

Auffrischung – Das Standardmodell



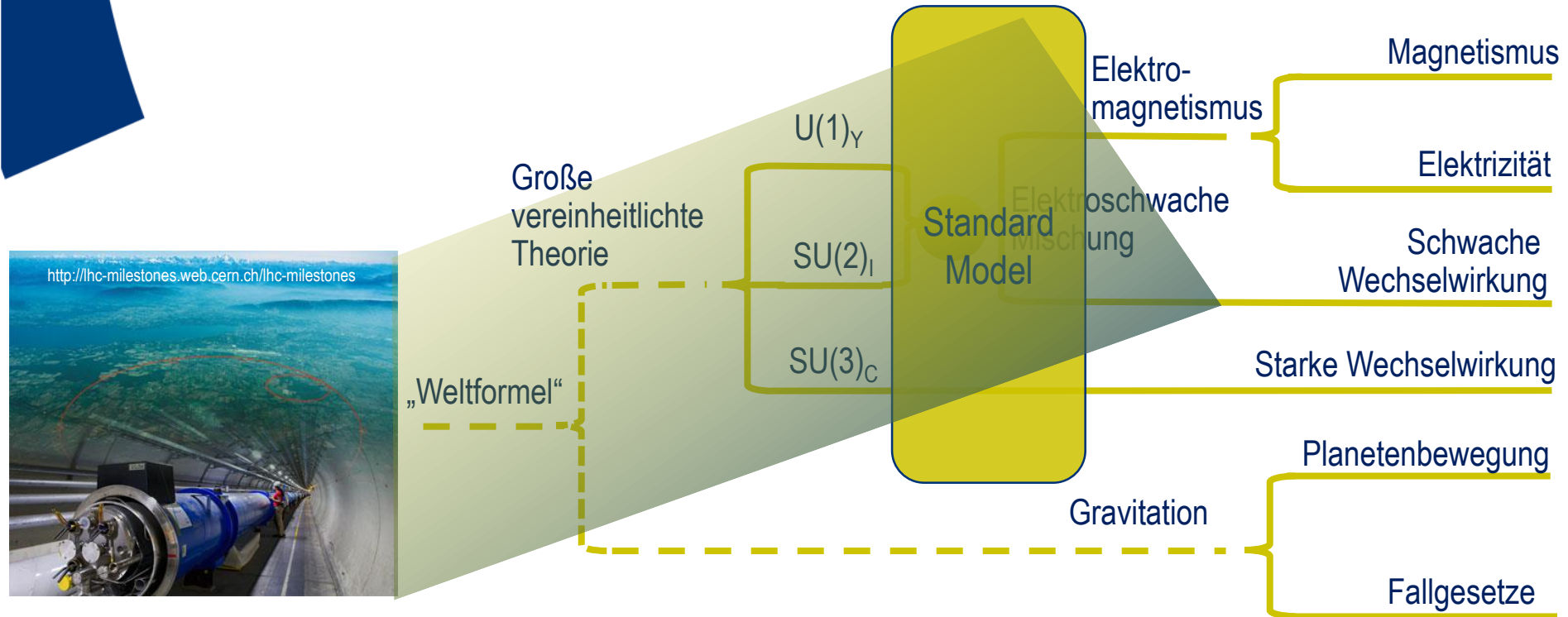
DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Philipp Lindenau, Sebastian Fabianski
CERN Summer School | 22.-27.07.2019



NETZWERK
TEILCHENWELT

Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



Vereinheitlichungen

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

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



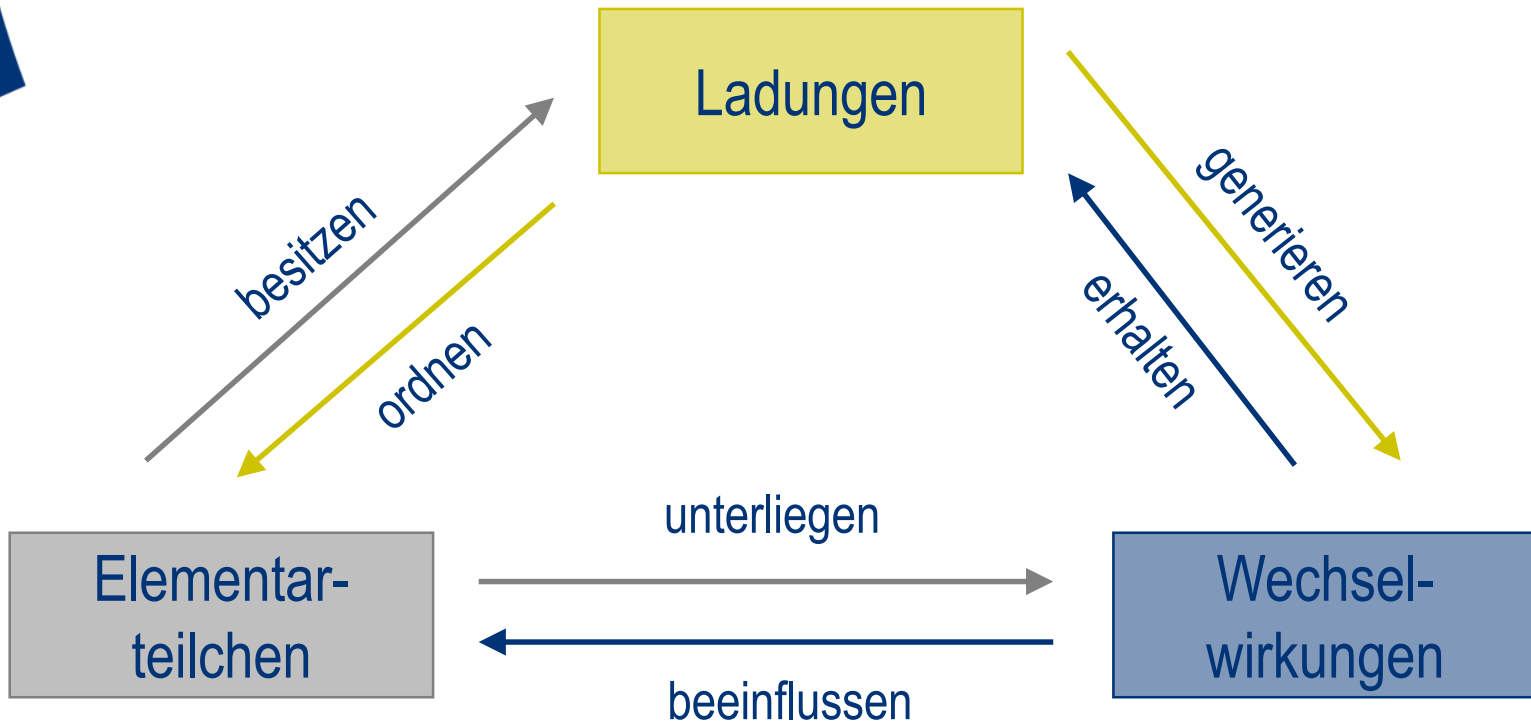
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**

Das Standardmodell der Teilchenphysik

► Das Standardmodell

- Elegantes Theoriegebäude („Quantenfeldtheorie“) mit großer Vorhersagekraft
angereichert mit experimentellen Erkenntnissen
- Separate Vorträge am Dienstag/Mittwoch von Robert Harlander
- Grundlage: Fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
- Separater Vortrag am Dienstag vom Michael Kobel
- Beschreibt alle bekannten Wechselwirkungen auf Teilchenebene
- Wurde 1960er und 1970er Jahren entwickelt.
Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt

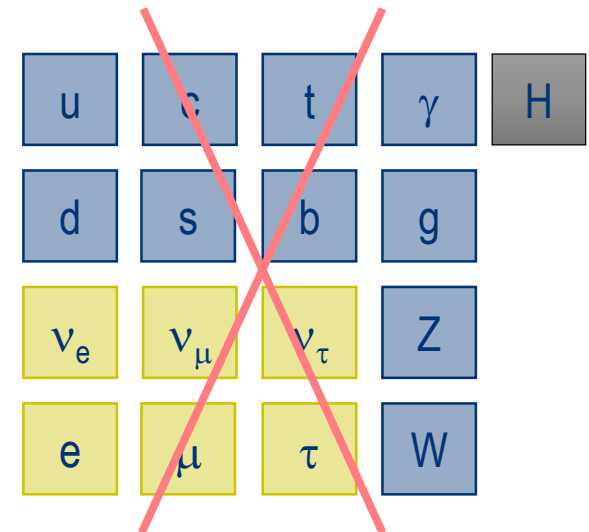
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



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!)

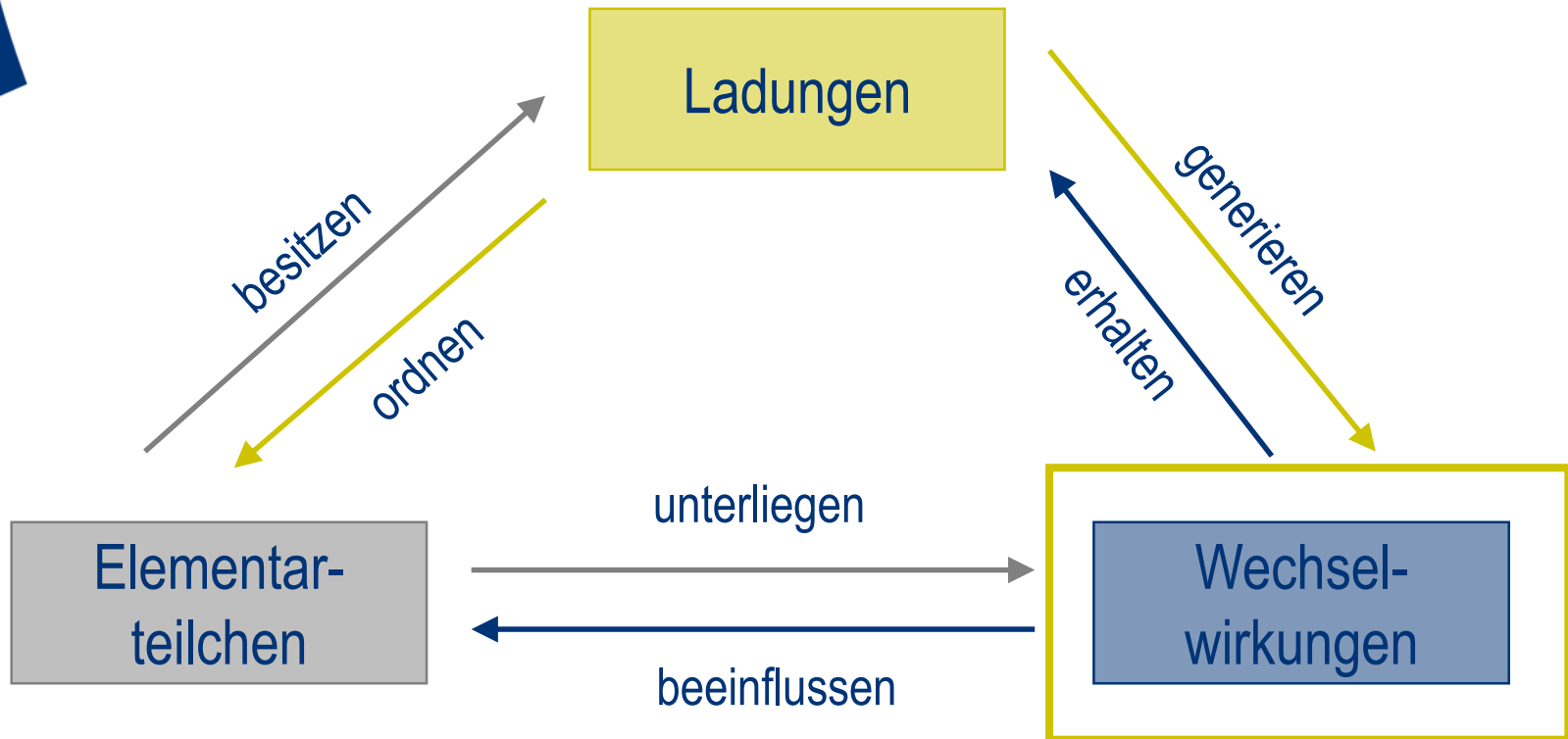


Das Standardmodell der Teilchenphysik

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

| | | | | |
|---------|-----------|------------|----------|---|
| u | c | t | γ | H |
| d | s | b | g | |
| ν_e | ν_μ | ν_τ | Z | |
| e | μ | τ | 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. 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,
...



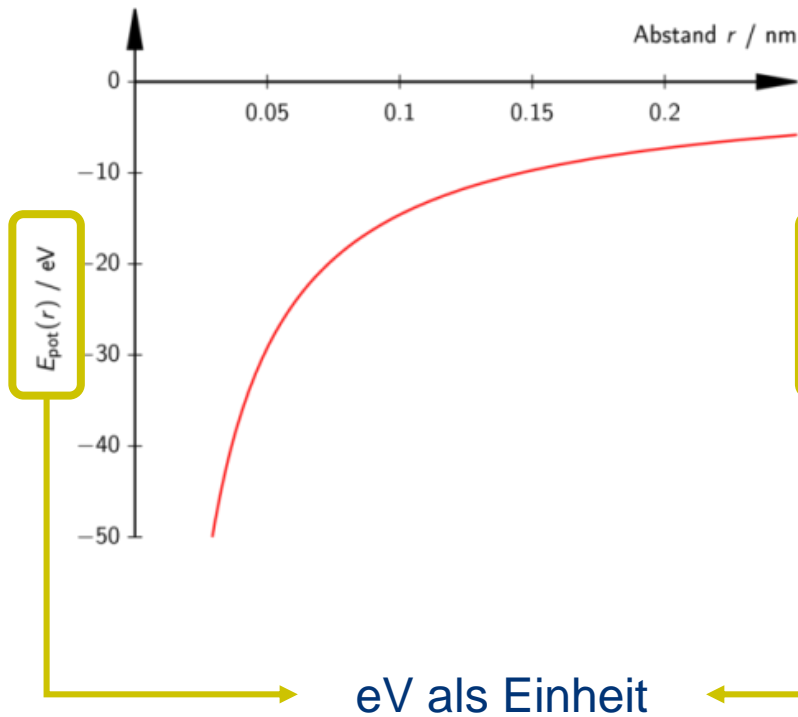
**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**



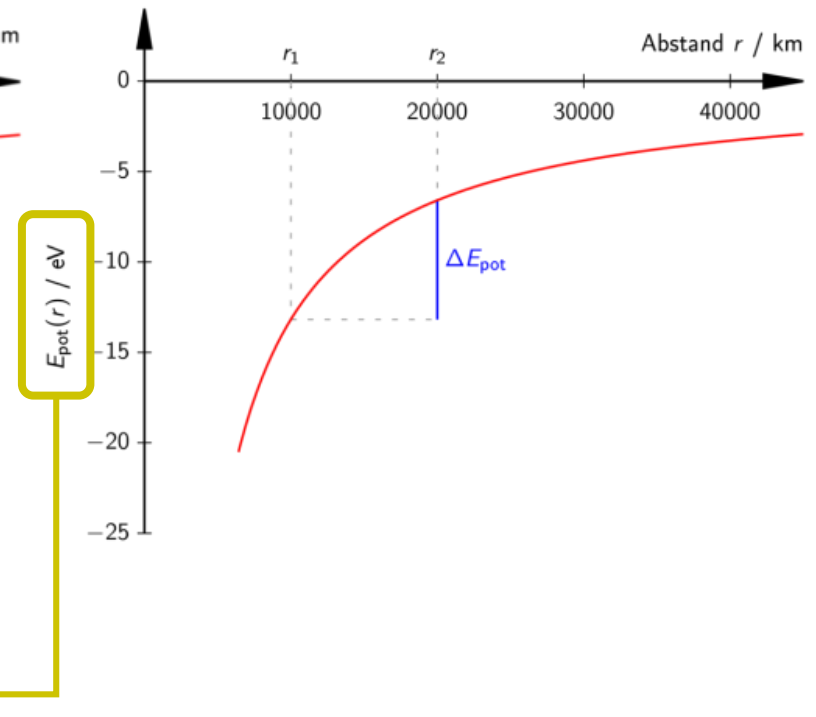
**Standardmodell
(ohne Gravitation)**

Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



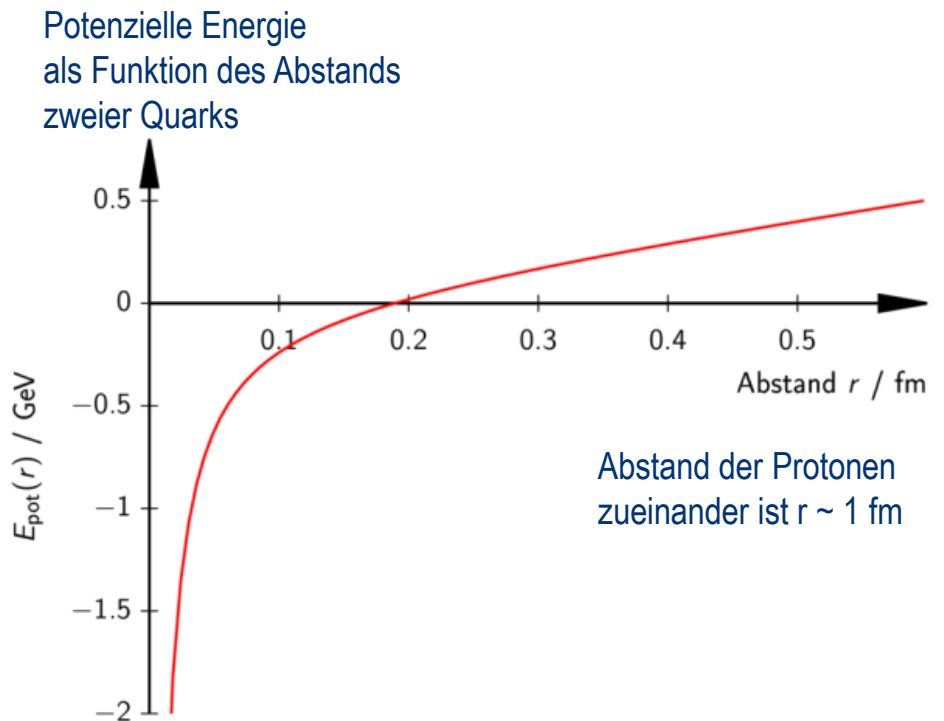
► Gravitation (O_2 und Erde)



Die Starke Wechselwirkung

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

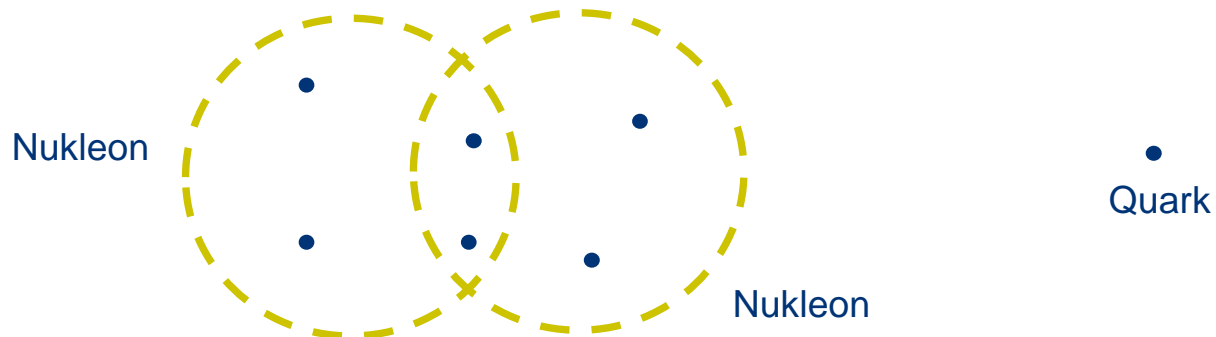
- ▶ **Substruktur:**
Nukleonen bestehen aus Quarks, die „neue“ starke Wechselwirkung spüren.
Kernkraft geht auf diese Substruktur zurück
(Ähnlich Molekül ↔ Atom)



Bindung von Nukleonen

► Zusammenhalt von Nukleonen analog zur Elektronenpaarbindung bei Atomen

- Kurze Abstände: Nukleonen im Kern „teilen“ sich kurzzeitig ein Quark-Paar



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

Die Schwache Wechselwirkung

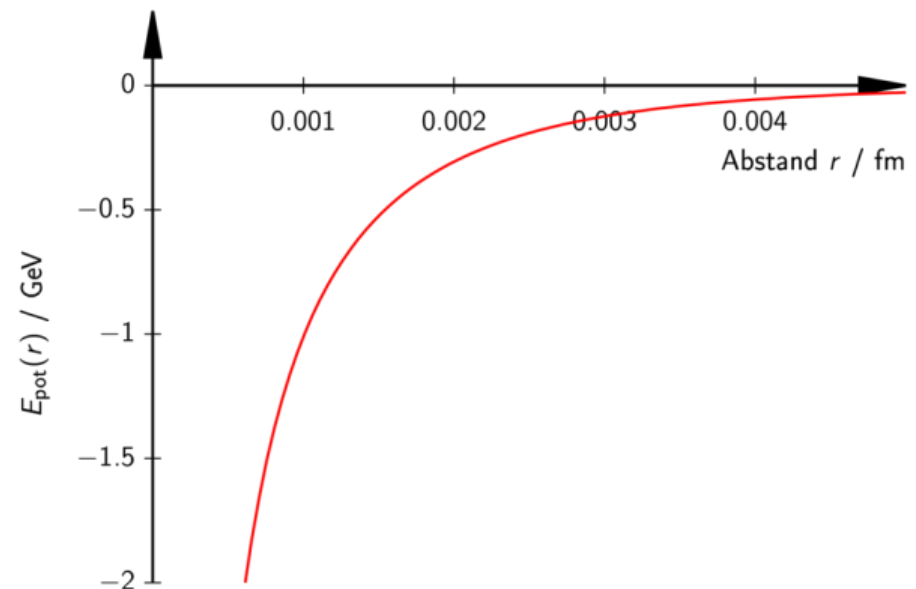
► Warum scheint die Sonne?

