

超流動ヘリウム中のマイクロクラスター スノーボール

大阪大学理学部 高橋憲明

超流動ヘリウム中に不純物イオンがあれば、それを中心に約50個のヘリウム原子が凝集して、+1価に帯電したマイクロクラスター、スノーボール(氷球粒子)を生じる。核偏極した短寿命ベータ放射性イオン ^{12}B を超流動ヘリウム中に打ち込み、崩壊のさい放出されるベータ線によってスノーボールを検出するとともに、ベータ線の非対称角度分布によって崩壊時の核偏極を決定した。スノーボールを閉じ込めたり、静電場によって搬送し得ること、 ^{12}B の核偏極が寿命($T_{1/2}=20.3\text{ms}$)の間完全に保持できることなどが分かった。スノーボールはクラスター物理の対象として興味があるし、ここで開発した新しい検出法はスノーボールの性質と相俟って超流動の基本的な問題等を明らかにするのに役立つことができよう。また、閉じ込めと核偏極保持は安定線を離れた原子核の電磁気モーメントを決定するさい有効である。

1. はじめに

超流動ヘリウム中に導入された不純物のイオンには、それを中心として50-100個のヘリウム原子が誘電分極によって凝集し+1価に帯電した凝縮体が生じる。このことはすでに30年以上前、超流動ヘリウム中におけるヘリウムイオンの輸送現象を調べているときに発見された¹⁾。このいわばマイクロクラスターをスノーボールと呼んでいる。当然ながらヘリウムイオンだけでなく、ほかの正イオンもスノーボールを作ることが知られている²⁾。スノーボールについての解説は数多いが、文献³⁾は生き生きとした記述と相俟って液体ヘリウム中の荷電粒子に関して多々興味を呼び覚ましてくれる。

重イオン反応における核偏極を調べているうちに、この文献³⁾によってスノーボールに興味湧き、そこで用いた方法⁴⁾、ベータ線検出法とベータNMR法によって個々のスノーボールを検出するとともに、核偏極も調べようとして始めたのが本実験である。⁵⁾

実際、氷球粒子は従来それらが運ぶ電流によって測定されていた。このため、 10^6 個程度の数のスノーボールがないと測定は不可能であった。このことがスノーボールを用いる実験の障壁の一つになっていたと考えられる。例えば、スノーボールは固化した芯をもっていると考えられているが⁶⁾、また一方で、現在までの実験結果が本当にすべて固体の描像を支持しているか疑う面もある⁷⁾。スノーボールの構造を調べようとすれば、従来の電流検出法とは別の、新

しい検出法を開発することが必須であろう。

ベータ放射性核を中心としてスノーボールを創り出せば、そのベータ線を検出することによってスノーボールを個々に検出することが可能になり、従来より遙かに高感度な新しい検出法が確立できる、というのが本実験の狙いの一つである。

ここでは、液体ヘリウム中に導入された不純物イオンを芯として生ずるスノーボールの検出、閉じ込めと輸送、および不純物イオンの核偏極保持について報告する。

スノーボールはクラスター物理の対象として興味があるし、ここで開発したスノーボールの新しい検出法はスノーボールの性質と相俟って超流動の基本的な問題等を明らかにするのに役立つことができよう。また、閉じ込めと核偏極保持は安定線を離れた原子核の電磁気モーメントを決定するさい有効である。ここではクラスター物理の研究会の一つの話題として、今後この方面の興味が広がっていけば幸いである。

2. スノーボール

液体ヘリウム中に導入された正イオンはそのまわりに強い電場を作る。ヘリウム原子は極めて電気分極しにくく、その電気分極率は極く小さく $0.2 \times 10^{-30} \text{m}^3$ に過ぎない。そのため僅かばかり誘電分極したヘリウム原子が多数不純物イオンを中心として凝集してスノーボールが生成される。簡単な計算によるとスノーボールの内部の圧力は0Kにおける融解圧を十分超えている。したがってその内部は固相になっていると考えてよいであろう。これらのことはすでに1958年頃に指摘されている。当時、スノーボールの関係する一連の仕事は超流動ヘリウムの素励起の1つ、ロトンや渦糸の存在を明確に示したりして、超流動状態の全体としての描像を明らかにした点に大きな意義があり、特に最も顕著な例は量子化された渦の発見⁸⁾である。

