

令和元年6月12日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13724

研究課題名(和文)ベクトルポテンシャルと電子ボルテックスビームとの相互作用の探索

研究課題名(英文) Interaction between vector potential and electron vortex beams

研究代表者

紀井 俊輝 (Toshiteru, Kii)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：30314280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：「電子らせん波」は、らせん状の波面を持つ電子のド・ブロイ波で、ラゲールガウシアン光ビームのド・ブロイ波版に相当し、軌道角運動量を運ぶ。本研究では、軌道角運動量とベクトルポテンシャルの相互作用について実験的な知見を得ることを目指し、ベクトルポテンシャル生成・制御コイルの作製を行った。その一方、相互作用については、当初想定した実験系では量子消去条件が満たされておらず干渉による観測ができない可能性があるとの指摘を受け、実験を遂行することができず相互作用の定量もしくは上限の決定にはいたらなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「電子らせん波」は、らせん状の波面を持つ電子のド・ブロイ波で、ラゲールガウシアン光ビームのド・ブロイ波版に相当し、軌道角運動量を運ぶ。本研究では、これまでに知られていない電子らせん波のもつ軌道角運動量とベクトルポテンシャルの相互作用について実験的評価を行うためのコイル作成方を確立することができた。量子消去条件により相互作用の定量や上限決定には至らなかったが、量子消去条件の見直しにより未知の相互作用探索の可能性を指摘できた。

研究成果の概要(英文)：An “electron vortex beam” is a de Broglie wave of electron having a spiral wave front, which corresponds to a de Broglie wave version of optical Laguerre-Gaussian beam, and carries orbital angular momentum.

In this study, we aimed to obtain experimental knowledge about the exotic interaction between orbital angular momentum (OAM) and vector potential. In order to realize pure vector potential field, we fabricated the vector potential generation coil. On the other hand, concerning exotic interactions, it was pointed out that in the assumed experimental system that the quantum-eraser conditions might be not satisfied and observation by interference might not be possible, the experiment could not be carried out. Therefore we could not make quantitative analysis or determination of upper limit for the exotic interaction in this research period.

研究分野：ビーム物理

キーワード：ベクトルポテンシャル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2010年に日本で初めて実験的に確認された「電子らせん波」[M. Uchida, and A. Tonomura, Nature 464, pp. 737-739 (2010)]は、らせん状の波面を持つ電子のド・ブロイ波で、ラゲールガウシアン光ビームのド・ブロイ波版に相当し、軌道角運動量を持つ(図1)。このビームを使った量子力学の研究[Y. Hasegawa, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 033002 (2013)]、ナノサイズ粒子の回転操作[J Verbeeck, et al., Adv. Mater. 25, pp. 1114-1117 (2013)]など基礎

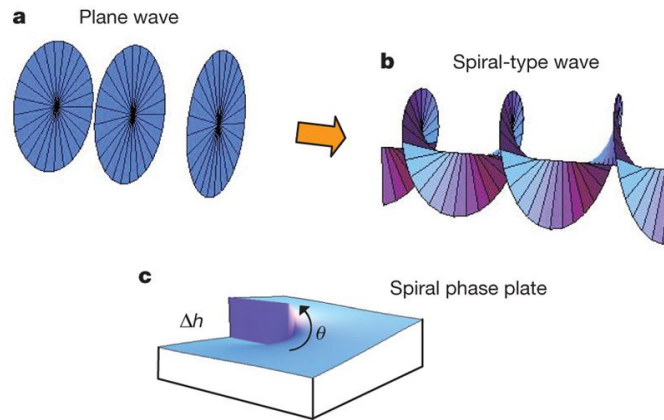


図1 電子螺旋波の模式図 a 平面波をc位相板によりb螺旋波に変換

M. Uchida, A. Tonomura, Nature 464 pp. 737-739 (2010) より

から応用に至る幅広い領域で研究が始まろうとしている。電磁場と電子らせん波との相互作用の理解については、理論的な取り組みも始まっているが[Konstantin Y. Bliokh, et al., Phys. Rev. X 2, 041011 (2012)]、ベクトルポテンシャルとの相互作用を実験的に観測するための具体的な手法は提案されていない。

古典電磁気学を量子化すると、正準運動量に電荷とベクトルポテンシャルの積が現れ、アハラノフ・ボーム効果[Y. Aharonov and D. Bohm, Phys. Rev. 115 (1959) 485.]に代表される観測可能な干渉効果が理論的に説明できる。しかし、軌道角運動量とベクトルポテンシャルの相互作用については、世界的に見てもベクトルポテンシャル単独の生成がほとんど行われていないこともあり、実験的な知見はほとんど得られていない。

