



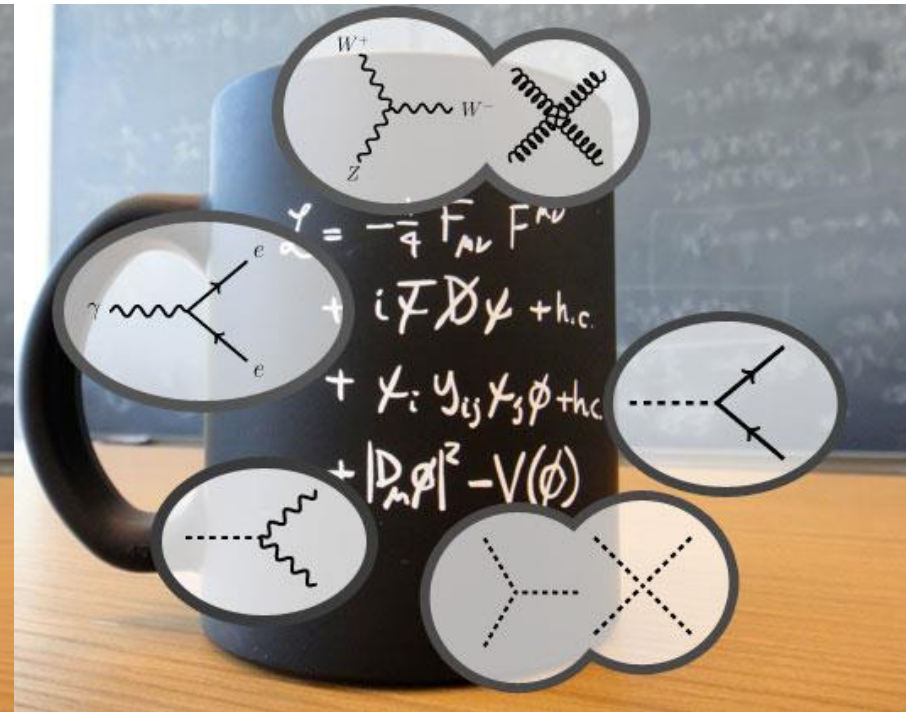
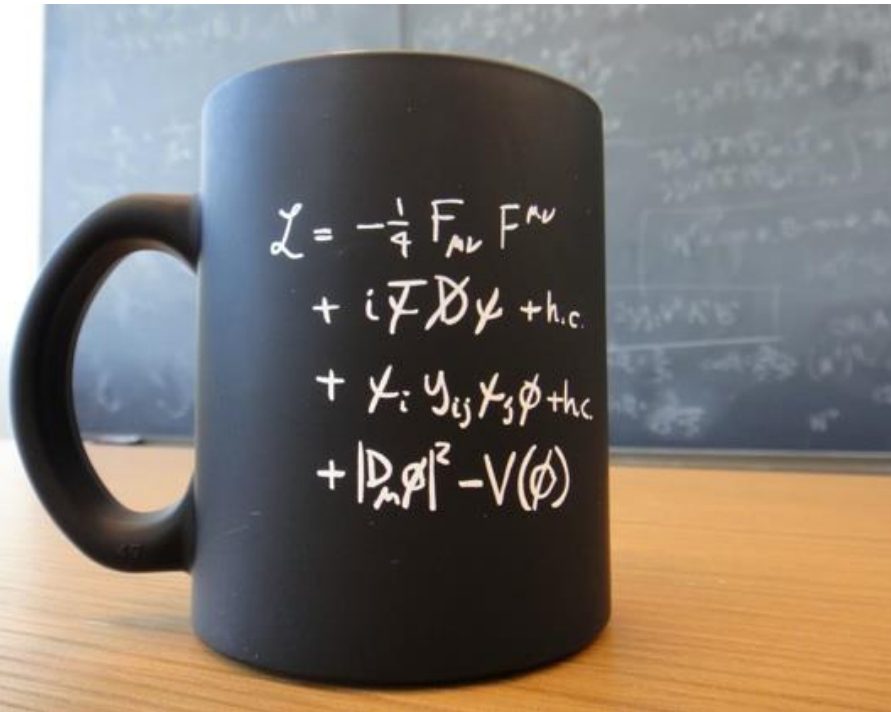
# Die Theorie hinter dem Standardmodell: Symmetrien & Lagrangedichten

Michael Kobel  
Technische Universität Dresden

Netzwerk Teilchenwelt Workshop für Jugendliche  
CERN 19.06.2015



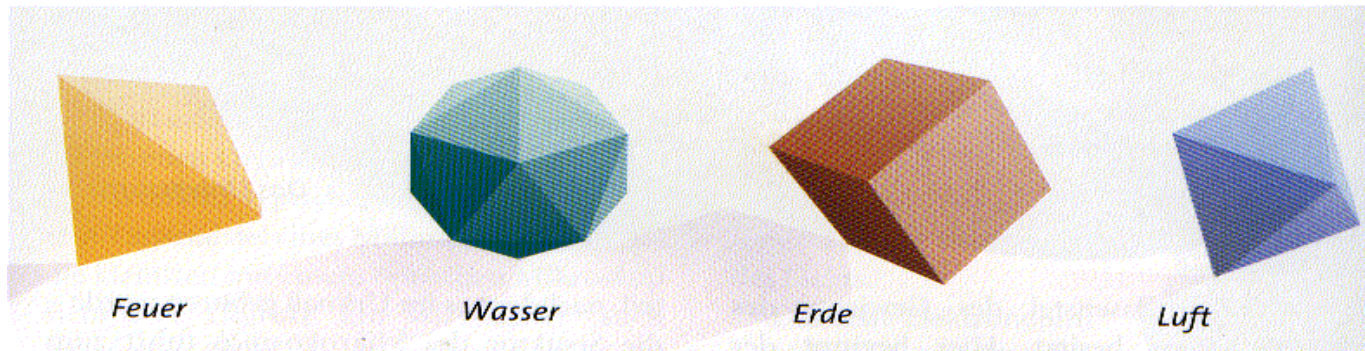
<http://www.quantumdiaries.org/2011/06/26/cern-mug-summarizes-standard-model-but-is-off-by-a-factor-of-2/>



- 1. THEORIEN FRÜHER UND HEUTE**
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Ladungen
5. Symmetrien
6. Vorhersagen und Bedeutung

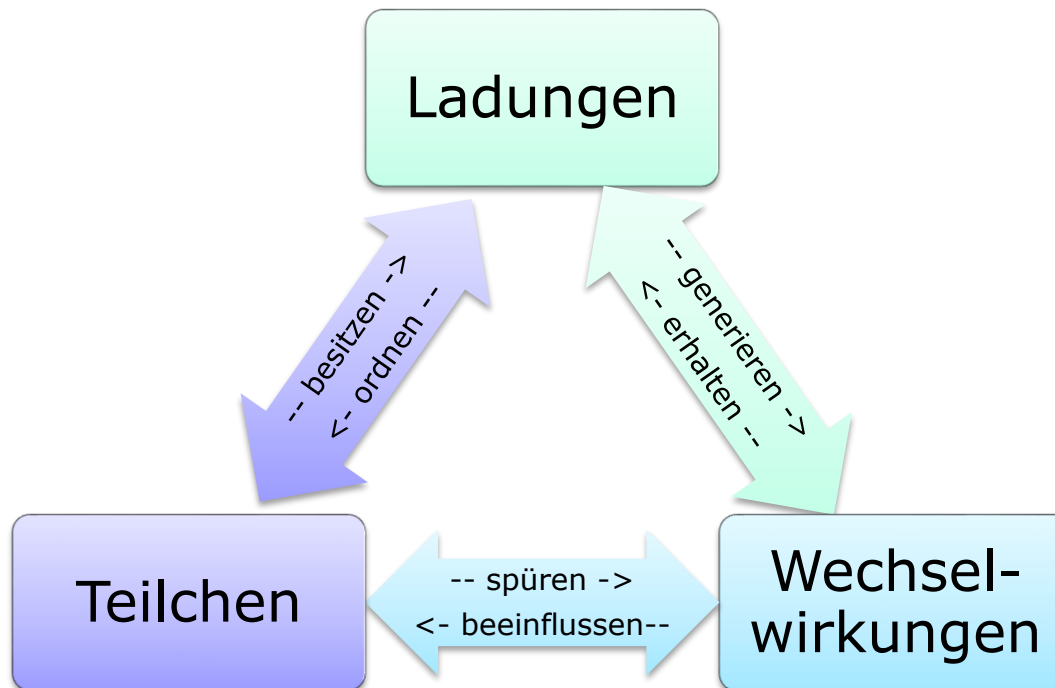
“Standardmodell“ der griechischen Philosophie vor 2500 Jahren

- ❖ **Elemente und Kräfte:** 500-430 v.Chr. Empedokles
  - **Vier Elemente:** Feuer, Wasser, Erde, Luft
  - **Zwei Urkräfte:** Liebe , Haß  $\Leftrightarrow$  Mischung , Trennung
- ❖ **Symmetrien:** 427-347 v.Chr. Platon
  - **Räumliche Symmetrien:** Schönheit der Körper



- ❖ **Kleinste Bausteine:** 460-371 v.Chr. Demokrit
  - **Atome:** verschiedene Formen und Gewichte
  - **Leere:** Verbindung und Bewegung im Nichts

- ❖ **Urkräfte** (heute: enthalten in Wechselwirkungen (WW))
- ❖ **Kleinste Bausteine** (heute: unteilbare Elementarteilchen)
- ❖ **Räumliche Symmetrien** (heute: Ladungssymmetrien)
- ❖ **Neu: verbindendes Konzept: Ladungen für jede WW**
  - → Ladungen sind \*das\* Grundkonzept des Standardmodells (SM) !



## ❖ Pierers Universallexikon:

- **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier ~~gleichzeitig vorhandener~~ Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.



## ❖ In der Teilchenphysik sogar mehr als das

- Vereinigen die Phänomene „Entstehung“, „Kraft“ u. „Zerfall“
- 3 dieser Wechselwirkungen können im Standardmodell **über Symmetrien begründet** werden
- Das Standardmodell ist zuallererst eine **Theorie der Wechselwirkungen** !

			
	<b>Starke Wechselwirkung</b>	<b>Elektromagnetische Wechselwirkung</b>	<b>Schwache Wechselwirkung</b>
<b>Betroffene Materie-Teilchen</b>	Quarks	Quarks und elektrisch geladene Leptonen	Alle
<b>Zugehörige Ladung</b>	starke Ladung (Farbladung)	elektrische Ladung	schwache Ladung
<b>Austauschteilchen</b>	Gluonen	Photon	$W^+, W^-, Z^0$
<b>Wirkungen</b>	Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen	Licht, Strom, Magnetismus, Zusammenhalt von Atomen...	Betazerfall, Kernfusion...
<b>Reichweite</b>	$10^{-15}$ m (Protonendurchmesser)	unbegrenzt	$10^{-18}$ m (1/1000 Protonendurchmesser)

Die vierte Wechselwirkung ist die Gravitation. Sie ist mit Abstand die schwächste Wechselwirkung und spielt für Elementarteilchen keine Rolle.



<http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/>

❖ Basierend auf mathematischem Noether-Theorem (1918)



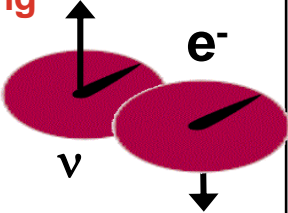
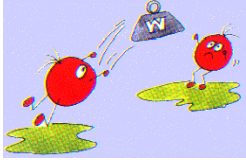
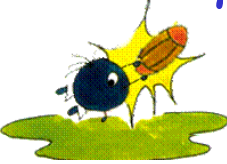
**Symmetrie**



**Erhaltungsgröße: Ladung**



- Jede Wechselwirkung hat eigene **Botenteilchen**
- **Botenteilchen koppeln** nur an Teilchen mit entsprechender **Ladung**

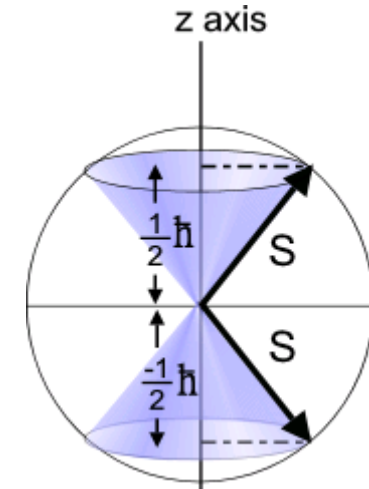
	<b>Ladung der Materieteilchen</b>	<b>Botenteilchen</b>
<b>Starke Wechselwirkung</b>	<p><b>Starke „Farb“-Ladung</b> „Rot“, „Blau“, „Grün“</p> 	<p><b>Gluonen g</b></p> 
<b>Schwache Wechselwirkung</b>	<p><b>Schwache „Isospin“-Ladung</b></p> $I_3^W = \begin{pmatrix} +1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$ 	<p><b>„Weakonen“ (W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>, Z)</b></p> 
<b>Elektromagnetismus</b>	<p><b>Elektrische Ladung</b></p> $Q = -1, +2/3, -1/3, \dots$	<p><b>Photonen <math>\gamma</math></b></p> 
<b>Gravitation</b>	<p><b>über Supersymmetrie???</b></p>	<p><b>Gravitonen ?</b></p>



❖ Zugrundeliegende Symmetrie  
genau dieselbe wie bei Spin

❖ 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 nur:

- Gesamter Betrag
- eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
- sie beiden anderen sind „unscharf“

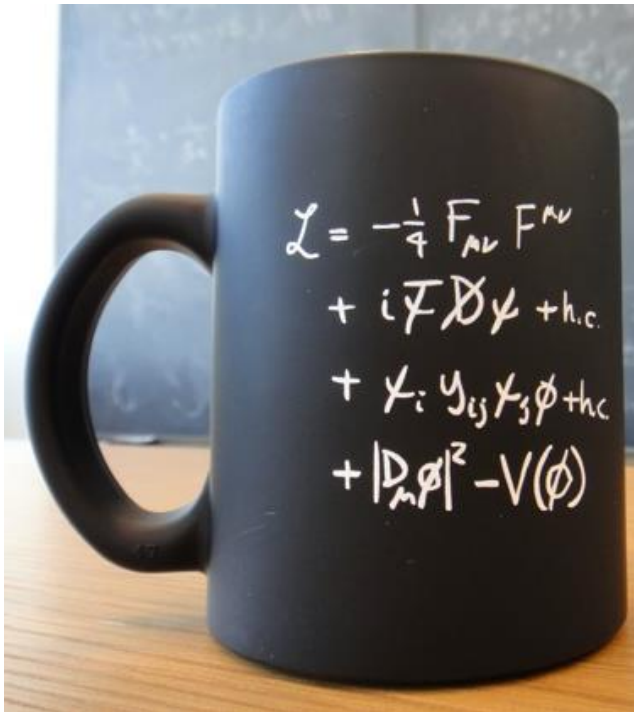
❖ Darstellung in Multipletts in  $I_3^W$

