

# 粒子宇宙論II(原子核理論研究室)

## 研究室構成員

八尋 正信 教授

清水 良文 助教授

緒方 一介 助手

### 《 大学院 博士課程 》

木村 龍司    長沢 泰輔    松本 琢磨    橋本 慎太郎

### 《 大学院 修士課程 》

江上 智晃    方倉 幸秀    島田 誠 (特別研究学生 [琉球大学])    小路 拓也

### 《 学部 卒業研究生 》

今屋順一    門脇康大    濱田大地    浜田政智

## 担当授業

力学基礎 (清水)

力学演習 (緒方)

特殊相対論と電気力学 (八尋)

量子力学 I (清水)

量子力学演習 (清水、緒方)

計算物理学 (清水)

核物理学 II (清水 (4 回分担当))

物理学最前線 (緒方 (3 回分担当))

現代の物理学 (八尋)

原子核反応論 (八尋 (大学院))

## 今年度の研究テーマと成果

### [I] ハドロン物理の理論的研究

#### (1) 超弦理論描像によるハドロンの研究

最近の超弦理論の進展が、将来、ハドロン物理と密接関わる可能性がでてきている。最も注目されるのが、gauge/gravity 対応と言われるものである。これは、ハドロン物理の基礎理論である 4 次元 QCD と等価な 10 次元重力理論が存在するという

指摘である。すでに、4次元 QCD に超対称性を付加した 4次元の共形場の理論と 10次元重力理論における  $AdS_5 \cdot S^5$  型の真空が対応しているという指摘なされている。現在は 4次元 QCD に対応する 10次元重力解は見つかっていない。しかし、その解の発見は重要な課題である。というのは、4次元 QCD という非摂動的量子場の性質を、10次元重力理論の古典解やその補正を使って調べることを、この対応が可能にするためである。このような背景を踏まえて、今年度は以下の二点の研究を行った。

- 4次元 QCD と定性的に類似した性質をもつ 10次元重力理論の古典解の探査。候補となる解を 1つ見出した。この解が、カイラル対称性の自発的破れや閉じ込めという QCD の基本的性質を持っていることを示した。また、超対称性とカイラル対称性の自発的破れの関係を 10次元重力理論を使って調べ、超対称性があるときにはカイラル対称性の自発的破れはないことを示した。本研究は、Physical Review の論文としてまとめた。(八尋、郷六 [福岡工大])
- 4次元 QCD の高温解と類似した性質をもつ 10次元重力理論の古典解の探査。候補となる解を 1つ見出した。この解が、カイラル対称性の回復や非閉じ込めという QCD の高温解の基本的性質を持っていることを示した。また、この解を使って、メソンやバリオンの温度依存性を定性的に調べて、格子ゲージ理論と類似した性質を持つことを明らかにした。本研究は、現在、Physical Review に投稿中である。(八尋、坂口 [九大素粒子研究室・学術研究員]、植草 [九大素粒子研究室・学術研究員]、郷六 [福岡工大])

## (2) 構成子クォーク模型を用いたエギゾチック・ハドロンの研究

近年、ペンタクォークと呼ばれる新しいバリオンが測定され、多くの研究者の注目を浴びている。このバリオンは、 $K$  と  $n$  に崩壊するため、 $u, d, u, d, \bar{s}$  のクォーク 5 体系と考えられている。しかし、そのスピン・パリティはまだ確定されておらず、また、その狭い崩壊幅の起源も明らかではない。更には、ペンタクォーク・バリオン以外にも、クォーク 4 体系からなると期待されるエギゾチック・メソンの測定も報告されている。このような背景を踏まえて、今年度は以下の研究を行った。

- 構成子クォーク模型によるペンタクォーク・バリオンの理論解析。相互作用として、定評のある、2体力型閉じ込め力 + グルーオン交換力の組み合わせを考えた。クォーク 5 体系の束縛状態を、九大グループによって開発・発展されてきた「ガウス展開法」を用いて、高精度に求めた。また、 $K$  と  $n$  に崩壊する共鳴状態を、同じく九大グループによって開発・発展されてきた「チャンネル結合変分法」を用いて、5 体問題の解として求めた。この共鳴状態の導

出は格子ゲージ理論では困難なため、本方法の大きな利点となっている。結果として、実験から期待される程度の質量をもつ共鳴状態は理論的には見つからなかった。しかし、代わりに、実験値より 500MeV 程度大きな質量をもち、狭い崩壊幅をもつ共鳴状態が見つかった。本研究は、現在、論文としてまとめつつある。(肥山 [奈良女子大]、上村 [理研・九大]、土岐 [核物理研究センター]、保坂 [核物理研究センター]、八尋)。

- 構成子クォーク模型によるメソンとバリオンの理論解析。上記の解析の信頼性を調べる上で、通常メソンやバリオンが、上記の相互作用でどの程度系統的に説明できるかを明確する必要がある。メソンを系統的に再現する閉じ込め力とバリオンを説明する閉じ込め力(2体力型)の間に、有意の相違があることが分かった。今後は、QCD-string 模型、flux-tube 模型のような異なるタイプの閉じ込め力の検討をして行く予定である。島田氏は特別研究学生として一年間九大に在籍した。八尋教授の指導の下、本研究は島田氏の修士論文研究として行われ、島田氏は本研究課題で琉球大学大学院修士号を取得した。(島田 [琉球大・修士2年]、八尋、上村 [理研・九大])

## [II] ビッグバン元素合成に基づく実証論的高次元宇宙論

### (1) Randall-Sundrum モデルの拡張とその検証

ビッグバン元素合成は核物理の集大成であり、金字塔である。このビッグバン元素合成は、宇宙背景輻射、タイプ Ia 超新星観測と並んで、宇宙進化を決める重要な観測量である。この三大観測量を用いて、最近話題になっている高次元宇宙論の可能性を検証するのが、本研究の目的である。現在注目しているのは、超弦理論から着想された Randall-Sundrum モデルである。このモデルでは、我々の宇宙は5次元時空 (bulk) に浮かぶ4次元の膜 (brane) である。この様な背景をもとに以下の研究を行った。

