

Abbildung 16: Ereignis mit einem rekonstruierten sekundären Vertex im ZEUS Mikrovertexdetektor. Das Ereignis ist ein Kandidat für den Zerfall eines Beauty-Quarks.

ZEUS Experiment

Beteiligte Institute: Univ. of the Aegean Chios, Inst. Phys. Technol. Almaty, NIKHEF und Univ. Amsterdam, ANL Argonne, Humboldt Univ. Berlin, Andrews Univ. Berrien Springs, Univ. und INFN Bologna, Univ. Bonn, Univ. Bristol, RAL Chilton, Ohio State Univ. Columbus, Univ. della Calabria und INFN Cosenza, Inst. of Nucl. Physics und Jagellonian Univ. Cracow, AGH Univ. Cracow, Univ. und INFN Firenze, Univ. Freiburg, Univ. Glasgow, DESY und Univ. Hamburg, Columbia Univ. Irvington, FZJ Jülich, Chonnam Nat. Univ. Kwangju, Imperial Coll. und Univ. Coll. London, Univ. Cathol. de Louvain, Univ. of Wisconsin Madison, Univ. Autónoma Madrid, McGill Univ. Montreal, Engin. Phys. Inst. und State Univ. Moscow, MPI München, Yale Univ. New Haven, York Univ. North York, Oxford Univ., Univ. und INFN Padova, Weizmann Inst. Rehovot, Univ. La Sapienza und INFN Roma, Polytech. Univ. Sagamihara, Univ. of California Santa Cruz, Ewha Womans Univ. Seoul, Kyungpook Nat. Univ. Taegu, Tel Aviv Univ., Inst. of Technol. Tokyo, Metropolitan Univ. und Univ. Tokyo, Univ. und INFN Torino, Univ. del Piemonte Orientale Novara, Univ. Toronto, KEK Tsukuba, Pennsylvania State Univ. University Park, Inst. for Nucl. Stud. und Univ. Warsaw, Meiji Gakuin Univ. Yokohama, DESY Zeuthen.

Sprecher: R. Yoshida, Argonne Natl. Lab, USA

Von Januar bis Mitte August lieferte HERA sehr erfolgreich Luminosität mit Positronen. Im Juni wurden mit etwa 100 mA Protonstrom und fast 50 mA Positronenstrom die Designwerte erreicht. Die Polarisation erreichte regelmäßig Werte über 40%. Nach der Reparatur eines Vakuumlecks nahe der H1 Wechselwirkungszone Ende Juni musste bis Mitte August der Strom auf 90 mA für den Protonenstrahl und etwa 40 mA für den Positronenstrahl begrenzt bleiben um Strahlenschäden am H1 Detektor zu vermeiden. Von 78 pb^{-1} die HERA geliefert hat wurden 42 pb^{-1} von ZEUS aufgezeichnet. Die Verluste lagen hauptsächlich am hohen Protonuntergrund von HERA und an Instabilitäten des Datennahmesystems. Beide Probleme wurden im Juni gelöst. Mitte August begann eine etwa 8 wöchige Betriebsunterbrechung, in der bei ZEUS lediglich kleinere Wartungs- und Reparaturarbeiten durchgeführt wurden. Nach dieser Unterbrechung wurde HERA auf Elektronen umgestellt. Seit Anfang Dezember produziert HERA routinemäßig Luminosität mit Elektronen. Die Strahlströme sind noch begrenzt, da nach umfangreichen Umbauarbeiten in der Wechselwirkungsregion von H1,

das Vakuum dort konditioniert werden muss. Die spezifische Luminosität ist mit Werten von über $2 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ höher als der Designwert, damit werden trotz begrenzter Ströme hohe Luminositäten erreicht.

Für die Analyse beginnen die neuen, seit 2003 genommenen Daten, zunehmend wichtig zu werden. So wurden im Sommer vier Konferenzpapiere mit Analysen der neuen Daten zur Internationalen Hochenergiephysik Konferenz (ICHEP) in Peking geschickt. Darin werden erste Messungen des geladenen Stromes mit polarisierten Positronen, sowie Messungen schwerer Quarks mit dem Silizium-Mikrovertexdetektor beschrieben. Darüberhinaus hat ZEUS neun weitere Analysen mit den bis zum Jahr 2000 genommenen Daten veröffentlicht.

ZEUS Betrieb

HERA lieferte von Beginn des Jahres an regelmäßig Luminosität. Da im Shutdown des Vorjahres umfangrei-

che Arbeiten an den Wechselwirkungszonen der Experimente durchgeführt worden waren, wurden die Strahlströme langsam gesteigert, um das Vakuum zu konditionieren. Die in der Nähe des Wechselwirkungspunktes gelegenen Absorber für reflektierte Synchrotronstrahlung waren im Shutdown 2003 modifiziert worden. Seitdem spielt reflektierte Synchrotronstrahlung keine signifikante Rolle mehr beim Untergrund in ZEUS. Das Hauptproblem für eine effiziente Datennahme war Untergrund vom Protonstrahl. Häufige, kurze und sehr hohe Spitzen im Protonuntergrund führten regelmäßig zur Abschaltung der Hochspannung in der zentralen Driftkammer. In der ersten Hälfte des Jahres musste der Datennahmebetrieb wegen dieser Spitzen häufig für mehrere Stunden unterbrochen werden. Im Juni waren alle technischen Probleme im Protonspeicherring soweit unter Kontrolle gebracht, dass die Datennahme mit Strahlströmen von 100 mA Protonen auf fast 50 mA Positronen möglich wurde. Mitte Juni führte ein Vakuumleck in der Nähe der H1 Wechselwirkungszone zu einer etwa einwöchigen Betriebsunterbrechung, in der umfangreiche Reparaturen an der Strahlführung durchgeführt wurden. In der Folge musste der Strahlstrom auf etwa 90 mA Protonen und etwa 40 mA Positronen begrenzt bleiben, da sonst die Strahlrestgaswechselwirkungen zu Beschädigungen des H1 Detektors geführt hätten. Bis zur Betriebsunterbrechung im Sommer hat HERA 78 pb^{-1} geliefert, von denen 45 pb^{-1} mit rechteckhändig und 33 pb^{-1} mit linkshändig polarisierten Positronen produziert wurden. Davon hat ZEUS 42 pb^{-1} aufgezeichnet (25 pb^{-1} rechteckhändig und 17 pb^{-1} linkshändig polarisiert). Neben den Untergrundproblemen haben auch einige Instabilitäten des Datennahmesystems zu den Verlusten beigetragen. Im Juni war das Datennahmesystem soweit stabilisiert, dass die Effizienz der Datennahme wieder mit den besten Werten des Jahres 2000 vergleichbar war.

Am 16. August begann eine achtwöchige Betriebsunterbrechung, die bei ZEUS für kleinere Reparaturen sowie für Wartungsarbeiten benutzt wurden.

