

2011年5月9日

報道関係各位

ジルコニウム同位体で変形魔法数を発見 ～変形魔法数が原子核に大きな変形をもたらす～

東京理科大学科学技術交流センター (TLO)

独立行政法人理化学研究所

ポイント

- 中性子数が過剰なジルコニウム同位体に広がる大きく変形した領域
- 変形魔法数の中性子数64で、ジルコニウム同位体の変形度が最大に
- 変形変化の理解から超新星爆発による重元素合成過程の解明へ

東京理科大学(学長 藤嶋昭)理工学部物理学科の炭竈聡^{すみかま}之助教と独立行政法人理化学研究所(理事長 野依良治)仁科加速器研究センターのグループは、国内外の大学・研究機関との国際共同研究(※1)で、中性子過剰なジルコニウム同位体(※2)(原子番号40)において中性子数64が変形魔法数(※3)となる事を発見しました。

陽子数と中性子数が変化すると原子核は様々な形状をとりますが、形状の変化は魔法数(※3)と密接に関係しています。中性子過剰なジルコニウム同位体は、中性子数60を境に急激に形状が変化し、中性子数64まで大きく変形することが知られていました。しかしながら、大きな変形をもたらす変形魔法数との関係はわかっていませんでした。

今回、理化学研究所のRIビームファクトリー(※4)で、世界最高強度のジルコニウム同位体およびイットリウム同位体(原子番号39)ビームを生成し、原子核の崩壊に伴い放出される γ 線(※5)を観測しました。その結果、 ^{106}Zr (ジルコニウム-106:陽子数40, 中性子数66)と ^{108}Zr (ジルコニウム-108:陽子数40, 中性子数68)の励起準位のエネルギーを初めて測定し、変形度が ^{104}Zr (ジルコニウム-104:陽子数40, 中性子数64)で最大となる事を明らかにしました。モリブデン同位体(原子番号42)との類似性から、中性子数64に存在する変形魔法数が最大の変形度をもたらしている事がわかりました。本研究の成果は、原子核の質量や β 崩壊半減期(※6)などを理論的に再現する際に基礎となる知見であり、超新星爆発(※7)での重元素合成過程(※8)の解明にもつながると期待されます。

*本研究成果はPhysical Review Letter誌(5月13日号)に掲載予定です。

注) ※印1~10:別紙用語解説添付

1. 背景

陽子と中性子から構成される原子核は、球形やラグビーボール型に変形した形状など様々な形状をとり、陽子数や中性子数に関する魔法数とも密接に関連しています。良く知られているのが魔法数と球形の関係で、陽子数及び中性子数の一方もしくは両方が2、8、20、28、40、50などの魔法数になると球形となります。変形した形状においても、変形魔法数と呼ばれる魔法数が存在し、陽子数及び中性子数が変形魔法数になると大きく変形した状態で安定化する事が知られています。

自然界に存在する安定なジルコニウム同位体 ^{90}Zr (ジルコニウム-90) では、陽子数40と中性子数50が魔法数であり、その形状は球形となります(図1)。 ^{90}Zr に中性子を10個加えて中性子数を60にすると、大変形領域に入って球形は急激に変化し、さらに中性子を加えると中性子数64まで緩やかに変形度が大きくなる事が知られ

