

HERA-B Experiment

Beteiligte Institute: NIKHEF Amsterdam, Univ. Texas Austin, Univ. Barcelona, IHEP Beijing, Tsinghua Univ. Beijing, 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, UC Los Angeles, Univ. Mannheim, ITEP Moscow, MPI Phys. München, Univ. Oslo, Univ. Rostock, Univ. Siegen, Univ. Utrecht, DESY Zeuthen, Univ. Zürich.

Sprecher: M. Medinnis, DESY

HERA-B ist ein Fixed Target Experiment, das die Protonen aus den Randbereichen des 920 GeV HERA-Protonenstrahls nutzt. Hierzu werden Targetdrähte aus unterschiedlichen Materialien (Kohlenstoff, Titan, Palladium und Wolfram) mittels einer Präzisionsmechanik an den Protonenstrahl herangefahren, bis die gewünschte Wechselwirkungsrate erreicht ist. Die Produkte der so erzeugten hochenergetischen Proton-Nukleon-Reaktionen werden im HERA-B Detektor, einem leistungsfähigen Spektrometer mit Teilchenidentifikation, registriert und vermessen.

Primärziel des Experiments im Berichtszeitraum war das Studium der Produktion von Charmonium-Zuständen und Beauty-Mesonen, insbesondere die Abhängigkeit von der Massenzahl des Targetkerns.

Die umfangreichen Reparatur- und Verbesserungsarbeiten am Experiment während der HERA-Betriebspause 2001 erwiesen sich als erfolgreich, es konnte eine Steigerung der Rate interessanter Ereignisse um mehr als einen Faktor 40 gegenüber der letzten Datennahmeperiode (2000) erreicht werden.

Leider verzögerte sich die Inbetriebnahme der HERA-Anlage durch diverse Schwierigkeiten erheblich, so dass erst ab Herbst 2002 mit dem regulären Datennahmebetrieb begonnen werden konnte. Die im Berichtszeitraum gesammelte Datenmenge blieb daher hinter den Erwartungen zurück. Dennoch wurde eine ausreichend große Datenmenge

akkumuliert, für die bereits erste Analysen durchgeführt wurden, und die eine Reihe interessanter Ergebnisse erwarten lässt.

Betriebsverhalten des HERA-B Detektors

Die lange Unterbrechung des HERA-Betriebs, die Ende 2001 zu Ende ging, bot die Gelegenheit, den Detektor HERA-B und sein Triggersystem fertig zu stellen. Gleichzeitig konnten viele Probleme gelöst werden, die während der Datennahmeperiode 2000 aufgetreten waren (Näheres dazu im Jahresbericht 2001).

In den Monaten bis September 2002 war die Wiederinbetriebnahme des Speicherrings HERA durch vielfältige technische Defekte und die unvorhergesehenen Probleme mit zu hohem Strahlungsuntergrund bei H1 und ZEUS so weit erschwert und verzögert, dass keine reguläre Datennahme stattfinden konnte. Diese Zeit wurde von der HERA-B Kollaboration effektiv genutzt, den jetzt vervollständigten Detektor neu und besser zu verstehen. Von Ende Oktober bis zur Weihnachtspause lieferte HERA längere Perioden stabilen Strahlbetriebes, die von HERA-B zur Datennahme genutzt wurden.

Abbildung 43 zeigt die anteilige Verteilung der Betriebszeit vom 30.10.2002 bis zum 22.12.2002, insge-