Während der Datennahme zeigte der supraleitende Solenoid Temperaturschwankungen, die gelegentlich zur Abschaltung führten. Im Juni wurde entdeckt, dass diese Temperaturschwankungen mit dem Ein- und Ausschalten der Niederspannungsversorgung des Straw-Tube-Trackers (STT) korreliert sind. Der STT wurde ursprünglich nur während der Datennahme eingeschaltet,

da trotz Kühlung in einigen Teilen des Detektors hohe Temperaturen beobachtet worden waren. Nach Entdeckung der Korrelation wurde der STT eingeschaltet gelassen. Der Solenoid lief daraufhin stabil, allerdings mit einem relativ hohen Heliumverbrauch. Während der Wartungsperiode wurde der Solenoid aufgewärmt und es stellte sich heraus, dass sich während des Ein- und Ausschaltens des STT das Isoliervakuum des Solenoiden kurzzeitig stark verschlechtert. Genauere Untersuchungen zeigten, dass eine Dichtung des Solenoiden, die in der Nähe des STT liegt, vorübergehend undicht wird, solange der STT nicht im thermischen Gleichgewicht ist. Offenbar führen Temperaturänderungen am Frustum, an dem der Solenoid hängt, zu mechanischen Spannungen am Flansch des Magneten, der die Dichtung enthält. Dieses temporäre Leck erklärt die Temperaturschwankungen während des Betriebes. Aus Zeitgründen war eine Reparatur innerhalb der laufenden Betriebsunterbrechung nicht möglich. Um einen stabilen Betrieb des Magneten zu gewährleisten und die Gefahr eines permanenten Lecks so gering wie möglich zu halten, wurde beschlossen, den STT zunächst nicht wieder in Betrieb zu nehmen. Mit der Planung einer möglichen Reparatur wurde sofort begonnen, um sie während der Betriebsunterbrechung im Sommer 2005 durchführen zu können. Jeder Zugang zur Elektronik des Vorwärtsdetektors sowie zum Frustum und der betroffenen Dichtung des Solenoiden erfordert den Ausbau des gesamten Vorwärtsdetektors. Um die Reparaturzeit zu minimieren und ein Belüften des Strahlrohres zu vermeiden, ist geplant eine Vorrichtung zu bauen, die es erlauben wird, den Vorwärtsdetektor über das Strahlrohr und den ersten Magneten nach vorne aus dem Detektor zu ziehen und in dieser Position die notwendigen Reparaturen vorzunehmen.

Am 5.11.2004 begann HERA mit Elektronenbetrieb, nachdem der Beschleuniger zunächst mit Positronen in Betrieb genommen und dann auf Elektronen umgestellt worden war. Seit dem 5.12. liefert HERA regelmäßig Luminosität mit langsam steigenden Strahlströmen. Die Strahlströme sind noch begrenzt, da nach umfangreichen Umbauarbeiten in der Wechselwirkungsregion von H1, das Vakuum dort konditioniert werden muss. Die spezifische Luminosität ist mit Werten von über $2 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mA}^{-2}$ höher als der Designwert. Damit werden trotz begrenzter Ströme hohe Luminositäten erreicht. Der Detektor, Trigger und Datennahme laufen stabil. Die Effizienz der Datennahme sowie die Daten-

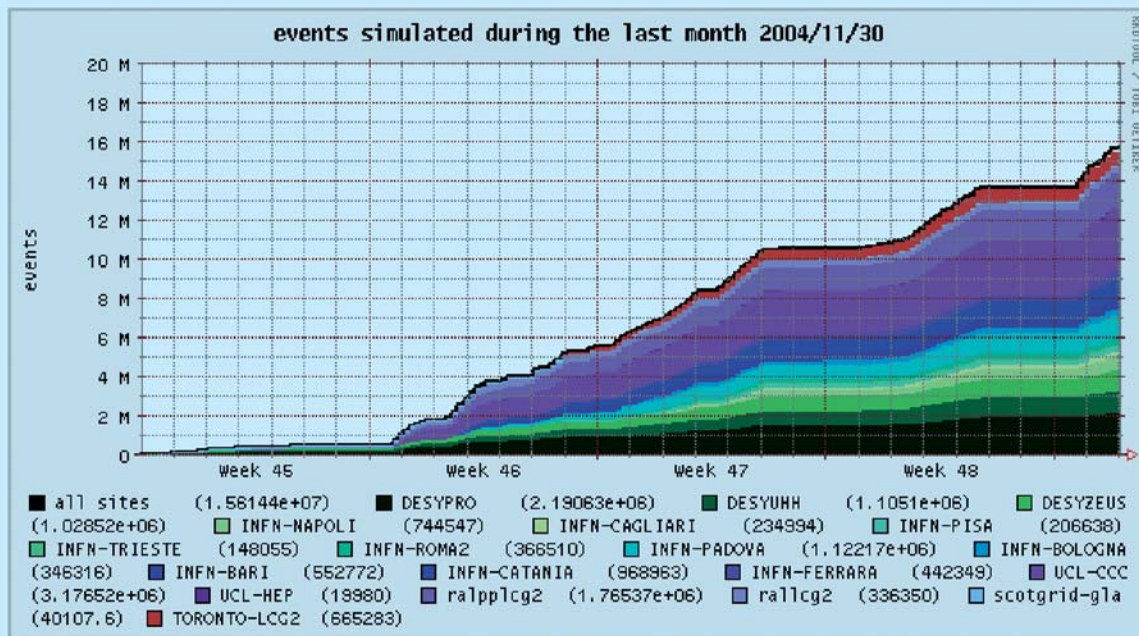


Abbildung 17: Anlauf der Grid-basierten Monte Carlo-Produktion bei ZEUS im November 2004. Gezeigt sind die integrierten Ereignisraten, farblich differenziert nach den einzelnen Produktionsstätten in Deutschland (DESY und Univ. Hamburg), Großbritannien (UCL, RAL und Scotgrid), Italien (INFN) und Kanada (Toronto).

qualität sind sehr gut. Die Kammerströme sind weit von jeder Begrenzung entfernt und die Untergrundsituation lässt sicher erwarten, dass ZEUS in der Lage ist auch bei höchsten Strahlströmen problemlos zu messen.

ZEUS Datenverarbeitung

Die Rohdaten der bis August andauernden e^+p -Runperiode wurden zunächst zeitnah auf der neuen Rekonstruktionsfarm mit 70 Prozessoren von 3 GHz Taktfrequenz rekonstruiert. Nach dem Ende des Positronenbetriebs wurden die Daten mit erheblichen Verbesserungen in der Rekonstruktionssoftware sowie im Vertexdetektor-Alignment innerhalb eines Monats reprozessiert, wobei eine maximale Produktionsrate von 3.2 Millionen Ereignissen pro Tag erreicht wurde. Die Leistung des zentralen Analysesystems ZARAH konnte

ebenfalls weiter gesteigert werden: im Laufe des Jahres 2004 wurden rund 630 000 Analysejobs gerechnet.

