

Moderne Experimentalphysik III: Hadronen und Teilchen (Physik VI)

Thomas Müller, Roger Wolf
05. Juli 2018

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IETP) – PHYSICS FACULTY



Kapitel 9: Grenzen der Standardmodells



Was wir gelernt haben...

- Wir hatten 12 Wochen lang das **Vergnügen**
- 20 Vorlesungen
- 9 Übungsblätter (21 Aufgaben) mit detaillierten Lösungen

Vorlesung:

VL-01 Einheiten, Rel. Kinematik (Fragen) (1) ●●●	Di 17.04.2018
VL-02 Teilchenstreuung (Fragen) (2) ●	Do 19.04.2018
VL-03 Wirkungsquerschnitt (Fragen) ●●	Di 24.04.2018
VL-04 Teilchenbeschleunigung	Do 26.04.2018
Vorlesung fällt aus	Di 01.05.2018
VL-05 WW gel. Teilchen mit Materie (Fragen) ●●●	Do 03.05.2018
VL-06 WW Photonen und Hadronen mit Materie ●●	Di 08.05.2018
Vorlesung fällt aus	Do 10.05.2018
VL-07 Teilchendetektoren und Experimente	Di 15.05.2018
VL-08 Symmetrien und Erhaltungssätze ●●●	Do 17.05.2018
VL-09 Diskrete Symmetrien der Teilchenphysik ●●●	Di 22.05.2018
Vorlesung fällt aus	Do 24.05.2018
VL-10 Fundamentale Teilchen und Kräfte ●●	Di 29.05.2018
Vorlesung fällt aus	Do 31.05.2018
VL-11 Teilchenzoo: vom Hadron zum Quark ●	Di 05.06.2018
VL-12 Farbladung und QCD ●	Do 07.06.2018
VL-13 Phänomenologie der schwachen WW	Di 12.06.2018
VL-14 Eichtheorien	Do 14.06.2018
VL-15 Theorie der elektroschwachen WW	Di 19.06.2018
VL-16 Higgs Mechanismus	Do 21.06.2018
VL-17 Eigenschaften des Top Quarks	Di 26.06.2018
VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften	Do 28.06.2018
VL-19 Neutrino-Physik	Di 03.07.2018
VL-20 Physik jenseits des SM	Do 05.07.2018

Vorlesungstag:

Di 17.04.2018
Do 19.04.2018
Di 24.04.2018
Do 26.04.2018
Di 01.05.2018
Do 03.05.2018
Di 08.05.2018
Do 10.05.2018
Di 15.05.2018
Do 17.05.2018
Di 22.05.2018
Do 24.05.2018
Di 29.05.2018
Do 31.05.2018
Di 05.06.2018
Do 07.06.2018
Di 12.06.2018
Do 14.06.2018
Di 19.06.2018
Do 21.06.2018
Di 26.06.2018
Do 28.06.2018
Di 03.07.2018
Do 05.07.2018

Übungsblatt:

-
-
Blatt-01 (Lösung-01)
-
Blatt-02 (Lösung-02)
-
Blatt-03 (Lösung-03)
-
Blatt-04 (Lösung-04)
-
Blatt-05 (Lösung-05)
-
Blatt-06 (Lösung-06)
-
Blatt-07 (Lösung-07)
-
Blatt-08 (Lösung-08)
-
Blatt-09 (Lösung-09)
-
-
-
-
-
-
-

(1) Folien mit links ergänzend zu den Vorlesungsfolien.

(2) Weiterführende Informationen zu den Vorlesungsfolien.

Was wir nicht wissen...

