

Das Standardmodell der Teilchenphysik: Symmetrien und Lagrangedichte

Netzwerk Teilchenwelt Workshop für Jugendliche
CERN

13.11.2015

Florian Goertz
CERN



Gliederung



1. Entwicklung des Standardmodells der Teilchenphysik:
Historisches und grundlegende Konzepte
2. Lagrangefunktion der klassischen Mechanik
3. Lagrangedichte der Teilchenphysik
4. Ladungen und Symmetrien
5. Das Standardmodell + Ausblick



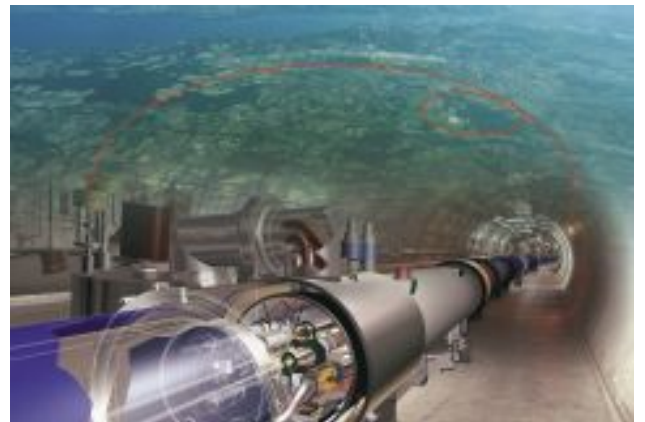
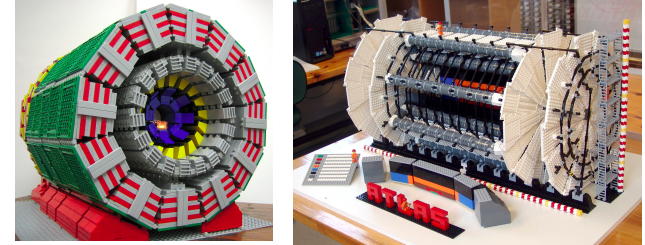
*1) Entwicklung des Standardmodells der
Teilchenphysik:
Historisches und grundlegende Konzepte*

Einleitung

In der **Elementarteilchenphysik** versucht man zu verstehen, ...

“... was die Welt **im Innersten** zusammenhält”

Faust I



Einleitung

In der **Elementarteilchenphysik** versucht man zu verstehen, ...

“... was die Welt **im Innersten** zusammenhält”

Faust I



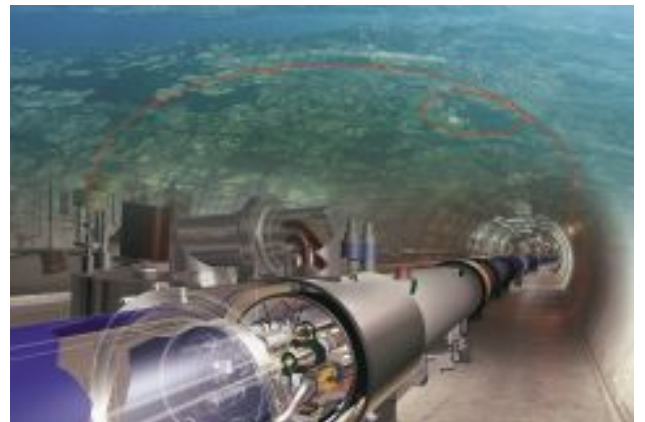
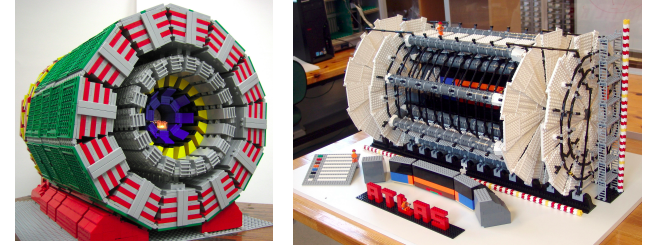
kleinste Abstände



$$\Delta x \sim h/p$$

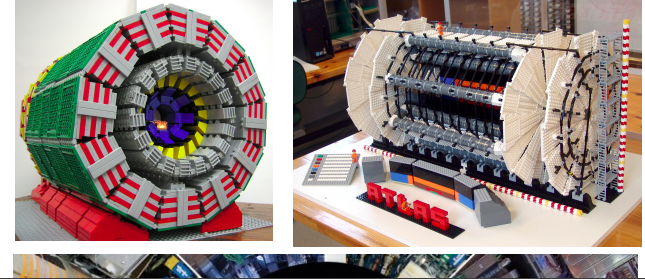
höchste Energien

Elementarteilchenphysik $\hat{=}$ Hochenergiephysik



Einleitung

In der **Elementarteilchenphysik** versucht man zu verstehen, ...



“... was die Welt
zusammenhält”

Faust I

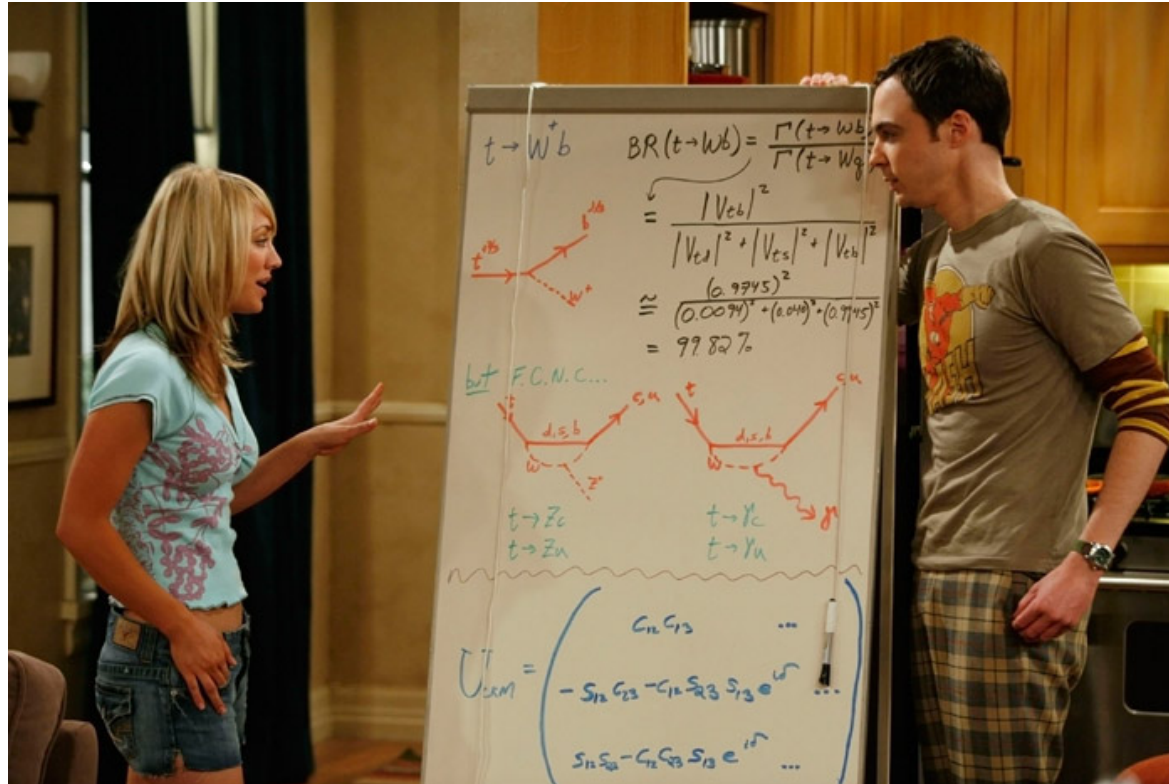


Elementarteilchenph



Einleitung

- **Mathematik** → Sprache zur Beschreibung der Natur



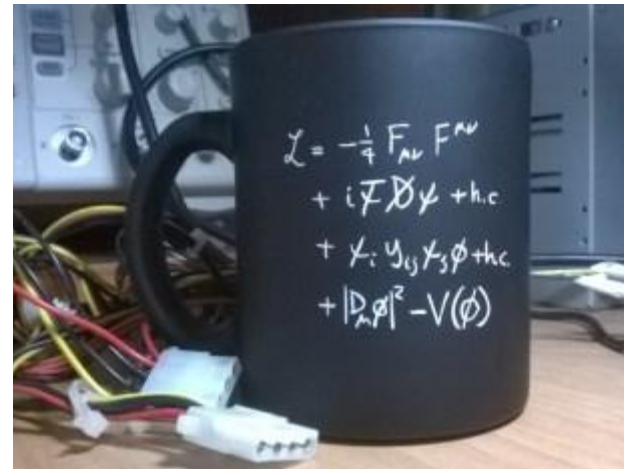
Einleitung

- **Mathematik** → Sprache zur Beschreibung der Natur



Einleitung

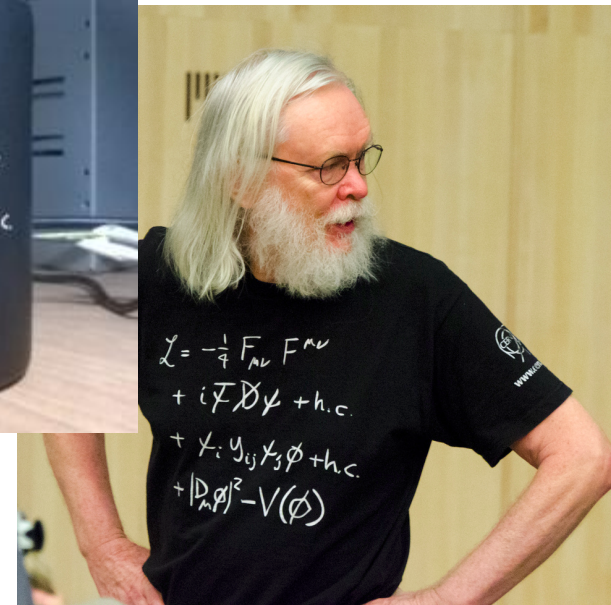
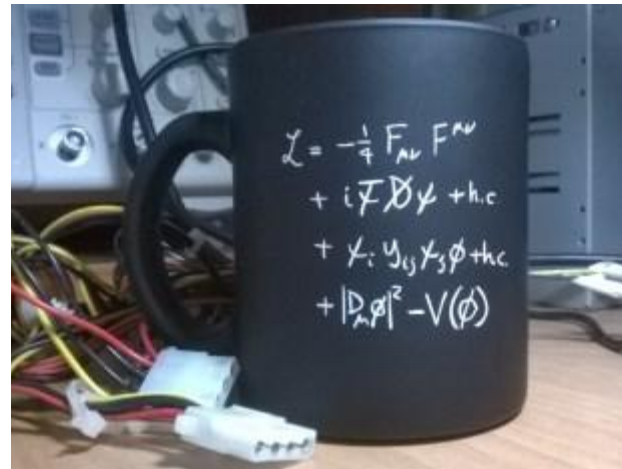
- **Mathematik** → Sprache zur Beschreibung der Natur



Das Standardmodell
der Teilchenphysik

Einleitung

- **Mathematik** → Sprache zur Beschreibung der Natur



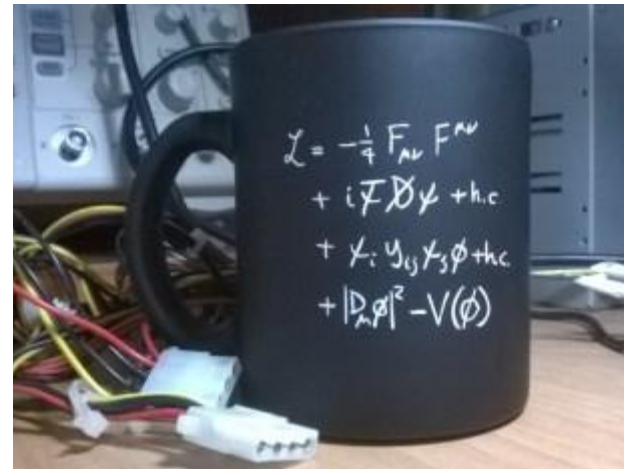
Das Standardmodell der Teilchenphysik

<https://www.flickr.com/photos/joshmt/7503048090>

http://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1322907

Einleitung

- **Mathematik** → Sprache zur Beschreibung der Natur



→ ??

Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

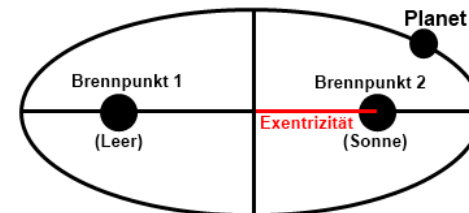
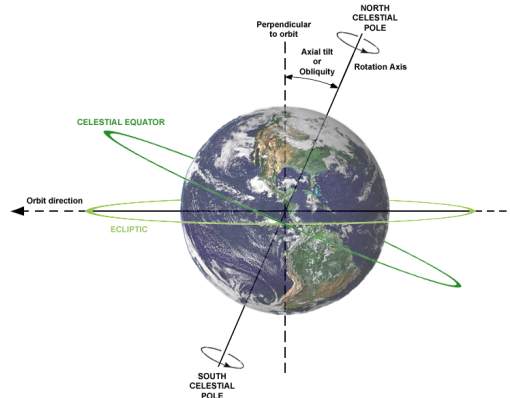
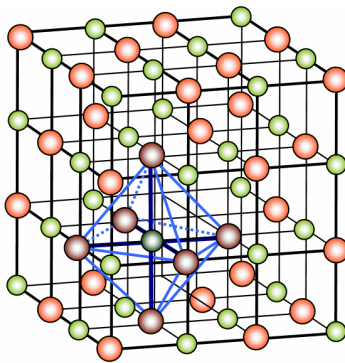
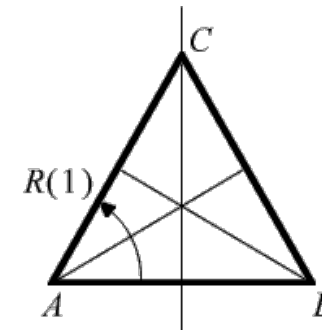
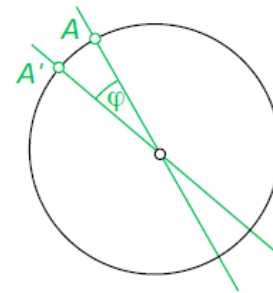
<https://www.flickr.com/photos/joshmt/7503048090>

http://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1322907

Einleitung

- **Mathematik** → Sprache zur Beschreibung der Natur

- Fundamental: **Symmetrie**
(-Gruppen)



<http://www2.math.ethz.ch/arithmetik+geometrie/MKA/symm2.html>

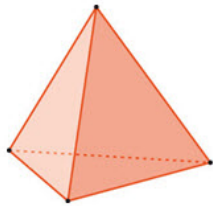
http://centauri-astronomie.de/die_keplerschen_gesetze.php

<https://de.wikipedia.org>

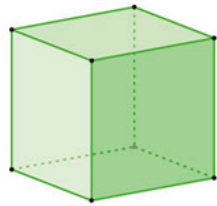
Einleitung

- Symmetrien schon in der griechischen Philosophie zentrales Konzept

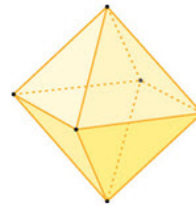
Tetraeder



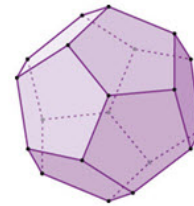
Hexaeder



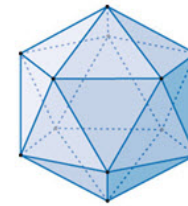
Oktaeder



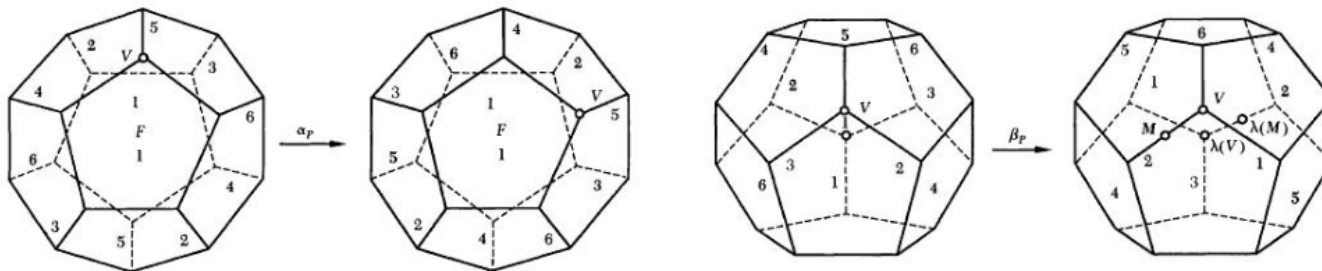
Dodekaeder



Ikosaeder



Platonische Körper

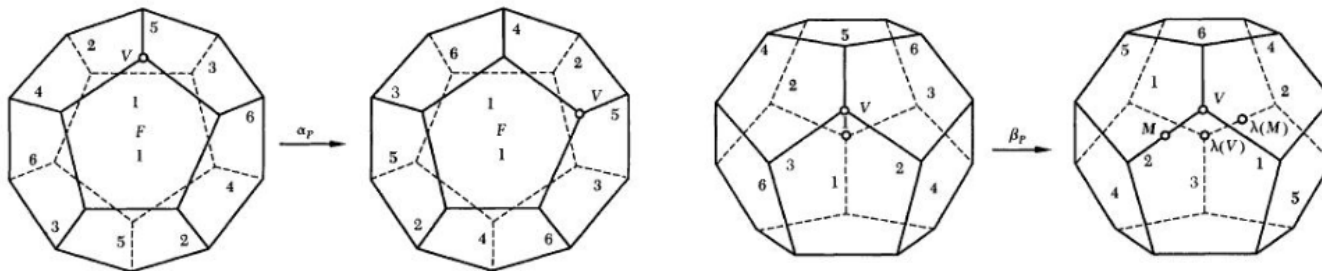


Einleitung

- Symmetrien schon in der griechischen Philosophie zentrales Konzept



Platonische Körper



<http://www.mit.edu/~yongwhan/projects/math109.pdf>

<http://www2.math.ethz.ch/arithmetik+geometrie/MKA/symm2.html>

http://centauri-astronomie.de/die_keplerschen_gesetze.php

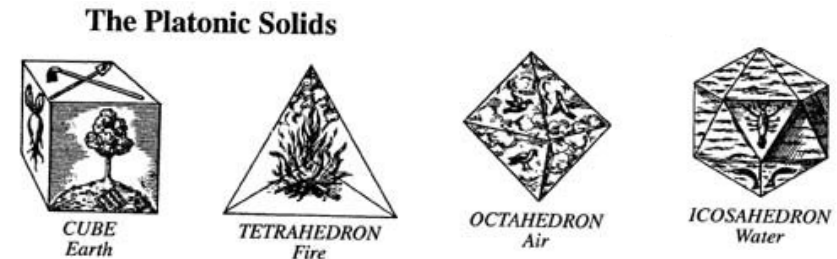
<https://de.wikipedia.org>

Standardmodell der griechischen Philosophie

- Kräfte und Elemente:
500-430 v.Chr., Empedokles

- 2 Urkräfte: Liebe \leftrightarrow Hass,
Mischung \leftrightarrow Trennung
- 4 Elemente: Erde, Feuer, Luft, Wasser

- Symmetrien
427-347 v.Chr., Platon

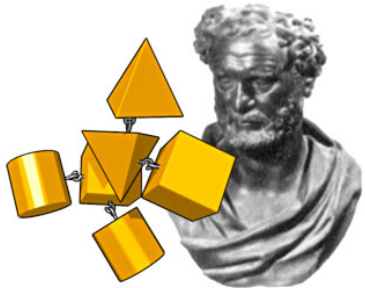


Räumliche Symmetrien \leftrightarrow Schönheit

- Kleinste Bausteine

460-371 v.Chr. Demokrit

- Atome (verschiedene Formen: geometrische Körper)
- Leere (Bewegung+Verbindung im Nichts)



Vergleich mit heute (SM)

- Kräfte

→ 'Wechselwirkungen' (WW):

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung
- Elektromagnetismus
- Gravitation

- Symmetrien

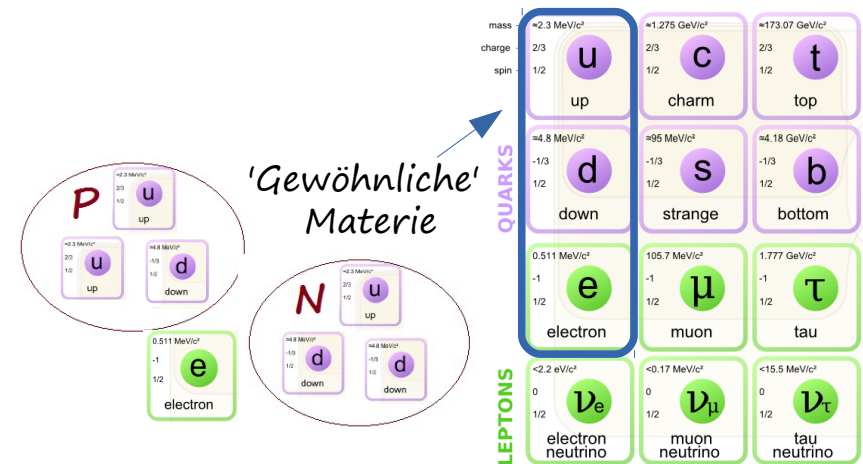
→ Ladungssymmetrien

['lokale Eichsymmetrien']

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

- Kleinste Bausteine

→ Elementarteilchen



Vergleich mit heute (SM)

- Kräfte

→ 'Wechselwirkungen' (WW):

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung
- Elektromagnetismus
- [Gravitation]



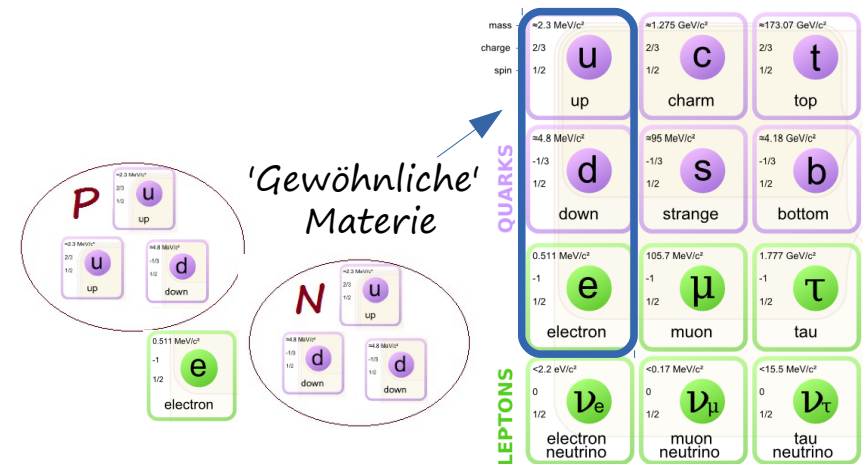
- Symmetrien

→ Ladungssymmetrien

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

- Kleinste Bausteine

→ Elementarteilchen

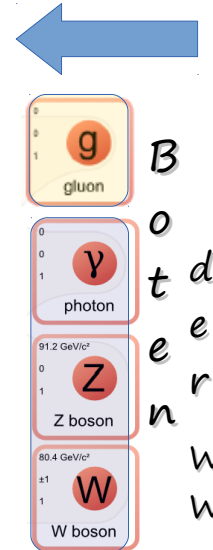


Vergleich mit heute (SM)

