

Fine-Tuning in Teilchenphysik und Kosmologie

Überblick:

- Was ist ein "Fine-Tuning"-Problem?
- Fine-Tuning der Higgs-Masse
- Supersymmetrie als Lösungsvorschlag
- Fine-Tuning der kosmologischen Konstanten
(als Existenzbeweis für Fine-Tuning in der Natur?)
- Der "Lösungsvorschlag" der String-Theory-Landscape
- Andere phys. Implikationen dieses Vorschlags
(am Beispiel dunkler Materie)

Einfachste Wirkung einer Quantenfeldtheorie:

$$S = \int d^4x \mathcal{L} = \int d^4x \left[\frac{1}{2} (\partial_\mu \varphi) (\partial^\mu \varphi) - \frac{1}{2} \underline{m^2} \varphi^2 \right]$$

(als Modell für das Higgs-Feld)

Resultierende Bewegungsgleichung:

$$(\partial_\mu \partial^\mu - \underline{m^2}) \varphi = 0$$

↑
physikalische Masse

Yukawa-Wechselwirkung:

$$\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L} + \lambda \varphi \underbrace{\bar{\psi} \psi}$$

(Fermion,
als Modell für t-quark)

Problem: Standardmodell (als renormierbare QFT)
kann nicht die "endgültige" Theorie sein.

(Haupt-)grund: Bei 10^{19} GeV wird Kopplung an
Gravitation wesentlich (in dieser sind die
Divergenzen perturbativ nicht zu beseitigen)

aktuelles Paradigma: Bei 10^{19} GeV werden SM + Gravitation
ersetzt durch UV-endliche Theorie
(z.B. Superstringtheorie), deren fundamentale
Massenskala $M_p \approx 10^{19}$ GeV ist.

⇒ $\Lambda \rightarrow M_p$; $m_{\text{phys.}}^2 = m_0^2(M_p^2) - \lambda^2 M_p^2$
echtes Fine-Tuning-Problem!

Konkretisierung im Rahmen der Supersymmetrie (Bei sehr hohen Energien)

$$\Delta m^2 = \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} + \text{---} \text{---} \text{---} \text{---}$$

Superpartner des t -quarks



$$\Delta m^2 = \lambda^2 \Lambda^2 - \lambda^2 (\Lambda^2 - \underbrace{m_{\tilde{t}}^2}) = \lambda^2 m_{\tilde{t}}^2$$

(für stringtheoret. motivierte SUSY wäre

$m_{\tilde{t}} \sim M_p$ natürlich)



$$m_{\text{phys.}}^2 = m_0^2 + \lambda m_{\tilde{t}}^2$$

Fine-Tuning!

Supersymmetrie als Lösung des Fine-Tuning-Problems (bzw. des Hierarchieproblems $m_{EW} \ll M_P$)

- Sei $m_{\tilde{E}} \approx m_{EW} \ll M_P$ ("low-energy SUSY")
- Dieser niedrige Wert der SUSY-Brechungs-Skala ist relativ einfach dynamisch erklärbar

$$\Rightarrow m_{\tilde{E}} \approx m_{\text{Higgs}} \approx m_Z \equiv m_{EW} (\approx 100 \text{ GeV})$$

Problem:

Experimenteller Befund: $m_{\tilde{E}} \geq 10 m_{EW}$

Gründe:

- Bisher keine Superpartner entdeckt
- LEP-Collider: $m_{\text{Higgs}} > 115 \text{ GeV}$
- SUSY: $m_{\text{Higgs}} < 90 \text{ GeV}$

⇒ Quantenkorrekturen (Loop-Korrekturen) müssen diese Diskrepanz beseitigen

(Die führende Korrektur ist $\sim m_{\tilde{t}}^2$,
konkret heißt das: $m_{\tilde{t}} \gtrsim 10 m_{EW}$.)

Mit einer SUSY-Brechungs-Skala ($m_{\tilde{t}}$) von ~ 1000 GeV ist dann die natürliche Erwartung $m_{EW} \sim 1000$ GeV, im Widerspruch zu $m_Z \approx 90$ GeV.

