

科学と技術のための核データ国際会議 (ND2022)

(5) 宇宙核物理

原子力機構
先端基礎研究センター

小浦 寛之

koura.hiroyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

ND2022 の Nuclear Astrophysics (天体核物理) のセッションはサクラメント現地時間 7 月 26 日 (火) 9 時 30 分、日本時間 7 月 27 日 (水) 1 時 30 分から始まった。Lawrence Heilbronn (University of Tennessee)の座長で行われた。

2. 会議の様子

発表者は Nadine Mariel Chiera (Paul Scherrer Institute, PSI)、Rugard Dressler (PSI)、Nikolay Sosnin (University of Edinburgh)、Simone Amaducci (Laboratori Nazionali del Sud (IT))の 4 名で、1 名 Alvaro Tolosa-Delgado (University of Jyväskylä, Finland) の取り消しがあった。

(1) PSI の ERAWAST 実験 - 1:半減期測定

一人目の Nadine Mariel Chiera (PSI)は「High precision re-determination of the half-lives of ^{146}Sm , ^{148}Gd , and ^{154}Dy (^{146}Sm 、 ^{148}Gd 、 ^{154}Dy の半減期の高精度の再決定)」の題目で、長寿命の半減期測定について報告した。スイス PSI では ERAWAST(Exotic Radionuclides from Accelerator Waste for Science and Technology) [1]と呼ばれる、長寿命の放射性核種を生成するシステムを構築している (図 2)。今回の報告はこのシステムを用いた結果である。

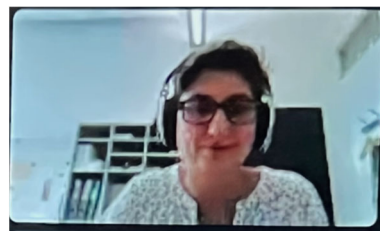


図 1 Nadine Chiera (PSI)

^{146}Sm 、 ^{148}Gd 、 ^{154}Dy のランタノイド原子核は α 崩壊する長寿命原子核である。これらは安定核から見て中性子欠損核側に位置し、p 過程と呼ばれる元素合成過程に関わる可能性のある原子核である。それらの半減期の現在の値は ENDF/B VII-0, JENDL/FPD-2011, JEFF-3.3 の格納データではそれぞれ 103 My (5%), 74.6 y (4%), 3.0 My (50%)である (括弧は精度)。一方 NUBASE2016 だと 68 My (10%), 70.9 y (4%), 3.0 My (50%)とかなりの不一致が見られる。半減期の長い原子核でのこのような不一致の要因には「資料の少なさ」、「化学

分離における純度」、「長寿命測定特有の問題」、「半減期決定の方法に起因する問題」などが挙げられるが、これらの問題を ERAWAST のシステムを用いて解決し、半減期を精度よく測定しようというのが目的である。今回の発表では ^{154}Dy の半減期が $1.40 \pm 0.08 \text{ My}$ 、また ^{148}Gd が $87.1 \pm 3.9 \text{ y}$ という結果を得て、特に ^{154}Dy の精度を格段に上げている。

