中性子が拓く宇宙核物理研究

永井 泰樹

(大阪大学核物理研究センター)

Cosmo Nuclear Physics Investigated by Intense Pulsed Neutrons

Yasuki Nagai

Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

◆緒言：

宇宙そこには、超新星爆発、ブラックホール、暗黒物質等我々の夢を駆り立てる未知の現象や物質が満ち溢れている。一体この宇宙はビッグバン以降どのような歴史を経て今日に至ったのであろうか？「宇宙核物理」は宇宙で起こる原子核現象に着目しその歴史解明を目指す研究分野の総称である。今この分野では、宇宙で観測される原子核をそこで繰広げられたイベント情報を担う「遺物」と見做し 150 億年に及ぶ歴史を解き明かそうとする研究が大きく進展している。その中には原子核が持つ特異な属性が重要な貢献をしている場合が数多くある。本稿ではこの「遺物」の中、特に中性子が関与するものに着目し「J-PARC」で飛躍が期待される研究について紹介する。

1) 宇宙の歴史情報を担う重原子核：

我々の身近にある原子核から宇宙の歴史について一体どのような事を学ぶ事ができるのであろうか？その手掛かりは隕石等から得ている太陽系の元素（原子核）組成にある。我々はこの情報をもとに H, D, ^3He , ^4He , ^7Li の軽元素はビッグバン直後 3 分間にそれ以上の重元素は宇宙進化に伴い誕生した恒星内で合成された事を知っている。星間空間のガスを成分に誕生した恒星は「生と死」を繰り返しつつ新しい世代の恒星へ進化している。そしてその「死」に際しては恒星内で合成した原子核を星間空間に放出する。こうして星間空間は徐々に重い原子核で濃縮されていく。そのため太陽系の原子核はビッグバン後約 100 億年にわたる宇宙のイベント情報を包含している。原子核が宇宙の歴史を紐解く上で貴重な「遺物」になっているのである。宇宙初期から現在まで各世代の恒星について観測される「遺物」を基に「恒星の進化と原子核合成」のモデルを構築すれば、この「モデル」は 150 億年の宇宙史を解明する有力な道具になるという事である。このモデル構築それが我々の夢である。

このモデル構築には宇宙初期世代の恒星（超金属欠乏星：重原子核が乏しい星間ガス中で誕生）周辺での重原子核の観測が欠かせない。現在、天文観測により鉄が太陽系の 1/1000 以下の超金属欠乏星における重原子核が測定されつつある。一方、隕石分野では太陽系形成以前の記憶を保持するプ

レ・ソーラーグレーン（隕石）の分析が飛躍的に進み様々の元素について同位体異常が発見されつつある。

ところで、鉄以上の重原子核は原子核の β 崩壊速度に比べて遅い中性子捕獲過程（s 過程）か速い過程（r 過程）で合成される。これら過程は、異なる天体環境下で異なる原子核を合成するため宇宙を探る上で特異なプローブでありその理解が欠かせない（s 過程は陽子数に近い中性子数を持つ原子核を r 過程は中性子数が過剰な原子核を合成）。s 過程はかなり理解されており、質量数 90 以下の s 過程原子核（s 核）は太陽質量の 8 倍以上の赤色巨星中で、90 以上のものは 2-3 倍の漸近巨大分岐星中で合成されると考えられている。しかし、中性子捕獲反応が進行する恒星内の物理条件（温度、中性子源、中性子密度、継続時間）等重要な課題が未解決である。更に、最近隕石の研究で発見されている重原子核の同位体異常は s 過程について新たな課題を提供している。一方、r 過程が進行する天体環境は長年の研究にもかかわらず未解決である。最近、超金属欠乏星で r 過程原子核（r 核）が観測され始めた。この結果は、r 核が 1 次過程か 2 次過程かの長年の疑問に対し前者である事を示唆すると共に、r 過程と s 過程は全く異なる宇宙の時空をプローブする事を観測事実として示している点でも極めて重要である。超金属欠乏星周辺での重核の観測は始まったばかりであり、今後更に新しい情報が待たれる。ところで、この r 過程は生誕間もない中性子星から放出されるニュートリノ風により進行するとの説が最近提唱されている。この説によれば、陽子・中性子反応による重陽子生成を皮切りに、軽・中重原子核を合成する核融合反応が進行し、続いて r 核合成過程が進行する。ビッグバン直後の元素合成過程を想起させる。この説が実際に観測されつつある r 核を説明できるかどうかは、その合成に関わる原子核の中性子誘起反応断面積に大きく依存する。

