

Alternativen zum Standardmodell

Ideen und Konzepte

Wolfgang Kilian (DESY)

DPG-Frühjahrstagung Mainz

März 2004

Standardmodell 2004

SM: *Minimales Modell*, das mit allen Daten der Teilchenphysik vereinbar ist
 und im Prinzip Extrapolationen bis zu (fast) **beliebig hohen Energien** erlaubt

Teilchen:

$$\begin{array}{cc}
 \begin{pmatrix} uuu_L \\ ddd_L \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix} & uuu_R & \nu_{eR} \\
 \begin{pmatrix} ccc_L \\ sss_L \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix} & ccc_R & \nu_{\mu R} \\
 \begin{pmatrix} ttt_L \\ bbb_L \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ e_L \end{pmatrix} & ttt_R & \nu_{\tau R}
 \end{array}
 \quad
 \begin{pmatrix} W_L^+ \\ H/Z_L \end{pmatrix}$$

Wechselwirkungen:

$$\begin{array}{lll}
 qqq\text{-Übergänge:} & g & SU(3) \\
 u_L d_L\text{-Übergänge:} & W_T/Z_T & SU(2) \\
 \text{Re/Im-Übergänge:} & \gamma & U(1) \\
 q\ell\text{-Übergänge:} & - & \\
 u_R d_R\text{-Übergänge:} & - & \\
 f_1 f_2 f_3\text{-Übergänge:} & - & \\
 f_L \bar{f}_R\text{-Übergänge:} & - &
 \end{array}$$

Drei Generationen: CP i.a. nicht erhalten

Rechtshändige Neutrinos: Leptonzahl i.a. nicht erhalten

Higgs-Dublett: $SU(2) \times U(1)$ gebrochen (abhängig vom Higgs-Potential)

... das funktioniert – warum also Alternativen?

Defizite des Standardmodells

- Das SM ist konsistent bis zur Gravitationskala $M_{\text{Planck}} = 10^{19} \text{ GeV}$ – falls $M_H \approx 170 \text{ GeV}$.
 - was ist, wenn das Higgs-Boson deutlich schwerer ist?
 - was ist, wenn kein Higgs-Boson existiert?
- Das SM erlaubt CP-Verletzung – allerdings auch in der starken Wechselwirkung!
- Gravitation, dunkle Materie, ... sind *nicht* Bestandteil des SM
 - ⇒ Es *gibt* also Physik jenseits des SM

Defizite des Standardmodells

- Viele mögliche Wechselwirkungen fehlen — stimmt das?
- Das SM gibt keine Erklärung für die Parameterwerte – (oder wenigstens die Größenordnungen)

$$\frac{v}{M_{\text{Planck}}} \approx 10^{-17} \quad \frac{m_\nu}{v} \approx 10^{-14} \quad \frac{m_e}{v} \approx 10^{-6} \quad \dots$$

- Die elektroschwache Skala $v = 250 \text{ GeV}$ ist nicht stabil: Erwarte $\frac{v}{M_{\text{Planck}}} \gtrsim \frac{1}{4\pi}$
⇒ Heißt das: Neue Physik bereits bei $\lesssim 4\pi v$ (TeV-Bereich)?
... auch dann, wenn ein Higgs-Boson gefunden wird!

Neue Physik

Was suchen wir also?

LHC, Linear Collider: Die erreichbare Energie ist im TeV-Bereich

- ⇒ Lösung für das Problem der elektroschwachen Skala?
- ⇒ Dynamische Erklärung der elektroschwachen Symmetriebrechung?
- ⇒ Eigenschaften des Higgs-Felds?

Higgs-Feld

Wie könnte eine dynamische Erklärung der elektroschwachen Symmetriebrechung aussehen?

1. **Quanteneffekte:** Starke Wechselwirkung, Kondensation von Feldern
2. **Geometrie/Gravitation:** Zusätzliche Raumdimensionen?

