

# 2016年ノーベル物理学賞

## トポロジカルな相転移とトポロジカルな物質相の理論的発見

FOR THEORETICAL DISCOVERIES OF TOPOLOGICAL PHASE TRANSITIONS AND TOPOLOGICAL PHASES OF MATTER

水が氷になったり、鉄が磁石になったりすることを「相転移」というのはご存知でしょう。この時、水と氷は異なる「相」にあるといいます。これら通常の「相」の記述や「相転移」では「対称性」が本質的です。磁石には向きがあるので対称性が破れていると考えます。ところが、実は対称性と無関係な新しい相や相転移がたくさんあるというのです。これを理論的に最初に予言した研究が2016年度のノーベル物理学賞の対象になりました。その予言は多くの実験で確認され現在の物性物理学の理論と実験の重要な分野に成長しています。また、引き続き新しい発見がつつぎつぎになされていて今後も大きな進展が期待されています。

### トポロジカルな相転移の理論的発見

### トポロジカルな物質相の理論的発見

コステリッツ (1/4)

J. Michael Kosterlitz

ブラウン大学 (米国)

📍 **KT転移の発見**

渦による新しい相転移の概念

水が凍って雪になる相転移を少し詳しくみましょう。雪の結晶には特定の形があるので、回転したとき全ての方向が同等ではありませんが、水蒸気にとっては方向は全て同等です。このことを水蒸気は対称性が高く、雪は対称性が低いと表し、温度の低下に伴って水蒸気にはあった回転対称性が自発的に破れるといいます。この対称性の概念とその破れは物理学全体に適用可能なとても普遍的な原理であると考えられてきましたが、コステリッツとサウレスは1973年に全く異なる機構による相転移を発見しました (KT転移)。形や向き (これらを秩序変数といいます) ではなく、トポロジカルな構造である渦がこの転移では重要だと言うのです。この発見は、対称性の破れとは独立の新視点からの相転移であるトポロジカルな相転移の源流となりました。

サウレス (1/2)

David J. Thouless

ワシントン大学 (米国)

📍 **TKNN整数の発見**

量子ホール効果のトポロジカルな起源

平面内に閉じ込められた電子に磁場を面に垂直に加えると電子は磁場から進行方向の横向きに力を受けますから、電流をまっすぐに流すためには横方向に電圧をかける必要があります。この時の電圧と電流の比をホール抵抗といいます。これが勝手な値をとらず量子化した値になるというのが、K.von Klitzing が1980年に実験的に発見した量子ホール効果です。(1985年のノーベル物理学賞)。サウレス-甲元-ナイチンゲール-デニスらは1982年にこの量子化の理由がトポロジカルな起源にあることを発見しました。この量子化値 (TKNN整数) は仮想的な単磁極の個数であり連続変形でかわらない位相不変量となります。近年話題のトポロジカル絶縁体などをトポロジカル相といいます。TKNNの発見によれば量子ホール効果はその全ての母体といえます。

ハルデー (1/4)

F. Duncan M. Haldane

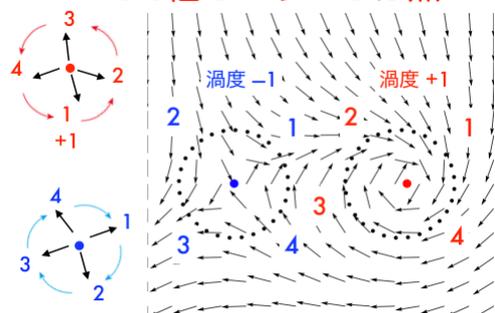
プリンストン大学 (米国)

📍 **Haldane 予想**

スピン絶縁体の存在を予言

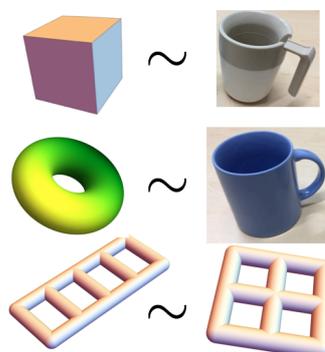
磁石は小さな磁石 (スピン) が秩序正しく整列した (磁気秩序といいます) ものですが、磁石はガスバーナーで熱すると磁化を失います。つまり熱揺らぎでスピンの整列が乱されてしまうのです。Haldaneは1983年に鎖状の磁性体では絶対零度まで冷やしても量子力学による効果が乱れとなり磁気秩序ができない場合があることを発見しました。このときは系は外乱にも応答せず一種のスピンの絶縁体となります。この一風変わった特性は電子偶数個が作るスピンのときのみ起きて、奇数個の電子が作るスピンでは起きないと彼は予言しました (トポロジカル項の効果とされます)。この不思議な予言はその後、世界中の研究者により確認され、現在ではこの系はHaldane鎖とよばれるトポロジカル相の一つの典型例となりました。

渦は常に整数個(量子化)  
0.5個ということは無い

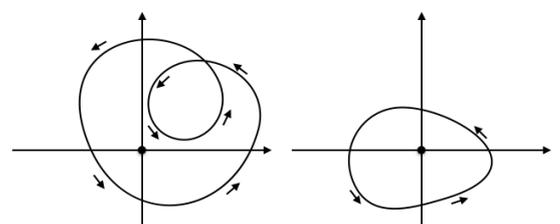


点線にそって時計回りに矢印を追いかけたとき矢印が時計回りに一周すれば渦度+1 反時計回りなら渦度-1

トポロジカルには等価な  
形への連続変形



位相不変量の例: 連続変形で不変



原点周りの回転数はともに+1