以上 r 及び s 過程を中心に宇宙史解明研究について最近の進展を踏まえ紹介した。その解明には、両過程による原子核合成モデルを構築する事、核合成に関与する中性子反応断面積測定が重要であることを強調しておきたい。

2) 宇宙の歴史を解き明かす原子核属性：

宇宙史解明に原子核が持つ特異な属性が貴重な情報をしばしば提供する。結合エネルギーが最小の重陽子はビッグバン直後に軽元素合成が開始した時の宇宙温度（時間）を、最大の鉄は鉄以上の原子核合成が中性子捕獲反応で進行するという情報を提供している。原子核の半減期は、 r 過程が継続する時間、宇宙年齢、 s 過程の持続時間及び中性子密度等の情報を提供する。原子核の属性を利用した宇宙核物理研究は今後更に飛躍する可能性があるので以下にその研究の一端を紹介する。

◆初期宇宙に関わる課題：

陽子と中性子は、宇宙の膨張に伴いクォーク・グルーオンプラズマ状態 ($\sim 10^{12}$ °K ~ 200 MeV) から核子への相転移により作られた。両者は宇宙温度が重陽子の結合エネルギー (2.2 MeV) より十分冷却 (10^9 °K) して後に元素合成を開始したと考えられている。この時の物理環境には 2 つの説、陽子と中性子の空間分布が一樣とする説（標準模型）と非一樣とする説（非一樣模型）がある。相転移が 1 次の場合は中性子過剰の非一樣宇宙が生じこの領域で中性子捕獲反応により Si 程度まで合成されると言われている。（標準模型は ^7Li 迄）。現在これら原子核の探索が天文衛星・地上望遠鏡を用い進行している。この予言の検証は、初期宇宙の物理情報を得るだけでなく D, ^3He , ^4He , ^7Li 等の観測値をもとに宇宙の核子密度を決定し暗黒物質の問題を解明する上でも重要である。これら原子核合成に関わる中性子反応断面積の高精度実験が必要である。

◆宇宙年齢に関わる課題：

宇宙年齢に匹敵する半減期を有する原子核は宇宙年齢を推定する特異なプローブである。宇宙初期世代の恒星で検出されるこの原子核の初期存在量を予測し観測値と比較して銀河年齢を決定しようというものである。最近、Th や U 等の長寿命放射性核が複数の初期世代星で検出され始めた。これら原子核は、初期銀河で初めて爆発した超新星や連星中性子星の合体で合成されたと考えられている。又 r 過程核 ^{187}Re はその半減期が 435 億年でそのベータ崩壊核 ^{187}Os との太陽系における存在比から ^{187}Re が合成された年代の情報が得られると期待されている。これら原子核を用い信頼できる宇宙精密原子核時計を構築していくには、その観測に加え r 過程元素合成モデルの構築、中性子反応実験の研究が欠かせない。

