



軽核の速中性子捕獲断面積 (仁科記念賞を受賞して)

東京工業大学 原子炉工学研究所

井頭 政之

iga@nr.titech.ac.jp

平成 14 年度 (第 48 回) の仁科記念賞を、大阪大学核物理研究センターの永井泰樹教授と共同受賞した。同賞は仁科記念財団の事業の一つで、過去の受賞者の中には後にノーベル賞に輝いた江崎玲於奈先生や小柴昌俊先生の名前もある。(詳細はホームページ参照 : <http://www.nishina-mf.or.jp/>)

受賞対象の「公式」研究業績は『原子核による速中性子捕獲現象の研究』であるが、財団から最初に連絡を頂いた時は「原子核による速中性子非共鳴 p 波中性子捕獲現象の発見」であった。元のものが高すぎ、また、「非共鳴 p 波」が分野外の方々に分かり難いためプレス発表の際に変更されたようだ。この研究は「宇宙における元素合成」に関する核データ研究で、東工大・原子炉研の 3MV ペレトロン加速器と keV 中性子捕獲反応実験用コンプトン抑止型 NaI(Tl)ガンマ線検出器を用いて、当時は東工大・理学部・応用物理学科だった永井先生と平成 2 年から開始した共同研究である。

宇宙における元素 (原子核) 合成は、(1)ビッグバン 100~1,000 秒後の原始宇宙、(2) 恒星の進化・終焉過程、で起こる。(1)では軽い原子核 (標準ビッグバンモデルでは $A < 8$ の核、非一様ビッグバンモデルでは $A < 30$ の核) が合成される。尚、ビッグバン後 100~1,000 秒の期間に限られる理由は、100 秒以前だと宇宙温度が高すぎて輻射により重陽子の結合が切られて元素合成が進まず、1,000 秒以降は中性子寿命を過ぎてしまい元素合成材料である自由中性子が無くなるためである。(2)の「進化」過程の元素合成はハイゼンベルグの谷に沿って中性子捕獲・ β 崩壊を繰り返してゆっくり進み (s 過程)、 ^{209}Bi が最終核となる。「終焉」過程 (超新星爆発等) での元素合成は中性子ドリップ・ラインに沿って爆発的に進み (r 過程)、質量数 300 を越える核まで合成される。(1)と(2)の元素合成に関与する中性子のエネルギーは $kT = \text{数 keV} \sim \text{数 } 100\text{keV}$ であり、特に $kT = 30\text{keV}$ の速中性子が重要である。

^{12}C 及び ^{16}O は恒星進化過程で多量に生成され、それらの速中性子捕獲反応断面積は s 過程元素合成研究において重要である。即ち、断面積が大きすぎると中性子毒となって

元素合成が進まない。また、これらの核は非一様ビッグバン模型による元素合成研究でも重要である。 ${}^7\text{Li}$ については原始宇宙での元素合成において、 $A=8$ のギャップ（安定核が無い）を ${}^7\text{Li}$ の速中性子捕獲で生成される ${}^8\text{Li}$ （半減期：約1秒）を経由して越せるか否かで重要である。

しかし表1に示した様に、これらの核種の中性子エネルギー30keVにおける過去の測定結果の精度は大変乏しいものであった。放射化法で測定できる ${}^7\text{Li}$ については、1989年の測定値の誤差は9%と小さいが過去の測定値の1/2~1/3であり、測定値間に矛盾があった。 ${}^{12}\text{C}$ に至っては誤差が200%であった。一方、これらの核種に対する熱中性子捕獲断面積はかなりの精度で測定されていた。また理論的には、これらの核の熱~keV領域での捕獲断面積は入射中性子スピード v と共に $1/v$ 則に従って減少する、即ちs波中性子による非共鳴捕獲であると考えられていた。表1には熱中性子に対する測定値と $1/v$ 則を用いた30keVでの予測値も示してある。表から分かる様に、 ${}^7\text{Li}$ に対する1989年の測定値以外の30keV測定値は、実験誤差内で $1/v$ 則予測値と一致している。しかし理論的には、keV領域ではp波中性子非共鳴捕獲も可能であり、 $1/v$ 則予測値の良否を確かめるためには、30keV付近での精度良い測定が不可欠であった。

