

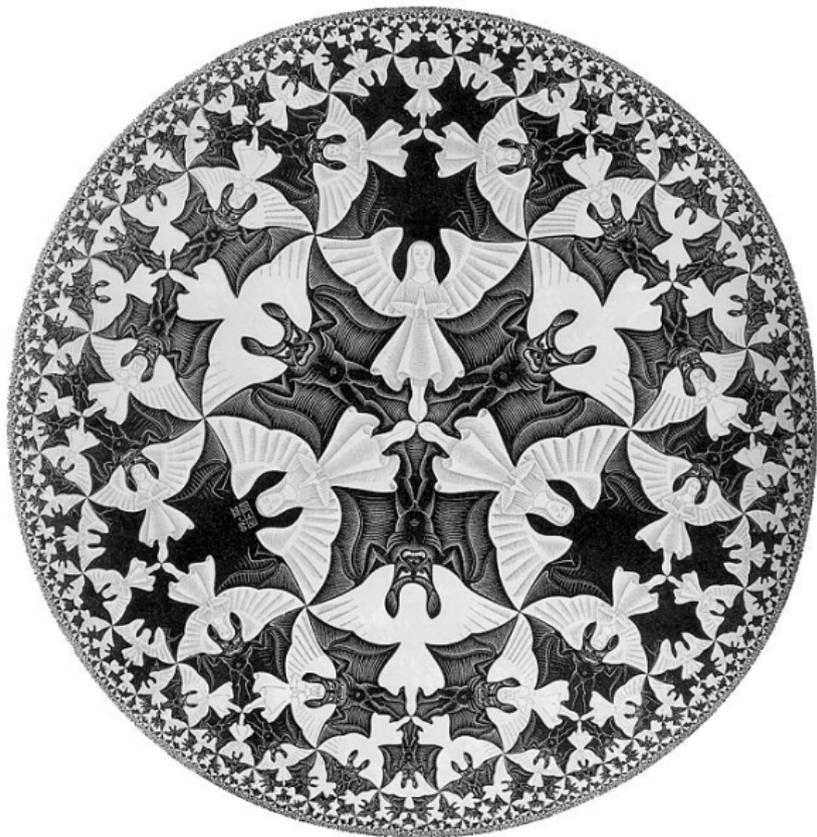
# Dunkle Materie und Supersymmetrie

Thomas Meier

Scheinseminar zur Astro- und Teilchenphysik

10. Dezember 2007

- 1 Was bedeutet Symmetrie in der Physik?
- 2 Einblick in das Standard-Modell
- 3 Grundzüge der Supersymmetrie
- 4 Kandidaten für Dunkle Materie
  - Neutralinos
  - Gravitinos
- 5 SUSY-Suche am LHC



## Beispiele von bekannten Symmetrien

- Isotropie des Raumes
- Homogenität des Raumes
- Homogenität der Zeit
- → Poincaré-Gruppe

Symmetrien helfen bei der Analyse physikalischer Probleme, sei es durch Vereinfachungen in Rechnungen oder in konzeptioneller Hinsicht:

### **Noether-Theorem**

⇒ Symmetrien spielen eine wichtige Rolle in der Physik!

Die Erzeugenden einer Symmetrie (z.B. Drehimpuls bei Drehungen) liefern Operatoren, die einen neuen Zustand erzeugen:

$$Q |\psi_1\rangle = |\psi_2\rangle$$

# U(1)-Eichsymmetrie in einer Feldtheorie

## Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik

Mit  $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi - \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\vec{A}$  und  $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ :

$$\begin{aligned}\square\phi - \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\Lambda &= 4\pi\rho; & \Lambda &= \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\phi - \vec{\nabla} \cdot \vec{A} \\ \square\vec{A} + \vec{\nabla}\Lambda &= \frac{4\pi}{c}\vec{j}; & \square &= \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \vec{\nabla}^2\end{aligned}$$

## Eichfreiheit

Aber die Eichtransformation

$$\begin{aligned}\phi &\rightarrow \phi - \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}\chi \\ \vec{A} &\rightarrow \vec{A} + \vec{\nabla}\chi\end{aligned}$$

lässt die Maxwell-Gleichungen invariant (U(1)-Eichsymmetrie). Diese Symmetrie ist für die Ladungserhaltung verantwortlich!

