Title	液体ヘリウムを利用したイオントラップ : 原子核物理への応用
Author(s)	下田, 正
Citation	大阪大学低温センターだより. 1998, 101, p. 1-11
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/6164
rights	
Note	

研究ノート

液体ヘリウムを利用したイオントラップ ―原子核物理学への応用―

理学研究科　下　田　　正（内線 5744）
shimoda@rcnpax.rcnp.osaka-u.ac.jp

陽子と中性子の数が極端に異なった不安定な原子核の構造が、今注目を浴びている。安定領域の原子核とは異なった、特異な核構造が見えてきたからである。これらの原子核の研究によって、今まで知られていなかった核力の性質が明らかになるとともに、これまで築きあげられてきた、有限量子多体系である原子核へのアプローチの方法の妥当性が、より厳しく試されつつある。

これらを研究する方法の一つとして、スピン偏極した不安定原子核からの放射線を観測することによって様々な物理量を効率よく引き出すという、極めて有効な方法がある[1]。そのためには、不安定な原子核を空間的に閉じ込め、スピン偏極度を核の寿命程度の時間保持することが不可欠である。寿命の長い原子核については、物質内の電磁場の影響が深刻で、スピン偏極度を保持することが難しいという場合が少なくない。不安定核イオンを液体ヘリウムに打ち込んだら、スピン偏極度を長時間保持出来るのではなかろうかというのが、本研究の出発点であった。本稿では、放射線を用いて液体ヘリウム中のイオンの動きを追うという新しい実験方法を紹介し、液体ヘリウムが、イオンや中性原子のトラップとして、特に核スピンを保持する環境として、有効であるという実験結果について述べる。

1　液体ヘリウム中の不純物イオン

液体ヘリウム中にイオンを導入するという試みは1959年の Meyer と Reif の実験[2]に始まると言ってよいであろう。彼らは ^{210}Po の α 線源を液体ヘリウム中に浸し、生成されるイオンを電場のもとで輸送し、交流電場の周波数とイオン電流の相関から移動度を求めた。

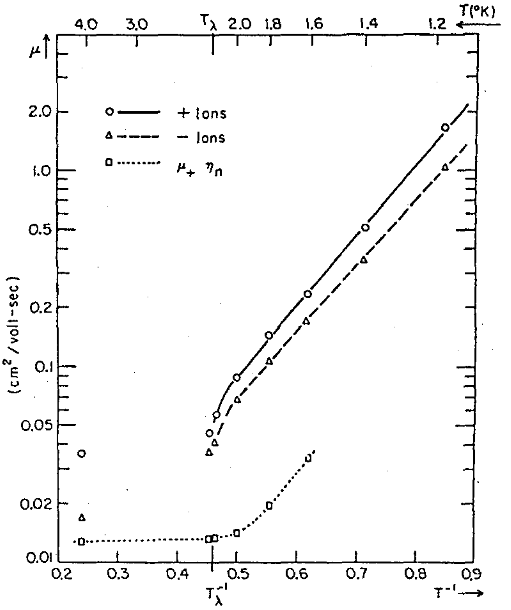

図1　液体ヘリウムに導入された正イオンと負イオンの移動度をヘリウム温度の逆数の関数としてプロットしたもの[2]。

図1は移動度をヘリウム温度の逆数($1/T$)の関数としてプロットしたものである。移動度が小さいこと、および超流動状態($T<2.18$ K)で移動度が指数関数的な振る舞いをすることから、ある程度の大きさを持った charge carrier が、

常流動ヘリウム成分(roton)と多数回衝突しているという描像が浮かび上がってくる。Atkins は、このデータから半径が 5.8 Å 程度、実効質量がヘリウム原子の 40 倍程度の carrier であると結論した。そして、このような大きな有効質量は、ヘリウム原子の分極率の小ささに由来すると解釈した[3]。すなわち、イオンによる電場によって、誘電分極されたヘリウム原子がイオンの周り引きせられるが、ヘリウムの分極率が極度に小さいため、このような多数のヘリウム原子が集まるのだというのである。連続媒質中に置かれた点電荷と電気双極子が相互作用するという簡単なモデルによって、イオンの周りのヘリウム原子の密度を求めると、ヘリウムは固相にある可能性が示唆された[3]。イオンはヘリウムの氷に閉じこめられているようなものである。そのようなヘリウムのいわばマイクロクラスターを"iceberg"とか"snowball"とか呼ぶ。ちなみに、電子が液体ヘリウムに導入されると、ヘリウム原子内の電子との間で Pauli 原理による斥力が働き、ヘリウムが押しのけられて空間ができるとされている。これを electron bubble と言う。電子は深さ 1 eV 程度、半径 17 Å 程度のポテンシャルにトラップされているかのように振る舞うのだそうである[4]。この electron bubble の描像は、最近の遠赤外分光によって実験的に確認されている[5]。

