

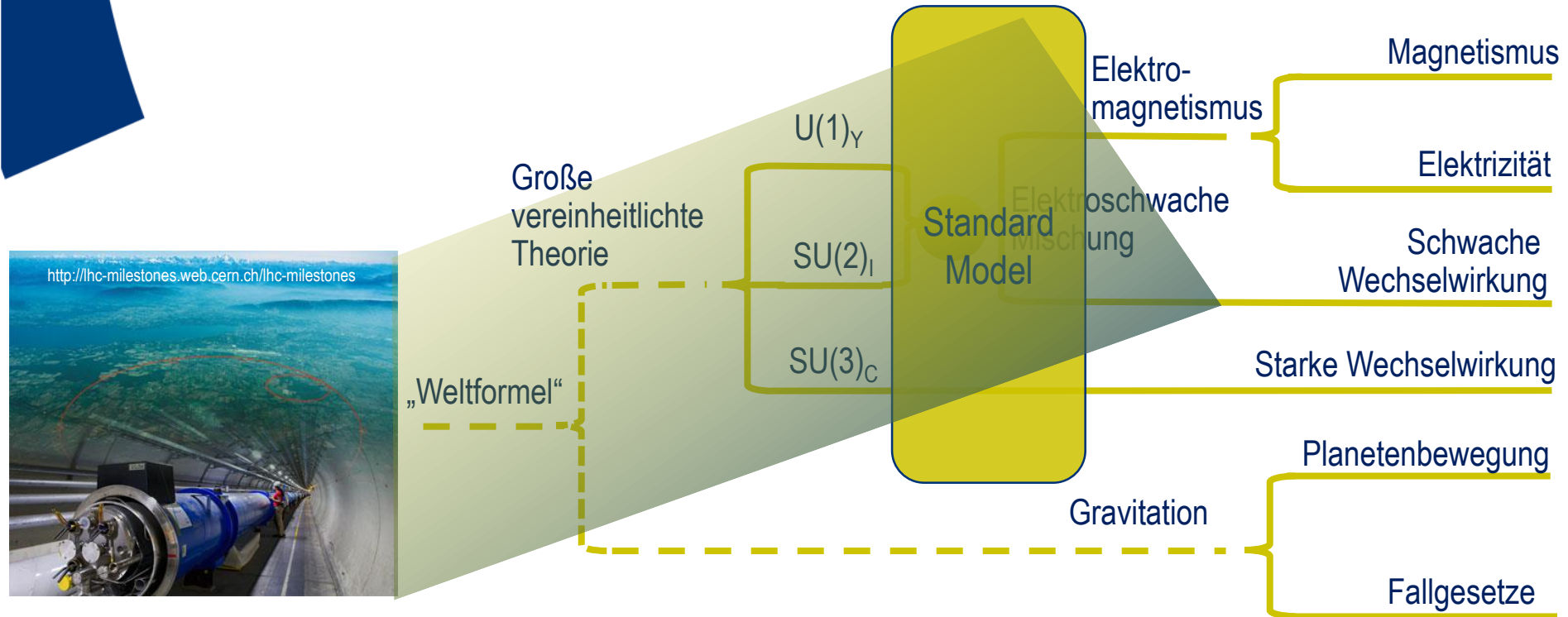
Auffrischung: Das Standardmodell der Teilchenphysik

Philipp Lindenau

Forschung Trifft Schule - CERN Summerschool
16.07.2018



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



Vereinheitlichungen

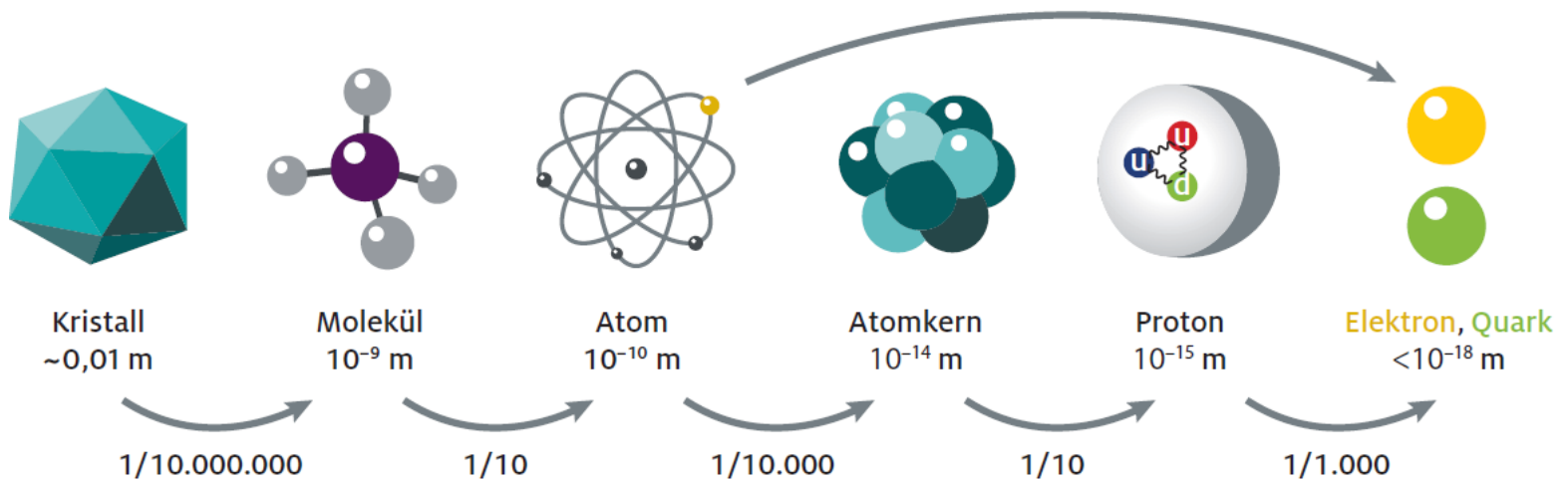
- ▶ Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 Wechselwirkungen zurückführen

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

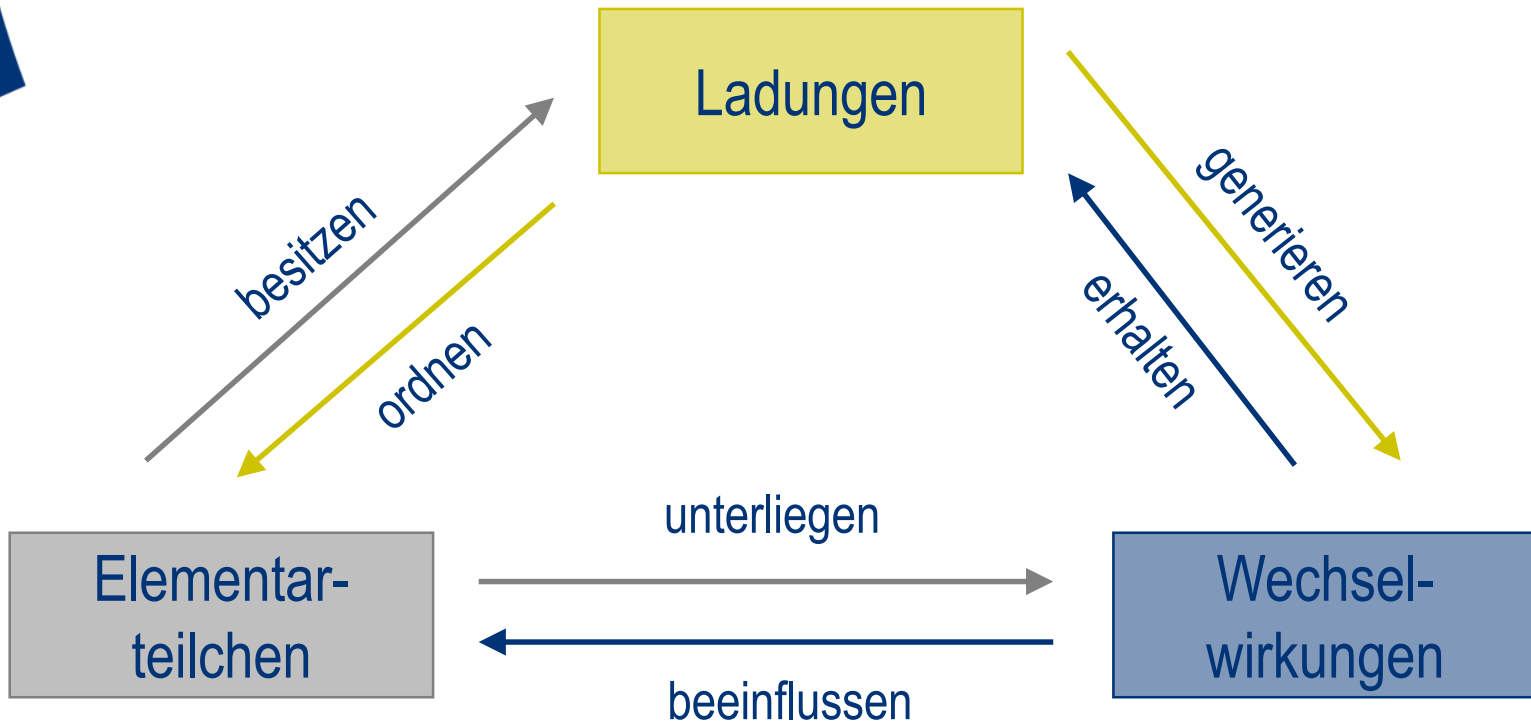


**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

Einschub: Größenordnungen



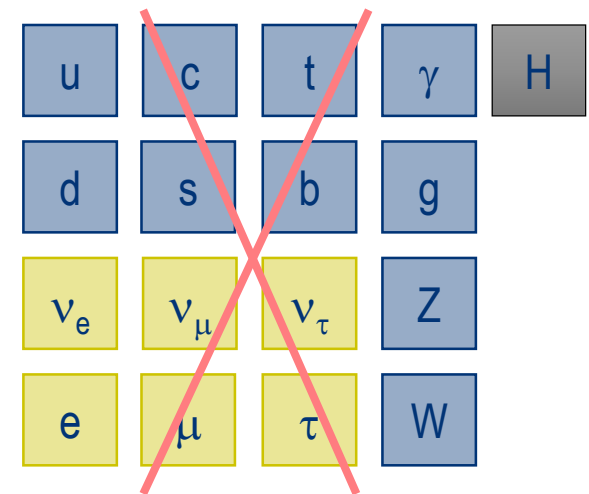
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Fußball - Analogie

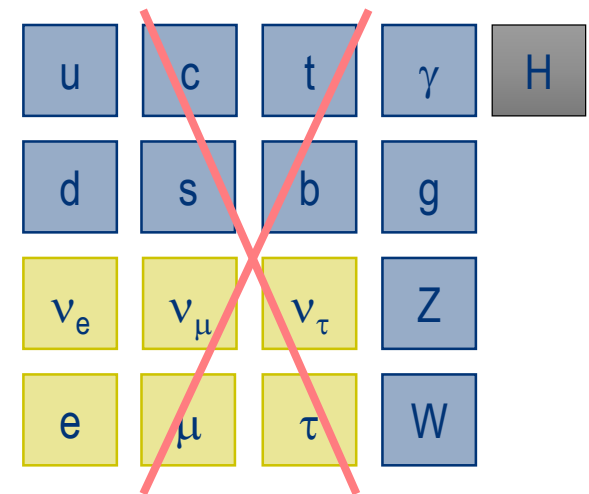
- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
 - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den Grundregeln
 - Spieler = Elementarteilchen
 - Regeln = Wechselwirkungen, Erhaltungssätze,...

- ▶ 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!)

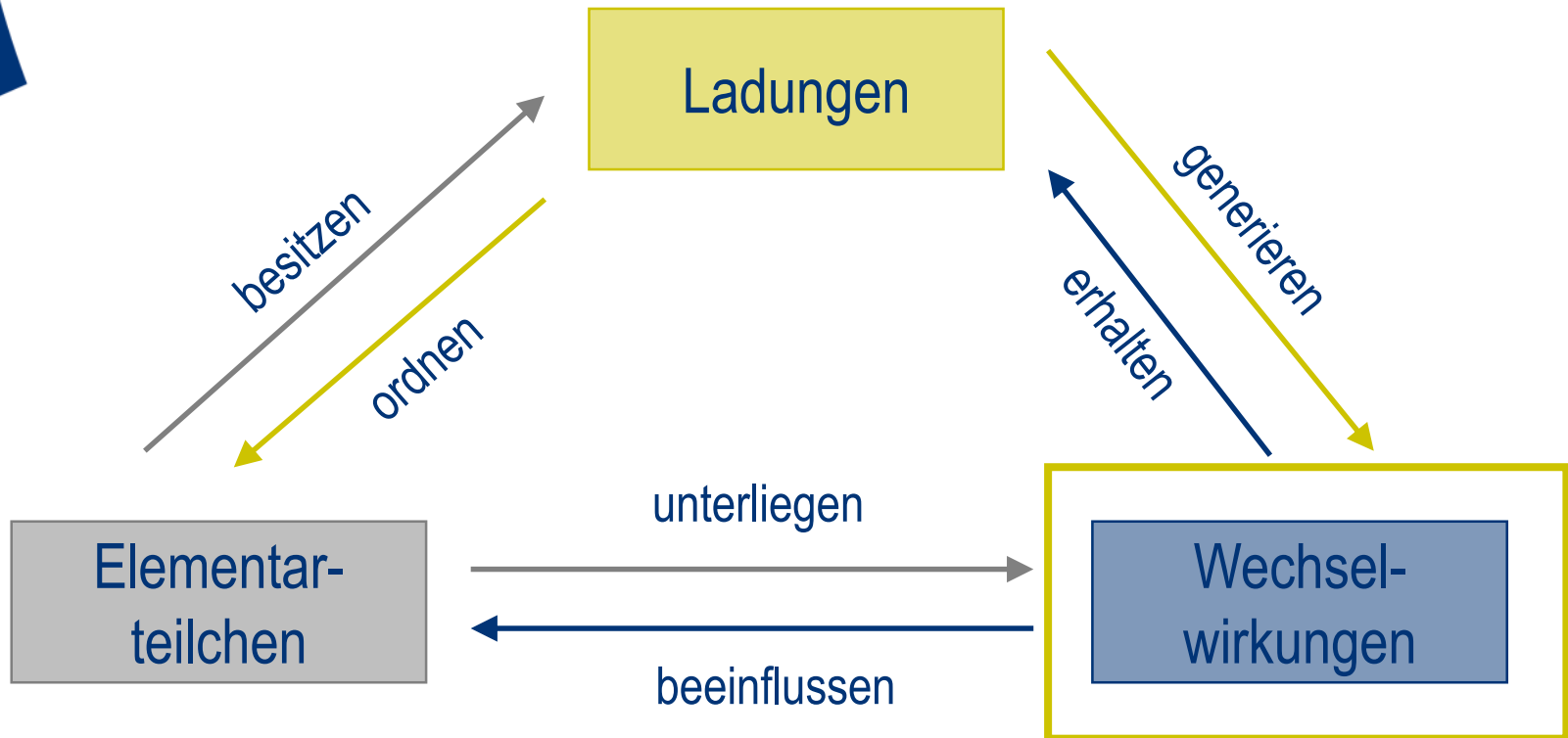


Das Standardmodell der Teilchenphysik

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



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

► Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

► Kraft 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,
...



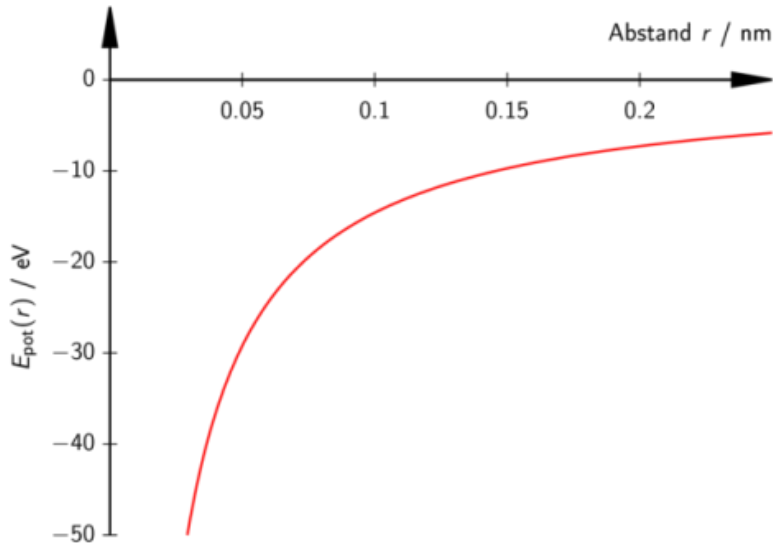
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**



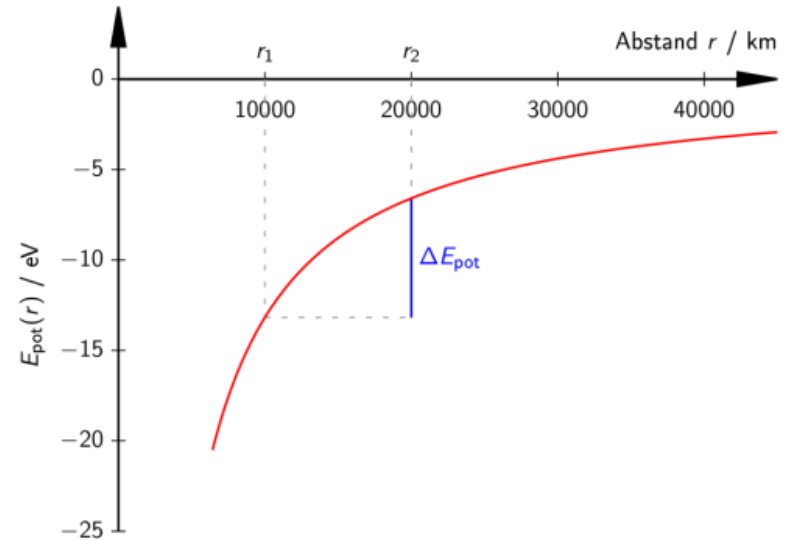
**Standardmodell
(ohne Gravitation)**

Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



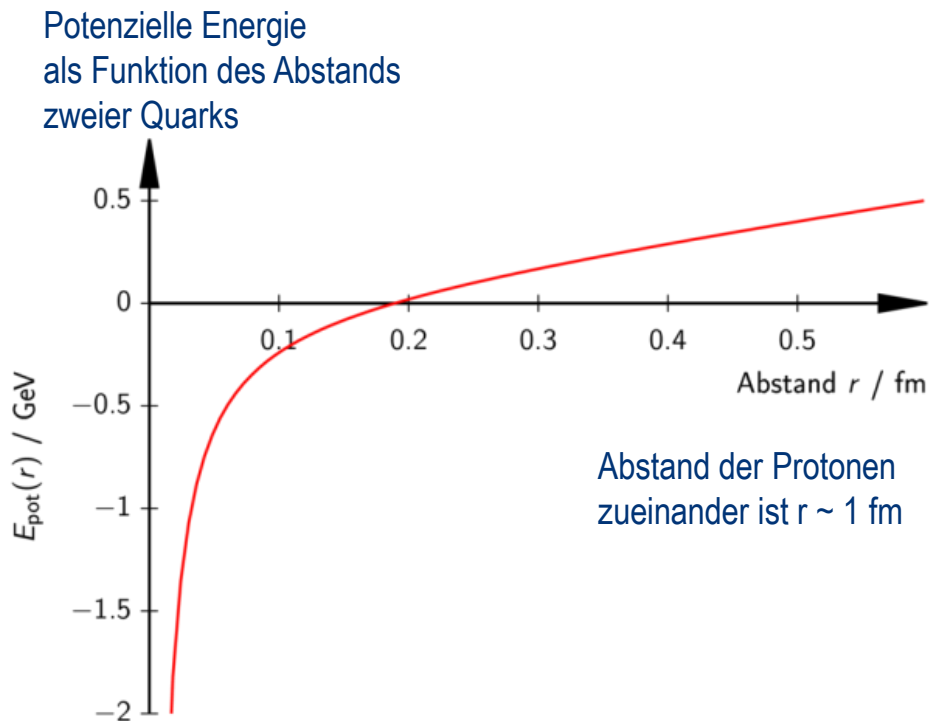
► Gravitation (O_2 und Erde)



Die Starke Wechselwirkung

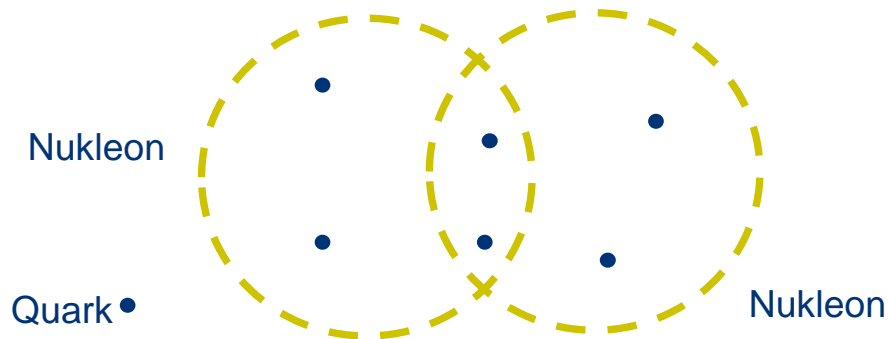
- ▶ Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen?

