

# C AB Neutronensterne

## C.1 Didaktische Hinweise

### Lernziele:

- Die Lernenden nennen die charakteristischen Merkmale von Neutronensternen (Anzahl einlaufender und auslaufender Spuren, Summe der elektrischen und schwachen Ladungszahlen sowie der Strangeness vor der Umwandlung).
- Sie stellen Umwandlungshypothesen für Neutronensterne unter der Voraussetzung, dass keine neutralen Teilchen bzw. dass ein Neutron entstanden ist, auf.
- Sie testen die aufgestellten Hypothesen hinsichtlich der Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladung, sowie der Strangeness.
- Die Schülerinnen und Schüler erkennen Neutronensterne auf Blasenkammeraufnahmen.

### Vorwissen<sup>1</sup>:

- Kenntnisse darüber, welche Teilchen in der Blasenkammer Spuren hinterlassen
- Kenntnis der Teilchen Proton, Neutron, Pion, Kaon
- Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladung bei einer Wechselwirkung von Teilchen
- Strangeness und deren Erhaltung bei Wechselwirkungen

### Link zum digitalen Arbeitsblatt:

- <http://tube.geogebra.org/m/VcICi3Ui>

### Weitere Voraussetzungen:

- Für die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* notwendig. Diese Liste sollte im Vorfeld ausgefüllt werden.

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen erlangen die Lernenden beim Bearbeiten der beiden Einführungen zu Blasenkammern.

## C.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Untersuchung von Neutronensternen<sup>a</sup>

Untersuchungsgegenstand dieser Übung sind Neutronensterne, das heißt Spurmuster auf Blasenkammerbildern, welche bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs entstehen.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Charakteristika eines Neutronensterns

Überlege, welche Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen und wie viele einlaufende Spuren es demnach gibt. Gib die Anzahl einlaufender Spuren an.

Die Anzahl beträgt: \_\_\_\_\_

Begründe deine Antwort.

---

---

---

---

Bei jeder Teilchenumwandlung muss die elektrische Ladung erhalten bleiben. Gib die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt: \_\_\_\_\_

Begründe deine Antwort rechnerisch.

---

<sup>a</sup>Dieser Begriff wird im Zusammenhang mit der Blasenkammer als Bezeichnung für das Spurmuster verwendet, welches bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs auf einer Blasenkammeraufnahme zu sehen ist. Es besteht kein Zusammenhang zu den astronomischen Neutronensternen.

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Die Summe der elektrischen Ladungszahlen der Teilchen, welche bei der Umwandlung entstehen, muss also ebenfalls diesen Wert ergeben. Entscheide, welche Schlussfolgerung sich über die Anzahl auslaufender Spuren damit ziehen lässt.

Die Anzahl auslaufender Spuren ist stets

gerade

ungerade

Begründe deine Antwort.

---

---

---

---

Um nun die Teilchen zu identifizieren, welche die Spuren hinterlassen haben, müssen Umwandlungshypothesen aufgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass auch die Summe der schwachen Ladungszahlen erhalten bleibt. Gib die Summe der schwachen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt: \_\_\_\_\_

Begründe deine Antwort rechnerisch.

---

Beachtet werden muss bei einer solchen Wechselwirkung von einem Neutron und einem Proton auch die Erhaltung der Strangeness. Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

Gib die Strangeness vor der Wechselwirkung an.

Die Strangeness beträgt: \_\_\_\_\_

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**2. Aufgabe - Aufstellen von Umwandlungshypothesen**

Stelle Hypothesen darüber auf, welche Teilchen bei dem markierten Neutronenstern die Spuren hinterlassen haben. Teste diese hinsichtlich der Ladungserhaltung und der Erhaltung der Strangeness.

**Neutronenstern A**

Anzahl auslaufender Spuren: \_\_\_\_\_

 $q$  ... elektrische Ladung $I$ ...schwache Ladung $S$ ...Strangeness

In der Spalte „Hypothese“ sollen die Teilchen genannt werden, welche die auslaufenden Spuren hinterlassen haben könnten.

Hypothese	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

**Neutronenstern B**

Anzahl auslaufender Spuren: \_\_\_\_\_

Hypothese	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Anhand der Spuren kann lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, welche geladenen Teilchen bei dem Prozess entstehen, nicht aber, ob eventuell auch ungeladene Teilchen entstehen. Stelle eine Hypothese unter der Voraussetzung auf, dass ein Neutron bei der Umwandlung entsteht und drei auslaufende Spuren vorhanden sind. Notiere hier die Teilchen, welche in diesem Fall bei der Umwandlung entstehen. Begründe deine Antwort.

---

---

---

---

### 3. Aufgabe - Finden eines Neutronensterns

Finde auf der Blasenkammeraufnahme einen Neutronenstern und markiere diesen, indem du den vorgegebenen Punkt V auf den Wechselwirkungspunkt setzt.

Begründe, warum es sich um einen Neutronenstern handelt. Notiere die Anzahl der auslaufenden Spuren und eine mögliche Umwandlungshypothese.

---

---

---

---

## C.3 Lösungsblatt

Lösung

### Untersuchung von Neutronensternen<sup>a</sup>

Untersuchungsgegenstand dieser Übung sind Neutronensterne, das heißt Spurmuster auf Blasenkammerbildern, welche bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs entstehen.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Charakteristika eines Neutronensterns

Überlege, welche Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen und wie viele einlaufende Spuren es demnach gibt. Gib die Anzahl einlaufender Spuren an.

Die Anzahl beträgt:   0  

Begründe deine Antwort.

Es gibt keine auslaufende Spur, weil das Neutron als elektrisch neutrales Teilchen keine Spur hinterlässt und das Proton vor der Wechselwirkung ruht.

Bei jeder Teilchenumwandlung muss die elektrische Ladung erhalten bleiben. Gib die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt:   +1  

Begründe deine Antwort rechnerisch.

$$q_p + q_n = +1 + 0 = +1$$

Die Summe der elektrischen Ladungszahlen der Teilchen, welche bei der Umwandlung entstehen, muss also ebenfalls diesen Wert ergeben. Entscheide, welche Schlussfolgerung sich über die Anzahl auslaufender Spuren damit ziehen lässt.

Die Anzahl auslaufender Spuren ist stets

- gerade
- ungerade

Begründe deine Antwort.

Die Anzahl der auslaufenden Spuren muss ungerade sein, denn es muss genau ein positiv elektrisch geladenes Teilchen mehr entstanden sein als negativ elektrisch geladene Teilchen.

<sup>a</sup>Dieser Begriff wird im Zusammenhang mit der Blasenkammer als Bezeichnung für das Spurmuster verwendet, welches bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs auf einer Blasenkammeraufnahme zu sehen ist. Es besteht kein Zusammenhang zu den astronomischen Neutronensternen.

Lösung

Um nun die Teilchen zu identifizieren, welche die Spuren hinterlassen haben, müssen Umwandlungshypothesen aufgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass auch die Summe der schwachen Ladungszahlen erhalten bleibt. Gib die Summe der schwachen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt:   0  

Begründe deine Antwort rechnerisch.

$$I_p + I_n = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

Beachtet werden muss bei einer solchen Wechselwirkung von einem Neutron und einem Proton auch die Erhaltung der Strangeness. Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

Gib die Strangeness vor der Wechselwirkung an.

