

スピンなしの強磁性機構の解明に初めて成功

～磁石の新たな応用への貢献に期待～

ポイント

- ・ 金属磁石（遍歴電子系）の相互作用ラグランジアンに成功。
- ・ スピンの関与しない金属の強磁性機構を理論的に解明。
- ・ 遍歴電子の物理解明と新たな応用の進展に期待。

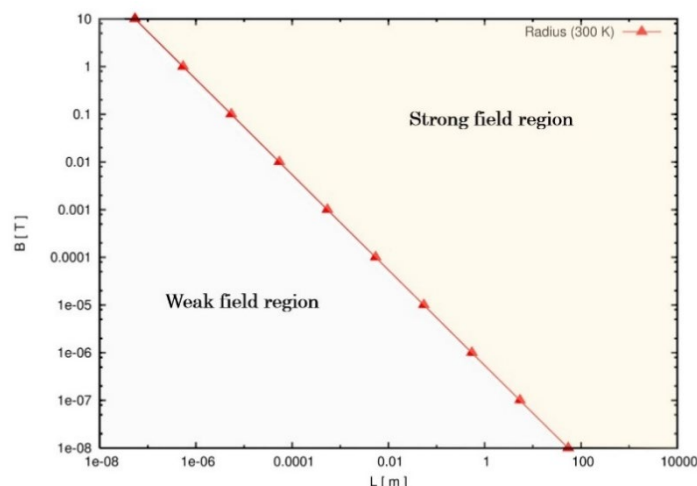
概要

北海道大学の石川健三名誉教授（元大学院理学研究院教授）らの研究グループは、理論的な研究に基づいて、鉄やニッケル等の金属磁石（遍歴電子系）の新たな強磁性生成機構を発見しました。

従来のスピン（軌道角運動量）と磁場との相互作用を起源とする強磁性機構と異なり、新しい機構は、磁場下での金属の電磁場ポテンシャルのラグランジアンや作用に見つかった、チャーニーサイモン項の相互作用によって引き起こされます。本研究により、この項のために新たに特異な性質や効果が生じ、物理系の磁氣的性質を大きく変えてしまうことが分かりました。チャーニーサイモン項は、ベクトルポテンシャルと電磁場の積に比例し、電子密度と磁場の逆数の積に比例する結合定数と、電磁場強度の二乗である通常の電磁場エネルギーより低いスケール次元を持っています。このため、電子密度と磁場の直接的な相互作用や、電流と電位変化の相互作用が起こります。このことにより、低エネルギーの現象やマクロなサイズの電子系に、従来の相互作用では発現しない効果として、強磁性が導かれました。

物質の性質を理論的に解明することによって、新たな物理効果・現象が解明され、さらなる応用の道が開かれることが期待されます。磁石の物理は、基礎と応用の両面で長い歴史を持っていますが、新たに見つかった相互作用より、今までの研究で未解明だった事柄の解明につながると予想されます。

なお、本研究成果は、2024年8月28日（水）公開の Nuclear Physics B 誌に掲載されました。



強磁場領域（strong field region）と弱磁場領域（weak field region）と境界線。

【背景】

金属磁石（遍歴電子系）の強磁性は、物性物理の代表的なテーマとして長い歴史を持ちます。金属の磁石の内部で、電子はサイクロトロン円運動の閉軌道（ランダウ準位）に沿い、その半径は磁場に逆比例し、ゼロ磁場で無限大になります。弱い磁場からゼロ磁場への変化が特異になっているため、自発磁場を調べる今までの研究は、ランダウ準位にある電子の代わりに、ゼロ磁場で計算してきました。

本研究は、ゼロ磁場でなく、有限磁場中の電子をランダウ準位のフォノンイマン格子上で表現することにより、場の理論の定式化を行い厳密な関係式を導くことに成功し、今までの困難を乗り越えました。

光や電子は、物質や宇宙を構成する素粒子で、電磁気力を表すゲージ理論で厳密に記述されます。しかし、今でも未解明の事柄が多い磁場に伴う現象や物理効果の研究は、現在進行中の課題です。本研究では、筆者たちによる半導体中の“量子ホール効果”^{*1}論を強磁性体に拡張し、新たな相互作用と、新たな効果を明らかにしました。

【研究手法・研究成果】

基本的な物質の性質や変化を、量子力学^{*2}量子場の理論を駆使して理論的に解明したところ、一様磁場中における多電子の量子効果から、特異な電磁場の相互作用“チャーナーサイモン項”が導かれ、今まで考えられていなかった遍歴磁性体効果を生ずることが示されました。チャーナーサイモン項より、磁場と電子密度に直接依存する相互作用が働くことより、遍歴磁性体に新たな特異な現象が発現することが判明しました。

また、低温における電子密度と自発磁場に関するスレイターポーリングの関係式にスピンの依存しない新たな証明を与えました。

【今後への期待】

本研究の成果より、遍歴磁性体の理解が進むとともに、新たな効果が、直接実験的に検証されることが期待されます。特に、遍歴強磁性^{*3}における磁場と電子密度の絡んだ現象は、多面的な応用に有益だと考えられます。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (JP21H01107) の助成を受けたものです。

論文情報

論文名 Magnetization without spin: Effective Lagrangian of itinerant electrons
(スピンのない磁化：遍歴電子系の有効ラグランジアン)
著者名 石川健三（北海道大学大学院理学研究院）
雑誌名 Nuclear Physics B (物理学の専門誌)
DOI 10.1016/j.nuclphysb.2024.116663
公表日 2024年8月28日（水）（オンライン公開）

お問い合わせ先

北海道大学 名誉教授（元大学院理学研究院教授） 石川健三（いしかわけんぞう）
TEL 011-706-4486 FAX 011-706-4926 メール ishikawa@particle.sci.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課（〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目）
TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【用語解説】

- *1 量子ホール効果 … SiMOSFET や Ga 超格子半導体で極低温・強磁場で発見された、特異なマクロ量子現象のこと。電気抵抗が、微細構造定数に厳密に比例する。抵抗標準となっていると共に、微細構造定数の精密な決定に使われている。
- *2 量子力学 … 20 世紀初めに発見されたミクロな世界を記述する現代物理学の柱の一つである力学体系。物体の位置の変化を運動方程式で記述するニュートンの運動法則とは異なり、粒子の状態を表す波動はシュレディンガー方程式に従うが複素数であり、古典波動のような物体の変位を表すわけではない。そのかわり、現象の生ずる確率を表す。古典力学は、日常生活における認識や理解の基礎になっているので、理解が易しいが、量子力学は、これらと異質であり理解は易しくない。量子力学は、1900 年のプランクの黒体放射の理論から始まったが、現在も量子情報、量子計算機等の新たな理解や応用が進展中である。また、ミクロ世界だけでなく、マクロな世界でも重要であることが分かってきた。 (石川健三著：レクチャー量子力学、I,II (裳華房))
- *3 遍歴強磁性 … 磁石となる金属である鉄やニッケルの強磁性のこと。局在電子による強磁性と異なりまだ分かっていないことが多い。