

大阪科学・大学記者クラブ 御中
(同時資料提供先：文部科学記者会、科学記者会)

2021年5月24日
大阪市立大学

従来の認識を覆す発見！！

自発的対称性の破れによって生じた謎の物体を解明

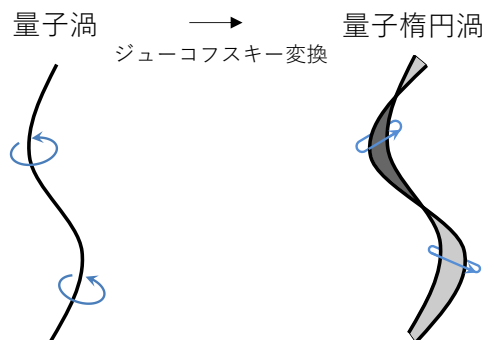
<本研究のポイント>

- ◆南部陽一郎氏のノーベル物理学賞受賞で話題になった自発的対称性の破れに関して、最近実験で観測された謎の物体（位相欠陥^{※1}）を理論的に解明。
- ◆飛行機の翼の揚力計算に用いられるジューコフスキー変換を応用することで量子楕円渦と呼ばれる新たな位相欠陥の存在を予言。

※1位相欠陥…自発的対称性の破れを記述する場が相転移の過程で空間的に非一様に成長することで取り残される局所的なエネルギーの集中領域。このような場の例として素粒子論ではヒッグス場が知られている。

<概要>

大阪市立大学大学院 理学研究科および南部陽一郎物理学研究所の竹内 宏光（たけうち ひろみつ）講師は、最近実験で発見された自発的対称性の破れ（Spontaneous Symmetry Breaking、以下SSB）の非平衡時間発展によって生み出される謎の位相欠陥の正体を理論的に突き止めました。この系で実現するSSBは古くからよく知られる等方的超伝導体や超流動⁴Heで起こるSSBと同様であるため、量子渦と呼ばれる流体中の渦のような性質を持つ位相欠陥が生じると予想されます。ところが、その実験で観測された位相欠陥はそれとは似ても似つかない構造をもっており、その物理的性質は謎に包まれていました。本研究では飛行機の翼の揚力計算に用いられるジューコフスキー変換を量子渦に適用するという考えを初めて導入し、解析の結果、この謎の位相欠陥の最も安定な状態が量子楕円渦という新たな位相欠陥であることを明らかにしました。本研究成果は、物理学分野で最も権威のある米国物理学会が発行する学術雑誌『Physical Review』の速報としてオンライン掲載されました。



量子楕円渦の概念図：量子渦は竜巻のような糸状の物体（左）ですが、量子楕円渦は帯状の構造をとります。矢印は渦の周りを迂回する流れを表しています。

<研究者からのコメント>

実験の写真を初めて見たときは度肝を抜かれました。なぜなら、それがこれまで観測されたことのない自然現象であることが一目でわかったからです。物理学の基礎研究をしていると、このような鳥肌の立つような体験にたまに遭遇します。しかも、このような体験を通じて発表した単著の論文が物理学分野で最も権威のある専門誌に掲載されたことは、物理学者冥利に尽きる出来事です。





<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Physical Review Letters (IF=8.4)

【論文名】 Quantum Elliptic Vortex in a Nematic-Spin Bose-Einstein Condensate

【著者】 Hiromitsu Takeuchi

【掲載 URL】 <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.195302>

<研究の背景>

SSB の概念を素粒子論に応用した研究が、南部陽一郎氏のノーベル物理学賞の対象となったことは有名な話です。南部陽一郎氏の研究に象徴されるように SSB はあらゆる物理分野に適用される物理概念です。このような普遍的概念に関する新たな発見は物理界全体に波及し得るため飛躍的な発展をもたらす可能性を秘めています。SSB は物性物理から素粒子・原子核・宇宙物理に跨る幅広い分野の普遍的基礎概念として半世紀以上前から研究されているにもかかわらず、その時間発展については単純な場合を除いて未解明の部分が多く残されています。極低温で実現する超流動 ^3He やスピン自由度をもつアルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体^{*2}などの多成分超流体では、他の物理系に比べて SSB に起因した多彩な物理現象が起こることから、SSB と結び付けた研究がこの分野で世界的に活発に行われてきました。

^{*2} ボース・アインシュタイン凝縮体…原子気体が絶対零度に近い温度まで冷却されたときに、大部分の原子が最低エネルギー状態に収束する現象。

<研究の内容>

SSB が起こった物理系の性質を記述する際には「場」と呼ばれる時間と空間に依存した関数が共通して用いられます。この場の運動を計算することができれば、その系の挙動を予測できるわけですが、場の自由度は無量大であるためその計算は一般に困難です。場の複雑な運動を記述する上で有効な方法として、位相欠陥と呼ばれる場の中を漂う物体にその自由度を代表させるというやり方があります。位相欠陥の「芯」付近の場はある決まった構造をとります。そのため、芯の中心を質点の運動のように記述することで場の運動も近似的に予測できます。この状況はちょうど台風の目の進路を見れば今後の風向きの変化をある程度予測できることに似ています。超伝導体と超流体といった SSB が起こる典型的な物質では、この「風」は抵抗なしの電流と摩擦なしの流れに対応します。対称性の破れ方に応じて芯の周りの場の構造は予測できるので、対称性の破れ方を大局的に把握していれば位相欠陥の挙動、すなわち場の挙動もよく理解できると考えられてきました。

