

# Dunkle Materie und Teilchenphysik

Seminar "Teilchenphysik und Astrophysik", Sommersemester 2011

Stanislav Schmidt

Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg

27. Juni 2011



# Gliederung

## Einleitende Bemerkungen

- Hubble-Konstante  $H$

- Wichtige Skalen

## Evidenz von DM und Probleme des SM

## SUSY

## WIMPs

- Was sind WIMPs?

- Entstehung

## Detektion

- Arten der Detektion und Beschränkungen

- Neutralinos

## Weitere Kandidaten für die DM

## Quellen

## Weiterführende Informationen

- Planck-Skala

- Details zum Bino

# Hubble-Konstante H

- ▶ Beschreibt die Expansion des Universums
- ▶ Besser: Hubble-Parameter, da  $H = H(t)$

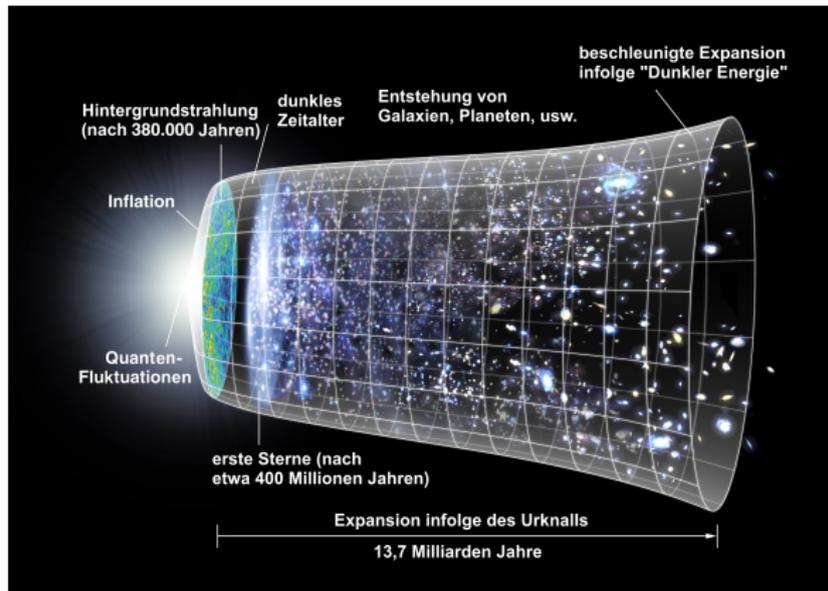


Abb.: Entwicklung des Universums, [map.gsfc.nasa.gov]

# Hubble-Konstante H

## Herleitung:

- Annahme: **Kosmologisches Prinzip**, Universum ist homogen unter...
  - ▶ ... Translationen
  - ▶ ... Rotationen

(Auf Skalen  $> 100\text{Mpc} \approx$  Größe von Superhaufen von Galaxien).

- (Friedmann-Lemaitre-)Robertson-Walker-Metrik

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \underbrace{(dr^2 + \tilde{r}^2 d\Omega^2)}_{\text{Ortskoordinaten}}$$

( $\tilde{r} \sim$  Krümmung, wenn keine Krümmung  $\tilde{r} = r$ )

# Hubble-Konstante H

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$$

→ Nach aktuellen Messungen

$$H \approx 70 \frac{\text{km}}{\text{Mpc}} \frac{1}{\text{s}}$$

→ Bei gleichmäßiger Expansion wäre das Alter des Universums

$$\frac{1}{H} \equiv \text{Hubble-Zeit}$$

$$(\approx 13.3 \times 10^9 \text{y})$$

→ Für große Entfernungen gilt:

$$D \approx \frac{c}{H} z$$

( $c$  = Lichtgeschw.,  $z$  = Rotverschiebung =  $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ ,  $H$  = Hubble-Param.,  $D$  = Entfernung zum Objekt)

# Wichtige Skalen

## Grand Unification Theory Skala

- ▶  $\Lambda_{GUT} \approx 10^{16} \text{ GeV}$  (Desert + Symmetry)
- ▶ EM + weak + strong?

## Planck-Skala

- ▶  $E_p \approx 10^{19} \text{ GeV}$
- ▶ EM + weak + strong + gravity?

