

Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik

Michael Kobel, Philipp Lindenau
Vitzthum-Gymnasium Dresden | 04.02.2017

Herzlich willkommen!

Ziele der Fortbildung

- ▶ 1) Eigenes Wissen über Teilchenphysik erweitern
- ▶ 2) Unterrichtsplanungen erarbeiten und mit nach Hause nehmen

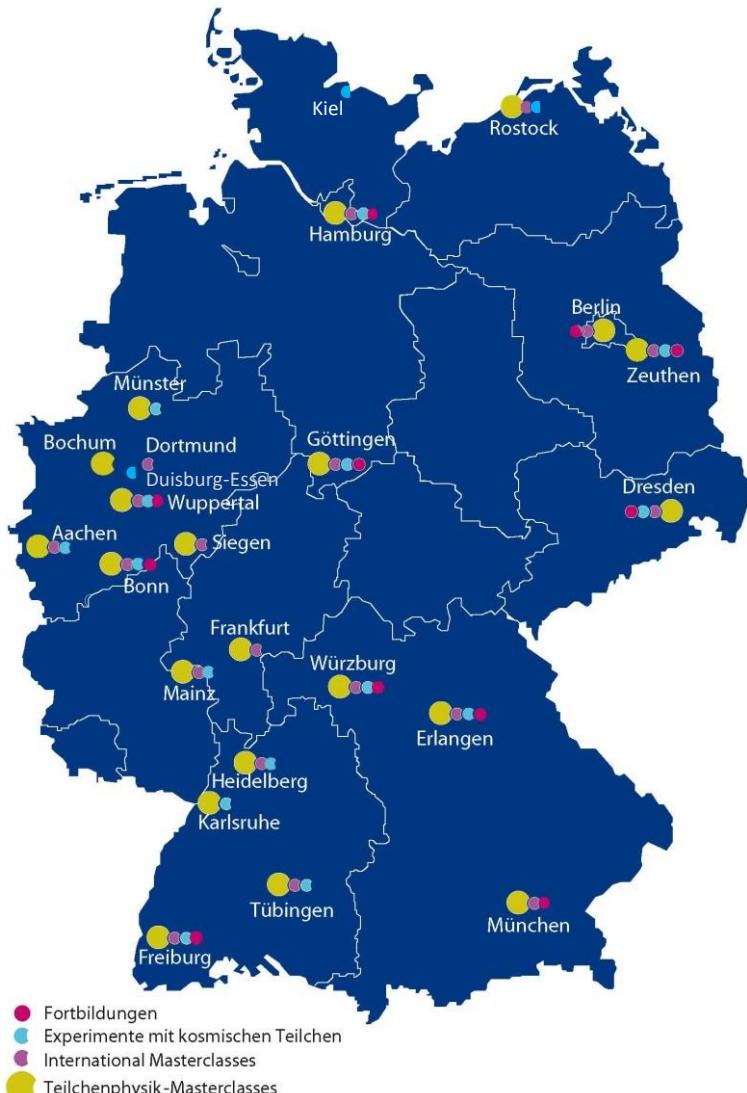


Ablauf

1. Vorstellung NTW
2. Aufwärmübung
3. Vortrag: Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht
4. Gruppenarbeit: Sequenzplanung
5. Präsentation und Diskussion der Ergebnisse

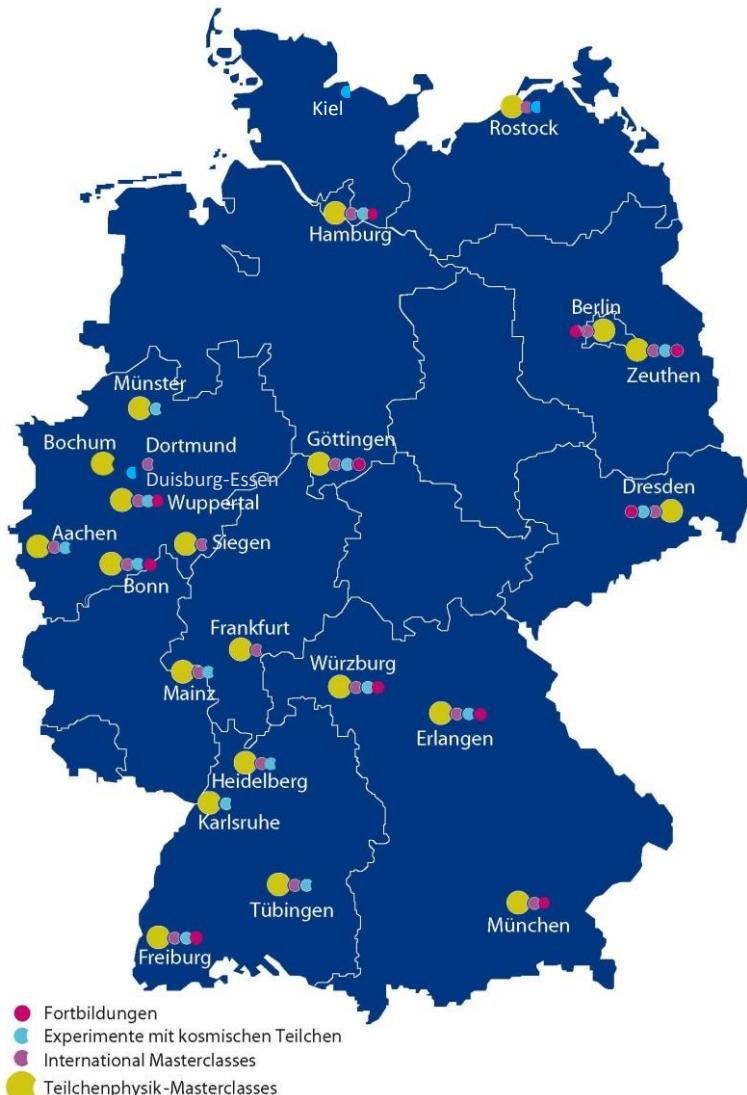
Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ 24 Standorte in 12 Bundesländern
 - insgesamt 26 Institute
 - Leitung: TU Dresden
- ▶ Netzwerk zwischen Wissenschaftlern, Jugendlichen im Alter von 15-19 Jahren und Lehrkräften mit direktem Kontakt zum CERN



Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ Forschungsthemen aus der Teilchen- und Astroteilchenphysik mit aktuellen Daten und einfachen Experimenten in die Schulen bringen
- ▶ Projektziele:
 - Faszination Astro-/Teilchenphysik erleben
 - Wissenschaft kommunizieren
 - Forschung vor Ort und im Unterricht
 - Wertschätzung von Erkenntnisgewinn durch Grundlagenforschung



Das Konzept: Stufenprogramm



Mehrstufiges Angebot für Lehrkräfte

Mehrstufiges Angebot für Lehrkräfte im Überblick

Teilchenphysik erleben

1

BASIS-
PROGRAMM



Teilnahme

- Lehrertage der „Internationalen Masterclasses“
- Andere einführende Veranstaltungen

Teilchenphysik vermitteln

2

QUALIFIZIERUNGS-
PROGRAMM



Mitarbeit - Teilchenwelt-MultiplikatorInn

- Organisation von Projekttagen in Ihrer Einrichtung mit dem Netzwerk Teilchenwelt:
- Teilchenwelt-Masterclasses
 - Experimente mit kosmischer Strahlung

Teilchenphysik erforschen

3

VERTIEFUNGSPROGRAMM/
FORSCHUNGSMITARBEIT



Projekte an Originalschauplätzen

- Workshops für Teilchenwelt-MultiplikatorInnen am CERN
- Forschungsabordnung an lokale Forschungseinrichtungen



Mehrstufiges Angebot für Jugendliche

Mehrstufiges Angebot für Jugendliche im Überblick

Teilchenphysik erleben

1 BASIS-PROGRAMM

Teilnahme

- Teilchenwelt – Masterclasses
- Internationale Masterclasses
- Experimente mit kosmischer Strahlung



Teilchenphysik vermitteln

2 QUALIFIZIERUNGS-PROGRAMM

Mitarbeit - Teilchenwelt-BotschafterIn

- TutorIn bei Masterclasses und Cosmic-Experimenten
- Mithilfe bei Vermittlungsangeboten
- Weitergabe der Faszination Teilchenwelt über Präsentationen, Internet & Co



Teilchenphysik erforschen

3 VERTIEFUNGSPROGRAMM/ FORSCHUNGSMITARBEIT

Projekte an Originalschauplätzen

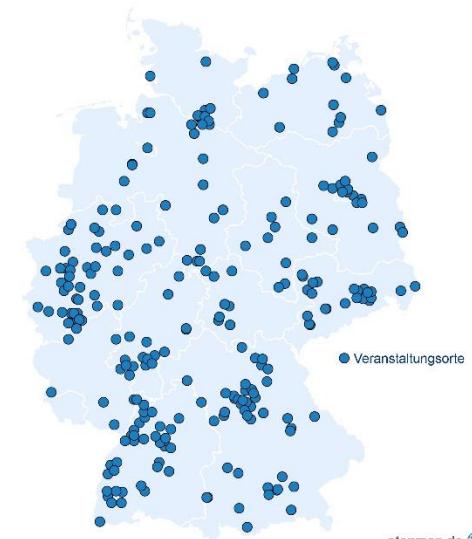
- Workshops für Teilchenwelt-BotschafterInnen am CERN
- Projektarbeiten an lokalen Forschungseinrichtungen



Basisprogramm: Teilchenphysik-Masterclass

► Eintägige Veranstaltung in Schulen

- Durchgeführt von Nachwuchswissenschaftler/inne/n (Doktorand/inn/en)
- Einführungsvorträge
- Eigene Messungen mit Daten der LHC-Experimente ATLAS, CMS, ALICE oder LHCb
- Auch als Lehrerfortbildung
- > 100 Teilchenphysik-Masterclasses im Jahr im Netzwerk Teilchenwelt



Astroteilchen-Projekte

- ▶ Szintillator-Experiment „CosMO“ und „Kamiokanne“-Experiment
 - Zur Ausleihe nach vorheriger Fortbildung
 - Geeignet für kleinere Gruppen in allen Programmstufen
 - Verschiedene Messungen (Winkel, Lebensdauer, Abschirmung)
- ▶ Nebelkammer-Sets
- ▶ Auger-Masterclasses
- ▶ IceCube Masterclasses



Kamiokannen



Szintillationszähler



Nebelkammer

Materialsammlung

- ▶ Hintergrundinformationen und Arbeitsblätter zu
 - Teilchenphysik - Forschung und Anwendungen
 - Standardmodell der Teilchenphysik
 - Vier Wechselwirkungen
 - ATLAS-Detektor
 - Selbstbau einer Nebelkammer
 - Teilchensteckbriefe
- ▶ Erhältlich als...
 - Gedruckte Version
 - Download als pdf www.teilchenwelt.de/material



MATERIALSAMMLUNG
KONTEXTMATERIALIEN FÜR LEHRKRÄFTE

Diese Sammlung enthält pädagogische Materialien des Netzwerks Teilchenwelt für Lehrkräfte, die zur Didaktik in der Hochschule verwandt werden können. Sie reicht von Materialien zur Vor- und Nachbereitung eines Hochschulvortrags über auch interessante Beispiele für die Praxis bis hin zu Materialien, welche einen didaktischen Bezugspunkt für den Unterricht darstellen.



ARBEITSBLATT
ATLAS-DETEKTOR

DER ATLAS-DETEKTOR
ARBEITSBLATT 3: ZUSAMMENFASSUNG

1a. Halbleiter-Spurdetektor
Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

1b. Übergangssstrahlungsdetektor
Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

2a. Elektromagnetisches Kalorimeter
Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

2b. Hadronisches Kalorimeter
Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:



ANWENDUNGEN DER TEILCHENPHYSIK
MEDIZIN

Positronen-Emissions-Tomographie (PET)
Die PET ist eine Diagnosemethode, mit der sich unter anderem Tumore sichtbar machen lassen. Hierfür wird dem Patienten eine Flüssigkeit gespritzt, die Positronen aussendet (ein Beta-Plus-Strahler). Diese Teilchen bewegen sich mit einer speziellen Zuckbewegung, in der Raux-Abstand durch die radioaktive Isotope ^{18}F ersetzt werden (Fluor-Desoxyglucose). Da Tumorzellen mehr Zucker verbrauchen als gesunde Zellen, sammelt er sich insbesondere in Tumorzellen an.

Tumorthерапie mit Hadronen
Hier werden hauptsächlich drei Methoden verwendet, um Krebs zu behandeln: Operation, Chemotherapie und Strahlentherapie. Bei der Strahlentherapie werden Photonen (Elektronen) bestrahlt. Diese ionisieren auf ihrem Weg durch den Körper Moleküle in den Zellen abtöten oder sie an der Teilung hindern. Obwohl die Strahlentherapie direkt startet auf den Tumor fokussiert wird, kann die Behandlung auch gesunde Zellen – insbesondere, wenn der Tumor tief unter der Haut liegt.

Eine neuartige Form der Strahlentherapie, die am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt entwickelt wurde, verwendet Hadronen (Protonen oder anderes) und kann sich auf die Tumorzellen konzentrieren, die Teilchen ins Gewebe eindringen sollen, bevor sie an den Großteil ihrer Energie abgeben. So kann gesundes Gewebe geschont werden.

Abb. 1: Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Mögliche experimentelle Diskussionspunkte für den Unterricht

Woher weiß man,:

- ▶ dass es Quarks gibt?
- ▶ dass es drei verschiedenen Farbladungen gibt?
- ▶ dass Farbladungen vektoriellen Charakter haben?
- ▶ dass die Leptonenuniversalität gilt?
- ▶ dass es drei Arten leichter Neutrinos gibt
- ▶ Welche Werte die Kopplungsparameter der fundamentalen Wechselwirkungen haben

LEIFI Physik Portal



www.leifiphysik.de/themenbereiche/teilchenphysik

- seit 9/2013 mit Joachim Herz Stiftung
- über 40 Seiten Texte u. Animationen

Wechselwirkung	Starke Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Gravitation
Beispiele für Wirkung	Zusammenhalt des Protons	Betätsztet: Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um (oder umgekehrt). Kinetik in der Nähe verschwindet der Protonen zu einem Heliumkern.	Magnetismus, Licht, ...; Chemische Bindungen, Photoeffekt	Anziehung zwischen Massen. Schwerkraft, Umlauf der Planeten um
Reichweite	10^{-15}m (Protonendurchmesser)	10^{-18}m ($\frac{1}{1000}$ Protonendurchmesser)	unbegrenzt	unbegrenzt
Botenteilchen	Gluonen	W^+, W^-, Z^0	Photon	
Ladung	Starke Ladung (Farbdladung)	Schwache Ladung	Elektrische Ladung	
Kopplungsstärke-konstante	$\alpha_S = \frac{1}{8}$	$\alpha_W = \frac{1}{30}$	$\alpha_{em} = \frac{1}{137}$	$\alpha_G \sim 10^{-44}$

Photon - das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung

Das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon.

Die folgende Animation soll die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Elementarteilchen durch den Austausch von Photonen darstellen.

Grundwissen Versuche Aufgaben Ausblicke Geschichte Weiterführende Links

Mehr anzeigen

Die 12 Bausteinteilchen lassen sich zunächst in drei Generation (oder auch Familien, in der Tabelle rechts die drei Spalten) einteilen. Die drei Generationen beinhalten jeweils sehr ähnliche Teilchen, lediglich die Masse der Teilchen ändert sich zwischen den Generationen erheblich.

Am gefülltesten sind die Mitglieder der 1. Generation in der 1. Spalte, die sind die Grundbausteine der Materie, mit der man gewöhnlich in Beziehung kommt: Für den Aufbau der Atome sind die Quarks u und d. Von den Leptonen gehört zur 1. Generation das Elektron e, das die kleinste Masse aufweist, sowie das nahezu masselose Elektron-Neutrino ν_e , das von den 0-Zerfällen her bekannt ist und auch in großer Zahl von der Sonne zur Erde gelangt.

Die Mitglieder der 2. und 3. Generation in der 2. und 3. Spalte treten nur unter extremen Bedingungen auf, wie sie z.B. in Teilchenbeschleunigern oder in den oberen Schichten unserer Atmosphäre herrschen, wo die kosmische Strahlung auf Teilchen in unserer Atmosphäre trifft. Die Mitglieder der 3. Generation besitzen im Vergleich zu ihren Verwandten eine sehr große Masse und können daher nur in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen werden, denn man benötigt sehr hohe Energien um diese Teilchen zu erzeugen.

Man kann die 12 Teilchen aber auch nach ihrer Ladung in verschiedene Gruppen einteilen (in der Tabelle rechts die drei Zeilen), wodurch ein erstaunlich übersichtliches Schema entsteht. Je höher die Teilchen in der Tabelle stehen, desto mehr unterschiedliche Ladungen besitzen sie.

Die elektrisch neutralen Leptonen in der untersten Zelle tragen lediglich eine schwache Ladung. Somit werden sie "nur" von der schwachen Wechselwirkung beeinflusst und tauschen nur die Botenteilchen W^+, W^- und Z^0 als Botenteilchen aus.

Die elektrisch geladenen Leptonen in der mittleren Zelle tragen zusätzlich eine elektrische Ladung. Somit werden sie auch von der elektromagnetischen Wechselwirkung beeinflusst und tauschen neben W^+, W^- und Z^0 auch Photonen als Botenteilchen aus.

Die Quarks in der obersten Zelle schließlich tragen auch noch eine starke Ladung. Sie werden also zusätzlich von der starken Wechselwirkung beeinflusst und tauschen somit außer Photonen und W^+, W^- und Z^0 Gluonen als Botenteilchen aus.

