

宇宙誕生の謎に挑んだ大学生たち

—ビッグバン元素合成研究の重要な核反応の測定にはじめて成功

川畑 貴裕

京都大学大学院理学研究科

学部4年生が卒業研究として取り組んだ研究テーマが一流誌の誌面を飾った¹⁾。「卒業研究といえども、研究というからには学術論文を書くつもりでやる」——言葉にするのは簡単だが、実践するのは難しい。アイデアと工夫でさまざまな困難を乗り越え、快挙を成し遂げた教員と学生たちの物語。

ビッグバン元素合成と宇宙リチウム問題

「観測可能な領域のみでさえ 10^{26} m という広大な宇宙と、 10^{-15} m というきわめてミクロな原子核のあいだには密接な関係がある」といわれると不思議に思う方も多いかもしい。宇宙開闢^{かいびやく}のとき、宇宙にはまだ一切の元素が存在していなかった。しかし、現在の宇宙にはさまざまな元素が存在している。すべての元素は約 137 億年にわたる宇宙の進化の過程で、原子核反応によって生みだされてきた。すなわち、宇宙の歴史は元素合成の歴史でもあり、宇宙の成り立ちを明らかにしようとするとき、原子核物理学的な手法によるアプローチを欠かすことはできない。

今から約 137 億年前、誕生直後の宇宙は「ビッグバン」と呼ばれる超高温・高密度の状態にあったと考えられている。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」が起こり、水素 (H)、ヘリウム (He)、リチウム (Li) などの軽い元素が生成された。このとき生成された軽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きわめて重要な知見を私たちにもたらしてくれる。

水素とヘリウムの同位体については、生成量の観測推定値と理論予測値が非常によく一致を示す一方で、リチウムの同位体の一つである ${}^7\text{Li}$ 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おり、この不一致は「宇宙リチウム問題²⁾」と呼ばれ、ビッグバン理論に残された深刻な問題として世界中の研究者の関心を集めている。

${}^7\text{Li}$ は ${}^4\text{He}$ と ${}^3\text{He}$ が核融合して生成された ${}^7\text{Be}$ (ベリリウム 7) が、ビッグバン元素合成が終了したあと、約 53 日の半減期で崩壊することにより生成されたと考えられている。しかし、 ${}^7\text{Be}$ が崩壊して ${}^7\text{Li}$ に変化する前に、ほかの原子核に転換していたとしたら、 ${}^7\text{Li}$ の生成量が減少し、宇宙リチウム問題の解決につながると期待されている。

${}^7\text{Be}$ 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 (中性子と ${}^7\text{Be}$ から 2 個の ${}^4\text{He}$ が生成する反応) である。しかし、中性子と ${}^7\text{Be}$ はいずれも不安定な原子核であるため実験が難しく、これまで、ビッグバン元素合成に関係する反応エネルギー領域における反応率が測定されていなかった。

京都大学理学部の物理科学課題研究 P4

課題研究 P4³⁾ とは、筆者が担当している京都大学理学部の卒業研究科目である。自由の学風を標榜する京都大学理学部にあつて、唯一の必修科目が「課題研究」であり、素粒子・原子核・宇宙分野を専攻する学生の場合、6 講座提供されているテーマのなかから一つを選択して 1 年間履修しなければ

かわばた・たかひろ ● 京都大学大学院理学研究科准教授、2002 年京都大学大学院理学研究科博士課程修了、＜研究テーマ＞原子核におけるクラスター構造の実験的研究、宇宙における元素合成過程、＜趣味＞ソフトボール、旅行、飲酒

ばならない。その4番目の講座であるP4では、原子核理論研究室の延與佳子准教授と原子核実験を専門とする筆者の2人の担当教員に対して、毎年6～7人の学生が所属して卒業研究に取り組んでいる。実験を指導する筆者の信条は「卒業研究といえども、研究というからには学术论文を書くつもりでやる」ことである。「何をあたりまえのことを…」とお感じの読者もおられるかもしれないが、実験の高度化・大規模化が進む原子核実験の分野において、この信条を実現することは決して簡単なことではない。2009年に京都大学に赴任してP4を担当するようになってからというもの、いつも、学部学生であっても成果をあげられるニッチな研究テーマはないかと探し求めている。

