

ナノスケール・ヘリウム物理学の構築とその応用 Nanoscale Helium Physics and Its Applications



白濱 圭也 (SHIRAHAMA KEIYA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究の概要

本研究では、ボース粒子であるヘリウムをナノスケールの空間に閉じこめたときに現れる新しい量子現象を探索・解明して、物性物理学に新概念をもたらすと共に、超流動の性質がナノスケールで変化することを利用して、超流動ジョセフソン素子や物質波干渉計などの量子コヒーレントデバイスを開発し、応用への展開を図る。そして「ナノスケール・ヘリウム物理学」と呼ぶ新しい研究分野を構築していく。

研究分野：低温物理学

科研費の分科・細目：数物系科学、物理学、物性 II

キーワード：超低温・量子凝縮系、ヘリウム、超流動、量子臨界現象、ナノサイエンス

1. 研究開始当初の背景

物質が極低温度で示す超伝導や超流動は、「対称性の破れ」の典型として物理学の根幹をなす基本現象であるだけでなく、そのコヒーレント性を利用した量子コンピュータ等の応用への期待が高まっている。私たちは、ボース粒子である ^4He をナノサイズの細孔を有する多孔体に閉じこめ、原子相関を系統的に制御して、「ナノスケール・ヘリウム」を創成し、新しい量子多体現象の探索・解明を行うと共に、ナノ構造中で超流動が強く抑圧される性質を利用して、新しい手法で「超流動ジョセフソン接合」を実現し、超流動ヘリウムを他分野や実用研究に大きく発展させるという着想を得た。

2. 研究の目的

ナノスケール・ヘリウムにおける量子臨界現象の解明と、その周辺で出現しうる固体超流動状態などの新しい量子相を探索する。またナノスケールで超流動が強く抑圧される性質を利用し、ポーラスアルミナが作るナノポアアレイ中のヘリウムの超流動特性の制御を試み、これを利用した「超流動ジョセフソン素子」を開発し、「物質波干渉計」などへの応用研究を展開する。

3. 研究の方法

細孔サイズの揃ったポーラスアルミナに対して、金属蒸着等の方法により細孔の狭窄化を図り、ナノポアアレイ中ヘリウムの超流

動性の制御を試みる。また超音波、捻れ振動子等の動的な力学測定手法を駆使して、量子臨界ダイナミクスを研究する。また装置全体を回転可能な冷凍機を用いてナノスケール・ヘリウムの量子コヒーレンス性を調べる。

4. これまでの成果

ポーラスアルミナの細孔狭窄化

ポーラスアルミナが作るナノ細孔配列の均一性と規則性、高密度性を最大限利用して、細孔を他の物質でコートする「修飾」を施すことで、均一さを失わず細孔の狭窄化を図った。金薄膜の蒸着と、カーボンコーティングの二つの方法を試み、超流動特性の測定から、それぞれの方法で細孔径を10nm程度まで狭窄化することに成功した。

ねじれ振りに環状流路を設け流路の1箇所をアルミナ板で仕切ったとき、超流動転移温度直下で多数の鋭い共鳴を観測した。これはPA板の振動により第二音波が励起されたと解釈でき、モードの同定にも成功した。この共鳴は極めて鋭いため、地球自転などの回転測定のセンサへの利用という新しい着想を得た。

量子臨界現象と固体超流動挙動の研究

ナノ多孔体中 ^4He は、吸着薄膜状態と加圧液体状態において、絶対零度で超流動が連続的に消失する「量子臨界点」(QCP)を一つずつ持つ。QCP近傍での量子揺らぎの効果をねじれ振りと超音波という測定時間スケール

が3桁以上異なる2種類の動的測定法を用いて調べた。加圧下のQCP近傍で10-110MHzの広い周波数域での超音波実験に成功し、超流動・局在BEC相における超音波吸収が低温で温度に比例することを見出した。この振る舞いは、量子臨界現象の特性時間が温度に反比例するという一般論と合致し、ナノ多孔質ガラス中 ^4He の量子臨界挙動を初めて確認するものである。

直径5nmの球状の空洞が規則正しく配列し、その間がパイプで繋がったナノ多孔体(HMM3)に閉じこめた ^4He の超流動転移温度の圧力依存性を調べ3.4MPa近くで転移温度が絶対零度に近づく量子相転移を発見した。これにより、量子相転移がナノスケール・ヘリウムの普遍的な性質であり、細孔構造の乱れと関係なく起こることが示された。

