

超流動ヘリウム中の放射性不純物の振る舞い

重松利信**, 清水俊***, 平山賀一****, 出水秀明***, 下田正***

Impurities in Superfluid helium Detected via Radioactivity

T.Shigematsu**, S.Shimizu***, Y.Hirayama****, H.Izumi*** and T.Shimoda***

Abstract

High-speed ions of ^{12}B and ^8Li were introduced into superfluid He at 4.2K-1.2K. The impurities were individually detected with the multi-counter detection system and were resolved in position and in time. Two regimes for the impinging impurities were observed; snowballs and neutrals. Snowballs of ^{12}B were transported under a static electric field and stored. Nuclear spin polarization of ^{12}B encapsulated in the snowballs was then determined via beta-ray asymmetry measurements. The polarization of ^{12}B inherent to the incident ions is maintained in the snowballs, but not in the neutrals. The neutral atoms belong to two different categories in their behaviour; atoms keeping the swift motion and other atoms stopped. These measurements imply wide applicabilities of impurities as micro-laboratories and disentangling the problems concerning trapping and motion of impurities in superfluid He.

I. INTRODUCTION

量子液体である超流動ヘリウムについては Balk 的な取り扱いとしての実験結果は非常に多く^{1),2)}, Landou 等による理論的解釈も完成されたものがある^{1),3)}。ところが, 有限サイズの超流動性についての研究は, 超距離交換相互作用の発現機構の解明など非常に有意義であるにもかかわらず, 実験的取り扱いや実験手法の困難等から殆どなされていない⁴⁾。理論的には Sindzingre が Feynmann Path Integral Monte Carlo Calculations によって 60 個以上のヘリウム原子が集まると超流動性を示すことを予言したに止まっている⁵⁾。

そこで, 我々は有限サイズの実験系として Snowball に着目した。Snowball はイオンの周囲にヘリウム原子が誘電分極して凝集したものをいい, 図 1 に示すように1価のイオンを core とした場合, 40 個程

度のヘリウム原子が凝集すると考えられている。また core となるイオンの価数を変える事で凝集数を変化

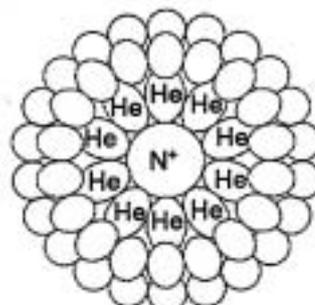


図 1 : イオンを core とする Snowball の概念図

させることができる利点を持つ。また, 実験手法として不安定核を core とした Snowball を用いることで崩壊過程で放出される β 線を観測し, 位置をトレースすることが可能となる。このように原子核の実験技術を導入する事で core と周囲のヘリウム原子との相互作用まで拡張した議論が期待できる。

さて本研究に際し, 大阪大学・核物理研究センターから E119「Study of behavior of Impurities in Superfluid Helium」としてリングサイクロトロンのマシントラック 5 日間で許可された。

* 原稿受付 平成16年10月20日

** 佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科

*** 大阪大学大学院・理学研究科

**** 高エネルギー加速器研究機構・
素粒子原子核研究所

そこで、第1段階の実験として以下の研究目標を定めた実験を計画した。

○光速に近い速度で打ち込まれる不安定核は Snowball を形成するか

——超流動ヘリウム中に撃ち込まれた不安定核は次の Energy Loss の過程を経て順次速度を落とし、最後には止まると考えられる。

① Ionization process

——ヘリウム原子の Ionization potential, 24.6eV まで

② Excitation process (phonon, roton の励起)

——two-roton 励起の最低エネルギー 1.3meV まで

③ Elastic scattering (normal component との弾性散乱)

①の過程でイオンか中性かの選別がなされると考えられるが、本当にイオンが生成されるのかどうかは全く不明であり、確かめる必要がある。

○Snowball の Formation efficiency に温度・核種依存はあるか

——Snowball が生成されるならば、何が生成率を決めるポイントなのか。①の過程だけの考慮では温度依存は存在しない結果が得られるはずである。また、He の Ionization Energy (24.6eV) が効いているならば核種依存はないはずである。

○Snowball の電場に対する挙動を調べ、コントロール可能かどうか判断する。

——Snowball の mobility は核種によって10%程度の違いがあり、その温度依存性も多少違う事が知られている⁶⁾。しかしながら、それを説明出来るだけの実験も理論的解釈もなされていない。不安定核を core にするこの手法では core の種類を変えた系統的な測定が可能である。それにより Snowball の structure を明らかにし、電子がどの様に寄与して電場を作っているのかの詳細を言及できる。

また、核の超微細構造相互作用を β NMR 法で測定する場合の Stopper として Snowball を利用する場合、長時間液体中に留めておくことが

必要である。しかし、Snowball は速度が電場に比例している為、加速度が電場と比例関係にある電子で行われる ion trap 法では留める事は出来ない。そこで、100Hz 程度の往復電場による蓄積法を考案したが、これを成功させるためには液中での Snowball の挙動を知る必要がある。

