

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 2 月 23 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800162

研究課題名(和文)s-過程元素合成を探る天体精密温度計と ^{204}Pb 中性子捕獲反応断面積測定研究課題名(英文)s-process thermometer and neutron capture cross section of ^{204}Pb

研究代表者

瀬川 麻里子(segawa, mariko)

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 原子力基礎工学研究センター・研究員

研究者番号：00435603

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では宇宙初期の恒星内温度を調べるため、「天体の温度計」として知られる ^{204}Tl - ^{204}Pb に注目した。天体温度計として機能させるには娘核 ^{204}Pb の中性子捕獲反応の高精度断面積値が必要不可欠である。そこで、 ^{204}Pb の非常に小さい中性子捕獲反応断面積を宇宙初期の恒星内温度に相当するエネルギー(8 keV)で求めるため、高強度のパルス中性子が得られるJ-PARCにおいて、新たにLaBr検出器システムを整備した。そして、中性子捕獲反応直後に放出される不連続な即発線のTOF及びエネルギー測定し、keVを含む高エネルギー中性子領域で中性子捕獲反応による共鳴を観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focused on ^{204}Tl - ^{204}Pb which is known as "s-process thermometer" in order to investigate the temperature inside the star in the early universe. In order to function as an astronomical thermometer, the precise and accurate measurement of neutron capture cross section for daughter nucleus ^{204}Pb is required. In order to obtain the very small neutron capture cross section of ^{204}Pb with the energy (8 keV) corresponding to the star's temperature in the early universe, we newly developed the LaBr detector system at J-PARC, which can obtain high intensity pulse neutron. We have succeeded in measuring TOF and energy of the prompt gamma rays emitted from the neutron capture reaction and observing the several resonances by the neutron capture reaction in the keV neutron energy region.

研究分野：原子核物理

キーワード：ガンマ線計測

1. 研究開始当初の背景

宇宙初期に元素がどのように生成されたかを理解する事は、銀河宇宙の歴史を明らかにしていく上で大変重要で興味深い。

恒星内の遅い中性子捕獲反応で起こる元素合成(s-過程)は、進化の進んだ太陽系でのFeからPbの元素組成比を説明することに成功している。一方で、s-過程はその元素合成が起こる恒星内温度と特に強い相関があることがよく知られている。そのような折、宇宙初期の進化の進んでいない星(AGB星)の温度はこれまで提唱された温度(~30keV)より低い(8keV)事を示唆する理論研究が発表された。これは宇宙初期の元素合成に多大な影響を及ぼすと考えられ、宇宙初期の恒星内温度の解明が急務となっている。

本研究では宇宙初期の恒星内温度を調べるため、「天体の温度計」として知られる ^{204}Tl - ^{204}Pb に注目した。以下に温度計の機能を説明する。 ^{204}Pb は ^{204}Tl のベータ崩壊で生成される。一方 ^{204}Tl は、恒星内で温度に依存して電子が剥ぎ取られる“Bound State β 崩壊”によりその半減期が劇的に短くなる(図1)。すると図2に示すように、 $^{204}\text{Tl}(n,\gamma)^{205}\text{Tl}$ の経路を経ての ^{206}Pb の合成量が減少する。その割合は ^{204}Tl の半減期、即ち恒星内温度に強く依存するため、恒星内の $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 同位体比は恒星内温度の指標となる。しかし ^{204}Pb 量は恒星内で起こる $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$ 反応で減少する。ここで、太陽系の $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 量は既知である事から、宇宙初期の恒星内温度を調べるには、その温度(8keV)での $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$ 反応を精度良く調べる事が極めて重要である。 $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$ 反応を精度良く調べる事で、宇宙初期の恒星内 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 量を導出することができる。その結果、 ^{204}Tl ベータ崩壊率からs-過程元素合成が起きた宇宙初期の恒星内温度についての知見が得られる。宇宙初期の恒星内温度はs-過程元素合成模型に強い制限を与えるため、模型の高精度化には極めて有効である。本研究では、宇宙初期恒星内温度に相当する8keVでの $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$ 反応断面積の高精度測定を行う。

