

研究室だより (I)

新たな原子核研究領域の開拓を目指す

理化学研究所仁科加速器研究センター

重イオン核物理研究室

本林 透

motobaya@riken.jp

1. はじめに

約 7000 種類とも 10,000 種類とも言われる原子核¹の大半は不安定である。安定な原子核は、わずか 270 種程度であるが、それらを出発点に、 α 、 β 崩壊、または核分裂を起こす不安定な原子核が作られ、現在では約 3,000 種の同位体が知られている (図 1)。近年、不安定な原子核をビームとして利用する技術が進展し、原子核の研究は新しい段階に入ったと言える。理化学研究所 (理研) は、1990 年ころより、入射核破砕と呼ばれる方法

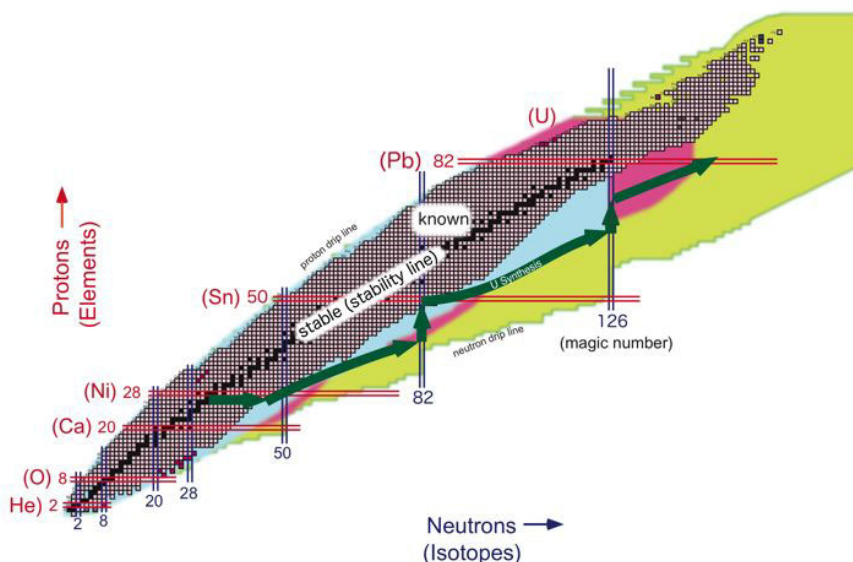


図 1 核図表。濃い部分が実験的に知られている核である。

¹ β 崩壊を起こす原子核の領域で勘定すると約 7,000 種と予想されているが、マイクロ秒程度以上の寿命を持つ自発性核分裂核まで含めると、10,000 種類程度となる。

によって世界有数の高性能不安定核ビーム（RI ビーム²）を供給している。

理研ではさらに、RI ビーム生成の能力を格段に向上させた RI ビームファクトリー（RIBF）を建設中である。その稼動を間近に控え、今年の 4 月に仁科加速器センターを設立し、加速器を用いた研究を押し進めようとしている。我々の重イオン核物理研究室は、センターの原子核研究部門にある 6 研究室の一角を占め、不安定な原子核の挙動や、宇宙での不安定原子核の役割を明らかにする研究を行っている。現在、PD 以上の研究者 20 名あまりが所属し、日常的に活動する大学院生とともに活動している。ほとんどの実験は国内・国外の研究グループとの協力で行われ、理論・実験研究者間の議論も活発に行われている。以下、いくつかの例を挙げて研究活動を紹介する。

2. 新しい方法による不安定原子核の構造研究

2.1 RI ビームによる核分光

原子や分子と同様に、分光学的方法は原子核を研究する有力な手段である。ビームを標的核に照射しつつ励起された原子核からの γ 線を測定する方法（インビーム核分光法）は、森永晴彦氏等により始められ、成果をあげてきた。一方、高速粒子による非弾性散乱や粒子移行反応によって原子核を励起し、その強度から核構造を調べる、直接反応分光と呼ばれる方法も有力で、両者により原子核構造の研究は飛躍的に進展した。

