

Dunkle Materie

- Hinweise
- Kandidaten
- Nachweismethoden



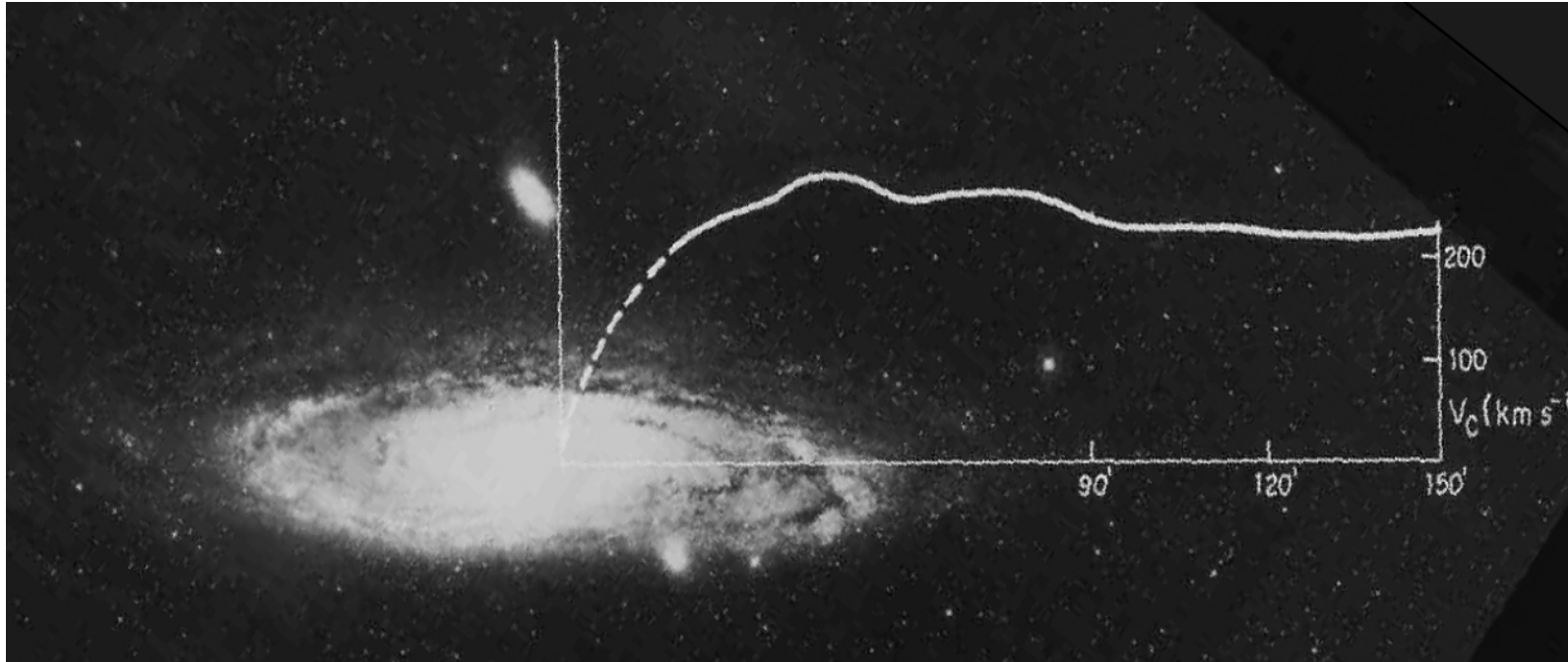
$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

ρ - mittlere Dichte im Weltall


$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \text{ - kritische Dichte}$$

Hinweise auf DM

1. Rotationskurven von Spiralgalaxien (I)



- Rotationskurven der Galaxien \rightarrow DM-Dichte
- in Erdnähe: $100 - 700 \text{ MeV/cm}^3 \approx 10\%$ der Scheibendichte)
($1 \text{ MeV} = 1.77 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$)

$\rightarrow O(1 \text{ kg}) /$ 

Hinweise auf DM

1. Rotationskurven (II)

Stabile Kreisbahn:

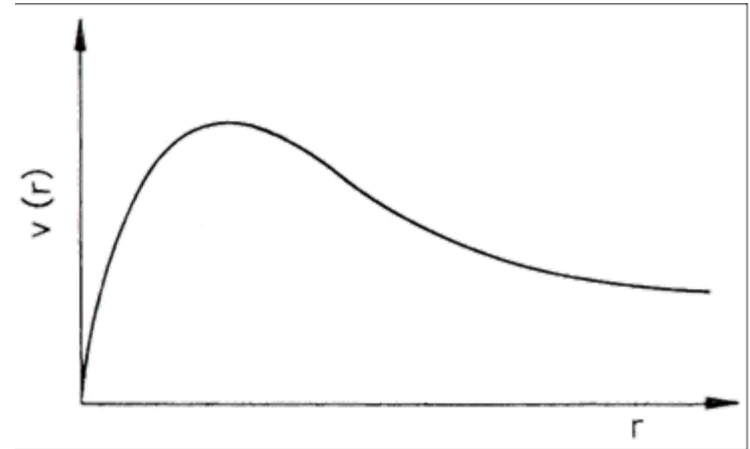
$M(r)$ – Gesamtmasse innerhalb Radius r

$$F_G = \frac{GmM(r)}{r^2} = \frac{mv^2}{r} = F_Z$$

innerhalb: kugelförmiger „bulge“

$$M(r) = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \Rightarrow$$

$$v(r) \sim r$$



außerhalb: Gesamtmasse

$$M(r) = M_{Galaxie} = const \quad \Rightarrow \quad v(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Hinweise auf DM

2. Dynamik von Galaxienhaufen



$$\text{Virialsatz: } 2\langle E_{kin} \rangle + \langle E_{pot} \rangle = 0$$

$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{1}{2} N \langle m v^2 \rangle$$

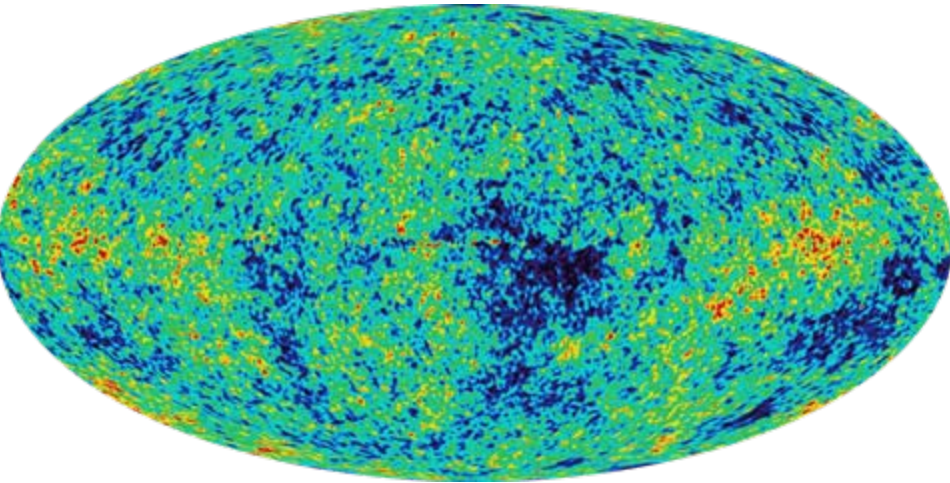
$$\langle E_{pot} \rangle = -\frac{1}{2} G N(N-1) \frac{\langle m^2 \rangle}{\langle r \rangle}$$

