

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400417

研究課題名(和文)らせん電子波と量子測定理論

研究課題名(英文)Vortex electron beam and quantum measurement theory

研究代表者

谷村 省吾(Tanimura, Shogo)

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：90273482

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：角度と軌道角運動量の不確定性関係を数学的に定式化した。この関係を、一般の秩序変数と保存量の不確定性関係にも拡張した。粒子と波動の相補性に顕れる不確定性関係の正体を問う問題を立て、相補性の背後にあるのは、ケナード・ロバートソン型の不確定性関係であることを明らかにした。マイケルソン型の干渉計を改造した装置で実験をすれば、この理論が検証できることを示した。電子ビームを微細な環状スリットに照射することにより電子の波動関数のコヒーレンスを保って平面波からベッセル関数の形に変換することに成功した。らせん電子波を金の超微粒子に照射し、回折像を得た。スピン偏極したコヒーレントな電子ビームの生成に成功した。

研究成果の概要(英文)：We formulated mathematically the uncertainty relation of angle and angular momentum. And we generalized it to the uncertainty relation of order parameter and conserved quantity. We asked which type of uncertainty relation is realized in the particle-wave complementarity, and showed that the Kennard-Robertson uncertainty relation causes the complementarity. Moreover, we proposed an experiment using a modified Michelson interferometer to verify our theory.

We transformed the electron plane wave function into the form of the Bessel function by injecting a coherent electron beam through a fine annular slit. By radiating vortex electron beam on a micro cluster of gold, we successfully obtained a diffraction image. We successfully generated also a coherent beam of spin-polarized electrons.

研究分野：量子基礎論

キーワード：不確定性関係 相補性 軌道角運動量 フォーク型回折格子 らせん電子波 電子線ホログラフィー
スピン偏極電子

1. 研究開始当初の背景

(1) 真空中を伝播する電子や光子が軌道角運動量を持つことは理論的にも実験的にも知られている。軌道角運動量の値を人為的に変更・制御することは、光子に関しては10年以上前から実行されていたが、電子に関しては長らく実現していなかった。

(2) 2010年に内田・外村が初めて電子の軌道角運動量の人為的変更を実証した。その後、Verbeeckらはフォーク型に微細加工した回折格子を作り、これを用いて、異なる軌道角運動量を持つ電子ビームを分離することに成功した。直進方向を軸とする軌道角運動量を持つ電子の波動関数は、位相が「らせん状」に回転しながら進行するため(図1)、そのような電子ビームは「らせん電子波」あるいは「渦電子波」(electron vortex beam)と呼ばれるようになった。

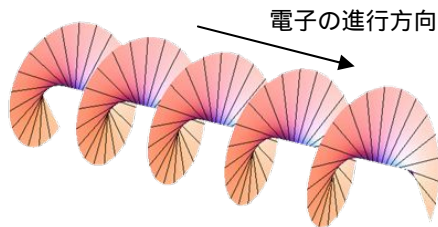


図1. らせん電子波の等位相面

(3) 2013年に齋藤・谷村(本研究代表者と研究分担者)らは、フォーク型回折格子をマイクロメートルスケールで2つ並べた微細構造を作り、異なる軌道角運動量値を持つらせん電子波を2つ作って、波動関数を重ね合わせることに成功した。重なった回折像の干渉パターンを観察することにより、コヒーレントな重ね合わせ状態ができていることを実証した(図2)。ただ、この時点では、角運動量に関する不確定性関係が実験と比較できる形で定式化されていなかったため、この装置で作られた重ね合わせ状態が角運動量の不確定状態になっていることを検証することはできなかった。

