



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](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

Atomaufbau  
Ionisierende Strahlung  
Radioaktiver Zerfall  
Kernspaltung und Kernfusion  
Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

### Mögliche Kontexte

Geschichte der Atommodelle  
Lichtquellen und ihr Licht  
Physik in der Medizin (Bildgebende Verfahren, Radiologie)  
(Erdgeschichtliche) Altersbestimmungen  
Energiegewinnung durch nukleare Prozesse  
Forschung an Teilchenbeschleunigern

### Basiskonzept Wechselwirkung

Kernkräfte  
Kettenreaktion  
Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen  
Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept

### Basiskonzept Energie

Linienspektren  
Energiequantelung der Hüllelektronen  
Dosimetrie  
Bindungsenergie  
Äquivalenz von Masse und Energie

### Basiskonzept Struktur der Materie

Kern-Hülle-Modell  
Bohr'sche Postulate  
Strahlungsarten  
Zerfallsprozesse  
Massendefekt  
Kernbausteine und Elementarteilchen

Quelle: [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOST\\_Physik.pdf](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





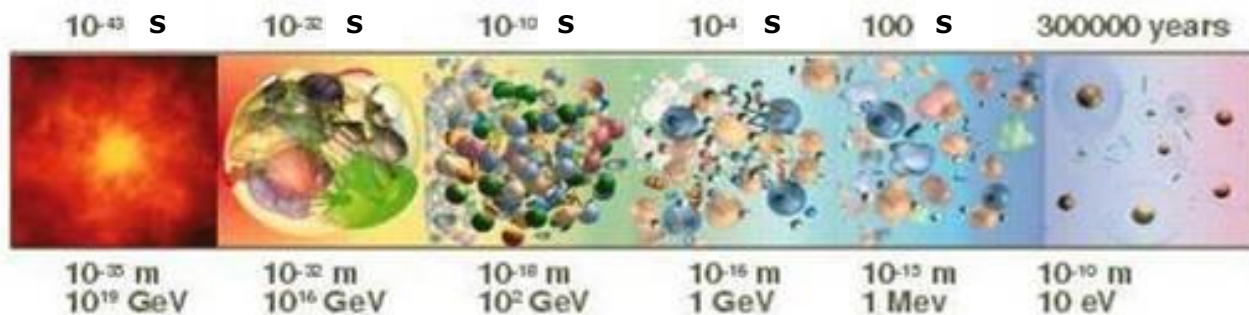
# Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

- ▶ **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

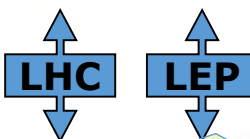
# Physik: Reduktion auf wenige Prinzipien

- LHC:**

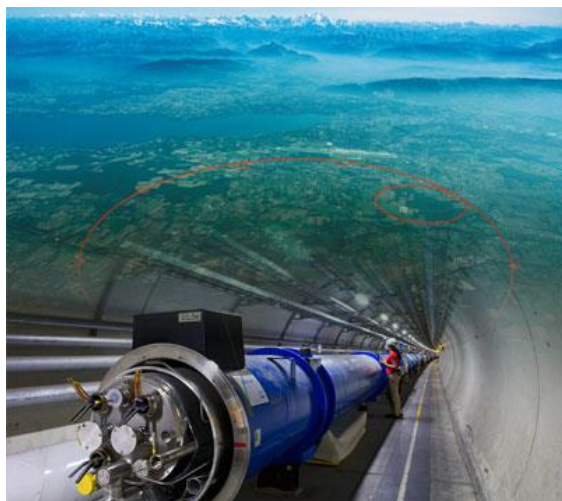
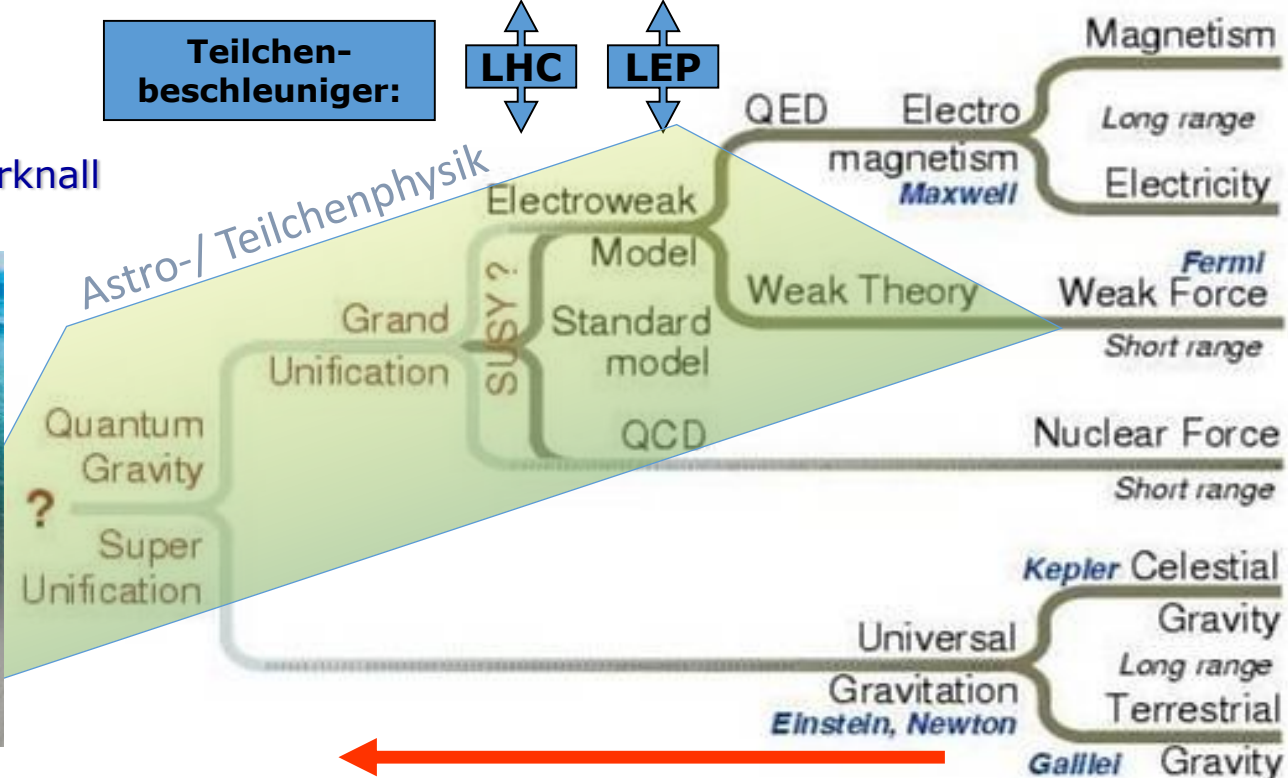
Nachstellen der Prozesse zwischen Elementarteilchen  $10^{-12}$  s nach dem Urknall



**Teilchenbeschleuniger:**



Astro-/ Teilchenphysik



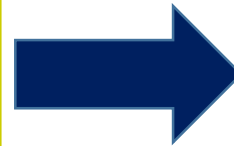
← **Geschichte der Physik**  
Zurück zum Urknall

# 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**

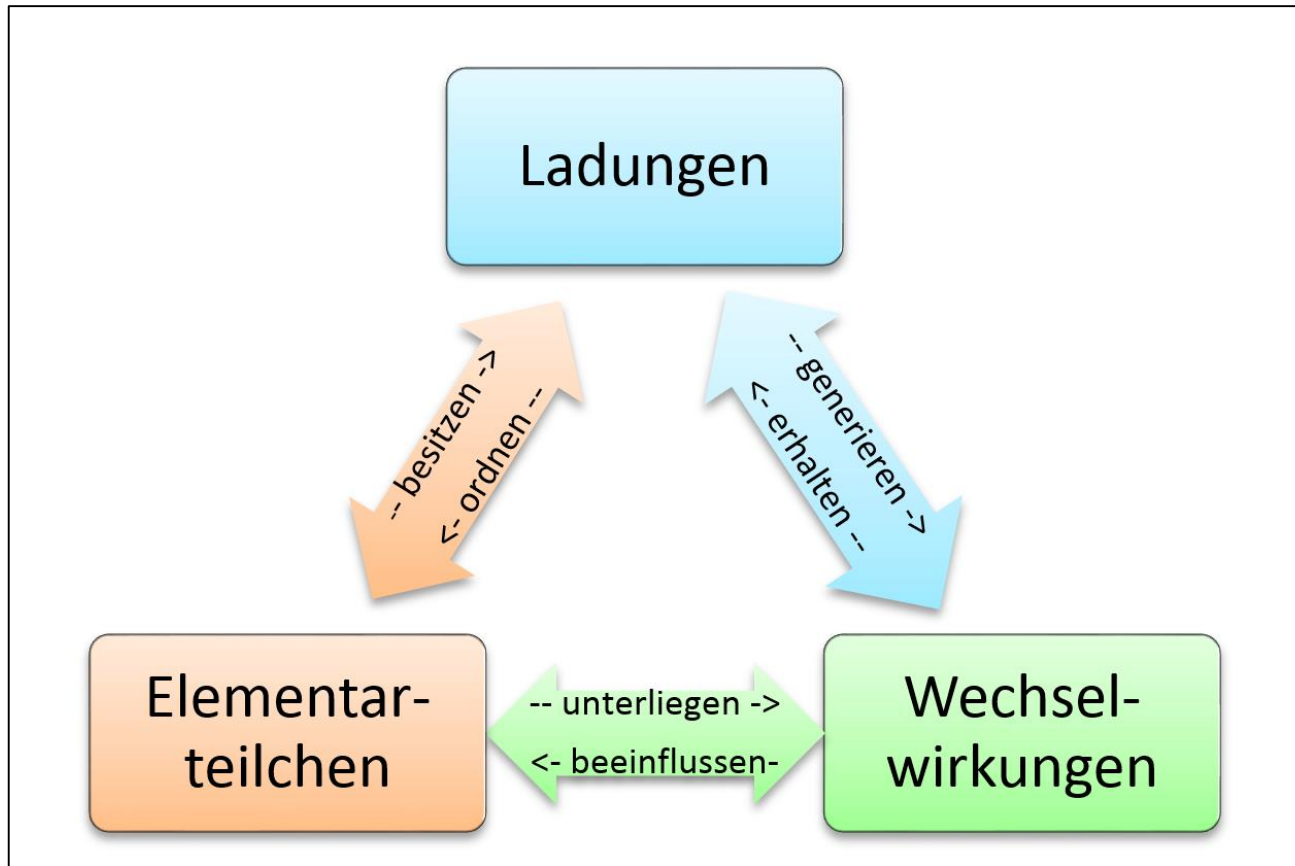


# Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ 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??

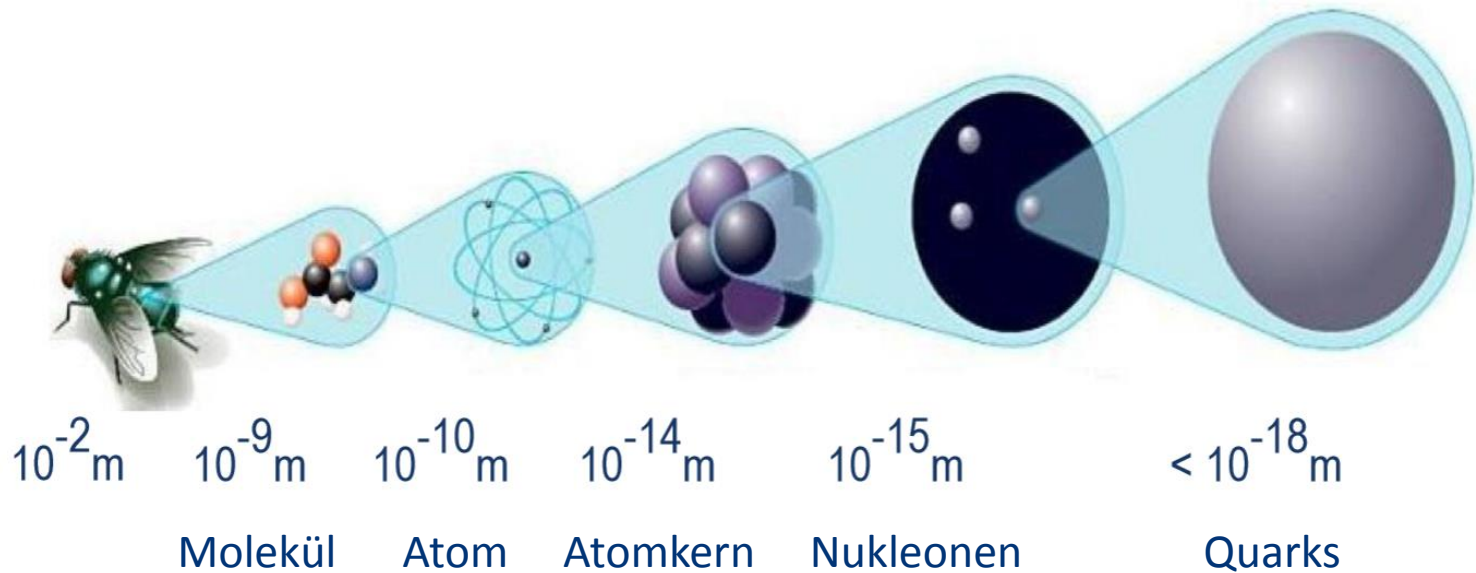
- Nur u,d,e sind für Aufbau der Materie nötig
- Warum es genau diese Teilchen gibt, kann nicht vorhergesagt werden (nicht verstanden!)
- Das Standardmodell ist eine **Theorie der Wechselwirkungen**