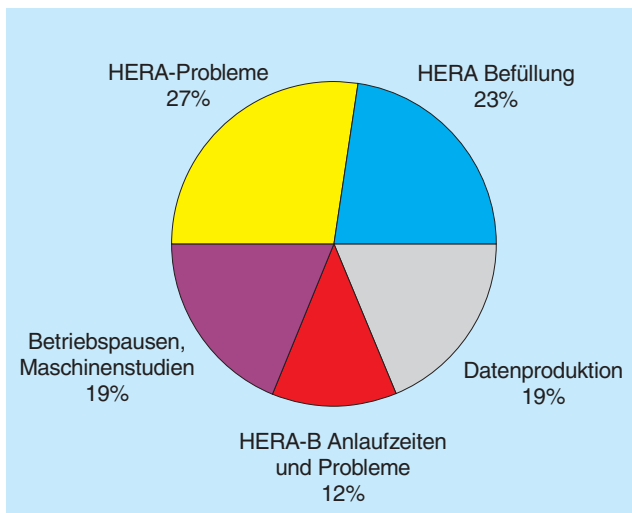


Abbildung 43: Anteilige Verteilung der Betriebszeit für die Periode 10.10.2002 – 22.12.2002.

samt wurden 250 Stunden zur Datenproduktion akkumuliert.

Die während der Betriebsunterbrechung 2001 durchgeführten Reparatur- und Verbesserungsarbeiten waren erfolgreich, was sich besonders deutlich in der Rate aufgezeichneter J/ψ -Mesonen widerspiegelt: Sie erreichte bereits Anfang November mehr als 1000 J/ψ pro Stunde, während sie im Jahr 2000 noch auf 25 pro Stunde begrenzt war. Für diese Verbesserung um mehr als einen Faktor 40 sind viele Faktoren maßgeblich, insbesondere:

- Deutliche Verbesserungen im elektromagnetischen Kalorimeter, vor allem durch bessere Kopplung der Signale vom Detektor an die Ausleseelektronik. Auswirkungen auf die Datenqualität der vom Kalorimeter getriggerten Ereignisse werden auf Seite 77 diskutiert.
- Verbesserungen im Myonsystem, einerseits durch verringerte Empfindlichkeit gegenüber Untergrund durch Modifikationen an den Vorverstärkern und deren Anbindung an die Ausleseelektronik, andererseits durch erfolgreiche Bemühungen, defekte Kanäle zu reparieren und die Stabilität des Systems zu erhöhen.
- Eine Reduzierung von Hochspannungsausfällen im äußeren Spurkammersystem um mehr als einen Faktor 10. Dies wurde durch einen vollständigen Ausbau

des Detektors erreicht, bei dem 14 000 falsch angebrachte Kondensatoren ersetzt wurden. Die gesteigerte Hochspannungssicherheit des Systems führte zu einer signifikanten Erhöhung der Ansprechwahrscheinlichkeit des Detektors, sie beträgt nun im Mittel 95% für die 5 mm Zellen und 98% für die 10 mm Zellen. Die Effizienz der Spurerkennung wurde hierdurch sowohl im Trigger als auch in der endgültigen Rekonstruktion nachhaltig verbessert.

- Die Spurverfolgung im äußeren Spurkammersystem und in den Myonkammern in der ersten Triggerstufe (FLT) wurde erfolgreich in Betrieb genommen.
- In der zweiten Triggerstufe wurde ein vollständig neuer, verbesserter Spurerkennungs-Algorithmus angewendet.
- Die 240 Prozessoren der zweiten Triggerstufe mit einer Taktrate von 400 MHz wurden durch 1.3 GHz-Prozessoren ersetzt. Hierdurch konnte die Totzeit reduziert und der Datendurchsatz erhöht werden.
- Die Stabilität des Datennahmesystems wurde verbessert und der Datendurchsatz um mehr als einen Faktor 10 erhöht.

Die Verbesserungen an der PC-Farm der zweiten Triggerstufe und auch die endgültige Inbetriebnahme von deren Kontrollsoftware erlaubt es, nun beide PC-Farmen von HERA-B zur Rekonstruktion oder für Monte Carlo-Rechnungen zu benutzen, sobald sie für die Datennahme nicht gebraucht werden. Dadurch ist es möglich, die mit hoher Rate aufgezeichneten Ereignisse in den Strahlpausen zu reprozessieren, wodurch diese, vollständig rekonstruiert, nur Stunden oder Tage nach ihrer Aufzeichnung für die Analyse zur Verfügung stehen.

