■ 研究紹介

● HERA 実験における高い x、Q^2 領域での深非弾性散乱

東京大学原子核研究所

山崎 祐司*、久世 正弘

1. はじめに

2 月 19 日に行われた特別セミナー、H1 と ZEUS による high-x、high-Q^2 事象のデータ公表の場となった DESY 講堂にはまさに一つの空席もないほどに人が集まった。筆者らの知る限りここがこんなに満員になったことはない。20 年前にグルーオンが発見された時には斯様であったのであろうか。すでに噂は数週間前から高エネルギーコミュニティーに広まっていたが、DESY 首脳陣の提案で H1 と ZEUS のデータをお互いに較べられるようにということで、運動学変数も生の測定値でなく真の値へ補正した形で、さらに事象数の期待値と測定値を議論する領域も合わせた上で公表が行われた。ZEUS のメンバーである我々にとっては H1 のデータを見るのはこれが初めてである。

事の起こりは 1 年前にさかのぼる。95 年までのデータで 1 つ、非常に高い Q^2(電子の運動量移行の 2 乗の負数) の事象があった。本誌昨年 5 月号の紹介記事をご覧になればわかるが、一番高い Q^2 のビンで断面積が標準模型を大きく上回っている。もっとも 1 事象だけであるから統計的には何も言えなかった。又、x(クォークの運動量の陽子に占める割合) の分布を見てみると 0.5 の付近に先の事象と併せて 2 つ、y(非弾性度) の低いところをカットしても残る事象があった。レプトクォークが生成された場合、まさにこのような形で見えるはずなので、96 年のデータに期待が高まっていた。

さらに、H1 がレプトクォークを見つけたという噂が去年のある時期に流れたことがあるが、ワルシャワ国際会議での H1 のレプトクォーク探索の結果 (95 年までのデータ) を見る限りでは有意な超過は見られなかった。

96 年の運転は 7 月に始まり、最初のうちはなかなか積算ルミノシティが上がらなかったが、9 月以降 HERA は非常に効率良く運転され、11 月末の運転終了時点で 95 年までの総積算値とほぼ同じ 17 pb^{-1} を記録した。つまり前年までに較べデータ量が倍になった訳である。オンラインで取られたデータは 2、3 日のうちにオフライン処理され、全事象の再構成が行われる。この結果はテープに保存され、一年の運転が終わった後に最終較正解析コードで再処理されるが、特に興味深い事象をあらかじめ定義した条件で選び、hotline-event としてそのままディスクに残す。これらはグループの誰もがさらに解析したり、スキャンできる事象である。毎週月曜の定例ミーティングでランコーディネータが一週間のデータ収集をレポートするのだが、その時に event-of-the-week として、一週間で最も面白い事象を紹介するのが通例になっている。ルミノシティが上がり始めてから、高い Q^2 の事象が紹介されることが多くなった。ことに x が 0.5 付近の事象が出ると「おお、また出たか」とミーティングはどよめいた。運転終了後、これは面白いのではないかということで、さっそく 94 年、95 年のデータと合わせて解析が行われた。やはり高い x のところで期待値より多くの事象があり、とにかくプレプリントを出そう、ということでクリスマス前にスポークスマンが最初の結果を所長に見せに行った。

ところがその同じ日に H1 も所長のところに彼らの結果を見せに行っていた。どうやら ZEUS も H1 も事象数の超過があるらしい (ただしどこにどのように分布しているかはお互いに見せていない)。そこで、投稿論文の形にして同じ日に発表しようという合意がなされ、x、Q^2 の定義や区切りを合わせるための話し合いが何度か行なわれた。

* 日本学術振興会海外特別研究員として DESY に滞在中

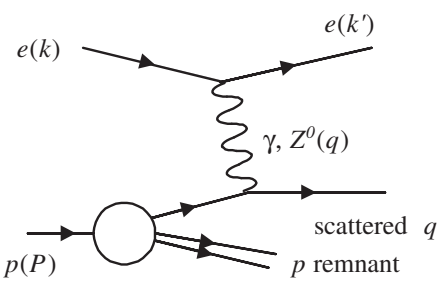

図 1. 最低次の中性カレントのファインマン図

そういう経緯で 2 月 19 日の発表になったわけであるが、ここでそのデータの内容と解釈について議論したいと思う。

2. HERA における中性カレント事象

現在 HERA は陽子 820 GeV、陽電子 27.5 GeV で運転されており、重心系のエネルギーは約 300 GeV である。この領域における深非弾性散乱の散乱断面積の測定では、標準模型の検証および標準模型を超える物理の探索が可能である。