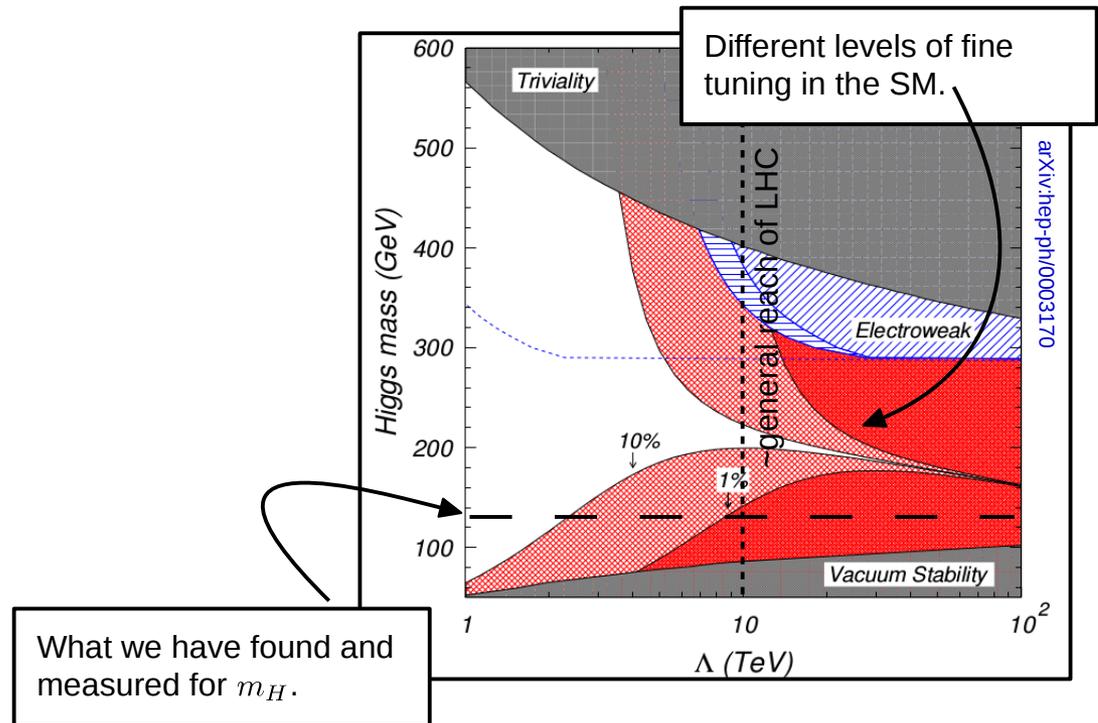
- Das SM besteht aus über 18 freien Parametern, deren Ursprung wir nicht kennen
- Warum unterscheidet die schwache WW zwischen links- und rechtshändigen Teilchen?
- Warum ist die schwache WW CP-verletzend? Ist auch CPT verletzt?
- Warum gibt es gerade drei Fermion-Generationen?
- Wie kommt es zu den Massenhierarchien zwischen den Fermionfamilien?
- Warum gerade eine $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_c$ -Symmetrie zur Beschreibung der fundamentalen WW? Gibt es eine übergeordnete Symmetrie (z.B. $SU(5)$)?
- Warum ist die $SU(2)_L$ -Symmetrie im Quantenvakuum gebrochen und wie kommt es zu dieser Symmetriebrechung?
- Wir wissen nur wenig über das Verhalten des SM in nicht-perturbativen Regimen z.B. in der QCD

Was wir nicht wissen...

- Wie läßt sich die Gravitation als QFT in das SM einfügen? Warum ist die Gravitation so schwach im Vgl zu allen anderen WW?
- Neutrinos haben Masse – wo sind die rechtshändigen Neutrinos und welcher Natur sind sie?
- ...

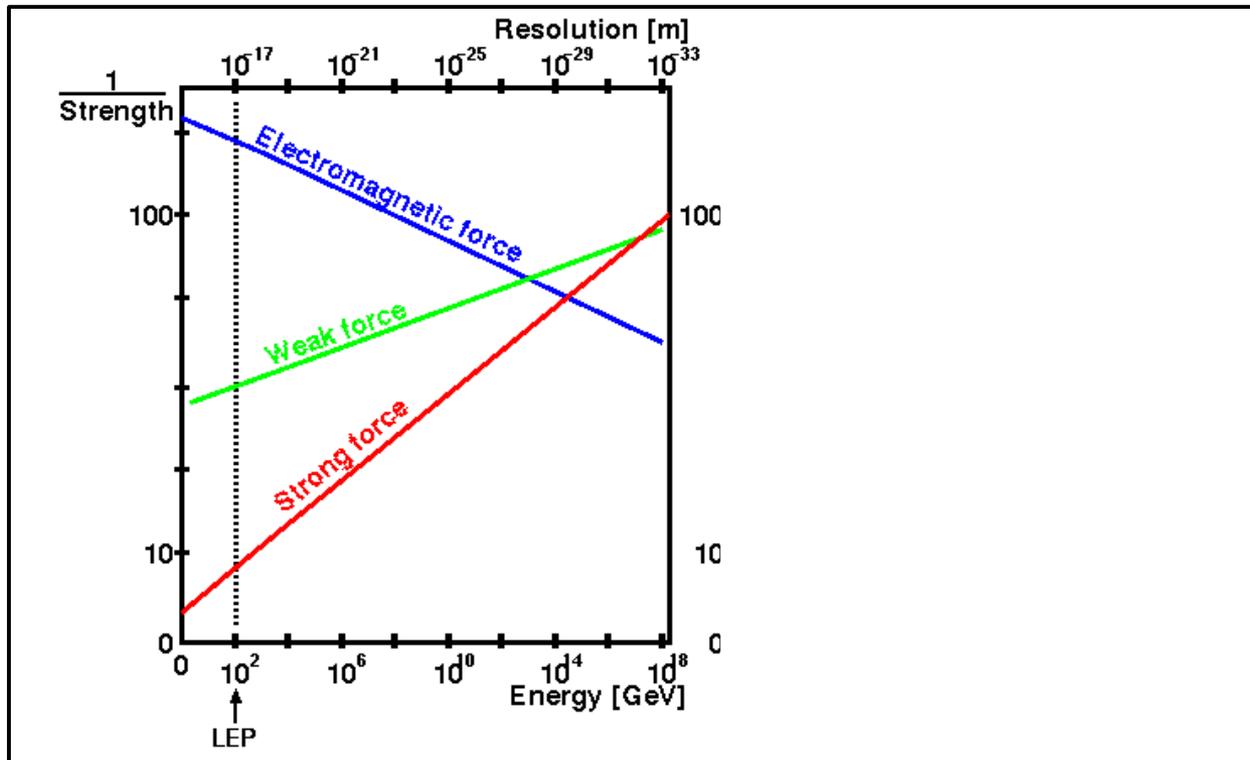
Hierarchie-Problem des SM

- Höhere **Korrekturen zur Higgsmasse** enorm groß (z.B. 100 mal größer als gemessene Higgsmasse)
- D.h. “nakte” Higgsmasse und higher-order Korrekturen müssen sich bis auf 1% auslöschen, um gemessene Higgsmasse zu ergeben (→ fine-tuning problem)