Physikalische Resultate und Ziele

Der Zeitraum von Oktober bis Dezember wurde unter relativ konstanten Bedingungen des Beschleunigers für die Aufnahme des 2002er Datensamples genutzt.

Insgesamt konnten in diesem Zeitraum etwa 75 Millionen getriggerte Zwei-Lepton-Ereignisse von zwei gleichzeitig am Strahl befindlichen Targetdrähten (Kohlenstoff und Wolfram) aufgenommen werden. Zusätzlich wurden etwa 150 Millionen Ereignisse ohne

Triggerselektion (Minimum Bias Daten) für QCD-Studien mit verschiedenen Targetmaterialien aufgezichnet.

Die Analyse der im Jahr 2000 aufgenommenen Daten wurde weitergeführt und die endgültigen Resultate zur Messung des $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitts, der Produktion von χ_c -Mesonen und des inklusiven Strangeness-Produktionswirkungsquerschnitts publiziert.

Charmonium-Produktion

Die hadronische Produktion von schweren Quarks an Fixed-Target-Experimenten erlaubt genaue Tests der perturbativen QCD. Die in jüngster Zeit veröffentlichten Vorhersagen für den Produktionswirkungsquerschnitt sind kompatibel mit Ergebnissen von Experimenten an Pionen- und Protonenstrahlen; allerdings sind sowohl die theoretischen als auch die experimentellen Fehler relativ groß.

Bei HERA-B wird der $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitt für Proton-Nukleon Wechselwirkungen bei 920 GeV aus der Reaktion $B \rightarrow J/\psi X$ gemessen, wobei das J/ψ über die dileptonischen Zerfälle $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ und $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ identifiziert wird. Hierbei sucht man nach Ereignissen, bei denen das J/ψ , wegen der langen Lebensdauer der B-Mesonen, deutlich vom Vertex der Primärreaktion getrennt erzeugt wird.

Die Analyse der Daten aus dem Jahr 2000 wurde bereits im Jahresbericht 2001 vorgestellt, sie konnte im Berichtsjahr abgeschlossen und die endgültigen Ergebnisse publiziert werden.

Die wesentlich vergrößerte Statistik des Berichtsjahres wird eine neuerliche und erheblich genauere Bestimmung des $b\bar{b}$ -Wirkungsquerschnitts ermöglichen, zudem wird es möglich sein, ausgewählte B-Meson Zerfälle vollständig zu rekonstruieren und so den gemessenen Wirkungsquerschnitt unabhängig zu überprüfen.

Eine erste Studie der neuen Daten zeigt, dass neben der größeren Ereigniszahl eine deutliche Verbesserung der Qualität der Daten, so zum Beispiel in der Massenauflösung der J/ψ -Mesonen, im Vergleich zur Datennahme 2000 erreicht wurde. Abbildung 44 zeigt das invariante Massenspektrum von $\mu^+\mu^-$ -Paaren. Zur Identifikation der Myonen wurden Informationen des Myon-