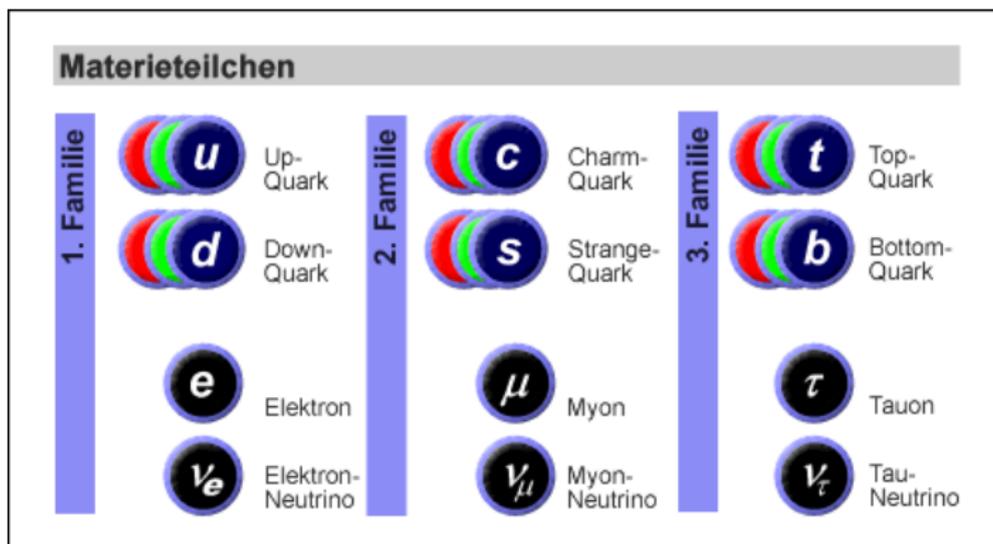
### Grundlagen

- Zusammenführung von quantenmechanischen Prinzipien  
( $E \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}, \mathbf{p} \rightarrow \frac{\vec{\nabla}}{2m}$ )
- und Lorentz-Invarianz (SRT) ( $E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$ )  
Beachte:  $\hbar = c = k_B = \dots = 1$
- Teilchen als Quanten der entsprechenden Felder
- Wechselwirkungen werden durch Teilchenaustausch übertragen
- Grundlegende Gleichung: Klein-Gordon-Gleichung

$$(\square - m^2) \psi(x, t) = 0$$

# Materie im Standard-Modell

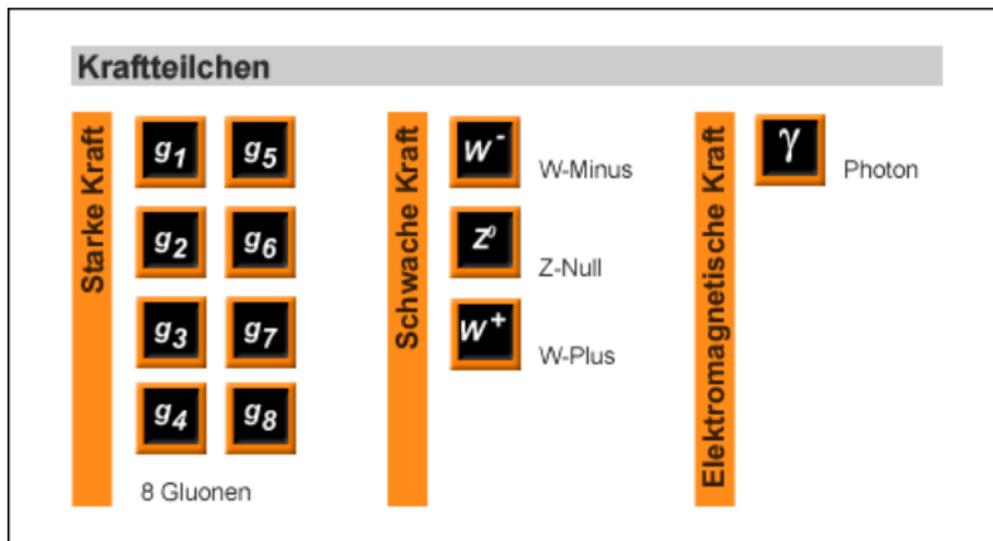
## der Teilchenphysik



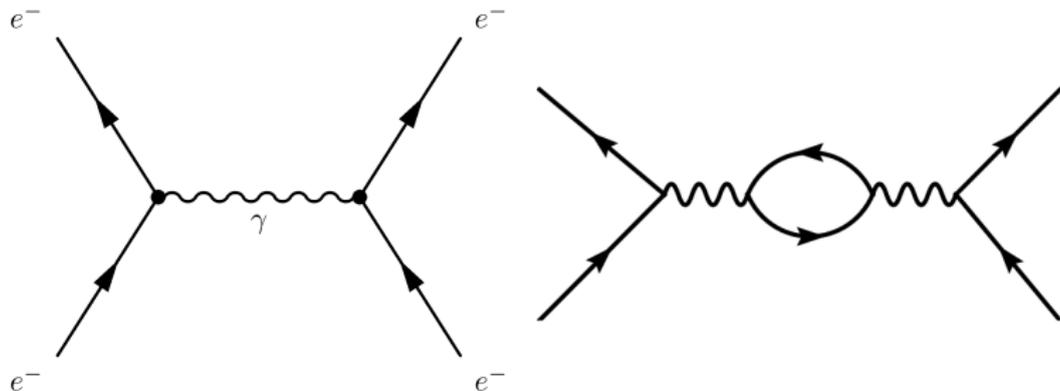
Die Materie im Standard-Modell teilt sich in 3 sog. Familien auf, wobei die Eigenschaften der Teilchen unterschiedlicher Generation, bis auf die Masse, gleich sind.

