

Faszination Teilchenphysik im Unterricht

Michael Kobel
Netzwerk Teilchenwelt
Zeuthen, 26.02.2016

Herzlich willkommen!



Netzwerk Teilchenwelt

- ▶ 24 Standorte in 12 Bundesländern
 - insgesamt 26 Institute + CERN
 - Leitung: TU Dresden
- ▶ Daten aus der Teilchenphysik und Astroteilchenphysik in die Schulen bringen
- ▶ Projektziele:
 - Faszination Teilchenphysik erleben
 - Wissenschaft kommunizieren
 - Forschung vor Ort und im Unterricht
 - Wertschätzung von Erkenntnisgewinn durch Grundlagenforschung



Ziele der Fortbildung

- ▶ 1) Eigenes Wissen über Teilchenphysik erweitern
- ▶ 2) Konkrete Sequenz-/Stundenverlaufspläne erarbeiten und mit nach Hause nehmen



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

3

Grundlage der Fortbildung

- ▶ Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik, erstellt vom Netzwerk Teilchenwelt in Kooperation mit der Joachim-Herz-Stiftung
 - Fachtexte, Aufgaben und Lösungen, Arbeitsblätter, Anknüpfungspunkte an den Lehrplan, Vorkenntnisse, Lernziele, methodische Hinweise, fachliche Hinweise
 - Vier Teile, heute: Konzentration auf Teil 1
 - Teil 1: Wechselwirkungen, Ladungen und Teilchen
 - Teil 2: Forschungsmethoden der Teilchenphysik
 - Teil 3: Kosmische Strahlung
 - Teil 4: Mikrokurse



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

4

Ablauf I

- ▶ 10:10 – 10:40 Fachvortrag I
- ▶ 10:40 – 10:55 Diskussion / Fragen
- ▶ 10:55 – 11:10 *Kaffeepause*

- ▶ 11:10 – 11:40 Fachvortrag II
- ▶ 11:40 – 11:55 Diskussion / Fragen
- ▶ 11:55 – 12:15 Gruppeneinteilung und Arbeitsaufträge
- ▶ 12:15 – 13:00 *Mittagspause*

Vortrag
1



Vortrag
2



Bild 1: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/30/Kaffee_mit_Honiglebkuchen.jpg

Bild 2: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Dell%27_Weltnachtsfeier_2013_256_F%C3%BCr_die_rund_300_eingeladenen_Kinder_gab_es_als_Hauptgericht_Erbsen_und_M%C3%B6rchen_mit_paniertes_Putenbrust_und_Kartoffelpommes_oder_Pommes_frites_zum_Sp%C3%A4ten_Mittagessen.jpg

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

5

Ablauf II

- ▶ 12:15 – 13:00 *Mittagspause*

- ▶ 13:00 – 15:00 Gruppenarbeit (Teil I + Teil 2)

- ▶ 15:00 – 16:00 Präsentation der Ergebnisse (Basar)
- ▶ 16:00 – 16:15 Kaffeepause
- ▶ 16:15 – 16:45 Aktuelles vom CERN (Thorsten Kuhl)
- ▶ 16:45 – 17:00 Evaluation, Ausgabe Zertifikate



Gruppen-
arbeit

Präsentation

Aktueller
Vortrag

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

6



10:10 – 10:40 Uhr

Wechselwirkungen

Ladungen

Fachvortrag 1

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

7



Was ist Physik?

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



26.02.2016

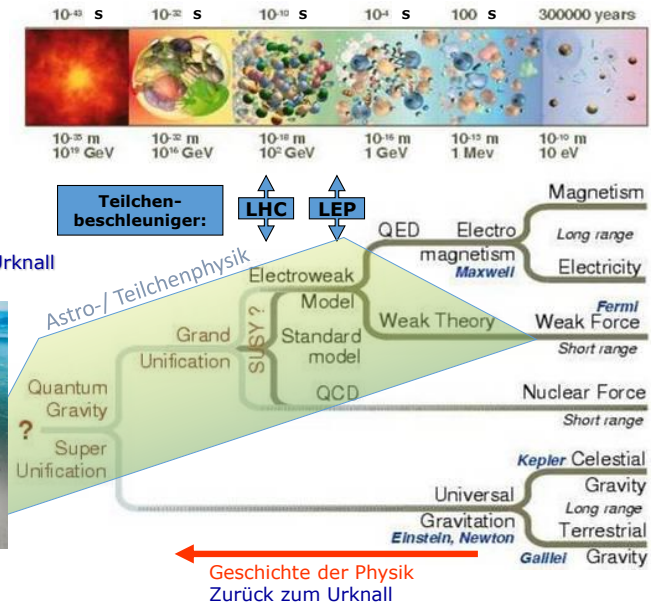
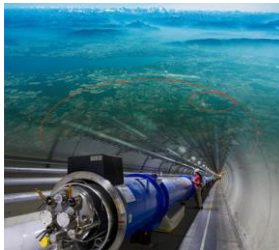
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

8

Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“

LHC:

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



26.02.2016

9

Reduktion

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

Basiskonzept Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung + Erzeugung + Vernichtung

Hangabtriebskraft,
Wasserkraft,
Gasdruck,
Radiowellen,
Luftreibung,
Radioaktiver Zerfall,
...



4 Fundamentale Wechselwirkungen

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

10

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- ▶ In den 1960er und 1970er Jahren entwickelt
- ▶ Seitdem in zahlreichen Experimenten überprüft und bestätigt
- ▶ Präziseste Beschreibung der Vorgänge in unserem Universum, die uns aktuell zur Verfügung steht
- ▶ Elegantes Theoriegebäude mit großer Vorhersagekraft angereichert durch experimentelle Erkenntnisse
- ▶ Grundlage: fundamentale Symmetrien (lokale Eichsymmetrien)

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

11

Fußball-Analogie

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

▶ Wieso also bei der Behandlung des Standardmodells damit beginnen??

