

HERA 実験の概要と最近の成果

電子・陽子衝突実験の軌跡

KEK 素粒子原子核研究所

山田 作衛

sakue.yamada@kek.jp

2009 年 (平成 21 年) 1 月 31 日

1. はじめに

2007 年 6 月末に HERA は運転を停止した。実験グループメンバーの大半がホールの前に集まり、スクリーンを見守る中、ビームモニターのグラフが落ちた。現在もデータ解析は継続しているが、測定器の解体作業は既にほぼ完了した。データ取得開始から数えても 16 年が経ち、建設を含めると 20 年に及び、参加者の顔ぶれもかなり変わった。

この区切りに HERA 実験を振り返ってみる。測定器の紹介と HERA 改造の詳細、当初の物理の結果は、過去にも本誌に書かれているので^[1,2]、それも参考にさせていただくとして、若い読者も多いことを念頭に、ここでは少し広い観点から書いてみたい。まず、世界で初めての電子(陽電子)・陽子衝突が多様な高エネルギー実験の発展の過程で占める位置を述べた上で、最新の解析結果を紹介する。

電子(陽電子)は典型的なレプトン、一方陽子は典型的なハドロンであり、強・電・弱すべての相互作用が関与する。HERA のエネルギー(重心系で 314 GeV、最大の Q^2 は 10^5 GeV^2)は電弱統一エネルギーを凌駕したので、QCD、電弱相互作用、核子構造、標準模型を超える物理の探索など、幅広い研究で、新しい領域が開かれた。終わってみると、実験前にはもしやと期待した標準模型を覆すような結果はなかった。しかし逆に、これまでにない高い Q^2 領域で標準模型の正しさを確認できたし、陽子の基本的な構造を詳細に測定できた。本稿では触れないが、回折事象が高頻度で起こったのは予想外であり、謎に満ちたポメロンの本質を探るなど、回折現象の解明も進んだ。HERA で得られた結果は、LHC での次世代の実験への寄与をはじめ、今後いろいろな場面で、素粒子物理の基本的な知見として役立つであろう。

2. 歴史的背景

少し物語になるが、まずは歴史をたどってみよう。陽子は水素の原子核だが、簡単にイオン化されるので、粒子物理以外では陽子とは呼ばずに水素イオンと呼ばれる。光合成や燃料電池などで分かるように、生物・化学反応で水素イオンの果たす役割は大きく、自然界で重要な存在である。粒子物理でも、陽子は中性子と対をなす原子核の構成

要素であり、原子番号は陽子の数で決まるから、電子の数を決め手となっている物質の多様性の根底に、実は陽子があるといってもよい。長いこと素粒子のひとつとしてリストされていたが、陽子が本当の素粒子ではなく内部構造を持っているヒントは、すでに前世紀の前半に分かっていた。素粒子研究がすなわち陽子構造の研究だった歴史は長い。

最初の手がかりは 1930 年代の陽子の異常磁気能率の測定である。HERA の建設が始まった頃、当時の DESY 所長ゾルゲル教授から聞いた話であるが、その昔 W. パウリはコペンハーゲン訪問の道すがら、ハンブルグ大学に講座のない客員教授として在任し、スピンの大家シュテルンと親交があった。シュテルンの「陽子の磁気能率や如何」との問に、パウリの答えは簡明で、「電子のボーア磁子の式で、電子質量の代わりに陽子質量を入れるだけの簡単なことさ」であったようだ。「そんな自明のことを訊くな」というような答えに、ならば本当かどうかやってみようとして実際に測定したのは、シュテルンの実験家としての面目躍如である。結果はパウリの予測とまったくかけ離れていた。いくら卓越した理論家の予言でも、やはり実験家は実験で確かめよ、ということだろう。答えを聞いたパウリの反応はどうだったろうか。

さらに、第二次大戦後にアメリカで GeV 領域の加速器が稼働すると、H. L. アンダーソン、E. フェルミ、J. シュタインパーガーたちによる πp 弾性散乱で、有名な(3,3)共鳴をはじめとする核子共鳴が次々と見つかった。共鳴状態はまさに内部構造の反映だから、分光学的な陽子構造の研究が素粒子物理の中心課題として発展した。もう一つの手法は電子の弾性散乱による形状因子の測定である。スタンフォード大のホッフシュッターグループの実験で、平均的な荷電半径が分かり、陽子が光子に結合する際に介在すると想定されたベクトル中間子の質量が明らかになった。泡箱などによる分光学実験では、引き続き多くのバリオン共鳴や、形状因子から予測された質量のベクトル中間子、その他多くの中間子共鳴が見つかって、ハドロンの総数は一挙に増大した。

1960 年代には、増えすぎてとても素粒子とは呼べなくなったハドロンが、坂田模型に端を発する SU(3) 対称性によつ

て整理され、その基本粒子としてクォークを想定したハドロンのクォーク模型が作られた。(3,3)共鳴の統計的整合性を回復するために、南部先生によるカラーの自由度の導入もあった。ただし、クォーク自体は半端な電荷を持った奇妙な粒子だし、いろいろな探索実験でも見つからなかったから、提唱者を含めて実体のある粒子と考える人はいなかった。