陽電子・陽子中性カレント散乱 $e^+p \to e^+X$ の記述には、運動学的変数として Bjorken スケーリング変数 x と y、および Q^2 が用いられる。これらの変数は、電子の始状態、終状態、および陽子の始状態の 4 元運動量をそれぞれ $k,\ k',\ P$ とすると、仮想光子の運動量 $q = k - k'$ を用いて $Q^2 = -q^2,\ x = Q^2/2(P\cdot q),\ y = (P\cdot q)/(P\cdot k)$ と定義される (図 1)。これらの変数は $Q^2 = sxy$ で関係づけられ、独立な変数は 2 つである。クォーク・パートン模型では、x は陽子中のクォークのもつ運動量の割合を表す。陽電子・散乱クォーク系の不変質量 M は、$M = \sqrt{xs}$ と表される。

この過程の微分散乱断面積は、標準模型では陽子の構造関数 F_2 および F_3 によって

$$\frac{d^2\sigma}{dxdQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4}\{(1+(1-y)^2)F_2(x,Q^2) - (1-(1-y)^2)xF_3(x,Q^2)\}$$

と記述される。Q^2 の高い領域では Z^0 交換および Z^0 と光子との干渉項の影響から、パリティ非保存項 F_3 の寄与が加わる。

この微分散乱断面積は、x, Q^2 の両変数に対してその値が大きくなるにしたがって急速に減少していく。また、$y[= (1-cos\theta^*)/2, \theta^*$ は陽電子・クォーク重心系での散乱角] に対しては、ベクトルボゾン γ および Z^0 が交換される場合は $d\sigma/dy \simeq 1/y^2$ で減少していくが、スカラー粒子が $s-$ チャネルで生成される場合は、y に対して一定となる。

この散乱における運動学的変数の再構築について少し述べる。HERA は衝突型加速器であるため、終状態の陽電子の運動量に加えて、散乱されたクォークから生成される終状態のハドロンの運動量も実験的に測定可能である。すなわち電子のエネルギー E_e および散乱角 θ_e、ハドロン系のエネルギー Eq および散乱角 γ を測定量として用いることができる (図 2)。事象の運動学的変数は、これらのうち 2 つを用いて求まる。HERA では主に散乱陽電子の情報 (E_e, θ_e) を使った「電子法」および 2 つの角度の情報 (θ_e, γ) を用いた「二角法」が用いられ、対象となる運動学的領域において測定器の精度からくる決定精度のよい方が選択される。前者はハドロンのエネルギー測定によらない方法で、H1 実験で用いられた。後者はエネルギー測定の絶対値の不定性による影響が少ない方法で、ZEUS 実験で用いられた。以下の

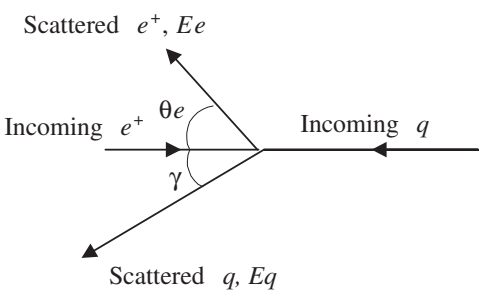

図 2. 中性カレントにおける散乱の摸式図と運動学変数

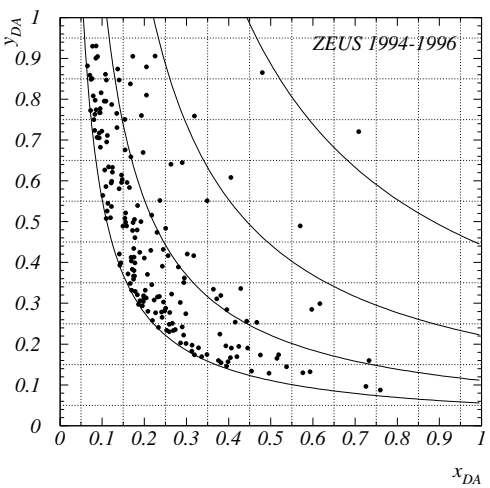

図 3. ZEUS における中性カレント事象 ($Q^2 > 5000\,\mathrm{GeV}^2$) の $x-y$ 分布 (曲線は左下より $Q^2 = 5000, 10000, 20000, 40000\,\mathrm{GeV}^2$ の線)

