

平成 22 年 4 月 6 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2005～2008

課題番号：17540313

研究課題名 (和文) 準安定量子流体の物性

研究課題名 (英文) Properties of meta-stable quantum fluids

研究代表者

簀口 友紀 (MINOGUCHI TOMOKI)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：10202350

研究成果の概要：ヘリウム 4 (He-4) は低温で超流動という、粘性がなく熱を通しやすい液体に転移する。超流動 He-4 は常圧では凍らないが、25 気圧以上の圧力をかけると凍ることが知られる。ゆっくりと加圧し、25 気圧を越えることで準安定な超流動 He-4 を得る。本研究では、超流動 He-4 に特徴的な短波長音波 (ロトン) が、準安定状態で圧力とともにどのように変化するかを、固体転移と関連して明らかにした。圧力を 140 気圧程度まで上げていくと、ロトンのエネルギーはゼロとなり、超流動状態は不安定になって必ず固化することを示した。この結果は、ミラノ大学の量子シミュレーションと定量的に一致した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	1,700,000	0	1,700,000
2006 年度	600,000	0	600,000
2007 年度	500,000	150,000	650,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	360,000	3,860,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：超流動ヘリウム、準安定、固液転移、固化、ロトン、一次相転移、巨視的量子トンネリング、ヘリウム 4

1. 研究開始当初の背景

(1) 92 年に Ruutu らによって、超流動 He-4 を加圧して固体核を生成する実験が発表された。固体核は容器壁に出来、ある温度以下で量子論的に生成されると主張する興味深い論文であった。この論文は、二つの重要な可能性を含んでいると申請者は考えた。すなわち、一次相転移の研究の新しい切口として、超流動 He-4 を用いる可能性と、巨視的量子トンネリングの新しい研究の可能性である。

前者については、通常の液体は固化に際して熱を生じ、熱平衡を妨げるため、実験を困難にしていた。超流動 He-4 は固化に際して熱を生ぜず、しかも超流動のため熱伝導度が発散しているため、速やかに熱平衡に達する利点がある。後者では、Leggett により、量子論はあるマクロなスケール以上では成り立たないかもしれない、という基本的な問題が提出されており、この方向の実験が回答を与えてくれると考えたのである。

(2) ここで問題があった。それは、超流動 He-4 が固化するときのダイナミクスがわからないことと、固化のメカニズムがそもそもわからないことであった。固化のダイナミクスについては、Lifshitz-Kagan モデルとよばれる理論モデルがあるが、固化に際して破れるはずの並進対称性を取り入れておらず、しかも並進対称性の破れは、古典液体の固化では、最も重要な力学変数なのである。よって並進対称性の破れを含むように理論を拡張する必要があった。一方、固化のメカニズムについては、古典液体の固化について非常に成功を収めてきた密度汎関数理論(DFT)がうまく働かず、超流動 He-4 のような秩序(ボース凝縮)を持った液体が固化するときには、一風異なったメカニズムで固化が起こる可能性があった。

(3) 申請者は、これらについて半定量的に満足する理論モデルを 2002 年に提出し、これに基づいて本研究をスタートさせる機運にあった。(このモデルによって、固化に際して、密度の増大に先立って並進対称性が破れることが明白に示された。) 折りしも、パリの ENS で強過加圧状態の超流動 He-4 が収束音波によって実現された。静水圧下では、容器壁の汚れを種として固体核がただちに生成される。収束音波の実験は、これを避け、汚れのないところでの核生成を見るための工夫であった。結果として、固化の種になる物がないところでは、超流動相は考えられないくらい強固であること、そして準安定な領域は、超流動状態が安定に存在する領域の何倍も大きいことが示された。すなわち準安定領域の超流動 He-4 は、これまで研究されたことのない広大な平野で、新しい物性が見つかるチャンスと考えた。準安定状態の超流動 He-4 と、その固化は、このようにして重要な研究対象となった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、量子流体(特に超流動 He-4)の固化を記述する出来るだけ定量的な理論モデルの構築ならびに、それを用いた準安定量子流体に期待される新しい物性(例えば固化の前駆的励起)の探索である。

3. 研究の方法

(1) 超流動 He-4 の固化のダイナミクス及びメカニズムの理論
、申請者の2002年の理論モデルを、より定量的に改良する。
・高次のビリアル係数の非局所性を考慮する。

、量子論的密度汎関数理論の開発
・古典液体の固化で成功したDFTが、なぜ超流動 He-4 で失敗するのか様々な補正を考える。古典DFT は、転移する固体の種類(特にfcc)によって、密度歪みの高次(3次)まで取り入れなければならないケースがある。また、Haymetらのように高次の逆格子ベクトルまで考えないと、定量的に正しい結果が得られないことがある。He-4の場合にも、こうした確認が必要である。
・DFTのインプットに必要な、出来るだけ正確な、液体の密度応答関数を、ミラノ大学の量子シミュレーショングループの協力により得る。