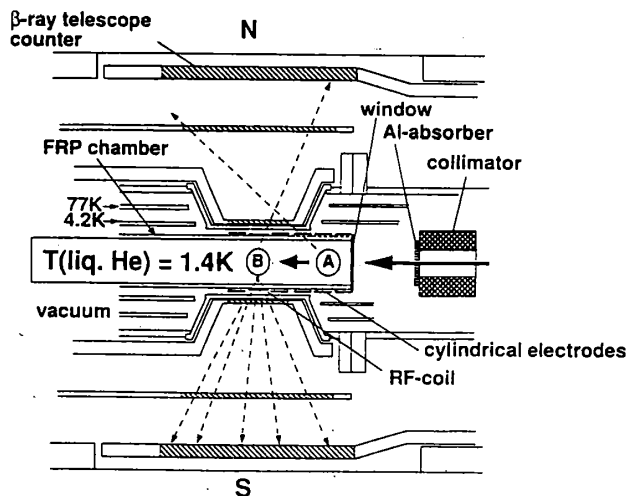
スノーボールの生成はちょうど上層大気中にある埃の粒子の周りに水蒸気水滴が凝集して雨粒ができる状況に似ている。気相中で不均一な液相ができるように、超流動ヘリウムの液相にはスノーボールという固相を含んだ凝集体ができると考えてよいのであろう。

スノーボールの芯となるイオンの核偏極が振舞う様子を知ることによって、その内部構造が対称性の高い構造を示すかどうか、固相であるかどうか、などの問題に関する知見を得られるであろう。このような内部場の構造はクラスターの問題として面白いかも知れない。

そのほかスノーボールと超流動ヘリウムの相互作用も古くからの問題ながら、極めて面白いと言えよう。

3. 実験

ここで紹介するのは大阪大学核物理研究センターのサイクロトロンおよびリングサイクロトロンを用いて行った一連の実験の一部である。560MeVまで加速された ^{14}N ビームを20msのビーム幅、くり返し60msにパルス化し集束させたのち、 ^9Be 標的に導いた。標的を通過したビームは2次ビームコースの光軸外で止め、反応生成核 ^{12}B を $^9\text{Be}(^{14}\text{N}, ^{12}\text{B})$ 反応によって創って、反応角度 5° の2次ビームコースの光軸にのせてクライオスタットの空間に導き、1.4Kの超流動ヘリウム中に打ち込んだ。超流動ヘリウムの温度は超流動チェンバー中の蒸気圧とGeとC抵抗によって測った。チェンバーの窓は $50\mu\text{m}$ 厚のステンレスで出来ていて、ある値以上の運動エネルギーをもつ反応生成核のみ超流動ヘリウム中へ入ることができる。超流動ヘリウム中での不安定核の飛程は数mmである。入ってきた ^{12}B は停止過程で相当分が中性化されてしまうが、一部は中性化されずに誘電分極によって50-100個のヘリウム原子で固く囲まれてスノーボールを形成する。このようにして生成されたスノーボールは円筒形の超流動チェンバー中に印加された静電場によって約50mm搬送される。実験装置を第1図に示す。



第1図

測定装置

こうして搬送された放射性核からのベータ線を40msのオフビームの間にプラスチック検出器によって検出する。上下一対の検出器は反応平面に垂直に配置してある。標的から超流動チェンバーにいたる道筋には静磁場があり大きさは900Gで、不均一度は約1%である。放射されたベータ線は超流動チェンバーの $100\mu\text{m}$ 厚のステンレス窓を通過したのち、真空箱の $50\mu\text{m}$ アルミニウム窓を通り検出器に入る。検出器は3対の薄いエネルギー損失検出器と、磁極の内面で磁極から散乱されるベータ線を除去する検出器との速い同時計数から成っている。ベータ線の検出最小エネルギーはほゞ3MeVである。

一回おきのオフビーム時間に高周波磁場を共鳴点675kHzを一回通過させることによって、断熱通過の核磁気共鳴をかけ不安定核 ^{12}B の核偏極 180° 反転させる。これはオンビーム時間が

終わったときの5ms間に行う。核磁気共鳴用の高周波は静磁場に垂直にかける。そのための高周波コイルは超流動箱の外に巻いてある。別のオフビーム時間には高周波をかけないため核偏極の反転は生じない。これらの時間に測定したベータ線計数から、上下非対称を平均によって求めた。この方法によって装置固有の非対称の影響は、取り除かれている。

不安定核¹²Bの核偏極は標的から超流動箱の窓にいたる真空中においては、イオンが完全に電子を剥ぎとられた状態にあつて超微細相互作用が働かないので、そのまま保持される。窓などを通過中ではそれらの原子との衝突時間が短いため、核偏極がこわされることはない。

