

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740150

研究課題名（和文）不安定核における魔法数発現メカニズムの解明

研究課題名（英文）Formation mechanism of magic numbers in unstable nuclei

研究代表者

道正 新一郎（MICHIMASA SHIN'ICHIRO）

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：80392140

研究成果の概要（和文）：

本研究では、大強度重イオンビームの破碎反応で生成する不安定核の質量を測定することを目指し、飛行時間法を用いた不安定原子核の質量測定法を確立のための高時間分解能検出器およびイオン光学の開発研究を実施した。ビーム透過型で時間分解能の高い検出器として、200ミクロンの CVD ダイヤモンド検出器を開発し、核子あたり 300MeV の炭素ビームに対して 30ps(σ)の分解能を得た。イオン光学開発では、実験装置中のイオンビームの飛行経路を測定することで、その情報を基に得たイオン光学行列要素からイオンビームの運動量を 1/8100 で決定することができた。以上2点の結果から、本質量測定法は、質量数 50 近傍の不安定核質量を数百 keV の精度で決定できると評価された。

研究成果の概要（英文）：

We developed the method to determine nuclear masses of radioactive ions (RIs) by coincidence measurements of magnetic rigidity and flight time in a long flight path. Those RIs were produced by intermediate-energy fragmentation reactions from intense heavy-ion beam. CVD diamond detectors were manufactured as the fundamental detector to measure flight time. The time resolution of its detector was achieved to be 30 ps in sigma for carbon ions at 300 MeV per nucleon. A correction method in measured particle momenta was also developed by using the experimentally-determined ion-optical transfer matrix of the beam line. We demonstrated to improve the momentum resolution of the beam line from 1/3000 to 1/8100 by adopting this correction method. By those improvements, this mass measurement method was evaluated to achieve a mass resolution of several hundreds keV for the nuclei around mass number 50.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：原子核（実験）、不安定核ビーム、魔法数、質量測定、飛行時間法、磁気分析装置

1. 研究開始当初の背景

(1) 魔法数の生成・消滅に象徴される安定線から離れた不安定原子核の安定性の構造的な理解は、核力や核子多体系の性質を理解する重要な研究課題である。原子核の安定性は、比較的狭い核領域に特徴的に変化すると考えられている。これは、対相関などの核子間相互作用が核内核子の一粒軌道の占有の仕方によって大きく変化するという核力の特徴を反映したものである。

原子核質量は、原子核を構成している核子の質量と核子間相互作用の総和であり、基底状態の安定度を最も顕著に表す物理量である。そのため、質量の系統的データは、魔法数の生成・消滅のような核子間相互作用が顕著に変化している核領域を見出すのに適している。また、低励起状態の励起エネルギーや寿命と異なり、遷移後の励起状態および娘核の基底・励起状態の占有配位の影響を受けないので、異なる核領域間の比較に際しても適したプローブであるといえる。

(2) 2000年に報告された中性子過剰酸素同位体における新魔法数 $N=16$ は、 $Z=6$ (炭素) から 9 (フッ素) 同位体にかけて見られるが、 $Z=10$ (ネオン) 同位体では見られないことから $N=16$ 新魔法数の発現に関しては中性子 $d_{5/2}$ - $d_{3/2}$ 間のテンソル相互作用により中性子 $s_{1/2}$ の閉殻構造が形成される描像が提案された。

このような核力の強いテンソル相互作用を反映した描像は、類似した配位をもつ核領域でも閉殻構造が達成される可能性があり、新たな中性子過剰核の新しい魔法数として、中性子数 34 (中性子 $p_{1/2}$ - $f_{5/2}$ 間に新しい閉殻構造ができる。) が提案された。

(3) 平成19年度に世界最強の RI ビーム強度を誇る RIBF が理化学研究所に完成し、世界の主要な研究所 (ドイツ GSI の FAIR 計画、フランス GANIL での SPIRAL2 計画、アメリカ NSCL での FRIB 計画など) の計画に一步先んじてより安定線から離れた不安定核の測定が展開できる環境ができた。また、平成21年度 RI ビームに特化した高分解能ビームラインおよび高分解能磁気分析装置 SHARAQ スペクトロメータが完成したことにより、運動量分散整合および角度分散整合ビーム輸送による粒子速度の決定精度の向上と、高分解能スペクトロメータによる磁気剛性の測定精度が向上し、不安定核の高分解能測定が可能になった。これらにより、質量