• Kräfte

→ 'Wechselwirkungen' (WW):

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung
- Elektromagnetismus
- [Gravitation]



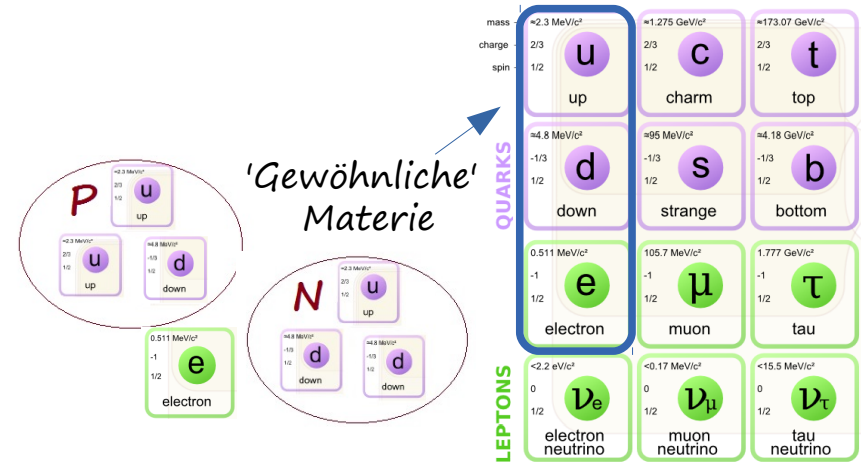
• Symmetrien

→ Ladungssymmetrien

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

• Kleinste Bausteine

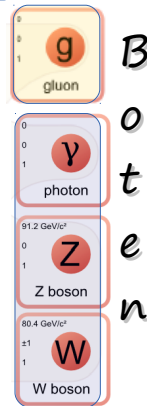
→ Elementarteilchen



Vergleich mit heute (SM)

Wechselwirkungen (WW):

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung
- Elektromagnetismus
 - [Gravitation]



Ladungssymmetrien

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Lie Gruppe

Transformation der Elementarteilchen unter Symmetrieoperation

Elementarteilchen

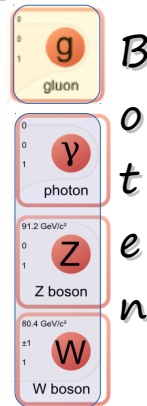
	mass	charge	spin
u (up)	~2.3 MeV/c²	2/3	1/2
c (charm)	~1.275 GeV/c²	2/3	1/2
t (top)	~173.37 GeV/c²	2/3	1/2
d (down)	~4.8 MeV/c²	-1/3	1/2
s (strange)	~95 MeV/c²	-1/3	1/2
b (bottom)	~4.18 GeV/c²	-1/3	1/2
e (electron)	0.511 MeV/c²	-1	1/2
μ (muon)	105.7 MeV/c²	-1	1/2
τ (tau)	1.777 GeV/c²	-1	1/2
ν_e (electron neutrino)	< 2.2 eV/c²	0	1/2
ν_μ (muon neutrino)	< 0.17 MeV/c²	0	1/2
ν_τ (tau neutrino)	< 15.5 MeV/c²	0	1/2

Vergleich mit heute (SM)

Wechselwirkungen (WW):

- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung
- Elektromagnetismus
- [Gravitation]

WW die sie spüren



Ladungssymmetrien

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Lie Gruppe

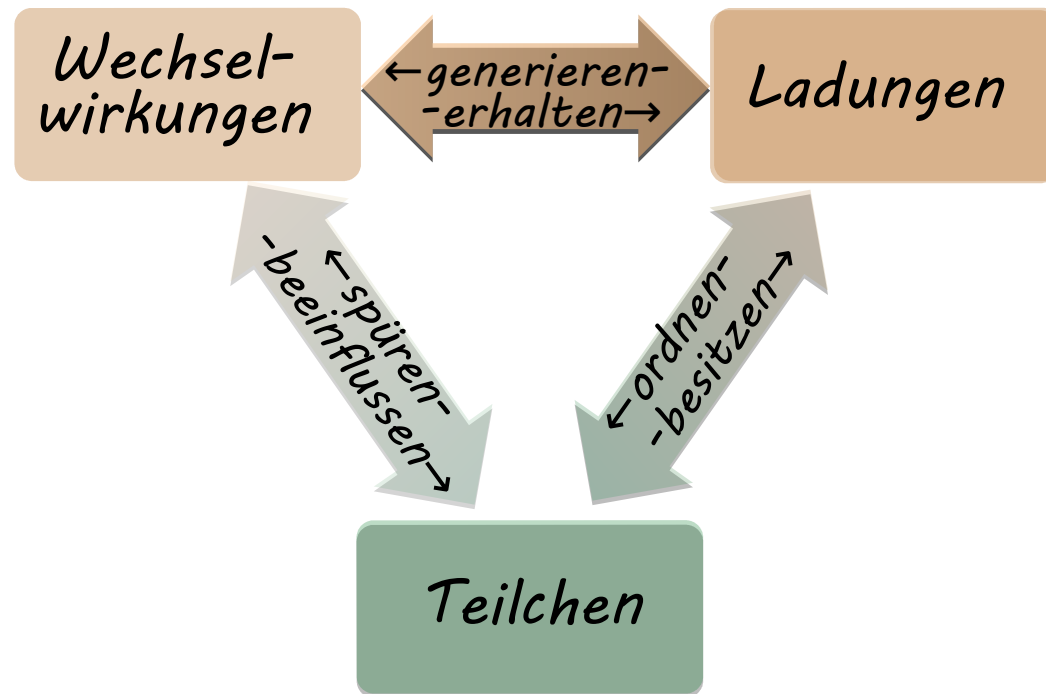
Zentrales Konzept

Transformation der Elementarteilchen unter Symmetrieoperation

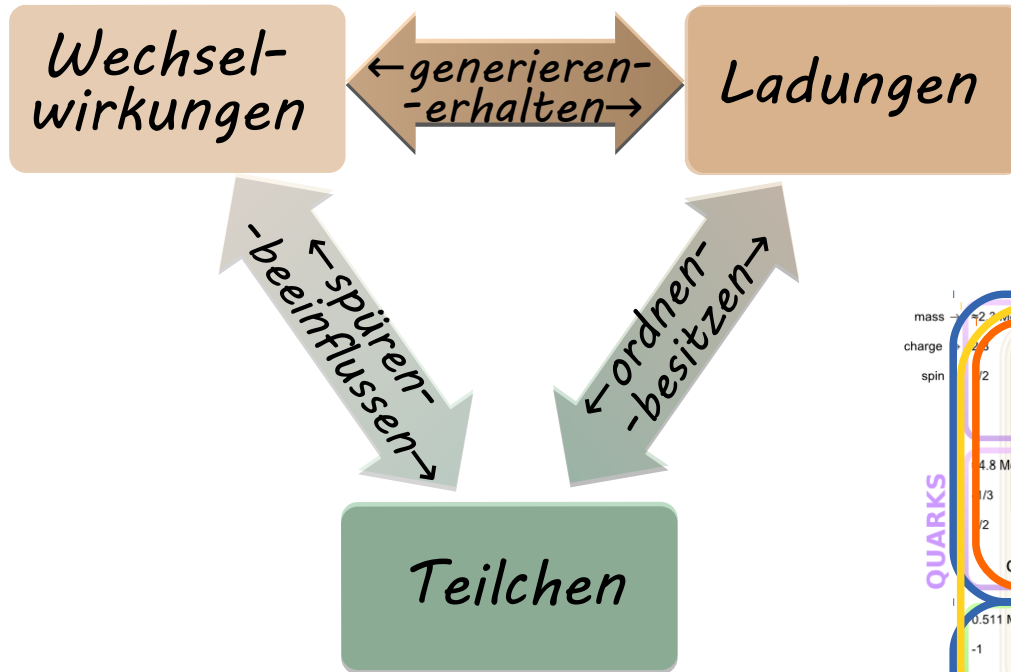
Elementarteilchen

	mass	charge	spin
u up	~0.3 MeV/c ²	2/3	1/2
c charm	~1.275 GeV/c ²	2/3	1/2
t top	~173.1 GeV/c ²	2/3	1/2
d down	~4.8 MeV/c ²	-1/3	1/2
s strange	~95 MeV/c ²	-1/3	1/2
b bottom	~4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2
e electron	0.511 MeV/c ²	-1	1/2
μ muon	105.7 MeV/c ²	-1	1/2
τ tau	1.777 GeV/c ²	-1	1/2
ν_e electron neutrino	< 2.2 eV/c ²	0	1/2
ν_μ muon neutrino	< 0.17 MeV/c ²	0	1/2
ν_τ tau neutrino	< 15.5 MeV/c ²	0	1/2

Standardmodell der Teilchenphysik



Standardmodell der Teilchenphysik



- Starke Wechselwirkung
- Schwache Wechselwirkung (LH)
- Elektromagnetismus

	mass $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	mass $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	mass $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$
QUARKS	u up	c charm	t top
mass	$4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
charge	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$
QUARKS	d down	s strange	b bottom
mass	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
charge	-1	-1	-1
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau
mass	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
charge	0	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Neuer Begriff: Wechselwirkung

■ *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: erweiterter Begriff*

- *Vereinigung der Phänomene „Entstehung“, „Zerfall“ und „Kraft“*
- *Drei der fundamentalen Wechselwirkungen können im Standardmodell über Symmetrien begründet werden*
- *Das Standardmodell ist eine Theorie der Wechselwirkungen !*

Das Standardmodell der Teilchenphysik

			
	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 (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!



1960's+70's

Glashow, Weinberg, Salam, ...



Noether Theorem (1918):

Symmetrie





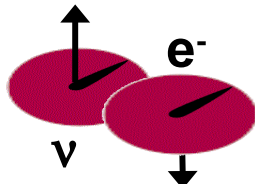
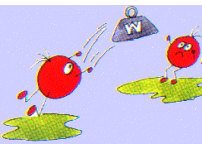

Erhaltene Ladung




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

Das Standardmodell der Teilchenphysik

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

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

B
o
t
e
n



QUARKS

u up 2/3 1/2 4.8 MeV/c ²	c charm 2/3 1/2 =95 MeV/c ²	t top 2/3 1/2 =173 GeV/c ²
d down -1/3 2 4.8 MeV/c ²	s strange -1/3 1/2 =95 MeV/c ²	b bottom -1/3 1/2 =4.18 GeV/c ²

LEPTONS

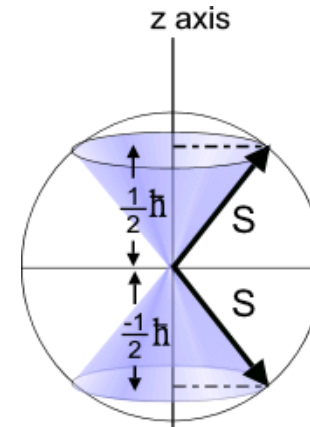
e electron -1 1/2 0.511 MeV/c ²	μ muon -1 1/2 105.7 MeV/c ²	τ tau -1 1/2 1.777 GeV/c ²
ν_e electron neutrino 0 1/2 <2.2 eV/c ²	ν_μ muon neutrino 0 1/2 <0.17 MeV/c ²	ν_τ tau neutrino 0 1/2 <15.5 MeV/c ²

M. Kolbel, CERN 18.6.2015

Starke Wechselwirkung
Schwache Wechselwirkung
Elektromagnetismus

Beispiel $SU(2)$: Schwacher Isospin

- ◆ Zugrundeliegende Symmetrie identisch mit gewöhnlichem Spin
- ◆ Vektor mit 3 Komponenten
 - Spin $S = (S_x, S_y, S_z)$ im Ortsraum
 - Schwacher Isospin $I^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$ im abstrakten schwachen Isospinraum



