

Basiskonzepte der Teilchenphysik Wechselwirkungen, Ladungen, Teilchen

Michael Kobel

Netzwerk Teilchenwelt, TU Dresden

CERN, 21.+22.03.2016

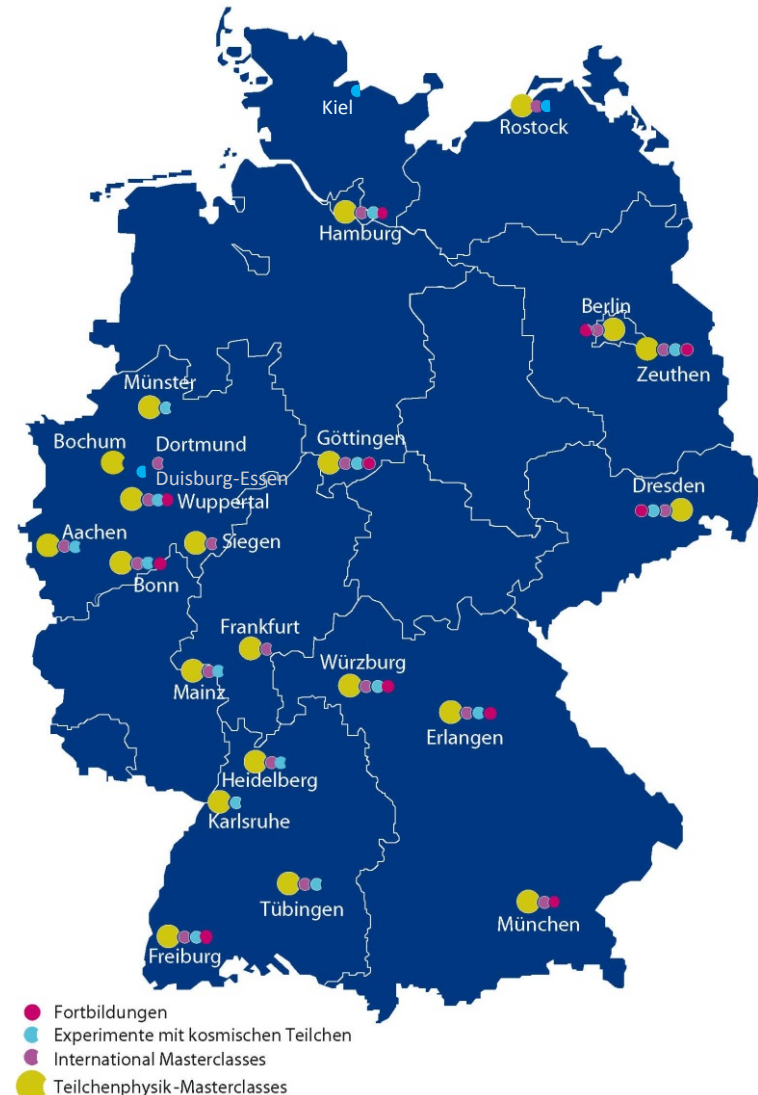
Herzlich willkommen!



NETZWERK
TEILCHENWELT

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

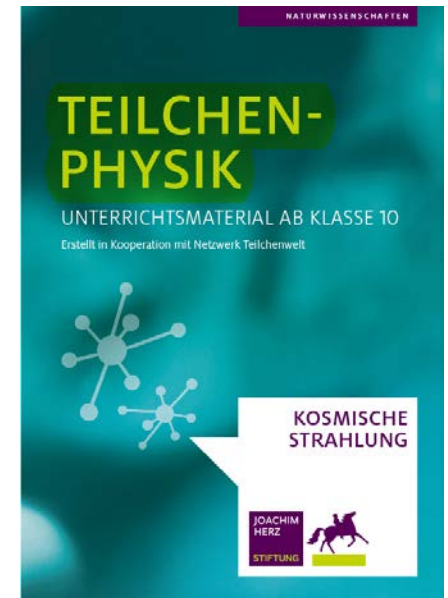
- ▶ Mo+Di: Eigenes Wissen über Teilchenphysik erweitern
→ Was sind die eigentlichen Erkenntnisse?
- ▶ Mi+Fr: Konkrete Unterrichtssequenzpläne erarbeiten
und mit nach Hause nehmen



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 (derzeit 126 Seiten, 40 Seitenblätter folgen)
 - Teil 2: Forschungsmethoden der Teilchenphysik
 - Teil 3: Kosmische Strahlung (fertig!!)
pdf: www.leifiphysik.de/arbeitsmaterialien-teilchenphysik
 - Teil 4: Mikrokurse



Ablauf I: Unsere Vorträge und Fragen

- | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|---|
| ▶ <i>Mo bis 10:30</i> | <i>Kaffeepause</i> |  |
| ▶ Mo 10:30 – 11:05 | Fachvortrag 1a: Wechselwirkungen | Vortrag 1a |
| ▶ Mo 11:05 – 11:15 | Diskussion / Fragen | |
| ▶ Mo 11:15 – 11:50 | Fachvortrag 1b: Ladungen | Vortrag 1b |
| ▶ Mo 11:50 – 12:00 | Diskussion / Fragen | |
| ▶ <i>Mo 12.00</i> | <i>Mittagessen</i> |  |
| | | |
| ▶ Di 8:30 – 9:10 | Fachvortrag 2a: Felder und Boten | Vortrag 2a |
| ▶ Di 9:10 – 9:20 | Diskussion / Fragen | |
| ▶ Di 9:20 – 10:00 | Fachvortrag 2b: Teilchenmultipletts | Vortrag 2b |
| ▶ Di 10:00 – 10:15 | Schlussdiskussion / Fragen | |

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

Bild 2: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Die!!!_Weihnachtsfeier_2013_256_F%C3%BCr_die_rund_300_eingeladenen_Kinder_gab_es_als_Hauptgericht_Erbsen_und_M%C3%B6hrchen_mit_paniierter_Putenbrust_und_Kartoffelbrei_oder_Pommes_frites_zum_sp%C3%A4ten_Mittagessen.jpg

Ablauf II : Ihre Aktivitäten

- ▶ Di 10:15 – 10:30 Gruppeneinteilung und Arbeitsaufträge
- ▶ Di 10.30 *Kaffeepause*
- ▶ Mi 11:15 – 12:15 Gruppenarbeit
- ▶ Fr 11:00 – 12:00 Präsentation Ihrer Ergebnisse



Gruppen-
arbeit

Präsentation



10:30 – 12:00 Uhr

Wechselwirkungen

Ladungen

Fachvortrag 1

a. Wechselwirkungen

b. Ladungen

Was ist Physik?



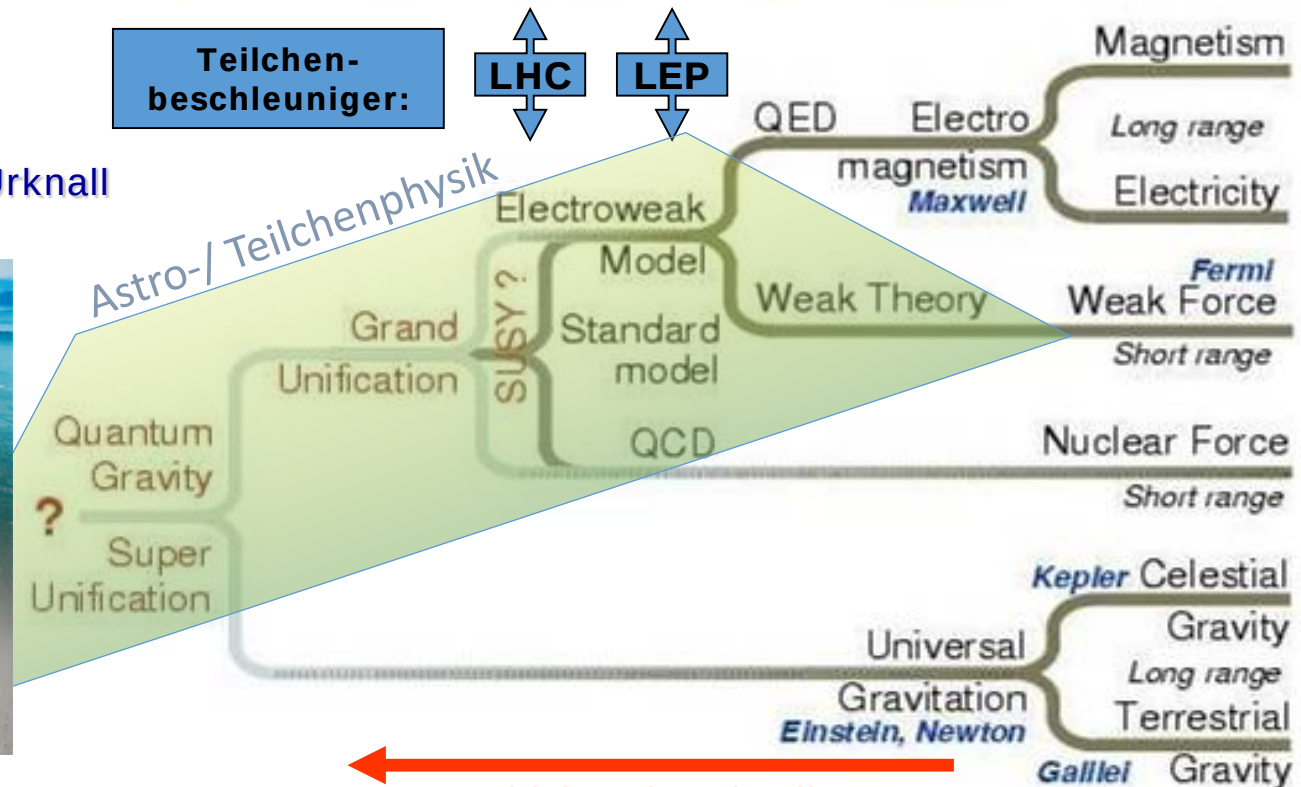
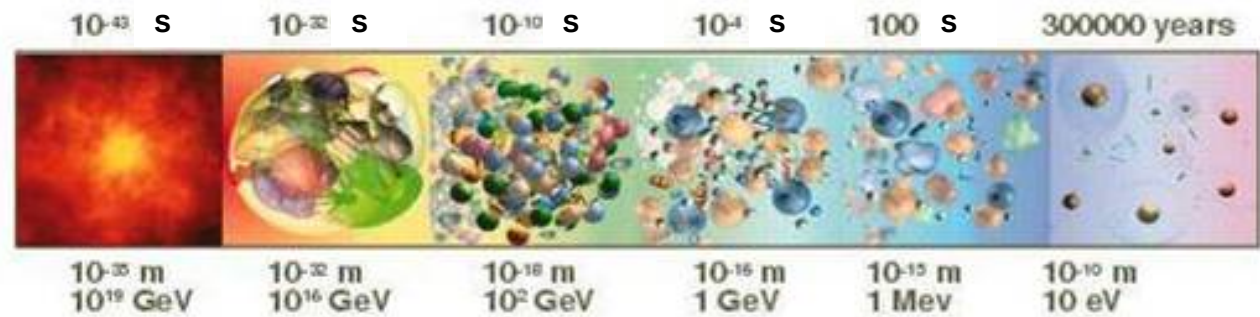
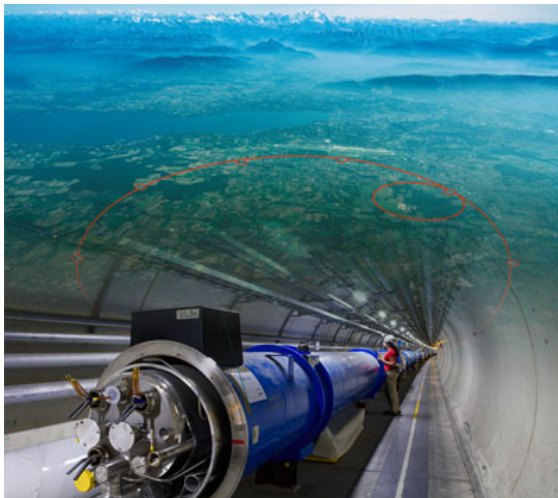
- ▶ Physik versucht die Wirklichkeit / Welt zu beschreiben
- ▶ Am Besten: Möglichst einfach



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“

- LHC:**

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



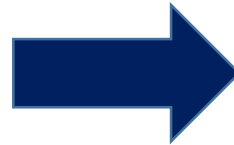
Geschichte der Physik
Zurück zum Urknall

Reduktion

Basiskonzept
Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

- ▶ z.B. Alle Vorgänge / Phänomene lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen

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



**4 Fundamentale
Wechselwirkungen**



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)



Fuß

- ▶ Wi
- ▶ Ma
- Pos
- 3

- ▶ **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	171.2 GeV/c ²	0	?
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	+1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	±1	
leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson	Gauge bosons

Elementarteilchenphysik im neuen Rahmenlehrplan der Sek II in NRW

Inhaltsfeld 5 Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik

Inhaltliche Schwerpunkte

Atomaufbau
Ionisierende Strahlung
Radioaktiver Zerfall
Kernspaltung und Kernfusion

Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

Mögliche Kontexte

Geschichte der Atommodelle
Lichtquellen und ihr Licht
Physik in der Medizin (Bildgebende Verfahren, Radiologie)
(Erdgeschichtliche) Altersbestimmungen
Energiegewinnung durch nukleare Prozesse
Forschung an Teilchenbeschleunigern

Basiskonzept Wechselwirkung

Kernkräfte
Kettenreaktion
Austauschteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen
Konzept der Austauschteilchen vs. Feldkonzept

Basiskonzept Energie

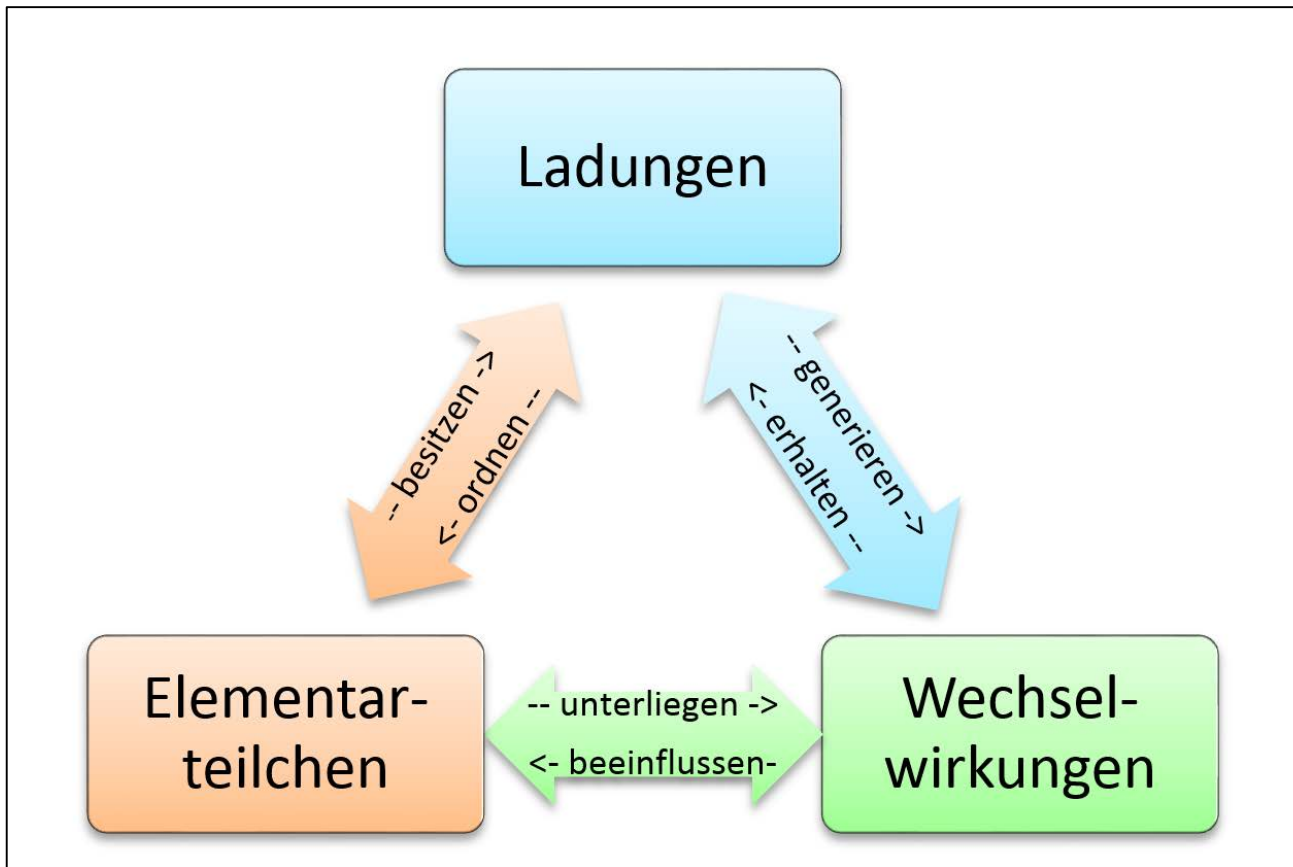
Linienpektren
Energiequantelung der Hüllelektronen
Dosimetrie
Bindungsenergie
Äquivalenz von Masse und Energie

Basiskonzept Struktur der Materie

Kern-Hülle-Modell
Bohr'sche Postulate
Strahlungsarten
Zerfallsprozesse
Massendefekt
Kernbausteine und Elementarteilchen

Quelle: http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GoSt_Physik.pdf, 15.02.2016

Die drei Basiskonzepte des Standardmodells



Basiskonzept Wechselwirkung

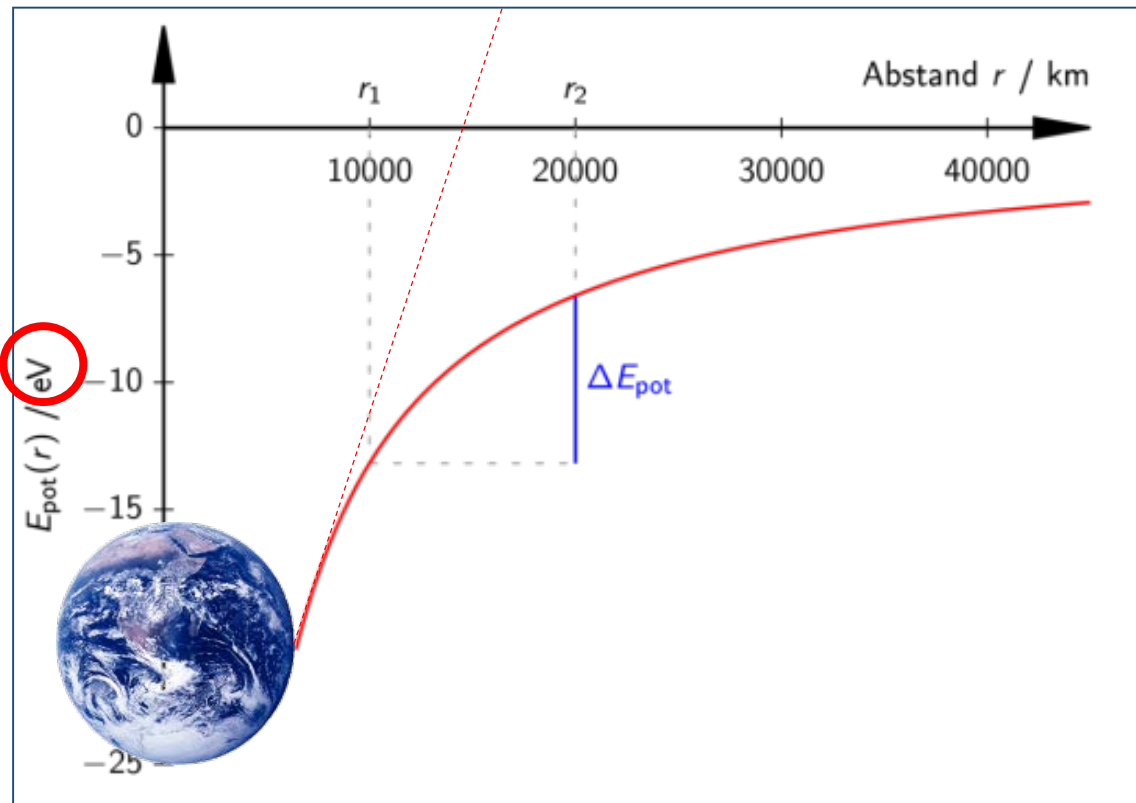
Basiskonzept
Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung + Erzeugung +
Vernichtung