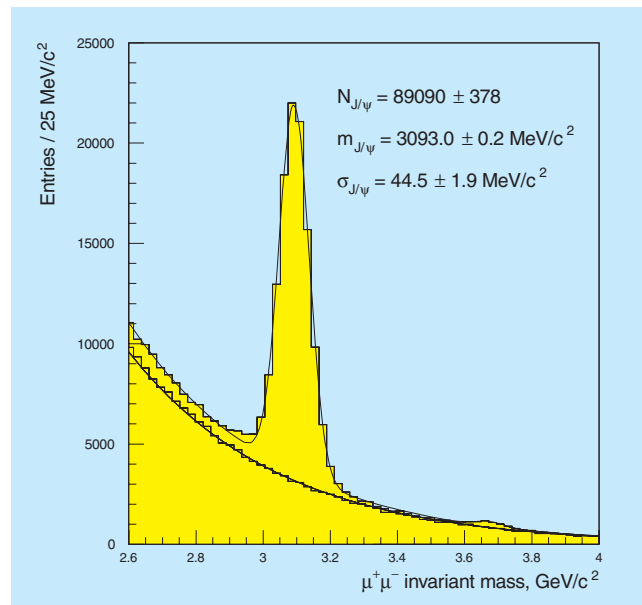


Abbildung 44: *Invariantes Massenspektrum von $\mu^+\mu^-$ -Paaren. Nicht nur das J/ψ ($m = 3.09 \text{ GeV}/c^2$), sondern auch das $\psi(2S)$ ($m = 3.63 \text{ GeV}/c^2$) ist deutlich erkennbar. Die durchgezogenen Linien sind Anpassungsrechnungen an die Daten, die untere Kurve stellt die Massenverteilung für gleichgeladene μ -Paare dar.*

systems und der Spurkammern verwendet. Insgesamt wurden in den Daten von Oktober bis Dezember etwa 90 000 J/ψ -Mesonen im Myon-Zerfallskanal nachgewiesen. Die Massenauflösung beträgt etwa 45 MeV und konnte damit um etwa 20% gegenüber 2000 verbessert werden.

Zur Analyse von $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ Zerfällen werden Spuren von Teilchen benutzt, die im elektromagnetischen Kalorimeter ein Signal erzeugen, deren Energie mit dem im Spurkammersystem gemessenen Impuls übereinstimmt. Die Elektronen können allerdings einen Teil ihrer Energie bereits vor Erreichen des Kalorimeters durch Bremsstrahlung verlieren. Findet die Bremsstrahlung vor dem Magneten statt, so erzeugen Elektronen und Bremsstrahlungsphoton zwei voneinander getrennte Cluster im Kalorimeter. Durch die getrennte Rekonstruktion des Bremsstrahlungsphotons und seine Berücksichtigung bei der Energiemessung des Elektrons kann die Genauigkeit der Energiemessung verbessert werden.

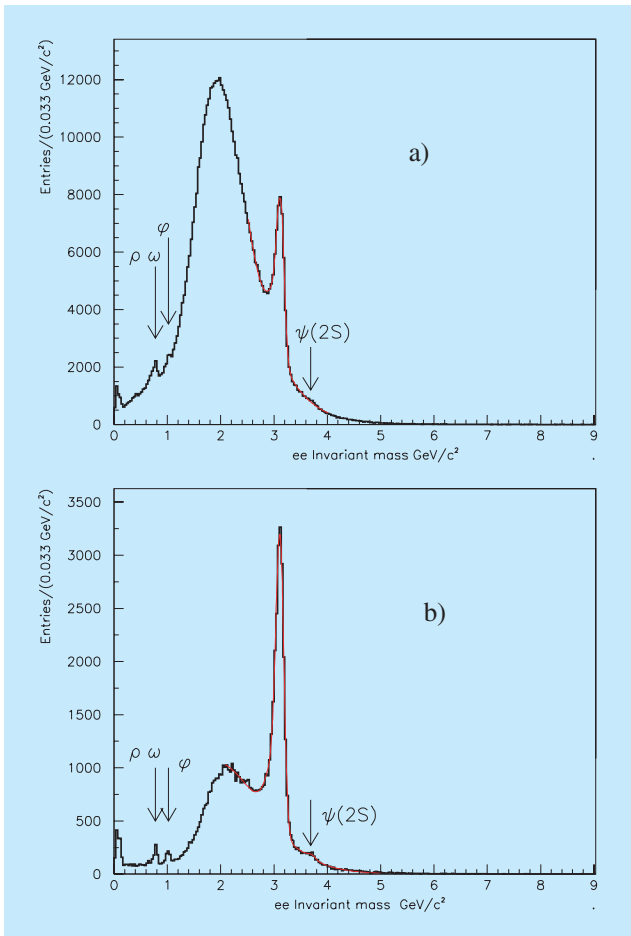


Abbildung 45: Invariantes Massenspektrum von e^+e^- -Paaren: a) ohne Forderung eines assoziierten Bremsstrahlungsphotons, b) mindestens ein assoziiertes Bremsstrahlungsphoton wurde gefunden.