図中では、こうして算出した運動学的変数に、さらに両実験が直接比較できるように各検出器による影響が補正されたものが用いられている。またどちらの実験も、この両方法による結果を比較して矛盾のないことを確かめている。

中性カレント事象の選択は、カロリメータに一定エネルギー以上の電磁クラスタを要求して行なわれた (詳細は論文 [1, 2] 参照)。選択した事象のうちバックグランドからの寄与は、両実験とも無視できる (後述)。得られた中性カレントの事象数は、標準模型に基づいたモンテカルロシミュレーションと比較された。その結果を順に見ていこう。

3. ZEUS 実験の結果

まずは我々ZEUS実験の結果から紹介させていただく。図3 は、積算ルミノシティ $20.1\,\mathrm{pb}^{-1}$ から選択された中性カレント事象 ($Q^2 > 5000\,\mathrm{GeV}$) の $x-y$ 分布である。散乱断面積が x、y あるいは Q^2 の増加に対して急激に減少するため、事象は低い x、y あるいは Q^2 (図中の曲線は等 Q^2 線を表す) の領域に集中しているが、非常に高い x および y の領域にもいくつかの事象があることがわかる。これらの事象のうち、最も Q^2 の高い事象を図4に示す (陽子は右方から、陽電子は左方から入射)。終状態の陽電子が大角度で反跳され、またジェットがビーム軸に垂直な平面において陽電子とほぼ 180° の角をなしている (図の右下) 様子が見てとれる。

図5は、これらの事象の標準模型に対する超過を Q^2 の分布で見たものである。$Q^2 < 15000\,\mathrm{GeV}^2$ では測定は標準模型とよく一致しているが、Q^2 の高い部分では超過が見られる。特に事象数の期待値が 0.145 ± 0.013 と小さい $Q^2 > 35000\,\mathrm{GeV}^2$ の領域で、2 事象が観測されている。多数の標準模型実験を行なった場合に、測定範囲内のある Q^2 以上の領域にこれ以上の統計的有意性をもった超過が見られる確率は 6.0% であった。また、x の決定精度が高くスカラー粒子が生成された場合に超過の有意度の大きい、高い y の部分 ($y > 0.25$) を選択し、x の関数として標準模型の予測と比較したのが図6である。これも低い x の領域では、予測と実験データはよい一致を示しているが、高い x の領域に超過が見られ、$x > 0.55$ かつ $y > 0.25$ の領域に 4 事象が観測されている。この部分の期待値は 0.91 ± 0.08 事