学生たちが自ら選んだ研究テーマ

そうしたなかで、2014年のある日、理化学研究所仁科加速器研究センターの久保野 茂氏から、「宇宙リチウム問題に重要な $n + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応を測定してみないか？」と提案をいただいた。久保野氏は、測定が難しい $n + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応を直接に測定するのではなく、逆反応の ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow n + {}^7\text{Be}$ を測定すればよいというアイデアを着想していた。逆反応の反応率を測定すれば、詳細釣り合いの原理^{*1}によって、順反応の反応率を決定することができるのである(図1)。学部学生向けの研究テーマを探し求めている筆者は、渡りに船とこの提案に飛び乗ったのであった。

しかし、いかに優れたアイデアであっても、本来は博士論文にしてもよいほどの研究課題である。これを学部学生に完遂させることは簡単なことではない。まずは学部学生に基礎的な実験技術を身につけさせることが必要である。物理学教室では大半の卒業生が大学院へ進学する。9月に行われる大学院入試までは、学生たちも試験のことが気になって、なかなかじっくりと卒業研究に取り組む雰囲気にはならない。しかし、P4では4月からカリキュラムを組んで、前期のうちに放射線計測技術の基礎を習得させるようにしている。毎週月曜日の13:30から開いている実験ゼミは、輪講と実習で20:00過ぎに及ぶことも珍しくない。また、毎回の実習では宿題を与え、実習以外の日にも自主的に計測技術の向上

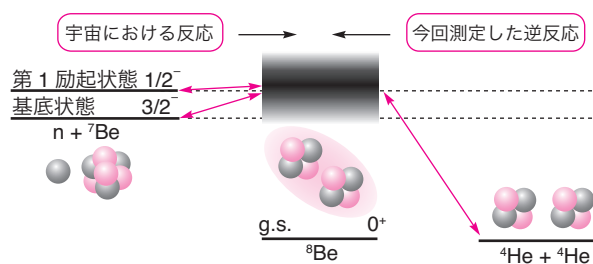


図1 $n + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の模式図

に取り組むように求めている。学生たちには「アットホームな^{*2}課題研究」と陰口を叩かれているようだが、楽しい雰囲気なかで実習できるように腐心しており、学生たちもよくついてきてくれていると感じている(筆者の独りよがりかもしれないが…)。

研究テーマの設定にも気を遣う。筆者のなかでは「宇宙リチウム問題」と心を決めてはいるのだが、テーマを天下りに学生に与えるのではうまくいかない。あまり教員側からテーマを推しすぎると、「結局、先生がやりたいだけなんですよー」的な雰囲気醸成されてしまうのである。本命の研究テーマに加えて、ダミーのテーマを用意して、それぞれについて関連研究の参考文献を輪読させる。学術的な位置づけや、何を達成できれば成功といえるのか、そして、それをP4がもつ人的・経済的資源に照らして実現可能なかを巧妙に誘導しながら学生たちに議論させる。当然ながら、ダミーのほうは研究テーマとしての完成度も低いので採択は見送りとなり、筆者が望む結論となるのだが、学生たちに自身の研究テーマであるという自覚をもたせ、主体的に取り組んでもらうようにするためには必要なプロセスだと感じている。

晴れて研究テーマが学生たちに採択されると、次は実験提案書の執筆にとりかかる。この研究ではHeガス標的に約40 MeVの ${}^4\text{He}$ ビームを照射し、放出される中性子を測定するため、大型の加速器が必要である。そこで、大阪大学核物理研究センター(RCNP)から教育用ビームタイムの提供を受けた。ビームタイムの提供を受けるための実験提案書は、学生に執筆してもらう。まともな学術文書を書いたことのない学生たちにとっては無茶振りともいえる仕事ではあるが、研究の全体像を理解させるうえでは非常に有効である。どれほど言葉を費やして学生たちに物理を語ったところで、実際に頭を使い、手を動かさなければ身にはつかない。学生たちが書いた文章に容赦のない朱入れと注文をして突き返し、再提出された提案書をさらに朱く染める。これを幾度か繰り返

^{*1} 時間反転対称性が成り立つ量子力学的な系において、状態Aから状態Bになる過程(A→B)があったとき、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。

^{*2} アルバイト情報誌などに掲載される「アットホームな職場」という文言は、従業員に報酬の伴わない家族的な献身を強制するブラックな職場を連想させるらしく、学生たちにとって決してポジティブな言葉ではないらしい。