# Kräfte im Standard-Modell

## der Teilchenphysik



Im Standard-Modell sind nur 3 der 4 Grundkräfte (Wechselwirkungen) beschrieben. Sie werden durch einen Austausch von Bosonen (Kraftteilchen) vermittelt. ( $m_\gamma = 0$ ;  $m_{Gluon} = 0$ ;  $m_{W,Z} \approx 80\text{GeV}$ )



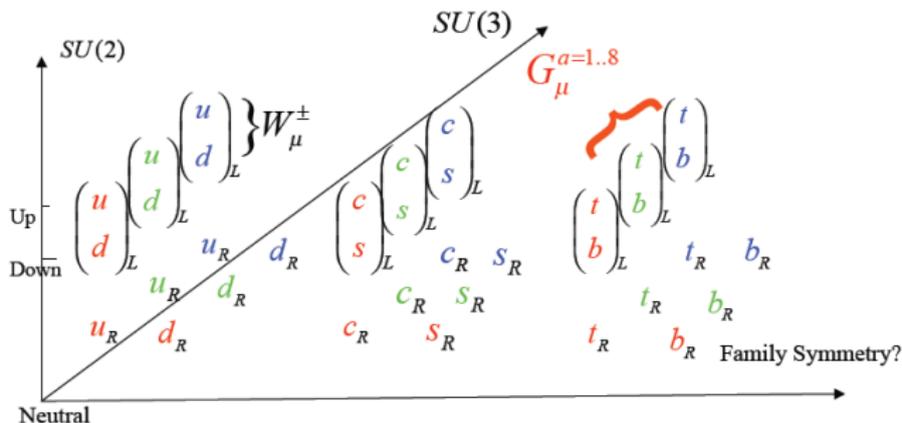
**Hier:** Anschauliche Darstellung teilchenphysikalischer Prozesse (z.B. Streuung von 2 Elektronen)

**Aber:** Exakte mathematische Bedeutung zur Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten mit Hilfe sog. Propagatoren

# Symmetrien im Standard-Modell

## $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$

- Eichsymmetrie der Starken Wechselwirkung
- Eichsymmetrie der Schwachen Wechselwirkung
- Eichsymmetrie der el.-mag. Wechselwirkung
- Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie
- Poincaré-Gruppe



Theorie der Massenerzeugung durch den Higgs-Mechanismus  
→ nächster Vortrag!

- Keine Gravitation
- Natürlichkeitsproblem (Higgs-Masse)
- Wieso 3 Familien?
- Keine Vereinigung der Kopplungskonstanten
- ...

## Elektromagnetische Wechselwirkung

$\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$  beschreibt die Stärke der Wechselwirkung Elektron-Photon

### Ladung im Dielektikum

Um eine Ladung  $Q$  bildet sich ein Halo Dipole, die die Ladung nach außen abschirmen.

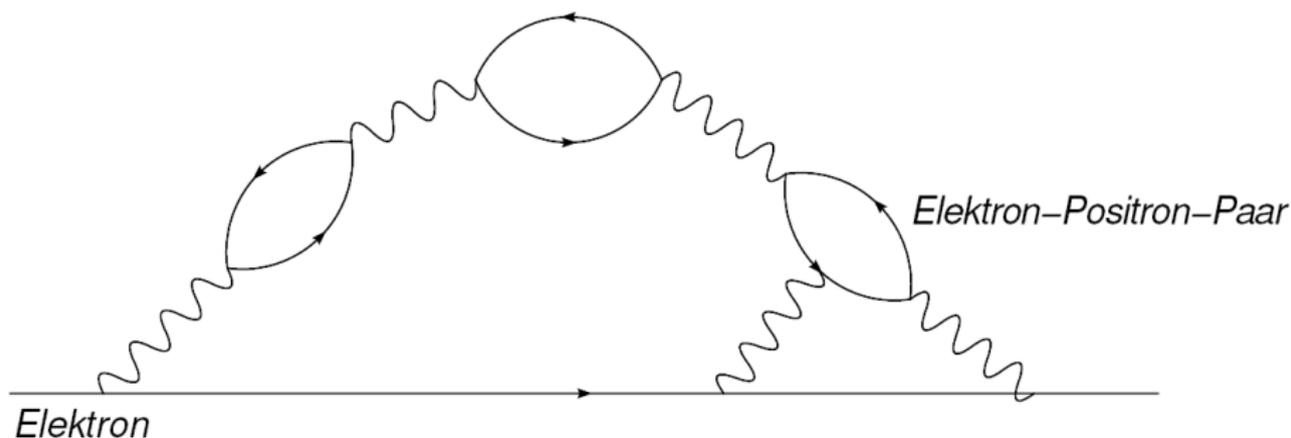
⇒ Man „sieht“ die ganze Ladung nur bei sehr kleinen Abständen!

# Vakuum-Polarisation

Beim freien Elektron, wirkt das Vakuum selbst wie ein Dielektrikum, da sich Elektron-Positron-Paare bilden, die die Ladung abschirmen.

