



Fachvortrag

Das Standardmodell der Teilchenphysik im Schulunterricht

Elementarteilchenphysik im neuen Rahmenlehrplan in NRW

Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik Das Inhaltsfeld *Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik* beinhaltet den Aufbau des Atoms, seiner Hülle und seines Kerns sowie den **Aufbau der Materie im Kleinsten nach dem sogenannten Standardmodell**. Inhalte sind außerdem ionisierende Strahlung und radioaktiver Zerfall von Atomkernen sowie Kernumwandlungen durch Kernspaltung und Kernfusion. Die Behandlung von Atom- und Kernphysik bietet einerseits einen Einblick in den Aufbau der Materie unter dem Aspekt des Wandels historischer Atommodelle und liefert andererseits Entscheidungsgrundlagen für die Einschätzung des Für und Wider im Umgang mit ionisierender Strahlung und der Nutzung von Kernenergie.

Quelle: http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOST_Physik.pdf, 15.02.2016

Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik

Inhaltliche Schwerpunkte	Mögliche Kontexte
<p>Atomaufbau</p> <p>Ionisierende Strahlung</p> <p>Radioaktiver Zerfall</p> <p>Kernspaltung und Kernfusion</p> <p>Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen</p>	<p>Geschichte der Atommodelle</p> <p>Lichtquellen und ihr Licht</p> <p>Physik in der Medizin (Bildgebende Verfahren, Radiologie)</p> <p>(Erdgeschichtliche) Altersbestimmungen</p> <p>Energiegewinnung durch nukleare Prozesse</p> <p>Forschung an Teilchenbeschleunigern</p>
<p>Basiskonzept Wechselwirkung</p> <p>Basiskonzept Energie</p> <p>Basiskonzept Struktur der Materie</p>	<p>Kernkräfte</p> <p>Kettenreaktion</p> <p>Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen</p> <p>Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept</p> <p>Linienpektren</p> <p>Energiequantelung der Hüllelektronen</p> <p>Dosimetrie</p> <p>Bindungsenergie</p> <p>Äquivalenz von Masse und Energie</p> <p>Kern-Hülle-Modell</p> <p>Bohr'sche Postulate</p> <p>Strahlungsarten</p> <p>Zerfallsprozesse</p> <p>Massendefekt</p> <p>Kernbausteine und Elementarteilchen</p>

Quelle: http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOST_Physik.pdf, 15.02.2016

Was ist Physik?



- ▶ Physik versucht die
Wirklichkeit / Welt
zu beschreiben

- ▶ Am Besten:
Möglichst einfach



Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

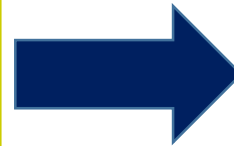
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung 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,
...
...



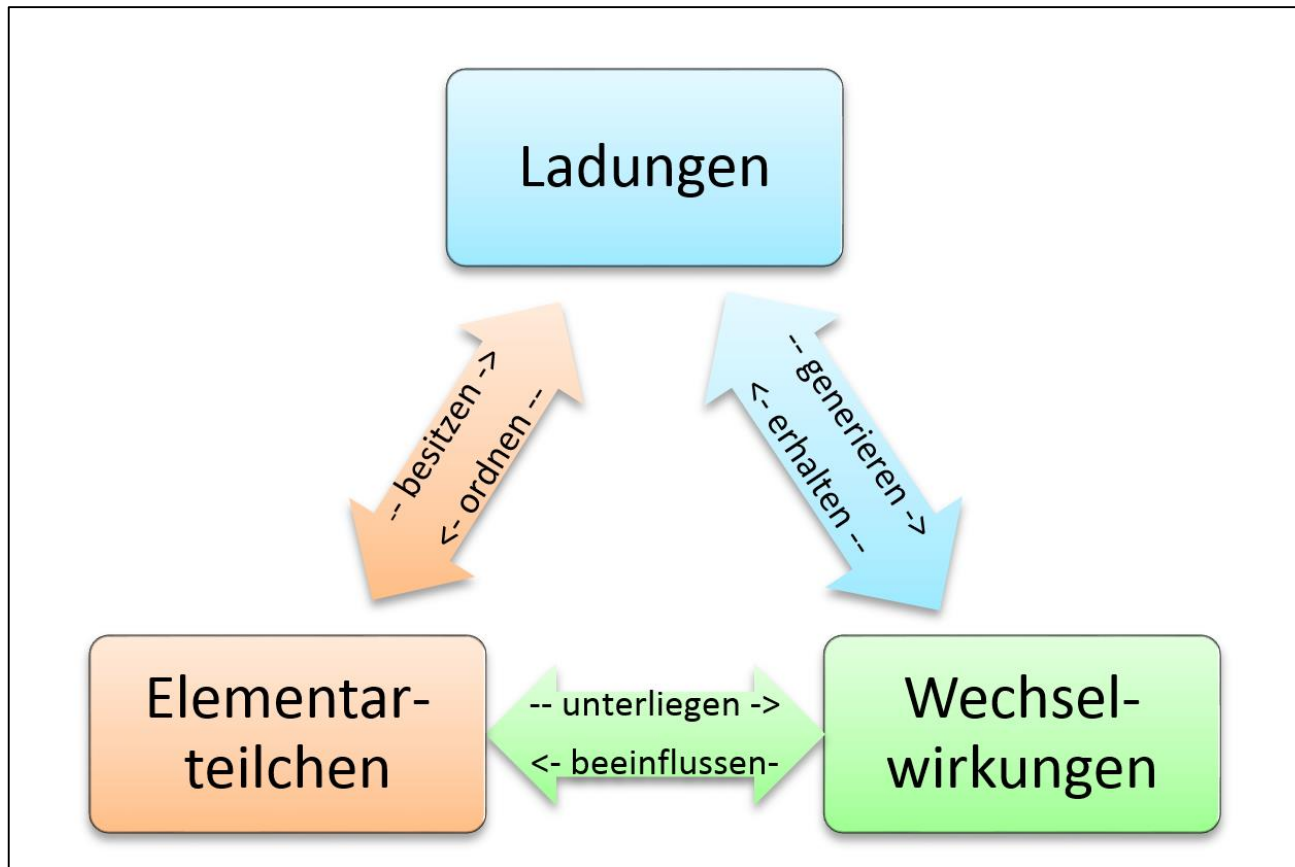
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**



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 Basiskonzepte 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??

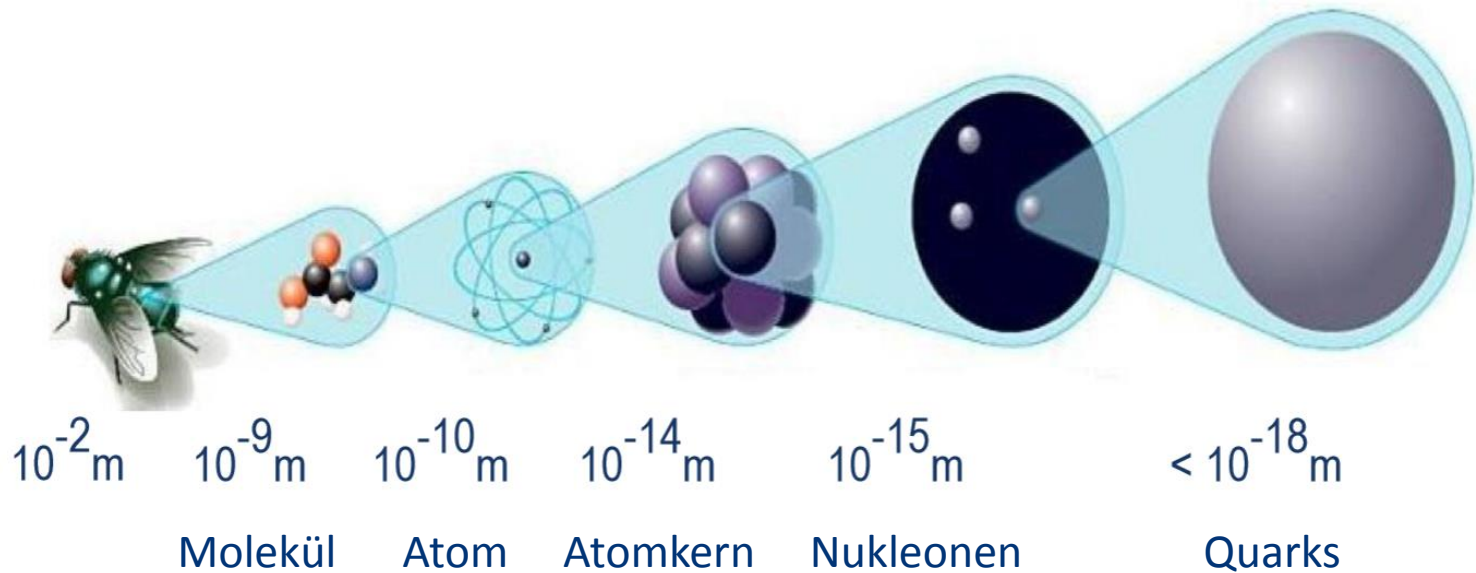
- Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
- Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
- Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen**

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	7 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
name	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson	

Gauge bosons

Einschub: Größenordnungen in der Teilchenphysik



Einschub: Elektronenvolt

- 1 eV ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

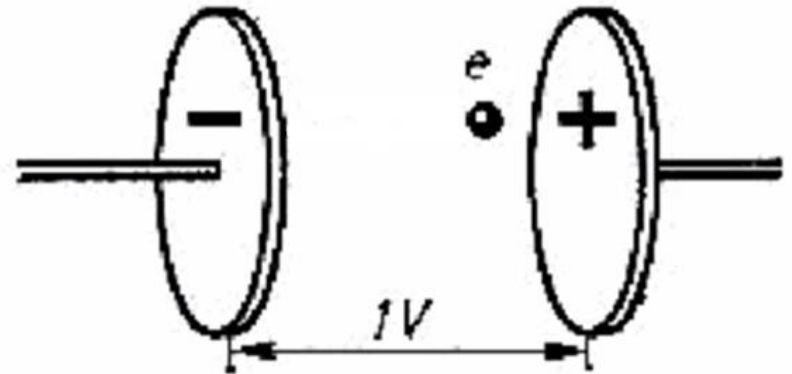
$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

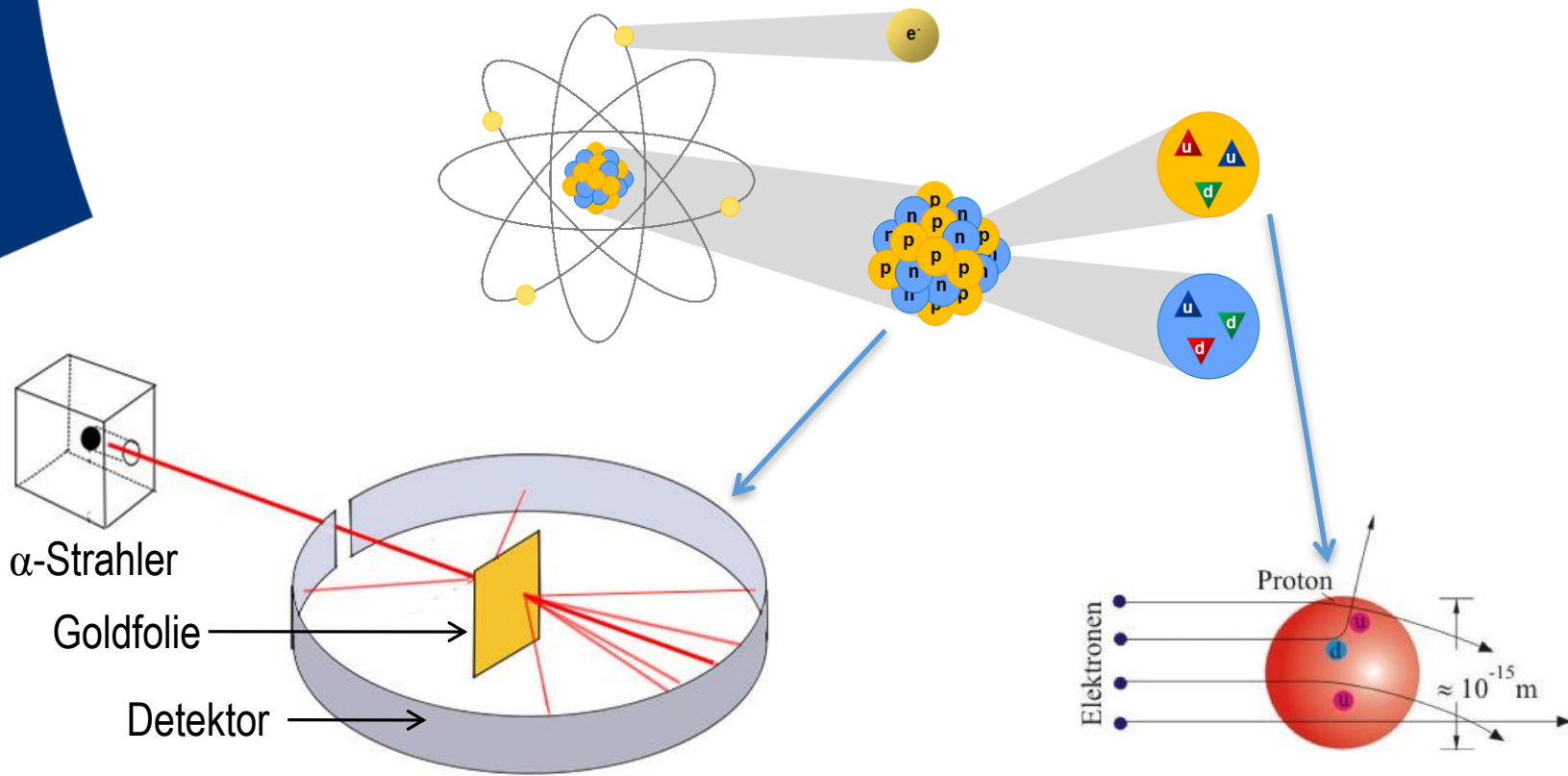
- Wegen $E=mc^2$ können Massen in eV/c^2 angegeben werden!