II. EXPERIMENTAL SETUP

上記実験目的を達成するためには、適当な寿命を持つ不安定核を生成・選別し、超流動ヘリウムに導くための不安定核生成装置、安定な超流動ヘリウムを得る事の出来る Cryostat 及び超流動ヘリウムに打ち込まれた不安定核全ての崩壊位置、崩壊時間を測定できる位置感応型 β ray detection system が必要である。以下、実験装置の詳細を説明する。

A. 不安定核生成

不安定核の生成はサイクロトロンにより加速した一次 Beam を Production target にあて、入射核破砕反応によって不安定核を生成する手法を用いる。生成される不安定核は磁場と運動量により選別され、目的とする不安定核を殆ど混じり物無しで得る事が出来る。この不安定核生成装置は大阪大学・核物理研究センター (RCNP) に設置されており、その専用コース (EN) の最下流で実験を行う。

さて、本実験に使用する不安定核は寿命と収量予測から以下のように決めた。

${}^8\text{Li}$ ($T_{1/2}=838\text{ms}$, Ionization energy=5.40eV),

${}^{12}\text{B}$ ($T_{1/2}=20.2\text{ms}$, Ionization energy=8.28eV),

${}^{17}\text{N}$ ($T_{1/2}=4.2\text{s}$, Ionization energy=14.55eV)

一次 Beam に ${}^{18}\text{O}$ (60nA/u) を、Production target に 2mm の Be を用いた場合のそれぞれの収量は以下の通りであり、マシンタイム内に実験を終えることができるかと期待できる。

