

Dieses Dokument wurde von **Christian Buth** erstellt.

Es ist auf meinen Internetseiten unter

<http://www.Christian.Buth.mysite.de>

frei erhältlich.

Sollten Sie Probleme mit der Anzeige haben oder einen

Fehler entdecken, wenden Sie sich bitte an

cbuth@ix.urz.uni-heidelberg.de .

© 2000 Christian Buth. Dieser Text ist nach allen nationalen und internationalen Regeln urheberrechtlich geschützt. Das Verändern und anschließende Veröffentlichen unter meinem Namen ist verboten – auch auszugsweise. Das Veröffentlichen und Verbreiten unter einem anderen als meinem Namen ist nicht erlaubt. Das Dokument kann für nichtkommerzielle Zwecke aber hemmungslos verbreitet und kopiert werden, sofern es unverändert bleibt. Kommerzielle Nutzung jeglicher Art – auch auszugsweise – ist nur nach Rücksprache gestattet.

1 Einleitung und theoretischer Hintergrund

In diesem Versuch wurden am CERN gemachte Blasenkammeraufnahmen analysiert. Dabei wurden die an den Reaktionen beteiligten Teilchen anhand der Diaufnahmen von Spuren in Wasserstoff bestimmt. Dazu wurde auf Energie- und Impulserhaltungssatz und die Erhaltungssätze einiger Quantenzahlen zurückgegriffen, um mögliche Reaktionsabläufe mit den Bildern zu vergleichen.

1.1 Wechselwirkungen

Bei der Reaktion von Elementarteilchen sind die folgenden Prozesse möglich: elastische Streuung, inelastische Streuung und Zerfälle. Bei der elastischen Streuung bleiben die Primärteilchen erhalten, wogegen sie sich bei der inelastischen Streuung in andere Teilchen umwandeln oder zusätzliche Teilchen entstehen. Bei Zerfällen werden instabile Teilchen in andere, leichtere Teilchen umgewandelt.

Die entscheidenden, in der Elementarteilchenphysik auftretenden Wechselwirkungen (WW) sind die starke WW, die elektromagnetische WW und die schwache WW. Die Teilchen, die der starken WW unterliegen, heißen Hadronen. Eine Sonderform dieser WW, die Kernkraft, hat eine Reichweite von ca. 1,5 fm, während die starke WW eine unendliche Reichweite hat und unabhängig von der Entfernung ist. Die nächstschwächere WW, die elektromagnetische Wechselwirkung, wirkt zwischen geladenen Teilchen; ihre Abhängigkeit von der Entfernung wird durch das Coulombgesetz beschrieben. Die schwache WW tritt hauptsächlich bei Zerfällen auf. Alle diese Wechselwirkungen lassen sich durch den Austausch virtueller Teilchen beschreiben, den sogenannten Eichbosonen: Das Photon ist das Eichboson der elektromagnetischen WW, W^+ , W^- und Z^0 gehören zur schwachen WW und die Gluonen $g_1 \dots g_8$ zur starken WW.

1.2 Erhaltungssätze von Quantenzahlen

Nach dem Quarkmodell sind Hadronen aus Grundbausteinen, den Quarks, aufgebaut. Baryonen bestehen aus drei Quarks (bzw. Antibaryonen aus drei Antiquarks) und Mesonen aus einem Quark und einem Antiquark. Quarks haben die Baryonenzahl $\frac{1}{3}$, Antiquarks $-\frac{1}{3}$, Baryonen somit die Baryonenzahl 1 (bzw. Antibaryonen -1) und Mesonen 0. Es sind sechs verschiedene Quarks bekannt, die man zu drei Paaren zusammenfaßt; siehe Tabelle 1.

Quark	Antiquark	Ladung [e]	Masse [GeV]
u (up)	\bar{u}	$+\frac{2}{3}$	0,3
d (down)	\bar{d}	$-\frac{1}{3}$	0,3
c (charm)	\bar{c}	$+\frac{2}{3}$	1,8
s (strange)	\bar{s}	$-\frac{1}{3}$	0,5
t (top)	\bar{t}	$+\frac{2}{3}$	> 30
b (bottom)	\bar{b}	$-\frac{1}{3}$	5

Tabelle 1: Eigenschaften der Quarks und Antiquarks

Analog zur Baryonenzahl gibt es eine Leptonenzahl, die für Leptonen 1, für Antileptonen -1 und für alle anderen Teilchen 0 ist. Anders als die Baryonen wer-

den die Leptonen in drei Familien untergliedert, die Elektronen-, die Myonen- und die Taufamilie. Innerhalb jeder Familie gilt jeweils der Erhaltungssatz für die eigene Leptonenzahl.