⇒ Es gibt im Rahmen "minimaler" SUSY (\equiv MSSM) wieder ein "kleines Fine-Tuning-Problem" vom Typ

$$A - B \approx \underline{O(100) - O(100) \approx O(1)}$$

Ein ganz ähnliches Fine-Tuning Problem existiert in der Kosmologie:

- Die allg. Relativitätstheorie erlaubt einen Term

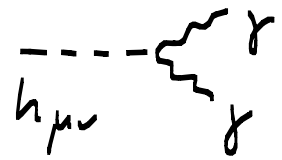
$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \lambda$$

$$g_{\mu\nu} = \underbrace{\eta_{\mu\nu}}_{\text{Graviton}} + h_{\mu\nu} \quad \text{"kosmol. konstante"}$$

- In Feynman-Diagramm-Sprache: 

- Dieser lineare Term in $h_{\mu\nu}$ verursacht, falls vorhanden, eine beschleunigte Expansion des Universums.

Kommentar zu Lösungsvorschlägen ("der Fairness halber")

- Noch zu entdeckende Symmetrie erzwingt $\lambda = 0$
(beobachtetes $\lambda_{\text{phys.}}$ ist Effekt eines "Quintessenz-Feldes")
- Das Graviton ist ein gebundener Zustand, so dass die Kopplung $h_{\mu\nu}$  bei hoher Energie unterdrückt ist
- Unsere Welt ist eine "Brane" im 5-dim. Raum, deren Dynamik $\lambda_{\text{phys.}}$ klein macht
- $\lambda_{\text{phys.}} = \lambda_{\text{phys.}}(t)$ wird durch zeitabhängigen Adjustierungsmechanismus klein

Was, wenn wir akzeptieren, dass unsere Welt durch eine Niederenergie-Theorie beschrieben wird, die "fine-tuned aussieht"?

Gibt es fundamentale (Hochenergie-) Theorien, die das leisten können?

(Wir wollen aber einen "Schöpfer" mit unbegrenzter Rechenfertigkeit, der die fund. Parameter perfekt getuned hat, ausschließen.)

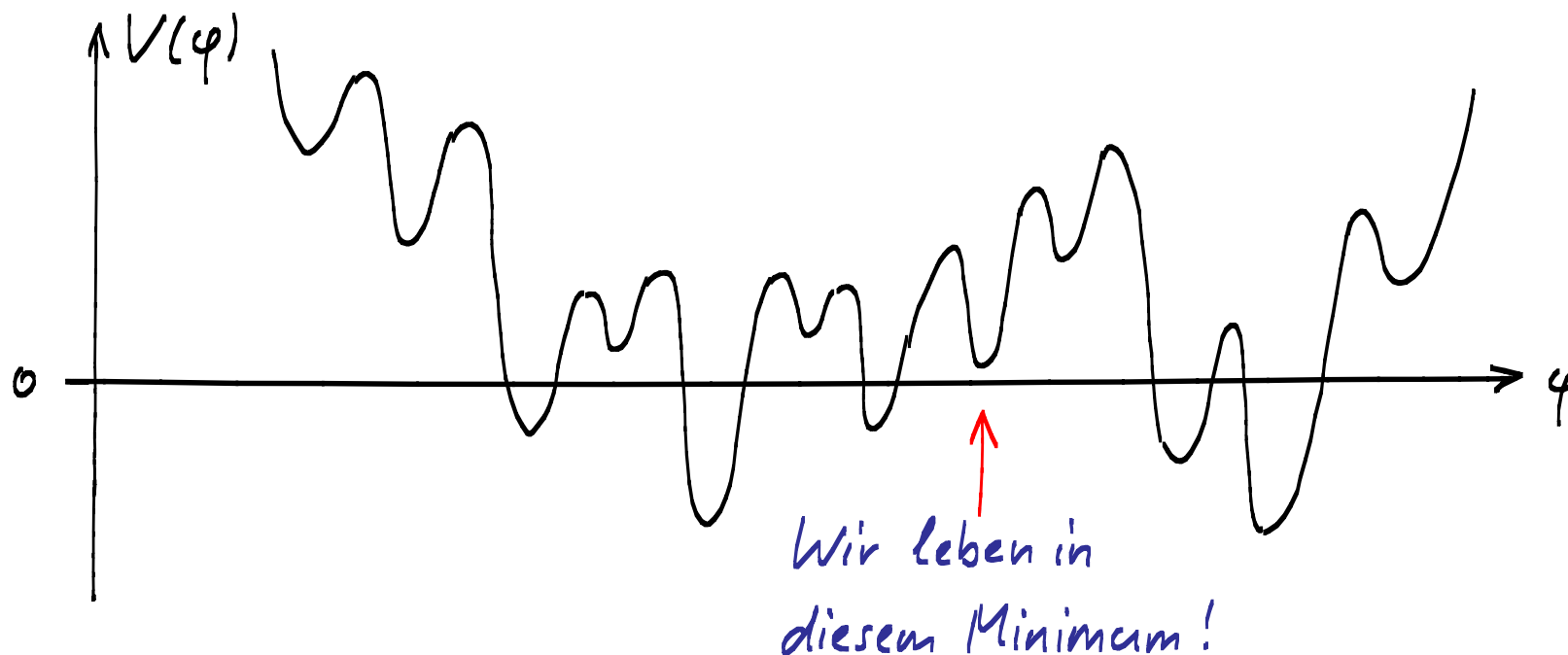
Einzigster (mir bekannter) Vorschlag:

