

## 課題名 陽子放出をともなう放射性崩壊と量子もつれ

### Proton-emitting radioactivity and quantum entanglement

大石知広

茨城工業高等専門学校

#### 1. 研究目的

本研究では  $2p$  放出崩壊とその量子もつれの計算を行った。計算手法としては申請者が開発してきた「時間発展 3 体模型」および「平均場計算に準拠した結合定数解析接続法 (ACCC 法)」を採用した。この 2 つの手法はどちらも  $2p$  放出を起こすような量子共鳴状態を記述する能力を備えている。 $2p$  放出の寿命 (確率) と量子もつれの強さとの相関関係などを議論した。

#### 2. 研究成果の内容

原著論文[1]:  $2p$  放出を起こす原子核に結合定数解析接続 (ACCC) を適用し、この方法が時間発展 3 体模型の結果、および実験データの両方に対して矛盾がないことを確認した。 $2p$  放出のエネルギーと寿命が、陽子間の相互作用に対して強い依存性を持つことを確認した。 $6\text{Be}$  の基底状態と  $16\text{Ne}$  の  $2+$  共鳴については、陽子間相互作用に応じて、短寿命系から長寿命系へと滑らかに移行することが示された。一方、 $16\text{Ne}$  の 1 番目と 2 番目の  $0+$  共鳴では、サブシステムである  $15\text{F}$  核における 2 つの共鳴準位の結合により、エネルギーと幅が複雑な挙動を示した。総じて、ACCC 法が  $2p$  放出を解く選択肢のひとつとして有効であることが確認できた。

原著論文[2]: 本研究では時間依存三体モデルを用い、 $16\text{Ne}$  原子核の  $2$  陽子放出がスピン量子もつれした陽子対の供給源となる可能性を明らかにした。放出過程が三体同時の「民主的放出」で進行する場合、初期状態のスピン一重項相関が反映され、放出された陽子間に、局所的な隠れた変数理論の限界を超える顕著なスピン相関が発現することを確認した。この相関はベルの不等式の破れ (量子もつれ) に相当し、放出後も維持される。一方で逐次放出や初期相関の欠如はこの特性を消失させる。本成果は、原子核の放射性崩壊が量子もつれの自然な発生源となり得ることを示唆している。

#### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

当初、GPU マシンの利用が妥当と判断して Pegasus の利用を申請したが、コード開発が難航したこともあり、大規模な GPU 数値計算まで実装・実行することはかなわなかった。それでも GPU マシン用のコード移植作業を実機で行えたことは、数値計算の効率化に一定の効果があった。また通常の CPU ベースの数値計算にも、本プログラムによって

提供された計算機環境が役立った。

4. 今後の展望

今後は放射性崩壊における陽子・中性子間のスピン相関を評価する。陽子同士の場合と異なり、異種粒子の間に局所的な隠れた変数理論の限界を超えるような CHSH スピン相関が存在するか否かを議論する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

[1] Tomohiro Oishi, and Msaaki Kimura, “Analytic continuation in coupling constant applied to two-proton emitters”, Physical Review C 112 014305 (2025). <https://doi.org/10.1103/ckxc-r2c3>

[2] Tomohiro Oishi, and Msaaki Kimura, “Two-proton emission as source of spin-entangled proton pairs”, Physics Letters B 877, 140439 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2026.140439>

(2) 学会発表

大石知広、“Spin correlation and entanglement in two-proton radioactivity”、RIBF ULIC mini-WS043 「量子もつれと原子核物理」、理研・仁科センター、埼玉県和光市【2025/05/06】 <https://indico2.riken.jp/event/5169/>

大石知広、“Spin correlation and entanglement in two-proton radioactive emission”、RCNP 研究会「量子多体系におけるスピン自由度の織り成すダイナミクス」、大阪大学・核物理研究センター（RCNP）、大阪府茨木市【2025/10/29-31】 <https://indico.rcnp.osaka-u.ac.jp/event/2594/>

| 使用計算機  | 使用計算機に○ | 配分リソース* |     |           |
|--|---------|---------|-----|-----------|
|  |         | 当初配分    | 移行* | 一般利用による追加 |
| Pegasus  | ○       | 2,800   |     |           |
| Miyabi-G   |         |         |     |           |
| Miyabi-C   |         |         |     |           |
| ※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。<br>*バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入 |         |         |     |           |