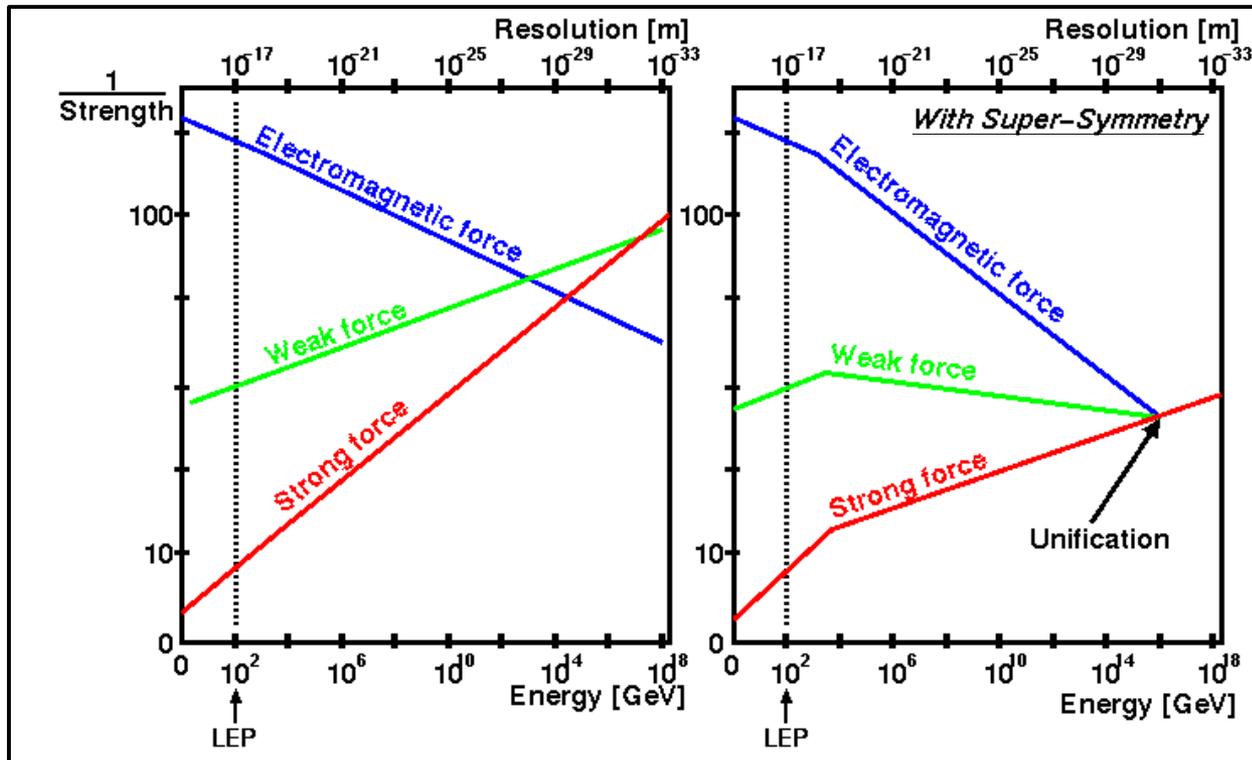
Grand Unified Theories (GUT)

- Wir beobachten, dass sich **die laufenden Kopplungen** bei hohen Skalen fast treffen
- Wir interpretieren diesen Umstand als mögliches Indiz für eine Vereinheitlichung aller Kräfte bei großen Skalen
- Aber warum treffen sich die Kopplungen nur fast?



