

氏名	山木 さやか
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 1057 号
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 22 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	新元素の探索に向けた波形解析による短寿命崩壊のエネルギー・寿命測定方法の研究
論文審査委員	委員長 准教授 山口 貴之 委員 教授 鈴木 健 委員 連携教授 上坂 友洋 委員 教授 吉永 尚孝 委員 理化学研究所仁科加速器研究センターチームリーダー 森本 幸司

## 論文の内容の要旨

原子核がどれほど多くの陽子を束縛しうるのかという核物理の基本的な問いに答えようとする試みは、世界中でなされている。現在のところ原子番号  $Z=118$  までの原子核が発見、命名されている。 $Z=119, 120$  の原子核を合成・観測するための研究開発がこの数年間、理化学研究所において進められてきた。著者の研究はこの未到達の新元素の観測のための研究である。

超重元素を人工的に生成する際には完全核融合反応の手法が使用される。したがって標的とする原子核と入射する原子核の原子番号と質量数の和が、複合核の原子番号と質量数となる。目的とする原子核はこの複合核から中性子数個が蒸発した蒸発残留核である。超重核の蒸発残留核の生成断面積は、すでに 1 ピコバーンやそれ以下の領域に達している。すなわち、大強度の入射核を、数十日～数百日という長期間標的に当て続けるという実験となる。ほとんどの入射核は反応せず、目的の蒸発残留核を観測する際のバックグラウンドとなりうるため、可能な限り蒸発残留核と分離する必要がある。この分離を目的とした装置のひとつが理研の有する気体充填型反跳核分離装置 GARIS である。

さて、分離器によって分離された蒸発残留核は、焦点面に設置された検出器へと導かれるが、検出器中に埋め込まれた蒸発残留核はその核種固有の半減期によって崩壊する。

超重元素領域の原子核では、 $\alpha$  崩壊や自発核分裂が優勢であり、我々が今後合成しようとする  $Z=119, N=177 \sim 179$  や  $Z=120, N=178 \sim 179$  の原子核も  $\alpha$  崩壊によって崩壊すると予想されている。A. Sobizewski 氏の微視的・巨視的モデルによれば、 $Z=120, N=178$  の原子核は、半減期  $T_{1/2}=11.4 \mu$  秒である ( $\alpha$  崩壊の  $Q$  値、 $Q_\alpha$  が 13.06 MeV の場合)。半減期というのはある多数の核種を集めたときに、その核種が崩壊によって半数崩壊するまでの時間として定義される。ところで、標的中で生成された蒸発残留核が分離器を通過し、焦点面検出器に到達するまでの時間が  $1 \mu$  秒程度であるため、 $1 \mu$  秒に到達しない半減期の原子核は、ほとんどが焦点面検出器に到達せずに崩壊してしまう。同氏の予言が正しければ  $Z=120, N=178$  の原子核は辛うじて大きな確率で検出器に到達することができるが、到達して数十  $\mu$  秒もしないうちに崩壊してしま

う。

このような短寿命崩壊を観測するうえでは、装置的な制約が生じてくる。残留核は、シリコン検出器に入射し、その運動エネルギーをすべて検出器に受け渡して停止する。次にその原子核固有の、 $Q_\alpha$ にほぼ等しいエネルギーの $\alpha$ 粒子を放出して連続的に崩壊したり、自発核分裂を起こしたりする。これらのイベントによるエネルギーが信号として読み出される。読み出し回路では、はじめに検出器の微弱な電荷の信号を増幅し、電圧の情報として置き換える前置増幅器があり、そのあとに信号をさらに増幅してガウシアンに整形する増幅器がある。後段の増幅器では、微分積分多段回路によって整形することでノイズを軽減し、精度よくエネルギー情報を再現することができるが、ある程度良いエネルギー分解能に到達するためには数 $\mu$ 秒の整形時間が必要である。したがって、ふたつの信号が近接している場合には、それらがひとつのガウシアンとして整形されてしまうという問題がある。現在の回路では整形時間を $1\mu$ 秒に設定しており、約 $5\mu$ 秒以内の連続した信号はそれらの個々のエネルギーが正しく得られていない。また、ふたつの信号の時間間隔の情報、すなわち後発の崩壊の“崩壊時間”の情報も失われる。入射イベントとその直後の $\alpha$ 崩壊の時間間隔が大変短いという状況が今後の新元素探索では予想されるため、これを解決するための方法を本研究で模索した。