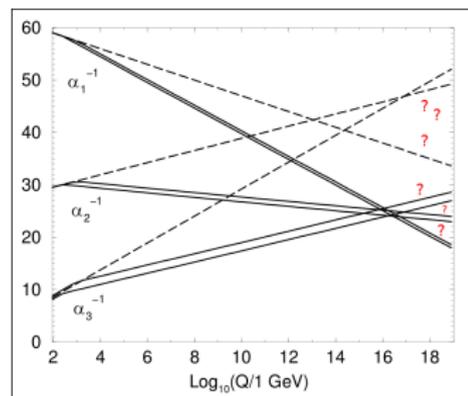


Abb.: Kopplungskonstanten,  
[Stephen P. Martin]

# Evidenz

Alle astronomischen Beobachtungen erfolgen durch 2 WW:

EM + Gravitation

- ▶ Auf **kleinen** Skalen: **Übereinstimmung** der Messergebnisse
- ▶ Auf **großen** Skalen: **Abweichungen** der Messergebnisse

## Messergebniss von WMAP:

$$\Omega_{\text{Baryonen}} \approx 4.5\%$$

$$\Omega_{DM} \approx 22.7\%$$

$$\Omega_{DE} \approx 72.8\%$$

# Evidenz

- ▶ Bullet-Cluster
- ▶ Gravitationslinsen
- ▶ Strukturbildung
- ▶ Rotationskurven von Galaxien
- ▶ Verhältnis von Masse zu Helligkeit bei Galaxiehaufen
- ▶ uvm.

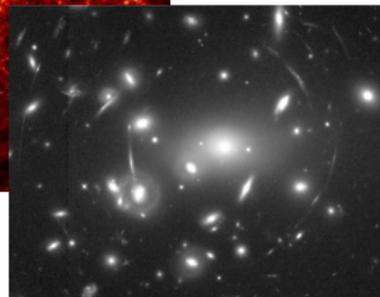
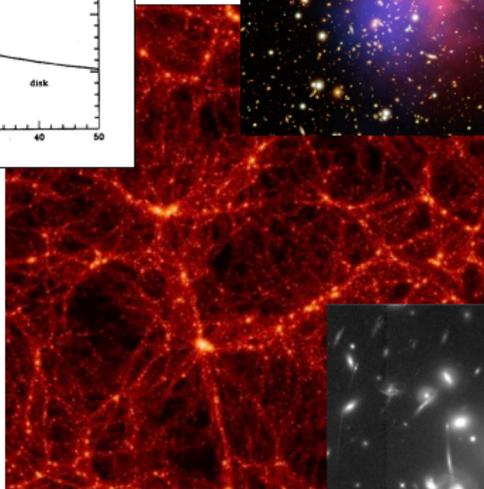
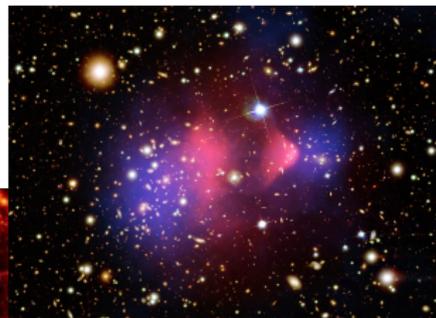
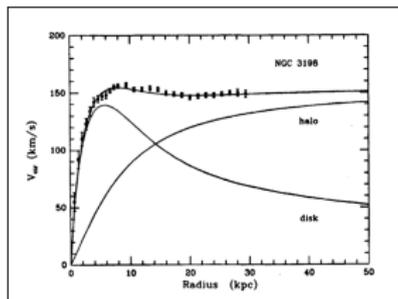
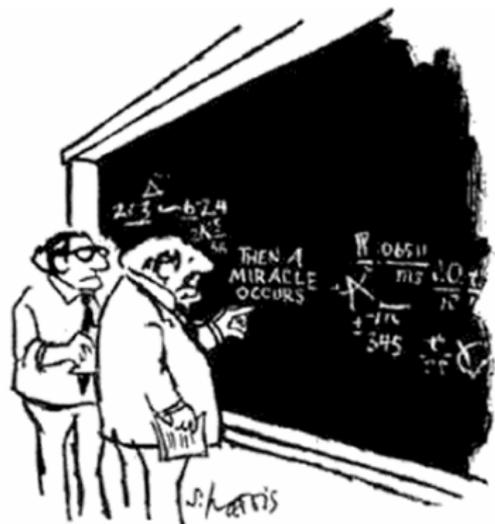


Abb.: Evidenz der DM,  
[[www.zum.de](http://www.zum.de)]  
[[apod.nasa.gov](http://apod.nasa.gov)]  
[[www.physikblog.eu](http://www.physikblog.eu)]  
[[www.mpa-garching.mpg.de](http://www.mpa-garching.mpg.de)]

# Probleme des SM

- ▶ Keine Teilchen für DM
- ▶ Keine Gravitation
- ▶  $m_\nu = 0$
- ▶ Hierarchieproblem, neue Flavours
- ▶ Starke CP-Verletzung in der QCD
- ▶ Vereinigung bei  $E = \Lambda_{GUT}$
- ▶ Zu viele Parameter
- ▶ etc.