- 4 Protonen fusionieren zu ${}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$
- Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?

► Einführung:

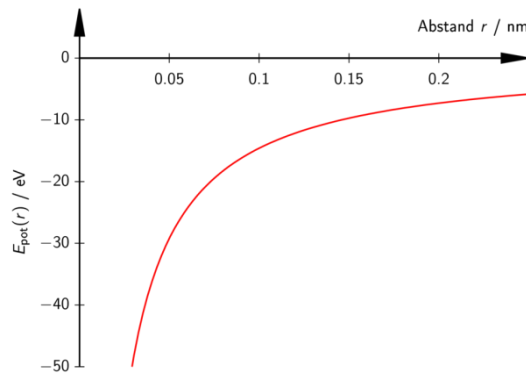
schwache Wechselwirkung
(z.B. Quarks der Nukleonen bei
 $r \sim 0.001 \text{ fm}$)

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

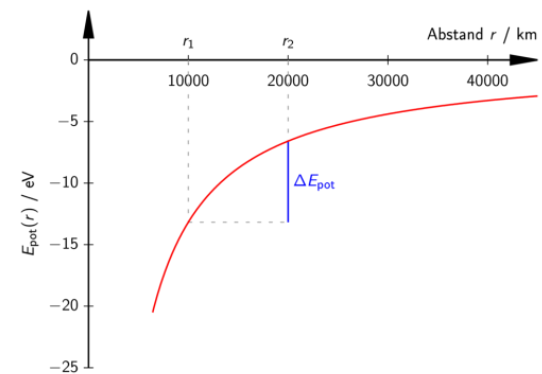


Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

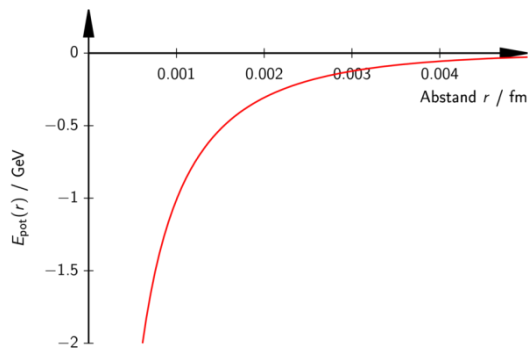
► Elektromagnetische WW



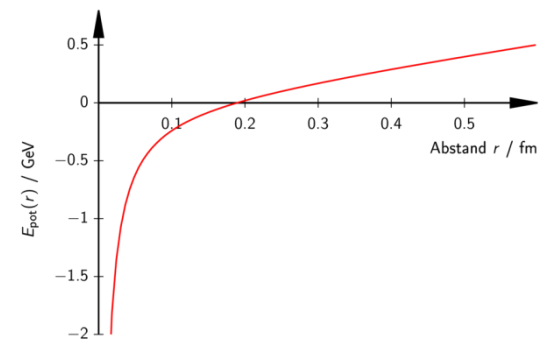
► Gravitation



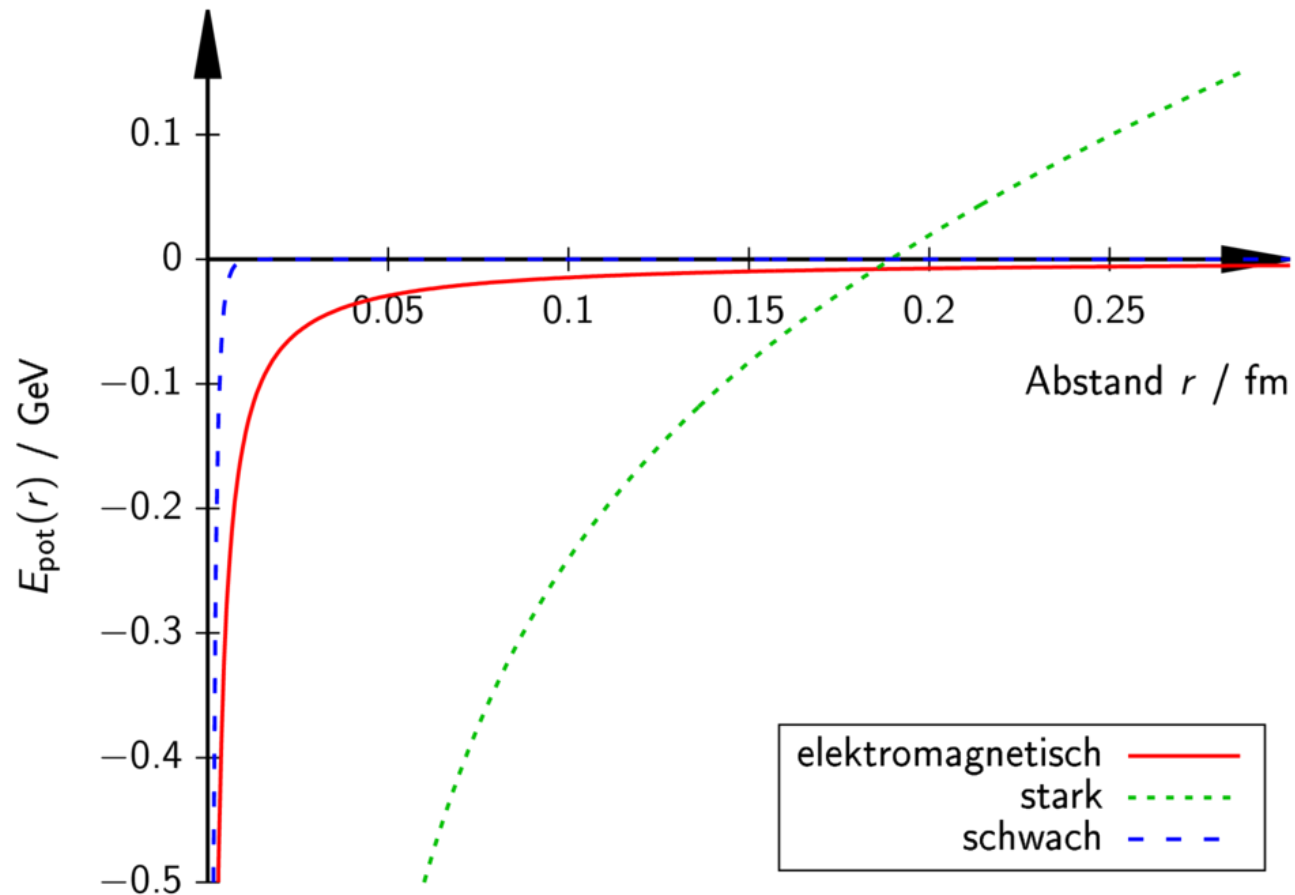
► Schwache WW



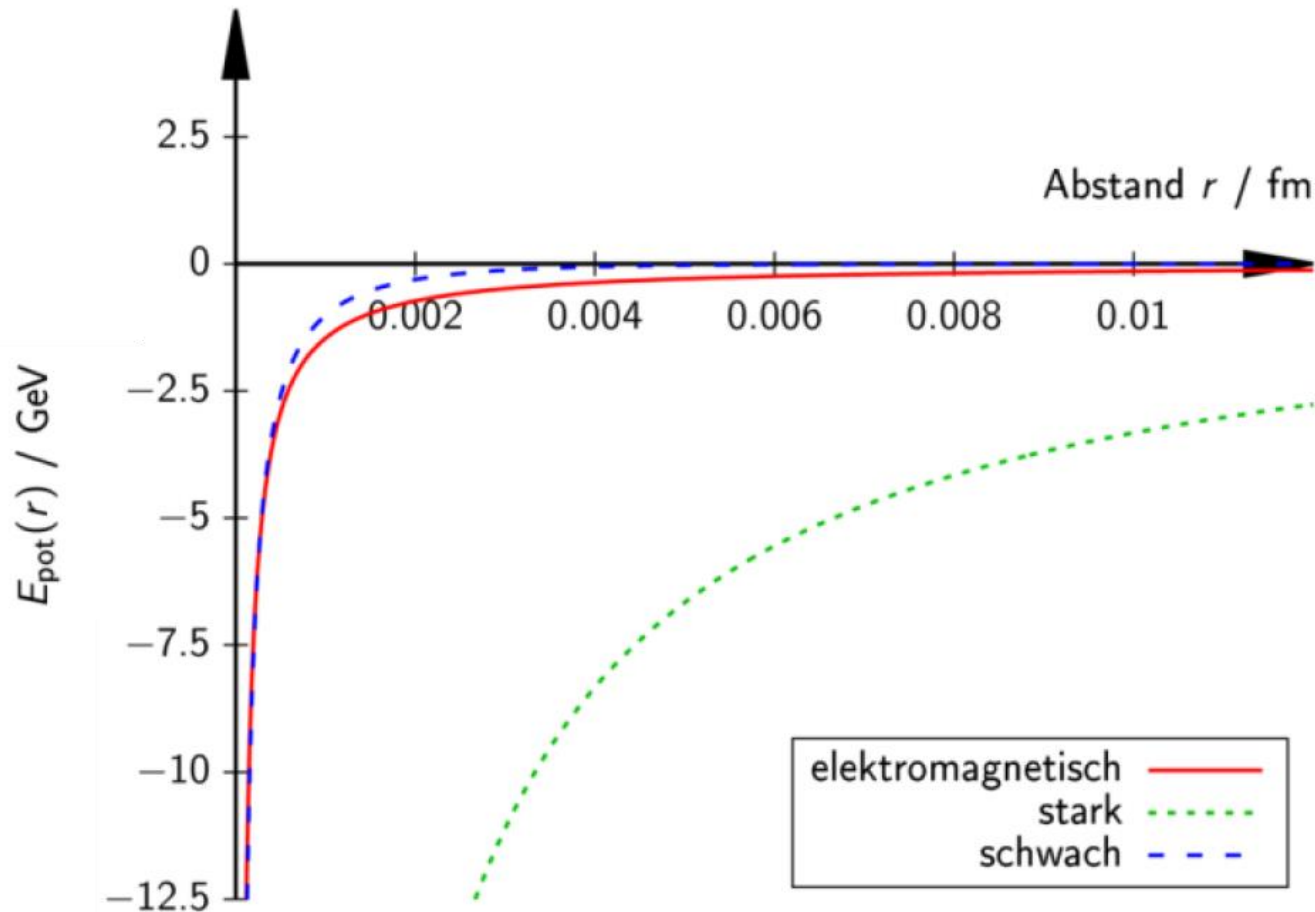
► Starke WW



Vergleich der potenziellen Energien



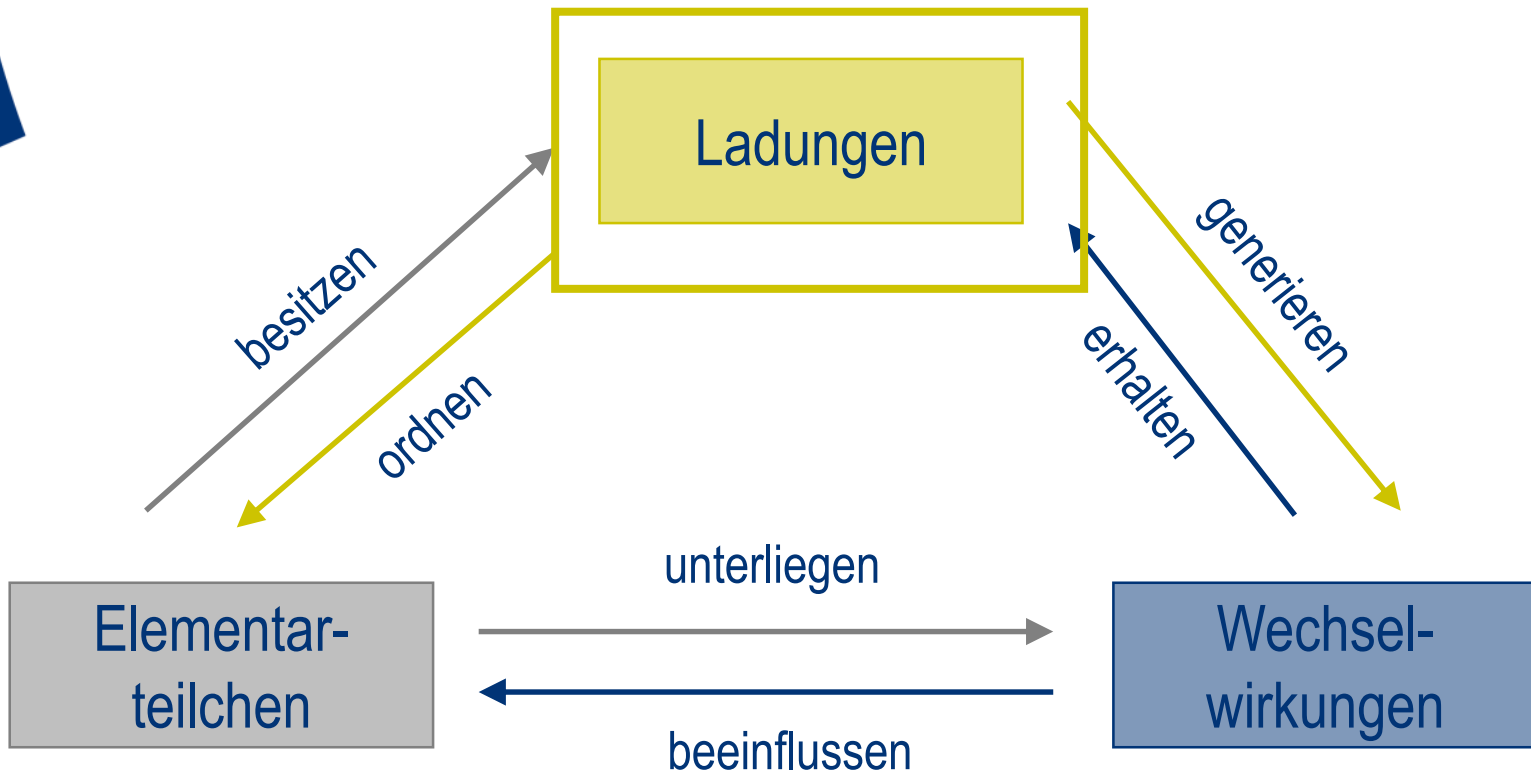
Vergleich der potenziellen Energien bei sehr kleinen Abständen (Achsen jeweils mit Faktor 25 gedehnt bzw gestaucht)



Potenzielle Energien bei sehr kleinen Abständen

| Wechselwirkung | Potenzielle Energie |
|-------------------|---|
| gravitativ | $E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$ |
| 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 |
|-------------------|-------------------------------------|
| 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
 - ▶ Wenn „Ladung“ gesagt wird, meinen wir die charakteristischen Ladungseigenschaften (L.-zahl oder –vektor)

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: $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$



Erweiterung: Konzept der Ladung

| 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 | $\alpha_w \approx \frac{1}{30}$ |

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

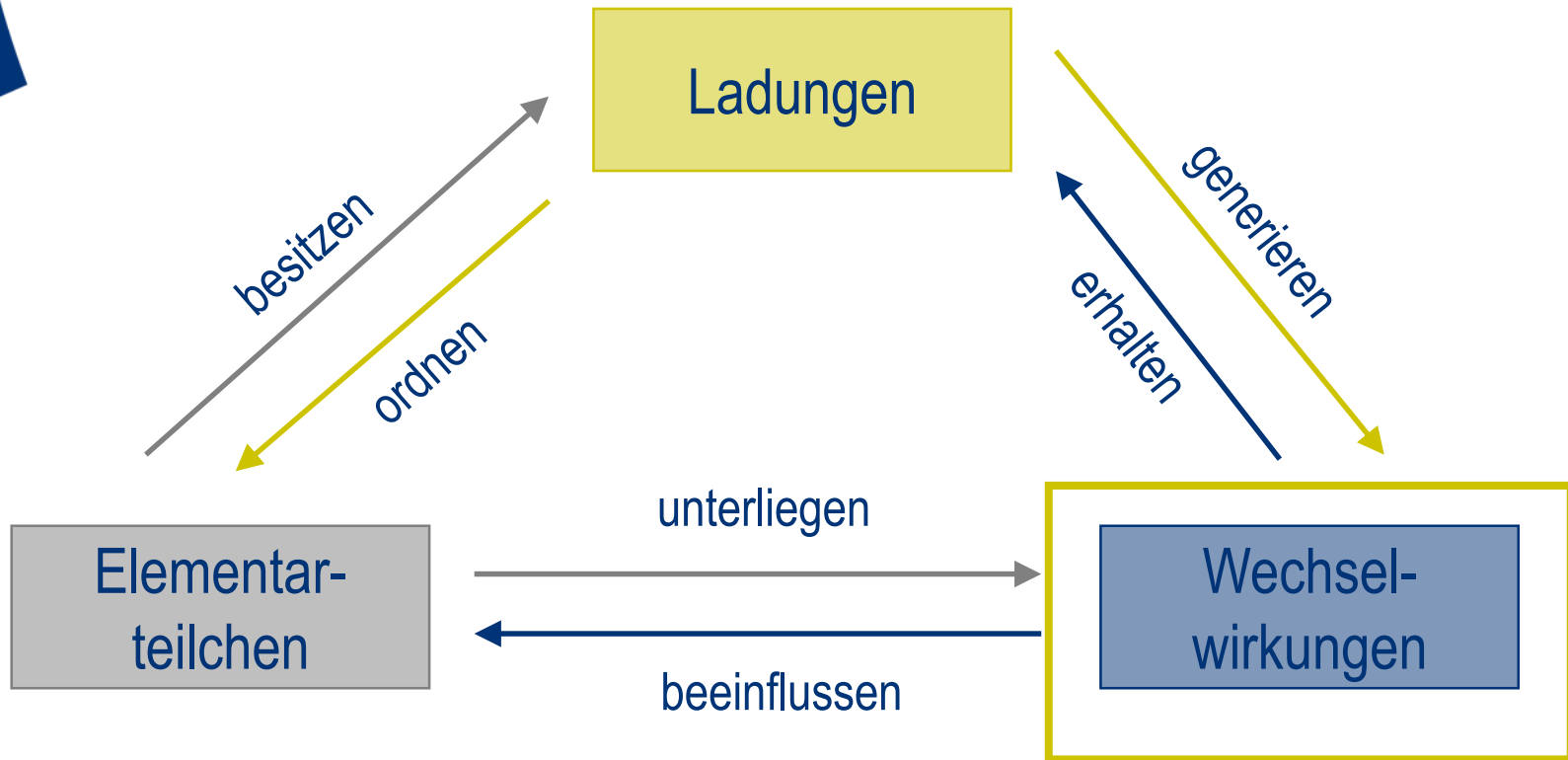
Konzept der Ladung

- ▶ 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

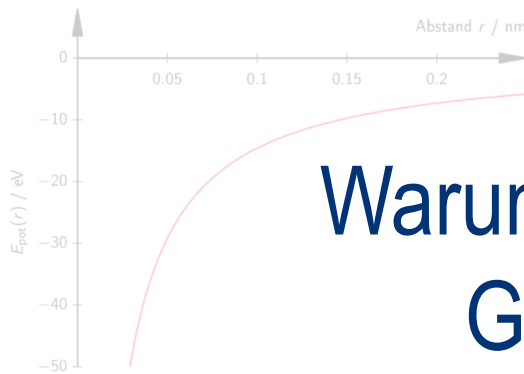
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

► Gravitation

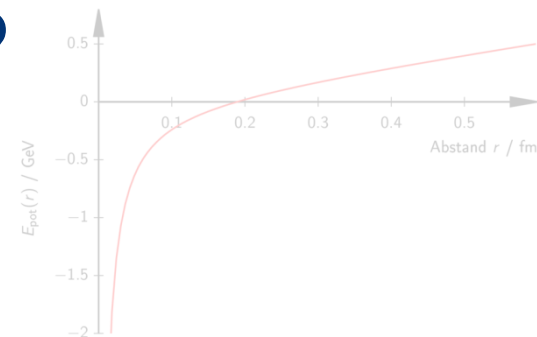
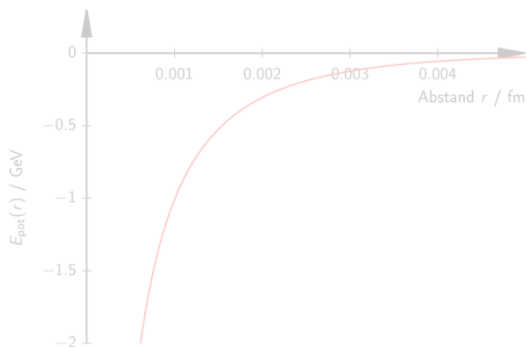


Warum erfahren wir nur
Gravitation und

► Schwache WW

Elektromagnetismus

im Alltag?



