

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13811

研究課題名(和文) 単一電子イメージングを利用した静電場測定技術の原理実証

研究課題名(英文) Proof-of-principle of electrostatic field measurement using single electron imaging

研究代表者

上野 一樹 (Ueno, Kazuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：20587464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、真空中に取り出した単一電子イメージング技術の確立およびこれを利用した静電場測定手法の原理実証である。紫外光をある条件を満たす標的に照射することで、低速電子を放出させることができる(光電効果)。その電子を特別な検出器(MCP)によってイメージングを行い、この手法の確立を目指すものである。また、標的に導体を利用した場合、電圧を印加し、その値を変化させるとイメージングの取得レートが変化することがわかっており、この情報を用いることで電場測定を試みる。イメージングには成功し、標的選定やMCPシステムの改良を進めることができた。精査や電場測定の実証については今後詰めていく予定である。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to establish the basic technology of single electron production in vacuum and its imaging. In addition to the goal, the system is used for proof-of-principle of electric field measurement. Slow electron can be obtained by special material irradiated with the ultra-violet photon, which is known as photoelectric effect. Imaging such electron is done with a special detector system (MCP). This scheme has been developed. It is known that imaging rate changes with the voltage of target material by our studies. We have challenged the proof-of-principle of electric field measurement using this phenomenon, We have succeeded in the electron imaging and promoted the improvement of the detector system and target material. Detailed investigation and the challenge of electric field measurement is still remaining, then those will be performed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：単一電子 MCP イメージング 静電場

### 1. 研究開始当初の背景

電場は、1785年のクーロンの法則の発見から始まり、現在では物理学に留まらず化学、工学などあらゆる場面で扱われている量である。にも関わらず、確実な静電場測定技術は今のところほぼ存在しない。大抵は電圧等測定可能な量から電場は計算可能であり、概ねその見積もられた値で事足りる。精度を気にしない場合は、静電誘導や交流電場を利用した方法等も考えられるが、昨今の精密測定実験などが進められはじめている現状、より精度の良い電場の情報が必要となってきた。つまり、電場測定技術が確立すればより精密な測定が可能となり、得られる知見はより深いものとなる。例えば、電場を精密に測定する必要がある実験が考えられ、申請者が参加しているJ-PARCにおけるミュオン異常磁気モーメント・電子双極子モーメント超精密測定実験が挙げられる。この実験では、磁場リング中にミュオンを閉じ込め、そこで崩壊した陽電子を測定するが、そのリング中の電場の値は得られる結果に影響を及ぼす。すなわち、電場測定により値が保障できない限りそれだけ不定性が残ってしまう。しかし、測定が可能となれば、結果の不定性を減らすことに成功し、より精密な測定結果が得られ、究極的には標準理論を越えた新しい物理の示唆につながる可能性がある。さらにはこの技術により様々な実験において検出器キャリブレーション方法、パラメタ設定の容易さが飛躍的に向上することなども考えられる。

### 2. 研究の目的

申請者は単一電子を真空中に取り出し、その電子のイメージングを行う技術の開発を進めてきた。これにより、紫外光(UV)を真空中で銅ワイヤーに照射させ、光電効果により放出した低速電子を電場で引き出し、二次元検出器(MCP)で検出し、イメージングすることに成功している。ここで、電場中に入れた銅ワイヤーに電圧を印加し、その値を変化させるとイメージングでできるピークの取得レートが変化する現象が見られた。これは、ワイヤーと周りの電場の間にできる局所的な電場による影響だと考えており、ちょうどまわりの電場とワイヤーの電位が一致したとき、ピーク取得レートの極が見られるのではないかと考えられる。このことから、ワイヤー位置(電子放出点)複数点での情報を用いて電場測定が可能でないかと着想に至った。測定精度を上げ、単一電子イメージング技術を確立し、この技術を応用した静電場測定技術の原理実証ができれば、上記のように新たな測定技術向上につながり、一歩進んだ実験研究への発展が期待できる。そして、様々な分野への応用も考えられる。実証ができなかった場合でも、現状低速の単一電子を取り出す技術は完全なものではないため、本研究により系統的な調査が進み、未だ不定性

