

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860643

氏 名 福井徳朗

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地(派遣先国名) 用務地: Napoli (国名: Italia)

2. 研究課題名(和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

連続殻模型を用いた非束縛核の定量的理解3. 派遣期間: 平成 30 年 9 月 1 日 ~ 令和 元年 10 月 25 日

4. 受入機関名及び部局名

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意

書式任意(A4判相当3ページ以上、英語で記入也可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

本研究は、原子核物理における最重要課題である、非束縛核(束縛状態を持たず、共鳴状態としてのみ存在する原子核)の性質の解明を目指したものである。非束縛核は開いた量子系、いわゆる open-quantum system (OQS)であり、原子核の存在限界を超えた極限状態にある核子多体系である。非束縛核ではこれまでの原子核物理の常識が覆る新奇な存在形態が示唆されている。しかし、過去の関連する研究では、異なる模型が矛盾する結果を導いているだけでなく、定量的な問題のため非束縛核の基底状態の構造(スピン・パリティおよび共鳴エネルギー)に大きな不定性が残っている。さらに、非束縛の性質をどのように観測量と結びつけるかという議論は、重要であるにもかかわらず、理論研究で軽視されていると言わざるを得ない。このような状況下で、本研究では、

(a) OQS における連続状態の結合と 3 体力の寄与のコヒーレントな寄与の解明

(b) 非束縛核を生成する核反応の精密な理論的記述

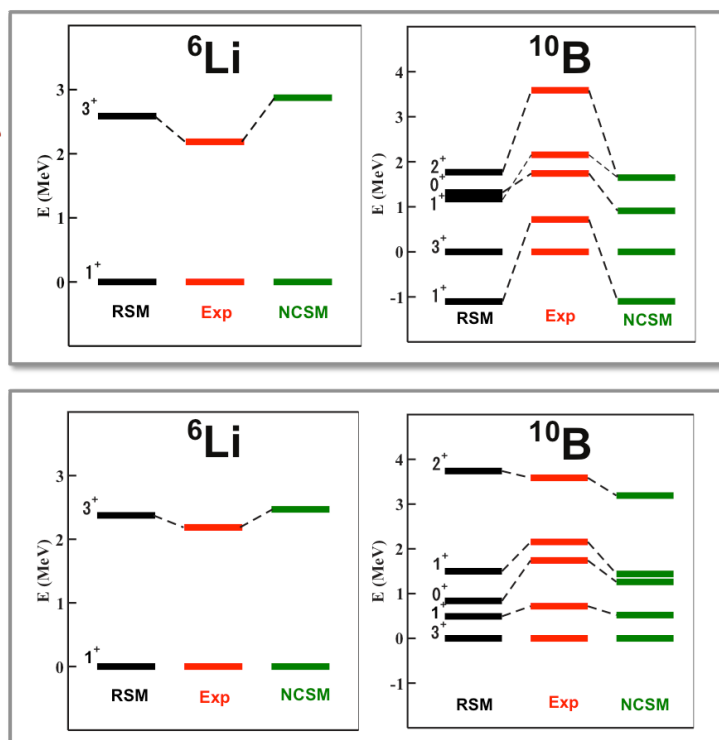
を目的とし、上記問題点の克服を図る。

本研究初年度は、目的(a)実現のため、カイラル有効場理論(量子色力学に立脚した理論で、世界最先端・最高水準の核力を導く)に基づく相互作用(カイラル相互作用)を、殻模型(独立粒子描像に基づく核構造論で、簡潔であるとともに定量的な成功を収めてきた模型)のインプットとなるように、3 体行列要素の定式化および計算コードの開発に取り組んだ。具体的には 3 体系の重心運動の分離、3 体波動関数の反対称化、非正則化関数を用いた Jacobi 運動量表示における行列要素の計算、正規順序近似による 3 体演算子の 1 体・2 体化である。これらの定式化を完了し、数値計算のためのコードを作成した。計算コードでは、MPI + OpenMP による並列化を実装し、イタリア CINECA が提供するスーパーコンピュータ MARCONI を用いて、大規模計算が可能な環境を整備した。

