

"The International Workshop on Nuclear Physics for Astrophysical Phenomena" 会議報告

東京工業大学
科学技術創成研究院先導原子力研究所
石塚 知香子・千葉 敏
chikako@lane.iir.titech.ac.jp

1. はじめに

東京工業大学科学技術創成研究院が主催する国際ミニワークショップ (以下 WS) 「The International Workshop on Nuclear Physics for Astrophysical Phenomena」が 2019 年 10 月 23 日から 25 日まで東京工業大学大岡山キャンパスにて開催された。本 WS は紆余曲折の末、翌週から京都大学基礎物理学研究所にて開催された「YITP Workshop: Nuclear Fission Dynamics 2019」との続き物となるように企画された。これら二つの WS の趣旨は、中性子星合体や超新星爆発における元素合成などで必要とされる各種核反応、質量公式、超重核分裂、崩壊熱、状態方程式等について理論や実験の垣根を越えて率直に意見交換を行うことであった。本 WS および基研 WS の発表資料は以下のホームページで公開されているので、興味のある方はそちらもご参照いただきたい。

○国際ミニ WS 「The International Workshop on Nuclear Physics for Astrophysical Phenomena」

http://www.nr.titech.ac.jp/~chiba/LANEconf2019/npap19_slide.html

○YITP WS 「Nuclear Fission Dynamics 2019」

http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yipqs.project/entry_e.php?id=488

2. 本 WS の概要

核データは原子力分野、放射線医療、天文・宇宙物理などの諸分野で必要とされる基礎的な情報である。特に第 3 章で紹介するような中性子が多く密度が非常に高い中性子星同士の合体を記述する際には、中性子捕獲反応断面積や中性子過剰な超重元素の核分裂、ベータ崩壊で放出されるニュートリノ、高密度核物質の状態方程式などの様々な核物理諸量の情報がインプットとして使われる。本 WS は核物理諸量に関する最新の知見を理

論／実験、核物理／宇宙物理の垣根を越えて自由に交換することを目的に開催された。本 WS では一件あたりの講演時間を長くとり（質疑応答込みで一般講演 30 分、招待講演 50 分）、自由な雰囲気です二日半の会期中全 25 件の講演と活発な議論が行われた。しかしながら議論時間が足りず、同じテーマで開催された翌週の YITP WS では 30 分講演+30 分議論という形式となった。招待講演は Sven Aaber 氏 (Lund 大)、Matthew Mumpower 氏 (LANL)、Stephane Goriely 氏 (ULB)、小浦 寛之氏 (JAEA)、Gabriel Martinez-Pinedo 氏 (TUD)、Jorgen Randrup 氏 (LBNL)、関口 雄一郎氏 (東邦大)、和南城 伸也氏 (AEI)、吉田 正氏 (東工大)、富樫 甫氏 (九大) にお願ひした。2019 年度はいわゆる天体核分野（原子核物理と天文・宇宙物理の共通分野）の当たり年であり、4 月から 12 月の間に似たようなテーマで「原子核物理でつむぐ r プロセス (5 月 22-24 日)」、「The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15) (7 月 2-5 日)」、本 WS および YITP WS の 4 つの会合が開催された。そのため招待講演では他と内容が被らないように苦労した。参考までに「原子核物理でつむぐ r プロセス」の発表資料のリンクも下記に示す。

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~rp2019/talks.php>

興味のある方はこちらも参照されたい。なお、OMEG15 の発表資料には鍵がかかっているため、残念ながらここでは紹介しない。講演内容の詳細については、続く第 3 章で報告するが、本 WS では中性子捕獲反応や核分裂など、原子力分野とも馴染み深いテーマが様々な天体现象と関連付けて議論された。