偏極核¹²Bからのベータ線の角度分布は弱い相互作用におけるパリティ非保存から

$$W(\theta) = 1 - P \cos \theta$$

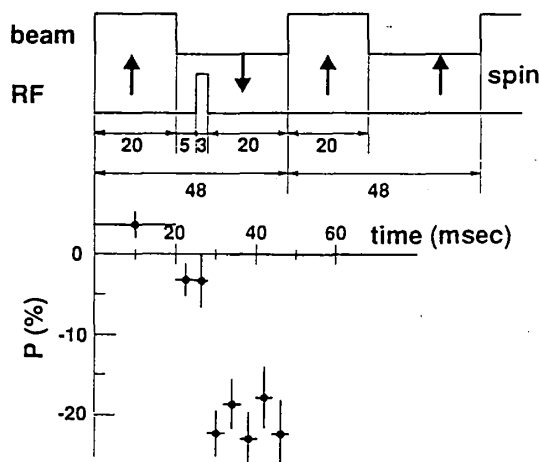
と書ける。このさい、 $\theta = 0$ は¹²Bの期待される核偏極Pの方向、すなわち反応平面に垂直な方向である。Pの大きさはベータ線計測の非対称 $R^{1/2}$ を使って

$$P = (1 - R^{1/2}) / (1 + R^{1/2})$$

と書け、そのさいNMRの印加する場合をonで、印加なしの場合をoffで区別すると、

$$R = (N(\theta)/N(\pi))_{\text{off}} / ((N(0)/(\pi))_{\text{on}}$$

である。ここでNはそれぞれのオフビーム時間における $\theta = 0$ と π でのベータ線の計数である。



第2図

スノーボール中における¹²B
核偏極の時間スペクトル

4. 結果

測定したベータ線のエネルギースペクトルと時間スペクトルは、 ^{12}B ($E_{\beta\text{max}} = 13.7\text{MeV}$, $T_{1/2} = 20.3\text{ms}$)のものとも一致している。以前の135 MeVの ^{14}N ビームでの実験に比べるとバックグラウンドが小さくなり、実験の精度が飛躍的に向上している。第2図は偏極時間スペクトルの1例である。測定点から見ると偏極保持の緩和時間は ^{12}B の寿命に比し、十分長いことを意味している。測定された偏極の値は20%で、パーゼル規約に従ったその符号は負である。問題の一つはスノーボールがゆっくりとしか動かないので高周波を印加するときその領域に達していないことである。そのため非対称が小さくしか観測されず、真の偏極は補正によってしか得られないことである。補正した値は-30%で、以前当方で測定した入射エネルギー560 MeV、角度 5° での核反応 $^9\text{Be} (^{14}\text{N}, ^{12}\text{B})$ における ^{12}B の偏極値の2次ビームコースで選んだ高運動量部分の平均の偏極値は-30%であった。このことから ^{12}B イオンの核偏極はその寿命の間完全に保持されるものと結論できる。また、ベータ線の計数率から、液体ヘリウム中に入ってきた ^{12}B のうちおよそ10%程度がスノーボールを形成するようである。

ちなみに初期の実験では、偏極の初期値10%にたいしスノーボール中での偏極は $7 \pm 3\%$ であった。⁵⁾

5. 議論

核偏極保持が観測されたことから、スノーボールの構造は対称性が極めて高く、固体の性質を持つものである可能性が大きい。すなわち、正に帯電したイオンのまわりにヘリウム原子が極めて恒久的なマイクロクラスターを形成している。古典力学的な模型によったAtkinsの説明⁹⁾は定性的に正しいと考えられる。この模型は1個のパラメーター、表面張力だけを用いて、描像を明らかにしてくれる。誘電分極による凝縮は広い範囲にわたって、イオンのまわりの液体の密度の増大をもたらしている。しかし、イオンから10分の数nmにわたって密度が極めて高くなっていることは理解されるものの、果して固体の芯が形成されているかは、これまで明らかでなかった。

もし、スノーボールが対称性の低い固体構造や、液相の状態にあれば、実験で得られたように核偏極の凍結が起こると考えるのは無理であろう。例えば、JohnsonとGlabersonは、各種の不純物イオンを含むスノーボールの易動度の測定から、スノーボールは小さな結晶であると結論しながらも、易動度が不純物イオンの原子番号と単なる比例関係にないことから、スノーボールは完全な球形ではなくその表面が振動している可能性があるとして指摘している。²⁾

