公 募 班
研究紹介
（D03）

カイラル p 波超流動体の固有角運動量とエッジ流の解明

押川 正毅 / 東京大学物性研究所 教授

おしかわ・まさき

1994 年　東京大学大学院理学系研究科博士課程中退、1995 年博士（理学）
1994 年から東京大学工学部物理工学科助手、Killam Post-Doctoral Fellow, University of British Columbia、東京工業大学物性物理学専攻助教授を経て 2006 年より現職。

カイラル p 波超流動体あるいは超伝導体は、ヘリウム 3 の超流動状態を記述するものとして、また Sr_2RuO_4 の超伝導状態を記述するものとして重要な系である。また、近年はトポロジカル超流動の観点からも注目を集めている。カイラル p 波超流動体については、以前より「固有角運動量のパラドックス」が知られていた。これは、超流動体の全角運動量を問うものである。カイラル p 波超流動体では、2 つのフェルミ粒子が相対角運動量 1 のクーパー対を作る。従って、フェルミ粒子の個数を N とすれば、クーパー対の数は $N/2$ であり、全角運動量も $N/2$ になりそうである。一方、対形成によるギャップの大きさは、通常はフェルミエネルギーに比べて非常に小さい。従って、フェルミ面から離れた（エネルギーが対形成ギャップよりも高い）フェルミ粒子は対形成に参加せず、クーパー対形成はフェルミ面の近くでのみ起きるとも考えられる。すると、超流動体の全角運動量は $N/2$ に比べて強く抑制されると考えられる。これら 2 つの直観的な描像にそれぞれ対応する具体的な計算結果も報告された。両者の間の矛盾を解明し、与えられた状況下での全角運動量の値を理論的に正しく求めることが一つの目標になる。これは物性物理学における基本問題であり、数十年にわたって研究されてきたが、解決には至っていなかった [1]。

この問題は、量子相転移とも深く結びついている。2 次元のカイラル p 波超流動体は、強く対形成した相と、弱く対形成した相の 2 つを持つことがわかっている。対形成の強い極限では、全てのフェルミ粒子が対を作り、この対がボース粒子としてボース・アインシュタイン凝縮を起こす。この状況では、超流動体の全角運動量は $N/2$ になるはずである。しかし、主な興味の対象である、マヨラナモードを持つトポロジカル超流動相は弱く対形成した相であり、ボース・アインシュタイン凝縮の極限とは量子相転移によって隔てられている。この相での全角運動量の値は自明ではない。

無限系では角運動量をはじめとするさまざまな物理量が無限大になるので、数学的に確実な議論を行うには、まず有限系を考える必要がある。角運動量が保存されるには系が回転対称性を持つ必要があるので、有限系としては回転対称なポテンシャル中の超流動体を考えることになる。このとき、トポロジカルな機構により、必然的に系の外側の境界付近にはギャップレスなエッジ状態が生じる。エッジ状態はエッジ流を担うことができ、これはまた角運動量に寄与する。このように、固有角運動量の問題は、エッジ状態とも密接に関連している。

本研究では、まず理想的な状況下で固有角運動量とエッジ流を解明するため、空間的に一様な対形成ギャップを仮定して、有限の大きさの回転対称ポテンシャル中のボゴリューボフ・ドジャン方程式を解いて角運動量やその空間分布を求める。また、当初の研究提案は p 波に限定されていたが、さらに高次の d 波、f 波等のカイラル超流動体も含めて統一的な理解を試みる。

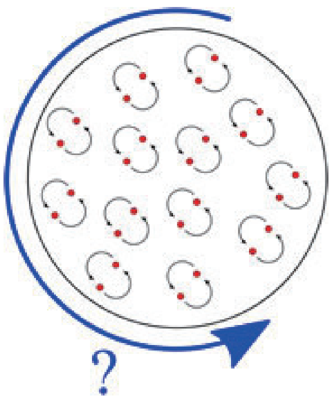

図 1：カイラル超流動体の固有角運動量問題。N 個のフェルミ粒子全てがクーパー対を形成するとすれば、系の全角運動量は $N/2$（p 波の場合）となる。しかし、この結果がどの範囲まで成立するかは自明ではない。

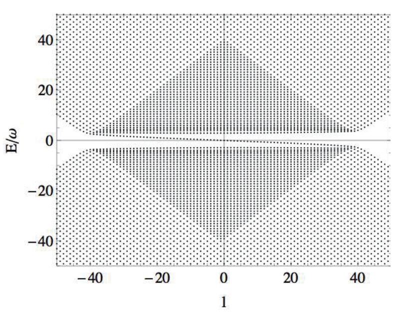

図 2：回転対称な 2 次元無限井戸型ポテンシャル中のカイラル p 波超流動体のエネルギースペクトル。対形成ギャップが開いているが、ギャップ中のエネルギー準位としてエッジ状態が存在している。

[1] A. J. Leggett, "Quantum Liquids: Bose Condensation And Cooper Pairing in Condensed-matter Systems" (Oxford Graduate Texts), Oxford University Press (2006).