



東京工業大学
理化学研究所

中性子ハローがマグネシウム同位体にも出現

—中性子数の極端に多い原子核の普遍的性質となる可能性を示唆—

【要 点】

- マグネシウム同位体「マグネシウム 37」の微視的構造を決定
- マグネシウム 37 に中性子ハローが出現していることを特定
- マグネシウム 37 はハロー構造をもつ原子核として最重—より重い原子核の特異構造を知る手掛かりに

【概 要】

東京工業大学大学院理工学研究科の小林信之院生（現東京大学学振研究員）、中村隆司教授と理化学研究所の研究グループは、中性子が非常に多い原子核に現れる「中性子ハロー（用語 1）」と呼ばれる特異構造が、中性子数が過剰なマグネシウム同位体（用語 2）「マグネシウム 37」(^{37}Mg)にも現れていることを発見した。 ^{37}Mg は、中性子ハロー構造が実験で確認されている原子核としては、最重のものとなった。

強力な不安定核ビーム（用語 3）を供給する世界の拠点研究施設、理化学研究所の RI ビームファクトリー（RIBF）を用い、中性子数が陽子数よりも極端に多い ^{37}Mg をビームとして取り出し、分解反応（用語 4）という手法を用いた実験で解明した。4月に発表したネオン 31 (^{31}Ne) に現れる特異構造（中性子ハローを含む）の解明に続く成果であり、中性子ハローが、中性子数の極端に多い原子核の普遍的性質となる可能性が広がった。

研究は、東工大、理研のほか、サレー大学（英）、日本原子力研究開発機構、米国ウェスタンミシガン大、カナダ・セントマリー大、韓国ソウル国立大、フランス・カン素粒子原子核研究所（LPC-CAEN）、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。この成果は 6 月 18 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）」電子版に掲載される。

●研究成果

同研究グループは天然に存在する一般の原子核（安定同位体）よりも非常に中性子数が多いマグネシウム同位体、マグネシウム 37 (^{37}Mg) の構造の詳細を初めて明らかにした。すなわち、図 1 右のように ^{37}Mg は ^{36}Mg というコンパクトなコアのまわりに、薄い密度で広がる外縁部「中性子ハロー」をまとっていることと、強く変形していることがわかった。中性子ハローは、質量数（用語 5）が 20 未満で、中性子数が陽子数に比べて極めて多い原子核に現れることはよく知られていたが、質量数が 40 に近い原子核で発見されたのは初めてで、これまでで最も重い、中性子ハロー構造を有する原子核ということになった。

今回、理研の RIBF で行った実験では、4 月に発表した ^{31}Ne の研究 (Physical Review Letters 112, 142501 (2014), および東工大・理研のプレスリリース) で用いたのと同様の手法（分解反応）を ^{37}Mg に適用し、そのハロー構造を明らかにした。質量数 40 付近のハロー構造が見いだされたことで、さらに重い原子核でのハロー構造出現の期待も高まった。また、 ^{31}Ne と同様に ^{37}Mg でも魔法数（用語 6）の破れや強い変形状態、という特異構造を持つことも同時に明らかになった。

今回の結果は、「中性子ハロー」がより重く、より中性子数が多い原子核にも普遍的に現れることを示した。宇宙を形作る元素のうち、鉄より重い元素の合成では、中性子数が陽子数よりも多い原子核が関与しているとされる。中性子ハローをもつ原子核がより多く存在すれば、こうした元素合成過程にも影響する可能性がある。

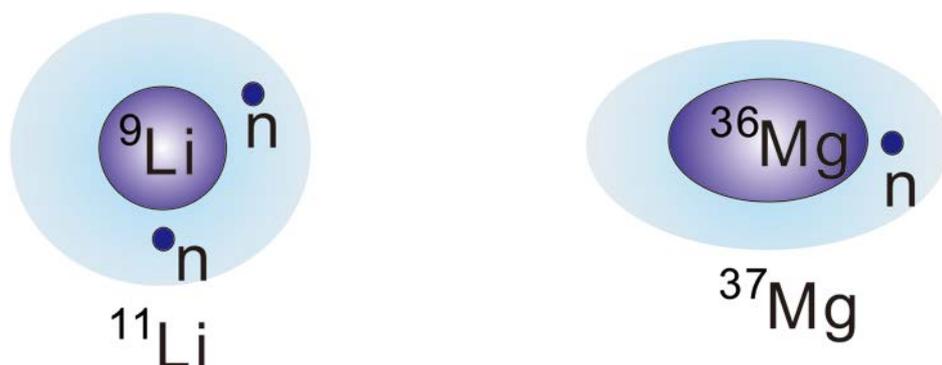


図 1 ハロー構造の模式図。左は従来から知られているハロー構造をもつ原子核、リチウム ^{11}Li の模式図で、右は今回の研究の結果見出した ^{37}Mg の構造を表わしている。図中 n は中性子を表わす。 ^{11}Li は ^{9}Li コアの周りに 2 つの中性子が雲のように大きくひろがり中性子ハローを形成する。一方、 ^{37}Mg では ^{36}Mg コアのまわりに 1 個の中性子が中性子ハローを形成していることがわかった。また ^{37}Mg が強く変形していることも今回の研究の結果解明された。

