

PRESS RELEASE

2022 年 11 月 17 日

理化学研究所
東京工業大学

超中性子過剰同位元素ナトリウム-39 を発見

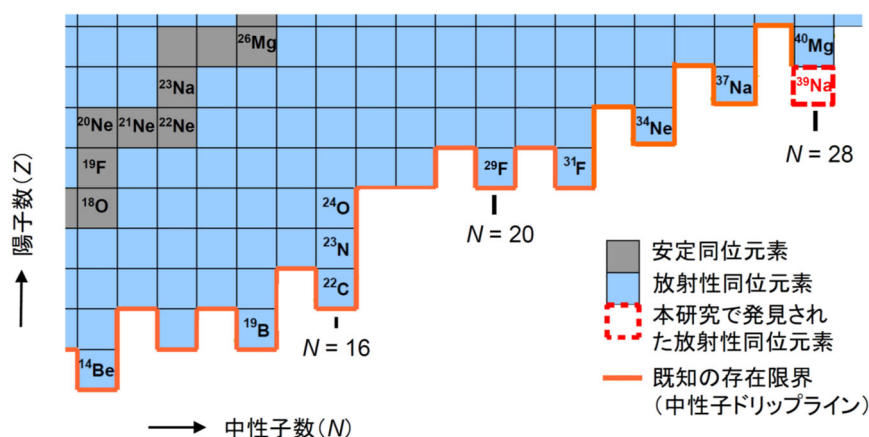
ーナトリウム同位元素の既知存在限界を 20 年ぶりに更新ー

理化学研究所（理研）仁科加速器科学研究センター実験装置運転・維持管理室の久保敏幸研究嘱託、安得順協力研究員（研究当時）、鈴木宏技師、東京工業大学理学院物理学系の中村隆司教授らの国際共同研究グループは、理研の重イオン加速器施設 RI ビームファクトリー（RIBF）^[1]を用いて、安定なナトリウム-23（ ^{23}Na ：陽子数 11、中性子数 12、質量数 23）より中性子が 16 個も多い超中性子過剰な同位元素^[2]、ナトリウム-39（ ^{39}Na ：陽子数 11、中性子数 28、質量数 39）を世界で初めて生成・観測することに成功しました。この発見により、 ^{39}Na の原子核が束縛^[3]し、存在していることが初めて突き止められました。

本研究成果は、中性子数が過剰な極限付近にある放射性同位元素（RI）^[4]の原子核構造の解明や理論計算に貢献するとともに、宇宙における元素合成過程などを理解する上で重要な原子核の質量モデルの有効性を検証する試金石になると期待できます。また、中性子過剰な原子核が魔法数^[5]28 を消失していることを裏付ける重要な証拠を与えています。

今回、国際共同研究グループは、大強度重イオンビームや高効率の RI ビーム分離生成装置 BigRIPS^[6]など、RIBF における卓越した実験条件の実現により、ナトリウム-37（ ^{37}Na ：陽子数 11、中性子数 26、質量数 37）が発見されて以来 20 年ぶりに、それより中性子過剰な ^{39}Na を発見し、ナトリウム同位元素の既知存在限界を更新することに成功しました。

本研究は、科学雑誌『*Physical Review Letters*』オンライン版（11 月 14 日付）に掲載されました。また、同誌の Editors' Suggestion と Viewpoint (Featured in Physics) に選ばれています。



本研究の対象領域と成果を示す原子核の地図（核図表）

背景

元素の同位体^[2]（同位元素）の原子核に、中性子は何個まで付け加えられるでしょうか。例えば、ネオン（Ne：陽子数 10）の場合は、ネオン-20（ ^{20}Ne ：中性子数 10、質量数 20）、ネオン-21（ ^{21}Ne ：中性子数 11、質量数 21）、ネオン-22（ ^{22}Ne ：中性子数 12、質量数 22）の 3 種が天然に存在する安定な同位体（安定核）です。これに中性子をさらに付け加えた同位体であるネオン-23（ ^{23}Ne ：中性子数 13、質量数 23）、ネオン-24（ ^{24}Ne ：中性子数 14、質量数 24）などは、ベータ崩壊^[7]によって時間をかけて核内の中性子が陽子へ変換されていくものの、ネオン-34（ ^{34}Ne ：中性子数 24、質量数 34）までは陽子と中性子は結合し、束縛された原子核として存在します。