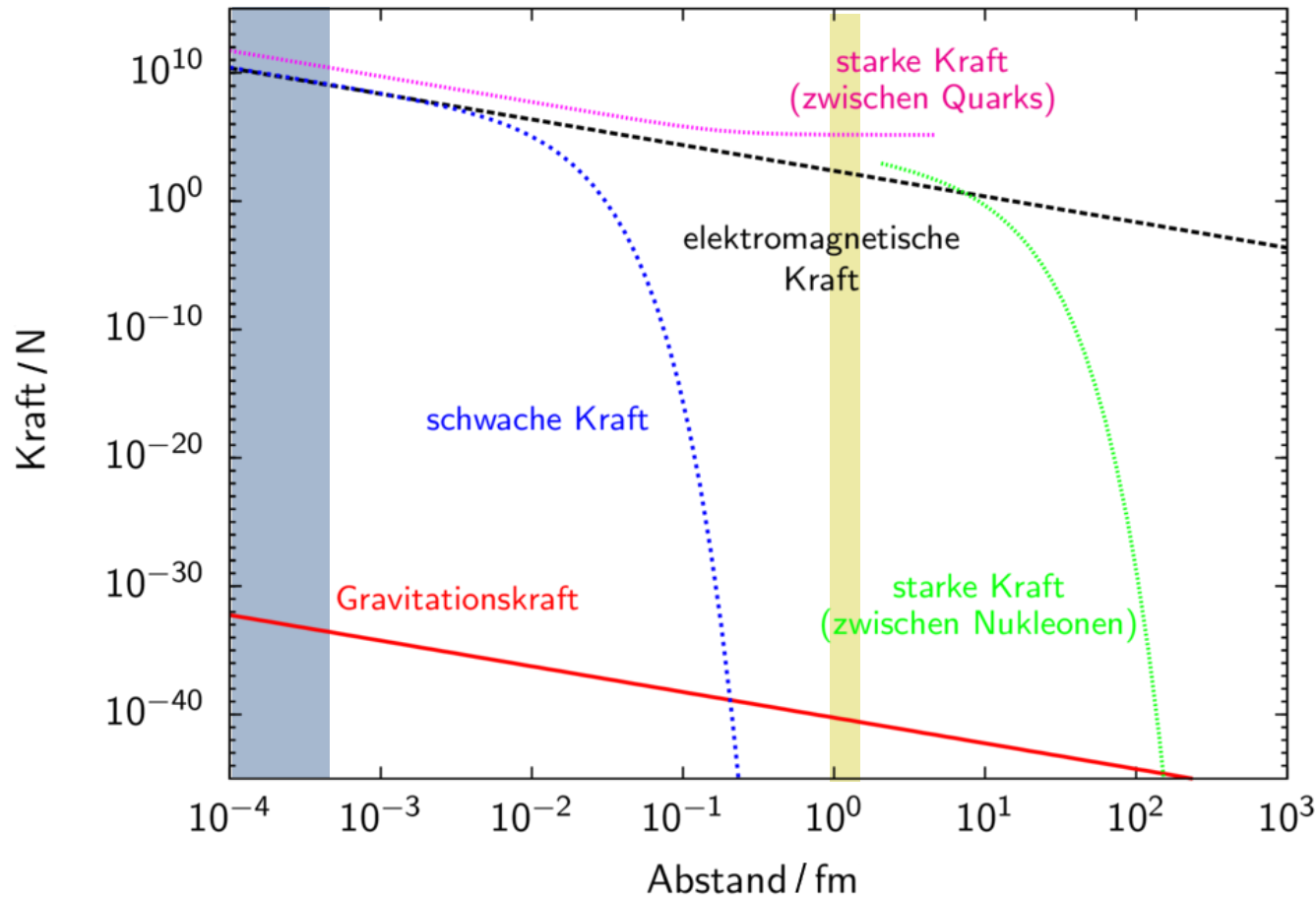
Kräfte der Wechselwirkungen

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

Grenze exper. Auflösung
(stark, schwach, em)

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

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



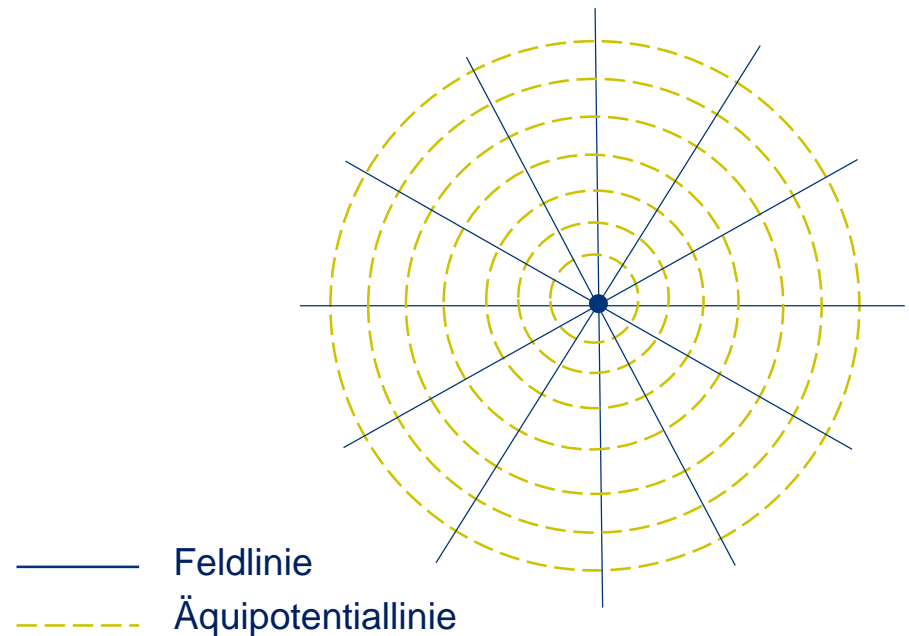
Warum erfahren wir nur

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

Gravitation und Elektromagnetismus im Alltag?

Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

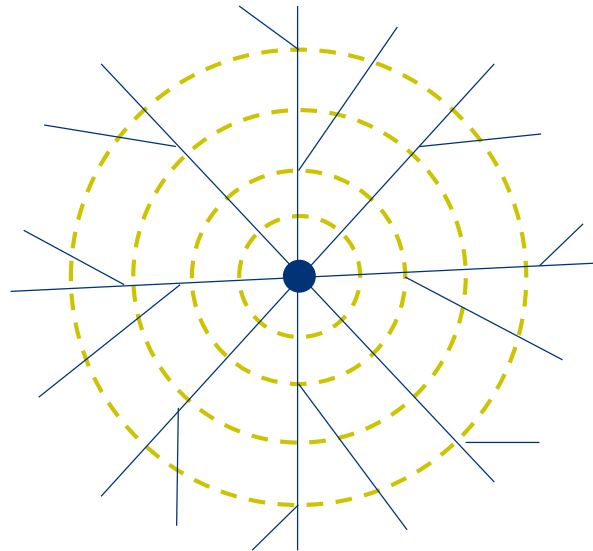
- ▶ Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW
- ▶ **Dichte** der Feldlinien ist **proportional** zur Kraft
 - Idee Ladung im Zentrum
 - Kugeloberfläche $A = 4\pi r^2$
 - $F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$
- ▶ Stimmt bei
 - $F_C = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$



Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

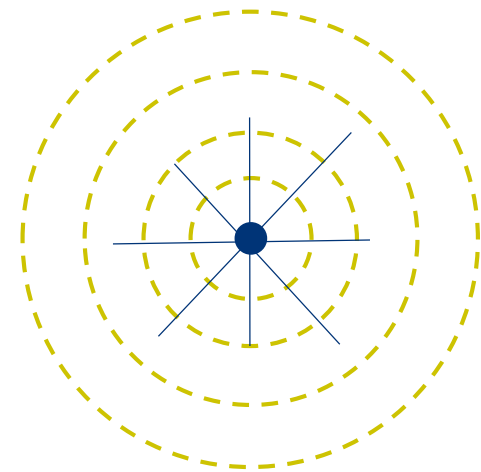
▶ Stark

- Kraft konstant →
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



▶ Schwach

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

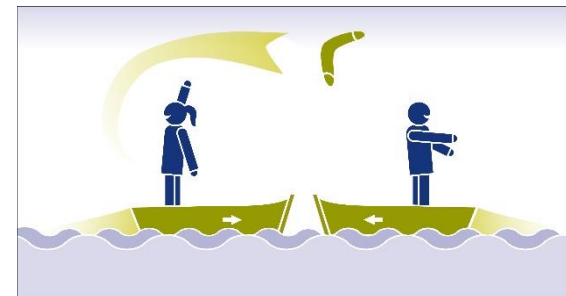
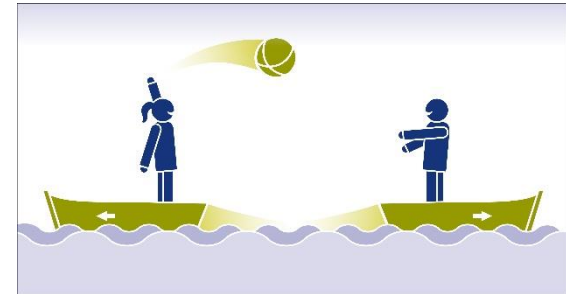


Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► 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

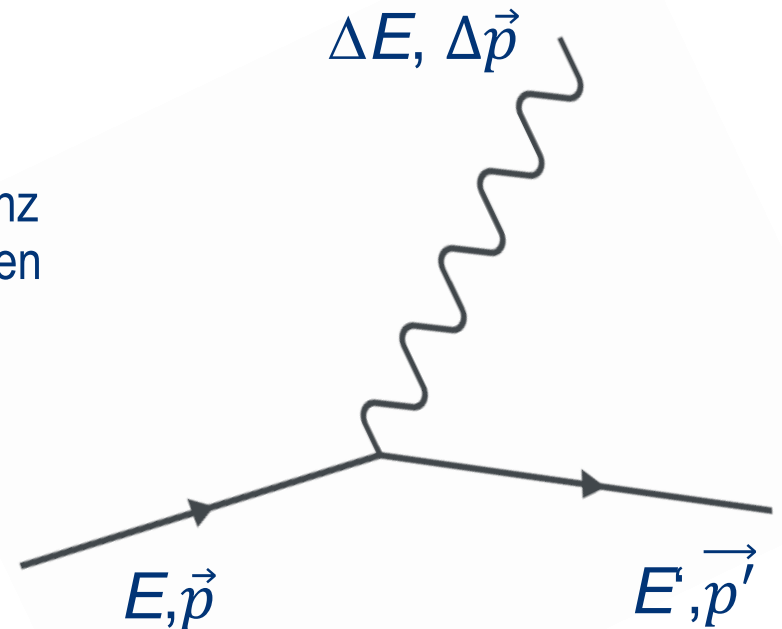


Übergang: Feldlinien zu Botenteilchen

► 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
- elektrisch neutral

▶ 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:

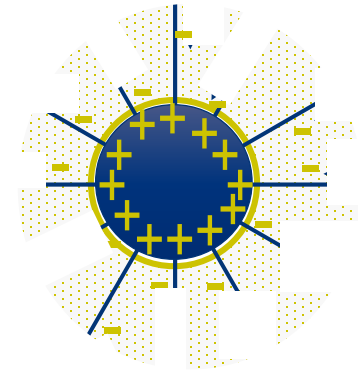
► Abschirmung von Feldlinien im Kugelkondensator

- 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

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



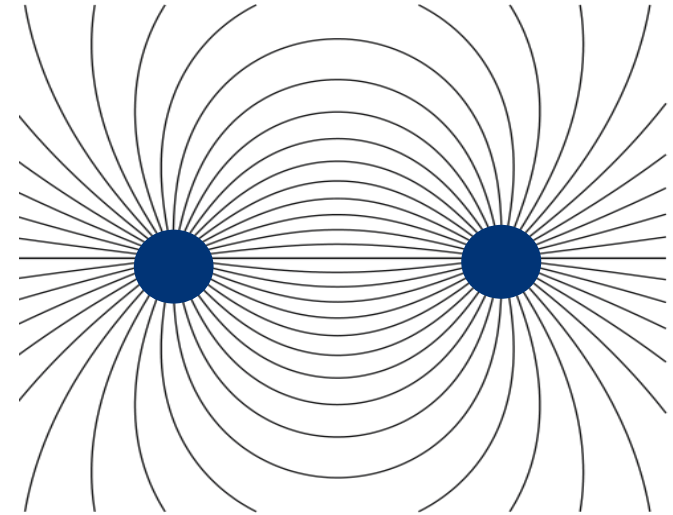
Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

- ▶ Botenteilchen (Photon) ist
 - masselos
 - elektrisch ungeladen

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

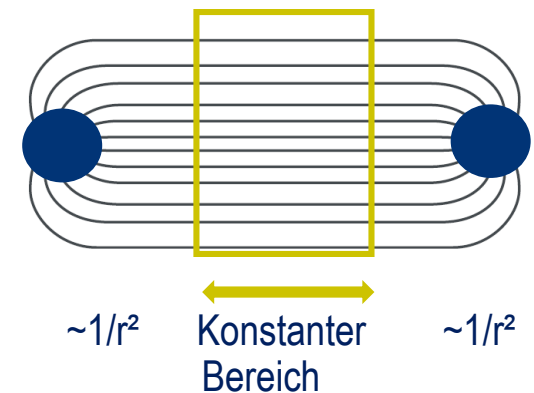
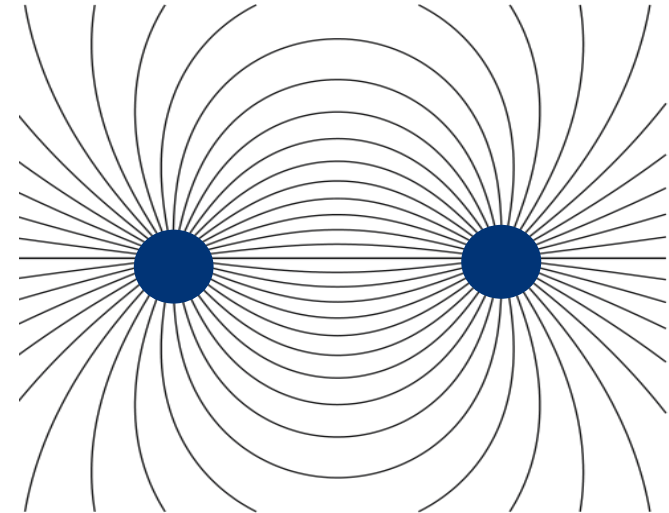
- ▶ Vergleich: Stark $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$

- ▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung



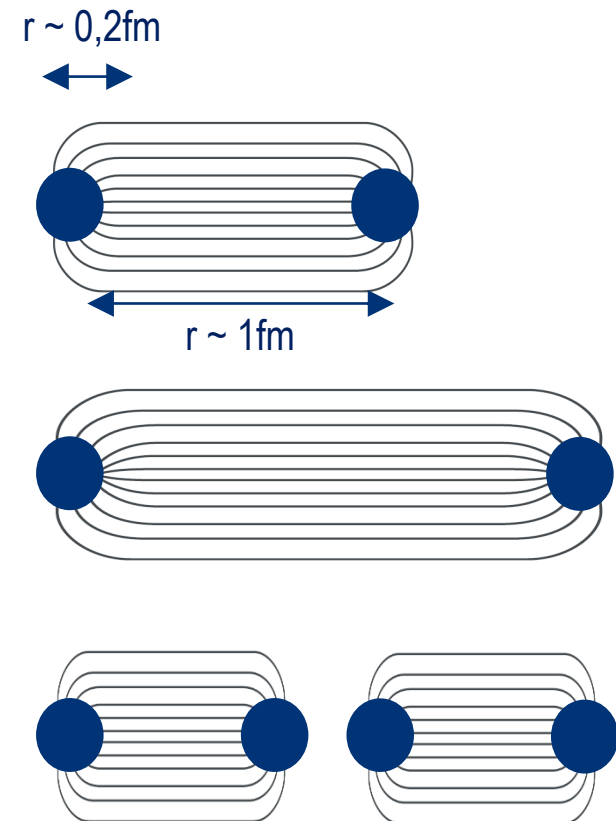
Starke Wechselwirkung

- ▶ $E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$
- ▶ Einführung: die Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst starke Ladung
 - Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen
 - Sie wechselwirken miteinander
 - Es entsteht ein „Feldlinienschlauch“
- ▶ 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!
- ▶ Einführung: „Confinement“