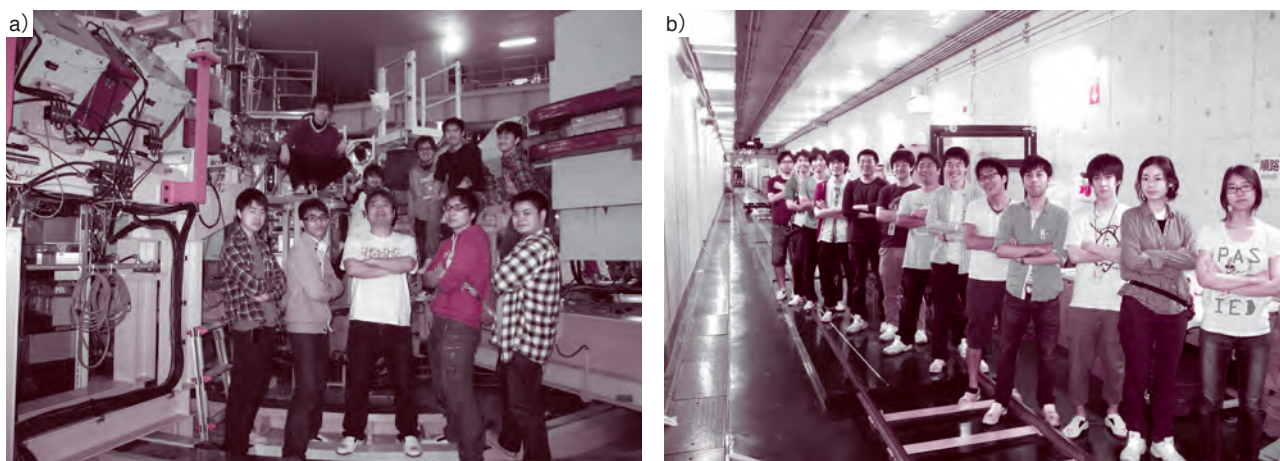


写真1 1年目(2014年度, a)と2年目(2015年度, b)にP4に所属した学生たち
2年目の測定にはOBの学生も参加してくれた。写真(a)の中央が筆者。

して実験提案書を完成させるのである。

実験に必要な装置開発も並行して進める。He ガスを封入するための標的容器、測定中にガスの温度や圧力をモニターするための計測器、中性子を測定するための液体シンチレータ、データを電子化してコンピュータに記録するためのデータ収集システムなど、7人の学生全員に責任範囲を割り当てる。7人もの学生がいると、能力やモチベーションのばらつきは避けられないので、優秀な学生の影に隠れてお客さんになってしまう学生がでないように心がけている。このころになると、筆者1人ではすべての学生に目が行き届かなくなるので、大学院生にも協力をお願いして、実験の準備を進めていく。

実験装置を携えていざ出陣！

かくて、開発した実験装置を抱えていよいよ RCNP へ乗り込んだ。万端の準備を整えて測定に臨んだつもりであったが、初年度の測定は見事に失敗した。RCNP には、測定目的ごとに多様なビームラインが備えられており、初年度は、そのうちの WS コースで測定を行った。このコースは荷電粒子の高分解能測定には適しているが、中性子測定には特化していないコースであり、バックグラウンドが多すぎて意味のあるデータを取得できなかったのだ。RCNP には N0 コースと呼ばれる中性子測定用のコースがあったにもかかわらず WS コースで実験をしてしまったのは、ひとえに教員である筆者の不明の致すところであった。筆者は20年来、RCNP で原子核反応を測定してきた。しかし、その大半を WS コースで実施しており、N0 コースで測定を行った経験に乏しかっ

たのである。N0 コースでの実験についてきちんと事前に調査をして準備をすればよいだけのことであったが、希望的な観測のもとに、わずかな手間を惜しんで安易な測定を行ってしまった。日々、学生に、「測定成功のためには小さな努力こそ惜しむべきではない」と説いている言葉が己に跳ね返ってきたことに恥じ入るばかりであった。

1年目の学生たち(写真1a)は不本意な実験結果に終わりながらも、その経験を卒業論文にまとめて巣立っていき、2年目には新たな学生たち(写真1b)がP4にやってきた。学生たちは、前期に放射線計測技術の基礎を習得しながら、自分たちの研究テーマについて議論し、前年度の測定に再チャレンジすることを決断してくれた。

2年目には実験コースをN0コースに切り替え、事前に学生たちとともにビームラインの使用方法について訓練をした。また、バックグラウンドを低減するために、He ガス標的の再設計を行った。He ガスは真鍮製の標的容器に1気圧の圧力で封入し、ビームラインの真空を維持するために、ビームと放出中性子が通過する出入口を薄膜で封止する。薄膜にはいくつかの材質をテストし、バックグラウンド低減とガス封止性の観点から最適であったアラミド(芳香族ポリアミド)を採用した。アラミドの膜厚も最適化を行い、1気圧の圧力差を安全に封止できる限界として6 μ m 厚を選択した。