Im Bereich der Monte Carlo Simulation sind die Anforderungen an die Rechenleistung durch die größere Komplexität der HERA II Ereignisse erheblich gestiegen. Aus diesem Grunde war bereits im Herbst 2003 das „ZEUS Grid Projekt“ gestartet worden, in dessen Rahmen das ZEUS Produktionssystem auf die Erfordernisse des modernen „Grid-Computings“ umgestellt wurde. Diese Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit der DESY IT-Gruppe durchgeführt. Im November 2004 lief erstmals die automatisierte Produktion auf dem Grid an (Abb. 17), wobei auf Anhieb tägliche Produktionsraten von 1 Million Ereignissen erreicht und überschritten wurden. Zur Zeit sind dem ZEUS-Produktionssystem weltweit 19 Grid-Cluster angeschlossen, die sich an Instituten in Großbritannien, Italien, Kanada und Deutschland befinden.

Physikalische Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden die ersten Resultate basierend auf den in den Jahren 2003 und 2004 aufgezeichneten Positron-Proton Kollisionen auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Diese Daten entsprechen etwa einem Drittel des Datensatzes der Jahre 1994–2000. Der größte Teil der neuen Daten wurde mit longitudinal polarisiertem Positronstrahl gewonnen und zwar etwa jeweils zur Hälfte links- beziehungsweise rechtshändig. Außerdem ermöglichen die zusätzlich im Jahr 2000 installierten Komponenten des ZEUS Detektors, der Mikrovertexdetektor und der Straw-Tube-Tracker, entscheidende Verbesserungen bei Spur- und Vertexrekonstruktion. Diese Veränderungen verlangen aber andererseits umfangreiche systematische Studien bevor sie ausreichend verstanden sind, um sie in physikalischen Publikationen verwenden zu können. Wir diskutieren hier zunächst einige dieser vorläufigen Ergebnisse, wie sie als sogenannte „Preliminary Results“ auf internationalen Fachtagungen vorgestellt worden sind.

Im Übrigen kommt die Analyse der HERA I Daten der Jahre 1994–2000 allmählich zum Abschluss. Hier dominieren nun jene Untersuchungen, die sehr umfangreiche Studien der systematischen Messfehler erfordern. In diesem Bericht stellen wir einen Querschnitt dieser Ergebnisse vor. Schließlich geben wir einen Ausblick auf die für diese Resultate zu erwartenden Verbesserungen in den kommenden Jahren.

Verletzung der Parität in der schwachen Wechselwirkung

Seit den theoretischen Arbeiten von Lee und Yang und den Experimenten von C.S. Wu in den späten 50er Jahren wissen wir, dass die schwache Kraft, die zum Beispiel für den radioaktiven Betazerfall verantwortlich ist, die Symmetrie gegenüber Raumspiegelungen maximal verletzt. Das heißt, die schwache Kraft koppelt jeweils nur an linkshändige Teilchen, bzw. rechtshändige Antiteilchen. Die Natur kann somit eindeutig links und rechts unterscheiden. Die Ereignisse des geladenen Stromes bei HERA unterliegen denselben Regeln. Die im Rahmen des HERA Upgrade eingebauten Spinrotatoren ermöglichen es, einen wohldefinierten lon-

gitudinalen Spinzustand des Positron- bzw. Elektronstrahls einzustellen und die Paritätsverletzung genau zu vermessen. Durch Einstellen des bevorzugten oder des unterdrückten longitudinalen Spinzustands (man bezeichnet diesen auch als Helizität) können wir die schwache Wechselwirkung verstärken oder abschwächen. Wenn der Strahl vollständig polarisiert wäre, sollte man die schwache Wechselwirkung sogar vollständig aus- bzw. einschalten können. Abweichungen von diesem erwarteten Verhalten könnten Hinweise auf die Existenz bisher unbekannter schwerer W Bosonen mit rechtshändiger Kopplung liefern.

Für diese Analysen stehen aus den Jahren 2003 und 2004 Daten mit einer integrierten Luminosität von etwa 40 pb^{-1} zur Verfügung. Diese Daten sind etwa zur Hälfte links- beziehungsweise rechtshändig polarisiert. Der Grad der Polarisation liegt bei durchschnittlich 31%. Mit dieser Datenmenge erwartet man noch keine Empfindlichkeit für Phänomene außerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik. Diese Analysen dienen jedoch dazu, die Methode zu testen und zu etablieren.

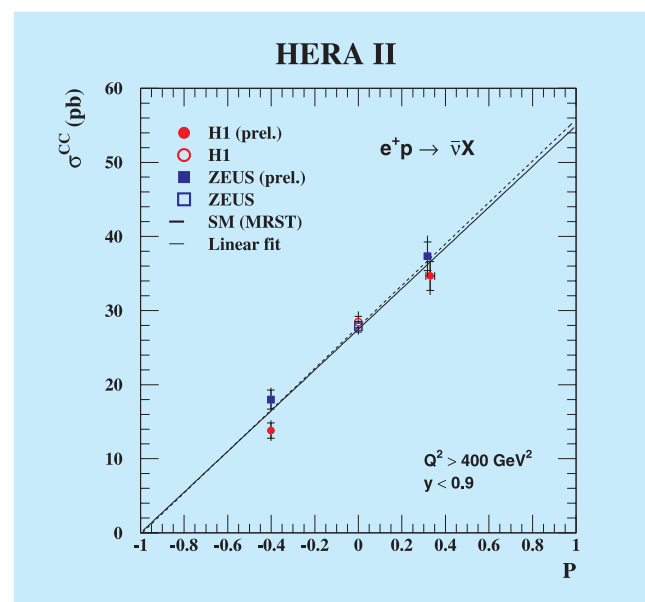


Abbildung 18: Der totale Wirkungsquerschnitt für Ereignisse des geladenen Stromes in tiefinelastischen e^+p Kollisionen als Funktion der longitudinalen Polarisation des Positronenstrahls. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt die Erwartung des Standardmodells der Teilchenphysik.

Die vorläufigen Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 18 dargestellt. Im Einzelnen sind die Werte des Wirkungsquerschnitts für geladene Stromereignisse als Funktion des durchschnittlichen Polarisationsgrades aufgetragen. Die Punkte bei Polarisationsgrad $\mathcal{P} = 0$ stammen aus den Messungen mit unpolarisierten Leptonen bei HERA I. Sowohl die vorläufigen Ergebnisse von ZEUS als auch die von H1 sind zu sehen. Eine lineare Extrapolation der Ergebnisse zu $\mathcal{P} = -1$, d. h. zu vollständig linkshändiger Polarisation (in der Abbildung als Gerade dargestellt) zeigt in der Tat, dass dort der Wirkungsquerschnitt nahezu null ist. Das bedeutet, dass die schwache Wechselwirkung nicht an linkshändige Antiteilchen koppelt. Diese Darstellung demonstriert eindrucksvoll das Potenzial von HERA bei voller Luminosität. Allerdings ist zum jetzigen Zeitpunkt die Aussage noch mit einem recht großen statistischen Fehler verbunden.

