

Name:

Matrikelnummer:

Klausur zur Vorlesung
Einführung in die Kern-, Teilchen- und Astrophysik
Prof. Dr. Laura Fabbietti, Dr. Martin Berger
Wintersemester 2015/16

Aufgabe 1 Reaktionen und Wechselwirkungen [10 Punkte]

Tragen Sie für jede der angegebenen Reaktionen und Zerfälle **direkt in die folgende Tabelle ein**,

- ob diese Reaktion bzw. dieser Zerfall möglich ist (*ja/nein*)
- falls ja*, über welche Wechselwirkung(en) sie/er vermittelt wird und
falls nein, welche Erhaltungsgröße(n) verletzt werden.

Berücksichtigen Sie für die schwache Wechselwirkung nur Prozesse niedrigster Ordnung und vernachlässigen Sie Neutrinooszillationen. [Jeweils 1 Punkt pro korrekter Zeile]

Lösung: 1 Punkt pro Zeile, die vollständig korrekt ist. 0 Punkte für (teilweise) fehlerhafte Zeilen.

Reaktion	ja/nein	Wechselwirkung(en) bzw. verletzte Erhaltungsgröße(n)
$\omega^0(782) \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	ja	starke WW •
$e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	ja	schwache WW (W-Austausch) •
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	nein	Verletzung der Leptonfamilienzahl • ("Leptonzahl" nur ○)
$e^- + \mu^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	ja	schwache WW (W-Austausch) •
$\tau^- \rightarrow \pi^- + \pi^- + e^+$	nein	Verletzung der Lepton(familien)zahl •
$\tau^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 + \nu_\tau$	ja	schwache (+ starke) WW • (kein •, wenn nur starke WW)
$\pi^- + p \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^- + p$	ja	starke (und em. und im Prinzip auch schwache) WW •
$\rho^0(770) \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	ja	starke WW •
$\rho^0(770) \rightarrow K^+ + K^-$	nein	Energieerhaltung/Masse (nicht Strangeness) •
$\bar{\Lambda}^0 \rightarrow p + \pi^-$	nein	Baryonenzahlerhaltung •

Aufgabe 2 Elementare Teilchen des Standardmodells [5 Punkte]

Geben Sie die Lösung für die 12 Leerstellen (a bis l) in der untenstehenden Tabelle an [jeweils 1/2 Punkt].

Drei Generationen der Materie (Fermionen)				
	I	II	III	
Massen	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	(d)
Ladungen	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spins	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	(a) Quarks	t top	(b) Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ (c)	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ (e)	(l) 0 1 g Gluon
Leptonen	<2 eV (f) (g) (h)	<0,19 MeV (f) (g) ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV (f) (g) ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson
				Eichbosonen
	0,511 MeV (j) (k) (i)	105,7 MeV (j) (k) μ Myon	1,777 GeV (j) (k) τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson

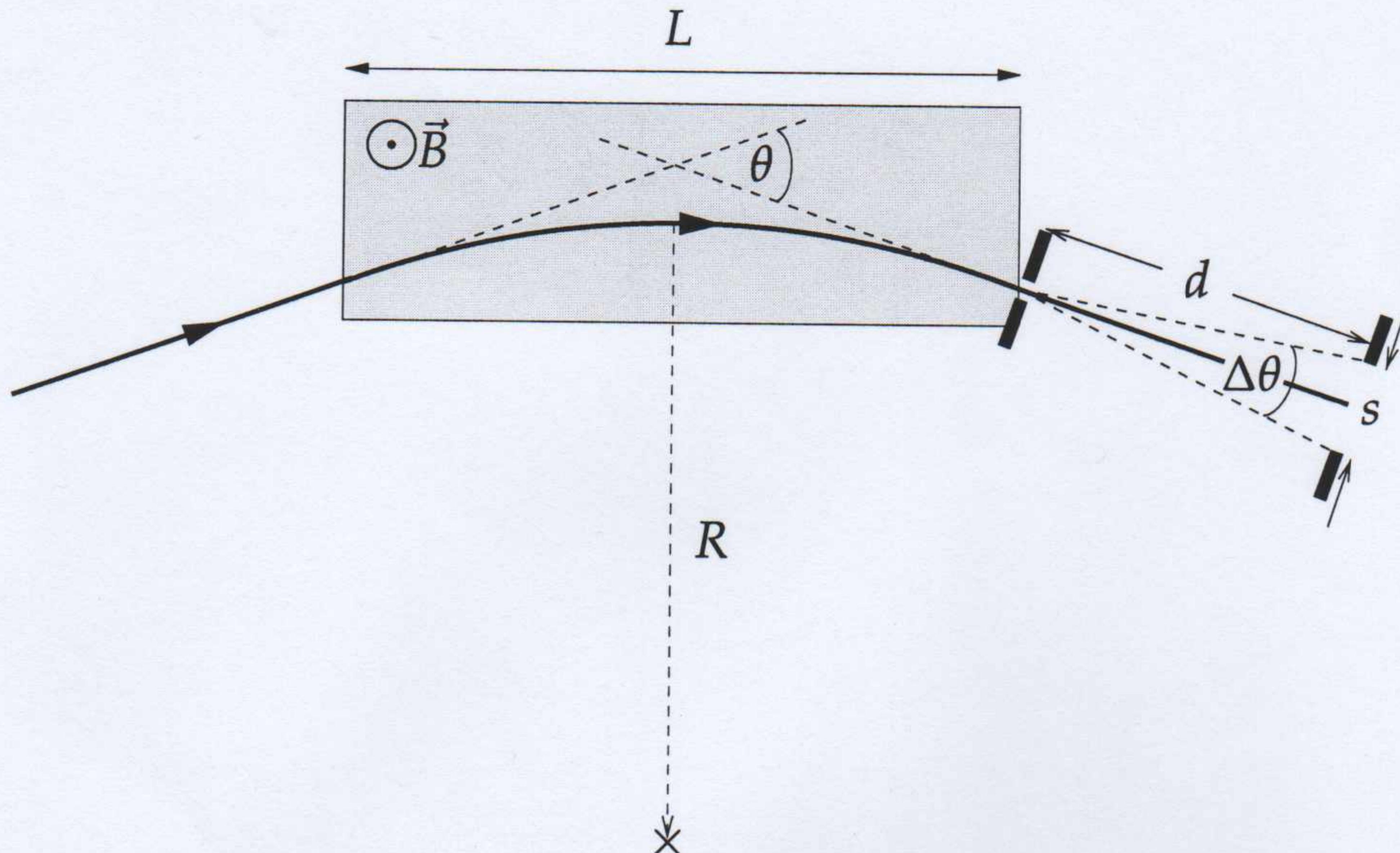
Lösung:

- a. c: charm
- b. γ : photon
- c. d: down
- d. Masse Photon: 0
- e. b: bottom
- f. Ladung der Neutrinos: 0
- g. Spin der Neutrinos: 1/2
- h. ν_e : Elektron Neutrino
- i. e: Elektron
- j. Ladung der Leptonen: -1

- k. Spin der Leptonen: 1/2 ◯
 l. Masse des Gluons: 0 ◯
-

Aufgabe 3 Magnetspektrometer [8 Punkte]

Ein Protonenstrahl mit einem mittleren Impuls von $p = 50 \text{ GeV}/c$ soll durch einen Magneten (Länge $L = 0.15 \text{ m}$, homogenes Magnetfeld $B = 1.2 \text{ T}$) abgelenkt werden (siehe Bild).



- a. Berechnen Sie den Ablenkinkel θ als Funktion der gegebenen Größen. [4 Punkte]

Hinweis: Verwenden Sie die Kleinwinkelnäherung: $\theta \approx L/R$

Lösung:

Aus der Zeichnung ergibt sich mit der Kleinwinkelnäherung

$$\theta \approx \frac{L}{R}$$

Der Ablenkradius R kann durch Gleichsetzen der Beträge von Zentrifugal- und Lorentzkraft berechnet werden:

$$\begin{aligned} F_Z &= \frac{mv^2}{R} = qvB = F_L \bullet | \cdot m \\ \frac{p^2}{R} &= qpB \\ R &= \frac{p}{qB} \bullet \end{aligned}$$

[Alternativer Ansatz mit Zyklotronfrequenz:

$$f_{\text{Zyk}} = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{1}{2\pi R} \bullet$$

$$\frac{qB}{m} = \frac{v}{R}$$

$$R = \frac{p}{qB} \bullet$$

]

Somit ist

$$\theta = \frac{LqB}{p} \bullet$$

[alternativ • für $R = 138.9 \text{ m}$]

In geeigneten Einheiten folgt

$$\theta = \frac{L \cdot 0.3 \frac{\text{GeV}/c}{\text{T m}} \cdot B}{p} = 1.08 \text{ mrad} = 0.0619^\circ \bullet$$

[für $\theta = 1.08 \cdot 10^{-3}^\circ$ nur ○]

- b. Im Anschluß an den Magneten soll durch eine Schlitzblende mit Schlitzbreite $s = 2 \text{ mm}$ ein Impulsbereich von $49 \dots 51 \text{ GeV}/c$ selektiert werden. In welchem Abstand $d \gg L$, s muß die Blende platziert werden? [4 Punkte]

Hinweis: Verwenden Sie für $\Delta\theta$ wieder die Kleinwinkelnäherung.