まずはカイラル相互作用の 3 体力の寄与を確認するため、束縛核での研究を遂行した。具体的には、 p 殻核におけるベンチマークテスト、そして fp 殻核における殻進化(中性子数の増加とともに原子核の 1 粒子構造が進化していく現象。中性子を増やし続ければ、やがて非束縛核に到達する)に着目した。これは、非束縛核を研究する上で必要なステップである。右図に示すように、 p 殻核領域では、3 体力が原子核の低励起スペクトルに本質的に寄与していることを示した。また、第一原理計算の結果と整合する結果を得た。これは、我々のモデルが第一原理計算と比較して単純でありながら、それに匹敵する

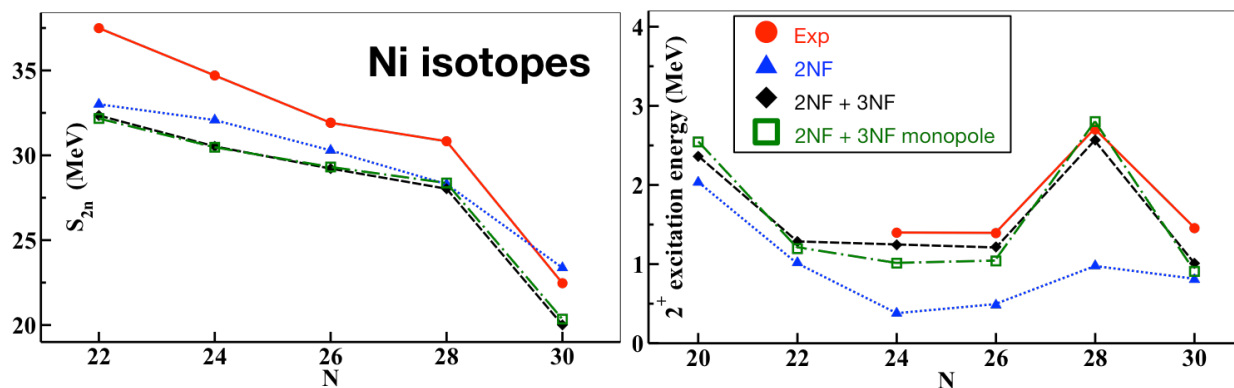
2NF only

2NF + 3NF



${}^6\text{Li}$ および ${}^{10}\text{B}$ の励起スペクトルにおける、本研究の結果(RSM)と実験値(Exp)および第一原理計算の結果(NCSM)との比較。上が 3 体力なし、下が 3 体力あり。

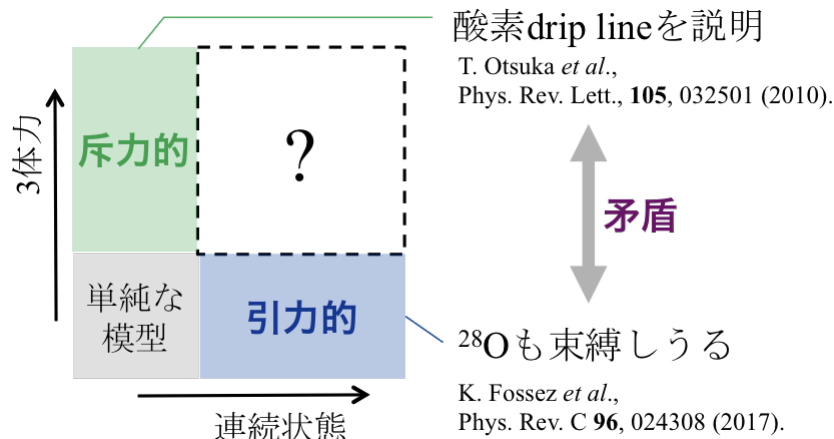
精度を有することを示している。一方、下図に示すように fp 殻領域における Ni 同位体では、系を記述する Hamiltonian のうち、その単極子成分(球形平均場を記述する)への 3 体力の寄与が非常に大きく、この寄与が殻進化の説明のために必要であることを示した。これにより、非束縛研究の基盤が整った。