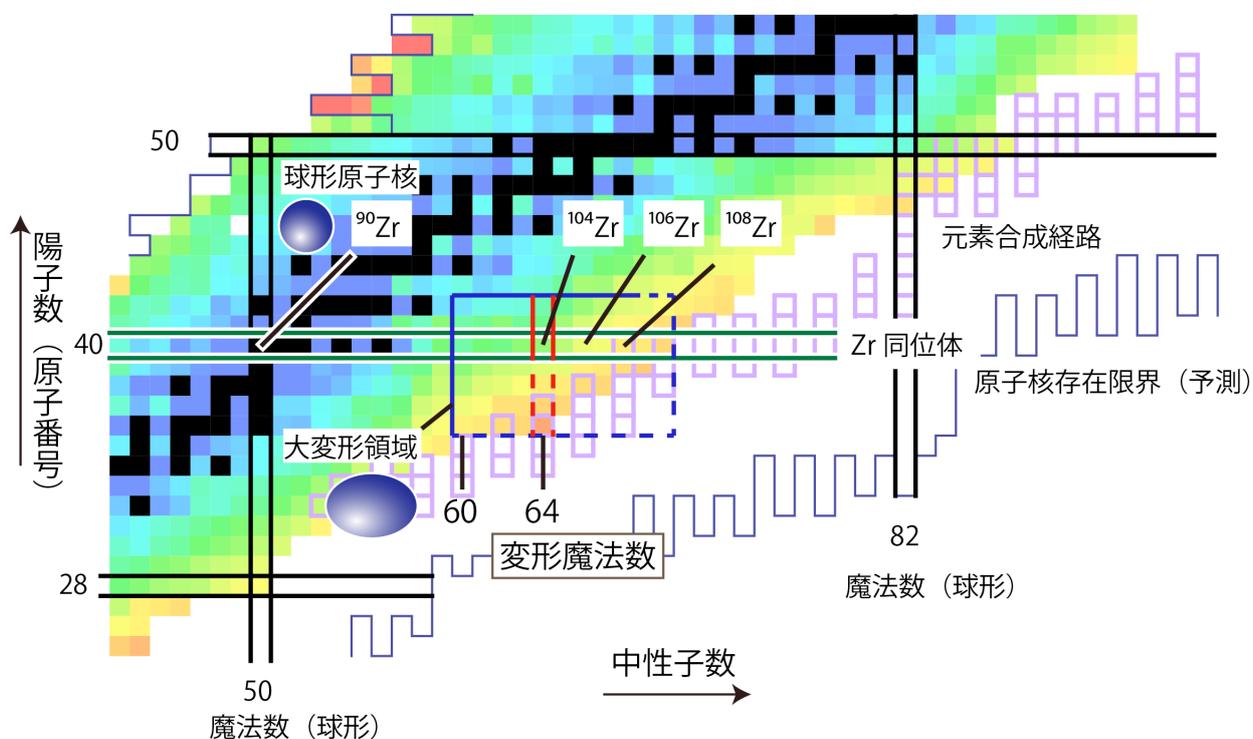


図1 原子核図表。横軸が中性子数、縦軸が陽子数。青線で囲まれた領域は大変形領域であり、境界の点線部は推測である。赤2重線は、本研究によりジルコニウム (Zr) 同位体に発見された中性子の変形魔法数64である。黒2重線は魔法数(球形)を、緑2重線はZr同位体を表す。紫の四角は元素合成の経路を示している。色付けされている領域は、 β 崩壊の半減期が測定されている領域である。黒は安定な原子核で、青は半減期が長く、赤は短い。

ています。しかしながら、さらに中性子が多いジルコニウム同位体の励起準位に関する実験的研究は無いため、その先さらに変形度が大きくなるかどうかはわかっておらず、大変形をもたらす理由も解明されていませんでした。

非常に中性子過剰で不安定なジルコニウム同位体は、超新星爆発の際に生成されたのち β 崩壊してしまったとされています。これまで大強度で生成するのは困難でしたが、2007年、理研仁科加速器センターに世界最高強度の RI ビーム生成施設である RI ビームファクトリーが完成し、ようやく中性子数64を超えるジルコニウム同位体の変形研究に道が開けました。本研究では、変形度の変化を中性子数68まで調べるため、中性子数が66と68である ^{106}Zr 、 ^{108}Zr の励起準位に関する測定を行いました。

2. 研究手法と成果

変形度が大きくなると第1励起準位(※9)のエネルギーは減少するため、その逆数が変形度の良い指標となります。今回の研究では、中性子過剰核が崩壊する性質に注目し、放出される β 線及び γ 線を検出し、励起準位のエネルギーを測定しました。

中性子過剰なジルコニウム同位体およびイットリウム同位体は、理化学研究所の RI ビームファクトリーで、光速の約70% (核子当り 345MeV) まで加速した ^{238}U をベリリウム標的に照射して生成しました。得られた不安定核は、 β 線検出器の中に止めて崩壊させます。 ^{106}Zr と ^{108}Zr の第1励起準位は、それぞれ ^{106}Y (イットリウム-106:陽子数39, 中性子数67) および核異性体(※10) $^{108\text{m}}\text{Zr}$ (ジルコニウム-106:陽子数40, 中性子数68) の崩壊過程で生成され、直ちに γ 線を放出して基底状態になります。 γ 線検出器を β 線検出器の周囲に配置し、この γ 線のエネルギーを測定しました。この測定で得られた第1励起準位のエネルギーの逆数から、中性子数60から68のジルコニウム同位体の変形度はモリブデン同位体より大きく、中性子数64で最大となる事が明らかになりました(図2)。モリブデン同位体でも、同様に中性子数64で最大となる事から、中性子数64の変形魔法数によって変形度が最大化している事がわかりました。