$$\text{mit } N-1 \approx N \text{ und } N \langle m \rangle = M$$

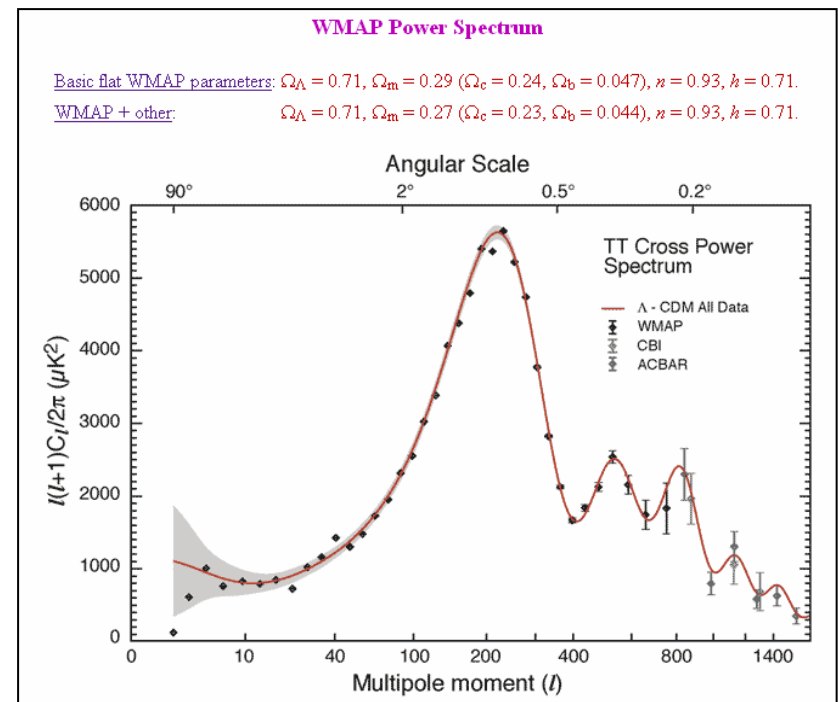
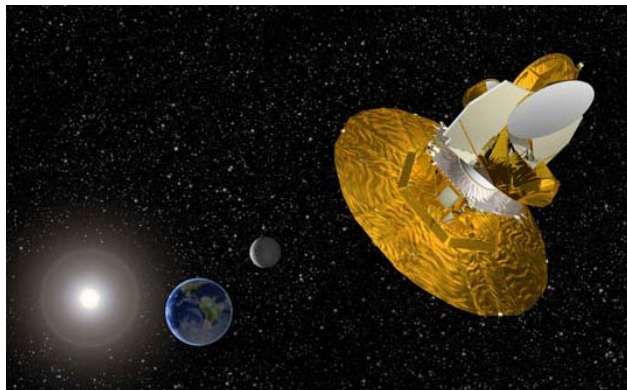
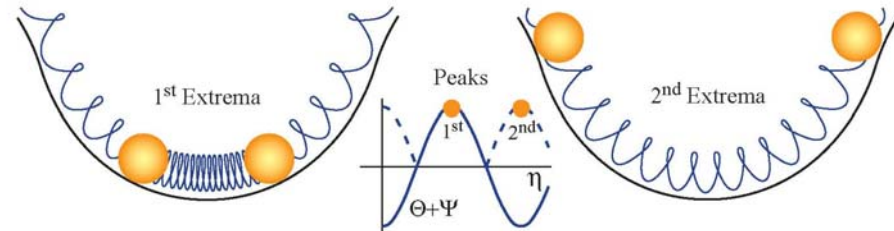
$$\Rightarrow M \approx \frac{2 \langle r \rangle \langle v^2 \rangle}{G}$$

Hinweise auf DM

4. Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB)



