



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Philipp Lindenau, Kristof Schmieden

Bad Honnef | 23.01.2025



NETZWERK
TEILCHENWELT



**FOLGENDE BÄNDE
SIND VERFÜGBAR:**

- Mikrokurse
- Kosmische Strahlung
- Forschungsmethoden
- Wechselwirkungen und Teilchen



**KOSTENFREI
ERHÄLTlich!**

UNTERRICHTS- MATERIALIEN ZUR TEILCHENPHYSIK

Teilchenphysik ist aktuell und spannend. Die Joachim Herz Stiftung und das Netzwerk Teilchenwelt haben gemeinsam mit Wissenschaftlern und Lehrkräften dieses Thema für den Physikunterricht aufgegriffen und eine Heftreihe mit Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik entwickelt. Sie soll Lehrkräften Ideen, Anregungen und Hintergrundinformationen für ihren Unterricht geben.

Die Materialien können per E-Mail an info@leifphysik.de angefordert oder unter www.leifphysik.de/tp heruntergeladen werden.





Band 1: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen

- ▶ Ca. 100 Seiten Hintergrundinformationen für Lehrkräfte
- ▶ Einführung in das Standardmodell
- ▶ Spiralcurriculum, didaktische und fachliche Hinweise
- ▶ Aufgaben



Was ist Physik?

Was ist Physik?

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

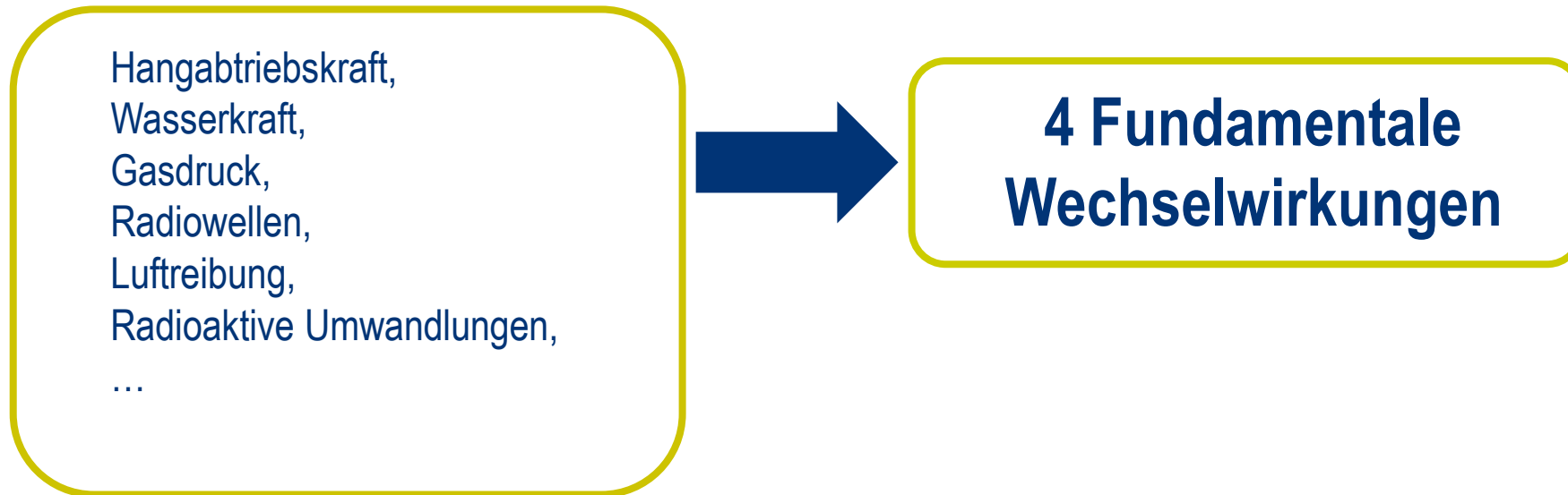


Vereinheitlichungen in der Physikgeschichte

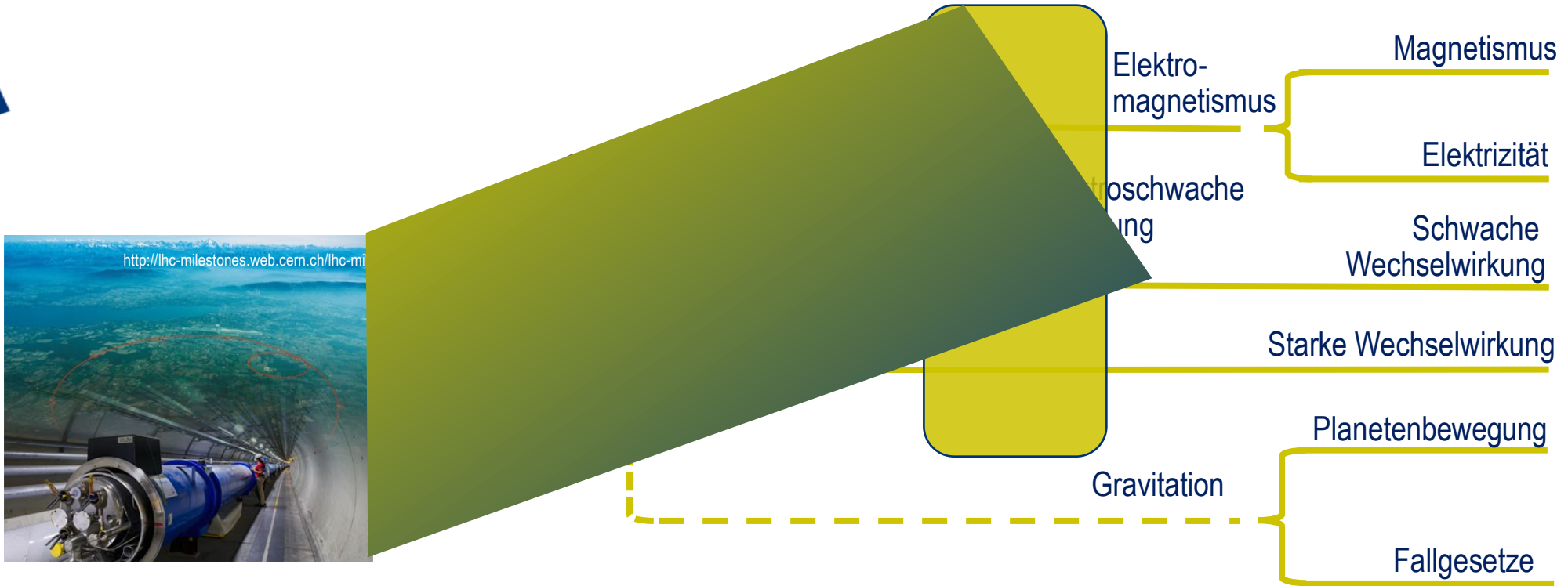
- ▶ **Newtonsche Mechanik** (17. Jhd.): „irdische“ Fallgesetze (Galilei) und Bewegung der Himmelskörper (Kepler) als Folgen der Gravitation
- ▶ **Elektromagnetismus** (19. Jhd.): Zusammenfassung elektrischer und magnetischer Phänomene durch J. C. Maxwell
- ▶ **Relativitätstheorie** (20. Jhd.): Vereinheitlichung von Raum und Zeit zur *Raumzeit* und von Masse und Energie ($E = mc^2$) durch A. Einstein

Vereinheitlichungen

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



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ Elegantes Theoriegebäude („Quantenfeldtheorie“) mit großer Vorhersagekraft
- ▶ angereichert mit experimentellen Erkenntnissen
- ▶ Grundlage: Fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)
- ▶ Beschreibt alle bekannten Wechselwirkungen auf Teilchenebene
- ▶ in 1960er und 1970er Jahren entwickelt
- ▶ in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt

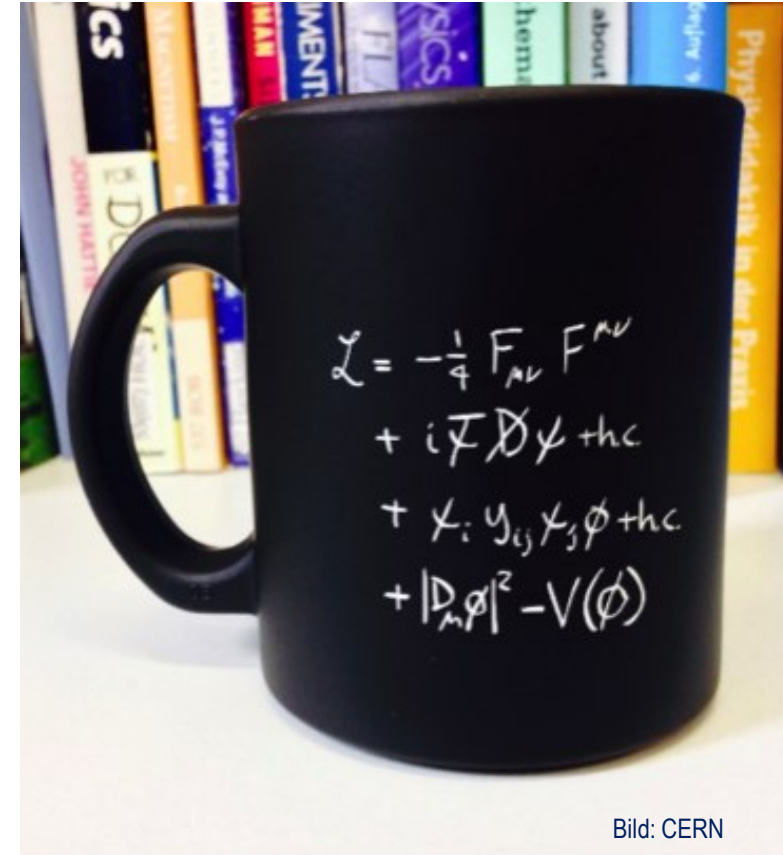


Bild: CERN

Das Standardmodell der Teilchenphysik

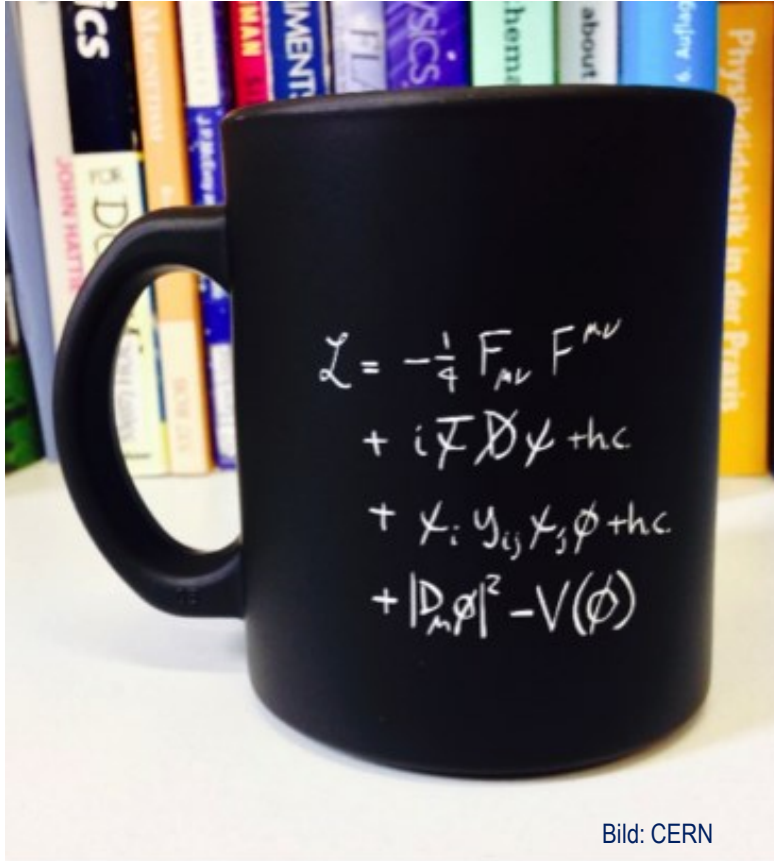


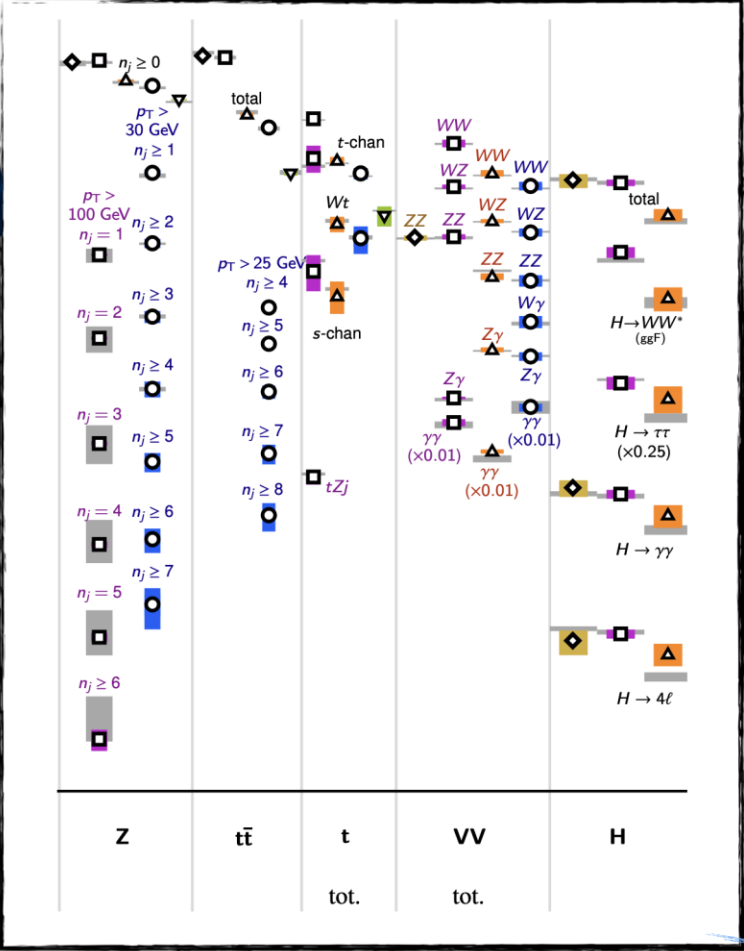
Bild: CERN



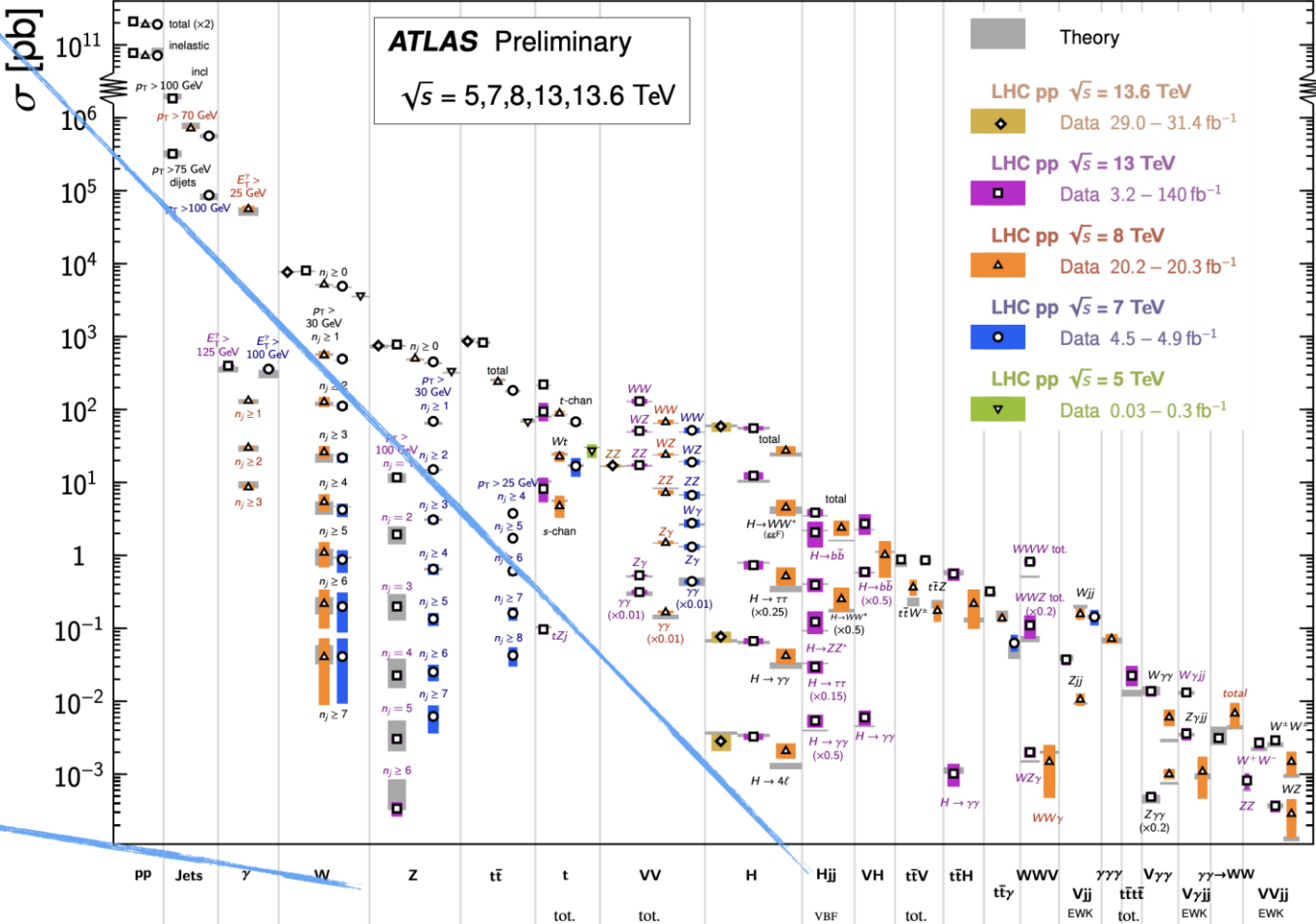
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
 & - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{cw} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)) - \\
 & ig_{sw} (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + g^2 c_w^2 (Z_\nu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^4} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{sw} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig_{sw} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{M}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^c \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{sw} A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + \\
 & (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) d_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda e} e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda e} d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda \nu} \nu^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda \nu}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda e} (1 - \gamma^5) e^\lambda) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda e} (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda \nu} (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) - m_\nu^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda \nu} (1 - \gamma^5) \nu^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda \nu}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\nu - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda \nu}^L (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\nu + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda e} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda e} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda \nu}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda \nu}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{C}^a C^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