ナノ多孔質ガラスの細孔に吸着させた ^4He の薄膜が、超流動に類似した「低摩擦流(スリップ現象)」を起こすことを発見し、これが量子臨界現象の一環として起こること、そして摩擦の緩和時間とその分布が絶対零度に向かって発散する傾向を見出した。量子臨界現象がガラスやスピングラスに類似した側面をもつことが示唆される。

細孔構造ランダム化による量子局在

多孔質ガラスにKr原子を前吸着させて細孔径を制御する実験を試み、Kr約1原子層の吸着により細孔径分布が数倍大きくなり、そこに吸着された ^4He 薄膜の超流動転移温度が10%低下することを見出した。この事実は、細孔が作るポテンシャルのランダムネスが増強されたために起こる量子局在効果により超流動性が抑制されたものと解釈される。このことから、吸着薄膜状態では乱れの効果が存在することがわかった。

ヘリウムナノ構造の「固体超流動」的挙動

ナノ多孔質ガラス中 ^4He において、0.2K以下でバルク固体 ^4He に見られる「固体超流動」の振る舞いを見出し、その性質が定量性も含めバルク固体の振る舞いと同じであることを見出した。更に、ナノ細孔の中心付近が液体の状態にあっても固体超流動の振る舞いが観測されたことから、超流動的挙動は細孔壁から2-3層目の固体層で主として生じていること、最近議論されているシアモデュラスの増加に基づく解釈では現象を説明できないことがわかった。これらは現在ホットな話題となっている固体超流動の論争に一石を投じる重要な発見である。

さらに超流動性の検証を目的として、超流動挙動の測定を回転下で行い、「超流動成分」が試料を回転させると大きく減少し、その減少は回転角速度の逆数(Ω^{-1})で周期的に振動することを見出した。この興味深い挙動の起源はわかっておらず、現在測定を続けている。

5. 今後の計画

ナノスケール・ヘリウムが示す量子臨界現象、および固体超流動現象の研究については予定通りもしくは一部に期待以上の成果があがっており、本研究の目標の一つである「 ^4He ナノ構造における量子臨界現象の解明」は達成されつつある。特に動的測定から得られる散逸や摩擦の情報を、量子臨界現象と関連づけて議論するための基礎が構築され、強相関係に普遍的な物理概念への貢献という新たな目標ができた。

ポーラスアルミナナノポアアレイを利用した超流動性制御の研究は、ジョセフソン効果の実現に向けたブレイクスルーまであと一步のところに来ていると考えている。これまでの研究で、より小さい細孔のアレイを形成することが、超流動の大きな抑制とジョセフソン効果の実現に向けて最も重要な課題であるということがわかってきた。今後はこの課題に全力を傾注していく。また、環状流路ねじれ振り子で第二音波の共鳴を観測したことで、超流動ヘリウムの新しい回転センサとしての利用という道が開けそうである。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

“Torsional oscillator experiment on superfluid ^4He confined in a porous alumina nanopore array”, S Murakawa, R Higashino, K Yoshimura, Y Chikazawa, T Tanaka, K Kuriyama, K. Honda, Y. Shibayama and K. Shirahama, *Journal of Physics, Conf. Ser.* (2012), in press.

“Layer by Layer Growth of Solid ^4He on Graphite down to 0.1 K”, A. M. Koga, Y. Shibayama, K. Shirahama, *Journal of Low Temperature Physics* **166**, 257-267 (2012).

“Four-dimensional XY quantum critical behavior of ^4He in nanoporous media”, Th. Eggel, M. Oshikawa, K. Shirahama, *Physical Review B* **84**, 020515 (2011).

“Suppression of Superfluidity of ^4He in a Nanoporous Glass by Preplating a Kr Layer”, Y. Shibayama and K. Shirahama, *Journal of the Physical Society of Japan* **80** (2011) 084604 (10 pages).

“Torsional oscillator studies for possible supersolidity in two-dimensional ^4He solid”, Y. Shibayama, H. Fukuyama, K. Shirahama, *Journal of Physics: Conference Series* **150** 032096 (2009).

受賞 村川智(研究支援雇用者、慶應大特任助教) 日本物理学会若手奨励賞 2012年3月

ホームページ

http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/sirahama/kiban_s/index.html