



Title	液体ヘリウムとBose凝縮：回転したHe IIの液面の測定について
Author(s)	佐々木, 祥介; 発生川, 武次
Citation	大阪大学低温センターだより. 1981, 33, p. 6-9
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/11172
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

液体ヘリウムとBose凝縮

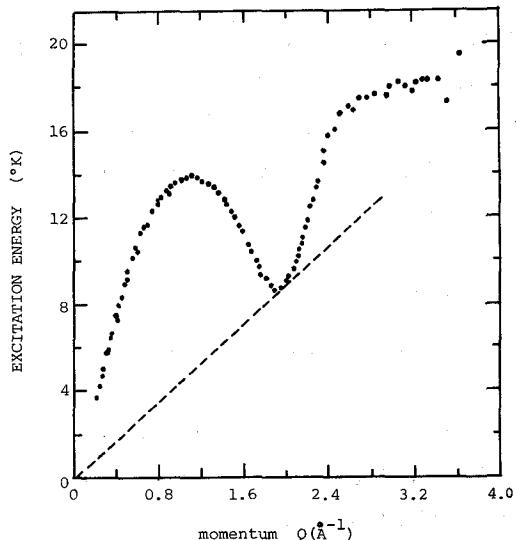
—回転したHeIIの液面の測定について—

教養部 佐々木 祥介(豊中 5244)
発生川 武次(豊中 5240)

液体Heはよく知られているように、2.17 K以下の温度でHe II状態になり、超流動性を示す。この性質を説明するために、Landau¹⁾は液体HeIIをスーパー成分とノーマル成分の2成分よりなる2流体であると仮定し、半現象論的立場から超流動性を説明した。すなわち、彼はノーマル成分を励起子の集まりと考え、スーパー成分から励起される時の励起子の運動量とエネルギーの関係を求めた。この関係は中性子散乱の実験²⁾から実際に見つけられ、その運動量・エネルギーの関係は第1図のような形をしていることが分った。更に、Landauは巨視的物体がHeII中を運動する時、スーパー成分にエネルギー及び運動量を与える、それを励起させ、物体の方はその反作用として減速される場合を考えた。その結果、スーパー成分に対する巨視的物体の速度が、ある一定な速度 v_c 以上でないと、エネルギー・運動量の両保存則を満さないことを見つけた。この v_c は第1図の点線で示される直線の勾配であり、中性子散乱の実測値から計算すると約 5.8 m/s となる。このことから、Landauは、スーパー成分が巨視的物体に摩擦力を及ぼすのは、スーパー成分と巨視的物体の相対速度が v_c 以上の場合に限られること、すなわち、 v_c 以下の相対速度では粘性のない超流動性を示すことを明らかにした。しかし、ここに2つの問題が残された。

その第1はノーマル成分は励起子の集まりだと考えることができても、スーパー成分が何者なのか分らないままであること。第2に Landauのcritical velocity v_c に対する予言は約 5.8 m/s であったが、それに対する実測が行われた結果、そのような高速の v_c を観測することはできず、現在までのところ、 v_c の測定値のうちの最高のものでも 0.8 m/s となっており、測定条件により異なる値が出ている。このように、まだ HeII の性質には、不可解な点が多くある。

一方理論の立場からすると、HeIIの問題は Bose 粒子系の最も基礎的な多体問題であり、それ故、それを解くことは興味深いものであり、多くの人々が色々な方面から追求を行なっている。阪大教養部では、砂川研究室³⁾、西山研究室⁴⁾において、多くの仕事が行なわれ、8次元 Bose 系の近似的解を求め