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

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	173.2 GeV/c ²	125 GeV/c ²
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name	up	charm	top	Higgs boson
	u	c	t	H
	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	down	strange	bottom	gluon
	d	s	b	g
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	electron (neutrino)	muon (neutrino)	tau (neutrino)	Z boson
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z^0
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	electron	muon	tau	W boson
	e	μ	τ	$W^\pm$
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

Quarks

Leptons

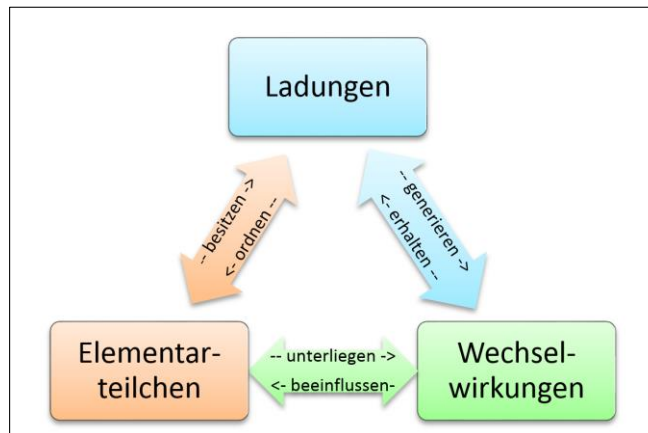
Gauge bosons

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

12

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

13

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 nur dort verwenden, wo wirklich Kraft gemeint ist

26.02.2016

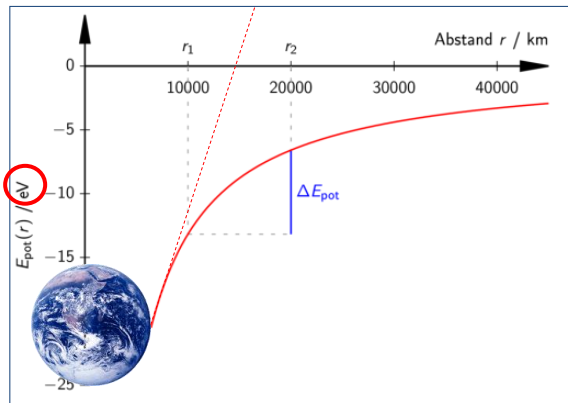
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

14

Bekannter Ausgangspunkt: Wwirkung Gravitation

► Potenzielle Energie zwischen Erde und O₂-Molekül

- Grenzfall: kleine Höhen über der Erdoberfläche: $E_{\text{pot}} = mgh$
- Neue Einheit: eV, Möglichkeit des Vergleichs mit $E_{\text{kin}} = 3/2 k_B T = 0,04 \text{ eV}$



<http://1234gifs.de>

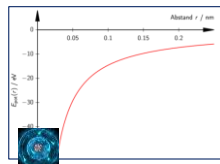
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

15

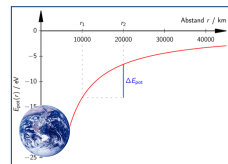
Schule: Zwei bekannte sehr ähnliche Wechselwirkungen

► Elektromagnetische WW (hier Proton – Elektron: $r \sim \text{nm}$)



www.precisionillustration.co.uk

► Gravitation (hier Erde – O₂-Molekül: $r \sim \text{km}$)

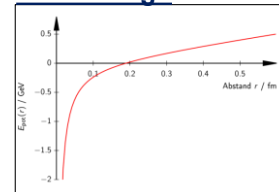


<http://1234gifs.de>



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

► Einführung: starke WW



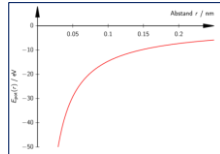
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

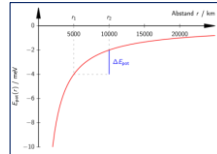
16

Die vierte fundamentale Wechselwirkung

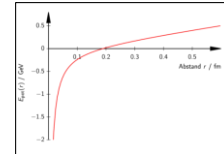
► Elektromagnetische WW



► Gravitation



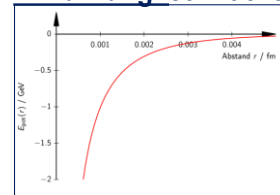
► starke WW



► Warum scheint die Sonne seit nunmehr über vier Milliarden Jahren?

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

► Einführung: schwache WW



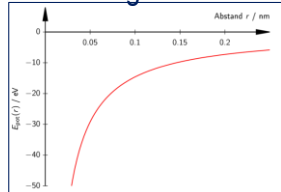
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

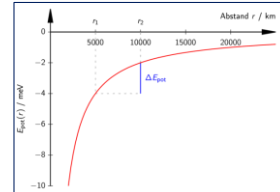
17

Vergleich der potenziellen Energien (Ähnlichkeiten und Unterschiede)

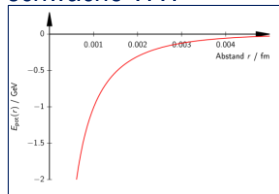
► Elektromagnetische WW



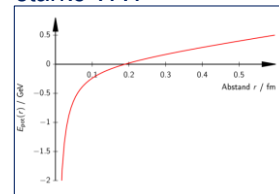
► Gravitation



► schwache WW



► starke WW

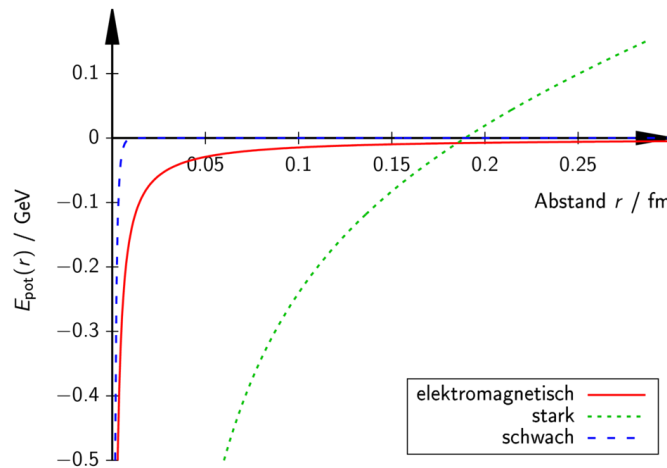


26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

18

Gemeinsames Bild (außer Gravitation)



