

ビッグバン元素合成 ——「トロイの木馬法」で迫る「リチウム問題」

早川 勢也 〈東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター hayakawa@cns.s.u-tokyo.ac.jp〉

山口 英斉 〈東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター yamag@cns.s.u-tokyo.ac.jp〉

梶野 敏貴 〈北京航空航天大学物理学院 kajino@buaa.edu.cn〉

現在の宇宙に多様に存在する元素、そのうちの最も軽い数種類の元素が初めて合成されたのが、ビッグバン宇宙開始後3分から20分ほどまで続いた**ビッグバン元素合成** (Big Bang Nucleosynthesis, BBN) である。BBNによる軽元素同位体、特に重水素と ^4He の推定生成量は、観測と非常に良く一致することから、宇宙背景放射ゆらぎの観測と並んで標準宇宙論を支持する大きな証拠の一つとされる。一方で、 ^7Li の生成量はそれらより10桁近く少ないものの、理論・観測の不定性をそれぞれ慎重に考慮しても、理論による推定値が観測値の3倍程度になってしまうという「宇宙リチウム問題」が存在し、**宇宙核物理学**分野で長年の未解決問題となっている。

この原因を巡っては、低金属星の観測からBBN直後の ^7Li 量を推定する解析方法に残る問題点、標準BBN理論を超える未知の物理を組み込む必要性、宇宙磁場ゆらぎのような宇宙論的効果、あるいはBBN計算に必要な原子核反応率データの不定性や問題点など、いくつかの可能性がさまざまな分野の研究者によって検証されてきたが、未だに解決には至っていない。

BBN中では ^7Li は陽子との反応によって壊れやすいため、 ^7Li 生成量の大半は、実際にはBBN後に残る ^7Be の崩壊に由来する。つまり、 ^7Be の増減を左右する原子核反応が ^7Li 生成量の鍵を握る。 ^7Be の生成に関する核反応率は比較的良好にわかっている一方、 ^7Be 量を減らす反応が近年注目され、複数のグループによる実験が報告されている。特に、BBN中に多数存在する中性子が誘起する ^7Be の破壊反応が重要な反応と考えられている。しかし、中性子は半減期約10分で陽子にベータ崩壊し、 ^7Be は半減期約53日で ^7Li に電子捕獲崩壊する不

安定核である。不安定な核同士の反応を直接測定するのは技術的に難しく、BBNに新たに定量的な制限をかけるまでには至っていない。

我々は、この困難を克服するために「**トロイの木馬法**」という間接手法を用いることで、最も重要な $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$ および $^7\text{Be}(n, \alpha)^4\text{He}$ 反応を新たに測定した。これは、不安定な中性子の代わりに重陽子を標的として用い、そこへ ^7Be 不安定核ビームを入射し、 ^7Be と重陽子中の中性子の**準自由反応**の情報を抜き出す、という手法である。この実験によってBBNエネルギー領域でのデータを必要十分な精度で拡充することができ、特に、これまで未測定であった ^7Li 第一励起状態への遷移の寄与 $^7\text{Be}(n, p_1)^7\text{Li}^*$ を初めて明らかにした。

本研究と過去の実験データとを併せて、最も整合性が高いと考えられる反応断面積の励起関数を**R行列解析**によって導き出した。これにより、BBNエネルギー領域を含む広いエネルギー範囲(10^{-8} –1 MeV)にわたり複合核である ^8Be 共鳴構造に伴う不定性も含めて合理的に評価し、BBN計算に必要な精度の熱核反応率を導き出した。この反応率をBBN計算へ適用した結果、 $^7\text{Be}(n, p_1)^7\text{Li}^*$ 反応チャンネルの寄与によって、 ^7Li の推定生成量を1割ほど下方修正する可能性を示した。

本研究では、この未測定であった反応チャンネルが $^7\text{Be}+n$ 反応の重要性をより強調する結果となったとともに、この反応のみによる問題解決の可能性は、より定量的な意味で排除された。原子核物理の不確実性が一つ解消した今、宇宙論的効果などさまざまな理論的仮説による宇宙リチウム問題の解決法が、より高精度で検証できるようになるものと期待する。

用語解説

ビッグバン元素合成：

宇宙幕開け後20分くらいまでの間に進む、水素からベリリウムまでの軽元素の合成を、ビッグバン元素合成という。宇宙の膨張に伴う温度低下により、陽子と中性子の結合が光分解との競合に打ち勝つことで重陽子数が増え、それを足がかりに一気に合成が進む。

宇宙核物理学：

元素合成や、原子核の性質が深く関わる天体現象の解明を目指す学際的研究分野。天文学・宇宙物理学・原子核物理学・素粒子物理学・隕石科学など、関連する細分野は多岐にわたり、観測、理論、実験からのアプローチがある。

トロイの木馬法：

直接測定では難しい中性子誘起反応やクーロン障壁以下の荷電粒子誘起反応の断面積を間接的に測定するための手法。重陽子や ^6Li など単純なクラスター構造を持つ原子核と入射ビームとの準自由反応により目的の反応の情報を得る。

準自由反応：

トロイの木馬法においては、クラスター原子核中の特定の核子(または核子群)が、反応に寄与しないとみなせるほど、その核子(群)への運動量移行が十分小さい反応を用いる。反応に寄与する核子(群)を「参加者」、しないほうを「傍観者」と呼ぶ。

R行列解析：

原子核反応での複合核の内部と外部を適切な境界条件で繋ぎ、量子力学的に導かれる散乱行列と実験の断面積データを比較することで共鳴反応を解析する手法。