数 70 程度の中重不安定核の質量測定を実現する施設基盤が整った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、安定線から離れた不安定核領域における魔法数生成・消滅現象の普遍的な発現メカニズムを解明するために、飛行時間法を用いた不安定核の質量測定の手法を確立し、不安定核質量の系統的測定から未知の魔法数生成・消滅領域を探索することである。中性子過剰酸素同位体における $N=16$ 閉殻構造生成との類似性から提案されている、中性子数 34 をもつ中性子過剰カルシウム同位体 ^{54}Ca 核近傍の核質量測定の実現を目指した。

3. 研究の方法

質量測定実験を実現するために不可欠な技術要素であるビーム透過型の高時間分解能検出器の開発と、RIBF 施設内高分解能ビームラインおよび SHARAQ スペクトロメータにおけるビーム運動量の高分解能測定の実験設計およびテスト実験を行なった。

(1) ビーム透過型の高時間分解能検出器の開発としてダイヤモンド検出器製作・開発を行った。近年、3センチメートル四方のダイヤモンド薄膜素材の供給が可能となったため、それらを用いて物質厚の小さな検出器の製作を行った。製作したダイヤモンド検出器の基礎特性テストをイオンビームを用いて行ない、①シグナル波形取得、②検出効率、③有感厚測定、④エネルギー分解能、⑤時間分解能測定を測定した。また、質量測定実験を予定しているビームラインにおけるイオン光学実験に用いた。

(2) 運動量の高分解能測定の実験に先立ち、イオン光学ソフトウェア COSY infinity を用いたイオン光学設計とビームライン・スペクトロメータ調整法を開発をした。

(3) 理化学研究所 RIBF 施設において、質量測定のためのイオン光学実験を行った。この実験において、(2) の調整法を実施するとともに、ビームラインにおける運動量分解能測定を行った。実験施設の概略を図1に示す。

4. 研究成果

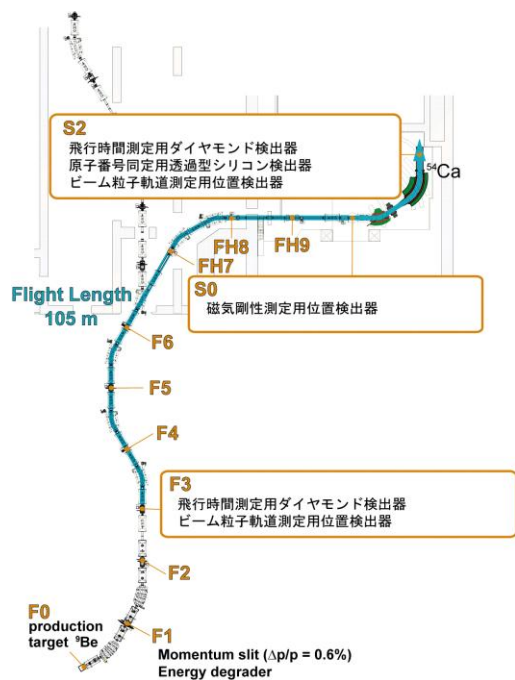


図1 イオン光学実験の概念図

(1) 化学気相成長(CVD)法による多結晶ダイヤモンド薄膜を用いた検出器の製作し、検出器としての基礎特性を評価した。基礎特性テストは理化学研究所内 E7 実験室の安定核ビームラインを用い、32 MeV の ^4He ビームを照射して行なった。図2はダイヤモンド検出器の写真である。以下は測定項目の結果を報告する。

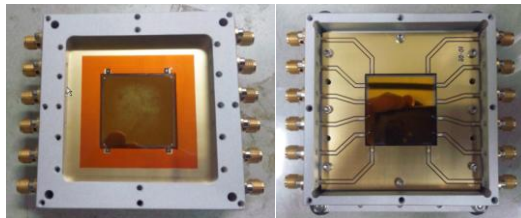


図2 ダイヤモンド検出器

①シグナル波形について

高圧印加時のノイズレベルは約 10mV、 α 粒子に対しての波高値は約 120mV が得られた。パルスの立ち上り時間および減衰時間は、典型的に 700ps および 10ns であった。

②検出効率、

ダイヤモンド検出器のビームライン下流にプラスチックシンチレータを設置し、ダイヤモンドとプラスチックとのコインシデンス測定により、検出効率を求めた。検出効率は検出器への印加電圧に依存するが、400V 印加によって検出効率 99.2%に達した。200 マイクロメートルのダイヤモンド結晶のブレイクダウン電圧は約 2kV であるので、結晶に損傷を与えない安全な電圧で十分な検出効