${}^8\text{Li}$: $\sim 90\text{cps}$

${}^{12}\text{B}$: $\sim 300\text{cps}$

${}^{17}\text{N}$: $\sim 1.3\text{Kcps}$

超流動ヘリウム中の放射性不純物の振る舞い

B. Cryostat

B-1 Design

サンプルとなる超流動ヘリウムを得るための装置は ^4He evaporation cryostatを用いた。図2に示す

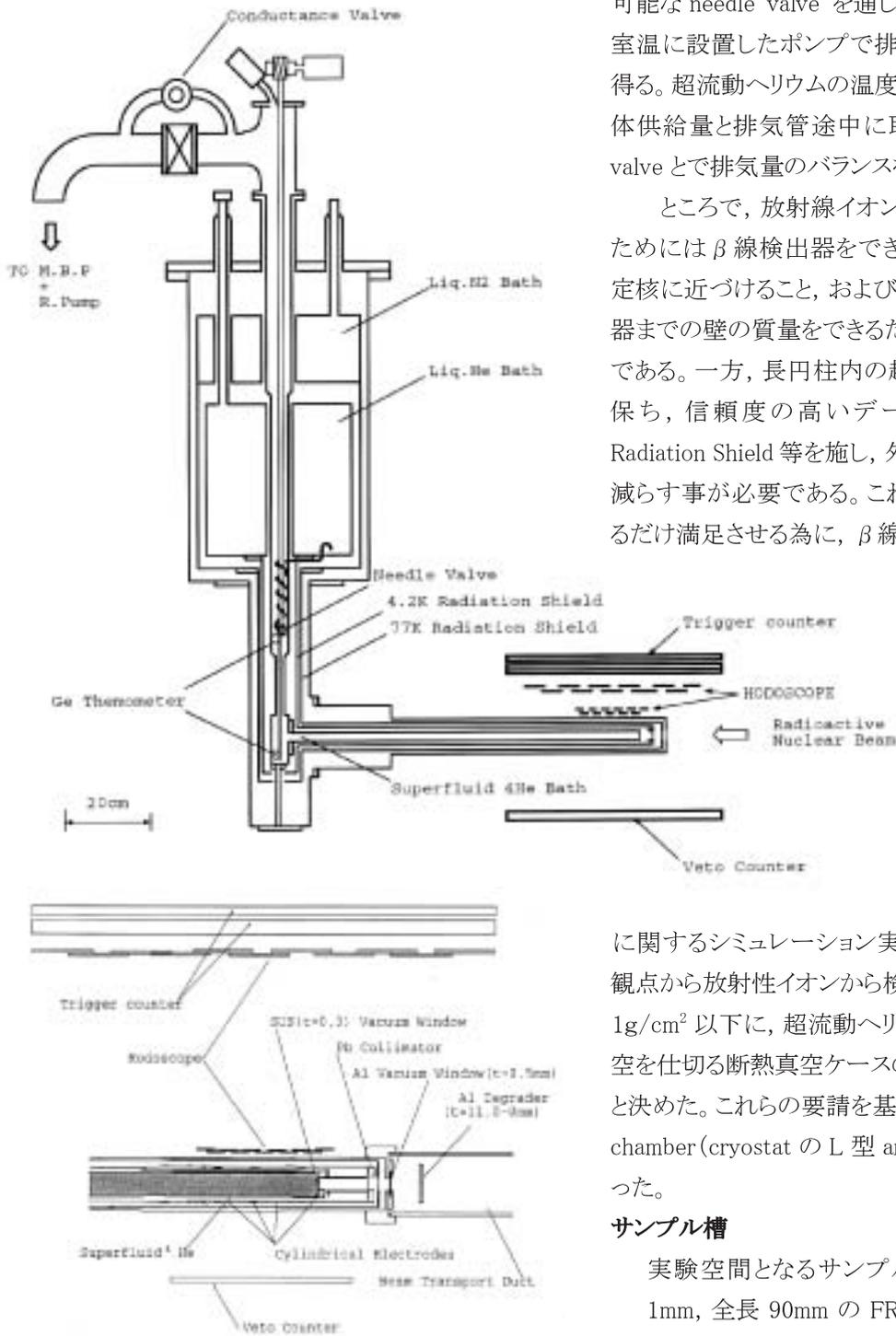


図2: Cryostatの全容(上図)と Position sensitive β ray detection system(下図)。

ように Cryostat は液体窒素槽, 液体ヘリウム槽, 超流動ヘリウム槽から成り, 超流動ヘリウムの溜まるサンプル槽はL型の構造となっている。超流動ヘリウム槽への液体の供給は液体ヘリウム槽から遠隔操作可能な needle valve を通して行われる。その液体を室温に設置したポンプで排気し, 超流動ヘリウムを得る。超流動ヘリウムの温度は needle valve による液体供給量と排気管途中に取り付けた conductance valve とで排気量のバランスをとることによって行う。

ところで, 放射線イオンの位置分解能を上げるためには β 線検出器をできるだけ β 崩壊する不安定核に近づけること, および超流動ヘリウムから検出器までの壁の質量をできるだけ小さくすることが必要である。一方, 長円柱内の超流動ヘリウムを安定に保ち, 信頼度の高いデータを得るには十分な Radiation Shield 等を施し, 外部からの熱侵入を極力減らす事が必要である。これら相反する事柄をできるだけ満足させる為に, β 線の multiple-scattering

に関するシミュレーション実験を行い, 実験精度の観点から放射性イオンから検出器までの質量を $1\text{g}/\text{cm}^2$ 以下に, 超流動ヘリウム槽の壁から大気と真空を仕切る断熱真空ケースの壁までの距離を 10mm と決めた。これらの要請を基にして以下に示すように chamber (cryostat の L 型 arm 部) の設計・製作を行った。

サンプル槽

実験空間となるサンプル槽は内径 $\phi 20$, 厚み 1mm, 全長 90mm の FRP の筒からなる。不安定核の入射口となる先端部は電極を兼ねるための SUS cap で密封する。この cap には不安定核の打ち込みにより生まれるであろう電子群を吸い取

る役目も持たせている。入射口は不安定核のエネルギーロスを考え中央部のφ10を厚み0.3mmとし、それ以外は5mmにすることでcollimatorの役割も持たせた。

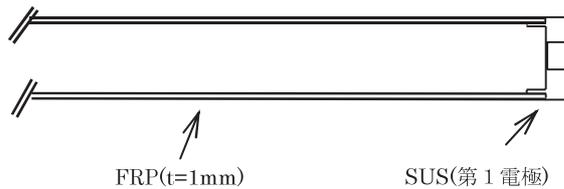


図3：超流動ヘリウム槽の概略図

4.2K Radiation Shield

FRPとAlの2重円筒構造とし、厚み1.5mmのFRPの円筒に0.2mmのAl箔を貼り付けている。B-2章で詳しく述べるが、サンプル槽へのheat loadを減らすために、Snowballを動かすためのC型電極はこのRadiation Shieldに取り付けている。

77K Radiation Shield

本実験計画では向上に放出されるβ線だけを検出する様に検出器の最適化をかけている。つまりβ線のmultiple scatteringを考慮し、壁材の質量に制限を持たせるのは上方と下方であり、左右壁材では多少の質量増加は差し支えない。そこで、厚み1mmのAlの円筒をH型に加工し、上下部には0.2mmのAl箔を張る構造とした。ここで上下部の穴の形状はβ線のscatteringが実験に支障の無いことをシミュレーション実験によって確認した後強度設計を行った。こうして円筒形のRadiation Shieldを完成させた。

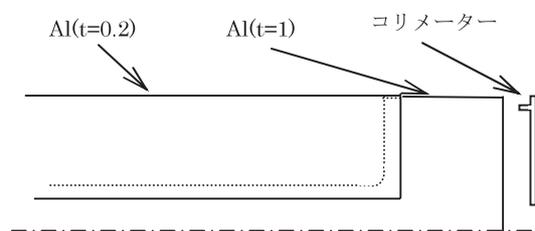


図4：77K 輻射シールドの概略図

断熱真空

FRP製の2段階円筒形状を採用した。実験空間は厚み1.5mmである。内壁には熱輻射を考慮し、Al蒸着マイラーを貼り付けた。先端は組み立て時のクリアランスチェック等を考慮し、取り外し可能なSUS cap O-ringシールにした。また、不安定核入射口となる先端部にはφ10mmの穴をあけ、様々な厚みのdegraderを取り付ける事が出来るように特殊加工を施している。

このようにして製作したCryostatのperformanceを以下に示す。

- 超流動ヘリウムへの熱侵入量… 10^{-5} W/cm²
- 温度安定性… 10^{-5} K/min
- 最低到達温度…1.04K
- 測定可能温度範囲…4.20K～1.08K
- 温度調節速度…0.10K/sec
- 放射性イオンから検出器までの質量…0.5g/cm²
- 超流動ヘリウム槽の内壁から断熱真空ケースの外壁までの距離…10mm