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

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

1. Theorien früher und heute
2. **LAGRANGEFUNKTION IN KLASSISCHER MECHANIK**
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Ladungen
5. Symmetrien
6. Vorhersagen und Bedeutung

### ❖ Hintergrund der heutigen „Weltformel“ der Teilchenphysik



$$L = T - V$$

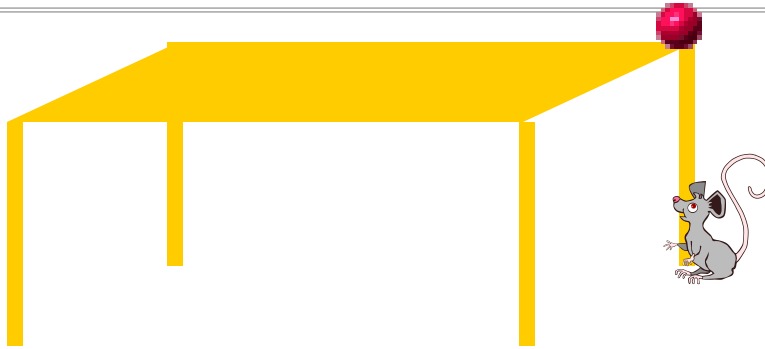
- ❖  $L$ : Lagrange Funktion  
(Joseph L. Lagrange, 1736-1814, Mathematiker)
- ❖  $T$ : Bewegungsenergie
- ❖  $V$ : Potentielle Energie (z.B. Lageenergie)
- ❖ Vorgehen:
  - Finde  $T$  und  $V$  für das gegebene Problem
  - Anwenden von Mathematik
  - Erhalte Bewegungsgleichungen und Bewegungen

- ❖ Grundprinzip von Maureau de Maupertuis (1750)  
(Prinzip der minimalen Wirkung)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Pierre-Louis\\_Moreau\\_de\\_Maupertuis](https://de.wikipedia.org/wiki/Pierre-Louis_Moreau_de_Maupertuis)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Hamiltonsches\\_Prinzip](https://de.wikipedia.org/wiki/Hamiltonsches_Prinzip)

*Vereinfacht gesagt:*

*Jede Bewegung erfolgt so,  
dass der Mittelwert von  $L=T-V$   
so klein (negativ) wie möglich ist*

- ❖ Handwerkszeug: Mathematik von 1744  
(Euler, Lagrange: Variationsrechnung)



$T = 0, V$  groß  
 $\Rightarrow T-V$  sehr negativ  
**GUT!**



$T$  groß,  $V = 0$   
 $\Rightarrow T-V$  sehr positiv  
**SCHLECHT!**



Mittelwert:  
minimales  $T-V \Rightarrow$   
oben lange (langsam)  
unten kurz (schnell)

❖ Wenn kin. Energie  $T$  und potenzielle Energie  $V$  bekannt sind:

- Bilde  $L=T-V$

- Definiere die „Wirkung“  $S = \int_{t_A}^{t_E} L(x(t), v(t)) dt$

- Suche  $x(t)$  und  $v(t) = \frac{d}{dt} x(t)$   
so dass Wirkung  $S$  minimal (= möglichst negativ) wird  
(Bemerkung:  $S$  minimal, wenn zeitlicher Mittelwert von  $L$  minimal)

- Methode: Variationsrechnung (variieren  $x(t)$  solange, bis es passt)  
→ erhalte so Bahn und die Bahngeschwindigkeit

- Ergibt **immer** die Euler-Lagrange Gleichungen der klass. Mechanik  
(Uni-Studium Physik, 2. Semester)

$$\frac{dL}{dx} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{dv} = 0$$

- Man verwendet am besten gleich diese → Bewegungsgleichung für  $x(t)$
- Beispiel freier Fall

$$V = mgx$$

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

**Jede Bewegung erfolgt so,  
dass das Zeitintegral über  $L=T-V$  („Wirkung“)  
so klein wie möglich ist**

$$L=T-V = \frac{1}{2} mv^2 - mgx$$

nutze: Euler-Lagrange Gleichung

$$\frac{dL}{dx} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{dv} = 0$$

$$mg + \frac{d}{dt} mv = 0$$

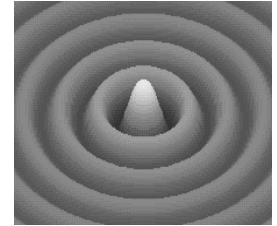
$$F = ma = -mg$$

erhalte: Newtonsche Bewegungsgleichung



1. Theorien früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
- 3. LAGRANGEDICHTEN**
4. Ladungen
5. Symmetrien
6. Vorhersagen und Bedeutung

#### ❖ Quantenmechanik verlangt Ersetzungen:



- Keine Bahnen mehr:  $x(t) \rightarrow$  Wellenfunktionen  $\psi(t, x, y, z)$
- Zeitliche **und** örtliche Variationen:  $\frac{d}{dt} \rightarrow \partial_\mu := \left( \frac{1}{c} \frac{d}{dt}, \frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz} \right)$
- Ersetze Zeitableitung  $v(t) = \frac{d}{dt} x(t) \rightarrow$  Raum+Zeitableitung  $\partial_\mu \psi(t, x, y, z)$

#### ❖ Lagrangefunktion L (Energie) $\rightarrow$ Lagrangedichte $\mathcal{L}$ (Energiedichte)

- Statt  $S = \int_{t_A}^{t_E} L(x(t), v(t)) dt \rightarrow$  Wirkung  $S = \int \iiint_{x, y, z, t} \mathcal{L}(\psi(t, x, y, z), \partial_\mu \psi(t, x, y, z)) dx dy dz dt$
- Lagrangedichte wird weiterhin gebildet als  $\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V}$
- Aber:  $\mathcal{T}$ : kin. Energiedichte,  $\mathcal{V}$ : potenzielle Energiedichte sind nur für freie Teilchen (ohne WW) aus Quantenfeldtheorie bekannt
- **\*Die\* theoretische Herausforderung: finde allgemein generelles  $\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V}$**

$$\mathcal{V} = m\bar{\psi}\psi$$

$$\mathcal{T} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi$$

Euler-Lagrange Variationsrechnung:  
*Jede Bewegung erfolgt so,  
dass das Raum-Zeitintegral über  $\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V}$   
so klein wie möglich ist*

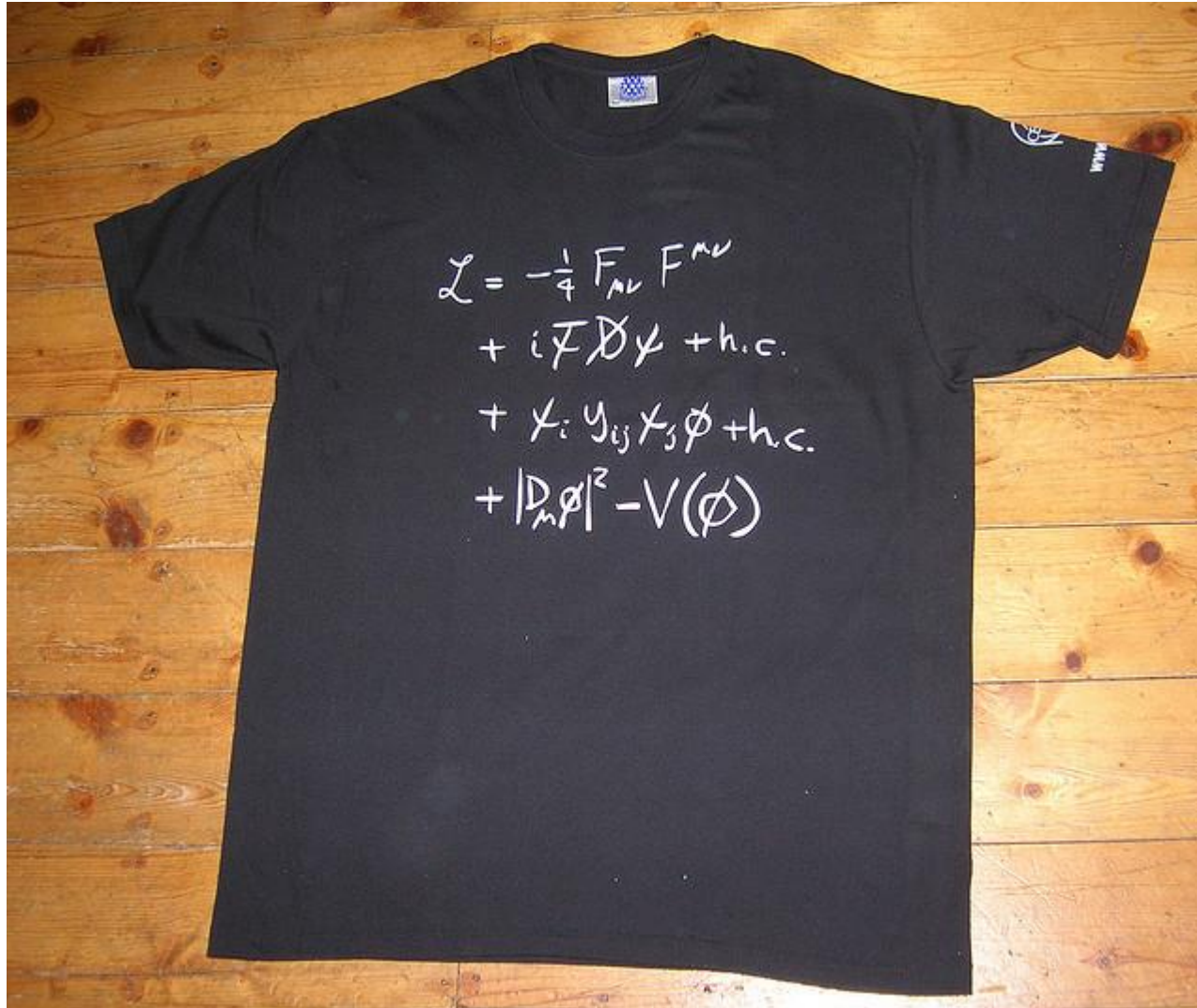
(Uni-Studium Physik, 6. Semester)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Dirac-Matrizen>

Dirac Gleichung

$$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0$$

(entspricht dem Newtonschen  $F=ma$ )



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



1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichten
- 4. LADUNGEN**
5. Symmetrien
6. Das Brout-Englert-Higgs Feld als Supraleiter

Ladungen sind *charakteristische Eigenschaften von Teilchen*

- ❖ Ladungen sind *Additiv*  
Ladung(A+B) = Ladung(A) + Ladung(B)  
("+" notfalls vektoriell)
- ❖ Ladungen kommen nur  
in Vielfachen einer *kleinsten Ladung* vor
- ❖ Ladung ist *erhalten*,  
d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren  
(Ausnahme: schwache Ladung im „See“ des BEHiggs-felds)
- ❖ Das Konzept der Ladung lässt sich völlig analog auf  
*alle drei für Teilchen relevante Wechselwirkungen* anwenden

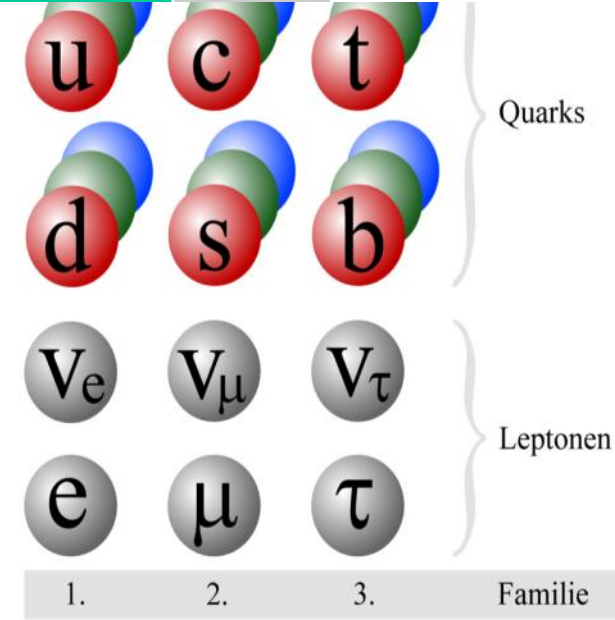
## ❖ Ladungen *ordnen Teilchen* in „Multipletts“

- Warum genau diese Anordnung im „Periodensystem der Teilchen“? → immernoch unverständlich!