Lösung:

Für nicht zu große Impulsintervalle Δp gilt

$$\Delta\theta = \left| \frac{d\theta}{dp} \right| \Delta p \bullet$$

Aus der Zeichnung ergibt sich mit Kleinwinkelnäherung

$$\Delta\theta \approx \frac{s}{d} \bullet$$

Aus a) ist bekannt, daß

$$\theta = \frac{LqB}{p}$$

Deshalb gilt

$$\frac{s}{d} = \Delta\theta = \frac{LqB}{p^2} \Delta p \implies d = \frac{sp^2}{LqB \Delta p} \bullet$$

[Alternativ: $\Delta\theta = 4.32 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 2.48 \cdot 10^{-5}^\circ$] •]

Einsetzen von $\Delta p = 2 \text{ GeV}/c$ liefert:

$$d = \frac{s p^2}{L \cdot 0.3 \frac{\text{GeV}/c}{\text{T m}} \cdot B \cdot \Delta p} = 46.3 \text{ m} \bullet$$

[Alternativer Lösungsweg:

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= \theta(p_{\min}) - \theta(p_{\max}) \\ &= LqB \left(\frac{1}{p_{\min}} - \frac{1}{p_{\max}} \right) \bullet\end{aligned}$$

mit $p_{\min} = 49 \text{ GeV}/c$ und $p_{\max} = 51 \text{ GeV}/c$.

Also ist

$$d = \frac{s}{LqB} \frac{1}{\frac{1}{p_{\min}} - \frac{1}{p_{\max}}} \bullet$$

[Alternativ: $\Delta\theta = 4.32 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 2.48 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ$] \bullet]

Einsetzen liefert:

$$d = \frac{s}{L \cdot 0.3 \frac{\text{GeV}/c}{\text{T m}} \cdot B} \frac{1}{\frac{1}{p_{\min}} - \frac{1}{p_{\max}}} = 46.3 \text{ m} \bullet$$

]

Aufgabe 4 Energieverlust von Teilchen in Materie [9 Punkte]

- a. Die Bethe-Bloch-Formel beschreibt näherungsweise den Energieverlust, den ein schweres, geladenes, relativistisches Teilchen beim Durchgang durch Materie aufgrund der Ionisation von Atomen im Material erfährt.
- (i) Wie hängt der Energieverlust von der Ladung z des schweren, geladenen Teilchens ab? Wie von der Ladungszahl Z und der Massenzahl A des absorbierenden Materials? [2 Punkte]

Lösung:

$$\frac{dE}{dx} \propto z^2 \bullet \quad \frac{dE}{dx} \propto \frac{Z}{A} \bullet$$

- (ii) Wo liegt ungefähr das Minimum der Bethe-Bloch-Formel, wenn man sie als Funktion von $\beta\gamma$ des durchfliegenden Teilchens betrachtet? [1 Punkt]

Lösung:

$$\beta\gamma \approx 3 \dots 5$$

-
- b. Beschreiben Sie **kurz**, wie diese Energiedeposition in einem Proportionalzählrohr zu einem Signal führt. [3 Punkte]
-

Lösung:

Geladenenes Teilchen erzeugt Primärionisation •.

Elektronen driften zum Anodendraht •, Ionen zur Kathode.

In der Nähe vom Anodendraht nimmt die Feldstärke zu, sodaß Elektronen weitere Gasatome ionisieren können. Die erzeugten Sekundärelektronen werden ebenfalls zur Anode hin beschleunigt und können Gasatome ionisieren. Dies führt zu einer Elektronenlawine •. Die in der Elektronenlawine erzeugten Ionen influenzieren ein Signal auf dem Anodendraht, das proportional zur Primärionisation ist.

- c. Nennen Sie drei Prozesse, durch die Elektronen beim Durchgang durch Materie Energie verlieren können? [3 Punkte]
-

Lösung:

1 Punkt auf jeweils einen der folgenden Prozesse (max. 3 Punkte)

- Anregung von Hüllenelektronen
 - Ionisation
 - Bremsstrahlung
 - Cherenkov-Strahlung
 - Übergangsstrahlung
 - Elastische Streuung an Kernen
 - Inelastische Streuung an Kernen (Kernanregungen)
 - Quasi-elastische Streuung an Nukleonen im Kern
 - Inelastische Streuung an Nukleonen im Kern (Resonanzanregung der Nukleonen)
 - Tief-inelastische Streuung an Partonen im Nukleon
-

Aufgabe 5 : Z-Boson-Zerfall [6 Punkte]

Ein Z-Boson zerfällt in ein $\tau^+ \tau^-$ -Paar.