の大きい単一電子による散乱・干渉実験等への応用も可能になると考えられる。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、準備研究で使用していた電子イメージング用セットアップを基本的にはそのまま使用する。このセットアップにおける真空チャンバーに関しては、以前申請者が所属していた機関から借用していたが、返却の必要性が出てしまったため本研究用に新たに設計、構築する。このチャンバーが出来ればすぐに真空試験等のチェックを経て、既に開発した多チャンネル読み出し二次元検出器(MCP)および単一電子ガイド用電場形成ケージ等のセットアップを組み、準備研究の再現試験を進める。以前採択された若手研究(B)(24740189)によりこのMCPの信号読み出し部の開発を進めたが、まだ全チャンネル読み出しに対応していないため、改良を加え、その試験も同時に行う。これらを踏まえ、本研究用セットアップを完成させる。

(2) 準備研究で使用していたシステムでは、比較的安価なキセノンフラッシュランプ及び銅ワイヤーを使用していた。UV光を銅に当てることにより光電子が放出させ、この光電子を電場により引き出し、MCPにて検出するシステムであった。フラッシュランプの波長は185ナノmから2000ナノmと非常に広く、波形の長さも400ナノ秒と非常に遅いものであった。そのため、エネルギー情報の不定性を生み、さらにタイミング情報も全く使えなかった。そこで、単波長であるUVLEDを用いることを考えている。UVLEDであれば、今挙げたように波長の広がりもほぼなく、かつタイミング情報としてもトリガー、ゲートタイミングを適切に選べば十分な早さを得ることが可能となる。

照射ターゲットに関しては、仕事関数の小さい、比較的手に入りやすかつ加工もしやすい物質が好ましい。銅は4.65eVという仕事関数を持つため(波長に換算すると~270ナノm)UVを用いて1eV程度の電子を取り出すには最適だと考えられる。しかし、他の仕事関数を持つターゲットでも測定を行うことで、取得エネルギースペクトルに違いが見られることが予想されるため、より系統的な調査が可能となる。現状、電子顕微鏡などで使用されている六ホウ化ランタン(仕事関数:2.5eV)や、次世代の放電陰極材料等として注目を浴びているC12A7エレクトライド(仕事関数:2.4eV)などを候補として考えている。また、これらの物質を用いてターゲットを作成する。大きさ、形状、配置方法の異なるものを用意し、電子の放出効率、イメージの位置分解能などを系統的に調査できるようにする。

(3) (1)(2)を踏まえた上で、単一

電子イメージング技術の確立を行う。(2)で用意したUV源およびそれぞれの照射ターゲットに対しイメージング試験を行い、エネルギー情報から単一電子検出をより確実なものとした上で、電子放出効率、位置分解能等を系統的に調査し、イメージングの最適化を図る。こういった改良を踏まえた上で、単一電子イメージングの技術を確立させる。

(4) 電場ケージ内に照射ターゲットを設置するわけであるが、この照射ターゲットの位置によってイメージの形、取得レートは変わると考えられる。このことを踏まえ、移動ステージをケージ内の電場構造を乱さない真空チェンバー内に設置し、ターゲットの位置を変更できるようにする。このシステムを用いて位置依存性の調査を進める。また、ターゲットそのものに電圧を印加することで電場ケージ内の電場構造が変化することが考えられるが、これによるイメージの形、取得レートの変化を調査する。

(5) (1)~(4)が終了すれば、電子イメージに関する様々な条件に対する系統的な情報が得られる。このことを踏まえ、イメージのピーク取得レート変化から電場ケージ内における電位マップおよび電場マップを作成する。一方で、シミュレーションによる電場計算を行い、ターゲット位置における電場の測定可能性について調査する。その後、測定される電場の、電場ケージに与える電圧に対する依存性や、ケージ内に誘電体等を入れることによって起こる電場変化なども測定し、より系統的に調査を進める。さらに、電場測定に成功した際には、これらの系統的調査の結果を踏まえ、達成される精度についても確かめる。また、以上を基に、より精度の高い測定の可能性や、実用化方法についても探る。

