



2021年4月27日

報道関係者各位

慶應義塾大学

4次元相転移は実在する — ナノ多孔体中ヘリウムの超流動相転移 —

慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻の博士課程学生谷智行（研究当時）、同大学理工学部物理学科の白濱圭也教授、永合祐助教らの研究グループは、ナノ多孔体（ナノメートルサイズのスポンジ状細孔を持つガラス材料）に閉じ込めた液体ヘリウムが、4次元 XY 型と呼ばれる超流動相転移（※1）を起こすことを明らかにしました。空間的には3次元でありながら、4次元の相転移を示す物質が現実に見つかったことになります。

相転移現象は「普遍性クラス」（※2）と呼ばれるカテゴリーに分類され、通常の液体ヘリウムは3次元 XY 型の普遍性クラスに属します。またヘリウムの薄膜は2次元 XY 型の BKT 超流動相転移を示すことが知られていました。ナノ多孔体中ヘリウムは絶対零度で4次元 XY 型の量子相転移を示すことは本研究グループの過去の研究で知られていましたが、本研究で通常の温度で起こる超流動相転移も4次元的事実であることが初めて明らかになりました。4次元相転移は理論的には最も単純な相転移であり、その発見は相転移現象の理解に大きく貢献すると期待されます。

本研究成果は、2021年3月に日本物理学会英文誌「Journal of the Physical Society of Japan」に掲載され、同誌の注目論文 Editors' Choice に選定されるとともに、英文サイト JPS Hot Topics に取り上げられました。

1. 本研究のポイント

- ・スポンジ状のナノ細孔に入れたヘリウムが、4次元 XY 型の超流動相転移を起こすことを発見
- ・「3 空間次元プラス 1 虚数時間次元」の4次元量子相転移が、通常の温度で現れたと解釈される
- ・4次元相転移は最も基本的な相転移だが、現実の物質では実現困難であった。これが実現された意義は大きく、相転移現象の理解に貢献するであろう

2. 研究背景

水が氷になるような物質の変化は「相転移」と呼ばれます。相転移は身近な物質で起こるだけでなく、例えば宇宙や素粒子の創成にも重要な役割を果たしています。相転移は物理学の重要な問題として20世紀後半に盛んに研究が行われ、「繰り込み理論」によりその基本的な理解は確立しました。

