

# Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik

Philipp Lindenau  
Dresden | 23.09.2016

**Herzlich willkommen!**



NETZWERK  
TEILCHENWELT



**FOLGENDE BÄNDE  
SIND VERFÜGBAR:**

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen  
und Teilchen



**KOSTENFREI  
ERHÄLTlich!**

## UNTERRICHTS- MATERIALIEN 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@leifiphysik.de](mailto:info@leifiphysik.de) angefordert oder unter [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.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](http://www.teilchenwelt.de/tp)
  - [www.leifiphysik.de/tp](http://www.leifiphysik.de/tp)
  - Online oder als Druckexemplar
- Band 3 und 4 bereits erschienen
- Band 1 und 2 folgen im Lauf des Jahres

# TEILCHENPHYSIK

UNTERRICHTSMATERIAL AB KLASSE 10  
Erstellt in Kooperation mit Netzwerk Teilchenwelt

KOSMISCHE STRAHLUNG



# 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

### 2.1 INHALTLICHE ANKÜPFUNGSPUNKTE IM LEHRPLAN

Die Kernphysik (speziell die Myonen) ist ein zentraler Bestandteil der Teilchenphysik und der Kosmischen Strahlung. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

### 2.2 WISSENSINISSE

Die Schüler/innen sollen die folgenden Kenntnisse erwerben:

- Die Eigenschaften der Myonen (Ladung, Masse, Lebensdauer).
- Die Erzeugung von Myonen in der Natur (Kosmische Strahlung).
- Die Messung der Lebensdauer von Myonen.

### 2.3 LEHRZIELE

Die Schüler/innen sollen die folgenden Ziele erreichen:

- Die Eigenschaften der Myonen verstehen.
- Die Erzeugung von Myonen in der Natur verstehen.
- Die Messung der Lebensdauer von Myonen durchführen.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

## 3.3 WOHER KOMMEN DIE MYONEN?

Die Myonen entstehen durch die Wechselwirkung von kosmischer Strahlung mit der Erdatmosphäre.

### 3.3.1 BESTIMMUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Lebensdauer von Myonen wird durch die Zeitmessung bestimmt.



Abb. 1: Messung der Lebensdauer von Myonen.



Abb. 2: Verteilung der Lebensdauer von Myonen.

Die Lebensdauer von Myonen wird durch die Zeitmessung bestimmt. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

## 3.3.2 BESTIMMUNG DER FLUGSTRECKE

Die Flugstrecke von Myonen wird durch die Messung der Flugzeit bestimmt.

### 3.3.2.1 BESTIMMUNG DER FLUGSTRECKE

Die Flugstrecke von Myonen wird durch die Messung der Flugzeit bestimmt.

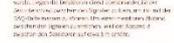


Abb. 3: Messung der Flugstrecke von Myonen.

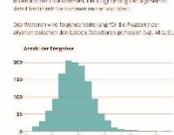


Abb. 4: Verteilung der Flugstrecke von Myonen.

Die Flugstrecke von Myonen wird durch die Messung der Flugzeit bestimmt. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.

## AUFGABEN

### 1 EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER

Die Lebensdauer von Myonen wird durch die Zeitmessung bestimmt.



Abb. 1: Verteilung der Lebensdauer von Myonen.

### 2 BERECHNUNG DER LEBENSDAUER VON MYONEN

Die Lebensdauer von Myonen wird durch die Zeitmessung bestimmt.

$$T = \frac{L}{v}$$

Die Lebensdauer von Myonen wird durch die Zeitmessung bestimmt. Die Myonen sind ein Beispiel für die Erzeugung von Teilchen in der Natur und die Messung ihrer Eigenschaften ist ein wichtiger Bestandteil der Teilchenphysik.





## Band 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen

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

## Band 2: Forschungsmethoden

- Forschungsziele
- Beschleuniger
- Detektoren
- Zahlreiche Aufgaben

[www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



Neue Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik, Dresden



# Was ist Physik?



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



# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

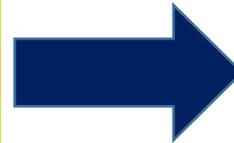
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung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



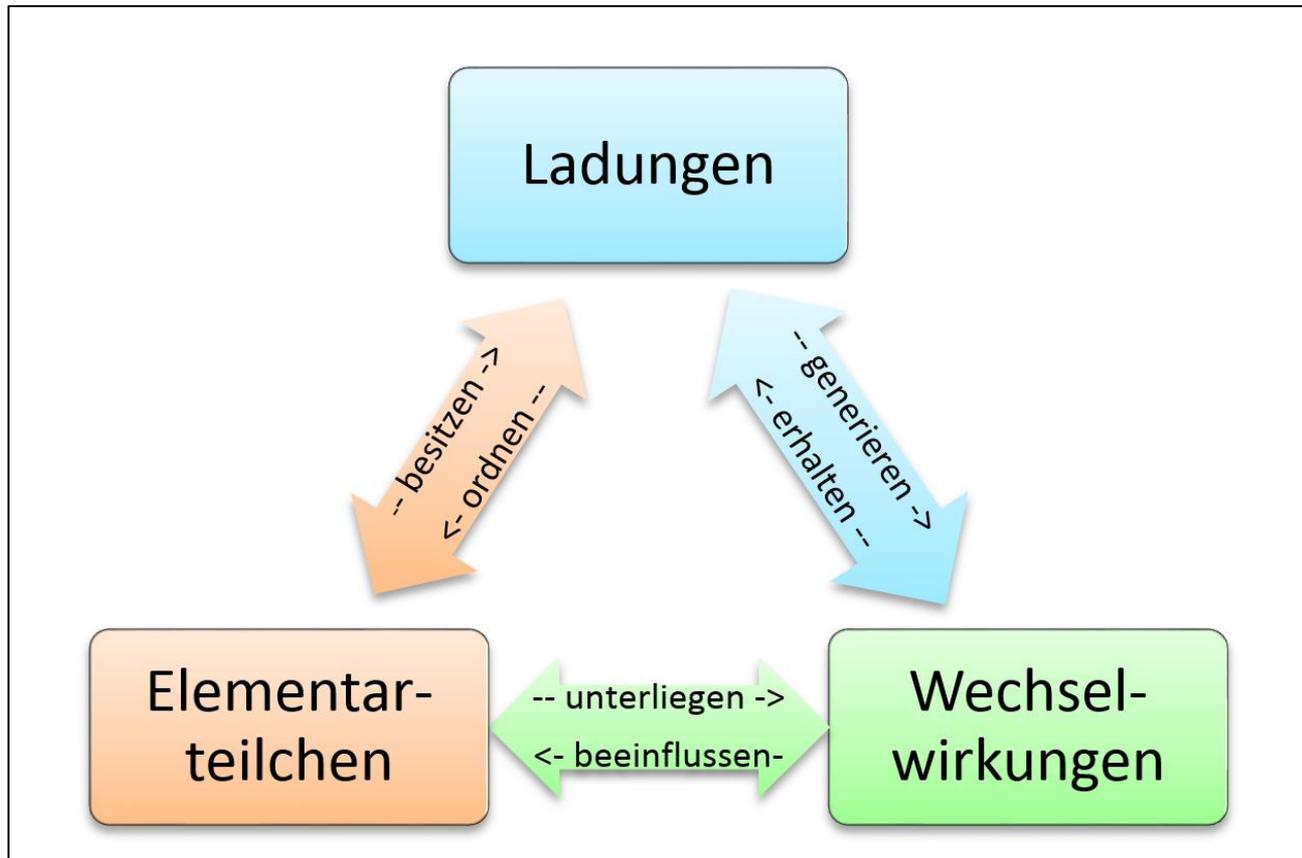
**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**



# 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 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??

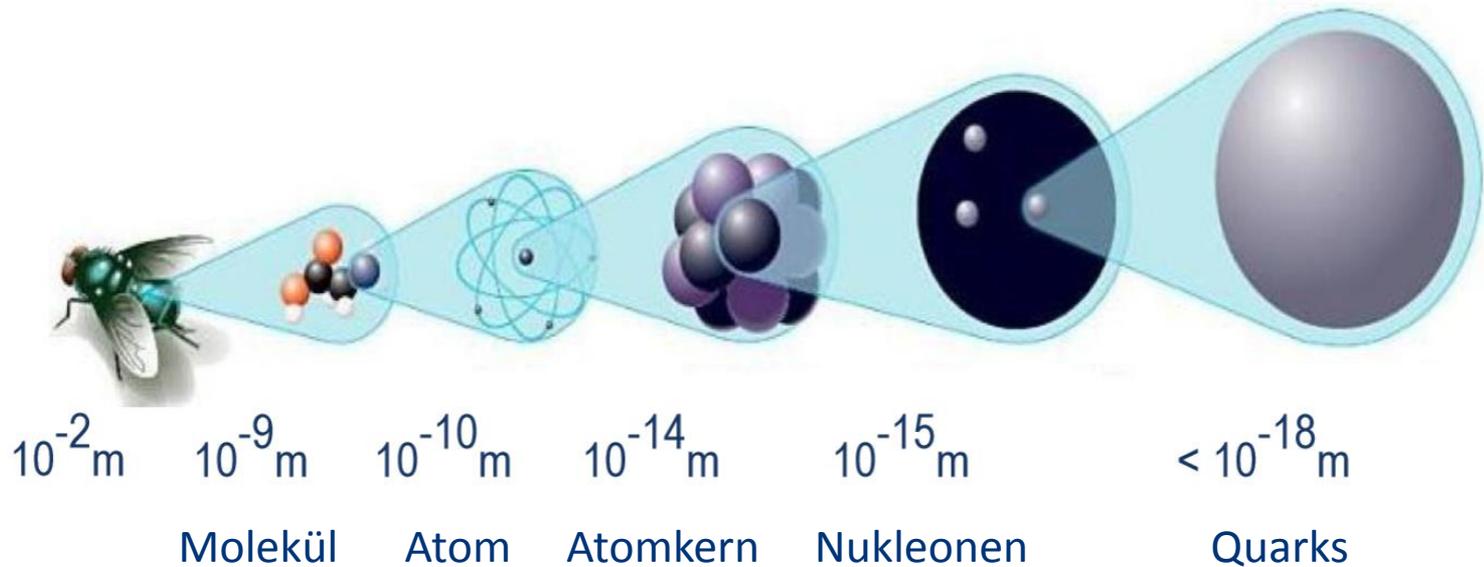
- Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
- Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
- Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen**

Three generations of matter (fermions)

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

Gauge bosons

# Größenordnungen in der Teilchenphysik

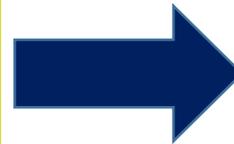


# Reduktion

**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

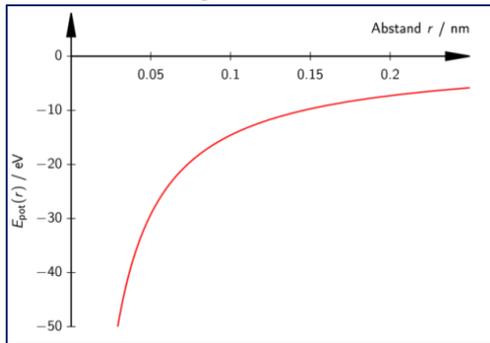
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B.  $\beta$ -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

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

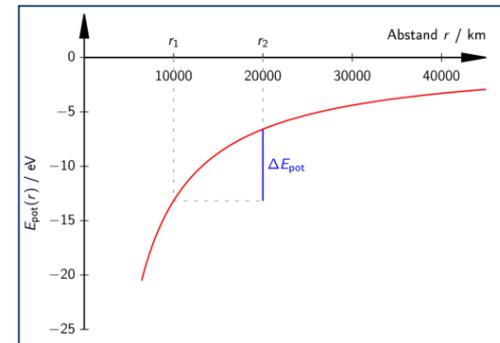
## ▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