ベクトルポテンシャルの生成を目的として実施された研究事例はわずかに2015年11月に報告された岩手大学 大坊らによる1例[M. Daibo, et al., "Vector Potential Coil and Transformer" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 51, 1000604, 2015] (ソレノイド配置のトロイダル)のみである。

### 2. 研究の目的

ベクトルポテンシャルは電磁気学における基本的なポテンシャル場ではあるが、電場・磁場と異なり荷電粒子に対するローレンツ力のように直感的に把握可能な相互作用が無い。しかし、量子力学においては、正準運動量を通じて極めて重要な役割を果たし、アハラノフ・ボーム効果に代表される量子効果をもたらす。本研究では、量子力学研究で利用するための基盤技術として電場・磁場の生成を伴わずにベクトルポテンシャル分布を生成・制御する手法を確立するとともに、特に近年観測に成功した「電子らせん波」との相互作用についての実験的な知見を得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究は、(1)ベクトルポテンシャルの生成・制御と(2)相互作用の探索の2つの課題に分けて実施する方法とした。

#### (1)ベクトルポテンシャルの生成・制御

ベクトルポテンシャルを高度に生成・制御する技術確立し、従来行えなかった実験的・理論的研究基盤を確立させる。具体的には図2のa,b,cの3通りのコイルについて実現可能性について評価を行うこととした。

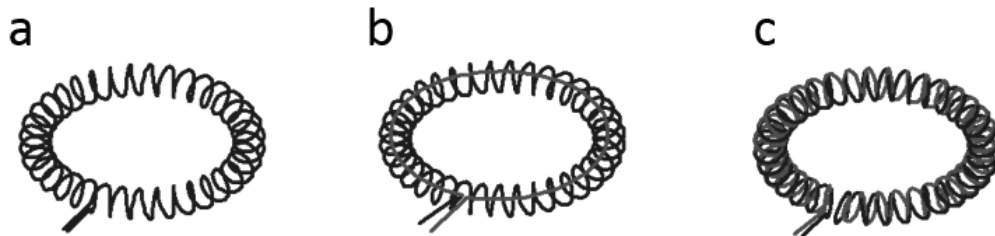


図 2 ベクトルポテンシャル生成環状ソレノイド a 最も単純な構造 b 環状ソレノイド内部に周回成分を打ち消す戻り経路を導入 c 周回成分の発生を抑制する巻き方。

## (2) ベクトルポテンシャルと電子らせん波の軌道角運動量との相互作用の探索

ベクトルポテンシャルと電子らせん波の軌道角運動量との相互作用を観測するための実験系について評価を行い、有効な実験手法について検討を行い、実験が可能であることが判明した場合には、相互作用の大きさもしくは上限を与え「電子らせん波」の本質の理解につながる実験的な知見を得ることを目指す。

## 4. 研究成果

### (1) ベクトルポテンシャル生成コイル

これまでにベクトルポテンシャルの生成法として知られているトロイダルコイルによりソレノイド状のコイルを生成する(円筒状のトロイダル)大坊らによる方法があるが、本研究では干渉性の高い電子波として比較利用が容易な電子顕微鏡内のビームに対して相互作用の探索を行うことを念頭に置き、電子顕微鏡鏡筒内に追加的に装備可能なコイル群によりベクトルポテンシャルの生成・制御する手法の検討を進めた。

大きさとして、直径10mm、厚さ1mmの円環コイルを試作した。真空テストの結果、コイルの支持に使う材質は機械加工が可能なマシナブルセラミックをコイルボビンとしてカプトン被膜を持つ銅線によりコイル作成を行うこととした。

図2-aに示した1ターン分の円形コイル成分が残るコイルは、容易に作成が可能であったが、ビーム通過部分でも有意に磁場が残り、相互作用探索においては支障がでるため、1ターン分を打ち消すコイル図2-b、図2-cについて拡大したモデルを作成して評価を行った。拡大モデルは、トロイダル部の直径および全体の直径をそれぞれ4cmおよび40cmとし、目標と下サイズの40倍に拡大したモデルとし、大気中での評価で十分なことからコイルボビンの材質は樹脂製とした。トロイダル内部に逆向き成分のコイルを仕込むbは線の巻きつけは容易だが、直径10mmのコイルボビンで仕込むための溝を作成するのは実サイズモデルでは現実的ではなかった。図2-cについては、巻線密度を一定に保ち2方向のトロイダルを同時に巻くことは困難ではあったが、大型拡大モデル作成時に3Dプリンタによりコイルボビンに巻き線用のガイド溝を入れることで安定した交差位置を保ちかつ一定の巻線密度で中心部に実磁場の出ないベクトルポテンシャルコイルを作成することができた。大型モデルの作成の際に、ガイド溝については、リングの内周と外周に均等にタブをつけた状態であれば安定して等間隔(均一密度)でコイルを作成可能であることが明らかになった。図3に大型モデルの拡大写真を示す。