In diesem Versuch sind besonders die folgenden Erhaltungssätze von Bedeutung:

- Impulserhaltung
- Energieerhaltung
- Ladungserhaltung
- Baryonenzahlerhaltung
- Leptonenzahlerhaltung

1.3 Kinematik

In der Elementarteilchenphysik spielt die spezielle Relativitätstheorie eine große Rolle. Zum einen werden in den meisten Experimenten Teilchen aus Energie erzeugt oder vernichtet, d.h. Energie in Materie oder Materie in Energie umgewandelt. Zum anderen werden die Teilchen in den grossen Teilchenbeschleunigern auf Energien von mehreren GeV gebracht, so daß die klassische, nicht-relativistische Mechanik nicht mehr gilt.

Damit die Berechnungen möglichst einfach werden, wählt man die Lichtgeschwindigkeit zu $c=1$, d.h. c ist eine Maßeinheit. Energie, Impuls und Masse haben dann jeweils die Einheit eV . Mit Masse ist hierbei die Ruhemasse gemeint, die relativistische Masse ist gleich der Gesamtenergie des Teilchens. Die Transformation physikalischer Größen aus einem Bezugssystem in ein anderes, dazu bewegtes, erfolgt mit Hilfe der Lorentztransformation. Um die Rechnungen zu vereinfachen werden Vierervektoren verwendet. Deren Quadrat ist invariant unter der Lorentztransformation. Die Koordinaten des Vierervektors des Ortes sind die Raum-Zeit-Koordinaten, die des Impulsvierervektors sind die Gesamtenergie und die drei Komponenten des Impulses. Für ein Teilchen der Ruhemasse m gilt somit Gleichung (1). Daraus ergibt sich dann sofort die relativistische Energie-Impuls Beziehung in Gleichung (2).

$$P \cdot P = P^2 = E^2 - p^2 = m^2 \quad (1)$$

$$E = \sqrt{p^2 + m^2} \quad (2)$$

Die Massen der hier auftretenden Teilchen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

1.4 Blasenkammer

Eine Wasserstoffblasenkammer, wie die am CERN verwendete, besteht im Wesentlichen aus einem Tank, in dem sich flüssiger Wasserstoff bei einer Temperatur von $T = 27K$, knapp unterhalb des Siedepunktes bei einem Druck von $p = 8bar$ befindet. Nun wird der Druck adiabatisch erniedrigt, so daß sich die Flüssigkeit in einem metastabilen Zustand befindet. Fliegen nun geladene Teilchen durch die Kammer, so bilden sich durch ihre ionisierende Wirkung kleine Bläschen längs ihrer Flugbahn. Diese werden fotografiert und die Aufnahmen

Teilchen	Masse[MeV]
n	939,6
p	938,3
\bar{K}^0	497,7
K^-	493,7
π^0/π^+	135,0
μ^-/μ^+	105,7
Σ^-	1197,3

Tabelle 2: Massen der betrachteten Teilchen

werden anschließend analysiert. Da sich die ganze Kammer in einem starken homogenen Magnetfeld von $B = 2,05T$ befindet, werden geladene Teilchen auf Kreisbahnen gezwungen, deren Radius vom Impuls abhängt. Weitere Informationen über die Teilchen erhält man aus der Blasendichte einer Spur. Diese hängt ab von der elektrischen Ladung und von der Geschwindigkeit des Teilchens. Hier gilt für flüssigen Wasserstoff die Bethe-Bloch-Gleichung für die Bläschendichte ρ in folgender Form:

$$\rho \approx \frac{1}{\beta^2} \ln \frac{46880\beta^2}{1 - \beta^2} - 1 \quad (3)$$