図 1 本 WS の様子

3. 核物理に関連した宇宙物理の現状

核データのニーズは、今や放射線工学、加速器・ビーム科学、材料科学、物理学、生物学、医学、環境科学、安全保障、天体核物理学と幅広い分野に亘っている [1,2]。その中でも天体现象で起こる金やウランなどの重元素合成では元素合成に関係する 5000 種以上の核種の核反応ネットワークを解いている。つまり、5000 種以上の原子核に関連する様々な核反応断面積やベータ崩壊率、ガンマ崩壊率などの核データが必要とされているので

ある。本稿の執筆にあたり関連資料を検索していると、20年前に筆者らの所属機関の大先輩である大崎敏郎先生（当時、東工大原子炉研）が核データニュースに「宇宙の元素合成と原子力システムの核反応」[3]という題目で解説記事を書かれていたのを発見した。この記事の興味深いところは原子力分野と宇宙分野の間の共通点に焦点を当てている点である。例えば宇宙で起きている元素合成過程の温度領域が $kT=10\sim 100\text{keV}$ であり、炉内の中性子エネルギーに近いことや、高速炉内の核分裂生成物 FP の生成・変換反応が恒星内の s 過程元素合成と類似性が高いこと、科学者としても SF 作者としても名高いガモフ博士がビッグバン元素合成の着想を高速炉から得たエピソードなどが紹介されている。高速炉と宇宙での元素合成の共通点について関心のある読者は大崎先生の記事をご一読願いたい。

本稿で紹介する国際ミニワークショップは会議名にもあるとおり、「天体現象のための核物理」に焦点を当てている。そこで本 WS で議論された天体現象のうち代表的なもの、そこで重要となる核反応について以下で簡単に解説した。

3.1 初めて重力波で観測された中性子星合体と r 過程元素合成

中性子星はその名の通り、組成の大部分を中性子が占めており、その他に少量の陽子や電子、場合によってはハイペロンやクォークを含む星であり、太陽質量の 8~10 倍以上の大質量星が年老いて最晩年に超新星爆発を経た残骸として知られる。この中性子星が最初に発見された 1967 年から半世紀にあたる 2017 年には、連星中性子星の合体からの重力波 GW170817 [4]が初めて検出されて大変な話題となった。この GW170817 では、ガンマ線から近赤外線に至る広い波長域の電磁波で検出されたため、中性子星合体に関する様々な情報が得られた。特に注目を集めたのが「中性子星合体でランタノイドを含む物質が放出された可能性が高い」という点である。ランタノイドは早い中性子捕獲過程（r 過程）で合成される元素で、中性子星合体時に r 過程元素合成が起きた証拠になる [5]。さらに 2019 年 10 月 23 日（なんと本 WS の開催初日！）には、ヨーロッパ南天天文台パラナル天文台の超大型望遠鏡 VLT が観測した GW170817 のデータの再解析によりストロンチウムの痕跡が見つかったとの論文が Nature 誌に公開され、中性子星同士の合体で r 過程が起きたことが明確に示された [6]。余談であるが、筆者は本 WS 中会場を走り回っていた為、この翌日の招待講演で G. Martinez-Pinedo 氏（GSI/TUD）がこの話題に触れた際に、ロスアラモス国立研究所で r 過程元素合成ネットワーク計算のフリーコード PRISM を開発した M. Mumpower 氏（LANL）が「昨日見たよ！」と大変興奮していた理由が正直言ってわからなかった。本原稿の執筆にあたり状況を整理してみて、今更ながら彼が興奮した理由をやっと筆者は理解できたのである。