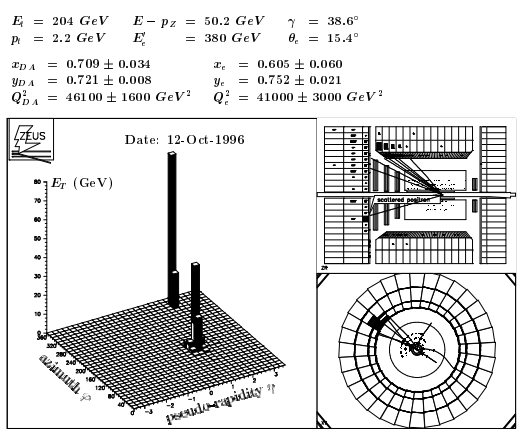

図 4. ZEUS における Q^2 のもっとも高い中性カレント事象

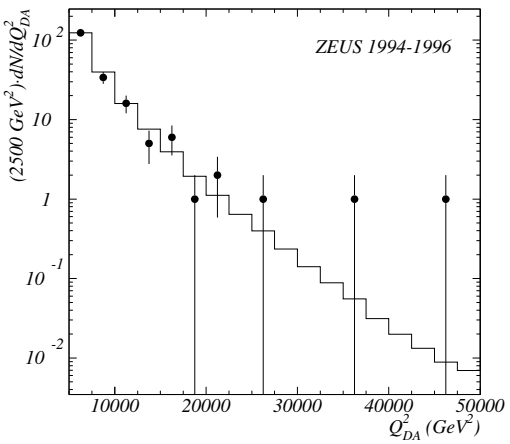

図 5. ZEUS における中性カレントの Q^2 分布。点は測定結果、誤差は統計および系統誤差の和、実線は標準模型の予想。

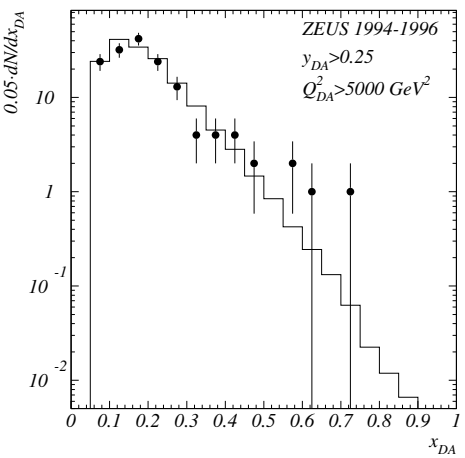

図 6. ZEUS における中性カレントの x 分布 ($Q^2 > 5000\,\mathrm{GeV}^2$,$y > 0.25$)。記号は前図に同じ。

象である。多数の標準模型実験集合から、これ以上の統計的ずれが見られる確率を x と y の 2 次元平面上の分布を用いて評価したところ、0.72% を得た。一方、$x > 0.55$、$y > 0.25$ を除いた領域での確率は 50.2% で、標準模型とのよい合致を示した。

4. H1 実験の結果

さて一方H1実験の結果はいかなるものであろうか。図7は、中性カレント ($Q^2 > 2500\,\mathrm{GeV}^2$) の事象分布を $M - y$ 平面で見たものである。H1 は x のかわりに $M = \sqrt{xs}$ を用いている。H1 の積算ルミノシティは $14.2\,\mathrm{pb}^{-1}$ である。ZEUS と同様 M および y の高い領域に多くの事象が見られる。ここで、前述の理由で高い y の部分 ($y > 0.2, 0.4$) を選択すると (図 8)、$M = 200\,\mathrm{GeV}$($x = 0.44$ に相当) の付近に超過があり、$y > 0.4$ のとき、$M = 200\,\mathrm{GeV}$ を中心として $25\,\mathrm{GeV}$ の範囲内に 7 事象が観測された。この領域での期待値は 0.95 ± 0.18 である。この測定以上の統計的有意性をもった超過が標準模型実験で $80 < M < 250\,\mathrm{GeV}$ のどこかの $25\,\mathrm{GeV}$ の範囲内に見られる確率は 1% であった。また、Q^2 の分布は、$Q^2 < 15000\,\mathrm{GeV}^2$ では標準模型とよく一致しているが、高い部分には超過があり (図 9)。$Q^2 > 15000\,\mathrm{GeV}^2$ において期待値 4.71 ± 0.76 事象に対して 12 事象を観測した。この領域でこのような超過のある確率をポアソン分布を用いて計算すると、0.6% であった。同じ Q^2 の領域を荷電カレント事象について見た場合には、期待値 1.77 ± 0.87 に対して 4 事象を観測した。

