

第2章 HERA の 実験結果とその理論的可能性

I. HERA

DESYにある電子（陽電子）・陽子衝突型加速器は英語名をHadron-Electron-Ring-Acceleratorといい、その頭文字をとって通称「HERA」と呼ばれている。現在、入射する

電子（陽電子）のエネルギー=27.5 GeV（光速の99.9999%）

陽子のエネルギー=820 GeV（光速の99.94%）

で正面衝突させている。ちなみに、電子の質量 (m_e) は、 0.511×10^{-3} GeV、陽子の質量 (M_p) は、0.938 GeVである。この衝突により、正味300 GeVのエネルギーが供給されて、陽子は木っ端みじんに破壊され、幾多の粒子が生成される。その中に、未発見の新粒子がないかを調べる事になる。実際には、新粒子自身は観測にかかるより速く既知の素粒子に壊れてしまい、なかなか新粒子自身を捕獲することはできず、その痕跡を残留粒子から探ることになる。そのため既知の素粒子による現象を詳しく解析し、それらを同定する作業が必要となる。もし、既知の素粒子による現象でないとすると、余分な事例となり、新粒子の生成の影響は、衝突による事例数の増加として現れる。

以下の議論に使う幾つかのパラメータを図2-1とともに定義する。このパラメーターの物理的意味を明らかにするため、陽子の静止系に移って考えてみる。陽子の静止系では

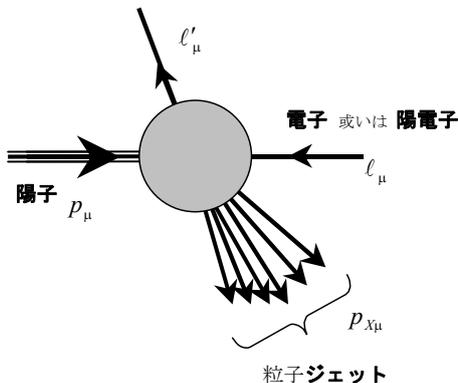
$$p^\mu = (M_p, 0, 0, 0)$$

電子（陽電子）が x 軸正の方向に加速されて陽子に衝突するとき

$$\ell^\mu = (E_e, \vec{p}_e) \text{ with } E_e = \sqrt{\vec{p}_e^2 + m_e^2} \text{ and } \vec{p}_e = (p_e, 0, 0)$$

電子 或いは 陽電子 : 中性電流相互作用

電子ニュートリノ 或いは 反電子ニュートリノ : 荷電電流相互作用



衝突後の電子のエネルギーを E'_e 、運動量を \vec{p}' とすると、

$$\ell'^\mu = (E'_e, \vec{p}'_e)$$

である。これらを x, y の表式に代入すれば、

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{Q^2}{2M_p v} \\ y &= \frac{v}{E_e} \end{aligned} \right\} \text{ with } v = E_e - E'_e$$

$$\begin{aligned} \ell + p &= \ell' + p_X \\ Q^2 &= -(\ell - \ell')^2 \\ s &= (\ell + p)^2 \\ x &= \frac{Q^2}{2p(\ell - \ell')} \\ y &= \frac{p(\ell - \ell')}{p\ell} \end{aligned}$$

変数の定義

図2-1 : 散乱の4次元運動量

を得る。一方、

$$p_x^2 = (\ell - \ell' + p)^2 = -Q^2 + 2p(\ell - \ell') + M_p^2 > M_p^2 \Rightarrow 2M_p v > Q^2$$

なので、 $x < 1$ 。散乱電子の散乱角を θ_e とすると

$$Q^2 = -(\ell - \ell')^2 = 2(E_e E_e' - |\vec{p}_e \parallel \vec{p}_e'| \cos \theta_e - m_e^2)$$

これは、 m_e の関数として $m_e > 0$ で常に正であるので、 $Q^2 > 0 \Rightarrow x > 0$ 。さらに、粒子ジェットのエネルギーを E_x とすると

$$E_x = v + M_p > M_p \Rightarrow v > 0$$

なので、 $0 < y$ 。また、 $v < E_e \Rightarrow y < 1$ 。以上から

- 1) $0 < x < 1$: 電子から陽子に渡る4次元エネルギーの大きさを示している
- 2) $0 < y < 1$: 電子から陽子に渡るエネルギーの大きさを示している

