

## 原子核の研究の新展開

### - レーザーを利用してスピンの向きを制御する -



研究ノート

下田 正\*

A novel method in nuclear physics by means of lasers

Key Words : unstable nuclei, exotic structure, polarized radioactive beams, laser optical pumping

#### 1. 原子核とは

私たちの身のまわりの物質や生物を構成している原子の中心に位置する原子核は、原子の1万分の1の大きさしか持たないが、原子核が放出するエネルギーは、原子同士をつなぎ止めている電磁気エネルギーの百万倍も大きい。原子核がそのような小さな実体であることがアーネスト・ラザフォードによって発見されたのは、今から100年足らず前のことである(1911年)。ミクロな世界を記述する運動法則である量子力学が確立して(1927年)間もなく、原子核内に中性子が存在することがラザフォードの弟子のジェームズ・チャドウィックによって発見され(1932年)、原子核は陽子と中性子(2つをまとめて核子と呼ぶ、これらは素粒子ではなく、それぞれ3つのクォークからなる複合粒子系)というスピン1/2のフェルミオンが、核力という非常に強くて複雑な様相を持った力のもとで運動する量子多体系であるという、原子核の基本概念が確立した。そのわずか13年後に誘導核分裂反応を利用した核爆弾が広島と長崎に投下されたことを思うと、全てに優先する軍事という目的の牽引力の大きさに驚かされる。

自然界には264種ある安定な原子核ばかりが存在している訳ではなく、有限の寿命を持って別種の原子核に転換する様々な不安定な原子核(ラジオアイ

ソトープ)も数多く存在する。例えば、ウラン<sup>238</sup>は太陽系の元素が生成された際のものでその長い寿命のゆえにまだ残存しているものであり、ラジウム<sup>226</sup>はウラン<sup>238</sup>が崩壊して生成される5世代先の不安定な原子核である。人類は、1930年頃から次々と発明された粒子加速器を用いて核反応を起こし、寿命の短い不安定な原子核をも生成し、核反応の際に放出される粒子や放射線を測定し、安定核およびそれと中性子数があまり違わない不安定核の核構造や、その内部で働く核力の性質を解明していった。原子核の構造が明らかになるにつれ、核反応を詳細に議論することが出来るようになった。太陽の中で水素がどのように核融合反応を起こしてヘリウムに変わるのかを定量的に説明したハンス・ベーテの熱核融合反応論(1938年)の成功は、ビッグバン後の宇宙で元素がどのように作られたかを解明する天体核物理学へと発展した。

第二次世界大戦後、世界各地に粒子加速器や研究用の原子炉が建設され、原子核の構造や核反応機構の研究が本格化した。系統的な研究は、原子のような力の中心を持たない原子核にも「魔法数」があることを明らかにした(1949年)。これは、核子は他の核子から強い引力を受けながら、核子同士が近づくパウリ原理による強い斥力を感じるというフェルミオン特有の多体効果によって、核子同士はつかず離れずの距離を保ち、自分以外の核子が作る平均的な力の場の中であたかも独立に運動しているかのような描像が良い近似で成り立つからである。また、2つの核子のあいだに働く、スピンとアイソスピンをゼロに組ませるような対相関相互作用が核構造に重要な役割を演じていることも明らかになってきた。

図1は、一体どれだけの種類の原子核が存在するかを示した「原子核の地図(核図表)」である。横軸に中性子の数、縦軸に陽子の数を取り、一つ一つ



\*Tadashi SHIMODA

1952年5月生  
京都大学・大学院理学研究科(1980年)  
現在・大阪大学大学院 理学研究科  
教授 理学博士 原子核物理学  
TEL : 06-6850-5744  
FAX : 06-6850-5764  
E-mail : shimoda@phys.sci.osaka-u.ac.jp