- 前年度の研究で、暗黒物質(重い粒子)が brane 上から bulk へと消滅していくことを明らかにし、その寿命を三大観測量と銀河団観測を使って求めた。今年度は、この「消える暗黒物質」モデルを拡張し、宇宙進化のある時期に暗黒物質が bulk から brane 上に流入してくる可能性を検討した。この暗黒物質の流入が宇宙項と同じ効果を宇宙進化に与えることを示した。この流入の結果として、多大な暗黒物質が brane に存在することになり、その存在量の大きさの妥当性が次の課題として残されることを明らかにした。八尋教授、梶野助教授(国立天文台)の指導の下、本研究は梅津氏(国立天文台・博士

1年)の博士論文研究として、行われている。現在、その内容を論文としてまとめている。また、本研究は日米共同研究、並びに九大・天文台共同研究である。(八尋、梅津[国立天文台・博士1年]、市来[国立天文台・博士3年]、梶野[国立天文台]、G.J. Mathews[ノートルダム大])

- Randall-Sundrum モデルのような5次元重力理論から4次元の有効理論を導出する方法として、brane running に注目し、この方法の正当性を示した。更に、具体的に、bulk 上にスカラー場があるときに、どのような4次元有効理論が生まれるかを示した。また、bulk にスカラー場が存在する two-brane モデル考えたときに、bulk と brane の間に存在する BPS 条件を少し壊すことによって始めて、brane 間の距離が安定化することを示した。この内容は、二編の論文としてまとめた。(八尋、郷六[福岡工大])

### [III] 原子核反応の理論的研究

#### (1) 離散化チャネル結合法による天体核反応の研究

地上で精力的に観測されている高エネルギー太陽ニュートリノの性質を詳細に調べるためには、その源となる ${}^8\text{B}$ が太陽内部でどれだけ生成されているかを正確に決定する必要がある。これは天体物理学因子 $S_{17}$ によって特徴付けられ、この物理量を決定すべく様々な研究が展開されている。我々は九大グループが開発・推進にあたった離散化チャネル結合法(CDCC)を用い、 ${}^8\text{B}$ の分解反応(太陽内 ${}^8\text{B}$ 生成過程の逆反応)を正確に記述することにより、 $S_{17}$ の正確な決定を試みている。

我々は今回、昨年度開発した“不安定核分解反応を記述する新しい方法”を実際の反応解析に適用した。これにより、計算時間が約10分の1に短縮されたため、系統的かつ効率的な解析が可能となった。我々は一連の反応解析を通じ、これまでの実験解析には取り入れられていなかった核力及び多段階過程の効果が定量的に明らかにした。また、実験グループの間でその役割が論争の的となっていたクーロン4重極遷移過程に関しても、極めて重要な知見を得ることができた。これらの知見を総括することにより、 ${}^8\text{B}$ の分解反応を用いた $S_{17}$ の“間接測定”の結果が、 ${}^8\text{B}$ 生成反応 ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ の“直接測定”の結果と無矛盾であることを示し、前者が後者を大きく下回るといふ数年来の問題を解決することに初めて成功した。(緒方・八尋・上村[理研・九大]・井芹[千葉経済短大])

#### (2) 漸近係数法による天体物理学因子 $S_{17}$ の決定

我々は、 ${}^8\text{B}$ が関与する反応の実験データを解析して間接的に $S_{17}$ を決定する研究を行っている。その一例は前項に掲げた ${}^8\text{B}$ 分解反応である。特に、漸近係数法(ANC法)と呼ばれる手法を用いることにより、解析結果の誤差を定量的に評価しつつ、 $S_{17}$

の“間接決定”を行っていることに本研究の特徴がある。昨年度我々は、様々な実験条件(入射エネルギーや散乱角度)に対し、ANC法の精度がどのような依存性を持つかを定量的に分析した。

本年度我々は、その知見を活かし、ANC法が有効に機能すると期待される数100 keVのエネルギー領域で測定された ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ を解析の対象とし、実際に $S_{17}$ を決定することを試みた。本解析において重要となるのは、始状態の波動関数を記述する $p$ - ${}^7\text{Be}$ 間の歪曲ポテンシャルである。我々は不定性が大きいこのポテンシャルのパラメータを、実験で測定された $p+{}^7\text{Be}$ の散乱長を基に、誤差を付けて設定した。そしてその誤差がもたらす影響を $S_{17}$ の誤差として取り扱うことにより、 $S_{17}$ の正当な評価を行った。

本研究は八尋教授・緒方助手の指導の下、博士課程1年の橋本氏を中心に進められた。(橋本・八尋・緒方・上村[理研・九大]・井芹[千葉経済短大])

### (3) 4体離散化チャネル結合法による ${}^6\text{He}$ 弾性散乱の記述

不安定核研究において注目されている、軽い中性子・陽子過剰な不安定核の構造の多くは3体系を成し、それらを入射核ビームに用いた反応は、標的核も含め4体反応系を成す。我々はこれまでにこの4体分解反応を純量子力学的に解析できる反応理論として、4体離散化チャネル結合法(4体CDCC)を提唱した。今回我々は、この4体CDCCを用いてより低いエネルギー領域における ${}^6\text{He}+{}^{12}\text{C}$ 散乱実験を解析した。この反応において、 ${}^6\text{He}$ は $n+n+{}^4\text{He}$ の3体に分解する。この分解の効果を4体CDCCにより精密に記述することで、弾性散乱の微分断面積を再現することを示した。また、4体CDCCの理論の基礎付けとして、分解状態を多く取り入れることで、その解が収束性することを確認した。この4体CDCCは今後の不安定核物理の研究の飛躍的な進歩に繋がると期待される。

