

軽核の keV 中性子捕獲断面積と 原始宇宙における元素合成

(1991年5月24日受理)

(東京工業大学原子炉工学研究所) 井頭 政之

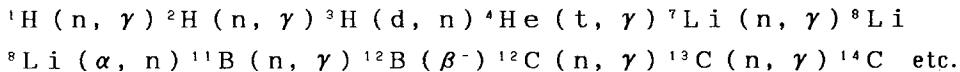
1. はじめに

我々は最近、原始宇宙における元素合成に関する中性子核データの測定を行っている。即ち、軽い原子核に対する keV 中性子捕獲断面積の測定であり、特に入射中性子エネルギー 30 keV の測定を中心に行っている。これまでに ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、及び ${}^{13}\text{C}$ 等の核についての測定結果が得られたが、我々の結果は過去の測定データと大きく異なっていたり、これまでの測定データの混乱に決着をつけるものであった。これらの核を例にとり、過去のデータがどのような状況にあって、今回の我々の結果とどのくらい異なるかを概観すれば、現在の軽核の keV 中性子捕獲断面積データの信頼性の程度を示すことができると考え、本報告を行うこととした。

2. 原始宇宙における元素合成

宇宙はビッグバンで始まり、非常に短時間でクォークとグルーオンのフェーズからハドロンのフェーズに移り、元素合成が開始した。物質が空間的に一様に存在したとする標準ビッグバン模型によると、星が形成される以前の原始宇宙では $A < 10$ の原子核のみが合成され、 $A > 10$ の原子核はずっと後に星の中で合成されたことになる。この標準ビッグバン模型は宇宙の数々の特徴の説明に成功を納めたが、超銀河団等の宇宙の大きな構造を説明するには至っていない。一方、ハドロンのフェーズに移る時にフラクチュエーションが起こり、密度が高くプロトン・リッチな領域と密度が低くてニュートロン・リッチな領域が発生したとする非一様ビッグバン模型も提案されており、これによって宇宙の大きな構造を説明しようとする試みもなされている。

非一様ビッグバン模型では、ニュートロン・リッチな領域で (n, γ) 反応によって元素合成が進み、ビッグバン直後にも $A > 10$ の原子核もかなり合成されることになる。原子核を合成する主な反応系列は、



と考えられている。この非一様ビッグバン模型が受け入れられるか否かの判断方法の一つに、上記の反応系列で合成される原子核の生成量分布の理論的予測値と観測値との比較がある。予測値を求めるには各反応の断面積が必要となるが、これらの断面積は実験値の存在しないものや存在しても非常に精度の悪いものが多い。我々に関連の強い中性子捕獲反応もこの反応系列の中で重要な役割を果たしているが、その断面積についても同様な状況である。この反応系列が進行したのはビッグバン後 1000 秒程度までで、その時の宇宙の温度に対応する中性子エ

エネルギーは30 keVである。

3. 軽核のkeV中性子捕獲断面積データの現状

${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、及び ${}^{13}\text{C}$ の標的核を例にとり、これまでのkeV中性子捕獲断面積の測定データの状況について述べる。

${}^7\text{Li}$ については、1959年のImhof等による測定と1989年のWiescher等の測定がある。双方とも放射化法による測定で、中性子エネルギー30~1000 keVの範囲でデータを与えている。255 keVの共鳴構造を含めて、励起関数の相対的な形は非常に良く似ているが、絶対値は約2倍異なっている。30 keVの点で比較すると、Imhof等の値は約50 μb であるのに対してWiescher等の値は約20 μb である。熱中性子に対する捕獲断面積は45 mbで、この値と $1/v$ 則を用いて30 keVにおける断面積を計算すると45 μb となる。Wiescher等は、彼らの値が $1/v$ 則から求めた値よりも小さい理由を、ある共鳴とのデストラクティブな干渉の結果であるとした。しかし、理論屋のLynn（現ロスアラモス、元ハーウエル）にとってはWiescher等の測定値はパズルであった。（Lynnは干渉は考えられないという立場をとっていた。）