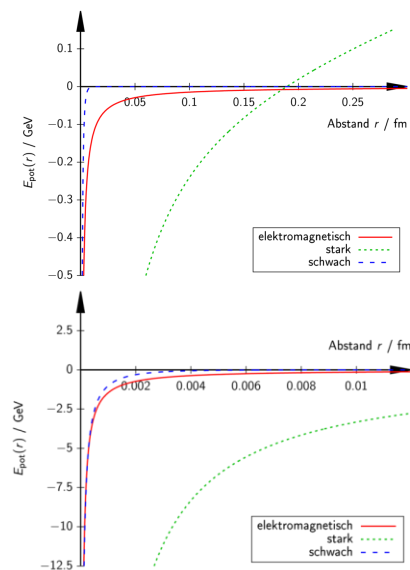
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

19

Vergleich bei Skalierung

(horizontale Achse ÷ 25, vertikale Achse x25)



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

20

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

$$E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

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

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

Stärkeparameter



► Coulombsches Gesetz

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

- Mit Kopplungsparameter (historisch: Feinstrukturkonstante)

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

- Übergang zur Quantenphysik! ($\epsilon_0 \rightarrow \hbar c$)

► Einführung Kopplungsparameter α auch für andere Wechselwirkungen

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

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

21

Basiskonzept der Ladung



► Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

► Bekannt:

- Elektrische Ladung $Q = q \cdot e$

Elektrische
Ladungszahl

Elementarladung

► Elementarladung ist nun in Kopplungsparameter α enthalten (ist damit Eigenschaft der *Wechselwirkung*!)

► Die *Teilcheneigenschaft* ist eigentlich nur die Ladungszahl (analog zur üblichen Kernladungszahl Z)

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

22

Erweiterung auf alle WWirkungen



- ▶ Einführung: Zu **jeder** Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladung als charakteristische Teilcheneigenschaft
- ▶ Bekannt:
 - Elektrische Ladung
- ▶ Neu:
 - Schwache Ladung
 - Starke (Farb-)Ladung
- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv und negativ sein

elektrische Ladungszahl	q
schwache Ladungszahl	I
starker Farbladungsvektor	$\vec{C}$

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

23

Erweiterung: Konzept der Ladung



- ▶ Kopplungsparameter der Gravitation quantenmechanisch (noch) nicht definierbar
- ▶ Praktikabel: zw. Teilchen1 und Teilchen2: $\alpha_{grav}^{1,2} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{\hbar c}$
- ▶ Beispiel: α_{grav} zwischen Proton (p) und Elektron (e)
 - $\alpha_{grav}^{p,e} = G \cdot \frac{m_p \cdot m_e}{\hbar c} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{41}}$
 - Erinnerung: $\alpha_{em}^{p,e} \approx \frac{1}{137}$
 - Vergleich: $\frac{\alpha_{em}^{p,e}}{\alpha_{grav}^{p,e}} \approx 2 \cdot 10^{39}$

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

24

Ladung der Gravitation?



Warum kann die Masse m eines Teilchens nicht die Ladung der Gravitation sein?

► Schulniveau:

- Masse ist keine Erhaltungsgröße
- Produkt zweier Massen $m_1 \cdot m_2$ kann nicht negativ sein

► Theorie:

- Massen können keine Eichsymmetrie in Raum und Zeit erzeugen; denn Raum und Zeit selbst müssen „verdrehen“ werden

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

25

Konzept der Ladung



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

Und:

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

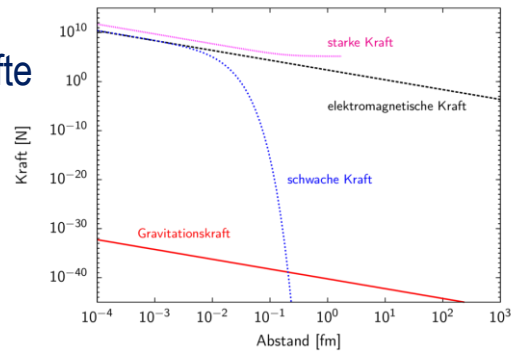
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

26

Vergleich der Kräfte

- Tiefe Einsicht:
Alle $\sim \frac{1}{r^2}$ für kleine r



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

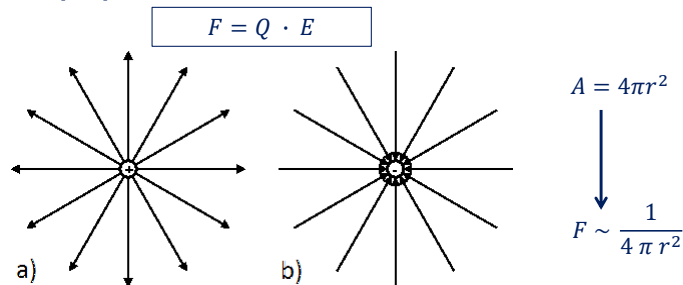
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

27

Geometrische Betrachtung

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



- $\sim \frac{1}{r^2}$ ist Eigenschaft des 3-dim Raumes !
► In n -dim Raum würden Kräfte $\sim \frac{1}{r^{n-1}}$ abfallen

26.02.2016

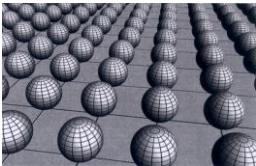
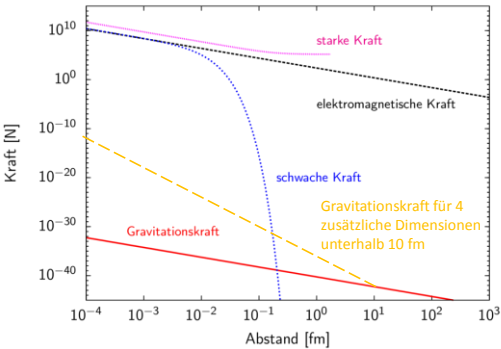
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