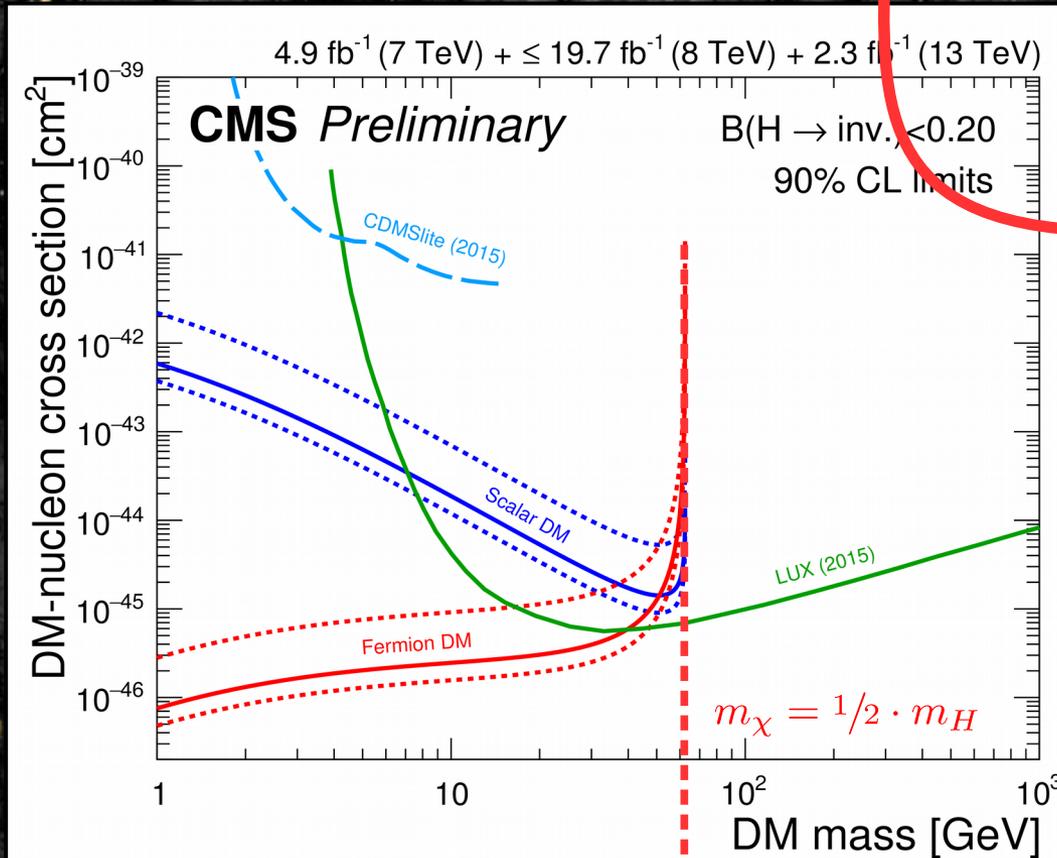
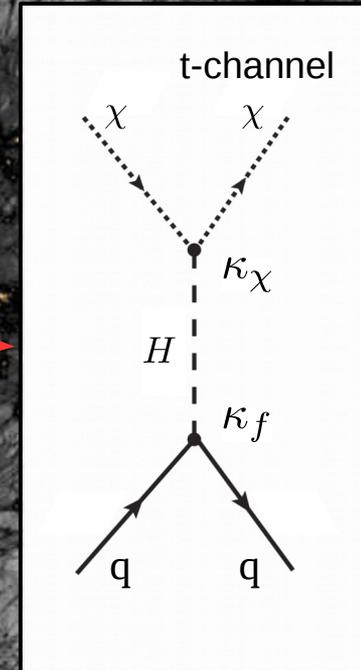
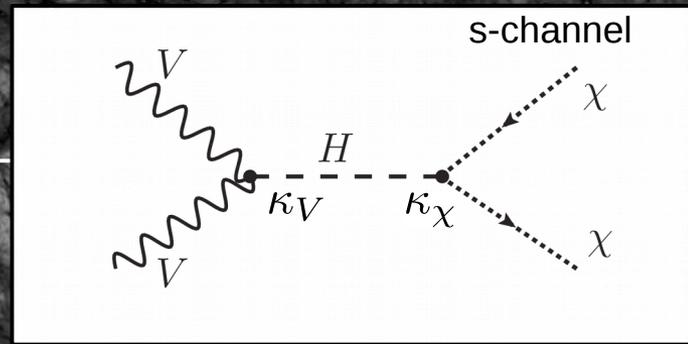
Grand Unified Theories (GUT)

- Wir beobachten, dass sich **die laufenden Kopplungen** bei hohen Skalen fast treffen
- Wir interpretieren diesen Umstand als mögliches Indiz für eine Vereinheitlichung aller Kräfte bei großen Skalen
- Aber warum treffen sich die Kopplungen nur fast?



Dunkle Materie

- Das Universum besteht zu **20% aus dunkler Materie**, die wir nicht kennen und die auf eine uns nicht bekannte Art und Weise (nur durch seine Masse?) mit sichtbarer Materie in Wechselwirkung tritt