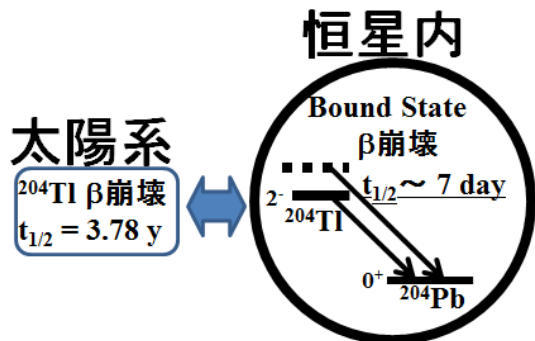


図1 恒星内で起こる Bound State β 崩壊

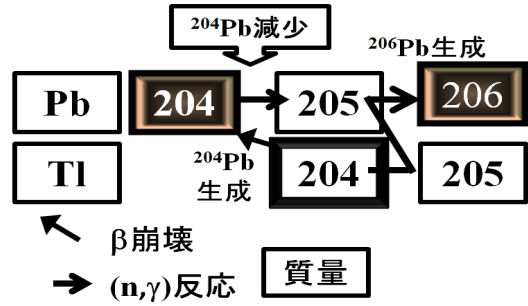


図2 恒星内 ^{204}Pb , ^{206}Pb の合成

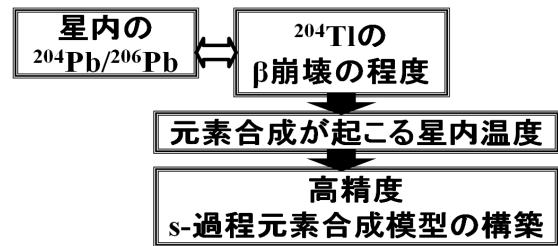


図3 鉛同位体と元素合成模型構築

2. 研究の目的

^{204}Tl - ^{204}Pb 天体温度計は遅い元素合成(s-過程)が起きる恒星内温度を調べる重要なプローブであるが、天体温度計として機能させるには娘核 ^{204}Pb の中性子捕獲反応の高精度断面積値が必要不可欠である。そこで本研究では、 ^{204}Tl の娘核 ^{204}Pb について、その中性子捕獲反応断面積を宇宙初期の恒星内温度に相当するエネルギー(8 keV)で測定し、s-過程元素合成が起きている恒星内温度を解明する事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究は中性子捕獲反応断面積の小さい ^{204}Pb 捕獲反応断面積(図4)の捕獲反応直後に放出される不連続な即発 γ 線(真の信号)を測定した。即発 γ 線を高感度で検出しその断面積を高精度で決定するため、実験は高強度のパルス中性子が得られるJ-PARCにおいて、新たにLaBr検出器を用いて γ 線のTOF及びエネルギーを測定した。LaBr検出器は、従来の有機シンチレータと比較し感度、時間分解能に勝る新型検出器である。

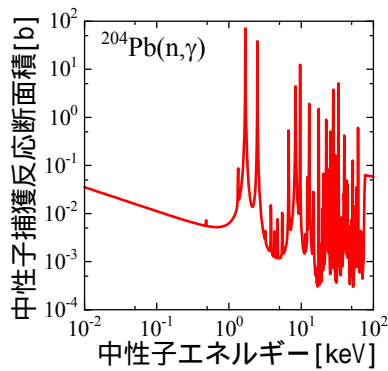


図4 $^{204}\text{Pb}(n, \gamma)$ 断面積値

精度を決定する誤差には統計誤差と系統誤差があり如何にバックグラウンド(BG)を除去した環境で両方の精度を上げるかという点が鍵となった。研究方法における3つのポイントを示す。

J-PARC・MLF ビームライン 4 番(BL04)で生成される高エネルギー領域のパルス中性子を用いた。

J-PARC では keV 領域の中性子を 6.0×10^6 n/cm²/s(at 1MW $E_n=0.9-1.1\text{keV}$) という極めて高いフラックスで生成可能であり、パルス化中性子を利用した TOF 法にて即発 γ 線(真の信号)と時間依存性のない実験室からの BG γ 線を弁別するため、真の信号/ノイズ比の向上が可能であった。

大立体角かつ高検出効率の検出器システムの整備

γ 線用 Pb 遮蔽及び中性子遮蔽効率の極めて高い濃縮 ^6LiF 遮蔽体を備えた LaBr 検出器システムを整備し、J-PARC に設置した。また、波高及び飛行時間(TOF)をリストモードでの即発 γ 線測定システムを整備し、信号/BG 比を上げ系統誤差の少ない解析が可能となった。

高純度試料の使用

試料の不純物からの中性子捕獲 γ 線 BG はいかなる遮蔽によっても取り除けない為、99%以上に濃縮した ^{204}Pb 試料、中性子反応断面積が高精度(3%)で既知の濃縮 ^{197}Au を用いた。

4. 研究成果

概要: J-PARC の予期せぬ運転計画の変更により、当初の研究計画を変更し H25-26 年度に LaBr 検出器システムの設計を行い、H27 年度に製作、J-PARC への搬入、据え付け、テスト実験及び本実験を行った。本実験では J-PARC でガンマ線及び中性子に対して十分遮蔽した LaBr 検出器システム及び濃縮 ^{204}Pb 試料を用い、 ^{204}Pb 中性子捕獲反応によるガンマ線を測定した結果、 $E_n=8\text{keV}$ 近傍にある $^{204}\text{Pb}(n, \gamma)$