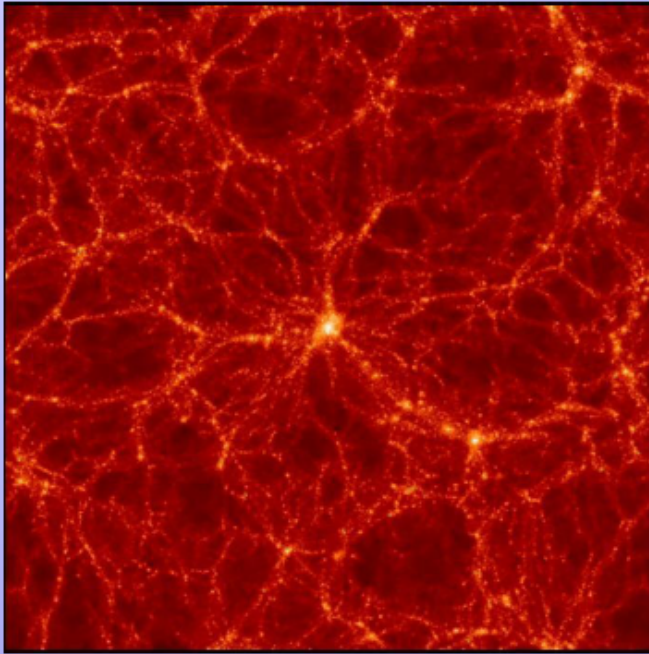
Akustische Schwingungen



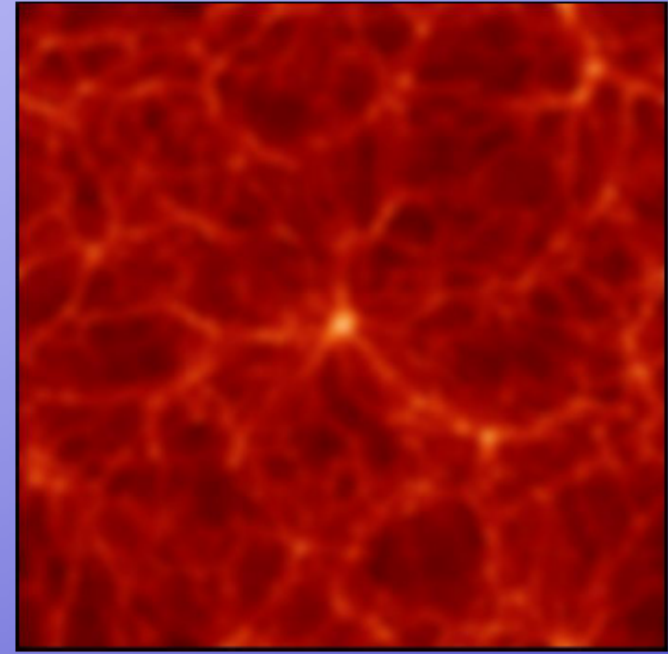
Hinweise auf DM

5. Strukturenbildung

Kombination von heißer und kalter DM



kalt

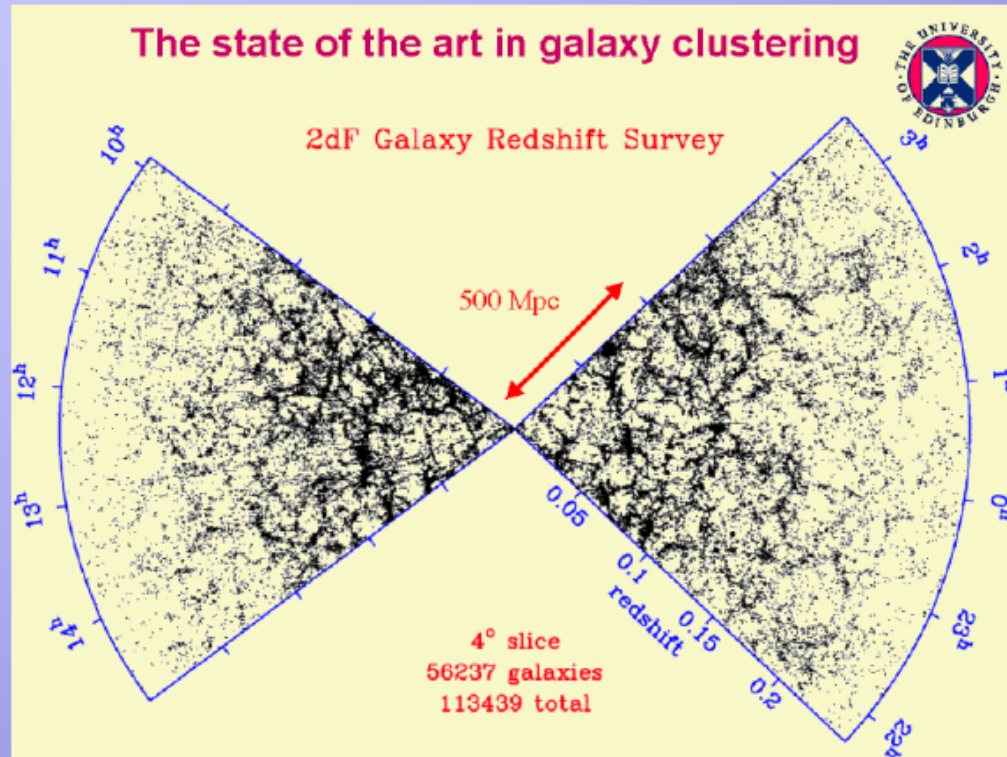


heiß

Heiße DM verschmiert die Strukturen auf kleinen Skalen und sorgt für großräumige Strukturen

Galaxiencluster

Die beobachtete Form der Galaxiencluster



Der überwiegende Teil der DM muss kalt sein

Heiße DM (z.B. Neutrinos) existieren, aber können nur einen geringen Teil ausmachen

