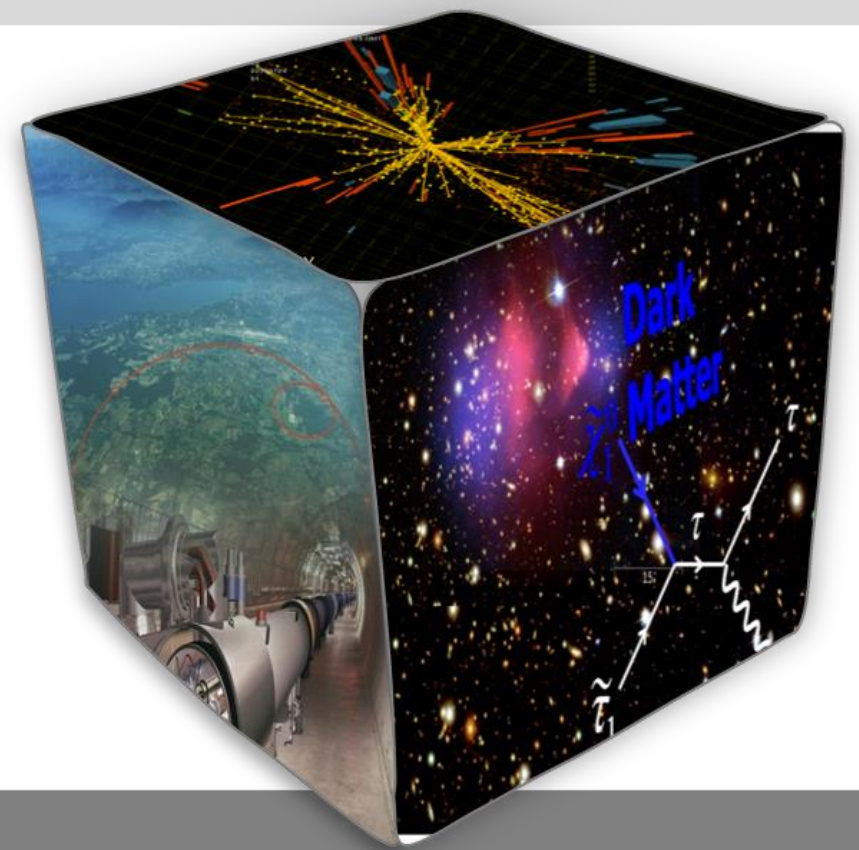


Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 11, 16.01.2014

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik



Dunkles Universum

- Einführung
- WIMP-Kandidaten
- Supersymmetrie (SUSY):
SUSY-Multiplette
Charginos & Neutralinos
R-Parität