Die Strangeness beträgt:   0  

## 2. Aufgabe - Aufstellen von Umwandlungshypothesen

Stelle Hypothesen darüber auf, welche Teilchen bei dem markierten Neutronenstern die Spuren hinterlassen haben. Teste diese hinsichtlich der Ladungserhaltung und der Erhaltung der Strangeness.

### Neutronenstern A

Anzahl auslaufender Spuren:   3  

$q$  ... elektrische Ladung  
 $I$ ...schwache Ladung  
 $S$ ...Strangeness  
 In der Spalte „Hypothese“ sollen die Teilchen genannt werden, welche die auslaufenden Spuren hinterlassen haben könnten.

Hypothese <sup>a</sup>	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	+1	+1	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p \pi^+ \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p K^+ \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	+1	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$\pi^+ \pi^- \pi^-$	-1	-1	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p p \pi^-$	+1	0	0	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

<sup>a</sup>Die hier angegebenen Hypothesen sind eine Auswahl. Es gibt weitere nicht zulässige Hypothesen.

Lösung

**Neutronenstern B**Anzahl auslaufender Spuren: 5

Hypothese <sup>a</sup>	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
$p \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$\pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	+1	+1	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p \pi^+ K^+ \pi^- \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	+1	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p p \pi^+ \pi^- \pi^-$ <sup>b</sup>	+1	0	0	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
$p p K^+ K^- \pi^-$ <sup>b</sup>	+1	0	0	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Anhand der Spuren kann lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, welche geladenen Teilchen bei dem Prozess entstehen, nicht aber, ob eventuell auch ungeladene Teilchen entstehen. Stelle eine Hypothese unter der Voraussetzung auf, dass ein Neutron bei der Umwandlung entsteht und drei auslaufende Spuren vorhanden sind. Notiere hier die Teilchen, welche in diesem Fall bei der Umwandlung entstehen. Begründe deine Antwort.

Bei der Umwandlung entstehen ein Proton, ein Neutron, ein positiv elektrisch geladenes Pion und ein negativ elektrisch geladenes Pion, denn dann ist die Summe der elektrischen Ladungszahlen nach der Umwandlung +1, die Summe der schwachen Ladungszahlen 0 und die Strangeness ebenfalls 0. Es ist auch möglich, dass ein Proton, ein Neutron, ein positiv elektrisch geladenes Kaon und ein negativ elektrisch geladenes Kaon entstehen, weil auch dann die elektrische und die schwache Ladung sowie die Strangeness erhalten sind.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Die hier angegebenen Hypothesen sind eine Auswahl. Es gibt weitere nicht zulässige Hypothesen.

<sup>b</sup>Es ist ausreichend, wenn der Lernende eine korrekte Hypothese findet.

<sup>c</sup>Es ist ausreichend, wenn der Lernende eine der beiden Lösungen notiert.



*Lösung*

### 3. Aufgabe - Finden eines Neutronensterns

Finde auf der Blasenkammeraufnahme einen Neutronenstern und markiere diesen, indem du den vorgegebenen Punkt V auf den Wechselwirkungspunkt setzt.

Begründe, warum es sich um einen Neutronenstern handelt. Notiere die Anzahl der auslaufenden Spuren und eine mögliche Umwandlungshypothese.

Es handelt sich um einen Neutronenstern, weil keine einlaufenden Spuren zum Wechselwirkungspunkt führen und eine ungerade Anzahl von auslaufenden Spuren sichtbar ist.

Lösung 1: Der Neutronenstern hat drei auslaufende Spuren. Mögliche Umwandlungshypothesen sind:<sup>b</sup>

- $p p \pi^-$
- $p n \pi^+ \pi^-$
- $p n K^+ K^-$

Lösung 2: Der Neutronenstern hat fünf auslaufende Spuren. Mögliche Umwandlungshypothesen sind:<sup>b</sup>

- $p p \pi^+ \pi^- \pi^-$
- $p p K^+ K^- \pi^-$
- $p n \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$
- $p n K^+ K^- \pi^+ \pi^-$
- $p n K^+ K^- K^+ K^-$

<sup>b</sup>Die Koordinaten der Neutronensterne sind für Lösung 1 (33,8; 112,2) und für Lösung 2 (33,4; 119,5). Es ist ausreichend, wenn der Lernende einen Neutronenstern identifiziert und eine Umwandlungshypothese angibt. Bei den hier angegebenen Hypothesen handelt es sich um eine Auswahl.



# D AB 2663

## D.1 Didaktische Hinweise

### Lernziele:

- Die Schülerinnen und Schüler bestimmen den Impuls eines Teilchens aus der Krümmung der Spur, welche es in der Blaskammer hinterlassen hat.
- Sie bestimmen den Impuls aus der Reichweite des Teilchens.
- Die Lernenden beschreiben mögliche Probleme, welche bei der Anwendung der Methoden auftreten können.
- Sie vergleichen die beiden Methoden zur Impulsberechnung hinsichtlich der Kriterien für ihre Anwendbarkeit auf zu untersuchende Spuren.

### Vorwissen:

- Kenntnisse über die Bewegung elektrisch geladener Teilchen im Magnetfeld:
  - Zusammenhang zwischen Krümmungsrichtung einer Spur und Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens, welches diese hinterlassen hat (Rechte-Hand-Regel)
  - Wirkung der Lorentzkraft als Radialkraft
  - Impulsberechnung mittels  $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ <sup>1</sup>
- Zusammenhang zwischen der Masse eines Teilchens und Dicke der Spur<sup>1</sup>
- Grundlagen der räumlichen Rekonstruktion mit Blaskammeraufnahmen<sup>1</sup>
- Kenntnis der geometrischen Begriffe Mittelsenkrechte und Sehne
- Wissen, dass die Spurlänge der Reichweite des Teilchens entspricht<sup>1</sup>
- Zusammenhang zwischen Energieverlust des Teilchens durch Ionisation und der Länge (Impuls-Reichweite-Beziehung)<sup>1</sup> sowie dem Krümmungsradius der Spur (spiralförmige Spuren),
- Umgang mit der Einheit  $\frac{eV}{c}$

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen können die Lernenden in der *Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blaskammeraufnahmen* erwerben.

**Link zum digitalen Arbeitsblatt:**

- <http://tube.geogebra.org/m/vjI67Sf6>

**Weitere Voraussetzungen:**

- Das Zusatzmaterial *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* soll anhand dieses Arbeitsblattes nachvollzogen werden. Die Lernenden können sich auch zusätzliche Notizen auf dem Zusatzmaterial anfertigen.
- Für die Bearbeitung des Arbeitsblattes kann die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* hilfreich sein.

## D.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Impulsberechnung - 3D

#### Vergleich zweier Methoden

In dieser Übung sollen zwei Methoden der Impulsberechnung miteinander verglichen werden. Dazu soll die grün hervorgehobene Spur betrachtet und der Impuls des Teilchens, welches diese Spur hinterlassen hat, berechnet werden.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### Vorüberlegung - Identifikation des Teilchens

Überlege, welches Teilchen die Spur hinterlassen hat. Ein Proton des Teilchenstrahls ist mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung getreten. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus. Gib unter Beachtung der Krümmungsrichtung der Spur und der Blasendichte eine Vermutung an.