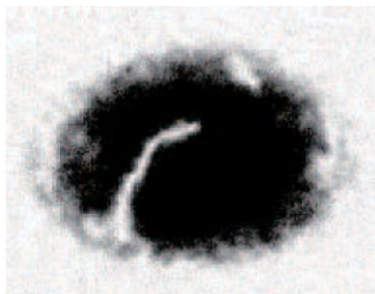


図1：ホットケーキ型の2次元的な“電磁容器”に閉じ込められた ^{23}Na 超流体中の複合欠陥。色が黒いほど流体密度が濃い領域を表す。位相欠陥の芯は写真中央の白い領域に相当する。写真はPhys. Rev. Lett. **122**, 095301 (2019)より。

このような考えを否定する現象がソウル国立大学の Shin 教授の実験グループによって最近観測されました[Phys. Rev. Lett. **122**, 095301 (2019)]。この実験系の対称性の破れ方は良く知られる通常の超伝導体・超流体と同様であるため、そこで現れる量子渦と呼ばれる位相欠陥の芯の形

状は2次元断面では台風の目のように丸くなると予測されます。ところが、実際に観測された位相欠陥の断面の構造はまったく異なるものだったのです。図1は相転移を急に引き起こすことで生じた位相欠陥の断面に相当する構造を実験で撮影した写真です。当時この位相欠陥は既知の2種類の位相欠陥が複合したもの（複合欠陥）とされ、臨界点近傍の相転移過程で一時的に起こる過渡的な状態だと解釈されました。

本研究では実験で観測された複合欠陥の物理的性質を解明するために、飛行機の翼の揚力計算に用いられるジュコフスキー変換を量子渦に適用するという考えを初めて導入しました。この考えに基づくと実験で観測された位相欠陥は量子楕円渦(Quantum elliptic vortex)と呼ばれる新たな位相欠陥として最終的に安定化することになります。通常量子渦は竜巻の様に、その断面で回転対称な流れを伴います(図2左)。ところが、新たに提案された量子楕円渦の断面は、自発的に回転対称性を破って楕円に沿った流れを形成しています。位相欠陥の外形はその物理系の大局的なSSBの起こり方に基づいて決まると従来考えられていましたが、この結果はその認識をはっきり覆すものでした。このような不思議な構造は、相転移の臨界点近傍で起こり、その安定性には位相欠陥の芯内部での局所的なSSBが深く関わっていることが理論的に分かっています。

<期待される波及効果>

SSBの研究は古くから行われていますが、芯内部の局所的なSSBがどのように起こるのか、またそれが位相欠陥の物理的性質にどのように影響するのかについて、一般的な理解は得られていません。位相欠陥は超伝導体のような特殊な物質中だけでなく結晶や液晶といった比較的身近な物質からスピントロニクスといった最先端の科学技術に至る様々な物性系で顔を出し、はたまた初期宇宙の相転移や高速回転する中性子星の内部運動でも重要な役割を果たすと考えられています。今後も上記発見のようなSSBに関する新たな展開が実験技術の向上とそれに応じた理論の進展によりもたらされ、物理分野全体に波及することを期待しています。

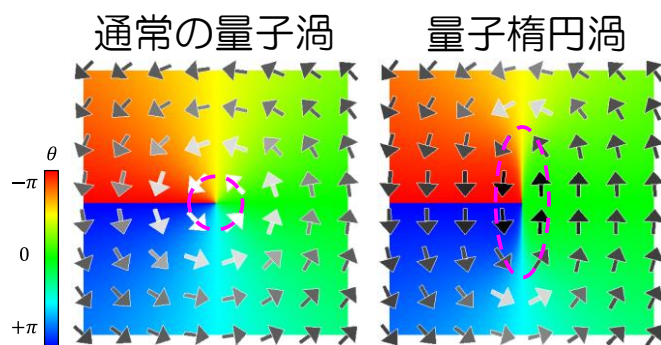


図2：通常回転対称な量子渦（左）と量子楕円渦（右）まわりの流れ（数値計算）。矢印は流れの向きを表しており、色が白いほど流れが強い。芯の外形を破線で概略的に示した。背景色は超流体の場に相当する巨視的波動関数（複素関数）の位相 θ を表している。

<今後の展開について>

本研究で明らかになったのは、新奇な位相欠陥の単独の振る舞いについてですが、急激な相転移が起きた場合には無数の位相欠陥が生成されるため、位相欠陥の間に働く相互作用を考慮したより高度な理論解析が求められます。また、今回明らかになった現象は、多成分超流体で想定される様々な科学的条件の内のある特定の条件下で発見された現象にすぎません。今後想定する条件を拡大させることで、更に興味深い現象が見つかるかもしれません。



<資金情報>

本研究は JSPS 科研費 JP17K05549,JP18KK0391,JP20H01842 の助成を受けたものです。
本研究の一部は「大阪市のふるさと寄付金（市立大学振興）」を財源とした「グローバル人材育成事業（研究支援）」による支援を受けて行われたものです。

【研究内容に関するお問い合わせ先】

大阪市立大学大学院
理学研究科 数物系専攻
講師：竹内 宏光（たけうち ひろみつ）
E-mail : takeuchi@osaka-cu.ac.jp

【報道に関するお問い合わせ先】

大阪市立大学 広報課
担当：西前
TEL : 06-6605-3411
E-mail : t-koho@ado.osaka-cu.ac.jp