

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03905

研究課題名(和文) 反応断面積によるアイソマー状態の核半径測定法開発とその宇宙物理学への応用

研究課題名(英文) Development of an experimental method to determine the nuclear radii of isomeric states through reaction cross sections and its application to astrophysics

研究代表者

福田 光順 (Fukuda, Mitsunori)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50218939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の励起状態であるアイソマー状態は、原子核物理学として大いに興味深い研究対象であるだけでなく、宇宙物理学からもその重要性が指摘されているが、その寿命の短さから核半径測定などは困難であった。そこで、原子核衝突の確率である反応断面積という物理量を用いてアイソマー状態核半径を測定する手法を確立することを目指した。その結果、わずか5  $\mu$ sの半減期を持つ $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマー状態について、反応断面積の測定から、基底状態とは大きく異なる核半径を持つらしいことを突き止めた。この結果は、宇宙の中、特にビッグバン過程や恒星中での核反応による元素合成の速さの、より正確な見積もりに寄与することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

$^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマー状態の核半径についての情報が得られたことは、この状態の原子核構造に対する重要な知見が得られたというだけでなく、宇宙環境における元素合成の理解に大いに寄与する。開発した新しいアイソマー状態の核半径決定法は、同様な宇宙物理学で興味を持たれるアイソマー状態の核構造決定に利用できる。また、研究の過程で開発した新しい粒子検出器群、例えば重イオン用リング・イメージング・チェレンコフ検出器(速度分解能 0.05%)は、他の実験核物理分野の多くの研究に利用できる。

研究成果の概要(英文)：The isomeric state, which is the excited state of nuclei, is not only a very interesting research subject in nuclear physics, but its importance is pointed out also in astrophysics, but due to its short life, nuclear radius measurement was difficult. Therefore, we aimed to establish a method to measure the radius of the isomeric-state nucleus using a physical quantity called the reaction cross section, which corresponds to the probability of nuclear collision. As a result, we found that the  $^{16}\text{N}(0^-)$  isomeric state with a half-life of only 5  $\mu$ s seems to have a nuclear radius that is significantly different from that of the ground state by measuring reaction cross sections. This result is expected to contribute to a more accurate estimation of the rate of nucleosynthesis by nuclear reactions in the universe, especially in the process of the big bang.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：核半径 アイソマー状態 反応断面積 元素合成 リングイメージングチェレンコフ検出器

### 1. 研究開始当初の背景

原子核の励起状態のうち、何らかの理由でそれよりかなり長い寿命( $10^{-9}$  s ~ 数秒以上)を持つものがあり、これらはアイソマー(核異性体)状態と呼ばれている。長い寿命を持つ理由は、総じて基底状態(または崩壊前の状態)と比べて極めて特異な構造を持っているからである。一方で、ビッグバンから始まった宇宙の中で、どこでどのように元素が合成されてきたかという謎は、現代物理学の中でも未解決の極めて重要な問題である。恒星内部でのゆっくりとした核反応による元素合成は古くから議論され、最近はかなり程度まで解明が進んできている。しかし、これでは説明できない宇宙の元素存在比が軽核領域で存在し、これを説明する鍵としてビッグバン直後の数分~数10分という段階ですでにLi程度までの軽元素が合成されていたとするビッグバン元素合成模型が提唱された。特に、最近では陽子と中性子の密度に大きな“むら”(揺らぎ)があったとする非一様ビッグバン元素合成模型が注目を浴びており、実験的検証に期待が寄せられている。このような元素合成の諸問題に対し、実はいくつかの場合、アイソマーの存在とその構造・性質の理解は後で述べるように重要な意味をもつと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、反応断面積を用いてアイソマー状態の核半径を求める測定手法を確立し、特異で興味深いアイソマー状態の核構造を宇宙物理でも重要な核種に対し明らかにする。この目的のために、重イオン用リング・イメージング・チェレンコフ検出器をはじめとする世界最高性能を有する粒子検出器群を開発することにより、粒子速度の超高分解能スポット測定( $\delta / \sim 0.1\% @ 400$  MeV/u 程度)や高質量分解能粒子識別を可能にし、広いエネルギーの範囲でコンパクトな中重核に対する反応断面積測定システムを実現する。これにより宇宙における元素合成の問題解明へも大きく貢献できる。

