

Supersymmetriebrechung

Veronika Tinkl

Sommerakademie Neubeuern

August 2008

Inhaltsverzeichnis

- 1 weiche Brechung
 - Lagrangedichte
 - Ursprung der SUSY Brechung
- 2 R-Parität
 - Protonenzerfall
 - R-Parität
 - Konsequenzen
- 3 Dunkle Materie
 - LSP als Dunkle Materie
 - direkte Suche
 - indirekte Suche

Einleitung

Warum wurde bis jetzt noch kein Superteilchen entdeckt?

Bei einer ungebrochenen Supersymmetrie müssten Selektrenen mit einer Masse von $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ existieren.

Die Supersymmetrie muss also spontan gebrochen sein.

weiche Brechung

Wenn die gebrochene Supersymmetrie weiterhin das Hierarchie Problem lösen soll, muss das Verhältnis der Kopplungskonstanten erhalten bleiben. Sonst gäbe es quadratisch divergente Strahlungskorrekturen zur skalaren Higgs Masse. \Rightarrow weiche Symmetriebrechung

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SUSY}} + \mathcal{L}_{\text{soft}}$$

$\mathcal{L}_{\text{soft}}$ verletzt die Supersymmetrie, aber enthält nur Massenterme und Kopplungsparameter mit positiver Massendimension.

Zusätzliche Korrekturen zur quadratischen skalaren Higgs Masse:

$$\Delta m_{\text{H}}^2 = m_{\text{soft}}^2 \left[\frac{\lambda}{16\pi^2} \ln \left(\frac{\Lambda_{\text{UV}}}{m_{\text{soft}}} \right) + \dots \right]$$

Lagrangedichte

Ein möglicher weicher Supersymmetriebrechungsterm in der Lagrangedichte ist:

$$\mathcal{L}_{\text{soft}} = - \left(\frac{1}{2} M_a \lambda^a \lambda^a + \frac{1}{6} a^{ijk} \phi_i \phi_j \phi_k + \frac{1}{2} b^{ij} \phi_i \phi_j + t^i \phi_i \right) + \text{c.c.} \\ - (m^2)_j^i \phi^{j*} \phi_i$$

$\mathcal{L}_{\text{soft}}$ ist frei von quadratischen Divergenzen.

$\mathcal{L}_{\text{soft}}$ bricht die Supersymmetrie, da es nur Skalare und Gauginos enthält, aber nicht ihre Superpartner. Außerdem kann er allen Skalaren und Gauginos Massen geben.

Lagrangedichte im MSSM

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{soft}}^{\text{MSSM}} = & -\frac{1}{2} \left(M_3 \tilde{g} \tilde{g} + M_2 \tilde{W} \tilde{W} + M_1 \tilde{B} \tilde{B} + \text{c.c.} \right) \\ & - \left(\tilde{u} \mathbf{a}_u \tilde{Q} H_u - \tilde{d} \mathbf{a}_d \tilde{Q} H_d - \tilde{e} \mathbf{a}_e \tilde{L} H_d + \text{c.c.} \right) \\ & - \tilde{Q}^\dagger \mathbf{m}_Q^2 \tilde{Q} - \tilde{L}^\dagger \mathbf{m}_L^2 \tilde{L} - \tilde{u} \mathbf{m}_u^2 \tilde{u}^\dagger - \tilde{d} \mathbf{m}_d^2 \tilde{d}^\dagger - \tilde{e} \mathbf{m}_e^2 \tilde{e}^\dagger \\ & - m_{H_u}^2 H_u^* H_u - m_{H_d}^2 H_d^* H_d - (H_u H_d + \text{c.c.})\end{aligned}$$

neue Parameter: 105 Massen, Phasen und Mischungswinkel.
Ein großer Teil des Parameterraums ist phänomenologisch ausgeschlossen.

Ursprung der SUSY Brechung

Der Vakuumzustand $|0\rangle$ ist nicht invariant unter supersymmetrischen Transformationen.

$$Q_a|0\rangle \neq 0 \text{ und } Q_b^\dagger|0\rangle \neq 0$$

Die Vakuumenergie ist positiv: $\langle 0|H|0\rangle > 0$

$F^i = 0$ und $D^\alpha = 0$ darf nicht gleichzeitig erfüllt werden.

Das Nambu-Goldstone Teilchen ist ein masseloses neutrales Fermion: das Goldstino

- F-Term Brechung
linearer Term im Superpotential
- D-Term Brechung

$$\mathcal{L}_{\text{Fayet-Iliopoulos}} = -\kappa D$$

Protonenzerfall

Zum Superpotential können Terme hinzugefügt werden, die die Baryonenzahl bzw. die Leptonenzahl um eine Einheit verändern.

$$W_{\Delta L=1} = \frac{1}{2} \lambda^{ijk} L_i L_j \bar{e}_k + \lambda'^{ijk} L_i Q_j \bar{d}_k + \mu^i L_i H_u$$

$$W_{\Delta B=1} = \frac{1}{2} \lambda''^{ijk} \bar{u}_i \bar{d}_j \bar{d}_k$$

Verschwinden λ' und λ'' nicht, so sollte das Proton zerfallen. Ein möglicher Zerfallsprozess wäre: $p^+ \rightarrow e^+ \pi^0$

Experimentell wurde eine Protonenlebensdauer $> 10^{32}$ Jahre ermittelt.

