

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740166
 研究課題名（和文）
 質量欠損分光を用いた弱束縛核の圧縮性の測定
 研究課題名（英文）
 Measurement of the compressibility on weakly-bound nuclei by missing mass spectroscopy
 研究代表者
 馬場 秀忠 (Baba Hidetada)
 独立行政法人理化学研究所・情報処理技術チーム・リサーチアソシエイト
 研究者番号：10415268

研究成果の概要（和文）：

弱束縛核の圧縮性は中性子星や超新星爆発を理解するためにとっても重要なパラメータである。本研究ではアイソスカラー双極子共鳴を逆運動学の質量欠損分光を用いて測定し、圧縮率を導き出す方法論が確立された。この測定には大強度不安定核ビーム、高分解能スペクトロメータおよび位置感応型高エネルギー γ 線検出器が必要であり、これらの性能評価がなされた。

研究成果の概要（英文）：

The compressibility on weakly-bound nuclei is one of the very important parameters to understand neutron star and super nova explosion. In this research, the methodology to determine the compressibility is established by selectively measuring isoscalar dipole resonances with the missing mass method. For measurement, high-intensity unstable-nucleus beam, a high-resolution spectrometer and high-energy gamma-ray detectors with position sensitivity are required. The performance evaluations of these components are performed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000		1,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	420,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 ・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：不安定核実験、弱束縛核、核の圧縮性、 γ 線検出器、質量欠損分光

1. 研究開始当初の背景

未解決の原子核研究の1つに「核の圧縮性」というテーマがある。原子核の密度は質量数によらずほぼ一定であると考えられて

いたが1980年代のアイソスカラー単極子共鳴状態の発見により高励起エネルギー領域に核全体が膨張収縮（密度振動）する状態の存在が確認された。その後、核の部分により密度が異なるアイソ

スカラー双極子状態も報告され、核の圧縮性についての研究が進みつつある。これらはいずれも安定核における報告であり、近年では中性子星や超新星爆発といった圧縮中性子過剰物質がもたらす現象を理解するために安定核から遠く離れた中性子過剰核（特に弱束縛核）の圧縮性を測定が期待されている。

安定核における実験結果から陽子と中性子数が同じ程度の対称核物質の硬さ（非圧縮率）についてさかんに議論がなされている。これらの実験は通常 α 非弾性散乱を用いて行われる。 α 粒子はスピン 0、アイソスピン 0 でありアイソスカラーナチュラルパリティ状態を選択的に励起することが可能であるため、角度分布が移行角運動量 $L=0$ の特徴を示せばアイソスカラー単極子状態、 $L=1$ であればアイソスカラー双極子状態と一意に決まる。また、 α 粒子の第一励起状態が 20MeV と非常に高く、 α 粒子自身の励起が起こりにくいため、他のプローブに対し大きなアドバンテージを持っている。

最近の圧縮性の興味は非対称核、特に中性子過剰核に移りつつある。これは中性子星や超新星爆発といった圧縮中性子過剰核物質がもたらす現象が知られているが、未だその振る舞いは解明されておらず、非対称核の圧縮性の実験が求められている。中性子星のような巨大な核物質を考えた場合、その中心部では強力な重力によって原子核は存在できずクォークグルーオンプラズマ (QGP) 状態層を形成しており、また外側になるにつれ圧縮された中性子超流体層、さらに表面付近では原子核層といった構造を持っていると予想されている。これに関連し、米国ブルックヘブン国立研究所では QGP 状態を明らかにしようと高エネルギー重イオン衝突実験を行っている。また、核物質の状態方程式 (EOS) を導き出そうと米国ミシガン州立大学では中間エネルギーの重イオン衝突実験を行っている。これらの実験では人工的に高温高密度核物質を作り出し、マクロスコピックな観点から核物質の性質（圧縮性を含んで）を理解しようとしている。

一方で小さな非対称核物質、すなわち不安定核に対する圧縮性の実験の報告例は非常に少ない。最近では標的からの反跳粒子を測定することで、不安定核の圧縮状態を測定する試みが理化学研究所及び仏国 GANIL 研究所でなされているが、検出器の制約から標的に α 粒子を用いることができないためアイソスカラー単極子・双極子状態を特定することが難しく、主だった結果はまだ報告されていない。

そこで本研究では中性子過剰核のうちでも特に弱束縛核の圧縮性を測定するために、逆運動学の質量欠損分光を用いてアイソスカラー双極子状態を選択的に測定する方法を考案しその方法論を確立させる。