Kandidaten

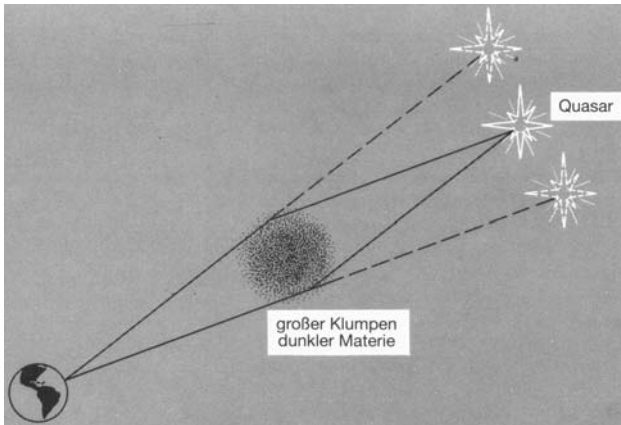
1. Baryonische Dunkle Materie



Braune Zwerge:

Objekte mit kleiner Masse → Keine Kernfusion

Suche nach **MACHO**'s (Massive Compact Halo Objects)



Gravitationslinseneffekt durch Klumpen von DM:
Wechselnde Helligkeit von Sternen in Nachbargalaxien

Resultat: Effekt beobachtete,
aber **nicht ausreichend**, um DM zu erklären

Weißer Zwerge, Neutronensterne, schwarze Löcher:
Häufigkeit etwa bekannt

DM-Kandidaten

2. Alternativen

Zeitabhängige Gravitationskonstante:

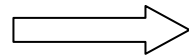
$G(t)$ hätte anderes Ω_b zur Folge

Aber: Keine Energieerhaltung !!!

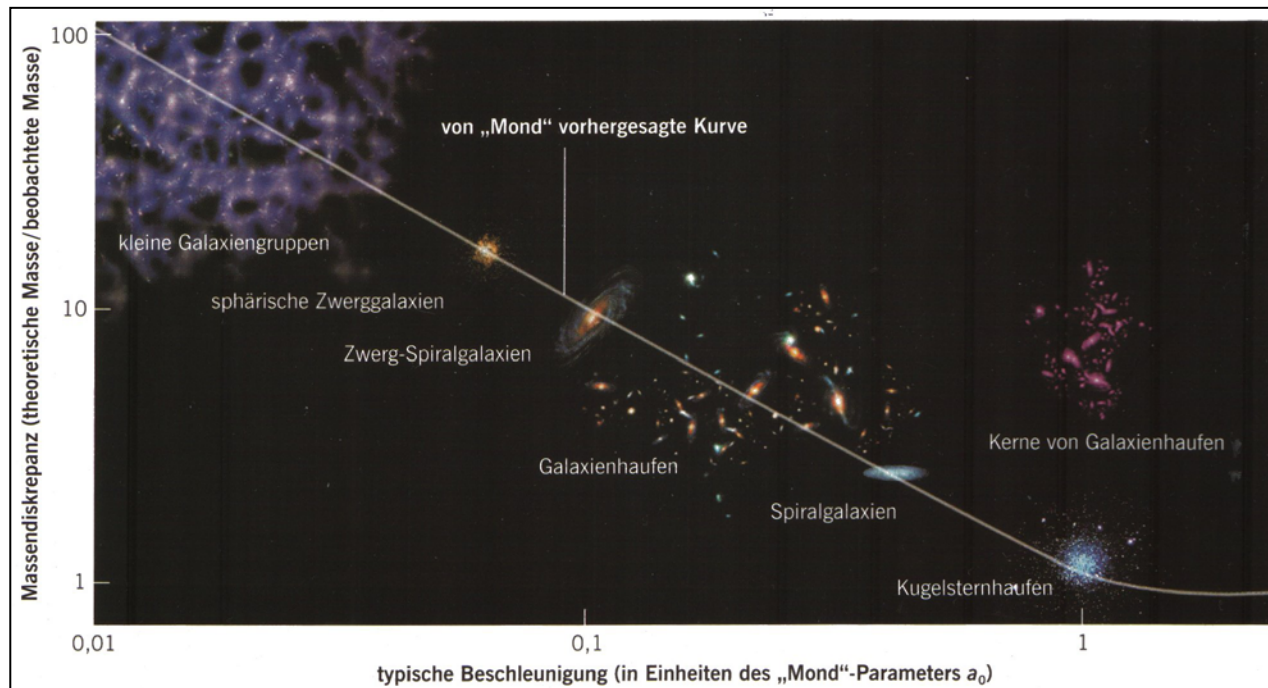
Kandidaten (I)

