

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05635
研究課題名：陽子半径パズルの解明を目指した極限的低エネルギーでの電子・陽子弾性散乱
研究代表者氏名（ローマ字）：須田利美（Toshimi SUDA）
所属研究機関・部局・職：東北大学・電子光物理学研究センター・教授
研究者番号：30202138

研究の概要：

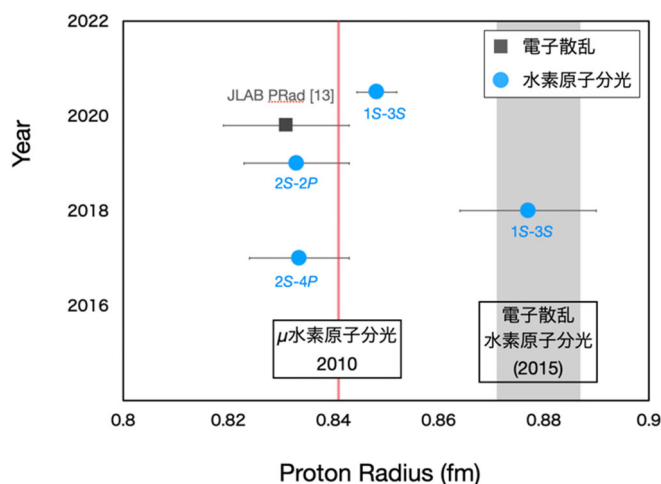
水素の原子核である陽子は現代物理学の重要な研究対象であり続けている。10年ほど前に陽子の大きさ（電荷半径）という基本物理量の不定性が指摘された。陽子半径の不定性は、原子核物理学や原子物理のみならず、素粒子物理学への影響さえ可能性がある。本研究は史上最低エネルギーの電子散乱測定により最も信頼度の高い陽子電荷半径の決定を目指す。

研究分野：原子核物理学

キーワード：電子散乱、陽子電荷半径、史上最低エネルギー、電荷形状因子、Rosenbluth 分離、2連スペクトロメータ、断面積絶対値測定、CH₂標的

1. 研究開始当初の背景

2010年に、ミュオン粒子水素原子（電子を μ^- に置換した原子）分光実験から決定された陽子の電荷半径が、それまで電子を利用した測定で決定されていた半径と、決定誤差を考慮しても7 σ で4%も食い違うことが明らかになり、「陽子電荷半径問題（Proton Charge Radius Puzzle）」としてNature誌やScience誌の表紙を飾る事態になった。この問題は、陽子の大きさという基本物理量の不定さだけにとどまらず基礎物理定数であるリュドベリー（Rydberg）定数の不定性に直結し、また電子と μ^- 粒子間の未知の相違が原因の可能性もあり、現代物理学が解決すべき問題の一つの認識されている。2010年以降、世界各地で多くの追試が行われてきた。陽子半径値の現場を右図に示す。図中、棒は2010年時点での電子並びにミュオン粒子による容姿半径値、他はそれ以降の新測定の結果である。青丸で示す水素原子分光実験ではお互いに矛盾する値を示し、■で示すJLABでの電子散乱の結果は、半世紀にわたる電子散乱研究と深刻な不一致を示す値が発表され、混迷は一層深まっている感がある。原因として、測定データから半径値決定時のモデル依存性が指摘されており、それを排した研究が強く求められている。



2. 研究の目的

本研究は、史上最低エネルギーで電子・陽子弾性散乱断面積を測定し、電子散乱としては最も信頼度の高い電荷半径値の決定を目標とする。電荷半径は、電荷形状因子の $Q^2 \rightarrow 0$ での微分係数として定義されるため、決定精度向上には可能な限り運動量移行を小さくする必要がある。東北大学・電子光物理学研究センターの大強度60MeV直線電子加速器を利用し、前例のない極低運動量移行領域($0.0003 \leq Q^2 \leq 0.005$ (GeV/c)²)を覆った電子・陽子弾性散乱測定をおこなう。Rosenbluth分離法によって電荷半径の情報を含む電荷形状因子を分離・決定し、電荷形状因子の極低運動量移行領域での振る舞いから半径を決定する。