Das Standardmodell der Teilchenphysik

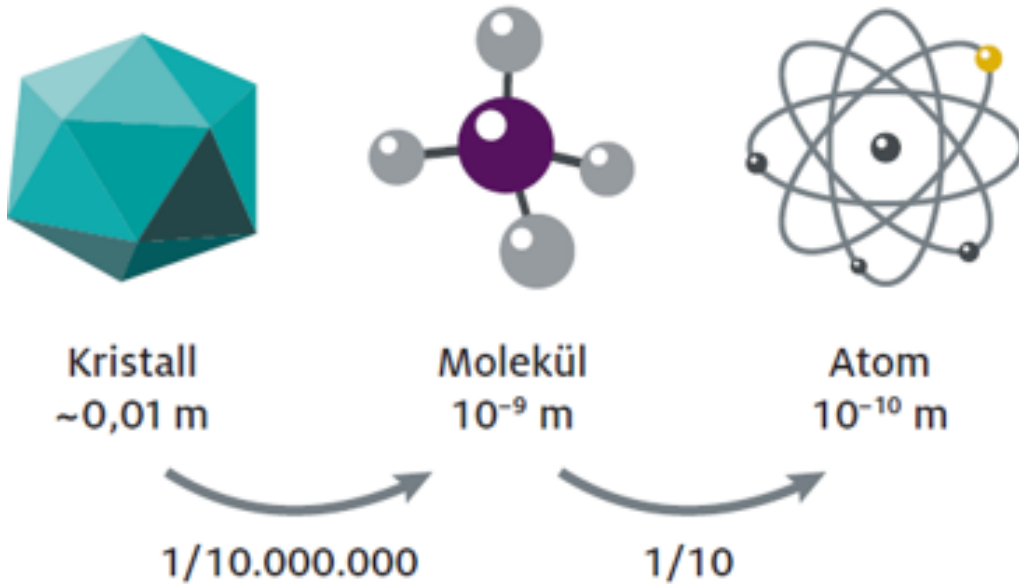
Status: June 2024



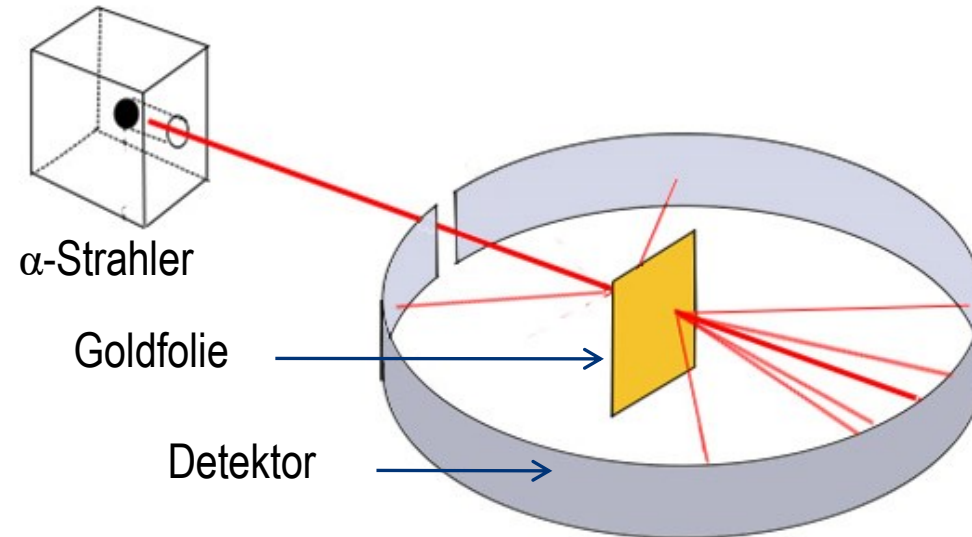
Standard Model Production Cross Section Measurements



Größenordnungen und Aufbau der Materie



Experimenteller Nachweis des Atomkerns



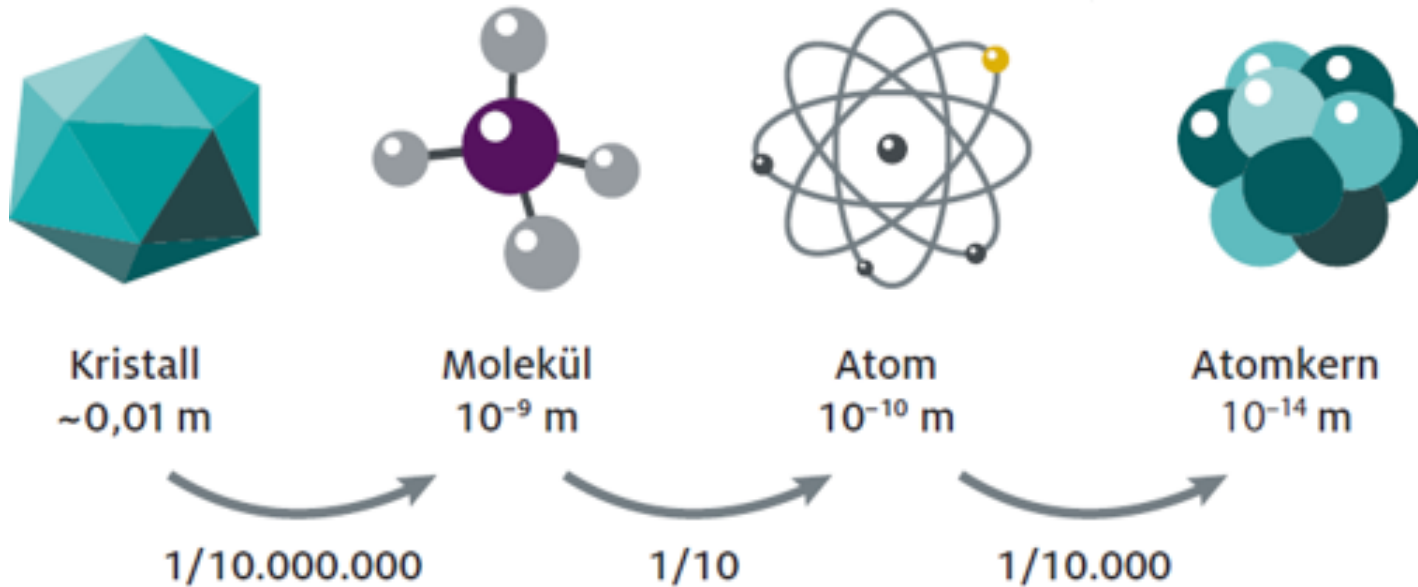
Rutherford-Streuexperiment (1911)

Streuung von α -Teilchen (Heliumkerne, 2 Protonen und 2 Neutronen) an Goldatomen

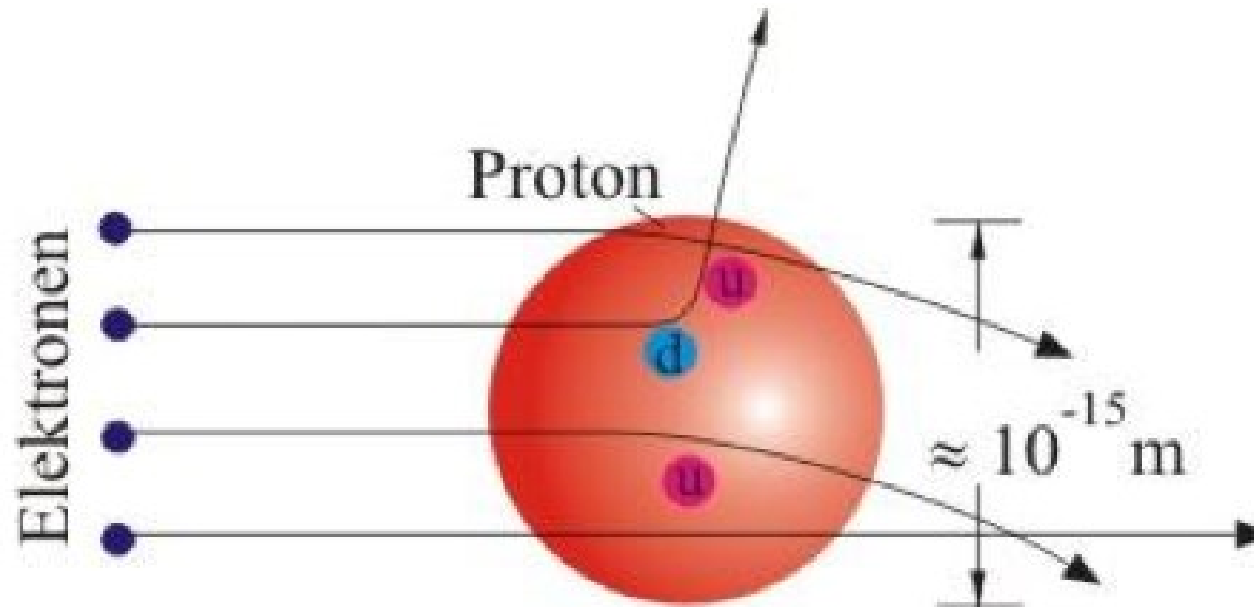
→ Unerwartetes Streuverhalten (Häufigkeit und Winkel)

→ Atome besitzen eine innere Struktur

Größenordnungen und Aufbau der Materie



Experimenteller Nachweis der Quarks



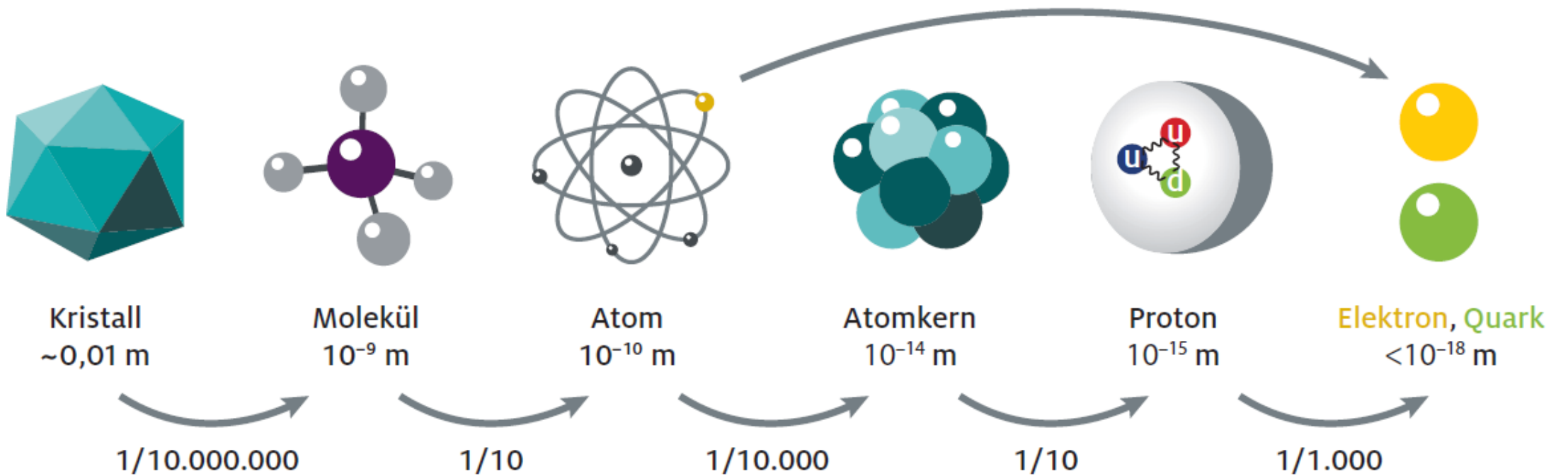
Experiment am Stanford Linera Accelerator Center (SLAC, 1969)

Streuung von Elektronen an Protonen (von flüssigem Wasserstoff)

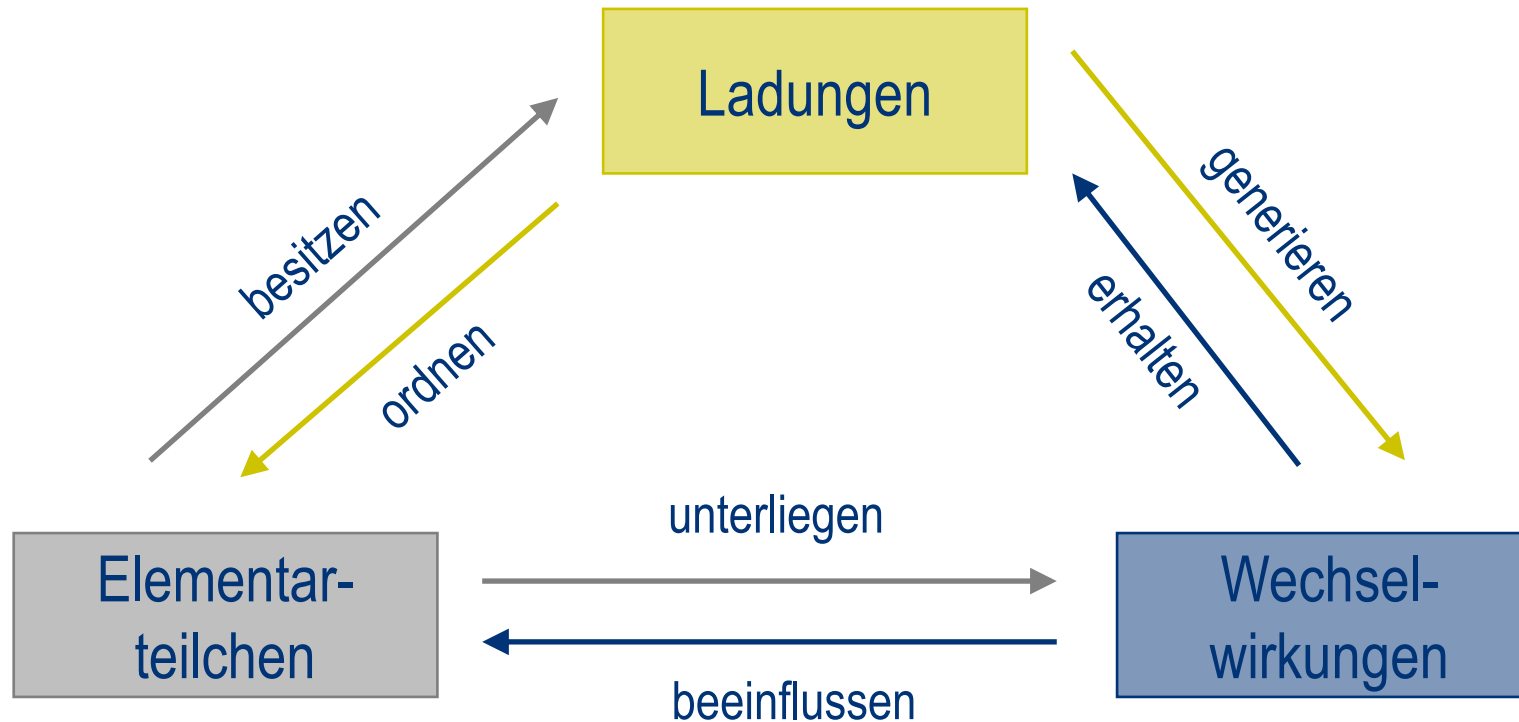
→ Unerwartetes Streuverhalten (Häufigkeit und Winkel)

→ Protonen Besitzen eine innere Struktur

Größenordnungen und Aufbau der Materie



Die drei Basiskonzepte des Standardmodells





Fußball - Analogie

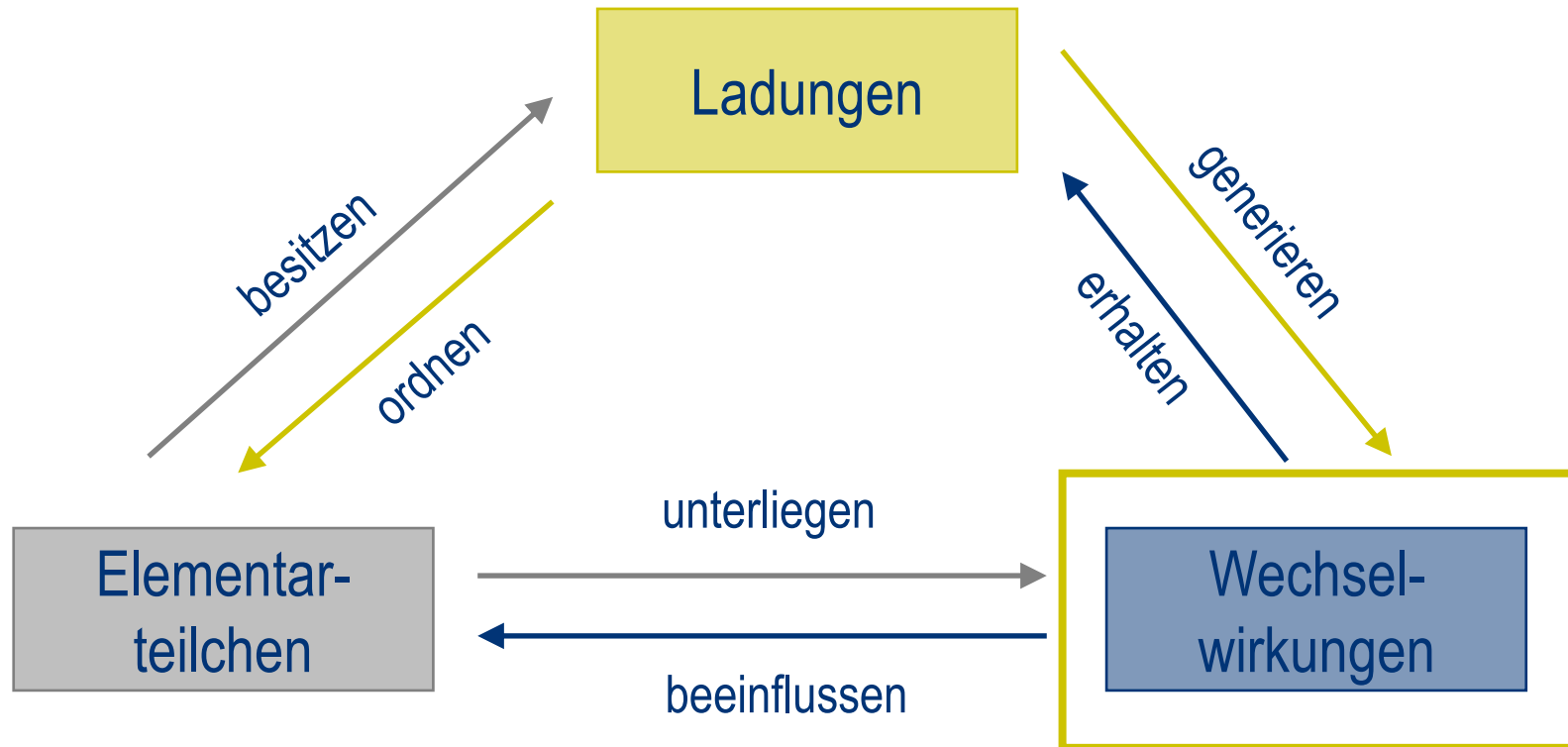
- ▶ Wie erklärt man jemandem etwas Unbekanntes? z.B. Fußball...
 - Man beginnt nicht mit der Anzahl der Spieler oder gar deren Positionen, sondern mit den **Grundregeln**

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,...
- ▶ Nicht: Liste der existierenden Teilchen
- ▶ Sondern: Regeln, die beschreiben, wie diese wechselwirken

u	c	t
d	s	b
v_e	v_μ	v_τ
e	μ	τ

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Basiskonzept: Wechselwirkung

▶ Umfasst die Phänomene

- Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
- Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. Beta-Zerfall)
- Erzeugung von Materie + Antimaterie (z.B. Elektron + Positron)
- Annihilation in Botenteilchen (z.B. PET: 2 Photonen)

