

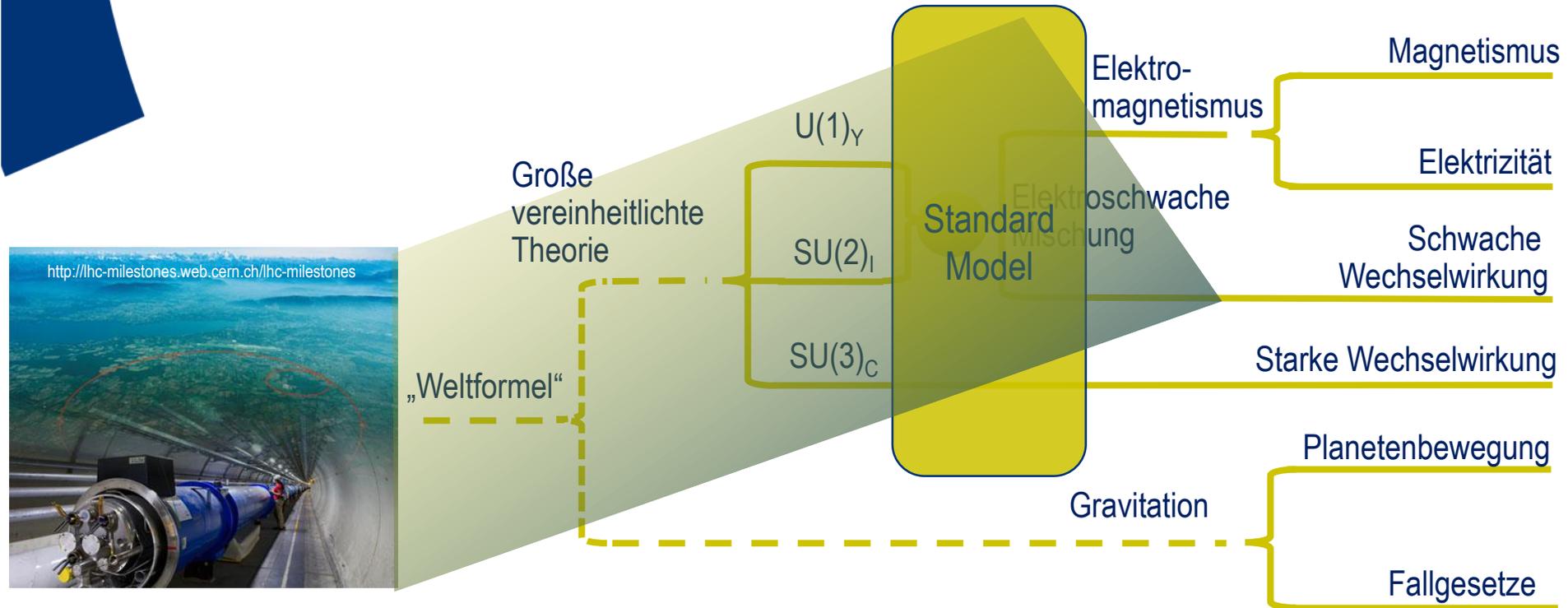
# Auffrischung: Das Standardmodell der Teilchenphysik

Philipp Lindenau

Forschung Trifft Schule - CERN Summerschool  
16.07.2018



# Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



# Vereinheitlichungen

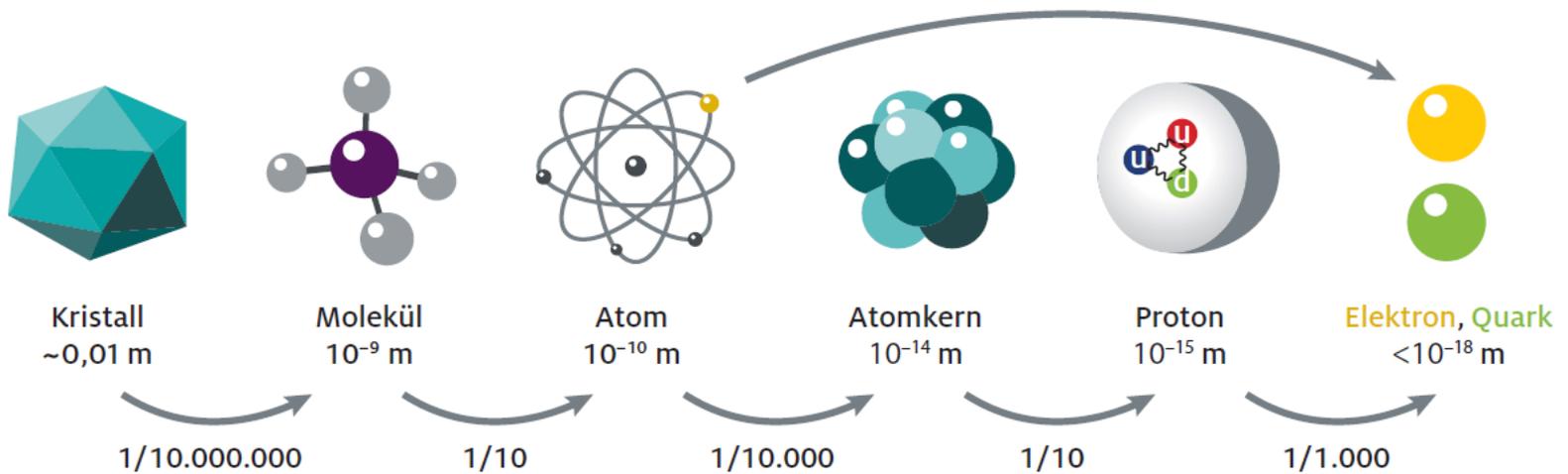
- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

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

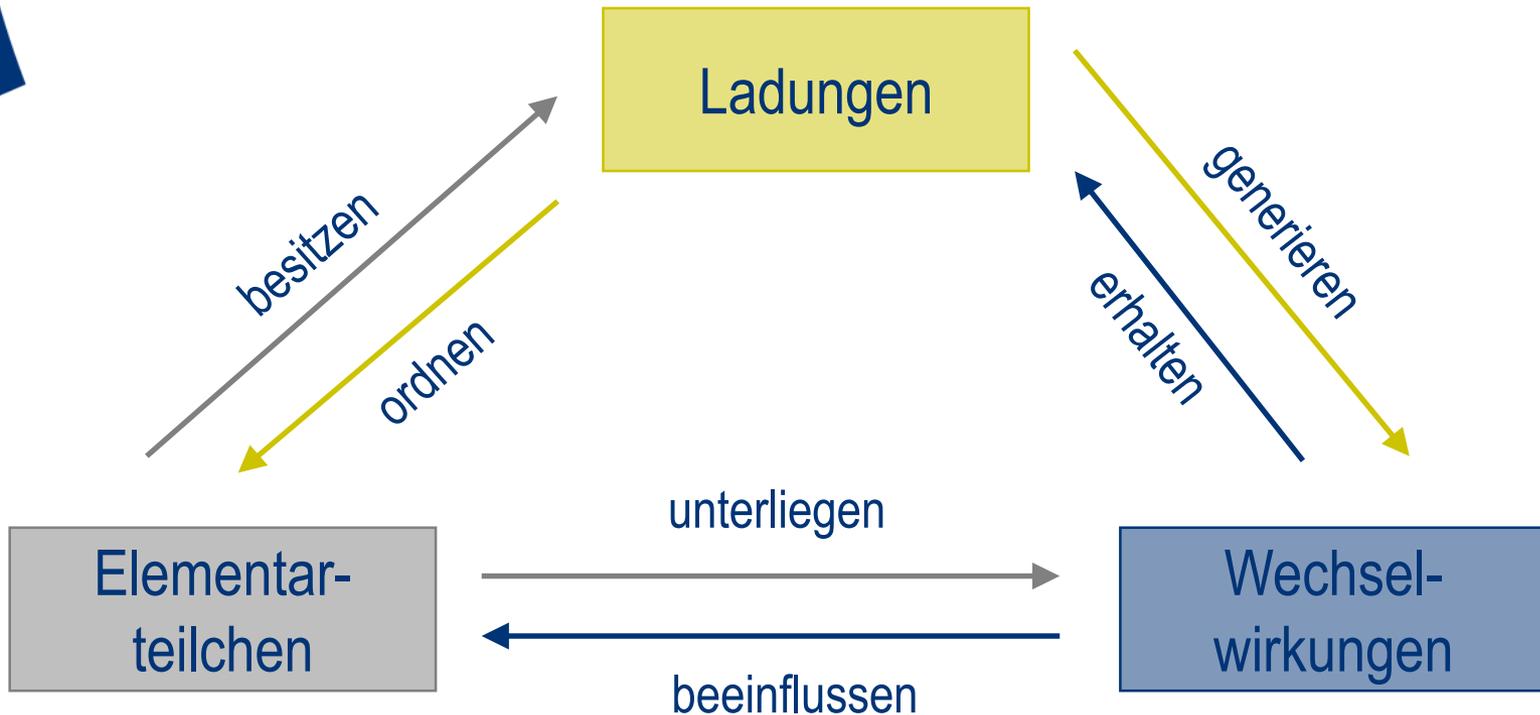


**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**

# Einschub: Größenordnungen

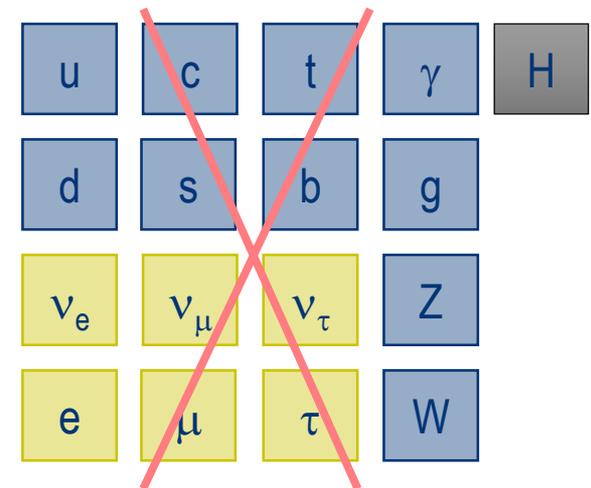


# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# 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!)

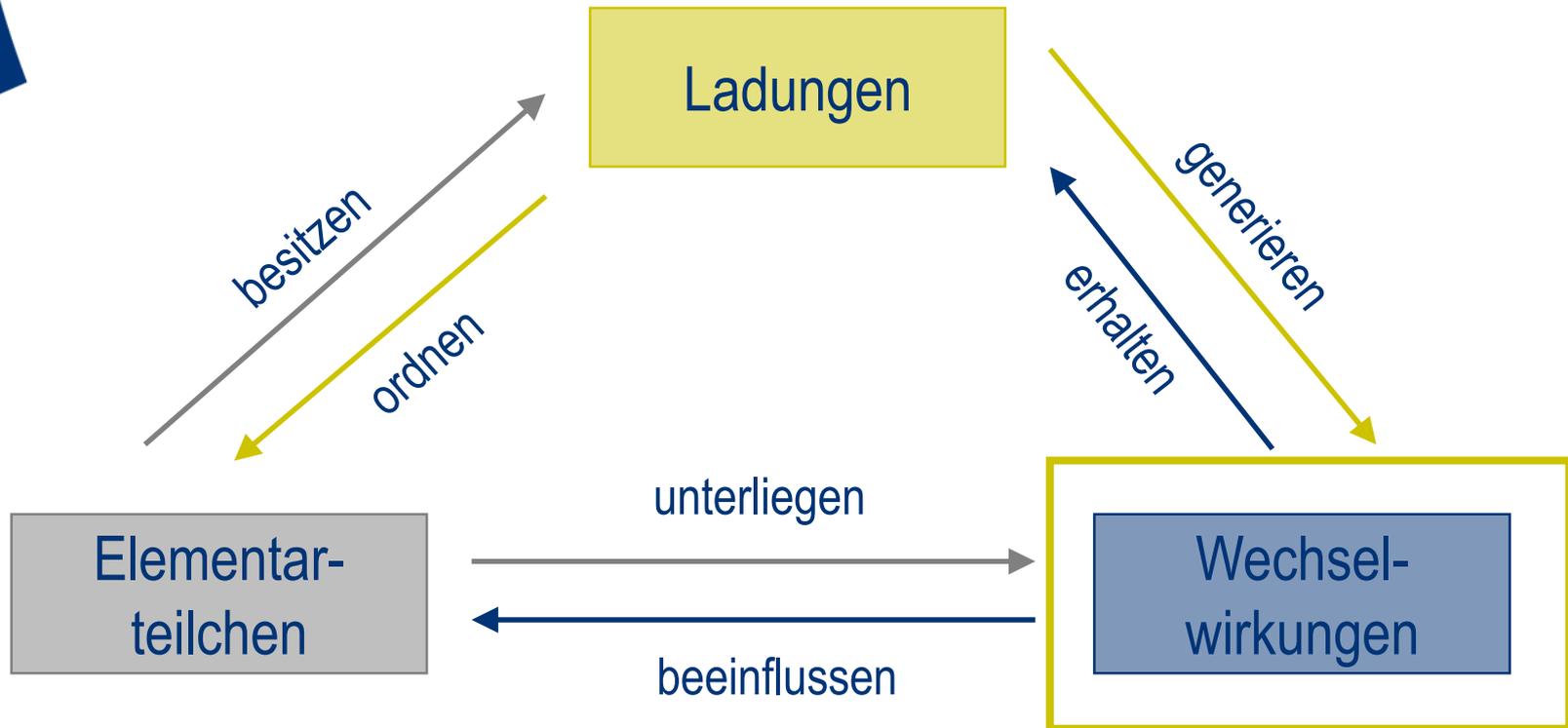


# Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Grundlage: Konsequenzen fundamentaler Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
  - Ladungen und Wechselwirkungen
  - Nicht: Liste der existierenden Teilchen
  - Sondern: Regeln, die beschreiben, wie diese wechselwirken

u	c	t	$\gamma$	H
d	s	b	g	
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	Z	
e	$\mu$	$\tau$	W	

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# 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 ist nur ein Aspekt von Wechselwirkung

► Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

# Vereinheitlichungen

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

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



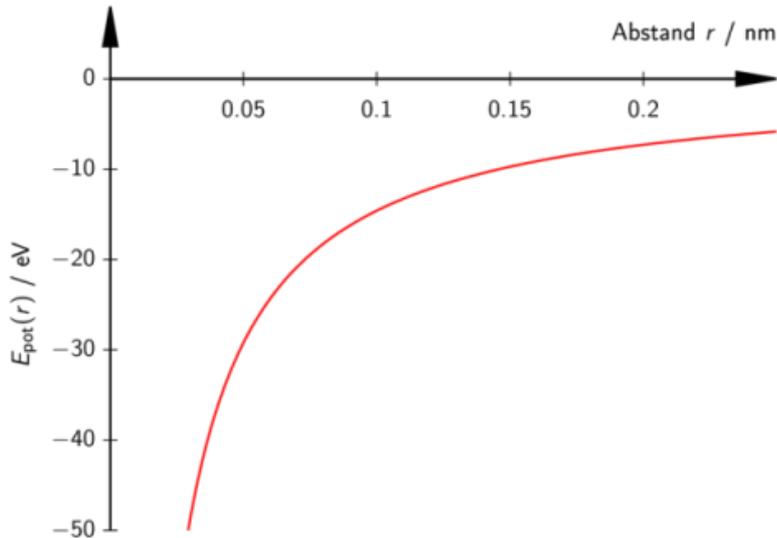
**4 Fundamentale  
Wechselwirkungen**



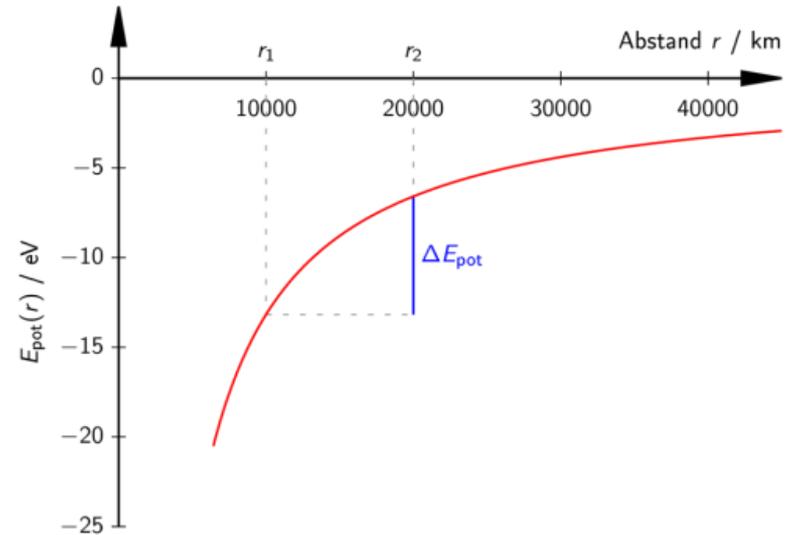
**Standardmodell  
(ohne Gravitation)**

# Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



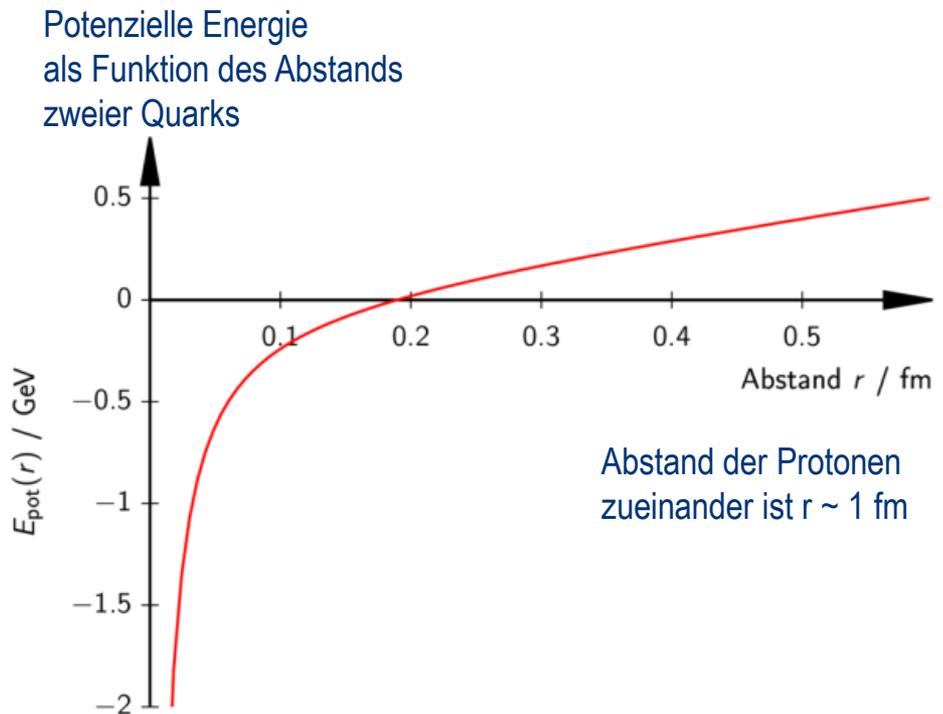
► Gravitation ( $\text{O}_2$  und Erde)



# Die Starke Wechselwirkung

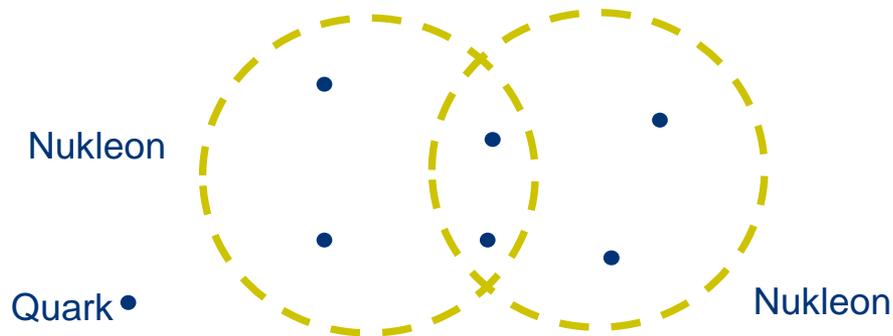
- ▶ Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

- ▶ **Substruktur:**  
Nukleonen bestehen aus Quarks, die „neue“ starke Wechselwirkung spüren.  
Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück  
(Ähnlich Molekül ↔ Atom)



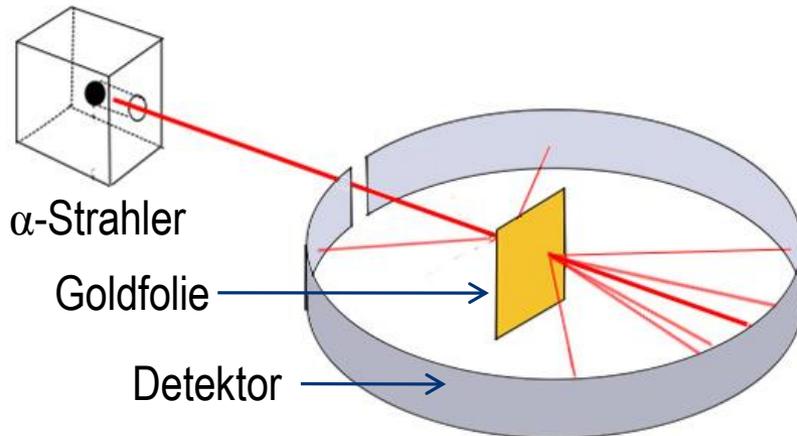
# Bindung von Nukleonen

- ▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
  - Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

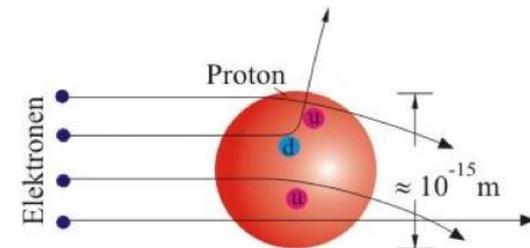


- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb.  $q\bar{q}$  Zustände)

# Experimenteller Nachweis von Quarks



**Rutherford-Streuexperiment (1911)**  
Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldatomen  
→ Entdeckung des Atomkern