28



Spekulationen

► Zusätzliche Dim für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



26.02.2016

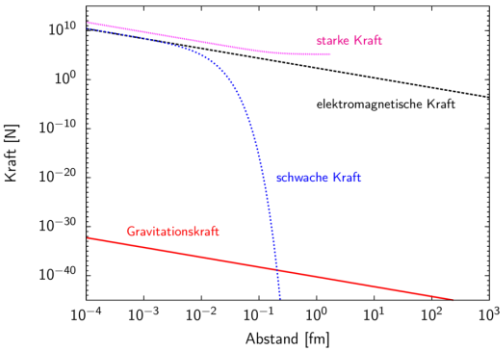
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

29



Reichweiten der Kräfte

- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

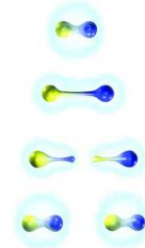
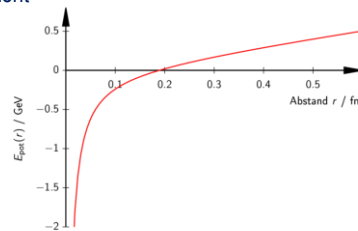
30

Endliche Reichweiten

- Starke Wechselwirkung: Confinement („Eingesperrtsein“)

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

- Linearer Term, ab $r \approx 0,2 \text{ fm}$
- Im Feld gespeicherte Energie steigt streng monoton
- Genügend Energie um neue Teilchen(-paare) über $E=mc^2$ zu erzeugen!
- Begriff: Confinement



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

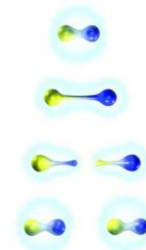
31

Endliche Reichweiten

- Confinement

- Beispielrechnung: Separation eines Quark-Anti-Quark-Paares

- $W = k \cdot \Delta r = 930 \frac{\text{MeV}}{\text{fm}} \cdot 0,7 \text{ fm} = 650 \text{ MeV}$
- Folgerung: Bereits bei einer zusätzlichen Separation von $\Delta r = 0,7 \text{ fm}$ über den typischen Bindungsabstand von $r \approx 0,3 - 1,3 \text{ fm}$ hinaus können neue Quark-Anti-Quark-Paare entstehen.



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

32

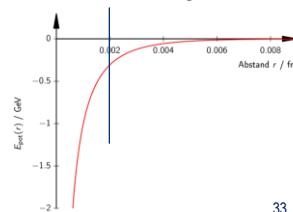
Endliche Reichweiten

► Schwache Wechselwirkung

- Massereiche Botenteilchen: ergeben endliche Reichweite
 - Heisenberg'sche Unschärferelation
 - Exakte Argumentation schwierig
 - Mathematische Herleitung möglich (Feynman-Propagatoren), liegt außerhalb der hier behandelten Themen
- Klassisches Analogon: Abschirmung von Feldlinien
 - Elektrisches Polarisationsfeld (Dielektrikum) schirmt Feldlinien von elekt. Ladungen ab
 - Brout-Englert-Higgs Feld (BEH-Feld) schirmt Feldlinien schwacher Ladungen ab

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

$$\text{► Mit } \lambda_w = \frac{\hbar}{m_w c} \approx 0,002 \text{ fm}$$



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

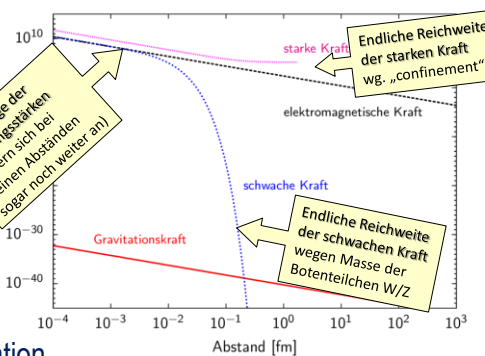
33

Überblick

- Verschiedene Reichweiten
- Für kleine Abstände $F \sim 1/r^2$
- Reihenfolge der Stärken

- Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen $F(r)$
- Kann nur für WWirkungen definiert werden: α !

- Stärken aller WWirkungen sehr ähnlich, außer für Gravitation



Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$
stark	$F_s = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$
schwach	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

34

Zusammenfassung: Wechselwirkungen

- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen
 - (elektromagnetische, schwache, starke, Gravitation)
- ▶ 3 dieser WWen werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben **und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien**
- ▶ Nur 2 WWen besitzen eine unendliche Reichweite, während die beiden anderen auf subnukleare Abstände beschränkt sind

→ Wechselwirkungen werden durch Ladungen hervorgerufen

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

35

Basiskonzept: Ladungen

- ▶ Für Wissenschaftler
 - Ladungen generieren lokale Eichsymmetrien des Standardmodells
 - Teilchen befinden sich in Multipllett-Darstellungen der Eichgruppe
 - Eichsymmetrien erfordern Eichfelder und Wechselwirkungen
 - Ladungserhaltung folgt aus der Eichsymmetrie
 - Der BEHiggs-Mechanismus bricht die elektroschwache Symmetrie und erzeugt Massen für die Eichbosonen
- ▶ Für alle:
 - Für jede **Wechselwirkung** (außer Gravitation) existiert ein entspr. Ladung
 - Ladungen liefern ein charakteristisches **Ordnungsprinzip** für Teilchen
 - Wechselwirkungen werden durch **Botenteilchen** vermittelt
 - Ladungserhaltung bestimmt welche **Prozesse erlaubt** sind
 - Das BEHiggs-Feld ist ein unendlicher **See schwacher Ladung** und erzeugt eine **endliche Reichweite der schw. WW** durch Abschirmung

26.02.2016

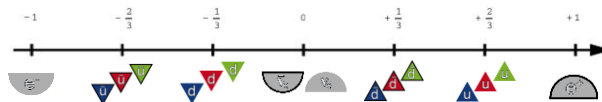
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

36

Elektrische Ladung



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



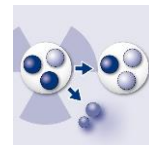
- Elektrische Ladung ist gequantelt

26.02.2016

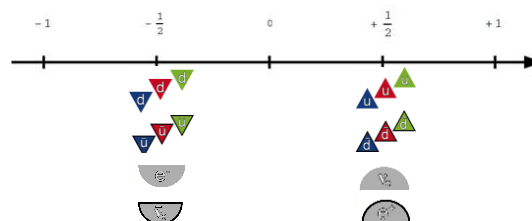
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