RI ビームの出現は、短寿命の不安定原子核を研究の対象とすることができるという点で画期的であるが、従来のインビーム分光や直接反応分光の実験法をそのまま適用するわけにはいかない。第一に、RI ビームは、安定な粒子によるビームに比べて格段に弱い。従って、高い実験効率が求められ、例えば、厚い標的を使わざるを得ない状況が生じる。また、いわゆる逆運動学の問題がある。安定な原子核を標的とする実験では、調べたい原子核はほとんど静止しているのに対し、RI ビームによる実験では、調べようとする原子核のほうがビームであり、標的との反応後も高速で飛行している。

このような状況では、励起された原子核からの γ 線はドップラー効果により本来とは異なったエネルギーで観測される。特に理研で採用している入射核破碎の方法では、RI ビームの速度が光速の約 $1/3$ と大きく、この効果は非常に深刻となる。また、通常の直接反応分光では、散乱粒子のエネルギーを測定することにより励起状態を同定するが、逆運動学では良いエネルギー分解能を得ることが難しく、工夫が必要である。問題を解決する一つの方法は、ドップラー効果を補正できる高効率の検出器を建設し、高速ビームの条件で断面積の大きな直接反応と組み合わせることである。筆者等によって世界に先駆けてこの方法を用いて行われた研究である ^{32}Mg 核のクーロン励起を例に説明する。

2.2 不安定核のクーロン励起

^{32}Mg は、中性子数 N が魔法数 20 を持つのに対し、陽子数 Z が 12 と、非常に中性子が

² 不安定な原子核は放射性を持つことから、放射性同位体（RI）ビームとも呼ばれる。

過剰な原子核である。第一励起状態が周辺の $N=20$ 核に比べて非常に低いことは、既に 1970 年代から知られていた。また、 $N=20, 21$ のナトリウム同位体 $^{31,32}\text{Na}$ の質量測定からも、中性子が過剰な領域では中性子数 $N=20$ の魔法数に異常が生じているらしいことが推定された。その後理論的研究は行われたが、実験的な情報が増えることはほとんどなかった。

この状況を打ち破ったのが理研で行われた RI ビームによる実験である。 ^{32}Mg ビームを入射核破砕法で生成し、鉛の 2 次標的に衝突させ、非弾性散乱により励起された ^{32}Mg 核を検出すると同時に崩壊 γ 線を測定した。1994 年に行われた最初の実験では、ビーム強度は 1 秒間に約 300 個と、かなり弱いものであったが、厚い標的の使用と、DALI³ と呼ばれる NaI(Tl) 検出器 56 個による高効率の γ 線測定装置によって、第一励起 2^+ 状態をクーロン力により励起する断面積を測定することに成功した。 2^+ 状態の励起は、56 個の検出器それぞれの位置によって異なるドップラー効果を補正することによって同定した。得られた断面積から求められた遷移確率は、 $N=20$ が魔法数である場合の予想の約 3 倍という大きなものであり、 ^{32}Mg 核では、 $N=20$ の閉殻構造が大きく崩れていることを明確に示している。図 2 にこの実験の模式図、図 3 に測定装置 DALI の後継機として現在使われている DALI2 の構造を示す。