本研究は八尋教授・緒方助手・上村元教授の指導の下、博士課程3年の松本氏によって遂行された。松本氏は本研究(過去2年間の成果も含む)を総括し、2005年3月、理学博士の学位を取得した。(松本・八尋・緒方・上村[理研・九大]・井芹[千葉経済短大]・肥山[奈良女子大])

### (4) 4体クーロン分解反応に対する離散化チャネル結合法

近年、重イオン加速器と実験技術の発展に伴い、不安定核を入射する実験が盛んに行われ、不安定核の研究が急速に発展しつつある。特に軽い原子核の領域には、2つないし3つのクラスターが弱く束縛した系として記述される不安定核が数多く存在する。不安定核は、標的核に入射すると容易に分解するため、不安定核の反応解析には分解過程を正確に取り扱うことが出来る離散化チャネル結合法(CDCC)が必要である。特に、不安定核の情報を引き出す為に4体クーロン分解反応(3体系をな

す入射粒子の標的核による分解反応)が注目されており、CDCCによる解析が急務となっている。

最近の本研究室の成果として、pseudostate(擬状態)を利用したCDCCの整備がある。CDCCには連続状態を離散化する手続きが必要であるが、この新しい方法では、それまで広く用いられてきたaverage法の代わりに、pseudostateを利用して離散化が行われる。この離散化の方法をpseudostate法(PS法)と呼ぶ。PS法を用いることにより、4体核力分解反応のCDCCによる解析が可能になった。しかしクーロン力が分解反応に寄与する場合、PS法の有効性は確かめられておらず、これまで4体クーロン分解反応に対してはCDCCによる解析が行われていなかった。

我々はまず、4体クーロン分解反応のCDCCによる解析を行う準備として、3体クーロン分解反応に対するPS法の有効性を検証した。その結果、3体クーロン分解反応に対するCDCCの計算値は、PS法を用いた場合と、既にその有効性が確かめられているaverage法を用いた場合とで完全に一致した。これにより、PS法のクーロン分解反応に対する有効性が確かめられた。

次に我々は、2003年に興味深い実験が報告された ${}^6\text{He}+{}^{209}\text{Bi}$ 弾性散乱に注目し、4体CDCCによる解析を行った。その結果、弾性散乱の実験データを再現することに世界で初めて成功した。また、 ${}^6\text{He}$ を便宜的に ${}^4\text{He}+2n$ の2体模型で記述した3体CDCCの結果との比較から、 ${}^6\text{He}$ を正しく3体( ${}^4\text{He}+n+n$ )で記述することの重要性が示された。

本研究は八尋教授・緒方助手の指導の下、修士課程2年の江上氏を中心に行われた。本研究の成果により、江上氏は2005年3月に修士の学位を取得し、また2005年度の日本学術振興会特別研究員に採用された。(江上・八尋・緒方・松本・上村[理研・九大]・井芹[千葉経済短大]・肥山[奈良女子大])

#### (5) 陽子- ${}^3\text{He}$ 間の現象論的ポテンシャルの探索

宇宙初期における元素合成過程 ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ の正確な記述や、太陽ニュートリノと関連する不安定核 ${}^8\text{B}\sim p+{}^3\text{He}+{}^4\text{He}$ の構造解明には、陽子と ${}^3\text{He}$ の間の相互作用が不可欠である。この相互作用を決定すべく、これまで陽子- ${}^3\text{He}$ の散乱実験が精力的に行われてきたが、現在に至るまで、精度良く実験を再現する相互作用は決定されていない。その原因には諸説あるが、 ${}^3\text{He}$ が複雑なスピン構造を持つことや、陽子+ ${}^3\text{He}$ 系に幅の広い共鳴状態が存在することが有力な原因とされている。

一般に原子核間相互作用は、適当な関数形を仮定し、導入したパラメータを、実験を再現するように調整することによって決定される。その際、多次元のパラメータ空間においてサーチを行うことになるが、これまでは空間をメッシュに分け、最小二乗法によってパラメータを決定するという手法が一般的であった。しかしこの方法は、変数の数が増えるに伴い実用的でなくなる。例えば9つの変数をそれぞれ10の区間

に分けた場合、 $10^9 = 10$  億もの計算が必要となる。実際は1変数につき数十区間程度が要求されるため、この方法で9つのパラメータを決定するのはほぼ不可能であると言って良い。

そこで我々は、宇宙論の研究におけるパラメータ決定で成功を収めている Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 法と呼ばれる解析手法を原子核物理の問題に初めて適用し、広範囲にわたる多変数解析を可能にした。この方法は乱数を用いて変数を次々に与え、それぞれの変数値 (パラメータセット) について尤度を計算し、確率論的にその変数値をサンプリングしていくことで、最終的に実験データに最適な変数値を見つけ出す方法である。我々はまず、メッシュ法が機能する3変数のパラメータサーチを初めに行い、MCMC法の結果と比較することにより、MCMC法が原子核物理のポテンシャル問題についても有効に機能することを示した。その後この方法を多数のパラメータが必要となる場合に適用し、陽子- $^3\text{He}$ 間の相互作用を決定することに成功した。

本研究は八尋教授・緒方助手の指導の下、修士課程2年の方倉氏によって遂行された。本研究により、片倉氏は2005年3月に修士の学位を取得した。(方倉・八尋・緒方・市来 [国立天文台・博士課程3年])