${}^{12}\text{C}$ については、1961年のGibbons等による測定がある。パン・デ・グラフ加速器とタンク・ディテクターを用いた測定で、30 keVにおいて $200 \pm 400 \mu\text{b}$ という値を与えている。一方、熱中性子に対する捕獲断面積と $1/v$ 則からは3.5 μb という値が得られる。元素合成における生成量分布の計算には200 μb 及び3.5 μb の両方の値が用いられたが、2桁異なる値を用いた結果からは何も結論できない状態であった。1990年、MacklinはORELAとトータル・エネルギー・ディテクターを用いて測定を行い、30 keVにおける上限値は14 μb であると結論した。

${}^{13}\text{C}$ については、1971年のAllenとMacklinによる測定がある。ORELAとトータル・エネルギー・ディテクターを用いた測定で、153 keVのp波共鳴の放射幅として $4.0 \pm 1.6 \text{ eV}$ という値を与えている。また、この放射幅の値と熱中性子捕獲断面積（1.4 mb）を用いて、30 keVの捕獲断面積として $120 \pm 40 \mu\text{b}$ という値を与えている。彼らはこの共鳴のスピンを1と仮定したが実際は2なので、彼らの測定データからは $2.4 \pm 0.9 \text{ eV}$ という値が得られるべきで、また30 keVの値も70 μb となるはずである。

4. 東工大ベレトロンでのkeV中性子捕獲断面積測定方法

測定は東工大・原子炉研の3MVベレトロンを用いて行われた。中性子源としては、ベレトロンから得られるパルス化陽子ビーム（パルス幅：1.5 ns、繰り返し周波数：2 MHz、平均電流：7~15 μA ）を金属リチウム・ターゲットに照射し、 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反応によって発生するパルス化keV中性子を用いた。測定用試料として、 ${}^7\text{Li}$ 試料は天然の金属リチウム、 ${}^{12}\text{C}$ 試料はリアクター・グレードの天然のグラファイト、 ${}^{13}\text{C}$ 試料は99%濃縮の

カーボン粉末を用いた。各試料は直径約6 cm、厚さ1~2.5 cmの円板で、中性子源から約8 cm、陽子ビームの進行方向に対して0°の位置に置かれた。実験装置の配置略図は本誌前号の北沢氏のテクニカル・コメントに示されているので参考にされたい。試料から発生する捕獲ガンマ線は、試料から約80 cm、125°方向に置かれたコンプトン抑止型NaI (Tl) 検出器で測定された。この検出器は、ホウ酸入りパラフィン、鉛、カドミウム、及び ^6Li Hで構成されている重遮蔽体中に納められている。中性子モニターとして、14°あるいは30°方向に置かれた ^6Li -ガラス・シンチレーション検出器が用いられた。標準試料としてAu試料を用いた相対測定とし、測定用試料あるいは標準Au試料を置いた測定と試料を全く置かない3種類の測定を行った。実験条件の変動を緩和するため、これら3種類の測定を周期的に行った。測定は中性子飛行時間法を用いて行われ、ガンマ線検出器からの信号は波高 (PH) と飛行時間 (TOF) の2次元データとしてミニ・コンピュータに取り込まれた。 ^7Li と ^{12}C については入射中性子エネルギー30 keVで捕獲断面積の測定を行い、 ^{13}C については153 keV共鳴の放射幅の測定を行った。

5. 今回の測定結果と過去のデータの比較

データ処理の方法等の説明は割愛して、得られた測定結果を過去のデータ等と比較して表1に示す。我々の結果は、中性子捕獲状態 (cs) から残留核の各エネルギー状態 (gnd, 1st等) への遷移に対応する部分捕獲断面積あるいは部分放射幅として得られている。全捕獲断面積あるいは全放射幅はこれらの和から求めた。