Bedingt durch die Position der Kamera und des Projektors war es nötig, die gemessenen Längen auf die tatsächlichen Werte umzurechnen. Dazu waren auf den Glasscheiben der Kammer Kreuze angebracht, deren Lagen und Abstände einer Skizze in der Versuchsanleitung zu entnehmen sind. Durch Bestimmung der Abstände auf dem Digitalisiertisch wird der Abbildungsmaßstab bestimmt. Für die Mittelebene der Kammer gilt Gleichung (6).

$$\zeta_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{\overline{GC}_{Blasen\,kammer}}{\overline{GC}_{Bild\,vorne} + \overline{GC}_{Bild\,hinten}} \right] \quad (4)$$

$$\zeta_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{\overline{HC}_{Blasen\,kammer}}{\overline{HC}_{Bild\,vorne} + \overline{HC}_{Bild\,hinten}} \right] \quad (5)$$

Daraus dann:

$$\zeta = \frac{1}{2} (\zeta_1 + \zeta_2) = 0,6 \quad (6)$$

2 Analyse der Ereignisse

Aus dem in der Anleitung angegeben Impuls $p = (670 \pm 10 MeV)$ des einfliegenden K^- -Teilchens und der Ruhemasse von $m = 493,677 MeV$ ergibt sich dessen Energie zu:

$$E_{K^-} = \sqrt{p^2 + m^2} = 832,2 MeV \quad (7)$$

Mit der Ruhemasse des Protons von $m_p = 938,28 MeV$ ergibt sich somit für die Gesamtenergie des Systems vor der Reaktion:

$$E = 832,2 MeV + 938,28 MeV = 1770,5 MeV \quad (8)$$

Der gemessene Radius muß über $R = \zeta \cdot r$ in den tatsächlichen Radius umgerechnet werden. Daraus ergibt sich dann der Impuls eines geladenen Teilchens zu $p = 3,0 \frac{MeV}{T_{cm}} \cdot B \cdot R$ mit $B = 2,05T$. Der Impuls kann in 2 Komponenten aufgeteilt werden, p_x und p_y , wobei die Flugrichtung des einfliegenden K^- als x-Richtung gewählt wird. Die einzelnen Komponenten des Impulses sind dann:

$$p_x = p \cdot \cos \alpha \quad \text{bzw.} \quad p_y = p \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

Bei neutralen Teilchen, bei denen der Impuls nicht über ihren Radius bestimmt werden kann, wird p mit Hilfe der Impulserhaltung berechnet.

2.1 Fehlerrechnung für die Tabellenerstellung

Der Fehler des korrigierten Radius beträgt:

$$\Delta R = \zeta \cdot \Delta r + \Delta \zeta \cdot r \quad (10)$$

Der Fehler des Impulses der Teilchen:

$$\Delta p = 3,0 \frac{MeV}{T_{cm}} \cdot B \cdot \Delta T \quad (11)$$

Für die einzelnen Komponenten ergibt sich somit ein Fehler von:

$$\Delta p_x = \Delta p \cdot \cos \alpha + p \cdot \sin \alpha \cdot \Delta \alpha \quad \text{bzw.} \quad \Delta p_y = \Delta p \cdot \sin \alpha + p \cdot \cos \alpha \cdot \Delta \alpha \quad (12)$$

Hier muß aber auch noch ein systematischer Fehler berücksichtigt werden, die Flugbahn der Teilchen kann nämlich gegen die Bildebene um bis zu 20° geneigt sein. Hieraus ergibt sich ein größerer Impuls, so daß der positive Fehler ebenfalls größer gewählt werden muß. Mit der Annahme, daß die Flugbahn der meisten Teilchen um nicht mehr als 5° geneigt ist, läßt sich der zusätzliche Fehler berechnen zu:

$$\Delta p^+ = p \cdot \left(\frac{1}{\cos 5^\circ} - 1 \right) \approx 1\% \cdot p \quad (13)$$