しかし、まず MIT-SLAC グループの行った電子・陽子の非弾性散乱が、陽子構造の研究に新しい展開をもたらした。 Q^2 が大きい領域でも散乱断面積が減らない、いわゆる深非弾性散乱を理解するため、ファインマンのパートン模型が提案された。それに沿って核子の構造関数が考察され、プヨルケンのスケーリング則、いろいろな和則など多くの理論的発展もあった。プヨルケン変数 x で見ると、構造関数が SLAC-MIT 実験の比較的狭いエネルギー範囲では、予想通りスケールしていることも確かめられた。また、パートンの運動量の総和が核子の運動量の半分であること、SU(3) 対称性で導入された半端電荷のクォークをパートンと見なすと構造関数が説明できることも明らかとなり、クォークがパートンの実体であると判明した。後に、MIT-SLAC 実験の J. フリードマン、H. ケンドール、R. テイラー三教授がノーベル賞を受けている。深非弾性散乱の根底にある漸近的自由については QCD で説明でき(これを解決した三人の理論家 D. グロス、H. ポリッツァー、F. ヴィルチェックも、後にノーベル賞を受けている)、クォークが担っていない残りの運動量をグルーオンが担っていると考えるとつじつまが合った。

深非弾性散乱実験は電子のみでなく、他のレプトン、すなわちミュオンやニュートリノを用いても可能である。加速器実験では、ハドロン崩壊で作られるこれらの粒子の方が、電子よりも高エネルギーのビームを実現でき、100 GeV 領域のレプトンを使えたから、1970 年代になると運動学的な変数の領域が拡大した。その結果、スケーリング則の破れが観測され、QCD で期待される発展関数(当初はアルタレーリ・パリジ方程式)で構造関数の Q^2 依存性が導かれ、間接的にはあるが QCD の妥当性とグルーオンの役割が確かめられた。その上、ニュートリノでは弱い相互作用で反応が起こるので、クォークと反クォークを区別するなど別の切り口で測定できたし、ミュオンの場合にはスピン偏極ビームも可能だったから、深非弾性散乱の舞台は、ハドロン加速器に移った。弱反応を用いた実験でも、パートンはクォークと同定された。さらに、ニュートリノ散乱では中性流反応が発見されて、電弱相互作用統一への重要な証明となり、中性流弱結合の強さから電弱混合比も測定された。

こうした展開に並行して、1974 年の J/ψ 粒子の発見に続くチャーム粒子の確認は、単に 4 番目のクォークではなく、

クォークそのものの存在を納得させるものだった。それに続く電子・陽電子衝突のハドロン生成全断面積の測定は R 値(ミュオン対生成断面積との比)の階段状の増加を示し、その値はカラー自由度を含めたクォークパートン模型と完全に一致したし、SPEAR のエネルギーとともに生成ハドロンが球対称からずれ始めるというジェット解析も、電子・陽電子反応で生じるハドロンがまずクォーク対であるとのクォークパートン模型の考えを支持した。私事であるが、さらにエネルギーの高い PETRA の JADE 実験で見た最初のハドロン生成事象は忘れられない。それまで見たことのない明らかなペンシル状のジェット対を目の当たりにして、強い印象でクォークを実感した。

決定的な QCD の確認は、グルーオン放出に由来する 3 ジェットの観測であり、さらにその頻度から得られる QCD 結合定数の測定だった。後にトリスタンでは 4 ジェットも観測され、3 グルーオン結合も確認されている。これらの実験では、電子・陽電子衝突の全エネルギーをクリーンな終状態に導く特徴が功を奏した。

こうした発展と並行して、本来の電子・陽子反応で QCD の研究を進めようとする動きは早くからあり、ビーム衝突で反応エネルギーを上げる電子・陽子衝突装置の計画が、すでに 1970 年代からいくつか提案されていた。しかし、HERA に至るまで実現したものはなかった。HERA は 1977 年に公表された Llewellyn-Smith and Wiik の提案論文を契機に ECFA で議論が始まり、1981 年に HERA の提案書が作られた。ドイツ政府の「国際協力が得られることを条件に、認める」との決定で、1984 年 4 月に正式に建設の調印が行われ、間もなく建設が始まった(表)。当時のドイツは不況で、この決定は景気刺激策の一つでもあった。

表 HERA の歴史

1981 年 7 月:	計画の提案
1984 年 4 月:	建設の承認と工事開始
1987 年 8 月:	トンネル完成
1988 年 8 月:	電子ビーム蓄積
1990 年 11 月:	HERA 完成
1991 年 4 月:	陽子ビーム蓄積
1991 年 10 月 19 日:	最初の電子・陽子衝突
1992 年 10 月:	H1 と ZEUS グループによる測定開始
1995 年:	HERMES グループのコミッションング
1996 年:	HERA-B グループのコミッションング

わが国の TRISTAN 計画では、当初電子・陽電子・陽子の 3 リングが想定され、電子・陽子衝突も主要なオプションの一つだった。だが、異種粒子の非対称エネルギー衝突は技術的に困難が予想され、世界にはその前例もない。ビーム衝突型加速器の経験なしに当初から電子・陽子衝突に挑

むのは無謀だろうとの考察から、第1期では電子・陽電子衝突のトリスタン、その後第2期に電子・陽子に取り組むことになった。しかし、HERA建設が認められたところで、それよりもエネルギーの低い当初のTRISTAN第2期計画は中止された。ではあるが、電子・陽子衝突の検討に、日本でも錚々たるメンバーの貢献があったことは注目に値する[3]。トリスタン第2期計画をBファクトリーに変更し、今日の成功につながったことは周知の通りである。