## ► Elektromagnetische WW

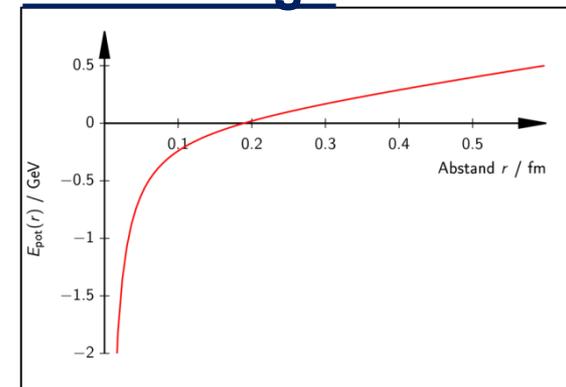


## ► Gravitation



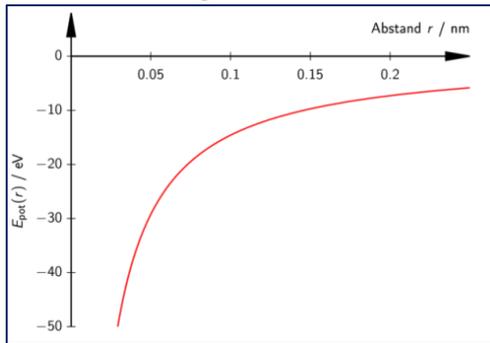
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ( $r \sim \text{fm}$ )

## ► Einführung: starke WW

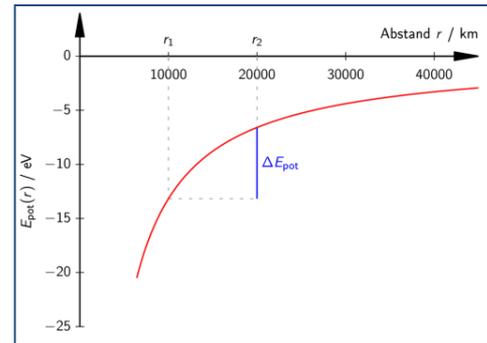


# Die vierte fundamentale Wechselwirkung

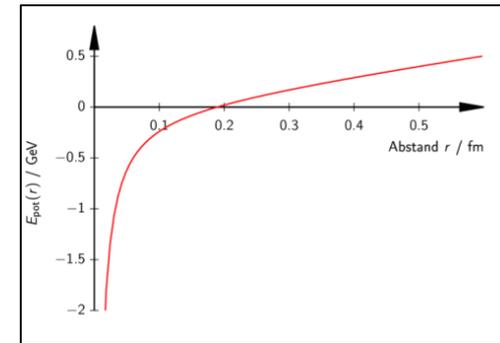
## ▶ Elektromagnetische WW



## ▶ Gravitation

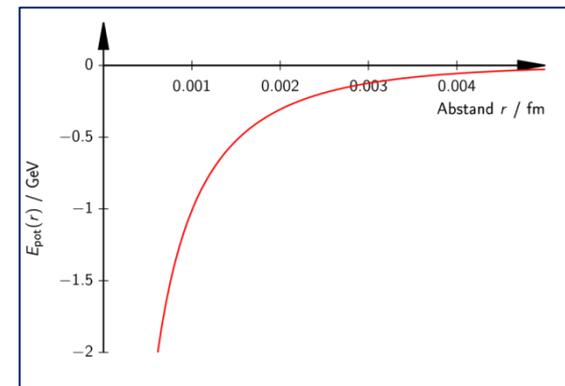


## ▶ starke WW



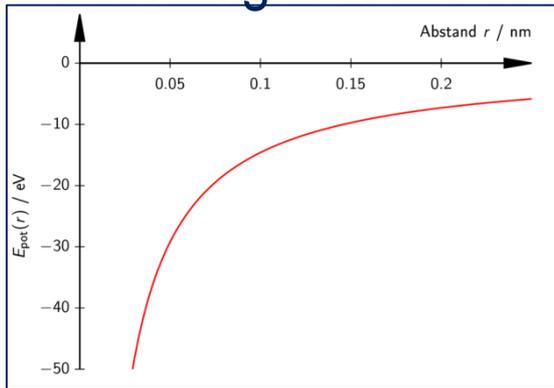
## ▶ Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren? ▶ Einführung: schwache WW

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

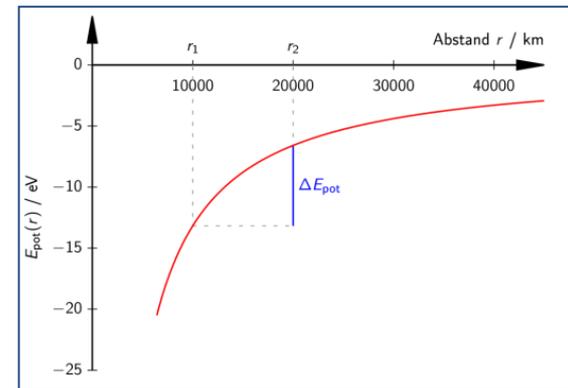


# Vergleich der potenziellen Energien

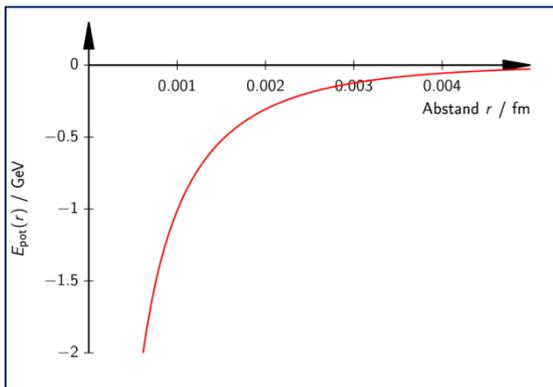
## ▶ Elektromagnetische WW



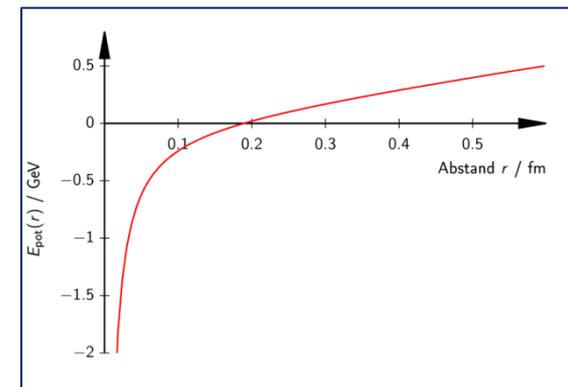
## ▶ Gravitation



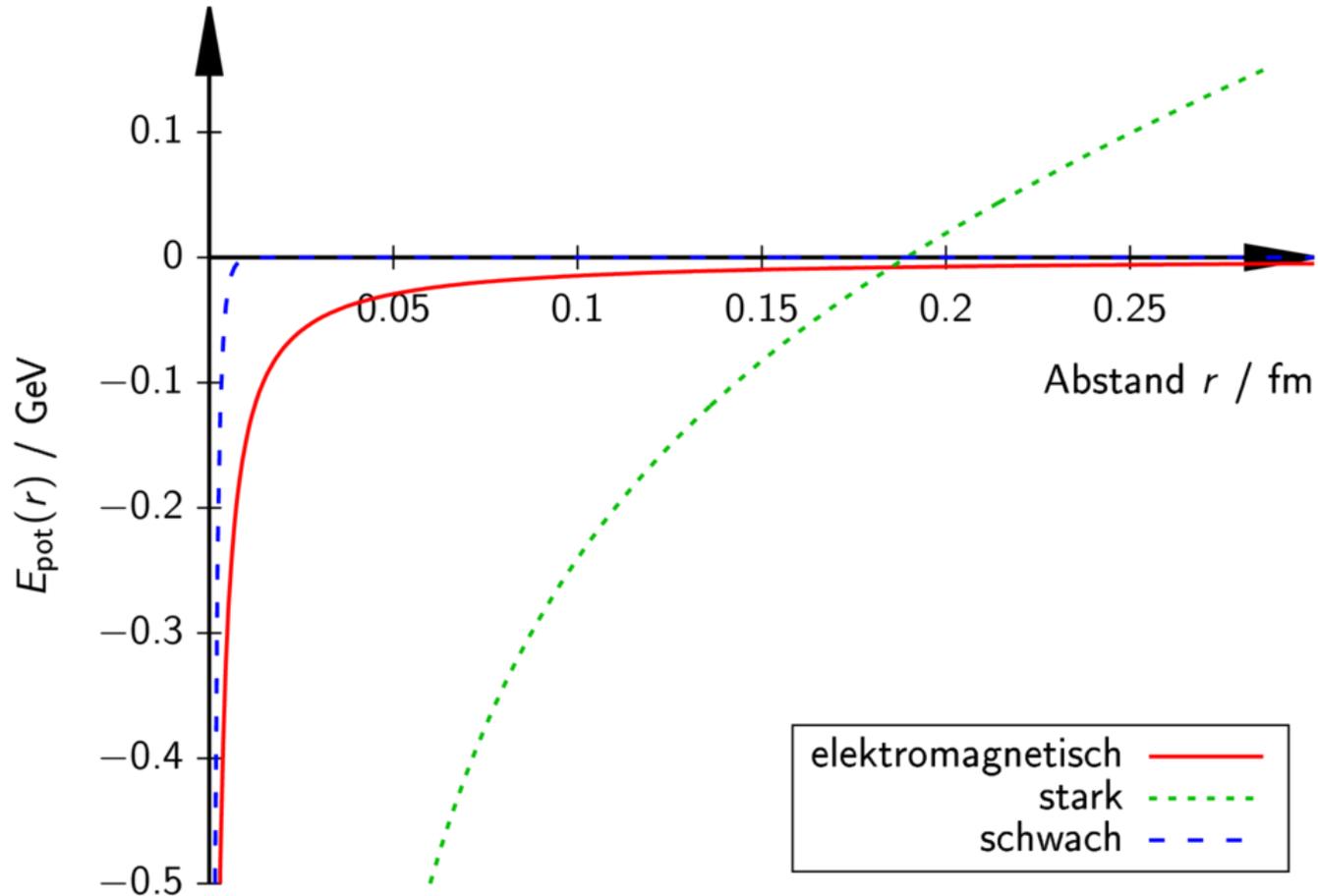
## ▶ schwache WW



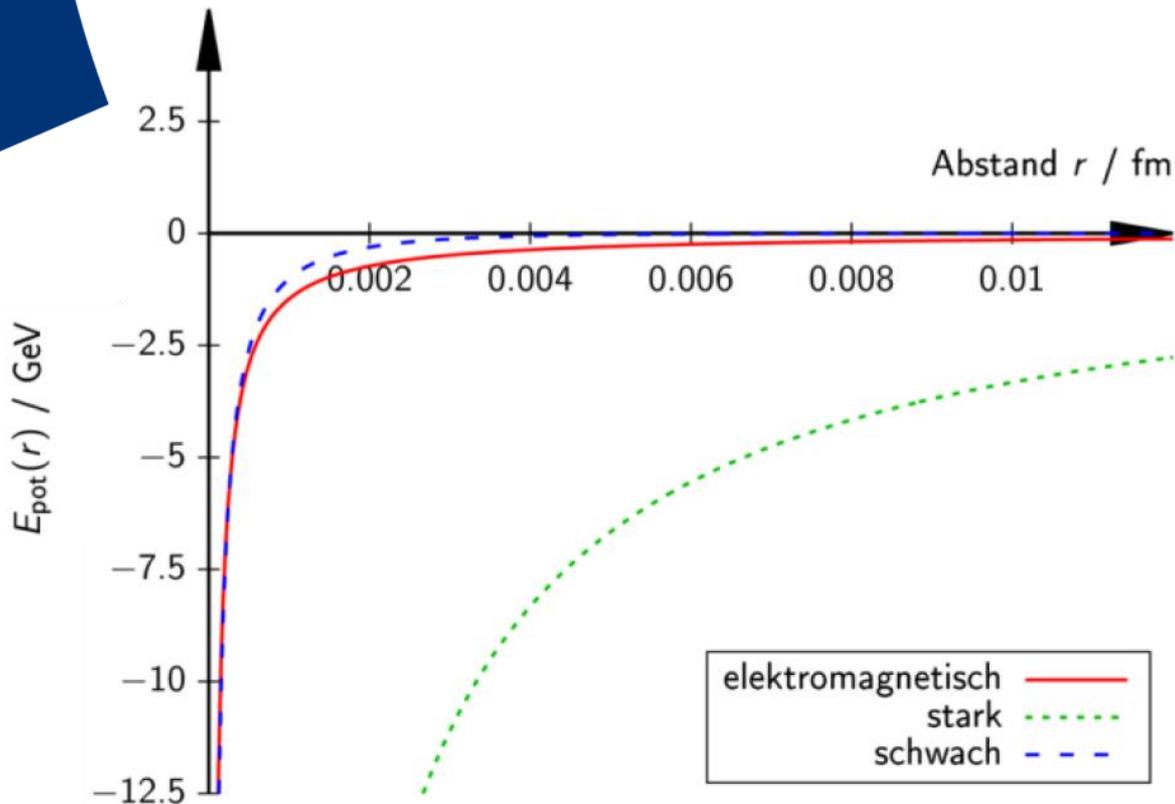
## ▶ starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien

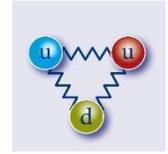
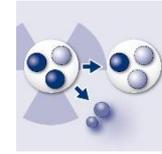


# Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen



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

# Erweiterung: Konzept der Ladung



## ► Coulombsches Gesetz

$$\text{► } F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

- 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 $\alpha$ auch für andere Wechselwirkungen

$$\text{► } \alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$$

# Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

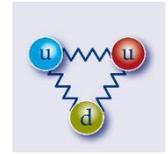
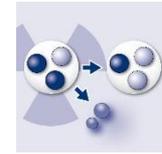
$$Q = q \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

- ▶ Elementarladung ist nun im Kopplungsparameter  $\alpha$  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

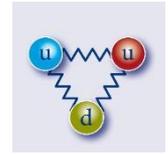
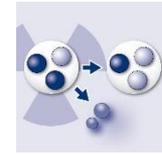
elektrische Ladungszahl  $q$

schwache Ladungszahl  $I$

starker Farbladungsvektor  $\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

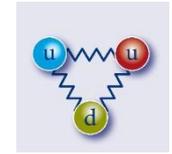
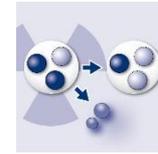
# Erweiterung: Konzept der Ladung



- ▶ Kopplungsparameter der Gravitation zwischen Teilchen1 und Teilchen2:  $\alpha_{grav}^{12} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{\hbar c}$
- ▶ Beispiel:  $\alpha_{grav}$  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?

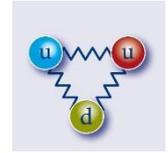
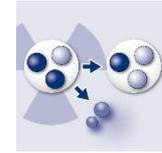
## ► Schulniveau:

- 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



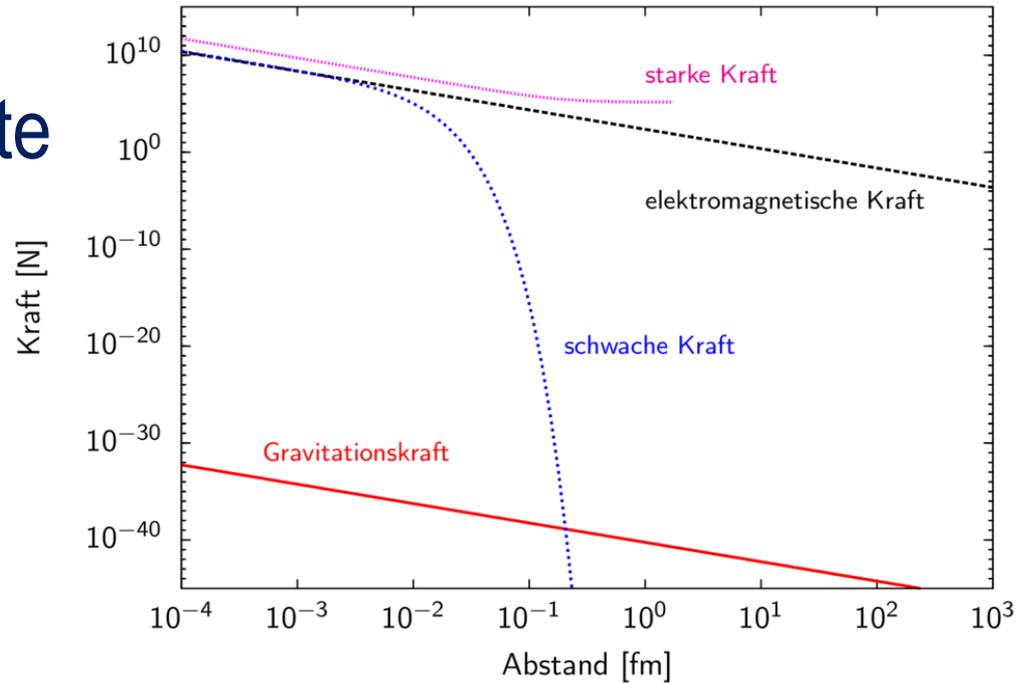
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

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

# Vergleich der Kräfte

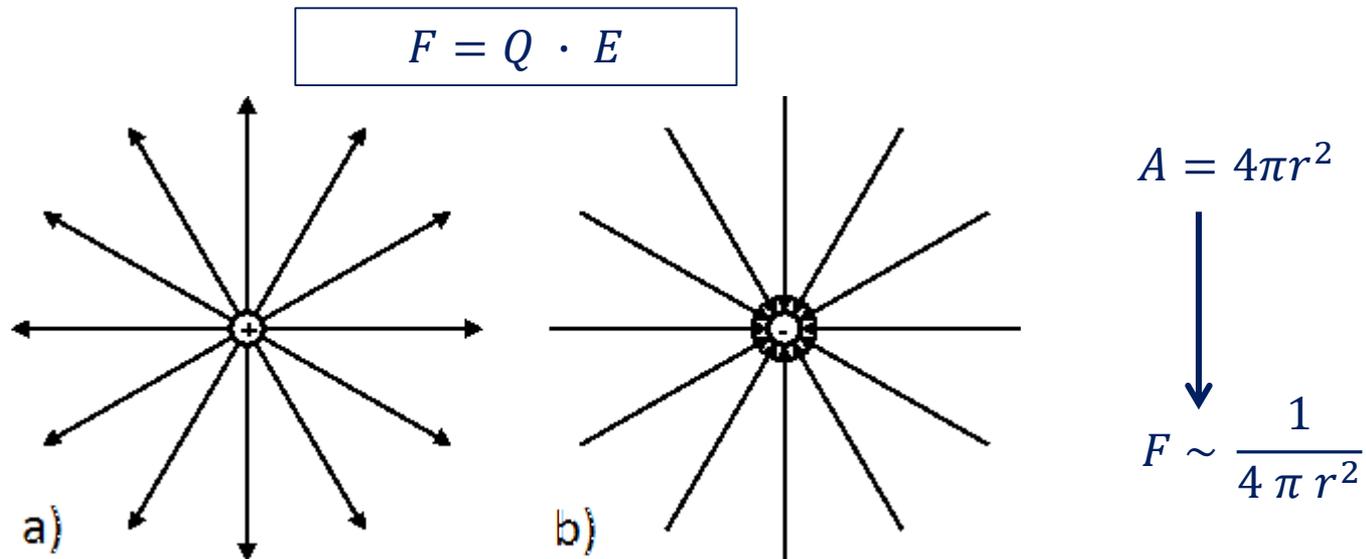
- Tiefe Einsicht:  
Alle  $\sim \frac{1}{r^2}$  für kleine  $r$



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
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	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_S = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15}$ m	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_W = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18}$ m	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

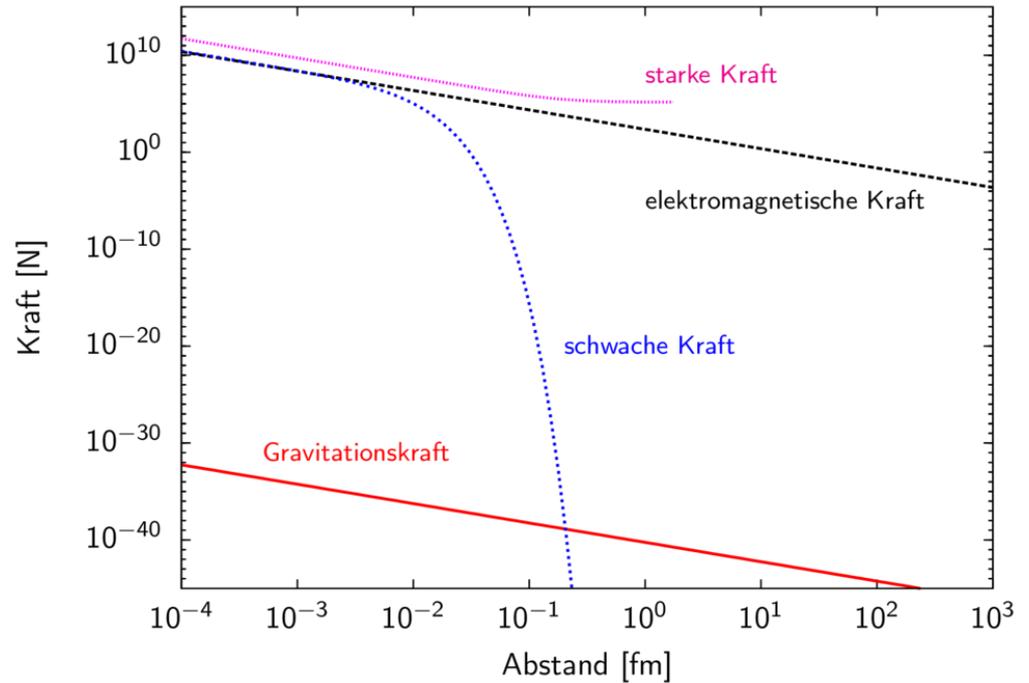
# Geometrische Betrachtung

- ▶ 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



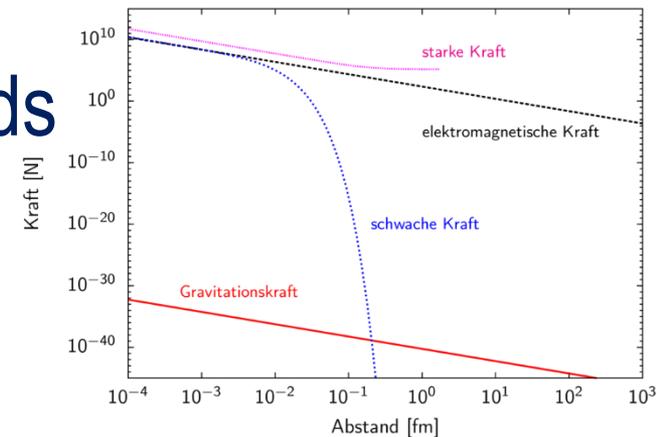
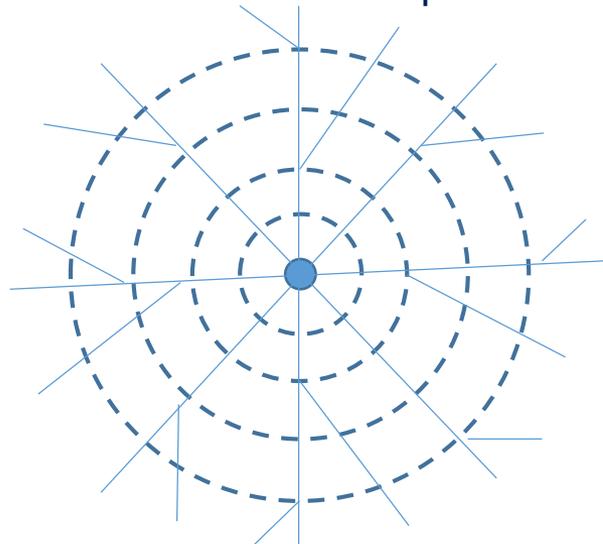
Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	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:

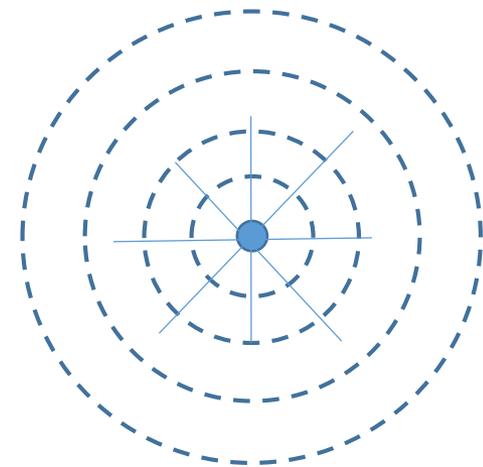
► stark

- Kraft  $\rightarrow$  Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



schwach

Kraft strebt rasch gegen Null  
Feldlinien enden „im Nichts“



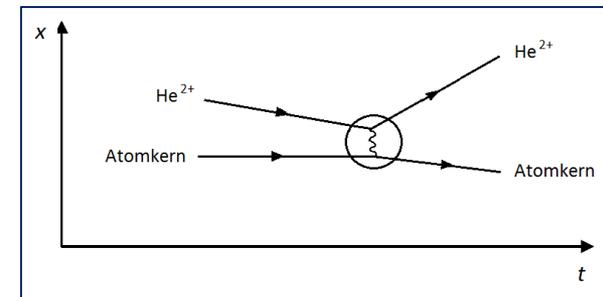
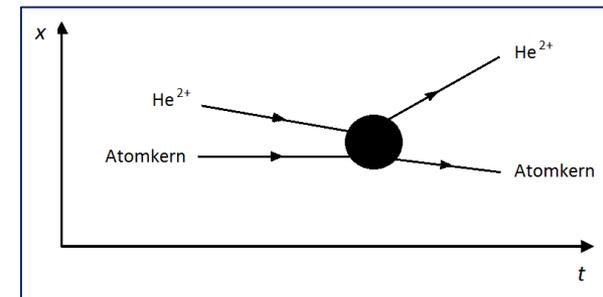
# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

## ► Makroskopisch:

- Feldliniendichte  $\rightarrow$  Feldstärke  $\rightarrow$  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  $\Delta E$  und Impulsdifferenz  $\Delta \vec{p}$  wird durch Botenteilchen übertragen



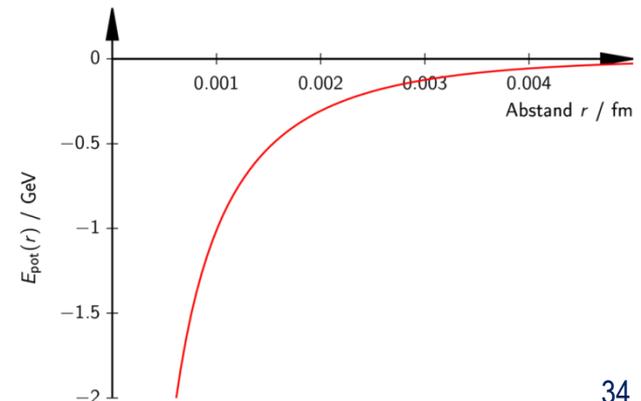
# Endliche Reichweiten

## ► 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

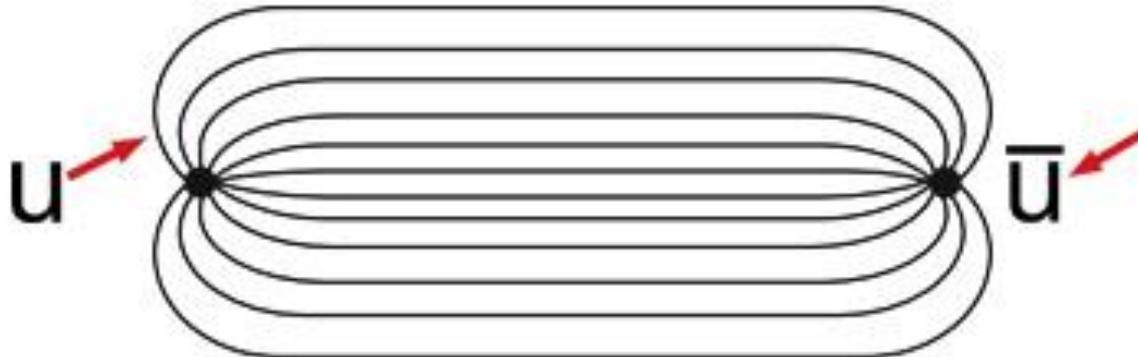
$$\text{► } E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_W \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_W}}$$

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



# Endliche Reichweiten

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

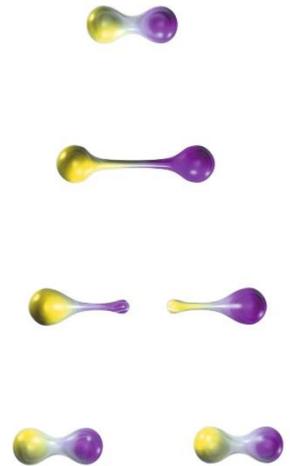
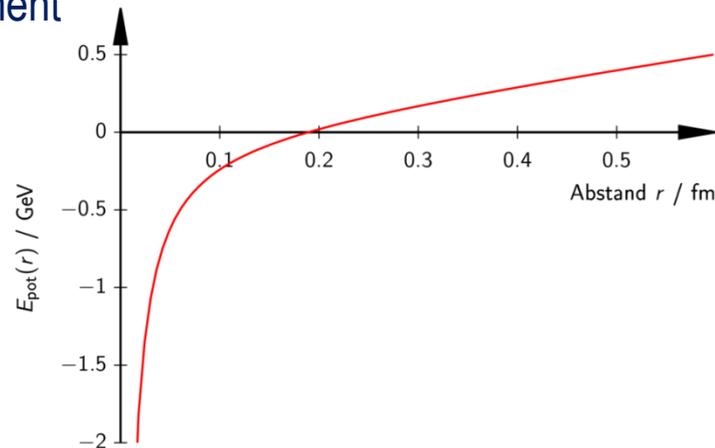


# Endliche Reichweiten

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

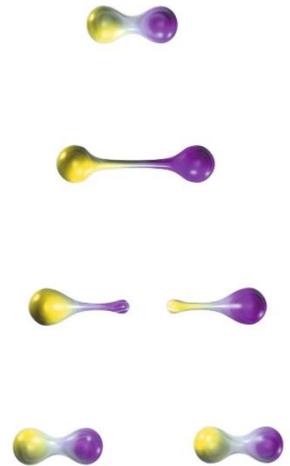


# Endliche Reichweiten

## ► 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

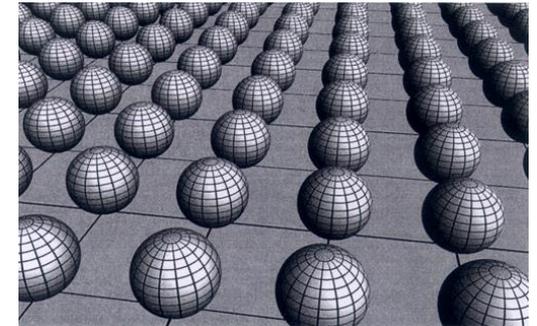
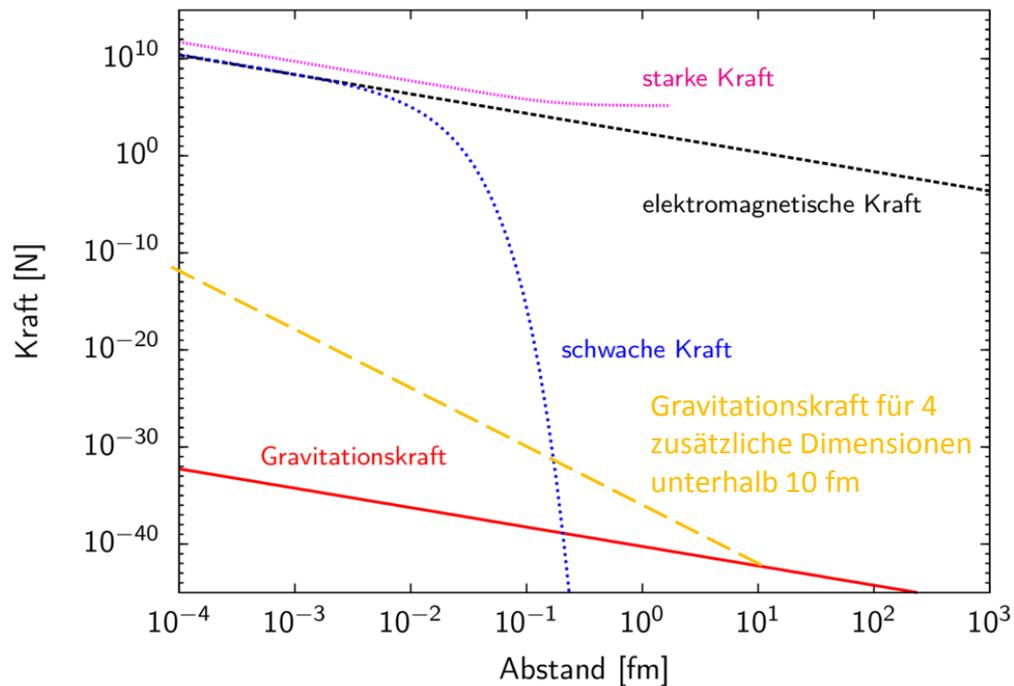
- Masselos
- Besitzen selber starke Ladung
- Gluonen können selber Gluonen abstrahlen (im Gegensatz zu Photonen)
- Feldliniendichte bleibt konstant

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

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

# Spekulationen

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



# Zusammenfassung: Wechselwirkungen

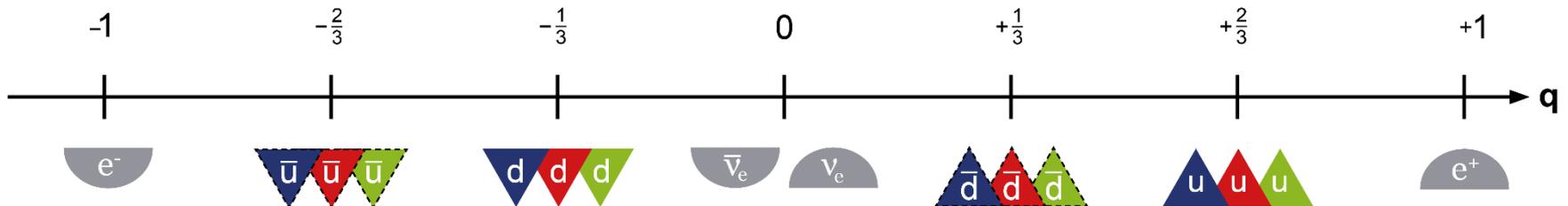
- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
  - (Gravitation, elektromagnetische, schwache und starke WW)
- ▶ 3 dieser WWn werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Nur 2 WWn besitzen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

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

# Elektrische Ladung

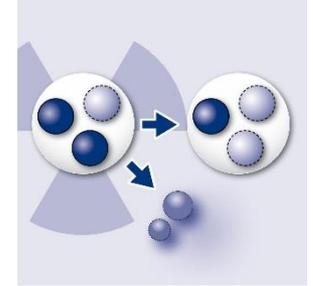


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $q$  einiger Anti-/Materieteilchen

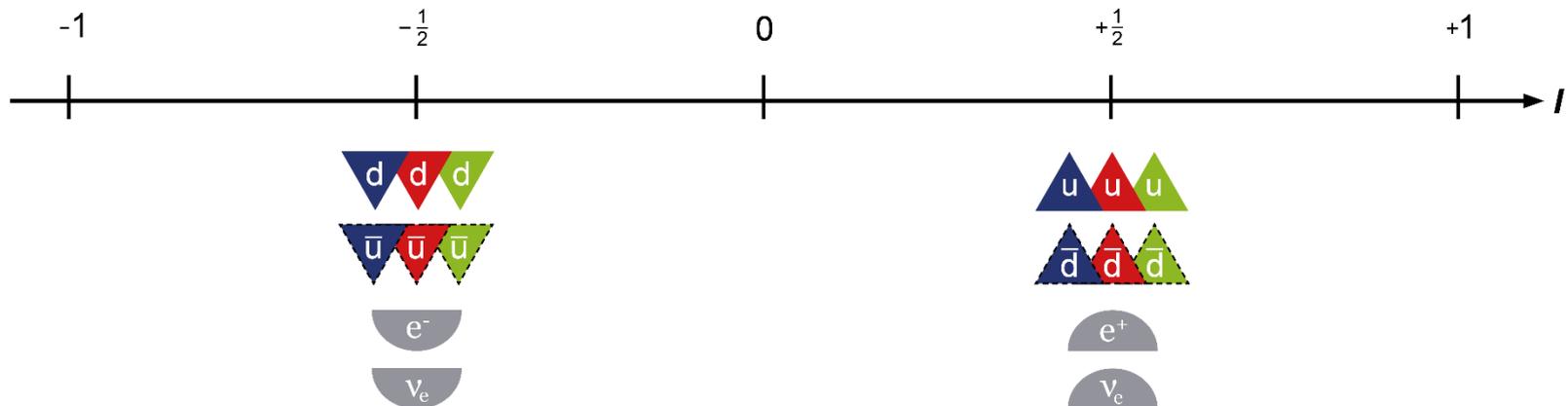


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladung



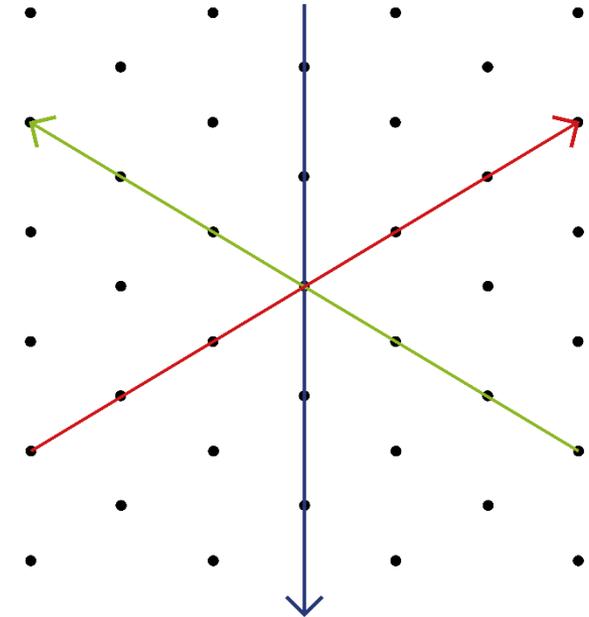
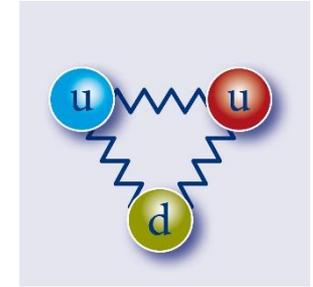
- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von  $I = +\frac{1}{2}$  oder  $I = -\frac{1}{2}$ 
  - alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

