

特集：量子色力学—中間子論を源として

高エネルギー加速器実験で探る量子色力学

徳 宿 克 夫

強い相互作用の漸近的自由という性質により、高エネルギーの衝突では結合定数が小さくなり量子色力学 (QCD) も摂動計算が可能になる。例えば、電子と陽子の衝突過程は、陽子の内部のパートン (クォークあるいはグルーオン) の分布と、電子とパートンの素過程から計算できる。反応後のパートンは高エネルギーではジェットとなり、その運動量はもとのパートンの運動量に良く対応している。この稿では、私たちが進めている電子・陽子衝突実験を中心に、最近のいくつかの QCD の検証を紹介する。

電子・陽子深非弾性衝突

総論で触れられているように、電子・陽子衝突での陽子が壊れてたくさんのハドロンが生成する散乱 (深非弾性散乱) の研究から、陽子の内部に点電荷クォークがあることが発見された。現在実験が進んでいるドイツの DESY 研究所の電子・陽子衝突型加速器 HERA は、27.5 GeV に加速した電子と 920 GeV に加速した陽子を衝突させることにより、それまでの深非弾性散乱の実験と比べて格段に高い重心系のエネルギーでの散乱を可能にした。

私たちの建設した ZEUS 検出器で捕えた深非弾性衝突事象の例を図 1 に示す。中央横

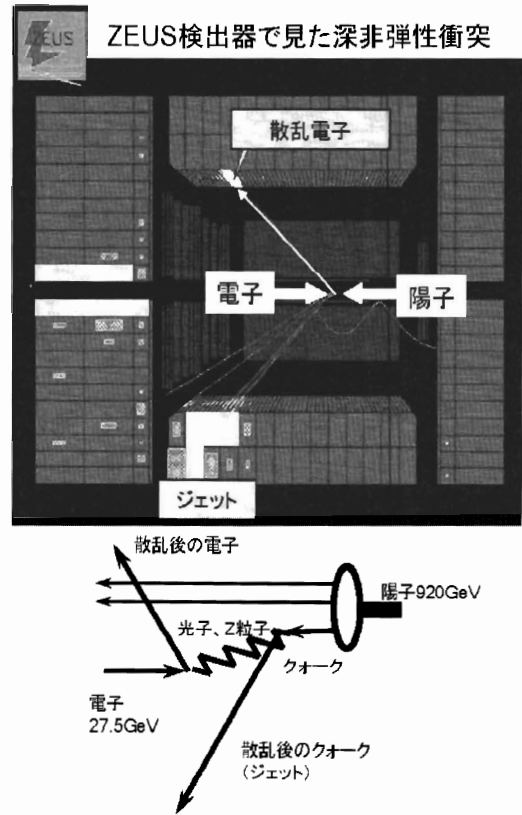


図 1 ZEUS 測定器で見た深非弾性散乱事象と、その解釈

向きに加速器のビームパイプが通り、左右から電子と陽子ビームがきて中央で衝突する。衝突点の周りに飛跡測定器があり、その外側はエネルギーを測定するカロリメータでほぼ全立体角を覆われている。図では検出したエネルギーに応じてカロリメータが白く表示されている。左上方に電子が検出され、その逆

側にたくさんの粒子が集中して発生している。また陽子の進行方向のビームパイプ周りにも大きなエネルギーが検出されている。

私たちはこのような事象を見て、図1の下図のように電子と陽子内部のクォークが光子を介して散乱したと解釈する。クォークは閉じ込めによってそのままではなく、多数のハドロンが束になって発生するジェットとなって観測される。陽子内部に残る他のパートンもハドロン化する過程でビームパイプ周りにたくさんのハドロンを生成する。電子やジェットの運動量を測定すればクォークがもともと持っていた運動量がわかるので、このような事象を多数集めることにより陽子内部のクォークの運動量分布やパートンがジェットになる過程を詳しく研究でき、そこからQCDの検証を進めている。

スケーリングの破れ

クォーク模型では陽子は二つのuクォークと一つのdクォークからできているが、深非弾性散乱でみると、陽子内部には、他にも海クォークとよばれるクォークと反クォークが多数存在し、その運動量分布は連続的に広がっているのがわかる。初期の実験ではクォークの分布は反応によらず一定にスケールするように見え、そこから陽子の中に自由な点電荷が分布していると考え、クォーク・パートン模型が導かれた。

ところが、QCDによると陽子内部のクォーク分布は実は一定ではない。分解能(Q^2)をあげると、今までクォークと思っていたものがクォークとグルーオンに分かれ、グルーオンがまたクォーク対に分かれていく(図2)。摂動的なQCDは、クォーク分布を

