

# HERA-B Experiment

**Beteiligte Institute:** NIKHEF Amsterdam, Univ. Barcelona, Humboldt Univ. Berlin, Univ. und INFN Bologna, Univ. Cincinnati, LIP and Univ. Coimbra, Niels Bohr Inst. Copenhagen, Wayne State Univ. Detroit, Univ. Dortmund, JINR Dubna, DESY Hamburg, MPI Kernphys. und Univ. Heidelberg, Univ. of Houston, INR Kiev, LIP und Univ. Lissabon, Jozef Stefan Inst. und Univ. Ljubljana, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

**Sprecher:** M. Medinnis, DESY

**HERA-B ist ein Präzisionsspektrometer, das die Wechselwirkungen der Protonen im Halo des HERA-Protonenstrahls mit Drahttargets verschiedener Kernladungszahl untersucht. Die große Akzeptanz des Spektrometers, die hohe Granularität der Teilchenidentifikationssysteme, der hochpräzise Vertexdetektor und ein mehstufiger Trigger erlauben das detaillierte Studium komplexer und seltener Vielteilchen-Endzustände. Zwischen Sommer 2002 und März 2003 wurden 150 Millionen Ereignisse mit einem Zwei-Leptonen-Trigger und 200 Millionen Ereignisse mit einem „Minimum-Bias“ Trigger aufgezeichnet. Damit ist die Datennahme mit dem HERA-B Spektrometer abgeschlossen. Seither konzentriert sich die Kollaboration auf die Auswertung der Daten. Die Analyse eines kleinen, während der Inbetriebnahme im Jahr 2000 aufgezeichneten Datensatzes, wurde Anfang des Jahres 2003 abgeschlossen und führte zur Veröffentlichung von Messungen des Produktionswirkungsquerschnittes von B- und  $\chi_c$ -Mesonen sowie von  $\Lambda$ - und  $K_s^0$ -Teilchen.**

Während des HERA-Betriebs von Sommer 2002 bis Anfang März 2003 konnte HERA-B 150 Millionen Ereignisse mit dem Zwei-Leptonen-Trigger aufzeichnen. Hierbei handelt es sich um einen mehrstufigen Trigger, der die Selektion seltener Wechselwirkungen mit zwei Leptonen aus einem sehr hohen Untergrund an anderen Zerfallsprodukten der Proton-Kern-Wechselwirkungen ermöglicht. Diese Leptonpaare können zum Beispiel

dem Zerfall von  $J/\psi$ -Mesonen entstammen. Durch die Verwendung von Targetdrähten verschiedener Materialien (Kohlenstoff, Aluminium, Titan und Wolfram) ist HERA-B in der Lage, die Abhängigkeit verschiedener Eigenschaften der Proton-Kern-Wechselwirkungen als Funktion der Kernladungszahl zu messen.

Der Datensatz beinhaltet etwa 300 000 Ereignisse mit einem  $J/\psi$  im Endzustand, jeweils etwa zur Hälfte Zwei-Myon- bzw. Zwei-Elektron-Zerfälle. Damit konnte der im Jahr 2000 aufgezeichnete Datensatz um mehr als einen Faktor 50 vergrößert werden. Aufgrund einer Vielzahl von Verbesserungen am Detektor- und Triggersystem konnten die Daten in einer vergleichbaren Strahlzeit aufgezeichnet werden. Zusätzlich wurden durch Verbesserungen des Datennahmesystems Datenraten von mehr als 1000 Ereignissen pro Sekunde (mehr als 1 Terabyte pro Tag) für unelastische Wechselwirkungen (so genannte Minimum-Bias Daten) erzielt und innerhalb einer Kalenderwoche ca. 150 Millionen unelastische Ereignisse aufgezeichnet. Dies entspricht einer Erhöhung des Datensatzes aus dem Jahr 2000 um etwa einen Faktor 100.

Die HERA-B Kollaboration hat im März 2003 entschieden, die Datennahme zu beenden und sich ganz auf die Analyse der Daten zu konzentrieren. Daraufhin wurden von Untergruppen der Kollaboration zwei verschiedene Vorschläge für weitere Messungen mit dem HERA-B Spektrometer ausgearbeitet. Diese Vorschläge zur Untersuchung von Teilchen mit Charm (HERA-c) sowie zur Suche nach exotischen Mesonen (HERA-g) wurden

dem Physics Research Committee (PRC) zur Begutachtung vorgelegt. Nach eingehender Diskussion wurden diese Vorschläge vom DESY Direktorium abgelehnt.