の原子核をこの平面上の小さな四角で表している。斜めに連なる濃い四角が安定な原子核である。縦横の実線は魔法数を表す。この線上の原子核は、そのまわりの核に比べてより安定性を示す。濃い四角を取り囲む薄い色のものがこれまでに発見された不安定核で、約3000種にのぼる。こういった不安定核は、安定な原子核に核子をくっつけたりはぎ取ったり、あるいは重い原子核をバラバラに壊して生成する。濃い四角の領域からより遠い不安定核を生成しようとすれば、こういう操作がより難しくなるのは容易に想像出来よう。1970年代以降に発達した高エネルギー・大強度の重イオン加速器や陽子加速器、および生成核を分離・測定する技術の進展は、安定核からより離れた原子核の生成を可能にし、その核構造が調べられてきた。不安定な原子核にこれ以上陽子や中性子をくっつけようとしても、もはや結合状態を作れない(こぼれてしまう)という限界(図1にあるギザギザの実線で、「ドリップライン」と呼ばれる)まで数え上げると、存在が可能な原子核は6000種あるいは7000種に達すると予測されている。存在すら確認されていない不安定核はまだ多数残っていることがわかる。

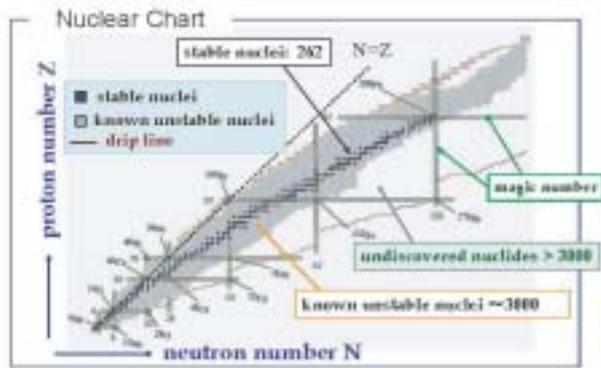


図1 核図表：横軸に中性子数、縦軸に陽子数をとって、どのような原子核が存在するかを示したものの。

## 2. 不安定な原子核の奇妙な構造

1990年頃から、不安定核を二次ビームとして供給できる「不安定核ビーム施設」が本格稼働し、不安定核が入射する核反応の研究や、安定領域からますます遠い不安定核の構造の研究が可能となってきた。その結果、中性子の数が安定核のそれと極端に異なる不安定核において、これまでに得てきた原子核に関する知識では容易には理解できない、奇妙な

構造が発見され始めた。図2は軽い中性子過剰核において発見された新奇な構造を模式的に示したものである。たとえば、中性子ドリップラインの近くの核における、中性子の波動関数が空間的に大きく広がった「中性子ハロー」構造があげられる。また、中性子の数を魔法数である8あるいは20に保ったまま陽子の数を減らして行くと、魔法数の特徴が消えてなくなってしまうという現象が発見された。代わりに中性子数16の中性子過剰核が魔法数の核にふさわしい性質を持っているように見える。陽子の数と中性子の数が大きくずれた $^{16}\text{C}$ では、陽子・中性子間の相関が弱くなって独立に運動しているように見える励起状態が発見された。言わば陽子は卵の黄身のように固まり、それを白身のように分布した中性子が取り囲んで、独立に運動しているようなイメージである。また、中性子の数が多いベリリウム isotopes では、2つの粒子を中性子が取り巻いている「クラスター構造」が発見されている。どうしてこういった構造があらわれるのかを理解することは、陽子の数と中性子の数が極端に非対称な核子多体系における核力に関する知見を得るとともに、有限量子多体系を記述する手法の妥当性を検討するうえで、大変挑戦的な課題である。さらに、こういった安定領域から極端に遠い不安定核が、ある種の高温・高密度の星の内部や超新星爆発における元素合成過程に重要な役割を果たしているのではないかとされており、それらの核の構造や性質を解明することは、原子核物理学のみならず宇宙物理学からも求められている緊急の課題である。