その後、snowball は、渦糸(vortex line)との衝突や渦環(vortex ring)の励起という観点でも研究された。特に Careri らは、電場を強くすると移動度がステップ状に減少することを見いだし、渦環一つ一つの励起に対応するのだと解釈した[6]。snowball そのものの構造は、そう単純ではないことが、アルカリ、アルカリ土類の様々なイオンを液面すれすれのフィラメントイオン源からヘリウム中に引き込んで移動度を測定した Glaberson らの実験[7]で明らかとなった。すなわち、イオンの電子配位によって移動度はかなり変わるのである。Atkins のモデルでは一価のイオンは全て等しい移動度を示すはずである。Glaberson のデータは valence electron の影響の重要性を示しており、そのような効果を考慮した計算もなされた[8]。valence electron に働く Pauli 斥力によって、ヘリウム密度の低いすき間が出来る可能性がある。中性のアルカリ原子でもそうだろうということで、"atomic bubble"という概念が出てきた。snowball の密度に関しては、固相だとか、いやそうは言えないとか様々な議論がなされた[9]が、決着を見てはいない。

ところで、He^+ snowball の拡散係数は、Meyer らによると 1.5°K において $D = 0.5\times10^{-4}$ ㎠/sec 程度とヘリウム原子の値の 1/4 程度だそうである[2]。これは 10 秒間で 0.4 ㎜ 程度の拡散を意味する。原子核屋の目からは、電荷を持ったものがほぼ静止しているということに興味をひかれる。通常のイオントラップでは、電磁場を用いるため、イオンは必ず有限の空間領域を周期運動をしているからである。核反応で生成された不安定原子核を液体ヘリウムに打ち込めば、電荷を持ったままで（不安定核イオンとして）停止させることができ、電場のもとで任意の位置に輸送することが出来るのではなかろうか。snowball 生成のメカニズムの詳細は未知ではあるが、ヘリウムのイオン化ポテンシャルが大きい(24.6 eV)ため、打ち込まれたイオンのうち相当な割合が電荷を持ったまま停止し、snowball が生成されるのではなかろうか。また snowball は対称性の良い構造を持つに違いないので、ヘリウム原子群が原子核に及ぼす電磁場は弱く、核スピンの緩和時間は長いと予測される。さらに、液体ヘリウムは透明であるため、ほぼ静止したイオンにレーザーを照射することも考えられる（これについては京都大学の藪崎先生のグループが精力的な研究を展開されている：後述)。このような考えで、われわ

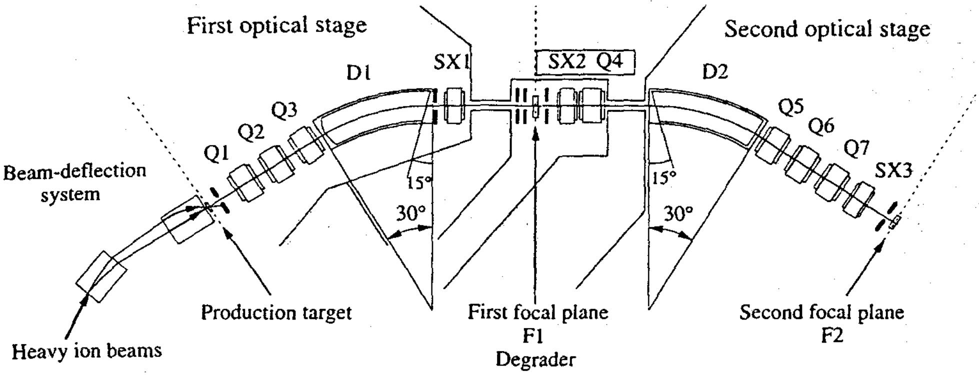

図2　大阪大学核物理研究センターの「二次ビームコース」。Q、D、SX はそれぞれ四極電磁石、双極電磁石、六極電磁石を表す。リングサイクロトロンで加速された重イオンビームが左手下方から標的(Production target)に入射し、入射核破砕反応(*)が起こる。様々な反応生成核（原子番号 Z、質量数 A）が、ビーム方向に集中して放出される。これらは、三つの四極電磁石、双極電磁石、六極電磁石によって分析され、A/Z 比がほぼ一定のもののみが First focal plane に角度集束される。そこにはエネルギー損失をさせるためのアルミ板（Degrader)が置かれている。Degrader を通過した原子核は、下流に置かれた電磁石類によって Second focal plane に角度・エネルギー集束されるが、エネルギー損失の仕方は A と Z に依存しているため、集束されるのは特定のA と Z のものに限られる。こうして、様々な反応生成核の中から望みの核種を選び出すことが出来る。

