

Planning Lecture | Technical division and Network : [Co-organized by Nuclear Data Division]

📅 Wed. Mar 12, 2025 1:00 PM - 2:30 PM JST | Wed. Mar 12, 2025 4:00 AM - 5:30 AM UTC 🏠 Room A(Zoom room 1)

## **[1A\_PL] Study of Three-body Nuclear Force and its Expectations for Nuclear Data Production**

Chair:Tokio Fukahori(JAEA)

[1A\_PL01]

### Three-body Nuclear Force

A New Vision of Matter in Nuclear Physics

\*Kimiko Sekiguchi<sup>1</sup> (1. Tokyo Sciense)

---

[1A\_PL02]

### Description of Nucleon Many-body Systems using Density Functional Theory

\*Takashi Nakatsukasa<sup>1</sup> (1. Tsukuba Univ.)

---

[1A\_PL03]

### Establishment of Nuclear Structure and Reaction Calculations for Nucleon Many-body Systems

\*Emiko Hiyama<sup>1</sup> (1. Tohoku Univ.)

---

[1A\_PL04]

### Expectations for Medical Applications of Three-Body Nuclear Force

\*Mikako Ogawa<sup>1</sup> (1. Hokkaido Univ.)

---

## 核データ部会セッション[「シグマ」調査専門委員会共催]

## 三体核力研究と核データ応用への期待

## Study of Three-body Nuclear Force and its Expectations for Nuclear Data Production

## (1) 三体核力 ～原子核物理の新しい物質観～

## (1) Three-body Nuclear Force ～A New Vision of Matter in Nuclear Physics～

関口 仁子

東京科学大学

物質のもととなる原子の中心には原子核が存在し、強い力である核力が働く。核力の成り立ちを理解し、核力から出発して原子核という量子多体系を理解する、これは原子核物理学の長年の重要課題となっている。この課題への挑戦がここ 20 年で大きく展開され、「三体核力」と呼ばれる核力が原子核の様々な現象を理解するためには不可欠である、という新しい視点が生まれた。三体核力とは、三つの核子が同時に作用することで引き起こされる核力の事を言う。

三体核力の存在そのものは長らく予想されていたが、実験的な検証が難しく、なかなか研究が進まなかった。我々は、三体核力の効果を探索し、その性質を調べるため、重陽子と陽子との散乱（重陽子-陽子散乱）実験を理化学研究所の加速器施設で行ってきた。三つの核子からなるこの散乱系では、実験値と厳密理論計算との比較から、直接定量的に三体核力の大きさ、運動量依存性、スピン量子数依存性といった諸性質を引き出すことができる。これまでに微分断面積の高精度測定によって三体核力の明らかな証拠を見つけ、重陽子-陽子散乱が三体核力研究に有効なプローブである事を示した。

我々の一連の実験をきっかけに、核力は二体核力だけではなく三体核力をも含めた理論の記述が進みつつある。さらに、核力をインプットとして原子核の様々な性質を記述する研究も進み、例えば原子核の結合エネルギーや、中性子星などに見られる高密度の核物質などにおいて三体核力は欠かすことの出来ない重要な力である事が指摘されている。

その様な中「三体核力を精緻に決定し、極めて精度の高い核力をインプットとする原子核の精密計算が実現すれば、それは原子核の物性（半減期、質量、励起エネルギー、半径、変形など）や核反応に対し、予言力の高いシミュレーションツールとなるのでないか」というねらいのもと、我々は ERATO 関口三体核力プロジェクトを開始した。