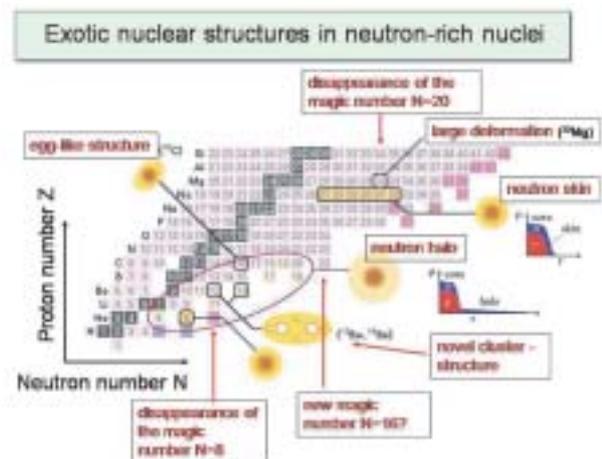


図2 軽い原子核の領域の核図表。最近発見された新奇な核構造を模式的に示す。(理化学研究所のホームページにある素材を使って作成)

3. 特定の方向にスピンの向いた原子核が放つ

ベータ崩壊から探る不安定核の構造

私たちのグループでは、不安定核の構造を研究するために、核内で核子がどのように運動しているのかに敏感な物理量を高感度・高精度で測定している。本稿では、レーザーを用いて不安定核のスピンの向きを偏らせて（偏極させて）、その崩壊を観測するという、独自の研究手法を紹介する。

多体系である原子核には様々な励起状態が存在し、どのエネルギーにどのようなスピンとパリティを持った固有状態が現れるかは、核子がどのように相互作用しどのように運動しているのかを理解するうえで欠かすことの出来ない物理量である。しかし、安定領域から遠く離れた核では、基底状態のスピンやパリティすらわかっていなかったり、励起状態が全く未知であったりすることが少なくない。

私たちは、不安定核の崩壊を利用して娘核の準位を生成し、個々の準位の励起エネルギー、スピン、パリティ、崩壊経路を測定している。図3は中性子過剰な不安定核  ${}^AZ$  ( $A$ は質量数、 $Z$ は原子番号)が崩壊を起こす状況を模式的に表している。縦方向にエネルギーを取り、核の状態を水平線で表している。崩壊によって一つ原子番号の大きい原子核  ${}^{A(Z+1)}$  (娘核: daughter nucleus という粹な名で呼ばれている、元の核  ${}^AZ$  は親核: parent nucleus と呼ばれる) の状態が生成される。安定領域から離れた核では、親核と娘核の質量差が大きい為、生成される娘核の準位は広い励起エネルギー範囲にわたっている。多くの場合、それらの準位は中性子放出のしきい値エネルギーよりも上に位置し、さらに中性子を放出して原子核  ${}^{A-1(Z+1)}$  (孫核と呼ぶ) の状態が生成される。中性子しきい値よりも低い準位や孫核の励起準位は  $\gamma$ 線を放出してそれぞれの基底状態に至る。このような中性子や  $\gamma$ 線の離散的なエネルギーを測定し、同時計測の関係から崩壊経路を特定すれば、娘核の準位の励起エネルギーを求めることが出来る。これが  $\beta$ -delayed decay spectroscopy と呼ばれる方法である。私たちは、これに加えて親核のスピンを偏極させるという独自の手法をとる。そうすれば娘核の準位のスピンとパリティを求めることが出来る。崩壊の原因となっている弱い相互作用(核力のひとつ)においてパリティが保存されないという事実を利用するのである。