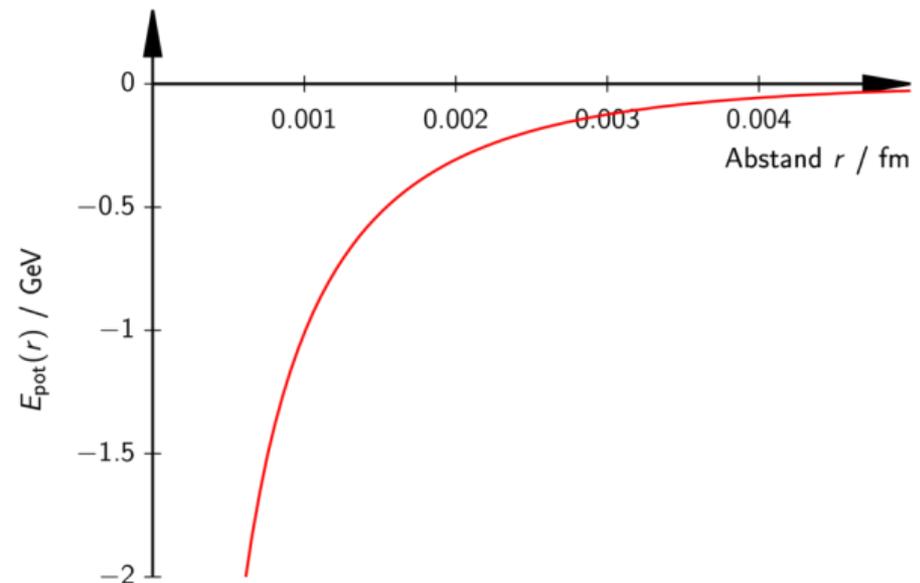
**Experiment am SLAC (1969)**  
Streuung von Elektronen an Protonen  
→ Entdeckung der Quarks

# Die Schwache Wechselwirkung

- ▶ Warum scheint die Sonne?
  - 4 Protonen fusionieren zu  ${}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$
  - Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?
- ▶ Motivation auch über Neutrino bei Beta-Umwandlungen möglich (später)

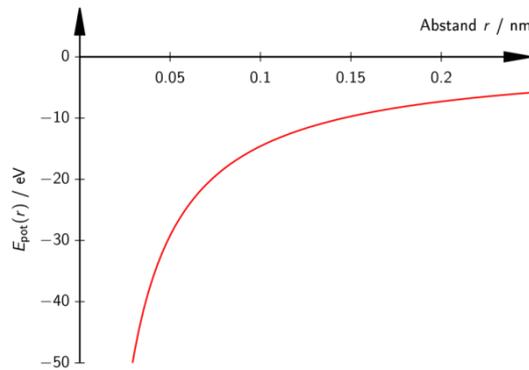
- ▶ **Einführung:**  
schwache Wechselwirkung  
(z.B. Quarks der Nukleonen bei  $r \sim 0.001$  fm)

- z.B.  $\beta^+$ -Umwandlung  
 $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$

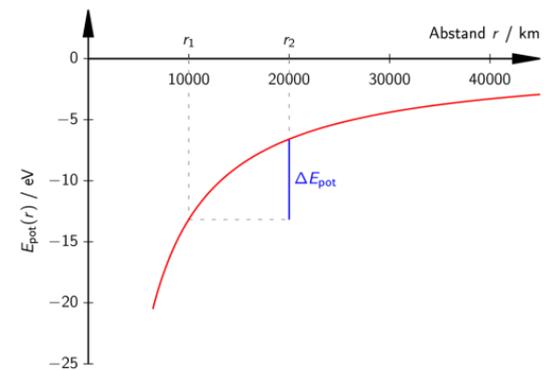


# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

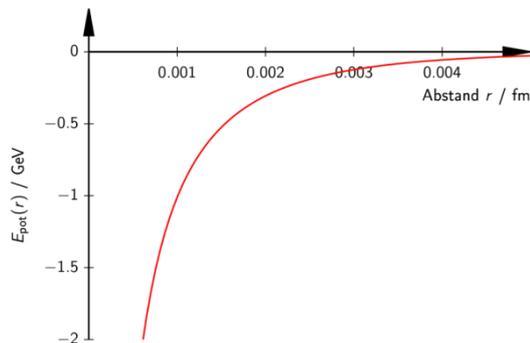
## ► Elektromagnetische WW



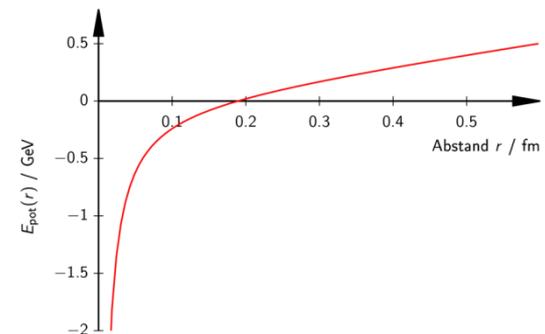
## ► Gravitation



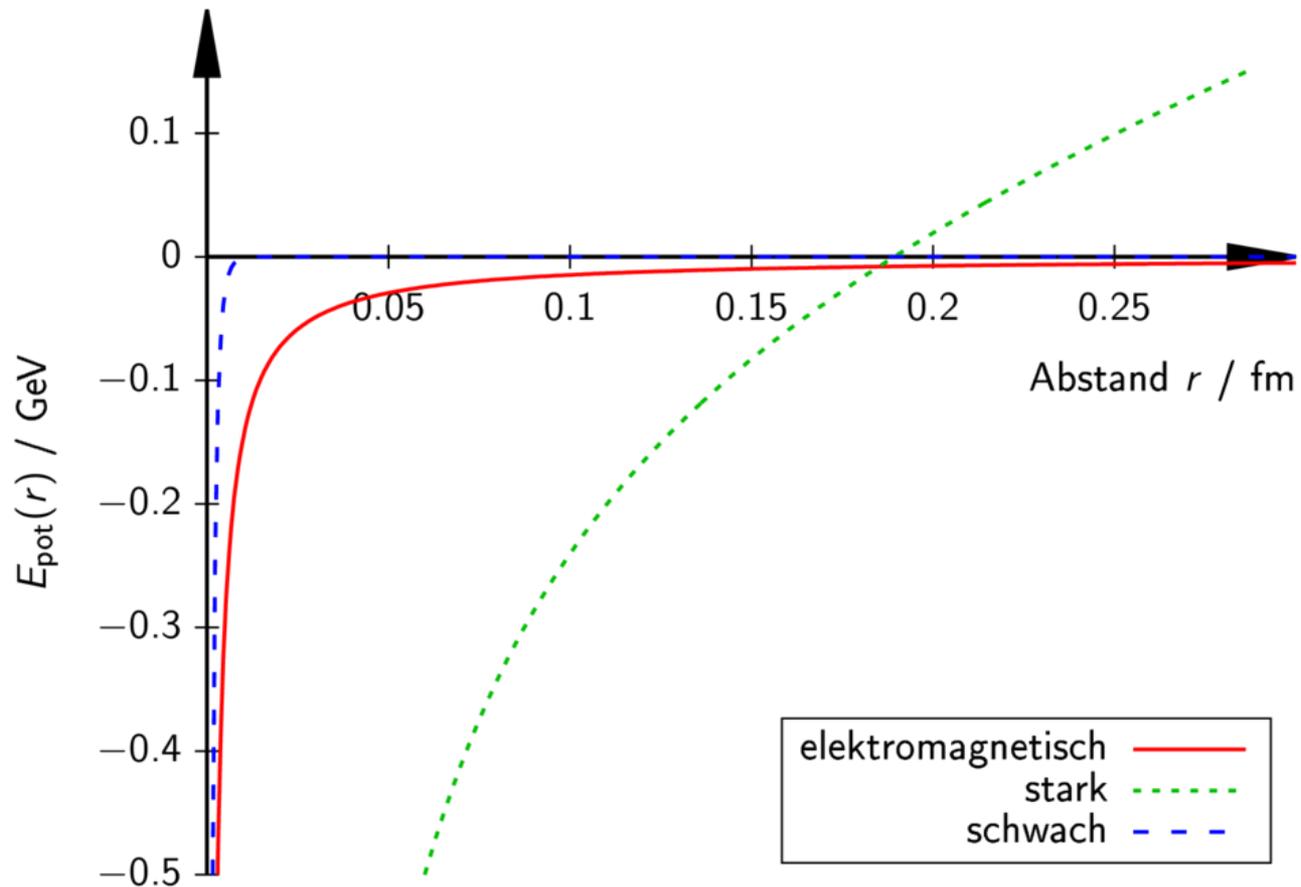
## ► Schwache WW



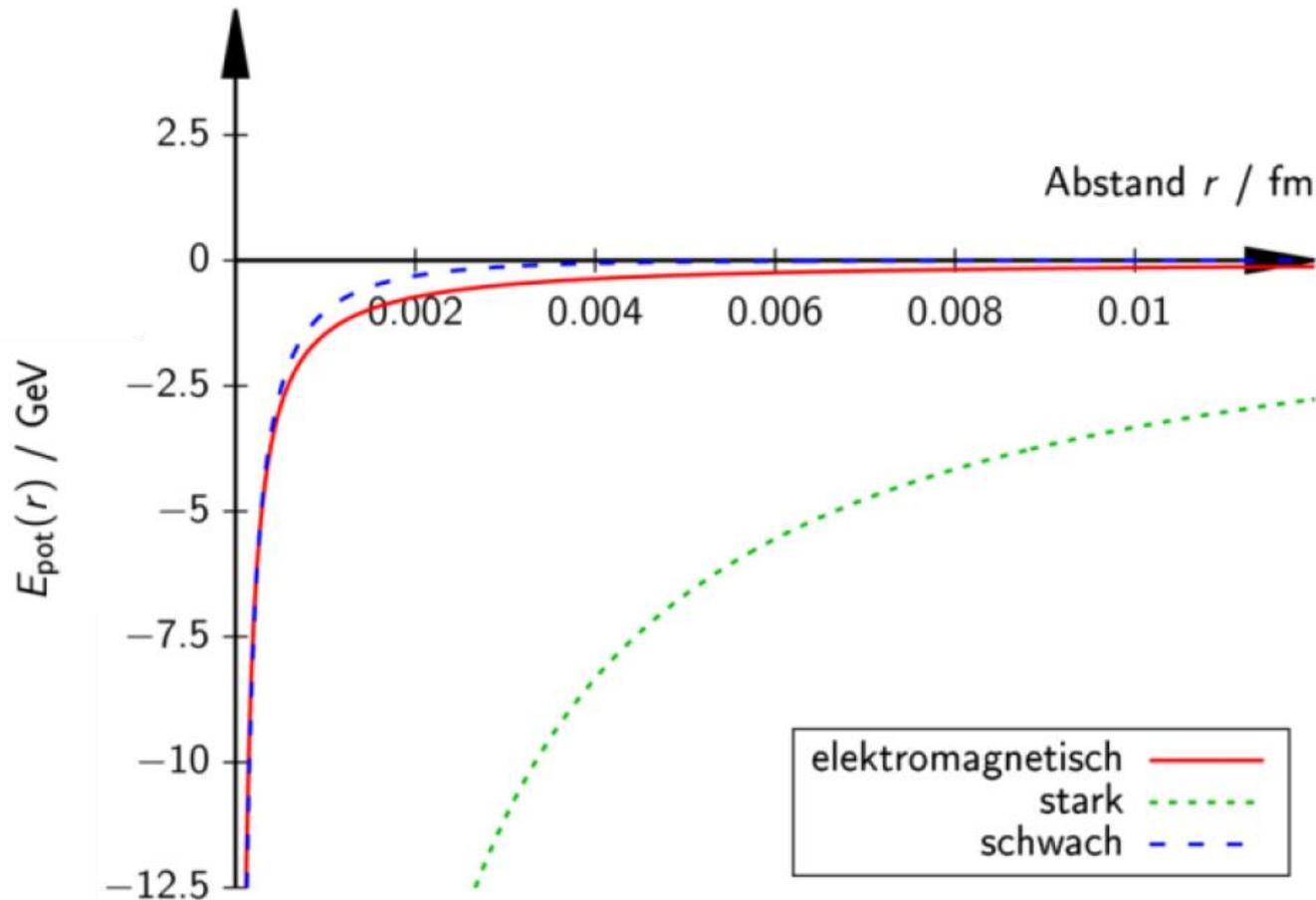
## ► Starke WW



# Vergleich der potenziellen Energien



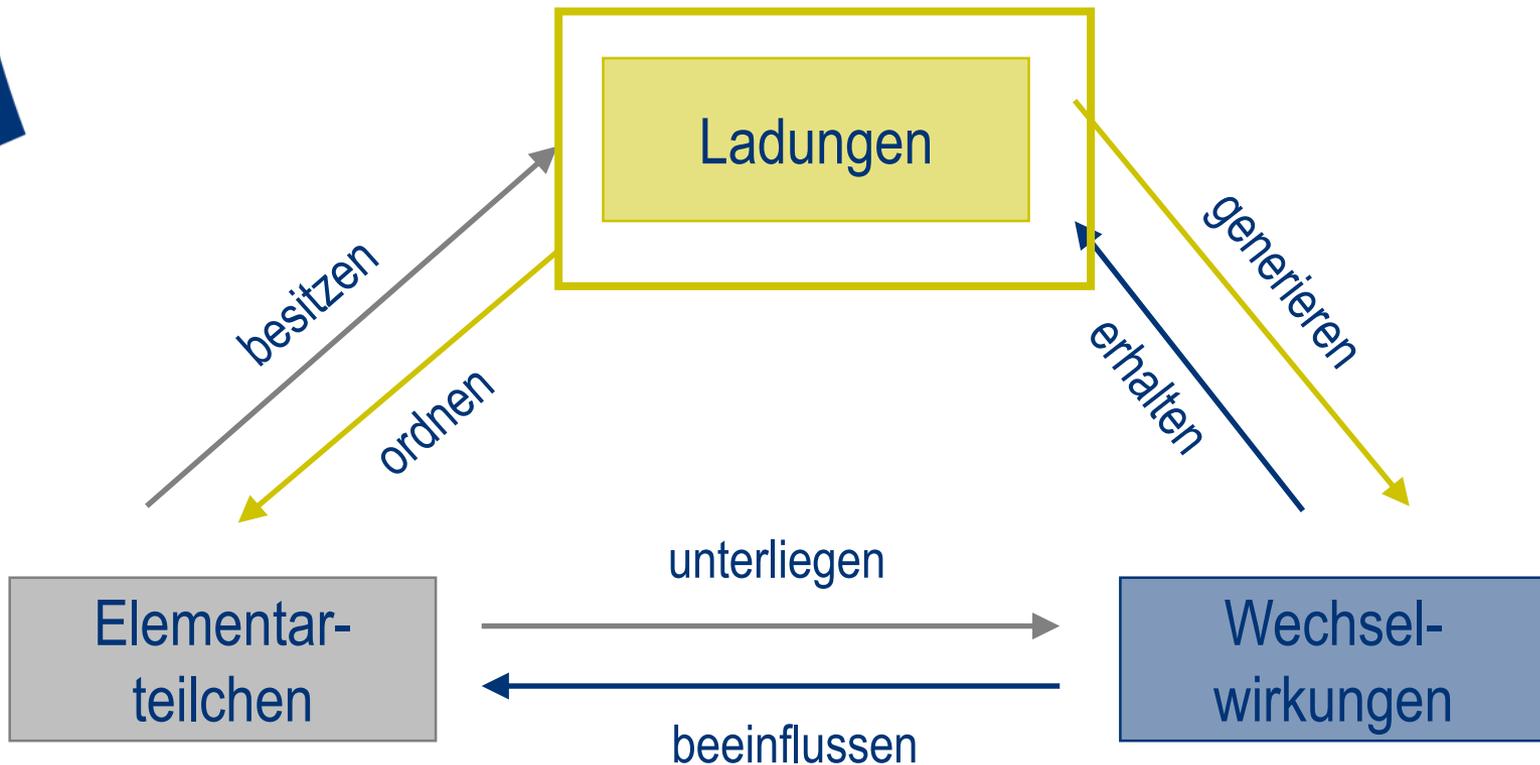
## Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw. gestaucht)



# Potenzielle Energien bei sehr kleinen Abständen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{\text{grav}} \frac{-1}{r}$
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Basiskonzept der Ladung

- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:
  - Elektrische Ladung

$$Q = Z \cdot e$$

Elektrische  
Ladungszahl

Elementarladung

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

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

■  $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$

Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)

▶ Einführung eines **Kopplungsparameters**  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

■  $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

# Erweiterung: Konzept der Ladung

► **Einführung:** eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

- $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
gravitativ	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

# Erweiterung auf andere Wechselwirkungen

- ▶ Coulombsches Gesetz:  $F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r^2} = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$ 
  - $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137}$   
Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante)
- ▶ **Einführung** eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen
  - $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$
- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**
  - Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

# Erweiterung: Konzept der Ladung

- ▶ **Einführung:** Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
  - ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren als charakteristische Teilcheneigenschaften
  - ▶ 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 quantenfeldtheoretisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Praktikabel: zwischen Teilchen 1 und Teilchen 2:

$$\alpha_{grav}^{1,2} = G \frac{m_1 m_2}{\hbar c}$$

- ▶ Beispiel:  $\alpha_{grav}$  zwischen Proton (p) und Elektron (e<sup>-</sup>)

- $\alpha_{grav}^{p,e} = G \frac{m_p m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
- Erinnerung elektromagnetisch:  $\alpha_{em}^{p,e} \approx \frac{1}{137}$
- 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 kann nicht negativ sein

## ▶ Theorie:

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

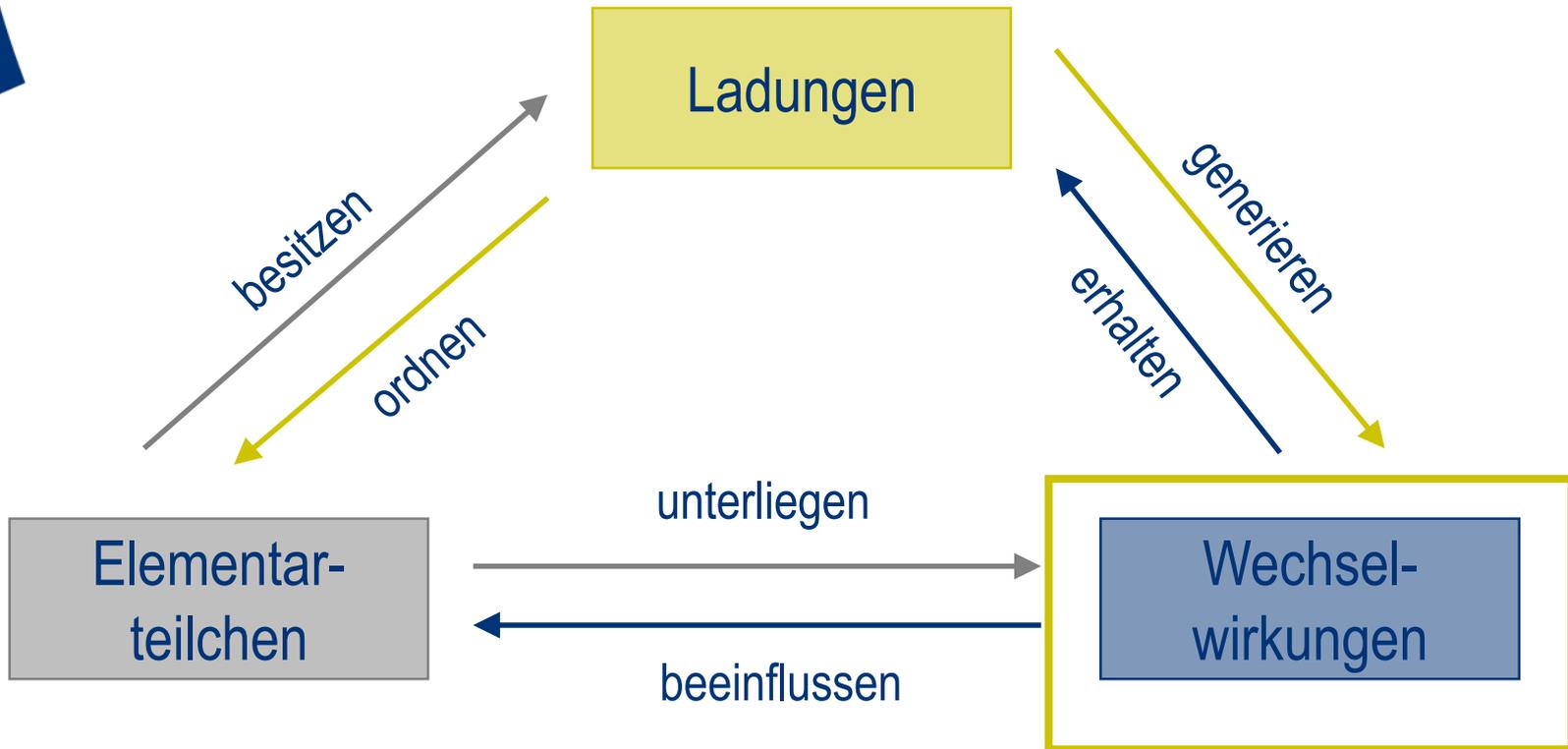
# Konzept der Ladung

- ▶ Ladungszahlen bzw. – Vektoren sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten Wechselwirkung teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

- ▶ Ladungszahlen bzw. –Vektoren dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
- ▶ Ladungszahlen bzw. –Vektoren sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
  - Grundlage der Symmetrien des Standardmodells

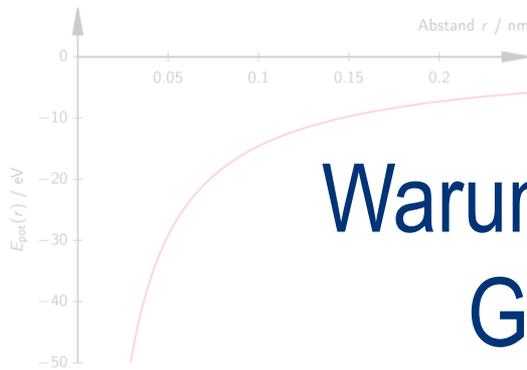
# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

► Gravitation

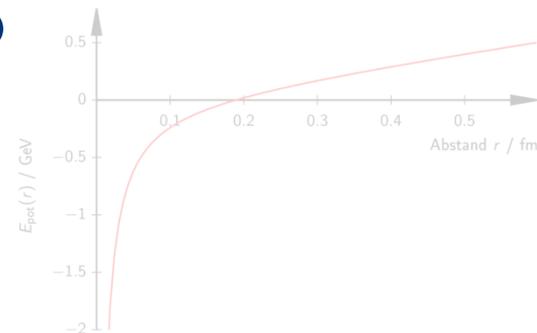
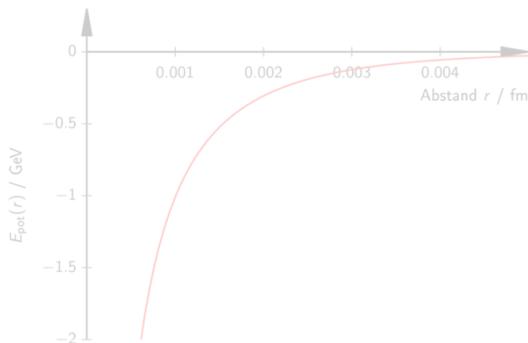


Warum erfahren wir nur  
Gravitation und

► Schwache WW

Elektromagnetismus

im Alltag?