r 過程は高い中性子束下で短い時間に沢山の中性子が原子核に吸収される過程のことで、r 過程元素合成では中性子ドリップライン近傍の核種を経由しながら金やウランなど

の元素が作られる。r 過程元素合成のサイトとなる候補天体には超新星爆発、中性子星同士の合体、中性子星とブラックホールの合体など様々な意見があるが、現在でも決着は着いていない。r 過程元素合成が起きた証拠がこれまでなかった中、GW170817 では少なくとも r 過程元素合成で作られるとされる重い元素のうち、ランタノイドまでの元素が生成されたという高い確証が得られたのだ。ただし、ランタノイドより重いウランなどが別の天体現象（たとえば中性子星とブラックホールの合体など）で作られる可能性は十分に残っている。さらに 2017 年以降、重力波検出の精度は向上を続けており、候補天体も多数見つかっているため、重元素合成を含む中性子星合体などの数値計算シミュレーション研究がこれまで以上に活発になっている。では中性子星同士の合体や中性子星とブラックホールの合体による重元素合成で重要となる核物理情報とは何だろうか。本 WS で招待講演をお願いした S. Goriely 氏 (ULB)、G. Martinez-Pinedo 氏 (GSI/TUD)、和南城伸也氏 (AEI) の三人が口を揃えて重要性を説いたのが、ベータ崩壊寿命や核分裂障壁の実験値が存在しない質量数 $A=245\sim 265$ の核種である ^{254}Cf や Fm 同位体の自発核分裂またはベータ崩壊遅発核分裂である。というのも中性子星合体で放出される光の時間変化が、原子核の質量モデルに非常に敏感だからだ。本 WS では質量公式 KTUY の開発者である小浦寛之氏 (JAEA) の招待講演の中で代表的モデル間での核分裂障壁の違いについて詳細な解説があった。

3.2 r 過程元素合成と超重核核分裂

r 過程元素合成ではウランのようなアクチノイドは当然のことながら、それよりも遥かに質量数の大きな元素も作られると考えられている。そして質量数の大きな元素は核分裂し、生成された核分裂片は次の r 過程元素合成の種核となる。これを核分裂サイクルという。非常に中性子束が高く電子の割合が低い環境下では原子番号 120 以上の超重元素（原子番号が 104 以上の元素を超重元素という）が r 過程における核分裂サイクルによって安定的に生成されることが知られている [7]。超重元素といえば、2016 年に原子番号 113 の元素がニホニウムと命名されたことは読者の皆様の記憶にも新しいだろう。超重元素は基本的には不安定であり短時間で核分裂するが、宇宙空間での元素合成で必要となる核分裂の励起エネルギーは高々 10 MeV 程度であり、新元素生成のための実験で到達するエネルギー (30 MeV 以上) よりもずっと低い。そのためウランなどの起源を正確に見積もるためには理論モデルによる超重元素の核分裂の研究が必要不可欠である。ところが超重元素の核分裂の様相は用いる模型によって大きく異なる。そこで 2018 年以降、超重元素の核分裂は非常にホットな研究テーマとなっている。その背景には 2017 年に中性子星同士の合体が重力波によって初めて検出されたことにより、中性子星とブラックホールの合体のように、中性子星同士の合体よりも更に電子の割合が低く超重元素の核分裂が重要になる事象の観測可能性が急激に高まったことが深く関係している。本 WS でも

J. Randrup 氏 (LBNL) の招待講演の中で超重元素の核分裂の様相について各々のモデルでの結果が紹介された。

ここで超重元素の核分裂を系統的に調査した代表的な研究を熱中性子入射の ^{235}U 核分裂と $^{302}120$ の自発核分裂を例に比べてみよう。先ず超重核核分裂実験の第一人者である Itkis 等の研究を紹介する。Itkis 等の実験解析結果によるとウランでは核分裂で出来る核分裂片の質量数のピークは $A=90$ および $A=140$ 近傍に存在するが、超重元素 120 では核分裂片のピークが $A=132$ および $A=170$ に大きく変化する。他のアクチノイドや超重元素の例でも同様に、

