

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03631

研究課題名(和文)星のr過程元素合成における元素生成量に対する核分裂の影響

研究課題名(英文)Effects of fission to isotopic abundances on the r-process synthesis in star

研究代表者

小浦 寛之(Hiroyuki, Koura)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・室長

研究者番号：50391264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、元素の起源の解明のために、爆発的天体現象における速中性子捕獲反応過程(r過程)における、核分裂に関連した理論計算を行った。核図表上の大域的な計算を小浦-橘-宇野-山田(KTUY)原子核質量模型を用いて行い、特に重要と思われるベータ崩壊遅延核分裂割合について計算を行った。その結果、超重核領域の閉殻構造の出現に伴い、ベータ崩壊遅延核分裂割合がその影響を受け、主に3つの領域に有意な核分裂確率を持つ原子核群が存在し、一方で、2重閉殻原子核[126]-354を中心とした領域ではベータ崩壊遅延核分裂が抑制される核種領域が存在することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の身の回りに存在する元素は宇宙の始まりから全てあったわけではなく、138億年の時を経て作られていった。その成り立ちは決して自明ではなく、原子物理、原子核物理、天体物理、宇宙物理の進展のなかで明らかになっていったのである。その観点で見ると、本課題の爆発的天体環境下で起こるとされた元素合成(r過程と呼ぶ)はそれに関わる原子核のほとんどが実験的に未知であり、その解明は「我々はどのようにして存在したのか」という問いに大きく迫るものである。本課題は「超重核」で重要とされている核分裂現象がr過程でも有意に影響を及ぼすことを示したものであり、両研究を結びつける意義のある研究成果である。

研究成果の概要(英文)：In the program, we performed a theoretical calculation related to nuclear fission on the r-process nucleosynthesis in explosive stellar phenomena for understanding the origin of chemical elements. We adopted the Koura-Tachibana-Uno-Yamada (KTUY) nuclear mass model for the calculation, and applied for the beta-delayed fission probabilities. We found that there are three regions as fission-favorable in the unknown superheavy nuclear mass region, while there is a region as fission-hindered near one of the doubly-magic nuclei, [126]-354.

研究分野：原子核物理(理論)

キーワード：原子核崩壊 崩壊 核分裂 r過程元素合成

1. 研究開始当初の背景

宇宙における元素の起源は原子番号3番のリチウム程度までを合成する宇宙初期のビッグバン元素合成と、それ以上の全ての元素を合成する星の中での元素合成に分けられる。後者のうち、我々の周りに存在する既知原子核を利用する原子核反応については過程、遅中性子捕獲反応過程(s過程)については原子核実験により解明されつつある。一方で原子番号92のウランはこれらの原子核反応では決して合成することはできず、速中性子捕獲反応過程(r過程)でのみ起こると考えられているが、これらが関わる原子核は短寿命であり、現在の実験技術では生成することが困難であり、理論的な研究が本質的に重要である。

そのr過程で不明な点の一つはどのサイトでそのような環境が実現されるかという点である。これまでの伝統的な研究では超新星爆発が有力な候補であったが、最近では中性子星同士の合体による元素合成が提唱されてきた。特に2017年10月16日に公開された「中性子星同士の合体の重力波の検出および光学的な観測に成功した」という事象である「GW170817」はr過程研究においてある種の大きな転換点を与えている。これにより、(1)中性子過剰原子核が容易に存在する環境を設定することができ(超新星爆発だと中性子過剰核の生成に幾つかの仮定が必要であった)(2)r過程の経過時間が従来の超新星爆発での考察より長いとしてよい(これまでの標準的な時間である数百ミリ秒~1秒を大きく超えても良い)、という大きな知見が得られた。これに伴い原子核物理側の観点で言えば、中性子過剰核側の原子核の研究の重要性は言うまでもないが、それに加えて中性子過剰な「超重核」の原子核の研究が俄然重要となる。つまりこれまでの伝統的な解釈以上に超重核領域での原子核反応が元素合成に重要な役割を果たすのである。その際に特に重要になるのが「核分裂」である。

r過程元素合成の元素の生成量に核分裂の影響があるという指摘は1980年代からなされ、例えばP. Möllerらは中性子数 $N < 200$ までのベータ崩壊遅延核分裂割合の系統的計算を巨視的-微視的質量モデル+準粒子乱雑位相近似(QRPA)計算により行い(1997年)、いわゆる超重核領域より少し軽い領域の中性子過剰核側で核分裂が起こりうることを議論している。しかしながら $N = 200$ を大きく超える領域での核分裂の影響は、せいぜい1秒程度の反応時間であると考えられていた超新星で、r過程元素合成で作られる原子核がそこまで重い領域にまで到達するとは考えにくく、これまで重視されてこなかった(ベータ崩壊遅延核分裂計算を試みた例はなかった)。しかし、前述の中性子星同士の合体によるr過程は、従来で想定された時間以上の長時間の反応過程を経る可能性があり、より中性子数が大きい原子核での反応が進むことが予想される。しかしそのような極めて重い原子核の領域の理論計算はほとんどなされていなかった。