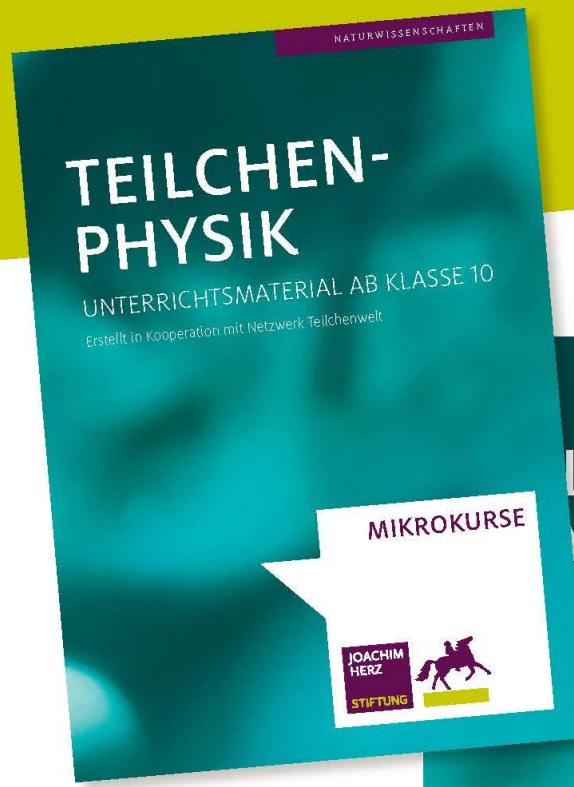
Das gleiche Bild ergibt sich für die jeweiligen Antiteilchen, hier sind lediglich alle Ladungen umgekehrt, statt einer elektrischen Ladung von $+ \frac{2}{3}$ trägt das

1. Generation 2. Generation 3. Generation

Quarks Leptonen Leptonen

Elektrisch geladene Leptonen Elektrisch neutrale Leptonen schwach elektroneutral (Photon)

Übersicht über die Bausteinteilchen der Materie



FOLGENDE BÄNDE
SIND VERFÜGBAR:

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen und Teilchen



UNTERRICHTSMATERIALIEN ZUR TEILCHENPHYSIK

Teilchenphysik ist aktuell und spannend. Die Joachim Herz Stiftung und das Netzwerk Teilchenwelt haben gemeinsam mit Wissenschaftlern und Lehrkräften dieses Thema für den Physikunterricht aufgegriffen und eine Heftreihe mit Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik entwickelt. Sie soll Lehrkräften Ideen, Anregungen und Hintergrundinformationen für ihren Unterricht geben.

Die Materialien können per E-Mail an info@leiphysik.de angefordert oder unter www.leiphysik.de/tp heruntergeladen werden.

Materialentwicklung

- Kooperation mit der Joachim Herz Stiftung
- Laufzeit: 2013 – 2016
- enge Kooperation mit Lehrkräften (NTW-Alumni), u.a. 3 Workshops
- modulare Sammlung von Handreichungen für Lehrkräfte (4 Bände)
- Kostenfrei erhältlich auf:
 - www.teilchenwelt.de/tp
 - www.leifiphysik.de/tp
 - Online oder als Druckexemplar
- Band 3 und 4 bereits erschienen
- Band 1 und 2 folgen im Lauf des Jahres

Band 3: Kosmische Strahlung

- 32 Seiten
 - Fokus: Untersuchung von Myonen
 - Hintergrundinfos für Lehrkräfte
 - Fachtext für Schüler/innen
 - Aktivitäten, Aufgaben und Lösungen

2 INFORMATIONEN FÜR LEHRKRÄFTE	<p>2.1 INHALTUELLE ANHINPUNKTE IM LEHRKRÄFT</p> <p>2.2 VORKENNTNISSE</p> <p>2.3 LEHRKRÄFT</p> <p>2.4 LERNZIELE</p>
3 INHALT	<p>3.1 THEORETISCHE INHALTE</p> <p>3.2 PRAKTIKISCHE INHALTE</p> <p>3.3 PRAKTIKISCHE INHALTE</p>
4 PRAKTIK	<p>4.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>4.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
5 PRAKTIK	<p>5.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>5.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
6 PRAKTIK	<p>6.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>6.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
7 PRAKTIK	<p>7.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>7.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
8 PRAKTIK	<p>8.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>8.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
9 PRAKTIK	<p>9.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>9.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
10 PRAKTIK	<p>10.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>10.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
11 PRAKTIK	<p>11.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>11.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
12 PRAKTIK	<p>12.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>12.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
13 PRAKTIK	<p>13.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>13.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
14 PRAKTIK	<p>14.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>14.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
15 PRAKTIK	<p>15.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>15.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>
16 PRAKTIK	<p>16.1 THEORETISCHE PRAKTIK</p> <p>16.2 PRAKTIKISCHE PRAKTIK</p>

Autorenkennung: Name / Funktion: Datum: 100

Band 4: Mikrokurse

- 28 Seiten
 - 4 Kurse
 - Zeitbedarf 1-2 Unterrichtsstunden
 - Anknüpfung an klassische Lehrplanthemen, z.B. waagerechter Wurf mit Anti-Wasserstoff
 - mit Aufgaben und Lösungen

Band 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen

- Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- Einführung in das Standardmodell
- Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- Aufgabenblätter online

Band 2: Forschungsmethoden

- Forschungsziele
- Beschleuniger
- Detektoren
- Zahlreiche Aufgaben

Forum

<http://www.teilchenwelt.de/forum/>

- ▶ Diskussion zu unseren Materialien
- ▶ Teilen und diskutieren eigener Unterrichtsideen
- ▶ Ideen und Anregungen zur Verbesserung der Arbeit von NTW
- ▶ Vernetzung mit anderen Lehrkräften und Wissenschaftler
- ▶ Klärung von fachlichen Fragen



ORIGINALSCHAUPLATZ

www.teilchenwelt.de



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLITUNG



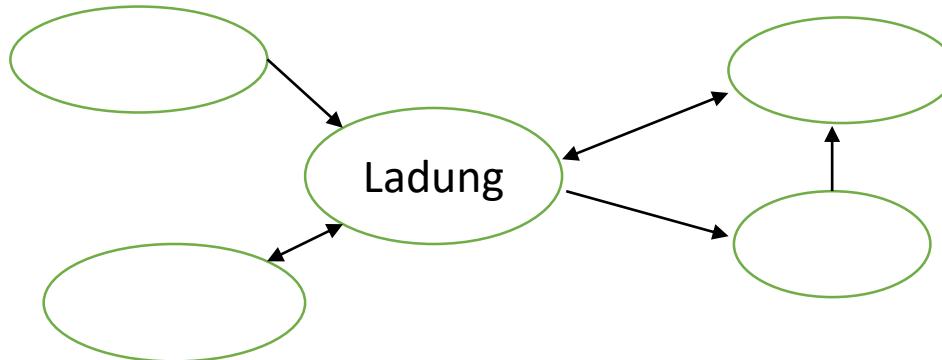
GEFÖRDERT VOM



Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik, Vitzthum Dresden

Aufwärmübung

- ▶ Erstellen Sie in Gruppen eine Concept-Map zum Begriff Ladung.



- ▶ Formulieren Sie einen kurzen fachlichen Kommentar dazu.



Fachvortrag

Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht

Was ist Physik?



- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten:
Möglichst einfach



Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

- ▶ **Newton'sche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung von Raum und Zeit zur *Raumzeit* und von Masse und Energie ($E = mc^2$) durch A. Einstein

Reduktion

Basiskonzept Wechselwirkung

= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

- Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

Hangabtriebskraft,
Wasserkraft,
Gasdruck,
Radiowellen,
Luftreibung,
Radioaktive Umwandlungen,
...
...

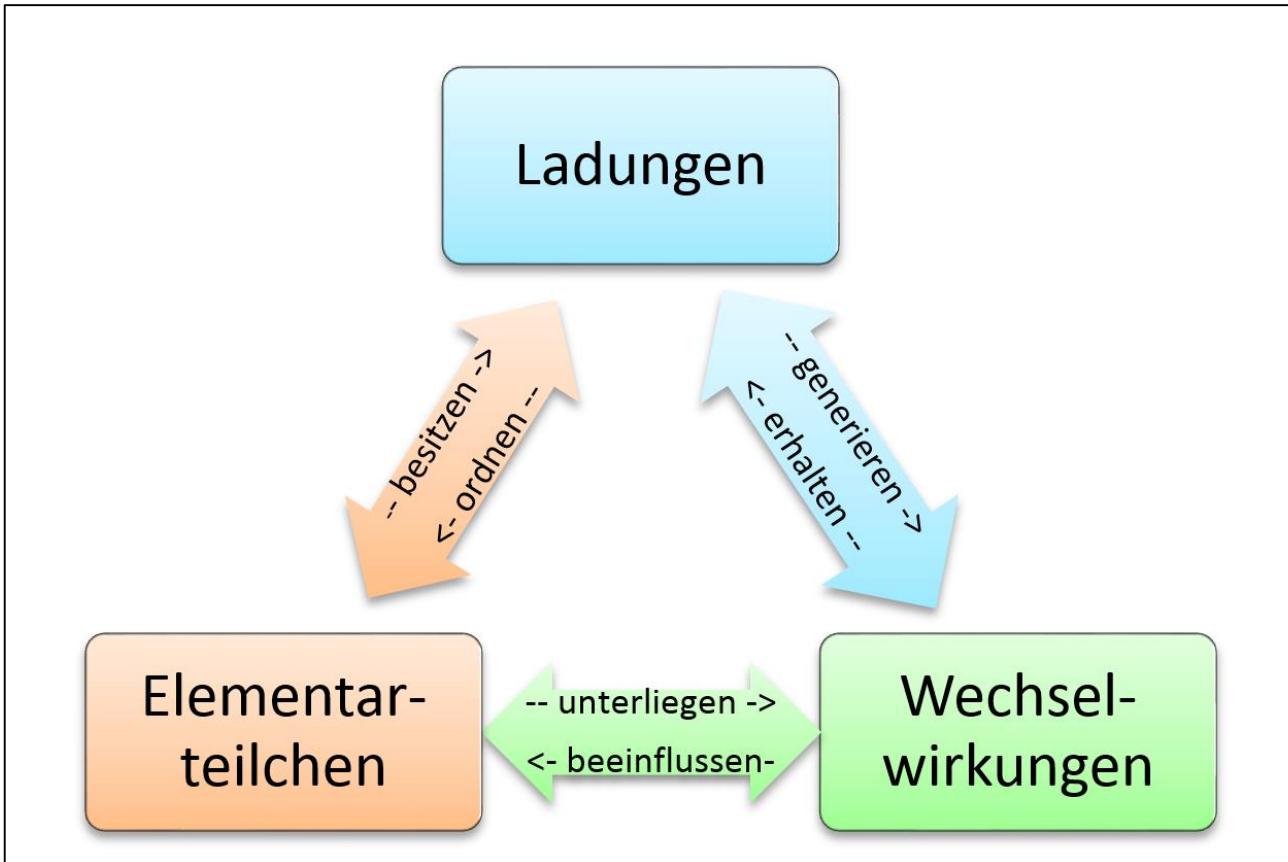


4 Fundamentale Wechselwirkungen

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ In den 1960er und 1970er Jahren entwickelt
- ▶ Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt
- ▶ Präziseste Beschreibung der Vorgänge in unserem Universum, die uns aktuell zur Verfügung steht
- ▶ Elegantes Theoriegebäude mit großer Vorhersagekraft angereichert durch experimentelle Erkenntnisse

Die drei Grundpfeiler des Standardmodells



Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Grundlage: fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
 - Ladungen und Wechselwirkungen
 - nicht: Spektrum der existierenden Elementarteilchen, dies ist rein experimentelle Erkenntnis
- ▶ **Fundamentale Bedeutung des Ladungsbegriffs!**

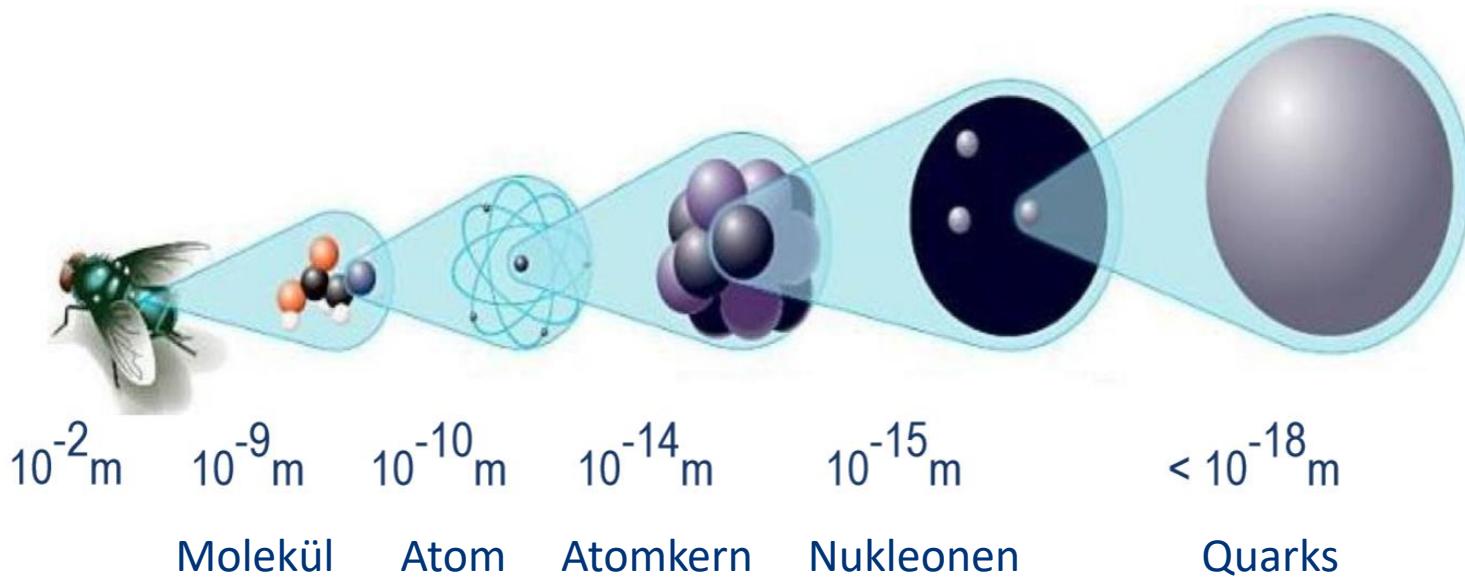
Fußball-Analogie

- Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
- Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den Grundregeln
- Spieler = Elementarteilchen
- Regeln = Wechselwirkungen, Erhaltungssätze,...

- **Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??**
 - Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
 - Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
 - Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen**

Three generations of matter (fermions)				Higgs boson
Quarks	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	?
charge →	2/3 1/2 up	2/3 1/2 charm	2/3 1/2 top	0 0 photon
spin →	1/2	1/2	1/2	0 0 Higgs boson
name →	u	c	t	
Leptons	II	III		
mass →	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0 0 g
charge →	-1/3 1/2 down	-1/3 1/2 strange	-1/3 1/2 bottom	0 0 gluon
spin →	1/2	1/2	1/2	0 0 Z ⁰
name →	d	s	b	Z boson
Gauge bosons	III			
mass →	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
charge →	0 1/2 electron neutrino	0 1/2 muon neutrino	0 1/2 tau neutrino	0 1 W [±]
spin →	1/2	1/2	1/2	1/2
name →	e	μ	τ	W boson

Größenordnungen in der Teilchenphysik



Reduktion

Basiskonzept Wechselwirkung

= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

- Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

Hangabtriebskraft,
Wasserkraft,
Gasdruck,
Radiowellen,
Luftreibung,
Radioaktive Umwandlungen,
...
...