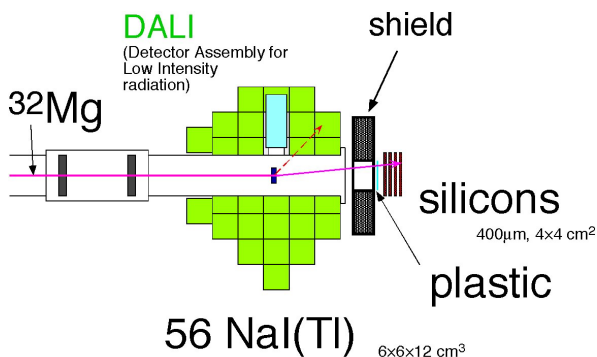


図 2 クーロン励起反応実験の概念図

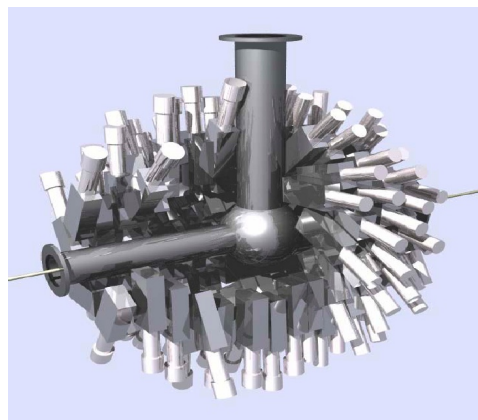


図 3 γ 線測定装置 DALI2

2.3 新しい直接反応分光法の発展

この中性子過剰な不安定核 ^{32}Mg の遷移確率の測定は、RI ビームと新しい核分光法の組み合わせによって始めて可能となったものである。中間エネルギーの RI ビームによるクーロン励起は、世界的に一つの標準的な方法となっている。同様な研究手法は、陽子非弾性散乱、核子移行反応などに拡張され、今まで不可能であった安定線から遠く離れた原子核の励起状態の研究が発展している。また、RI ビームの破砕反応によって多彩な

³ Detector Array for Low Intensity radiation

励起状態を作り出し、その γ 線分光を行う方法も理研で始められ、米国ミシガン州立大学で考案された、核子をたたき出すノックアウト反応の研究でも、たたき出された後の原子核の励起状態を同定するのに γ 線測定が使われている。

最近の成果の例として、 ^{16}C 核の鉛による非弾性散乱による 2^+ 状態励起を紹介する。図 4 に示す散乱角度分布に、核力とクーロン力の干渉パターンが現れ、その分析から、この励起状態がほとんど陽子の運動のみによっており、中性子はほぼ無関係であることがわかった。この描像は、独立に測定された異常に長い 2^+ 状態の寿命や、陽子非弾性散乱の結果ともつじつまが合っており、また近傍の原子核の電気四重極能率の異常性との関連も考えられる。安定線に近い原子核では全くみられなかった現象で、中性子と陽子が独立に運動する原子核の新しい振る舞いが顕われたのではないかと考えられる。