Des Weiteren erlaubt der Nachweis eines zum Elektron assoziierten Bremsstrahlungsphotons eine Verminderung von Fehlidentifikationen der Elektronen, was zu einem deutlich besseren Signal-zu-Untergrund-Verhältnis im invarianten Massenspektrum von e^+e^- -Paaren führt. In Abbildung 45 ist die invariante Masse von e^+e^- -Paaren dargestellt, und zwar ohne und mit der Zusatzbedingung, dass zu mindestens einer Spur ein Bremsstrahlungsphoton rekonstruiert werden konnte.

Neben dem prominenten J/ψ -Signal bei 3.1 GeV sind das $\psi(2S)$ sowie die seltenen Zwei-Elektron-Zerfälle von ρ/ω - und ϕ -Mesonen klar zu erkennen. Die Massenauflösung für das J/ψ im Elektronen-Zerfall be-

trägt etwa 80 MeV. Die erhebliche Verbesserung des Elektronen- und Photonennachweises gegenüber dem Jahr 2000 wird deutlich, wenn man erinnert, dass zum damaligen Zeitpunkt das in Abbildung 45a) gezeigte Spektrum keine Struktur, auch nicht das prominente J/ψ -Signal, aufwies.

Der HERA-B Zwei-Spur-Trigger selektiert neben den J/ψ -Mesonen auch die weiteren Charmonium-Zustände $\psi(2S)$ und χ_c .

Bereits mit dem kleinen Datensatz des Jahres 2000 konnte das Produktionsverhältnis von χ_c -Mesonen zu J/ψ -Mesonen

$$R(\chi_c) = \sigma(\chi_c) \cdot \text{Br}(\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma) / \sigma(J/\psi) \quad \text{zu}$$

$$R(\chi_c) = 0.32 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.04 \text{ (sys)}$$

bestimmt werden (siehe Jahresbericht 2001). Dieses Ergebnis der HERA-B Messung aus den Daten von 2000 basierte auf 380 ± 74 rekonstruierten χ_c -Mesonen, die endgültige Analyse wurde im Berichtsjahr publiziert.

In den im Berichtszeitraum aufgezeichneten Daten sind mehr als eine Größenordnung mehr χ_c -Mesonen rekon-

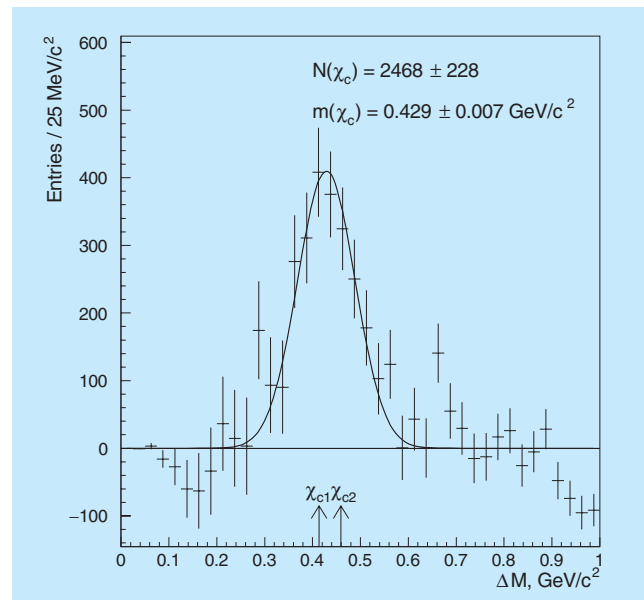


Abbildung 46: Das invariante Massenspektrum $\Delta M = (\mu^+\mu^-\gamma) - (\mu^+\mu^-)$ nach Subtraktion des kombinatorischen Untergrundes (es wurde etwa ein Drittel der Daten des Jahres 2002 prozessiert).

