

---

# 会場 B

## 素粒子, 核物理領域 (B)

---

### B-1 殻模型と粒子表現 Dyson boson 展開法を用いた $^{136}\text{Xe}$ , $^{138}\text{Ba}$ 原子核の低励起状態

国際医療福祉大学<sup>A</sup> 安本誠一<sup>A</sup>

今日では, 計算機の発展に伴い, 大次元殻模型計算が sd - shell や pf - shell の原子核に置いて可能となってきた. しかしながら, 一般に多核子・多準位系での殻模型ヒルベルト空間はとても大次元で, この意味に置いて, 殻模型ハミルトニアンを正確に取り扱うことはとても困難である. そこで, 多核子殻模型に対する大次元ヒルベルト空間を小さな集団的部分空間へ切断するために, 私達は, Dyson boson 展開 (DBM) 法を用いる. 集団的部分空間として, Tamm - Dancoff phonon を取り扱うとき, Dyson boson Hamiltonian は集団的部分と非集団的部分に分かれるが, 後者は集団的自由度と非集団的自由度間の結合効果として取り込むことが可能である. つまり, boson Hamiltonian は選ばれた集団的 boson のみで書き下すことが出来る. これまでに私達は, 殻模型空間を Tamm - Dancoff phonon を用いて集団的フォノン部分空間に切断し, 更に殻模型ハミルトニアンを Dyson boson 展開する上述の理論的枠組みを発展させてきた. そして, その理論を用いて sd - shell や pf - shell の現実的原子核に対して数値計算を行ってきた. その結果, ガウス型と湯川型の中心力のみ有効相互作用がとても有効であり, 低エネルギー準位や B(E2) の実験値が良く再現されることを示してきた. 本支部会では, 殻模型と粒子表現 Dyson boson 展開法を用いて, 中重核である  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Ba}$  原子核の低励起状態と B(E2) を数値計算し, 実験値との比較を発表する. ただし, 中性子空間は閉殻とし, 一粒子エネルギー準位は陽子空間の  $0g7/2$ ,  $1d5/2$ ,  $1d3/2$ ,  $2s1/2$ ,  $0h11/2$  の 5 準位空間で行った.

## B-2 ガウス基底を用いた Gogny-HFB 計算による軸対称変形した不安定核の研究

九大院理<sup>A</sup> 嶋田充宏<sup>A</sup>, 田上真伍<sup>A</sup>, 清水良文<sup>A</sup>

原子核の性質をよく再現できる方法として、密度に依存する相互作用を用いた平均場理論が発達してきた。特に、対相関を正しく考慮できる Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 理論は原子核の性質を核図表の全体にわたって再現できる信頼できる方法だと考えられている。中でも、よく理解されている調和振動子基底を用いた HFB 計算がさかんに行われてきた。密度に依存する有効相互作用の代表例としてゼロレンジ力の Skyrme 力や有限レンジの Gogny 力がよく知られているが、現在、対相関部分の相互作用に任意性のなく、原子核の性質をよりよく再現すると考えられている Gogny 力を用いる計算に取り組んでいる。

最近では、中性子数と陽子数が大きく異なる不安定核の研究が進展してきている。特にドリップライン近傍の中性子過剰の不安定核では、最後の中性子が極端に薄く広がった中性子ハロー構造が実験的にも理論的にも示唆されている。調和振動子基底を用いた HFB 計算ではそういったハロー構造を十分に記述することができない。一方、外側まで広がったガウス基底はハロー構造を記述するのに有効だと考えられている。また、原子核は球形ではなく変形をしていることが多くの実験から示唆されており、原子核の性質を正しく記述するためには変形の効果を取り入れる必要がある。今回は、原子核の変形のうち大部分を占めると考えられている軸対称変形した不安定核に対し、ガウス基底を用いた Gogny-HFB 計算に取り組んだので、その結果を報告する。

