

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13553

研究課題名(和文) 低エネルギー電子散乱実験に向けた真空直結・散乱角度可変の新型散乱槽の開発

研究課題名(英文) Development of a new angle variable vacuum chamber for low-energy electron scattering

研究代表者

本多 佑記 (Honda, Yuki)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号：70807685

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)：電子散乱実験による陽子荷電半径の測定を行うために、新しい接続角度が可変な散乱槽の開発を行った。シミュレーションから新散乱槽を原因としたバックグラウンドの起源や量を確認し、その結果をもとに十分にバックグラウンドを低減するように形状を最適化した。テスト機を作成して 10^{-5} Pa 程度の高真空が得られることを確認した。これらの成果から新散乱槽の設計を完了し、実用に耐えることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

接続角度可変な散乱槽の需要は電子散乱に限らず、高エネルギーのハドロン-ハドロン散乱実験や軟X線分光など多岐に渡る。使用されている手法としてはベローズ式やSUS膜を真空シールドに使用したSM式が挙げられるが、ベローズ式は変更可能角度が小さく($\sim 50^\circ$)、SM式は到達真空度が低く($\sim 10^{-3}$ Pa)、度々真空漏れを起こすなどの問題を抱えている。両者の持つ欠点を克服した新しい本散乱槽を開発したことで、多くの実験で実験品質の向上が見込める。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the proton charge radius with electron scattering, a new scattering chamber with a new angle variable vacuum chamber was developed. The origin and quantity of the background due to the new scattering chamber were investigated from simulations, and the geometry of the chamber was optimized to sufficiently reduce the background. We made a test chamber and confirmed that a high vacuum of about 10^{-5} Pa could be obtained. Based on these results, we have completed the design of the new scattering chamber and confirmed that it can be used for our experiment.

研究分野：原子核物理

キーワード：散乱槽 原子核物理 電子散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2010年に電子とミュオンで測定された陽子荷電半径が4%(7)も異なるということが明らかになった。これは、標準模型のlepton universalityの破れの可能性を示唆しており、大きな注目を浴びた。その重要さから世界各地で様々な検証が行われ、過去の電子散乱により決定された半径にはモデル依存性が指摘された。申請者はモデル依存性を極力排した手法で、電子散乱による陽子荷電半径を目指している。

実験では直線加速器で加速した電子を散乱槽内の標的に照射し、散乱された電子の散乱角度と運動量を磁気分析器で測定する。Rosenbluth分離を行うため測定角度を自由に選択できるようにする必要があり、本研究では、 $30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ の範囲で角度を変える。設計中の分析器の受け入れ角度は約 5.7° でありその全域を覆うことは出来ないため、測定角度に応じて分析器を移動させる必要がある。この時に散乱槽と分析器間の接続が問題になる。本研究で使用する低エネルギービームでは、窓や空気で散乱されることによる電子の角度変化は分析器の角度分解能よりも大きく、それらが存在すると十分な測定精度を得ることができなくなる。そのため、電子の通り道全てを窓なしの真空中で繋ぐ必要がある。よって、実験を遂行するためには、散乱槽に任意の角度で分析器と接続が可能な機構が必要となる。

接続角度可変散乱槽の需要は電子散乱に限らず、高エネルギーのハドロン-ハドロン散乱実験や軟X線分光など多岐に渡る。使用されている手法としてはベローズ式やSUS膜を真空シールドに使用したSM式が挙げられる。しかし、ベローズ式は変更可能角度が小さく($\sim 50^\circ$)、SM式は到達真空度が低く($\sim 10^{-3}$ Pa)、度々真空漏れを起こすなどの問題を抱えており、実験の要請を満たす散乱槽は見受けられず、その開発を行った。

