



2019年12月17日

報道関係者各位

慶應義塾大学

水素薄膜が超流動寸前の状態にあることを発見

慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程の巻内崇彦(研究当時。現 東京大学大学院工学系研究科 ERATO 齊藤スピン量子整流プロジェクト特任研究員)、理工学部の永合祐助教、白濱圭也教授らの研究グループは、水素分子の薄膜が極低温まで液体として保たれ、超流動(※1)寸前の状態にあることを発見しました。

超流動は金属の超伝導と同様に物質が低温で示す劇的な量子現象ですが、液体ヘリウム(※2)などのごく限られた物質でのみ観測されていました。分子状水素(H₂)は超流動を示しうる数少ない候補物質のひとつとして注目されてきました。本研究では水素薄膜の弾性測定から、薄膜の表面が絶対温度1ケルビン(摂氏マイナス272度)という極低温まで液体のように振る舞い、超流動寸前の状態にあることを発見しました。この成果は、水素がどの程度超流動に近づいたかを初めて定量的に示した点で画期的であり、高周波音波の印加などの新手法により超流動水素を実現する可能性を拓くものです。水素は宇宙や生命の成り立ちに重要なだけでなく、超高压下では超伝導の発現も期待されています。超流動水素の実現は、水素の多様性の一端を示すだけでなく、科学の発展に大きく貢献すると期待されます。

本研究成果は2019年12月13日(現地時間)に米国の科学雑誌『Physical Review Letters』に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- 液体ヘリウムの粘性が低温で消失する「超流動」現象は、金属の超伝導と同じ量子現象であるが、ヘリウム以外に超流動を示す物質はごく限られている。分子状水素(H₂)は超流動を示しうる数少ない候補物質のひとつとして注目されてきた。
- 水素薄膜の弾性測定から、薄膜の表面が絶対温度1ケルビン(摂氏マイナス272度)という極低温まで液体のように振る舞うことを発見。ヘリウム薄膜の弾性との比較から、水素薄膜が超流動寸前の状態にあることを見出した。
- 水素の超流動実現に向けて、新しい指針を与える成果である。

2. 研究背景

水素は最も単純な構造をもつ元素でありながら、宇宙を構成する物質で最大の割合を占め、生命活動にとっても重要な役割を持っています。また、クリーンエネルギーとしても期待されています。水素は常温で分子(H₂)の気体として存在しますが、低温ではほかの物質と同様に、液体や固体になります。水素分子は軽いため、液体・固体水素では量子力学的な性質が現れます。物質の量子力学的性質として最も劇的なものは、液体ヘリウムの「超流動」と呼ばれる現象で、約2ケルビン(摂氏マイナス271度)の極低温で液体ヘリウムが粘性を失い、さまざまな奇妙な性質を示します。超流動は金属のなかの電子が抵抗を失う「超伝導」と同様に、粒子がもつ波としての性質がマクロなスケールで表れた巨視的量子効果の一例であり、物理学の重要な問題として活発に研究されてきました。超伝導物質は多数存在し、新しい超伝導物質が発見されるたびに物理学は大きく発展してきました。

これに対し、超流動は液体ヘリウムと冷却原子気体と呼ばれる物質に限られてきました。もし新しい超流動物質ができれば、超流動そのものの理解が深まるだけでなく、新しい物理概念が生まれ科学の発展に貢献する可能性があります。水素分子は質量がヘリウムと同程度に軽いため、超流動を示す可能性があります。超流動水素を作る方法として、1970年代にロシアの理論物理学者ギンツブルグ(2003年に超伝導理論でノーベル物理学賞受賞)が、液体水素を凝固温度(三重点:13.8ケルビン)より低温まで過冷却液体として保つことを提案しました。以来、過冷却液体水素を作る多数の試みがなされましたが、超流動の実現にはほど遠いものでした。

