

HERA-II : 高輝度化の歩みと物理

KEK 素粒子原子核研究所

山崎 祐司 yuji.yamazaki@kek.jp

長野 邦浩 kunihiro.nagano@kek.jp

2005 年 (平成 17 年) 9 月 2 日

1 はじめに

ドイツ・ハンブルク市の DESY 研究所の HERA 加速器は、世界で初めて、かつ現在まで唯一の電子・陽子衝突型加速器で、電子、陽子ビームのエネルギーはそれぞれ 27.5 GeV、920 GeV である。衝突実験は H1、ZEUS の二つで、日本グループは測定器建設の段階から ZEUS 実験に参加している。実験は 1992 年に開始し、2000 年夏までに各実験約 120 pb^{-1} のデータを取得した。2000 年秋から 2001 年秋にかけて高輝度化に向けた改造を行い、HERA-II として運転を始めた。この記事では、HERA-II のこれまでの経過、物理の成果、今後の展望についてまとめる。

2 HERA-II 高輝度化改造の概要

HERA-II の高輝度化 [1] は、貯蔵リングの電流をほとんど増やさずに、ビームを衝突点付近で絞る手法を用いている。このため、衝突点付近に絞り込み用(いわゆるミニベータ)の磁石を設置した。図 1 に衝突点付近のビームラインを示す。HERA では質量も運動量も異なる粒子を衝突させるため、各ビーム専用の絞り込み用磁石が必要である。このため、電子と陽子のビームを衝突点のできるだけ近くで分離する。HERA-II では分岐点を衝突点に近づけるため、衝突点から 2-3m 離れた位置に双極、四重極、六重極の役割を併せ持つ超伝導磁石を置いた。既存の検出器と干渉しないよう、磁石の外半径を約 9cm に抑えた(図 1 の GO、GG 磁石)。他の磁石と組み合わせ、約 10m の位置で陽子、電子ビームを別のビームパイプに導いている(高輝度改造以前の HERA-I では約 20m)。電子は改造前より小さい半径で曲げられるため、衝突点付近からのシンクロトロン放射は約 20kW に増す。これを多数のマスクで遮蔽し、検出器などの損傷を防いでいる。また、電子ビームの下流 10m のビームパイプの分岐点に置かれた銅製の放射光吸収板(図 1 で GJ 磁石の右側に置

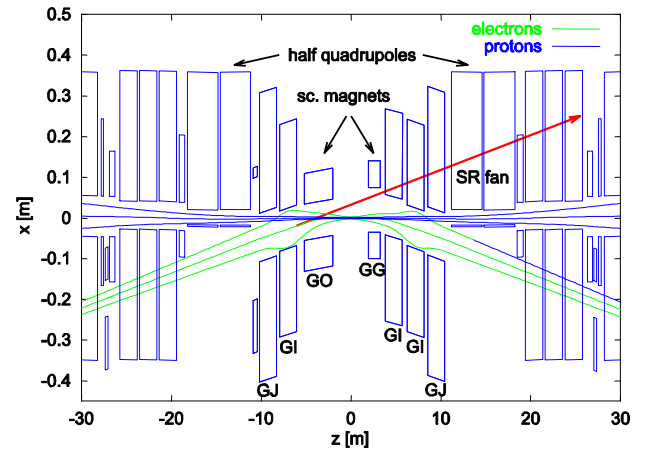


図 1: 高輝度化改造後の検出器付近のレイアウトと両ビームのエンベロップ。“SR fan” はシンクロトロン放射の最も外側の方向を表す。

かれている)は、形状やコーティングを工夫して反射を小さく抑えている。

これらの改良により、ビーム電流あたりのルミノシティは $L_{\text{spec}} = 1.6(0.7) \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ (かっこ内は改造前)に増加し、さらに若干のビーム電流の増加(電子 58mA、陽子 135mA)により改造前の 4-5 倍のルミノシティ、すなわち $L_{\text{inst}} = 7 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ を予定している。現在 L_{spec} は $1.8 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ 以上で目標を達成しているが、ビーム電流が HERA-I と同じ水準(電子 45mA、陽子 100mA)にとどまっているため、最大ルミノシティは約 $5 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ である。

HERA-II のもう一つの目玉は衝突実験に対する電子ビームの縦偏極である。これまで HERA の電子ビームを用いた固定標の実験の HERMES には縦偏極ビームが供給されてきた。高輝度改造と同時に衝突実験にもスピローターが設置され、陽子と縦偏極した電子または陽電子との衝突が可能となった。HERA-II での理論的

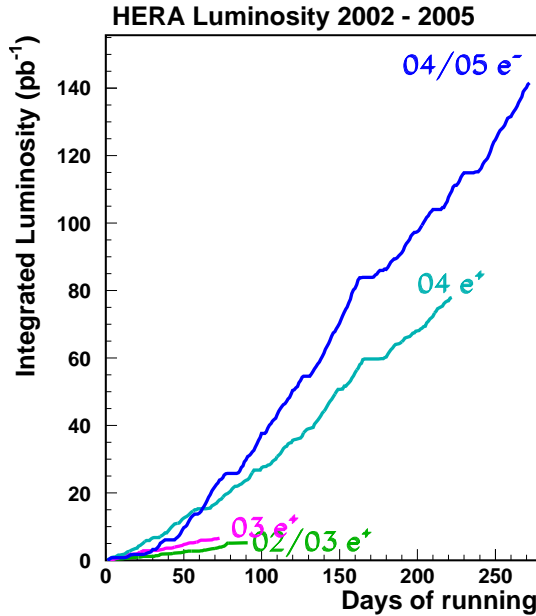


図 2: HERA-II のランごとの積算ルミノシティ(2005 年 8 月 30 日時点)。

な最大偏極度は約 55% で、現在ほぼこれを達成している。これについては後に詳しく述べる。

3 HERA-II の立ち上げ

実際には前章で述べたようなルミノシティや偏極度を得るまでには紆余曲折があった。図 2 に年毎の積算ルミノシティを示す。これが示すとおり、2002-2003 年初頭までの運転期間では積算ルミノシティが小さい。これは、加速器運転に伴う測定器へのバックグラウンドが非常に大きく、電流を上げられなかったからである。

HERA-II でのバックグラウンドは以下の三つに大別される。

- 電子ビームからのシンクロトロン放射
衝突点近傍で増加した放射光が特にガスを用いた飛跡検出器に直接、あるいは反射して入射すると、検出器に飛跡と関係のないヒットなどが増加してパターン認識に問題を起こすだけでなく、暗電流が増加して検出器の寿命を短くする。また他の検出器にも放射線損傷を与える。
- 電子ビームからのバックグラウンド
電子が加速器中の残留ガス、コリメータなどと散乱して運動量を失い、加速器中の磁場で曲げられて検出器に入り込むと、飛跡検出器の暗電流だけでなく電子・陽子散乱からの電子との弁別も問題になる。

- 陽子ビームからのバックグラウンド
陽子が残留ガスやコリメータと陽子・イオン散乱を起こし、多数のハドロン粒子が発生して飛跡検出器およびカロリメータに大量のヒットを残すため、事象あたりの暗電流に対する影響が大きく、また電子・陽子散乱との区別が難しいことが多い。