Es handelt sich um ein: \_\_\_\_\_

Begründe deine Vermutung.

---

---

---

---

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**1. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Krümmung der Spur**Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur

Zeige View 1 an und verschiebe dieses Bild auf die Blasenkammeraufnahme (View 2), sodass zwei Vorderseitenkreuze übereinander liegen.

Miss die Abstände

- $d_R$  zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,
- $d_A$  zwischen den beiden Anfangspunkten,
- $d_E$  zwischen den beiden Endpunkten.

Berechne aus den Werten die  $z$ -Koordinaten des Anfangs- und des Endpunktes.

$$z_{Anfang} =$$

$$z_{Ende} =$$

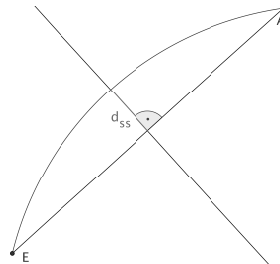
Notizen zu Schritt 1: (Hier können Zwischenergebnisse notiert werden.)

Schritt 2: Bestimmung des Krümmungsradius

Berechne die Länge der Sehne  $l_s$  zwischen Start- und Endpunkt der Spur aus den dreidimensionalen Koordinaten.Konstruiere eine Mittelsenkrechte auf der Sehne in View 2 und bestimme dort den Abstand  $d_{ss}$  zwischen Spur und der Sehne.

$$l_s =$$

$$d_{ss} =$$



Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Berechne mithilfe der folgenden Formel nun den Radius:

$$r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}$$

$r =$

Schritt 3: Berechnung des Impulses

Berechne aus dem von dir bestimmten Krümmungsradius den Impuls des Teilchens. Das Magnetfeld beträgt 1,74 T.

$$p_1 = \frac{GeV}{c} = \frac{MeV}{c}$$

Überlege dir zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses aus der Krümmung einer Teilchenspur auftreten können:

- 
- 

## 2. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Reichweite des Teilchens

Nun soll der Impuls des gleichen Teilchens mit einer zweiten Methode erneut bestimmt werden.

Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinate eines dritten Spurpunktes

Lege den Punkt  $SP$  auf die Spur. Miss die Länge  $l_{ges}$  der Spur insgesamt und die Länge  $l$  zwischen Anfangspunkt und deinem neuen Punkt.

Berechne daraus die  $z$ -Koordinate.

$z_{SP} =$

Schritt 2: Bestimmung der dreidimensionalen Spurlänge

Rekonstruiere auch deinen Spurpunkt in der 3D-Ansicht. Erzeuge nun einen Kreis durch die drei rekonstruierten Punkte (Anfangs-, Spur- und Endpunkt) in der 3D-Ansicht. Miss die Bogenlänge.

Die Reichweite des Teilchens beträgt: \_\_\_\_\_.

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Schritt 3: Bestimmung des Impulses aus der Reichweite

Über die Impuls-Reichweite-Beziehung kann aus der von dir bestimmten Reichweite der Impuls des Teilchens bestimmt werden.

Öffne dazu den Link, der unterhalb des digitalen Arbeitsblatts steht in einem neuen Tab. Du gelangst zur Impuls-Reichweite-Beziehung für Protonen in Wasserstoff.

Trage hier den aus der Reichweite bestimmten Impuls ein:

$$p_2 =$$

Überlege dir auch für diese Methode zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses auftreten können:

- 
- 

### 3. Aufgabe - Vergleich der Methoden zur Impulsberechnung

Fülle die Tabelle aus!

	Impulsberechnung aus	
	der Krümmung der Spur	der Reichweite des Teilchens
berechneter Impuls		
Vergleich der Impulse und der Eignung der Methoden am Beispiel		
Kriterien für die Anwendbarkeit der Methode		



## D.3 Lösungsblatt

Lösungsblatt

### Impulsberechnung - 3D

#### Vergleich zweier Methoden

In dieser Übung sollen zwei Methoden der Impulsberechnung miteinander verglichen werden. Dazu soll die grün hervorgehobene Spur betrachtet und der Impuls des Teilchens, welches diese Spur hinterlassen hat, berechnet werden.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### Vorüberlegung - Identifikation des Teilchens

Überlege, welches Teilchen die Spur hinterlassen hat. Ein Proton des Teilchenstrahls ist mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung getreten. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus. Gib unter Beachtung der Krümmungsrichtung der Spur und der Blasendichte eine Vermutung an.

Es handelt sich um ein: Proton

Begründe deine Vermutung.

Die Krümmungsrichtung der Spur lässt nach der Rechten-Hand-Regel auf ein elektrisch positiv geladenes Teilchen schließen. Es kommen also Proton, positives Pion und positives Kaon in Frage. Aufgrund der hohen Blasendichte, das heißt der Dicke der Spur, lässt sich auf das schwere Proton schließen.

#### 1. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Krümmung der Spur

Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur

Zeige View 1 an und verschiebe dieses Bild auf die Blasenkammeraufnahme (View 2), sodass zwei Vorderseitenkreuze übereinander liegen.

Miss die Abstände

- $d_R$  zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,
- $d_A$  zwischen den beiden Anfangspunkten,
- $d_E$  zwischen den beiden Endpunkten.

Berechne aus den Werten die  $z$ -Koordinaten des Anfangs- und des Endpunktes.

$$z_{Anfang} = (29,45 \pm 5,89) \text{ cm}^a$$

$$z_{Ende} = (23,88 \pm 4,78) \text{ cm}^a$$

<sup>a</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

Notizen zu Schritt 1:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen anfertigen, z.B.:

$$d_R = 9,19 \text{ cm}$$

$$d_A = 5,36 \text{ cm}$$

$$d_E = 4,35 \text{ cm}$$

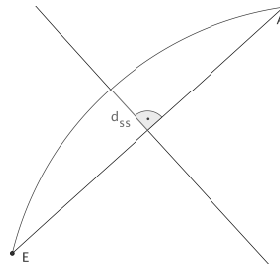
Schritt 2: Bestimmung des Krümmungsradius

Berechne die Länge der Sehne  $l_s$  zwischen Start- und Endpunkt der Spur aus den dreidimensionalen Koordinaten.

Konstruiere eine Mittelsenkrechte auf der Sehne in View 2 und bestimme dort den Abstand  $d_{ss}$  zwischen Spur und der Sehne.

$$l_s = 17,36 \text{ cm}^b$$

$$d_{ss} = (0,49 \pm 0,09) \text{ cm}^a$$



Berechne mithilfe der folgenden Formel nun den Radius:

$$r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}$$

$$r = 77,13 \text{ cm}^b$$

Schritt 3: Berechnung des Impulses

Berechne aus dem von dir bestimmten Krümmungsradius den Impuls des Teilchens. Das Magnetfeld beträgt 1,74 T.

$$p_1 = 0,403 \frac{\text{GeV}}{c} = 403 \frac{\text{MeV}}{c}^b$$

<sup>a</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

<sup>b</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Im digitalen Arbeitsblatt wird entsprechend der Eingaben des Lernenden Feedback gegeben.

