

人工非可換ゲージ場が引き起こす 冷却原子気体ボーズ・アインシュタイン凝縮体の 新奇な基底状態

川上 拓人 〈物質・材料研究機構, 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点〉

新田 宗土 〈慶應義塾大学日吉物理学教室, 自然科学研究教育センター〉

町田 一成 〈立命館大学理工学部物理学科〉

ボーズ凝縮体や縮退フェルミ気体などの冷却原子気体では、量子多体効果を、外場によって高精度に制御可能な物質パラメーターの下で、不純物効果に阻害されることなく実現することができる。さらに、相互作用の対称性が高く、固体電子系や量子場の物理を抽出したシンプルな模型を正確に再現することができる。これらの特徴から、冷却原子気体系はその他の系の「量子シミュレーター」として位置づけられる。

本分野における近年の大きな進展として、ゲージ場の人工制御が挙げられる。まず、アメリカ標準技術研究所をはじめとする実験グループが、電気的に中性な原子系に対して、その運動と結合するローレンツ力をもたらず擬似的な磁場を創出することに成功した。さらに同様の手法により、可換ゲージ場である電磁場だけでなく、その概念を多自由度に拡張した非可換ゲージ場を生成する方法が提案されている。固体電子系でよく用いられるラシュバ型スピン軌道相互作用も、ある種の非可換ゲージ場として理解することができる。つまり、ゲージ場の人工制御技術の進展により、可換ゲージ場を起源とする量子ホール効果に加えて、非可換ゲージ場を起源とするトポロジカル絶縁相、トポロジカル超流動相などを原子気体系でシミュレートする可能性が開けてきた。

一方多成分ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) においては、非可換人工ゲージ場が空間変調した秩序変数をもたらすという観点から研究されている。このような背景の下、我々は非可換ゲージ場が現れる最

小の自由度である2成分 BEC について、基底状態として実現する秩序変数の織目構造を研究した。特に正四面体型レーザーによって実現可能であると考えられている、3次元版のラシュバ型スピン軌道相互作用を引き起こす非可換ゲージ場に注目する。そして、このようなゲージ場中では、スピンの回転角がその回転軸の方向に空間的に変化する、“ヘリカル変調”によって基底状態を理解できることを示す。さらに、グロス・ピタエフスキー方程式を数値的に解くことで、 $SO(3)$ 対称なゲージ場中での基底状態が3次元スキルミオンと呼ばれるトポロジカルに非自明な織目構造であることを明らかにする。この織目構造は、凝縮体の中心から外側に向かって、ヘリカル変調の変調ベクトルがハリネズミ状に組み合わさった状態としても理解できる。加えて、ゲージ場の対称性を2次元的、1次元的なものへと人工的に制御することで、3次元スキルミオンが、2次元、1次元スキルミオンへとクロスオーバー的に移り変わることを示す。

本稿で議論する、冷却原子系に加え、近年ではマンガンシリサイドなどの空間反転対称性の破れたスピン系でも、2次元、3次元スキルミオンの検出が報告されており、今後の領域横断的研究により、スキルミオンの持つ物性解明が期待される。

また、ラシュバ型のみならず、多様なゲージ場を実現することで、冷却原子系の「量子シミュレーター」としての有用性がさらに高まることも期待される。

—Keywords—

スキルミオン:

スキルムが1962年に3次元空間中で陽子や中性子のような核子を記述するために提唱した、粒子状のソリトンである。2成分 BEC の秩序変数空間である3次元球に、実空間3次元の織目構造が巻き付いており、秩序変数の連続変形によって取り去ることができない、トポロジカルに非自明な構造として知られる。オリジナルの3次元のものに加えて、次元がひとつ低下した2次元スキルミオンも、磁性体や $^3\text{He-A}$ 相を対象として研究されている。

ラシュバ型スピン軌道相互作用:

もともと表面2次元電子系で提案されたスピン軌道相互作用である。この相互作用の下では、粒子の分散関係が、運動量とスピンの成す角によって定義されるヘリシティの正負によって分裂する。この効果は、トポロジカル絶縁体、超伝導体を実現するにあたり重要な役割を果たすために注目されている。冷却原子系では、ゲージ場の人工制御の手法を用いて、ラシュバ型スピン軌道相互作用を人工的に作り出す方法が提案されている。