Die fund. Theorie hat viele Lösungen ("Vakua") mit verschiedenen λ — Wir leben in einer mit sehr kleinem λ .

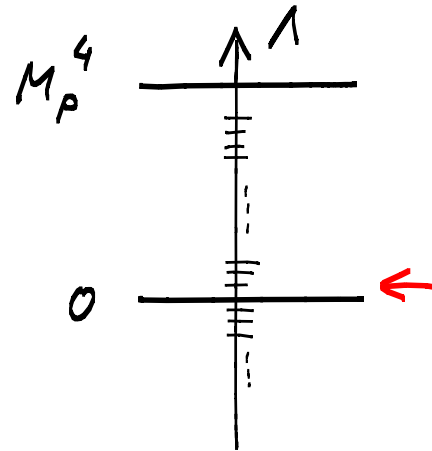
Einfaches Modell zur Veranschaulichung:

Vorbemerkung: Λ ist in Wirklichkeit die Energiedichte des Vakuum

- Betrachte eine Theorie mit einem Skalarfeld φ und einem Potential $V(\varphi)$:



- Um diese Lösung des Problems zu ermöglichen, brauchen wir eine fund. Theorie mit mind. 10^{120} Vacua!



zu erwartender kleinster Wert:

$$M_p^4 / \underbrace{N} \sim (\text{meV})^4$$

Zahl von Vacua

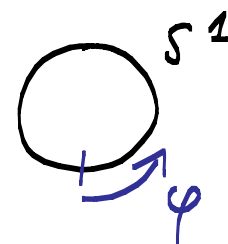
(10-dimensionale) Superstring-Theorie hat diese Eigenschaft aufgrund von Flüssen ("Fluxes")

- Superstring - Theorie \rightarrow Feldtheorie in 10 Dimensionen

- Kompaktifizierung von 6 Dim. erforderlich

(\equiv Aufrollen der extra Dim.-en auf Räumen mit sehr kleinem Radius)

- Einfachstes Beispiel: $\xrightarrow{\mathbb{R}}$ \rightarrow

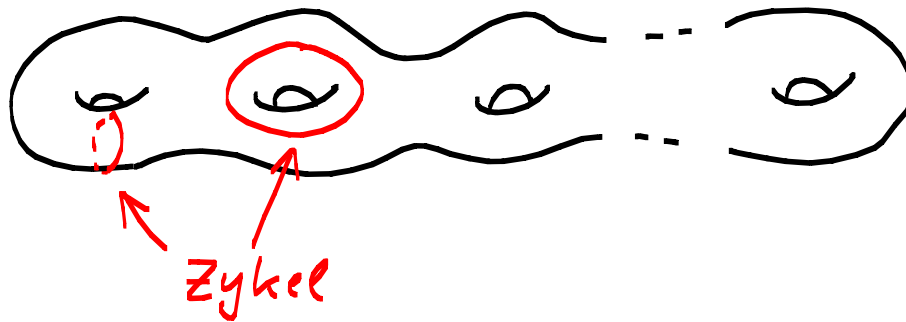


- Gewisse Felder haben diskret wählbare

Randbedingungen: $\phi(\varphi) = \phi(\varphi + 2\pi) + n \quad (n \in \mathbb{Z})$

- Für $n \neq 0$ ist eine gewisse Gradienten-Energie von ϕ unumgänglich. Diese trägt zur kosmol. Konstanten der effektiven 4-dim. Theorie bei.