▶ Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

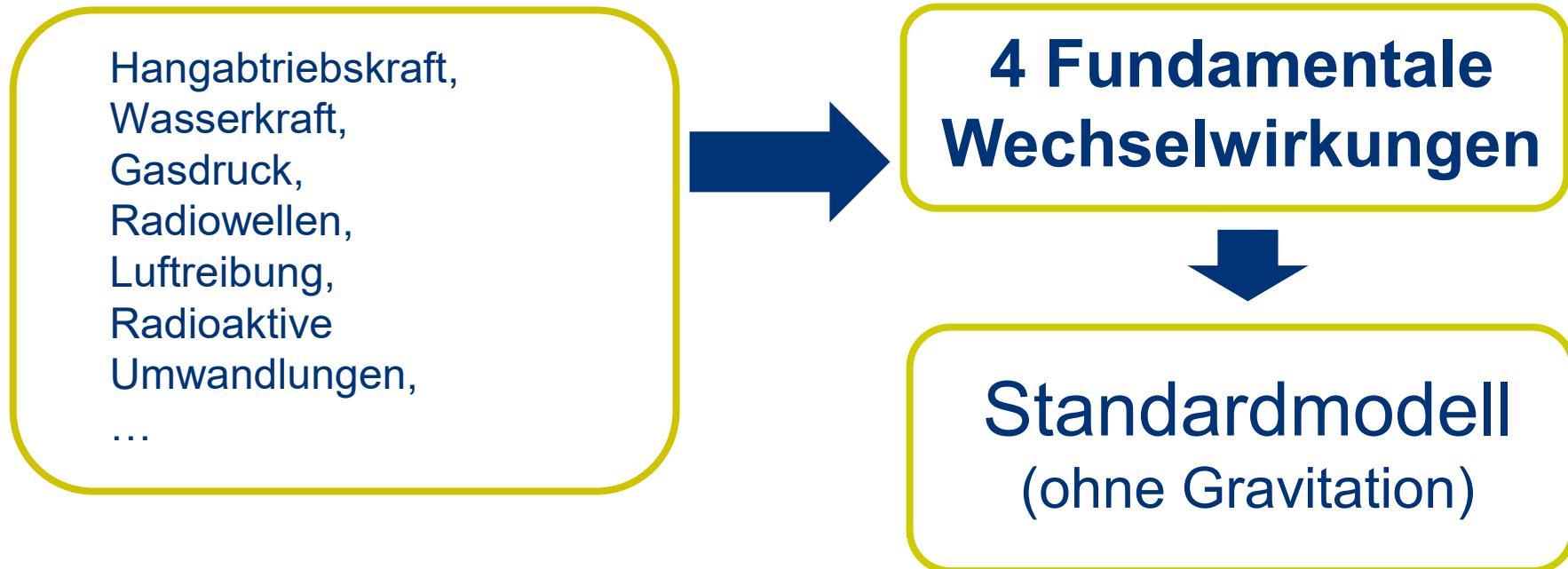
▶ Kraft ist nur ein Aspekt von Wechselwirkung

▶ Kraft nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

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

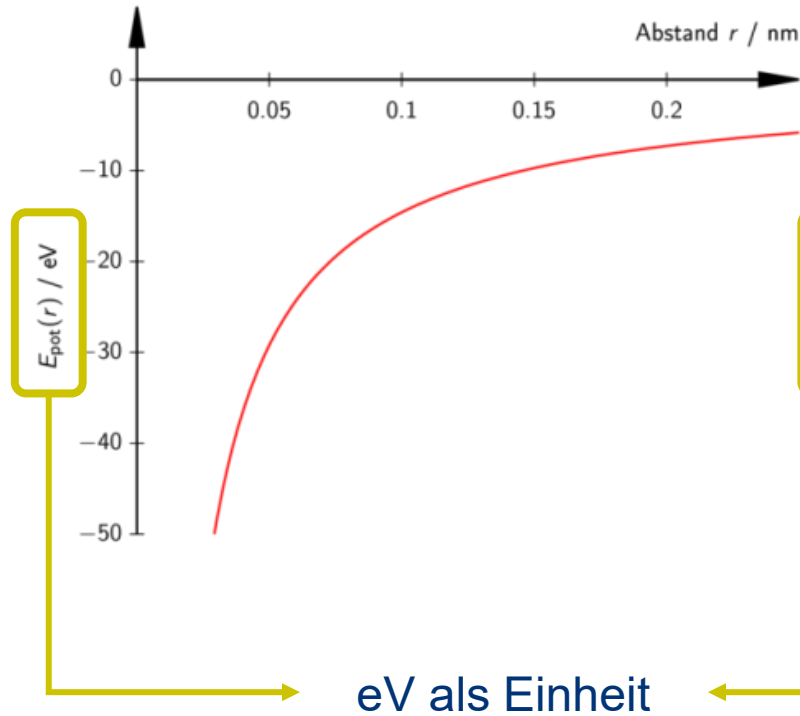
Wechselwirkungen

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

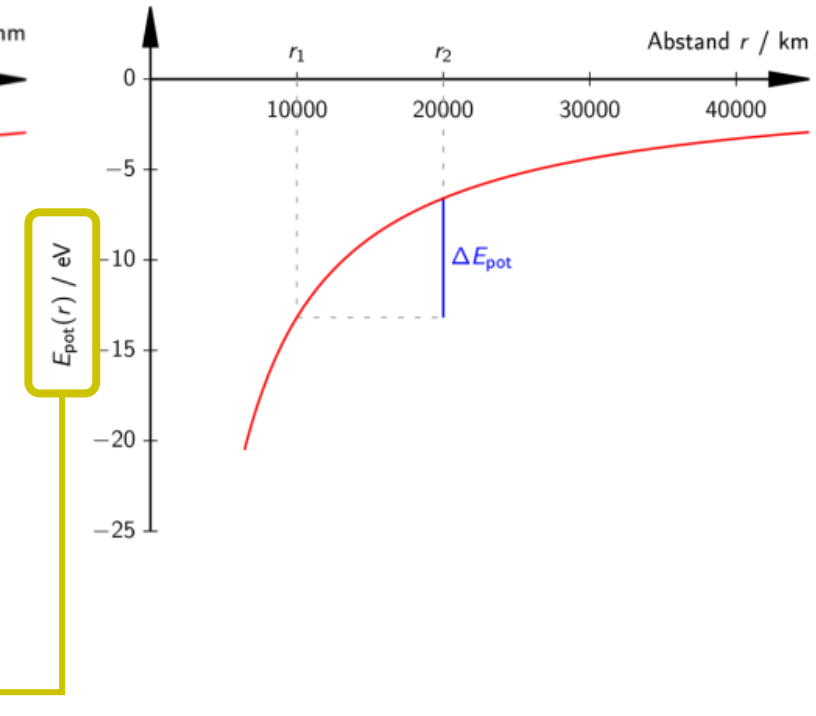


Ausgangspunkt: Zwei Bekannte Wechselwirkungen

► Elektromagnetische Wechselwirkung



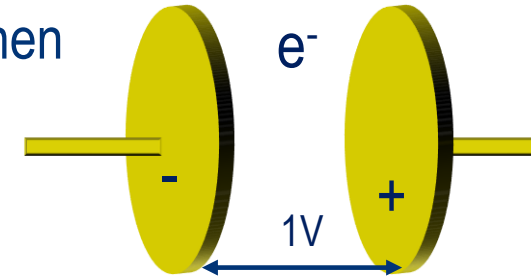
► Gravitation (O_2 und Erde)



Einheit Elektronenvolt

- ▶ 1 eV ist die Energie, die ein einfach elektrisch geladenes Teilchen gewinnt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft.
 - $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$
 - $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
 - $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

- ▶ Wegen $E=mc^2$ können Massen in eV/c^2 angegeben werden! (c: Lichtgeschwindigkeit)
 - Elektron $0,5 \text{ MeV}/c^2$
 - Proton $938 \text{ MeV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$
 - Higgs-Teilchen $\sim 125 \text{ GeV}/c^2$

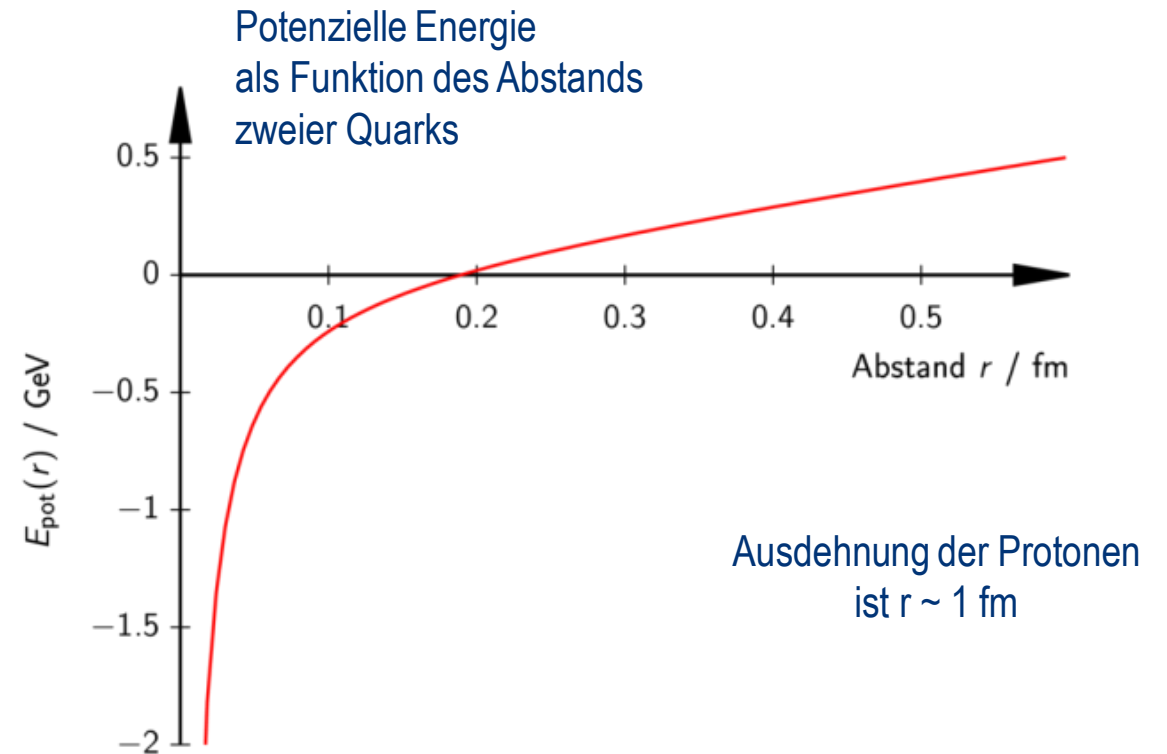


Die Starke Wechselwirkung

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

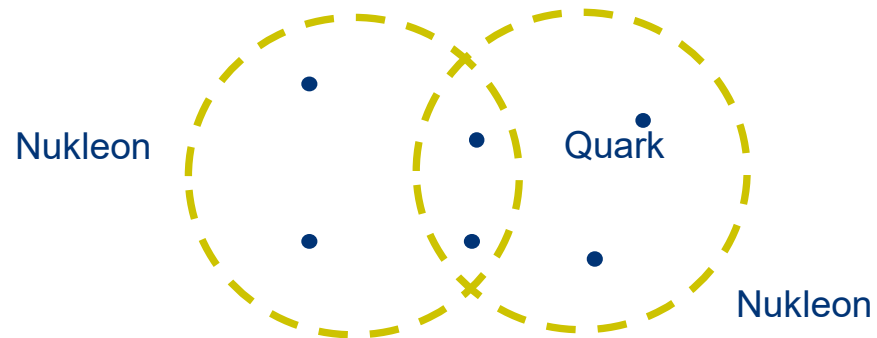
- ▶ **Substruktur:**

Nukleonen bestehen aus Quarks, die starke Wechselwirkung spüren.
Die „starke Kernkraft“ geht auf diese Substruktur zurück



Bindung von Nukleonen

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



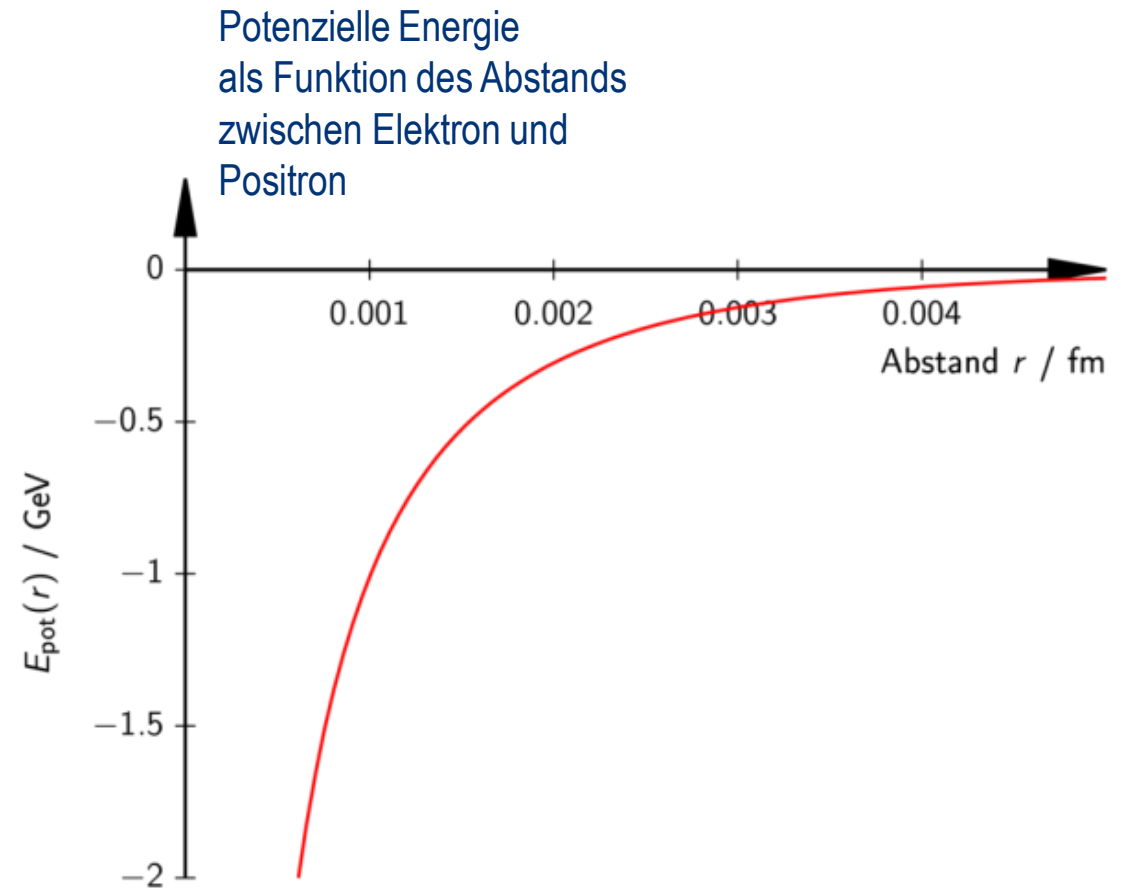
- Bessere Vorstellung: Nukleonengas
- Größere Abstände: Austausch von „Pionen“ (geb. $q\bar{q}$ Zustände)

Die Schwache Wechselwirkung

- ▶ Warum scheint die Sonne?
 - Protonen (H) fusionieren zu He unter Entstehung von Positronen und Neutrinos
 - Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?
- ▶ schwache Wechselwirkung
 - z.B. β^+ -Umwandlung

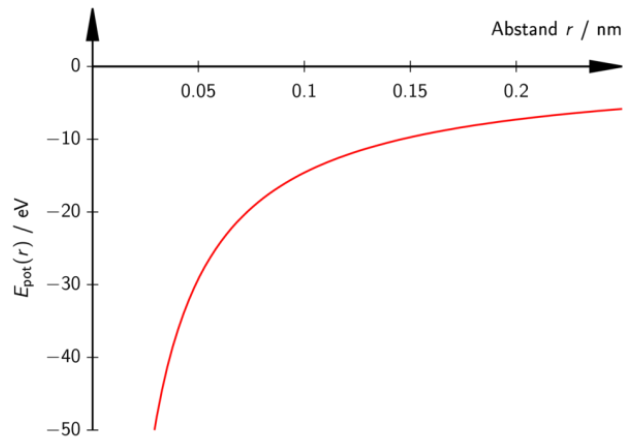
Die Schwache Wechselwirkung

- ▶ Warum scheint die Sonne?
 - Protonen (H) fusionieren zu He unter Entstehung von Positronen und Neutrinos
 - Wie „verwandelt“ sich ein Proton in ein Neutron?
- ▶ schwache Wechselwirkung
 - z.B. β^+ -Umwandlung