Überlege dir zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses aus der Krümmung einer Teilchenspur auftreten können:

- Wenn das Teilchen einen großen Impuls besitzt, wird die Krümmung der Spur sehr groß und damit die Messung der Krümmung ungenau bzw. die Krümmung ist dann nicht mehr erkennbar.
- Bei sehr kurzen Spuren erhöht sich ebenfalls die Ungenauigkeit.
- Der Impuls des Teilchens verringert sich beim Durchqueren der Kammer und die Krümmung der Spur ändert sich. Ist diese Änderung besonders stark (z.B. bei der spiralförmigen Bahn eines Elektron), so ist die dreidimensionale Berechnung des Impulses über die Krümmung komplizierter.

## 2. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Reichweite des Teilchens

Nun soll der Impuls des gleichen Teilchens mit einer zweiten Methode erneut bestimmt werden.

Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinate eines dritten Spurpunktes

Lege den Punkt  $SP$  auf die Spur. Miss die Länge  $l_{ges}$  der Spur insgesamt und die Länge  $l$  zwischen Anfangspunkt und deinem neuen Punkt.

Berechne daraus die  $z$ -Koordinate.

$z_{SP} =$  Je nach gewähltem Punkt ergibt sich hier ein Wert,  
welcher zwischen der Tiefe des Anfangs- und Endpunktes liegt.

Schritt 2: Bestimmung der dreidimensionalen Spurlänge

Rekonstruiere auch deinen Spurpunkt in der 3D-Ansicht. Erzeuge nun einen Kreis durch die drei rekonstruierten Punkte (Anfangs-, Spur- und Endpunkt) in der 3D-Ansicht. Miss die Bogenlänge.

Die Reichweite des Teilchens beträgt: 17,38 cm<sup>b</sup>.

Schritt 3: Bestimmung des Impulses aus der Reichweite

Über die Impuls-Reichweite-Beziehung kann aus der von dir bestimmten Reichweite der Impuls des Teilchens bestimmt werden.

Öffne dazu den Link, der unterhalb des digitalen Arbeitsblatts steht in einem neuen Tab. Du gelangst zur Impuls-Reichweite-Beziehung für Protonen in Wasserstoff.

Trage hier den aus der Reichweite bestimmten Impuls ein:

$$p_2 = (315 \pm 10) \frac{\text{MeV}}{c} \text{ }^a$$

Überlege dir auch für diese Methode zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses auftreten können:

- Die Spur endet nicht innerhalb der Blaskammer.
- Die Spur ist sehr lang und kann deshalb nicht mittels eines einfachen Bogens beschrieben werden (z.B. spiralförmige Spur des Elektron).

*Lösungsblatt*

### 3. Aufgabe - Vergleich der Methoden zur Impulsberechnung

Fülle die Tabelle aus!

	Impulsberechnung aus	
	der Krümmung der Spur	der Reichweite des Teilchens
berechneter Impuls	$403 \frac{\text{MeV}}{c}$	$315 \frac{\text{MeV}}{c}$
Vergleich der Impulse und der Eignung der Methoden am Beispiel	Die beiden Impulse liegen etwa in der gleichen Größenordnung. (Dies bestätigt auch die Vermutung, dass es sich um ein Proton handelt.) Aufgrund der geringen Krümmung und der Kürze der Spur eignet die zweite Methode besser und liefert genauere Ergebnisse.	
Kriterien für die Anwendbarkeit der Methode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spur nicht zu kurz</li> <li>• ausreichende Krümmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfangs- und Endpunkt der Spur liegen in der Kammer</li> <li>• Spur möglichst kurz</li> </ul>

# E AB 2806

## E.1 Didaktische Hinweise

### Lernziele:

- Die Lernenden berechnen den Impuls des Myon-Neutrinos in dem Fall, dass das Pion bei der Umwandlung ruht, mithilfe des Energieerhaltungssatzes und der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung.
- Die Schülerinnen und Schüler wenden eine geeignete Methode zur Impulsberechnung bei der Spur des Anti-Myons an.
- Sie begründen mithilfe des Impulserhaltungssatzes qualitativ die Entstehung von elektrisch neutralen Teilchen anhand des Spurmusters auf der Blasenkammeraufnahme.

### Vorwissen:

- Kenntnis der Teilchen Pion, Anti-Myon, Myon-Neutrino, Positron, Anti-Elektron-Neutrino
- Zusammenhang zwischen Krümmungsrichtung einer Spur und Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens, welches diese hinterlassen hat (Rechte-Hand-Regel)
- Energieerhaltungssatz und relativistische Energie-Impuls-Beziehung
- Methoden der Impulsberechnung anhand von Blasenkammeraufnahmen und deren Kriterien zur Anwendbarkeit<sup>1</sup>
- Nutzung des Impulserhaltungssatzes zum Rückschluss auf neutrale Teilchen anhand von Blasenkammeraufnahmen

### Link zum digitalen Arbeitsblatt:

- <http://tube.geogebra.org/m/SbVHkFAX>

### Weitere Voraussetzungen:

- Für die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* notwendig. Diese Liste sollte im Vorfeld ausgefüllt werden.
- Das Zusatzmaterial *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* ist hilfreich für das Lösen der Aufgaben.

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen erlangen die Lernenden bei der Bearbeitung von AB 2663.

## E.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Die Umwandlung des Pions

Dieses Arbeitsblatt behandelt die Umwandlung eines elektrisch geladenen Pions und die darauf folgende Umwandlung der Produkte.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Identifikation des Teilchens

Die grün hervorgehobene Spur wurde von einem Pion erzeugt. Entscheide, um welches Pion es sich gehandelt hat. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

$\pi^0$

$\pi^+$

$\pi^-$

Begründe deine Antwort.

---

---

---

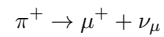
---

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**2. Aufgabe - Theoretische Betrachtung des Impulses des Anti-Myons**

Am Ende der grün markierten Spur ist eine weitere Umwandlung erkennbar. Das Pion wandelt sich in ein Anti-Myon um, welches die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat:



Ruht das Pion bei dieser Umwandlung, so besitzen Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impuls.

Berechne diesen Impuls mithilfe des Energieerhaltungssatzes. Nutze die relativistische Energie-Impuls-Beziehung und runde auf ganze Zahlen.

$$E_{\text{vorher}} =$$
$$=$$

$$p_{\mu 1} =$$
$$=$$

Notizen zur Berechnung des Impulses: (Hier kann der Rechenweg notiert werden.)

**3. Aufgabe - Messung des Impulses des Anti-Myons**

Um nun zu untersuchen, ob das Pion vor der Umwandlung in Ruhe war, muss der Impuls des Anti-Myons aus der Blasenkameraaufnahme ermittelt und der gemessene mit dem berechneten Wert verglichen werden.

Entscheide, welche Methode sich zur Bestimmung des Impulses des Anti-Myons eignet.

- Berechnung aus der Krümmung der Spur
- Berechnung aus der Reichweite des Teilchens

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Berechne nun mithilfe dieser Methode den Impuls des Anti-Myons.

$$p_{\mu 2} =$$

Notizen zur Bestimmung des Impulses: (Hier können Zwischenergebnisse notiert werden.)

#### 4. Aufgabe - Schlussfolgerung

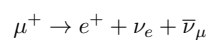
Der berechnete Wert für den Impuls des Anti-Myons kann nun mit dem gemessenen Wert verglichen werden.