これらのバックグラウンドは、改造前には陽子ビーム以外のはコリメータを適切に配置することによりほとんど問題にならなかった。陽子ビームからのバックグラウンドは主に残留ガスの真空度によって決まる。ビームパイプ中の真空度は、真空容器のコンダクタンスやポンプの排気量に加え、内壁から放出されるガス分子の量にも左右される。放出ガス量は温度が上昇したり放射光が内壁に当たると飛躍的に増える。つまり、真空度のうち電子ビームの電流の関数となる部分 (dynamic vacuum) が主な割合を占める。安定した加速器運転が続き、放射光などが物質に吸着した残留ガスを出し切ると、dynamic vacuum が改善し (ベーキング効果) 陽子バックグラウンドは減少すると理解されていた。

さて、2001 年 11 月に HERA-II の運転を始めたところ、上記の三つからのバックグラウンドが HERA-I に比べてはるかに高いことがわかった。最初の問題は電子ビームから直接検出器に入り込むシンクロトロン放射であった。しかし、電子ビームのコリメータを調整し直接の放射光を遮蔽した後でも、依然として飛跡検出器の暗電流が高かった。調べてみると、電子ビームバックグラウンドの寄与は少ないものの、依然シンクロトロン放射からの寄与が大きく、また陽子からのバックグラウンドも同程度の影響を暗電流に及ぼしていることがわかった。これが電子の電流を最大 20mA、陽子を 40mA 程度に制限し、高輝度化の目標の達成が危ぶまれた。

そこで、加速器グループと実験チーム共同のタスクフォースを設置し、原因の究明が行われた。翌年 7 月には KEK の宇野氏をはじめとする B-factory などでのバックグラウンド対策の専門家を招いて評価委員会を開催し、貴重な助言を得ることができた。その後も理解に努めた結果、以下のような成果を得た [2, 3]。

シンクロトロン放射

放射光が検出器に入り込んでいる理由を放射の到達時間を用いて調べたところ (図 3)、電子ビーム下流 10m の吸収板から反射した放射光が完全には遮蔽されていないことが判明した。この問題はマスクの配置が若干異なる H1 実験では比較的軽微であったが、ZEUS 実験では暗電流の半分程度を占めるほど大きなものであった。反射の遮蔽には複数のマスクを用いてカバーしている。その状況

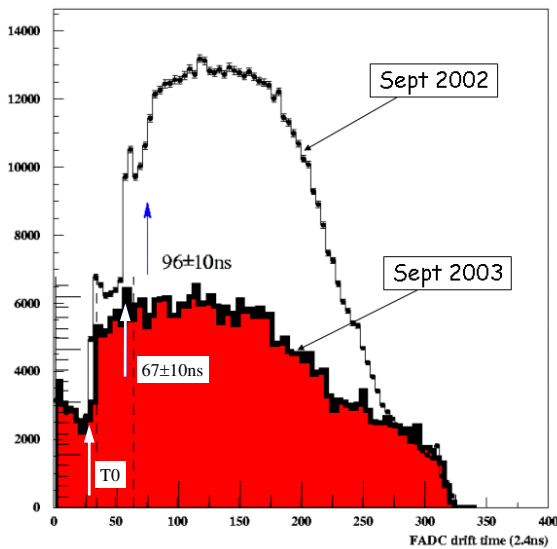


図 3: CTD バックグラウンドの到達時間。2002 年ではビームのタイミング (T0) に比べて 67ns 以上遅れて観測される寄与が大きく、電子下流 11m などの放射光吸収板からの反射と考えられる。2003 年 (灰色) ではこの寄与がなくなった。

を詳細なモンテカルロシミュレーションで検証したところ、計画段階では反射光の経路の一部に考え落としがあり、遮蔽の一部に隙間があることが判明した。ZEUS 実験は 2003 年夏に対策を施したマスクを設置した。秋に運転を再開したところ、反射した放射光がほぼ完璧に遮蔽されていることがわかり (図 3 灰色のヒストグラム)、問題は解決した。これにより、2003 年秋から電流値を上げる準備が整った。

陽子ビームからのバックグラウンド

電子の電流値を上げられるようになると、放射光が大量に吸収される場所、つまり陽子ビーム上流 10m の放射光吸収板付近での dynamic vacuum は、放射光によるベキング効果などで徐々に改善していった。2004 年前半には飛跡検出器の暗電流も運転可能な範囲に収まった (図 4)。一方、放射光を遮蔽している衝突点付近の真空度はなかなか改善せず、陽子バックグラウンドのうち 6 割以上が衝突点付近 ± 3m での残留ガスとの散乱から来ていることがわかった。2004 年中頃になると (図 4 の 14 Jun 2004) 真空度の改善が頭打ちになり、加速器の電流が増加していく中でトリガー頻度にバックグラウンドからの影響が出始めた。

主原因は衝突点に最も近いミニベータ用の超伝導磁石であった。これらは設置場所の制約から熱シールドが完

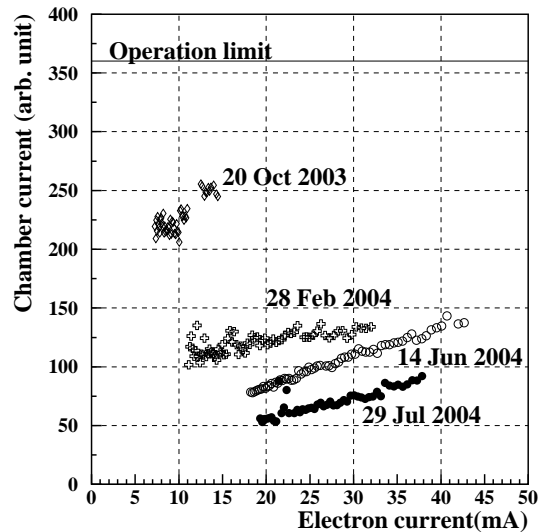


図 4: 陽子ビームバックグラウンドからの飛跡検出器に対する暗電流の推移。横軸は電子の電流。縦軸は陽子電流 100mA 当たりの暗電流値。100mA は定常運転の典型的陽子電流値である。

全でなく、ビームパイプの内壁が約 40K に冷えている。この表面には残留ガスが霜のように吸着し、最初は真空ポンプとして働く。しかし、吸着したガスの量がある程度多くなった後温度が上昇したり放射光が当たったりすると、霜が蒸発して再び真空を悪くする。この可能性は早くから指摘されており、表面の温度を窒素、酸素の沸点以上の温度 (110K) で運転してその影響を見るなどの実験が 2002 年に行われたが、その時点では効果が明確ではなかった。全体の真空度がまだ悪く効果が見えなかったと考えられる。2004 年 6 月に表面を常温に戻し、その状態で他のポンプによって真空度を上げた後にまた 40K に戻したところ、この「霜取り」が劇的な効果をあげた。陽子ビームからのバックグラウンドが 2/3 に減ったのである (図 4 で、14 Jun 2004 → 29 Jul 2004)。これ以降、2-3ヶ月ごとに 40K 表面の霜取りが行われ、検出器の暗電流、トリガー頻度ともにバックグラウンドを低い値に抑えることに成功している。