### 3. 研究の方法

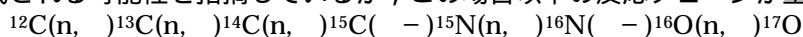
アイソマー比  $R_{IS}$  が違う何点かで反応断面積  $R$  を測定し、 $R_{IS}$  に対して直線で外挿することにより、 $R_{IS} = 0$  (基底状態) と  $R_{IS} = 1$  (アイソマー状態) に対する  $R$  を導出できる。現在までに  $^{16}\text{N}^*(0^-)$  アイソマーに関して  $R_{IS}$  の放出角度も含めたフラグメント運動量依存性のデータが得られており、運動量(縦・横方向)を選択することにより、 $R_{IS}$  を大きく変えられることがわかってきた。また、1次ビーム核種にも大きく依存する。 $^{18}\text{O}$  1次ビームを用いた場合、最大で  $R_{IS}=35\%$  が得られているが、 $^{15}\text{N}$  1次ビームを用いて  $^{16}\text{N}$  を生成した場合、最小でわずか  $R_{IS}=4\%$  が得られた。これらの  $R_{IS}$  の大きな違いを利用して、アイソマー状態の核半径測定は十分な精度で測定可能と考えられる。

$^{16}\text{N}$  のケース以外のアイソマー状態の研究に対応するため、検出器システムの高度化が必要となってくる。したがって、以上の研究と同時に検出器開発も並行して進める。

### 4. 研究成果

#### (1) $^{16}\text{N}(0^-)$ アイソマー状態の核半径

非一様ビッグバン元素合成模型では質量数(A) ~ 30 までの元素がビッグバンにより合成される可能性を指摘しているが、この場合以下の反応チェーンが重要と考えられている。



この中で、我々は  $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$  に以下のような理由で着目した。 $^{16}\text{N}$  には 120 keV の励起エネルギーをもつ半減期 5  $\mu\text{s}$  のアイソマーが存在するが、単純な殻模型では最外殻中性子は s 軌道に入ることが期待され、しかも 1 中性子結合エネルギーが小さい (~2 MeV) ため、この状態は中性子ハロー構造をもつ可能性がある。図 1 は単一粒子模型で計算したアイソマー状態の最外殻中性子密度分布と電子散乱からわかっているコア ( $^{15}\text{N}$ ) の密度分布である。アイソマー状態のように外側に密度が大きく広がる場合には、この状態の最外殻中性子の広がり(中性子ハロー)による大きな電気双極子モーメントのため、これを終状態とする  $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}^*$  放射捕獲断面積が大きく増大する可能性があり、上述の非一様ビッグバン元素合成模型に大きく影響すると考えられる。

そこで、アイソマー状態の最外殻中性子の広がり、言い換えると核半径、を調べるために、我々は放射線医学総合研究所の重イオンシンクロトロン加速器施設 HIMAC において実験を行った。この加速器により核子当たりおよそ 160 MeV まで加速された  $^{18}\text{O}$  および  $^{15}\text{N}$  の 1 次ビームから生成されるアイソマー比  $R_{IS}$  が違う 2 種類の  $^{16}\text{N}(0^-)$  アイソマー・ビームを利用し、それぞれについて精密に炭素標的に対する相互作用断面積(反応断面積)を測定した。その結果得られた相互作用断面積の実験値を図 2 の誤差付きマーカーに示す。相互作用断面積は、核半径の大きさを示してお

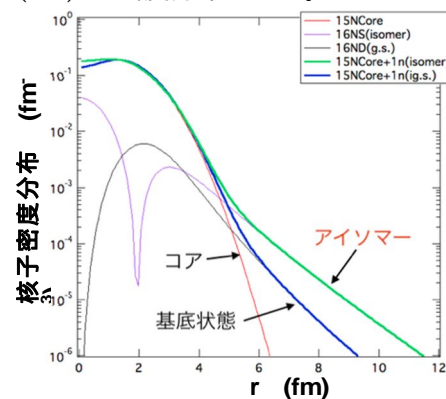


図 1 単一粒子模型で計算された  $^{16}\text{N}$  アイソマーと基底状態の最外殻中性子密度分布と電子散乱から求められたコア密度分布

り、図からわかるようにアイソマー状態の方が基底状態より核半径が大きくなっていることが明らかとなった。図2の直線はそれぞれ図1に示されるアイソマー状態および基底状態の密度分布を用いて計算された相互作用断面積であり、この計算結果はよく実験結果を再現していると言える。この成果は、近々学術雑誌に論文発表する予定である。

