

HS: Hunting New Physics in the Higgs Sector

Defizite des SM - Motivation für Physik jenseits des SM

Martin Heinrich
Betreuer: Dr. Hendrik Mantler

26. November 2015

Inhaltsverzeichnis

Das Hierarchieproblem/fine-tuning Problem

Dunkle Materie

Dunkle Energie

Neutrinooszillationen

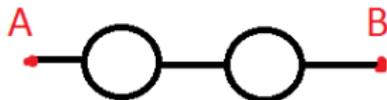
Die Vereinheitlichung der Kräfte

Fazit

Das fine-tuning Problem

Das Hierarchieproblem/fine-tuning Problem

- ▶ Betrachten Strahlungskorrekturen zur nackten Masse von Teilchen in der QED
- ▶ Zur Veranschaulichung von Strahlungskorrekturen, betrachte z.B. Teilchen in Bewegung von Punkt A nach B



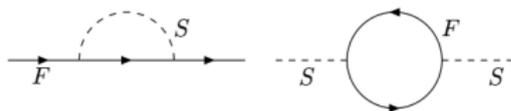
- ▶ Wenn Teilchen ohne Ereignis von A nach B fliegt
→ Nackte Masse m
- ▶ Das Teilchen kann sich aber auch beliebig oft aufteilen in weitere Teilchen und wieder rekombinieren
→ Massenkorrektur δm

Das fine-tuning Problem

- ▶ $m_{phys.}^2 = m^2 + \delta m^2$
- ▶ Betrachte Beispiel-Lagrangedichte:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\cancel{\partial} - m_F)\psi + \frac{1}{2}(\partial_\mu S)^2 - \frac{1}{2}m_S^2 S^2 - \frac{\lambda_F}{2}\bar{\psi}\psi S$$

- ▶ Strahlungskorrekturen sind durch folgende Diagramme gegeben:



- ▶ Schleifenintegrale zur Berechnung der Strahlungskorrekturen divergieren
→ führe Abschneideparameter Λ zur Regularisierung ein

Das fine-tuning Problem

- ▶ Erhalten für Korrekturen zur Fermionmasse δm_F und zur skalaren Masse δm_S^2

$$\delta m_F = -\frac{3\lambda_F^2 m_F}{64\pi^2} \log \frac{\Lambda^2}{m_F^2} + \dots$$

$$\delta m_S^2 = -\frac{\lambda_F^2}{8\pi^2} [\Lambda^2 - m_F^2 \log \frac{\Lambda^2}{m_F^2}] + \dots$$

- ▶ Korrekturen zur Fermionmasse logarithmisch
→ milde Divergenz
- ▶ Korrekturen zur skalaren Masse quadratisch divergent
→ starke Divergenz
- ▶ Aber: SM ist renormierbar
→ Strahlungskorrekturen können bis zu beliebiger Genauigkeit ausgearbeitet werden
- ▶ Außerdem: Eichbosonen besitzen lokale Eichsymmetrien und Fermionen chirale Symmetrie
→ Sind geschützt vor Massenkorrekturen

Das Hierarchieproblem

- ▶ Wo liegt also das eigentliche Problem?
- ▶ Betrachte dazu die Higgsmasse

$$\begin{aligned} m_{H_{SM}}^2(\text{phys.}) &= m_{H_{SM}}^2 + \delta m_{H_{SM}}^2 \\ &\approx m_{H_{SM}}^2 + \frac{c}{16\pi^2} \Lambda^2 \end{aligned}$$

- ▶ Lagrangedichte des skalaren Spin 0 Higgsboson weist keine Symmetrien auf, die es vor Korrekturen schützen
- ▶ Nehmen wir nun an, dass SM nur niederenergetischer Spezialfall einer Hochenergietheorie ist (davon ist aufgrund der noch vorgestellten Probleme auszugehen), so müssen wir Λ Wert zuordnen, bis wohin das SM gültig ist

Das Hierarchieproblem

- ▶ Nehmen z.B. an, dass SM gültig ist bis Skala der Großen Vereinheitlichung (GUT) $\approx 10^{16}$ GeV
- ▶ Man erhält:

$$\begin{aligned}m_{H_{SM}}^2(\text{phys.}) &= (125 \text{ GeV})^2 \approx 10^4 \text{ GeV}^2 \\ &\approx m_{H_{SM}}^2 + 10^{26}\end{aligned}$$

→ Quadrat der nackten Masse $m_{H_{SM}}^2$ des Higgsbosons ist von Größenordnung 10^{26}