(c: Lichtgeschwindigkeit)

- Proton: $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$



Einschub: Experimenteller Nachweis von Quarks



Rutherford-Streuexperiment (1911)
Streuung von α -Teilchen an Goldatomen -
--> Atomkern

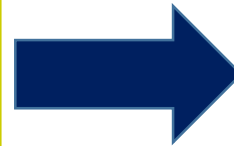
Experiment am SLAC (1969)
Streuung von Elektronen an Protonen
--> Quarks

Reduktion

Basiskonzept
Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

Hangabtriebskraft,
Wasserkraft,
Reibungskraft,
Muskelkraft
Gasdruck,
Radiowellen,
Radioaktive Umwandlungen,
...



**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

Basiskonzept Wechselwirkung

**Basiskonzept
Wechselwirkung**
= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

▶ Umfasst die Phänomene

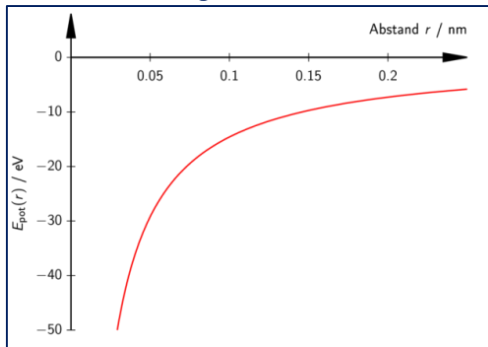
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. β -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

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

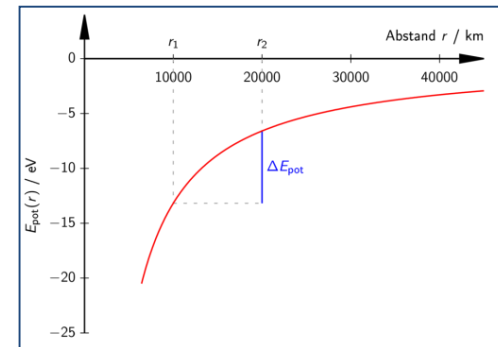
▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

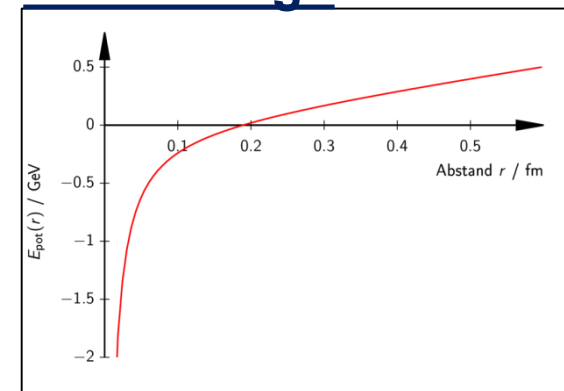


► Gravitation



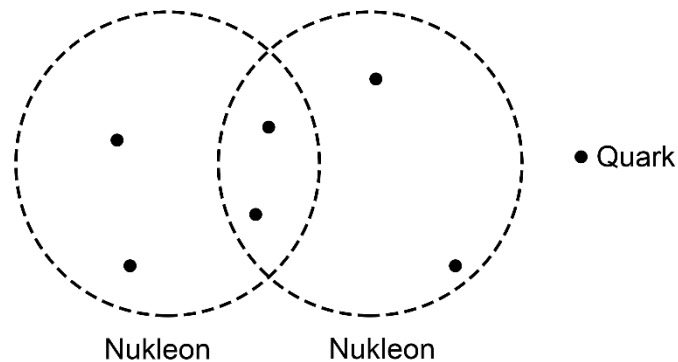
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ($r \sim 1$ fm)

► Einführung: starke WW



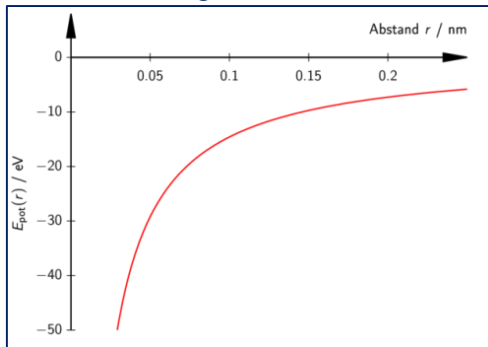
Anknüpfungsmöglichkeit an Bekanntes:

- ▶ Zusammenhalt von Nucleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
- ▶ Zwei Nucleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

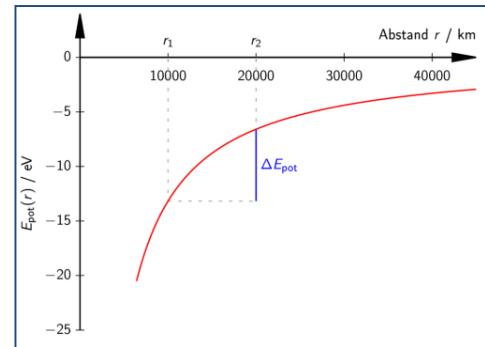


Die vierte fundamentale Wechselwirkung

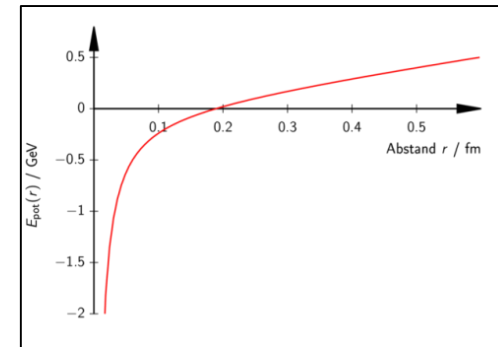
▶ Elektromagnetische WW



▶ Gravitation

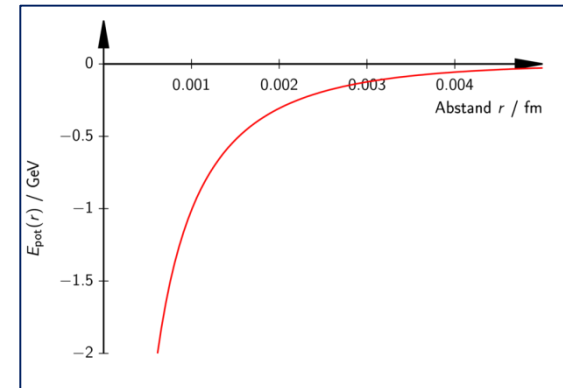


▶ starke WW



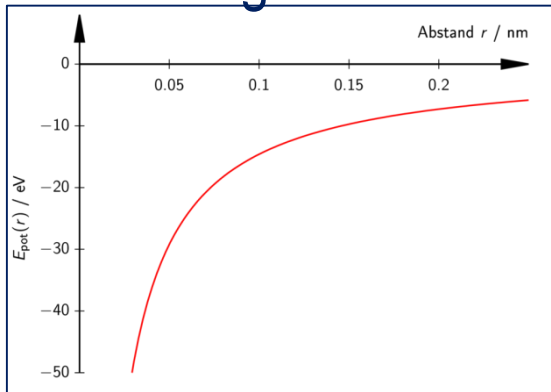
▶ Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren? ▶ Einführung: schwache WW

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

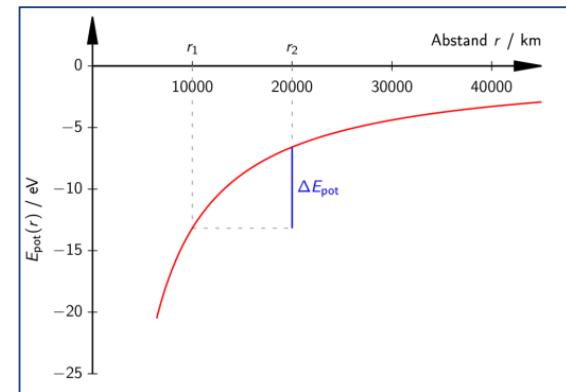


Vergleich der potenziellen Energien

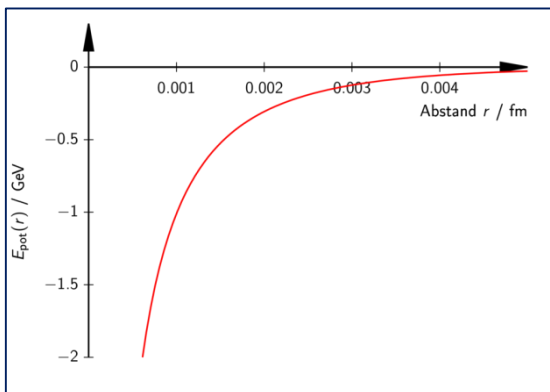
▶ Elektromagnetische WW



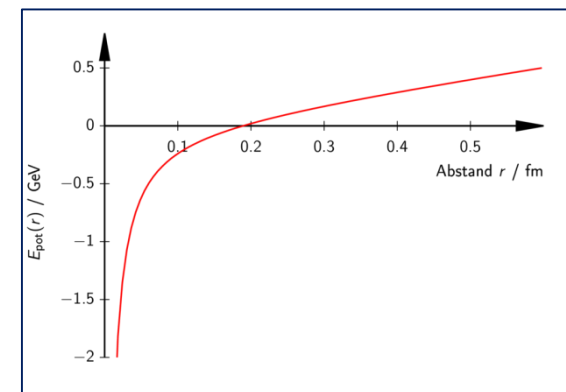
▶ Gravitation



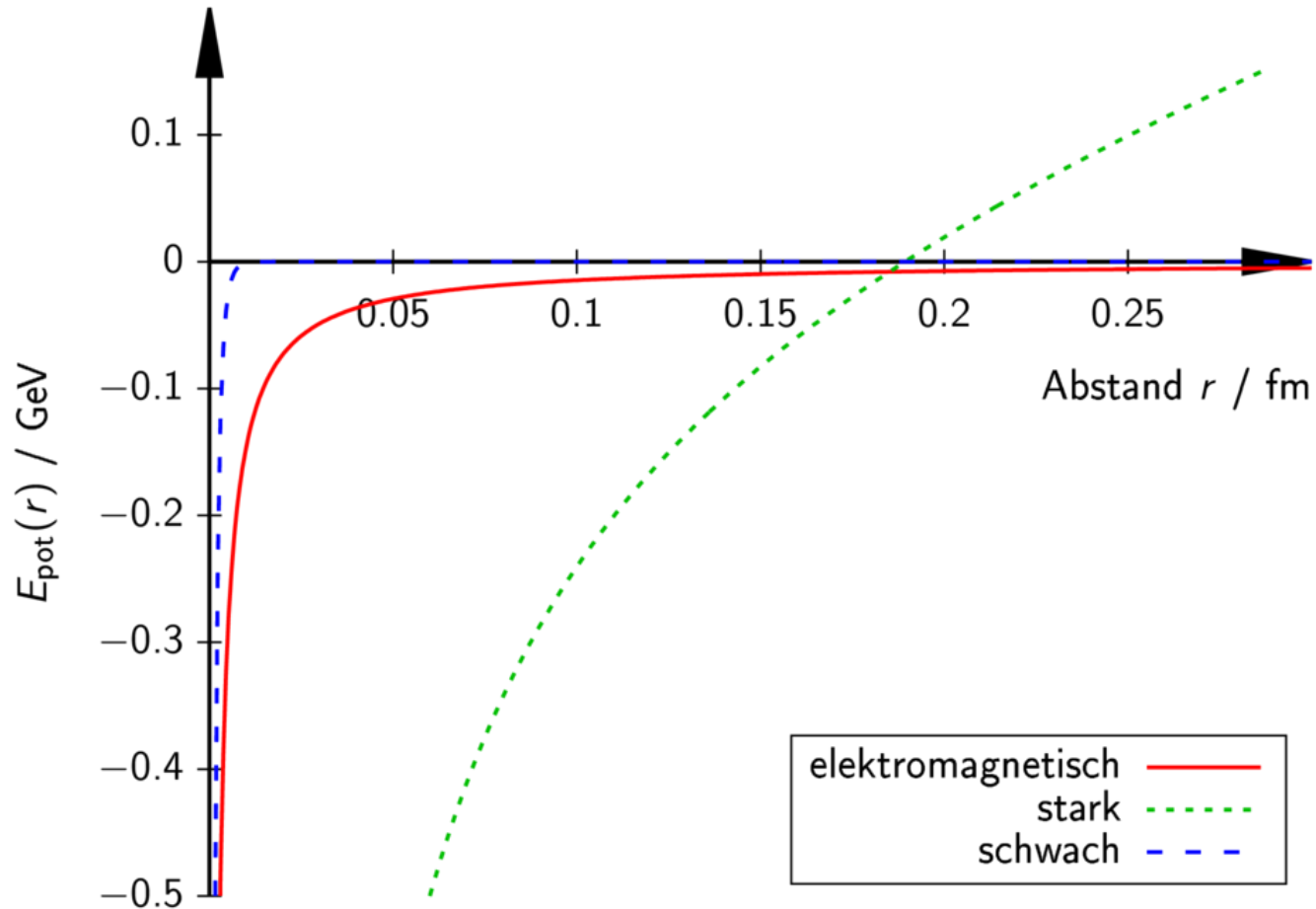
▶ schwache WW



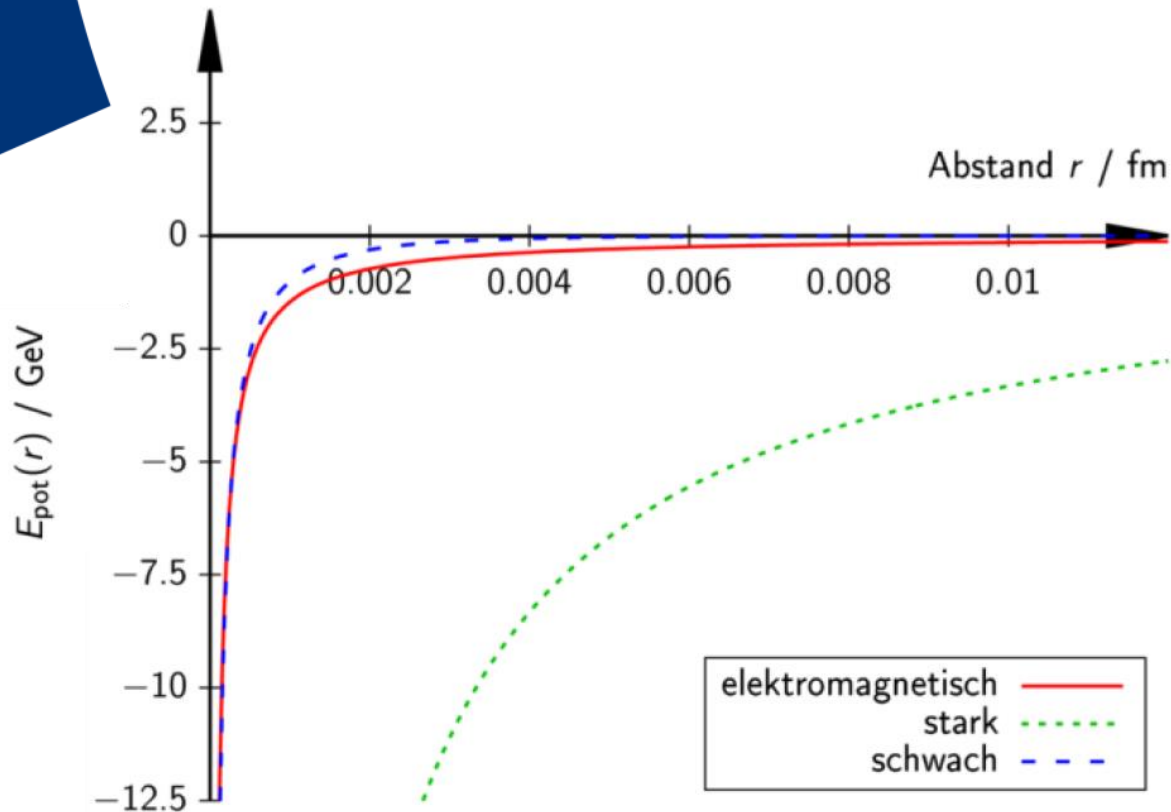
▶ starke WW



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

Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

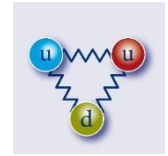
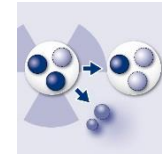
- Elektrische Ladung