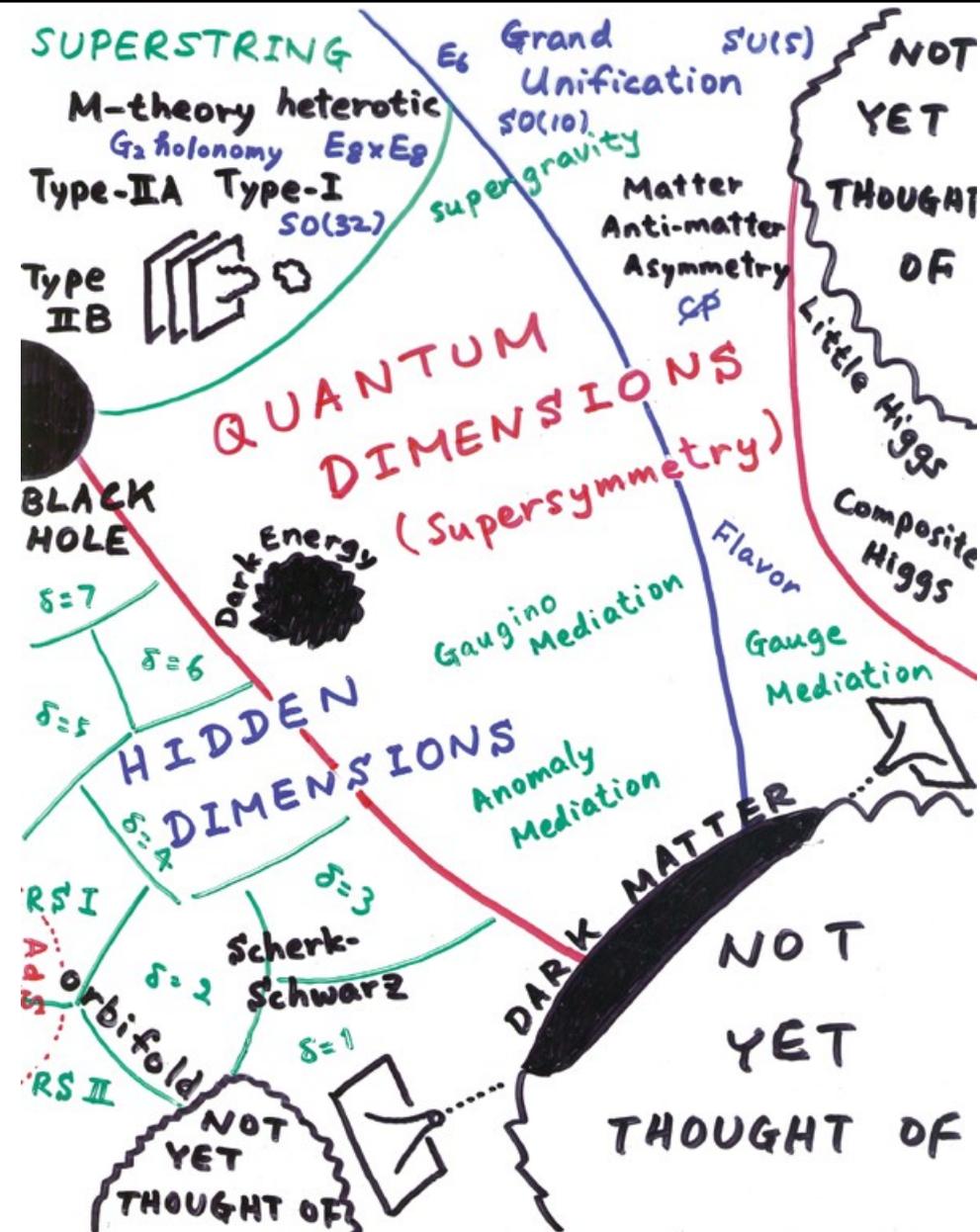
Materieuniversum

- Das Universum (das wir kennen) besteht aus **Materie und nicht aus Antimaterie**
- Es gibt CP-Verletzung im SM, die notwendig ist, um Materie-Antimaterie Asymmetrie erklären zu können, aber wo ist das Maß an CP-Verletzung, das das Ausmaß der beobachteten Asymmetrie erklären kann?



Es gibt (Teilchen-)Physik jenseits des SM

- Die Frage ist nur: **bei welcher Skala** setzt sie ein und ist sie für uns erreichbar?
- **Direkte Beobachtung** neuer Physik bei höchsten erreichbaren Energien
- **Indirekte Auswirkungen** neuer Physik bei unerreichbaren Skalen durch Präzisionmessungen