Elektrische Ladung $Q$	Schwache Ladung $I_3^W$	Starke Ladung	Blau Grün Rot	
$+2/3$	$+1/2$	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>
$-1/3$	$-1/2$	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>
$0$	$+1/2$	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
$-1$	$-1/2$	<b>e</b>	$\mu$	$\tau$
		1.	2.	3.
		Familie		

Quarks

Leptonen



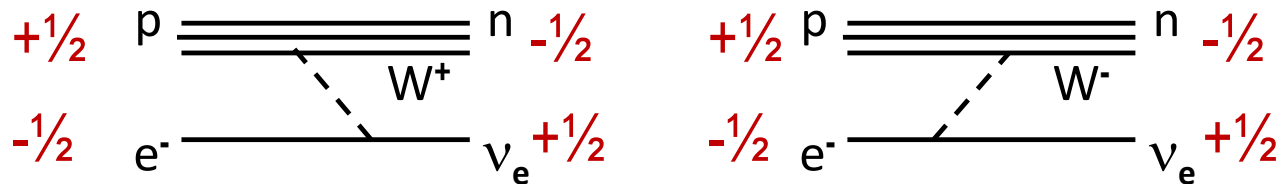
[www.teilchenphysik.de/teilchenphysik/elementarteilchen](http://www.teilchenphysik.de/teilchenphysik/elementarteilchen)

- ❖ Ladungen *erlauben/verbieten Prozesse* (Ladungserhaltung!)
- ❖ Ladungen *generieren Symmetrien*

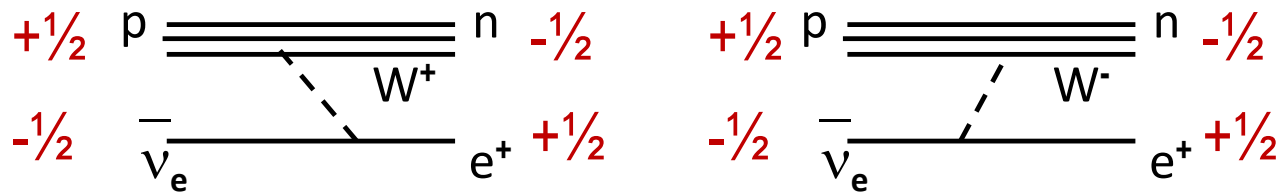
# Ladungserhaltung

- Erhaltung der schwachen Ladung  $I_3^W$  bei wichtigen Prozessen: (der Vektorcharakter von  $I$  hier nicht wichtig, es genügt  $I_3^W$ )

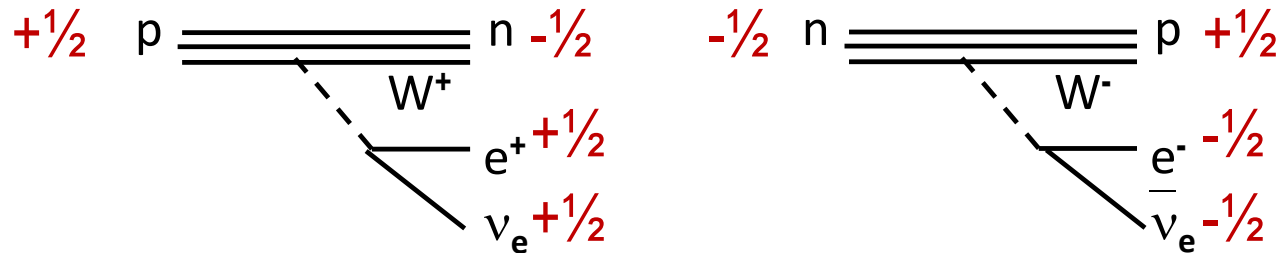
- K-Elektron Einfang in Atomen



- Erster Nachweis von Antineutrinos aus Kernkraftwerken



- $\beta^+$  und  $\beta^-$  - Umwandlungen von Kernen





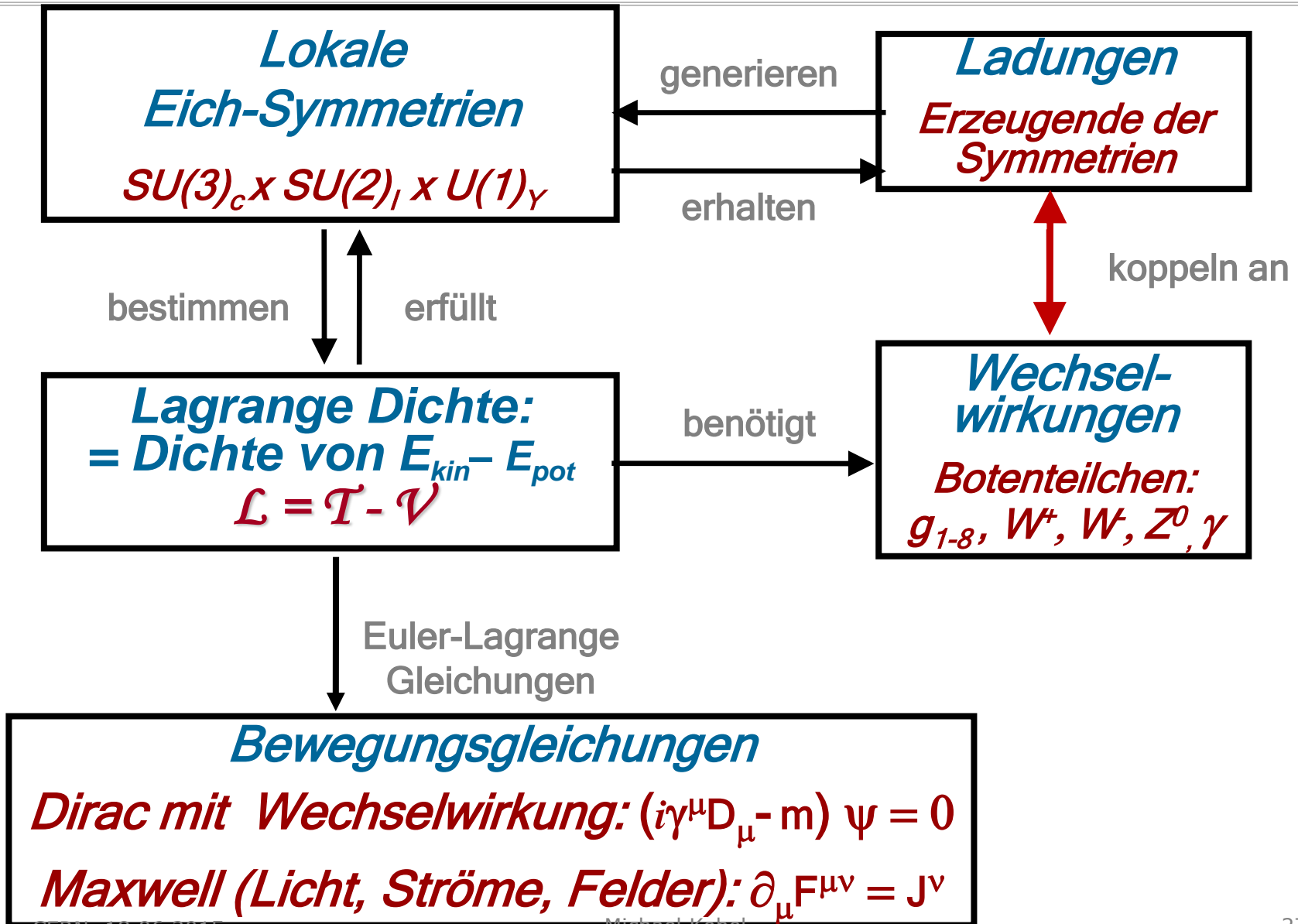
1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Ladungen
- 5. SYMMETRIEN**
6. Vorhersagen und Bedeutung

## 5. Mathematische Symmetrien (Hermann Weyl)

Werkzeugkiste: Transformationsgruppen

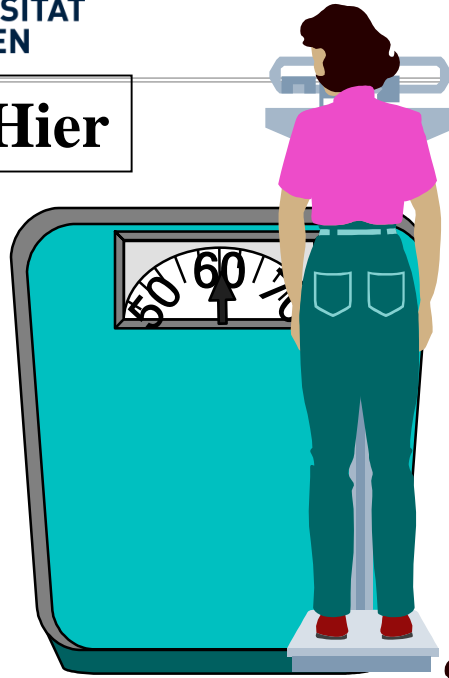


R.P. Feynman: Ein **Objekt** heißt *symmetrisch*, wenn man mit ihm **etwas anstellen** kann, **ohne** es am Ende, wenn man fertig ist mit der Prozedur, **geändert** zu haben.

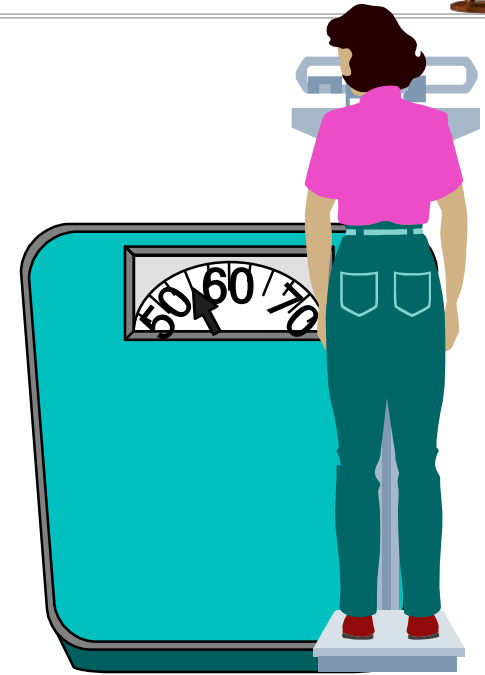


# Lokale Umeichungen auf einer Waage

Hier

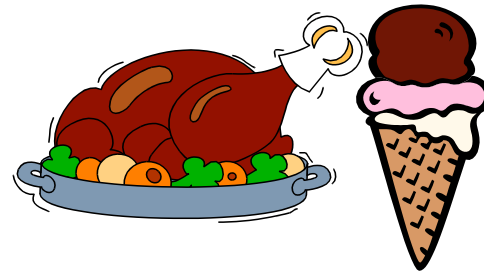
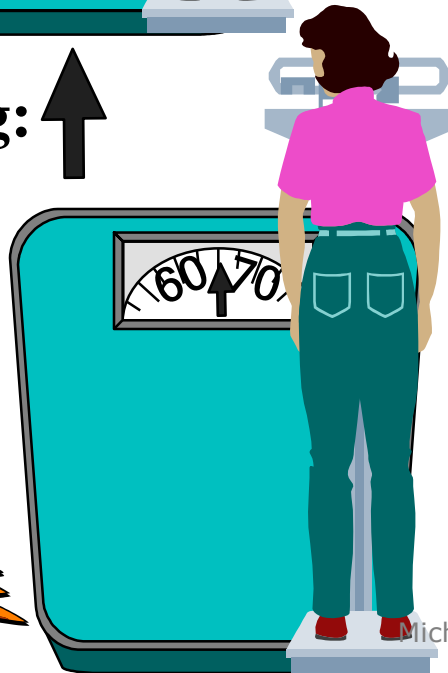


Dort

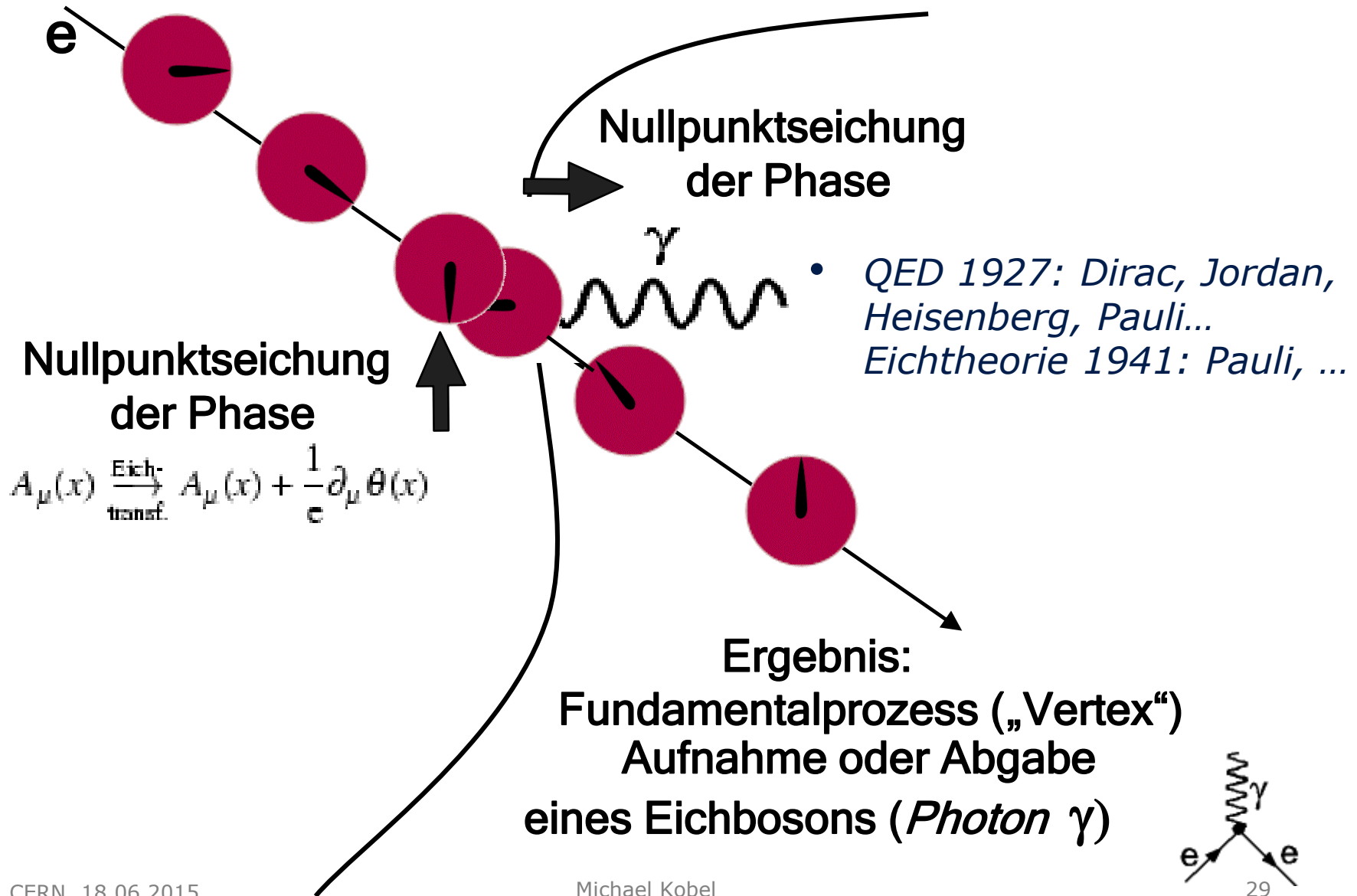


Messung:

Messung:

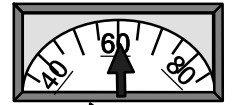
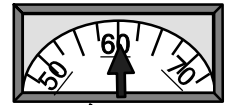


- ❖ Lokale Eichsymmetrie erfordert
  - Absorption oder Emission von "Eich-Teilchen"





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



- ❖ *Sensitivität* auf Umeichungen

- Bestimmt durch *Meßskala (Ladung Q)*

- ❖ Wahrscheinlichkeit der *Nahrungsänderung (Wechselwirkung)*

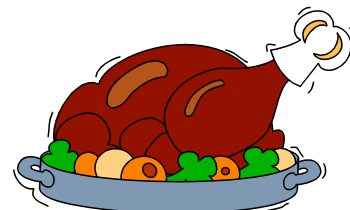
- *Häufigkeit der Gewichtskontrolle (Kopplung  $g_e = e$ )*