3. HERAの建設と改造

HERAの建設には、いわゆるHERA方式と呼ばれる国際協力があった。建設地がDESYだから当然であるが、建設予算(1981年当時の金額で654Mマルク)の3分の2はドイツ連邦政府とハンブルグ州(両者の分担比は9:1)が担い、残りをアメリカ、イタリア、イスラエル、オランダ、カナダ、フランスの6カ国がin-kindで提供した。その際、協力協定は政府間ではなく、DESYと各国の当該研究所が約束を交わす形を取り、それぞれの研究所がその国の政府から協定実施の予算を得た。協力国の中でもイタリアの貢献が大きく、陽子用超伝導双極磁石の半数を受け持った。これには、超伝導技術を国内企業に根付かせようとする同国の希望もあり、ドイツ国内で建設されたものと同じ仕様の超伝導磁石がイタリアでも量産されるよう、技術導入がなされたそうだ。加速器要素を分担した国の他にも、イギリス、スイス、中国、チェコスロバキア(当時)、ポーランドなどが人材を派遣した。

建設には約6年を要した。加速器サイトがほとんどDESYの敷地の外に広がっているのは注目に値する。LEP/LHCでもそうだが、そのトンネルは地下100メートルの深さである。一方、HERAの深さは比較的浅く約20メートルしかない。DESYの研究棟などの下も通っているが、外の住宅地の下も通過している。ビームの上20~30メートルで市民が生活しているなどとは、わが国では考えられない状況である。もちろん法的な制約も違うけれど、住宅地近くに立地しているDESYの周辺住民への配慮は大層きめ細かい。当然ながら、建設に先立っての説明会も入念におこなわれたとのことだ。

話は少しずれるが、目下建設中の自由電子レーザーの超伝導電子加速器XFELも、同じように敷地から外に伸びている。住宅地や牧場の下を通るが、周辺からは苦情や反対運動はなく、逆に歓迎されているようだ。こうした友好的関係を築くため、日頃のDESYの努力も大きい。見学は常時可能で、高校生も頻りに訪れるし、低学年の子供たち向けの簡単な体験施設も整備されている。職員の来ない週末など、近隣の人たちが勤務時間外用のカフェテリアまでランチを楽しみに来る。

HERA建設は1990年に終わり、ビームの立ち上げ試験の後、1992年に史上最初の ep 衝突が観測された(写真)。実験はH1とZEUSの電子(陽電子)・陽子衝突の他に、陽子ビーム中の固定標的のHERA-B、偏極電子ビームと偏極ガス標的のHERMESの二つの静止標的実験が、すべて並行しておこなわれた。



写真 史上初の ep 衝突を観測し、グラスを合わせる陽子リング責任者のB.ウーク(左)と電子リング責任者のG.フォス(右)を囲んで祝杯を上げる関係者たち

フォス教授は長年KEKのLCPAC委員を務め、TRISTAN、KEKBに対して多くの貢献があった。

HERAは8年間のデータ取得運転の後、1年余の改造でHERA-IIとなった。ルミノシティが増強され、併せて電子の偏極を軌道面に垂直なものから進行方向に回転し、衝突後はまた元に戻すスピン・ローテーターと呼ばれる磁石系が両衝突実験用にも設置された[2]。この磁石系は、HERA-Iの時代にも固定偏極標的のHERMES実験のために導入され、機能は実証済みだった。レーザーコンプトン散乱を用いて偏極度をモニターする手法もすべての実験グループの協力で開発されていた。ZEUSからは東京都立大のチームもこれに参加した。改造後のHERAのコミッション時には真空が上まらないという問題(一部は放射光によるエレクトロンクラウドが原因)があって、実験を再開するまで1年を要したが、ルミノシティは次第に向上し、HERA-I、HERA-IIを通じて運転終了までにZEUSは積分ルミノシティ570/pbを集積した(図1)。H1もほぼ同じ量のデータを得た。偏極実験では、右手系と左手系の両方の運転を電子ビームと陽電子ビームのそれぞれで行うので、都合4種の組み合わせで、それぞれほぼ同量のデータを取るよう実験がおこなわれた。ルミノシティを稼ぎ、かつバックグラウンドを押さえるビームオブティックスでは、偏極度は理論的に予想される最高値には届かなかったが、それでも30ないし40%の偏極が得られ、荷電流弱相互作用の偏極依存を測定するという初期の目的は達成した。偏極レーザービームを用いた逆コンプトン散乱によって、偏極度は常時測定され、刻々変化するルミノシティとともに記録された。