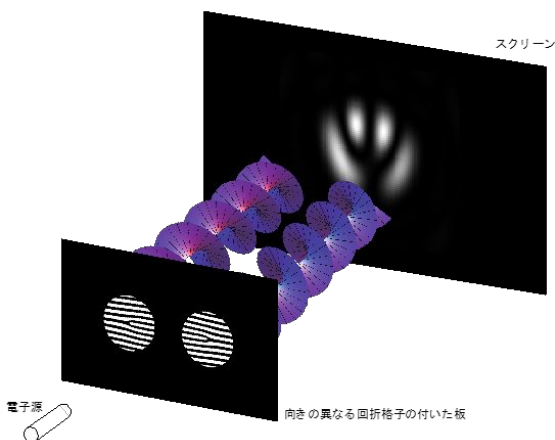


図2. らせん電子波の回折干渉像

2. 研究の目的

量子通信や量子計算機は、量子状態を制御して利用するシステムであり、容量の大きなシステムを作るには、量子状態の個数が多い系が適している。電子や光子のスピン角運動量は2通りの量子状態しか持たないが、軌道角運動量の量子状態の数に制限はない。したがって、らせん電子波の軌道角運動量を制御し、異なる軌道角運動量の重ね合わせ状態を自在に作れるようにすることは、量子通信や量子計算機の新しい実装方法になる可能性がある。また、電子波の軌道角運動量を制御し、測定することは、物性・物質構造の新しい測定方法になり得る。

そういった観点から、以下のような研究目的を設定した:

(1) 角度と角運動量に関する不確定性関係を定式化し、らせん電子波の重ね合わせ状態から得られた回折干渉像を定量的に分析する。

(2) 電子ビームの波動関数を変調・制御する方法を開発する。波動関数の角度依存性を変調するだけでなく、半径依存性も変調する方法を考案し、実装する。

(3) らせん電子波に対する回折理論を構築する。物質試料にらせん電子波を照射し、コヒーレントな回折像が得られるか検証する。

(4) 電子のスピン角運動量のそろったコヒーレントなビームを生成する。さらに、スピン角運動量と軌道角運動量の両方を制御し、エンタングル状態を作る方法を開発する。

(5) 量子系に対する測定の可能性と限界を明らかにするため、量子測定全般に関する理論を構築し発展させる。

3. 研究の方法

(1) Robertsonの不等式を参考にして角度と角運動量に関する不確定性関係を定式化する。「角度の不確定性」と呼ぶべき指標の定義については諸説があるので、この指標の定義から考案する必要がある。不確定性関係を定式化できたら、実験データを解析し、理論と比較検証する。

(2) 円形スリットを微細加工した構造を作り、電子ビームの波動関数を半径方向について変調した状態を作る。また、ビームの経路上に微細なワイヤを置いて回折像を観察し、ワイヤの形を像に再現できるか調べる。

(3) らせん電子波を用いたホログラフィー技術を開発し、微小結晶に照射した電子波から回折像を得る。

(4) 偏光レーザーが誘起する光電効果によりスピン偏極した電子を取り出し、電子顕微鏡

に導入することによりコヒーレントな電子ビームを生成する。

(5) 時間とエネルギーの不確定性関係を定式化し、実験でテストできるような予測を与える。また、測定に関する相対論的な限界を知るために相対論的量子測定理論を構築する。

4. 研究成果

(1) 角度と角運動量に関する不確定性関係の定式化に成功した(論文)。2次元平面の直交座標 X, Y を用いて複素座標 $Z=X+iY$ を定め、平面上の電子の確率分布に関する平均値 Z を定める。同様に Z の n 乗の平均値 Z^n や、 Z の複素共役 Z^* を用いた平均値 $(Z^*Z)^n$ も定める。平面に垂直な軌道角運動量を L とし、電子の波動関数に関する L の分散 $(\Delta L)^2 = \langle L^2 \rangle - \langle L \rangle^2$ を定める。このとき、任意の自然数 $n=1, 2, 3, \dots$ に対して

$$(\Delta L)^2 \geq (Z^*Z)^n \frac{(n\hbar/2)^2}{|Z^n|^2}$$

という不等式が成り立つことを証明した。ここで、 \hbar はプランク定数を 2π で割ったものである。 Z^n は角度分布の集中度の指標になる。電子が角度に関して一様に分布していれば $Z^n = 0$ になり、角度分布が集中していれば Z^n は大きな値をとる。つまり、角度に関する不確定さが小さいと、 Z^n は大きな値をとり、角運動量の不確定さは大きくなることをこの式は意味している。

なお、この不等式を実験で検証することも本研究の目的であったが、異なる軌道角運動量の重ね合わせ状態を生成するフォーク型回折格子を高精度で作製することが難しく、また、解像度を上げることも難しかったため、本研究期間内に実験との比較を完成させることができなかった。

また、この不等式は角度と角運動量に関するものだが、対称性の秩序変数と保存量に関する不確定性不等式に拡張することもできた(論文)。例えば、光子の個数と光の位相との不確定性関係が、この拡張によって得られる。