4 HERA 運転の推移と今後の予定

バックグラウンドが改善したことにより、HERA-II の本格的な運転が 2003 年秋から始まった。図 2 を見ると、2004 年の運転期間でルミノシティが急上昇していることがわかる。また、2004 年冬に陽電子から電子ビームに変更した後はさらに高いルミノシティが得られ、すでに

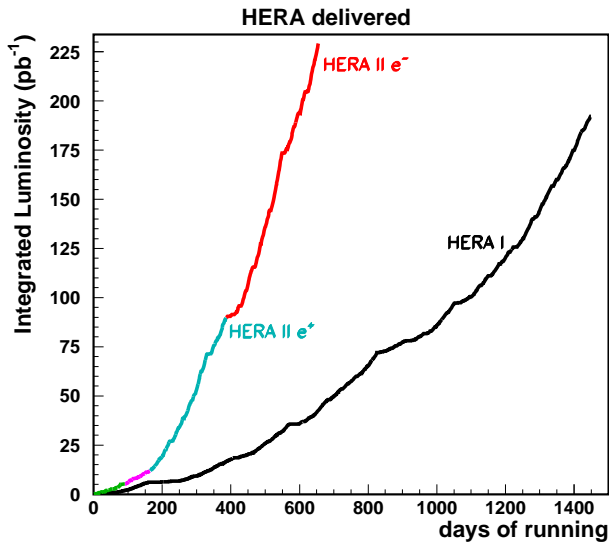


図 5: 2005 年 8 月 30 日時点での HERA-I との積算ルミノシティの比較。

HERA-II の積算ルミノシティは HERA-I を超えている (図 5 参照)。特に、2005 年 4、5 月には一日平均 1 pb^{-1} を超えるルミノシティを記録した週がいくつかあり、目標の年間 250 pb^{-1} に徐々に近づいている。

運転開始 15 年近くを経過した HERA にはさまざまな小故障があり、その都度運転が中断される。また、加速器運転のうち実験に使用可能なものは 8 割程度にとどまっているが、この理由も主に小故障でバックグラウンドが悪化するためである。こうした問題を加速器、実験グループが連携し迅速に解決することが残された課題である。

実験が取得した積算ルミノシティは、H1、ZEUS 間で若干異なるが、陽電子・陽子散乱が 55 pb^{-1} 、電子が 100 pb^{-1} である。合計は HERA-I の 120 pb^{-1} を超えた。特に、電子散乱では HERA-I の 20 pb^{-1} を圧倒的に上回っている。

今後は 2005–6 年冬の 12 週間のシャットダウンの後 2007 年 6 月まで運転を行い、HERA-II は終了する。このうち前半は電子ビーム、後半は陽電子ビームで走る予定である。

5 電子ビームの偏極

電子ビームは蓄積リング内を回っているうちに自然に横偏極してくる。これは Sokolov-Ternov 効果と呼ばれており、ビームを曲げる双極磁場中で電子がシンクロトロン放射を行う際、スピンの向きが磁場に並行なものと反並行なものとの間でスピンフリップする断面積が異なる

ため、平衡状態である最高偏極に向けて横偏極がゆるやかに大きくなっていく。実際の加速器では双極磁石ばかりでなく絞り込み用の四重極磁石などもあり、また、磁石の据付精度なども効いてスピンの歳差運動をしてしまう。このような偏極を減少させる作用と Sokolov-Ternov 効果による作用とが平衡して、実際に得られる最大偏極と平衡状態に達するまでの特性時間が決まる。HERA の場合、特性時間は約 30 分程度である。達成できる最大偏極度は HERA-I では約 70 % だったが HERA-II になってビームを絞り込むようになったことによりビーム・ビーム相互作用が増えて、55 % に低下した。

偏極度の向上を優先すると、ビームが周回ごとに加速器から同じ磁場を受けやすくなるため、軌道から外れた粒子にフィードバックがかかりにくくなり、ビームの品質が劣化しやすい。このビーム軌道の共鳴状態を避けながら偏極度を上げるには、ビームの組み合わせ (陽電子あるいは電子、偏極の右巻き、左巻き) を変えるたびに約一週間の加速器の精密なチューニングが必要である。たとえば、電子ビームに切り替えた 2005 年はルミノシティの向上と加速器の安定運用が最重要課題であったため、偏極度向上の優先度は低かった。しかし今年 7 月によやく右巻きビームのチューニングを行ったところ、ルミノシティを大きく損なうことなく最大 50 %、1 回のビーム入射の平均でも約 40 % の偏極度を得ることができた。まだすべてのビームの組み合わせでのチューニングは終わっておらず、これらをすべて網羅することが課題である。

偏極度を精度良く測定することは、HERA-II での電弱相互作用の研究において必須である。H1/ZEUS/HERMES 実験合同で偏極度を測定するプロジェクトが生まれ、日本グループもその重要な一部門を担当している。HERA には横偏極度を測定する TPOL (Transverse Polarimeter) と、スピンローテーターで縦偏極に変えられた後の縦偏極度を測定する LPOL (Longitudinal Polarimeter) の二つの独立した偏極度測定装置がある。どちらも円偏光レーザーを電子ビームに入射し、コンプトン散乱された光子を測定する (コンプトンポラリメータ)。電子が横偏極している場合には、レーザーの円偏光の左右で、散乱された光子の散乱角分布に非対称性が現われ、電子が縦偏極している場合には、散乱された光子のエネルギー分布に非対称性が現われる。

日本グループは TPOL に参加している。HERA-II への移行にともない、TPOL では位置検出器 (シリコンストリップとシンチレーションファイバー) のインストールと DAQ のアップグレードを行った。TPOL では角分布の非対称度を上下に分割したカロリメータのエネルギー非対称度から測定するが、その際の系統誤差を理解する

のが位置検出器の役割である。

HERA-II 開始直後のコミッショニングでは、LPOL と TPOL とで偏極度が 10%程度異なって問題となっていた (HERA-I では両測定は 2% 以内の一致)。解析が進むにつれ、TPOL では電子ビームの広がりの影響が大きく、HERA-II になって HERA-I より電子ビームの広がりが変わったためその分の補正が必要であることがわかった。モンテカルロで補正を導き、データに適用したところ LPOL と TPOL は 2%程度での一致をみた。

一方で、日本グループは従来の測定方法とはまったく異なった多変数フィットによる偏極度測定法を開発した。電子ビームの広がりやその中心位置といったビームに関連したパラメータや、検出器に関連したパラメータなどを変数として、偏極度ともども一括してフィットで求めるというものである。つまり、時間変動し得るビームに関連したパラメータへの依存を吸収して偏極度を求めようとする試みである。また、カロリメータの特性をパラメータ化するにあたり、HERA-II で新規導入された位置検出器による実測を利用して測定精度の向上も目指した。得られた偏極度は、これまでの解析手法に上記のビームの広がりによる補正を適用したものと非常によく一致し、補正の正当性も示すことができた。

6 HERA-II の物理

さて、若干遅れながら立ち上がった HERA-II ではあるが、物理解析は順調に行われており、2003 年 3 月には HERA-II 初の物理結果を暫定公表し、2005 年夏現在 HERA-II 初の論文を準備中である。また、並行して HERA-I データの解析も行われており、円熟した検出器の理解に根差した新たなアイデアに基づく解析も出てきている。これらの「改良された」物理解析により、より一層の高統計の得られる HERA-II への期待も高まっている。

