

平成26年4月9日

東京工業大学
理化学研究所

中性子が多い原子核に現れる特異構造を解明 —中性子ハロー、魔法数の消失、強い変形を統一的に理解—

【要 点】

- 理研 RI ビームファクトリーでの実験により、ネオン 31 の微視的構造を決定
- 中性子が非常に多い原子核に現れる 3 つの特異構造を統一的に理解
- より重く、より中性子が多い不安定核に中性子ハローが普遍的に現れる可能性を示唆

【概 要】

東京工業大学大学院理工学研究科の中村隆司教授と理化学研究所(理研)の研究グループは、中性子が非常に多い原子核で見つかった「中性子ハロー(用語1)」「魔法数(用語2)の消失」、「強い変形」という3つの特異構造が、重いネオン同位体(用語3)「ネオン31」(^{31}Ne)にすべて発現していることを定量的に明らかにし、これを統一的に理解することに成功した。

不安定核ビーム(用語4)の世界的拠点施設、理研 RI ビームファクトリー(RIBF)を用いて、中性子数が陽子数の2倍以上もある原子核「 ^{31}Ne 」を人工的に生成し、分解反応という手法による実験で解明した。中性子数が陽子数に比べて非常に多い原子核の普遍的性質の一つを示したもので、未知の、より重い原子核でも同様の中性子ハローが発見される可能性を示すものである。さらに、私たちの身体を構成する元素が宇宙でどのように生まれたかを探る上でも重要な成果である。

この研究は東工大、理研のほか、ソウル国立大学(韓国)、サレー大学(英)、日本原子力研究開発機構、カン素粒子原子核研究所(LPC-CAEN)(フランス)、東京大学原子核科学研究センター(CNS)、東京理科大学と共同で行った。研究成果は4月7日に米国物理学会の学術誌「フィジカル・レビュー・レターズ(Physical Review Letters)」電子版に掲載された。

●研究成果

中性子を陽子の2倍以上多く含む重いネオン同位体“ネオン31” (^{31}Ne)は、ネオン30 (^{30}Ne)というコンパクトで硬い芯原子核のまわりに、薄く雲のように拡がった1個の中性子がとりまく「中性子ハロー」という特異な構造を持つことが知られている。

今回、理研のRIBFで行った不安定核ビームを用いた実験では、クーロン力と核力(用語5)という2種の異なる力によって ^{31}Ne を分解し、これらの感度の違いを利用して、 ^{31}Ne の微視的構造を突き止めた。すなわち、①中性子ハロー構造の定量的な同定に加え、②重いネオン同位体では中性子の魔法数“20”および“28”が消失し、③原子核が強く変形していることを示した。また、この「魔法数の消失」や「強い変形」が中性子ハローの形成に重要な役割を果たしていることも明らかになった。 ^{31}Ne は実験的に中性子ハロー構造が確認されている最も重い原子核であるが、今回の研究で新たに見出したハローの形成メカニズムはさらに重い原子核にも適用できることから、類似の特異な核構造が普遍的に現れる可能性がある。

私たちの身の回りにある多様な元素の合成は、宇宙で起こっている超新星爆発の時に中性子が非常に多い原子核が一瞬作られたことがかかわっているとされている。今回、観測した特異構造がその謎解きにも重要であると考えられる。

今回の成果は、不安定核ビームの世界的な研究拠点、理研のRIBFの威力を示すとともに、実験の解析では最近急速に進歩している大規模殻模型計算(用語6)が重要な役割を果たしている。今後は、RIBFでの実験と大規模理論計算の相乗効果により、未知の原子核の特異構造が次々に明らかになり、宇宙の元素合成の解明も急速に進展するものと期待される。

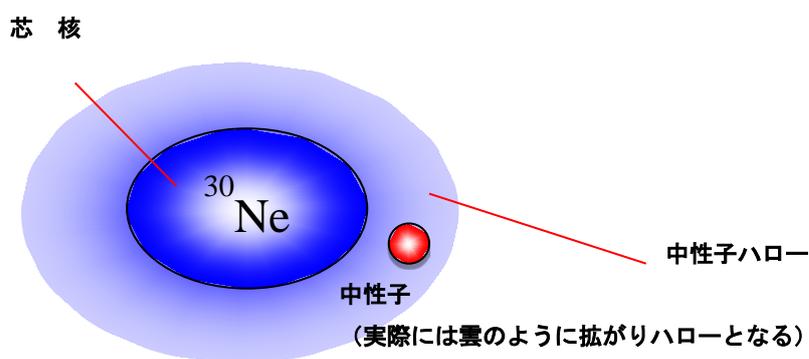


図1 今回観測されたネオン31 (^{31}Ne)の描像。 ^{30}Ne というコンパクトで硬い芯原子核のまわりに、中性子1個が薄く拡がって雲のようになっている部分(中性子暈、あるいは中性子ハローと呼ばれる)がとりまいている。 ^{31}Ne が約3:2(長軸:短軸比)で変形していることもわかった。