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

$SU(2)$: spezielle unitäre Gruppe

$$SU(2) = \left\{ A \in \text{Mat}(2, \mathbb{C}) : A \bar{A}^T = \bar{A}^T A = 1, \det(A) = 1 \right\}$$

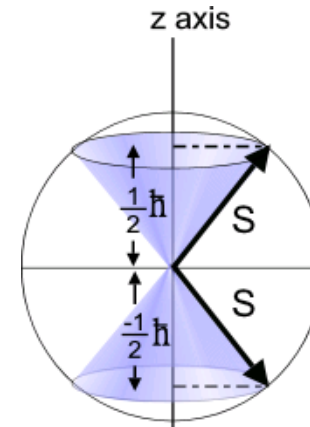
- ◆ Darstellung in Multipletts

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

- ◆ Starke WW analog: $SU(2) \rightarrow SU(3)$

Beispiel $SU(2)$: Schwacher Isospin

- ◆ Zugrundeliegende Symmetrie identisch mit gewöhnlichem Spin
- ◆ Vektor mit 3 Komponenten
 - Spin $S = (S_x, S_y, S_z)$ im Ortsraum
 - Schwacher Isospin $I^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$ im abstrakten schwachen Isospinraum



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

$SU(2)$: spezielle unitäre Gruppe

$$SU(2) = \left\{ A \in Mat(2, \mathbb{C}) : A \bar{A}^T = \bar{A}^T A = 1, \det(A) = 1 \right\}$$

- ◆ Darstellung in Multipletts

LEPTONS			mass →	QUARKS		
0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²		≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
-1	-1	-1	charge →	2/3	2/3	2/3
1/2	1/2	1/2	spin →	1/2	1/2	1/2
e electron	μ muon	τ tau		u up	c charm	t top
<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²		≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²
0	0	0		-1/3	-1/3	-1/3
1/2	1/2	1/2		1/2	1/2	1/2
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino		d down	s strange	b bottom

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

- ◆ Starke WW analog: $SU(2) \rightarrow SU(3)$

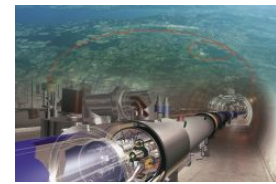
Später mehr ...

Das Standardmodell

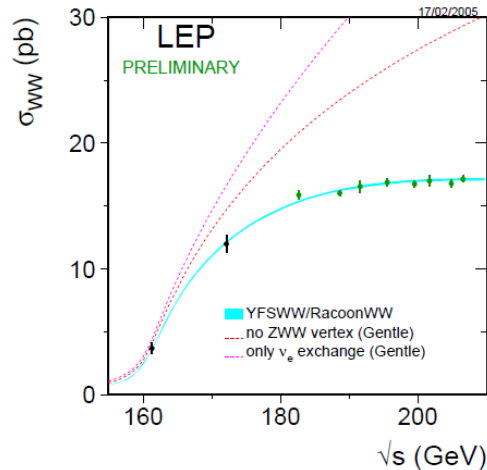
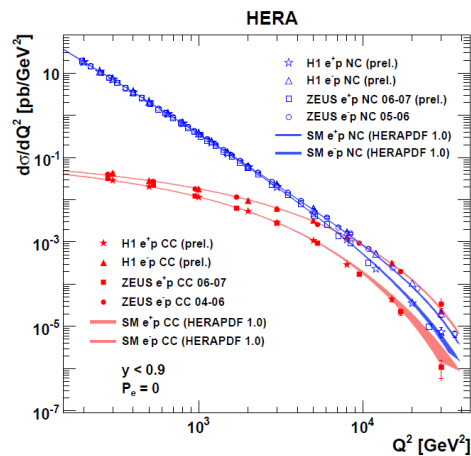
Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Eine Erfolgsgeschichte -

- Extrem erfolgreich getestet bis zur elektroschwachen Skala ~ 100 GeV (+darüber hinaus)
- Nicht-triviale Vorhersagen durch (versteckte) Eichsymmetrie



CERN LHC



	Measurement	Fit	$ \sigma_{meas} - \sigma_{fit} / \sigma_{meas}$
$\Delta\alpha_{had}^{(5)}(m_Z)$	0.02750 ± 0.00033	0.02759	
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1874	
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4959	
σ_{had}^0 [nb]	41.540 ± 0.037	41.478	
R_b	20.767 ± 0.025	20.742	
$A_{FB}^{0,b}$	0.01714 ± 0.00095	0.01645	
$A(P_e)$	0.1485 ± 0.0032	0.1481	
R_b	0.1721 ± 0.0030	0.1723	
$A_{FB}^{0,b}$	0.0992 ± 0.0016	0.1038	
$A_{FB}^{0,c}$	0.0707 ± 0.0035	0.0742	
A_b	0.923 ± 0.020	0.935	
A_c	0.670 ± 0.027	0.668	
$A(SLD)$	0.1513 ± 0.0021	0.1481	
$\sin^2\theta_{eff}^{lept}(Q_b)$	0.2324 ± 0.0012	0.2314	
m_W [GeV]	80.385 ± 0.015	80.377	
Γ_W [GeV]	2.085 ± 0.042	2.092	
m_t [GeV]	173.20 ± 0.90	173.26	

March 2012

Verschiedene Nobelpreise

Glashow, Weinberg, Salam '79

Rubbia, van der Meer '84

't Hooft, Veltman '99

Gross, Politzer, Wilczek '04

Nambu, Kobayashi, Maskawa '08

Englert, Higgs '13



2) Lagrangefunktion der klassischen Mechanik

Lagrangefunktion der klassischen Mechanik

$$L = T - V$$

- L = Lagrangefunktion [Joseph L. Lagrange, 1736-1814, Mathematiker]
- T = kinetische Energie (Bewegungsenergie)
- V = potentielle Energie ('Lageenergie')

• Gegebenes Problem $\rightarrow L=T-V$



Gleichung der Bewegung \rightarrow Lösung

[...] \rightarrow



Prinzip der extremalen Wirkung

- ◆ Grundprinzip: Maureau de Maupertuis (1750)
(Prinzip der extremalen Wirkung)

https://de.wikipedia.org/wiki/Hamiltonsches_Prinzip

https://de.wikipedia.org/wiki/Pierre-Louis_Moreau_de_Maupertuis

- ◆ Mathematik von 1744: Euler, Lagrange → Variationsrechnung

- Jede Bewegung verläuft so, dass das Zeitintegral über $L=T-V$ ('Mittelwert') extremal wird

Beispiel: freier Fall



$T = 0$, 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)

Prinzip der extremalen Wirkung

- 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 die Wirkung S extremal ('minimal') wird (\rightarrow zeitlicher Mittelwert von L extremal)
- Methode: Variationsrechnung (variieren $x(t)$, suche Extremum)
 \rightarrow Bahn und Bahngeschwindigkeit

◆ Euler-Lagrange Gleichungen der klassischen Mechanik
(Uni-Studium Physik, 2. Semester) $\frac{dL}{dx} - \frac{d}{dt} \frac{dL}{dv} = 0$

Prinzip der extremalen Wirkung

$$V = mgx$$

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

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

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

Euler-Lagrange Gleichung

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

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

$$F = ma = -mg$$

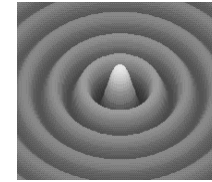
Newtonsche Bewegungsgleichung

The background of the slide features a photograph of a modern building with a glass facade, partially obscured by lush green trees. The image is slightly blurred and has a dark, semi-transparent overlay, which makes the white text stand out prominently.

3) Lagrangedichte der Teilchenphysik

→ Quantenphysik

◆ Quantenphysik:



- Bahnen: $x(t) \rightarrow$ Wellenfunktionen $\psi(t, x, y, z)$
- Variation in Zeit und Raum: $\frac{d}{dt} \rightarrow \partial_\mu := (\frac{1}{c} \frac{d}{dt}, \frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz})$
- Zeitableitung $v(t) = \frac{d}{dt} x(t) \rightarrow$ Raum+Zeitableitung $\partial_\mu \psi(t, x, y, z)$
- Lagrangefunktion L (Energie) \rightarrow Lagrangedichte L (Energiedichte)
 - $S = \int_{t_A}^{t_E} L(x(t), v(t)) dt \rightarrow S = \int \int \int \int_{x, y, z, t} \mathbf{L}(\psi(t, x, y, z), \partial_\mu \psi(t, x, y, z)) dx dy dz dt$
 - $L = T - V$; T : kin. Energiedichte, V : potenzielle Energiedichte
 - Quantenfeldtheorie (QFT): Wellenfunktion \rightarrow Feldoperator

https://de.wikipedia.org/wiki/Zweite_Quantisierung

Freie Materieteilchen

$$V = m\bar{\Psi}\Psi$$

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

Jede Bewegung erfolgt so,
dass das Raum-Zeitintegral über $L=T-V$
extremal ist

$$\mathcal{L} = i\bar{\Psi}\gamma^\mu\partial_\mu\Psi - m\bar{\Psi}\Psi$$

Dirac Gleichung

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

Erweiterung der Newtonschen Bewegungsgleichung

	mass →	charge →	spin →
QUARKS	≈2.3 MeV/c ²	2/3	1/2
	u		
	up		
	≈1.275 GeV/c ²	2/3	1/2
	c		
	charm		
≈173.07 GeV/c ²	2/3	1/2	
t			
top			
≈4.8 MeV/c ²	-1/3	1/2	
d			
down			
≈95 MeV/c ²	-1/3	1/2	
s			
strange			
≈4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2	
b			
bottom			
LEPTONS	0.511 MeV/c ²	-1	1/2
	e		
	electron		
	105.7 MeV/c ²	-1	1/2
	μ		
	muon		
1.777 GeV/c ²	-1	1/2	
τ			
tau			
<2.2 eV/c ²	0	1/2	
ν _e			
electron neutrino			
<0.17 MeV/c ²	0	1/2	
ν _μ			
muon neutrino			
<15.5 MeV/c ²	0	1/2	
ν _τ			
tau neutrino			

Vollständiges SM?

Prinzipien



The background of the slide features a photograph of a modern building with a glass facade, partially obscured by lush green trees. The image is slightly blurred and has a dark, semi-transparent overlay, which makes the white text stand out prominently.

4) Ladungen und Symmetrien

Ladungen

Ladungen: *charakteristische Eigenschaften von Teilchen*

- ◆ Ladungen (Q) sind *additiv*:

$$Q(A+B) = Q(A) + Q(B)$$

- ◆ Ladungen sind quantisiert:

sie kommen nur in Vielfachen einer *kleinsten Ladung* vor

- ◆ Ladung ist *erhalten*:

entsteht weder neu, noch geht sie verloren $\overset{\text{Noether}}{\longleftrightarrow}$ Symmetrie

- ◆ Konzept der Ladung auf *alle drei für Teilchen relevante Wechselwirkungen* anwendbar

Ladungen

- ◆ Ladungen *ordnen* Teilchen in „Multiplets“

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

Quarks

Leptonen

Familie

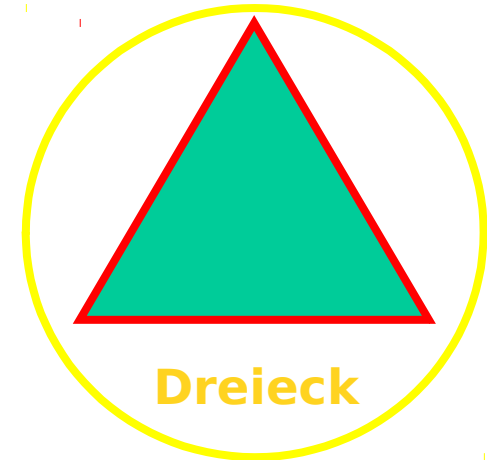
Warum gerade diese Anordnung?