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

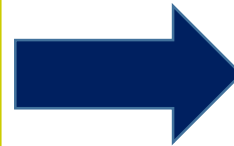


# Reduktion

**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

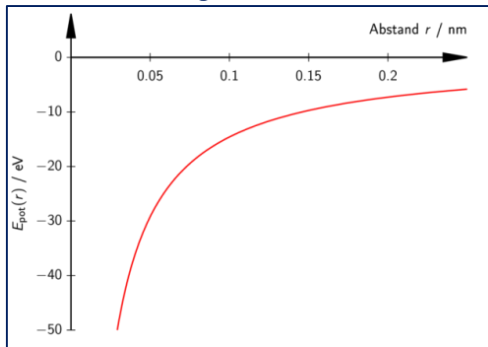
- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B.  $\beta$ -Umwandlung)
- Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
- Vernichtung in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

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

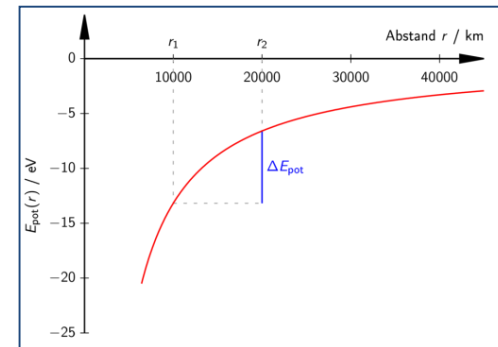
## ▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Ausgangspunkt: Beschreibung der Vorgänge mit 2 bekannten Wechselwirkungen

## ► Elektromagnetische WW

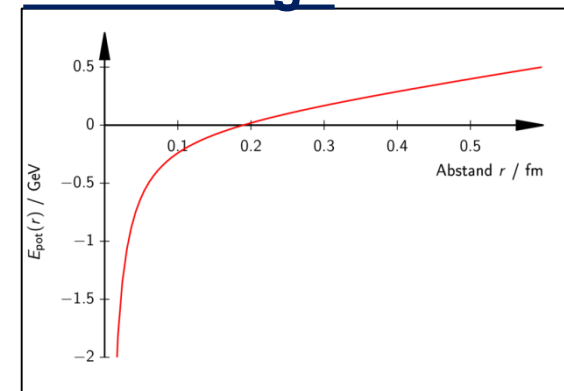


## ► Gravitation



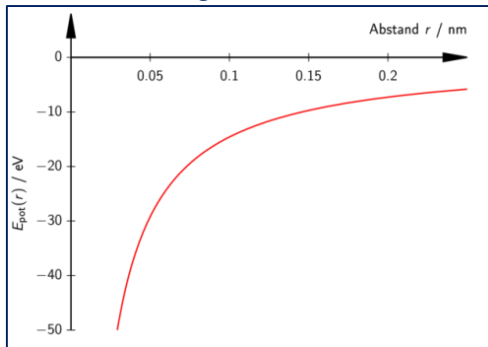
► Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ( $r \sim \text{fm}$ )

## ► Einführung: starke WW

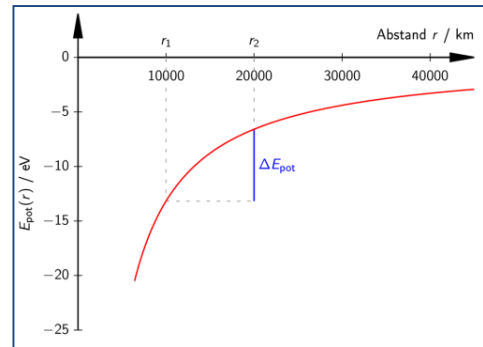


# Die vierte fundamentale Wechselwirkung

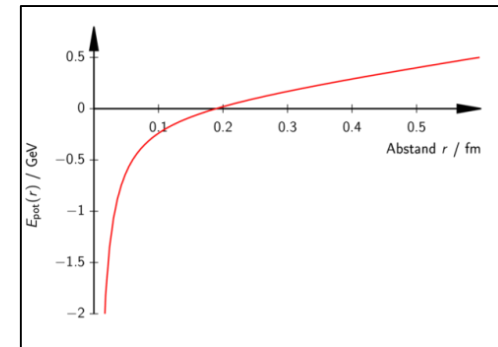
## ▶ Elektromagnetische WW



## ▶ Gravitation



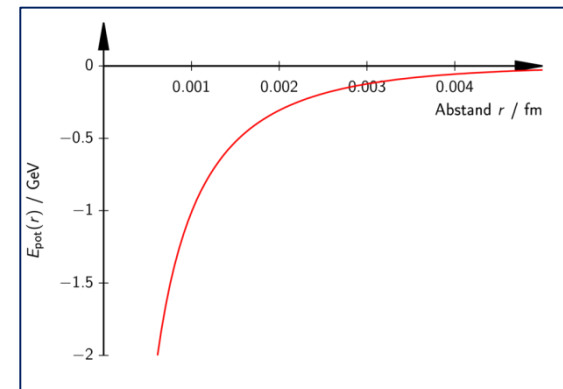
## ▶ starke WW



## ▶ Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren?

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

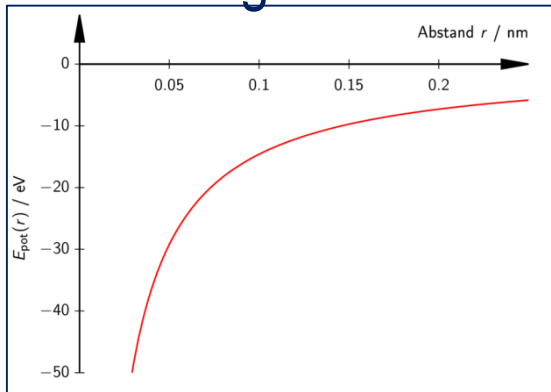
## ▶ Einführung: schwache WW



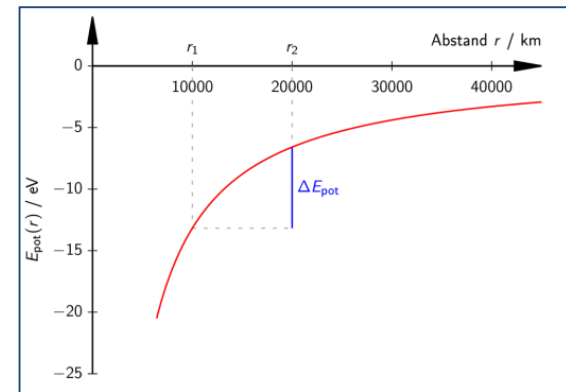


# Vergleich der potenziellen Energien

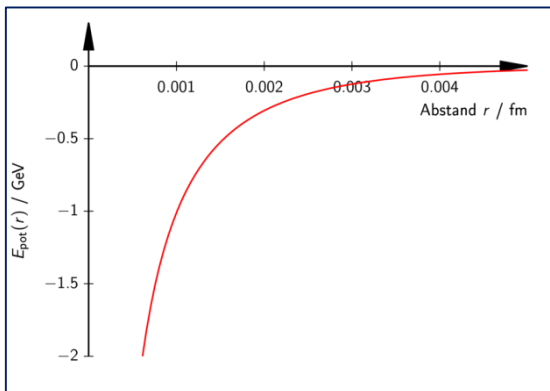
## ▶ Elektromagnetische WW



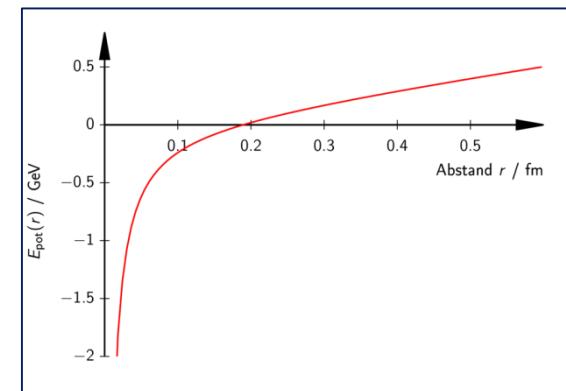
## ▶ Gravitation



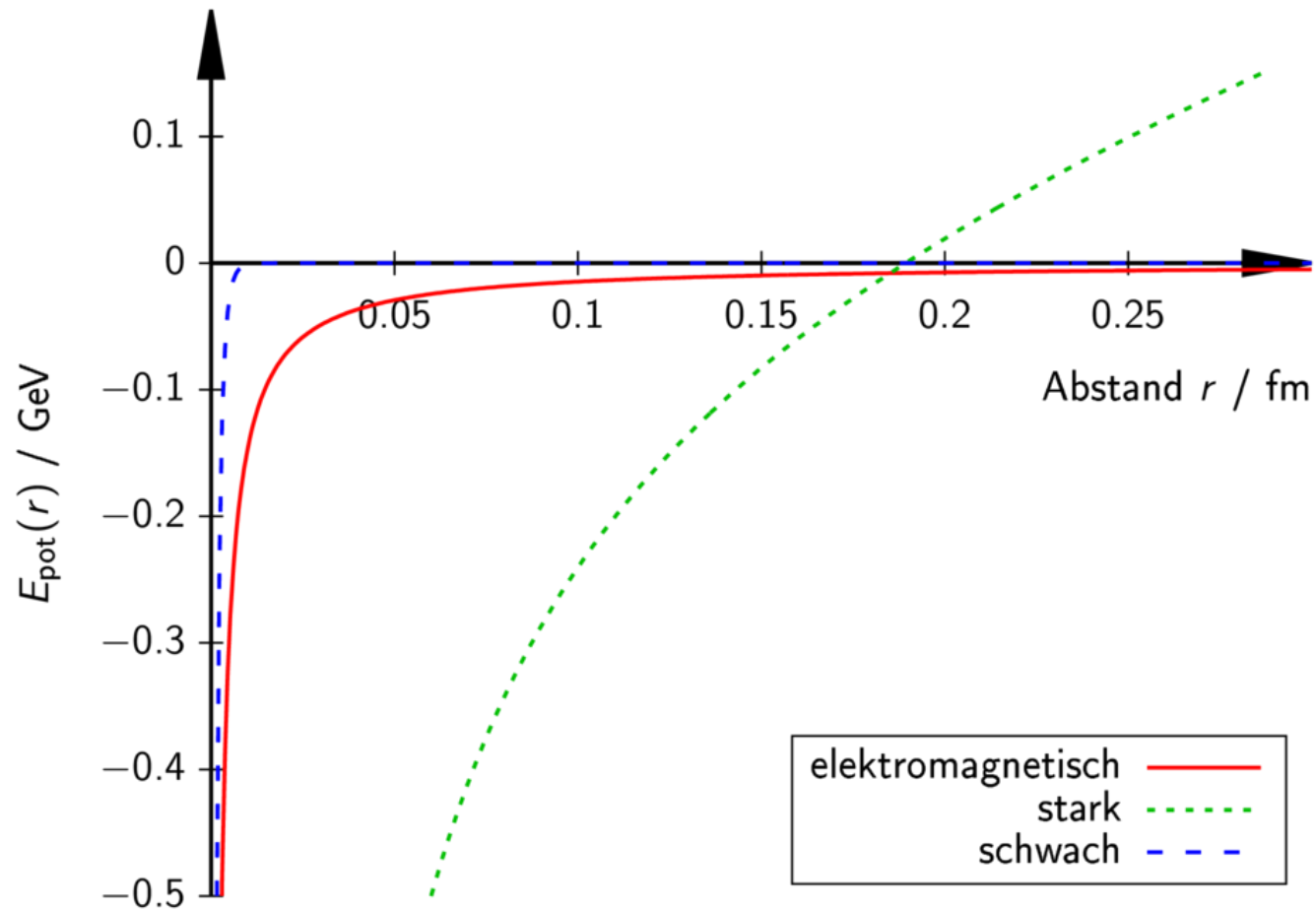
## ▶ schwache WW



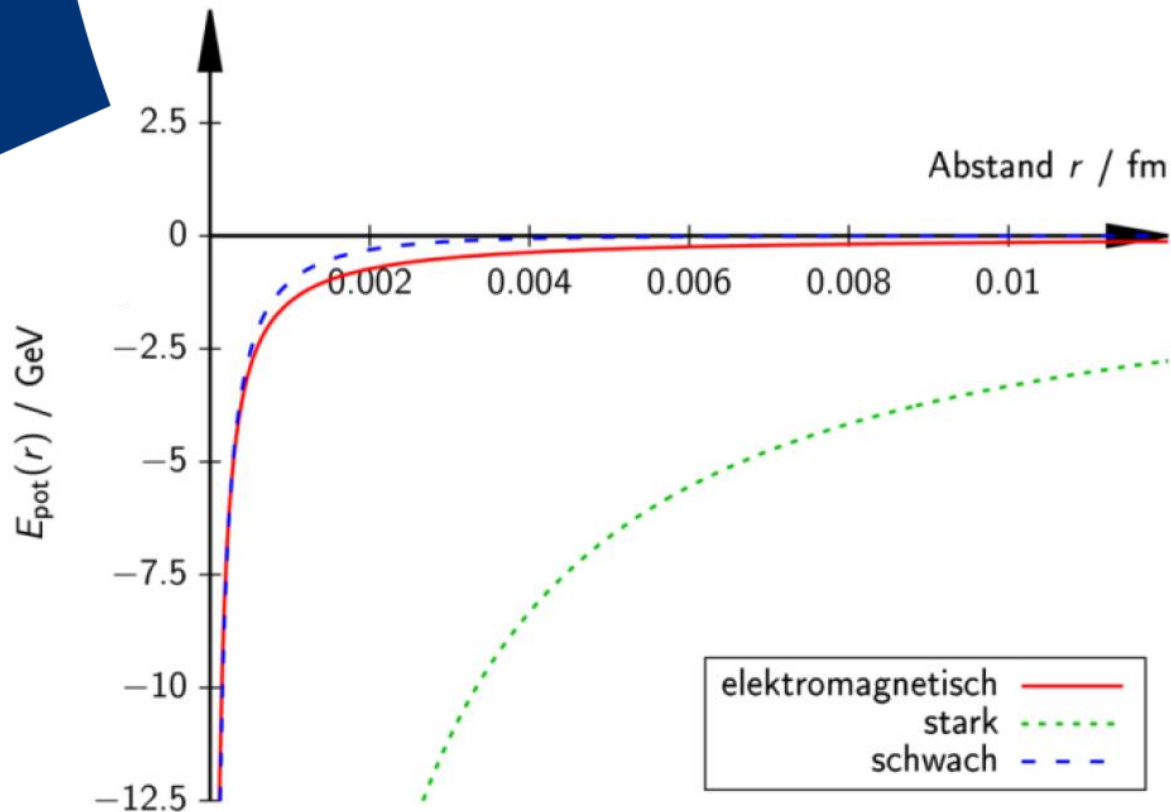
## ▶ starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien



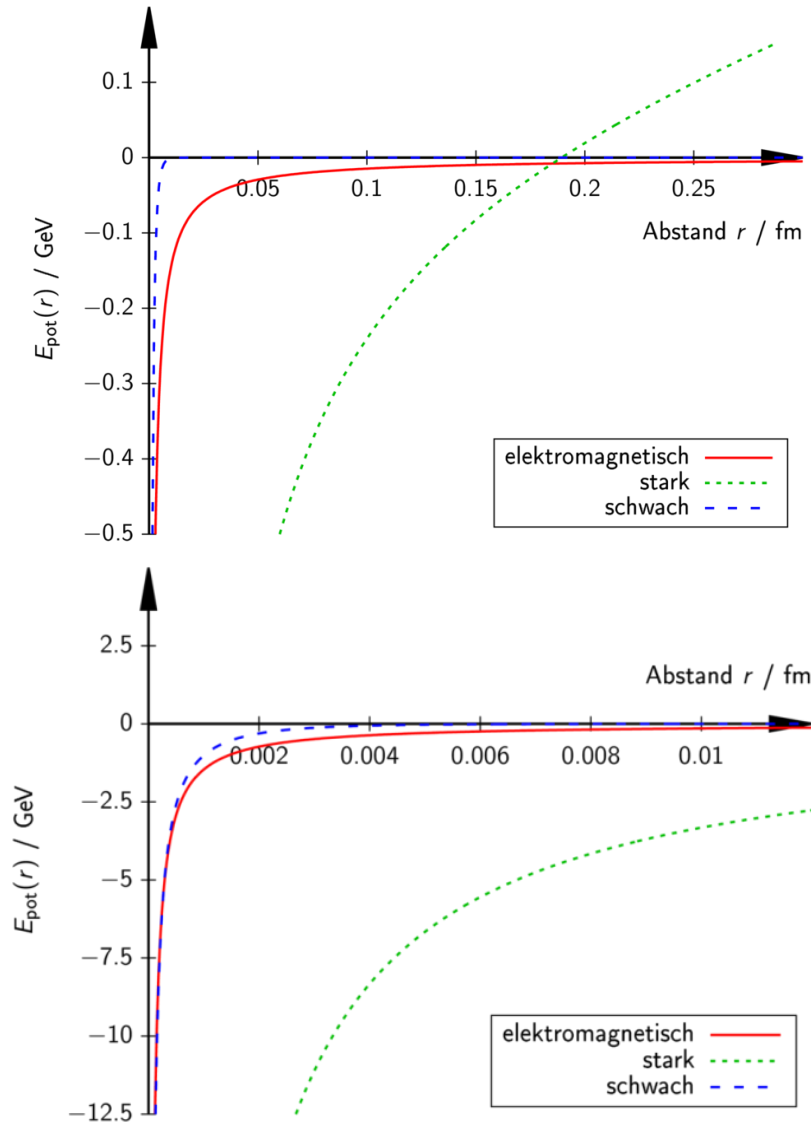
# Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen



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

# Ziel: Vergleich bei Skalierung

(horizontale Achse  $\div 25$ , vertikale Achse  $\times 25$ )



- ▶ **Bei kleinen Abständen** gleiches  $1/r$  – Verhalten aller WW (unteres Bild)
- ▶ **Elektromagnetische WWirkung** invariant bei Skalierung  $\rightarrow$  “unendliche Reichweite“
- ▶ **Schwache und Starke WWirkung** haben charakteristische Länge für Abweichung von  $1/r$
- ▶ **Quantitativ beschreibbar** mit
  - Ladungsprodukt
  - Stärkeparameter  $\alpha$
  - Char. Längen  $\lambda_w = 0,002$  fm und  $(\hbar c \alpha_s / k)^{1/2} = 0,2$  fm

$$E_{\text{Pot}}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r}$$

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

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

# Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

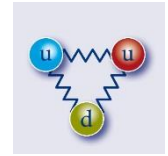
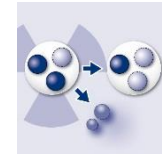
- Elektrische Ladung

$$Q = Z \cdot e$$

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 $\alpha$ auch für andere Wechselwirkungen

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

# Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:

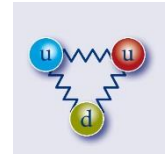
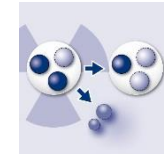
- Elektrische Ladung  $Q = Z \cdot e$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

- ▶ Elementarladung ist nun im Kopplungsparameter  $\alpha$  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

$Z$

schwache Ladungszahl

$I$

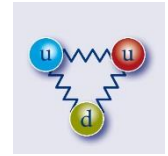
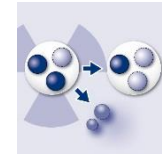
starker Farbladungsvektor

$\vec{C}$

- ▶ 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:  $\alpha_{grav}$  zwischen Proton (p) und Elektron (e)

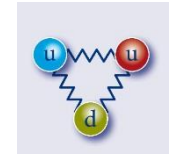
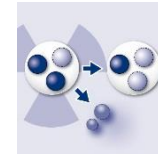
- $\alpha_{grav}^{p,e} = G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$

- 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?

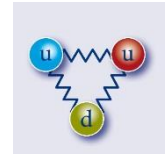
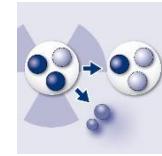
## ► Schulniveau:

- 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



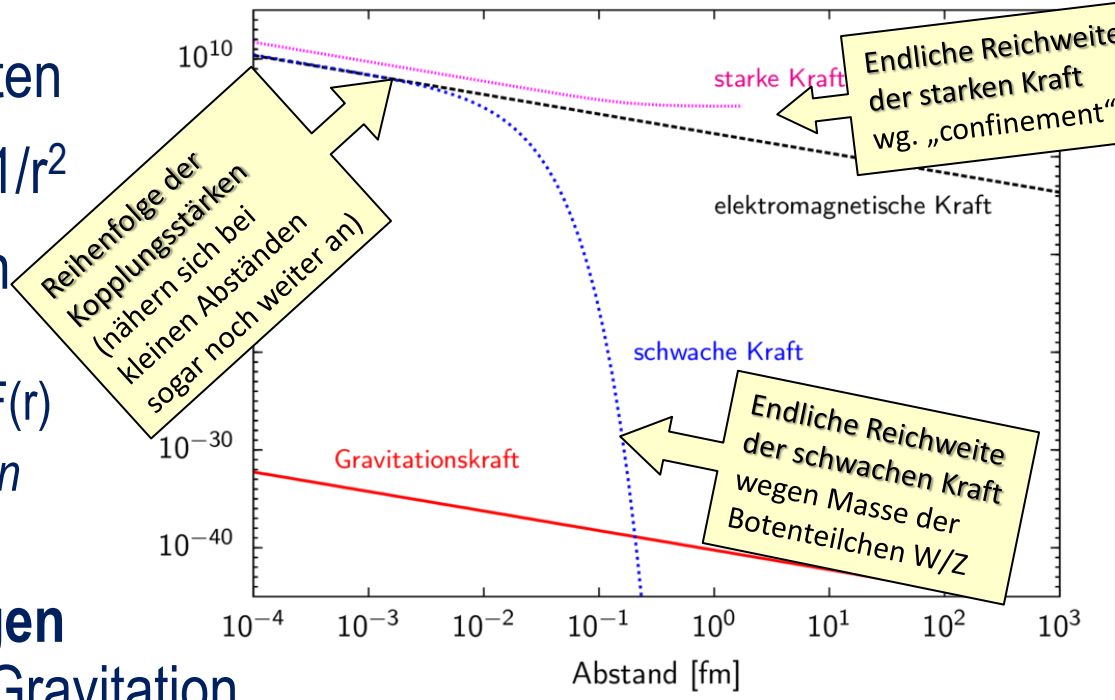
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

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

# Überblick

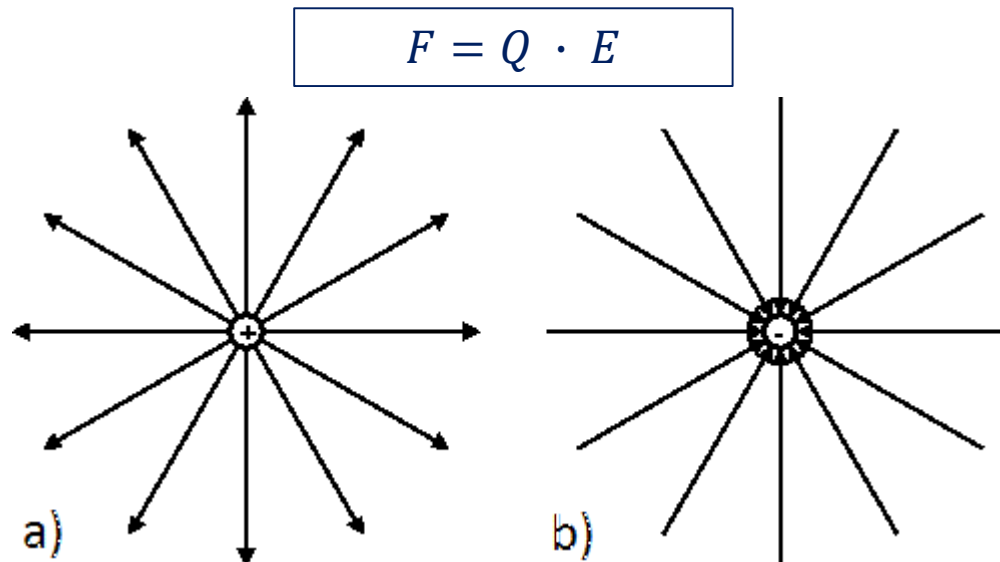
- ▶ Verschiedene Reichweiten
- ▶ Für kleine Abstände  $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reihenfolge der Stärken
  - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen  $F(r)$
  - Kann nur für WWirkungen definiert werden:  $\alpha$  !
- ▶ Stärken aller WWirkungen **sehr** ähnlich, außer für Gravitation



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	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

# Geometrische Betrachtung

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



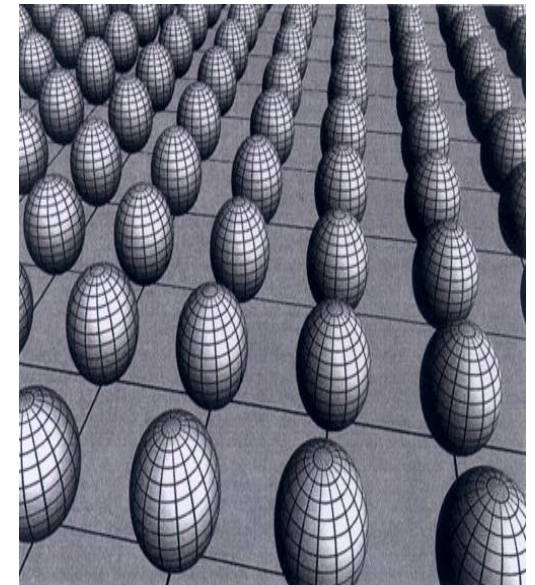
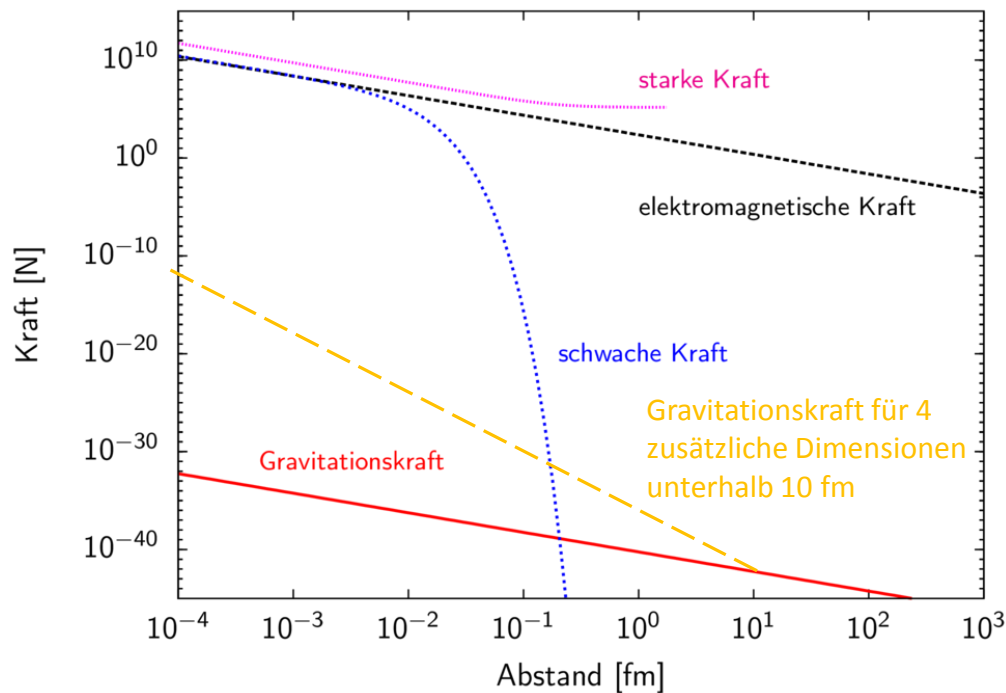
$$A = 4\pi r^2$$