## B-3 量子数射影法を用いた四面体変形核の研究

九大院理<sup>A</sup>, IN2P3-CNRS/Univ. de Strasbourg<sup>B</sup> 田上真伍<sup>A</sup>, 清水良文<sup>A</sup>, J. Dudek<sup>B</sup>

大きなギャップが存在し、そのギャップまで粒子を詰めた粒子数の原子核が特に安定となるため、原子核が四面体変形した状態が存在するのではないかと考えられている。しかし、四面体変形をした原子核の存在を示す確かな証拠は現在までのところ見つかっていない。なぜなら、どのような実験データを得れば原子核が四面体変形をしていると言えるかがわかっていないためである。そこで、私と共同研究者は平均場理論により計算された四面体変形した状態に量子数射影を行うことで、実験と比較可能な物理量の計算を試みた。四面体変形は空間反転対称性を破った非軸対称な変形であり、その量子数射影の計算には数値的に非常に大きな労力を要するが、我々は量子数射影の効率的な手法を用いることでそれを可能としている。

現在までに計算したのは四面体変形した状態のエネルギースペクトル (回転バンド) とそのバンド内の電磁遷移確率である。これまでに報告してきた不安定核である  $^{108,110}\text{Zr}$  に加え、それに加えて安定核  $^{160}\text{Yb}$ ,  $^{226}\text{Th}$  の計算を行った。これまでの結果と同様に、四面体変形の大きさに対し強く依存する特徴的な回転バンドを得た。これらのエネルギースペクトルは四面体変形の大きさが大きい場合に回転体のスペクトルになるが、その近づき方には核子数依存性がある。講演では得られた結果を示し、それに関する考察を行う。

## B-4 D(n,p)nn を用いた nn 共鳴探索： $\Delta E$ - $\Delta E$ -E での BG 低減

九州大学理学府物理学専攻粒子物理学講座実<sup>A</sup> 前田裕史<sup>A</sup>, 相良建至<sup>A</sup>, 石橋和久<sup>A</sup>, 木村駿太郎<sup>A</sup>, 田中翔基<sup>A</sup>, 大中貴恵<sup>A</sup>

$nd$  分解反応において、入射した  $n$  が  $d$  の中の  $n$  とのみ散乱し、 $p$  は傍観者として振舞う反応を  $nn$  QFS (Quasi-free scattering) と呼ぶ。この反応の  $E_n = 25\text{MeV}$  での微分断面積の理論計算は、測定値を約 18% 過小評価していると報告された。 $nn$  QFS の過程での主要な相互作用は  $^1S_0$  状態の  $nn$  間ポテンシャル  $V(^1S_0)$  であり、微分断面積の理論計算値もこの  $S$  波核力の変化に対して鋭敏である。Witala 氏と Glöckle 氏は、 $S$  波核力の寄与を 1.08 倍 ( $\lambda = 1.08$ ) とすれば上記の異常は概ね説明できることと、更にその核力では 2 つの  $n$  が束縛状態になる可能性があることを指摘した。

我々は、この  $nn$  束縛状態の有無を検証する実験を行っている。 $E_n = 12\text{MeV}$  の  $n$  ビームを  $\text{CD}_2$  膜に照射し、 $nd$  分解反応を起こした  $p$  のみを Si SSD で検出することで、 $nn$  の挙動を調べている。観測される  $p$  のエネルギースペクトルは、 $nn$  FSI (Final-state interaction) での最大のエネルギーまで分布する。もし 2 つの  $n$  が束縛状態をとれば、この最大エネルギーよりも更に高エネルギー側に孤立したピークが観測される。このピークの有無を調べることが実験の目的である。

現段階では、 $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  反応で生成する  $n$  に起因するバックグラウンドが最大の障害であり、遮蔽材の素材や設置位置の最適条件を調べている。また荷電粒子の検出器を、E 型、 $\Delta E$ -E 型、 $\Delta E$ - $\Delta E$ -E 型とした場合のバックグラウンドの比較も行っている。実験の現状を報告する。

