

氏名	秋山 隆宏
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記号番号	博理工甲第 659 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	超重核領域における α 崩壊の半減期の系統的研究
論文審査委員	委員長 教授 鈴木 健
	委員 教授 吉永 尚孝
	委員 客員教授 本林 透
	委員 准教授 山口 貴之
	委員 准主任研究員 森田 浩介（理化学研究所）

論文の内容の要旨

本研究は原子番号が一体いくつのものまで存在可能か？という根源的興味に基づくものである。

原子核は陽子と中性子から構成されており、陽子数や中性子数は、ある決められた数の場合、特に安定になる。このような数は、魔法数(マジックナンバー)と呼ばれ、2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 があり、この数は、陽子、中性子ともに共通である。魔法数はまた、原子核が殻構造を持っていることを反映している。

原子番号 92 であるウランより大きな原子番号をもつ元素は全て人工的に合成されたものである（ただし、ネプツニウム(原子番号 93)、プルトニウム(原子番号 94)は人工合成の後、天然中でも発見された)。

重元素の合成に関する研究はドイツ、ロシア、アメリカの研究所を中心に行われ、新しい元素を含む数多くの同位体が発見されてきた。

理化学研究所の超重元素合成グループでは、線形加速器からの大強度重イオンビームを用いて、標的核との完全融合反応を行わせドイツのグループにより報告されていた 110 番元素ダウムスタチウム、111 番元素レントゲニウム、112 番元素の追認実験を、よりよい精度で行いその合成を確認した。また、世界に先駆けて 113 番元素の実験的確認に成功した。

このように近年、原子番号 110 番を越える超重核の合成の報告が数多くなされている。

質量の重い原子核は何処まで存在しうるのか？原子核はその原子番号が大きくなっていくにつれて、陽子間の静電反発力が核子をつなぎ止めている核力を上回り自発核分裂を起こしやすくなる。

したがって超重核は原子核の殻効果なしには存在できない。陽子数 114、中性子数 184 を中心とした領域では陽子と中性子が閉殻構造をなし安定な原子核が存在すると理論的には予想されている。陽子数 120 や 126 で閉殻になるとの理論予測もある。

理論的に予想されている $N=162$ の変形核の魔法数について、超重核領域の半減期($T_{1/2}$)と Hindrance Factor (HF) の系統性から考察を行った。

中重核や超重核は主にアルファ粒子を放出もしくは自発核分裂を起こし崩壊する。その崩壊の際の Q 値と半減期 ($T_{1/2}$) の関係を説明する半経験的公式があり、Viola Seaborg らや Smolanczuk らによって提唱されている。

本研究では始めに ViolaSeaborg の公式を用い、原子番号 $Z>84$ より大きい原子核の α 崩壊について実験の Q 値から半減期を計算し実験で得られた半減期と比較を行い超重核領域の α 崩壊の半減期を系統的に考察した。

中性子の魔法数である $N=126$ の領域で、 N が 126 より小さい領域では 126 に近づくにつれ長半減期化しており、 $N=126$ の前後で $T_{1/2}$ が 10^{10} から 10^{-8} まで急激に変化し、 N が 126 より大きい領域では 126 から離れるにつれ長半減期化していくという傾向が得られた。また同様に $N=162$ の領域で、 N が 162 より小さい領域では 162 に近づくにつれ長半減期化しており、 $N=162$ の前後で $T_{1/2}$ が 10^2 ほど変化し、 N が 162 より大きい領域では 162 から離れるにつれ長半減期化していくという $N=126$ の領域と同じ傾向が得られた。

また HF の点では、 $N=126$ にピークを持つ大きな値が得られた。この事は親核の内部で娘核と α 粒子が強い相関をもっているためだと考えられる。同様に、 $N=162$ の領域においても $N=162$ にピークを持つような傾向が得られた。

本研究では次に、 α 崩壊において原子核内部の α 粒子の波動関数を考慮に入れ、その Q 値と半減期の関係性についても考察を行った。

α 粒子の波動関数は井戸型の核力ポテンシャルを想定し、球ベッセル関数 j とクーロンポテンシャルによる減衰領域との WKB 近似から計算した。またある仮の順位 E_0 があるとした時、原子核半径 r ($R=1.21 \times A^{(1/3)}$) での連続条件から仮の順位が存在することのできる波数 k を計算し、波動関数の具体形を決定し半減期 T_{wf} を求めた。またここで求めた T_{wf} と実験値との比較からアルファ-スペクトロスコピックファクター (S_α) を出し、 ^{212}Po の S_α に対して規格化することで超重核領域での S_α の系統性について議論した。

半減期に対する波動関数の節 (node) 依存性は、node が 0 から 12 まで変化する間に 104 程変化し強い依存性を示した。

以上の点から理論的に予想されていた $N=162$ が魔法数である可能性が理論的な面からも強く示唆された。

論文の審査結果の要旨

本論文は、理論的に予想されていた中性子数 $N=162$ が魔法数である可能性を実験的な面からも強く示唆するものである。

重核や超重核は主にアルファ粒子を放出もしくは自発核分裂を起こし崩壊する。その崩壊の際の Q_α 値と半減期 ($T_{1/2}$) の関係を説明する半経験的公式 (Geiger Nuttall 則) があり、それを超重核領域へ拡張したものが Viola Seaborg らや Smolanczuk らによって提唱されている。本研究では始めに Viola Seaborg の公式を用い、原子番号 $Z>84$ より大きい原子核の α 崩壊について実験の Q 値から半減期を計算し実験で得られた半減期と比較を行い超重核領域の α 崩壊の半減期を系統的に考察した。