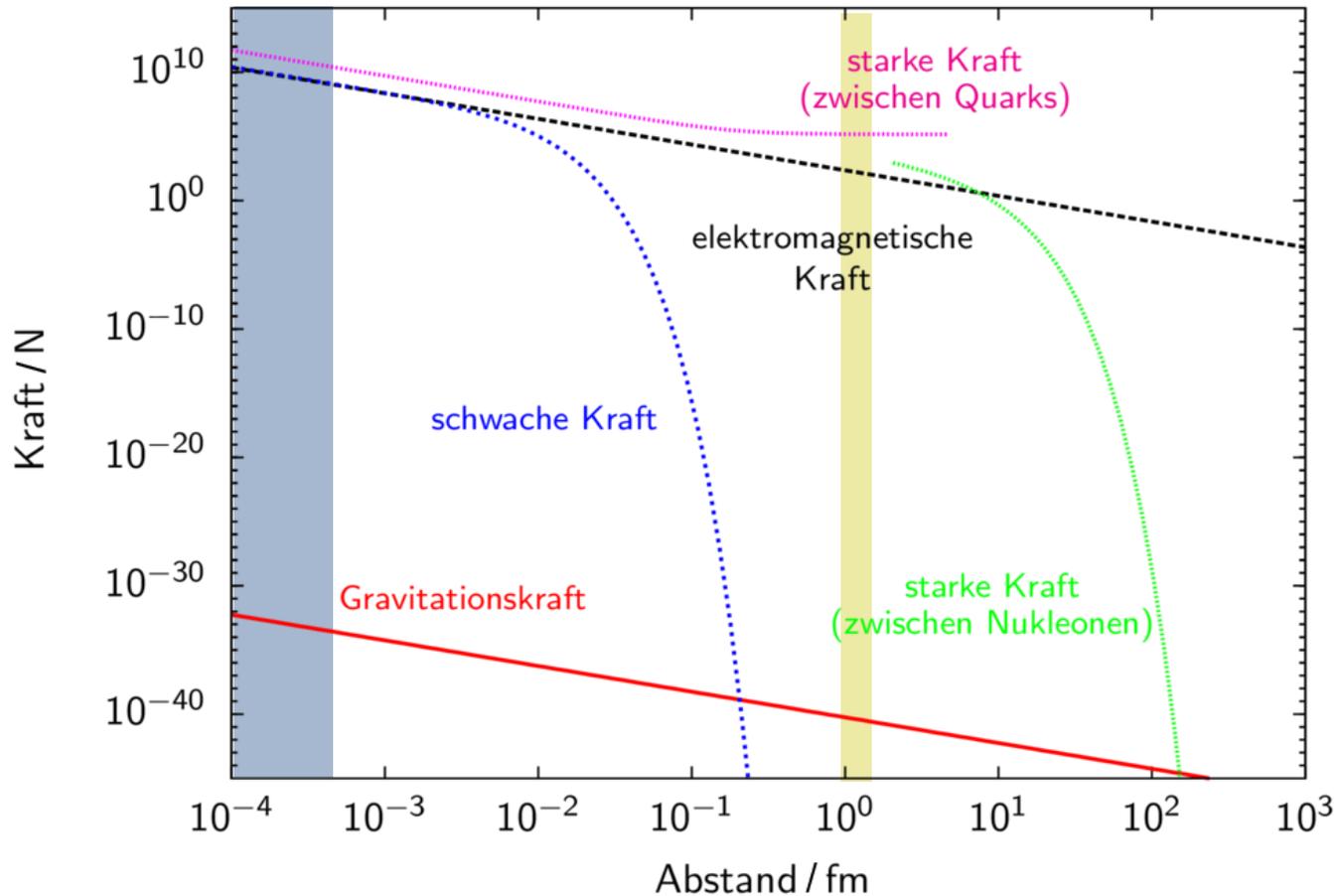
# Kräfte der Wechselwirkungen

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

Grenze exper. Auflösung

Protondurchmesser

\*Wir sind ~1m weiter dort →



# Kräfte der Wechselwirkungen

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand  $r$ 
  - Bei kleinen Abständen  $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reichweiten sind Konsequenzen dieser Kraftgesetze
  - Unendlich: im Alltag spürbar
  - Endlich: nur subatomar
- ▶ Reihenfolge der Stärken
  - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen  $F(r)$
  - Kann nur für Wechselwirkungen definiert werden:  $\alpha$  !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

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

# Stärke der Wechselwirkungen

► Einführung: eines Kopplungsparameters  $\alpha$  auch für andere Wechselwirkungen

- $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$



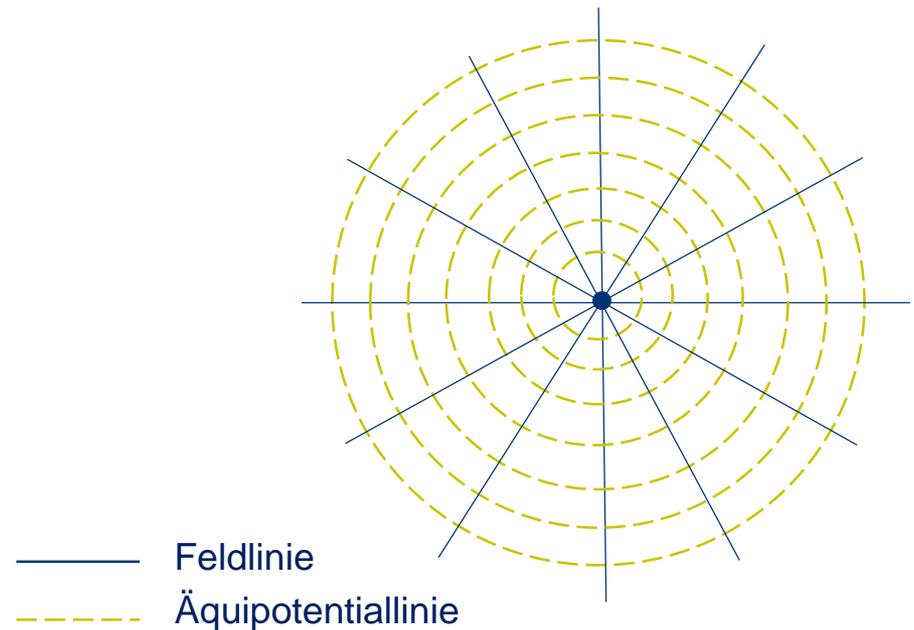
## Warum erfahren wir nur

Wechselwirkung	Kopplungsparameter $\alpha$
Gravitation	$\alpha_{grav} \approx 10^{-38}$
elektromagnetisch	$\alpha \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Gravitation und Elektromagnetismus im Alltag?

# Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

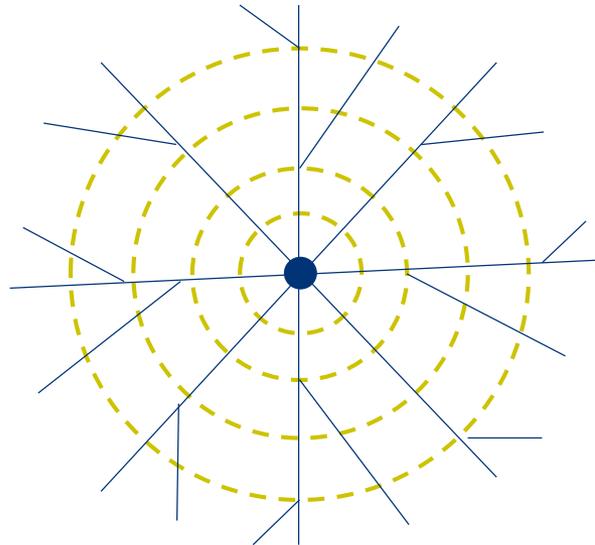
- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW
- ▶ **Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur Kraft
  - Idee Ladung im Zentrum
  - Kugeloberfläche  $A = 4\pi r^2$
  - $F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$
- ▶ Stimmt bei
  - $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



# Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

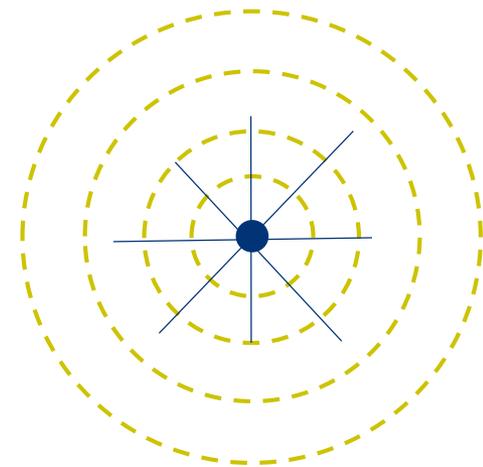
## ▶ Stark

- Kraft konstant →  
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



## ▶ Schwach

- Kraft strebt rasch gegen Null
- Feldlinien enden „im Nichts“

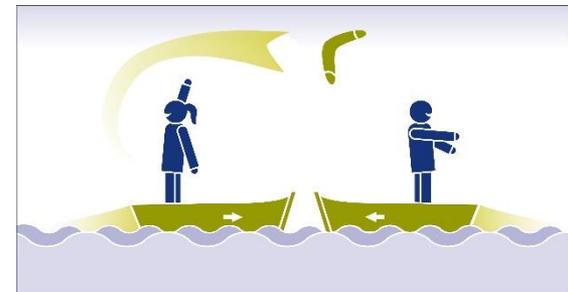
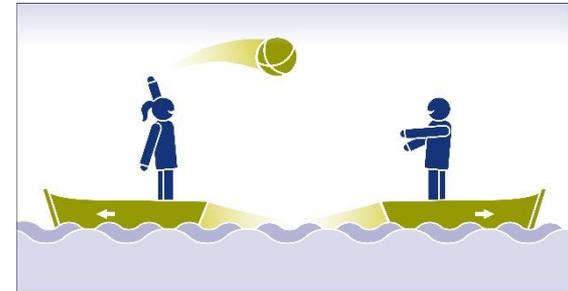


# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► Einführung: Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

► Bekannt ist:

- 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

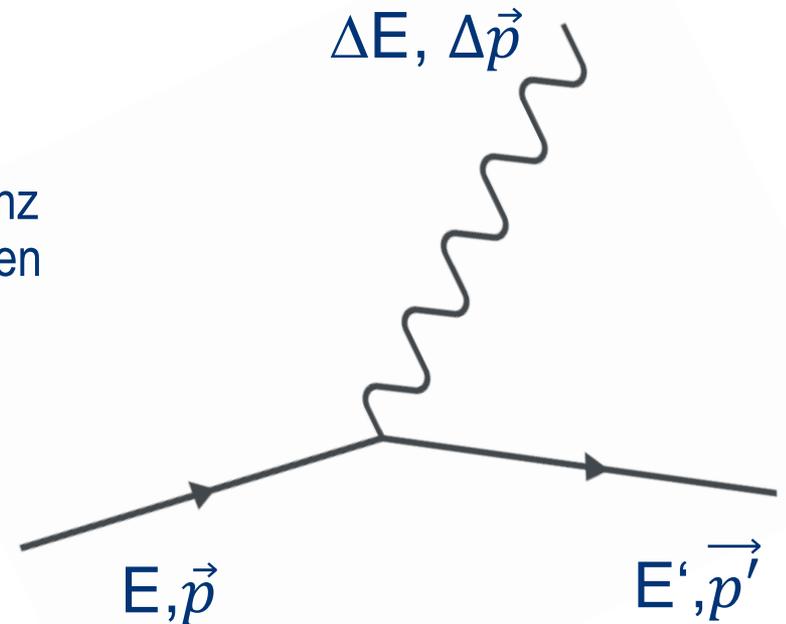


# Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► Einführung: Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

► Bekannt ist:

- 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



# Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

▶ Botenteilchen (Photon) ist

- masselos
- ungeladen

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

▶ Grund: Massereiche Botenteilchen (W- und Z-Teilchen) verursachen kurze Reichweite

- Compton-Wellenlänge  $\lambda_w = \frac{\hbar}{m_w c} \approx 0,0024 \text{ fm}$
- Exakte Argumentation schwierig. Mathematische Herleitung möglich, liegt außerhalb der hier behandelten Themen

# Klassisches Analogon:

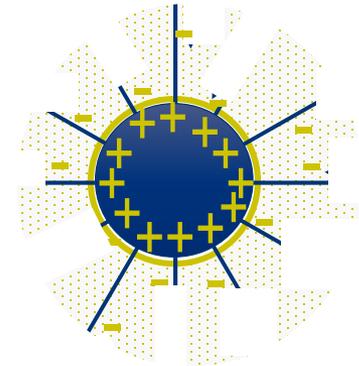
## ► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

- Einfügen von Dielektrikum
- Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch Polarisation
- Abgeschirmtes Feld  
→ Endliche Reichweite  $\lambda$

## ► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

- Polarisierbares Medium der Schwachen Wechselwirkung → „Dischwachladikum“
- Abgeschirmtes Feld  
→ Masse der Botenteilchen

$$m_W c^2 = \frac{\hbar c}{\lambda_W} = \frac{0,2 \text{ GeV fm}}{\lambda_W}$$



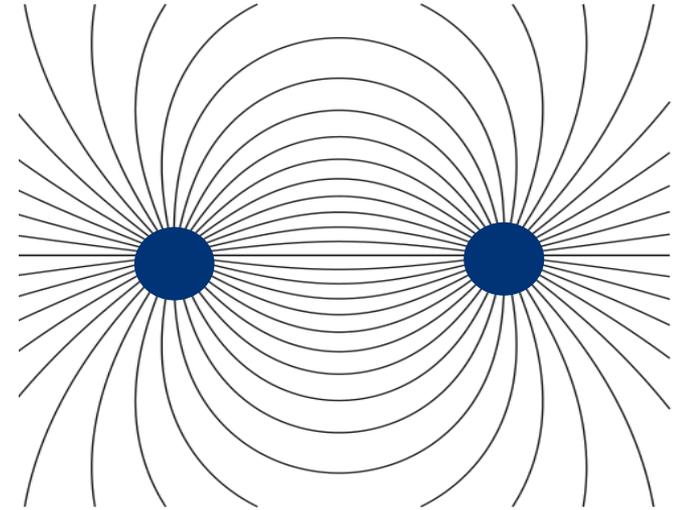
# Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

- ▶ Botenteilchen (Photon) ist
  - masselos
  - ungeladen

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

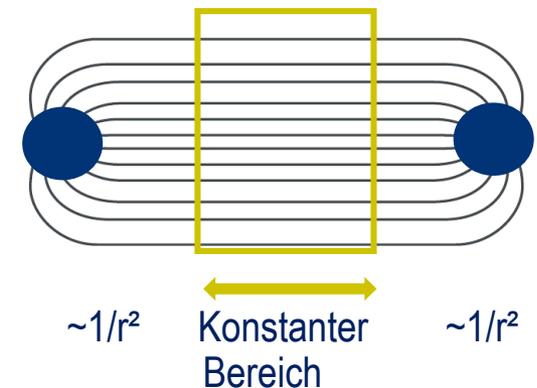
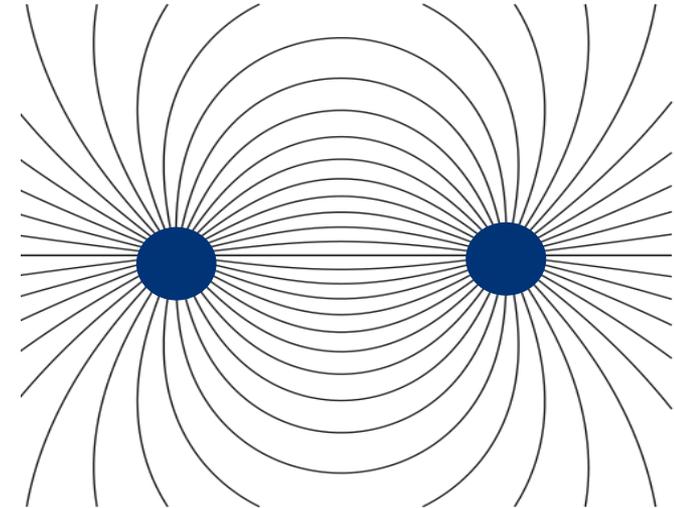
- ▶ Vergleich: Stark  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

- ▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung



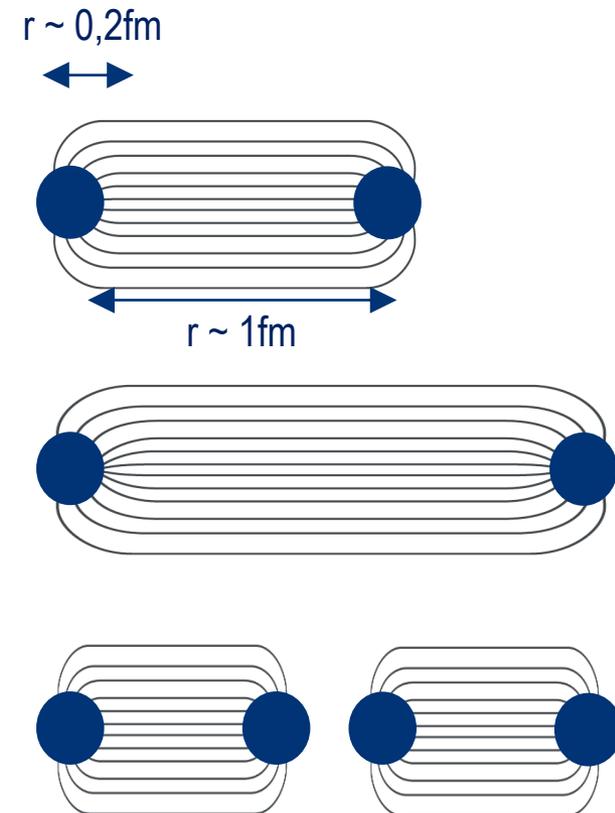
# Starke Wechselwirkung

- ▶  $E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$
- ▶ Die Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst starke Ladung
  - Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen
  - Sie wechselwirken miteinander
  - Es entsteht ein „Schlauch“
- ▶ Feldliniendichte bleibt konstant
  - Potential linear → Kraft konstant



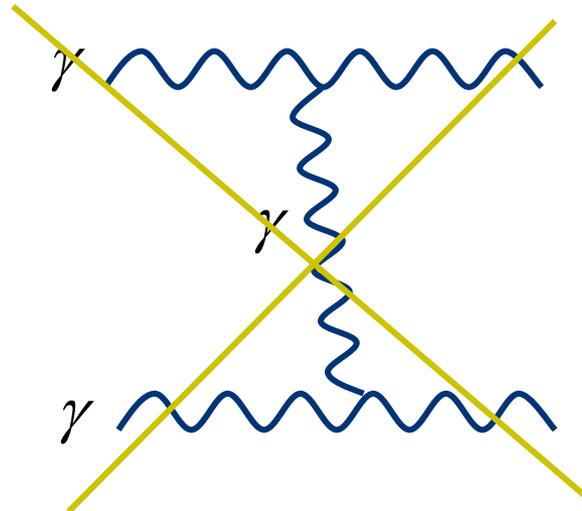
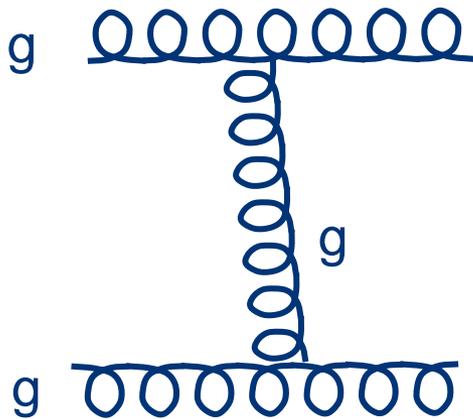
# Starke Wechselwirkung

- ▶  $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$
- ▶ Linearer Term, dominiert ab  $r \approx 0,2 \text{ fm}$ 
  - Die im Feld gespeicherte Energie steigt linear
  - Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) zu erzeugen!
- ▶ „Confinement“



# Glukon Selbstwechselwirkung

- ▶ Glukonen besitzen selbst starke Ladung
  - Glukonen können selbst Glukonen abstrahlen