我々の ^7Li の結果は最近のWiescher等の結果を否定し、むしろ古いImhof等の結果および熱中性子捕獲断面積からの予測値を支持している。尚、我々の全捕獲断面積は、中性子捕獲状態から基底状態および第1励起状態への遷移の分岐比が熱中性子捕獲状態からの分岐比と同じであると仮定して求めている。

^{12}C についての我々の結果は熱中性子捕獲断面積からの予測値を否定した。熱中性子捕獲の場合、捕獲状態から残留核の基底状態($1/2^-$)および第2励起状態($3/2^-$)への遷移が99%以上を占めるのに対し、表から分かるように我々の結果では第1励起状態($1/2^+$)への遷移が50%以上を占めており、30 keV中性子捕獲においてはp波中性子の寄与が大きいことが分かる。尚、Macklinの結果とは矛盾していないと考えるのが妥当であろう。

^{13}C の我々の結果は修正を行ったAllenとMacklinの結果より1桁小さい値となった。尚、基底状態への遷移はE2遷移であり、中性子共鳴捕獲反応でE2遷移が観測されたのは非常に珍しいケースである。

6. おわりに

今回の ^7Li 、 ^{12}C 、および ^{13}C の結果から、他の軽核のkeV中性子捕獲断面積あるいは放射幅の測定データについても、その信頼性は乏しいと考えられる。今後、他の核種についても

測定を進めて行く予定である。

少し自慢話を許して頂き、今回の結果に関するエピソードを紹介する。昨年10月米国アシロマで開催された捕獲ガンマ線に関する国際シンポジウムにおいて、筆者はWiescherと彼の共同研究者であるKäppelerと⁷Liの結果について議論したが、彼らの値が小さくなった理由は明かにならなかった。上述のLynnとも話をしたが、彼はパズルが解けたと喜び、後日オークリッジのRamanを介して「Direct and valence neutron capture by ⁷Li」と題した論文のプレプリントを送ってきた。また、¹²Cの結果のプレプリントを天体核物理で有名なFowler氏（1983年ノーベル物理学賞授賞者）に送ったところ、昨年9月に彼は我々の実験室を訪ね、実験装置の見学や議論を楽しみ丸1日を通じた。元素合成に関する核データに頭を突っ込んだおかげで、たくさんの研究者と知り合いになった。今後も機会があれば他の分野に頭を突っ込んでみようと目論んでいる。

尚、本研究は多くの人々との共同研究で行っている。

表1 今回の測定結果と過去のデータ等の比較

核種	我々の結果	対応する過去のデータ	予測値**
${}^7\text{Li}$	En=30keV cs→gnd: $35.4 \pm 6.0 (\mu\text{b})$ cs→1st: $< 9 (\mu\text{b})$ total [#] : $39.3 \pm 6.0 (\mu\text{b})$	Imhof et al. Wiescher et al. 50(μb) 20(μb)	45(μb)
${}^{12}\text{C}$	En=30keV cs→gnd: $3.3 \pm 0.9 (\mu\text{b})$ cs→1st: $9.6 \pm 1.3 (\mu\text{b})$ cs→2nd: $1.7 \pm 0.8 (\mu\text{b})$ cs→3rd: $2.2 \pm 1.1 (\mu\text{b})$ total : $16.8 \pm 2.1 (\mu\text{b})$	Gibbons et al. Macklin 200±400(μb) < 14(μb)	3.5(μb)
${}^{13}\text{C}$	En=153keV cs→gnd: $34^{+13}_{-6} (\text{meV})$ cs→1st: $151^{+76}_{-33} (\text{meV})$ cs→3rd: $30^{+30}_{-13} (\text{meV})$ total : $215^{+84}_{-35} (\text{meV})$	Allen and Macklin 2400±900(meV)	

中性子捕獲状態から基底状態および第1励起状態への遷移の分岐比が熱中性子捕獲状態からの分岐比と同じであると仮定して求めた。

熱中性子捕獲断面積と $1/v$ 則を用いて求めた値。