れは液体ヘリウムをイオントラップとして原子核に応用することを検討し始めた。ちなみに、1970年当時の阪大で、伊達宗行[10]、杉本健三両先生が原子核への応用を相談されたことがあると、最近教えていただいた[11]。本稿で紹介するような原子核への応用が実証できた[12]のは、高エネルギー重イオン*核反応で大量に生成される不安定核の中から、特定の核種だけを取り出し、ビームとして供給する装置、「二次ビームコース」(大阪大学核物理研究センター、図2参照）[13]の実現に負うところが大きい。

2　実験方法

測定のポイント　snowball を不安定原子核の研究へ応用するためには

- 打ち込まれたイオンのうち、どれだけが snowball になるのか？
- snowball に寿命はあるのか、あるとしたらどれくらい？
- snowball に閉じこめられた核の核スピンの緩和時間はどれくらい？

といったことが明らかにならなければならない。イオン電流を測定する従来の方法では、これらの問いには答えられない。そこでわれわれは、核反応で生成される不安定核を液体ヘリウムに打ち込み、不安定核が崩壊する際に放出する β 線を観測することによって、snowball をひとつひとつ同定することにした。この方法では、従来の方法に比べて、10^7 倍程度の感度の向上が期待できる。また、不安定核ビームをパルス化して打ち込むことができるので、時間と空間の相関をとった測定も可能である。ただし、β 線は核が snowball 中にあろうがなかろうが無関係に放出されるので、snowball を選択的に

*この印の付いている語は、後に「用語説明」があります。

観測するための工夫が必要になる。そこで、β 線検出器が特定の空間領域の線源に対してのみに有感であるようにし、snowball を電場によってその場所に輸送する方法をとった。ところで、電荷を持ったものがすなわち snowball であると断定するのは適当ではないかも知れない。そこで電荷を持ったものの移動度を測定し、Meyer らの値と比較することにした。これにはビームを短い時間だけ照射し、β 線検出が始まるまでの時間差から電場による輸送時間を求めればよい。

実験装置　大阪大学核物理研究センターのリング・サイクロトロンからの ^{14}N ビーム(エネルギー 539 MeV)を ^{9}Be 標的に照射し、反応生成核の質量分析を行うことによって、不安定核ビーム ^{8}Li ($T_{1/2}=0.84$ sec)または ^{12}B (0.020 sec) が得られた。不安定核ビームの強度は、それぞれ毎秒 300 および 1000 個程度、空間的広がりは縦 3.2 ㎜ 横 6.0 ㎜ 程度(FWHM)、運動量の広がりは ± 1.2 % であった。^{8}Li、^{12}B の一価イオン中の電子はいずれも閉殻であり、ヘリウム原子中の電子との Pauli 斥力を考えなくてもよく、snowball が出来るとしたら最もふさわしい候補である。図 3 に測定器周辺の実験装置を示す。これが図 2 の Second focal plane に設置された。図 3 の右手から不安定核ビームがやってくる。ビームのエネルギーがアルミの薄板で調整された後、1.4°K の超流動ヘリウムに打ち込まれる。ヘリウムデュワーは円筒状(外径 20 ㎜、内径 17 ㎜ FRP 製)であり、0.1 ㎜ 厚のステンレス窓を透過して軸方向にイオンビームが入射される。ヘリウム入射時はイオンは高エネルギーであり、全て裸の状態($^{8}Li^{3+}$、$^{12}B^{5+}$)にあると考えて良い。入射後ヘリウムとの相互作用

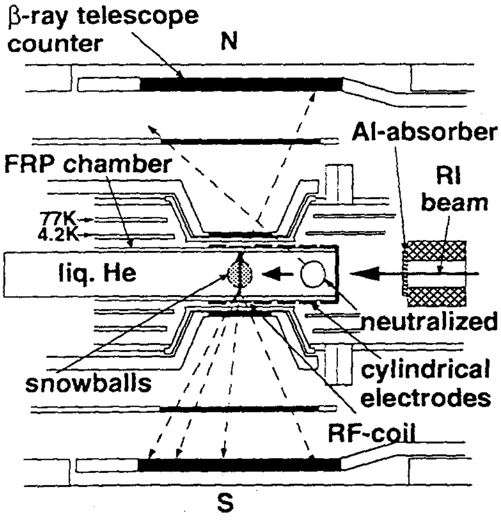

図 3　実験装置の主要部分。不安定核ビームが真空中右手方向から飛来し、温度 1.40°K に保たれた超流動ヘリウムに入射する。snowball になった不安定核イオンは、軸方向にかけられた静電場によって装置中央部分の静電ポテンシャルの井戸まで輸送される。ポテンシャルに閉じこめられた snowball に対して核磁気共鳴用高周波磁場が印加され、核スピンの反転操作が行われる。不安定核はやがて β 崩壊するが、その β 線が三枚のプラスティック・シンチレーターからなる β 線検出器によって計測される。β 線検出器は上下二系統ある。