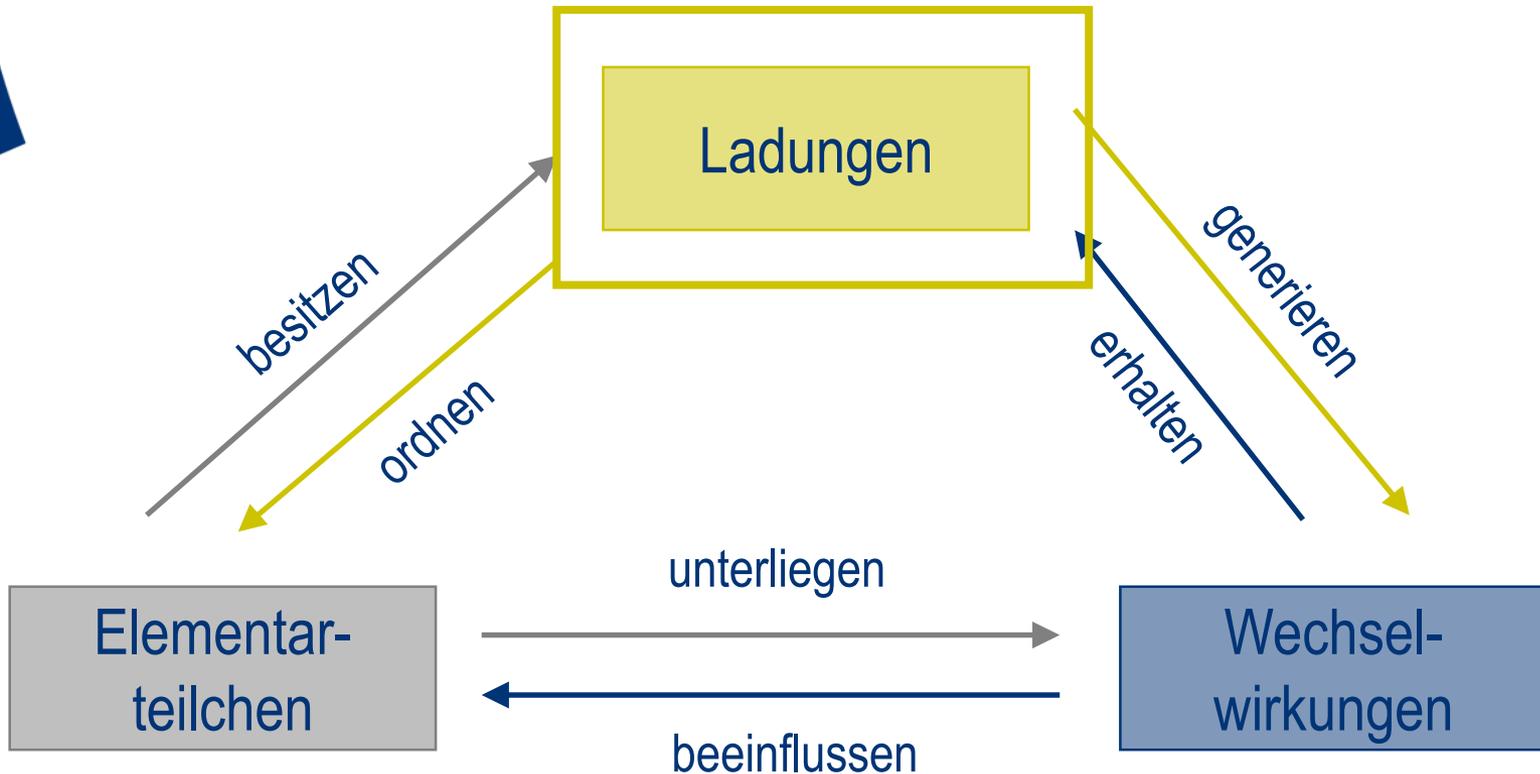
# Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Potenzielle Energie	Reichweite
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$	unendlich
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$	unendlich
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + kr$	$5 \cdot 10^{-15} \text{m}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{m}$

# Diskussion / Fragen



# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Konzept der Ladung

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

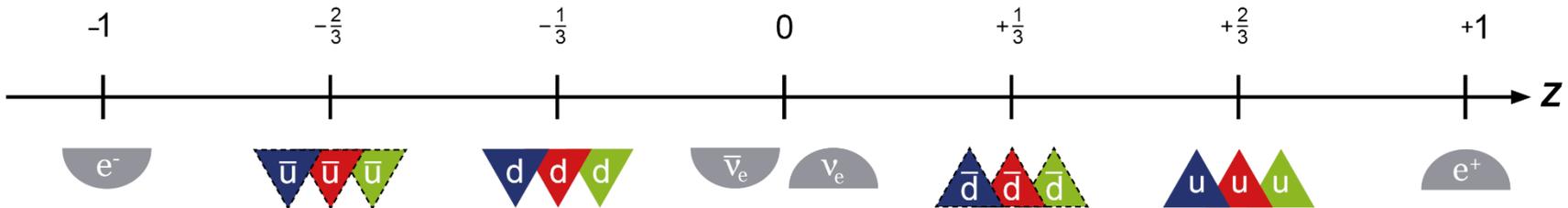
Und:

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

# Elektrische Ladung

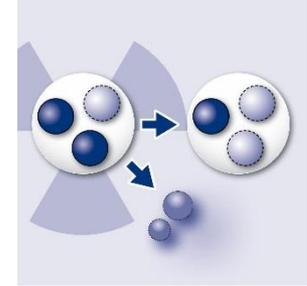


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen  $Z$  einiger Anti-/Materieteilchen

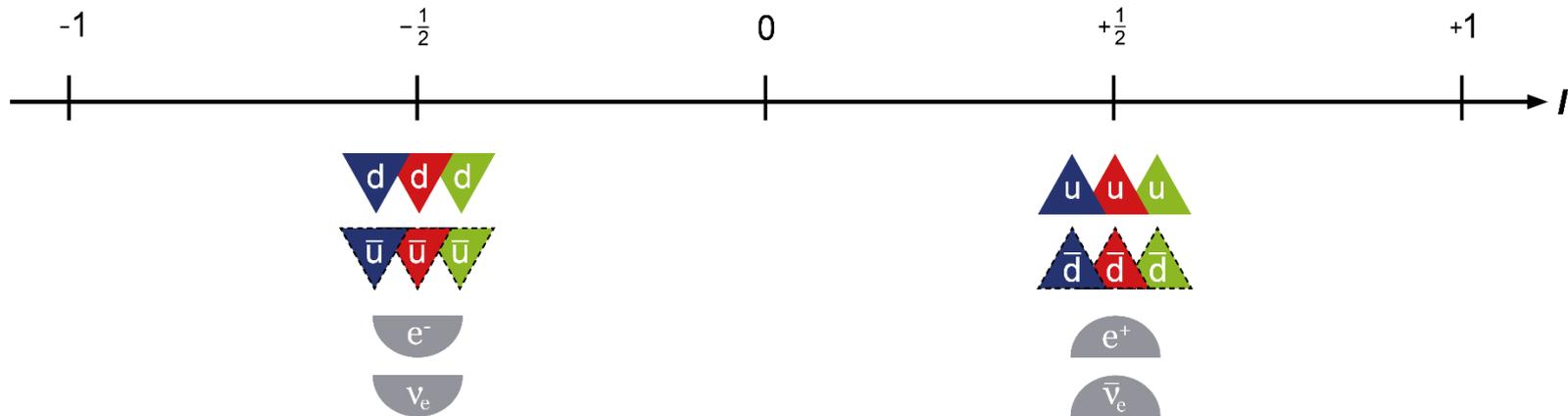


- Elektrische Ladung ist gequantelt

# 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

# Schwache Ladungszahl

$$Q_{em} = e \cdot Z$$
$$Q_w = g_w \cdot I$$

Kopplungsstärke  $g_w$       Ladungszahl  
 $\rightarrow \alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi}$

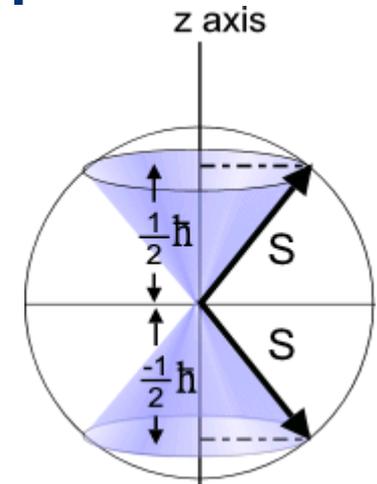
## ► Fachlicher Hinweis

- Die schwache Ladung hat eigentlich einen vektoriellen Charakter, daher die **vollständige** Bezeichnung „Schwache **Isospin-Ladung**“
- Wie beim Spin (z.B. in Atomorbitalen die magnetische Quantenzahl  $m$ ) ist nur eine Komponente (die schwache **Ladungszahl**) messbar. (Daher der „Isospin“ Begriff)
- Sie darf außerdem nicht verwechselt werden mit dem „starken Isospin“, der insbesondere zur Ordnung von gebundenen Quark-Zuständen dient. Er ist **keine Ladung** im Sinne einer Wechselwirkung.

## ► Bei Literatur und Webrecherche ist daher **größte** Vorsicht geboten

# Exkurs: warum schwache „Isospin“-Ladung?

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

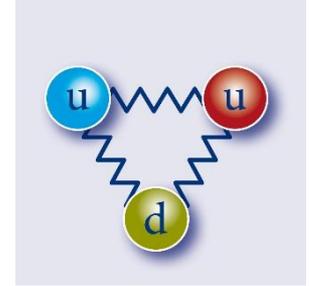


<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

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

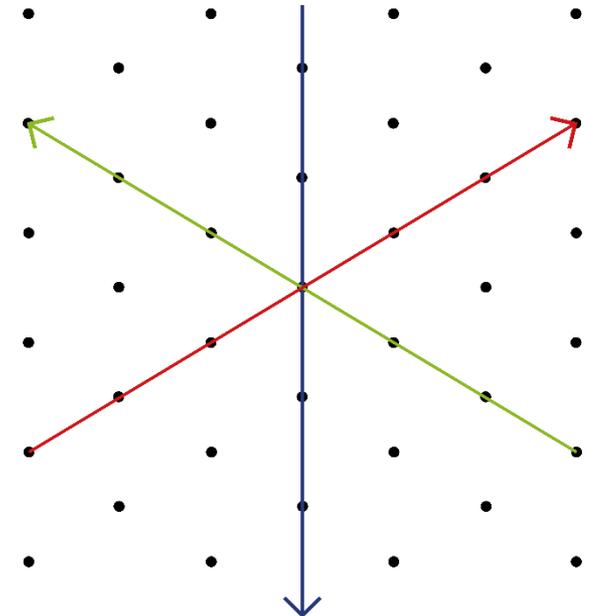
# Starke Ladung

▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: starke „Farbladung“)



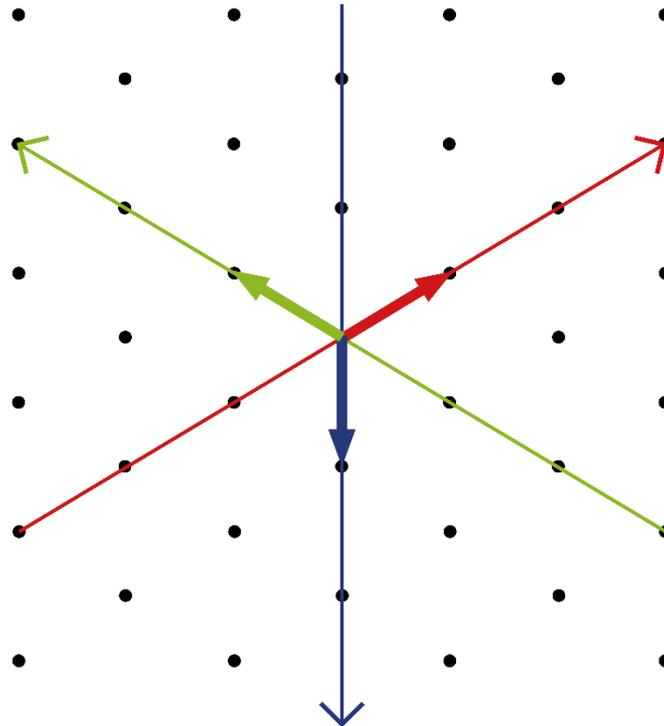
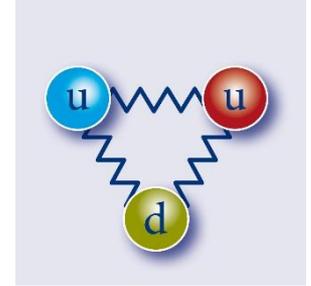
▶ Farbgitter:

- Experimentell nachgewiesen: Alle starken Ladungen haben gleichen Betrag
- 3 Ladungen addieren sich zu 0 (Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus 3 Quarks)  
→ geht nur mit Vektoren
- Theorie: 2 Komponenten messbar  
→ 2-dim Farbgitter



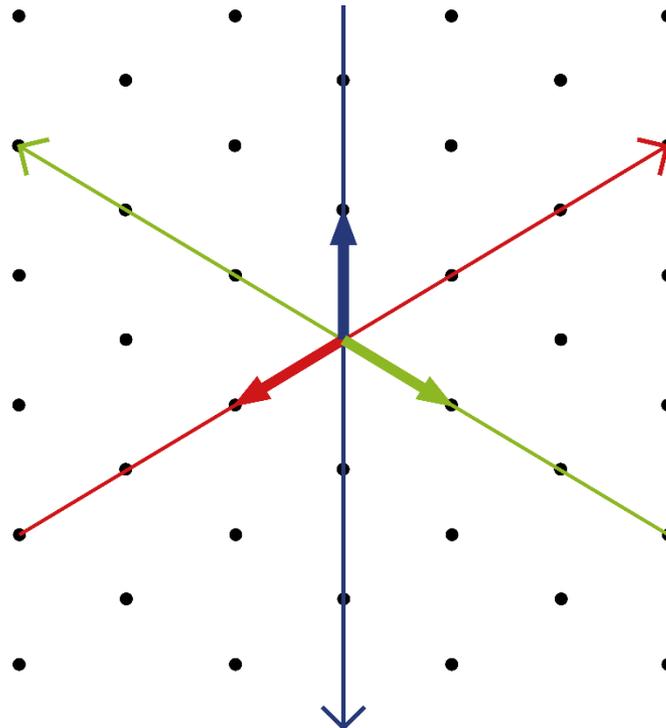
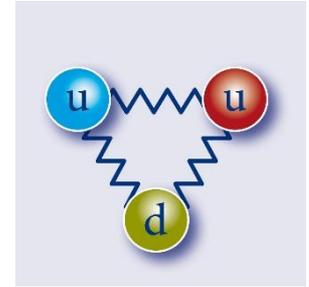
# Starke Ladung

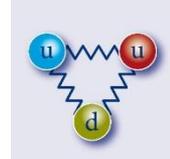
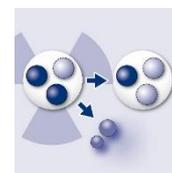
► Farbladungsvektoren von Quarks



# Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





# Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

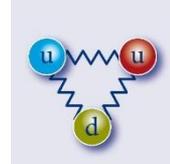
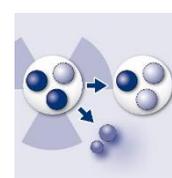
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

$$\vec{C}_p = \vec{C}_u + \vec{C}_u + \vec{C}_d = \begin{array}{c} \color{red}{\rightarrow} \\ + \\ \color{green}{\leftarrow} \\ + \\ \color{blue}{\downarrow} \end{array} = \color{red}{\rightarrow} + \color{green}{\leftarrow} + \color{blue}{\downarrow} = \vec{0}$$



# Alle Ladungen sind jeweils 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:

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

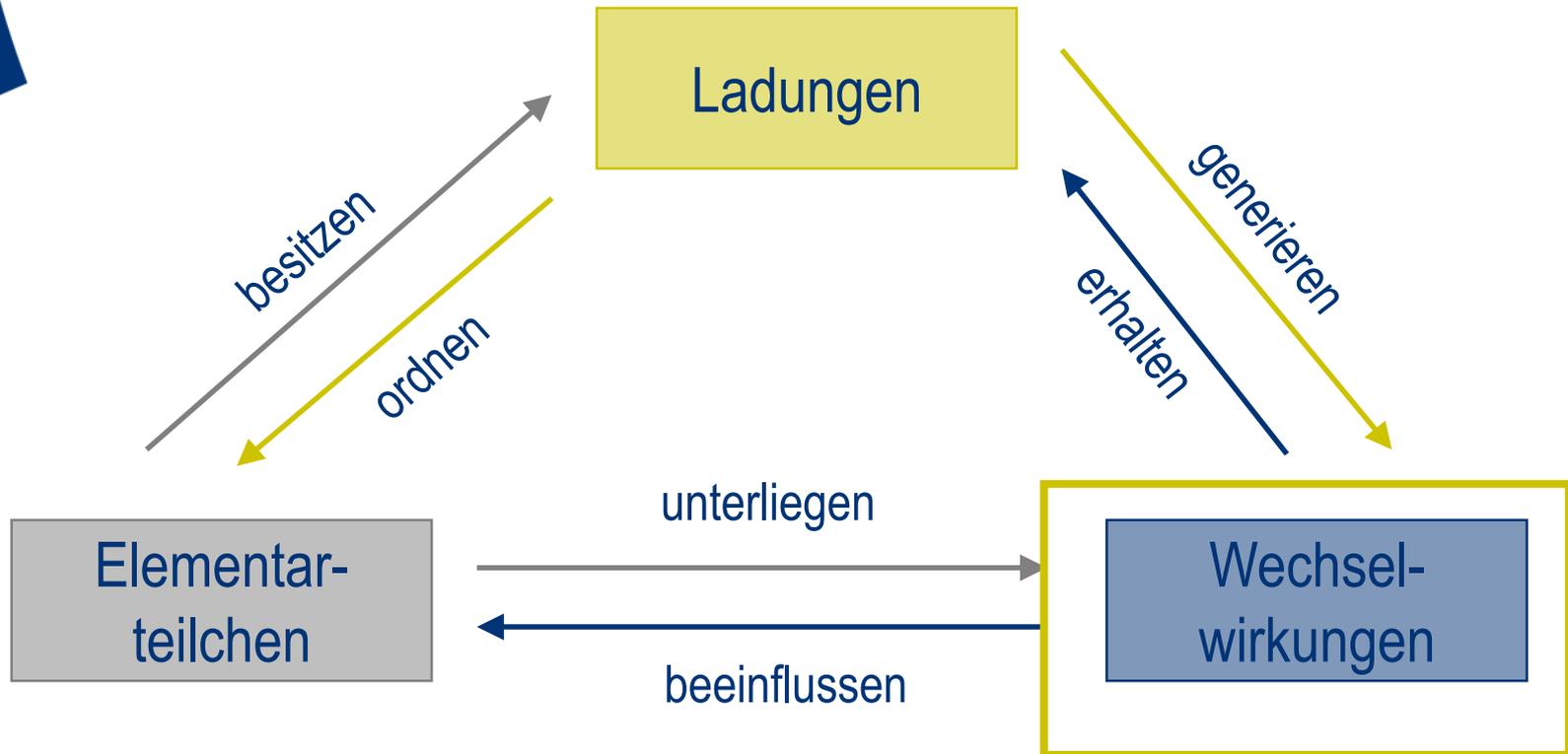
# Eindeutige Vorhersage möglich

- ▶ ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind (und sogar ihrer Wahrscheinlichkeiten) aus
  - Energie- und Impulserhaltung
  - **Erhaltung aller drei Ladungen**
  - Beachtung der Teilchen-“Multipletts“ (später)

# Zusammenfassung: Ladungen

- ▶ Drei verschiedene Ladungen
  - Elektrisch
  - Schwach
  - Stark
- ▶ Ladungen sind
  - Additiv
  - Erhalten
    - Vorhersage von erlaubten Prozessen
  - Gequantelt
- ▶ Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



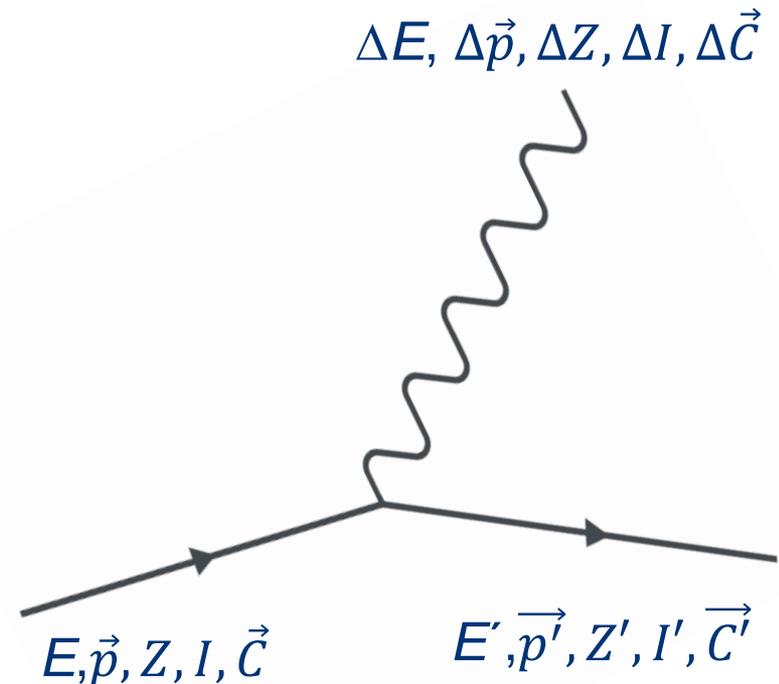
# Darstellung durch Botenteilchen

▶ Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

▶ Bekannt ist:

- Energie, Impuls, Ladungen **vorher**
- Energie, Impuls, Ladungen **nachher**
- Differenzen werden durch Botenteilchen übertragen