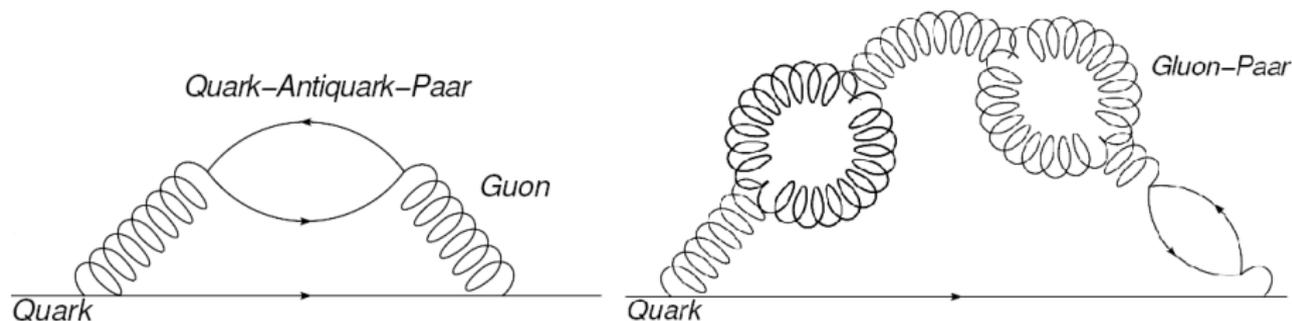
$$\alpha_{\text{Alltag}} = \frac{1}{137}$$

$$\alpha_{100\text{GeV}} = \frac{1}{128}$$

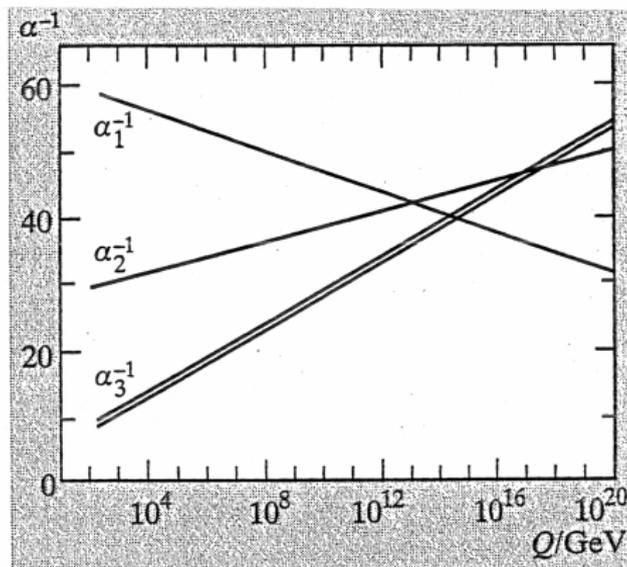


## Starke Wechselwirkung (Nobelpreis 2004)

- Kopplungskonstante  $\alpha_s$  nimmt mit steigender Energie ab!
- $\alpha_s = \frac{12\pi}{33-2n_f} \frac{1}{\ln Q^2/\Lambda^2}$
- Grund: Selbstkopplung der Gluonen, da diese auch eine Farbladung tragen



# Kopplungskonstanten



$\alpha_1$ : el.mag. WW

$\alpha_2$ : schwache WW

$\alpha_3$ : starke WW

$Q$ : Schwerpunktsenergie

## Überblick

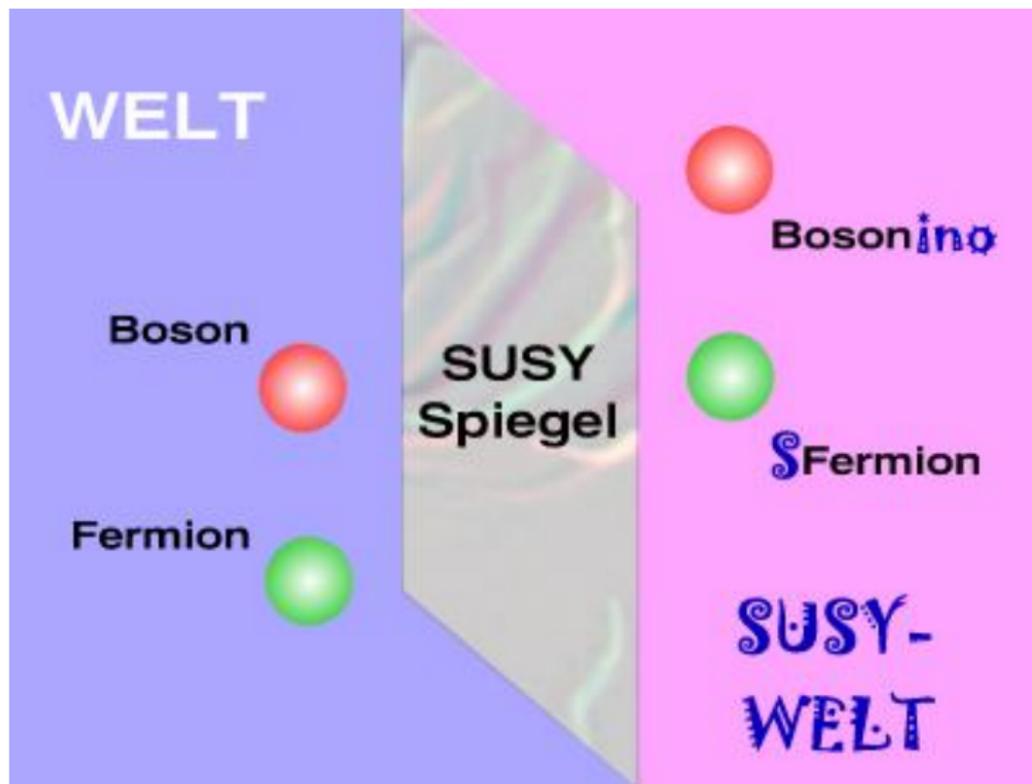
- Symmetrie, die Fermionen und Bosonen verknüpft