Signal	Statistik 2000 ≈	Statistik 2002 ≈	Statistik 2002 C und W Target
$J/\psi \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$	8000	150 000	≈ 50 000
$\psi(2s) \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$	150	2000	
$\chi_c \rightarrow J/\psi\gamma \rightarrow e^+e^-\gamma/\mu^+\mu^-\gamma$	350	10 000	
$\Upsilon \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$		30	

Tabelle 1: Erwartete Signale aus dem Datensatz 2002 im Vergleich zur Datennahme 2000.

strierbar (Tabelle 1), so dass der statistische Fehler dieser Messung deutlich reduziert werden kann.

Abbildung 46 zeigt die aus dem Datensatz im Kanal $\chi_c \rightarrow (J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)\gamma$ rekonstruierten χ_c -Mesonen, basierend auf etwa einem Drittel der vollen Statistik 2002. Bereits hier ist das χ_c mit guter Statistik sichtbar.

Das Hauptziel der Datennahme 2002/03 ist die Untersuchung der Abhängigkeit der Erzeugung verschiedener Charmonium-Zustände von der Massenzahl des Targetkerns. Ein erheblicher Teil der Daten wurde daher mit zwei Targetdrähten (Kohlenstoff und Wolfram) gleichzeitig aufgenommen. Die Möglichkeit, mit verschiedenen Targetmaterialien simultan zu messen, hilft, die systematischen Fehler einer solchen Messung zu reduzieren.

Besonderes Interesse erlangen die Messungen bei HERA-B durch den erstmals zugänglichen kinematischen Bereich von negativem Feynman- x , das heißt der Messung bei großen Streuwinkeln. In diesem Fall ist die Aufenthaltsdauer des Charmoniums im Kern am größten, und man erwartet eine starke Abhängigkeit von der Massenzahl des Kerns. Damit können die verschiedenen theoretischen Modelle für die Produktion und Absorption von Charmonium-Teilchen getestet werden. Durch gleichzeitige Messung von J/ψ -, $\psi(2s)$ - und χ_c -Mesonen, die verschiedene Bindungsenergien haben und damit unterschiedlich sensitiv auf die einzelnen Absorptionsmechanismen reagieren, gibt es eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung der verschiedenen theoretischen Modelle.

Die Analyse der Daten des Berichtsjahres ist noch nicht abgeschlossen, so dass in Tabelle 1 nur die zu erwartenden Signale der einzelnen Charmonium-Zustände zusammengestellt wurden.

Minimum-Bias Physik

Die Aufnahme von Proton-Kern-Ereignissen ohne einen selektiven Trigger (Minimum Bias Ereignisse) ermöglicht eine Vielzahl von Studien zur QCD-Physik. Hierbei sind die exzellenten Eigenschaften des HERA-B Spektrometers hinsichtlich der Spurfundung und der Teilchenidentifikation wesentlich.

Fortschritte in der Schwerionenphysik haben das Interesse an Untersuchungen zur Produktion von Teilchen mit Strangeness erneuert. Zum besseren Verständnis dieser Prozesse werden genaue Untersuchungen bei Kern-Kern- und Proton-Kern-Wechselwirkungen benötigt. Eines der Ziele der Schwerionenexperimente ist die Suche nach einem Quark-Gluon Plasma.

Die Schwierigkeit ist jedoch der Nachweis, ob tatsächlich ein Quark-Gluon Plasma erzeugt wurde. Hierbei wird als eine der möglichen Signaturen die erhöhte Produktion von Teilchen mit Strangeness diskutiert. Als beobachtbare Größen dienen zum Beispiel die Verhältnisse von Antibaryonen zu Baryonen im kinematischen Bereich mittlerer Rapidität, oder die Abhängigkeit vom Transversalimpuls.