Identifikation schwerer Quarks durch Messung des Stoßparameters

Aus den Produktionsraten der schweren Quarks, Charm (c) und Beauty (b), bei HERA lassen sich wichtige Einblicke in Mechanismen der starken Wechselwirkung gewinnen. Diese wird, so glauben wir, von der Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben. Die mathematische Komplexität der QCD erlaubt allerdings nur wenige präzise Vorhersagen. Die Vorhersagen der Produktionsraten für c und b sollten jedoch, aufgrund ihrer vergleichsweise großen Massen, verlässlich sein. Diese Vorhersagen zu überprüfen, ist daher Teil des Programms des Studiums der starken Kraft bei HERA. Des Weiteren sind diese Produktionsraten eng mit den Partondichten im Proton verknüpft. Ein detailliertes Verständnis dieser Raten sollte daher auch das Wissen um die Struktur von Hadronen wesentlich voranbringen.

Schwere Quarks können auf unterschiedliche Weise identifiziert werden. Eine bewährte Standardmethode zum Identifizieren von c-Quarks verwendet die Zerfallskette über ein D-Meson, das ein c-Quark enthält. Bei b-Quarks bietet sich dagegen die hohe Masse von ca. 4 GeV als Unterscheidungsmerkmal an. Hierzu betrachtet man die Verteilung des Transversalimpulses in Jets, die als Kandidaten für den Zerfall eines schweren Quarks in Betracht kommen. Diese Verteilung ist

bei b-Quarks zu sehr viel höheren Werten verschoben als bei leichteren Quarks wie c, u, d und s. Diese Verschiebung erlaubt eine statistische Trennung der b-Quarks.

Eine andere vielversprechende Methode macht sich die lange Lebensdauer der schweren Quarks zu Nutze. Dabei versucht man den makroskopischen Stoßparameter des Quarks im Detektor zu rekonstruieren. Für b-Quarks liegt dieser bei 500 μm . Bei c-Quarks sind es um zwischen 100 und 300 μm . Mithilfe des ZEUS Mikrovertexdetektors, der speziell dafür entworfen und gebaut wurde, kann diese Methode nun zum ersten Mal bei ZEUS angewendet werden. Abbildung 16 zeigt ein Ereignis im ZEUS Mikrovertexdetektor mit einem sekundären Vertex, der vom Zerfall eines schweren Quarks stammen könnte. Für diese Messung muss allerdings die Position des ZEUS Mikrovertexdetektors relativ zum zentralen Spurdetektor von ZEUS mit hoher Genauigkeit bestimmt und die Ausrichtung aller Messebenen im Innern errechnet werden. Dieses sogenannte „Alignment“ verlangt viel Sorgfalt und Zeit und hat die endgültige Präzision noch nicht erreicht. Die Präzision ist jedoch für erste Untersuchungen ausreichend. Zwei dieser vorläufigen Messungen werden im Folgenden beschrieben.

Die erste Messung betrifft die Verbesserung der Identifikation von geladenen D^\pm Mesonen. Zunächst werden in guten Positron-Proton Ereignissen ein Kaon- und zwei gegensätzlich geladene Pionkandidaten kombiniert. Dann wird für diejenigen Kombinationen, deren Massen mit der eines geladenen D^\pm Mesons verträglich sind, die Vertexrekonstruktion wiederholt und überprüft, ob sich die rekonstruierten Spuren der drei Zerfallsprodukte des geladenen D^\pm zu einem, vom Primärvertex des Ereignisses wohl separierten sekundären Vertex, kombinieren lassen. In Abbildung 19 ist die Signifikanz des Abstandes dieser Sekundärvertices vom Primärvertex aufgetragen. Die Signifikanz ist der Quotient aus gemessenem Abstand und dem erwarteten Fehler der Messung. Diese Größe trägt außerdem ein Vorzeichen, und zwar positiv, wenn der Sekundärvertex auf der richtigen Seite des Primärvertex, also in Flugrichtung des rekonstruierten D^\pm liegt. Fällt der Sekundärvertex in die entgegengesetzte Hemisphäre des Ereignisses, dann ist die Signifikanz negativ. Negative Signifikanzen kommen durch das begrenzte Auflösungsvermögen des Detektors zustande: liegt der Se-

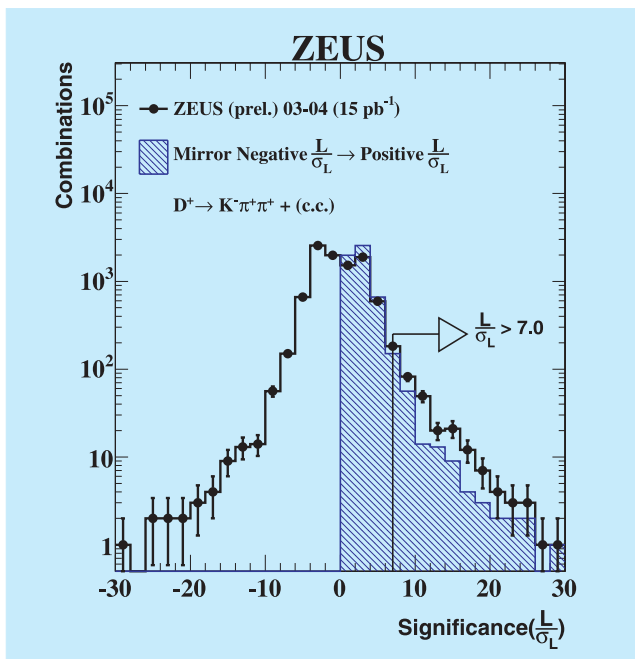


Abbildung 19: Verteilung der Signifikanz des transversalen Abstandes des Sekundärvertex vom Primärvertex für Ereignisse mit rekonstruierten D^\pm Kandidaten.

kundärvertex zu nahe am Primärvertex, dann kann der Detektor die Vertices nicht wirklich trennen und der Sekundärvertex wird in 50% der Fälle auf der „falschen“ Seite des Primärvertex rekonstruiert. Dieser Effekt ist allerdings für die Extraktion der wahren Abstandsverteilung von großem Nutzen. Man verwendet nämlich den negativen Teil der Verteilung, um den entsprechenden Anteil im positiven Teil der Verteilung abzuschätzen und entsprechend abzuziehen. Das was nach dieser statistischen Subtraktion übrig bleibt, ist der Anteil der Vertices, die einen echten messbaren Abstand vom Primärvertex haben.

Abbildung 20 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Man sieht die Verteilung der invarianten Masse der D^\pm Kandidaten nach der oben beschriebenen statistischen Subtraktion. Zum Vergleich ist, klein dargestellt, dieselbe Verteilung ohne Anwendung der Sekundärvertexmessung zu sehen. Die Sekundärvertexmethode liefert ein gutes Signal zu Untergrund Verhältnis, während ohne diese Methode, siehe kleines Bild, praktisch kein Signal zu erkennen ist.