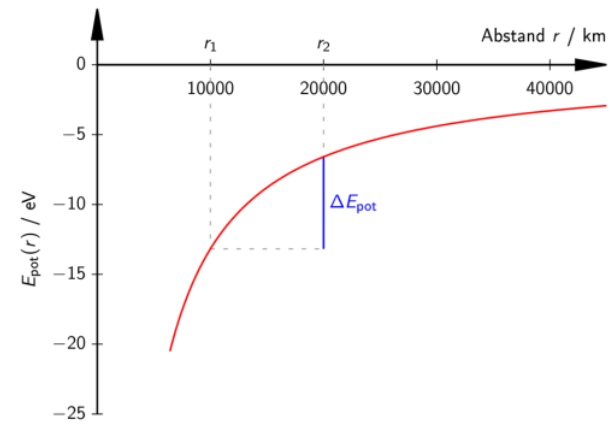


Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

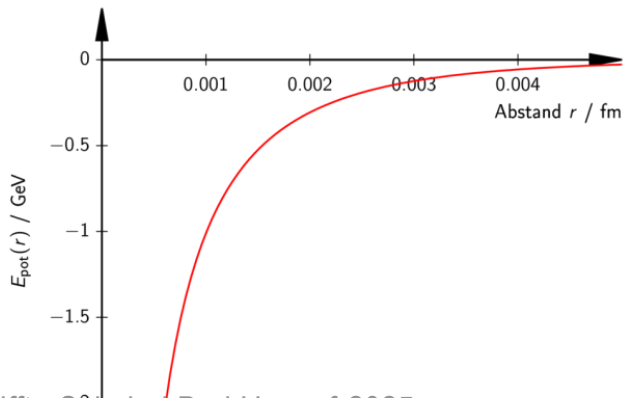
► Elektromagnetische WW



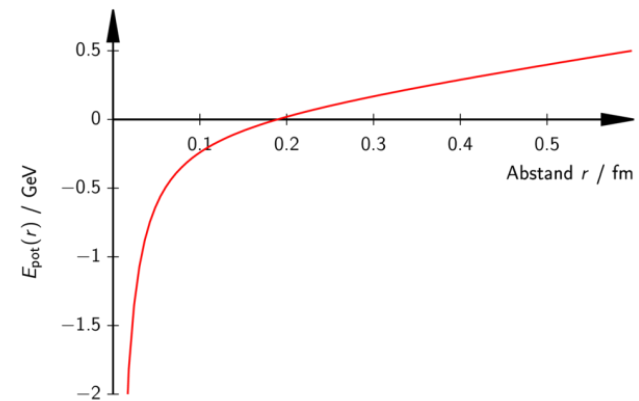
► Gravitation



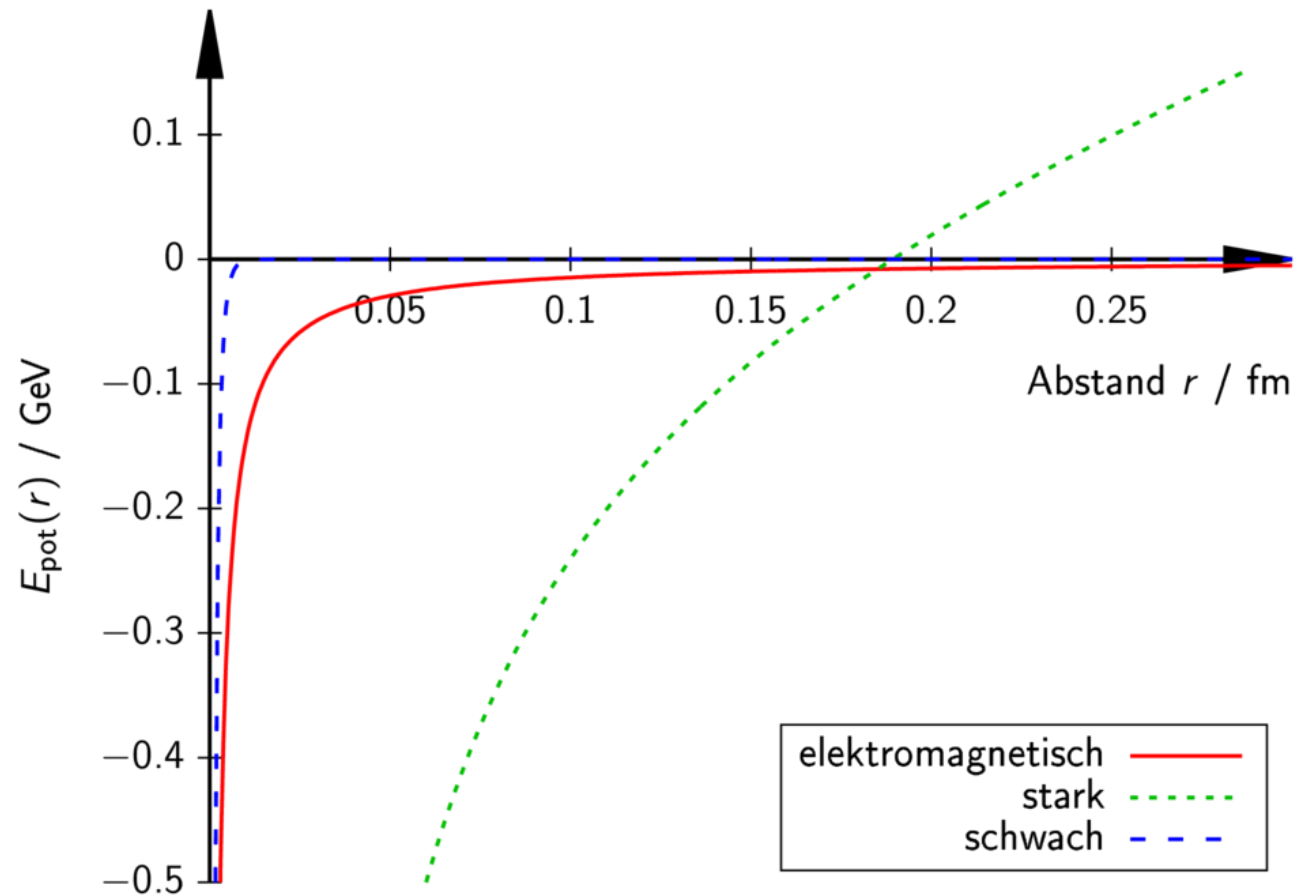
► Schwache WW



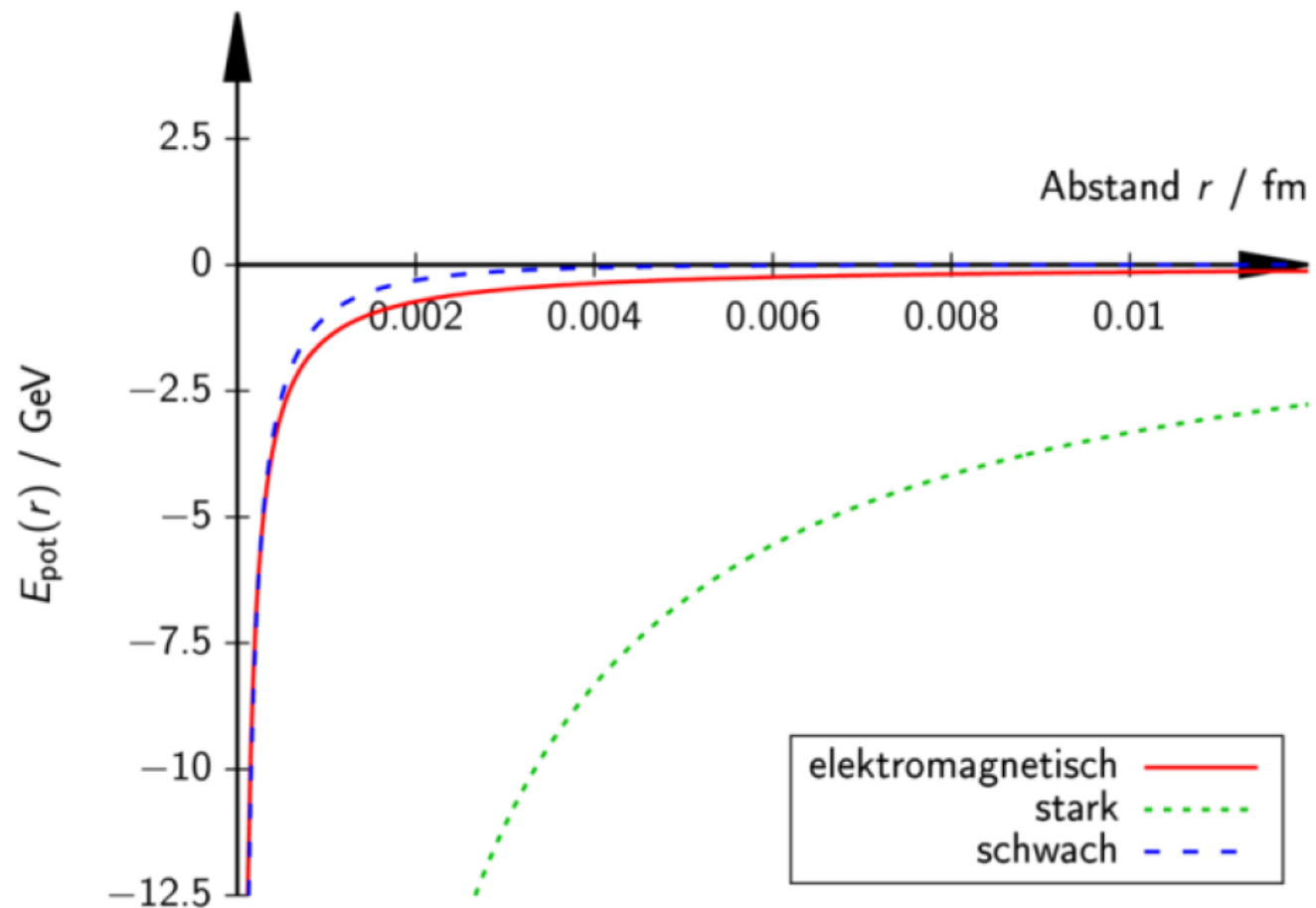
► Starke WW



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

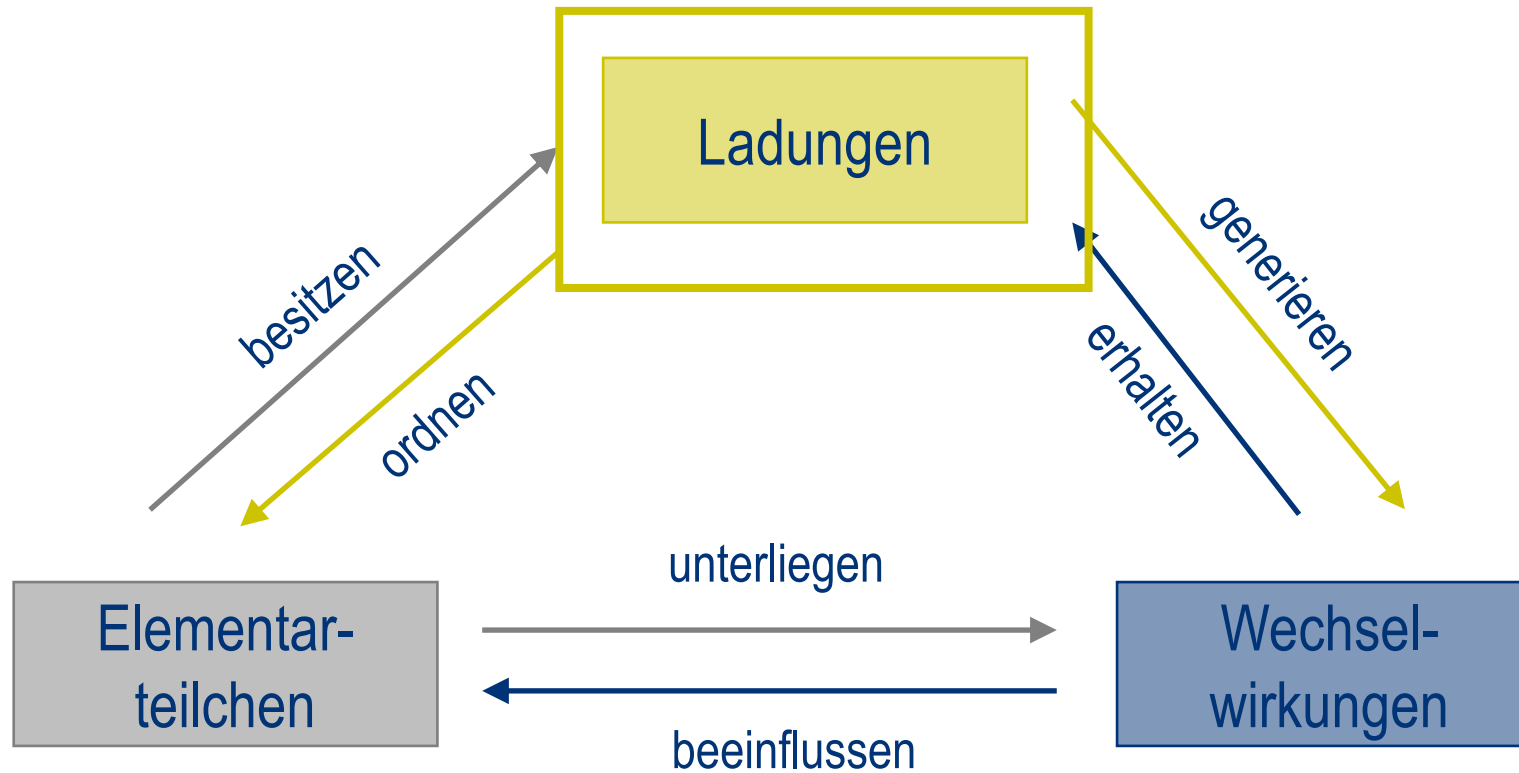
Wechselwirkung	Potenzielle Energie
gravitativ	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{grav} \frac{-1}{r}$
elektromagnetisch	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_{em} \frac{Z_1 Z_2}{r}$
stark	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r}$

Quiz: Welche Wechselwirkung ist verantwortlich?

1. Öffne **www.slido.com** und gib den Code **3634483** ein oder scanne den **QR-Code**
2. Gib deinen Namen oder einen Fantasienamen ein
3. 8 Situationen – 8 Entscheidungen – Welche WW ist (haupt)verantwortlich? Jeweils 20 s Zeit zur Entscheidung. „Senden“ drücken!



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)

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)
- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine **Ladung**
- ▶ Ein **Kopplungsparameter** α existiert auch für andere Wechselwirkungen
 - $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_{grav}$

Erweiterung des Ladungsbegriffs

- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladungszahlen bzw. -vektoren sind charakteristische Teilcheneigenschaften
- ▶ Bekannt:
 - Elektrische Ladung
- ▶ Neu:
 - Schwache Ladung
 - Starke (Farb-)Ladung
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv oder negativ sein

elektrische Ladungszahl	Z
schwache Ladungszahl	I
starker Farbladungsvektor	\vec{C}

Die Kopplungsparameter der fundamentalen WW

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
elektromagnetisch	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Und Gravitation?

- ▶ Ladung und Kopplungsparameter der Gravitation quantenfeldtheoretisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Keine Elementarmasse, kein teilchenunabhängiger Kopplungsparameter.
- ▶ Masse als „Ladung“ der Gravitation ungeeignet, da keine Erhaltungsgröße

▶ Praktikabel: zwischen Teilchen 1 und Teilchen 2: $\alpha_{grav}^{1,2} = G \frac{m_1 m_2}{\hbar c}$

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

Vgl. EM WW: $\alpha_{em} = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 \hbar c} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c}$



Konzept der Ladung

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

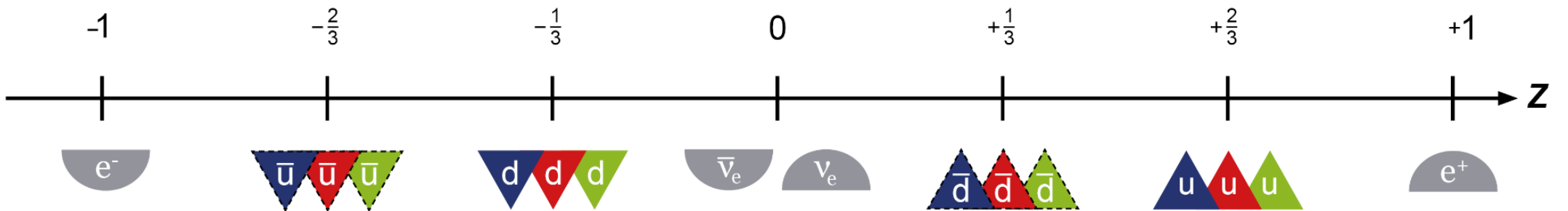
Und:

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



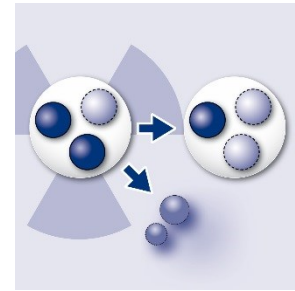
Elektrische Ladung

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

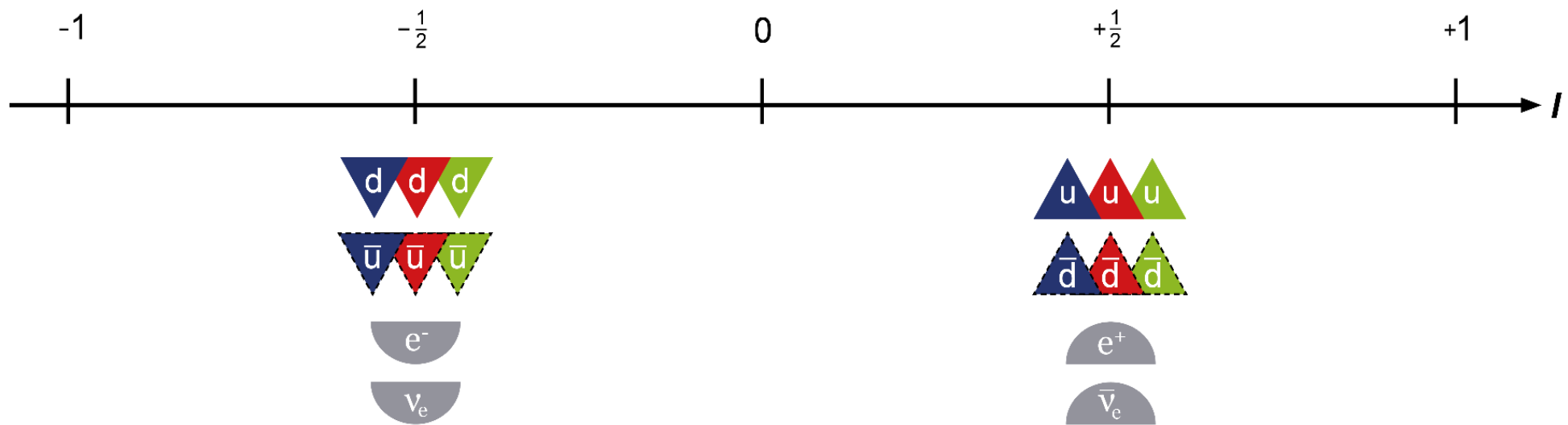


- Elektrische Ladung ist gequantelt

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

- ▶ Schwache Ladung hat eigentlich einen vektoriellen Charakter
- vollständige Bezeichnung: **Schwache Isospin-Ladung**
- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie beim 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.)
 - zwischen den Komponenten existieren Unbestimmtheitsrelationen
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl $I := I_3^W$

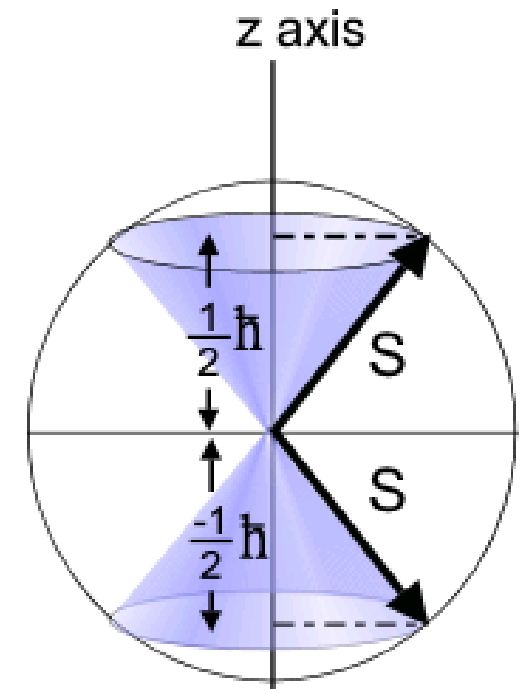
$$Q_{em} = e \cdot Z$$

$$Q_w = g_w \cdot I$$

Kopplungsstärke g_w

Ladungszahl

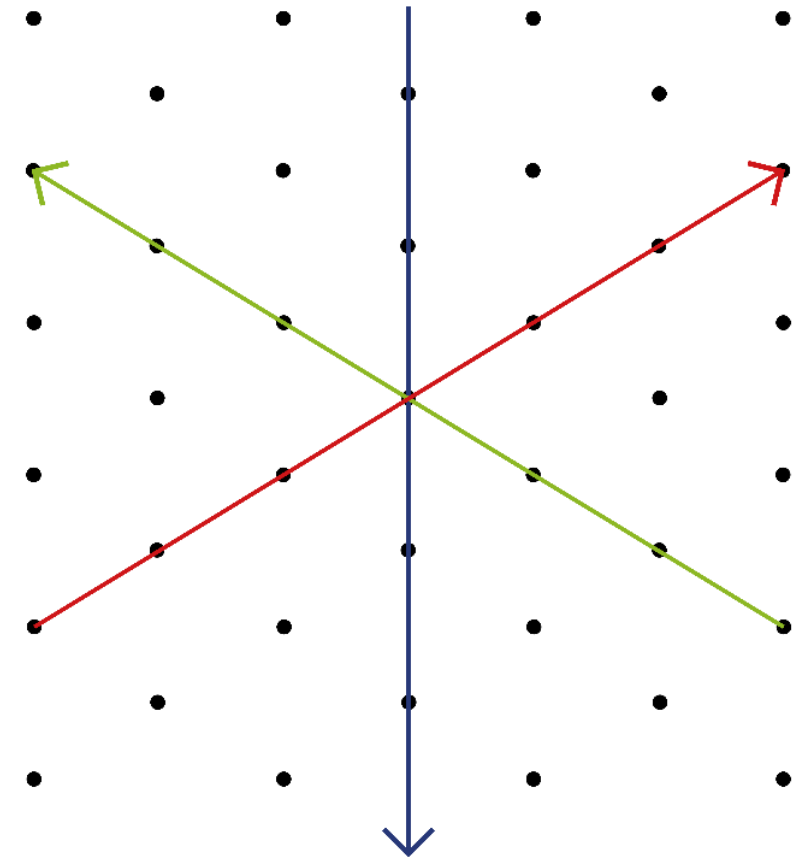
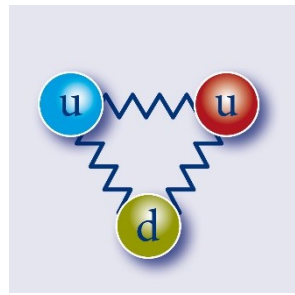
$$\rightarrow \alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi}$$



