

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2006～2008

課題番号：18204034

研究課題名(和文)回転超流動ヘリウム3の流体力学 - 超低温におけるミニチュア初期宇宙 -

研究課題名(英文) Fluid mechanics of rotating superfluid ^3He Miniature universe at ultra-low temperatures

研究代表者

河野 公俊 (KONO Kimitoshi)

独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・主任研究員

研究者番号：30153480

研究成果の概要:超流動 ^3He 表面上2次元電子の運動によって誘起される超流動 ^3He の運動のうち、準粒子素励起の運動のみが電子抵抗の原因となる。この描像を確立し、超流動秩序パラメータの表面近傍の振る舞いと準粒子の運動に関する新しい知見を得た。超流動 ^3He 薄膜の超流動転移において既存の理論では説明のできない転移温度の減少を発見した。超流動 ^4He 表面下のイオンの運動が誘起する流れにおいて、層流から量子渦生成状態への明瞭な転移を始めて観測し、その臨界速度について新たな知見を得た。超流動 ^3He の回転実験は、なお今後の課題である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2007年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2008年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
年度			
年度			
総計	36,000,000	10,800,000	46,800,000

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3、ヘリウム4、テクスチャー、2次元電子、2次元イオンブール、量子渦、薄膜

1. 研究開始当初の背景

BCS超伝導理論によって理解される超流動 ^3He は異方的なP波超流動であることが知られている。P波超流動の秩序パラメータはS波超伝導や超流動 ^4He のように複素スカラー量ではなく、2階の対称スピノルであるために豊かな内部自由度を持つ。そのもっとも顕著な効果は超流動相に複数の相が現れることである。秩序パラメータの内部自由度により、

超流動 ^3He では素粒子論との対応がより多彩に展開される。この着想を提唱した南部陽一郎は2008年のノーベル物理学賞を受賞した。ヨーロッパを中心に素粒子論との対応という観点から超流動 ^3He を見直し、新しい実験を企画する試みに隆盛が見られた。

当時我々は超低温冷凍機の整備を終わり、ヘリウム液面電子による超流動 ^3He 表面の研究を進めていた。それと並行して超流動 ^3He

薄膜の流体力学を実験的に研究する手法の開発も行っていた。さらに回転希釈冷凍機も始動する状態にあったので、超流動³Heの表面近傍で起きる流れに起因する特異な流体现象について、素粒子論との対応を視野に入れた研究を企画した。

2. 研究の目的

超流動³He、特にA相と呼ばれる相では流れと秩序パラメータの関係を記述する方程式が波動関数の位相だけではなく、テクスチャーと呼ばれる特有の空間構造に依存し、かつエネルギーギャップが消失する点がフェルミ面上に存在するために散逸の効果が重要となるなど、流体力学的な性質には複雑で多様な要素が存在する。この特異な液体における流体现象には、まだ多くの未知の現象があるが、わずかな研究がなされているに過ぎない。本研究は、回転などの方法を用いて、これまで困難であった、超流動³Heの流れを超低温領域で実現し、制御されたテクスチャーのもとで流体力学的な性質を調べること、超流動³Heと素粒子論との対応について研究することを目的とする。この現象は素粒子のゲージ場理論に現れるほとんどすべての要素が超流動³Heの物性現象に現れるという理論的理解に基づいている。加速器実験では到底実現できないような高エネルギーでの現象をシミュレートする可能性を展開する実験として、今後の物性物理と素粒子・宇宙物理の連携を強く意識した研究である。

3. 研究の方法

大きく3つの異なる測定手法を用いて研究を行った。

- (1) ヘリウム表面電子を用いることで、表面から電子間平均距離程度の深さの領域に流れを誘起させることができる。この流れによるエネルギーの散逸が電子抵抗として観測される。超流動³He表面上の2次元電子抵抗を測定することにより、超流動³He表面近傍での秩序パラメータの空間構造とその結果現れる流体力学的な動的な性質について明らかにすることができる。
- (2) 平面状に展開した楕型電極をコンデンサーとして、楕間に発生する電場によって引き寄せられるヘリウムの性質を用いて、自由にヘリウム膜の厚さを制御することができる。同じ素子を用いて、液体ヘリウムを吸い上げるポンプとして使用することができる。このような手法によって、制御された膜厚の超流動³He薄膜を用意し、その中に流れを誘起することができる。この方法によって超流動³He薄膜の流動性についての研究を行った。