4 Fundamentale Wechselwirkungen

Basiskonzept Wechselwirkung

Basiskonzept Wechselwirkung

= Kraft + Umwandlung + Erzeugung + Vernichtung

► Umfasst die Phänomene

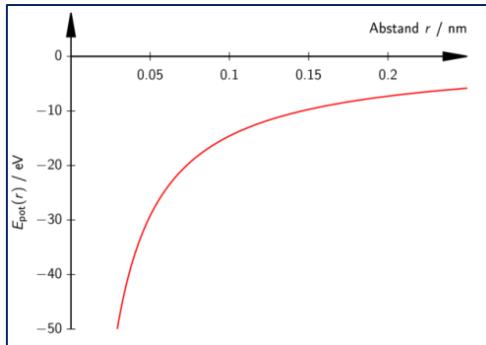
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. β -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

► Begriffe **Kraft** und **Wechselwirkung** sind klar zu trennen

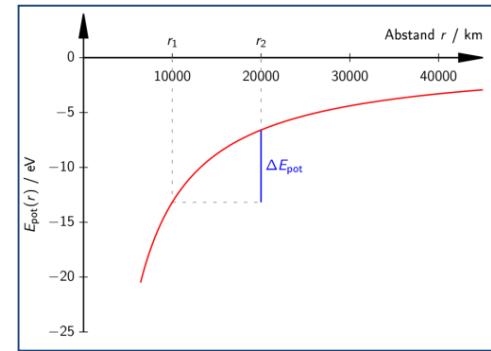
► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

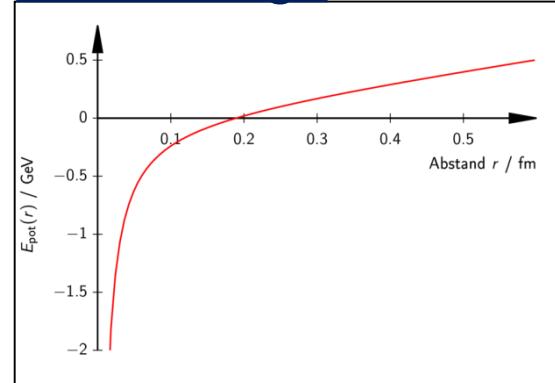


► Gravitation



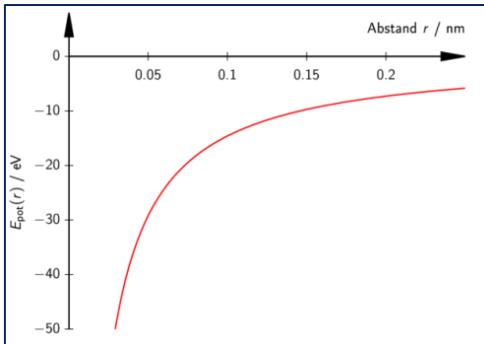
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ($r \sim \text{fm}$)

► Einführung: starke WW

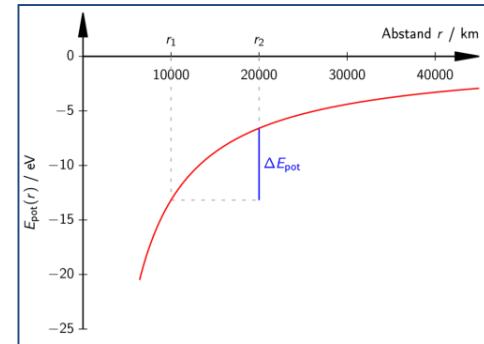


Die vierte fundamentale Wechselwirkung

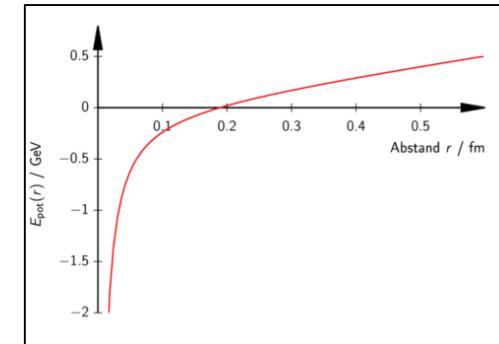
► Elektromagnetische WW



► Gravitation



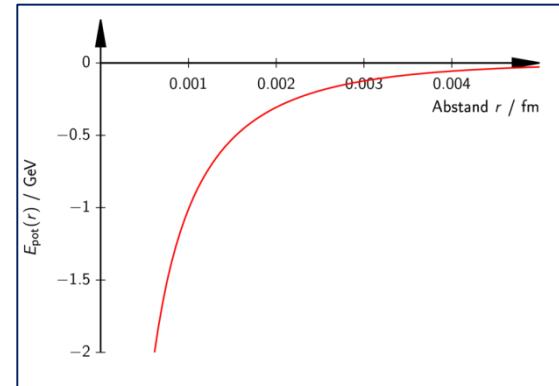
► starke WW



► Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren?

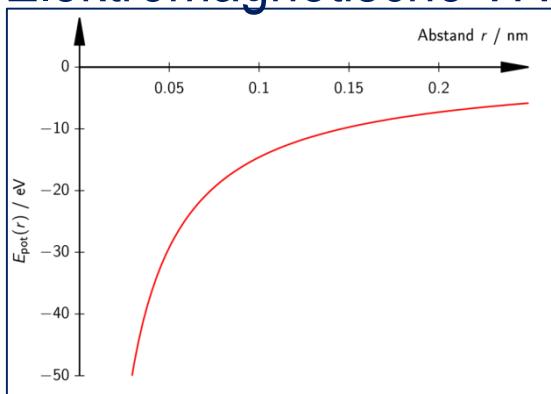
Umwandlung $2p \rightarrow 2n$
($4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$)
passiert **innerhalb** des Protons
 $r \sim 0.001$ fm

► Einführung: schwache WW

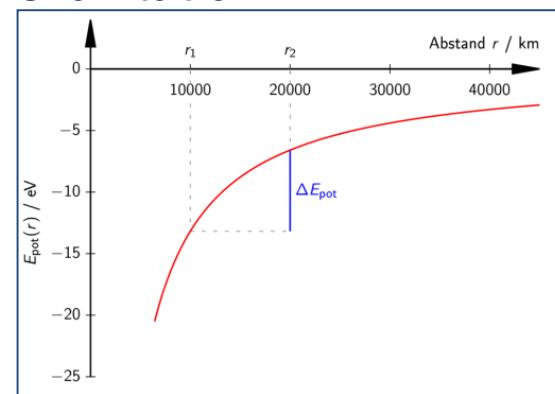


Vergleich der potenziellen Energien

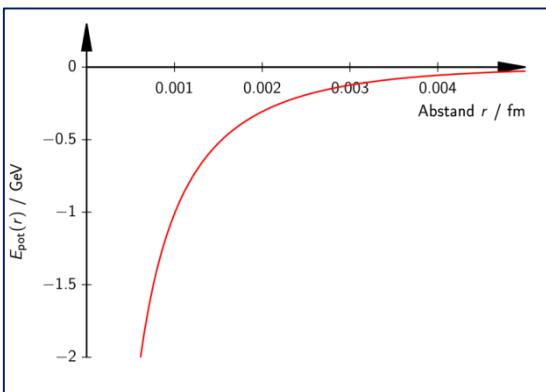
► Elektromagnetische WW



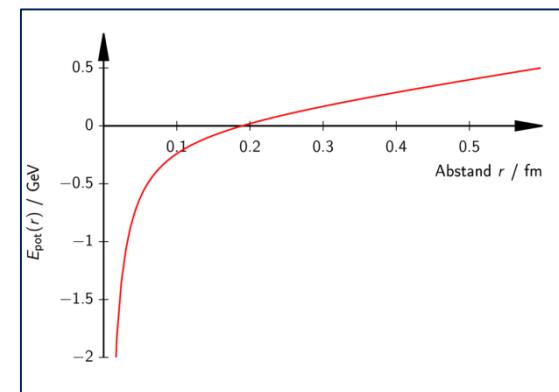
► Gravitation



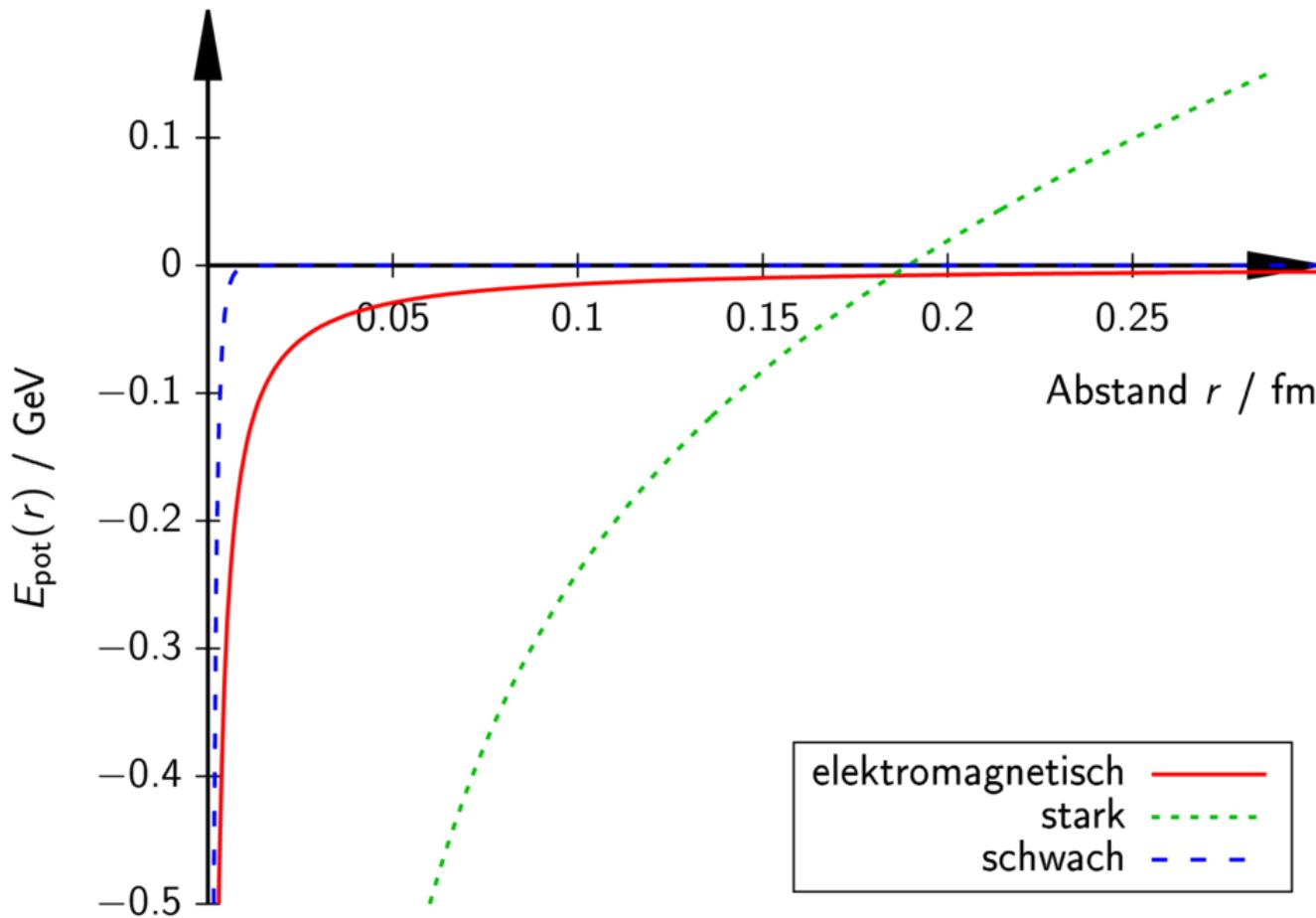
► schwache WW



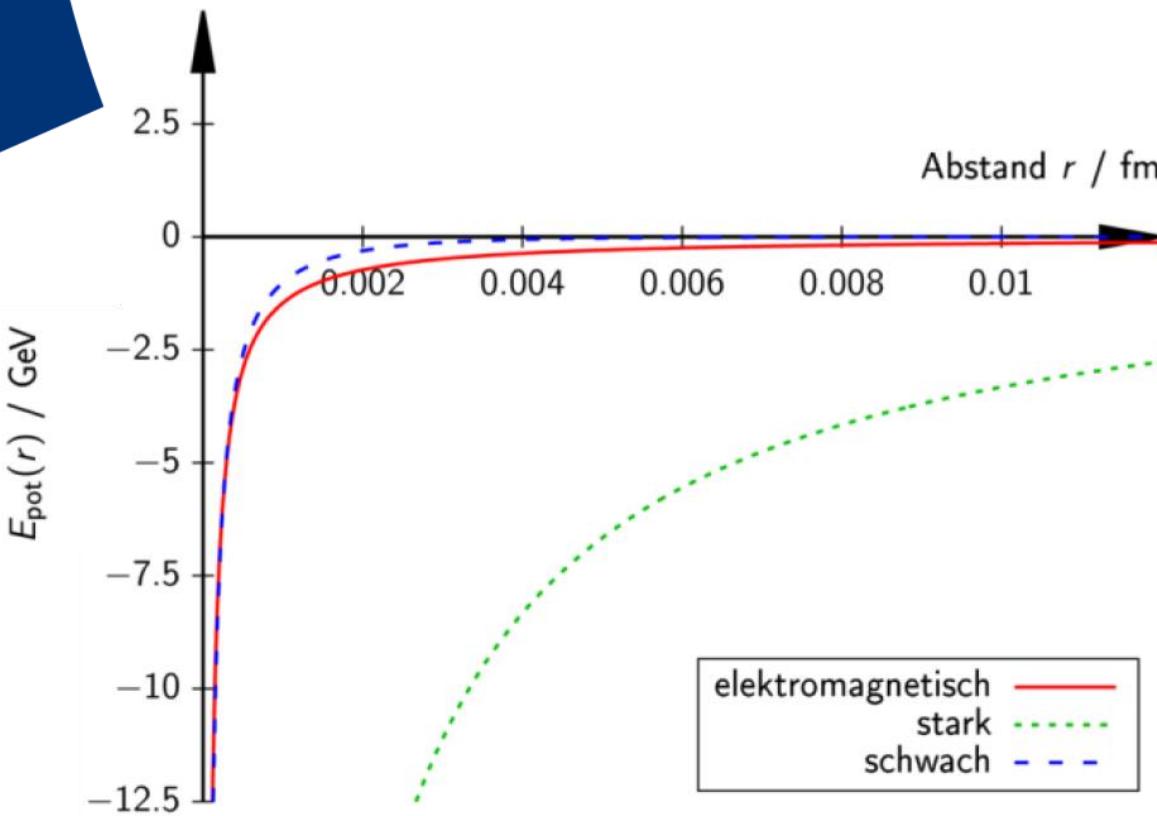
► starke WW



Vergleich der potenziellen Energien

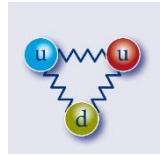
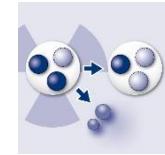


Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen



- ▶ Erkennbar: mit wenigen, ähnlichen Prinzipien die Vorgänge der Welt beschreiben
- ▶ Das Konzept der Ladung (elektrische Ladung) sollte erweitert werden

Erweiterung: Konzept der Ladung



► Coulombsches Gesetz

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$$

- Mit $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$ Kopplungsparameter (historisch: Feinstrukturkonstante)
- Übergang zur Quantenphysik! ($\epsilon_0 \rightarrow \hbar c$)

► Einführung Kopplungsparameter α auch für andere Wechselwirkungen

► $\alpha_w, \alpha_S, \alpha_{grav}$

Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

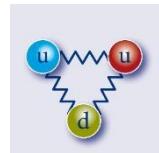
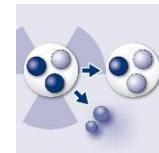
$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische
Ladungszahl

Elementarladung

- ▶ Elementarladung ist nun im Kopplungsparameter α enthalten (ist damit Eigenschaft der Wechselwirkung!)
- ▶ Die Teilcheneigenschaft ist eigentlich nur die Ladungszahl (analog zur üblichen Kernladungszahl Z)

Erweiterung: Konzept der Ladung



- ▶ Einführung: Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:
 - Elektrische Ladung
- ▶ Neu:
 - Schwache Ladung
 - Starke (Farb-)Ladung
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

elektrische Ladungszahl

Z

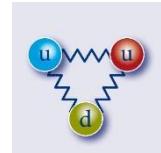
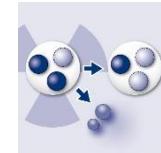
schwache Ladungszahl

I

starker Farbladungsvektor

\vec{C}

Erweiterung: Konzept der Ladung



► Kopplungsparameter der Gravitation zwischen Teilchen1 und Teilchen2: $\alpha_{grav}^{1\ 2} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{\hbar c}$

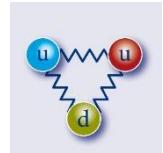
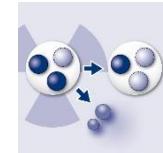
► Beispiel: α_{grav} zwischen Proton (p) und Elektron (e)

- $\alpha_{grav}^{p\ e} = G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$

- Erinnerung: $\alpha_{em}^{p\ e} \approx \frac{1}{137}$

- Vergleich: $\frac{\alpha_{em}^{p\ e}}{\alpha_{grav}^{p\ e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$

Ladung der Gravitation?



Warum kann die Masse m eines Teilchens nicht die Ladung der Gravitation sein?

