

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740189

研究課題名(和文)単一電子イメージング技術の開発

研究課題名(英文)Development of single electron imaging technology

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) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は真空中に単一電子を取り出し、その電子をイメージングするための基礎的な技術を開発するというものである。あるエネルギーをもつ光を物質に照射することで、そのエネルギーが物質の持つ閾値(仕事関数)をこえれば電子を放出させることができることが良く知られており(光電効果)、真空中で銅などに紫外光を照射することで低速電子を得られると考えられる。真空中で低速電子をイメージングするためには特別な検出器(MCP)を用いる。これらを新たに開発し、単一低速電子と思われるイメージングに成功した。しかし、精査はまだ終了しておらず、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 development of the basic technology to produce a single electron in vacuum and to have imaging of its electron. It is well known that a material which has a threshold (work function) emit an electron when the material is irradiated with a photon which has an energy larger than the threshold. This phenomenon is used in this study. The copper irradiated with the ultra-violet photon can be considered to emit single slow electron in vacuum. A special detector (MCP) is used for the imaging of slow electrons in vacuum. We have developed new system using those and seemed to succeed in the single electron imaging. Detail investigation is not done yet, then will be performed.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術

1. 研究開始当初の背景

電子は、1800年代後半に発見されて以来様々な研究が行われている素粒子の一つである。現在では、電子は素粒子・原子核・宇宙物理実験にて用いられる放射線検出器のプロンプや、顕微鏡の拡大機構(いわゆる電子顕微鏡)など様々な用途に利用されており、物理に留まらず化学や工学といった様々な分野でも研究、利用がなされている非常に親しみの深い粒子である。ところが、今挙げたようにまとまった電子を扱うということはできているが、単一の低エネルギー電子の取り出しおよびその検出はほとんど成功の例がない。2011年9月、東大らにより世界で初めて単一電子を周囲から孤立させ、検出する技術を開発したという成果が報告され、単一電子取り扱いの可能性や量子情報処理への応用の期待が高まっている。この技術は半導体上の単一電子を取り出すというものであるが、さらに電子を真空中に取り出すことが可能となれば、単一電子による散乱・干渉実験等への期待がさらに高まる。

2. 研究の目的

申請者はJ-PARCにおいて新しく提案されているミュオン粒子異常磁気能率精密測定実験に参加しており、この実験に欠かすことのできない低速ミュオン粒子生成のためのミュオン分布測定実験を行っている。ミュオン粒子をターゲット(SiO_2)に照射させると真空中にミュオン(ミュオン粒子と電子の束縛状態)が出てくる。このミュオンを構成しているミュオン粒子の崩壊により放出される陽電子を飛跡検出器(MWDC)とエネルギー検出器(NaI)にて測定し、取り残された低速単一電子を電場・磁場により引き出し、二次元検出器(MCP)にて測定するというものである。この実験において、取り残される単一電子を正確に捉えるということが鍵になる。しかし、前述の通り単一電子の取り出しおよび検出の例はなかったため、新たに単一電子が検出できていることを保証する必要があった。そこで、紫外光(UV)と銅ワイヤーを用いた光電効果を利用した方法を思いつき、着手に至った。原理実証試験として、安価に手に入るキセノンフラッシュランプを用い、MCPにてイメージングおよびエネルギー測定を行っており、単一電子検出を示唆する結果が得られていた。より時間構造および波長域の狭いレーザー等を使用し、UV照射ターゲットの選定を進め、さらにエネルギー情報を正確に捉えることで、単一電子のイメージングが可能となると考えられる。以上をもとに、本研究では単一電子を真空中に取り出し、そのイメージングを行う技術を確認させる。そして、よりコンパクトな単一電子検出システムを構築し、様々な分野でも応用が可能となるような開発を進める。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、前述の通り、既存のミュオン分布測定用装置を基本的にはそのまま使用する。原理実証試験を既に進めており、そこでわかった問題点を考慮した上でデータ収集システムの改良を行う。ミュオン分布測定用装置では、二次元検出器(MCP)にて電子を捉え、TDCによる電荷分割により位置情報を得、電荷積分型ADC(QDC)によりエネルギー情報を得ていた。しかし、MCPの読み出しカプラから得られる信号は、反射等の影響によりあまりシャープな波形は得られていなかった。そのため、QDCによるエネルギー情報には不定性が大きく出てしまった。そこで、信号の波形サンプルを行い、より詳細な波形解析を行うことにより正しいエネルギー情報を得られるようにする。

(2) 既存の原理実証用システムでは、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おり、UV光を銅に当てることにより、光電子が放出する。この光電子を電場、磁場により引き出し、MCPにて検出するシステムである。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、単波長で出力可能なUVレーザーやUVLED等の使用を検討する。これらを用いることにより波長の広がりもほぼなく、かつタイミング情報も容易に制御可能となる見込みである。

(3) 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くかつ加工もしやすい材質が望ましい。銅は4.65eVという仕事関数を持つため(波長換算で ~ 270 ナノm)UVを用いることで1eV程度の電子を取り出すには最適だと考えられる。一方で、他の仕事関数を持つターゲットでもエネルギー測定ができれば、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、単一電子を検出できる証拠になり得、さらに系統的な測定が可能となると考えられる。そこで、照射ターゲットの選定を進める。

