

Basiskonzepte der Teilchenphysik Wechselwirkungen, Ladungen, Teilchen 2

Michael Kobel

Netzwerk Teilchenwelt, TU Dresden

CERN, 21.+22.03.2016

Herzlich willkommen!



NETZWERK
TEILCHENWELT



8:30 – 10:00 Uhr

Felder, Boten, Darstellen von Wechselwirkungen

Teilchen-Multipletts | Ordnungsschema

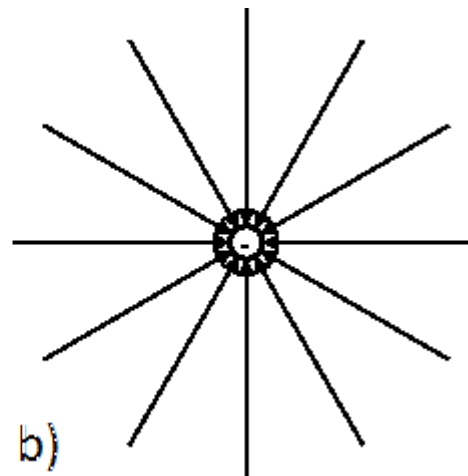
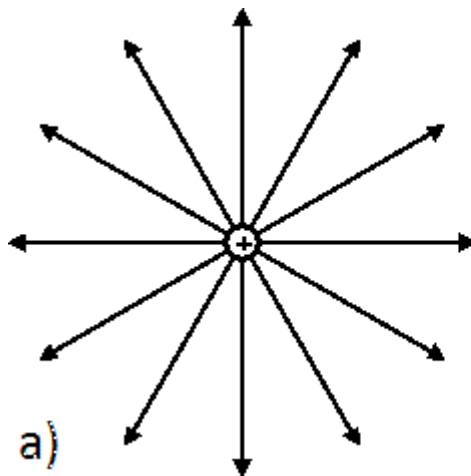
Fachvortrag 2

Darstellen von Wechselwirkungen

► Klassische Physik: Feldlinien

für Wechselwirkungen mit unendlicher Reichweite
hier: elektromagnetische Wechselwirkung

$$F = Q \cdot E$$



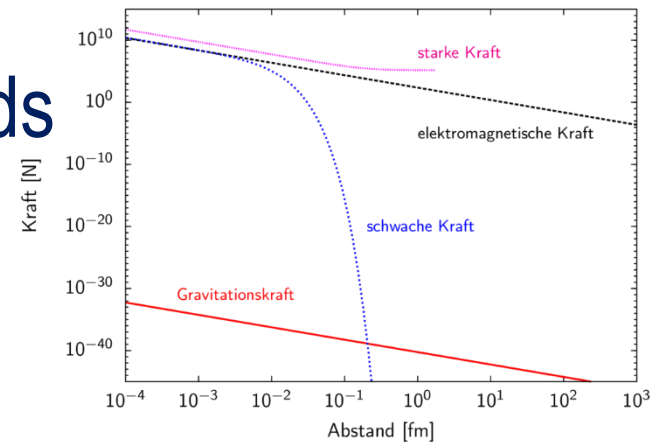
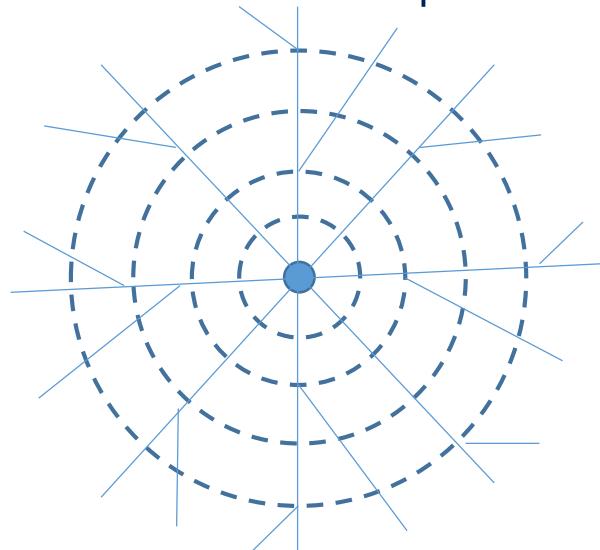
$$A = 4\pi r^2$$

↓

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

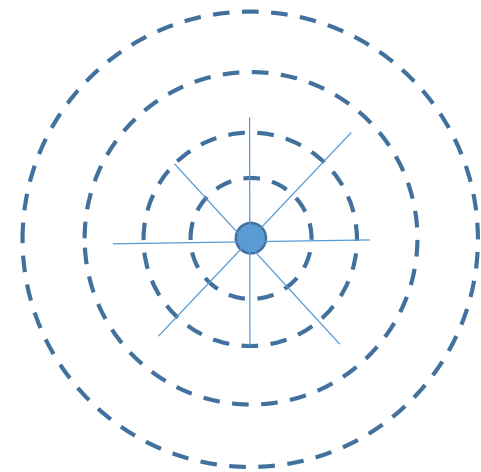
Schwierigkeiten des Feldlinienbilds

- ▶ 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

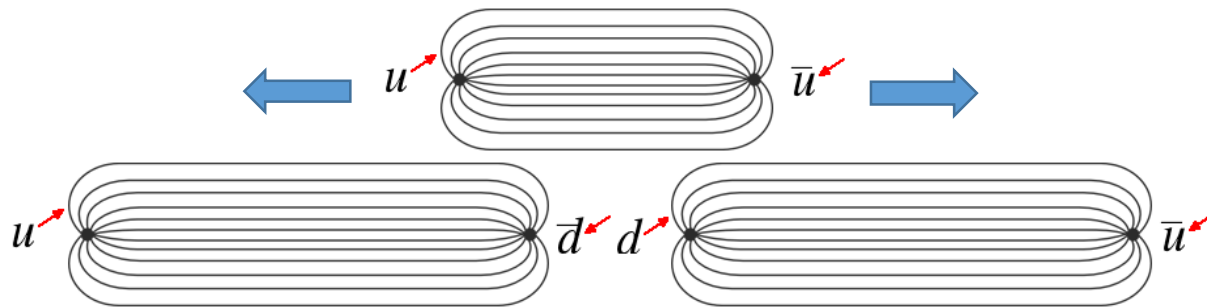
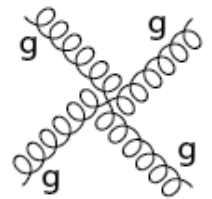
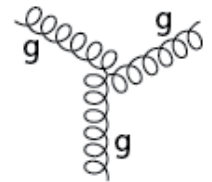
Kraft strebt rasch gegen Null
Feldlinien enden „im Nichts“



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



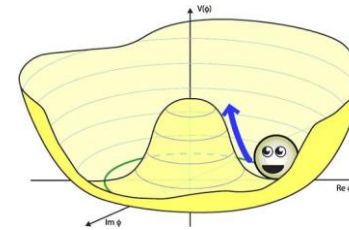
Lösung 2: Massive Botenteilchen

► 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 !))

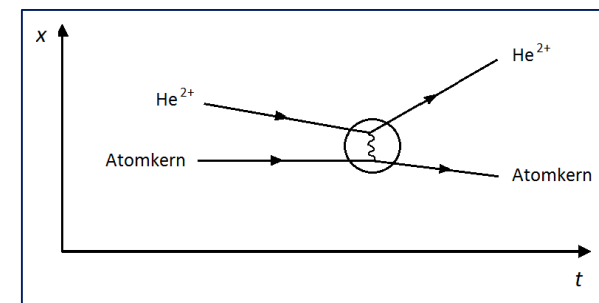
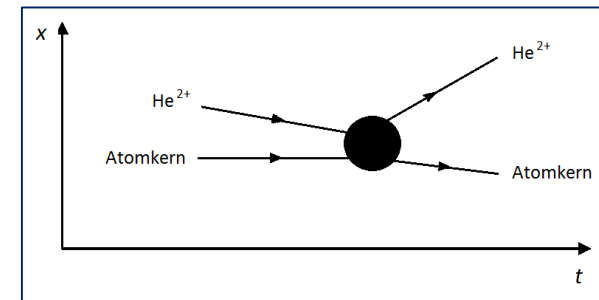
Übergang Feldlinien \rightarrow Botenteilchen

► Makroskopisch:

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

► Mikroskopisch:

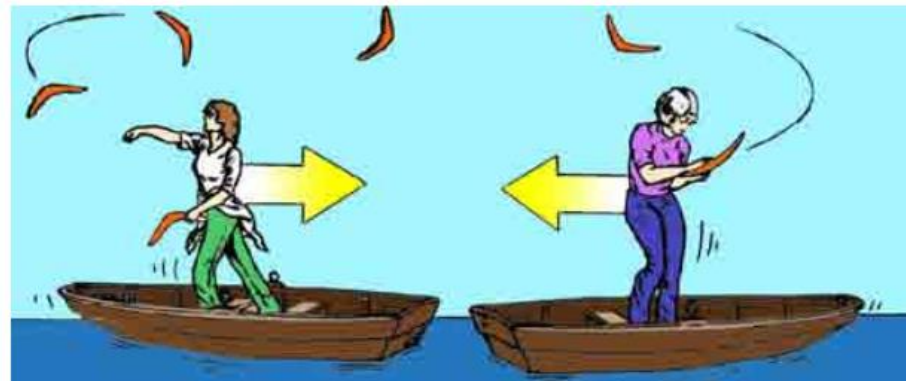
- Wechselwirkung ohne Bahnbeginn (z.B. Streuung: Unbestimmtheit von Ort u. Zeit)
- Messbar sind nur (für jedes Teilchen)
 - Energie E und Impuls \vec{p} **vorher**
 - Energie E und Impuls \vec{p} **nachher**
 - Energiedifferenz ΔE und Impulsdifferenz $\Delta \vec{p}$ wird durch Botenteilchen übertragen



Darstellen von Wechselwirkungen

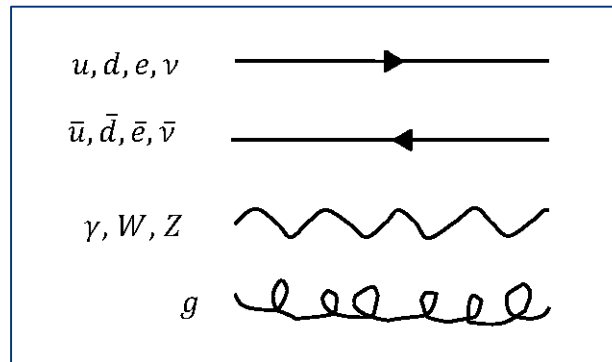
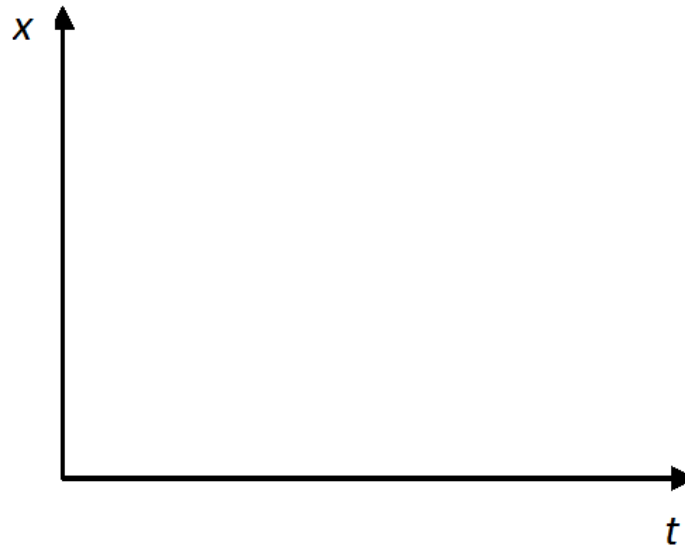
► Analogie: Austausch eines Botenteilchens

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



Feynman-Diagramme

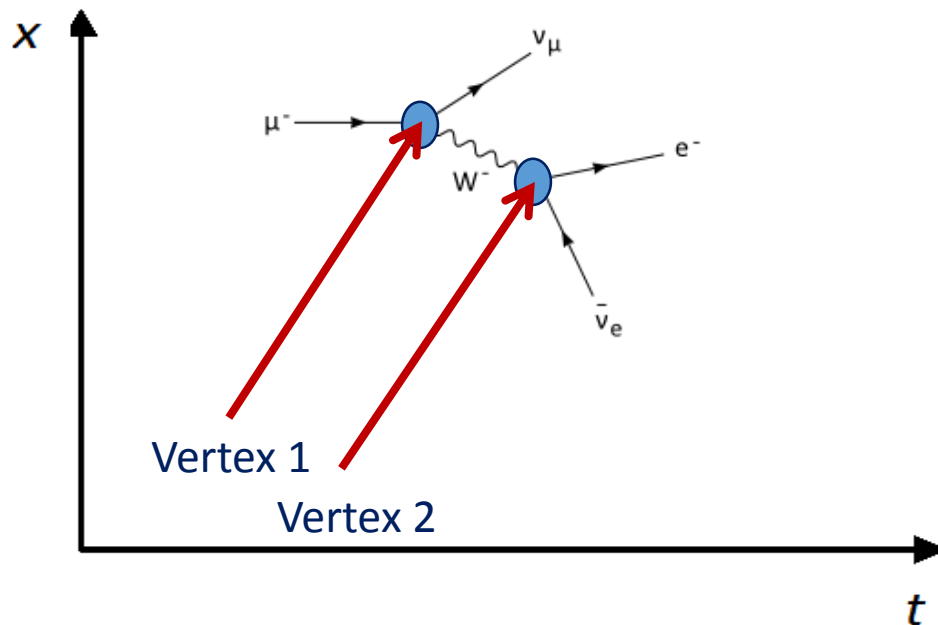
► Aufbau



Feynman-Diagramme

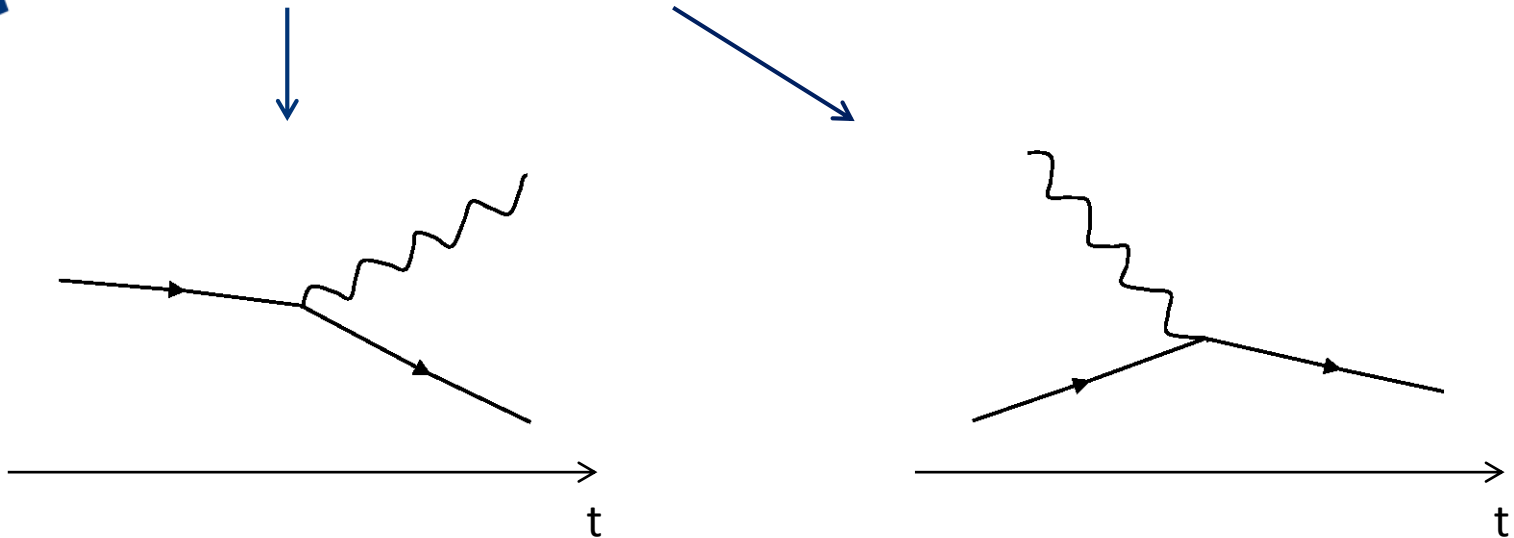
► Begriffsklärung:

- 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

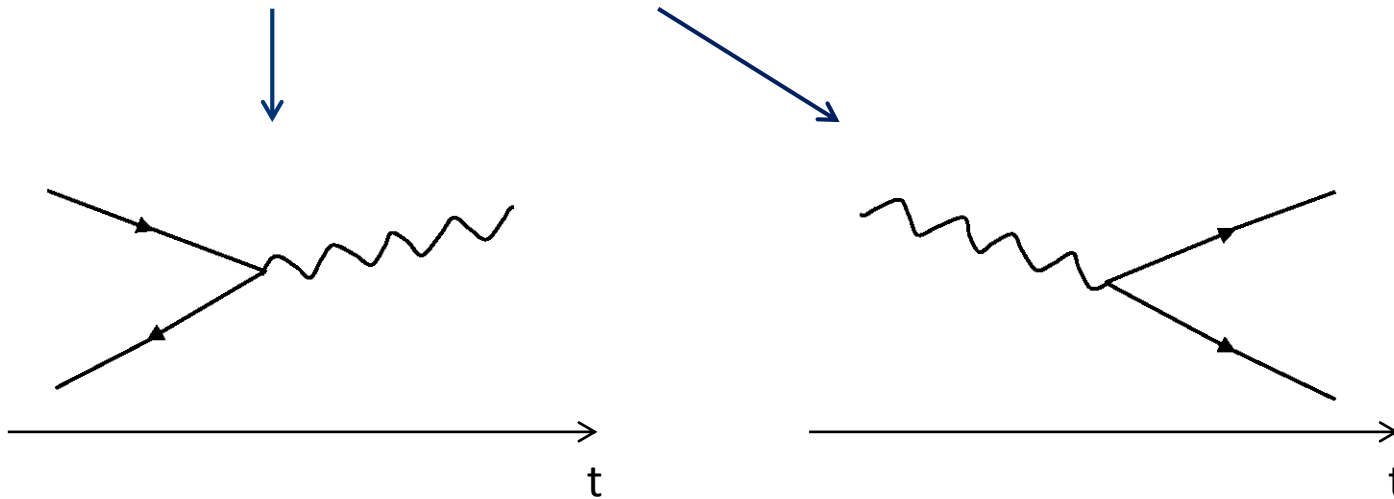
► Abstrahlung und Einfang eines Botenteilchens



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

Grundbausteine 2/2

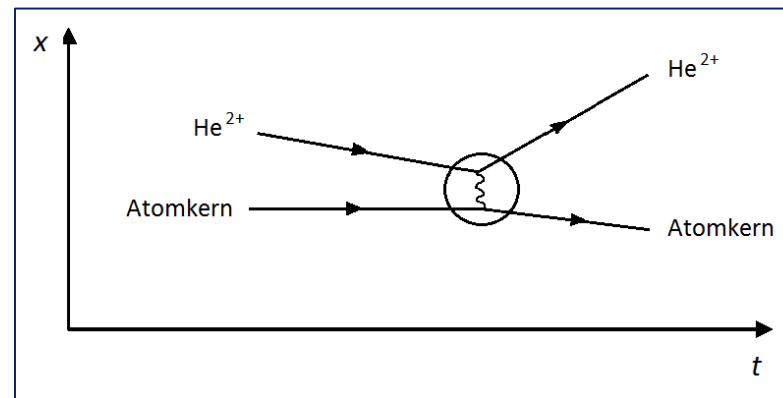
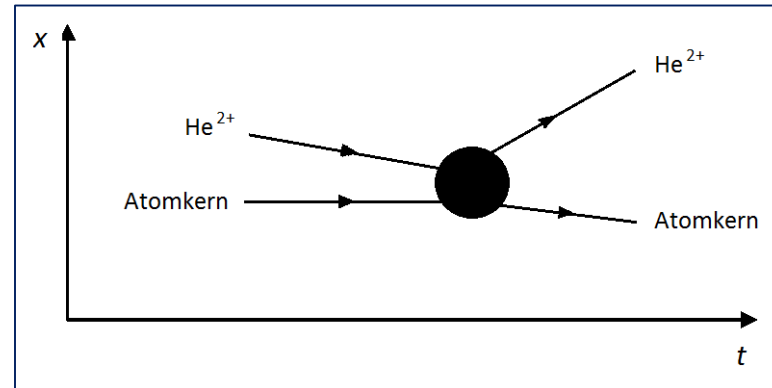
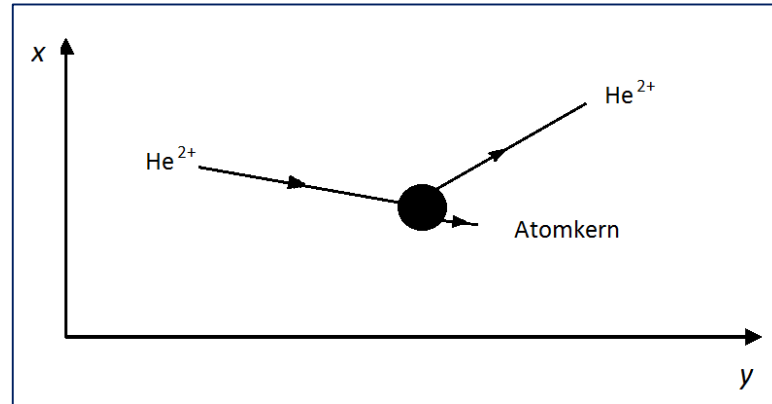
► Paarvernichtung und Paarerzeugung



- Geht beides **nicht** mit Feldlinien

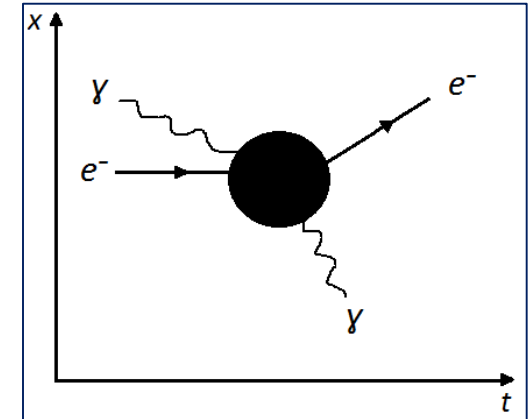
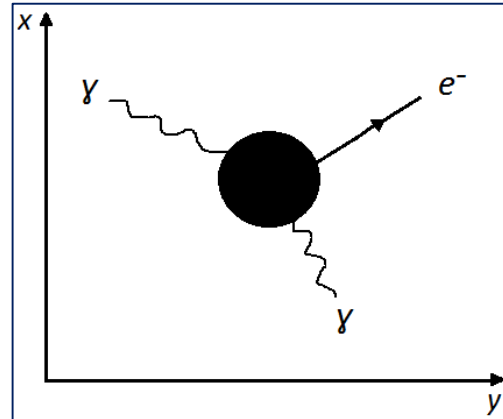
Prozesse

► Rutherford-Streuung

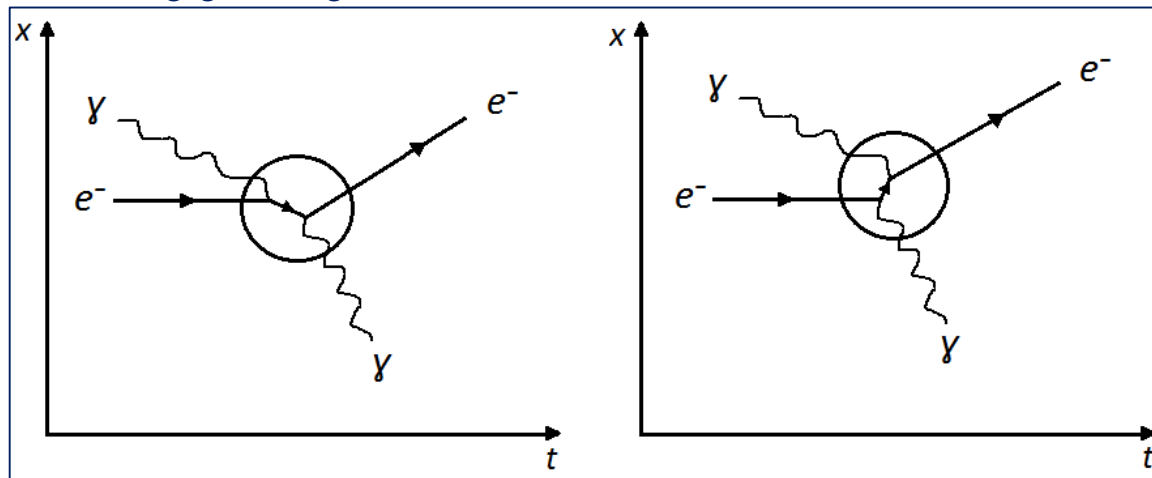


Prozesse

► Compton-Streuung

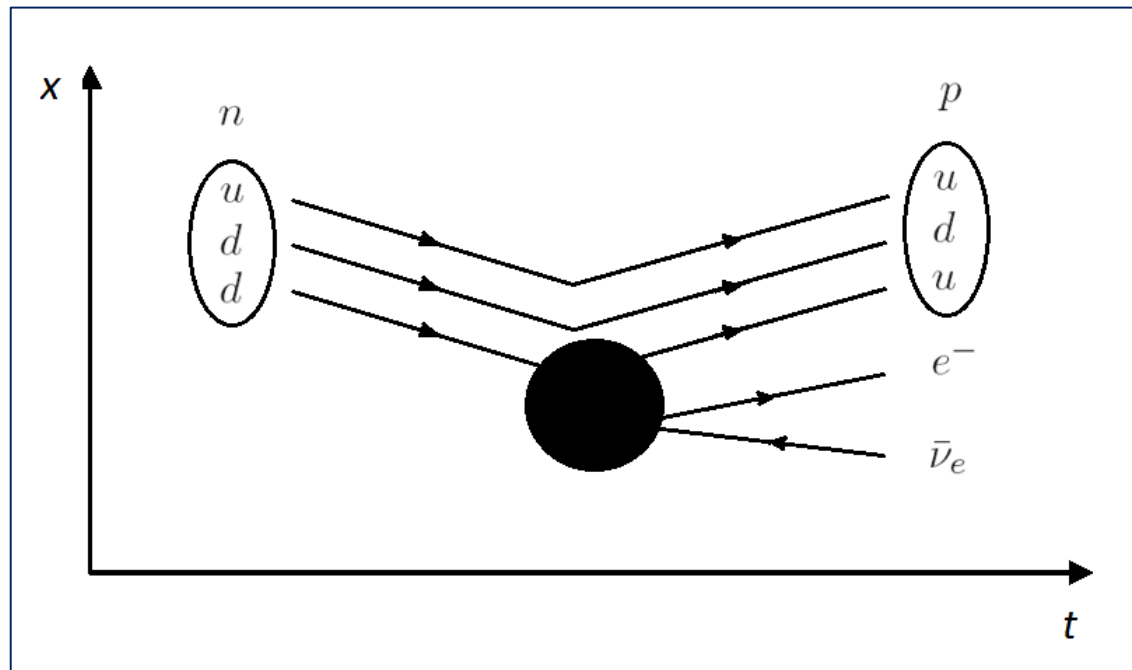


- 2 unabhängige Diagramme, müssen „addiert“ werden



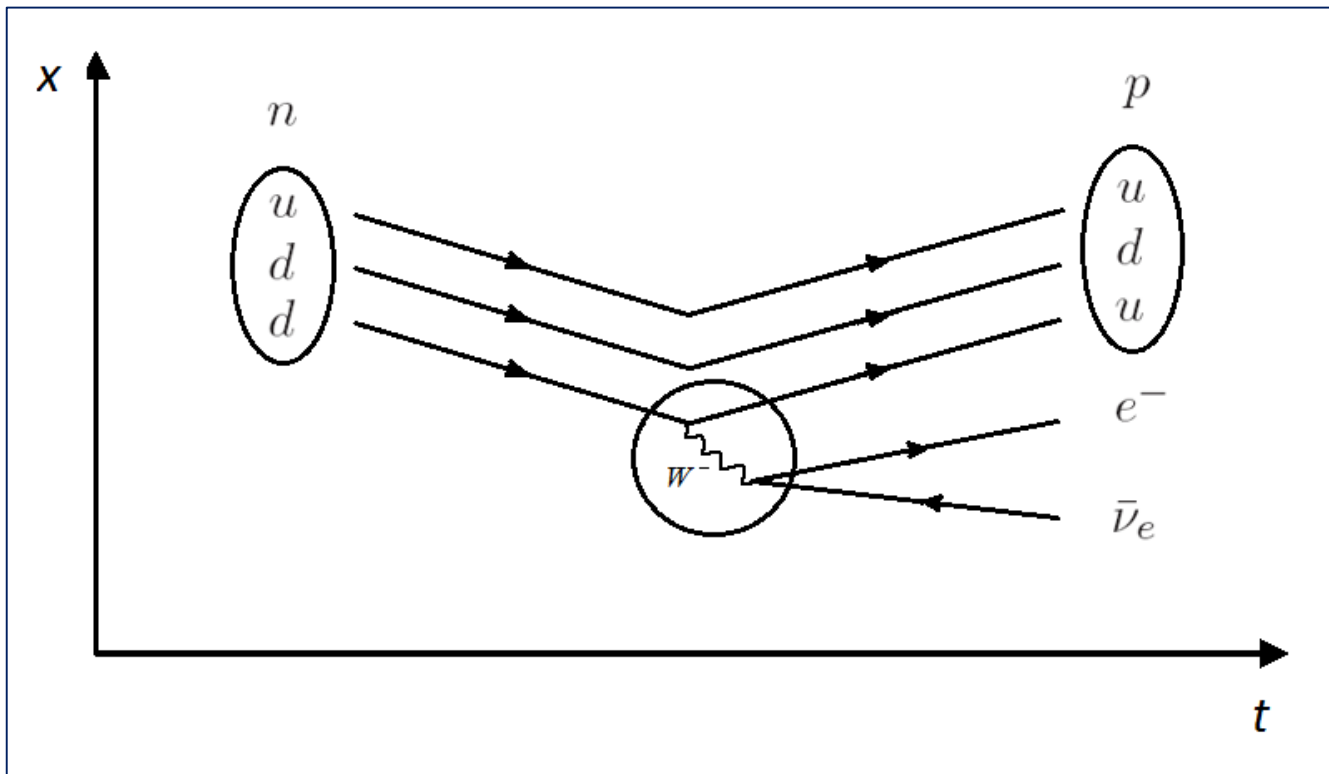
Prozesse

► β^- -Umwandlung



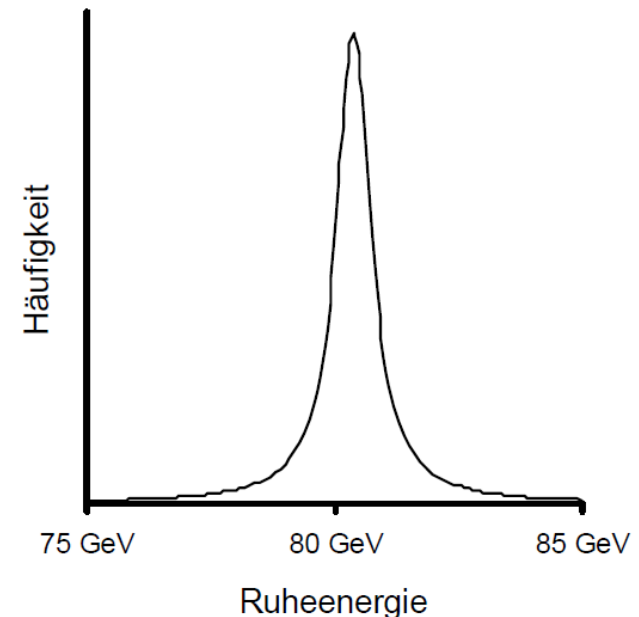
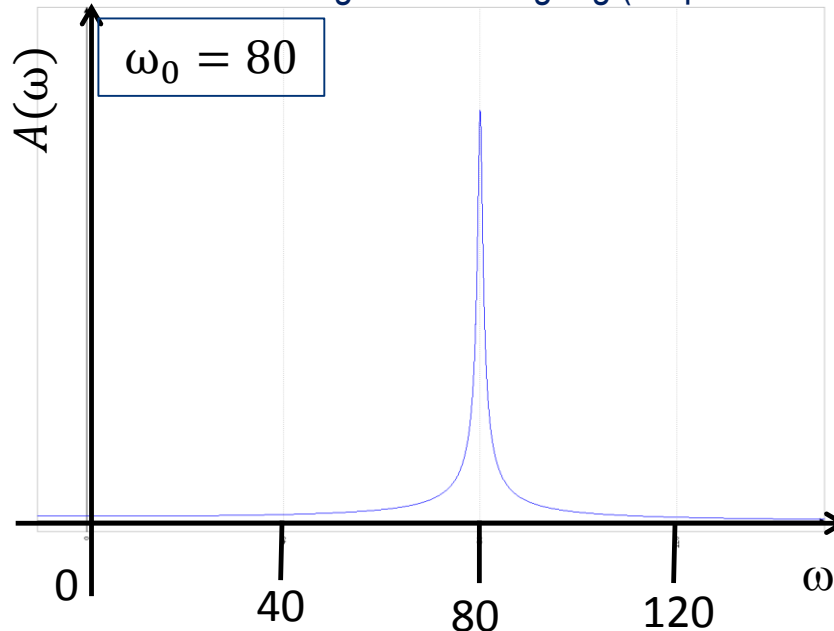
Prozesse

- ▶ 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)



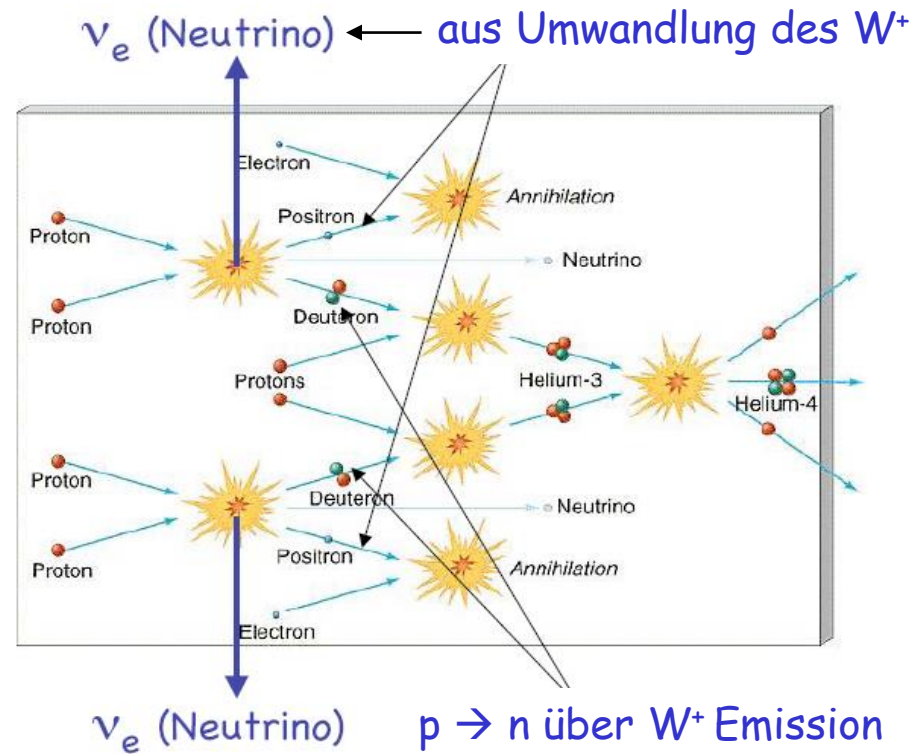
langsameres Brennen der Sonne

- ▶ $p + p \rightarrow D + e^+ + n$ (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 !

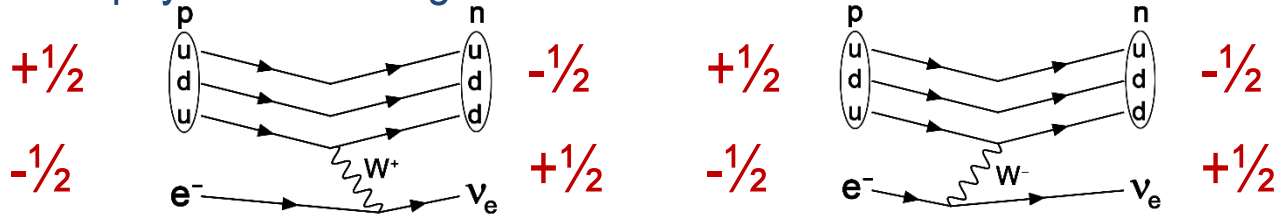
www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn-die-teilchenmassen-und-das-universum



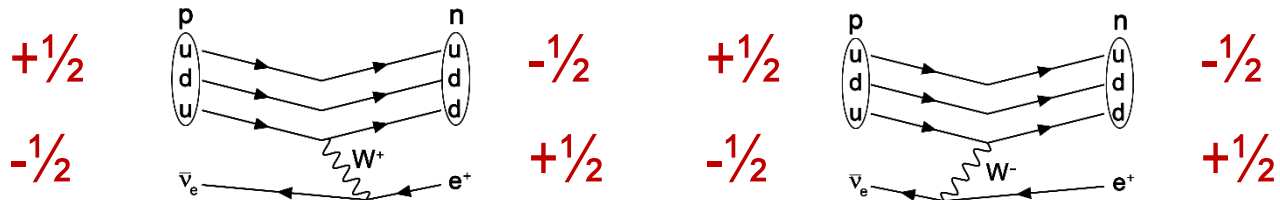
Ladungserhaltung (z.B. schwache Ladung I)

Alle möglichen Prozesse durch „Umklappen“ von Linien:

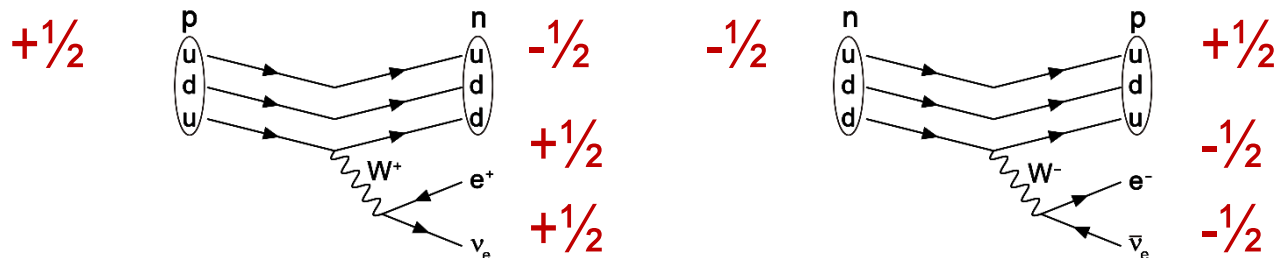
- Atomphysik: K-Einfang eines Elektrons der K-Schale



- 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

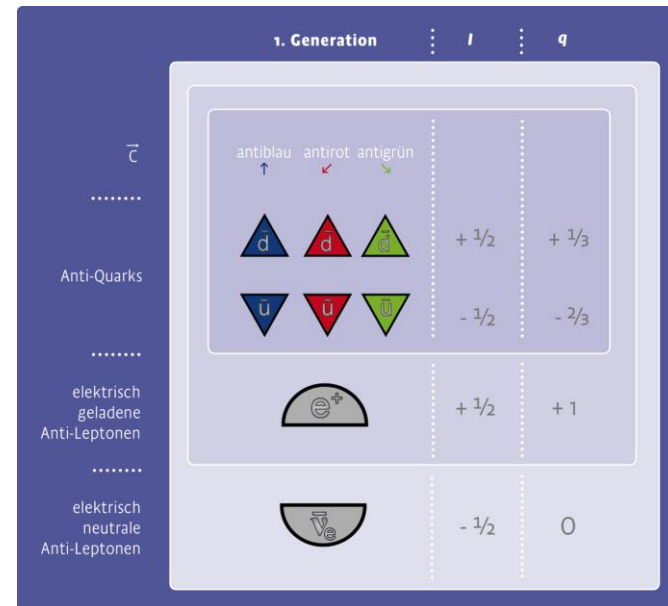
- ▶ Wechselwirkungen werden in der Teilchenphysik durch den Austausch von Botenteilchen beschrieben
- ▶ Wechselwirkungen werden mittels Feynman-Diagrammen dargestellt
 - Diese können auch zur quantitativen Berechnung dienen
- ▶ Eine Vorstufe der Feynman-Diagramme ist das x-y-Diagramm
- ▶ Ein Feynman-Diagramm 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

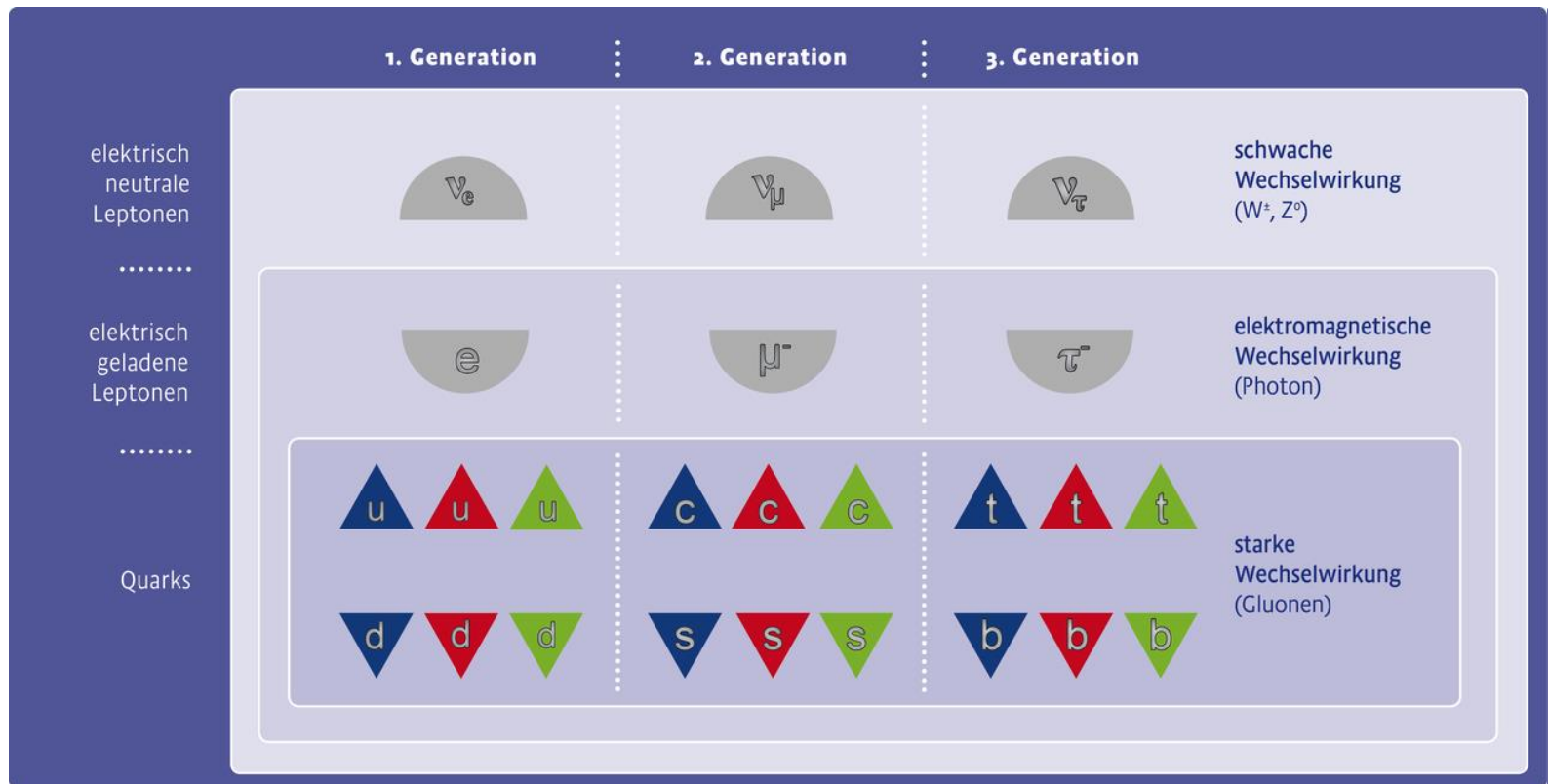
- ▶ Uns umgebende Materie besteht aus Up- und Down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos
- ▶ 1936: Entdeckung des Myons
 - Gleiche Ladungszahlen wie das Elektron
 - 200 Mal schwerer als das Elektron
 - Schwere „Kopie“ des Elektrons
- ▶ 1975: Entdeckung des Tauons: schwere „Kopie“ des Myons

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



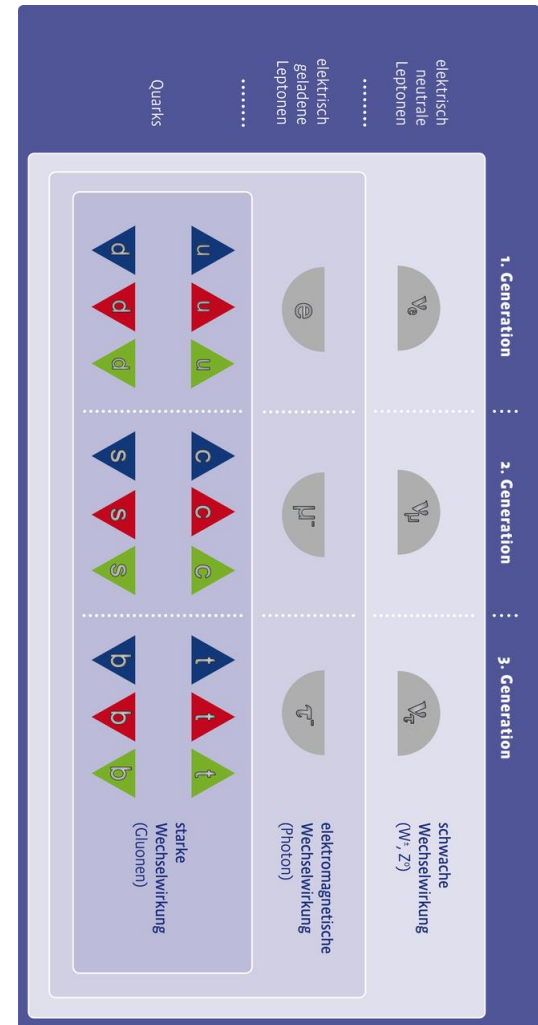
Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

- ▶ 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

Ordnungsschema: Analogie zum Periodensystem

1A																	8A				
1																	2				
H																	He				
2A	3A											4A	5A	6A	7A	8A					
3	4											5	6	7	8	9	10				
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne				
11	12											13	14	15	16	17	18				
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
19	20	21-28	29-36	37-38	39	40	41-48	49-56	57-64	65	66	67-74	75-78	79	80	81	82	83	84	85	86
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39	40	41-48	49-56	57-64	65	66	67-74	75-78	79	80	81	82	83	84	85	86			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57	58-64	65	66	67-74	75-78	79	80	81	82	83	84	85	86						
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
87	88	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuq	Uus	Uuo				
* lanthaniden		57	58	59	60-64	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
** actiniden		89	90	91	92-94	95	96	97	98	99	100	101	102	103							
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

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

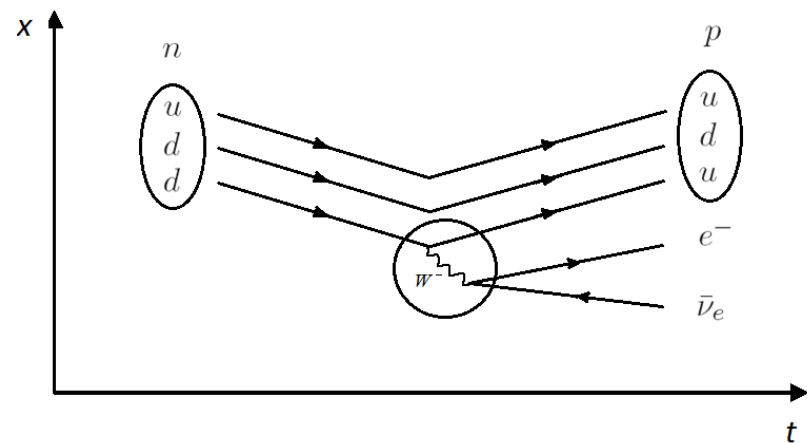


Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► 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

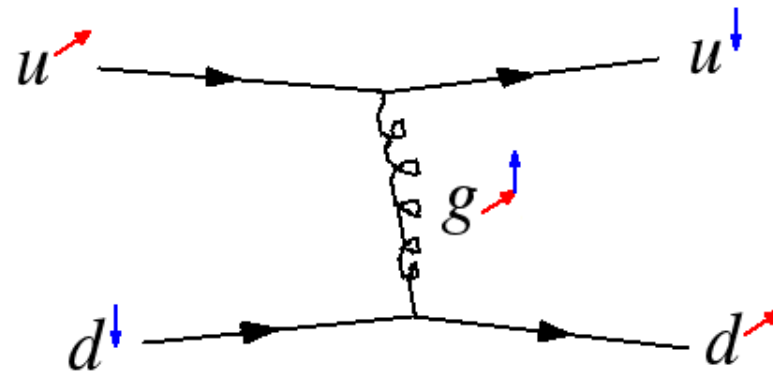
- Drei Quarks mit Farbladungsvektoren \rightarrow , \leftarrow , oder \downarrow
Up-Quarks haben alle schwache Ladungszahl $I = +\frac{1}{2}$,
Down-Quarks haben alle schwache Ladungszahl $I = -\frac{1}{2}$
- $\begin{pmatrix} u \rightarrow \\ d \rightarrow \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \leftarrow \\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

Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

► Starke Wechselwirkung

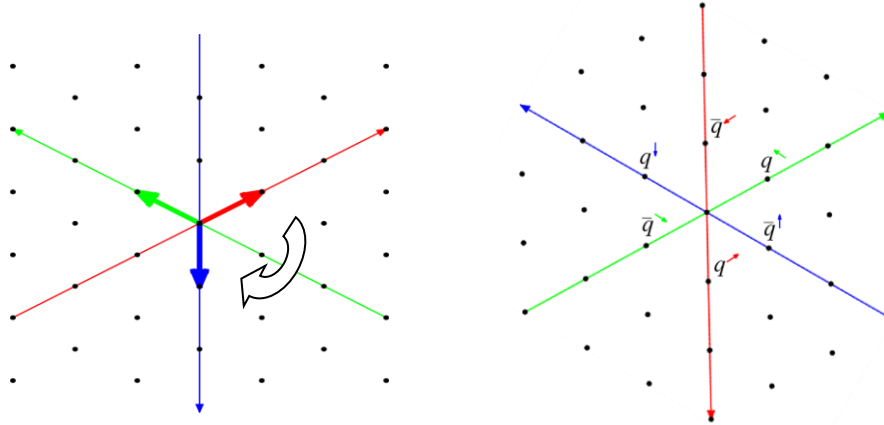
- Durch Gluonen nur Änderung der Farbladung eines Teilchens
- Drei verschiedene Farbladungsvektoren für Quarks:
Quarks bilden Triplets bezüglich der starken Ladung

► $(u \rightarrow u \rightarrow u)$

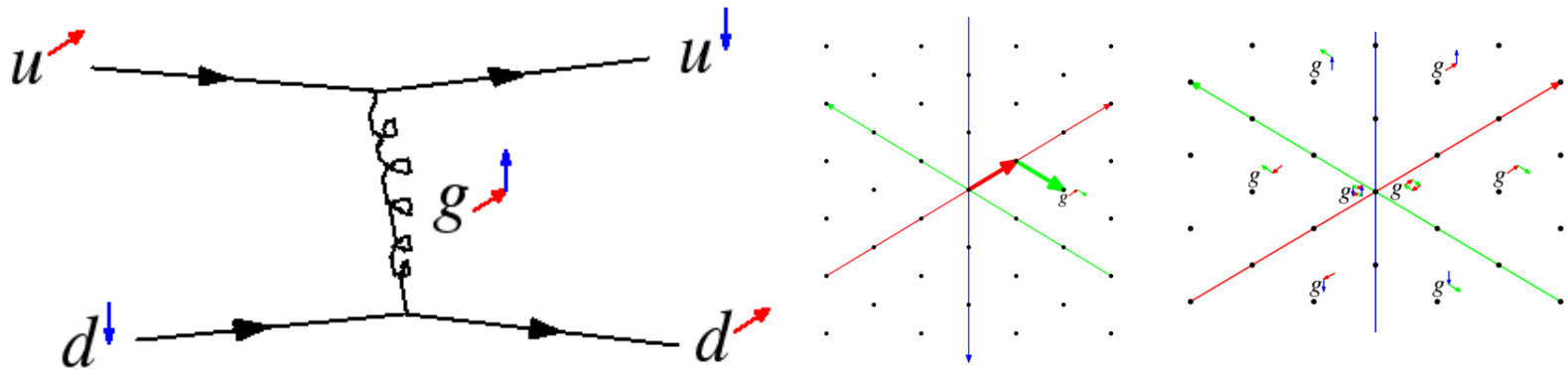


Botenteilchen: Umwandlung innerhalb Multipletts

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



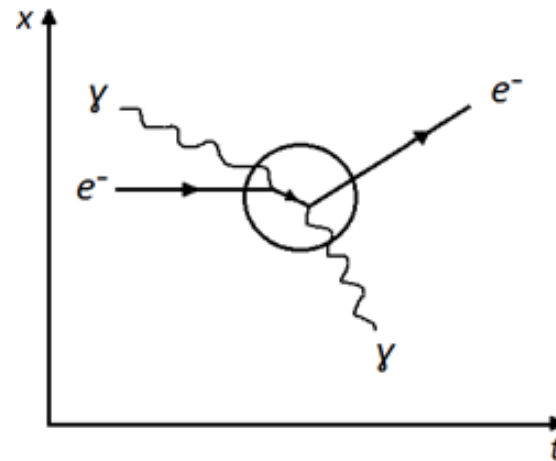
- ▶ hat denselben Effekt wie Emission oder Absorption eines Gluons



Teilchenumwandlungen als Schlüssel zur Ordnung

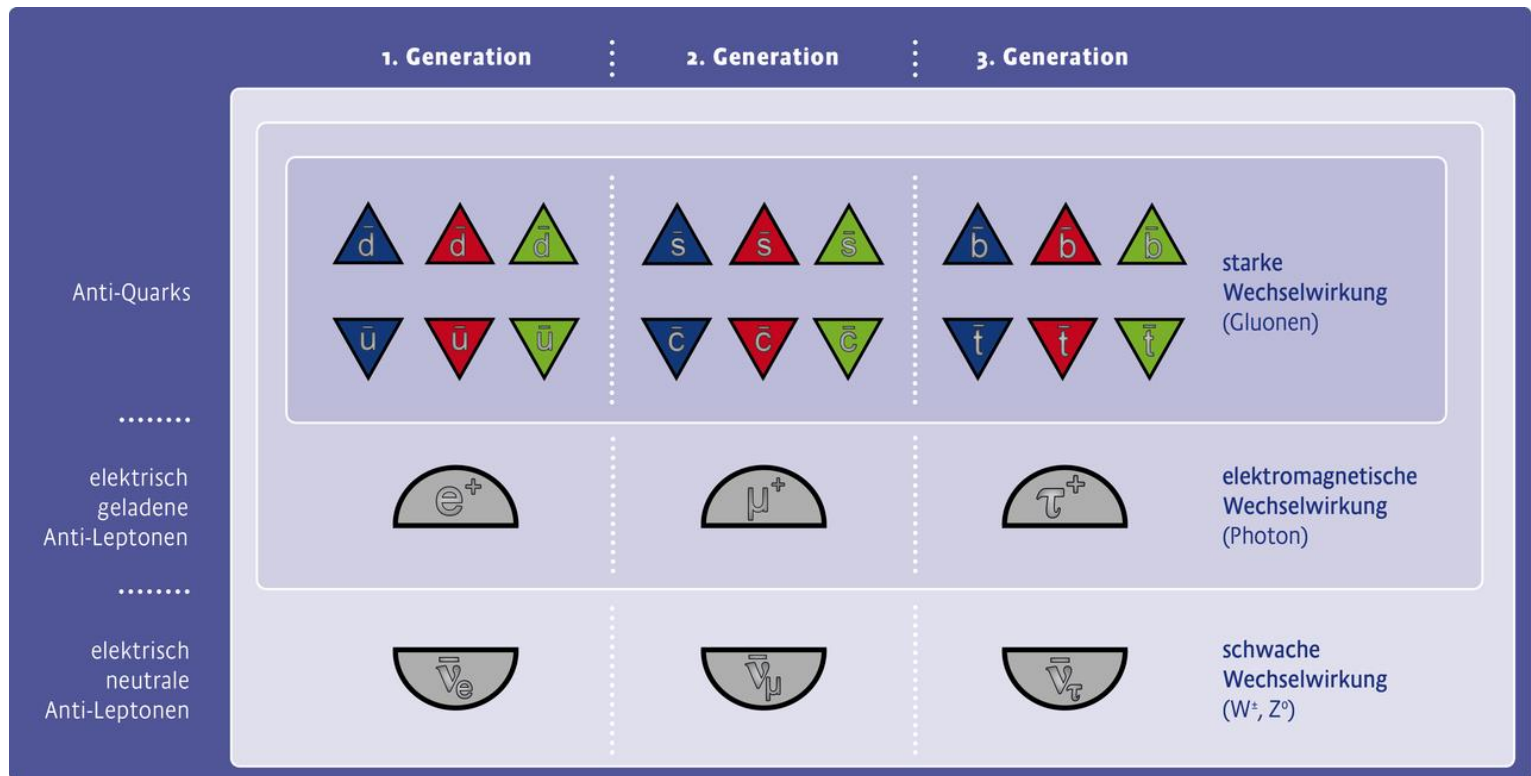
▶ Elektromagnetische Wechselwirkung

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



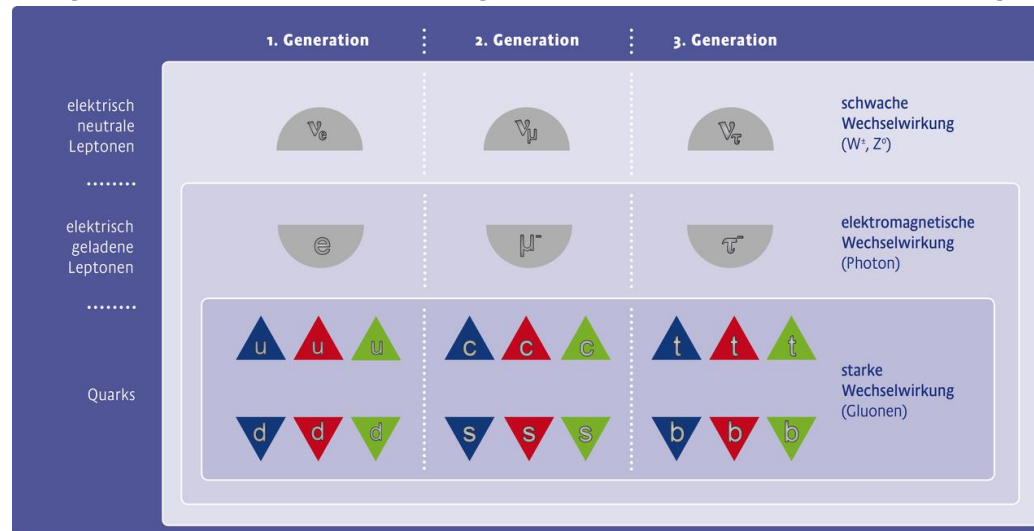
Multipletts – Ladungen als Ordnungsprinzip

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



Zusammenfassung: Multipletts

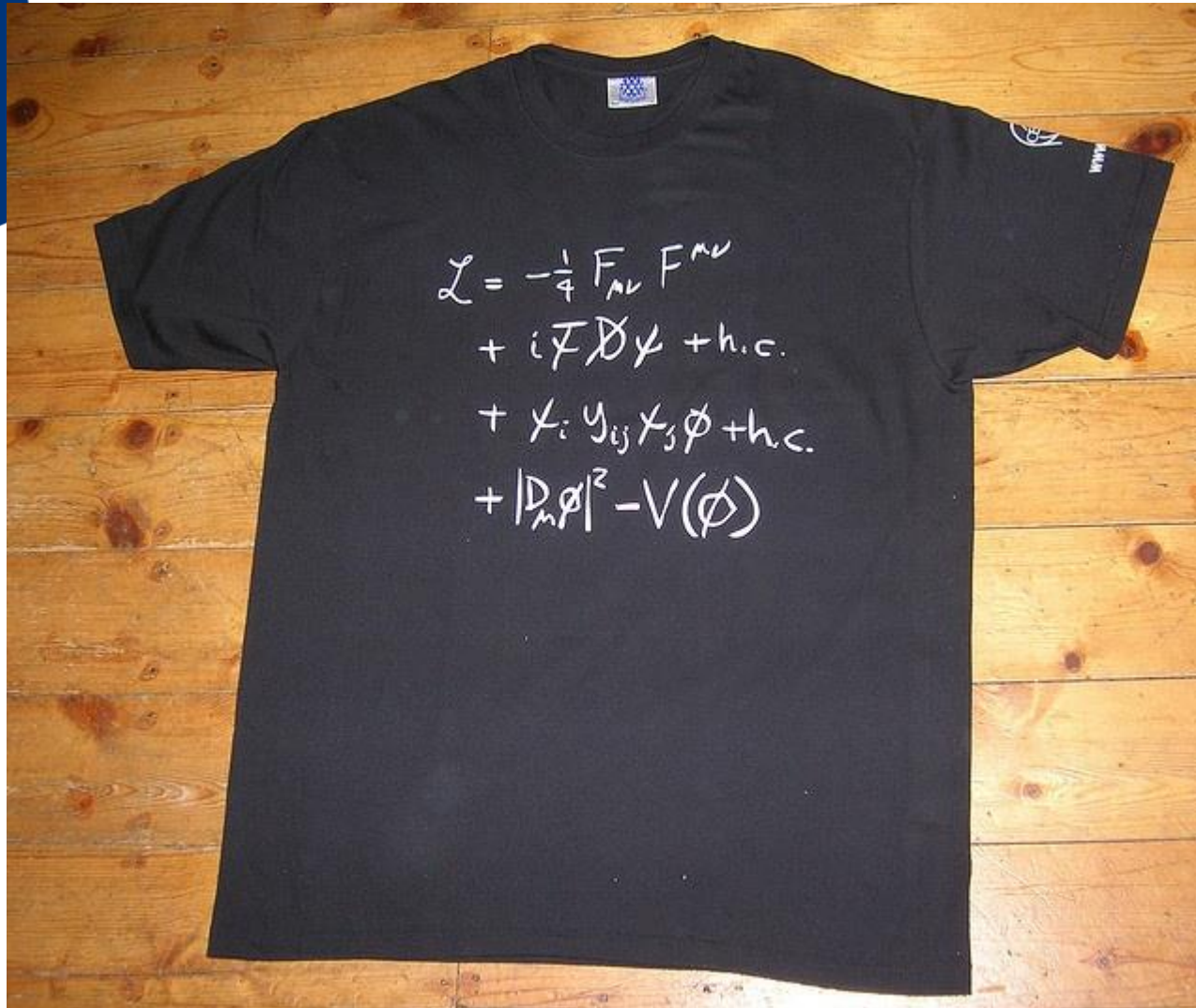
- ▶ Teilchen lassen anhand ihrer Ladungen ordnen
- ▶ Experimentell findet man
 - Dupletts der schwachen Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
 - Tripletts der starken Wechselwirkung (nicht vorhersagbar!)
 - Singulett der elektromagnetischen Wechselwirkung (vorhersagbar)



- ▶ 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

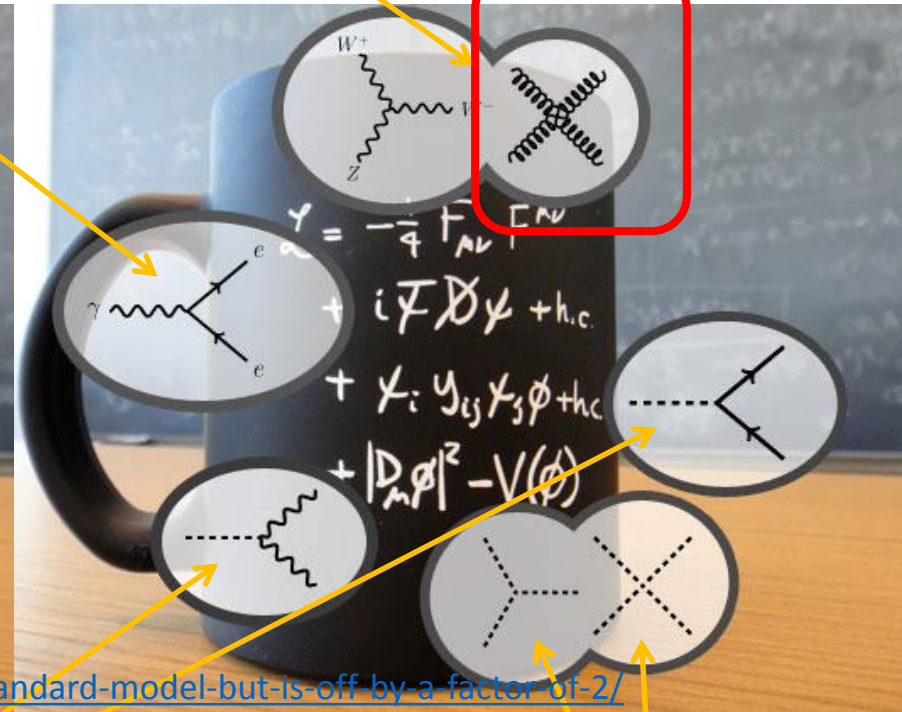
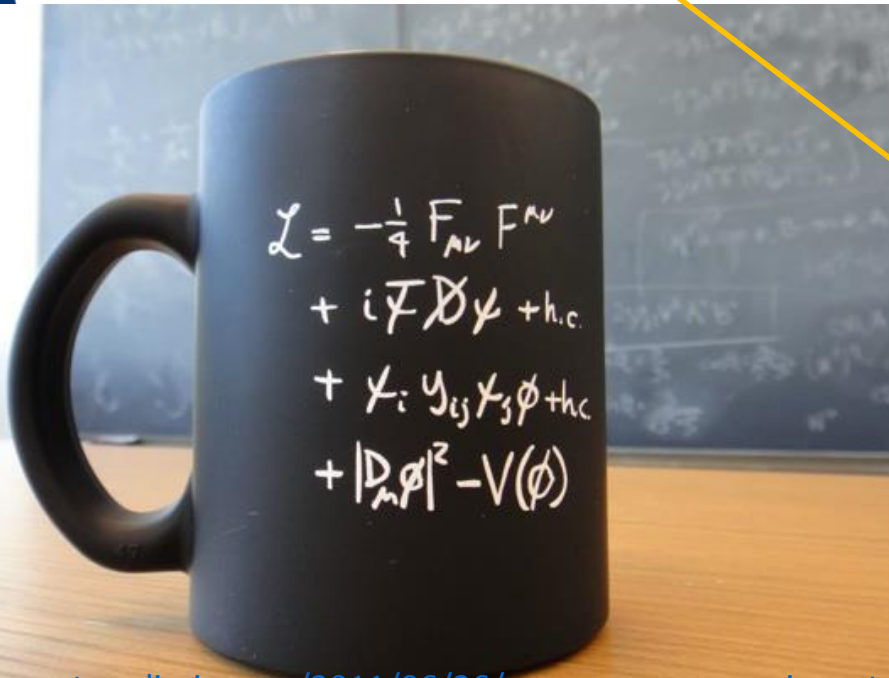
- ▶ Aufstellung der Terme dieser „Weltformel“:
 - Natur verlangt Invarianz unter 3 Symmetrien („lokalen Umeichungen“)
 - Terme, die die Symmetrie nicht erfüllen, sind verboten
 - **Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungen erfüllen**
-> lokale Eichsymmetrie ist „Ursache“ der Wechselwirkungen
- ▶ 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

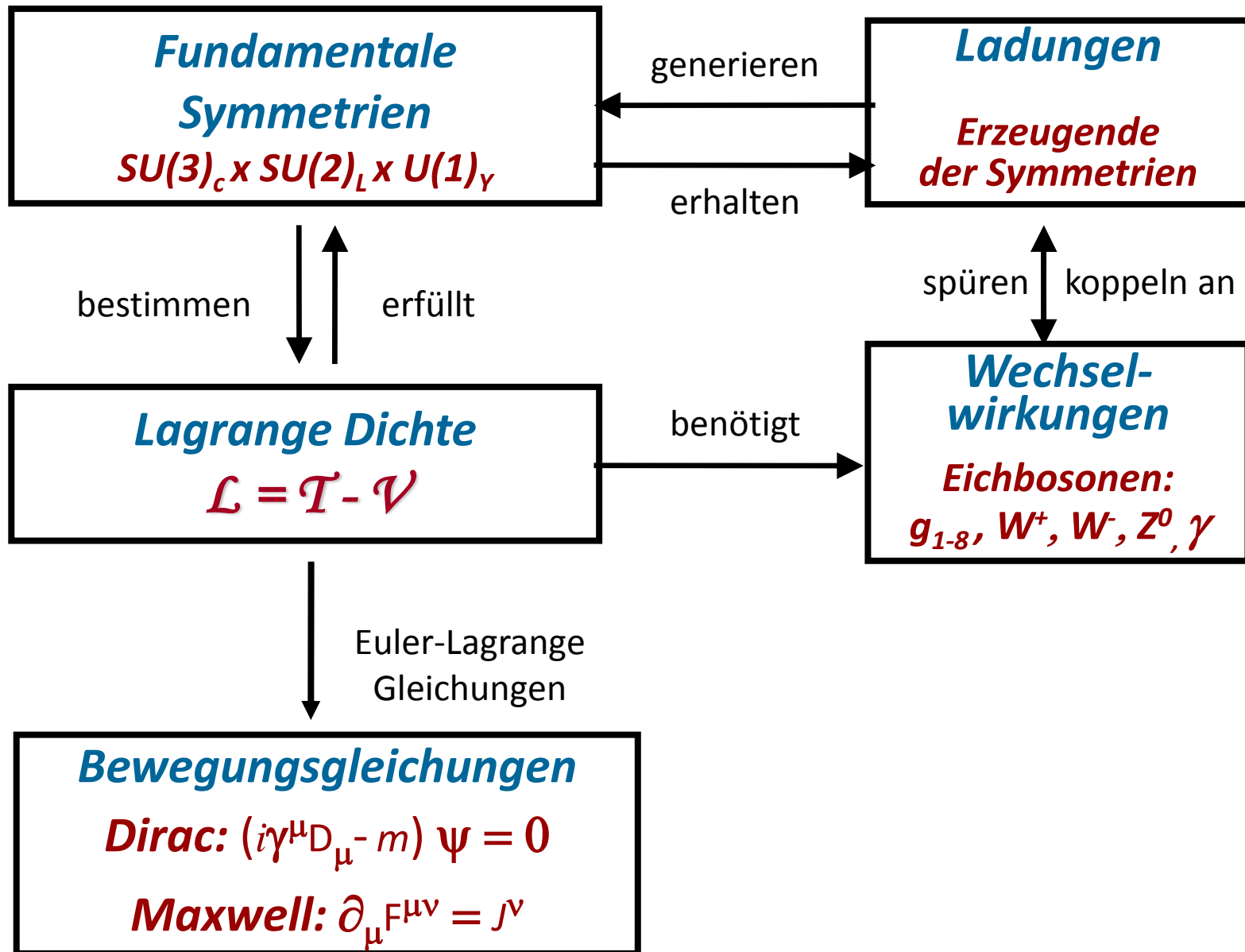


www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/

Higgs mit Bausteinen und Boten
Massen der Bausteine und Botenteilchen
Erzeugung und Zerfälle des Higgs Teilchens

Higgsteilchen unter sich
noch nicht beobachtet
-> nächster Beschleuniger

Das Konzept des Standardmodells



Diskussion / Fragen – zum Fachvortrag 2

► Wir freuen uns auf Ihre Mitarbeit



Mittagspause: 11:30 -12:30 Uhr!



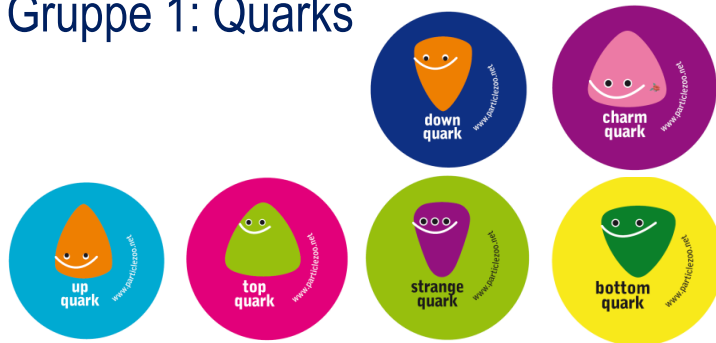
Mi 11:15 – 12:15 Uhr

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



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

JOACHIM
HERZ
STIFTUNG



22.03.2016



NETZWERK
TEILCHENWELT

41