#### (6) 半古典歪曲波模型によるハイペロン生成過程の記述

核物質中におけるハイペロンの一体場ポテンシャルは、中性子星などの高密度なハドロンの議論や、フレーバーのSU(3)対称性を基にしたバリオン-バリオン間相互作用の理解に対して、重要な鍵を握っている。現在、この一体場の大きさは、 $\pi$ や $K$ 入射のハイパー核生成反応実験を解析することから求められている。

我々は、ハイパー核生成反応の中でも特に threshold 近傍の包括的断面積に注目し、これを半古典歪曲波模型 (SCDW) によって解析している。SCDW は  $(p, p')$  や  $(p, n)$  の包括的断面積を定量的に記述することができる数少ない手法である。昨年我々は、 $\Sigma^-$  生成 ( $\pi^-, K^+$ ) 反応の解析を行い、ハイペロンポテンシャルの決定に対して SCDW による解析が有効であることを示した。

今回我々は、新たに  $\Xi^-$  生成 ( $K^-, K^+$ ) 反応の包括的断面積を SCDW を用いて解析することで、 $\Xi^-$  の一体場ポテンシャルについて議論を行った。この反応は既に DWIA によって解析されているが、そこでは素過程 ( $K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-$ ) の断面積として、核内核子のフェルミ運動について平均したものが用いられていた。SCDW ではこの部分を近似なく取り扱う事ができるので、 $\Xi^-$  ポテンシャルについてより信頼性のある議論が可能となった。ただし、現在の計算結果には多段階過程の寄与が含まれておらず、用いた  $K^-(K^+)$  の光学ポテンシャルが適切でないなどの不十分な点があるため、定量的な議論を行うには至っていない。しかし今後これらを改善することで、信頼性の高いハイペロンポテンシャルの情報が導出できると期待される。

本研究は緒方助手・河合名誉教授・河野教授(九州歯科大)の指導の下、博士課程1年の橋本氏によって推進された。(橋本・緒方・河合・河野[九州歯科大]・渡辺[九大総理工])

#### [IV] 原子核集団運動の微視的研究

##### (1) 高速回転する巨大変形状態 — 超変形回転バンド

近年、重イオン加速器と $\gamma$ -線測定技術の発展より高い角運動量を持った原子核の高速回転極限状態(高スピン状態)を研究することが可能になってきた。この高スピン状態においては、高速回転の効果によって基底状態近傍では現れなかった色々なタイプの変形状態が低励起エネルギー領域に出現する。この中でも、慣性能率が大きく回転エネルギーの面で得をする巨大変形極限状態は特に興味深く、現在では多くの原子核領域での実験データの蓄積とともに様々な研究が行なわれている。

このような巨大変形状態の研究で興味深いものの一つが、超変形回転バンドが低スピン領域でより小さな変形を持つ通常変形状態への崩壊現象の研究である。このような現象は大きな変形状態から小さな変形状態への変形自由度に対応する集団座標空間の中での変形転移現象(有限系でのトンネル効果)であり、ここ数年、その研究に取り組んでいる。これまでの研究では、変形座標に対するポテンシャルと質量パラメータを対相関効果を適切に取り入れて計算することにより、特に $A \approx 150$ 領域と $A \approx 190$ 領域の超変形回転バンドの崩壊が、ある角運動量のところで急激に起こるといった特徴が説明できることを示した。最近では、他の質量領域、特に $A \approx 60$ や $A \approx 80$ の領域でも系統的に超変形回転バンドが観測されており、その崩壊が $A \approx 150$ 領域と $A \approx 190$ 領域と同じメカニズムで起こるのかが問題になっている。例えば、 $A \approx 130$ 領域の超変形バンドは古くから知られているが、変形度がかなり小さく通常変形状態に近いために、変形ポテンシャルの障壁は小さくなり、トンネル現象としてとらえることは難しい。これに対し、 $A \approx 80$ 領域の超変形状態は変形度の大きさが $A \approx 150$ 領域核とほぼ同じであり、トンネル現象として理解できるかものかが興味深い。本年度は、この $A \approx 80$ 領域についても検討を行なった。その結果わかったことは、確かに超変形状態自身は変形度が大きな極小値としてポテンシャル面に現れるが、かなり大きな変形度をもつ非軸対称の極小が近くに現れ、ポテンシャル障壁が $A \approx 150$ 領域核のように発達しないことである。現在、原子核の領域によって何故このようなポテンシャル面の違いが出るのか、そして、そのような違いにもかかわらず、崩壊が急激に起こるといった特徴が共通に見られる理由は何か、ということを検討している(清水)。

##### (2) 非軸対称超変形核のウォブリング運動と軸対称核の歳差運動

最近、非常に大きく非軸対称変形していると考えられる回転バンド(非軸対称超変



形回転バンド)を持つ Lu, Hf の同位体で、非軸対称変形した剛体に特有の回転運動であるウォブリング運動(首振り運動)に対応する回転バンドが発見された。我々は以前から乱雑位相近似(RPA)の微視的方法により、このウォブリング運動の研究を行ってきたが、最近発見されたこれらの原子核に対しても分析を行ない、調節パラメータなしの微視的 RPA 計算によって、ウォブリング運動と解釈できる集団的振動状態が出現することを示した。しかしながら、我々の計算ではほぼ実験で観測されたエネルギー領域にウォブリング状態が現れるが、その励起エネルギーの角運動量依存性が完全には再現できず、また、ウォブリングバンドからイラスト非軸対称超変形回転バンドへの電磁遷移の絶対値が実験値と比べてかなり小さいという問題点がある。