3. 研究の方法

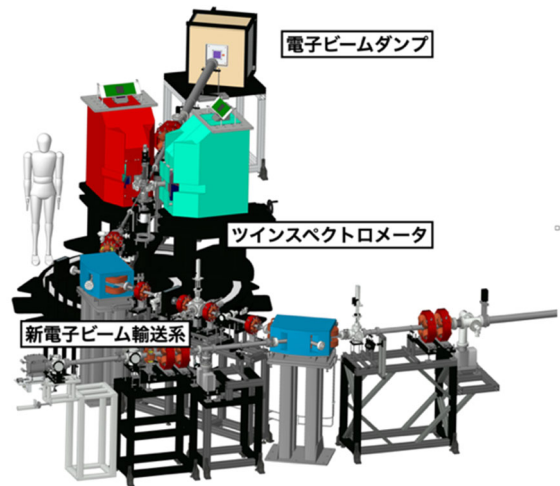
本研究では、陽子半径値決定時のモデル依存性を極限まで排除することを可能にする電子散乱断面積測定を行う。史上最低エネルギー($E_e = 10 - 60$ MeV)の電子散乱を実現し、Rosenbluth分離法により極低運動量移行領域での電荷形状因子を実験的に分離決定する。これは従来行われてこなかった（実施ができなかった）測定である。数%の精度で電荷半径を決定するには、断面積の絶対値を 10^{-3} の精度で測定する必要がある。そのためCH₂標的を導入する。電子・炭素核(C)の弾性散乱断面積は 10^{-3} の精度で既知のため、CH₂標的により電子・炭素核との相対測定で電子・陽子散乱断面積の絶対値を決定できるのである。電磁石スペクトロメータを2台準備し、ビーム照射によるC/H比変化が知られているCH₂標的中のC/H比をスペクトロメータ1台で常時モニターしつつ、2台目のスペクトロメータで電子・陽子散乱断面積の角度分布を測定する。

4. これまでの成果

東北大学電子光物理学研究センター・第一実験室内に、加速器からの良質な電子ビームを輸送するための

新ビーム輸送系ならびに散乱電子を測定する高運動量分解能電磁スペクトロメータ2台を建設・設置した(右のCAD図と写真参照)。標的に弾性散乱した低エネルギー散乱電子をさまざまな散乱角度を含む広い運動学条件下で高精度で測定するため、特殊な散乱真空槽や電磁石スペクトロメータの磁極形状、そして検出器にさまざまな工夫を凝らし建設した。特に、真空直結で広い散乱角度を覆った測定を可能にする散乱真空槽の前例がなく、全く新しい散乱真空槽を発明し、測定に供している。

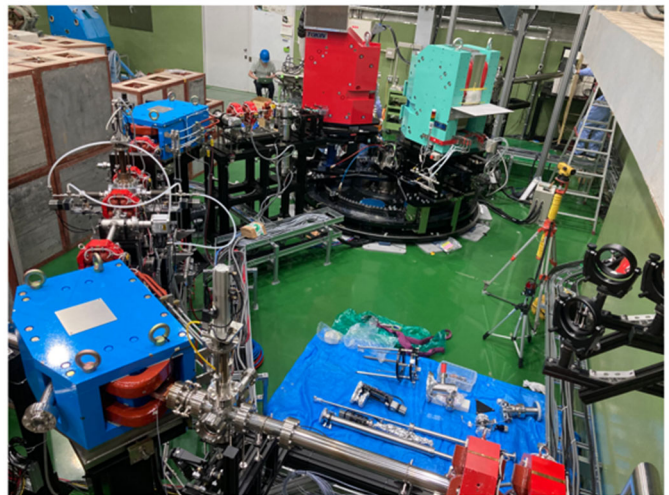
電子ビームをCH₂標的に照射し、弾性散乱電子を利用し、電磁石スペクトロメータの運動量分散や運動量分解能、角度分散などの基本的な性能評価を実施、全て要求性能を満たすことを確認済みである。本測定に必要な環境は揃ったため、2022年度から広い運動学領域を覆った電子・陽子弾性散乱断面積測定を開始を目指して準備中である。



5. 今後の計画

2022年度中には本格測定を開始する計画である。2022年前半は更なるバックグラウンド抑制と 10^{-3} 精度で散乱断面積を決定するために必要な様な検出効率の確認を進める。同年度後半からは本測定を開始し、2023年度中には陽子電荷半径決定を目指す。並行して、陽子の磁荷半径、重陽子の電荷半径測定も同時に進めたいと考えている。

また今回建設した陽子半径測定用電子散乱装置は、約半世紀の電子散乱による原子核研究で測定できなかった非常に低い運動量移行領域での原子核の電荷形状因子測定を可能にする。最近、この非常に低い運動量移行領域での測定から原子核の中性子分布の情報が決定できることを発見し、原子核の理論研究者との共著論文として発表した(下記リストの3)論文)。陽子半径決定後、同装置で上記研究の推進の可能性を検討する。原子核の中性子分布は、近年中性子星構造との関係で高い注目を浴びているが、いまだに定量的測定ができていない。



6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- 1) Proton Charge Radius (査読あり)
T. Suda, Y. Honda, Y. Maeda and K. Tsukada
高エネルギーニュース 40 (2021) 107-116.
- 2) Proton Charge Radius (査読あり)
T. Suda, Y. Honda, Y. Maeda et. al.,
原子核研究 66 (2021) 1-11.
- 3) The mean square radius of the neutron distribution (査読あり)
and the skin thickness derived from electron scattering
Haruki Kurasawa, Toshimi Suda and Toshio Suzuki
Prog. Theoretical and Experimental Physics, 2021, 013D02 (40 pages).

7. ホームページ等

- 1) 研究室のホームページ
<https://w3.tohoku.ac.jp/ris-es/>
- 2) 「陽子の半径の正確な値を突き止めよー半世紀前の古い加速器だからこそできること」
須田利美 インタビュー記事(国立大学附置研・センター会議)
http://shochou-kaigi.org/interview/interview_93/