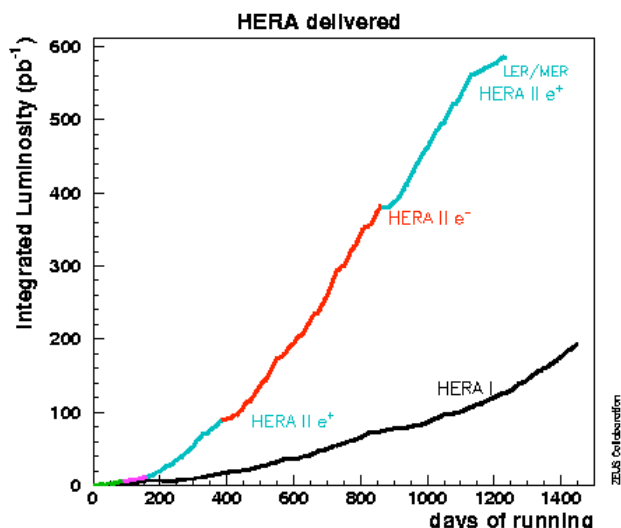


図1 HERA の集積ルミノシティの時間変化

4. 縦成分構造関数 F_L の測定

建設時の目的をほぼ達成した後、HERA は当初の計画になかった低いエネルギーでの運転をおこなった。電子・陽子衝突のエネルギーフロンティアを目指した目的からは離れるが、運転終了・シャットダウンの予定が議論された際、最後の半年ほどを使って F_L の直接測定をしようと H1 と ZEUS の両実験チームが合意した。 F_L はグルーオンの寄与によって現れる構造関数で、グルーオン分布を反映する。測るには Q^2 、 x の値が同じで、非弾性度 y の異なるデータを組み合わせる（微分断面積 $d\sigma/dQ^2 \cdot dx$ の F_L の項には y の関数が係数として入っているので、 y を変えると F_L の効果が変化する）そのため、異なるエネルギーのデータが必要である。 Q^2 と x を同じにするには従来の F_2 の観測に現れた y に比べて、大きな y の領域を観測することになる。すなわち散乱角の範囲を微小角まで広げ、低エネルギーの散乱電子を捕らえなければならないが、もともと狙っていなかった領域のため、測定器はその部分で完璧ではない。既存の検出器の性能を確認して、測定領域を広げる必要があった。新しい範囲をカバーするトリガー条件も改めて設定した。また、その領域では光反応に由来するバックグラウンドも増加すると分かっていた。大角度領域とは違い、ガンマ線に由来する対生成電子の識別や光反応の除去が一層深刻な問題となる。光反応を起こしてエネルギーを失った電子を検出するための後方測定器（ビームライン方向の電子タagger）を用いて他の測定器で誤認される電子の頻度を検討し、さらにバックグラウンド用モンテカルロを実験的に確かめた上で、バックグラウンド見積りの確度を高めた。

陽子エネルギーを 460 GeV と 575 GeV に下げて、それぞれ 14/pb と 7/pb のデータを集積した。この解析には東大の院生清水志真さんがあたり、上述の新しい課題に挑んで、初めての F_L データの抽出に貢献した。結果は陽子構造関数

のスケージングの破れから予想される F_L と矛盾のないものである。驚くような結果ではなく、限られたデータ量のために統計精度もよくないが、直接観測で全体像にうまく収まる結果が出たのは、QCD にとって朗報である。ジグゾーパズルで、最後のピースをびたりと納めたときの感覚のような感じといえよう。HERA 最後の実験としては新しい領域の難しい解析で、日本の院生が活躍したのは嬉しい。

5. ZEUS と H1 の合同解析

二つの衝突実験 H1 と ZEUS の測定器、ことにカロリメータ、は異なったアイデアで設計されている。HERA 実験では、荷電流弱反応の際、終状態に高エネルギーニュートリノが生成するため、事象の再構成には生成ハドロンのエネルギーを正確に測定する必要がある。ニュートリノ実験とは逆にビームの方はよく分かっているが、測定器の性能が要求される点は同じである。その際、電磁用・ハドロン用の両方のカロリメータが重要となる。両グループとも設計段階から最高の性能を目指した。ただし手段は違い、H1 は液体アルゴンを用いたのに対して、ZEUS は劣化ウランとプラスチック・シンチレータの積層型を選択した。ハドロン用カロリメータの精度を上げるためには、シャワー中の電磁成分とハドロン成分の出力を等しくする必要があるのである。H1 は読み出しを細かくして、ソフトウェアでハドロンシャワーに含まれる電磁シャワーを識別し、ハドロン成分と電磁成分それぞれの換算係数を用いて精度を上げ、1 GeV ハドロンに対して分解能約 40% を達成した。一方、ZEUS のハドロンカロリメータは、スポレーションで劣化ウランが発する中性子をプラスチック・シンチレータで捕らえることによって（シンチレータ中での中性子・陽子散乱が効く）、ハドロン成分が核反応を起こす際に必要な原子核の結合エネルギー分を補償する、いわゆる補償型カロリメータである。ハドロンに対して 1 GeV で 35% 程度の分解能を実現した。

両チームが競争しつつ進めた数十年に及び実験で、統計誤差の範囲で概ね一致する結果を得たが、統計上は有意というほどではない程度の、違った兆候を示す事例も多い。たとえば、一時話題となった欠損横向き運動量を伴う高エネルギーレプトン事象の超過などである。H1 が観測したような超過は ZEUS では見られなかった[4]。また、議論を引き起こしたペンタクォーク関連のデータについても、ZEUS が見たチャンネルは H1 では見られず、逆に H1 の観測したような事象は ZEUS では見られていない。いずれのケースでも、相互に確認しあうことにより事象の信憑性を判断できた。二つの実験が競合する意義の一つである。

実験の終盤になって、DESY 首脳陣から、さらに一步を進めて両者のデータを統合して解析するよう勧められ、H1 と ZEUS は合同解析のチームを作った。首脳陣の LEP での

