

大阪公立大学
科学技術振興機構（JST）

複雑な量子流動現象から生じた三日月スキルミオン ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の量子版を実験により観測

<概要>

大阪公立大学南部陽一郎物理学研究所／大学院理学研究科の竹内 宏光准教授らの研究グループは、韓国科学技術院（KAIST）の Jae-yoon Choi（ジェユン チョイ）准教授らの研究グループと共同で、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性（KHI）と呼ばれる、流体の流れに関する物理現象の量子版（量子 KHI）の観測に、世界で初めて成功しました。また、本研究で観測した量子 KHI の界面から生じた渦が、2022 年に本研究グループが予測した新種のスキルミオン※¹（三日月スキルミオン）であることが明らかになりました。

KHI は、速度が異なる二つの流体の境界面の波が発達して特徴的な渦巻き模様を引き起こす現象で、流体力学の分野で古くから知られており（図 1）、フィンセント・ファン・ゴッホの代表作である「星月夜」にインスピレーションを与えたとも言われています。KHI は流体の粘性※²の有無に関わらず生じるため、粘性を持たない超流動体でも KHI が生じることが予想されていましたが、これまで KHI の界面模様が観測された例はありませんでした。

本研究で発見された新種のスキルミオンは、超省エネ型次世代メモリデバイスなど、スキルミオンを活用した応用技術の基礎原理に革新をもたらすことが期待されます。

本研究成果は 2025 年 8 月 8 日（金）に、国際学術誌「Nature Physics」のオンライン速報版に掲載されました。



図 1 ケルビン・ヘルムホルツ波の写真と絵画。左：雲の波模様として捉えられたケルビン・ヘルムホルツ波。右：ゴッホ作「星月夜」。中央の渦巻き模様は KHI によって二つの流れの間に生じたケルビン・ヘルムホルツ波の渦模様をモチーフにしたものとも考えられている。

コロナ禍で静かな研究室で集中して取り組んだ理論研究が、今回の実験で実証されました。この理論研究は KAIST の Jae-yoon Choi らが実現した量子気体を強く意識したのですが、磁性体の専門家である Se Kwon Kim らの先行研究に強く触発されたものです。私の理論研究を公表した直後に Se Kwon から連絡があり、そのとき初めて彼も KAIST に所属していることを知って驚きました。このような偶然も重なり、今回の国際共同研究が実を結びました。



竹内 宏光准教授

<研究の背景>

量子流体は低温下で実現し、超伝導や超流動がその代表的な現象です。超伝導は電荷を持つ粒子の集団が電気抵抗なしで流れる現象としてよく知られています。超流動は電氣的に中性の粒子集団が粘性なしで流動する現象を指します。ケルビン・ヘルムホルツ不安定性 (KHI) は、19 世紀に理論提案された“流れ”に関する代表的な物理現象の一つで、対象とする流体を粘性のない流体（理想流体）と近似的に見なすことでその理論が適用されてきました。この意味では、KHI 理論を検証する上で、粘性がない超流動体の性質は従来の粘性流体よりも優れていると言えます。

KHI を題材にした超流動体の研究は古くから存在し、最も有名な研究は 1995 年に報告されたフィンランドの Aalto 大学(当時はヘルシンキ工科大学)による量子液体ヘリウムの $^3\text{He-A}$ と $^3\text{He-B}$ という二つの超流動層の界面を利用した実験です。しかし、この系は KHI の理論との整合性は良いものの、散逸（エネルギーが外部に奪われる現象）が強いために KHI とは異なる不安定性が先に起こり、KHI が引き起こす現象を覆い隠してしまいます。また最近では米国 MIT とイタリア LENS の実験グループが、中性原子を極低温まで冷却して実現する量子気体の超流動体でせん断流を作ることで、それぞれ超流動体における KHI の再現に迫っていました。しかし、彼らが実験で利用した 1 成分の超流動体では、界面自体がそもそも物理的に不安定なため、KHI を特徴づける界面波の成長の様子を捉えることはできませんでした。