- a. Berechnen Sie Energie und Impuls der Zerfallsprodukte im Ruhesystem des Z. [3 Punkte]

Lösung:

Der Vierervektor des ruhenden Z-Teilchens ist

$$p^\mu = (M_Z c, \vec{0})$$

Die Vierervektoren der beiden Taus sind

$$p_{1,2}^\mu = \left(\frac{E_\tau}{c}, \vec{p}_{1,2} \right) \quad \text{wobei} \quad \vec{p}_1 = -\vec{p}_2 \equiv \vec{q}_\tau \quad \text{und} \quad E_\tau^2 = m_\tau^2 c^4 + \vec{q}_\tau^2 c^2$$

D.h. im Ruhesystem des Z fliegen die beiden τ s mit entgegengesetztem gleich-großem Impuls auseinander. Die Energie des Z (d.h. seine Masse) verteilt sich also zu gleichen Anteilen auf die beiden Taus. Es ist also

$$E_\tau = \frac{M_Z c^2}{2} = 45.5938 \text{ GeV} \circ$$

Damit ergibt sich der Impuls q_τ der Taus zu

$$q_\tau = \sqrt{\frac{E_\tau^2}{c^2} - m_\tau^2 c^2} = \sqrt{\frac{M_Z^2 c^2}{4} - m_\tau^2 c^2} = 45.5592 \text{ GeV}/c \circ$$

Alternativ kann man die Rechnung mit $c = 1$ durchführen und dann in der finalen Formel die Einheiten betrachten.

-
- b. Die mittlere Lebensdauer des τ beträgt $\tau_\tau = 2.906 \cdot 10^{-13}$ s. Wie weit fliegen die τ s aus (a) im Mittel im Z-Ruhesystem? [3 Punkte]

Lösung:

Die Lebensdauer gilt im Ruhesystem der τ -Leptonen. Im Laborsystem haben sie die Geschwindigkeit $\beta = q_\tau c / E_\tau \circ = 0.99924$. Der Lorentz-Faktor ergibt sich entsprechend zu $\gamma = E_\tau / (m_\tau c^2) \circ = 25.66$

Der Lebensdauer τ_τ eines ruhenden τ -Leptons (Eigenzeit) entspricht im Laborsystem das Zeitintervall (Koordinatenzeit) $t = \gamma \tau_\tau \circ$. Während dieser Zeit durchfliegt das Lepton die Wegstrecke

$$x = \beta c t \circ = \beta \gamma c \tau_\tau = \frac{q_\tau c}{E_\tau} \frac{E_\tau}{m_\tau c^2} c \tau_\tau = \frac{q_\tau}{m_\tau c} c \tau_\tau = 2.234 \text{ mm} \circ$$

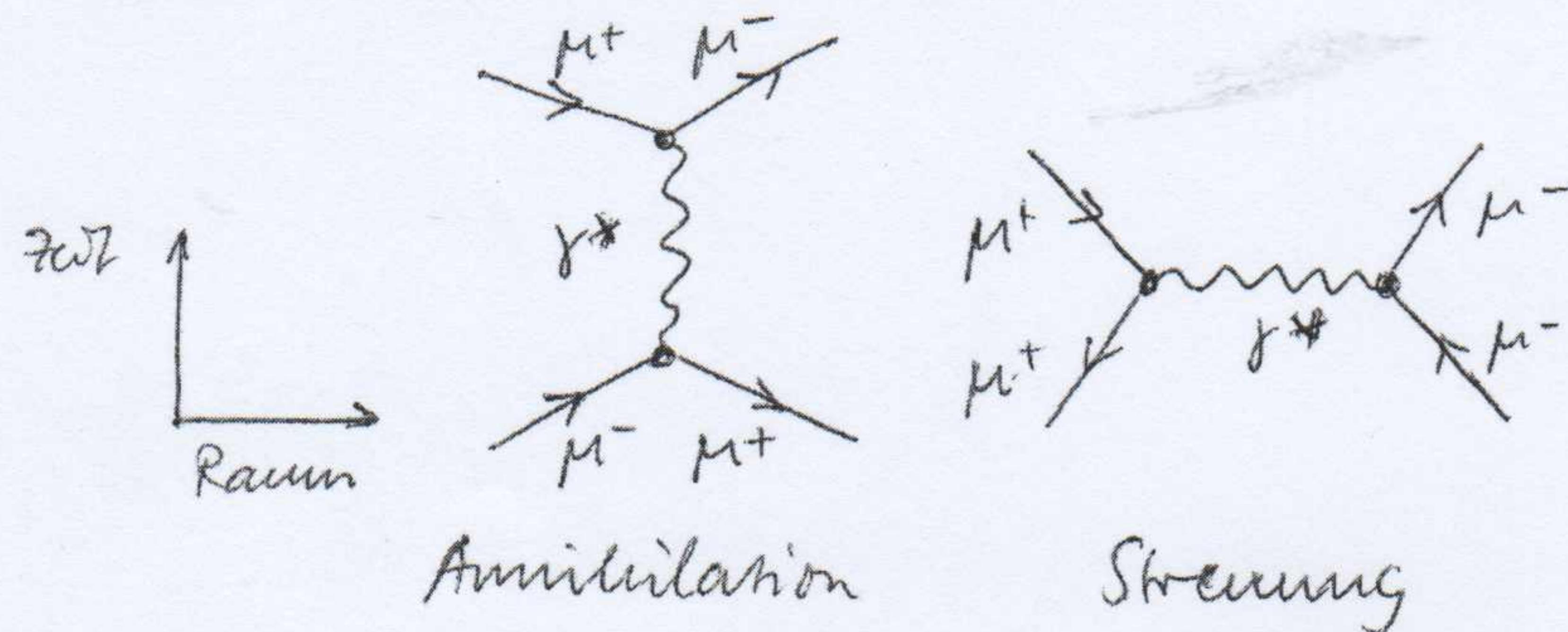
Alternativ kann man auch die c -Faktoren erstmal weglassen, d.h. $\beta = q_\tau / E_\tau$, $\gamma = E_\tau / m_\tau$ und $x = \beta t$. Dann muss man in der Endformel die Einheiten betrachten:

$$x = \frac{45.5592 \text{ GeV}/c}{1.77682 \text{ GeV}/c^2} \tau_\tau = 25.641 c \tau_\tau = 2.234 \text{ mm}$$

Aufgabe 6 Feynmandiagramme [5 Punkte]

Zeichnen Sie alle möglichen QED Feynmandiagramme *erster Ordnung* für die elastische $\mu^+\mu^-$ -Streuung und benennen Sie die jeweiligen Prozesse.

Lösung:



Pfeile an Myonlinien: entweder Fluß der negativen Ladung (wie Bild) oder Impulsrichtung

- für korrekte Myonlinien im Anfangs und Endzustand
- für Photonaustausch (○ Abzug für Pfeil an Photonlinie)
- für korrekte Orientierung der Graphen
- Jeweils ● für korrekten Prozeßnamen

jeweils ○ Abzug für: fehlende Fermion- oder Photonbeschriftung, für falsche oder inkonsistente Pfeile

Aufgabe 7 Neutronenzerfall [6 Punkte]

Freie Neutronen zerfallen mit einer Lebensdauer von $\tau_n = 880$ sec.

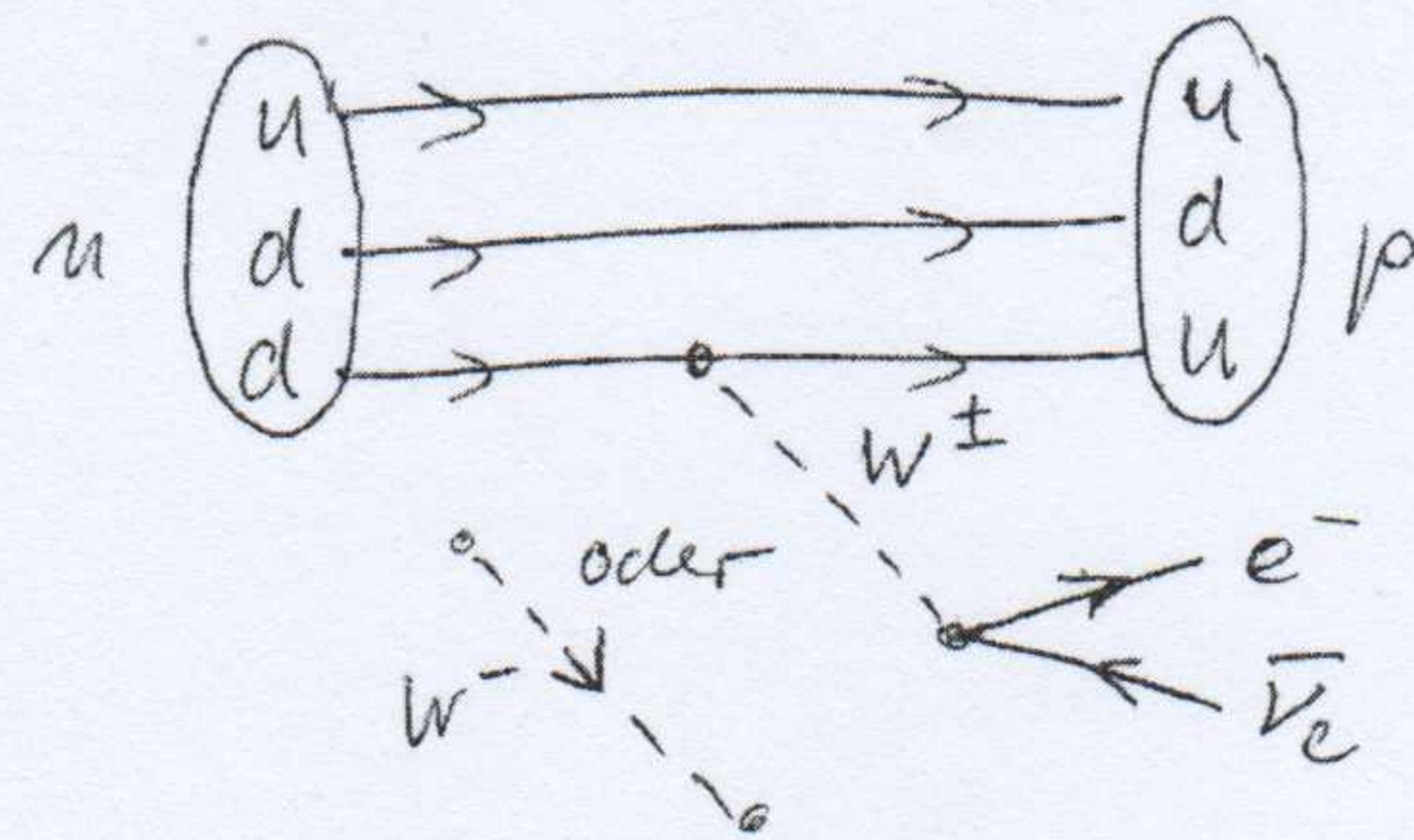
- a. In welche Endzustandteilchen zerfällt das Neutron? [1 Punkt]