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



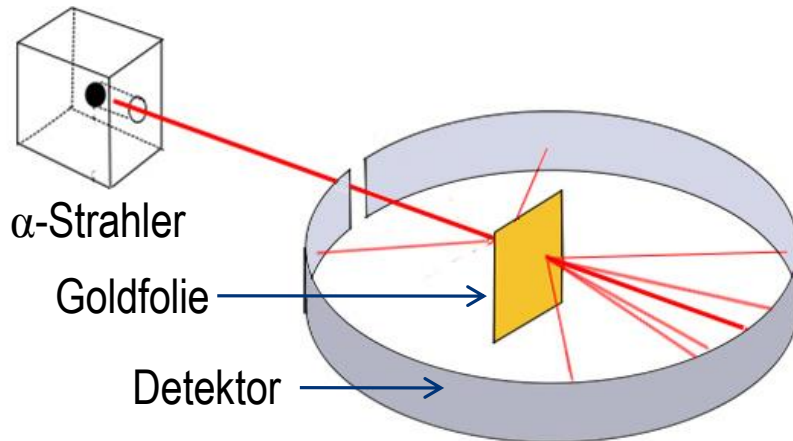
Bindung von Nukleonen

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

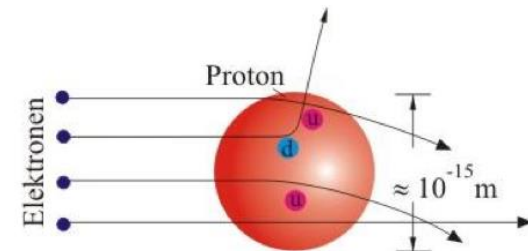


- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)

Experimenteller Nachweis von Quarks



Rutherford-Streuexperiment (1911)
Streuung von α -Teilchen an Goldatomen
→ Entdeckung des Atomkern



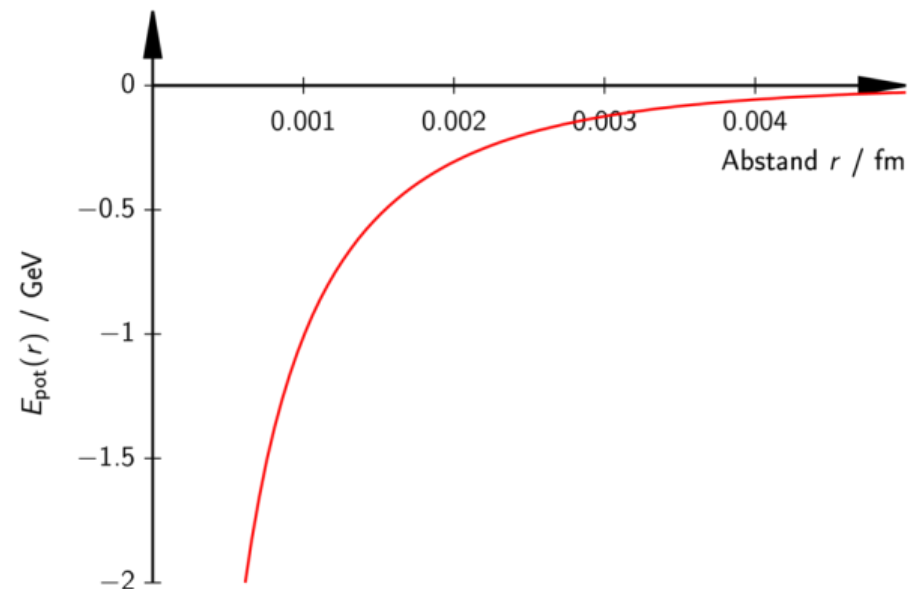
Experiment am SLAC (1969)
Streuung von Elektronen an Protonen
→ Entdeckung der Quarks

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)

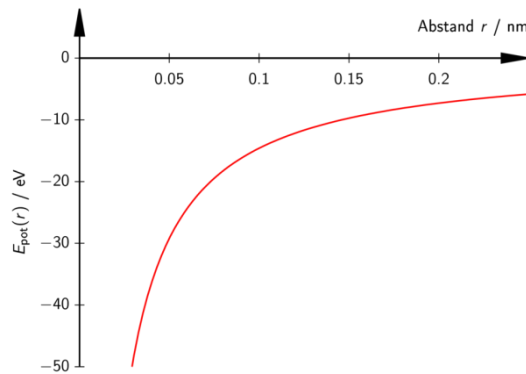
- ▶ **Einführung:**
schwache Wechselwirkung
(z.B. Quarks der Nukleonen bei $r \sim 0.001$ fm)

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

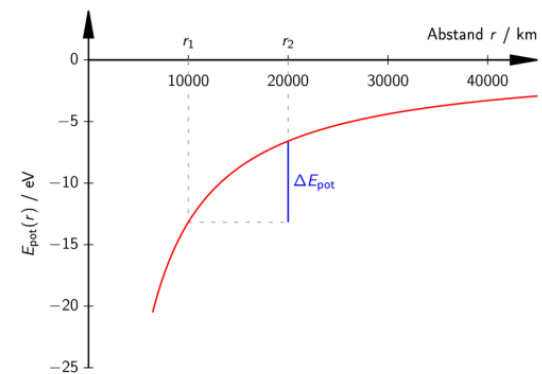


Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

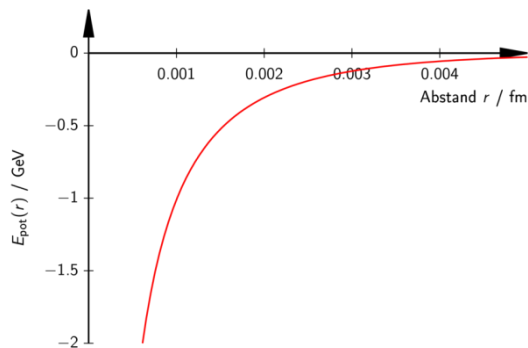
► Elektromagnetische WW



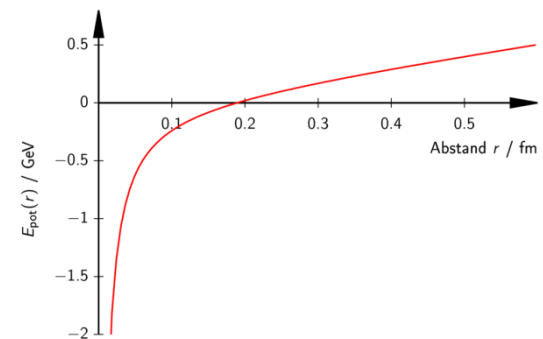
► Gravitation



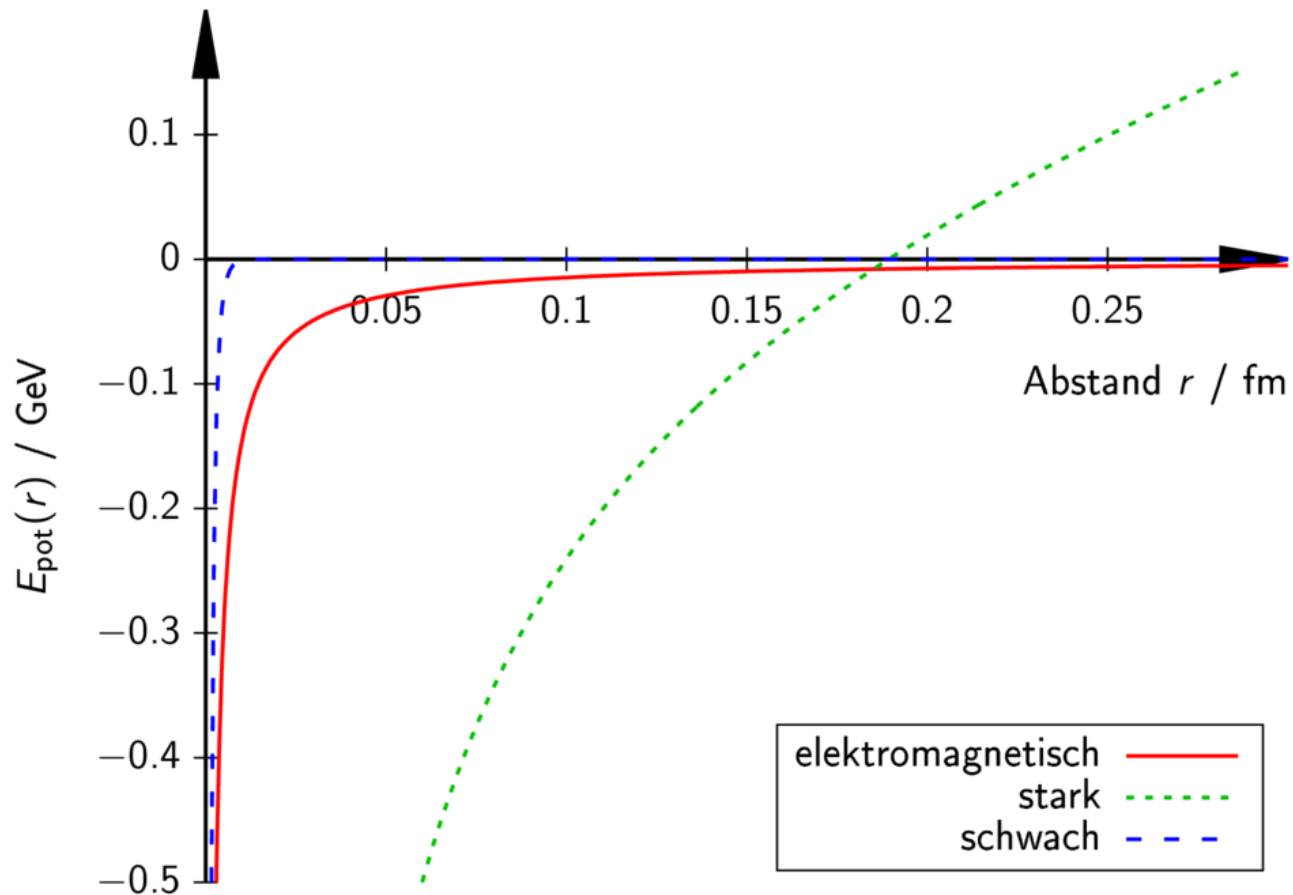
► Schwache WW



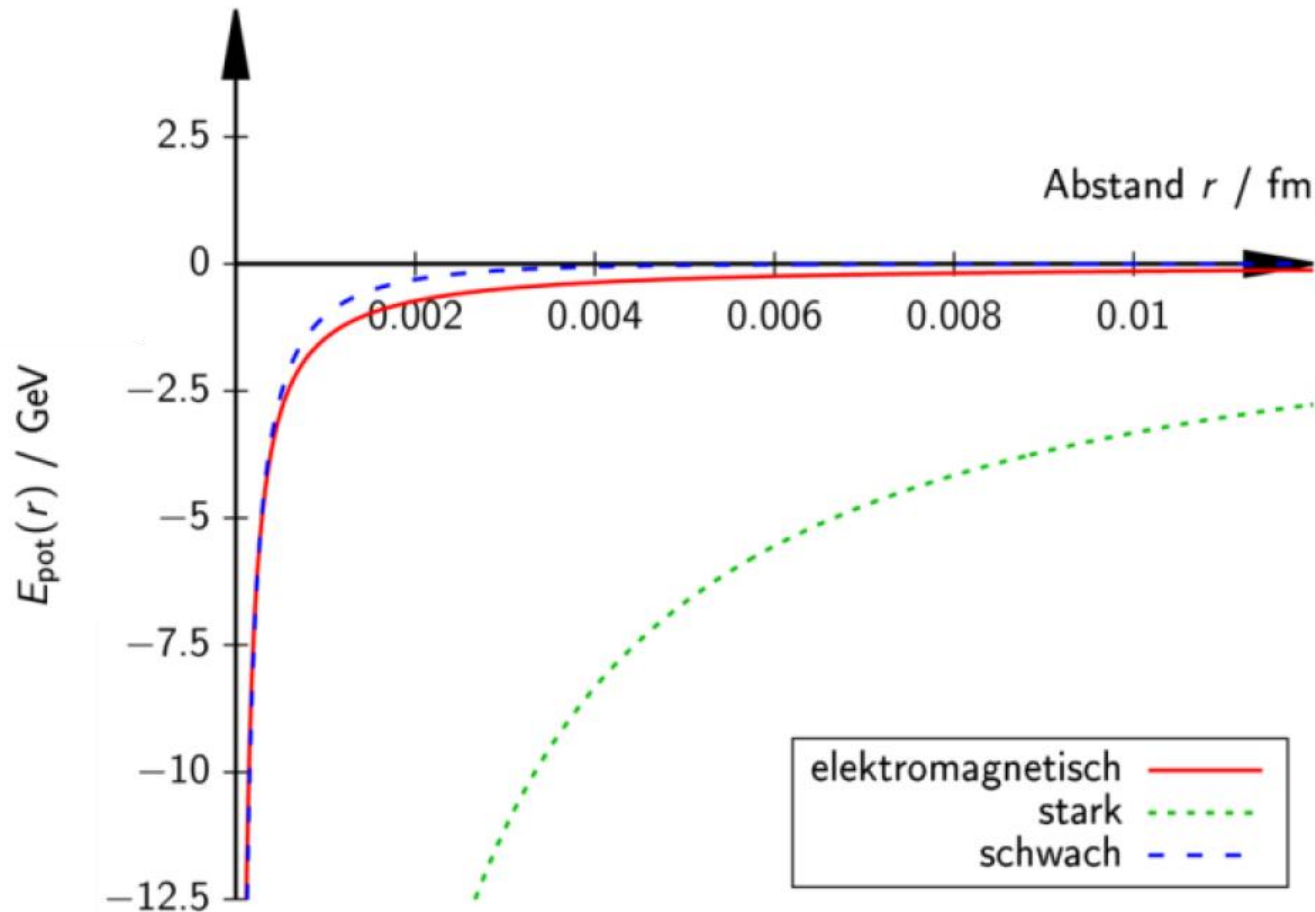
► Starke WW



Vergleich der potenziellen Energien



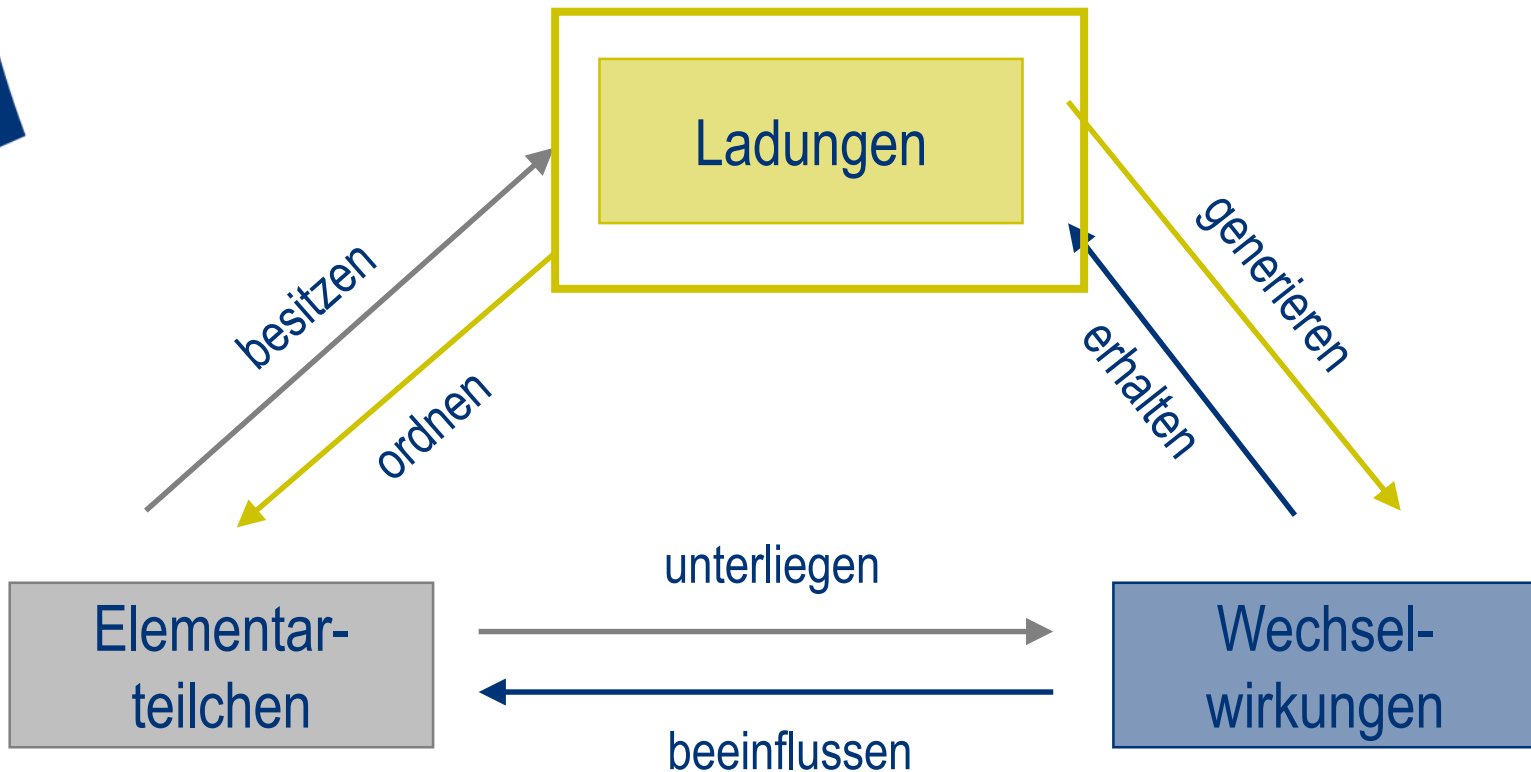
Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw. gestaucht)



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** α auch für andere Wechselwirkungen

■ $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

Erweiterung: Konzept der Ladung

► **Einführung:** eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen

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

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
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 α 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: α_{grav} zwischen Proton (p) und Elektron (e⁻)

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

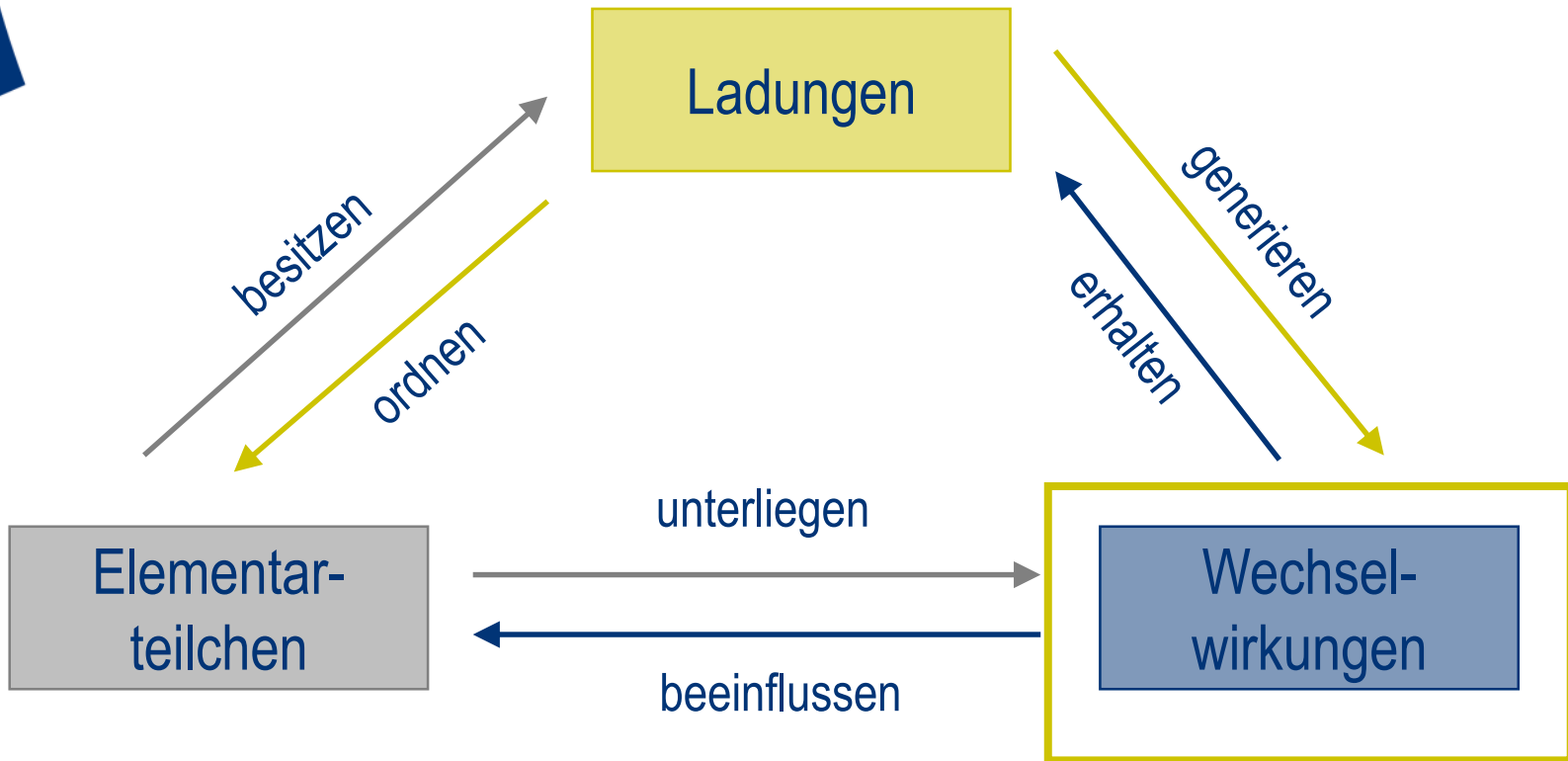
Konzept der Ladung

- ▶ 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

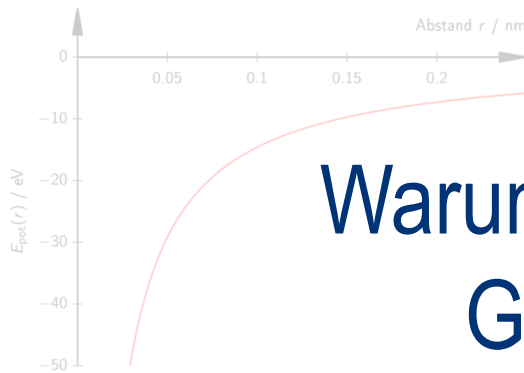
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

► Gravitation

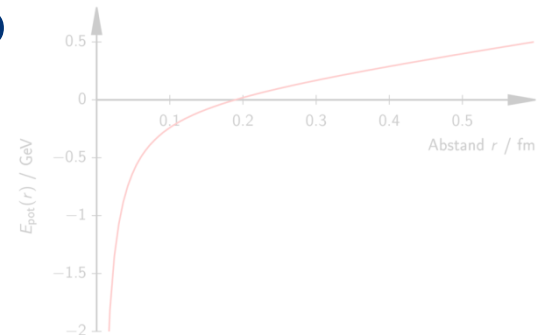
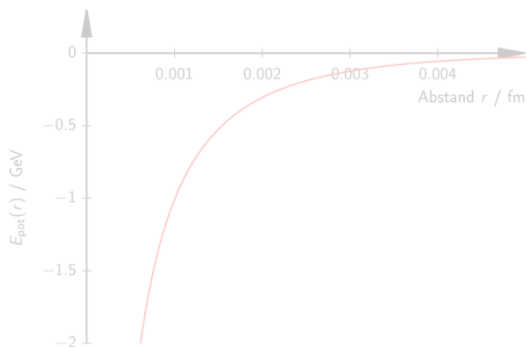


Warum erfahren wir nur
Gravitation und

► Schwache WW

Elektromagnetismus

im Alltag?