B-2 Electrode

Snowballを広げないように動かすためには、横電場の無い均一な電場が必要である。そこでC型電極をサンプル槽と同軸に並べる方法を採用した(図5参照)。今回の実験ではSnowballの移動距離

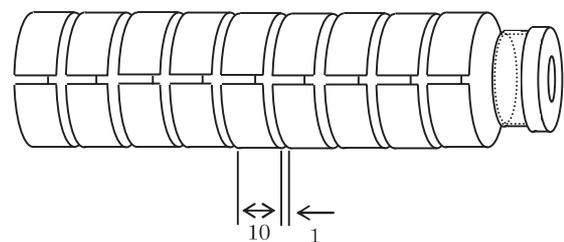


図5：電極の概略図

を100mmとした。そこで電極はC型電極9つとキャップ型電極1つの10電極で構成し、それぞれの電極には0～3KVの電圧を掛け、10V/cm～1000V/cmの均一電場を実現する(図6(b)参照)。C型電極の

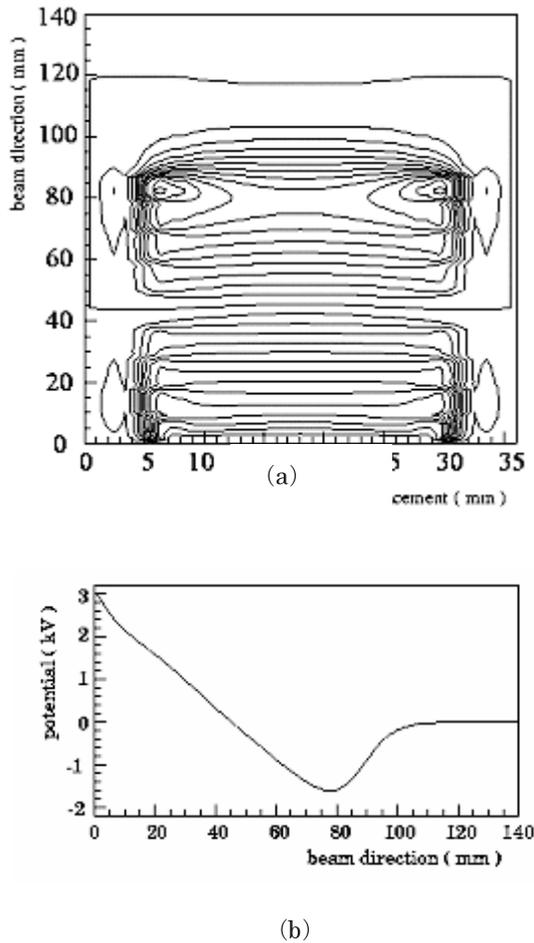


図6:(a) 電極の配置状況 (b)600V/cmの均一電場を掛けたときの電場マップ
(b) 600V/cmのサンプル槽中心軸上の potential

材質はリン青銅(0.02mm in thickness)で製作し、電極間隔は1mmである。電極間の放電防止の為に電極はFRPでモールドを施し、電極間にも注意深くFRPを入れ固めている。計算上、リン青銅製C型電極の設置の有無がβ線のmultiple scatteringに大きく影響することは無い。

ところで、これらの電極には理想的に電流は流れ込まないはずであるが、リード線や電極が互いにあるいはgroundに対してもつ静電容量の為に電圧印可時に次式にしたがって数~数十 mAの電流が流

$$i = C \frac{dV}{dt}$$

この実験で使用した電源のスローレイトは30V/ μ sec

れる。そこで、リード線には0.3mmマンガニン線を用い、放電防止にカプトン製のポリミドチューブを二重に被せた。これら電極は実験空間への熱侵入を避けるため4.2K Radiation ShieldのFRP部にモールドを行い、直接サンプル槽に触れないようにした。またこのシステムは10KVまでの絶縁破壊に対するテストを十分に行い、FRPにモールドされた電極同士が放電することも、ポリミドチューブを被せたリード線がgroundに対して放電することも無いことを確認している。

C. β ray detection system

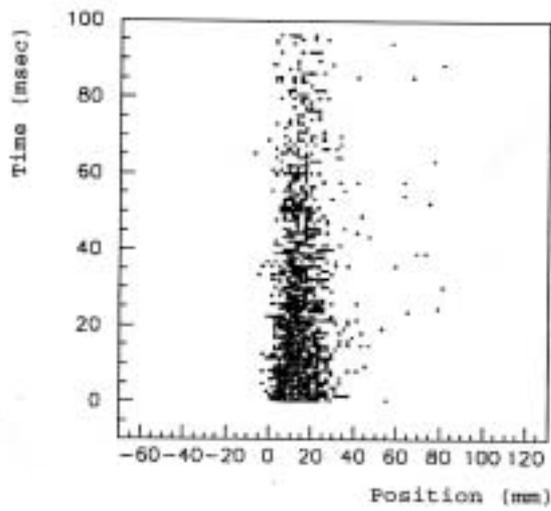
Detectorはβ崩壊の位置と時間を測定するための2組のHodoscope、位置分解能向上のために高エネルギーβ線を選び出す2枚のtrigger counter、cosmic rayによるeventを除去するためのVeto counterからなる(詳細図は図2に示す)。Hodoscopeはそれぞれ11枚のplastic scintillatorで構成されている。scintillation光はscintillatorの片端からアクリルガイドを通してPMT(Photo Multi T)に集光される。それぞれのscintillatorは互いに一部を重ねた状態で取り付けられており、PCによるevent処理によりあたかも21個のscintillatorのように取り扱う事が出来る。これらの工夫により超流動ヘリウム中の不安定核の位置分解能は7mm、集団の中心位置分解能~1mmで検出できる。