↓

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

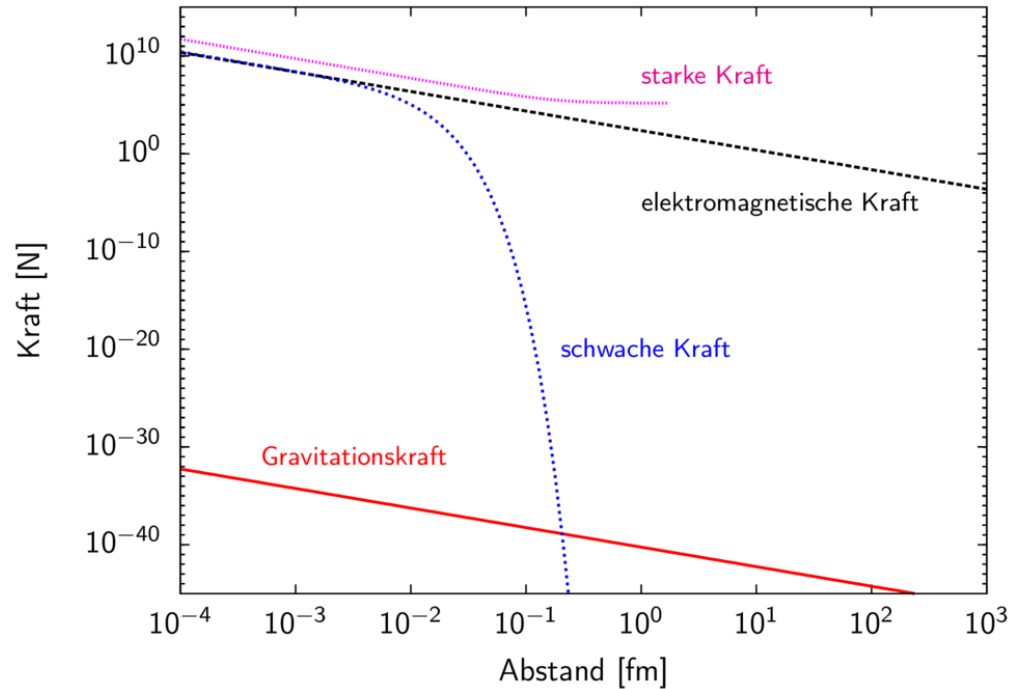
# Spekulationen

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



# Reichweiten der Kräfte

- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



Wechselwirkung	Kraftgesetz 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	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

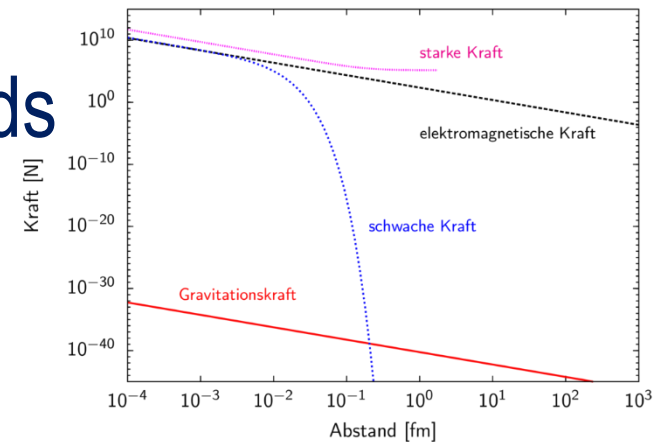
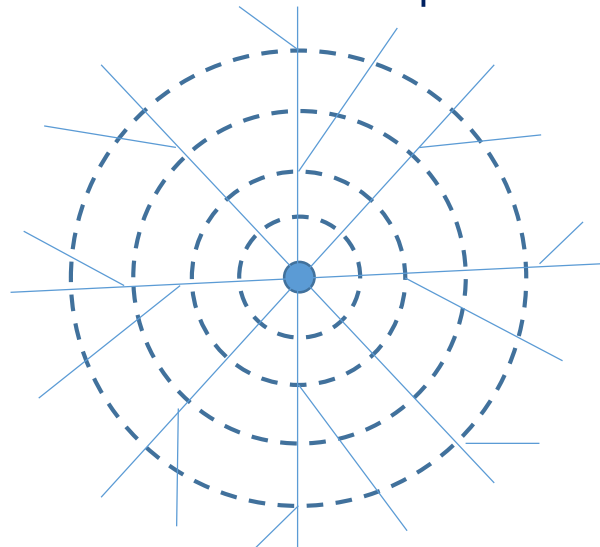


# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

► Ungewöhnliche Feldlinien für WW, deren Kräfte zunächst  $F \sim 1/r^2$  folgen, dann aber abweichen:

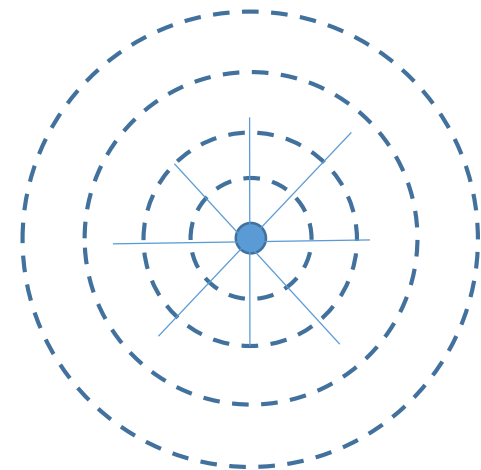
► stark

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



schwach

Kraft strebt rasch gegen Null  
Feldlinien enden „im Nichts“



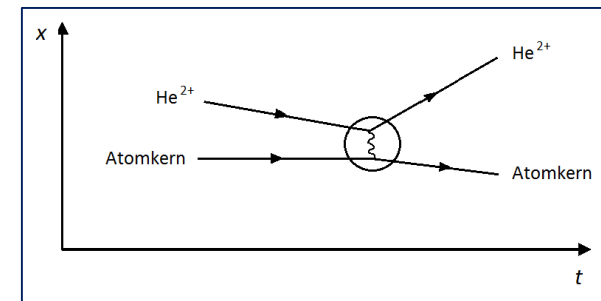
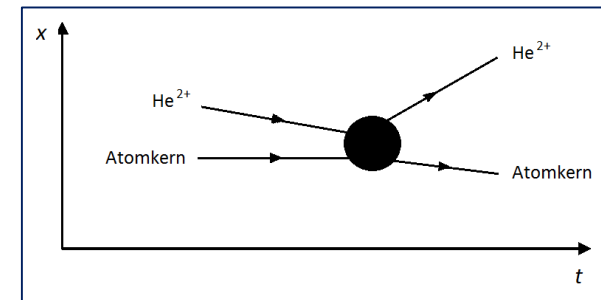
# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

## ► Makroskopisch:

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



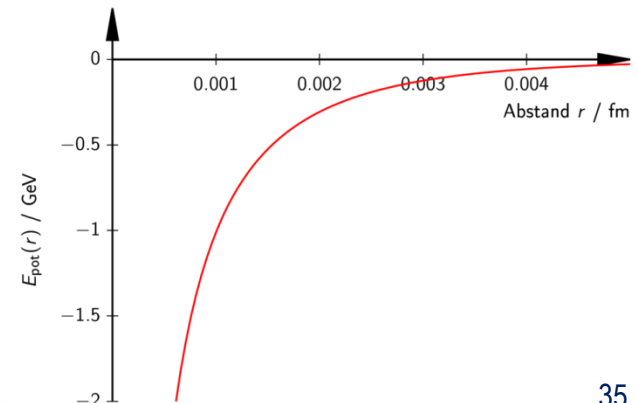
# Endliche Reichweiten

## ► 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

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

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

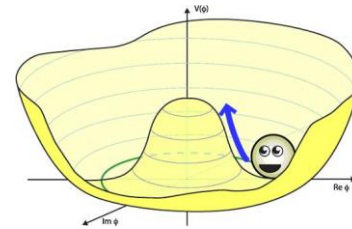


► Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien

- 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

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



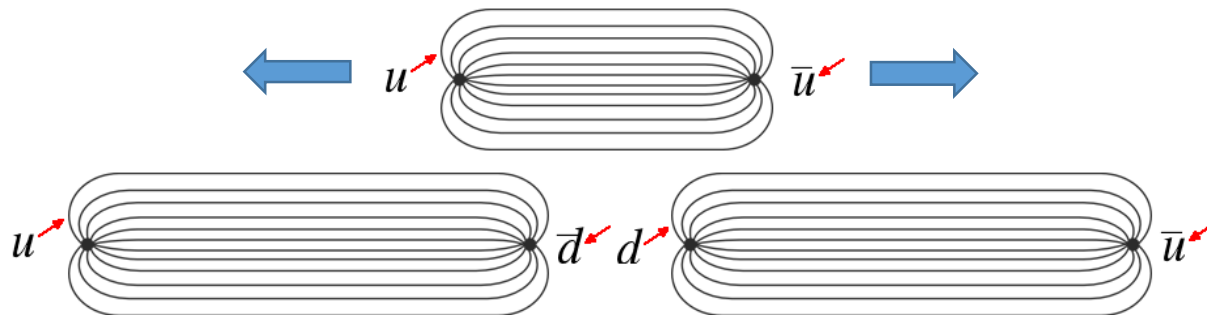
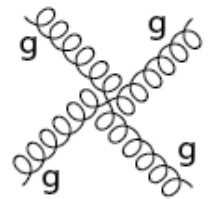
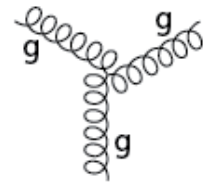
► Quantenfeldtheorie: Feldquanten „Weakonen“ (W und Z)

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

# Endliche Reichweiten

## ► Starke WW: Feldquanten Gluonen

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

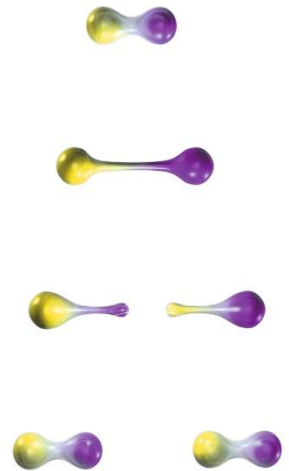
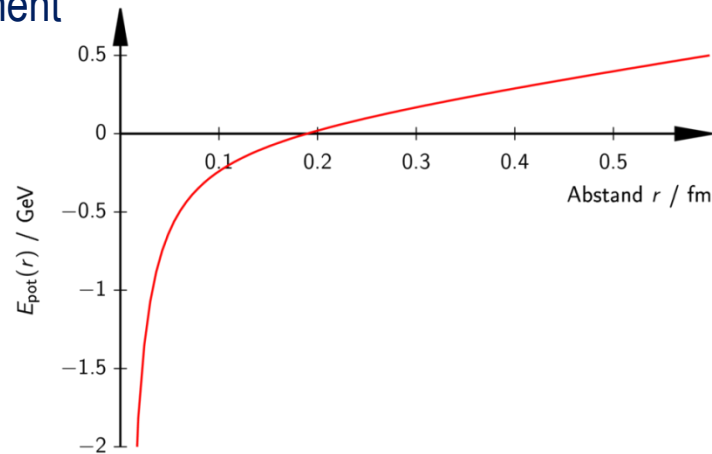


# Endliche Reichweiten

▶ 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

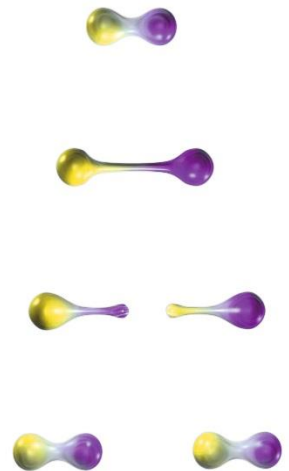


# Endliche Reichweiten

## ► 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

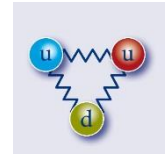
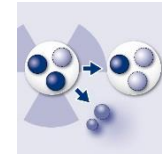
→ **Die Wechselwirkungen des Standardmodells werden durch Ladungen hervorgerufen**

# 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

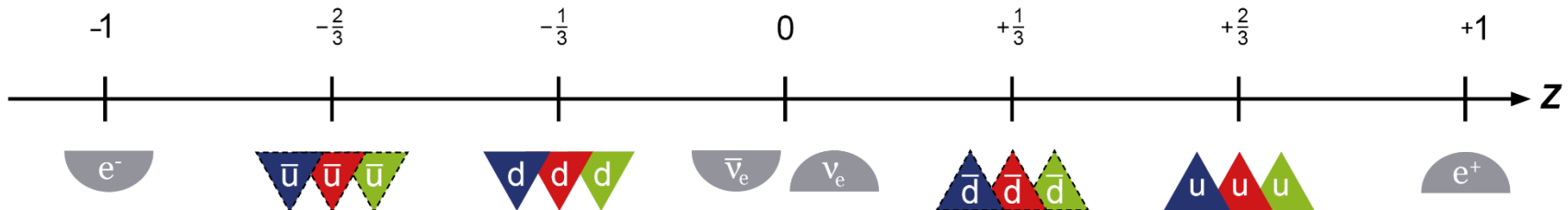
Und:

- ▶ 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

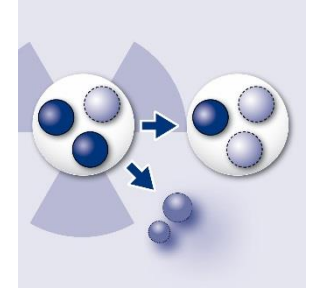


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $Z$  einiger Anti-/Materieteilchen