(2) 準安定な超流動 He-4 の素励起
過加圧によりソフト化を起こすモードであるロトンについて、特に調べる。上記(1)で定量的な改良が得られれば、固化圧を越えて外挿するだけで準安定領域も含めた任意の圧力でロトンギャップが得られるはずである。ミラノ大学による量子モンテカルロシミュレーションとの比較も行う。ロトンの束縛状態などの異常についても注意を払う。

4. 研究成果

過加圧下にある超流動 He-4 の(1)準安定状態、(2)固化、そして(3)固体のダイナミクスについて研究を行った。

(1)については、2002年に提出したモデルを改良し、状態方程式およびロトンエネルギーを、超流動相が安定に存在する圧力全体に渡って定量的に記述することに成功した。ビリアル係数の非局所性を導入するのではなく、環境変数を化学ポテンシャルから圧力に変えるだけの単純な変換で充分であった。準安定領域のロトンギャップも、ミラノの量子シミュレーションの結果と、見事に一致した。(ミラノの量子シミュレーションは、新しいアルゴリズムでなされ、それについて現在もまだ論文の受理がなされていないため、この結果に関する論文はまだ投稿されていない。) すなわち、ロトンについて言えば、その性質は安定領域から準安定領域に移っても、質的な変化がないと理解できる。ただし、ロトンの束縛状態と見られる高エネルギーのピークがより強く現れ、密度応答関数にはロトン波数でのメインピークのほかに、その分のショルダーピークが(メインピークの高波数側で)現れる。

(2)については、上記(1)で述べた密度応答関数を用いて、DFTの計算を行った。上記(1)で述べたショルダーピークが、液体の密度ゆ

がみをエネルギー的により易くしてしまい、結果はより病的に失敗した。すなわち、超流動状態は常に不安定で、任意の圧力で固化してしまうという、よく知られた DFT の失敗を繰り返すこととなった。DFT を超流動 He-4 に拡張しようとする試みは完成しておらず、ここから派生するアイデアを元に、さらに研究を進めたい。

(3)2004 年に Kim と Chan は、多孔質媒質中の固体 He-4 が低温で超流動を示すことを発見した。実験を進めるうち、超流動はバルクの固体でも起こることがわかってきた。そこで、我々も急遽、固体の超流動性を調べることにした。2002 年の申請者の理論モデルは、固体-超流体間の五原子層程度の厚さの界面を記述するので、界面での超流動を調べようとしたものである。そのころ、電通大の鈴木勝教授の実験グループでは、グラファイト上の He-4 固層が滑っているらしい、という結果を得ていた。そこで、鈴木グループと密接に議論を重ねながら研究することになった。研究の結果、その振舞いは固体の超流動性から来るのではなく、固体層に自発的にできるディスロケーションが高い易動度で動くことによるという結果を得た。鈴木グループでは、より低温で、固層の上の液層が超流動になると、固層のすべりがストップするという奇妙な結果も得ていた。そのメカニズムの解明に、力を注ぐことになった。結果、固層のディスロケーションが超流動薄膜の正常流体成分と結合すると考えると、実験を説明できることがわかった。ディスロケーションが動くと、超流動薄膜中の正常成分と一緒に引き摺られて動くので、第二音波を励起することになる。従って、ディスロケーションの移動には第二音波の励起分の復元力が働くことになる。結局、この方向の研究は、固体の超流動を離れてしまったと思ったが、面白いことに、近年、バルクの固体で見られる超流動性は、ディスロケーションが本質的な役割を果たすということがわかってきた。今まで得られた知見は、固体の超流動の解明に役立つと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

K. Ideura, H. Kobayashi, N. Hosomi, J. Taniguchi, Masaru Suzuki, and T. Minoguchi, Competition between the Slippage and the Superfluidity of He-4 Films. Proceedings of World Tribology Congress 2009 (Kyoto, Japan) 270, 2009, 査読有

Hosomi N, Taniguchi J, Suzuki M and Minoguchi T, Dynamical sticking of a solid He-4 film with superfluid overlayer. Phys. Rev. **B79**, 172503, 2009, 査読有

T. Minoguchi, New sound mode in superfluid He-4 film adsorbed on atomically flat substrate. J. of Phys.: Conference Series, **150**, 032060, 2009, 査読有

N. Hosomi, J. Taniguchi, M. Suzuki, and T. Minoguchi, Effect of He-4 on Superfluid He-4 Films Adsorbed on Grafoil. J. of Phys.: Conference Series, **150**, 032031, 2009, 査読有

Minoguchi, T. Effective free energy for solidification of superfluid He-4 under pressure: An improvement of previous model. AIP Conf. Proc. **850**, 351, 2006, 査読有

Kubota, M., Fukuda, M., Obata, T., Ito, Y., Penzhev, A., Minoguchi, T., and Sonin, E. B. Dynamics of Quantized Vortices in a Torsional Oscillator under Rotation: Proposed Experiments in Supersolid He-4. AIP Conf. Proc. **850**, 283, 2006, 査読有