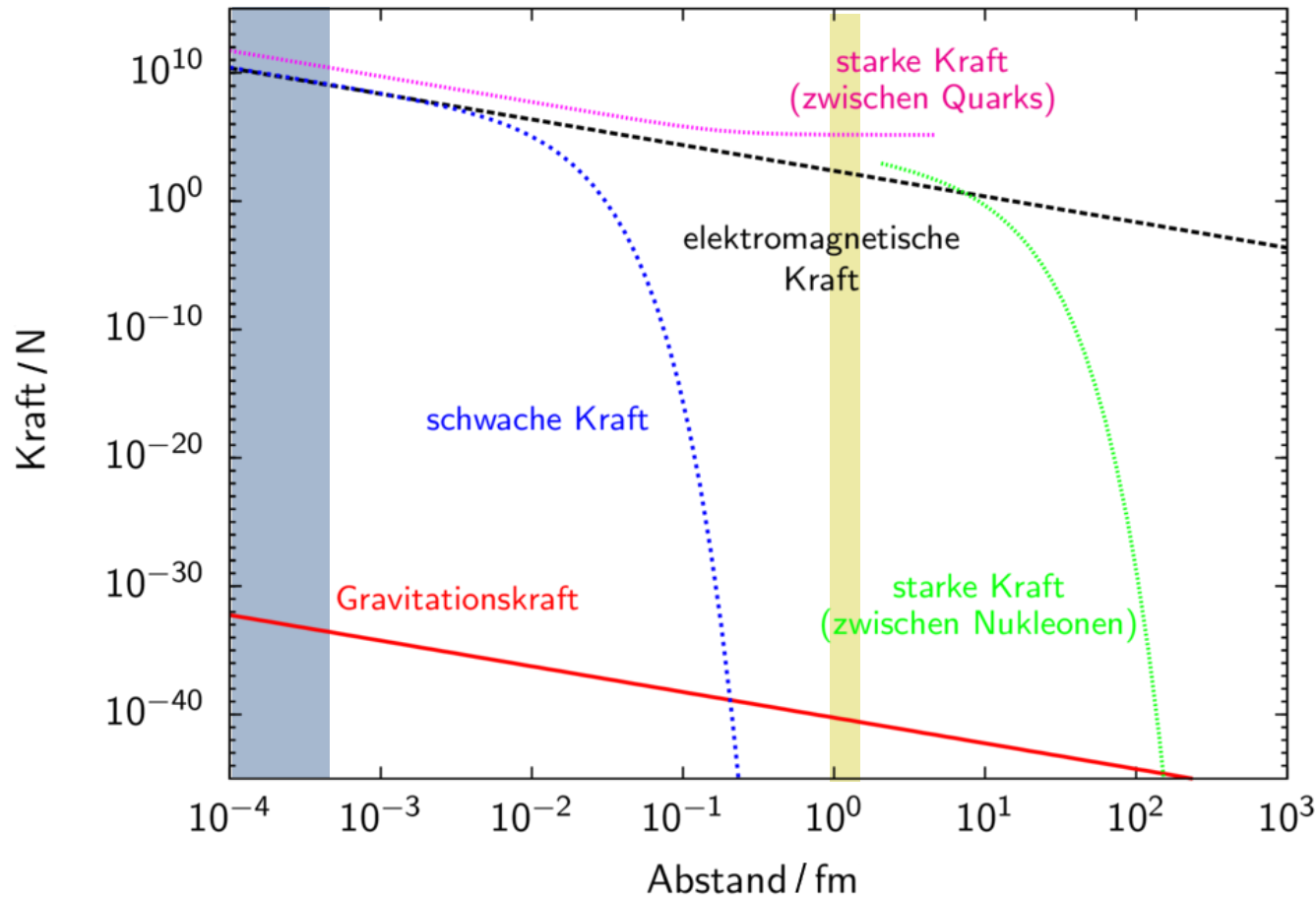
Kräfte der Wechselwirkungen

**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: α !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

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

Stärke der Wechselwirkungen

► Einführung: eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen

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



Warum erfahren wir nur

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

Gravitation und Elektromagnetismus im Alltag?

Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

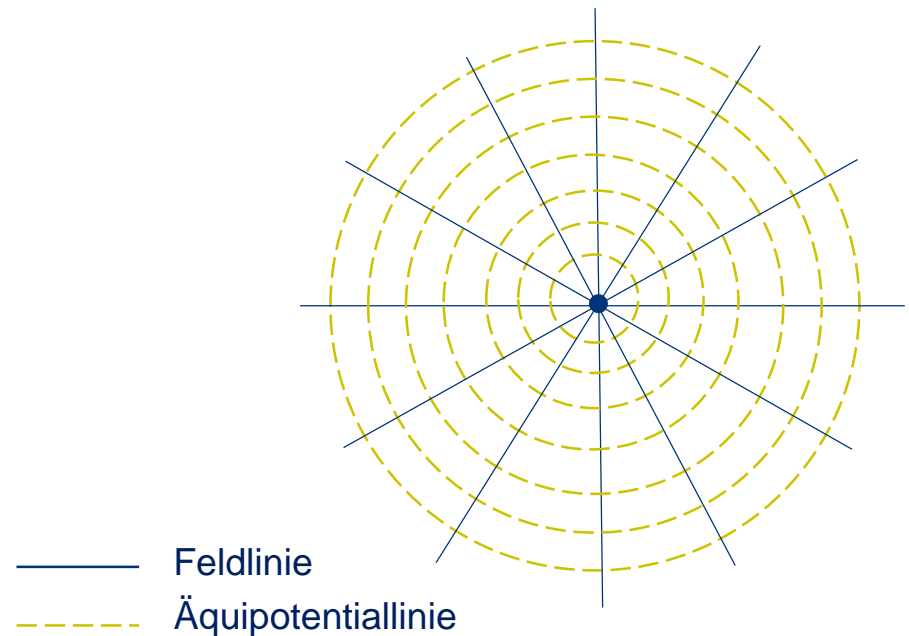
▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW

▶ **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

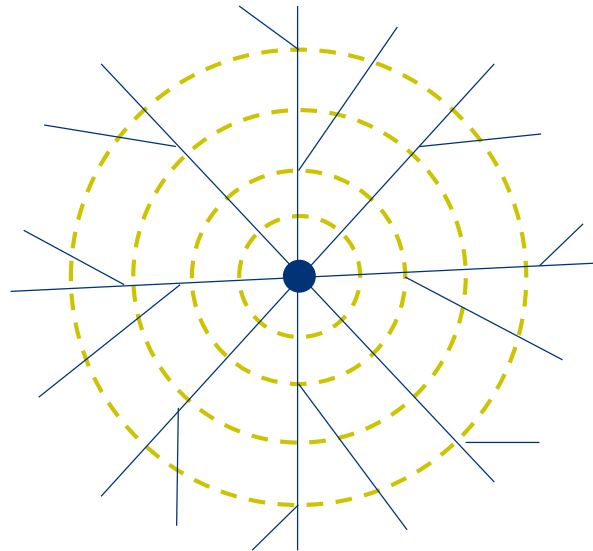
- $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

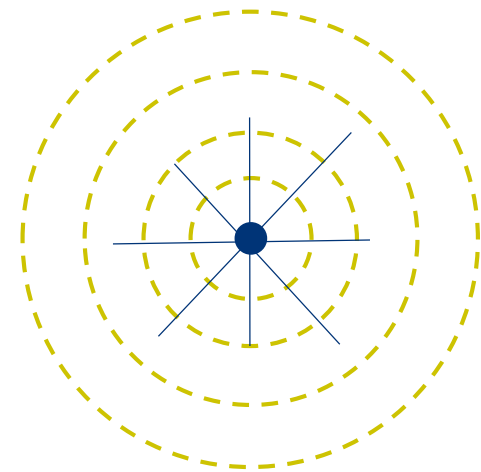
▶ Stark

- Kraft konstant →
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



▶ Schwach

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

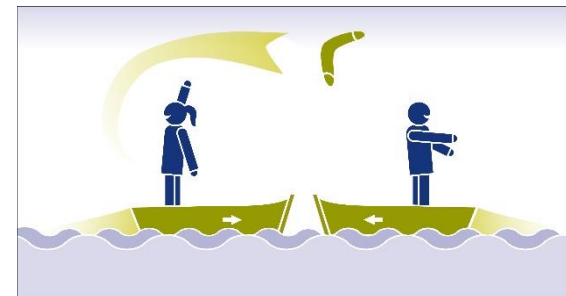
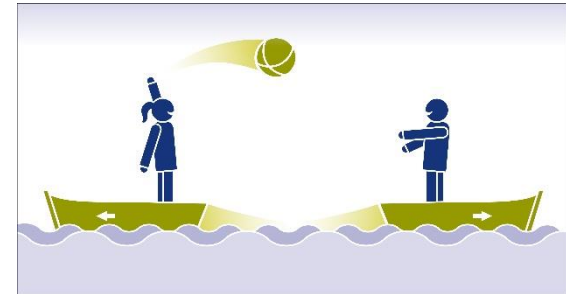


Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► Einführung: Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

► Bekannt ist:

- Energie E und Impuls \vec{p} **vorher**
- Energie E und Impuls \vec{p} **nachher**
- Energiedifferenz ΔE und Impulsdifferenz $\Delta\vec{p}$ wird durch Botenteilchen übertragen

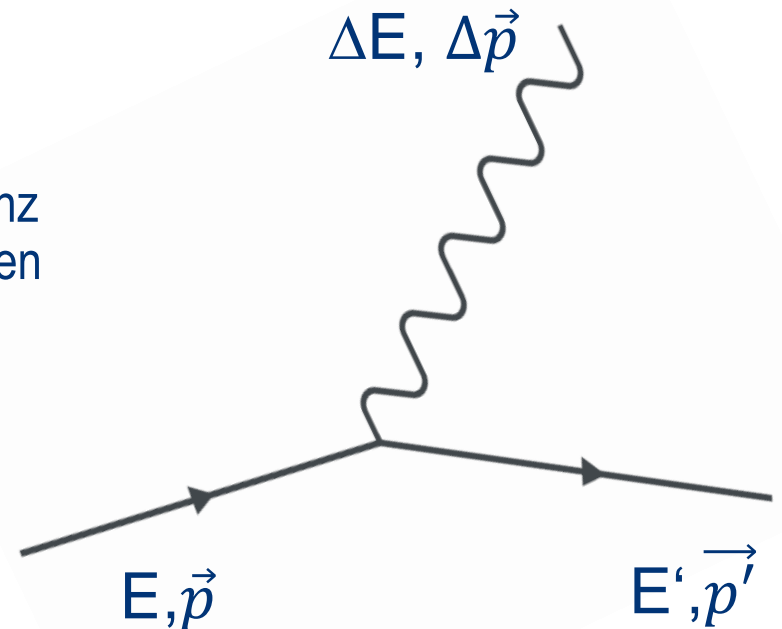


Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► Einführung: Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

► Bekannt ist:

- Energie E und Impuls \vec{p} **vorher**
- Energie E' und Impuls \vec{p}' **nachher**
- Energiedifferenz ΔE 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:

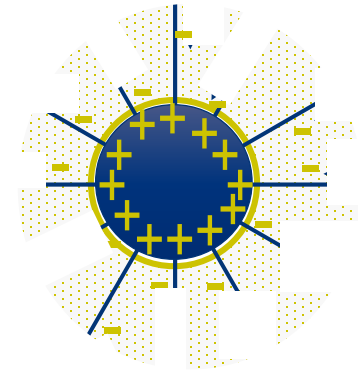
► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

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

► Brout-Englert-Higgs Feld schirmt schwache Ladungen ab

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

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



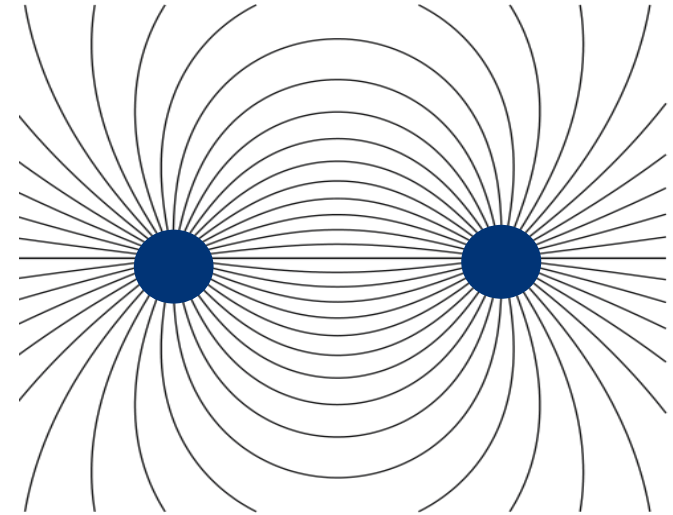
Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

- ▶ Botenteilchen (Photon) ist
 - masselos
 - ungeladen

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

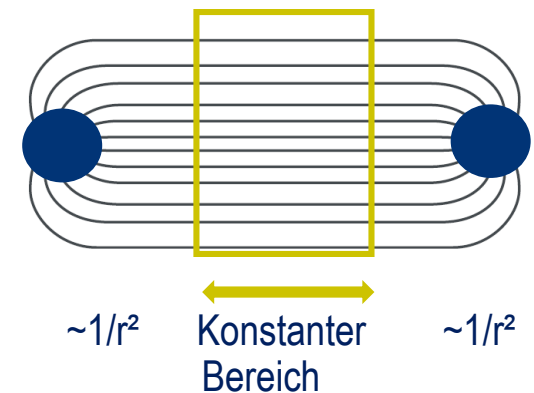
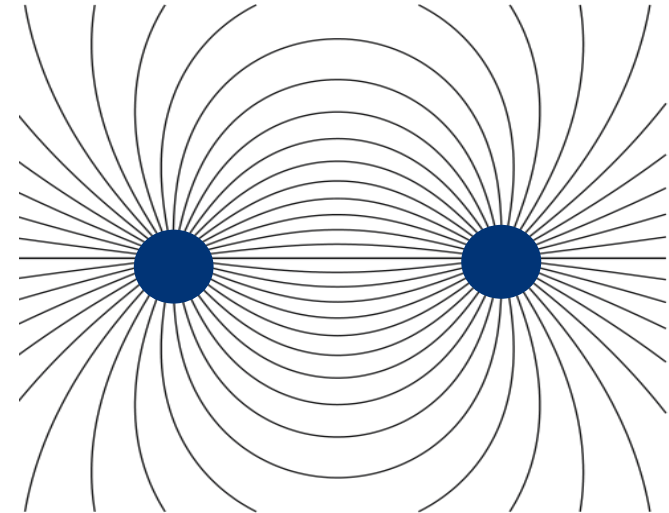
- ▶ Vergleich: Stark $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

- ▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung



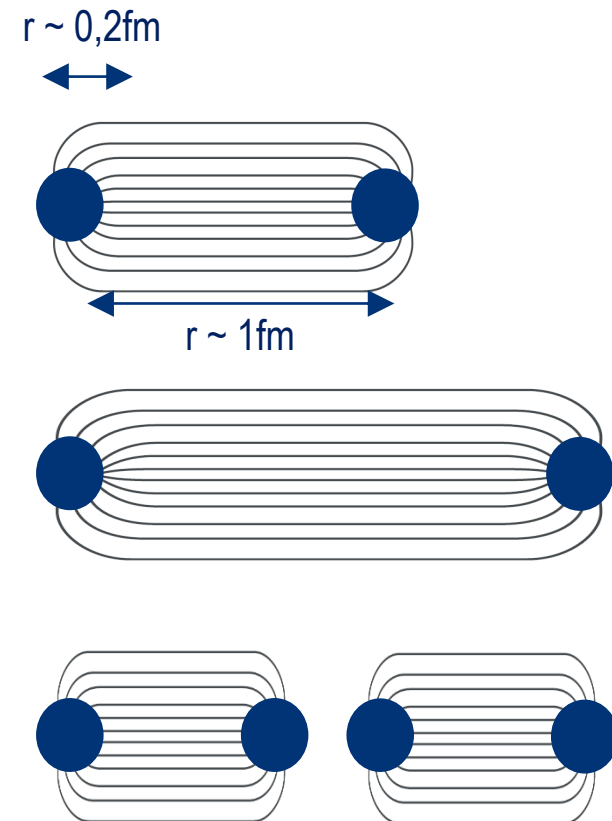
Starke Wechselwirkung

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



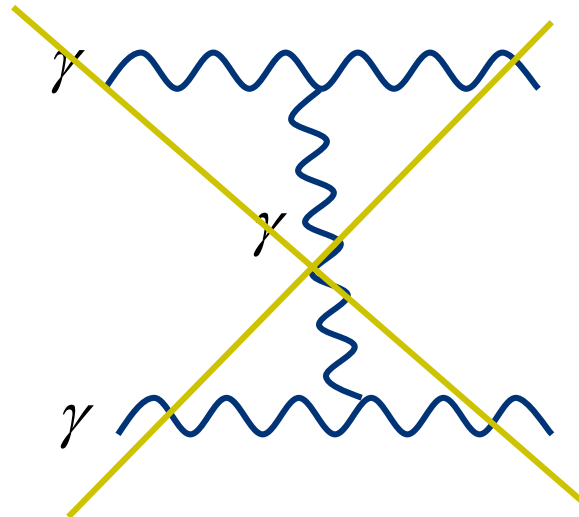
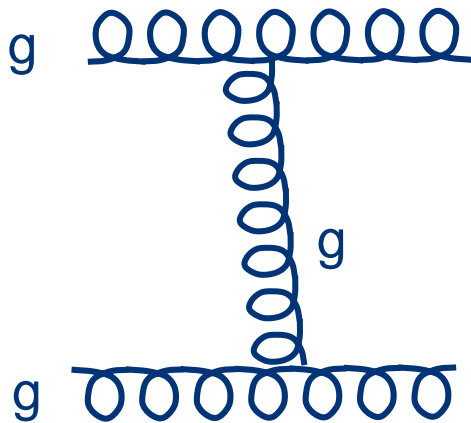
Starke Wechselwirkung