- ❖ Zunahme oder Abnahme von *Gewicht (Phase)*

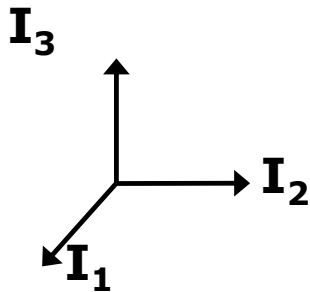
- in Form von *Nahrung (Eichbosonen: Photonen)*

- ❖ Menge der *Zu- und Abnahme (QM-Amplitude)*

- *Produkt von Sensitivität \* Häufigkeit (Produkt  $Q * e$ )*



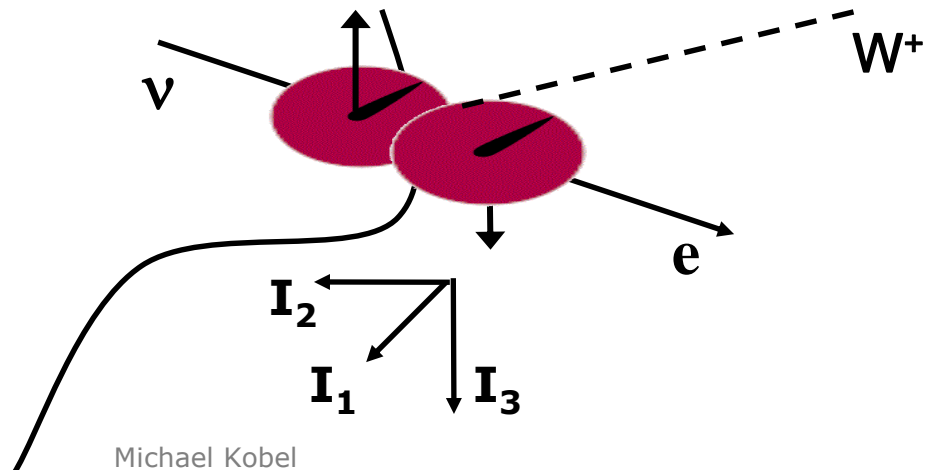
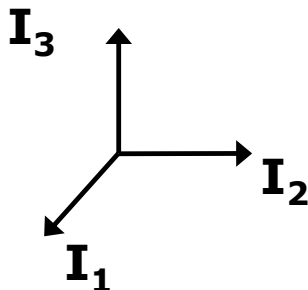
❖ 1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung



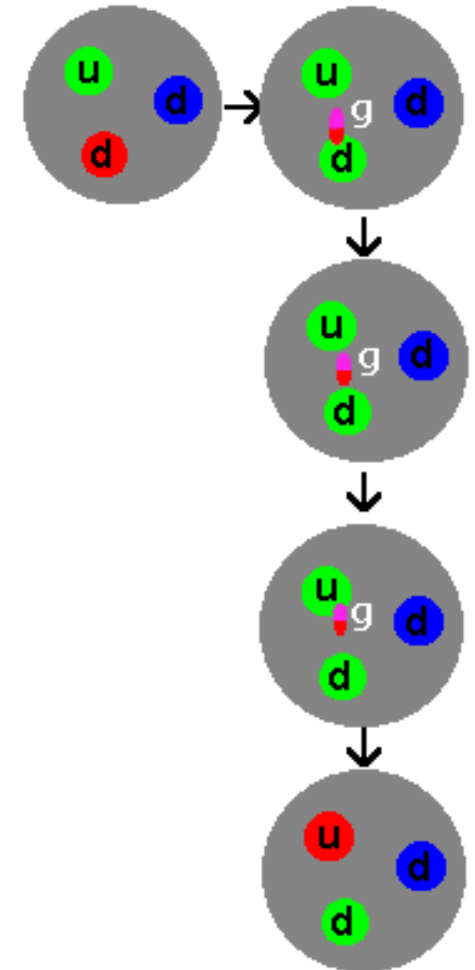
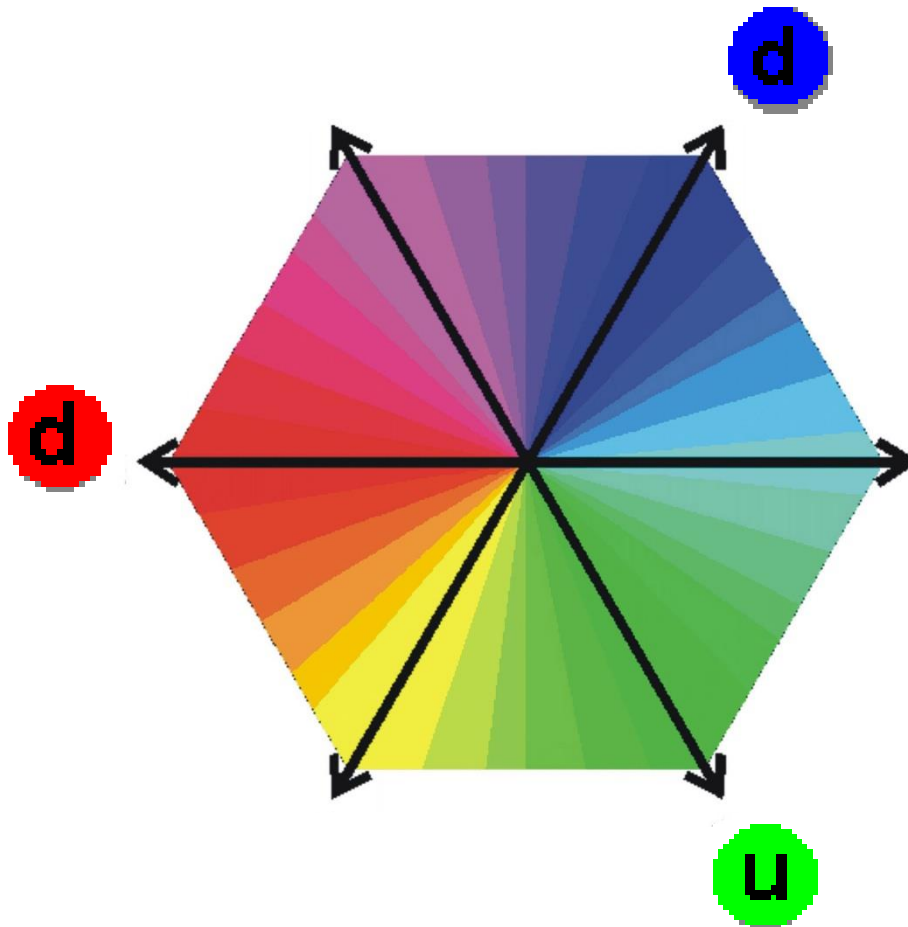
Neutrino:  $I_3 = 1/2$       Elektron:  $I_3 = -1/2$   
 Up-Quark:  $I_3 = 1/2$     Down-Quark:  $I_3 = -1/2$

Idee:  $(\nu, e)$  und  $(u, d)$  unterscheiden sich jeweils *nur* durch die „Richtung“ des schwachen Ladungsvektors  $I^W$

❖ lokale Umeichung

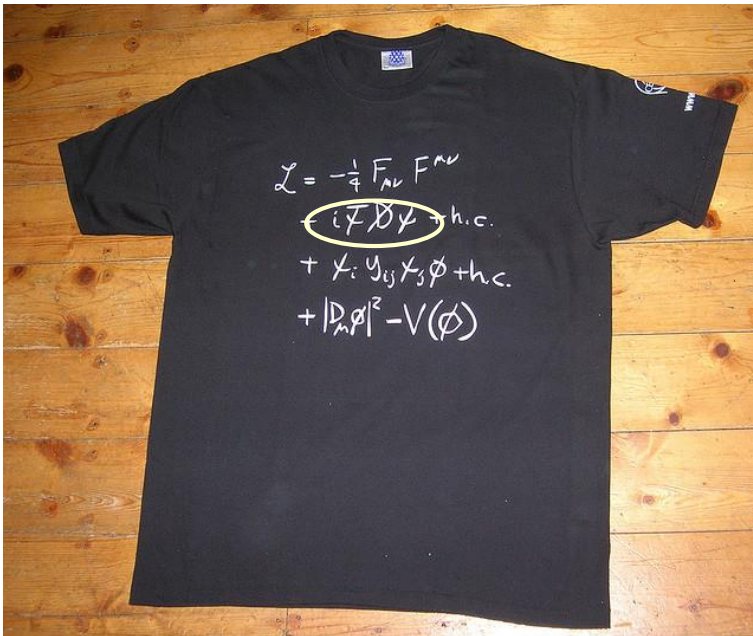


- ❖ 1973: Gross, Politzer, Wilczek, Nambu, Fritzsche...  
starke WW durch Umeichung der Farbladung

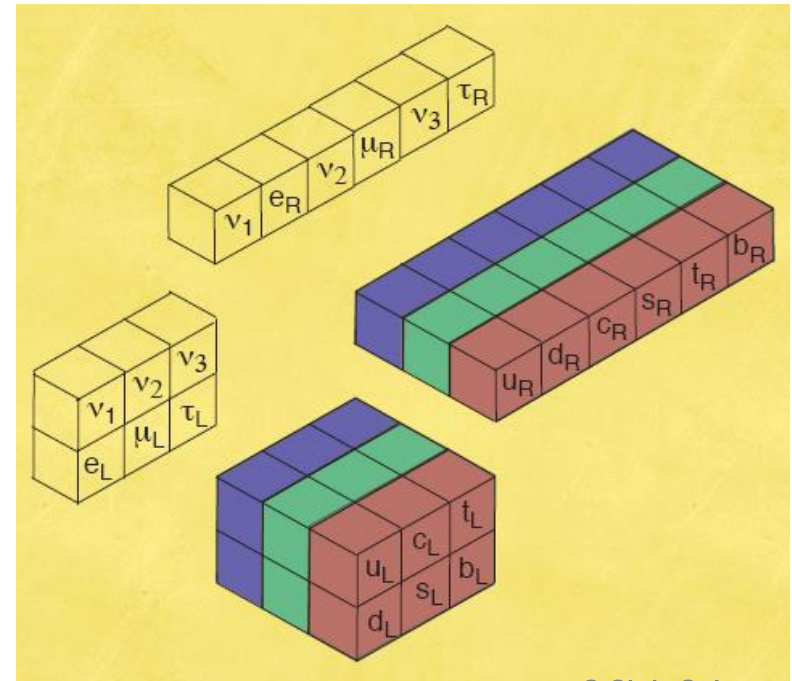




- ❖ 3 Typen von **Ladungen** erzeugen 3 Symmetrie-Gruppen:
  - $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
- ❖ Lokale Eichinvarianz erfordert Vorhandensein von **Wechselwirkung** in  $\mathcal{L}$  und sagt alle Eigenschaften vollständig vorher



- ❖ Fundamentale Fermionen erscheinen in bestimmten **Multipletts** bzgl. der 3 Symmetrie-Gruppen



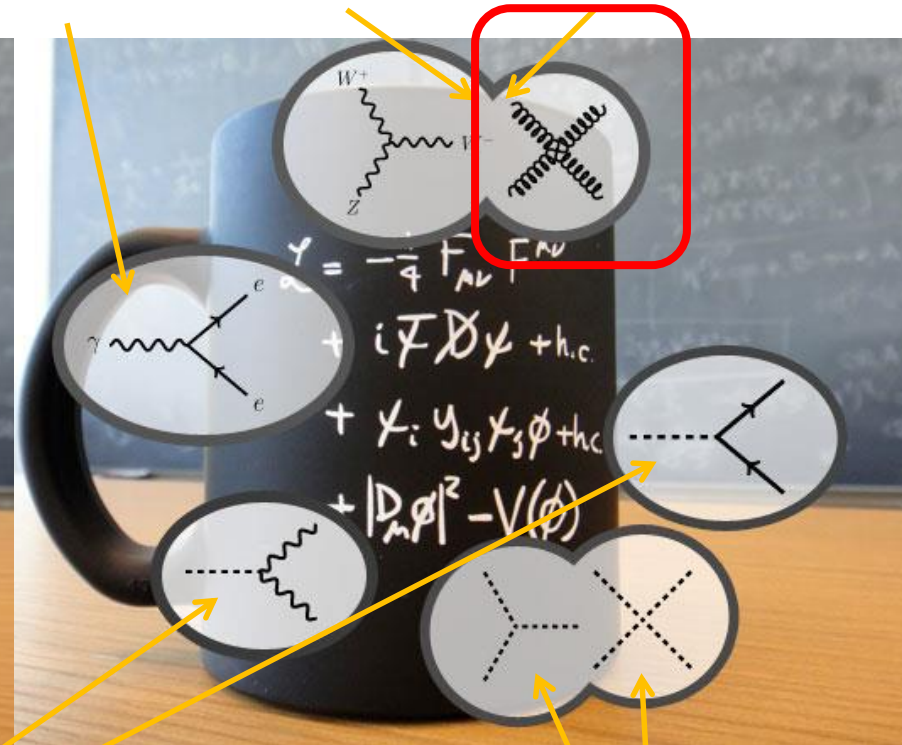
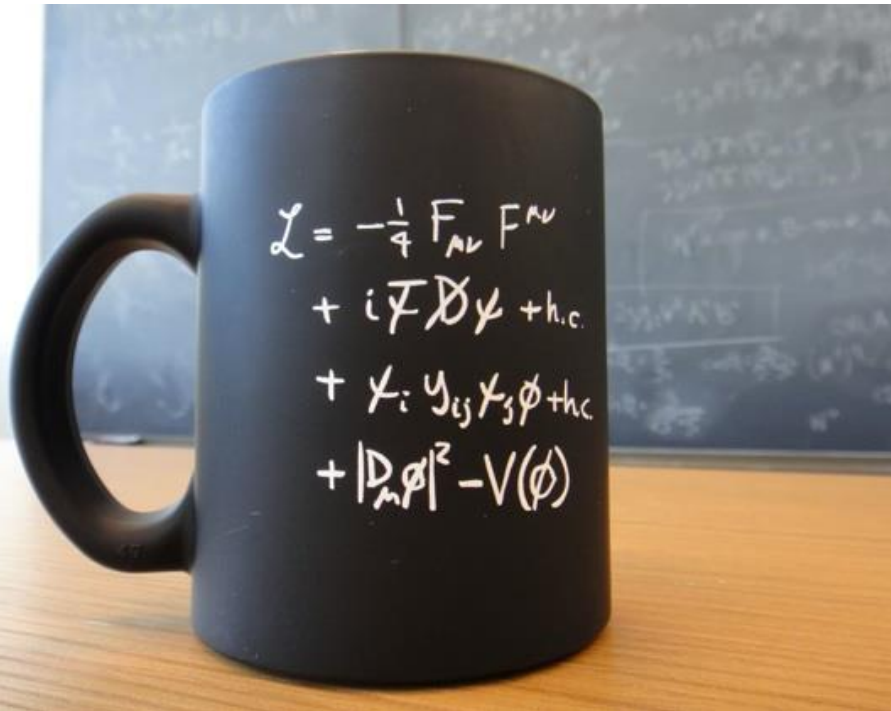
© Chris Quigg

- ❖ Diese definieren die Werte ihre Ladung und die Empfindlichkeit gegenüber Wechselwirkungen (je n. Chiralität L,R)

Wechselwirkungen zwischen  
**Boten und Bausteinen**

**Botenteilchen unter sich:**

→ keine freien Quarks, emag Wellen, ...