Die Analyse von 2.4 Millionen Minimum Bias Ereignissen, die während der Strahlzeit 2000 innerhalb einer Woche Datennahme aufgezeichnet wurden,

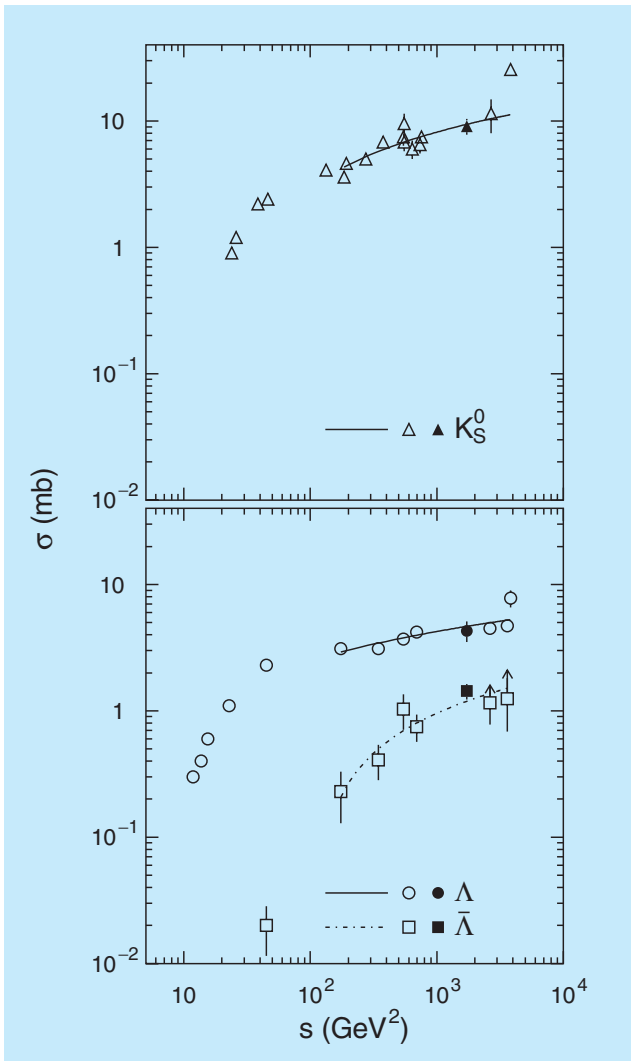


Abbildung 47: Totaler Proton-Nukleon Produktions-Wirkungsquerschnitt für K_S^0 -, Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Teilchen als Funktion der Schwerpunktsenergie s . Die schwarzen Symbole zeigen die Messungen von HERA-B.

konnte im Berichtsjahr fertig gestellt werden. Die Daten wurden mit den Targetmaterialien Kohlenstoff, Aluminium, Titan und Wolfram aufgezeichnet. Mit diesem Datensatz wurde der inklusive Produktions-Wirkungsquerschnitt für K_S^0 -, Λ - und $\bar{\Lambda}$ -Teilchen in Kollisionen von 920 GeV Protonen mit den verschiedenen Targetmaterialien gemessen. Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse des HERA-B Experiments im Vergleich mit älteren Experimenten.