MOND-Theorie:
(modified Newtonian dynamics)

Annahme: Gravitationsgesetz nicht universell gültig



$$a_G = \frac{GM}{r^2} + \frac{\sqrt{GMa_0}}{r}$$



Kandidaten

3. WIMPS

WIMPS: Weakly Interacting Massive Particles

Kandidaten:

- **SUSY**: LSP = lightest supersymmetric particle
z.B. Neutralino χ , Spin $\frac{1}{2}$,
Mischung neutraler SUSY($s=1/2$)-Teilchen (Higgsino, Photino, Zino)
Entkoppeln nach Big Bang, wenn $kT = M_\chi c^2$
- **Axionen**
(gefordert, um CP-Verletzung in QCD zu verhindern)
$$M_a = 10^{-5} \dots 10^{-3} \text{ eV}$$

Trotzdem CDM, weil bei Entkopplung bereits nicht-relativistisch
- und, und, und

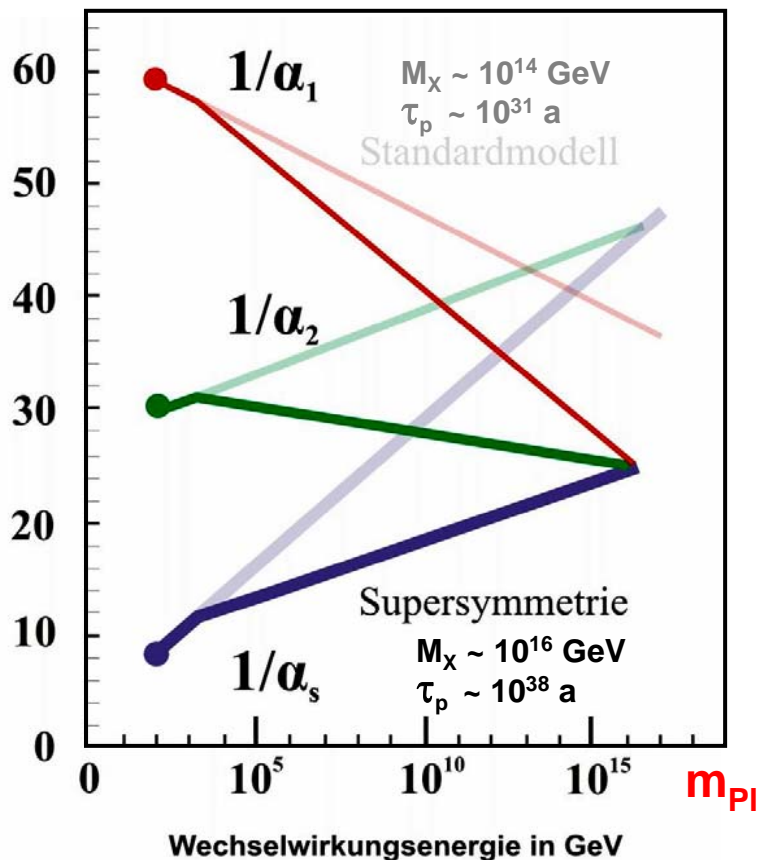
SUSY-Teilchen

Teilchen und ihre supersymmetrischen Partner (SUSY)

Spin	Normales Teilchen	Superpartner	Spin
1/2	Leptons (e, ν_e , ...) Quarks (u, d, ...)	Sleptons (\tilde{e} , $\tilde{\nu}_e$, ...) Squarks (\tilde{u} , \tilde{d} , ...)	0
1	Gluons W^\pm Z^0 Photon (γ)	Gluginos Wino Zino Photino ($\tilde{\gamma}$)	1/2
0	Higgs	Higgsino	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2

Super-Symmetrie

vereinigt Kräfte und ...



- ein Vereinigungs-Punkt bei $M_x = 2 \cdot 10^{16}$ GeV !
- Proton-Lebensdauer > exptl. Grenze
- leichtestes SUSY-Teilchen
Dunkle Materie im Universum !
- beseitigt mathemat. Inkonsistenzen in der Theorie