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische
Ladungszahl

Elementarladung

Erweiterung: Konzept der Ladung



► Coulombsches Gesetz

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

- 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

$$\text{► } \alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}(?)$$

Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

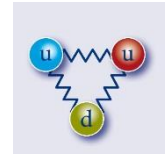
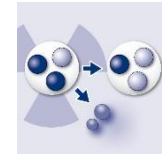
- Elektrische Ladung $Q = Z \cdot e$

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

elektrische Ladungszahl

Z

schwache Ladungszahl

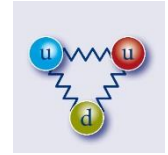
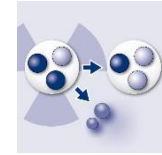
I

starker Farbladungsvektor

\vec{C}

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

Und Gravitation?



► Ladung und Kopplungsparameter der Gravitation quantenmechanisch (noch) nicht definierbar

► Praktikabel: zw. Teilchen1 und Teilchen2: $\alpha_{grav}^{1,2} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{\hbar c}$

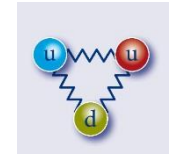
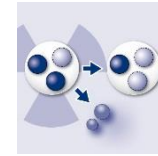
► Beispiel: α_{grav} zwischen Proton (p) und Elektron (e)

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

- 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?

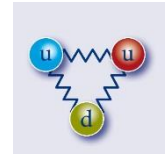
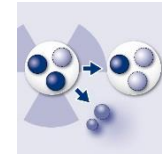
► Schulniveau:

- 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



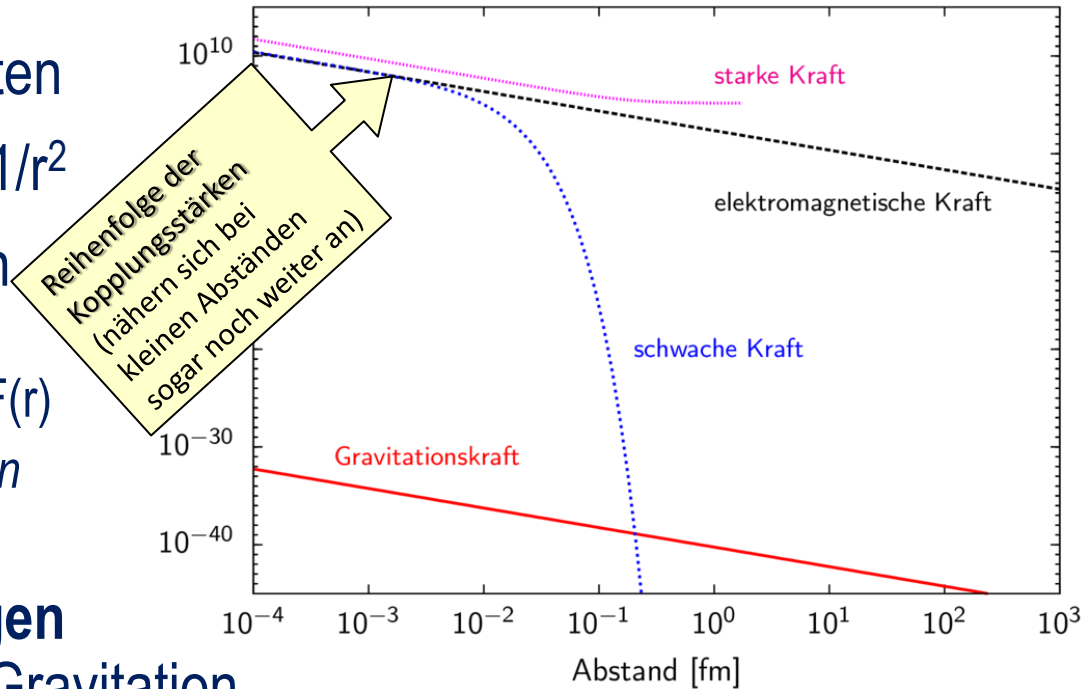
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

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

Überblick

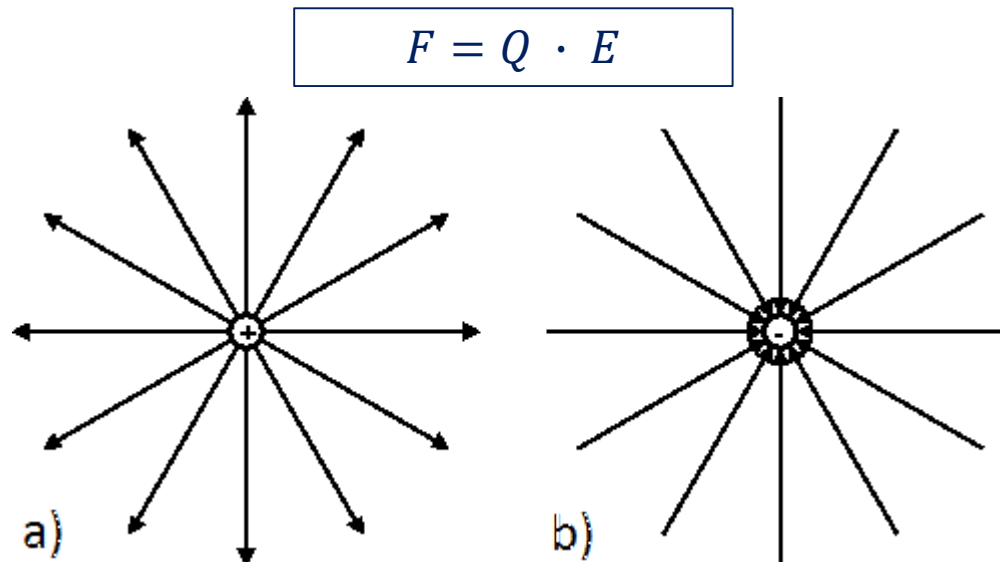
- ▶ Verschiedene Reichweiten
- ▶ Für kleine Abstände $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reihenfolge der Stärken
 - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen $F(r)$
 - Kann nur für WWirkungen definiert werden: α !
- ▶ Stärken aller **WWirkungen** sehr ähnlich, außer für Gravitation



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	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
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



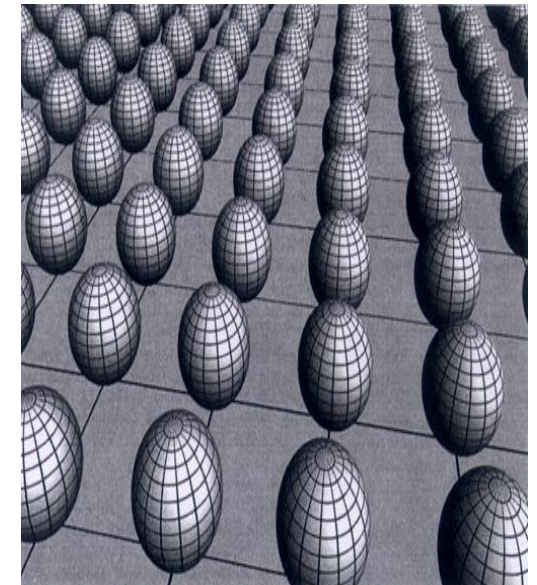
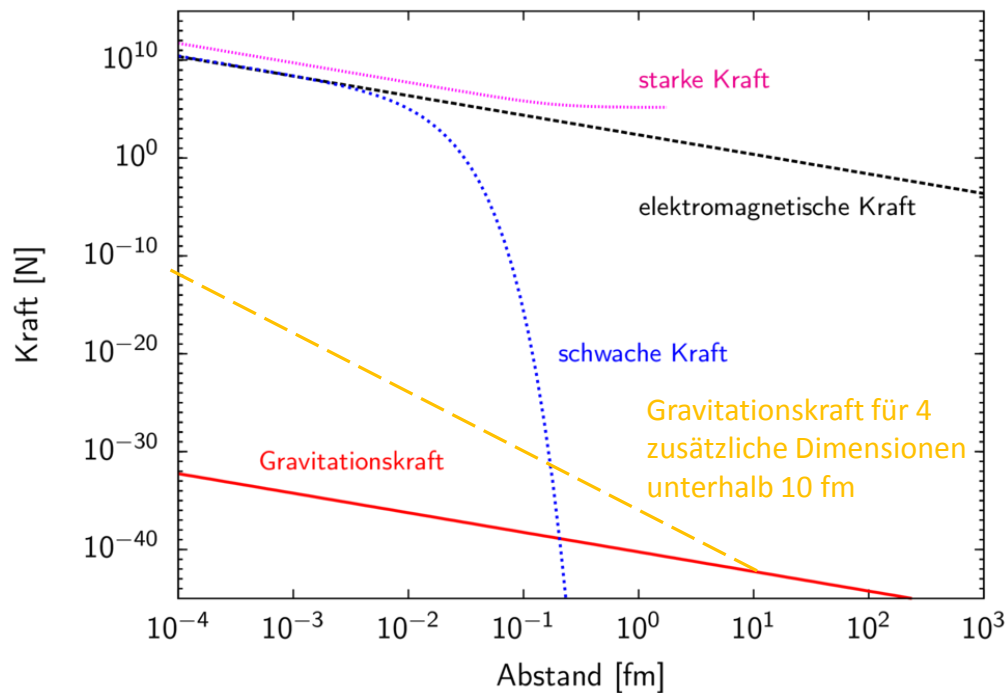
$$A = 4\pi r^2$$

↓

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

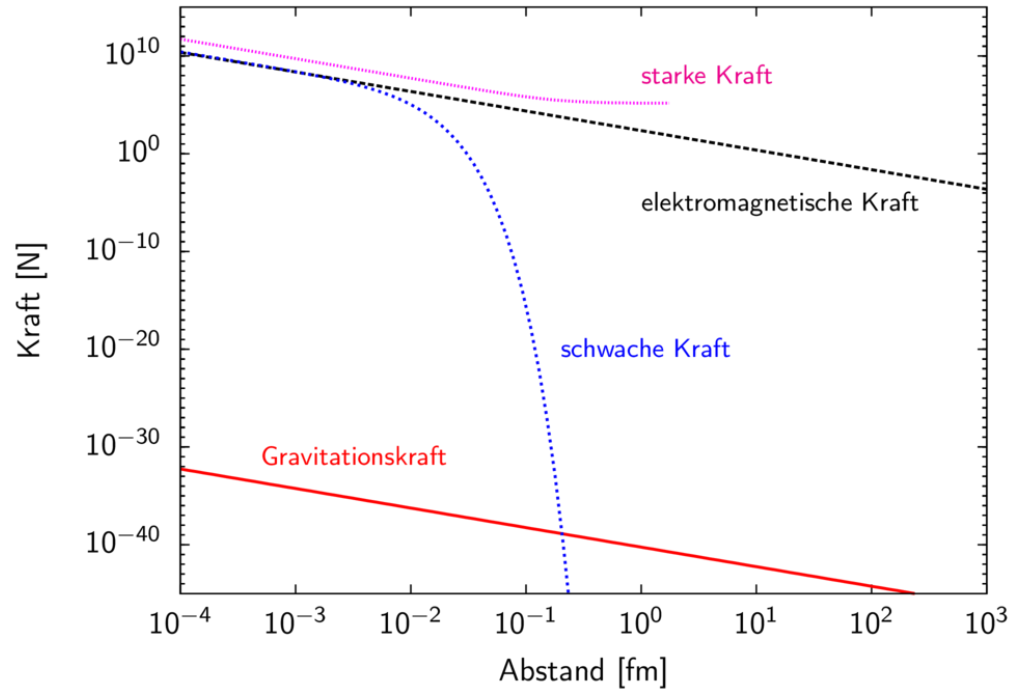
Spekulationen

- ▶ Zusätzliche Dim für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



Reichweiten der Kräfte

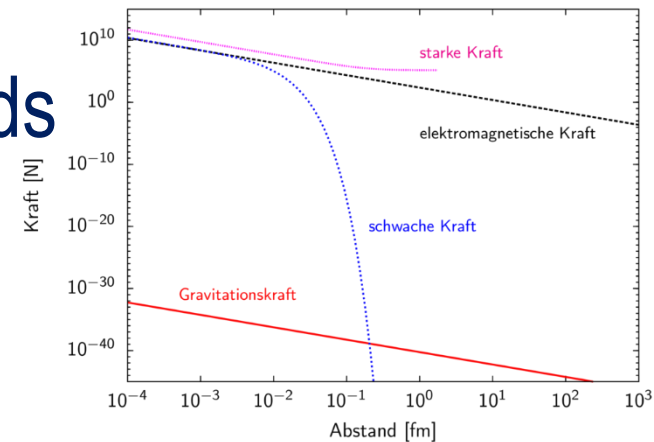
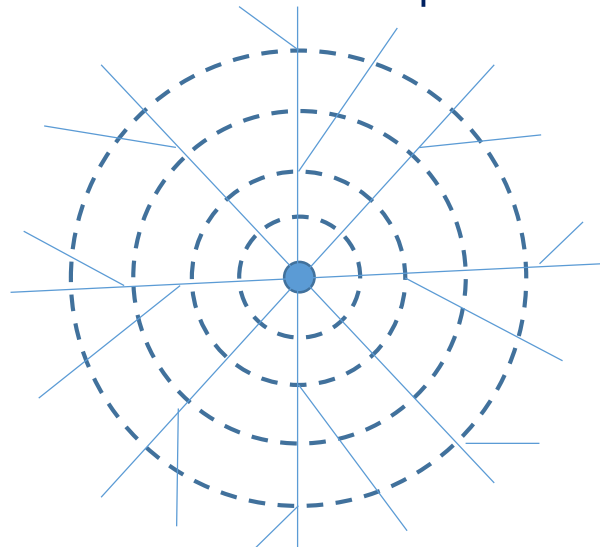
- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