▶ Feynman Diagramme



# Feynman - Diagramme

## ► „Zeit - Ort“ Diagramm

- Wo passiert etwas
- Wann passiert etwas

## ► Bausteine:

- Materie Teilchen
- Materie Antiteilchen
- Botenteilchen



$u, d, e, \nu$  

$\bar{u}, \bar{d}, \bar{e}, \bar{\nu}$  

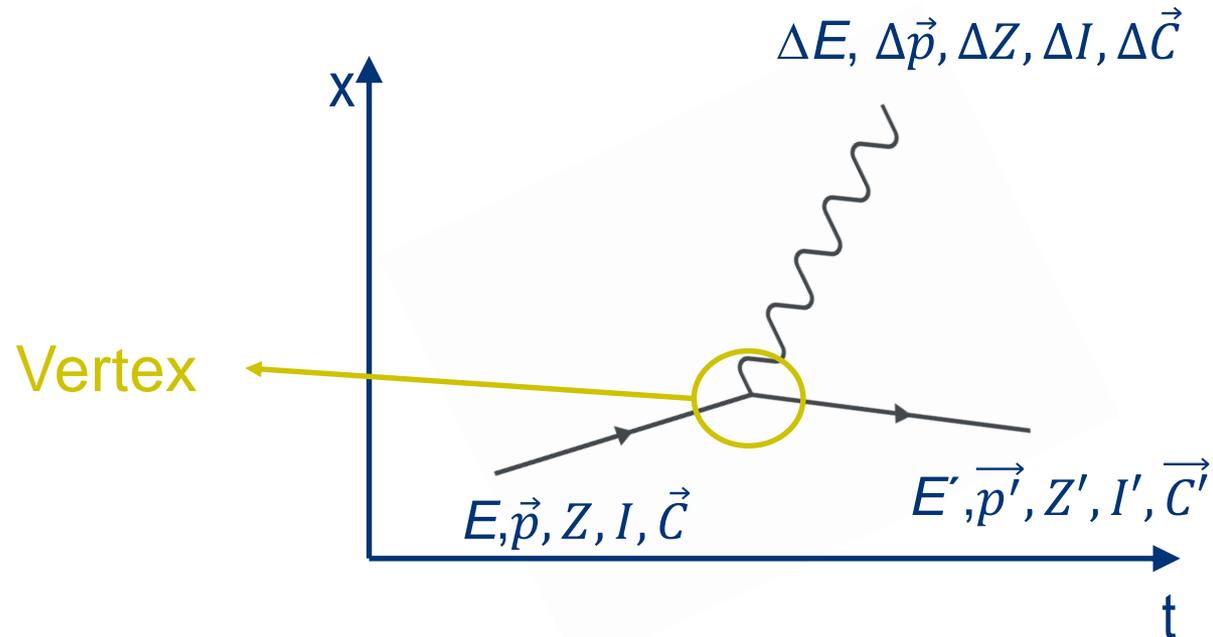
$\gamma, W, Z$  

$g$  

# Feynman - Diagramme

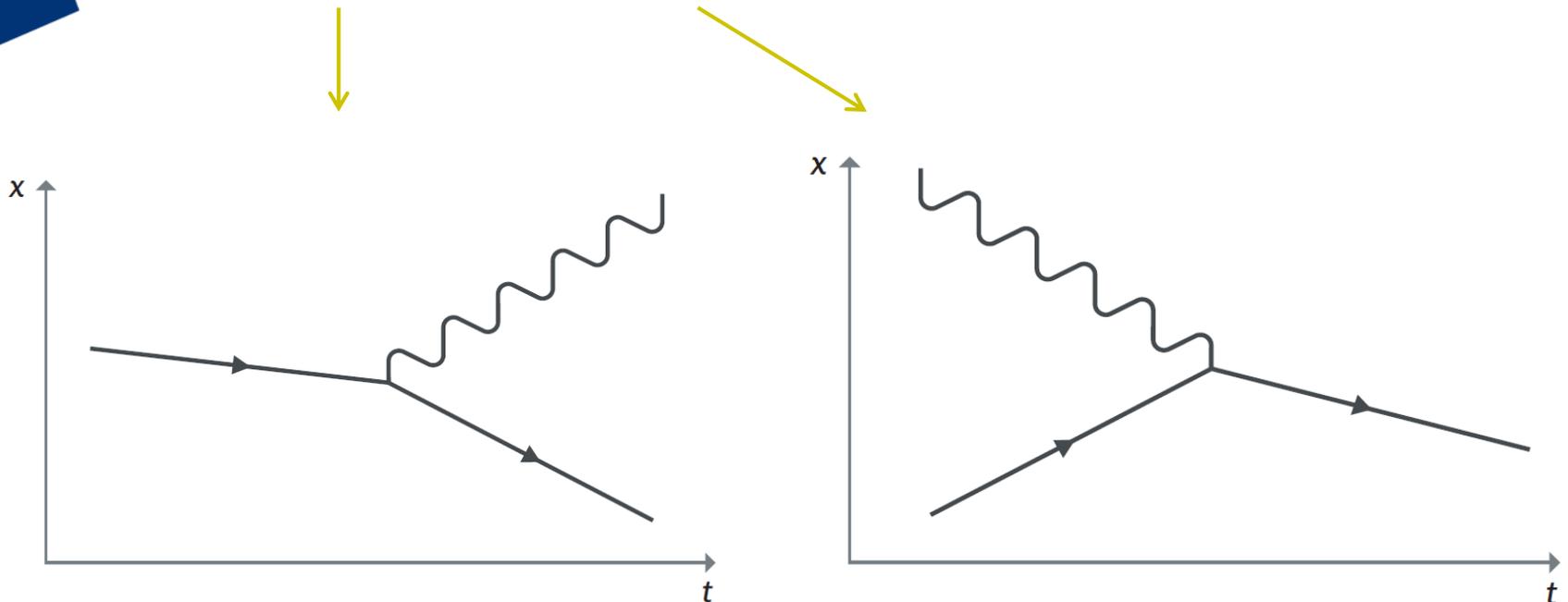
## ► Begriffsklärung:

- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass sich die Teilchen treffen
- Treffpunkt heißt:  
Vertex / Vertices (plural)



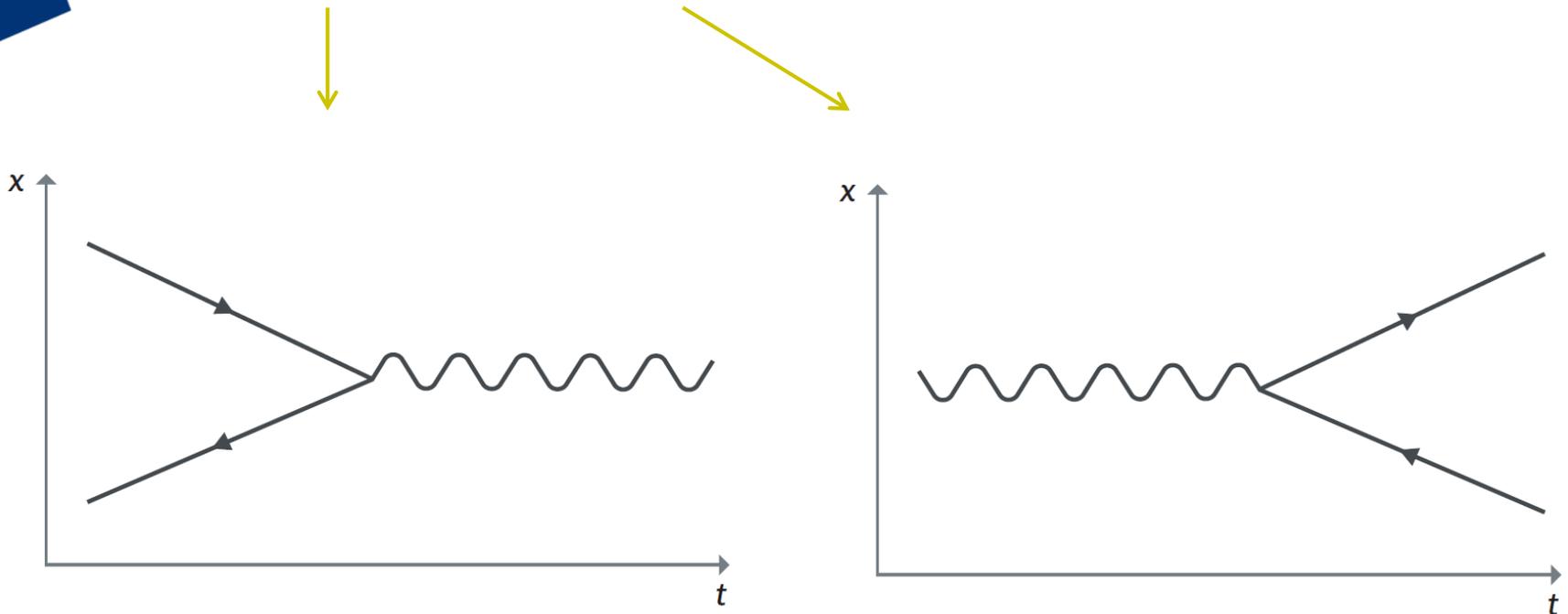
# Grundbausteine 1/2

## ► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



# Grundbausteine 2/2

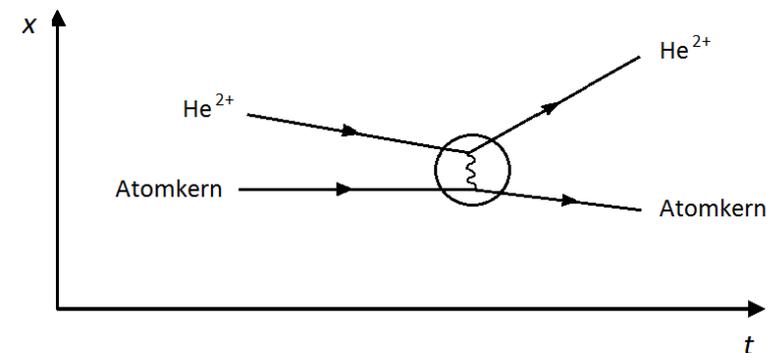
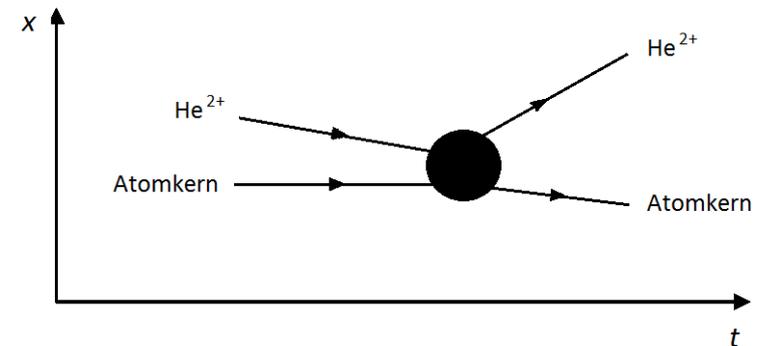
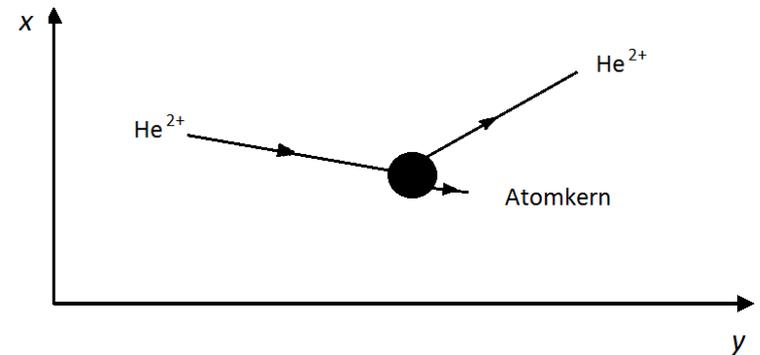
## ▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



# Prozesse

## ► Rutherford-Streuung

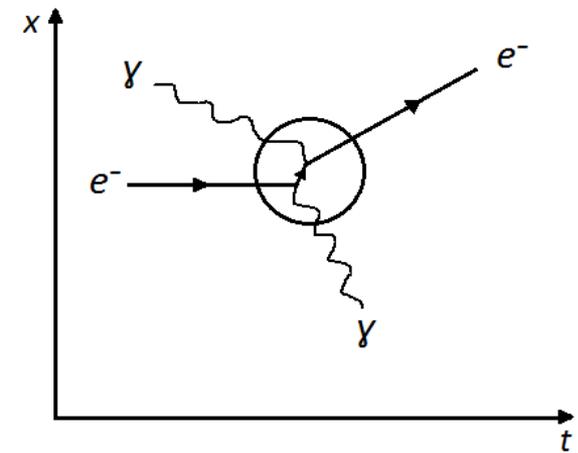
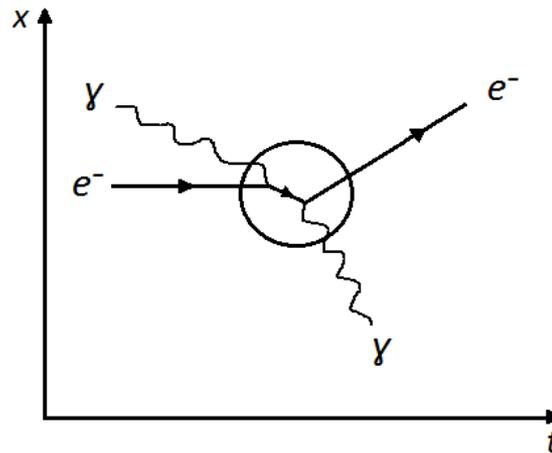
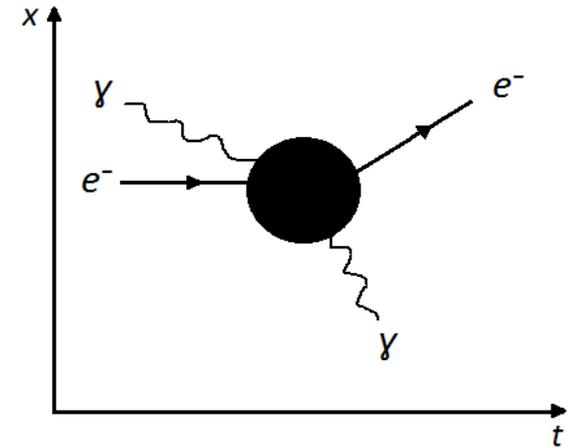
- „Ort - Ort“ Diagramm
- „Ort - Zeit“ Diagramm  
„Blackbox“ Vertex
- „Ort - Zeit“ Diagramm  
detaillierter Vertex



# Blackbox Vertex

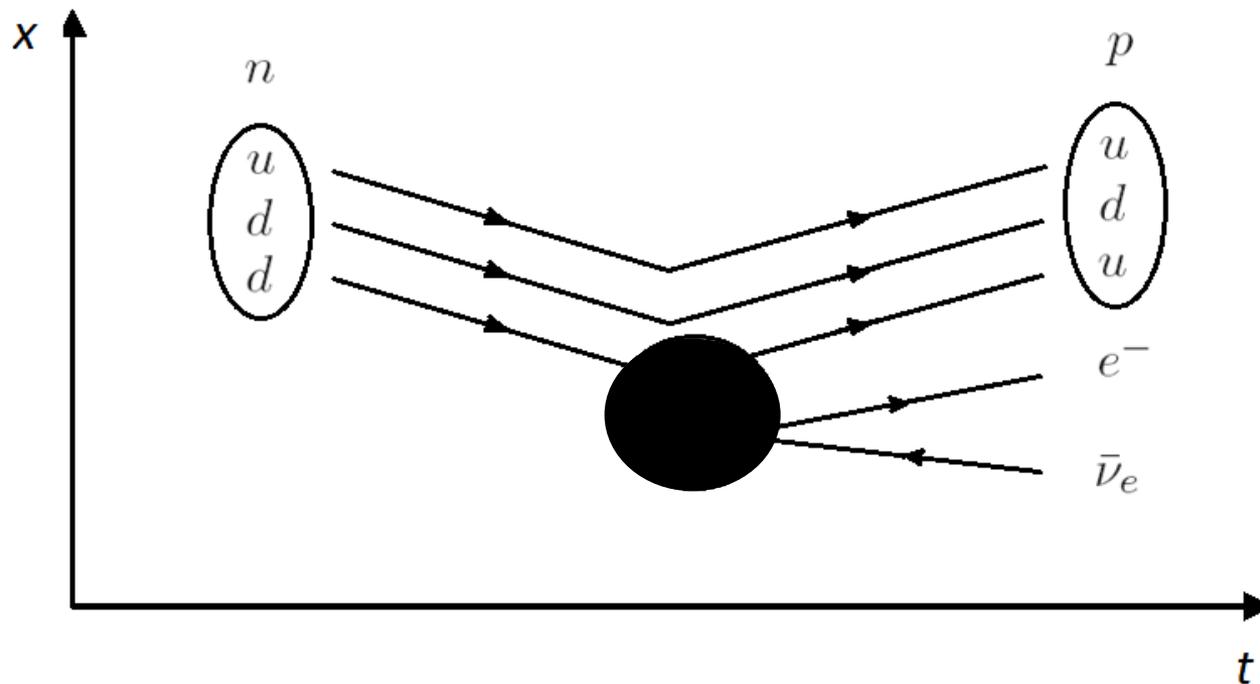
## ► Compton-Streuung

- Blackbox Vertex zeigt nicht das Botenteilchen
- In diesem Fall 2 gleichberechtigte Prozesse



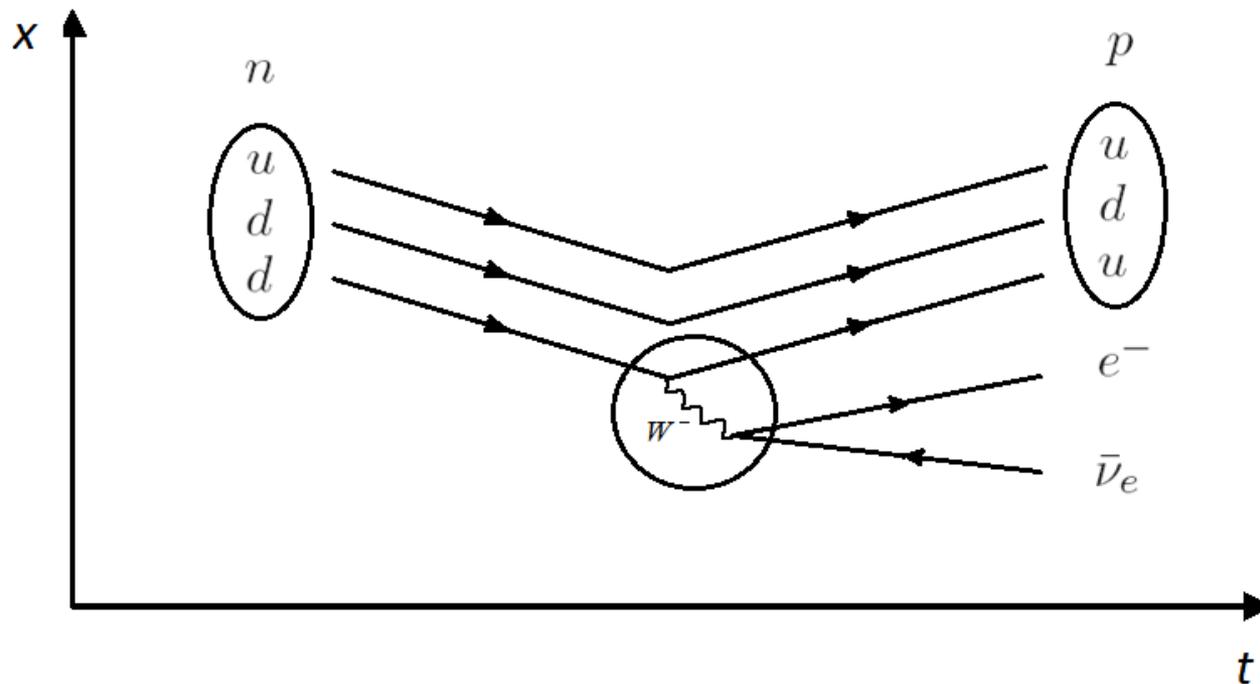
# Prozesse

## ► $\beta^-$ - Umwandlung



# Prozesse

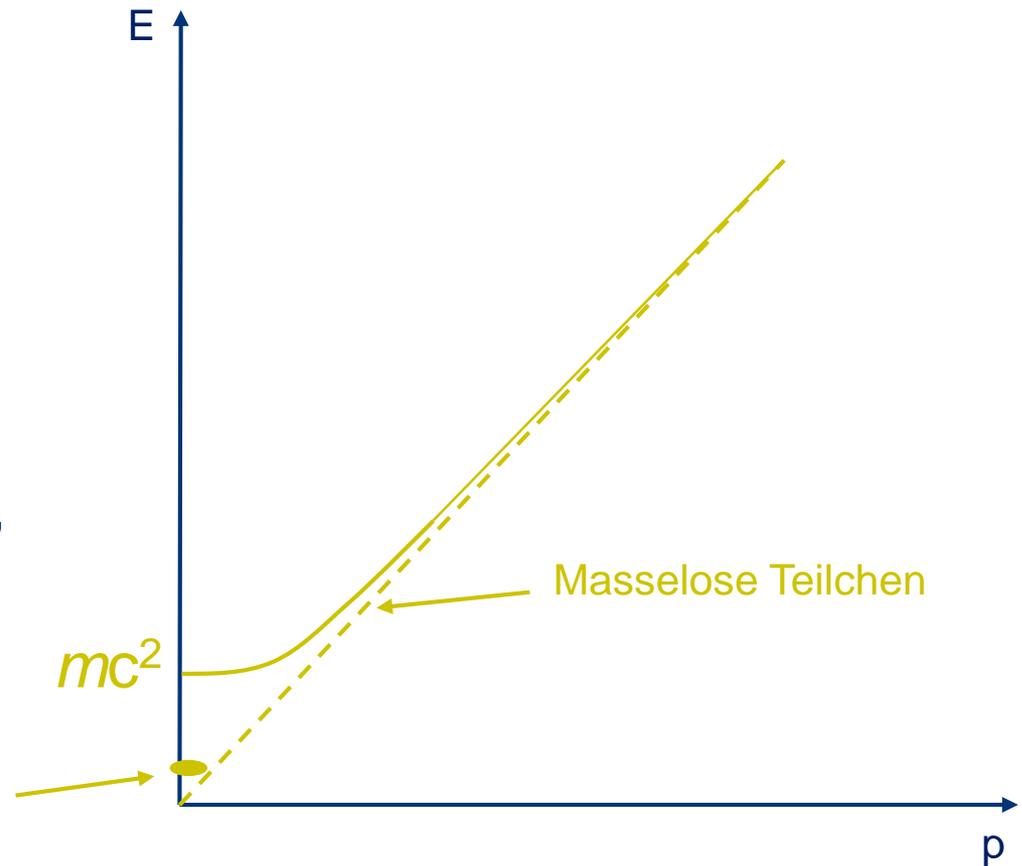
## ► $\beta^-$ - Umwandlung



# Virtuelle Teilchen

- ▶ Für reelle Teilchen muss die Energie-Impuls Beziehung gelten:  
$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$
- ▶ Für virtuelle Teilchen ist dies nicht der Fall
- ▶ Je weiter ein virtuelles Teilchen von der Energie-Impuls Beziehung entfernt ist, desto unwahrscheinlicher wird der Prozess

W Botenteilchen der  $\beta$ -Umwandlung



# Virtuelle Teilchen

- ▶ Analogie: Erzwungene Schwingung vs. Teilchenphysik

$$\sim \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega_0^2 \gamma^2}$$

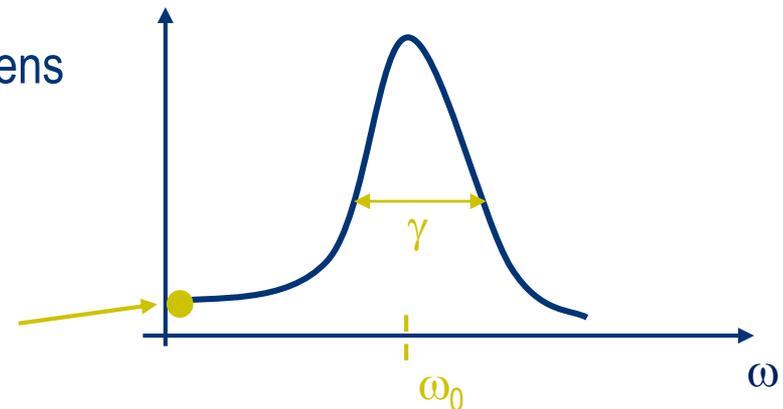
von außen Vorgegeben →  $\omega^2 - \omega_0^2$  (Eigenfrequenz) → Dämpfung = 1/Lebensdauer →  $\gamma^2$

$$\sim \frac{1}{(E^2 - (mc^2)^2)^2 + (mc^2)^2 \Gamma^2}$$

von außen Vorgegeben →  $E^2 - (mc^2)^2$  (Ruheenergie) → Breite  $\sim 1/\text{Lebensdauer}$  →  $\Gamma^2$