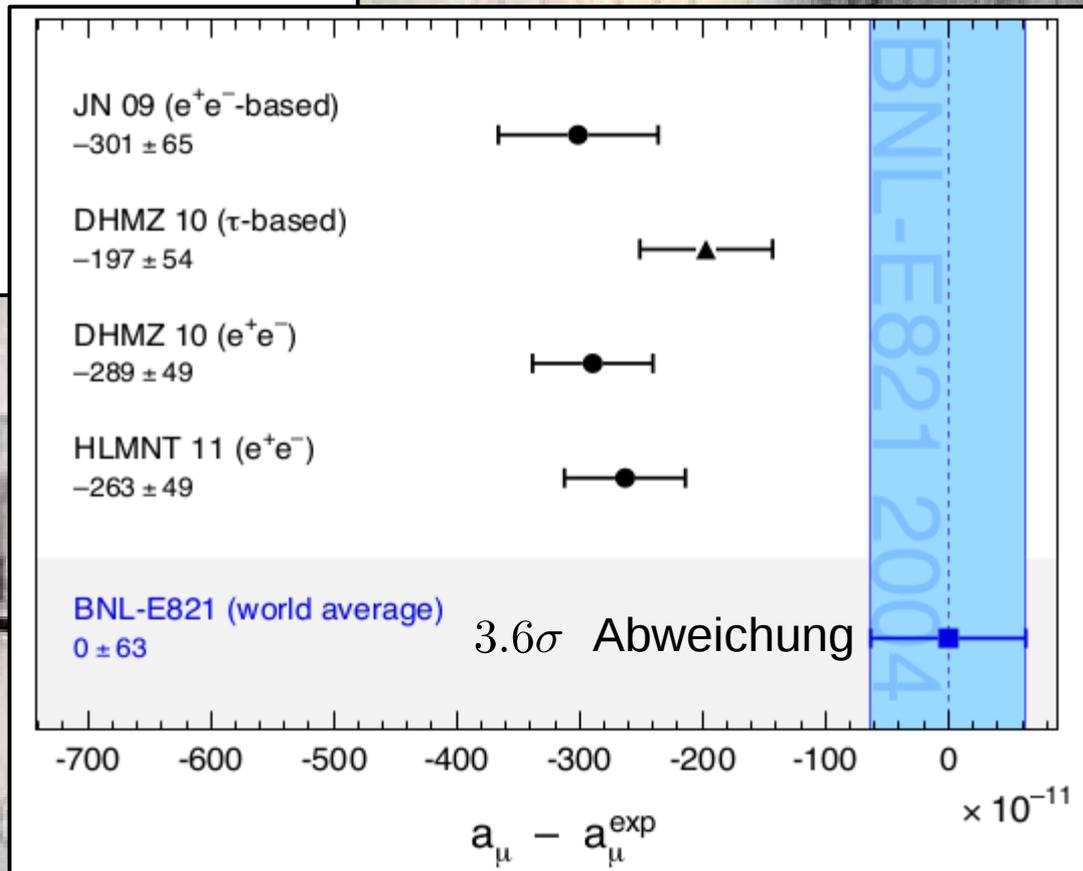


- Magnetisches Moment des Myons: $g_\mu \equiv 2$
(aus Dirac-GL für Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen)
- Im SM (als QFT) \rightarrow Korrekturen höherer Ordnung
- Möglicher Vergleich extrem präziser Messung mit extrem präziser Berechnung

$$1 + \frac{\frac{\alpha}{2\pi} + 1}{\mu_e^{\text{experimentell}}} \approx 2 \approx g_e$$

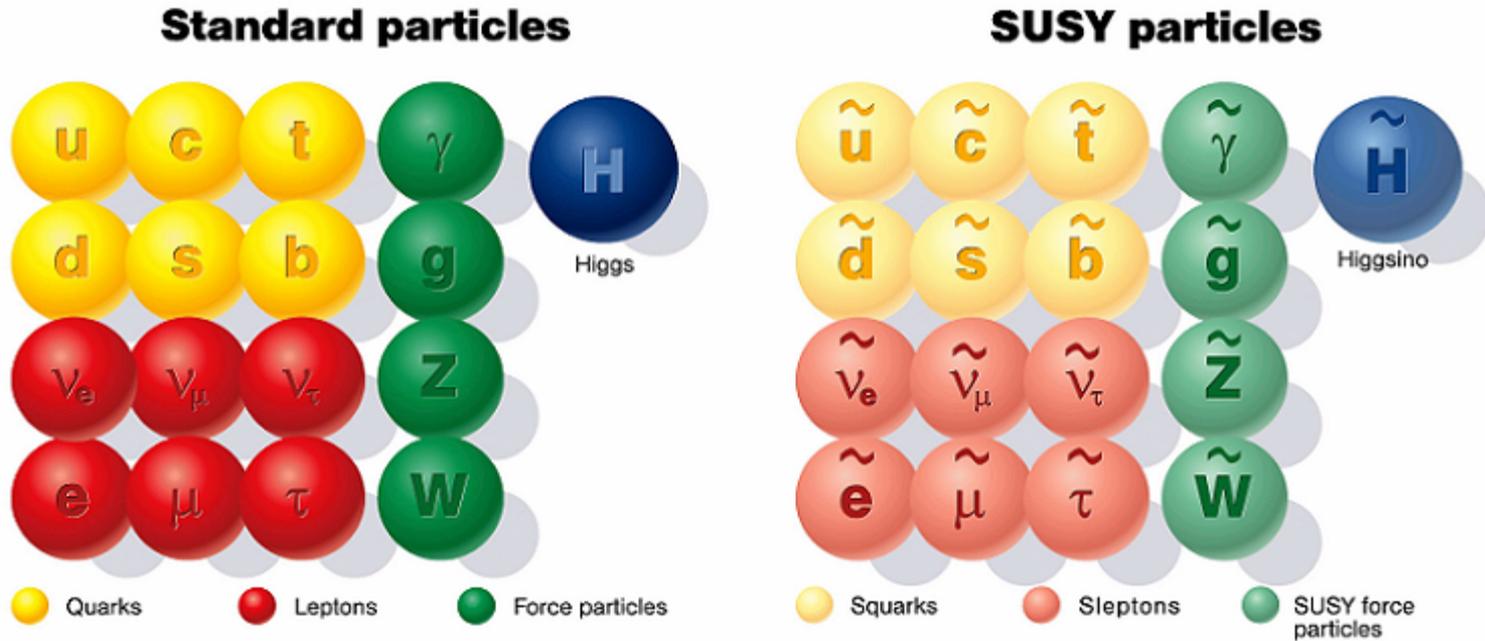
$\alpha = 5.579\,193 \dots$
 Riemannsche Zeta-Funktion
 $\mu_p^{\text{experimentell}}$
 $\mu_e^{\text{experimentell}}$
 $\sim 125 \text{ GeV}$

- Magnetisches Moment des Myons: $g_\mu \equiv 2$ (aus Dirac-GL für Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen)
- Im SM (als QFT) \rightarrow Korrekturen höherer Ordnung
- Möglicher Vergleich extrem präziser Messung mit extrem präziser Berechnung



Supersymmetrie (SUSY)

- Erweitere SM um letzte nicht-triviale **Symmetrie-Operation** (Boson \leftrightarrow Fermion)