- (3) 回転希釈冷凍機を用いて、超流動ヘリウム中に量子渦を生成させ、その量子渦と液面電子や液面下のイオンとの相互作用によってその性質を調べる方法を精力的に開発した。超流動³Heを回転させることで、秩序パラメータの空間構造を制御できるので、量子渦とともに、秩序パラメータの空間構造が流体力学に及ぼす効果について研究することを意図したが、結果的に超流動³Heの実験までは実施することができなかった。その代わりに、⁴He表面下イオンプールの伝導現象について詳細な測定を行い、イオンの運動に伴って誘起されるイオン周辺の流れの様子が層流から量子渦を伴うものへ転移する現象について初めて明瞭で定量的な測定を行うことができる。

4. 研究成果

3つの研究課題についてそれぞれ以下のような研究成果が得られた。

- (1) ヘリウム表面上2次元電子の伝導特性の測定をA相およびB相の超流動³Heにおいて行うことで、エネルギーギャップの異方性を明瞭に反映する実験結果を得て、磁場中の秩序パラメータの空間構造を考慮した理論によって実験結果が非常によく説明できることを明らかにした。このことによって従来の理論の正しさに対して実験的なさらなる検証をあたえるだけでなく、自由表面による準粒子散乱が鏡面的であるとする理論的仮説に直接的な実験的証拠を与えることができた。しかし、これまでの説明においては、秩序パラメータの空間構造を数値的に求めて具体的な比較を行うところまでは行えず、定量的で厳密な理論との比較には課題が残っている。特に空間的に変化する秩序パラメータが存在する空間は力場あるいは空間の歪の存在する真空に対応しており、その中での準粒子の運動を理解することが必要である。これは重力レンズ効果に類似する現象である。今後、磁場の方向を変えた実験により理論モデルのさらなる検証が必要であると考えられる。
- (2) 超流動³He薄膜の流れ、フィルムフローの実験においてはフィルムと平行に磁場を印加した実験を行うことができた。初めての実験であるので、予想しない現象の発見がいくつかなされた。しかし、それらは今後の更なる検証を必要とするものもあり、現段階で確定した事実として述べられるものはまだ限られている。1 薄膜の超流動オンセット温度は膜厚依存性を示し、膜厚がコヒーレンス長程度に薄くなる(~100nm)と急激に降下

する。そしておおよそ $1\mu\text{m}$ 程度の膜厚では十分に厚いバルクな ^3He と同じ転移（オンセット）温度を示すことが理論的に予想されている。これに対し我々の測定では、この膜厚が十分に厚い領域においても転移温度の顕著な下降が見られた。この原因については現在のところ不明である。流量がゼロになる極限としてのオンセット温度を求めるために、注意深い測定を繰り返し行うことでデータの信頼度は十分自信の持てる段階に達している。今後の理論的な考察が必要である。² 磁場を薄膜に平行に印加した実験では、磁場がないときに比べて超流動オンセットが安定して再現性よく観測される傾向がある。磁場が存在する場合の超流動 ^3He では A 相がバルクでは実現される。薄膜中では B 相よりも A 相の方が安定であると信じられているが、そのことと実験結果は符合している。ゼロ磁場下ではオンセットに 2 種類の転移温度が現れるなど、不規則な傾向が見られた。その原因の特定には今後さらに測定を積み重ねなければならない。

- (3) 回転希釈冷凍機を用いた実験では超流動 ^3He の実験に突き進む前に ^4He でチェックすべき課題が多くあり、また興味深いものが多いので、これまでのところ ^4He での測定を継続している。回転超流動ヘリウム自由表面に関する実験を行うにあたり、ヘリウム液面電子や表面下イオンプールの伝導度やプラズマ振動の測定を行うことにしたが、これまでに回転下でのこれらの測定を行った先行研究はなく、すべてはじめての測定である。そのために測定結果の評価を慎重に行い、回転の影響がどのようにあらわれるのか、静止下の測定と詳細に比較する必要があった。これらの試行錯誤を重ねた結果、ヘリウム液面電子の伝導度においては量子渦に本質的に依存する効果は見られないということが結論された。一方、イオンの伝導現象においては、静止下の測定においてイオンの速度には臨界値が存在し、その前後でイオン周辺の流れの様子が大きく変化していることを示唆する、強い非線形伝導現象を発見した。この発見の後、過去の文献をたどってみると、バルク液体中のイオン伝導度の測定においても定性的に類似の現象で、おそらく同じ原因によると考えられる現象が古くから報告されていることがわかった。しかし、我々の測定では従来の測定に比べてはるかに高い精度で微弱な電場の制御が可能であることにより、この転移が明瞭に観測されたものと考えられる。この転移は量子渦