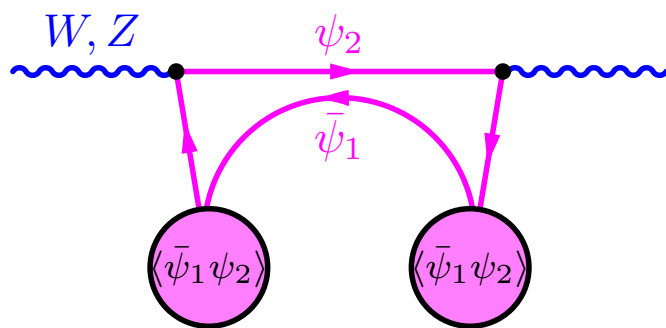
Wir sehen keine Spur dieser Effekte . . . wie kann das sein?

1. **Compositeness:** Higgs- und/oder andere Felder sind stark gebundene Zustände
2. **Indirekte Symmetriebrechung:** Higgs-Feld(er) sind (quasi-)elementar, das Higgs-Potential ist die Folge einer neuen Dynamik

⇒ Viele Modelle verbinden diese Konzepte miteinander

Dynamische Symmetriebrechung

Grundprinzip: Starke Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Feldern



Feldkondensation:

$$\langle \bar{\psi}_1 \psi_2 \rangle \neq 0$$

falls dies energetisch günstiger ist als

$$\langle \bar{\psi}_1 \psi_2 \rangle = 0$$

⇒ Kontinuum von gebundenen $\bar{\psi}_1 \psi_2$ -Paaren
im Vakuum

Quantenfeldtheorie: Kopplungen variieren schwach mit der Energie

⇒ Kondensationskala kann sehr klein sein: $v/M_{\text{Planck}} \sim e^{-1/\alpha_0}$

Was passiert dann?

1. ψ_1 und ψ_2 unterschiedliche schwache Wechselwirkung: W - und Z -Bosonen werden massiv, elektroschwache Symmetriebrechung
2. sonst: andere Symmetrie gebrochen (z.B. Supersymmetrie), andere Felder werden massiv
⇒ indirekte Brechung der elektroschwachen Symmetrie?

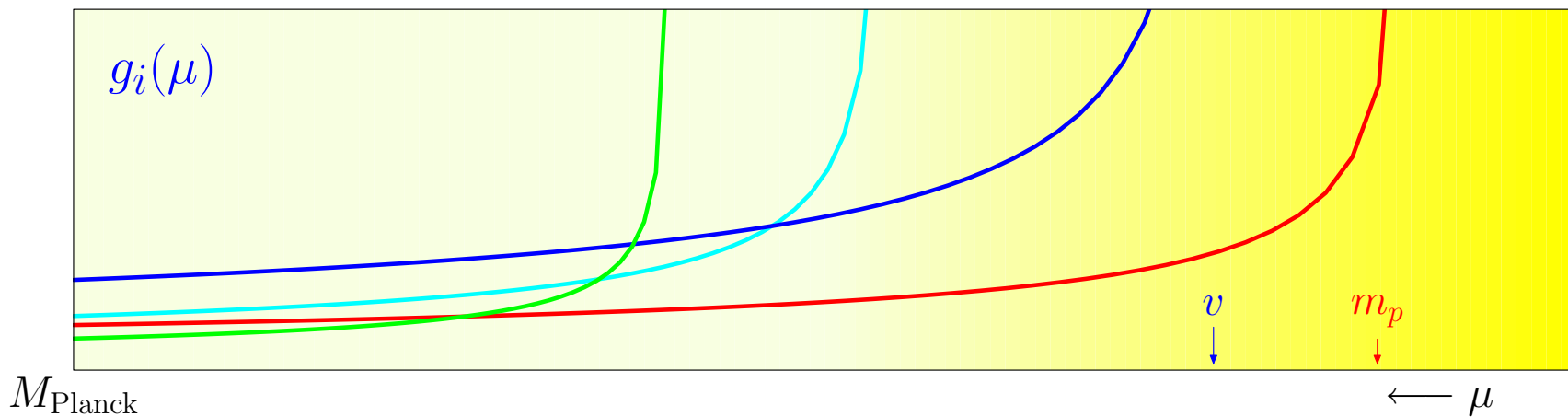
Technicolor

Warum nicht direkte dynamische Symmetriebrechung?