- ◆ Ladungen *erlauben/verbieten* Prozesse (Ladungserhaltung!)
- ◆ Ladungen \leftrightarrow *Symmetrien*

www.teilchenphysik.de/teilchenphysik/elementarteilchen

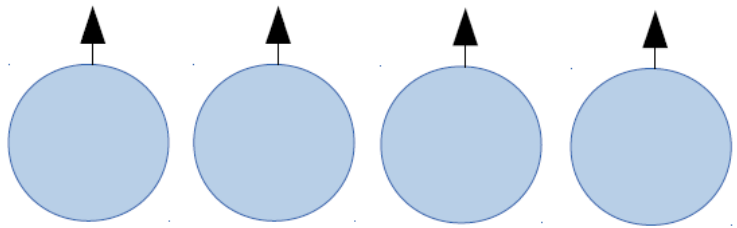
Symmetrien in der Mathematik (H. Weyl)

◆ Transformationsgruppen

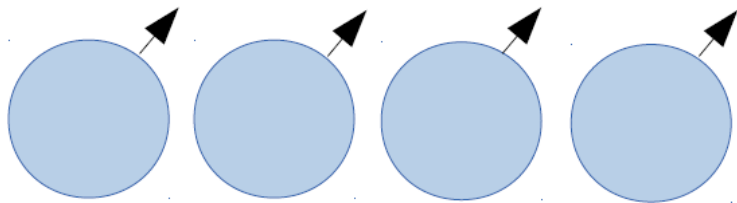


R.P. Feynman: Ein Objekt besitzt eine Symmetrie, wenn man mit ihm etwas anstellen kann, ohne es am Ende, wenn man fertig ist mit der Prozedur, geändert zu haben.

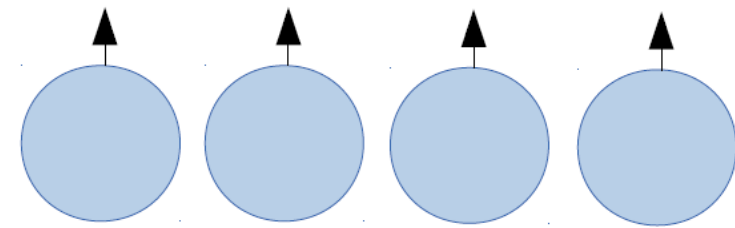
Globale vs. Lokale Symmetrie



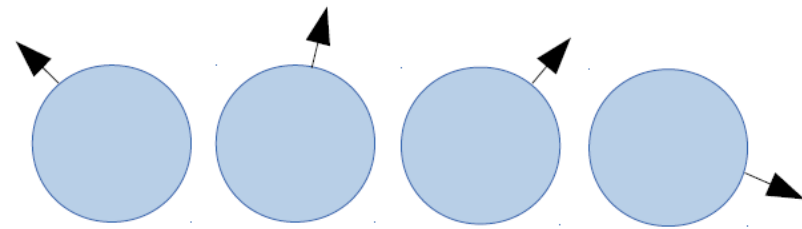
Dynamik \downarrow invariant



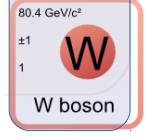
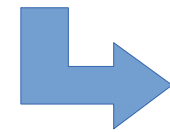
global



Dynamik \downarrow invariant

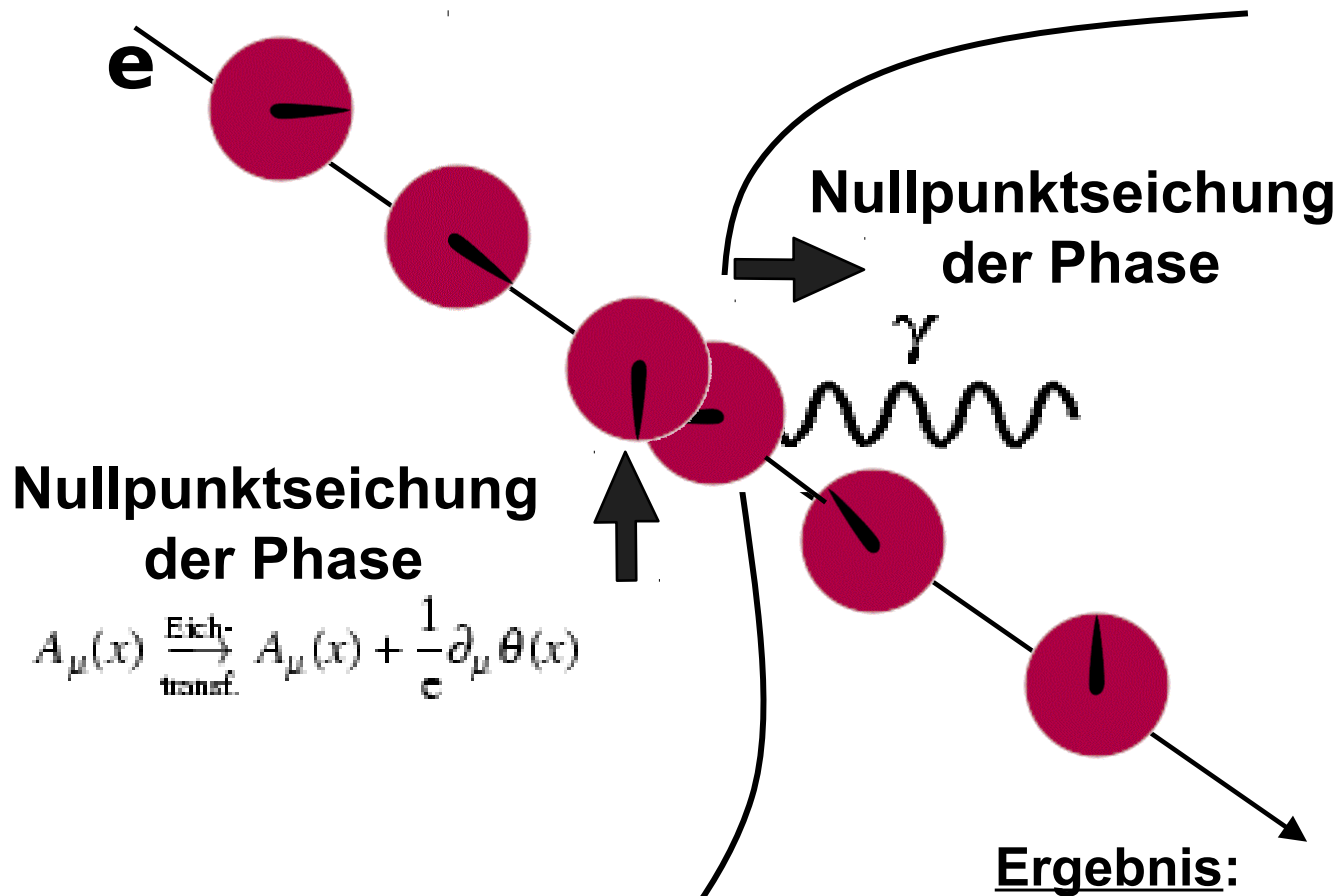


lokal



K
r
ä
f
t
e

Lokale Eichsymmetrie: U(1)



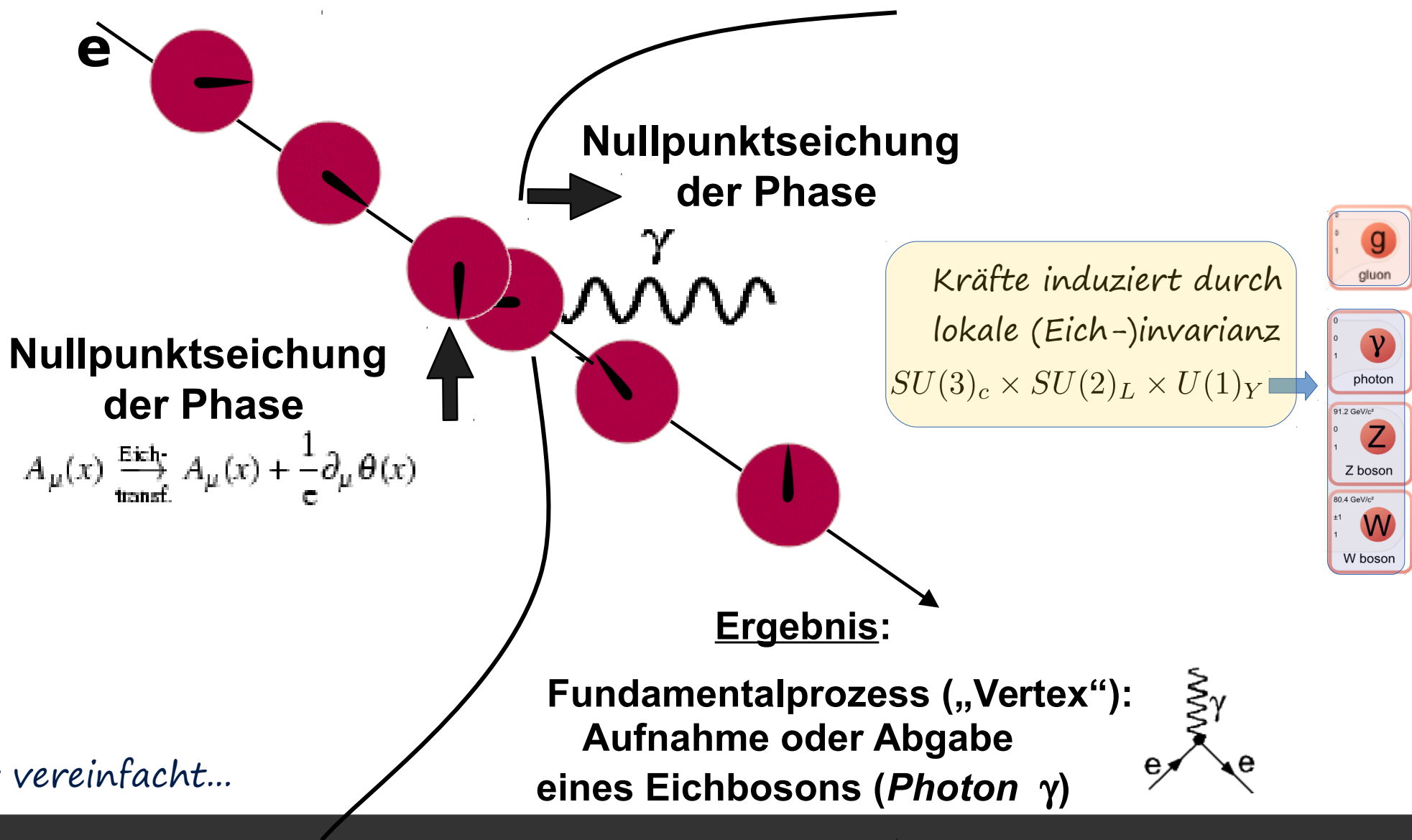
Fundamentalprozess („Vertex“):
Aufnahme oder Abgabe
eines Eichbosons (*Photon* γ)



sehr vereinfacht...