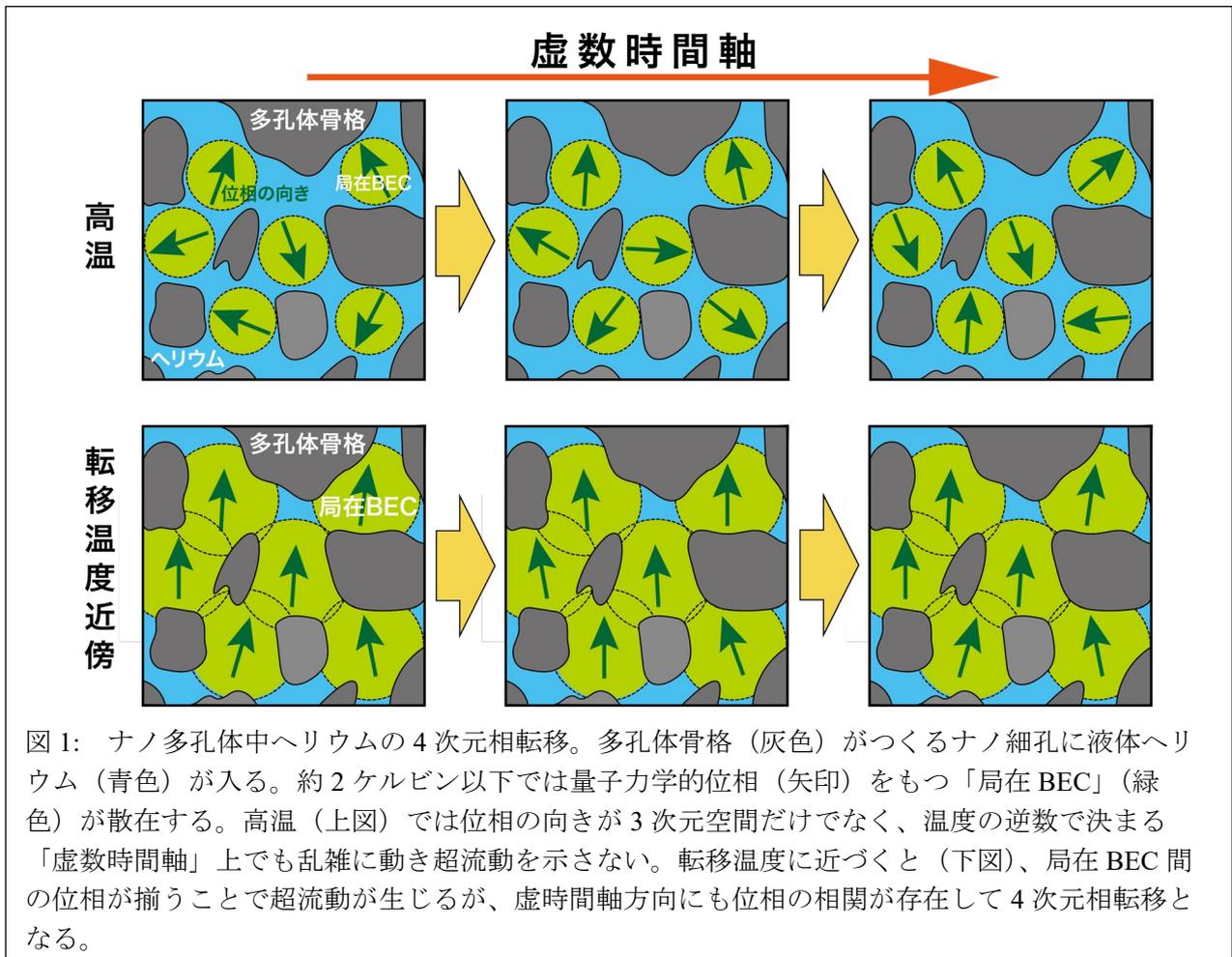
相転移は、その起こり方が物質の「次元」により大きく異なるという重要な特徴があります。普通の物質は空間の全方向に原子や分子が連なった3次元物質です。ところが、極めて薄い膜のような物質は2次元と見なせます。2次元では、材質が同じでも3次元とは全く異なる機構の相転移が起こることがあります。また、3次元の相転移は理論的考察が難しいが、2次元や1次元では問題が解けることがあります。このように空間の次元性は相転移で重要な役割を演じます。そして意外なことに、多くの相転移では空間次元を仮想的に「4次元」と考えると、最も簡単な相転移理論が成り立つのです。もし4次元相転移が実在すれば、相転移の理解に最も基本的な枠組みを与えることになります。

さて、液体ヘリウムが示す「超流動相転移」は非常に詳細に研究され、相転移の理解に重要な貢献をしてきました。ヘリウムは医療用 MRI などの超伝導磁石に欠かせない寒剤ですが、約 2 ケルビン（マイナス 271°C）以下の極低温で、粘性のない超流動状態に相転移します。相転移が起こるとき、比熱などの量が無限大に発散するような異常な挙動-臨界現象-を示しますが、その振る舞いを記述する「臨界指数」の値により、相転移は「普遍性クラス」と呼ばれるカテゴリーに分類することができます。ヘリウムの超流動相転移は「3 次元 XY 型」という普遍性クラスに属します。一方、固体壁に吸着したヘリウムの薄膜は 2 次元物質として知られ、「2 次元 XY 型」の BKT 超流動相転移を示します。BKT 相転移は「トポロジカル相転移」とも呼ばれ、これを提唱したコスタリッツ (J. M. Kosterlitz) とサウレス (D. J. Thouless) が 2016 年のノーベル物理学賞を受賞したのは記憶に新しいところです。

