

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01925

研究課題名(和文)電子散乱による陽子半径測定に向けた陽子/炭素比オンライン測定器の開発

研究課題名(英文) Development of C/H ratio online detector for proton radius measurement by 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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：東北大学電子光物理学研究センターでは低エネルギー電子散乱による陽子電荷半径測定実験を推進している。CH₂標的を使用して電子・水素/炭素散乱の同時測定を行うが、電子ビーム照射によって段々と水素が抜け、実験中に最大で約20%の水素が減少すると予想されている。この標的数の変化を0.1%以下の精度で追跡する必要があり、炭素・水素標的比オンライン検出器の開発を行った。

ビームラインと検出器を設置する電磁スペクトロメータのコミッショニングを行い、検出器に要求される性能を調査し、三層の片面シリコンストリップ検出器をオンラインモニターとして使用することとし、その製作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子は原子核を構成する基本要素の一つであり、その電荷半径は陽子の基本的な物理パラメータの一つであり、物理的に重要な値である。ELPHで行う電子散乱による陽子電荷半径測定は低エネルギー電子散乱によって初めて可能な研究であり、現時点では東北大電子光物理学研究センターの低エネルギー電子ビームラインでのみ実行が可能である。モデル依存性を可能な限り排除し、電子散乱としては最も信用できる陽子電荷半径を決定することができるため、世界的に見ても重要な実験である。本研究で物理実験を開始できる段階まで進む準備が整った。

研究成果の概要(英文)：Proton charge radius measurement by low-energy electron scattering is ongoing at Research Center for Electron Photon Science, Tohoku university. The experiment use a polyethylene (CH₂) target to perform simultaneous measurement of the e+H and e+C elastic scatterings. To determine a e+H cross section, target number ration of H and C plays very important roll, but the ratio changes during the experiment due to hydrogen knockout by the electron beam. We developed a online monitor of the target ratio with 0.1% accuracy. We performed commissioning of the new ULQ2 beam line and electron-magnetic spectrometer to investigate the required performance of the online monitor. Finally, we decide to adopt 3 layer of single-side silicon strip detector as the online monitor, and manufactured that.

研究分野：原子核物理

キーワード：原子核物理 陽子半径 検出器

1. 研究開始当初の背景

電子散乱は原子核の構造を研究するのに非常に強力な手段である。これは電子が構造を持たない素粒子であること、電子と原子核間に働く力である電磁相互作用が良く理解されており精密な計算が可能であることによる。電子散乱実験データを厳密に行われた理論計算と比較することで、曖昧さなく原子核の内部構造を決定することができる。最も基本的な原子核である陽子に関しても例外ではなく、電子散乱によってその構造が調べられていた。しかし、2010年以降、陽子の半径が揺れている。

電子散乱と水素原子分光から推定された陽子の荷電半径はそれぞれ $0.879(8)$, $0.877(5)$ fm[1] と両者は誤差の範囲で一致しており、正しく測定がなされていると考えられていた。しかし、2010年に報告された、水素原子の電子をミュオンに置き換えた μ 水素原子の分光から推定された陽子荷電半径は $0.84087(39)$ fm[1] と 7σ 以上異なるものであった。この問題は陽子半径パズルと呼ばれ、大きな議論を呼んだ。両測定の違いは測定のプロブとして電子を使うかミュオンを使うかであり、推定された陽子荷電半径が異なるということは電子とミュオンで陽子との相互作用が異なるということ意味する。これは両者が質量以外は完全に同じ粒子であるという標準模型の重要な仮定: **lepton universality** の破れを示唆するものであり、それゆえに陽子半径パズルは大きな注目を集めた。その物理的 중요さから様々な検証作業が行われており、過去のデータ解析が徹底的に再検討されている。電子散乱に関しては、測定で散乱断面積の絶対値を抑えていないことによる解析方法依存性や後述する磁気成分除去のモデル依存性が排除しきれていないことが指摘されている。そのため、電子散乱による陽子荷電半径の再測定は急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では電子・陽子弾性散乱断面積の絶対値高精度測定を行い、陽子半径を決定する。そのために必要な CH₂ (ポリエチレン) 標的に含まれる陽子/炭素比のオンライン測定器を開発する。