M. Kolbel, CERN 18.6.2015

Lokale Eichsymmetrie: U(1)



Lokale Eichsymmetrie: U(1)

Nullpunktseichung der Phase

Nullpunktseichung der Phase

$A_\mu(x) \xrightarrow[\text{transf.}]{\text{Eich-}} A_\mu(x) + \frac{1}{c} \partial_\mu \theta(x)$

Kräfte induziert durch lokale (Eich-)invarianz $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Ergebnis:

Fundamentalprozess („Vertex“):
Emission oder Abgabe eines Eichbosons (Photon γ)

g
gluon

γ
photon

91.2 GeV/c²
Z
Z boson

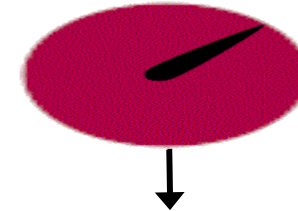
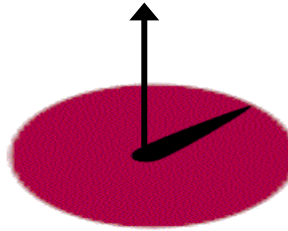
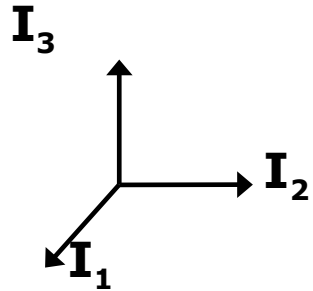
80.4 GeV/c²
 ± 1
W
W boson

$\mathcal{L} = i\bar{\Psi}\gamma^\mu\partial_\mu\Psi - m\bar{\Psi}\Psi$

$\mathcal{L} = i\bar{\Psi}\gamma^\mu(\partial^\mu - igA^\mu)\Psi - m\bar{\Psi}\Psi$

Lokale Eichsymmetrie: $SU(2)$

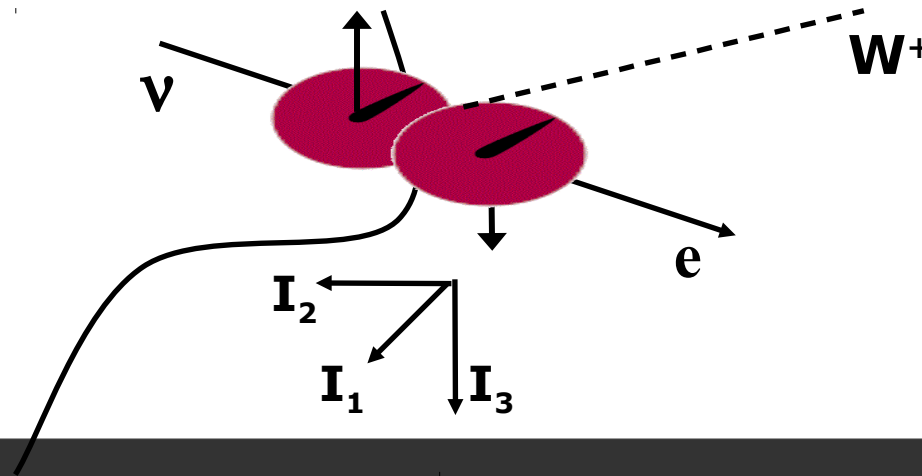
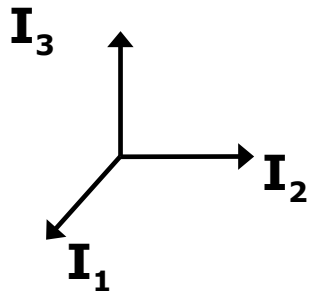
- 1961 S.Glashow: Eichung der schwachen Ladung



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 jeweils *nur* durch die „Richtung“ des schwachen Ladungsvektors I^w

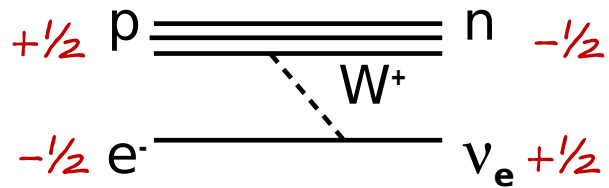
- lokale Umeichung



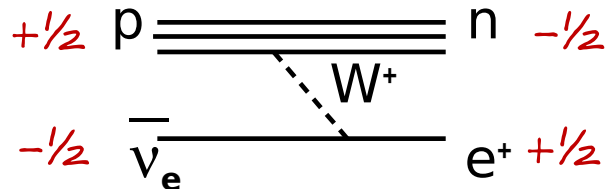
Ladungserhaltung

- Erhaltung der schwachen Ladung I_3^W bei wichtigen Prozessen:

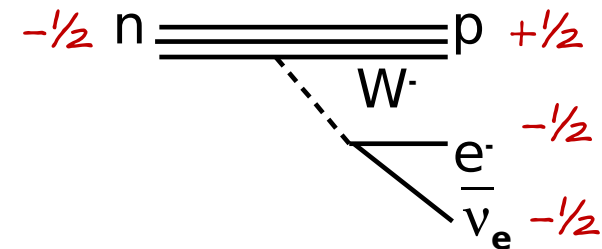
- K-Elektron Einfang in Atomen



- Erster Nachweis von Antineutrinos aus Kernkraftwerken

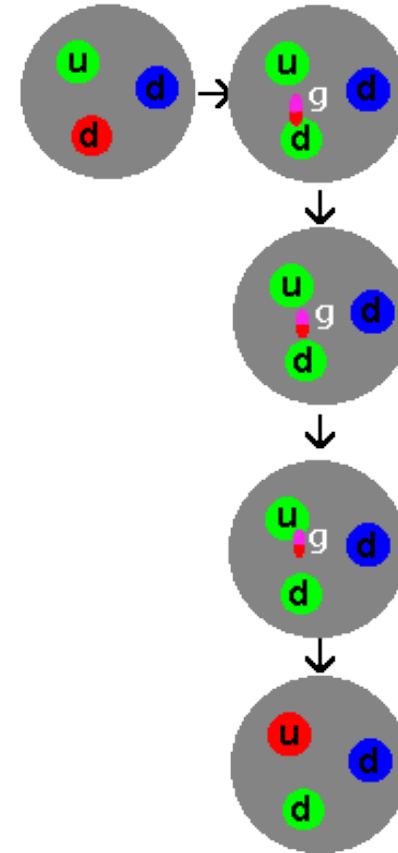
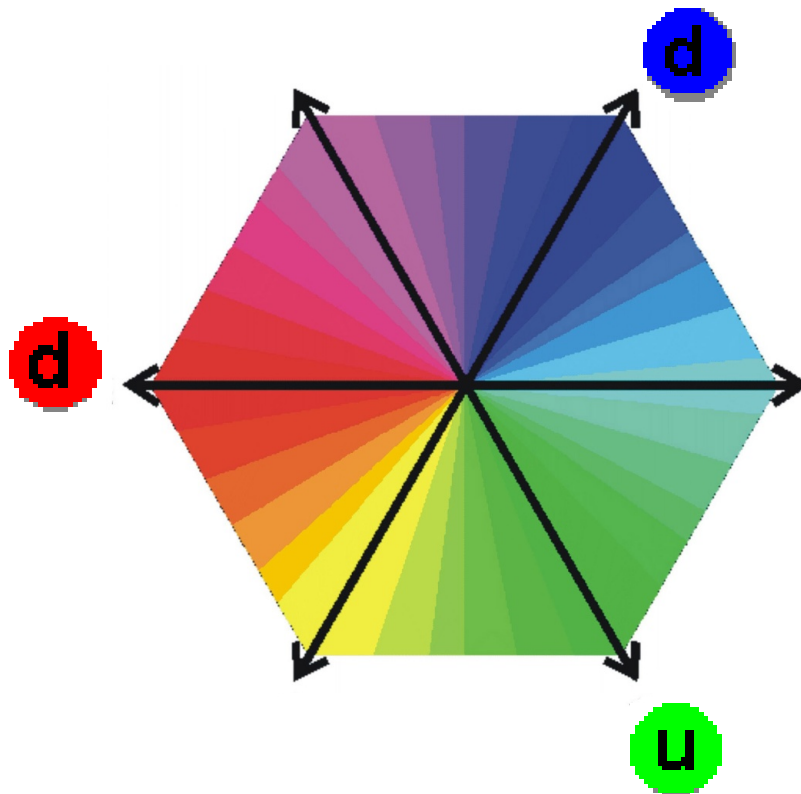


- β^- - Umwandlungen von Kernen



Farbladung: $SU(3)$

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

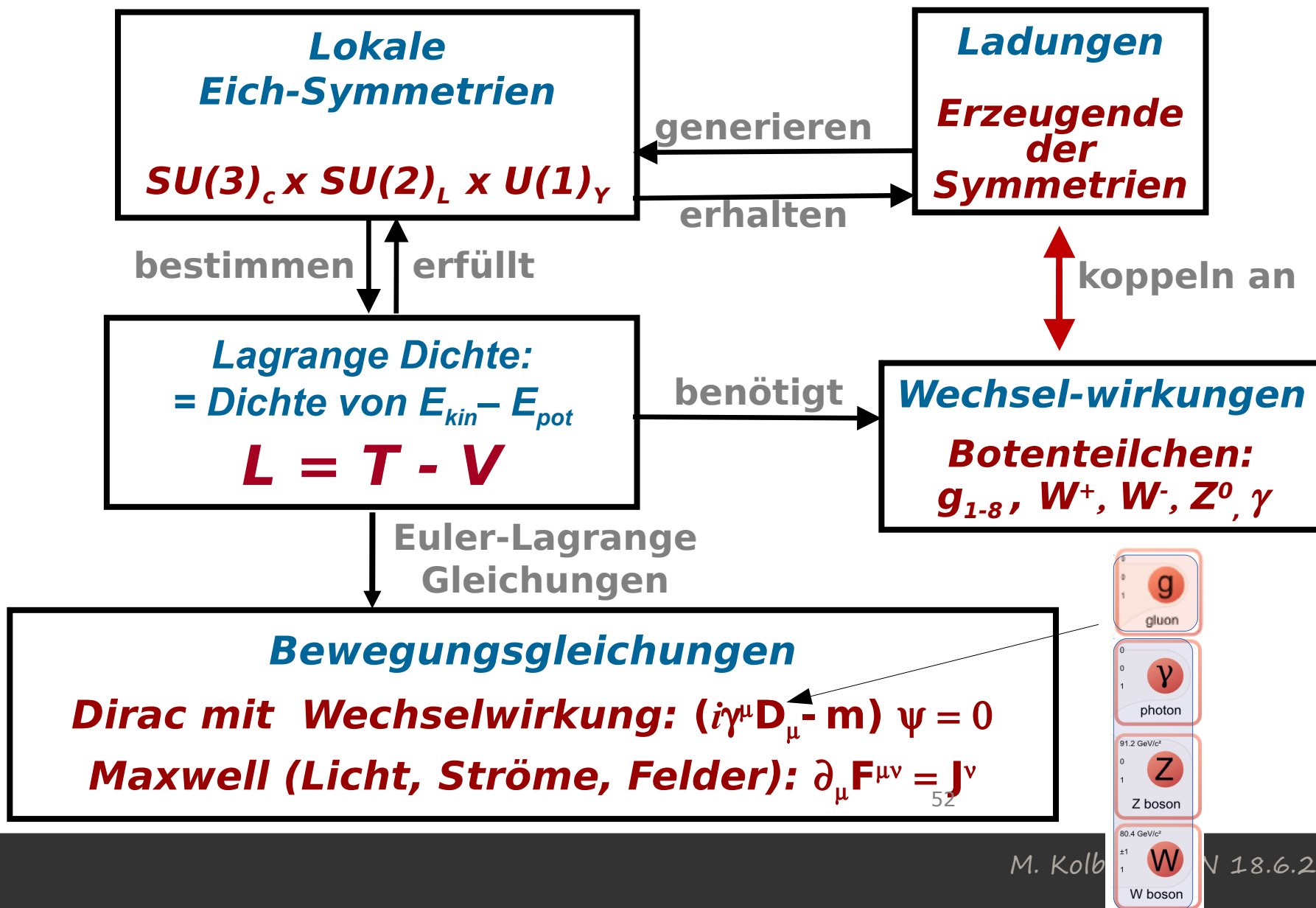


M. Kolbel, CERN 18.6.2015

The background of the slide features a photograph of a modern building with a glass facade, partially obscured by lush green trees. The image is slightly blurred and has a dark, semi-transparent overlay, which makes the white text stand out prominently.