## (2)実験を可能にするための検出器開発

### a) リングイメージングチェレンコフ検出器

物質中の光速を越える速度で荷電粒子が物質を通過するとき発生するチェレンコフ光を利用すると、荷電粒子の速度を測定することができる。このチェレンコフ光は粒子の速度方向に対して、物質の屈折率と粒子速度で決まる一定の角度で円錐状に放出されるため[図3(a)]、薄い物質を荷電粒子が通過したときに放出されるリング状の光子を検出して、そのリング半径を測定することにより、粒子速度を決定することができる。このような検出器をリングイメージングチェレンコフ検出器と呼び、高エネルギー軽粒子用には一般的に利用されているが、重イオン用のものは実用化されていない。そこで、我々は光子検出器として位置感応型光電子増倍管(PMT)およびそれに替わる新しい光子検出器であるMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を用いて、重イオン用リングイメージングチェレンコフ検出器の開発を行った。PMTを用いたシステム[図3(b)]をHIMACからの $^{132}\text{Xe}$  420A MeVの1次ビームでテストしたところ、図3(c)に示すようなチェレンコフ光のリング・イメージが得られ、その結果、速度分解能として0.05%という極めてよい性能を達成することに成功した。次世代型の光子検出器であるMPPCを使用するシステムも開発を行っており、既に図3(b)の6本のPMTを6台のMPPCアレイに置き換えたシステムが完成している。MPPCアレイ3台での $^{132}\text{Xe}$ ビームを用いたテストが行われ、その結果、MPPCアレイ3台で既にPMT6本の性能と同等の速度分解能0.05%を達成できている。今後MPPCアレイ6台でのオンラインテストの結果に期待が持たれる。PMTシステムの結果は成果で学術論文として発表されている。

### b)チェレンコフ飛行時間(TOF)検出器

通常のTOF検出器に用いられるシンチレーターは、荷電粒子の通過によって励起されたシンチレーターが、基底状態に戻るときに発生する光を利用している。このとき、励起状態には寿命があるため、粒子通過の時刻から遅れてシンチレーター光の放射および検出が行われることになる。これに対しチェレンコフ光は粒子が物質を通過した瞬間に放出されるため、この時間遅れがなく、したがって非常に良い時間分解能を達成できる可能性がある。ところが、これまでの通常のチェレンコフ検出器の用途では、荷電粒子の電荷が小さかったり、速度があまり大きくなかったり、チェレンコフ光の光子数が充分多くはできないケースがほとんどであったと考えられる。一方、高エネルギー重イオンが測定対象の場合は、光子数が格段に増やせるため、この瞬間放出の利点を生かせ

