

内文 21~44

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Secondary Macroscopic Quantum Phenomena
in Neutral Superfluids

(中性超流体における第二種巨視的量子現象)

申請者

西田 宗弘

Munehiro Nishida

物理学及応用物理学専攻・低温量子物性研究

2001年12月



理 2683 (3323)

極低温の世界では、物質の波動性がマクロなスケールで現れ、超流動や超伝導のような特異な巨視的量子現象が起こる。その起源はボーズ・AINシュタイン凝縮(BEC)であると考えられている。ボーズ粒子(フェルミ粒子対)の統計性により、極低温で巨視的な数の粒子が一つの状態を占め、凝縮体が形成される。したがって、この凝縮体は多粒子系であるにもかかわらず一つの波動関数で記述される。すなわち、本来確率振幅という意味を有する波動関数が、BECを介して巨視的・古典的な物質波へと変化し、剛性を獲得する。凝縮体は、波動関数の振幅や位相さらには構成粒子のスピンのような内部自由度を用いて、トポロジーの異なる様々な構造を取りうる。これらの構造はマクロな波動関数の剛性により安定に保たれる。これがいわゆる“永久流”的起源であり、凝縮体の内部構造であるvortexやtextureの安定性の原因である。このように、量子力学的な波動関数がBECを介して巨視的・古典的な物質波となってマクロなスケールに現れ、多様な安定構造を作り出す現象を、ここでは第一種巨視的量子現象と呼ぶことにしよう。

ミクロとマクロの中間に位置するメゾスコピック領域では、この現象はどのように見えるだろうか。凝縮体は完全には古典的に振る舞わず、量子性を有することになる。したがって、巨視的に区別のできる凝縮体の異なる状態(構造)間でトンネル(Macroscopic Quantum Tunneling: MQT)や重ね合わせ(Macroscopic Quantum Coherence: MQC、シュレーディンガーの猫)が起ることになる。凝縮体それ自身が量子的に振る舞うことから、古典的に振る舞う第一種巨視的量子現象と区別するために、この現象を第二種巨視的量子現象と呼ぼう。この現象を調べることにより、ミクロからマクロへの移行の過程で如何にして量子力学的干渉性の消失(デコヒーレンス)が起こるのかを理解することができる。また、デコヒーレンスの理解は現在盛んに研究が行われている量子コンピューターなどの量子情報技術の成功の鍵を握っている。以上のように、第二種巨視的量子現象の研究は、現代の量子論の根幹をなす重要な概念の理解を深めるだけではなく、量子情報技術の基礎を築く上で重要な役割を担うと考えられる。

上記の観点から、メゾスコピックな超流動体や超伝導体での第二種巨視的量子現象は、凝縮体の異なる構造間の量子的な遷移と捉えることが出来る。一般に凝縮体の構造間の遷移は凝縮体の欠陥の生成を介して起こると考えられる。これまで、ジョセフソン接合におけるMQTやMQCは盛んに研究されてきたが、この系はあらかじめ欠陥を含んでいる系であり、欠陥の量子的な生成(量子核形成)が如何にして起こるのかという問い合わせには何も答えてくれない。そこで、我々はトーラス状の領域に閉じこめられた超流動体を想定し、永久流の量子的な減衰が如何にして起こるのかを調べた。

凝縮体の波動関数の一価性から、トーラスを一周まわってきた時の位相のずれは 2π の整数倍でなければならない。(この位相のずれを表す整数を巻数と呼ぶことにする。) 超流動カレントが位相の勾配に比例することから、トーラス状の超

流動体では循環が量子化されることになる。しかし、十分に細い試料では波動関数の欠陥である位相スリップの核形成が起こり、巻数の小さな状態に遷移していくと考えられる。実際、この核形成が熱活性によって起こることが、理論・実験の両面から確かめられている。位相スリップの核形成は十分低温では、量子トンネル効果によって起こると期待される。しかし、これは無限自由度の場のトンネル問題であり、直接トンネル確率を計算することは非常に困難である。そこで、位相スリップの量子核形成過程を記述するのに適した集団座標を導入し、一自由度のトンネル問題を考えることによって、量子核形成率を計算した。

位相スリップの核形成を律する慣性質量が経路に依らないと仮定すると、凝縮体の関数空間におけるGross-Pitaevskiiの自由エネルギー曲面上で、二つの極小点(巻数が整数の点)を結んだ峠道がトンネル確率にもっとも寄与する経路となる。自由エネルギー曲面の鞍点における場は、Gross-Pitaevskii方程式の定常解として解析的に求まるので、それらを滑らかにつなぐ関数によって峠道上の場が記述できるはずである。我々は、数値計算の結果と良く一致する関数形を見いだし、その関数形を決めるパラメータを集団座標として採用した。さらに、集団座標に対するポテンシャルエネルギーの解析的な表式を得た。また、ポテンシャルの極大・極小点の近傍での集団励起の励起エネルギーとポテンシャルの曲率を比較することにより、集団座標に対する有効慣性質量を求め、トーラスの円周 L に比例するという結果を得た。