4 実験のデータ統合の経験に基づいてであろうが、LEP の 4 実験の場合よりも少ないし、個々の特性を重んずる HERA の両チームにとっては、これは容易なことではなく、共同解析に合意するまでにはやはり時間がかかった。手法の上でも簡単ではない。度重なる強い指導の結果、共同作業が構造関数、回折事象、ジェット解析、レプトン事象など、合計 7 テーマについて別々におこなわれ、検討が進められた。最近はその結果が報告されて、従来個々の実験結果に見られた誤差が改善されており、共同作業は成功した。ことに QCD フィットで改善がはっきりして、この結果に基づいて DGLAP 発展方程式で LHC 領域の構造関数を計算すると、たとえば LHC におけるグルーオンに由来する事象頻度の予測幅が一層確実になる。

以下に、おもに陽子構造、電弱相互作用の検証に関して、合同解析の結果を中心に最新の結果を紹介する。

6. 陽子構造

広い範囲の Q^2 と Bjorken 変数 x にわたって測定された。最新の構造関数 F_2 の Q^2 依存性を、いろいろの x 値について図 2 に示す。見て取れるように、低エネルギーでの固定標的実験の結果も含め、きれいな陽子構造の全体像が得られた。小さな x の領域では急速な増加が見られる。実験開始当初に観測されたとき、これは意外と受け取られた。 x 分布は陽子中のパートンの比運動量分布に相当するので、運動量には陽子サイズで決まる不確定性原理による下限があるはずで、どこかで飽和するものと期待され、HERA でその兆しが現れるかも知れないと考えられていたためだ。図

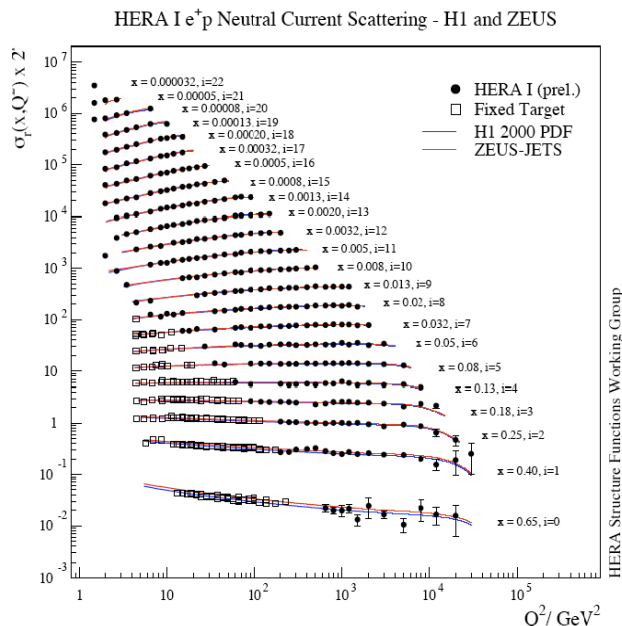


図 2 HERA-I データの ZEUS と H1 陽子構造の合同解析の結果 Bjorken 変数 x の値によってスケージングの破れ方が違うが、QCD の予想通りである。

を見る限り、HERA のエネルギーで到達できる範囲の x 値では未だ飽和に達していない。

いろいろな QCD 反応を総合した pdf のフィットも大幅に改善された。ZEUS と H1 のグループの結果と対比させて、図 3 に例を示す。不定性がかなり改善されている。将来 LHC で予想される反応の推定に非常に有用なデータである。たとえば W 中間子生成の断面積を推定する際、推定精度が改善される様子を図 4 に示す。HERA のデータなしの場合に比べると、HERA のデータで予想値の不定性は半分以下になり、合同データを用いることによって、特にラピディティの中央部に生ずる W 中間子についてさらに大幅な改善が見られる。陽子の基本的構造が判明していることは、LHC で新現象を探るために不可欠かつ有力な要素である。