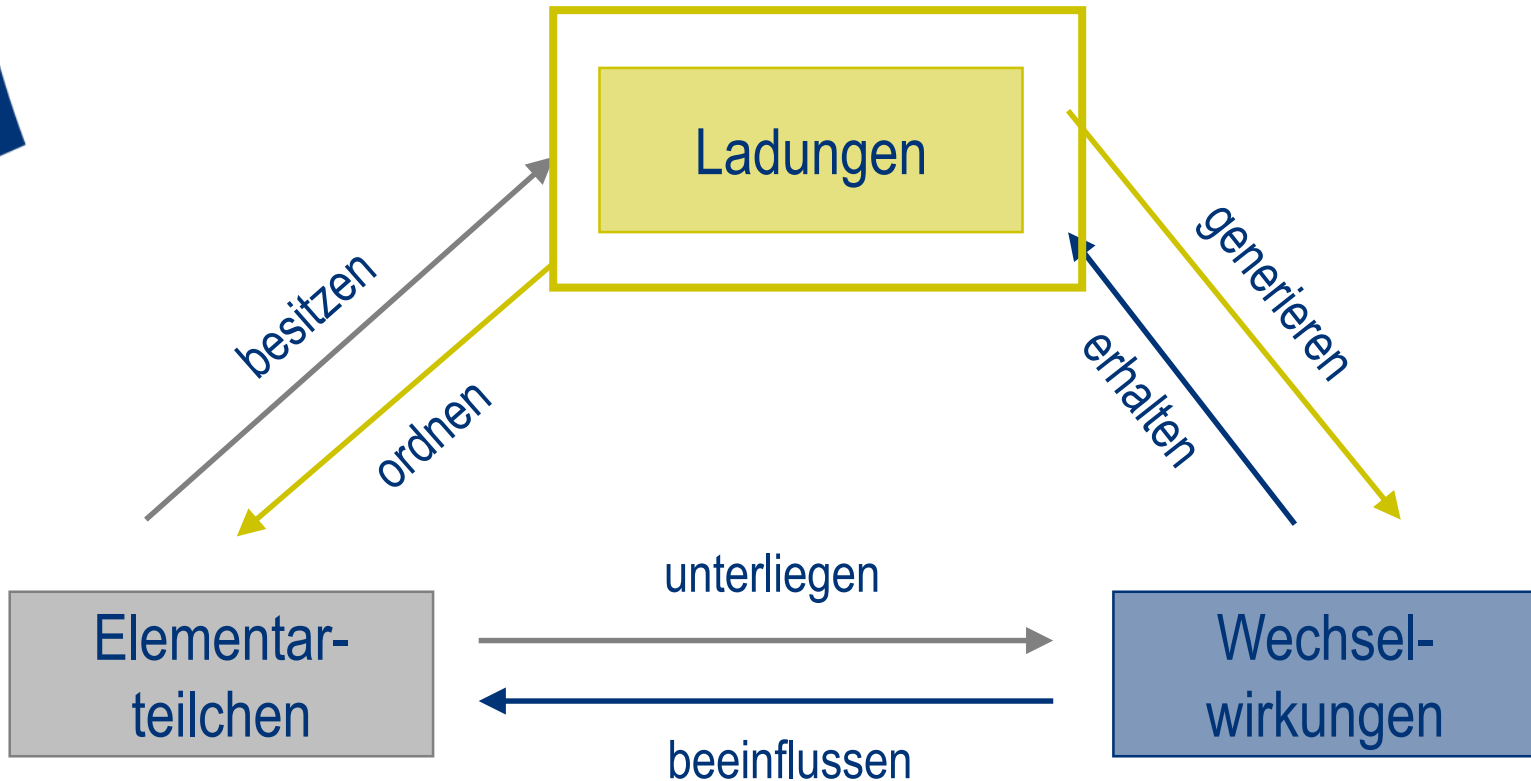
Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

| 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

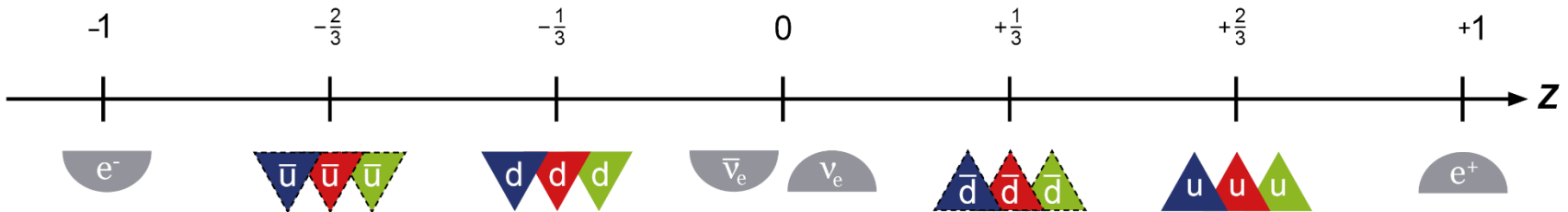
Und:

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

Elektrische Ladung

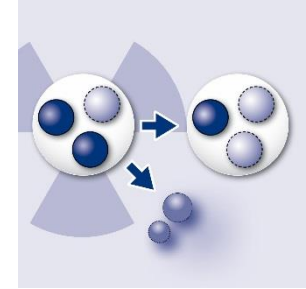


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen Z einiger Anti-/Materieteilchen

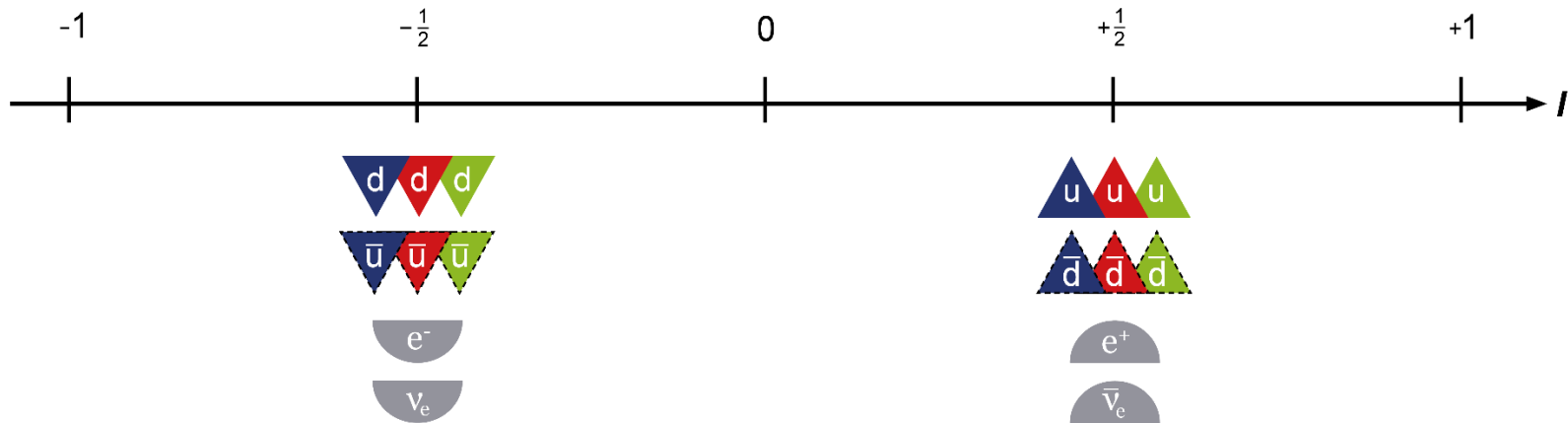


- Elektrische Ladung ist gequantelt

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

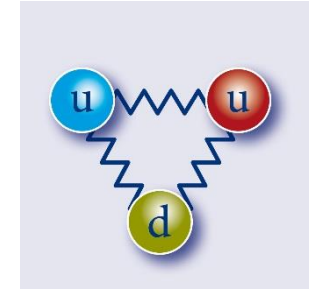
► Fachlicher Hinweis

- 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

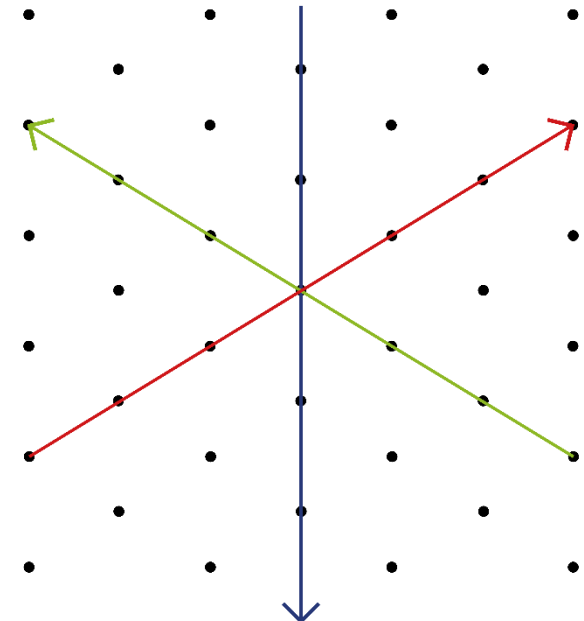
Starke Ladung

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



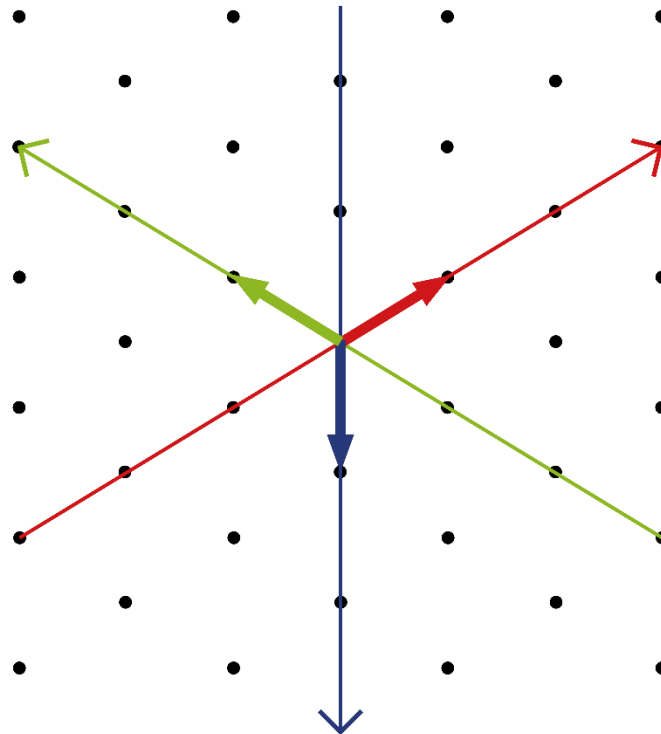
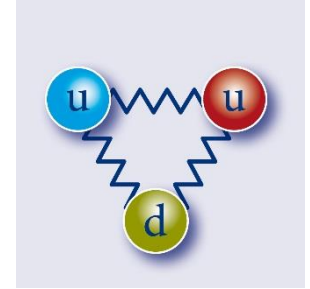
▶ Farbgitter:

- 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



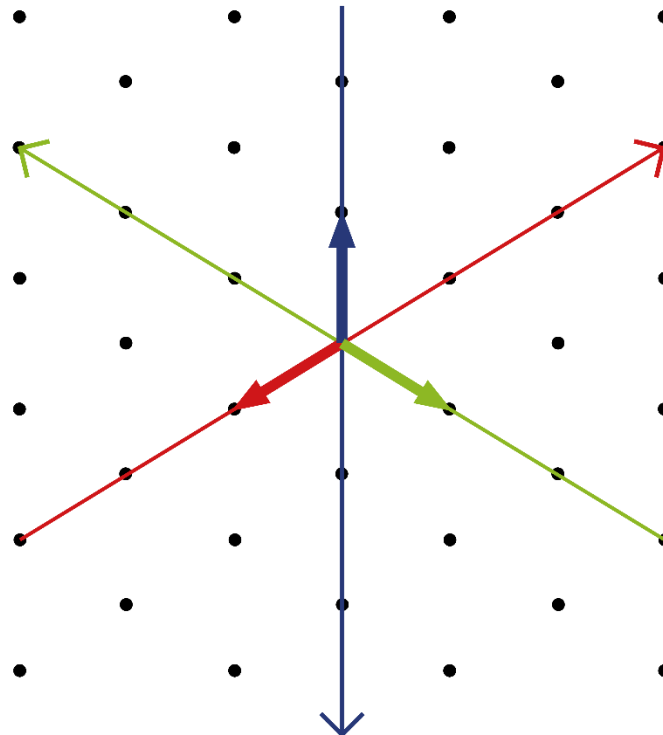
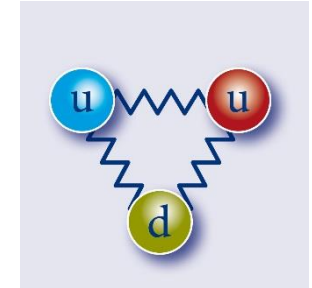
Starke Ladung

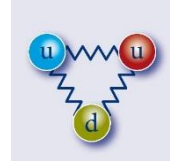
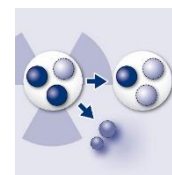
► Farbladungsvektoren von Quarks



Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

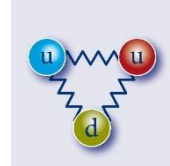
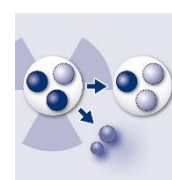
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- 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: 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:

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



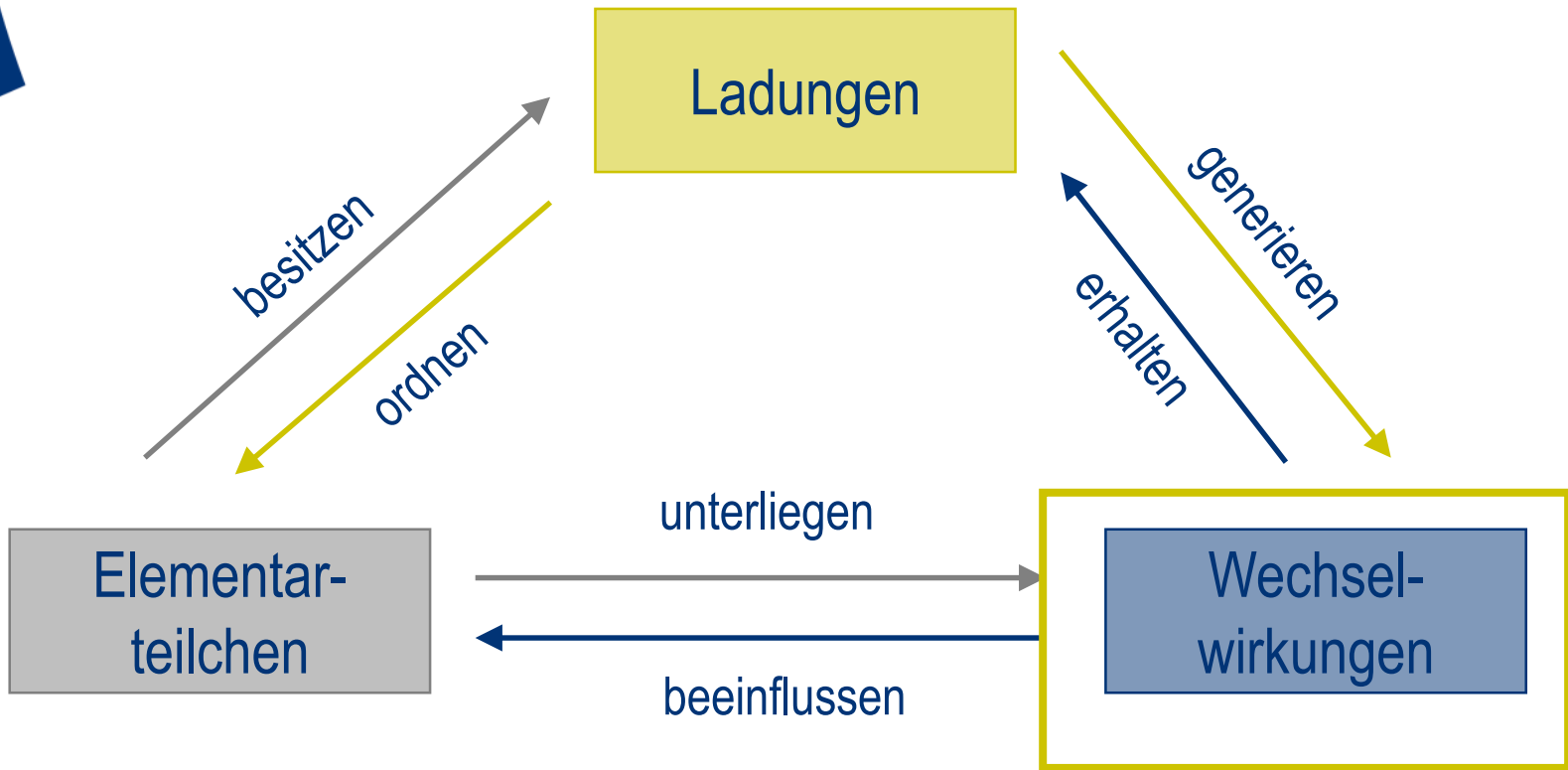
Eindeutige Vorhersage möglich

- ▶ 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



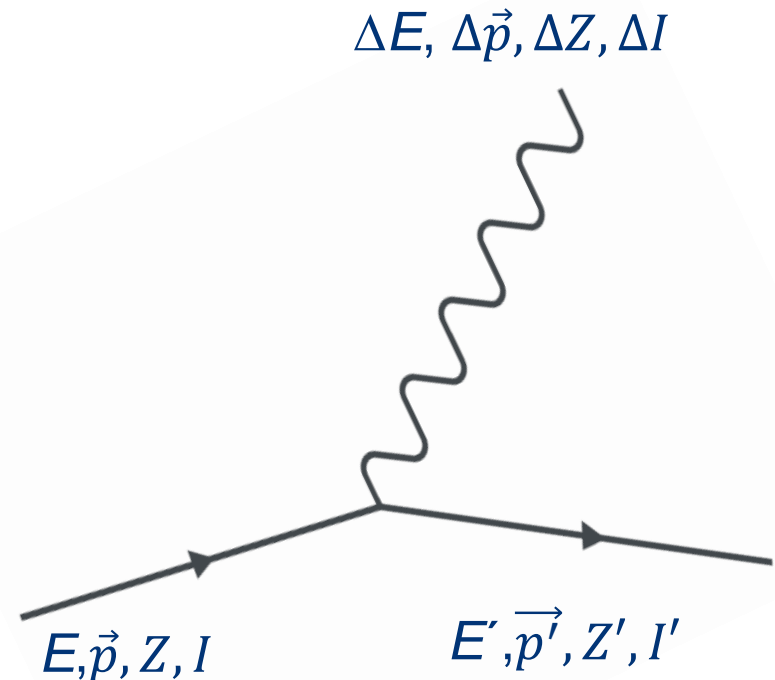
Darstellung durch Botenteilchen

▶ Wechselwirkungen werden von Botenteilchen übermittelt

▶ Bekannt ist:

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

▶ Feynman Diagramme



Feynman - Diagramme

► Bausteine:

- Materie Teilchen

u, d, e, ν



- Materie Antiteilchen

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



- Botenteilchen

γ, W, Z



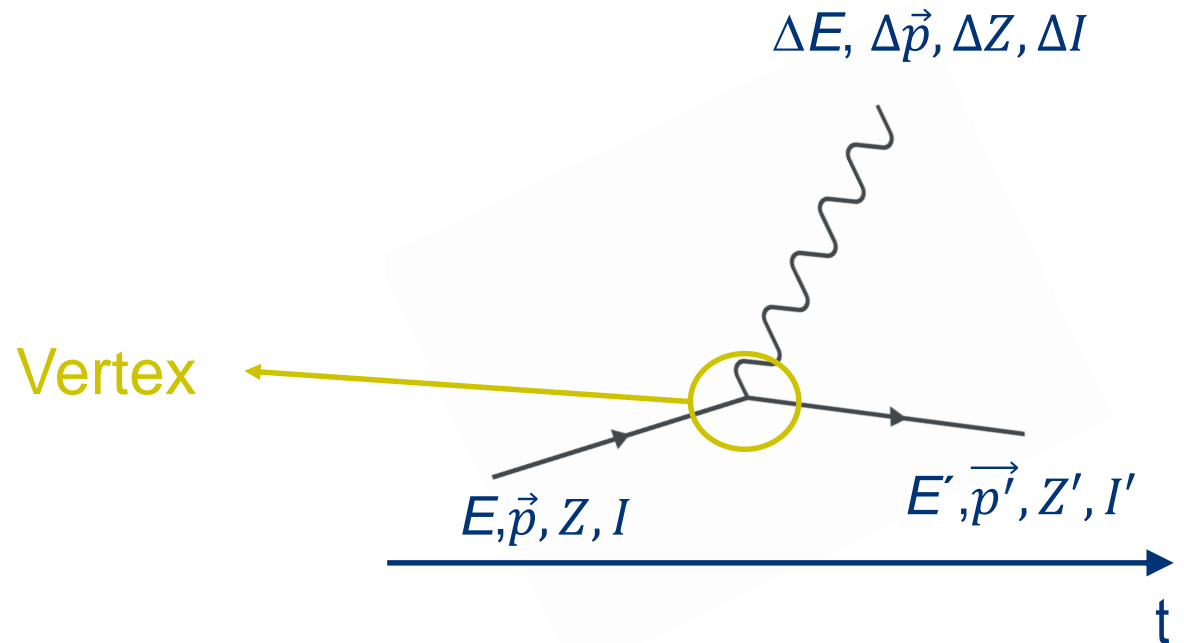
g



Feynman - Diagramme

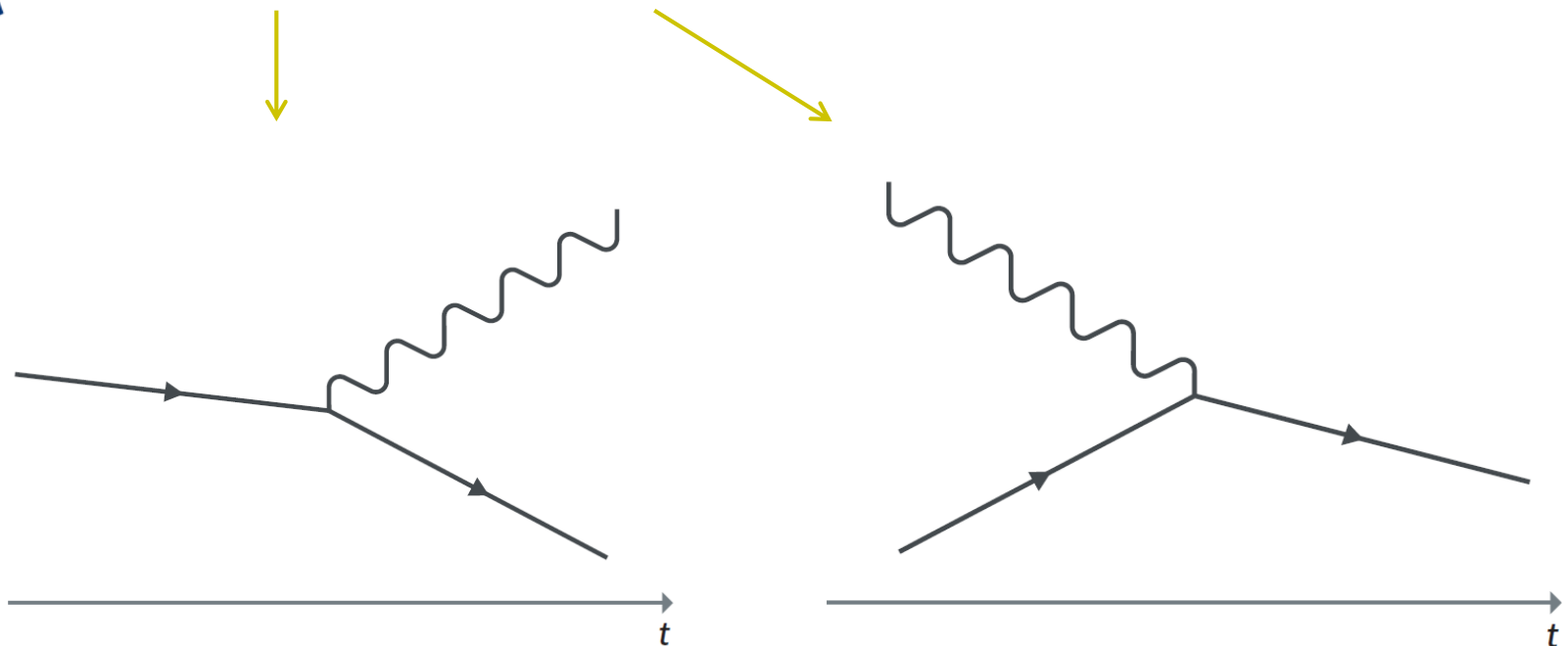
► Begriffsklärung:

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



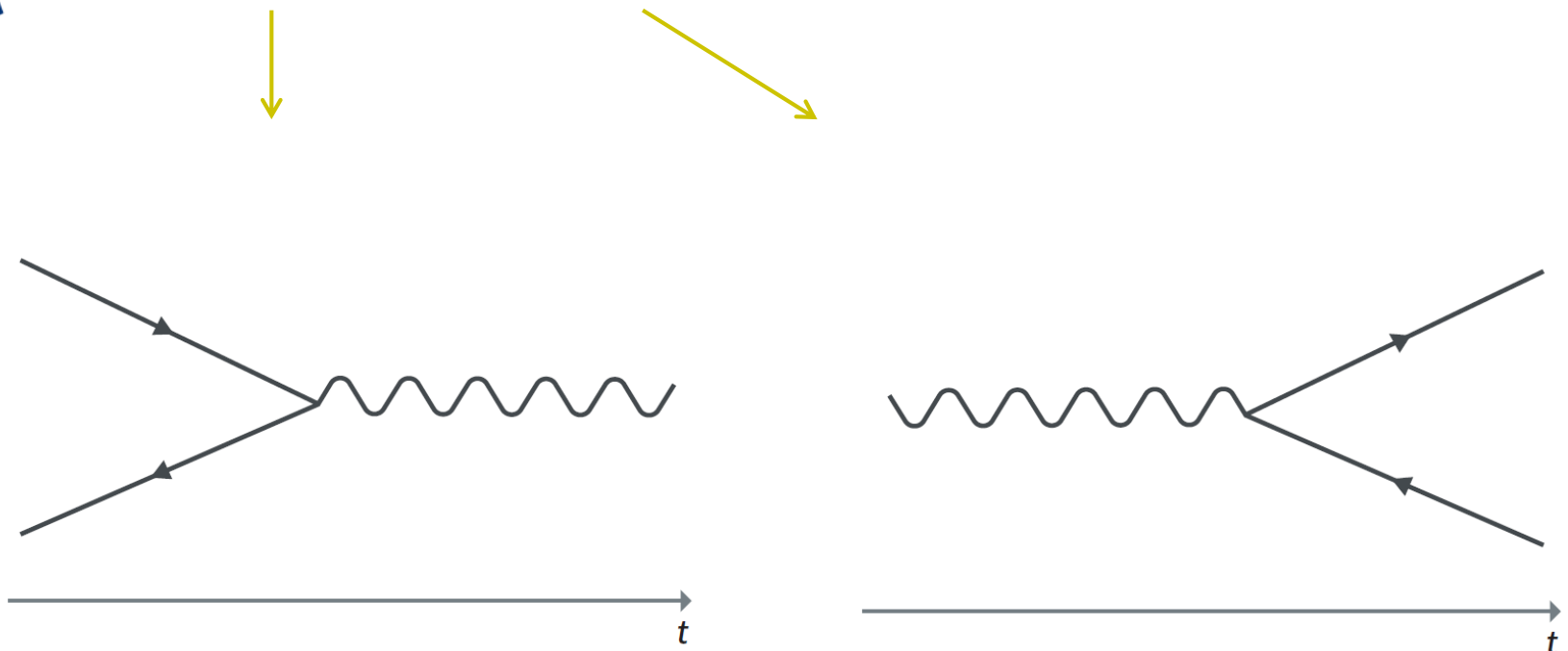
Grundbausteine 1/2

► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



Grundbausteine 2/2

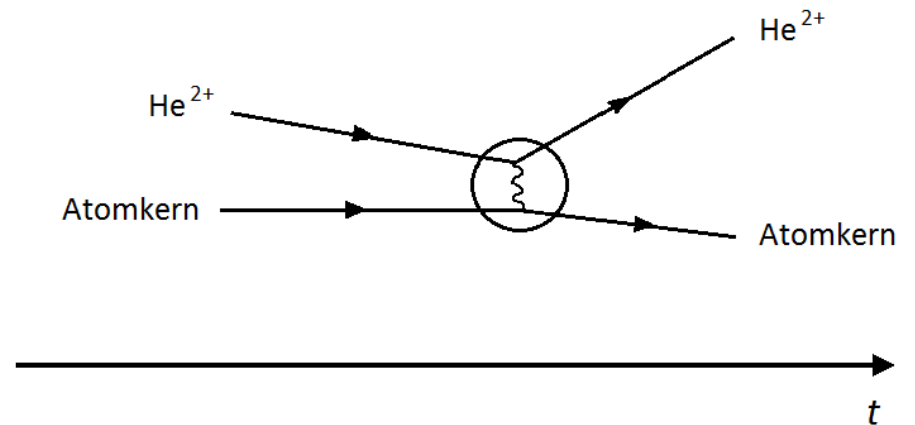
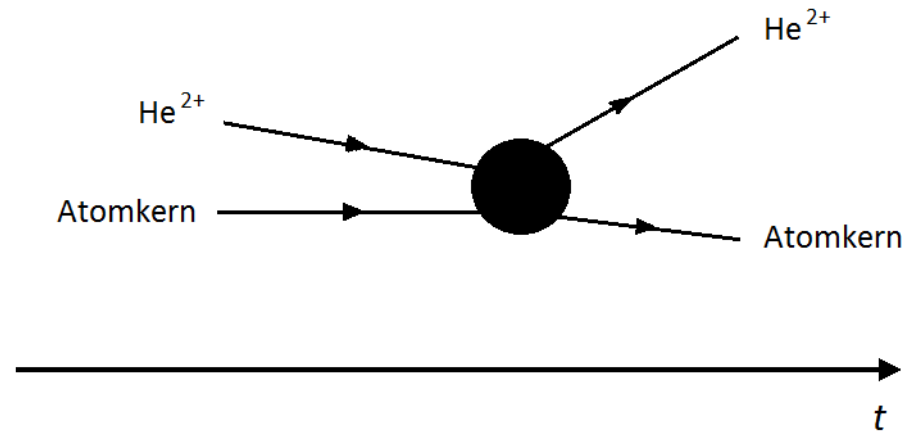
▶ Paarvernichtung und Paarerzeugung



Prozesse

► Rutherford-Streuung

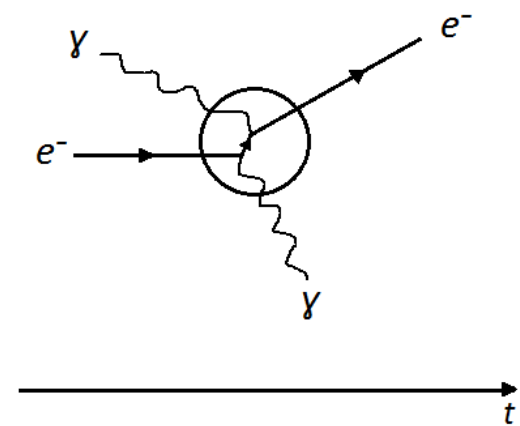
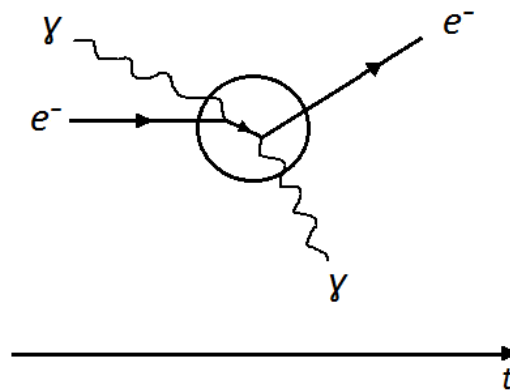
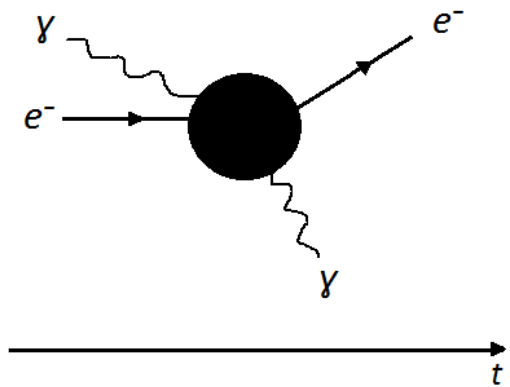
- Feynman-Diagramm mit „Blackbox“ Vertex
- Feynman-Diagramm detaillierter Vertex



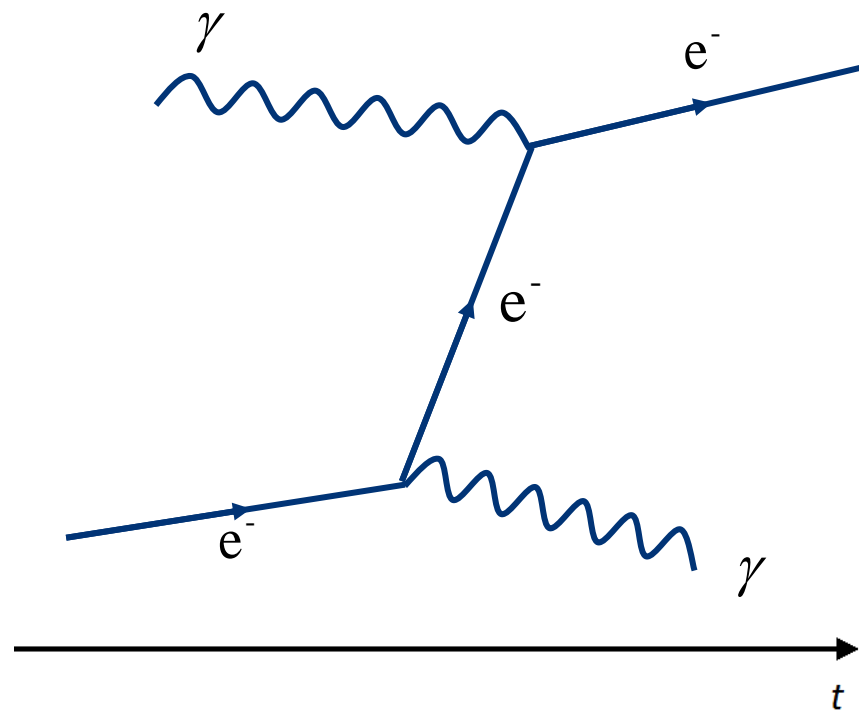
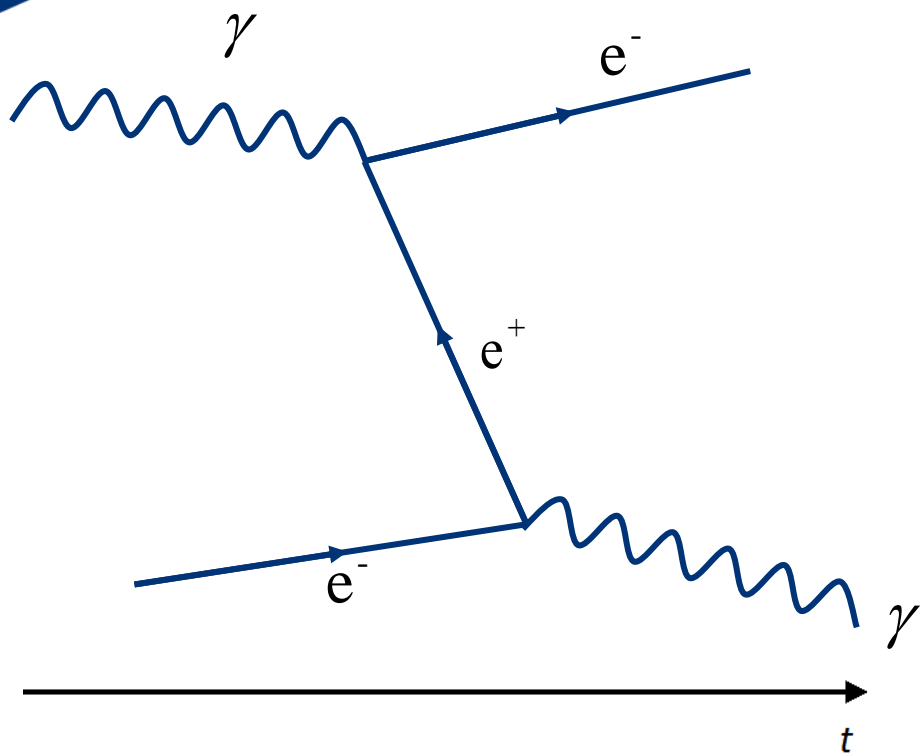
Blackbox Vertex

► Compton-Streuung

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

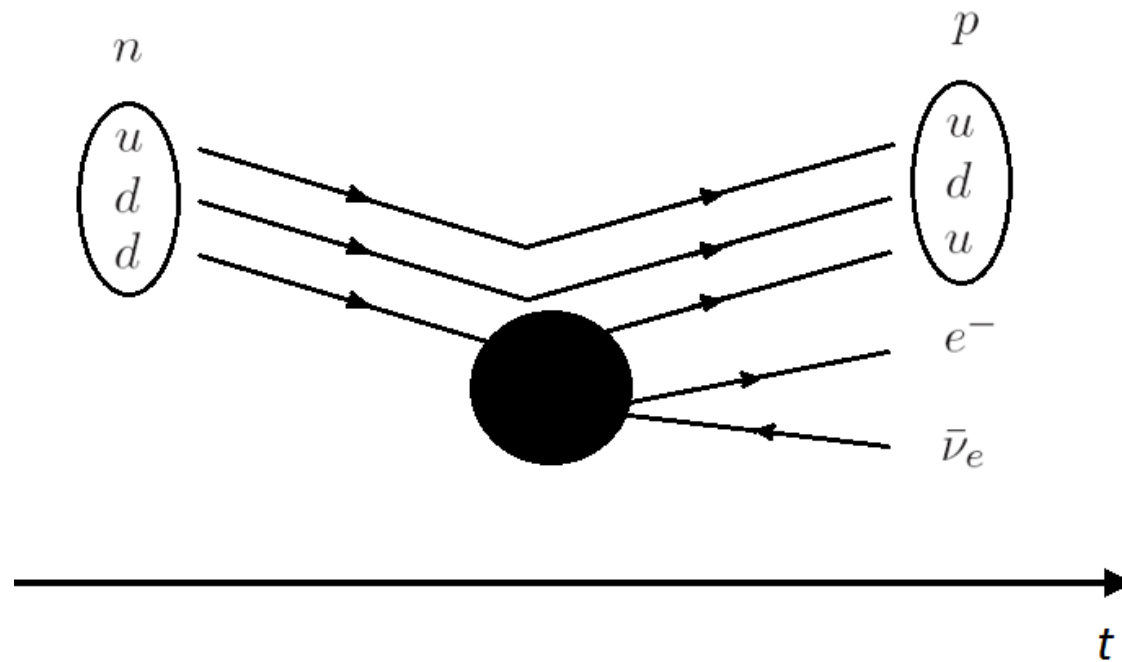


Alternative Feynman-Diagramme zur Compton-Streuung



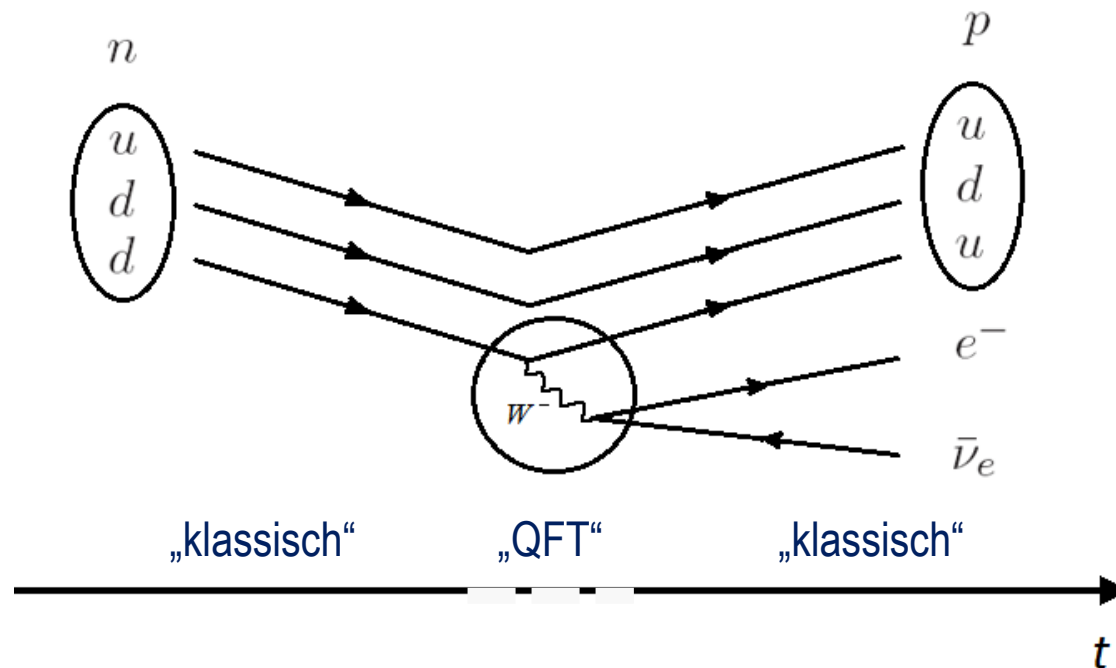
Beispiel für Spiralansatz: Feynman-Diagramme