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



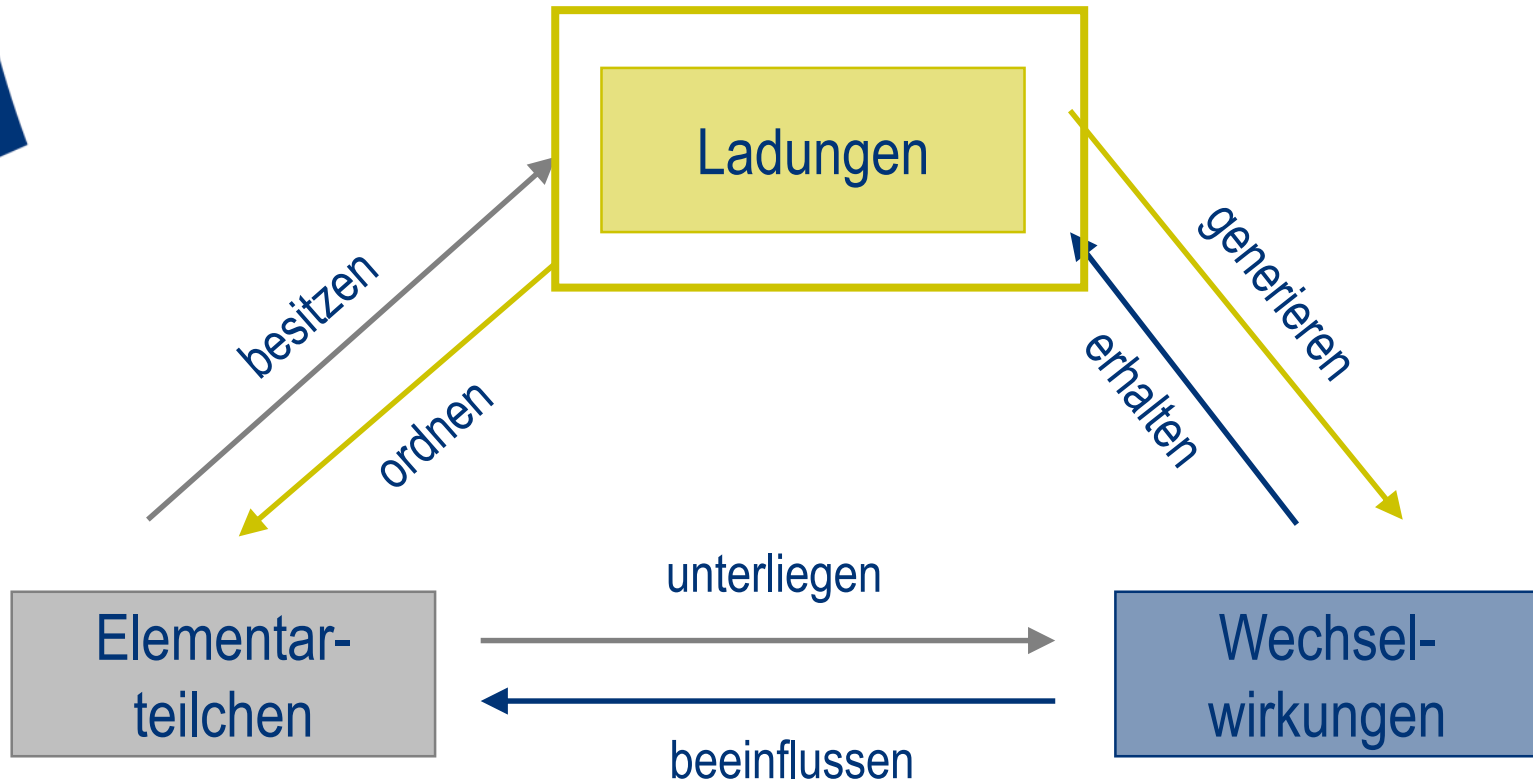
Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

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

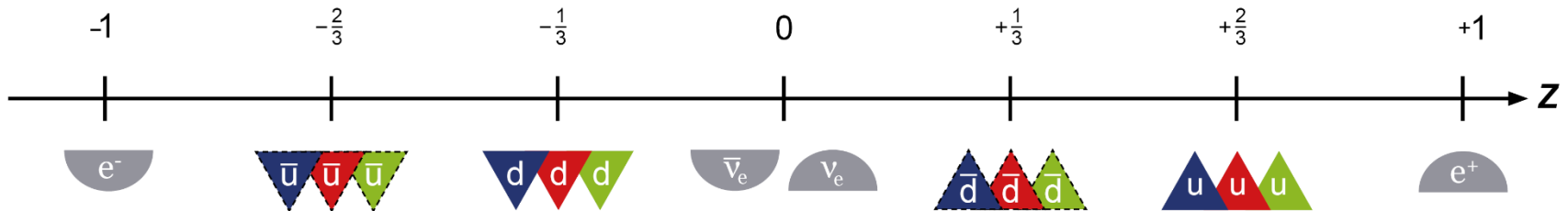
Und:

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

Elektrische Ladung

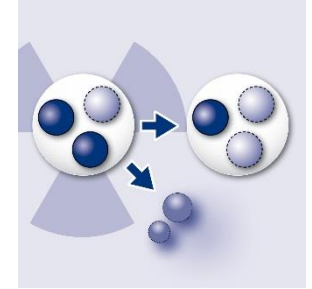


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen Z einiger Anti-/Materieteilchen

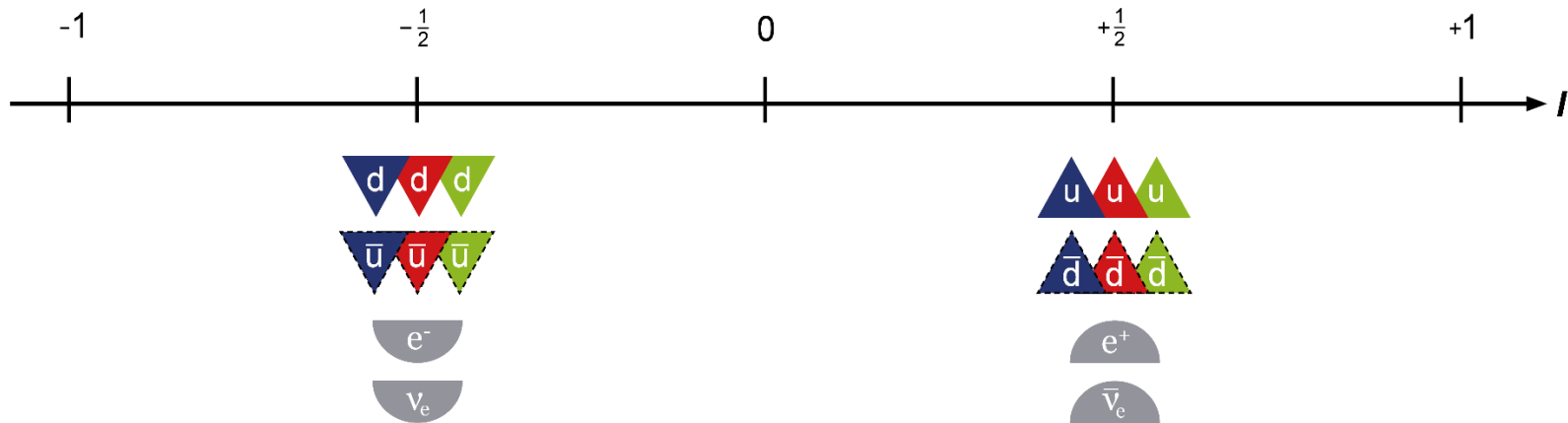


- Elektrische Ladung ist gequantelt

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

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

Ladungs-
zahl

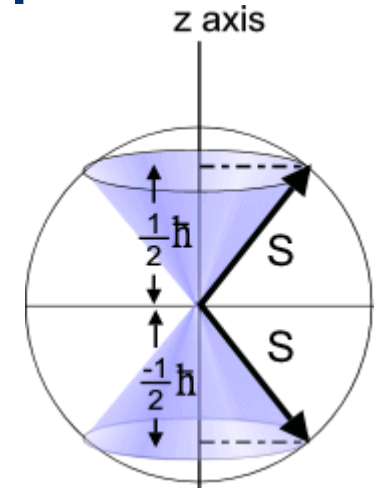
► Fachlicher Hinweis

- 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 $I := I_3^W$

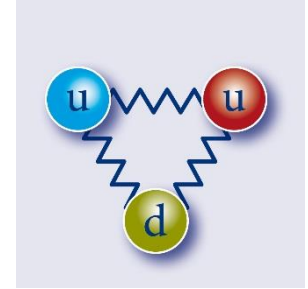


<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

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

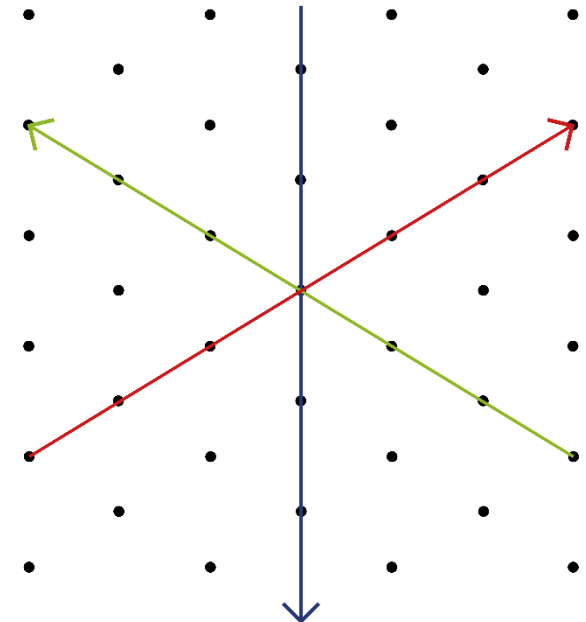
Starke Ladung

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



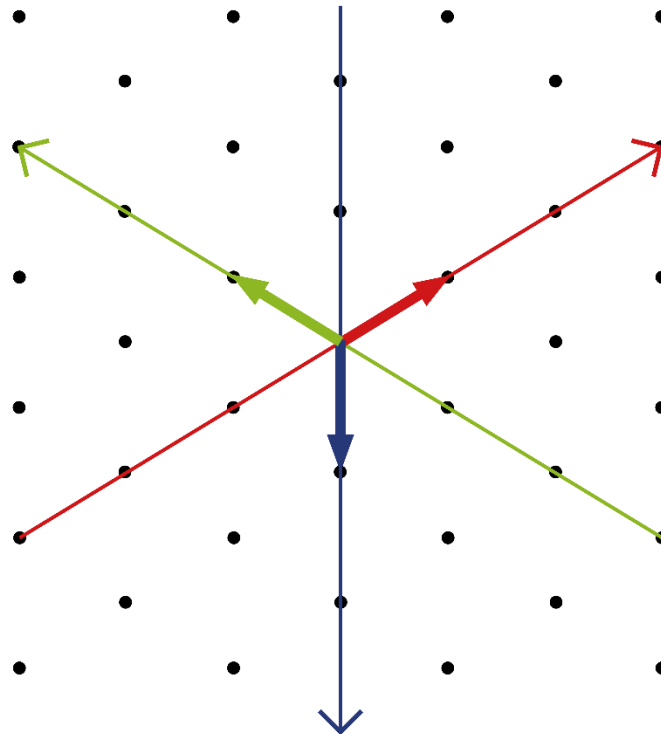
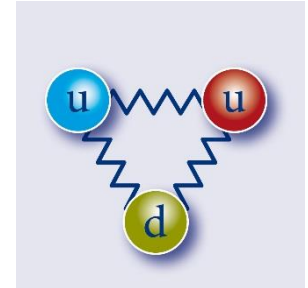
▶ Farbgitter:

- 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



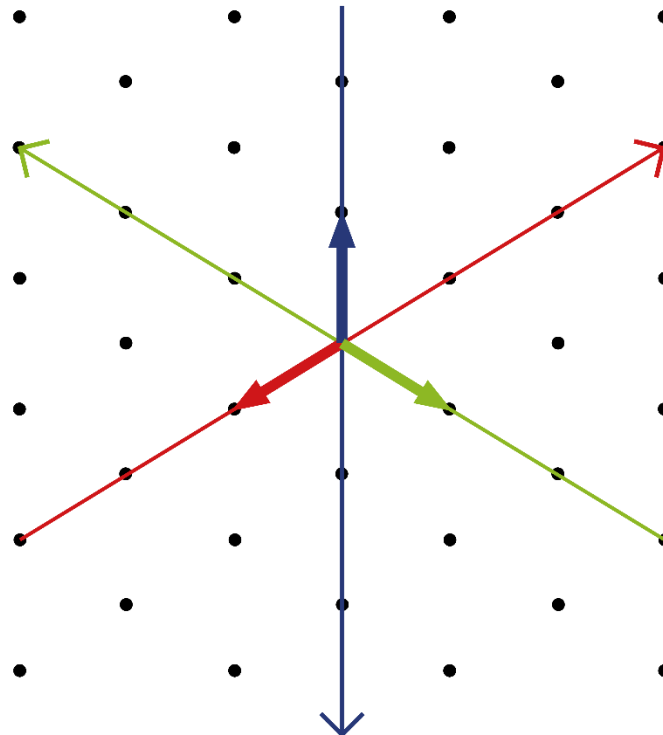
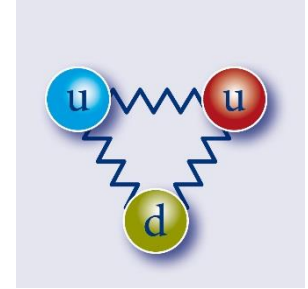
Starke Ladung

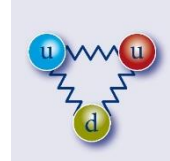
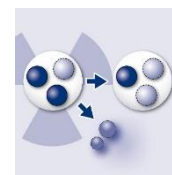
► Farbladungsvektoren von Quarks



Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

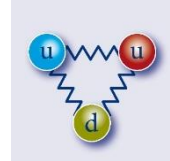
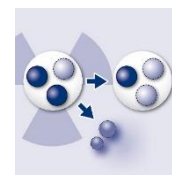
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



Alle Ladungen sind jeweils erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

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

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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