- ▶ „Erzwungene“ Ruheenergie des W Teilchens in der Beta Umwandlung ist weit weg von seiner „nominellen Ruheenergie“ (Resonanz)

W Botenteilchen der  $\beta$ -Umwandlung



# Ladungsbilanz: $\beta^-$ - Umwandlung

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

- Elektrische Ladungszahl:  $Z$

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

- Schwache Ladungszahl:  $I$

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

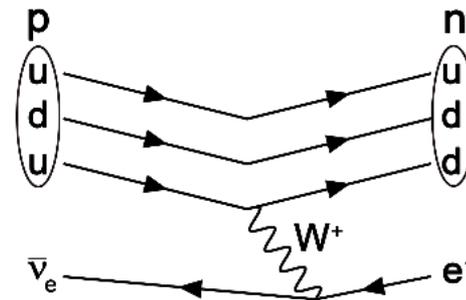
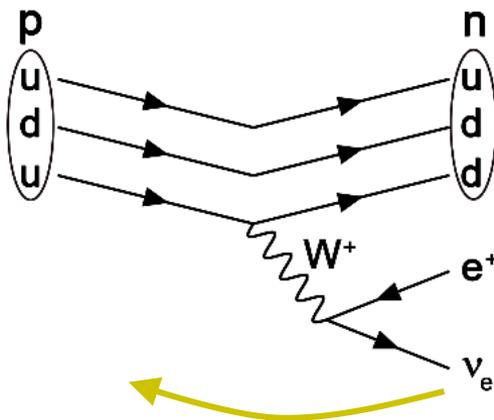
- Starker Farbladungsvektor:  $\vec{C}$

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

► Alle Ladungen sind erhalten

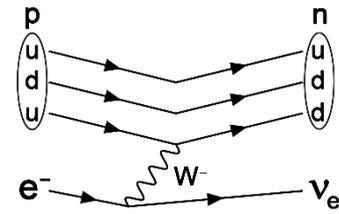
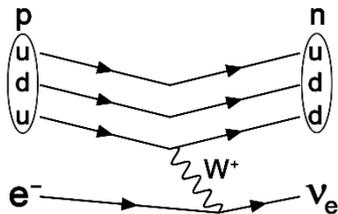
# „Umklappen“ von Linien

- ▶ Durch “umklappen” von Linien können mögliche Prozesse vorhergesagt werden
- ▶ Beispiel:
  - Von der  $\beta^+$  Umwandlung zum Nachweis der Elektron Anti Neutrinos

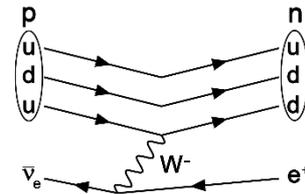
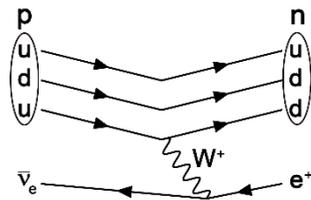


# „Umklappen“ von Linien

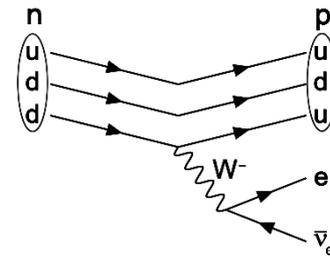
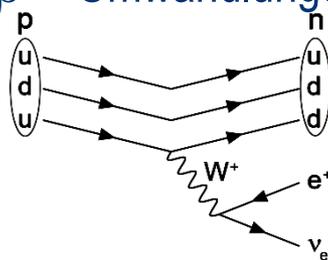
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953

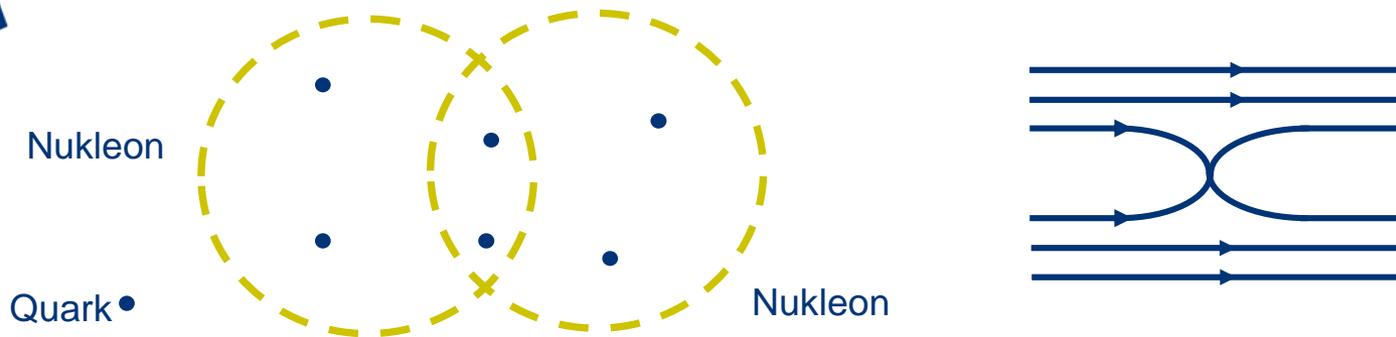


- β<sup>+</sup> und β<sup>-</sup> - Umwandlungen von Kernen

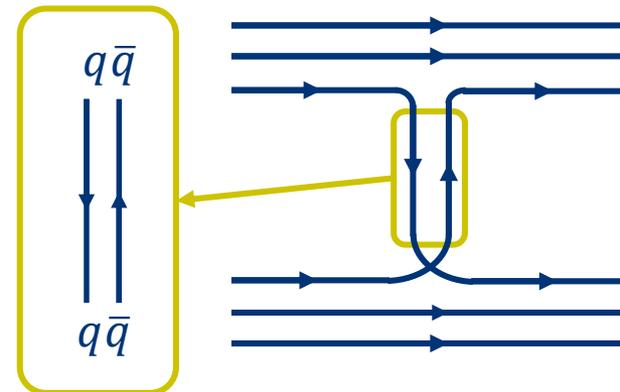


# Bindung von Nukleonen – Starke Wechselwirkung vs. Kernkraft

- ▶ Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen
  - Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar

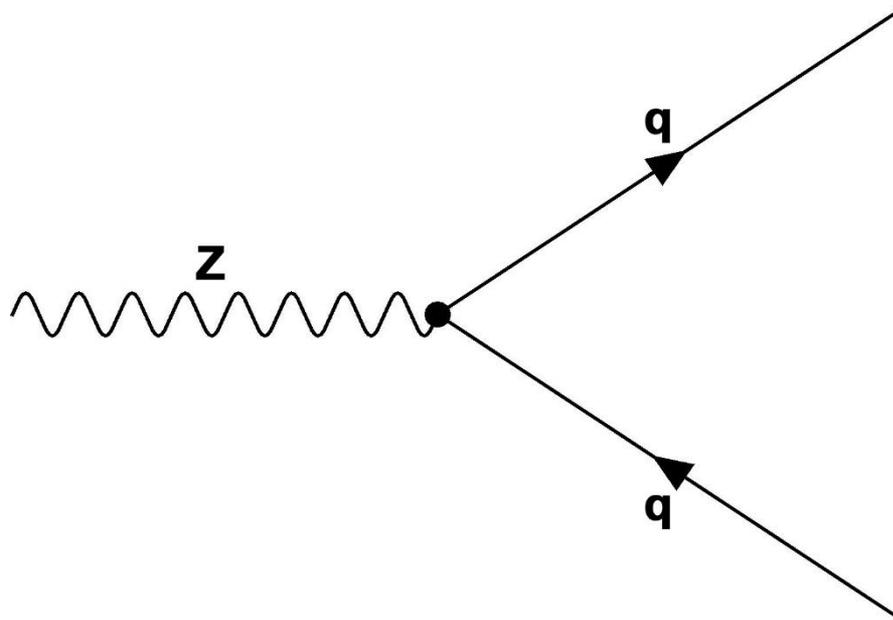


- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb.  $q\bar{q}$  Zustände)



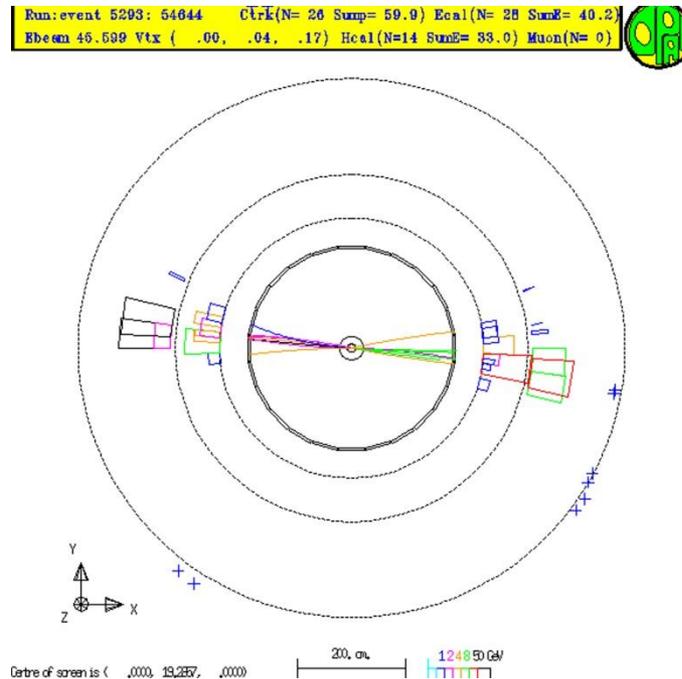
# Quantitative Aussagen durch Vergleich von Feynman-Diagrammen

- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen
- ▶ Wie?



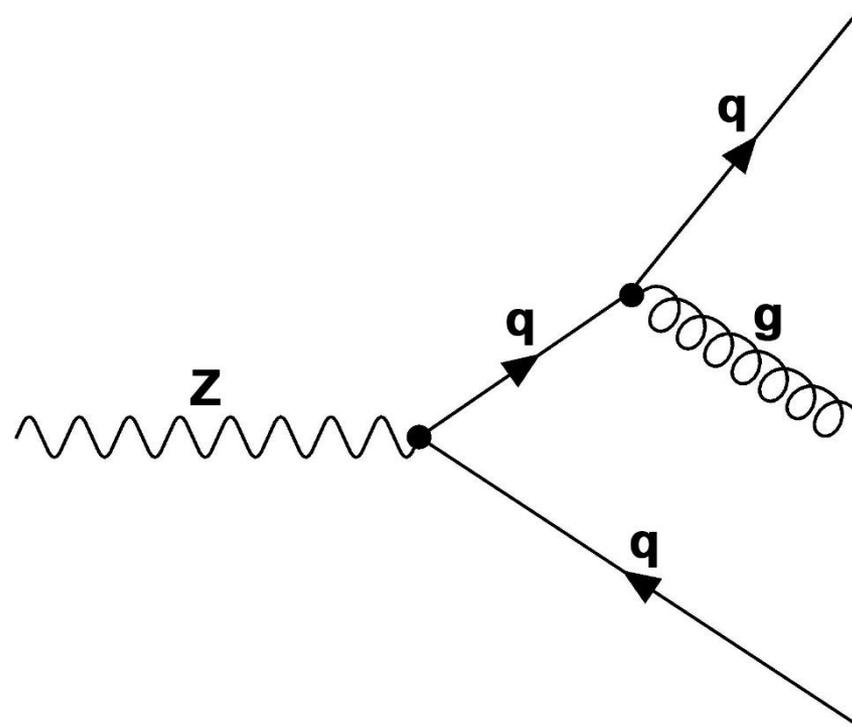
# Quantitative Aussagen durch Vergleich von Feynman-Diagrammen

- ▶ Bei LEP wurde unter anderem der starke Kopplungsparameter bei verschiedenen Energien sehr genau gemessen.
- ▶ Wie?



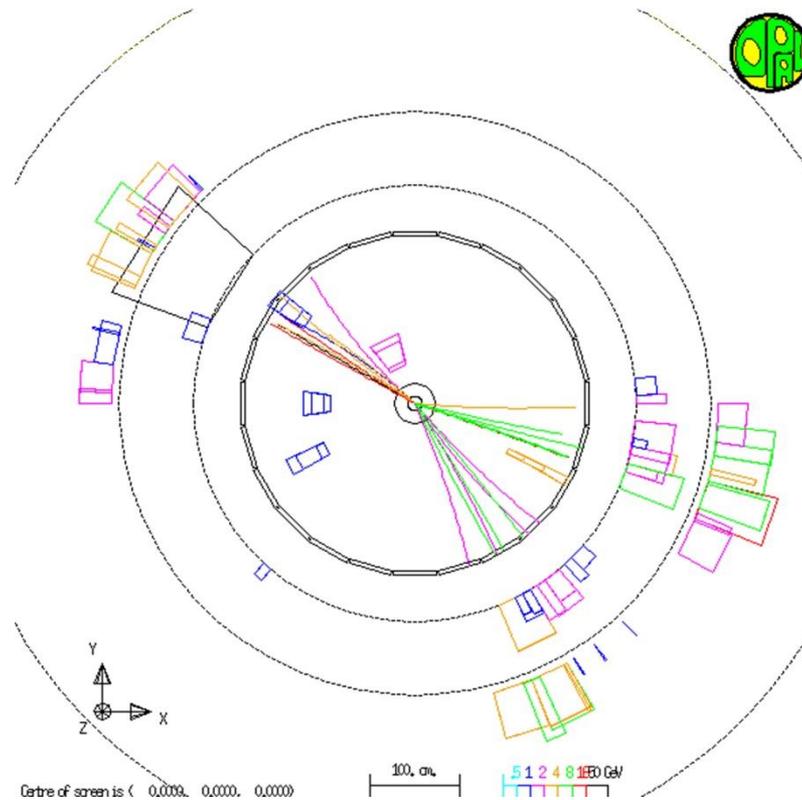
# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

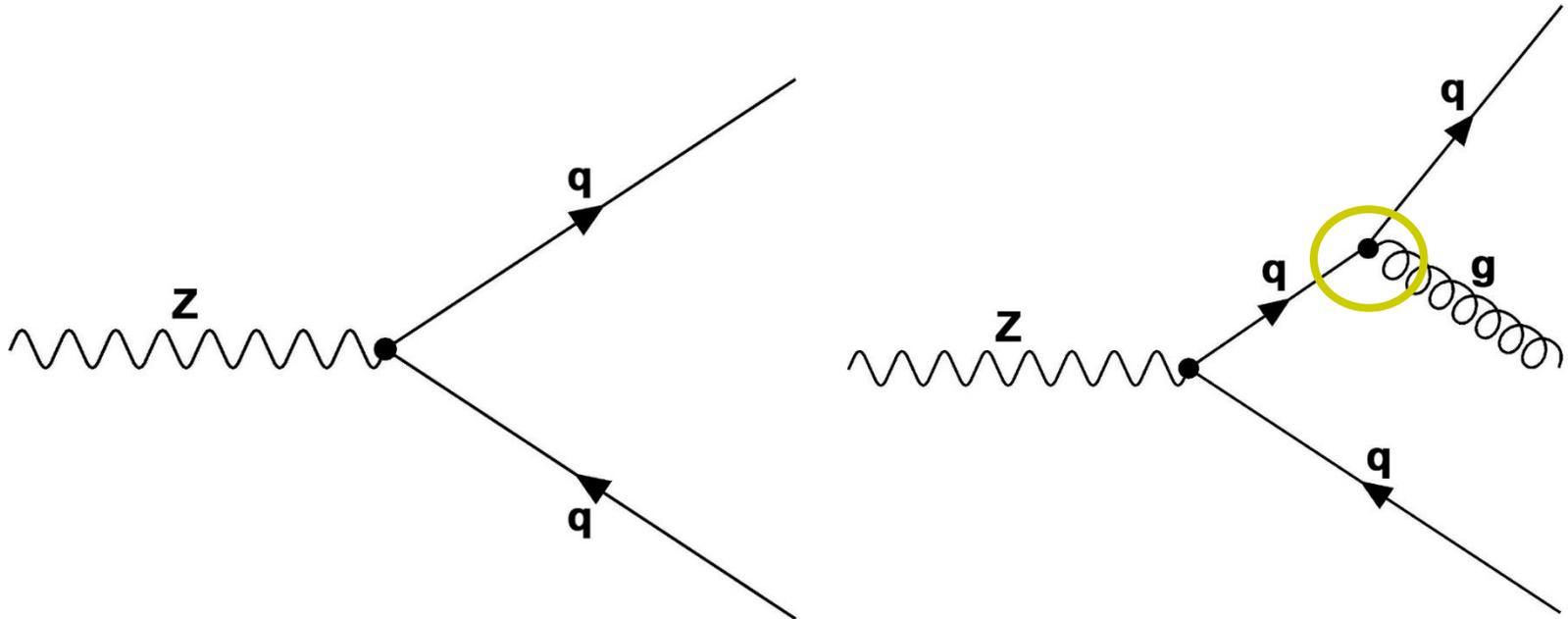


# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:



# Bestimmung des starken Kopplungsparameters



- Feynman-Diagramme unterscheiden sich nur durch einen zusätzlichen Vertex, an dem ein Prozess der starken WW stattfindet

# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess der starken Wechselwirkung abläuft ist direkt proportional zum starken Kopplungsparameter

$$P(3 - Jet) = P(2 - Jet) \cdot k \cdot \alpha_s$$

$$\alpha_s \sim \frac{P(3 - Jet)}{P(2 - Jet)}$$

- ▶ Dabei ist  $k$  ein Faktor, der durch weitere Kennwerte des Prozesses bestimmt wird und berechnet werden kann

# Bestimmung des starken Kopplungsparameters

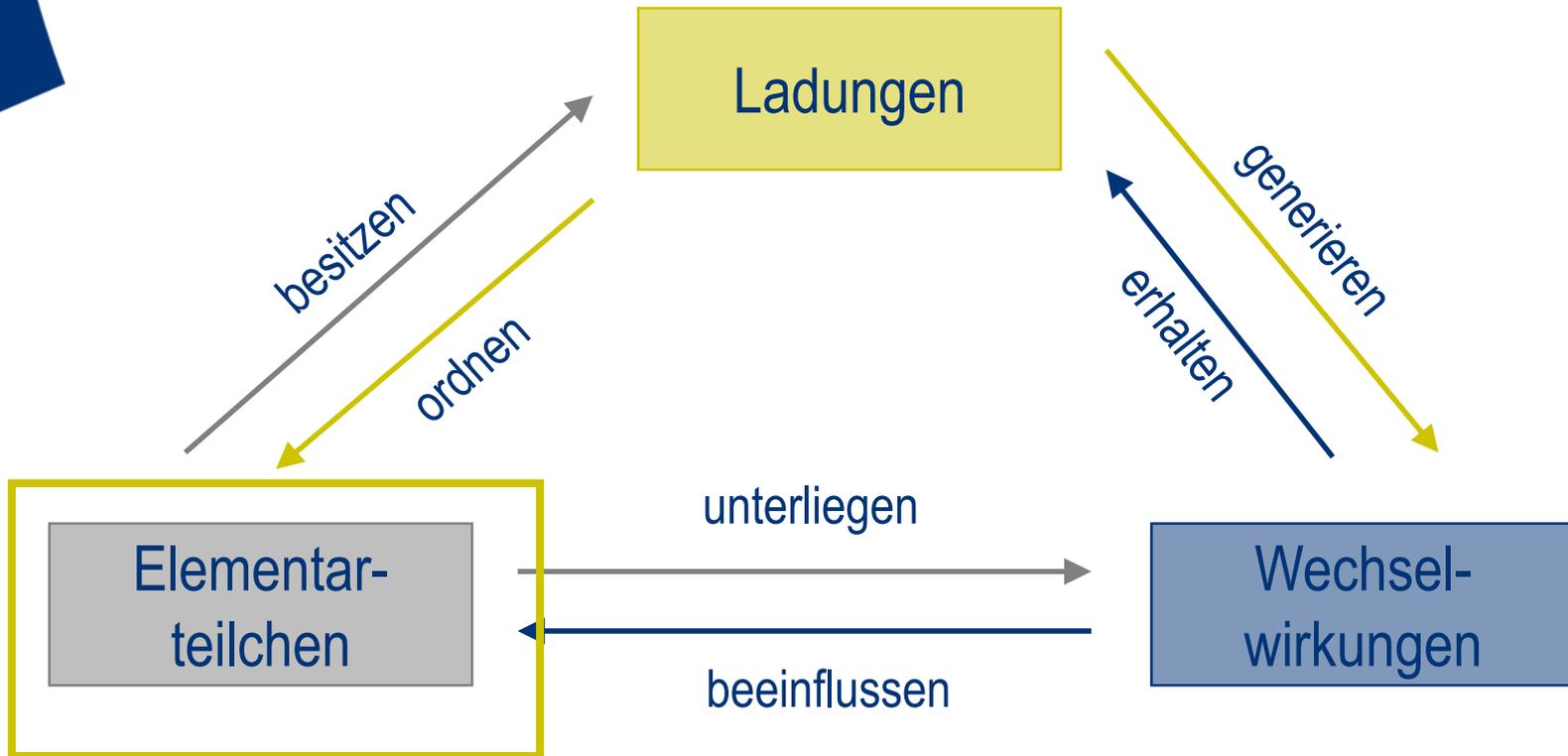
- ▶ Bei sehr vielen Ereignissen kann aus absoluten Häufigkeiten auf Wahrscheinlichkeit geschlossen werden

$$\alpha_s \sim \frac{H(3 - Jet)}{H(2 - Jet)}$$

# 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
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Vertices symbolisiert, an denen Teilchen emittiert, absorbiert, erzeugt oder vernichtet werden

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# 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  $\nu_\mu$
- ▶ 1961: Postulierung von Up-, Down- und Strange-Quarks
- ▶ 1964: Entdeckung des  $\Omega^-$  (sss)
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons
- ▶ 1974-1994: weitere „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks
  - 1974: Charm
  - 1977: Bottom
  - 1994: Top
- ▶ 2000: Nachweis des Tauon-Neutrinos  $\nu_\tau$