率が得られることがわかった。

③有感厚測定、

有感厚とは、結晶中でのビームのエネルギー損失によって生じた電子-正孔対のうち電極から電荷信号として取り出せる結晶の深さを示している。一般に多結晶ダイヤモンドは、小さなダイヤモンド結晶の集まりであるため、結晶間の隙間にキャリアがトラップされてしまい、生じた電子-正孔対を電極ですべて取り出すことができない。したがって、このパラメータはダイヤモンド結晶の大きさを示しており、実際の厚みに近いものほど検出器としては性能がよく、検出されるシグナルも大きくなる。得られた有感厚は、190 マイクロメートルで、検出器の物質厚 200 マイクロメートルとほぼ一致した。これにより、電子-正孔対が高効率でシグナルとして取り出せていることがわかった。

④エネルギー分解能、

ダイヤモンド検出器に対して 400V を印加した際の、プラスチックシンチレータとのコインシデンスイベントに対するシグナルの電荷量のスペクトラムから、エネルギー分解能は、29% (σ) と求められた。

⑤時間分解能測定

製作したダイヤモンド検出器には、1 本の電極に対して両端読み出しを設けているため、同一電極からのシグナルの時間差から時間分解能が評価でき、27ps (σ) が得られた。質量数 50 領域に対する質量測定で目標としていた 35ps (σ) に比べて高速な応答が得られ、ダイヤモンド検出器が質量測定実験に適応可能なタイミング検出器であることが実証できた。

(2) 高分解能ビームラインおよび SHARQA スペクトロメータの調整法の開発として、実験施設における分散整合イオン輸送の調整手順を検討した。イオン光学シミュレーションによって装置の最適設定値からのずれ具合と、その時のビームライン焦点面のイオン光学要素の相関関係を事前にモデル化しておくことによって、当初の調整法から、アクロマチックビームによるスペクトロメータの調整手順を省略することができた。この調整法は、(3) に報告するマシンタイムで実施され、当初手順で調整に要した時間の 65%に調整時間を短縮することができ、効率的な実験進行を行なうことができた。

(3) 実験装置の運動量測定分解能の評価するため、SHARQA 施設において分散整合ビームラインのイオン光学実験を行った。図3は、SHARQA スペクトロメータの焦点面で、(a)位置分散が整合し、かつ、(b)角度分散が整合できていることを示している。

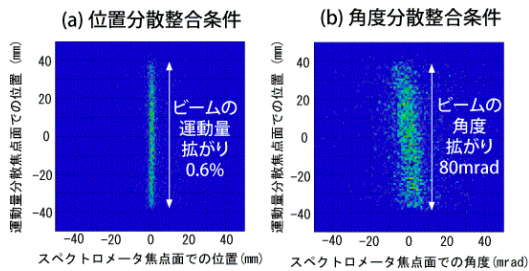


図3 実験装置の分散整合条件。(a)位置分散整合。ビームの運動量拡がり がスペクトロメータ焦点面で打ち消されている。(b)角度分散整合。ビームの角度拡がり がスペクトロメータ焦点面で打ち消されている。

図4は、実験装置の運動量分解能を示しており、分析磁石のみでの分解能（赤いヒストグラムで示す）は全幅半値幅で3000であると評価を得た。これに高分解能ビームラインのスタート地点に置かれたビーム粒子位置検出器から得られたビーム飛跡でのイオン輸送行列を考慮することにより、実験装置システムの運動量分解能は改善され、全幅半値幅で8100が得られた（黒いヒストグラムで示す）。

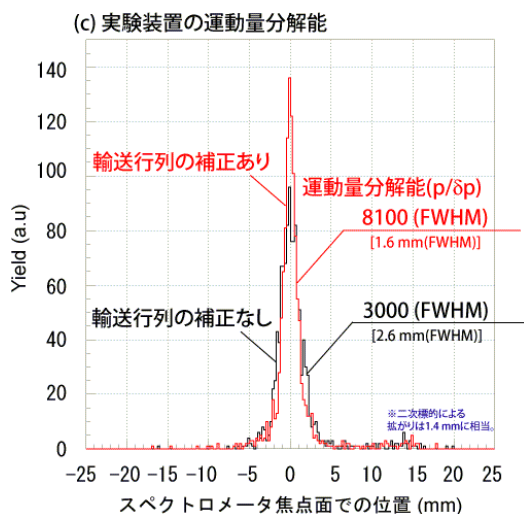


図4 ビームの磁気剛性の分解能。黒、赤色スペクトラムは各々、イオン輸送行列補正前後の分解能を示している。

(4) 以上の項目(1-3)の結果に基づき、RIBF内SHARAQ実験施設を用いた飛行時間法による質量測定は、質量数50領域において、核構造を議論するのに十分な精度で実現できると評価できる。