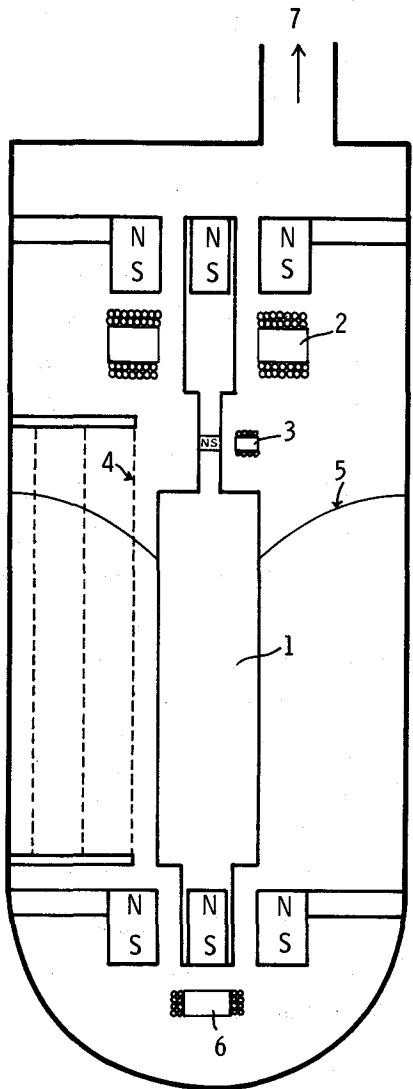
第1図 液体HeIIの励起スペクトル

ることが可能になった。しかし、とりわけ励起子が多くある場合の固有状態については、近似を正しく行なうことが難しく、未整理な部分を残している。一方、おもちゃの model ではあるが、1 次元の系を考えると任意の 2 粒子間に δ 関数的な斥力があるような多粒子の Bose 系の問題が Girardeau, Lieb, Liniger⁵⁾ 等により古典量子力学の取扱いによって厳密に解かれている。そこで、我々⁶⁾はこの問題を Field Theory の立場から再度追求し、厳密解を求める成功した。その結果、相互作用のない free state から、上述の相互作用のもとでの厳密な固有状態へのユニタリー変換を見つけることができ、その変換を He 原子の生成・消滅演算子にはどこと、新しい相互作用の着物を着た演算子を作ることができた。そして、相互作用のある場合の固有状態は、この新しい演算子によって作られる相互作用の着物を着た粒子から構成されていることで分かる。更に、基底状態は、運動量 0 を持つこの着物を着た準粒子のみで作られており、言い換えると、この準粒子が運動量 0 の状態に Bose 凝縮したものである。くり返しになるが、He 原子 1 つ 1 つが運動量 0 を持つではなく、準粒子が運動量 0 を持つのである。又斥力の相互作用の係数が無限に大きくなる時には、この基底状態の中にしめる free な He 原子が運動量 0 を持つ確率は無限小となるが、正確に着物を着た粒子が運動量 0 をもつ確率は、100% であるというきわだつた結果を示している。この意味で、He 原子が運動量 0 をもつ確率を主要部とした近似 (Bogolyubov の近似はそうなっている) は非常に悪いことが分かる。

我々の model は一次元であるが、このような結論がもし 3 次元の場合も定性的に成立するなら、He II のスーパー成分とは正確に相互作用の着物を着た Bose 粒子が運動量 0 の状態に Bose 凝縮したものと表わしており、ノーマル成分は運動量が 0 ではない準粒子全体を表わすことになる。(スーパー成分が静止していない時は、特定な運動量 p に巨視的な数の準粒子が Bose 凝縮したものがスーパー成分であり、それ以外の運動量をもつ準粒子がノーマル成分である。) このことから、スーパー成分のエントロピーが 0 であること、すなわち、状態数が 1 であることは自明となり、又その超流動性は Landau の議論と同じように成立する。ここで少し注意しておきたいことは、第 1 図で運動量 0 のところの励起子は、Landau 理論では励起にならないため存在しない。これは運動量が 0 であるようなフォノンが存在しないことに対応している。我々の結論では相互作用の着物を着た粒子を考えているので、運動量 0 の準粒子も勿論存在するし、その準粒子の数は保存し、He 原子の数と一致しているから、上述のような運動量空間で 0 という唯一点に Bose 凝縮したものが考えられるのである。