2. 研究の目的

星の元素合成に必要な物理量は(1)爆発的現象の天体サイトの環境(中性子星密度、温度、経過時間など)と(2)核物理的諸量である。本研究課題では、原子核物理研究の観点から後者の(2)核物理的諸量の理論計算を行う。

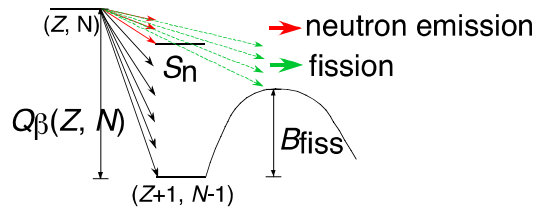
その際に議論の妥当性を分けるのは用いる原子核モデルの外挿の信頼性である。研究代表者は原子核の基底状態を核図表上で広くよく記述でき、かつ外挿性に信頼性における模型に立脚して物理学諸量を計算する。r過程元素合成に必要な物理量として、中性子捕獲断面積、ベータ崩壊半減期、ベータ崩壊遅発中性子放出、ベータ崩壊遅延核分裂が挙げられる。このうち中性子捕獲断面積、ベータ崩壊半減期は原子核の巨視的な量である基底状態の原子核質量の予測計算に強く依存することもあり最小限の考察とし、本課題ではより原子核の核構造に影響を与えるベータ崩壊遅延核分裂の崩壊確率の超重核領域を含む系統的な計算を行う。その計算の妥当性を検証するために、ベータ崩壊遅発中性子放出割合も計算する。

3. 研究の方法

研究代表者は核図表上の大域的原子核質量理論計算である小浦-橘-宇野-山田(KTUY)質量模型計算[2005年]を開発し、原子核基底状態の質量および原子核形状の理論計算を実施し、大きな成果を得てきた。また、この計算に用いた「球形基底の方法」を用いて核分裂障壁の系統的計算を重核・超重核領域について実施した[2014年]。本研究課題ではこのKTUY模型計算を用いてベータ崩壊遅延核分裂割合の理論計算を行った。ベータ崩壊の理論計算については「大局的理論」を採用する。このコードは2012年から研究代表者が開発を進め、2017年に完成し、かつ核構造に起因した系統的改良を施した([2017年])。これとKTUY質量模型計算を組み合わせることにより、崩壊遅延核分裂計算を行う。

4. 研究成果

ベータ崩壊に伴随する過程の模式図を図1で示す。ベータ崩壊は図中の (Z, N) から $(Z+1, N-1)$ の間で起こるが、この際に $Q > S_n$ であればベータ崩壊遅発中性子放出を起こし、 $Q > B_{fiss}$ であればベータ崩壊遅延核分裂を起こす(Q :ベータ崩壊 Q 値、 S_n :中性子分離エネルギー、 B_{fiss} :核分裂障壁)。これらのうち Q 及び S_n はKTUY質量模型計算で求めた。 B_{fiss} は同じく球形基底の方法により求めた。それぞれの事象の起こる確率は以下のように記述できる。



β-delayed neutron emission and β-delayed fission

図1:ベータ崩壊に伴随する過程の模式図。縦方向はエネルギーを表す。

Q :ベータ崩壊 Q 値
 S_n :中性子分離エネルギー
 B_{fiss} :核分裂障壁

$$P_k = \frac{C}{\lambda} \int_{-Q_\beta}^0 S_\beta(E) f(-E) \frac{\Gamma_k}{\Gamma_\gamma + \Gamma_n + \Gamma_f} dE,$$

(k は n (遅発中性子) (ガンマ崩壊)), f (遅延核分裂)が入る。 C は適当な係数、 λ はベータ崩壊定数、 S はベータ崩壊強度関数、 f は形状因子である。崩壊幅を計算することにより各確率が計算できる。

(1) ベータ崩壊遅発中性子放出割合

ベータ崩壊遅発中性子放出割合の計算例を図2に示す。KTUY質量模型の閉殻構造により、中性子数 N が82、126、184及び228に沿って不連続性が表れている。中性子の閉殻構造は $N=126$ (鉛 208 (^{208}Pb)で認識)までは既知であるが、それ以上の中性子数の未知核種領域でも閉殻の性質が維持されていることが示されている。 $N=184$ はいわゆる「超重核の安定の島」を形成する閉殻として、他の従来研究でも知られている「次の中性子閉殻魔法数」である。これより中性子数の大きい原子核の構造は理論的にもほとんど知られてない。我々の計算ではさらに中性子数 $N=228$ でも閉殻が存在し、中性子放出割合に不連続性を与えていることを示している。この領域は現時点の原子核実験としては望むべくもない領域であるが、 r 過程元素合成でこの領域に到達するとすればこの不連続性が原子核生成に影響を与えることになり得る。このような影響は2中性子、3中性子放出、...と放出中性子数が大きい場合でも類似の効果を示す(放出中性子数が多い原子核は、より中性子過剰核側に位置する)。

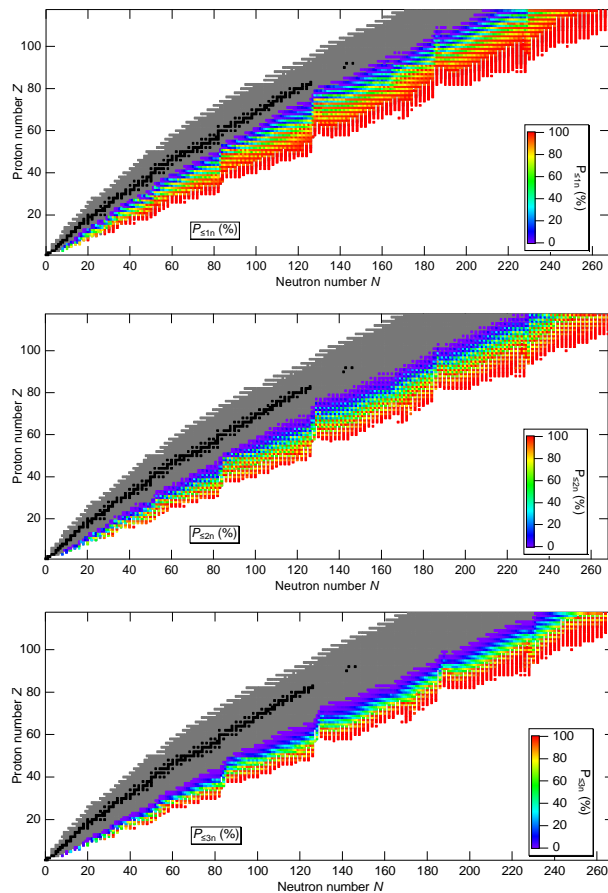


図2:ベータ崩壊遅発中性子放出割合の例。上から1個の中性子放出、2個以下中中性子の放出、3個以下の中性子放出。実際には10個の中性子放出まで考慮した。

は長寿命原子核(半減期が5億年以上)。

(2) ベータ崩壊遅延核分裂割合

ベータ崩壊遅延核分裂割合の計算結果を図3に示す。超重核領域での系統的な計算の結果、核図表上で

^{268}Es 付近
 ^{294}Sg から 348 [126]付近の領域
 390 [130]を中心とした領域

に有意な核分裂確率を持つ領域が存在し、一方で、

$^{354}\text{[126]}$ を中心とした領域

では崩壊遅延核分裂が抑制される核種領域が存在することが分かった。

は過去にも他の研究で類似の指摘がされた領域であるが、
 -)は今回の研究の結果新たに得た結論である。図3の下方にはベータ崩壊Q値 Q と核分裂障壁 B_f との比較図を載せている。両者はベータ安定線から外れ、中性子過剰核側に移るにつれその値が大きくなるという点では類似の傾向を示す。しかしそれぞれの構造的な差異により今回のような特徴的な核種領域が存在するのである。今回の課題で実施したこのような超重核領域のベータ崩壊および核分裂に関する定量的な計算はこれまでにない。この成果は今後のr過程元素合成研究に大きな影響を与えると期待できる。