N0 コースでの実験セットアップを図2に示す。加速器から入射した ^4He ビームを He ガス標的に照射し、放出された中性子はコリメータと呼ばれる厚さ1m ほどのコンクリート壁の穴を通過して13m 下流に設置した中性子検出器(液体シンチレータ)で検出される。このとき、13m の距離を中

中性子が飛行するのに要する時間から中性子のエネルギーを決定する。反応を起こさなかった ^4He ビームはビームダンプに廃棄する。こうしてビームダンプと検出器をコンクリート壁で仕切ることによって、バックグラウンドを大幅に低減することができた。

このとき得られた中性子のエネルギースペクトルを図3(a)に示す。 ^7Be の基底状態と第一励起状態に由来する二つのピークが、ついに連続的なバックグラウンドの上に観測された。連続的なバックグラウンドは標的のガス封止膜に由来するもので、 He ガスを封入しない状態で測定したスペクトル(赤色)を除算することで図3(b)に示すよう

なバックグラウンドのないスペクトルを得ることに成功した。

宇宙リチウム問題の観点からは、順反応である $n + ^7\text{Be} \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$ 反応の反応率が重要である。順反応と逆反応の反応率は、詳細釣り合いの原理を用いて換算した。その結果、決定された $n + ^7\text{Be} \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$ 反応の反応率は、ビッグバン元素合成の理論計算に広く使われてきた理論計算による予測値⁴⁾に比べて、約10倍も小さいことが明らかになった。すなわち、 $n + ^7\text{Be} \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$ 反応による ^7Be 転換の寄与は小さく、残念ながら宇宙リチウム問題を解決するものではなかったのである。

2年目の測定は成功裏に終わったものの、宇宙リチウム問題を解決することはできず、麻雀でいうところの「安目」を引いてしまった。しかし、これはこれで学術的には非常に重要な結果であると学生たちを励まし、2年目の卒業論文が完成した。

アメリカ物理学会誌の *Letters* に掲載！

続く3年目の学生たちには、前期の放射線計測実習のなかで、実験に使用した液体シンチレータによる中性子の検出効率を測定してもらった。2年目の実験時にはシミュレーション計算によって検出効率を評価していたが、学術論文として公表するためには実測による確認が必要であった。実際に、既知の強度とエネルギーをもつ中性子線を液体シンチレータに照射して検出効率を評価し、シミュレーション計算が5%以内の精度で正しいことを確認した。

かくて、3年間の取り組みは結実し、その成果はアメリカ物理学会の学術誌 *Physical Review Letters* に掲載された。

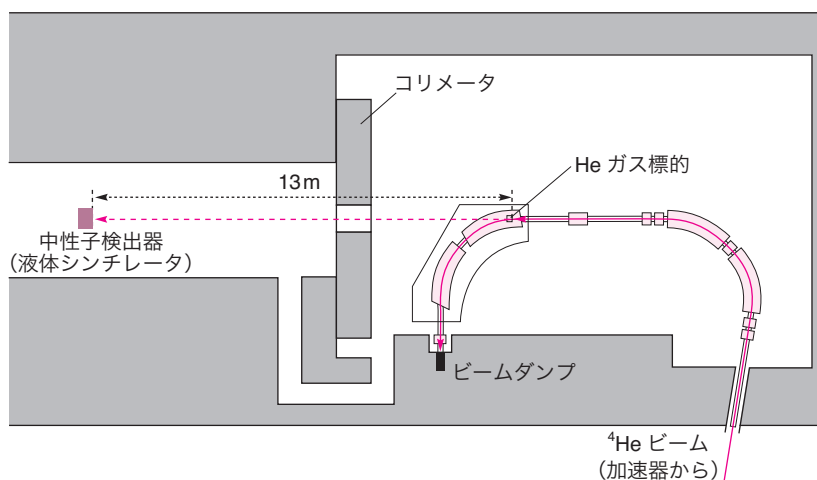


図2 大阪大学核物理研究センター (RCNP) N0 コースにおける実験セットアップ

筆者は学部学生時代、当時、京都大学理学部化学教室の教授であった梶本興亜先生の分子動力学の講義を聴講させていただいた。その講義のなかで、梶本先生はご自身の研究について