- Erlaubt Implementierung der Gravitation in SM (ursprüngliche Motivation)
- Kann spontane Symmetriebrechung im SM erklären
- Löst Hierarchieproblem im Higgs-Sektor des SM
- Öffnet neue Quellen für CP-Verletzung
- Bietet Kandidaten für dunkle Materie

Higgs Bosons in the MSSM ⁽¹⁾

(1) Minimal Supersymmetrisches SM

- Any 2 Higgs Doublet Model (2HDM) predicts **five Higgs bosons**:

$$\phi_u = \begin{pmatrix} \phi_u^0 \\ \phi_u^+ \end{pmatrix}, \quad Y_{\phi_u} = +1, \quad v_u : \text{VEV}_u$$

$$\phi_d = \begin{pmatrix} \phi_d^- \\ \phi_d^0 \end{pmatrix}, \quad Y_{\phi_d} = -1, \quad v_d : \text{VEV}_d$$

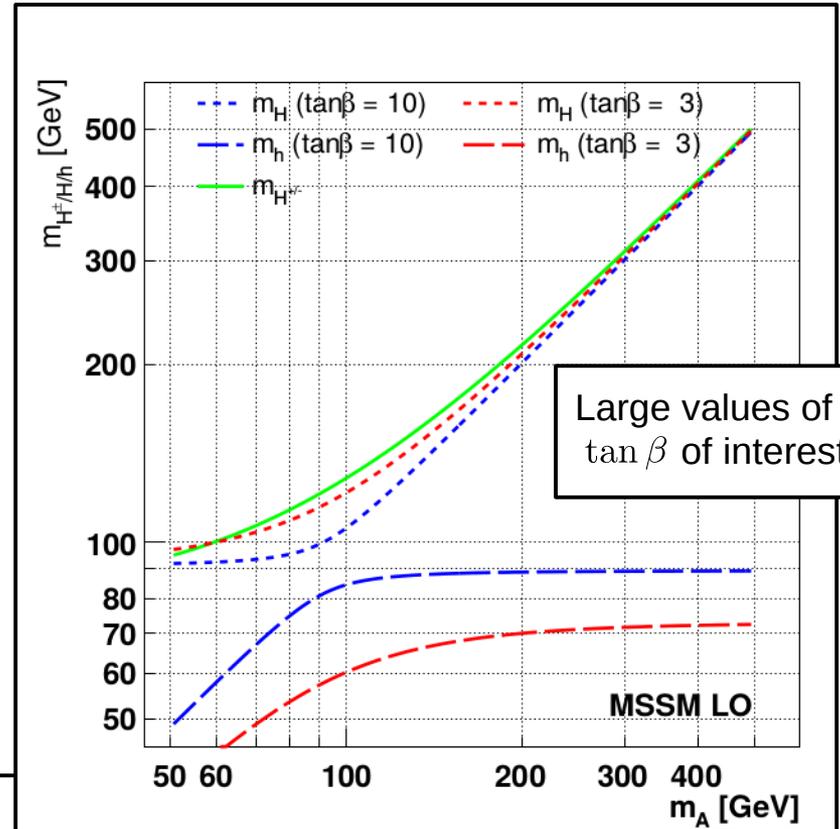
$$N_{\text{ndof}} = 8 \quad - \quad \underbrace{3}_{W, Z} = \underbrace{5}_{H^\pm, H, h, A}$$

- Strict mass requirements at tree level:
two free parameters: m_A , $\tan \beta = v_u/v_d$

$$m_{H^\pm}^2 = m_A^2 + m_W^2$$

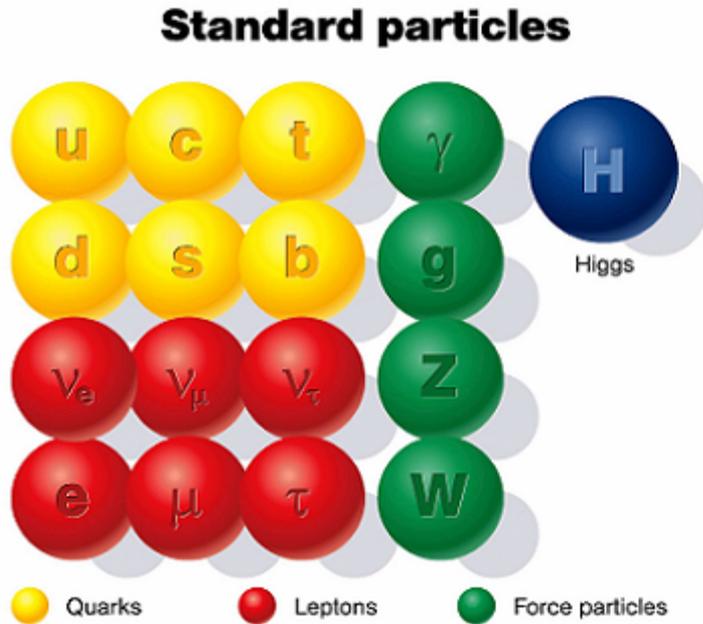
$$m_{H, h}^2 = \frac{1}{2} \left(m_A^2 + m_Z^2 \pm \sqrt{(m_A^2 + m_Z^2)^2 - 4m_A^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta} \right)$$

$$\tan \alpha = \frac{-(m_A^2 + m_Z^2) \sin 2\beta}{(m_Z^2 - m_A^2) \cos 2\beta + \sqrt{(m_A^2 + m_Z^2)^2 - 4m_A^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta}}$$