Für die Teilchen, deren Impuls wir nicht über den Radius bestimmen konnten, da sie keine Spur hinterlassen, wurde p mit Hilfe der Impulserhaltung rekonstruiert und der Fehler aus den vorhandenen Fehler abgeschätzt. Damit ergibt sich der Fehler in der Energieberechnung zu:

$$\Delta E = \frac{p \cdot \Delta p}{\sqrt{p^2 + m^2}} \quad (14)$$

2.2 Normierung der Bethe-Bloch-Gleichung

Zunächst muß aus dem in der Anleitung angegebenen Impuls der einfliegenden K^- -Teilchen der Wert von β berechnet werden. Hiermit kann dann der Normierungsfaktor bestimmt werden. $p_{K^-} = (670 \pm 10 MeV)$, damit:

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m^2}{p^2}}} = 0,805 \quad (15)$$

Mit einem Fehler von:

$$\Delta \beta = \frac{m^2 \cdot \Delta p}{p^3 \sqrt{1 + \frac{m^2}{p^2}}} = 0,007 \quad (16)$$

Dieser Wert eingesetzt in die Bethe-Bloch-Gleichung (Gleichung (3)) ergibt:

$$\frac{1}{\beta^2} \ln \frac{46880\beta^2}{1-\beta^2} - 1 = 16,54 \quad (17)$$

Durch Vergleich mit der von uns ermittelten Blasendichte, bzw der Länge L mit 400 Bläschen, ergibt sich jetzt bezogen auf den Digitalisertisch ein Normierungsfaktor von:

$$c = \frac{\frac{400}{\frac{1}{2}(33,6+36,2)cm}}{16,54} = 0,693 \frac{1}{cm} \quad (18)$$

Mit der Annahme, daß $\Delta L = \frac{36,2-33,6}{2}$ ist, beträgt der Fehler hier:

$$\Delta c = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{\frac{\partial c}{\partial L}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \beta}{\frac{\partial c}{\partial \beta}}\right)^2} \quad (19)$$

2.3 Testen der Hypothesen

Für jede Topologie gibt es mehrere mögliche Hypothesen; jene wurden jeweils durchgerechnet und mit dem gemessenen Ereignis verglichen. Dies ist im folgenden dargestellt, wobei Teilchen 1 jeweils das eingeschossene K^- ist, dessen Energie die Gesamtenergie nach Gleichung (8) inklusive der Masse des Protons ist. Die jeweils angegebenen Summen sind immer über die letztlich entstehenden Teilchen.

Dia 23

Das beobachtete Ereignis hat die Topologie 201, hier gibt es 2 mögliche Hypothesen.

Hypothese 1: $K^- p \rightarrow \pi^- p \bar{K}^0$; $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E = 10 MeV$
Teilchen 2:	π^-	$E = 348,7 MeV, \Delta E^+ = 2,9 MeV, \Delta E^- = 2,7 MeV$
Teilchen 3:	\bar{K}^0	$E = 497,7 MeV, \Delta E^+ = 32 MeV, \Delta E^- = 30 MeV$
Teilchen 4:	p	$E = 939,0 MeV, \Delta E = 0,1 MeV$
Teilchen 5:	π^+	$E = 555,5 MeV, \Delta E^+ = 2,5 MeV, \Delta E^- = 2,4 MeV$
Teilchen 6:	π^-	$E = 169,4 MeV, \Delta E = 0,3 MeV$
Summe Teilchen 2,4-6:		$E = 2012,6 MeV, \Delta E^+ = 5,8 MeV, \Delta E^- = 5,5 MeV$

Hypothese 2: $K^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ \Lambda$; $\Lambda \rightarrow p \pi^-$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E = 10 MeV$
Teilchen 2:	π^-	$E = 348,7 MeV, \Delta E^+ = 2,9 MeV, \Delta E^- = 2,7 MeV$
Teilchen 3:	Λ	$E = 1115,6 MeV, \Delta E^+ = 19,6 MeV, \Delta E^- = 18,4 MeV$
Teilchen 4:	π^+	$E = 144,4 MeV, \Delta E = 0,5 MeV$
Teilchen 5:	p	$E = 1081,4 MeV, \Delta E^+ = 1,3 MeV, \Delta E^- = 1,2 MeV$
Teilchen 6:	π^-	$E = 169,4 MeV, \Delta E = 0,3 MeV$
Summe Teilchen 2,4-6:		$E = 1743,9 MeV, \Delta E^+ = 5,0 MeV, \Delta E^- = 4,7 MeV$

Wie man klar sieht liegt die Energie bei Hypothese 2 deutlich näher an der des gemessenen Ereignisses.