<研究の内容>

KAIST の Jae-yeon Choi の実験グループは、スピンと呼ばれる磁石のような性質を持つ ^7Li 原子の磁性量子気体で超流動体を実現し、この系で精密な制御・観測技術を世界最高峰のレベルで確立していました。一方、本学理科学研究科の竹内准教授は、2022 年にスピンの性質を利用することで、この超流動体で KHI における界面波の成長過程とその後の興味深いダイナミクスを実験で確かめられることを理論的に予測していました。本研究では、KAIST の理論・実験グループが竹内准教授の理論予測に興味を持ったことをきっかけに、国際共同研究に至りました。

本研究では、2 次元的に制限された空間領域に閉じ込められた ^7Li 原子の超流動体で、量子 KHI の観測に世界で初めて成功しました。本研究で観測されたダイナミクスの概略を図 2 に示します。界面波が成長するにつれて突起（フィンガー）と呼ばれる構造が流れになびいて斜めに成長します。このような突起の出現は、まさしく量子・古典系に依らず普遍的に KHI が引き起こす特徴的な模様です（図 1 左）。突起模様が現れる条件は理論的に限定されるため、超流動体の原子種によってはこのような普遍的な構造を観測することは現実的ではありません。しかし、 ^7Li 原子の超流動体はこの条件をうまく満たしており、実験では成長した突起の様子がはっきり捉えられました。

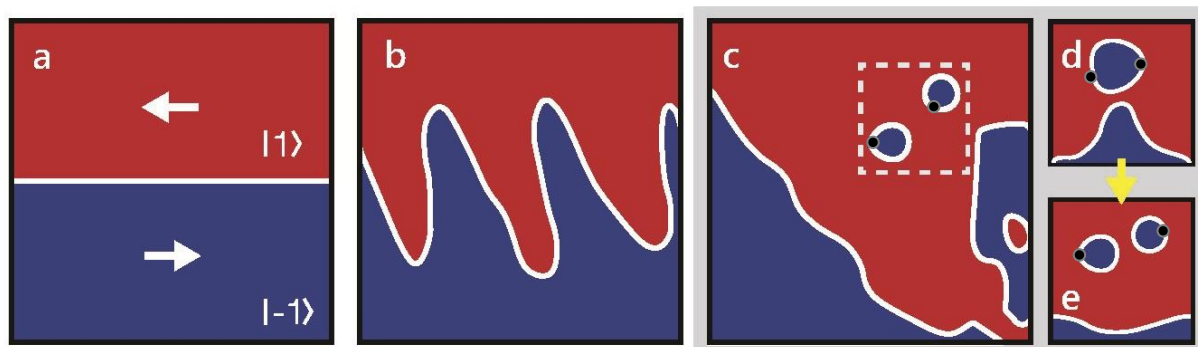


図 2 スピン上向き（赤）と下向き（青）成分間の相対流による KHI と三日月スキルミオン生成のダイナミクスの概略図。白い矢印は初期状態の流れの方向を表す。平らな界面（白線）を持つ初期状態 (a) から擾乱が突起状に成長し (b)、突起の先端がちぎれて三日月スキルミオン（破線の四角内）が放出される (c)。界面上のスピン特異点を黒い点で示した。スキルミオン数^{*3}は $N_s = 1$ であるがスピン特異点を 2 つ持つスキルミオンも見られ (d)、それが分裂すると二つの三日月スキルミオンになる (e)。

古典流体の KHI では、突起成長の後に界面がらせん状に巻きつくことで渦巻き模様が形成されることが知られています。ところが、超流動体では渦の強さ（循環）が飛び飛びの値をとって量子化されることで、渦巻き模様の代わりに突起の先端がちぎれて孤立した渦が放出されます（図 3）。放出された渦の循環の大きさはトポロジカル量子数と呼ばれる整数 (N_V) で特徴づけられ、実験では放出された $N_V = 2$ の渦が、二つの $N_V = 1$ の渦に分裂する様子も観測されました。KHI の理論が予言する界面波の成長の後に現れる、上述のような量子性を反映した特徴的な現象は古典流体では決して見られませんが、この実験はまさにその特徴を捉えることに初めて成功しました。

