

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料
〔事後評価用〕

平成16年度採択分

平成22年3月31日現在

研究課題名（和文） **高エネルギー縦偏極電子・陽子衝突
による標準模型の精密検証**

研究課題名（英文） Precision tests of the Standard Model based on
high-energy collisions between the proton
and the longitudinally-polarized electron

研究代表者
徳宿 克夫 (TOKUSHUKU KATSUO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授



研究の概要：ドイツ DESY 研究所が建設した、世界最高エネルギーの偏極電子・陽子衝突型加速器 HERA を用いて、国際共同実験を推進し、陽子の内部構造の研究、つまり陽子内部のクォークやグルーオンの運動量分布の精密パラメータ化と、素粒子の標準模型の精密検証を進めた。

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： レプトン、クォーク、グルーオン、素粒子、標準模型

1. 研究開始当初の背景

自然界の現象はクォークとレプトンとの間に働く4つの力により引き起こされ、そのうち重力を除く力はすべてゲージ相互作用で記述されているという、素粒子の標準模型が、現在成功をおさめている。しかし理論としては不完全であり、高エネルギーではこれを超える現象が起こると考えられている。

重心系エネルギー約 300GeV の世界最高エネルギーの電子・陽子衝突を達成できる HERA 加速器は、まさにレプトン・クォークの衝突器である。改造が進み、平成15年秋から、電子（または陽電子）を縦偏極させた衝突を、高輝度で行えることになった。

2. 研究の目的

本研究は、HERA を使って偏極電子・陽子衝突事象を多量に収集し、そこで起こる多様な現象の中から、陽子内部のクォークやグルーオンと電子との間の相互作用を詳しく研究し、現在成功を収めている素粒子の標準模型の精密検証を行う。特に陽子内部のクォークやグルーオンの分布の決定、偏極を利用して、弱い相互作用の左右非対称の検証などを進める。その過程において標準模型を超える現象を探索する。

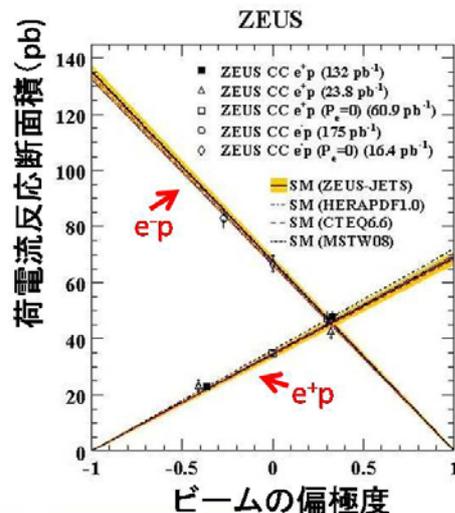
3. 研究の方法

1988年以來、我々は国際協力で ZEUS 測定器を建設し、運転・改良を進めてきた。したがって加速器・測定器ともに既に実験準備が整っており、HERA の運転期間中、効率よくデータを収集し、物理解析を進めていく。

4. 研究の主な成果

(1) 2007年6月末の HERA 加速器運転終了まで、電子・陽子衝突および陽電子・陽子衝突実験を順調に進めた。積算データ量はこれまでのデータの約3倍になった。特に電子・陽子衝突データはこれまでの約10倍のデータを収集し統計誤差を非常に改善した。さらに、同時に実験を行っていたもう一つのグループ (H1) のデータとの統合を進めた。単に統計量を増やすだけでなく、系統誤差をよりよく理解でき、全体の測定誤差を大きく改善することができた。

(2) 高い運動量移行 (Q^2) での荷電流および中性流の電子・陽子の散乱断面積を測定した。(陽電子・陽子に関しては暫定結果を国際会議で発表)。荷電流反応では、ビームの偏極度に応じて断面積が直線的に変わることを示し、弱い相互作用が左巻きのみ相互作用であることを示した (下図)。



[4. 研究の主な成果 (続き)]

(3) これらの断面積は標準模型でよく記述できており、これからもしクォークが点電荷でないとしても、その大きさは $0.63 \times 10^{-18} \text{m}$ 以下 (95%信頼度)、つまり陽子の大きさの千分の1より小さいことがいえた (暫定結果)。

(4) 陽子の構造関数の測定を行った。実験の最後に陽子のエネルギーを下げた衝突実験を行うことにより、縦方向構造関数の測定を初めて行うことができ、量子色力学 (QCD) の予想と一致した。

二つの実験 (H1 と ZEUS) の構造関数の測定結果を総合することによって、統計と系統誤差の両方を大きく改善できることを示し、まず無偏極衝突のデータで陽子内部のクォーク・グルーオンの運動量分布を精度よく導出した。例えば LHC 実験でのヒッグス生成で重要になってくる領域のグルーオンの密度分布を 3%の精度で求めることができています。本研究によって、運動量の小さいグルーオンが急激に増えているという陽子の内部構造がわかり、かつそれが QCD で説明できることを示すことができた。

(5) 陽子構造の研究と並行してジェット生成機構の研究も進んだ。両方とも QCD によって記述されるわけであるが、様々な反応から、QCD の唯一のパラメータである強い相互作用の結合定数 (α_s) を測定した。すべてが誤差の範囲で一致し、かつ数%の精度での測定を達成できた (2007年までの総合値は $\alpha_s(M_Z) = 0.1198 \pm 0.0019$ (実験誤差) ± 0.0026 (理論誤差)、下図はそれ以後の新しい測定も加えた図)。これにより、クォークの力学としての QCD の不変性を示すことができた。

本研究は標準模型の多様な側面の精密測定を進めたが、特に重要な成果は、QCD が陽子 (そしてその構成物であるクォークとグルーオン) の力学を、非常に定量的に記述できる理論であるということを示した点である。



5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

標準模型を超える現象は観測されず、クォークと電子と散乱は標準模型でよく記述できることを示し、これを超える現象を見つけるには、より高いエネルギーでの実験が将来必要であることを明らかにした。

この研究を通して、標準模型が、そしてその中でも特に強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) が、クォークやグルーオンの反応を精度よく記述することを示した。LHC など、今後のより高いエネルギーでの陽子・陽子衝突実験との比較が重要になる。

6. 主な発表論文

(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

- “Combined Measurement and QCD Analysis of the Inclusive e^\pm Scattering Cross Section at HERA”
F.D. Aaron et al.
(H1 and ZEUS Collaborations),
JHEP, Vol. 2010, No. 1, 1-63,
DOI: 10.1007/JHEP01 (2010) 109
- “Measurement of the Longitudinal Proton Structure Function at HERA”
S. Chekanov et al.
(ZEUS Collaboration),
Physics Letters B 682 (2009) 8-22.
- “Measurement of High- Q^2 Neutral Current Deep Inelastic $e-p$ Scattering Cross Sections with a Longitudinally Polarised Electron Beam at HERA”
S. Chekanov et al.
(ZEUS Collaboration),
European Physical Journal C 62 (2009) 625-658.
- “高エネルギー陽子の描像: HERA での展開から LHC、LHeC へ”
長野邦浩 日本物理学会誌 65 (2010) No 3. 148-155
ホームページ等
<http://research.kek.jp/group/zeus/kakenhi/>