## Ereignisse mit Zweispurtrigger

Abbildung 32 (oben) zeigt das invariante Massenspektrum von  $\mu^+\mu^-$ -Paaren für 80% aller Ereignisse. Ein  $J/\psi$ -Signal mit etwa 150 000 Ereignissen ist deutlich sichtbar. Ferner sind Signale von  $\psi(2s)$ ,  $\phi(1020)$ ,  $\omega(782)$  und  $\rho(770)$  zu erkennen. Auch im Elektronkanal können die gleichen Signale nachgewiesen werden (Abb. 32 (unten)). In diesem Fall wird allerdings die Massenaufösung durch die Bremsstrahlung der Elek-

tronen verschlechtert. Das  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ -Signal entspricht etwa 100 000 Ereignissen.

Zur Zeit werden mehrere Analysen dieser Daten durchgeführt, unter anderem eine Präzisionsmessung des  $b\bar{b}$ -Produktionswirkungsquerschnitts, die Suche nach seltenen Zerfällen von  $D^0$ -Mesonen über „flavor changing neutral currents“ (FCNC), eine genauere Messung des  $\chi_c$  zu  $J/\psi$  Produktionsverhältnisses und Analysen der Abhängigkeit des  $J/\psi$ -Produktionswirkungsquerschnitts von kinematischen Größen und der Kernladungszahl des Targetmaterials.

## FCNC-Zerfälle von $D^0$ -Mesonen

Innerhalb des Standardmodells sind Prozesse mit neutralen Strömen bei gleichzeitiger Änderung der Quark-Flavor (FCNC) stark unterdrückt. Dies führt zu einer starken Unterdrückung des Zwei-Myon-Zerfallskanals des  $D^0$ -Mesons mit einem erwarteten Verzweungsverhältnis der Größenordnung  $10^{-13}$ . Von einigen Erweiterungen des Standardmodells werden jedoch wesentlich höhere Zwei-Myon-Zerfallsraten vorhergesagt. Nach einer aktuellen Studie wird für ein Minimal Supersymmetrisches Standardmodell (MSSM) mit R-paritätsverletzenden Prozessen ein Verzweungsverhältnis von  $3.5 \times 10^{-6}$  vorhergesagt. Das HERA-B Experiment kann im Zerfall  $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  diese Empfindlichkeit erreichen.

Die große Anzahl an Ereignissen in der Massenregion des  $D^0$ -Mesons (1.86 GeV, Abb. 32) zeigt die potentielle Sensitivität von HERA-B für den  $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  Zerfallskanal.

Unter Ausnutzung der kinematischen Eigenschaften dieser Zerfälle (hier wird unter anderem ausgenutzt, dass  $D^0$ -Mesonen aufgrund ihrer langen Lebensdauer nicht direkt am Hauptvertex zerfallen), kann die Anzahl der im  $D^0$ -Massenbereich beobachteten Ereignisse auf drei reduziert werden. Der nach der Selektion erwartete Untergrund, der von Prozessen des Standardmodells stammt, wurde auf sechs Ereignisse abgeschätzt, was mit den Beobachtungen verträglich ist. Damit ist es möglich eine vorläufige obere Grenze für das Verzweungsverhältnis von  $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  von  $2.2 \times 10^{-6}$  anzugeben. Diese Grenze liegt unterhalb des von dem oben