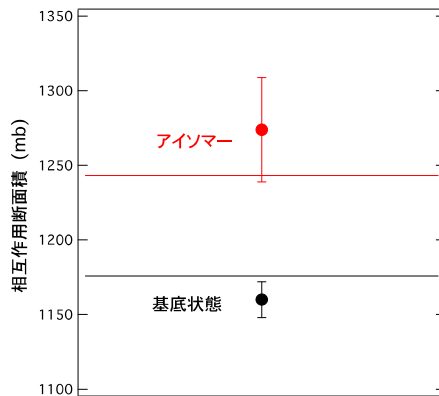


図2 アイソマー状態および基底状態それぞれに対する相互作用断面積実験値と単一粒子模型による計算値

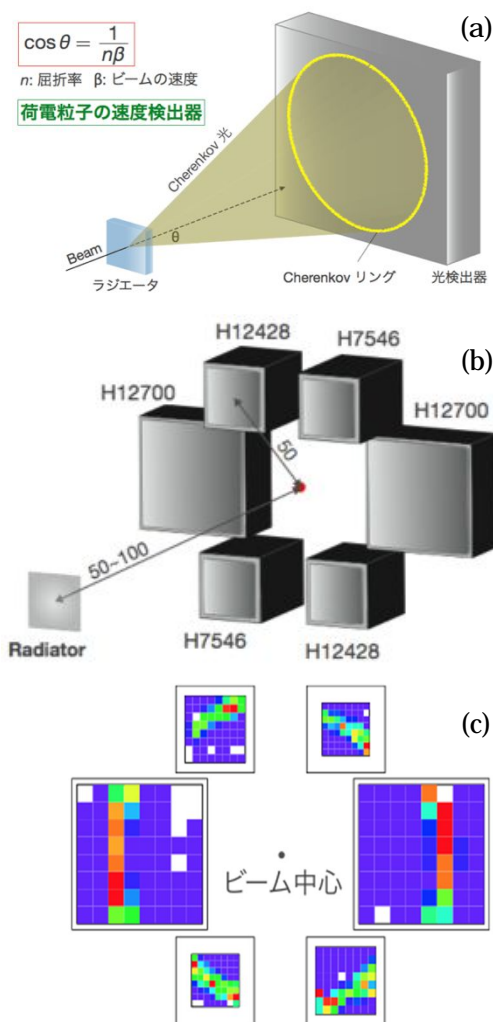


図3 (a)リングイメージングチェレンコフ検出器の概念図、(b)PMTを用いたシステムのセットアップ、(c)420A MeV  $^{132}\text{Xe}$ ビームで得られたリングイメージ

るはずである。そこで我々は、高屈折率ガラスを利用したチェレンコフ光による TOF 検出器を開発した。その検出器に対して HIMAC の  $^{132}\text{Xe}$  1 次ビームを用いたテストを行った結果、図 4 に示すように、エネルギーが最大でチェレンコフ光光子数も最大になる場合、約 5 ps という極めてよい時間分解能を達成した。

### c) 高時間分解能飛行時間 (TOF) 検出器

b) で開発したチェレンコフ TOF 検出器は、重イオンのエネルギーが核子当たり 400 MeV 以上であったり、重イオンの原子番号が大きかったりする場合に、その威力を発揮できるが、その反面原子番号が小さかったり、エネルギーが低かったりする場合には、十分な性能を発揮できない。そこで、我々は  $^{16}\text{N}$  アイソマー状態の核反応で生成される  $^{15}\text{N}$  の運動量分布測定を行うために、エネルギーが低く原子番号が小さくても利用できる新しい種類の高時間分解能 TOF 検出器を開発することにした。そのために、クエンチング剤を添加して励起状態寿命を短くしたプラスチック・シンチレーター (時間幅 FWHM = 360ps) と最近開発された新型光速光電子増倍管 (transit time spread = 130ps) を組み合わせ、TOF 検出器を製作した。この検出器を HIMAC の各種 1 次ビームを用いてテストした結果を図 5 に示す。図からわかるように、 $^{132}\text{Xe}$  ビームではチェレンコフ TOF 検出器にせまる高時間分解能を達成することに成功し、室素程度の原子番号が小さいビームに対しても、時間分解能 < 10 ps を達成できている。この分解能は、飛行距離がわずか 2 m 程度でも、運動量では 0.07% もの高分解能が得られるため、充分に利用可能である。この検出器を用いて実際に測定した  $^{16}\text{N}$  の 1 中性子剥離反応で生成された  $^{15}\text{N}$  の運動量分布を図 6 に示す。この結果は、(1) で述べた核半径の情報と相補的な情報を与えるため、詳しい解析が現在進行中である。

### (3) その他の核半径研究への応用

(2) で述べた世界最高性能を誇る検出器群の開発は、これらの開発の直接的な目的以外の核半径 (反応断面積・相互作用断面積) 研究にも利用できおり、様々な興味深い有意義な成果を出しつつある。その 1 つの例として、Ca 同位体の中性子数  $N > 28$  における異常なコア膨張の発見<sup>1)</sup>が挙げられる。

## References

- 1) Swelling of Doubly Magic  $^{48}\text{Ca}$  Core in Ca Isotopes beyond  $N=28$ , M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, M. Fukuda, D. Nishimura et al., Phys.Rev.Lett.**124**, 102501 (2020).