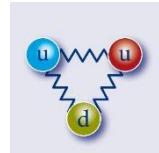
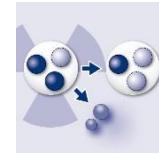
► Schulniveau:

- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen $m_1 \cdot m_2$ kann nicht negativ sein

► Theorie:

- Massen können keine Eichsymmetrie **in** Raum und Zeit erzeugen;
- denn Raum und Zeit selbst müssen „verdreht“ werden

Konzept der Ladung



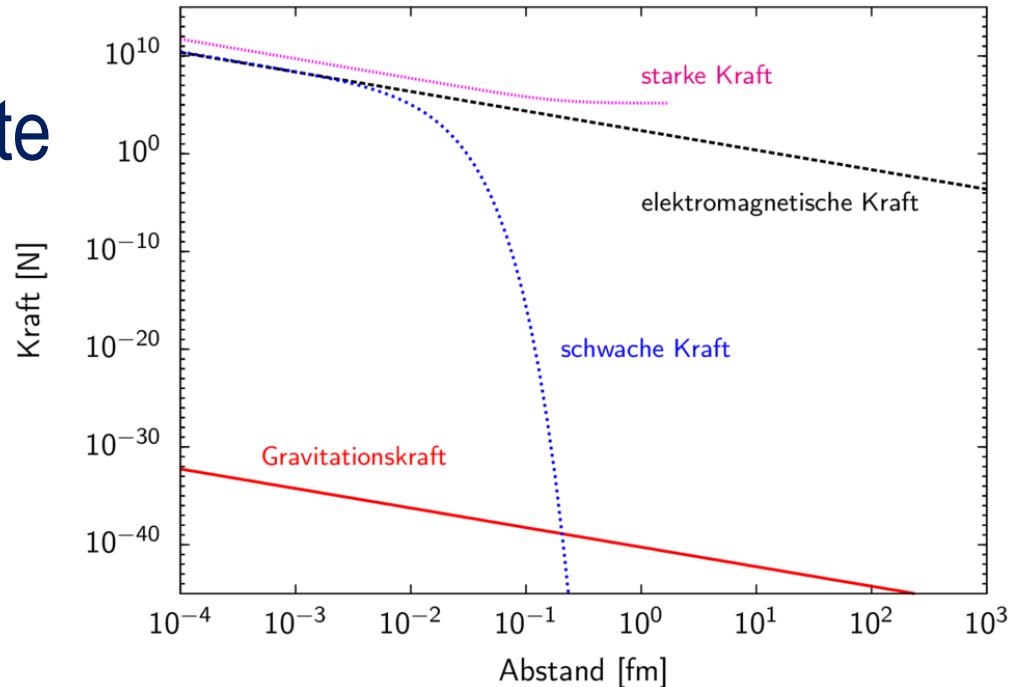
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

- ▶ Ladungen dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
- ▶ Ladungen sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
 - Grundlage der Symmetrien des Standardmodells

Vergleich der Kräfte

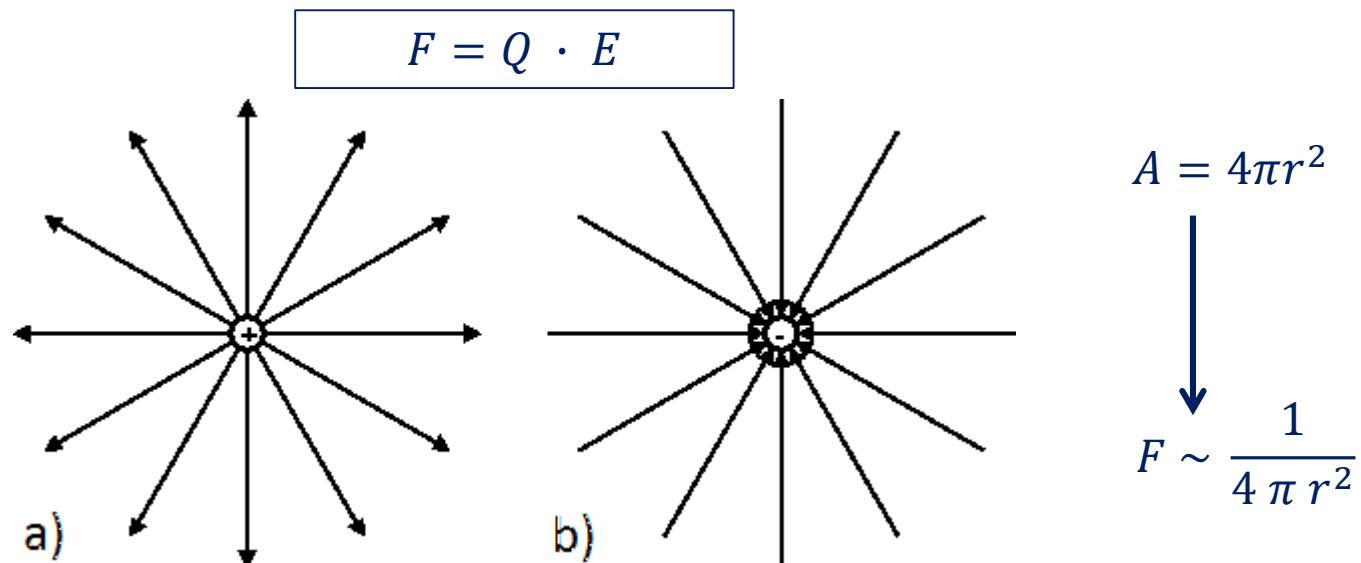
► Tiefen Einsicht:
Alle $\sim \frac{1}{r^2}$ für kleine r



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

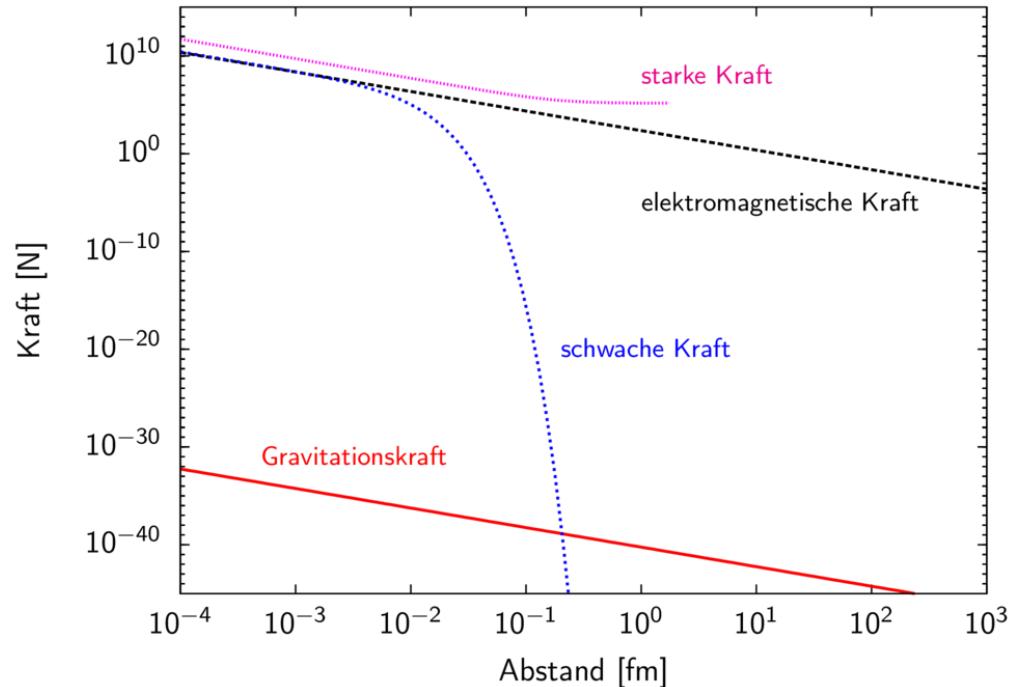
Geometrische Betrachtung

- Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW
Dichte der Feldlinien ist proportional zur Stärke der Kraft



Reichweiten der Kräfte

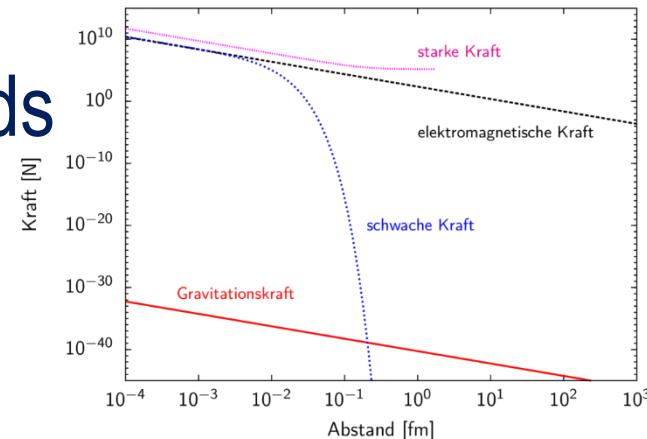
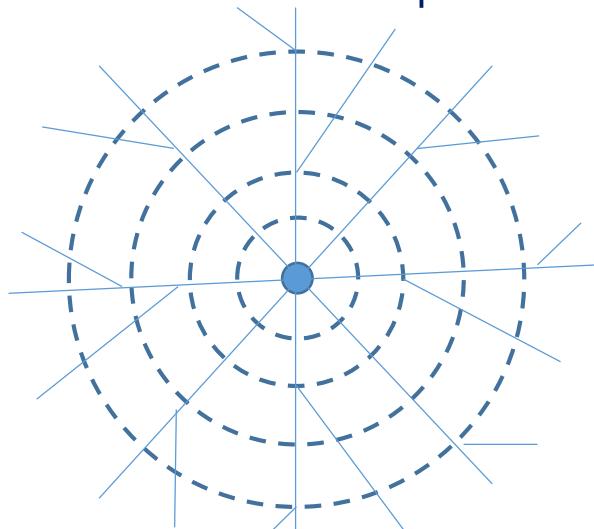
- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

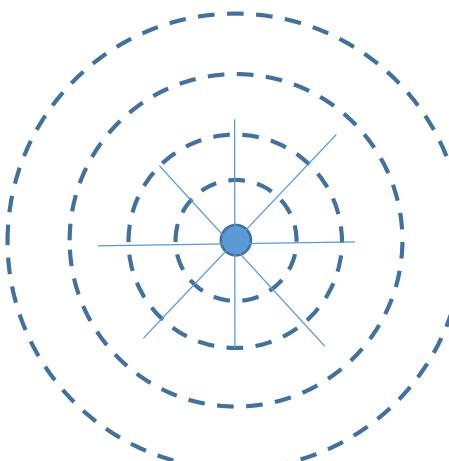
Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

- ▶ Ungewöhnliche Feldlinien für WW, deren Kräfte zunächst $F \sim 1/r^2$ folgen, dann aber abweichen:
- ▶ stark
 - Kraft \rightarrow Feldliniendichte wird konstant
 - Feldlinien entstehen spontan



schwach

Kraft strebt rasch gegen Null
Feldlinien enden „im Nichts“



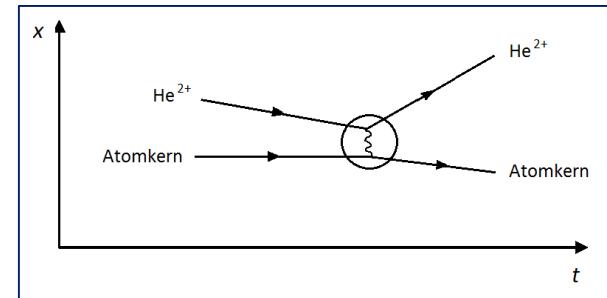
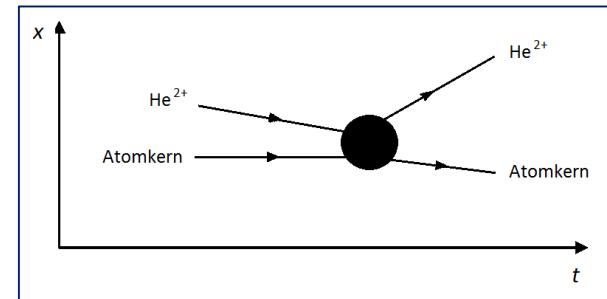
Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► Makroskopisch:

- Feldliniendiche --> Feldstärke --> Kraft in ausgedehnten Feldern
- klassische Bahnen berechenbar

► Mikroskopisch:

- Wechselwirkung ohne Bahnbegriff
(z.B. Streuung: Unbestimmtheit von Ort u. Zeit)
- Messbar sind nur (für jedes Teilchen)
 - Energie E und Impuls \vec{p} **vorher**
 - Energie E und Impuls \vec{p} **nachher**
 - Energiedifferenz ΔE und Impulsdifferenz $\Delta \vec{p}$
wird durch Botenteilchen übertragen



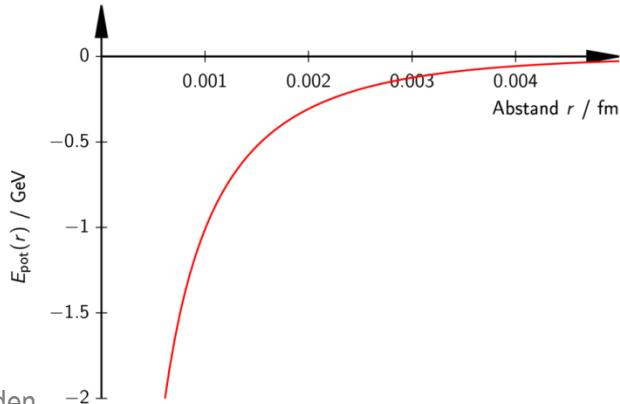
Endliche Reichweiten

► Schwache Wechselwirkung

- **Massereiche Botenteilchen** (W- und Z-Teilchen): ergeben endliche Reichweite
 - Heisenberg'sche Unschärferelation
 - Exakte Argumentation schwierig
 - Mathematische Herleitung möglich (Feynman-Propagatoren), liegt außerhalb der hier behandelten Themen
- **Klassisches Analogon: Abschirmung von Feldlinien**
 - Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch entgegengesetzte Feldlinien
 - Brout-Englert-Higgs Feld (BEH-Feld) schirmt schwache Ladungen ab

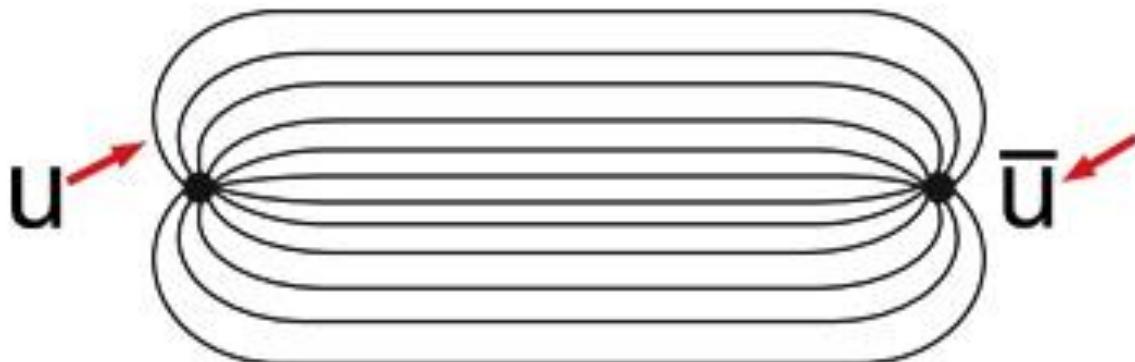
$$► E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$$

$$► \text{Mit } \lambda_w = \frac{\hbar}{m_w c} \approx 0,0024 \text{ fm}$$



Endliche Reichweiten

- ▶ Starke Wechselwirkung wird vermittelt durch masselose Botenteilchen (Gluonen)
- ▶ Aber: Gluonen sind selbst stark geladen, wechselwirken also miteinander



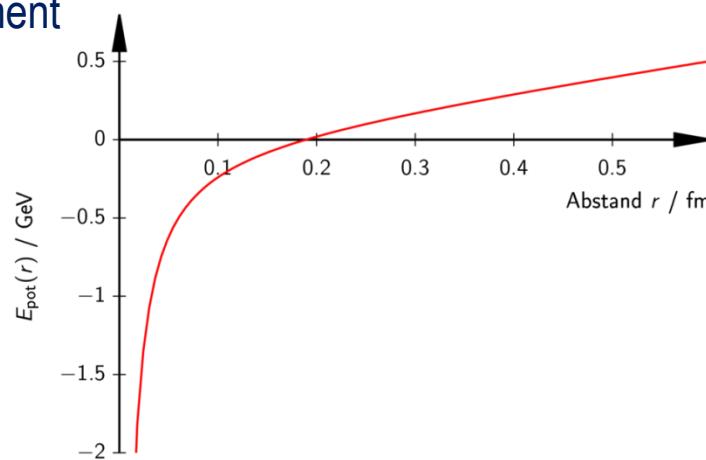
Endliche Reichweiten

► Starke Wechselwirkung: Confinement („Eingesperrtheit“)



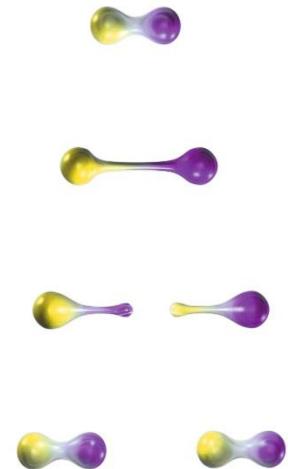
$$E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$$

- Linearer Term, ab $r \approx 1 \text{ fm}$
- Im Feld gespeicherte Energie steigt streng monoton
- Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!
- Begriff: Confinement



Endliche Reichweiten

- ▶ Confinement
- ▶ Beispielrechnung: Separation eines Quark-Anti-Quark-Paars
 - $W = k \cdot \Delta r = 930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}} \cdot 0,7 \text{ fm} = 650 \text{ MeV}$
 - Folgerung: Bereits bei einer zusätzlichen Separation von $\Delta r = 0,7 \text{ fm}$ über den typischen Bindungsabstand von $r \approx 0,3 - 1,3 \text{ fm}$ hinaus können neue Quark-Anti-Quark-Paare entstehen.