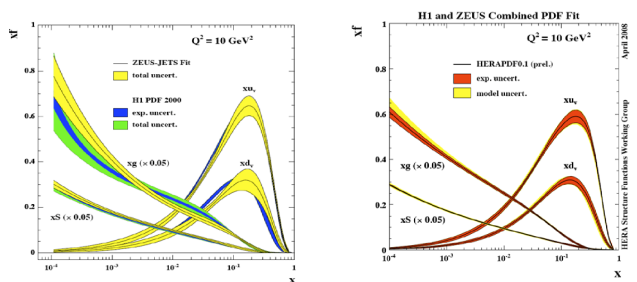


図 3 左図は H1 と ZEUS のデータを用いた pdf フィット、右図は両実験のデータをまとめておこなった pdf フィットの結果

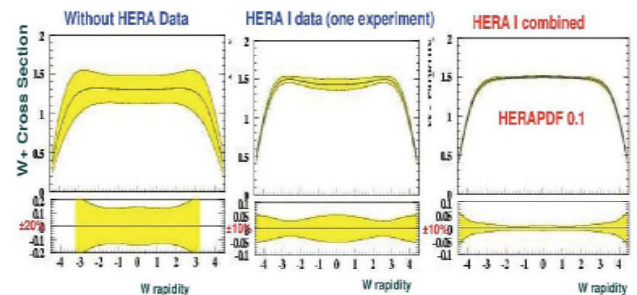


図 4 LHC での W 中間子生成断面積の予想 HERA のデータで大幅に精度が上がる。

7. 電弱相互作用

HERA のエネルギーは Q^2 の低いところから 10^4 GeV^2 を越える範囲を覆っているので、電弱相互作用の検証には最適である。反応断面積の詳細は[5]を参照されたい。図 5 に荷電流反応、中性流反応の断面積の Q^2 依存性を示す。中性流反応は低い Q^2 ではガンマ線交換が圧倒的に効くから、電子・陽子と陽電子・陽子の間に差はなく Q^4 に比例して減少するが、 10^4 GeV^2 辺りでは光子交換と Z 中間子交換の干渉が顕著となり、レプトン電荷により断面積に差が現れる。この差はパリティ非保存の構造関数 F_3 にも依存する。一方、荷電流反応は W 中間子の交換で生ずるから、 Q^2 の小さいところではその質量効果で断面積は小さく（弱い相互作用と呼ばれる所以である） Q^2 依存性は少ないが、 Q^2 が増え

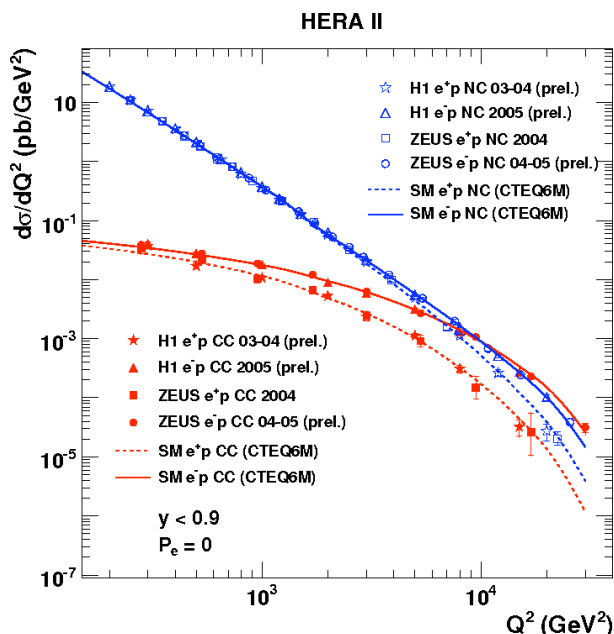


図5 中性流反応と荷電流反応による電子（陽電子）・陽子散乱断面積の Q^2 依存性

るとその効果が始め 断面積はさらに減少して、 10^4 GeV^2 では中性流反応と同じように振る舞う。図はまさに Q^2 の関数として電弱相互作用統一の全体像を示している。荷電流反応の場合の電子と陽電子の差には、標的となるクォークの種類が異なる効果も含まれる。この Q^2 依存性から反応を媒介する粒子の質量を判別できる。予想通り、およそ 80 GeV^2 となる。質量の精度は s チャンネルの直接測定で得られるものには及ばないが、高エネルギーの t チャンネルでははっきりと W 粒子の交換に由来していることが分かり、われわれの理解を裏付ける。

電子・陽電子の縦偏極は荷電流弱相互作用の検証を目指した試みである。偏極依存性の測定結果を図6に示す。直

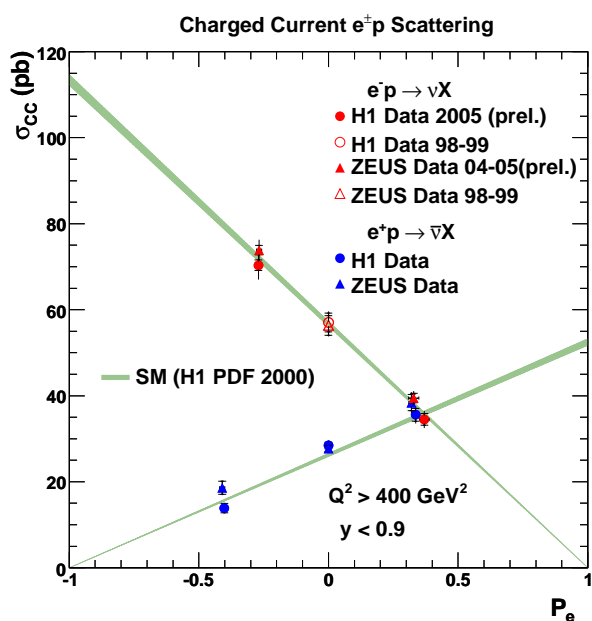


図6 電子（陽電子）・陽子の荷電流弱反応断面積の電子（陽電子）縦偏極依存性

線を外挿して右手系電子あるいは左手系陽電子の断面積をみるとゼロとなり、左手系電子と右手系陽電子のみが反応していることは明らかだ。エネルギーが 100 GeV を超えているところで、荷電流弱相互作用のカイラリティがはっきりと確かめられた。この解析では、当時院生だった日本グループの片岡真由子さん、梶裕志君が活躍した。H1グループは右手系 W 中間子の質量の制限として 208 GeV (95%CL) を得た。この制限は右手系に属するニュートリノが数 GeV 程度の質量を持っていても変わらない。