本講演では、我々が切り拓いてきた三体核力の実験的研究とその背景、また本プロジェクトを核データへつなげたいという思いも含め、今後の展望について言及したい。

**謝辞** 本研究は JST/ERATO（課題番号 JPMJER2304）の助成を受けたものである。

## 核データ部会セッション[「シグマ」調査専門委員会共催]

## 三体核力研究と核データ応用への期待

## Study of Three-body Nuclear Force and its Expectations for Nuclear Data Production

## (2) 密度汎関数理論を用いた核子多体系の記述

## (2) Description of Nucleon Many-body Systems using Density Functional Theory

中務 孝

筑波大学 計算科学研究センター

## 1. 緒言

密度汎関数理論は、原子・分子や固体などの多電子系の第一原理計算として有名であるが、原子核物理においては、Brueckner Hartree-Fock (BHF) theory に対して局所密度近似と密度行列展開を実行し導出される Density-Dependent Hartree-Fock (DDHF) theory として知られる理論と同一視されている。BHF では、原子核の最も基本的な性質である飽和性を定量的に再現することが困難であり (cf, Coester band)、三体力の必要性に絡めて様々な議論がなされてきた[1]。一方 DDHF では、密度行列展開から導出されるエネルギー密度に対して、飽和性を再現するように密度依存性を調整することで、原子核の定量的な記述が可能となり、DDHF と実質的に同等な現象論的エネルギー密度汎関数である Skyrme エネルギー密度汎関数計算、密度依存 Gogny 相互作用を用いた計算、相対論的平均場理論から発展した共変型エネルギー密度汎関数計算が幅広く用いられている。現在、これらはどれも原子核密度汎関数理論として知られている。

## 2. エネルギー密度汎関数による原子核の記述

## 2-1. 基底状態

原子核基底状態の性質については、実験的には質量や荷電半径、反応断面積などの測定が行われる。これらの物理量に対して、密度汎関数理論は定量的な記述を与え、例えば質量に関しては平均誤差で 3 MeV を切るエネルギー汎関数も開発されている。荷電密度分布などに対しても実験データの再現性は高い。開殻配位の原子核を含めた計算を実施するためには、エネルギー密度汎関数として通常密度の  $\rho_n$ 、 $\rho_p$  に加えて対密度  $\kappa_n$ 、 $\kappa_p$  を加えた密度汎関数を用意する必要があり、また変形を取り入れて自己無撞着に決定する必要がある。これらを有限核に対して実行できるオープンソースウェアが複数存在する。一方で、うまくいかない点も分かっている。例えば質量に関しては、陽子・中性子数が魔法数に対応する開殻配位の原子核の質量を再現させると、開殻配位の核種の質量を過大評価してしまうことが知られている。また、現在の汎関数は核力とのリンクが切れてしまっているため、核力から核構造を理解するという観点では不満足な点が残されている。

## 2-2. 励起状態

励起状態の記述には、主に二つの方法が採用される。一つは、配位混合を考慮することで基底状態に対して相関エネルギーを導入するとともに、励起状態を計算する方法である。生成座標法 (GCM) などが良く知られている。この方法は量子力学的な手法で分かりやすい一方、エネルギー密度汎関数のコンセプトとの整合性に問題がある。また、密度依存性からくる数値的な不安定性も大きな問題である。

もう一つの手法は時間依存密度汎関数理論に基づく手法である。基底状態の周りでの線形応答を考えると、励起状態の情報を得ることができる。魔法数周辺の球形の原子核に対する計算が系統的に実施され、最近では変形核を含めた開殻配位の核種に対する計算も行われるようになってきた。これに対しては、有限振幅法[2,3]と呼ばれる方法が現在世界的に広く使われ、系統的な計算も行われている。巨大共鳴状態の実験データを高精度で再現することが知られている。低エネルギー状態に対しては、集団ハミルトニアンからアプローチする手法が取られている[3]。

核反応に対しても時間依存密度汎関数計算が広く行われている。平均的な振る舞いをうまく説明することが知られる一方で、レアイベントの記述はできない。また、量子力学的なトンネル効果をフルに取り入れた記述ができないため、自発的核分裂などの計算を直接行うことができない。これに対して、時間依存密度汎関数理論に基づき、低エネルギー核反応の模型ハミルトニアンを微視的に導出するアプローチが取られている[4]。また、直接反応に対しては、上記の線形応答計算から遷移密度を計算し、反応模型に導入する形で計算が行われている[5]。

### 2-3. 核反応

核反応に対しても時間依存密度汎関数計算が広く行われている。この手法は古くは1970年代から用いられ重イオン反応の平均的な振る舞いをうまく説明することが知られる一方、レアイベントの記述はできないとされてきた。また、量子力学的なトンネル効果をフルに取り入れた記述ができないため、自発的核分裂の時間発展を直接追うことができない。虚時間発展法[1]といった手法が提唱されているが、現実的な計算例はまだ存在しない。これに対して我々は、時間依存密度汎関数理論に基づき、低エネルギー核反応の模型ハミルトニアンを微視的に導出するアプローチが取ることで一定の成功を収めた[4,5]。また、直接反応に対しては、定量的に必ずしも成功しているとは言い難いが、上記の線形応答計算から遷移密度を計算し、反応模型に導入する形で計算が行われている[6]。