Wechselwirkung	Kraftgesetz	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	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2} + k$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}} \cdot (1 + \frac{r}{\lambda_w})$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

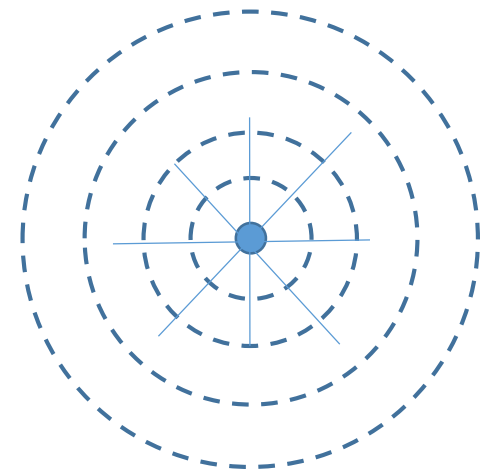
Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

- ▶ 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“



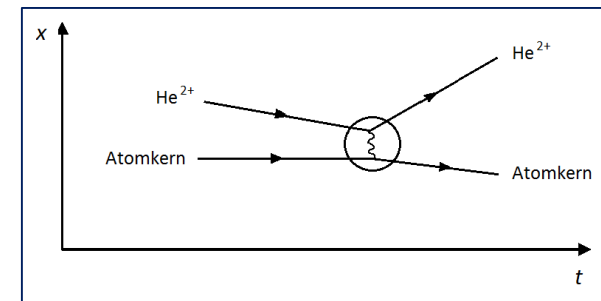
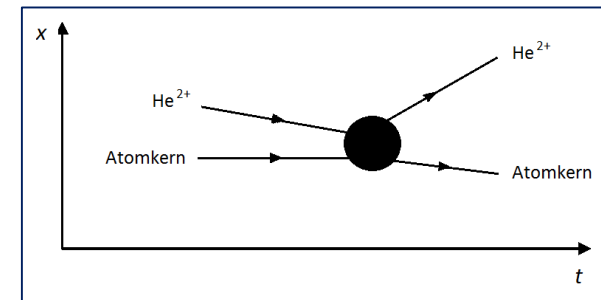
Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► Makroskopisch:

- Feldliniendichte --> 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



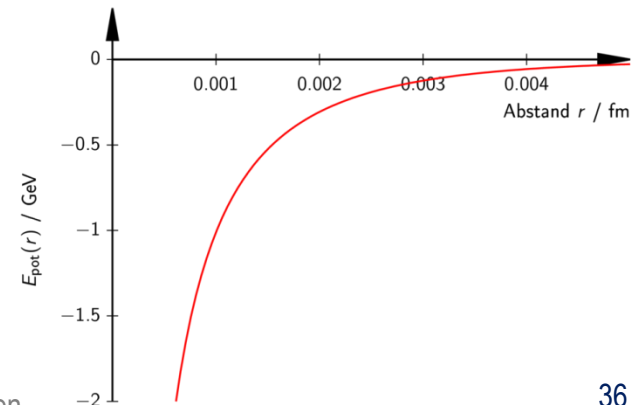
Endliche Reichweiten

► 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

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

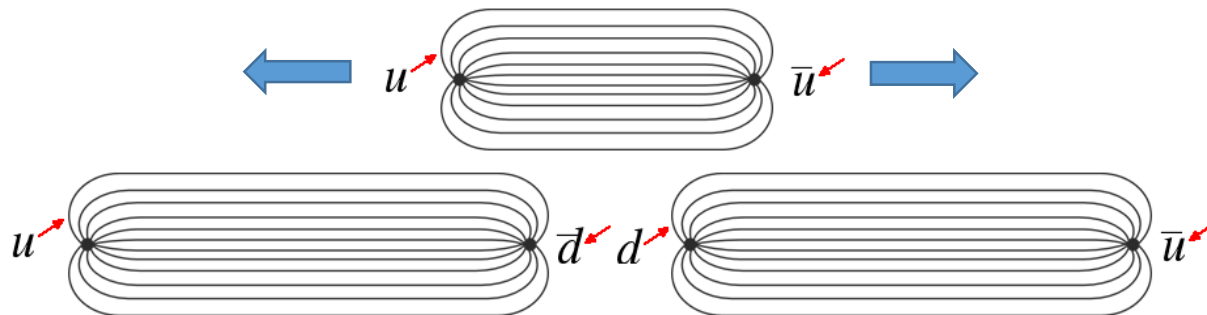
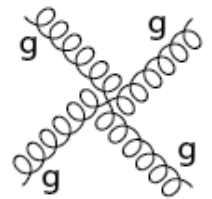
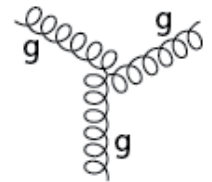
- Mit $\lambda_W = \frac{\hbar}{m_W c} \approx 0,0024 \text{ fm}$
Compton-Wellenlänge des W-Teilchens
(= Übergang QM -> QFT)



Endliche Reichweiten

► Starke WW: Feldquanten Gluonen

- Masselos \rightarrow prinzipiell unendliche Reichweite, aber
 - **Besitzen selbst starke Ladung** (während z.B. $Z(\text{Photon}) = 0$)
 - Gluonen können daher selber Gluonen abstrahlen (im Gegensatz zu Photonen)
 \rightarrow Feldliniendichte bleibt konstant
 - Selbstwechselwirkung \rightarrow „Schlauchbildung“ der Feldlinien ($F = \text{const}$)
 - \rightarrow Quark-Paarerzeugung \rightarrow Confinement

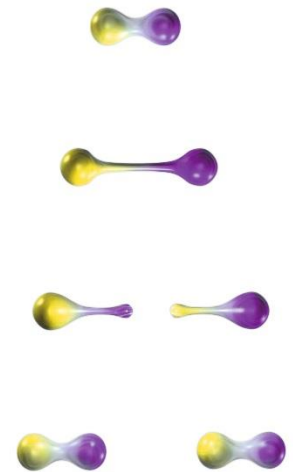
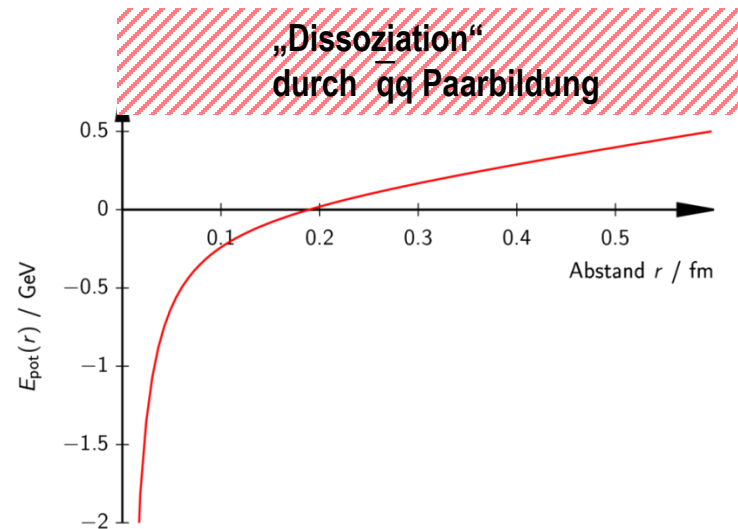


Endliche Reichweiten

▶ 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 $r \approx 1$ fm
- Im Feld gespeicherte Energie steigt streng monoton
- Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!
- Begriff: Confinement

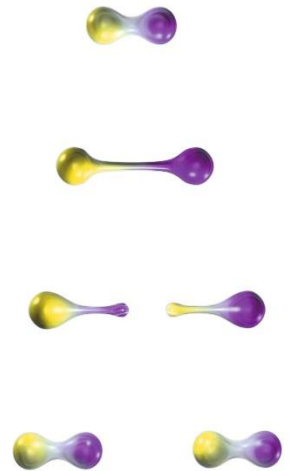


Endliche Reichweiten

► Confinement

► Beispielrechnung: Separation eines Quark-Anti-Quark-Paares

- $W = k \cdot \Delta r = 930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}} \cdot \mathbf{0,7 \text{ fm}} = 650 \text{ MeV}$
- Folgerung: Bereits bei einer zusätzlichen Separation von $\Delta r = \mathbf{0,7 \text{ fm}}$ 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

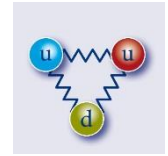
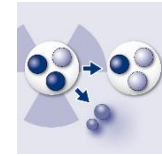
→ **Die Wechselwirkungen des Standardmodells werden durch Ladungen hervorgerufen**

Diskussion / Fragen



10 Minuten Pause

Basiskonzept Ladung



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

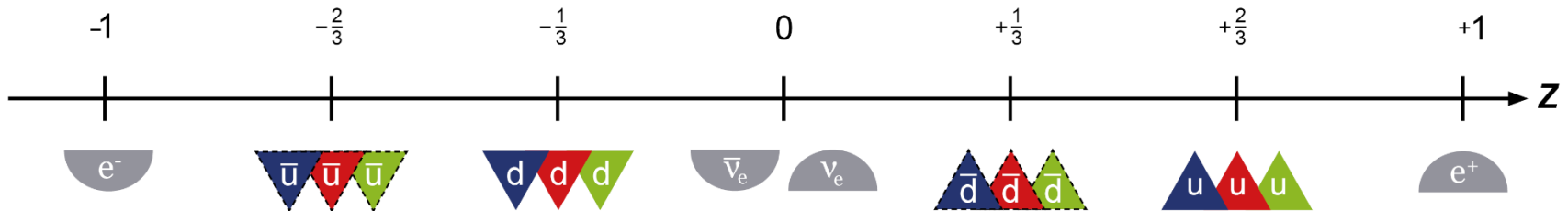
Und:

- ▶ Ladungen dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
 - Teilchen bilden „Multipletts“ bezüglich der Ladungen
- ▶ Ladungen sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
 - \leftrightarrow Grundlage der Symmetrien des Standardmodells (Noether!)

Elektrische Ladung

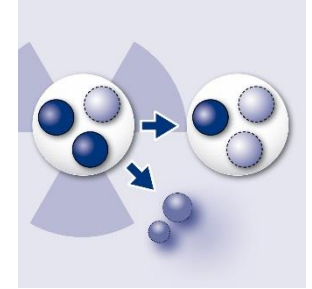


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen Z einiger Anti-/Materieteilchen

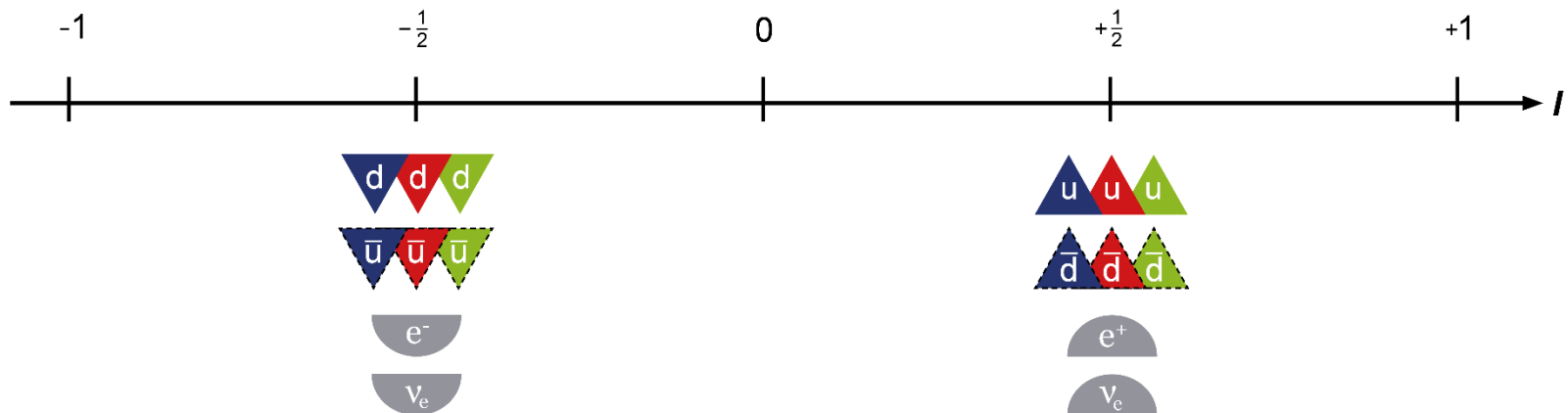


- Elektrische Ladung ist gequantelt

Schwache Ladung



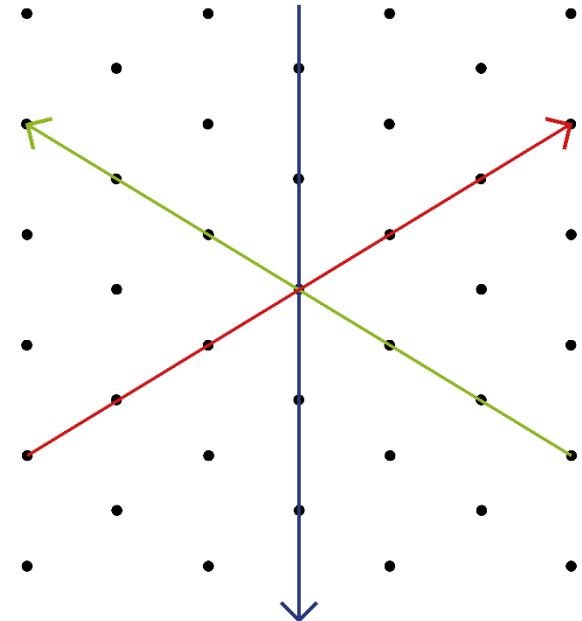
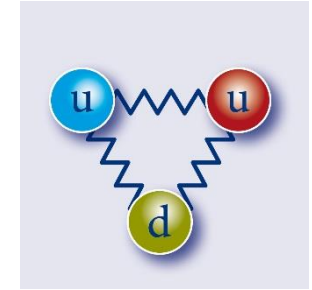
- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von $I = +\frac{1}{2}$ oder $I = -\frac{1}{2}$
 - alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