Lösung:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

- b. Zeichnen Sie das Feynman-Diagramm dieses Zerfalls inklusive aller Quarkflusslinien. [3 Punkte]

Lösung:



- Korrekte Quarklinien •
- W -Propagator: W^\pm -Linie ohne Pfeil oder $W^-(W^+)$ -Linie mit Pfeil • (○ Abzug, wenn Pfeil an W^- -Linie fehlt)
- Korrekte Leptonlinien •

Pfeile an Fermionlinien: entweder Fluß der Ladung (wie Bild) oder Impulsrichtung, keine Punkte, wenn inkonsistent

- c. Begründen Sie quantitativ, warum die Neutronen im Inneren von Deuterium-Kernen nicht zerfallen. [2 Punkte]
-

Lösung:

Deuterium-Kerne sind gebundene pn -Zustände oder $m_d < m_p + m_n + m_e$ •

Neutronzerfall verboten wegen Energieerhaltung: $1875.612\,859 \text{ MeV}/c^2 = m_d < 2m_p + m_e$ • = $1877.055\,091 \text{ MeV}/c^2$

Aufgabe 8 Gebundene Zustände der starken Wechselwirkung [6 Punkte]

- a. Das Quarkmodell beschreibt gebundene Zustände von Quarks q und Antiquarks \bar{q} anhand der “darin enthaltenen” Konstituenten. Aus wie vielen Konstituentenquarks bestehen demnach Mesonen und Baryonen und welche Kombinationen von Quarks q und Antiquarks \bar{q} sind in jeder dieser Gruppen jeweils zulässig? [2 Punkte]
-

Lösung:

- Mesonen: [max. 1 Punkt]
 - $q\bar{q}$ [1 Punkt]
 - “Quark + Antiquark” [1 Punkt]
 - “zwei Quarks” [$\frac{1}{2}$ Punkt]
- Baryonen: [max. 1 Punkt]
 - qqq [$\frac{1}{2}$ Punkt] und $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ [$\frac{1}{2}$ Punkt]

- “drei Quarks” [$\frac{1}{2}$ Punkt]

b. Nennen und erläutern Sie einen möglichen Bindungszustand der starken Wechselwirkung, der nicht im Quarkmodell enthalten ist und charakteristisch ist für die grundlegenden Eigenschaften der QCD. [1 Punkt]

Lösung: maximal 1 Punkt!

- glueball / rein gluonisch [1 P.]
- hybrid mesons: $q\bar{q}g$ [1P]
- tetraquark: $qq\bar{q}\bar{q}$ [1P]
- pentaquark: $qqqq\bar{q}$ bzw. $\bar{q}\bar{q}\bar{q}\bar{q}q$ [1P]

c. Was sind “Seequarks”? [1 Punkt]

Lösung: maximal 1 Punkt!

- $q\bar{q}$ / Quark-Antiquark-Paare [$\frac{1}{2}$ Punkt]
- virtuell / aus Vakuum [$\frac{1}{2}$ Punkt]
- tragen nicht zu Quantenzahlen bei [$\frac{1}{2}$ Punkt]
- bei kleinem x_F [$\frac{1}{2}$ Punkt]

d. Was ist “asymptotische Freiheit”? [1 Punkt]

Lösung: Kraft/Bindung wird (sehr) klein für:

- kleine Abstände [$\frac{1}{2}$ Punkt]
- hohe Energien [$\frac{1}{2}$ Punkt]

e. Was bedeutet “Confinement”? [1 Punkt]

Lösung:

- keine freien Quarks / Farbneutralität hadronischer Zustände [$\frac{1}{2}$ Punkt]
- Kraft/Bindung wird sehr stark bei großen Distanzen [$\frac{1}{2}$ Punkt]

Aufgabe 9 Quiz [10 Punkte]

Geben sie an, welche Aussage richtig ist (Mehrfachnennungen sind möglich). Schreiben sie ihre Lösung bitte auf einen der ausgeteilten Doppelbögen.

a. Energieverlust geladener Teilchen in Materie

- (i) Der Energieverlust ist maximal für ultrarelativistische Teilchen.
- (ii) Der Energieverlust nimmt für Teilchen mit Impulsen größer als $300 \text{ MeV}/c$ zu, weil sich die transversale Komponente des elektrischen Feldes verstärkt (Lorentzkontraktion).
- (iii) Der Energieverlust ist maximal für Teilchen mit kleinen Impulsen und nimmt dann stetig ab für größer werdende Impulse.