量子 KHI によって放出された渦の内部をよく見ると、渦内部に残存したスピン（磁化）は外部とは逆向きになっており、その結果として円状の磁壁を境界とした「島」を形成しています。この磁壁上でスピンの xy 平面（紙面）内で回転すると、渦を巻いたような織目構造を形成します。このような構造は磁気スキルミオンと呼ばれ、その安定性には位相幾何学（トポロジー）※4 が関与しています。また、渦が循環量子数 N_V で特徴づけられるように、スキルミオンもスキルミオン数 (N_S) と呼ばれるトポロジカル量子数で特徴づけられます。多成分の超流動体では渦はスキルミオンの性質を併せ持つことがあり、渦スキルミオンとも呼ばれます。

本研究の超流動体では、渦から離れた場所ではスピンが内部とは逆を向いており、この場合スキルミオン数は整数になるはずだと考えられてきました。しかし、量子 KHI で生成される渦スキルミオンの多くはスキルミオン数が半整数 $N_S = 1/2$ のものでした。観測された半整数 $N_S = 1/2$ のスキルミオンは、円状の磁壁の一点にスピン特異点を有し、回転対称性を自発的に破った織目構造をとります。特異点の位置が中心からずれて偏心して風変わりなことから、この半整数スキルミオンには **Eccentric Fractional Skyrmion (EFS)** という英名が付けられました。磁壁はおおよそ円の形をしています、特異点ではスピンのある成分 ($m_F = 0$ 成分) が消失しているため、その分布はアルファベットの C のあるいは三日月型をとります（図 4）。KHI をモチーフにした

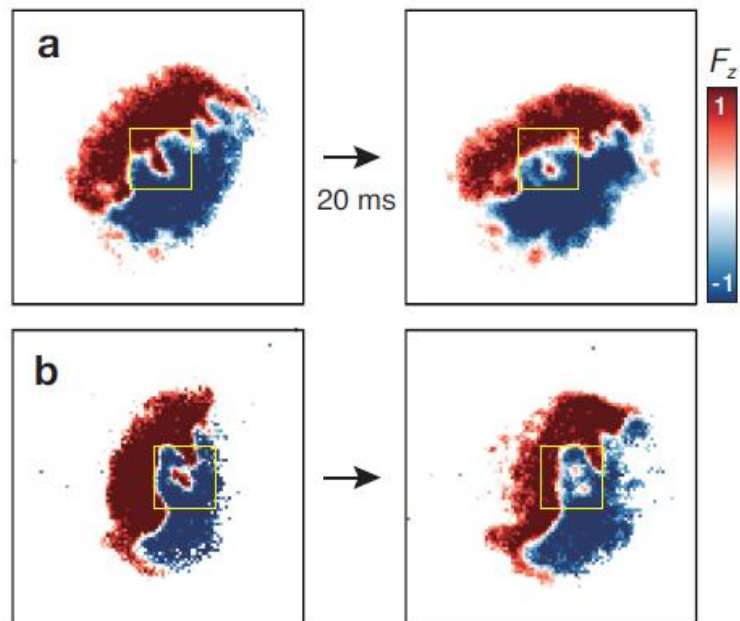


図 3 界面の突起がちぎれて放出される量子化された渦。
a: 突起がちぎれてスピン上向きの島が出現している。 b: 突起から放出されたスピン上向きの島が二つの島に分裂している。これは循環量子数 $N_V = 2$ の渦が $N_V = 1$ の渦に分裂したことを示唆している。

ミオンには **Eccentric Fractional Skyrmion (EFS)** という英名が付けられました。磁壁はおおよそ円の形をしています、特異点ではスピンのある成分 ($m_F = 0$ 成分) が消失しているため、その分布はアルファベットの C のあるいは三日月型をとります（図 4）。KHI をモチーフにした

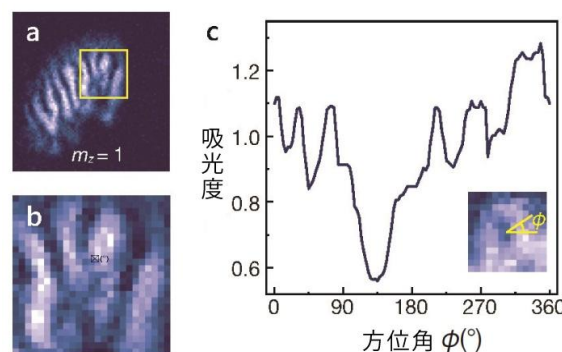


図 4 三日月スキルミオン。a: スピン上向き成分の波動干渉像。Y 字型の（2 対 1 の）干渉縞は、循環量子数 $N_V = N_S/2 = 1$ を表している。b: 渦が存在する領域の拡大図。c: 三日月スキルミオンを中心とした $m_F = 0$ 成分の角度方向の密度分布。135°あたりの密度のくぼみはスピン特異点の存在を示唆しており、これにより三日月型の分布を形成する。