このような微視的 RPA 計算の不満足な点を改良する道を探るため、類似の運動であると解釈される、軸対称核の歳差運動回転バンドを同じ枠組を用いて分析した。歳差運動回転バンドとは、プロレート型の軸対称変形を持つと考えられる中重希土類原子核の中でもより重い、Hf, W の領域で系統的に観測されているもので、核子の準粒子が対称軸方向に大きな角運動量を整列させた長寿命の準安定状態である、高スピン K-アイソマー状態の上立つ回転バンドのことである。この回転バンドは、対称軸方向の準粒子回転整列角運動量に、それに垂直な集団的回転の角運動量が重ね合わさって作られる回転状態であり、軸対称剛体の歳差運動と類似の状態であると解釈できる。このような回転バンドは古くから知られているが、最近では一つの原子核においても多くのバンドが観測にかかっており、典型的な例として<sup>178</sup>W が挙げられる。我々はこの原子核で観測されている  $K = 13$  から  $K = 34$  までのアイソマー状態上の歳差運動回転バンドを微視的 RPA 計算によって調べ、励起エネルギーの系統性や E2 および M1 の電磁遷移の確率について、ほぼ実験で推定されている値を再現することに成功した。このようにして得られた結果を Lu, Hf 領域のウォブリングバンドの計算と比較することにより RPA 計算の中身を調べ、ウォブリングの場合に実験値を再現できない理由を検討中である(清水、松崎[福岡教育大]、松柳[京都大])。

### (3) ガウス基底関数展開法の平均場計算への応用

最近、不安定核の実験的研究が進み、中性子数と陽子数の比が 1 から大きくずれるような原子核においては、安定核とはかなり異なった性質を持ち、原子核の魔法の数でさえも変化することがわかってきた。この魔法の数の変化をもたらず球形一核子準位の変化の原因としては、中性子ハローのような不安定核に特有の低密度効果や、陽子数と中性子数が非常に異なることを反映した核子間有効相互作用の効果が考えられている。このような不安定核では、安定核で良く知られているのとは異なった平均場が実現されるので、適当な有効相互作用から出発して自己無撞着に一粒子ポテンシャルを計算する必要がある。このために、安定核を良く記述する有効核力である有限レンジの Gogny 力を用いた Hartree-Fock 計算プログラムの開発を一昨年

から始めた。一昨年はまず、調和振動子基底を用いた計算プログラムを開発したが、昨年度は、広がった低密度効果をよりうまく記述できると期待されるガウス基底関数展開法を用いた計算プログラムを開発した。この方法は九大の上村元教授を中心として開発され、少数核子系や核反応でその有用性が確かめられている方法であるが、自己無撞着平均場計算においても有効であることが確かめられた。特に、複素レンジ振動ガウス基底を用いると、核内部で多く振動する軌道を含む超重原子核や、密度分布が広がった中性子ドリップ線近傍の原子核を、同時に精度良くかつ効率的に記述できることがわかった。

以上は、一昨年度(2002年度)の卒業生の吉柳氏の修士論文、および、昨年度(2003年度)の卒業生の財前氏の修士論文での結果であるが、そこでやり残したこととして、調和振動子基底の空間をどんどん広げて行った時に、ガウス基底関数展開法で得られた平均場解に近づくことを検証することがあった。一昨年度の計算プログラムでは、単純に調和振動子基底空間を広げると、2体の行列要素の計算で激しい桁落ちを起こし、空間をある程度以上広げることができないという問題点があった。本年度は、新しい行列要素の計算法を開発してプログラムを改良することにより、調和振動子一粒子基底を量子数  $N_{\text{osc}} = 30$  以上まで計算できるようになった。これによりガウス基底関数展開法の計算と調和振動子基底の計算がほぼ厳密に一致することを確かめた。また、このように巨大な空間を用いれば、ハローのような低密度領域でさえも調和振動子基底を用いて記述可能であることがわかった(清水)。

#### (4) 相対論的枠組に基づく水素様イオンにおける超微細構造

水素様イオンにおける基底状態の超微細構造は、核磁気能率、Bohr-Weisskopf効果(有限の核磁気分布の効果)等の原子核の構造の情報を知る上で、また一方では電子状態に対して、繰り込み等のQEDの効果を実験値で測定できる上で、原子核、原子分子両分野に渡って半世紀以上研究され続けている。我々は、Bohr-Weisskopf効果について理論的に再現することを目標に、まず超微細構造分裂エネルギーの実験値のある  $^{209}\text{Bi}^{82+}$ 、 $^{207}\text{Pb}^{81+}$  に対し、相対論的平均場近似に基づき、再現することにした。この平均場近似下では、1粒子模型の段階で有効質量が非相対論的模型に比べ小さく、理論値が実験値から大きくずれる傾向がある。我々は、この傾向に対して、過去に相対論的平均場における核磁気能率の計算で用いられた、線形応答近似を採用し、対処した。さらに、多体の効果を取り込むために、核磁気能率を再現する上で成功を修めた配位混合計算を、摂動論と対角化による2種類の方法で各々行った。線形応答近似や配位混合計算で用いる中間子やそのパラメータについては、平均場近似下での物と無撞着になるよう同じ物を用いた。結果的に、この計算においても核磁気能率を完全に一致させられず、信頼性の高い超微細構造分裂エネルギーを得ることは困難となった。そこで、現状では取り込まれていない残留相互作用を、Landau-Migdal

力に押し込めることで、そこで用いられる Landau-Migdal パラメータをフリーパラメータとして、核磁気能率を実験値に合わせた上で超微細構造分裂エネルギーを求めた。その結果、最終的に、Bohr-Weisskopf 効果の 50~70%を再現するまでに至った。この一連の模型計算をさらに、実験値のない  $^{209}\text{Pb}^{81+}$ 、 $^{207}\text{Tl}^{80+}$  に対して適用し、その超微細構造分裂エネルギーを予言した。

以上の模型は、微細構造定数の 1 次の次元であり、一般に高次の効果は微小であり無視される。しかしながら、現状の模型で説明不十分な Bohr-Weisskopf 効果の原因を探るために、それ以上の高次の効果についても、現在研究中である。