"I THINK YOU SHOULD BE MORE EXPLICIT  
HERE IN STEP TWO."

© 1995 J.K. Rowling Ltd.

Distilled by Color-Expressions Ltd.

[blog.stackoverflow.com]

→ **Das SM hat noch Erweiterungsbedarf**

# Supersymmetrie (SUSY)

- ▶ Erweiterung des SM → Superpartner
- ▶ Motivation aus der Theorie
- ▶ Noch kein Nachweis → gebrochene Symmetrie
- ▶ Löst eventuell viele Probleme:
  - ▶ Dunkle Materie
  - ▶ Vereinigung der Kopplungskonstanten bei  $\Lambda_{GUT}$
  - ▶ Hierarchieproblem uvm.
- ▶ Transformationsregel: **Spin** → **Spin  $\pm \frac{1}{2}$**

Boson	→	<b>Bosino</b>	(= Fermion)
Fermion	→	<b>Sfermion</b>	(= Boson)
Higgs	→	<b>Higgsino</b>	(= Fermion)

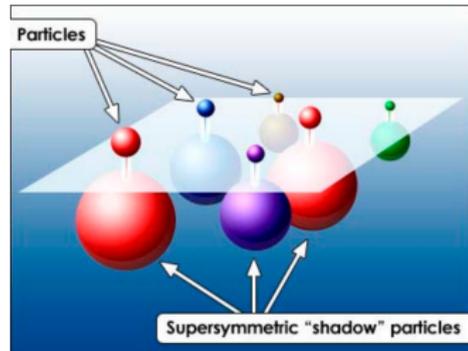


Abb.: Supersymmetrie - Schema  
[Benoît Clément]

∃ viele Modelle der SUSY, hier **MSSM** = Minimal Super Symmetric Model

# Supersymmetrie (SUSY)

Standard Model particles and fields		Supersymmetric partners			
Symbol	Name	Interaction eigenstates		Mass eigenstates	
Symbol	Name	Symbol	Name	Symbol	Name
$q = d, c, b, u, s, t$	quark	$\tilde{q}_L, \tilde{q}_R$	squark	$\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$	squark
$l = e, \mu, \tau$	lepton	$\tilde{l}_L, \tilde{l}_R$	slepton	$\tilde{l}_1, \tilde{l}_2$	slepton
$\nu = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	neutrino	$\tilde{\nu}$	sneutrino	$\tilde{\nu}$	sneutrino
$g$	gluon	$\tilde{g}$	gluino	$\tilde{g}$	gluino
$W^\pm$	$W$ -boson	$\tilde{W}^\pm$	wino	} $\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$	chargino
$H^-$	Higgs boson	$\tilde{H}_1^-$	higgsino		
$H^+$	Higgs boson	$\tilde{H}_2^+$	higgsino	} $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$	neutralino
$B$	$B$ -field	$\tilde{B}$	bino		
$W^3$	$W^3$ -field	$\tilde{W}^3$	wino	}	
$H_1^0$	Higgs boson	$\tilde{H}_1^0$	higgsino		
$H_2^0$	Higgs boson	$\tilde{H}_2^0$	higgsino		
$H_3^0$	Higgs boson				

Abb.: Die Teilchen des MSSM,  
[Gianfranco Bertone, Dan Hooper and Joseph Silk]

# Supersymmetrie (SUSY)

## Warum 5 Higgs-Teilchen?

1. ▶ **SM** ein Doublet  $H = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix} \rightarrow 4$  Freiheitsgrade
- ▶ Elektroschwache SB  $\rightarrow$  "wegeichen" von 3 Freiheitsgraden
- $\rightarrow 4 - 3 = 1$  Higgsteilchen

2. ▶ **MSSM** Modellbedingt 2 Doublets nötig:  $H_1$  und  $H_2 \rightarrow 8$  Freiheitsgrade
- ▶ Elektroschwache SB  $\rightarrow$  "wegeichen" von 3 Freiheitsgraden
- $\rightarrow 8 - 3 = 5$  Higgsteilchen:

$$H^+$$

$$H^-$$

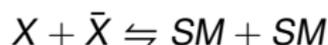
$$H_1^0 (\equiv h^0)$$

$$H_2^0 (\equiv H^0)$$

$$H_3^0 (\equiv A^0)$$

# WIMPs

- ▶ **WIMP** = **W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**article
- ▶ Kein konkretes Teilchen, sondern eher eine Idee+Anforderungsliste
- ▶ Der "heißeste" Kandidat
- ▶  $m \sim m_{weak} \sim GeV - TeV$  - ziemlich massiv
- ▶ Nur schwache WW - neutrale, farblose Teilchen
- ▶ Bevorzugter Reaktionsmechanismus (bei SUSY-Modellen):



- ▶ **Korrektes  $\Omega!$  → "The WIMP-miracle"**

# Entstehung

## Thermal freeze-out

- ▶ **Keine Ausdehnung des Universums + T fällt:** sobald  $E_T < m_X$  fällt die Anzahl exponentiell
- ▶ **Das Universum dehnt sich aus: Entkopplung** → Reaktionsgleichgewicht der DM-Teilchen wird nicht mehr erreicht!

