TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Dr. Hans Riegel-Stiftung

Bereich Mathematik und Naturwissenschaften, Fakultät Physik

Die Theorie hinter dem Standardmodell: Symmetrien & Lagrangedichten

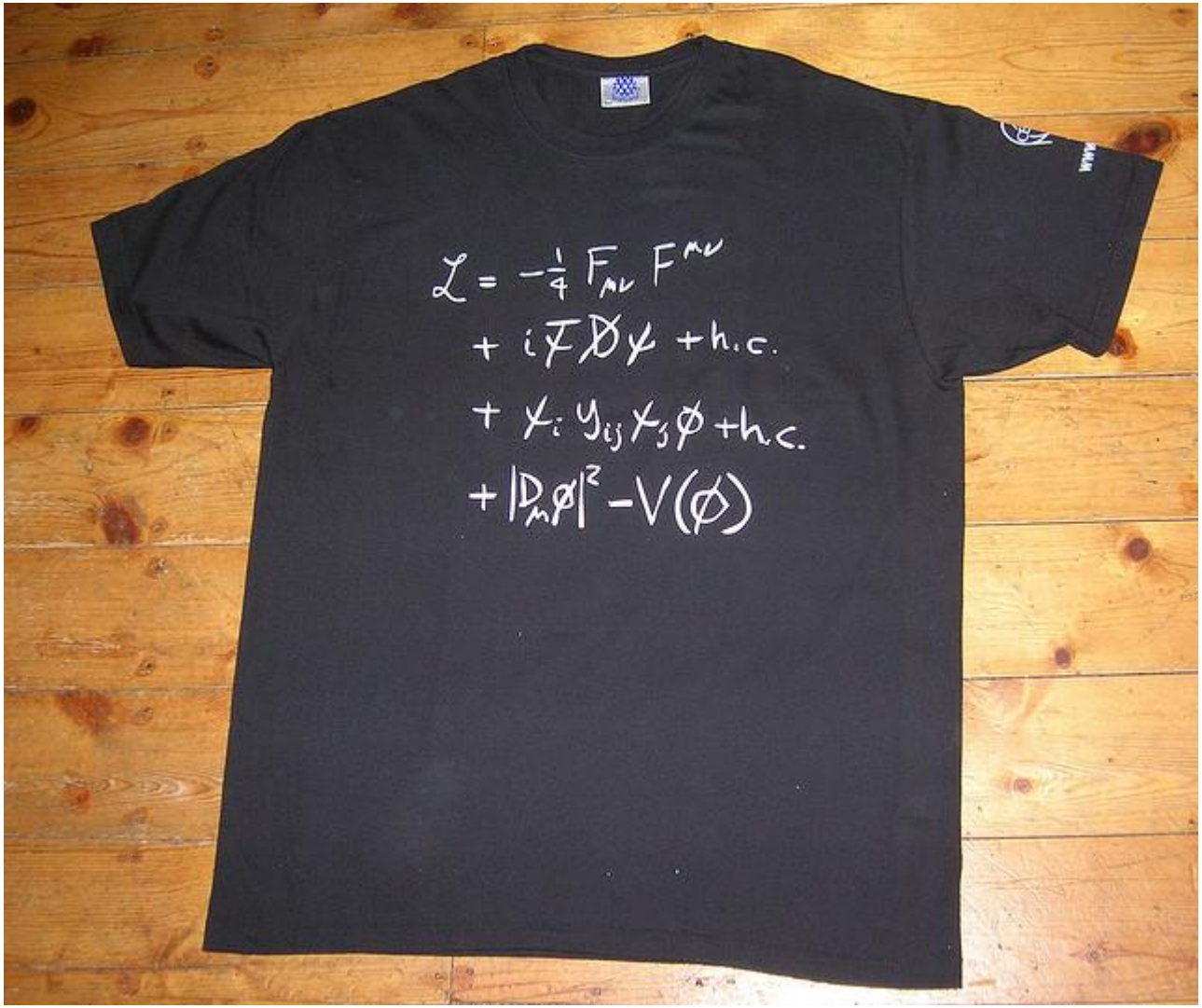
Michael Kobel
Technische Universität Dresden

Netzwerk Teilchenwelt Summer School
CERN 31.07.2024

DRESDEN concept

1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. **SYMMETRIEN**
5. Zusammenfassung und Bedeutung

Entstehung der Lagrangedichte **mit WWirkungen**



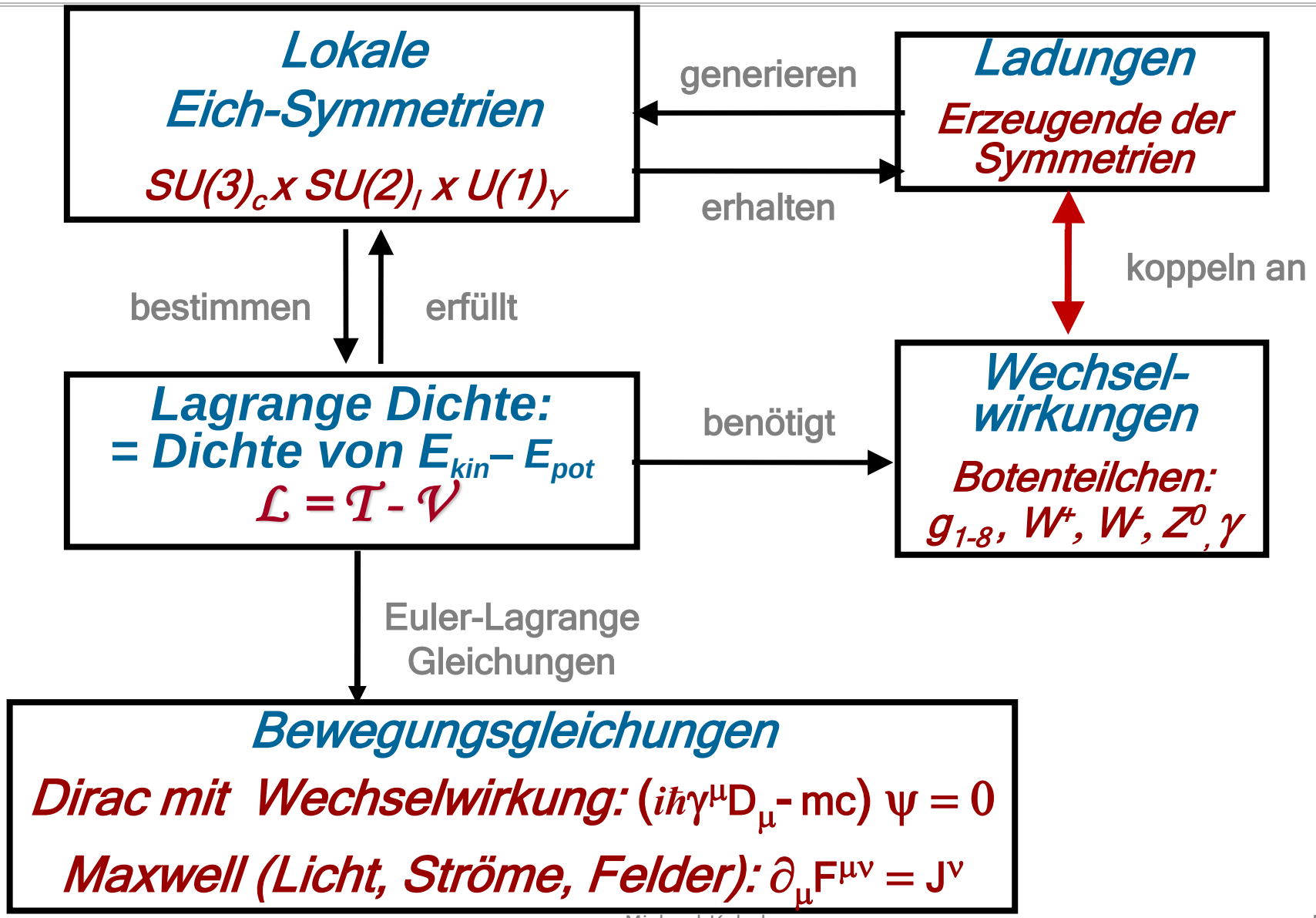
- „Weltformel“ auf CERN T-shirt und Mouse Pad

4. Mathematische Symmetrien (Hermann Weyl)

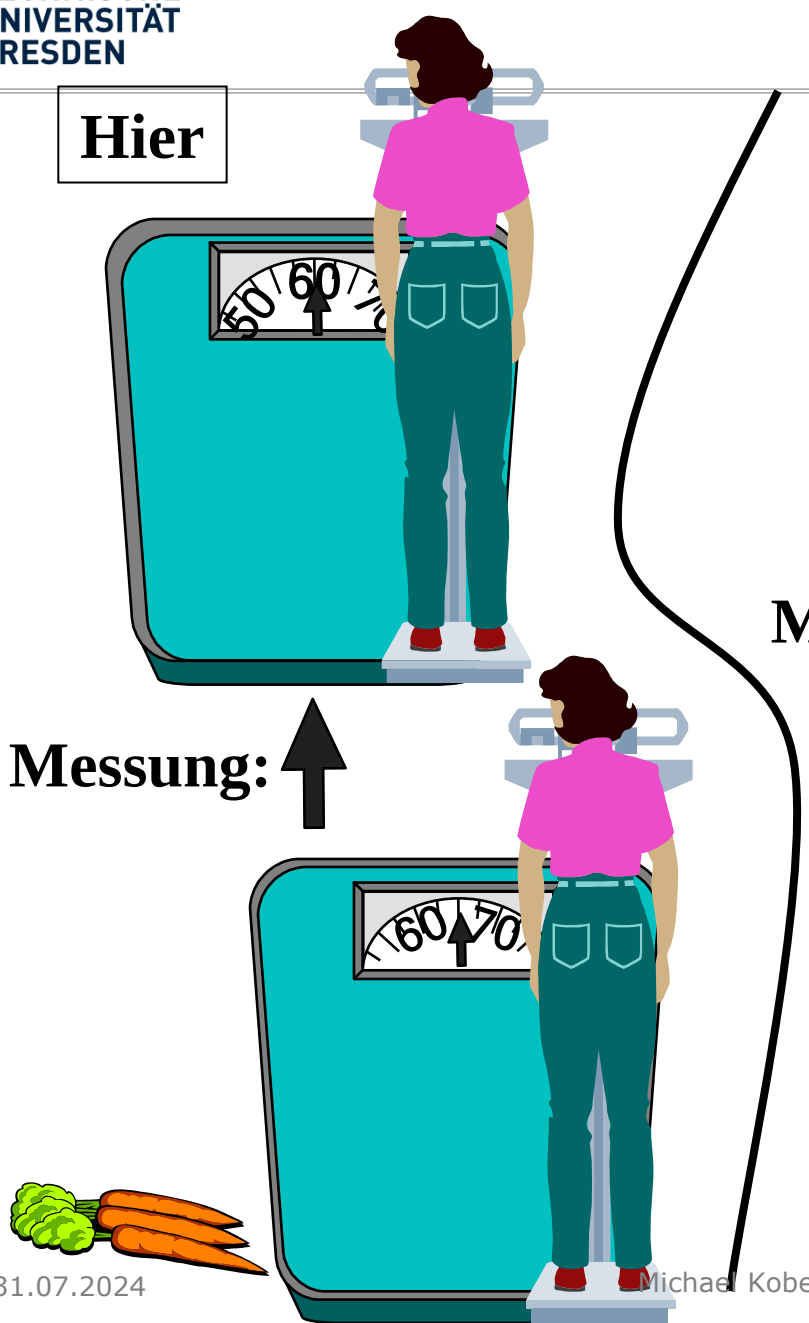
Werkzeugkiste: Transformationsgruppen

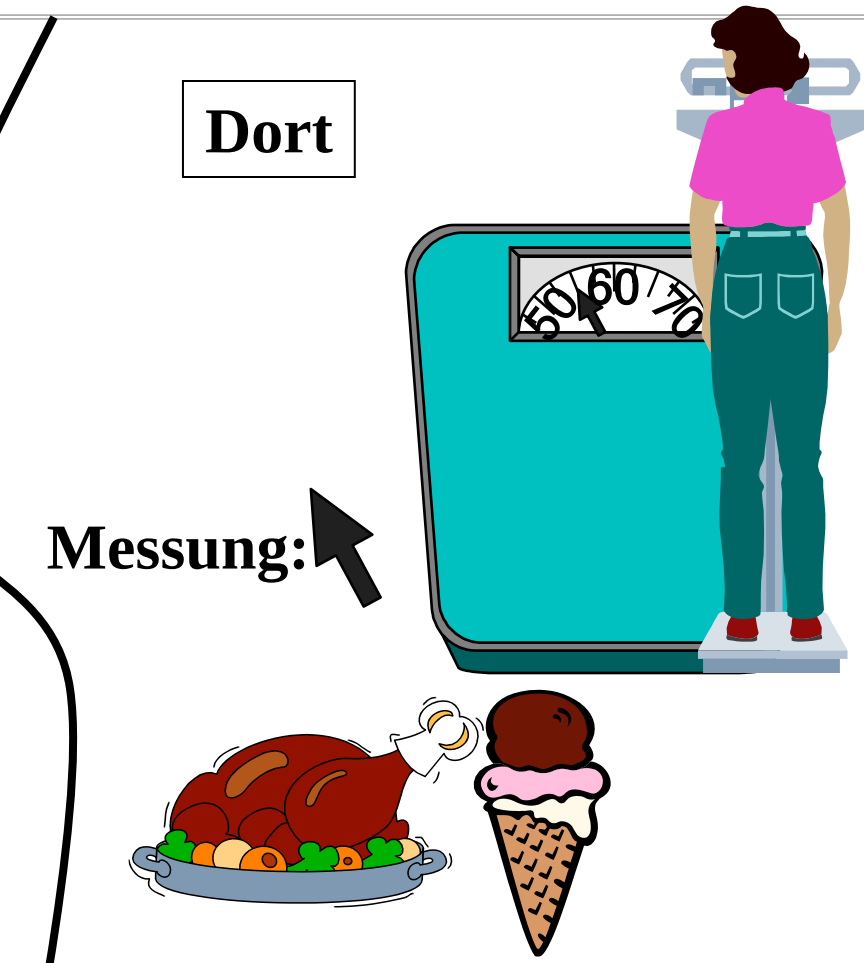
R.P. Feynman: Ein Objekt heißt *symmetrisch*, wenn man mit ihm etwas anstellen kann, ohne es am Ende, wenn man fertig ist mit der Prozedur, geändert zu haben.

Quelle:
Thomas Lohse, 2006


Lokale Eich-Symmetrien
$SU(3)_c \times SU(2)_l \times U(1)_Y$
generieren
erhalten
Ladungen
Erzeugende der Symmetrien
koppeln an
bestimmen
erfüllt
Lagrange Dichte:
= Dichte von $E_{kin} - E_{pot}$
$\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V}$
benötigt
Wechsel-wirkungen
Botenteilchen:
g_{1-8}, W^+, W^-, Z^0, γ
Euler-Lagrange Gleichungen
Bewegungsgleichungen
Dirac mit Wechselwirkung: $(i\hbar\gamma^\mu D_\mu - mc)\,\psi = 0$
Maxwell (Licht, Ströme, Felder): $\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu$

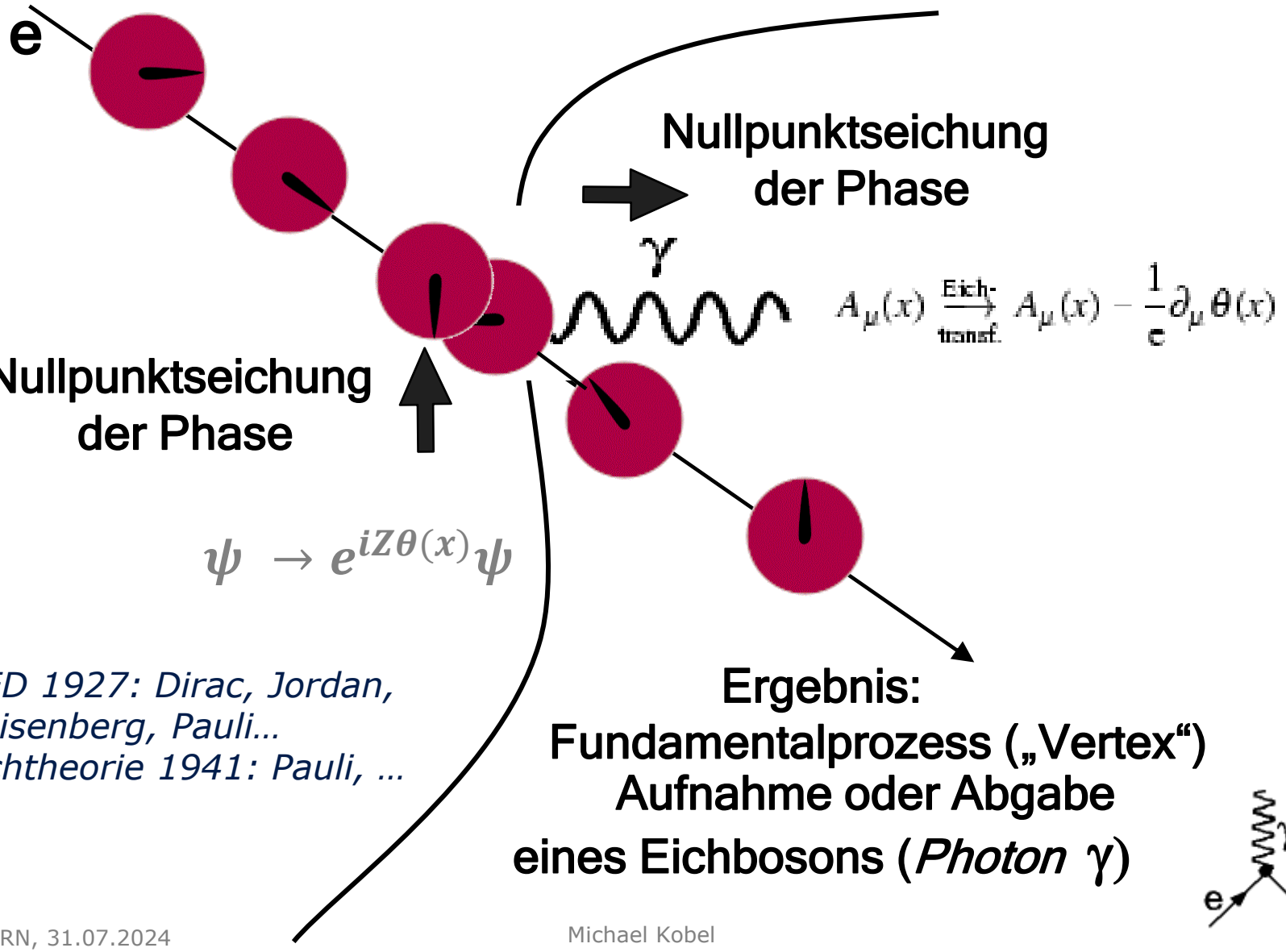
Lokale Umeichungen auf einer Waage



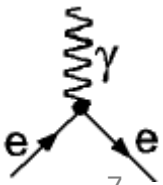


- Lokale Eichsymmetrie erfordert
  - Absorption oder Emission von "Eich-Teilchen"

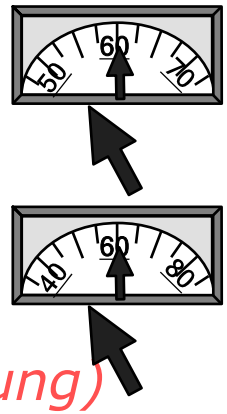
Lok. Umeichung im Elektromagnetismus $U(1)_Z$



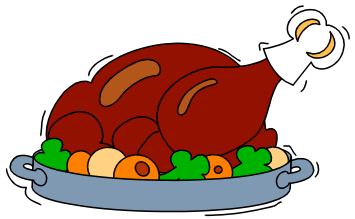
- *QED 1927: Dirac, Jordan, Heisenberg, Pauli…*
  Eichtheorie 1941: Pauli, …



- Ziel der *Person (Teilchen):*
  - Keine Änderung des *angezeigten Gewichts (Phasenwerts)* unter lokalen Änderung der Eichung



- *Sensitivität* auf Umeichungen
  - Bestimmt durch *Meßskala (Ladungszahl Z)*
- Wahrscheinlichkeit der *Nahrungsänderung (Wechselwirkung)*
  - *Häufigkeit der* Gewichtskontrolle (*Kopplung e =: $g_e\sqrt{(\hbar c \varepsilon_0)}$)*
- Zunahme oder Abnahme von *Gewicht (Phase)*
  - in Form von *Nahrung (Eichbosonen: Photonen)*
- Menge der *Zu- und Abnahme (QM-Amplitude)*
  - Produkt von *Sensitivität*Häufigkeit (Produkt Z*e)*

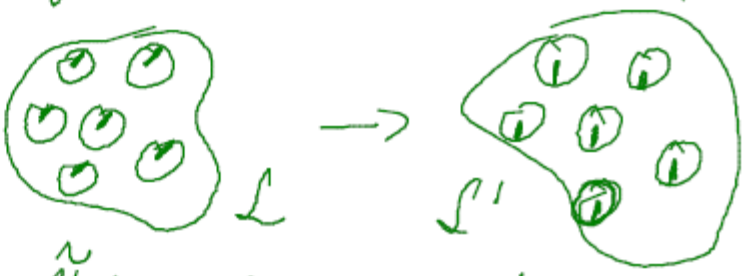


Globale .vs. Lokale Symmetrie (z.B. QED)
(hier natürliche Einheiten ħ=c=1)

- globale $U(1)_Z$ Symmetrie

$$\psi \to \psi' = e^{i\Theta \hat{Z}} \psi$$
$$\tilde{\psi} \to \tilde{\psi}' = e^{-i\Theta \hat{Z}} \tilde{\psi}$$

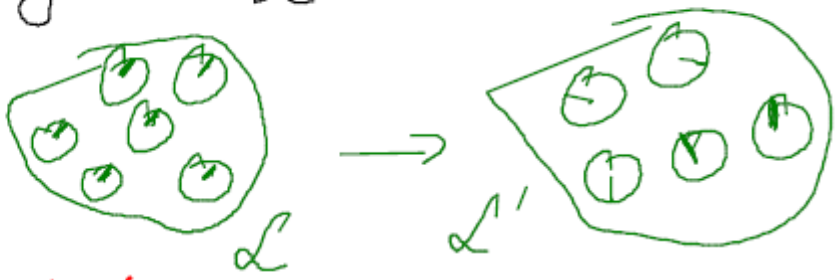
Neu-Definition des Phase-Nullpunkt



$$\Rightarrow \mathcal{L}_{QED}^{frei} = i\tilde{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\tilde{\psi}\psi$$ invariant

- Pauli 1941 <u>lokale</u> $U(1)_Z$ Symmetrie

$$\psi \to \psi' = e^{i\Theta(x^\mu)\hat{Z}} \psi$$
$$\tilde{\psi} \to \tilde{\psi}' = e^{-i\Theta(x^\mu)\hat{Z}} \tilde{\psi}$$



$$\mathcal{L}'^{frei}_{QED} = \ldots = i\tilde{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - \partial_\mu\Theta\, \tilde{\psi}\gamma^\mu Z \psi - m\tilde{\psi}\psi \neq \mathcal{L}$$

weil $\partial_\mu \psi' = \partial_\mu (e^{i\Theta(x^\mu)Z}\psi) = e^{i\Theta Z}[\partial_\mu \psi + iZ\,\partial_\mu\Theta\,\psi]$

„Rettung" durch das Photon-"Eichfeld"

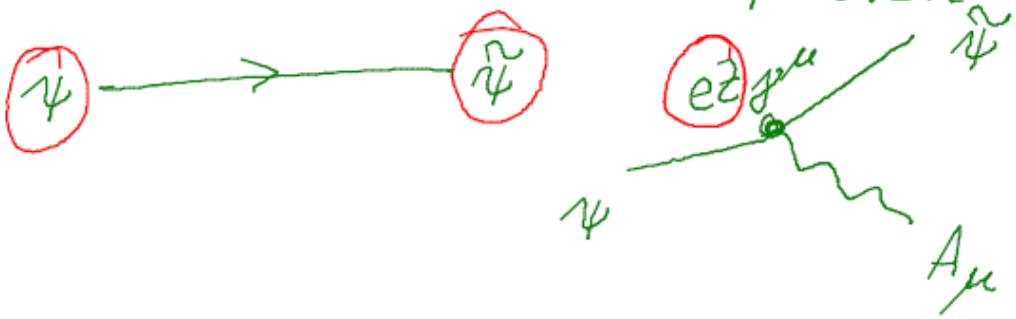
Freiheitsgrad wenn $A_\mu \to A'_\mu = A_\mu - \frac{1}{e}\partial_\mu \Theta$

Eichfreiheit des Potentials

$\mathcal{L}_{QED}$ aus $\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + ieQA_\mu$

$\mathcal{L}_{QED} = i\bar{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - e\bar{\psi}\gamma^\mu Q \psi A_\mu - m\bar{\psi}\psi$

freie Fermionen — WW Fermion — Photon — Masse d. Fermionen



Photon koppelt mit e an den Fermionstrom

$Q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi = j^{em}_Q$

$\mathcal{L}^{WW} = \mathcal{L}^{frei} - e j^{em}_Q A_\mu$

13

❖ Feldstärketensor, siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetischer_Feldst%C3%A4rketensor

Der elektromagnetische Feldstärketensor ist gewöhnlich definiert durch das Vektorpotential:

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$$

z. B. mit dem klassischen Vektorpotential

$$A^\mu = \left(\phi/c, \vec{A}\right)$$

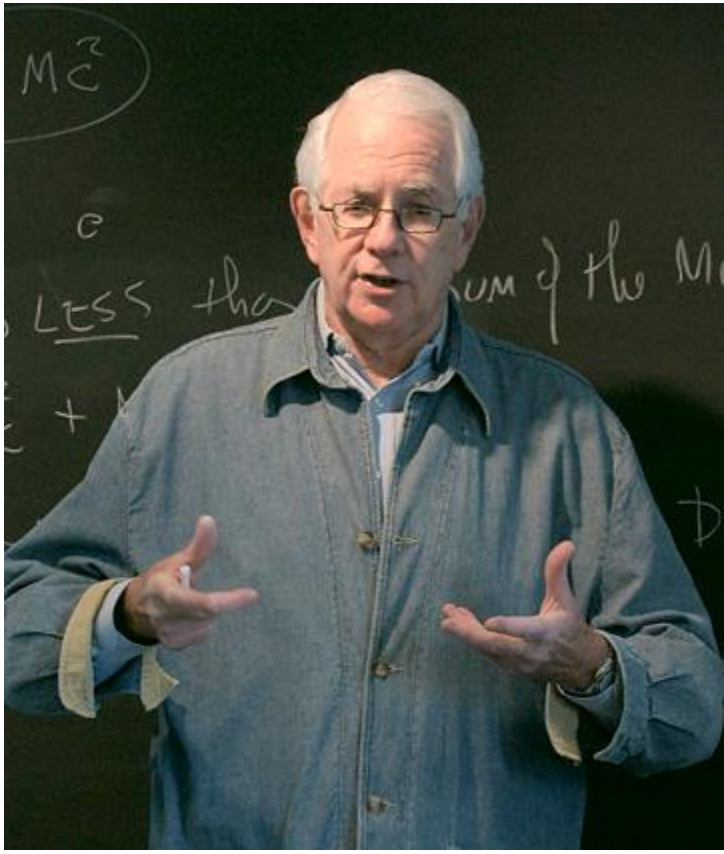
Diese Definition ist auch für die Quantenelektrodynamik gültig. Dort ist einfach nur das Vektorpotential operatorwertig. Es ist ein Spezialfall der Feldstärketensor-Definition einer allgemeinen Eichtheorie.

Die Matrixdarstellung des Feldstärketensors ist *koordinatenabhängig*. In einer flachen Raumzeit (also mit Minkowski-Metrik) und kartesischen Koordinaten kann der kontravariante Feldstärketensor geschrieben werden als:

$$F^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}$$

4.2. Historischer Überblick

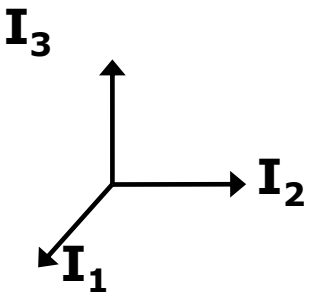
- Sheldon Glashow (*1932)
- 1950: Bronx High School of Science
  (selbe Klasse wie Steven Weinberg)
- 1959: Ph.D. in Harvard bei Julian Schwinger
  (Nobelpreis für QED 1965 mit Feynman und Tomonaga)
- 1961: Vorschlag $SU(2)_I \otimes U(1)_Y$
  Partial Symmetry of Weak Interactions,
  Nuclear Physics, Bd. 22, 1961, S. 579. Abstract



- Einführung des Schwachen Isospins I^w
  analog zum vorher bekannten Starken Isospin I^S
  [da Quarks unbekannt urspr. für (p,n) und (e,ν_e)]
- Ad-hoc Einführung der Elektroschwachen Mischung
  und des schwachen Mischungswinkels
  (Diskussion später diese Woche)
  - Vorhersage des Z^0 („neutrale schwache Ströme“)
  - Photon-Kopplungen so, dass es an Elektr. Ladung
    und damit nicht an Neutrinos koppelt
    (keine Erklärung, warum die Natur ausgerechnet diesen Mischungswinkel wählte)

- Probleme mit Teilchenmassen, da Symmetrien nur mit masselosen Teilchen möglich

❖ 1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung

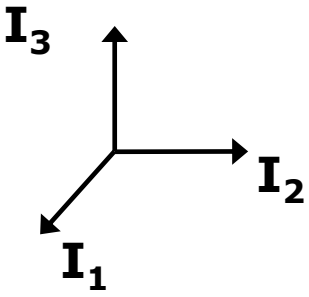


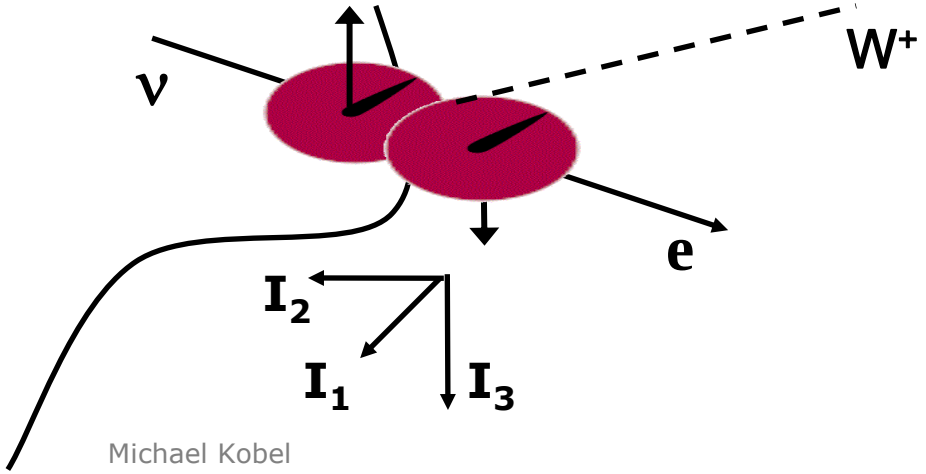
Neutrino: $I_3 = ½$ Elektron: $I_3 = -½$

Proton: $I_3 = ½$ Neutron: $I_3 = -½$

Idee: (ν, e) und (p, n) unterscheiden sich jeweils *nur* durch die „Richtung" des schwachen Ladungsvektors I^w

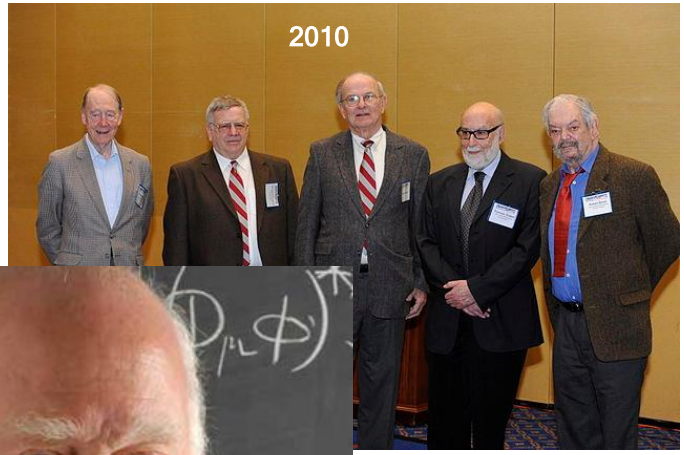
❖ lokale Umeichung

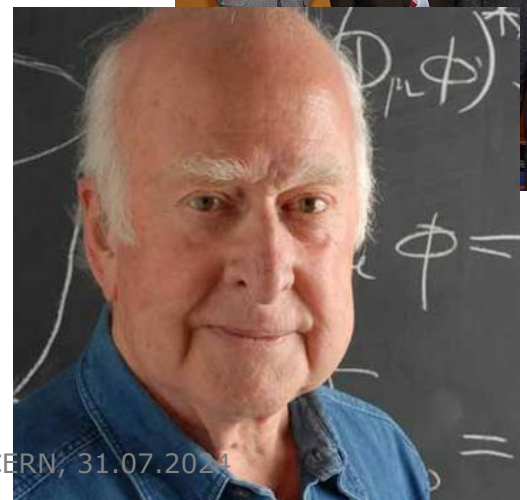




Historischer Ablauf Eichtheorien
Schwache und Starke Wechselwirkung

- 1961: GLASHOW (*1932) — Lokale Elektroschwache Eichsymmetrie
- 1964: ENGLERT, BROUT, HIGGS KIBBLE, GURALNIK, HAGEN (Bilder) — Spontane Symmetriebrechung zur Massenerzeugung ("Higgs Boson")
- 1964: GELL-MANN (1929-2019), ZWEIG(*1937) — Quarks
- 1965: HAN, NAMBU (1921-2015), GREENBERG — Starke "Farb-" Ladung
- 1967: SALAM (1926-96), WEINBERG (1933-2021) Weinberg:"A model of Leptons" — Anwendung auf Baustein-Teilchen (Nobelpreis 1979 mit Glashow, Foto)
- 1973: GROSS, POLITZER, WILCZEK, FRITSCH,GELL-MANN,LEUTWYLER,WEINBERG — starker Kopplungsparameter (Nobelpreis 2004) und Lokale Eichsymmetrie der starken WW





$$\mathfrak{L} = -\tfrac{1}{4}(\partial_\mu \vec{A}_\nu - \partial_\nu \vec{A}_\mu + g\vec{A}_\mu \times \vec{A}_\nu)^2 - \tfrac{1}{4}(\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu)^2 - \bar{R}\gamma^\mu(\partial_\mu - ig'B_\mu)R - L\gamma^\mu(\partial_\mu + ig\vec{t}\cdot\vec{A}_\mu - i\tfrac{1}{2}g'B_\mu)L$$

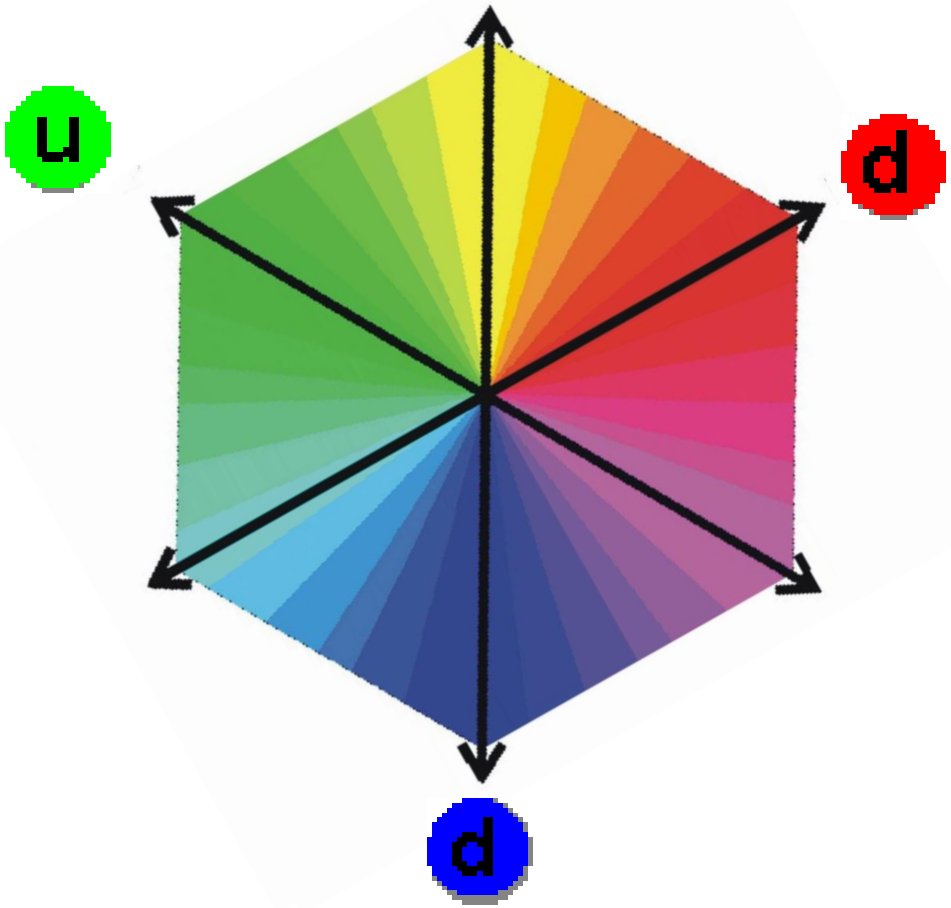
$$-\tfrac{1}{2}|\partial_\mu\varphi - ig\vec{A}_\mu\cdot\vec{t}\varphi + i\tfrac{1}{2}g'B_\mu\varphi|^2 - G_e(\bar{L}\varphi R + \bar{R}\varphi^\dagger L) - M_1{}^2\varphi^\dagger\varphi + h(\varphi^\dagger\varphi)^2. \quad (4)$$

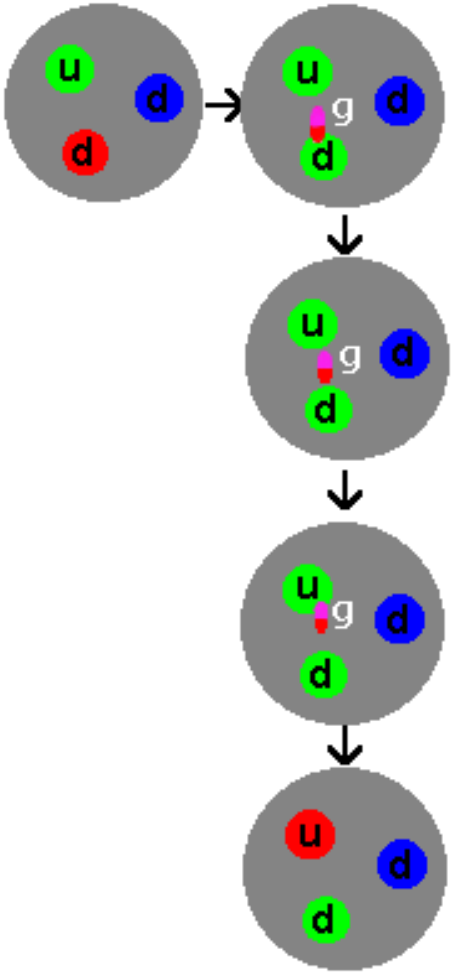
http://prl.aps.org/pdf/PRL/v19/i21/p1264_1

Masse für Bausteine

Die starke Eichsymmetrie $SU(3)_c$

- 1973: Gross, Politzer, Wilczek, Nambu, Fritzsch…
  starke WW durch Umeichung der Farbladung





4.3. Mathematische Umsetzung

- Jede Eichsymmetrie wird durch n Ladungsoperatoren ”generiert”
  - *Emag Symmetrie mit n=1 durch* $\hat{Z}$
    Ladungszahl (1x1 Matrix)
  - *Schwache Isospin Eichsymmetrie mit n=3 durch* $\hat{I}_i := ½\ \sigma_i$, *i=1,2,3*
    σ_i *Pauli-Matrizen (2x2)*
  - *Starke Eichsymmetrie mit n=8 durch* $\hat{C}_a := ½\ \lambda_a$, *a=1,…,8*
    λ_a *Gell-Mann-Matrizen (3x3)*

- Die Ladungen sind Eigenwerte der “Generatoren”
  - *z.B.* $I_3(e^-) = -½$, *da* $\hat{I}_3 \left|e^-\right\rangle = \frac{1}{2}\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\ \psi_e\end{pmatrix} = -\frac{1}{2}\left|e^-\right\rangle$
  - *Nicht-diagonal Operatoren haben keinen Eigenwert -> nicht messbar*
    - *Schwache Ladung: 1 Eigenwert*
    - *Starke Ladung: 2 Eigenwerte (2-dim Vektor)*

Die 8 Gell-Mann Matrizen und Leiteroperatoren (Berger, Kap.4)

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \qquad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \qquad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}.$$

Die Fundamentaldarstellung, das Triplett, ist wieder durch die Matrizen der Gruppe selbst gegeben, also gilt für die Generatoren

$$F_i = \lambda_i/2 \ . \tag{4.15}$$

Die zugehörigen Basisvektoren innerhalb des Multipletts, in unserem Fall also die Farbzustände $|R\rangle$, $|G\rangle$, $|B\rangle$, unterscheiden sich durch die Eigenwerte zu F_3 und F_8. Man stellt sie graphisch in einem sog. Gewichtsdiagramm (Abb. 4.1) dar, das entsprechend dem Rang 2 der Gruppe die Ebene ausfüllt.

Analog zum Vorgehen bei $SU2$ faßt man auch bei $SU3$ die neben den Eigenwertoperatoren verbleibenden Generatoren zu Leiteroperatoren zusammen. Durch sie kann man Zustände ineinander überführen. Ihre Wirkung läßt sich sehr anschaulich durch die Pfeile in Abb. 4.1 verdeutlichen.

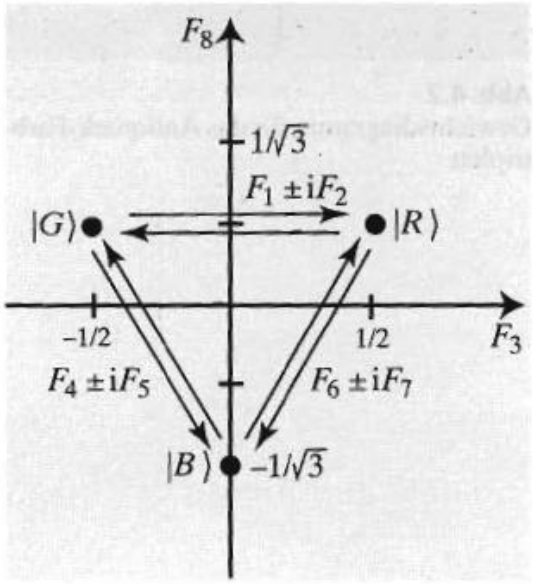
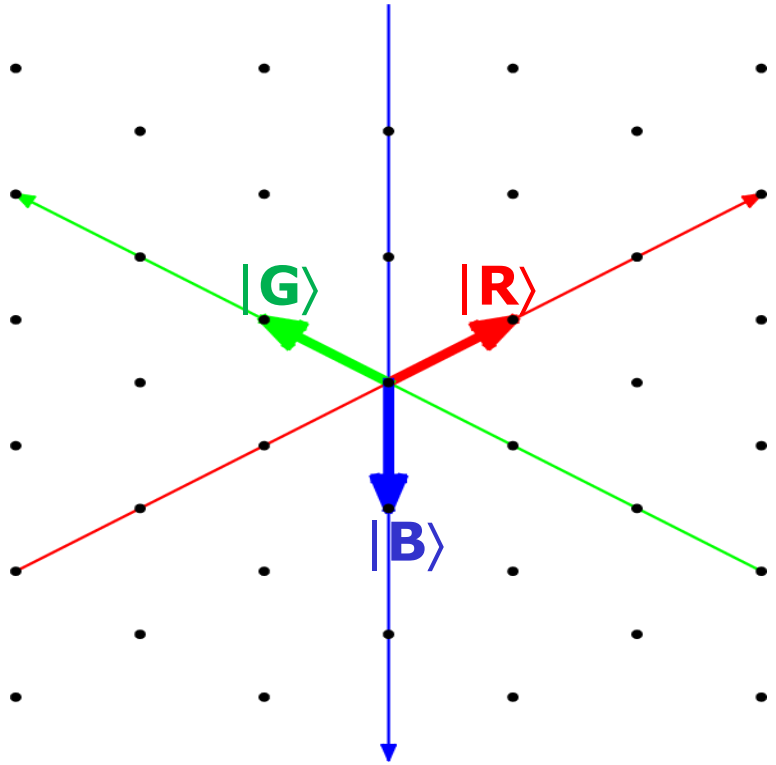


Abb. 4.1
Gewichtsdiagramm für das Quark-Farbtriplett

Operationen im Farbraum der QCD

❖ Leiter-Operatoren:~ Drehungen im Farbraum



Darstellung der Basisvektoren $|R\rangle, |G\rangle, |B\rangle$

$$\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\1\\0\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}$$

Wirkung der Leiteroperatoren

Als Beispiel wird

$$F_1 + \mathrm{i}F_2 = \begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&0\\0&0&0\end{pmatrix}$$

betrachtet. Offenbar gilt $(F_1 + \mathrm{i}F_2)|G\rangle = |R\rangle$

4.4. Symmetrien verlangen Wechselwirkung

- Freie Lagrangedichte $\mathcal{L}$ nicht invariant unter *lokalen* Eichtransf.

- Invarianz nur möglich, wenn "Eichbosonen" V_μ vorhanden

  V_μ = Gluonen $G_{a\mu,\ a=1,\ldots,8}$, Weakonen $W_{i\mu,\ i=1,2,3}$, Photon A_μ

- Zahl der Eichbosonen = Zahl der Generatoren T der Symmetrie
  - Emag: $\hat{Z}$
  - Schwach: $\hat{I}_i$ i=1,2,3
  - Stark: $\hat{C}_a$ a=1,…,8
- Eichbosonen haben *Wechselwirkung* mit Materiemultipletts
  - einfaches "Rezept" zur Erfüllung der Symmetrien:

    Ersetze die Ableitung ∂_μ durch $D_\mu = \partial_\mu + \imath\, g\, \Sigma T V_\mu$

    z.B. Elektromagnetismus $D_\mu = \partial_\mu + \imath\, g_{em}\, Z A_\mu$

    Schwache Wechselwirkung $D_\mu = \partial_\mu + \imath\, g_W\, \Sigma I_i W_{i\mu}$

Übersetzung Lagrangedichte → Vertices

Quelle: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa5b25

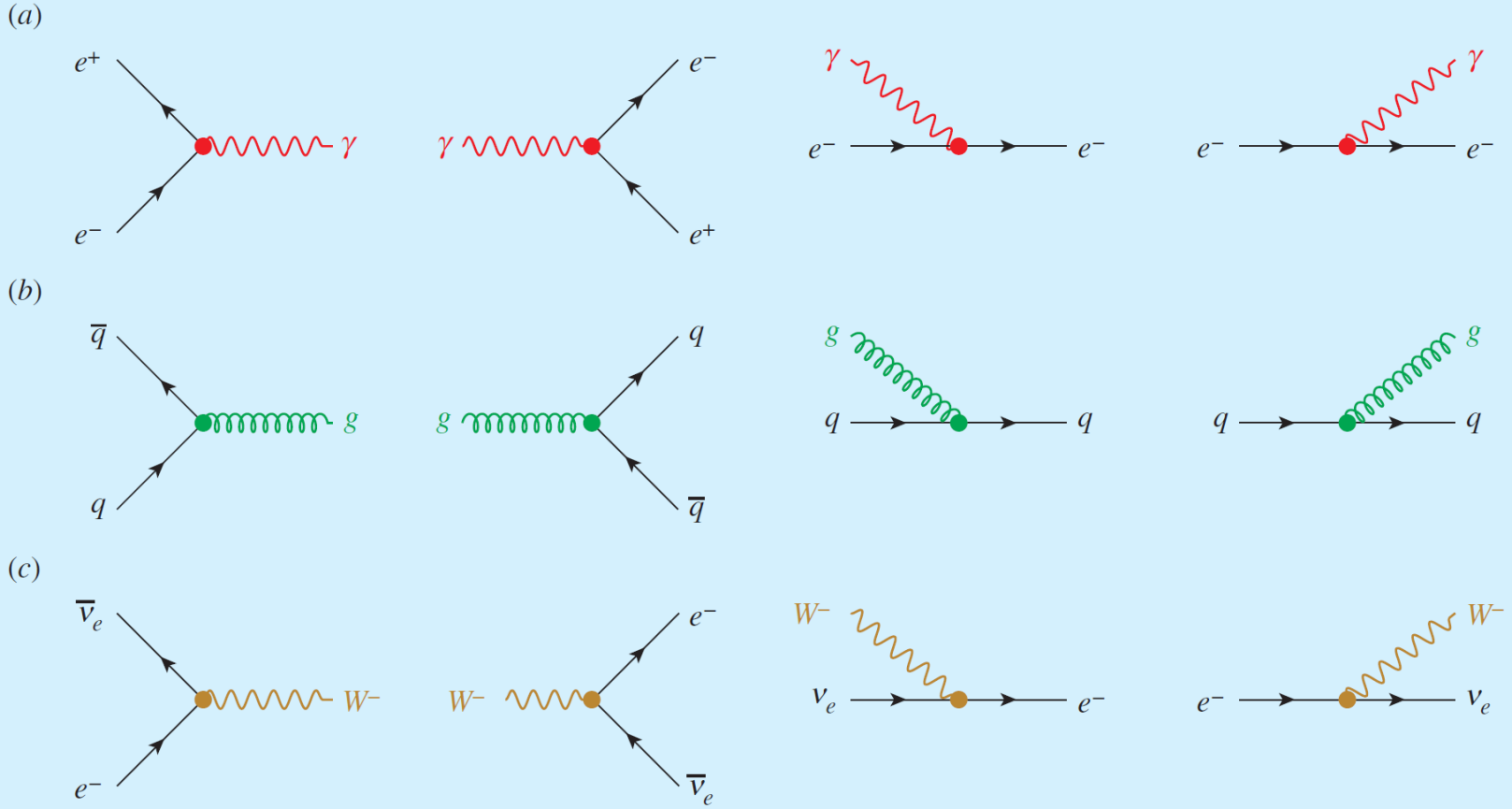
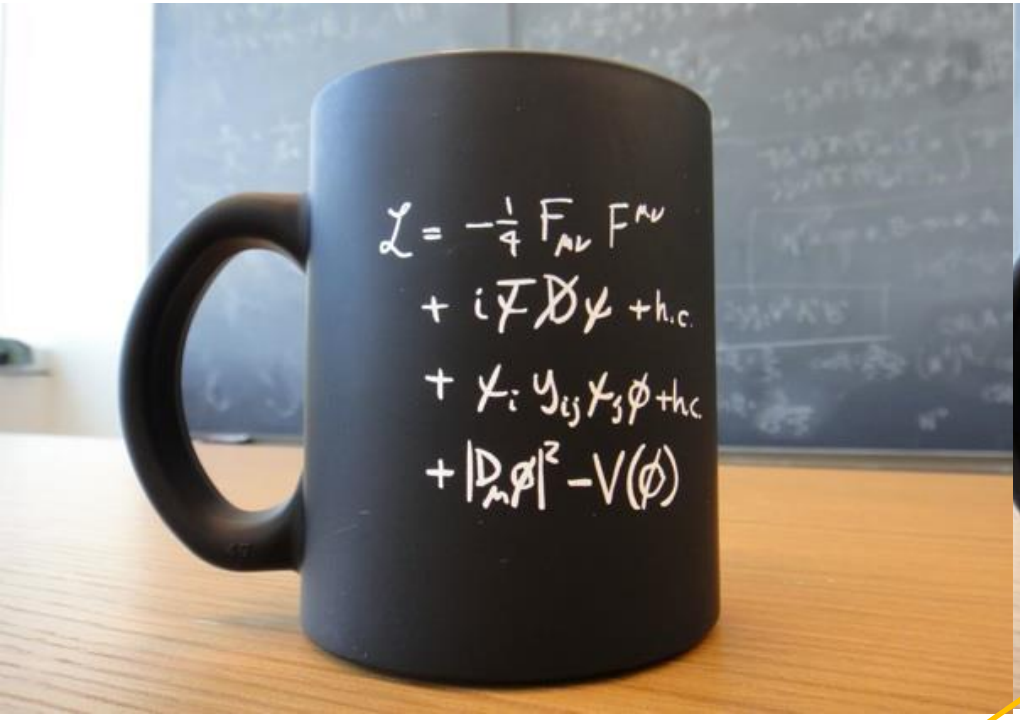


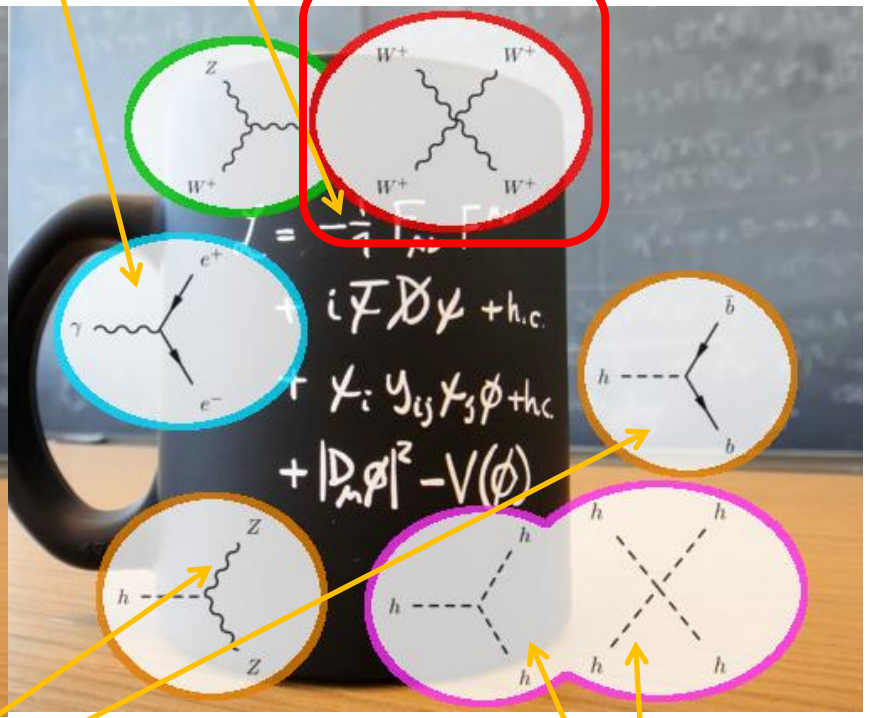
Figure 4. Basic vertices of the electromagnetic interaction (a), strong interaction (b), and weak interaction (c). From left to right: examples of annihilation, pair production, absorption, and emission.

Nur diese Formel erfüllt alle Symmetrien !

Wechselwirkungen zwischen
Boten und Bausteinen

Botenteilchen unter sich:
→ emag Wellen, Confinement, VBS…

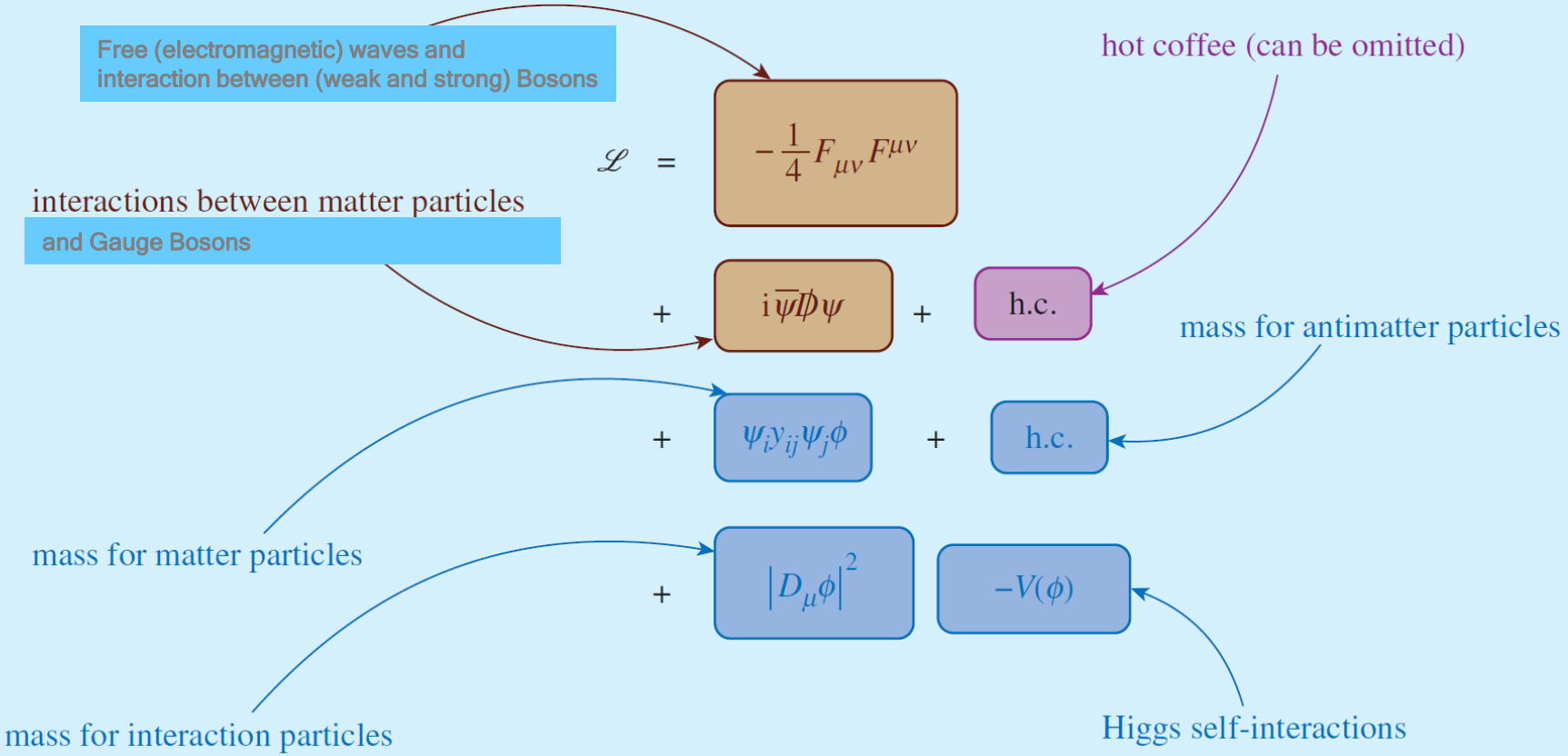




http://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/

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

Higgsteilchen unter sich
noch nicht beobachtet


Free (electromagnetic) waves and interaction between (weak and strong) Bosons
hot coffee (can be omitted)
$\mathscr{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$
interactions between matter particles
and Gauge Bosons
$+ \; i\bar{\psi}\not{D}\psi \; +$ h.c.
mass for antimatter particles
$+ \; \psi_i y_{ij} \psi_j \phi \; +$ h.c.
mass for matter particles
$+ \; |D_\mu \phi|^2$
$-V(\phi)$
mass for interaction particles
Higgs self-interactions

1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Symmetrien
5. **ZUSAMMENFASSUNG UND BEDEUTUNG**

5. Zusammenfassung und Bedeutung

❖ Aufstellung der Terme der Lagrangedichte:

- Natur verlangt ihre Invarianz unter 3 „lokalen Umeichungen“
  -> 3 lokale Eichsymmetrien
- Jede Symmetrie lässt sich nur mit Hilfe von Wechselwirkungstermen in der Lagrangedichte erfüllen
  -> lok. Eichsymmetrie ist „Ursache“ der Wechselwirkungen !

❖ Bedeutung der Terme in der Lagrangedichte:

- Jedem Term entspricht entweder
  → kinetische Energie freier Teilchen
  → Wechselwirkung (Vertex) zwischen Teilchen
- Terme (=Vertices), die die Eichsymmetrie nicht erfüllen, sind verboten und damit auch Prozesse, die diese erfordern.
- Bewegungsgleichungen (Dirac, Klein-Gordon, Maxwell,…) folgen aus Prinzip minimaler Wirkung

- 3 Typen von **Ladungen** generieren 3 Symmetrie Gruppen:
  - $SU(3)_C \otimes SU(2)_I \otimes U(1)_Y$
  - Diese „lokalen Eichsymmetrien" verlangen (!) **Wechselwirkungen**, (sonst können die lokalen Symmetrien nicht erfüllt werden)

- Je 1 freien **Kopplungsparameter** (Stärke) für jede Wechselwirkung (genaue Werte abhängig vom jeweiligen Energieübertrag z.B. $1/\alpha_s \sim 2\text{-}10$)
  - $\frac{1}{\alpha_s} = 5 \quad \frac{1}{\alpha_W} = 29 \quad \frac{1}{\alpha_Y} = 108$ vor Kondensation des BEH-Feldes
  - $\frac{1}{\alpha_{em}} = \frac{1}{\alpha_W} + \frac{1}{\alpha_Y} = 137$ nach Kondensation des BEH Feldes

- **Brout-Englert-Higgs (BEH) Mechanismus** bei 10^{-12}s nach Urknall
  - Kondensation eines allgegenwärtigen BEH-Feldes
  - Spontane Brechung der schwachen Eichsymmetrien
  - Elektroschwache Mischung von (B^0, W^0) zu (Z^0, γ)
  - Generierung der Massen von W^+, W^- und Z^0
  - Mischung der Fermionen und Generierung ihrer Massen

- **Gravitation**

Why are all the interactions so similar in their structure?

There are a number of possibilities:

- The first is the limited imagination of physicists:
  When we see a new phenomenon, we try to fit it in the frame-work we already have – until we have made enough experiments we don't know that it doesn't work…
  It's because physicists have only been able to think of the same damn thing, over and over again.

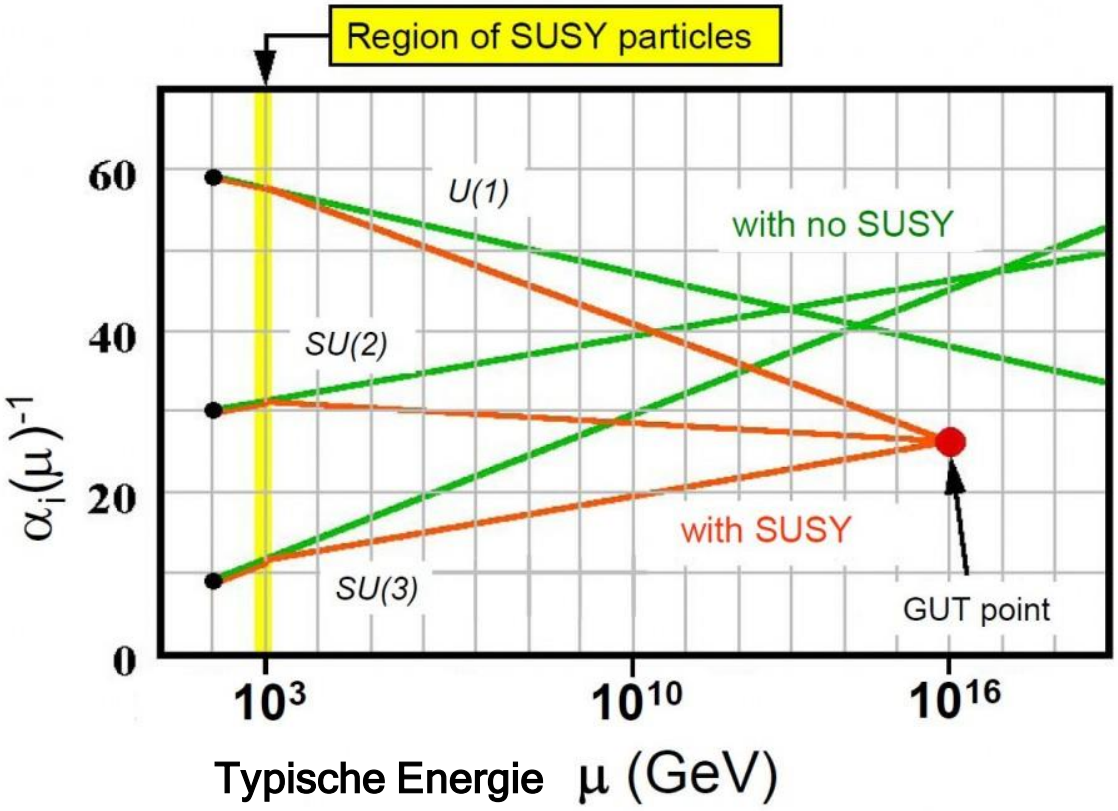
- Another possibility is that it is the same damn thing over and over again – that Nature has only one way of doing things, and She repeats her story from time to time.

- A third possibility is that things look similar because they are aspects of the same thing – some larger picture underneath…

Richard. P. Feynman, "The strange theory of light and matter"
Princeton University Press, 1985
"Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie"
Piper Taschenbuch, 9,95€

Ein mögliches „larger picture underneath“

- Kopplungsparameter α nähern sich bei hoher Energie an
  → alle Kräfte haben ähnliche Stärke
- Zeichen für einen gemeinsamen Ursprung aller Wechselwirkungen?



http://sites.uci.edu/energyobserver/2012/12/02/update-on-some-higgs-blog-entries/

- Klappt sogar noch besser mit Supersymmetrie!

Was sagen die Symmetrien vorher?

- Aus Axiomen des Standardmodells
  - 3 Symmetrien mit je 1 freien Kopplungsparameter α
  - Spontane Brechung einer Symmetrie durch das BEHiggs-Feld (mind. 15, und falls Neutrinos ihre Masse (auch) über dass BEH-Feld bekommen 22-24 weitere freie Parameter)

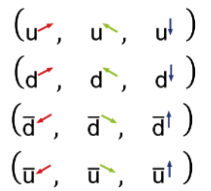
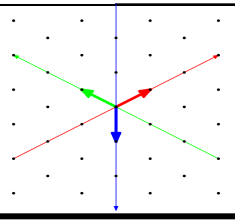
- ergibt sich theoretische Vorhersagekraft für
  - Anzahl und *alle* Eigenschaften der Botenteilchen (daher konnte Glashow das Z^0 voraussagen)
  - Erlaubte und verbotene Prozesse mit Wahrscheinlichkeiten und Winkelverteilungen
  - Energie (Abstands-)abhängigkeit der Kopplungsparameter α

- wobei als rein experimenteller Input nicht vorhersagbar sind
  - freie Parameter
  - Objekte (Materieteilchen-Multipletts) auf die die Symmetrien wirken

ANHANG

Übersicht Wechselwirkungen und Eichbosonen

❖ Eichsymmetrien mit masselosen Eichbosonen (ungebrochen)

Eichsymmetrie	QED $U(1)_Z$	QCD $SU(3)_c$
	abelsch	nicht- abelsch
D_μ	$\partial_\mu + \imath e \hat{Z} A_\mu$	$\partial_\mu + \imath g_s C_a G_{a\mu}$
Kopplung	g_{em}=0.3 (= e nat. Einh.)	g_s = 1.2
Generatoren	1: $\hat{Z}$ (1x1)	8 : C_a (3x3)
Eichfelder	A_μ	$G_{a\mu}$, a = 1,…,8
Eichbosonen	Photon γ	Gluonen $g_{1…8}$
Wirkt auf Teilchenmultiplett	(e),(μ),(τ), (u),(c),(t), (d),(s),(b)	
Ladungen	Elektrische Ladung -1, -1, -1,+⅔, -⅓, -⅓,…	Starke Farb-ladung 

- Schwache Eichsymmetrien: ungebrochen nur bis ~10^{-10} s nach dem Urknall

Eichsymmetrie	$U(1)_Y$	("QFD") $SU(2)_I$
	abelsch	nicht- abelsch
D_μ	$\partial_\mu + \imath g_Y \hat{Y}^W B_\mu$	$\partial_\mu + \imath g_W I_i W_{i\mu}$
Kopplung	$g_Y = 0.36$	$g_W = 0.63$
Generatoren	1: $\hat{Y}^W$ (1x1)	3 : I_i (2x2)
Eichfelder	B_μ	$W_{i\mu}$, $i = 1,\ldots,3$
Eichbosonen	B-Boson	Weakonen W^+, W^-, W_3^0
Wirkt auf Teilchenmultiplett	(e),(μ),(τ),(ν_e)(ν_μ)(ν_τ), (u),(c),(t),(d),(s),(b)	$\begin{pmatrix}\nu_e\\e^-\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_\mu\\\mu^-\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_\tau\\\tau^-\end{pmatrix}\ \begin{pmatrix}u\\d'\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c\\s'\end{pmatrix}\begin{pmatrix}t\\b'\end{pmatrix}$
Ladungen	Schwache Hyperladung $Y^W = Z - I_3$	Schwache Isospin-Ladung $I_3 = \begin{pmatrix}+1/2\\-1/2\end{pmatrix}$

- nach Symmetriebrechung im Brout-Englert-Higgs Feld B^0 und W^0 vermischt zu Z^0 und γ in "elektroschwacher Wechselwirkung

Suche nach Neuer Physik

- **Theoretiker** schlagen neue(n) Term(e) in $\mathcal{L}$ vor
  - (Meist) motiviert von neuen Ideen / Erklärungen
- **Experimentalphysiker** simulieren Effekt in Detektor+ Daten
  - suchen danach, bzw schließen diesen Term aus

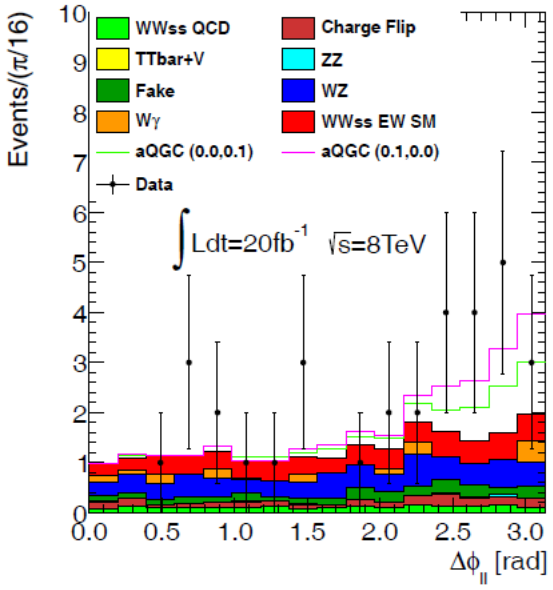
- Beispiel Diplomarbeit in Dresden 2013
  Constanze Hasterok, Optimization of the Search for Contributions of Anomalous Quartic Gauge Couplings to Vector Boson Scattering at the Large Hadron Collider
  https://cds.cern.ch/record/1647794/files/CERN-THESIS-2013-273.pdf
  - Neuer „aQGC" Beitrag zum WWWW-vertex

$$\mathscr{L}_1 = \alpha_1 g g' \,\mathrm{tr}[\Sigma \mathbf{B}_{\mu\nu} \Sigma^\dagger \mathbf{W}^{\mu\nu}], \quad (2.41)$$

$$\mathscr{L}_2 = i\alpha_2 g' \,\mathrm{tr}\left[\Sigma \mathbf{B}_{\mu\nu} \Sigma^\dagger [V^\mu, V^\nu]\right], \quad (2.42)$$

$$\mathscr{L}_3 = i\alpha_3 g \,\mathrm{tr}\left[\mathbf{W}_{\mu\nu} [V^\mu, V^\nu]\right], \quad (2.43)$$

$$\mathscr{L}_4 = \alpha_4 \,(\mathrm{tr}[V_\mu V_\nu])^2, \quad \text{and} \quad (2.44)$$

$$\mathscr{L}_5 = \alpha_5 \,(\mathrm{tr}[V_\mu V^\mu])^2. \quad (2.45)$$

In this work, anomalous coupling parameters shall be constrained in the measurement of the scattering of two W bosons with equal electric charge. $\mathscr{L}_1$ and $\mathscr{L}_2$ modify only triple gauge couplings. Hence, they are not relevant for our process of interest. $\mathscr{L}_3$ modifies triple and quartic gauge couplings and $\mathscr{L}_4$ and $\mathscr{L}_5$ modify only quartic gauge couplings [29].