しかし、さらに中性子を加えてネオン-35（ ^{35}Ne ：中性子数 25、質量数 35）を作ろうとしても結合せず、直ちに中性子を放出して崩壊してしまいます。こうした原子核としての存在限界を、原子核の地図（核図表^[8]）上で「中性子ドリップライン^[9]」と呼んでいます。中性子ドリップラインは、核図表上の中性子過剰側の境界線に当たります。現在までのところ、中性子ドリップラインが確定しているのはネオンまでで、ナトリウム（Na：陽子数 11）以上の重い元素では確定されていません（図 1）。

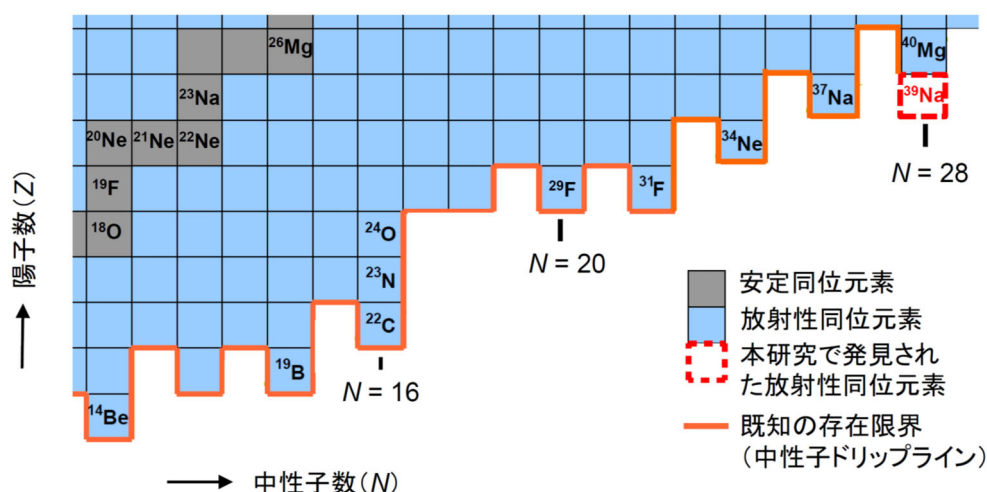


図 1 本研究の対象領域を示す核図表

それぞれの升目は同位元素を示し、点線で示した升目は、本研究において探索を行った新同位元素のナトリウム-39（ ^{39}Na ：陽子数 11、中性子数 28、質量数 39）を示す。升目が縦方向上側に行くほど陽子数が増加し、横方向右側に行くほど中性子数が増加する。既知の存在限界（中性子ドリップライン）は、橙色の太線で示す。

初めの「原子核に中性子は何個まで付け加えられるか」という問いは、原子核物理学において重要で基本的な問題ですが、未だ解決されていません。中性子ドリップラインの近傍にある極限原子核は、中性子ハロー^[10]のような特異な構造を持ち、原子核の中で陽子と中性子を結び付けている力、すなわち湯川秀樹博士が発見した「核力」は、天然に存在する安定な原子核とは異なる性質を持つ原子

核構造を出現させると考えられています。核構造における魔法数の消失という興味深い現象も発生します。

中性子数が過剰な原子核（中性子過剰核）の生成は、今日の加速器技術や生成技術をもってしても容易ではありません。実際、Na 元素については、20 年前にナトリウム-37 (^{37}Na : 中性子数 26、質量数 37) の存在が確認されて以来、それよりも中性子数の多い同位体は確認されていませんでした（図 1）。これは、重い元素になればなるほど、中性子ドリップライン近傍にある同位元素の中性子数が格段に多くなるため、天然に存在する安定同位元素の重イオンビームを使った反応では生成率が減少し、生成が極めて難しくなるからです。この困難を乗り越えるには、高い生成効率をもたらす実験条件の実現が不可欠でした。