Dia 21

Das beobachtete Ereignis hat die Topologie 210^- , hier gibt es 5 verschiedene Hypothesen. Zwei dieser Ereignisse fallen aus der Betrachtung, da bei diesen im zweiten Zerfall jeweils ein Neutrino entsteht, aber bei dem beobachteten Ereignis die Bahn stark abgelenkt war. Daraus läßt sich schliessen, daß die entstehenden Teilchen in etwa die gleiche Ruhemasse haben müßten. Übrig bleiben also 3 zu prüfende Hypothesen.

Hypothese 3: $K^- p \rightarrow K^- n \pi^+$; $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 6,2 MeV, \Delta E^- = 5,8 MeV$
Teilchen 2:	π^+	$E = 261,1 MeV, \Delta E = 1,1 MeV$
Teilchen 3:	K^-	$E \geq 493,7 MeV$
Teilchen 5:	π^-	$E = 206 MeV, \Delta E^+ = 35 MeV, \Delta E^- = 33 MeV$
Teilchen 6:	π^0	$E \geq 135,0 MeV$
Teilchen 7:	n	$E \geq 939,6 MeV$
Summe Teilchen 2,5-7:		$E \geq 1541,7 MeV, \Delta E^- = 39,9 MeV$

Bei den beiden letzten Teilchen ist als untere Abschätzung für die Energie nur die Ruhemasse angegeben, sowohl das π^0 als auch das Neutron müssen aber noch einen nicht verschwindenden Impuls tragen. Im Falle des Neutron ist dieser größer als $578,2 MeV$, wodurch die Gesamtenergie die zur Verfügung stehende Anfangsenergie von $1770 MeV$ übersteigt. Somit trifft auch diese Hypothese nicht auf die Beobachtung zu.

Hypothese 4: $K^- p \rightarrow \pi^+ \Sigma^-$; $\Sigma^- \rightarrow n \pi^-$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 6,2 MeV, \Delta E^- = 5,8 MeV$
Teilchen 2:	π^+	$E = 261,1 MeV, \Delta E = 1,1 MeV$
Teilchen 3:	Σ^-	$E = 1434 MeV, \Delta E^+ = 23 MeV, \Delta E^- = 21 MeV$
Teilchen 5:	π^-	$E = 313 MeV, \Delta E^+ = 35 MeV, \Delta E^- = 33 MeV$
Teilchen 6:	n	$E = 1111 MeV, \Delta E^+ = 26 MeV, \Delta E^- = 24 MeV$
Summe Teilchen 2,5,6:		$E = 1685 MeV, \Delta E^+ = 62 MeV, \Delta E^- = 58 MeV$

Hypothese 5: $K^- p \rightarrow K^- p$; $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 6,2 MeV, \Delta E^- = 5,8 MeV$
Teilchen 2:	p	$E = 963,9 MeV, \Delta E = 0,3 MeV$
Teilchen 3:	K^-	$E = 930,9 MeV, \Delta E^+ = 35 MeV, \Delta E^- = 33 MeV$
Teilchen 5:	π^-	$E = 313,3 MeV, \Delta E^+ = 35 MeV, \Delta E^- = 33 MeV$
Teilchen 6:	π^0	$E = 608,2 MeV, \Delta E^+ = 47 MeV, \Delta E^- = 44 MeV$
Summe Teilchen 2,5,6:		$E = 1885,4 MeV, \Delta E^+ = 82 MeV, \Delta E^- = 77 MeV$

Bei Hypothese 4 ist die Energie im Rahmen der Messgenauigkeit erhalten, es kann daher davon ausgegangen werden, daß diese Hypothese das beobachtete Ereignis beschreibt.

Dia 15

Das beobachtete Ereignis hat die Topologie 100, hier gibt es 2 mögliche Hypothesen.