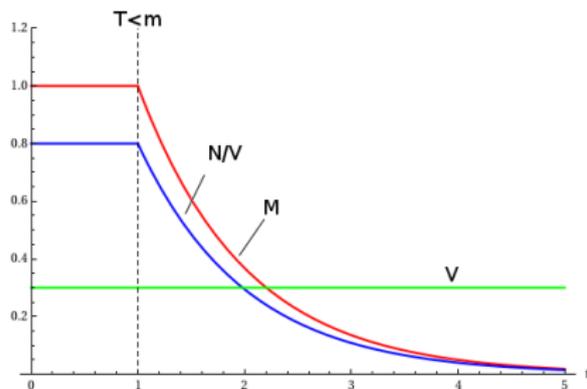


Abb.: Abkühlung bei konstantem Volumen

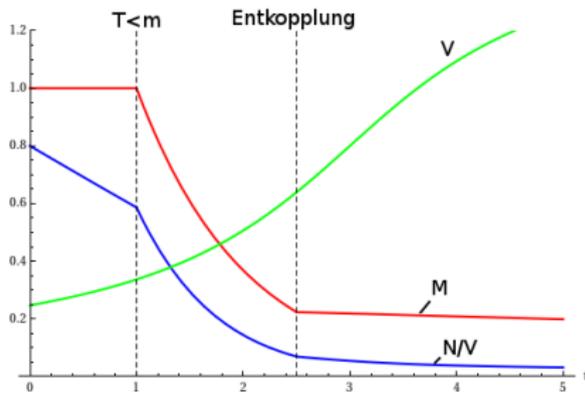


Abb.: Abkühlung aufgrund von Expansion

$T$ =Temperatur,  $V$ =Gesamtvolumen des Universums,  $N$ =Gesamtzahl der betrachteten DM-Teilchen,  $M$ =Gesamtmasse der betrachteten DM-Teilchen. (Grafiken nur qualitativ!)

# Entstehung

## Rechnung: Boltzmann-Gleichung

$$\underbrace{\hat{L}[f_X]}_{\text{Liouville-Operator}} = \underbrace{\hat{C}[f_X]}_{\text{Kollision}}$$

[...]

$$\frac{dn_X}{dt} + 3Hn_X = -\langle \sigma|v| \rangle (n_X^2 - n_{X,eq}^2)$$

$f_X =$  Verteilungsdichte von  $X$ ,  $f_X(x_\mu, p_\mu) dx_\mu dp_\mu$

$=$  Anzahl von Teilchen in  $[x_\mu, x_\mu + dx_\mu] \times [p_\mu, p_\mu + dp_\mu]$

$n_X =$  Anzahldichte von  $X$

$n_{X,eq} =$  Anzahldichte von  $X$  im Gleichgewicht

$H =$  Hubble-Parameter

$\langle \sigma|v| \rangle =$  Thermisch gemittelter Wirkungsquerschnitt  $\times$  Geschwindigkeit  
für die Reaktion  $X + \bar{X} \rightleftharpoons SM + SM$

1.  $3Hn_X$ : Expansion des Universums

2.  $n_X^2 = n_X \cdot n_{\bar{X}}$ : Annahme  $n_X = n_{\bar{X}}$ , Gleichgewicht nicht erreicht

3.  $n_{X,eq}^2 = n_{X,eq} \cdot n_{\bar{X},eq}$ : kommt von den SM-Teilchen, sie werden im Gleichgewicht angenommen

# Entstehung

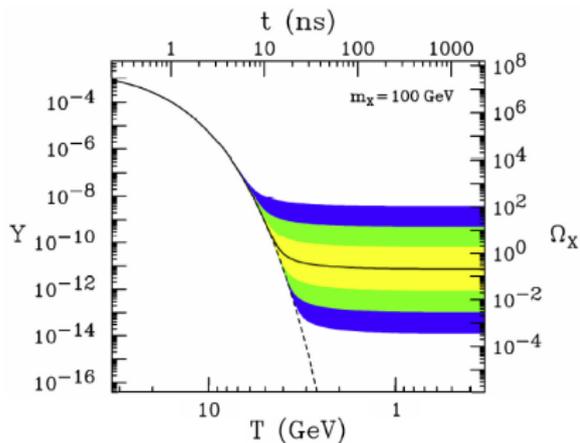


Abb.: Entwicklung der Anzahldichte - Freeze Out (Farbig: versch. Wirkungsquerschnitte)", [Jonathan L. Feng]