Kreuze die Schlussfolgerungen an, welche sich ergeben.

- Das Pion ruhte nahezu vor der Umwandlung.
- Die Annahme, dass das Pion vor der Umwandlung ruhte, hat sich nicht bestätigt.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls, der etwa gleich  $p_{\mu 2}$  ist.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls in Richtung der einlaufenden Spur des Pions.

#### 5. Aufgabe - Umwandlung des Anti-Myons

Das Anti-Myon selbst wandelt sich dann weiter in ein Positron (braun hervorgehobene Spur) um. Auch dabei entstehen Neutrinos:



Überprüfe diese Umwandlungshypothese anhand der Blasenkammeraufnahme, indem du die folgenden Punkte qualitativ begründest:

- positive elektrische Ladung des Teilchens, welches die braun hervorgehobene Spur hinterlassen hat
- Entstehung neutraler Teilchen bei der Umwandlung

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

---



---



---



---



## E.3 Lösungsblatt

Lösungsblatt

### Die Umwandlung des Pions

Dieses Arbeitsblatt behandelt die Umwandlung eines elektrisch geladenen Pions und die darauf folgende Umwandlung der Produkte.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Identifikation des Teilchens

Die grün hervorgehobene Spur wurde von einem Pion erzeugt. Entscheide, um welches Pion es sich gehandelt hat. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

$\pi^0$                         $\pi^+$                         $\pi^-$

Begründe deine Antwort.

Nach der Rechten-Hand-Regel ergibt sich, dass das Teilchen, welches die grün hervorgehobene Spur hinterlassen hat, positiv elektrisch geladen ist. Es handelt sich also um das positive Pion  $\pi^+$ .

#### 2. Aufgabe - Theoretische Betrachtung des Impulses des Anti-Myons

Am Ende der grün markierten Spur ist eine weitere Umwandlung erkennbar. Das Pion wandelt sich in ein Anti-Myon um, welches die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Ruht das Pion bei dieser Umwandlung, so besitzen Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impuls.

Berechne diesen Impuls mithilfe des Energieerhaltungssatzes. Nutze die relativistische Energie-Impuls-Beziehung und runde auf ganze Zahlen.

$$\begin{aligned} E_{\text{vorher}} &= \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} = \sqrt{(140 \text{ MeV})^2 + (0 \text{ MeV})^2} \\ &= 140 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{\mu 1} &= \frac{(140 \text{ MeV})^2 - (106 \text{ MeV})^2}{2 \cdot 140 \text{ MeV}} \cdot \frac{1}{c} \\ &= 30 \frac{\text{MeV}}{c} \end{aligned}$$

Notizen zur Berechnung des Impulses:

Der Energieerhaltungssatz für diese Umwandlung lautet:

$$\begin{aligned} E_{\text{vorher}} &= E_{\mu} + E_{\nu_{\mu}} \\ &= \sqrt{(m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2} + p_{\nu_{\mu}}c \end{aligned}$$

Unter der Bedingung, dass Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impuls besitzen ergibt sich:

$$E_{\text{vorher}} = \sqrt{(m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2} + p_{\mu}c$$

Diese Gleichung muss nun umgestellt werden:

$$\begin{aligned} (E_{\text{vorher}} - p_{\mu}c)^2 &= (m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2 \\ E_{\text{vorher}}^2 - 2E_{\text{vorher}}p_{\mu}c + (p_{\mu}c)^2 &= (m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2 \\ E_{\text{vorher}}^2 - 2E_{\text{vorher}}p_{\mu}c &= (m_{\mu}c^2)^2 \\ p_{\mu} &= \frac{E_{\text{vorher}}^2 - (m_{\mu}c^2)^2}{2E_{\text{vorher}}} \cdot \frac{1}{c} \end{aligned}$$

### 3. Aufgabe - Messung des Impulses des Anti-Myons

Um nun zu untersuchen, ob das Pion vor der Umwandlung in Ruhe war, muss der Impuls des Anti-Myons aus der Blasenkameraaufnahme ermittelt und der gemessene mit dem berechneten Wert verglichen werden.

Entscheide, welche Methode sich zur Bestimmung des Impulses des Anti-Myons eignet.

- Berechnung aus der Krümmung der Spur <sup>a</sup>  
 Berechnung aus der Reichweite des Teilchens

Berechne nun mithilfe dieser Methode den Impuls des Anti-Myons.

$$p_{\mu 2} = 32 \pm 2 \frac{\text{MeV}}{c} \text{ } ^b$$

<sup>a</sup>Diese Methode ist aufgrund der Kürze der Spur nicht geeignet.

<sup>b</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

Notizen zur Bestimmung des Impulses:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen anfertigen, z.B.:

$$d_R = 9,06 \text{ cm}$$

$$d_A = 4,98 \text{ cm}$$

$$d_E = 5,23 \text{ cm}$$

$$l_{ges} = 0,49 \text{ cm}$$

$$l = 0,21 \text{ cm}$$

$$z_A = 27,76 \text{ cm}$$

$$z_E = 29,15 \text{ cm}$$

$$z_{SP} = 28,36 \text{ cm}$$

Reichweite: 1,47 cm

#### 4. Aufgabe - Schlussfolgerung

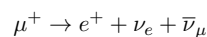
Der berechnete Wert für den Impuls des Anti-Myons kann nun mit dem gemessenen Wert verglichen werden.

Kreuze die Schlussfolgerungen an, welche sich ergeben.

- Das Pion ruhte nahezu vor der Umwandlung.
- Die Annahme, dass das Pion vor der Umwandlung ruhte, hat sich nicht bestätigt.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls, der etwa gleich  $p_{\mu 2}$  ist.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls in Richtung der einlaufenden Spur des Pions.

#### 5. Aufgabe - Umwandlung des Anti-Myons

Das Anti-Myon selbst wandelt sich dann weiter in ein Positron (braun hervorgehobene Spur) um. Auch dabei entstehen Neutrinos:



Überprüfe diese Umwandlungshypothese anhand der Blasenkameraaufnahme, indem du die folgenden Punkte qualitativ begründest:

- positive elektrische Ladung des Teilchens, welches die braun hervorgehobene Spur hinterlassen hat
- Entstehung neutraler Teilchen bei der Umwandlung

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

Mithilfe der Rechten-Hand-Regel lässt sich feststellen, dass das Teilchen, welches die braun hervorgehobene Spur erzeugt hat, positiv elektrisch geladen ist.

Bei jeder Umwandlung gilt der Impulserhaltungssatz vektoriell. Wäre bei dieser Umwandlung nun lediglich das Positron entstanden, so müsste es sich in die gleiche Richtung weiterbewegen wie das Anti-Myon. Da allerdings ein Abknicken der Spur sichtbar ist, müssen bei der Umwandlung auch neutrale Teilchen entstanden sein.



# F AB 2930

## F.1 Didaktische Hinweise

- Die Schülerinnen und Schüler überprüfen Umwandlungshypothesen für die inelastische Proton-Proton-Streuung hinsichtlich der Erhaltung der Ladungen.
- Sie testen die Umwandlungshypothesen, indem sie den Energieerhaltungssatz anwenden.
- Die Lernenden wenden eine geeignete Methode der Impulsberechnung an.