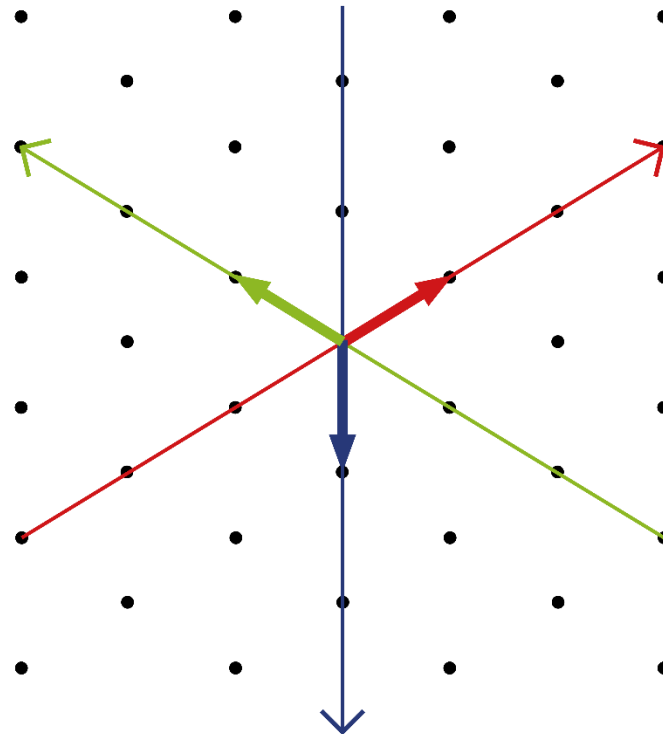
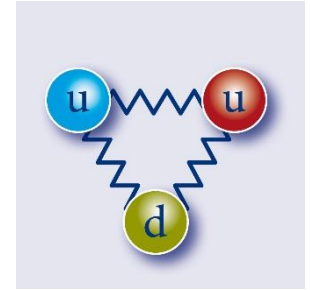
Starke Ladung

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



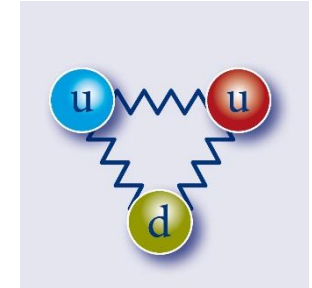
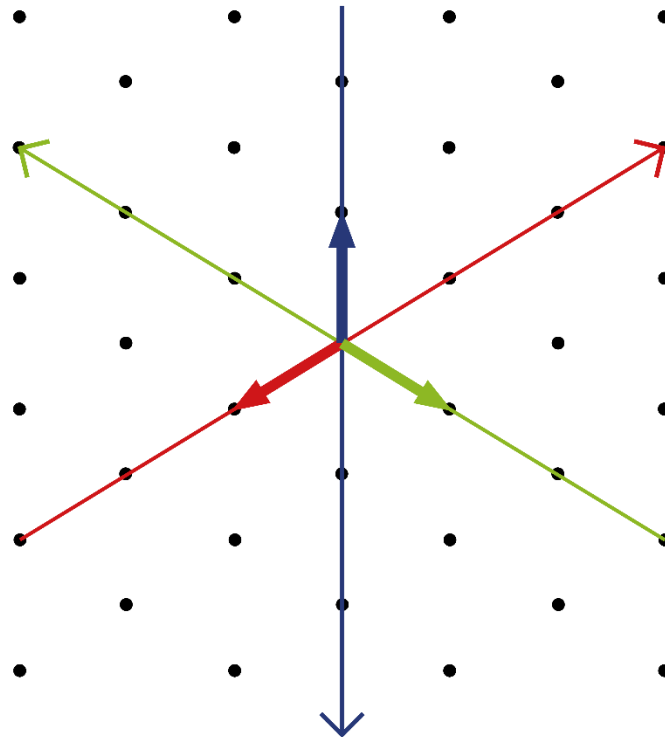
Starke Ladung

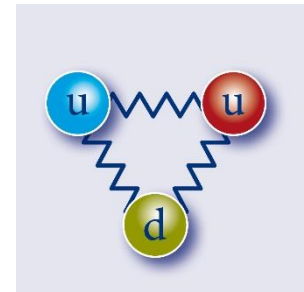
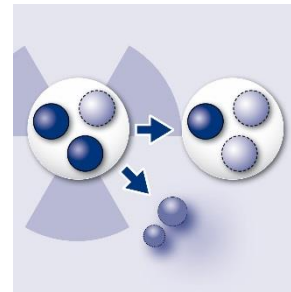
► Farbladungsvektoren von Quarks



Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





- ▶ Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

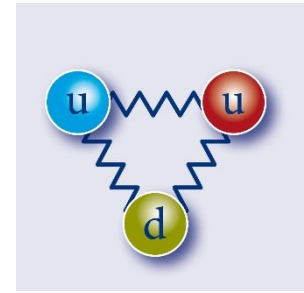
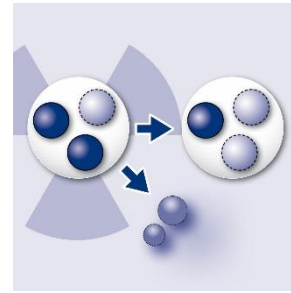
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \color{red}{\rightarrow} + \color{green}{\rightarrow} + \color{blue}{\downarrow} = \color{red}{\rightarrow} + \color{green}{\rightarrow} = \vec{0}$$



- ▶ Alle drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

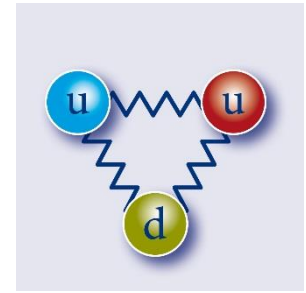
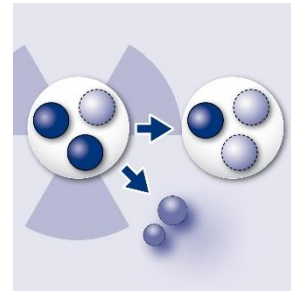
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- 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	l	q	\bar{c}
elektrisch neutrale Leptonen		$+\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$
.....				
elektrisch geladene Leptonen		$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\bar{0}$
.....				
Quarks	  	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau rot grün ↓ ↓ ↓
	  	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau rot grün ↓ ↓ ↓
	starke Wechselwirkung elektromagnetische Wechselwirkung schwache Wechselwirkung			

	1. Generation	l	q	\bar{c}
schwache Wechselwirkung				
elektromagnetische Wechselwirkung				
starke Wechselwirkung				
Quarks	  	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	antiblau antirot antigrün ↑ ↓ ↓
	  	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	antiblau antirot antigrün ↑ ↓ ↓
.....				
elektrisch geladene Leptonen		$+\frac{1}{2}$	+1	$\bar{0}$
.....				
elektrisch neutrale Leptonen		$-\frac{1}{2}$	0	$\bar{0}$

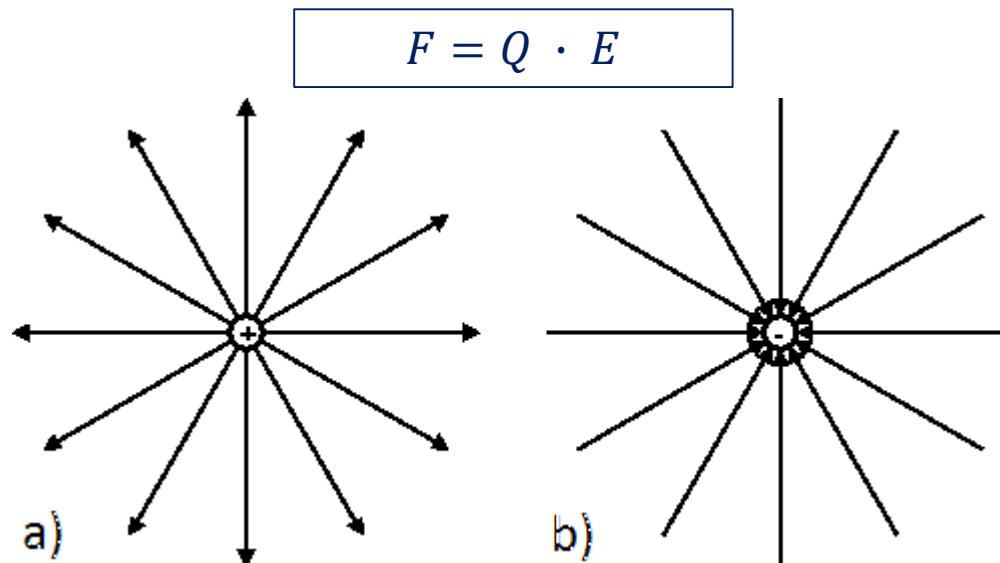
Zusammenfassung: Ladungen

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

Darstellen von Wechselwirkungen

► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite
hier: elektromagnetische Wechselwirkung



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

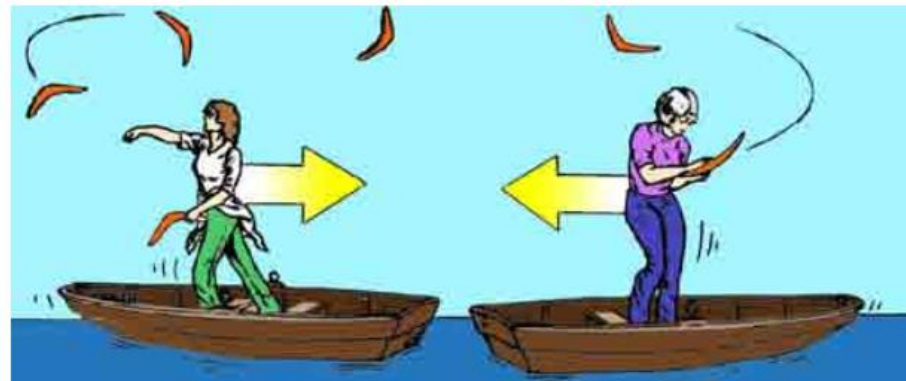
↓

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

Darstellen von Wechselwirkungen

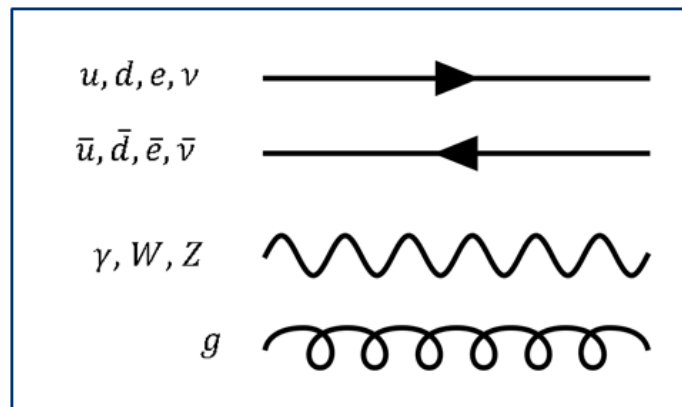
► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

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



Feynman-Diagramme

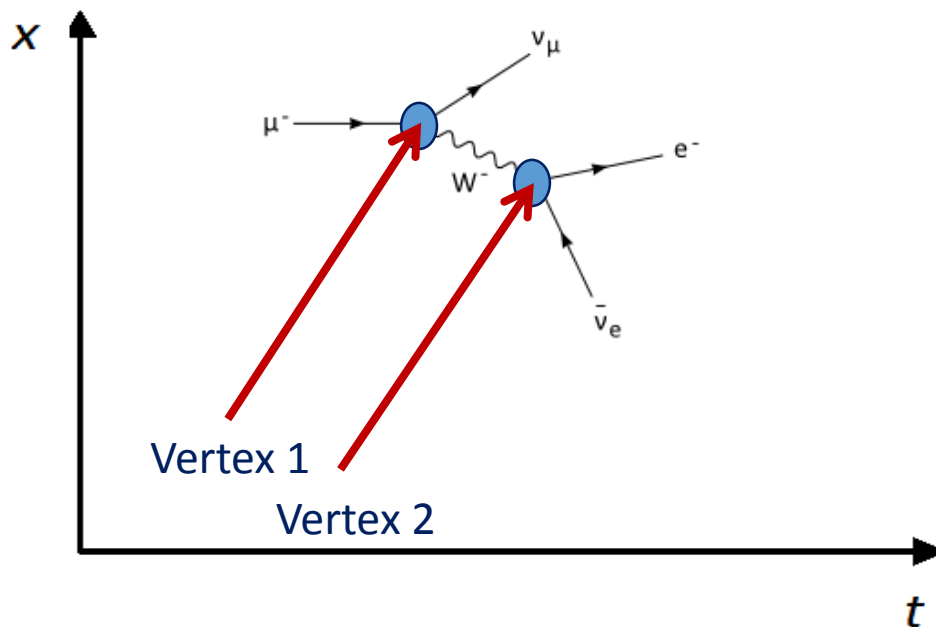
► Aufbau



Feynman-Diagramme

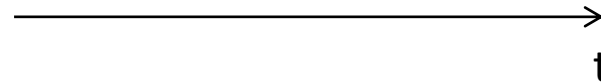
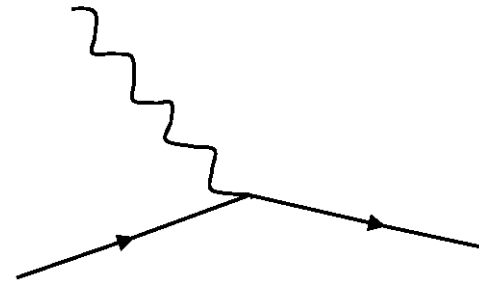
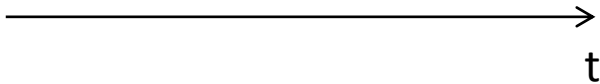
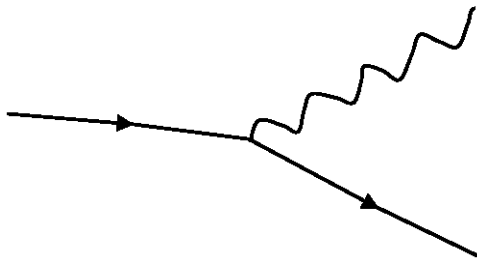
► Begriffsklärung:

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



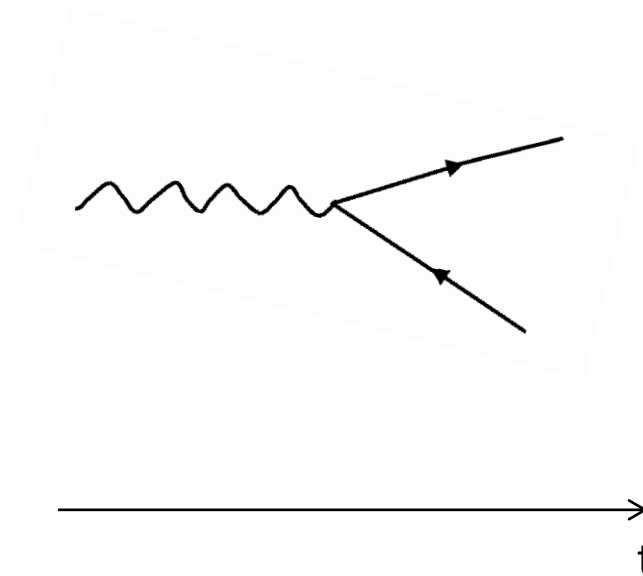
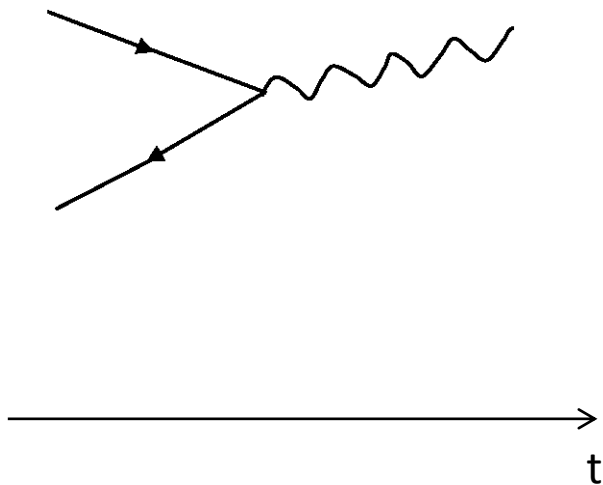
Grundbausteine 1/2

► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



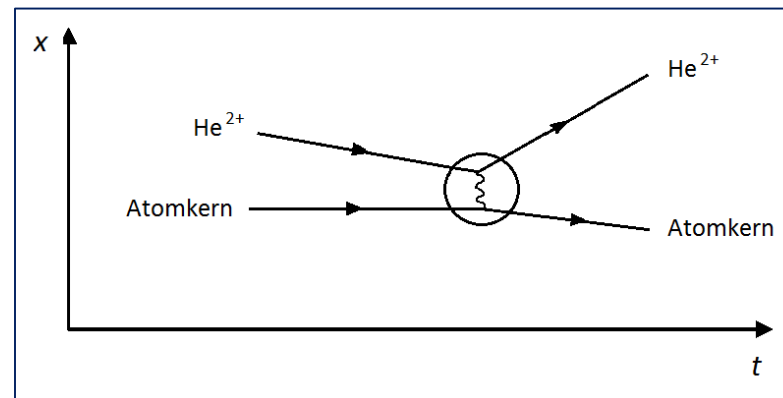
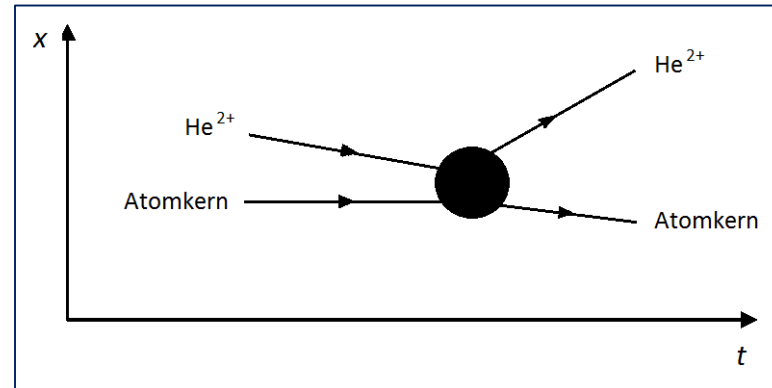
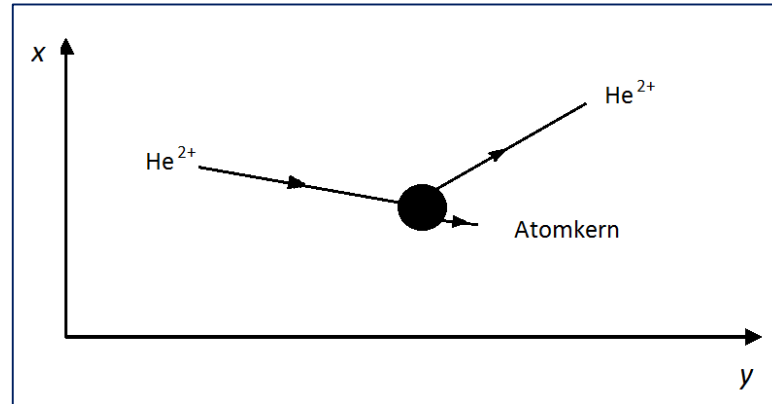
Grundbausteine 2/2

▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



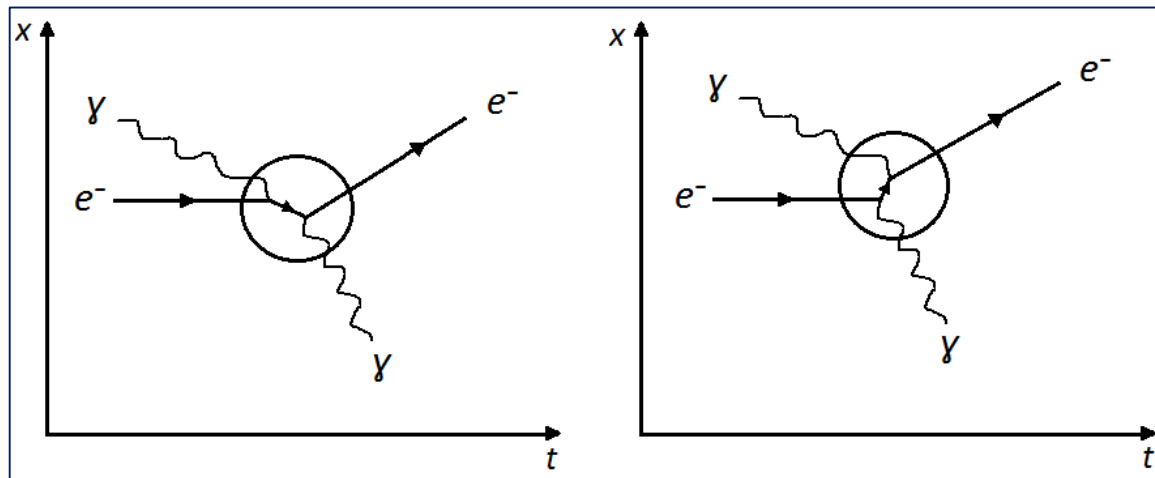
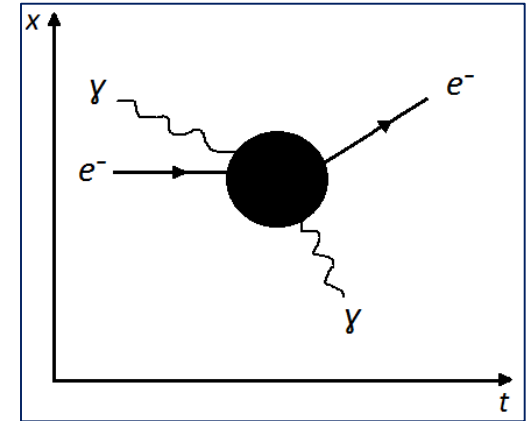
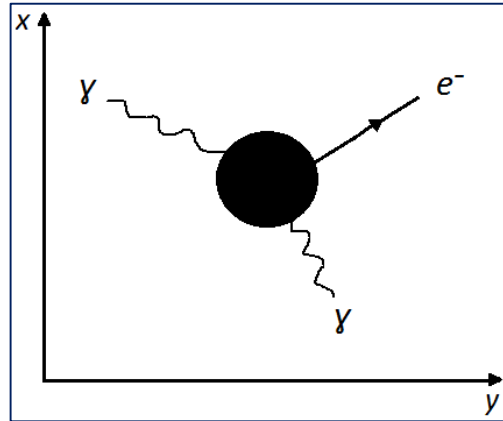
Prozesse

► Rutherford-Streuung



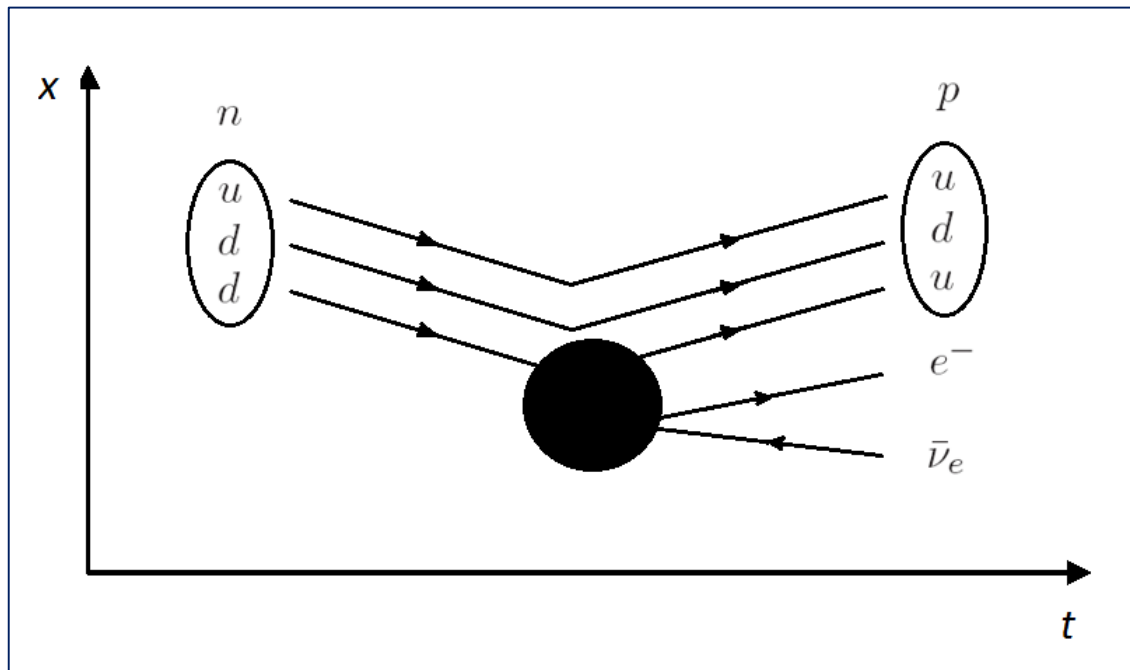
Prozesse

► Compton-Streuung



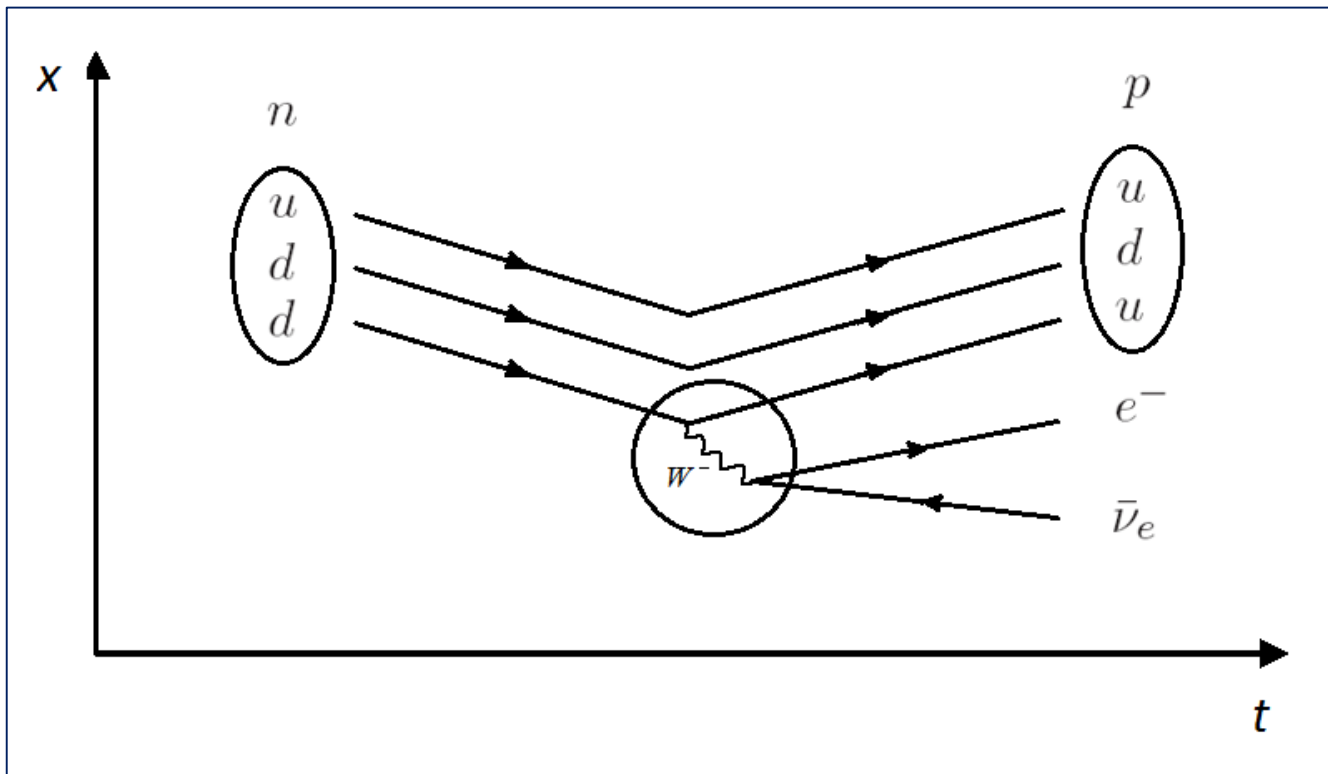
Prozesse

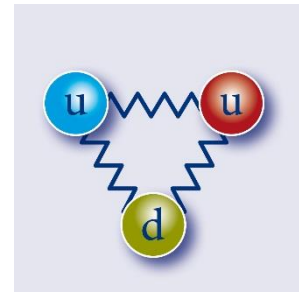
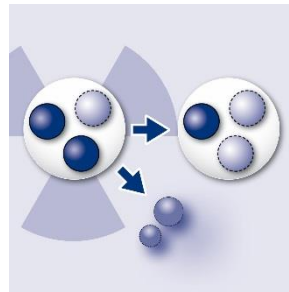
► β^- - Umwandlung