Itkis 等の研究ではアクチノイドはスズの二重魔法数 (^{132}Sn) が重い核分裂片の質量数ピーク

を決め、超重元素では同じスズの二重魔法数が今度は軽い核分裂片の質量数ピークを与えると結論づけている [8]。ここで注意したいのが原子核の励起エネルギーである。Itkis 等の研究では複合核として 30MeV 前後の超重核の核分裂を測定している。ところが何度も繰り返しになるが、r 過程元素合成で問題となるのは高々 10MeV 以下に励起した超重核の核分裂である。この点に注目し、筆者らは長寿命放射性廃棄物 LLFP の短寿命化のために開発した動的モデルによりウラン領域から原子番号 104~122 の超重原子核の核分裂について系統的な計算および解析を行った [9]。その結果を原子番号 120 の場合を例として図 2 に示す。図 2 からは超重核の核分裂で作られる核分裂片の質量数分布は、アクチノイドの場合や Itkis 等の実験結果と異なり、質量数 $A=132-144$ と $A=208$ 近傍にピークを持つことがわかる。これらピークを形成する核分裂片の形状 (変形度 Q_{20}) を調べたところ、特に $A=208$ のピークは鉛の同位体を中心としていることが明らかとなった。ただし、この新たなピークは励起エネルギーが 30MeV に上がると消失する。蛇足になるが、本 WS で超重核核分裂について筆者らと別のモデルで発表した J. Randrup 氏 (LBNL) の結果も筆者らの結果に近いものであったため、本 WS に続いて彼が企画した京都の WS では、超重核核分裂についての議論で大変盛り上がった。

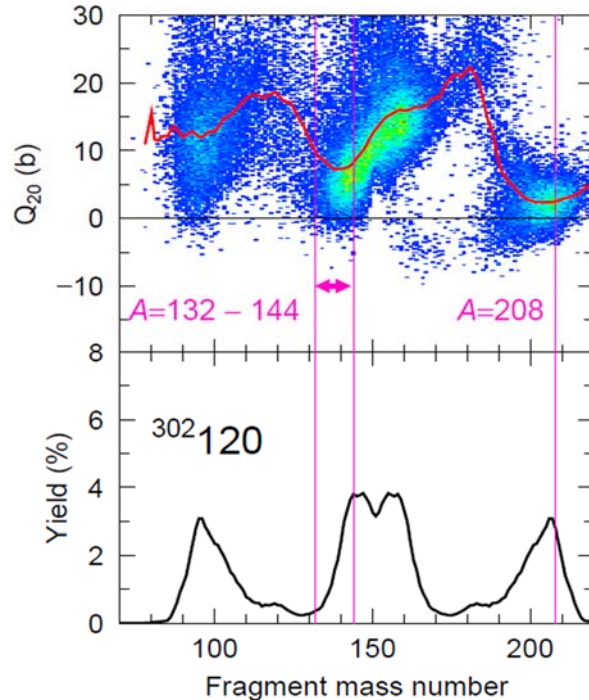


図 2 低励起状態の $Ex=10\text{MeV}$ 原子番号 120、質量数 302 を持つ超重元素の核分裂片の変形度 Q_{20} (上) および質量数分布 (下) の様子。

3.3 AGB 星と s 過程元素合成

r 過程の次に取り上げたいのが、同じ中性子捕獲過程でも今度は遅い中性子捕獲過程 (s 過程) である。ここで「速い・遅い」と言うのは、中性子捕獲とベータ崩壊の時間スケールの比較に由来する。r 過程では、高中性子束下で一つの原子核による沢山の中性子捕獲がベータ崩壊する間もなく行われる。一方 s 過程では、ある原子核が一つの中性子を捕獲した後に次の中性子捕獲をするまでの間が十分長い。そのため s 過程元素合成は核図表のベータ安定線に沿って安定同位体を推移しながら進む。ちなみに具体的な時間スケールとして r 過程には数秒間、s 過程には千年単位の時間がかかると考えられている。この s 過程は r 過程に比べて解明が進んでおり、太陽の約 1~8 倍の質量を持つ恒星が年老いて出来る漸近巨星分枝星 (AGB 星) の中で s 過程が起きると考えられている。AGB 星は炭素と酸素のコアを持つ星であるが、ここ 20 年ほどで星の表面の金属量が太陽に比べて非常に小さい金属欠乏星が大量に発見されるようになった。これにより s 過程元素合成を含む AGB 星内部の核反応や AGB 星の成立ちの見直しが迫られ、詳細な検討が続いている [10]。本 WS では森寛治氏 (東大) による金属欠乏星の Ca 生成についての講演があった。