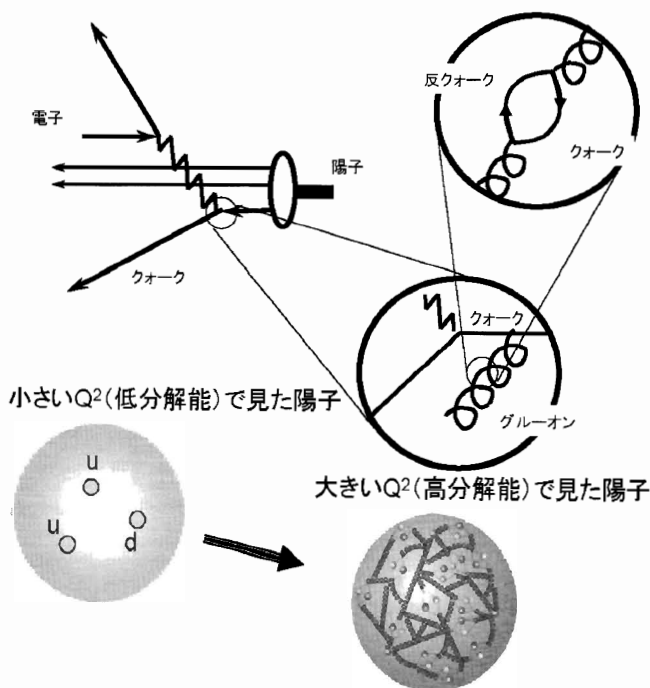


図2 陽子の構造の探索。陽子の内部のクォークとグルーオン分布は見ている分解能で変化してくる。QCDはその変化の仕方を予言する。

予想することはできないが、ある Q^2 での分布がわかれば、それが Q^2 とともに分布がどう変化していくかを予言できる。

HERA では非常に広い範囲の Q^2 が観測可能で、このスケーリングの破れを精密に研究できた。この破れは、陽子内部のグルーオンが多いほど大きくなるし、クォークやグルーオン間の結合の強さにも依存する。QCD とデータとの比較を通して、ここから陽子のグルーオン分布と、強い相互作用の結合定数 (α_s) を決めることができる。

図3は、HERAで測定した F_2 と呼ばれる陽子の構造関数を、 Q^2 を横軸にとって示したものである¹⁾。 Q^2 の小さいところには、以前の静止標的の実験結果も含んでいる（白抜き点）。陽子内部の種類 i のクォークの運動量分布を $q_i(x)$ 、そのクォークの電荷を e_i とおくと、 $F_2 = \sum_i e_i^2 x q_i(x)$ となる。 x は、陽子全体の運動量中、そのクォークが占める割合であり、0 から1までの値をとる。図のように、 x の値で F_2 をプロットすれば、その運動量を持ったクォークの量が分解能とともに