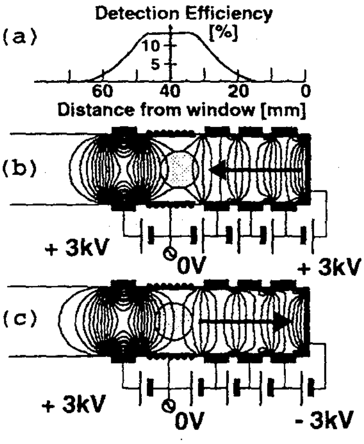

図 4　(a)横軸をヘリウムデュワー入射窓からの距離として表した、β 線検出器の検出効率。入射窓から 40 ㎜ の位置(検出領域と呼ぶ)で検出効率が最大となる。(b)正電荷を持ったものを検出領域へ移動させるようにかけた電場の等ポテンシャル線図。(c)(b)とは逆に、検出領域から排除するようにかけた電場の等ポテンシャル線図。

によって減速される過程で価数が減少してゆき、ほとんど止まりかけになった時点で snowball が形成されるであろう。snowball の位置を制御するために、軸方向に静電場がかけられている。図4にデュワーの拡大図、等ポテンシャル線、検出器の検出効率を示す。デュワー入り口窓と検出領域中心の間の距離は 40 mm である。静電場は二通りかけられた：一つは入り口窓付近に不安定核ビームを止め、電荷を持ったものを β 線検出器の有感領域まで輸送するやり方、もう一つは不安定核ビームを検出領域に打ち込み（ビームのエネルギーを高くする）、電荷を持ったものを入り口窓の方に押しやるやり方である。そうする意味は後述する。いずれの場合も、検出領域の左手には正の電荷を持ったものを押し返す高いポテンシャルがかけられている。入り口窓付近の検出効率は、検出領域の検出効率の 10^{-4} 程度以下であり、入射イオンのうち snowball になるものの割合がたとえ 0.1 % 程度と小さな値であっても、非 snowball からの β 線と区別出来るようになっている。検出領域には、核磁気共鳴によって核スピンの偏極度を測定するための高周波磁場を発生させるコイルが、軸方向に巻いてある。この実験で用いた核から放出される β 線（電子線）のエネルギーは高く（最大エネルギー 16.0 MeV（^{8}Li）、13.4 MeV（^{12}B））、FRP デュワー壁やコイルや真空窓(0.1 mm SUS)をものともせず大気中に飛び出してくる。β 線は3枚のプラスティック・シンチレーターで同時計測を行った。β 線検出器系は上下に2系統ある。これは β 崩壊の非対称度を測定して核スピンの偏極度を求めるためである。上下の検出器系の検出効率の違いによる非対称度を消すために、核磁気共鳴を利用して核スピンの向きを180° ひっくり返した測定との比較を行った。検出領域には核磁気共鳴のために 0.07 T の静磁場がかけられている。

3 実験結果

3．1 snowball 生成確率

打ち込まれたイオンのうちどれだけが snowball になるかは、打ち込まれたものと電場で輸送されたものの比をとればわかる。しかし、これには二つの不定要素がある。一つは入射粒子数である。入射ビームの空間的広がりおよび数は、50 cm 程上流に置いた透過型の検出器で常にモニターしている。しかし、ここで観測した粒子が全てデュワーに入るという保証はないし、透過型のガス検出器は 100 % の検出効率ではない。さらに、snowball となって輸送されたものの数は β 線検出器の絶対効率を知らなければならない。これがもう一つの不定要素である。そこで、両者ともを β 線で測ることにした。つまり、ビームを検出領域中心に打ち込み、検出領域の静電ポテンシャルが最も低く

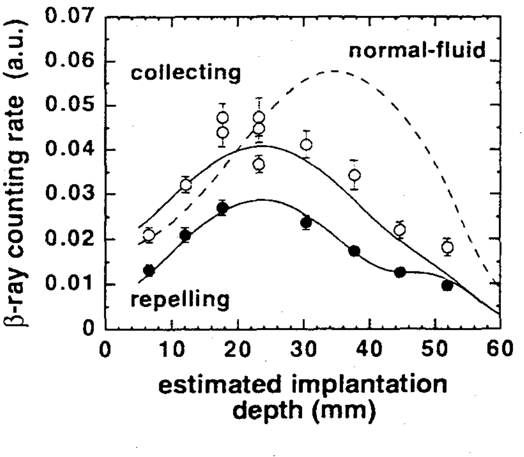

図5 ^{8}Li の予測される入射位置（入射窓からの距離）の関数として β 線の検出数をプロットしたもの。予測位置は、^{8}Li のエネルギーに対応する飛程の計算値に基づく。白丸は、電荷を持ったものを入射窓の方から検出領域の方へ集めるように静電場をかけた場合、黒丸は検出領域から入射窓の方へ排除する向きに静電場をかけた場合を表す。実線は fitting の結果。点線は常流動ヘリウムの場合の集める電場での実験結果をなぞったもの。

