

報告番号	甲 第 12760 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 固体物理におけるアクシオン電磁気学
(Axion electromagnetics in condensed
matter physics)

氏 名 今枝 立至

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、申請者の研究成果[1,2]をまとめたものである。本論文の目的は、**アクシオン**が電磁場と相互作用することで引き起こされる現象に関して、固体物理において関連した現象を明らかにすることである。構成は以下の通りである。

第1章では、序論としてアクシオンの基本事項を紹介する。

一般に3+1次元のゲージ理論にはラグランジアンに**シータ項**と呼ばれるトポロジカル項を加える自由度がある。電磁気学の場合ではシータ項は電場 \mathbf{E} と磁束密度 \mathbf{B} の内積の形の相互作用 $\theta\mathbf{E}\cdot\mathbf{B}$ で与えられ、 θ はその係数である。素粒子・宇宙物理の分野では、シータ項の存在は系のCP対称性を破ることから、物質と反物質の量的な非対称性などの問題として古くから研究されてきた[3]。また近年、固体物理の分野でも、マルチフェイロック物質における電磁場の交差相関[4]やトポロジカル絶縁体における表面量子ホール効果[5]などの興味深い現象がシータ項によって説明できることが明らかになり、研究が盛んに行われるようになった。

一般にシータ項は3+1次元のディラック電子とゲージ場の相互作用系から微視的に導出できる。固体物理学ではこのディラック電子の理論は絶縁体のミニマムモデルとしてしばしば用いられるが、絶縁体のバンドギャップに寄与する項として2種類が存在することが知られている[5]。その2つは時間反転対称性(TRS)によって区別ができ、TRSを破らない非磁性秩序 ϕ_4 と、破る磁性秩序 ϕ_5 にそれぞれ対応している。TRSがある場合($\phi_5 = 0$)、 ϕ_4 はトポロジカル絶縁体相の秩序変数としてはたらくが、TRSが破れている場合($\phi_5 \neq 0$)、もはやトポロジカル相の区別はなくなる。これに対応して、その異なるトポロジカル相間を

バンドギャップが開いたまま連続的につなぐパラメータとして、図1に示すように2つの秩序 ϕ_4, ϕ_5 のなす角度 θ を定義する。実は、この角度 θ が量子異常（古典的なラグランジアン
の対称性が量子論において破れる現象）の解析によって、正にシータ項の係数に対応している
ことが知られている。

電磁気学において、シータ項の存在は $\theta \mathbf{E}$ に比例する磁化および $\theta \mathbf{B}$ に比例する電気分極を生じさせる。
もし、ここで2種類の秩序 ϕ_4, ϕ_5 が場として $\phi_4(\mathbf{x}, t), \phi_5(\mathbf{x}, t)$ のように位置や時間的な揺らぎを
許せば、それに伴い θ も単なる定数ではなく場 $\theta(\mathbf{x}, t)$
（これをアクシオン場または動的アクシオン場と呼ぶ）として振る舞うと考えられる。これに伴い、
アクシオンの効果を磁化や電気分極に取り入れた電磁場の方程式だけでなく、アクシオン場に対する
方程式を両立した物理現象というのが期待できる。
素粒子としての動的アクシオン場は、その最初の提案[3]から40年近くたった現在でもその存在を示
す証拠が見つかっていないが、固体物理における動的アクシオン場は、加速器などの大型の装置を使用
しなくても、実験室で検出が可能であり、そのため、動的アクシオン場特有の現象がはじめて実際に検
証できる系として期待されている。

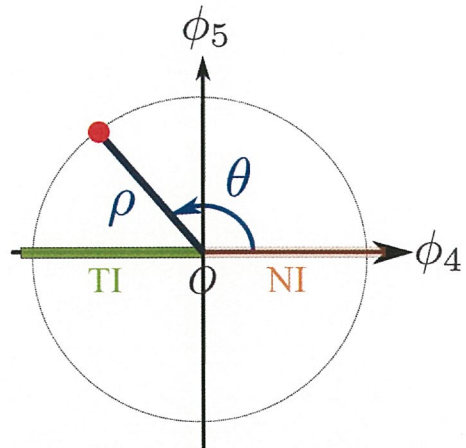


図1 アクシオン場 θ と2種類の秩序 ϕ_4, ϕ_5 の関係。 ϕ_4, ϕ_5 のなす角度として θ が与えられる。 ϕ_4 軸上ではその符号によって、通常の絶縁体(NI)とトポロジカル絶縁体(TI)に分類できる。