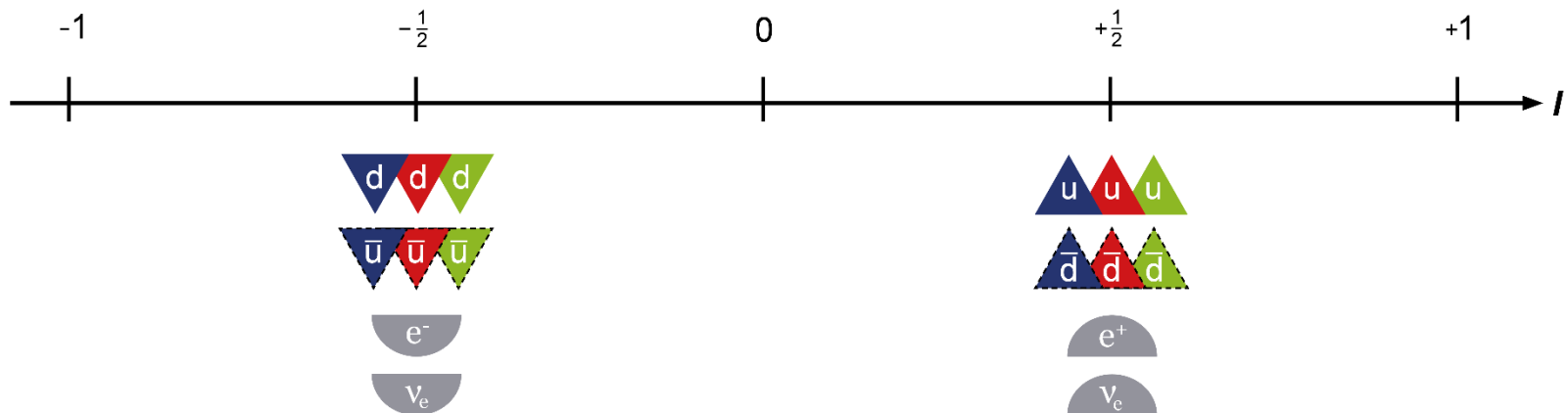


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# Schwache Ladung



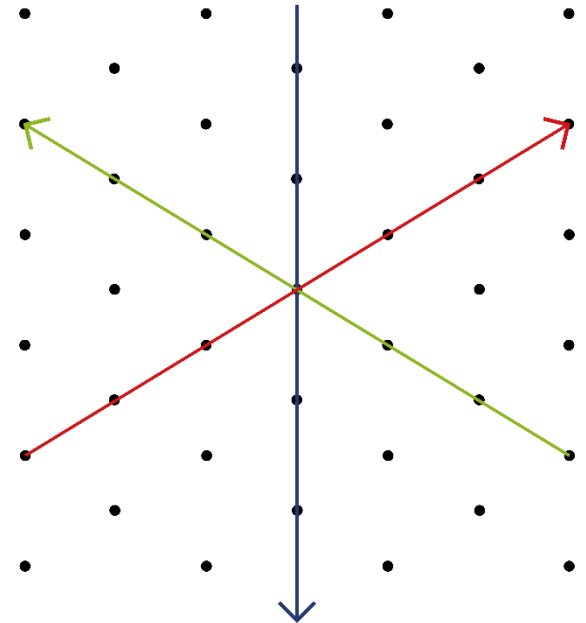
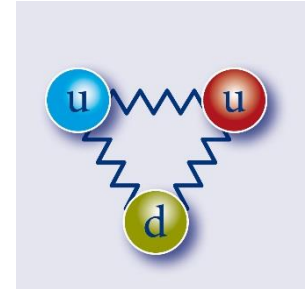
- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von  $I = +\frac{1}{2}$  oder  $I = -\frac{1}{2}$ 
  - alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

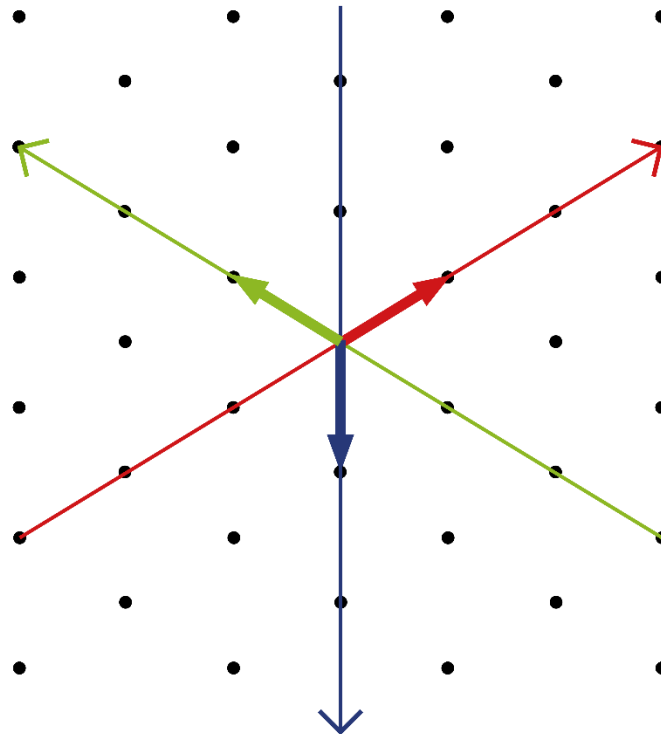
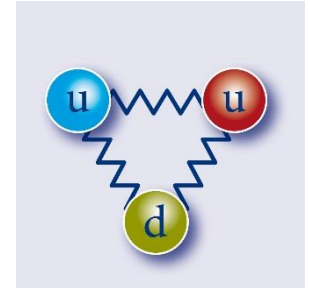
# Starke Ladung

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



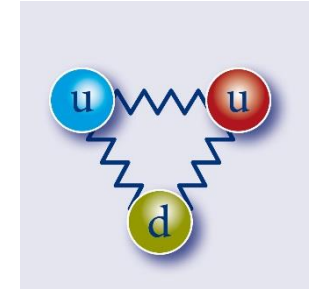
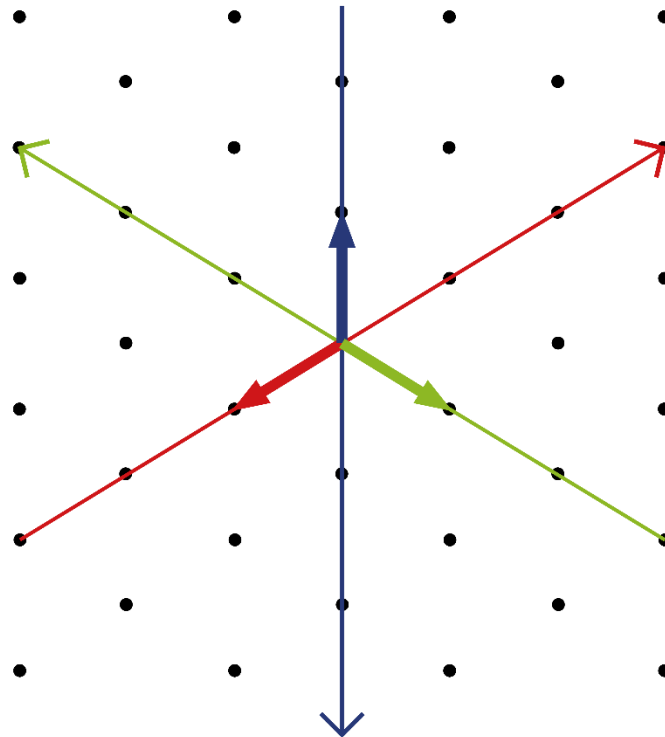
# Starke Ladung

## ► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

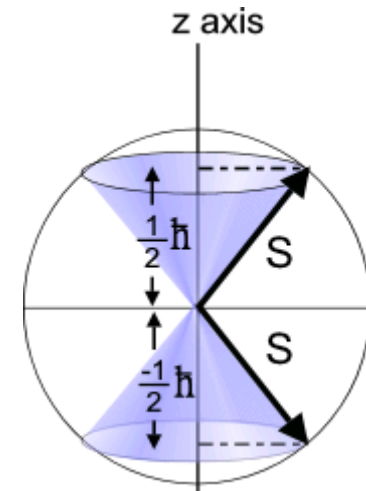
## ► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





# 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

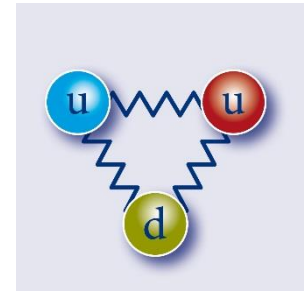
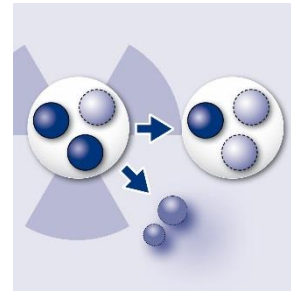


<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

- ▶ 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  $I := I_3^W$

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

$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$



- ▶ Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

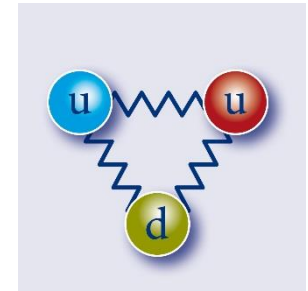
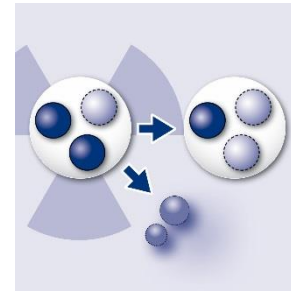
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \text{red arrow} + \text{green arrow} + \text{blue arrow} = \vec{0}$$



- ▶ Alle drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

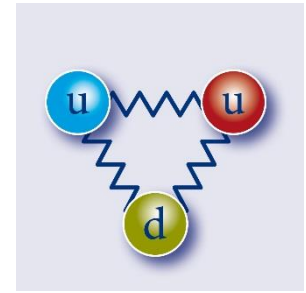
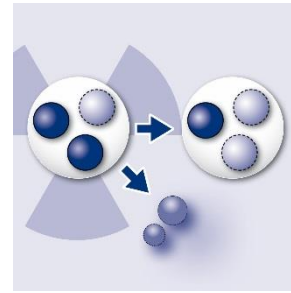
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- 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	$l$	$q$	$\bar{c}$
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

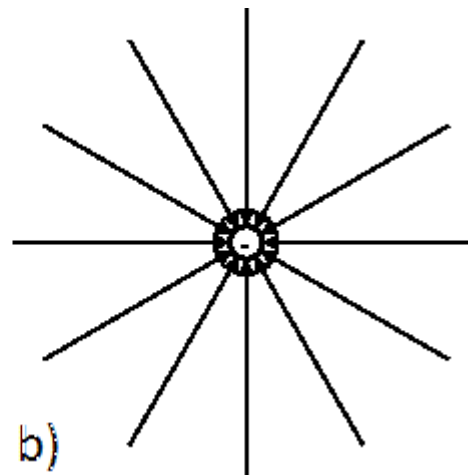
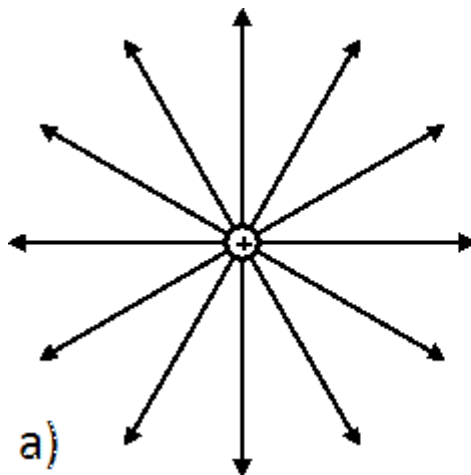
- ▶ Drei verschiedene Ladungen
  - elektrisch
  - schwach
  - stark
- ▶ Ladungen sind
  - additiv
  - erhalten
    - > Vorhersage zu erlaubten Prozessen
  - gequantelt

# Darstellen von Wechselwirkungen


## ► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite  
hier: elektromagnetische Wechselwirkung

$$F = Q \cdot E$$



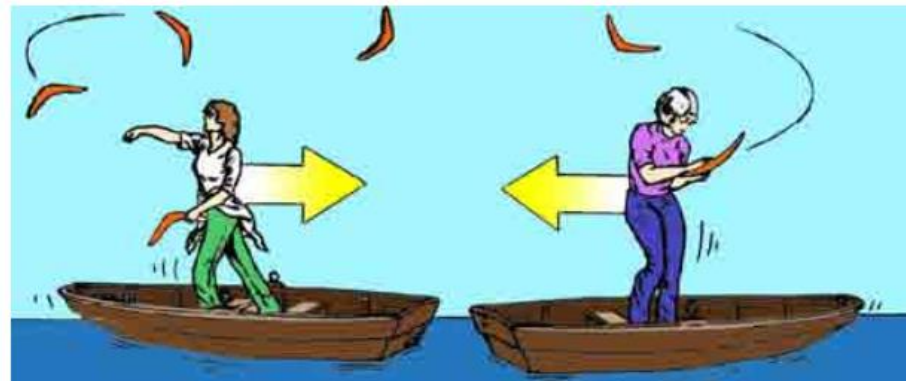
$$A = 4\pi r^2$$


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

# Darstellen von Wechselwirkungen

## ► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

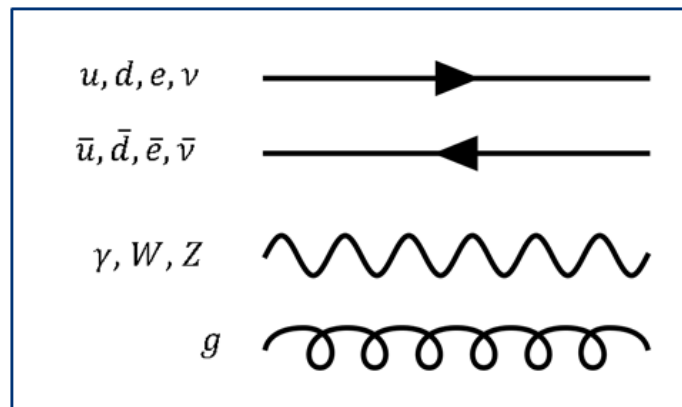
Anstelle der Feldlinien kann die elektromagnetische Wechselwirkung auch durch den Austausch eines Botenteilchens beschrieben werden





