

---

## 会場 A

# 素粒子論, 理論核物理, 宇宙線・宇宙物理領域

---

### A-2 Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory

九州大学 基幹教育院<sup>A</sup>, 九州大学大学院 理学府<sup>B</sup> 大河内豊<sup>A</sup>, 笠井彩<sup>B</sup>

弦理論において、近年ストリングランドスケープという概念がホットトピックとなっている。弦理論の余剰次元をコンパクト化する方法には 10 の 500 乗ものオーダーで候補が存在することが知られている。ストリングランドスケープによるとこれらのコンパクト化は全て、仮に非摂動的に弦理論を定式化できたとしたとき、その理論のポテンシャルの異なる準安定真空に相当し、互いにポテンシャル障壁を介してつながっていると考えられる。すなわち実空間には各々の真空に対応した様々な宇宙が存在しうるため、マルチバースを仮定することになる。その中でも我々の宇宙を記述するモデルは少なくとも宇宙年齢程度の寿命を持たなければならない。しかし弦理論において準安定状態の崩壊率を見積もる際には巨視的理論などで一般的な、不純物の存在による相転移の触媒効果を考慮してこなかった。本学会では、モノポールが不純物として存在する場合の準安定なコンパクト化の崩壊を考え、弦理論においても不純物が相転移を触媒する可能性を述べる。

## A-3 $f(R)$ 重力でのポスト・ニュートニアン・パラメータ

沖縄高専<sup>A</sup>, 長岡技科大<sup>B</sup> 森田正亮<sup>A</sup>, 高橋弘毅<sup>B</sup>

遠方の Ia 型超新星の観測により明らかとなった「宇宙の加速的膨張」に対する理論の構築は、宇宙論における最も大きな課題の一つである。この加速的膨張を説明する理論の候補として、重力をアインシュタインの一般相対論から変更する「修正重力理論」があり、 $f(R)$  重力はその代表格である。

修正重力理論は宇宙の加速的膨張を説明する理論である一方、太陽系スケールでの観測、いわゆる「局所重力テスト」から強い制限を受ける。その際に「ポスト・ニュートニアン・パラメータ」と呼ばれる、弱い重力場における一般相対論からのずれを表すパラメータ  $\gamma$  (一般相対論では  $\gamma = 1$  となる) が用いられるが、 $f(R)$  重力に対するこのパラメータの値については論争がある。スカラー的自由度からくる場の実効質量が小さい場合には  $\gamma \approx 1/2$  となり、観測的制限  $|\gamma - 1| \leq 10^{-4}$  を満たせないことが比較的容易に示される。それに対して、太陽系スケールにおいて場の実効質量が大きくなる場合には、一般相対論からのずれを小さく抑える遮蔽メカニズムが働き、観測的制限を満たせる可能性が出てくる。ただし、この場合の  $\gamma$  に対する明示的な表式は得られていない。

本講演では、通常ポスト・ニュートン近似を宇宙論的な状況に拡張した「宇宙論的ポスト・ニュートン近似」を用いることにより、上述の遮蔽メカニズムが働くような  $f(R)$  重力でのポスト・ニュートニアン・パラメータが明示的かつ系統的に得られることを報告する。また、このことから  $f(R)$  重力に対して従来よりもさらに厳しい制限をつけられることを指摘する。

## A-5 最新の観測データと宇宙初期元素合成

九州大学<sup>A</sup>, 熊本大学<sup>B</sup> 一政遼太郎<sup>A</sup>, 中村理央<sup>B</sup>, 橋本正章<sup>A</sup>, 荒井賢三<sup>B</sup>