3. 研究内容・成果

本研究では、液体ヘリウムをナノ多孔質ガラスと呼ばれる多孔体に閉じ込めたときの超流動相転移を詳細に調べました。多孔質ガラスにはナノメートルサイズの小さな穴が、スポンジのように無数に空いています。ナノ細孔中のヘリウムの流れを計測し、超流動密度という量の臨界指数を正確に決定しました。その結果、様々な圧力で臨界指数が全て 1 という値をとることがわかりました。この 1 という指数値は、3 次元 XY 普遍性から期待される 0.67 (3 分の 2) とは異なり、4 次元 XY 普遍性に属する相転移の指数です。つまり、ヘリウムをナノメートルサイズのスポンジに入れると 4 次元相転移を示すという、なんとも不思議な結果になりました。

なぜナノ多孔体中で 4 次元相転移が起こるのでしょうか？ 実はナノ多孔体中ヘリウムは「量子相転移」を示すことが、本研究グループの過去の研究によりわかっていました。通常相転移は熱揺らぎで生じますが、量子相転移は絶対零度でも存在する「量子揺らぎ」により起こります。ヘリウムをナノ多孔体に閉じ込めて圧力をかけると、超流動が徐々に消失する量子相転移が起こりますが、この量子相転移は、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ます (図 1)。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 次元量子相転移が起こると考えられていましたが、今回の研究では、この 4 次元相転移が絶対零度ではない温度でも起こることがわかったわけです。ナノ多孔体中ヘリウムでは、図 1 のように超流動相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 (局在 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 (図の緑色の丸) と量子力学的な位相 (図の矢印の向き) を持ちます。高温 (図 1 上) では、3 次元空間と虚時間方向の両方で位相が乱雑に揺らぎ、BEC があいながら超流動を示さない状況になっています。通常は位相が熱により揺らぎますが、ナノ多孔体中ヘリウムではヘリウム原子集団の持つ量子力学的不確実性で位相が揺らぐことが、今回の研究で明らかになりました。転移温度のごく近く (図 1 下) では、相関長が 4 次元の全方向で大きくなり、局在 BEC が重なり合っ位相がある向きに揃い、超流動状態となります。



4. 今後の展開

4次元相転移は、理論的には最も単純な相転移ですが、これを現実の物質で実現することは困難でした。今回ナノ多孔体中ヘリウムが4次元相転移を示すことが明らかになり、相転移やトポロジカル量子現象の理解に大きく貢献することが期待されます。

<原論文情報>

Evidence for 4D XY Quantum Criticality in ^4He Confined in Nanoporous Media at Finite Temperatures

Tomoyuki Tani, Yusuke Nago, Satoshi Murakawa, and Keiya Shirahama

Journal of the Physical Society of Japan, Volume 90, Number 3, 033601 (2021)

doi: <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.033601>

<用語説明>

※1 超流動相転移: 液体ヘリウムは約2ケルビンで相転移を起こし、粘性のない超流動状態になる。超流動相転移は「2次相転移」の典型例として、相転移現象のなかでも最も詳細に研究されてきた。

※2 普遍性クラス: 2次相転移では転移温度で比熱や磁化率などの量が発散する「臨界現象」を示すが、磁性体とヘリウムのような全く異なる物質であっても、秩序を記述する「秩序変数」の構造と空間次元が同じであれば、発散の仕方が同じになるという「普遍性」(universality)をもつ。これを、

臨界現象の普遍性が同じクラスに属すると称する。超流動は、磁気モーメントが XY 面内だけを動ける「XY 磁性体」と同じ、XY 普遍性クラスに属する。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 白濱 圭也 (しらはま けいや)

TEL : 045-566-1684 FAX : 045-566-1672 E-mail : keiya@phys.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (澤野)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>