以下では、まず HERA-I の重要な物理結果を概観した後 HERA-II における物理の課題を述べ、現在までに得られた HERA-II 最新の結果を紹介する。

6.1 概観

HERA の物理のうち最も直観的なものは深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering, DIS) による陽子構造の探索であろう。電子をプローブに陽子構造を見る巨大な電子顕微鏡と考えれば分かりやすく、電子から陽子への 4 元運動量移行 Q^2 は空間分解能に対応する ($\approx 1/\sqrt{Q^2}$)。HERA

の重心系エネルギー 320 GeV での運動学的最大の Q^2 は 100000 GeV² で、陽子の構造を 10^{-16} cm、陽子半径の 1/1000 でプローブすることになる。DIS の運動学的変数でもう一つ大事なものはビヨルケン x と呼ばれる変数である。これは実際に反応を起こした陽子内の点状構成粒子 (クォークとグルーオン、総称してパートンと呼ばれる) が持っていた運動量比である。陽子構造を理解するための解析の流れは以下の通りである。実験では散乱断面積を x と Q^2 、すなわち反応したパートンの運動量比とそれが見えたスケールとの関数として測定し、「構造関数」 $F_2(x, Q^2)$ 、 $F_3(x, Q^2)$ などを測定する。理論では、測定された「構造」から内部の点状粒子の分布の様子を引き出す。摂動論的量子色力学 (QCD) に基づくクォーク・パートン模型では陽子はパートンから構成され、構造関数は構成子である各パートンの密度分布関数に、散乱に関わった反応の coupling constant などを掛け合わせたものの和で表すことができる。この密度分布関数は Parton Distribution Function (PDF) と呼ばれる。たとえば電磁相互作用で陽子構造を探った場合の F_2 は:

$$F_2 = \sum_i e_i^2 x (q_i(x, Q^2) + \bar{q}_i(x, Q^2)) \quad (1)$$

と表される。ここで、 i はクォークフレーバーを表し、 e_i はクォーク i の電荷、 q_i はクォーク i の PDF、 \bar{q}_i は反クォーク i の PDF である。

HERA-I における主な物理結果の一つは、この陽子構造関数の精密測定であった。HERA と従来の固定標的型 DIS 実験結果も含めた広い領域で next-to-leading order (NLO) の摂動論的 QCD を検証することができ、 x にして $10^{-4} \lesssim x \lesssim 1$ の 4 桁、 Q^2 にして $1 \lesssim Q^2 \lesssim 10000$ GeV² の 4 桁にわたる広範囲の運動学的領域において、その枠内できれいに記述されることが示された。こうして摂動論的 QCD の正当性が確かめられたので、その枠組に基づいて実際の実験データにフィットすることによって PDF と α_s が求められた。求められた PDF の不定性には理論からの誤差だけでなく実験誤差が反映されることになるので高統計が必要となる。図 6 に、ZEUS 実験結果と固定標的型 DIS 実験結果にグローバルフィットして得られた PDF の分布の例を示す。各 PDF につけられた「幅」が、現在の PDF 測定の精度である。

さて、HERA-II における次の課題は何であろうか？ LHC 実験が間もなく始まることも視野に入れ、私的な見解で大まかに分けると以下の三種の重要な課題があると考える。

- 高い Q^2 での新相互作用の探索と陽子・縦偏極電子衝突による電弱相互作用の検証

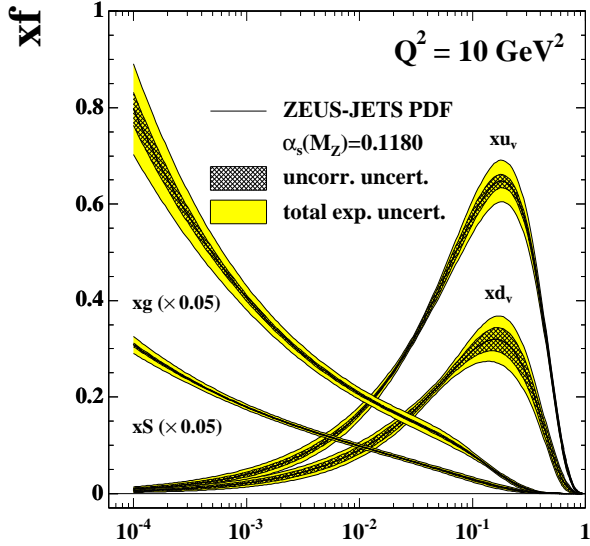


図 6: $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$ における PDF 分布を Bjorken x の関数として示す。 xu_v は価 u クォーク PDF、 xd_v は価 d クォーク PDF、 xg はグルーオン PDF、 xS は海クォーク PDF である。同一図に収めるため、グルーオンと海クォークは $1/20$ にして表示してある。

- PDF の包括的な理解
 - グルーオン分布と重いクォークの生成断面積
 - 高い x 領域
 - フレーバー分解
- 前方ジェット生成、多ジェット終状態

以下の章では各々の課題についてその物理的意義や現状・最新結果などを述べる。

6.2 高い Q^2 での新相互作用の探索と陽子・縦偏極電子衝突による電弱相互作用の検証

高い Q^2 では超短距離で電子とクォークが相互作用することになり、標準模型を越える物理が観測される可能性がある。また、観測されない場合でも、高い Q^2 において摂動論的 QCD、特に DGLAP 発展を詳細に検証することが非常に大切である。というのも、HERA で測定されたパートン分布関数を LHC で到達する超高 Q^2 領域まで DGLAP 方程式で外挿する正当性を精密に検証する必要があるからである。図 7 に、HERA および従来の固定標的型 DIS 実験、そして TEVATRON と LHC の運動学領域を (x, Q^2) 平面で示した。LHC の主な運動学領域は、 x では $10^{-4} \lesssim x \lesssim 10^{-1}$ と HERA とほぼ同じ

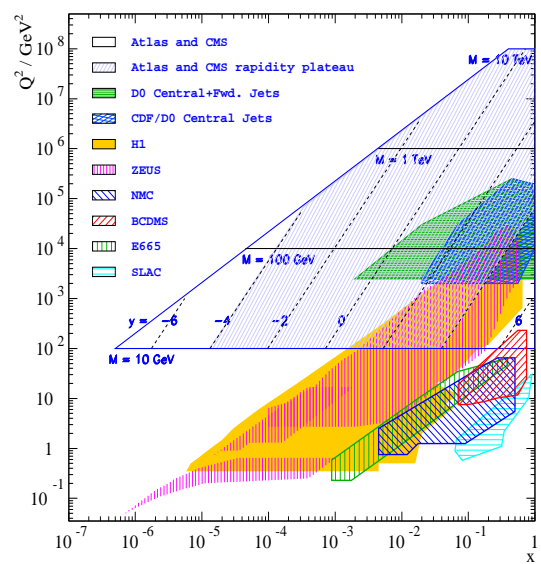


図 7: HERA および固定標的型 DIS 実験と TEVATRON、LHC の運動学的領域。横軸は Bjorken x 、縦軸は Q^2 である。LHC 運動学的領域は、質量 M の粒子がラピディティ y に生成される際の素過程パートンの運動学領域として示してある。