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

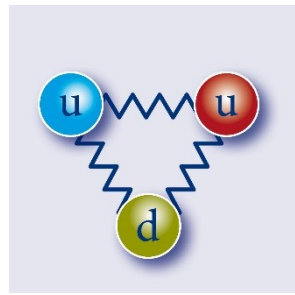
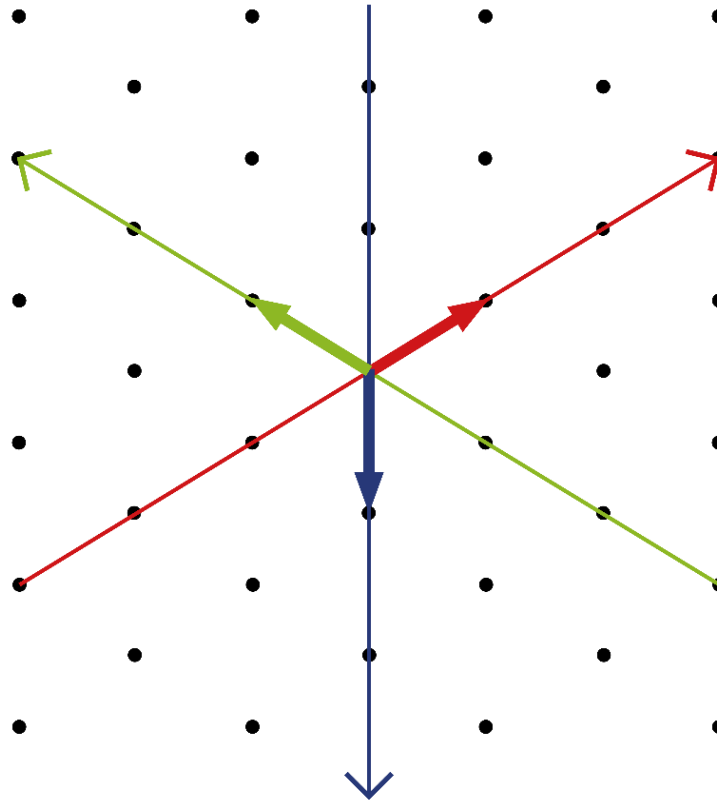
Starke Ladung

- ▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung = „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**



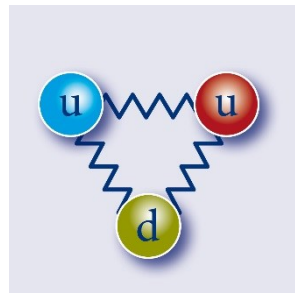
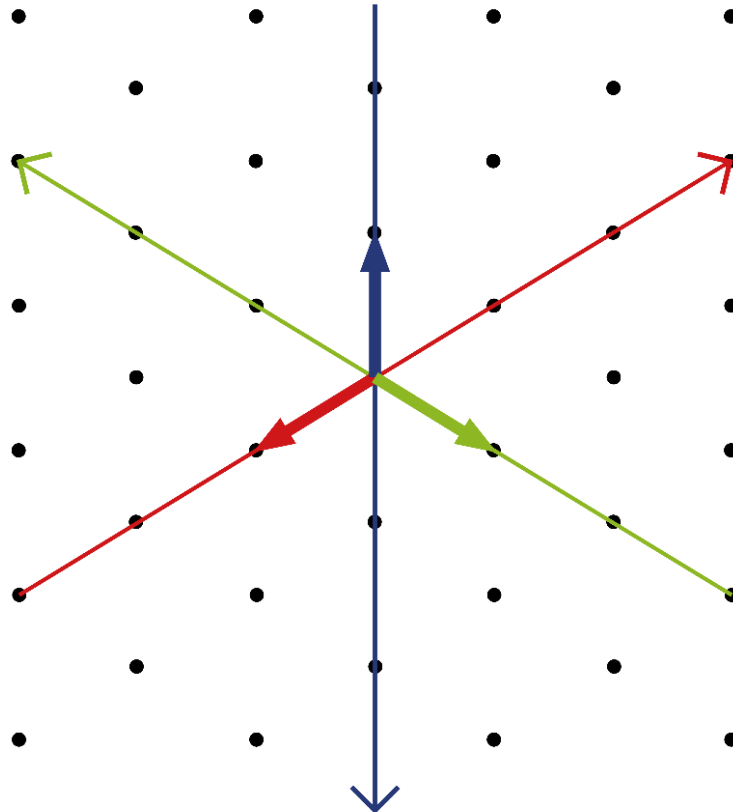
Starke Ladung

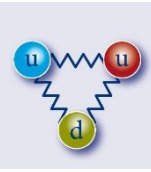
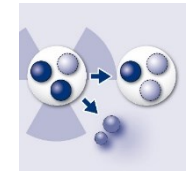
► Farbladungsvektoren von Quarks



Starke Ladung

► Farbladungsvektoren von Anti-Quarks





Alle Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

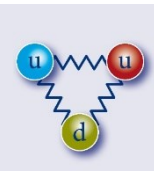
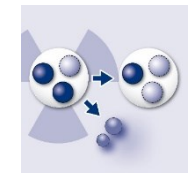
$$Z_p = Z_u + Z_u + Z_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



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

Zusammenfassung: Ladungen

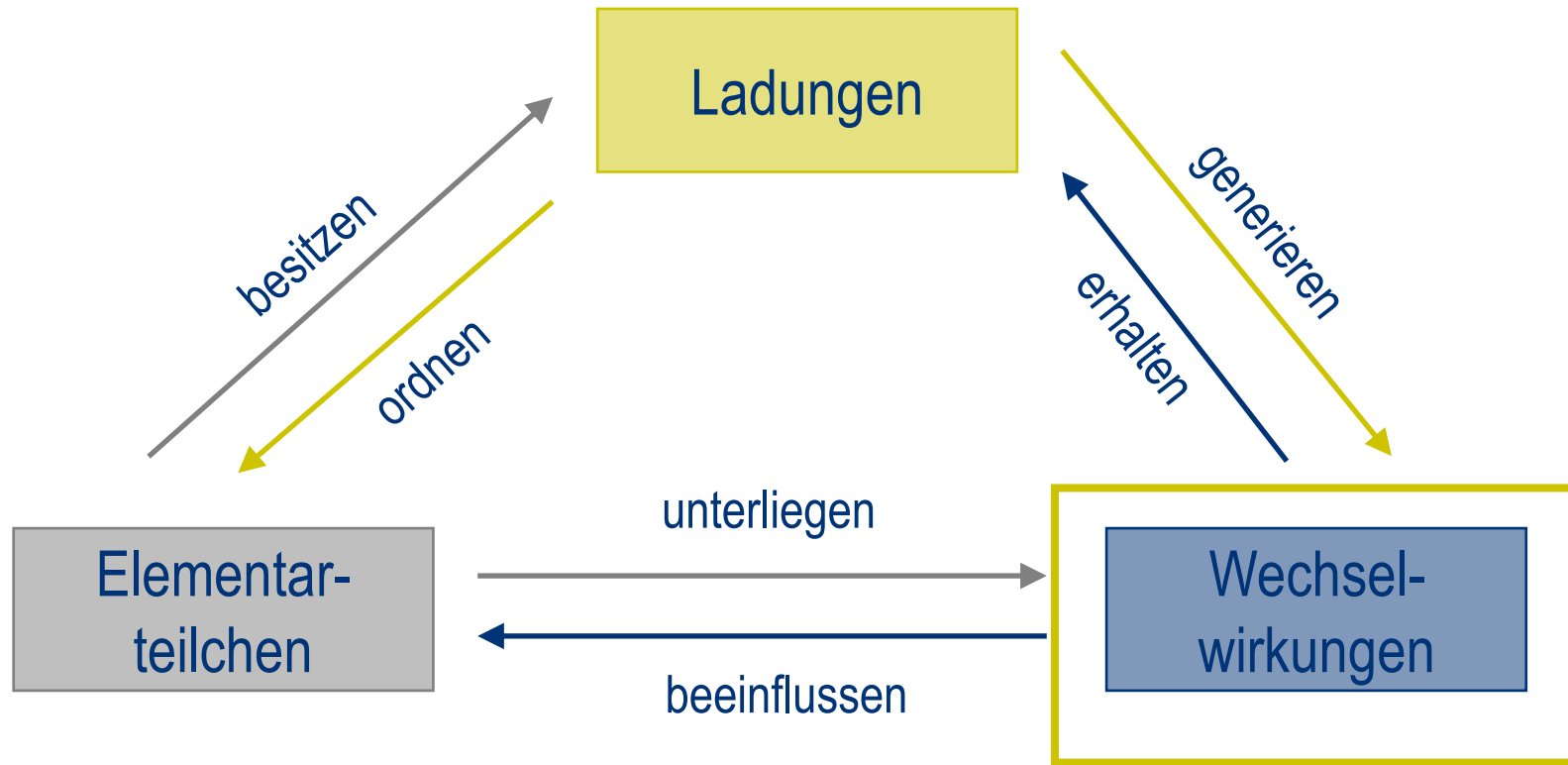
- ▶ Drei verschiedene Ladungen
 - Elektrisch
 - Schwach
 - Stark
- ▶ Ladungen sind
 - Additiv
 - Erhalten
 - Vorhersage von erlaubten Prozessen
 - Gequantelt
- ▶ Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt

Diskussion / Fragen

- ▶ Murmelfase: Diskutiert und formuliert die für euch wichtigsten Erkenntnisse aus dem bisherigen Vortrag.
 - Formuliert Fragen, die ihr zu den bisherigen Inhalten habt.
 - Zeit: 5 Minuten

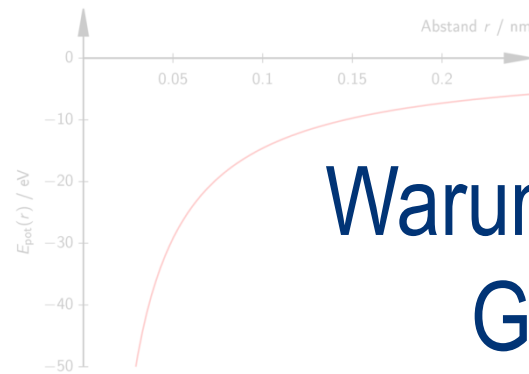


Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Die 4 fundamentalen Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW

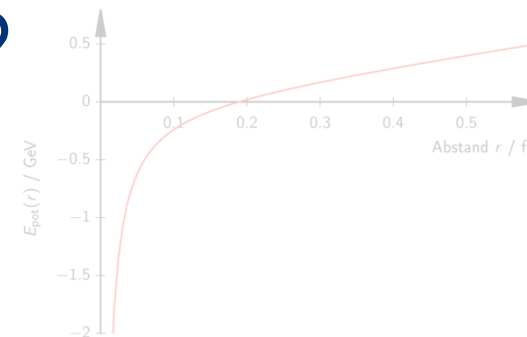
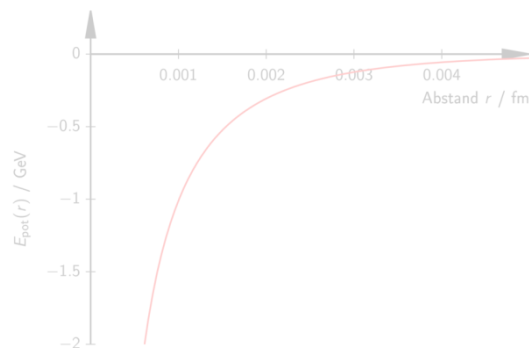


► Gravitation



Warum erfahren wir nur
Gravitation und
Elektromagnetismus
im Alltag?

► Schwache WW

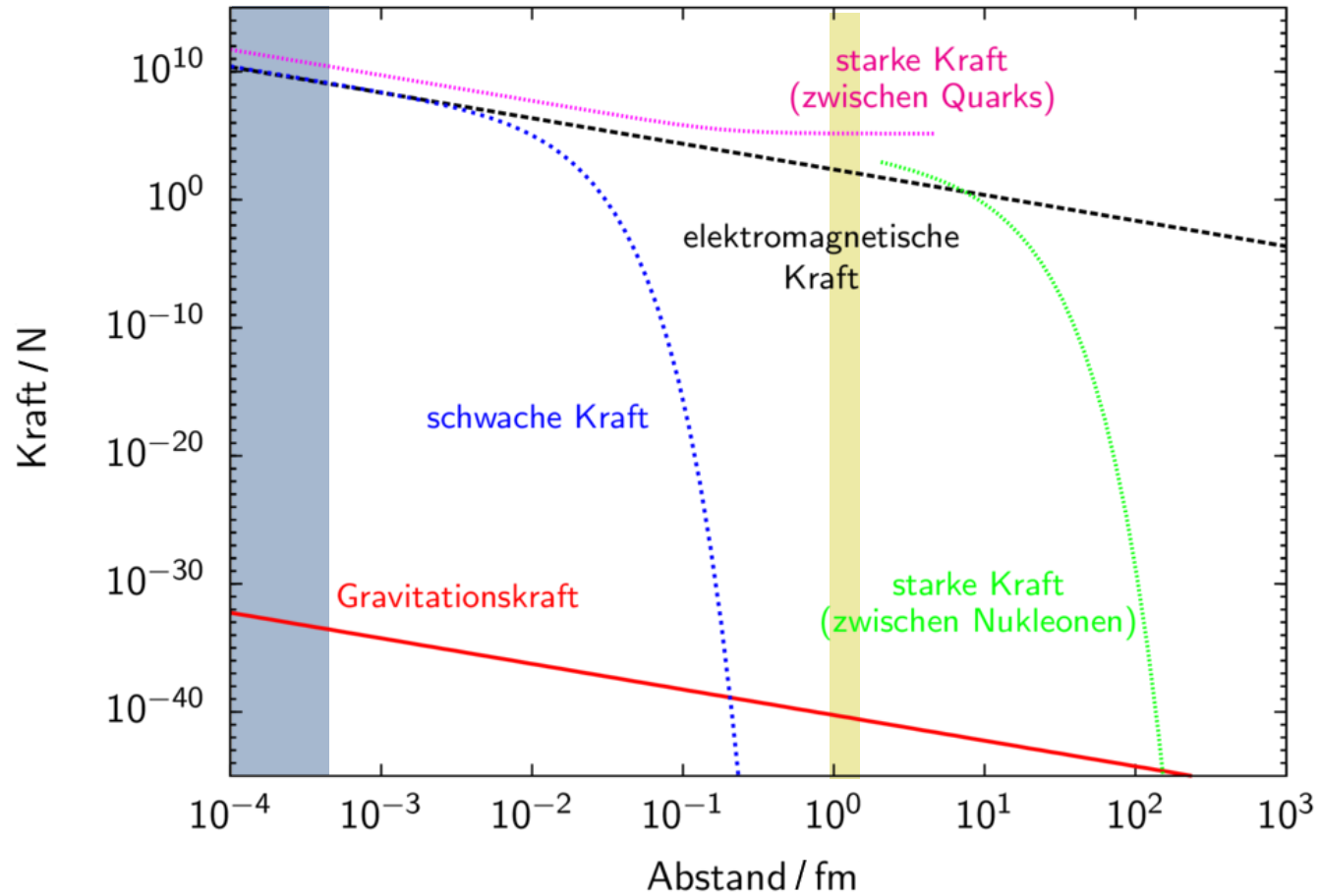


Kräfte der Wechselwirkungen

Basiskonzept:
Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung +
Erzeugung + Vernichtung

Grenze exper. Auflösung
(stark, schwach, em)

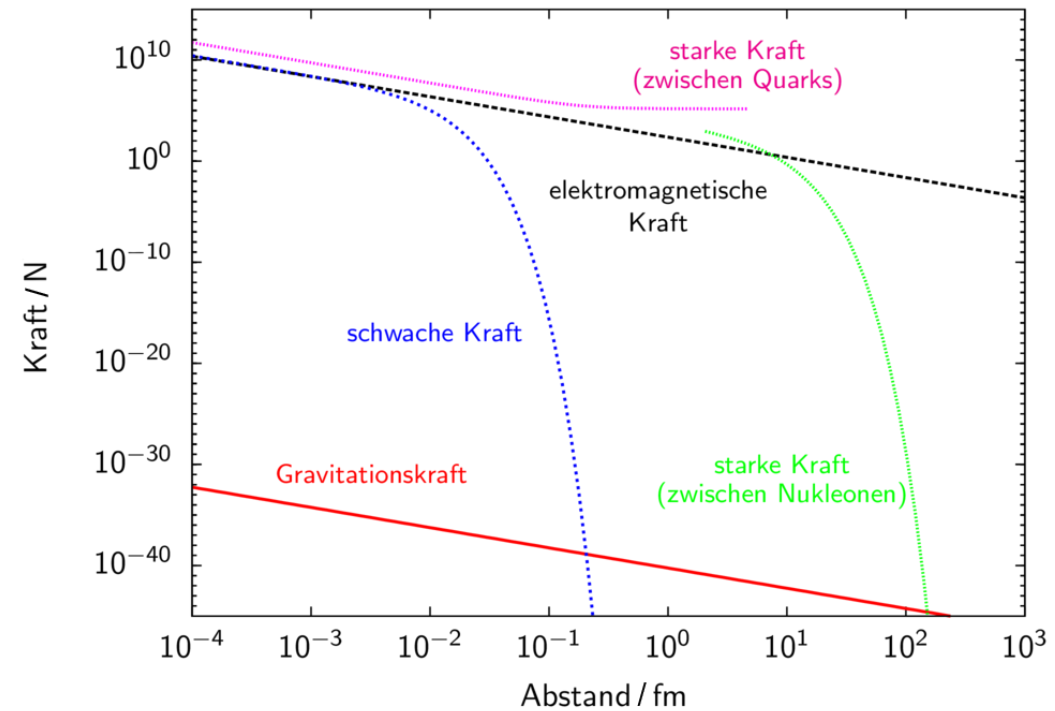
Protondurchmesser



Kräfte der Wechselwirkungen

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand r
 - Bei kleinen Abständen $F \sim 1/r^2$
- ▶ 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



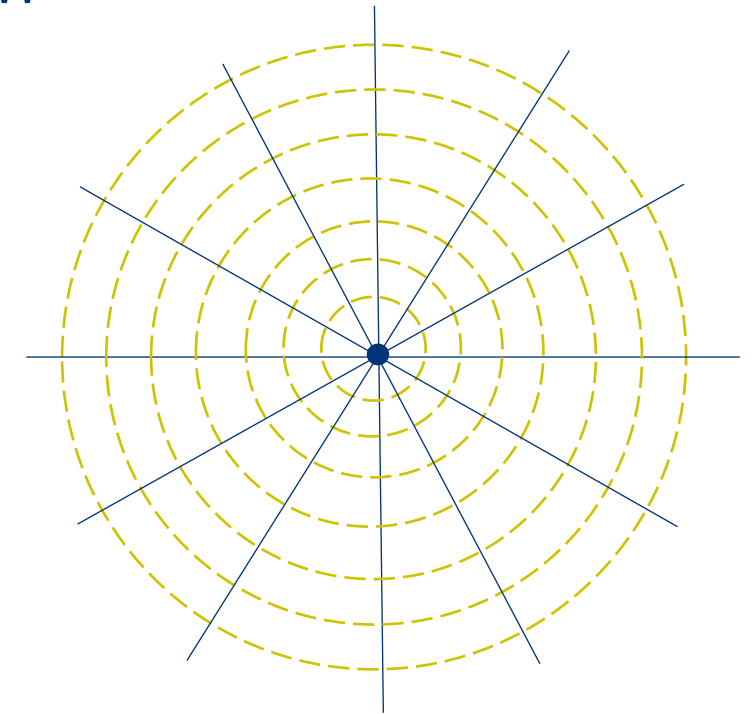
Stärke der Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Kopplungsparameter α
Gravitation	$\frac{1}{10^{38}}$... , $\frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$\frac{1}{137}$
stark	$\alpha_s \approx \frac{1}{5}$
schwach	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Warum erfahren wir nur
Gravitation und
Elektromagnetismus
im Alltag?