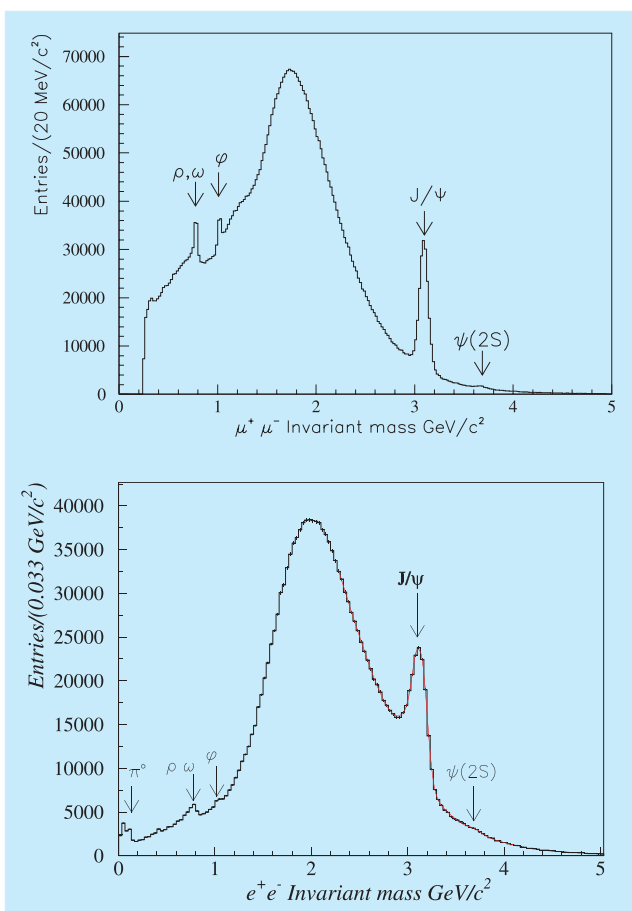


Abbildung 32: Invariantes Massenspektrum der  $\mu^+\mu^-$ -Paare (oben) und der  $e^+e^-$ -Paare (unten).

erwähnten Minimal Supersymmetrischen Standardmodell (MSSM) vorhergesagten Verzweigungsverhältnis und verbessert die bisher empfindlichste Messung der CDF-Kollaboration von  $2.5 \times 10^{-6}$ .

## $b\bar{b}$ -Produktionswirkungsquerschnitt

Die Erzeugung schwerer Quarks in Proton-Kern-Reaktionen erlaubt es, die Quantenchromodynamik (QCD), die Theorie der starken Wechselwirkung, zu testen bzw. ihre phänomenologischen Parameter genauer zu bestimmen. Aus diesem Grund wird von HERA-B eine Präzisionsmessung des B-Wirkungsquerschnittes durchgeführt.

Die Mehrheit der  $J/\psi$ -Mesonen wird direkt am Wechselwirkungspunkt erzeugt. Im Gegensatz dazu entstehen  $J/\psi$ -Mesonen aus Zerfällen von B-Mesonen aufgrund der langen B-Lebensdauer bei HERA-B Energien typischerweise 1 cm vom Primärvertex entfernt. Allerdings ist nur in etwa einem aus 100 B-Meson Zerfällen ein  $J/\psi$ -Meson im Endzustand enthalten.

Das Prinzip der HERA-B-Messung des B-Wirkungsquerschnitts beruht auf der Bestimmung der Rate an  $J/\psi$ -Zerfällen, die in Strahlrichtung separiert vom Primärvertex entstehen (und damit wahrscheinlich B-Zerfallsprodukte darstellen) im Vergleich zur Rate an direkt produzierten  $J/\psi$ -Mesonen. Da der Wirkungsquerschnitt für direkte  $J/\psi$ -Produktion bereits bekannt ist (Messungen von E771 und E789), wird der B-Wirkungsquerschnitt relativ dazu bestimmt. Mit den Daten aus dem Jahr 2000 wurde mit dieser Methode ein B-Produktionswirkungsquerschnitt von  $32_{-12}^{+14} \text{ }_{-7}^{+6}$  nb/Nukleon gemessen. Die deutlich größere Anzahl von Ereignissen wird eine signifikant genauere Messung ermöglichen. Die Analyse der Daten wird im Moment durchgeführt. Abbildung 33 zeigt für etwa 35% der gesamten Statistik das invariante Massenspektrum für  $e^+e^-$ -Paare (oben) und  $\mu^+\mu^-$ -Paare (unten) nach Anwendung von Vertexschnitten, um den Beitrag direkt produzierter  $J/\psi$ -Mesonen zu unterdrücken. Die Messpunkte mit Fehlerbalken beziehen sich auf Ereignisse, deren Zerfallsvertex stromabwärts vom Wechselwirkungspunkt (Primärvertex) liegt. Das schraffierte Histogramm hingegen enthält Leptonpaare, deren Zerfallsvertex aufgrund der begrenzten Messauflösung des