Lösung: (ii) •

b. Synchrotronstrahlung

Geladene Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit werden auf eine Kreisbahn gezwungen und strahlen Energie aus. Diese Energie

- (i) hängt nur von der Geschwindigkeit der Teilchens ab
- (ii) ist invers proportional zur vierten Potenz der Teilchenmasse und deshalb umso größer umso leichter das Teilchen ist.
- (iii) ist invers proportional zum Impuls des Teilchens.

Lösung: (ii) •

c. Detektoren

- (i) Plastik Szintillatoren zeigen eine sehr gute Energieauflösung weil nur wenige eV notwendig sind um einen Szintillationsprozess im Material entstehen zu lassen.
- (ii) Plastik Szintillatoren sind sehr schnell und erlauben das Messen der Flugzeit von Teilchen mit einer Präzision von 100 ps
- (iii) Gas Detektoren sind sehr schnelle Detektoren, weil die primäre Ladung die bei der Ionisierung des Gases erzeugt wird, sehr schnell zur Auslese gelangt.

Lösung: (ii) •

d. Formfaktoren

- (i) Der Formfaktor eines Protons ist gleich 1.

- (ii) Der gemessene Formfaktor eines Protons hängt von der Energie des Strahls ab.
- (iii) Der Formfaktor eines Protons ist eine Gauss Funktion des Impulses der Quarks, die das Proton aufbauen.

Lösung: (ii) •

e. Bethe-Weizsäcker Massenformel

- (i) Die Bindungsenergie in Kernen ist maximal für Eisen, aber ähnlich für alle Kerne
- (ii) Kerne mit einer ungeraden Anzahl an Neutronen und Protonen sind stärker gebunden.
- (iii) Der Coulomb Beitrag in der Bethe-Weizsäcker Massenformel erhöht die Bindungsenergie.

Lösung: (i) •

f. Quarkstruktur des Nukleons

- (i) Im Nukleon gibt es 3 Valenzquarks und Hunderte von Seequarks.
- (ii) Der Impuls des Nukleons wird hauptsächlich von den Seequarks getragen.
- (iii) Die Ruhemasse der See- und Valenzquarks sind unterschiedlich.

Lösung: (i) ○, (iii) ○

g. Kaon Oszillation

- (i) Die Masseneigenzustände K^0 und \bar{K}^0 werden durch die starke Wechselwirkung bestimmt und sind auch CP Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung.
- (ii) Die Masseneigenzustände K^0 und \bar{K}^0 sind keine Eigenzustände des CP Operators.
- (iii) Eine Linearkombination von K^0 und \bar{K}^0 kann ein Eigenzustand des CP Operators ergeben.