第2章では、アクシオン不安定性と非線形電磁気効果に関する研究成果をまとめる[1]。図2に示すようなセットアップを考える。すなわち、常に $\theta = 0$ の通常の絶縁体と一般にはノンゼロ θ になり得るアクシオン絶縁体の接合系を考えて、通常の絶縁体側から電場 E_0 を印加する。動的アクシオン場による新奇現象として、電場 E_0 がある閾値以上になると、系がある種の相転移を示し、アクシオン場と磁束密度が大きく誘起され、印加電場は一部遮蔽されることが、大栗と押川らによって示された[5]。この研究結果の驚くべき点は、たとえ基底状態でTRSがある場合($\phi_5 = 0$)でも、臨界電場を超える外部電場をかけることで、シータ項を通じてTRSの破れが自発的に生じ、磁場が発達することである。しかしながら、

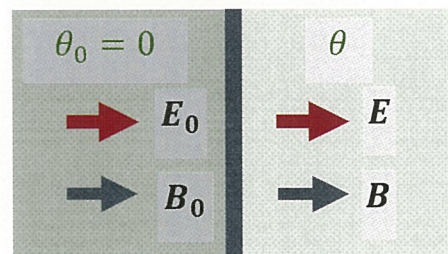


図2 セットアップの概略図。常に $\theta = 0$ の通常の絶縁体(左側)と一般にはノンゼロ θ になり得るアクシオン絶縁体(右側)の接合系を考える。第2章では電場 E_0 を印加するのに対して、第3章では磁束密度 B_0 を印加する。

彼らの解析ではアクシオン場に関して、解析で使用したポテンシャルと実際に誘起された値との間に問題がある。すなわち、彼らは誘起されるアクシオン場の値が1に比べて十分小さいと仮定したポテンシャルを使って解析したにもかかわらず、我々の追従の解析によって実際に誘起されたアクシオン場の値は1を大きく超えたものになっていることが明らかになった。そこで、申請者らはアクシオンの有効ポテンシャルを微視的な観点から導入し、相転移後の電磁場の値を評価し直す必要があると考えた。絶縁体の2種類の秩序 ϕ_4, ϕ_5 がアクシオンと関係があることを考慮して、 ϕ_4, ϕ_5 のゆらぎやすさのパターンをポテンシャルに反映した。その結果、符号変化が可能な秩序ゆらぎの数によって相転移後に誘起されるアクシオン場に顕著な差が現れることを明らかにした。

また、途中の計算結果から、アクシオン絶縁体の誘起された θ の大きさが分かれば電磁場の値も求められる表式を解析的に得た。それによると、図3のように電磁場の表式中には θ は常に $\theta \approx 137\pi$ でスケールされて現れ、そのためにアクシオンの効果を大きくしたい場合には $\theta \geq \Theta$ (図3中の領域IIやIII)が必要になってくることを明らかにした。また同時に、どのように内部の電磁場が決まっているのかや、なぜ不安定性が生じるのかという点に関して、図4に示すようなアクシオン電磁気効果の非線形効果が重要だということを明らかにした。すなわち印加電場によってアクシオン絶縁体に内

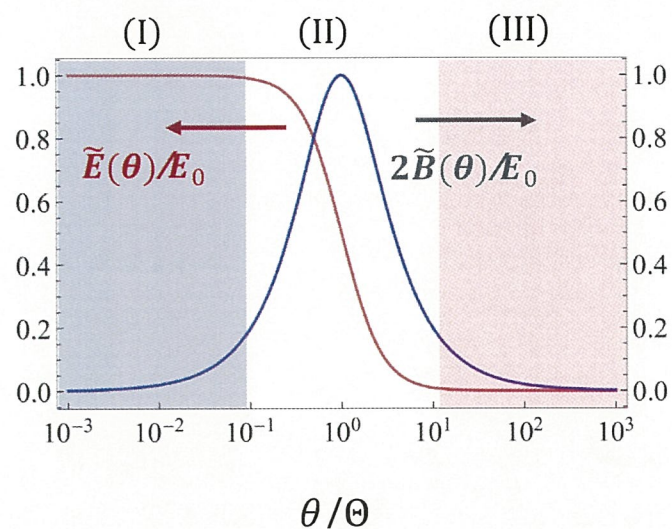


図3 アクシオン絶縁体の内部電場 $\tilde{E}(\theta)$ および磁束密度 $\tilde{B}(\theta)$ の θ 依存性。 θ/Θ のように常に $\Theta \approx 137\pi$ でスケールされて現れる。大きなアクシオン電磁応答を得るためには $\theta \geq \Theta$ ほどのアクシオン場の誘起が必要。これは秩序 ϕ_4, ϕ_5 のゆらぎが2つとも符号変化が可能な場合に実現される。このとき、図4で示すようなアクシオン電磁気効果の非線形効果が顕著に現れる。