- Die in Wirklichkeit auftretenden extra-dimensionalen Räume sind viel komplizierter als S^1 :



- Die entscheidenden diskreten Randbedingungen (Flüsse) sind für jeden Zykel (ein $n \in \mathbb{Z}$ pro Zykel) wählbar
- Gewisse technische Gründe begrenzen die Größe von n (Sei also z.B. $|n| \leq 10$).
- Typische extra-dimensionale Räume der String-Theorie haben ~ 100 Zyklen.

$$\Rightarrow N_{\text{vac.}} \sim (\text{Flüsse})^{\text{Zykel}} \sim 20^{100} > 10^{120}$$

- String-Theorie hat das Potential, eine Welt zu erklären, die fine-tuned aussieht
- Diese "Lösung" des Problems der kosm. Konstanten kann auf andere, ähnliche Fine-Tuning-Probleme übertragen werden.
- Warum wir gerade in einem Vakuum mit kleinem Λ (oder kleinem m_{Higgs}) leben, bleibt offen.
(anthropische Argumente ??)

Dies ist ein ernstzunehmendes neues Paradigma
 (String - Theory - Landscape ; Multiverse ; ...)

→ Weinberg , '89
 Bousso , Polchinski , '00
 Giddings , Kachru , Polchinski , '01
 Kachru , Kallosh , Linde , Trivedi , '02

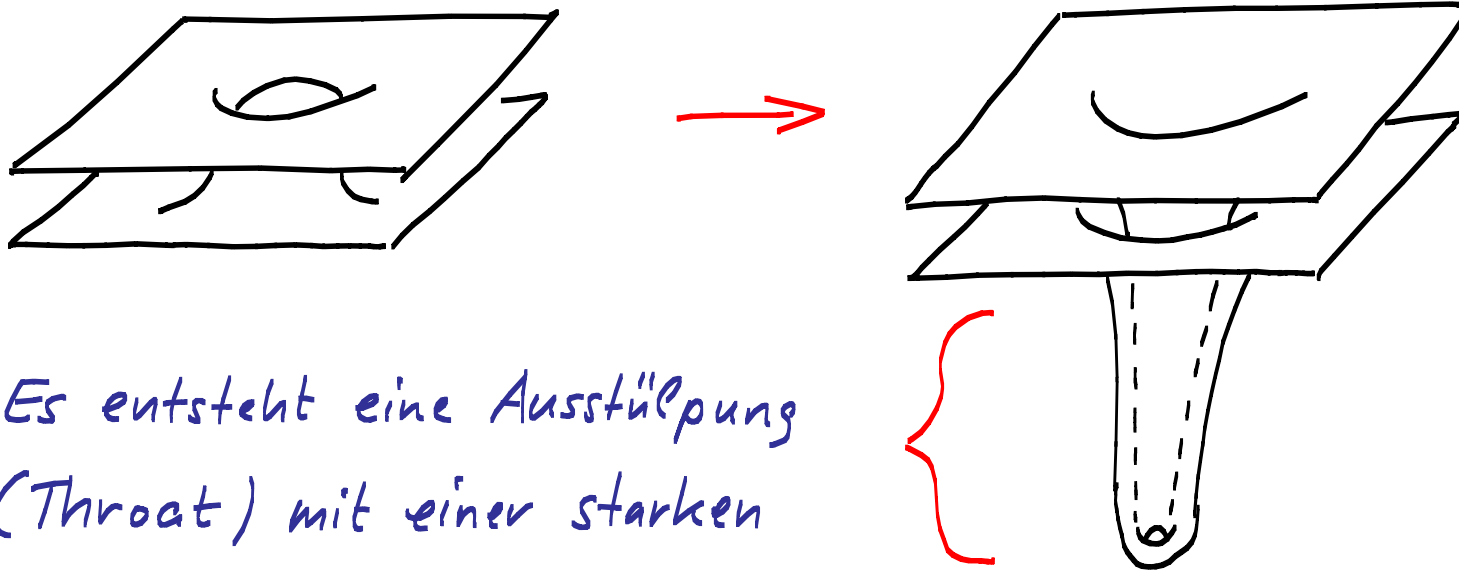
Folgen daraus neue beobachtbare Konsequenzen?