Ausgangspunkt: Geometrische Betrachtung

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

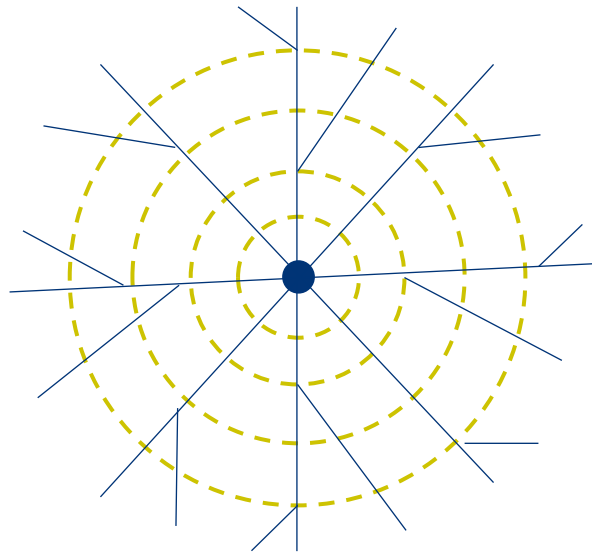


— Feldlinie
- - - Äquipotentiallinie

Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

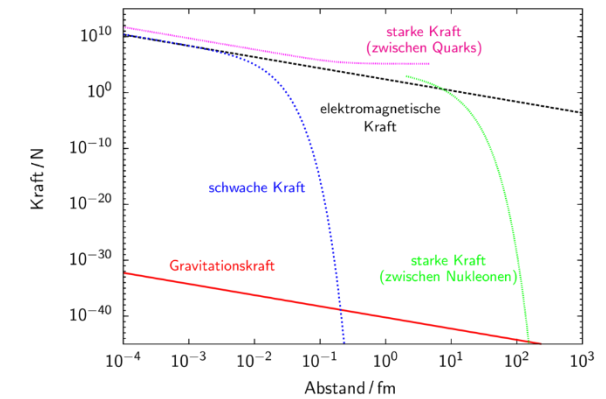
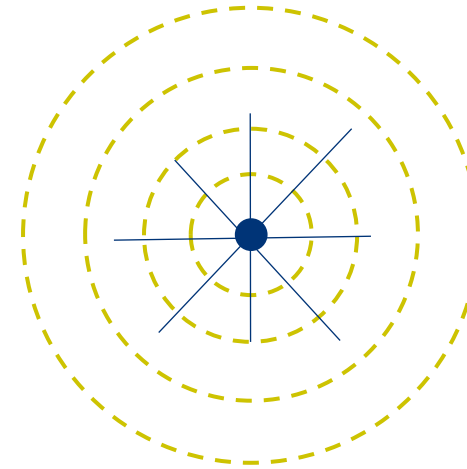
► Stark

- Kraft konstant →
Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



► Schwach

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



Das Botenteilchenmodell

- ▶ Wechselwirkungen werden durch Botenteilchen vermittelt.
- ▶ Energieübertrag, Impulsübertrag und Teilchenumwandlungen werden durch Abstrahlung/Absorption von Botenteilchen beschrieben

$e^- + \gamma \rightarrow e^-$ (Absorption eines Photons, Energieänderung)

$e^- + W^+ \rightarrow \nu_e$ (Absorption eines W – Teilchens, Umwandlung)

Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

▶ Botenteilchen (Photon) ist:

- masselos
- elektrisch neutral

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

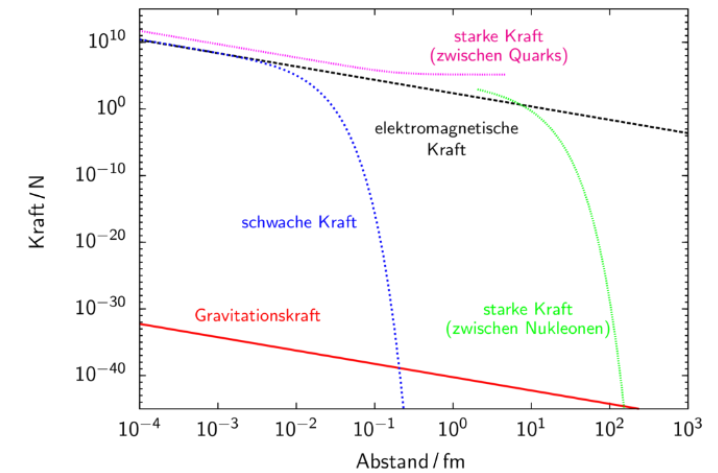


Schwache WW – W- und Z-Teilchen

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

▶ Grund: Massereiche Botenteilchen (W^+ , 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



Analogie

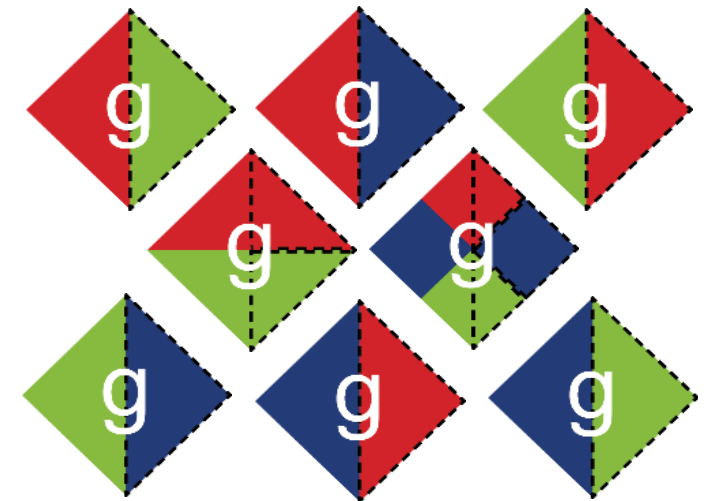
- ▶ Abschwächung/Abschirmung von el./magn. Feldern
 - Dielektrikum → Abschwächung
 - Supraleiter → Abschirmung auf kleine Reichweite λ
- ▶ Brout-Englert-Higgs-Feld schirmt schwache Ladungen ab
 - „Supraleiter der schwachen Ladung“
 - Überall im Universum vorhanden
 - BEH-Mechanismus beschreibt, wieso W und Z Masse haben und damit die Reichweite der schwachen WW
- ▶ Higgs-Teilchen ist Anregung des BEH-Feldes

Starke WW – Gluonen

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

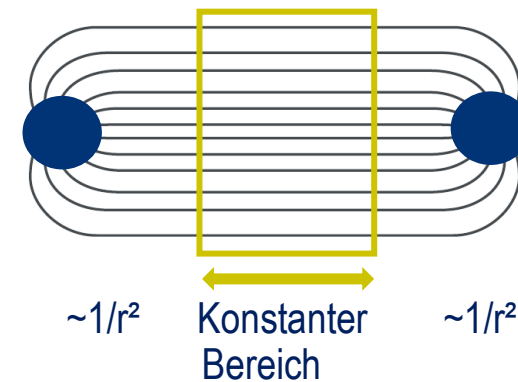
- ▶ Grund: die Botenteilchen besitzen selbst starke Ladung
- Gluonen können selbst Gluonen abstrahlen/absorbieren
 - Sie wechselwirken also miteinander

→ Linearer kr -Term im Potenzial



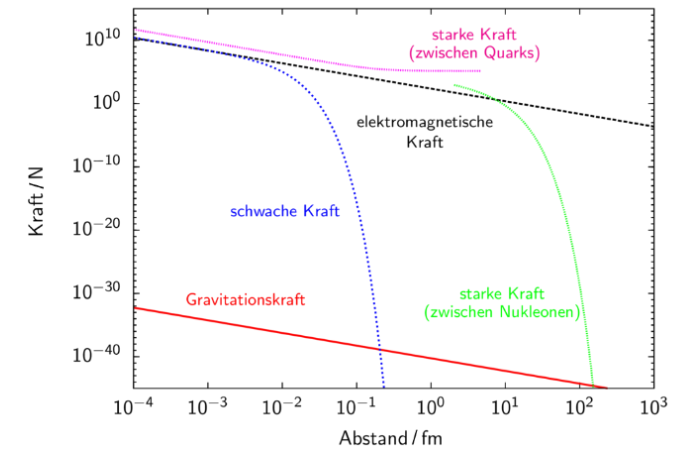
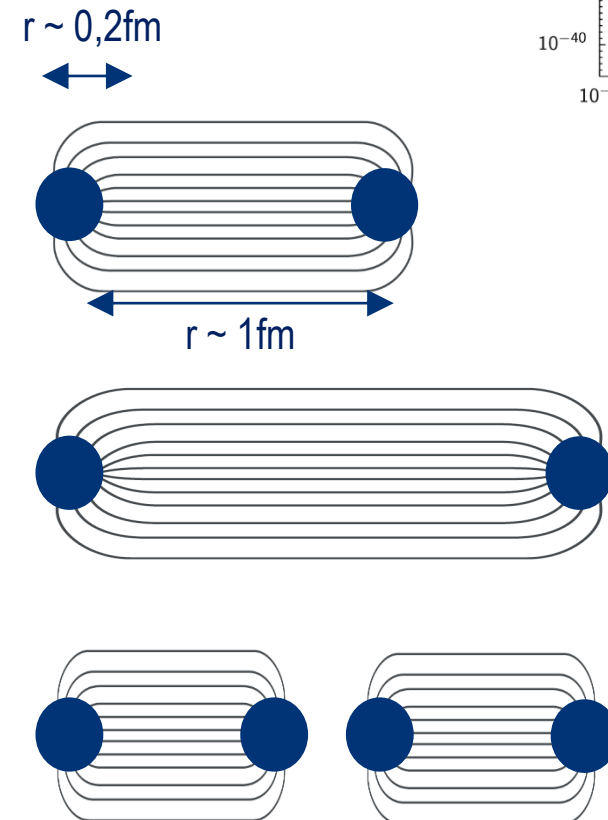
Starke Wechselwirkung

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



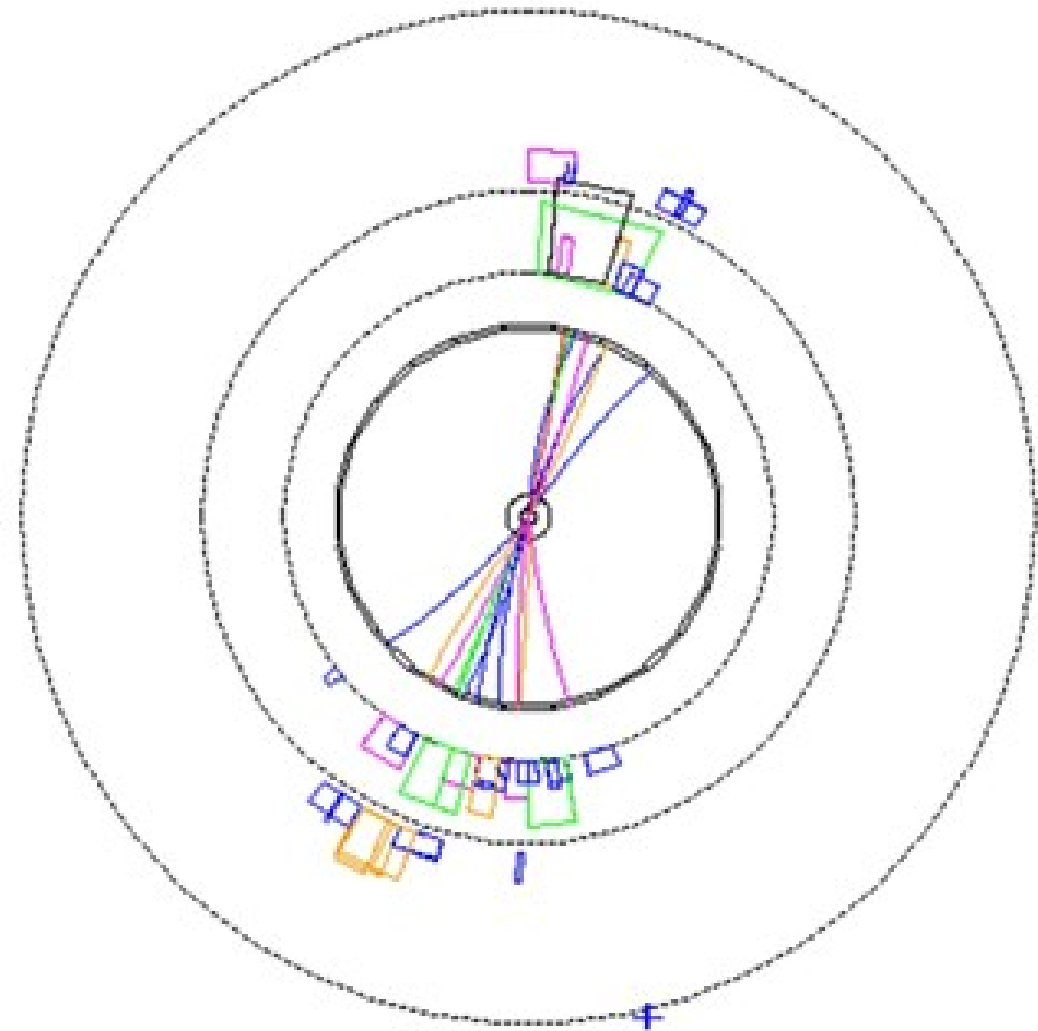
Starke Wechselwirkung

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



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“



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	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_s \frac{\vec{C}_1 \vec{C}_2}{r} + kr$	$5 \cdot 10^{-15} \text{m}$
schwach	$E_{Pot}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{m}$

Quiz: Was stimmt?

1. Öffne **www.slido.com** und gib den Code **3634483** ein oder scanne den **QR-Code**.
2. Gib deinen Namen oder einen Fantasienamen ein.
3. Mehrere Aussagen – Welche stimmen? Mehrfachauswahl möglich. Jeweils 90 s Zeit zur Entscheidung. „Senden“ drücken!



Zusammenfassung: Botenteilchen

- ▶ Reichweite und Potenziale der fundamentalen WW des Standardmodells lassen sich durch die Eigenschaften der zugehörigen Botenteilchen erklären
- ▶ Elektromagn. WW: Photon
 - Ungeladen, masselos
- ▶ Schwache WW: W- und Z-Teilchen
 - Große Masse → kleine Reichweite der WW
- ▶ Starke WW: Gluonen
 - Besitzen selbst starke (Farb-) Ladung → Selbstwechselwirkung → Confinement → effektiv beschränkte Reichweite