Endliche Reichweiten: Botenteilchen

► Stark: Gluonen

- Masselos
- Besitzen selber starke Ladung
- Gluonen können selber Gluonen abstrahlen (im Gegensatz zu Photonen)
- Feldliniendichte bleibt konstant

► Schwach: „Weakonen“ (W und Z-Teilchen)

- Große Masse
- Quantenmechanik --> Endliche Reichweite
- Masse entsteht durch BEHiggs-Hintergrundfeld
- Abschirmung der Feldlinien (analog: Dielektrikum)

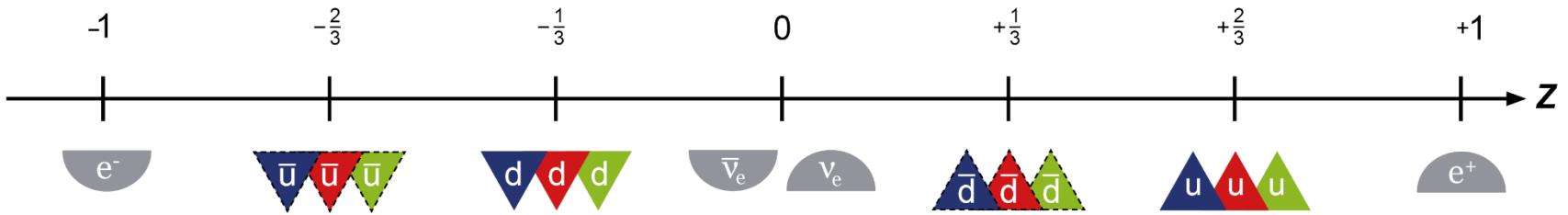
Zusammenfassung: Wechselwirkungen

- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
 - (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
 - ▶ 3 dieser WWn werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
 - ▶ Nur 2 WWn besitzen eine unendliche Reichweite, während die beiden anderen auf subnukleare Abstände beschränkt sind
- **Die Wechselwirkungen des Standardmodells werden durch Ladungen hervorgerufen**

Elektrische Ladung

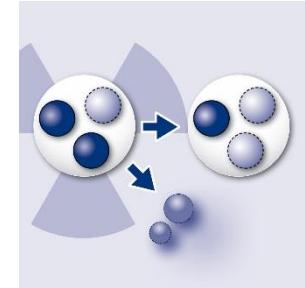


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen Z einiger Anti-/Materienteilchen

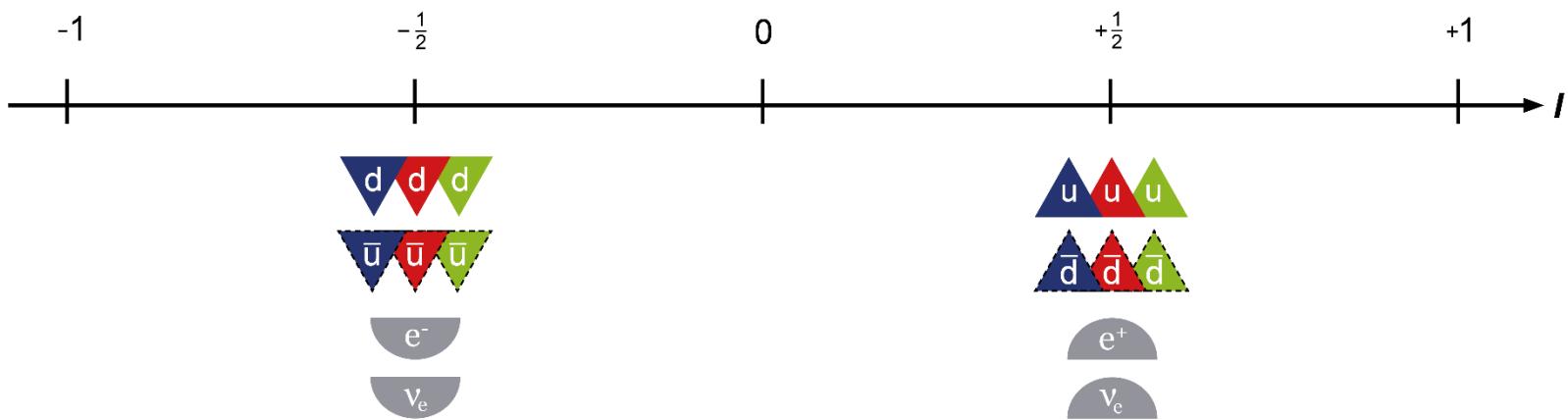


- Elektrische Ladung ist gequantelt

Schwache Ladung



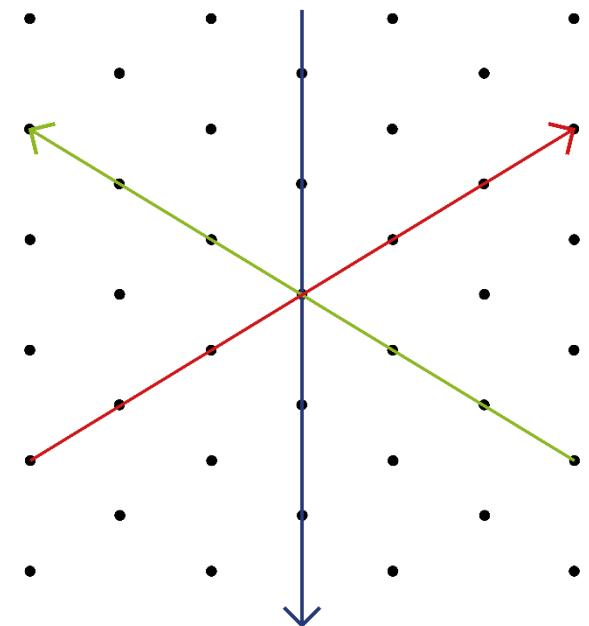
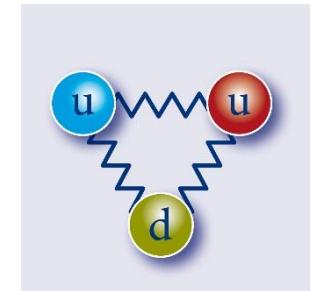
- Materienteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von $I = +\frac{1}{2}$ oder $I = -\frac{1}{2}$
 - alle Materienteilchen nehmen an der schwachen WW teil



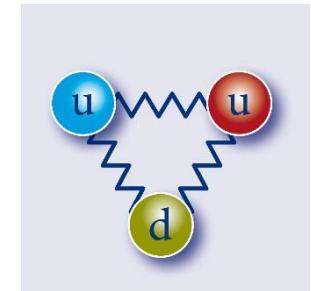
- Schwache Ladung ist gequantelt

Starke Ladung

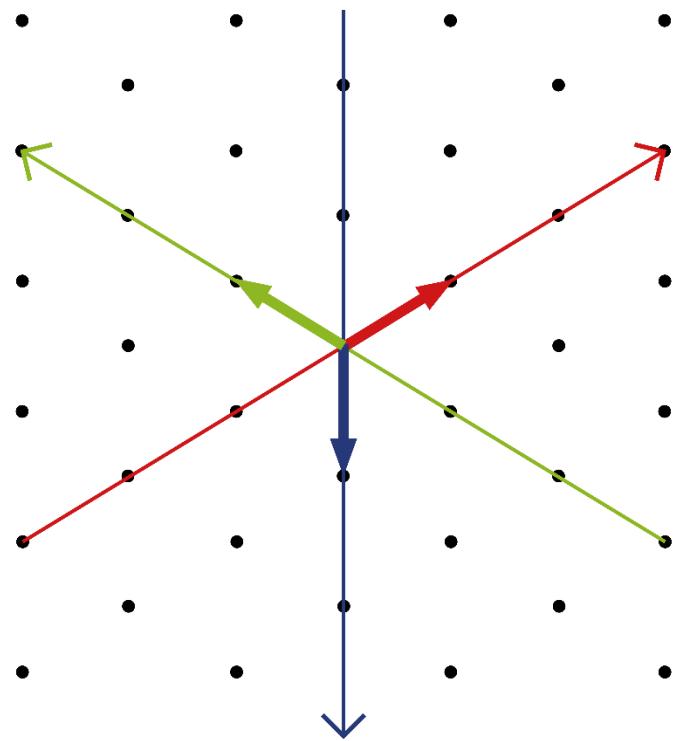
- ▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: „Farbladung“)
 - Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus Quarks
- ▶ Ladung mit Vektorcharakter: Farbgitter



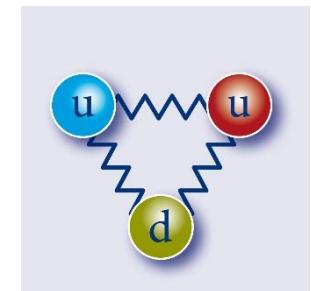
Starke Ladung



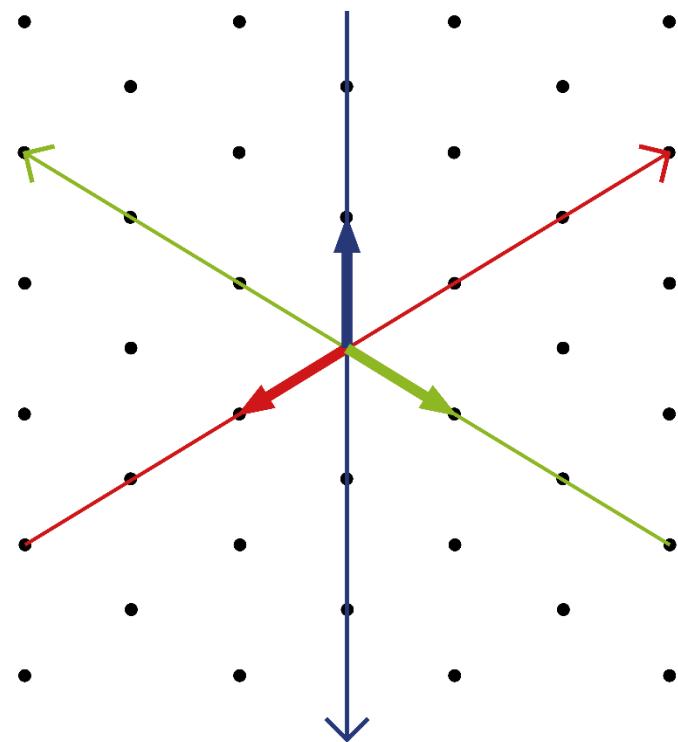
► Farbladungsvektoren von Quarks

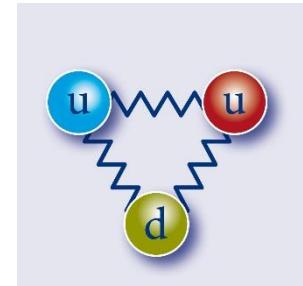
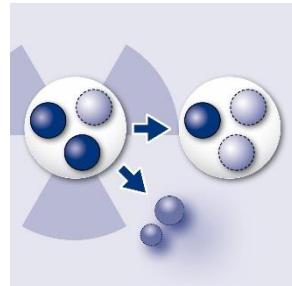


Starke Ladung



► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





► Alle drei Ladungen sind additiv

Beispiel: Ladungszahlen eines Protons $p(u, u, d)$

- Elektrische Ladungszahl:

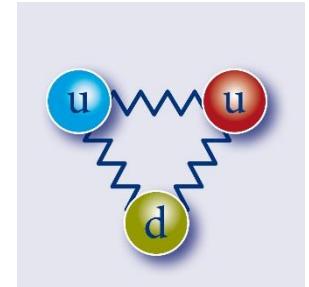
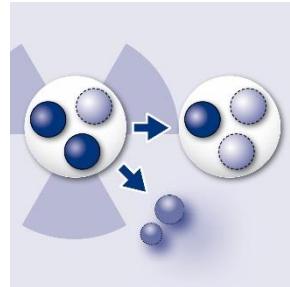
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

$$I_p = I_u + I_u + I_d = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = +\frac{1}{2}$$

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \begin{smallmatrix} \rightarrow \\ + \\ \leftarrow \end{smallmatrix} + \begin{smallmatrix} \rightarrow \\ \uparrow \\ \leftarrow \end{smallmatrix} + \begin{smallmatrix} \uparrow \\ \downarrow \\ \leftarrow \end{smallmatrix} = \begin{smallmatrix} \rightarrow \\ \uparrow \\ \downarrow \end{smallmatrix} = \vec{0}$$



- Alle drei Ladungen sind erhalten

Beispiel: β -Umwandlung $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- Elektrische Ladungszahl:

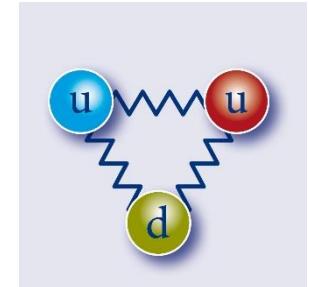
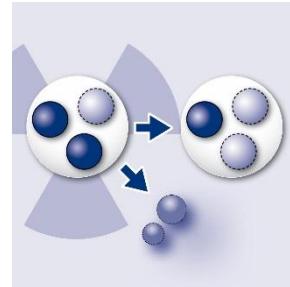
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- Schwache Ladungszahl:

$$-\frac{1}{2} \rightarrow +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -\frac{1}{2}$$

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{0} \rightarrow \vec{0} + \vec{0} + \vec{0} = \vec{0}$$



- ▶ Alle drei Ladungen sind erhalten
- ▶ mit Energie- und Impulserhaltung ist eine **Vorhersage** möglich, ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind

Übersichten

► Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt

1. Generation		/	q	\bar{c}
elektrisch neutrale Leptonen	ν_e	$+\frac{1}{2}$	0	$\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	e^-	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>u</div> <div>u</div> <div>u</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div>d</div> <div>d</div> <div>d</div> </div> </div>	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	blau rot grün blau rot grün

starke Wechselwirkung
elektromagnetische Wechselwirkung
schwache Wechselwirkung

1. Generation		/	q	\bar{c}
Quarks	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>\bar{d}</div> <div>\bar{d}</div> <div>\bar{d}</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div>\bar{u}</div> <div>\bar{u}</div> <div>\bar{u}</div> </div> </div>	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$ $-\frac{2}{3}$	antiblau antirot antigrün antiblau antirot antigrün
elektrisch geladene Leptonen	e^+	$+\frac{1}{2}$	+1	$\vec{0}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\bar{\nu}_e$	$-\frac{1}{2}$	0	$\vec{0}$

schwache Wechselwirkung
elektromagnetische Wechselwirkung
starke Wechselwirkung

Zusammenfassung: Ladungen

- ▶ Drei verschiedene Ladungen
 - elektrisch
 - schwach
 - stark
- ▶ Ladungen sind
 - additiv
 - erhalten
 - > Vorhersage zu erlaubten Prozessen
 - gequantelt

Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag I



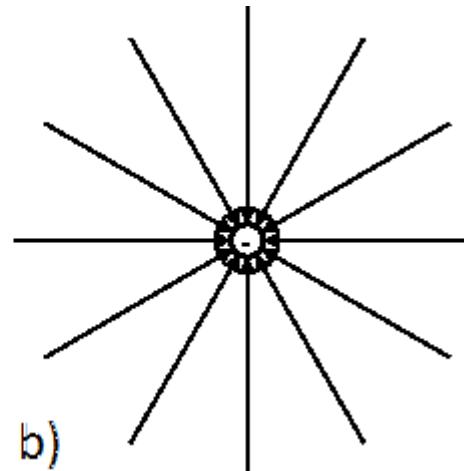
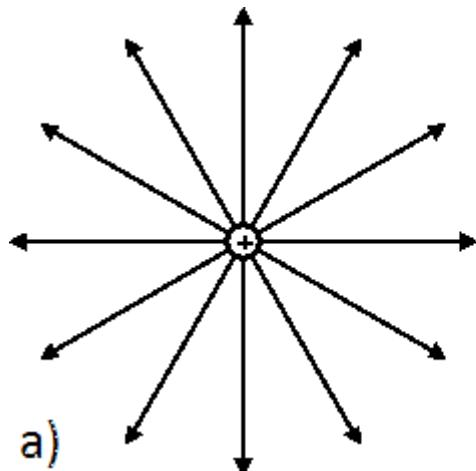
10 Minuten Pause

Darstellen von Wechselwirkungen

► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite
hier: elektromagnetische Wechselwirkung

$$F = Q \cdot E$$



$$A = 4\pi r^2$$

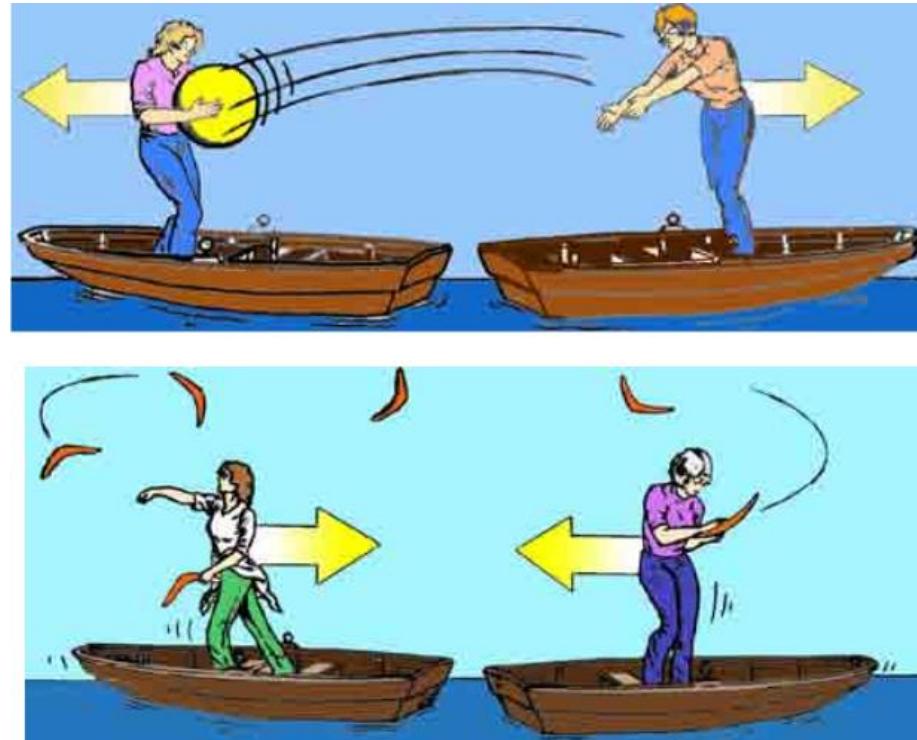
↓

$$F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$$

Darstellen von Wechselwirkungen

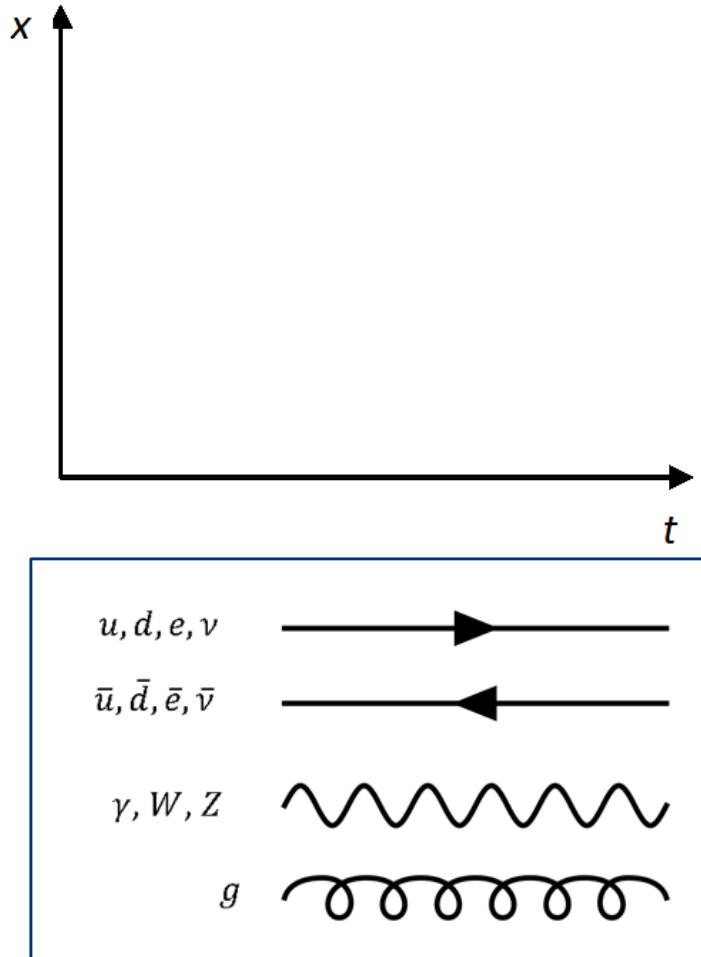
► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