以上の考察の際に用いた実験データはドイツ、ロシア、アメリカの研究所を中心に行われたものや、新しい元素を含む数多くの同位体が発見されてきたものも含むが、 $N=162$ を超える実験データについては、理化学研究所の超重元素合成グループ (申請者が実験においては重要な役割を果たした) で、線形加速器からの大強度重イオンビームを用いて、標的核との完全融合反応を行わせドイツのグループにより報告されていた 112 番元素の追試実験 および、世界初の 113 番元素の確認実験 から求めた Q 値および半減期 ($T_{1/2}$) による。112 番元素や 113 番元素の中性子数は $N>162$ であり魔法数と予想される $N=162$ をまたぐものだからである。

実験は理研線形加速器リニアックからの重イオンビームを GARIS と呼ばれる気体充填型反跳核分離装置に入射させ核融合反応を行った。この装置は目的の原子核を、入射ビームやバックグラウンドとなる粒子から、高効率・超低バックグラウンドで分離する装置である。ヘリウムガスを充填する事により、目的とする核が標的膜からどのようなイオン価数で飛び出してきても収集する事を可能にしている。粒子識別は以下のものであった。 $(^{208}\text{Pb}+^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{277}\text{112}; ^{209}\text{Bi}+^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{278}\text{113})$ $Z=113$ 番元素について述べる。 $^{278}\text{113}$ は、標的の ^{209}Bi とビームの ^{70}Zn が完全融合してできた核、 $^{279}\text{113}$ が中性子 1 個を放出する反応によって合成された。合成された $^{278}\text{113}$ は、 $344\ \mu\text{s}$ の寿命で α 粒子を放出し、111 番元素の同位体 $^{274}\text{111}$ に崩壊。その $^{274}\text{111}$ は 9.26ms で 109 番元素の同位体 ^{270}Mt に α 崩壊し、 ^{270}Mt は 7.16ms で ^{266}Bh に α 崩壊した。 ^{266}Bh は 2.47s で ^{262}Db に α 崩壊し、その ^{262}Db は 40.9s で自発核分裂を起こし崩壊連鎖は終了した。一連の崩壊 α 粒子のエネルギー E_α を測定しており、測定された ^{267}Bh の寿命とエネルギー、およびその娘核である ^{262}Db の寿命が、従来報告された値と矛盾のないことを根拠として、この 2 つの崩壊に先立つ 3 つの崩壊が $^{278}\text{113} \rightarrow ^{274}\text{111} \rightarrow ^{270}\text{Mt} \rightarrow$ という崩壊であると結論付けられる。この測定により Q_α 値と半減期 ($T_{1/2}$) が同時に決定された。実験装置・手法は非常に高く評価された。

中性子の魔法数である $N=126$ の領域で、 N が 126 より小さい領域では 126 に近づくにつれ長半減期化しており、 $N=126$ の前後で $T_{1/2}$ が 10^{10} から 10^8 まで急激に変化し、 N が 126 より大きい領域では 126 から離れるにつれ長半減期化していくという傾向が得られた。また同様に $N=162$ の領域で、 N が 162 より小さい領域では 162 に近づくにつれ長半減期化しており、 $N=162$ の前後で $T_{1/2}$ が 10^2 ほど変化し、 N が 162 より大きい領域では 162 から離れるにつれ長半減期化していくという $N=126$ の領域と同じ傾向が得られた。

また HF (Hindrance 因子) の点では、 $N=126$ にピークを持つ大きな値が得られた。この事は親核の内部で娘核と α 粒子が強い相関をもっているためだと考えられる。同様に、 $N=162$ の領域においても $N=162$ にピークを持つような傾向が得られた。

次に α 崩壊において原子核内部の α 粒子の波動関数を考慮に入れ、その Q 値と半減期の関係性についても考察を行った。 α 粒子の波動関数は井戸型の核力ポテンシャルを想定し、球ベッセル関数 j とクーロンポテンシャルによる減衰領域との WKB 近似から計算した。またある仮の順位 $E0$ があるとした時、原子核半径 R ($R=1.21 \times A^{(1/3)}$ (A は質量数))での連続条件から仮の順位が存在することのできる波数 k を計算し、波動関数の具体形を決定し半減期 T_{wf} を求めた。更に T_{wf} と実験値との比較からアルファ-スペクトロスコピックファクター (S_α) を出し、 ^{212}Po の S_α に対して規格化することで超重核領域での S_α の系統性についても議論を行っている。半減期に対する波動関数の節 (node) 依存性は、node が 0 から 12 まで変化する間に 10^4 程変化し強い依存性を示した。 S_α は $N=126$ の原子核で小さい値を持つこと示された、親核が娘核 + α 粒子で形成されるという描像でうまく説明され、同様に $N=162$ においても S_α が小さくなるということが示された。

従って既知の魔法数 $N=126$ での系統性から $N=162$ が魔法数である可能性を実験的な面からも強く示唆するものである。今後実験データが増え $N=162$ が魔法数であることが期待される。

以上、本論文の研究は、査読制度のある国際学術雑誌に 1 編掲載され、また論文提出者により日韓国際会議 APPC10 にて英語で、平成年 19 年日本物理学会年会でも日本語で口頭発表されている。このほか、本論文に関連する研究として、査読制度のある国際学術雑誌に 6 編の既発表論文もある。また査読制度のある国際学術雑誌に 1 編の英文で掲載された本研究に関する上記の発表論文は論文提出者が中心的役割を演じていることからして、本論文は十分に学位論文に値すると判断され、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。