2. 研究の目的

実験の実現のために、真空シール性に優れ、大角度で接続位置が可変な散乱槽の開発を行った。申請者が考案したCPR(Combination of Parallel displacement and Rotation)式散乱槽の概念図を図1に示す。散乱層は回転方向に長い穴を開けた直方体チャンバー(図中a-1)、穴を開けフランジを溶接した金属球(a-2)、その球体を保持するSUS板(a-3)、溶接ベローズ(a-4)から構成される。金属球はOリングを介してSUS板に固定されており、真空シールを行った上で自由に回転することができる。SUS板と直方体チャンバー間の真空シールにもOリングを使用し、SUS板をチャンバーに沿って滑らせることで金属球を平行に移動させる。測定角度の変更はこれらの回転と平行移動の組み合わせで行う。CPR式では厚い金属とOリングによって真空シールがされているため、真空漏れの心配なく真空度 10^{-5} Paを達成することができる。本設計では $30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ に対応し、全方向に 10 mSr 以上の立体角が確保できる。

本CPR式散乱槽設計の最適化と、真空シール性能の確認を行い、実用に耐える散乱槽の開発を目的とした。

3. 研究の方法

研究は(1)シミュレーションによる散乱槽の最適化と、(2)テスト機作成による真空シール性能や可動性の確認に分けられる。

(1) CPR式では散乱槽が細長くならざるを得ず、フランジ付き球(図中a-2)は標的と数cmと非常に近い位置に置かれることになる。標的に散乱された電子が球に再び散乱され、それらが分析器に入射することで、大きなバックグラウンドとなることが危惧された。そのため、Geant4を使用したシミュレーションを行う事でバックグラウンド源となる場所を特定し、その部分の形状や材質を変更することで、バックグラウンドが最小となるように、設計の最適化を行った。

(2) SUS板(図中a-3)とチャンバー(図中a-1)でのOリングによる真空シールは一般的に行われており、シール性能に問題はない。しかし、球(図中a-2)とOリングによる真空シールは一般的ではなく、その性能の確認が必要となる。また、真空を維持した状態で球部分を回転させるため、その可動性や、回転時の真空リーク等についてテストする必要があった。そのため、該当部分のみのテスト機を作成し、実際に測定を行った。

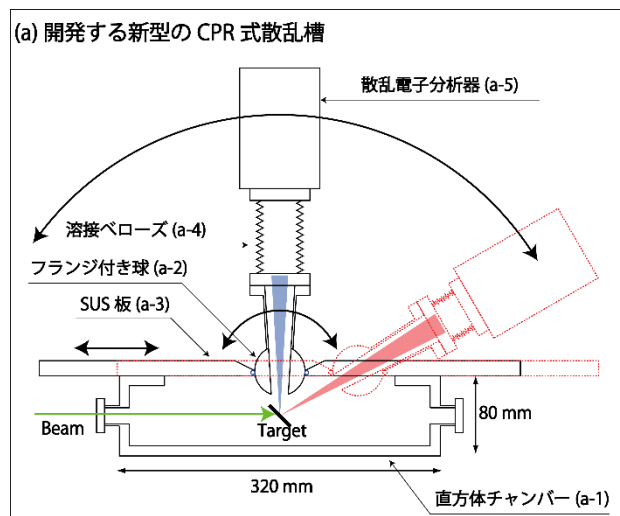


図1 開発する新型のCPR式散乱層の概念図。

金属球の回転と平行移動の組み合わせで

$30^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$ の角度変化を実現する。

4. 研究成果

(1) シミュレーションによる設計の最適化について

シミュレーションから得られた、分析器の焦点面上での散乱電子のヒット分布を示す。図2の赤線は新散乱槽を含めた、青線は新散乱槽が理想的で、バックグラウンド源とならない時のシミュレーション結果である。中央に見られる鋭いピーク部分がフォアグラウンドであり、その他はバックグラウンドとなる。新散乱槽の採用時には、ピークの左側のバックグラウンドが大きく増加することがわかる。