本研究では、従来の施設・装置に比べて卓越した生成効率を持つ、RI ビームファクトリー（RIBF）が供給する大強度重イオンビームと次世代型の大口徑超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS を用いて、20 年ぶりに、中性子ドリップライン近傍に位置する新同位元素、ナトリウム-39 (^{39}Na : 中性子数 28、質量数 39) の生成と発見に挑みました。 ^{39}Na の原子核は、中性子数が陽子数より 17 個も多い超中性子過剰核です。

研究手法と成果

国際共同研究グループは、RIBF の加速器から供給される、光速の約 70% まで加速された大強度カルシウム-48 (^{48}Ca : 陽子数 20、質量数 48) ビームを厚さ 20mm のベリリウム（Be）標的に照射し、入射核破碎反応^[11]によって、 ^{39}Na を含む中性子過剰放射性同位元素^[4]ビーム（RI ビーム）を生成しました。さらに、大口徑超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS を用いて、生成された RI ビームを収集・分離し、観測される放射性同位元素の粒子識別（同定）を行いました（図 2、3）。本研究は、大強度 ^{48}Ca ビームの使用と BigRIPS の持つ高い RI ビーム収集・同定能力により、 ^{39}Na など安定線^[8]から遠く離れた中性子ドリップライン近傍の同位元素の生成に対して、十分な生成効率を実現しました。

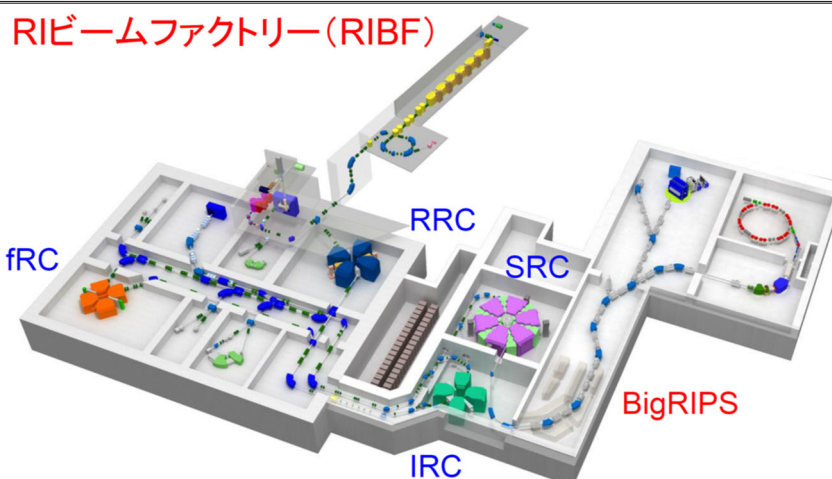
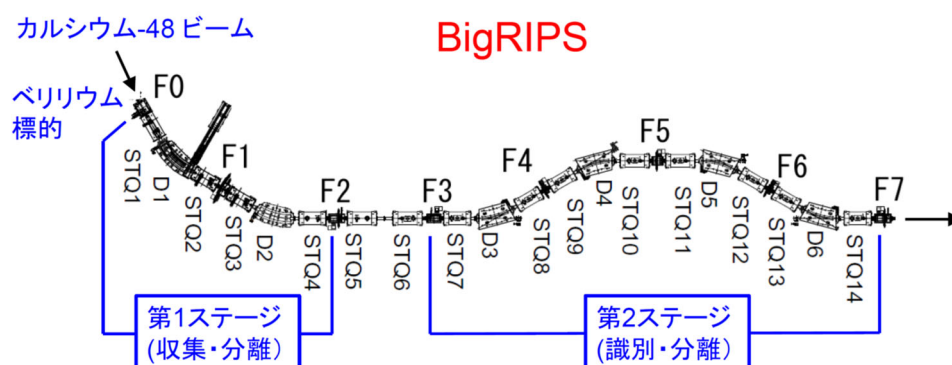