過去の ${}^{12}\text{C}$ 及び ${}^{16}\text{O}$ に対する測定精度が悪い原因は、30keVにおいては散乱断面積(${}^{12}\text{C}$: 4.6b、 ${}^{16}\text{O}$: 3.6b)が捕獲断面積(我々の結果で、 ${}^{12}\text{C}$: 16 μb 、 ${}^{16}\text{O}$: 34 μb)と比べて極端に大きい(10万倍以上)ためである。 ${}^{12}\text{C}$ 及び ${}^{16}\text{O}$ の中性子捕獲反応によって生成される核種は安定核なので放射化法を用いることができず、捕獲ガンマ線を直接測定しなければならない。測定用試料からは捕獲ガンマ線の他に試料によって散乱された中性子がガンマ線検出器に入射する。試料から検出器に向かう散乱中性子と捕獲ガンマ線の量は各々の断面積に比例するので、散乱中性子の量は捕獲ガンマ線の量の約10万倍である。この散乱中性子に起因するバックグラントが、通常のkeV中性子捕獲実験においては極めて深刻となる。また、中性子源から発生した中性子は床・壁・天井・実験機器等によって多重散乱されてエネルギーが低くなり、実験室内にはこれらの低エネルギー中性子が充満している。これらの低エネルギー中性子に起因するバックグラントも深刻となる。

この様な状況から我々は、ペレットロン加速器を用いた ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応から得られる1.5ナノ秒パルスkeV中性子源と大型遮蔽体付きコンプトン抑止型NaI(Tl)ガンマ線検出器を用いて、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ についてkeV中性子捕獲実験を行った。実験には中性子飛行時間法を採用し、「中性子飛行時間」×「ガンマ線波高」の2次元測定を行った。得られた30keVでの結果を表1に示す。 ${}^7\text{Li}$ の結果は $1/v$ 則予測値と一致したが、 ${}^{12}\text{C}$ については予測値の5倍、 ${}^{16}\text{O}$ に至っては170倍となった。この背景に潜む物理は何であろうか？

非共鳴中性子捕獲反応における1次ガンマ線遷移は電気的雙極子(E1)遷移が支配的であり、E1遷移ではスピン変化が1以下でパリティ変化が起こる。一方、熱中性子は正パリティのs波中性子成分のみで、エネルギー増加に伴って負パリティのp波中性子成分

が発生してくる。我々の実験では（離散）捕獲ガンマ線のエネルギー分析を行っているので、1次ガンマ線遷移の終状態を同定することができる。従って、終状態のスピン・パリティ情報を用いることにより、各1次ガンマ線遷移に対応する捕獲反応がs波中性子によるのかp波中性子によるのかを決定することができる。また、非共鳴s波中性子捕獲断面積の $1/v$ 則と異なり、非共鳴p波中性子捕獲断面積は v に比例する。従って、入射中性子エネルギーを変化させて各終状態遷移に対応する「部分」捕獲断面積の変化を調べれば、s波捕獲あるいはp波捕獲を確認することができる。

我々が観測した ^{12}C の30keV中性子捕獲状態からの遷移を、熱中性子捕獲状態からの遷移と比較して図1に示す。熱中性子捕獲状態は $1/2^+$ なので、基底状態($1/2^-$)と3.68MeV状態($3/2^-$)にしかE1遷移できない。3.09MeV状態($1/2^+$)へのM1遷移も観測されているが非常に弱い。これに対して30keV中性子捕獲では3.09MeV状態への遷移が最も強く、また3.85MeV状態($5/2^+$)への遷移も観測されている。これは、30keV中性子捕獲ではp波中性子成分の寄与が非常に重要であることを示している。即ち、p波中性子捕獲状態は $1/2^-$ あるいは $3/2^-$ であり、従って、これらの状態にE1遷移することができる。次に、基底状態と第1励起(3.09MeV)状態への遷移に対する部分捕獲断面積の入射中性子依存性を図2に示す。図中の実線は、熱中性子に対する基底状態への部分捕獲断面積を用いた $1/v$ 則外挿である。100keV以下の領域では、 $1/v$ 外挿と測定値が実験誤差内で一致している。200keV以上で実験値が大きくなっているが、これはd波中性子成分が寄与していることを示している。一方、点線は v 則を示しており、第1励起状態への部分断面積測定値の入射中性子エネルギー依存性を再現している。即ち、第1励起状態への遷移に対応する中性子捕獲はp波中性子の寄与であることが確認できた。

