

極低運動量移行の電子弾性散乱による陽子電荷半径精密決定

Precise determination of the proton charge radius
by elastic electron scattering
at ultra-low momentum transfer region

課題番号：16H06340

須田 利美 (SUDA, TOSHIMI)

東北大学・電子光理学研究センター・教授



研究の概要（4行以内）

電子とミュオン粒子を使って測定された陽子サイズが一致しない。素粒子物理学の標準模型では、電子とミュオン粒子は質量は違うものの同性質を有する粒子と考えられているため、この不一致は「陽子半径パズル」と呼ばれ現代物理学の大問題となっている。本研究では、前例のない測定条件での電子散乱測定から、最も信頼度の高い陽子電荷半径値の決定を目的としている。

研究分野：原子核物理学（実験）

キーワード：電子弾性散乱、陽子、電荷半径、電荷形状因子、Rosenbluth 分離

1. 研究開始当初の背景

陽子は現代物理学の重要な研究対象であり続けているが、その大きさ（電荷半径）に関し、「陽子半径パズル」と呼ばれる事態になっている。素粒子物理学の標準理論では同じ性質を持つと考えられている電子とミュオン粒子で測定した陽子の大きさが一致しないのである。これは単に陽子の大きさの不定性の問題に止まらず、標準理論を超える物理の存在の可能性、分光実験から陽子半径とともに決定される基礎物理定数である Rydberg 定数への影響、もあり、物理学全体の問題として捉えらその理解または解決に向けた研究が世界各地で展開されている。（参考：陽子電荷半径パズルは、*Science* 誌や *Nature* 誌で取り上げられ、それら雑誌の表紙を飾っている）。

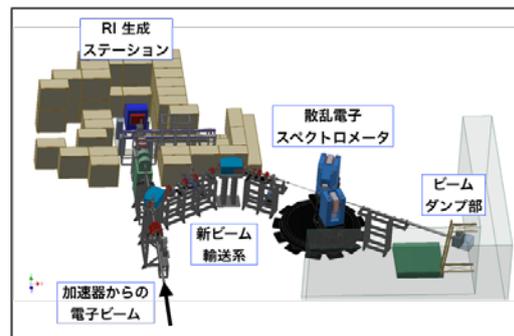
2. 研究の目的

電子散乱による陽子の大きさや形状の研究は、Hoftstadter らのノーベル賞受賞研究から始まる長い歴史があるが、電子散乱で決定された陽子半径にはデータ自体の問題や半径決定の際のモデル依存性が指摘されている。本研究の目的は、史上最低エネルギー（20-60 MeV）の電子ビームによる電子・陽子弾性散乱実験を通じて、指摘されているモデル依存性を極限まで排し、電子散乱としては最も信頼度の高い陽子の電荷半径値を決定することである。

3. 研究の方法

本研究では、前例のない極低運動量移行領域での測定により、モデル依存性を極限まで抑えた電荷半径を決定する。信頼度高く電荷半径を決定するには、陽子との弾性散乱断面積から電荷形状因子を実験的に分離決定することが不可欠である（Rosenbluth 分離）。しかしながら、世界で稼働中の原子核研究用電子加速器施設では極低運動量領域での Rosenbluth 分離を伴う測定は実施不可能である。それは、電子ビームエネルギーが高すぎ Rosenbluth 分離に必要な大きく散乱角度を変えた測定、並びに頻繁な加速エネルギー変更が実際上不可能なためである。

本研究を実施する東北大学・電子光理学研究センターの低エネルギー電子直線加速器（最大ビームエネルギー 60 MeV）に高品質電子ビーム供給用ビーム輸送系と広い散乱



角度を覆う散乱電子測定系を建設し、本研究を実施する。

4. これまでの成果

東北大学電子光理学研究センターの低エネルギー電子加速器（最大エネルギー 60 MeV）からの電子ビームを利用した電子・陽子弾性散乱測定を可能にするための

- 1) 新しい高分解能電子ビーム輸送系、
- 2) 散乱電子電磁石スペクトロメータ、

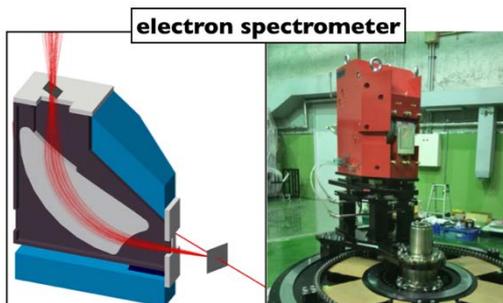
を設計、建設そして実験室に設置した。以下にそれぞれを説明する。

1) 新設電子ビーム輸送系

当該低エネルギー電子加速器は国内で最大の電子ビームパワー（ ~ 10 kW: 60 MeV, 120 μ A）を誇り、様々な研究分野で利用する放射性同位元素（RI）を製造する専用加速器であった。そのためビームパワー優先で電子ビームの品質そのものは重要視されてこなかった。そこで本研究で要求される高品質な電子ビーム（運動量広がり $< 10^{-3}$, 標的でのビーム広がり < 1 mm）を電子散乱実験に供することができるよう、新設ビームラインとともに既存のビーム輸送系も全面的に見直した。加速器直下のビーム輸送系も見直し、運動量広がりを制御するため運動量分散部に大パワービーム用のスリットの整備や電磁石（偏向用 2 重極電磁石や収束用 4 重極電磁石）の製作を行った。

2) 散乱電子スペクトロメータ

本研究では、散乱電子を高精度（運動量分解能 $< 10^{-3}$, 散乱角度精度 < 5 mrad）で測定する必要がある。散乱電子のエネルギーは大変低い（ $E_e = 20 - 60$ MeV）、高エネルギー実験で採用されているような検出器による散乱電子の軌跡測定は、多重散乱による情報損失のため不可能である。したがって、スペクトロメータの電磁石の磁極形状を工夫し、必要な光学収束条件が満たされスペクトロメータ焦点面の 2 次元位置測定のみで



散乱エネルギーと散乱角が必要な精度で分離決定できるスペクトロメータを設計した。2019年3月に実験室に設置された。

焦点面で使用する検出器は、KEK や九州大学と共同開発している 190 μ m ストリップ幅を有するシリコン検出器である。本検出器についても当センターの電子ビームを利用した性能評価試験を行なっている。

5. 今後の計画

平成 31 年度前半からは、加速ビームを新設ビームラインで電子・陽子散乱用標的位置まで導き、バックグラウンド、運動量広がり、ビームサイズ等を調べ、電子ビームが研究に要求される品質を有するか、また散乱電子スペクトロメータが設計通りの性能（運動量分解能、散乱角度分解能、立体角）を有するかを調査する。

予定性能の達成を確認後、本格的な電子・陽子弾性散乱測定を開始する。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

Measurement of Proton Charge Radius by Low-Energy Electron Scattering
T. Suda, T. Aoyagi, Y. Honda, Y. Maeda, S. Miura, T. Muto, K. Namba, K. Nanbu, K. Takahashi, T. Tamae and K. Tsukada
Journal of Particle Accelerator Society of Japan, 15 (2018) 52-59.

極低運動量領域での電子・陽子弾性散乱による陽子電荷半径の精密決定

須田利美、塚田暁
原子核研究 61 (2017) 87-98.

陽子電荷半径パズル

須田利美
バリテイ 33 (2018) 57-59.
2018年1月1日

7. ホームページ等

<http://researchmap.jp/toshimi.suda/>