Anstelle der Feldlinien kann die elektromagnetische Wechselwirkung auch durch den Austausch eines Botenteilchens beschrieben werden



Feynman-Diagramme

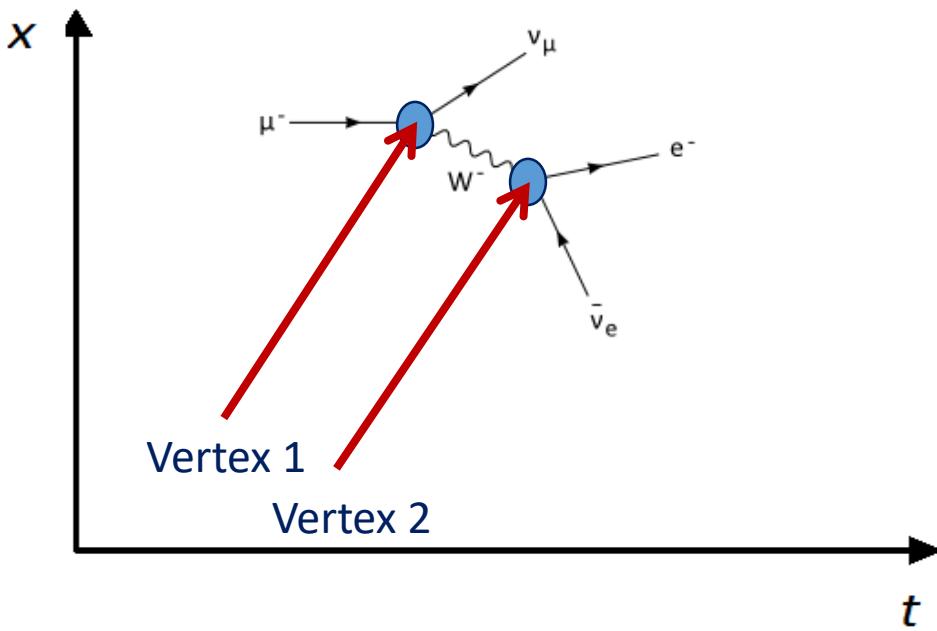
► Aufbau



Feynman-Diagramme

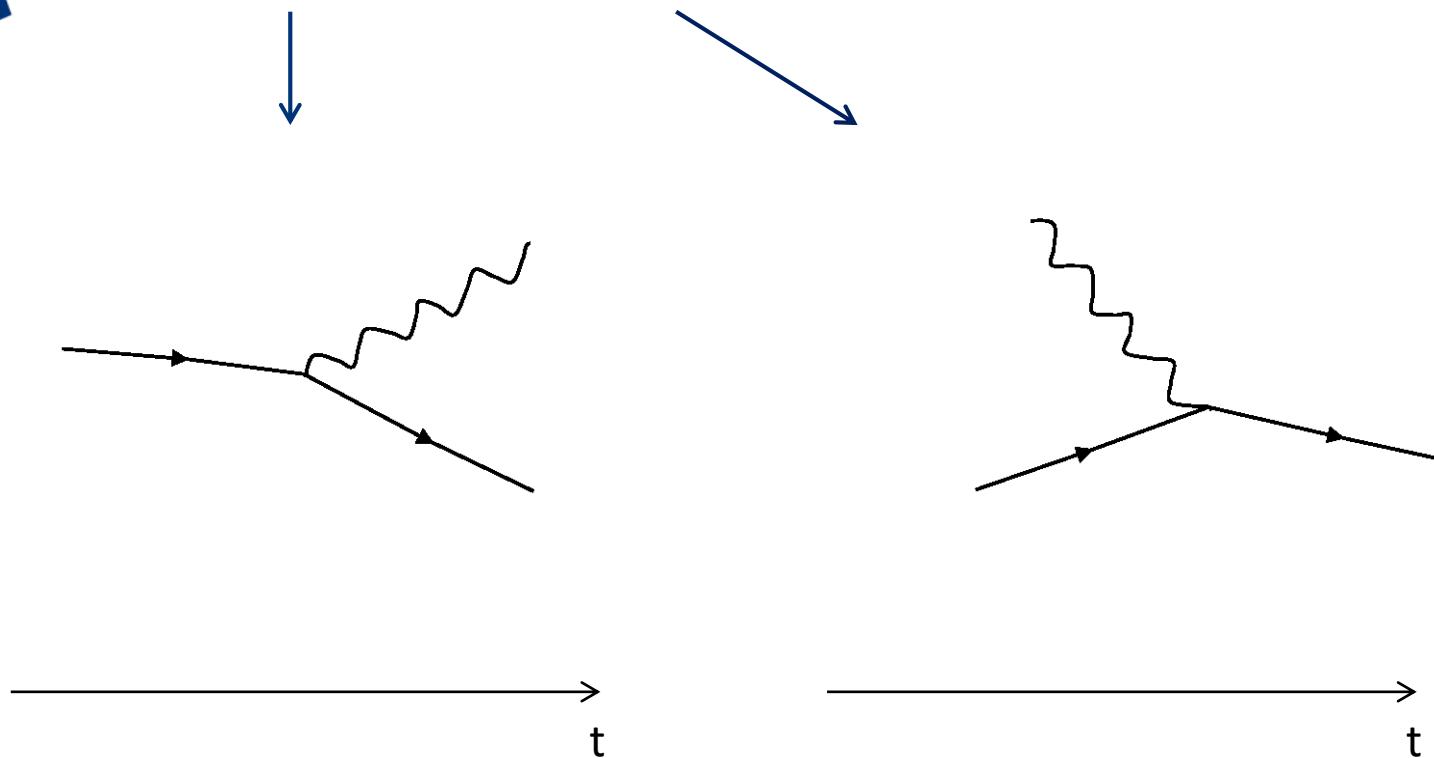
► Begriffsklärung:

- Vertex / Vertices (plural)
- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass sich die Teilchen treffen (an einem „bestimmtem Ort“, zur einer „bestimmten Zeit“)



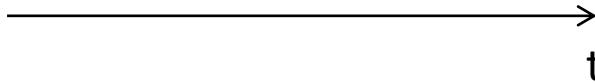
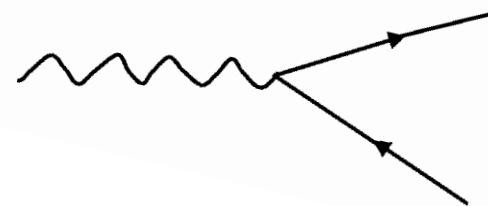
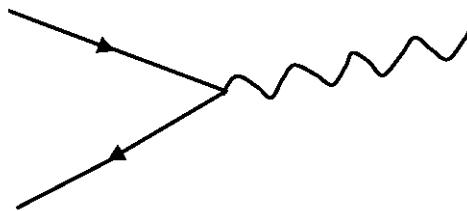
Grundbausteine 1/2

- Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



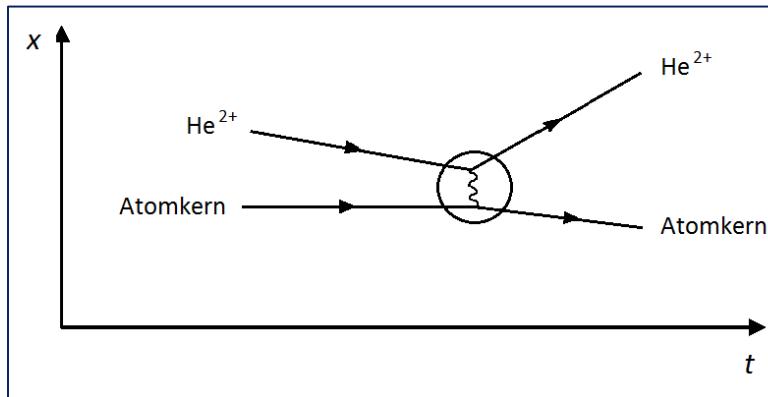
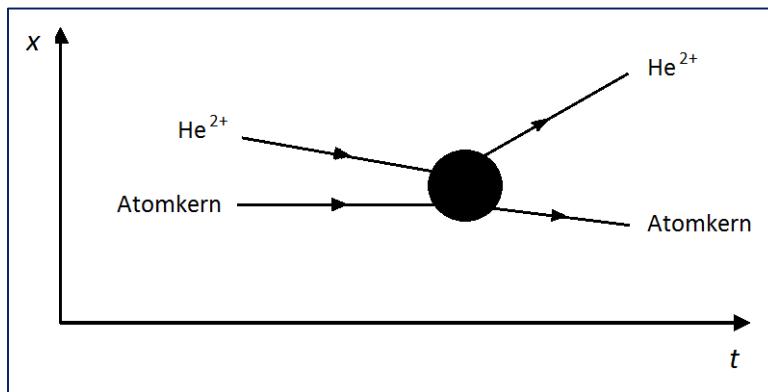
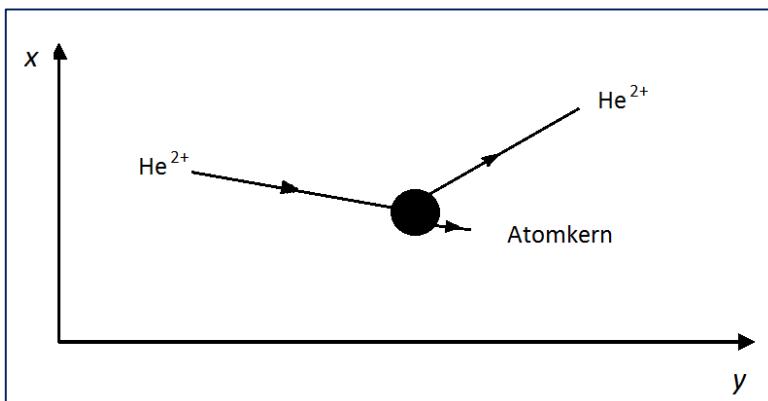
Grundbausteine 2/2

► Paarvernichtung und Paarerzeugung



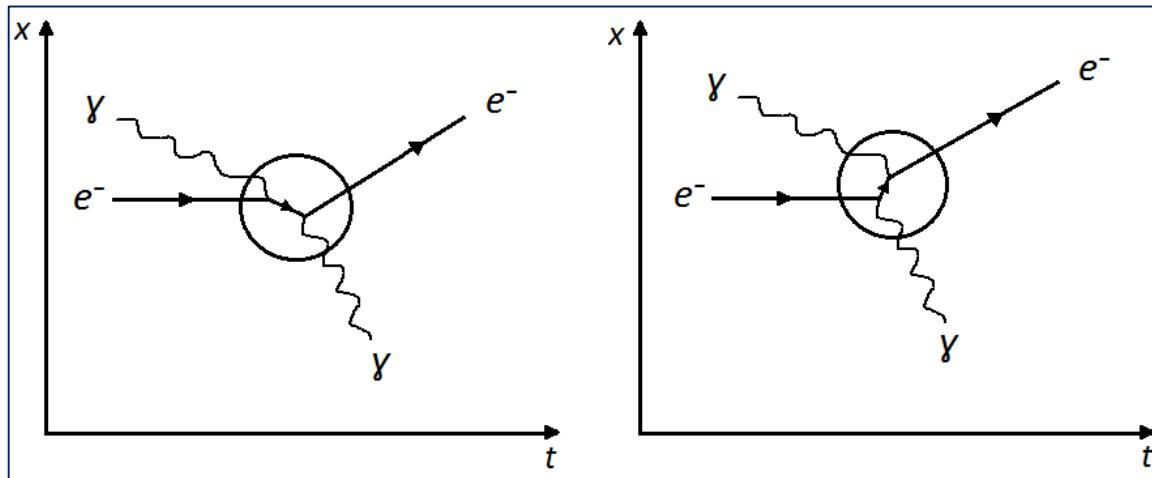
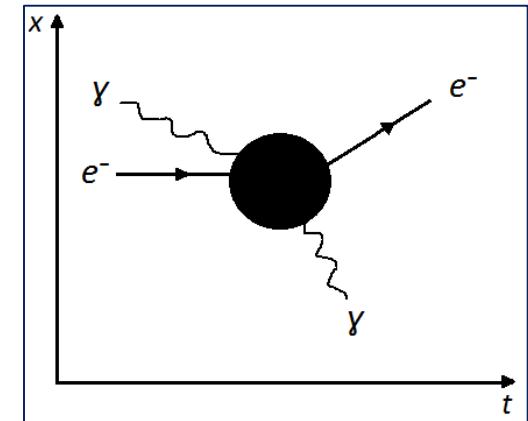
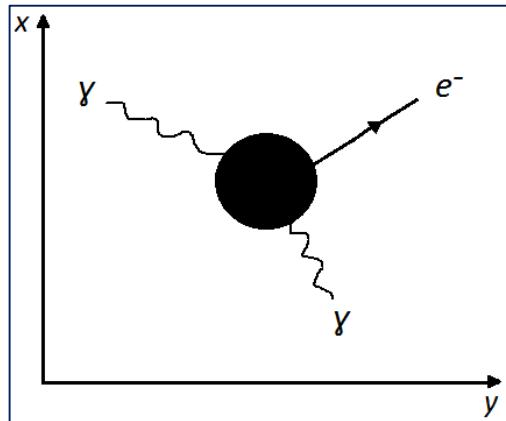
Prozesse