^{16}O の結果を図3に示す。熱中性子捕獲では3.055MeV状態($1/2^-$)へのE1遷移が支配的であるが、 ^{12}C の場合と比較して、0.871MeV状態($1/2^+$)へのM1遷移の相対強度が大きい。これは双極子遷移の場合、遷移強度がガンマ線エネルギーの3乗に比例することを考慮することで理解できる。尚、 ^{16}O の熱中性子捕獲断面積は ^{12}C の約 $1/20$ と小さく、従って、0.871MeV状態へのM1遷移強度の絶対値が大きいのではない。40keV中性子捕獲では、p波中性子捕獲に起因する基底状態($5/2^+$)と0.871MeV状態へのE1遷移のみが観測されている。尚、40keVにおけるs波中性子捕獲の寄与は $0.15\mu\text{b}$ 程度で、我々の実験装置の検出感度以下である。

^7Li の場合、何故p波中性子捕獲の寄与が無いのか？答えは ^8Li の束縛状態の特殊性にある。図4に示す様に、 ^8Li の束縛状態は正パリティの基底状態(2^+)と0.981MeV状態(1^+)しか無い。 ^7Li の基底状態は $3/2^-$ なので、s波中性子捕獲状態(1^- , 2^-)からこれらの状態へE1遷移することができるが、p波中性子捕獲状態($0^+ \sim 3^+$)からはE1遷移できない。この様な事情で、 ^7Li の場合にはp波中性子捕獲が抑制されているのである。

^{12}C の結果を纏めた論文のpreprintを天体核物理学創始者の一人でノーベル賞受賞者の

W. A. Fowler 先生に送ったところ、我々の成果を非常に高く評価し、平成 2 年秋の来日の際にペレットロン実験室を訪ねてくれた。また ^{16}O の結果については、「新しい測定値が古い測定値より小さくなるのはよくあるが、2 桁も大きくなった例はこれまでに無い。何故、そんなに大きくなったのか？」とよく質問を受けるが、返答に困ってしまう。

我々の結果は元素合成研究、中性子核反応研究、及び（今回は説明を割愛した）核構造研究の分野に大きなインパクトを与えた。特に最近の元素合成研究において、 ^{16}O の 170 倍も大きな捕獲断面積のインパクトは益々大きくなって来ている。

授賞式は故仁科芳雄先生の誕生日である 12 月 6 日（金）に、お堀端の東京會館で開催された。西島和彦仁科記念財団理事長の挨拶に続いて、伊達宗行選考委員長（大阪大学名誉教授）からの選考過程報告と受賞業績内容の紹介があった。今年度は 28 件の推薦があり、例年に漏れず夜 9 時を過ぎるまで議論が続き、最終的に選考委員（約 20 名）の過半数の支持を得た 3 件が選考されたそうである。受賞業績内容については、伊達先生はメモを一切見ず、3 件について空で見事に紹介された。敬服の一語に尽きる。そして、西島理事長から賞状と記念品が贈呈されて授賞式は終了し、引き続いて懇親会となった。

授賞式・懇親会の出席者は、選考委員を含む仁科記念財団関係の方々、歴代の受賞者（とご婦人）、等々で 100 名を越し、93 歳の伏見康治先生（大阪大学名誉教授）もお元気に出席されていた。物理の教科書で名前を存じ上げている先生方が勢揃いしている感があった。原子力界では、故仁科芳雄先生のご子息であり、筆者が 20 年以上に渡ってご指導頂いている仁科浩二郎先生（愛知淑徳大学）が出席されていた。

今回の授賞を研究室の学生と卒業生が喜んでくれた。これを機に、これからも若い人をどんどん巻き込んで、核データ研究活動を種々の分野で活発にしたいと思っている。最後に、これまでの多くの方のご支援にお礼を申し上げると共に、核データ研究の活性化のために今後も益々のご支援をお願いしたい。

表 1 ^7Li 、 ^{12}C 、 ^{16}O の 30keV 中性子捕獲断面積 (μb)

核種	過去の測定値	1/v 則予測値	我々の測定値
^7Li	$59 \pm 11.8 (^{59})$, $39.5 \pm 7.9 (^{59})$, $21.0 \pm 1.9 (^{89})$	41.4	39.8 ± 6.0
^{12}C	$200 \pm 400 (^{70})$	3.2	15.4 ± 1.0
^{16}O	$0.2 \pm 0.1 (^{71})$	0.17	34 ± 4