Lösung: (ii) ○, (iii) ○

h. Cabibbo Modell I

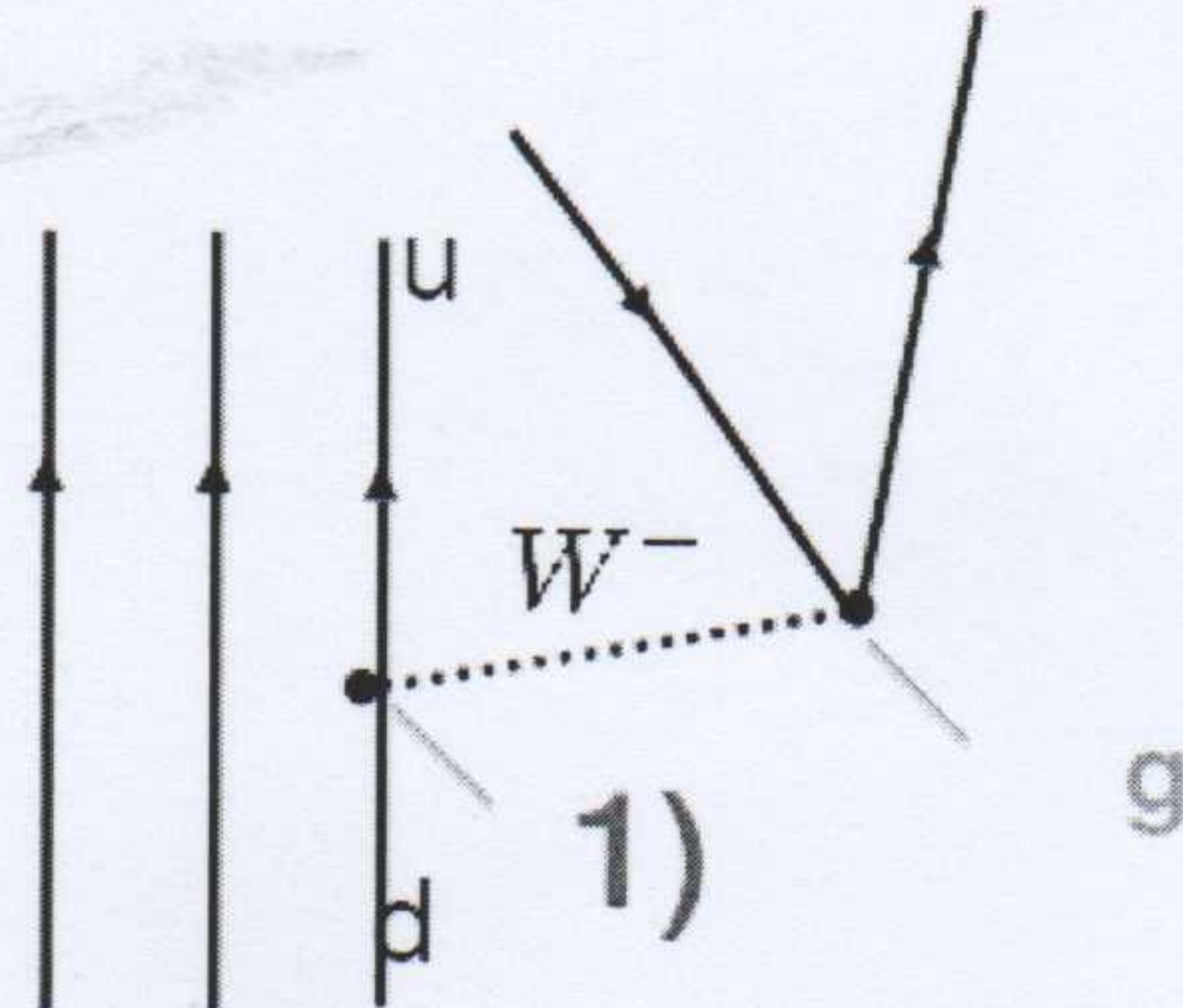
- (i) Die Quark-Eigenzustände der starken Wechselwirkung sind identisch mit den Quark-Eigenzuständen der schwachen Wechselwirkung.
- (ii) Die Quark-Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung sind eine Linearkombination der Quark-Eigenzustände der starken Wechselwirkung.

Lösung: (ii) •

i. Cabibbo Modell II

Die Kopplungskonstante am Vertex 1 ist gleich:

- (i) g
- (ii) $g \cdot \cos\theta$
- (iii) $g \cdot \sin\theta$



Lösung: (ii) •

j. W und Z Bosonen

- (i) Die große Masse der W und Z Bosonen ($M \approx 80\text{-}90 \text{ GeV}$) zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für die schwache Wechselwirkung sehr groß ist.
- (ii) Der Nachweis von W Bosonen ist schwierig, weil bei den Zerfällen immer ein Neutrino dabei ist.
- (iii) Z^0 zerfällt nur in Leptonen.

Lösung: (i) \circ , (ii) \circ

Zusätzliche Angaben

Teilchen	Masse [MeV/ c^2]
e^\pm	0.510 998 928
μ^\pm	105.658 3715
τ^\pm	1776.82
π^0	134.9766
π^\pm	139.57018
K^\pm	493.677
$\rho(770)$	775.49
$\omega(782)$	782.65
$\eta(547)$	547.86
p	938.272046
n	939.565379
Λ	1115.683
$d = {}^2\text{H}$	1875.612859
Z^0	91 187.6

Quarkinhalt

$$\begin{aligned}
 |\Lambda\rangle &= |uds\rangle \\
 |\rho\rangle &= 1/\sqrt{2}(|d\bar{d}\rangle - |u\bar{u}\rangle) \\
 |\omega\rangle &= c_1(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle) + c_2(|s\bar{s}\rangle) \\
 |K^0\rangle &= |d\bar{s}\rangle \\
 |K^-\rangle &= |\bar{u}s\rangle \\
 |K^+\rangle &= |u\bar{s}\rangle
 \end{aligned}$$

Konstanten

$$\begin{aligned}
 \alpha_{\text{em}} &= 7.297\,352\,5698 \cdot 10^{-3} \\
 c &= 299\,792\,458 \text{ m/s} \\
 e &= 1.602\,176\,565 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\
 h &= 6.626\,069\,57 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \\
 \hbar &= 6.582\,119\,28 \cdot 10^{-22} \text{ MeV s} \\
 \hbar c &= 197.326\,9718 \text{ MeV fm}
 \end{aligned}$$

Umrechnungsfaktoren

$$\begin{aligned}
 1 \text{ eV} &= 1.602\,176\,565 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\
 1 \text{ eV}/c^2 &= 1.782\,661\,845 \cdot 10^{-36} \text{ kg}
 \end{aligned}$$