<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

1. Theorien von früher und heute
2. Lagrangefunktion in klassischer Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Ladungen
5. Symmetrien
- 6. VORHERSAGEN 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 !**

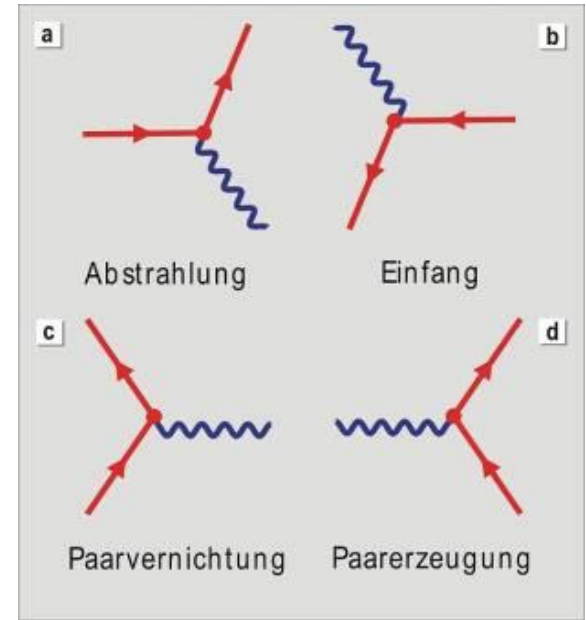
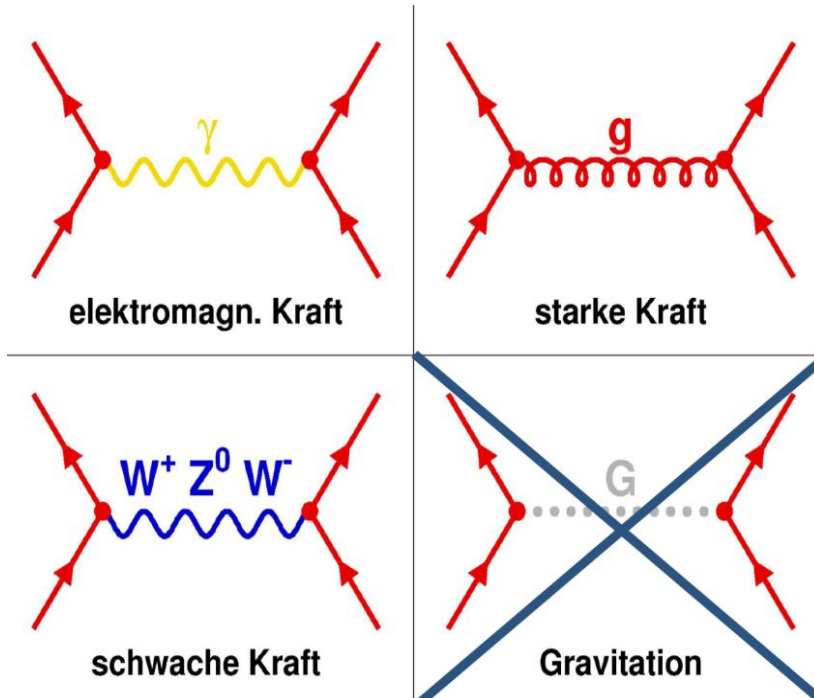
### ❖ Bedeutung der Terme in der Lagrangedichte:

- 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

# Fundamentale Vertices

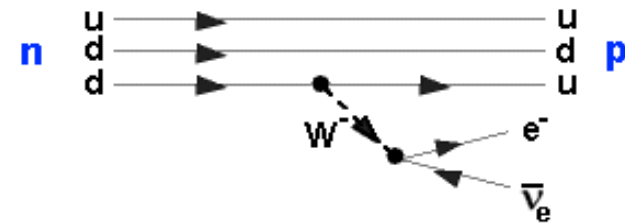
## ► Theorievorhersage:

- **Eindeutiges** Set von fundamentalen "Vertices" für jede Wechselwirkung
- Bilden Grundlage von Feynman-Diagrammen zur Beschreibung von Reaktionen, die auf Abständen  $\ll$  fm ablaufen
- **Alle Prozesse sind Kombination** solch fundamentaler Vertices



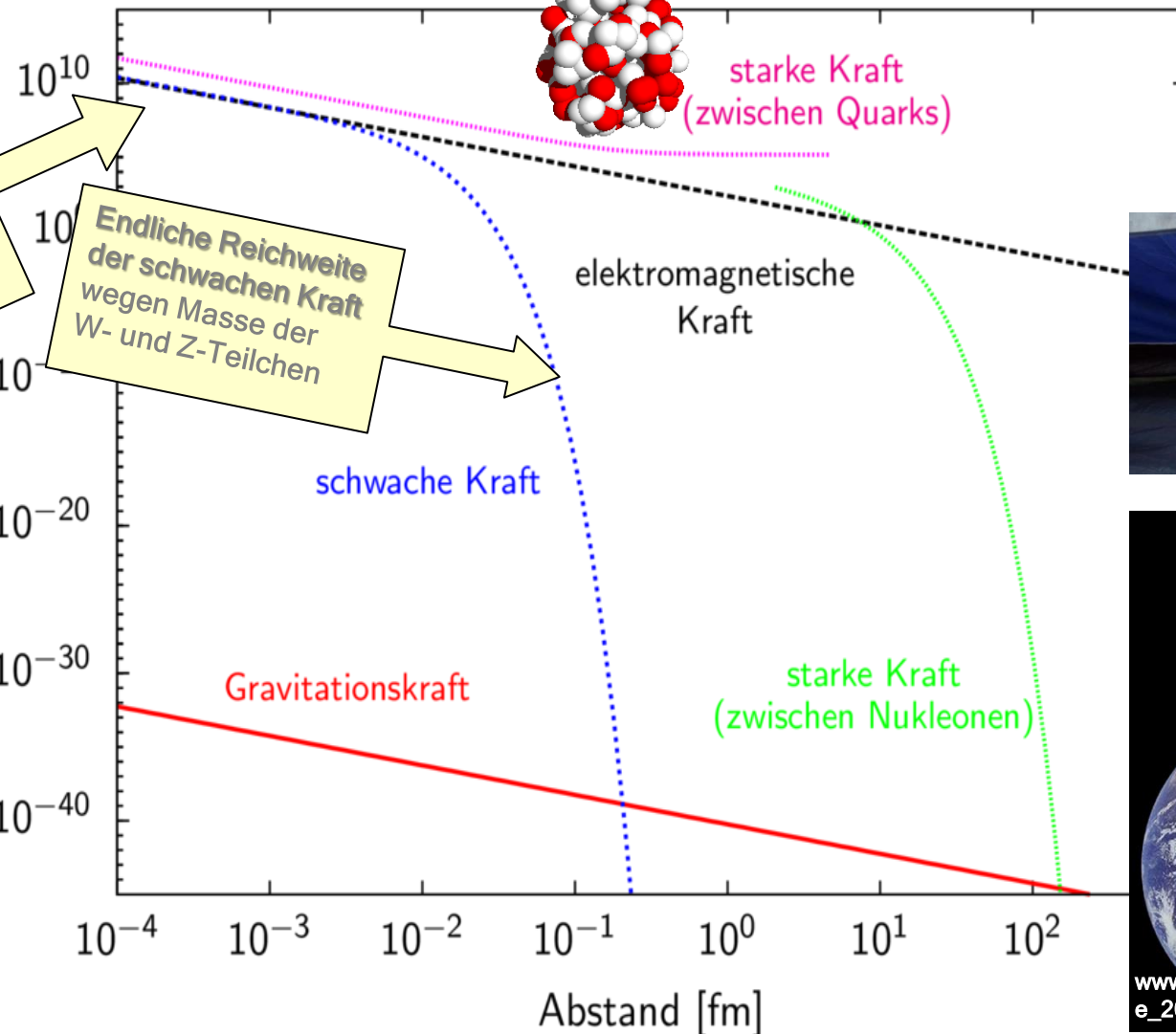
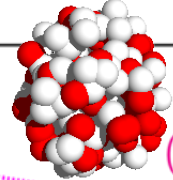
Zeit →

## • z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



Anm: Pfeilrichtung  $\leftarrow$  symbolisiert Antiteilchen  
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts

## Kernphysik



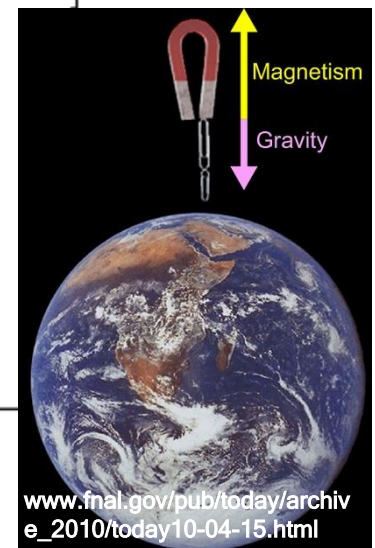
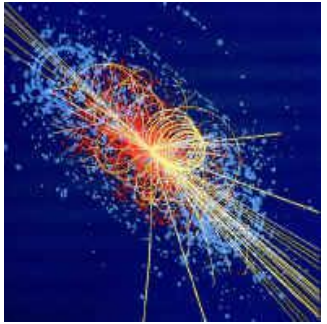
**Stärke der Kräfte**  
Nähern sich bei noch kürzeren Abständen weiter an

**Endliche Reichweite der schwachen Kraft**  
wegen Masse der W- und Z-Teilchen

„Wir“



## Teilchenphysik



[www.fnal.gov/pub/today/archiv\\_e\\_2010/today10-04-15.html](http://www.fnal.gov/pub/today/archiv_e_2010/today10-04-15.html)

- ❖ **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



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

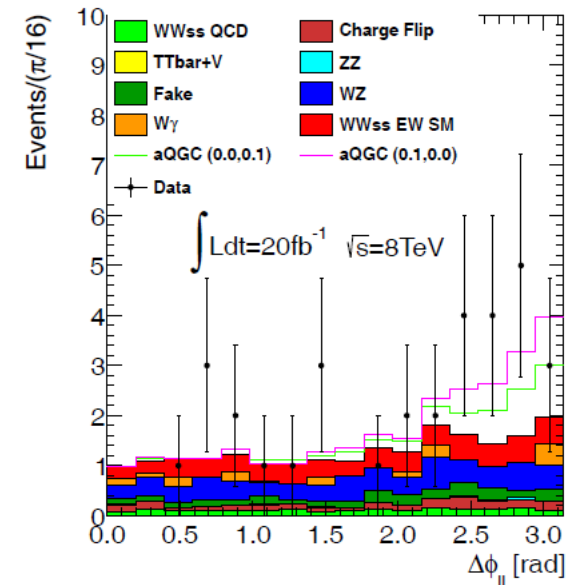
$$\mathcal{L}_2 = i\alpha_2 g' \text{tr}[\Sigma \mathbf{B}_{\mu\nu} \Sigma^\dagger [V^\mu, V^\nu]], \quad (2.42)$$

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

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

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

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

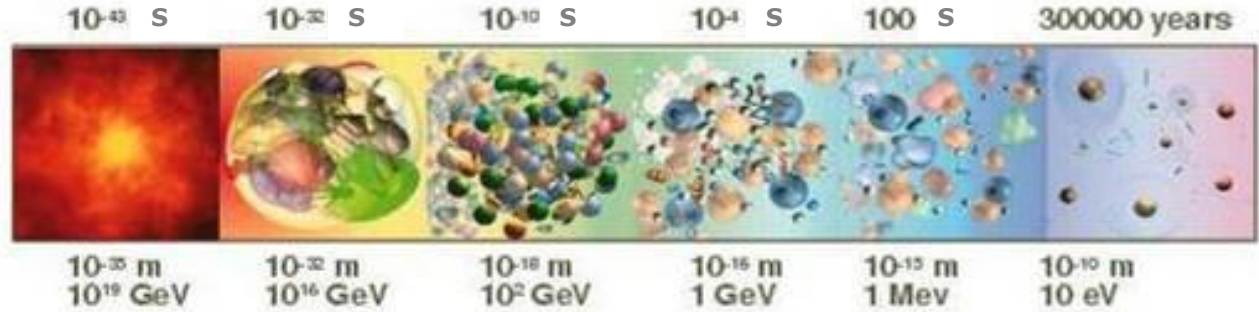


# Heutiges "Standardmodell" der Teilchenphysik (1961-73)

- ▶ Fundamentale Wechselwirkungen zwischen Teilchen
  - sind aus Symmetrien ableitbar
  - Ladungen erzeugen Symmetrien und werden erhalten
  - Symmetrien erfordern Botenteilchen (Austauschteilchen)
- ▶ Bausteine der Welt
  - Träger von Ladungen
  - Zahl und Anordnung nicht vorhergesagt
  - Spielen nach Regeln der entsprechenden Wechselwirkungen
- ▶ Massenmechanismus
  - Symmetrien verbieten Teilchenmassen !!
  - Erzeugung "Higgsmechanismus", Nachweis über Higgs-Teilchen
  - Massenwerte ~ Kopplungen nicht vorhersagbar
  - Bricht Symmetrie der schwachen Ladung und Ladungserhaltung
- ▶ Errungenschaft des Standardmodells
  - beschreibt \*alle\* bekannten Prozesse
  - Ist (derzeit) DIE grundlegende Theorie der Physik

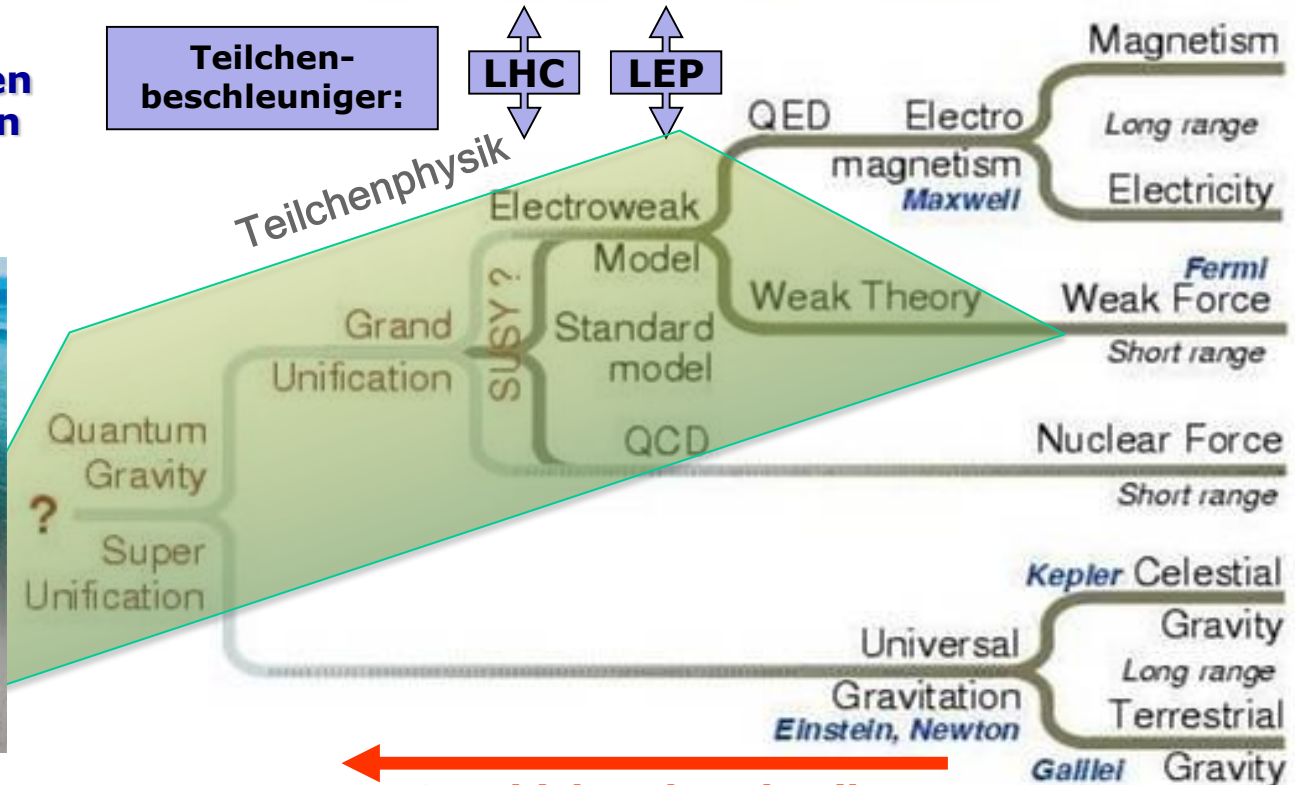
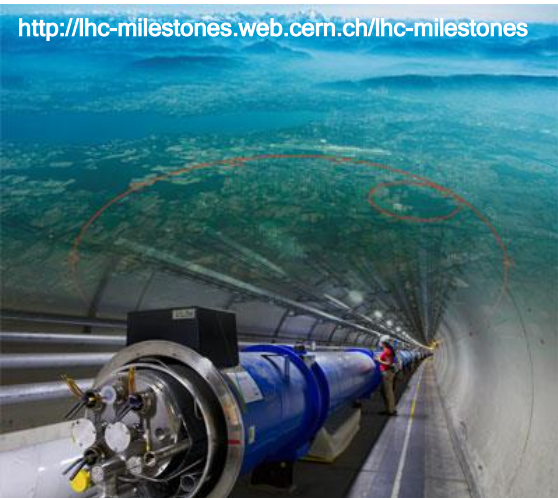


# ANHANG



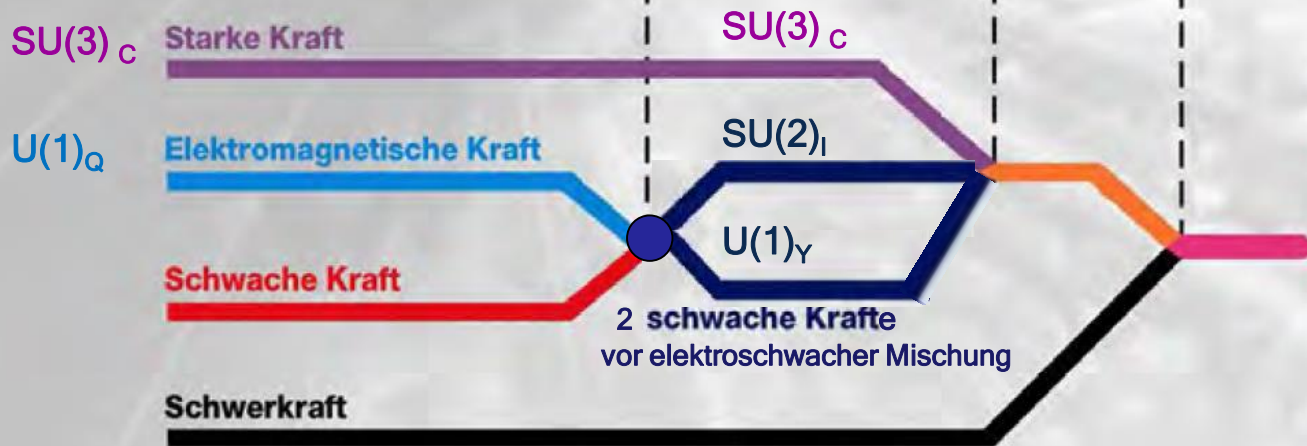
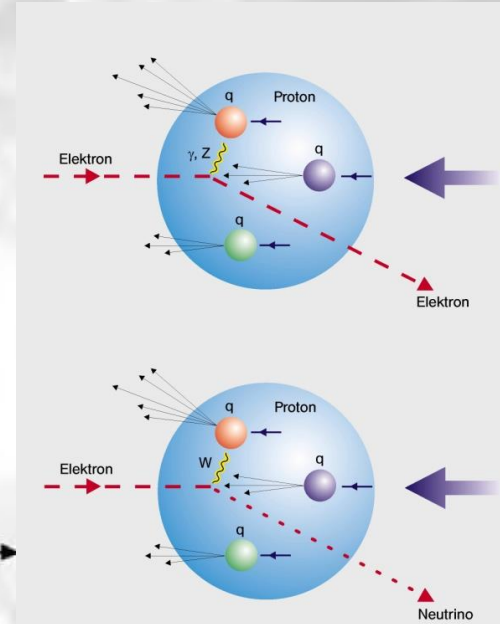
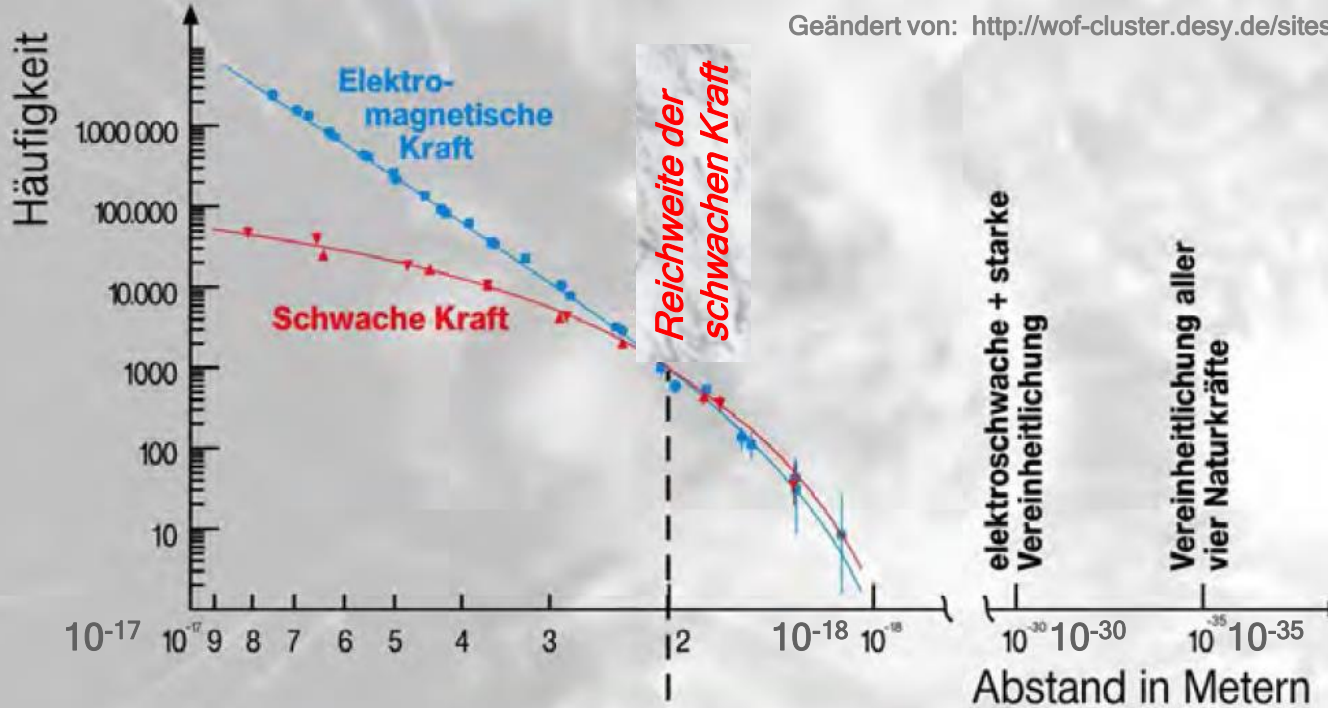
• **LHC:**

**Nachstellen der Prozesse zwischen Elementarteilchen 10<sup>-12</sup> s nach dem Urknall**



**← Geschichte der Physik Zurück zum Urknall**

Geändert von: [http://wof-cluster.desy.de/sites/images/content/e8/e76/index\\_eng.html](http://wof-cluster.desy.de/sites/images/content/e8/e76/index_eng.html)



Urknall



- ❖ 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)
  - $\frac{1}{\alpha_s} = 8 \quad \frac{1}{\alpha_W} = 29 \quad \frac{1}{\alpha_Y} = 108$  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  $(Z^0, \gamma)$
  - Generierung der Massen von  $W^+, W^-$  und  $Z^0$
  - Mischung der Fermionen und Generierung ihrer Massen

## ❖ Gravitation

❖ Vorhersage von Teilchenmassen

(GeV)	Experim.	Theorie
$m_W$	80.4	0
$m_Z$	91.2	0
$m_t$	173.2	0
$m_b$	4.2	0
...		0
$m_e$	0.000511	0
...		0

❖ Grund:

- Schwache Ladung ist „**Vektoreigenschaft**“
- $SU(2)$  Eichtransformation verbindet  $b \leftrightarrow t, \nu_e \leftrightarrow e, \dots$  Massen sind identisch

- **Unterschiedliche Schwache Ladung für Chiralität  $f_L$  und  $f_R$ , Zustände erfordern:  $m=0$ ,**

weil  $m_e \bar{l}_R \begin{pmatrix} \nu_L \\ l_L \end{pmatrix} + \dots$  ein schwacher Vektor und nicht invariant unter  $SU(2)$  Drehungen ist

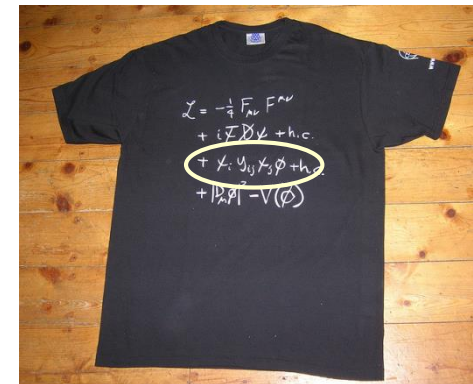
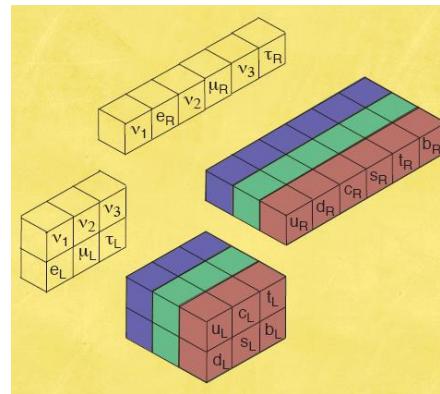
❖ Lösung (Weinberg 1967)

- Fermionen-Paare koppeln über „Yukawa“ Wechselwirkung mit  $SU(2)$  Duplett Feld  $\Phi$
- Entspricht der Bildung eines

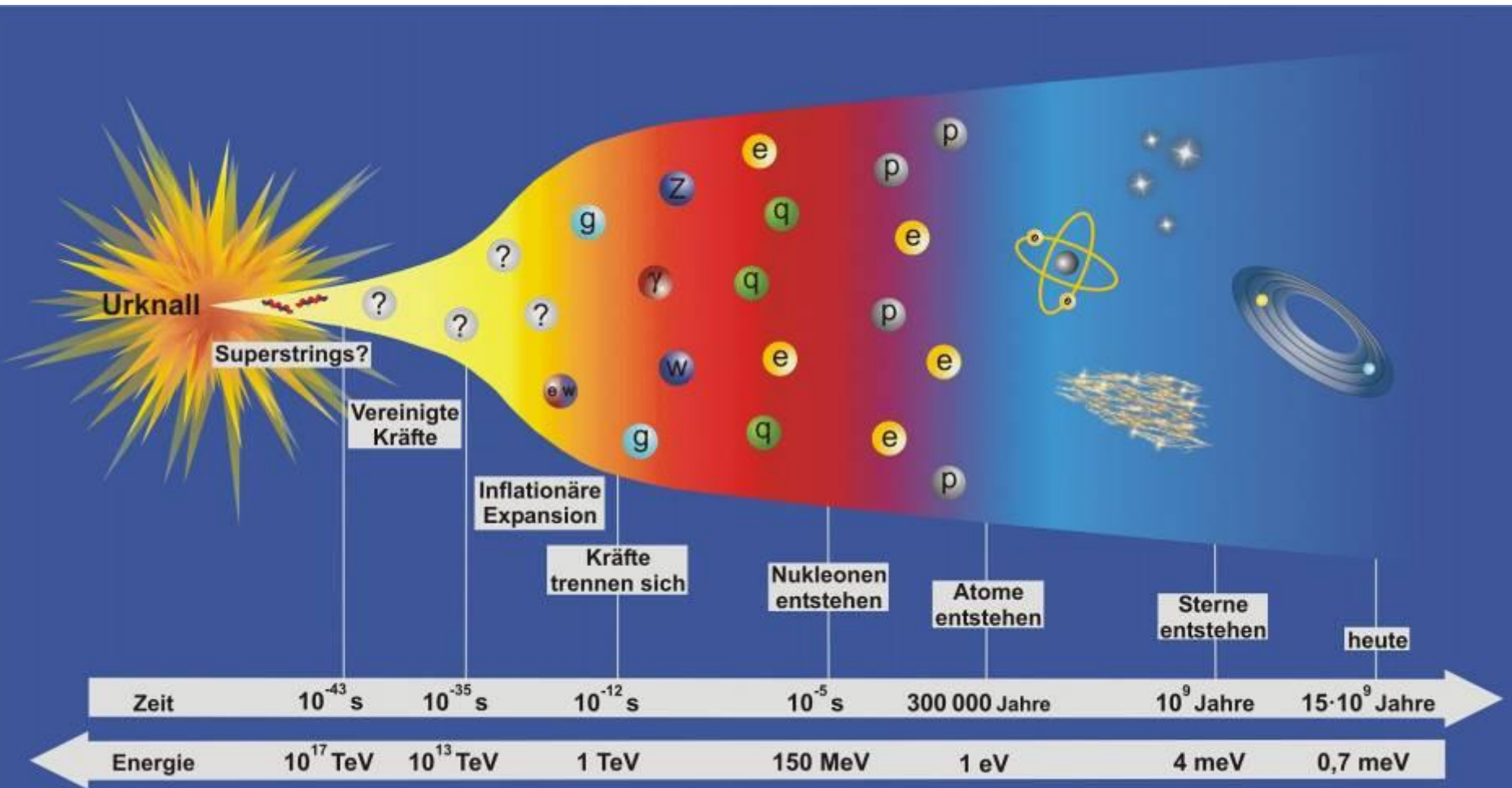
**Skalarproduktes**  $y_e \bar{l}_R \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ l_L \end{pmatrix}$

das eich(=dreh) invariant ist

- ❖ Bedarf an jedem der 12 Fermionen eine neue „Yukawa“- Kopplung  $y_f \sim m_f$
- ❖ Erklärt **nicht** den Massenwert, sondern erklärt, was Masse ist



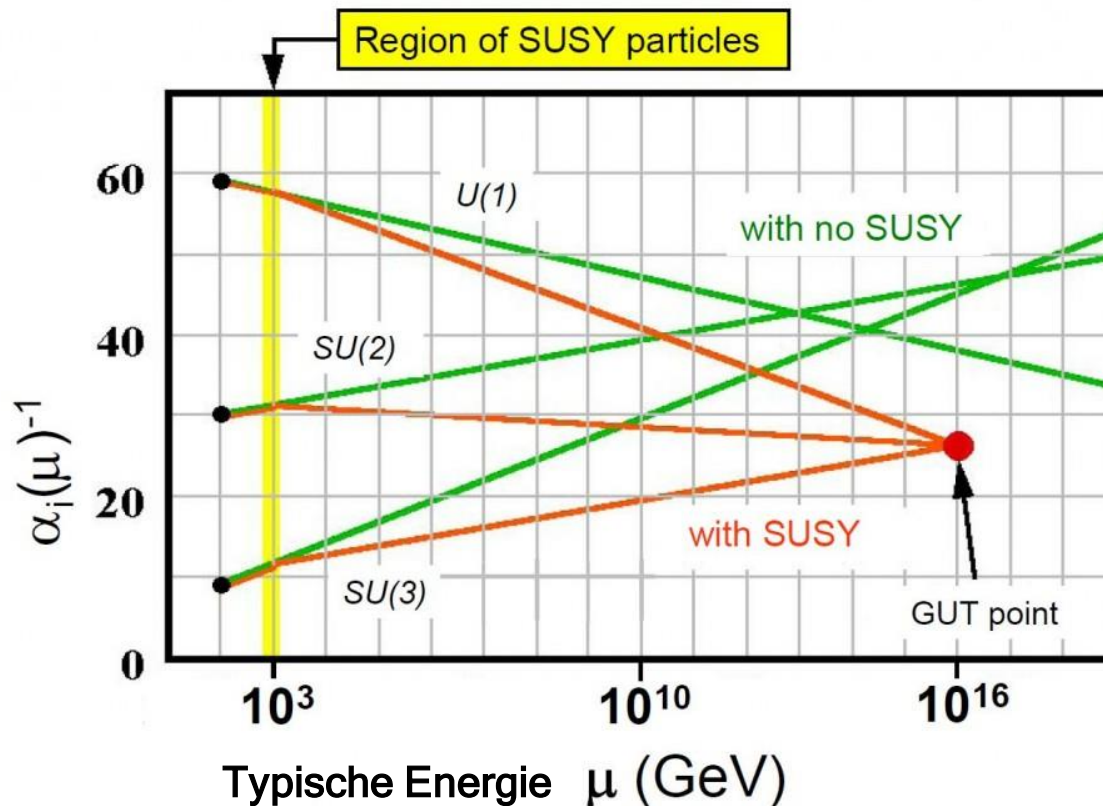
## ❖ Verschiedene Phasen der Strukturbildung



Kopplungen sind **Eigenschaften von Botenteilchen**,  
und damit **Eigenschaften der Wechselwirkungen**  
(N.B: Auch  $e$  ist \*Kopplung\* und somit eine Eigenschaft des Photons.  
Die Bezeichnung „Ladung“ für  $e$  ist ein historischer Irrtum!  
Die elektrische Ladung ist  $Q$ , die meist im Produkt  $Qe$  vorkommt)

- ❖ (Quadrate von) Kopplungen beschreiben die Stärke von Wechselwirkungen
- ❖ Wahrscheinlichkeiten von Prozessen hängen ab von
  - **Stärke (Kopplung)** der Wechselwirkung
  - **Ladungen** der beteiligten Teilchen
  - **Massen** der beteiligten Teilchen, falls diese nicht klein sind gegenüber verfügbarer Energie

- ❖ Kopplungsparameter  $\alpha$  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!



## 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"

1. Wechselwirkung= Ladung+Kopplung
2. Die schwache Isospin-Ladung
3. Zutaten für unser Universum
4. **SPONTANE SYMMETRIEBRECHUNGEN**
5. Das Brout-Englert-Higgs Feld als Supraleiter

Siehe auch: Steven Weinberg in  
<http://cerncourier.com/cws/article/cern/32522>

- ❖ **1959-1961: Yōichirō Nambu (Nobelpreis 2008)**  
Erste Anwendungen von spontaner Brechung von Symmetrien auf Supraleitung und Teilchenphysik (starke WW, Protonmasse)

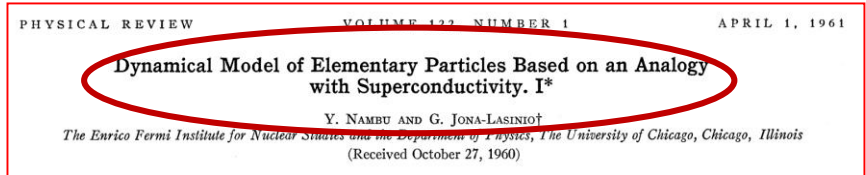


BCS theory of superconductivity

Particle Field Theory  
Feynman/Dyson

Field Theory of Strong Interactions

[http://prola.aps.org/abstract/PR/v122/i1/p345\\_1](http://prola.aps.org/abstract/PR/v122/i1/p345_1)



PHYSICAL REVIEW VOLUME 117, NUMBER 1 FEBRUARY 1, 1960

**Quasi-Particles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity\***

YOICHIRO NAMBU

*The Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies and the Department of Physics, The University of Chicago, Chicago, Illinois*  
(Received July 23, 1959)

Ideas and techniques known in quantum electrodynamics have been applied to the Bardeen-Cooper-Schrieffer theory of superconductivity. In an approximation which corresponds to a generalization of the Hartree-Fock fields, one can write down an integral equation defining the self-energy of an electron in an electron gas with phonon and Coulomb interaction. The form of the equation implies the existence of a particular solution which does not follow from perturbation theory, and which leads to the energy gap equation and the quasi-particle picture analogous to Bogoliubov's.

The gauge invariance, to the first order in the external electro-

magnetic field, can be maintained in the quasi-particle picture by taking into account a certain class of corrections to the charge-current operator due to the phonon and Coulomb interaction. In fact, generalized forms of the Ward identity are obtained between certain vertex parts and the self-energy. The Meissner effect calculation is thus rendered strictly gauge invariant, but essentially keeping the BCS result unaltered for transverse fields.

It is shown also that the integral equation for vertex parts allows homogeneous solutions which describe collective excitations of quasi-particle pairs, and the nature and effects of such collective states are discussed.

1960 Midwest Conference in Theoretical Physics, Purdue University

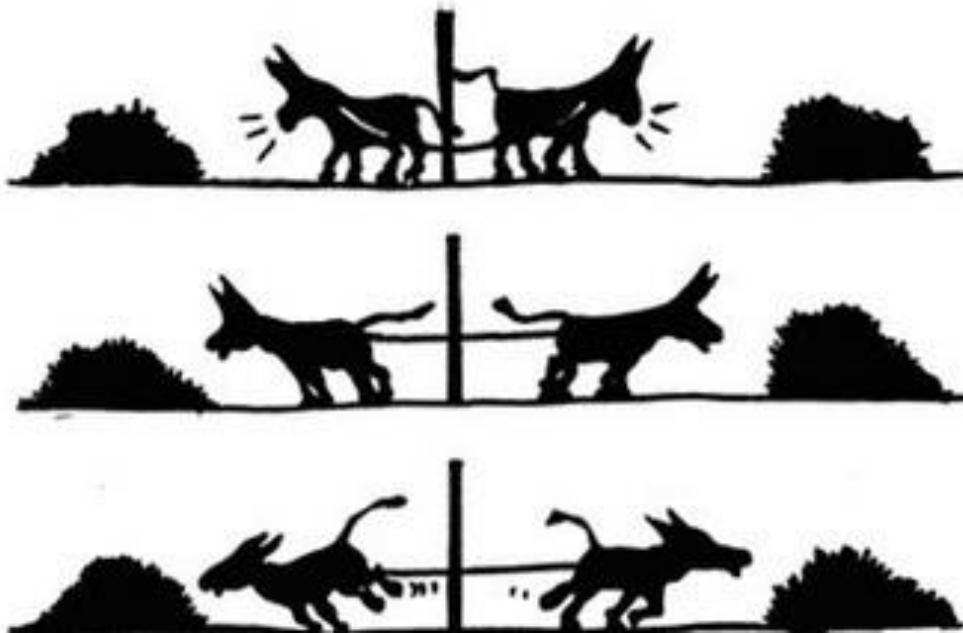
**A 'SUPERCONDUCTOR' MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES AND ITS CONSEQUENCES** by Y. Nambu (University of Chicago)\*

(In absence of the author the paper was presented by G. Jona-Lasinio.)

1

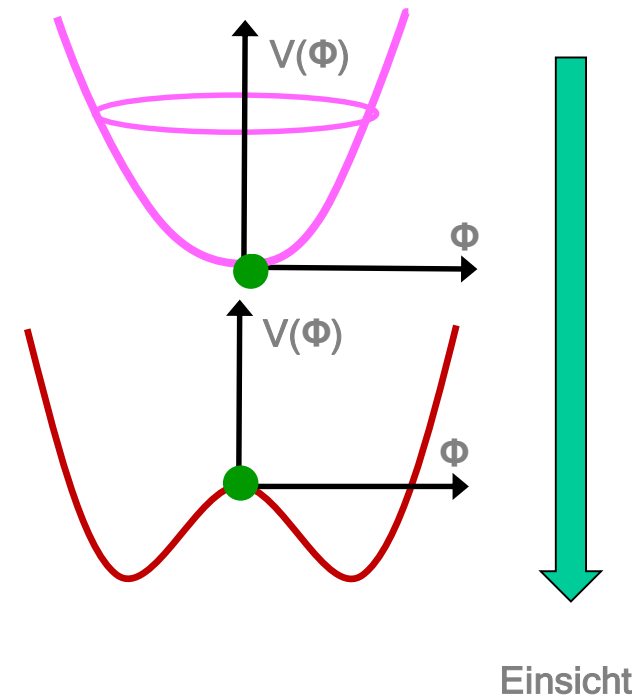
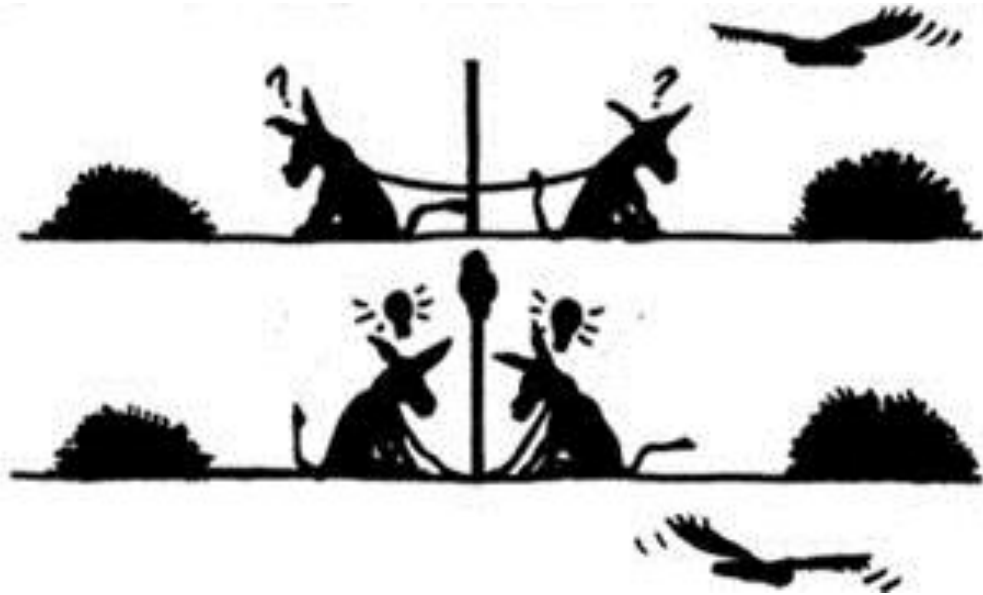
In recent years it has become fashionable to apply field-theoretical techniques to the many-body problems one encounters in solid state physics and nuclear physics. This is not surprising because in a quantized field theory there is always the possibility of pair creation (real or virtual), which is essentially a many-body problem. We are familiar with a number of close analogies between ideas and problems in elementary particle theory and the correspond-

- ❖ Ausgangslage: **Symmetrische Konfiguration**  
(hier Spiegelsymmetrie zweier hungriger Esel)



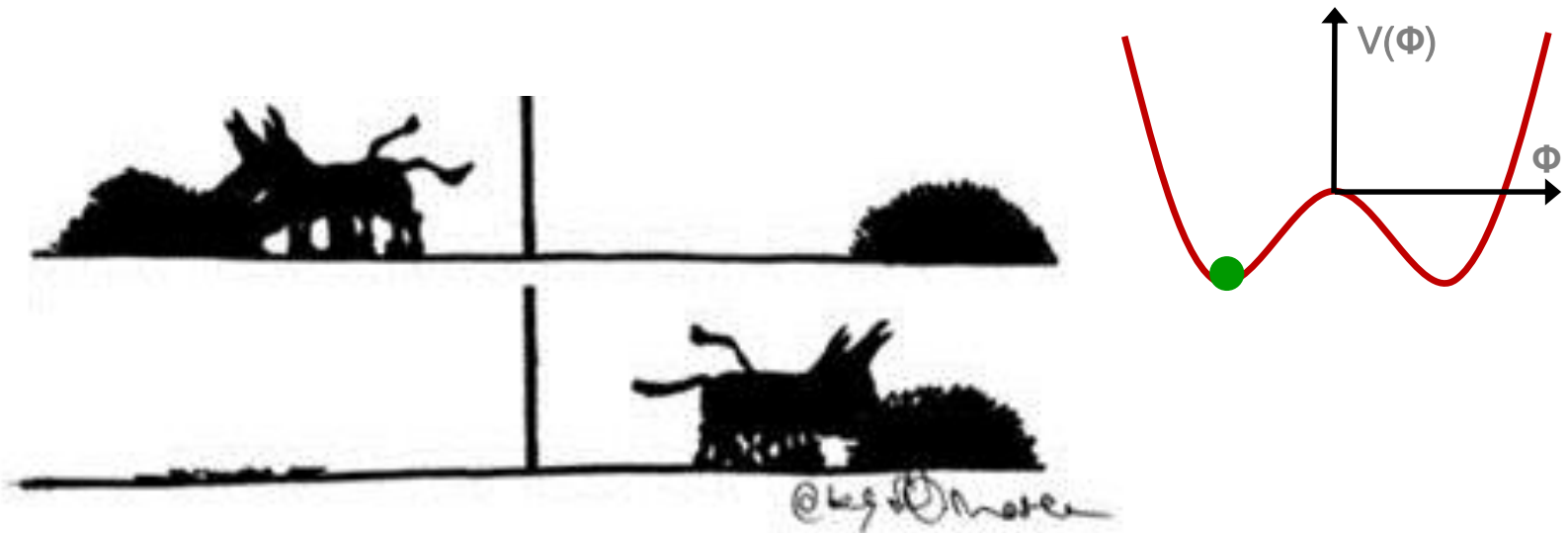
<http://www.g2webdesign.de/mediation/WasIstMediation.html>

- ❖ Veränderlich: **Brechungsparameter**  
(hier: Einsicht)



- ❖ Übersteigt der Brechungsparameter einen **kritischen Wert**,  
wird der symmetrische Zustand instabil

- ❖ Es entsteht ein neuer **unsymmetrischer Grundzustand**, mit **endlicher Auslenkung  $\Phi$**



- ❖ Quantenmechanisch entspricht dies einem überall im Vakuum vorhandenen Feld mit endlichem Wert

## Überblick einiger spontaner Symmetriebrechungen

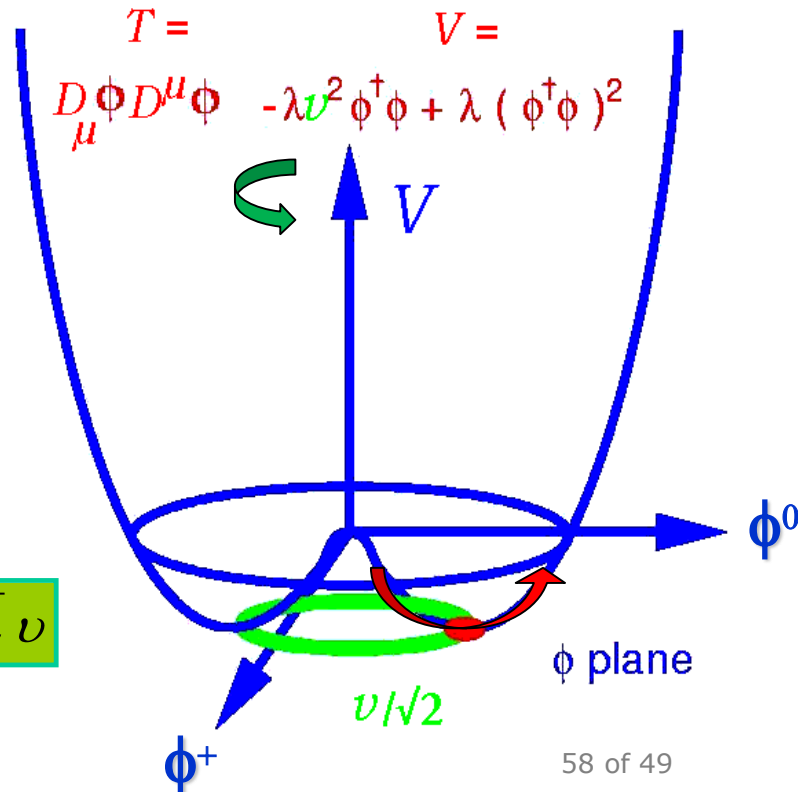
Phänomen	gebrochene Symmetrie	Brechungsparameter	Ordnungsparameter	Massive Anregung
<b>Esel</b>	Spiegelung	Einsicht	Paar-Bildung	Trennung
<b>Elastischer Stab</b>	O(2) Rotation	Kraft	Biegung	Schwingung
<b>Supraleitung</b>	U(1) Phasenrot.	Temperatur, Magnetfeld	Cooperpaar Dichte	Schmid-Gap-Flukt.
<b>Ferromagnetismus</b>	O(3) Rotation	Temperatur	Magneti-sierung	Spinwelle
<b>Kern-deformation</b>	O(3) Rotation	Valenz-nukleonanzahl	Deformation	Vibration
<b>Hadron-massen</b>	SU(2) <sub>A</sub> Chiral-axial	Stärke der WWirkung	$\bar{q}q$ Kondensat	Sigma Meson
<b>Brout-Englert Higgs Mech.</b>	SU(2) <sub>L</sub> El.-schwach	Temperatur	Higgsfeld $v = 246$ GeV	Higgs-Boson

❖ Idee von Brout, Englert, Higgs, Kibble, Hagen und Guralnik, 1964

- Allgegenwärtiges Hintergrundfeld  $\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$  mit Potenzial  $V \sim \phi^4$ 
  - „Brout-Englert-Higgsfeld“ , Völlig homogen, strukturlos

- Grundzustand  $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$  bricht  $SU(2)_I$  Rotationssymmetrie

- 1 Anregungsmöglichkeit:  $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v+H \end{pmatrix}$ 
  - „Higgs-Boson“ H
  - Beweist Existenz des Hintergrundfelds



❖ 2 neue Parameter im Standardmodell

- $v = 246 \text{ GeV}$  (Wert des Hintergrundfelds )
- $\lambda = 0.13$  (Zähigkeit des BEH-Feldes  
-> Masse d. Higgs-Bosons)

$$m_H = \sqrt{2\lambda} v$$



- Anregungen des BEH-Feldes erscheinen als massives Higgs Boson
  - Zuerst gezeigt von Peter Higgs, PRL 13 (1964) 508

$$m_H = \sqrt{2\lambda} v$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0\{V''(\varphi_0^2)\}^{1/2}$

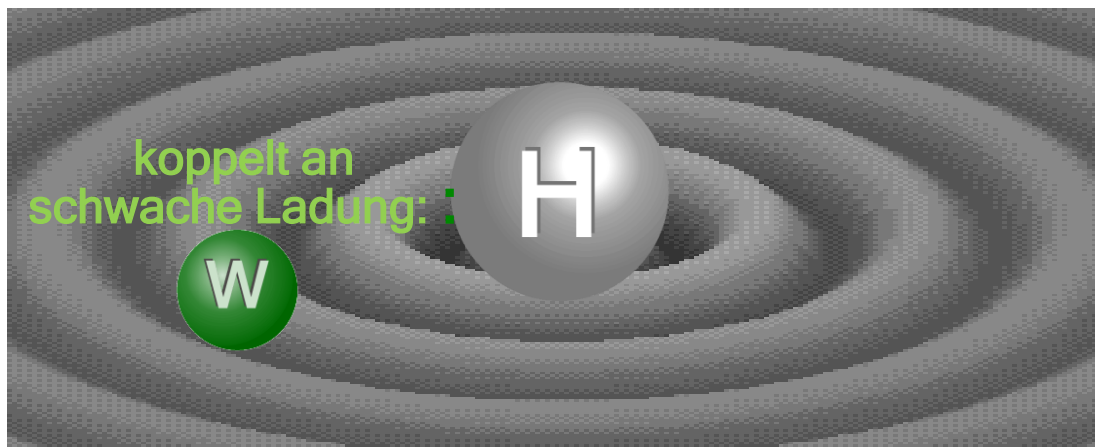
- Kinetischer Energie-Term  $(D_\mu\phi)^\dagger(D^\mu\phi)$  des Hintergrundfelds
  - erzeugt Z-H u. W-H Wechselwirkung **mit bekannten Stärken g**
  - erzeugt W und Z-Boson Massenterme → **Massen vorhersagbar!**

$$m_W = \frac{1}{2} g_W v \quad m_Z = \frac{1}{2} \sqrt{g_W^2 + g_Y^2} v \quad m_\gamma = 0$$

- Erzeugung der Baustein-Massen
  - Postulat (Weinberg): Jedes Baustein-Teilchen f koppelt **mit seiner eigenen Kopplung  $y_f$**  an das Hintergrundfeld

$$m_f = \sqrt{\frac{1}{2}} y_f v$$

- ❖ Brout-Englert-Higgs Feld  $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu \end{pmatrix}$   $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu + H \end{pmatrix}$
- ❖ ist Kondensat (See) mit schwacher Ladung  $I_3^W = -1/2$ 
  - Kann durch Ströme schwache Ladungsfelder kompensieren
  - Begrenzt damit die Reichweite der schwachen Felder von W und Z
  - Äquivalent zur Erzeugung von Masse der Bosonen  $\lambda_W = \hbar/m_W c$
- ❖ W koppelt an schw. Ladung  $I_3^W$  und damit ans BEH-Feld mit  $g_W = 0.6$ 
  - ❖ W-Masse quantitativ vorhersagbar!
  - ❖ Vorhersage: 80,37 GeV    Messung: 80,40 GeV (Präzision < Promill!)



$$m_W = \frac{1}{2} g_W \nu$$



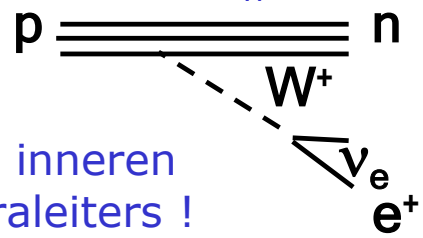
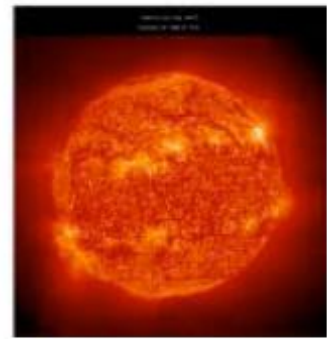
View Online: <http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn>

Download: : [www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen](http://www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen)

- ❖ Massen von Elementarteilchen bestimmen den Ablauf der Kosmologie
- ❖ W-Masse bestimmt z.B. die Geschwindigkeit von Prozessen der schwachen Wechselwirkung

## ❖ Warum brennt die Sonne so langsam?

- $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$   
(Energiegewinn  $pp \rightarrow D$ :  $\Delta E = 0,9 \text{ MeV}$ )
- Vermittelndes  $W$ -Teilchen sehr schwer:  
 $m_W = 80400 \text{ MeV}$
- Rate unterdrückt um  $\sim (\Delta E / m_W)^4 > 10^{-20}$

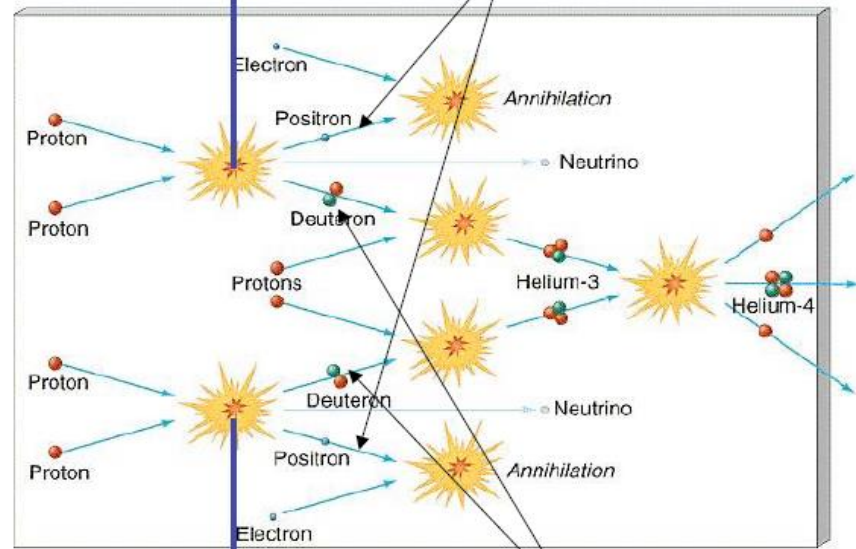


- Sonne brennt im inneren eines schw. Supraleiters !

## ❖ Weiterführende Literatur

- [http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951\\_1](http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951_1)  
R.N. Cahn, „The 18 arbitrary parameters of the standard model in your everyday life“ (1996)
- <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9707380>  
V.Agrawal, S.M.Barr, J.F.Donoghue, D.Seckel, „The anthropic principle and the mass scale of the Standard Model“ (1997)
- <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2>  
C. Hogan, „Why the Universe is Just So“ (1999)
- <http://arxiv.org/abs/0712.2968v1>  
Th Damour und J.F.Donoghue, „Constraints on the variability of quark masses from nuclear binding“ (2007)

## $\nu_e$ (Neutrino) Zerfallsprodukte des $W^+$



## $\nu_e$ (Neutrino) n entsteht über $W^+$