の生成に関連しており、それが量子トンネル効果で生じていることを強く示唆している。しかしながらその温度依存性は高温ほど臨界速度が上昇するという直感に反するものであり、オーミックな散逸を伴う量子トンネル現象と傾向が一致する。この系において、散逸がオーミックであるかどうか理論的な検討が加えられているところであるが、自明ではない。今回の発見は巨視的な量子トンネルの理論に対して大きな制約を加えるものとなることが期待される。イオンの伝導現象においても回転の影響を調べる予備的な実験が行われており、電子の場合と異なり本質的な影響があることが強く示唆されている。なお、先の臨界速度への回転の影響は見られなかった。量子渦とイオンの相互作用の解明は今後の重要な課題である。

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 20 件)

- 1 H. Ikegami, H. Akimoto and K. Kono: “Nonlinear Transport of the Wigner Solid on Superfluid ^4He in a Channel Geometry”, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 046807 [4 pages]. (査読あり)
- 2 K. Kono, H. Ikegami, and Yu. P. Monarkha: “Quasiparticle Scattering Model for interpreting the Wigner Solid Resistivity on the Surface of Superfluid ^3He ”, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 111004 [8 pages]. (査読あり)
- 3 D. Konstantinov, H. Isshiki, H. Akimoto, K. Shirahama, Yu. P. Monarkha and K. Kono: “Microwave-Absorption-Induced Heating of Surface State Electrons on Liquid ^3He ”, J. Phys. Soc. Jpn., 77 (2008) 034705 [10 pages] (査読あり)
- 4 H. Ikegami and K. Kono: “Anisotropy of Superfluid ^3He Near Free Surface Investigated by Surface State Electrons”, J. Low Temp. Phys., 150 (2008) 145-153. (査読あり)
- 5 H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono: “Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel”, J. Low Temp. Phys. 150 (2008) 224-229. (査読あり)
- 6 D. Konstantinov, Y. Monarkha, and K. Kono: “Microwave-Resonance Induced Change in Magneto-Resistivity: Hot Surface Electrons on Liquid ^3He ”, J. Low Temp. Phys. 150 (2008) 230-235. (査読あり)
- 7 D. Konstantinov and K. Kono: “Melting of Two-Dimensional Electron Crystal on Liquid