ことがわかる。

II. 陽電子・陽子散乱における現象

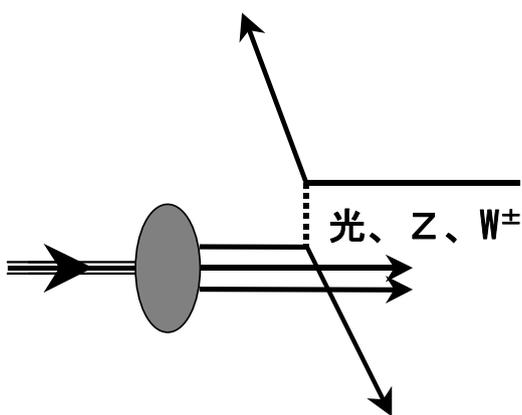


図 2-2 : 標準理論での散乱

電子（陽電子）－陽子衝突の典型的な現象としては、高エネルギーの電子／電子ニュートリノ（陽電子／反電子ニュートリノ）が飛び出してきて、その反対方向にこれも高エネルギーの粒子流（ジェット）が噴流する反応である。電子（陽電子）が入射して電子（陽電子）が飛び出す反応の相互作用を中性電流相互作用という。また、電子（陽電子）が入射して電子ニュートリノ（反電子ニュートリノ）が

飛び出す場合を荷電電流相互作用という。標準模型では電子（陽電子）が光やZボソンをクォークとやり取りすると中性電流相互作用が、電子（陽電子）がW[±]ボソンをクォークとやり取りすると荷電電流相互作用があらわれる。

1997年の2月に、HERAの2つの実験グループ、H1とZEUS、が陽電子－陽子衝突実験のデータを解析したところ、high- Q^2 ($Q^2 \geq 15000 \text{ GeV}^2$)において、陽電子が再び飛び出てくる事例数が標準模型からの予測値を超えていたことを見つけた [19, 20]。これは中性電流相互作用にて起こっており、典型的な衝突例を図 2-3 に示す。陽電子の飛跡と数本の粒子流（ジェット）の飛跡が記録されている。飛び出してきた陽電子のエネルギーは入射エネルギー

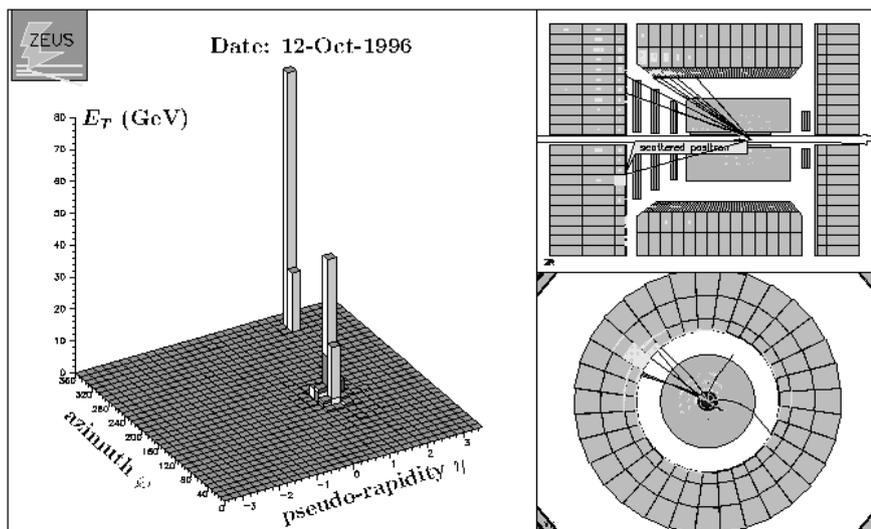


図 2-3 : 標準理論を超えたデータ例

ギーの 28.5 GeV をはるかに超えた 380 GeV である。このような現象が観測され、その事例数は 24 に対して標準模型では 13.4 ± 1.0 である。約 10 例程度が標準理論では説明できない衝突と思われる。 Q^2 の下限を大きくしていくにつれて表 2-1 のように標準模型からの予測事例数は小さくなって

H1+ZEUS reported on Feb. '97 $\mathcal{L}=34\text{pb}^{-1}$		
Q^2 (GeV ²)	観測数	標準理論予測数
15000~	24	13.4 ± 1.0
20000~	10	4.08 ± 0.36
25000~	6	1.52 ± 0.18
30000~	4	0.60 ± 0.06
35000~	2	0.23 ± 0.04