→ Riesig im Vergleich zur physikalischen Masse

- ▶ Wirkt unnatürlich, dass "kleine" physikalische Higgsmasse aus zwei riesigen Beiträgen zusammengesetzt ist

Lösungsansatz: SUSY

- ▶ Fügen zu ursprünglicher Lagrangedichte weitere Lagrangedichte \mathcal{L}_2 hinzu:

$$\mathcal{L}_2 = |\partial_\mu \phi_1|^2 + |\partial_\mu \phi_2|^2 + \frac{\lambda_S}{2} S^2 (|\phi_1|^2 + |\phi_2|^2) - m_\phi^2 (|\phi_1|^2 + |\phi_2|^2)$$

mit ϕ_1, ϕ_2 Feldern die komplexe skalare Teilchen der Masse m_ϕ beschreiben, welche ebenfalls mit λ_S ans skalare Feld koppeln \rightarrow SUSY-Teilchen

- ▶ Man erhält dadurch Strahlungskorrekturen von:

$$\delta m'_S{}^2 = + \frac{\lambda_S^2}{8\pi^2} [\Lambda^2 - m_\phi^2 \log \frac{\Lambda^2}{m_\phi^2}] + \dots$$

- ▶ Die quadratischen Korrekturterme heben sich für $\lambda_S = \lambda_F$ also gerade weg

Problem an SUSY

- ▶ Da SUSY-Teilchen noch nicht entdeckt wurden, wissen wir, dass sie schwerer sein müssen, als ihre SM Partner
→ $\lambda_F \neq \lambda_S$ → Für kleine Unterschiede nicht so problematisch
- ▶ Aber: Sollten SUSY-Teilchen sehr viel schwerer sein als ihre SM Partner, dann haben wir wieder das gleiche Problem
- ▶ Hoffen wir auf baldige Entdeckung von (nicht zu schweren) SUSY-Teilchen, sonst muss ein anderer Lösungsansatz gewählt werden

Hinweise auf Dunkle Materie

Dunkle Materie

- ▶ 1930 Jahre: Fritz Zwicky untersucht die Galaxien des Coma-Clusters
- ▶ Berechnung der Gesamtmasse auf zwei Arten:
 - über gemessene Leuchtkraft → M_1
 - über Virialtheorem: $T = -\frac{1}{2}U$, wobei $U \approx -G\frac{M^2}{R}$
- ▶ Mit isotroper Geschwindigkeitsverteilung gilt: $|v| = \sqrt{3}\langle v \rangle$
und somit $T = \frac{1}{2}M * 3 * \langle v \rangle^2$
 - $M_2 \approx \frac{3 * R * \langle v \rangle^2}{G}$
- ▶ Allerdings: $\frac{M_2}{M_1} \approx 10$
 - Zwicky: "Rest ist nicht leuchtende, dunkle Materie"

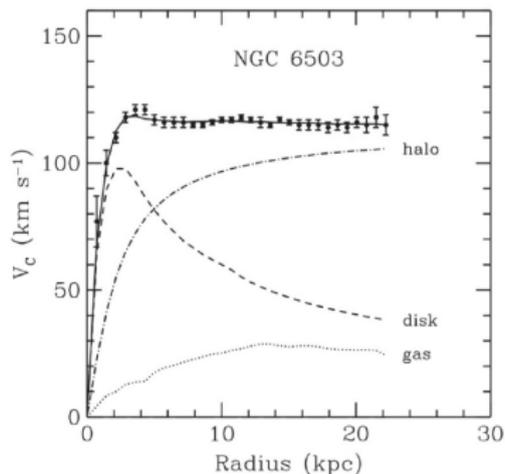
Hinweise auf Dunkle Materie

- ▶ Analyse der Rotationskurven von Galaxien
→ untersuche Rotationsgeschwindigkeit in Funktion zum radialen Abstand
- ▶ Setze dazu Zentripetal- & Gravitationskraft gleich:

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM}{r^2}$$
$$\rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- ▶ Verhalten von $\frac{1}{\sqrt{r}}$ konnte nicht beobachtet werden