このように、一次元系の新しい計算方法によって明らかにされた定性的性格を 3 次元に拡張すると、スーパー成分が持っている性質があまりにも簡単に出てくることから、我々は、このような拡張が本物を表わしているのではないかと考えるようになった。もしそうなら、前述の critical velocity v_c は我々の立場でも Landau の予言どおり約 5.8 m/s となるから、乱流を起させないように、巨視的物体を He II 中で走らせることができるならば、この v_c が観測できるのではないかと思うようになった。

そこで、第 2 図の如き装置による実験を行なおうと考えている。まず、デュワービンの中に He II が入っており、その中に滑らかな表面をもつ回転円柱を図の如く鉛直軸まわりに回転させる。回転円柱の表面速度(周速) v が v_c より小さい時は、スーパー成分は回転円柱との摩擦がないから静止したまま



1. 回転子

2. 回転磁場発生コイル

3. 回転数検知コイル

4. 液面計

NO-Ti 超電導線($0.03\text{mm}\phi$)

5. He II の液面

6. 回転子の落下

浮上を自動制御するコイル

7. 真空ポンプへ

第2図 装置の概略図

であり、一方、ノーマル成分は粘性により回転し、遠心力が生じ、中心部が図の如くへこむはずである。このへこみの形は全流体が粘性を持つ常流体では流体力学の結論から、流体の密度や粘性係数によらない一定な形となるため、スーパー成分があるとその形が変化し、それを観測することにより、スーパー成分のあることを知ることができる。次に、回転円柱の周速 v を v_c 以上にすると、スーパーも粘性を生じ、液面の形が変化するはずである。

過去に行われた実験⁷⁾では第2図とは異なって外筒をまわした実験が行われているが、乱流のため、時々結果の異なるいくつかの状態が表われたり、実験状況の違いにより渦の発生のしかたが微妙に変化したりして、決定的なことは分かっていない。又、それらの実験では、回転子の構造上 5.8m/s 近くの

周速を得ることができず、わずかに 1 m/s 以下の実測があるだけである。更に外筒を回す場合、ノーマル成分が遠心力で外筒にへばりつくことになり、摩擦を生じやすいが、第2図の如く、内円柱を回すと、ノーマル成分を外へはじき出すことになり、乱流その他よけいなもの発生も少なくすることができると思う。

現在、大山忠司、^{*)} 北野保行^{**)} 両氏の協力のもとで、この実験を行う準備を進めているが、軸受けのない完全に浮いた高速回転子（周速 60 m/s 以上）を作ることが難しく、第1段階で作った軸受けのある回転子では、それを駆動するために回転磁場を用いて回しているが、その渦電流による発熱（数W）のため実測するまでに至っていない。現在、軸受のない回転子を製作中で来年度には実験にこぎつけたいと考えている。

参考文献

- 1) L.Landau, *J. Phys.* 5 (1941) 71 ; 11 (1947) 91.
- 2) R.A.Cowley and A.D.B.Woods, *Can. J. Phys.* 49 (1971) 177.
D.G.Henshaw and A.D.B.Woods, *Phys. Rev.* 121 (1961) 1266.
- 3) S.Sunakawa, S.Yamasaki and T.Kebukawa, *Prog. Theor. Phys.* 41 (1969) 919 ; 44 (1970) 565 ; 53 (1975) 1243 ; 54 (1975) 348 ; 61 (1979) 996, 1012.
S.Yamasaki and M.Hirooka, *Prog. Theor. Phys.* 64 No.3, 4.
- 4) T.Nishiyama, *Prog. Theor. Phys.* 45 (1971) 730 ; 54 (1975) 384 ; 56 (1976) 16.
- 5) M.Girardeau, *J. Math. Phys.* 1 (1960) 516.
E.H.Lieb and W.Liniger, *Phys. Rev.* 130 (1963) 1605.
E.H.Lieb, *Phys. Rev.* 130 (1963) 1616.
- 6) S.Sasaki and T.Kebukawa, I, II, III, IV (submitted to *Prog. Theor. Phys.*)
- 7) C.T.Lane, *Superfluid Physics* (McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1962).

*) 阪大教養部所属

**) 広大理学部所属