Prozesse

► β^- - Umwandlung





► Ladungsbilanz

$$\begin{pmatrix} I \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I \\ +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix}, \dots$$

Prozess:

$$d \rightarrow u + W^- \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

- Elektrische Ladungszahl: Z

$$-\frac{1}{3} = +\frac{2}{3} - 1 = +\frac{2}{3} - 1 + 0$$

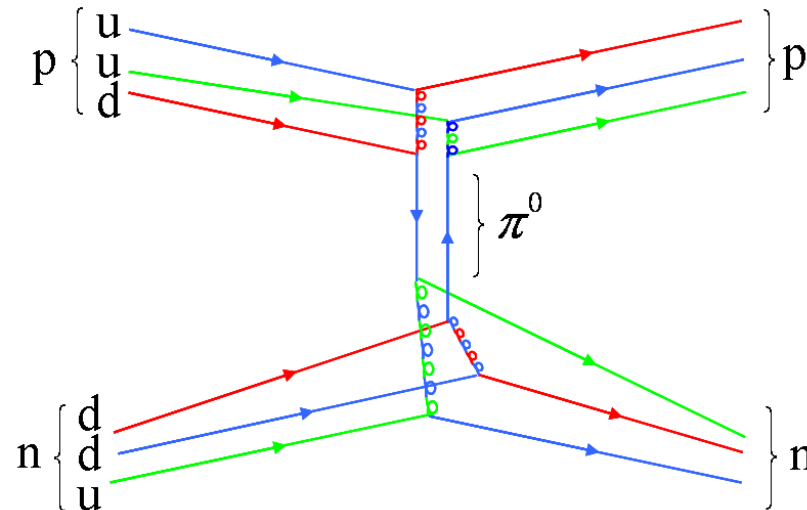
- Schwache Ladungszahl: I

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

- Starker Farbladungsvektor: \vec{C}

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

Feynman-Diagramme: Ladungsfluss-Diagramme

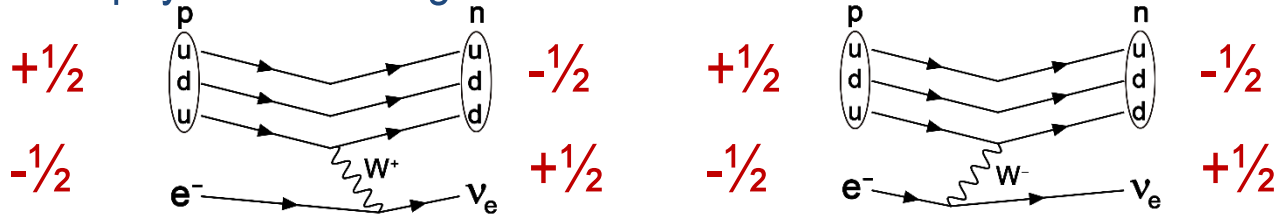


- ▶ Vertices können als “=” Zeichen aufgefasst werden
 - Auf beiden Seiten müssen Summen gleich sein:
Impuls, Energie, Drehimpuls, elekt. Ladung, schw. Ladung, starke Ladung
 - Umklappen der Linien dreht Ladungsvorzeichen um

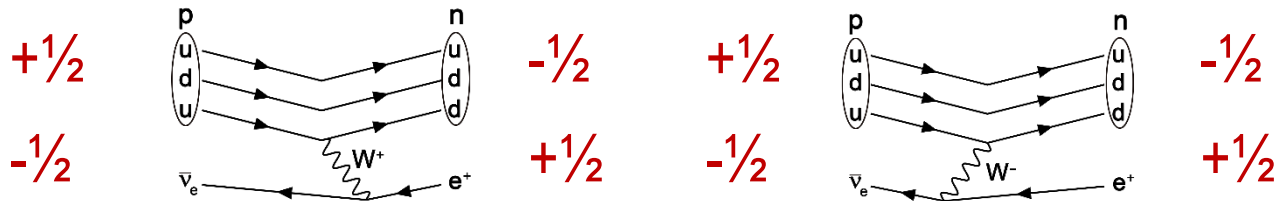
Ladungserhaltung (z.B. schwache Ladung I)

Alle möglichen Prozesse durch „Umklappen“ von Linien:

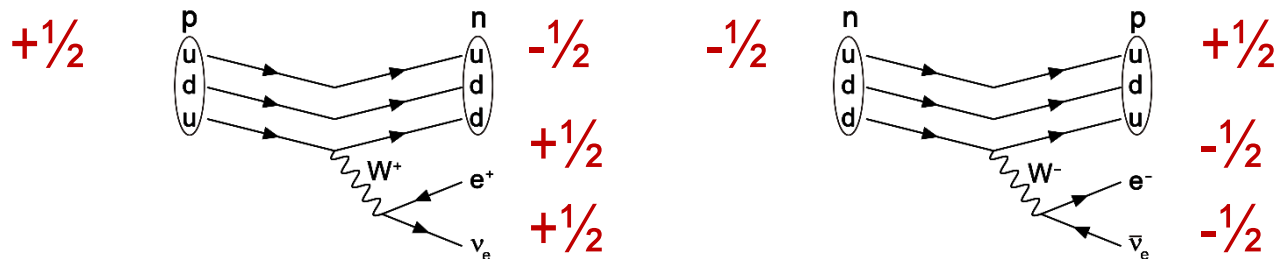
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



- β^+ und β^- - Umwandlungen von Kernen



Die Erhaltung der schwachen Ladung erfordert Neutrinos!
 (experimenteller Hinweis: fehlender Impuls und Energie)

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

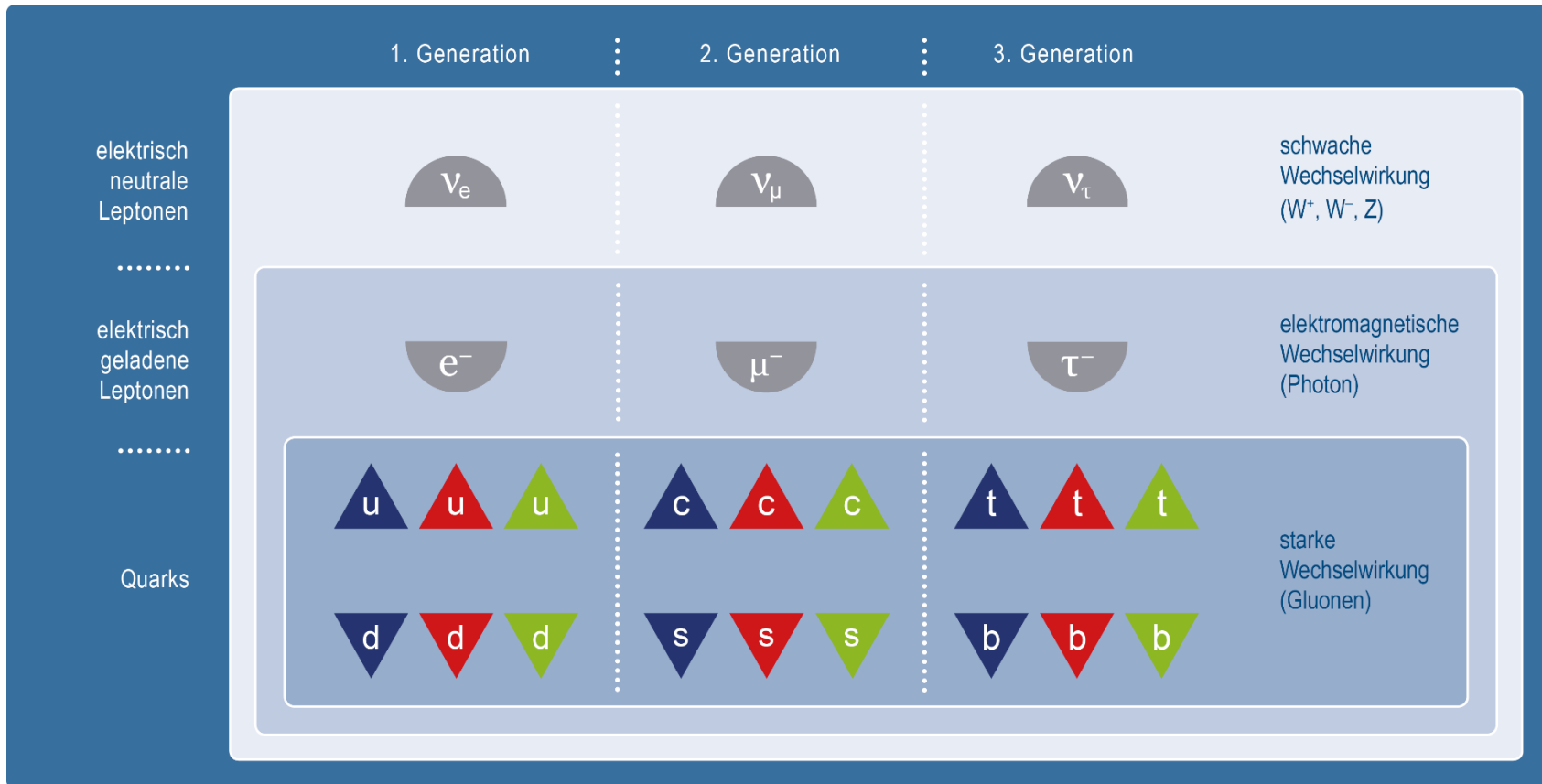
Ordnung der Elementarteilchen

- ▶ **Materieteilchen** der uns umgebenden Materie: u, d, e^-, ν_e
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons μ^- (Rabi: „who ordered that?“)
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron, aber ~ 200 Mal schwerer
 - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1961: Nachweis des Myon-Neutrinos ν_μ
- ▶ 1961: Postulierung von Up-, Down- und Strange-Quarks
- ▶ 1964: Entdeckung des $\Omega^-(sss)$
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons
- ▶ 1974-1994: weitere „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks
 - 1974: Charm
 - 1977: Bottom
 - 1994: Top
- ▶ 2000: Nachweis des Tauon-Neutrinos ν_τ

„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 Materieteilchen (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

- ▶ Gleiche Ladungen \leftrightarrow Gleiche Eigenschaften (“Lepton-Universalität”)
- ▶ Welche Plätze gefüllt sind, ist nicht vorhergesagt (Experiment !)
- ▶ Muster wiederholt sich 2x für größere Massen (Grund unbekannt!)

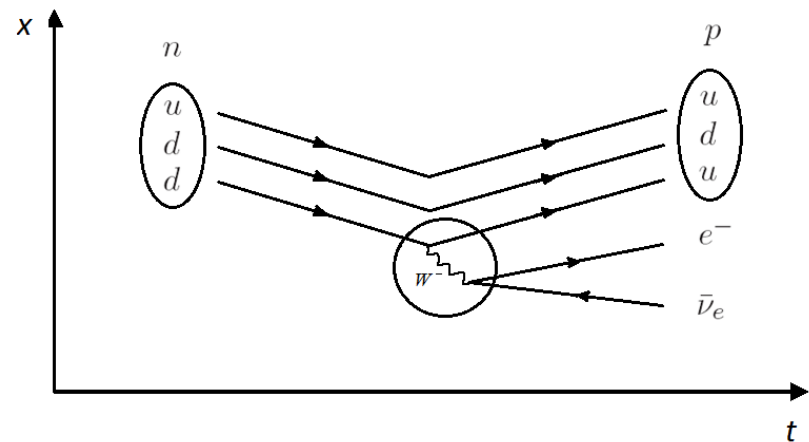


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

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



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

- Drei Up-Quarks mit Farbladungsvektoren , , oder  haben alle schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$, Down-Quarks hingegen $I = -\frac{1}{2}$

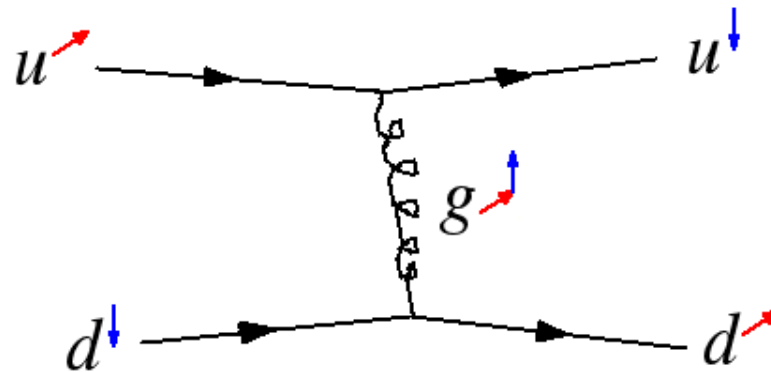
- $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Starke Wechselwirkung

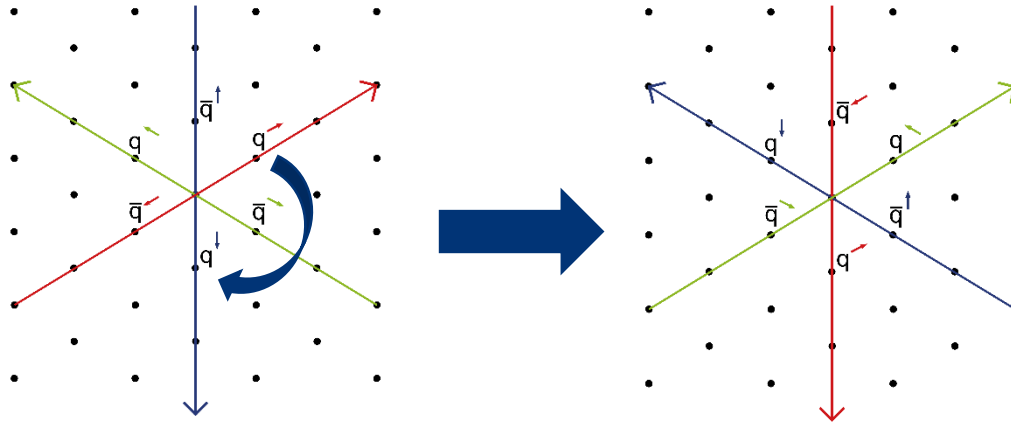
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:
Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