宇宙初期にビッグバン元素合成によって決まる元素組成は、その後の宇宙の元素組成に重大な影響を与えるために重要な物理量である。近年の精密な観測によって、宇宙初期に存在する元素量の比は従来よりも詳細に検討できるようになってきている。これに伴い、宇宙初期元素合成に対してさらに強い制限が加えられるようになった。特に著しい改善がみられたのは重水素の存在比であり、その不定性はおよそ 1.56% 程度と、従来の観測値とくらべ劇的に小さくなっている (Cooke et al. 2014)。また、特に重要な元素である  $^4\text{He}$  の存在比の不定性も数% まで小さくなっている (Aver et al. 2015)。今回、宇宙初期元素合成において生成されるこれら元素生成量の理論値と観測値との比較を行った。特に、宇宙初期元素合成の計算で奨励されている Descouvemont ら (2004) の核反応率と NACRE-II (2013) の反応率を用いた計算の比較、中性子の寿命の不定性の影響について議論を行う。

## A-7

### Pion凝縮によるニュートリノ放射過程を考慮した静穏期の中性子星光度と観測との比較

九大理<sup>A</sup>, 久留米工業大学<sup>B</sup>, 北海道大学<sup>C</sup> 松尾康秀<sup>A</sup>, 橋本正章<sup>A</sup>, 林田晃太郎<sup>A</sup>, 野田常雄<sup>B</sup>, 藤本正行<sup>C</sup>

中性子星 (Neutron star; NS) とは超新星爆発の後に残される天体で、その中心密度は核密度を超える。このような環境は実験室では作ることができない。従って、高密度環境での物質の性質を知るために、NSの観測と理論を比較する必要がある。

NSはしばしば恒星と連星系をなす low-mass X-ray binary(LMXB)として発見される。LMXBは、降着円盤を通して恒星からNSへ物質が降着することでX線を放射する天体であり、数年程度の周期でX線増光現象が観測される。一方、その間のX線放射が少ない時期は静穏期と呼ばれる。静穏期の中性子星は crust heating がニュートリノ放射とX線放射を合わせたものが釣り合った定常状態である考えられている。

近年、LMXBの一つであるSAX 1808-36の静穏期の光度の上限が観測から得られた。Yakovlev et al. (2003)や Heinke et al.(2007;2009)らは、この天体の光度の上限を説明するためにはkaon凝縮、pion凝縮によるニュートリノ放射では不十分であり、direct URCA過程のような強いニュートリノ放射過程が必要であることを指摘した。しかし、彼らは中性子星の構造をかなり単純化して議論していたため、より詳細なモデルと観測を比較する必要がある。

そこで我々は、一般相対論効果を取り入れた球対称進化コードを用いて中性子星の定常状態を求め、観測と比較した。その結果、Muto et al. (1993)の pion凝縮によるニュートリノ放射過程でもSAX 1808-36の光度を説明できることが分かった。この先行研究との違いは、彼らが用いた  $T_{\text{int}} - T_{\text{eff}}$  関係 (中性子星の内部温度と表面温度の関係) が原因であると考えられる。

## A-8

### 相対論的平均場理論に基づく核物質の状態方程式

九大院理<sup>A</sup>, 佐賀大院工<sup>B</sup> 管野淳平<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>B</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

核物質の状態方程式は、超新星爆発とそれに伴う中性子星の形成・冷却プロセスを理解するうえで必須の要素である。これらのプロセスの精密な理解に向け、温度・バリオン数密度・electron fractionの広い領域をカバーする状態方程式の構築が行われている。なかでも代表的なものの一つがShenらにより構築された、相対論的平均場理論に基づく状態方程式である。Shenらの状態方程式は、飽和密度における核物質の非圧縮率や対称エネルギーを実験に比べてover estimateしており、シミュレーションにおいて超新星爆発が起きにくいこと、中性子星の半径が比較的大きくなってしまふことが指摘されている。これはShenらの状態方程式がstiffであることに起因している。