図2 RI ビームファクトリー (RIBF) の構造

RIBF は、重イオンビームを供給する加速器系（サイクロトロン of RRC、fRC、IRC、SRC など）、超伝導 RI ビーム分離生成装置の BigRIPS からなる RI ビーム生成系、そして生成系で生成した RI ビームを用いて多角的な研究・利用を行う基幹実験装置系から構成される。



STQ1-14: 超伝導三連四重極電磁石 D1-6: 常伝導双極電磁石 F1-7: 焦点面

図3 超伝導 RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS)

BigRIPS は常伝導偏向電磁石 6 台と大口径の超伝導三連四重極電磁石 14 台から構成される、二段階型の飛行分離型 RI ビーム生成装置である。一段目の第 1 ステージでは、生成標的で生成された RI ビームを収集・分離し、二段目の第 2 ステージでは、さらなる分離と RI ビームの高分解能粒子識別（同定）を行うことができる。この二段階構成と高効率の RI ビーム生成を強く意識した大口径・高磁場仕様が大きな特長である。

粒子識別は、RI ビームの飛行時間（速度）、磁気剛性^[12]、物質通過中のエネルギー減衰を測定し、放射性同位元素の陽子数（ Z ）および質量数（ A ）と陽子数の比（ A/Z ）を事象ごとに導出することで行いました。図 4 はその粒子識別図で、本測定において観測された事象を二次元プロットしたものです。精密データ解析により、粒子識別において十分な分解能とバックグラウンド事象の除去（バックグラウンドフリー）を実現しました。

図 4 に見られるように、本実験は新同位元素の ^{39}Na を明瞭に観測しました。生成された ^{39}Na の総数は 9 個であり、これは ^{39}Na の疑いのない発見を示して

います。以上の結果から、 ^{39}Na の原子核が束縛していることが明らかになりました。

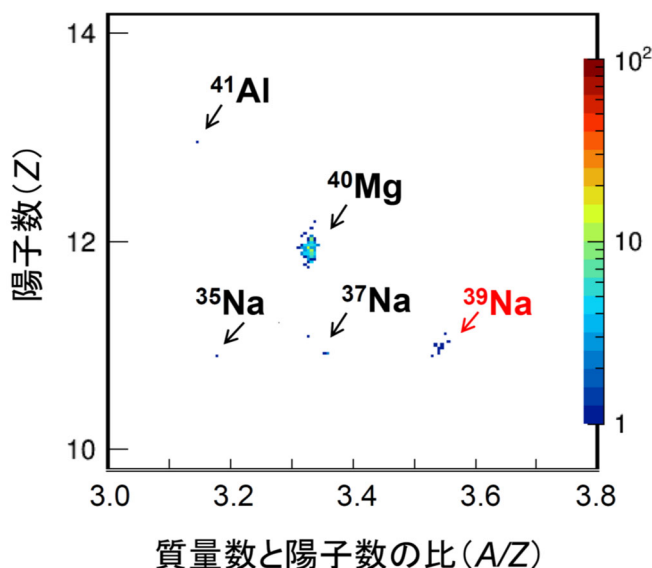


図4 ナトリウム-39 探索実験時の粒子識別図

新同位元素のナトリウム-39 (^{39}Na : 陽子数 11、中性子数 28、質量数 39) が、明瞭に観測されている。マグネシウム-40 (^{40}Mg : 陽子数 12、中性子数 28、質量数 40) など、同時に観測されたいくつかの既知同位元素も同定され、図中にその種類が示されている。

今後の期待

今回の ^{39}Na の発見は、中性子過剰極限に特徴的な原子核構造や核力の解明に寄与すると期待できます。 ^{39}Na の原子核の中性子数は 28 で、安定核の領域では魔法数に当たります。 ^{39}Na の原子核が束縛するという実験結果から、中性子過剰極限においてこの魔法数 28 が消失しており、その結果、 ^{39}Na の原子核が変形^[13]していると解釈できます。それは、この領域では原子核が変形すると核子はより強く結合し、原子核はより束縛するからです。この解釈は、最近の最先端の理論計算とも整合します。