Hypothese 1: $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$

Teilchen 1:	K^-	$E = 741 MeV, \Delta E^+ = 44 MeV, \Delta E^- = 41 MeV$
Teilchen 2:	π^-	$E = 178,6 MeV, \Delta E^+ = 1,8 MeV, \Delta E^- = 1,7 MeV$
Teilchen 3:	π^0	$E = 546 MeV, \Delta E^+ = 59 MeV, \Delta E^- = 55 MeV$
Summe Teilchen 2,3:		$E = 724 MeV, \Delta E^+ = 61 MeV, \Delta E^- = 57 MeV$

Hypothese 2: $K^- \rightarrow \mu^- \nu$

Teilchen 1:	K^-	$E = 741 MeV, \Delta E^+ = 44 MeV, \Delta E^- = 41 MeV$
Teilchen 2:	μ^-	$E = 153,5 MeV, \Delta E^+ = 2,1 MeV, \Delta E^- = 2,0 MeV$
Teilchen 3:	ν	$E = 529 MeV, \Delta E^+ = 61 MeV, \Delta E^- = 57 MeV$
Summe Teilchen 2,3:		$E = 683 MeV, \Delta E^+ = 63 MeV, \Delta E^- = 59 MeV$

Leider kann man über die Energie nicht sicher sagen, welche Hypothese zutrifft. Zwar liegt die Energie in Hypothese 1 näher an der Anfangsenergie, deutet somit auf ein Zutreffen diese Hypothese hin, jedoch ist es nicht zweifelsfrei zu entscheiden. Nähere Betrachtung der beobachteten Spuren zeigt jedoch, daß die Spur sehr stark abgelenkt ist. Dies deutet darauf hin, daß die beiden entstehenden Teilchen vergleichbare Ruhemasse haben müssen. Dies ist bei μ und ν nicht der Fall, wohl aber bei den beiden Pionen. Daher ist Hypothese 1 wohl eher zutreffend.

Dia 15

Das hier beobachtete Ereignis hat die Topologie 001, auch hier gibt es 2 mögliche Hypothesen, die zu überprüfen sind.

Hypothese 1: $K^- p \rightarrow n \bar{K}^0; \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 6,2 MeV, \Delta E^- = 5,8 MeV$
Teilchen 2:	\bar{K}^0	$E = 895,7 MeV, \Delta E^+ = 11,5 MeV, \Delta E^- = 10,8 MeV$
Teilchen 4:	π^+	$E = 606,7 MeV, \Delta E^+ = 11,5 MeV, \Delta E^- = 10,8 MeV$
Teilchen 5:	π^-	$E = 216 MeV, \Delta E^+ = 29 MeV, \Delta E^- = 27 MeV$
Teilchen 6:	n	$E = 1001,0 MeV, \Delta E^+ = 6,6 MeV, \Delta E^- = 6,2 MeV$
Summe Teilchen 4,5,6:		$E = 1823 MeV, \Delta E^+ = 47 MeV, \Delta E^- = 44 MeV$

Hypothese 2: $K^- p \rightarrow \pi^0 \Lambda; \Lambda \rightarrow p \pi^-$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 28 MeV, \Delta E^- = 27 MeV$
Teilchen 2:	Λ	$E = 1341,3 MeV, \Delta E^+ = 7,7 MeV, \Delta E^- = 7,2 MeV$
Teilchen 3:	p	$E = 1108,6 MeV, \Delta E^+ = 6,3 MeV, \Delta E^- = 5,9 MeV$
Teilchen 4:	π^-	$E = 216 MeV, \Delta E^+ = 29 MeV, \Delta E^- = 27 MeV$
Teilchen 5:	π^0	$E = 370 MeV, \Delta E^+ = 18 MeV, \Delta E^- = 17 MeV$
Summe Teilchen 3-5:		$E = 1695 MeV, \Delta E^+ = 52 MeV, \Delta E^- = 49 MeV$

Bei Hypothese 2 ist die Energie erhalten, sie beschreibt daher ziemlich sicher das beobachtete Ereignis.

Dia 15

Als letztes Ereignis fand sich auf diesem Dia auch noch eines mit Topologie 300. Für diese Topologie gibt es nur eine einzige Hypothese.