Fukuda, M., Zhalalutdinov, M. K., Kovacic, V., Minoguchi, T., Obata, T., Kubota, M. and Sonin, E. B. Rotation-induced 3D vorticity in 4He superfluid films adsorbed on a porous glass. Phys. Rev. **B 71** (21), pp212502, 2005, 査読有

Caupin, F. and Minoguchi, T. Density functional theory of interface between solid and superfluid helium 4. J. Low Temp. Phys. **138** (1-2): pp331-336, 2005, 査読有

〔学会発表〕(計 24 件)

籾口 友紀, New sound mode in superfluid He-4 film adsorbed on atomically flat substrate, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2010)、2010 年 3 月、横浜(神奈川県)

籾口 友紀, New dynamics of He-4 films on graphite - Superfluid dynamics coupled with solid bilayer -, ISSP workshop on Quantum solid properties, the Supersolid

state, and the Vortex State、2010年3月6日、柏(千葉県)

籾口 友紀、超流動 He 4 の固化と密度汎関数理論(DFT)、九州大学研究室セミナー、2010年2月23日、九州大学(福岡県)

籾口 友紀、グラファイト上の He 4 吸着膜 - 固体二重層と超流動薄膜の結合ダイナミクス、九州大学物性理論セミナー、2010年2月22日、九州大学(福岡県)

籾口 友紀、グラファイト上の He 4 吸着膜 - 固体二重層と結合した超流動薄膜のダイナミクス、科研費特定領域「スーパークリーン物質の物理」A2 班研究会、2010年1月、八王子

籾口 友紀、過加圧下超流動 He 4 のトンギャップ、物理学会、2009年9月、熊本大学(熊本県)

出浦 健一、Competition between the slippage and the superfluidity of He 4 Films、World Tribology Congress 2009、2009年9月、京都

籾口 友紀、He 4 吸着固層の滑り - 超流動環境下と常流動環境下、摩擦の会議 2008、2008年9月、愛知教育大学(愛知県)

籾口 友紀、New sound mode in superfluid He 4 film adsorbed on atomically flat substrate、International Workshop on Ultra Low Temperature (ULT2008)、2008年8月、London (England)

籾口 友紀、New sound mode in superfluid He 4 film adsorbed on atomically flat substrate、International Conference of Low Temperature Physics (LT25)、2008年8月、Amsterdam (Netherland)

細見 斉子、Effect of He 4 on superfluid He 4 Films adsorbed on grafoil、International Conference of Low Temperature Physics (LT25)、2008年8月、Amsterdam (Netherland)

籾口 友紀、吸着固層で生じる新しい種類の音波、物理学会、2008年3月、近畿大学(大阪)

籾口 友紀、Solid layers of He 4 on graphite: Why they slip and why they stick?、International Symposium on Physics of New

Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007)、2007年10月、長良川(岐阜県)

籾口 友紀、Solid layers of He 4 on graphite: Why they slip and why they stick?、International Conference on Science of Friction (ICSF)、(ICSF2007)、2007年9月、伊良湖(愛知県)

籾口 友紀、Dynamic pinning of CDW in superfluid environment、Workshop on quantum liquid and solid (QFS2007)、2007年8月、Kazan (Russia)

籾口 友紀、超流動ヘリウムの物性、成蹊大学大学院セミナー、2007年9月26日、東京

籾口 友紀、He 4 吸着膜の非線形応答、物理学会、2007年3月、鹿児島

籾口 友紀、超流動 He 4 のヘテロジニアスな固体核生成、物理学会、2006年9月26日、千葉

籾口 友紀、過加圧下における超流動 He 4 の固液境界エネルギー、物理学会、2006年3月30日、愛媛

籾口 友紀、超流動 He 4 の固化の実効自由エネルギー - 過加圧状態と固体核生成 -、東大駒場物性セミナー、2005年6月21日、東京

²¹ 籾口 友紀、Activation energy for solid nucleation in overpressurized superfluid He 4、Workshop on quantum liquid and solid (QFS2006)、京都

²² 籾口 友紀、Effective free energy for solidification of superfluid He 4 under pressure II、International Conference of Low Temperature Physics (LT24)、2005年8月、Florida (USA)

²³ 籾口 友紀、New energy dissipation peak in superfluid He 4 film on rotating porous media、Workshop on superfluid under rotation (SuR2005)、2005年4月、Manchester (England)

²⁴ 籾口 友紀、Effective free energy for solidification of superfluid He 4 under pressure II、物理学会、2005年4月、同志社大学(奈良県)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)
〔その他〕
ホームページ
<http://phys.c.u-tokyo.ac.jp/cond-mat/minoguchi.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

箕口 友紀 (MINOGUCHI TOMOKI)
東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号：10202350

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者