さらに、宇宙の爆発的な現象によって引き起こされる r 過程^[14]と呼ばれる元素合成過程には、中性子過剰核が介在しますが、その解明にはそれらの質量予想が重要です。今回の ^{39}Na の発見は、こうした中性子過剰核の質量モデルの有効性を検証する上で重要な試金石になると期待できます。さらに、正しい質量モデルは、中性子星^[15]の構造の解明に必要な中性子過剰核の状態方程式^[16]の決定にも重要な役割を果たします。

次なる挑戦としては、さらに中性子過剰なナトリウム同位元素の探索、マグネシウム-42 (^{42}Mg : 陽子数 12、中性子数 30、質量数 42) やアルミニウム-45 (^{45}Al : 陽子数 13、中性子数 32、質量数 45) などより陽子数の大きい超中性子過剰同位元素の探索が考えられます。理研の RIBF では、大幅なビーム強度の増強を目

指した高度化計画が進行中で、達成の暁には中性子過剰極限に向けた研究がさらに進むと期待でき、核図表の境界線の確定が進みます。米国においても最近大型 RI ビーム施設が稼働し始め、ドイツでは大型 RI ビーム施設を建設中です。こうして、極限状態にある原子核の謎、宇宙の物質の起源などがより明らかにされるものと考えられます。

論文情報

<タイトル>

Discovery of ^{39}Na

<著者名>

D. S. Ahn, J. Amano, H. Baba, N. Fukuda, H. Geissel, N. Inabe, S. Ishikawa, N. Iwasa, T. Komatsubara, T. Kubo, K. Kusaka, D. J. Morrissey, T. Nakamura, M. Ohtake, H. Otsu, T. Sakakibara, H. Sato, B. M. Sherrill, Y. Shimizu T. Sumikama, H. Suzuki, H. Takeda, O. B. Tarasov, H. Ueno, Y. Yanagisawa, K. Yoshida

<雑誌>

Physical Review Letters

<DOI>

[10.1103/PhysRevLett.129.212502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.212502)

補足説明

[1] RI ビームファクトリー (RIBF)

水素からウランまでの全元素の放射性同位元素 (RI) を世界最大強度の RI ビームとして発生させ、それを多角的に利用することにより、基礎から応用まで幅広い研究と産業技術の発展に貢献することを目的とする次世代加速器施設。RIBF は RI ビームを生成するために必要な重イオンビームを供給する fRC、IRC、SRC などからなる「加速器系」、RI ビーム分離生成装置の BigRIPS からなる「RI ビーム生成系」、生成系で生成した RI ビームを用いて多角的な研究・利用を行う「基幹実験装置系」で構成される。RIBF は以前の施設に比べ卓越した性能を持ち、これまで生成不可能だった RI ビームを多種生成できるようになっている。RI ビームは原子核の構成メカニズムの解明、元素の起源解明に有用であるとともに、RI 利用による産業発展に寄与することも期待されている。米国、ドイツなど世界の主だった重イオン加速器施設でも同様の計画が進行中、または稼働開始中で、国際競争も激しい状況にある。

[2] 同位元素、同位体

陽子数が同じ元素には、中性子数が異なるものが複数存在する。これらを同位元素や同位体と呼ぶ。それらのうち、長期間にわたって安定な状態で存在するものを安定同位元素、時間とともに放射線を出し崩壊する不安定なものを放射性同位元素と呼ぶ。

[3] 束縛

原子核を構成する核子（陽子と中性子）がエネルギー的に束縛した（結合した）状態にあり、核子放出に対して安定であることをいう。「原子核が存在する」ともいう。原子核が非束縛な場合は、原子核として存在できず、直ちに核子を放出して崩壊してしまう。