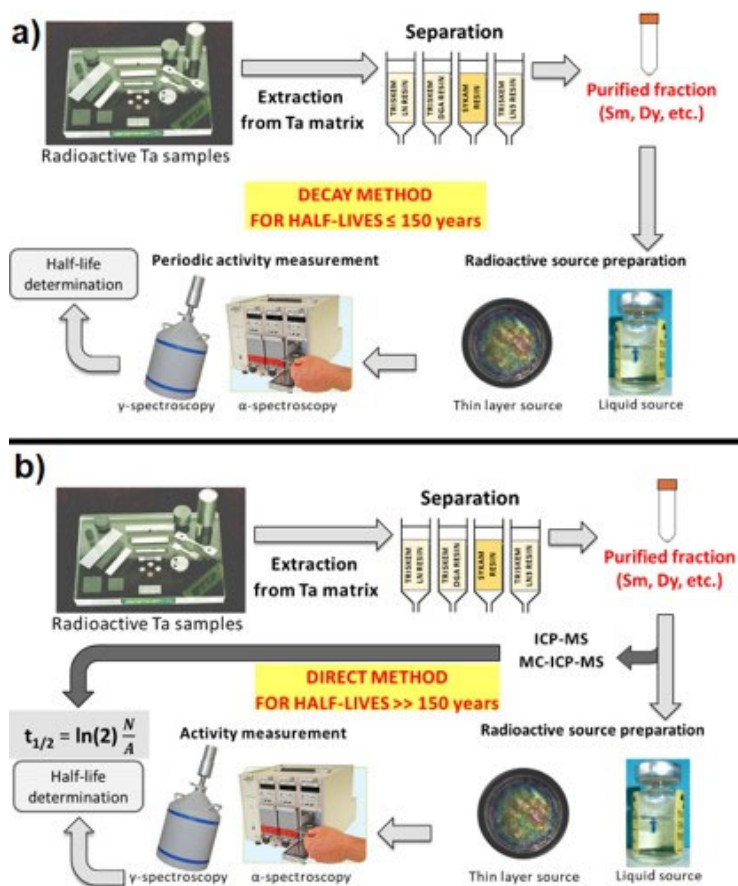


図2 ERAWAST の概念図。a)は半減期 150 年以上、b)は半減期 150 年以下の試料の例。発表者のアブストラクトから。著者の了解を得て掲載。

彼女らの本命は実は ^{146}Sm である。これは 1987 年の測定値 [2]が $103.1 \pm 4.5 \text{ My}$ に対して、2012 年の測定値 [3]が $68 \pm 7 \text{ My}$ と大きく食い違っており（34%短くなった）、特に ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代法において太陽系の進化に対してインパクトを与えている（Science 誌への掲載もこのようなインパクトからと評価できる）。今回の発表では数値を出すには至らず、ERAWAST の質量分析器の部分までは完了し、現在は放射化の測定を実施中とのことであった。

なお、Nadine Chiera は 2017-2019 年の間原子力機構先端基礎研究センターの重元素核科学研究グループに博士研究員として在籍しており、この間にドブニウム (Db)の揮発性

の実験を原子力機構タンデム加速器で実施し、結果を 2021 年に原子力機構発でプレス発表した (2021 年 7 月 7 日「元素周期表の極限の分子にみつけた周期律のほころび—超アクチノイド元素ドブニウム化合物の分子の結合に変化が—」[4])。現在も変わりなくスイスで活躍されて嬉しく思う。

追記：事前に Nadine に本報告で図の利用の確認をしたところ、「問い合わせ先としてメールアドレスを載せて欲しい」とのことであった。ERAWAST のプロジェクトおよび関連した半減期測定に関する問い合わせは Nadine Chiera (nadine-mariel.chiera@psi.ch) まで。

(2) PSI の ERAWAST 実験 - 2：捕獲断面積測定

二人目の Rugard Dressler (PSI) は「Neutron capture cross-section measurements of Mn-53 (Mn-53 の中性子捕獲断面積測定)」の題目で、 ^{53}Mn の中性子捕獲断面積の測定についての発表を行った。こちらも ERAWAST を用いた成果である



図 3 Rugard Dressler (PSI)

(今回の時点では結果は未発表)。 ^{53}Mn は 3.74 My の半減期を持ち、この程度の半減期を持つ原子核は消滅核種と呼ばれている。これらは太陽系形成の初期には存在し、現在では全て娘核に壊変したと考えられるが、その存在比を調べることでより太陽系が形成された当時の環境を再現することが試みられている。この時に参照核種として重要なのは ^{60}Fe である。これは 2.69 My の半減期を持つ消滅核種であるが、r 過程でのみ生成され、かつ核破砕反応や高エネルギー粒子線照射でも作るのが困難であるとされている (つまり寿命が短く恒星内元素合成でのみ効率的に合成される核種)。これと他の消滅核種との生成比は重要な量となる。Dressler は $^{60}\text{Fe}/^{53}\text{Mn}$ に注目し、現在の銀河化学進化理論の $^{60}\text{Fe}/^{53}\text{Mn} \approx 0.2$ と、現在の実験値とされる $^{60}\text{Fe}/^{53}\text{Mn} \approx 0.0019 \pm 0.0005$ (宇宙線による同位体分光)、 $^{60}\text{Fe}/^{53}\text{Mn} \approx 0.017 \pm 0.010$ (南極の雪の分析) の不一致を $^{53}\text{Mn}(n,\gamma)^{54}\text{Mn}$ の値に求めるというアプローチで実験を行った。いまのところ $\sim 10^{19}$ atom の ^{53}Mn を ERAWAST を用いて生成し、放射化測定を実施中ということである (暫定値を示していたが割愛)。

(3) CERN の n_TOF 実験 - 1： $^{77,78}\text{Se}(n,\gamma)$ および $^{68}\text{Zn}(n,\gamma)$ の断面積測定

三人目の Nikolay Sosnin (University of Edinburgh) は「 $^{77,78}\text{Se}(n,\gamma)$ and $^{68}\text{Zn}(n,\gamma)$ Cross-section Measurements at n_TOF Relevant for the Astrophysical s-process (天体物理 s 過程に関連した、n_TOF を用いた $^{77,78}\text{Se}(n,\gamma)$ および $^{68}\text{Zn}(n,\gamma)$ の断面積測定)」の題目で報告を行った。s 過程において、中性子捕獲断面積が重要なのはいうまでもない。彼らが動機付けと挙げて