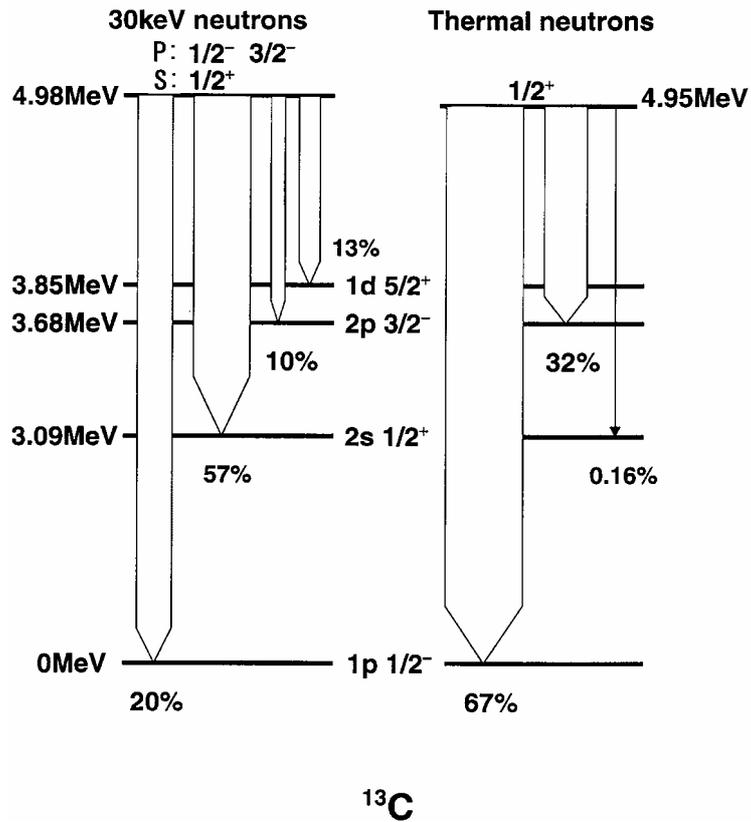


図1 $^{12}\text{C}(n,\gamma)^{13}\text{C}$ 反応における中性子捕獲状態からの分岐比

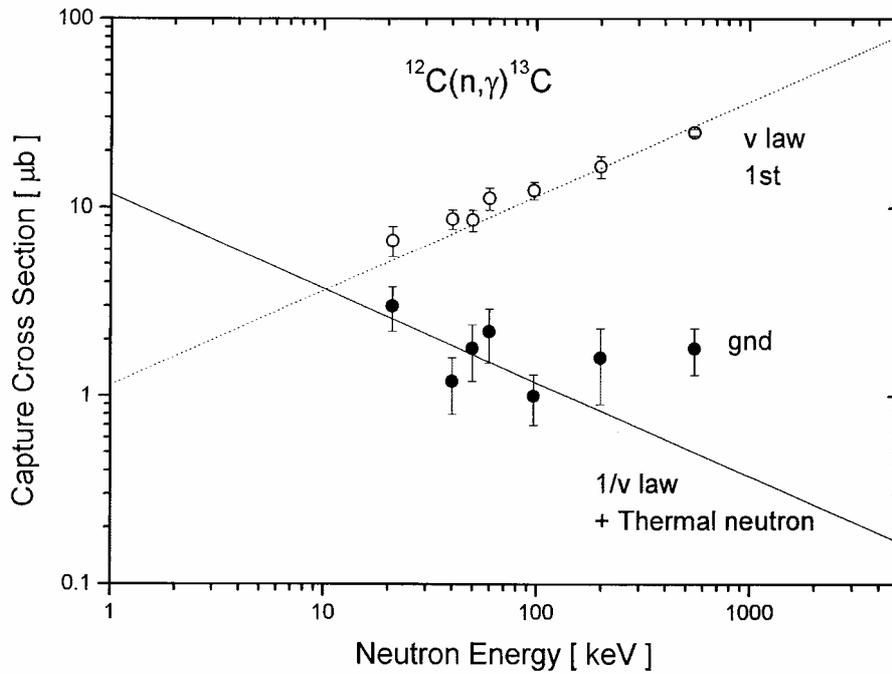


図2 $^{12}\text{C}(n,\gamma)^{13}\text{C}$ 反応における、 ^{13}C の基底及び第1励起状態への遷移に対応する部分捕獲断面積の入射中性子エネルギー依存性