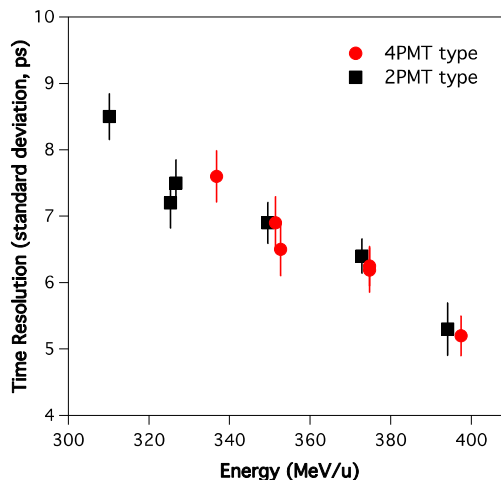


図 4  $^{132}\text{Xe}$  ビームに対するチェレンコフ TOF 検出器時間分解能のエネルギー依存性

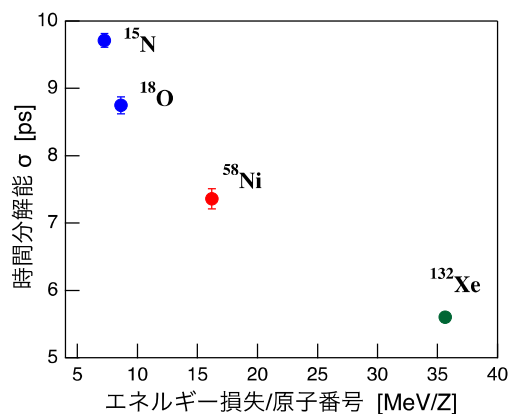


図 5 各種 1 次ビームに対する高時間分解能 TOF 検出器の時間分解能テスト結果。横軸はシンチレーターの発光量に相当する。

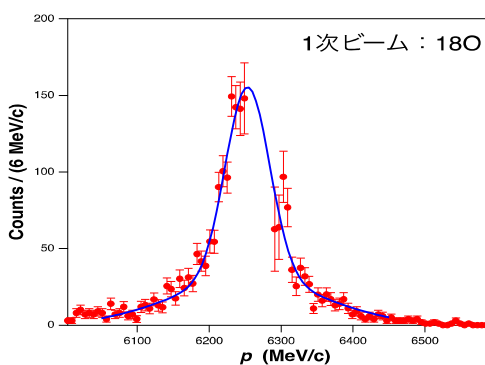


図 6  $^{16}\text{N}$  の 1 中性子剥離反応で生成された  $^{15}\text{N}$  の運動量分布。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, M. Fukuda, D. Nishimura et al.	4. 巻 124
2. 論文標題 Swelling of Doubly Magic $^{48}\text{Ca}$ Core in Ca Isotopes beyond $N=28$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 102501(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.102501">https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.102501</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 坂上護	4. 巻 1
2. 論文標題 21-28Na, 22-30Mg の荷電変化断面積に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、埼玉大学理工学研究科物理機能系専攻	6. 最初と最後の頁 1-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 横田健次郎	4. 巻 1
2. 論文標題 GAGG:Ce シンチレーション検出器の性能試験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、埼玉大学理工学研究科物理機能系専攻	6. 最初と最後の頁 1-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 若林 諒	4. 巻 1
2. 論文標題 中性子過剰窒素同位体 17, 18, 19N の反応断面積と密度分布	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、大阪大学理学研究科物理学専攻	6. 最初と最後の頁 1-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 富田瑞樹	4. 巻 1
2. 論文標題 Sc 同位体の荷電変化断面積測定と陽子蒸発モデル	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、新潟大学自然科学研究科物理学専攻	6. 最初と最後の頁 1-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 茂住圭一	4. 巻 1
2. 論文標題 12Be の陽子標的に対する反応断面積測定と密度分布	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、新潟大学自然科学研究科物理学専攻	6. 最初と最後の頁 1-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口滉太	4. 巻 1
2. 論文標題 16N の基底状態・アイソマーの相互作用断面積測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、新潟大学自然科学研究科物理学専攻	6. 最初と最後の頁 1-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 沖本直哉	4. 巻 1
2. 論文標題 16N アイソマー状態の中性子剥離断面積	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 大阪大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福留美樹	4. 巻 1
2. 論文標題 16N の 1 中性子剥離反応による 15N の運動量分布	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 大阪大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 草雉瑛梨	4. 巻 1
2. 論文標題 荷電変化断面積に見る陽子蒸発反応におけるクーロン障壁の効果	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 野田真理奈	4. 巻 1
2. 論文標題 Na, Mg 同位体の荷電変化断面積測定と中性子スキン厚の導出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Machida, D. Nishimura, M. Fukuda, S. Yagi, T. Sugihara, S. Kanbe, S. Yamaoka, M. Takechi, M. Tanaka, et al.	4. 巻 931
2. 論文標題 Development of prototype RICH detector with multi-anode photomultipliers for radioactive ions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A	6. 最初と最後の頁 23-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.03.085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福田光順, 武智麻耶, 西村太樹, 田中聖臣, 大西康介, 杉原貴信, 八木翔一, KEHL Ronja, 柳原陸斗, 三原基嗣, 松多健策, 泉川卓司, 鈴木健, 山口貴之, 町田聖寛, 森口哲朗, 鈴木伸司, 百田佐多生, 福田茂一, 佐藤眞二, 北川敦志 et al.	4. 巻 QST-R-8
2. 論文標題 重粒子線による核反応断面積の研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2017 Annual Report of the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC	6. 最初と最後の頁 131-132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤居朋也	4. 巻 1