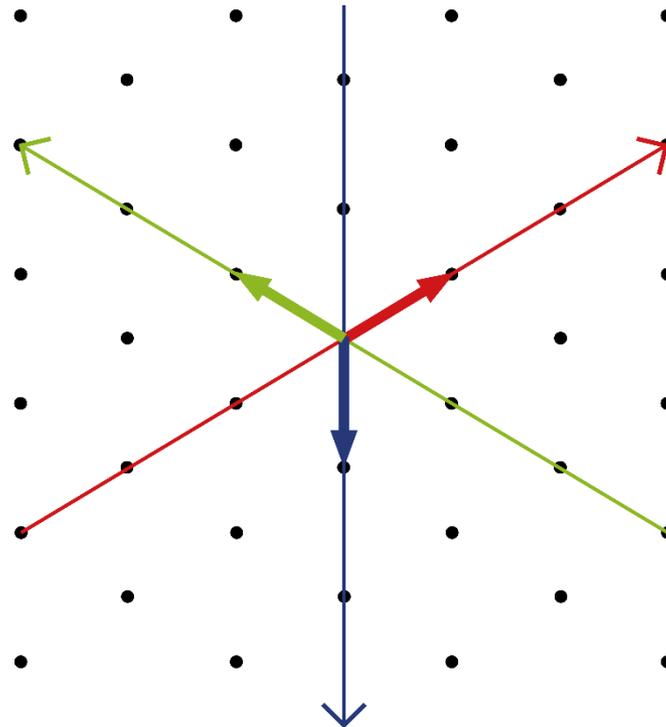
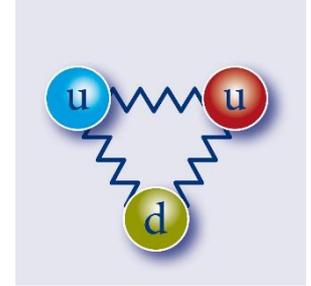
# Starke Ladung

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



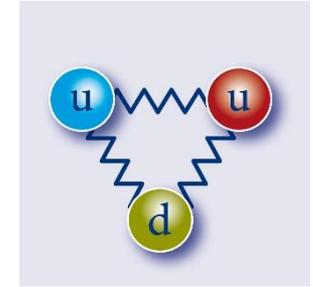
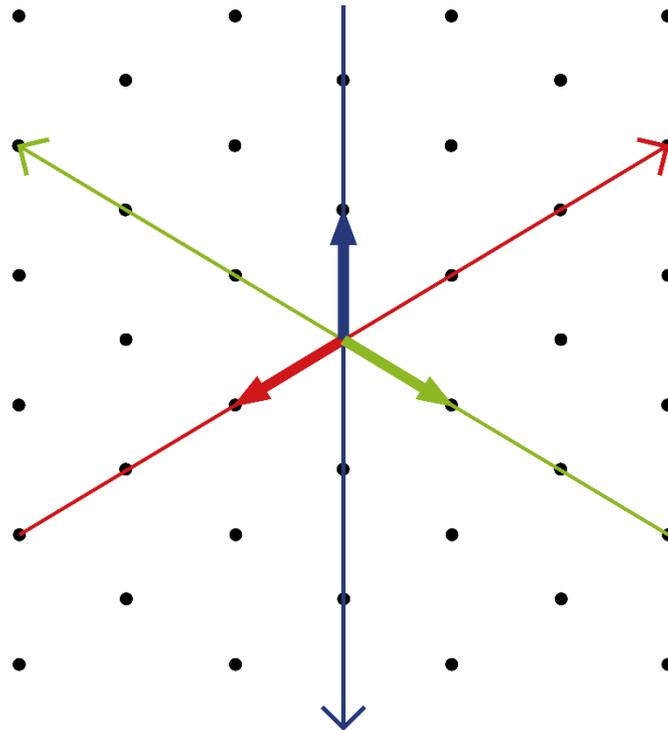
# Starke Ladung

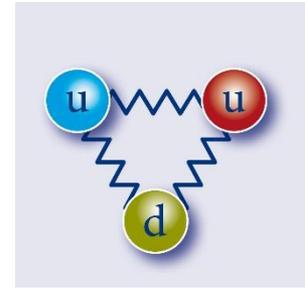
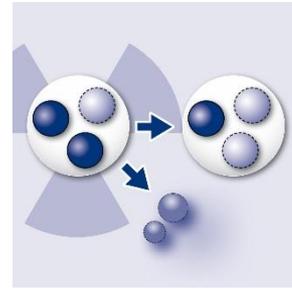
## ► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

## ► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





- ▶ Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

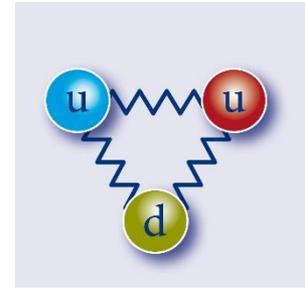
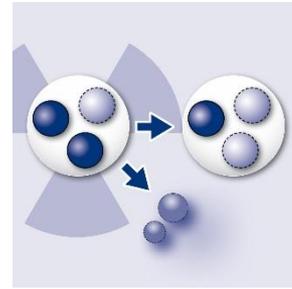
$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \vec{e}_1 + \vec{e}_2 + \vec{e}_3 = \vec{0}$$



- ▶ Alle drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

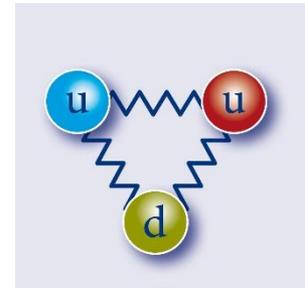
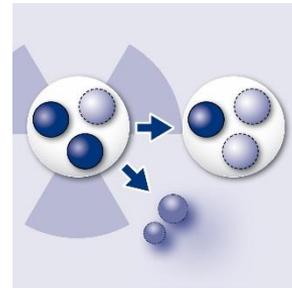
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- 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

# Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag I

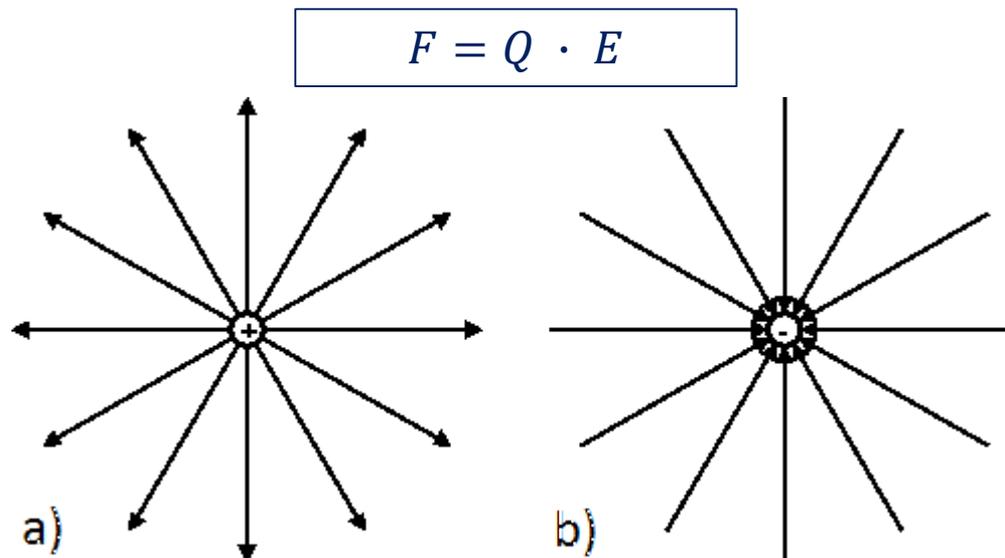


15 Minuten Pause

# Darstellen von Wechselwirkungen

## ► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite  
hier: elektromagnetische Wechselwirkung



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

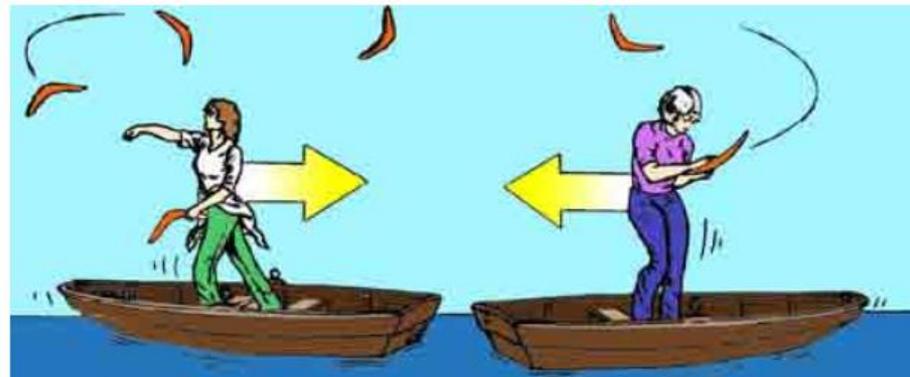
↓

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

# Darstellen von Wechselwirkungen

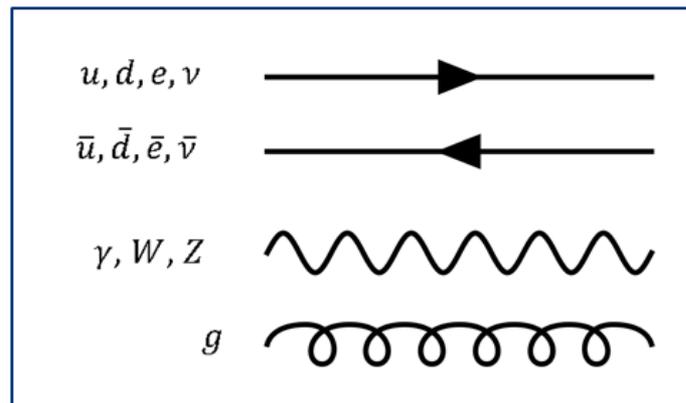
## ► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

