

4次元相転移は実在する - ナノ多孔体中超流動ヘリウムの量子臨界性 -

[1] 要旨

ナノ多孔体中に閉じ込めた液体ヘリウムの超流動特性を実験的に調べ、超流動転移温度での臨界現象が4次元XY型の普遍性クラスに属することを明らかにした。これは4次元の相転移が現実の物質で現れたユニークな例であり、ナノ細孔に閉じ込められたヘリウムの強い量子臨界性を反映している。4次元臨界現象は量子相転移における次元性の変化で説明できるため、本研究の成果は相転移の基本的理解と新しい相転移現象の発見解明に貢献すると期待される。

[2] 本文

水の凍結に代表される相転移現象は自然界の成り立ちの解明に重要であり、盛んに研究されてきた。相転移の特徴はその「普遍性」、すなわち異なる種類の相転移が共通の理論で説明されることにある。例えば寒剤として使用される液体ヘリウムは、約2ケルビン(-272°C)の極低温で「超流動」に相転移して粘性を失うが、その超流動転移は「3次元XY普遍性」という、ある種の磁性体や液晶などと同じ普遍性をもつ。相転移の普遍性は、転移温度近傍で物理量が転移点からの温度差のべき乗で発散する「臨界現象」に現れ、ヘリウムと磁性体のように全く異なる物質の相転移であっても、同じ普遍性クラスに属する相転移ではべき指数が同じになる。このような臨界現象の普遍性は物理学の大きな謎であったが、繰り込み群理論により解明された。

相転移は、その物質の「次元性」に大きな影響を受ける。例えば通常の超流動ヘリウムの臨界現象は3次元XY型だが、ヘリウムを固体壁に吸着させてできる薄膜は2次元XY型の超流動転移を示す。この相転移はBKT転移と呼ばれ、その機構を提案したコスタリツとサウレスが2016年のノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。一方で理論的には3次元より大きな次元の相転移を考えることができ、4次元以上では臨界現象が「平均場理論」と呼ばれる最も簡単な相転移理論で説明できることが知られている。しかし我々の住む世界は3次元であり、4次元相転移は想像の産物に過ぎなかった。もし4次元相転移が現実の物質で見つかれば、相転移理論の基礎づけに貢献するだけでなく、新しい相転移現象の発見と解明につながると期待される。

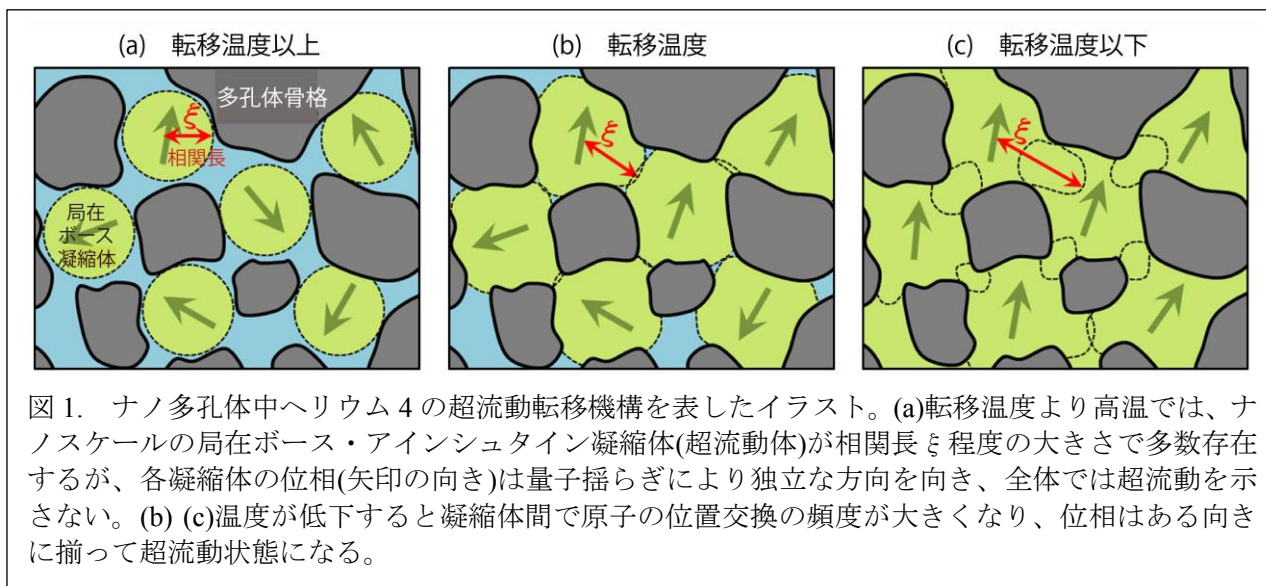
最近、慶應義塾大学理工学部のメンバーを中心とする研究グループは、ナノ多孔体中に閉じ込めた液体ヘリウムの超流動特性を詳細に調べ、超流動転移温度での臨界現象が「4次元XY普遍性」のクラスに属する量子相転移であることを明らかにした。これは4次元相転移が現実の物質で現れた極めて珍しい例であり、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan* (JPSJ)の2021年3月号に掲載された。