### Vorwissen:

- Kenntnis der Teilchen Proton, Neutron, Pion
- Zusammenhang zwischen Krümmungsrichtung einer Spur und Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens, welches diese hinterlassen hat (Rechte-Hand-Regel)
- Methoden der Impulsberechnung anhand von Blasenkammeraufnahmen und deren Kriterien zur Anwendbarkeit<sup>1</sup>
- Impulserhaltungssatz (insbesondere Beachtung der vektoriellen Form)
- Energieerhaltungssatz und relativistische Energie-Impuls-Beziehung

### Link zum digitalen Arbeitsblatt:

- <http://tube.geogebra.org/m/oqgCRSEJ>

### Weitere Voraussetzungen:

- Für die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* notwendig. Diese Liste sollte im Vorfeld ausgefüllt werden.
- Das Zusatzmaterial *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* ist hilfreich für das Lösen der Aufgaben.

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen erlangen die Lernenden bei der Bearbeitung von AB 2663.

## F.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Untersuchung inelastischer Proton-Proton-Streuung

Dieses Arbeitsblatt behandelt die inelastische Proton-Proton-Streuung. Dabei tritt ein Proton des Strahls mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung und es kommt zur Teilchenumwandlung.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Umwandlungshypothesen

Vom Wechselwirkungspunkt (Vertex) gehen zwei auslaufende Spuren aus, das heißt es sind zwei elektrisch geladene Teilchen entstanden. Es kann außerdem ein elektrisch neutrales Teilchen entstanden sein. Entscheide, welche Umwandlungshypothesen unter dieser Voraussetzung möglich sind.

- $p p \rightarrow p n \pi^+$
- $p p \rightarrow p n \pi^-$
- $p p \rightarrow p n \pi^0$

- $p p \rightarrow n \pi^+ \pi^+$
- $p p \rightarrow p p \pi^0$
- $p p \rightarrow p p \pi^-$

Begründe deine Entscheidung.

---



---



---



---

#### 2. Aufgabe - Berechnung der Impulse der auslaufenden, geladenen Teilchen

Bestimme den Impuls der Teilchen, welche die blau markierte Spur (Teilchen 1) und die grün markierte Spur (Teilchen 2) hinterlassen haben. Wende eine der dir bekannten Methoden zur Impulsberechnung an.

Bestimme die z-Koordinate der Anfangs- und Endpunkte und entscheide dann, welche Methode du verwendest:

- Berechnung aus der Krümmung der Spur
- Berechnung aus der Reichweite des Teilchens

Notizen zur Bestimmung der z-Koordinaten:

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Notiere deine Ergebnisse hier.

$$p_1 =$$

$$p_2 =$$

Notizen zur Impulsberechnung:

### 3. Aufgabe - Bestimmung des Impulses des neutralen Teilchens

Bei der Wechselwirkung von Teilchen gilt der Impulserhaltungssatz. Um mit Hilfe dieses Satzes den Impuls des neutralen Teilchens bestimmen zu können, müssen die Richtungen ermittelt werden, in denen sich die beiden Teilchen vom Vertex entfernen. Ermittle den Impuls des neutralen Teilchens.

$$p =$$

### 4. Aufgabe - Überprüfung der Hypothesen mit dem Energieerhaltungssatz

Mithilfe des Energieerhaltungssatzes lassen sich nun die Umwandlungshypothesen testen. Berechne die Differenz  $\Delta E$  der Energien vor der Umwandlung und nach der Umwandlung für beide Hypothesen mittels der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung.

Führe die Berechnungen für beide Hypothesen durch und runde die Ergebnisse auf ganze Zahlen.

$$E_{\text{vorher}} =$$

$$=$$

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**Hypothese 1:**  $p \rightarrow p \pi^0$  $E_{\text{nachher}} =$ 

=

 $|\Delta E| =$ 

=

**Hypothese 2:**  $p \rightarrow n \pi^+$  $E_{\text{nachher}} =$ 

=

 $|\Delta E| =$ 

=

**5. Aufgabe - Entscheidung für eine Umwandlungshypothese**

Entscheide auf Grundlage deiner Berechnungen, welches neutrale Teilchen entstanden ist.

- Neutron  
 neutrales Pion

Begründe deine Entscheidung.

---

---

---

---



## F.3 Lösungsblatt

Lösungsblatt

### Untersuchung inelastischer Proton-Proton-Streuung

Dieses Arbeitsblatt behandelt die inelastische Proton-Proton-Streuung. Dabei tritt ein Proton des Strahls mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung und es kommt zur Teilchenumwandlung.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Umwandlungshypothesen

Vom Wechselwirkungspunkt (Vertex) gehen zwei auslaufende Spuren aus, das heißt es sind zwei elektrisch geladene Teilchen entstanden. Es kann außerdem ein elektrisch neutrales Teilchen entstanden sein. Entscheide, welche Umwandlungshypothesen unter dieser Voraussetzung möglich sind.

- |   |   |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^+$ | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow n \pi^+ \pi^+$        |
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^-$            | <input checked="" type="checkbox"/> $p p \rightarrow p p \pi^0$ |
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^0$            | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p p \pi^-$            |

Begründe deine Entscheidung.

Die Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladungszahlen ist nur bei diesen beiden Hypothesen gegeben. Die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung beträgt +2 und die Summe der schwachen Ladungszahlen beträgt +1.

#### 2. Aufgabe - Berechnung der Impulse der auslaufenden, geladenen Teilchen

Bestimme den Impuls der Teilchen, welche die blau markierte Spur (Teilchen 1) und die grün markierte Spur (Teilchen 2) hinterlassen haben. Wende eine der dir bekannten Methoden zur Impulsberechnung an.

Bestimme die z-Koordinate der Anfangs- und Endpunkte und entscheide dann, welche Methode du verwendest:

- Berechnung aus der Krümmung der Spur
- Berechnung aus der Reichweite des Teilchens<sup>a</sup>

Notizen zur Bestimmung der z-Koordinaten:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen z.B. zu den Abständen  $d_R$  und  $d_P$  für die drei Punkte anfertigen.

<sup>a</sup>Diese Methode ist für die markierten Spuren nicht geeignet. Die Spuren sind wahrscheinlich nicht vollständig abgebildet, weil die Teilchen die Blaskammer verlassen. Die Endpunkte der Spuren haben als z-Koordinaten beinahe 0 cm bzw. 50,5 cm, was der Ober- bzw. Unterseite der Blaskammer entspricht.

Notizen zur Impulsberechnung:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen anfertigen, z.B.:

z-Koordinate des Vertex:  $z_V = 28,89 \text{ cm}$

blau markierte Spur

grün markierte Spur

$$z_{Ende} = 0,79 \text{ cm}$$

$$z_{Ende} = 50,50 \text{ cm}$$

$$l_s = 40,82 \text{ cm}$$

$$l_s = 43,80 \text{ cm}$$

$$d_{ss} = 1,53 \text{ cm}$$

$$d_{ss} = 1,72 \text{ cm}$$

$$r = 136,90 \text{ cm}$$

$$r = 140,28 \text{ cm}$$

Notiere deine Ergebnisse hier.

$$p_1 = (715 \pm 72) \frac{\text{MeV}^b}{c}$$

$$p_2 = (732 \pm 73) \frac{\text{MeV}^b}{c}$$

### 3. Aufgabe - Bestimmung des Impulses des neutralen Teilchens

Bei der Wechselwirkung von Teilchen gilt der Impulserhaltungssatz. Um mit Hilfe dieses Satzes den Impuls des neutralen Teilchens bestimmen zu können, müssen die Richtungen ermittelt werden, in denen sich die beiden Teilchen vom Vertex entfernen.