► Rutherford-Streuung



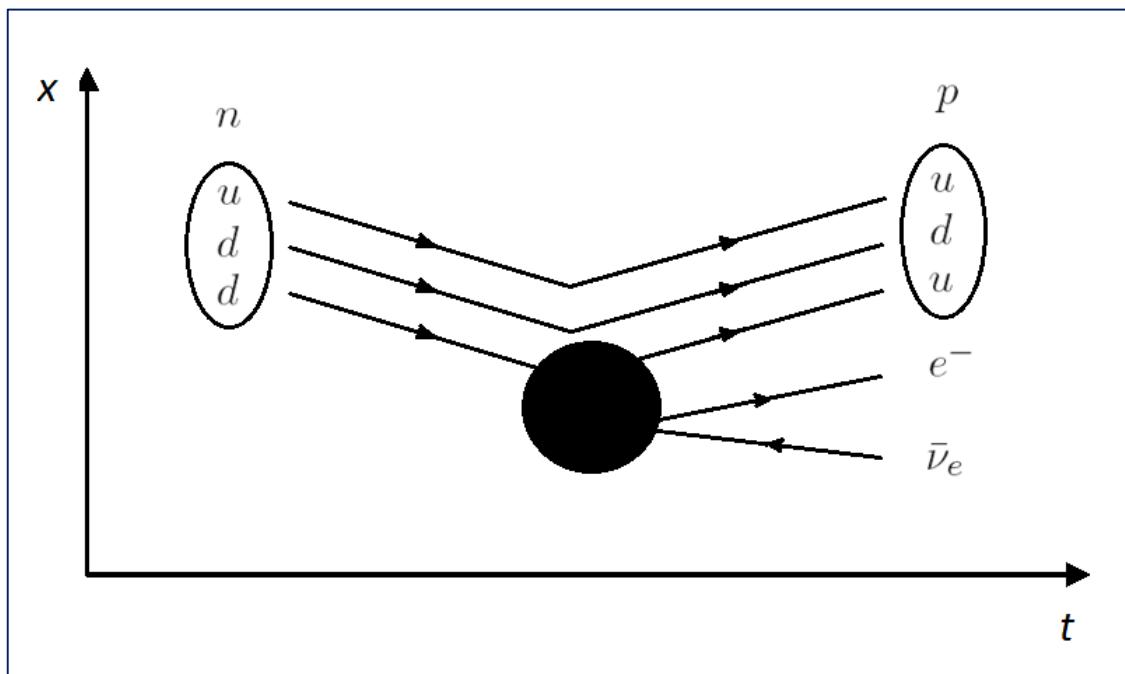
Prozesse

► Compton-Streuung



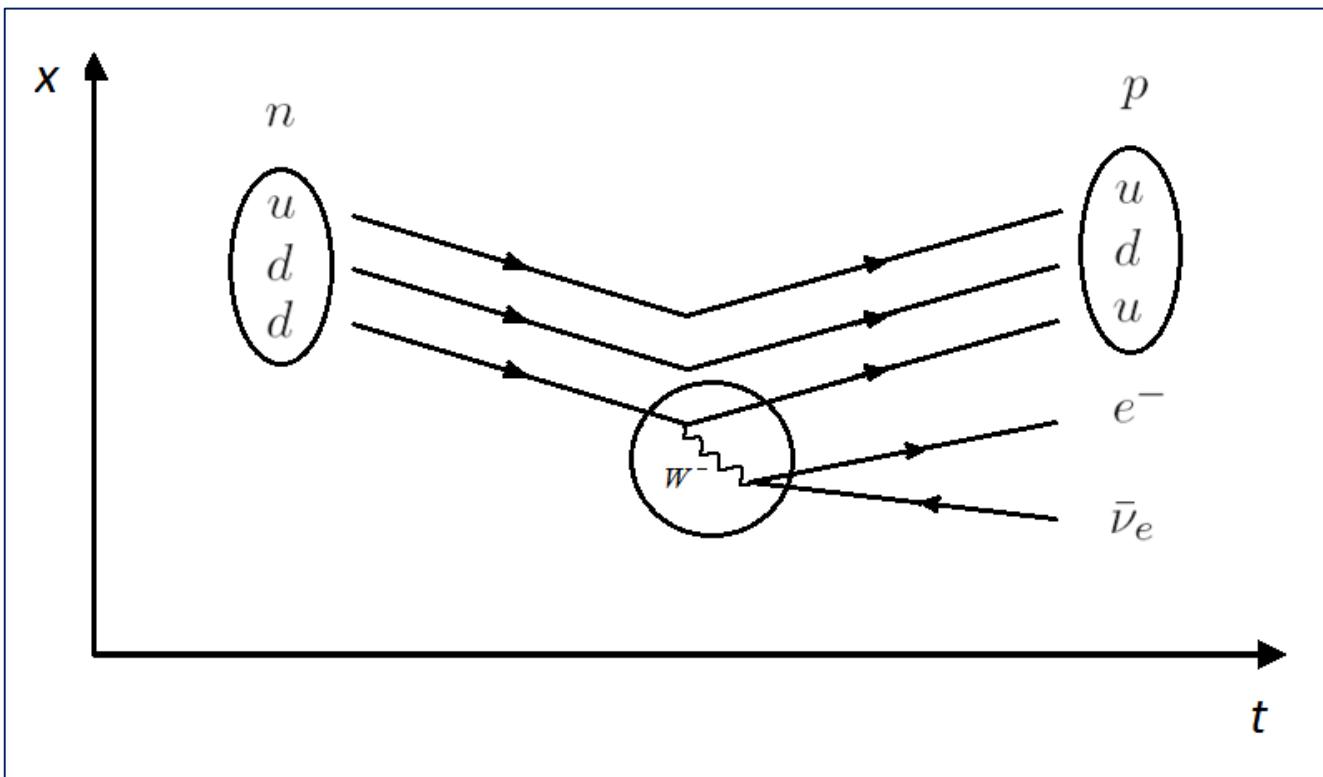
Prozesse

► β^- -Umwandlung

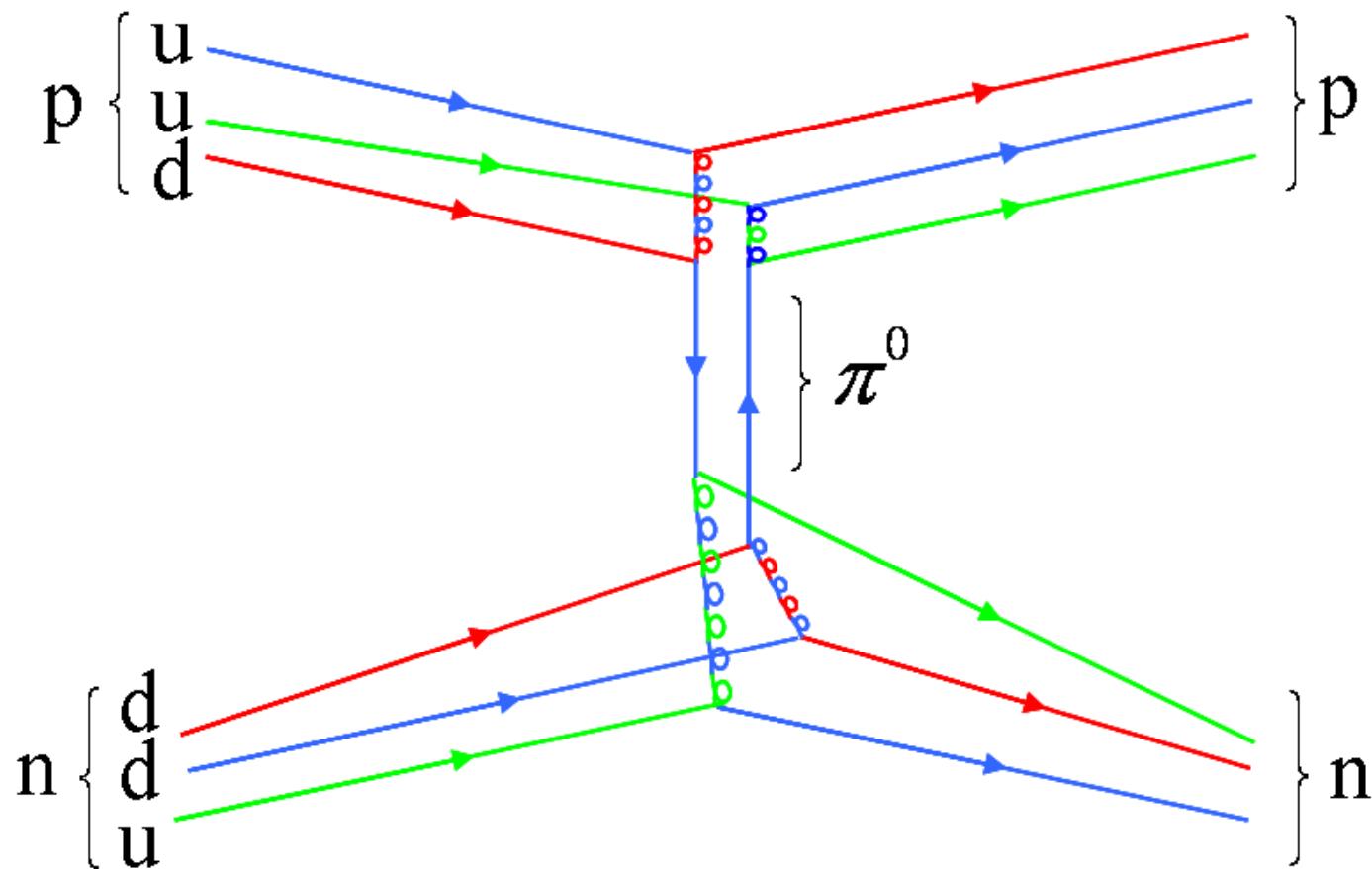


Prozesse

► β^- -Umwandlung



Feynman-Diagramme: Ladungsfluss-Diagramme



Zusammenfassung: Feynman-Diagramme

- ▶ Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben
- ▶ Wechselwirkungen werden mittels Feynman-Diagrammen dargestellt
 - Diese können auch zur quantitativen Berechnung dienen
- ▶ Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Vertices symbolisiert, an denen Teilchen emittiert, absorbiert, erzeugt oder vernichtet werden

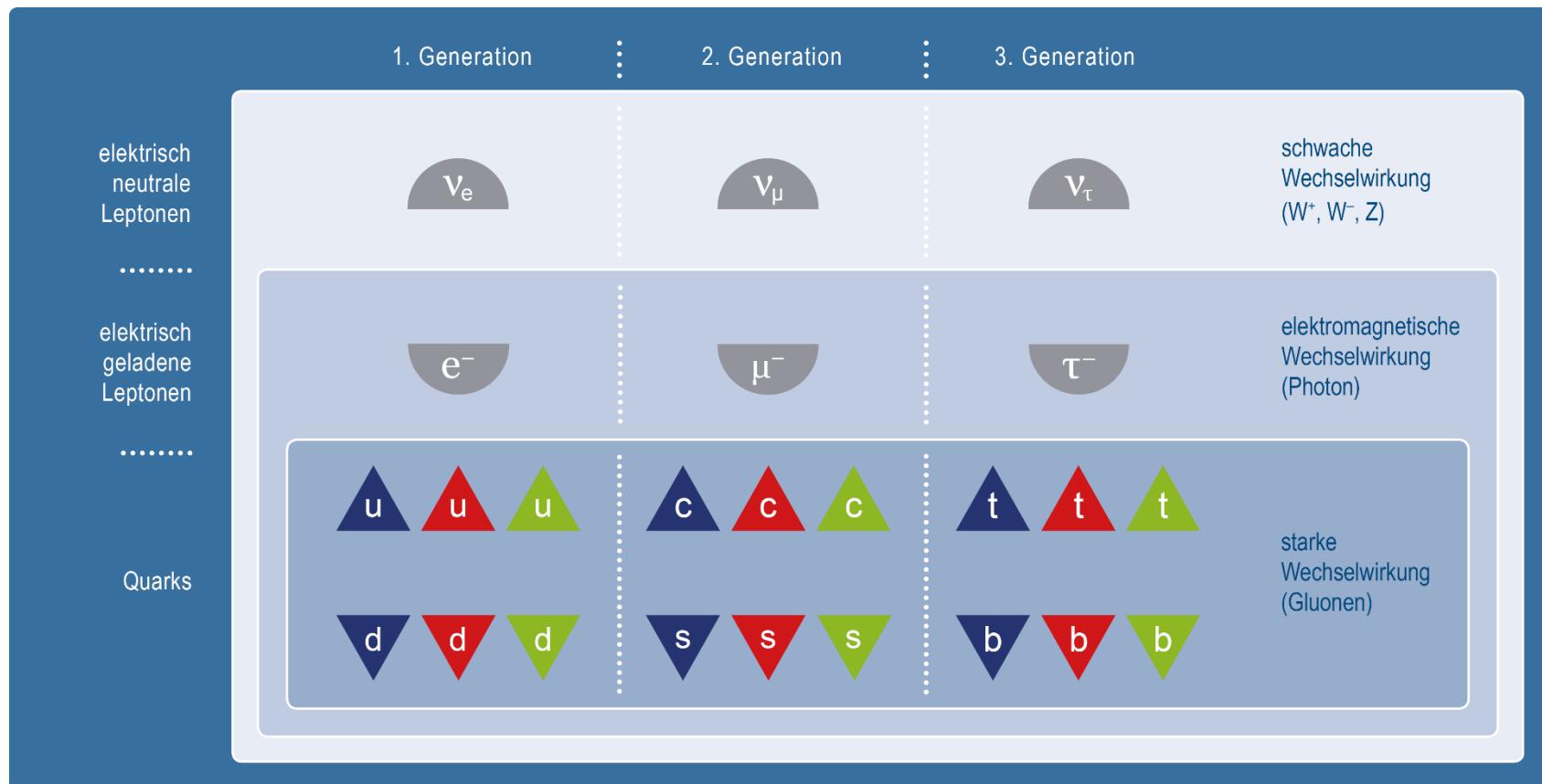
„Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- Uns umgebende Materie besteht aus Up-und Down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos
- 1936: Entdeckung des Myons
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
 - 200 Mal schwerer als das Elektron (Schwere „Kopie“ des Elektrons)
- 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons

„Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
 - Von jedem der leichten Materienteilchen (u, d, e^-, ν_e) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?

Anordnung von Teilchen in Generationen



Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

- ▶ Analogie zum Periodensystem der Elemente (PSE) in der Chemie
- ▶ Drehen der Abbildung um 90° im Uhrzeigersinn
 - Teilchen sind nach Ladungen geordnet analog den chemischen Elementen in die Hauptgruppen
 - Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigen geordnet
 - Analog dazu sind auch die Elementarteilchen in den um 90° gedrehten Darstellungen bezüglich der drei Generationen aufsteigend von oben nach unten nach ihrer Masse geordnet

Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

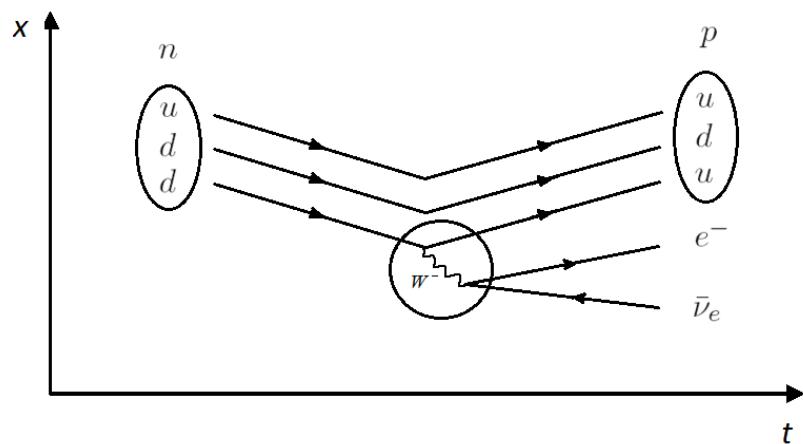
| 1A | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 | 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 | 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 | 396 | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 | 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 | 438 | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 | 459 | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 | 480 | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 | 501 | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 | 510 | 511 | 512 | 513 | 514 | 515 | 516 | 517 | 518 | 519 | 520 | 521 | 522 | 523 | 524 | 525 | 526 | 527 | 528 | 529 | 530 | 531 | 532 | 533 | 534 | 535 | 536 | 537 | 538 | 539 | 540 | 541 | 542 | 543 | 544 | 545 | 546 | 547 | 548 | 549 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 550 | 551 | 552 | 553 | 554 | 555 | 556 | 557 | 558 | 559 | 560 | 561 | 562 | 563 | 564 | 565 | 566 | 567 | 568 | 569 | 570 | 571 | 572 | 573 | 574 | 575 | 576 | 577 | 578 | 579 | 580 | 581 | 582 | 583 | 584 | 585 | 586 | 587 | 588 | 589 | 590 | 591 | 592 | 593 | 594 | 595 | 596 | 597 | 598 | 599 | 600 | 601 | 602 | 603 | 604 | 605 | 606 | 607 | 608 | 609 | 610 | 611 | 612 | 613 | 614 | 615 | 616 | 617 | 618 | 619 | 620 | 621 | 622 | 623 | 624 | 625 | 626 | 627 | 628 | 629 | 630 | 631 | 632 | 633 | 634 | 635 | 636 | 637 | 638 | 639 | 640 | 641 | 642 | 643 | 644 | 645 | 646 | 647 | 648 | 649 | 650 | 651 | 652 | 653 | 654 | 655 | 656 | 657 | 658 | 659 | 660 | 661 | 662 | 663 | 664 | 665 | 666 | 667 | 668 | 669 | 670 | 671 | 672 | 673 | 674 | 675 | 676 | 677 | 678 | 679 | 680 | 681 | 682 | 683 | 684 | 685 | 686 | 687 | 688 | 689 | 690 | 691 | 692 | 693 | 694 | 695 | 696 | 697 | 698 | 699 | 700 | 701 | 702 | 703 | 704 | 705 | 706 | 707 | 708 | 709 | 710 | 711 | 712 | 713 | 714 | 715 | 716 | 717 | 718 | 719 | 720 | 721 | 722 | 723 | 724 | 725 | 726 | 727 | 728 | 729 | 730 | 731 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 730 | 731 | 732 | 733 | 734 | 735 | 736 | 737 | 738 | 739 | 740 | 741 | 742 | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 | 750 | 751 | 752 | 753 | 754 | 755 | 756 | 757 | 758 | 759 | 760 | 761 | 762 | 763 | 764 | 765 | 766 | 767 | 768 | 769 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 770 | 771 | 772 | 773 | 774 | 775 | 776 | 777 | 778 | 779 | 780 | 781 | 782 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 | 789 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | 796 | 797 | 798 | 799 | 790 | 791 | 792 | 793 | 794 | 795 | 796 | 797 | 798 | 799 | 800 | 801 | 802 | 803 | 804 | 805 | 806 | 807 | 808 | 809 | 800 | 801 | 802 | 803 | 804 | 805 | 806 | 807 | 808 | 809 | 810 | 811 | 812 | 813 | 814 | 815 | 816 | 817 | 818 | 819 | 810 | 811 | 812 | 813 | 814 | 815 | 816 | 817 | 818 | 819 | 820 | 821 | 822 | 823 | 824 | 825 | 826 | 827 | 828 | 829 | 820 | 821 | 822 | 823 | 824 | 825 | 826 | 827 | 828 | 829 | 830 | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 | 839 | 830 | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 | 839 | 840 | 841 | 842 | 843 | 844 | 845 | 846 | 847 | 848 | 849 | 840 | 841 | 842 | 843 | 844 | 845 | 846 | 847 | 848 | 849 | 850 | 851 | 852 | 853 | 854 | 855 | 856 | 857 | 858 | 859 | 850 | 851 | 852 | 853 | 854 | 855 | 856 | 857 | 858 | 859 | 860 | 861 | 862 | 863 | 864 | 865 | 866 | 867 | 868 | 869 | 860 | 861 | 862 | 863 | 864 | 865 | 866 | 867 | 868 | 869 | 870 | 871 | 872 | 873 | 874 | 875 | 876 | 877 | 878 | 879 | 870 | 871 | 872 | 873 | 874 | 875 | 876 | 877 | 878 | 879 | 880 | 881 | 882 | 883 | 884 | 885 | 886 | 887 | 888 | 889 | 880 | 881 | 882 | 883 | 884 | 885 | 886 | 887 | 888 | 889 | 890 | 891 | 892 | 893 | 894 | 895 | 896 | 897 | 898 | 899 | 890 | 891 | 892 | 893 | 894 | 895 | 896 | 897 | 898 | 899 | 900 | 901 | 902 | 903 | 904 | 905 | 906 | 907 | 908 | 909 | 900 | 901 | 902 | 903 | 904 | 905 | 906 | 907 | 908 | 909 | 910 | 911 | 912 | 913 | 914 | 915 | 916 | 917 | 918 | 919 | 910 | 911 | 912 | 913 | 914 | 915 | 916 | 917 | 918 | 919 | 920 | 921 | 922 | 923 | 924 | 925 | 926 | 927 | 928 | 929 | 920 | 921 | 922 | 923 | 924 | 925 | 926 | 927 | 928 | 929 | 930 | 931 | 932 | 933 | 934 | 935 | 936 | 937 | 938 | 939 | 930 | 931 | 932 | 933 | 934 | 935 | 936 | 937 | 938 | 939 | 940 | 941 | 942 | 943 | 944 | 945 | 946 | 947 | 948 | 949 | 940 | 941 | 942 | 943 | 944 | 945 | 946 | 947 | 948 | 949 | 950 | 951 | 952 | 953 | 954 | 955 | 956 | 957 | 958 | 959 | 950 | 951 | 952 | 953 | 954 | 955 | 956 | 957 | 958 | 959 | 960 | 961 | 962 | 963 | 964 | 965 | 966 | 967 | 968 | 969 | 960 | 961 | 962 | 963 | 964 | 965 | 966 | 967 | 968 | 969 | 970 | 971 | 972 | 973 | 974 | 975 | 976 | 977 | 978 | 979 | 970 | 971 | 972 | 973 | 974 | 975 | 976 | 977 | 978 | 979 | 980 | 981 | 982 | 983 | 984 | 985 | 986 | 987 | 988 | 989 | 980 | 981 | 982 | 983 | 984 | 985 | 986 | 987 | 988 | 989 | 990 | 991 | 992 | 993 | 994 | 995 | 996 | 997 | 998 | 999 | 990 | 991 | 992 | 993 | 994 | 995 | 996 | 997 | 998 | 999 | 1000 | 1001 | 1002 | 1003 | 1004 | 1005 | 1006 | 1007 | 1008 | 1009 | 1000 | 1001 | 1002 | 1003 | 1004 | 1005 | 1006 | 1007 | 1008 | 1009 | 1010 | 1011 | 1012 | 1013 | 1014 | 1015 | 1016 | 1017 | 1018 | 1019 | 1010 | 1011 | 1012 | 1013 | 1014 | 1015 | 1016 | 1017 | 1018 | 1019 | 1020 | 1021 | 1022 | 1023 | 1024 | 1025 | 1026 | 1027 | 1028 | 1029 | 1020 | 1021 | 1022 | 1023 | 1024 | 1025 | 1026 | 1027 | 1028 | 1029 | 1030 | 1031 | 1032 | 1033 | 1034 | 1035 | 1036 | 1037 | 1038 | 1039 | 1030 | 1031 | 1032 | 1033 | 1034 | 1035 | 1036 | 1037 | 1038 | 1039 | 1040 | 1041 | 1042 | 1043 | 1044 | 1045 | 1046 | 1047 | 1048 | 1049 | 1040 | 1041 | 1042 | 1043 | 1044 | 1045 | 1046 | 1047 | 1048 | 1049 | 1050 | 1051 | 1052 | 1053 | 1054 | 1055 | 1056 | 1057 | 1058 | 1059 | 1050 | 1051 | 1052 | 1053 | 1054 | 1055 | 1056 | 1057 | 1058 | 1059 | 1060 | 1061 | 1062 | 1063 | 1064 | 1065 | 1066 | 1067 | 1068 | 1069 | 1060 | 1061 | 1062 | 1063 | 1064 | 1065 | 1066 | 1067 | 1068 | 1069 | 1070 | 1071 | 1072 | 1073 | 1074 | 1075 | 1076 | 1077 | 1078 | 1079 | 1070 | 1071 | 1072 | 1073 | 1074 | 1075 | 1076 | 1077 | 1078 | 1079 | 1080 | 1081 | 1082 | 1083 | 1084 | 1085 | 1086 | 1087 | 1088 | 1089 | 1080 | 1081 | 1082 | 1083 | 1084 | 1085 | 1086 | 1087 | 1088 | 1089 | 1090 | 1091 | 1092 | 1093 | 1094 | 1095 | 1096 | 1097 | 1098 | 1099 | 1090 | 1091 | 1092 | 1093 | 1094 | 1095 | 1096 | 1097 | 1098 | 1099 | 1100 | 1101 | 1102 | 1103 | 1104 | 1105 | 1106 | 1107 | 1108 | 1109 | 1100 | 1101 | 1102 | 1103 | 1104 | 1105 | 1106 | 1107 | 1108 | 1109 | 1110 | 1111 | 1112 | 1113 | 1114 | 1115 | 1116 | 1117 | 1118 | 1119 | 1110 | 1111 | 1112 | 1113 | 1114 | 1115 | 1116 | 1117 | 1118 | 1119 | 1120 | 1121 | 1122 | 1123 | 1124 | 1125 | 1126 | 1127 | 1128 | 1129 | 1120 | 1121 | 1122 | 1123 | 1124 | 1125 | 1126 | 1127 | 1128 |
<th
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