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



# Feynman-Diagramme

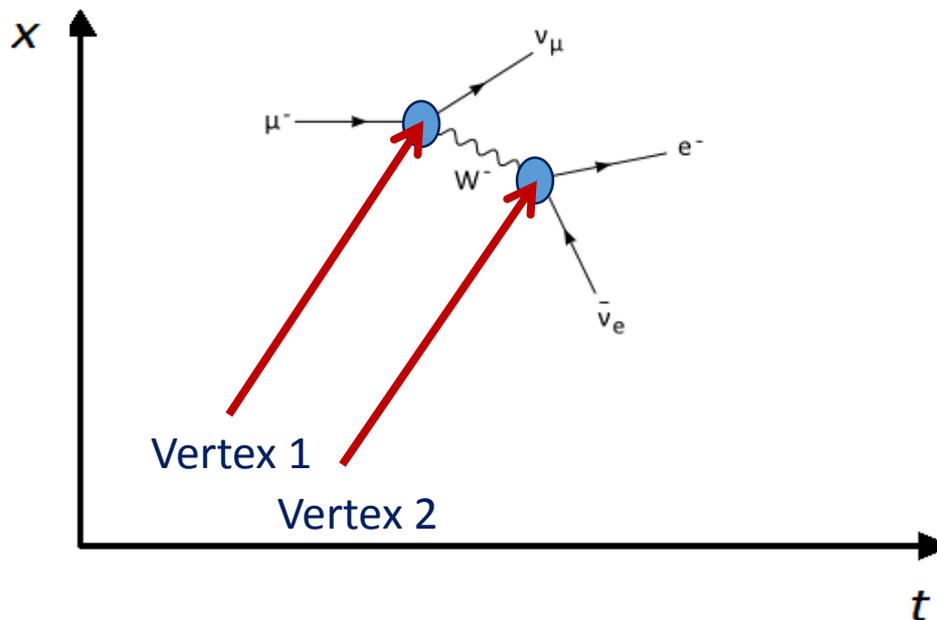
► Aufbau



# Feynman-Diagramme

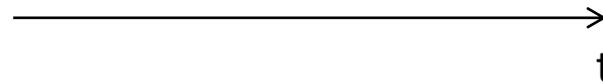
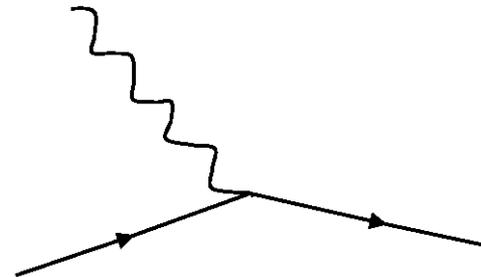
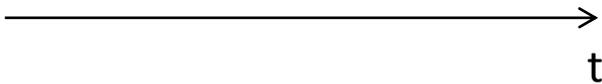
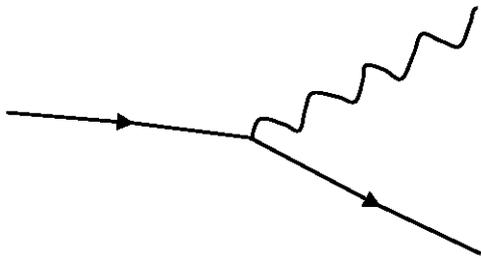
## ► Begriffsklärung:

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



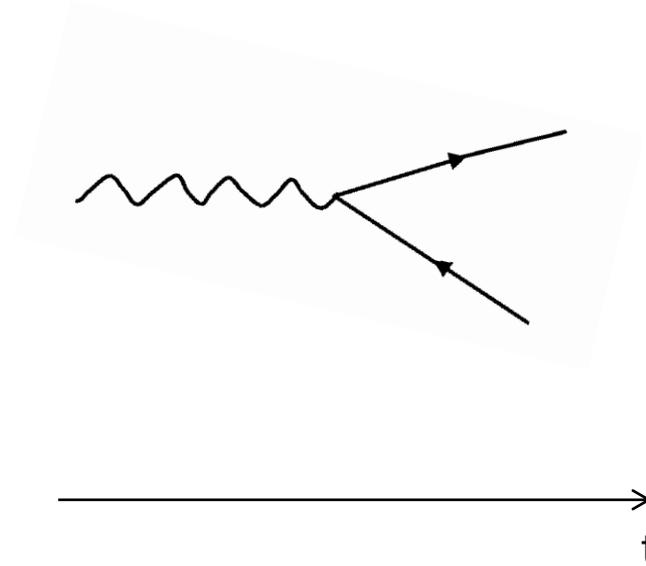
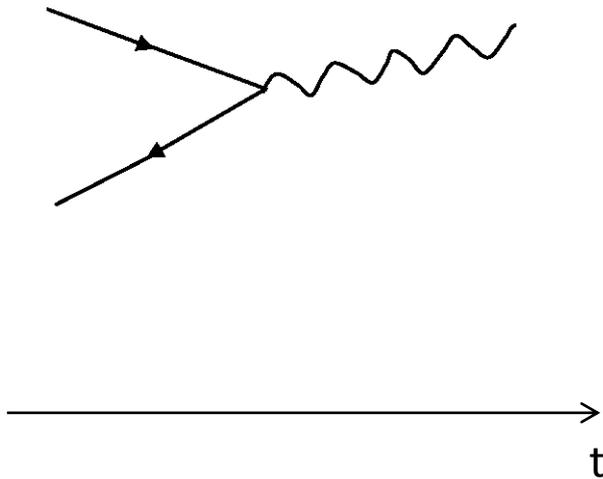
# Grundbausteine 1/2

## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



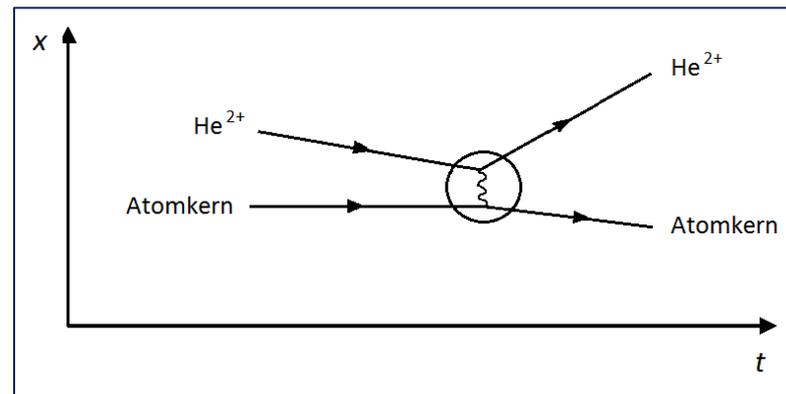
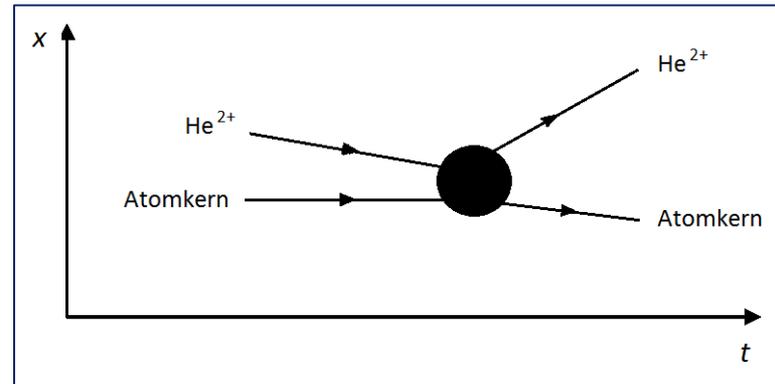
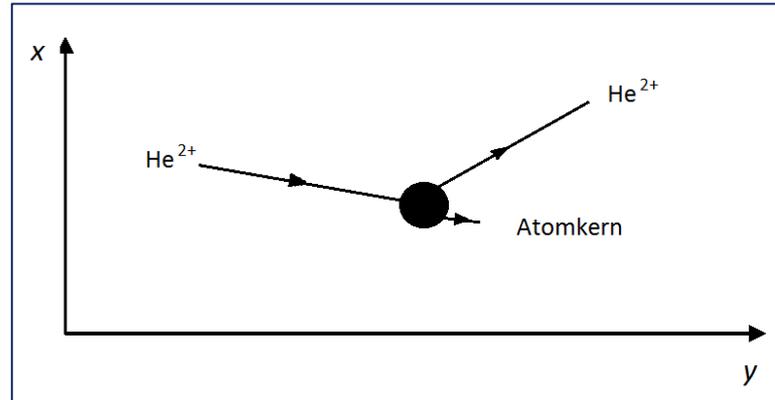
# Grundbausteine 2/2

## ▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



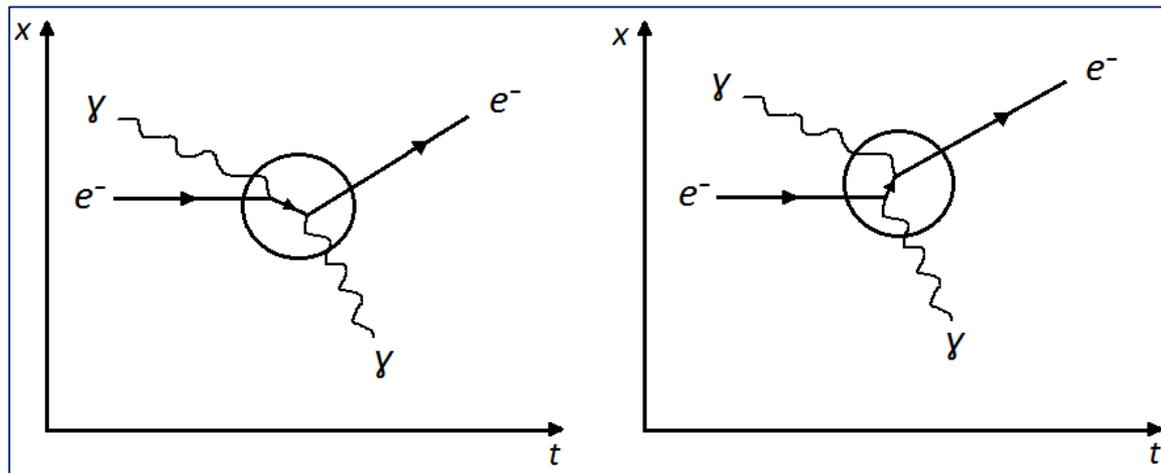
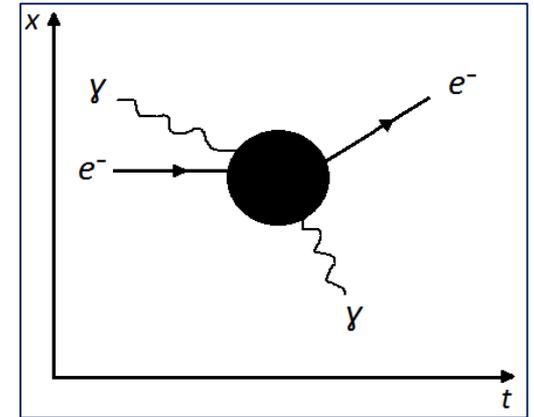
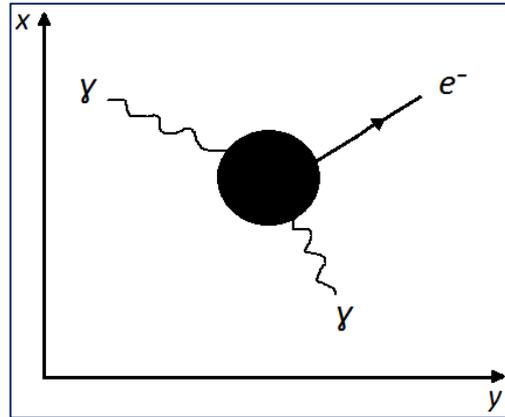
# Prozesse