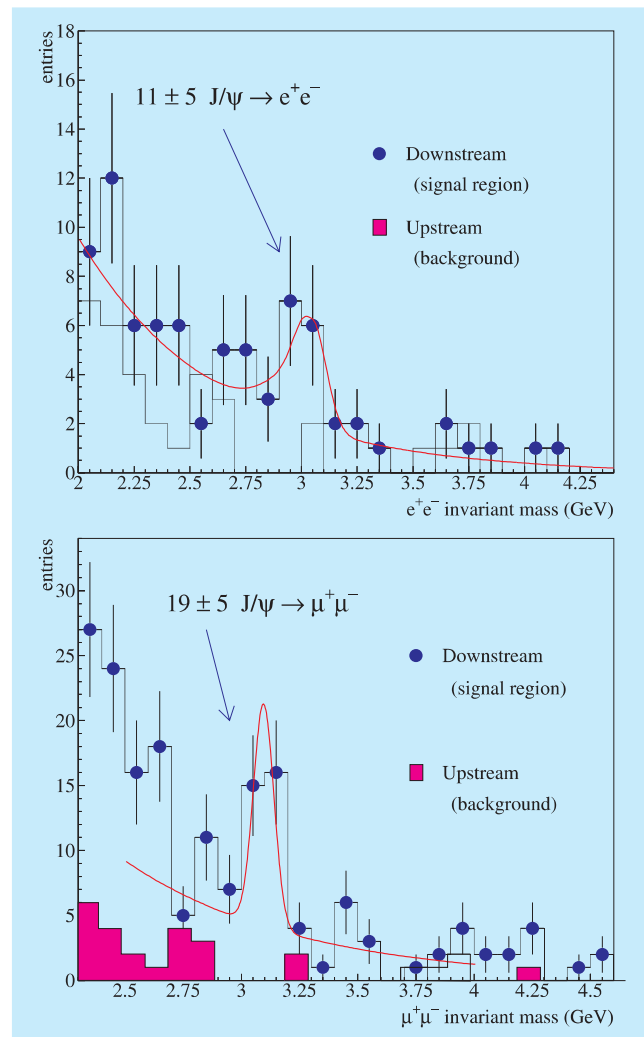


Abbildung 33: Invariantes Massenspektrum der  $e^+e^-$ -Paare (oben) und  $\mu^+\mu^-$ -Paare (unten) nach Anwendung von Vertexschnitten. Punkte mit Fehlerbalken: der Zerfallsvertex liegt in Strahlrichtung relativ zum Primärvertex. Histogramm: der Zerfallsvertex liegt vom Primärvertex aus gesehen entgegen der Strahlrichtung.

Vertexdetektors entgegen der Strahlrichtung (stromaufwärts) rekonstruiert wurde und die damit ein Maß für den Untergrund darstellen. Die Ereignisse in Strahlrichtung zeigen ein klares  $J/\psi$ -Signal, während der Vergleichsdatensatz kein Signal zeigt. Für die volle Statistik werden etwa 100  $J/\psi$ -Ereignisse aus B-Zerfällen erwartet. Zur Zeit werden die Schnittparameter optimiert und systematische Studien durchgeführt.

## Charmonium-Erzeugung

Paarproduzierte Charm- und Anticharm-Quarks bilden meistens zusammen mit einem Up- oder Down-Quark D-Mesonen. In einigen Fällen bilden das Charm und Anticharm-Quark gemeinsam einen Charmoniumzustand, ein  $J/\psi$ -,  $\chi_c$ - oder  $\psi(2s)$ -Zustand. Die Produktionsmechanismen sind bisher noch nicht genau verstanden, so dass eine Messung der relativen Produktionsrate von  $\chi_c$  zu  $J/\psi$  dazu beitragen kann, zwischen verschiedenen Modellen zu unterscheiden. Basierend auf der Statistik des Jahres 2000 hat HERA-B das Verhältnis zu  $0.32 \pm 0.06 \pm 0.04$  gemessen; diese Messung beruht auf  $380 \pm 74$  rekonstruierten  $\chi_c$ -Mesonen, welche unter Aussendung eines Photons in ein  $J/\psi$  zerfallen. Insgesamt können in dem neuen Datensatz etwa 10000  $\chi_c$ -Mesonen rekonstruiert werden, wodurch eine deutlich genauere Messung möglich wird. In Abbildung 34 ist die Massendifferenz  $\Delta m = m(\ell^+\ell^-\gamma) - m(\ell^+\ell^-)$  für eine Untermenge des neuen Datensatzes dargestellt.