$$Q |Fermion\rangle = |Boson\rangle$$

$$Q |Boson\rangle = |Fermion\rangle$$

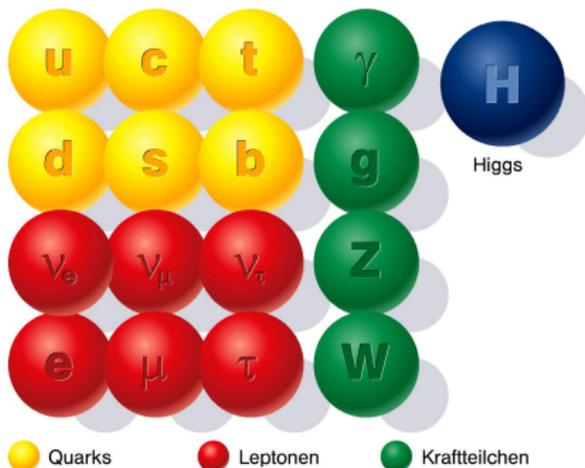
- „Natürliche“ Erweiterung der Poincaré-Gruppe
- Jedem Teilchen wird ein *Superpartner* zugeordnet
- 105 (!) freie Parameter

# Der Susy-Spiegel

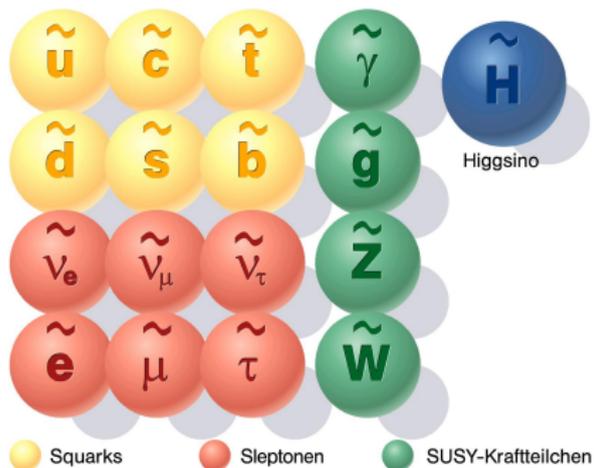


# Der Susy-Spiegel

## Standard-Teilchen



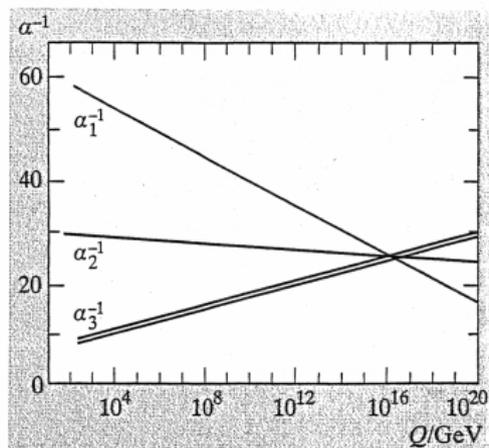
## SUSY-Teilchen



# Kopplungskonstanten

Da mehr Teilchen im Modell vorhanden sind, gibt es zusätzliche Prozesse die zu den Vakuum-Korrekturen beitragen.

→ Änderung der Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten!



$\alpha_1$ : el.mag. WW

$\alpha_2$ : schwache WW

$\alpha_3$ : starke WW

$Q$ : Schwerpunktsenergie

Superpartner mit entarteten Massen können nicht existieren

→ hätte man schon entdeckt!

⇒ keine exakte Symmetrie, also eigentlich keine Einschränkungen, die Massen betreffend

**Aber:** Gewisse Massen würden das Natürlichkeitsproblem des Standard-Modells ohne „Fine-Tuning“ beheben.

Im Folgenden wird immer  $m_{SUSY} \approx 100$  GeV angenommen

Ohne zusätzliche Struktur würden Verletzungen der Baryonen- und Leptonen-Zahl-Erhaltung auftreten  
z.B. im Protonenzerfall  $p \rightarrow \pi^0 + e^+$

## Lösung

Einführung einer neuen Quantenzahl

$$R_p = (-1)^{3(B-L)+2S}$$

$B$ : Baryonen-Zahl;  $L$ : Leptonen-Zahl;  $S$ : Spin

- „normale“ Teilchen haben  $R_p = 1$ , Superpartner haben  $R_p = -1$
- Erhaltung bedeutet:  $\prod R_p = 1$  in jedem Vertex

**Direkte Konsequenz:** Bei jedem Zerfall eines Superpartners muss ein anderer Superpartner beteiligt sein.

→ Der leichteste Superpartner (LSP) muss stabil sein!