## B-5 10MeV 近傍での 3 核子系反応断面積異常究明の現状

九州大学・理学研究院<sup>A</sup>, 九州大学・理学府<sup>B</sup> 相良建至<sup>A</sup>, 石橋和久<sup>B</sup>, 木村 駿太郎<sup>B</sup>, 田中翔基<sup>B</sup>, 前田裕史<sup>B</sup>, 大中貴恵<sup>B</sup>

3 核子系の精密な実験結果と正確な理論計算との比較から、 $\pi\pi$  交換 3 核子力 ( $\pi\pi$  3NF) の強度が決定された。残る  $\pi\rho$  3 NF、 $\rho\rho$  3 NF 等は高いエネルギーで効く。2 核子力は既に精密に決められている。従って、10MeV 近傍の 3 核子系反応観測は全て理論計算で再現できる筈である。ところが 10MeV 近傍には、再現できない有名な観測量、Ay puzzle と Space Star Anomaly がある。Ay puzzle は P 波核力が主に関与するので理論説明が試みられた (未成功) が、Space Star Anomaly は S 波核力に起因する断面積の異常なので深刻で、未だ理論説明の試みがない。Space Star Anomaly は  $n+d \rightarrow n+n+d$  断面積で見つかったが、中性子実験は誤差が大きい。そこで我々は、 $p+d \rightarrow p+p+n$  断面積を精密かつ系統的に測定して、クーロン力を扱える理論計算と比較した。Space Star では、終状態 3 核子が正 3 角形を作り、かつ正 3 角形がビーム軸と垂直である。1) 先ず正 3 角形とビーム軸のなす角度  $\alpha$  を  $0^\circ \sim 180^\circ$  に変えて測定したところ、 $\alpha = 90^\circ$  (垂直面) 付近でのみ異常が現れた。2) 次にビーム軸と垂直な面内において、正 3 角形を種々の 2 等辺 3 角形に変えて測定しているが、正 3 角形付近でのみ異常が現れるようである (未確定)。つまり、Anomaly は Space Star 近傍でしか起こっていない、ようである。これは原因を探るための重要なヒントである。我々の系統的实验を紹介し、予測される結果の意味を議論する。

## B-6      パイ中間子を含む核子有効場理論による二核子散乱の記述

佐賀大学<sup>A</sup>, 九州大学<sup>B</sup>, 東北公益文科大学<sup>C</sup> 久保博史<sup>A</sup>, 榮田達也<sup>B</sup>, 原田恒司<sup>B</sup>,  
山本 裕樹<sup>C</sup>

核子の間に働く力はクォークとグルーオンと呼ばれる素粒子の相互作用として理解できる事が分かっている。核子同士の相互作用をこの基本理論から理解したいと考えるのが自然な流れであるが、適切な計算手法が無いために、現時点では数値的なシミュレーションによるもの以外には望みがなさそうである。直接的な記述をあきらめたとしても、強い相互作用の基本理論との関係性を保ちつつ低エネルギーの現象を記述したい。これを可能にするのが有効場理論の方法である。この方法では理論に対称性で許される無限個の演算子が存在する。Wilson 流くり込み群を用いた解析により有効場理論の power counting(演算子の順序づけ) を決定する事ができる。本講演では、この方法を用いて決定したパイ中間子を含む核子有効理論の power counting に従った計算により得られる二核子系 S 波散乱の散乱振幅の結果と、くり込み群不変性について説明する。

## B-7      中性子過剰炭素同位体における全反応断面積の偶奇性

九大院理<sup>A</sup>, 北海道大学大学院理学研究院附属原子核反応<sup>B</sup> 佐々部悟<sup>A</sup>, 古立直也<sup>B</sup>, 田上真伍<sup>A</sup>, 葦茂工将<sup>A</sup>, 松本琢磨<sup>A</sup>, 清水良文<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