(2) 同心円の細い環状のスリットを微細加工で作製し、これに平面波電子ビームを照射し、ベッセル関数型に波動関数を変調した電子ビームを生成した(論文、図3、4)。

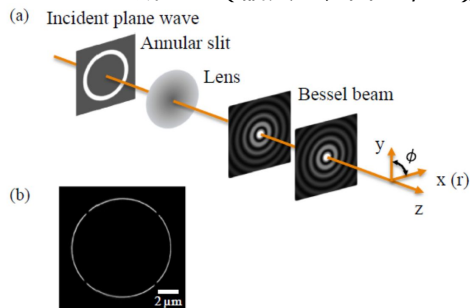


図3. 電子ビームを環状スリットに通す

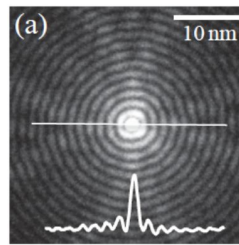


図4. ベッセル関数型の回折像写真

(3) らせん電子波を金の微小結晶に照射し、回折像を得た(論文、図5)。これにより、らせん電子波が物質中でもコヒーレンスを保っていることが実証された。

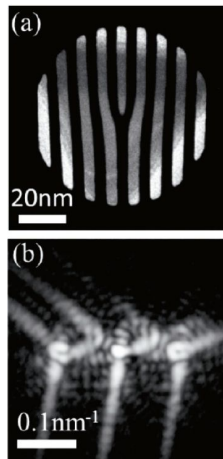


図5. 金の三角形微小結晶にらせん電子波を照射して得られた回折像

(4) 半導体を偏光レーザー照射することにより得られる光電子を加速することにより、エネルギー30keVでスピン偏極率82パーセントの電子ビームを生成することに成功した。バイプリズムで干渉縞を観測し(図6、7) スピン偏極ビームが十分なコヒーレンスを持っていることを確認した(論文)。

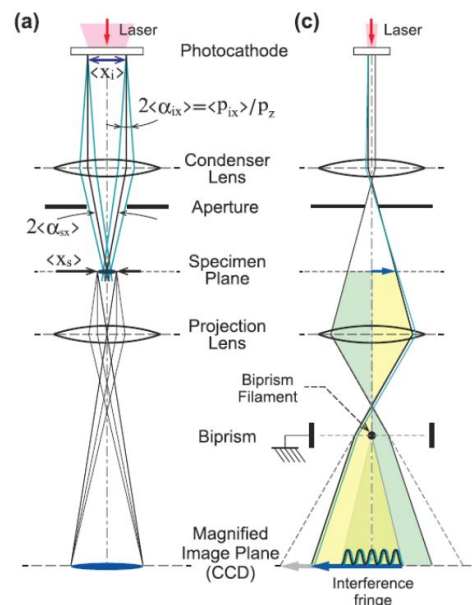


図6. スピン偏極電子源とバイプリズム

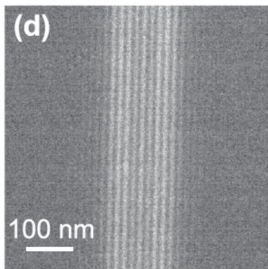


図7 . パイプリズムで得られた干渉像

(5) 相補性と不確定性関係に関する研究を行った。粒子と波動の相補性の背後には不確定性関係があるとされているが、近年、数学的定義も物理的解釈も異なった種々の不確定性関係が定式化され、相補性に顕れる不確定性関係の正体は何かということが問題となった。谷村(研究代表者)は、ダブルスリット干渉実験のモデルを分析し、相補性の背後にあるのは、Kennard-Robertson 型の不確定性関係であることを明らかにした。さらに、Michelson 干渉計を拡張した装置で実験をすれば、この理論が検証できることを示した(論文、図8)

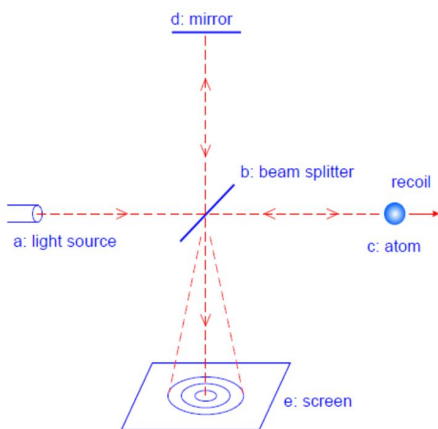


図8 . 相補性を検証する実験のモデル

(6) 時間とエネルギーの不確定性関係を数学的に定式化した(学会発表)。厳密に言うと、測定器と被測定系との相互作用に要する時間と、測定過程中的エネルギー準位間隔の不確定性と、測定値のシグナル・ノイズ比を定義し、これら3者の間に一種のトレードオフ関係が成立することを証明した。シグナル・ノイズ比を大きくして測定精度を上げると、測定時間とエネルギーの不確定性との積が大きくなることを示した。また、この定義・定式化だと、従来の素朴な時間とエネルギーの不確定性関係が成立しないケースがあることも明らかになった。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 22 件)(うち査読付き論文計 14 件)

齋藤晃、内田正哉、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」、日本結晶学会誌、査読有、58巻、2016年、pp.79-84, DOI: 10.5940/jcrsj.58.79

H. Nambu, K. Saitoh, M. Uchida: "Electron diffractive imaging using fork-shaped grating masks" AMTC Letters, 査読有, 5巻, 2016年, pp.248-249, DOI: 10.1002/9783527808465.EMC2016.6060

K. Saitoh, K. Hirakawa, H. Nambu, N. Tanaka, and M. Uchida: "Generation of electron Bessel beams with nondiffractive spreading by nanofabricated annular slit" Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 85巻, 2016年, 043501, 総ページ数 4, DOI:10.7566/JPSJ.85.043501

S. Tanimura: "Complementarity and the nature of uncertainty relations in Einstein-Bohr recoiling slit experiment", Quanta, 査読有, 4巻, No.1, 2015年, pp.1-9, DOI: 10.12743/quanta.v4i1.35

S. Tanimura: "Uncertainty relation between angle and orbital angular momentum: interference effect in electron vortex beams", Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 査読有, 6巻, 2015, pp.205-212, DOI:10.17586/2220-8054-2015-6-2-205-212

M. Kuwahara, S. Kusunoki, Y. Nambo, K. Saitoh, X. Jin, T. Ujihara, H. Asano, Y. Takeda, and N. Tanaka: "Coherence of a spin-polarized electron beam emitted from a semiconductor photocathode in a transmission electron microscope", Applied Physics Letters, 査読有, 105巻, 2014年, 193101, 総ページ数 4, DOI: 10.1063/1.4901745

〔学会発表〕(計 28 件)(うち招待・特別講演 計 11 件)

谷村省吾、「測定時間とエネルギーゆらぎと Signal-Noise 比のトレードオフ関係」、日本物理学会、2016年9月14日、金沢大学(金沢市)

谷村省吾、「相対論的量子測定理論はどのようなものであるべきか」、第5回 QUATUO 研究会、2016年1月10日、高知工科大学(高知県香美市)

齋藤晃、「軌道角運動量を持った電子波を

利用した電子顕微鏡」、日本物理学会にてシンポジウム講演、2015年9月17日、関西大学（大阪府吹田市）

K. Saitoh, "Propagation properties of electron vortex beams", Microscopy and Microanalysis 2015にて招待講演、2015年8月2~6日、Portland (USA)

谷村省吾、「量子測定理論の数学的定式化・量子論と確率の諸解釈」、統計数理研究所研究集会「科学における確率」にて特別講演、2015年7月6日、統計数理研究所研究(東京都立川市)

谷村省吾、「角度・軌道角運動量の不確定性関係とらせん電子波干渉」、第30回量子情報技術研究会 (QIT30)にて招待講演、2014年5月12日、名古屋大学（名古屋市）

齋藤晃、「電子ボルテックスビームの生成および伝播」、日本顕微鏡学会 第70回学術講演会にて招待講演、2014年5月11日~13日、幕張メッセ国際会議場（千葉市）

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

サイエンストーク：谷村省吾、「光子の逆説 ミクロの世界の不思議」、あいちサイエンスフェスティバル 2014、名古屋市中区ロフト、2014年10月1日

本研究が科学雑誌記事で紹介された件：
古田彩 著、「不確定性原理で電子の記憶を消す」、別冊日経サイエンス No.199「量子の逆説」pp.38-39（2014年6月発行）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷村 省吾 (TANIMURA Shogo)
名古屋大学・大学院情報学研究所・教授
研究者番号：90273482

(2) 研究分担者

齋藤 晃 (SAITOH Koh)
名古屋大学・未来材料システム研究所・教授
研究者番号：50292280

以上