# Feynman-Diagramme

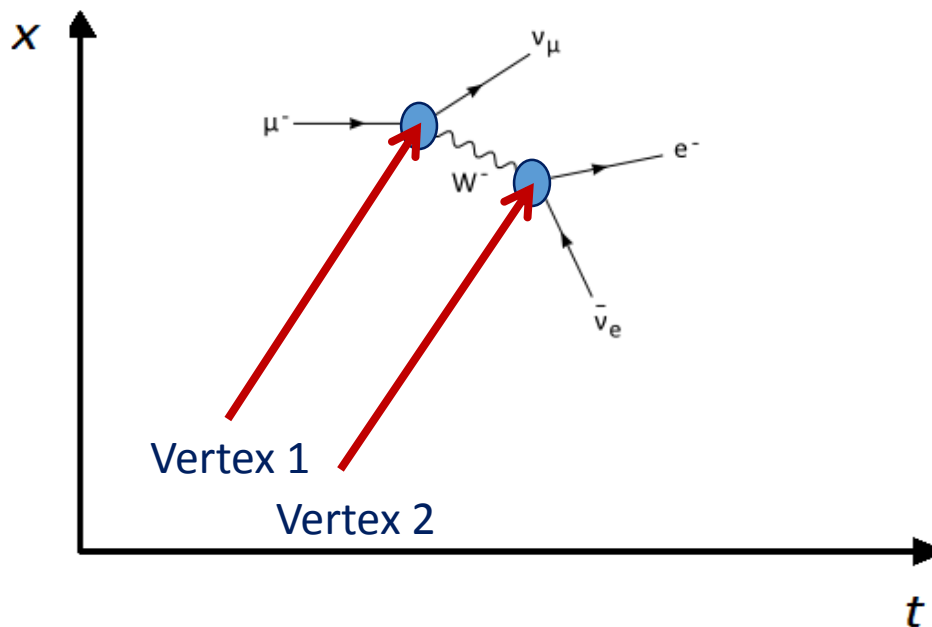
► Aufbau



# Feynman-Diagramme

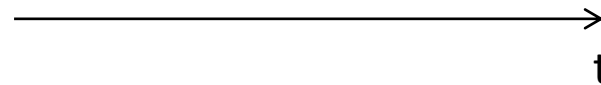
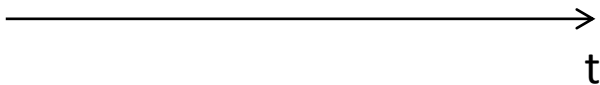
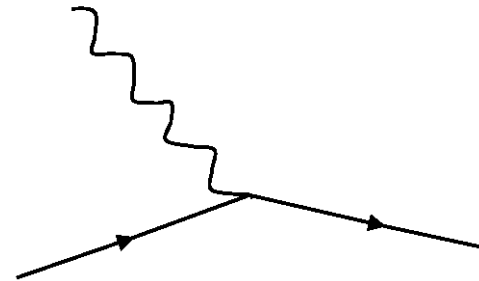
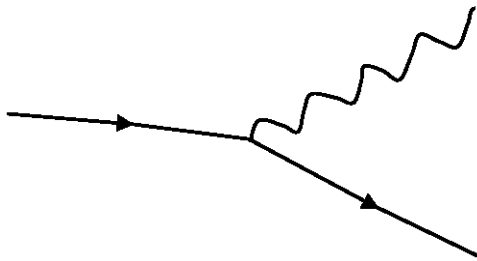
## ► Begriffsklärung:

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



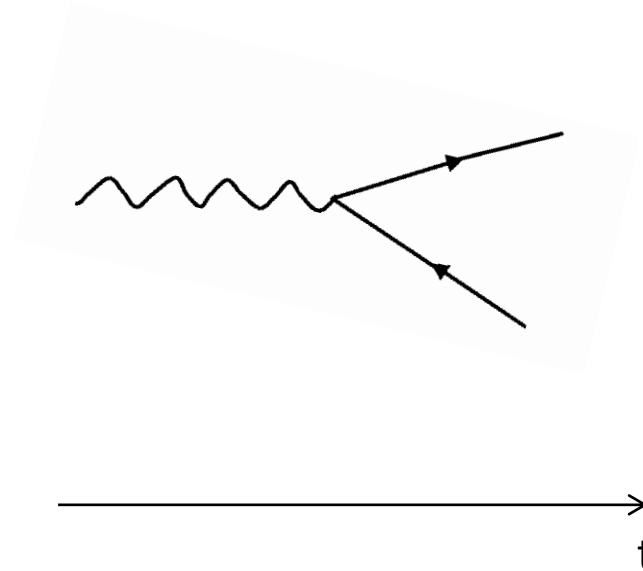
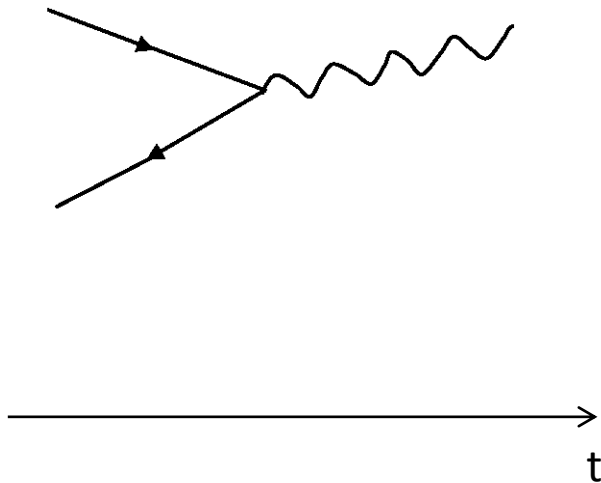
# Grundbausteine 1/2

## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



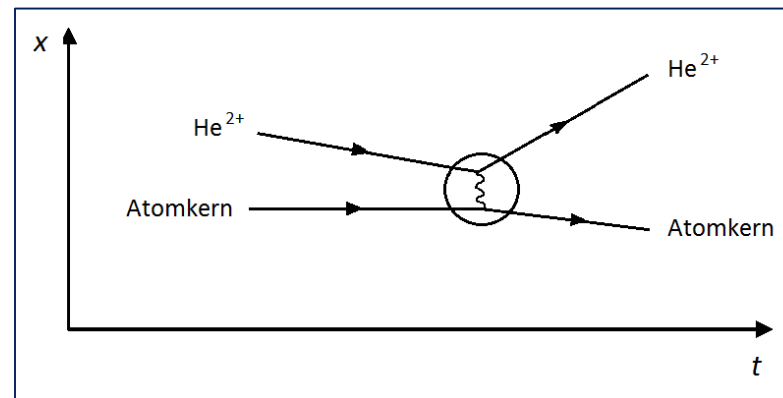
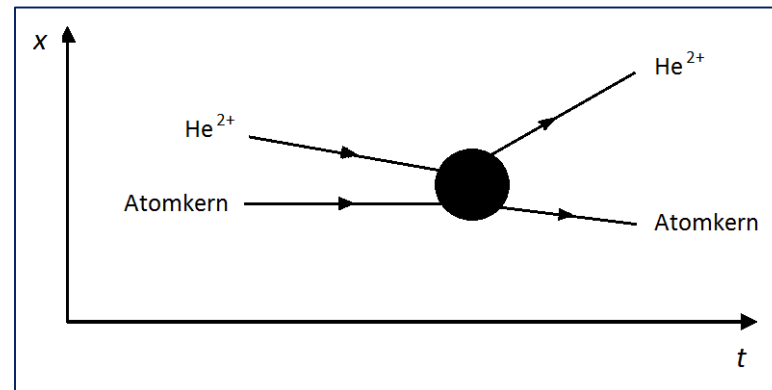
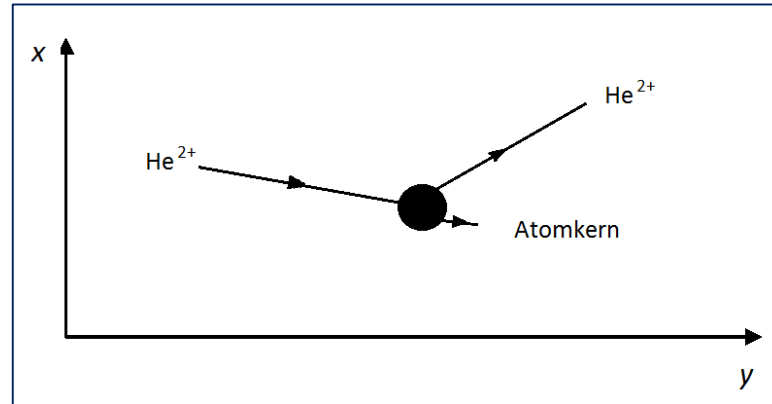
# Grundbausteine 2/2

## ▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



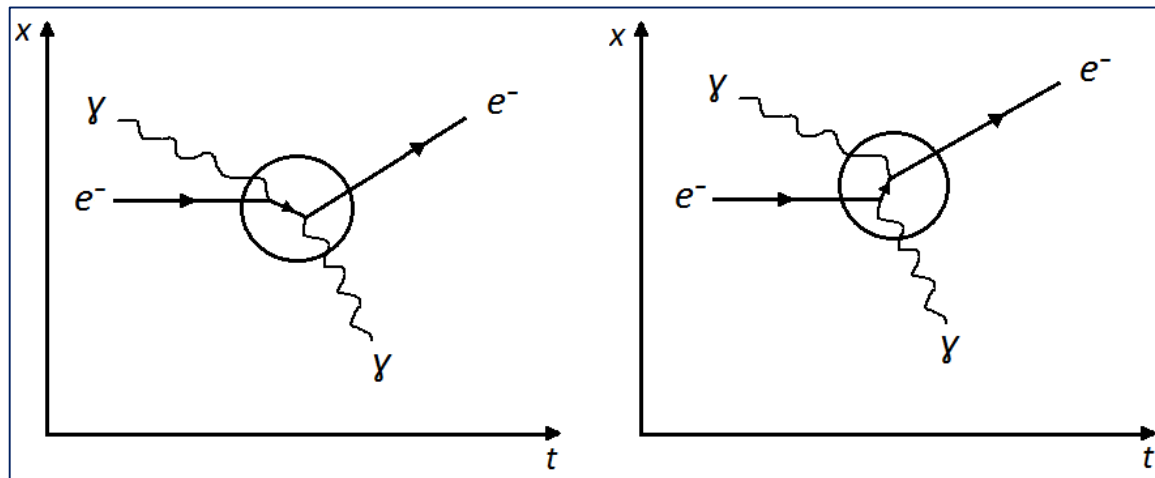
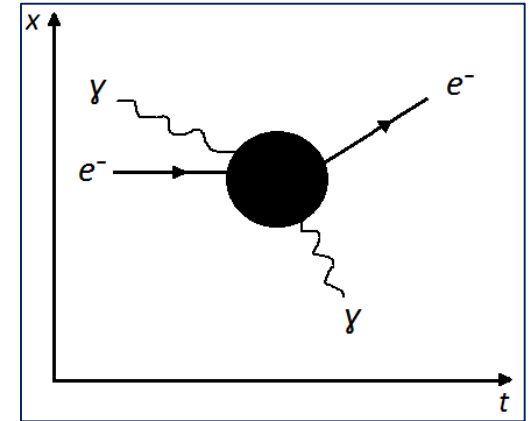
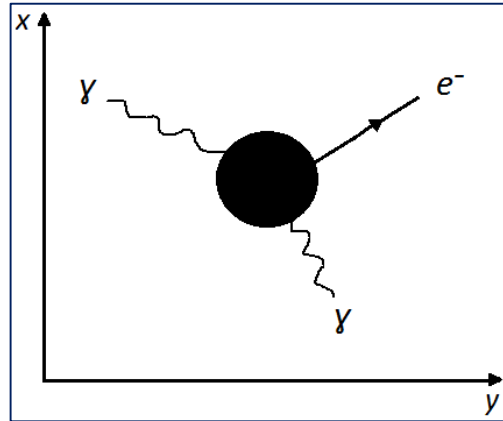
# Prozesse