Diskussion / Fragen





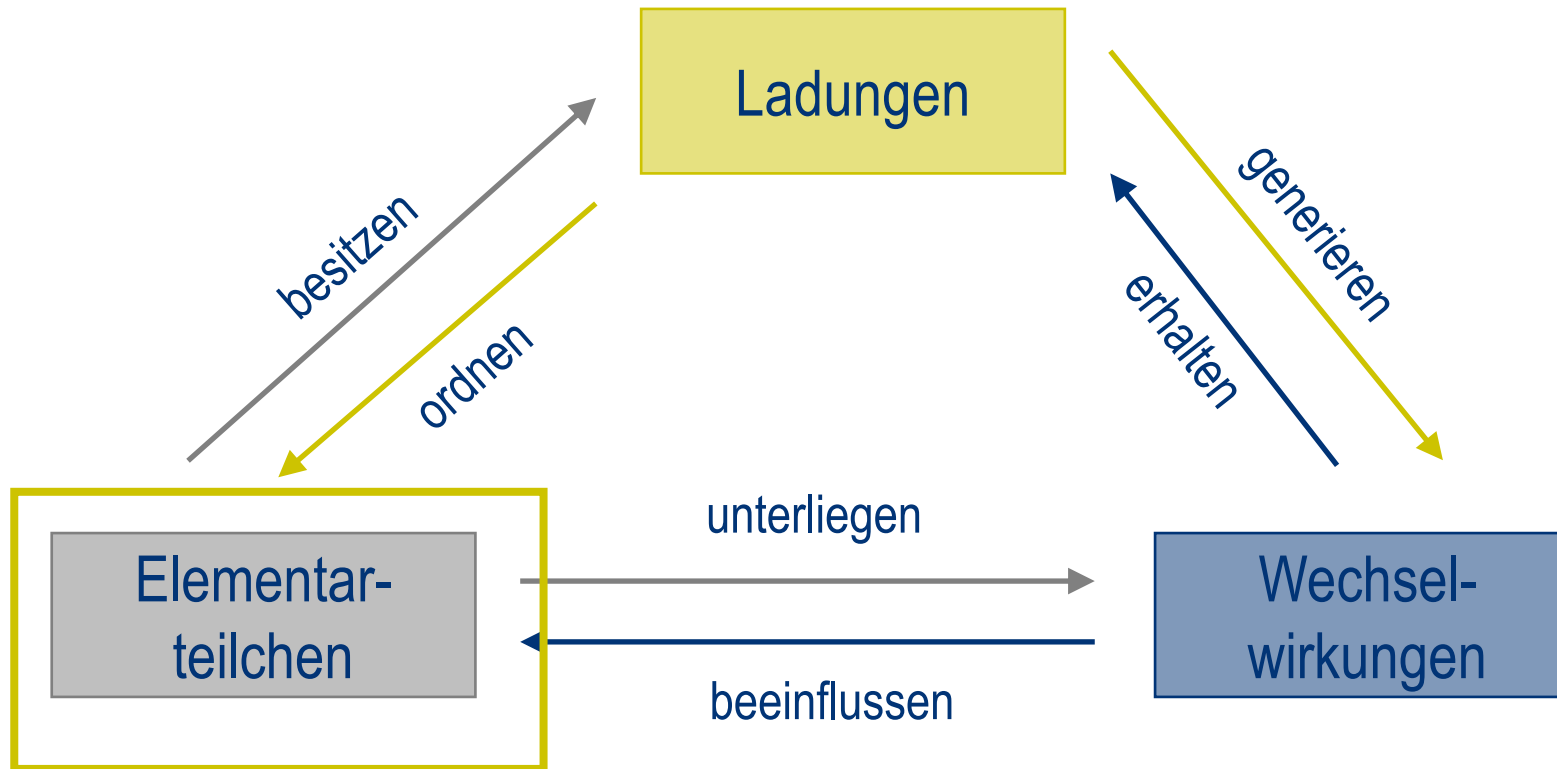
Übung: Botenteilchen

Ziel: Lösen der Aufgaben 1-3



NETZWERK
TEILCHENWELT

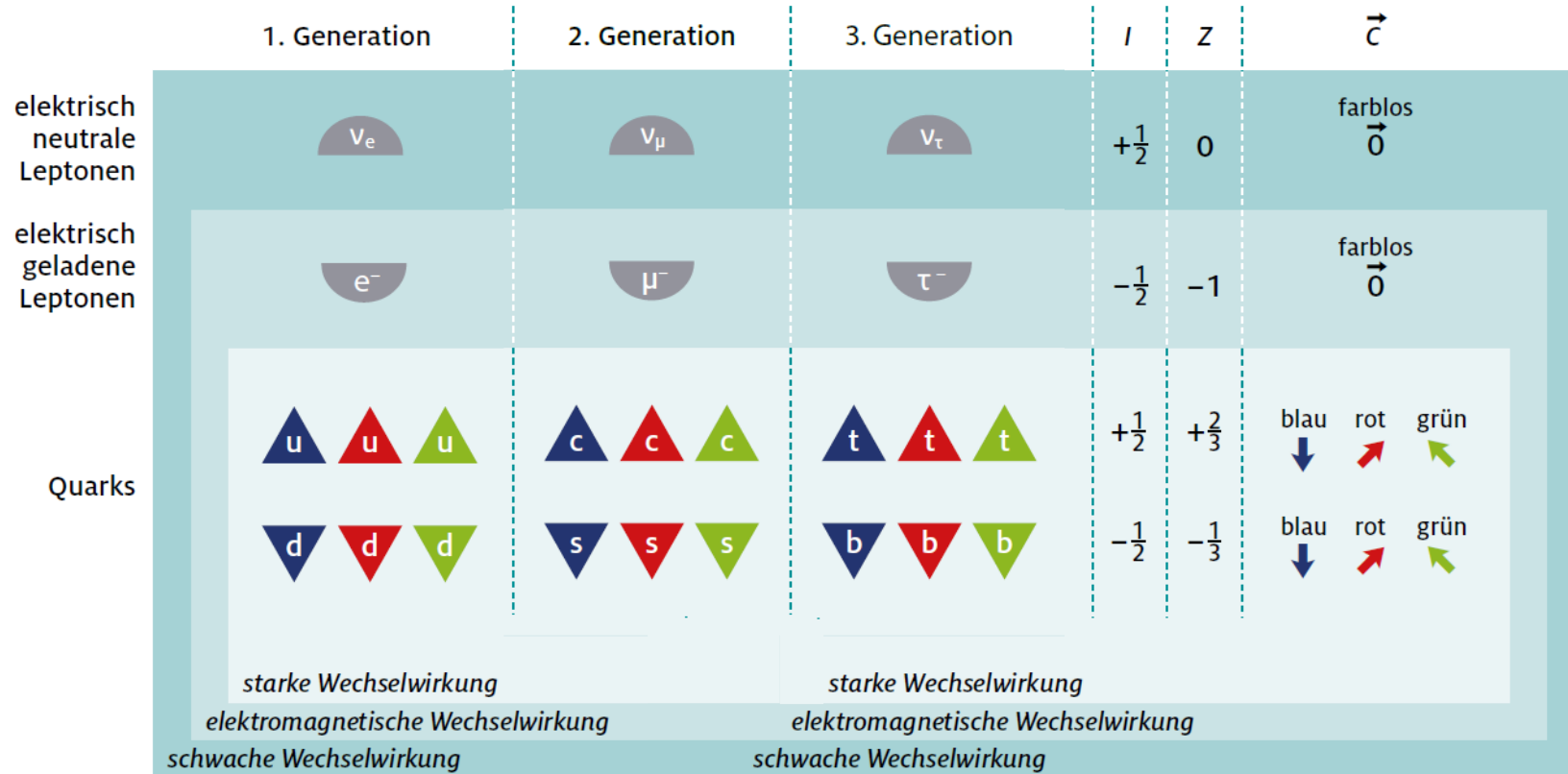
Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



„Teilchenzoo“ oder Ordnung?

- ▶ **Marieteilchen** 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 $\Omega^-(sss)$
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons
- ▶ 1974-1994: weitere „schwere Kopien“ der Up- und Down-Quarks
 - 1974: Charm
 - 1977: Bottom
 - 1994: Top
- ▶ 2000: Nachweis des Tauon-Neutrinos ν_τ

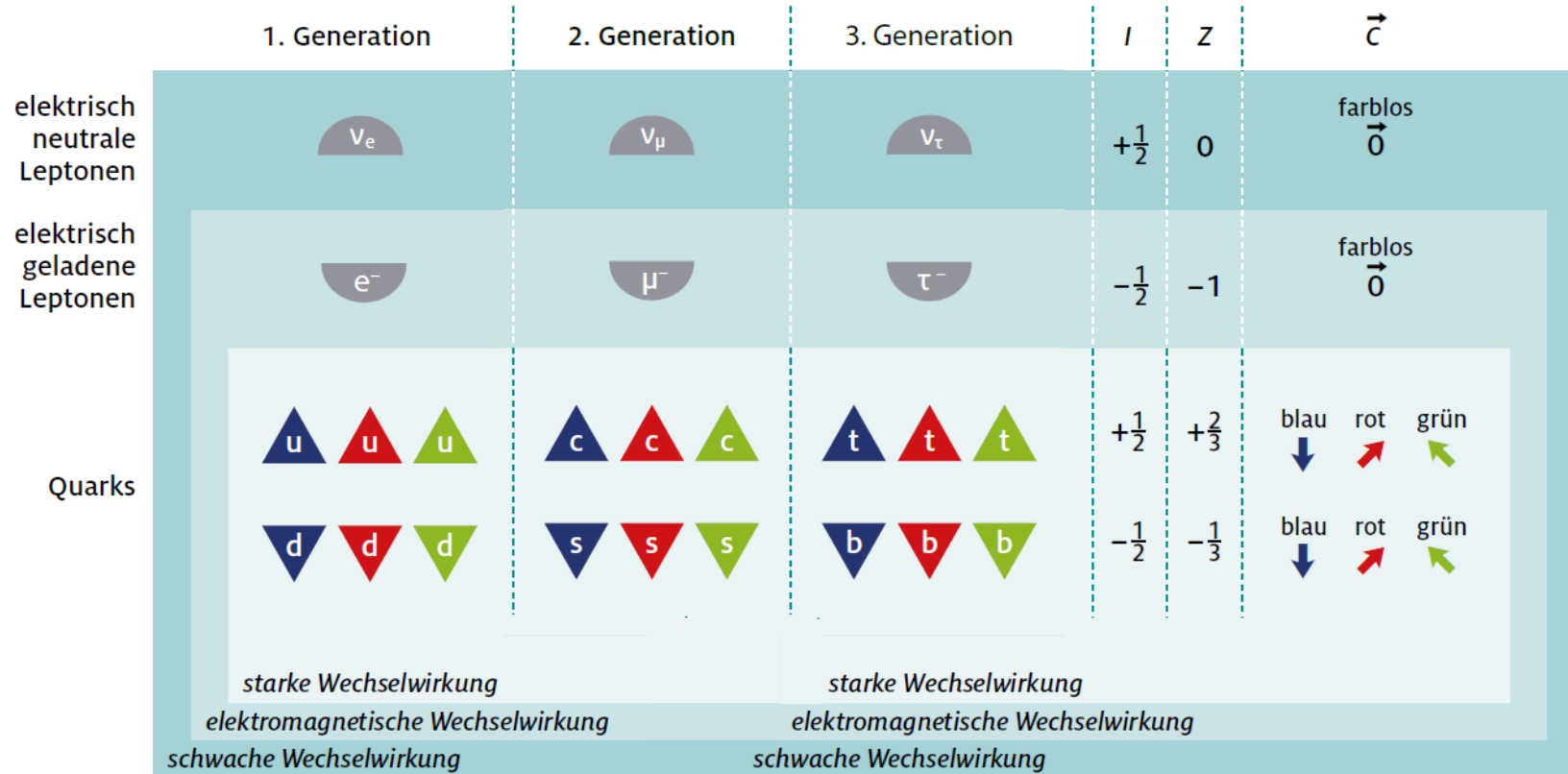
Anordnung von Teilchen in Generationen



„Teilchenzoo“ oder Ordnung?

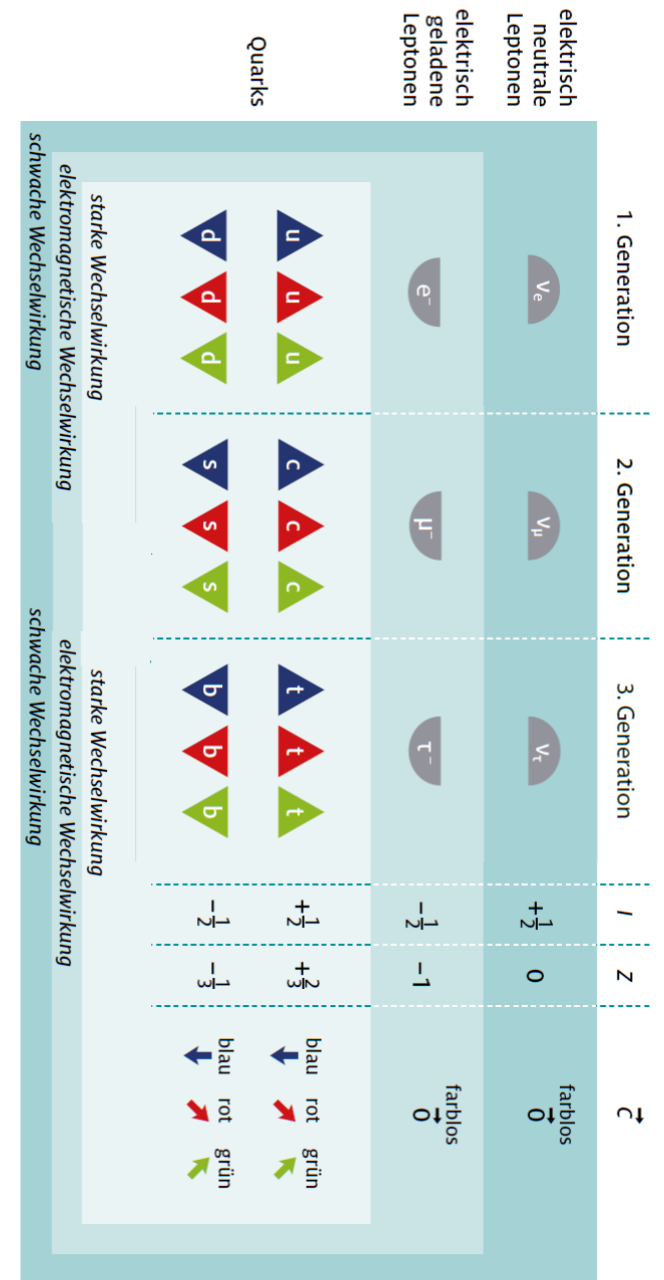
- ▶ Von jedem der leichten Materieteilchen (u , d , e^- , ν_e) gibt es je zwei Kopien mit größeren Massen.
- ▶ Wie lassen sich Teilchen ordnen?
- ▶ Gleiche Ladungen \leftrightarrow Gleiche Eigenschaften

Anordnung von Teilchen in Generationen

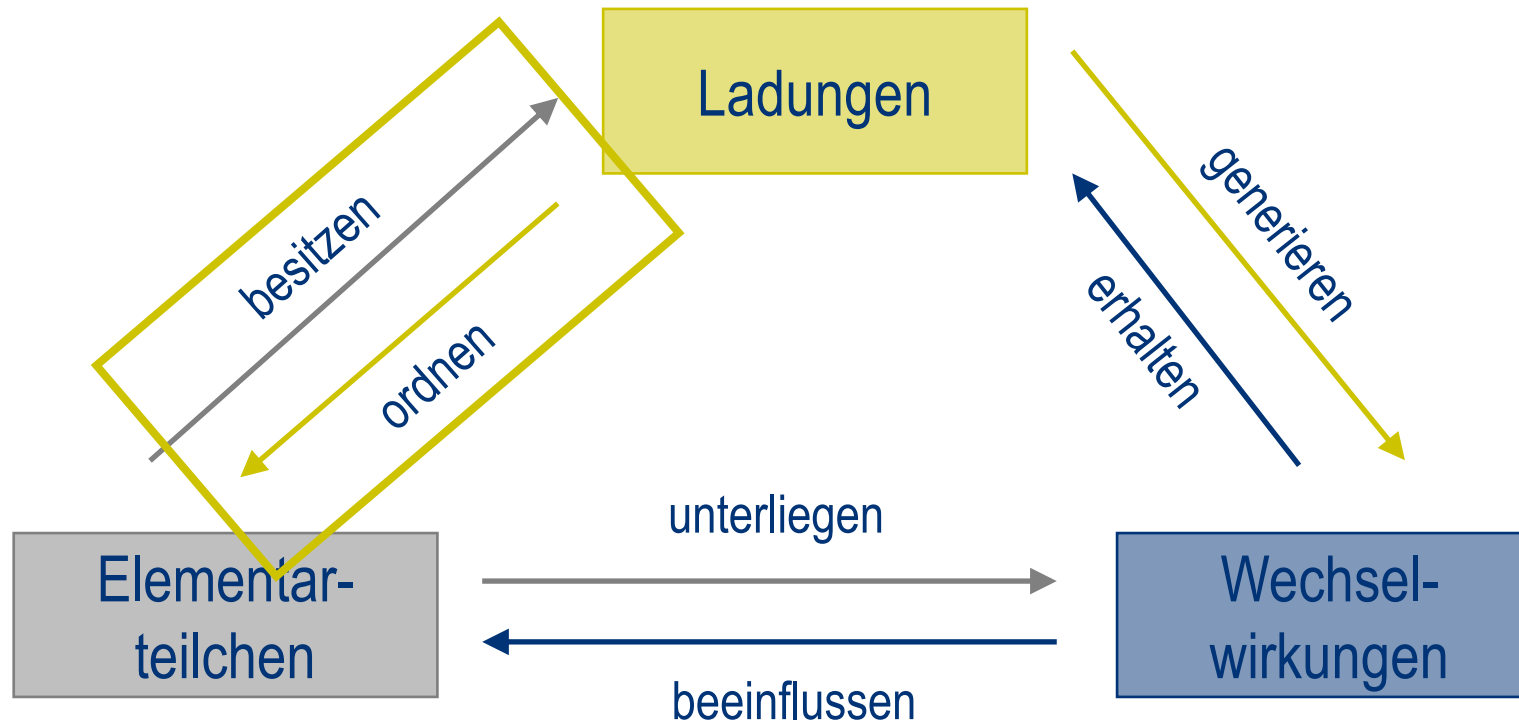


Analogie zum Periodensystem

- ▶ Teilchen sind nach Ladungen geordnet, analog zu 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

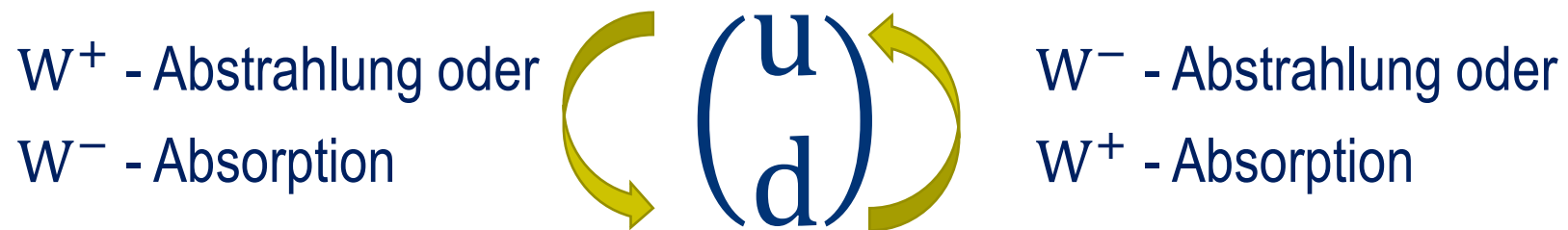


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

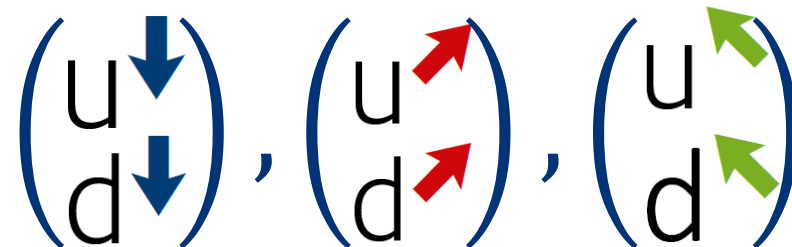
► $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I = +1/2 & Z = +2/3 \\ I = -1/2 & Z = -1/3 \end{matrix}$



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



Ladungsbilanz: β^- -Umwandlung

► Prozess:



■ Elektrische Ladungszahl: Z

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

■ Schwache Ladungszahl: I

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

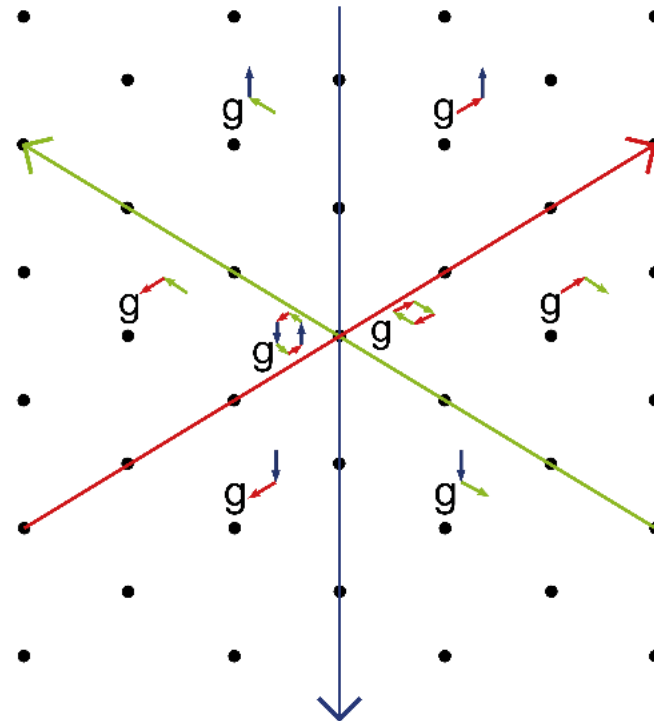
■ Starker Farbladungsvektor: \vec{C}

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

► Alle Ladungen sind erhalten.

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

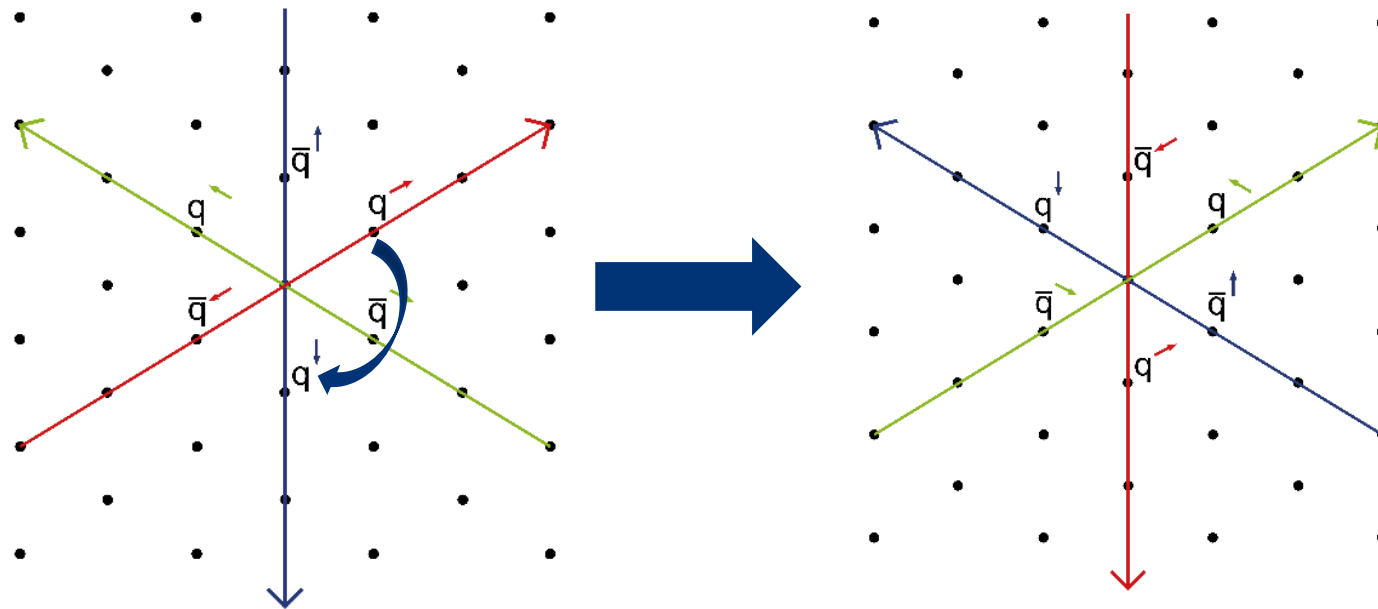
▶ Starke Wechselwirkung

- durch Gluonen: nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks: Quarks bilden **Tripletts** bezüglich der starken Ladung

$$\left(u \downarrow \quad u \nearrow \quad u \nwarrow \right)$$

Umwandlung innerhalb Multipletts

Eine Rotation eines Quark-Multipletts (Stichwort: Eichsymmetrie)



... 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.
 - Es gibt keine elektromagnetischen Teilchenumwandlungen.
 - Alle Teilchen sind **Singulett**s bezüglich der elektrischen Ladung.