これらDetector群は広範囲な実験空間をカバーできるようにcryostatのL型armに沿って最大600mmまで移動できるようにした。

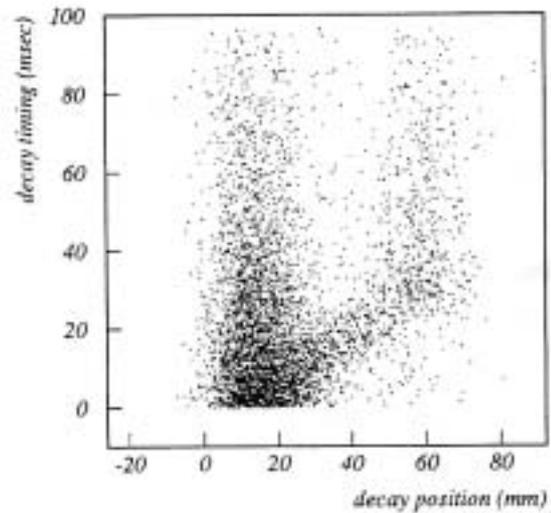
III. EXPERIMENTAL RESULTS

A. Experiment of ^{12}B

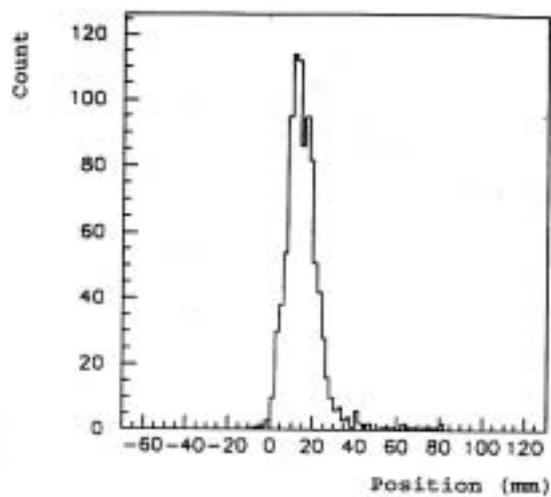
代表的な測定結果を図7, 8に示す。図7は核種 ^{12}B で超流動ヘリウム温度1.40K、電場無しの測定結果である。横軸は超流動ヘリウムの入口を0mmとした時の不安定核の崩壊位置を示す。(a)は縦軸を崩壊時間にとった場合、(b)は(a)の縦軸を崩壊位置への射影をしたもので、それぞれの位置での崩壊粒子総数を示している。超流動ヘリウム中に導かれた不安定核群は分布中心位置16mmで適当な分布を



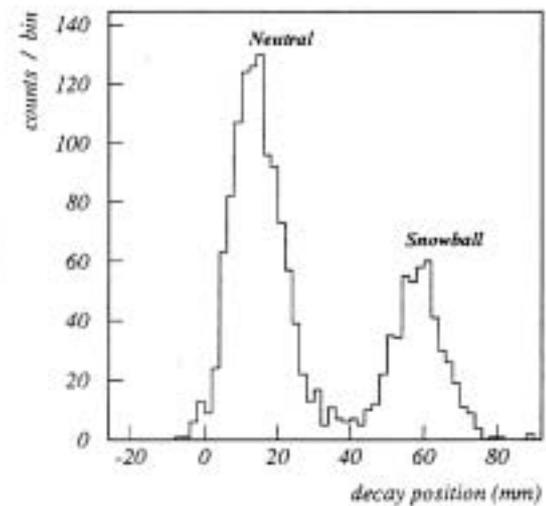
(a)



(a)



(b)



(b)

図7: ^{12}B で超流動ヘリウム温度 1.40K, 電場無しの場合の測定結果。横軸は超流動ヘリウムの入口を 0mm とした時の不安定核の崩壊位置を示す。(a)は縦軸を崩壊時間にとった場合、(b)は(a)の縦軸を崩壊位置への射影をしたものでそれぞれの位置での崩壊粒子総数を示している。

図8: ^{12}B で超流動ヘリウム温度 1.40K, 電場 300V/cm, 0-30ms の測定結果である。横軸は超流動ヘリウムの入口を 0mm とした時の不安定核の崩壊位置を示す。(a)は縦軸を崩壊時間にとった場合、(b)は(a)の縦軸を崩壊位置への射影をしたものでそれぞれの位置での崩壊粒子総数を示している。