(Extended) Technicolor:

Weinberg, Susskind, Dimopoulos, Eichten, Lane (1976–1980)

(Viele) zusätzliche Eichwechselwirkungen, Feldkondensation bei unterschiedlichen Energien



⇒ Erklärung der elektroschwachen Skala und der hierarchischen Strukturen in der Flavorphysik

Probleme:

- Direkte Brechung der elektroschwachen Symmetrie: Mischung von Z und Photon
- Top-Quark-Masse
- FCNC

Topcolor

Indirekte Symmetriebrechung:

Neue Wechselwirkung zwischen Top-Quarks (t_L und t_R): Z.B. massive Top-Gluonen

⇒ Starke Wechselwirkung bewirkt Top-Kondensation ⇒ Elektroschwache Symmetriebrechung

⇒ aber Top-Quarks existieren auch als freie Teilchen

⇒ Higgs-Boson besteht aus $\bar{t}_L t_R$

⇒ $m_t \gtrsim 500$ GeV?

Nambu; Miransky, Tanabashi, Yamawaki; Marciano;

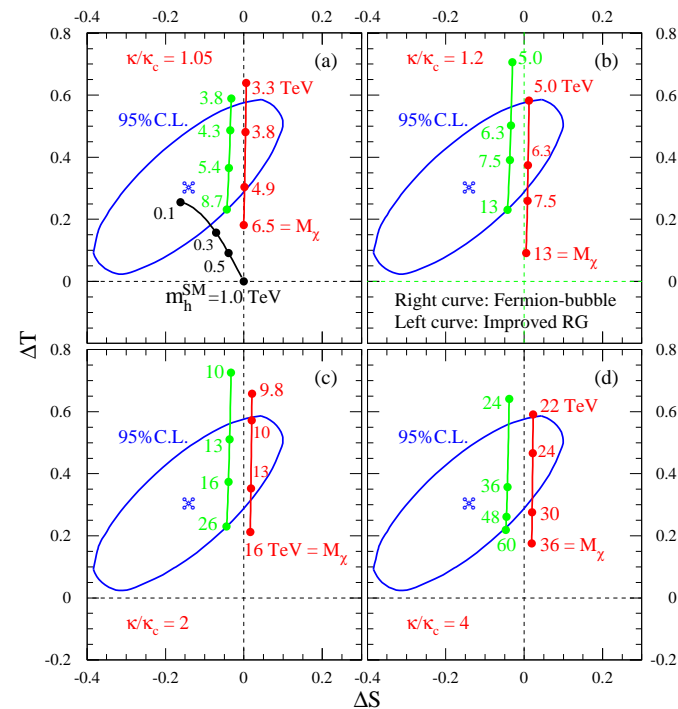
Bardeen, Hill, Lindner (1988–90)

Lösung: See-saw Topcolor

Mischung von Top-Quark t
und neuem, massiven Quark χ_t

⇒ konsistent mit Daten

Dobrescu, Hill (1998)



He, Hill, Tait

Higgs-Boson

SM, Technicolor, Topcolor:

- Modelle mit 2 Skalen: v (250 GeV) und Λ (cutoff: starke Wechselwirkung)
- Higgs-Boson: $100 \text{ GeV} \lesssim M_H \lesssim 1 \text{ TeV}$

Geht es auch anders?

$$\begin{aligned}
 M_H^2 &: \quad \text{X} + \text{O} + \text{OO} + \dots & \Rightarrow & \quad M_H^2 \sim \Lambda^2 \exp\left(-\frac{v^2}{M_H^2}\right) \\
 M_H^2 &: \quad \text{---X---} + \text{---O---} + \dots & \Rightarrow & \quad \Delta M_H^2 \sim M_H^2 \left(\frac{\Lambda}{4\pi v}\right)^2
 \end{aligned}$$

...passt nicht, falls $\Lambda \gg 4\pi v$.