37

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



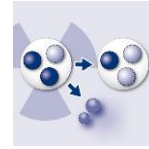
- Schwache Ladung ist gequantelt

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

38

Schwache Ladung



- ▶ Teilchen bilden Dupletts, die sich sowohl in I als auch in q um den Betrag 1 unterscheiden
- ▶ Beispiel: Elektron-Neutrino und Elektron

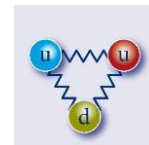
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{matrix} I = +\frac{1}{2} \\ I = -\frac{1}{2} \end{matrix} \quad \begin{matrix} q = 0 \\ q = -1 \end{matrix}$$

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

39

Starke Ladung

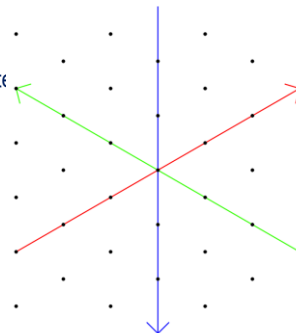


- ▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: „Farbladung“)

- Protonen und Neutronen bspw. bestehen aus Quarks

- ▶ Ladung mit Vektorcharakter: Farbgitter

- ▶ gequantelt



26.02.2016

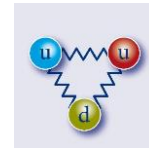
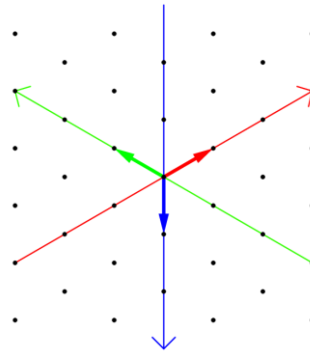
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

40



Starke Ladung

► Starke Farbladungen von Quarks



26.02.2016

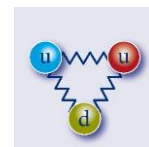
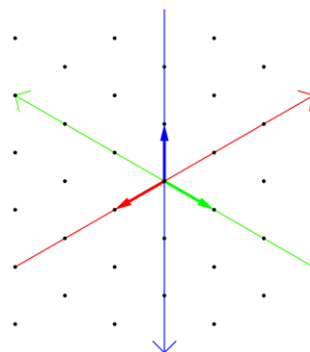
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

41



Starke Ladung

► Starke Farbladungen von Anti-Quarks



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

42

Übersichten

- Antimaterie: Alle Ladungen entgegengesetzt

	1. Generation	l	q
elektrisch neutrale Leptonen		$+ \frac{1}{2}$	0
elektrisch geladene Leptonen		$- \frac{1}{2}$	-1
Quarks		$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
		$- \frac{1}{2}$	$- \frac{2}{3}$
	blau rot grün		

	1. Generation	l	q
Anti-Quarks		$+ \frac{1}{2}$	$+ \frac{2}{3}$
		$- \frac{1}{2}$	$- \frac{2}{3}$
elektrisch geladene Anti-Leptonen		$+ \frac{1}{2}$	+1
elektrisch neutrale Anti-Leptonen		$- \frac{1}{2}$	0

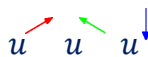
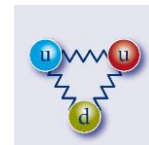
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

43

Starke Ladung

- Quarks bilden Farbtupletts
- Beispiel: Up-Quarks

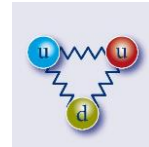
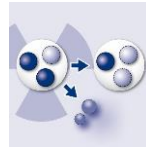


- Die drei Farben bzw. eine Farbe und ihre Anti-Farbe addieren sich zu farbneutral
- Alle zusammengesetzten Teilchen müssen farbneutral sein

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

44



► Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

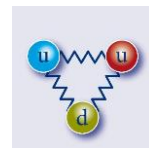
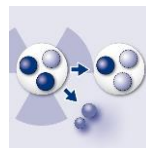
- Starker Farbladungsvektor:

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

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

45



► Alle drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

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

- Schwache Ladungszahl:

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

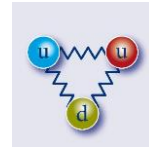
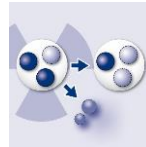
- Starker Farbladungsvektor:

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

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

46



► Alle drei Ladungen sind erhalten

→ mit Energie- und Impulserhaltung ist eine Vorhersage möglich, ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

47



Zusammenfassung: Ladungen

► Drei verschiedene Ladungen

- Elektrisch
- Schwach
- Stark

► Ladungen sind

- additiv
- erhalten
 - Vorhersage zu erlaubten Prozessen
- gequantelt

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

48

Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 1

► Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



Kaffee Pause

Nächster Vortrag: 10:30 Uhr!

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

49

11:10 – 11:40 Uhr

Darstellen von Wechselwirkungen

„Teilchenzoo“ | Multipletts | Ordnungsschema

Fachvortrag 2

26.02.2016

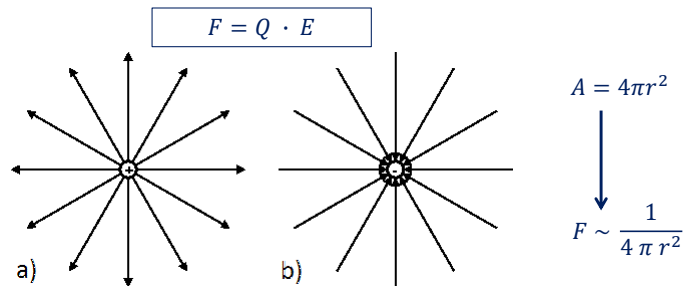
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

50

Darstellen von Wechselwirkungen

► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite
hier: elektromagnetische Wechselwirkung