Gruppen am Fermilab und CERN haben ausgezeichnete Ergebnisse über die Abhängigkeit der  $J/\psi$ -Produktion vom verwendeten Targetmaterial publiziert. Jedoch wird von diesen Messungen der kinematische Bereich der Rückwärtsstreuung (negatives  $x_F$ ) nicht abgedeckt. Dieser Bereich ist unter theoretischen Gesichtspunkten interessant, da hier das  $J/\psi$ -Meson noch im Kern gebildet wird, d. h. bevor das  $c\bar{c}$ -Paar den Kern verlassen hat. Die Akzeptanz des HERA-B Experimentes in diesem Bereich erlaubt eine weitergehende Überprüfung der existierenden Modelle. Zusätzliche Details hierzu können dem Beitrag der HERA-B/Zeuthen-Gruppe entnommen werden.

## Minimum-Bias-Datensatz

Das HERA-B-Experiment benutzt den großen Datensatz von unelastischen Ereignissen, um Aspekte der offenen Charmproduktion und der Produktion von Teilchen mit Strangeness zu untersuchen. Des Weiteren kann mit diesem Datensatz nach Anzeichen des kontrovers diskutierten Pentaquark-Zustandes  $\theta^+$  mit einer Masse von  $1.54 \text{ GeV}/c^2$  gesucht werden, der auch von den zwei HERA-Experimenten HERMES und ZEUS beobachtet wurde.

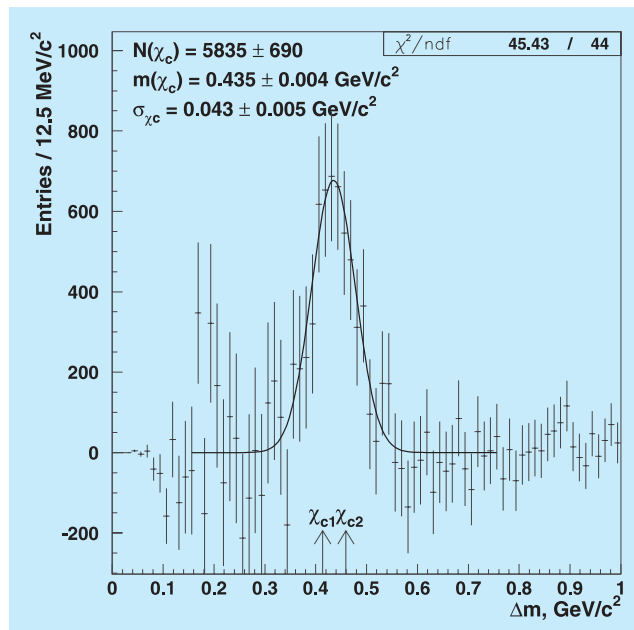


Abbildung 34: Spektrum der Massendifferenz  $\Delta m = m(\ell^+\ell^-\gamma) - m(\ell^+\ell^-)$  nach Abzug des kombinatorischen Untergrunds.

## Suche nach Pentaquarkzuständen

$\theta^+$  ist ein Kandidat für den vorhergesagten 5-Quark-Zustand (Pentaquark), der sich aus zwei Up- und Down-Quarks sowie einem Antistrange-Quark zusammensetzt.  $\theta^+$  wurde bisher in den Zerfallskanälen  $pK_s^0$  und  $nK^+$  beobachtet; für HERA-B ist der Zerfallskanal  $\theta^+ \rightarrow pK_s^0$  zugänglich.

Die Analyse des gesamten Minimum-Bias-Datensatzes hat keine Anzeichen für ein Signal im  $pK_s^0$ -Kanal ergeben, obwohl HERA-B aufgrund der großen Statistik eine hohe Sensitivität aufweist (Abb. 35). Die Beobachtung von deutlichen Kontrollsignalen wie das  $\Lambda(1520)$  beweisen, dass die Analysen sensitiv auf ein mögliches Pentaquark-Signal sind, wenn der Produktionswirkungsquerschnitt groß genug ist. Eine obere Grenze für den Produktionswirkungsquerschnitt kann somit abgeleitet werden und wird helfen die Kontroverse um  $\theta^+$  aufzulösen bzw. als Anhaltspunkt dienen, um Produktionsmodelle zu entwickeln.