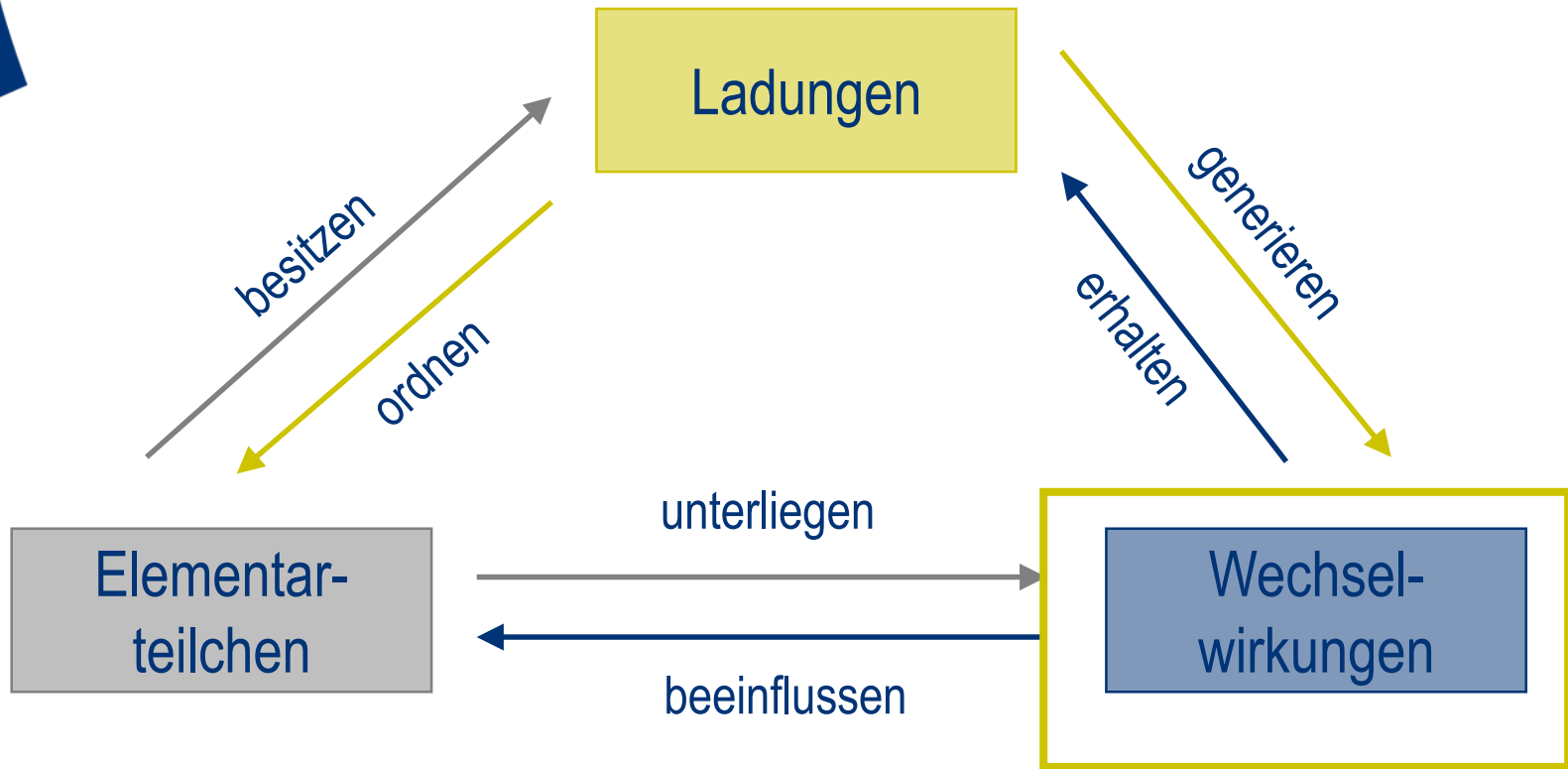
Eindeutige Vorhersage möglich

- ▶ 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



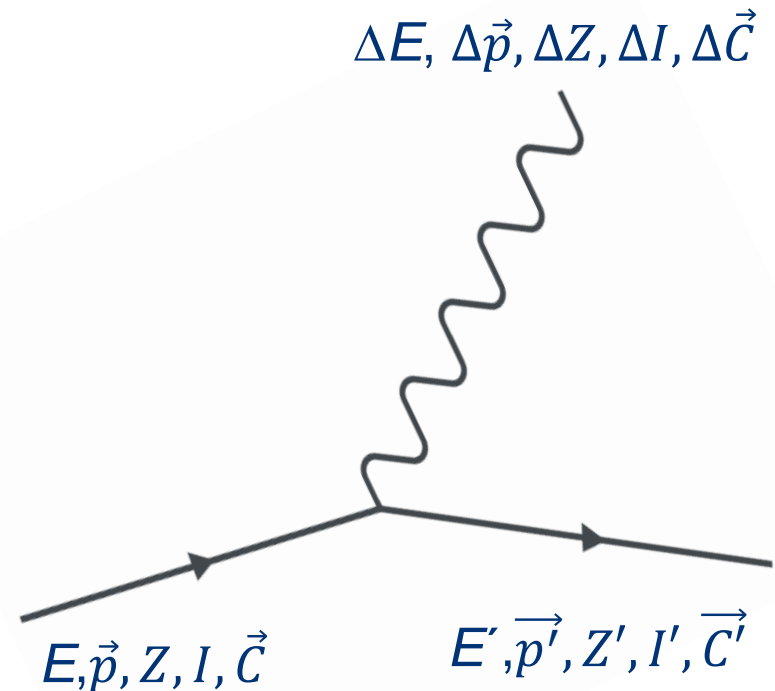
Darstellung durch Botenteilchen

▶ 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, ν 

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

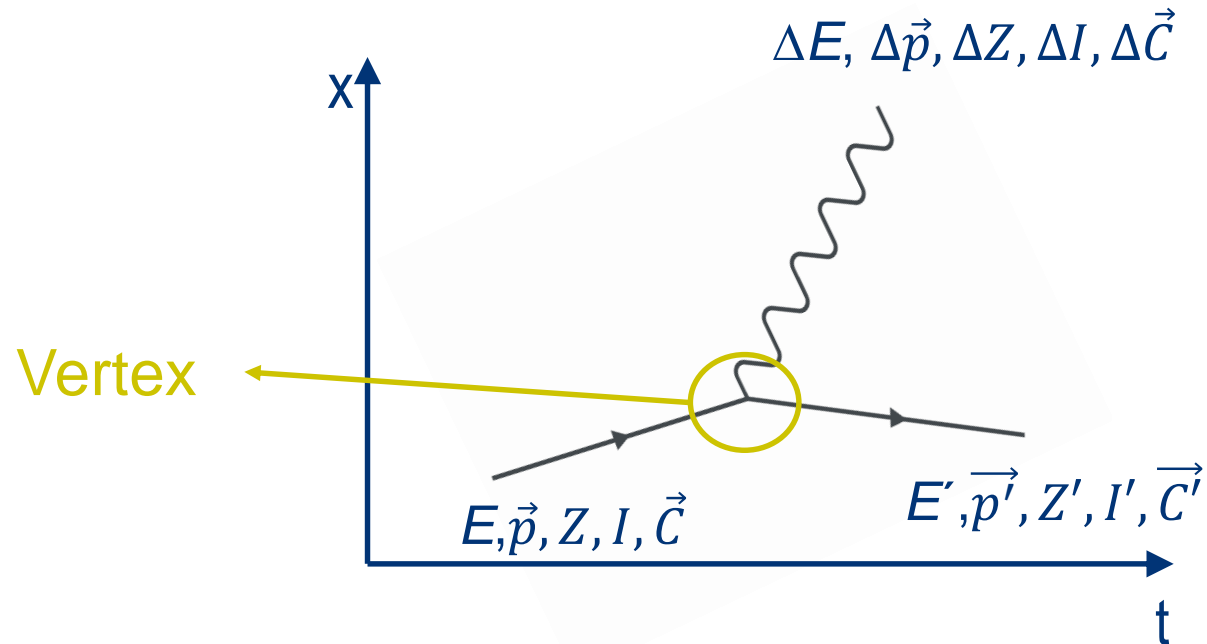
γ, W, Z 

g 

Feynman - Diagramme

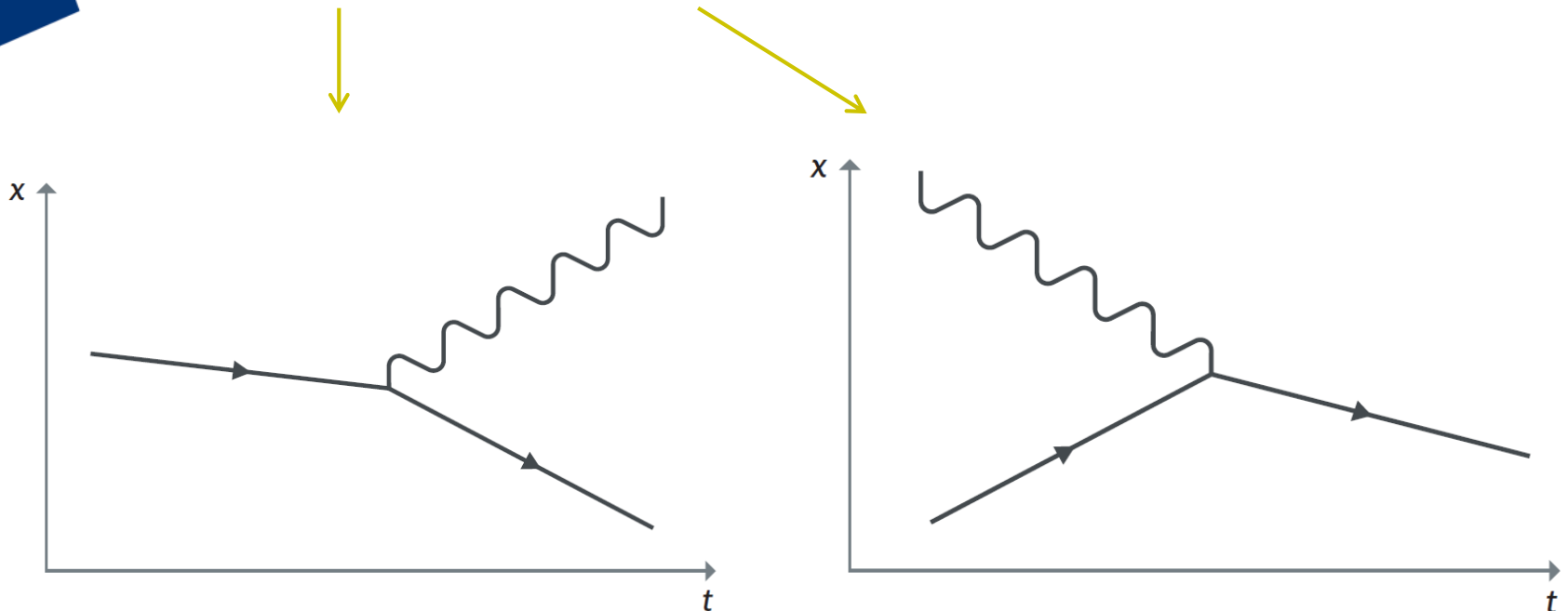
► Begriffsklärung:

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



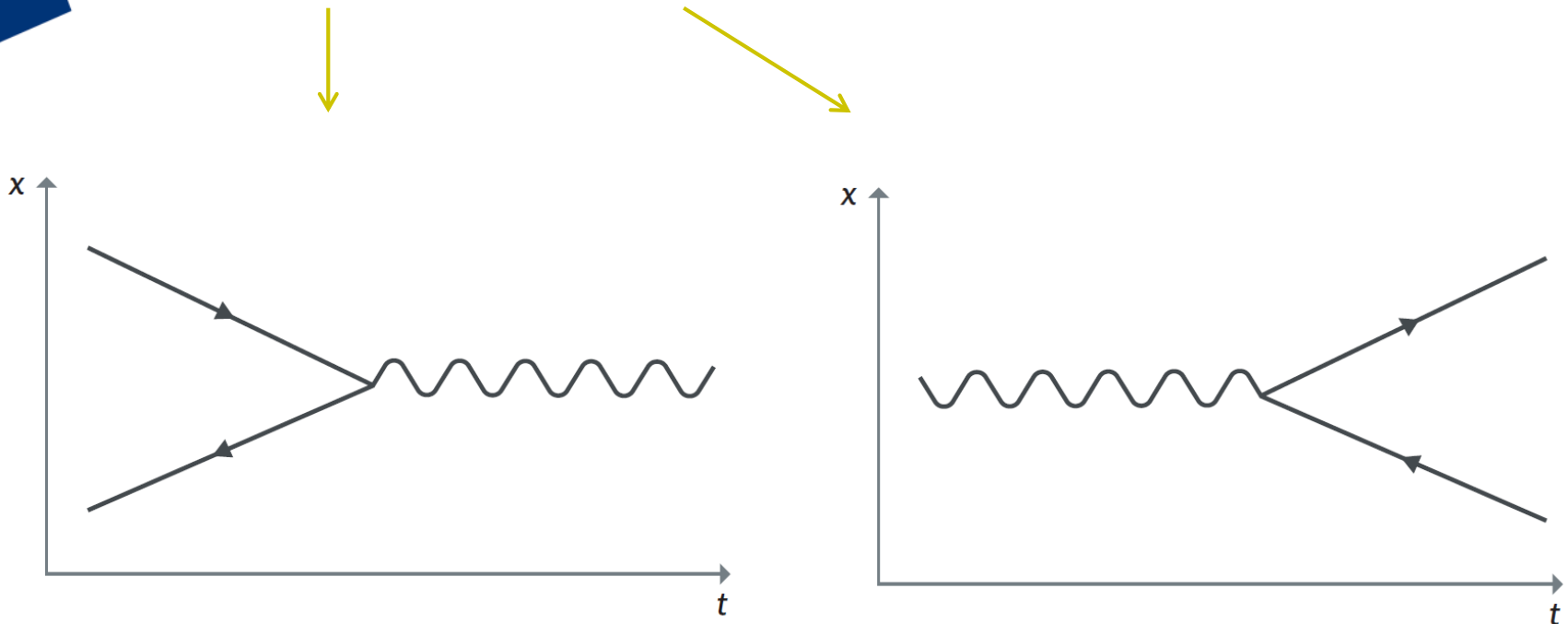
Grundbausteine 1/2

► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



Grundbausteine 2/2

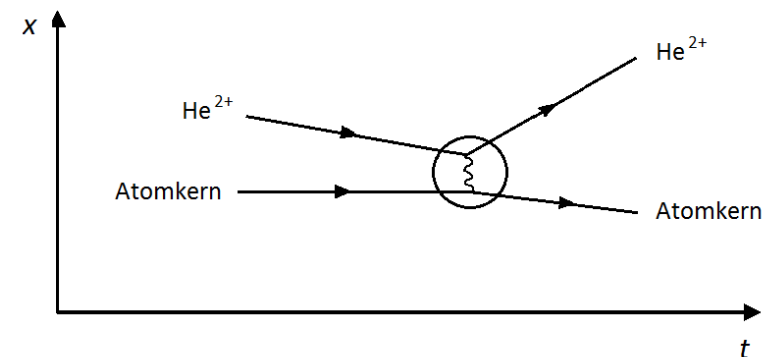
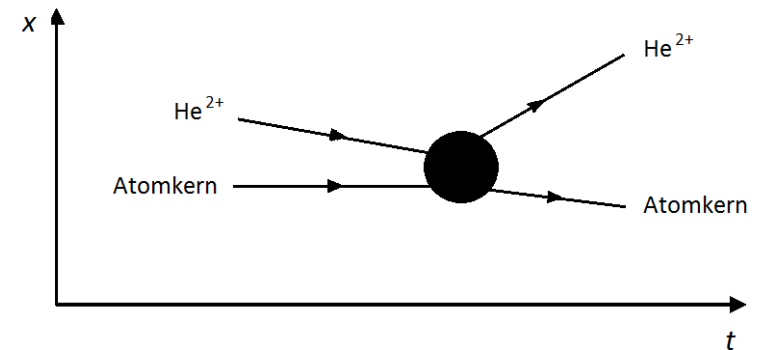
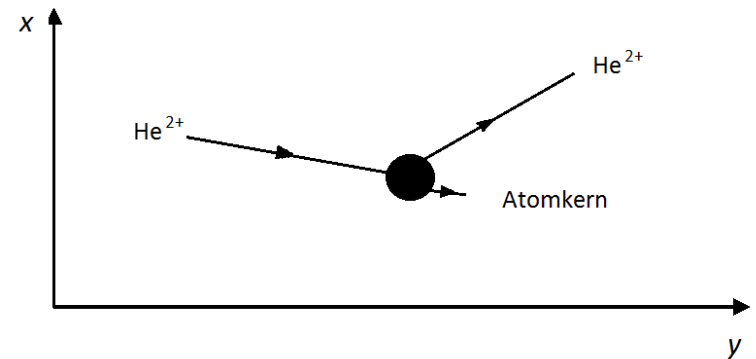
▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



Prozesse

► Rutherford-Streuung

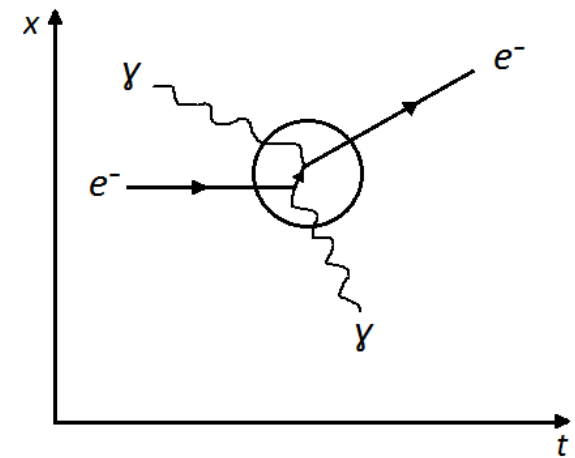
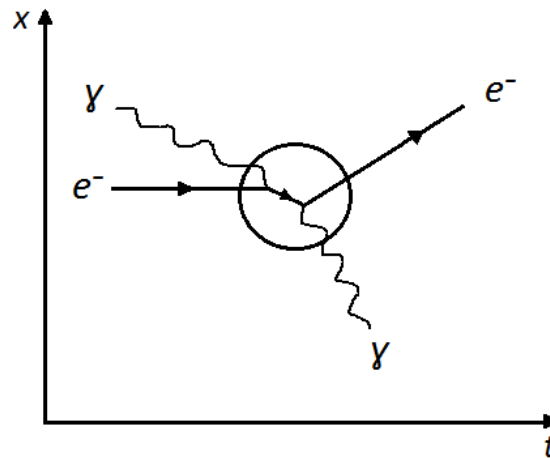
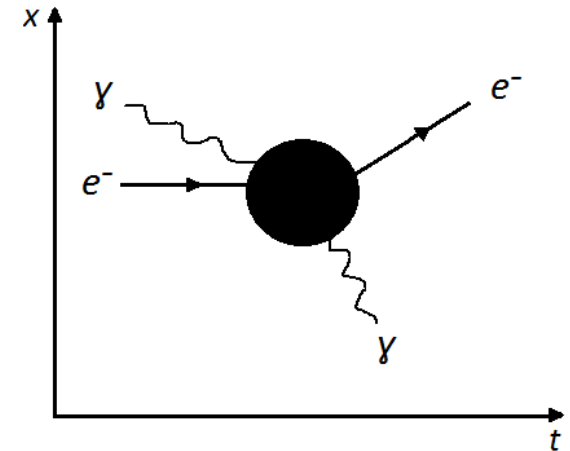
- „Ort - Ort“ Diagramm
- „Ort - Zeit“ Diagramm
„Blackbox“ Vertex
- „Ort - Zeit“ Diagramm
detaillierter Vertex



Blackbox Vertex

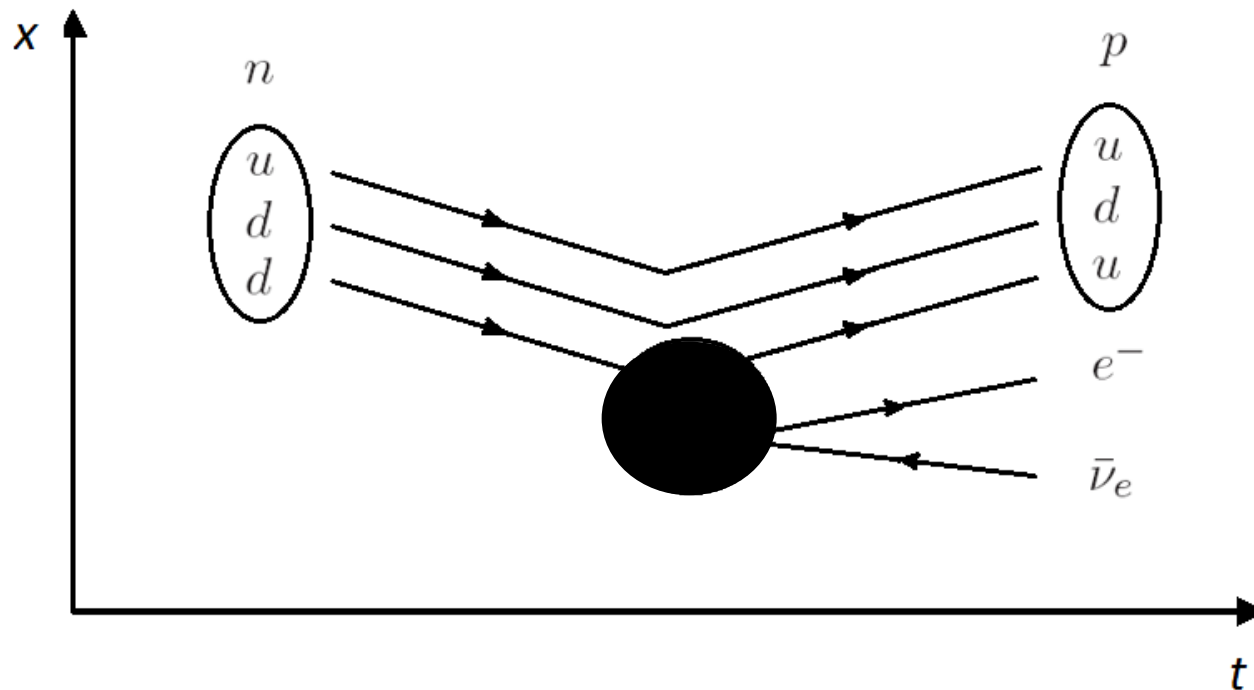
► Compton-Streuung

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



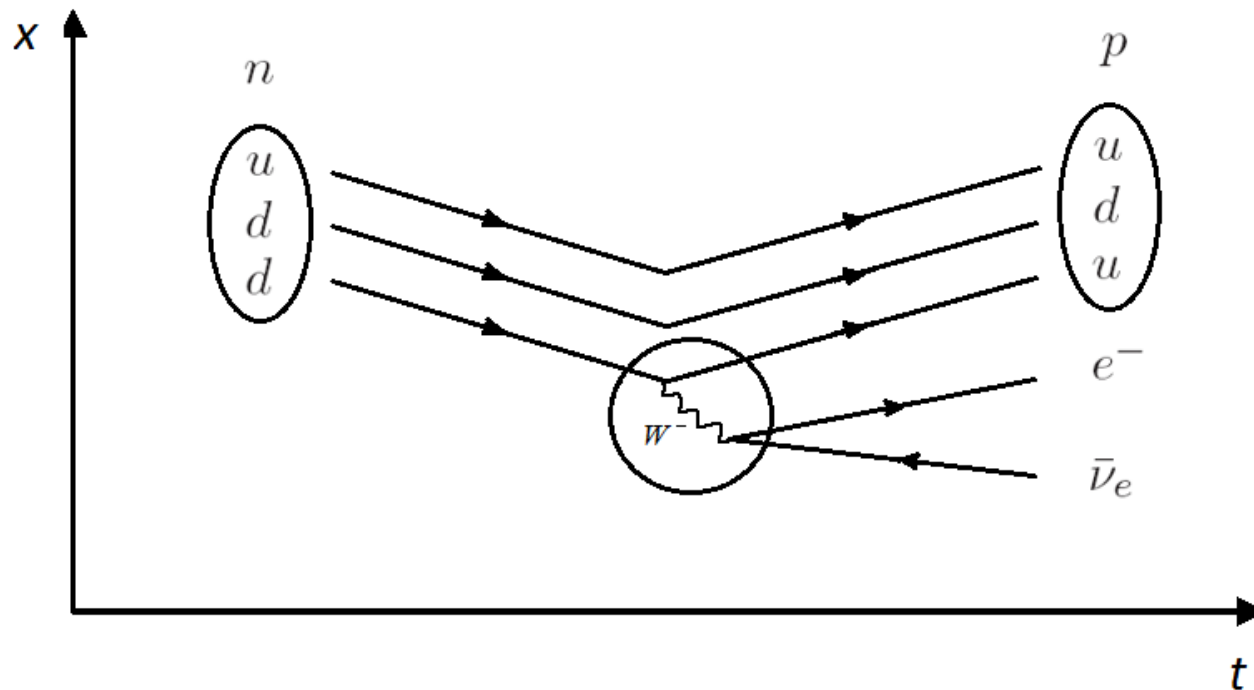
Prozesse

► β^- - Umwandlung



Prozesse

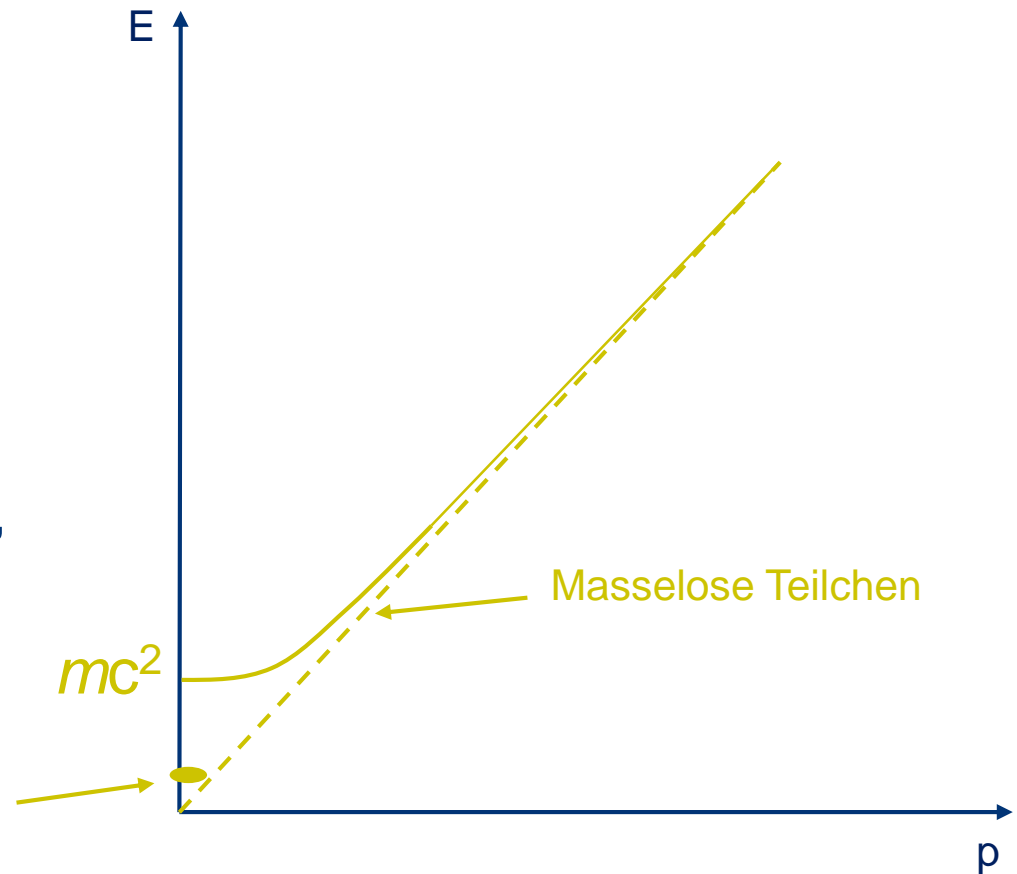
► β^- - Umwandlung



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 β -Umwandlung



Virtuelle Teilchen

- ▶ Analogie: Erzwungene Schwingung vs. Teilchenphysik

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

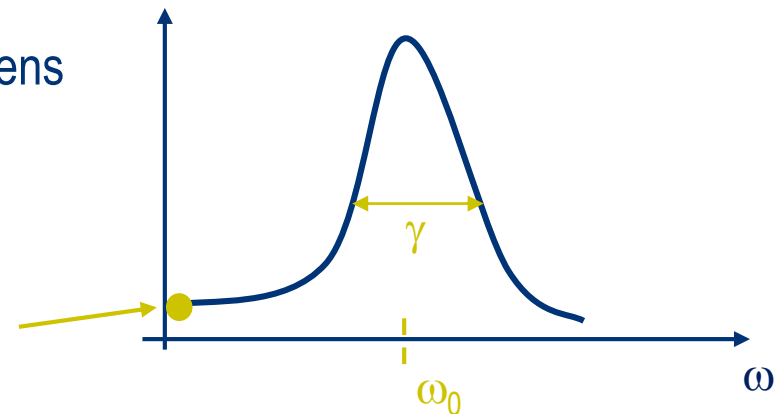
von außen Vorgegeben Eigenfrequenz Dämpfung = 1/Lebensdauer