(4) 既存の測定装置において、MCPやターゲット等を設置させるための真空チェンバは前述の通りミュオン分布測定用に最適化されており、もちろん本研究にも使用は可能であるが、完全には適さない。そこで、新たな真空チェンバの製作または既存の物で使用可能なものを適用させることを考えている。真空系等も新たに構築し、本研究に最適なセットアップを組む。

(5) 以上を踏まえた上で単一電子イメージングの実証試験を行う。波形情報、タイミン

グ情報を正確にとらえるために疑似パルス等を用いてキャリブレーションを行った後にデータ取得を行う。得られた情報とイメージの照らし合わせを行い、単一電子検出を確かめる。また、複数ターゲットによるイメージングを行い、エネルギー情報から単一電子検出をより確実なものにする。

(6) 既存の MCP は、ディレイライン読み出しという方式を用いており、強度の弱い粒子に対しては位置分解能が良いが、その他の性能はあまり良いものではない。そこで、レーザー等にも耐えられる大強度に対応し、かつより位置分解能、時間分解能を良くするためにマルチアノード読み出し方式の MCP の開発を進めることを考えている。これを用いれば、単一電子をより正確に精度良く捉えることができるようになると考えられる。まずはプロトタイプ機を製作し、その読み出し回路の検討を含めた性能評価試験を進めることを考えている。(1)～(5)において研究計画通りに進められない状況になった場合はこちらを優先し、最終的にはこの新 MCP を利用して(5)を行えるよう進める。

4. 研究成果

本研究は、上述の通り真空中に単一電子を取り出し、その電子をイメージングするための基礎的な技術を開発するというものであり、実証試験準備を進めてきた。途中で研究方法(6)に移行せざるを得ない状況になったため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、既存の MCP を用いて簡易試験を行っていた際に、このシステムを用いることで静電場測定が可能にな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成果の詳細について報告する。

データ収集システムの改良、UV 光源・照射ターゲットの選定に先駆け、既存システムを用いた試験およびシステム性能評価試験を行い、MCP のゲイン、電子を MCP までガイドするための電場等に対する系統的な調査を行った。UV 光源としてはキセノンフラッシュランプ、UV 照射ターゲットとしては銅ワイヤーを使用した。図1に示すのは、ターゲット位置を移動させた際のイメージ図であり、ピーク位置の移動が見られ、電子イメージングに成功していると考えられる。ピーク位置以外にも事象が見られるが、これはフラッシュランプの強度が高いため、既存の MCP 読み出しシステムではゴーストイメージを作ってしまうものと考えられる。読み出しシステムの改良により改善が見込まれる。また、この試験を行っている際に新たな事象が見受けられた。長時間照射を続けていると、取得レートが徐々に減衰していくという事象である。これは、おそらく電場ガイド等に行っている誘電体におけるチャージ

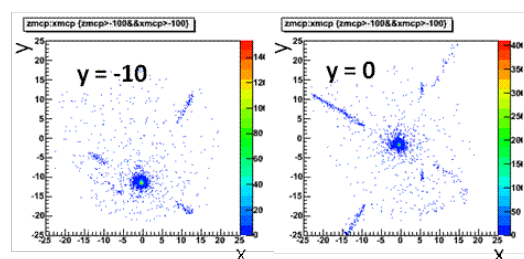


図1 UV ターゲット位置を変化させた時のイメージ。UV 光源およびターゲット起源のイメージが得られていることがわかる。

アップが原因ではないかと考えている。または照射ターゲットそのものにおける電子の減少等も考えられる。後者を確かめるために銅ワイヤーにも電圧をかけられるように改良を行い、電流を供給等できるようにした。その結果、ある程度改善が見られた。完全には改善していないため、チャージアップ等も調べる必要がある。この調査についてはターゲット選定等と合わせて行うようにした。一方、銅ワイヤーに印加する電圧によって取得レートが変わることも見受けられた。これは周りの電位および銅ターゲットにおける電位によって形成される局所的な電場による影響だと考えられる。今後電場シミュレーション等も進めて調査する予定である。この結果は、電位を操作することによりまわりの電場を測定できる可能性を示唆していると考えられるため、今後より精細に調べることを予定している。システムの系統的な調査に関しては、順調に進み概ね完了させた。しかし、使用していた MCP に不具合が生じ、さらに借用していた真空チェンバも返却せざるを得ない状況になってしまうという問題が生じた。そこで、予定を変更し、新たな MCP 開発および真空チェンバの準備を先に行うことにした。

上述の結果を受け、読み出しシステムをマルチアノード方式に改良した MCP の開発を進めた。この方式では、MCP で検出された電子を多数に分割したマルチパッドにて読み出す。それにより、多チャンネルの電圧供給および信号取り出し機構が必要となるため、新たなカップリング基板を開発した。一方で、新たな真空チェンバとして、以前所属していた理化学研究所に使用可能なものがあったため借用することにした。これらを用いて、現在真空試験、電圧印加試験を進めているところである。

並行して、新たな UV 光源、照射ターゲットの選定を進めた。光源に関しては、単波長出力が可能でかつコンパクトであるということから UVLED を購入し、その試験準備まで進めた。照射ターゲットに関しては、低仕事関数を持ち、かつ手に入りやすいものとして LaB6 などが候補となった。上記試験に加え、これらの選定、試験も続けて進めていく予定である。

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、最低限必要な部分は準備できており、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、今後も単一電子イメージング技術の基礎技術の開発を進める予定である。結果については今後学会等で報告したいと考えている。一方で、上述の静電場測定に関しても調査を進める予定である。

研究者番号：

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 0 件)

〔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〕

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

()