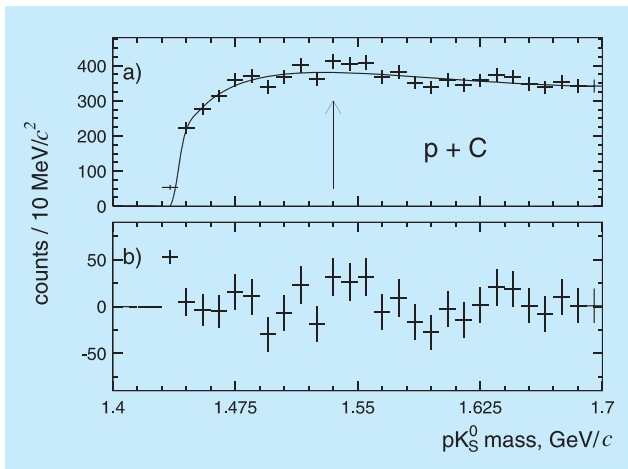


Abbildung 35:  $pK_s^0$  Massenverteilung aus  $p + C$  Ereignissen. a) Die durchgezogene Linie stellt den durch die „event mixing“ Methode bestimmten Untergrund dar. b) Nach Abzug des Untergrunds verbleibende Ereignisse. Der Pfeil markiert die Masse des  $\theta^+$ .

## Erzeugung von Teilchen mit Charm

Wie die B-Produktion ist die Untersuchung der Charm-Produktion ein empfindlicher Test der perturbativen QCD-Rechnungen. Messungen von  $\sigma(c\bar{c})$  in Proton-Kern-Wechselwirkungen existieren bei HERA-B nahen Energien. Allerdings haben diese Messungen noch große Unsicherheiten, so dass genauere Daten wichtig sind. Da der Charm-Wirkungsquerschnitt mehr als einen Faktor 1000 größer ist als der B-Wirkungsquerschnitt bei der HERA-B Energie, können Teilchen mit Charm im Minimum-Bias-Datensatz nachgewiesen werden, ohne sie durch einen besonderen Trigger anzureichern.

Abbildung 36 zeigt das invariante Massenspektrum für die Zerfälle  $D^0(D^0) \rightarrow K^\mp \pi^\pm$  (oben) und  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$  (unten) für den gesamten unelastischen Datensatz. Da D-Mesonen vor ihrem Zerfall einige Millimeter zurücklegen, werden Vertexschnitte benutzt, um die Beiträge von Spurkombinationen aus dem Primärvertex zu unterdrücken. Sowohl für neutrale als auch für geladene D-Mesonen sind signifi-