► $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

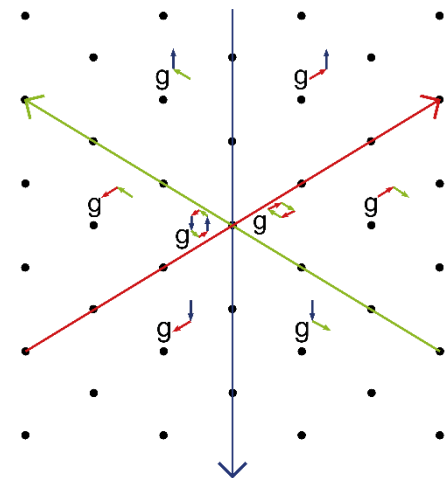
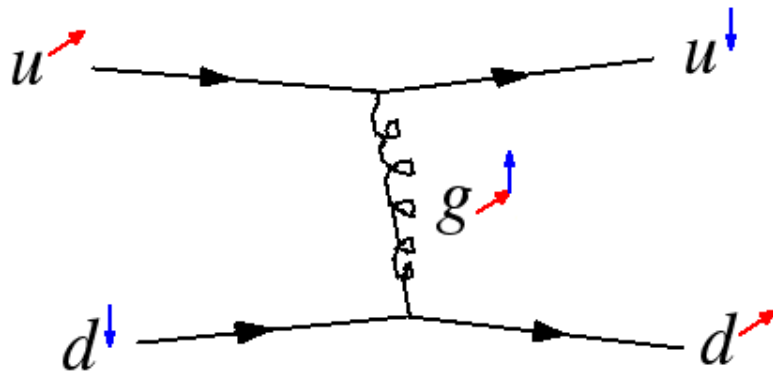


Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

- ▶ Eine Rotation (\sim Eichsymmetrie) eines Quark-Multipletts



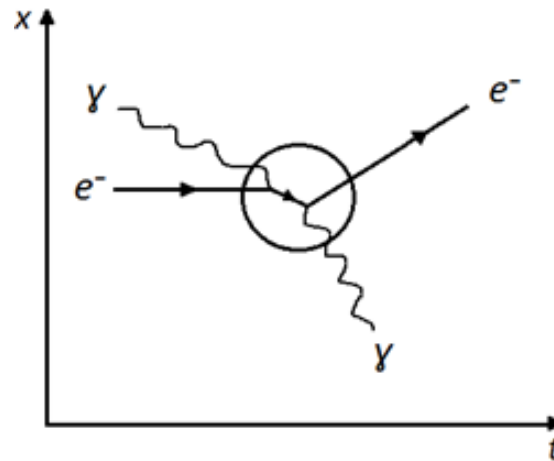
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



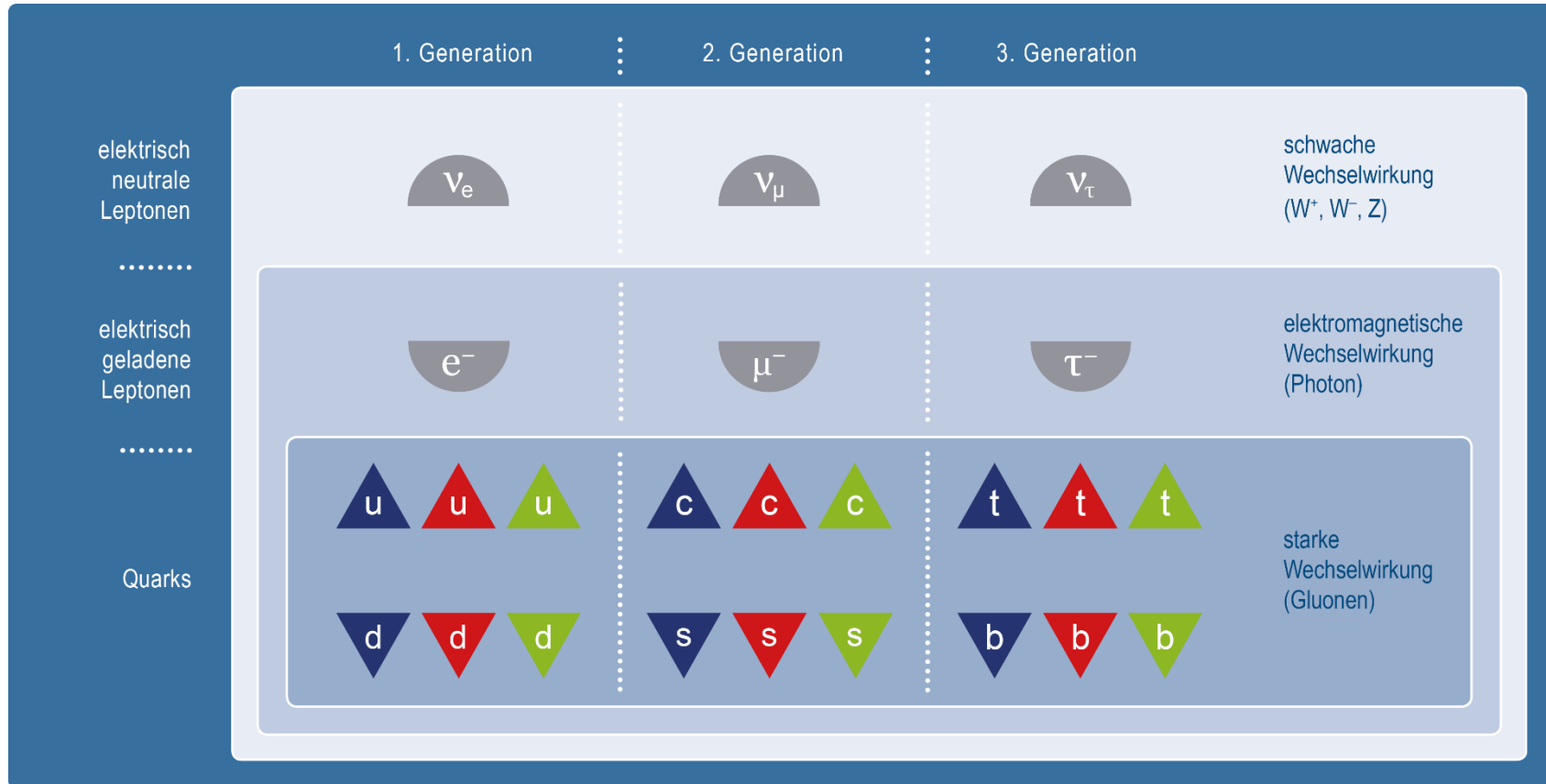
Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Elektromagnetische Wechselwirkung

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

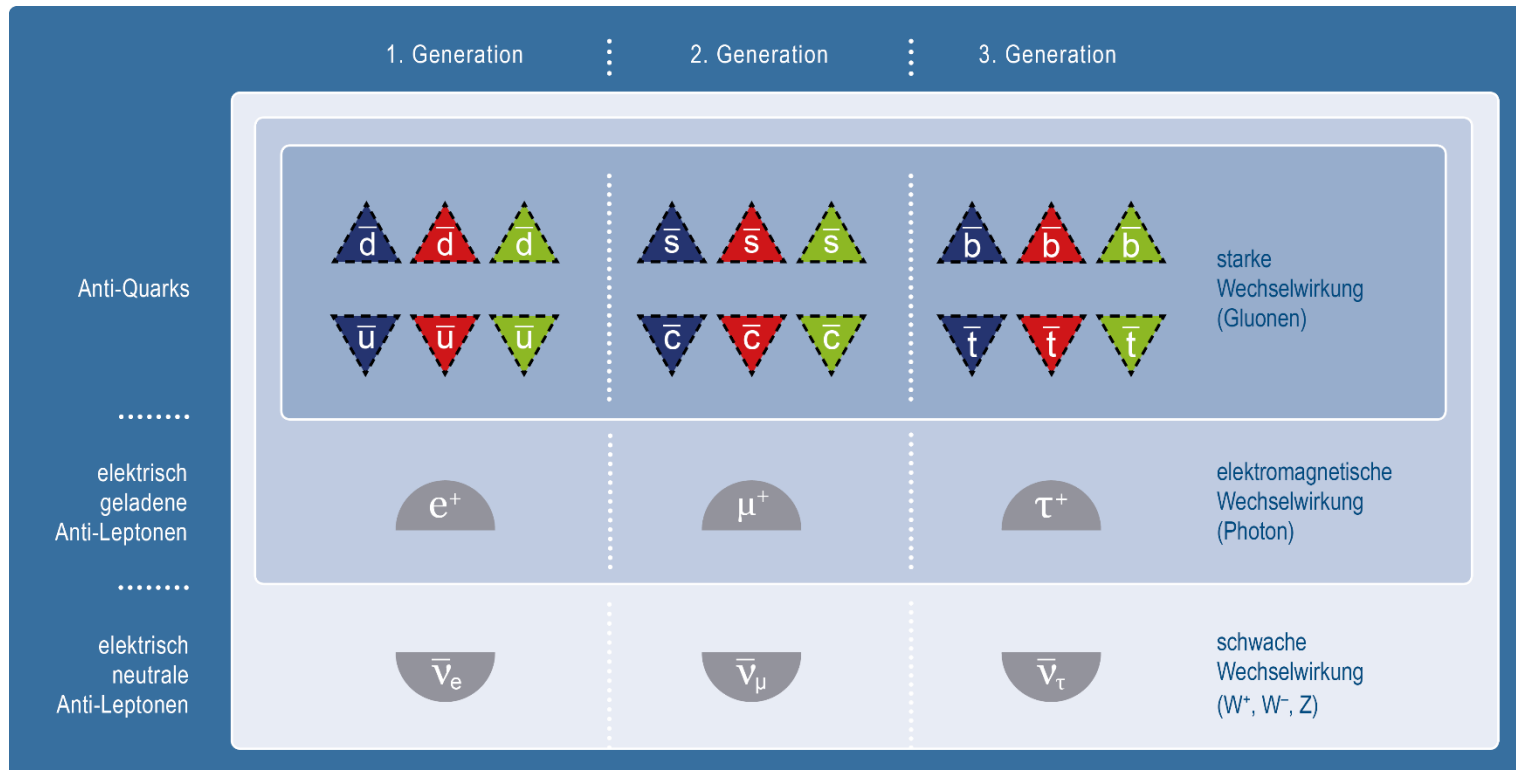


Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



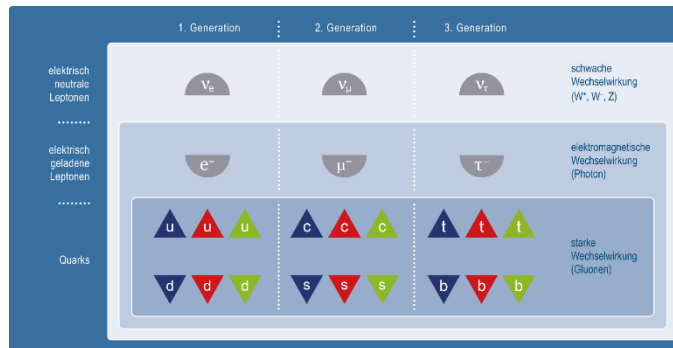
Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

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



Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Die Zahl und Multipletts der Botenteilchen werden aus den Symmetrien des Standardmodells vorhergesagt
- ▶ Für die Materieteilchen findet man experimentell
 - Dupletts der schwachen Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
 - Tripletts der starken Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
 - Singulett der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)



- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
(zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung)



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

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

JOACHIM
HERZ
STIFTUNG



22.03.2017



Diskussion / Fragen

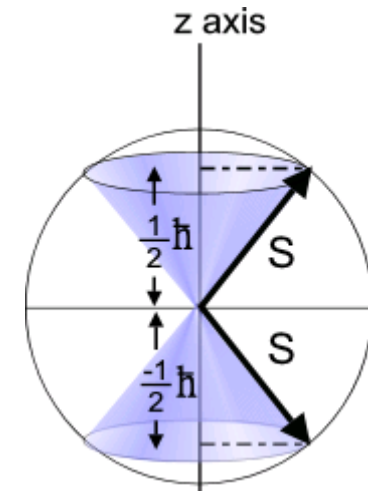




Extrafolien

Exkurs: warum schwache „Isospin“-Ladung?

- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie bei Spin
- ▶ Jeweils Vektor mit 3 Komponenten
 - Spin $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$ im Ortsraum
 - Schwacher Isospin $\mathbf{I}^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$ im abstrakten schwachen Isospinraum



<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

- ▶ Messbar bei beiden nur:
 - Gesamter Betrag und eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
 - die beiden anderen Komponenten sind „unscharf“ (Heisenberg)
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl $I := I_3^W$
- ▶ Ordnung in Multipletts von $I := I_3^W$

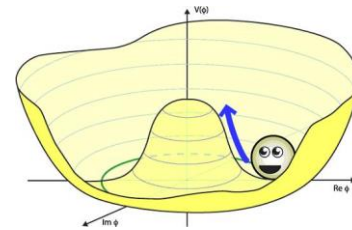
$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} : \left(\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{v} + H(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} I_3^W \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$

► Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien

- Abschirmung „schwacher Felder“ durch BEHiggs-Hintergrundfeld = unendlicher See schwacher Ladung

- Abschirmendes Feld
Duplett in schw. Ladung
Komponente $\nu = 246$ GeV
im Vakuum

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu \end{pmatrix}$$



- Anregung = Higgs-Teilchen

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu + H \end{pmatrix}$$



► Quantenfeldtheorie: Feldquanten „Weakonen“ (W und Z)

- Quantenmechanik: Masse \leftrightarrow Endliche Reichweite von W und Z
Stichwort: Compton-Wellenlänge
 - SM: Kopplung mit α_W an schwache Ladung von ν ergibt Masse von W und Z
(vorhersagbar: $m_W c^2 = 80,37$ GeV; Messung: 80,40 GeV (Präzision < Promill !))