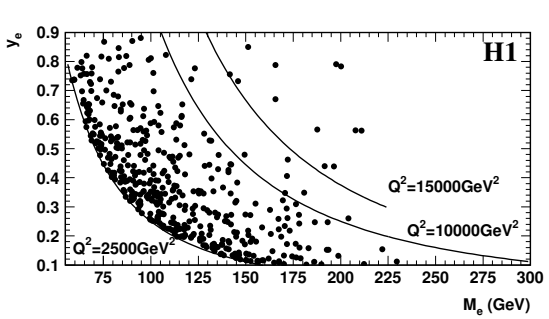

図 7. H1 における中性カレント事象 ($Q^2 > 2500\,\mathrm{GeV}^2$) の $M - y$ 分布

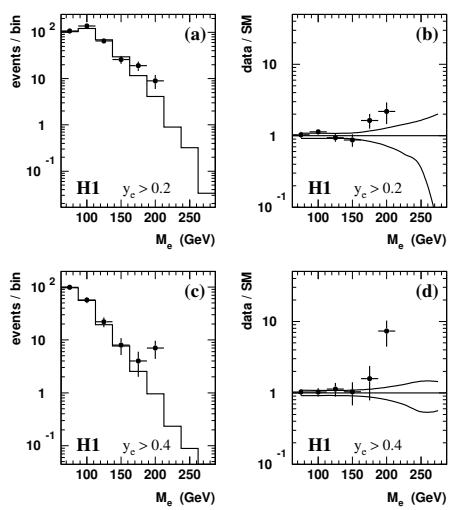

図 8. H1 における中性カレントの M 分布 (上段:$y > 0.2$, 下段:$y > 0.4$)。(a) および (c) は標準模型（実線）との事象数の比較、(b) および (d) は、標準模型に対する測定結果の比 (1 をはさんで上下の曲線は、標準模型の予想の 1σ の統計および系統誤差の和を表す)

5. データの解釈

こうして 2 つの実験ともに高い x、Q^2 の部分で超過があったわけだが、その理由は何であろうか。第一は、標準模型内での他の過程からの寄与である。圧倒的に断面積が高い $Q^2 \approx 0$ の光生成反応で、例えば 2 ジェット生成のうち一つを電子と見誤る場合、あるいは Prompt-Photon 反応（終状態が光子とジェット）で光子を電子と見誤る場合はバックグランドになりうるが、どちらの実験も多量のモンテカルロ事象を作って調べた結果、最終サンプルに残る数は無視できるとしている。また、W や Z ボゾンの生成崩壊、あるいは 2 光子反応で高い質量のレプトン対ができる場合に高い横運動量を持つ電子が観測されるが、これらも断面積が小さいのでデータに入ってくる割合は無視できるという結論である。

第二は、中性カレントの散乱断面積の予言の不定性である。この領域のパートン分布関数は当然今までに測定はないので、低い Q^2 での実験から Altarelli-Parisi 方程式を用いて外挿するわけである。この計算の不定性は、実験値の誤差の伝幡、ストレンジクォークやチャームクォークの不定性、α_s の不定性等を考慮しても 5-10% 程度である。CDF で観測された高いエネルギーのジェット生成の超過を説明するために、高い x でのグルーオンを増やしたパートン分布 (CTEQ4HJ) が最近提唱されたが、我々の測定はクォーク (特に u クォーク) 分布に最も敏感なので、これも影響は 5% 以下である。当然我々の測定器の誤差も考慮しているが、エネルギー測定スケール、位置決定精度の不定性を見積っても事象の期待値の変化は 6% 以下である。また、電子の初期状態で大きな輻射があった場合、x や Q^2 の測定は真の値と異ってくるが、中性カレントの場合は電子法と二角法の両者でお互いチェックすることができるので輻射補正からの寄与の不定性も少ない。これらすべてを考慮しても、事象数の期待値の不定性は ZEUS の場合 9% としている。

これらの説明ができないとなると、考えられるのは統計のふらつきか標準模型を超えた現象かのどちらかになる。電子– クォーク間

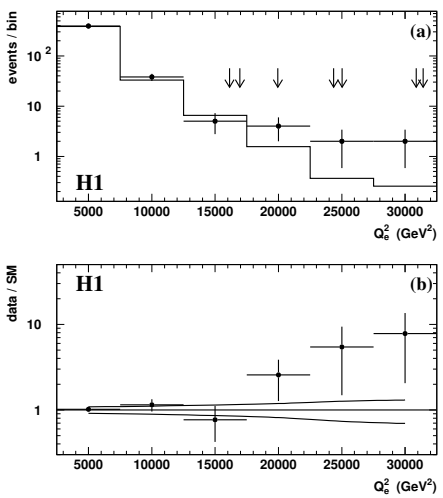

図 9. H1 における中性カレントの Q^2 分布 (矢印は $Q^2 > 15000\,\mathrm{GeV}^2$, $M > 180\,\mathrm{GeV}$ の事象の分布、他の記号は前図に同じ)