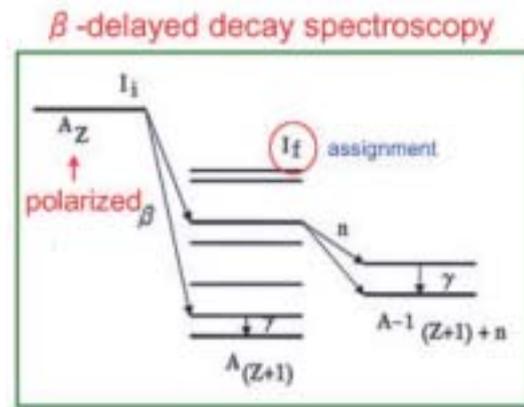


図3 中性子過剰核の崩壊の様子。

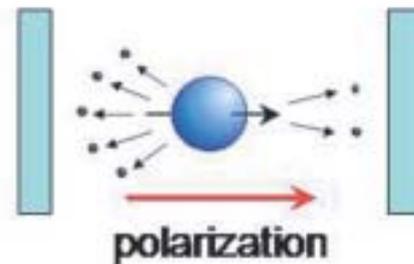


図4 スピンの向きに対して  $\gamma$ 線は非等方的に放出される。 $\gamma$ 線を左右に置いた検出器で測定して計数のアンバランスさを求める。

1957年、まだ20歳代の中国人理論物理学者、T.D. Lee と C.N. Yang は、弱い相互作用においてはパリティが保存していないかも知れないと考え、コロンビア大学の中国人女性実験物理学者 C.S. Wu に、そのことを検出するための最適な実験を提案した。極低温環境下での断熱消磁法を用いてスピンの向きが特定の方向に揃えられた  ${}^{60}\text{Co}$  が、スピンの向きとは逆の方向に多くの  $\gamma$ 線を放出することが観測され、パリティ保存が100%破れていることが確認された。

私たちも、不安定核のスピンの方向に放出される  $\gamma$ 線と逆向きに放出される  $\gamma$ 線の数を数える(図4参照)。もちろん、 $\gamma$ 線と同時に娘核や孫核が放出する中性子や  $\gamma$ 線を測定し、娘核のどの状態へ崩壊したかをイベント毎に同定する。 $\gamma$ 線の数の非対称度は崩壊に固有な非対称パラメーター  $A$  と呼ばれる物理量に依存するが、 $A$  は始状態と終状態のスピン値によって大きく異なる。例として、 ${}^{11}\text{Li}$  (半減期 8.5 ms、最も多くの中性子を含む Li のアイソトープ、安定アイソトープは  ${}^6\text{Li}$  と  ${}^7\text{Li}$ ) が  ${}^{11}\text{Be}$  に崩壊する場合を考えよう。 ${}^{11}\text{Li}$  の基底状態のスピン

ン・パリティは $3/2^-$ であることが知られている。遷移確率の大きな許容転移に話を限るなら、娘核 $^{11}\text{Be}$ の励起状態のうち崩壊で生成されるのは $1/2^-$ か $3/2^-$ か $5/2^-$ のどれかのスピン・パリティを持った状態のみである。それぞれのスピン・パリティに対応する非対称度パラメーター $A$ は、 $-1$ か $-0.4$ か $+0.6$ である。こんなに $A$ が飛び離れていることがポイントである。左右の検出器で観測された線の数の違いから $A$ は容易に求められるが、 $A$ にある程度の誤差があっても娘核の状態のスピン・パリティが不定性なく求められるのである。

不安定核のスピン向きを揃えるのには様々な方法があるが、私たちは非常に大きな偏極度が得られるレーザー光ポンピング法を用いている。再び $^{11}\text{Li}$ を例にとろう。図5は $^{11}\text{Li}$ 中性原子の準位(原子核ではない)を示している。縦方向にエネルギー、横方向に原子全体のスピン $F(=I+J)$ の $z$ 成分( $M_F$ )をとっている。アルカリ元素であるリチウムでは電子の閉殻の外に電子が一つあるだけなので比較的単純な準位構造である。基底状態 $^2S_{1/2}$ と励起状態 $^2P_{1/2}$ ともに、電子と原子核との電磁相互作用(超微細構造相互作用)によって2つに分裂している。ここで例として、2つのうちの一つ、 $F=2$ の状態にある原子を考えよう。この原子に円偏光したレーザー光(波長は $^2S_{1/2}$ と $^2P_{1/2}$ の間のエネルギー差に等しい)を吸収させ、角運動量変化が $+1$ の励起を起こさせる(右斜め上方向の矢印)。始めは原子はスピン偏極していないのであるから、基底状態の全ての $M_F$ の状態が均等に占有されている。そのうち一番右にある準位( $M_F=+2$ )は、円偏光レーザーを吸収できないことに注意されたい。右斜め上に励起状態が存在しないからである。その他の基底準位は光を吸収して $^2P_{1/2}$ の励起準位に遷移するが、それらはただちに光を放出して基底状態に脱励起する。その際、角運動量の $z$ 成分の変化が $-1$ 、 $0$ 、 $+1$ という全て遷移(下向きの矢印)が可能である。ひとつの原子に何度もレーザー光を吸収させて、この過程を繰り返すと、基底状態のうち一番右にある準位の占有率が高くなる。先に述べたように、一旦この準位に至った原子はもはや光を吸収出来ず、別の準位に戻れないからである(スピン緩和はないという条件下でなければならないが)。この準位の占有率が100%とすると、全ての原子のスピンが $z$ 軸