●背景

中性子と陽子からなる原子核は、私たち生命体や、空気や土、水など、宇宙に存在する観測可能な物を構成する基本となる粒子（半径は10兆分の1センチメートル程度）である。天然に存在する約270種の原子核は、安定核あるいは安定同位体と呼ばれ、中性子と陽子の数はだいたい同じである（例、炭素12は6個の陽子と6個の中性子から成る）。

一方で、中性子数が陽子数より多く（あるいは少なく）、有限の寿命を持つ「不安定核」は、既知のもので約3000種、未知のものがさらに3000種以上はありと予想されている。その多くは宇宙の爆発的な天体現象（超新星爆発など）で瞬間的に存在すると考えられている。図2は、陽子数20（カルシウムCa）までの原子核について、中性子数を横軸に陽子数を縦軸として、存在が実験的に確認されている原子核をプロットした原子核の地図で「核図表」（あるいはセグレ図）と呼ばれるものである。図に示すように、安定核に比べて、不安定核の種類ははるかに多く、中性子数と陽子数の差に起因する多様な物理現象・特異構造が報告されており、今後も新奇な現象の発見が期待されている。

理研では、世界最高性能の重イオン加速器施設RIBFが2006年に稼働し、「不安定核物理」の研究で世界をリードしている。今回の研究対象 ^{31}Ne のように、中性子を陽子の2倍も含むような中性子数の非常に多い原子核を大量に生成することがRIBFの登場で初めて可能になり、今回の成果につながった。

不安定核物理の最近のハイライトは安定核にはない様々な特異現象である。その第一は「魔法数の消失・新魔法数の出現」である。原子核では特定の中性子数や陽子数になると特に安定になり、この数を魔法数と呼んでいる。2, 8, 20, 28, 50, 82, 126は安定核で確立している魔法数であるが、最近の研究から、中性子が多い原子核では8, 20などの魔法数が消失し、一方で新しい魔法数が出現していることが実験で判明し、注目されている（例えば、RIBFの成果「 ^{54}Ca （カルシウム）に現れる新魔法数34の発見」はNatureの表紙を飾った）。魔法数をもつ原子核は基本的に「球形」であるが、不安定核では魔法数が消失するために強く「変形」している例がみつまっている。「強い変形」は、不安定核の第二の特異構造と言える。

さらに、「中性子ハロー」という特異構造が不安定核の中でも特に中性子が多い原子核に現れるものとして注目されていたが、「魔法数の消失」、「強い変形」との関係は謎のままであった。 ^{31}Ne については、中村教授らが2009年に発表した先行研究によって、中性子ハローをもつこと、また魔法数の破れとラグビーボール型の変形の可能性が示唆されていたが、定性的な理解にとどまっていた。特に ^{31}Ne の質量がわからなかったこと、中性子の軌道（用語7）の種類が確定的でなく、ハロー成分の割合が求められなかったことがネックとなり、変形の可能性を示唆するに留まっていた。

●研究の経緯

今回、同研究グループは、RIBFで生成される高強度の不安定核ビームを利用し、核力とクーロン力という感度の異なる力で ^{31}Ne を分解し、その微視的状态を捉えることに成功した。こうした手法を本格的に利用したのはこの実験が初めてである。

この実験の結果、 ^{31}Ne 中の最外殻の中性子は、p軌道、f軌道（用語7）という異なる軌道の強い混合状態であることがわかった。これは中性子の魔法数“20”および“28”の破れを意味する。さらに、この強い混合は、ヤン・テラー効果（用語8）と呼ばれるメカニズムによってラグビーボール型への強い変形が促進されたことを意味する。大規模殻模型

計算との比較から、変形度が長軸対短軸比で3 : 2程度に及ぶことも確認した。また、中性子の主要な軌道の一つ（p軌道）がハローを形成する正体であることもわかり、一つの中性子がハローを形成する割合は約30%と見積もられた。

一方、今回の実験は ^{31}Ne の質量の測定にもなっており、得られた質量から、ハローを形成した中性子は、通常の中性子の2%程度というわずかなエネルギーで原子核に束縛されていることがわかった。このことも、中性子ハローを形成する一因となっている。

なお、この研究では大規模殻模型計算が大きな役割を果たしている。同計算によって、実験で得られたデータが説明されるとともに、変形、魔法数の破れ、ハロー現象を統一的に理解することが可能になった。