本研究では、はじめに短寿命核の崩壊に由来する信号を、その崩壊特性の情報を失わずに読み出すことのできる回路を導入した。オンライン実験でデータ取得を行い、そのデータ中の短寿命崩壊特性の導出を可能とする波形解析方法の提案を行った。

次に、波形解析アルゴリズムが実践的な解析において有効であることを示すため、 $^{206}\text{Pb}+^{23}\text{Na}\rightarrow^{229}\text{Np}^*$ の反応によって短寿命核を合成し、その崩壊連鎖を解析した。 $^{218}\text{Ac}(T_{1/2}=1.1\mu\text{s})$ の崩壊連鎖などが多く観測され、波形解析によって約 $200\text{ns}$ の時間差のイベントまでエネルギーと寿命情報を引き出すことができた。また、実験データすべてを解析し、蒸発残留核の生成断面積をはじめとする物理的な情報を引き出し、考察を行った。波形解析アルゴリズムに関する性能評価も行い、超重元素の入射イベントとそれに続く短寿命崩壊の波形に対する解析の有効性などを吟味した。

## 論文の審査結果の要旨

本論文の成果は、理化学研究所（理研）仁科加速器研究センター超重元素研究グループでの新元素探索実験において、新元素がマイクロ秒あるいはそれ以下の短寿命で崩壊する時、確実に崩壊事象を観測するための新しいデータ取得装置ならびにその解析手法を開発し、実用に足ることを示したことにある。

自然界には一体いくつの元素が存在するのかという基本的な問いに答えようとする試みは、世界中でなされてきた。現在のところ原子番号  $Z=118$  までの原子核が加速器によって人工的に合成され、命名に至っている。その中で記憶に新しいのは、日本で発見され 2016 年 11 月にニホニウムと命名された原子番号 113 番である。理研の線形加速器で加速された  $^{70}\text{Zn}$  を  $^{209}\text{Bi}$  標的に照射して、通算約 600 日の実験で 3 個の 113 番元素  $^{278}\text{Nh}$  が合成された。その後、さらなる新元素を求め、 $Z=119, 120$  の原子核を合成・観測するための研究開発がこの数年間、理化学研究所において進められてきた。申請者の研究はこの未到達の新元素の観測のための研究である。

超重元素を人工的に生成する際には完全核融合反応の手法が使用される。したがって標的とする原子核と入射する原子核の原子番号  $Z$  と質量数  $A$  の和が、複合核の原子番号と質量数となる。目的とする原子核はこの複合核から中性子数個が蒸発した蒸発残留核である。超重核の蒸発残留核の生成断面積は、すでに 1 ピコバール以下の領域に達している。すなわち、大強度の入射核を、数十日～数百日という長期間標的に当て続けるという実験となる。ほとんどの入射核は反応せず、目的の蒸発残留核を観測する際のバックグラウンドとなるため、可能な限り蒸発残留核と分離する必要がある。この分離を目的とした装置が理研の有する気体充填型反跳核分離装置 GARIS (GAs-filled Recoil Ion Separator) および GARIS-II である。

分離器によって分離された蒸発残留核は、焦点面に設置された検出器 DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector) へと導かれる。検出器中に埋め込まれた蒸発残留核はその核種固有の半減期によって崩壊する。超重元素領域の原子核では、 $\alpha$  崩壊や自発核分裂が優勢であり、我々が今後合成しようとする  $Z=119, 120$  の原子核も  $\alpha$  崩壊によって崩壊すると予想されている。超重元素の半減期は理論的には質量模型によって表現されている。その半減期は質量から直接計算されるアルファ崩壊の  $Q_\alpha$  値に大きく依存しており、同じ核種でも模型によって  $Q_\alpha$  値の予測がかなり異なるため、半減期の不定性は大きい。質量模型のうち、短い半減期予測を与えるものにはミクロスコピック・マクロスコピック模型がある。Sobicewski 氏のミクロスコピック・マクロスコピック模型によれば、 $Z=120, N=178$  の原子核は、 $\alpha$  崩壊の  $Q_\alpha$  値が 13.06 MeV で、半減が  $T_{1/2} = 11.4\mu\text{s}$  である。標的中で生成された蒸発残留核が分離器を通過し、焦点面検出器に到達するまでの時間が  $1\mu\text{s}$  程度であるため、 $1\mu\text{s}$  より短い半減期の原子核は、ほとんどが焦点面検出器に到達せずに飛行中に崩壊してしまう。同氏の予言が正しければ  $Z=120, N=178$  の原子核は辛うじて大きな確率で検出器に到達することができるが、到達してすぐに崩壊してしまうだろう。