反応の共鳴ピークの観測に成功した。

具体的には、H28 年 1 月 J-PARC BL04 に LaBr 検出器システムを搬入し据え付けた。加えてガンマ線計測システムを準備した。H28 年 3 月、同 LaBr 検出器システムが中性子捕獲断面積の極めて小さい ^{204}Pb からの即発 γ 線を十分な統計で計測可能かを確認するため、J-PARC で生成された中性子と同検出器システムを用いた性能試験を実施した。試料には高い中性子捕獲反応断面積を有する ^{197}Au を用いた。この試験の結果、有意なビームタイムで実験を終結させるためには真の信号の計数率を上げる必要があるとわかった。この原因として本検出器システムは S/N 比を上げる事を優先し設計したが、H28 年 2 月加速器トラブルにより加速器の出力が当初の半分程度(205 kW) となった事が挙げられる。そこで、LaBr 検出器と試料の距離を設計時より近づけて設置し、真の信号の計数率を上げて改良前後でガンマ線 TOF スペクトラム比較した(図 5)。これより真の信号の計数率を数倍上げること成功した。

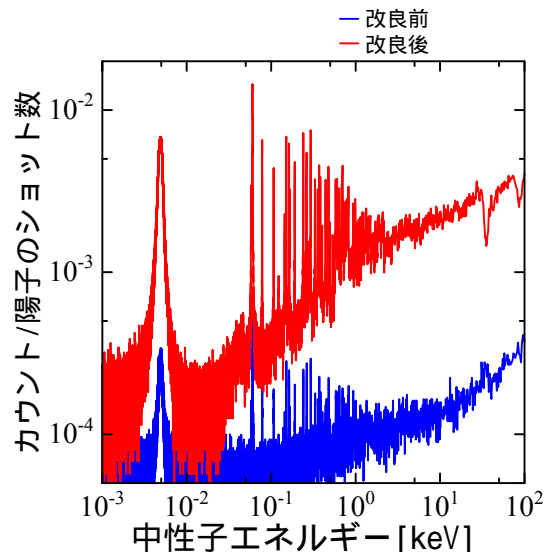


図5 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ によるガンマ線 TOF スペクトラム

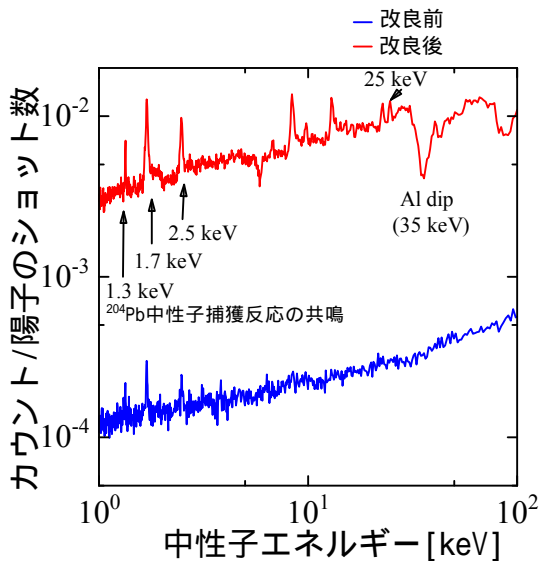


図6 $^{204}\text{Pb}(n,\gamma)$ によるガンマ線
TOF スペクトラム

続けて本実験では ^{204}Pb を試料として用いた。図6に両条件でのガンマ線 TOF スペクトラムを比較した。図6で示すように改良後の実験セットアップで中性子エネルギー1~3keVを含む高エネルギー中性子領域で中性子捕獲反応による共鳴を観測することに成功し、この中性子エネルギー領域で中性子捕獲反応から生じるガンマ線の高感度測定に目途がついた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Mariko Segawa, Yosuke Toh, Hideo Harada, F. Kitatani, Mitsuo Koizumi, T. Fukahori, M. Oshima, Nobuyuki Iwamoto, Osamu Iwamoto, Yuichi Hatsukawa, Yasuki Nagai, et.al., Measurements of neutron capture cross section for $^{207,208}\text{Pb}$, AIP Conference Proceedings **1594**, 査読有, 339 (2014); <http://doi.org/10.1063/1.4874092>

〔学会発表〕(計1件)

瀬川麻里子, 「s過程とPb安定同位体の中性子捕獲断面積測定」, 「宇宙核物理実験の現状と将来」研究会, 2014年8月7日(木)~8日(金), 大阪大学核物理研究センター本館6階講義室1(大阪府茨木市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬川麻里子 (SEGAWA, Mariko)
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 原子力基礎工学
学研究センター・研究員
研究者番号: 00435603

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

牧井宏之 (MAKII, Hiroyuki)
藤暢輔 (TOH, Yosuke)
永井泰樹 (NAGAI, Yasuki)
木村敦 (KIMURA, Atsushi)