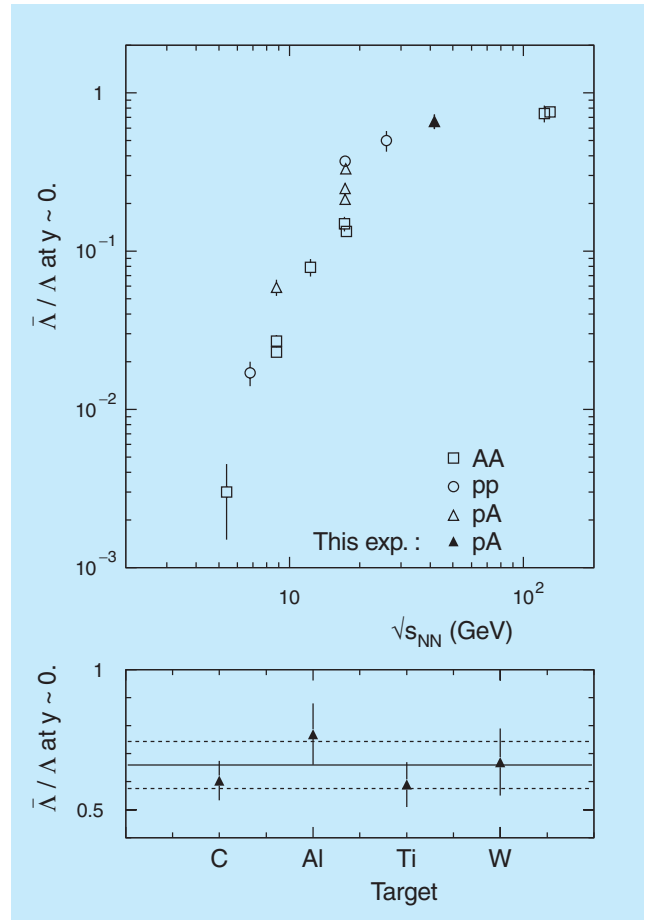


Abbildung 48: Verhältnis von $d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda})$ für pp (Kreise), pA (Dreiecke) und AA (Quadrate) Wechselwirkungen als Funktion der Nukleon-Nukleon Schwerpunktsenergie. Das schwarz gefüllte Dreieck stellt den Mittelwert der HERA-B Messung dar. In der unteren Darstellung ist das Verhältnis $d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda})$ einzeln für die verwendeten Targets bei $x_F \approx -0.06$ abgebildet (Mittelwert und Standardabweichung sind durch die durchgezogene bzw. gestrichelten Linien angedeutet).

Genauer als die Produktions-Wirkungsquerschnitte selbst sind Wirkungsquerschnittsverhältnisse, da sich in diesem Fall Akzeptanzkorrekturen und systematische Fehler zu einem großen Teil gegenseitig auslöschen. Aus den Messungen folgt für die Verhältnisse:

$$\begin{aligned} d\sigma(K_S^0)/d\sigma(\Lambda) &= 6.2 \pm 0.5 && \text{und} \\ d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda}) &= 0.66 \pm 0.07 && \text{für } x_F \approx -0.06. \end{aligned}$$

Signal	Statistik 2002 \approx
K_s^0	3 500 000
Λ	900 000
$\bar{\Lambda}$	450 000
ϕ	60 000
Ξ^- / Ξ^+	8000
Ω^- / Ω^+	800
ρ_{770}	200 000
ω_{782}	15 000
K_{892}^{0*}	200 000
D^0	600
D^+	150
D^{*+}	150

Tabelle 2: Erwartete Signale für die HERA-B Datennahme 2002.

Das Verhältnis von $d\sigma(\Lambda)/d\sigma(\bar{\Lambda})$ ist in Abbildung 48 für die untersuchten Targetmaterialien dargestellt. Erste HERA-B Ergebnisse zur Produktion von Teilchen mit Strangeness wurden im Berichtszeitraum publiziert. Im Dezember 2002 wurden etwa 150 Millionen Minimum-Bias-Daten aufgezeichnet. Damit wurde die Statistik des Jahres 2000 um mehr als einen Faktor 60 vergrößert. Tabelle 2 zeigt, wieviele Ereignisse für verschiedene Teilchen aus diesem Datensatz erwartet werden.

Mit dieser Statistik werden nun auch Messungen der Produktion seltener Hyperonen sowie Messungen zur Polarisation von Hyperonen möglich sein.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem Datensatz des Berichtsjahres auch eine relevante Messung des Open-Charm-Wirkungsquerschnitts möglich sein sollte. Vorhersagen für den Wirkungsquerschnitt im Energiebereich von HERA-B bei 920 GeV liegen zwischen 9 und 71 μb , abhängig von der verwendeten QCD-Skalierung. Eine Messung von HERA-B würde wesentlich zur Einschränkung der möglichen Theorien beitragen.