これらの結果を用いて、集団座標のトンネル確率をWKB近似で計算すると、循環の減衰率がトーラスの円周とともに指数関数的に減少することが分かった。これは、波動関数の位相がトンネルの全過程を通じて系全体にわたり変化するためであり、凝縮体を表すマクロな波動関数のコヒーレンスの帰結である。この結果は、熱活性による古典的な核形成では見られない特徴であり、量子核形成では、マクロな波動関数のコヒーレンスの結果として、トーラスの円周のようなローカルでない物理量が現象を左右するという興味深い示唆を与えている。

ところで、実際の系では、凝縮体の構造変化にともない準粒子の状態は変化し、逆にその変化が凝縮体の運動にも影響を与えるはずである。欠陥の生成は必然的に凝縮体の集団モードや準粒子とカップルし、凝縮体の運動に対して摩擦や質量あるいはポテンシャルへの繰り込みとして大きな影響を及ぼす。また、デコヒーレンスの一因となっているとも考えられる。逆に、凝縮体の構造変化は準粒子にとって時空の構造変化に相当し、その生成消滅、状態変化など非常に多彩で興味深い現象が起こるものと思われる。このような凝縮体(真空)の構造変化と集団モードや準粒子の状態変化の問題は現代の場の量子論の様々な場面で現れる重要な問題である。

ジョセフソン効果は準粒子の感じるオーダー・パラメーターの情報が反映されるので、クーパー・ペアの対称性の決定のみではなく、textureのような内部構造

の決定にも用いることができるはずである。 ${}^3\text{He}$ の texture が無限の構造をとれるように、本来多様な構造をとり有ることが内部自由度のある系の特徴なので、その構造を同定するためには、それに対応する一般的な理論が必要である。

そこで、凝縮体の構造変化に伴ってどのように準粒子の状態が変化し、実際の物理量にどのような影響を与えるのかを調べる。古崎らによって構築されたアンドレーエフ描像による S-N-S 接合の理論を拡張し、より広範な異種相間接合を記述できるジョセフソン・カレント及びアンドレーエフ反射係数の一般式を導いた。さらに、この公式を超流動ヘリウム 3 の B 相/A 相/B 相接合の系に適用し、取りうる texture の自由度に対応して 2 種類のカレント位相特性が得られることを示した。

アンドレーエフ反射は超流動体界面で起こる特異な量子反射現象で、クーパー・ペアの生成を伴いながら準粒子がホールとして反射される現象である。このとき、界面にはアンドレーエフ束縛状態が形成され、それがジョセフソン・カレントを運ぶ。カレントは準粒子を記述する温度グリーン関数から計算でき、温度グリーン関数はアンドレーエフ反射係数から構成することが可能である。そこで、準古典近似の下で、任意の対称性に対して成立する拡張されたアンドレーエフ方程式を解くことによって、アンドレーエフ反射係数の一般式を得る。これをもとに古崎の処方箋に従って温度グリーン関数を構成し、任意の対称性を持った異種相間接合に適用できるジョセフソン・カレントの一般公式を導いた。この公式は、s 波超伝導体の場合の古崎・塙田公式や、それを一般の singlet 超伝導体に拡張した田中・柏谷公式を含み、さらに triplet-p 波の知られた結果を再現できる。

次に、我々は、この公式を使って初めて解析が可能となる新しいジョセフソン接合系の一例として、超流動ヘリウム 3 における B 相/A 相/B 相接合のカレント位相特性を計算した。超流動ヘリウム 3 のクーパー・ペアは triplet-p 波の対称性を持っており、スピンと軌道の内部自由度を持っている。これらの対称性は超流動転移と同時に破れ、凝縮体は複雑な内部構造 (texture) を形成する。相境界におけるエネルギーの考察から各層の texture を決定すると、可能な構造が 8 種類に制限され、対称性から、これらは二つのグループに分かれ、それぞれ異なるカレント位相特性を示すことが分かった。また、A 相領域の幅依存性、温度依存性から、これらの二種類のカレント位相特性が、A 相 B 相界面に形成されるアンドレーエフ束縛状態に由来することを明らかにした。

総括すると、我々は凝縮体の量子的な構造変化の可能性を調べ、さらに、凝縮体の構造が実際に準粒子の状態を変化させ、それがジョセフソン効果の実験により観測され得ることを示した。今後、これら二つの研究を統合し発展させ、凝縮体の量子的な構造変化における動的な準粒子の状態変化や、その散逸・デコヒーレンスに対する役割を解明することにより、量子力学から古典力学への移行という量子論の根幹をなす原理的な問題に対する理解が深まるだろう。