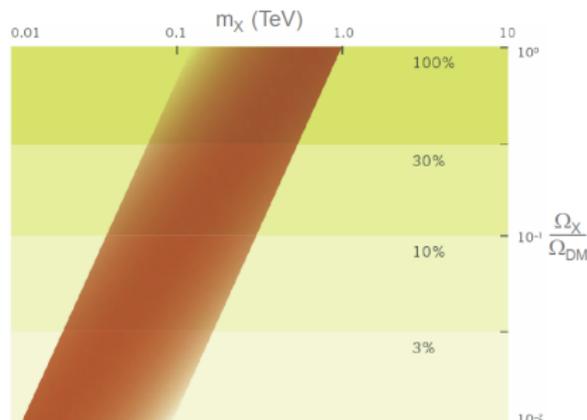


Abb.: "The WIMPs-Miracle" (ausgedehnt, da versch. Reaktionsmechanismen), [Jonathan L. Feng]

# Stabilität

## Sind WIMPs stabil?

▶  $X \Leftrightarrow SM + SM$  wäre denkbar, aber ungünstig

▶  $\exists$  Erhaltungsgröße: **R-Parität**,  $R_P = (-1)^{3B+L+2s}$

SM Particle type	Particle	Symbol	Spin	R-Parity	Superpartner	Symbol	Spin	R-parity
Fermions	Quark	$q$	$\frac{1}{2}$	+1	Squark	$\tilde{q}$	0	-1
	Lepton	$\ell$	$\frac{1}{2}$	+1	Slepton	$\tilde{\ell}$	0	-1
Bosons	W	$W$	1	+1	Wino	$\tilde{W}$	$\frac{1}{2}$	-1
	B	$B$	1	+1	Bino	$\tilde{B}$	$\frac{1}{2}$	-1
	Gluon	$g$	1	+1	Gluino	$\tilde{g}$	$\frac{1}{2}$	-1
Higgs bosons	Higgs	$\tilde{h}_u, \tilde{h}_d$	0	+1	Higgsinos	$\tilde{h}_u, \tilde{h}_d$	$\frac{1}{2}$	-1

Abb.: R-Parität, [Wikipedia (EN)]

▶ Reaktionen vom Typ  $X \Leftrightarrow SM + SM$  **verboten**

# Detektion

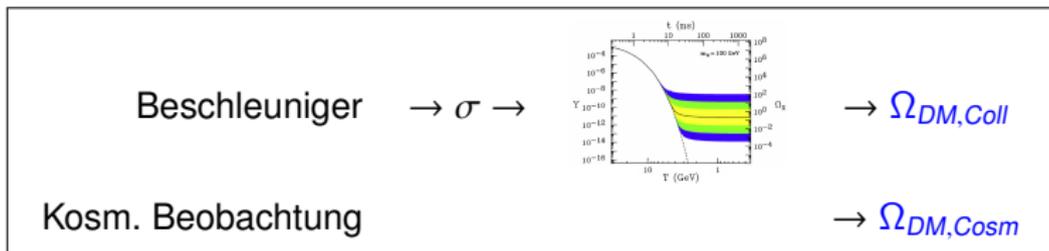
## Detektion?

1. **Indirekt:**  $X + X \rightarrow SM + SM$ , Beobachtung von SM-Teilchen
2. **Direkt:**  $X + SM \rightarrow X + SM$ , Streuung, Beobachtung von Energieübertrag  
**Interessant:**  $\exists$  Untergrenze für Interaktionsrate ( $\sim$  Vernichtungsrate) von  $X$  im Universum, da  $\Omega_X > \Omega_{DM}$  ausgeschlossen!  
 $\rightarrow$  Hilft bei der Detektion
3. **Teilchenbeschleuniger:**  $SM + SM \rightarrow X + X$ , typische Signatur.