さて、この実験結果から、スノーボール中において核偏極が凍結され得ると考えてよいであ

ろう。すると、実験事実はその他に何を示唆するであろうか。不純物イオンの周りに作用する誘電分極はイオンの電荷のみによって、多くのヘリウム原子を集めるであろう。そして、一般にこのような凝集体では、どのような種類の不純物イオンが中心になってもよいであろう。そのさい、固体の芯が形成され、10分の数nm程度の半径で液相に変る可能性がある。⁶⁾

このような核偏極の凍結が生じることは、スノーボールが核モーメントの決定にさいして極めて有効な捕集体となり得ることを示している。さらに、中心となる核の原子番号(陽子数 Z)や中性子数 N に依存しない。最近完成した、核反応で生成された不安定核をイオン線として形成する方法¹⁰⁾と、この方法を組み合わせると、従来、 $N-Z$ 平面の安定線附近の狭い部分に限定されていた原子核分光の研究を、広い $N-Z$ 平面に広げる有力な方法を提供する可能性がある。

また、このスノーボールの新しい検出法は超流動ヘリウム中における不純物イオンの輸送現象の詳細な研究を可能にするであろう。とくに ^6He や ^8He 等のベータ放射核のイオン線¹⁰⁾を用いると超流動における基本的な問題や、ヘリウムの固化にさいして、その中に自然に存在したり、生成されたりする不純物イオンが核になる可能性も¹¹⁾試されるであろう。

6. まとめ

スノーボールの新しい検出方法、ベータ線検出法およびアルファ線検出法が完成した。ここで開発した新しい検出法はスノーボールの性質と相俟って超流動の基本的な問題等を明らかにするのに役立てることができよう。超流動ヘリウム中の不純物イオンが閉じ込めたり、静電場によって搬送し得ること、また、その芯となるイオンの核偏極を凍結し得ることが明確になった。この閉じ込めと核偏極保持は安定線を離れた原子核の電磁気モーメントを決定するさい有効である。ヘリウム原子の凝集体であるスノーボールは、偏極保持から対称性の高い構造をしていることと、恒久的な固体の芯をもつかどうかを明らかにする手がかりが得られたと考えている。このことはクラスター物理の対象として興味があろう。

おわりに

この実験研究は大阪大学核物理研究センターで行ったものである。大阪大学旧教養部を中心とする実験班の努力と核物理研究センターの協力の賜物である。この研究を実施するにあたり、文部省の科学研究助成金、東レ科学技術研究助成金、三菱財団助成金のお世話になっていることを付記し、関係各位に感謝したい。

参考文献

- 1) L. Meyer and F. Reif, Phys. Rev. 110 (1959), 279L and G. Careri, F. Scaramuzzi and J. O. Thomson, Nuovo Cimento 8 (1959), 1758.
- 2) W. W. Johnson and W. I. Glaberson, Phys. Rev. Lett. 29 (1972), 214.
- 3) M. Date, 固体物理 5 (1970), 485.
- 4) K. Sugimoto, M. Ishihara and N. Takahashi, Polarization Phenomena in Heavy-Ion Reactions in Treatise on Heavy-Ion Science, edited by D. A. Bromley, Vol. 3, Plenum Press, New York, 1985.
N. Takahashi, Hyperfine Interactions 21 (1985), 173.
K.H. Tanaka, Y. Nojiri, T. Minamisono, K. Asahi and N. Takahashi, Phys. Rev. C34 (1987), 580.
- 5) N. Takahashi, T. Shimoda, Y. Fujita, T. Itahashi, N. Ikeda and D. J. Hinde, Nuclear Structure through Static and Dynamic Electromagnetic Moments, p.334 (University of Melbourne, 1987).
- 6) K. W. Schwarz, Adv. Chem. Phys. 33 (1975), 1.
- 7) D. L. Goodstein, J. Low Temp. Phys. 33 (1979), 137.
- 8) G. W. Rayfield and F. Reif, Phys. Rev. Lett. 11 (1963), 305.
- 9) K. R. Atkins, Phys. Rev. 116 (1959), 1339.
- 10) I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, S. Nagamiya, Y. Shida, N. Yoshikawa, O. Yamakawa, K. Sugimoto, T. Kobayashi, D. E. Greiner, N. Takahashi and Y. Nojiri, Phys. Lett. 160B (1985), 380, and I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, N. Yoshikawa, K. Sugimoto, O. Yamakawa, T. Kobayashi and N. Takahashi Phys. Rev. Lett. 55 (1985), 2676.
- 11) M. W. Cole and T. J. Sluckin, J. Chem. Phys. 67 (1977), 746.