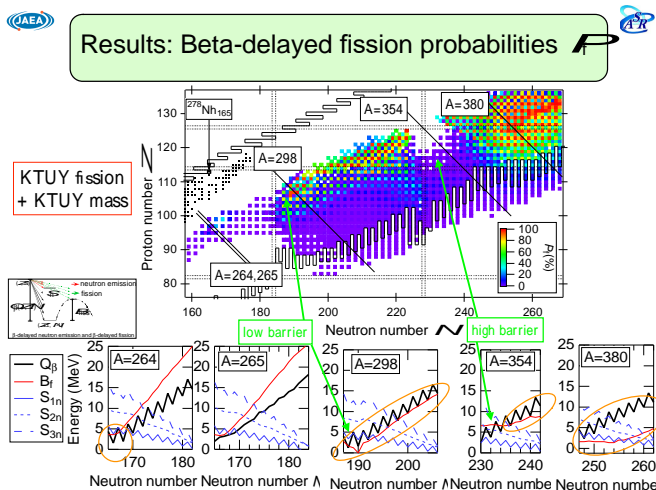


図3：ベータ崩壊遅延核分裂割合。

はこれまで実験的に確認された核種。実線はKTUY質量模型計算による中性子ドリップ線(図中の右下辺り)、陽子ドリップ線(図中の左上辺り)下の図は質量数(A=一定)でのエネルギーの比較図。 Q ：ベータ崩壊Q値、 B_f ：核分裂障壁、 S_{1n} 、 S_{2n} 、 S_{3n} ：中性子分離エネルギー(1個、2個、3個の場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Endo Fumitaka, Koura Hiroyuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Analysis of nuclear structure in the nuclear chart and improvement to the gross theory of decay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.034303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi T., Koura H., Litvinov Yu.A., Wang M.	4. 巻 120
2. 論文標題 Masses of exotic nuclei	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 103882 ~ 103882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ppnp.2021.103882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Schury P., Niwase T., Wada M., Brionnet P., Chen S., Hashimoto T., Haba H., Hirayama Y., Hou D. S., Iimura S., Ishiyama H., Ishizawa S., Ito Y., Kaji D., Kimura S., Koura H., Liu J. J., Miyatake H., Moon J.-Y., Morimoto K., Morita K., Nagae D., Rosenbusch M., Takamine A., Watanabe Y. X., Wollnik H., Xian W., Yan S. X.	4. 巻 104
2. 論文標題 First high-precision direct determination of the atomic mass of a superheavy nuclide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 L021304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.104.1021304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Mukai M., Hirayama Y., Watanabe Y. X., Watanabe H., Koura H., Jeong S. C., Miyatake H., Brunet M., Ishizawa S., Kondev F. G., Lane G. J., Litvinov Yu. A., Niwase T., Oyaizu M., Podolyak Zs., Rosenbusch M., Schury P., Wada M., Walker P. M.	4. 巻 105
2. 論文標題 Ground-state α -decay spectroscopy of Ta-187	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.105.034331	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 小浦寛之
2. 発表標題 原子核質量から見た原子核の大域的な性質とr過程元素合成
3. 学会等名 原子核物理でつむぐrプロセス（京都大学基礎物理学研究所）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Koura
2. 発表標題 Global properties of nuclei in the nuclear chart relevant to r-process nucleosynthesis
3. 学会等名 The international workshop on nuclear physics for astrophysical phenomena (Tokyo Tech, 23-25) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小浦寛之、遠藤史隆
2. 発表標題 超重核領域における核分裂が主要となる領域の分布
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会（山形大学）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Koura and F. Endo
2. 発表標題 Systematical calculation of probabilities of beta-delayed neutron emission and fission in the entire region of nuclear chart
3. 学会等名 The 2019 Symposium on Nuclear Data, Nov. 27-28, 2019, Fukuoka, Kyushu
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Koura and F. Endo
2. 発表標題 Effect of fission process in the heavy- and super-heavy nuclei to the r-process nucleosynthesis
3. 学会等名 The fourth International Symposium on Superheavy elements (SHE2019) , Dec. 1-5, 2019, Hakone, Kanagawa (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小浦寛之、遠藤史隆
2. 発表標題 中性子過剰な重・超重核領域における 崩壊の禁止遷移の役割
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小浦寛之
2. 発表標題 原子核質量と r 過程元素合成
3. 学会等名 核データと重元素合成を中心とする宇宙核物理研究会 (宇宙核物理連絡協議会・北大主催) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Koura
2. 発表標題 Decay properties on the island of stability of superheavy nuclei
3. 学会等名 SHE Science Symposium (Oak Ridge National Laboratory) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Koura
2. 発表標題 Effects of Beta-decay and Fission Processes of Super- and Extremely Super-Heavy Nuclei on the R-process Nucleosynthesis
3. 学会等名 Cosmology and Nuclear Astrophysics Group (COSNAP) Colloquium in Beihang University, No. 14 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小浦 寛之 (編集: 須藤 彰三、岡 真)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 266
3. 書名 基本法則から読み解く物理学最前線 2 4 ニホニウム ~超重元素・超重核の物理~	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------