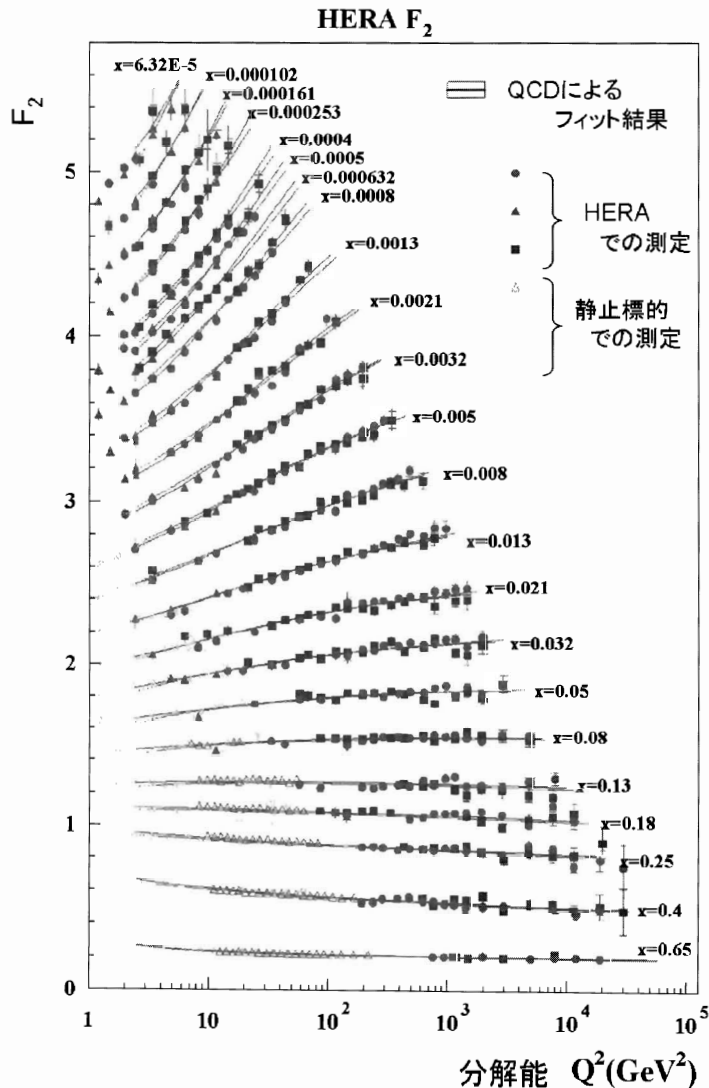


図3 陽子構造関数 F_2 の Q^2 依存性

にどう変化していくかがわかる。図では一番 x の大きいデータを一番下にプロットし、上にいくほど x が小さくなるように並べてある。このように広い領域にわたって測定すると、 F_2 が徐々に変わっていることがよく見える。 x の大きい ($x > 0.1$) ところでは Q^2 が大きくなる（つまり分解能が高くなる）とともに F_2 が小さくなり、 x が小さくなると反転している。これは、 Q^2 の増加とともに高い運動量を持ったクォークが少なくなり、かわりに運動量の低いクォークが急激に増えているということである。データを QCD の予想でフィットした結果も図に載せてあるが、広範囲でうまく説明できる。ここから、強い相互作用の結合定数 (α_s) と、陽子内部のクォークとグルーオン分布が求まる。

Q^2 とともに低い運動量を持つクォークが増えているということは、そのクォーク対を生み出すグルーオンもたくさんあることになる。このようにして直接は見えない陽子内部のグルーオンの分布が研究できる。また、電子陽子衝突で二つのジェットができる現象があるが、これにはクォークを介した光子・グルーオン融合反応 ($\gamma g \rightarrow q\bar{q}$) が主となるので、このデータも陽子内のグルーオンを決めるのに使える。これらを総合して、QCD との比較から求めた海クォークとグルーオンの分布が図 4 である²⁾。低い x では、クォーク以上にたくさんのグルーオンがあり、 Q^2 とともにそれがどんどん増加していくのが見える。このような低い運動量のグルーオンの存在は HERA の実験で初めて確認することが

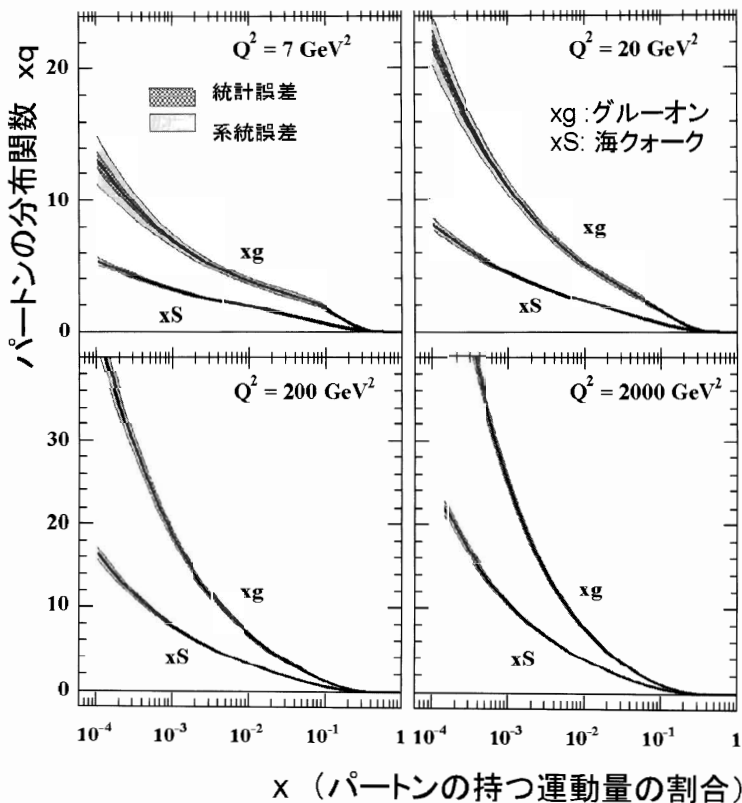


図 4 ZEUS 実験で求めた海クォークの分布とグルーオンの分布. x の小さい、つまり小さな運動量を持ったクォークやグルーオンがたくさんあり、 Q^2 が大きくなるとともにどんどん増えている。