## ► Rutherford-Streuung



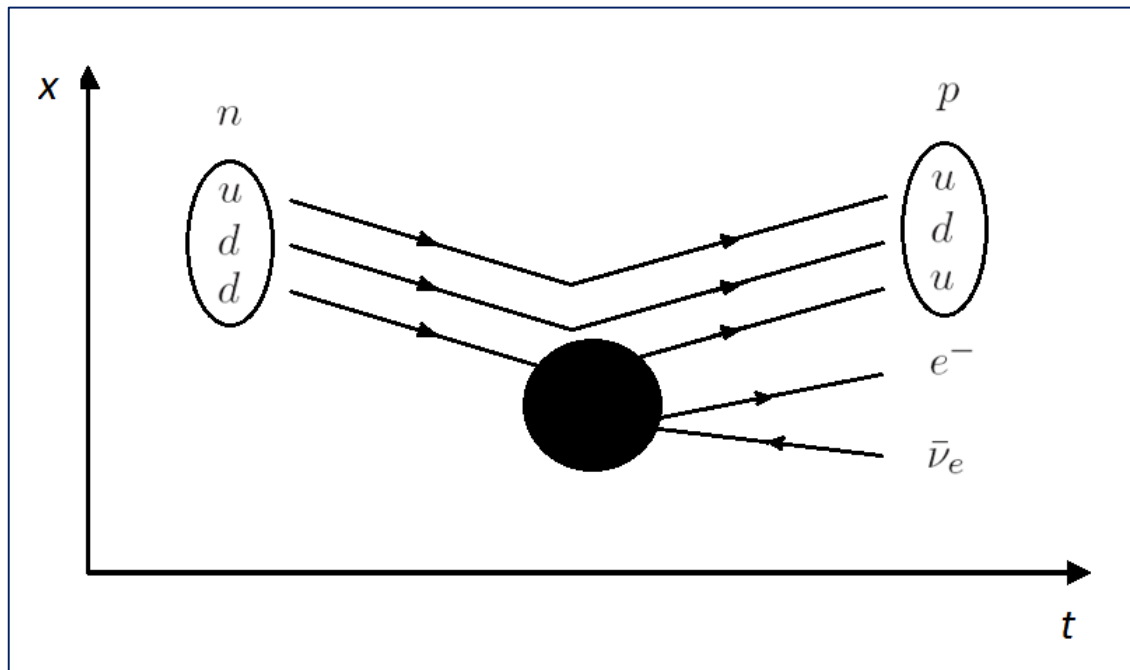
# Prozesse

## ► Compton-Streuung



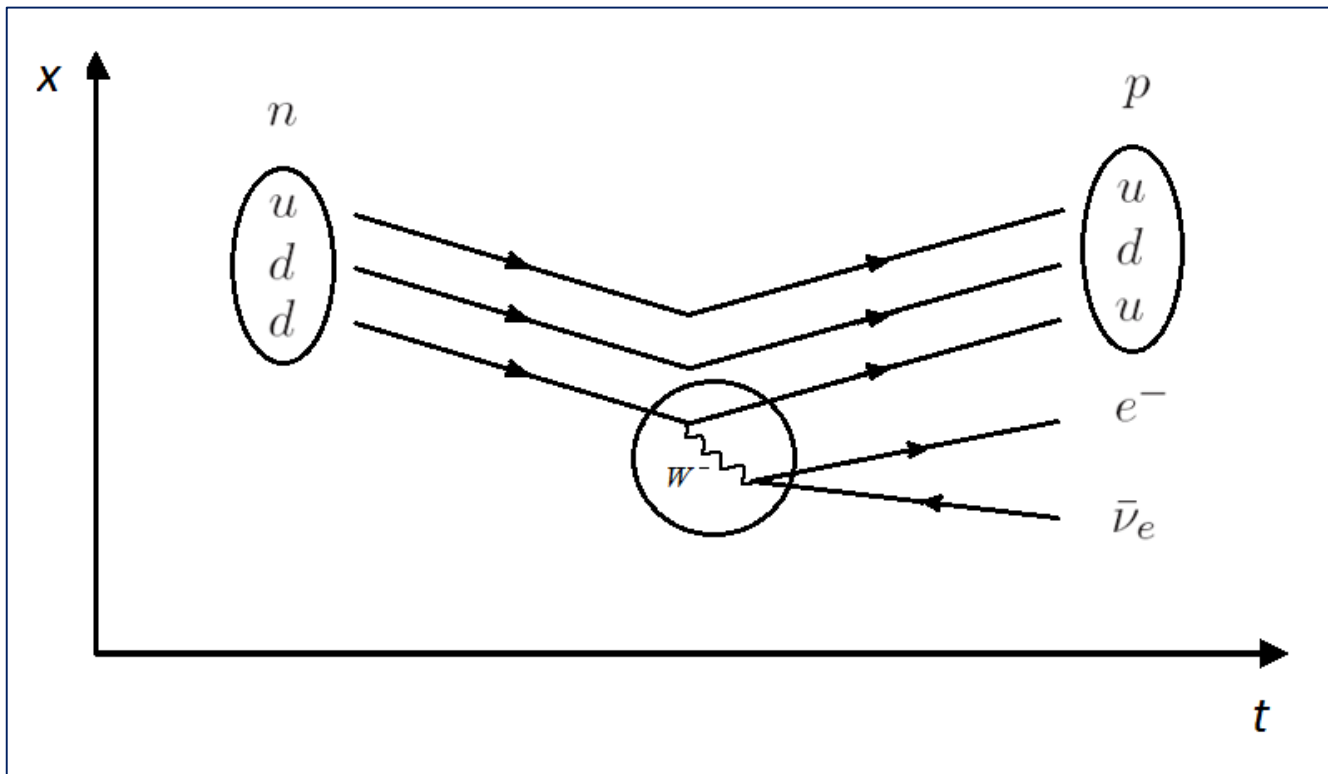
# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung



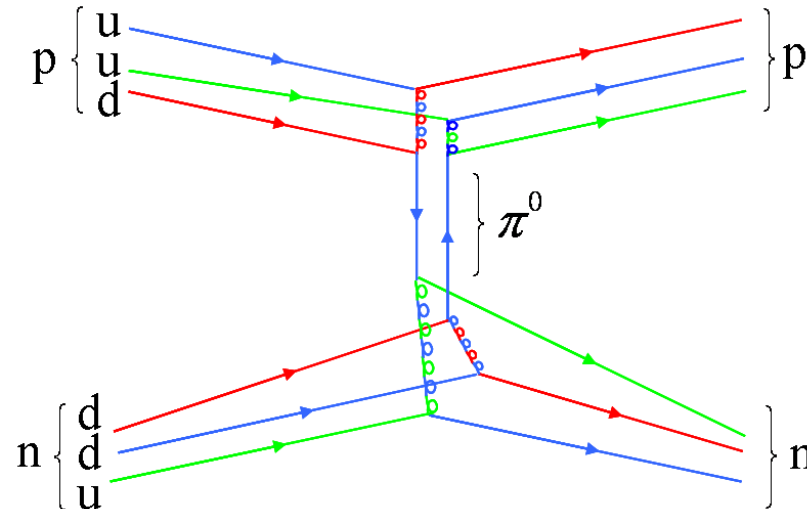
# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung





# Feynman-Diagramme: Ladungsfluss-Diagramme

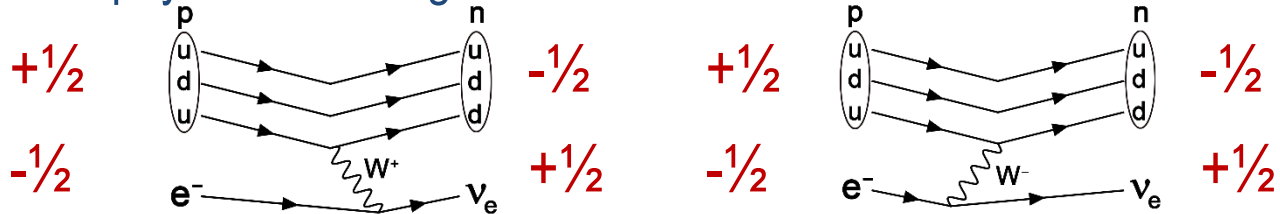


- ▶ Vertices können als “=” Zeichen aufgefasst werden
  - Auf beiden Seiten müssen Summen gleich sein:  
Impuls, Energie, Drehimpuls, elekt. Ladung, schw. Ladung, starke Ladung
  - Umklappen der Linien dreht Ladungsvorzeichen um

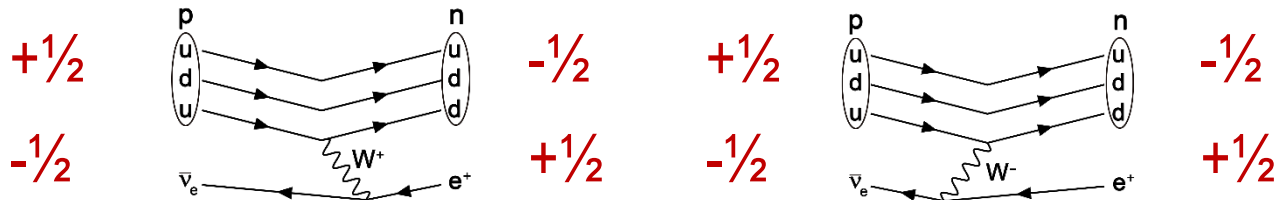
# Ladungserhaltung (z.B. schwache Ladung I)

Alle möglichen Prozesse durch „Umklappen“ von Linien:

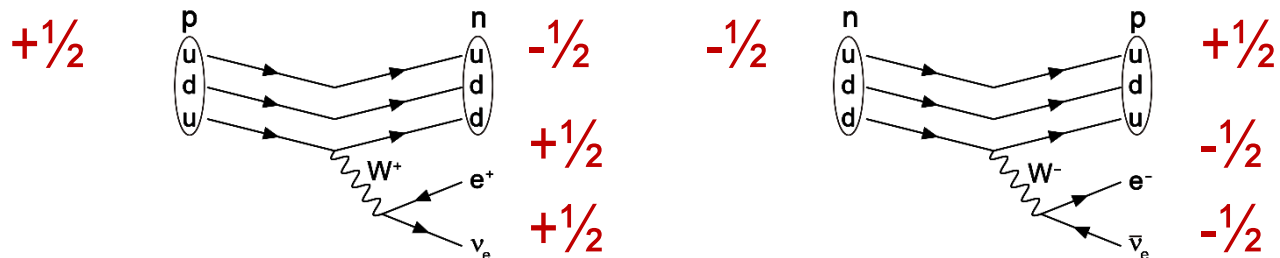
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



- $\beta^+$  und  $\beta^-$  - 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

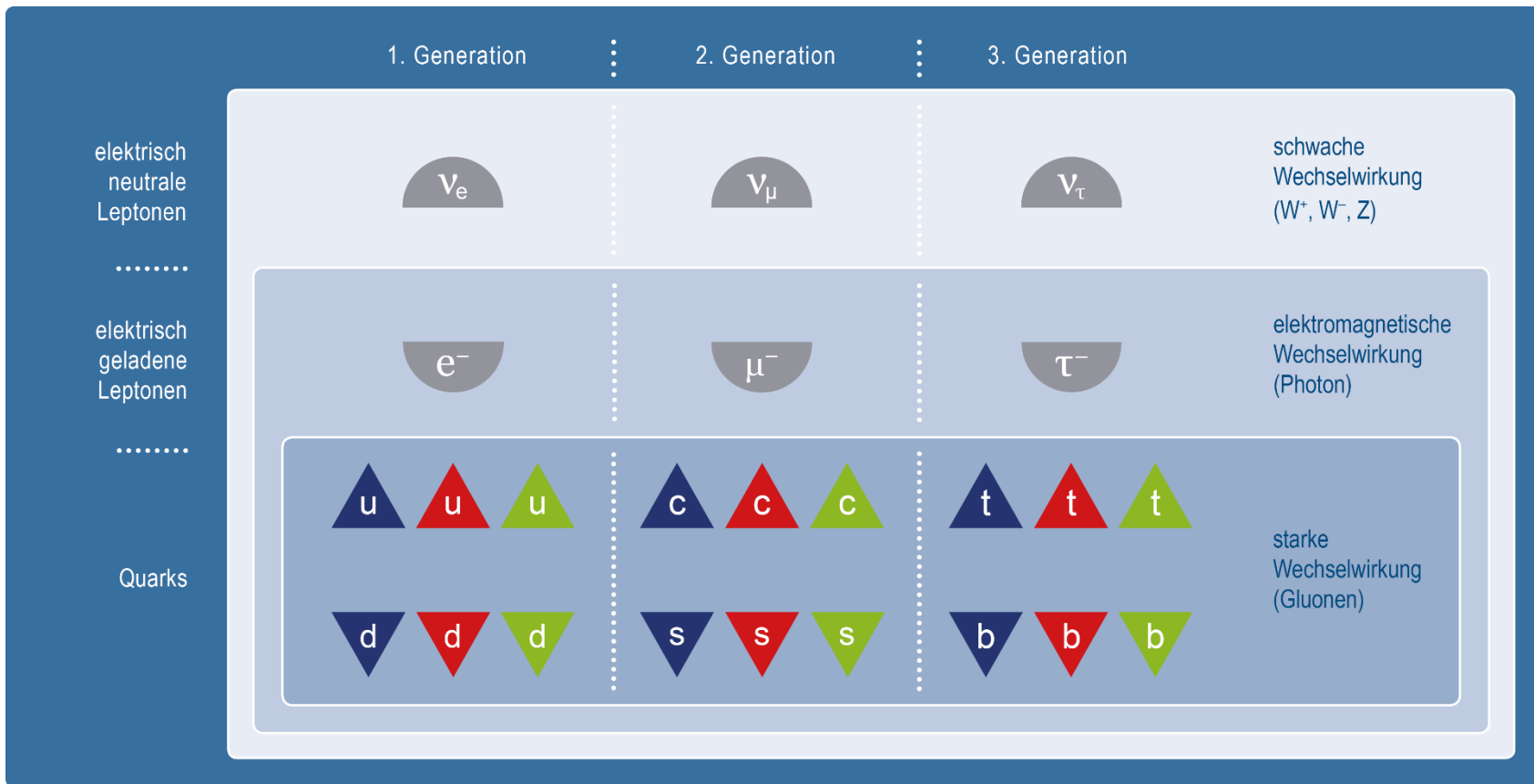
# Ordnung der Elementarteilchen

- ▶ **Materieteilchen** der uns umgebenden Materie:  $u, d, e^-, \nu_e$
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons  $\mu^-$  (Rabi: „who ordered that?“)
  - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron, aber  $\sim 200$  Mal schwerer
  - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1961: Nachweis des Myon-Neutrinos  $\nu_\mu$
- ▶ 1964: Postulierung des Strange-Quarks und  $\Omega^-(sss)$  Entdeckung
- ▶ 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  $\nu_\tau$

# „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	3A	4A	5A	6A	7A	8A												
1																	2	H																	He
3	Li																	Be	B	C	N	O	F	Ne											
4	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																	
5	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																	
6	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																	
7	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																	
8	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo																	
* lanthanoid			57	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																	
** actinoid			89	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																	

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



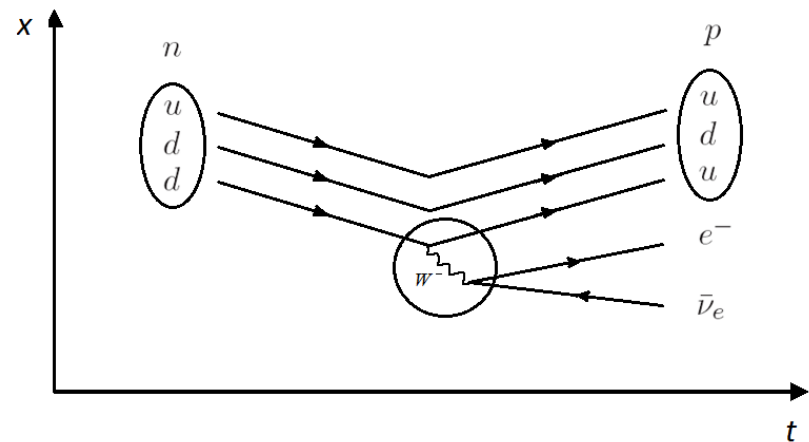


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► 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  $\rightarrow$ ,  $\swarrow$ , oder  $\downarrow$  haben alle schwache Ladungszahl  $I = +\frac{1}{2}$ , Down-Quarks hingegen  $I = -\frac{1}{2}$