持って止まり、崩壊している様子がわかる。(a)で時間の経過と共に薄くなっているのは寿命によるものである。電場をかけていないので、イオン・中性の区別はない。図8は電場300V/cmを掛けたときの測定結果である。核種 ^{12}B 、温度1.40Kで図7と同じ状態で電場の状態だけが違う。電場はBeam軸に平行(超流動ヘリウム槽の中心軸に平行)に0msから30msまで300V/cm掛けた。(a)は図7(a)と同様に崩壊位置—時間スペクトルを示している。図7と大きく違うのは電場によって分離された成分が現われているところである。この成分は電場をかけた0msから30msの間だけ動き、電場を切った30ms以後はその場に立ち止まり崩壊している。このことから電場によって動く成分はイオン、つまりSnowballであると考えられる。

さて、図中斜めに見る線はSnowballが崩壊しながら走っている様子を観測している。この傾きが速度である。この図から算出される速度は約1.8m/sであり、この温度におけるSnowballのmobilityはTaylorらの結果($0.5\text{cm}^2/\text{Volt}\cdot\text{sec}$)⁶⁾と誤差の範囲で一致する。

また、打ち込み位置に留まっているものは、電場を掛けているにもかかわらず動かないので中性化した放射性原子と考えられる。(b)は(a)で電場を切った時間(30ms)以降に時間で積分した崩壊位置スペクトルである。電場によりSnowballは、打ち込み位置

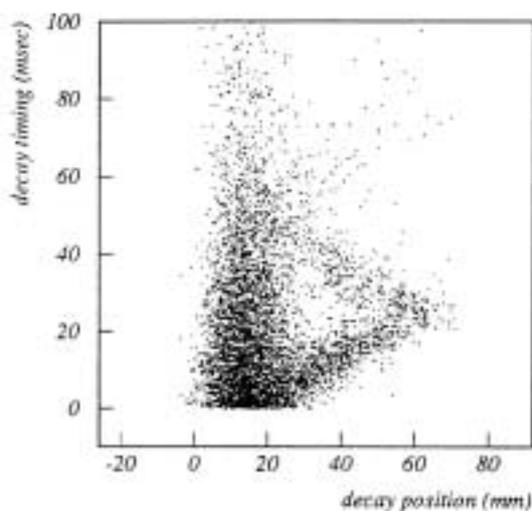


図9:電場の向きの正負を23ms毎に変え、Snowballを前後に動かした場合の測定結果。

に留まっている中性原子から十分に引き離すことが出来ており、きれいに両者の分離に成功した。ここから算出できる打ち込んだ総粒子数に対するSnowballの生成率は30%である。

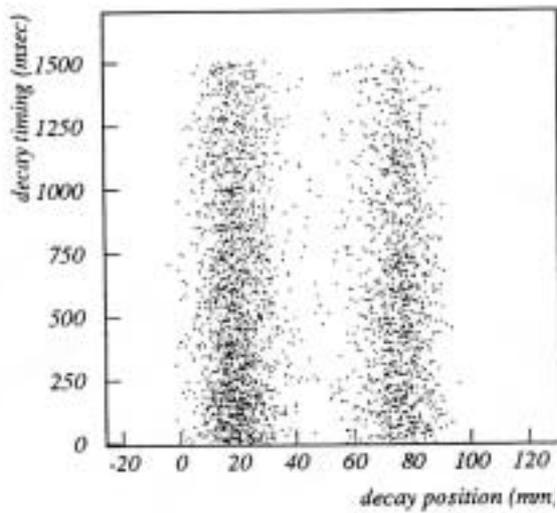
次にSnowballのコントロールの是非に関する実験を行った。その結果を図9に示す。この実験では電場の向きの正負を23ms毎に変え、Snowballを前後に動かした場合の測定結果である。Snowballは往復しながら崩壊し、ついには見えなくなっている様子がわかる。

B. Experiment of ^8Li

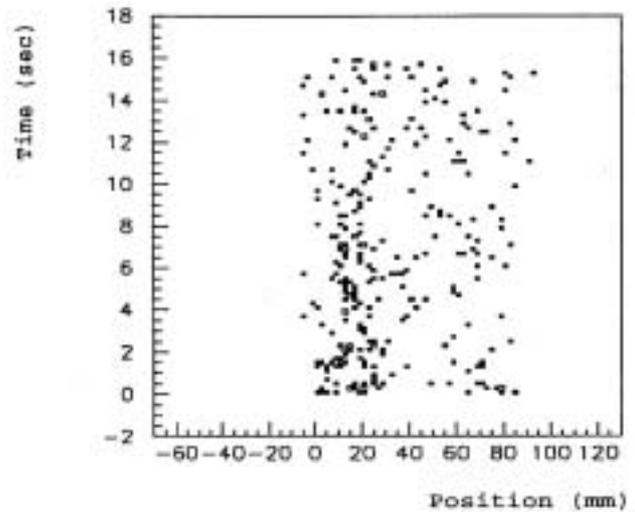
図10に代表的な測定結果を示す。(a)に崩壊位置—時間スペクトルを、(b)に崩壊位置—それぞれの位置での崩壊粒子総数スペクトルを示している。測定温度は1.40K、電場300V/cm、電場印加時間0ms—30msである。打ち込み核が ^8Li の場合、寿命が838msと長いので走りながらの β 崩壊は観測されず、打ち込み位置に留まった中性成分と電場により移動したSnowball成分だけが観測されている。(b)により打ち込んだ総粒子数に対するSnowballの生成率は40%である。