であり、 Q^2 では $10^4 \lesssim Q^2 \lesssim 10^8 \text{ GeV}^2$ と HERA の最大 Q^2 領域と一部重なっている。HERA-I での DIS 断面積測定では $Q^2 \gtrsim 10^3 \text{ GeV}^2$ でまだ統計誤差が系統誤差を上回っており(散乱断面積はプロパゲーター $1/Q^4$ で落ちる)、LHC 実験開始までに HERA-II の高統計で最大 Q^2 まで詳細に検証しておくことが肝要である。

HERA-II では世界で初めて陽子と縦偏極電子の高エネルギー衝突が実現した。高い Q^2 では電磁相互作用だけでなく電子と陽子の間に Z 、 W ボソンを交換する弱い相互作用の効果も入る。したがって、縦偏極電子ビームを用いることにより電弱相互作用の左右非対称性を直接に検証することが出来る。

荷電流 DIS 反応 $ep \rightarrow \nu X$ はニュートリノ散乱の逆反応であり、 W ボソンを交換する純粋な弱い相互作用である。標準模型では弱い相互作用は $V - A$ 型、パリティは最大に破れているので右巻き荷電流の寄与はゼロとなり、散乱断面積は電子の縦偏極度の一次関数として

$$\sigma_P(e^\pm p \rightarrow \nu X) = (1 \pm P)\sigma_0 \quad (2)$$

と書ける。 P は縦偏極度、 σ_P は縦偏極度 P の時の荷電流 DIS 断面積、 σ_0 は無偏極の時の荷電流 DIS 断面積である。

荷電流 DIS 散乱の電子の縦偏極度依存性をみる解析は HERA-II の「目玉」であり運転開始以来、重点的に行わ

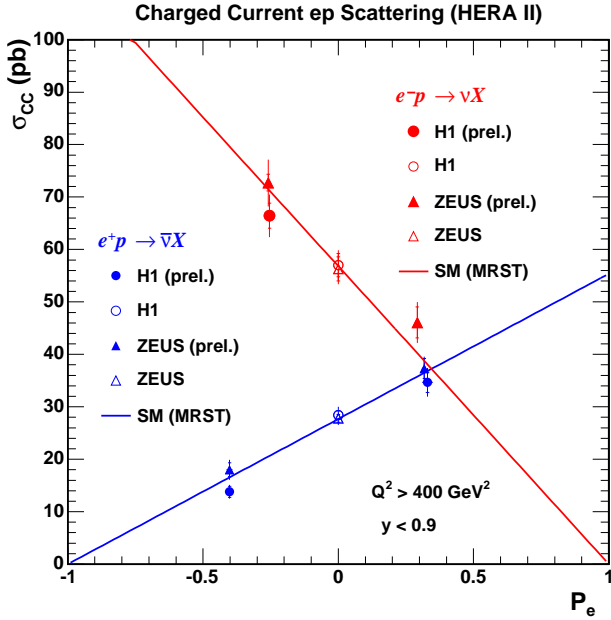


図 8: 荷電流散乱断面積の縦偏極度依存性の測定。横軸は縦偏極度、縦軸は散乱断面積である。電子・陽子、陽電子・陽子散乱について、各々、縦偏極が正、負のデータからの測定が示されている。

れた。2004年に陽電子・陽子衝突からの暫定結果を、2005年には電子・陽子衝突からの暫定結果をそれぞれ国際会議で発表した [4]。図 8 に測定された荷電流 DIS 断面積を縦偏極度の関数として示す。測定された断面積は、電子・陽子、陽電子・陽子、いずれも標準模型の予想のように縦偏極に対する線形依存性を示した。線形フィットの結果、右巻き荷電流による散乱断面積としてゼロと矛盾しない値： $0.2 \pm 1.8(stat.) \pm 1.6(syst.)$ pb が得られた(陽電子・陽子散乱データからの暫定値)。

中性流 DIS 反応 $ep \rightarrow eX$ の場合は荷電流と異なり、弱い相互作用の効果は大きな Q^2 のみに限られる。この領域では陽子構造関数 F_2 にはベクトル・ベクトル(VV)だけでなく軸性ベクトル・軸性ベクトル(AA)も含まれるようになり、またベクトル・軸性ベクトルとの干渉項(VA)から生じる F_3 構造関数の寄与が散乱断面積に現われてくる。 F_3 は電子・陽子散乱の場合と陽電子・陽子散乱の場合で散乱断面積に対して逆符号で寄与するので、差を取るにより取り出すことができる。詳しく書き下すと：

$$xF_3 = -(a_e \pm Pv_e)\kappa_Z xF_3^{\gamma Z} + [2v_e a_e \pm P(v_e^2 + a_e^2)]\kappa_Z^2 xF_3^Z \quad (3)$$

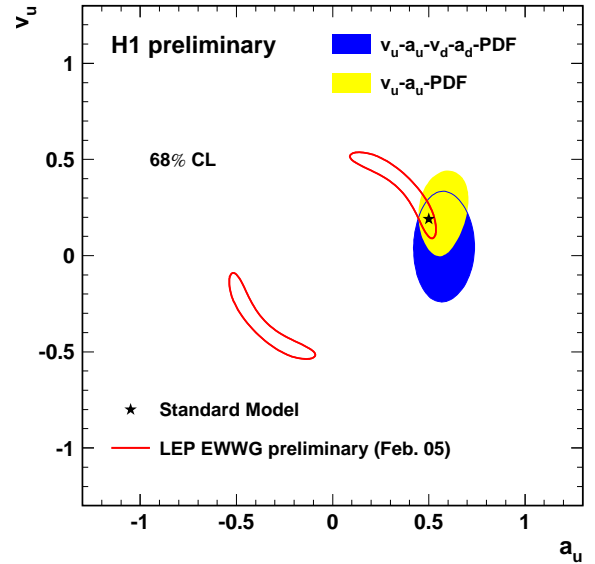


図 9: Z^0 に対する u クォーク結合定数の決定。 d クォーク結合定数を仮定したフィット (v_u - a_u -PDF) と d クォーク結合定数も求めたフィット (v_u - a_u - v_d - a_d -PDF) の結果を示す。

$$xF_3^{\gamma Z} = 2x \sum e_q a_q (q - \bar{q}), \quad (4)$$

$$xF_3^Z = 2x \sum v_q a_q (q - \bar{q}) \quad (5)$$

κ_z は運動学項 ($\kappa_z = \frac{Q^2}{Q^2 + M_Z^2} \frac{1}{4 \sin^2 \theta_W \cos^2 \theta_W}$)、 $v_q(v_e)$ と $a_q(a_e)$ はクォーク (電子) の Z^0 との結合定数である。縦偏極度 P の前の符号は、電子の場合と陽電子の場合とを表す(陽電子の場合が上)。 F_3 の特徴はクォーク PDF と反クォーク PDF の差、すなわち価クォーク PDF に比例することである。 v_e が小さいため、 F_3 は無偏極では $F_3^{\gamma Z}$ が主となり a_q に依存する。縦偏極の場合は $Q^2 \gtrsim M_Z^2$ の高い Q^2 領域で F_3^Z からのわずかな効果で v_q に対する感度が得られる。広い運動学領域をカバーする HERA では、低い Q^2 で PDF を精度よく決定し、高い Q^2 でそれに基づいた予言と測定を比較することで電弱相互作用への感度が得られ、検証が出来る。HERA-I の無偏極データからでも、既に PDF を求めると同時に Z^0 に対するクォーク結合定数も求めるフィットを行い、図 9 に示すような感度を得ている [5]。