本研究は博士課程 3 年の長澤氏を中心として、高度な専門的知識を持つ共同研究者、芳賀昭弘 [大阪大学 RCNP]、中野正博 [産業医科大学]、堀川弥太郎 [順天堂大学] 各氏との議論によって進められた。長澤氏は本研究によって、2005 年 3 月に理学博士の学位を取得した。(長澤泰輔, 芳賀昭弘 [大阪大学 RCNP], 中野正博 [産業医科大学], 堀川弥太郎 [順天堂大学])。

## 発表論文リスト

### 《 原著論文 》

- (1) I. Brevik, K. Ghoroku and M. Yahiro, “Effective action and brane running”, Phys. Rev. D **69**, 064004 (2004).
- (2) I. Brevik, K. Ghoroku and M. Yahiro, “Radius stabilization and brane running in the Randall-Sundrum type 1 model”, Phys. Rev. D **70**, 064012 (2004).
- (3) K. Ghoroku and M. Yahiro, “Chiral symmetry breaking driven by dilaton”, Phys. Lett. **B604**, 235-241 (2004).
- (4) T. Matsumoto, E. Hiyama, K. Ogata, Y. Iseri, M. Kamimura, S. Chiba, and M. Yahiro, “Continuum-discretized coupled-channels method for four-body nuclear breakup in  $^6\text{He}+^{12}\text{C}$  scattering”, Phys. Rev. C **70**, R061601 (2004).
- (5) T. Egami, K. Ogata, T. Matsumoto, Y. Iseri, M. Kamimura and M. Yahiro, “Gaussian expansion approach to nuclear and Coulomb breakup”, Phys. Rev. C **70**, 067604 (2004).
- (6) Michio Kohno, Yoshikazu Fujiwara, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata and Mitsuji Kawai, “Strength of the  $\Sigma$  Single-Particle Potential in Nuclei from Semiclassical Distorted Wave Model Analysis of the  $(\pi^-, K^+)$  Inclusive Spectrum”, Prog. Theo. Phys. **112**, 895 (2004).

- (7) K. Ogata, M. Yahiro, Y. Iseri, T. Matsumoto, N. Yamashita, T. Kamizato and M. Kamimura, “Determination of  $S_{17}$  from  $^8\text{B}$  Coulomb dissociation”, Nucl. Phys. **A738c**, 421 (2004).
- (8) T. Matsumoto, E. Hiyama, M. Yahiro, K. Ogata, Y. Iseri and M. Kamimura, “Four-body CDCC analysis of  $^6\text{He}+^{12}\text{C}$  scattering”, Nucl. Phys. **A738c**, 471 (2004).
- (9) M. Nakano, L.-G. Liu, H. Matsuura, T. Nagasawa, K.-I. Makino, N. Noda, H. Kouno, and A. Hasegawa, “Effective meson mass in nuclear matter based on dispersion equation including  $N\bar{N}$ ,  $\Delta\bar{N}$ ,  $\bar{\Delta}N$  excitations”, Int. J. Mod. Phys. **E13**, 973, 2004.

《Proceedings》

- (1) K. Ichiki, P. Garnavich, T. Kajino G, J, Mathews, and M. Yahiro (oral talk), “Observational Evidence for Disappearing Dark Matter in Brane World Cosmology”, 6th RESCEU Int. Symp. on “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology” (2003, Tokyo, Japan), eds. K. Sato and S. Nagataki (Universal Academy Press 2004), pp. 307-311.
- (2) G. J. Mathews, T. Ashenfelter, P. M. Garnavich, D. Menzies, K. Ichiki, T. Kajino, K. A. Olive, and M. Yahiro (oral talk), “Origin and Evolution of Matter in Brane-World Cosmology”, Proc. Int. Symp. on “Origin of Matter and Evolution of Galaxies” (2003, Saitama, Japan), eds. S. Kubono, M. Terasawa, T. Kajino, K.-I. Nomoto and T. Motobayashi (World Scientific Publishing Company Singapore, 2005), in press.
- (3) T. Kajino, K. Ichiki, P. M. Garnavich, G. M. Mathews, and M. Yahiro (invited talk), “Dark Matter Dark Energy, and Dark Radiation in the Universe and Cosmological Nucleosynthesis”, Proc. 1st Yamada Symp. on “Neutrino and Dark Matter in Nuclear Physics” (2003, Nara, Japan), Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **138**, 82-85 (2005).
- (4) T. Kajino, K. Ichiki, P. M. Garnavich, G. J. Mathews, and M. Yahiro, “Quest for the Origin of Dark Matter, Dark Energy, and Dark Radiation”, Czechoslovak Journal of Physics **54** (B), B247-B263 (2004).
- (5) Kazuyuki Ogata, M. Yahiro, Y. Iseri, T. Matsumoto, N. Yamashita, T. Kamizato and M. Kamimura, “Determination of  $S_{17}$  based on CDCC anal-

ysis of  $^8\text{B}$  dissociation, *Proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2003 (OMEG03)*, RIKEN, 17–19 November 2003, p. 268 (2004).

- (6) Yoshifumi R. Shimizu, Masayuki Matsuzaki, and Kenichi Matsuyanagi, “Microscopic study of wobbling motions in Hf and Lu nuclei”, in Proceedings of the 5-th Japan China Joint Nuclear Physics Symposium, March 7-10, 2004, Fukuoka, Japan.