8. 中性流弱反応観測による xF_3 の測定とパリティ非保存

電子と陽電子の非偏極中性流弱反応断面積の違いは、構造関数 F_3 の寄与によるから、差を取ると F_2 の分は相殺され、 F_3 を抽出できる。 F_3 はクォーク分布と反クォーク分布の差で表されるので、ヴァレンスクォークの分布関数と、もしも海クォークと海反クォークの分布に違いがあればその差を加えた量に相当する。ただし、抽出には偏極のないデータを使う。HERA-II での左右の偏極データはほぼ同量集積されており、HERA-I の無偏極データと HERA-II の無偏極に相当するデータが用いられた。 Q^2 を 1500 GeV^2 に調整したときの合同解析の結果を図7に示す。図には、HERA-I のデータを用いて NLO-QCD フィットで求めた H1 と ZEUS それぞれのヴァレンスクォークの分布も合わせて示しており、これらとよく合致している。NLO-QCD フィットでは、反クォークの分布関数を海クォークの分布関数と同じと見

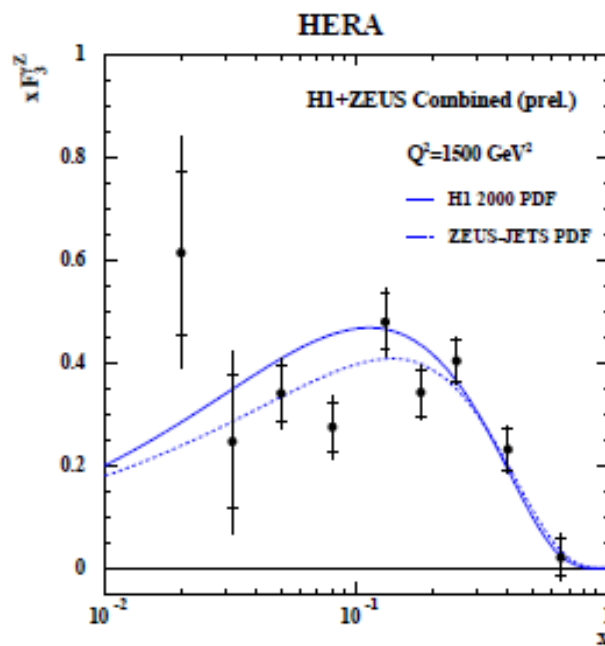


図7 電子・陽子と陽電子・陽子中性流反応の差から求めた構造関数 xF_3 の x 依存性

H1 と ZEUS が HERA-I のデータ（主に陽電子・陽子データ）から QCD フィットで求めたヴァレンスクォークの構造関数をそれぞれ実線と点線で示す。合同解析の直接測定データは、それらと整合している。

なしたが、直接観測の結果がヴァレンスコークの分布と一致しているので、この仮定と整合性のある結果が得られた。 x の値が大きいところで xF_3 は小さいと予想されているが、観測値もそうになっている。

さらに、偏極データを用いると電弱反応でのパリティ非保存の効果が、右手系と左手系の差として現れる。偏極非対称は電子・陽子反応と陽電子・陽子反応のそれぞれについて観測でき、標準模型では偏極による差の符号が反転する。これは、光子交換と Z 中間子交換の干渉によって生ずる量で、クォークと Z 中間子のベクトル結合定数に比例する。ZEUSとH1のデータ、合同解析のデータを図8に示す。明らかに偏極非対称のゼロからのずれが見られ、それが電子と陽電子の場合で逆符号になっているのが分かる。中性流反応の解析では都立大の院生だった李栄篤君の寄与が大きい。

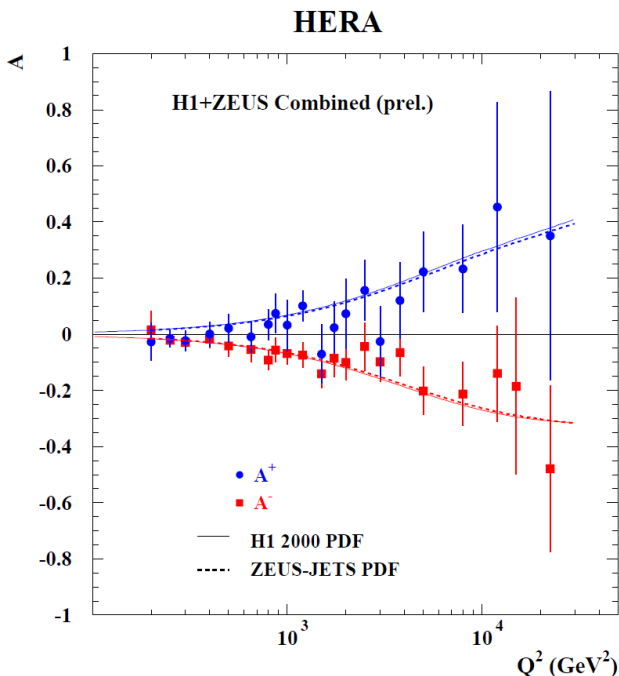


図8 電子・陽子と陽電子・陽子のそれぞれの場合の中性流反応の断面積の偏極非対称性

電弱相互作用の干渉によるパリティ非保存を示す。標準模型では電子の場合と陽電子の場合で符号が反転するが、観測でもそうになっている。

これらの量は、クォークと Z 中間子のベクトル結合定数に比例し、LEPとは違う運動学的領域でそれを観測できる。電弱効果を含めた総合的なQCD-EWフィットで求めたクォークと Z 中間子の結合定数を図9に示す。標準模型の期待値と一致しているが、LEP、CDFの結果と比較した場合、 u クォークについてはHERAの方が精度よく求められる。数の少ない d クォークについては、陽子の場合には統計精度が落ちる。