Mischzustand aus Bino, Wino und den neutralen Higgsinos  
In der Basis  $(-i\tilde{B}, -i\tilde{W}^0, \tilde{H}_d, \tilde{H}_u)$

$$M_\chi = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & -M_z \cos \beta s_s & M_z \sin \beta s_s \\ 0 & M_2 & M_z \cos \beta c_s & -M_z \sin \beta c_s \\ -M_z \cos \beta s_s & M_z \cos \beta c_s & 0 & -\mu \\ M_z \sin \beta s_s & -M_z \sin \beta c_s & -\mu & 0 \end{pmatrix}$$

$\tan \beta$ : Verhältnis der Vakuum-Erwartungswerte der Higgsfelder  
 $\mu, c_s, s_s = \cos \theta_s, \sin \theta_s$ : Unbekannte Susy-Parameter

→ 4 verschiedene Neutralino-Zustände  $\chi_i, i = 1 \dots 4$  mit unterschiedlichen Massen

**Bemerkung:** Neutralinos sind ihre eigenen Antiteilchen!

Urknall: alle Teilchen im thermischen Gleichgewicht



Durch Abkühlung/Ausdehnung des Universums werden Wechselwirkungen immer unwahrscheinlicher



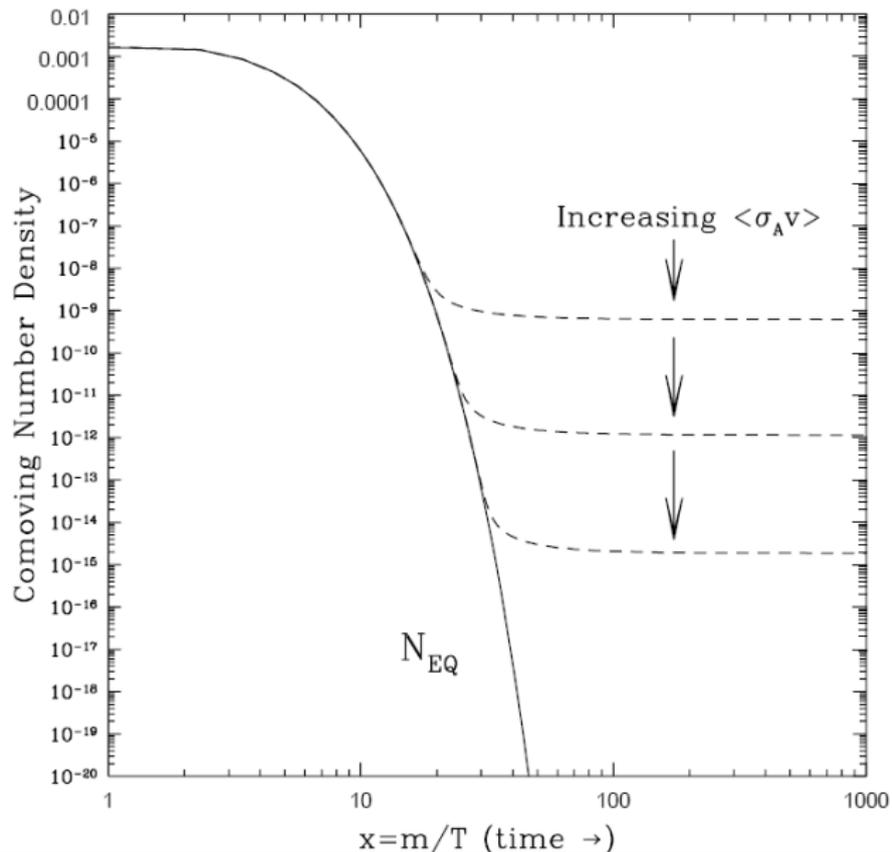
Instabile Teilchen verschwinden, stabile tendieren gegen eine konstante Anzahl

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma_{AV} \rangle (n^2 - n_{eq}^2)$$



$H$ : Hubblekonstante,  $\langle \sigma_{AV} \rangle$ : thermisch gemittelter Wirkungsquerschnitt

# Freeze Out



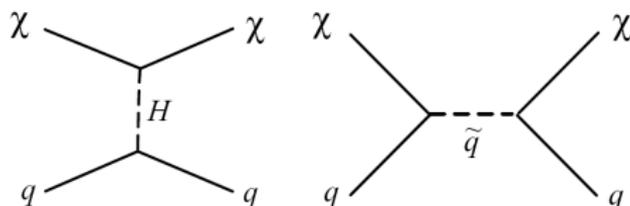
# Suche nach Weakly Interacting Massive Particles

## Direkter Nachweis

Falls Dunkle Materie aus Neutralinos besteht, kann  $\chi N$ -Streuung nachgewiesen werden. Die maximale Rückstoßenergie liegt im Bereich von

$$E_{max}^{recoil} = \frac{2m_\chi m_N}{(m_\chi + m_N)^2} v^2 \approx 100 \text{keV}$$