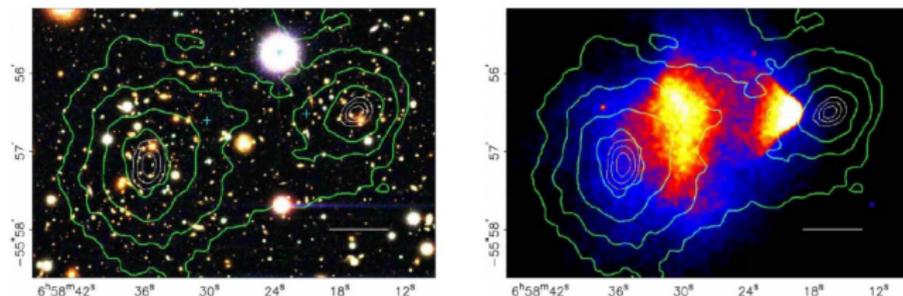
Hinweise auf Dunkle Materie



- ▶ Erklärbar durch kugelförmigen Halo von "dunkler Materie" oder durch Einfluss von galaktischem Gas
→ Berechnungen haben ergeben: Masse dunkler Halo zu Masse leuchtende Materie bis Galaxierand $\approx 10:1$

Hinweise auf Dunkle Materie

- ▶ Massenanalyse mithilfe von Gravitationslinsen
- ▶ Krümmung der Raum-Zeit durch große Massen
→ Ablenkung von Licht ähnlich einer optischen Linse
- ▶ Betrachte Bullet-Cluster (Kollision von zwei Galaxien)



- ▶ Verschiebung des Maximums des Gravitationspotentials
→ Zusätzliche Materie, die kaum wechselwirkt bei Kollision

Kandidaten für DM

- ▶ Im SM keine Kandidaten für DM
- ▶ MACHOs: Massive Compact Halo Objects
 - nicht-leuchtende baryonische Materie (Neutronensterne, schwarze Löcher etc.)
 - Allerdings: zu wenige um Großteil von DM zu erklären
- ▶ Axionen: hypothetisches Elementarteilchen, postuliert in QCD im Zusammenhang mit der Neutralität des Neutrons
 - Bisher noch kein Anzeichen von ihnen
- ▶ WIMPS: stabile, freie Elementarteilchen mit Masse von 10 GeV-TeV, nur schwache WW
 - In SUSY gibt es solche Teilchen
 - Im MSSM z.B. das leichteste stabile Teilchen, das Neutralino, ist guter Kandidat, $M \approx 100$ GeV

Geschichte der dunklen Energie

Dunkle Energie

- ▶ 1912: Vesto Slipher entdeckt Rotverschiebung des Spektrums weit entfernter kosmologischer Objekte
- ▶ 1917: Einstein formuliert die Allgemeine Relativitätstheorie & führt die kosmologische Konstante Λ ein
→ statisches, gleichbleibendes Universum
- ▶ Parallel: Georges Lemaitre & Alexander Friedmann formulieren unabhängig voneinander Theorie von dynamischem Universum
→ Verknüpfung der Rotverschiebung mit Expansion des Universums
- ▶ 1926: Edwin Hubble publiziert Distanzen zu kosmologischen Objekten deutlich außerhalb unserer Galaxie
- ▶ 1929: Hubble Gesetz bestätigt Lemaitres Schlussfolgerung von expandierendem Universum
→ Einstein setzt $\Lambda = 0$ und bezeichnet sie als Fehler

Hubble-Gesetz & Friedmann-Gleichung

- ▶ Hubble Gesetz:

$$c * z = H(t) * D$$

mit $H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$ dem Hubble-Parameter, z =kosmologische Rotverschiebung und $a = \frac{1}{z+1}$ einem Skalenfaktor, welcher relative Expansion des Universums beschreibt

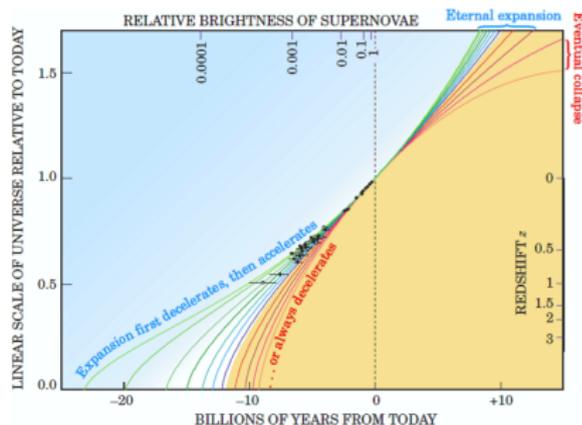
- ▶ Friedmann-Gleichung: erste relativistische Beschreibung eines dynamischen Universums

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$
$$\rightarrow \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi G}{3c^2}(\rho c^2 + 3P) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- ▶ Bis 1998: $\Lambda = 0$ gesetzt