Übung: Ordnungsschema des Standardmodells



NETZWERK
TEILCHENWELT

1. Es ergibt sich folgende Lösung:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}: \begin{array}{l} Z_{\nu_e} = 0 \\ Z_e = -1 \\ I_{\nu_e} = +\frac{1}{2} \\ I_e = -\frac{1}{2} \end{array} \quad \begin{array}{l} |\Delta Z| = 1 \\ |\Delta I| = 1 \end{array}$$

a) Die Umwandlung ist durch Abstrahlung eines W^- -Teilchens mit $Z_{W^-} = -1$ und $I_{W^-} = -1$ möglich: $e^- \rightarrow W^- + \nu_e$.

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}: \begin{array}{l} Z_u = +\frac{2}{3} \\ Z_d = -\frac{1}{3} \\ I_u = +\frac{1}{2} \\ I_d = -\frac{1}{2} \end{array} \quad \begin{array}{l} |\Delta Z| = 1 \\ |\Delta I| = 1 \end{array}$$

Die Umwandlung ist durch Abstrahlung eines W^- -Teilchens mit $Z_{W^-} = -1$ und $I_{W^-} = -1$ möglich: $d \rightarrow W^- + u$.

2. Die Umwandlung von dem unteren Teilchen zum oberen Teilchen in der Gruppierung geschieht durch Abstrahlung eines W^- -Teilchens, einem Botenteilchen der **schwachen Wechselwirkung**.

Die umgekehrte Umwandlung geschieht, wenn das obere Teilchen ein W^+ -Teilchen abstrahlt oder ein W^- -Teilchen absorbiert.

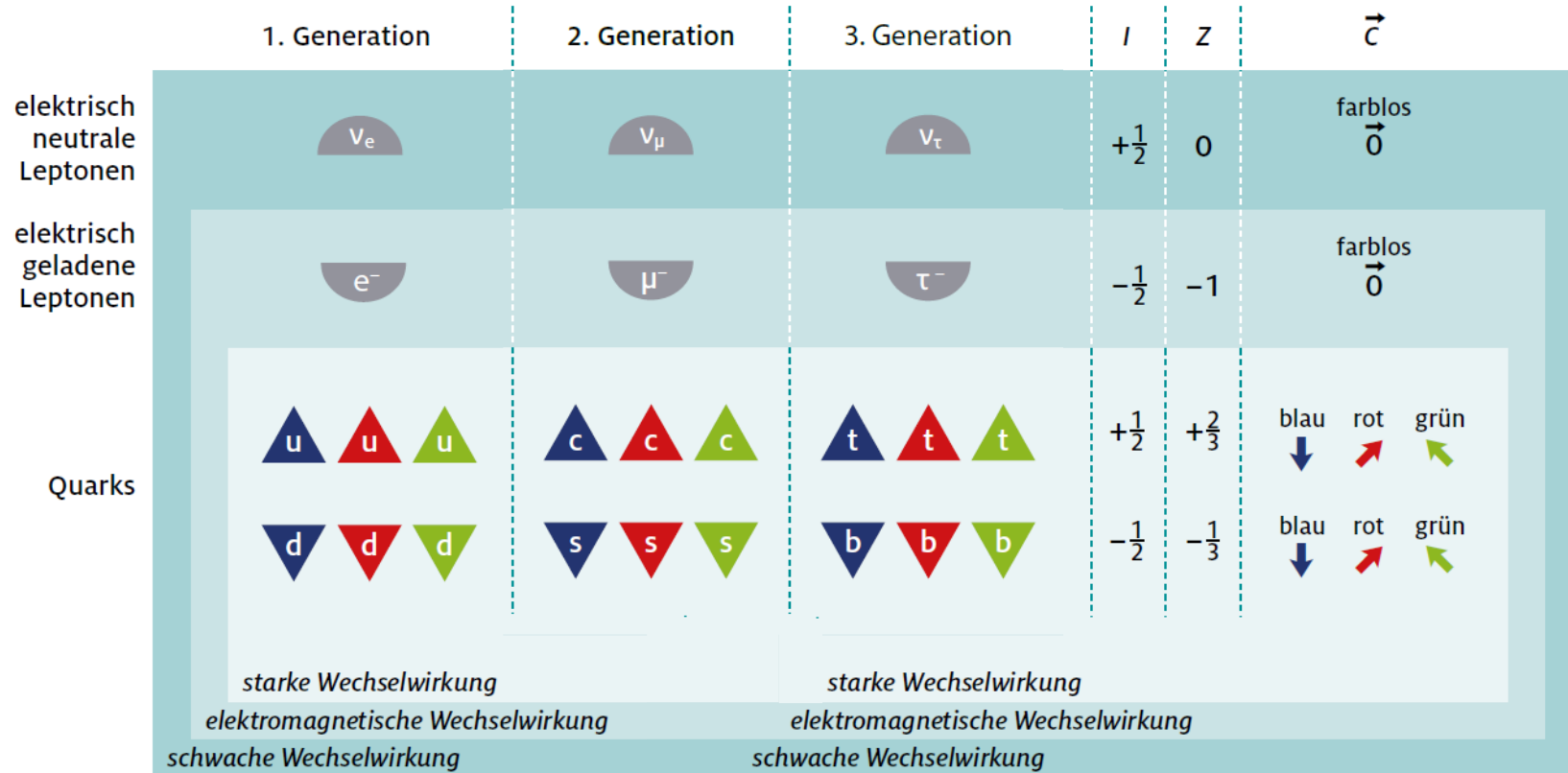
Man nennt diese Gruppierungen aus zwei Materieteilchen Dupletts (lat. duplex = doppelt) bezüglich der **schwachen Ladung**.

Die Teilchen innerhalb der Dupletts unterscheiden sich in ihrer schwachen und ihrer elektrischen Ladungszahl betragsmäßig jeweils um **1**.

Dabei steht das Teilchen mit **positiver** schwacher Ladung oben.

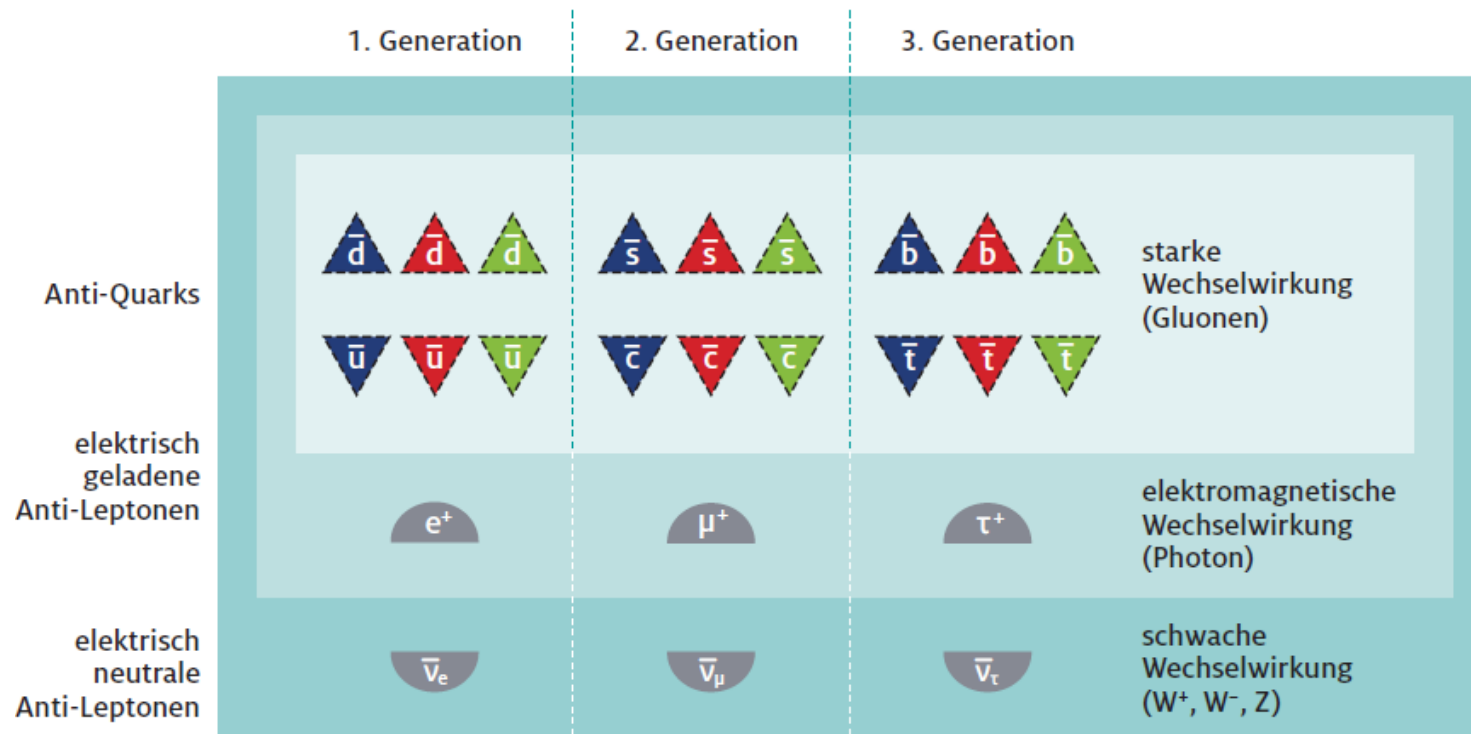
Nur über die **schwache** Wechselwirkung können Teilchen im selben Duplett ineinander umgewandelt werden.

Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip



Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

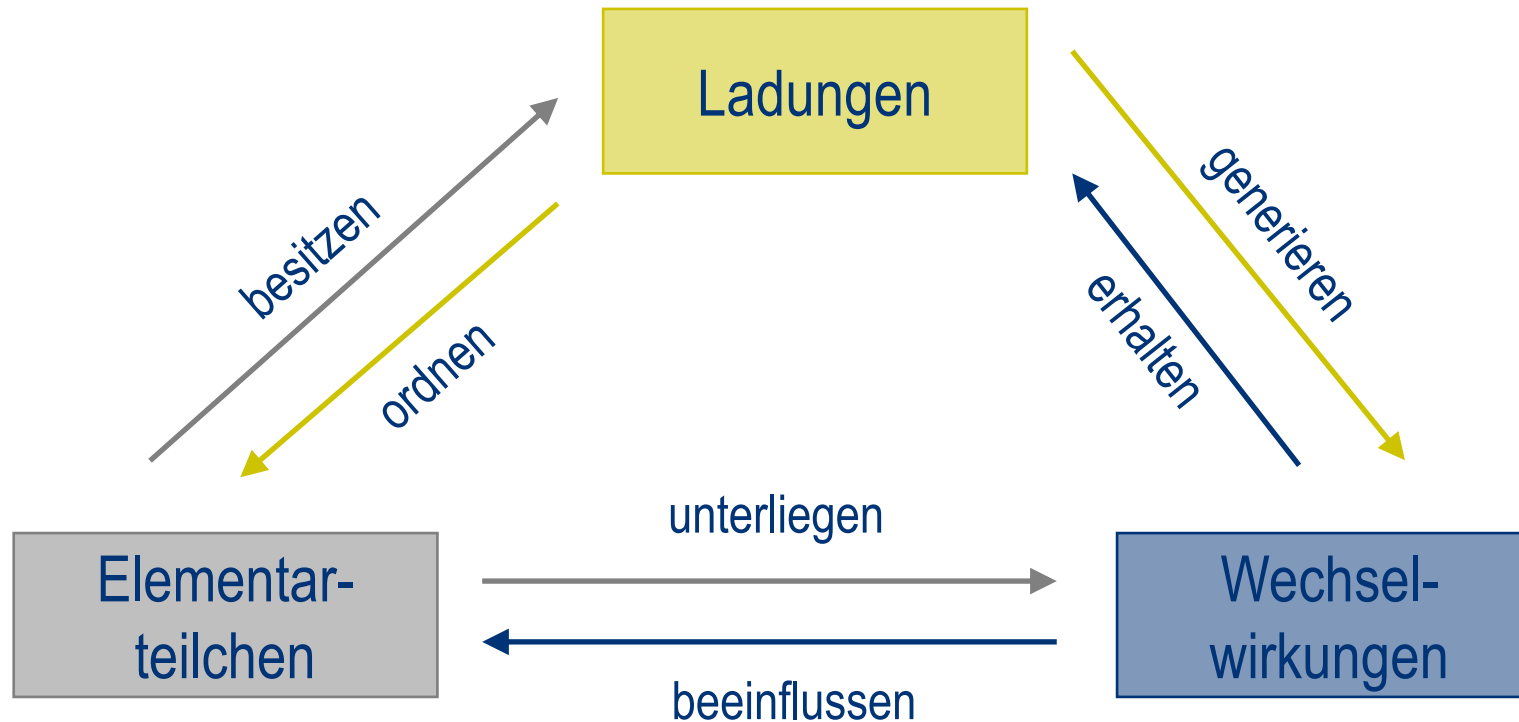
- ▶ Zu jedem Teilchen gibt es ein zugehöriges Anti-Teilchen mit gleicher Masse und entgegengesetzten Ladungen.
- ▶ Anti-Materieteilchen ebenfalls in drei Generationen



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 nur innerhalb der Multipletts möglich
 - zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



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 nur innerhalb der Multipletts möglich
 - zuzüglich: hier nicht diskutierte Effekte der Zustandsmischung



www.teilchenwelt.de

Kontakt:

mail@teilchenwelt.de

philipp.lindenau@tu-dresden.de



PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



Backup



NETZWERK
TEILCHENWELT

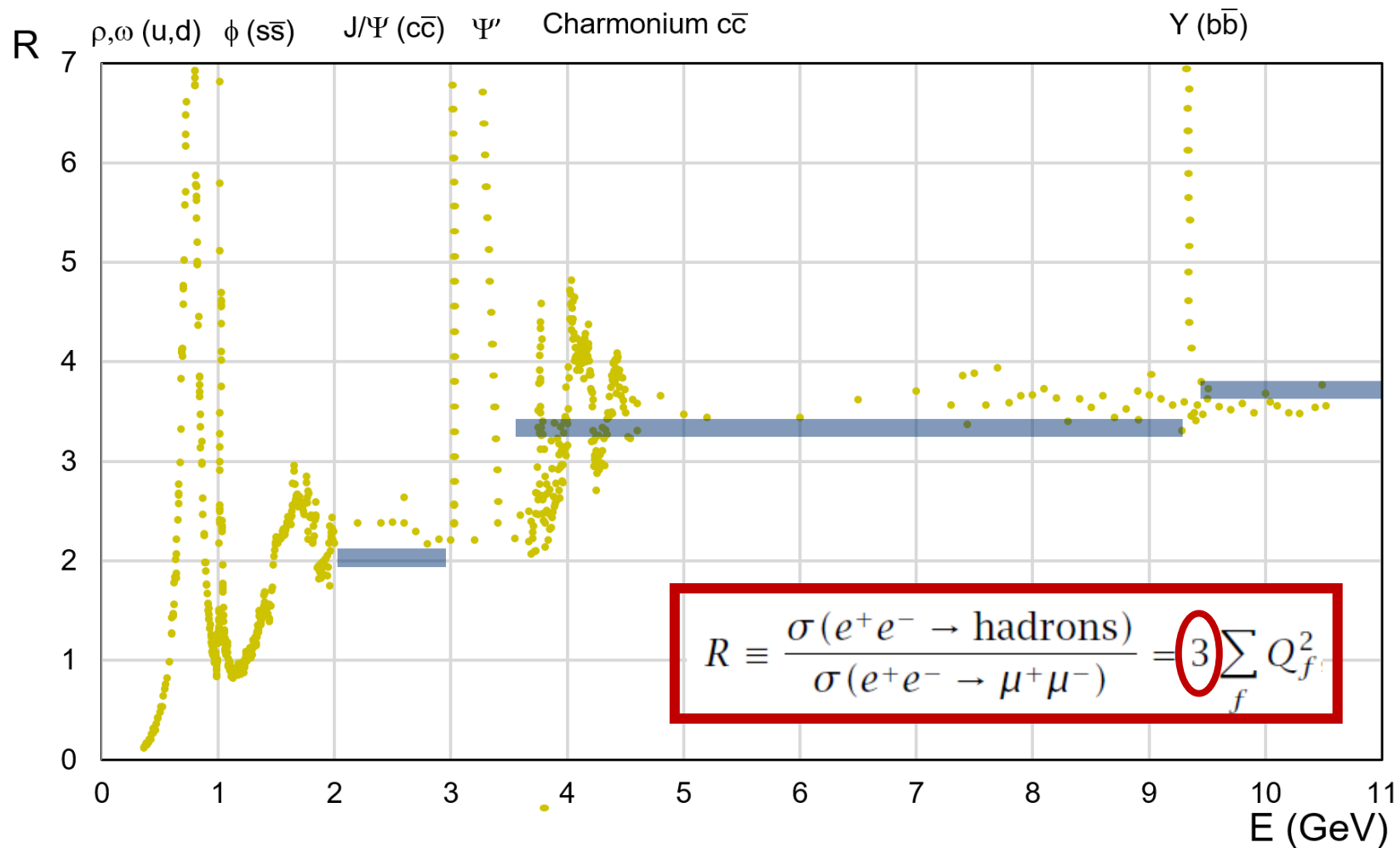
Anzahl der Farben

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

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

Anzahl der Farben

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



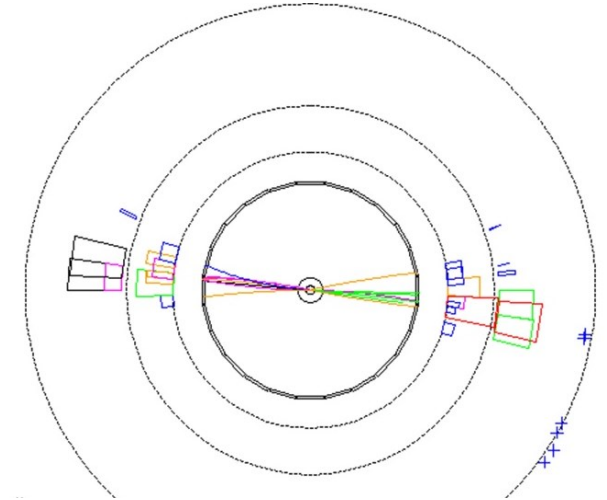
Anzahl der Farben

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

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



#



#