(angle btw. v_u & v_d in isospace)

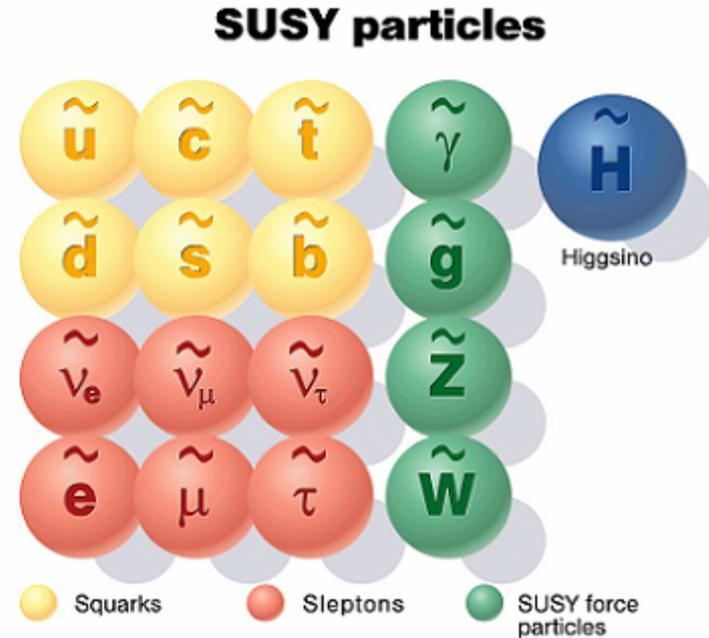
SUSY-Problem

- Supersymmetrie ist **selbst gebrochen**, denn...



SUSY-Problem

- Supersymmetrie ist **selbst gebrochen**, denn...
... **wo sind all die SUSY Teilchen?**
- In der Theorie: SUSY Teilchen exakt gleiche Eigenschaften, wie SM Teilchen nur einen anderen Spin
- Insbesondere → gleiche Masse
- Nichtbeobachtung kann heißen:
Massen der SUSY-Teilchen jenseits unserer (aktuellen) **experimentellen Reichweite** (→ **Symmetriebrechung**)



Gliederung der Vorlesung



Vorlesung:	Vorlesungstag:	Übungsblatt:
VL-01 Einheiten, Relativistische Kinematik	Di 17.04.2018	-
VL-02 Teilchenstreuung	Do 19.04.2018	-
VL-03 Wirkungsquerschnitt	Di 24.04.2018	Blatt-01
VL-04 Teilchenbeschleunigung	Do 26.04.2018	-
Vorlesung fällt aus	Di 01.05.2018	Blatt-02
VL-05 Teilchennachweis durch Ionisation	Do 03.05.2018	-
VL-06 Elektromag. WW und Schauer	Di 08.05.2018	Blatt-03
Vorlesung fällt aus	Do 10.05.2018	-
VL-07 Detektoren der Teilchenphysik	Di 15.05.2018	Blatt-04
VL-08 Symmetrien und Erhaltungsätze	Do 17.05.2018	-
VL-09 Fundamentale Teilchen und Kräfte im SM	Di 22.05.2018	Blatt-05
VL-10 Diskrete Symmetrien des SM	Do 24.05.2018	-
VL-11 Teilchenzoo: vom Hadron zum Quark	Di 29.05.2018	Blatt-06
Vorlesung fällt aus	Do 31.05.2018	-
VL-12 Farbladung und QCD	Di 05.06.2018	Blatt-07
VL-13 Phänomenologie der schwachen WW	Do	
VL-14 Theorie der elektroschwachen WW	Di	
VL-15 Higgs Mechanismus	Do	
VL-16 SM: Quarksektor	Di	
VL-17 Top: Entdeckung und Eigenschaften	Do	
VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften	Di	
VL-19 Neutrinoophysik	Do	

Das war's dann also, aber Sie wissen ja...

Gliederung der Vorlesung



SM

- VL-12 Farbladung und QCD
- VL-13 Phänomenologie der schwachen WW
- VL-14 Theorie der elektroschwachen WW
- VL-15 Higgs Mechanismus
- VL-16 SM: Quarksektor
- VL-17 Top: Entdeckung und Eigenschaften
- VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften
- VL-19 Neutrino-Physik

Vorlesungstag:

Di 17.04.2018
 Do 19.04.2018
 Di 24.04.2018
 Do 26.04.2018
 Di 01.05.2018
 Do 03.05.2018
 Di 08.05.2018
 Do 10.05.2018
 Di 15.05.2018
 Do 17.05.2018
 Di 22.05.2018
 Do 24.05.2018
 Di 29.05.2018
 Do 31.05.2018
 Di 05.06.2018

Übungsblatt:

-
 -
 Blatt-01
 -
 Blatt-02
 -
 Blatt-03
 -
 Blatt-04
 -
 Blatt-05
 -
 Blatt-06
 -
 Blatt-07

Do
 Di
 Do
 Di
 Do
 Di
 Do

Das war's dann also, aber Sie wissen ja...

... jeden Ende wohnt ein neuer Anfang inne.