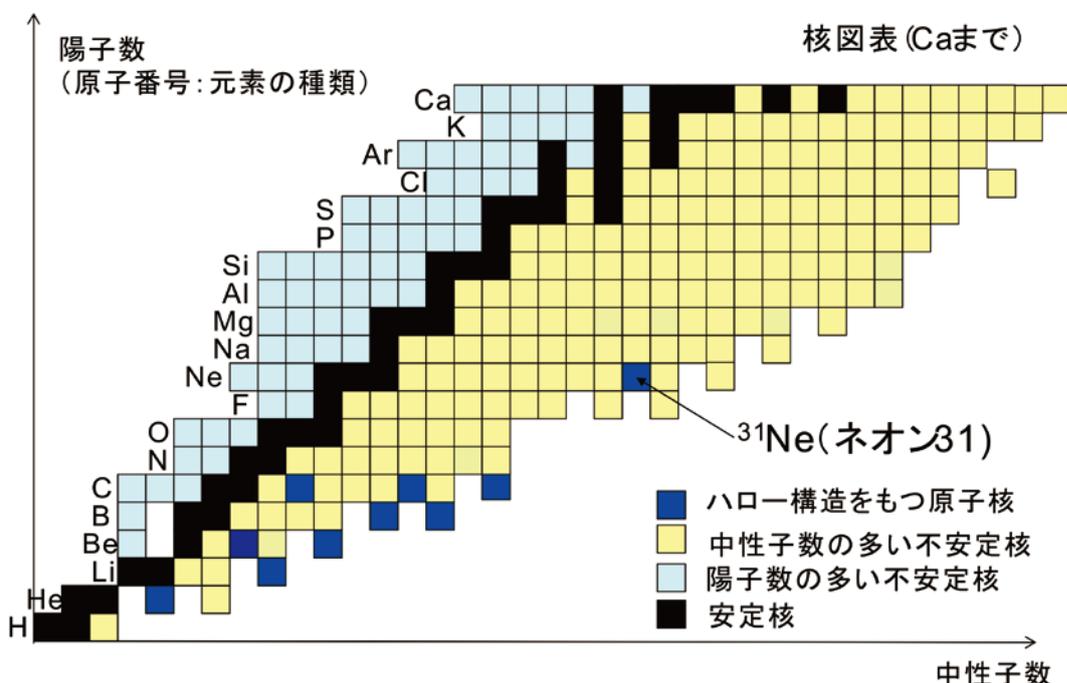


図2：核図表、いわゆる原子核の地図。横軸が中性子数、縦軸が陽子数（原子番号）を表わしている。ネオン31 (^{31}Ne)は陽子数が10、中性子数が21で、存在限界に近い原子核である。 ^{31}Ne はハロー構造が発見されている原子核の中では最も重い。

●今後の展開

今回の研究成果により、さらに重く、より中性子が多い原子核でも「中性子ハロー」「魔法数の消失」「強い変形」という特異構造が共存する核が発見される可能性が高まった。RIBFでは重い不安定核を用いた実験を進める予定で、今回のような原子核の特異構造、さらには未知の特異構造の研究が進むと期待される。

これはひいては、原子核にどれだけ中性子を詰めても存在可能かという、まだ解決していない核物理の根源的な問いへの手がかりにもなる。また、理研をはじめとする世界の重イオン研究所は“超重元素”の探索にもしのぎを削っているが、“どれだけ重い原子核・元素が存在しうるのか”という問いの解決にも繋がるものである。

一方、中性子の非常に多い原子核は超新星爆発などの天体現象で一瞬作られた可能性があり、現在の多様な元素でできた世界を形作っている要因の一つでもある。今回の成果は

不安定核の特異構造を理解する重要な鍵を与えるもので、重い元素合成過程の理解にも繋がる成果と言える。

●謝辞

今回の研究は科研費基盤B (No. 22340053) および新学術領域研究 (No. 24105005) の補助を受けている。また、共同研究者の J. A. Tostevin は英国科学技術カウンスルの補助 (ST/J000051) および東京工業大学「国際的な共同研究推進のための派遣・招聘プログラム」の補助を、小林信之は学振特別研究員 (25. 10601)、および GCOE (ナノサイエンスを開く量子物理学拠点) の補助を受けている。

【用語説明】

(1) **中性子ハロー**：1個または2個の中性子が芯原子核から外にしみだして薄く雲のように大きく広がった状態 (図1は ^{31}Ne の例)。中性子が非常に多い原子核に10種程度みつかっている。 ^{31}Ne はその中で最も重い原子核である。なお、日常用語としてのハロー (Halo) は日本語では暈 (かさ) と呼ばれ、薄曇りの日に太陽や月に現れる光の環を指す。

(2) **魔法数**：原子核は特定の中性子数や陽子数を持っていると、殻が閉じることにより、球形になり、より安定になる。安定核で知られている魔法数は2, 8, 20, 28, 50, 82, 126である。この機構はマイヤーとイェンゼンによって発見され、彼らはこの業績により1963年にノーベル物理学賞を受賞している。最近の不安定核の研究から、従来知られていた8や20などの魔法数が消失する一方、新しい魔法数も幾つかみつき注目されている。