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

von außen Vorgegeben Ruheenergie Breite $\sim 1/\text{Lebensdauer}$

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

W Botenteilchen der β -Umwandlung



Ladungsbilanz: β^- - 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

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

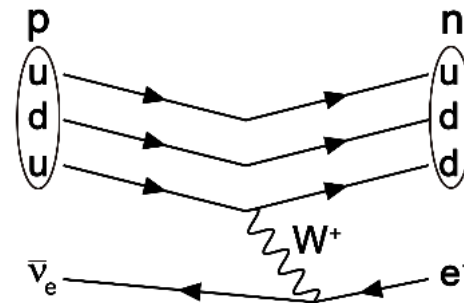
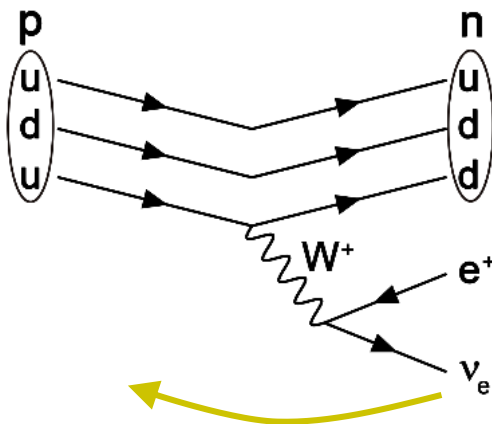
- Starker Farbladungsvektor: \vec{C}

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

► Alle Ladungen sind erhalten

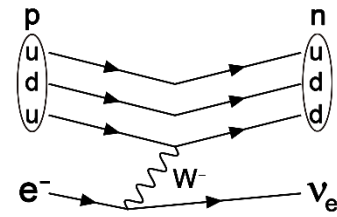
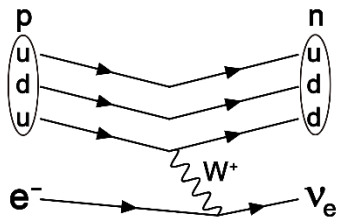
„Umklappen“ von Linien

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

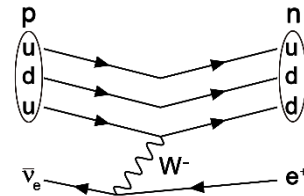
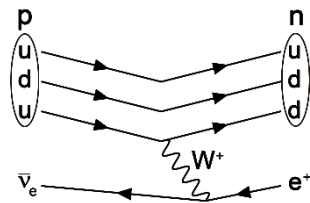


„Umklappen“ von Linien

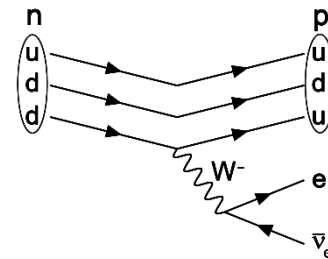
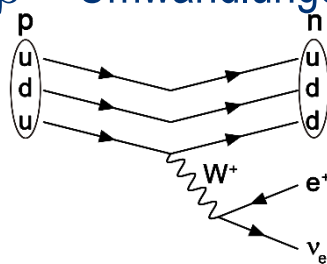
- ▶ Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- ▶ Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953

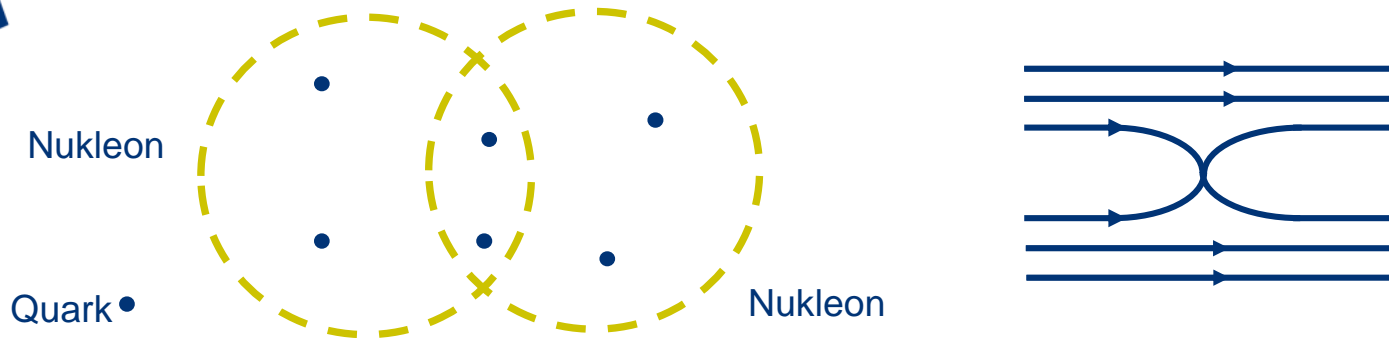


- ▶ β^+ und β^- - Umwandlungen von Kernen

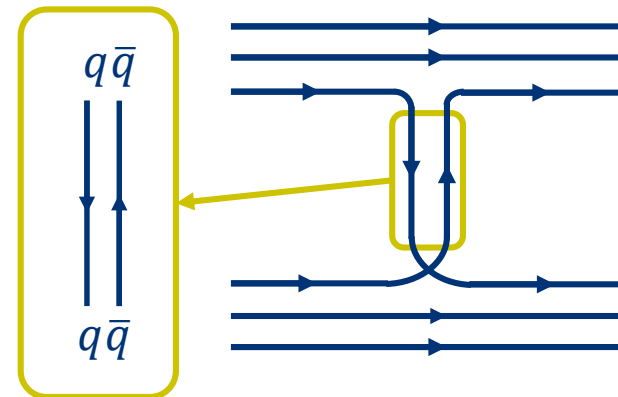


Bindung von Nukleonen – Starke Wechselwirkung vs. Kernkraft

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

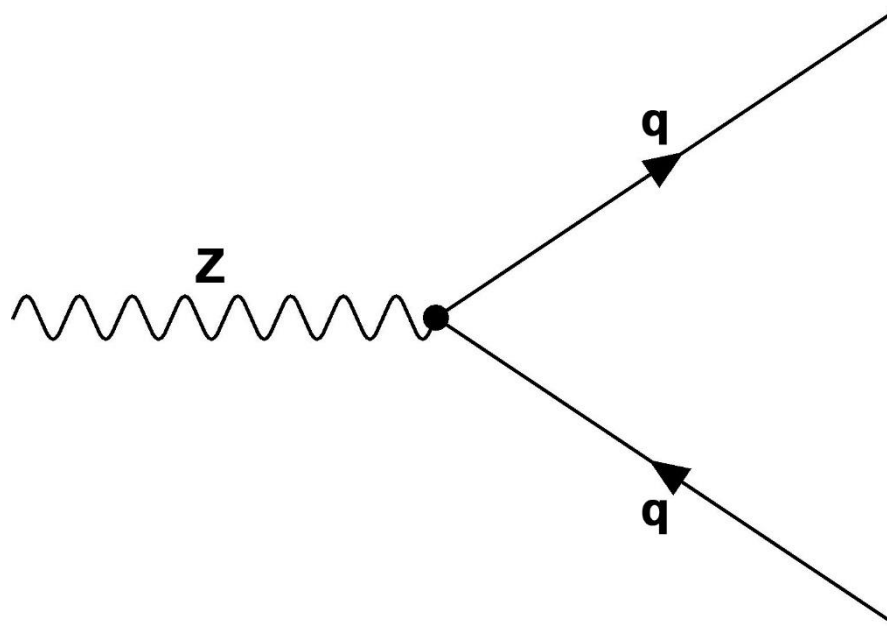


- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)



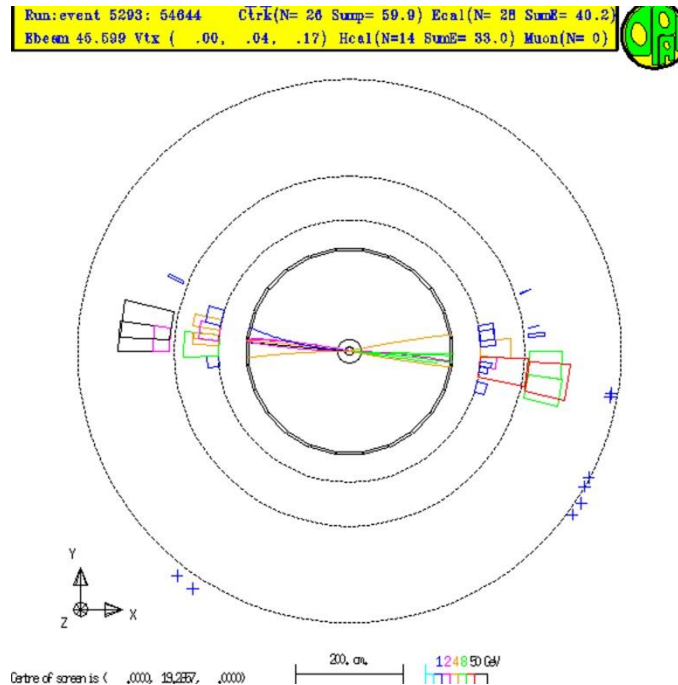
Quantitative Aussagen durch Vergleich von Feynman-Diagrammen

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



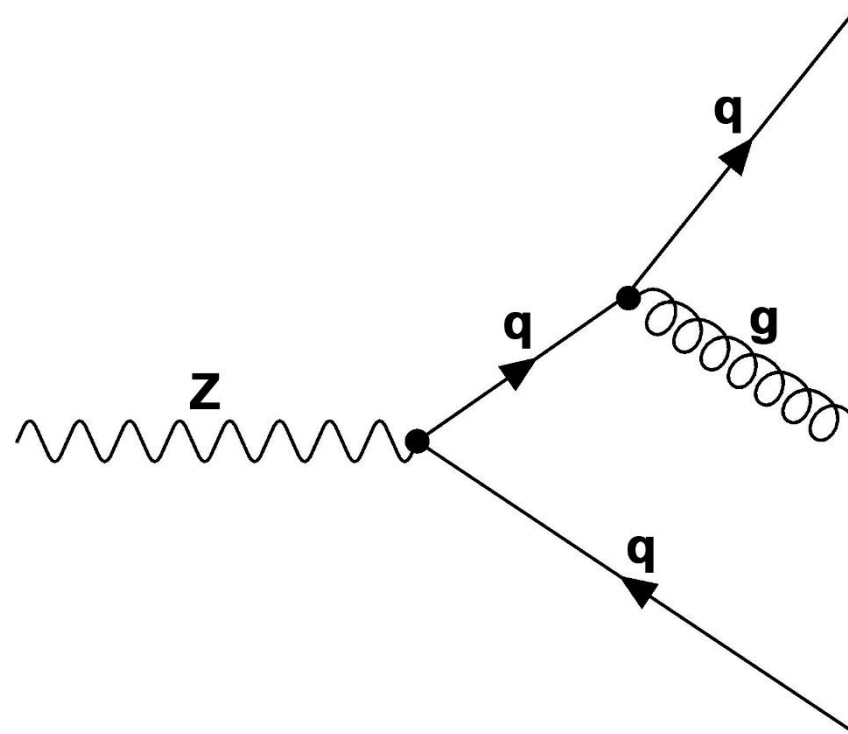
Quantitative Aussagen durch Vergleich von Feynman-Diagrammen

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



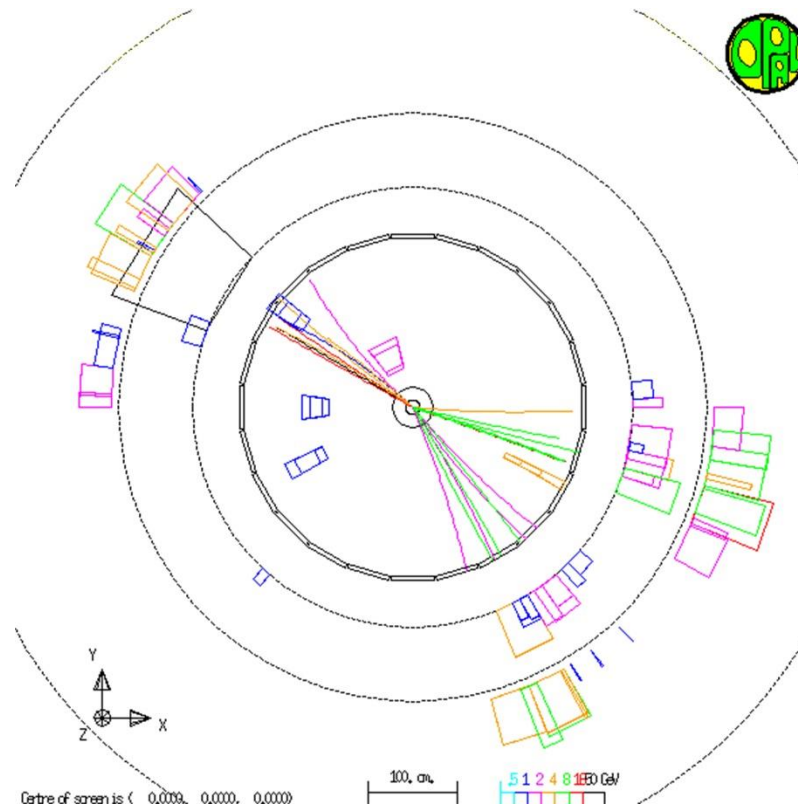
Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

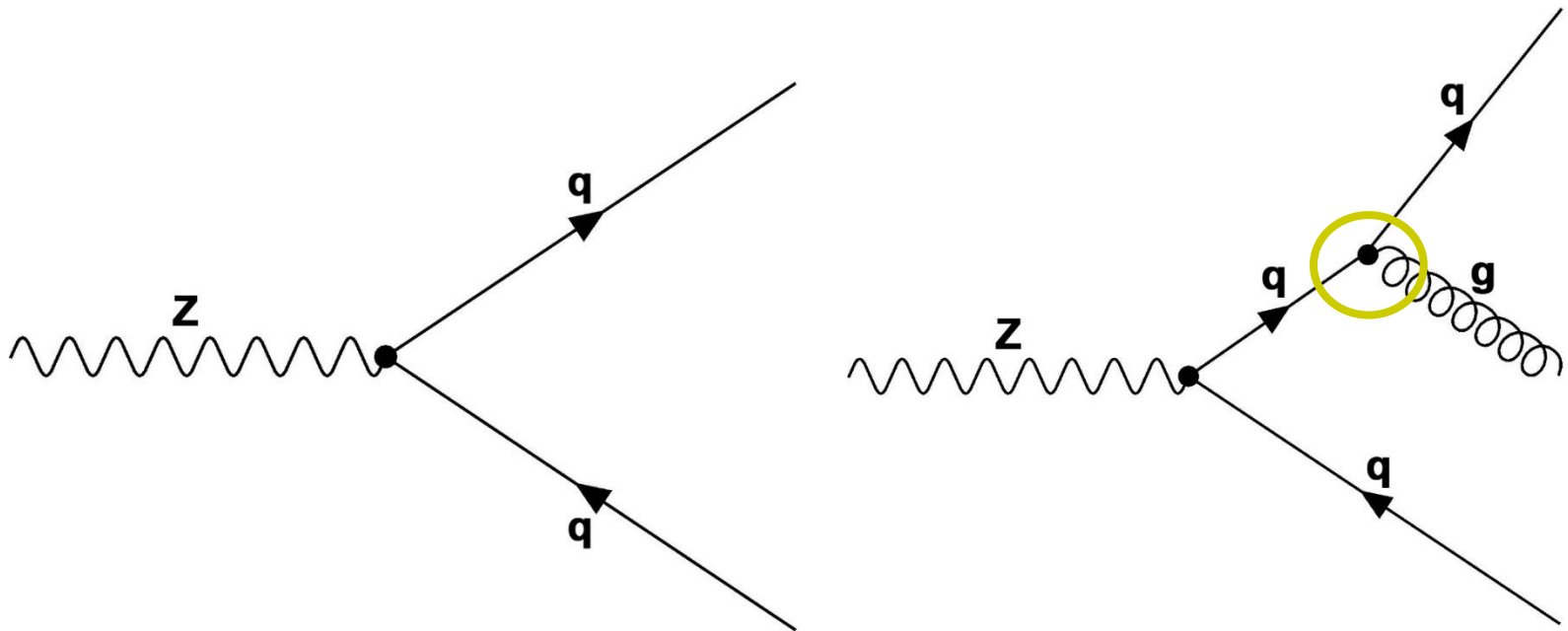


Bestimmung des starken Kopplungsparameters

- ▶ 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

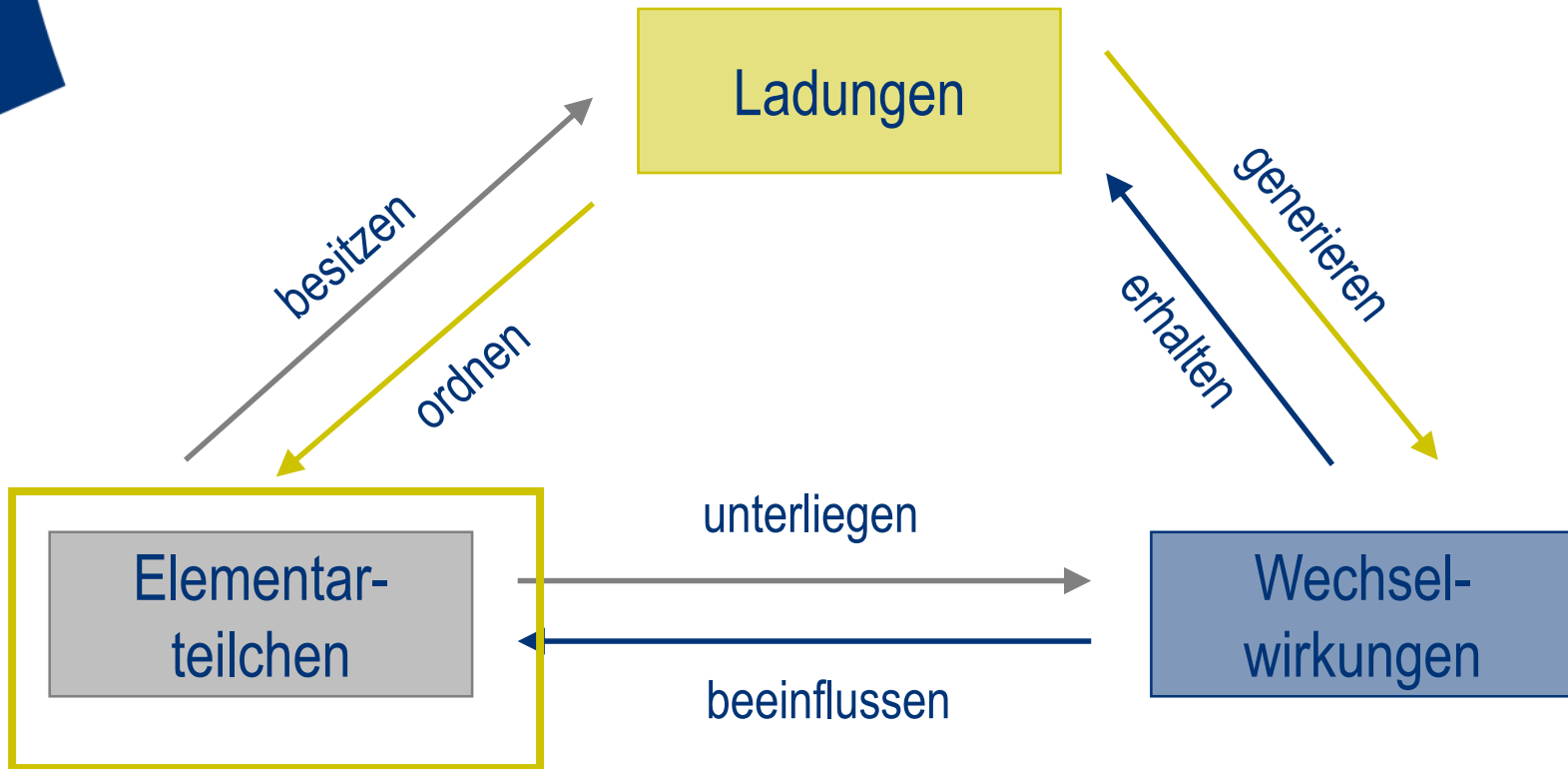
- ▶ Bei sehr vielen Ereignissen kann aus absoluten Häufigkeiten auf Wahrscheinlichkeit geschlossen werden

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

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

„Teilchenzoo“ oder Ordnung?