図 10 に HERA-II で測定された中性流 DIS 反応の散乱断面積を電子・陽子の場合について示す。上段の図は正の縦偏極データからの測定、中段の図が負の縦偏極データからの測定、下段の図はそれらの比を示す。上段・中段の図が示すように、測定された散乱断面積は Q^2 で 2 桁以上、散乱断面積で 5 桁にわたって標準模型でよく記述されている。現在の統計量では下段の絵が示すように電

ZEUS

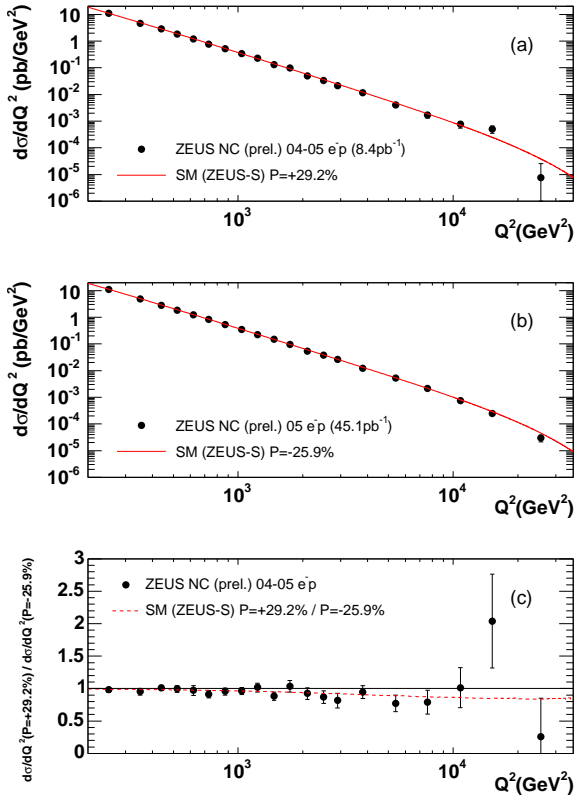


図 10: 中性流電子・陽子 DIS 散乱断面積。(c) は正偏極 (a)、負偏極 (b) の比を表す。

子の縦偏極度に対する依存性は明確には見えないが、将来、統計が上がると Z^0 に対するクォーク結合定数、特に軽いクォークの結合定数 v_u, v_d, a_u, a_d などの精密測定が出来ることが期待される。

ZEUS 検出器では HERA-II から MVD(後述) の設置などでデッドマテリアルの分布が変わり、また前述したように HERA-II 開始直後はバックグラウンドが高くトリガーにややきつめの要求を入れたなど新たな変更点もあるので、これらの解析を行う上で検出器の較正や検出器シミュレーションの妥当性の検証などを再度やり直す必要があった。こういった検出器較正には HERA では中性流 DIS 反応が極めて有用となる。というのも、DIS の運動学は x と Q^2 の二つで記述できるが、中性流 DIS では測定量が散乱電子からの二つ (エネルギーと角度) と反跳クォークからのハドロン系からも二つ (エネルギーと角度) あり、over-constraint 系となっているからである。たとえば Double Angle 法と呼ばれる方法では散乱電子の角度とハドロン系の角度だけから運動学を再構成でき、エネルギースケールの較正が出来る。日本グループは、散

乱断面積を求めるまでの検出器に密着した解析もほぼすべてをこなし、縦偏極中性流・荷電流 DIS 解析を押し進める中核を担っている。

6.3 パarton分布関数

グルーオン密度と重いクォーク生成断面積

式 (1) 中の PDF に x だけでなく Q^2 の依存性が書かれているように、摂動論的 QCD は PDF の Q^2 に対する発展を予言する (スケーリングの破れ)。これは DGLAP 発展方程式と呼ばれる方程式で記述され、 x の小さい領域ではおおまかに以下のように考えてよい:

$$\frac{d \ln F_2}{d \ln Q^2} \sim \alpha_s g \quad (6)$$

g はグルーオン PDF である。つまりスケーリングの破れの度合はグルーオンの多さと α_s の大きさに比例する。HERA の広い領域の Q^2 で F_2 を測定することができたので、このスケーリングの破れからグルーオン PDF が求められた。

こうして間接的に得られたグルーオン PDF をより高い精度で求める方法の一つは、チャームやボトムなどの重いクォークフレーバーを最終状態に持つ準包含的な過程を用いることである。重いクォーク生成は、ボソン・グルーオン融合過程 $\gamma^* g \rightarrow c\bar{c}$ で主に生成されるため、グルーオン密度に直接感度があるからである。チャームやボトムクォークの質量は QCD のスケール (λ_{QCD}) よりはるかに大きいので摂動論的 QCD でよく記述されることが期待できる。

HERA-I においても既に F_2 に対するチャーム対生成の寄与が測定されているがまだ統計誤差が大きく、HERA-II での精密測定を目指している。さらに、ZEUS 実験では HERA-II 高輝度化改造に合わせ、高精度シリコン飛跡検出器 (MVD) を設置した。日本グループは主にデータ読みだし回路の開発と製作を担当し、また取得したデータを使って各シリコン検出器の位置補正を行って現在まで $50\mu m$ の位置分解能を達成している。

2005 年には MVD を利用した最初の物理結果として b ジェット生成 $ep \rightarrow e'b\bar{b}X$ からのミュオン生成断面積を測定し、暫定公表した [6]。ミュオンは、MVD で測られたインパクトパラメータとジェット軸に対する横運動量を用いて同定した。図 11 はインパクトパラメータ分布を示す。図中、LF と書かれているのは軽いクォークフレーバーからの寄与である。データはモンテカルロシミュレーションでよく再現されており、重いクォークを同定する物理解析の準備が整った。今後の高統計に期待している。