- Nur bestimmte Paare von Teilchen beteiligt
- Unterscheiden sich in schwacher Ladungszahl I und in elektrischer Ladungszahl Z immer genau um Betrag 1
- **Dupletts** bezüglich der schwachen Ladung

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{matrix} I = +1/2 \\ I = -1/2 \end{matrix} \begin{matrix} Z = +2/3 \\ Z = -1/3 \end{matrix}$$



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

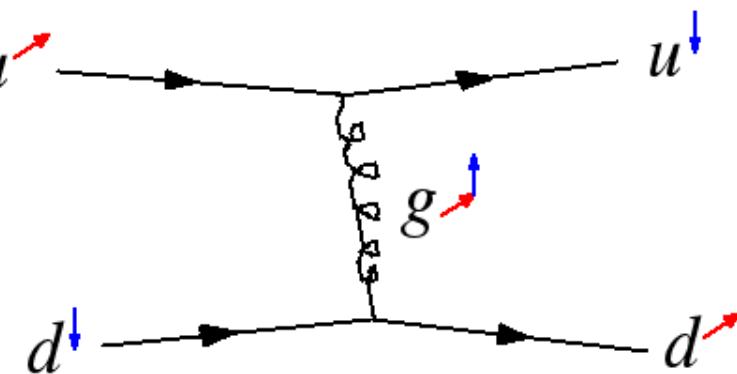
- Drei Up-Quarks mit Farbladungsvektoren \uparrow , \nearrow , oder \downarrow haben alle schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$, Down-Quarks hingegen $I = -\frac{1}{2}$
- $\begin{pmatrix} u & \uparrow \\ d & \uparrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u & \nearrow \\ d & \nearrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u & \downarrow \\ d & \downarrow \end{pmatrix}$

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Starke Wechselwirkung

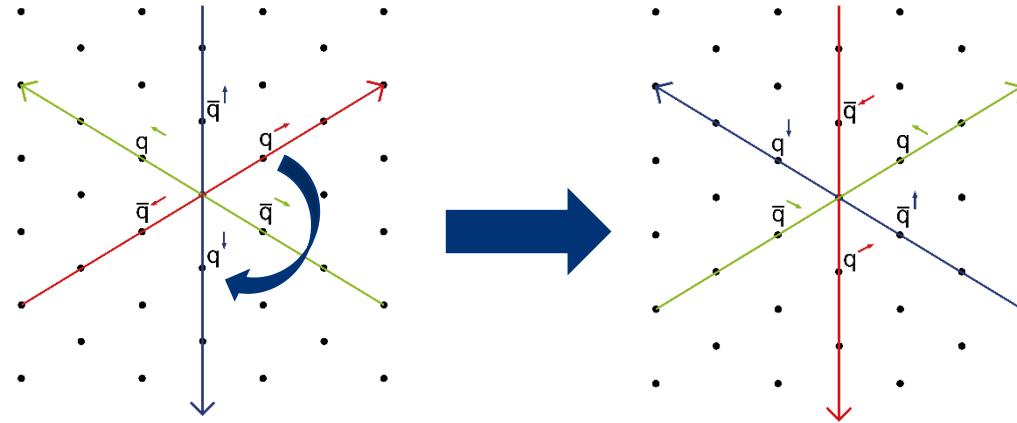
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:
Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

► $(u^{\uparrow} \ u^{\uparrow} \ u^{\downarrow})$

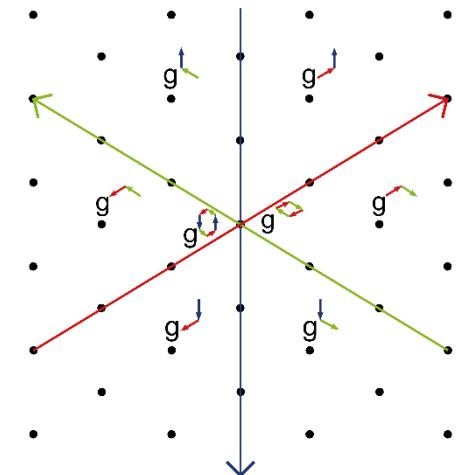
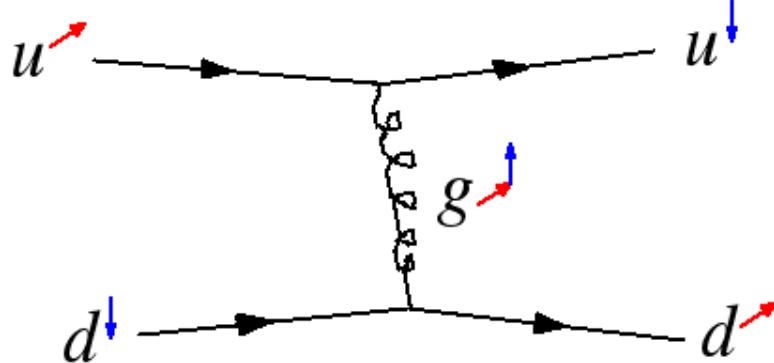


Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

- Eine Rotation (~Eichsymmetrie) eines Quark-Multipletts



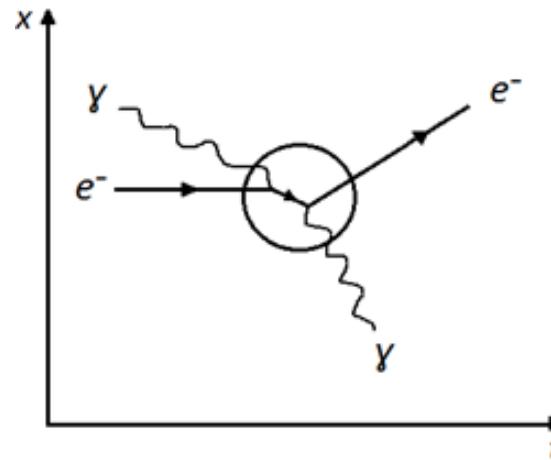
- hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

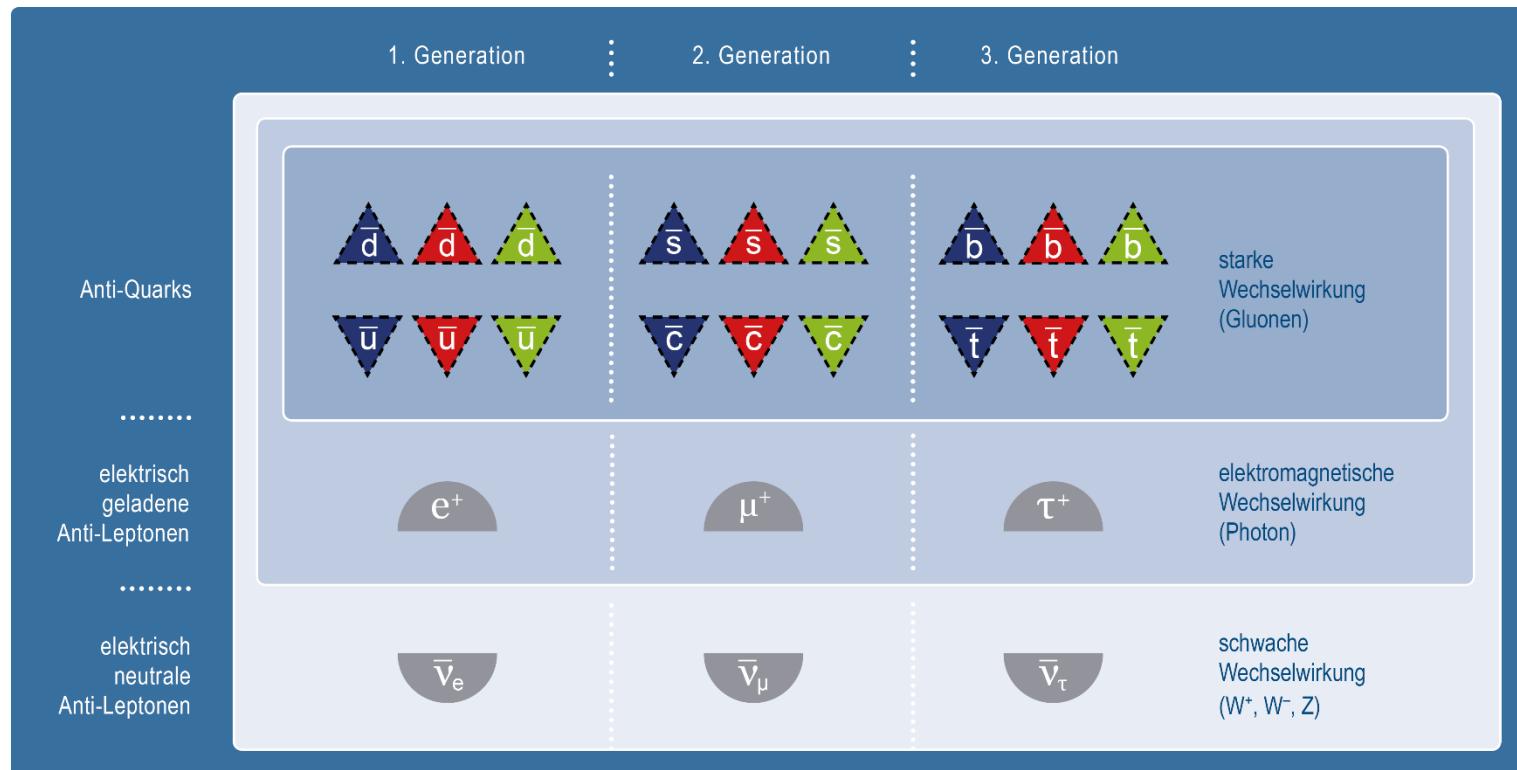
► Elektromagnetische Wechselwirkung

- Photonen besitzen keine Ladungen: durch elektromagnetische Wechselwirkung können die Ladungen eines Teilchens nicht geändert werden
- Alle Teilchen sind **Singulett** bezüglich der elektrischen Ladung



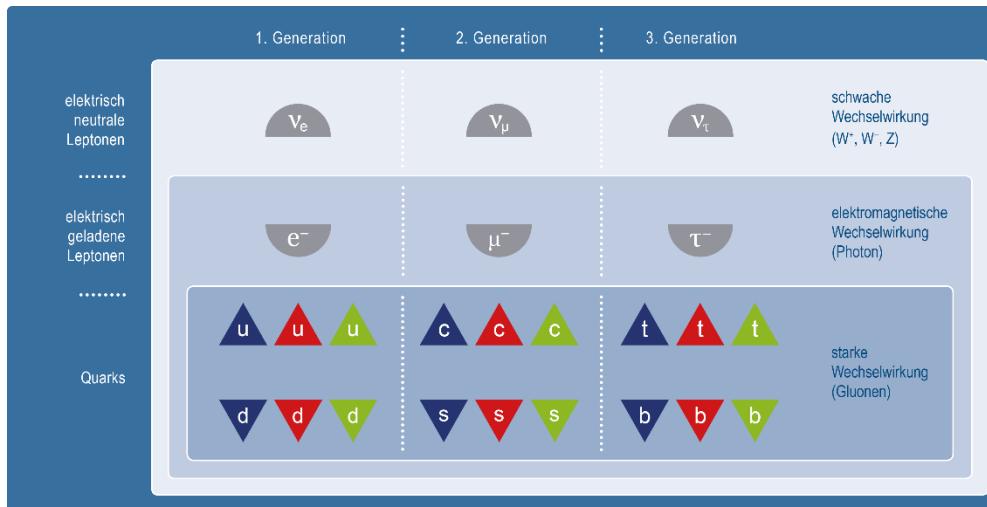
Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

- Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Teilchen, mit gleicher Masse jedoch entgegengesetzten Ladungen
- Anti-Materienteilchen ebenfalls in drei Generationen



Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Experimentell findet man (nicht vorhersagbar!)
 - Dpletts der schwachen Wechselwirkung
 - Tripletts der starken Wechselwirkung
 - Singuletts der elektromagnetischen Wechselwirkung



- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich

Mögliche experimentelle Diskussionspunkte für den Unterricht

Woher weiß man,:

- ▶ dass es Quarks gibt?
- ▶ dass es drei verschiedenen Farbladungen gibt?
- ▶ dass Farbladungen vektoriellen Charakter haben?
- ▶ dass die Leptonenuniversalität gilt?
- ▶ dass es drei Arten leichter Neutrinos gibt
- ▶ Welche Werte die Kopplungsparameter der fundamentalen Wechselwirkungen haben



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

www.teilchenwelt.de

SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLITUNG



GEFÖRDERT VOM



Diskussion / Fragen





Unterrichts-Sequenzplanung

Gruppenarbeit

Gruppenauftrag

► Sequenzplanung

- Planen Sie eine Unterrichtseinheit mit einem ausgewählten teilchenphysikalischen Schwerpunkt.
- Halten Sie die groben Lernziele der UE fest.
- Geben Sie an, welches Vorwissen benötigt wird.

► Präsentation der Ergebnisse

- Ergebnispräsentation pro Gruppe vor Plenum (morgen)
- Pro Gruppe ca. 5 min Präsentation und 10 min Diskussion

Gruppeneinteilung

Gruppe 1:
Konzept der Wechselwirkungen

Gruppe 2:
Ladungen als Ordnungsprinzip

Gruppe 3:
Darstellen von Wechselwirkungen