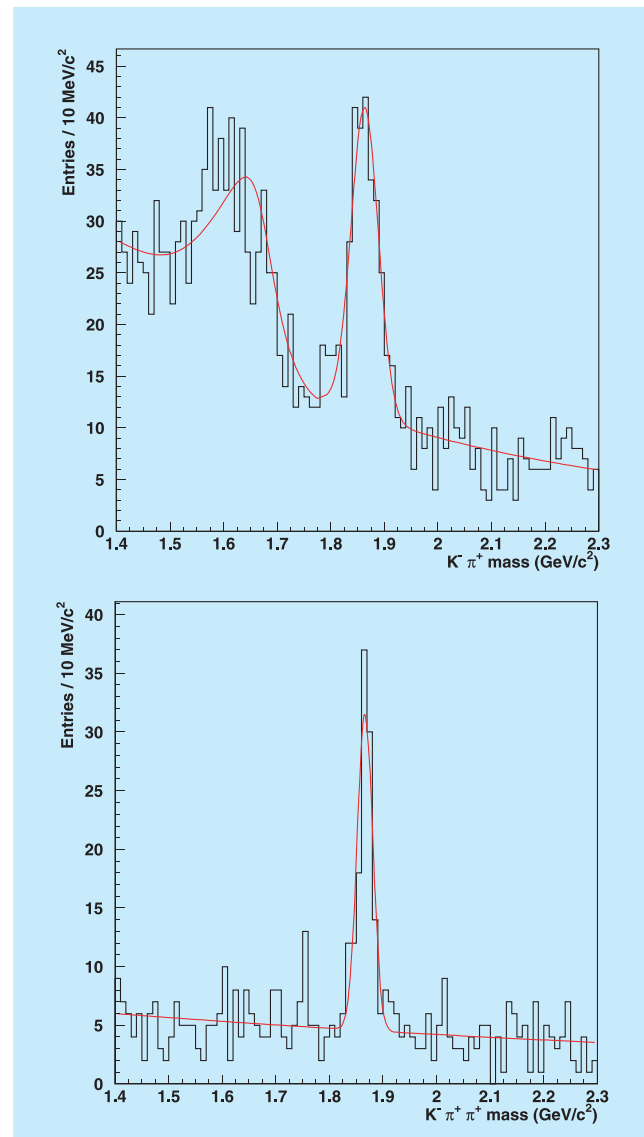


Abbildung 36: Invariantes Massenspektrum von  $K^\mp \pi^\pm$ - (oben) und  $K^\mp \pi^\pm \pi^\pm$ -Kombinationen (unten). In der oberen Abbildung ist unterhalb des  $D^0(D^0)$ -Signals eine Schulter aus unvollständig rekonstruierten Zerfällen zu sehen.

kante Signale zu erkennen. Mit diesen Signalen wird HERA-B den Charm-Produktionswirkungsquerschnitt mit höherer statistischer Signifikanz messen als bisherige Experimente. Systematische Fehler und Normalisierungsfaktoren werden zurzeit untersucht.

## Strangeness-Produktion

Teilchen mit der Quantenzahl Strangeness werden in großer Anzahl in Proton-Kern-Wechselwirkungen produziert; die Mehrzahl der Reaktionen enthalten ein  $s\bar{s}$ -Paar. Die relativ kleine Masse des Strange-Quarks macht verlässliche Vorhersagen der Produktionswirkungsquerschnitte schwierig. Es besteht jedoch ein starkes Interesse an den Produktionsparametern, speziell als Funktion der Kernladungszahl des Targetmaterials, aufgrund der Relevanz für Studien zu Schwerionenwechselwirkungen bei RHIC und der Suche nach dem schwer nachweisbaren Quark-Gluon-Plasma.

Signal	Statistik
$K_s^0$	4 900 000
$K^*(892)$	950 000
$\phi(1020)$	50 000
$\Lambda^0$	1 100 000
$\Lambda^0$	520 000
$\Sigma^+(1385)$	380 000
$\Xi^+/\Xi^-$	20 000
$\Xi(1530)^0$	2 800
$\Omega^+/\Omega^-$	1 300

Tabelle 1: Anzahl der rekonstruierten Zerfälle von Resonanzen mit Strangeness.

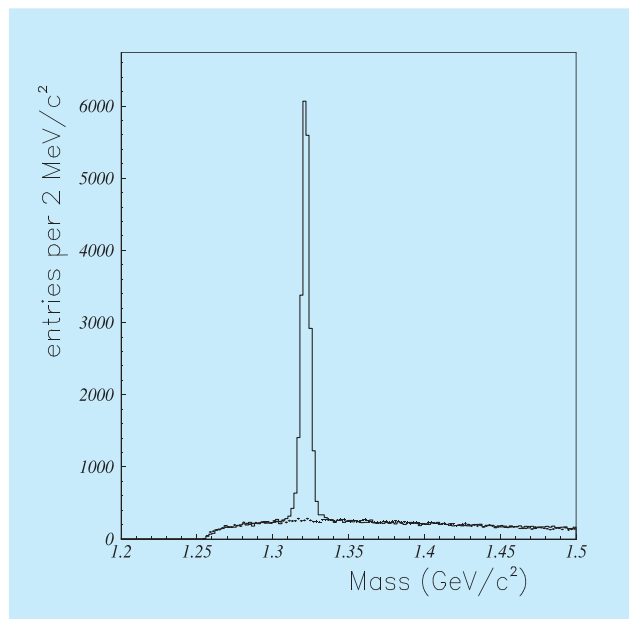


Abbildung 37: Invariantes Massenspektrum von  $\Lambda(\bar{\Lambda})\pi^\pm$  Kombinationen.

Wie man Tab. 1 entnehmen kann, erlaubt der umfangreiche Minimum-Bias-Datensatz von HERA-B den Nachweis von Mesonen und Baryonen mit Strangeness. Als Beispiel für die hohe Qualität der Daten ist in Abbildung 37 das invariante Massenspektrum von  $\Lambda\pi^+$  und  $\bar{\Lambda}\pi^-$  Kombinationen dargestellt, in dem ein deutliches Signal des Zerfalls  $\Xi^\pm \rightarrow \Lambda(\bar{\Lambda})\pi^\pm$  zu erkennen ist.