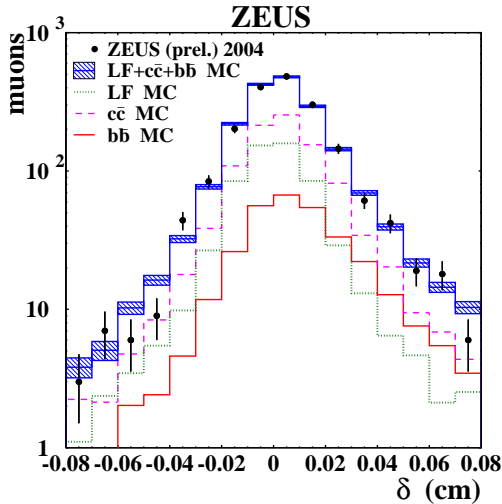


図 11: 重いクォークによるジェットからのミュオン候補の MVD におけるインパクトパラメータ分布。

高い x におけるパートン分布

高い x の物理的重要性は大きく、たとえば d クォークと u クォーク比の $x \rightarrow 1$ の極限值はどうなるかといった基本的な興味ばかりでなく、LHC や TEVATRON において大きな質量を持った新粒子探索や大きなエネルギーを持ったジェット生成測定などの不定性に大きく関与するという点でも重要である。しかしながら現在の PDF 決定の解析では、高い x ($\gtrsim 0.1$) においては PDF (特にグルーオン) はあまり精度よく求まっていない。これは、 Q^2 の低い固定標的型 DIS 実験では標的の質量効果や higher twist と呼ばれる DGLAP では表せない高次項の効果や原子核効果などが無視できなくなり、その補正分だけ不定性を増すからである。HERA でも x が大きくなると陽子の進行方向に生成ハドロン系がすべてブーストされてしまい検出が難しくなるので、これまでは $x \lesssim 0.75$ までしか測ることが出来なかった。

そこで新たに考え出されたアイデアは、高い x の断面積は x で積分したものを測定するというものである。すなわち、陽子の進行方向 (前方と呼ぶ) からある角度 (0.12 rad) 以上にジェットが見付からない場合は、 x が大きくハドロン系が超前方に小角度で反跳したとみなして、その角度に対応する $x(x_0$ とする) より大きい事象の断面積を $x_0 < x < 1$ の積分として求める。図 12 に、HERA-I データを用いたこの高い x に特化した F_2 測定を示す (暫定結果) [7]。結果は今までの PDF でよく記述されているが、最大 x においては全般的に測定値が大きい傾向にある。今後の HERA-II の高統計データを用いて解析を続ける予定である。

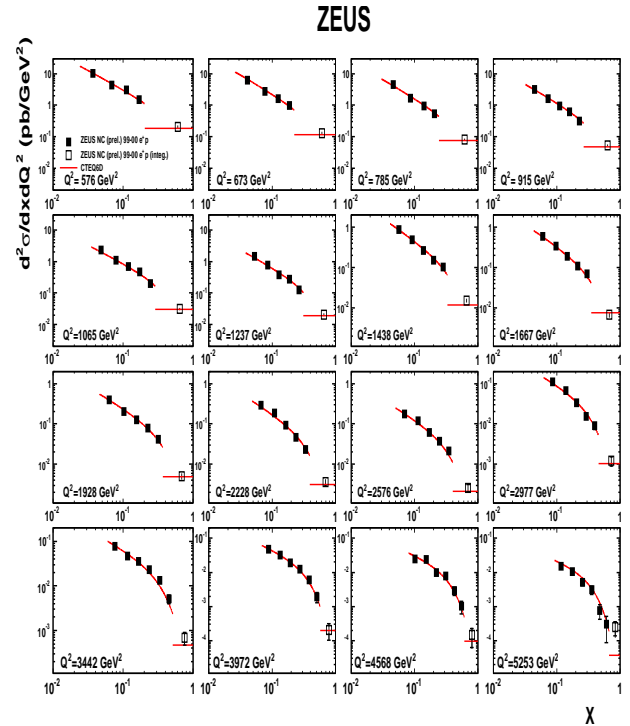


図 12: 高い x に特化した構造関数測定の結果を、いくつかの Q^2 においてビヨルケン x の関数として示す。

フレイバー分解

PDF 測定における残された問題の一つにクォークフレイバーの分解がある。これまでの PDF 測定では、 u クォーク PDF は非常に精度よく求まっているが d クォーク PDF は実はあまりよく求まっていない。なぜなら、高統計が得られている HERA での中性流 DIS やミュオン (または電子)・陽子の固定標的型 DIS は、散乱断面積がクォーク電荷の二乗に比例するため d クォークは u クォークの $1/4$ の感度しかないからである (さらにもともと d クォーク PDF 自体も u クォークの約半分しかない)。これを補うために、アイソスピン対称性を利用して中性子の構造関数測定が行われて来たが、実際は重陽子標的 ($D = (p+n)/2$) が用いられるので感度が下がる上、原子核補正による不定性が問題となる。ニュートリノ・原子核固定標的型 DIS 実験での F_3 測定も d クォークに対する感度を与えてくれるが ($u_v + d_v$ に比例する)、これにも重い原子核 (F_e など) の補正からの不定性がある。 s クォーク PDF についてはほとんど情報がなく、ニュートリノ・原子核固定標的実験からの 2 ミュオン生成から海 u クォークと海 d クォークに比べて小さい Q^2 において約 50% 少ないと考えられている程度である。

こうした事態を改良するのに最適なのが、HERA における荷電流 DIS である。原子核補正などの不定性がない

のはもとより、荷電流の電荷選択性により入射ビームが電子か陽電子かにより反応に寄与するクォークフレーバーが異なっているからである：

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{CC}(e^+p) &\propto x[(\bar{u} + \bar{c}) + (1-y)^2(d + s)], \\ \bar{\sigma}_{CC}(e^-p) &\propto x[(u + c) + (1-y)^2(\bar{d} + \bar{s})],\end{aligned}$$

上式は（無偏極の場合の）荷電流 DIS の散乱断面積を（QCD の 0 次で）書き下したものである。 $(1-y)^2$ はヘリシティ保存と角運動量保存から生じる運動学的抑制因子で、陽電子の場合はクォークに、電子の場合は反クォークにかかる。つまり、陽電子散乱の場合 d クォークへの直接感度を得られるわけである。さらに、終状態のチャームを同定すれば s クォークへの直接感度も得られる。実際、次項で述べるように HERA における荷電流 DIS 測定はすでに PDF を求めるフィットに用いられ始めている。現在ではまだ統計量が十分ではないので、今後の HERA-II における高精度測定が非常に期待される。

グローバルな PDF 測定

PDF 測定の今後の課題は、 F_2 だけでなく前述のような特定のフレーバーや特定の運動学的領域に個別の感度を持つ過程も含めてグローバルに解析することである。また、データが高統計になれば系統誤差の理解が重要になり、各データ点間の相関まで含めてフィットに組み込む必要がある。これまでは複数の異なった実験からのデータを用いて PDF 決定フィットが行われていたが、単一の実験からのデータだけを用いれば大半の系統誤差がデータセット間で共通になってその数が減るのに加え、それらの系統誤差を詳細に理解するのが容易になる（ZEUS 実験データを測定器をよく理解した上で ZEUS 実験がフィットするなどのように）。すなわち HERA-II における PDF 測定の最終目標は、HERA データだけで、しかし、おの個別の感度を持った複数の過程からの測定を統一的に解析して PDF を精度よく求めることと言える。

このような試みは現在すでに精力的に行われており、ZEUS では F_2 に加え高い Q^2 での中性流 DIS と荷電流 DIS を含め、さらにグルーオンへの直接感度を増すためにジェット生成断面積も含めてグローバルフィットを行った [8]。ジェット生成断面積により実際に $x \approx 0.01 - 0.5$ の中間から高い x 領域においてグルーオン PDF の精度の向上をみた。今度さらにこのような包括的な解析をおこなう予定である。