本実験では電子・陽子弾性散乱断面積 $(d\sigma/d\Omega)_{e+H}$ の絶対値を 0.1% の超高精度で測定し、陽子半径を 1% の精度で決定することを目指している。炭素と水素から構成される CH₂ 標的を使用し、0.1% 以上の精度で断面積が計算できる電子・炭素弾性散乱 (e+C) との同時測定を行う。炭素は電子散乱の標準標的として使用されており、その電荷分布が非常に精度よく測定されているため、十分な精度で弾性散乱断面積 $(d\sigma/d\Omega)_{e+C}$ を計算できる。同時測定を行うことで、電子・陽子弾性散乱断面積は以下の式で表すことができる。

$$(d\sigma/d\Omega)_{e+H} = (N_{e+H}/N_{e+C})/(N_H/N_C) \cdot (d\sigma/d\Omega)_{e+C}$$

ここで、 $N_{e+H(C)}$ は検出された電子・陽子 (炭素) 弾性散乱電子数、 $N_{H(C)}$ は標的水素 (炭素) 標的数である。このように、標的厚やビーム粒子数等をキャンセルして系統誤差を減らし、高精度測定を可能となる。その代わりに、標的中に含まれる炭素/水素の標的数比 N_H/N_C が重要な値となり、0.1% 以上の精度で知っている必要がある。

実験開始前には標的中の陽子/炭素比を **Liquid Chromatography Mass spectrometry** 等で 0.1% 以下の精度で測定する。しかし、CH₂ を標的とした電子散乱実験では、電子が標的中の水素を弾き出すことで、標的中の水素比率が減少していく効果が知られている。本実験では測定点 1 点、8 時間の測定中に最大で約 20% 陽子が減少すると見積もられている。そのため、本申請ではその変化を実験中に測定し続けるオンライン測定器の開発を行う。

3. 研究の方法

オンライン測定器は実験室に建造した運動量分析用の電磁スペクトロメータの焦点面に設置し、特定の角度に固定した状態で散乱電子の運動量を測定、計数し続け、e+C, e+p の二つの弾性散乱収量比の変化を監視することで陽子/炭素比の変化を監視する設計となっている。焦点面を散乱電子が通過する位置を測定することで電子の運動量を測定し、e+C, e+p 散乱を区別する。

また、本実験では東北大学の電子光物理学研究センターの ULQ2 ビームラインを使用する。ULQ2 ビームラインは本実験を行うために新設したビームラインであり、本研究が開始された 2020 年 4 月段階ではまだビームが供給されることがなく、同時に建造した電磁スペクトロメータの性能評価も始められていなかった。そのため、実際に電子ビームを使用して ULQ2 ビームラインと電

磁スペクトロメータのコミッショニングを行い、開発するオンライン測定器に要求される性能を調査した。

4. 研究成果

本研究では以下の成果が得られた。

(1) ULQ2 ビームライン、電磁スペクトロメータの性能評価

2020年9月にULQ2ビームラインに初ビームが得られ、目標としていたビームの運動量広がり0.1%、標的位置でのビームサイズ1mmを達成していることを確認した。また、電磁スペクトロメータの焦点面に二枚の片面シリコンストリップ検出器を設置し、x-y方向の散乱電子の通過位置を測定、電磁スペクトロメータの性能評価を行った。その結果、運動量・散乱角分解能、運動量分散など主要なパラメータは設計を再現し、実験遂行に十分な性能が得られることが確認された。図1に、CH2標的での散乱で得られた散乱電子のヒットマップを示す。はっきりとe+H, e+C散乱が観測されている。

(2) バックグラウンド事象の低減

コミッショニングを開始して、検出器位置でのバックグラウンドが想定以上に多いことが発覚した。バックグラウンド事象と弾性散乱事象の時間差からバックグラウンド発生源の特定、シールド増強を繰り返し、三桁以上のバックグラウンド事象の低減に成功した。図2に現在の実験室の写真を示す。特定されたバックグラウンドの発生源や検出器周辺に鉛シールドを設置し、バックグラウンドの低減を図っている。

(3) オンライン測定器の設計と製作

上記のシールド強化によるバックグラウンド事象低減を終えてもガンマ線のバックグラウンドが残り、散乱断面積が小さい高運動移行領域では目標としている信号ノイズ比10をまだ達成できていない。しかし、バックグラウンドがガンマ線であれば、検出器の層数を増やすことで解析によってバックグラウンドを排除することができるため、オンライン測定器にはコミッショニングに一層検出器を追加した、(x, x, y)の三層のシリコン検出器を採用することとした。これにより、バックグラウンドをさらに1/10にできると予想される。半導体不足によって基板の製作が遅れたが、2022年度末までに製作に必要な材料はすべて揃い、2023年度に早々に製作と試験を行う。

これらの成果によって物理実験を開始する準備が整い、2023年度から本測定を開始し、2024年度中には陽子半径を決定する予定である。

[1] C. Carlson: Prog. Part. Nucl. Phys. 82 (2015) 59-77.