5) Das Standardmodell + Ausblick

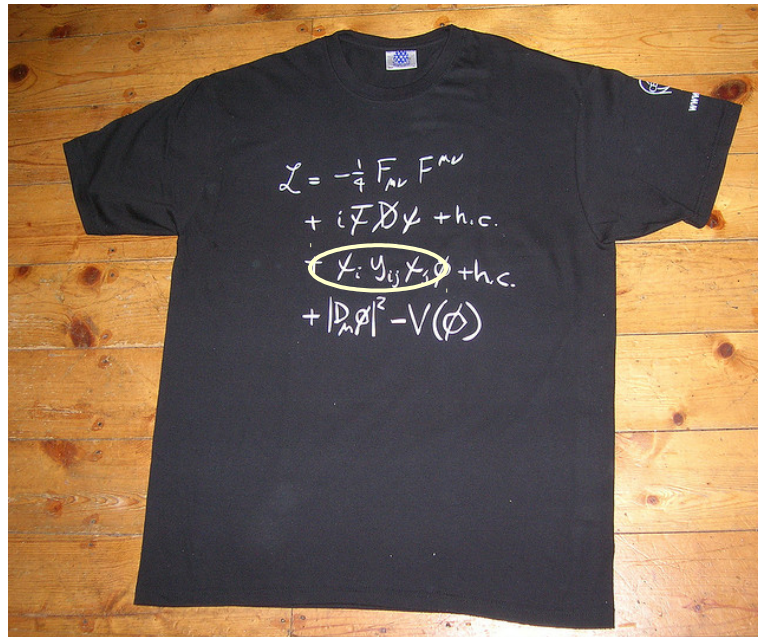
Das Standardmodell



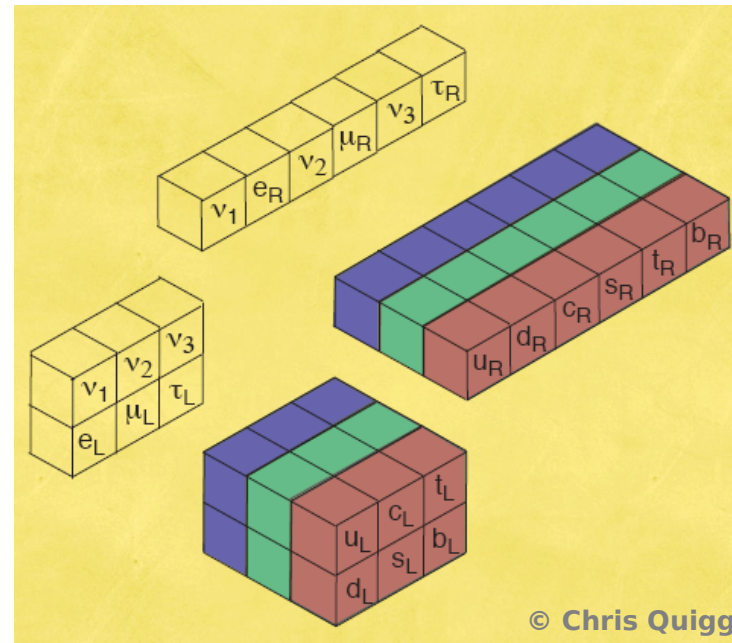
M. Kolb 18.6.2015

Das Standardmodell

- 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 L und sagt **Eigenschaften** vorher



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



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

M. Kolbel, CERN 18.6.2015

Das Standardmodell

- ◆ **Allgemeinste Lagrangedichte**, die

- Feldoperatoren für gefundene Materieteilchen enthält

LEPTONS			QUARKS		
0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	≈2.3 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	≈1.275 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	≈173.07 GeV/c ² 2/3 1/2 t top
<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν _e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν _μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν _τ tau neutrino	≈4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	≈95 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	≈4.18 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom

- lokal symmetrisch ist unter

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

- ◆ Teilchen klassifiziert anhand ihrer Transformationseigenschaften unter der Poincarégruppe: spin-1/2 (Materie) → Spinoren,...

Das Standardmodell

- ◆ **Allgemeinste Lagrangedichte**, die

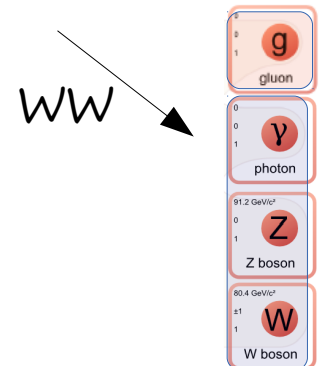
- Feldoperatoren für gefundene Materieteilchen enthält

LEPTONS			QUARKS		
0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	≈2.3 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	≈1.275 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	≈173.07 GeV/c ² 2/3 1/2 t top
<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	≈4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	≈95 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	≈4.18 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom

- lokal symmetrisch ist unter $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

- renormierbar ist $\rightarrow D[O \subset \mathcal{L}] \leq 4$

+ poincaréinvariant, hermitesch (Wahrscheinlichkeitserh.)...



- ◆ Teilchen klassifiziert anhand ihrer Transformationseigenschaften unter der Poincarégruppe: spin-1/2 (Materie) \rightarrow Spinoren,...

Das Standardmodell

- ◆ **Allgemeinste Lagrangedichte**, die

- Feldoperatoren für gefundene Materieteilchen enthält

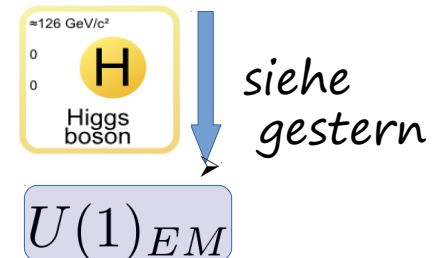
LEPTONS			QUARKS		
0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	≈2.3 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	≈1.275 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	≈173.07 GeV/c ² 2/3 1/2 t top
<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	≈4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	≈95 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	≈4.18 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom

- lokal symmetrisch ist unter

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

- renormierbar ist $\rightarrow D[O \subset \mathcal{L}] \leq 4$

+ poincaréinvariant, hermitesch (Wahrscheinlichkeitserh.)...



- ◆ Teilchen klassifiziert anhand ihrer Transformationseigenschaften unter der Poincarégruppe: spin-1/2 (Materie) \rightarrow Spinoren,...

Das Standardmodell

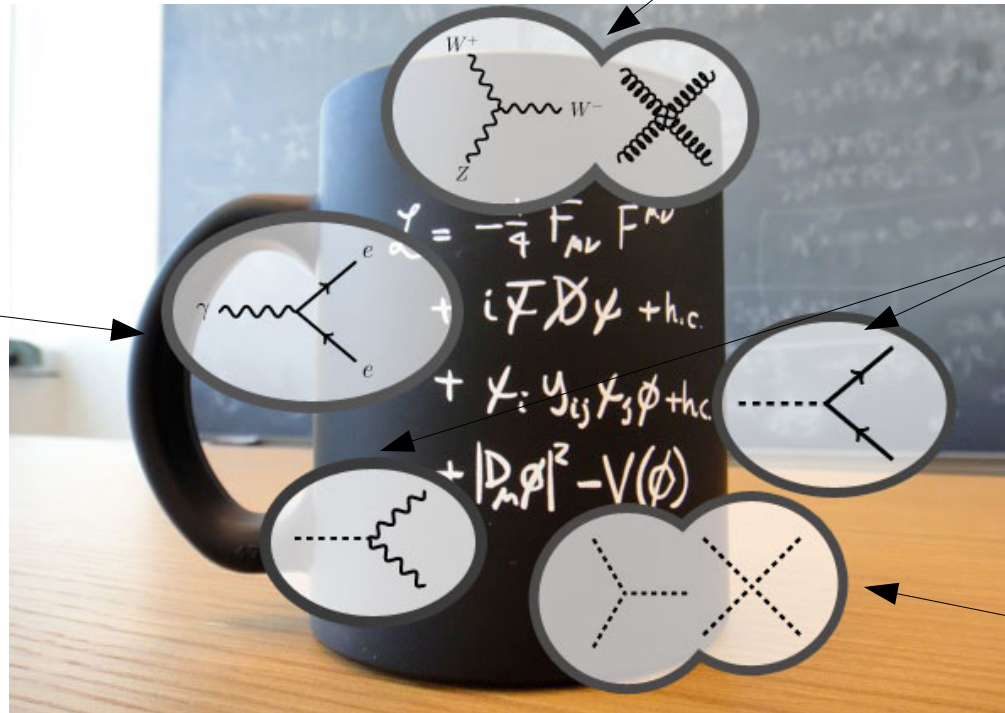


Das Standardmodell



WW der Botenteilchen unter sich

WW zwischen
Materie und
Kraftteilchen
(Boten)

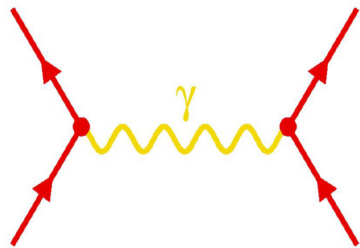
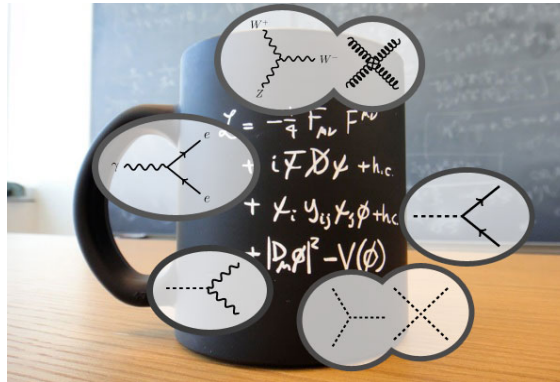


WW des Higgs-Bosons
mit Materieteilchen
und Boten

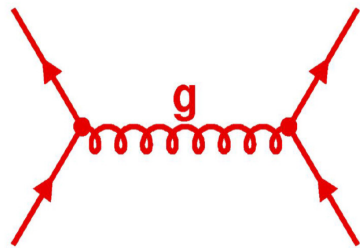
WW der Higgs-
Teilchen unter sich

'Feynman Diagramme' → Vorhersagen für Prozesse am CERN, etc.

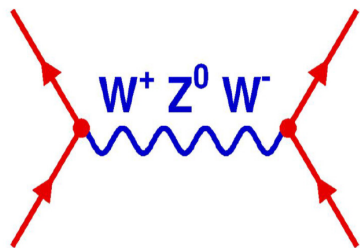
Das Standardmodell



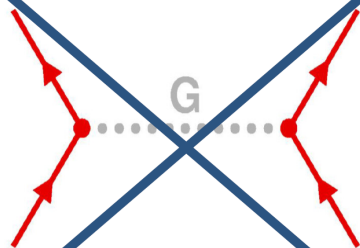
elektromagn. Kraft



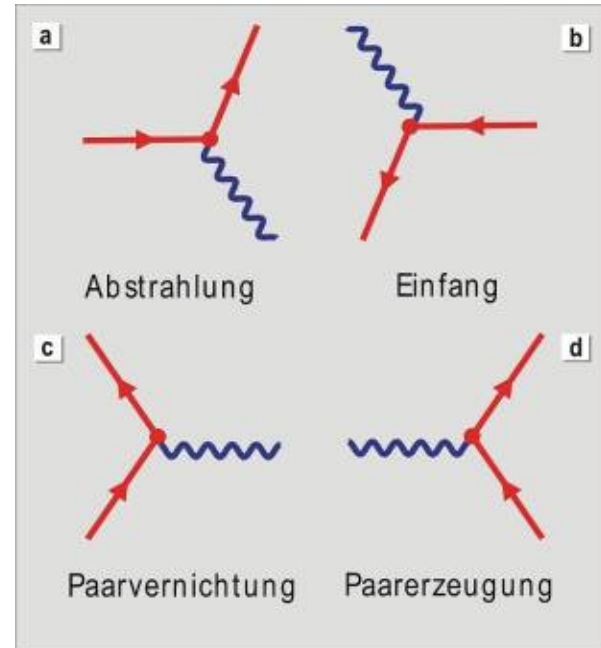
starke Kraft



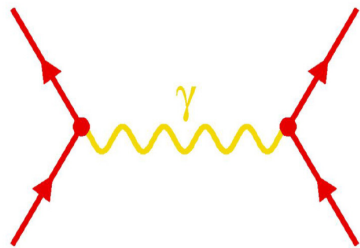
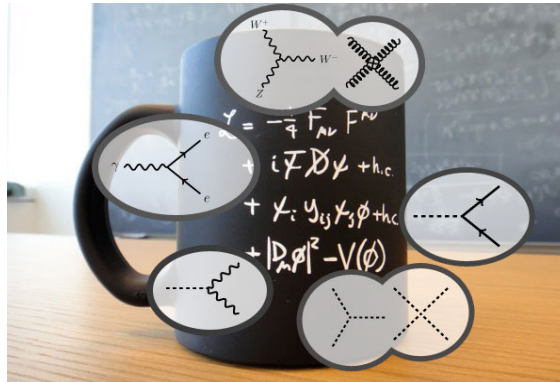
schwache Kraft