なるような電場をかけた場合の β 線の数と、電荷を持ったものを入射窓の方へ押しやるように電場をかけた場合の β 線の数を求めた。両者の差が snowball になったものの数であり、前者が打ち込んだ粒子の総数である。この目的のために飛程*の長い ^{8}Li ビームが用いられた。図5に結果を示す。横軸は飛程の計算値から求めた打ち込み位置(入射窓からの距離)、縦軸に β 線の検出数を示す。白丸が snowball を検出領域にかき集めるように電場をかけた場合、黒丸が snowball を検出領域から排除するように電場をかけた場合の結果である。ピークのあたりの検出数の違いから、約 30 % は snowball になっているように見える。このような大きな値ゆえ、液体ヘリウムをイオントラップとして活用するというもくろみは大いに有望である。点線は、常流動の液体ヘリウム(4.2°K)での、かき集める電場での結果である。ピークの位置は 35 mm 付近と読み取れるが、実際の位置 40 mm との差は飛程の計算式の不適当さを反映していると考えられる。超流動の場合は密度の違いを考慮して飛程を見積もっているが、点線とのピーク位置がずれて見えるのは、計算に取り込まなければならない他の効果があることを示している。注目されるのは、超流動と常流動の場合のピークの高さの違いである。超流動の場合には β 線の数が減少して見える(打ち込み粒子数は両者で共通になるようにプロットしてある)。すなわち、超流動の場合には打ち込まれたものが、あるべき領域からいなくなっているかのように見える。正の電荷をもったものは検出領域に集まるように電場をかけているので、いなくなったものは中性のものであろう。この数を考慮すると、snowball が生成される確率は約 20 % ということになる。図5の実線は、イオンの停止位置の広がり、不均一静電場の効果、止まらないで走り去った中性化したもの（後述）の存在を考慮した fitting の結果である。

この実験では、10 MeV/u*を遙かに越えるような高いエネルギーでイオンを打ち込んでおり、イオンがヘリウム中で減速される過程では多数のヘリウム原子がイオン化されているものと思われる。このような電子の雲に取り囲まれながら、イオンは最終的に1価の電荷を持ったままで停止し、snowball を形成するのであるから、snowball 生成確率は入射エネルギーや電子雲の密度などに依存するであろう。これらの解明は今後の課題である。

3．2　移動度

われわれが見ている電荷を持ったものは本当に snowball なのだろうか。それを調べるために、その移動度を測定した。今度は ^{12}B ビームを、図6(a)に示すような時間構造をもつパルス状にして、デュワー入り口窓付近に止まるように打ち込んだ。β 線検出器には小さな開口のコリメーターを装着し、検出領域の狭い空間からの β 線のみに敏感なようにした。snowball は有限の速度で輸送されるのだから、ビーム照射後しばらくたってから β 線が観測されるはずである。Meyer らの得た移動度[2]からは 15 ms あたりから β 線計数が立ち上がると期待される。ところが、図6(b)の実験結果では、ビーム照射中からすでに立ち上がり、いったん減少し、そして期待される時間あたりで再び増加するかのように見える。この速い立ち上がりは速度が速い成分が存在することを意味する。いったん減少するという傾向から、それらが検出領域を通り過ぎているという描像が浮かぶ。検出領域の奥にはポテンシャルの壁があり、電荷を持ったものが通り過ぎるのは困難である。そこで、中性化した ^{12}B が速い速度で通り過ぎるのだと解釈している。図のヒストグラムは、中性化したものに一定速度 5.3 m/s を、電

荷を持ったものに移動度 0.45 ㎠/Vs を仮定したシミュレーションの結果である。データを最も再現するように、中性化したものの速度、それぞれの粒子の数を定めた。この高速の粒子の数と、生成確率の測定の際にいなくなってしまった中性とおぼしきものの数とは、 consistent である。現在のところ、以上のデータを理解するためには、次のように解釈せざるを得ないと考えている。

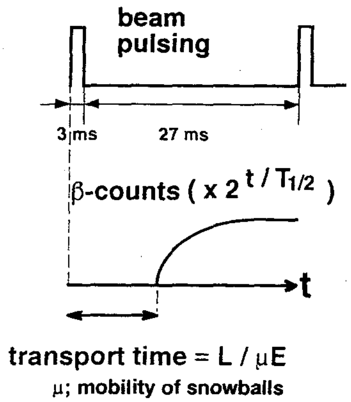

図 6 (a) パルスビームの時間構造と、期待される β 線検出数の時間変化。

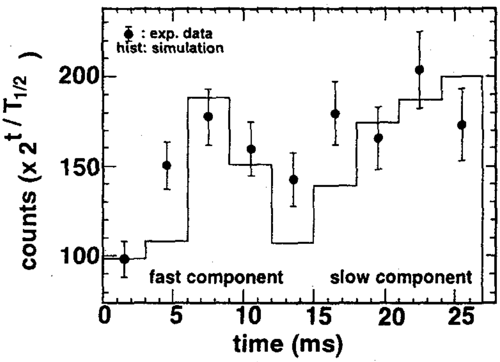

図 6 (b) 移動度測定実験の結果。横軸はビームパルスの始まりからの時間、縦軸は β 線の検出数に β 崩壊による減数の補正を施したもの。

- 打ち込まれたイオンのうち、20 % 程度が電荷を持って停止する。それらは Meyer らの得た値と等しい移動度を持つことから、snowball と考えてよいであろう。
- 残り約 80 % は中性化しているが、30 % は期待される位置に停止し、50 % は止まらないで走り続ける。