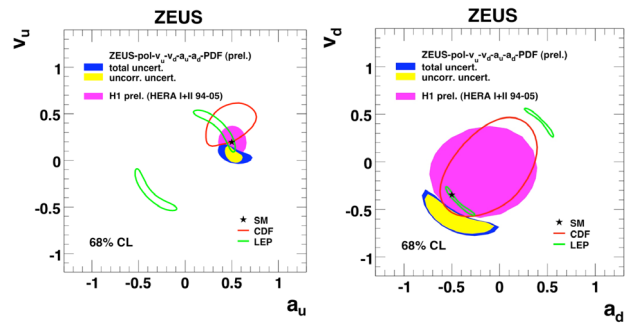


図9 QCDと電弱相互作用を総合したクォーク・ Z 中間子結合定数のフィットの結果
他の高エネルギー衝突装置の結果と比較してある。

9. 標準模型を超える事象の探索

エネルギーフロンティアの衝突装置では常に標準模型を超す現象の手がかりを探すが、HERAの場合はっきりした現象はなかった。先に述べたように、ひところ注目された大 P_t レプトンと横向き欠損運動量のあるジェット事象も、H1とZEUSで整合性のある異常は見られなかった。両実験を比べると、H1の方が、ことにHERA-Iの時代に、事象数を多く観測したが、それもHERA-IIでのデータを見ると、標準模型と合致している。 W 中間子の単体生成の統計的ばらつきとしても説明できる。このことから、H1は W 中間子の異常結合定数の限界を求めている。

HERAで新しく開かれた300GeVまでの t チャンネルの諸反応でも、標準模型が正しいと明らかになった。話を一歩進めて、そこからのズレを生ずるような現象に対しては制限が得られた。未知の相互作用があったとして、そのカットオフパラメータを求めたり、クォークの構造に制限を設けたりすることができ、詳細は省くが、大まかなスケールとしては、他の高エネルギー衝突装置と同じように1TeVないし数TeVの値が得られた。クォークのサイズに焼き直すと、 0.7×10^{-3} fm以下となる。

10. 終わりに

以上述べたように、当初に目指した研究は、HERA-I、-IIを通じて、すべて達成できた。びっくり仰天はなかったが、標準模型として考えられる素粒子像に関して、予測に合致するデータから、われわれの理解が正しいという確信を深めることができた。また、 F_2, xF_3, F_L のすべてを測り、摂動領域と閉じこめ領域の境界など今の理論では予測できない領域のデータも得て、次の段階へと進む基盤を固めることができた。共同研究を始めるに当たってHERAからLHCへの物理のつながりを想定していたので、メンバーの多くがLHCに移行して知見を活かしているのは喜ばしい。

実験準備を始めてから、数えると25年になり、その間にメンバーは大幅に入れ替わった。建設当時から今まで継続しているメンバーは数少ない。かく言う自分はメンバー

のような顔をしているが、実際には、データ取得が始まるとまもなく ZEUS 実験に当てる時間がなくなって、以後ほとんど実働はできなかった。実験の遂行は多くの(当時の)若手によって進められた。最初から一貫して多大の貢献をした徳宿氏を中心となって、若い人たちが今も完結に向け頑張っている。この間、中堅の人たちはいずれも ZEUS グループの中でリーダー役を務めた。旗振り役だった者として、これまでいろいろな時期に関与された人たちに感謝するとともに、尽力に敬意を表したい。実験を通じて 20 名余の学位取得者があり、現在いろいろな方面で活躍し、中堅あるいは指導的な役割を果たしている。レプトン、ハドロンの両方が関わるだけに、様々な問題・課題があり、解析手法も簡単ではないから、勉強する材料には事欠かないし、海外の協力者との交流も深められた。ZEUS グループの規模や DESY も、教育的には良い環境だったかと思う。

立案当時の原子核研究所は KEK と統合し、都立大も首都大と変わった。予算形態は、はじめの海外共同研究の特別事業から科研費となり、その科研費は次々と目まぐるしく姿が変わった。そんな中で最後まで予算も途切れず、若い人の参加も続いて、ここまで来られたのは幸いであった。立ち上げの頃に支援していただいた、核研の高エネルギー運営委員会や共同利用運営委員会、高エネルギー委員会のメンバーはすべて停年退官されたが、当時の判断がその後有効に活かしたことを報告すると共に、改めてご支援に感謝したい。KEK に移行後も引き続いてご支援いただいた。今日に至っているのはその賜であり、現在の現役メンバーに代わって感謝したい。

参考文献

- [1] 久世正弘, 徳宿克夫, 高エネルギーニュース, 15-2 (1997) 46.
- [2] 山崎祐司, 長野邦浩, 高エネルギーニュース, 24-2 (2005) 79.
- [3] M. Igarashi, T. Kamae and Y. Shimizu: Report of TRISTAN $ep(ee)$ working group, KEK report (1980), Y. Kimura, F. Takasaki, Y. Shimizu, Y. Yamaguchi, KEK Preprint 80-13 and Proc. of Second ICFA Workshop, CERN (1980).
- [4] 山崎祐司, 久世正弘, 高エネルギーニュース, 15-11 (1997) 252.
- [5] M. Klein and T. Riemann, Z. f. Phys. 24 (1984) 151.