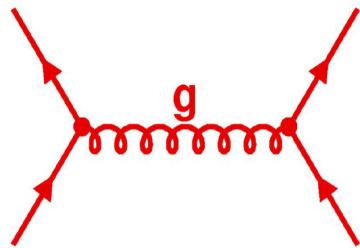
Gravitation



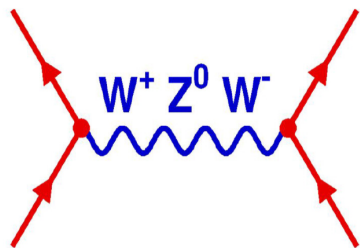
Das Standardmodell



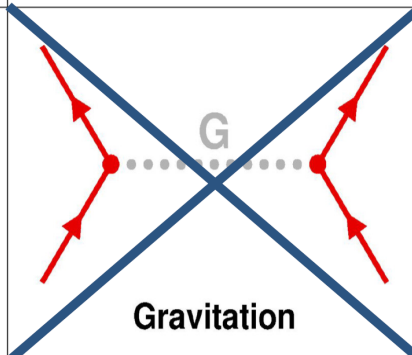
elektromagn. Kraft



starke Kraft

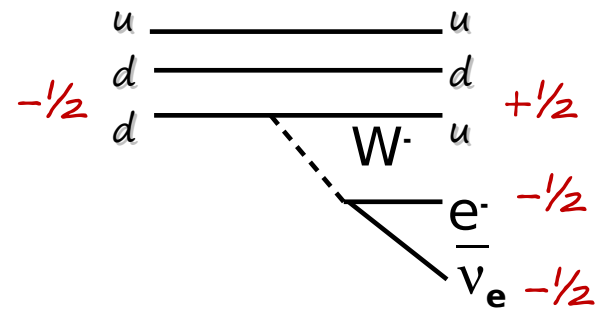


schwache Kraft

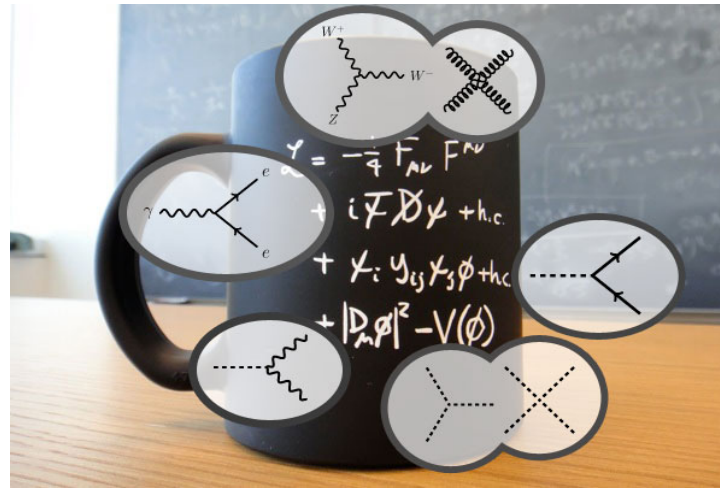


Gravitation

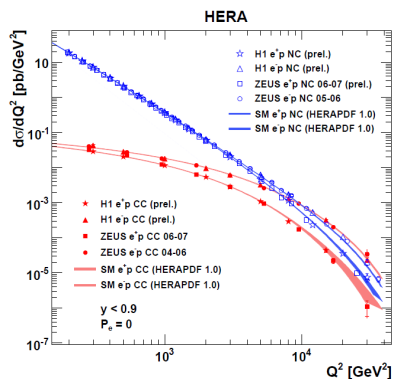
- β^- - Zerfall des Neutrons



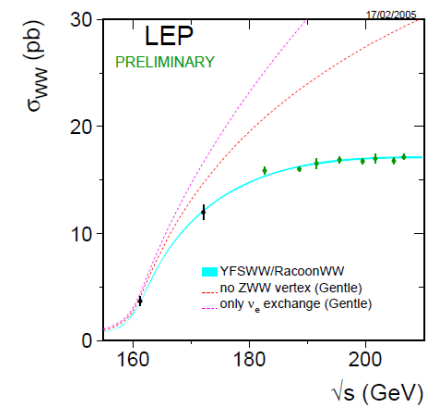
Das Standardmodell



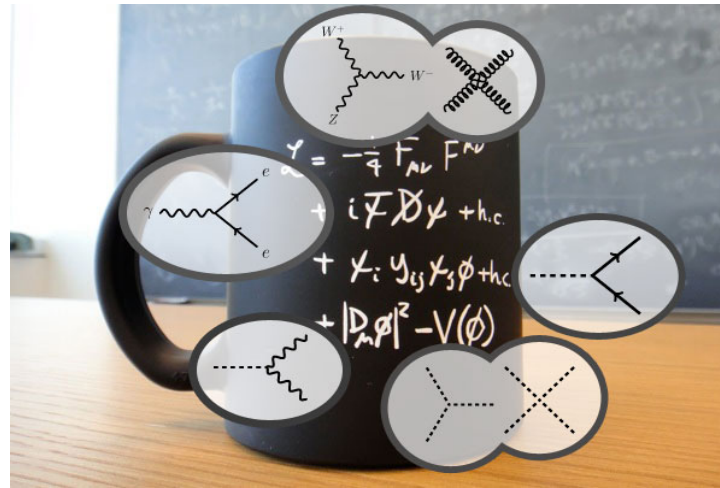
Lange Liste nichttrivialer Vorhersagen; gute Übereinstimmung!



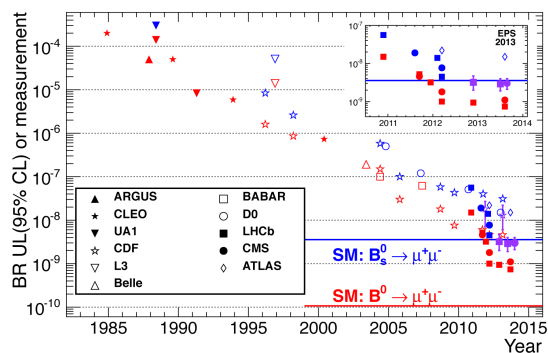
- 'Neutrale Ströme', W+Z Bosonen
- Charm-Quark
- Top-Quark (+ Masse)
- Higgs Boson



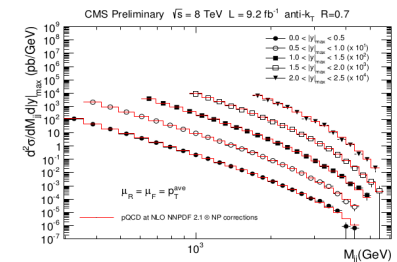
Das Standardmodell



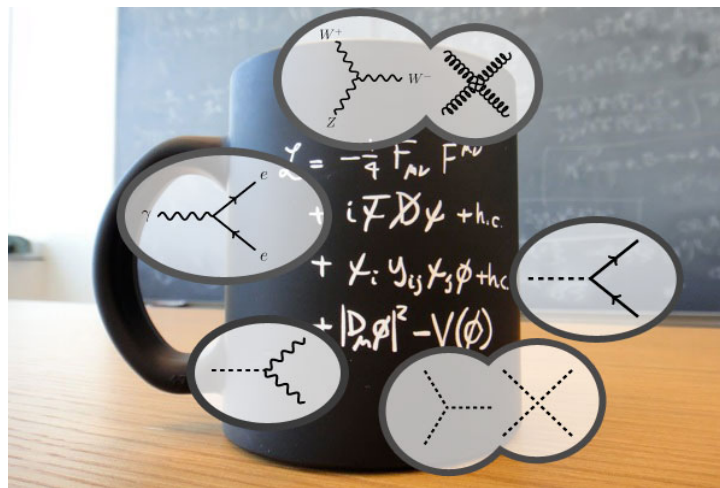
Lange Liste nichttrivialer Vorhersagen; gute Übereinstimmung!



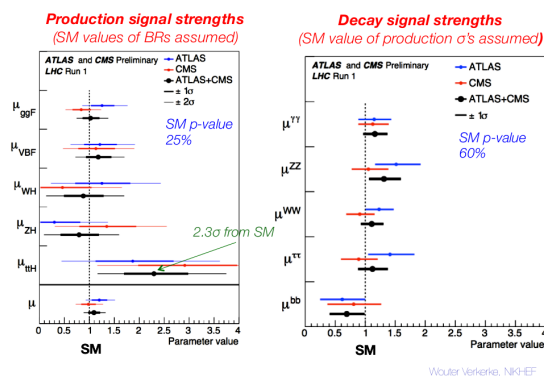
- 'Neutrale Ströme', W+Z Bosonen
- Charm-Quark
- Top-Quark (+ Masse)
- Higgs Boson



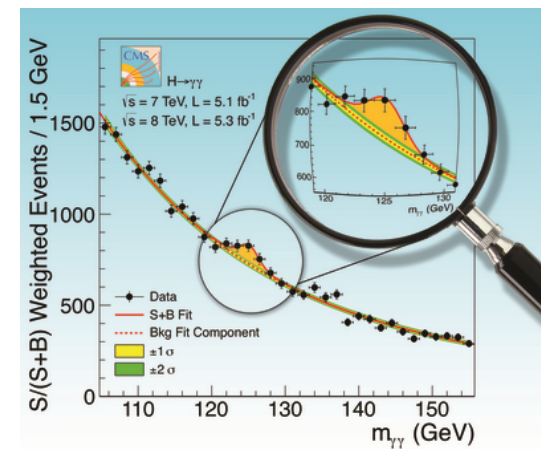
Das Standardmodell



Lange Liste nichttrivialer Vorhersagen; gute Übereinstimmung!



- 'Neutrale Ströme', W+Z Bosonen
- Charm-Quark
- Top-Quark (+ Masse)
- **Higgs Boson**



Physik Jenseits des SM

Viele Hinweise auf neue Physik!

- Gravitation
- Hierarchieproblem
- Neutrinomassen (See-Saw)
- Große Vereinheitlichung
- (Flavor-)Struktur
- Baryogenese
- Dunkle Materie
- Ursache für Symmetrie-brechendes Potential?
- Starkes CP-Problem
- Einige Hinweise in Flavor + Präzisionsmessungen
-

Physik Jenseits des SM

Viele Hinweise auf neue Physik!

- Gravitation
- Hierarchieproblem
- Neutrinomassen (See-Saw)
- Große Vereinheitlichung
- (Flavor-)Struktur
- Baryogenese
- Dunkle Materie
- Ursache für Symmetrie-brechendes Potential?
- Starkes CP-Problem
- Einige Hinweise in Flavor + Präzisionsmessungen
-

- Jagd nach nächstem 'Standardmodell' hat längst begonnen [Erweiterung des SM!]
- Neue Ideen sind immer willkommen :)





*Vielen Dank für eure
Aufmerksamkeit!*

Dank an Michael Kolbel für Materialien, etc.