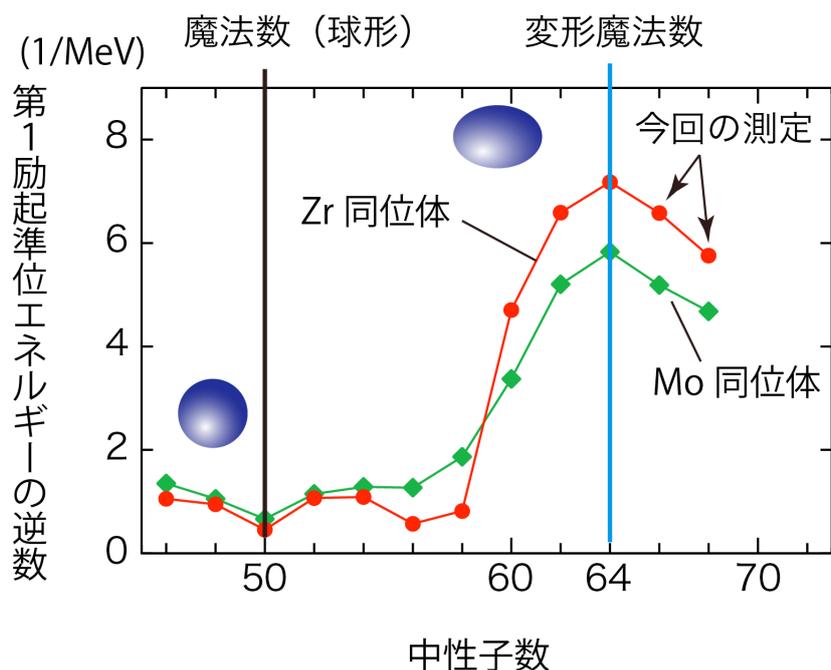


図2 第1励起準位エネルギーの逆数の中性子数依存性。変形魔法数の中性子数64で変形が最大化 (Zr, Mo 同位体)。

3. 今後の期待

超新星爆発での重元素合成過程の解明には、関与する非常に中性子過剰な不安定核 (図1) の質量や β 崩壊半減期を広範囲に調べる必要があります。現在測定されていない不安定核については、理論的予測が行われていますが、その計算には変形度が必須なパラメータとなっています。今回の成果である変形魔法数の発見によって、さらに高精度な予測へとつながると期待されます。

<本件に関するお問合せ先>

■東京理科大学科学技術交流センター(承認 TLO)企画管理部門 担当:近藤

Tel: 03-5228-8090 Fax: 03-5228-8091

■理化学研究所

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel:048-467-9272 Fax: 048-462-4715

【用語説明】

※ 1 国際共同研究

国内は、大阪大学、東京工業大学、九州大学、東京大学、日本原子力研究開発機構。海外はローレンス・バークレー研究所、ミシガン州立大学、INFN 研究所、ミラノ大学、ミュンヘン工科大学、ヨーク大学、サリー大学による共同研究。

※ 2 同位体

同一の原子番号（同一の陽子数）を持ち、中性子数の異なる原子核の事。今回測定したジルコニウム-106、ジルコニウム-108 は、 ^{106}Zr 、 ^{108}Zr と表記される。左肩の数字は、質量数を表し、陽子数（ジルコニウムの場合 40）と中性子数の和である。自然界に存在するジルコニウム同位体は、 ^{90}Zr 、 ^{91}Zr 、 ^{92}Zr 、 ^{94}Zr 、 ^{96}Zr であり、実験的に存在が確認されているのは、 ^{78}Zr から ^{112}Zr までである。

※ 3 変形魔法数、魔法数

原子核は、原子と同様に殻構造を持ち、陽子または中性子がある決まった数のとき閉殻構造となり、安定化する。この数を魔法数と呼び、2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 が知られている。陽子数または中性子数が魔法数をとるとき、原子核は球形となる。これに対し変形した形状に対する魔法数（変形魔法数）は、原子核を大きく変形させる。中性子の変形魔法数による効果は、陽子数が特定の範囲内にある時にのみ顕著に現れる。

※ 4 RI ビームファクトリー

理化学研究所に建設された RI（放射性同位元素）を用いた実験施設で、RI ビーム発生装置および不安定核ビーム分離装置 BigRIPS 等の基幹実験設備から構成されている。

※ 5 γ 線

不安定核の γ 崩壊に伴い放出される放射線で、電磁波の 1 種である。不安定核の種類（核種）に固有のエネルギーを持つ。

※ 6 β 崩壊半減期

自然界に存在する安定同位体より中性子数が多いまたは少ない同位体は、複数回

にわたる β 崩壊の後、安定核になる。それぞれの同位体は、ある決まった時間で半分が崩壊し、その時間を β 崩壊半減期という。

※ 7 超新星爆発

太陽質量の8倍より重い恒星は、進化の最終段階で重力崩壊を伴い超新星爆発を起こす。爆発時には、陽子が電子を捕獲して中性子になる反応が起こり、重元素合成に必要な大量の中性子が発生する。

※ 8 重元素合成過程

超新星爆発時に、急速な中性子の捕獲と中性子を陽子に変える β 崩壊を繰り返しながら、重元素を合成する過程で、 r 過程とも呼ばれている。鉄より重い元素の約半分が r 過程により生成されたとされている。非常に中性子過剰な原子核が、 r 過程に関与している。

※ 9 第1励起準位

原子核が持つエネルギーは、量子効果により不連続な値となる。最もエネルギーが低く安定な基底状態と、さらに内部にエネルギーを蓄えた励起準位が存在する。励起準位のうち最もエネルギーの低いものを第1励起準位という。陽子数と中性子数が共に偶数の原子核の第1励起準位のエネルギーは、変形度が大きいほど小さくなる事が知られている。

※ 10 核異性体

基底状態以外の準安定状態にある原子核を核異性体という。数百ナノ秒(ns)以上の長い半減期を持つ核異性体の場合、RIビームとして取り出す事が可能である。