表 2-1 : Q^2 データ数の観測値と予測値

H1+ZEUS reported on July '97 $\mathcal{L}=57\text{pb}^{-1}$			
Q^2 (GeV ²)	観測数	散乱断面積 pb	
		観測	理論
15000~	24+12	$0.71^{+0.14}_{-0.12}$	0.49
20000~	10+4	$0.30^{+0.092}_{-0.076}$	0.161
25000~	6+1	$0.16^{+0.069}_{-0.053}$	0.059
30000~	4	$0.098^{+0.059}_{-0.042}$	0.023
35000~	2	$0.060^{+0.059}_{-0.037}$	0.0091
40000~	1	$0.032^{+0.044}_{-0.023}$	0.0036

表 2-2 : Q^2 データ数の観測値と予測値

いく。余分な約 10 例程度が実際の物理を反映していれば、標準理論を超えた「新しい物理」からのシグナルとして受け取ることができる。

1997 年の 2 月から半年ほど更に解析を続行した結果 [21]、表 2-2 のような増加を見た。解析されたデータ量は約 1.7 倍になり、観測された事例数は $Q^2 \geq 15000 \text{ GeV}^2$ で $24 \rightarrow 36$ になり 1.5 倍である。「新しい物理」からのシグナルをより顕著にし、シグナルが優位に残り標準模型からの寄与が少なくなるように解析条件を (x, y) に課す。H1 では $(M_e = \sqrt{sx}, y)$ を (陽子の入射エネルギー、陽電子の入射・散乱後のエネルギー、陽電子の散乱角) で表わし [19]、ZEUS は (x, y) を (陽子の入射エネルギー、陽電子の入射エネルギー、

陽電子の散乱角、ジェットの散乱角) で表わす [20] ことで数値を得た。その結果、表 2-3 のように。どちらのグループも標準理論の予測数が 1.5 程度になった。この解析条件がどのような事例を選ぶようになっているかを調べてみる。H1 の条件を例にする。条件：

	解析条件	観測数	標準理論予測数
H1	$187.5 \text{ GeV} \leq M_e \leq 212.5 \text{ GeV}$ $y > 0.4$	7+1	1.53 ± 0.29
ZEUS	$x > 0.55$ 、 $y > 0.25$	4+1	1.51 ± 0.13

表 2-3 : 解析条件付きの観測値と予測値

$187.5 \text{ GeV} \leq M_e \leq 212.5 \text{ GeV}$ は陽電子と散乱クォークのサブシステムの全エネルギーを表わしている。これが大きい事

yの値と陽電子散乱角

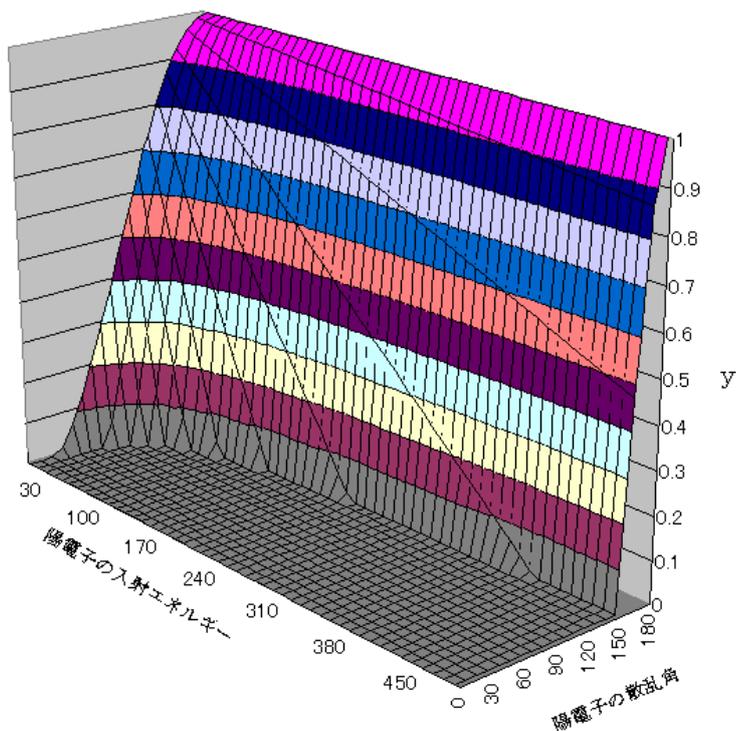


図 2-4 : 変数 y と陽電子の散乱角の関連性

例を選ぶように設定されている。つまり、陽電子と散乱クォークの重い“共鳴”状態があれば浮きだってくる。もうひとつの条件： $y > 0.4$ の影響を調べるためにグラフ化してみる。 y を (E_e, E'_e, θ_e) で表わすと、簡単な計算後