全反応断面積は原子核の大きさに相当する物理量である。安定核領域では、密度の飽和性から同位体の全反応断面積は質量数の増加に伴い単調に増加する。しかし、不安定核領域では密度の飽和性が成り立たず、同位体の全反応断面積を比較すると周辺の同位体に比べて大きな全反応断面積をもつ核が存在することが実験的に調べられている。これを全反応断面積の偶奇性と呼んでいる。このような核は、変形やハロ構造など原子核の大きさを実効的に大きくする機構を備えているはずであり、理論的興味の対象となる。今回我々は中性子過剰炭素同位体に注目し、その全反応断面積を解析すると共に中性子過剰炭素同位体の性質を探ることを試みた。

## B-8 全反応断面積の解析による $^{31}\text{Ne}$ の変形ハロ一構造の解明

九大院理<sup>A</sup>, 北大理<sup>B</sup>, 阪大核物理研究センター<sup>C</sup> 蓑茂工将<sup>A</sup>, 木村真明<sup>B</sup>, 緒方一介<sup>C</sup>, 清水良文<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

近年の実験技術の長足の進歩により、不安定核の性質の解明は着実に進展し、その研究対象は比較的軽い中重核のドリップラインにまで迫っている。その代表例が  $^{31}\text{Ne}$  や  $^{33}\text{Mg}$  などの中性子過剰核であり、このような中性子ドリップライン近傍の中性子数 20 周辺の領域は “island of inversion” と呼ばれ、大きな変形やハロ一構造などの豊富な話題で注目を集めている。現在、Ne 同位体や Mg 同位体の全反応断面積 (正確には相互作用断面積) などが測定されており、これらを解析することによって、island of inversion 核の性質の理解が進展すると期待されている。

全反応断面積は核の “半径” に敏感な量であり、不安定核特有の核密度の広がりを顕著に反映する。核の半径は変形やハロ一構造によって著しく増加するため、中性子過剰 Ne 同位体で測定された非常に大きな全反応断面積は、それらの可能性を強く示唆するものであった。したがって、この実験データを解析するには、変形やハロ一構造の記述が本質的に重要となる。

本研究では、反対称化分子動力学 (Antisymmetrized Molecular Dynamics, AMD) と二重畳み込みモデルを組み合わせた微視的理論によって、中性子過剰 Ne 同位体の全反応断面積を系統的に解析した [1]。AMD は、変形やクラスター構造を記述する上で極めて強力な手法である。これにより、核の変形を考慮した反応計算を行う。この解析を通じ、island of inversion 核の変形、さらに  $^{31}\text{Ne}$  のハロ一構造について定量的に議論する。

[1] K. Minomo, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 052503 (2012).

## B-9 全反応断面積の解析で探る変形ハロ一核の新たな候補

九大院理<sup>A</sup>, 北大創成<sup>B</sup>, ドイツ重イオン研究所<sup>C</sup>, 阪大理<sup>D</sup>, 東京理科大<sup>E</sup>, 埼玉大<sup>F</sup> 渡邊慎<sup>A</sup>, 田上真伍<sup>A</sup>, 蓑茂工将<sup>A</sup>, 木村真明<sup>B</sup>, 武智麻耶<sup>C</sup>, 福田光順<sup>D</sup>, 西村太樹<sup>E</sup>, 鈴木健<sup>F</sup>, 松本琢磨<sup>A</sup>, 清水良文<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

陽子数が 10~12 (Ne, Na, Mg)、中性子数が 20~22 の領域内の原子核は、「大きな変形」や「魔法数の破れ」といった特異な性質を示すことから、現在、実験・理論の両面から精力的に研究が進められている。先行研究 [1] によって、「反対称化分子動力学法 (AMD) により計算された密度」を用いた「二重畳み込みモデル (DFM)」によって、原子核の変形を考慮した反応計算が行われた。その結果、 $^{28-32}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$  at 240 MeV/nucleon 反応において、全反応断面積の実験データをよく再現し、これら Ne 同位体の変形が決定された。さらに  $^{31}\text{Ne}$  は大きな変形に加え、21 個目の中性子が極端に薄く広がった「ハロ一構造」を持つことが結論付けられた。