このような短寿命崩壊を観測する上では、測定装置の限界が問題となる。蒸発残留核は、焦点面の DSSD に入射し、その運動エネルギーをすべて検出器に受け渡して停止する。次にその原子核固有の、 $Q_\alpha$  値にほぼ等しいエネルギーの  $\alpha$  粒子を放出して連続的に崩壊したり、自発核分裂を起こしたりする。これらの事象によるエネルギーが信号として読み出される。読み出し回路では、はじめに検出器の微弱な電荷の信号を増幅し、電圧の情報として置き換える電荷感応型前置増幅器があり、そのあとに信号をさらに増幅してガウス形に整形する主増幅器が使われる。主増幅器では、微分積分多段回路によって整形することでノイズを軽減し、精度よくエネルギー情報を再現することができるが、良いエネルギー分解能に到達するためには数マイ

クロ秒の整形時間が必要である。したがって、短寿命崩壊によって二つの信号が時間的に近接している場合には、それらが一つのガウス波形ないしは積み重なった波形として整形されてしまうという問題がある。現在の回路では整形時間を  $1\mu\text{s}$  に設定しているため、約  $5\mu\text{s}$  以内の連続した信号はそれらの個々のエネルギーが正しく得られていない。また、二つの信号の時間間隔の情報、すなわち後発の崩壊の“崩壊時刻”の情報も失われる。蒸発残留核の入射事象とその直後の  $\alpha$  崩壊の時間間隔が大変短いという状況が今後の新元素探索では問題となるため、これを解決するための方法を本研究で開発した。

本研究では、はじめに短寿命核の崩壊に由来する信号を、その崩壊特性の情報を失わずに読み出すことのできる回路を導入した。すなわち、焦点面検出器 DSSD からの電荷パルスを前置増幅器によって電圧パルス（立ち上がり時間  $400\text{ns}$ ）に変換した後、直ちに Flash-ADC（サンプリングレート  $100\text{MHz}$ 、サンプリング時間  $8\mu\text{s}$ ）によりパルス波形そのものをデジタル変換してデータとして取り込むシステムである。さらに、短寿命崩壊による連続したパルス波形を解析するための波形解析アルゴリズムを独自に開発した。

解析アルゴリズムは以下のような構成になっている。まず、得られたパルス波形を微分して、MTOT (Mean in Time Over Threshold) という量を計算する。MTOT は設定した閾値を超えたパルス時間の重み付き時間平均を意味する。これによって、従来の TOT 法と比べて、シングルパルスとパイルアップパルスの判定効率を改善することに成功した。次に、パイルアップパルスに対して、実験データから作成したテンプレート関数を用いて最小 2 乗法フィッティングし、連続する二つのパルスのエネルギーと崩壊時刻を得る。

開発したシステムの性能評価のため、実験データに基づくシミュレーションデータセットを作成し、パイルアップ判定効率、エネルギーと時間の決定精度ならびにそれらの分解能を二つのパルスのエネルギー比（1st パルス / 2nd パルス）と時間差の関数として調べた。その結果、パイルアップ判定、エネルギー・時間決定精度ともに、エネルギー比が約  $0.25 \sim 4$ 、時間差  $200\text{ns}$  以上という条件下でほぼ  $100\%$  を得た。さらにシステム全体の効率を測定対象となる超重核の半減期の関数として算出し、半減期  $1\mu\text{s}$  以上で  $90\%$  以上の効率を得た。これは予定している新元素合成反応 ( $^{248}\text{Cm} + ^{51}\text{V} \rightarrow ^{299}119^*$ ,  $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{302}120^*$ ) において、入射直後の  $\alpha$  崩壊で  $\alpha$  粒子が DSSD から飛び出さない場合のエネルギー比 ( $2 \sim 3$ ) を考慮すると、十分実用に耐えるものである。また、 $\alpha$  粒子が DSSD から飛び出した場合に予想される最大のエネルギー比 ( $\sim 30$ ) に対しては、1st パルスと 2nd パルスが約  $800\text{ns}$  以上離れていれば十分に分離、フィッティングが可能となる。さらに、Flash-ADC のサンプリングレートと前置増幅器の立ち上がり時間の関係、ノイズの分解能や効率への寄与を考察し、将来さらなる改良を施す際の指針を示すと同時に、様々な条件での波形解析にユニバーサルに適用できる性能評価基準を示した。

