

B02 班 「中性子過剰な中低密度核物質の物性」

2012年度、2013年度成果報告

代表 中村隆司 東京工業大学理工学研究科

中性子星は中性子を主成分とする巨大な原子核、量子系とも言える。したがって、中性子を多く含む中性子過剰核の研究は、中性子星の微視的性質を地上の実験で調べる有力な手段となる。

本計画研究では、さまざまな中性子過剰核を、最先端の重イオン加速器（理研 RI ビームファクトリー RIBF）を用いて不安定核ビームとして生成し、その“反応”を駆使して、標準核密度から希薄核密度までの密度領域について中性子過剰核物質の物性を明らかにすることを目指している。特に、標準核物質密度付近での核物質の状態方程式（EOS）の解明、中性子星の超流動状態の解明が重要である。そのため1）中性子過剰核（中性子スキン核）の核応答の研究、2）希薄核物質中でのダイニュートロン相関の研究、3）中性子超過剰な核子多体系（非束縛核）の探索、の3つの課題に取り組んでいる。

2012-2013年度にかけては、それぞれの課題について、以下のような進展・成果があった。

1) 中性子過剰核（中性子スキン核）の核応答の研究（梶野特任助教、中村）

中性子過剰な核物質の状態方程式（EOS）の決定で重要となるのが対称エネルギーの密度依存性である。ここでは、この主要項（密度による展開の第0次と圧力項と呼ばれる1次の項）を中性子スキン核の電気双極子応答（励起スペクトル、図1参照）を用いて導出することを目指している。中性子スキン核の電気双極子応答は、図1に示すように、通常核にはほとんどないピグミー共鳴と呼ばれるエネルギーの低い成分をもつことが特徴である。本研究では、中性子過剰核のピグミー共鳴の実験のために γ 線カロリメータの建設を行う。2012年度には、実験のシミュレーションコード（特にガンマ線カロリメータのシミュレーション）、最初のプロトタイプ検出器の建設を行い、テスト実験を開始した。

2013年度には、D01班(理論班)と強く連携し、具体的な実験立案を進めた。特に最もピグミー共鳴の測定に適した中性子過剰核は何かを探った。D01班の稲倉研究員は、広範囲の中性子過剰核について、中性子スキン、および電気双極子応答とEOSとの相関を系統的に調べ、ピグミー成分と双極子分極率の両方を同時に調べることにより、高い信頼度でEOSの主要項や中性子スキン厚が導出できることを明らかにした。その結果、中性子過剰なカルシウム同位体 $^{50,52}\text{Ca}$ が強いピグミー共鳴が期待できることから、これらの電気双極子

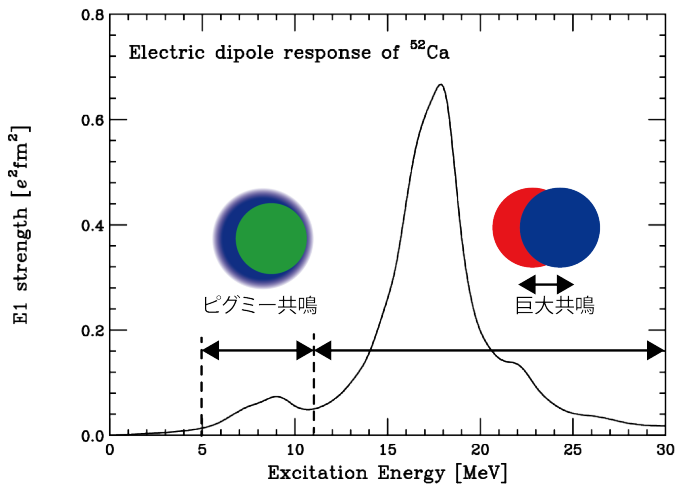


図1. 稲倉氏(D 班研究員)による ^{52}Ca の電気双極子応答の予想スペクトル。励起エネルギー8MeV付近に中性子スキン核に特有のピグミー共鳴が現れると予想さ

応答を測定することを決定した。これらは、クーロン励起後のガンマ崩壊の過程が比較的単純であること、比較するための ^{48}Ca (安定核) の電気双極子応答のデータを公募研究で参加した民井氏がすでに取得していること等を勘案した。開発したシミュレータでも実験の実現性を確認した。この実験提案は2013年に理研 RIBF の PAC (プログラム委員会) において高い評価を得、採択された。なお、具体的な実験の計画立案において、本学術領域で行ったワークショップ “SAMURAI International Collaboration Workshop 2013” (2013年度) や、ミニワークショップ “原子核 E1 応答と核物質の状態方程式” (同) が活かされている。

一方、図2に示すガンマ線カロリメータ(CATANA)については、2012年度から進めていたシミュレータコードを完成させ、上記の実験提案の完成に活かした。また、CsI(Tl),CsI(Na)結晶を用いたプロトタイプ制作、テスト実験を重ね、仕様の決定がほぼ終わった(図2)。2014年度には建設を加速させ、2015年度には実験を行う予定で進めている。

また、この実験に必要なその他の装置 (RIBF の多種粒子測定装置 SAMURAI,中性子検出器 NEBULA) については、下記で示すように、クーロン分解反応等を行い、その高い性能を確かめた。

2) 希薄核物質中でのダイニュートロン関連の研究 (中村、近藤)

2個の中性子が強い相関をもつかどうか、どのような密度依存性をもつかは中性子星の超流動現象を理解する上でも重要である。ミグダルは密度が低い核表面での2個の中性子の空間的な強い相関「ダイニュートロン」を約40年前に予言したが、いまだに確認されていない。これは、中性子星の表面付近での2中性子超流動のふるまいを理解する上でも重要である。本研究では、2個の中性子をハロー成分にもつ2中性子ハロー核のクーロン分解実験を行い、ダイニュートロン関連の解明を行うことを目指している。