- ▶ Beta-Umwandlung mit Blackbox



Beispiel für Spiralansatz: Feynman-Diagramme

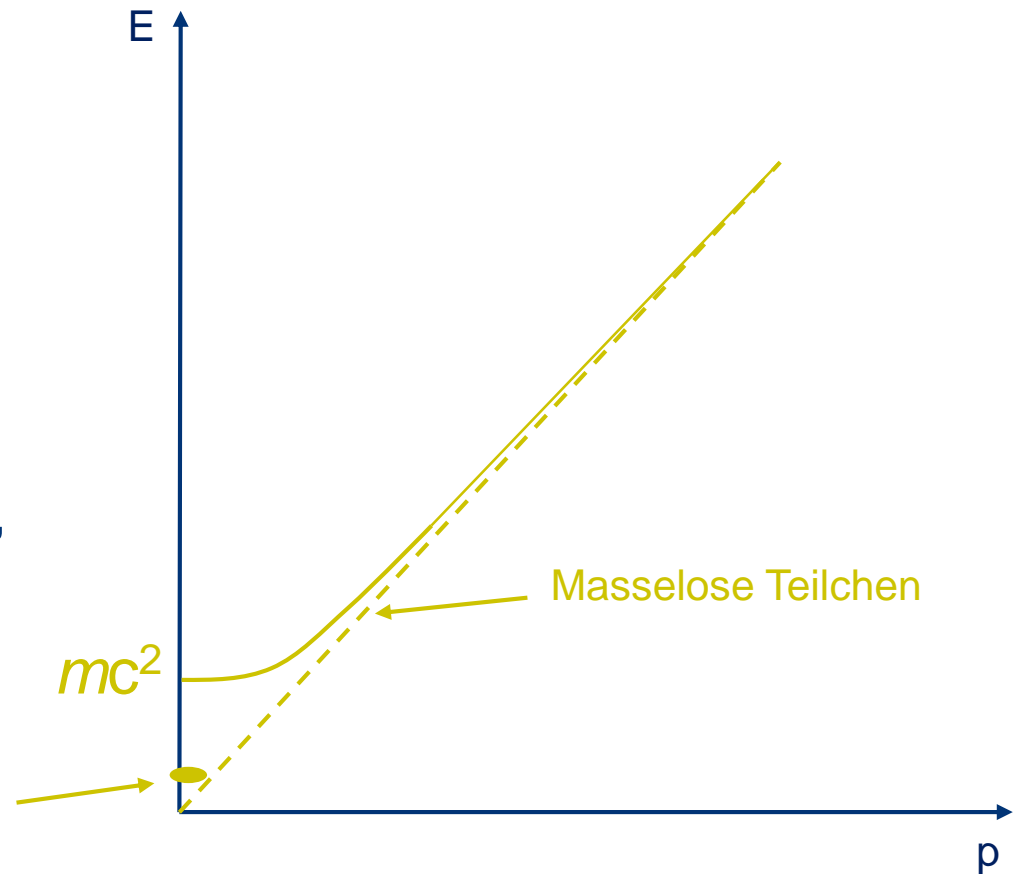
- ▶ Beta-Umwandlung mit „klassischem“ und „QFT“-Gebiet (gestrichelte Achse erst in nächster Auflage)



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

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

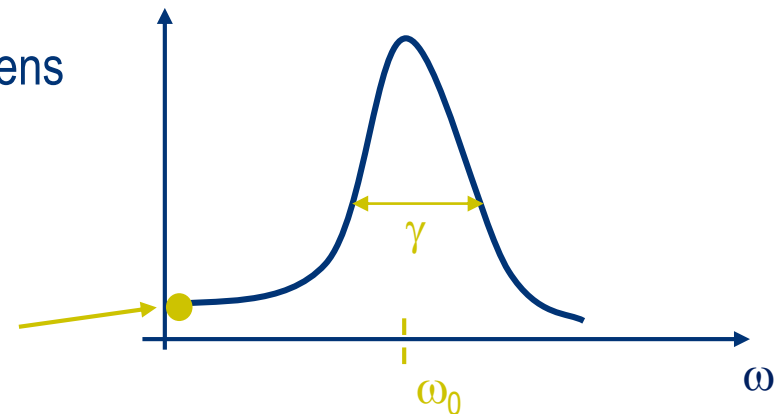
von außen Vorgegeben → $\omega^2 - \omega_0^2$
 ↑
 Eigenfrequenz ω_0^2
 Dämpfung = $1/\text{Lebensdauer}$ → γ^2

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

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

- ▶ „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

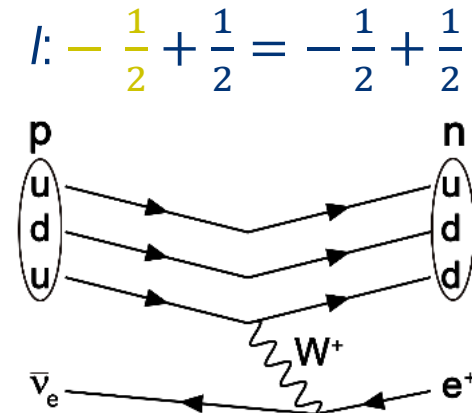
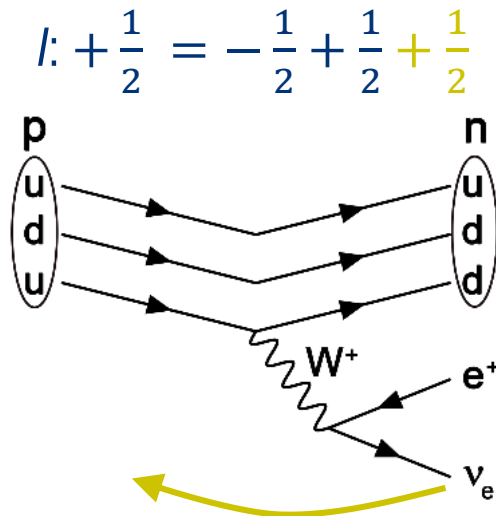


„Umklappen“ von Linien

- ▶ Durch “umklappen” von Linien können mögliche Prozesse vorhergesagt werden
- ▶ Aufgabe: Buch, S. 103/Nr. 9, *11

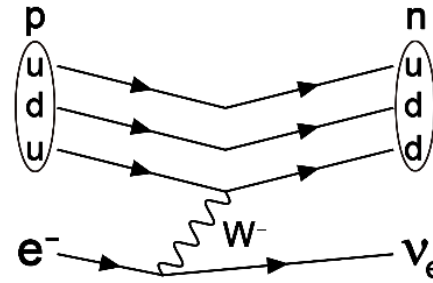
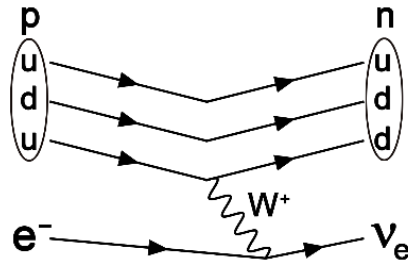
„Umklappen“ von Linien

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

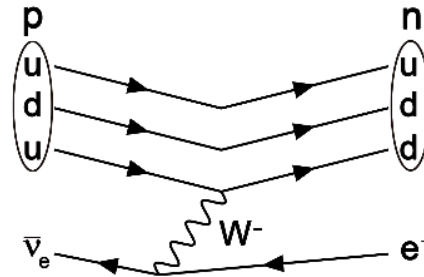
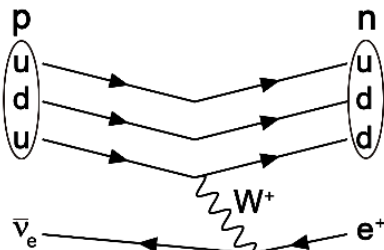


„Umklappen“ von Linien

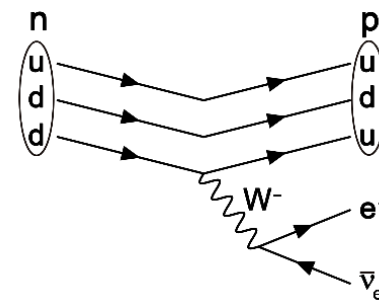
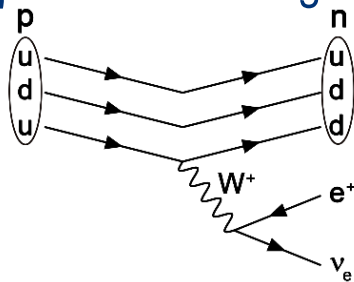
- ▶ Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- ▶ Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953

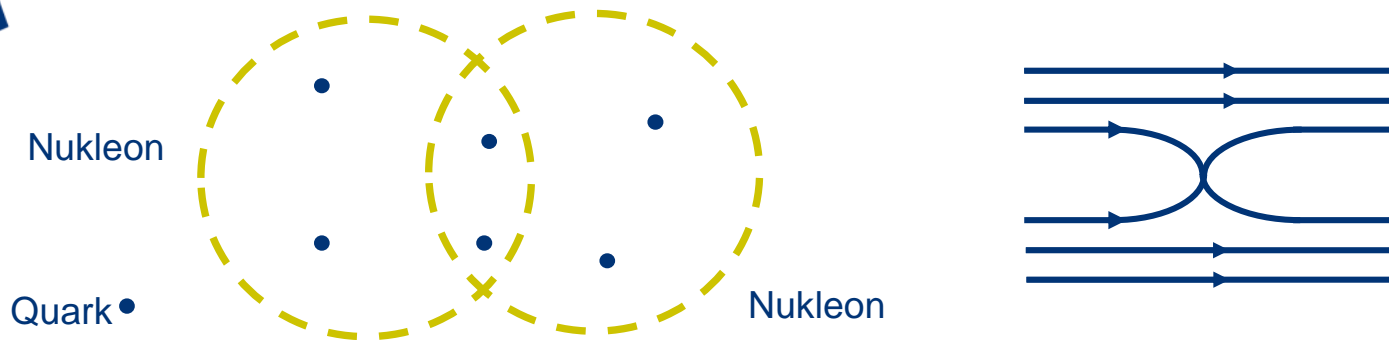


- ▶ β^+ und β^- - Umwandlungen von Kernen

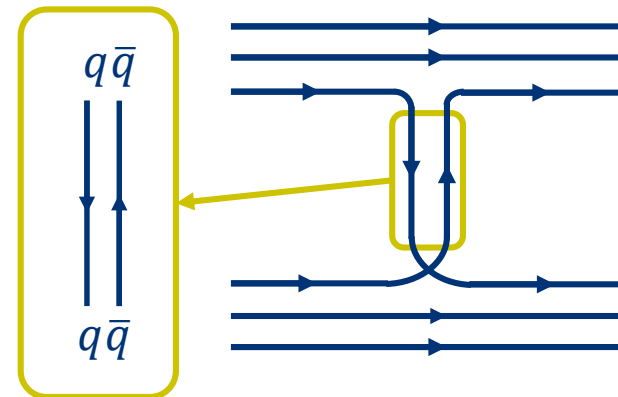


Erinnerung: Bindung von Nukleonen – Starke Wechselwirkung vs. Kernkraft

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

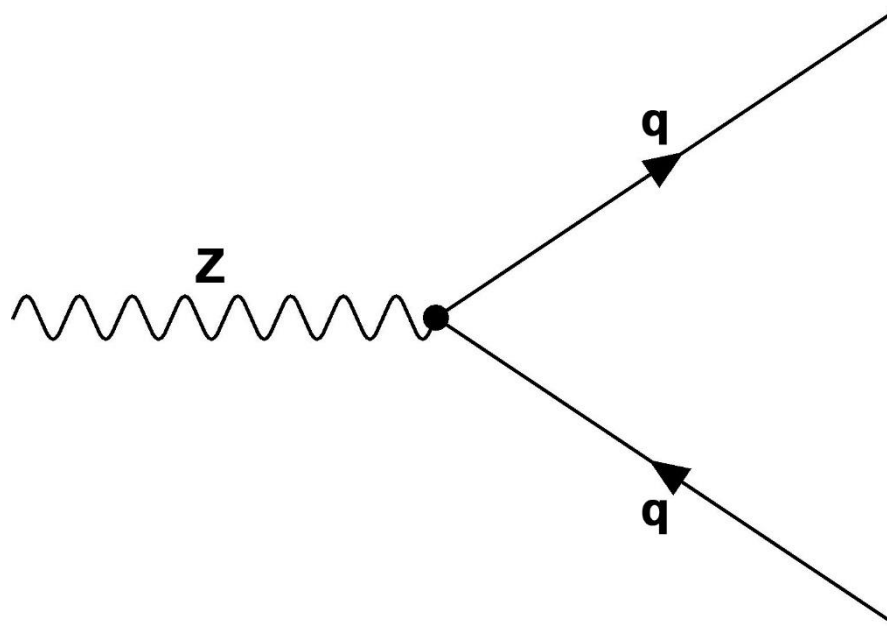


- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)



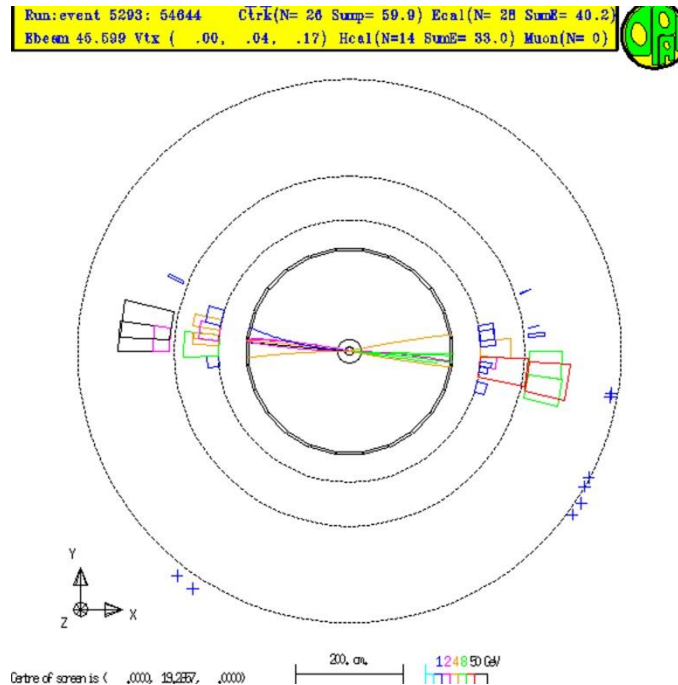
Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

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



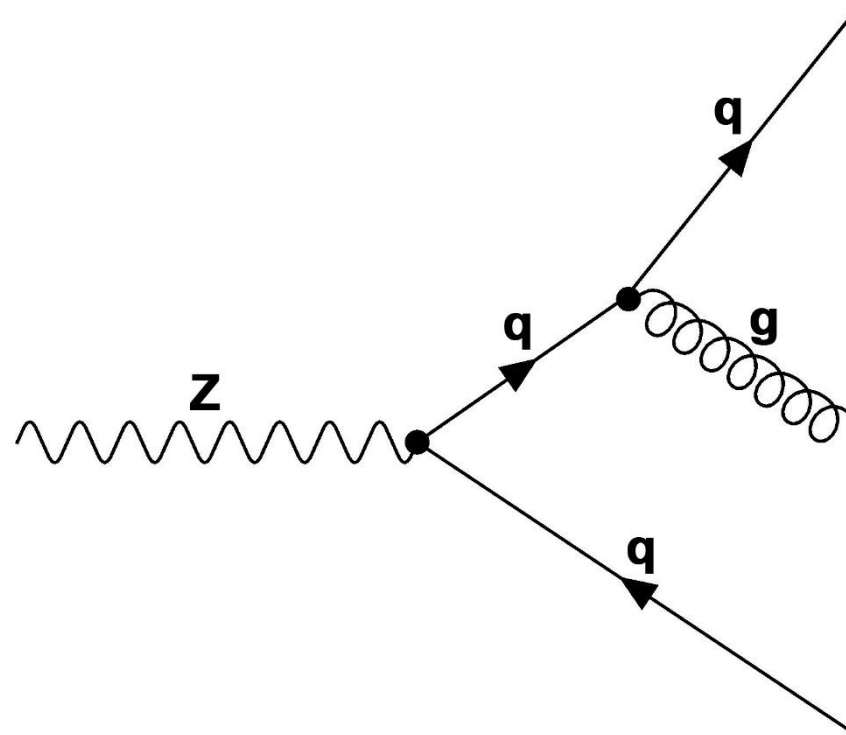
Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

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



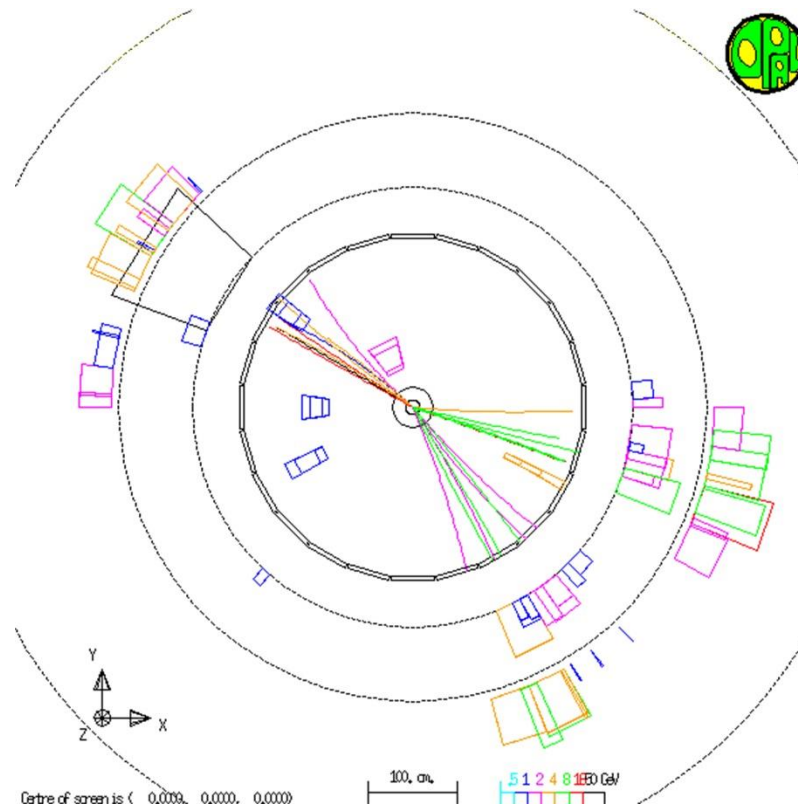
Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:

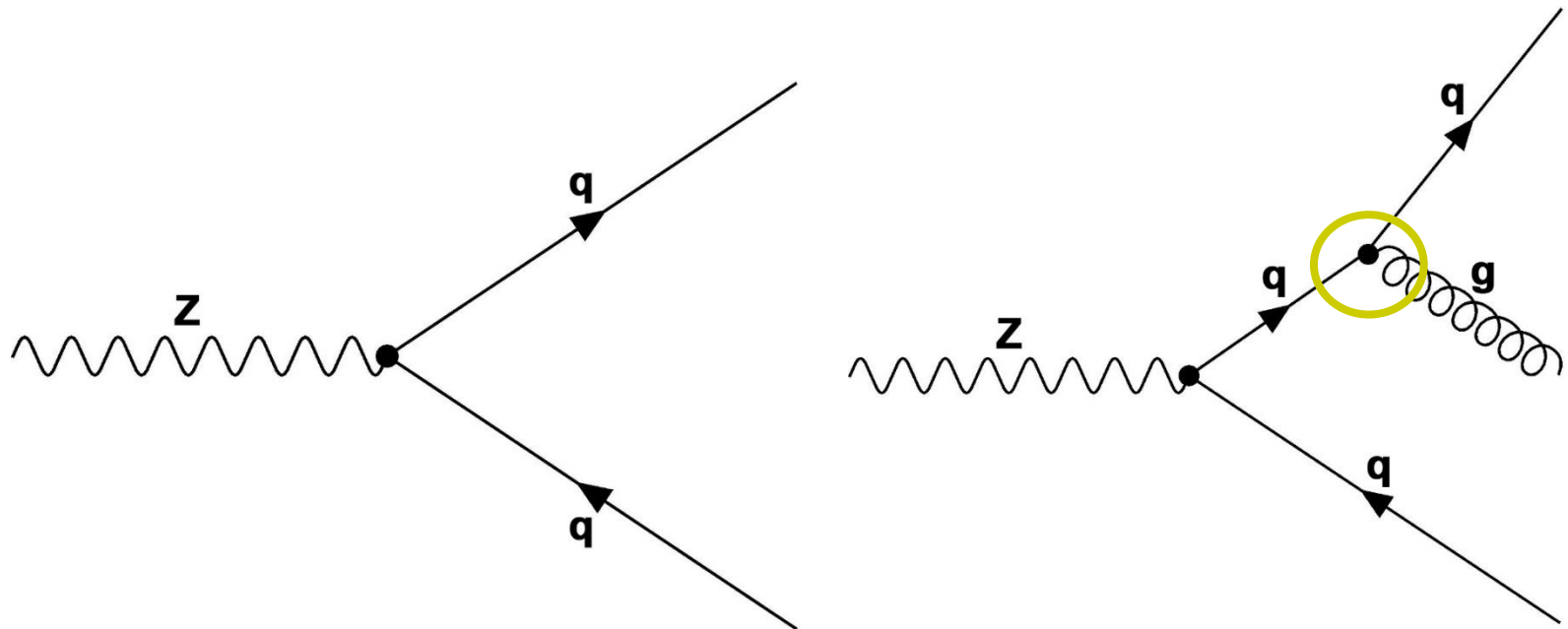


Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

- ▶ Manchmal passiert aber auch das:



Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik



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

Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

- ▶ 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

Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

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

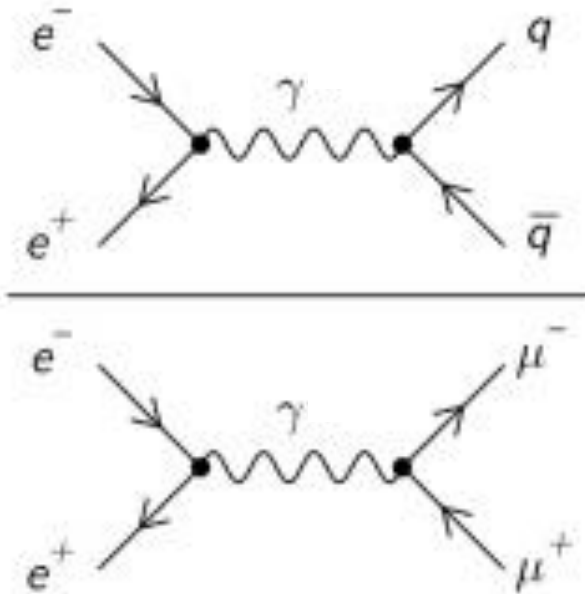
$$\alpha_s \sim \frac{H(3 - Jet)}{H(2 - Jet)}$$

Feynman-Diagramme und Forschungsmethodik

- ▶ Bestimmung der Anzahl der Farbladungen
- ▶ Idee: Messung des Verhältnisses von qq zu $\mu^+ \mu^-$

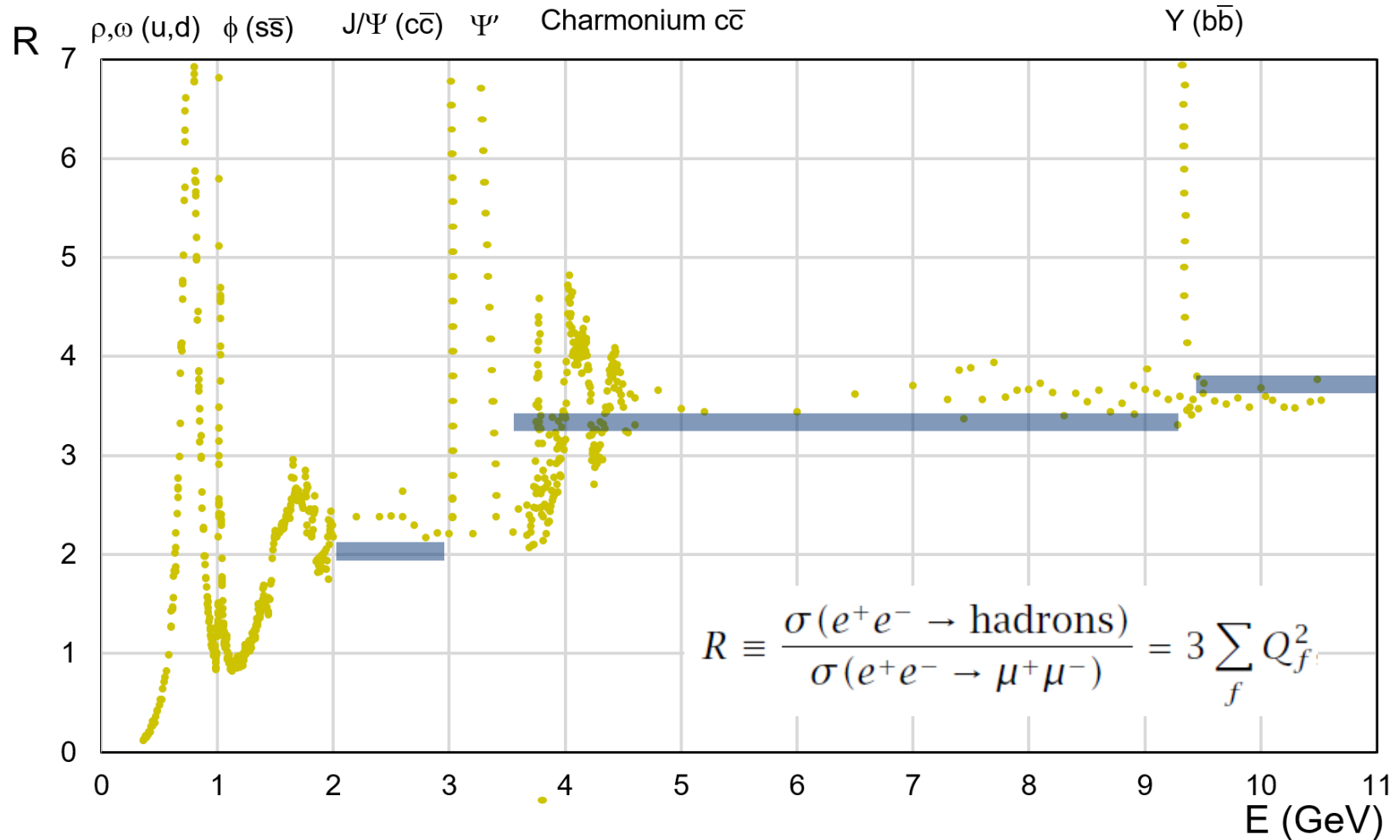
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

\approx



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

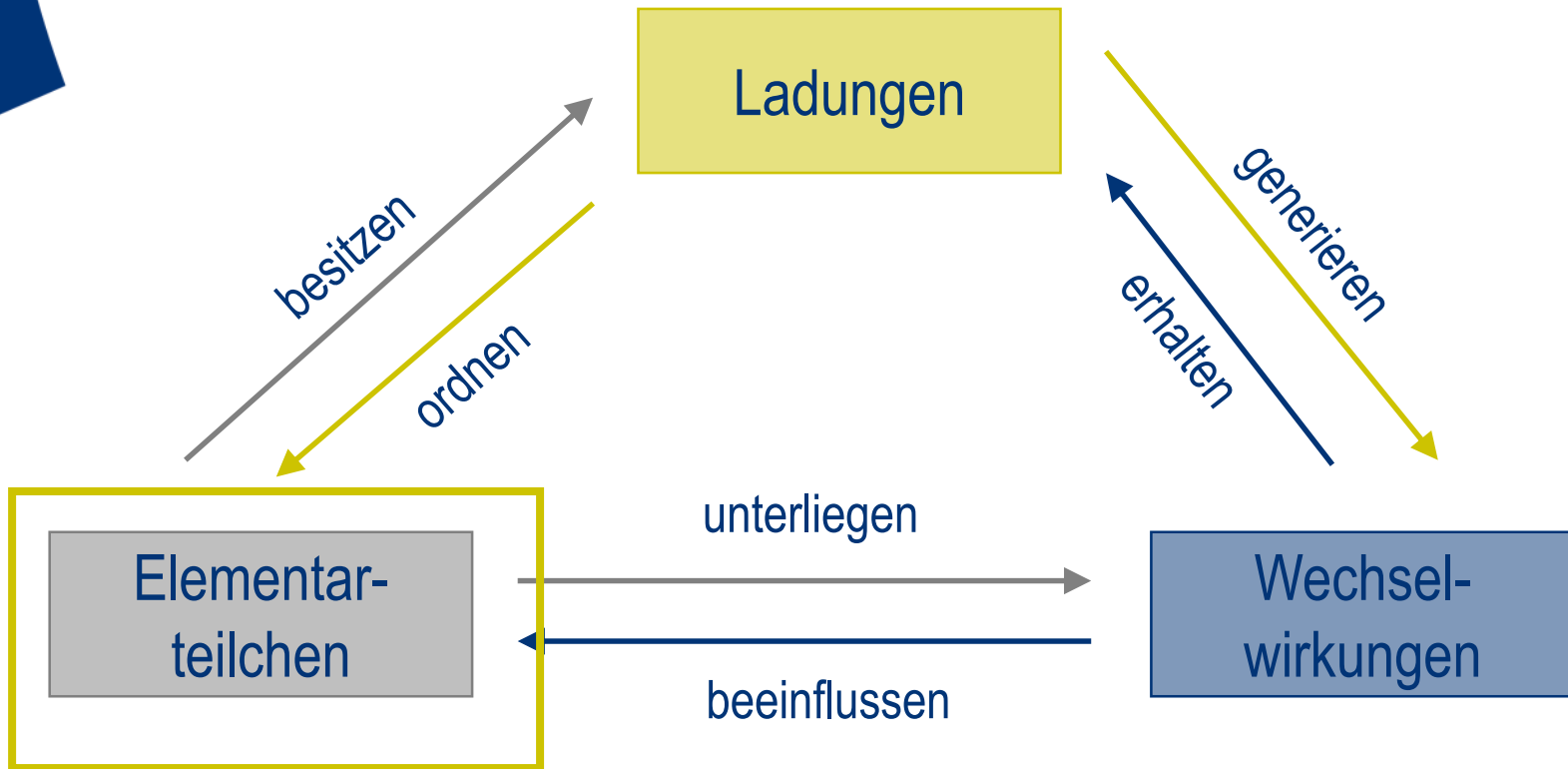
Anzahl der Farben



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



„Teilchenzoo“ oder Ordnung?

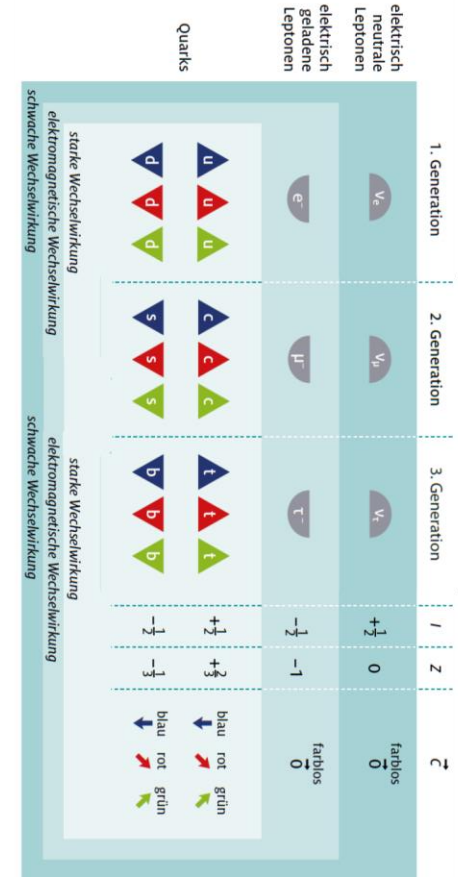
- ▶ Entdeckung weiterer Teilchen
- ▶ ausschließlich „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks sowie des Elektrons und des Elektron-Neutrinos
 - Von jedem der leichten Materieteilchen (u, d, e^-, ν_e) gibt es je zwei Kopien, die größere Massen besitzen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?
- ▶ Gleiche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

Anordnung von Teilchen in Generationen

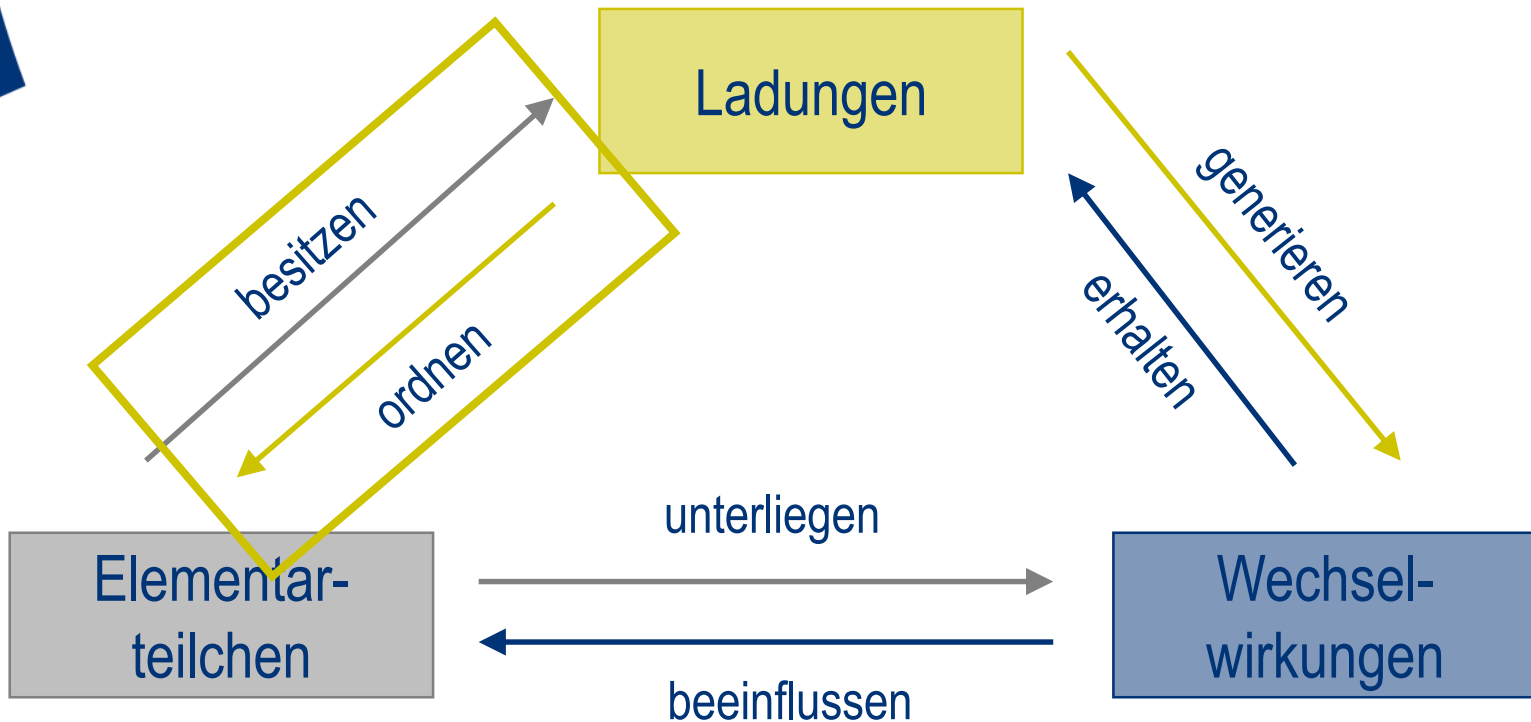
| | 1. Generation | 2. Generation | 3. Generation | I | Z | \vec{C} |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|--|
| elektrisch neutrale Leptonen | ν_e | ν_μ | ν_τ | $+\frac{1}{2}$ | 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 den Hauptgruppen
- ▶ Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigen geordnet



Die drei Basiskonzepte des Standardmodells

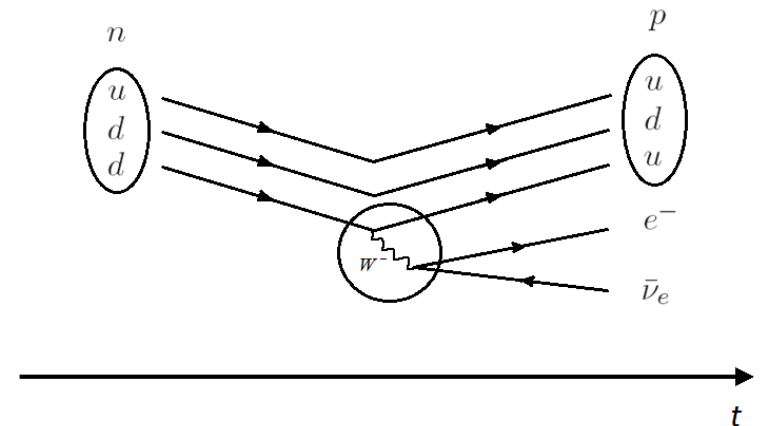


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

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



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

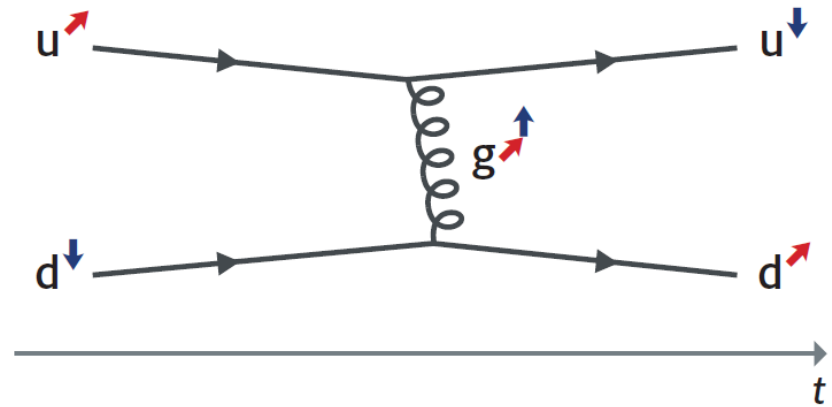
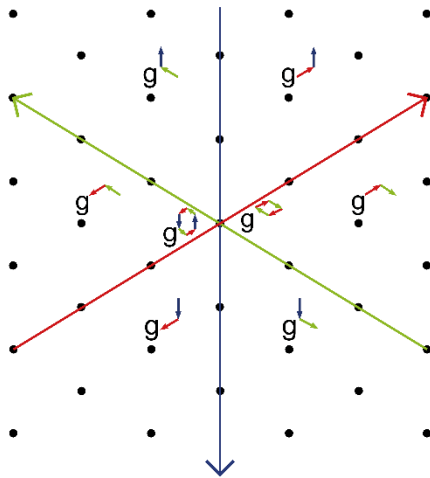
- Drei Up-Quarks mit Farbladungsvektoren  ,  , oder  haben alle schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$, Down-Quarks hingegen $I = -\frac{1}{2}$

