

研究種目：特別推進研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16001002

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）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：80207547

研究成果の概要：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。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	49,600,000	14,880,000	64,480,000
2005年度	55,700,000	16,710,000	72,410,000
2006年度	53,300,000	15,990,000	69,290,000
2007年度	44,400,000	13,320,000	57,720,000
2008年度	26,500,000	7,950,000	34,450,000
総計	229,500,000	68,850,000	298,350,000

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。

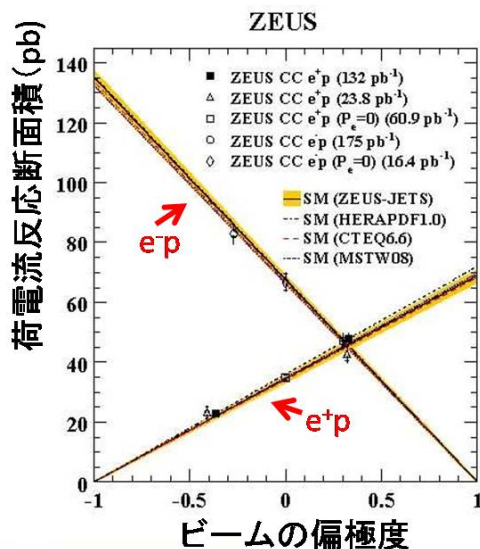
### 3. 研究の方法

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のものであることを示した(下図)。



(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( $\alpha_s$ )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)  $\pm 0.0026$  (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ことである。

まとめると、この研究では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。



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 72件)

- ① “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
- ② “Measurement of the Longitudinal Proton Structure Function at HERA”  
S. Chekanov et al.  
(ZEUS Collaboration),  
Physics Letters B 682 (2009) 8-22.
- ③ “Measurement of High- $Q^2$  Neutral Current Deep Inelastic  $e^{\pm}p$  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.
- ④ “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

[学会発表] (計 25件)

- ① 長野邦浩 “The ZEUS EW fit and measurement of the CC cross section in  $e^+p$  data”  
XVI International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related

Subjects (DIS2008)

7-11 April 2008, London, UK

- ② 山崎祐司 “QCD results at HERA”  
Aspen Winter Conference 2008,  
13-19 January 2008, Aspen, USA
- ③ 徳宿克夫 “HERA における陽子構造関数、重いクォーク生成の測定”  
2007 年第 62 回日本物理学会年次大会  
(北海道大学)  
シンポジウム「超高エネルギー宇宙線観測の新たな展開」招待講演

[図書] (計 1件)

- ① “Deep Inelastic Scattering (DIS2006) Proceedings of the 14th International Workshop, Tsukuba, Japan” Editors: M. Kuze, K. Nagano and K. Tokushuku 2007, World Scientific (ISBN-13 978-981-256-871-7)

[その他]

ホームページ等

<http://research.kek.jp/group/zeus/kakenhi/>  
平成 18 年 8 月 18 日の日本経済新聞で、この研究が取り上げられた。記事は「欧州物理拠点を歩く」の第 4 回で、「独 DESY でゼウス実験、陽子構造に迫る成果」という見出しのものとのシリーズ記事であった。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

徳宿 克夫 (TOKUSHUKU KATSUO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号: 8 0 2 0 7 5 4 7

### (2) 研究分担者

長野 邦弘 (NAGANO KUNIHIRO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号: 9 0 3 9 1 7 3 9

久世 正弘 (KUZE MASAHIRO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 0 0 2 2 5 1 5 3  
(H20: 連携研究者)

山崎 祐司 (YAMAZAKI YUJI)  
神戸大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 0 0 3 1 1 1 2 6  
(H20: 連携研究者)

山田 作衛 (YAMADA SAKUE)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・名誉教授  
研究者番号：70011658  
(H20：連携研究者)

浜津 良輔 (HAMATSU RYOSUKE)  
首都大学東京・客員准教授  
研究者番号：20087092  
(H20：研究協力者)