- ^3He Induced by Resonance Microwave Absorption”, J. Low Temp. Phys. 150 (2008) 236-241. (査読あり)
- 8 D. Konstantinov, K. Kono, and Y. Monarkha: “Photoresonance and conductivity of surface electrons on liquid ^3He ”, Low Temp. Phys. 34 (2008) 377-384. (査読あり)
 - 9 D. Konstantinov, Yu. Monarkha, and K. Kono: “Anomalous temperature dependence of microwave resonance-induced resistivity of surface-state electrons on liquid ^3He ”, Physica E 40 (2008) 1668-1670. (査読あり)
 - 10 D. Konstantinov, H. Isshiki, Y. Monarkha, H. Akimoto, K. Shirahama, K. Kono: “Microwave-Resonance-Induced Resistivity: Evidence of Ultrahot Surface-State Electrons on ^3He ”, Phys. Rev.Lett. 98 (2007) 235302 [4 pages]. (査読あり)
 - 11 D. Konstantinov, H. Isshiki, H. Akimoto, K. Shirahama, K. Kono: “Investigation of Microwaves Absorption of Surface-State Electrons on Liquid ^3He ”, J. Low Temp. Phys. 148 (2007) 187-191. (査読あり)
 - 12 M. Saitoh and K. Kono: “Thickness Dependence of Critical Current of Superfluid ^3He Film”, J. Low Temp. Phys. 148 (2007) 483-487. (査読あり)
 - 13 H. Ikegami and K. Kono: “Nonlinear Transport of Wigner Solid on Superfluid Microwave Absorption of Surface-State Electrons on Liquid ^3He ”, J. Low Temp. Phys. 148 (2007) 489-493. (査読あり)
 - 14 H. Isshiki, D. Konstantinov, H. Akimoto, K. Shirahama, K. Kono: “Microwave Absorption of Surface-State Electrons on Liquid ^3He ”, J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 094704 (7 pages). (査読あり)
 - 15 Y. Monarkha, D. Konstantinov, K. Kono: “Decay Heating and Microwave Resonance-Induced Resistivity of Surface Electrons on Liquid Helium”, J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 124702 (8 pages). (査読あり)
 - 16 Y. Monarkha, D. Konstantinov, K. Kono: “Microwave Absorption Saturation and Decay Heating of Surface Electrons on Liquid Helium”, Low Temp. Phys. 33 (2007) 718-720. (査読あり)
 - 17 Y. Monarkha, K. Kono: “Transport Properties of Two-Dimensional Wigner Solid on Free Surface of Liquid ^3He - ^4He Mixtures”, J. Phys. Soc. Jpn. 75 (2006) 044601 (7 pages). (査読あり)
 - 18 D. Takahashi, K. Kono: “New Rotating Dilution Refrigerator for a Study of the Free Surface of Superfluid He”, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1567-1568.
 - 19 H. Kawashima and K. Kono: “Temperature dependence of the conductivity of two-dimensional electron system on thin superfluid helium film using nano-gapped electrode”, AIP Conf. Proc. 850 (2006) 1462-1463. (査読あり)
 - 20 H. Ikegami and K. Kono: “Texture of Superfluid ^3He Probed by a Wigner Solid”, Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 165303. (査読あり)
- [学会発表](計 35 件)
- 1 池上 弘樹, 秋元 彦太, 河野 公俊: “1次元チャンネルにおけるWigner結晶転移”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 3 月.
 - 2 斎藤 政通, 池上 弘樹, 河野 公俊: “膜厚制御によるサブミクロン ^3He 薄膜の超流動転移”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 3 月.
 - 3 高橋 大輔, 池上 弘樹, 河野 公俊: “二次元正イオンを用いた臨界速度測定 -回転超流動内における二次元イオン系の移動度測定 II”, 日本物理学会第 64 回年次大会, 東京, 2009 年 3 月.
 - 4 高橋 大輔, 池上 弘樹, 河野 公俊: “回転超流動内における二次元イオン系の移動度測定-I”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡, 2008 年 9 月.
 - 5 D. Konstantinov, M. Dykman, M. Lea, Yu. P. Monarkha, K. Kono: “Nonlinear Microwave Absorption in Strongly Correlated Hot Electrons Bound to Helium Surface”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡, 2008 年 9 月.
 - 6 池上 弘樹, 秋元 彦太, 河野 公俊: “1次元チャンネル中のヘリウム液面電子の非線形伝導”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 盛岡, 2008 年 9 月.
 - 7 K. Kono: “Use of Nano-fabricated structures in ULT Experiments”, Frontiers of Low Temperature Physics (ULT 2008), London, UK, 2008 Aug.
 - 8 H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono: “Wigner Solid Transition of Electrons in Micrometer-wide Channels”, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, The Netherlands, 2008 Aug.
 - 9 D. Konstantinov, M. Dykman, M. Lea, Yu. P. Monarkha, K. Kono: “Nonlinear Resonance Microwave Absorption in Strongly Correlated Hot 2D Electrons on Liquid Helium Surface”, 25th International