Wie sieht ein Modell mit $\Lambda \gg 4\pi v$ aus?

Drei-Skalen-Modelle

Statt des Cutoff Λ könnten andere, neue Teilchen die Higgs-Massenkorrektur kompensieren

⇒ Deren Masse sollte nicht weit über $4\pi v$ liegen ⇒ TeV-Bereich

⇒ Die Kopplungen sollten durch eine Symmetrie festliegen

Modellstruktur:

- Skala Λ :

Starke Wechselwirkung, dynamische Symmetriebrechung

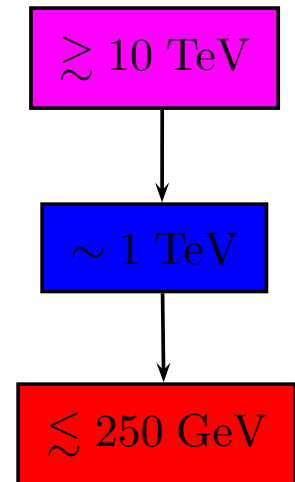
- Skala F :

Neue, schwach wechselwirkende Teilchen

- Skala v :

SM: Higgs, Vektorbosonen, Fermionen

⇒ Indirekte Symmetriebrechung



Little Higgs

Symmetrie im Higgs-Potential: Soll Higgs-Massenkorrektur verhindern

Effektives Potential ohne neue Teilchen ($M_H = 0$)

$$V(H) = \lambda H^4$$

hat sicher keine Symmetrie.

Little Higgs:

Arkani-Hamed, Cohen, Georgi (2001)

Neue skalare Teilchen ϕ mit Massen $\sim F$

$$V(H, \phi) = \lambda_1 (F\phi + (aH^2 - b\phi^2) + \dots)^2 + \lambda_2 (F\phi + (a'H^2 - b'\phi^2) + \dots)^2 + \dots$$

Jeder Term hat *nichtlineare Symmetrie*

$$\phi \rightarrow \phi + cH/F + \dots \quad H \rightarrow H + c + \dots$$

$\Rightarrow \phi$ kompensiert Higgs-Massenkorrektur

Bedingung: H und ϕ sind Goldstone-Bosonen

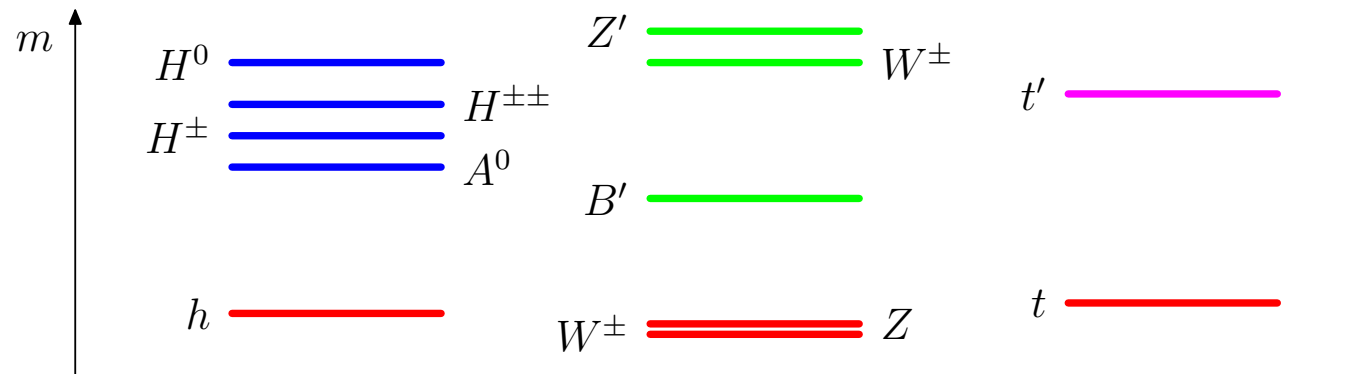
\Rightarrow verknüpft mit dynamischer Symmetriebrechung bei Λ