Hypothese 1: $K^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+$

Teilchen 1:	K^-	$E = 670 MeV, \Delta E = 10 MeV$
Teilchen 2:	π^-	$E = 229,6 MeV, \Delta E^+ = 3,1 MeV, \Delta E^- = 2,9 MeV$
Teilchen 3:	π^+	$E = 223,8 MeV, \Delta E^+ = 1,5 MeV, \Delta E^- = 1,4 MeV$
Teilchen 4:	π^-	$E = 210,5 MeV, \Delta E^+ = 0,6 MeV, \Delta E^- = 0,6 MeV$
Summe Teilchen 2-4:		$E = 663,8 MeV, \Delta E^+ = 5,2 MeV, \Delta E^- = 4,9 MeV$

Die Endenergie stimmt innerhalb unserer Fehlergrenzen mit der gemessenen Anfangsenergie überein. Daher beschreibt diese Hypothese das beobachtete Ereignis sehr gut.

Dia 18

Das hier beobachtete Ereignis hat die Topologie 200. Für diese Topologie gibt es 5 zu prüfende Hypothesen.

Hypothese 1: $K^- p \rightarrow K^- p$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 7,2 MeV, \Delta E^- = 6,7 MeV$
Teilchen 2:	p	$E = 1069,0 MeV, \Delta E^+ = 3,8 MeV, \Delta E^- = 3,5 MeV$
Teilchen 3:	K^-	$E = 690,9 MeV, \Delta E^+ = 4,1 MeV, \Delta E^- = 3,9 MeV$
Summe Teilchen 2,3:		$E = 1759,9 MeV, \Delta E^+ = 7,9 MeV, \Delta E^- = 7,4 MeV$

Hypothese 2: $K^- p \rightarrow K^- p \pi^0$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 7,2 MeV, \Delta E^- = 6,7 MeV$
Teilchen 2:	p	$E = 1069,0 MeV, \Delta E^+ = 3,8 MeV, \Delta E^- = 3,5 MeV$
Teilchen 3:	K^-	$E = 690,9 MeV, \Delta E^+ = 4,1 MeV, \Delta E^- = 3,9 MeV$
Teilchen 4:	π^0	$E = 146,6 MeV, \Delta E^+ = 6,2 MeV, \Delta E^- = 5,9 MeV$
Summe Teilchen 2-4:		$E = 1906,5 MeV, \Delta E^+ = 14,0 MeV, \Delta E^- = 13,1 MeV$

Hypothese 3: $K^- p \rightarrow K^- n \pi^+$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 7,2 MeV, \Delta E^- = 6,7 MeV$
Teilchen 2:	π^+	$E = 530,9 MeV, \Delta E^+ = 7,6 MeV, \Delta E^- = 7,1 MeV$
Teilchen 3:	K^-	$E = 690,9 MeV, \Delta E^+ = 4,1 MeV, \Delta E^- = 3,9 MeV$
Teilchen 4:	n	$E = 941,3 MeV, \Delta E^+ = 1,0 MeV, \Delta E^- = 0,9 MeV$
Summe Teilchen 2-4:		$E = 2163,1 MeV, \Delta E^+ = 12,6 MeV, \Delta E^- = 11,9 MeV$

Hypothese 4: $K^- p \rightarrow \pi^- p \bar{K}^0$; $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 7,2 MeV, \Delta E^- = 6,7 MeV$
Teilchen 2:	p	$E = 1069,0 MeV, \Delta E^+ = 3,8 MeV, \Delta E^- = 3,5 MeV$
Teilchen 3:	π^-	$E = 503,1 MeV, \Delta E^+ = 5,7 MeV, \Delta E^- = 5,3 MeV$
Teilchen 4:	\bar{K}^0	$E = 501,0 MeV, \Delta E^+ = 1,8 MeV, \Delta E^- = 1,7 MeV$
Summe Teilchen 2-4:		$E = 2073,1 MeV, \Delta E^+ = 11,3 MeV, \Delta E^- = 10,6 MeV$

Hypothese 5: $K^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ \Lambda$; $\Lambda \rightarrow n \pi^0$

Teilchen 1:	K^-	$E = 1770,5 MeV, \Delta E^+ = 7,2 MeV, \Delta E^- = 6,7 MeV$
Teilchen 2:	π^+	$E = 530,9 MeV, \Delta E^+ = 7,6 MeV, \Delta E^- = 7,1 MeV$
Teilchen 3:	π^-	$E = 503,1 MeV, \Delta E^+ = 5,7 MeV, \Delta E^- = 5,3 MeV$
Teilchen 4:	Λ	$E = 1117,1 MeV, \Delta E = 0,8 MeV$
Summe Teilchen 2-4:		$E = 2151,1 MeV, \Delta E^+ = 14,1 MeV, \Delta E^- = 13,2 MeV$

Bei Hypothese 1 wird die Energieerhaltung am besten erfüllt, daher beschreibt diese Hypothese wohl das beobachtete Ereignis.