[4] 放射性同位元素 (RI)、中性子過剰放射性同位元素

物質を構成する原子核には、構造が不安定なため時間とともに放射線を放出しながら崩壊(ベータ崩壊)していくものがある。このような原子核を放射性同位元素と呼ぶ。放射性同位体、不安定同位体、不安定原子核、不安定核、ラジオアイソトープは同義語である。同じ元素において、中性子の数が異なる放射性同位元素が多数存在する。このうち、中性子数が陽子数より多いものを中性子過剰放射性同位元素と呼ぶ。RI は、Radioactive Isotope、Rare Isotope、Radioisotope の略。

[5] 魔法数

原子核が特に安定になる陽子数や中性子数のことをいう。安定線に近い領域の原子核で知られている魔法数は、2、8、20、28、50、82、126 である。

[6] BigRIPS

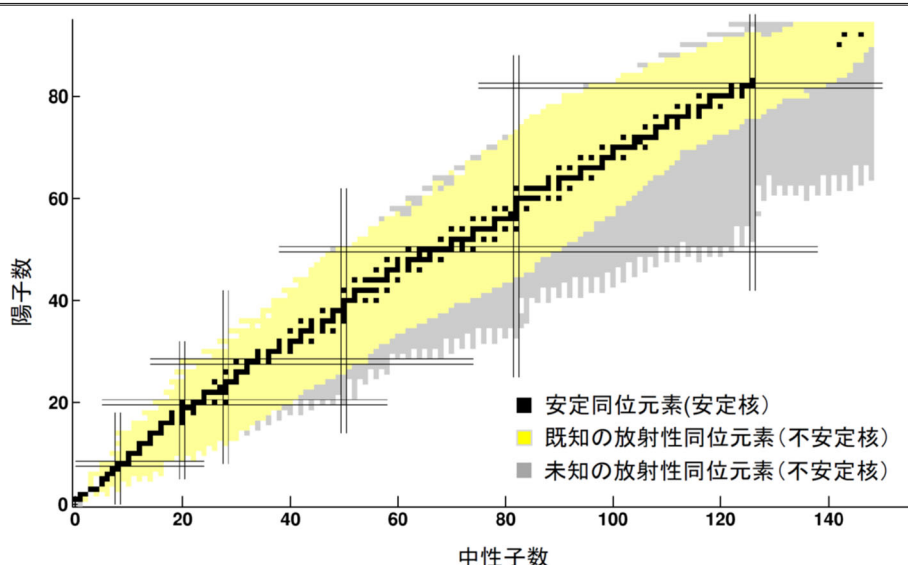
RIBF で使用される超伝導 RI ビーム分離生成装置。重イオンビームを生成標的に照射することによって生成されるさまざまな放射性同位元素 (RI) を収集・分離・識別し、放射性同位元素ビーム (RI ビーム) として供給する。大口径・高磁場の超伝導電磁石を使用し、第 1、第 2 の二段階のステージから構成される飛行分離型 RI ビーム生成装置である。高効率の RI ビーム生成、高分解能の粒子識別など卓越した性能を持ち、これまで生成不可能であった多数の RI ビームの生成を可能にしている。

[7] ベータ崩壊

弱い相互作用によって、原子核内の中性子が陽子と電子に（あるいは陽子が中性子と陽電子に）崩壊し、原子核がゆっくりとより安定なものに変換していく過程をいう。

[8] 核図表、安定線

核図表は縦軸に陽子数、横軸に中性子数を取り、原子核の核種（同位元素の種類）を示した配置図。原子核の地図。下図参照。黒色の升目は安定同位元素（安定核）を示し、それらの領域を結ぶ右上斜め方向に延びる線は安定線と呼ばれる。安定線の右側にある放射性同位元素の原子核は中性子過剰核、左側にあるものは陽子過剰核と呼ばれる。



[9] 中性子ドリップライン

陽子数が同じ元素に中性子を増やしていくと、束縛エネルギーが減少していき、やがて非束縛状態になり原子核として存在できなくなる。この存在限界を中性子ドリップラインと呼び、同じ元素において、中性子数の最も多い放射性同位元素（原子核）に対応する。例えば、ネオン元素の場合、ネオン-34 (^{34}Ne : 陽子数 10、中性子数 24、質量数 34) が中性子ドリップラインである。さらに中性子数を増やすと束縛エネルギーがゼロを切ってしまい、中性子数が 24 より多いネオンの同位元素は存在しない。