最後に、開発したシステムをビーム実験に使用し、蒸発残留核 (ER) の  $\alpha$  崩壊連鎖を観測することに成功した。実験ではビームエネルギーを変えながら、 $^{197}\text{Au} + ^{23}\text{Na} \rightarrow ^{220}\text{Th}^*$ ,  $^{208}\text{Pb} + ^{23}\text{Na} \rightarrow ^{231}\text{Np}^*$ ,  $^{206}\text{Pb} + ^{23}\text{Na} \rightarrow ^{229}\text{Np}^*$  反応を観測した。その結果、短寿命崩壊を含む ER  $\rightarrow ^{218}\text{Ac} \rightarrow ^{214}\text{Fr}$ , ER  $\rightarrow ^{222}\text{Pa} \rightarrow ^{218}\text{Ac} \rightarrow ^{214}\text{Fr}$ , ER  $\rightarrow ^{221}\text{Th} \rightarrow ^{217}\text{Ra} \rightarrow ^{213}\text{Rn}$ , ER  $\rightarrow ^{220}\text{Ac} \rightarrow ^{216}\text{Fr} \rightarrow ^{212}\text{At}$ , ER  $\rightarrow ^{219}\text{Ra} \rightarrow ^{215}\text{Rn} \rightarrow ^{211}\text{Po}$ , ER  $\rightarrow ^{217}\text{Ac}$ , ER  $\rightarrow ^{221}\text{Pa} \rightarrow ^{217}\text{Ac}$ , ER  $\rightarrow ^{219}\text{Ac} \rightarrow ^{215}\text{Fr}$ , ER  $\rightarrow ^{223}\text{Pa} \rightarrow ^{219}\text{Ac} \rightarrow ^{215}\text{Fr}$ , ER  $\rightarrow ^{222}\text{Th} \rightarrow ^{218}\text{Ra} \rightarrow ^{214}\text{Rn}$  などの崩壊連鎖の識別に成功した。個々の崩壊連鎖の統計量は、ビームエネルギー（複合核の励起エネルギー）に従って推移する傾向が見られており、その傾向は複合核が軽粒子を放出して蒸発残留核となる際の物理をよく表現していると言える。特に、本研究で開発したシステムを用いて、 $^{218}\text{Ac}$  ( $T_{1/2} = 1.1\mu\text{s}$ ),  $^{216}\text{Fr}$  ( $T_{1/2} = 0.7\mu\text{s}$ ) の短寿命崩壊曲線を得ることに成功している。これら統計量の多い核種に関しては、波形解析によって得られた崩壊曲線が、性能評価の傾向をよく再現している。

このように理研で発見された 113 番元素ニホニウムに続く 119, 120 番元素の探索へ向けて、新しいデータ取得装置の開発に成功しており、今後の新元素探索実験における貢献度は高いと認められる。



以上、本論文の研究内容は査読制度のある国際学術雑誌2編に掲載された。このほか申請者自身による物理学や国際会議での報告が4件ある。また関連する研究として、査読制度のある国際学術雑誌に15編の既発表論文もある。新元素ニホニウムに関連して、ナイスステップな研究者（科学技術政策研究所）、ベストチーム・オブ・ザ・イヤー2016ならびに朝日賞（朝日新聞社、朝日新聞文化財団）を共同受賞した。本研究に関する上記の発表論文（2編）は論文提出者が中心的役割を果たしていることから、本論文は十分に学位論文に値すると判断し、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。