	H1		ZEUS		H1 + ZEUS		
	e method $y < 0.9$ $\Theta_e > 10^o$		2α method $E_e > 20$ GeV ($P_{T,e} > 30$ GeV for $\Theta_e < 17^o$)				
Q^2 cut	data	NC exp.	data	NC exp.	data	NC exp.	P($N \geq N_{obs}$)
$Q^2 > 10000$ GeV^2	20	18.3 $\pm$ 2.4	33	32.2 $\pm$ 2.0	53	50.5 $\pm$ 3.1	0.37
$Q^2 > 15000$ GeV^2	12	4.71 $\pm$ 0.76	12	8.66 $\pm$ 0.66	24	13.4 $\pm$ 1.0	0.0074
$Q^2 > 20000$ GeV^2	5	1.32 $\pm$ 0.27	5	2.76 $\pm$0.24	10	4.08 $\pm$ 0.36	0.010
$Q^2 > 25000$ GeV^2	3	0.51 $\pm$ 0.16	3	1.01 $\pm$0.09	6	1.52 $\pm$ 0.18	0.0053
$Q^2 > 30000$ GeV^2	2	0.23 $\pm$ 0.05	2	0.37 $\pm$0.04	4	0.60 $\pm$ 0.06	0.0035
$Q^2 > 35000$ GeV^2	0	0.08 $\pm$ 0.04	2	0.15 $\pm$0.01	2	0.23 $\pm$ 0.04	0.023

表 1
両実験におけるある Q^2 以上での中性カレントの事象数と期待値の比較。"e method" は電子法、"2α method" は二角法を表す。

でなんらかの束縛状態が存在し、その質量が HERA の $\sqrt{s}$ 以下であれば、それは $x(M)$ 分布にピークを作る。レプトクォークはテクニカラーなどの拡張理論で予言されていたが、大統一理論の枠内での可能性も論じられている [3]。超対称性理論でも、$R-$ パリティが破られていると電子 $-$ クォークからスクォークの単一生成が可能である [4]。では、データはそのように見えるだろうか? H1 のデータは $y > 0.4$ の領域で $M = 200\,\mathrm{GeV}$ 付近に事象が集中している。ZEUS のデータにはその付近 ($x = 0.44$) に事象の集中はなく、もっと高い x に事象がある。両者を合わせたデータはある一つの共鳴状態を支持しているとはいい難い (この領域での x の測定精度はどちらの実験もおよそ 7%) が、はっきりした結論を出すにはやはり統計がもっと必要である。

また、HERA のエネルギーより高い質量の物理があるときでも $t-$ チャネル交換を通して断面積が増えることに注意されたい。この場合はピークは現れず、高い Q^2 になるほど標準模型からずれてくる。表 1 は 2 つの実験のデータを同じ Q^2 の領域で比べたものである。$Q^2 < 15000\,\mathrm{GeV}^2$ ではどちらも標準模型と一致しているが、それより高い Q^2 ではどちらも標準模型より多くの事象を得ている。この意味で両実験のデータはお互い矛盾してはいない。

6. おわりに

1997 年の HERA の運転が 3 月から始まった。今回は短いシャットダウンでリングに大きな変更はなかったため、立ち上がりは順調に行っているようである。今年は 11 月まで長い物理運転になり、現在手持ちのデータ量を倍以上にできるはずである。そのあと陽電子でなく電子で走るための長いシャットダウンに入る。このような事象が次々と出てくるのか、それとも統計の悪戯で終わってしまうのか、実験チームも特に張り切ってデータを取り始めた。

最後になりましたが、ZEUS 日本グループ（東大核研、都立大、明治学院大）の共同研究者に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

[1] ZEUS: DESY 97-25.

[2] H1: DESY 97-24.

[3] 例えば H. Murayama and T. Yanagida, Mod.Phys.Lett. A7(1992)147 など.

[4] 例えば T. Kon, T. Kobayashi and S. Kitamura, Phys.Lett.B333(1994)263 など.