# „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?
- ▶ Gleiche Ladungen  $\leftrightarrow$  Gleiche Eigenschaften

# Anordnung von Teilchen in Generationen

	1. Generation	2. Generation	3. Generation	I	Z	$\vec{C}$
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$-\frac{1}{2}$	-1	farblos $\vec{0}$
Quarks	$u$ $u$ $u$ $d$ $d$ $d$	$c$ $c$ $c$ $s$ $s$ $s$	$t$ $t$ $t$ $b$ $b$ $b$	$+\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\searrow$
				$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	blau $\downarrow$ rot $\nearrow$ grün $\searrow$
	starke Wechselwirkung		starke Wechselwirkung			
	elektromagnetische Wechselwirkung		elektromagnetische Wechselwirkung			
	schwache Wechselwirkung		schwache Wechselwirkung			

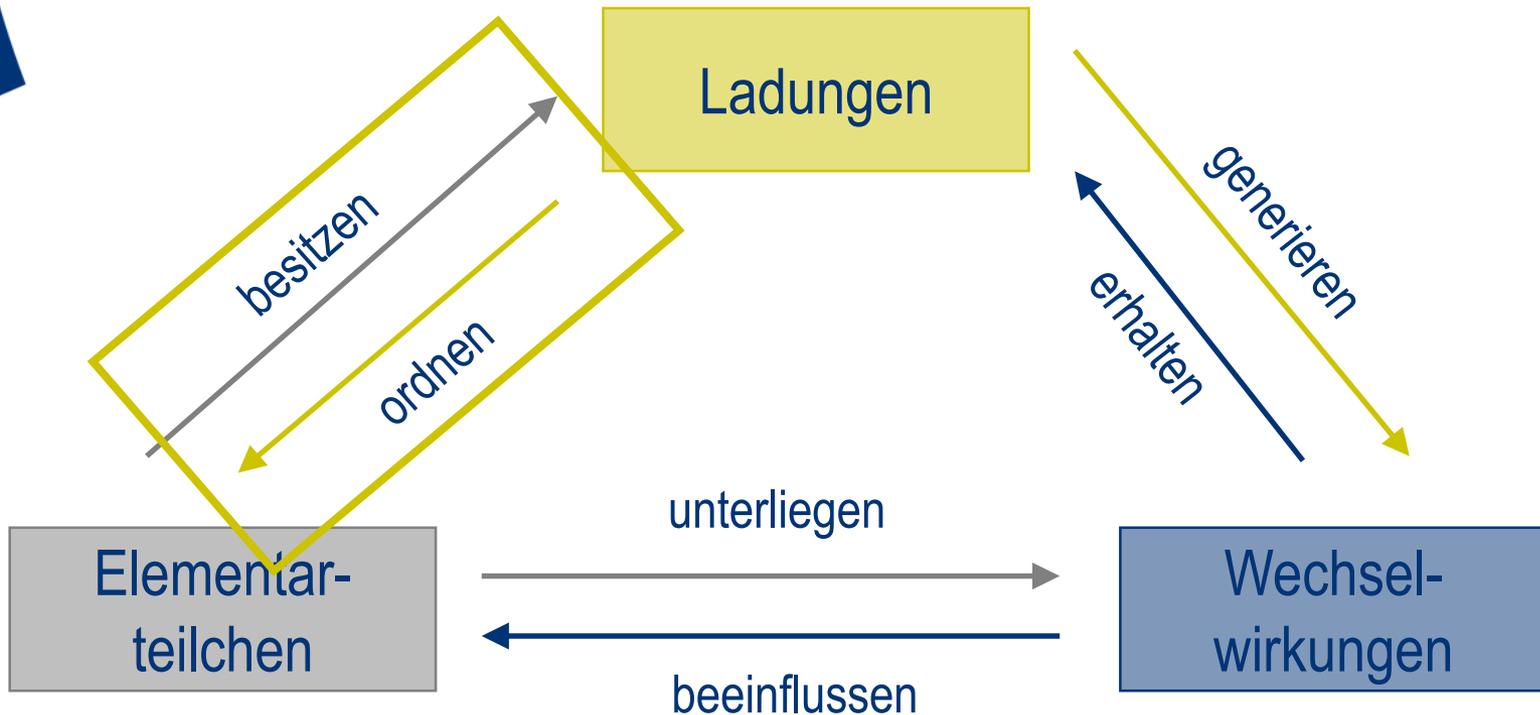
# Analogie zum Periodensystem

- ▶ 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

	1. Generation		2. Generation		3. Generation		I	Z	C
elektrisch neutrale Leptonen	$\nu_e$		$\nu_\mu$		$\nu_\tau$		$+\frac{1}{2}$	0	farblos 0
elektrisch geladene Leptonen	$e^-$		$\mu^-$		$\tau^-$		$-\frac{1}{2}$	-1	farblos 0
Quarks	starke Wechselwirkung elektromagnetische Wechselwirkung schwache Wechselwirkung		starke Wechselwirkung elektromagnetische Wechselwirkung schwache Wechselwirkung		starke Wechselwirkung elektromagnetische Wechselwirkung schwache Wechselwirkung		$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	bau blau rot rot grün grün
	$u$	$d$	$c$	$s$	$t$	$b$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	bau blau rot rot grün grün
	$\bar{u}$	$\bar{d}$	$\bar{c}$	$\bar{s}$	$\bar{t}$	$\bar{b}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	bau blau rot rot grün grün

1. HG	2. HG	3. HG	4. HG	5. HG	6. HG	7. HG	8. HG
H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

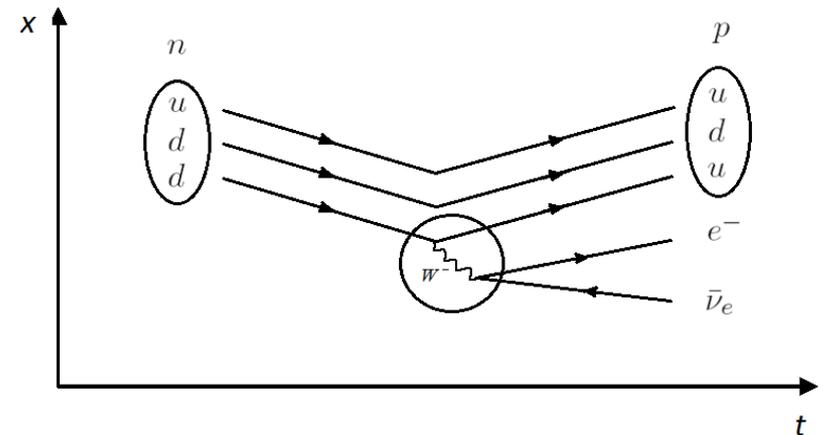


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► 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

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



# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

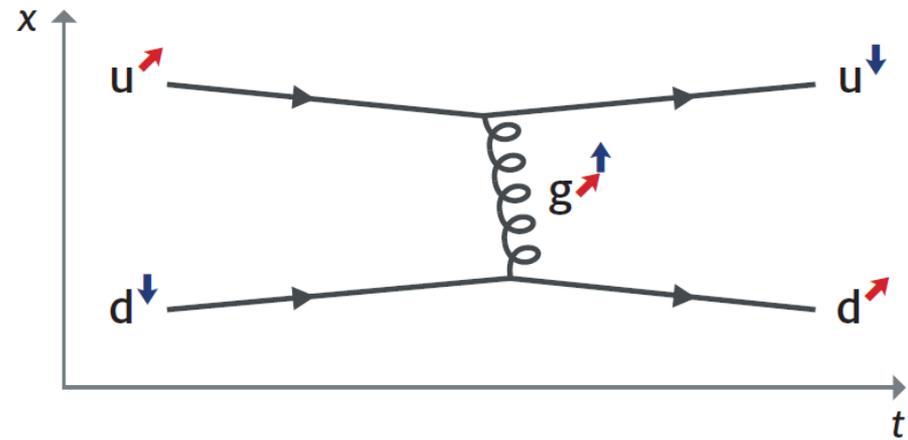
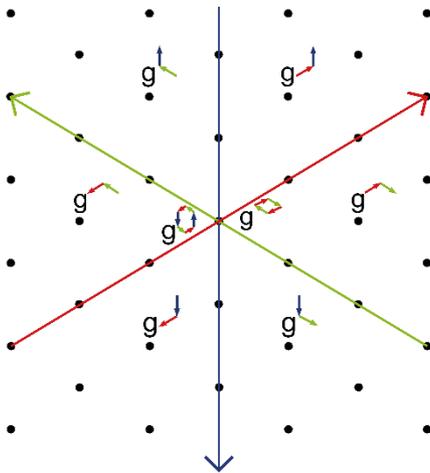
## ► Schwache Wechselwirkung

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

- $\begin{pmatrix} u \nearrow \\ d \nearrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \nwarrow \\ d \nwarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} d \downarrow \\ u \downarrow \end{pmatrix}$

# Erinnerung: Starke Wechselwirkung

- ▶  $F_S = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r^2} + k$
- ▶ Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst starke Ladung

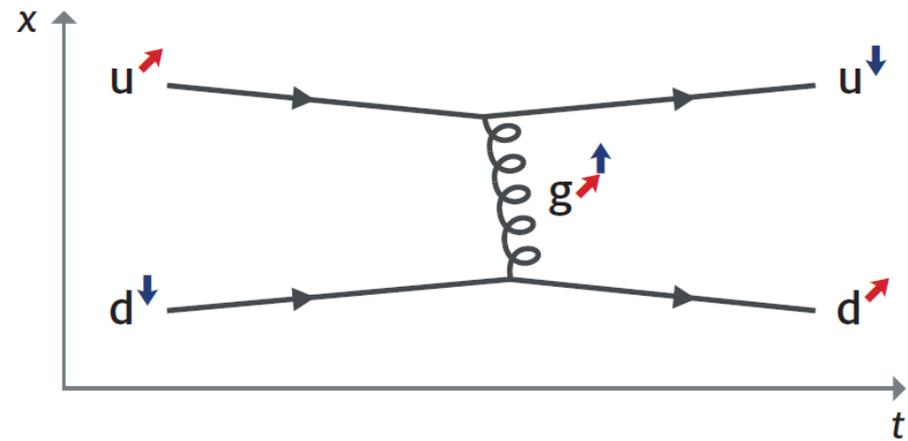


# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ▶ Starke Wechselwirkung

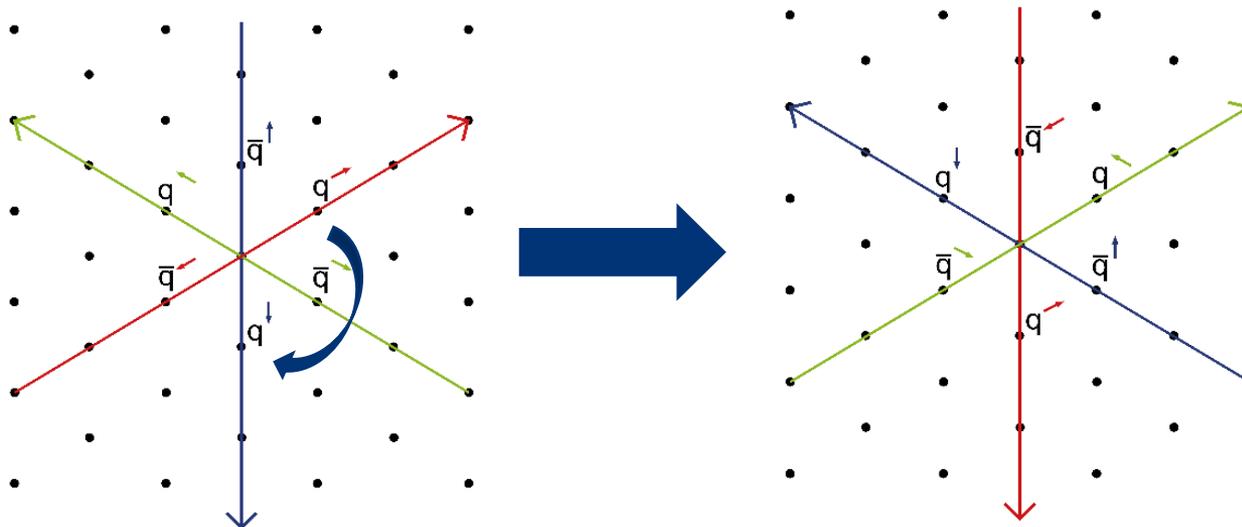
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks: Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

▶  $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

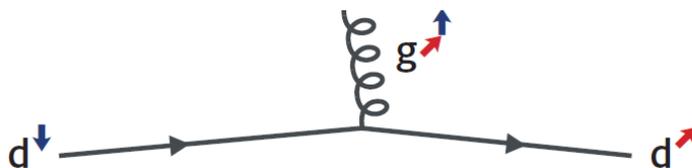


# Umwandlung innerhalb Multipletts

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



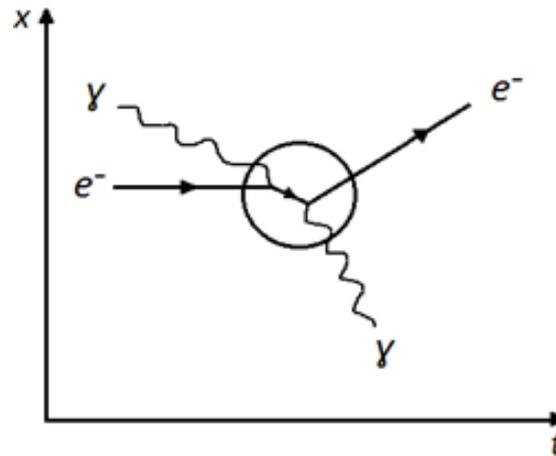
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



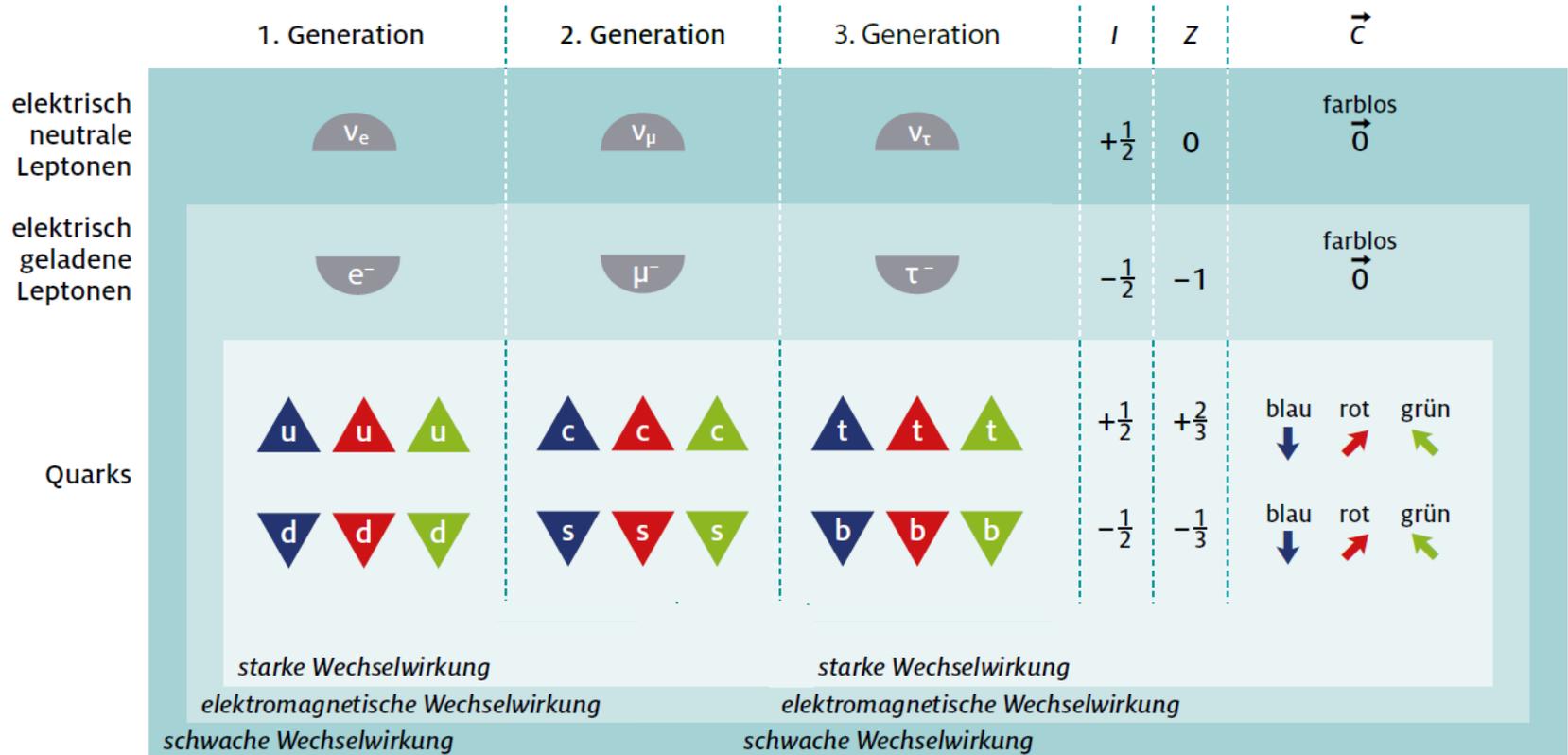
# Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

## ► 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

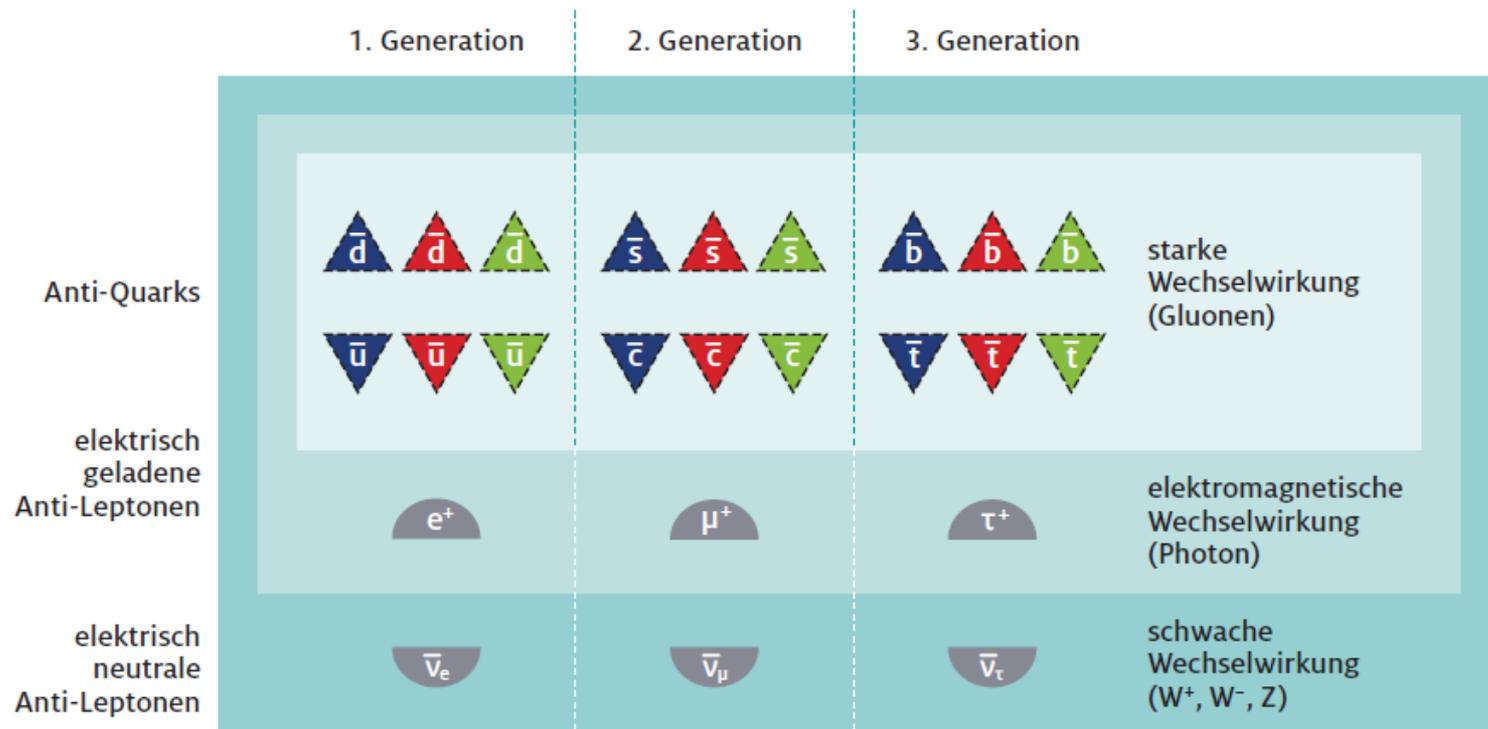


# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



# Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

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



# Zusammenfassung: Multipletts

- ▶ Teilchen lassen sich anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Die Zahl 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 durch Abstrahlung und Absorption von Botenteilchen nur innerhalb der Multipletts möglich

# Bisher ignoriert: Zustandsmischung

- ▶ Makroskopisch messbare Teilchen: immer **Massen-Eigenzustände**
- ▶ Wechselwirkungen: immer **Ladungs-Eigenzustände**
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Ladungs-Dupletts möglich
  - Die Multipletts sind daher \*nur\* für **Ladungs-Eigenzustände** definiert
- ▶ Konsequenz des BEHiggs Feldes:
  - die Masseneigenzustände von Quarks sind nicht identisch mit den schwachen Ladungs-Eigenzuständen, sondern eine Mischung aus diesen!
  - → Masseneigenzustände haben i.a. keine definierte schwache Ladung
  - → Schwache Ladungs-Eigenzustände haben i.a. keine definierte Masse

$$\begin{array}{c} \text{Schwache Ladungs-} \\ \text{Eigenzustände} \end{array} \begin{array}{c} \nearrow \\ \left( \begin{array}{c} d' \\ s' \\ b' \end{array} \right) \end{array} = \begin{array}{c} \text{Cabibbo-} \\ \text{Kobayashi-} \\ \text{Maskawa Matrix} \\ \text{(CKM Matrix)} \end{array} \begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} d \\ s \\ b \end{array} \right) \\ \nwarrow \\ \text{Massen} \\ \text{Eigenzustände} \end{array}$$

Also: Ladungs-Multipletts eigentlich  $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

# Zustandsmischung

- Die Quadrate der Elemente  $V_{qq'}$  der unitären CKM Matrix bestimmen die Wahrscheinlichkeit der Umwandlungen.

z.B.  $s \rightarrow u + W^-$  wird möglich wegen des  $|d'\rangle$ -Anteils in  $|s\rangle$

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{also } |s'\rangle &= V_{cd}|d\rangle + V_{cs}|s\rangle + V_{cb}|b\rangle \\ |s\rangle &= V_{us}^*|d'\rangle + V_{cs}^*|s'\rangle + V_{ts}^*|b'\rangle \end{aligned}$$

- Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein, d.h. die Mischungsmatrix ist „fast“ die Einheitsmatrix)

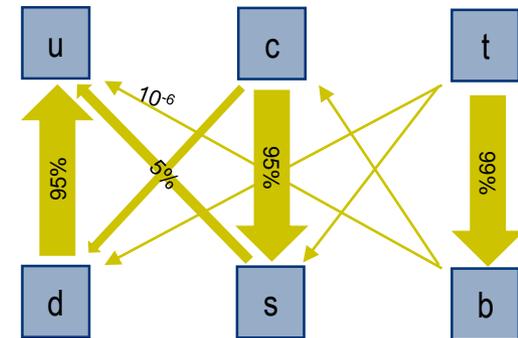
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0,975} & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & \mathbf{0,974} & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & \mathbf{0,999} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände

# Quark-Umwandlungen

- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein c-Quark in einem schwachen Prozess um, entsteht daraus **immer** ein s' Ladungs-Eigenzustand, den man mit Wahrscheinlichkeit  $|V_{cd}|^2=0,05$  aber als ein d-Quark Masse-EZ beobachtet
- ▶ Die Mischungsmatrix ist fast diagonal
  - Jeweils schwerere Massen-EZ (d,c,t) wandeln sich >95% innerhalb derselben Teilchen-Generation um
  - Für s- und b-Quarks sind nur Umwandlungen in die leichteren Generationen möglich, unterdrückt um Faktoren 40 ( $s \rightarrow u$ ), 600 ( $b \rightarrow c$ ) und 100.000 ( $b \rightarrow u$ ), ihre Lebensdauern sind entsprechend verlängert
  - Der Term  $|V_{ud}|^2=0,95$  verlängert z.B. die Lebensdauern von freien Neutronen und elektr. geladenen Pionen um 5%



# Zustandsmischung

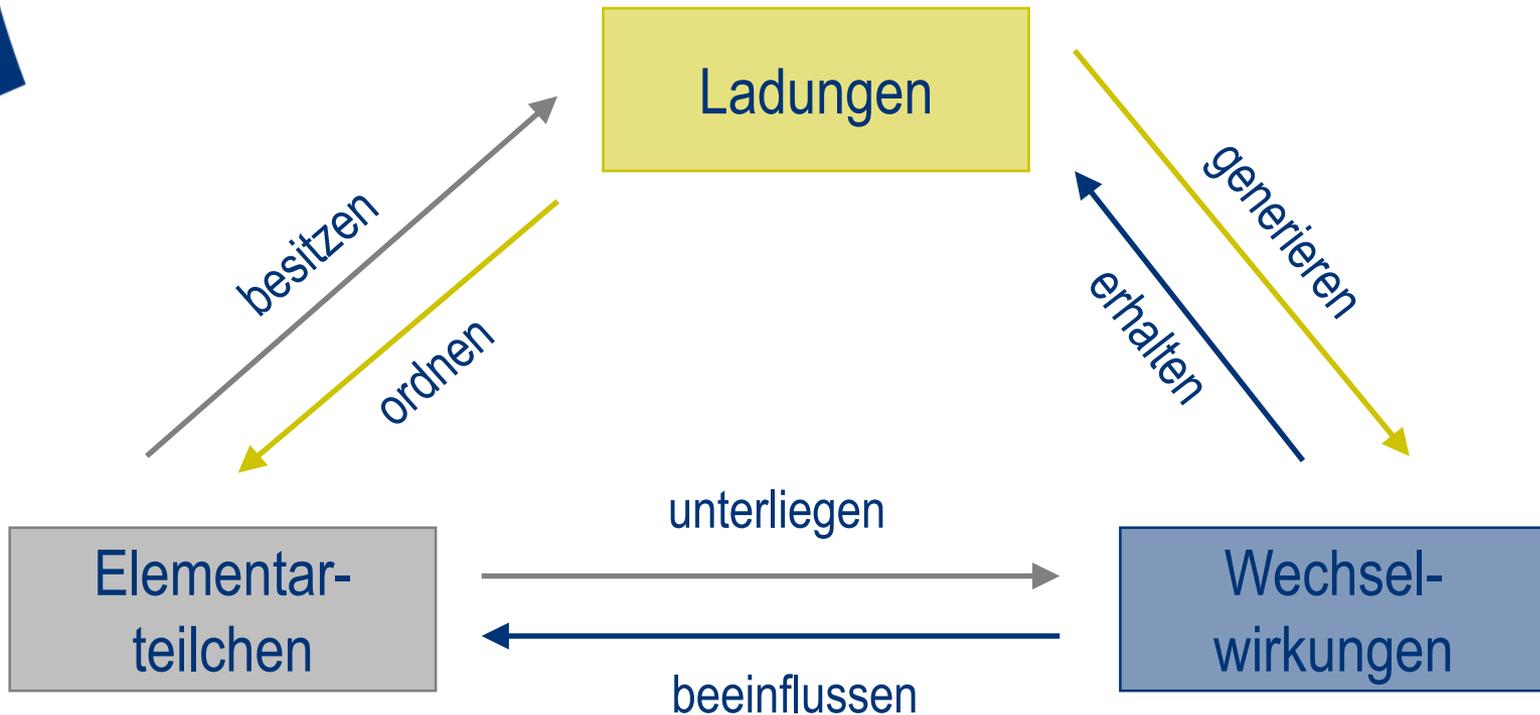
- ▶ **Die Mischungen der Quarks** in der schwachen Wechselwirkung **sind eher klein**
  - Größte Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des jeweiligen Multipletts
- ▶ **Die Mischungen der Neutrinos** in der schwachen Wechselwirkung **sind dagegen fast maximal**
  - Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-(PMNS)-Matrix
  - → Möglichkeit der „Neutrino Flavor-Oszillation“  $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & -0,15 \\ -0,33 & 0,60 & 0,73 \\ 0,46 & -0,58 & 0,67 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände

# Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



# Higgs Feld

## ► Symmetriebrechung

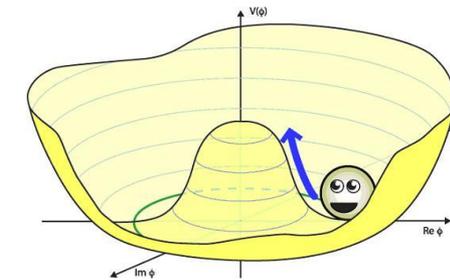
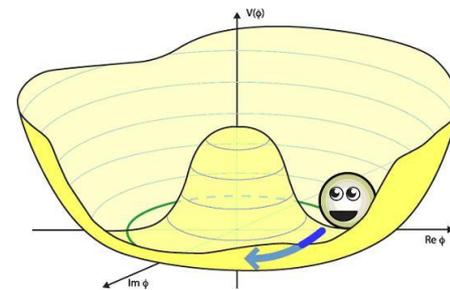
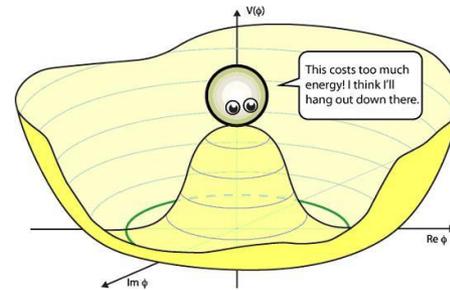
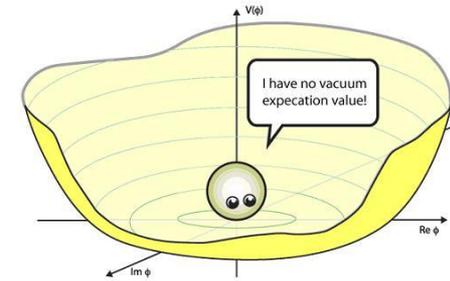
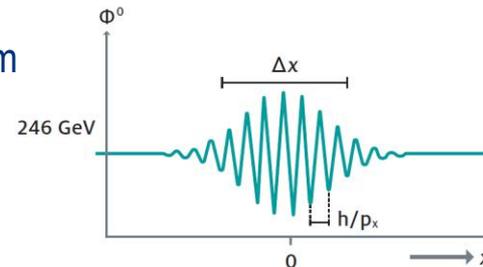
- Symmetrisches Potential  
Grundzustand symmetrisch
- Symmetrisches Potential  
Grundzustand nichtsymmetrisch

## ► Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien

- Abschirmung „schwacher Felder“  
durch BEHiggs-Hintergrundfeld  
= unendlicher See schwacher Ladung
- Abschirmendes Feld  
Duplett in schw. Ladung  
Komponente  $v = 246$  GeV im Vakuum
- Anregung = Higgs-Teilchen

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

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



# Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!

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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



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



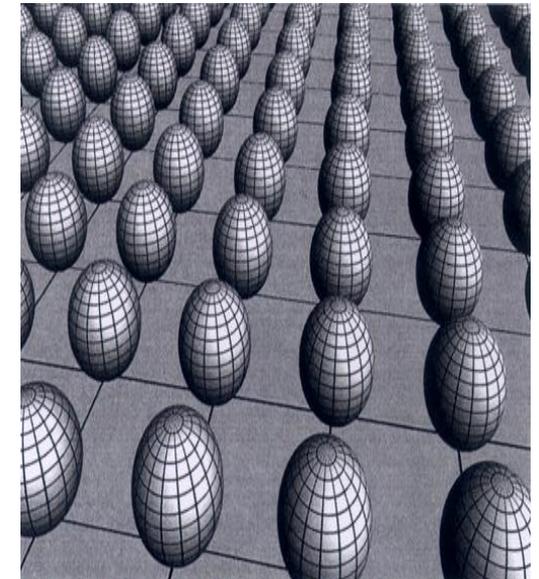
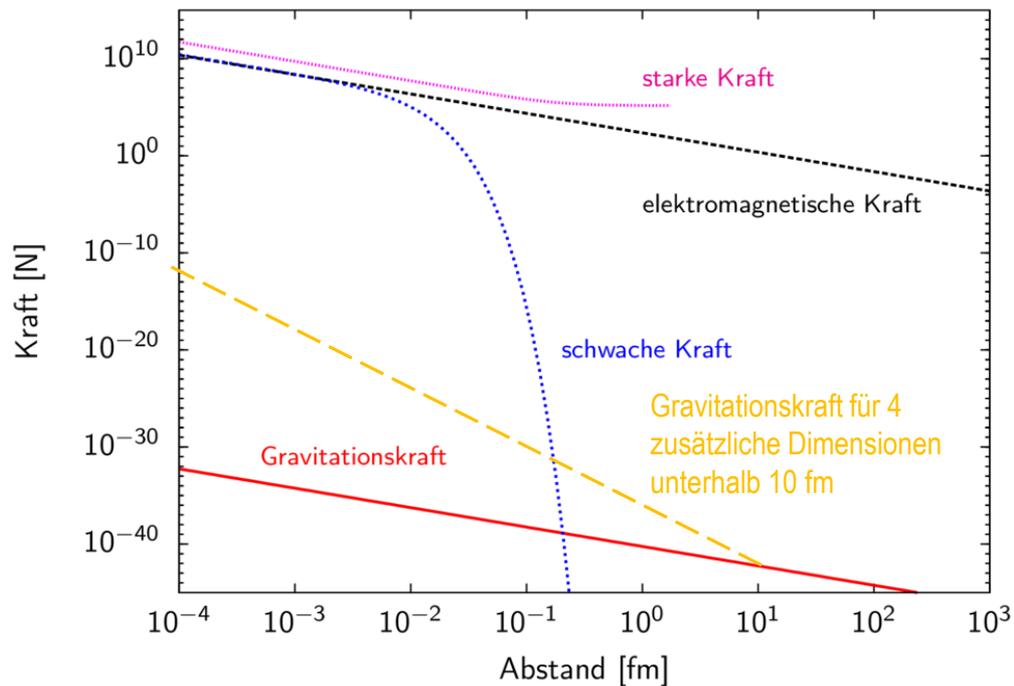
NETZWERK  
TEILCHENWELT

# Diskussion / Fragen



# Spekulationen

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

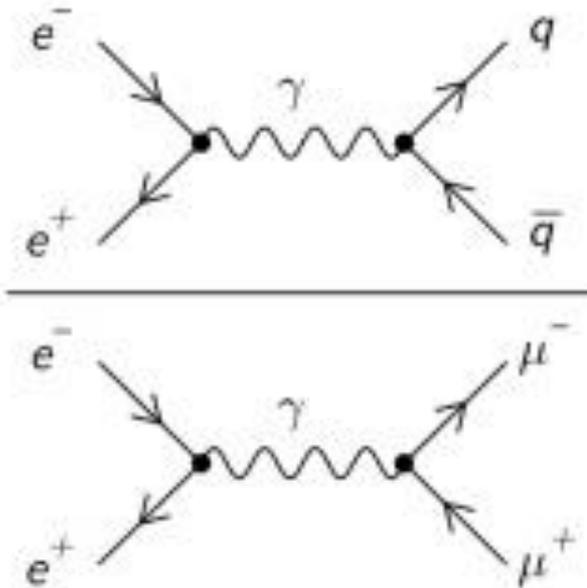


# Anzahl der Farben

- ▶ Idee: Messung des Verhältnisses von  $qq$  zu  $\mu^+ \mu^-$

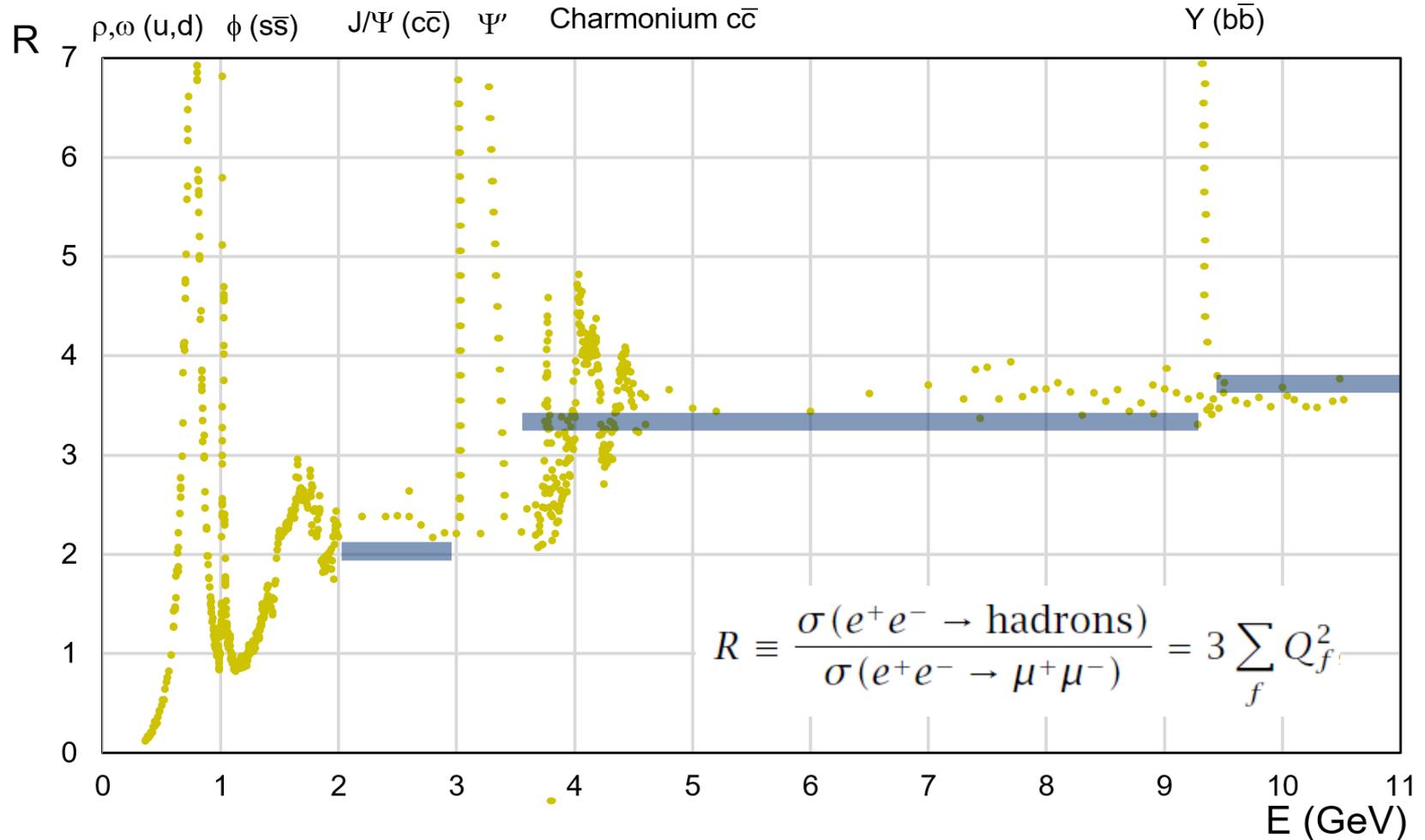
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

$\approx$



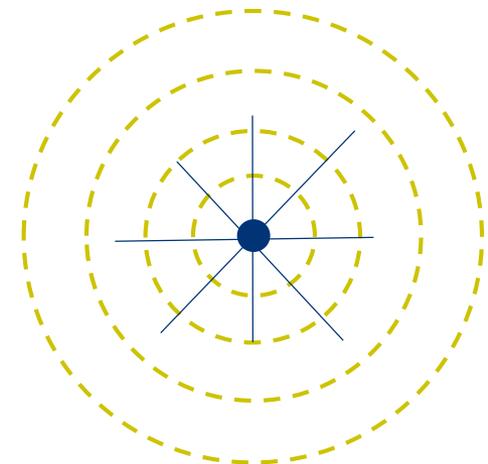
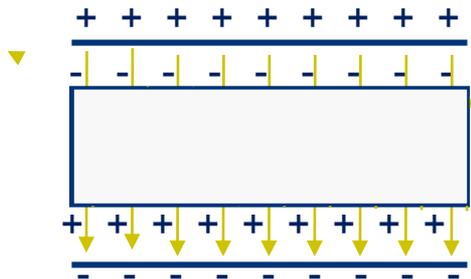
$$\begin{aligned}
 R &= 3[(2/3)^2 + (1/3)^2 + (2/3)^2] = 2 \text{ for } u, d, s \\
 &= 2 + 3(2/3)^2 = 10/3 \text{ for } u, d, s, c, \\
 &= 10/3 + 3(1/3)^2 = 11/3 \text{ for } u, d, s, c, b.
 \end{aligned}$$

# Anzahl der Farben



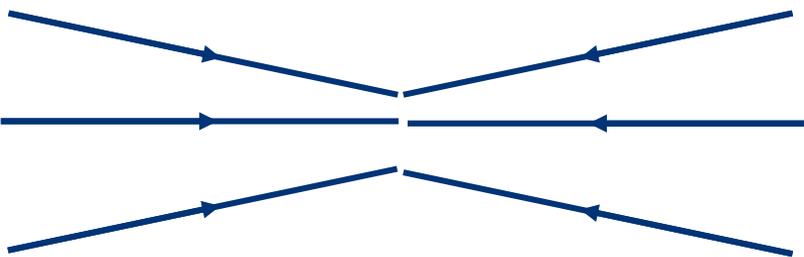
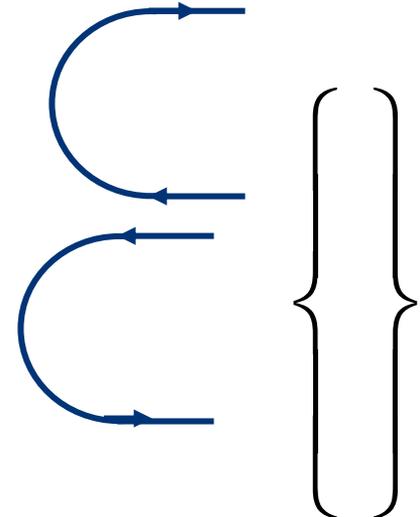
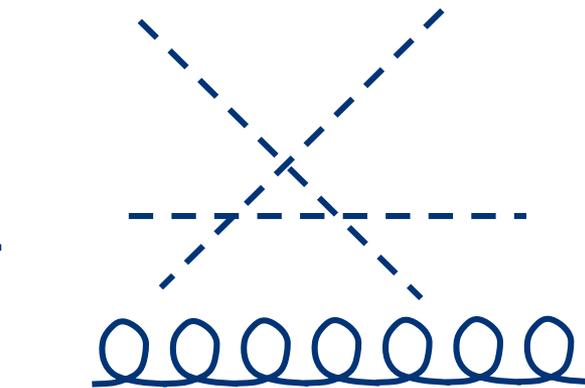
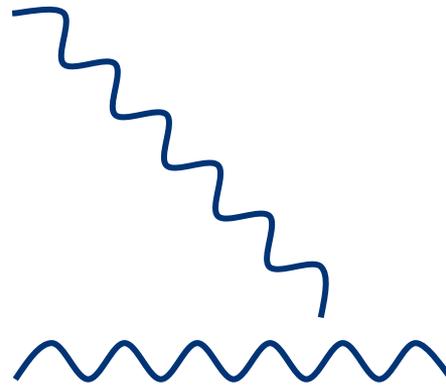
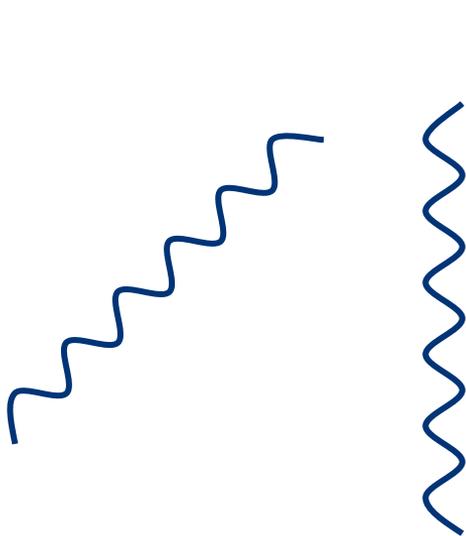
# Schwache Wechselwirkung

- ▶ Klassisches Analogon: Abschirmung von Feldlinien
  - Abschirmung von (unendlichen) Feldlinien durch entgegengesetzte Feldlinien
  - Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab



# Feynman Diagramm Tool kit

$e^-$   $e^+$   $\gamma$   
 $p^-$   $p^+$   $n^0$   
 $\pi^-$   $\pi^+$   $\pi^0$   
 $\bar{\nu}_e$   $\bar{\nu}_\tau$   $\bar{\nu}_\mu$   
 $W^-$   $W^+$



# Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“