### 3. 結語

本講演では、原子核密度汎関数理論の最近の発展を簡単にレビューし、上記の内容に関する原子核構造・反応に対するアプローチ、計算結果を紹介する。成功した点に加えて、うまくいかない点や問題点についても議論したい。また、時間が許せば中性子星物質を対象にした研究についても紹介する。

**謝辞** 本研究はJST/ERATO（課題番号JPMJER2304）の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] J. Negele, Rev. Mod. Phys. 54, 913 (1982).
- [2] T. Nakatsukasa, T. Inakura, and K. Yabana, Phys. Rev. C 76, 024318 (2007).
- [3] T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo and K. Yabana, Rev. Mod. Phys. 88, 045004 (2016).
- [4] K. Wen and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 94, 054618 (2016); *ibid* 96, 014610 (2017); *ibid*. 105, 034603 (2022).
- [5] K. Washiyama, N. Hinohara, and T. Nakatsukasa, Phys. Rev. C 103, 014306 (2021).
- [6] Y. Chazono, K. Yoshida, K. Yoshida, and K. Ogata, Phys. Rev. C 103, 024609 (2021).

## 核データ部会セッション[「シグマ」調査専門委員会共催]

## 三体核力研究と核データ応用への期待

## Study of Three-body Nuclear Force and its Expectations for Nuclear Data Production

## (3) 核子多体系の原子核構造・反応計算の確立

## (3) Establishment of Nuclear Structure and Reaction Calculations for Nucleon Many-body Systems

肥山 詠美子

東北大学

## 1. 緒言

物理学の興味のある課題の中には、少数粒子系（3体以上）のシュレディンガー方程式を「精密に」解くことに帰着する課題が多い。「精密に」解くことによって、新しい知見を得たり、新しい予言や発見に至ることがしばしばある。従って、少数粒子系のシュレディンガー方程式を、精密に解くことができる、容易に解くことができる、適用範囲が広い、大学院修士レベルでも容易に習得できるような計算法が存在すれば、心強い。しかし、そのような計算の開発は難しい。

原子分子の世界では、電子と原子核で構成されるが、ここでは、電子の質量が原子核よりも非常に軽いこと、相互作用であるクーロン力が比較的弱いだけ、よい近似が存在し、原子核物理分野よりも比較的、容易に解くことができる。一方、原子核物理の分野では、陽子や中性子で構成される核子の質量は同じ、相互作用は核力であり、強い相互作用であるために、近似法をできるだけ排除した計算法が必要である。

## 2. 無限小変位ガウス・ローブ関数展開法の提唱とその応用

そこで、「無限小変位ガウス・ローブ関数展開法」をいう3体、4体系のシュレディンガー方程式を厳密に計算する計算法を提唱した[1]。一般的に、少数系における

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon^l} \sum_{k=1}^{k_{\max}} C_{lm,k} e^{-\nu(\mathbf{r} - \varepsilon \mathbf{D}_{lm,k})^2}$$

シュレディンガー方程式を解くために、未知関数をできるだけ完全系に近い基底関数で展開し、ハミルトニアン

の行列要素を計算することで、一般化固有値問題に帰着させ、エネルギー固有値と波動関数を求める。この際、重要なことは展開する基底関数が「信頼できる」ものであることである。そこで、講演者は、次のような基底関数を提唱した。この基底関数を「無限小変位ガウス・ローブ基底関数」と呼ぶ。この基底関数によって、すべての粒子間の相関を取り入れることができる、波動関数の遠方の漸近形をよく記述できる。行列要素の計算が容易にできるだけ、解析的に実施することができる、という利点が生まれた。この基底関数の提唱のおかげで、4体問題だけでなく、5体問題以上の精密計算が可能になりつつある。実際、この計算法が厳密に数値解を与えるかを証明するために、世界中の少数多体系を計算する7つの研究グループと共に、 ${}^4\text{He}$  という4体問題について複雑な現実的核子間相互作用を使用して、その4体問題計算をし、その答えを比較するというベンチマークテストを実施した。その計算結果は、数10keVの精度で一致した[2]。

## 3. まとめ

本講演では、この計算法とその適用例として、4He原子系の3体～5体問題の計算について、説明し、本計算法が如何に有力な方法であることを示したい。

**謝辞** 本研究はJST/ERATO（課題番号JPMJER2304）の助成を受けたものである。

## 参考文献

[1] E.Hiyama, Y. Kino, and M. Kamimura, Prog. Part. Nucl. Phys. 51, 233 (2003).