本研究では、Shenらとは異なるパラメータセットを用いた、相対論的平均場理論に基づく状態方程式の構築を目指す。その第一歩として、まずゼロ温度領域において飽和密度における核物質の性質、中性子星の質量・半径を調べた。次に有限温度領域へ拡張し、構築された状態方程式が、LattimerSwestyによって構築された比較的softな状態方程式の結果にほぼ一致することを確認した。これは、相対論的平均場理論でも超新星爆発を引き起こす状態方程式が構築可能であることを示唆している。

## A-9 Gd 同位体の E0 遷移と形状相転移

福岡教育大<sup>A</sup> 上野智哉<sup>A</sup>, 松崎昌之<sup>A</sup>

核子数が魔法数から離れるにつれて、原子核の形状は球形から軸対称変形に変化していく。安定した軸対称変形を示す原子核では、低エネルギーの集団的振動励起として  $0^+$  のベータ振動と  $2^+$  のガンマ振動が存在し、それらをバンドヘッドとする回転バンドが存在すると考えられ、更には、変形が十分発達していない遷移領域核でも、第一励起  $0^+$  バンドは準ベータバンド、同  $2^+$  バンドは準ガンマバンドと呼ばれてきた。基底状態バンドへの強い  $E2$  遷移で特徴付けられるガンマ振動は実際に幅広い原子核で確認されており、少数の核ではその二重励起も観測されている一方で、励起  $0^+$  バンドのメンバーは必ずしも基底状態バンドへ強い  $E2$  遷移をせず、また、種々の観測量の核子数依存性も非常に強いことから、第一励起  $0^+$  バンドをベータ振動と解釈することに対して疑問を投げかけるデータが近年増加してきている。

そこで、本講演では、最も情報が豊富な同位体チェーンの一つである Gd を対象として、形状に敏感な、基底状態バンドへの  $E0$  及び  $E2$  遷移を分析することにより、第一励起  $0^+$  状態の性質を検討する。

## A-10 カイラル有効理論の核力に基づく微視的反応解析

九大院理<sup>A</sup>, 阪大 RCNP<sup>B</sup> 豊川将一<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>, 松本琢磨<sup>A</sup>, 蓑茂工将<sup>B</sup>, 緒方一介<sup>B</sup>, 河野通郎<sup>B</sup>

近年、カイラル有効理論から核力の 2 核子力や 3 核子力が系統的に決定され、QCD に基づく高精度な核力が利用可能になった。このカイラル有効理論の核力は少数核子計の散乱や核構造の第一原理計算などに適用され、さらに 3 核子力効果の議論も行われている。このように QCD に基づく核力から原子核を微視的に理解することは核物理の重要な課題のひとつである。

核力に基づく核反応の微視的記述において、 $g$  行列有効相互作用 ( $g$  行列) を用いた畳込み模型が有力な手法となる。 $g$  行列は、Brueckner 理論により核力に基づいて構築される、媒質効果を含む有効相互作用である。この  $g$  行列をカイラル有効理論の核力に基づいて構築することで、間接的にはあるが QCD に基づいた核反応の記述および核反応における 3 核子力効果の定量的理解が可能となる。

本講演では、新たに構築した  $g$  行列を用いた微視的反応解析を行うことで、カイラル有効理論の核力に基づいてフリーパラメタを一切導入することなく弾性散乱を記述できることを示す。さらに、弾性散乱における 3 核子力効果についても議論を行いたい。

## A-11 クォーク・ハドロンハイブリッド模型による格子 QCD 計算の解析 I

九大院理<sup>A</sup>, 佐賀大院工<sup>B</sup> 宮原昌久<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>B</sup>, 高橋純一<sup>A</sup>, 石井優大<sup>A</sup>, 菅野淳平<sup>A</sup>, 戸川秀一<sup>A</sup>, 鳥越悠平<sup>A</sup>, 開田丈寛<sup>A</sup>