恒星内での核反応計算の見直しで重要となる 10keV~100keV 程度の核反応データにはどんなものがあるだろうか。本 WS でも東工大を退官された永井泰樹先生による講演があったが、10keV~数 10keV を持つ中性子による $^{16}\text{O}(n, \gamma)$ 反応断面積および反応率の見直しがその一つとして挙げられる。因みに ^{16}O の中性子捕獲断面積の測定といえば、今回ご講演いただいた永井先生が井頭政之先生 (東工大・原子炉研) と共同で仁科記念賞を受賞した研究として知る方々も多いだろう [11]。ここで強調したいのは、実験で反応断面積を測定して論文発表したとしても、断面積のままでは天文・宇宙分野にとっては「存在しない」と同値だという点だ。本 WS でも天文・宇宙分野の参加者が実験核物理の参加者に「断面積ではなく、反応率に焼き直したデータを貰えますか？」という光景が散見された。もう一つの課題が 10keV~数 10keV の中性子による $^{17}\text{O}(n, \gamma)$ 反応断面積および反応率の測定である。筆者が EXFOR で調べた範囲で知る限り、恒星内部の核反応で重要となるエネルギー領域 (10keV~数 10keV) での $^{17}\text{O}(n, \gamma)$ 実験結果は 2020 年 1 月時点で存在していない。では恒星内部での核反応ネットワーク計算ではどのように対処しているかといえば、仕方がないので $^{16}\text{O}(n, \gamma)$ の反応率をそのまま $^{17}\text{O}(n, \gamma)$ でも代用しているのが現状である [12]。しかし $^{12}\text{C}(n, \gamma)$ と $^{13}\text{C}(n, \gamma)$ の例を参考にして考えても、やはり偶偶核の ^{16}O と偶奇核の ^{17}O では中性子捕獲断面積が違って当然である。どうも ^{17}O は高価なようなのだが、 ^{17}O の中性子捕獲反応率は特に金属欠乏星における s 過程に大きな影響を与える [13]。この反応率は一つの核種が吸収する中性子数を決定づけるため非常に重要で、どこかで誰かが測定してくれることを願うばかりである。他にも本 WS では天文・宇宙分野で重要となる $^{14}\text{C}(n, \gamma)$ および $^{31}\text{Ne}(n, \gamma)$ の反応断面積や中性子ドリップライン近傍の $^{26-28}\text{O}$

のスペクトロスコピーについて中村隆司教授（東工大）から報告があった。

3.4 中性子星やハイブリッド星と原子核の状態方程式

ここまで元素合成に着目した核物理と天文・宇宙分野の関わりを紹介してきたが、もう一つ両分野が強く関連するトピックが中性子星研究である。先述のとおり、中性子星は中性子を主な構成要素とし、少量の陽子や電子を含む天体であり、中心密度が太陽の平均密度の 10^{14} 倍以上にもなる高密度天体である。そのため中心にクォーク層を持つハイブリッド星が存在する可能性も示唆されており、高密度核物質（無限の大きさを持つ原子核）の試験場として様々な理論を用いた状態方程式の研究が行われている。状態方程式とは、密度とエネルギーの関係を指すのが一般的である。状態方程式の議論では、原子核（または核物質）の非圧縮率や状態方程式で支えられる中性子星の最大質量および半径などでモデルの良し悪しを議論するのが標準的である。本WSでは、富樫甫氏（九大）による裸の核力から計算した状態方程式についての研究紹介や、今流行りのマシンラーニングの手法を用いた状態方程式の研究紹介（藤本悠輝氏（東大））など多数の講演があった。ただし、中性子星の内部構造や状態方程式に関する議論は、その密度の高さ故に核データの話題からは遠ざかるように思えるが、実は中性子星を構成する核物質の状態方程式と核子・原子核反応を記述する核子光学モデルポテンシャルのアイソベクター部が密接に関係していることがわかっている [14]。このように一見遠いように思える天文・宇宙分野は核データと深く結びついているのだ。今後も分野の枠にとらわれず、活発に情報交換できる場を企画していきたい。