3. 研究内容・成果

本研究では、ガラス基板に吸着した水素分子薄膜の弾性を測定し、水素分子の拡散運動の振る舞いを調べました。本研究より前に、超流動を示すヘリウム薄膜と、量子性が弱く超流動を示さないネオン薄膜の両方において、弾性率が低温で増大する現象を発見し、これを「弾性異常」と名付けました(文献1、2)。弾性異常は、極低温で固化している薄膜から分子が熱活性化過程で励起されるために起こります。これは、薄膜分子の最低エネルギー状態と励起状態の間に「エネルギーギャップ」が存在することを意味します。ヘリウムでは、膜が厚くなるとエネルギーギャップがある膜厚(量子臨界点)で消失し、臨界点以上の膜厚で超流動が起こるため、水素薄膜でもエネルギーギャップの膜厚による変化から超流動の存否について情報が得られると期待されます。

その結果、水素薄膜では3つの異なる温度で弾性異常を発見し、そのうち高温側の2種類は分子の拡散運動と量子力学的トンネル運動が低温で凍結する過程に起因することがわかりました。残り1つの弾性異常は1ケルビン付近で起こり、水素薄膜の最表面の分子の拡散運動によることが判明しました。すなわち、水素分子は約1ケルビンまで固化せずに動き回り、一種の過冷却液体の状態にあります。通常の水素は約14ケルビンで固化することから、薄膜がその10分の1以下の温度まで液体的に振る舞うことは驚きです。これは水素の持つ強い量子性によって生じていると考えられます。

水素の弾性異常が発生する温度をヘリウムと比べてみます(図)。両者とも、膜を厚くするにつれて異常が生じる温度が急激に低下します。すなわち膜が薄いときの水素はヘリウムによく似ています。ヘリウムでは弾性異常が絶対零度で消失して量子臨界点に到達し、超流動を示します。一方水素では異常の温度が1ケルビンまで低下しますが、量子臨界点は存在しません。従って水素薄膜は超流動寸前の状態にあるが、1ケルビン以下では固化して超流動にはならないことがわかります。

4. 今後の展開

今回の研究で、固体表面に吸着した水素薄膜が極低温で超流動寸前の状態にあることを発見しました。一方で、通常の実験条件では水素薄膜の超流動化は困難であることも判明しました。

この成果は、水素がどの程度超流動に近づいたかを初めて定量的に示した点で画期的であり、外部電場や高周波音波の印加により超流動水素を実現する可能性を拓く研究成果です。水素は宇宙や生命の成り立ちに重要なだけでなく、超高压下では超伝導の発現も期待されています。超流動水素の実現は、水素の多様性を示すだけでなく、科学の発展に大きく貢献すると期待されます。

<参考文献>

1. T. Makiuchi, M. Tagai, Y. Nago, D. Takahashi, and K. Shirahama, “Elastic anomaly of helium films at a quantum phase transition”, *Physical Review B* **98**, 235104 (2018).
2. T. Makiuchi, K. Yamashita, M. Tagai, Y. Nago, and K. Shirahama, “Elastic Anomaly of Thin Neon Film”, *Journal of the Physical Society of Japan* **88**, 034601 (2019)

<原論文情報>

Multiple diffusion-freezing mechanisms in molecular-hydrogen films
(水素分子薄膜における複数の拡散凍結機構)

著者 Takahiko Makiuchi, Katsuyuki Yamashita, Michihiro Tagai, Yusuke Nago, and Keiya Shirahama

(巻内崇彦、山下勝之、互井通裕、永合祐輔、白濱圭也)