中性子過剰 ^{54}Ca 周辺核を対象とした質量測定実験は、適切な一次ビームが本課題期間

内に供給されなかったことにより未実施であるが、本課題で開発した検出器を用いることにより実験ビームタイムが配分され次第実験を行うことができる。

(5) 本課題研究で開発したダイヤモンド検出器および高分解能スペクトロメータの開発成果は、適宜、学会で発表してきた。最新報告は、電磁気スペクトロメータに関する国際会議で口頭発表およびポスター発表として公表し、近くこれらの会議録に掲載される予定である。

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7件)

- ① K.Miki, S.Michimasa (26人中12番目) et al., "Identification of the β^+ isovector spin monopole resonance via the ^{208}Pb and $^{90}\text{Zr}(t,^3\text{He})$ reactions at 300 MeV/u", *Physical Review Letters* **108** (2012) 262503, 5頁, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.262503
- ② S.Takeuchi, S.Michimasa (43人中31番目) et al., "Well developed deformation in ^{42}Si ", *Physical Review Letters* **109** (2012) 182501, 5頁, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.182503
- ③ A.Ozawa, S.Michimasa (37人中19番目) et al., "One- and two-neutron removal reactions from $^{19,20}\text{C}$ with a proton target", *Physical Review C* **84** (2011) 064315, 7頁, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevC.84.064315
- ④ Y.Togano, S.Michimasa (45人中27番目) et al., "Resonance states in ^{27}P using Coulomb dissociation and their effect on the stellar reaction $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ ", *Physical Review C* **84**, 035808 (2012), 7頁, 査読有.
DOI: 10.1103/PhysRevC.83.035808
- ⑤ T.Yamaguchi, S.Michimasa (35人中20番目) et al., "Nuclear reaction of $^{19,20}\text{C}$ on a liquid hydrogen target measured with the superconducting TOF spectrometer", *Nuclear Physics A* **864**, 1-37 (2011), 査読有.
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2011.05.095
- ⑥ K.Tanaka, S.Michimasa (37人中23番目) et al., "Observation of a large reaction cross

section in the drip-line nucleus ^{22}C ,
Physical Review Letters **104**, 062701 (2010),
4 頁, 査読有.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.062701

- ⑦ J.Chen, S.Michimasa (23人中20番目) et al.,
“Study of astrophysically important states in
 ^{26}Si with the $p(^{27}\text{Si}, ^{26}\text{Si}^*)d$ reaction and the
 $p(^{25}\text{Al}, p)^{25}\text{Al}$ elastic scattering”,
Nuclear Physics A **834**, 667c-669c, (2010),
査読有.
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2010.01.119

[学会発表] (計 4 件)

- ① S.Michimasa et al. (oral),
“SHARAQ spectrometer for high-resolution
studies of RI-induced reactions”, 16th
International Conference on
Electromagnetic Isotope Separators and
Techniques Related to their Applications
(EMIS2012), 2012年12月2~7日, 島根県
立産業交流会館 (島根県).
- ② S.Michimasa et al. (poster),
“Development of CVD diamond detector for
time-of-flight measurements”, 16th
International Conference on
Electromagnetic Isotope Separators and
Techniques Related to their Applications
(EMIS2012), 2012年12月2~7日, 島根県
立産業交流会館 (島根県).
- ③ S.Michimasa (oral),
“Gamma-ray spectroscopy of neutron-rich
Mg isotopes by using proton inelastic
scattering”, RIBF ULIC and CNS
Symposium on Frontier of Gamma-ray
Spectroscopy (GAMMA11), 2011年6月30
日, 理化学研究所 (埼玉県).
- ④ S.Michimasa (oral),
“Development of diamond detector at CNS”,
Workshop on advanced detector technology
for nuclear physics, 2011年1月12日, 理化学
研究所 (埼玉県).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

道正 新一郎 (MICHIMASA SHIN'ICHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 80392140