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

Anordnung von Teilchen in Generationen

	1. Generation	2. Generation	3. Generation	I	Z	\vec{C}
elektrisch neutrale Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	$+\frac{1}{2}$	0	farblos $\vec{0}$
elektrisch geladene Leptonen	e^-	μ^-	τ^-	$-\frac{1}{2}$	-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

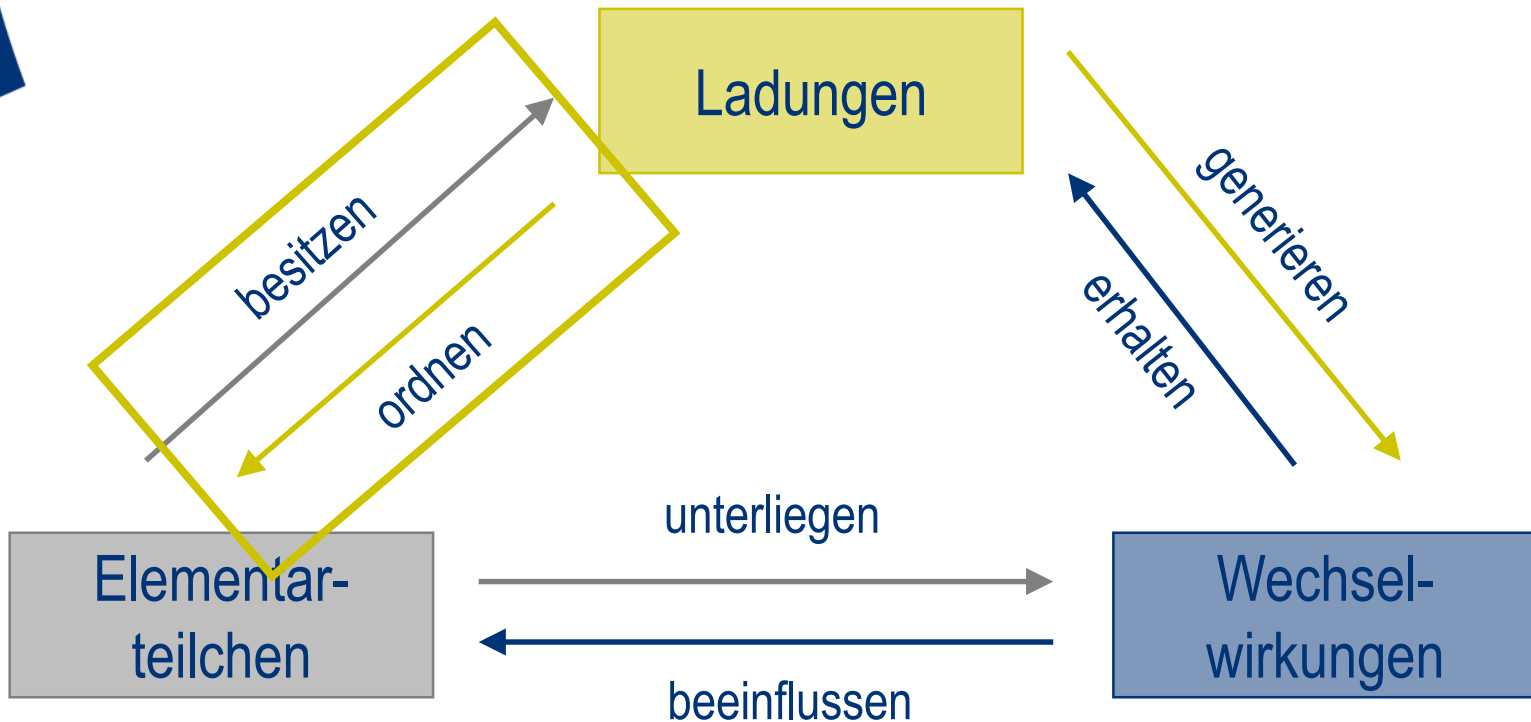
- ▶ Teilchen sind nach Ladungen geordnet analog den chemischen Elementen in die Hauptgruppen
- ▶ Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigen geordnet

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

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

Nebengruppen

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

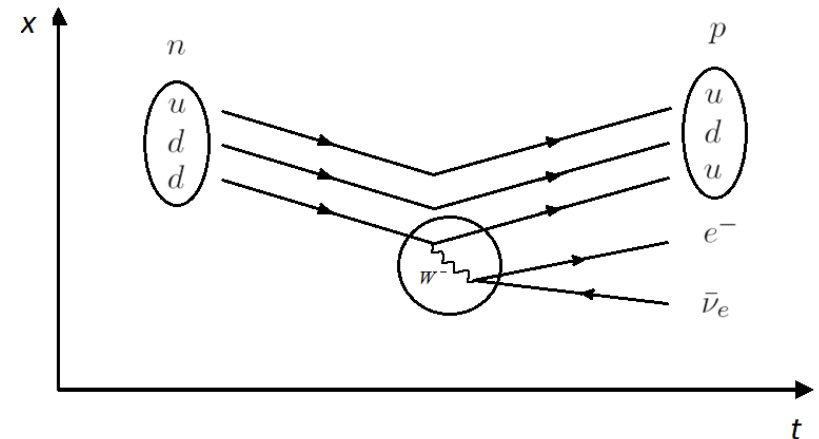


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

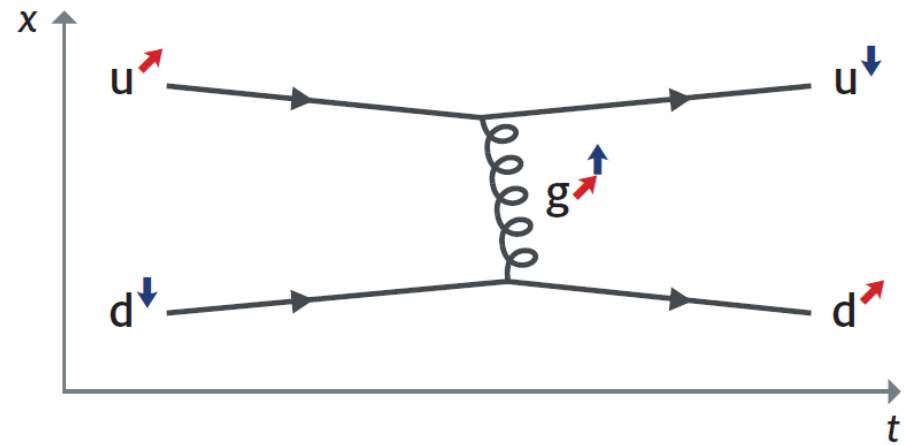
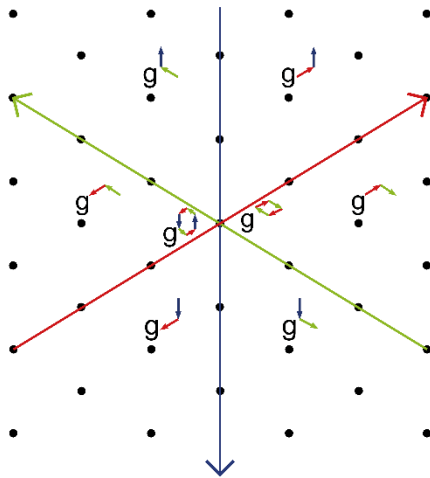
► Schwache Wechselwirkung

- 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

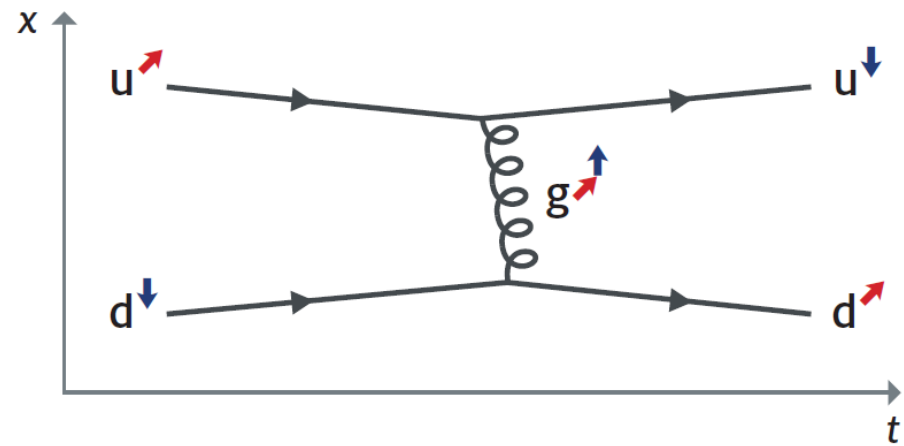


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

▶ Starke Wechselwirkung

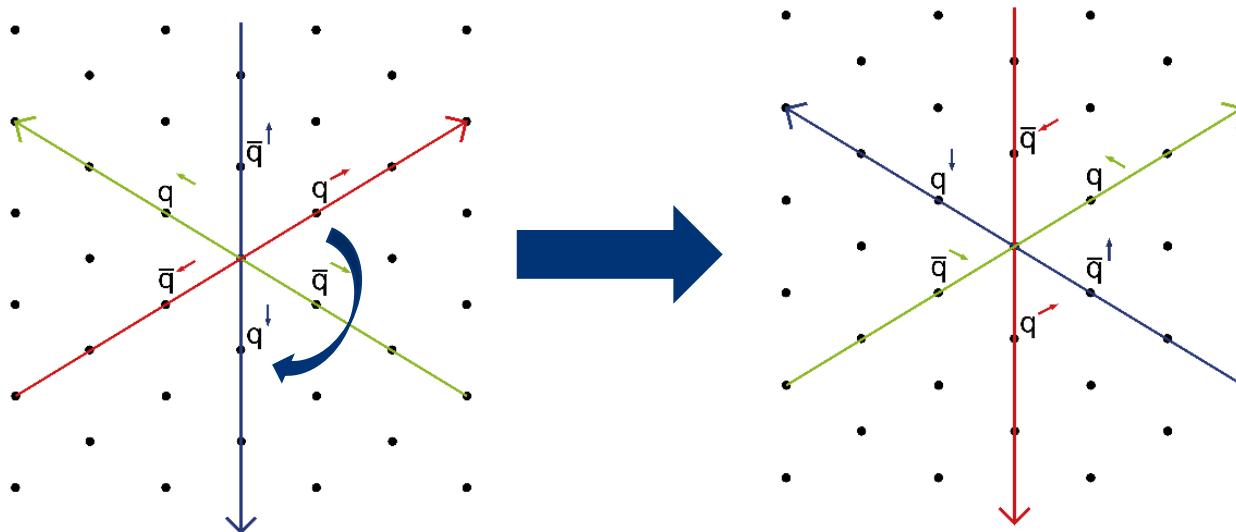
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks: Quarks bilden **Triplets** bezüglich der starken Ladung

▶ $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

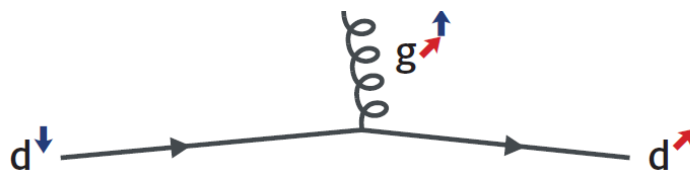


Umwandlung innerhalb Multipletts

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



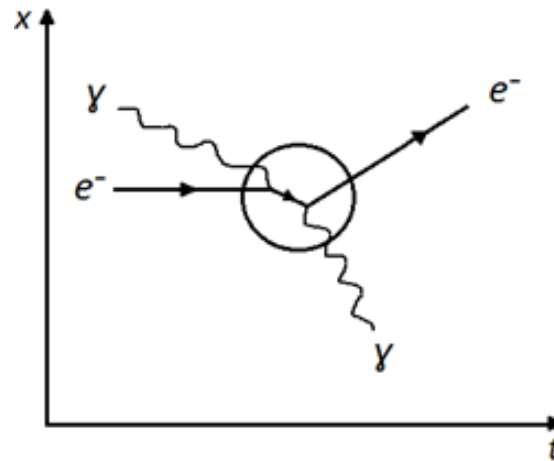
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



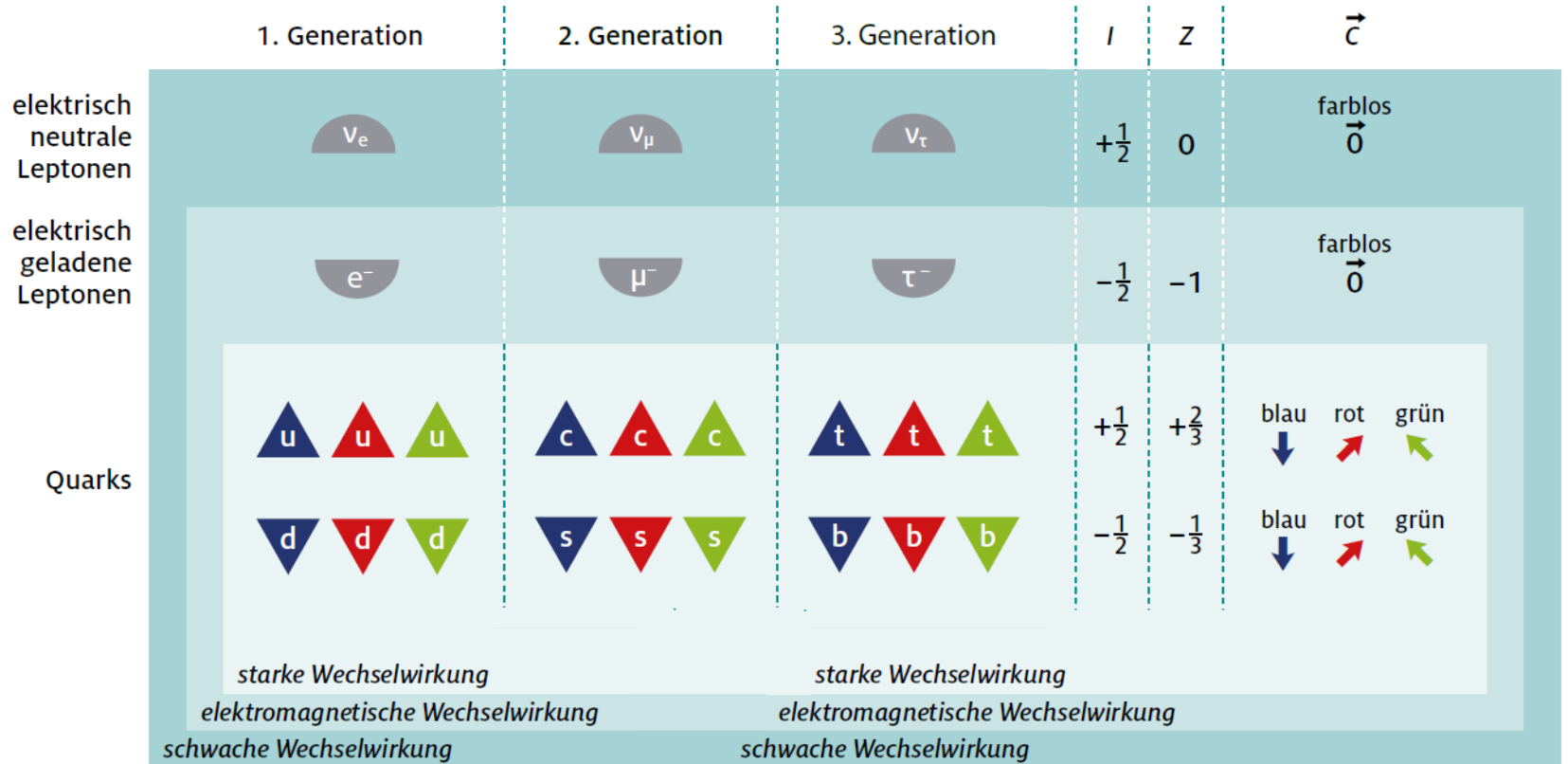
Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Elektromagnetische Wechselwirkung

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

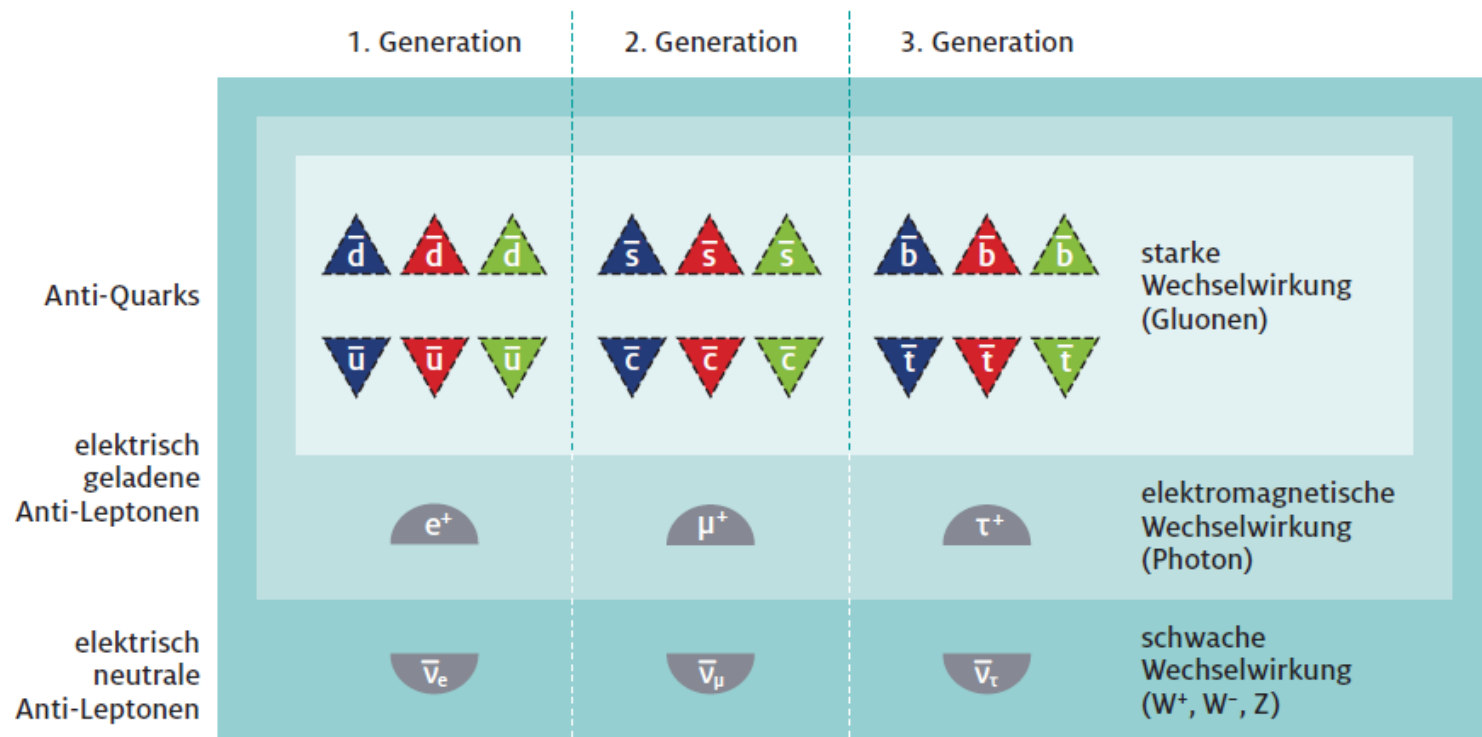


Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



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)

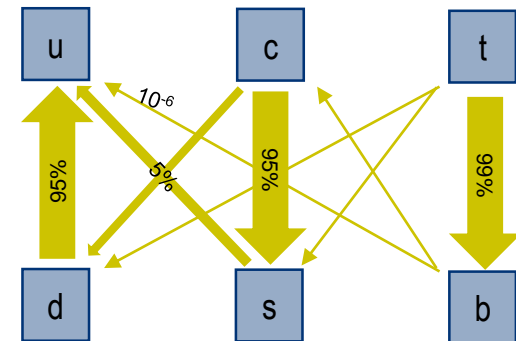
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0,975} & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & \mathbf{0,974} & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & \mathbf{0,999} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