Ermittle den Impuls des neutralen Teilchens.

$$p = 23051 \frac{\text{MeV}^c}{c}$$

<sup>b</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

<sup>c</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Im digitalen Arbeitsblatt wird entsprechend der Eingaben des Lernenden Feedback gegeben.

#### 4. Aufgabe - Überprüfung der Hypothesen mit dem Energieerhaltungssatz

Mithilfe des Energieerhaltungssatzes lassen sich nun die Umwandlungshypothesen testen. Berechne die Differenz  $\Delta E$  der Energien vor der Umwandlung und nach der Umwandlung für beide Hypothesen mittels der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung.

Führe die Berechnungen für beide Hypothesen durch und runde die Ergebnisse auf ganze Zahlen.

$$E_{\text{vorher}} = E_{P_1} + E_{P_2} \stackrel{\text{d}}{=} \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (24000 \text{ MeV})^2} + \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (0 \text{ MeV})^2}$$

$$= 24956 \text{ MeV}$$

**Hypothese 1:**  $p \ p \rightarrow p \ p \ \pi^0$

$$E_{\text{nachher}} = E_{p_1} + E_{p_2} + E_{\pi^0}$$

$$= \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (715 \text{ MeV})^2} + \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (732 \text{ MeV})^2}$$

$$+ \sqrt{(135 \text{ MeV})^2 + (23051 \text{ MeV})^2}$$

$$= 25421 \text{ MeV}^{\text{e}}$$

$$|\Delta E| = |E_{\text{nachher}} - E_{\text{vorher}}|$$

$$= 465 \text{ MeV}^{\text{e}}$$

<sup>d</sup>Das Strahlproton  $P_1$  besitzt einen Einfallsimpuls von 24000 MeV. Das Proton des Wasserstoffs  $P_2$  ruht.

<sup>e</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Im digitalen Arbeitsblatt wird entsprechend der Eingaben des Lernenden Feedback gegeben.

**Hypothese 2:**  $p p \rightarrow p n \pi^+$

$$E_{nachher} = E_p + E_{\pi^+} + E_n$$

$$= \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (715 \text{ MeV})^2} + \sqrt{(140 \text{ MeV})^2 + (732 \text{ MeV})^2} \\ + \sqrt{(940 \text{ MeV})^2 + (23051 \text{ MeV})^2}$$

$$= 24995 \text{ MeV}^f$$

$$|\Delta E| = |E_{nachher} - E_{vorher}|$$

$$= 39 \text{ MeV}^f$$

### 5. Aufgabe - Entscheidung für eine Umwandlungshypothese

Entscheide auf Grundlage deiner Berechnungen, welches neutrale Teilchen entstanden ist.

- Neutron  
 neutrales Pion

Begründe deine Entscheidung.

Die Berechnung zeigt, dass für die Hypothese, dass ein Neutron entstanden ist, die Energien, welche sich aus den gemessenen Impulsen ergeben, vor und nach der Umwandlung besser übereinstimmen.

<sup>f</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Außerdem können das Proton und das Pion auch der jeweils anderen Spur zugeordnet werden. Dann ergeben sich:  $E_{nachher} = 24989 \text{ MeV}$  und  $|\Delta E| = 33 \text{ MeV}$ . Das digitale Arbeitsblatt lässt beide Möglichkeiten zu und beachtet die vorangegangenen Eingaben.

# G Zusatzmaterialien

## G.1 Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften

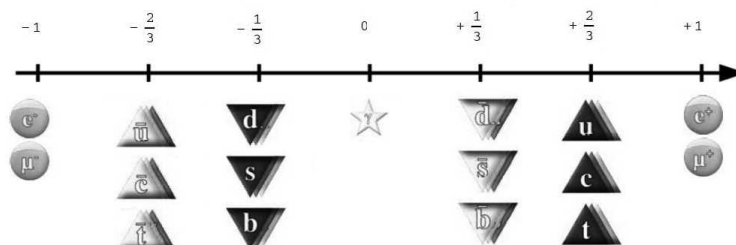
Bei der Auswertung von Blasenkammeraufnahmen ist es hilfreich, einige charakteristische Eigenschaften von Teilchen zu kennen. Dazu gehören:

- die (Ruhe-)Masse  $m$ ,
- die elektrische Ladungszahl  $q$ ,
- die schwache Ladungszahl  $I$  und
- die Strangeness  $S$ .

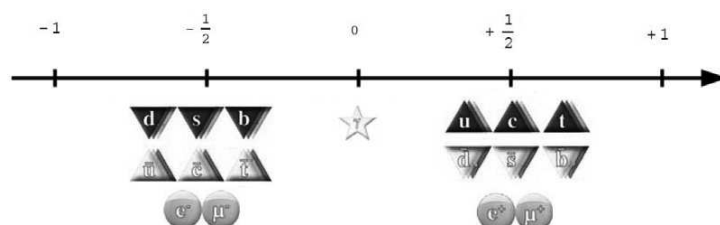
Stelle diese Eigenschaften für die vorgegebenen Teilchen in den Tabellen zusammen.

#### Hinweise:

- Recherchiere die Masse der Teilchen mithilfe des Internets. Notiere die Masse in der Einheit  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$  und runde das Ergebnis auf eine ganze Zahl (Ausnahme: Runde die Masse des Elektrons und des Positrons auf eine Nachkommastelle).
- Bei zusammengesetzten Teilchen ergibt sich die elektrische und schwache Ladungszahl aus der Summe der entsprechenden Ladungszahlen der einzelnen Quarks. Nutze folgende Abbildungen als Hilfestellung:



Elektrische Ladungszahlen einiger Elementarteilchen<sup>a</sup>



Schwache Ladungszahlen einiger Elementarteilchen<sup>a</sup>

- Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

<sup>a</sup>Quelle: verändert nach Netzwerk Teilchenwelt: *Schulmaterialien zur Teilchenphysik - Wechselwirkungen und Teilchen*, Hrsg. von Joachim Herz Stiftung, In Vorbereitung, 2015.