3 Zusammenfassung und kritische Diskussion

In diesem Versuch wurden Blaskammeraufnahmen untersucht, die in der 81cm-Saclay-Wasserstoffblasenkammer CBH-81¹ am CERN erzeugt worden sind. Für die verschiedene Topologien wurden mit Hilfe von Erhaltungssätzen jeweils mehrere Hypothesen aufgestellt, die auf ihr Zutreffen untersucht wurden. Dazu gingen wir wie folgt vor. Auf einem Digitalisiertisch wurden die Spuren der Teilchen in einen Computer eingelesen und so Radien und Winkel bestimmt. Daraus wurden dann der Impuls und schließlich die kinetischen Energien berechnet. Da neutrale Teilchen in der Blaskammer nicht beobachtet werden können, weil sie keine Spuren hinterlassen, musste in solchen Fällen der Impuls über seinen Erhaltungssatz bestimmt werden, bevor die Energie ausgerechnet werden konnte. Stimmt die Summe der Energie der Endprodukte mit der Summe der Energie der Ausgangsprodukte überein, so nahmen wir an, dass die entsprechende Hypothese richtig war. Aufgrund kleiner Probleme beim Digitalisieren der Spuren war die Energiebilanz nicht immer ein ausreichendes Kriterium zur Identifikation der richtigen Hypothese, so dass auch andere Überlegungen notwendig wurden. Im Großen und Ganzen lag aber immer bei einer der möglichen Hypothesen die Gesamtenergie im Bereich der Anfangsenergie, so dass diese Ereignisse zweifelsfrei zugeordnet werden konnten.

Probleme hatten wir auch beim Arbeiten mit dem Computer, mit dem die Spuren digitalisiert wurden. Dieser stürzte oft ab, ohne dass es dafür erkennbare Gründe gab. Auch sonst war die Arbeit mit dem Computer nicht befriedigend, da man keine genaue Aussage darüber treffen konnte, wie genau die Spuren beim Digitalisieren getroffen wurden. So war es teilweise nur sehr schwer möglich, reproduzierbare Werte für den Radius der Spur zu bekommen, nicht nur bei kurzen Spuren, bei denen es ja eventuell noch einleuchtend wäre, sondern auch bei eigentlich sehr gut zu erkennenden längeren Spuren. Aus diesem Grund ist es eigentlich auch nicht möglich, wirklich aussagekräftige Werte für die Fehler anzugeben.

Außerdem wurde noch die Bläschendichte in den Spuren durch Auszählen der Bläschen auf einem Kreisbogenstück ermittelt und mit den Theoriewerten der Bethe-Bloch-Gleichung verglichen. Dieser Vergleich fiel allerdings nicht sehr zufriedenstellend aus, was wohl darauf zurückzuführen ist, dass der Fehler beim Zählen hoch ist und sich zudem schlecht abschätzen lässt. Als mögliche unberücksichtigte Fehlerquellen wären hier zu nennen:

- Das projizierte Bild war nicht immer gut scharf zu stellen, insbesondere war es meistens nicht möglich, das gesamte Bild auf einmal scharf zu stellen. Hierdurch war es nicht immer einwandfrei klar, ob eine grosse oder zwei kleine Bläschen vorlagen.
- Die Zahl der Bläschen ist nicht wirklich proportional zur Ionisation, da bei hoher Ionisation nicht mehr jedes entstehende Ion ein eigenes Bläschen erzeugt, sondern eventuell mehrerer Ionen ein größeres.

Immerhin liegen die gemessenen Werte jedoch in etwa in der Nähe der theoretischen Kurven.

¹Literatur zur Technik der CBH-81 in L'Onde Elec. 41 (1961).