方向を向いている、すなわち原子集団はスピン偏極する。しかもこの $M_F=+2$ の状態では原子スピンと原子核スピンが同じ方向を向いているのであるから、核スピンも偏極している。これが通常のレーザー光ポンピング法である。

しかし、これでは大きな偏極度は達成できない。超微細構造相互作用によって分裂した基底状態のもう一方(上の例では $F=1$ の状態)に始めからあったり、ポンピングの過程で $F=1$ の状態遷移してきた状態は放っておかれるからである。そこで、私たちは超微細構造のエネルギー差を持った2つのレーザービームを同時に照射し、両方の基底状態( $F=1$ および $F=2$ )に対してポンピングを行うという独自の方法をとる。 $^{11}\text{Li}$ の場合には905 MHzだけ波長の違う光を使う(図5参照)。

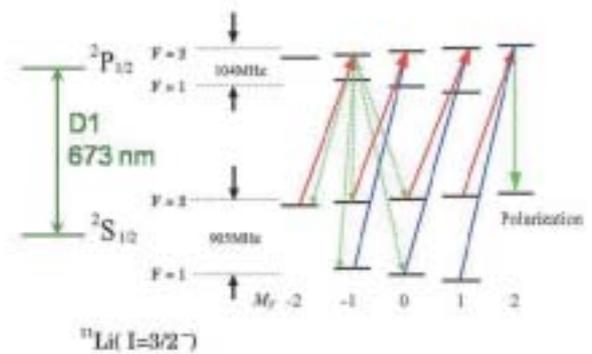


図5  $^{11}\text{Li}$ 中性原子の準位と光ポンピング法の模式図

私たちは、不安定核のスピン偏極を利用するというこの種の実験を、バンクーバーにあるカナダ国立素粒子原子核研究所 TRIUMF において行っている。TRIUMF では500 MeV、100  $\mu\text{A}$ の陽子ビームを用いて不安定核を生成し、それを加速したビームとして供給出来る不安定核ビーム施設が2000年に稼働を開始した。上記の光ポンピング法に基づく偏極生成装置が完成間近だった同年末に、私たちは詳細がほとんどわかっていなかった $^{11}\text{Be}$ (中性子ハロー核の一つ)の励起準位を調べる実験(スピン偏極した $^{11}\text{Li}$ ビームを用いる)を提案し、最優先の実験課題として評価委員会の承認を受けた。こうして2001年1月から、大阪大学、高エネルギー加速器研究機構、TRIUMFの3つのグループからなる国際共同研究がスタートした。