QCD 相図を解明することは宇宙進化や中性子星の内部構造、原子核衝突実験など多岐にわたって重要な意味を持つ。QCD 相図解明に向けたアプローチの手段に格子 QCD 計算と有効模型がある。高温・低密度領域 ( $\mu/T \leq 1$ ) においては QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算による解析が可能である。それ以外の領域においては符号問題があるために格子 QCD 計算での解析は難しい。一方、有効模型は T- $\mu$  面全域で計算可能であるが、その結果には模型のパラメーターによる不定性がつきものである。我々は高温・低密度領域において格子 QCD 計算の結果を再現する有効模型を構築することで模型の不定性を除き、T- $\mu$  面全域への正当性の高い解析を目指す。その道程として、ゼロ密度領域での QCD 相転移におけるハドロンの寄与が温度に対してどう変化するかを調べる。本研究では 2+1flavor Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio model と Hadron resonance gas model という二つの有効模型をもとにしたクォーク・ハドロンハイブリッド有効模型を用いて格子 QCD 計算の結果を解析する。ハドロンの寄与がどのように変化しているかを見ていくことで、格子 QCD 計算の結果から QCD 相転移の情報を引き出ししていく。

## A-12 クォーク・ハドロンハイブリッド模型による格子 QCD 計算の解析 II

九大院理<sup>A</sup>, 佐賀大院工<sup>B</sup> 鳥越悠平<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>B</sup>, 高橋純一<sup>A</sup>, 石井優大<sup>A</sup>, 菅野淳平<sup>A</sup>, 宮原昌久<sup>A</sup>, 戸川秀一<sup>A</sup>, 開田丈寛<sup>A</sup>

横軸を密度 ( $\mu_q$ )、縦軸を温度 (T) としてクォーク・グルーオンの状態を書き込んだ図を QCD 相図という。 $\mu_q/T \leq 1$  では QCD の第一原理計算である格子 QCD により正当性の高い解析が行えるが、 $\mu_q/T > 1$  では符号問題のために格子 QCD では計算結果の信頼性は低い。他のアプローチとしては有効模型を用いて計算をすることができる。この手法では全領域で計算できるが、模型に含まれるパラメータの不定性により信頼性の高い計算ができない。以上を踏まえて本研究では、格子 QCD で計算可能な  $\mu_q/T \leq 1$  で信頼できる模型を構築し、解析することを目的としている。

今回は 2+1-flavor Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio model と Hadron resonance gas model を合わせたハイブリッドモデルを出発点とする。2+1-flavor Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio model ではカイラル相転移と閉じ込め相転移がほぼ同時に起こってしまい 2+1-flavor 格子 QCD の結果を再現しない。こういった問題点があるため、ハイブリッドモデルを用いてゼロ密度でカイラル凝縮を計算し、格子 QCD の計算結果と比較して、そこから得られた情報を発表する予定である。

## A-13 虚数化学ポテンシャル領域における 2+1 Flavour QCD 相図の解析

九大院理<sup>A</sup>, 佐賀大院工<sup>B</sup> 戸川秀一<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>B</sup>, 高橋純一<sup>A</sup>, 石井優大<sup>A</sup>, 菅野淳平<sup>A</sup>, 宮原昌久<sup>A</sup>, 鳥越悠平<sup>A</sup>, 開田丈寛<sup>A</sup>

量子色力学 (QCD) はクォーク間の強い相互作用をグルーオン交換により記述する。有限温度  $T$ , 有限クォーク化学ポテンシャル  $\mu_q$  におけるクォークとグルーオンの状態図は QCD 相図と呼ばれる。QCD 相図の解明は、クォークが閉じ込めから開放される宇宙初期の高温状態や、クォーク物質の存在が考えられる低温高密度状態の中性子星などの理解に繋がる。しかし QCD の持つ非摂動性のために QCD 相図の解析は容易ではなく、相図の大部分は解明されていない。

QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算は、低密度 ( $\mu_q/T \leq 1$ ) で計算可能だが、高密度 ( $\mu_q/T \geq 1$ ) では符号問題のために計算が困難となる。これに対し、有効模型は  $T, \mu_q$  の全領域で計算可能である。しかし有効模型のパラメーターには不定性がある。そこで、まず格子 QCD 計算の可能な領域で有効模型の計算結果と格子 QCD 計算の結果を比較することで、模型のパラメータの不定性を抑える。このように構築された有効模型を用いて、 $\mu_q/T \geq 1$  の領域における QCD 相図を解明する。

最近では、より現実の系に近い、s クォークも含んだ 2+1 フレーバー系においても、信頼できる格子 QCD 計算の結果が得られ始めている。そこで本研究では、2+1 flavour Entanglement Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio (EPNJL) 模型を用いて、2+1 フレーバー格子 QCD 計算の結果を解析する。具体的には、カイラル凝縮の  $\mu_I, T$  依存性に対する格子 QCD 計算の結果と EPNJL 模型の結果が整合するか調べる。

## A-14 QCD 相転移とポッツ模型

九大院理<sup>A</sup>, 佐賀大院工<sup>B</sup> 開田丈寛<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>A</sup>, 高橋純一<sup>A</sup>, 石井優大<sup>A</sup>, 菅野淳平<sup>A</sup>, 宮原昌久<sup>A</sup>, 戸川秀一<sup>A</sup>, 鳥越悠平<sup>A</sup>

量子色力学 (QCD) では、低エネルギー領域において非摂動的であり、クォークはハドロン内に束縛され単独で外に現れない閉じ込め現象が起こる。逆に、高エネルギー領域では相互作用は弱くなるので、クォークは閉じ込めから解放される。この閉じ込めからの解放は一種の相転移現象と見なせ、秩序変数としてポリャコフ・ループを導入できる。これは重いクォークの極限では QCD は純ゲージ理論に帰着し、大局的な  $Z(3)$  対称性が存在することの帰結である。今回は、純ゲージ理論と同様な対称性を持ちより単純な 3 次元 3 状態ポッツ模型を用いて、計算を行った。特に、この模型に虚数化学ポテンシャルを導入した場合の秩序変数の振る舞いについて見ていく。

## A-15 中間子遮蔽質量の有効模型に基づく解析

九大院理<sup>A</sup>, 佐賀大院工<sup>B</sup> 石井優大<sup>A</sup>, 高橋純一<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>B</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

量子色力学 (QCD) の物性を理解する上で, 中間子の質量は本質的である. 有限温度  $T$  では, 二種類の質量, すなわち, 遮蔽質量  $M_{\text{scr}}$  と極質量  $M_{\text{pole}}$  を定義することができる.  $M_{\text{scr}}$  ( $M_{\text{pole}}$ ) は, 空間方向 (虚時間方向) に対する中間子の伝播関数の漸近形から決定される.

QCD の第一原理計算である格子 QCD では,  $M_{\text{pole}}$  の計算が難しく, 代わりに  $M_{\text{scr}}$  が盛んに計算されている. 一方, 重イオン衝突実験で観測できるのは  $M_{\text{pole}}$  であるため,  $M_{\text{pole}}$  の計算が望まれる. そこで,  $M_{\text{scr}}$  に関する格子 QCD 計算の結果を再現するように有効模型を構築して, 構築された有効模型を用いて  $M_{\text{pole}}$  を予言する.

本発表では, low-lying のスカラー中間子と擬スカラー中間子の遮蔽質量  $M_{\text{sc,scr}}$ ,  $M_{\text{ps,scr}}$  に着目する.  $M_{\text{sc,scr}}$ ,  $M_{\text{ps,scr}}$  の  $T$  依存性に関する格子 QCD の計算結果を再現するように EPNJL 模型の相互作用とその強さを決定する. 構築された EPNJL 模型を用いて極質量の  $T$  依存性を予言し, それが重イオン衝突実験で検証可能であるか議論する.