

宇宙リチウム問題の解決を目指して —原子核物理学からのアプローチ—

川畑 貴裕 (京都大学大学院理学研究科 kawabata@scphys.kyoto-u.ac.jp)

久保野 茂 (理化学研究所仁科加速器研究センター kubono@riken.jp)

今から約 138 億年前、誕生直後のわれわれの宇宙は「ビッグバン」と呼ばれる高温・高密度の状態にあった。ビッグバン理論によると、宇宙開闢の約 10 秒後から 20 分後にかけて「ビッグバン元素合成」(Big Bang Nucleosynthesis: BBN) が起こり、陽子と中性子を起点とする原子核反応によって水素、ヘリウム、リチウムなどの軽元素が生成された。このとき生成された元素の組成について、観測による推定値と理論計算による予測値を比較することは、宇宙創生のシナリオを明らかにするうえで、重要な知見を与えてくれる。

BBN における ${}^4\text{He}$ と重陽子の生成量は、観測による推定値と理論予測値が非常によく一致する一方で、 ${}^7\text{Li}$ については、生成量の観測推定値が理論予測値の約 1/3 でしかないという重大な不一致が知られている。この不一致は「宇宙リチウム問題」と呼ばれ、ビッグバン理論に残された深刻な問題として大きな関心を集めている。

宇宙リチウム問題を巡っては、いくつかの解決策が提案されており、それらは三つに大別される。一つ目は、観測から ${}^7\text{Li}$ の原始存在量を推定する方法に問題があるという説であり、二つ目は、宇宙リチウム問題の原因を標準理論を超える新物理に求める説である。そして、三つ目は、BBN 計算に用いられている原子核反応率に誤りがあるという説である。しかし、現時点でこれらの説を決定づける実験的・観測的な証拠は見つかっておらず、宇宙リチウム問題は、宇宙物理学だけでなく、天文学、原子核物理学、素粒子物理学までも巻き込んだ物理学における重要な問題となっている。

原子核物理学の観点からこの問題を考察

すると、 ${}^7\text{Li}$ は主に ${}^7\text{Be}$ が電子捕獲崩壊することで生成される。しかし、 ${}^7\text{Be}$ を生成する反応については、すでに複数のグループによる測定がなされており、BBN 計算の結果を大きく変化させる余地はない。

近年、 ${}^7\text{Be}$ の生成率ではなく、 ${}^7\text{Be}$ を他の原子核に転換する反応に注目すべきとの指摘がなされている。もし、BBN の過程で、 ${}^7\text{Be}$ が ${}^7\text{Li}$ へ崩壊する前に他の原子核へ転換する反応の寄与が増大すれば、BBN 計算における ${}^7\text{Li}$ の生成量が減少し、宇宙リチウム問題を解決できる可能性がある。

${}^7\text{Be}$ を転換する反応として有力視されていたのが、 $n + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応である。しかし、 ${}^7\text{Be}$ と中性子はどちらも短寿命の不安定核であるため、この反応を直接に測定することは容易でなく、これまで、BBN に関するエネルギー領域における断面積は測定されていなかった。

このような状況のなか、我々は大阪大学核物理研究センターにおいて、逆反応である ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ 反応を測定し、詳細釣り合いの原理に基づいて $E = 0.20\text{--}0.81$ MeV のエネルギー領域における $n + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積を初めて決定することに成功した。その結果、 $n + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積は、BBN 計算にこれまで用いられてきた推定値より約 10 倍も小さく、宇宙初期において中性子が ${}^7\text{Be}$ と衝突し二つの ${}^4\text{He}$ に分解する反応の寄与は小さいことが明らかになった。

残念ながら、宇宙リチウム問題の謎はさらに深まる結果となったが、今回の成果は標準模型を超える新しい物理の探索や、原子核反応率の見直しなど、さらなる研究を動機づけるに違いない。

—Keywords—

宇宙における元素合成：

宇宙に存在する全ての元素は、陽子と中性子を起点とする原子核反応によって生成されてきた。宇宙初期のビッグバン元素合成における軽元素の合成のあと、重元素を含む多くの元素が、恒星内部での核融合反応や超新星爆発など、恒星の進化に伴う過程で合成された。近年の研究では、このとき熱核反応だけでなく、ニュートリノによって駆動される反応も元素合成に重要な役割を果たしていることが明らかにされている。また、高速の宇宙線と星間物質の衝突による原子核反応においても、新しい元素が生まれてきた。現在の宇宙の元素組成は、極低温から超高温まで、超低密度から超高密度まで、多様な環境下における原子核反応によって作りあげられたと考えられている。

ビッグバン元素合成：

宇宙初期の「ビッグバン」と呼ばれる高温・高密度状態において、リチウムまでの軽元素が生成される過程を「ビッグバン元素合成」と呼ぶ。

電子捕獲崩壊：

陽子過剰な不安定原子核が、陽電子を放出 (β^+ 崩壊) する代わりに原子の軌道電子を吸収して ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$)、よりエネルギー的に安定な原子核へ変化する過程を電子捕獲崩壊と呼ぶ。 β^+ 崩壊でも電子捕獲崩壊でも、原子番号は Z から $Z-1$ へ変化する。通常、 β^+ 崩壊と電子捕獲崩壊は競合過程となるが、 ${}^7\text{Be}$ のように β^+ 崩壊がエネルギー的に許容されない場合には、電子捕獲崩壊のみが起こる。

詳細釣り合いの原理：

時間反転対称性が成り立つ系において、状態 A から状態 B に変化する過程 (A → B) があったとき、状態密度を考慮すれば、その過程が起こる確率は逆過程 (B → A) が起こる確率と等しいとする原理。