しかし、一体、中性化したもののいくつかは止まり、いくつかは止まらないなどということがあるのだろうか。この解釈が正しいとしたら、ヘリウムの超流動性に関係した現象であろう。中性化したものの動きを放射線によって観測するというこの実験の手法は、ヘリウムの物性研究の新しい手段になるかも知れない。現在のデータは統計精度が充分ではない。データの精密化が今後の課題である。β 線の軌跡に敏感な tracking detector の開発等の検討を進めている。

3．3　核スピン緩和時間

snowball 中でのスピン偏極度の緩和は、スピン偏極した ^{12}B を核反応で生成し、液体ヘリウムに打ち込み、その偏極度の時間変化を観測することによって調べた。高エネルギーの重イオンビームが入射する反応では、有限角度に放出される反応生成核のスピンの偏極が期待される[1]。これは反応の際の角運動量のやりとりと、二つの原子核の相対運動の軌道が散乱によって曲げられることの二つの効果である。われわれは、核力による軌道の大きな偏向が期待される軽い標的核 ^{9}Be を用いることによって、非常に大きな ^{12}B の偏極度を得ることに成功し、非常に効率の高い緩和時間測定を行うことができた(詳しい解析によると、従来言われていた入射核破砕反応*に加えて、直接核子移行反応の寄与も大きいことがわかった[14])。液体ヘリウムに入射する ^{12}B のスピン偏極度はあらかじめ知っておかなければ

ならない。このため、緩和時間が ^{12}B の寿命に比べて充分に長いことが知られている Pt フォイル中で ^{12}B を停止させて、偏極度 $P = -30 \pm 2$ % が測定された。このような ^{12}B を液体ヘリウムに入射させた場合に生成される snowball 中でのスピン緩和時間の測定結果を、図7に示す。上の方にビームの照射時間と核磁気共鳴のための高周波磁場の印加時間の関係を示す。高周波磁場がかけられると、核スピンの向きが核磁気共鳴の断熱通過に従って反転する。スピン反転と非反転を交互に繰り返し、それぞれの場合の上下の検出器での β 線検出数から β 非対称度が決められ、核スピンの偏極度が求められた。この操作は上下の検出器の効率の不揃いによる効果を消すためである。スピン偏極度を時間の関数として眺めると、高周波磁場をかけるまではスピン偏極度はゼロであるはずである。図7に示すように、実験結果はそうなっている。スピン反転に対応する時間後は、大きな、しかも観測時間(20 ms)の間一定のスピン偏極度が得られている。すなわち、スピン緩和は見られない。しかし、入射 ^{12}B の偏極度 -30 % に比べると、小さな偏極度 $P = -20.7 \pm 1.5$ % が観測されている。孤立した原子核と snowball 中の原子核の偏極度の大きさの食い違いは、次のように理解出来る。この実験では静電場をかけ続けており、snowball は生成されるはしから輸送される。測定領域まで到達するのに要する時間は約 18 ms である。ビーム照射の始めの頃打ち込まれた ^{12}B は、高周波磁場が印加される時点で測定領域に到達しているのでスピン反転が行われるが、照射の終わりの頃打ち込まれたものは、高周波磁場の印加終了後到達する。従ってスピン反転はされない。約 30 % の snowball は後者である。この効果を考慮すると、-30 % の偏極度に対して期待される観測量は -21 % である。これは観測値と一致している。すなわち、打ち込まれたイオンの偏極度はそっくり観測されていることになる。そこで、ビーム照射開始から観測終了までの 48 ms の間、緩和はないと結論出来る。これ以上の長い時間での緩和がどうなっているかを調べるには、長寿命の核種で測定を行う必要がある。