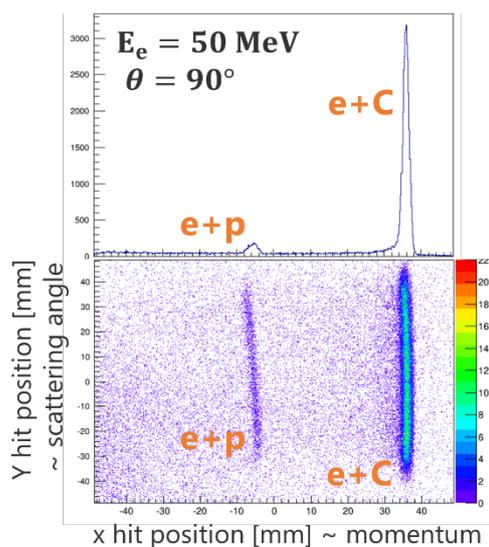


図1 CH2標的使用時の焦点面でのヒットマップ。電子・水素/炭素弾性散乱がはっきり観測されている。



図2 現在の実験室の様子。バックグラウンドの発生源や検出器周辺を鉛でシールドしている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aoyagi T., Honda Y., Ikeda H., Ikeno M., Kawagoe K., Kohriki T., Kume T., Mibe T., Namba K., Nishimura S., Saito N., Sasaki O., Sato N., Sato Y., Sendai H., Shimomura K., Shirabe S., Shoji M., Suda T., Suehara T., Takatomi T., Tanaka M., Tojo J., Tsukada K., Uchida T., Ushizawa T., Wauke H., Yamanaka T., Yoshioka T.	4. 巻 15
2. 論文標題 Performance evaluation of a silicon strip detector for positrons/electrons from a pulsed a muon beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04027 ~ P04027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/04/P04027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuki Honda
2. 発表標題 Current status of the ULQ2 experiment
3. 学会等名 International STRONG-2020 workshop on the proton charge radius and related topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Honda
2. 発表標題 Current Status of ULQ2 Experiment: Proton Radius Measurement with Low-energy Electron Scattering
3. 学会等名 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure in memoriam Simon Eidelman (HADRON 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Honda
2. 発表標題 Current Status of the ULQ2 Experiment
3. 学会等名 PREN2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本多佑記
2. 発表標題 ELPHでの低エネルギー電子散乱による陽子半径測定
3. 学会等名 ELPH symposium 2023
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Honda
2. 発表標題 Current status of ULQ2 experiment: Proton radius measurement with low-energy electrons scattering.
3. 学会等名 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure in memoriam Simon Eidelman
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Clement Legris
2. 発表標題 First test results for the ULQ2 experiment towards the proton charge radius determination
3. 学会等名 JPS 2021 Autumn Meeting,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshimi Suda
2. 発表標題 Study of radii of proton and exotic nuclei by electron scattering.
3. 学会等名 2021 Symposium on Nuclear Data,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Clement Legris
2. 発表標題 Commissioning of the twin spectrometers for the proton charge radius measurement by low-energy electron scattering.
3. 学会等名 International School for Strangeness Nuclear Physics 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Honda
2. 発表標題 Proton radius measurement with low-energy electron scattering at ELPH
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 須田利美
2. 発表標題 陽子半径
3. 学会等名 日本のスピンの展望
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多佑記
2. 発表標題 陽子半径パズルの解明に向けた極低エネルギー電子・陽子散乱実験
3. 学会等名 ELPH Symposium 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多佑記
2. 発表標題 ELPHでの低エネルギー電子散乱による陽子電荷半径の精密測定
3. 学会等名 ELPH研究会C028
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本多佑記
2. 発表標題 東北大ELPHでの低エネルギー電子散乱による陽子半径測定
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧大祐
2. 発表標題 低エネルギー電子散乱による陽子半径測定のためのスペクトロメータの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------