#### 4. 研究成果

本研究は、上述の通り単一電子を真空中に取り出し、その電子のイメージングを行う技術の確立を行い、さらにこの技術を応用した静電場測定技術の原理実証を行うというものであり、試験準備を進めてきた。予算状況および実験装置の状況により完全な実証までは至らなかったが、実証試験開始可能な状態にまで進められつつある状況である。一方、単一電子イメージング手法の改良を行っている際に、少し変更を加え、単一電子エネルギー測定等ができれば新たなキャリアレーション装置として使用可能であるかもしれないというアイデアが生まれた。以下、これまでに進めてきた詳細について報告する。

MCPを用いた電子イメージングセットアップの構築を進めた。MCP自体は上述の通り準備段階ですでに開発を進めており、マルチアノード読み出し型を採用していたが、読み出し回路部が全ちゃんねる対応をしてい

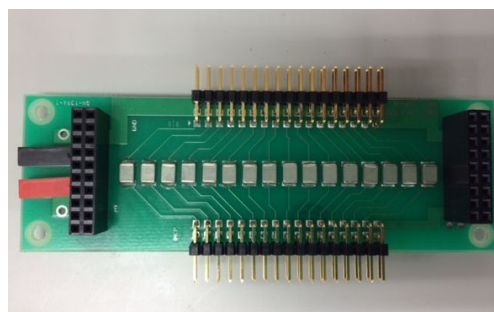


図1 マルチアノードMCP用多チャンネルカップリング回路。

なかったため、多チャンネル化を行った。図1に示しているものが、この新たに開発を行った多チャンネル化した読み出し回路部である。試験により動作確認は行っており、期待通りの性能を示している。これを用いた新たなイメージングセットアップを組める段までは進めることができたが、真空チェンバーが使用できなかったためイメージングまでは至らなかった。こういった状況もあったため、他の部分を進めた。特に、比較的安価に実行可能であるUV光源のアップグレードおよび光源そのものの系統的な調査を進めた。フラッシュランプとは異なり、単波長であるUVLEDの使用を考え、選定を行った。波長依存も調査するため、245nmメートルと260nmメートルのものを採用した。一方、このUVLEDからの光を真空内に導入するためにはファイバー等を経由させる必要がある。しかし、ここまで短波長の光に最適なものは現在のところ存在せず、光の減衰が起こってしまう。そこで、こういった減衰量を踏まえた光量の系統的な調査が必要となってくるため、その準備および試験を進めてきた。そもそもこの波長領域に感度のある検出器もあまりないため、最近新たに開発が進んでいるUVに感度のあるマルチピクセル光子計測装置(MPPC)を利用し、試験を進めている。



図2 UVLED(上左)とUV用MPPC(上右)。下二つは光量測定の一例。UVのON/OFFにより電流値の変化が見えている。

図2に採用したUVLEDおよびUV用MPPCを示している。また、エレクトロンメータを利用した光量測定の一例も示してある。これは最も単純な系における測定であるが、UVのON/OFFによりMPPCにおけるリーク電流値の変化がわかり、その電流量と光量との関連が調査可能である。こういった測定を進め、現在も系統的な調査を進めているところである。また、照射ターゲットの選定についても調査を進めた。低仕事関数をもち、かつ入手性の良いものとして、やはり銅やLaB6が現状では有力候補となることがわかった。

以上のように、本研究の補助事業期間内に完全な実証までは進められなかったが、ほぼ準備部分はできており、現在も継続して試験を進めているところである。最終年度に達してしまっただが、今後も本研究は進め、結果については学会等で報告したいと考えている。一方で、新たなアイデアの実証についても進める予定である。

#### 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 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

上野一樹、単一電子の発生と利用、  
Open-It 若手研究会 2017、函館アリーナ、  
2017年10月4日

上野一樹、電子イメージングとその応用、  
Open-It 若手研究会 2016、阿蘇プラザホ  
テル、2016年10月6日

〔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〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

上野 一樹 (UENO, Kazuki)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・助教

研究者番号：20587464

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )