

原子核物理の分野でも相対論的平均場 (RMF) 計算は広く積極的に利用され、多くの成功を収めている。しかしその一方で、variational collapse の存在によって、非相対論的な枠組みに比べて計算の自由度が制限されているのも事実である。非相対論的な平均場計算では、原子核の形に対称性を仮定しない、座標表示を用いた3次元実空間における計算が実現されている [3]。その際、虚時間発展法を用いたエネルギーの最小化がおこなわれているが、相対論的平均場計算では variational collapse のために同じ方法が使えず、3次元の計算が難しいのが現状である。

本研究では、 $1/H$ に対して成り立つ厳密な変分原理 ([2] および図1参照) に基づき、 $\langle H^{-1} \rangle$ を最大化することにより variational collapse を回避する Dirac 方程式の解法を開発した。本講演では、この方法で中心力ポテンシャル中の Dirac 方程式を解いた結果を紹介し、3次元の RMF 計算への応用可能性を議論する。

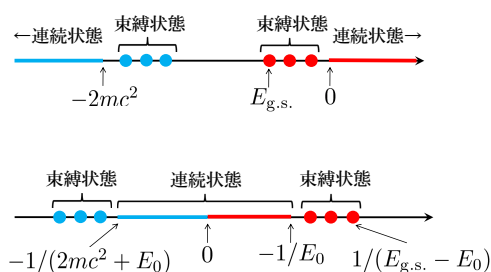


図 1: H (上) と $1/(H - E_0)$ (下) の典型的なスペクトル。赤は Fermi sea、青は Dirac sea の状態を表す。 H そのものとは異なり $1/(H - E_0)$ は有界なスペクトルを持つ。

参考文献

- [1] H. Wallmeier and W. Kutzelnigg, Chem. Phys. Lett. **78**, 341 (1981) ; H. Wallmeier and W. Kutzelnigg, Phys. Rev. A **28**, 3092 (1983) ; R. E. Stanton and S. Havriliak, J. Chem. Phys. **81**, 1910 (1984) ; Y. Ishikawa, R. C. Binning, Jr., K. M. Sando, Chem. Phys. Lett. **101**, 111 (1983)
- [2] R. N. Hill and C. Krauthauser, Phys. Rev. Lett. **72**, 2151 (1994)
- [3] K. T. R. Davies, H. Flocard, S. Krieger, and M. S. Weiss, Nucl. Phys. **A342**, 111 (1980)
- [4] K. Hagino and Y. Tanimura, Phys. Rev. C **82**, 057301 (2010)

有限密度におけるカイラル凝縮の結晶化

岩田裕平、鈴木克彦

東京理科大学大学院理学研究科

有限密度 (有限化学ポテンシャル) におけるカイラル凝縮は、クォークの化学ポテンシャルが反クォークの化学ポテンシャルに対して大きくなり、一様なカイラル凝縮が不安定になるため空間あるいは運動量空間で非一様な凝縮に移行する可能性が期待される。このような凝縮は物性理論では強磁場中の超伝導体や極低温原子気体の超流動において既に考えられており、前者は強磁場にスピニングレットが応答して起きるスピアンバランスによって、後者は異法的な光学格子ポテンシャルとアップ・ダウンスピン数の違いによって引き起こされる。非一様な凝縮が存在すれば、宇宙では中性子星の核程度の密度を持つ領域、地上では重イオン加速器実験によって実現される領域での物理に影響を与える可能性がある。故にこのような凝縮を考えることは未だ実験的・理論的に理解が浅い有限密度領域における物理を理解してゆく上で重要である。

非一様な凝縮に対し、3+1 次元 NJL model と平均場理論を用いて解析しようとしてもエネルギー固有値を求めるのは難しく、非常に特殊な場合を除いては一様な凝縮のように熱力学ポテンシャルを単純な計算で求めることは出来ない。そこで我々は D.Nickel (2009) が行ったように 1+1 次元 NJL model で Gap 方程式の解が求まっている事を利用し、非一様性が 1 次元方向のみであると仮定した上で、Lorentz boost を使って 3+1 次元の熱力学ポテンシャルを求める。今回、非一様な凝縮としては FF 状態 (chiral density wave) と呼ばれる運動量空間で非一様な凝縮を仮定する。ある温度・化学ポテンシャルの下で実現し得る凝縮を調べるためには変分法を用い、熱力学ポテンシャルを最小にするような凝縮を探す。結果として、温度と化学ポテンシャルに対する相図上で非一様な相が実現する事を示す。

参考文献

- [1] D. Nickel, Phys. Rev. D **80**, 074025 (2009).
- [2] G. Başar, G. V. Dunne, and M. Thies, Phys. Rev. D **79**, 105012 (2009).

Hadrons in AdS/QCD

東京理科大学大学院 理学研究科 物理学専攻 小川元、鈴木克彦

QCD はクォーク間の強い相互作用を記述する非可換ゲージ理論であり、低エネルギーにおいて摂動論が使えないという難点をもつ。しかし近年、4次元強結合のゲージ理論は5次元弱結合の古典重力理論によって記述できる可能性 (AdS/CFT 対応) が示唆された。これを QCD に応用すると、直接解析することの難しい QCD を5次元の古典理論で解析することが可能となる。本研究では Son-Stephanov による現象論的なボトムアップアプローチを用いて5次元の理論を構築して、SU(2)フレーバーの軽いメソン、バリオンの静的な物理量を記述することを目指す。

メソンセクターでは Erlich et al.[1]に従い、5次元作用の自由度としてパイオン、及びベクトル、軸ベクトルのゲージ場を考慮したハードウォールモデルを採用する。クォーク質量やカイラル凝縮などの基本的な3つのパラメータを用い、 π 、 ρ 、 a_1 メソンの質量、崩壊定数、結合定数を計算できる。

続いてバリオンについては、Hong et al.の方法[2]を用い右巻き、左巻きに対応する2つの5Dバルクスピノルを導入する。2つの場はカイラル凝縮に対応するバルクスカラー場を通して結合し、カイラル対称性が破れてパリティ正、負のバリオンが出現する。適切な境界条件のもとでスピノルに対する固有値方程式を解くとバリオンの質量、メソンとの結合定数が決定できる。

メソン、バリオンについて計算値と実験値を比較するとともに、メソン・バリオン間でのパラメータの整合性を議論する。また展望として弱い相互作用への応用について触れる。

[1] J. Erlich et al. Phys. Rev. Lett. 95, 261602 (2005).

[2] D. K. Hong et al. Phys.Lett. B646, 165 (2007).

中性子星の性質と流体シミュレーション

醍醐孝, 鈴木克彦

東京理科大学

中性子星とは、恒星が最期に超新星爆発をした後に残った星である。質量が太陽質量の2倍程度で、半径はわずか半径10[km]程度の非常に密度の高い星である。このような質量の大きい星は当然重力で収縮するが、その力を内部圧力として支えているのは縮退した中性子で、この二つの力が釣り合うことで中性子星が存在している。つまり、マクロな中性子星という天体の質量や半径という情報から、中性子星内部の核物質の状態や性質に制限を与え新たな知識を得ることと、それとは逆に加速器散乱実験などを通して観測・計算した核力といったミクロな情報を用い、中性子星全体の性質を予言することが可能である。

中性子星は高密度状態であることから超流動状態に相転移すると予想される。中性子星内でも超流動性を考慮して計算を行うために、本研究では「粒子法」という流体シミュレーションの一種を採用し、超流動性が中性子と星全体の安定性にどのように影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的としている。そのステップとして、動径方向から重力を受ける自由粒子についてのシミュレーションを行った。

参考文献

[1] J.Pearson and S.Pike, The Physics of Neutron star, SYTPR(2007)