26.02.2016

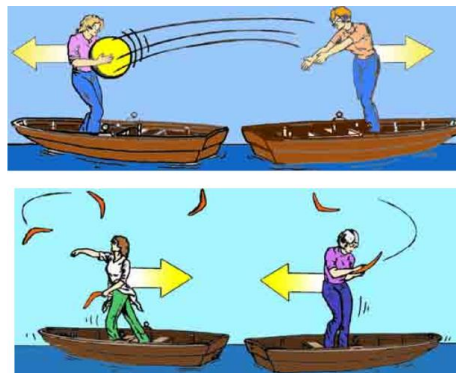
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

51

Darstellen von Wechselwirkungen

► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

Anstelle der
Feldlinien kann die
elektromagnetische
Wechselwirkung auch
durch den Austausch
eines Botenteilchens
(hier: Photon)
beschrieben werden



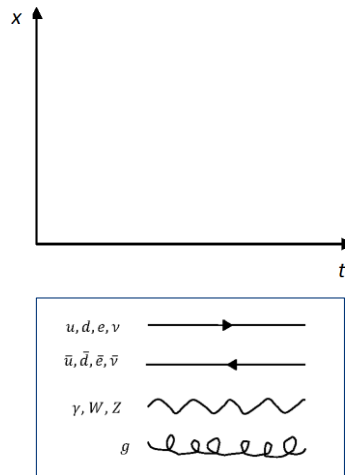
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

52

Feynman-Diagramme

► Aufbau



26.02.2016

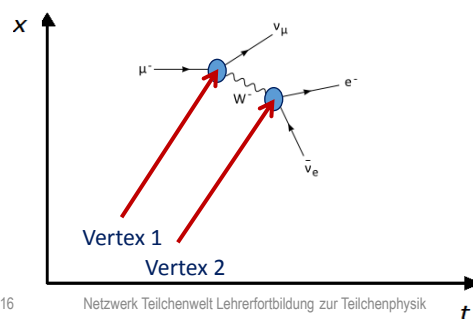
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

53

Feynman-Diagramme

► Begriffsklärung:

- Vertex / Vertices (plural)
- Wechselwirkung wird dadurch dargestellt, dass Teilchen emittiert, absorbiert, vernichtet oder erzeugt werden (an einem „bestimmtem Ort“, zur einer „bestimmten Zeit“)
- **Achtung!** nur bei grafischer Darstellung im Orts-Zeit-Diagramm. In Realität: quantenmechanische Unschärfe!



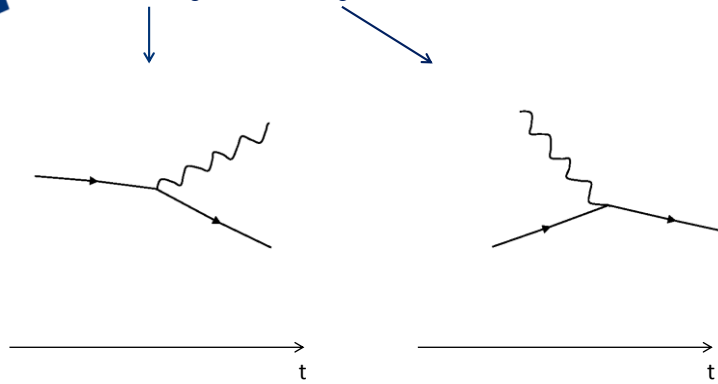
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

54

Grundbausteine 1/2

► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



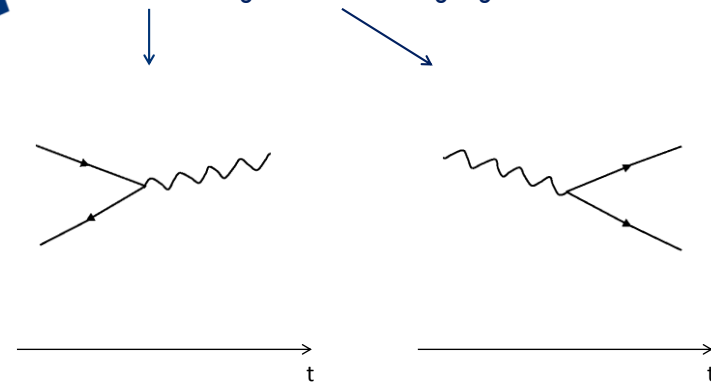
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

55

Grundbausteine 2/2

► Paarvernichtung und Paarerzeugung



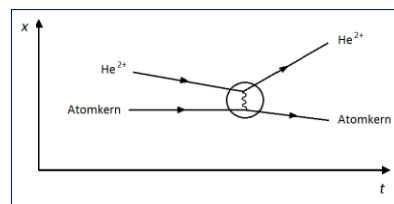
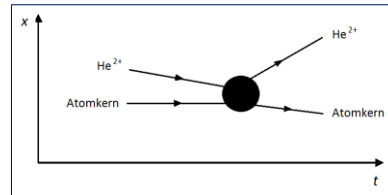
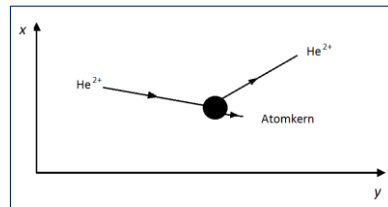
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

56

Prozesse

► Rutherford-Streuung



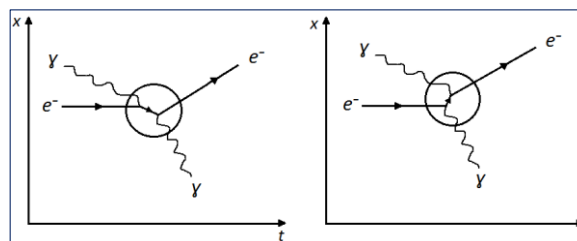
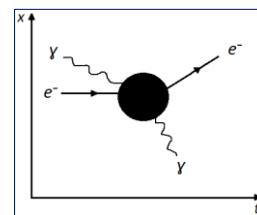
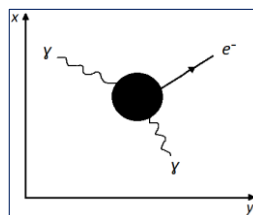
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