# Detektion in Detektoren

## Idee

- ▶  $m \sim m_{weak}$  → man kann DM theoretisch (im LHC) produzieren



- ▶  $\left. \begin{array}{l} \Omega_{DM,Coll} \\ \Omega_{DM,Cosm} \end{array} \right\}$  Vergleich, Verifizierung der Theorie

## Schwierigkeiten

- ▶ Kein direkter Nachweis von SM + SM  $\Leftrightarrow$  X + X möglich
- ▶ Theoretisch  $XX_j$  und  $XX_\gamma$  nachweisbar, praktisch unmöglich am CERN, in ILC (=International Linear Collider) aber denkbar
- ▶ Alternative bei LHC: fehlende Energie. Aber das liefert keine Informationen über das Objekt, nur  $\tau \gtrsim 10^{-7}$

# Neutralinos

## Denkbare WIMPs: **Neutralinos**

Standard Model particles and fields		Supersymmetric partners			
Symbol	Name	Interaction eigenstates		Mass eigenstates	
Symbol	Name	Symbol	Name	Symbol	Name
$q = d, c, b, u, s, t$	quark	$\tilde{q}_L, \tilde{q}_R$	squark	$\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$	squark
$l = e, \mu, \tau$	lepton	$\tilde{l}_L, \tilde{l}_R$	slepton	$\tilde{l}_1, \tilde{l}_2$	slepton
$\nu = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$	neutrino	$\tilde{\nu}$	sneutrino	$\tilde{\nu}$	sneutrino
$g$	gluon	$\tilde{g}$	gluino	$\tilde{g}$	gluino
$W^\pm$	$W$ -boson	$\tilde{W}^\pm$	wino	}	$\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$ chargino
$H^-$	Higgs boson	$H_1^-$	higgsino		
$H^+$	Higgs boson	$\tilde{H}_2^+$	higgsino		
$B$	$B$ -field	$B$	bino	}	$\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$ <u>neutralino</u>
$W^3$	$W^3$ -field	$\tilde{W}^3$	wino		
$H_1^0$	Higgs boson	$\tilde{H}_1^0$	higgsino		
$H_2^0$	Higgs boson	$\tilde{H}_2^0$	higgsino		
$H_3^0$	Higgs boson				

Abb.: Teilchen des MSSM, [Gianfranco Bertone, Dan Hooper and Joseph Silk]

⇒  $\tilde{\chi}_1^0 = LSP + \text{neutral}$  → **Perfekter WIMP-Kandidat!**

# Neutralinos - Detektion

Im mSUGRA (= minimal SUper GRAvity  $\approx$  Erweiterung von MSSM)  
nur **5 Parameter**

- ▶  $m_0$  = universale skalare Masse
- ▶  $M_{1/2}$  = universale Gaugino Masse,
- ▶  $A_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu)$

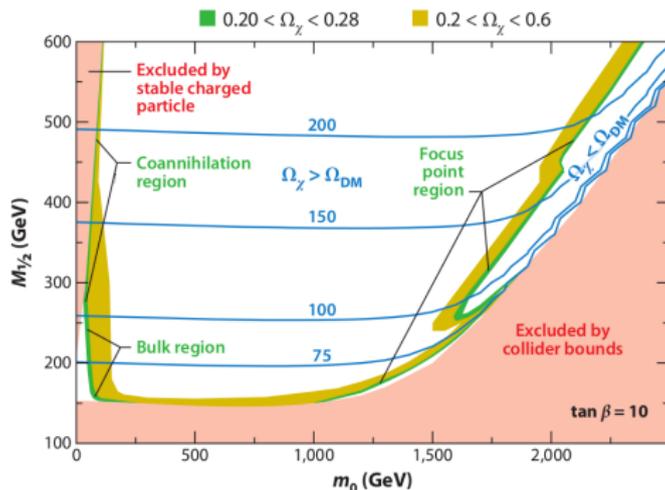


Abb.: Geeignete Masse der Neutralinos ( $A_0=0, \beta = 10, \mu > 0$ ), [Jonathan L. Feng]

Bem.: Geeignete Masse relativ niedrig da  $\tilde{\chi}_1^0$  = Majoranapartikel  $\rightarrow \sigma$  wird erniedrigt

# Kaluza-Klein DM

- ▶ Anderer Ansatz: UED = Universal Extra Dimensions
- ▶ Eine extra Dimension mit Unterlevels ( $\rightarrow \infty$ -viele Superpartner)
- ▶ Verschlimmert das Hierarchie Problem
- ▶ Nur 2 Parameter: Higgs-Masse  $m_H$  und Größe der Extradimension  $R$
- ▶  $\rightarrow \exists$  leichtestes, stabiles KK-Teilchen = LKP = Lightest KK Particle (=  $B^1$ , Level-1-Superpartner vom Bino)