中性子数 N の関数としてみた Ni 同位体の 2 中性子分離エネルギー S_{2n} (左) および第一励起状態のエネルギー準位 (右)。3 体力を含まない計算結果(▲), 3 体力を含む計算結果(◆), Hamiltonian の単極子成分にだけ 3 体力の寄与を取り入れた計算結果(□)の実験値(●)との比較。

これらの結果は、後記する「6. 研究発表」の業績のうち、2 本の学術論文として出版されたほか [(1).2, (1).7], 3 件の国際会議等で報告された[(2).1-3]。

次に我々は、酸素同位体のドリップライン核 ^{24}O およびドリップライン外に位置する非束縛核 ^{26}O , ^{28}O を研究対象とした。これらの原子核に対して、過去に矛盾する二つの論文が出版されている(図参照)。一つは、3 体力を陽に扱う一方で連続状態の寄与を無視した模型を用いており、3 体力の斥力的性質により、 ^{24}O がぎりぎり束縛し、



同時に ^{26}O が束縛しないことを説明している。この結果は実験的事実と整合している。ただし、この模型から得られる基底状態のエネルギーは、いずれの酸素同位体に対しても実験値と整合しない。したがって、酸素同位体のドリップラインの位置を定性的に説明しているに過ぎない。他方、3 体力を無視しているが、連続状態の結合を厳密に扱った模型では、連続状態結合が強い引力として働き、結果として、実験事実と反して ^{26}O や ^{28}O も束縛するという結論を導いている。連続状態の寄与が重要である可能性を示した点は価値があるが、定量的には受け入れられない結果である。

この矛盾の解決には、連続状態の結合と 3 体力の寄与を同時に分析する必要がある、両者のコヒーレントな寄与(図の?の部分)の解明が急務である。我々は、連続殻模型の一つである Gamow 殻模型(殻模型に連続状態の結合の自由度を取り入れた模型)を採用することによって、その寄与の解明を試みた。

Gamow 殻模型のインプットは、本研究 1 年目で構築したカイラル相互作用の行列要素である。従来の Gamow 殻模型では、相互作用を現象論的に決定している。しかし、上記の連続状態の結合が存在するため、相互作用のパラメータフィットが容易ではなく、結果として現象論的相互作用が大きな不定性を持つ。これが従来の研究における定量性の問題の原因である。本研究では、現象論的パラメータを包含しないカイラル相互作用をインプットとすることで、定量性を担保している。

上述の模型を用いた計算の結果、3 体力と連続状態のコヒーレントな寄与は極めて大きいことが判明した。つまり、コヒーレントな寄与がどれくらい重要なかを定量的に示した。また、我々の模型は、酸素同位体のドリップラインを実験結果と無矛盾に説明する(^{24}O が束縛し、それよりも重い核が束縛しないという事実を説明)。それだけでなく、実験値と整合する基底状態のエネルギーを得ることもできた。本研究により、過去の矛盾が解決された。上記結果をまとめた論文を執筆し、Physics Letter B に投稿した。現在、査読中である。なお、本研究は、Gamow 殻模型に精通した北京大学の Furong Xu 教授のグループとの共同研究である。

上記と平行して、目的(b)に関して、連続殻模型によって得られた非束縛核の構造の情報(波動関数や分光学的因子)をインプットとした核反応計算に着手している。特に、非束縛核を生成する移行反応を対象としている。非束縛核を生成する移行反応においても、上述の連続状態との強い結合は重要であり、その自由度を取り入れた反応模型を構築中である。

なお、令和元年 11 月 1 日付けで国内研究職への着任が決定したため、従来の派遣期間を 311 日間短縮し、海外特別研究員としての用務を令和元年 10 月 25 日までとした。大幅な期間短縮を実行したにもかかわらず、派遣期間内に上述の成果を得られた事実は、海外特別研究員として実行した研究活動が有意義であったことを示している。