Little Higgs

Das Higgs-Boson koppelt auch an W, Z und t :

Nichtlineare Symmetrien darstellbar mit Hilfe zusätzlicher neuer Teilchen: W', Z', B', t'
(Massen $\sim F$)

⇒ Typisches Spektrum:



Massen der schweren Teilchen: Direkte Folge der dynamischen Symmetriebrechung

Massen der SM-Teilchen: Higgs-Potential durch Quantenkorrekturen = Effekt zweiter Ordnung

Korrekturen zu SM-Observablen: $(v/F)^2 \sim 1\%$

⇒ konsistent mit Daten (nicht für alle Modelle und Parameterwerte)

Extra-Dimensionen

Little Higgs: Modell enthält schwere Kopien der SM-Teilchen

⇒ Wiederholt sich das Spektrum?

Viele Kopien der SM-Teilchen:

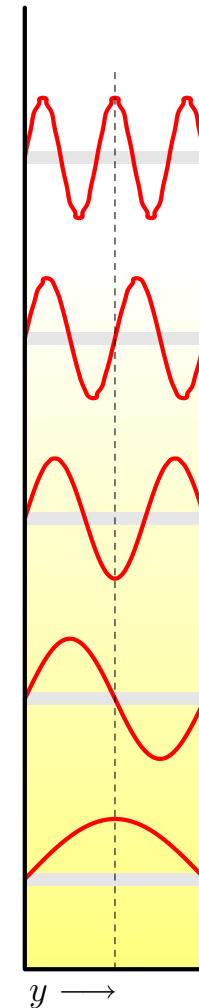
vgl. **Quantenmechanik:** Stationäre Zustände im Potential

y -Achse = (Kompakte) Extra-Dimension

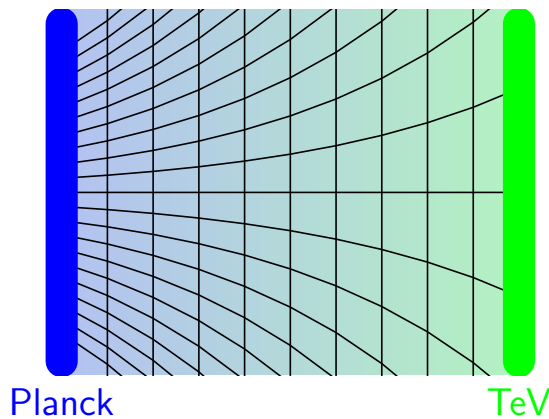
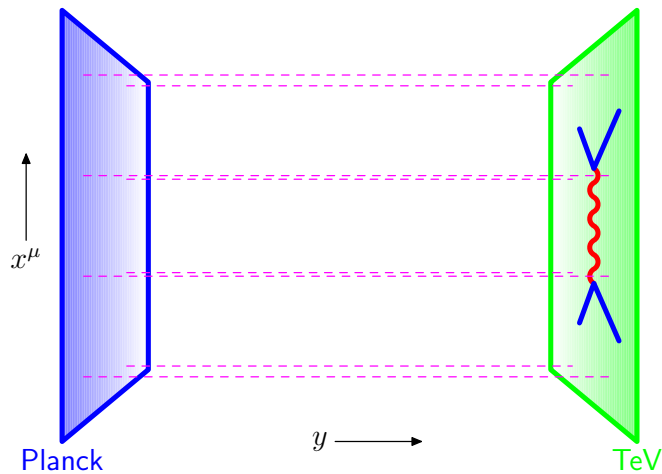
Modelle: Extra-Dimensionen

Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali (1998)

- Teilchen propagieren in mehr als 3 Dimensionen ($R \sim 1/F$)
- Eigenzustände: SM-Teilchen und **massive Resonanzen**
- **R-Parität** (gerade/ungerade Resonanz) i.a. erhalten
 - ⇒ Korrekturen zu elektroschwachen Observablen klein
 - ⇒ Dunkle Materie: γ'
- Elektroschwache Symmetriebrechung: $\bar{t}_L t_R$ -Kondensat möglich
 - ⇒ See-saw Topcolor



Randall-Sundrum-Modell



Variante: Extra-Dimension Randall, Sundrum (1999)
mit **negativer Raumkrümmung** (AdS)

- Verbindung von Teilchenphysik und Gravitation
- Metrik liefert Exponentialfaktor $\exp(-M_{\text{Planck}}/F)$
 \Rightarrow **alternative Lösung des Hierarchieproblems**

Effektive Theorie: 3-Skalen-Modell

- **Skala v :** SM (evtl. erweiterter Skalarsektor)
- **Skala F :** Kaluza-Klein-Resonanzen (schwache WW)
- **Skala Λ :** Starke Wechselwirkung
(Summe über Resonanzen)

Oberhalb von Λ : Konforme Feldtheorie

\Rightarrow Starke Wechselwirkung („Walking Technicolor“)
bis zur Planck-Skala

Supersymmetrie

Andere Möglichkeit: (N=1) Supersymmetrie

Ramond; Neveu, Schwarz; Gervais, Sakita; Wess, Zumino; Fayet; ... (1971–1976)

- Mathematisch: Fermionische Extra-Dimension
- Lokale Supersymmetrie: Supergravitation
- Jedes SM-Teilchen genau ein Partner: MSSM
- Mindestens 2 Higgs-Dubletts: Skalare h, H, A, H^\pm

Dies ist ebenfalls ein 3-Skalen-Modell

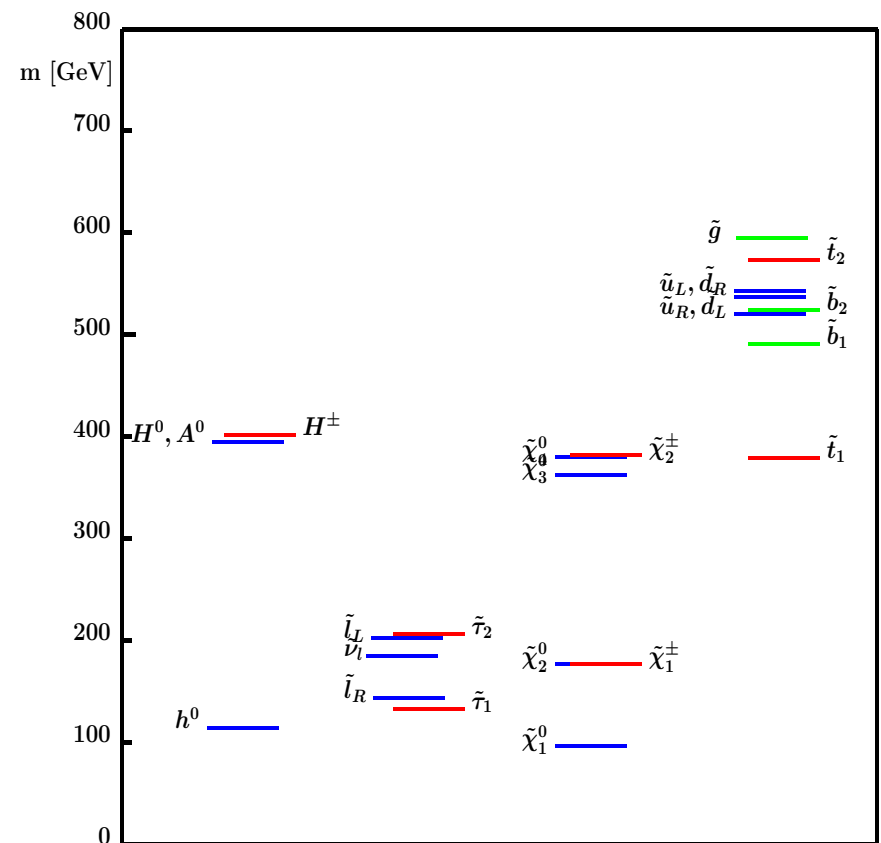
– die Cutoff-Skala Λ ist jedoch nicht fixiert