同グループは、ナノ多孔体の一種である多孔質ガラスがもつ直径約3nmの細孔に液体ヘリウムを入れ、超流動に参加するヘリウムの割合を示す「超流動密度」と呼ばれる量を、転移温度のごく近傍まで精密に測定することに成功した。その結果、超流動密度が転移温度近傍でべき乗的な振る舞いを示し、その臨界指数 ζ の値は1であることがわかった。この値は4次元XY型の臨界現象に期待される値と同じであり、通常の3次元XY普遍性($\zeta=0.67$)とは異なり、ナノ多孔体中ヘリウムの超流動転移は4次元の臨界現象を示すことが明らかになった。

なぜナノ多孔体に閉じ込めると4次元相転移が起こるのだろうか? 実はナノ多孔体中ヘリウムは「量子相転移」を示すことが、同じグループの過去の研究によりわかっていた。量子相転移は熱揺らぎで引き起こされる通常の相転移と異なり、絶対零度でも存在する量子揺らぎにより生じる。

ヘリウムをナノ多孔体に閉じ込めると、その超流動転移温度は通常の液体ヘリウムの転移温度に比べて大きく低下し、さらに約 30 気圧まで加圧すると超流動が消失してしまう(すなわち転移温度がゼロになる)。この絶対零度での相転移は、通常の 3 次元空間での揺らぎに加えて、虚数時間軸方向の次元をもう一つ考えることで理論的に説明できる。つまり絶対零度では「3 空間次元プラス 1 虚時間次元」の 4 次元量子相転移が生じる。今回の研究で、この 4 次元相転移が絶対零度だけでなく、熱揺らぎがある有限温度でもその臨界挙動が有意に観測されることが見いだされた。

有限温度で 4 次元相転移が起こる理由は、以下のように考えられる。ナノ多孔体中ヘリウムでは、図 1 のように超流動転移温度より高温側でも「局在ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC)」と呼ばれるナノスケールの超流動体が多数存在し、それぞれが「相関長」程度の大きさと量子力学的位相(図の矢印の向き)をもつ。高温(図 1(a))では位相が乱雑に揺らぎ、BEC がありながら超流動を示さない。超流動は(b)から(c)のように位相がある向きに揃ったときに生じる。転移温度以上では(a)のように位相が揺らぎバラバラな向きを向くが、ナノ多孔体中ヘリウムの特徴は、この位相の揺らぎが、細孔が狭いことによるヘリウム原子の位置交換の抑制(粒子数と位相の不確定性関係による量子力学的な揺らぎ)で起こることである。実際にヘリウム原子が隣の凝縮体に移る時のエネルギーを見積もると、超流動転移温度と同じ 1 ケルビン程度の大きさになることから、原子の位置交換が起こりにくくなっており、それにより生じる強い量子揺らぎのために 4 次元相転移が起こると考えられる。以上の説明は定性的だが、同じ実験で観測した超流動転移に伴うエネルギー吸収もこの考えで定量的に説明することができ、解釈の正当性を裏付けている。



以上、ナノ多孔体中ヘリウムが絶対零度だけでなく有限温度でも量子揺らぎが支配的な 4 次元相転移を示すことが明らかになり、量子相転移現象の理解に大きく貢献することが期待される。また液体ヘリウムがその環境に応じて 2 次元 BKT から 4 次元まで多様な相転移をもたらすことは、ヘリウムのもつ量子性と純粋さを反映しており、基礎物理学で重要な研究対象であることを示すものである。

原論文(公開済):

[Evidence for 4D XY Quantum Criticality in \$^4\text{He}\$ Confined in Nanoporous Media at Finite Temperatures](#)
Tomoyuki Tani, Yusuke Nago, Satoshi Murakawa, Keiya Shirahama

Journal of the Physical Society of Japan **90**, 033601 (2021)

<情報提供：白濱 圭也（慶應義塾大学理工学部）

谷 智行（慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻）>