Annahmen:  $m_\chi \approx 100 \text{GeV}$ ,  $v \approx 220 \frac{\text{km}}{\text{s}}$



Die Zahl der Events ergibt sich zu

$$N = N_N T n_\chi \sigma_N v \approx O(1) \frac{Tm}{\text{Tag kg}}$$

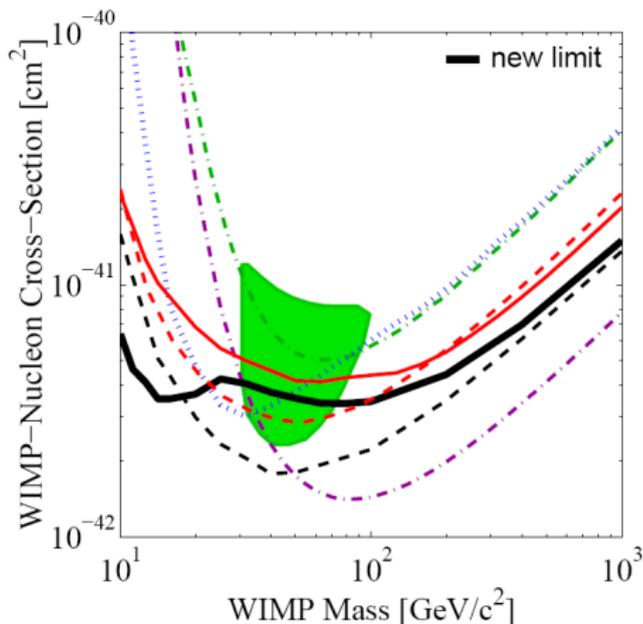
dabei ist  $N_N$  die Zahl der „Ziel-Kerne“ und  $T$  die Versuchszeit.

# Experimentelle Ergebnisse

**DAMA**: **D**Ark **M**Atter Project, Gran Sasso, grün hinterlegte Region

**CDMS**: **C**ryogenic **D**ark **M**atter **S**earch, Berkeley

**EDELWEISS**: **E**xpérience pour **D**étecter **L**es **W**IMP **E**n **S**ite **S**outerrain, Modane



# Suche nach WIMPs

## Indirekter Nachweis

Prinzip: Neutralinos vernichten sich *irgendwo* und erzeugen *irgendwas*, das man *irgendwie* detektiert, z. B.

**Positronen** Vor allem aus dem galaktischen Halo, Detektion mit Ballonexperimenten und Weltraumteleskopen. Schwierig, da Untergrund aus Zerfallsprodukten der kosmischen Strahlung sehr groß ist.

**Photonen** Aus dem galaktischen Zentrum oder extragalaktischen Objekten, Detektion mit Cherenkov-Teleskopen und Weltraumteleskopen

**Neutrinos** Aus der Nähe astronomischer Objekte (Sonne, ...), diese Produkte können leicht bis zur Erde dringen, sind aber auch schwierig nachzuweisen.

## Gravitinos

- Superpartner des Gravitons ( $s_G = 2, m_G = 0$ )
- Bei gebrochener Supersymmetrie gilt  $s_{\tilde{G}} = \frac{3}{2}, m_{\tilde{G}} \neq 0$
- Gravitino-Masse ist von der gleichen Größenordnung wie die Massen der anderen Superpartner (100GeV - 1TeV)

**Freeze Out** führt zu Problemen. Bei stabilen Gravitinos gilt  $m_{\tilde{G}} \leq 1$  keV (Overclosure), bei instabilen  $m_{\tilde{G}} \geq 10$  TeV (Primordiale Nukleosynthese durch Zerfallsprodukte gestört)

**Reheating** Nach der inflationären Ausdehnung des Universums folgt eine Phase der Wiederaufheizung wobei  $T_{SM} \leq T \leq T_{Planck}$ . Es entsteht ein See aus SM-Teilchen und Superpartnern, die Gravitinos erzeugen können (etwa  $gg \rightarrow \tilde{g}\tilde{G}$ ).

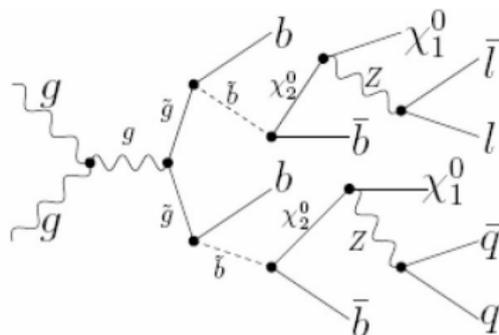
**Späte Zerfälle** Falls das Gravitino der LSP ist, so enden alle Prozesse irgendwann beim Gravitino.

**Problem:** Konventionelle direkte und indirekte Nachweismethoden funktionieren nicht (keine schwache Wechselwirkung mehr).