[2] H. Kamada et al., Phys. Rev. C64, 044001 (2001).

---

Emiko Hiyama

Tohoku Univ.

## 核データ部会セッション

## 三体核力研究と核データ応用への期待

## Study of Three-body Nuclear Force and its Expectations for Nuclear Data Production

## (4) 三体核力の医学応用への期待

## (4) Expectations for Medical Applications of Three-Body Nuclear Force

小川 美香子

北海道大学 大学院薬学研究院

## 1. はじめに

放射性同位元素 (RI) を導入した化合物による病気の診断・治療を、それぞれ核医学診断・核医学治療と呼ぶ。たとえば、がん細胞に取り込まれる化合物に放射標識を施した薬剤をヒトに投与することで、がんの診断や治療が可能となる。この際、目的に応じた崩壊形式の RI を選択することが重要である。放射線のエネルギーや核種の半減期にも注意を払う必要がある。また、病気の進行を待つことが出来ない場合が多く、必要時に薬剤を入手できることが求められるため、安定供給が可能な RI である必要がある。一方、核医学に用いる薬剤の投与量 (物質質量) は非常に少ないため、元素の種類には大きな制限はない。

現在、種々の診断用、治療用 RI が核医学に利用されているが、製造方法まで含め医療応用に適した「完全な」性質を持っている RI はそれほど多くなく、より良い性質を持つ RI があればさらに望ましい。

## 2. RI の医学利用について

## 2-1. 核医学診断

診断には生体透過性の高いエネルギーの $\gamma$ 線・X線を放出する RI が利用される。消滅 X 線を放出するポジトロン放出核種も含まれる。ポジトロン放出核種は PET に、その他はガンマカメラや SPECT での画像化に用いられる。診断用の RI の半減期は、被ばくを低減するため長すぎないことが重要である。一方、短すぎても薬剤が体の中を回る時間が確保できないため適さない。RI を結合する分子の体内動態に併せた半減期を選択することも必要である。一般に、数分から数日の半減期を持つ RI が利用されている。例えば、ガンマカメラ・SPECT での画像化に利用されている Tc-99m は、Mo-99 からジェネレータにより病院内で製造することができるため、薬剤の入手が容易であり汎用されている。一方、Mo-99 は原子炉で製造されており、本邦では輸入に頼っているため状況によっては入手が不能となるなど、「完全」とは言えない。

## 2-2. 核医学治療

治療では、細胞を殺傷する力がある、ある程度以上のエネルギーを持った粒子線を放出する RI が用いられる。従来より $\beta$ 線放出核種が主に用いられているが、近年、 $\alpha$ 線放出核種にも注目が集まっている。治療用 RI の半減期は、十分な治療効果を発揮するためある程度以上必要であるが、長すぎると非特異的に集積した薬剤による正常組織への被ばく量が多くなり、副作用につながる。そのため、一般に数日程度の半減期を持つ核種が利用される。例えば、近年注目されている $\alpha$ 線放出核種である At-211 は、その製造に原子炉を必要とせず、安定核種である Bi-209 から加速器で製造することが可能である。子孫核種による非特異的な被ばくも無い。ただし、半減期が 7.2 時間でありやや短い。

## 3. まとめ

実際に臨床で使える薬剤とするには、RI の物理的な性質に加え、標識合成の容易性も重要である。金属 RI ではキレート反応により比較的容易に標識することができるが、ハロゲン原子等では共有結合を作るための化学が必要である。三体核力研究により、簡易に利用可能な新しい核データが創出されれば、物理・化学的性質を含め「完全」な RI が供給される未来が来ると期待する。

謝辞 本研究は JST/ERATO (課題番号 JPMJER2304) の助成を受けたものである。

Mikako Ogawa

Hokkaido Univ.