2. 研究の目的

本研究ではこの弱束縛核における圧縮状態を実験的に測定することが最終的な目的である。そのための方法論を確立することが第一の研究となる。

中性子ドリップライン近傍の非対称核の多くは中性子ハロー、スキン構造を持っている。これらの核では中性子が弱く束縛されているため、安定核に比べて弱い力で圧縮・膨張することが可能であると考えられる。実際に浜本、佐川らの理論的研究 [PRC 53 (1996) R1492、PRC 57 (1998) R1064] では 28O や 60Ca などの中性子ドリップライン核のアイソスカラー単極子、双極子状態の強度の大部分が 10 MeV 以下の低励起状態に現れると予想している。（実際には 28O 核は束縛状態として存在できないことが報告されている。

[PLB 448 (1999) 180]) 弱束縛核の圧縮状態は上記参考論文の通り低エネルギー領域に大部分の強度が現れると予想されているが、もちろん実際に測定した例は無く、本研究が世界初の試みとなる。実際に低エネルギー圧縮状態が顕著に現れれば、これは弱束縛中性子が弱い力で膨張・圧縮されることが可能という直接的証拠になり、原子核研究全体にインパクトを与える。また測定した強度分布から弱束縛中性子の圧縮性に換算することが可能で、これはミクロスコピックな観点から核物質の圧縮性を解く一つのパラメータを得ることになる。また、弱束縛核の構造の理解にも貢献するため大変重要な研究である。

3. 研究の方法

今まで非対称核の圧縮性が測られてこなかった背景は、非対称核 (= 不安定核) を大強度で生成することができる加速器施設が無かったことが直接的原因である。しかし理化学研究所では世界に先駆けて RI ビームファクトリー (RIBF) を建設し、大強度不安定核ビームを用いた実験が 2007 年から開始された。

実験手法としては γ 線直接崩壊チャンネルのみを選択的に測定し、質量欠損分光を用いて励起エネルギーを求める。不安定核が粒子閾値以上の高励起状態になると、ほとんどの場合粒子崩壊を起こし、崩壊粒子や γ 線の不変質量から励起エネルギーを求めることが可能である (不変質量分光)。しかし中性子過剰になるにつれ、多数の中性子を検出することが必要でありまた崩壊様式も複雑になるため、実際に実験を行うのは非常に難しい。申請者の博士論文では不安定核の圧縮性測定の第一段階として軽い不安定核 14O に対する α 非弾性散乱実験を行い、不変質量法を用いて不安定核のアイソスカラー応答強度分布を世界で初めて求めたが、もちろんすべての崩壊チャンネルは測定できていない。そこで本研究では励起状態から粒子崩壊せずに γ 線を放出し基底状態に直接崩壊したチャンネルのみを測定する方法を提案する。 γ 線直接崩壊は粒子崩壊に比べて 1/100 程度の確率でしか起らず、現存の加速器施設では実験が困難であるが、RIBF の大強度不安定核ビームを用いれば

十分な統計を得ることができる。また、多数の崩壊粒子を検出する必要がなくシンプルな計測システムで実験可能である。

対象となる原子核は 22-240 のような中性子過剰の弱束縛核となる。双極子状態からの γ 線直接崩壊は 0+ の基底状態とのカップリングが強く、他の状態よりも遷移確率が高い。実際に $L \geq 2$ の遷移は $L=1$ よりも 1000 倍以上少ないという報告がされている [PRC 41 (1990) 920]。また $L=0$ の遷移はスピンパリティ的に禁止されている。したがって γ 線直接崩壊を測ることによりアイソスカラー双極子状態 (スクイージングモード) を選択的に得ることができる。クーロン力やアシソスピンミキシングによりアイソベクター型の双極子状態も励起されるが、標的に α 粒子を使うためこれらの影響は無視できるほど小さい。