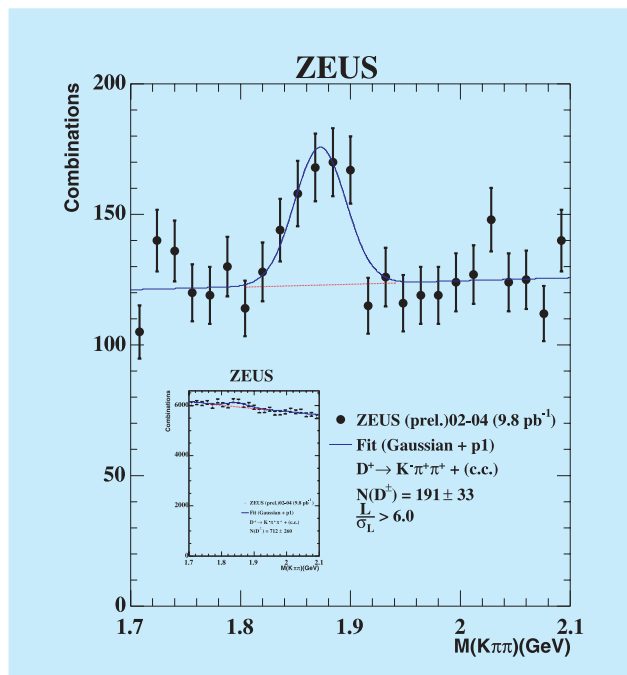


Abbildung 20: Invariante Masse der D^\pm Kandidaten nach Subtraktion des negativen Anteils der Signifikanzverteilung des Sekundärvertexabstands für Signifikanzen $\frac{L}{\sigma_L} > 6$. Zum Vergleich, klein gezeigt, ist die entsprechende Massenverteilung dargestellt ohne die Verwendung des Vertexabstands.

Die zweite Messung, die hier beschrieben werden soll, befasst sich mit der Bestimmung von b-Quarks in Photoproduktionsereignissen. Zunächst wurde eine Vorauswahl von Ereignissen mit zwei Teilchenjets mit großem Transversalimpuls getroffen, wobei einer der Teilchenjets ein Myon enthält. Das Myon ist dabei ein Hinweis auf einen semileptonischen Zerfall eines b-Quarks in ein c-Quark. Aufgrund der großen Masse des b-Quarks erwartet man in solchen Ereignissen, dass, im Vergleich zu leichteren Quarks, der Transversalimpuls des Myons relativ zum assoziierten Jet, p_T^{rel} , zu hohen Werten verschoben ist. Das erlaubt eine statistische Separation der b-Quarks von den leichteren Quarks.

Auch hier kann man die Messgenauigkeit des Mikrovertexdetektors zur Anwendung bringen. Bei dieser Messung wird allerdings, anders als bei der zuvor beschriebenen, kein Sekundärvertex rekonstruiert. Man

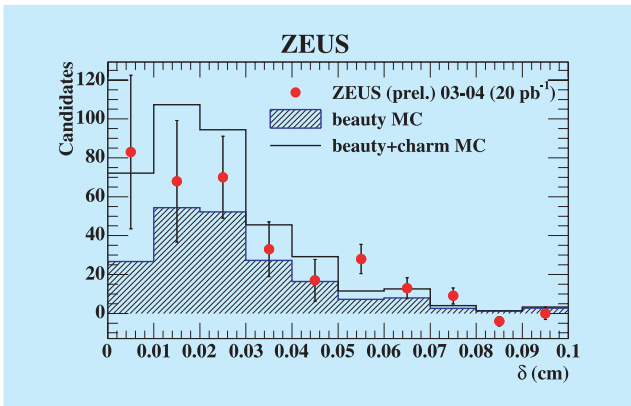


Abbildung 21: Verteilung des Stoßparameters δ von mit Jets assoziierten Myonen in Photoproduktionsergebnissen nach Subtraktion des negativen Anteils der Signifikanzverteilung. Die Punkte sind die vorläufigen Messdaten von ZEUS, das offene Histogramm zeigt die Erwartung für c - und b -Quark-Produktion und das schraffierte Histogramm zeigt die Erwartung für den b -Anteil.

verwendet hier den gemessenen Stoßparameter des assoziierten Myons, das heißt den transversalen Abstand des Perihels der Myonspur (der Punkt auf der Spur mit dem geringsten Abstand zum HERA Strahl). Dieser Abstand wird wiederum, wie zuvor beschrieben, in Form einer Signifikanz mit einem Vorzeichen dargestellt, wobei der negative Anteil der Verteilung die Abschätzung der Detektorauflösung ermöglicht.

Die Punkte in Abbildung 21 zeigen die Verteilung des Stoßparameters des assoziierten Myons nach Anwendung der statistischen Subtraktion im Bereich bis 0.1 cm. Ebenfalls dargestellt sind die Erwartungen für c und b (offenes Histogramm) und für b alleine (schraffiertes Histogramm). Allerdings sind die relativen Anteile von c und b aus der klassischen p_T^{rel} -Methode entnommen, da die noch relativ großen Fehler der Stoßparametermethode keine zuverlässige Extraktion dieser Anteile erlauben. Es handelt sich somit hier um keine eigenständige Messung, sondern lediglich um eine Überprüfung der Konsistenz.

In der Zukunft wird die Qualität dieser Ergebnisse noch stark gesteigert werden, insbesondere wenn die volle Präzision des Mikrovertexdetektors durch eine

entsprechende Kalibration vollständig ausgenutzt werden kann. Die Ergebnisse demonstrieren aber schon jetzt eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit dieser Erweiterung des ZEUS Detektors.

Prompte Photonen

Obwohl die QCD, die Theorie der starken Kraft, seit nun 25 Jahren etabliert ist, sind bisher nur sehr wenige exakte Vorhersagen bekannt. Insbesondere das Phänomen des „Confinement“, das heißt die Tatsache, dass wir in der Natur keine freien Quarks und Gluonen beobachten, entzieht sich weiterhin einer quantitativen Beschreibung. In der Praxis bedeutet das, dass wir Vorhersagen für die elementaren Reaktionen, in denen Quarks und Gluonen erzeugt werden, nur mit Messungen von Hadronen bzw. Teilchenjets überprüfen können. Für den Übergang von Quarks und Gluonen zu Hadronen gibt es eine Vielzahl verschiedener phänomenologischer Modelle. In Abhängigkeit vom untersuchten physikalischen Prozess sagen diese Modelle unterschiedlich große Korrekturen für die Hadronisation, also den Übergang von Quarks zu Hadronen, voraus. Ihre Vorhersagen sind in sorgfältiger Kleinarbeit über die Jahre immer weiter verbessert worden, so dass man daraus für viele Messungen einigermaßen verlässliche Korrekturen errechnen kann. Einen quantitativen Zugang zum Phänomen der Hadronisation gewinnt man dadurch aber leider nur sehr unzureichend.