◆ s 過程元素合成と中性子密度に関わる課題：

s 過程が進行する恒星内の中性子密度は s 過程元素合成モデルを構築する上で重要な情報である。それは長寿命核でベータ崩壊と中性子捕獲反応が共存する所謂分岐原子核の中性子捕獲反応断面積により抽出できる。標的核が放射性であり高強度

keV 中性子を必要とする事もあり未解決の重要課題である。

3) 実験方法と keV 中性子の性能：

◆中性子の性能：

中性子捕獲反応断面積はビッグバン直後の宇宙温度及び恒星内温度に相当するエネルギー領域 (10 keV $\sim$ 500 keV) で測定する。断面積はエネルギーに依存するので中性子エネルギーを精度良く決定する必要がある。一方、標的原子核は天然存在比の多寡を問わずその測定が重要で長寿命放射性核も対象となる。実験では標的核が中性子を捕獲直後に放出する γ 線をオンラインで測定する。そのため中性子源から中性子ガイド管中を輸送される keV 中性子が中性子源部で生成された γ 線を含んでいるとその γ 線は標的核と反応し多量の γ 線バックグラウンドを発生する。以上から keV 中性子に要求される性能は、パルス化されている事、高強度である事、連続エネルギー分布を持つ事、中性子ガイド管中の中性子対 γ 線比が高い事である。現在まで主に小型加速器で生成された単色 keV 中性子が利用されている。J-PARC では現状の 100 倍以上の強度と連続エネルギーを持つパルス中性子が得られると期待されている。

◆実験方法：

2 種類の方法、生成核から即発的に放出される γ 線を検出する方法と β 崩壊に伴う放射線を検出する方法がある。前者は、原子核の励起状態間を遷移する生成核固有の不連続 γ 線が検出できるため高精度の測定が出来る事に加え keV 中性子捕獲反応機構について重要な知見が得られる。この知見の重要性を指摘しておく。 r 及び s 過程元素合成に関わる全ての原子核標的について実験するのが望ましい事は言うまでもない。しかし、現実には不安定核標的等の場合は理論の評価に委ねる必要がある。その評価を正しく行うためにも安定核標的を用い keV 中性子捕獲反応機構を理解しておく事は重要である。現在、即発 γ 線検出法による研究が更に高感度で行えるよう高分解能・高効率 Ge 検出器系が関係者により構築されている。これが将来 J-PARC における研究に利用できるものと期待している。

4) おわりに：

本稿で紹介した「宇宙核物理」研究において、中性子反応断面積を誤差 1% 以内で決定する事の重要性が指摘されている場合がある。現状は 5% が良い所である。この高精度が達成されたとして何かが変わるのであろうか？ 宇宙核物理に対する貢献は明らかである。私の専門と離れるが、原子力分野の計画である「加速器駆動型未臨界炉システム」の開発研究に重要な貢献をするとされている。予測し難いが、「原子核物理」の研究に新

しい動機付を与える成果が得られると夢見たい。陽子による熱中性子捕獲断面積が 0.2%内の誤差で決定され原子核現象に中間子交換流の効果が初めて検証され既に 40 年も経過している事は留意しておきたい。

ところで、宇宙の歴史を解明するためには総合的な学術研究の推進が必要な事は言うまでもないであろう。J-PARC における宇宙核物理研究が国内外を問わず様々な学問分野の研究者の熱意と協力により力強く推し進められるようささやかではあるが尽力したい。

Abstract:

In the universe we see many fascinating physical phenomena and interesting but unidentified matters such as supernova explosion, black hole, dark matter and so on. They simply stimulate our imagination about the universe with dreams. Since the universe is so attractive, it may be quite natural to ask our self how the universe has evolved after the Big Bang. The Cosmo Nuclear Physics is the research field dedicated to trace the history of the universe by referring the nuclear phenomena observed in the universe. Many scientists in this field are actively working by paying their special attention on nuclear species observed in the universe. Since the species carry crucial information on many physical events occurred in 15 billion years after the Big Bang, they may be regarded as relics. Here, it is worthwhile to mention that there are many cases, where the unique property of a nucleus plays crucial role to trace the history. In this article I will discuss several subjects related the Cosmo Nuclear Physics probed using intense pulsed spallation neutrons at J-PARC.