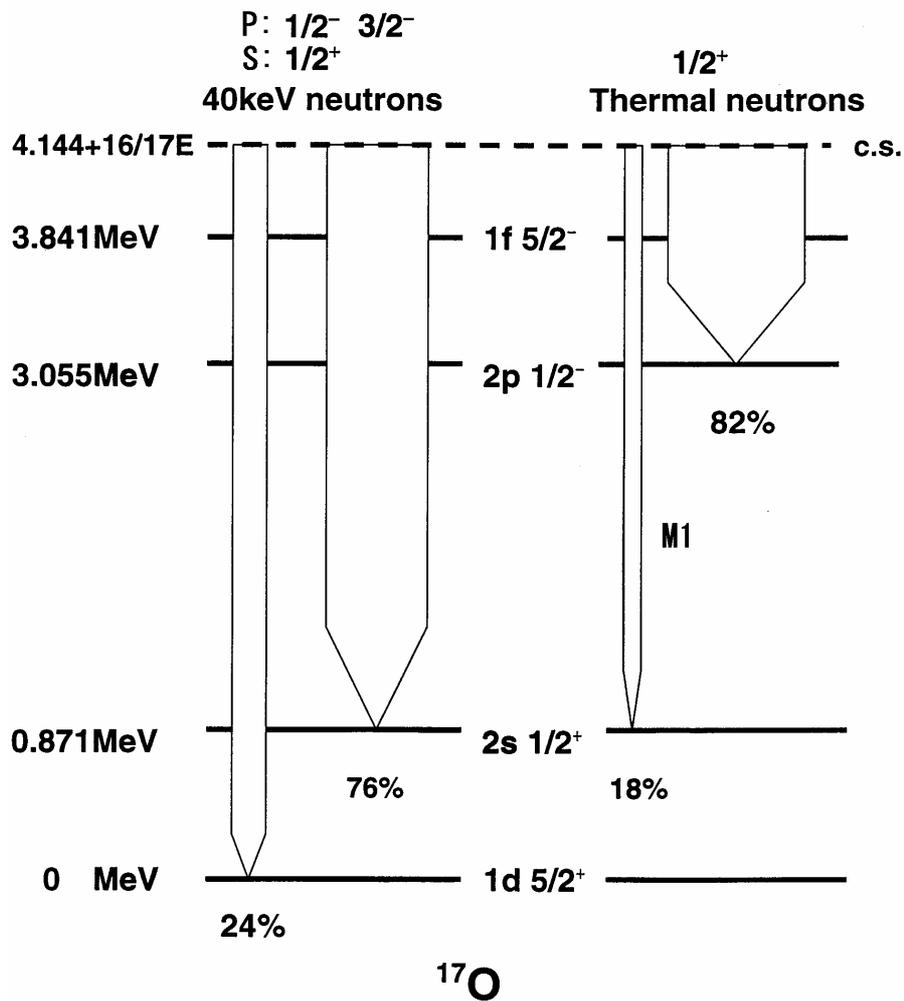


図3 $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$ 反応における中性子捕獲状態からの分岐比

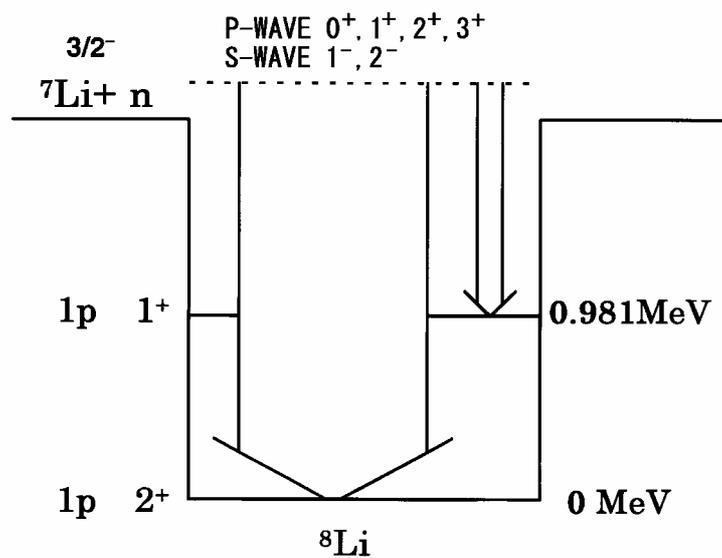


図4 $^7\text{Li}(n,\gamma)^8\text{Li}$ 反応における中性子捕獲状態からの分岐比