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

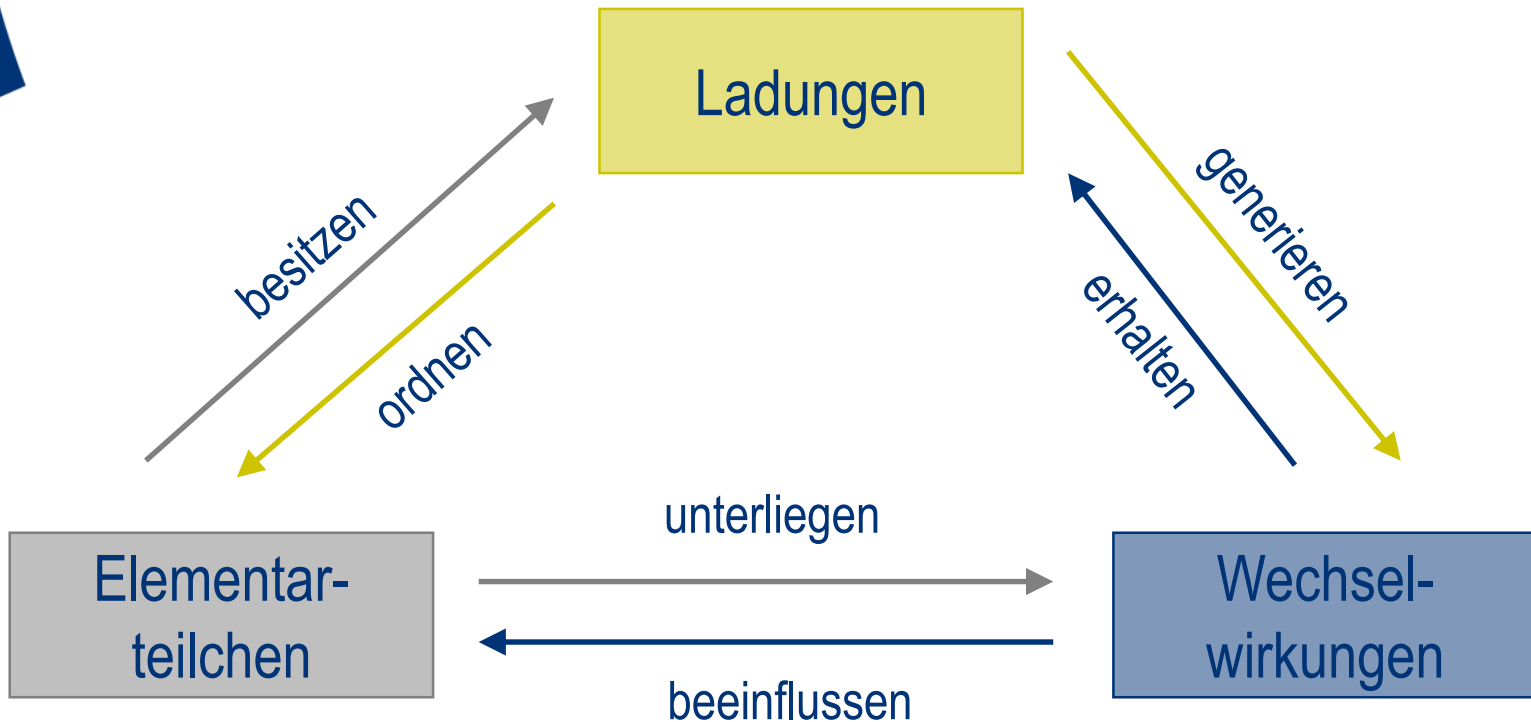
- ▶ **Die Mischungen der Quarks** in der schwachen Wechselwirkung **sind eher klein**
 - Größte Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des jeweiligen Multipletts
- ▶ **Die Mischungen der Neutrinos** in der schwachen Wechselwirkung **sind dagegen fast maximal**
 - Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-(PMNS)-Matrix
 - → 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

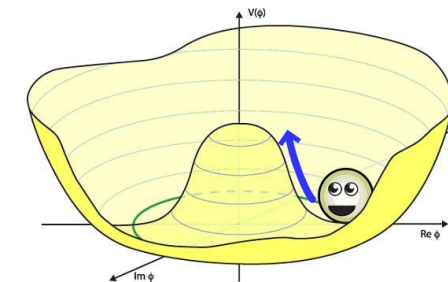
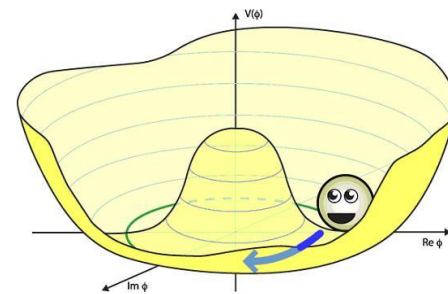
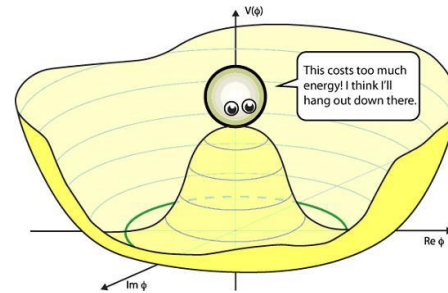
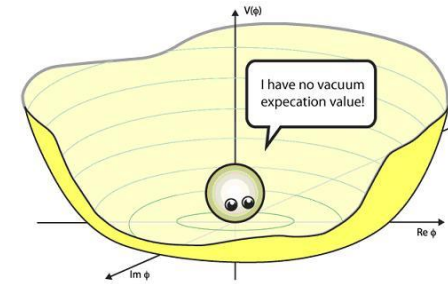
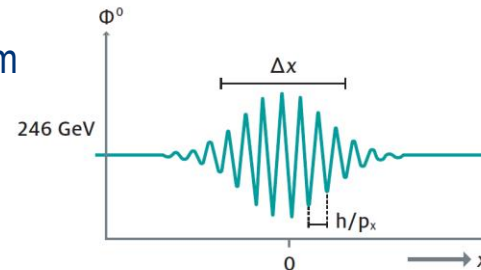
- Symmetrisches Potential
Grundzustand symmetrisch
- Symmetrisches Potential
Grundzustand nichtsymmetrisch

► 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

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



www.facebook.de/teilchenwelt/



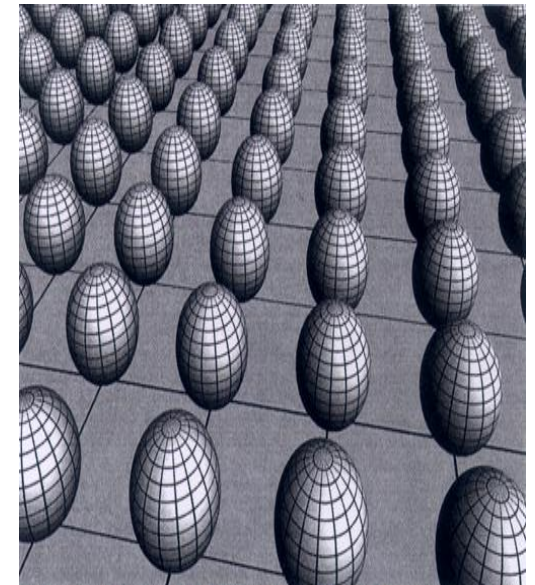
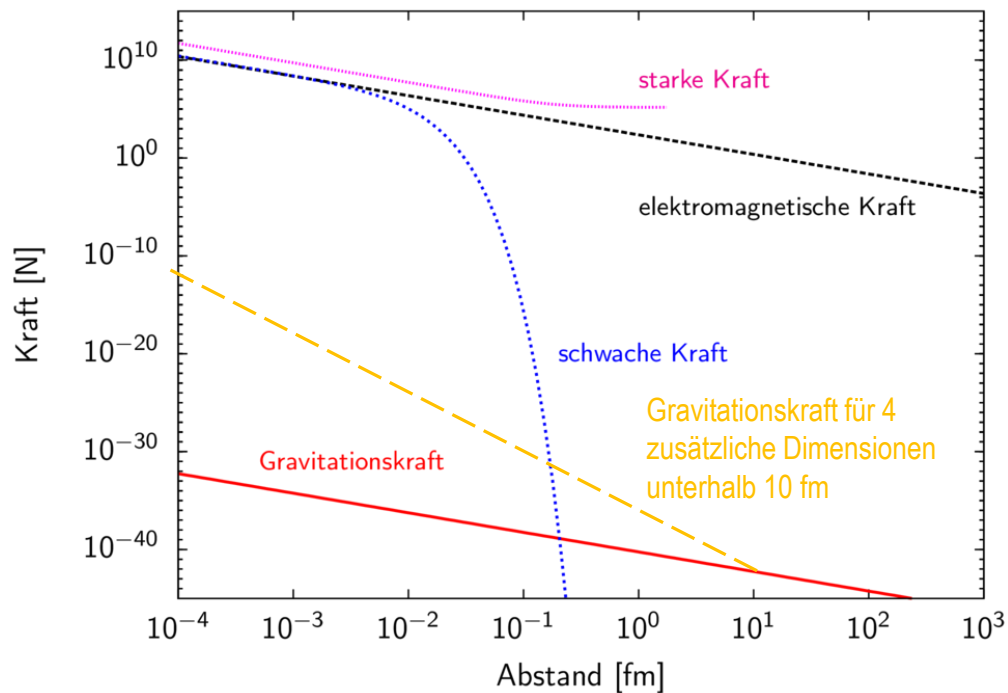
NETZWERK
TEILCHENWELT

Diskussion / Fragen



Spekulationen

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

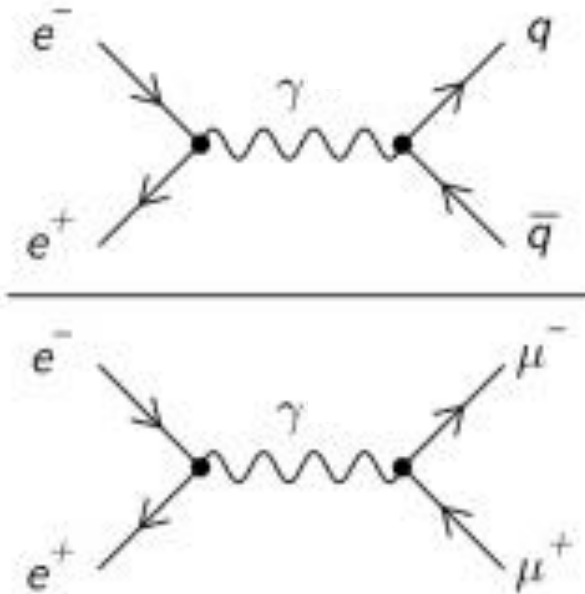


Anzahl der Farben

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

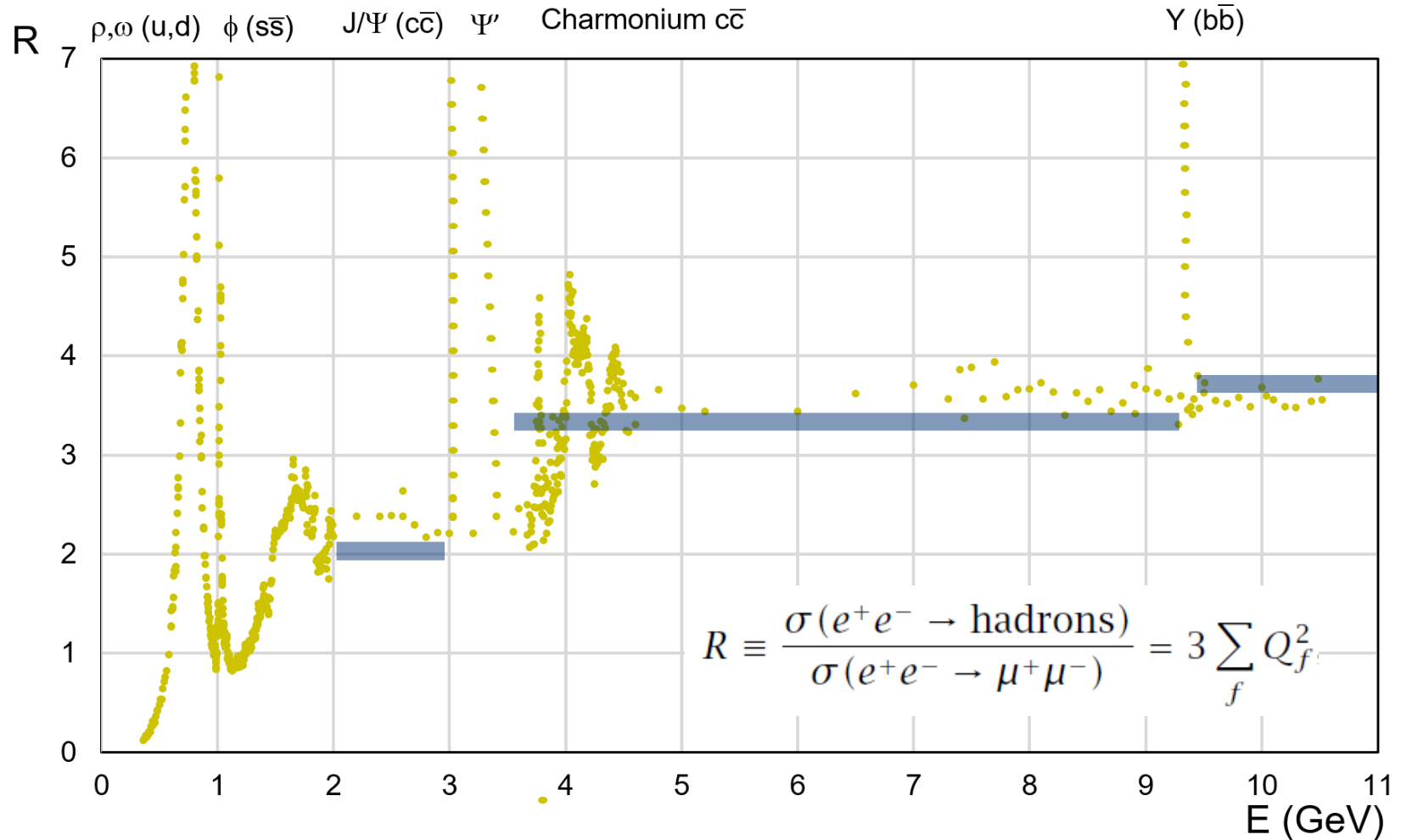
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

\approx



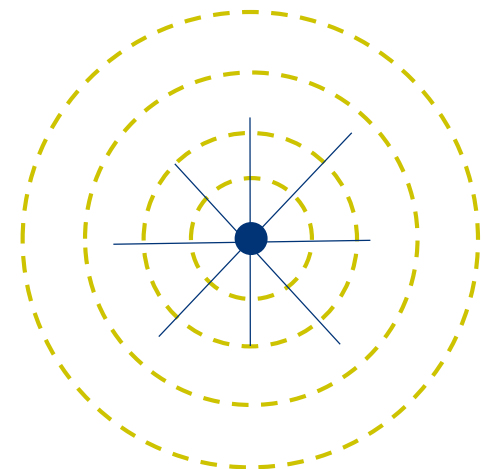
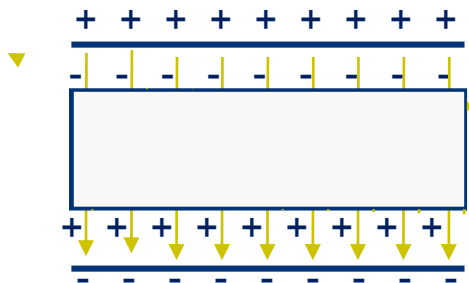
$$\begin{aligned}
 R &= 3[(2/3)^2 + (1/3)^2 + (2/3)^2] = 2 \text{ for } u, d, s \\
 &= 2 + 3(2/3)^2 = 10/3 \text{ for } u, d, s, c, \\
 &= 10/3 + 3(1/3)^2 = 11/3 \text{ for } u, d, s, c, b.
 \end{aligned}$$

Anzahl der Farben



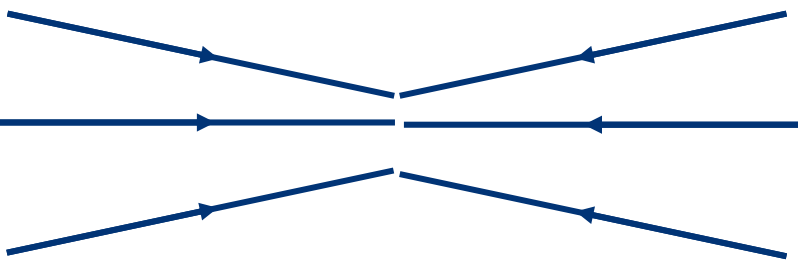
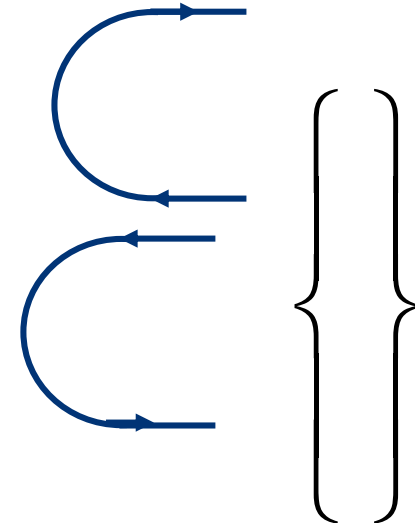
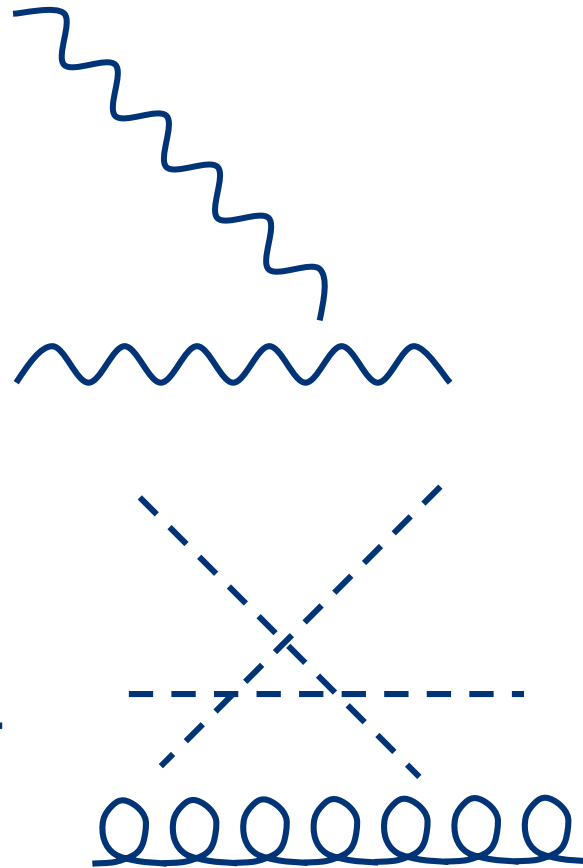
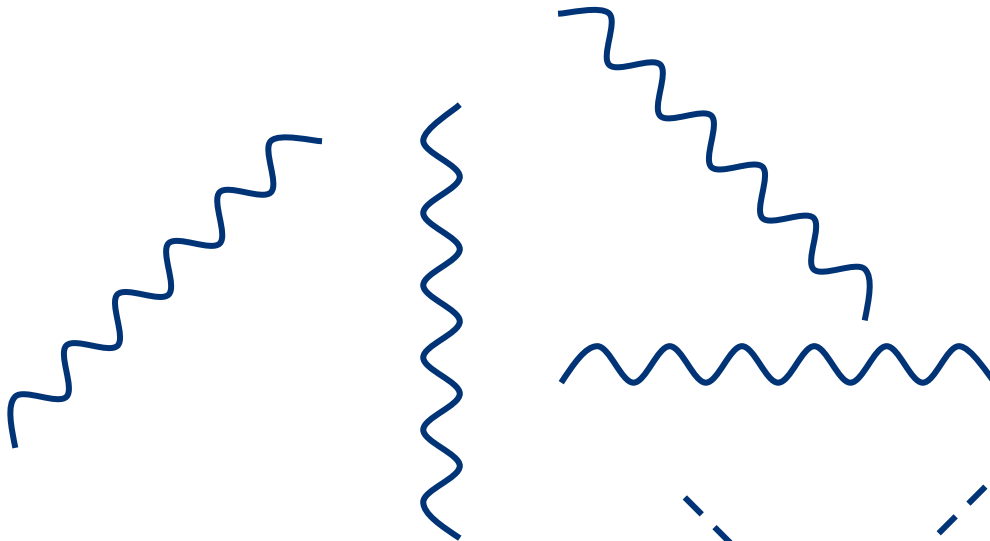
Schwache Wechselwirkung

- ▶ 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^+ γ
 p^- p^+ n^0
 π^- π^+ π^0
 $\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_\tau$ $\bar{\nu}_\mu$
 W^- W^+



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“