2. 論文標題 12Be の反応断面積の測定と魔法数の消失	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 学位論文(修士)、埼玉大学理工学研究科物理機能系専攻	6. 最初と最後の頁 1-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 成瀬彩夏	4. 巻 1
2. 論文標題 Sc 同位体の荷電変化断面積	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 生越瑞揮	4. 巻 1
2. 論文標題 16N アイソマーの運動量分布	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 吉村暢也	4. 巻 1
2. 論文標題 C 同位体陽子標的に対する荷電変化断面積	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福田光順, 武智麻耶, 西村大樹, 田中聖臣, 田中悠太郎, 杜航, 大西康介, 杉原貴信, 八木翔一, 中村翔健, 堀太地, 柳原陸斗, 三原基嗣, 松多健策, 泉川卓司, 本間彰, 宮田恵理, 西塚賢治, 池田彩夏, 神田直人, 星野寿春, 大坪隆, 加藤郁磨, 藤井朋也, 鈴木健, 山口貴之, 町田聖寛, 森口哲朗, 百田佐多生, 福田茂一, 佐藤真二, 北川敦志 et al.	4. 巻 QST-R-6
2. 論文標題 重粒子線による核反応断面積の研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2016 Annual Report of the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC	6. 最初と最後の頁 157-158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 八木翔一	4. 巻 1
2. 論文標題 重イオン用リング・イメージング・チェレンコフ検出器の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 大阪大学理学研究科物理学専攻修士論文	6. 最初と最後の頁 1-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 町田聖寛	4. 巻 1
2. 論文標題 重イオン粒子識別のためのRing-imaging Cherenkov Counter の 開発と性能評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東京理科大学大学院理工学研究科物理学専攻修士論文	6. 最初と最後の頁 1-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口滉太	4. 巻 1
2. 論文標題 生成反応の違いによる 16N アイソマー比の変化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 富田瑞樹	4. 巻 1
2. 論文標題 アイソマー状態と基底状態における 16N の核半径	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 新潟大学理学部物理学科卒業論文(学士)	6. 最初と最後の頁 1-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 E. Miyata, M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, D. Nishimura, K. Abe, K. Aoki, A. Ikeda, T. Izumikawa, H. Oikawa, K. Ohnishi, S. Ohmika, I. Kato, Y. Kanke, et al.	4. 巻 48
2. 論文標題 Development of high resolution TOF detector for RI beams using Cherenkov radiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Acta Phys. Polonica B	6. 最初と最後の頁 409-414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPolB.48.409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 福留美樹
2. 発表標題 超高時間分解能のプラスチックシンチレーションカウンターの開発とその性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田光順
2. 発表標題 荷電変化断面積の中性子数依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M.Tanaka
2. 発表標題 Remarkable growth in matter radii of Ca isotopes across neutron magic number $N = 28$ via interaction cross section measurements
3. 学会等名 27th International Nuclear Physics Conference, 29 July-2 August, 2019; Glasgow, UK (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田瑞樹
2. 発表標題 Sc 同位体の荷電変化断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茂住圭一
2. 発表標題 $^{12}\text{Be}$ の陽子標的に対する反応断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口滉太
2. 発表標題 不安定核ビームアイソマー比の違いを利用した $^{16}\text{N}$ 基底状態/アイソマー状態の反応断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若林諒
2. 発表標題 中性子過剰 N(窒素)同位体の反応断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田光順
2. 発表標題 核子ヒックアップ反応による核内核子運動量分布の研究 II
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福留美樹
2. 発表標題 超高時間分解能のプラスチックシンチレーションカウンターの開発と運動量分布測定への応用
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会, 九州大