Ein Versuch:

(Denef , Douglas , '04 --- A.H. , March-Russell '06 ; von Harling , A.H. , '08)

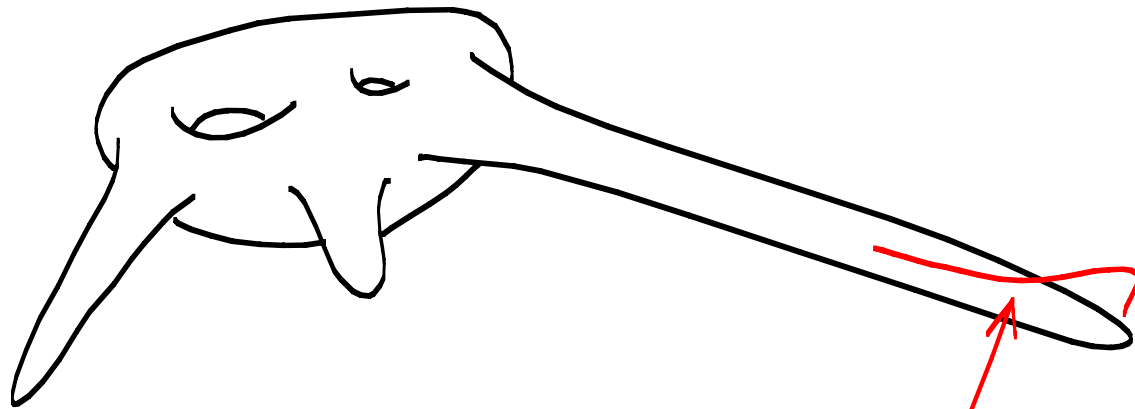
- Unsere Welt basiert auf einem extra-dim. Raum mit vielen Zykeln.

- Die Größe jedes Zyklus wird durch den auf ihm eingepprägten Fluss ($n \in \mathbb{Z}$) bestimmt.
- Kleines n bedeutet kleine Größe
- Wenn ein Zykel klein wird, kommt es zu einer typischen Deformation des umgebenden Raumes



Es entsteht eine Ausstülpung (Throat) mit einer starken Deformation der Metrik

- Da es sehr viele Zyklen mit (zufälligem) n gibt, werden (statistisch zwingend) einige kleine n auftreten.
- Der "vorhergesagte" extra-dim. Raum ist also in etwa:



Die "im Throat" lokalisierten Anregungsmoden sind aufgrund der Metrik-Deformation leicht:

$$\underline{m \sim M_p e^{-n_{\text{typisch}}/n}}$$

- Im frühen Universum werden diese schwach gekoppelten, leichten ($m \sim 10^6 \dots 10^{11} \text{ GeV}$) Freiheitsgrade angeregt
- Sie können sehr langlebig sein und die Rolle der dunklen Materie spielen
- Mögliche interessante Signale sind:
 - langsam verschwindende dunkle Materie (wegen Zerfall in zwei Gravitonen)
 - Zerfall in zwei Photonen (beobachtbar durch HESS?)
 - Zerfall in Higgs + Neutrino

Schlussbemerkungen

- Fine-Tuning-Probleme treiben einen wesentlichen Teil der modernen Forschung an fundamentaler Physik
- Im Fall der kosm. Konstanten scheint die "Landscape" die einzige realistische Lösungsmöglichkeit zu sein
- Sollte die "Landscape"-Lösung als Konkurrent zu SUSY, Technicolor etc. für das Higgs-Massen-Problem ernst genommen werden?
- Welche beobachtbaren Konsequenzen folgen aus der Landscape?
- Wer wählt "unser" Vakuum?