#### 《 その他の論文 》

- (1) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, “クーロン分解反応における pseudo-state CDCC 解析”, *原子核研究* vol. 49, No. 3, November 2004 (研究会報告) 2004年 原子核三者若手 夏の学校, p. 47.
- (2) 方倉幸秀, “ $^8\text{B}$  分解反応の 4 体 CDCC による記述”, *原子核研究* vol. 49, No.3, November 2004 (研究会報告) 2004年 原子核三者若手 夏の学校, p. 61.
- (3) 橋本 慎太郎, “漸近係数法による天体物理学因子  $S_{17}$  の決定”, *原子核研究* vol. 49, No. 5, 2005, p. 111.
- (4) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, 肥山詠美子, “クーロン分解反応における 4 体 CDCC”, *原子核研究* vol. 49, No. 6, March 2005 (研究会報告) 少数粒子系物理の最近の発展と今後の展望, p. 21.

#### 著書

なし

#### 講演

#### 《 海外での講演 》

- (1) K. Ogata, M. Yahiro, Y. Iseri, T. Matsumoto, S. Hashimoto, T. Egami and M. Kamimura, “Determination of  $S_{17}$  with the method of Continuum Discretized Coupled Channels (CDCC), Japanese-German Nuclear Structure and Astrophysics Workshop, GSI, 16–18 December 2004.

- (2) T. Matsumoto, E. Hiyama, K. Ogata, Y. Iseri, M. Kamimura, S. Chiba and M. Yahiro, “Continuum-discretized coupled-channels method for four-body breakup reactions”, International Workshop on Reaction Mechanisms for Rare Isotope Beams Michigan State University, March 9-12, 2005.
- (3) T. Nagasawa, A. Haga, M. Nakano, and Y. Horikawa, “Hyperfine splitting of hydrogenlike ions and relativistic nuclear model”, HCI 2004(12th International Conference on the Physics of High Charged Ions), Vilnius, Lithuania, Sep. 6-11, 2004
- (4) Masayuki Matsuzaki, Shin-Ichi Ohtsubo, Yoshifumi R. Shimizu, and Kenichi Matsuyanagi, “Dynamical Moments of Inertia and Wobbling Motions in Triaxial Superdeformed Nuclei”, in Proceedings of conference on *Nuclei at the Limits*, July 26-30, 2004, Argonne, USA. IP Conference Proceedings 764, ed. by D. Seweryniak and T. L. Khoo, American Institute of Physics, New York, 2005, pp. 21-24.
- (5) K. Umezumi, K. Ichiki, T. Kajino, G.J. Mathews, M. Yahiro, R. Nakamura, International Workshop on Particle Physics and the Early Universe (2004), Toronto, Canada, 17-21 sep 2004.

《 国内での講演 》

- (1) 郷六一生、八尋正信 『Gauge/Gravity 対応による QCD の理解』, 日本物理学会秋季大会 2004 年 9 月 29 日 高知大学
- (2) 郷六一生、八尋正信、 『Gauge/Gravity 対応描像に基づくハドロン質量の温度依存性』, 日本物理学会第 60 回年次大会 2005 年 3 月 24 日 東京理科大学
- (3) 島田 誠, 八尋 正信, 上村正康, 『Study on mesons and baryons for pentaquark』, 第 110 回日本物理学会九州支部例会 2004 年 12 月 4 日 九州工業大学
- (4) 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 松本琢磨, 上村正康, “中間エネルギー  $^8\text{B}$  分解反応における核力及び多段階過程の寄与”, 日本物理学会第 59 回年次大会, 2004 年 3 月 28 日, 九州大学.
- (5) 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 松本琢磨, 上村正康, “Eikonal CDCC 法による中間エネルギー不安定核分解反応の解析”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 29 日, 高知大学.

- (6) 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 松本琢磨, 上村正康, “Eikonal CDCC 法による中間エネルギー不安定核分解反応の解析”, 第 110 回日本物理学会九州支部例会, 2003 年 12 月 4 日, 九州工業大学.
- (7) 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “中間エネルギー不安定核分解反応における核力の役割”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 27 日, 東京理科大学.
- (8) 橋本慎太郎, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “不安定核反応における ANC 法の有効性”, 日本物理学会第 59 回年次大会, 2004 年 3 月 28 日, 九州大学箱崎キャンパス.
- (9) 橋本慎太郎, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “ ${}^8\text{B}$  分解反応に対する ANC 法の有効性”, RIBF-UEC/理研研究会「不安定核物理 この 10 年とこれから」, 2004 年 6 月 15 日–17 日, 理化学研究所.
- (10) 橋本慎太郎, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “漸近係数法による天体物理学因子  $S_{17}$  の決定”, 2004 年 原子核三者若手 夏の学校 原子核パート研究会, 2004 年 8 月 3 日, パノラマランド木島平.
- (11) 橋本慎太郎, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “ ${}^8\text{B}$  分解反応に対する ANC 法の有効性”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 27 日, 高知大学朝倉キャンパス.
- (12) 橋本慎太郎, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “天体物理学因子  $S_{17}$  の誤差”, 第 110 回 日本物理学会 九州支部例会, 2004 年 12 月 4 日, 九州工業大学.
- (13) 橋本慎太郎, 河野通郎, 緒方一介, 渡辺幸信, 河合光路, “半古典歪曲波模型による  $\Xi$  生成 ( $K^-, K^+$ ) 反応の記述”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日, 東京理科大野田キャンパス.
- (14) 松本琢磨, 肥山詠美子, 上村正康, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, “ ${}^6\text{He}+{}^{12}\text{C}$  散乱の 4 体 CDCC 解析”, RIBF-UEC/理研研究会「不安定核物理 この 10 年とこれから」, 2004 年 6 月 15 日–17 日, 理化学研究所.
- (15) 松本琢磨, 肥山詠美子, 上村正康, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, “ ${}^6\text{He}+{}^{12}\text{C}$  弾性散乱における  ${}^6\text{He}$  分解効果のエネルギー依存性”, 橋本慎太郎, 緒方一介, 八尋正信, 井芹康統, 上村正康, “ ${}^8\text{B}$  分解反応に対する ANC 法の有効性”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 29 日, 高知大学朝倉キャンパス.
- (16) 松本琢磨, “離散化チャンネル結合法による分解反応解析”, 「原子核理論呑舟会」, 2005 年 3 月 21 日–23 日, 高エネルギー加速器研究機構.