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田光順
2. 発表標題 中性子過剰軽核の中性子剥離断面積
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会，東京理科大
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中聖臣
2. 発表標題 Ca 同位体の中性子スキン厚
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会，東京理科大
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間彰
2. 発表標題 中性子過剰側 Ni,Cu 同位体の相互作用断面積と中性子スキン厚
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会，東京理科大
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsunori Fukuda
2. 発表標題 Nucleon pickup cross sections to explore nucleon momentum distributions and nuclear structure
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 23-27, 2018; Waikoloa, Hawaii (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miki Fukutome
2. 発表標題 Development of scintillation counter with ultra high time resolution and its application to research of fragment momentum distributions
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 23-27, 2018; Waikoloa, Hawaii (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tanaka
2. 発表標題 Measurements of Interaction Cross Sections and Charge-changing Cross Sections for Ca and Ni Isotopes at RIBF
3. 学会等名 The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, November 18-23, 2018, Huizhou, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tanaka
2. 発表標題 Nuclear Matter Radii of Ca Isotopes across the Neutron Magic Number $N = 28$ Via Interaction Cross Section Measurements
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, Dec.4-8, 2018, Omiya, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Homma
2. 発表標題 Development of a Method to Deduce Point-Proton Radii from Charge Changing Cross Sections
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, Dec.4-8, 2018, Omiya, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fukuda
2. 発表標題 Possibility to employ nucleon pickup cross sections to look into nucleon momentum distributions in nuclei
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, Dec.4-8, 2018, Omiya, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Fukuda
2. 発表標題 Recent progress of reaction cross section studies at RIBF and HIMAC
3. 学会等名 Int. Workshop on "Proton and Neutron Densities and Radii in Nuclei and Related Topics", December 17-19,2018, Beihang University, Beijing, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田光順
2. 発表標題 不安定核ビームを用いた反応断面積測定と核半径・密度分布
3. 学会等名 研究会「電子散乱による原子核研究-陽子半径、不安定核の電荷密度分布を中心に-」 東北大学電子光物理学研究センター、3月20 - 21日、2019年 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 町田聖寛
2. 発表標題 重イオン用 Ring-Imaging Cherenkov Counter の開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮田 恵理
2. 発表標題 チェレンコフ放射を利用した不安定核ビーム高時間分解能検出器の研究 III
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 武智 麻耶
2. 発表標題 Development of High Resolution TOF detector for RI Beams using Cherenkov Radiation
3. 学会等名 ZAKOPANE Conference on Nuclear Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	西村 太樹  (Nishimura Daiki)  (30612147)	東京都市大学・共通教育部・准教授   (32678)	
研究 分担者	武智 麻耶  (Takechi Maya)  (40570172)	新潟大学・自然科学系・助教   (13101)	
研究 協力者	田中 聖臣  (Tanaka Masaomi)	九州大学・理学研究院・学術研究員   (17102)	