Entdeckung der dunklen Energie

- ▶ 1998: Saul Perlmutter, Brian Schmidt & Adam Riess untersuchen Supernova Typ 1a Explosionen zur Vermessung des Universums → Physiknobelpreis 2011
- ▶ Supernovae Typ 1a: Weiße Zwerge nehmen Masse von benachbarten Sternen zu sich, bis sie kollabieren
- ▶ Alle Supernovae Typ 1a haben fast identische Helligkeit
→ Über Helligkeit kann Zusammenhang zu Rotverschiebung & Hubble-Parameter hergestellt werden
→ Zusammenhang zur Beschleunigung → $\Lambda > 0$



Kandidaten für dunkle Energie

- ▶ Interpretation von Λ als Vakuumergie, zusammengesetzt aus Nullpunktenergie und Vakuumschwankungen
→ Vakuumschwankungen nicht genau berechenbar
- ▶ Abschätzung über Grundzustandsenergien des harmonischen Oszillators + Summation über alle Wellenzahlen
→ $\rho_{\text{Vakuum}} \approx \int_0^\infty k^3 dk \approx k_{\text{max}}^4$
cut-off bei k_{max} um Divergenz zu vermeiden
- ▶ Setze z.B. k_{max} bei:
Planck-Skala: $M_{Pl} \approx 10^{18} \text{ GeV} \rightarrow \rho_\Lambda \approx 10^{76} \text{ GeV}^4$
QCD Skala: $M_{QCD} \approx 0,3 \text{ GeV} \rightarrow \rho_\Lambda \approx 10^{-3} \text{ GeV}^4$
- ▶ Allerdings bisherige Beobachtung: $\rho_\Lambda \approx 10^{-47} \text{ GeV}^4$
→ Bisher noch unbefriedigend
- ▶ Quintessenz: Einführung eines unsichtbaren, skalaren Feldes, welches langsamen Veränderungen unterliegt
→ Zustandsgleichung besitzt veränderlichen Wert, aktuell so groß wie kosmologische Konstante Λ

Kurze Geschichte der Neutrinos

Neutrinooszillationen

- ▶ 1930: Wolfgang Pauli postuliert das Neutrino, um die Energie- und Impulserhaltung beim β -Zerfall zu erklären
- ▶ 1933: Fermi formuliert erste Theorie des β -Zerfalls und nennt das Teilchen "Neutrino"
- ▶ 1956: Experimentelle Entdeckung des Neutrinos durch das Cowan-Reines-Neutrinoexperiment
→ Physiknobelpreis 1995
- ▶ Im SM gibt es 3 Generationen (Flavours) von Neutrinos + ihre Anti-Partner: Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ & Tauon-Neutrino ν_τ
- ▶ Im SM: Neutrinos sind Eigenzustände der schwachen WW, besitzen keine Ladung & keine Masse
- ▶ Außerdem gilt Leptonenzahlerhaltung
→ Nur Übergänge innerhalb einer Generation

Hinweise auf Neutrinooszillationen

- ▶ Homestake-Experiment: Seit 1970, in der Homestake Goldmine, Tiefe: 1480 m
→ Abschirmung vor kosmischer & atmosphärischer Strahlung
- ▶ $\nu_e + Cl^{37} \rightarrow e^- + Ar^{37}$
- ▶ Anschließend wird über 60-70 Tage Zerfall von Ar^{37} gemessen
→ Messungen von 1970-1994 haben ergeben:
0,482 ± 0,042 Neutrinoereignisse pro Tag
→ $R_{exp} = 2,56 \pm 0,22$ SNU
- ▶ Aus Standard Sonnenmodell (SSM) erwartet:
- ▶ $R_{SSM} = 8,0 \pm 3,0$ SNU
→ $\frac{R_{exp}}{R_{SSM}} \approx \frac{1}{3}$
→ Neutrinodefizit
- ▶ 2002: Nobelpreis für Raymond Davis Jr.

Hinweise auf Neutrinooszillationen

- ▶ 1999-2006: Sudbury Neutrino Observatory
→ Nachweis neben ν_e auch von ν_μ & ν_τ im Neutrinstrom von der Sonne
- ▶ Auffällig dabei: Gesamtneutrinstrom aller Flavourarten zusammen, ausgehend von der Sonne, entspricht, innerhalb der Messfehler, dem erwarteten ν_e Strom vorausgesagt durch das SSM
→ Umwandlung der ν_e in andere Flavours auf dem Weg Sonne-Erde
→ Physiknobelpreis 2015 für Arthur McDonald & Takaaki Kajita
- ▶ Theorie der Neutrinooszillationen von Gribov & Pontecorvo (1969)