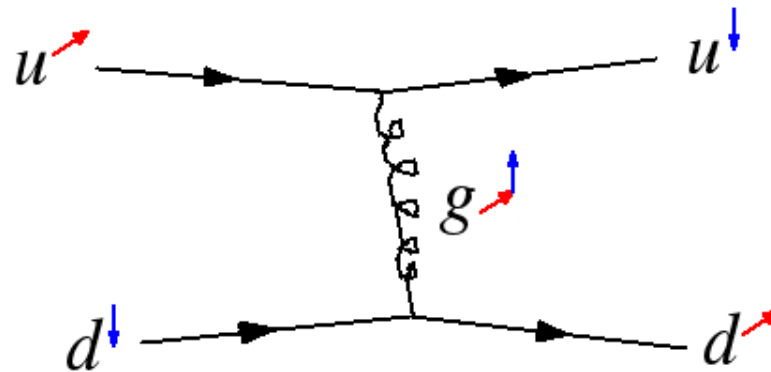
- $\begin{pmatrix} u \rightarrow \\ d \rightarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \swarrow \\ d \swarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \downarrow \\ d \downarrow \end{pmatrix}$

# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► Starke Wechselwirkung

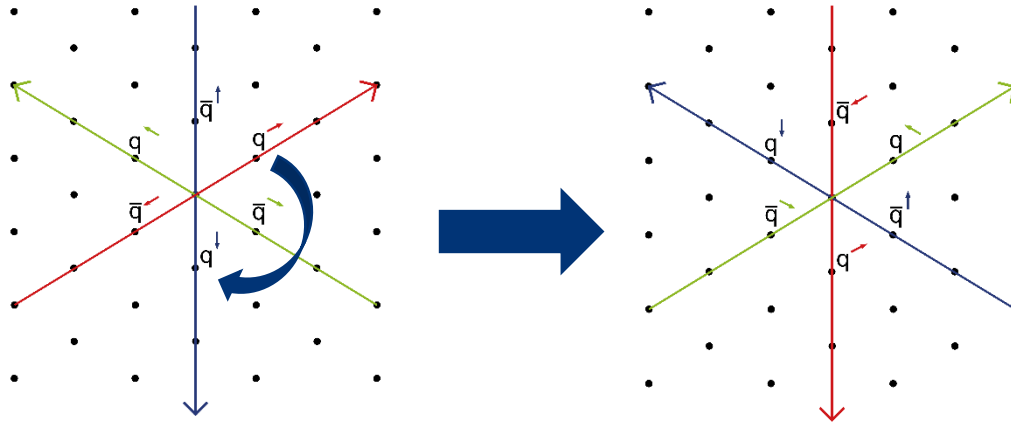
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:  
Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

►  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

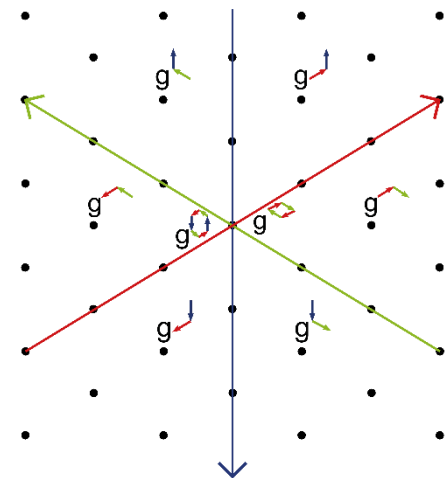
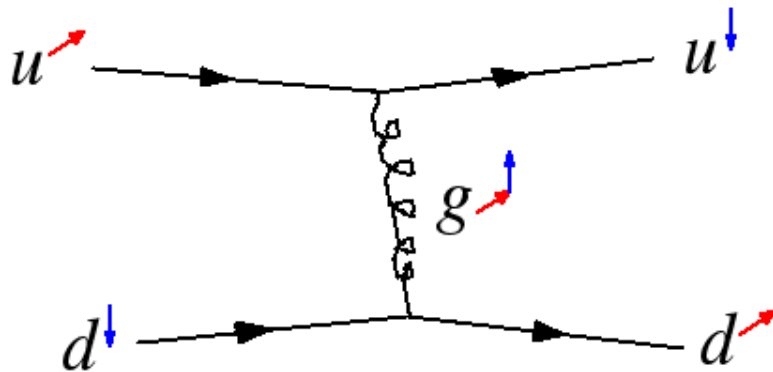


# Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

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



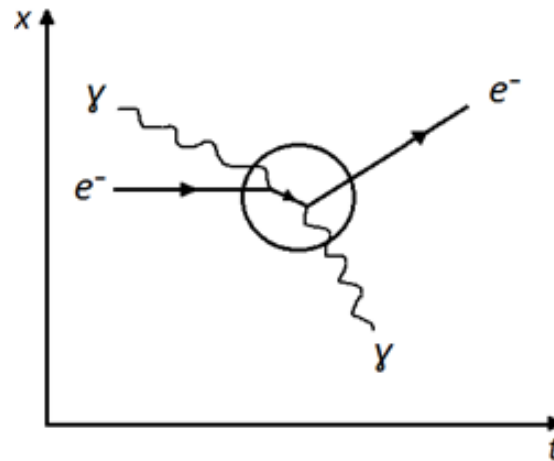
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



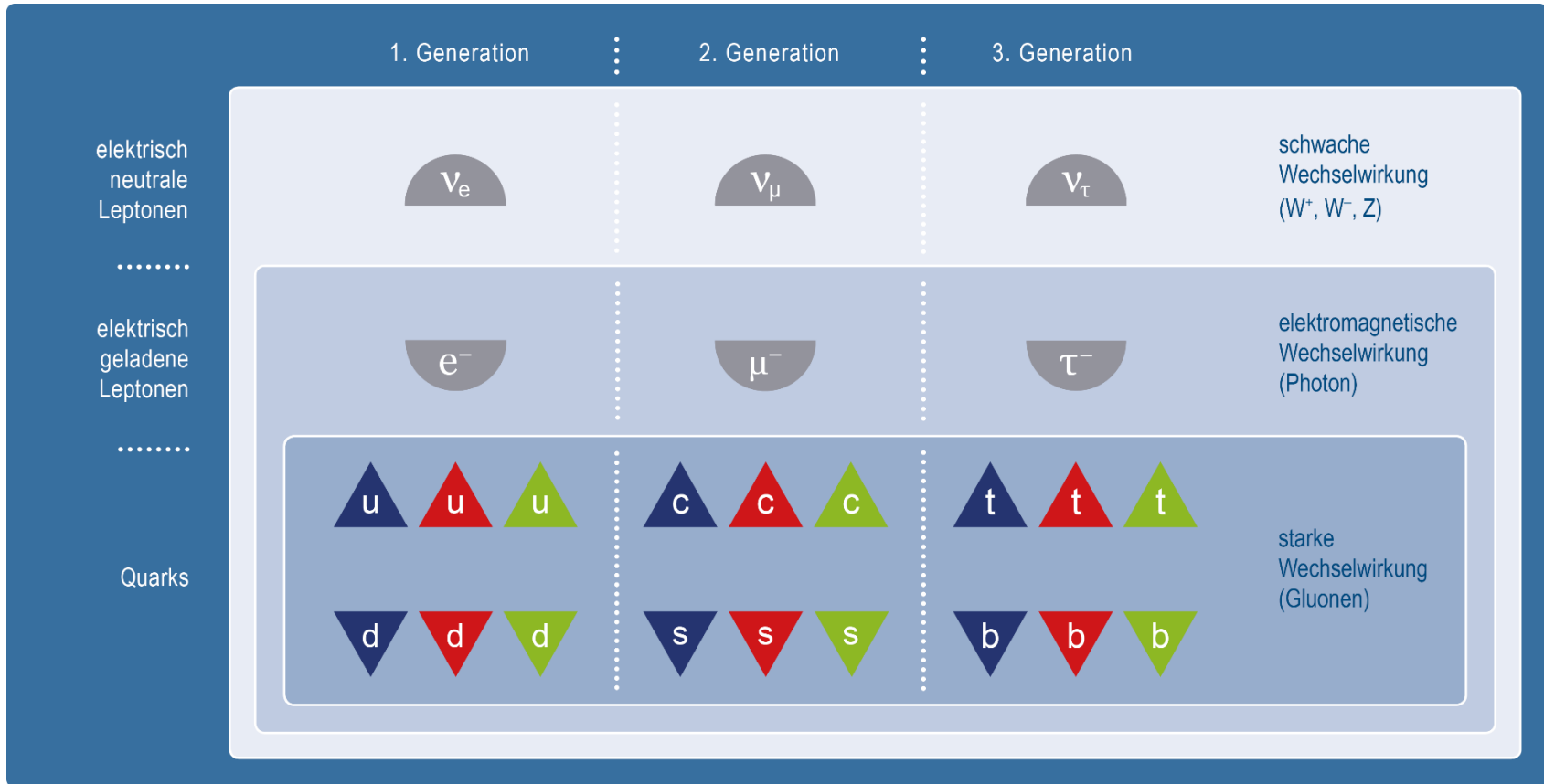
# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ▶ 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

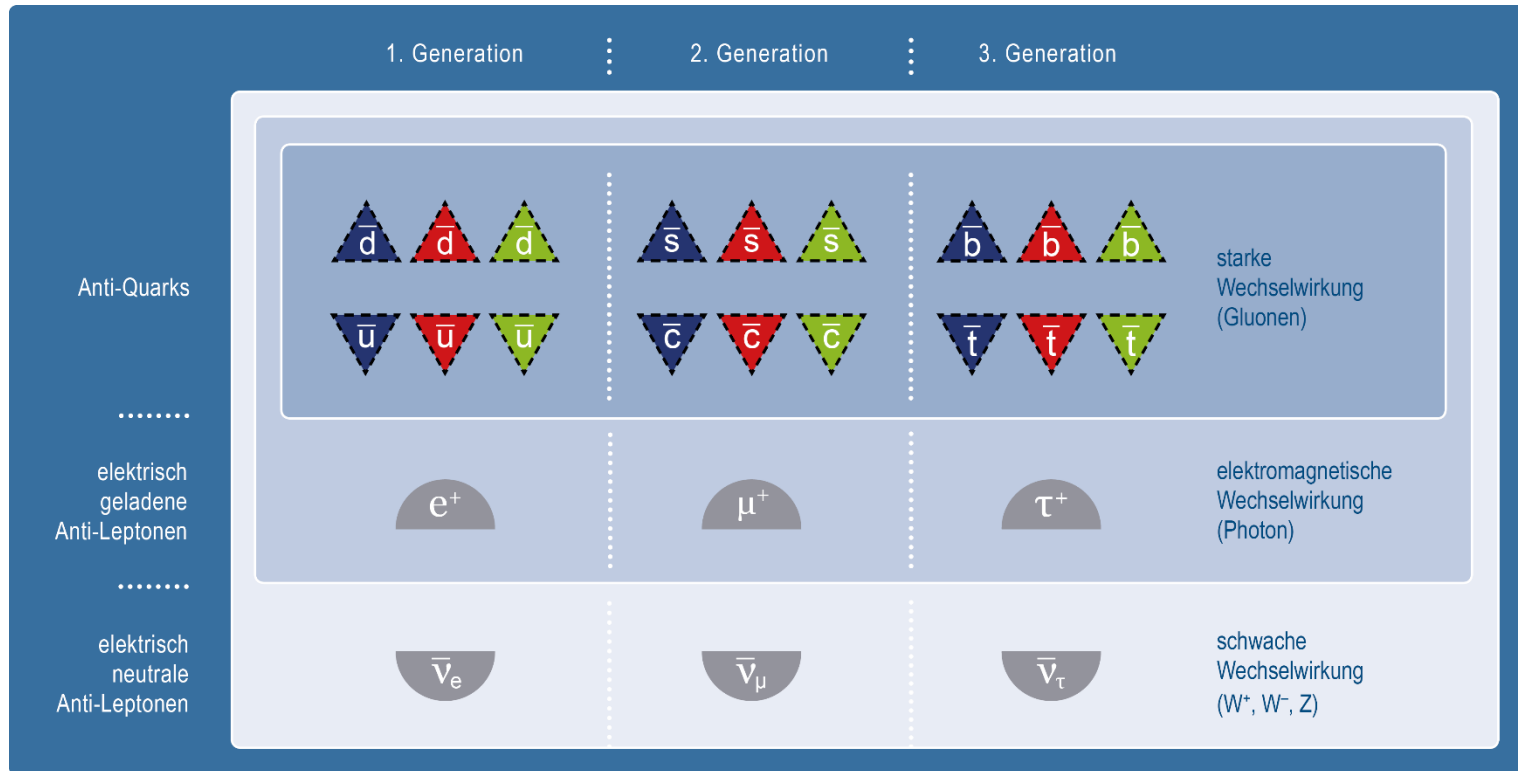


# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



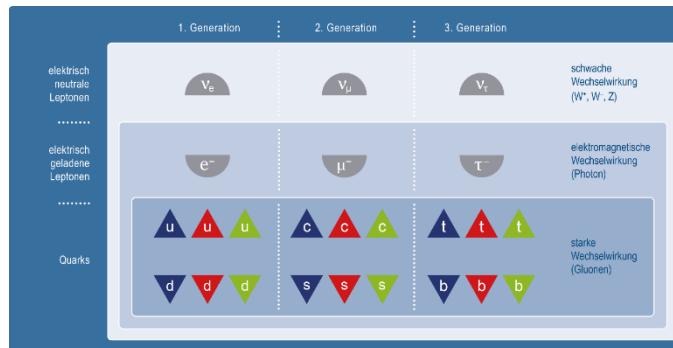
# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

- ▶ 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](http://www.teilchenwelt.de)

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

JOACHIM  
HERZ  
STIFTUNG



09.02.2017



# Diskussion / Fragen