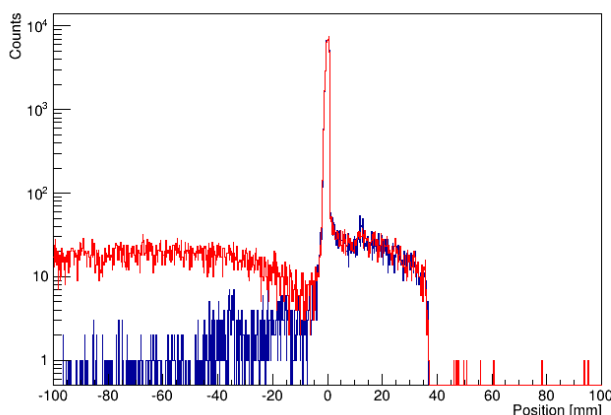


図2 分析器の焦点面に設置した検出器への、散乱電子のヒット分布。赤線は新散乱槽を含み、青線は新散乱槽が理想的でバックグラウンド源とならない時の結果。

これらのバックグラウンドの大部分は標的に散乱された電子がフランジ付き球の内壁に再び散乱されることで発生していることが判明した。そのため、内部形状を最適化することで、バックグラウンドは1/5程度に軽減された。また、球部分は負荷がかかるためSUSなどの金属である必要があるが、内壁からフランジにかけてをアクリルに変更することで、バックグラウンドをさらに1/10程度に軽減できる。これらの最適化によってバックグラウンドは十分に低減され、陽子半径測定実験に耐えうる散乱槽の設計が完了した。

また、球部分は負荷がかかるためSUSなどの金属である必要があるが、内壁からフランジにかけてをアクリルに変更することで、バックグラウンドをさらに1/10程度に軽減できる。これらの最適化によってバックグラウンドは十分に低減され、陽子半径測定実験に耐えうる散乱槽の設計が完了した。

(2) テスト機作製による性能の確認について

作成したテスト機の写真を図3に示す。テスト機はフランジを溶接した球部分(図1中a-2)と、O-リングによる真空シール部分を再現したパーツで形成される。このテスト機を真空チャンバーに接続、ターボポンプで真空引きしテストを行った。その結果、到達真空度は約 10^{-5} Paとなり、十分な真空シール性能が得られることが分かった。また、球全面に真空グリスを塗った状態であれば、球は手で回転させることができ、可動性にも問題が無かった。回転させた際には多少の真空漏れが見られ、一時的に 10^{-3} Pa台へ悪化したが、回転の停止後には直ちに真空度が回復した。これらのテストから新散乱槽は 10^{-5} Pa程度の高真空が得られる見込みが立った。



図3 フランジ付き球部分のテスト機

これらの成果によって、新散乱槽が実用に耐えうる見込みを得た。そのため、実機の作成、テストを行うために具体的な設計を進めた。しかし、申請当初は予定していなかったチャンバー独自に角度変更のための駆動機構が必要となり、コストカットを図ったが、それでも費用が膨らんだ。そのため、設計は完了しているが、予算不足のため本科研費での作成には至らなかった。今後、新たに資金を調達し、実機の作製、テストを行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuki Honda |
| 2. 発表標題 Elastic electron-proton scattering with low-energy electron beam at ELPH |
| 3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 本多 佑記 |
| 2. 発表標題 電子散乱による陽子の半径測定 |
| 3. 学会等名 第4回東北大学若手研究者アンサンブルワークショップ |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 本多 佑記 |
| 2. 発表標題 電子散乱による陽子半径測定@ELPH |
| 3. 学会等名 ELPH研究会C023「原子核中におけるハドロンの性質とカイラル対称性の役割」 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 本多 佑記 |
| 2. 発表標題 Proton radius puzzle and experiments |
| 3. 学会等名 Progress on QCD and nucleon structure in 2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 本多 佑記 |
| 2. 発表標題 Proton radius puzzle and ULQ2 experiment |
| 3. 学会等名 ELPH 研究会 C021「電子散乱による原子核研究 –陽子半径、不安定核の電荷密度分布を中心に–」（招待講演） |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | | | |