

Das Higgsfeld - Entstehung eines kosmischen Supraleiters

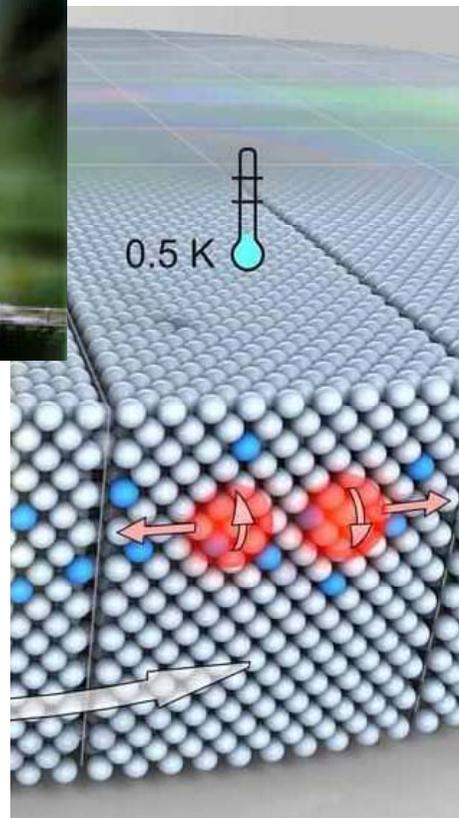
Michael Kobel
Technische Universität Dresden

Lehrerfortbildung DESY
Zeuthen 25.11.2013

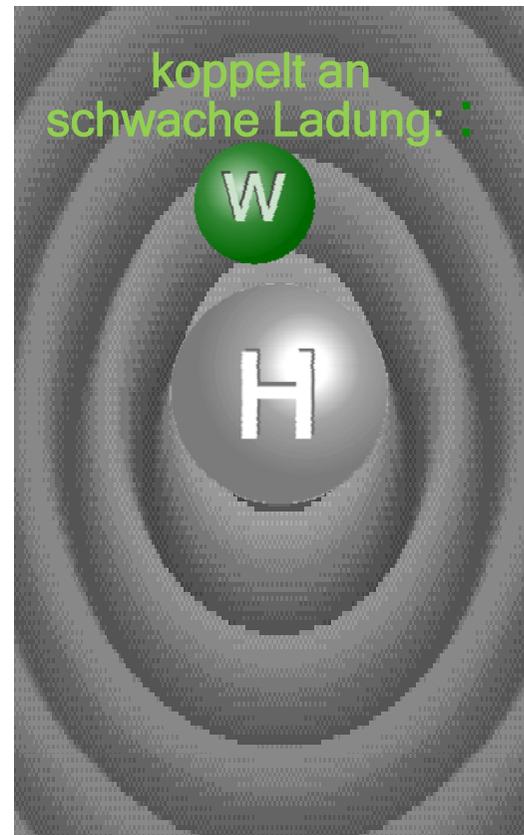
- ❖ Faszinierende Effekte frei beweglicher Ladungs-Seen
 - ❖ Cooperpaare im Supraleiter: See elektrischer Ladungen von $Q=-2$
 - ❖ Brout-Englert-Higgs-Feld im Universum: See schwacher Ladungen



<http://samstag.physik.tu-dresden.de/>

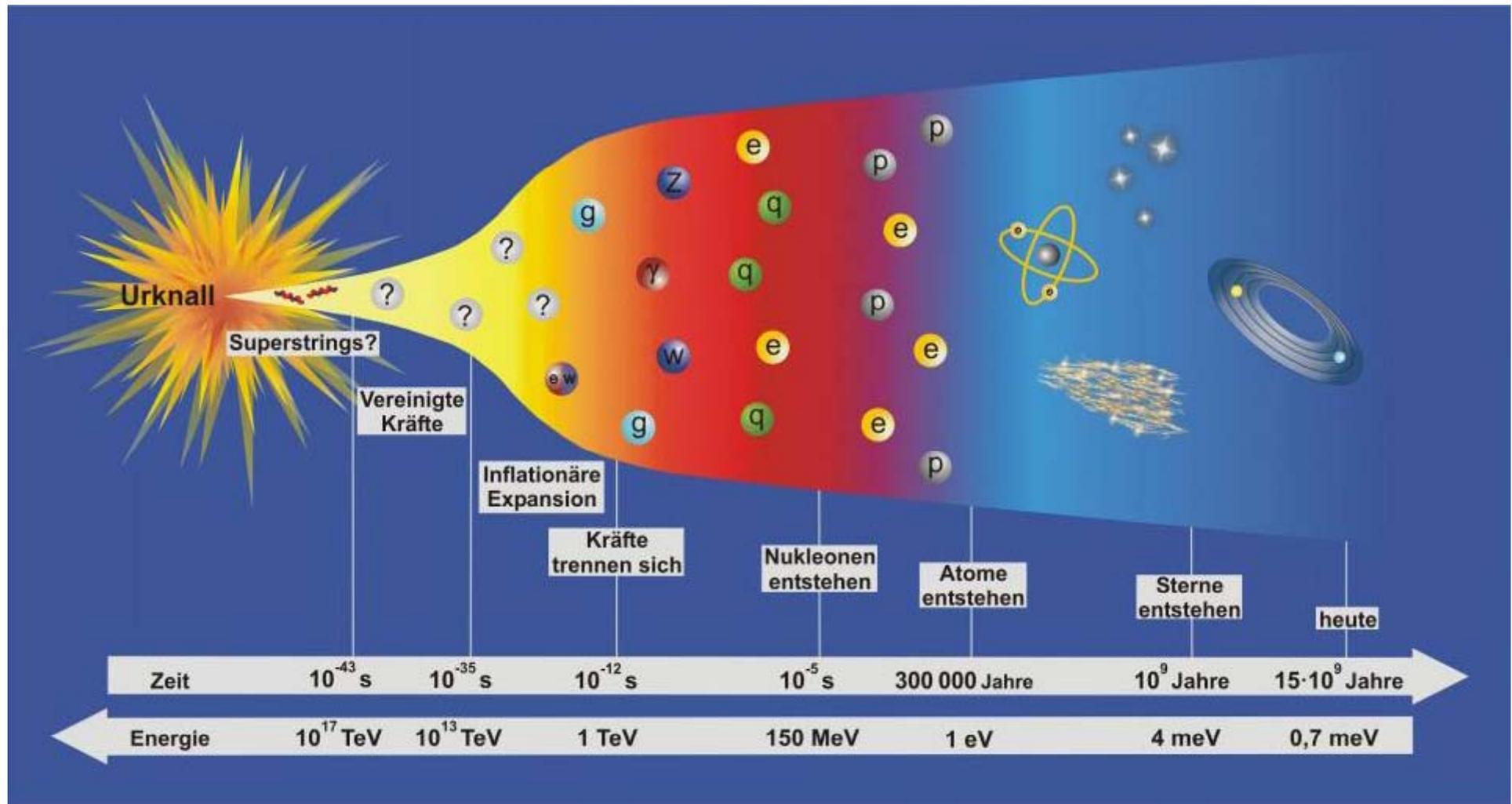


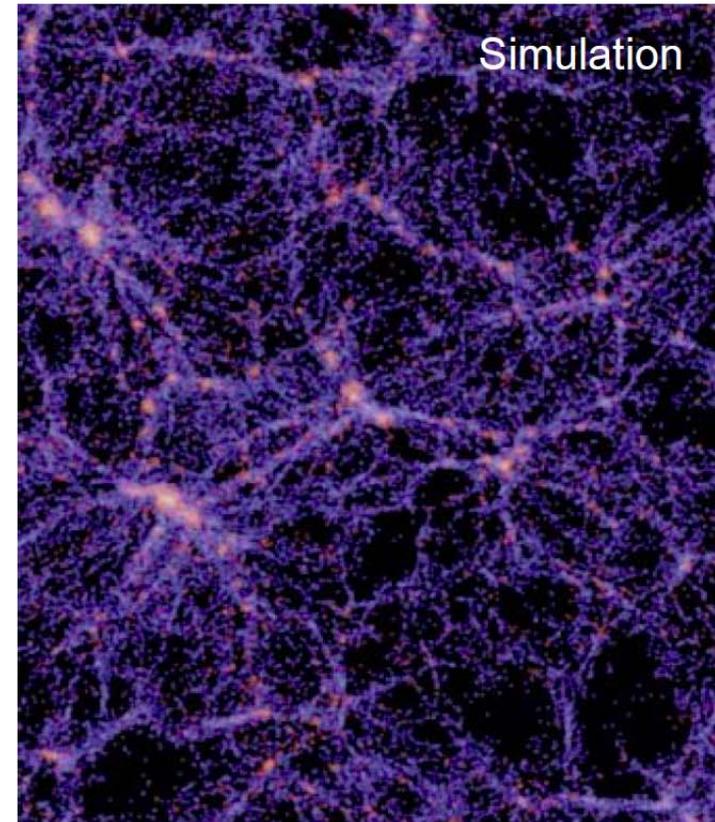
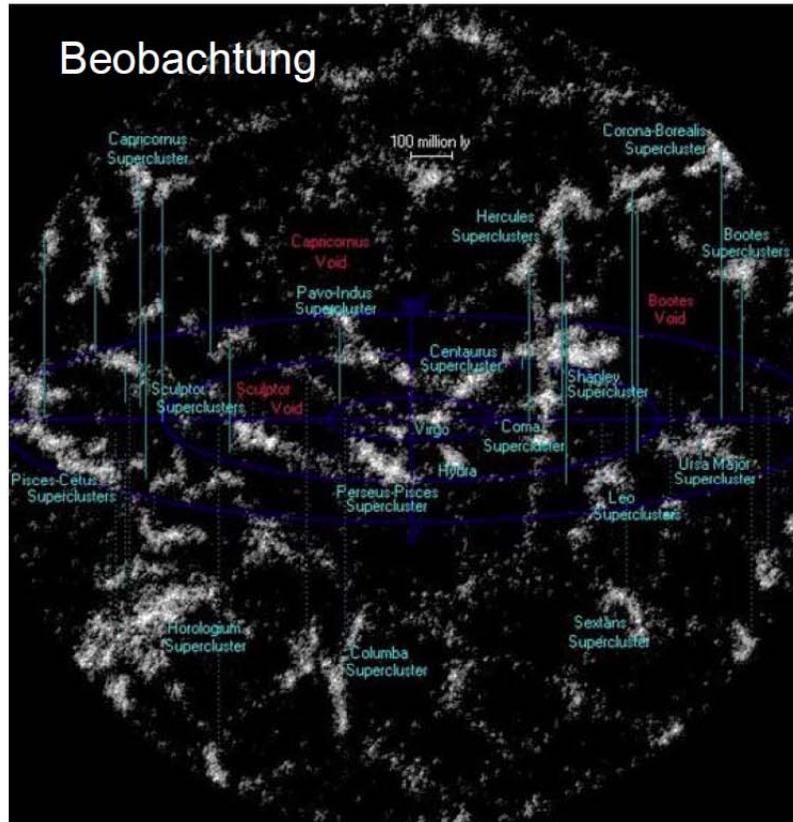
<http://idw-online.de/de/image92497>
Michael Kobel



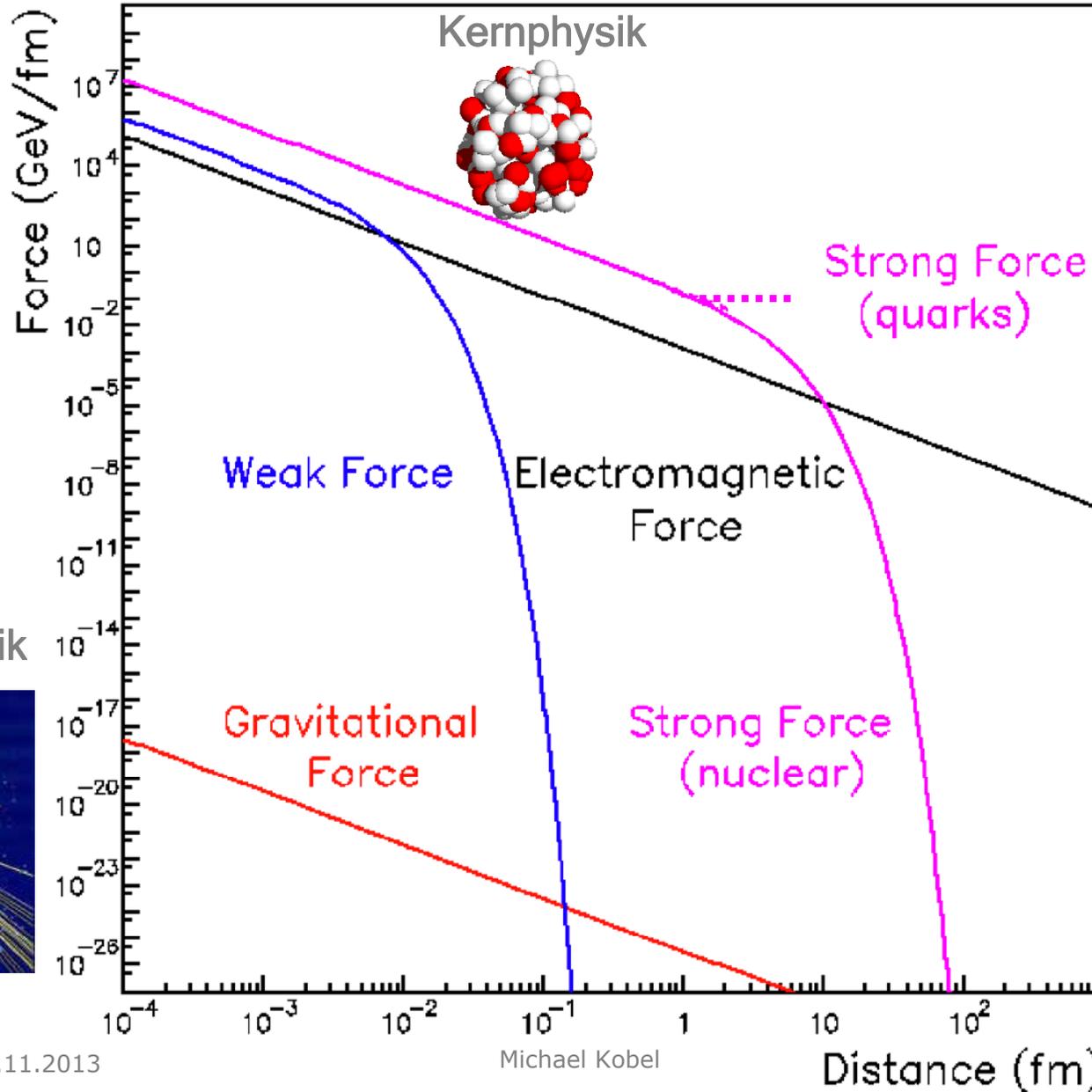
- 1. WECHSELWIRKUNG= LADUNG+KOPPLUNG**
2. Die schwache Isospin-Ladung
3. Zutaten für unser Universum
4. Spontane Symmetriebrechungen
5. Das Brout-Englert-Higgs Feld als Supraleiter

❖ Verschiedene Phasen der Strukturbildung

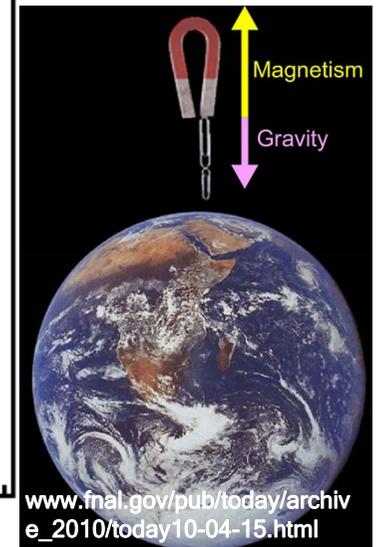
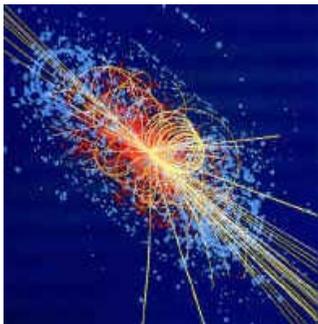


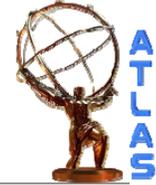


- ❖ Nicht Thema dieses Vortrags, Erklärung erfordert:
 - Primordiale Dichtefluktuationen (Quantenfluktuationen, Inflation)
 - Sehr viel dunkle Materie (jenseits des Standardmodells!)
 - **Gravitation**

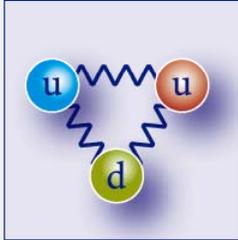
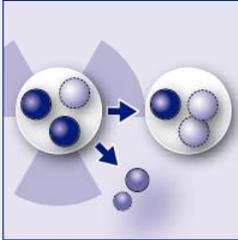


Teilchenphysik





- ❖ Für unseren Alltag sind
 - „dynamisch“ relevant:
 - **Gravitation**
 - **Elektromagnetismus (u.a alle Lebensvorgänge)**
 - „statisch“ relevant:
 - **Starke Wechselwirkung (Atomkerne <-> Chemische Elemente!)**
 - **Schwache Wechselwirkung (Brennen der Sonne!)**

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

❖ Alle bekannten Vorgänge lassen sich auf diese 4 Wechselwirkungen zurückführen !

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/>



❖ Pierers Universallexikon:

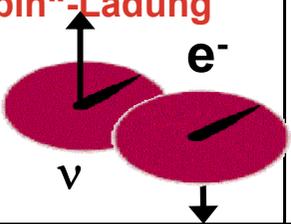
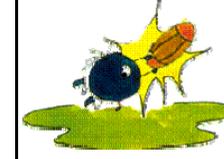
- **Wechselwirkung**, das Verhältnis zweier ~~gleichzeitig vorhandener~~ Gegenstände, vermöge dessen sie füreinander in gewissen Beziehungen zugleich als Ursache und als Wirkung aufgefasst werden.



❖ 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** !

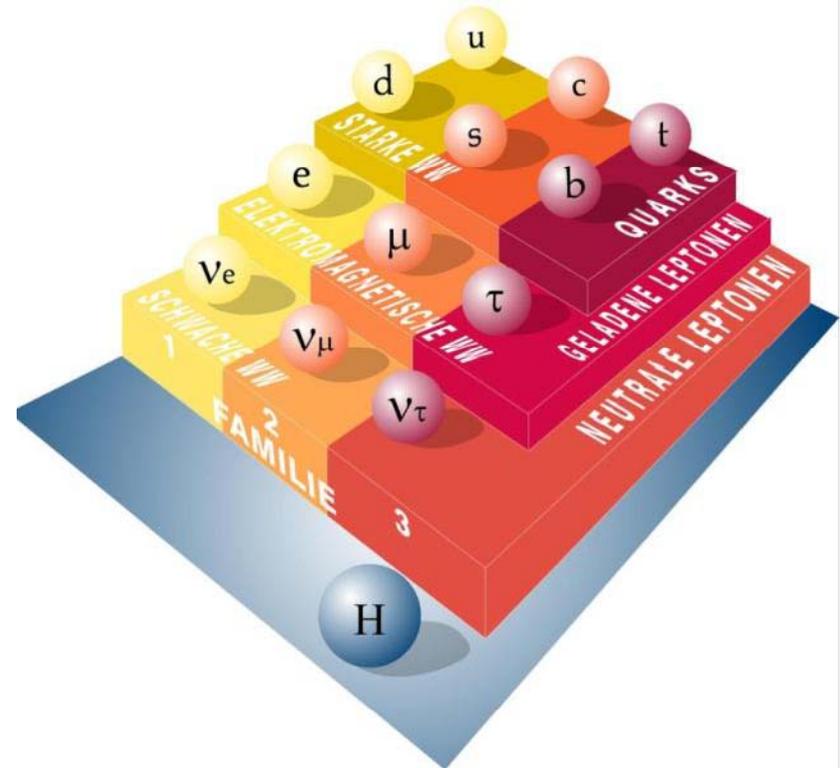
- Jede Wechselwirkung hat eigene Botenteilchen
- Botenteilchen koppeln nur an Teilchen mit entsprechender Ladung

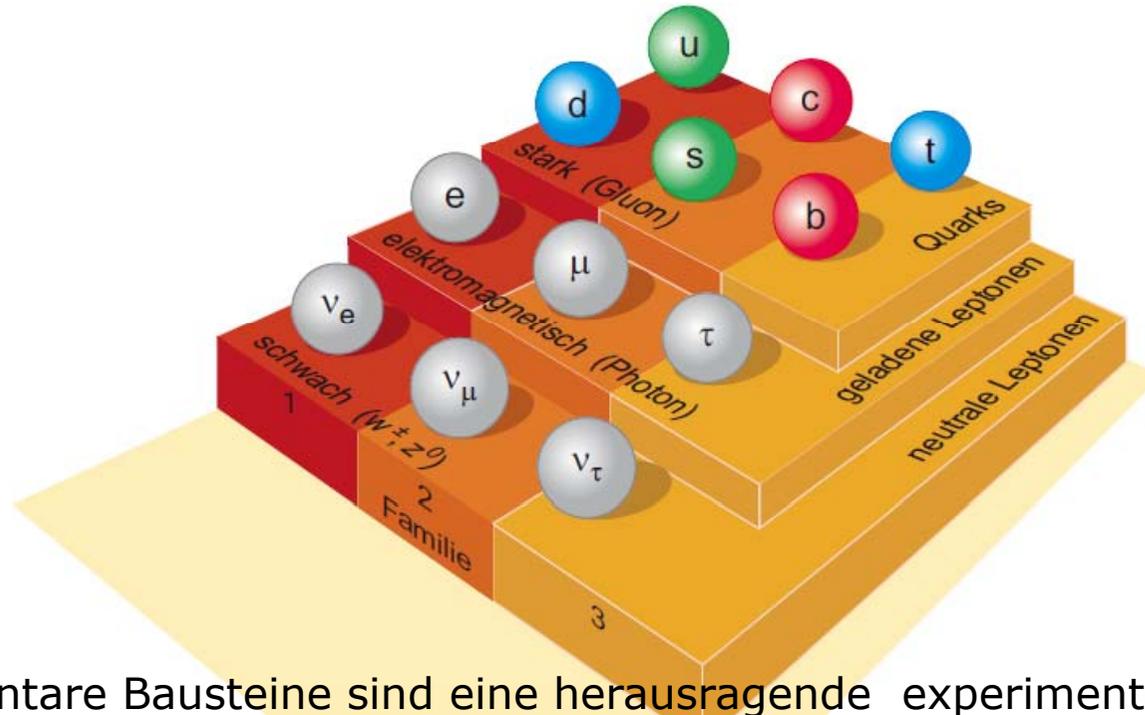
	Ladung der Materieteilchen	Botenteilchen	Kopplung der Botenteilchen (bei 100 GeV)	Kopplungsparameter
Starke Wechselwirkung	Starke „Farb“-Ladung „Rot“, „Blau“, „Grün“ 	Glukonen g 	$g_s = 1.2$	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$
Schwache Wechselwirkung	Schwache „Isospin“-Ladung $I_3^W = \begin{pmatrix} +1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$ 	„Weakonen“ (W ⁺ , W ⁻ , Z) 	$g_w = 0.6$	$\alpha_w = \frac{g_w^2}{4\pi}$
Elektromagnetismus	Elektrische Ladung $Q = -1, +2/3, -1/3, \dots$	Photonen γ 	$g_e = e = 0.3$ SI: $g_e = \frac{e}{\sqrt{\epsilon_0 \hbar c}}$	$\alpha = \frac{g_e^2}{4\pi}$
Gravitation	Supersymmetrie???	Gravitonen ?	?	G_N



- ❖ Es gibt 3 völlig verschiedene Ladungen (für jede WW des Standardmodells eine)
- ❖ Diese können Vektorcharakter haben (!)
- ❖ Die Teilchen ordnen sich bezüglich dieser Ladungen in „Multipletts“
 - Warum genau diese Anordnung im „Periodensystem der Teilchen“? → immernoch unverstanden!

Elektrische Ladung Q	Schwache Ladung I_3^W	Starke Ladung	Blau Grün Rot		
$+2/3$	$+1/2$	u	c	t	Quarks
$-1/3$	$-1/2$	d	s	b	
0	$+1/2$	ν_e	ν_μ	ν_τ	Leptonen
-1	$-1/2$	e	μ	τ	
		1.	2.	3.	Familie



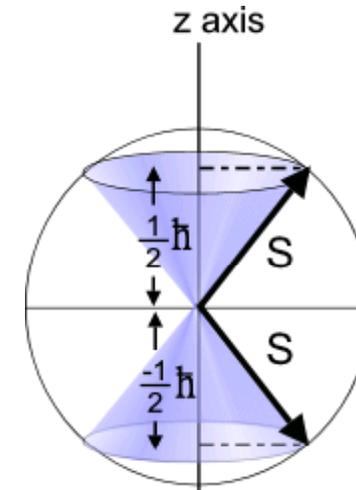


- ❖ Elementare Bausteine sind eine herausragende experimentelle Erkenntnis
→ eine weitere Substruktur ist „so gut wie“ ausgeschlossen
- ❖ Aber: sind nicht die theoretische Grundidee des Standardmodells
→ Anordnung ist weder vorhergesagt, noch bisher nachträglich verstanden !
- ❖ Bergen außerdem Gefahr des reines Auswendiglernens
- ❖ Die Elementarteilchen sind die „Spieler“ in einer Welt, in der sich die „Spielregeln“ = Wechselwirkungen aus Symmetrien herleiten lassen

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



- ❖ Zugrundeliegende Symmetrie
genau dieselbe wie bei Spin: SU(2)
- ❖ 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

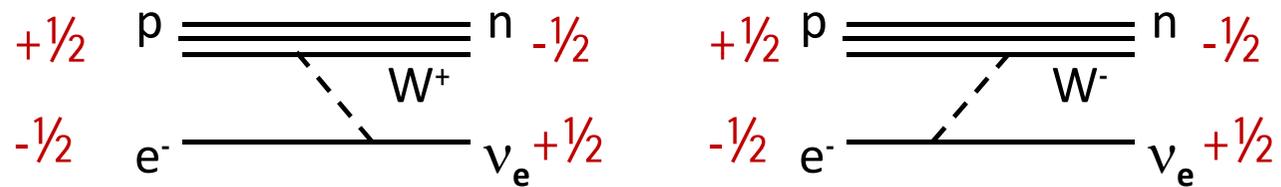
$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} : \left(\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \bar{d}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

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

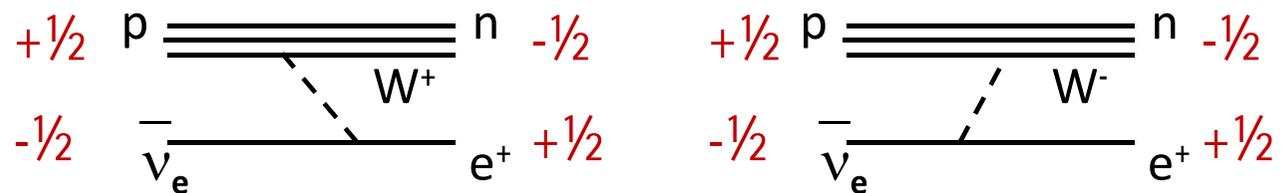
Ladungserhaltung

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

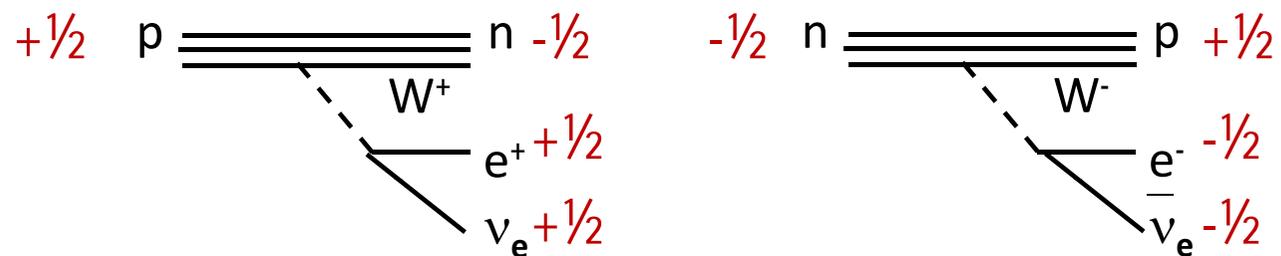
- K-Elektron Einfang in Atomen



- Erster Nachweis von Antineutrinos aus Kernkraftwerken



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





Ladungen sind *charakteristische Eigenschaften von Teilchen*

- ❖ Ladungen sind *Additiv*
Ladung(A+B) = Ladung(A) + Ladung(B)
("+" notfalls vektoriell: z.B: p,n: keine starke Farbladung)
- ❖ 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 3 für Teilchen relevante Wechselwirkungen anwenden



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

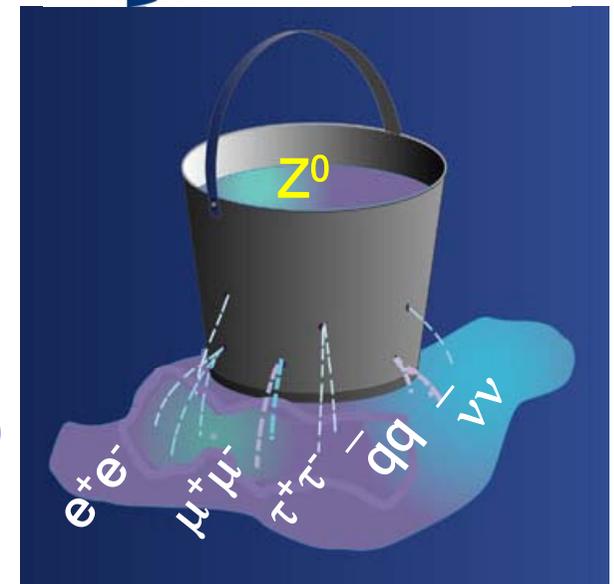


❖ Messung von Zerfällen des Z^0 Teilchens mit echten Daten des LEP

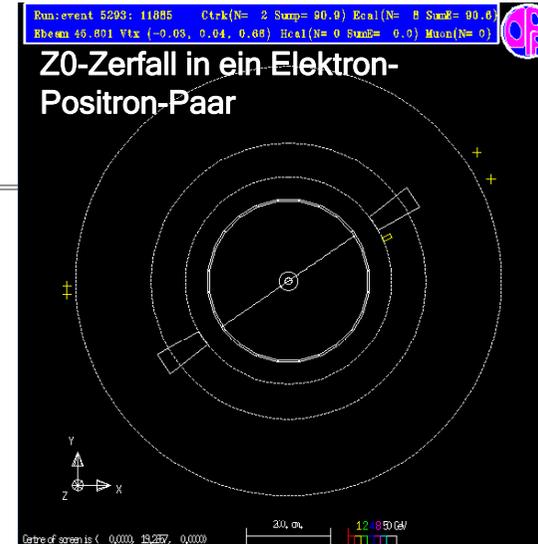
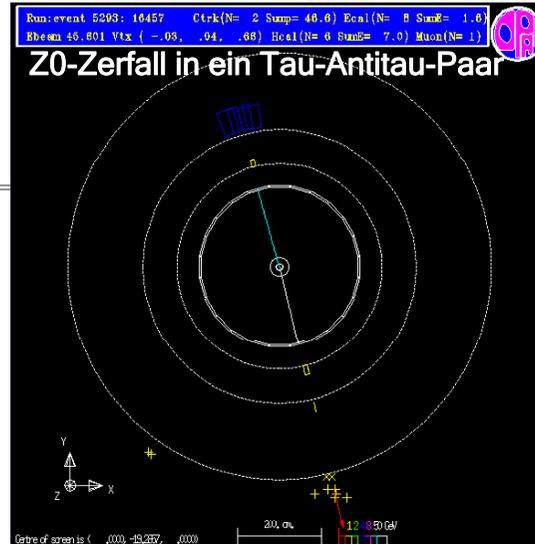
- Analogie: Löcher im Wassereimer entsprechen „Zerfallskanälen“
- Für einzelnes Wassermolekül ist Austrittsloch nicht vorhersagbar
<-> Für einzelnes Z-Teilchen ist Zerfallskanal nicht vorhersagbar

❖ Entleerung → Eigenschaften der Löcher
Zerfall des Z → Eigenschaften der Teilchen
(Kopplung ans Z über schwache Ladung)

- Verhältnis der Austrittsmengen
→ Größenvergleich der Löcher
Verhältnis der Zerfallshäufigkeiten
→ Größenvergleich der schwachen Ladungen
- e, μ, τ gleich häufig → gleiche schwache Ladung
(denn deren Massen sind alle klein gegen Z-Masse)
- Quarks kommen 15 Mal = 5×3 Mal „zu häufig“ vor
→ 5 mögliche Sorten \times 3 starke Farbladungen



www.teilchenwelt.de



Ereignisbilder eines LEP-Experimentes

1000 solcher Ereignisse werden von Jugendlichen (100 je Gruppe) analysiert und kategorisiert



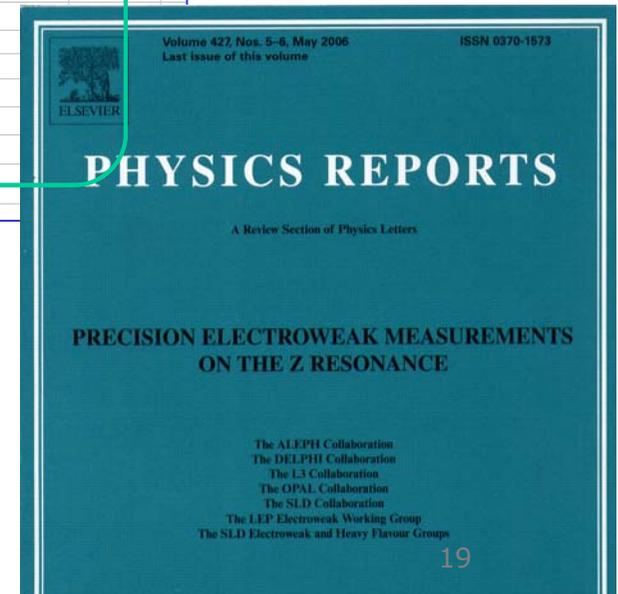
	A	B	C	D	E	F
1	Group	Electrons	Myons	Taus	Quarks	
2	A (1-100)	4	6	4	86	
3	B (101-200)	2	2	2	94	
4	C (201-300)	3	3	3	91	
5	D (301-400)	2	7	4	87	
6	E (401-500)	3	5	4	88	
7	F (501-600)	3	10	7	80	
8	G (601-700)	6	5	3	86	
9	H (701-800)	3	4	7	86	
10	I (801-900)	1	2	5	92	
11	J (901-1000)	4	0	4	92	
12						
13						
14	Sum all	Sum e	Sum μ	Sum τ	Sum q	
15	1000	31	44	43	882	
16	Sum corr	Sum e corr	Sum μ	Sum τ	Sum q	
17	1018,6	49,6	44,0	43,0	882,0	
18	Stat. Uncertainty	8,9	6,6	6,6	29,7	
19						
20	Fract. of Visible	e / all	μ / all	τ / all	q / alle	q / ((e+μ+τ)/3)
21		0,049	0,043	0,042	0,866	19,4
22	Stat. Uncertainty	0,009	0,006	0,006	0,011	2,1
23						
24	theory	0,04212	0,04212	0,04212	0,8736	20,74
	LEP Result	0,04200	0,04204	0,04208	0,8738	20,77
	Uncertainty	0,00005	0,00008	0,00010	0,0012	0,03



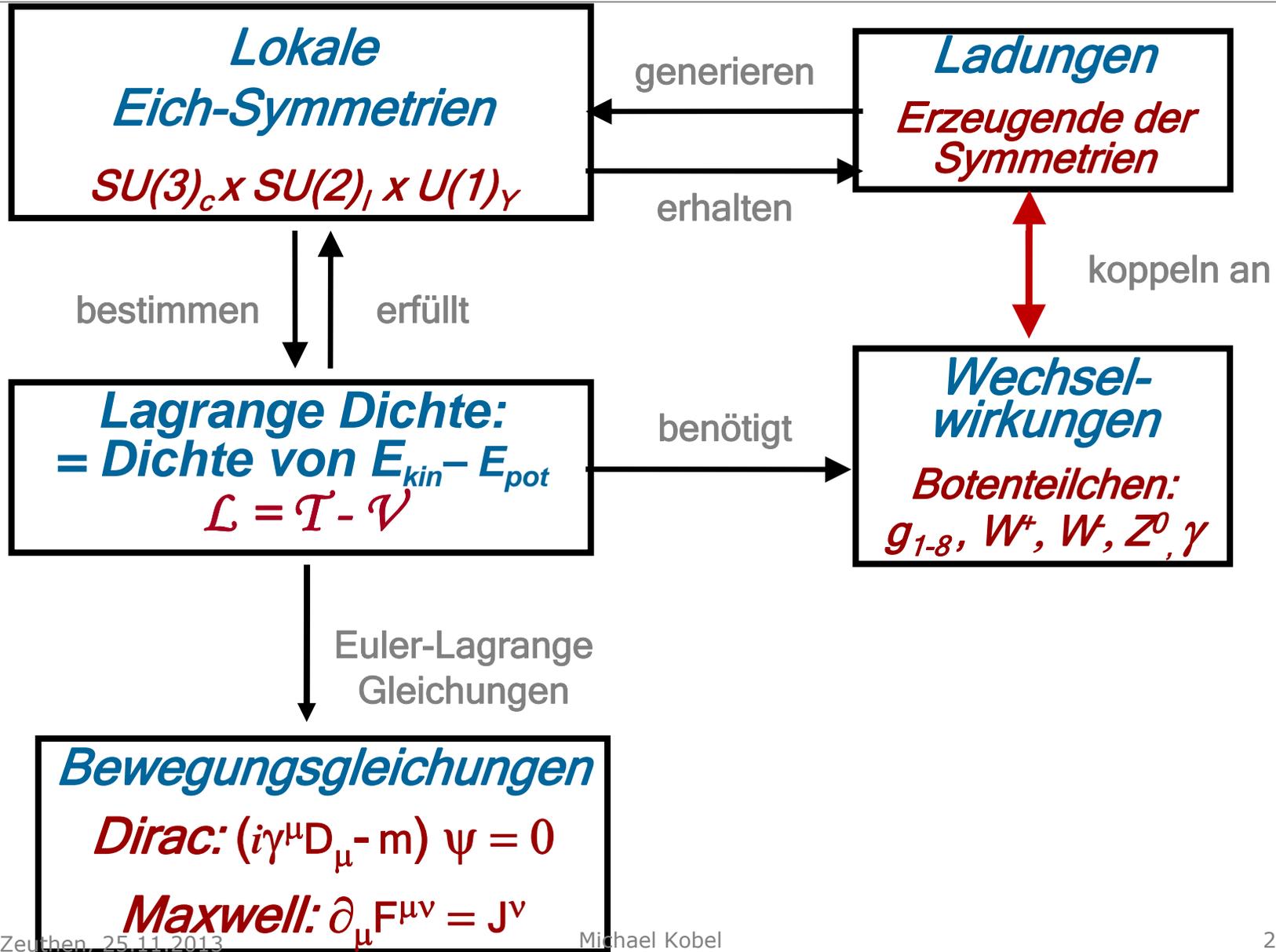
Eine der Messaufgaben die das Netzwerk Teilchenwelt an die Schulen bringt



In Einklang mit LEP Ergebnissen, publiziert in: Physics Reports, Mai 2006

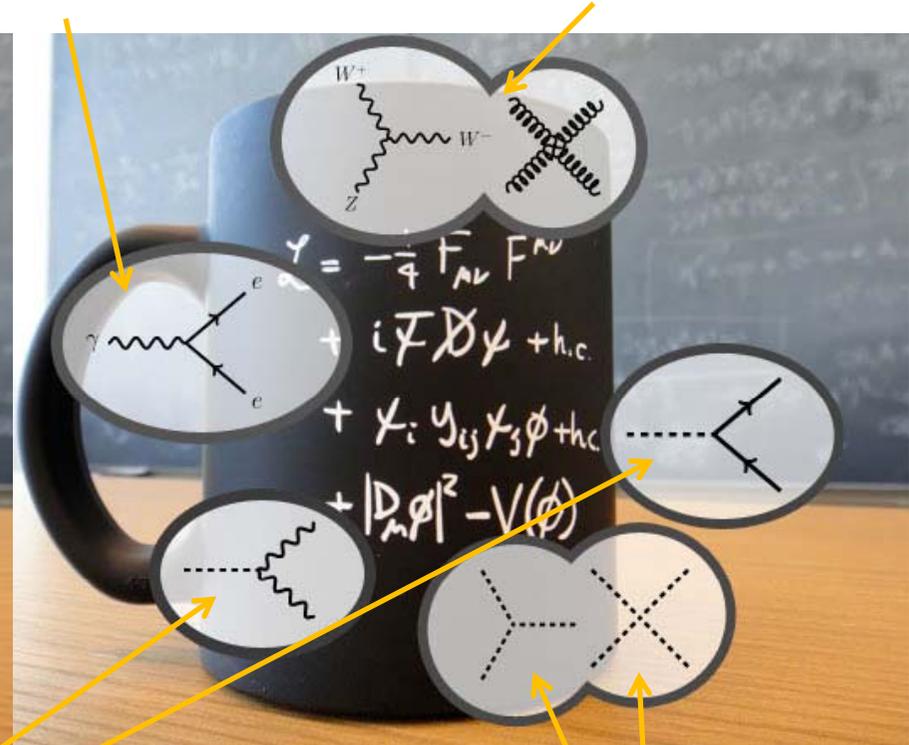
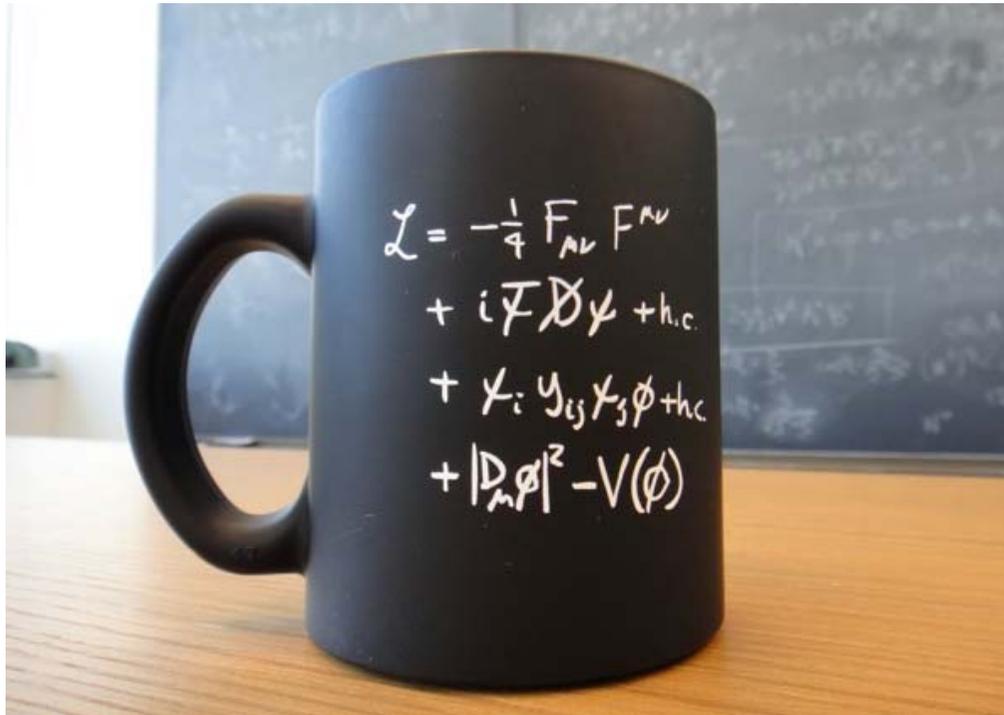


1. Wechselwirkung= Ladung+Kopplung
2. Die schwache Isospin-Ladung
- 3. ZUTATEN FÜR UNSER UNIVERSUM**
4. Spontane Symmetriebrechungen
5. Das Brout-Englert-Higgs Feld als Supraleiter



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



❖ 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)

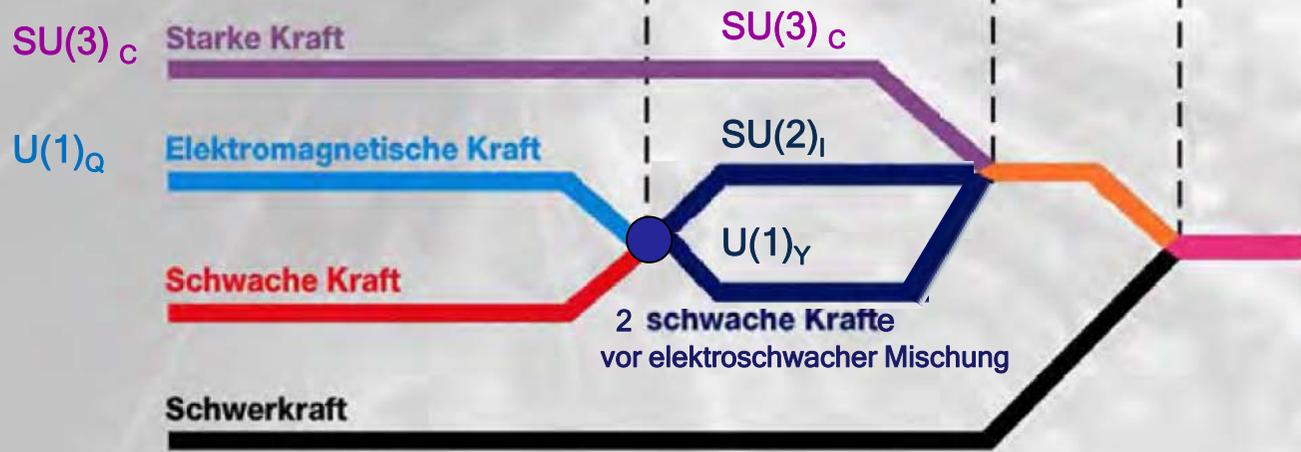
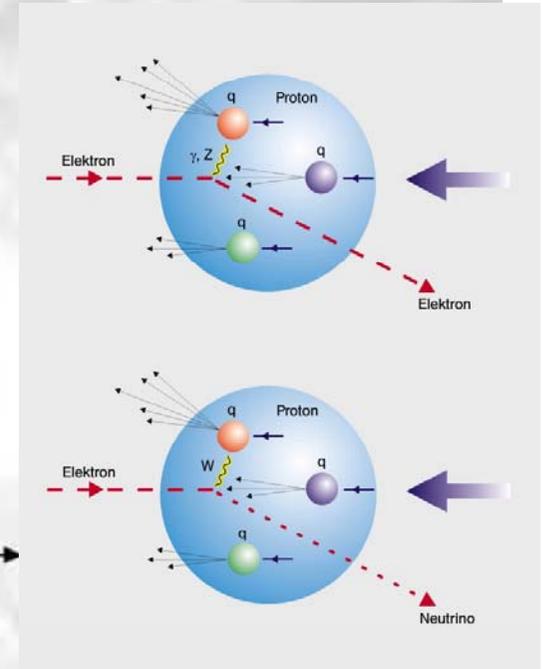
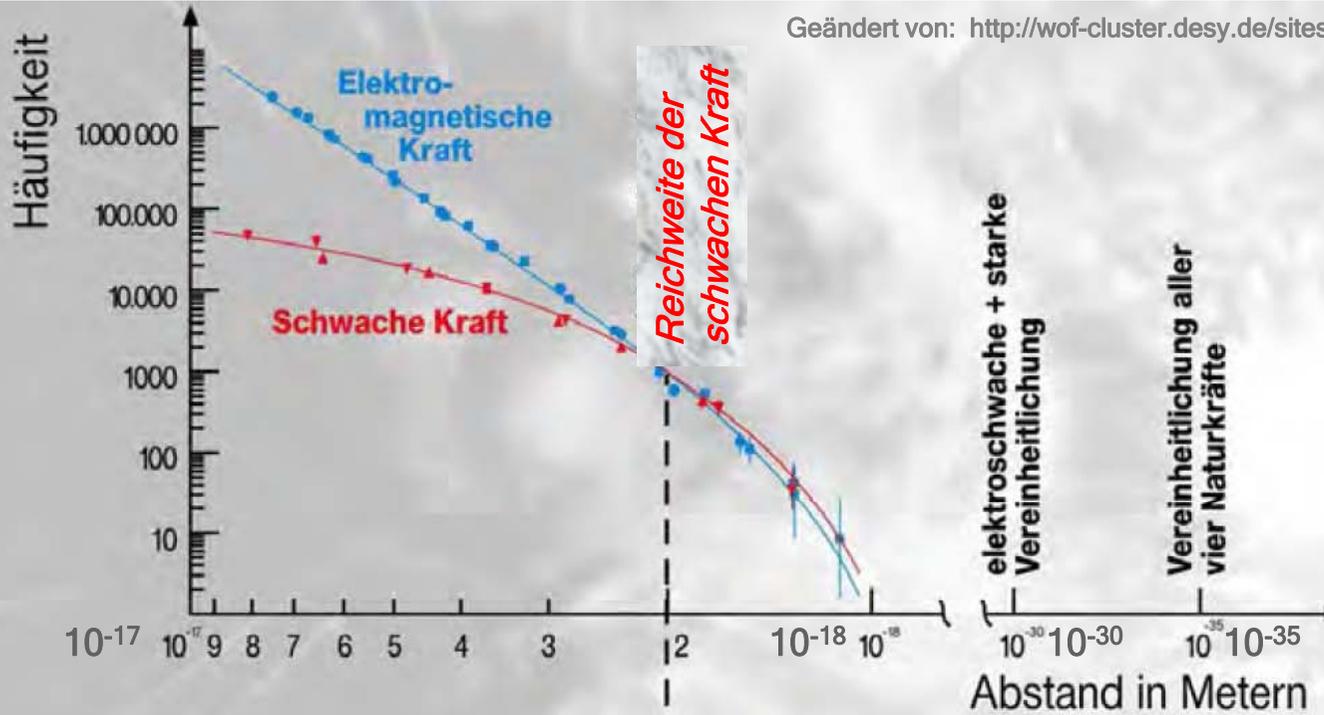
- $\frac{1}{\alpha_s} = 8 \quad \frac{1}{\alpha_W} = 29 \quad \frac{1}{\alpha_Y} = 108$ vor Kondensation des BEH-Feldes
- $\frac{1}{\alpha_{em}} = \frac{1}{\alpha_W} + \frac{1}{\alpha_Y} = 137$ nach Kondensation des BEH Feldes

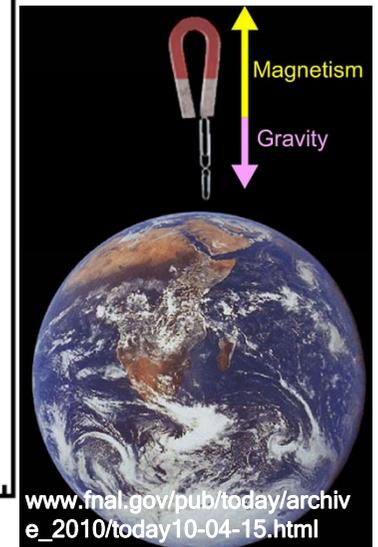
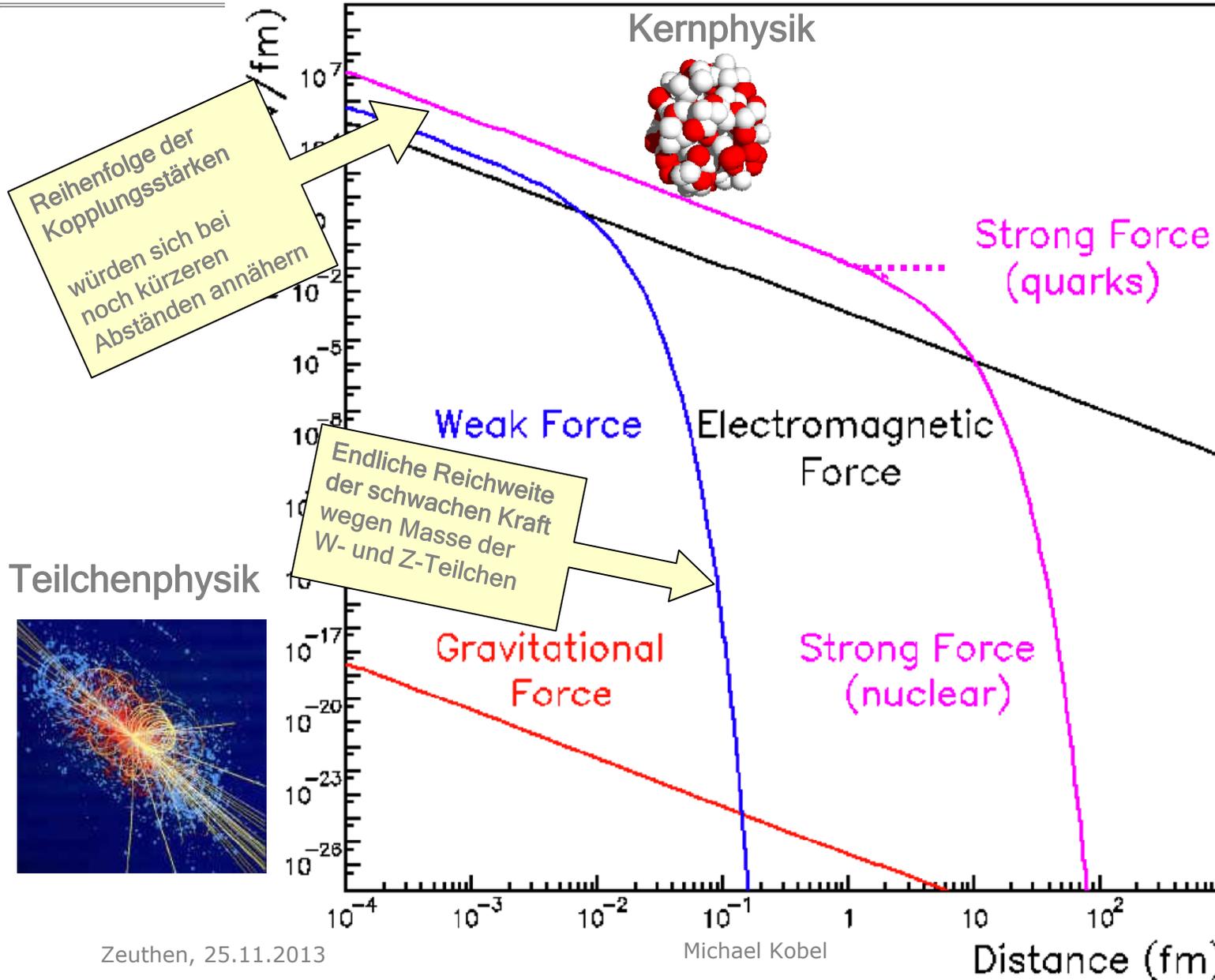
❖ **Brout-Englert-Higgs (BEH) Mechanismus** bei 10^{-12} s nach Urknall

- Kondensation eines allgegenwärtigen BEH-Feldes
- Spontane Brechung der schwachen Eichsymmetrien
- Elektroschwache Mischung von (B^0, W^0) zu (Z^0, γ)
- Generierung der Massen von W^+ , W^- und Z^0
- Mischung der Fermionen und Generierung ihrer Massen

❖ **Gravitation**

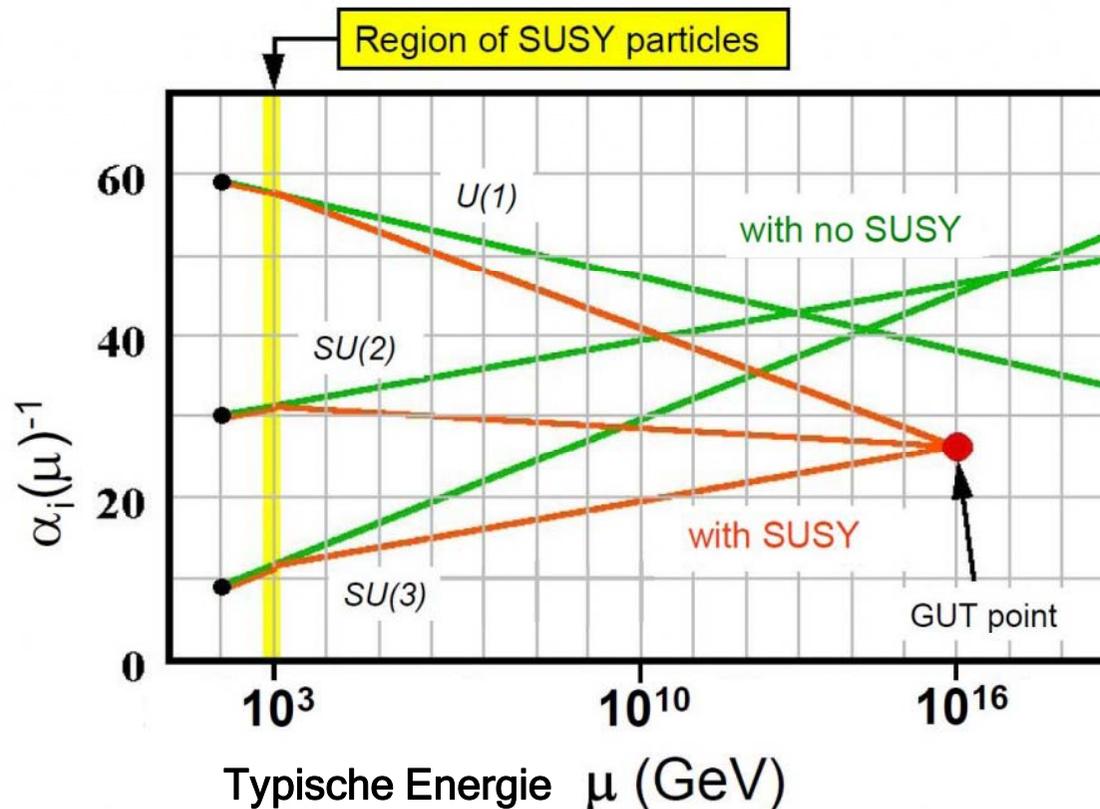
Geändert von: http://wof-cluster.desy.de/sites/images/content/e8/e76/index_eng.html







- ❖ 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!

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)



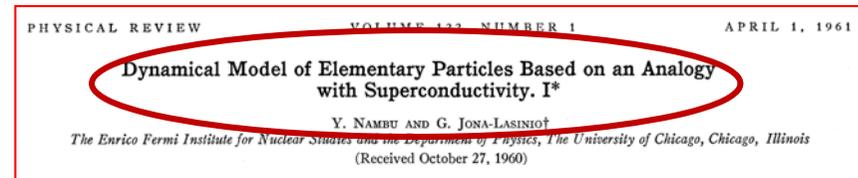
BCS theory of superconductivity

Particle Field Theory
Feynman/Dyson

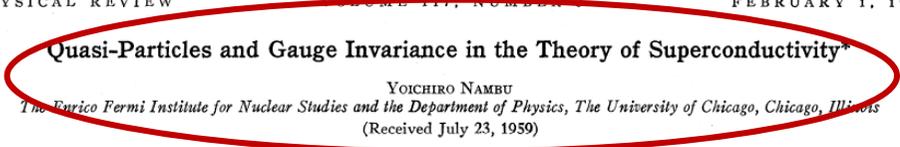


Field Theory of Strong Interactions

http://prola.aps.org/abstract/PR/v122/i1/p345_1



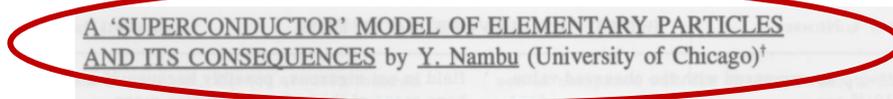
PHYSICAL REVIEW VOLUME 111, NUMBER 1 FEBRUARY 1, 1960



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



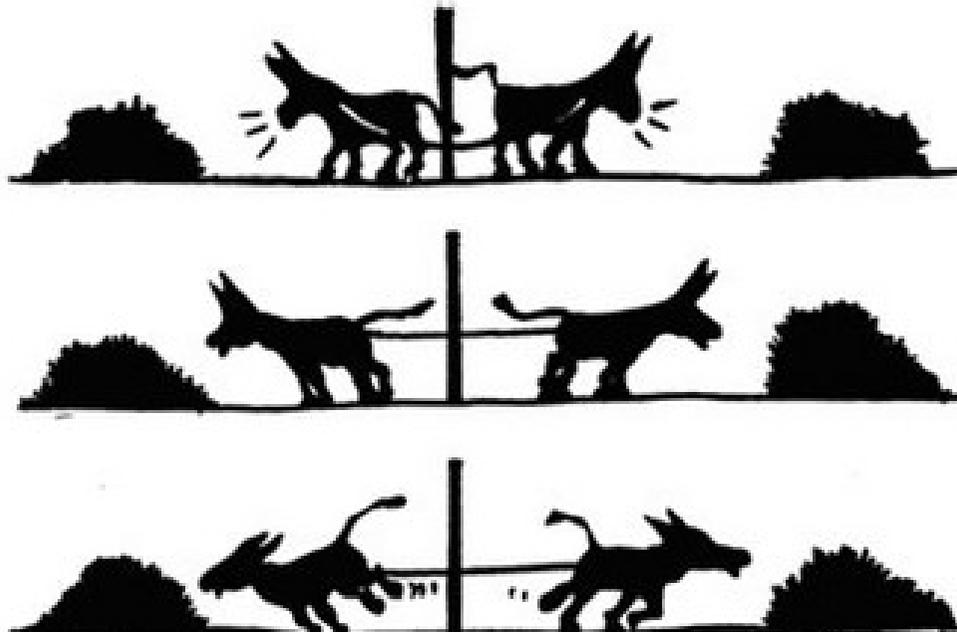
(In absence of the author the paper was presented by G. Jona-Lasinio.)

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-

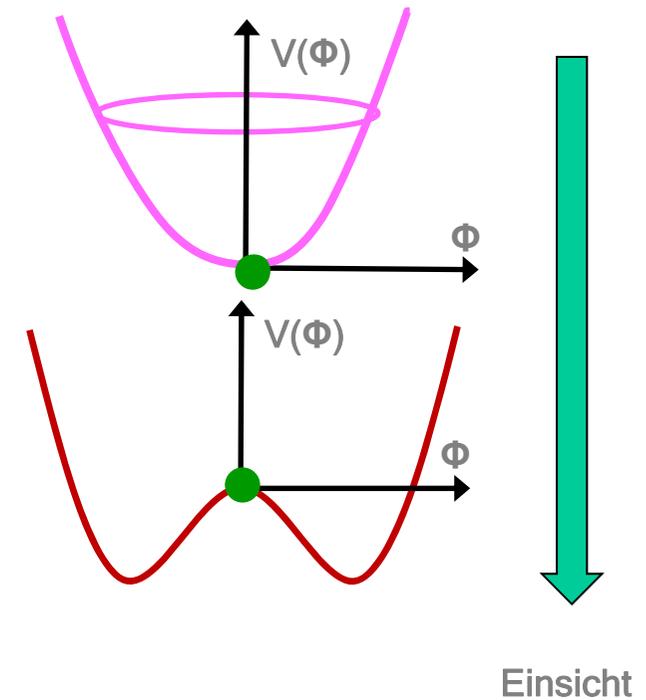


- ❖ Ausgangslage: **Symmetrische Konfiguration**
(hier Spiegelsymmetrie zweier hungriger Esel)



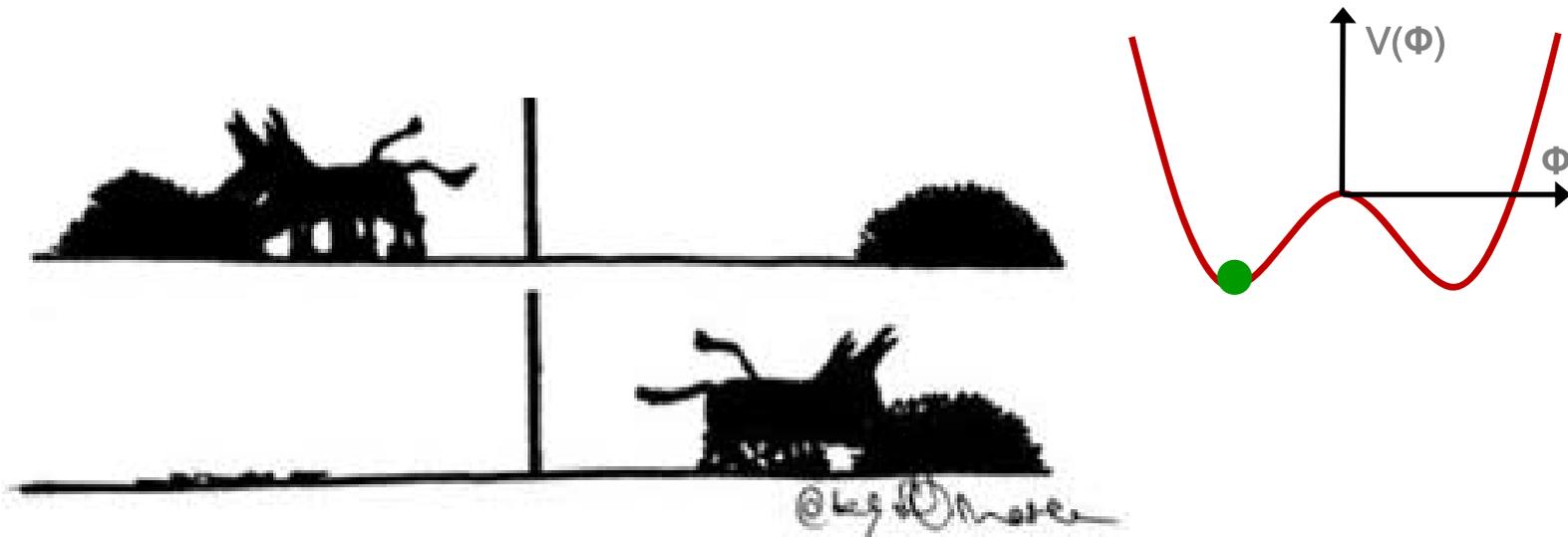
<http://www.g2webdesign.de/mediation/WasIstMediation.html>

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



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

- ❖ Es entsteht ein neuer **unsymmetrischer Grundzustand**, mit **endlicher Auslenkung Φ**

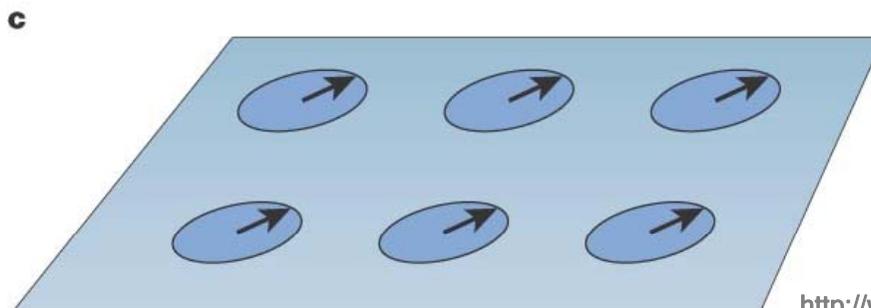
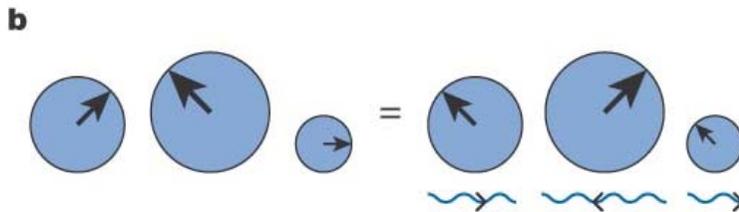
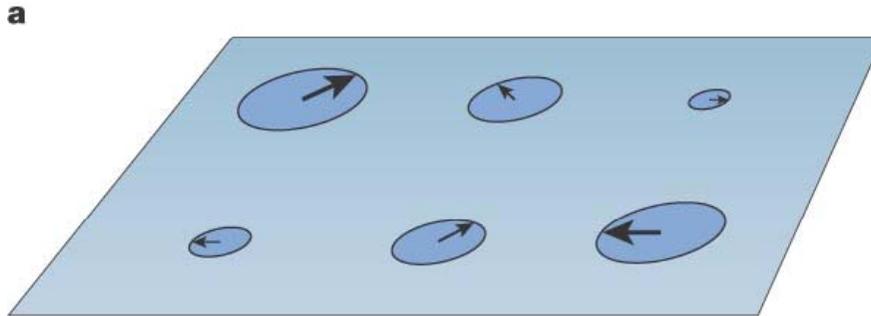


- ❖ Quantenmechanisch entspricht dies einem überall im Vakuum vorhandenen Feld mit endlichem Wert

Überblick einiger spontaner Symmetriebrechungen

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

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**



❖ Ungeordneter Zustand bei hohen Temperaturen: alle Phasen der Cooperpaare zufällig verteilt (=eichsymmetrisch)

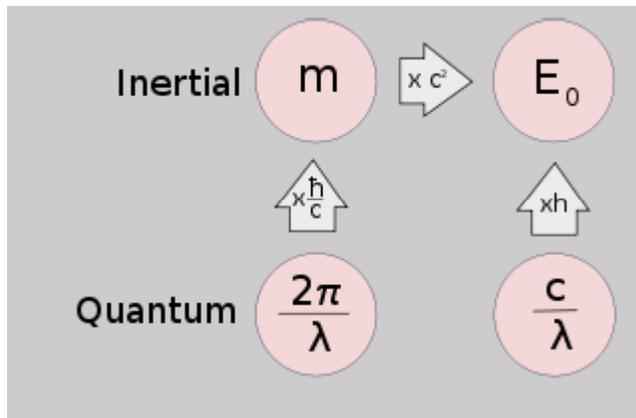
❖ → Phasen können ohne Energieaufwand durch masselose Photonen lokal geändert werden

❖ Unterhalb T_C : Kondensat
Alle Cooperpaare „in Phase“

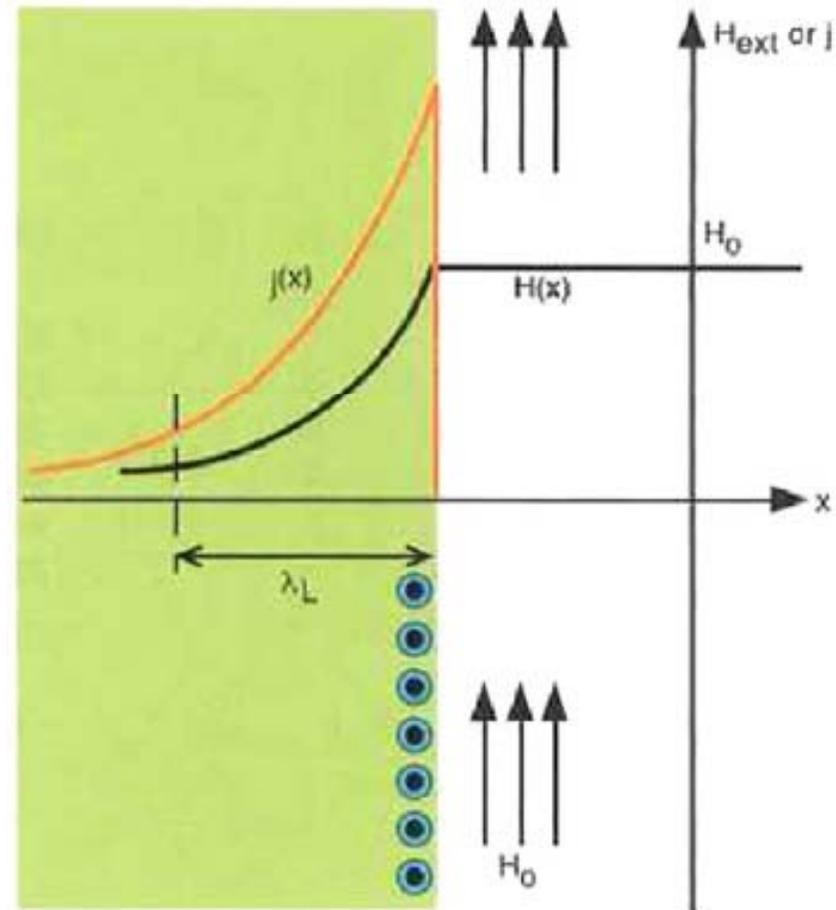
- U(1) Phasensymmetrie gebrochen
- Anregung = Streuung am Gitter kostet Energie
- → Cooperpaare bewegen sich ohne Widerstand

http://www.nature.com/nature/journal/v433/n7023/fig_tab/nature03281_F1.html

- ❖ Ströme schirmen alle elektromagnetischen Felder = Photonen ab
- ❖ Charakteristische Länge: London-Eindringtiefe λ_L äußerer Magnetfelder
- ❖ Endliche Reichweite λ_L von Photonen entspricht **massiven Photonen** (s. Comptonwellenlänge:



http://en.wikipedia.org/wiki/Compton_wavelength



<http://www.globalspec.com/reference/51122/203279/penetration-depth-of-a-magnetic-field-in-superconductor>



❖ 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

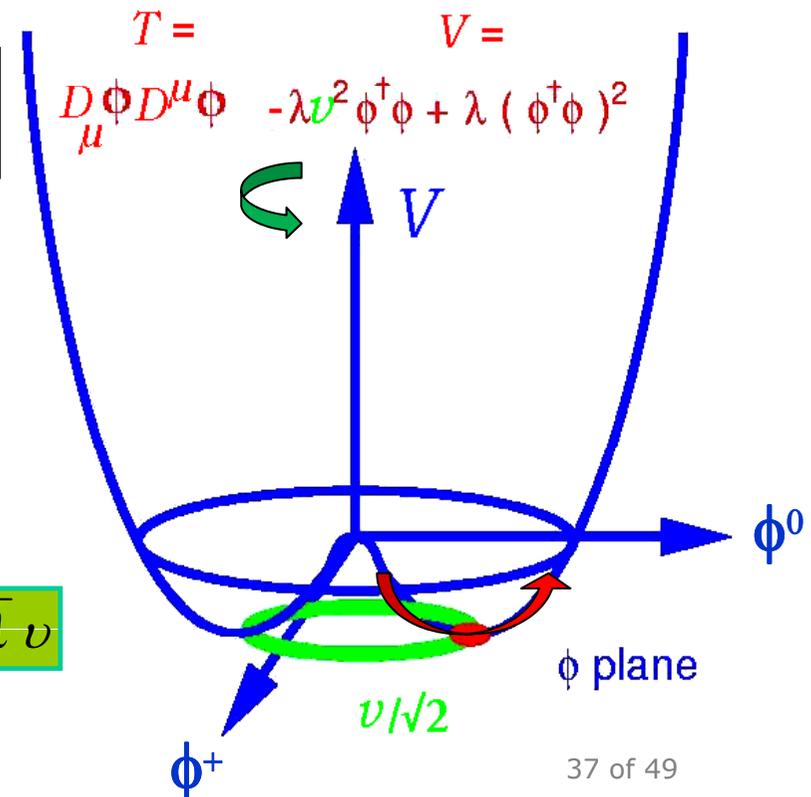
- Grundzustand $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$ bricht $SU(2)_I$ Rotationssymmetrie

- 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

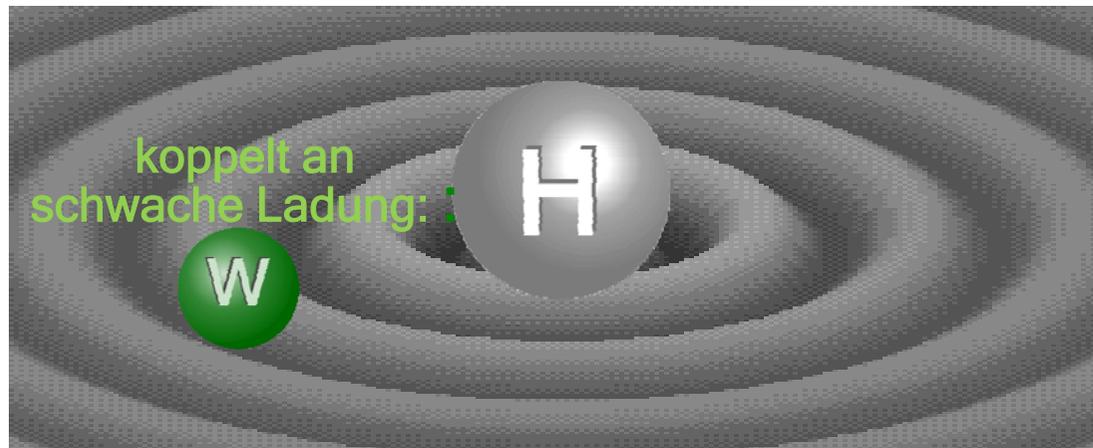
- $v = 246 \text{ GeV}$ (Wert des Hintergrundfelds)
- $\lambda = 0.13$ (Zähigkeit des BEH-Feldes -> Masse d. Higgs-Bosons)

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



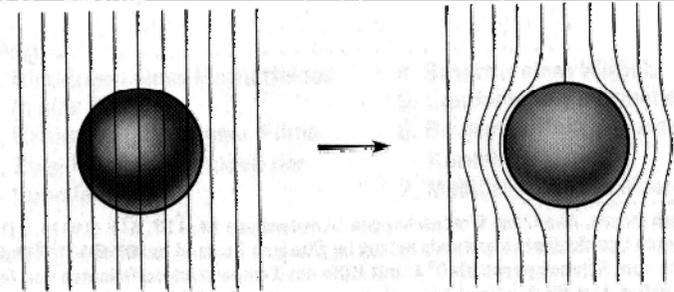


- ❖ Brout-Englert-Higgs Feld $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu \end{pmatrix}$ $\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu + H \end{pmatrix}$
- ❖ ist Kondensat (See) mit schwacher Ladung $I_3^W = -1/2$
 - Kann durch Ströme schwache Ladungsfelder kompensieren
 - Begrenzt damit 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!)



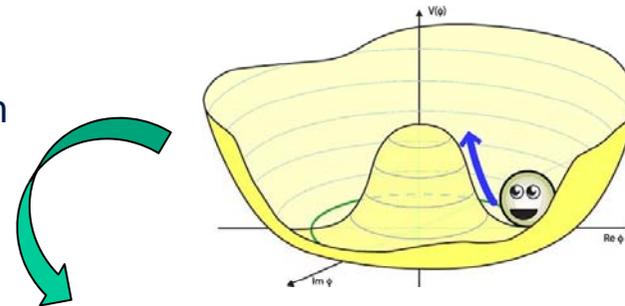
$$m_W = \frac{1}{2} g_W \nu$$

- ❖ *Meißner Effekt im Supraleiter:
B-Feld (Photonen)
erhalten endliche Reichweite (=Masse)
im Cooper-Paar Hintergrundfeld*

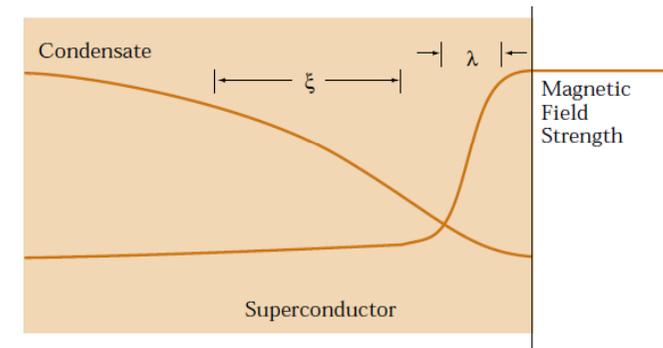
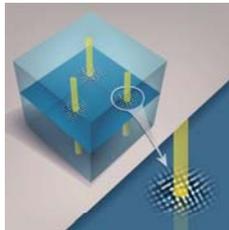


	Higgs Mechanismus	Supraleitung
Hintergrundfeld	BEH Feld	Cooper Paare
Natur	Bosonisch, S=0	Bosonisch, S=0
Amplitude Φ	v	$\sqrt{(n_{CP}/M_{CP})}$
Ladung C	$I_3^W = -1/2$	$Q = -2$
Kopplung g	g_W	e
Meißner Effekt	$\exp(-r/\lambda_W)$	$\exp(-r/\lambda_L)$
Reichweite $\lambda = \hbar/mc$	0,000.000.0025 nm	10 - 100 nm
Masse $m = Cg\Phi$	$m_W = 1/2 g_W v$	$m_\gamma = 2e\sqrt{(n_{CP}/M_{CP})}$

- ❖ massive Anregungen des Ordnungsparameters nach spontaner Symmetriebrechung:
 - Supraleiter: periodische Variation der Dichte n des Cooperpaar-Kondensats (beob. 2013!)
 - BEH-Feld: lokale Variation von $v+H(x)$ = Higgs Bosonen



- ❖ zweite damit verbundene Längenskala
 - Im Supraleiter : Kohärenzlänge ξ
 - $\xi > \lambda_L$: Typ-I Supraleiter
 - $\xi < \lambda_L$: Typ-II Supraleiter (dort sind Flussschläuche möglich)



Behavior of the magnetic field and the superconducting condensate near the surface of a superconductor to which an external magnetic field has been applied.

SLAC Beamline 1996:
Lance Dixon
„From Superconductors
to Supercolliders“
www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/26/1/26-1-dixon.pdf

- Im BEH-Feld : (Compton)wellenlänge der Higgs Anregung
 - $\lambda_H = \hbar/m_H c = 0,000.000.0016 \text{ nm} < \lambda_W = \hbar/m_W c$
 - → Typ II Supraleiter für schwache Ladungen

BEH-Feld als kosmischer Supraleiter - im Vergleich zu elektrischen Supraleitern -

- ❖ Wirkt ca 10 Milliarden Mal effektiver
 - Abschirmlänge (0,0025 fm) ist 10 Milliarden mal kleiner!

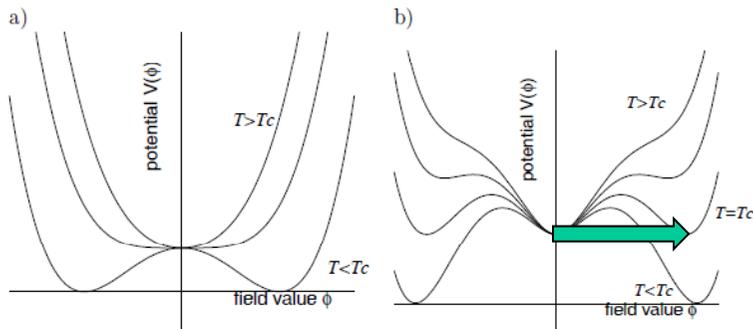
- ❖ Ist ca 100.000 Milliarden mal stabiler
 - Um das BEH-Feld zu „verdampfen“, müsste man ein Volumen im Weltall auf die kritische Temperatur von 3×10^{15} K erhitzen (= 250 GeV, 200 Millionen Mal heißer als im Sonneninneren !)
Ein wirklicher hoch- T_C Supraleiter!

- ❖ Ist ein Typ-II Supraleiter
 - Könnte also prinzipiell beim Phasenübergang „damals“ Flußschläuche („cosmic strings“) eingefroren haben, in denen das BEH-Feld Null ist. (ist aber unwahrscheinlich)



❖ Mögliche Arten:

- 1. Ordnung (b)
Ordnungsparameter Φ springt (**Wassertröpfchen**)
- 2. Ordnung
Ordnungsparameter Φ stetig mit Knick (**elektrische Supraleitung**)
- *Cross-over (a):*
Ordnungsparameter Φ stetig ohne Knick (*Koexistenz der Phasen*) (**BEH-Feld Kondensation für $m_H > 75$ GeV im SM**)

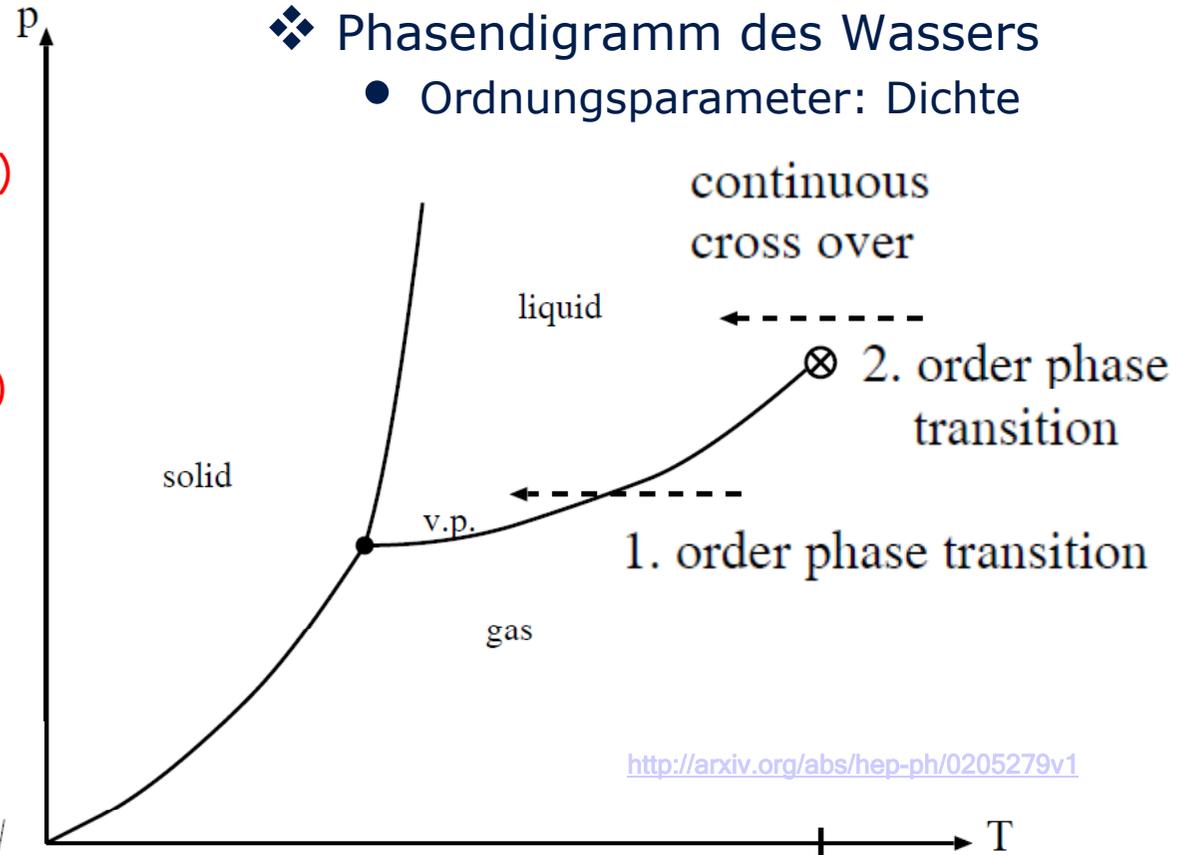


<http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/0307387v2>

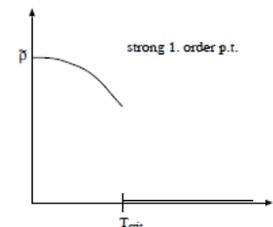
Zeuthen, 25.11.2013

❖ Phasendiagramm des Wassers

- Ordnungsparameter: Dichte



<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0205279v1>



Michael Kobel



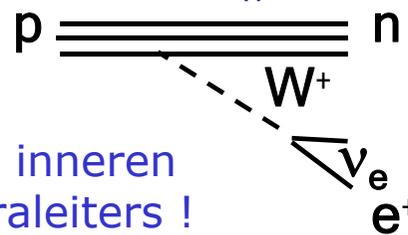
View Online: <http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn>

Download: : www.teilchenphysik.de/multimedia/informationmaterial/veranstaltungen

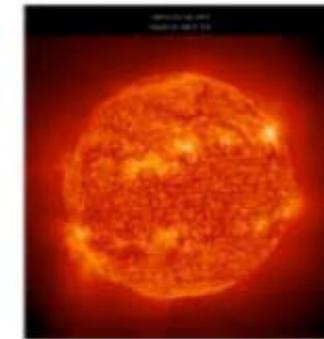
- ❖ Massen von Elementarteilchen bestimmen den Ablauf der Kosmologie
- ❖ W-Masse bestimmt z.B. die Geschwindigkeit von Prozessen der schwachen Wechselwirkung

❖ 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 $\sim (\Delta E / m_W)^4 > 10^{-20}$

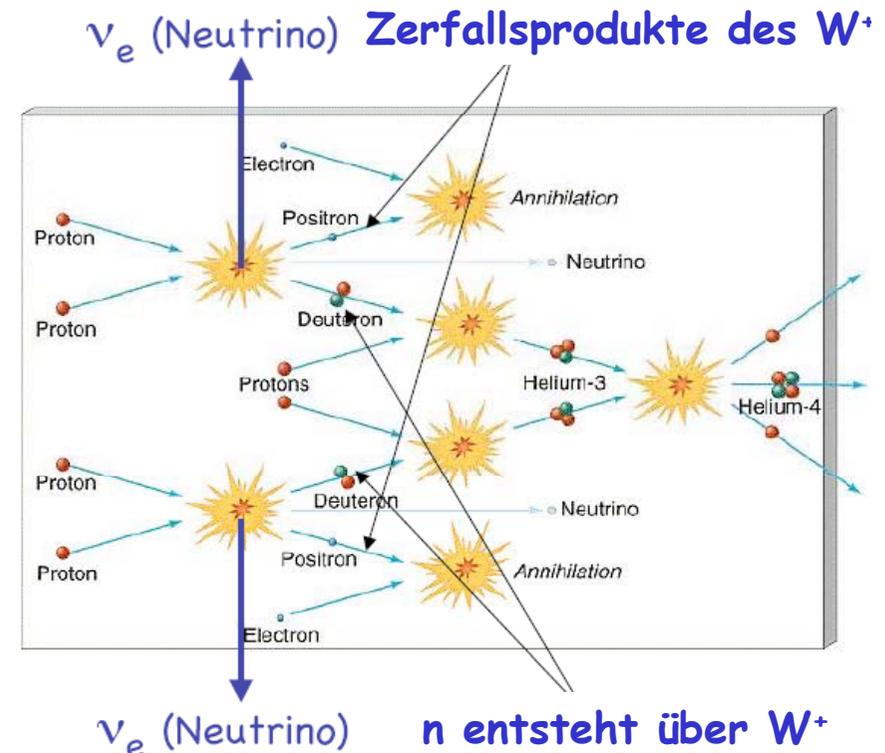


- Sonne brennt im inneren eines schw. Supraleiters !



❖ Weiterführende Literatur

- http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951_1
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)





BACKUP



zu Raum:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

zu Masse:

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein

neue und schwere Materie

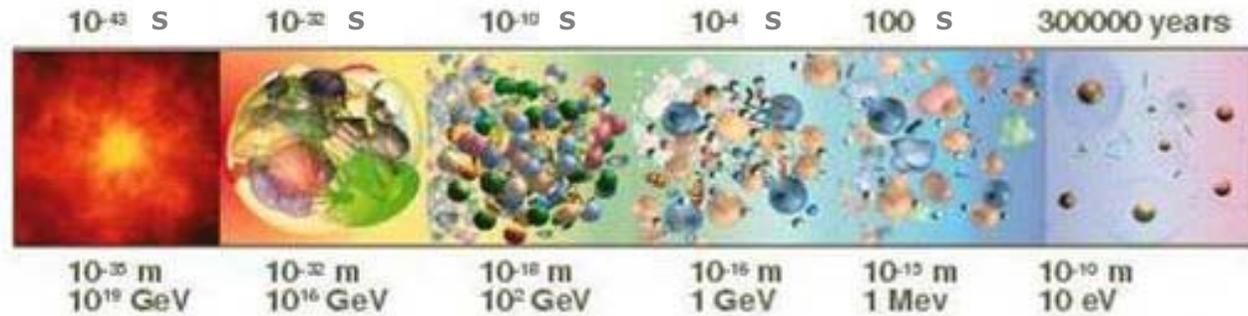
zu Zeit:

$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

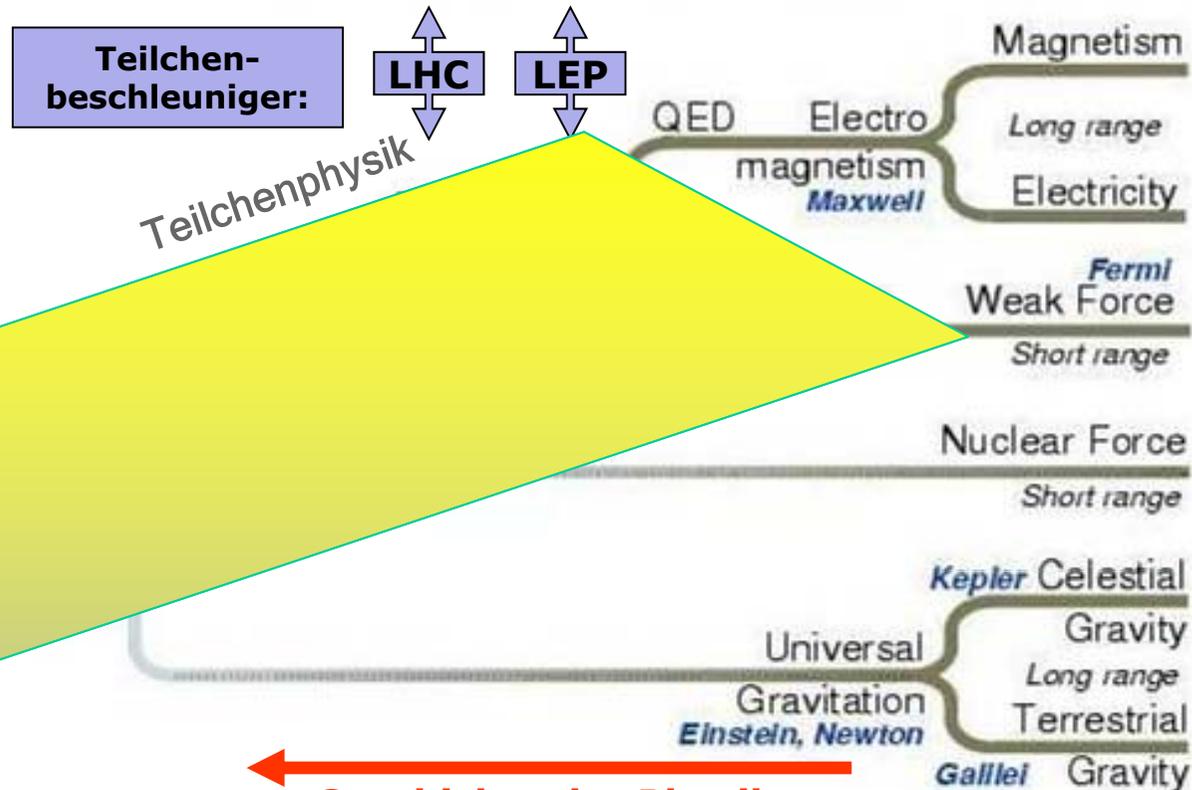
hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit



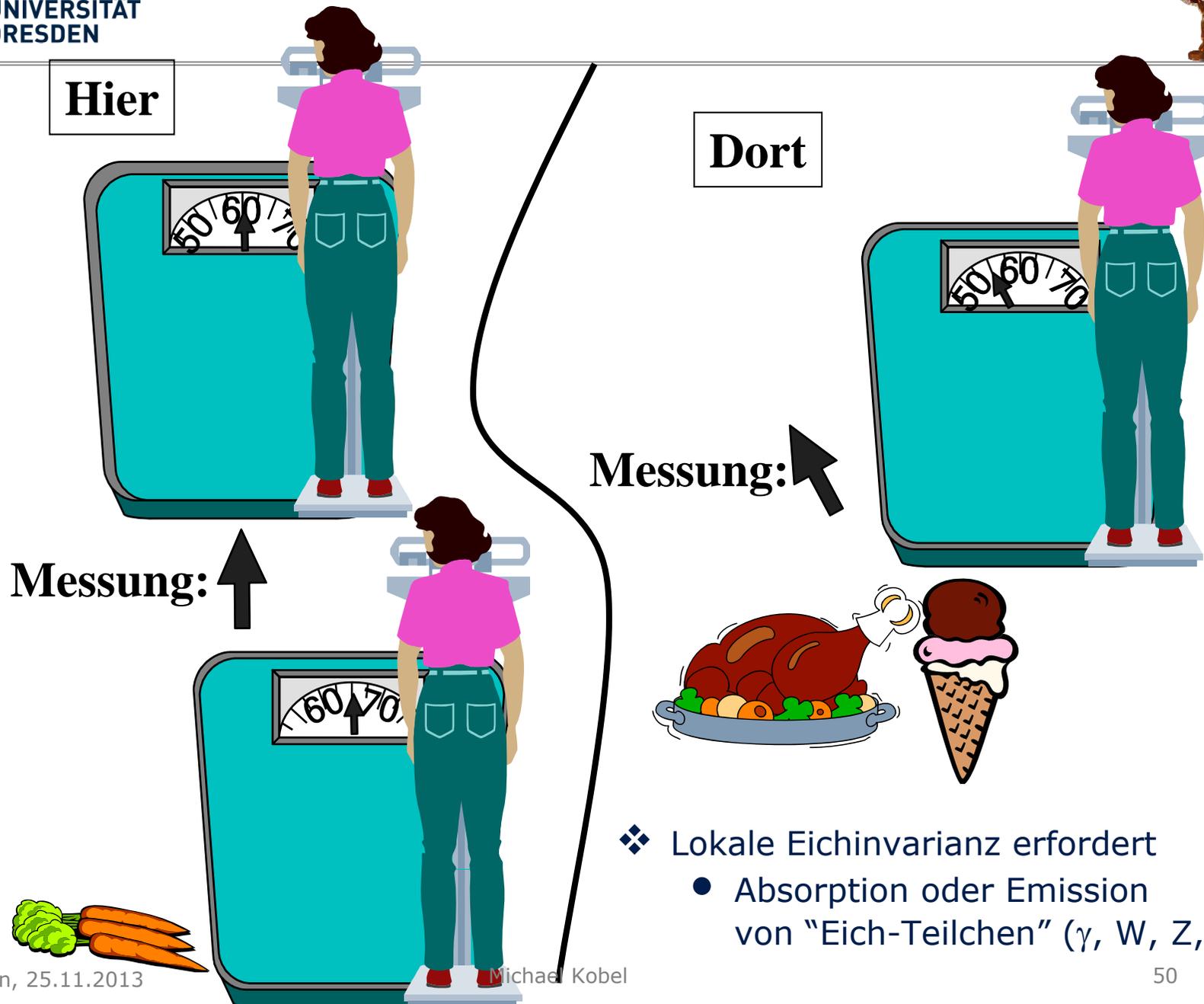
• **LHC:**

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



Geschichte der Physik Zurück zum Urknall







- ❖ 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)*

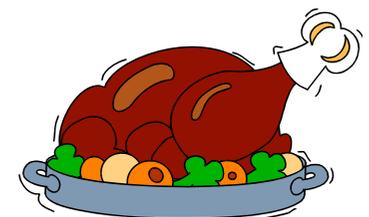
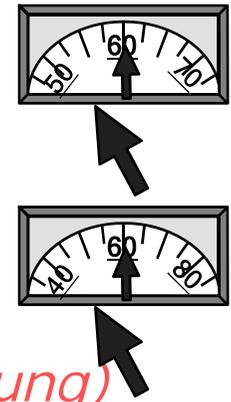
- *Häufigkeit der Gewichtskontrolle (Kopplung $g_e = e$)*

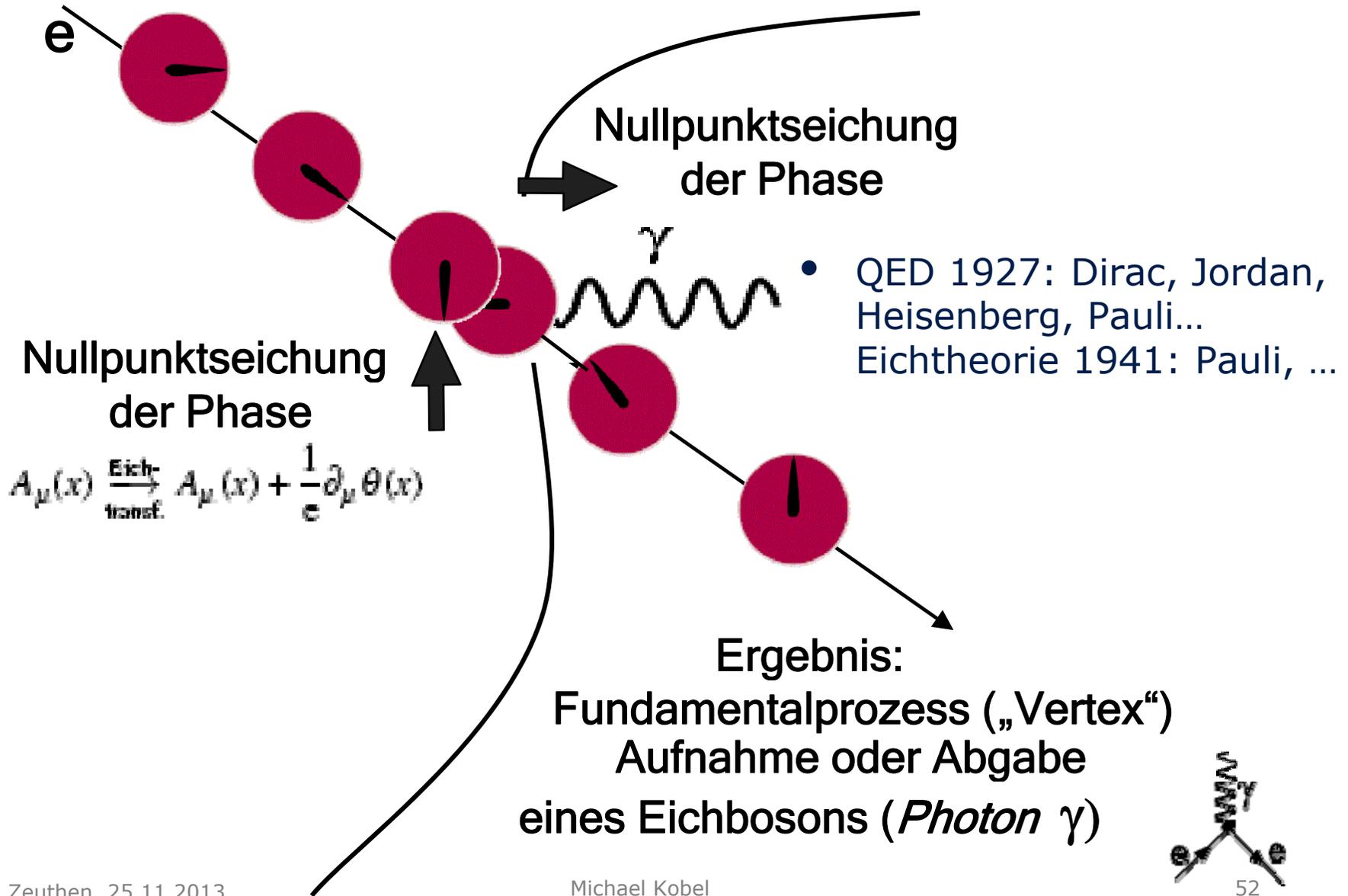
- ❖ Zunahme oder Abnahme von *Gewicht (Phase)*

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

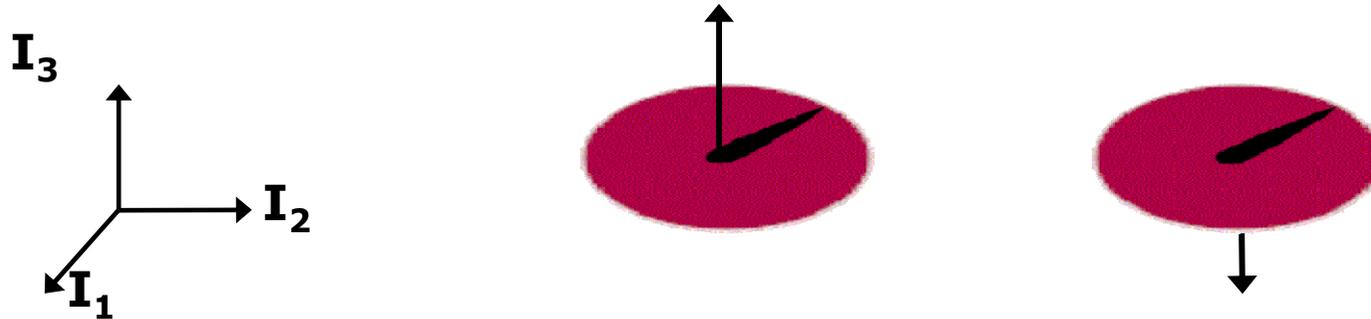
- ❖ Menge der *Zu- und Abnahme (Vertex- Amplitude)*

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





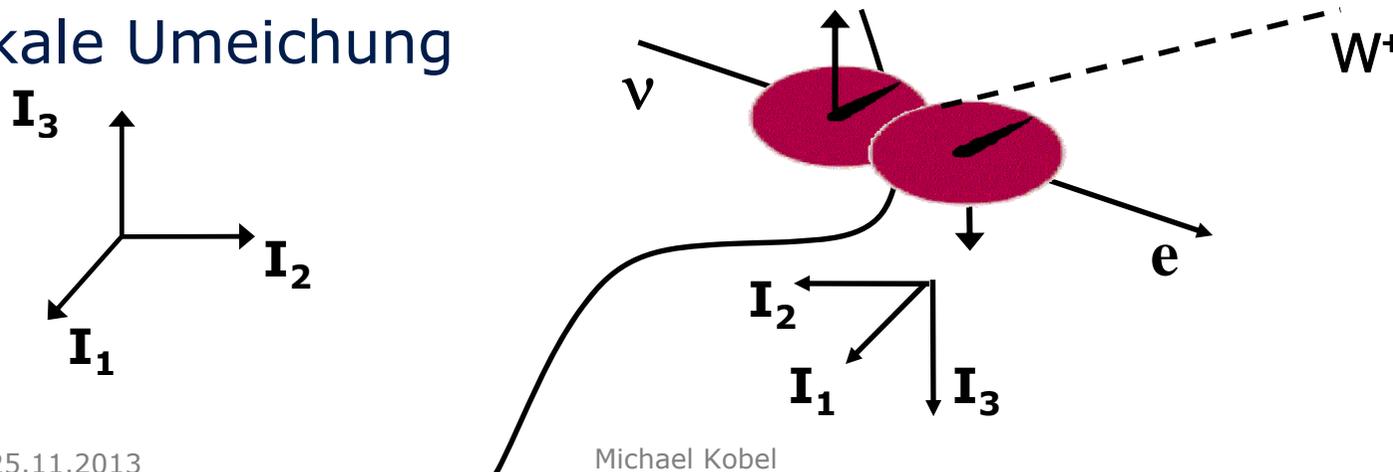
❖ 1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung



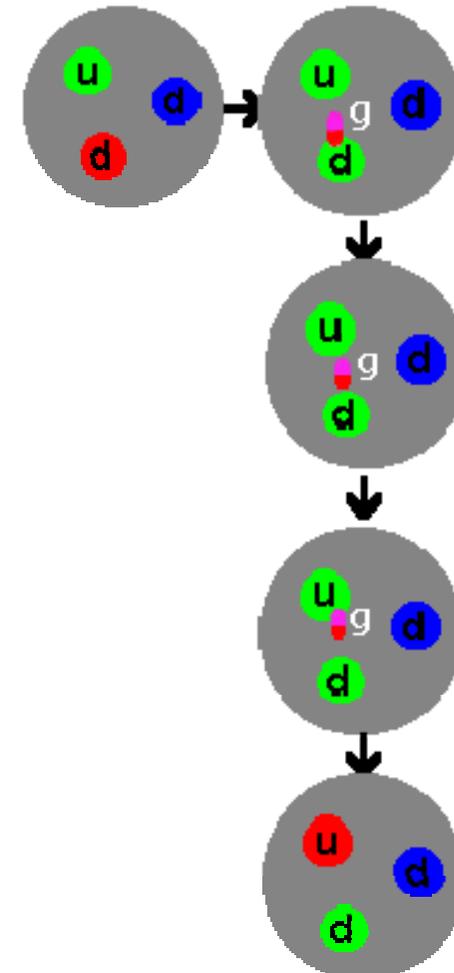
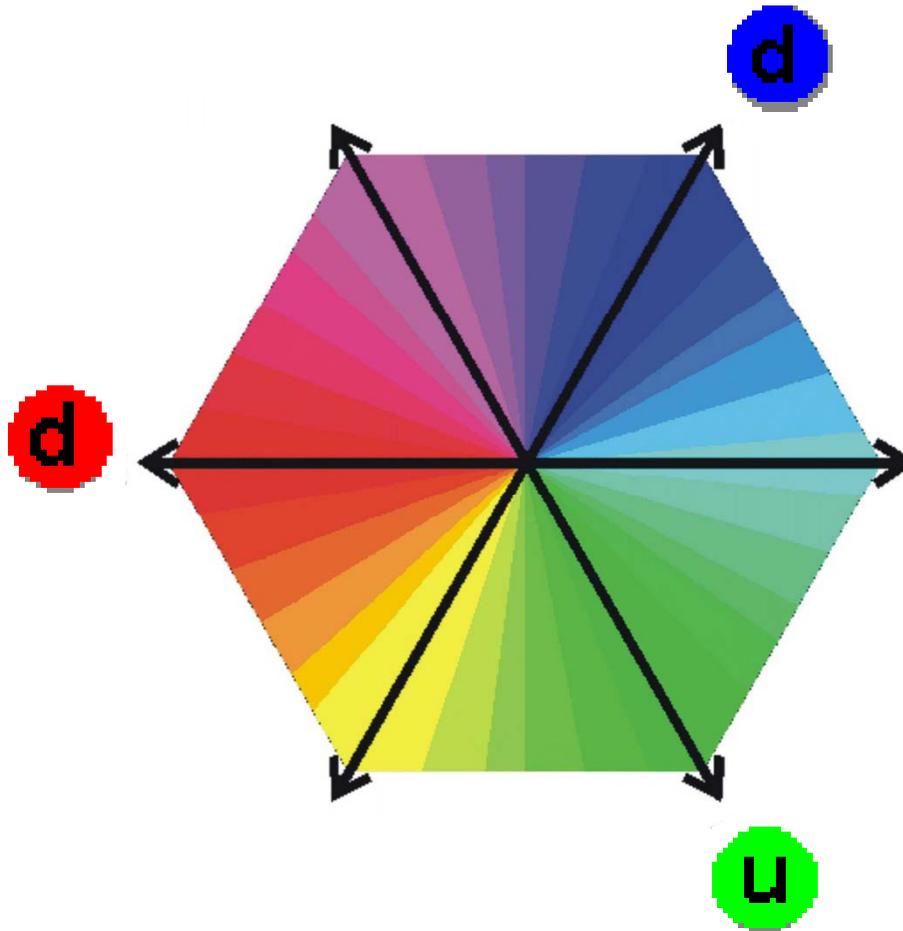
Neutrino: $I_3 = 1/2$ Elektron: $I_3 = -1/2$
 Up-Quark: $I_3 = 1/2$ Down-Quark: $I_3 = -1/2$

Idee: (ν , e) und (u , d) unterscheiden sich *nur* durch die „Richtung“ eines Pfeils (schwache Ladung I^w)

❖ lokale Umeichung

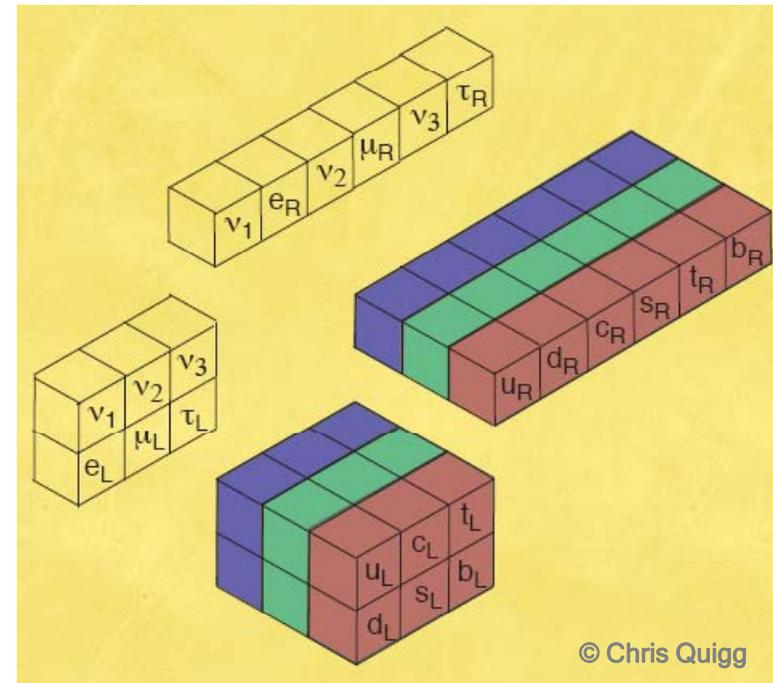
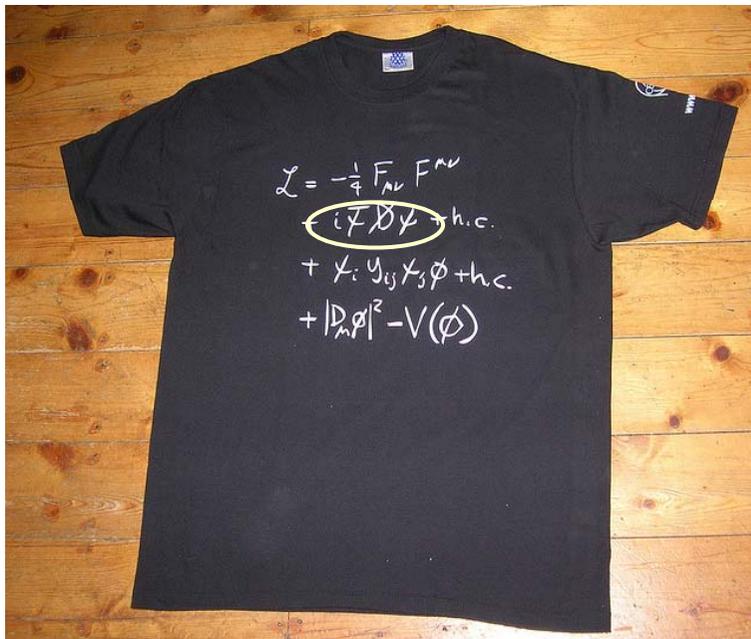


- ❖ 1973: Gross, Politzer, Wilczek, Nambu, Fritzsche...
starke WW durch Umeichung der Farbladung





- ❖ 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 **Darstellungen** bzgl. der 3 Symmetrie-Gruppen



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

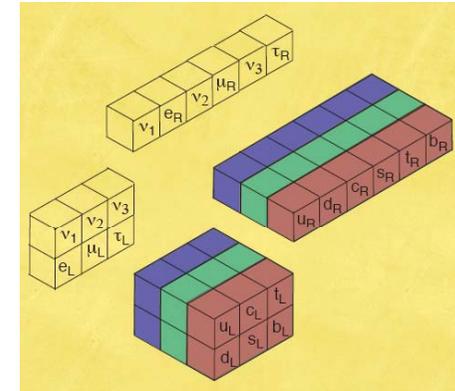


❖ **Symmetrien der Elektromagnetischen und starken Wechselwirkung**

- ✓ Erfordern masselose Austauschteilchen
- ✓ erlauben Teilchenmassen, da alle Massen im Multipllett gleich

❖ **Symmetrie der schwachen Wechselwirkung**

- ✗ Erfordert masselose Austauschteilchen
- ✗ Erfordert zusätzlich masselose Bausteinteilchen

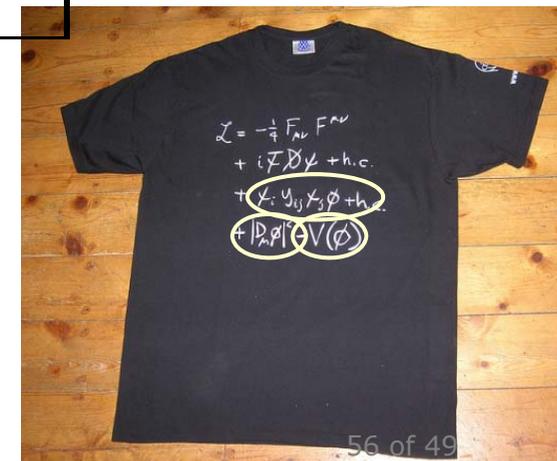


(GeV)	Experim.	Theorie
m_W	80.4	0
m_Z	91.2	0
m_t	173.2	0
m_b	4.2	0
...		0
m_e	0.000511	0
...		0



❖ **Lösung: Spontane Symmetriebrechung (Nambu 1960)**

- Gibt Austauschteilchen (W und Z) Masse: Brout&Englert, Higgs, Hagen&Guralnik&Kibble (1964)
- Kann auch allen Bausteinteilchen Masse geben Weinberg (1967), Salam(1967)





❖ 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: $m=0$,**

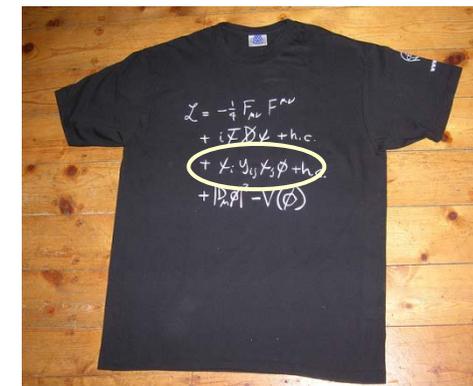
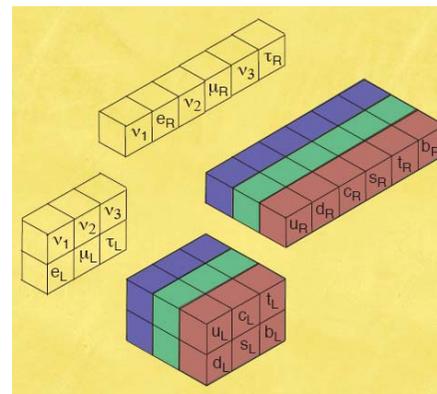
weil $m_i \bar{\ell}_R \begin{pmatrix} \nu_L \\ \ell_L \end{pmatrix} + \dots$ ein schwacher Vektor und nicht invariant unter $SU(2)$ Drehungen ist

❖ Lösung (Weinberg 1967)

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

Skalarproduktes $y_i \bar{\ell}_R \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ \ell_L \end{pmatrix}$
 das eich(=dreh) invariant ist

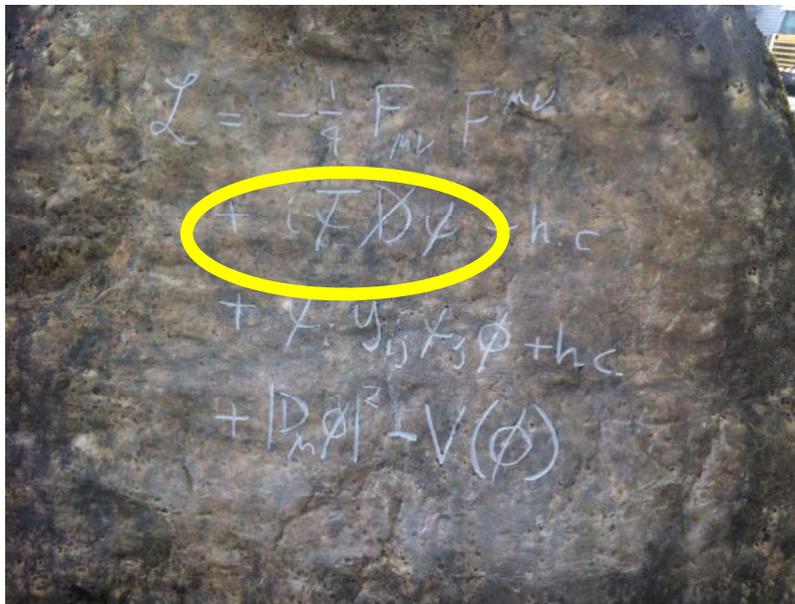
- ❖ Bedarf an jedem der 12 Fermionen eine neue „Yukawa“-Kopplung $y_f \sim m_f$
- ❖ Erklärt **nicht** den Massenwert, sondern erklärt, was Masse ist



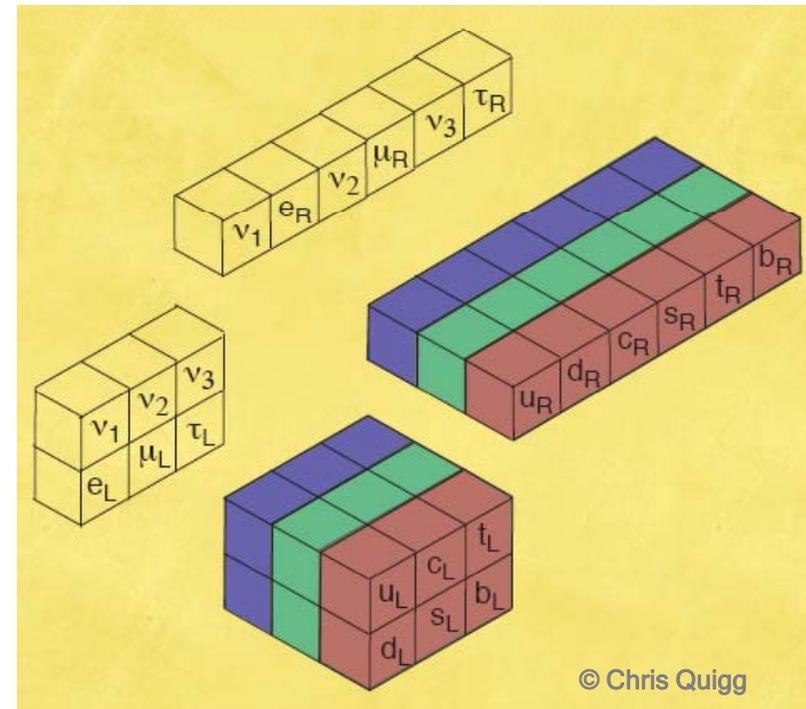


- ❖ 3 types of **charges** generate 3 Symmetry Groups:
 - $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$

- ❖ local Gauge Symmetries are fully predicting the Lagrange Density \mathcal{L} requiring Gauge Bosons to mediate **interactions** between fermions



- ❖ fundamental fermions f_L and f_R come in certain **representations** w.r.t. the 3 Symmetry Groups (depending on their chirality L,R)



- ❖ these define their charge eigenvalues and thus sensitivity to interactions



- 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!**

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

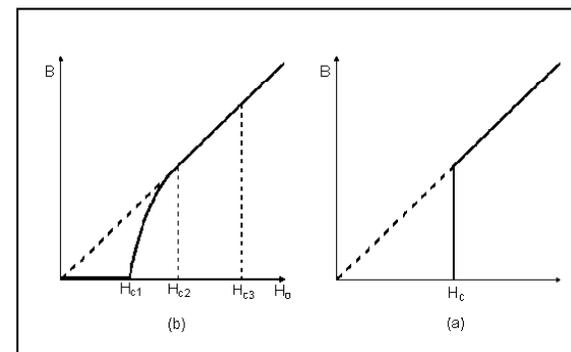
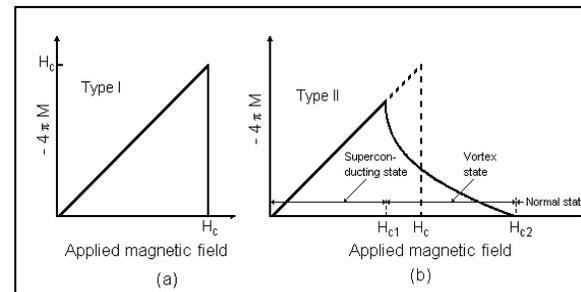
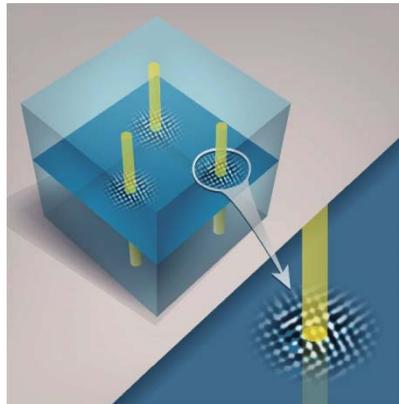
- Erzeugung der Baustein-Massen
 - Postulat (Weinberg): Jedes Baustein-Teilchen f koppelt **mit seiner eigenen Kopplung y_f** an das Hintergrundfeld

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

- ❖ Pure Metalle: Typ-I Supraleiter
- ❖ Metall-verbindungen: Typ-II Supraleiter

Superconductor	$\lambda_L(0)$ (nm)	ξ_0 (nm)	κ
Al	16	1500	0.011
In	25	400	0.062
Sn	28	300	0.093
Pb	28	110	0.255
Nb	32	39	0.82
Ta	35	93	0.38
Nb ₃ Sn	50	6	8.3
NbN	50	6	8.3
Yba ₂ Cu ₃ O _x	140	1.5	93

http://www.cockcroft.ac.uk/education/PG_courses_2006-7/Delayen_Notes/Daresbury%202007%20-%202001-02%20-%20SC%20-%20Physics.pdf



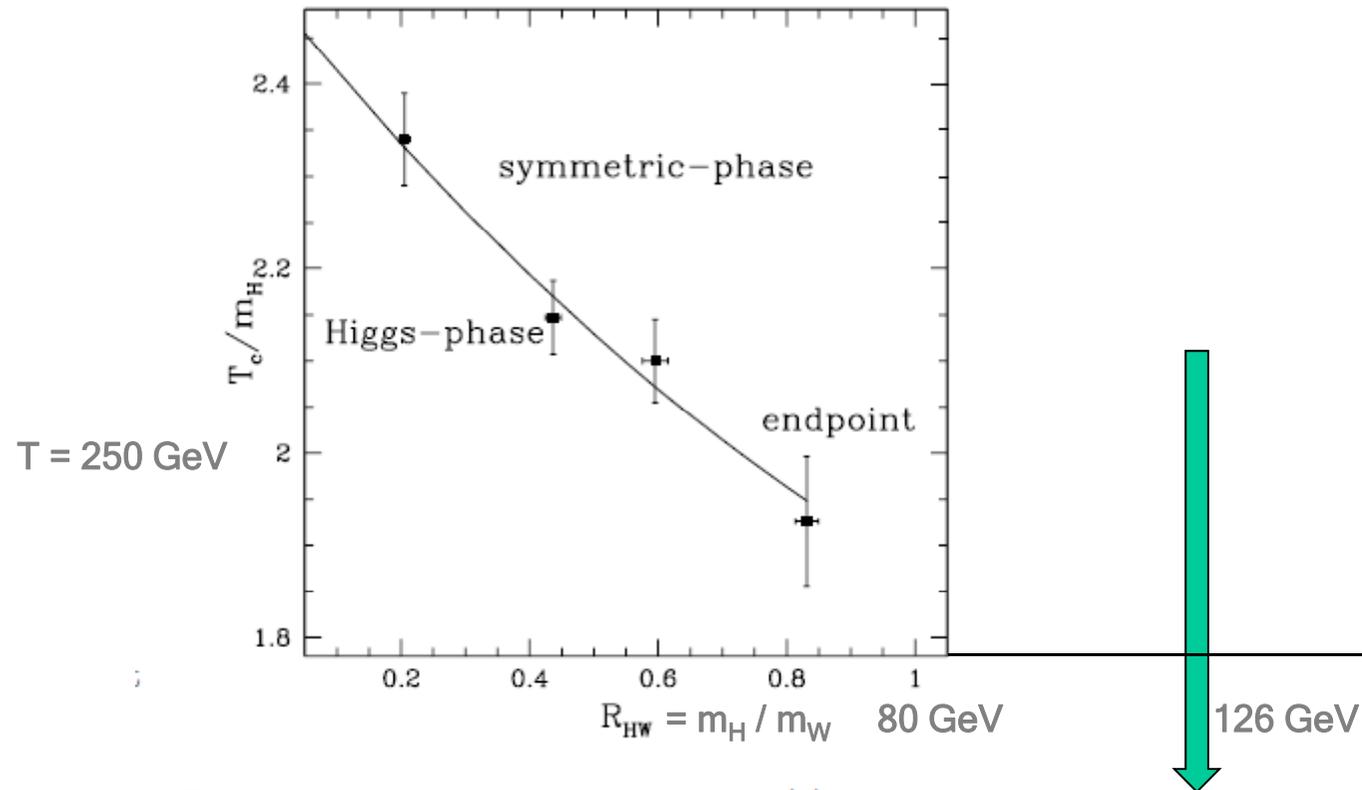
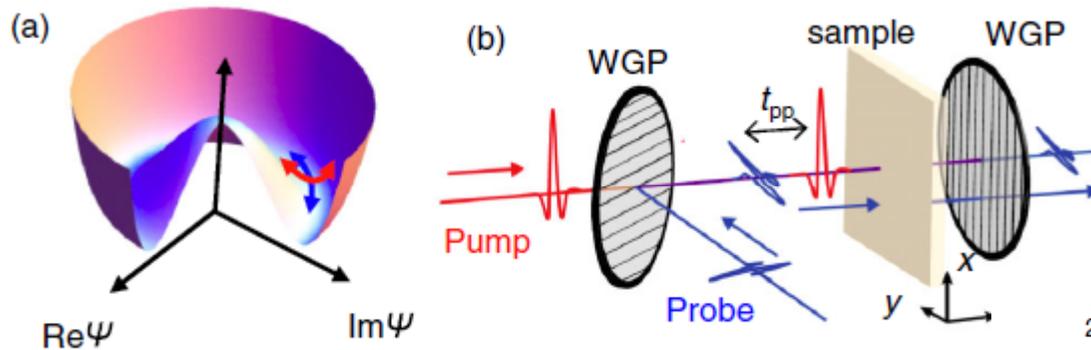


Figure 3. Phase diagram of the SU(2)-Higgs model in the $(T_c/m_H - R_{HW})$ plane. The continuous line – representing the phase-boundary – is a quadratic fit to the data points.

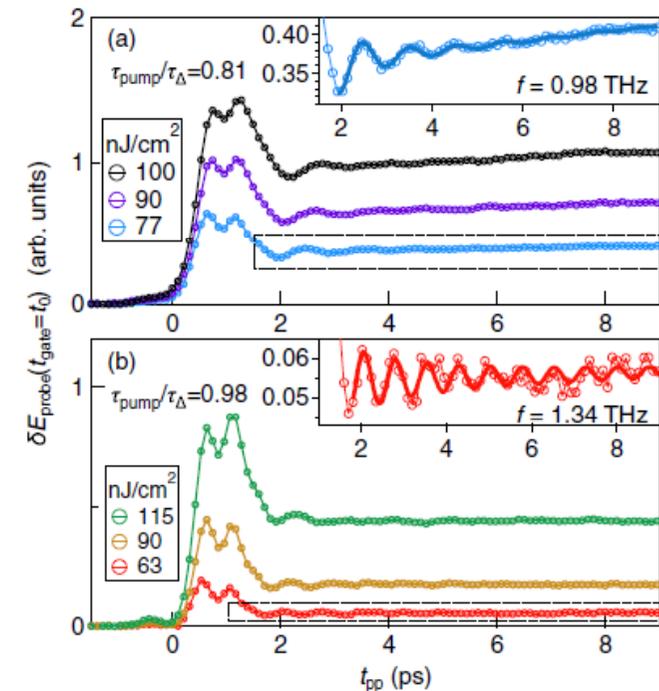
<http://cds.cern.ch/record/403900/files/9910354.pdf>

❖ 2013: Erste Beobachtung von Higgs-Moden im Supraleiter



❖ Periodische Oszillationen des Elektrischen Felds durch periodische Oszillationen der Cooperpaardichte

[Higgs Amplitude Mode in the BCS Superconductors Nb_{1-x}Ti_xN Induced by Terahertz Pulse Excitation](#)



❖ Neutrino Masse

- Theorie:
 - Zusätzliche Massen-Bedingungen erlaubt („Wippe“)
 - Massen stark durch Mischen beeinflusst
- Mindestens eine Millionen mal leichter als das Elektron