[10] 中性子ハロー

通常の安定な原子核では、陽子と中性子が均一に混ざり合って分布し、陽子の占める体積と中性子の占める体積はほぼ等しいと考えられている。しかし、ドリップライン近傍の中性子過剰不安定核には、通常のこのコアの部分と遠方まで広がる過剰な中性子の部分とに分かれた分布構造を持つものが存在する。この過剰な中性子が、異常に大きな半径を持ってコアの周りに薄く広がっている状態を中性子ハローと呼ぶ。

[11] 入射核破砕反応

高速に加速された入射原子核（重イオンビーム）が標的の原子核に衝突したとき、複数の破砕片が速度を保って前方（ゼロ度方向）に放出される原子核反応をいう。この破砕片には、陽子過剰側から中性子過剰側まで広範囲な領域にわたるさまざまな放射性同位元素が含まれる。

[12] 磁気剛性

電荷を持った粒子が磁場中を運動するときの曲がりにくさを表す量。粒子の運動量（質量数と速度の積）に比例し、電荷数に反比例する。磁気剛性の大きな粒子は大きな軌道半径、小さなものは小さな軌道半径で曲がる。

[13] 原子核の変形

原子核は、核子の数が魔法数に近い領域においては球形であるが、そこから離れた領域では、自発的対称性の破れに起因し、回転楕円体などの形状に変形することがある。

この現象は核変形と呼ばれ、変形した原子核は変形核と呼ばれる。

[14] r 過程

中性子星合体など宇宙の爆発的な現象のときに起こると考えられている元素合成過程のモデル。鉄よりも重い元素（重元素）のほぼ半分は、r 過程（rapid process）で生成されと考えられている。

[15] 中性子星

原子核の構成粒子である中性子がぎっしり詰まった超高密度の天体。大質量の恒星が一生を終える際、超新星爆発によってその中心部が圧縮されることにより形成される。

[16] 状態方程式

ここでは原子核の状態量であるエネルギー（温度）、密度、対称度の間の関係式をいう。

国際共同研究グループ

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

実験装置運転・維持管理室

研究嘱託

久保 敏幸 （クボ・トシユキ）

実験装置運転・維持管理室

RI ビーム分離生成装置チーム

協力研究員（研究当時）

安 得順 （アン・デュック・スン）

技師

鈴木 宏 （スズキ・ヒロシ）

前任技師

稲辺 尚人 （イナベ・ナオヒト）

技師

福田 直樹 （フクダ・ナオキ）

技師

清水 陽平 （シミズ・ヨウヘイ）

技師

竹田 浩之 （タケダ・ヒロユキ）

東京工業大学 理学院 物理学系

教授

中村 隆司 （ナカムラ・タカシ）

本研究には、理化学研究所、東京工業大学、東北大学、立教大学、重イオン研究所（ドイツ、GSI）、ミシガン州立大学国立超伝導サイクロトロン研究所（米国、NSCL）より、総勢 26 人の研究者から構成される国際共同研究グループが参加しました。

研究支援

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業新学術領域研究（研究領域提案型）「量子クラスターで読み解く物質の階層構造（研究代表者：中村隆司）」、米国立科学財団などによって一部助成されています。

発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

実験装置運転・維持管理室

研究嘱託	久保 敏幸 (クボ・トシユキ)
実験装置運転・維持管理室	RI ビーム分離生成装置チーム
協力研究員 (研究当時)	安 得順 (アン・デュック・スン)
技師	鈴木 宏 (スズキ・ヒロシ)

東京工業大学 理学院 物理学系
教授

中村 隆司 (ナカムラ・タカシ)



久保 敏幸



中村 隆司

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press [at] ml.riken.jp

東京工業大学 総務部 広報課

Tel: 03-5734-2975

Email: media [at] jim.titech.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