**Lösung:** Suche nach Spuren der Gravitinoproduktion, z.B. Nukleosynthese, kosmische Hintergrundstrahlung ...

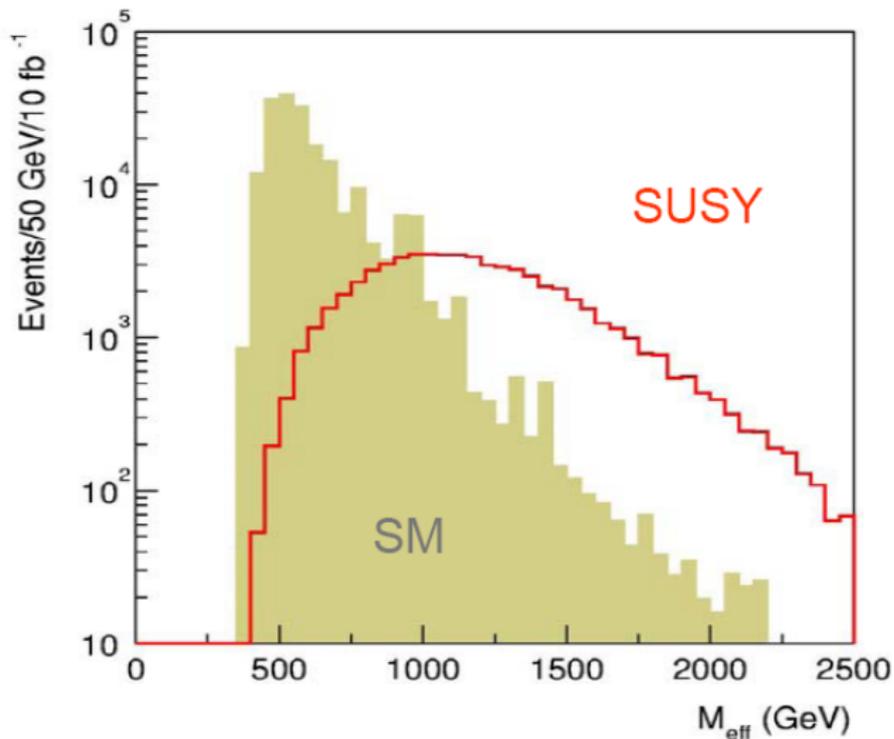
## Suchstrategien

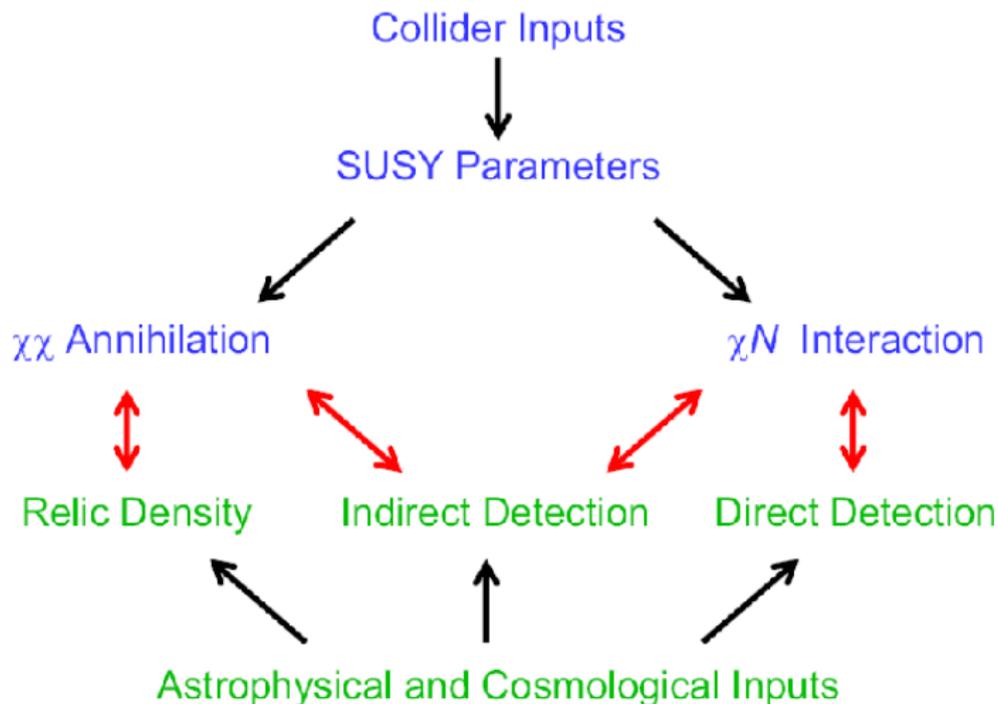
- Fehlende Energie in Teilchen-Jets



- Bestimmung der Modellparameter (Beschränkung auf eine Zerfallskette, Bestimmung der Massenverteilung)

Suche nach Ereignissen mit fehlendem Transversalimpuls





- Supersymmetrie als natürliche Erweiterung der bekannten Symmetrien
- Susy liefert mit dem Neutralino einen natürlichen Kandidaten für Dunkle Materie
- SUGRA liefert das Gravitino durch Integration der Gravitation
- Restdichten liegen im „benötigten“ Bereich

- Kane: Supersymmetry; *Poplärwissenschaftliche Einführung*
- Feng: Supersymmetry and cosmology; *Übersichtsartikel*
- Bertone: Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints; *Übersichtsartikel*
- Berger: Teilchenphysik; *Standard-Lehrbuch*