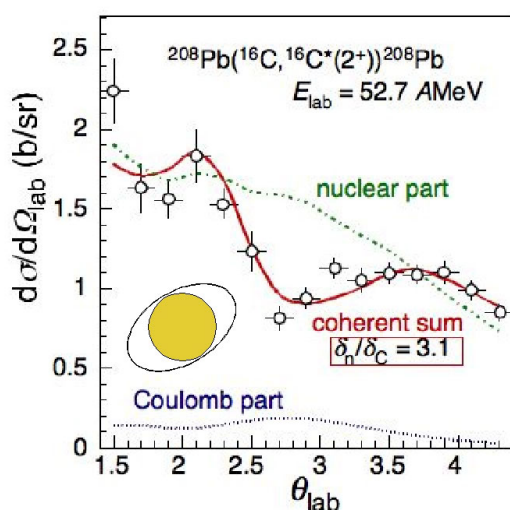


図 4 $^{16}\text{C}+\text{Pb}$ 非弾性散乱の角度分布

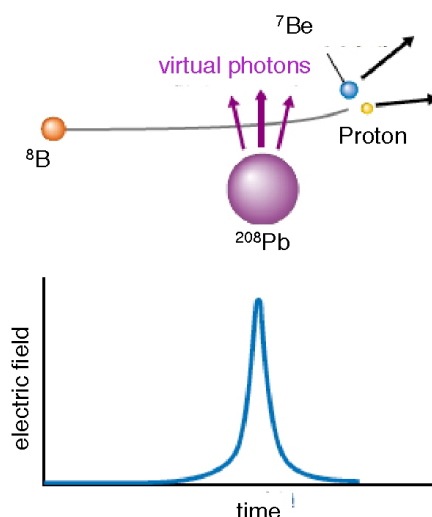


図 5 クーロン分解の模式図

3. クーロン分解法による天体核反応

上に述べたクーロン励起でも同様であるが、高速の原子核が鉛のような電荷の大きな原子核が作る電場を通過すると、仮想的な光子により励起や分解が起きる。図 5 に示すように、入射核（この例では ^8B ）が感じる電場の時間変化は、標的核（鉛）に一番近づいた時にピークとなるパルス状となる。したがって、この変化のフーリエ成分に対応する光子が発生する。この原理は既に 1930 年代に Fermi により議論されているが、高速の RI ビームが利用可能となり、天体核反応に適用することができるようになった。

図 5 の例では、 ^8B 核が仮想光子を吸収して陽子と ^7Be 核に分解するが、この過程は ^7Be 核と陽子が融合して ^8B を作り、 γ 線を発生する、という放射捕獲過程の逆反応になっている。後者は、太陽の中で ^8B 核を生成し、最終的には β^+ 崩壊を通して、太陽ニュートリノ発生する注目すべき反応である。このように、クーロン分解反応は天体核反応としてしばしば重要な役割を果たす放射捕獲過程の研究に適用できる。ここで重要なことは、

高速の衝突の際の仮想光子の強度は大きく、また位相体積の関係からクーロン分解反応の断面積が大きいので、直接に放射捕獲を測定できない場合でも実験が可能となることである。我々は、例としてあげた太陽ニュートリノ生成反応をはじめとして、hot CNO サイクル、hot pp chain, rp 過程といった、高温・高密度天体での爆発的な元素合成過程に関わる核反応をクーロン分解反応で調べている。また、クーロン分解反応は天体での放射捕獲反応のみではなく、 ^{11}Li , ^{11}Be といったいわゆるハローを持つ原子核の研究にも非常に有力で、重要な成果があがっている。

4. RI ビームファクトリーへの展開

入射核破碎によって安定線から遠く離れたビームを作ることは、我々が行ったような各種の研究手法の開発とあいまって、原子核の研究に大きな進展をもたらしつつある。さらに研究を発展させるには、より強力な RI ビームが必要となる。理研 RI ビームファクトリー（図 6）は、その目的で建設される次世代の施設で、世界に先駆けて本年中にも最初のビームを発生しようとしている。

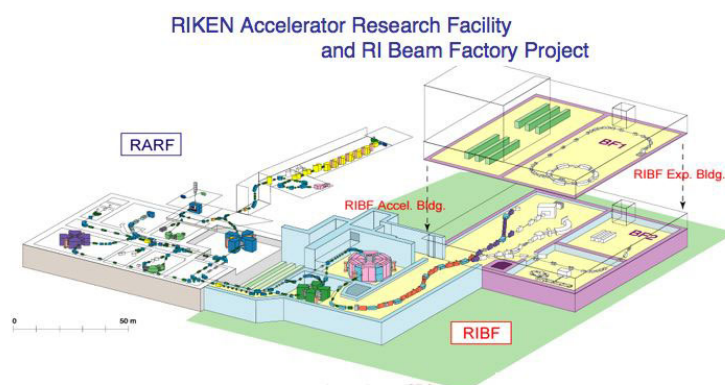


図 6 理研の加速器施設。色のついた部分が建設中の RI ビームファクトリーである。

RI ビームファクトリーによって新たに生成が可能な不安定原子核は 1,000 種類近く（図 1 でピンクと水色で示されている領域）と予測されている。現在の研究が、 $N=8$ や $N=20$ の魔法数近傍の殻構造の異常や、中性子・陽子分離現象、陽子捕獲による元素合成など、比較的軽い原子核の領域で行われているのに対し、RIBF では、より重い領域が開拓される。質量、寿命、核半径といった基本的な核データを、この新しく拡張された領域で取得することは我々の使命であろう。新たな研究手法の開発も行い。原子核の本質の究明と宇宙における元素の起源の解明に挑戦したいと考えている。