掲載誌 Physical Review Letters 第123巻
(2018年インパクトファクター 9.227)

doi: 10.1103/PhysRevLett.123.245301

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.123.245301>

<参考図>

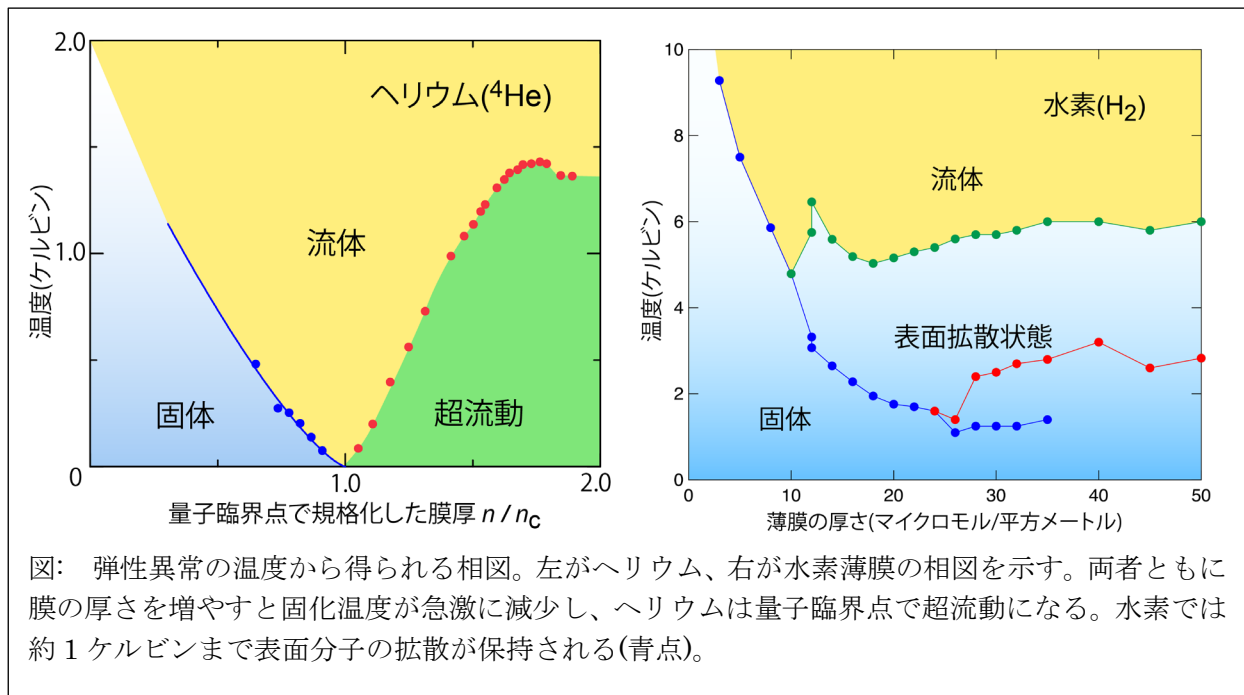


図: 弾性異常の温度から得られる相図。左がヘリウム、右が水素薄膜の相図を示す。両者ともに膜の厚さを増やすと固化温度が急激に減少し、ヘリウムは量子臨界点で超流動になる。水素では約1ケルビンまで表面分子の拡散が保持される(青点)。

<用語説明>

※1 超流動: 液体ヘリウムなどの量子性の強い物質が示す極低温現象であり、粘性が消失する、パイプの中で永久に回転するなどの特異な現象を超流動と呼ぶ。超流動は多数の粒子が一つの量子状態を占有(ボース・アインシュタイン凝縮)することで生じる。超流動物質としては液体ヘリウムの他にリチウムなどの冷却原子気体、半導体中のポラリトン凝縮体などが知られており、中性子星も超流動物質と考えられている。超伝導も、広い意味で電子の超流動状態と言える。

※2 液体ヘリウム: ヘリウムは最も液化しにくい物質で、約4ケルビン(摂氏マイナス269度)で液体となる。液体ヘリウムは超伝導磁石の寒剤として利用されるだけでなく、超流動に代表される量子現象を示すため盛んに研究されている。常圧下では絶対零度でも固化しない唯一の物質でもある。

※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（村上）

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

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