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**Ausgewählte Elementarteilchen**

Name des Teilchens	Symbol	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$
Photon	$\gamma$			
Elektron	$e^-$			
Positron	$e^+$			
Myon	$\mu^-$			
Anti-Myon	$\mu^+$			

**Zusammengesetzte Teilchen**

Name des Teilchens	Symbol	Quarkzusammensetzung	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$	$S$
Proton	$p$	$uud$				
Neutron	$n$	$udd$				
Lamda	$\Lambda^0$	$uds$				
neutrales Pion	$\pi^0$	Mischung von $u\bar{u}$ und $d\bar{d}$				
positives Pion	$\pi^+$	$u\bar{d}$				
negatives Pion	$\pi^-$	$d\bar{u}$				
neutrales Kaon	$K^0$	$d\bar{s}$				
neutrales Anti-Kaon	$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$				
positives Kaon	$K^+$	$u\bar{s}$				
negatives Kaon	$K^-$	$\bar{u}s$				

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften

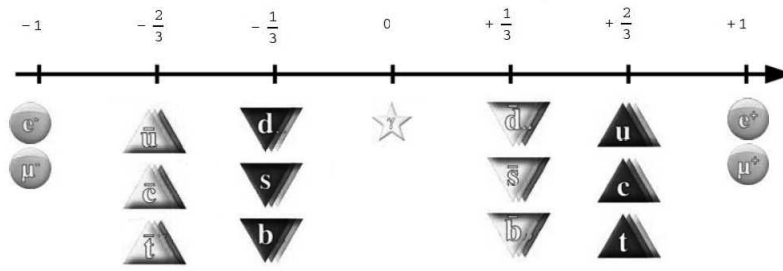
Bei der Auswertung von Blasenkammeraufnahmen ist es hilfreich, einige charakteristische Eigenschaften von Teilchen zu kennen. Dazu gehören:

- die (Ruhe-)Masse  $m$ ,
- die elektrische Ladungszahl  $q$ ,
- die schwache Ladungszahl  $I$  und
- die Strangeness  $S$ .

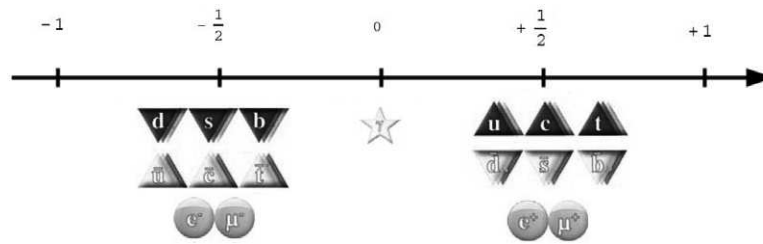
Stelle diese Eigenschaften für die vorgebenen Teilchen in der Tabelle zusammen.

**Hinweise:**

- Recherchiere die Masse der Teilchen mithilfe des Internets. Notiere die Masse in der Einheit  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$  und runde das Ergebnis auf eine ganze Zahl (Ausnahme: Runde die Masse des Elektrons und des Positrons auf eine Nachkommastelle).
- Bei zusammengesetzten Teilchen ergibt sich die elektrische und schwache Ladungszahl aus der Summe der entsprechenden Ladungszahlen der einzelnen Quarks. Nutze folgende Abbildungen als Hilfestellung:



Elektrische Ladungszahlen einiger Elementarteilchen<sup>a</sup>



Schwache Ladungszahlen einiger Elementarteilchen<sup>a</sup>

- Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

<sup>a</sup>Quelle: verändert nach Netzwerk Teilchenwelt: *Schulmaterialien zur Teilchenphysik - Wechselwirkungen und Teilchen*, Hrsg. von Joachim Herz Stiftung, In Vorbereitung, 2015.

Name:

Datum:

**Ausgewählte Elementarteilchen**

Name des Teilchens	Symbol	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$
Photon	$\gamma$	0	0	0
Elektron	$e^-$	0,5	-1	$-\frac{1}{2}$
Positron	$e^+$	0,5	+1	$+\frac{1}{2}$
Myon	$\mu^-$	106	-1	$-\frac{1}{2}$
Anti-Myon	$\mu^+$	106	+1	$+\frac{1}{2}$

**Zusammengesetzte Teilchen**

Name des Teilchens	Symbol	Quarkzusammensetzung	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$	$S$
Proton	$p$	$uud$	938	+1	$+\frac{1}{2}$	0
Neutron	$n$	$udd$	940	0	$-\frac{1}{2}$	0
Lamda	$\Lambda^0$	$uds$	1116	0	$-\frac{1}{2}$	-1
neutrales Pion	$\pi^0$	Mischung von $u\bar{u}$ und $d\bar{d}$	135	0	0	0
positives Pion	$\pi^+$	$u\bar{d}$	140	+1	+1	0
negatives Pion	$\pi^-$	$d\bar{u}$	140	-1	-1	0
neutrales Kaon	$K^0$	$d\bar{s}$	498	0	0	+1
neutrales Anti-Kaon	$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$	498	0	0	-1
positives Kaon	$K^+$	$u\bar{s}$	494	+1	+1	+1
negatives Kaon	$K^-$	$\bar{u}s$	494	-1	-1	-1



## G.2 Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Vorgehen bei der Impulsberechnung

	aus der Krümmung der Spur	aus der Reichweite des Teilchens
Schritt 1	<b>Bestimmung der z-Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• View 1 anzeigen und so auf die Blasenkameraaufnahme (View 2) verschieben, dass zwei gleiche Vorderseitenkreuze übereinander liegen</li> <li>• Abstände messen: <ul style="list-style-type: none"> <li>– <math>d_R</math> zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,</li> <li>– <math>d_A</math> zwischen den beiden Anfangspunkten,</li> <li>– <math>d_E</math> zwischen den beiden Endpunkten.</li> </ul> </li> <li>• z-Koordinaten berechnen: <math display="block">z_P = 50,5 \text{ cm} \cdot \frac{d_P}{d_R}</math> <p>(<math>P</math> ist zu ersetzen durch <math>A</math> bzw. <math>E</math>.)</p> </li> </ul>	
		<b>Berechnung der Tiefe eines weiteren Spurpunktes <math>SP</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge der Spur <math>l_{ges}</math> und Länge <math>l</math> zwischen Anfangspunkt und Spurpunkt <math>SP</math> messen (in View 2)</li> <li>• z-Koordinate berechnen: <math display="block">z_{SP} = z_A + \frac{l}{l_{ges}}(z_E - z_A)</math> </li> </ul>
Schritt 2	<b>Bestimmung des Krümmungsradius</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge der Sehne <math>l_s</math> zwischen Anfangs- und Endpunkt der Spur dreidimensional messen</li> <li>• Abstand <math>d_{ss}</math> zwischen Spur und Mitte der Sehne in View 2 messen</li> <li>• Radius berechnen: <math display="block">r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}</math> </li> </ul>	<b>Bestimmung der dreidimensionalen Spurlänge</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge der Spur dreidimensional messen</li> </ul>

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Schritt 3	<b>Berechnung des Impulses</b>  $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ (Werden der Radius $r$ in Meter und die Magnetfeldstärke $B$ in Tesla eingesetzt, erhält man als Einheit für den Impuls $\frac{\text{GeV}}{c}$ .)	<b>Bestimmung des Impulses aus der Reichweite</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impuls-Reichweite-Beziehung nutzen und zugehörigen Impuls ablesen</li> </ul>
-----------	---	--

### Allgemeine Informationen zu den Blaskammeraufnahmen

- Das Magnetfeld in der Blaskammer besitzt eine Stärke von 1,74 T und zeigt aus der Bildebene heraus.
- Die Strahlprotonen besitzen einen Eingangsimpuls von  $24 \frac{\text{GeV}}{c}$ . Sie durchqueren die Aufnahmen von unten nach oben.
- Der Maßstab GeoGebra-Einheiten : cm beträgt 1 : 1.