Eine Möglichkeit, sozusagen durch eine Hintertür hindurch, die Eigenschaften der primären Quarks zu untersuchen, bietet allerdings ein Prozess, der im Berichtsjahr zum ersten Mal bei HERA nachgewiesen werden konnte. Dabei handelt es sich um die Abstrahlung eines hochenergetischen Photons direkt von einem der an der primären Reaktion beteiligten Quarks in tiefunelastischen Stoßprozessen. Man bezeichnet solche Photonen als prompte Photonen. Mit der Untersuchung der Eigenschaften dieser Photonen hat man sozusagen einen Durchgriff direkt auf die elementaren Reaktionsprodukte ohne von den Vorhersagen der Hadronisationsmodelle abhängig zu sein.

Diese Untersuchung bereitet allerdings beträchtliche experimentelle Schwierigkeiten, die sich daraus ergeben, dass in Teilchenreaktionen eine Vielzahl von

Photonen erzeugt werden, aus denen die sogenannten prompten Photonen herausgefiltert werden müssen. Insbesondere die neutralen Mesonen, π^0 und η , die beide in je zwei Photonen zerfallen, bereiten die größten Schwierigkeiten. Die beiden Photonen aus dem Zerfall der Mesonen liegen nämlich typischerweise im Detektor so dicht beieinander, dass sie zunächst als einzelnes Photon erkannt werden. Erst eine sorgfältige Analyse der Energiedepositionen im Kalorimeter erlaubt eine statistische Trennung der prompten Photonen vom Untergrund. Die hier diskutierte Messung basiert auf dem vollständigen Datensatz der Jahre 1996–2000 und entspricht einer integrierten Luminosität von 122 pb^{-1} . In einer Vorauswahl von tiefunelastischen Streueignissen mit Teilchenjets werden isolierte elektromagnetische Schauer anhand ihrer Ausdehnung und Form im Kalorimeter identifiziert.

Details dieser statistischen Trennung sind in Abbildung 22 dargestellt, die die Verteilung der Observablen $\langle \delta Z \rangle$, einem Maß für die Breite der elektromagnetischen Schauer, zeigt. Die Verteilung enthält drei lokale

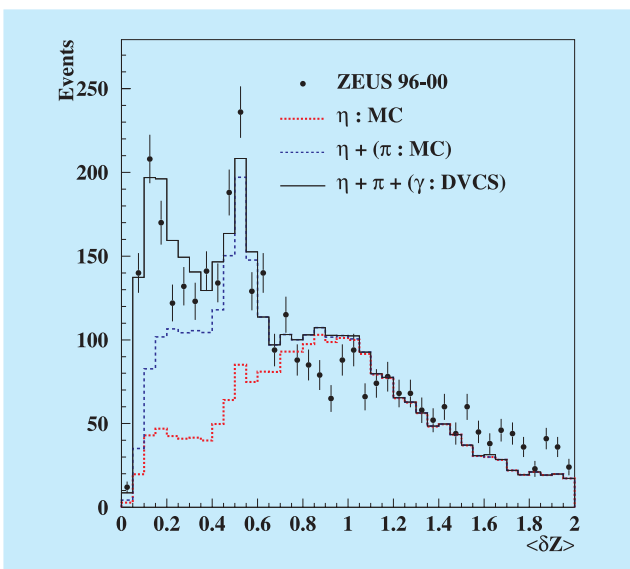


Abbildung 22: Verteilung der Breite elektromagnetischer Schauer, $\langle \delta Z \rangle$, im ZEUS Kalorimeter. Die Punkte stellen die ZEUS Daten dar. Die drei verschiedenen Histogramme entsprechen der statistischen Zerlegung mit Hilfe von Simulationen für die Photonen aus η und π^0 Zerfällen und wohl identifizierten Photonen aus „deep virtual compton scattering“ (DVCS) Ereignissen.

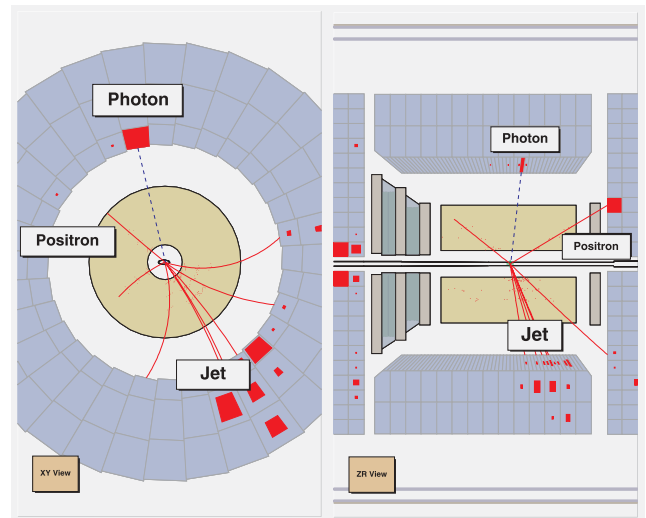


Abbildung 23: Tiefunelastisches Streueignis mit einem prompten Photon im ZEUS Detektor.

Maxima, die von den drei diskutierten Komponenten stammen. Die Photonenpaare aus den Zerfällen von η und π^0 Mesonen tragen typischerweise bei höheren Werten von $\langle \delta Z \rangle$ bei. Die einzelnen prompten Photonen sind als schmales Maximum bei niedrigen Werten von $\langle \delta Z \rangle$ zu sehen. Die Werte der einzelnen Beiträge werden durch statistische Anpassung einer Mischung der einzelnen Komponenten an Verteilungen wie diese errechnet. Ein Ereignis, das auf diese Weise extrahiert wurde ist in Abbildung 23 gezeigt.

Auf diese Weise wurden 572 Ereignisse über einem Untergrund von 1303 Ereignissen gefunden. Der sichtbare Wirkungsquerschnitt beträgt $\sigma(ep \rightarrow e\gamma X) = 5.64 \text{ pb}$ mit einem Fehler von etwa 10%. Damit ist die Existenz dieses Prozesses unzweifelhaft nachgewiesen und der Weg für weitere Untersuchungen an diesen interessanten Ereignissen gebahnt. Zukünftige Messungen mit höherer Statistik bei HERA II werden dann interessante neue Einblicke in den Hadronisationsprozess ermöglichen.

Pentaquarks

Nur zwei Arten von Quarkkombinationen sind notwendig, um alle bekannten stark wechselwirkenden Elementarteilchen zu erklären: Baryonen, bestehend aus

drei, und Mesonen, bestehend aus zwei Quarks. Beispiele für Mesonen sind das Pion und das η , die bereits im vorigen Abschnitt erwähnt wurden. Das Proton und das Neutron sind die bekanntesten Vertreter der Baryonen.