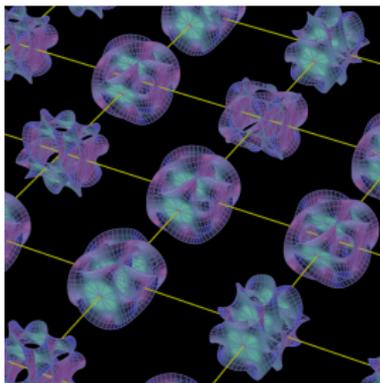


Abb.: Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten, Prototypen aufgerollte Mannigfaltigkeiten in der Kaluza-Klein- oder Stringtheorien, [<http://members.wolfram.com>]

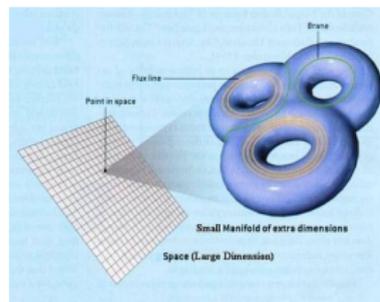


Abb.: Aufgerollte, kompakte Struktur einer möglichen extra Dimension der KK-Theorie, [[meridianes.files.wordpress.com](http://meridianes.files.wordpress.com)]

# Viele Weitere Ansätze für die Erklärung der DM

- ▶ Axionen
- ▶ SuperWIMPs
- ▶ Leichte Gravitinos
- ▶ Versteckte dunkle Materie
- ▶ Sterile Neutrinos
- ▶ MACHOS
- ▶ (...)

# Literatur I



Jonathan L. Feng

Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection

Link: [Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2010. 48:495–545](#)



Gautam Bhattacharyya

A Pedagogical Review of Electroweak Symmetry Breaking Scenarios

Link: [arXiv:0910.5095v2 \[hep-ph\]](#)



Benjamin Audren

Dark matter: experimental evidence, relic density and the supersymmetric candidate

Link: [Theses at the Uppsala University](#)



Yashar Akrami

Supersymmetry vis-à-vis Observation

Link: [Theses at the Stockholm University](#)

# Literatur II



M.J.Herrero

The Standard Model

Link: [arXiv:hep-ph/9812242v1](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9812242v1)



Stephen P. Martin

A Supersymmetry Primer

Link: [arXiv:hep-ph/9709356v5](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356v5)



Gianfranco Bertone , Dan Hooper and Joseph Silk

Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints

Link: [arXiv:hep-ph/0404175v2](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0404175v2)



Benoît Clément

Vorlesung: Physique des Particules, Grenoble UJF

Link: Vorlesungsfolien



[[www.zum.de](http://www.zum.de)] <http://www.zum.de/Faecher/A/BW/bilder/gravitationslinse.gif>



[[apod.nasa.gov](http://apod.nasa.gov)]

[http://apod.nasa.gov/apod/image/0608/bulletcluster\\_comp\\_f2048.jpg](http://apod.nasa.gov/apod/image/0608/bulletcluster_comp_f2048.jpg)

# Literatur III

-  [www.physikblog.eu]  
<http://www.physikblog.eu/wp-content/uploads/2011/05/Rotationskurve.png>
-  [www.mpa-garching.mpg.de]  
[http://www.mpa-garching.mpg.de/HIGHLIGHT/2002/fig0206\\_1.jpg](http://www.mpa-garching.mpg.de/HIGHLIGHT/2002/fig0206_1.jpg)
-  [blog.stackoverflow.com] <http://blog.stackoverflow.com/wp-content/uploads/then-a-miracle-occurs-cartoon.png>
-  [map.gsfc.nasa.gov] <http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>
-  [<http://members.wolfram.com>]  
<http://members.wolfram.com/jeffb/visualization/calabi-yau7.gif>
-  [meridianes.files.wordpress.com]  
[http://meridianes.files.wordpress.com/2011/02/rtmagicc\\_kaluza\\_klein\\_universe\\_review\\_ca\\_txdam16223\\_ae697f.jpg](http://meridianes.files.wordpress.com/2011/02/rtmagicc_kaluza_klein_universe_review_ca_txdam16223_ae697f.jpg)
-  Link: Wikipedia (DE)
-  Link: Wikipedia (EN)

*Ende*

# Planck-Skala

$$E_p \approx 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

- ▶ Obere Schranke der Quantentheorien
- ▶ Gravitation → Quanteneffekte
  - ▶ String theory
  - ▶ Loop Quantum Gravity
  - ▶ Nichtkommutative Geometrie
- ▶ Vermutung:  $F_G \approx F_{EM/weak/strong}$ , Unification?