図6は不安定核ビームの核偏極を作り出す装置を

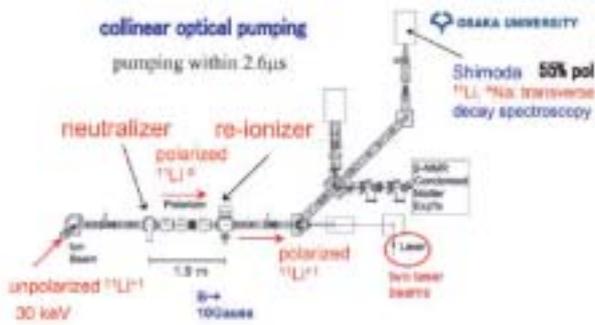


図6 TRIUMFにおける不安定核偏極装置と OSAKA beam-line

示す[1]。左斜め下からやって来た  $^{11}\text{Li}$  の 1 価イオンビーム (30 keV) がナトリウムの蒸気ジェットが循環している neutralizer に入射し、ナトリウム原子との衝突によって電子を 1 つ受け渡され、 $^{11}\text{Li}$  の中性原子ビームが生成される (中性化効率 70%)。このビームに右手から円偏光レーザーが衝突する。飛行距離 1.9 m、飛行時間 2.6  $\mu\text{s}$  のあいだに光の吸収と放出を 10 数回程度繰り返し、原子および原子核の偏極が生成される。中性ビームは高速で飛行しておりドップラー効果が甚大である。したがって、レーザー光の波長は正確にチューニングされなければならない。これには neutralizer 全体に印加された電圧を調整して  $^{11}\text{Li}$  のイオンビームの速度を減速調整することで達成される。偏極が生成された中性ビームは図 6 の右手に進み、低温ヘリウムガス (20 K) と衝突して電子をはぎ取られ、再びイオンビームとなる (イオン化効率 70%)。次に、ビームは静電場を使って 2 回 45 度曲げられて、右上方の OSAKA beam-line へと導かれる。その終端に私たちの測定装置が置かれている。

図 7 は測定装置の概念を示す。スピン偏極した  $^{11}\text{Li}$  ビームは真空パイプの中を左手からやって来て、図の中央の Pt stopper foil までビームが導かれ、Pt フォイル中でビームは停止する。偏極の向きはビームの進行方向に垂直である。フォイルには偏極の向きに静磁場がかけられており、スピンはその周りに歳差運動をしながら偏極度が保たれる。 $^{11}\text{Li}$  はやがて Pt フォイル中で崩壊して娘核  $^{11}\text{Be}$  のたくさんの励起状態が生成され、それらは中性子を放出して孫核  $^{10}\text{Be}$  の励起状態が生成される。それらは  $\beta$  線を放出して  $^{10}\text{Be}$  の基底状態に至る。これら  $\beta$  線、中性子線、 $\gamma$  線は薄いステンレス窓を通して大気中

に飛び出し、それぞれに特化した検出器によって同時に計測される。偏極の方向および逆方向の線の数の差が水平方向に置いた 2 つの線検出器 (beta-ray telescope) によって測定されるが、2 つの検出器の検出効率が全く等しいということはありません。

崩壊の非対称度を正確に求めることは難しい。そこで、スピンの向きを 180 度反転させた場合の計数と比較することによって、検出効率の影響を取り除く。スピン反転はレーザーの円偏光度を反転させれば実現される。これにはレーザービームに半波長板を挿入すれば良い。スピン反転は 30 秒毎に行われている。線と同時に、娘核  $^{11}\text{Be}$  から放出される中性子を湾曲したプラスチックシンチレーターで、孫核  $^{10}\text{Be}$  から放出される線を Pt フォイルの上下に置いたゲルマニウム検出器で測定する。中性子のエネルギーは、検出器に到達するまでの飛行時間から求める。飛行距離が一定になるよう、検出器は湾曲している (曲率半径 1.5 m)。