C. Experiment of ^{17}N

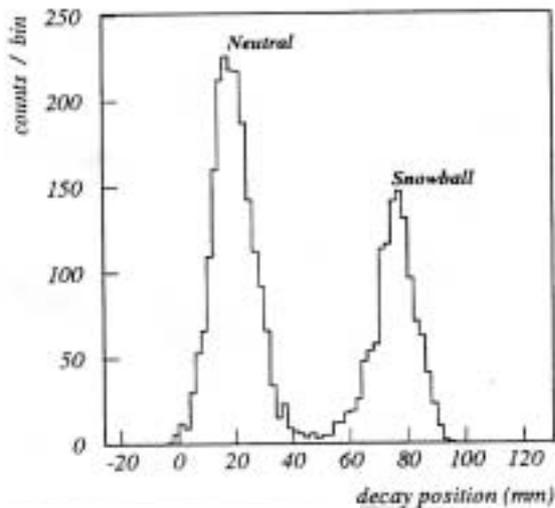
図11に代表的な測定結果を示す。(a)に崩壊位置—時間スペクトルを、(b)に崩壊位置—それぞれの位置での崩壊粒子総数スペクトルを示している。測定温度は1.40K、電場300V/cm、電場印加時間0ms—30msである。 ^{17}N ($T_{1/2}=4.2\text{s}$)の場合、これまでの核種と全く違い殆どSnowballは生成されていない。図11(b)で崩壊位置60mm付近にSnowballとも思える盛り上がりがあるが明らかではない。この盛り上りをSnowballと考えた場合の生成率は数%である。



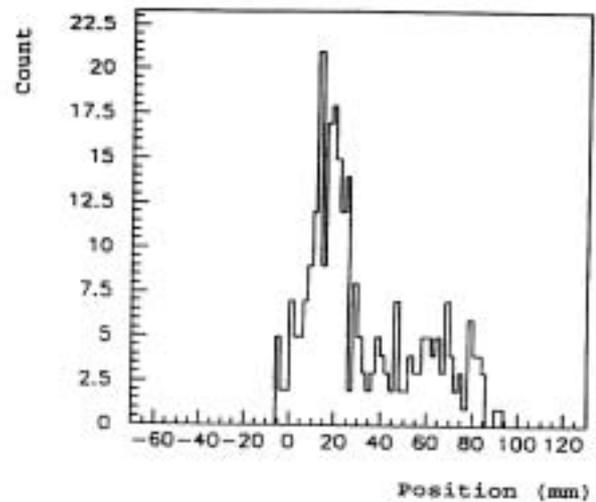
(a)



(a)



(b)



(b)

図 10: ^8Li の測定結果。温度 1.40K, 電場 300V/cm, 0-30ms. (a)崩壊位置—時間スペクトル(b)に崩壊位置—それぞれの位置での崩壊粒子総数スペクトル。

図 11: ^{17}N の測定結果。温度 1.40K, 電場 300V/cm, 0-30ms. (a)崩壊位置—時間スペクトル(b)に崩壊位置—それぞれの位置での崩壊粒子総数スペクトル。

D. Temperature Dependence of Formation

Efficiency

それぞれの不安定核における Formation efficiency の測定は 2.70K から 1.10K に至る温度範囲で行った。Formation efficiency は超流動ヘリウムに導かれた不安定核の総粒子数に対する Snowball

の生成された割合と定義する。 ^{17}N を core とした Snowball は全ての測定温度領域において図 11 に示した程度の生成しかなく、それ自体 Snowball かどうかとも疑問である。従って、ここでは ^{12}B , ^8Li の測定結果について議論する。Formation efficiency の温度依

存性を図 12, 13 に示す。横軸は温度, 縦軸は Formation efficiency である。 ^{12}B の場合、データにばらつきが大きく温度依存の有無ははっきりしないが、Formation efficiency はほぼ 30% である。 ^8Li の場合、Snowball と中性成分との分離が良く誤差が小さい。Snowball の Formation efficiency は温度の低下と共に上昇している事が明らかに見てとれる。その増加率は約 50% である。