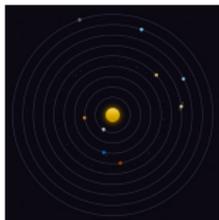
# Planck-Skala

⇒ **Einheiten:** Kombination von **G**, **c** und  $\hbar$

<b>Planck-Masse</b>	$= m_p$	$= \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$= 2.176 \times 10^{-8} \text{ kg}$
<b>Planck-Länge</b>	$= l_p$	$= \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$= 1.616 \times 10^{-35} \text{ m}$
<b>Planck-Zeit</b>	$= t_p$	$= \frac{l_p}{c}$	$= 5.391 \times 10^{-44} \text{ s}$

# Planck-Skala

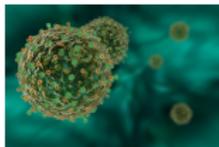
- ▶ Planck-Länge:  $10^{-20} \times d_{Proton}$
- ▶ Kleinste Messung heute: höchstens  $10^{-5} \times d_{Proton}$



$\hat{=}$  Proton



$\hat{=}$   $10^{-5} \times d_{Proton}$



$\hat{=}$   $10^{-20} \times d_{Proton}$

# Planck-Skala

- ▶ **Raumzeit:** Schaumartige Struktur?, keine Messung unter  $l_p$  möglich
- ▶ **Schwarzes Loch**,  $A$  = Fläche des Ereignishorizonts:  $S = \frac{A}{4l_p^2}$
- ▶ **Stringtheorie:**  $l_p$  = Größenordnung der Strings
- ▶ **LQG:**  $l_p$  = Größenordnung der quantisierten Flächen

$l_p$  = kleinste messbare Länge

Theorie auf der Skala von  $l_p$  = Weltformel (= theory of everything)

# Planck-Skala

- ▶ **Planck-Masse**  $\approx$  Masse eines Floh(ei)s
  - ▶ Quantenskala beachten!
  - ▶ Wenn  $m_p = M_{\text{SchwarzesLoch}}$ , dann  $l_p =$  Schwarzschildradius  
( $\rightarrow$  Schwarzes Loch  $\equiv$  Planckteilchen)
- 

- ▶ **Planck-Zeit** - Zeit in der Licht  $1 l_p$  durchläuft  
 $\hookrightarrow$  Kleinste mögliche Zeitmessung  
 $\hookrightarrow$  Innerhalb von  $t_p$  nichts detektierbar
- ▶ **Kleinste gemessene Zeit**  $> 12$  Attosekunden

$$12 \times 10^{-18} \text{ s} \xrightarrow{\times 10^{-24}} t_p$$

- ▶ **Alter des Universums**  $= 13.75 \times 10^9 \text{ a}$

$$4.34 \times 10^{17} \text{ s} \xrightarrow{\times 10^{-24}} 434 \text{ ns}$$

# Planck-Skala

- ▶ **Eine art Unschärferelation** → auf Planckgröße nichts mehr messbar (Photon wird zu schwarzem Loch)
- ▶ **Wie untersuchen?** Auf der Erde? Strahlung aus dem Urknall? WMAP? Planck Surveyor?
- ▶ **Viele Spekulationen:** virtuelle schwarze Löcher, Loops in Schaumstruktur, Verbindung zu höheren Dimensionen uvm.

# Bino

## Was ist ein Bino?

- ▶ Vereinigung  $U(1) \times SU(2)$

- ▶ 4 Generatoren, Kovariante Ableitung:  $D_\mu = \partial_\mu - ig \frac{\sigma_a}{2} W_\mu^a - ig' \frac{Y}{2} B_\mu$

( $a=1,2,3, \mu=0,1,2,3, \sigma_a = \text{Pauli-Matrizen}, Y = 2(Q - L_3) = \text{Hyperladung}$ )

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{array}{l} \swarrow t_3 = \frac{1}{2}, \quad Q = 0 \quad \therefore Q - t_3 = -\frac{1}{2} \\ \searrow t_3 = -\frac{1}{2}, \quad Q = -1 \quad \therefore Q - t_3 = -\frac{1}{2} \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \begin{array}{l} \swarrow t_3 = \frac{1}{2}, \quad Q = \frac{2}{3} \quad \therefore Q - t_3 = \frac{1}{6} \\ \searrow t_3 = -\frac{1}{2}, \quad Q = -\frac{1}{3} \quad \therefore Q - t_3 = \frac{1}{6} \end{array}$$

Abb.: Motivation der Hyperladung, [Gautam Bhattacharyya]

- ▶ Doublet  $(W_\mu^1, W_\mu^2) \xrightarrow{\theta_W} (W_\mu^+, W_\mu^-)$
- ▶ Doublet  $(W_\mu^3, B_\mu) \xrightarrow{\theta_W} (Z_\mu, A_\mu)$
- ▶  $\tilde{B}_\mu = \text{Superpartner von } B_\mu$