57

Prozesse

► Compton-Streuung



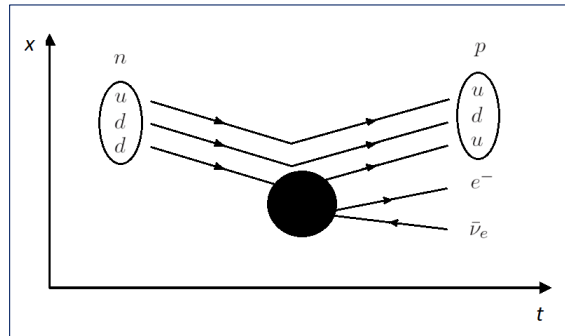
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

58

Prozesse

► β^- -Umwandlung



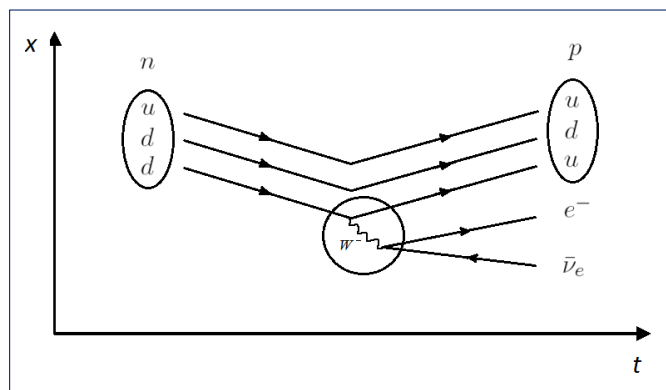
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

59

Prozesse

► β^- -Umwandlung + Diskussion „virtuelle Teilchen“



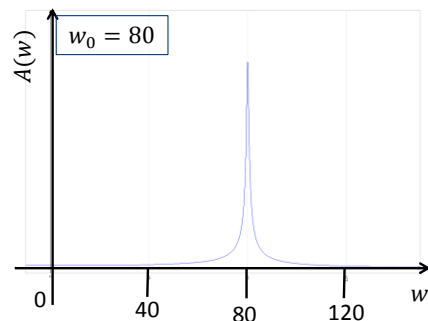
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

60

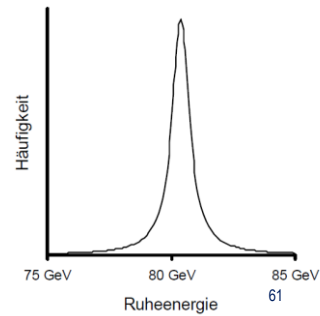
Virtuelle Teilchen

- ▶ Massendifferenz ($\Delta E = m_n c^2 - m_p c^2 = 1,3 \text{ MeV}/c^2$)
- ▶ Masse(W-Boson) = $80.400 \text{ MeV}/c^2$
- ▶ Grafik links: erzwungene Schwingung (Amplitude A in Abhängigkeit von Anregungsfrequenz w)



26.02.2016

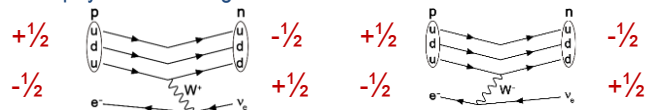
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik



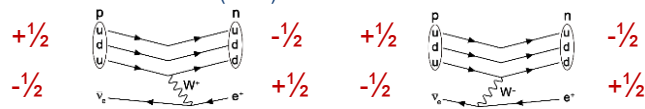
Ladungserhaltung (z.B. schwache Ladung I)

Alle möglichen Prozesse durch „Umklappen“ von Linien:

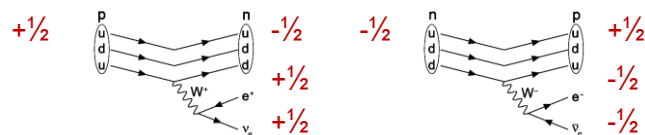
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- Erster Nachweis von (Anti-)neutrinos 1953



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



Die Erhaltung der schwachen Ladung erfordert Neutrinos!
(experimenteller Hinweis: fehlender Impuls und Energie)

Zusammenfassung: Feynman-Diagramme

- ▶ Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben
- ▶ Wechselwirkungen werden mittels Feynman-Diagrammen dargestellt
- ▶ Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)
- ▶ Wechselwirkungen werden durch sich „treffende“ Teilchen symbolisiert (Vertex, Vertices)
 - (Achtung: „Treffen“ nur im Diagramm / in Realität: Unschärfe)

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

63

Basiskonzept Elementarteilchen

- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up- und Down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
 - 200 Mal schwerer als das Elektron
 - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

64

Ordnung der Elementarteilchen

- 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?

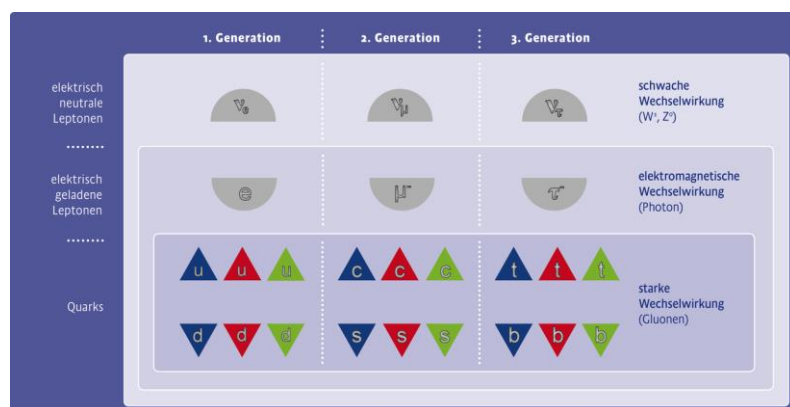


26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

65

Anordnung von Teilchen in Generationen



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

66

Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

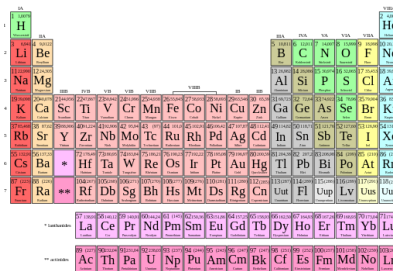
- ▶ Analogie zum Periodensystem der Elemente (PSE) in der Chemie
- ▶ Drehen der Abbildung um 90° im Uhrzeigersinn
 - Teilchen sind nach Ladungen geordnet analog den chemischen Elementen in die Hauptgruppen
 - Im PSE sind die chemischen Elemente innerhalb einer Hauptgruppe von oben nach unten nach ihrer Masse aufsteigend geordnet
 - Analog dazu sind auch die Elementarteilchen in den um 90° gedrehten Darstellungen bezüglich der drei Generationen aufsteigend von oben nach unten nach ihrer Masse geordnet

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

67

Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem



The image shows a standard periodic table of elements. Elements are color-coded by groups: alkali metals (red), alkaline earth metals (orange), transition metals (various shades of blue and green), halogens (yellow), noble gases (light blue), and lanthanides/actinides (pink). The table is organized into rows (periods) and columns (groups).

