

学位論文 博士（理学）

ナノ多孔体中ヘリウム 4 の超流動転移における
4 次元 XY 量子臨界性

2021 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

谷 智行

報告番号	○甲 乙 第 号	氏 名	谷 智行
<p>主 論 文 題 名： ナノ多孔体中ヘリウム4の超流動転移における4次元XY量子臨界性</p>			
<p>(内容の要旨)</p> <p>本研究は、量子相転移を示すボース粒子系であるナノ多孔体中ヘリウム4(^4He)の有限温度超流動転移が、4次元XYの普遍性(ユニバーサリティ)クラスに属することを実験的に示したものである。</p> <p>量子相転移は絶対零度で圧力などの外部パラメタの変化により起こる相転移であり、有限温度で生じる通常の相転移とは異なり、系の量子ゆらぎが重要な役割を演じる。量子相転移は重い電子系や銅酸化物高温超伝導体などの強相関フェルミ粒子系を中心に、物性物理学の主要な問題として興味を持たれてきた。一方、ボース粒子系で量子相転移を示す系は少ないが、ボース系は内部自由度や励起の複雑さを伴うフェルミ系よりも単純で、ボースハバード模型による理論的解析が可能である。</p> <p>ナノ多孔体に閉じ込めた^4Heは、圧力により量子相転移を示すボース粒子系の典型例として重要な研究対象である。この系では、絶対零度で圧力変化により超流動相と局在ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)状態と名付けられた非自明な非超流動状態の間で量子相転移が起こることが知られている。捻れ振動子を用いた実験から圧力-温度相図と超流動密度が調べられ、理論研究によってこの量子相転移は4次元XYの臨界性(普遍性クラス)を有することが示されている。この量子臨界性は有限温度にまで及ぶことが示唆されていたが、一般に量子相転移系の有限温度の相転移は古典的な臨界現象、すなわち本系では3次元XY普遍性、を示すと考えられる。この不一致の原因を探る鍵は有限温度の相転移点の臨界挙動を調べることであるが、過去の実験では臨界指数を評価できていなかった。</p> <p>本研究では直径3.0nmのナノ細孔を有する多孔質Gelsilガラスを用いて、多孔体中^4Heを挟んだ2つのバルク液体間の超流動流を、ヘルムホルツ共鳴実験技術を用いて測定した。複数のヘルムホルツ共鳴モードの測定から、多孔体中^4Heの超流動密度の温度依存性を精密かつ詳細に調べた。超流動密度の臨界指数を見積もると、実験を行った全圧力において臨界指数ζは1.0 ± 0.1の値を取ることがわかった。これは3次元XY普遍性クラスに属するバルク超流動^4Heの$\zeta = 0.67$と全く異なり、4次元XYモデルに期待される臨界指数と正確に一致する。従って、ナノ多孔体中^4Heの超流動転移は、有限温</p>			

度の相転移点でも4次元量子臨界性を示すことが明らかになった。

次に量子臨界性が有限温度で発現することの解釈として、局在 BEC の相関長がナノ細孔の有限サイズ効果によって強く抑制され、それらが最近接の局在 BEC 間で重なり合うことにより超流動性を発現するという描像を提案した。この描像より、乱雑な局在 BEC の位相が超流動転移点で相関を持って揃うことに起因するエネルギー散逸が期待される。本実験では、ヘルムホルツ共鳴の散逸(共鳴線幅)が超流動転移温度直下で異常な増大を示すことがわかった。この散逸の異常を上記の描像に基づいて解析し、いくつかのデータに対して定量的な説明を与えることに成功した。このことはナノ多孔体中 ^4He の超流動転移の微視的な機構を明らかにするとともに、局在 BEC の描像の妥当性を支持する実験事実が得られたことを意味する。

以上まとめると、本論文ではナノ多孔体中 ^4He の有限温度超流動転移が4次元 XY 普遍性クラスに属することを、ヘルムホルツ共鳴を用いた精密な超流動密度測定により示した。4次元相転移は理論的には単純だが実現は困難であり、ナノ多孔体中ヘリウム4はそのユニークな例であることが、本研究により初めて明らかになった。

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Tomoyuki Tani
Thesis Title 4D XY Quantum Criticality in the Superfluid Transition of ^4He Confined in Nanoporous Media			
Thesis Summary <p>This dissertation presents that the superfluid transition of ^4He confined in nanoporous media, a bosonic system showing quantum phase transition (QPT), belongs to the four-dimensional (4D) XY universality class at finite temperatures.</p> <p>QPT is a phase transition of matter occurring at absolute zero by changing an external parameter such as pressure. In QPT, contrary to classical phase transitions at finite temperatures, quantum fluctuations play an important role on the transition. QPT has been of central interest in physics of strongly correlated fermionic systems such as heavy electron compounds and high-T_c cuprates, but it is yet to be understood because of the complexity characteristic of fermions. In contrast, QPTs in bosonic systems are relatively simple and can be understood with a clear perspective based on the Bose-Hubbard model. However, there have been few real bosonic systems showing QPTs.</p> <p>^4He confined in nanoporous media provides a unique example of bosonic QPT. It undergoes a QPT between the superfluid phase and a nontrivial nonsuperfluid phase called the localized Bose - Einstein condensation (LBEC) state by changing pressure. The phase diagram and superfluid density were studied by torsional oscillator studies. A theoretical study showed that the criticality in the QPT is governed by 4D XY universality class. The theory proposed that the quantum nature influences the phase transition at finite temperatures. In general theory of QPT, however, the finite temperature transition is classical, which in the present case is 3D XY. To understand the mechanism of the QPT, further experimental information on the critical phenomenon at finite temperature is needed.</p> <p>In the present work, we have studied superfluidity of ^4He in nanoporous Gelsil glasses that have nanopores of 3.0 nm in diameter. Superflow in the porous glass disk sandwiched by two bulk ^4He reservoirs is measured by Helmholtz resonator technique. We have precisely determined the temperature dependence of superfluid density in nanopores by measuring several Helmholtz resonant modes in detail.</p> <p>The superfluid critical exponent ζ is estimated to be 1.0 ± 0.1. This value exactly agrees with the critical exponent derived from the 4D XY model, and is distinct from that of bulk superfluid ^4He, 0.67. That is, the superfluid transition of ^4He in Gelsil exhibits 4D XY quantum criticality even at finite temperatures.</p> <p>For the emergence of 4D criticality at finite temperatures, we give an interpretation that the coherence length of LBEC is strongly suppressed by a size effect in nanopores. The system</p>			

undergoes the superfluid transition when the coherence length exceeds the distance between LBECs. One may expect an excess dissipation accompanied with the superfluid transition by the alignment of the phases of LBECs. We have observed that Helmholtz resonance linewidths, i.e. dissipation, anomalously increase just below the superfluid transition. We have analyzed the linewidths in terms of the energy dissipation by phase alignment, and quantitatively explained the temperature dependence. This supports further the concept of LBEC and elucidates the microscopic mechanism superfluid transition in nanoporous media.

To conclude, we have revealed that the superfluid transition of ^4He in nanoporous media belongs to the 4D XY universality class even at finite temperatures, by the precise measurements of superfluid density with Helmholtz resonance technique. 4D phase transition is theoretically straightforward to analyze, but it was difficult to find in real matters. This dissertation presents for the first time that ^4He in nanoporous media provides a unique example of 4D transition.