とも言われるゴッホの「星月夜」にも渦と重ねて三日月が描かれていることから、EFS の和名を三日月スキルミオンと命名しました。2022 年に理論予測された三日月スキルミオンの証拠となるトポロジカル数 $N_5 = 1/2$ と三日月型の密度分布が、本研究で実証されました。

<期待される効果・今後の展開>

超低温の量子気体を使うことで、量子 KHI を世界で初めて実現し、新種のスキルミオンである三日月スキルミオン (EFS) の存在が実証されました。今後は、実験をより精密化することで、KHI が引き起こす界面波の波長や振動数に関する 19 世紀になされた理論予言が、定量的に検証できるようになると考えられます。

新種のスキルミオンである三日月スキルミオンがどのような物性を示すのかにも注目が集まります。磁気スキルミオンはその小ささ・安定性・独特な動きの性質から、次世代メモリデバイスやスピントロニクスなどの急速に発展する科学技術への応用が期待されています。スキルミオンはこれらの応用技術を物理的に記述する際の基本構成要素であり、その新種の発見は、応用分野や磁性体などの基礎物理分野に波及することが期待されます。

また、三日月スキルミオンスピン織目構造には特異点が埋め込まれており、高次元空間やより一般的な多成分場でもこのような風変わりなトポロジカル構造が起こる可能性があります。一方で、特異点の存在のために従来のトポロジーによる理論的記述は厳密には適用できません。このような新奇なトポロジカル構造を普遍的な物理現象として捉えるためには、対称性の自発的破れが複雑に起こる系について物理・数学的な造詣を深める必要があります。

<資金情報>

本研究は、JSPS 科研費 (JP18KK0391、JP23K20228)、JST 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学 (研究総括：後藤晋)」における研究課題「量子粘性の検証と複雑な量子流動現象の解明 (研究代表者：竹内宏光、JPMJPR23O5)」の支援を受けて行われたものです。

<用語解説>

※1 スキルミオン…スピン (磁化の向き) が渦巻き状に並んだ安定な構造で、粒子のようにふるまう。

※2 粘性…流体 (液体や気体) が流れるときの「ねばりけ」のことで、流れにくさや内部の摩擦の強さを表す。

※3 スキルミオン数…渦巻き状のスピン構造 (テクスチャー) が空間にどれだけ含まれているかを示す数で、スキルミオンの個数やトポロジー的な特徴を表す。

※4 位相幾何学 (トポロジー) …物体の連続的な変形 (切ったり貼ったりせずに曲げたり伸ばしたり) で変わらない性質を扱う数学の分野で、自発的対称性の破れによって生じる位相欠陥 (トポロジカルソリトン) を分類・理解するためによく用いられる。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Nature Physics

【論文名】 Stable singular fractional skyrmion spin texture from the quantum Kelvin-Helmholtz instability

【著者】 Seung Jung Huh, Wooyoung Yun, Gabin Yun, Samgyu Hwang, Kiryang Kwon, Junhyeok Hur, Seungho Lee, Hiromitsu Takeuchi*, Se Kwon Kim* and Jae-yoon Choi*

* Corresponding author(s)

【DOI】 10.1038/s41567-025-02982-x

【掲載URL】 <https://www.nature.com/articles/s41567-025-02982-x>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院理学研究科／
南部陽一郎物理学研究所
准教授 竹内 宏光（たけうち ひろみつ）

TEL : 06-6605-3190

E-mail : takeuchi@omu.ac.jp

【JST 事業に関する問い合わせ先】

科学技術振興機構 戦略研究推進部
グリーンイノベーショングループ
安藤 裕輔（あんどう ゆうすけ）

TEL : 03-3512-3526

E-mail : presto@jst.go.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

TEL : 06-6967-1834

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL : 03-5214-8404

E-mail : jstkoho@jst.go.jp

※本プレスリリース内の画像について、使用をご希望の場合は事前にご連絡ください。