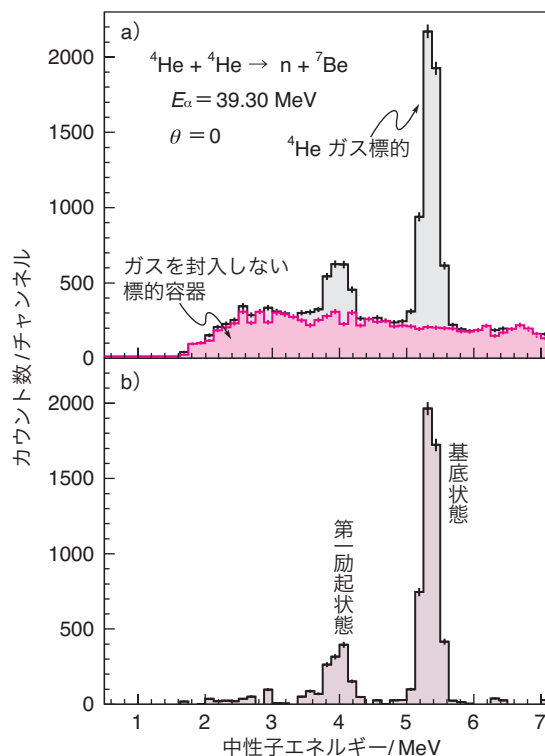


図3 $^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow n + ^7\text{Be}$ 反応により放出された中性子のエネルギースペクトル

a) 灰色と赤色のスペクトルは、それぞれ ^4He ガス標的とガスを封入しない標的容器を用いた測定結果。b) ^4He ガス標的のスペクトルからガスを封入しない標的容器のスペクトルを除算してバックグラウンドを除去した中性子のエネルギースペクトル。

て話が及んだときに、「letter というのは、成果の予約みたいなもので、なにか面白そうな結果がでたら、とりあえず letter を書いて投稿するのだよ。その結果が本当に正しいとわかったら、その後に別の article を書くのだ」とおっしゃっていたのを覚えている。しかし、物理分野では位置づけが異なり、letter とは他分野の研究者の関心をも引くような重要な成果を公表する場と位置づけられている。査読も regular article より letter のほうが数段厳しく行われる。今回、学生たちの成果が、その厳しい査読を通過して学術誌に掲載されたことを、指導教員としてたいへん誇らしく思う。



実は、この研究にはヨーロッパとアメリカにライバルとなる研究チームがいた。彼らは、文字どおり桁違いの資金と人的資源を投入して、不安定 ^7Be 標的を用いた測定に取り組んでいた。ヨーロッパのグループには成果の公表で 4 か月ほど先んじられたものの、彼らのデータ⁵⁾は、宇宙リチウム問題と $n + ^7\text{Be} \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$ 反応にかかる論争に結論を導けるものではなく、筆者らのデータこそが論争に終止符を打っ

たのだと自負している。学部学生たちを率いて世界に伍して戦い、成果をあげたことは、大学教員として、そして研究者として望外の喜びである。この成果は大学にも認められ、課題研究 P4 の学生たちは平成 28 年度の京都大学総長賞を受賞した。

謝辞：本稿で紹介した研究を行うにあたっては、実験を提案し測定にも参加していただいた久保野 茂氏（理化学研究所客員主管研究員）をはじめ、学生たちへの理論指導にあたっていただいた延與佳子氏（京都大学准教授）、さまざまな助言やサポートをいただいた岩佐直仁氏（東北大学准教授）、西村俊二氏（理化学研究所先任研究員）、若狭智嗣氏（九州大学准教授）、学生の指導を助けてくれた大学院生諸君など、多くの方々にご尽力いただいた。また、共同利用・共同研究拠点である大阪大学核物理研究センターからは、大学の枠を超えた教育用ビームタイムの提供を受けた。この場を借りて感謝を申し上げたい。

参考文献

- 1) T. Kawabata et al., *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 052701 (2017).
- 2) R. J. Cooke, M. Pettini, R. A. Jorgenson, M. T. Murphy, C. C. Steidel, *Astrophys. J.*, **781**, 31 (2014).
- 3) 京都大学理学部 課題研究 P4「原子核とハドロンの物理」[<http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakusei/p4/>] (アクセス日：2017 年 6 月 2 日).
- 4) R. V. Wagoner, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **18**, 247 (1969).
- 5) M. Barbagallo et al., *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 152701 (2016).