図 4 Nikolay Sosnin
(University of Edinburgh)

いたのは西村信哉さん（理研）の 2017 年の論文 [5]で、「s 過程での核種の生成比の不定性のほとんどが中性子捕獲率の不確実性による」という主張（ β 崩壊率の不確実性は s 過程分岐の近くの少数の核にのみ）である。これをもとに発表者は $^{77,78}\text{Se}(n,\gamma)$ および $^{68}\text{Zn}(n,\gamma)$ の中性子断面積測定を実施した。実験は CERN n_TOF の Experimental Area1(EA1)で行い、 $^{77}\text{Se}(n,\gamma)$ は 12 日間、 $^{78}\text{Se}(n,\gamma)$ は 14 日、 $^{68}\text{Zn}(n,\gamma)$ は 10 日かけて照射を行った。 $^{77}\text{Se}(n,\gamma)$ を例に挙げ、共鳴の解析を進めながらマックスウェル平均した断面積を求め、文献値（KADoNiS - The Karlsruhe Astrophysical Database of Nucleosynthesis in Stars を利用）より多少大きめの値が出たことを報告していた。現在 ^{77}Se は論文ドラフト作成中、 ^{78}Se は共鳴フィッティング中、 ^{68}Zn は ^{78}Se の作業後に解析を始めるとのことだった。

(4) CERN の n_TOF 実験-2 : $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$ の断面積測定

四人目の Simone Amaducci (Laboratori Nazionali del Sud) は「Measurement of the $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$ cross section at astrophysical energies at n_TOF (n_TOF を用いた天体物理的エネルギーでの $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$ の断面積測定)」の題目で報告を行った。 ^{140}Ce は中性子数 82 の魔法数を持つ核種であり、かつ Ce 元素としても 88.45% の高い天然同位体比を持つ。 ^{140}Ce の s 過程における生成は $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$ の断面積に大きく影響を受ける。しかし断面積には関連するエネルギー領域付近での共鳴が大きく影響するので共鳴を正しく測定し、かつその共鳴を含めたマックスウェル平均断面積が最終的に必要となる（この部分は前者の発表と一緒）。共鳴の解析の参照ライブラリーとしては JENDL 4.0 を用いた。解析結果は前者の結果と類似で、n_TOF + JENDL 4.0 で求めたマックスウェル平均断面積は 5~30 keV 付近で文献値 KADoNiS より多少大きめに出たことを報告していた（30 keV 以上ではそれほどの差異はない）。今回の測定値を天体モデルに適用すると、 ^{140}Ce の s 過程による生成比がおおよそ 20% 少なくなるという結果を示し、今回の結果のインパクトを強調していた。

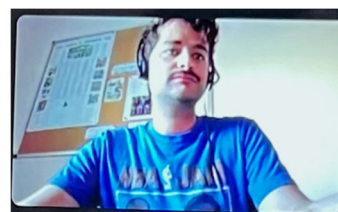


図 4 Simone Amaducci
(Laboratori Nazionali del Sud)

3. おわりに

取り消された 5 番目の予定の登壇者である Alvaro Tolosa-Delgado (University of Jyväskylä, Finland) は理研のベータ崩壊遅発中性子測定プログラム BRIKEN [6] の成果を発表する予定であった。r 過程元素合成にかかる物理なので楽しみにしており少々残念であった。オンラインということもあり、もう少し話題が多ければという思いがあったが、これは他のセッションも共通であろうか。

ともあれ、今回の 4 発表は原子核データを丁寧に一つ一つ測定するという研究が、太陽系の初期形成の理解に繋がり、また我々の元素の起源の理解に繋がるという成果であっ

た。核データの地道な積み上げが天体核物理に大きな貢献をしているわけで、このような研究は引き続き継続して進めていって欲しいと思う。

参考文献

- [1] A. Murray, ‘*Exotic Radionuclides from Accelerator Waste for Science and Technology*’, Nuclear Physics News **17**,45 (2007).
- [2] F. Meissner *et al.*, Z. Phys. A, **327**, 171 (1987)
- [3] N. Kinoshita *et al.*, Science **335**, 1614 (2012)
- [4] 原子力機構プレス発表「元素周期表の極限の分子にみつけた周期律のほころび―超アクチノイド元素ドブニウム化合物の分子の結合に変化が―」（2021 年 7 月 7 日）
<https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21070701/>
- [5] N. Nishimura, *et al.*, ‘*Uncertainties in s-process nucleosynthesis in massive stars determined by Monte Carlo variations*’, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **469**,1752 (2017).
- [6] 小浦寛之：「第 2 回理研における遅発中性子放出測定ワークショップ “BRIKEN: Beta delayed neutron emission measurement at RIKEN”」、核データニュース No.106、p.26 (2013).