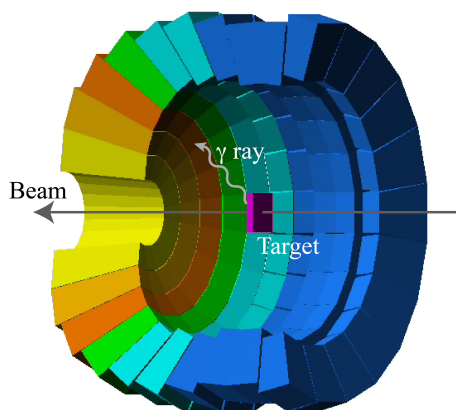


図 2. γ 線カロリメータ (CATANA) の完成予想図 (模式図)。CsI(Na)結晶でガンマ線を検出する。相対論的速度で進む残留核からのガンマ線を測定するため、ドップラー効果の補正が必要である。そのため、ガンマ線の放出角度が決められるように細分化されている。

2012 年度には, ^{19}B , ^{22}C のクーロン分解反応実を、理研 RIBF の多種粒子測定装置 (SAMURAI)で行った。2013 年度にかけて、この実験のオフライン解析が進められ、まだプレリミナリーながらもダイニュートロン相関の導出にも重要な電気双極子応答の強度分布の結果を得ている。現在詳細な解析を進めている。

多種粒子測定装置 SAMURAI は 1)のピグミー共鳴の実験にも利用されるが、この実験はその Day-One Campaign 実験 (最初の実験) として採択され、その高い性能が本実験により確かめられた。また、本研究でも D01 班との連携(松尾氏、稲倉氏)を進めており、また、公募研究の萩野氏とも ^{22}C のダイニュートロン相関で共同研究を進めている。

一方、2013 年度には中性子ハローの微視的構造をクーロン分解法と核力分解法の組み合わせで分析する方法を開発した。これは、このダイニュートロン相関の研究でも応用できることが期待される。この結果、中性子過剰なネオン同位体 ^{31}Ne 核が変形した中性子ハロー核であることをつきとめ論文発表し (Phys.Rev.Lett.112,142501(2014)) ,プレス発表も行った。さらに ^{37}Mg についても同様のハロー構造を発見し、論文発表し、(Phys.Rev.Lett. 112,242501(2014).)、これについてもプレスリリースした。

3) 中性子超過剰な核子多体系 (非束縛核) の探索 (下浦、近藤、中村)

本研究では4中性子系(テトラニュートロン)、酸素 $28(^{28}\text{O})$ など未知の非束縛な核子多体系を探索し、こうした非束縛系の質量 (エネルギー) を調べることにより、中性子過剰な核物質の EoS を解明する上で重要な、「核力」の理解、特に核力のアイソスピン、密度依存性

が理解することを目指している。

特に、2重閉殻構造をもつことも期待され、4中性子系を内包すると期待される ^{28}O の観測、および少数核子系の特異構造として注目されている4n系の観測が具体的な目標である。観測されればどちらも世界初となる。

2012年度には、酸素同位体の非束縛原子核 $^{25,26}\text{O}$ の生成実験を、SAMURAIを用いて行った。これは ^{28}O の実験の前駆的な実験と言えるが、3体力の解明や寿命の長い2中性子放射性核の探索など、世界的にも非常に注目されている課題である。2013年度にかけてその解析を進め、 ^{26}O については殻構造の進化や「3体力」に感度のある第一励起準位の特定に世界で初めて成功した。また、 ^{26}O の基底状態が2中性子分解のしきい値のすぐ上にあることも確認され、有限の寿命をもつ世界初の2中性子放射性核の可能性も出てきた。 ^{28}O の実験については実験計画が理研RIBFのPACにおいて最高評価を得、2015年度の実験に向けて準備を本格化させている。

一方、このような4中性子系を効率よく測定するための次世代型中性子検出器についてもその仕様が固まり、その建設を、実験分担者の下浦（東大CNS）が中心となって進めている。通常、100-300 MeVの中性子の測定は、検出器内の陽子との散乱で、反跳を受けた陽子の測定により実現され、その検出効率は、検出器の物質を増やすことで高めることができる。しかしながら、高速で飛行している中性子対などのような運動量の大きさと向きがそろった複数の中性子を同時に測定する場合、複数の中性子が検出された事象と一個の中性子が検出システム内で散乱して複数の位置で信号を出す事象（クロストーク事象）を区別することが非常に困難である。次世代型中性子検出器では反跳陽子の飛跡を測定することにより、検出器内の中性子をトラックすることで、真の複数中性子事象とクロストーク事象の識別を行う。これまで、反跳陽子の飛跡測定の精度、検出効率、価格を含めた実現性を検討し、基本設計を行った。厚さ3mm、幅6mm、長さ100mmの短冊型のプラスチックシンチレータを16本横に並べたホドスコープを一つのモジュールとし、それを多層に重ねるという方式を確定し、プロトタイプ制作を始めている。シンチレーション光の読み出しは当初は多アノード光電子増倍管を想定していたが、最近安価で普及してきたMPPCを採用することにした。不感領域が小さくなり、検出器がよりコンパクトでスクエアビリティを高めることができる。読み出し回路系は、MPPCからのアナログ信号を、タイミングと波高に対応するパルス幅をもつ信号に変換し、マルチストップ時間デジタル変換器で読み出す予定である。