部電場 E が生じると θ を介して磁化 M が誘起されるが、それが磁束密度 B としてはたらくし、その結果 θ を介して電気分極 P を誘起し、 E を一部遮蔽するようにフィードバックがかかる。この過程を収束するまで続けた結果として電磁場の値は図3で与えられる。また、 θ を大きくするほど電場を遮蔽効果は大きくなるので不安定性が生じる。最後に、この現象を実験で測定しやすい系としてトポジカル相転移点の近傍の絶縁体を提案した。この系では臨界電場を小さくでき、また誘起されるアクシオン場の値を大きくできることを明らかにした。

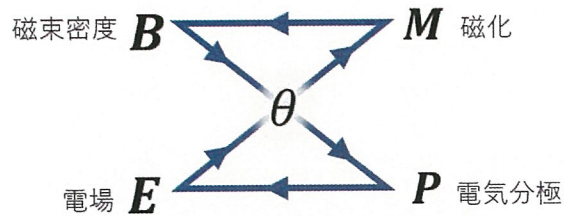


図 4 アクシオン電磁気効果の非線形効果の概略図. 印加電場によってアクシオン絶縁体に内部電場 E が生じると θ を介して磁化 M が誘起されるが, それが磁束密度 B としてはたらし, その結果 θ を介して電気分極 P を誘起し, E を一部遮蔽するようにフィードバックがかかる. この過程を収束するまで続けた結果として電磁場の値は図 3 で与えられる. この効果は θ/θ_0 が 1 に比べて同程度か大きくなると顕著である.

第 3 章では, 磁場駆動の動的アクシオンによる電磁気効果に関する研究成果をまとめる [2]. 第 2 章では外部電場を印加することで自発的に動的アクシオンをつくり出したので, これを磁束密度の印加した場合にも考えてみるというのが本研究の動機である. したがって, セットアップとしては第 2 章のような接合系を考え, 通常絶縁体側から今度は磁束密度を印加する. このとき定常状態においては相転移が生じないことを明らかにした. これは, 静的な磁束密度は系に対して仕事をしないことから明らかである. そこでこの章では外部磁場が磁性秩序と相互作用することを使って強制的に動的アクシオンをつくり出し, その際に生じる瞬間的な電磁気現象を調べることを目的とした. このとき, カイラル磁気効果と呼ばれる, 磁束密度と動的アクシオン場の組み合わせでつくられる電流が瞬間的に生じ得ることを明らかにした. また, カイラル磁気効果によって移動した電荷量なら, 磁束密度の印加に伴うアクシオン場の変化による電気分極の変化を測定することで求めることを明らかにした. 実際, 電流を測定する方法では各時刻の電流値を求める必要があるが, 電気分極の変化なら, アクシオン場の変化の前後における値さえ測定すればカイラル磁気効果によって移動した電荷量を求めることができるので, 非常に簡便な測定法である.

第 4 章は, 博士論文全体のまとめである.

アクシオン電磁気学では, アクシオン場と電磁場はそれらの運動方程式を通じて互いに密接に関連している. そのため, 電磁場の境界条件やアクシオンや電磁場の値を 1 つ指定するだけで, その他の場の値も自動的に決定されるという特異な性質を持つ. これを利用することで, 本研究のように静的な外場の系だけでもアクシオン不安定性現象やカイラル磁気効果を予言出来た. ただ, 本論文で示せた現象はアクシオン電磁気学の一部簡単な問題だ

けである。特に動的な過程に関しては最終的には電磁場シミュレーションによる解析が必要であるが、これは今後の課題である。

参考文献

- [1] T. Imaeda, Y. Kawaguchi, Y. Tanaka, and M. Sato: J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 024402 (2019)
- [2] K. Taguchi, T. Imaeda, T. Hajiri, T. Shiraishi, Y. Tanaka, N. Kitajima, and T. Naka: Phys. Rev. B **97**, 214409 (2018)
- [3] R. D. Peccei and H. R. Quinn: Phys. Rev. Lett. **38** 1440 (1977).
- [4] F.W. Hehl, Y.N. Obukhov, J.P. Rivera, H. Schmid: Phys. Rev. A **77** 022106 (2008).
- [5] X. L. Qi, T. L. Hughes, S. C. Zhang: Phys. Rev. B **78** 195424 (2008)
- [6] H. Ooguri, and M. Oshikawa: Phys. Rev. Lett. **108** 161803 (2012).