- (17) 松本琢磨, 緒方一介, 井芹康統, 八尋正信, 上村正康, 江上智晃, “CDCC 法による  $^{11}\text{Be}$  分解反応解析”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 27 日, 東京理科大学.
- (18) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, “pseudo-state CDCC によるクーロン分解反応解析”, RIBF-UEC/理研共催研究会『不安定核物理 この 10 年とこれから』, 2004 年 6 月 15 日–17 日, 理化学研究所.
- (19) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, “pseudo-state CDCC によるクーロン分解反応解析”, 原子核三者若手夏の学校, 2004 年 8 月 2 日–7 日, パノラマランド木島平 (長野).
- (20) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, “pseudo-state CDCC 法によるクーロン分解反応解析”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 29 日, 高知大学.
- (21) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, “4 体 CDCC によるクーロン分解反応解析”, 日本物理学会九州支部例会, 2004 年 12 月 4 日, 九州工業大学.
- (22) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, 肥山詠美子, “クーロン分解における 4 体 CDCC”, RCNP『少数粒子系物理の最近の発展と今後の展望』研究会, 2004 年 12 月 23 日–25 日, 大阪大学核物理研究センター (RCNP).
- (23) 江上智晃, 緒方一介, 松本琢磨, 井芹康統, 上村正康, 八尋正信, 肥山詠美子, “ $^6\text{He}$  のクーロン分解反応に対する E1 の効果”, 日本物理学会 2005 年春季大会, 2005 年 3 月 27 日, 東京理科大学野田キャンパス.
- (24) 方倉幸秀, “ $^8\text{B}$  分解反応の 4 体 CDCC による記述”, 原子核三者若手夏の学校, 2004 年 8 月 2 日–7 日, パノラマランド木島平 (長野).
- (25) 方倉幸秀, “陽子- $^3\text{He}$  間の現象論的ポテンシャルの探索”, 日本物理学会九州支部例会 2004 年 12 月 4 日 九州工業大学.
- (26) 長澤泰輔, 芳賀昭弘, 中野正博, 堀川弥太郎, “配位混合の効果を含んだ水素様重イオンにおける超微細構造の相対論的計算 II”, 日本物理学会第 59 回年次大会, 2004 年 3 月 30 日, 九州大学.
- (27) 長澤泰輔, 芳賀昭弘, 中野正博, 堀川彌太郎, “配位混合の効果を含んだ水素様重イオンにおける超微細構造の相対論的計算 III”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 28 日, 高知大学朝倉キャンパス.



- (28) T. Nagasawa, A. Haga, M. Nakano, and Y. Horikawa, “Configuration mixing effects on the hyperfine structure in the relativistic model”, International Symposium on Correlation Dynamics in Nuclei (CDN05), Jan. 31th – Feb. 4th, 東京大学.
- (29) 長澤泰輔、芳賀昭弘、中野正博、堀川彌太郎, “水素様重イオンの超微細構造に対する相対的枠組に基づく高次の補正”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 25 日, 東京理科大学野田キャンパス.
- (30) 財前浩一, 清水良文, “複素ガウス基底を用いた不安定核のための HF 計算”, 日本物理学会第 58 回年次大会 2004 年 3 月 30 日, 九州大学.
- (31) 清水良文, “ガウス基底を用いた不安定核のための平均場計算”, RIBF 核物理ワークショップ「不安定原子核の平均場と集団運動」, 2004 年 9 月 5 日–7 日, 理化学研究所.
- (32) 松崎昌之, 清水良文, 松柳研一 “Magnetic properties of precession modes built on high-K multi-quasiparticle states in  $^{178}\text{W}$ ”, 日本物理学会 2004 年秋季大会 2004 年 9 月 27 日, 高知大学.
- (33) 清水良文, “高品質 RI ビームによる不安定核の核構造研究”, 日本物理学会第 59 回年次大会 2005 年 3 月 25 日, 東京理科大学野田キャンパス.

#### 文部省科学研究費等の採択

- (1) 基盤研究 (C) 「宇宙項の起源の候補としての自己相互作用スカラー場に対する観測量からの制限」2002–2004 (研究代表者: 八尋正信)

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

なし

#### 学部 4 年生卒業研究

【前期】 今屋順一, 門脇康大, 濱田大地, 浜田政智, 「宇宙・天体核物理学」, 担当: 緒方

【後期】 今屋順一, 浜田政智, 「ハドロン物理学」, 担当: 八尋

#### 修士論文

- (1) 江上 智晃, “クーロン分解反応における pseudo state を用いた離散化チャンネル結合法”, 2005 年 3 月.
- (2) 方倉 幸秀, “陽子- $^3\text{He}$  間の現象論的ポテンシャルの探索”, 2005 年 3 月.
- (3) 島田 誠, “Study on mesons and baryons for pentaquark”, 2005 年 3 月 (九州大学大学院特別研究学生として学び、琉球大学大学院修士号取得).

#### 博士論文

- (1) 長澤 泰輔, “Hyperfine structure splitting in hydrogenlike heavy atoms based on the relativistic mean field theory” (相対論的平均場理論に基づく水素様重原子における超微細構造分裂), 2005 年 3 月.
- (2) 松本 琢磨, “The method of continuum-discretized coupled-channels for three-body and four-body break up” (3 体・4 体分解における離散化連続チャンネル結合法), 2005 年 3 月.

#### 外国人留学生の受け入れ

なし

#### 学外での学会活動

なし

#### 受託研究・民間との共同研究

なし