●背景

原子核は陽子と中性子からなる微小な粒子で、原子の中心に位置し、観測しうる物質の 99.9% 以上の質量を占める。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るが、陽子数と中性子数はほぼ同数であり、例えば天然に存在するマグネシウム同位体は ^{24}Mg （陽子数 12, 中性子数 12）, ^{25}Mg （陽子数 12, 中性子数 13）, ^{26}Mg （陽子数 12, 中性子数 14）の 3 種類である。通常の原子核は、中性子と陽子をこれ以上詰め込められないほど密になった状態にあり、中性子の密度分布と陽子

の密度分布が相似形となっている。なお、陽子数と中性子数の和を質量数とよんでおり、原子核の質量はこの質量数にほぼ比例し、原子核の半径は質量数の3乗根に比例して大きくなる。

1980年代の終わりに中性子数が陽子数に対して大きい（あるいは小さい）原子核「不安定核」が人工的に効率よく「不安定核ビーム」として生成できる手法が開発され、以来、不安定核物理が進展してきた。さらに2006年には新世代の不安定核施設となる理化学研究所のRIBF（RIビームファクトリ）が完成し、これまで実現できなかった非常に中性子数が多い原子核を人工的に生成できるようになり、研究が新しい段階に進みつつある。

不安定核物理の黎明期(1987)に、初めてみつかった原子核の特異構造が「中性子ハロー」である。このとき最初に発見されたのが ^{11}Li （リチウム11、図1左）で、 ^{11}Li は、 ^9Li という高密度でコンパクトなコア核のまわりに、2個の中性子が薄く雲のように取り巻いている構造をしていることがわかった。この中性子雲を中性子ハローと呼び、質量数11の ^{11}Li のハローの広がり、質量数が200を超える鉛の原子核の半径に匹敵する（上記の「原子核の半径は質量数の3乗根に比例する」という法則を破る）。

中性子ハローは、様々な反応率を極端に大きくするなど、特異なふるまいを示すが、まだよくわかっていないことも多い。2009年以前には質量数20未満の原子核にしかハローはみつかっておらず、重い原子核に中性子ハロー構造があるのかどうかは謎のままであった。2009-2010年にかけて ^{22}C 、 ^{31}Ne が新たにハロー構造をもつことが示され、今回の研究では、さらに重い ^{37}Mg でもハロー構造がみつかった。

●研究の経緯

最近、我々は ^{31}Ne について、核力とクーロン力という感度の異なる力で分解し（分解反応）、その微視的状态を捉えることに成功した。この手法を初めて未知の核に応用したのが今回の ^{37}Mg である。 ^{37}Mg は1996年に理研の実験で初めて同定された不安定核であるが、それ以降、その生成の難しさから、半減期や質量などの基本的な量ですら測定されてこなかった。1996年に ^{37}Mg が初めて同定されたときには4日間で3個の ^{37}Mg を収集できたにすぎなかったのだが、RIBFの登場で、1秒間に6個の割合で収集できるようになり、今回の実験が可能になったわけである。

実験の結果、 ^{37}Mg の構造として中性子ハローを同定した。また、このハローを構成する中性子が ^{31}Ne と同様にp軌道(用語7)を占めること、中性子の魔法数”28”が破れており、強く変形していることもわかった。 ^{37}Mg と同じく25個の中性子数をもつ安定核 ^{47}Ti (陽子数22, 中性子数25)では最外殻の中性子軌道はf軌道であり、魔法数28が破れていないということと対比される。