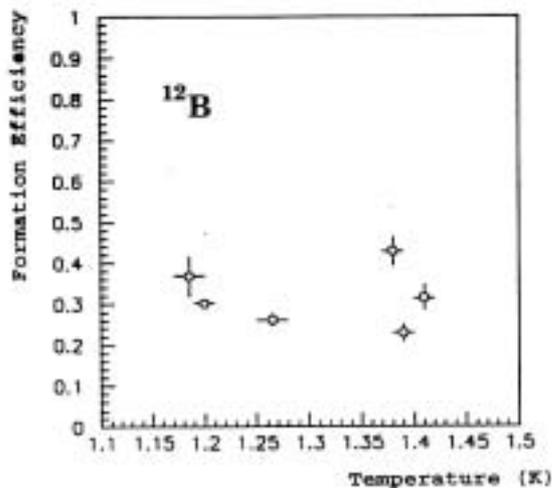


図 12: ^{12}B の Formation efficiency の温度依存性

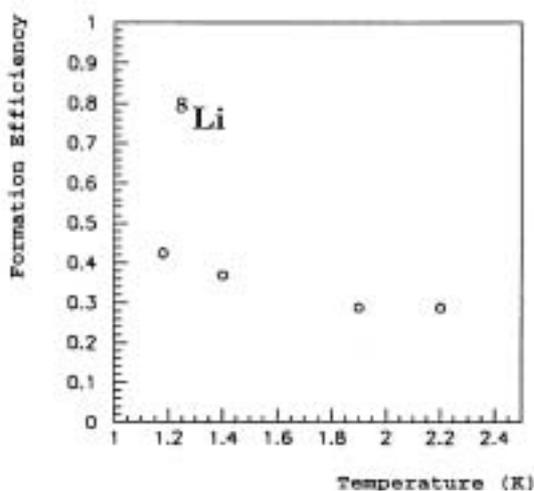


図 13: ^8Li の Formation efficiency の温度依存性

IV. DISCUSSION

以下、本実験で得られた Formation efficiency の温度依存性, 核種依存性に関して議論する。

Snowball の Formation efficiency を決める第一の要素として考えられるのは、入射した不安定核と超流動ヘリウムとの energy exchange の過程である。不安定核は Full strip 状態で、光速に近い速度で超流動ヘリウムに導かれる。その際の超流動ヘリウム中での粒子のエネルギー損失過程は次のように大別できる。

- ① Ionization process
- ② Excitation process (phonon, roton の励起)
- ③ Elastic scattering (normal component との弾性散乱)

通常、イオンと中性との選別は Ionization process により行われると考えられる。しかしながら、この Ionization による過程だけの考慮では ^{12}B , ^8Li , ^{17}N の核種による違いは出てこない。また、温度依存性も同様である。温度依存性の発現は、打ち込まれた粒子が温度による違いを感じる③の過程になってからである。超流動状態にある液体ヘリウムの中で弾性散乱が許されるのは Normal component だけであり、その濃度 ρ_n/ρ は温度と $(T/T_\lambda)^{5,6}$ の関係がある¹⁾。この Normal component の濃度は超流動転移温度 ($T_\lambda = 2.17\text{K}$) 以下で、温度の低下と共に対数的に減少する(因みに、液体ヘリウムの密度は 2.0K 以下では殆ど変化しない)。イオンと中性との選別則に温度依存があることから③の過程もその選別に十分寄与していると考えられるが、ヘリウム原子がその Ionization potential よりも低い energy で電子を受け渡すことは考えに難い。仮に③が支配的である考えでも ^8Li における Formation efficiency の温度依存は $(T/T_\lambda)^{5,6}$ とは一致せず、他の弾性散乱中心を示唆している。

次に考えられるのは、Snowball と電子との recombination である。電場中の電子の速度には温度依存 ($\propto T^{-1}$, $1.6\text{K} < 0.9\text{K}$) があり、入射した粒子はその道筋に Ionization による電子海を作っている。従って、①; その電子との recombination の割合が温度依存している可能性がある。あるいは②; recombination

による Formation efficiency の劣化が考えられる。しかしながら①の場合、その寄与は温度の低下と共に強くなるため、Snowballの Formation efficiency は温度のべき乗に比例する方向に働くと予測できる。ところが、実験結果は温度の低下に対し、増加する方向に働いており実験結果の説明には至らない。また②の場合、Ionization potential の小さい ${}^8\text{Li}$ (Ionization energy =5.40eV)が最も影響されやすく、イオンを残しにくくするはずである。次に ${}^{12}\text{B}$ (Ionization energy = 8.28eV)が、最もイオンを残しやすいもの、Snowball の Formation efficiency が最も大きいものとして ${}^{17}\text{N}$ (Ionization energy=14.55eV)があるはずであるが、実験結果はこの考察に対し逆の結果であり、この考えでも説明ができない。

これら Snowball の Formation mechanism に関する諸問題は今後の課題である。

V. CONCLUSION

我々は超流動ヘリウム中での放射性不純物の振る舞いの研究のために、特別な実験装置を開発し、実験をおこなった。それによって以下のことを明らかにした。

- 光速に近い速度の放射性不純物を超流動ヘリウムに入射する方法で、Snowball の生成に成功した。
- 入射されたイオンは中性状態とイオンの状態になる。しかしながら、その比率を決める背景を議論できる段階には達していない。
- Snowball の生成率には、核種依存、温度依存がある事を明らかにしたが、その原因及び係数を決めるには至らなかった。これらのためにはより詳細な測定、特に低温領域に測定範囲を広げた測定が必要である。
- 電場による Snowball の control に成功した。
- 正イオンを核とした Snowball が、まさに走っている動的状態の観測に世界ではじめて成功した。

REFERENCES

- 1) London, F. *Superfluids*. Vol. II , (*Superfluid Helium*) Wiley, New York (1954)

- 2) Tilley, D.R. and Tilley, J. *Superfluidity and Superconductivity*. Van Nostrand Reinhold, London (1974)
- 3) V.L.Ginzburg, L.D.Landau, *Zh. Exp. Teor. Fiz.*, **20**, 1064 (1950)
- 4) S.Grebenev, J.P.Toennies and A.F.Vilesov, *SCIENCE*, **279**, 2083 (1998)
- 5) P.Sindzingre, M.L.Klein, D.M.Ceperley, *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 1601 (1989).
- 6) R.D.Taylor and J.G.Dash, *Phys. Rev.*, **106**, 398 (1957)