4. おわりに

余り各トピックを詳細には解説しきれなかったが、駆け足ではなくスキップで筆者らが企画したミニワークショップの様子を本稿で紹介した。本WSでは小規模ながら海外の第一級の研究者が多数参加してくれたおかげで、議論やデータ交換が活発に交わされ、参加者の皆がホクホクした顔になっていたことに世話人一同が嬉しい気持ちになった。また本WSでは一つのセッションの座長をするためだけに遠路はるばる東工大まで来てくれた宮津剛志氏（東京理科大）・椿原康介氏（旭川高専）の両氏にも深く感謝している。最後に、この原稿を執筆するにあたり、筆者を推薦してくださったIAEA核データセンターの奥村森氏に心より感謝したい。

参考文献

- [1] 須山賢也、国枝賢、千葉豪、深堀智生：「多様化する原子核工学と核データのニーズ」 ATOMS Vol.59、No.10、p.44 (2017).
- [2] 大塚直彦、河野俊彦、国枝賢、大澤孝明：「IAEAの核データ事業」 ATOMS Vol.60、

No.2、 p.37 (2018).

[3] 大崎敏郎：「宇宙の元素合成と原子力システムの核反応」、核データニュース No.66、 p.60 (2000).

[4] B. P. Abbott et al. (LIGO, Virgo and other collaborations)：「Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger」 The Astrophysical Journal. 848 (2): L12 (2017).

[5] 田中雅臣：「GW170817：可視光・赤外線対応天体と重元素合成」日本物理学会誌 Vol. 73、 No.9、 p.627 (2018).

[6] D. Watson et al.：「Identification of strontium in the merger of two neutron stars」 Nature vol. 574、 p.497 (2019).

[7] 和南城伸也：「超新星爆発と中性子星合体—r プロセス元素の起源として」天文月報第 107 巻第 1 号、 p. 7 (2014).

[8] M. G. Itkis et al.：「Fusion and fission of heavy and superheavy nuclei (experiment)」 Nuclear Physics A Vol. 944、 p. 204 (2015).

[9] C. Ishizuka et al.：「Effect of the doubly magic shell closures in ^{132}Sn and ^{208}Pb on the fission fragments mass distributions of superheavy nuclei」 Physical Review C Vol. 101、 011601(R) (2020).

[10] 須田拓馬：「金属欠乏星で探る初期宇宙の星形成史」天文月報第 107 巻第 5 号、 p.268 (2014).

[11] 井頭政之：「軽核の速中性子捕獲断面積（仁科記念賞を受賞して）」核データニュース No.74、 p. 109(2003).

[12] Z. Y. Bao et al.：「NEUTRON CROSS SECTIONS FOR NUCLEOSYNTHESIS STUDIES」、 Atomic Data and Nuclear Data Tables Vol.76、 p.70 (2000).

[13] T. Nishimura et al.：「Oxygen and Light-Element Synthesis by Neutron-Capture Reactions in Metal-Free and Extremely Metal-Poor AGB Stars」 Publications of the Astronomical Society of Japan、 Vol. 61、 p.909 (2009).

[14] T. Maruyama, S. Chiba：「Equation of State of neutron-star matter and the isovector nucleon optical model potential」 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics Vol. 25、 p.2361 (1999).