- ▶ Kraft ist immer auch Wechselwirkung (Actio = Reactio)
- ▶ Nun: Begriff Wechselwirkung wird erweitert → neues Basiskonzept
- ▶ Umfasst die Phänomene
 - Kraft (Vektor) (z.B. Coulomb-Kraft)
 - Erzeugung von Materie+Antimaterie (z.B. Elektron+Positron)
 - Vernichtung in „Feldquanten“ (z.B. PET: in 2 Photonen)
 - Umwandlung von Teilchen ineinander (z.B. β -Umwandlung)
- ▶ Ziel: Wir kennen genau 4 fundamentale Wechselwirkungen
 - Zu jeder existiert eine Kraft, oft stehen aber andere Phänomene im Vordergrund
- ▶ Begriffe Kraft und Wechselwirkung sind klar zu trennen

Bekannter Ausgangspunkt: Wwirkung Gravitation

► Potenzielle Energie zwischen Erde und O₂-Molekül

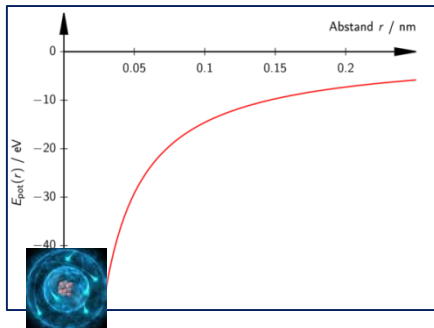
- Grenzfall: kleine Höhen über der Erdoberfläche: $E_{\text{pot}} = mgh$
- Neue Einheit: eV, Möglichkeit des Vergleichs mit $E_{\text{kin}} = 3/2 k_B T = 0,04 \text{ eV}$



<http://1234gifs.de>

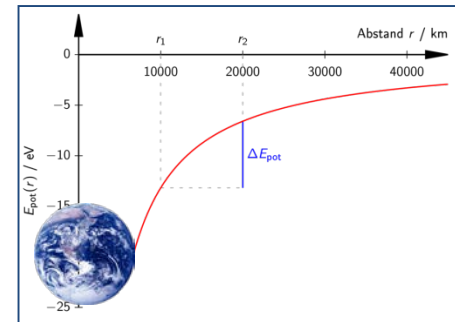
Schule: Zwei bekannte sehr ähnliche Wechselwirkungen

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



www.precisionillustration.co.uk

- Gravitation
(hier Erde – O_2 -Molekül: $r \sim \text{km}$)

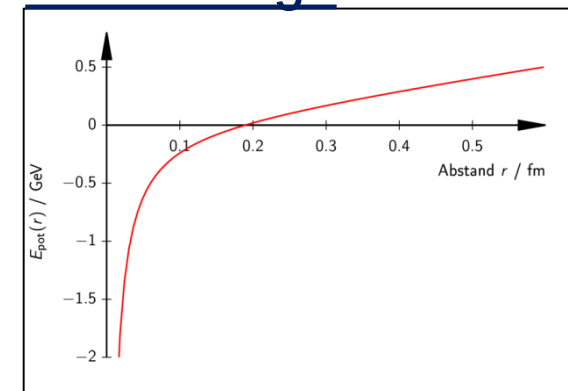


<http://1234gifs.de>



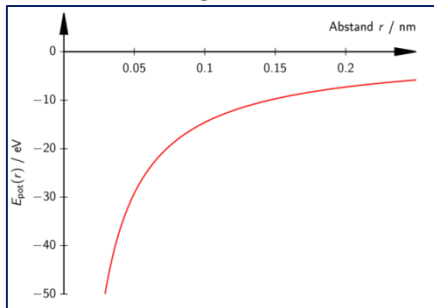
- Warum „halten“ die 8 Protonen im Sauerstoffkern zusammen, obwohl sie sich elektromagnetisch abstoßen? ($r \sim \text{fm}$)

- Einführung: starke WW

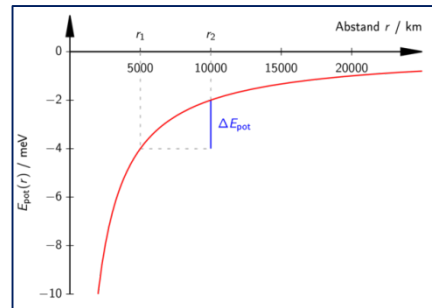


Die vierte fundamentale Wechselwirkung

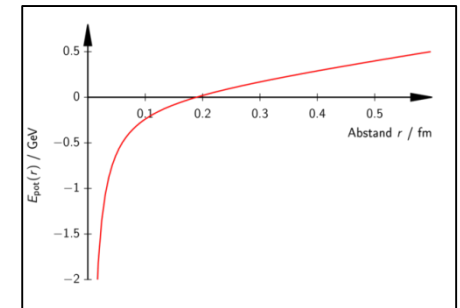
► Elektromagnetische WW



► Gravitation



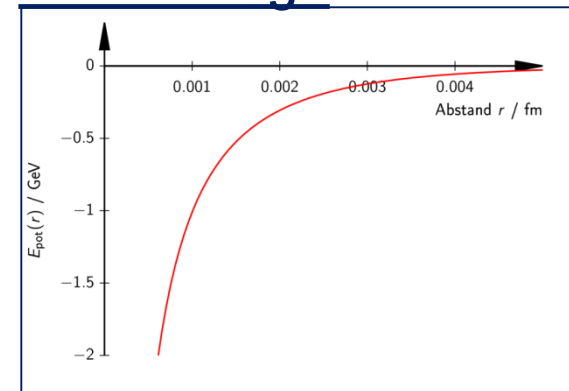
► starke WW



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

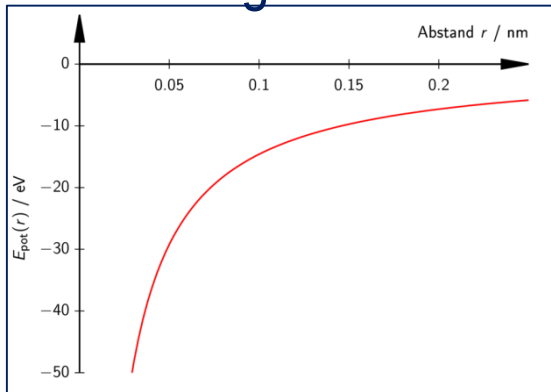
- β^+ Umwandlung $2p \rightarrow 2n$
($4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$)
passiert innerhalb des Protons
 $r \sim 0.001 \text{ fm}$

► Einführung: schwache WW

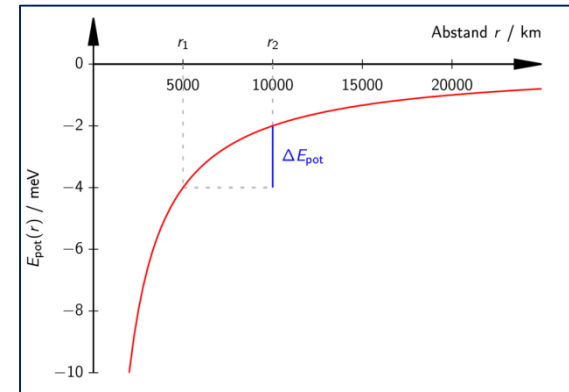


Vergleich der potenziellen Energien (Ähnlichkeiten und Unterschiede)

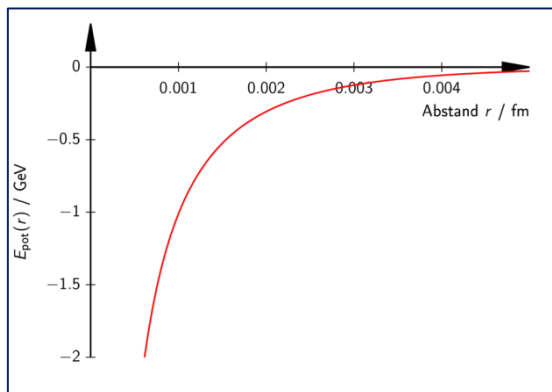
► Elektromagnetische WW



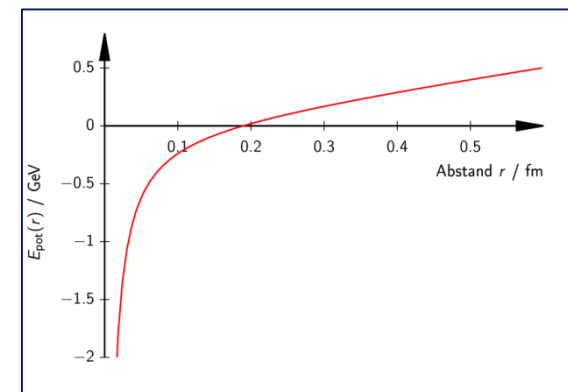
► Gravitation



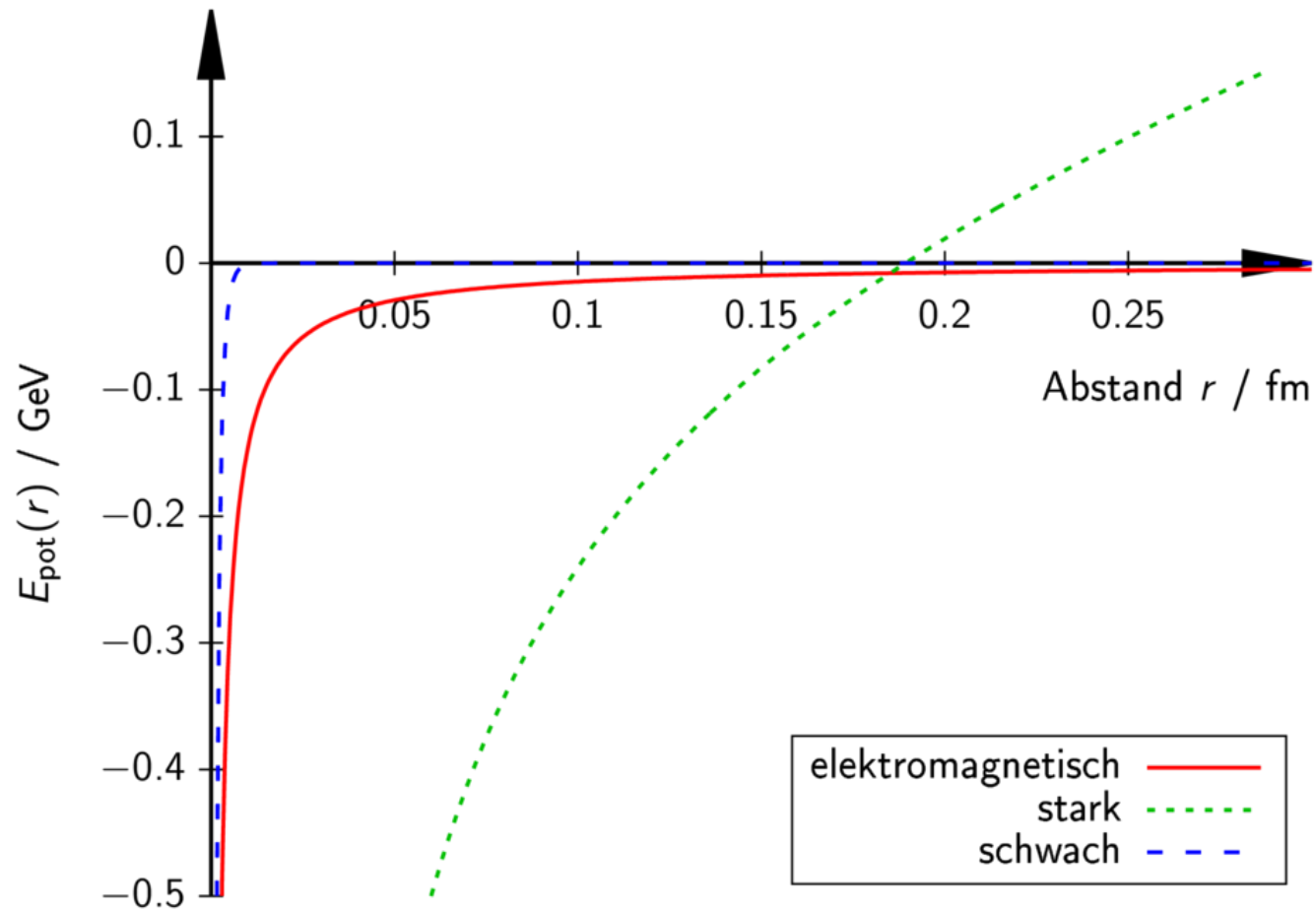
► schwache WW



► starke WW

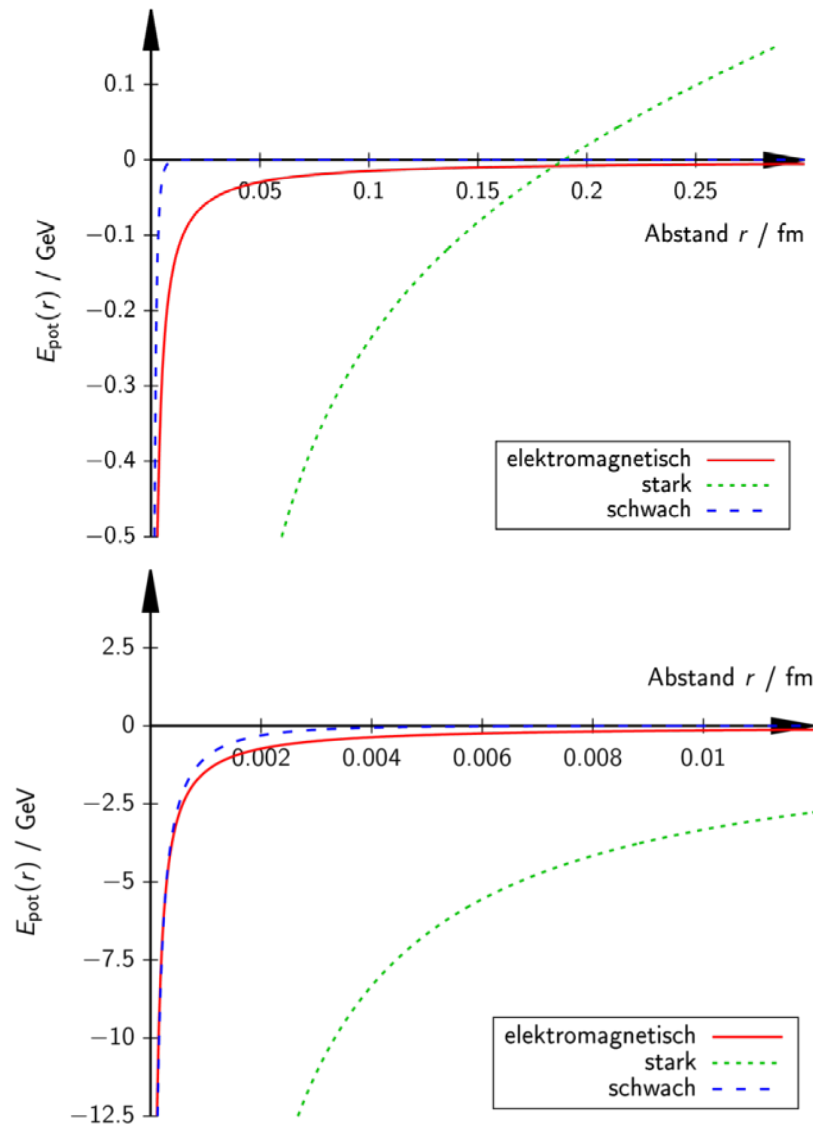


Gemeinsames Bild (außer Gravitation)



Ziel: Vergleich bei Skalierung

(horizontale Achse $\div 25$, vertikale Achse $\times 25$)



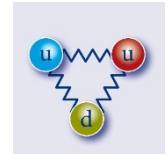
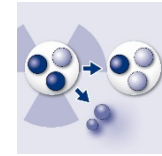
- ▶ Bei kleinen Abständen
gleiches $1/r$ – Verhalten aller WW
(unteres Bild)
- ▶ Elektromagnetische WWirkung
invariant bei Skalierung
→ “unendliche Reichweite”
- ▶ Schwache und Starke WWirkung
haben charakteristische Länge
für Abweichung von $1/r$
- ▶ Quantitativ beschreibbar mit
 - Ladungsprodukt
 -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

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

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

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

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 erfolgt! ($\epsilon_0 \rightarrow \hbar c$)
 $\hbar c = 0,2 \text{ GeV fm}$ (naturgegebene Skalenbeziehung)

► Einführung eines Kopplungsparameters α auch für andere Wechselwirkungen:

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

Basiskonzept der Ladung



- ▶ Ladungszahl als charakteristische Teilcheneigenschaft

- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

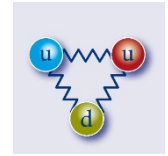
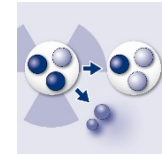
$$Q = q \cdot e$$

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)

Erweiterung auf alle WWirkungen



- ▶ Zu jeder Wechselwirkung existiert eine Ladung
- ▶ Ladung ist eine charakteristische Teilcheneigenschaft

- ▶ Bekannt:

- Elektrische Ladung

- ▶ Neu:

- Schwache Ladung
- Starke (Farb-)Ladung

elektrische Ladungszahl

q

schwache Ladungszahl

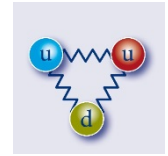
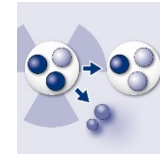
I

starker Farbladungsvektor

$\vec{C}$

- ▶ Produkt zweier Ladungen kann positiv und negativ sein

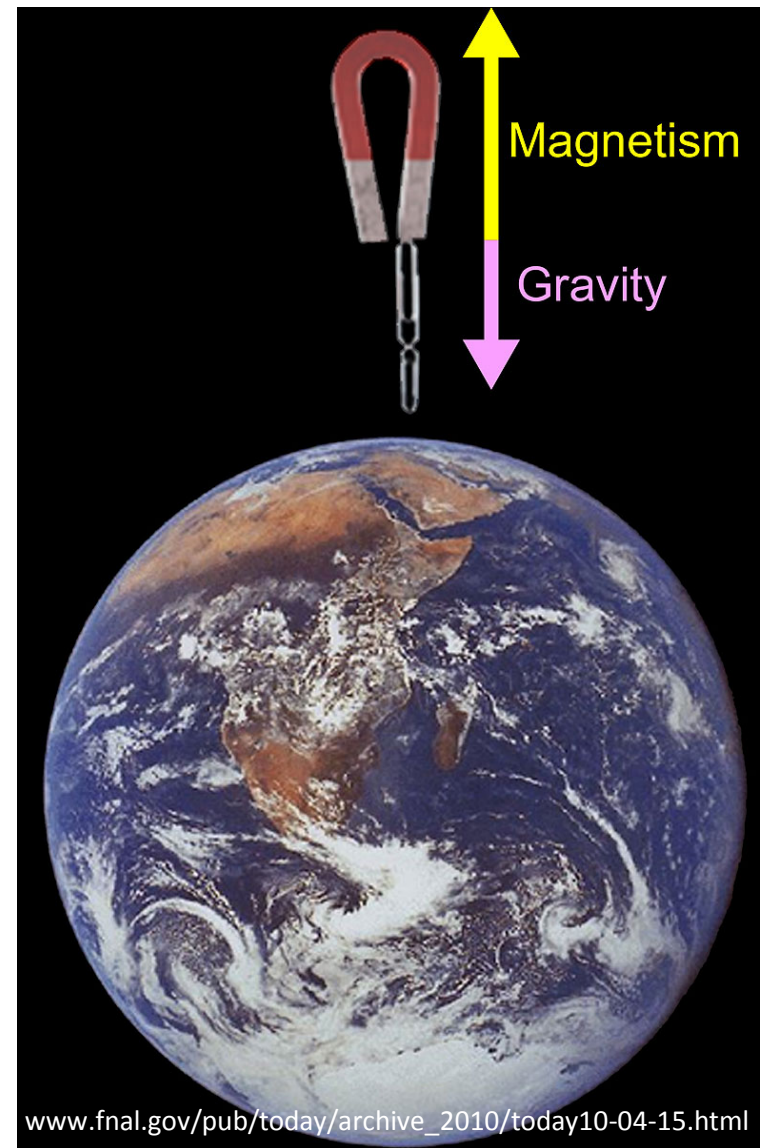
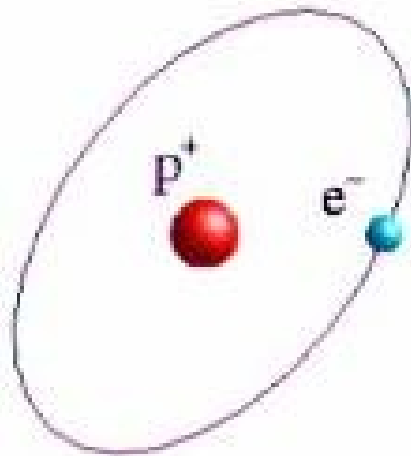
Und Gravitation?



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

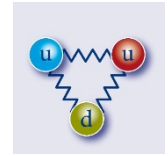
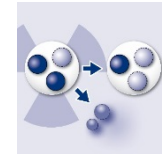
► Noch ein Beispiel:

Wasserstoff



$$\frac{F_{Coulomb}}{F_{Newton}} = 2.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$$

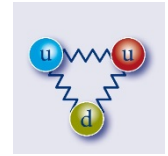
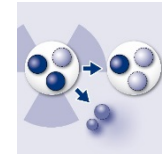
Ladung der Gravitation?



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

- ▶ Es gibt zwar Analogien zwischen Massen und Ladungen, aber:
 - ▶ Schulniveau:
 - Masse ist keine Erhaltungsgröße
 - Produkt zweier Massen $m_1 \cdot m_2$ kann nicht negativ sein
 - ▶ Quantenfeldtheorie:
 - Ladungen definieren Symmetrien (z.B. Drehungen) in Raum und Zeit; bei Gravitation müssten Raum und Zeit selbst „verdreht“ werden
 - Zu Ladungs-Symmetrien gehören Teilchengruppen (Multipletts) mit genau festgelegten Ladungswerten
- Eine solche Quantenfeldtheorie der Gravitation existiert (noch) nicht

Basiskonzept Ladung



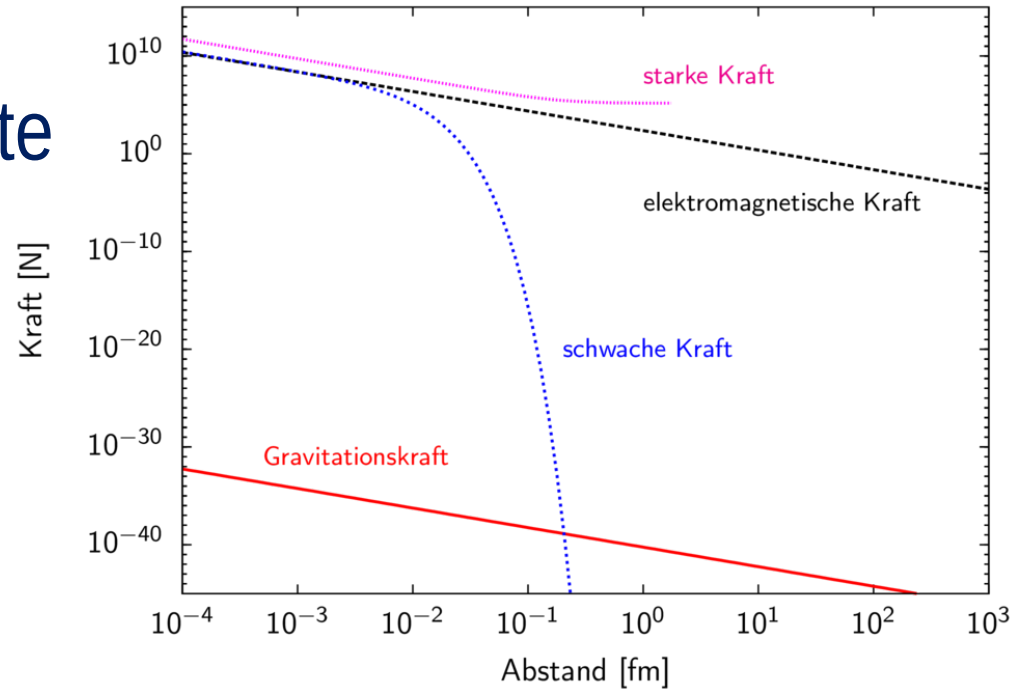
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Ladungen hervorgerufen
- ▶ Ladungen sind charakteristische **Teilcheneigenschaften**
- ▶ Teilchen nehmen nur dann an einer bestimmten WW teil, wenn sie die Ladung der entsprechenden **Wechselwirkung** besitzen

Und:

- ▶ Ladungen dienen als **Ordnungsprinzip** für Teilchen
 - Teilchen bilden „Multipletts“ bezüglich der Ladungen
- ▶ Ladungen sind fundamentale **Erhaltungsgrößen**
 - $\leftrightarrow$ Grundlage der Symmetrien des Standardmodells (Noether!)

Vergleich der Kräfte

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



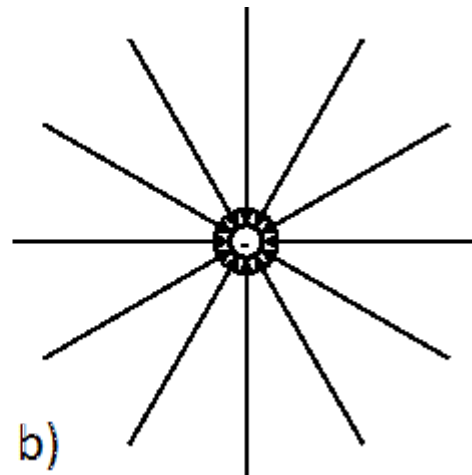
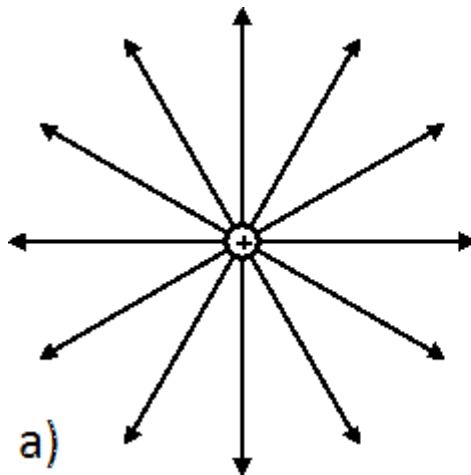
Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1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

Geometrische Betrachtung

- Klassische Physik: Feldlinien, hier elektromagnetische WW

die Dichte der Feldlinien
ist proportional zur Stärke der Kraft

$$F = Q \cdot E$$



$$A = 4\pi r^2$$

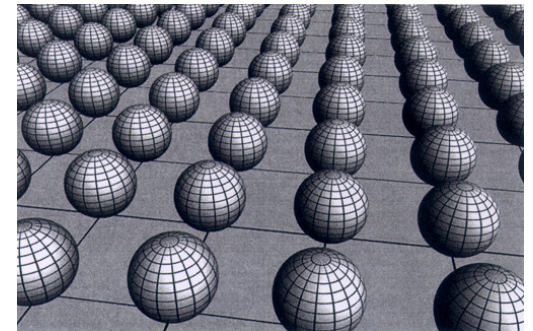
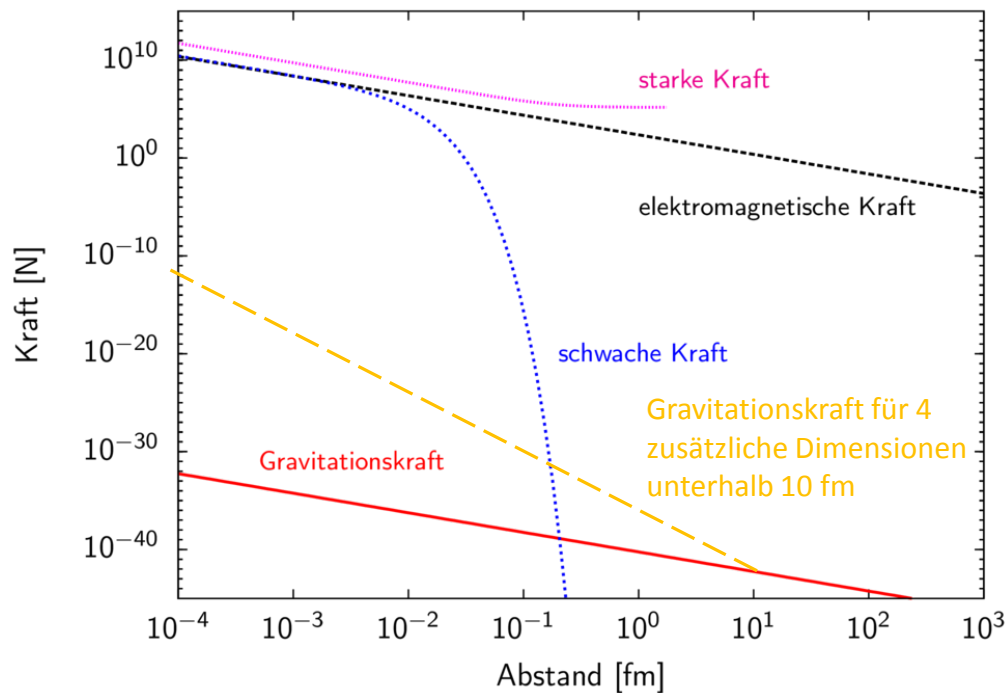
↓

$$F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$$

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

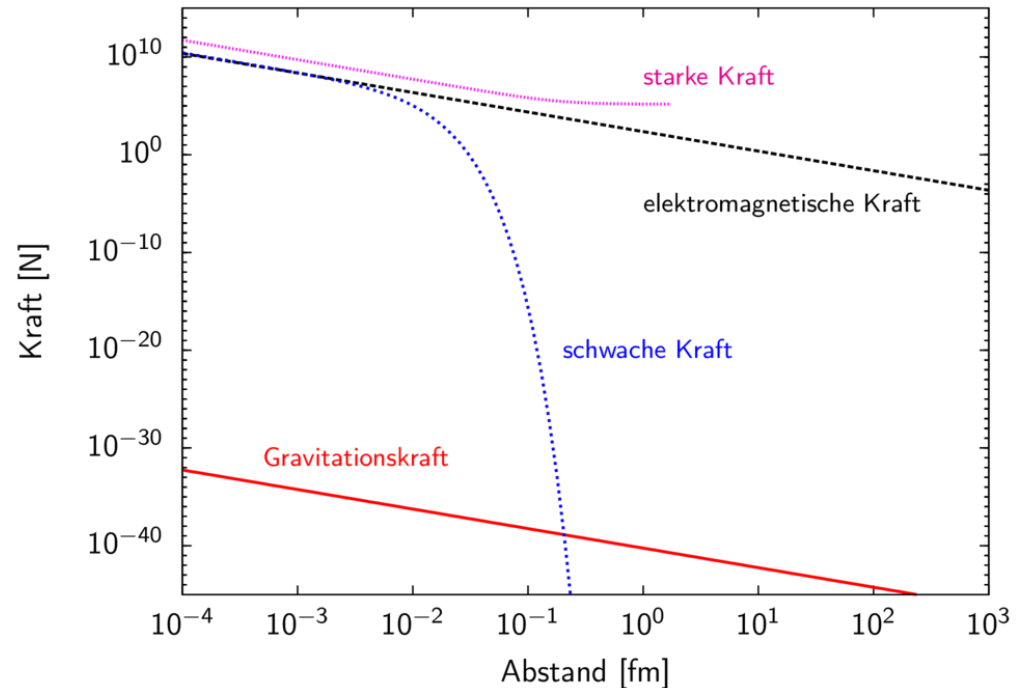
Spekulationen

- Zusätzliche Dim für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



Reichweiten der Kräfte

- Unendlich: im Alltag spürbar
- Endlich: nur subatomar



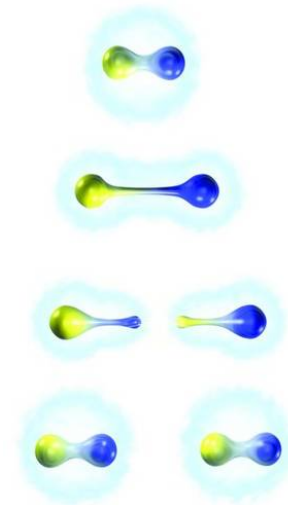
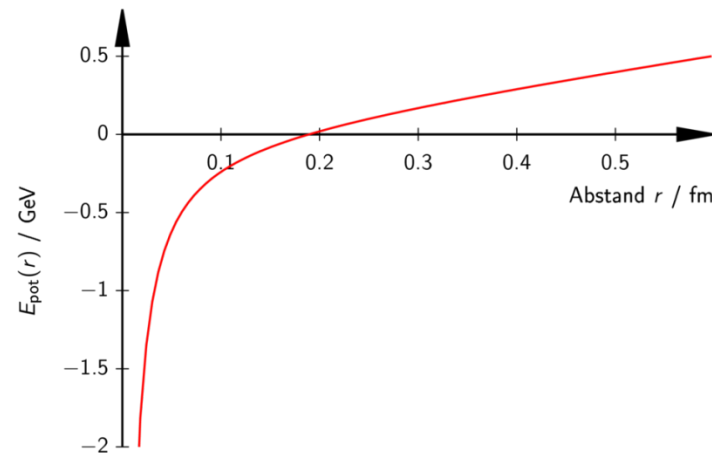
Wechselwirkung	Kraftgesetz für $r \rightarrow 0$	Reichweite	Kopplungsparameter α
Gravitation	$F_G = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{grav} \cdot \frac{-1}{r^2}$	unendlich	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{38}}, \dots, \frac{1}{10^{45}}$
elektromagnetisch	$F_C = \hbar \cdot c \cdot \alpha_{em} \cdot \frac{q_1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

Endliche Reichweiten: unterschiedliche Gründe

- ▶ Starke Wechselwirkung: Confinement („Eingesperrtsein“)

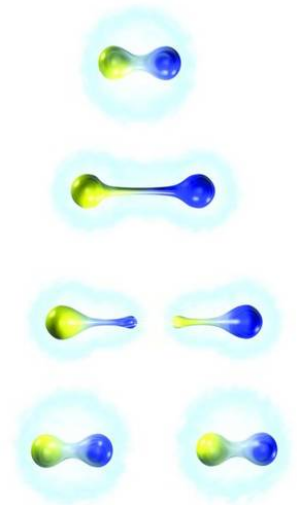
- ▶
$$E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_s \cdot \frac{\vec{C}_1 \cdot \vec{C}_2}{r} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$$

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



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.



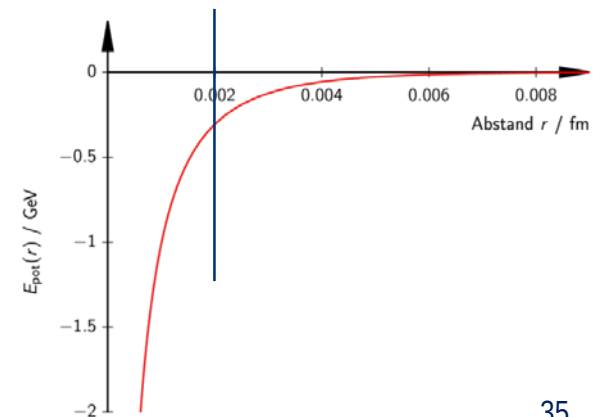
Endliche Reichweiten

► 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

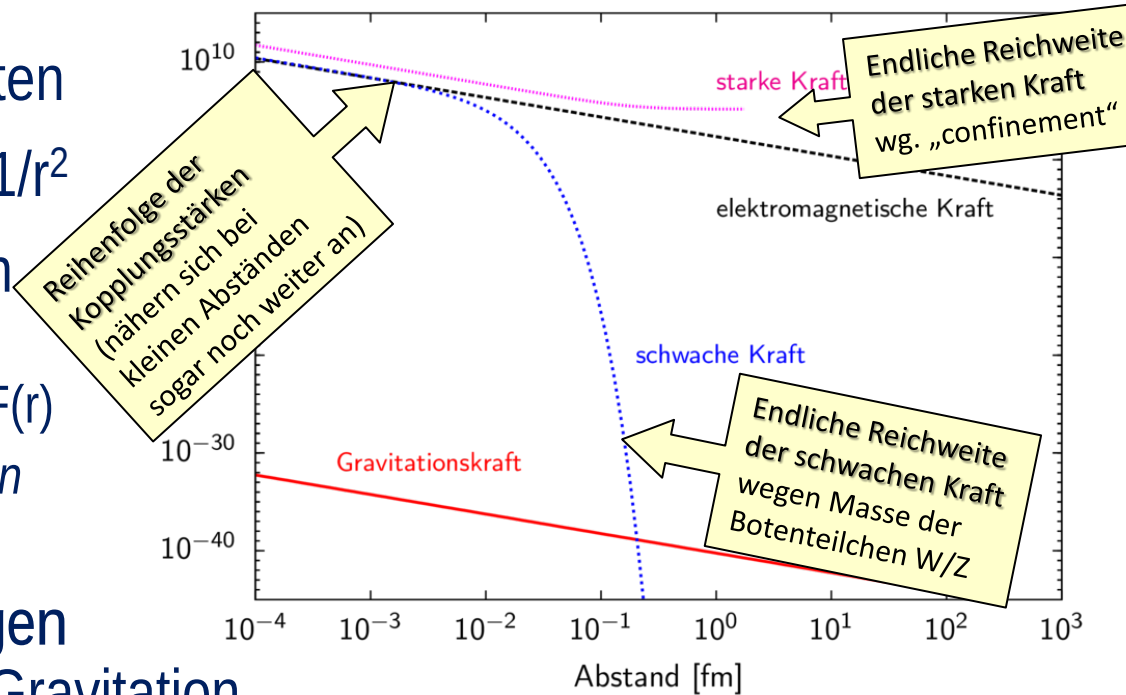
$$► E_{Pot}(r) = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$$

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



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	$F_w = \hbar \cdot c \cdot \alpha_w \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2}$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$

Zusammenfassung: Wechselwirkungen

- ▶ Alle bekannten Vorgänge im Universum lassen sich auf 4 fundamentale Wechselwirkungen zurückführen:
 - elektromagnetische, schwache, starke, Gravitations – Wechselwirkung
 - → Herausforderung für jegliche Esoterik!
- ▶ 3 dieser WWen werden im Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben und besitzen sehr ähnliche Grundprinzipien
 - analoge Beschreibung von Prozessen (Kräfte, Umwandlungen, etc.)
 - werden durch Ladungen hervorgerufen
 - Theorie: 3 Symmetrien mit urspr. nur 3 freien Parametern α_w , α_s , α_{em}
- ▶ Nur 2 WWen besitzen eine unendliche Reichweite, während die beiden anderen auf subnukleare Abstände beschränkt sind
 - Im Alltag direkt erfahrbar .vs. Im Alltag nicht direkt erfahrbar

10' Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 1a

► Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



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 v ist ein unendlicher See schwacher Ladung und erzeugt eine **endliche Reichweite** der schw. WW durch Abschirmung

Ladungen als Ordnungsprinzip

- ▶ Definieren Teilnahme an den Wechselwirkungen (=Kästen)
- ▶ Antimaterie: Alle Ladungen jeweils entgegengesetzt

MATERIE

	1. Generation	I	q
elektrisch neutrale Leptonen		$+1/2$	0
.....			
elektrisch geladene Leptonen		$-1/2$	-1
.....			
Quarks	  	$+1/2$	$+2/3$
	  	$-1/2$	$-1/3$
.....			
$\bar{c}$	blau rot grün    starke WW elektromagnetische WW schwache WW		

ANTIMATERIE

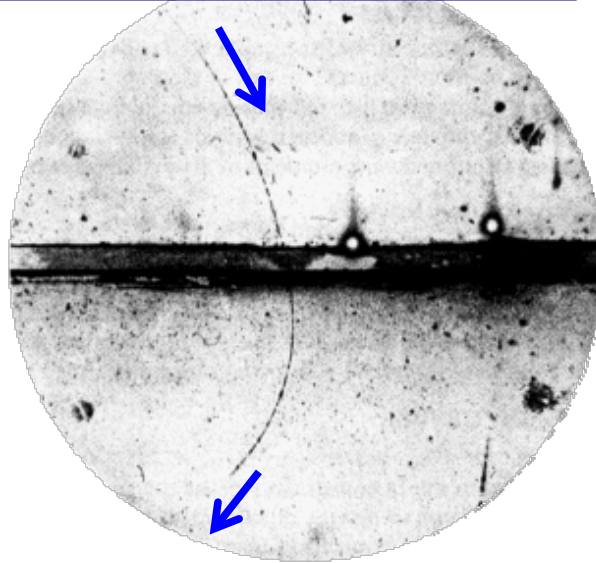
	1. Generation	I	q
	schwache WW		
	elektromagnetische WW		
	starke WW		
	antiblau antirot antigrün   		
.....			
Anti-Quarks	  	$+1/2$	$+1/3$
.....			
	  	$-1/2$	$-2/3$
.....			
elektrisch geladene Anti-Leptonen		$+1/2$	$+1$
.....			
elektrisch neutrale Anti-Leptonen		$-1/2$	0

Antimaterie: Entdeckung des Positrons

- ▶ Positronennachweis durch Nebelkammer
 - Postuliert: Paul M. Dirac 1928
 - Gefunden: Carl D. Anderson 1932

- ▶ Anderson fand 1936 auch das Myon
- ▶ erstes Teilchen der 2. Generation im Standardmodell
- ▶ Isidor Rabi: *"Who ordered that?"*

von oben einlaufendes Positron, 63 MeV



6 mm Bleiplatte

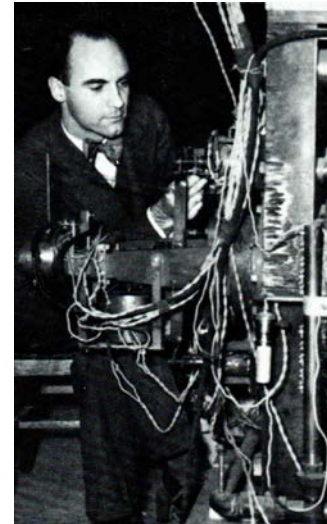


1.5 T Magnetfeld

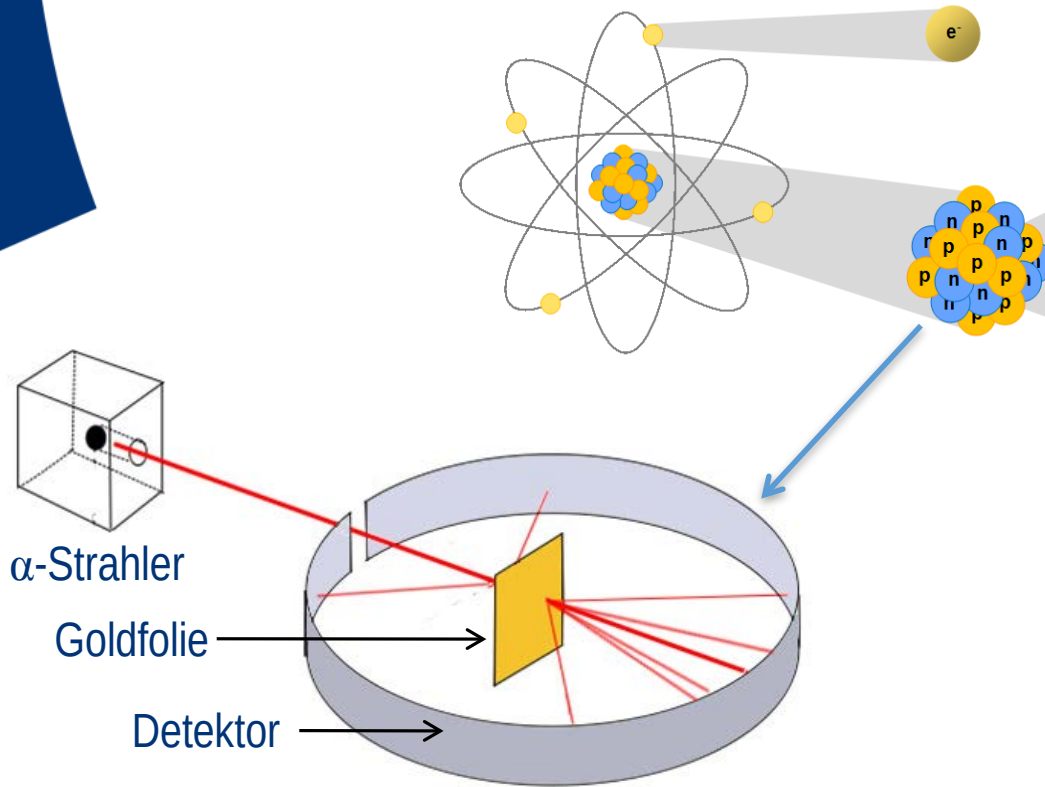
Positron verliert 23 MeV Energie im Blei →
kleinerer Radius, dies definiert die Flugrichtung!

- Antiteilchen verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse und umgekehrten Ladungen

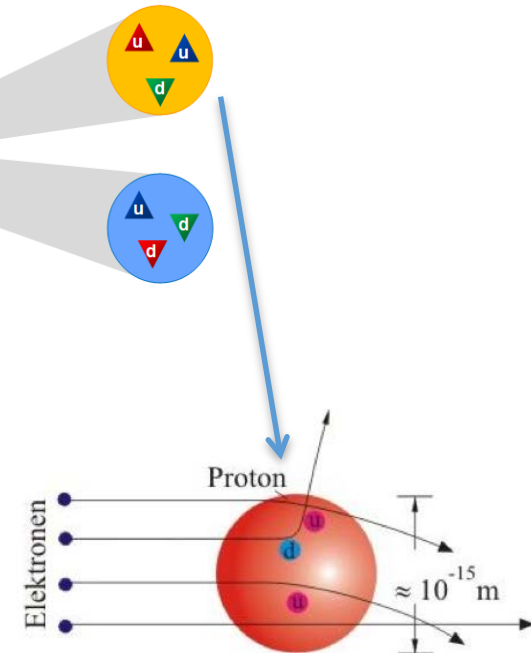
Carl D. Anderson



Streuprozesse zur Strukturerkennung



Rutherford-Streuexperiment (1911)
Streuung von α -Teilchen an Goldatomen -
--> Atomkern



Experiment am SLAC (1969)
Streuung von Elektronen an Protonen
--> Quarks

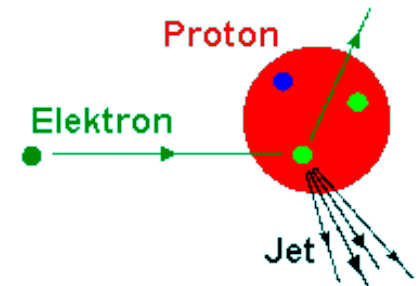
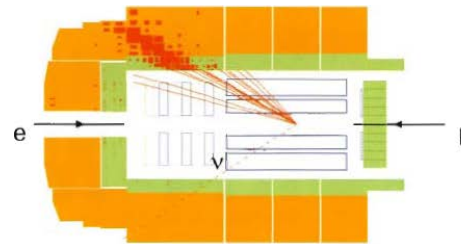
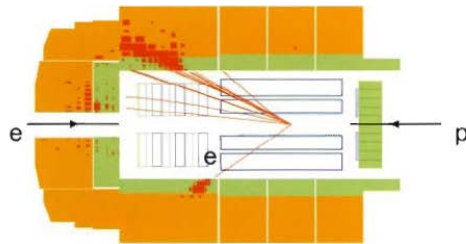
Messung der elektrischen u schwachen Ladung

► e⁻-p Streuung bei HERA am DESY (1992-2007)

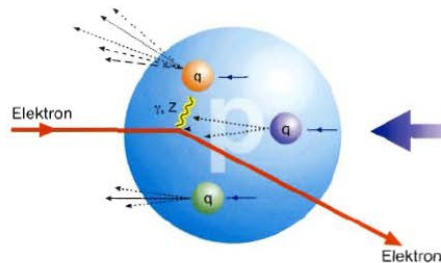
- Hohe Energien $\gg$ GeV $\rightarrow$ Quarks im Proton erkennbar $\ll$ fm (vgl. $\hbar c = 0,2 \text{ GeV fm}$)

► Analog zur Rutherford-Streuung: Abtasten der Struktur mit „Sonde“

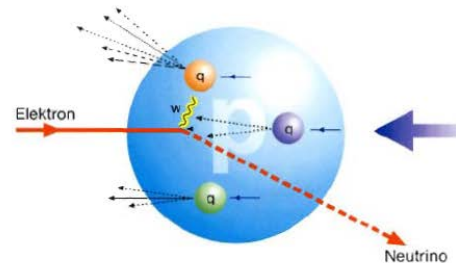
- Elmag. WW über Sonde Photon: $\rightarrow$ elektrische Ladung der Quarks
- Schwache WW über Sonde W-Teilchen: $\rightarrow$ schwache Ladung der Quarks



- γ : $e^- \rightarrow e^-$ (sichtbar)



- W: $e^- \rightarrow \nu$ (unsichtbar)



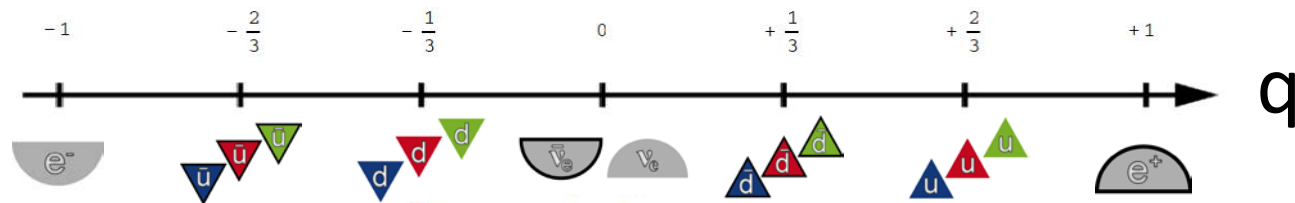
Broschüre: „Das Supermikroskop HERA“: http://pr.desy.de/e113/index_ger.html

Zwei Arten von Kollisionen: Trifft ein Elektron auf ein Proton, so kann es mit einem Quark (q) in dessen Innerem reagieren – entweder über ein neutrales Austauschteilchen (Photon γ bzw. Z-Teilchen) oder über ein geladenes W-Teilchen. Im ersten Fall wird das Elektron abgelenkt und im Detektor sichtbar (Neutraler-Strom-Reaktion, links). Im zweiten Fall verwandelt es sich in ein Neutrino (ν), das die Apparatur spurlos durchquert (Geladener-Strom-Reaktion, rechts). Das getroffene Quark wird aus dem Proton herausgeschlagen und erzeugt ein Bündel von Teilchen.

Elektrische Ladung

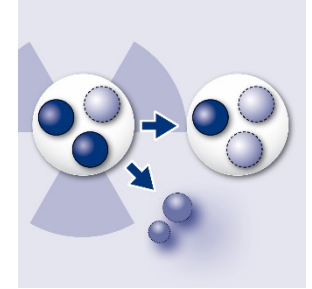


- Übersicht über die elektrischen Ladungszahlen q einiger Anti-/Materieteilchen

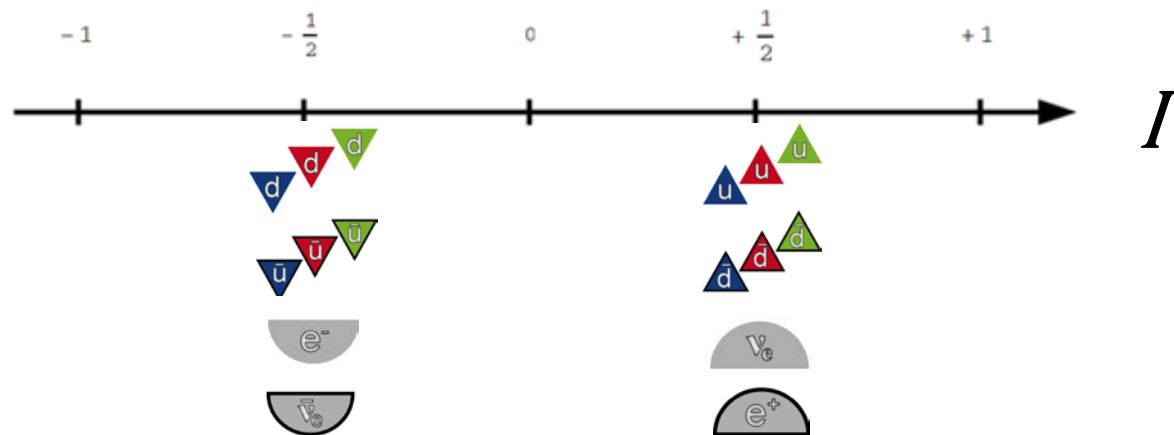


- Elektrische Ladung ist gequantelt

Schwache Ladung



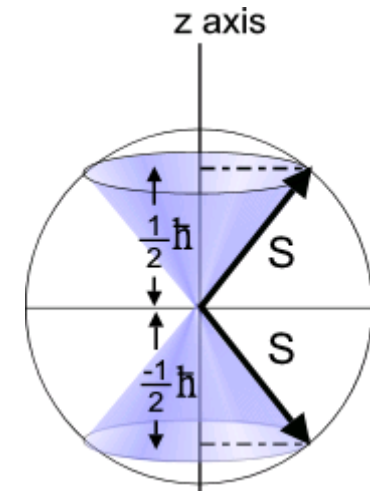
- ▶ Materieteilchen besitzen entweder eine schwache Ladungszahl von $I = +\frac{1}{2}$ oder $I = -\frac{1}{2}$
 - → alle Materieteilchen nehmen an der schwachen WW teil !



- ▶ Schwache Ladung ist gequantelt

Exkurs: warum schwache „Isospin“-Ladung?

- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie bei Spin: $SU(2)$
- ▶ Jeweils Vektor mit 3 Komponenten
 - Spin $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$ im Ortsraum
 - Schwacher Isospin $\mathbf{I}^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$ im abstrakten schwachen Isospinraum



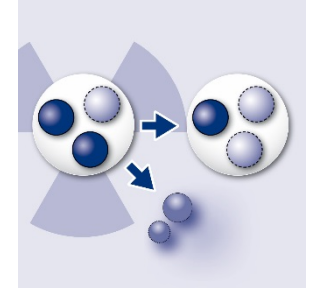
<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

- ▶ Messbar bei beiden nur:
 - Gesamter Betrag und eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
 - die beiden anderen Komponenten sind „unscharf“ (Heisenberg)
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl $I := I_3^W$
- ▶ Ordnung in Multipletts von $I := I_3^W$

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

$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$

Schwache Ladung



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

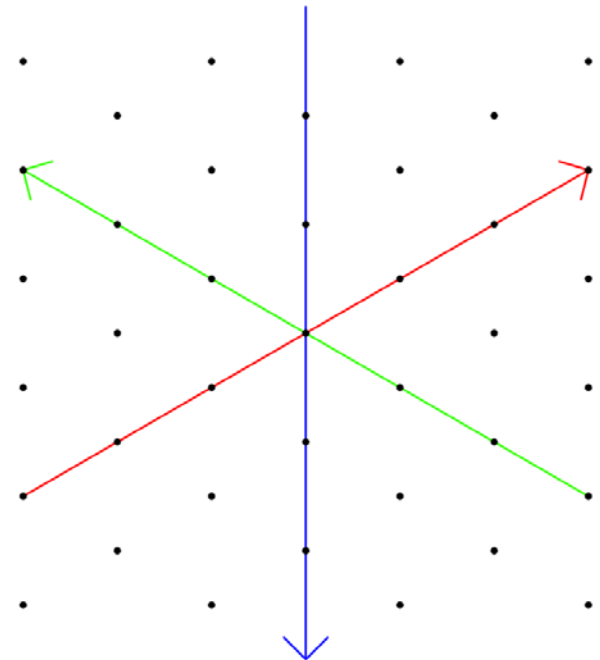
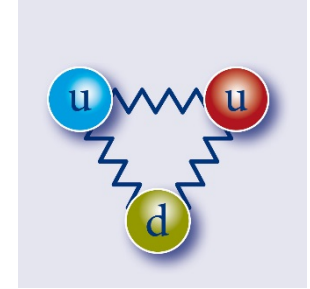
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} I = +\frac{1}{2} \\ I = -\frac{1}{2} \end{matrix} \quad \begin{matrix} q = 0 \\ q = -1 \end{matrix}$$

- ▶ Grund: Eigenschaften des $W^\pm$ -Teilchens

$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{pmatrix}$$

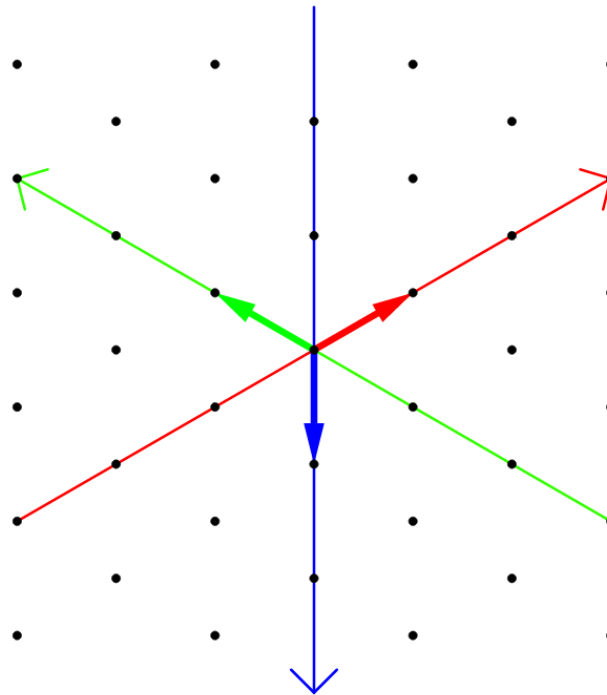
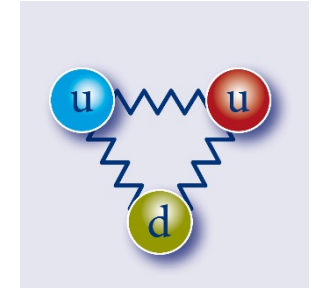
Starke Ladung

- ▶ Quarks und Anti-Quarks besitzen eine starke Ladung (auch: „Farbladung“)
 - Experiment: Betrag aller starken Ladungen der Quarks gleich
 - Protonen und Neutronen bestehen aus 3 Quarks und sind bzgl. starker Ladung neutral
- ▶ → starke Ladung hat Vektorcharakter ! (<-> theoretische Symmetrie: $SU(3)$)
- ▶ Starke Farbladungsvektoren sind gequantelt im Farbgitter



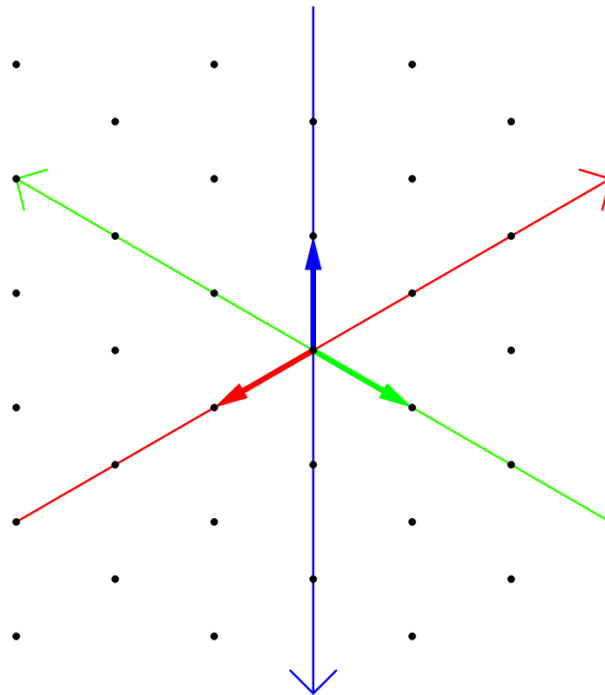
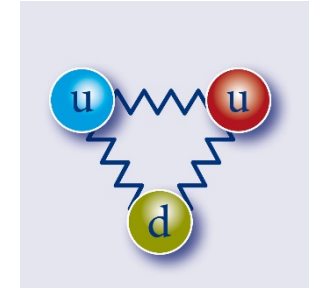
Starke Ladung

► Starke Farbladungen von Quarks



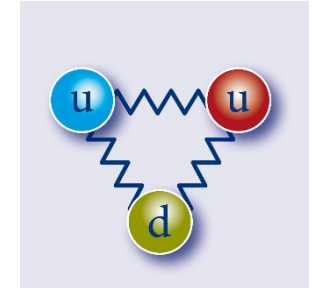
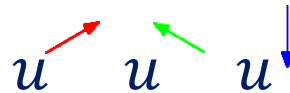
Starke Ladung

► Starke Farbladungen von Anti-Quarks

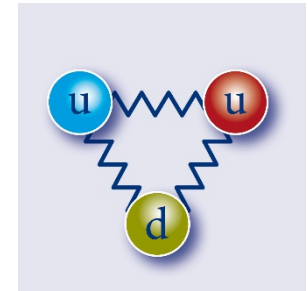
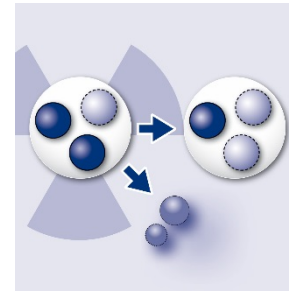


Starke Ladung

- ▶ Quarks bilden Farbtripletts
- ▶ Beispiel: Up-Quarks



- ▶ Die drei Farben bzw. eine Farbe und ihre Anti-Farbe addieren sich zu farbneutral
- ▶ Wegen Confinement (Eingesperrt-Sein):
Alle zusammengesetzten Teilchen müssen farbneutral sein
 - „Baryonen“ (p, n, ...) : 3 Quarks
 - „Mesonen“ (π , K, ...) : 1 Quark + 1 Anti-Quark
 - „Tetra-Quarks“ (....) : 2 Quarks + 2 Anti-Quarks
 - „Penta-Quarks“ (...) : 4 Quarks + 1 Anti-Quark



► Alle drei Ladungen sind additiv

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

- Elektrische Ladungszahl:

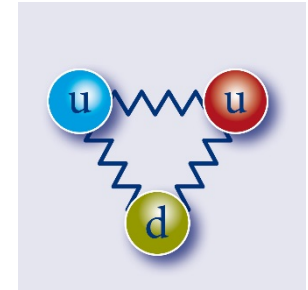
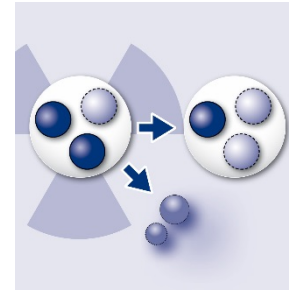
$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



- Alle drei Ladungen sind erhalten

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

- Elektrische Ladungszahl:

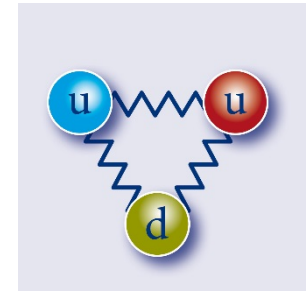
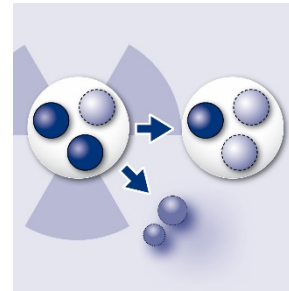
$$0 \rightarrow +1 - 1 + 0 = 0$$

- Schwache Ladungszahl:

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

- Starker Farbladungsvektor:

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



► Alle drei Ladungen sind erhalten

➡ Zusammen mit Energie- und Impulserhaltung erlaubt die Ladungserhaltung eine eindeutige Vorhersage, ob bestimmte Prozesse erlaubt oder unmöglich sind

Zusammenfassung: Ladungen

- ▶ Drei verschiedene Ladungen
 - Elektrisch
 - Schwach
 - Stark
- ▶ Ladungen sind
 - additiv
 - erhalten
 - Vorhersage zu erlaubten Prozessen
 - gequantelt

Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 1

► Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



12:00 Mittagessen !

Nächster Vortrag: 13:30 Uhr!



8:30 – 10:00 Uhr

Felder, Boten, Darstellen von Wechselwirkungen

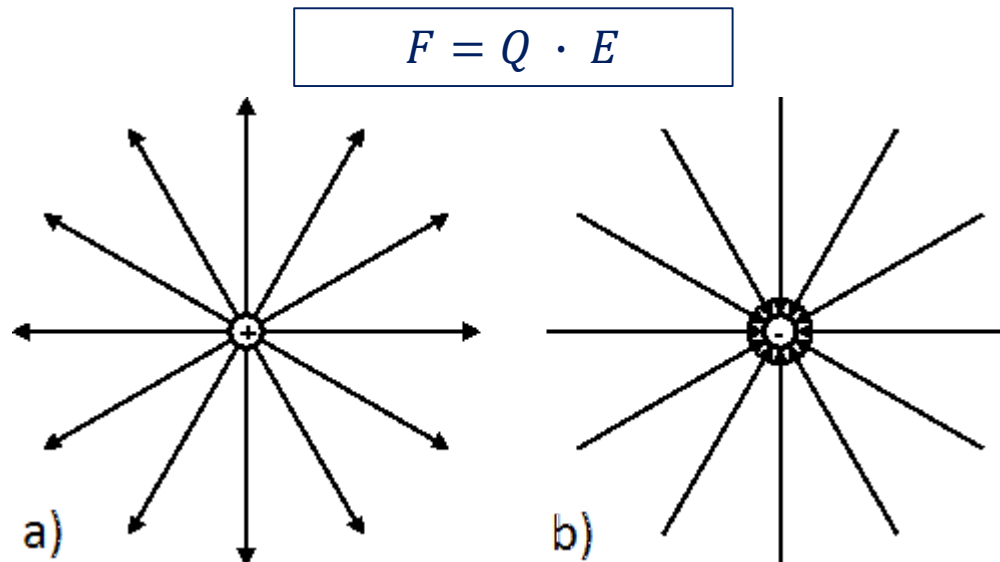
Teilchen-Multipletts | Ordnungsschema

Fachvortrag 2

Darstellen von Wechselwirkungen

► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite
hier: elektromagnetische Wechselwirkung



$$A = 4\pi r^2$$

↓

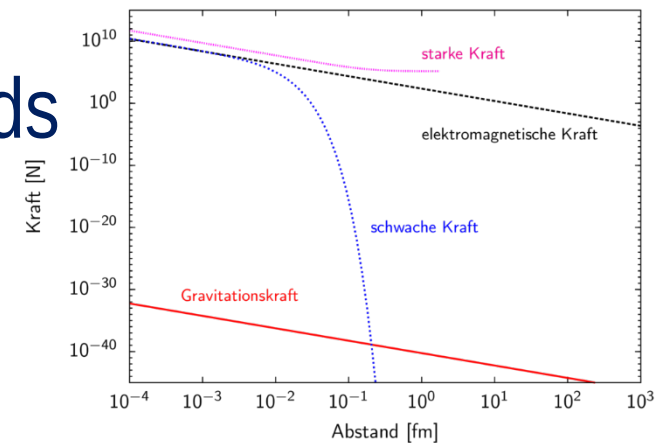
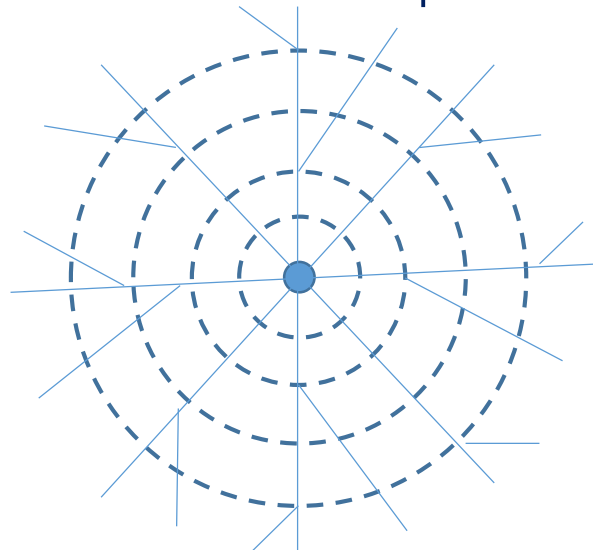
$$F \sim \frac{1}{4\pi r^2}$$

Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

- Ungewöhnliche Feldlinien für WW, deren Kräfte zunächst $F \sim 1/r^2$ folgen, dann aber abweichen:

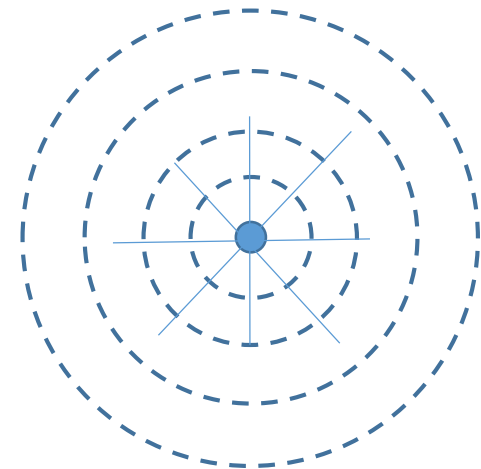
- 1: stark

- Kraft $\rightarrow$ Feldliniendichte wird konstant
- Feldlinien entstehen spontan



- 2: schwach

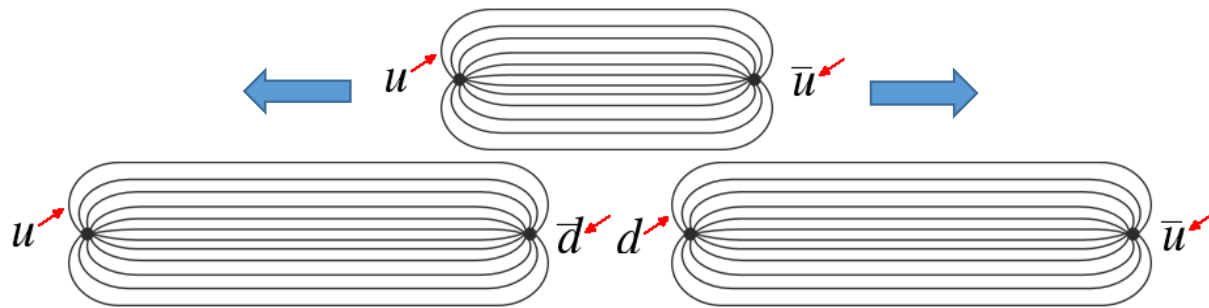
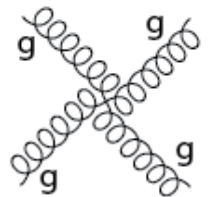
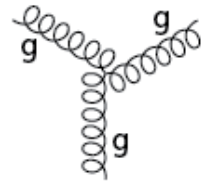
Kraft strebt rasch gegen Null
Feldlinien enden „im Nichts“



Lösung 1: stark geladene Botenteilchen

► Starke WW: Feldquanten Gluonen

- Tragen selbst die starke Ladung
(während z.B. $q(\text{Photon}) = 0$)
- Gluonen können daher selber Gluonen abstrahlen
(im Gegensatz zu Photonen)
→ Feldliniendichte bleibt konstant
- Masselos -> prinzipiell unendliche Reichweite, aber
 - Selbstwechselwirkung → „Schlauchbildung“ der Feldlinien ($F = \text{const}$)
 - → Quark-Paarerzeugung -> Confinement



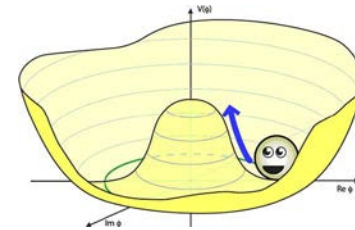
Lösung 2: Massive Botenteilchen

► Schwache WW: Feldquanten „Weakonen“ (W und Z-Teilchen)

- Abschirmung „schwacher Felder“ durch BEHiggs-Hintergrundfeld v
= unendlicher See schwacher Ladung

- Abschirmendes Feld:

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



- Anregung = Higgs-Boson

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



- Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien durch v
- Quantenmechanik: Masse $\leftrightarrow$ Endliche Reichweite von W und Z
 - SM: Kopplung mit α_W an schwache Ladung von v ergibt Masse von W und Z (vorhersagbar: $m_W c^2 = 80,37 \text{ GeV}$; Messung: $80,40 \text{ GeV}$ (Präzision < Promill !))

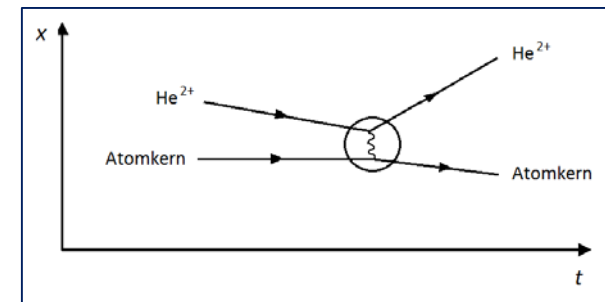
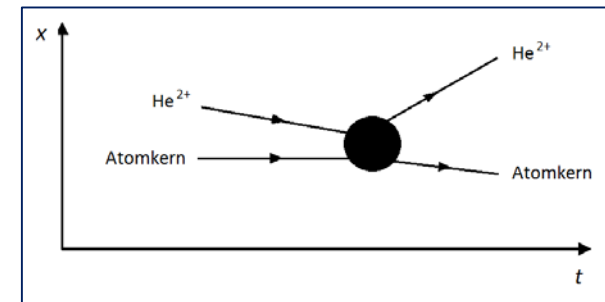
Übergang Feldlinien $\rightarrow$ Botenteilchen

► Makroskopisch:

- Feldliniendichte $\rightarrow$ Feldstärke $\rightarrow$ Kraft in ausgedehnten Feldern
- klassische Bahnen berechenbar

► Mikroskopisch:

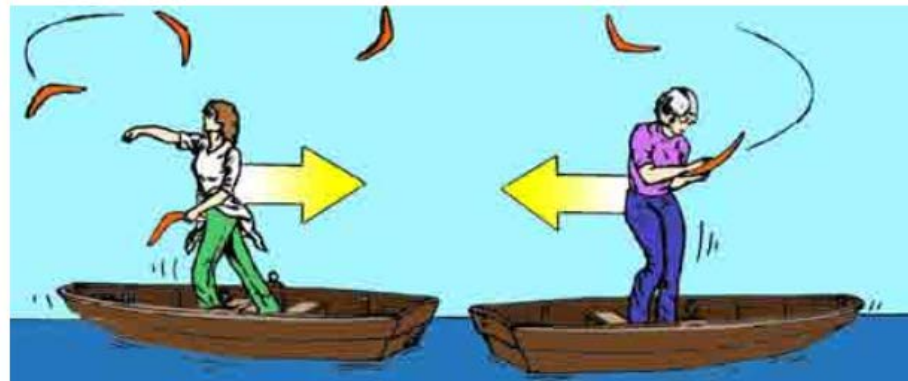
- Wechselwirkung ohne Bahnbegriff (z.B. Streuung: Unbestimmtheit von Ort u. Zeit)
- Messbar sind nur (für jedes Teilchen)
 - Energie E und Impuls $\vec{p}$ vorher
 - Energie E und Impuls $\vec{p}$ nachher
 - Energiedifferenz ΔE und Impulsdifferenz $\Delta \vec{p}$ wird durch Botenteilchen übertragen



Darstellen von Wechselwirkungen

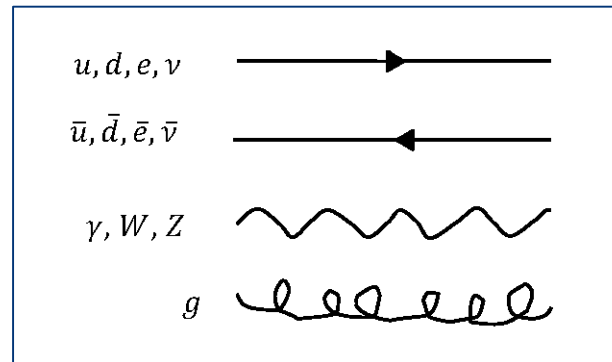
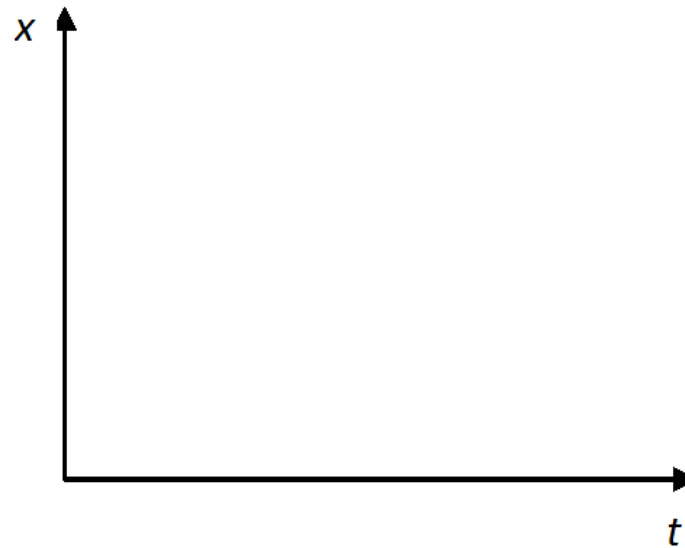
► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

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



Feynman-Diagramme

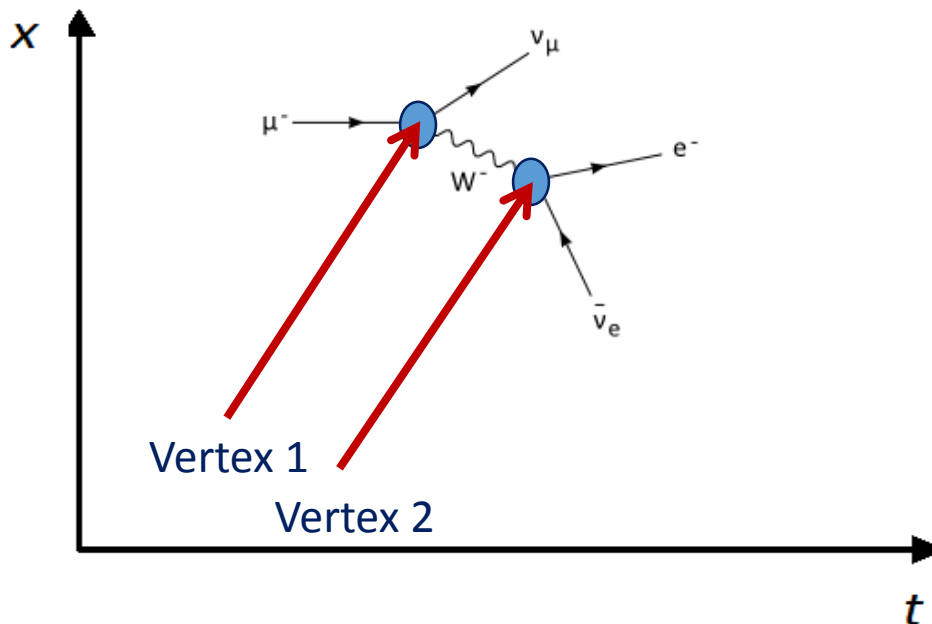
► Aufbau



Feynman-Diagramme

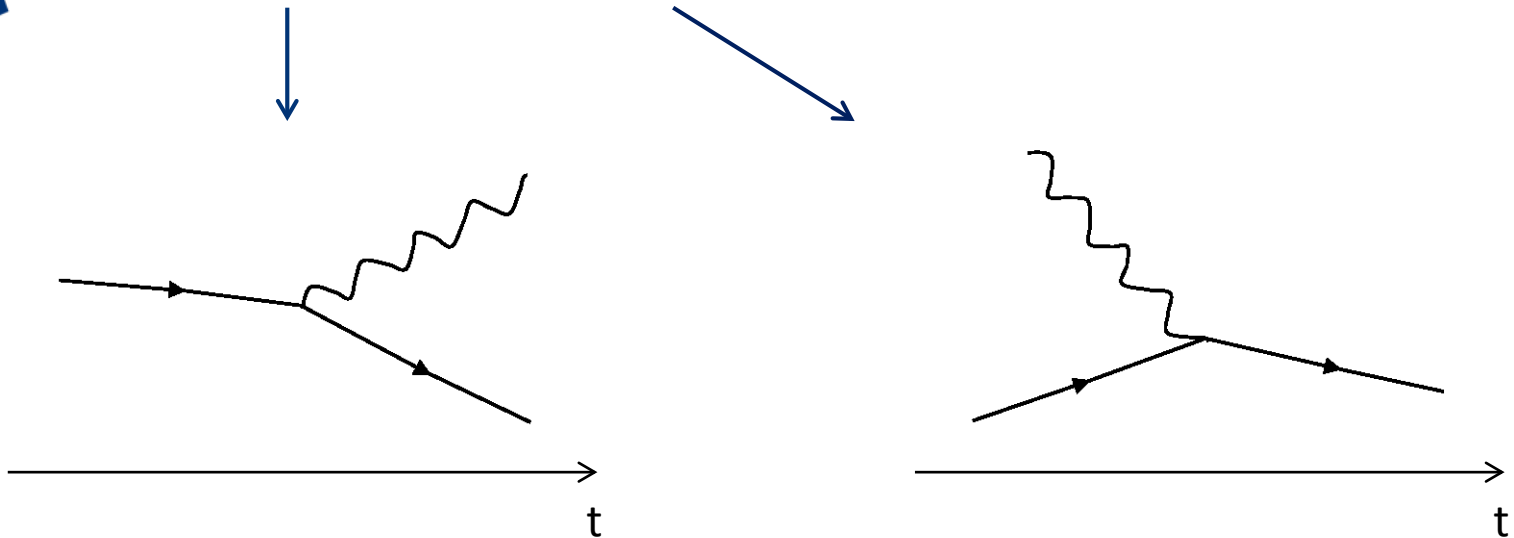
► Begriffsklärung:

- 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!



Grundbausteine 1/2

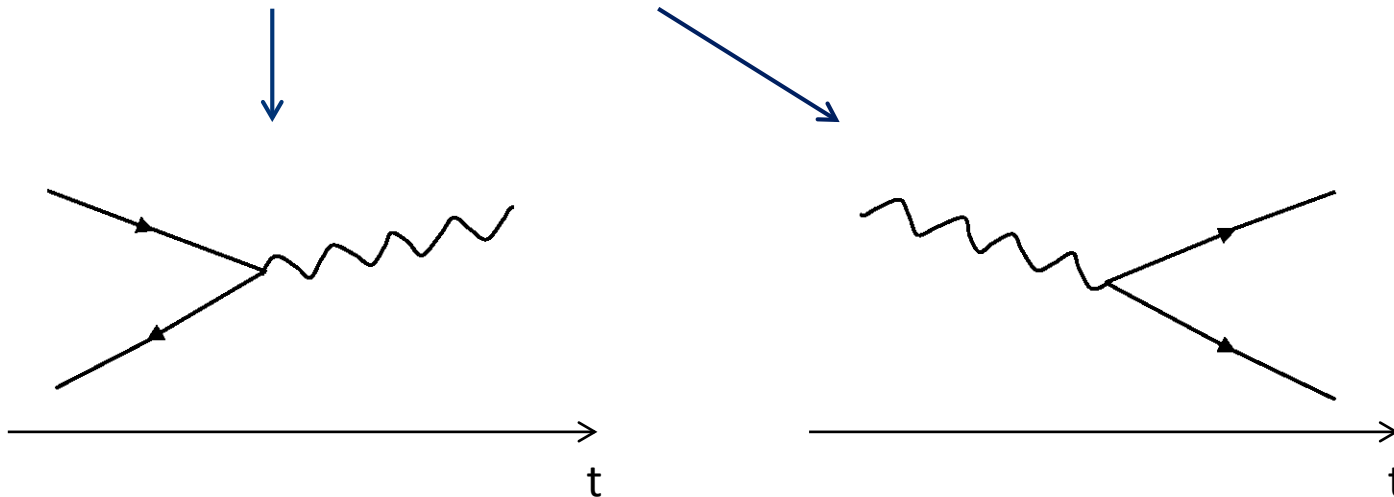
► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



- -> Kraftwirkungen (geht auch mit Feldlinien)
- -> Teilchenumwandlungen (geht **nicht** mit Feldlinien)

Grundbausteine 2/2

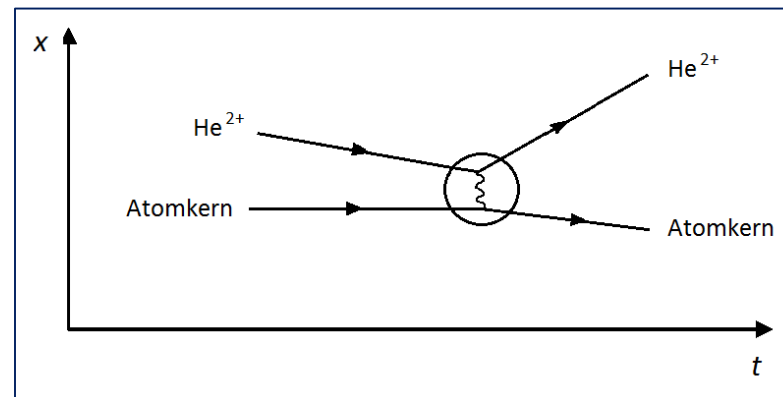
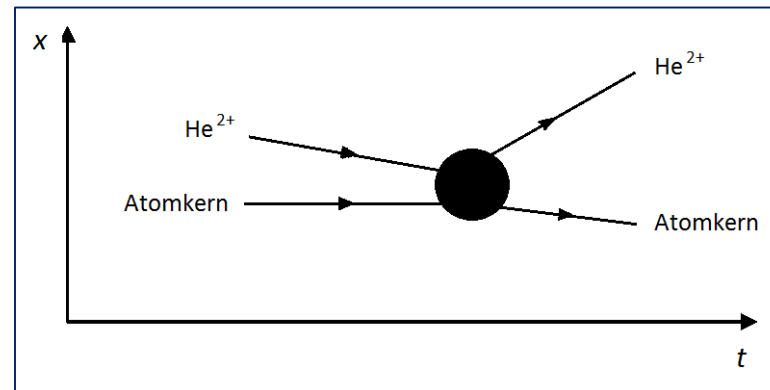
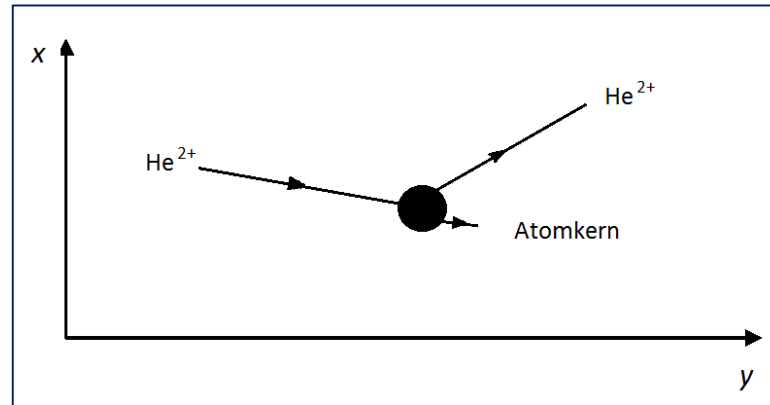
► Paarvernichtung und Paarerzeugung



- Geht beides **nicht** mit Feldlinien

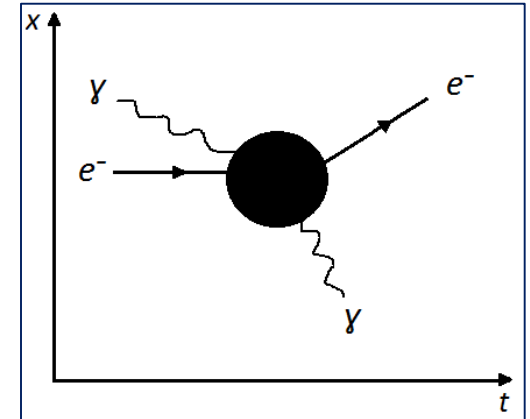
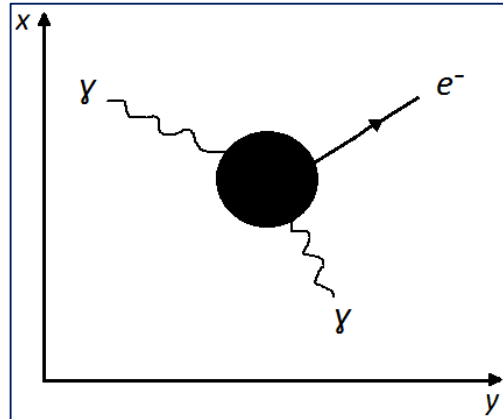
Prozesse

► Rutherford-Streuung

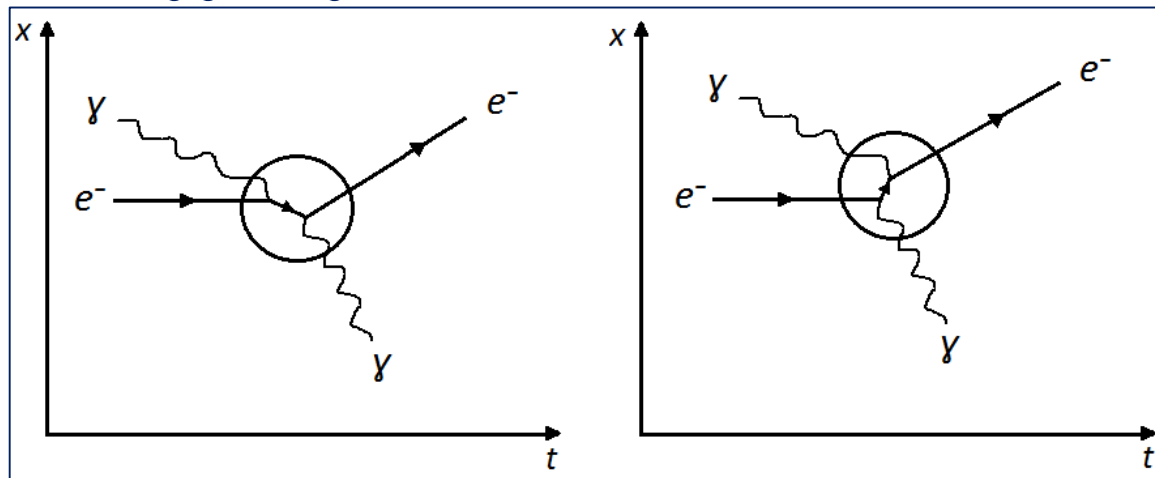


Prozesse

► Compton-Streuung

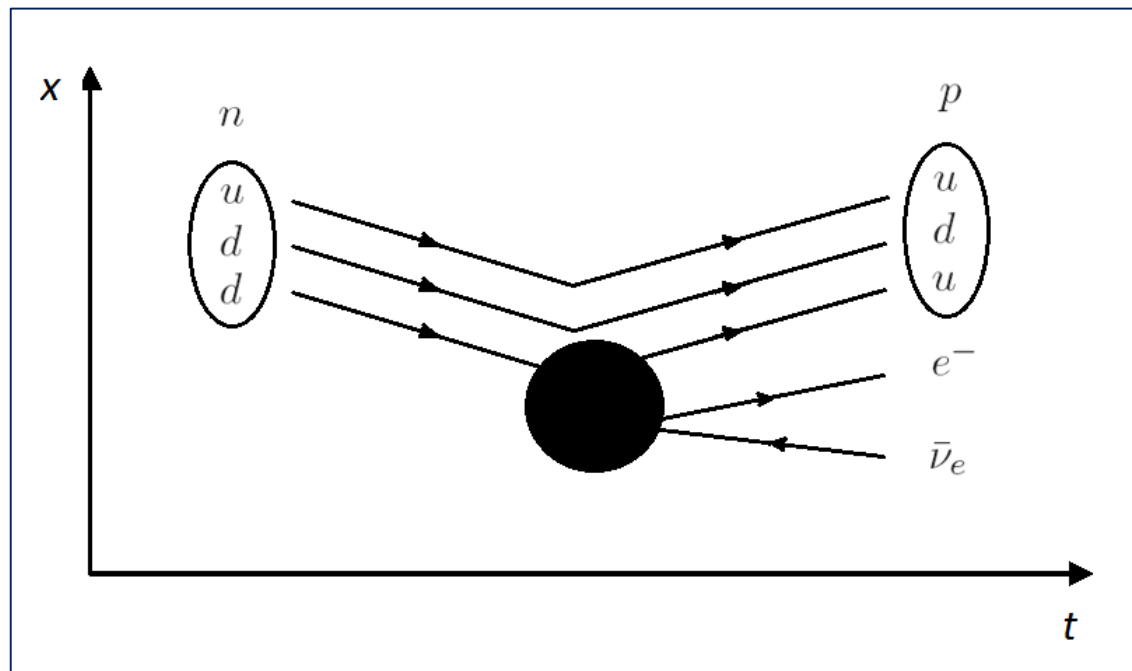


- 2 unabhängige Diagramme, müssen „addiert“ werden



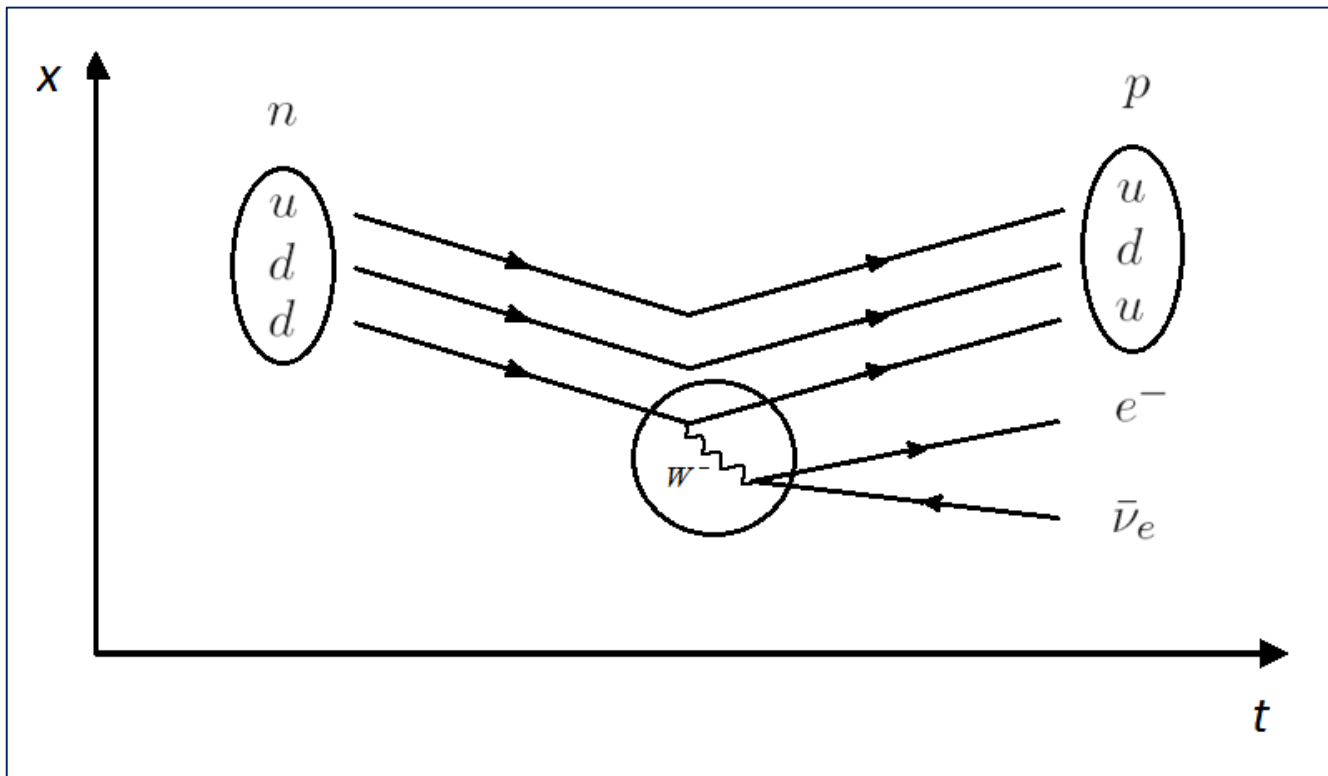
Prozesse

► β^- -Umwandlung



Prozesse

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



Virtuelle Teilchen

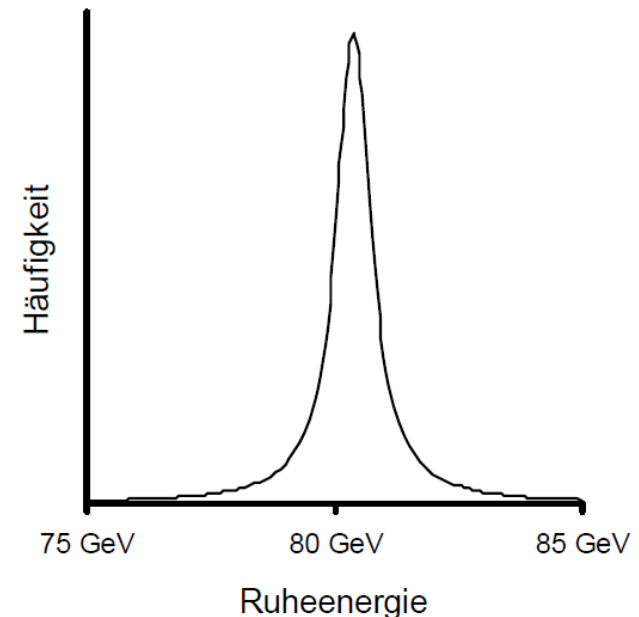
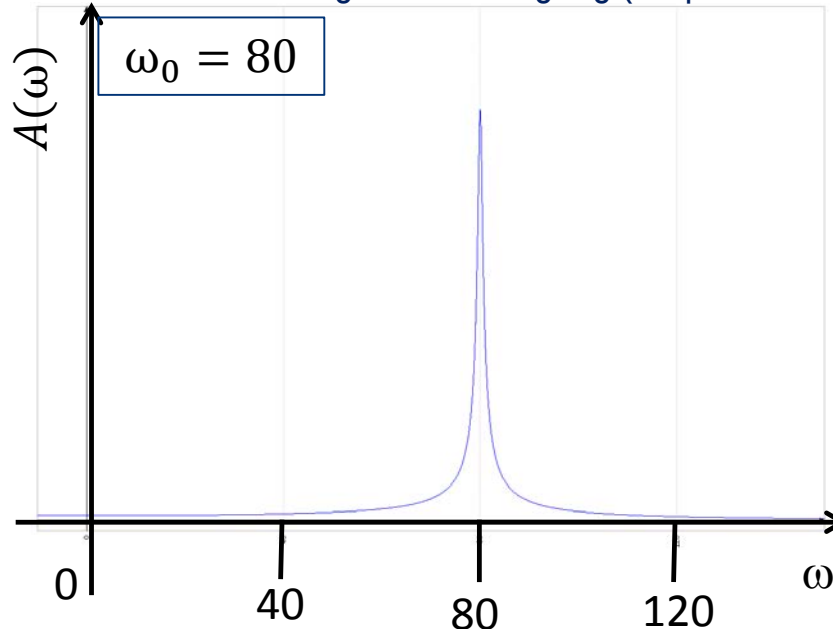
► Definition Virtuelle Teilchen:= Innere Linien von Feynmandiagrammen

- Massendifferenz β^- -Umwandlung: $\Delta E/c^2 = m_n - m_p = 1,3 \text{ MeV}/c^2$
- Aber: Masse(W-Boson) = $80400 \text{ MeV}/c^2 \gg 1,3 \text{ MeV}/c^2$??

► Lösung:

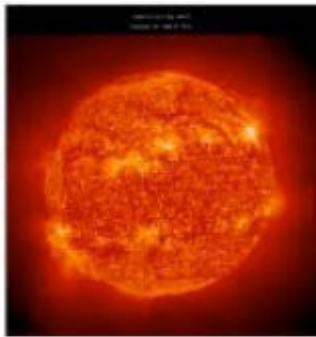
- Virtuelle Teilchen erfüllen Energie- und Impulserhaltung an Vertices
- Damit ist der Wert ihrer Masse „von außen“ aufgezwungen
- Analogie: erzwungene Schwingung (Frequenz von außen festgelegt)

► Grafik links: erzwungene Schwingung (Amplitude A in Abhängigkeit von Anregungsfrequenz ω)



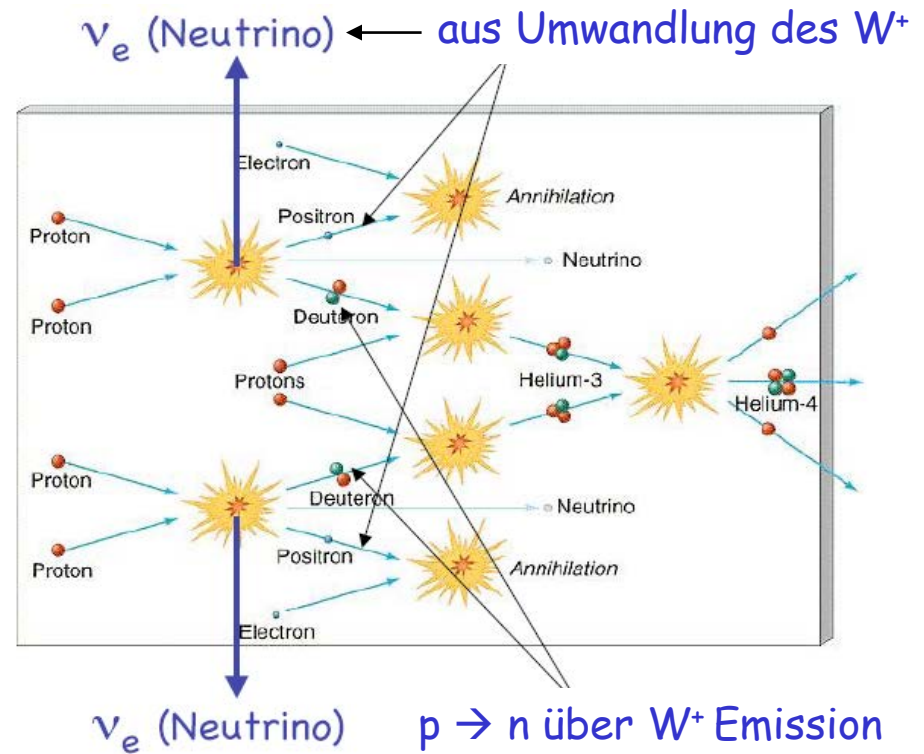
langsames Brennen der Sonne

- ▶ $p + p \rightarrow D + e^+ + n$ (Energiegewinn: $\Delta E = 0,9 \text{ MeV}$)
- ▶ Massenenergie des Zwischenzustands $m_W c^2 = 80400 \text{ MeV}$
- ▶ Rate unterdrückt um $\sim (\Delta E / m_W c^2)^4 > 10^{-20}$



- Bei kleinerem m_W wäre die Sonne längst ausgebrannt !

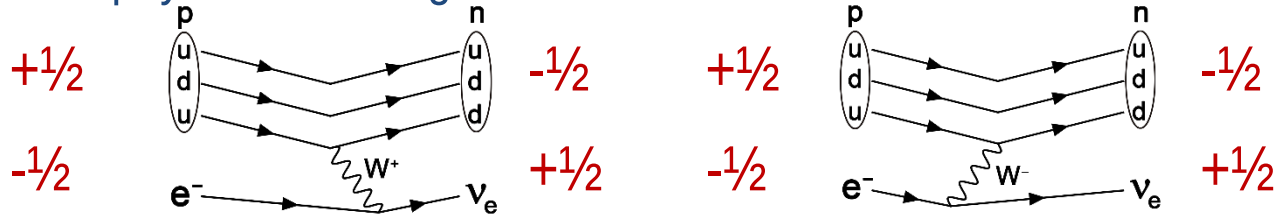
www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn-die-teilchenmassen-und-das-universum



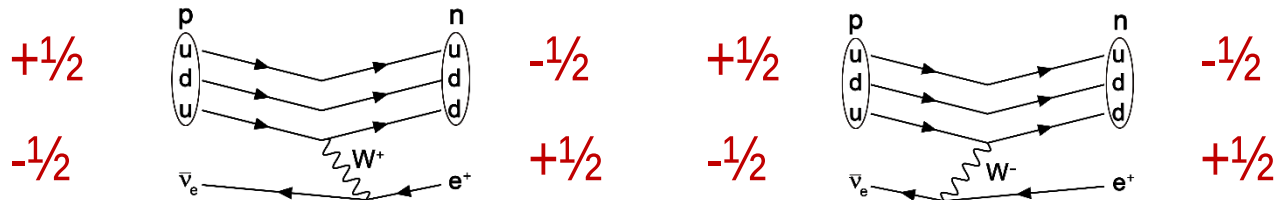
Ladungserhaltung (z.B. schwache Ladung I)

Alle möglichen Prozesse durch „Umklappen“ von Linien:

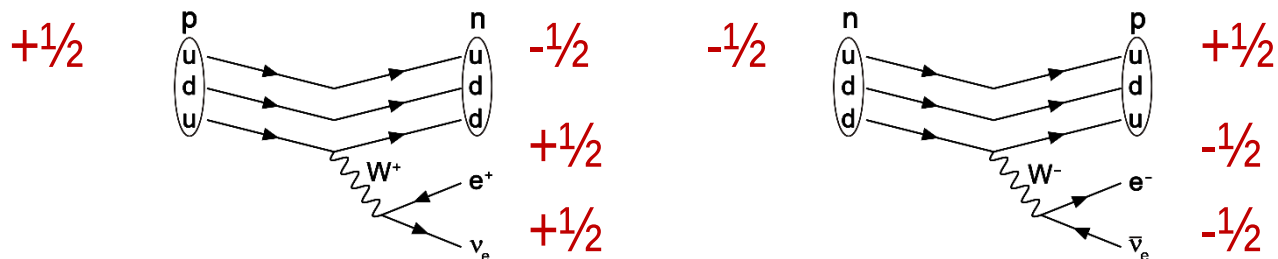
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- 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

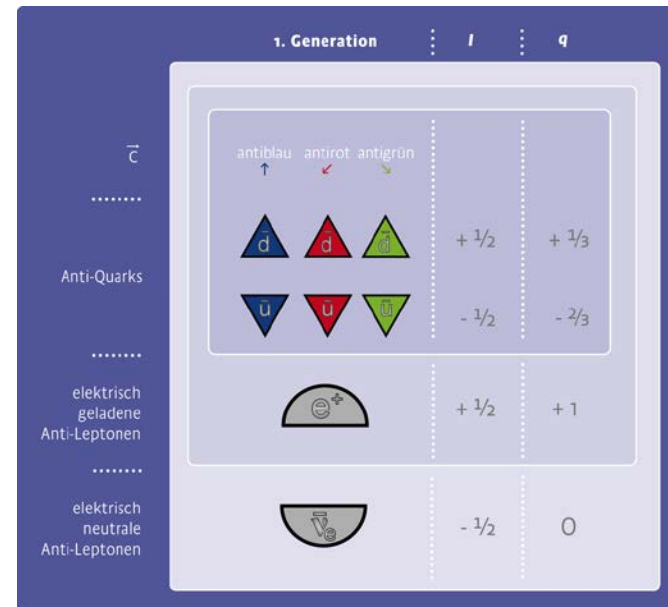
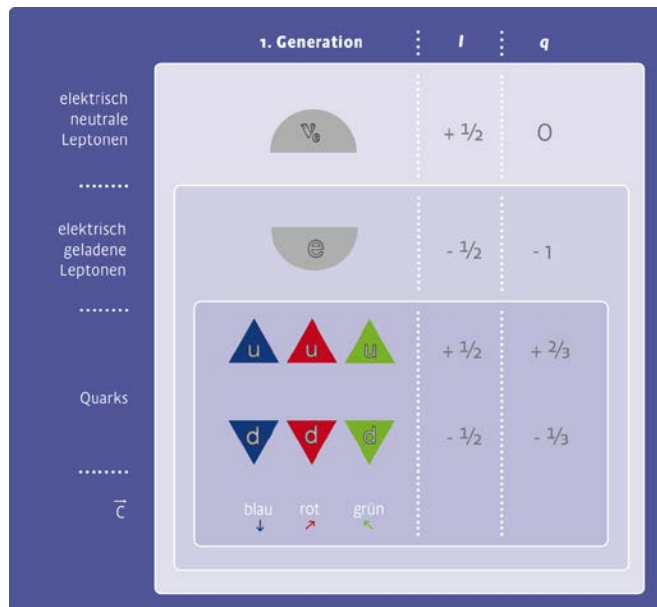
- ▶ Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben
- ▶ Wechselwirkungen werden mittels Feynman-Diagrammen dargestellt
 - Diese können auch zur quantitativen Berechnung dienen
- ▶ Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Ein Feynman-Diagramm ist ein x-t-Diagramm (Zeitachse nach rechts)
 - In Realität gilt natürlich quantenmech. Unbestimmtheit von (Ort, Zeit)
- ▶ Wechselwirkungen werden durch Vertices symbolisiert, an denen Teilchen emittiert, absorbiert, erzeugt oder vernichtet werden

Basiskonzept Elementarteilchen

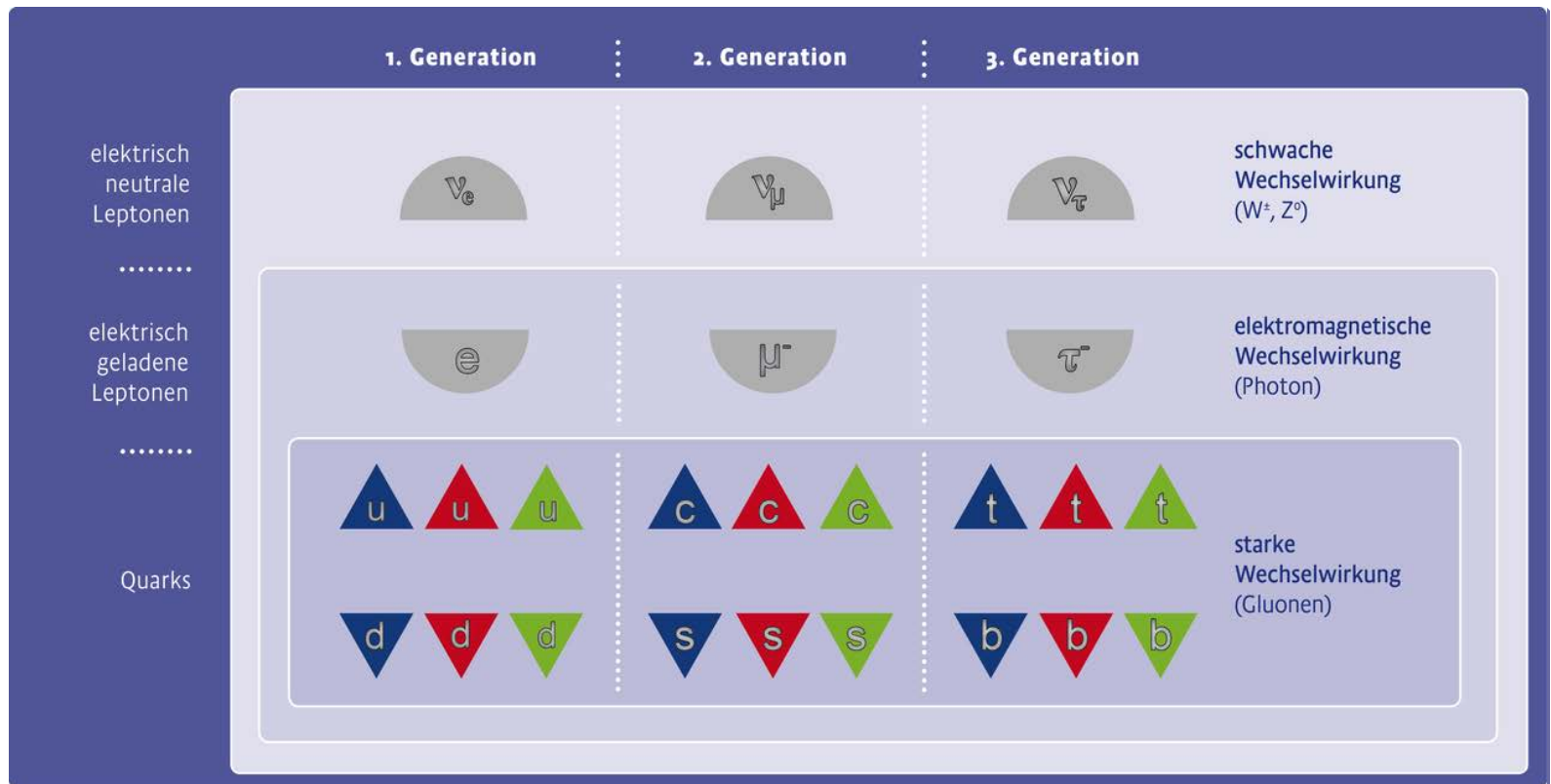
- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up-und Down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
 - 200 Mal schwerer als das Elektron
 - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons

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?



Anordnung von Teilchen in Generationen

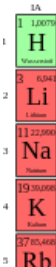




Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

- ▶ 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 aufsteigen 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

Order

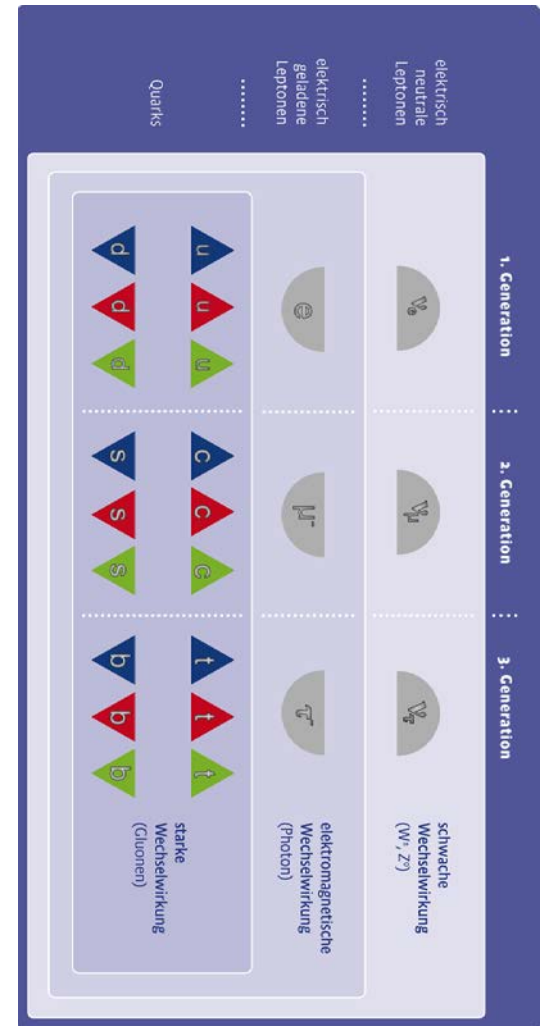


A decorative graphic in the bottom right corner shows a fragment of the periodic table. It includes the following elements:

- 1A: 1. 1.00794 H (Hydrogen)
- 1: 3. 6.941 Li (Lithium)
- 2: 11.22394 Na (Sodium)
- 3: 19.31223 K (Potassium)
- 4: 39.0983 Rb (Rubidium)

* Lanthanoids	57 138901	58 140121	59 140931	60 142042	61 143153	62 144263	63 145376	64 146492	65 147610	66 148729	67 149848	68 150968	69 152089	70 153210	71 154331
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Disprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
** actinoids	89 227	90 23204	91 23204	92 23204	93 237	94 244	95 243	96 247	97 247	98 251	99 252	100 257	101 258	102 259	103 261
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lruthenium

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

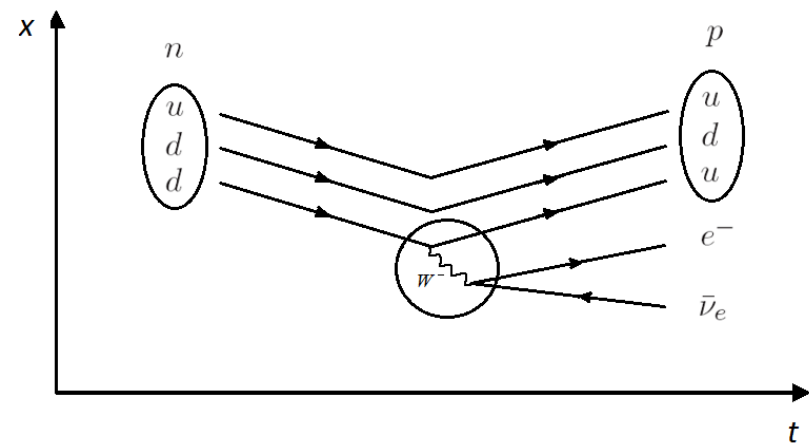


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

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



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Schwache Wechselwirkung

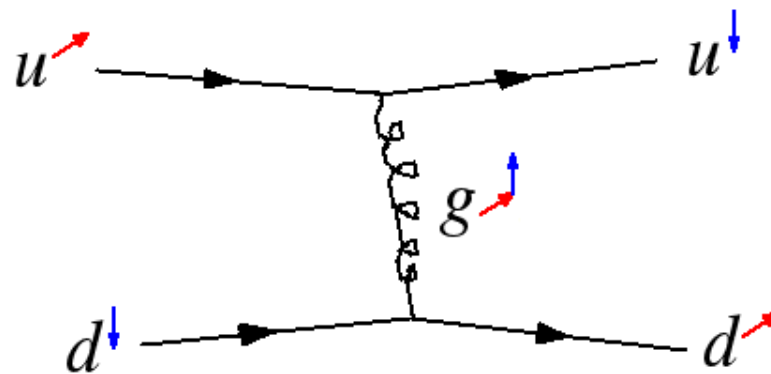
- Drei Quarks mit Farbladungsvektoren , , oder 
Up-Quarks haben alle schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$,
Down-Quarks haben alle schwache Ladungszahl $I = -\frac{1}{2}$
- $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ \bar{d} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Starke Wechselwirkung

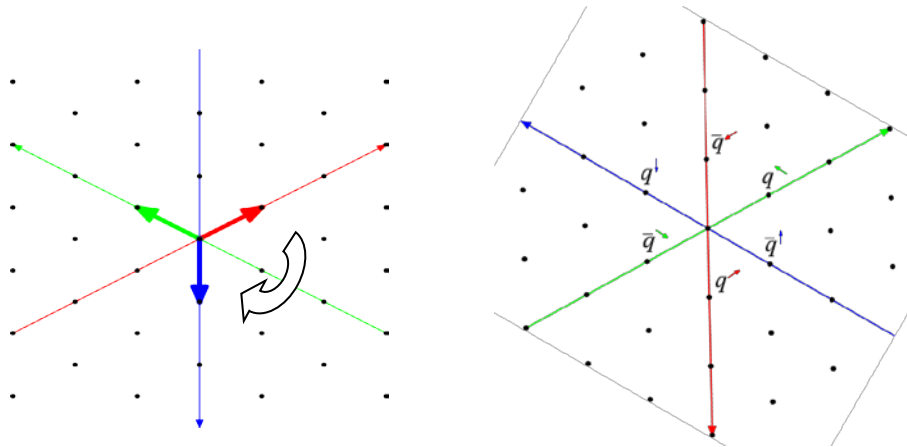
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:
Quarks bilden Triplets bezüglich der starken Ladung

► $(u \text{ (rot)}, u \text{ (grün)}, u \text{ (blau)})$

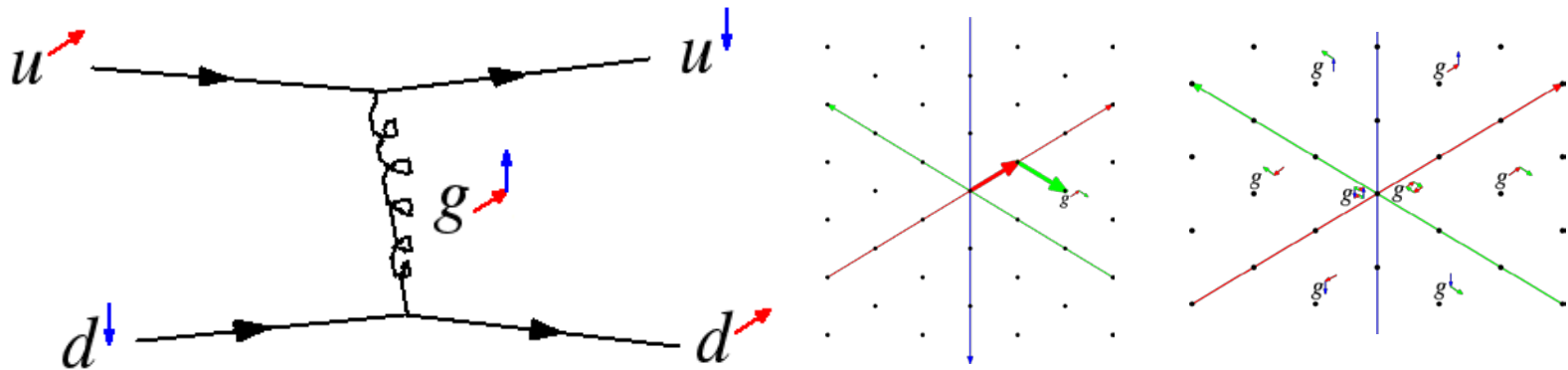


Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

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



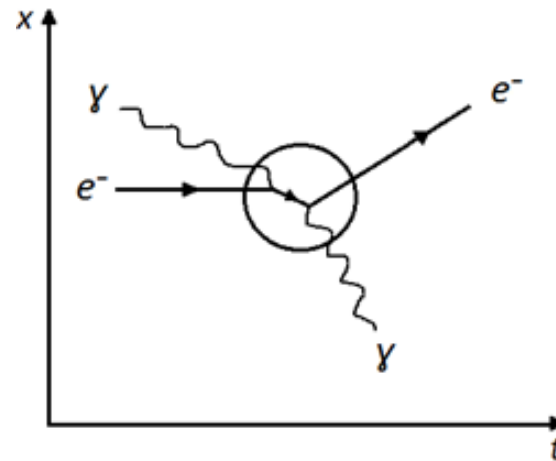
- hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

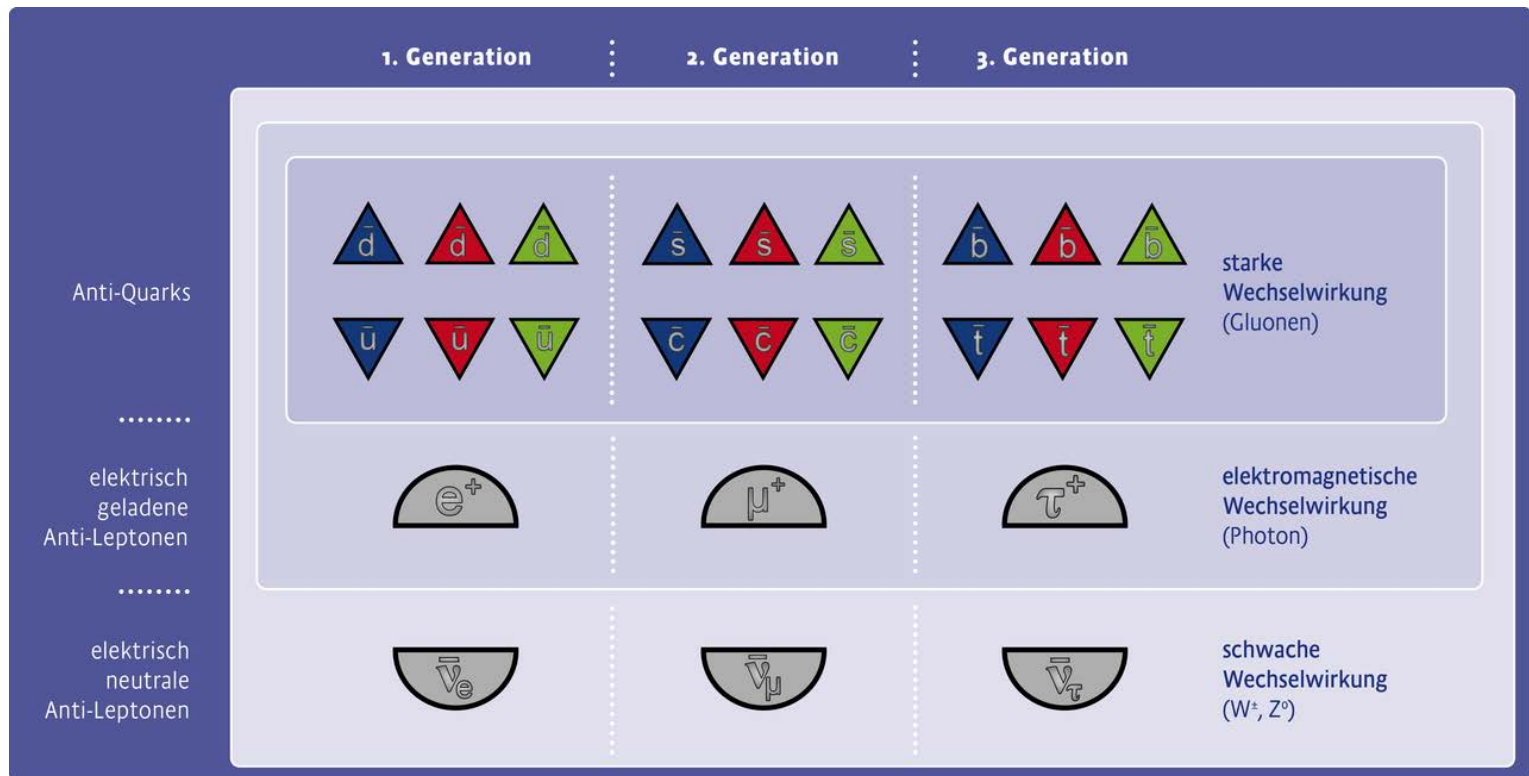
► Elektromagnetische Wechselwirkung

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



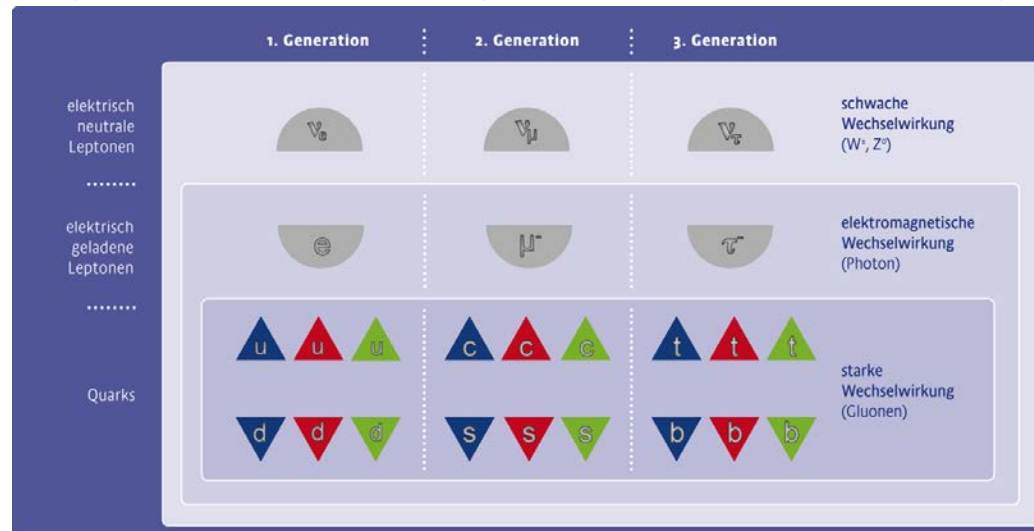
Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

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



Zusammenfassung: Multipletts

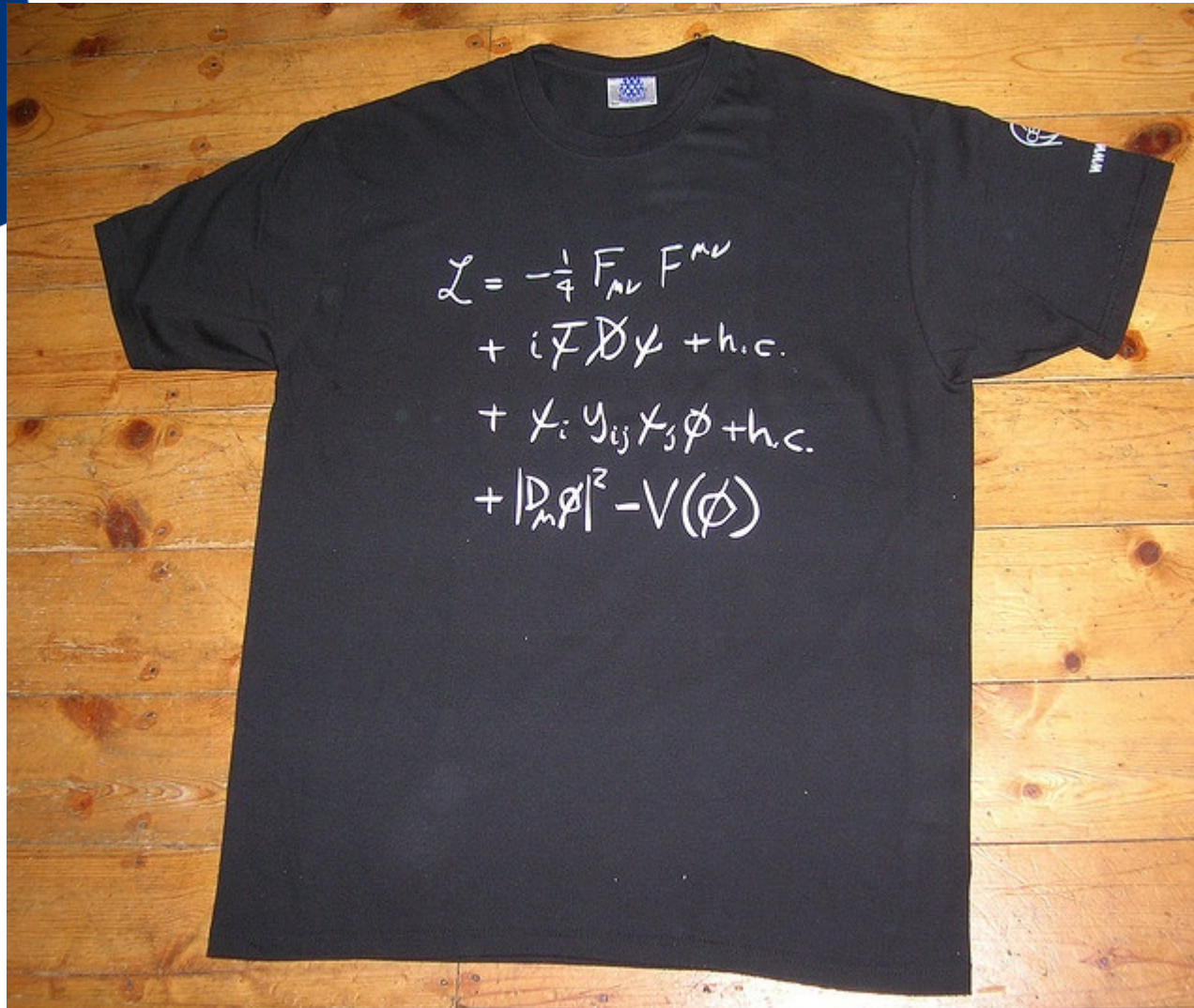
- ▶ Teilchen lassen anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Experimentell findet man
 - Dupletts der schwachen Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
 - Tripletts der starken Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
 - Singulets der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)



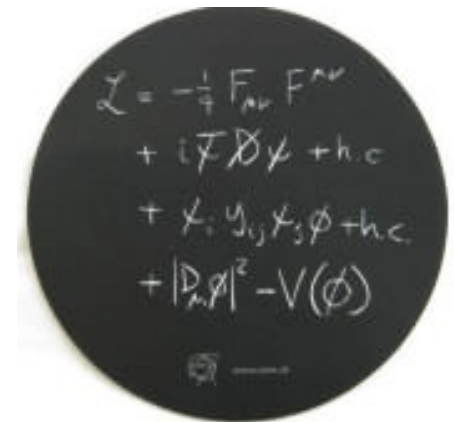
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Multipletts möglich

Lagrangedichte des Standardmodells = derzeitige „Weltformel“:

- Dies ist eigentlich nur eine in spezieller Form geschriebene Energiedichte !



➤ auf CERN
T-shirt, Tasse und
Mouse Pad



Bedeutung

- ▶ Aufstellung der Terme dieser „Weltformel“:
 - Natur verlangt Invarianz unter 3 Symmetrien („lokalen Umeichungen“)
 - Terme, die die Symmetrie nicht erfüllen, sind verboten
 - Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungen erfüllen
-> lokale Eichsymmetrie ist „Ursache“ der Wechselwirkungen
- ▶ Erläuterung der Formel:
 - Jedem Term entspricht in dieser Reihenfolge
 - elektromagnetische Wellen und Wechselw. zw. Botenteilchen
 - Wechselwirkung zwischen Baustein- und Botenteilchen
 - Massen der Bausteinteilchen und WW mit BEHiggs-Feld
 - WW der Botenteilchen BEHiggs-Feld und Higgs-Teilchen
 - Alle Prozesse lassen sich mit Hilfe dieser Formel vorhersagen
(Maxwell-Gleichungen: Licht, Magnetismus, Elektromotor, Radiowellen,
Kernphysik: α, β, γ - Zerfälle, Brennen von Sternen...)

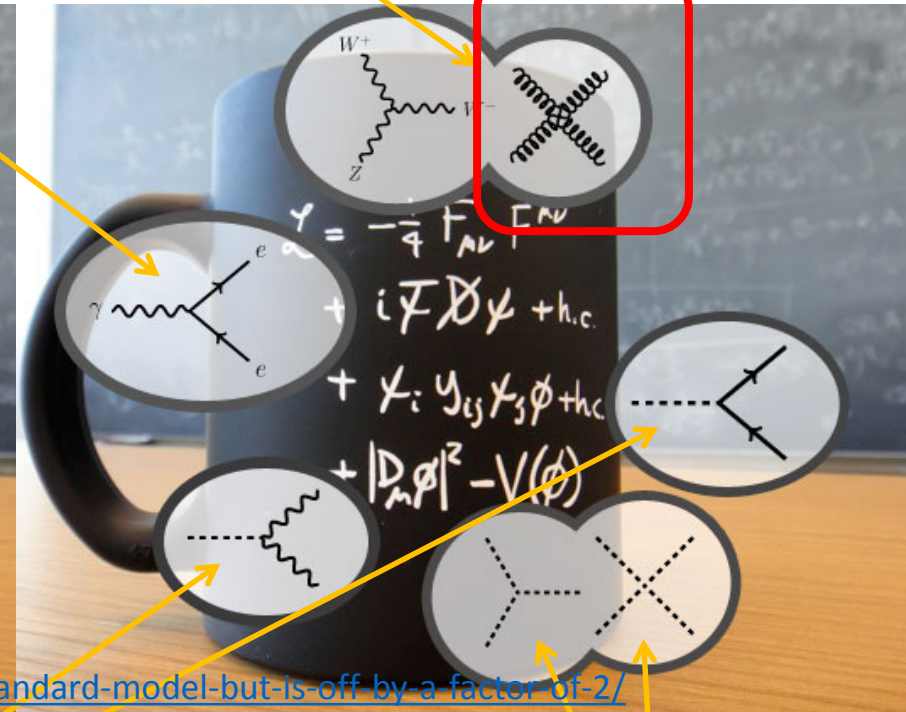
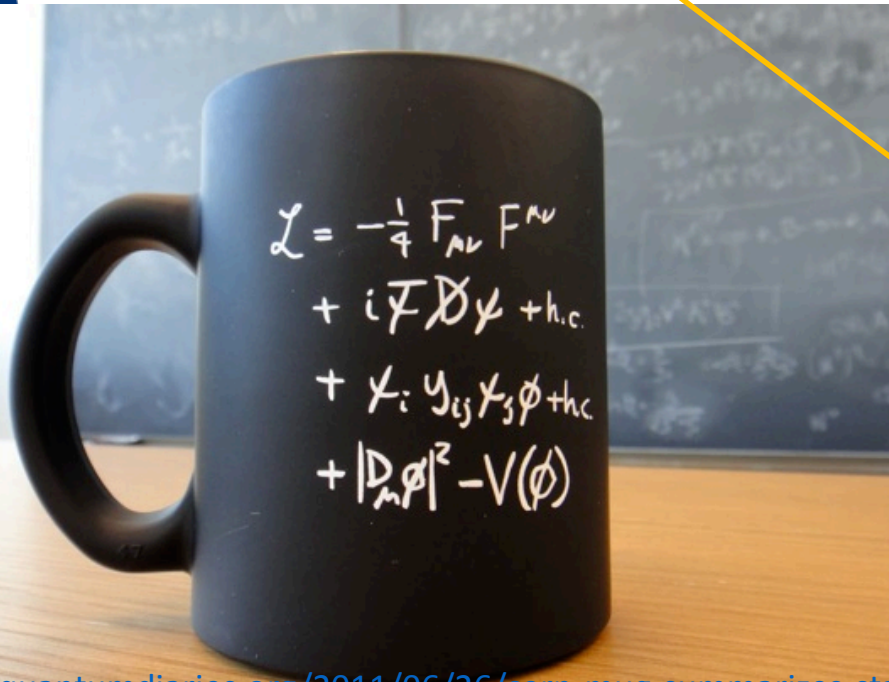
Von der Lagrangedichte zu den Vertices

Wechselwirkungen zwischen
Boten und Bausteinen
→ am Besten verstanden

Unsere Forschung in Dresden

Botenteilchen unter sich:

→ emag Wellen, Selbstkopplung



Higgs mit Bausteinen und Boten

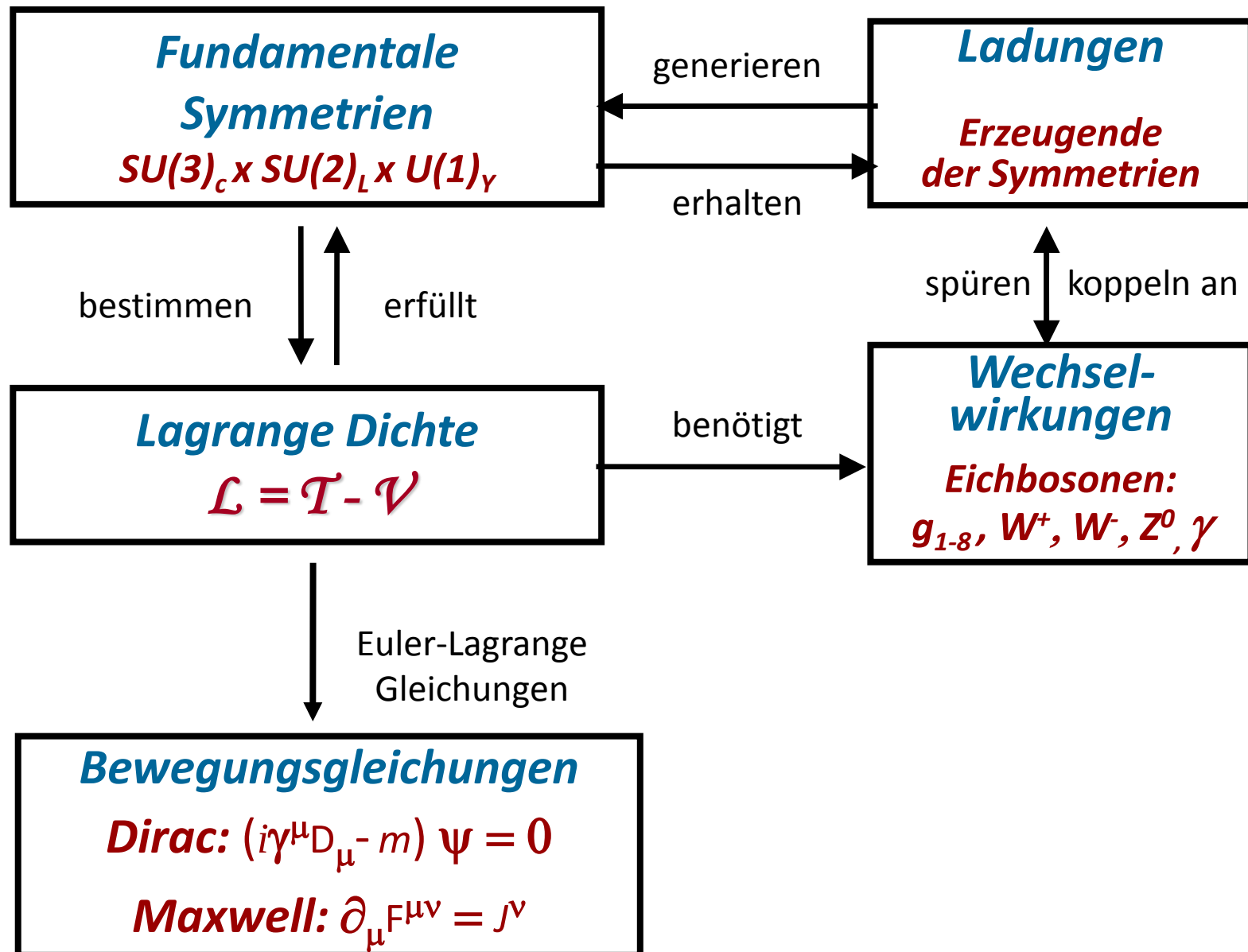
Massen der Bausteine und Botenteilchen
Erzeugung und Zerfälle des Higgs Teilchens

Higgsteilchen unter sich

noch nicht beobachtet
→ nächster Beschleuniger

www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/

Das Konzept des Standardmodells



Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 2

► Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



Mittagspause: 11:30 -12:30 Uhr!



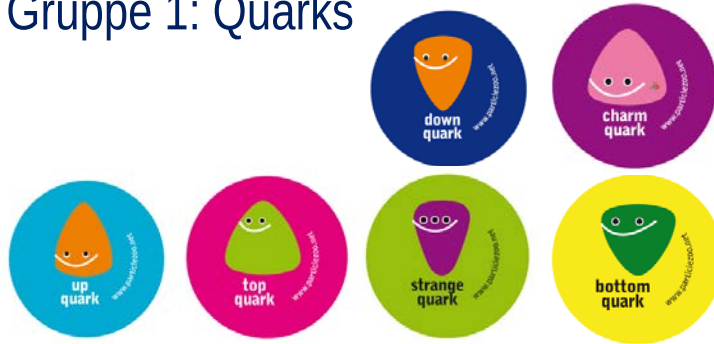
Mi 11:15 – 12:15 Uhr

Unterrichts-Sequenzplanung (in 3 Gruppen)

Gruppenarbeit

Gruppeneinteilung

Konzept der Wechselwirkungen
Gruppe 1: Quarks



Ladungen als Ordnungsprinzip
Gruppe 3: Neutrinos



Ladungen als Erhaltungsgrößen
Gruppe 2: Neutrinos und Z-Bosonen



Darstellen von Wechselwirkungen
Gruppe 4: Higgs und Dark Matter





Fr 11:00 – 12:00 Uhr

Jede Gruppe

Präsentation der Ergebnisse

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

ORIGINALSCHAUPLATZ



SCHIRMHERRSCHAFT



PROJEKTLEITUNG



GEFÖRDERT VOM



13.06.2016