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

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

68

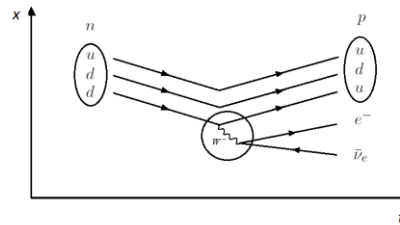


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

- Nur bestimmte Paare von Teilchen beteiligt
- Unterscheiden sich in schwacher Ladungszahl I und in elektrischer Ladungszahl q immer genau um Betrag 1
- Dupletts der schwachen Wechselwirkung

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



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

69

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

- Drei Quarks mit Farbladungsvektoren $\vec{r}$, $\vec{g}$, oder $\vec{b}$
Up-Quarks haben alle schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$,
Down-Quarks haben alle schwache Ladungszahl $I = -\frac{1}{2}$
- $\begin{pmatrix} u^{\vec{r}} \\ d^{\vec{r}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u^{\vec{g}} \\ d^{\vec{g}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u^{\vec{b}} \\ d^{\vec{b}} \end{pmatrix}$

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

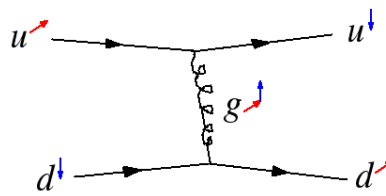
70

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

► $(u \rightarrow u \rightarrow u)$



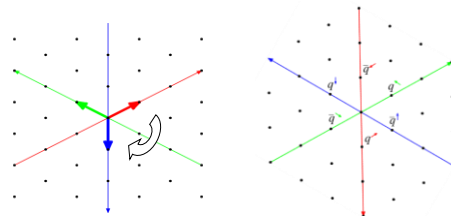
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

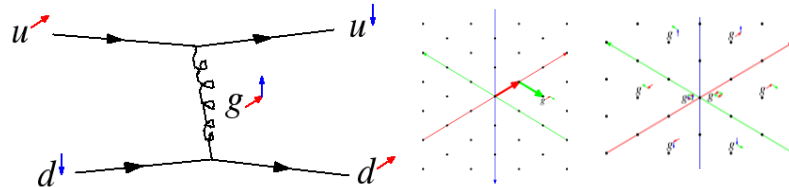
71

Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multiplikts

► Eine Rotation (~Eichsymmetrie) eines Quark-Multiplikts



► hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



26.02.2016

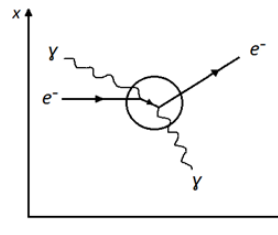
Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

72

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Elektromagnetische Wechselwirkung

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



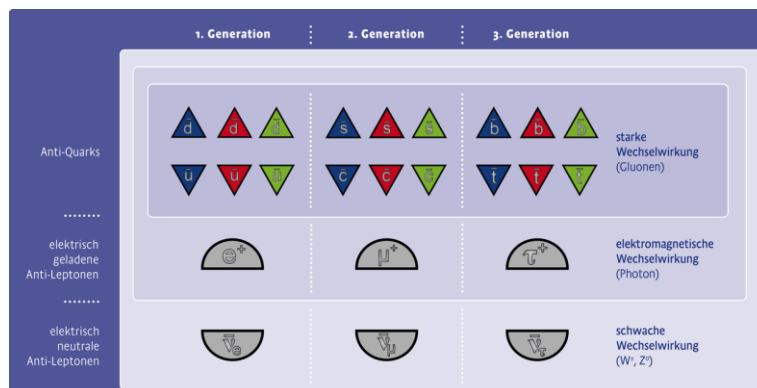
26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

73

Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

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



26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

74

Zusammenfassung: Multipletts

- Teilchen lassen anhand ihrer Ladungen ordnen
- Experimentell findet man (nicht vorhersagbar!)
 - Dupletts der schwachen Wechselwirkung
 - Tripletts der starken Wechselwirkung
 - Singulets der elektromagnetischen Wechselwirkung



- Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

75

Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 2

- Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



Mittagspause: 11:30 -12:30 Uhr!

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

76



13:00 – 15:00 Uhr
Teil 1: Sequenzplanung (in großer Gruppe)
Teil 2: Unterrichtsverlaufsplanung (in kleiner Gruppe)

Gruppenarbeit



Gruppeneinteilung

Gruppe 1
(Quarks)

Gruppe 3
(Neutrinos)

Gruppe 2
(W- und Z-Bosonen)

Gruppe 4
(Higgs und Dark Matter)



Gruppenaufträge

► Teil 1

- In großer Gruppe
- Sequenzplanung
- Max. 60 min

► Teil 2

- In kleiner Gruppe (große Gruppe halbieren)
- Konkreter Unterrichtsverlaufsplan einer Unterrichtsstunde
- Max. 45 min

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

79



15:00 – 16:00 Uhr

Präsentation der Ergebnisse

Basar

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

80



16:17 – 17:00 Uhr

Aktueller Vortrag

Evaluation + Teilnahmebestätigung

Verabschiedung

Aktuelles vom CERN (Thorsten Kuhl)

26.02.2016

Netzwerk Teilchenwelt Lehrerfortbildung zur Teilchenphysik

81



Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



26.02.2016



NETZWERK
TEILCHENWELT

82