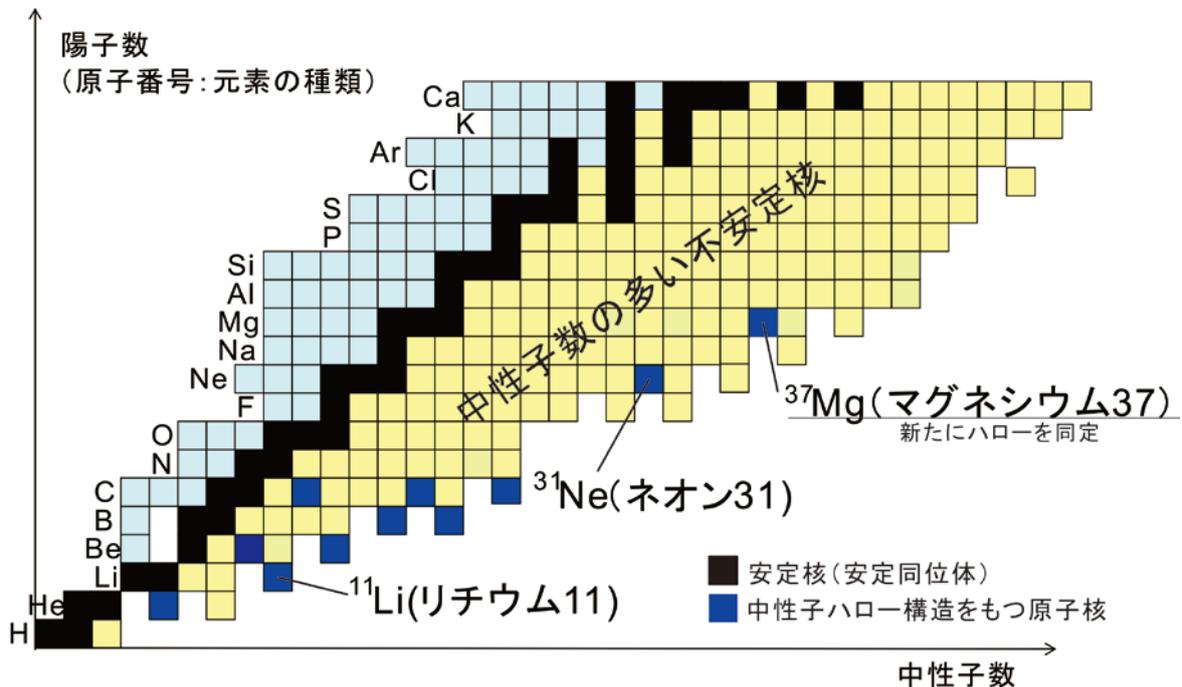


図2：核図表（原子核の地図）。横軸が中性子数、縦軸が陽子数（原子番号）を表わす。青色で表されているのがハロー構造をもつ原子核で今回新たに中性子ハロー構造が同定されたマグネシウム37 (^{37}Mg) はハロー構造が発見されている原子核の中で最も重い。

●今後の展開

今回の研究成果により、さらに中性子が多い原子核でも「中性子ハロー」が存在する可能性が高まった。「原子核にどれだけ中性子を増やせるのか」という、未解決の問いへの手がかりにもなる。一方、中性子の非常に多い原子核は鉄より重い元素の合成で主要な役割を果たしたとされる。こうした宇宙での元素合成の過程を解明する上でも重要な成果である。

●ご参考 4月9日発表のネオン31に関する研究「中性子が多い原子核に現れる特異構造を解明」は東京工業大学のホームページ

「http://www.titech.ac.jp/news/pdf/pr140411_nakamura.pdf」にございます。

●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1参照）。中性子が非常に多い原子核に10種程度みつまっている。今回の ^{37}Mg はその中で最も重い原子核である。

(2) **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。

(3) **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。不安定核は、重イオン加速器施設で加速された重イオンの反応で生成することができる。このとき生成された不安定核はビームとなるので、**不安定核ビーム**と呼んでいる。

(4) **分解反応**：この実験で用いているのは**クーロン分解反応**と**核力分解反応**である。クーロン分解反応では重い標的を用い、その強いクーロン力によりビームの中の粒子（この場合は ^{37}Mg ）を励起する。励起された ^{37}Mg は直ちに ^{36}Mg と n に分解する。この分解反応断面積（分解反応の確率）がハロー中の子核の密度分布に感度がある。実際、ハロー構造があると極端に反応率が上がることがわかっている。一方、軽い標的を用いると短距離力の核力（原子核中の中性子・陽子を結び付けている力）により ^{37}Mg から1個の中性子が引きはがされる反応が主となる。この場合も反応率がハローの密度分布に依存するが、クーロン力より短距離力であるため、感度が異なる。この感度の違いを利用すると、ハローの密度分布や質量、中性子の軌道（用語7）に関する情報が引き出せる。

(5) **質量数**：原子核は陽子と中性子から成る。陽子数を原子番号とよび、陽子数と中性子数の和を質量数とよんでいる。陽子と中性子は総称して「核子」と呼ぶが、質量数は原子核中に含まれる核子数である。 ^{37}Mg の質量数は37であり、元素記号(Mg)の左上の添え字とするのが標準的記法である。

(6) **魔法数**：原子核はその中性子数や陽子数に応じて安定性が変わる。これを支配している仕組みが殻構造であり、魔法数と呼ばれる特定の数の中性子（陽子）で殻が閉じることにより、球形になり、より安定になる。この機構を発見したマイヤーとイェンゼンは、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。従来知られていた魔法数は2, 8, 20, 28, 50, 82, 126であるが、最近の不安定核の研究から、中性子の多い原子核で8や20などの魔法数が消失する一方、新しい魔法数（16, 32, 34等）が発見され、注目されている。

(7) **軌道（p軌道・f軌道）**：中性子や陽子は、原子核の角運動量（回転運動を表わす量）などの量子数で分類される軌道にあり、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。p軌道の子核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。p軌道の子核はハロー

を形成されやすいが、f軌道の中性子はハローの形成が禁止されている。

【論文情報】

Observation of a p-Wave One-Neutron Halo Configuration in ^{37}Mg , N. Kobayashi, T. Nakamura et al., **Phys. Rev. Lett.****112**, 242501(2014). – Published 18 June 2014
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.242501

【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: nakaura@phys.titech.ac.jp

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