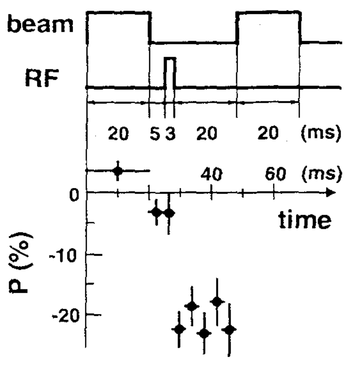

図7　スピン偏極度の測定値をビームパルスの始まりからの時間としてプロットしたもの。上にはビームパルスおよびスピン反転のための高周波磁場の時間構造を示す。

4　今後の展望

4．1　snowball の寿命

snowball は electron bubble との結合や、デュワー壁との衝突によって電子を受け取ることなどによって中性化してしまう可能性がある。その確率は打ち込み時の電子雲の密度、電場の有無、デュワーの形状・材質など様々な条件に依存するであろう。本実験で観測された、移動度や偏極測定時の snowball の数の時間変化からは、snowball の寿命は長いと思われる。しかし、寿命の定量的評価のためには、少なくとも秒のオーダーの長寿命核種で測定を行うべきである。安定核ビーム ^{18}O の入射核破砕反応で相当の生成量が期待される ^{16}N ($T_{1/2} = 7.13$ sec)を候補として寿命測定を行うことを計画している。

4．2　レーザーによるアプローチ

放射性核イオンをプローブとするわれわれの手法に加えて、レーザーによる不純物原子の研究も行われるようになってきた。レーザーによって不純物の原子励起を行い、脱励起光を観測しようというものである。ハイデルベルグのグループの、液面に置いたイオン源からの引き込みによるアルカリ土類元素のイオンや中性原子の研究[15,16]や、京大の藪崎グループ[17-19]や理研の高見グループ[20]の、レーザースパッタリングによって 10^8-10^{10} atoms/㎤ の中性原子をヘリウム中に生成する方法がある。いずれも原子スペクトルは青方に変移し線幅が大きく広がっていることが観測され、不純物原子中の電子がヘリウム中の電子と相互作用をし「圧力」を受けていることが実証された。実験結果は atomic bubble が形成されているとする計算[15]とよく一致している。しかし、snowball に対する観測はまだない。注目されるのは、藪崎グループの重いアルカリ金属元素(Cs，Ba)に対するレーザー光ポンピングによる原子偏極の生成[19]である。超微細構造相互作用により 50 % 以上の核偏極が達成されたと報告されている。今後、レーザーの特徴を生かして、ヘリウム中のイオンや中性原子に対する精密分光や量子状態の制御などの発展が大いに期待される。

4．3　原子核物理への応用

本実験によって、snowball が生成される確率が相当高いこと、snowball 中での核スピンの緩和時間は長いこと、が初めて示され、原子核物理学への様々な応用が期待される。その手始めとして、^{16}N の基底状態の磁気双極子モーメントを測定することを計画している。この核は、原子核の殻模型の観点で眺めると、二重閉殻である ^{16}O に対して一粒子一空孔の励起を行った単純な構造であることが期待される。さらに、粒子・空孔は異なった殻（p 殻および sd 殻）に属しており、核子・核子間相互作用のうち、これまであまり調べられていない、異なる殻に属する核子同士の相互作用(cross-shell interaction)を実験的に研究するのに大変適した原子核である。cross-shell interaction は、安定領域から遠く離れた原子核の構造を研究するための基本的道具となるため、その実験的確立は焦眉の急である。cross-shell interaction に敏感な物理量が電磁気モーメントである。しかし、^{16}N は安定領域に近い核であるにもかかわらず、その電磁気モーメントは未だ測定されていない。その理由は、長い寿命（$T_{1/2}$ ＝ 7.13 sec）の間、核スピンの向きを揃えておくことが難しいからである。通常は、不安定核を物質中に植え込み、そのスピンの向きを揃えたままで核磁気共鳴を観測することによって、電磁気モーメントを求めるという手法が使われる。この核のスピンは I=2 であり、電気四重極モーメントを持つ。そのため物質中の電場によるスピン緩和が問題となる。これまで適当な植え込み物質が見あたらなかったのである。液体ヘリウムは、これまでのこの困難を打ち破る道具となり得る。磁気モーメントが測定されれば、既知の電場勾配を持った結晶中での核磁気共鳴を観測することによって、電気四重極モーメントの測定が可能になる。磁気双極子モーメント、電気四重極モーメントの両方を求めることが出来れば、^{16}N の基底状態の波動関数を決定出来、cross-shell interaction が精度よく求められる。

磁気モーメントに関しては、30 年間にわたる懸案の核である ^{11}Be（$T_{1/2}$ ＝ 13.8 sec）もターゲットである。このような中性子過剰核では、単一粒子軌道 $s_{1/2}$ のエネルギーが下がり、$p_{1/2}$ 軌道より