Theorie der Neutrinooszillationen

- ▶ Mischung der Flavourzustände möglich \nexists
Leptonenzahlerhaltung im SM
- ▶ Alle Neutrinos müssen unterschiedliche Massen besitzen (also mindestens 2 haben eine) \nexists SM
- ▶ Eigenzustände der schwachen WW sind mit
Masseneigenzuständen über Mischungsmatrix verbunden
- ▶ Betrachte z.B. 2-dim Fall:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

mit einem Mischungswinkel θ

- ▶ Entwickle nun Masseneigenzustände nach der Zeit und nähere für kleine Massen, dann erhält man:

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_e | \nu_\mu(L) \rangle|^2 \\ &= \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{L \cdot \Delta m^2}{4E}\right) \end{aligned}$$

Theorie der Neutrinooszillationen

- ▶ Mit $\Delta m^2 \neq 0$ & $\theta \neq 0$ hat man also $P \neq 0$ für Neutrinooszillationen
- ▶ Für allgemeinen Fall von 3 Flavours:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j}^* |\nu_j\rangle$$

mit $\alpha = e, \mu, \tau$ Flavour EZ & $j = 1, 2, 3$ Massen EZ

- ▶ $U =$ MNS-Matrix (Maki, Nakagawa, Sakata)

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \\ * \begin{pmatrix} e^{i\frac{\alpha_1}{2}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\alpha_2}{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

mit $s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$ bzw. $c_{ij} = \cos(\theta_{ij})$, θ_{ij} Mischungswinkel,
 $\alpha_1, \alpha_2, \delta$ CP-verletzende Phasen

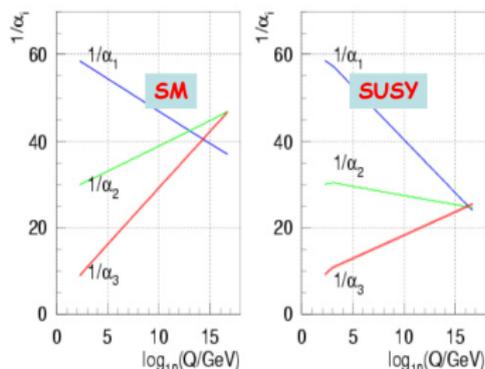
Neutrinooszillationen

- ▶ Beobachtung von Neutrinooszillationen ist also Beweis, dass Neutrinos Masse haben
→ Hinweis auf Physik jenseits des SM
- ▶ Unter anderem wird mit dem KATRIN-Experiment (Campus-Nord) versucht, diese Masse zu messen



Vereinheitlichung der Kräfte

- ▶ In TP versucht man bestehende Theorien (QED, QCD etc.) durch Vereinheitlichung immer weiter zusammen zu fassen
→ z.B.: EM-Theorie + schwache WW Theorie
→ elektroschwache Theorie
- ▶ Man will, dass sich alle 3 Kräfte (EM, schwache, starke) ab bestimmter Energie vereinigen → erwartet bei ca. 10^{16} GeV



→ Im SM: Kopplungskonstanten verfehlen sich

- ▶ Lösungsansatz: SUSY

→ Einführung von supersymmetrischen Partnern +
Anpassung der freien Parameter

Vereinheitlichung der Kräfte

- ▶ Trotzdem fehlt noch die Gravitation
- ▶ Quantengravitation ist im SM nicht renormierbar
→ Unendlichkeiten bringen Schwierigkeiten mit sich
- ▶ Vereinigung von Allgemeiner Relativitätstheorie & Quantenphysik ist seit ca. 100 Jahren ein Problem
- ▶ Bisher gibt es nur einige theoretische Überlegungen
→ z.B. Superstringtheorie
- ▶ Allerdings gibt es bisher keine Hinweise auf Richtigkeit dieser Theorien (Experimente zum Nachweis fehlen)
→ Ziel ist hier noch in weiter Ferne

Fazit

- ▶ Die vorgestellten Argumente, sowohl experimenteller als auch theoretischer Natur, sind nur einige wichtige von weiteren
→ z.B. Materie-Antimaterie-Asymmetrie, die große Anzahl an freien Parametern im SM etc.
- ▶ Alle Argumente weisen daraufhin, dass das SM in seiner aktuellen Form nicht stimmen kann/nicht vollständig ist
- ▶ Wir brauchen Physik jenseits des SM, um die offenen Probleme und Fragen zu klären
→ SUSY z.B. hält einige Antworten parat

Danke für ihre Aufmerksamkeit!