本研究では上記と同様の手法を Mg 同位体に適用し、RIBF における最新の実験データと比較することで、これら原子核の変形を探る。加えて今回の研究では、AMD の簡易モデルとして、AMD 計算から得られる変形度を参照した変形 Woods-Saxson 模型 (DWS) を提案する。DWS+DFM の計算を行った結果、それが AMD+DFM の計算の結果と類似しており、さらにそれらは実験データを全体的によく再現する。しかしながら、 $^{37}\text{Mg}$  に関しては実験データを大きく下回っており、これは DWS 計算で得られる  $^{37}\text{Mg}$  が弱束縛を再現できていないためと考えられる。 $^{37}\text{Mg}$  はドリップライン近傍の原子核で、変形した芯核に中性子が弱束縛した「変形ハロ一核」であることが疑われている原子核であり、核が弱束縛である効果は非常に重要となる。本講演では Mg 同位体に対する反応断面積の結果を示し、その後、 $^{37}\text{Mg}$  に対して行った解析を紹介する。

[1] K. Minomo *et al.* Phys. Rev. Lett. **108**, 02503 (2012)

## B-10 陽子弾性散乱における微視的光学ポテンシャルの標的核依存性

九大院理<sup>A</sup> 豊川将一<sup>A</sup>, 蓑茂工将<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

畳込み模型 [1] は入射核子と標的核内核子間の有効相互作用を標的核の密度で畳み込むことによって、核子-核間の光学ポテンシャルを微視的に決定する方法である。このようにして決定された光学ポテンシャルを微視的光学ポテンシャルと呼ぶ。それに対して、実験を再現するよういくつかのパラメータを調整して決定される光学ポテンシャルを現象論的光学ポテンシャル [2-4] と呼ぶ。

本講演では、微視的光学ポテンシャルが調整パラメータ無しに、微分断面積や偏極量の実験データを系統的に再現することを示す。更に、この微視的光学ポテンシャルと現象論的光学ポテンシャルが、安定標的核に対して似通っていることを示す。また微視的光学ポテンシャルの平均二乗根半径や体積積分などの性質が、標的核に対してどのように依存しているかを示す。最後に、安定核と<sup>6</sup>He や<sup>A</sup>Ne など中性子過剰の同位体とで、これらの性質にどのような違いが現れてくるかを議論する。

### 参考文献

- [1] K.Minomo, K.Ogata, M.Kohno, Y.R.Shimizu, and M.Yahiro, J. Phys. G **37**, 085011 (2010).
- [2] A.J.Koning and J.P.Delaroche, Nucl. Phys. A **713** 231 (2003).
- [3] S.Hama, B.C.Clark, E.D.Cooper, H.S.Sherif, and R.L.Mercer, Phys. Rev. C **41**, 2737 (1990).
- [4] E.D.Cooper, S.Hama, B.C.Clark, and R.L.Mercer, Phys. Rev. C **47**, 297 (1993).

## B-11 二重畳み込み模型を用いた<sup>4</sup>He 弾性散乱の解析

九大院理<sup>A</sup> 江頭慧<sup>A</sup>, 蓑茂工将<sup>A</sup>, 渡邊慎<sup>A</sup>, 佐々部悟<sup>A</sup>, 松本琢磨<sup>A</sup>, 八尋正信<sup>A</sup>

二重畳み込み模型とは、核子-核子間有効核力 ( $g$  行列相互作用) を入射核の核密度  $\rho_P$  と標的核の核密度  $\rho_T$  で畳み込み、核-核間のポテンシャルを求める方法である。

$g$  行列相互作用は密度依存性  $g(\rho)$  をもっているため、通常、 $\rho = \rho_P + \rho_T$  と仮定される。この仮定は、局所密度近似と呼ばれている。しかし、この近似の妥当性は必ずしも明確ではない。そこで、本研究では別の仮定として  $g(\rho_P)/2 + g(\rho_T)/2$  を考え、両者を比較・検証した。

新たな仮定により与えられた核-核間ポテンシャルは、<sup>4</sup>He 散乱において、従来の仮定より、よい実験との一致を与える。