6.4 前方ジェット生成、多ジェット終状態

HERA における QCD 物理に関する測定では、 F_2 測定のような包含的なものと終状態のジェットなどの測定は

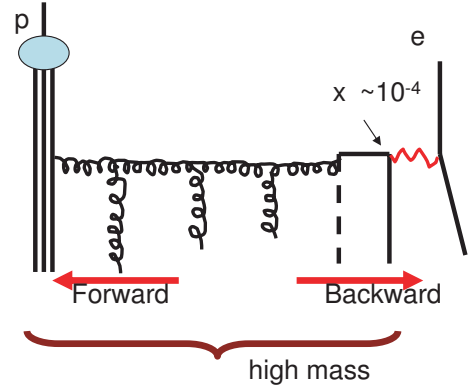


図 13: 低い x における電子・陽子散乱で、散乱クォークと陽子の間に多数のパートンが放出される様子の模式図。

相補的な役割を果たす。ジェット生成事象からクォークやグルーオンの間の QCD ダイナミクスに関する情報が得られる。実際、HERA-I において既に包含的ジェット生成断面積や 2 ジェット生成断面積が測定され NLO の摂動論的 QCD でよく記述されることがわかった。ジェット内部の微細構造などもよく記述され、これらの測定から α_s も非常に精密に求められた（各々の測定で得られた誤差は世界平均と同程度）。これもまた、摂動論的 QCD の成功の一つである。

しかしすべての運動学的領域で NLO QCD でよく再現されているわけではなく、特に x の小さい領域の終状態は実験の測定結果にも、また理論にも大きな不定性が残されている。図 13 に図解するように、 x が小さくなると電子・陽子散乱から生成されるハドロン系の質量が大きくなり、陽子から出たパートンが最終的に仮想光子と反応するまでに多くのパートンの放出が可能となる。このようなパートン発展を記述するのに理論からはいくつかの発展方程式が考えられている。DGLAP 発展（パートンシャワー法）では、放出されるパートンの横運動量が段々と大きくなっていく Q^2 方向の発展であり、 $\ln Q^2 \gg \ln(1/x)$ で適用可能とされる。他方、BFKL 発展は $1/x$ 方向の発展であり、放出されるパートンの横運動量はランダム、 $\ln(1/x) \gg \ln Q^2$ で適用可能とされる。CCFM 発展は DGLAP と BFKL 発展の両方を取り入れたもので、図 13 にあるようなグルーオンの梯子から放出されるパートンの放出角度が順次小さくなっていく。実験からこの違いを見るには、エネルギーフローや生成粒子の運動量スペクトラム、前方ジェット生成について見るのが有効である。図 14 は小さい x 領域において前方にジェットが生成されている事象の散乱断面積を見たものである [9]。DGLAP 発展に基づくモンテカルロシミュレーション（図中では LEPTO と

ZEUS

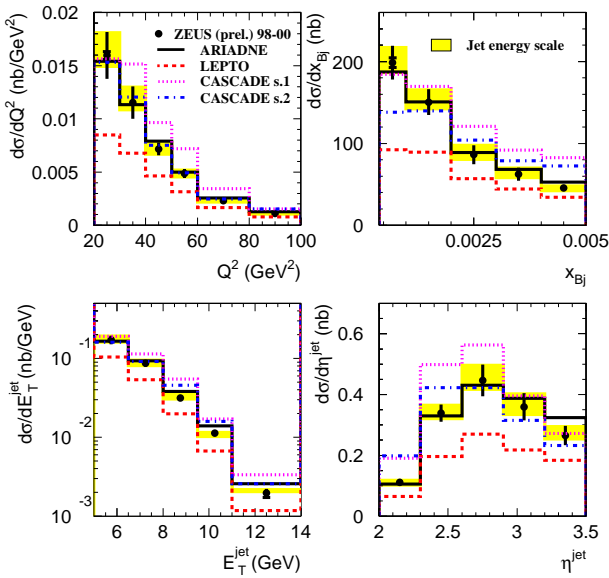


図 14: 低い x における前方ジェット生成断面積。それぞれ異なる発展方程式に基づくモンテカルロシミュレーションと比較している。

表記されている) では生成断面積が少なすぎる。図中で CASCADE と表記されているのは CCFM 発展に基づくモンテカルロシミュレーションである。ARIADNE とあるのは、カラーダイポール模型 (CDM) と呼ばれるもので放出されるパートンの横方向運動量が比較的ランダムに近くなる BFKL に近い模型である。CDM はデータをよく再現しているが、CASCADE は分布の形をあまりよく再現していない。つまり、データはハードな散乱ジェットと陽子との間に比較的ランダムな放射を起こすモデルをサポートしているように見える。しかし、モンテカルロモデルには様々なパラメータがあり、発展方程式間の比較にはまだ多くのデータと理論研究が必要である。このような低い x における発展、多ジェット生成の理解は、たとえば LHC における前方ジェット生成の理解に重要である。理論と実験が手を携えて今後さらに研究を進める必要がある。

7 おわりに

HERA-II は、現在までで加速器、測定器、物理解析ともに「コミショニング」時期を終え、これからいよいよ実りの時期を迎える。2007 年 6 月の HERA-II 終了まで、陽電子・陽子、電子・陽子、おのおの 350 pb^{-1} 程度の積算ルミノシティが見込まれており、前章で述べた

ような物理解析を予定通り進めたいと考えている。

また、次期エネルギーフロンティアである LHC での物理解析に、HERA における物理結果は独自の影響を持つ。たとえば LHC の主運動学領域である $10^{-4} \lesssim x \lesssim 10^{-1}$ 領域における PDF を決定しているのは HERA データである。このように、LHC 物理に対して、現在までの HERA で得られた成果をまとめ、また今後最大限のフィードバックをもたらすことを念頭においた研究を模索するため HERA-LHC Workshop と銘打ったワークショップも開催された。前章で HERA-II の物理課題として示したものは、いずれも高統計や解析手法の改良、理論の発展によってさらに理解が進むはずである。ぜひご期待いただきたい。

参考文献

- [1] U. Schneekloth *et al.*, The HERA Luminosity Upgrade, DESY HERA 98-05, available on <http://www.desy.de/~ahluwali/HERA-98-05/>.
- [2] Study of beam-induced backgrounds in the ZEUS detector from 2002 HERA running, available on <http://www-zeus.desy.de/~kuze/zeusbg/>.
- [3] Technical Report of the Beam Induced Backgrounds in the H1 Detector, available on <http://www-h1.desy.de/h1/www/publications/bgrep.pdf>; second report on <http://www-h1.desy.de/h1/www/publications/bgrep2.pdf>.
- [4] Contributed paper #254 and #255 for the “XXII International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energy”
- [5] H1 Collaboration, “A Determination of Electroweak Parameters at HERA”, submitted to Phys. Lett B
- [6] Contributed paper #359 for the “XXII International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energy”
- [7] Contributed paper #261 for the “XXII International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energy”
- [8] ZEUS Collaboration, “An NLO QCD Analysis of Inclusive Cross-Section and Jet-Production Data from the ZEUS Experiment”, submitted to European Physical Journal C
- [9] ZEUS Collaboration, “Forward Jet Production in Deep Inelastic ep Scattering and low- x Parton Dynamics at HERA” submitted to Physics Letters B