できた。

強い相互作用の結合定数の測定

これまで見てきたように、深非弾性散乱のデータから、クォークやグルーオンの振舞いはQCDでうまく説明でき、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)も求まった。HERAでは、さらに、ジェットの散乱断面積の Q^2 依存性やジェットの内部構造のジェットエネルギー依存性など、広範囲な観測量から α_s が測定できている。紙面の関係で詳しく述べられないが、米国Fermi研究所での陽子・反陽子衝突型加速器(Tevatron)でも、ジェットの研究でQCDとの比較が行われ、 α_s の測定がされている。それらの測定結果の例を図5に示す³⁾。観測のエネルギースケールとともに結合定数が小さくなるという、QCDの漸近的自由がはっきりと見えている。他の電子・陽電子衝

突実験などから得られた、現在の α_s 世界平均値からの予想ラインが図に示してあり、HERAやTevatronのジェットから測定した値はこれと一致している。これまでの世界平均の値を、エネルギースケールをZボソンの質量の位置でみると、 $\alpha_s(M_Z)=0.1176\pm 0.002$ となり数%の精度に達している³⁾。前章のスケーリングの破れから得られた値は $\alpha_s(M_Z)=0.1183\pm 0.003$ である²⁾。このように、様々な反応から得られた値がすべて誤差の範囲で一致することは、強い相互作用の普遍性を示しており、QCDがその正しい理論であることの根拠となっている。これらの結果は、2007年から始まるCERNの重心系14 TeVの陽子・陽子衝突加速器LHCでの実験にも大きな情報を与えている。陽子のパートン分布がHERAでの実験で決められ、理論的にも摂動計算の次数が上がったので、Higgsや新粒子の生成頻度を見積りの信頼性が上がった。それらの探索を妨げる普通の多

ジェット生成から求めた強い相互作用の結合定数

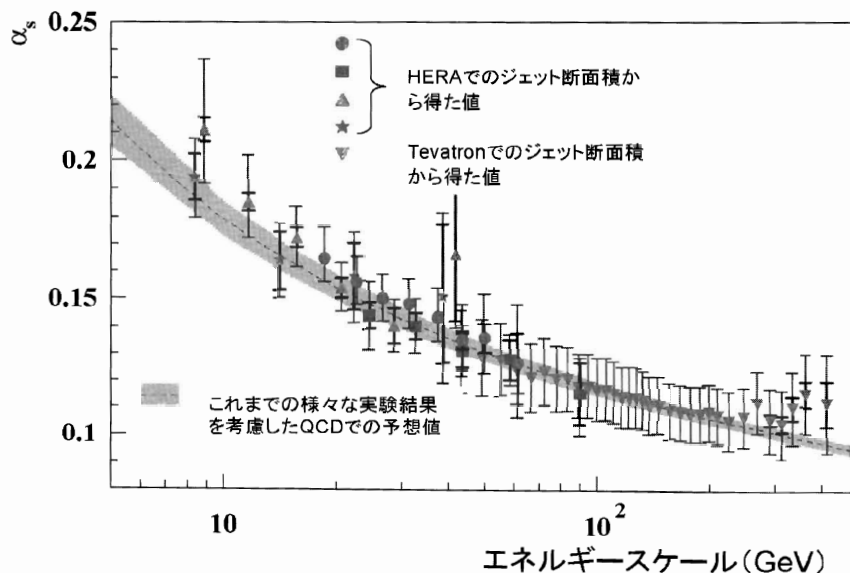


図5 電子・陽子衝突および陽子・反陽子衝突でのジェット生成断面積から測定した様々なスケールでの強い相互作用の結合定数(α_s)の値。エネルギースケールが大きくなるとともに、値が小さくなっていくのがわかる。

重ジェット事象の頻度もわかり、いかにしてこれらの事象を取り除くかの定量的な研究が進んでいる。つまり LHC 実験での測定は予測できるといえるが、未知の高エネルギーでの衝突であるので、本当に正しいかは実際に測定してみないとわからない。予測を外れた大きな驚きがある可能性はあるし、また、予測と一致した場合には、それらのデータも使って QCD をさらに高精度に検証できる。

■ 参 考 文 献 ■

1) H1, ZEUS 実験の F_2 の測定については ZEUS-

prel-04-003. Web ページ (URL: http://www-zeus.desy.de/public_results/publicsearch.html) を参照。

- 2) S. Chekanov et al. (ZEUS Collaboration), Eur. Phys. J. C 42 (2004) 1.
- 3) ZEUS 実験の α_s の比較は ZEUS-prel-03-032. Web ページ (URL: http://www-zeus.desy.de/public_results/publicsearch.html) を参照。
- 4) S. Eidelman et al., Phys. Lett. B 592, 1 (2004) 2006 年版に向けての、2005 の部分的な更新が Particle Data Group の Web ページ (URL: <http://pdg.lbl.gov/>) におかれている。

徳 宿 克 夫 (とくしゆく・かつお)

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核
研究所 教授