も下に位置していると指摘されて久しい。その磁気モーメントの理論値は様々に分布しており、実験値の確定が望まれている。

上で述べた藪崎グループの成果は、原子核への応用という意味では極めて注目に値する。液体ヘリウムはイオンや中性原子のトラップとして機能すると同時に、光ポンピングを効率よく行うための環境にもなり得るのである。入射核破砕反応で得られる偏極度は、われわれの 40 MeV/u での例を除いて、通常は数 % から10 % 程度である。安定領域から遠く離れた核については、収量とともに偏極度も相当に小さい。しかし、このレーザーによる偏極法を用いれば、大きな偏極を達成出来る可能性がある。液体ヘリウムは長い時間の間偏極を維持するための環境として適しているらしいことはすでに見てきたところであり、偏極生成と保持を同時に行えることになるのである。特に、入射核破砕反応では偏極させるのが難しいとされている ^{11}Be を偏極させ、その磁気モーメントを測定するというアイデアは魅力的ではあるが、残念ながら、このような軽い核では原子の準位幅の広がりが D_1 および D_2 線のオバーラップをもたらし、ポンピングが難しいようである[21]。重い核については問題なくやれそうであり、今後の発展が期待される。

4．4　物性物理への応用

放射線によって snowball を同定するというわれわれの方法では、snowball ひとつひとつの空間的・時間的位置を測定することが出来る。さらに中性化したものの動きを追うことも可能である。このような新しい手法によって、おもしろい物理が展開出来る可能性は高い。実際われわれの今回の実験結果からは、中性原子の不思議な振る舞いが見えてきた。今後の可能性に関して、物性物理を専門とする方々のアドバイスを歓迎する。

この研究は、宮武宇也、溝井　浩、小林　太、佐々木充、白倉徹也、高橋憲明（以上阪大旧教養部）、上野秀樹、出水秀明、旭耕一郎（以上東工大理）、村上哲也（京大理）、光岡真一、森信俊平（以上九大理）の諸氏との協同で行われたものである。

参考文献

[1] 旭耕一郎、日本物理学会誌 50 (1995) 791.

[2] L. Meyer and F. Reif, Phys. Rev. 110 (1958) 279.

[3] K.R. Atkins, Phys. Rev. 116 (1959) 1339.

[4] W.B. Fowler and D.L. Dexter, Phys. Rev. 176 (1968) 337.

[5] C.C. Grimes and G. Adams, Phys. Rev. B41 (1990) 6366.

[6] G. Careri *et al.*, Phys. Rev. 136 (1964) A303.

[7] W.W. Johnson and W.I. Glaberson, Phys. Rev. Lett. 29 (1972) 214 and J. Low Temp. Phys., 20 (1975) 313.

[8] M.W. Cole and R.A. Bachman, Phys. Rev. B15 (1977) 1388.

[9] K.W. Schwarz, Advances Chem. Phys. 33 (1975) 1 and references therein.

[10] 伊達宗行，固体物理 5 (1970) 485.

[11] 中井浩二 氏、私信 (1997).

[12] T. Shimoda *et al.*, Nucl. Phys. A588 (1995) 235c.

[13] T. Shimoda, H. Miyatake and S. Morinobu, Nucl. Instr. and Meth. B70 (1992) 320 and S. Mitsuoka *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A372 (1996) 489.

[14] S. Mitsuoka *et al.*, Proc. 14th RCNP OSAKA Int. Symp. on Nuclear Reaction Dynamics of Nucleon—Hardron Many Body System, Osaka, Dec. 1995.

[15] H.J. Reyher *et al.*, Phys. Lett. A115 (1986) 238.

[16] H. Bauer *et al.*, Phys. Lett. A146 (1990) 134.

[17] Y. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 1035.

[18] A. Fujisaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 1039.

[19] T. Kinoshita *et al.*, Phys. Rev. B49 (1994) 3648.

[20] Jaap H.M. Beijersbergen *et al.*, Phys. Lett. A181 (1993) 393.

[21] 藪崎　努 氏、私信 (1997).

用語説明

重イオン：α 粒子より重い原子核を「重イオン」と呼ぶ。この命名は歴史的理由による。

飛程：荷電粒子が物質中に打ち込まれると、電磁相互作用（および核間相互作用）により、荷電粒子のエネルギーが失われ、やがて荷電粒子は停止する。入射されてから止まるまでの距離を「飛程 (range)」と言う。

MeV/u：粒子の全エネルギーを核子数で割ったエネルギー。非相対論的近似のもとでは、粒子の種類が異なっていても、核子あたりのエネルギーが等しければ、粒子の速度はほぼ等しい。

入射核破砕反応：入射核と標的核との相互作用によって、入射核の一部が剝ぎ取られ、標的核との重なりがあまり大きくなかった部分（相互作用が弱かった部分：傍観者と呼ぶ）が、入射核とほぼ等しい速度で前方に放出されるような反応。入射核のエネルギーが高けれ高いほど、傍観者は前方ゼロ度方向に集中し、しかも傍観者のエネルギーの広がりが小さくなるので、前方に置いた電磁的な分析装置によって、傍観者を高い効率で捕集できる。また高エネルギーであるほど厚い標的が使えるので、特定の傍観者の生成率が高くなる。これら二つの理由で、安定領域から遠く離れた不安定核を生成するために、高エネルギー重イオンビームが用いられている。