$$y = 1 - \frac{E'_e}{2E_e}(1 + \cos\theta_e)$$

を得る。これを図示すると図 2-4 のようになる。これから、大まかに 90 度以上の散乱角で陽電子がはじき出ばされていることがわかる。即ち、H1 の解析条件は

- 1) 重い“共鳴”状態
- 2) 大角度散乱

H1+ZEUS reported on July '97 $\mathcal{L}=57\text{pb}^{-1}$		
Q^2 (GeV ²)	観測数	標準理論予測数
10000~	28	17.7 ± 4.3
15000~	11	4.9 ± 1.6
20000~	5	1.7 ± 0.7
30000~	1	0.003 ± 0.004

表 2-4 : Q^2 データ数の観測値と予測値

の選別である。HERAの解析条件も同様の条件になる。2) は新粒子・新物理を発見する際の定番であり、原子内に芯としての原子核を見つけたラザフォードの実験もその一例である。最終的に表 2-3 のように、新現象の事例候補は約 10 例なる。7月

δ表されたデータには、電子-陽子衝突での事例が含まれている。それを表 2-4 に示しておく。これは荷電電流相互作用にて起こっており、high- Q^2 ($Q^2 \geq 15000 \text{ GeV}^2$)において 28 例観測されている。中性電流相互作用では 36 例であった。この場合も、約 10 例くらいが新現象の事例候補である。中性電流相互作用の散乱断面積は実験により測定されており、これを図 2-5 に示しておく。標準理論からのずれの様子がわかる。