図3 40倍スケールで作成したベクトルポテンシャル生成コイルの写真。巻き線部には2つのらせんを掘り込んだ形状で、2分割したパーツを連結してベクトルポテンシャル生成コイルとする。

直径10mmの目標としたモデルにおいてはガイド溝を実際に用意することは不可能であったが、比較的再現性良く2重トロイダルを手巻きによっ

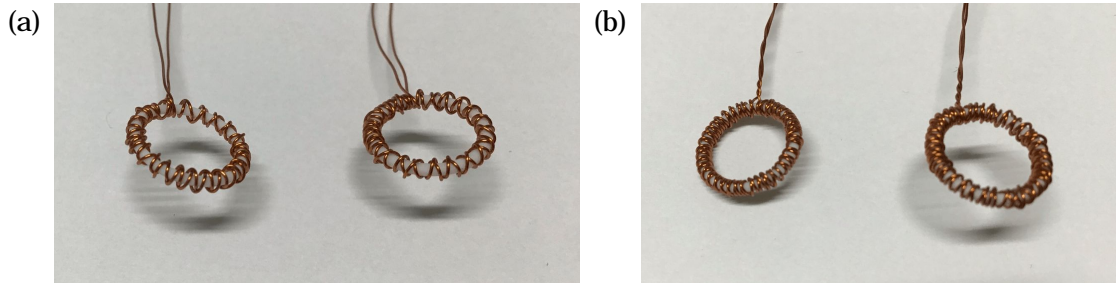


図 4 直径10mmのマシナブルセラミック製のコイルボビンを用いて作成したトロイダルコイルペア。(a)は疎に巻いたもの、(b)は密に巻いたもの。一部に巻き線密度の乱れやトロイダル小半径の増大箇所がみられる。

て巻くことが可能であることが示せた。トロイダルコイルでヘルムホルツコイル配置をとるための2本のコイルペアを用意することを想定し、2組4本のコイルの試作を行った。コイルボビンに溝加工ができなかったうえ、あらかじめ必要量の電線をすべて伸ばしコイルボビンに対して縫うように電線を交差させてコイルを作成する必要があるため、コイル作成は困難を極めたが合計4本のコイルの作成が完了した。図4に疎に巻いたコイルペアと密に巻いたコイルペアの写真を示す。どちらも、局所的に巻線密度がばらつくものの、ほぼ同じ巻線密度でペアを構成することが可能なベクトルポテンシャル生成コイルとなった。超精密実験を行うには、漏洩磁束を抑制し、かつベクトルポテンシャルの一様性を高めるために小型モデルにおいても3Dプリンタ方式もしくは微細加工法によりガイド溝を作る方法が必要であろう。

## (2) ベクトルポテンシャルと電子らせん波の軌道角運動量との相互作用の探索

ベクトルポテンシャルと電子らせん波の相互作用についても実験的な観測に向けた検討を進めた。想定した実験のセットアップは、図5のaおよびbに示したベクトルポテンシャルと電子の運動方向が平行な場合と直行した場合の2通りで、いずれもフォーク型プレートで2通りの軌道角運動量を持つビームを生成しベクトルポテンシャルの存在下で干渉効果を確認するタイプとした。(図5では、見やすいように1ターン成分の残るタイプaのトロイダルコイルペアを表示しているが、タイプcの2重巻きトロイダルコイルを想定している)

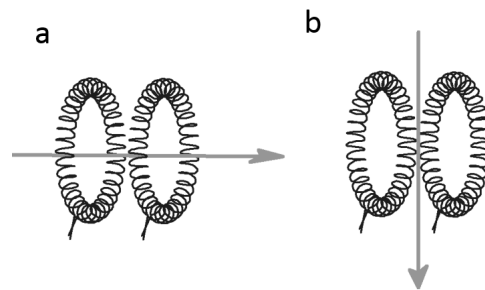


図5 ベクトルポテンシャルコイルと電子ビーム進行方向の関係 a) 並行タイプ b) 直交タイプ

このセットアップに基づき、干渉効果を観測

するための条件について検討を行った。研究会などを通じて理論研究者などと議論を行い検討をすすめたところ、異なるタイプのフォーク型回折格子を用いることで、量子状態とビーム経路が確定してしまいいわゆる量子消去により軌道角運動量数についての情報を消去しなければ干渉が観測できないのではないかという指摘を受けた。

指摘ののちに、検討を行ったが量子消去条件が成立しているかどうかを厳密な理論的評価ができなかったため、本研究期間内で相互作用の定量評価および上限調査実験を完了させることはできなかった。実験的には、異なる起動角運動量を持つビームの干渉が確認された例もあり、実験条件の見直し等により将来の相互作用探索実験に向けた基盤として研究を進展させる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況（計0件）

〔その他〕  
該当なし

## 6. 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。