Mit diesem einfachen Konstruktionsprinzip werden alle der vielen hundert bekannten stark wechselwirkenden Elementarteilchen erfasst. Es könnte aber auch andere Kombinationen von Quarks und von Quarks mit Gluonen geben. Die Theorie der starken Wechselwirkung, die QCD, schließt andere Kombinationen nicht aus und in mehreren theoretischen Arbeiten werden die Eigenschaften dieser Teilchen vorhergesagt. Ein besonders interessanter Fall ist das Θ^+ , das aus zwei u -, zwei d -, und einem Anti- s -Quark bestehen soll. Damit wäre das Θ^+ das einfachste Pentaquark und außerdem ein „exotisches“ Baryon, weil es ein ungepaartes Antiquark enthält. Für das Θ^+ hatte bereits 1997 eine Gruppe von russischen Theoretikern eine Masse von 1530 MeV und eine schmale Zerfallsbreite vorhergesagt, die es ermöglichen sollte, das Teilchen zu beobachten.

Im Juli 2003 behaupteten zuerst Arbeitsgruppen aus Japan und USA, das Θ^+ beobachtet zu haben. Seitdem haben wenigstens 11 weitere Experimente weltweit diese Ergebnisse bestätigt. Auch das ZEUS Experiment hat im Berichtszeitraum einen Beitrag zum Verständnis dieses wichtigen Themas geleistet.

Bei ZEUS wurde speziell nach dem Zerfall dieses hypothetischen Teilchens in neutrale Kaonen und Protonen gesucht. Ein Teilchen, das in ein Proton und ein neutrales Kaon zerfällt, muss aus mindestens 5 Quarks bestehen. Allerdings muss man dafür die neutralen Kaonen von ihren Antiteilchen unterscheiden können. Bei ZEUS wurden die Kaonen mittels des Zerfalls in zwei geladene Pionen, $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, identifiziert. Die Protonauswahl wurde anhand der Energieverlustverteilung im zentralen Spurdetektor getroffen. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 24 gezeigt, in der die Verteilung der invarianten Masse der Kaon-Proton Kombinationen aufgetragen ist.

Deutlich ist eine resonanzähnliche Anhäufung von Ereignissen bei 1521 MeV über einem breiten Untergrund zu erkennen. An die Daten wurde eine Funktion bestehend aus einem Untergrundanteil und zwei Gaußkurven angepasst. Die breitere der beiden Gaußkurven liegt bei 1465 MeV und hat eine Breite von 16 MeV.

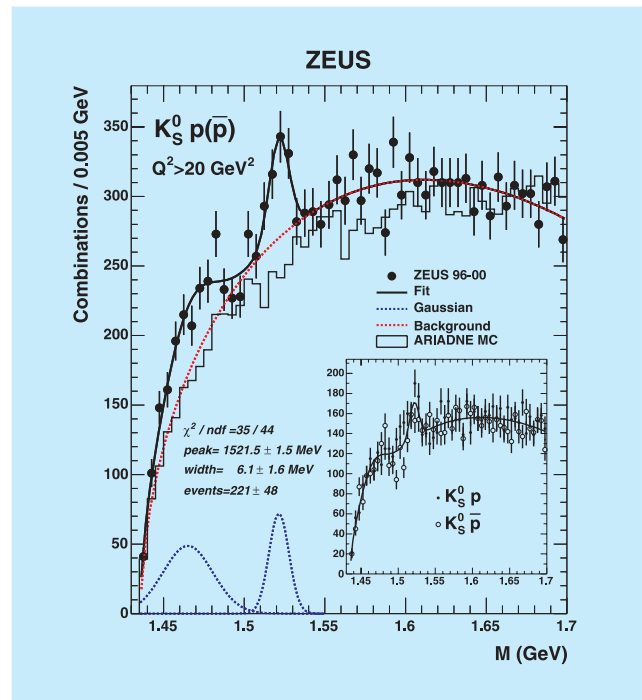


Abbildung 24: Invariante Massenverteilung der Kombinationen aus neutralen Kaonen und Protonen beziehungsweise Antiprotonen.

Dabei handelt es sich möglicherweise um das $\Sigma(1480)$, eine nicht gesicherte Resonanz. Die schmalere Gaußkurve liegt bei 1521 MeV, hat eine Breite von 8 ± 4 MeV und eine statistische Signifikanz von 3.9 Standardabweichungen. Die Position, Breite und der Zerfallskanal dieser Resonanz legen die Annahme nahe, dass es sich hierbei um das Θ^+ handeln könnte. Man muss allerdings einschränkend anmerken, dass in dieser Analyse die neutralen Kaonen nicht von ihren Antiteilchen unterschieden werden konnten. Die beobachtete Resonanz ist somit nicht zwingend exotisch. Außerdem liegt die Resonanz im Vergleich zu den anderen veröffentlichten Ergebnissen, die überwiegend zwischen 1530 und 1540 GeV zu finden sind, ein klein wenig zu niedrig. Klarheit wird vermutlich die Analyse weiterer Zerfallskanäle sowie die höhere Statistik der HERA II Daten bringen. Sollte es sich bei diesem Signal allerdings tatsächlich um das Θ^+ handeln, dann hätte ZEUS die erste Evidenz für das Antiteilchen des Θ^+ , nämlich das Θ^- , geliefert, wie das kleine eingefügte Diagramm in Abbildung 24 zeigt. Dort ist das Signal nämlich sowohl im Kanal $K_S^0 p$ als auch im Kanal $\bar{K}_S^0 \bar{p}$ zu sehen. Allerdings

wird hier noch einmal daran erinnert, dass zwischen K_S^0 und \bar{K}_S^0 in dieser Analyse nicht unterschieden werden kann.

Eine weitere mögliche Entdeckung sorgte im Berichtsjahr für Aufregung. Im März veröffentlichte die H1 Kollaboration die Beobachtung einer resonanz-artigen Struktur bei 3.1 GeV in Kombinationen eines $D^*(2010)$ Mesons mit einem Proton. Ein Objekt, das auf diese Weise zerfällt, müsste ebenfalls aus mindestens fünf Quarks bestehen, und zwar aus je zwei u-, zwei d- und einem Anti-c-Quark. Es wäre ein naher Verwandter des Θ^+ , bei dem das Anti-Strange-Quark durch ein Anti-c-Quark ersetzt ist und das man als Θ_C bezeichnet. Auch die Existenz dieses Pentaquarks wird in theoretischen Arbeiten vorhergesagt, allerdings mit einer Masse unter 3 GeV. Außer H1 hatte bisher kein anderes Experiment das Θ_C beobachtet. Somit war es von allerhöchster Wichtigkeit, auch in den Daten von ZEUS nach Hinweisen auf das Θ_C zu suchen. Die Methode, die bei ZEUS dafür verwendet wurde, und die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden präsentiert.