⇒ MSSM möglicherweise gültig bis zur Planck-Skala
(mit Vereinheitlichung der WW: GUT)

⇒ Hohe Vorhersagekraft: Schleifenkorrekturen

⇒ R-Parität: Dunkle Materie = LSP (i.a. $\approx \tilde{\gamma}$)

⇒ Leichtes Higgs: $m_h < 135$ GeV



Ghodbane, Martyn

SUSY-Brechung

Wenn Λ nicht fixiert ist – was bestimmt dann $F = M_{SUSY}$?

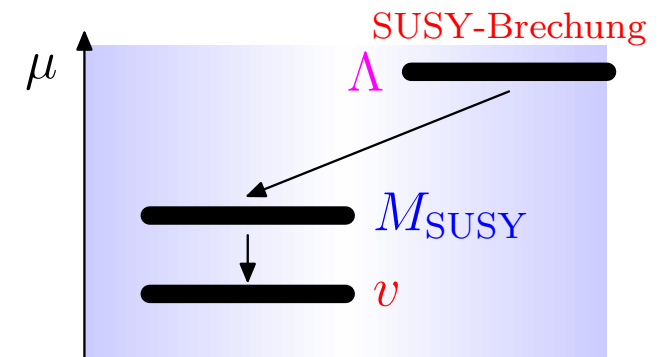
Modelle: Spontane SUSY-Brechung in „Hidden Sector“

Z.B. **Gaugino-Kondensation:**

(SUSY)-Technicolor-Wechselwirkung bricht Supersymmetrie, ohne direkte Kopplung an MSSM

Übertragung auf den MSSM-Sektor durch

- Gravitation (SUGRA etc.)
- Eichwechselwirkungen (und „Messenger“-Felder)



... oder: SUSY-Brechung durch Randbedingungen in Extra-Dimensionen

Zusammenfassung

Das Standardmodell ist mit den Daten aus der Teilchenphysik verträglich, jedoch nicht mit allen bekannten Tatsachen aus Kosmologie und Astrophysik — und es ist theoretisch unbefriedigend.

Alternative Modelle enthalten neue Physik an der TeV-Skala:

Konzepte wie dynamische Symmetriebrechung, Top-Kondensation, Goldstone-Bosonen, Extra-Dimensionen und Supersymmetrie lassen sich in unterschiedlicher Weise kombinieren.

Zwei unterschiedliche Szenarien scheinen sich herauszubilden: SUSY mit schwacher Wechselwirkung auf der einen Seite, Extra-Dimensionen/Technicolor-artige Modelle mit starker Wechselwirkung auf der anderen Seite.

LHC und Linear Collider sind in der Lage, in den TeV-Bereich vorzustoßen.

Viele Szenarien haben eine ähnliche LHC-Phänomenologie – Neben der Entdeckung neuer Teilchen werden Präzisionsmessungen und Bestimmung von Quantenzahlen wie Spin, Parität usw. eine wichtige Rolle spielen, und eine detaillierte Vermessung des Higgs-Sektors ist essentiell. Dies ist die Domäne eines e^+e^- -Colliders.