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

Erinnerung: Starke Wechselwirkung

▶ $F_S = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r^2} + k$

▶ Botenteilchen (Gluonen) besitzen selbst Ladung



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

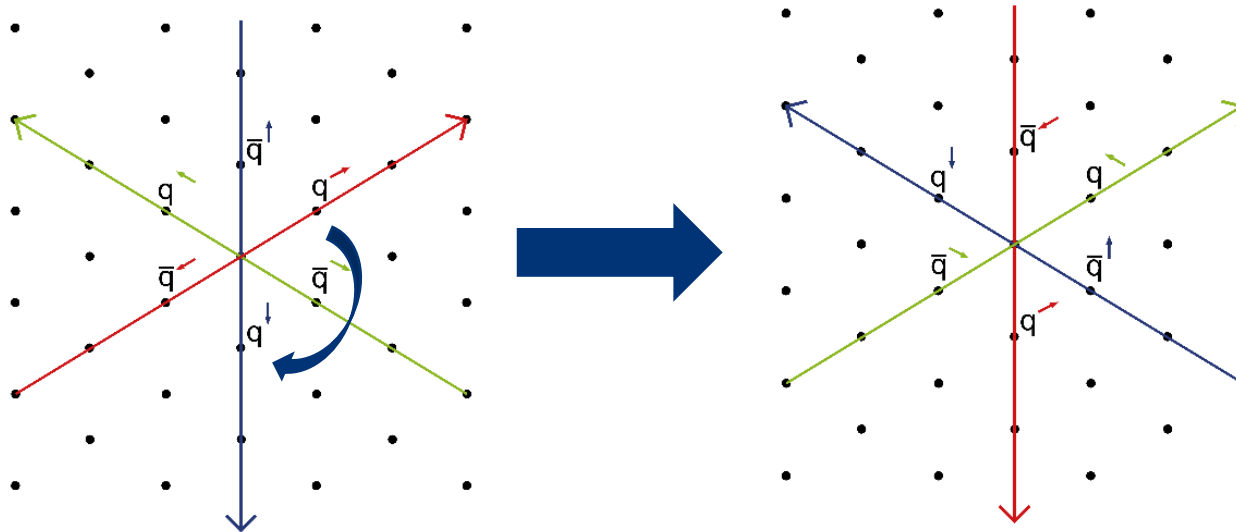
▶ Starke Wechselwirkung

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

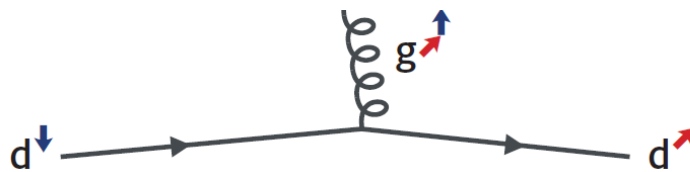
▶ $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

Umwandlung innerhalb Multipletts

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



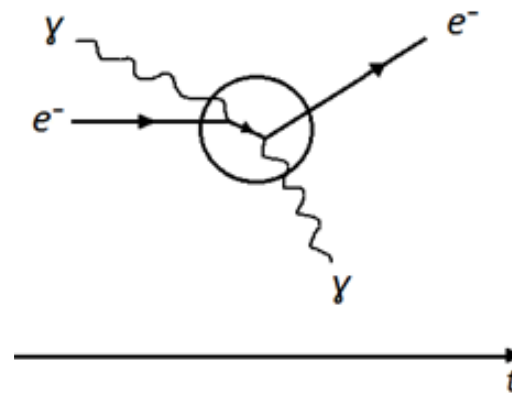
- hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



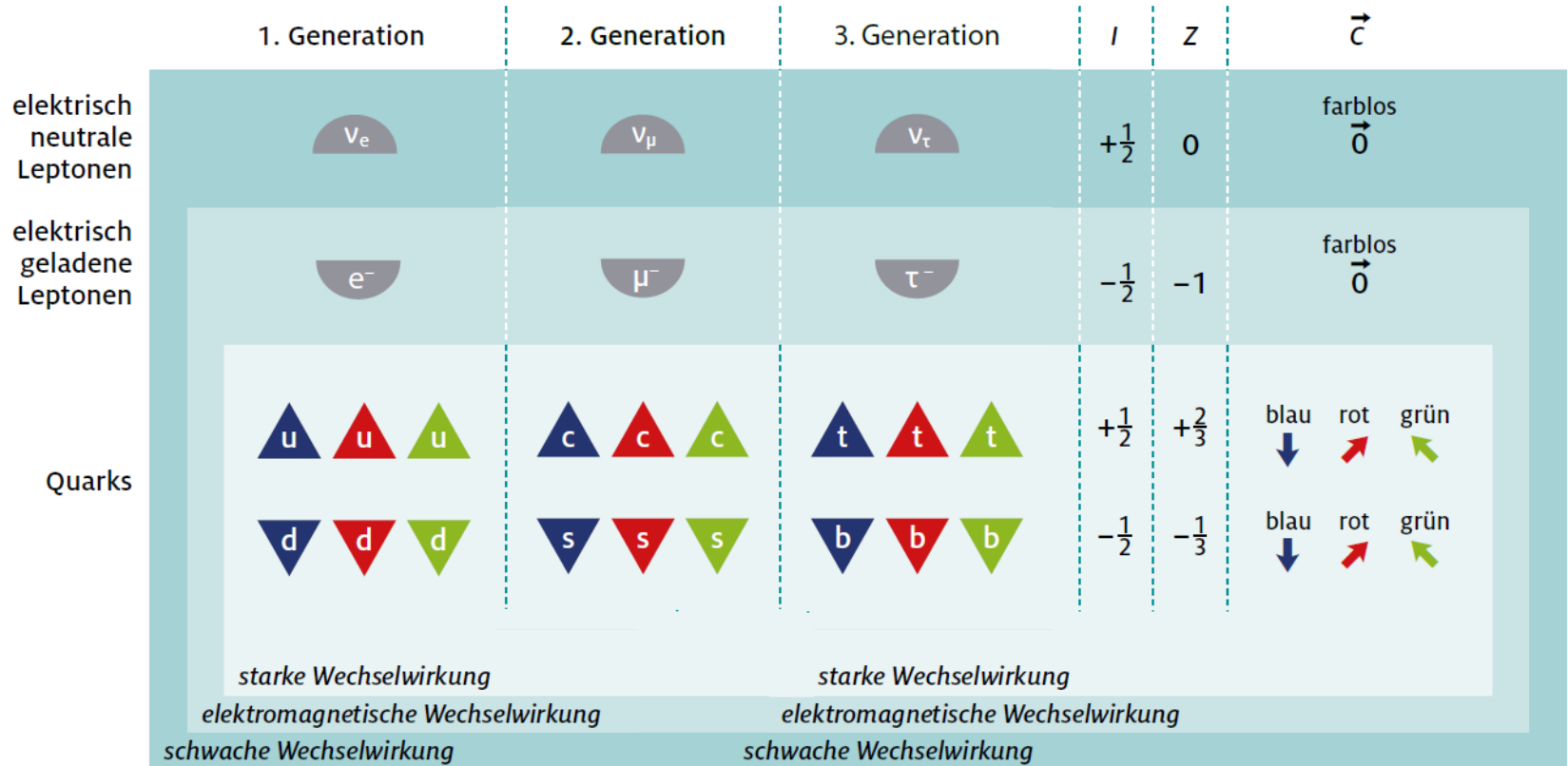
Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

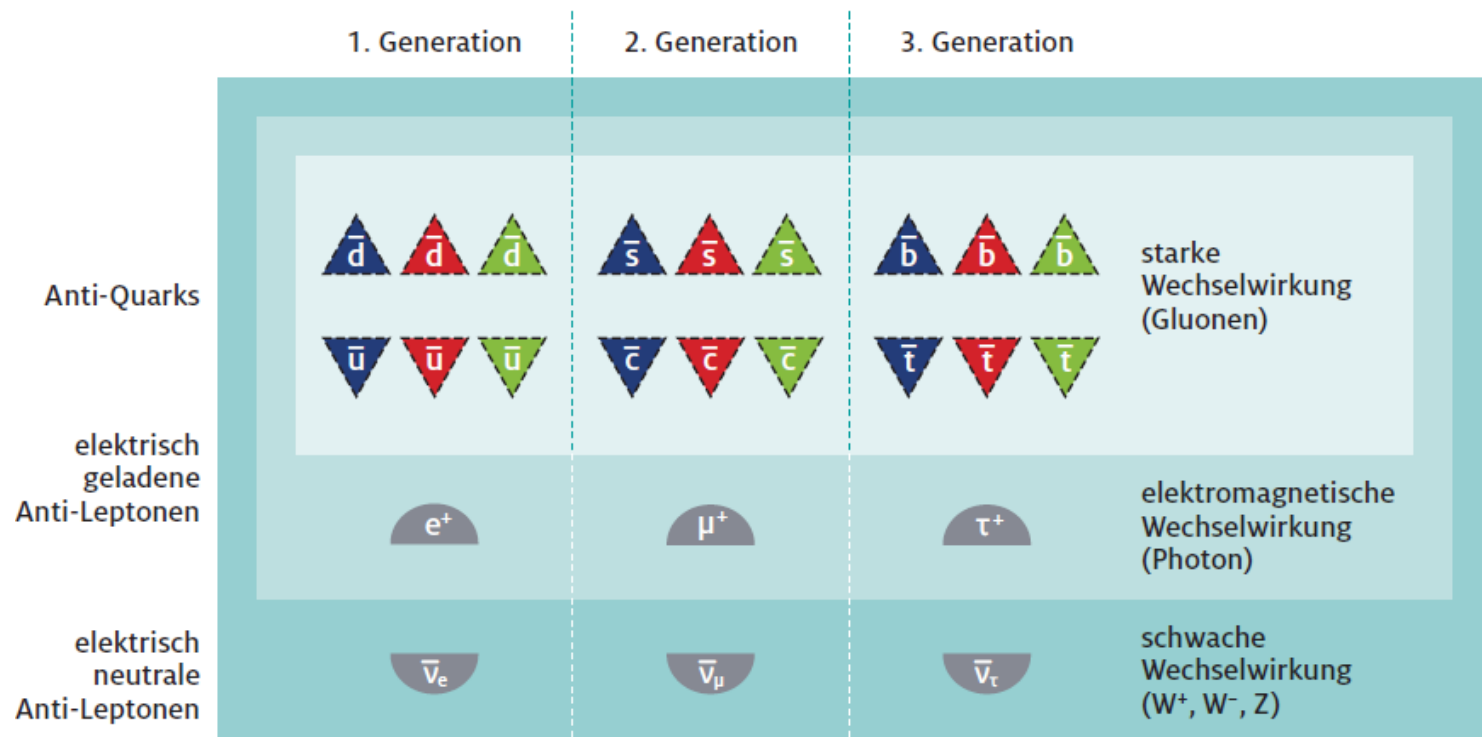


Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



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 Bosonteilchen 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!)
 - Singulettts der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich
 - (zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung)

Higgs Feld

► Symmetriebrechung

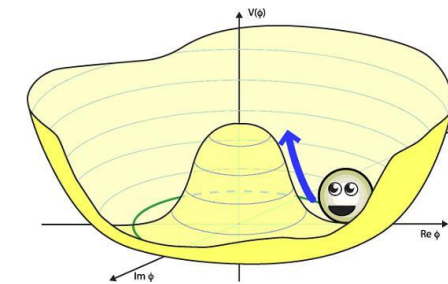
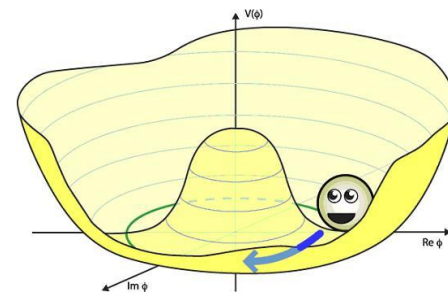
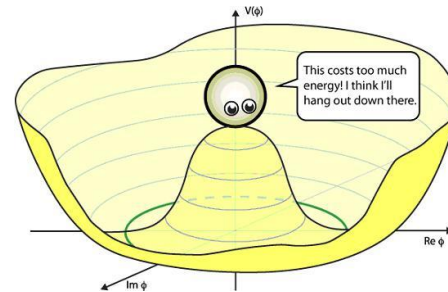
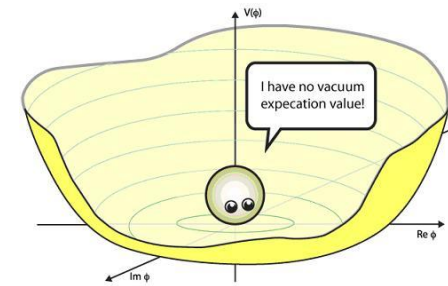
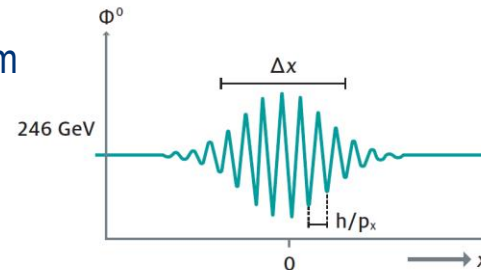
- Symmetrisches Potential
Grundzustand symmetrisch
- Symmetrisches Potential
Grundzustand nichtsymmetrisch

► 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

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

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



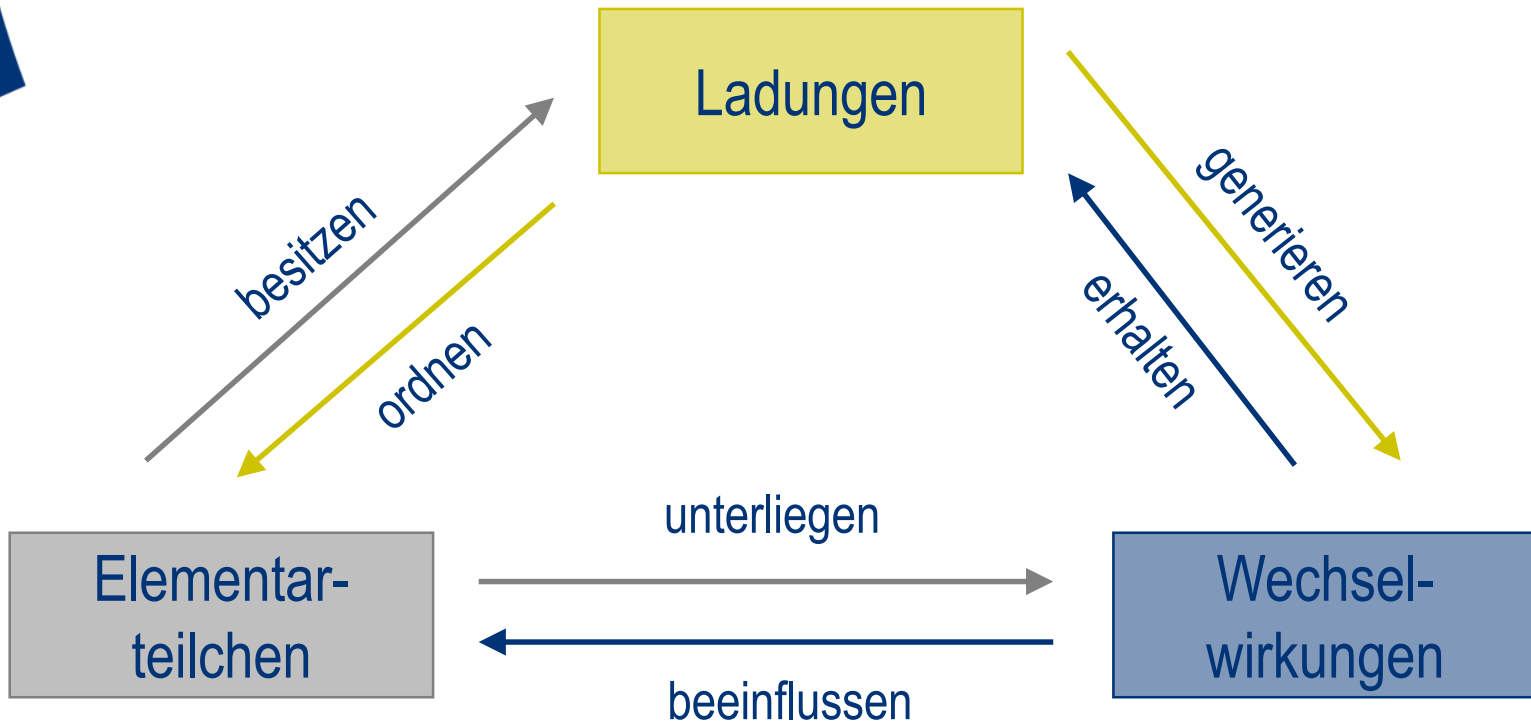
Bisher ignoriert: Zustandsmischung

- ▶ 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

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

Also: Ladungs-Multipletts eigentlich $\left(\begin{array}{c} u \\ d' \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} c \\ s' \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} t \\ b' \end{array} \right)$

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



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/



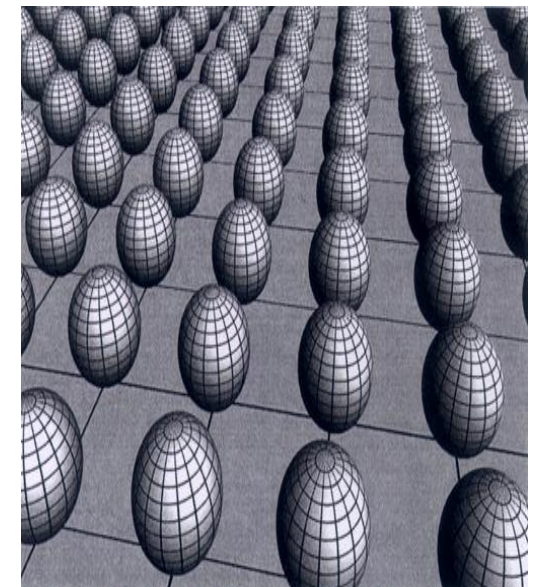
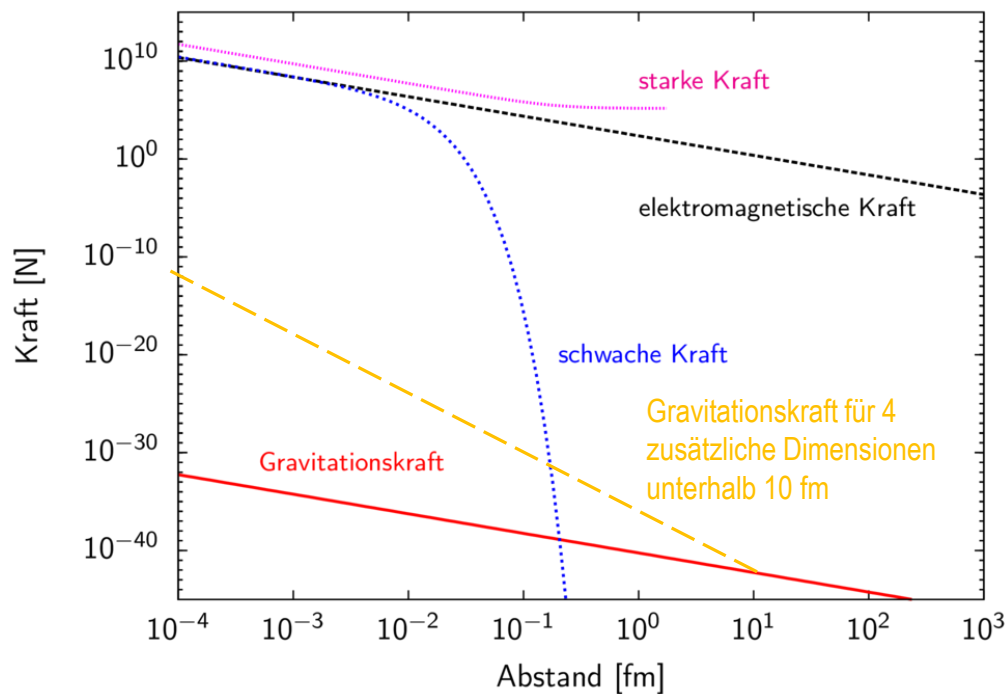
NETZWERK
TEILCHENWELT

Diskussion / Fragen



Spekulationen

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



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)

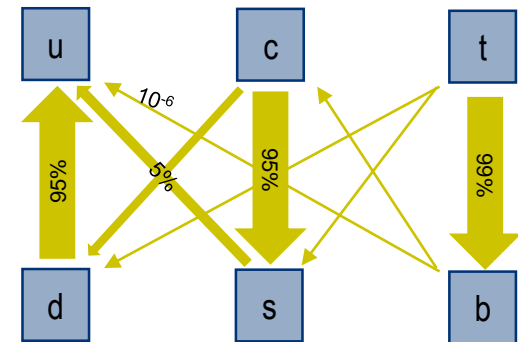
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0,975} & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & \mathbf{0,974} & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & \mathbf{0,999} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

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