## ► Rutherford-Streuung



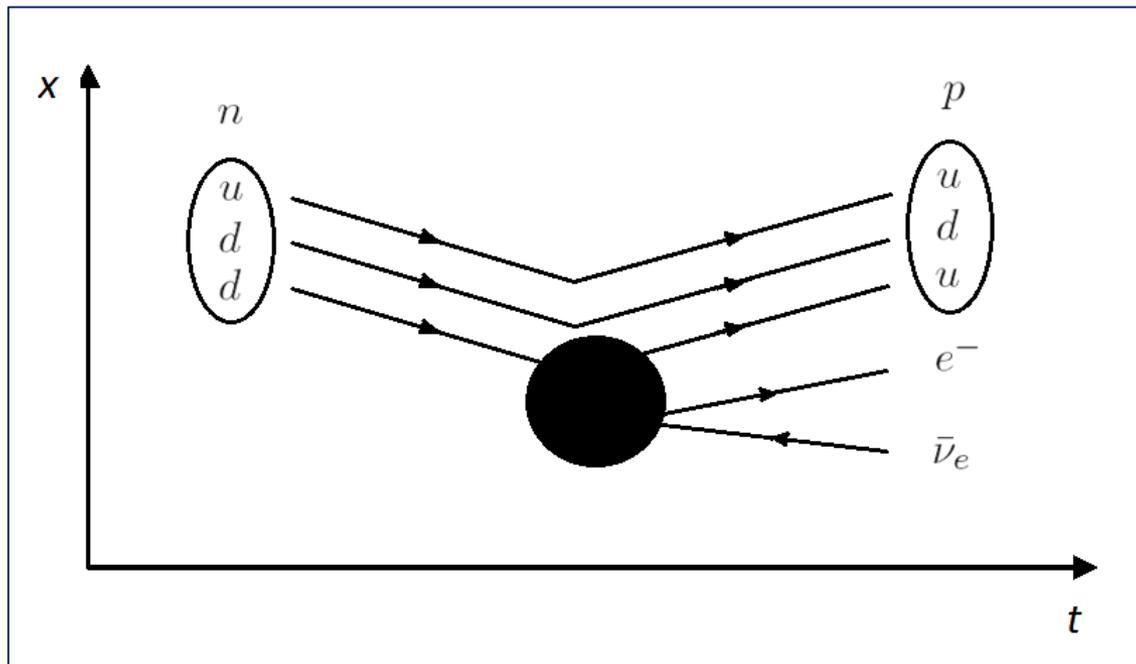
# Prozesse

## ► Compton-Streuung



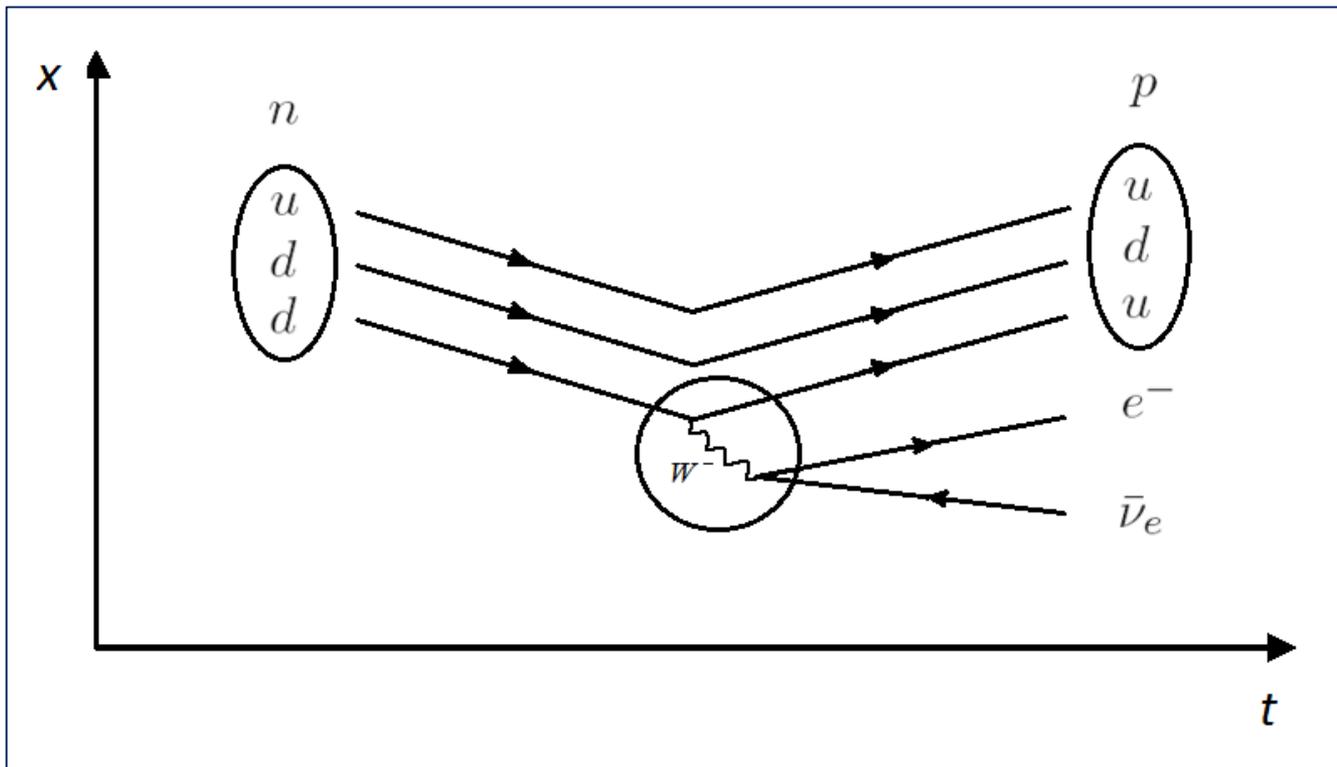
# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung

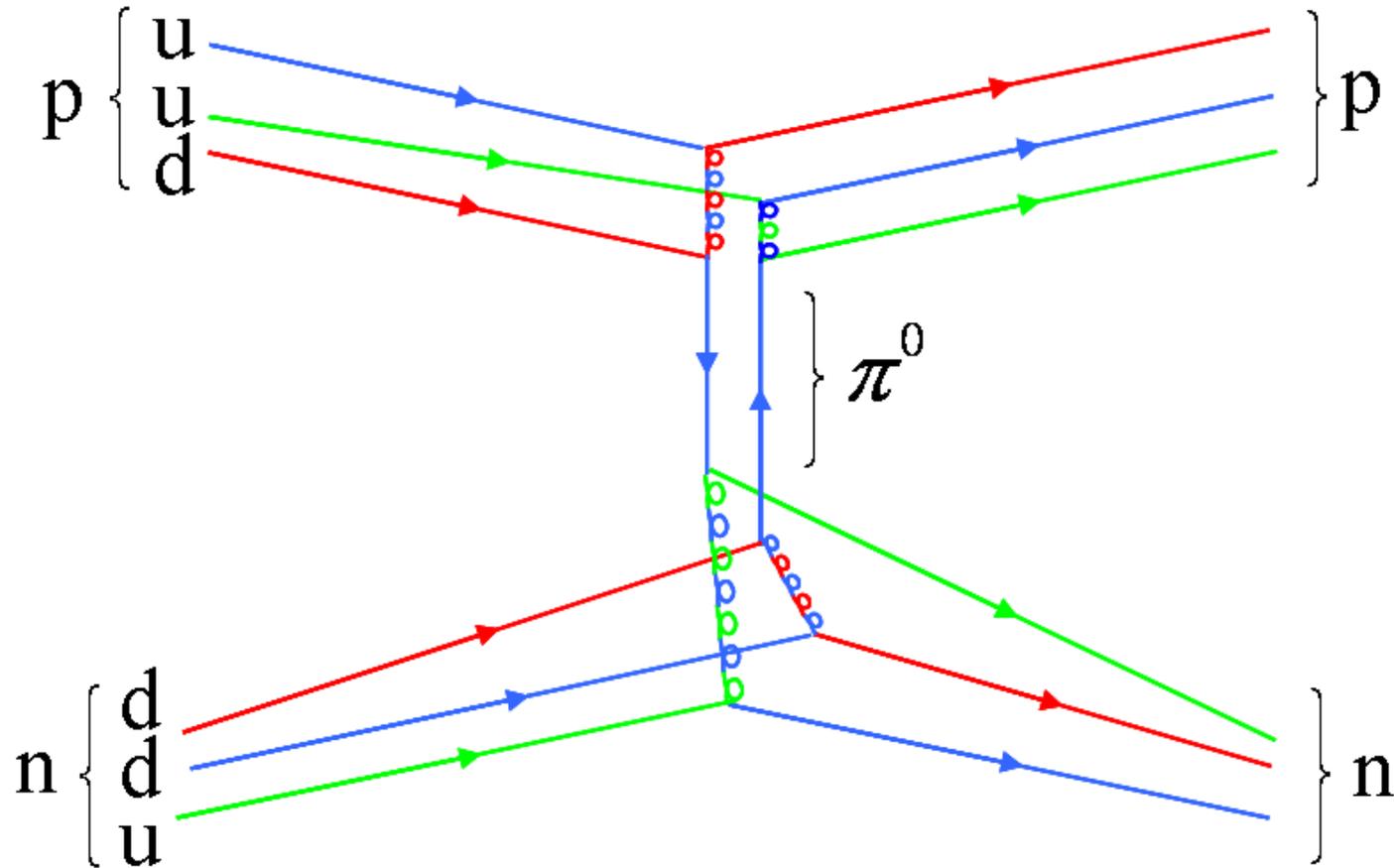


# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung



# Feynman-Diagramme als 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

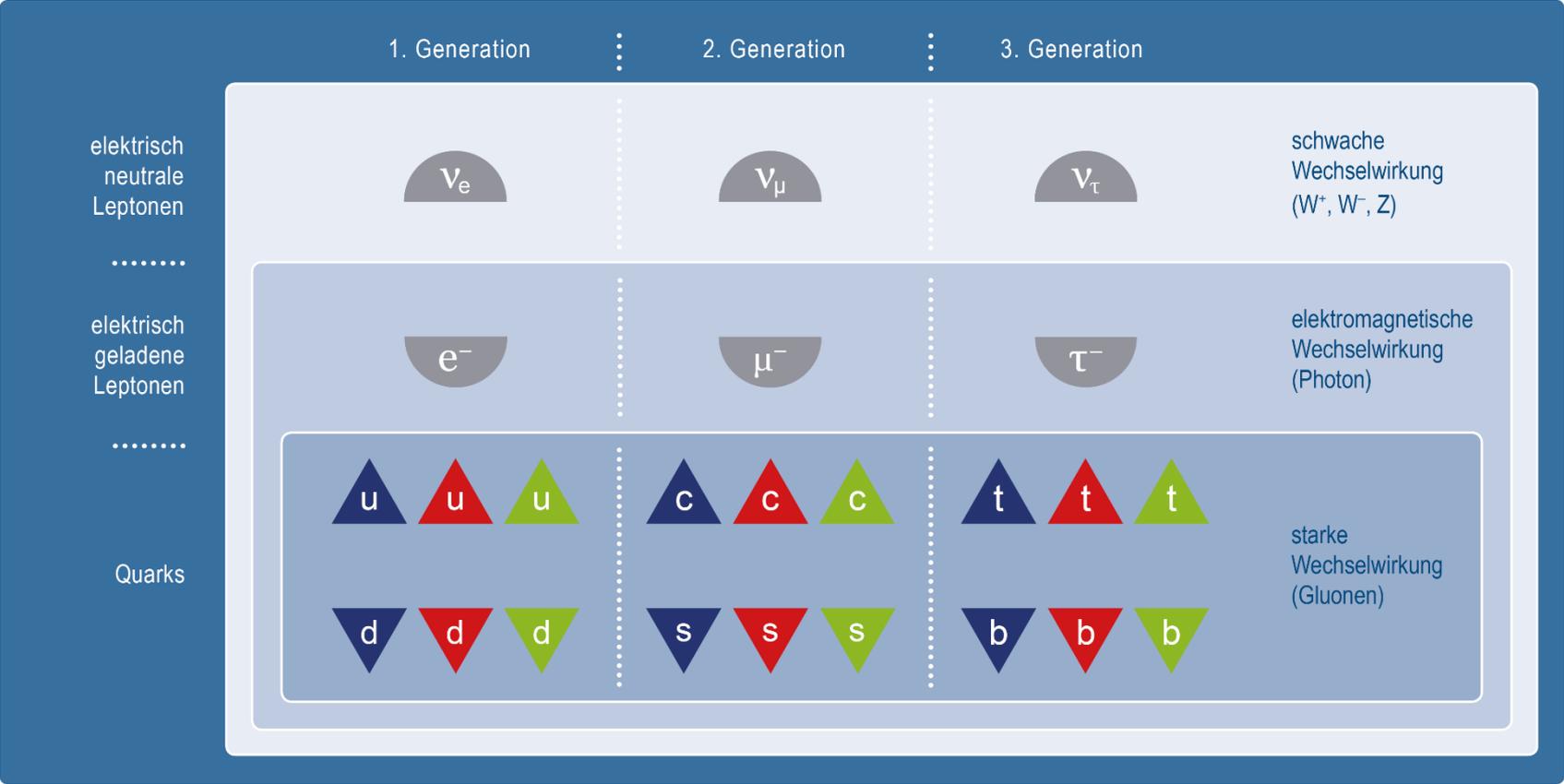
# „Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ 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 Materieteilchen ( $u, d, e^-, \nu_e$ ) 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  $90^\circ$  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  $90^\circ$  gedrehten Darstellungen bezüglich der drei Generationen aufsteigend von oben nach unten nach ihrer Masse geordnet

# Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

1A																	2A		
1																	2		
1	H																	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	
* lanthanisch			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
** actinisch			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

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

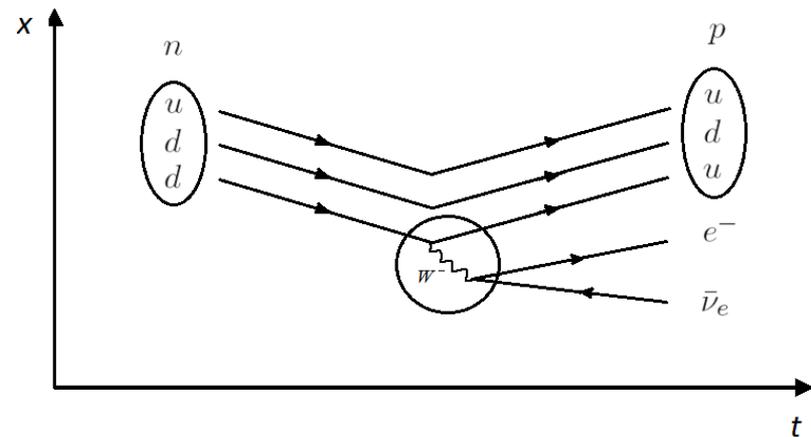


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

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

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



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Schwache Wechselwirkung

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

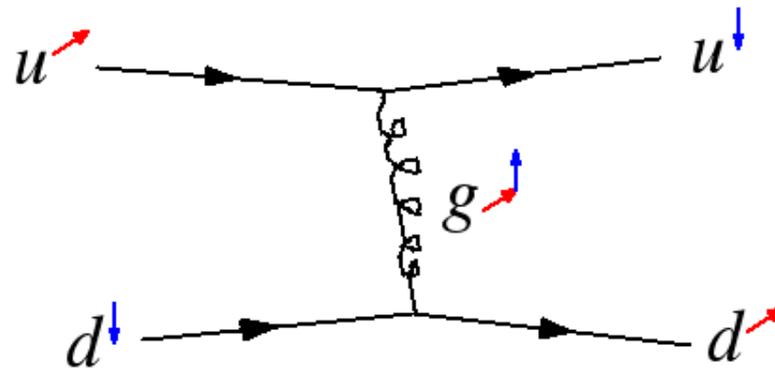
- $\begin{pmatrix} u \rightarrow \\ d \rightarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \swarrow \\ d \swarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \downarrow \\ d \downarrow \end{pmatrix}$

# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Starke Wechselwirkung

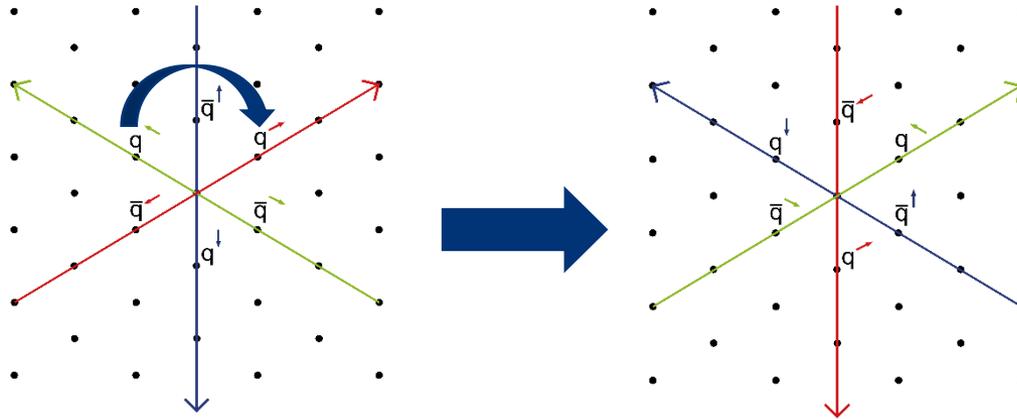
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

►  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

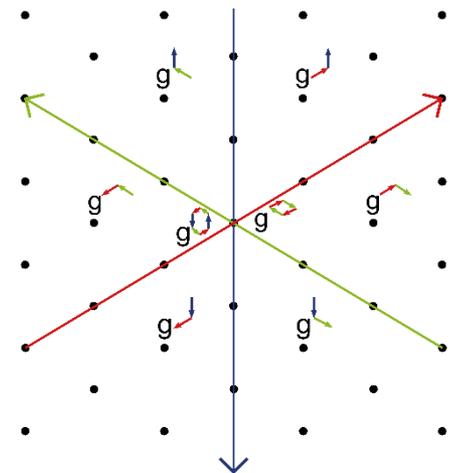
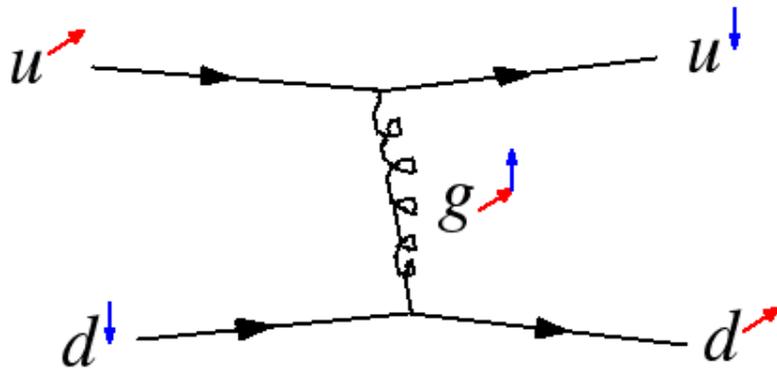


# Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

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



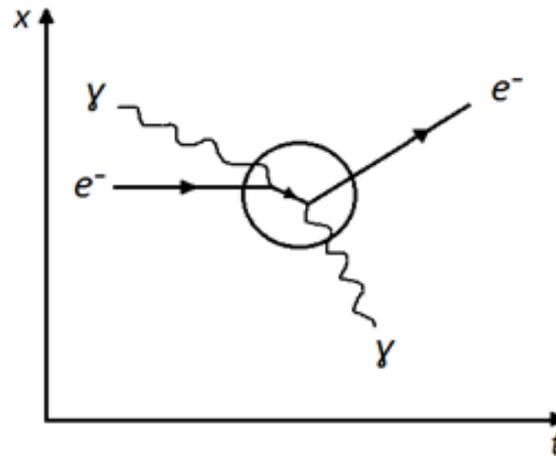
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

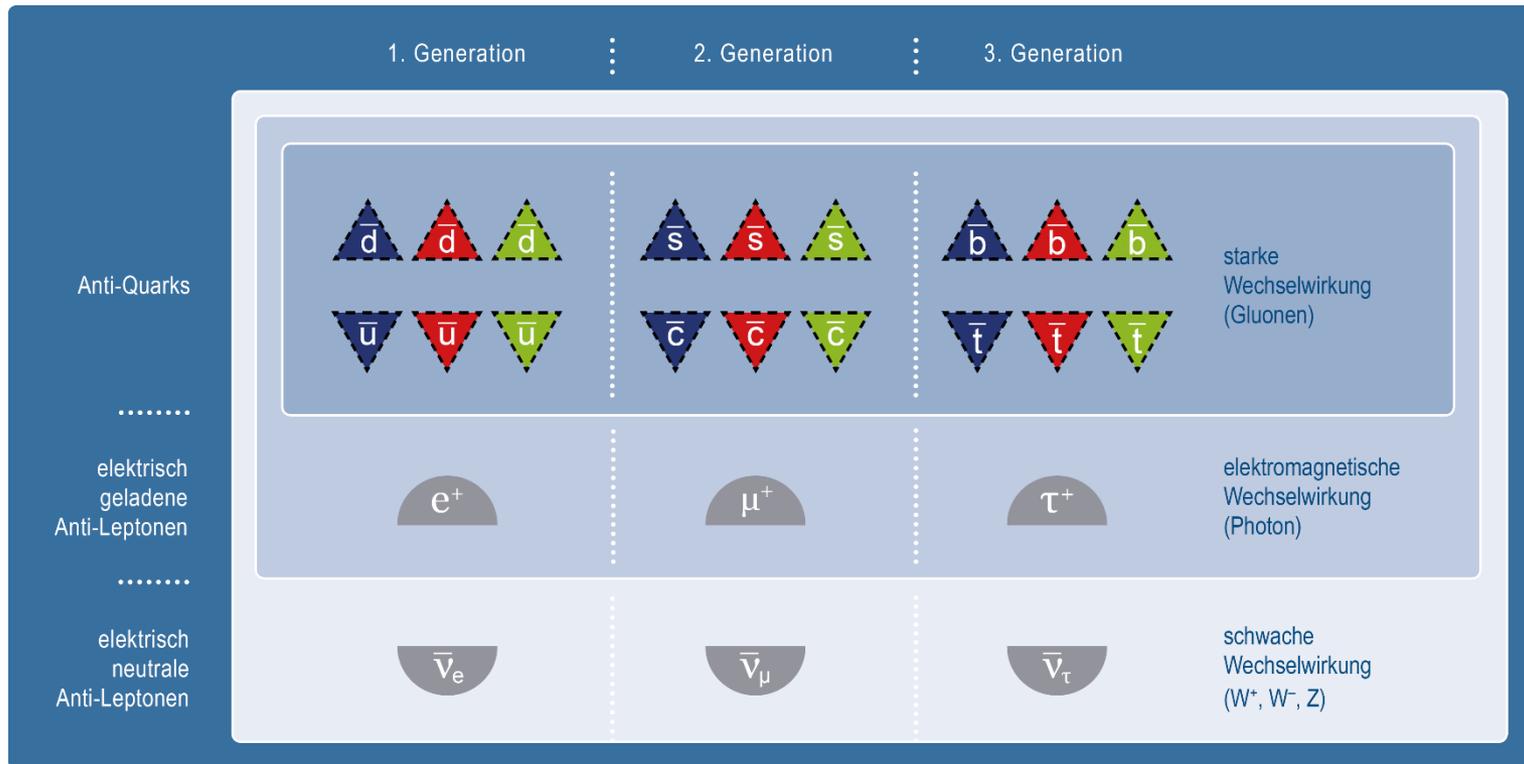
## ▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

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



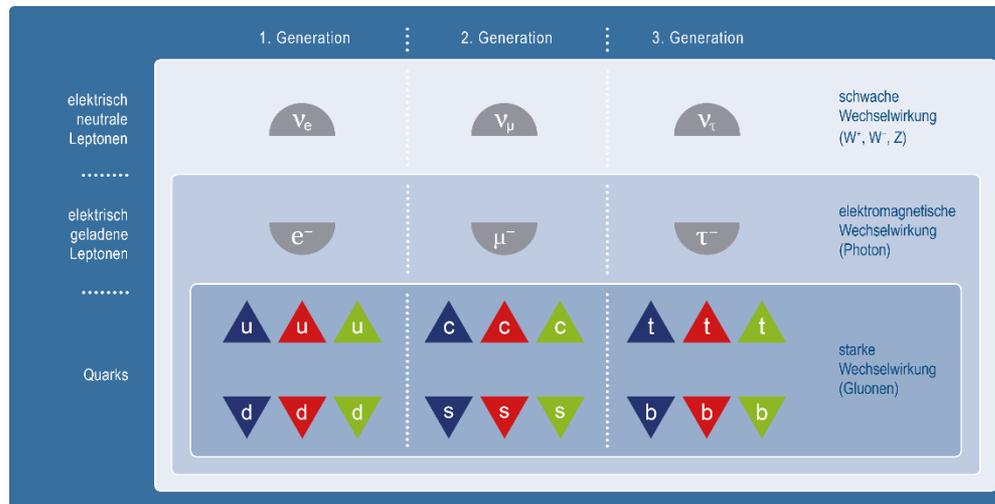
# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

- ▶ 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
- ▶ Experimentell findet man (nicht vorhersagbar!)
  - Dupletts der schwachen Wechselwirkung
  - Tripletts der starken Wechselwirkung
  - Singulett der elektromagnetischen Wechselwirkung



- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich

# Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!

[www.teilchenwelt.de](http://www.teilchenwelt.de)

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



27.02.2017



# Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag II



Mittagspause