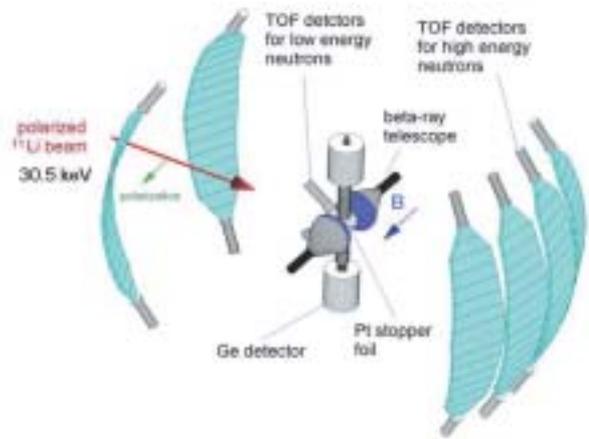


図7  $^{11}\text{Li}$  の崩壊に伴って放出される  $\beta$  線、中性子、 $\gamma$  線を測定するための装置の概念図。

実験結果をお見せする前に、この実験で調べようとする  $^{11}\text{Be}$  に関するデータの状況を簡単に紹介しよう。 $^{11}\text{Be}$  では中性子の数が魔法数 8 より一つ少ない 7 なので、前述の独立粒子描像に基づく shell model が良く成り立つはずなのに、基底状態と第一励起状態のスピン・パリティが、それぞれ  $1/2^-$  と  $1/2^+$  であるとの予測に反して、 $1/2^+$  と  $1/2^-$  と逆転していることが注目を集めてきた。 $1p_{1/2}$  軌道を占めているはずの中性子が、通常はそれより高いエネルギーを持っているはずの  $2s_{1/2}$  にいるとしか

考えられない。陽子の数に比べて中性子の数がこんなに多くなると、中性子数8は魔法数ではなくなるのではないと言われてきた。1960年代から議論されてきた重要な原子核であるにもかかわらず、実は $^{11}\text{Be}$ の励起状態のスピンのパリティはほとんどわかっていなかった。またそれらがどのように崩壊するのかという情報は少ししかわかっていなかった。これでは核構造や核力の議論が難しい。

図8はこの実験で測定された $^{11}\text{Be}$ の励起状態とその崩壊経路・崩壊強度を示す[2]。大変細かくて恐縮であるが、私たちの実験によってこんなに詳細が明らかにされたという印象を持って頂ければ幸いである。新たに確定された $^{11}\text{Be}$ の個々の状態のスピンのパリティと、それぞれが $^{10}\text{Be}$ どのような状態にどれだけの確率で遷移するのか、また $^{11}\text{Li}$ の崩壊によって $^{11}\text{Be}$ のどの状態がどれだけの強度で生成されるのかといった情報を様々な核構造モデルに基づく理論計算と比較すると、 $^{11}\text{Be}$ の状態がどのような構造を持っているかが見えてきた。それによると、この実験で観測された $^{11}\text{Be}$ の状態は大別して次の3種類のクラスター構造(原子核内に陽子2個と中性子2個が固まった単位[ $\alpha$ 粒子あるいはヘリウム4の原子核]が存在する)が現れていることがわかった。一つ目の構造では、2つの粒子が比較的近づいて存在し、その周りを3個の中性子が取り巻くように運動し、 $\alpha$ 粒子同士をつなぎ止めているように見える。二つ目の種類の構造では、2つの粒子のあいだの距離はもっと大きくて、原子核全体はもっと細長くなっている。三番目の構造では、 $\alpha$ 粒子は一つしか存在せず、その周りを2個の陽子と5個の中性子が取り巻いている。

TRIUMFにおける不安定核ビーム施設は、世紀の変わり目に完成した最新のものとして世界の注目を集めてきたが、新しい実験手法を用いて長年の懸案であった原子核の構造を明らかにしたこの実験は、TRIUMF稼働直後の実験として高い評価を受けた。しかし、ここまでの道のりは平坦ではなかった。私

たちは偏極ビーム生成装置(図6)の立ち上げを共に担当したが、当初のつもりと反して、テストを行った $^8\text{Li}$ の偏極度は20%しか達成出来なかった。検討の結果、その原因が不安定核ビームのエネルギーが予想外に大きく広がっていることにあることを突き止めた。そこでレーザー光の波長に変調をかける素子(Electro-Optic Modulator)を3段重ねに用いてレーザーの波長幅を広げ、偏極度を70%にまで高めることに成功した。もちろん、この値は世界最高である。