一般的に質量欠損分光では励起エネルギーを得るために標的からの反跳粒子を測定する。しかし反跳粒子が持つエネルギーはとても小さいため、標的にヘリウムを用いることは非常に難しい。本研究では γ 線崩壊のみを測ることから入射ビームエネルギーと核反応後のビームエネルギーの差から励起エネルギーが求められる。この場合、入射粒子のエネルギーを高精度で測定する必要があり、RIBF に建設される SHARAQ スペクトロメータ (2009 年より稼動開始) は非常に高い運動量分解能を持つため十分な精度を得ることができる。その他 α 標的中のエネルギーストラグリングにより分解能が劣化するが、標的厚が 50mg/cm² 程度であれば SHARAQ スペクトロメータと同程度の分解能広がりには抑えられる。逆運動学の質量欠損分光を行う場合、放出 γ 線による反跳を考慮しなければならない。例えば 120MeV の 220 核が 15MeV の γ 線を出した時、 γ 線放出角度によっては実際の励起エネルギーより 10MeV も違って検出される。この γ 線による反跳は γ 線の放出角度が解れば補正することができる。そのため、標的の周りに 20MeV 程度までの γ 線を測定するための位置感応型高エネルギー γ 線検出器が必要となる。このような検出器は現存しないため、位置感応型高エネルギー γ 線検出器の開発を行う。具体的には BGO 検出器を用いる。BGO 結晶は比重が重く、高エネルギー γ 線に対し高い検出効率を持っている。BGO 検出器は NaI 検出器などに比べて分解能は劣るが、本研究では γ 線の飛来方向さえ解ればよいので検出効率が重要である。位置情報を取得するために $2 \times 2 \times 20$ cm の棒状の BGO 結晶を作成し、両端にアバランシェフォトダイオードとプリアンプの信号読み出し回路を装着する。これにより両端信号の大きさの比から γ 線入射位置を特定することが可能である。放出角度特定に必要な位置分解能は標的からの検出器設置距離にもよるが、1cm

もあれば十分である。このように γ 線による反跳を位置感応型 γ 線検出器によって補正する点は非常に独創的である。

4. 研究成果

本研究では大強度不安定核ビーム・高分解能スペクトロメータ・位置感応型高エネルギー γ 線検出器の 3 つの要素が必要である。

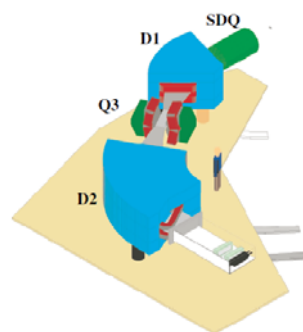
4-1) 大強度不安定核ビーム

22-240 の弱束縛核を生成するために大強度の 48Ca の一次ビームが必要となる。理化学研究所 RIBF で行われた初めての 48Ca ビームを用いた実験に参加し、必要な弱束縛核の生成量を調べた。実験は 2008 年 12 月に行われ、ここでは 48Ca 一次ビームから 32Ne 二次ビームが生成された (参考文献 2)。この結果従来の施設よりも 2 桁も多い 32Ne 生成量が確認された。これで 1/100 程度の確率でしか起こらない γ 線直接崩壊であっても問題なく統計量が得られると確認された。

4-2) 高分解能スペクトロメータ

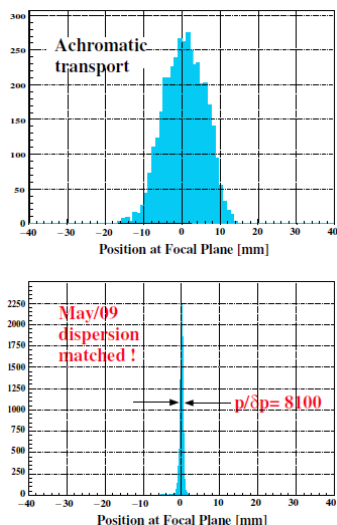
RIBF 内に建設された SHARAQ スペクトロメータを用いて逆運動学の質量欠損分光に必要な分解能が得られるか性能評価を行った。SHARAQ スペクトロメータは東京大学原子核科学研究センターが理化学研究所 RIBF 内に建設した高分解能スペクトロメータでありビーム生成部と合わせて 100m を超す長いビームラインと大きな 2 台の双極子電磁石を持つのが特徴である (図 1)。

図 1 : SHARAQ スペクトロメータ



2009 年 3 月に性能評価実験が行われ、本研究代表者は主にビームライン検出器からの信号処理部分を担当した。この実験では核子当たり 250MeV に加速された 14N ビームを用い、検出器のテストおよびイオン光学のスタディを行った。SHARAQ スペクトロメータでは分散整合を行うようなイオン光学系を設定することで非常に高い運動量分解能を達成することができる。この分散整合の結果 (図 2、上図が分散整合しない場合で、下図が分散整合した場合) のように 1/8100 という運動量分解能が確認された。この運動量分解能であれば質量欠損分光を用いてアイソスカラー双極子状態の測定が可能である。