- Conference on Low Temperature Physics (LT25), Amsterdam, The Netherlands, 2008 Aug.
- 10 池上 弘樹, 秋元 彦太, 河野 公俊: “1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子III”, 日本物理学会第63回年次大会, 東大阪, 2008年3月.
 - 11 D. Konstantinov, Yu. P. Monarkha, and K. Kono: “Hot Surface-State Electrons on Liquid ^3He in Ripplon Scattering Regime”, 日本物理学会第63回年次大会, 東大阪, 2008年(3月).
 - 12 M. Saitoh and K. Kono: “Critical Current Measurement of Superfluid ^3He Film in Magnetic Field”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Gifu, Japan, 2007 Oct.
 - 13 H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono: “Wigner Solid Transition of Electrons in a Micrometer-wide Channel”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Gifu, Japan, 2007 Oct.
 - 14 H. Ikegami and K. Kono: “Anisotropy of Superfluid ^3He Probed by a Wigner Solid”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials, Gifu, Japan, 2007 Oct.
 - 15 池上弘樹, 秋元彦太, 河野公俊: “1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子II”, 日本物理学会第62回年次大会, 札幌市, 2007年9月.
 - 16 D. Konstantinov and K. Kono: “Melting of Two-Dimensional Electron Crystal on Liquid He^3 induced by Resonance Microwave Absorption”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2007), Kazan, Russia, 2007 Aug.
 - 17 D. Konstantinov, Y. Monarkha, and K. Kono: “Microwave-Resonance Induced Change in Magneto-Resistivity: Hot Surface Electrons on Liquid ^3He ”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2007), Kazan, Russia, 2007 Aug.
 - 18 M. Saitoh and K. Kono: “Dynamical Property of Dissipative Flow of superfluid ^3He Film”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2007), Kazan, Russia, 2007 Aug.
 - 19 H. Ikegami and K. Kono: “Anisotropy of Superfluid ^3He Near Free Surface Investigated by Surface State Electrons”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2007), Kazan, Russia, 2007 Aug.
 - 20 H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono: “Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2007), Kazan, Russia, 2007 Aug.
 - 21 K. Kono, D. Konstantinov, and Yu. P. Monarkha: “Ultra-hot-electron Effect in the surface state electrons on liquid He^3 ”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2007), Kazan, Russia, 2007 Aug.
 - 22 D. Konstantinov, K. Kono, and Y. Monarkha: “Anomalous temperature dependence of microwave resonance-induced resistivity of surface electrons on liquid ^3He ”, electron properties of two-dimensional systems (EP2DS17), Genua, Italy, 2007 July.
 - 23 D. Konstantinov, 一色華子, Y. Monarkha, 白濱圭也, 河野公俊, 秋元彦太: “Microwave Resonance-Induced Change in Conductivity: Evidence of Ultrahot Surface Electrons (SEs) on Liquid ^3He ”, 日本物理学会2007年春季大会, 鹿児島, 2007年3月.
 - 24 池上弘樹, 秋元彦太, 河野公俊: “1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子”, 日本物理学会2007年春季大会, 鹿児島, 2007年3月.
 - 25 河野公俊: “ナノ加工技術のヘリウム研究への応用”, 日本物理学会2007年春季大会, 鹿児島, 2007年3月.
 - 26 池上弘樹, 河野公俊: “表面電子を用いた磁場中超流動 ^3He 自由表面の研究III”, 日本物理学会2006年秋季大会, 千葉市, 2006年9月.
 - 27 斎藤政通, 河野公俊: “膜厚制御による超流動 ^3He サブミクロン薄膜の相転移観測II”, 日本物理学会2006年秋季大会, 千葉市, 2006年9月.
 - 28 高橋大輔, 河野公俊: “高速度回転稀釈冷凍機を用いた He-4 における二次元電子の移動度測定 III”, 日本物理学会2006年秋季大会, 千葉市, 2006年9月.
 - 29 K. Kono: “Quantum Effects in the 2D Wigner Solid on Liquid Helium”, Sixth International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals (CC-2006), Kharkov, Ukraine, 2006 Sept.
 - 30 D. Takahashi and K. Kono: “Transport Property of Surface State Electrons on Rotating Superfluid ^4He ”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), Kyoto, Japan, 2006 Aug.
 - 31 H. Kawashima and K. Kono: “Mobility of Surface State Electrons on Liquid Helium Micro-Channel”, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), Kyoto, Japan, 2006 Aug.
 - 32 D. Konstantinov, H. Isshiki, H. Akimoto, K. Shirahama, K. Kono: “Investigation of

- Microwave Absorption of Surface-State Electrons on Liquid ^3He ", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), Kyoto, Japan, 2006 Aug.
- 33 M. Saitoh and K. Kono: "Thickness Dependence of Critical Current of Superfluid ^3He Film", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), Kyoto, Japan, 2006 Aug.
- 34 H. Ikegami and K. Kono: "Nonlinear Transport of Wigner Solid on Superfluid $^3\text{He-A}$ ", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), Kyoto, Japan, 2006 Aug.
- 35 H. Ikegami and K. Kono: "Transport Properties of Electrons on Superfluid ^3He in Magnetic Fields", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), Kyoto, Japan, 2006 Aug.

〔図書〕(計 1 件)

- 36 勝本信吾、河野公俊：“岩波講座：物理の世界「物質科学の展開 1」超伝導と超流動”岩波書店 (2006) 141 頁 (執筆範囲：1-54, 118-136.)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 公俊 (KONO KIMITOSHI)
独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・主任研究員
研究者番号：30153480

(2) 研究分担者

秋元 彦太 (AKIMOTO HIKOTA)
独立行政法人理化学研究所・研究技術開発・支援チーム・チームリーダー
研究者番号：60202545

高橋 大輔
独立行政法人理化学研究所・河野低温物理研究室・協力研究員
研究者番号：80415215

(3) 連携研究者

秋元 彦太 (AKIMOTO HIKOTA)
独立行政法人理化学研究所・研究技術開発・支援チーム・チームリーダー
研究者番号：60202545

高橋 大輔 (TAKAHASHI DAISUKE)
独立行政法人理化学研究所・河野低温物理

研究室・協力研究員
研究者番号：80415215