(3) **同位体**：陽子数が同じで中性子数が異なる原子核 (または原子) を同位体と呼んでいる。観測されているネオンの同位体は最も軽いものが ^{17}Ne (ネオン17) で最も重いものが ^{34}Ne (ネオン34) である。また、天然に存在するネオンの安定同位体 (用語4参照) は ^{20}Ne (ネオン20)、 ^{21}Ne (ネオン21)、 ^{22}Ne (ネオン22) の3種である。

(4) **不安定核、不安定核ビーム**：天然に存在する原子核は安定核、または安定同位体と呼ばれ、中性子数と陽子数はほぼ同数であるが (図2の黒い四角)、それより中性子数または陽子数が多くなると不安定になり、有限の寿命を持つ (短いものでミリ秒、長いものでは年単位になる)。このような原子核を**不安定核** (または**放射性同位体**、**RI**) と呼んでいる。不安定核の多くは宇宙の爆発的事象 (超新星爆発) で瞬間的に存在する可能性があるが、地上では重イオン加速器施設で人工的に生成したビーム (**不安定核ビーム**) として利用することができる。不安定核ビームの生成技術は1990年代頃から進展し、現在は大型の重イオン加速器と不安定核生成分離器を備えた施設が完成、または建設中である。理研のRIビームファクトリー (**RIBF**) は2006年より稼働し、世界最高性能を有しており、世界中から注目されている。今後、米国、ドイツおよび韓国で2018-2020年頃をめどに同様の施設が完成する見込みである。

(5) **クーロン力、核力**：宇宙のすべての物質は4つの力「重力」「電磁気力」「弱い力」「強い力」で支配されていると考えられている。クーロン力は「電磁気力」のうちの電氣的な力で力の及ぶ範囲が長い。一方「核力」は湯川秀樹博士の提唱した原子核中の中性子

と陽子を結び付ける力で「強い力」の一種であり、力の及ぶ範囲が非常に短い（原子核の半径より短い）。今回の実験では、2つの力の及ぶ範囲の違いを活用している。

(6) **大規模殻模型計算**：多数の中性子や陽子から成る原子核の状態は、さまざまな軌道（注、用語7参照）にある中性子、陽子の状態が混合した複雑な状態である。殻模型計算は陽子も中性子も魔法数をもついわゆる二重閉殻の原子核をコア状態として、その外の殻にある陽子や中性子（価陽子、価中性子）の軌道（配位と呼ばれる）の混合の仕方を計算する手法である。これにより全体の原子核の状態（波動関数）が決まる。従来はこの価陽子、価中子の数が少ないものに計算が限られていたが、今回のネオン31では酸素16をコアとして価陽子が2個、価中子が13個もの状態の計算を行っている。これは、最近進展してきた高速の計算機、および大規模行列計算の技術の進展により初めて可能になった。

(7) **軌道（p軌道・f軌道）**：原子核中の中性子や陽子は、原子中の電子のようにさまざまな軌道にあり、一つの軌道には決まった数の中性子、陽子しか占有できないという性質がある。中性子や陽子の軌道は角運動量と呼ばれる回転運動に関係する物理量で分類され、p軌道の中子は角運動量の単位が1（遅い回転状態）であり、f軌道は角運動量の単位が3（速い回転状態）である。遅い回転状態（p軌道）の方が、中子が外側に広がりやすい、すなわちハローを形成しやすい。

(8) **ヤン・テラー効果**：球形の原子核（球形の場合はこちらを向いても状態が同じなので、対称性が高い）において、複数の状態が同じエネルギーを持っているとき（縮退と呼ばれる）、これら複数の状態がその組み合わせ方を変えて全体の原子核のエネルギーを低くし、対称性の低い状態（変形した状態）に移行するという現象がある。これを原子核におけるヤン・テラー効果と呼んでいて、もとは分子物理学から来た用語である。³¹Neの場合には、球形でp軌道とf軌道という2つの状態のエネルギーが等しくなる（縮退する）ため、p軌道とf軌道の状態を適度に混合させてよりエネルギーの低い変形状態に進む、ということになる（水は低きに流れる）。これは物理学でよくおこる「自発的対称性の破れ」（南部陽一郎博士のノーベル賞の業績となった概念）の一種と言える。

【論文情報】

Deformation-Driven p -Wave Halos at the Drip Line: Ne 31, T. Nakamura et al., *Phys. Rev. Lett.* 112, 142501 - Published 7 April 2014

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.142501>

【問い合わせ先】

東京工業大学 大学院理工学研究科 基礎物理学専攻教授 中村隆司

Email: nakamura@phys.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2652 FAX: 03-5734-2652