2006年からは中性子の数が非常に多いMgのアイソトープの核構造を探る実験を行っている。今度は偏極したNaのアイソトープビームを用い、検出器はMgから放出される $\gamma$ 線を測定するものとなる。図9は2007年11月末に行った実験終了時、

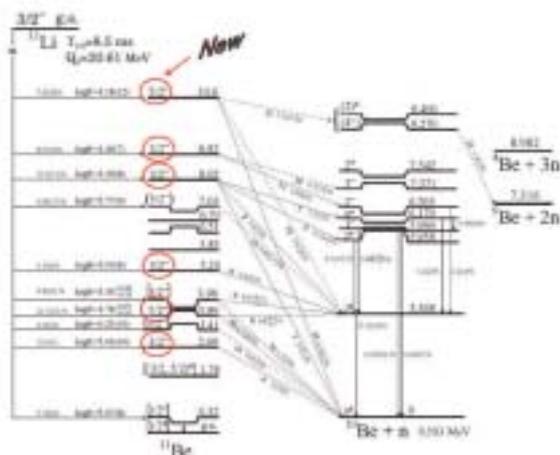


図8 私たちの実験で明らかにされた $^{11}\text{Li}$ の崩壊、 $^{11}\text{Be}$ の励起状態およびそれらの崩壊経路[2]。この実験で $^{11}\text{Be}$ の励起状態のうち6つの状態のスピンのパリティが明らかにされた。



図9 2007年11月、カナダのTRIUMFにおける実験メンバーの集合写真。

実験装置を背景に撮った集合写真である。不安定核ビームは左手からやって来る。円筒状で角のように配置されたものが線検出器で、全部で9台ある。ここには11名が写っているが、これ以外に、実験装置の組み立てと調整を行った後に帰国し支援要員を務めた3名がいるので、総勢14名の研究チームである。

#### 4. おわりに

図9には理学研究科修士課程1年生が2名、理学部4年生が3名写っている。このような若者達が海を越えてやって来て、現場で生き生きと働いていることにTRIUMFの人々は大変な関心を示した。所長を始め、加速器オペレーターや毎日掃除に来てくれる人々といった多様な人々が、彼らと様々な形の交流を行った。学生達は、自分達の実験のために様々な部署にいる人々が24時間働いてくれていること、実験がうまくいっているかどうかを常に気にして声をかけてくれることに感激をしていた。国際共同研究にはお金と手間が非常にかかるが、物理の成果を得るという目的だけでなく、このような日々の交流が人材育成にも大いに役立っていることを実感した。

以上説明してきたように、レーザーのおかげで原子核の量子状態を制御することが出来るようになってきた。私たちは、不安定核の基底状態のスピンや電磁気モーメントを測定する、新しい方法の開発にも挑戦している。超流動ヘリウムに打ち込まれた不

安定核原子に対してレーザー光ポンピングを行い、マイクロ波(またはラジオ波)を照射し、二重共鳴レーザー分光法と呼ばれる方法によって超微細構造分裂幅(またはゼーマン分裂幅)を測定し、核モーメント(または核スピン)を求めるというものである。液体ヘリウムの特異な性質を利用することによって、真空中に比べて桁はずれに高感度な測定が可能であるというのがポイントである。安定核を用いた実証実験が極めて成功裡に終了し[3]、不安定核に対する本実験を来年度理化学研究所にて行うべく準備中である。

このような新しい実験手法を、「原子核の父」と呼ばれた、かのラザフォードは何と評するだろうか。弟子のロシア人物理学者カピッツアが「決して後ずさりしない生物」という意味で「クロコダイル」(ロシア語で「偉大なる父」という意味も持つ)とあだ名をつけたラザフォードを見習って、私は決して後ずさりしない気概を持って日々教育と研究に励んでいる。

#### 参考文献

- [1] C. D. P. Levy *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **B204** (2003) 689.
- [2] Y. Hirayama *et al.*, Physics Letters, **B611** (2005) 239.
- [3] T. Furukawa *et al.*, Physical Review Letters, **96** (2006) 095301.