Der Ausgangspunkt sind Ereignisse, in denen ein $D^*(2010)$ Meson vorhanden ist. In den ZEUS Daten findet man ca. 40 000 dieser Mesonen. Wenn das Θ_C dort mit einem Anteil, vergleichbar dem von H1 angegebenen, vorhanden ist, dann müsste man an die 400 Θ_C bei ZEUS finden können. In diesen Ereignissen wurde dann nach Protonen und Antiprotonen gesucht und diese mit den $D^*(2010)$ Mesonen kombiniert.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 zu sehen. Dort werden vier verschiedene Fälle gezeigt. Diese unterscheiden sich im Zerfallskanal des $D^*(2010)$ und im kinematischen Bereich der untersuchten Daten. Diese Unterscheidung wurde vorgenommen, da das Θ_C bei H1 in verschiedenen kinematischen Bereichen unterschiedlich klar zu sehen ist. Außerdem wurden bei ZEUS auch die Ereignisse berücksichtigt, bei denen das $D^*(2010)$ in ein Kaon und drei Pionen zerfällt. H1 hat diesen Zerfallskanal bisher nicht betrachtet. Die in der Abbildung unterlegt dargestellte schmale Struktur zeigt die Größe des gemäss der H1 Beobachtung erwarteten Signals. In keinem der vier untersuchten Fälle konnte irgendein Hinweis auf ein Θ_C Signal von annähernd vergleichbarer Größe beobachtet werden. Aus der Tatsache, dass in den Daten von ZEUS nichts zu

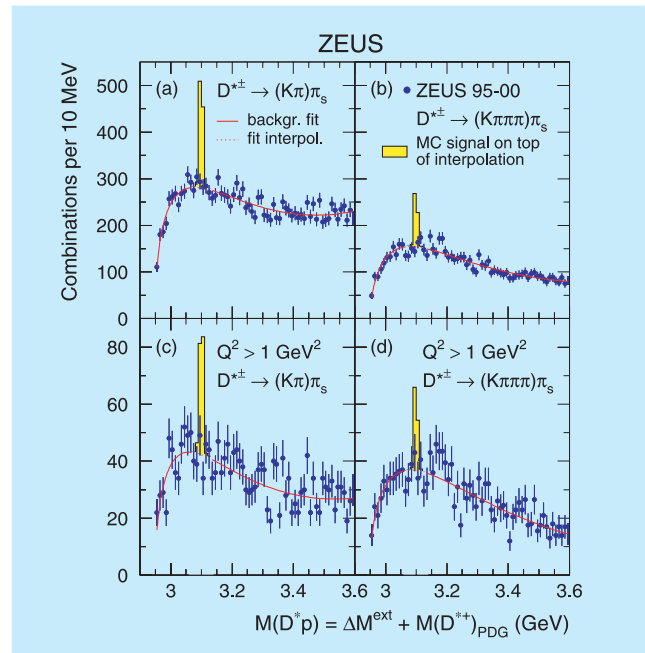


Abbildung 25: Invariante Massenverteilung der Kombinationen aus $D^*(2010)$ Mesonen mit Protonen beziehungsweise Antiprotonen.

sehen ist, wurde eine obere Schranke von 0.23% aller $D^*(2010)$ Mesonen für das maximal mögliche Θ_C Signal errechnet. Der von H1 angegebene Anteil des Θ_C Signals an allen Ereignissen mit einem $D^*(2010)$ beträgt dagegen 1%. Damit ist das Ergebnis von ZEUS mit dem von H1 klarerweise unverträglich.

Exklusive Produktion von J/ψ Mesonen

Seit seiner Entdeckung vor 30 Jahren im November 1974 spielt das J/ψ Meson eine wichtige Rolle für unser Verständnis der Physik der kleinsten Teilchen. Das J/ψ ist ein gebundener Zustand bestehend aus einem Charm- und einem Anti-Charm-Quark. Die Masse beträgt 3.1 GeV und die Zerfallsbreite ist extrem schmal. Die Entdeckung des J/ψ war der entscheidende experimentelle Schritt zum Verständnis des Quark Modells und eröffnete den Blick in die reichhaltige Welt der Charm-Mesonen. Insbesondere die Vermessung der

Teilchenspektren im Charm-Sektor lieferte die Verifikation der von Gell-Mann und Zweig vorgeschlagenen Theorie der starken Wechselwirkung.

Bei HERA erlaubt die exklusive Produktion von J/ψ Mesonen, ähnlich wie im Falle der Produktion von prompten Photonen, einen sehr direkten Rückschluss auf die elementaren Reaktionsprodukte in der Elektron-Proton Streuung. So kann man zusätzliche Informationen über die Gluonverteilung im Proton gewinnen.

Beispielhaft für diese Messungen sind in Abbildung 26 die Wirkungsquerschnitte für die Reaktion $ep \rightarrow epJ/\psi$ als Funktionen der invarianten Masse des Photon-Proton Systems, W , und der Virtualität des Photons, Q^2 , dargestellt. Man findet, dass diese Daten durch sehr einfache funktionale Zusammenhänge beschrieben werden, für die nur die Masse und der Spinzustand des J/ψ eine Rolle spielen. Die Ergebnisse sind außerdem mit den Messungen in der Photoproduktion konsistent. Somit kann man sagen, dass der Produktionsmechanismus des J/ψ wohlverstanden ist und die Methoden der perturbativen QCD Anwendung finden können. Sobald die notwendigen theoretischen Werkzeuge zur Verfügung stehen, wird es daher möglich sein, diese Daten zur Bestimmung der Gluonverteilung im Proton mit heranzuziehen.

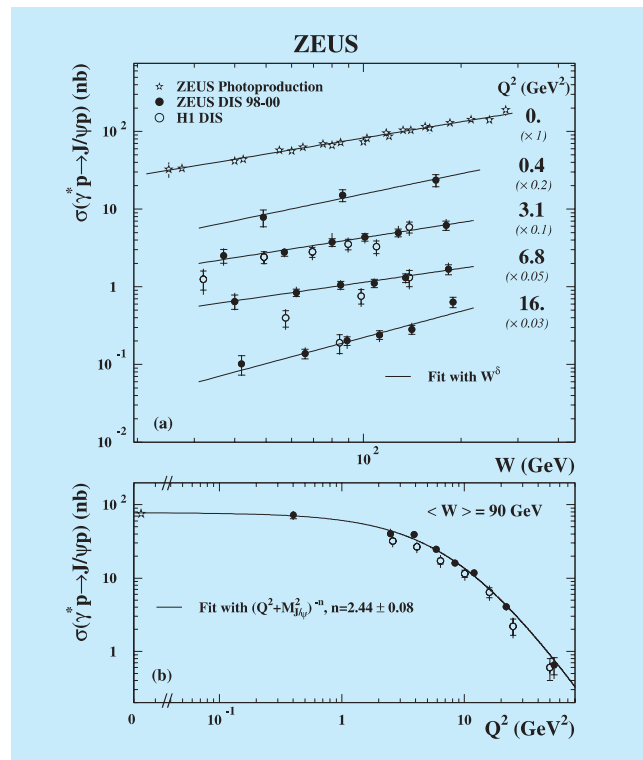


Abbildung 26: Wirkungsquerschnitt der Reaktion $ep \rightarrow epJ/\psi$ (a) als Funktion der invarianten Masse des Photon-Proton Systems, W , und (b) als Funktion der Virtualität des Photons, Q^2 .