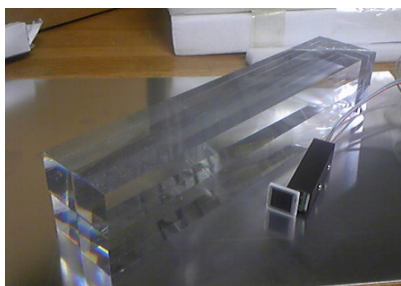
図 2 : 運動量分解能



3) 位置感応型高エネルギーγ線検出器

位置感応型高エネルギーγ線検出器として2x2x20cmのBGOシンチレータを採用した。BGOシンチレータは高いγ線阻止能を持つため高エネルギーγ線検出器として適当である。細長い長方形の結晶の両端から光読み出し、その光量比から位置を特定することが可能である。光読み出しにはアバランシエフォトダイオードを用いた。図3にBGOシンチレータおよびアバランシエフォトダイオード（小型前置増幅器付き）を示した。

図 3 : BGO シンチレータと光読み出し装置



両端から光を取り出すためにBGOシンチレータに用いる光反射材も重要である。ここでは住友スリーエム社の多層膜反射フィルムESR(Enhanced Specular Reflector)を用いた。このESRはBGO発光波長(480 nm)付近に対して非常に効率のよい反射効率を持っていることが知られている。また、アバランシエフォトダイオードは小型でかつ高い光電子変換効率をもっており、小型の前置増幅器と組み合わせることで検出器の集積度を上げることができる。これは高エネルギーγ線計測

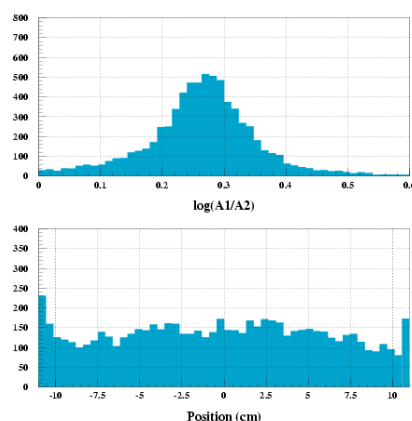
には重要なことである。10MeVを超すγ線の場合検出器内で電磁シャワーを起こすため、隣り合う検出器の光量比からも3次的にγ線入射位置を知ることが可能である。

両端の光量比から位置情報を得るが、これは理想的には次式によって計算できる。

$$Position = \log\left(\frac{A1}{A2}\right)$$

A1とA2は両端の光量である。しかし結晶内における光の減衰によって直線性は保たれない。したがって高次曲線によって位置の補正が必要である。図4に補正前の位置スペクトルと補正後の位置スペクトルを示した。補正後(下段)は位置情報cmに直されている。このデータは宇宙線が一様にBGOシンチレータに照射されたものである。

図 4 : BGO シンチレータによる情報取得 (上段が補正前で下段が補正後)



これにより位置感応型高エネルギーγ線検出器として開発したBGOシンチレータから位置情報が得られることが確認された。

3) まとめ

逆運動学による質量欠損分光を用いて弱束縛核の圧縮性を調べるためには大強度不安定核ビーム・高分解能スペクトロメータ・位置感応型高エネルギーγ線検出器の3つの要素が必要であった。本研究成果によりこれらすべての要素がそろったことが確認され、弱束縛核の圧縮性を得る方法論が確立された。この成果をもとに今後様々な核の圧縮性が解き明かされ、中性子星や超新星爆発の理解が進むと期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

H. Baba (8人中1番目)
New data acquisition system for the RIKEN
Radioactive Isotope Beam Factory
Nuclear Instruments and Methods A 616,
65-68, 2010, 査読有

P. Doornenbal, H. Baba, et al. (54人中
8番目)
Spectroscopy of ^{32}Ne and the "Island of
Inversion"
Physical Review Letters 103, 032501, 2009,
査読有

[学会発表] (計2件)

H. Baba
Isoscalar excitation in ^{140}La
Direct Reactions with Exotic Beams
(DREB2007), May 31, 2007, Wako, Japan

H. Baba
Measurement of isoscalar monopole and
dipole strengths in ^{140}La
June 6, 2007, Tokyo, Japan

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬場 秀忠 (Baba Hidetada)
独立行政法人理化学研究所・情報処理技術チ
ーム・リサーチアソシエイト
研究者番号: 10415268

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者