In der MSSM wird eine neue Symmetrie eingeführt die solche Terme im Superpotential verbietet.

R-Parität

Quantenzahl der R-Parität:

$$P_R = (-1)^{3(B-L)+2s}$$

Die Teilchen des Standardmodells und die Higgs Bosonen besitzen gerade R-Parität, die Steilchen ungerade R-Parität.

In der Lagrangedichte (oder im Superpotential) sind nur Terme erlaubt, bei denen das Produkt der R-Parität aller Felder $+1$ ergibt.

Es gibt keine Mischung von $P_R = -1$ und $P_R = +1$ Teilchen.

Jedes Wechselwirkungsvortex muss eine gerade Anzahl von Steilchen mit $P_R = -1$ enthalten.

Konsequenzen

- Das leichteste Steilchen mit $P_R = -1$ (LSP) muss stabil sein. Falls das LSP elektrisch neutral ist, ist es ein geeigneter Kandidat für die dunkle Materie.
- Jedes Steilchen muss in einen Zustand zerfallen, der eine ungerade Anzahl von LSPs enthält.
- In Stoßexperimenten können Steilchen nur in gerader Anzahl produziert werden.

Dunkle Materie

Experimentell wurde eine Materiedichte des Universums von

$$\Omega_M h^2 = 0,135_{-0,009}^{+0,008}$$

ermittelt (z.B. aus WMAP).

Die Materiedichte der kalten Dunklen Materie beträgt:

$$\Omega_{\text{CDM}} h^2 = 0,113_{-0,018}^{+0,016}$$

mit $h = 0,71_{-0,03}^{+0,04} \times (100 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$ Hubble Konstante.

Dies führt auf eine Dichte der Dunklen Materie von:

$$\rho_{\text{DM}} \approx 1.2 \times 10^{-6} \text{ GeV/cm}^3$$

LSP als Dunkle Materie

Das LSP muss farblos und neutral sein.

Drei Kandidaten für das LSP: das leichteste Sneutrino, das Gravitino und das leichteste Neutralino.

Direkte und indirekte Suchen schließen das Sneutrino aus. Das Gravitino wäre nicht detektierbar \Rightarrow attraktivster Kandidat ist das leichteste Neutralino.

Zu Beginn des Universums lagen die Steilchen mit den Standard Modell Teilchen im thermischen Gleichgewicht.

Die schwereren Steilchen vernichteten sich oder zerfielen in das Neutralino LSP. Die Vernichtungsprozesse der LSPs sind wichtig zur Berechnung der Dichte der Dunklen Materie.

Paarvernichtung: $\tilde{N}_1 \tilde{N}_1 \rightarrow ZZ, Zh^0, h^0 h^0$

- \tilde{N}_1 higgsino oder wino \rightarrow zu niedrige Dichte
- bino \rightarrow zu hohe Dichte
 - nicht zu schweres Fermion
 - $2m_{\tilde{N}_1} \approx m_{A^0}$ oder m_{h^0} oder m_{H^0}
 - Beimischung von higgsino oder wino
 - Sfermion weniger als ein paar GeV schwerer als LSP

MSSM Parameter der Lagrangedichte, die die falsche Menge Dunkler Materie liefern, können ein Modell für Kollisions Physik bereitstellen.

Korrektur durch:

- nicht Gleichgewichtszzerfälle von schweren Teilchen
- schwache Brechung der R-Parität
- unsichtbares Axion

lokale Massendichte $0,3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$.

direkte Suche

Neutralino LSPs können direkt über ihre schwache Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie detektiert werden. Diese hängt von ihrem elastischen Streuquerschnitt mit schweren Nuklei in einem Detektor ab. Mögliche Wechselwirkungen von \tilde{N}_1 mit Quarks sind:

- über den Austausch eines virtuellen Squarks im s-Kanal
- über Higgs Skalare oder Z Bosonen im t-Kanal

Die Energie, die auf ein Nukleon bei solchen elastischen Kollisionen übertragen wird, ist von der Ordnung 10 keV.

indirekte Suche

Indirekte Detektion der Neutralinos durch den Nachweis der Produkte der Neutralinovernichtung, wie z.B.: Neutrinos aus der Sonne oder der Erde, Photonen aus dem Zentrum der Galaxie und Positronen oder Antiprotonen aus dem galaktischen Halo.

- Photonen

$$\tilde{N}_1 \tilde{N}_1 \rightarrow \gamma\gamma \text{ oder } \tilde{N}_1 \tilde{N}_1 \rightarrow \gamma Z$$

über die Schleife eines geladenen Teilchens
⇒ Messung der Masse

- Neutrinos

$$\tilde{N}_1 \tilde{N}_1 \rightarrow t\bar{t}, b\bar{b}, c\bar{c} \text{ oder } \tilde{N}_1 \tilde{N}_1 \rightarrow ZZ, W^+W^-, \tau^+\tau^-$$

Nachweis durch Neutrino-teleskope

Literatur

- Stephen P. Martin: A Supersymmetry Primer hep-ph/9709356
- I.J.R. Aitchison: Supersymmetry and the MSSM
hep-ph/0505105
- Skript zur Vorlesung Einführung Supersymmetrie von
Katharina Müller
<http://www.physik.unizh.ch/~kmueller/text/vorlesung>
- D. Hooper und L.Wang hep-ph/0309036
- C.L. Bennett et al astro-ph/0302207