Combined H1 and ZEUS Cross Sections for $Q^2 > Q_{min}^2$

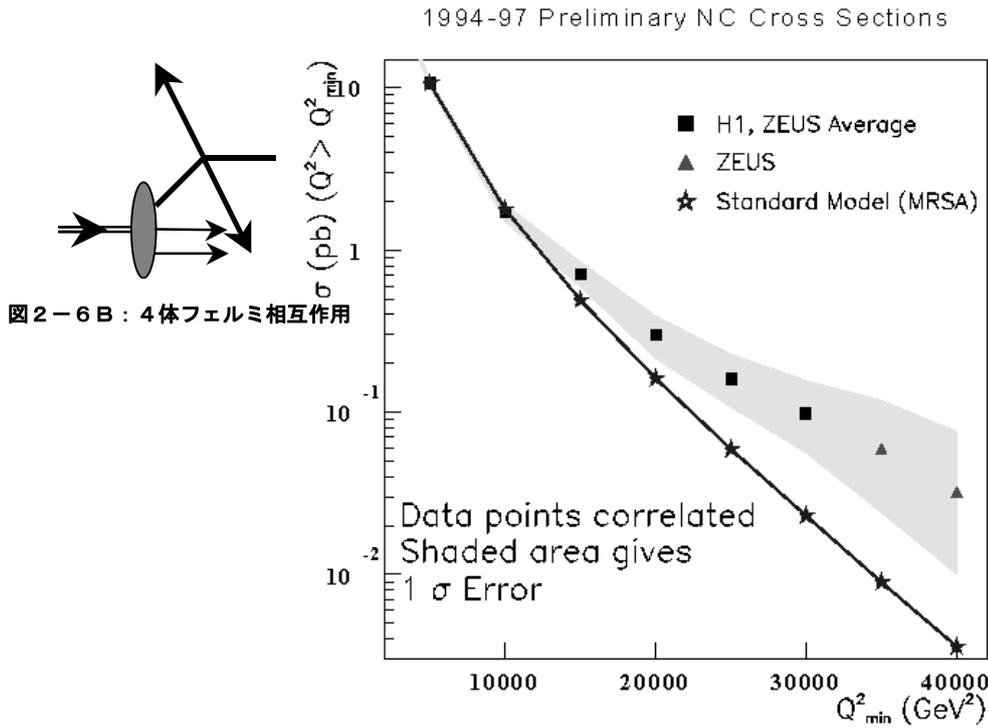


図2-6B: 4体フェルミ相互作用

図2-5: 散乱断面積: 標準理論の予測と観測値

III. 新しい物理への示唆

本稿では、HERAの実験結果として報告された標準理論では説明できないと思われる事例が新しい物理を示唆しているとみなしその物理を探っていく。標準模型では、 t -チャンネルに「光子、Zボソン」あるいは「 W^\pm ボソン」を交換して相互作用する。新しい物理では、それ以外の寄与を仮定して、余分な10例程度の事例数を引き起こさせる。幾つかを、簡単な説明と共に、列挙しておく。

A. t -チャンネルへの新しい寄与 [22]

それは「 W'^\pm 、 Z' ボソンボソン」として知られている余分な弱ボゾン交換による相互作用である。

B. 4体フェルミ型相互作用 [23]

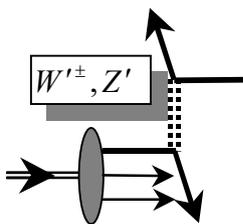


図2-6A: W'^\pm 、 Z'

W'^\pm 、 Z' の質量が大きいときには、有効4体フェルミ型相互作用になる。この有効4体フェルミ型相互作用は、クォークや陽電子が複合粒子であるとき、その広がり重なりによる結果としての相互作用を記述する際にもよく用いられる [24]。

C. s-チャンネルへの新しい寄与 [25, 26]

この場合、レプトクォークが存在すれば、その影響をうける。s-チャンネルの電荷は、 u -クォークと散乱を起こしていれば $5/3$ 、 d -クォークと散乱を起こしていれば $2/3$ 、 \bar{u} -クォークと散乱を起こしていれば $1/3$ 、 \bar{d} -クォークと散乱を起こしていれば $4/3$ 、のようになる。超対称性を持つ拡張された標準理論では、 $2/3$ の電荷を持つスカラークォークがこの場合に当たる [27]。また、クォーク・レプトンの複合模型でも、スペクトラムに自然とレプトクォーク [28] が現れ、電荷は、やはり $2/3$ である。

D. 励起電子や励起クォーク生成 [29]

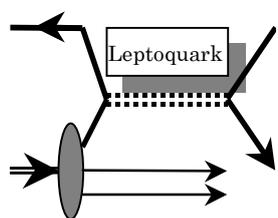


図2-6C: レプトクォーク

陽電子から未知のレプトン (E^+) に変化し、「 $E^+ \rightarrow e^+$ + その他」に引き続き崩壊したり、クォークから未知のクォーク (Q) に変化し、「 $Q \rightarrow q$ + その他」に引き続き崩壊。これは、クォーク・レプトンの複合模型から期待されている陽電子の励起状態 (e^{*+}) [30] やクォークの励起状態 (q^*) [31] がこの場合にあたる。

E. 陽子の“クォーク”密度の増加 [32]

陽子は uud と形成されており、 u や d のクォーク密度に比較してそれ以外のクォークや反クォークの密度はだいたい小さいことがわかっている。そこで、今回の

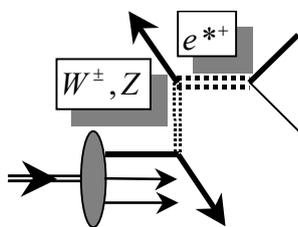


図2-6D: 励起電子

HERAでの実験結果は、新たに密度の小さい成分を決める役割をするとみなし解析すると、 c と \bar{c} が従来の結果から期待されるより大きいという結論を得る。

いずれもHERAでの実験結果を説明できるが、新しい効果はそれ以外の実験： e^+e^- 衝突や $p\bar{p}$ 衝突等にも影響を及ぼす。特に、 Z ボゾン生成に伴う実験結果と標準理論からの予測の驚くべき一致を損なう影響を与えてなら

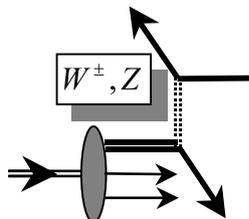


図2-6E: クォーク密度増加

ない。その意味で、E. 陽子の“クォーク”密度の増加は、あまり好ましくないとされている [33]。