Abschirmmethoden



■ Passive Abschirmung gegen Gammas & Neutronen

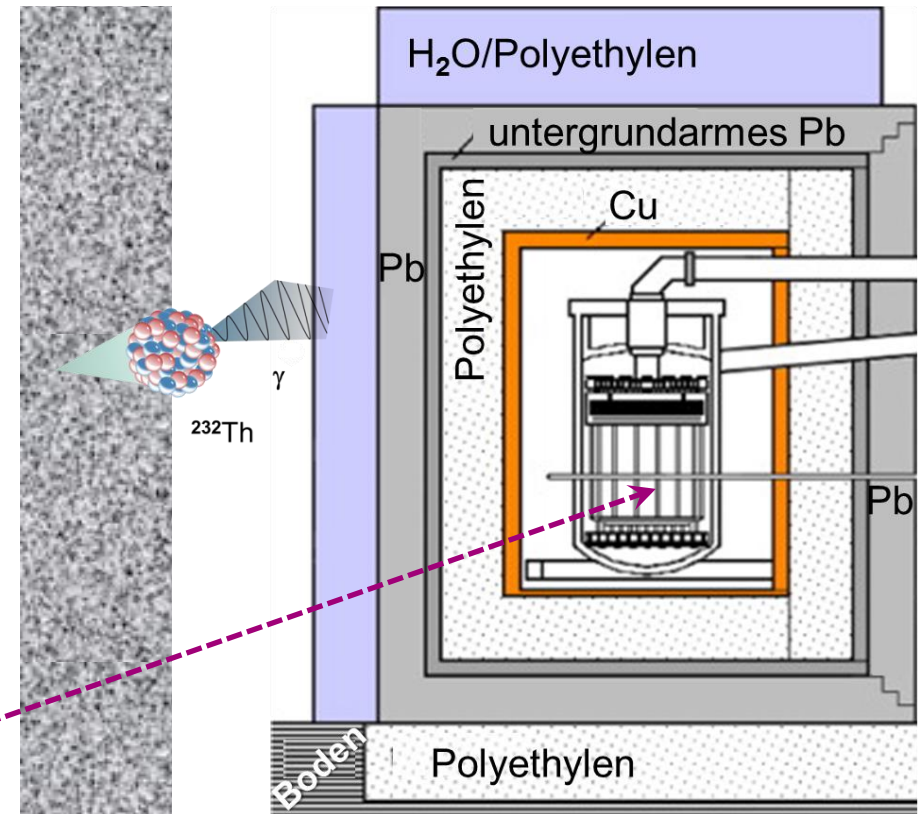
- **externer Veto** zur Identifikation von Myonen (Szintillator, Cherenkov)
 - ↳ Unterdrückung von Neutronen aus Myon-Reaktionen
- **massive Blei-Abschirmung**
 - ↳ Unterdrückung von Gammas
- **Polyethylen**
 - ↳ Moderierung von Neutronen
- **Reinst-Kupfer**
 - ↳ Unterdrückung der intrinsischen Gamma-Aktivität der Pb-Abschirmung



■ Ultimates Abschirm-Limit

(bei Targetmassen von 10-100 to.):

- solare Neutrinos
- atmosphärische Neutrinos



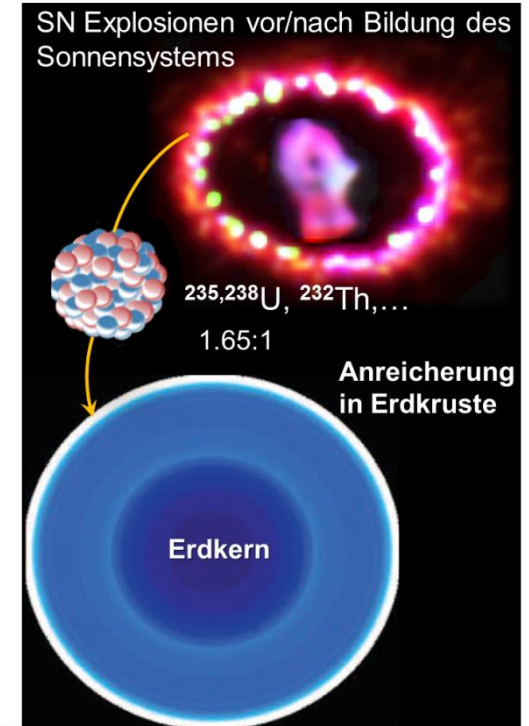
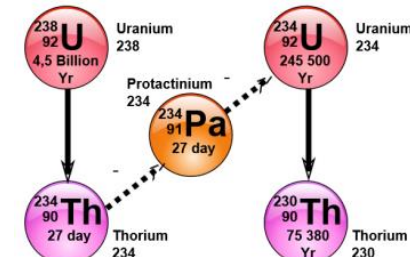
Zerfallsketten

■ 4 primordiale Zerfallsketten:

Name	Anfang-Ende	$t_{1/2}$ [a]	Masse A
Thorium	$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot j$
Neptunium	$^{237}\text{Np} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$	$2.1 \cdot 10^6$	$4 \cdot j + 1$
Uran	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	$4.5 \cdot 10^9$	$4 \cdot j + 2$
Aktinium	$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$	$7.1 \cdot 10^8$	$4 \cdot j + 3$

$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2$$

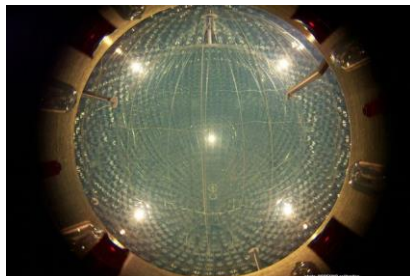
$$A_1 = A_2$$



■ Radon-Emanation

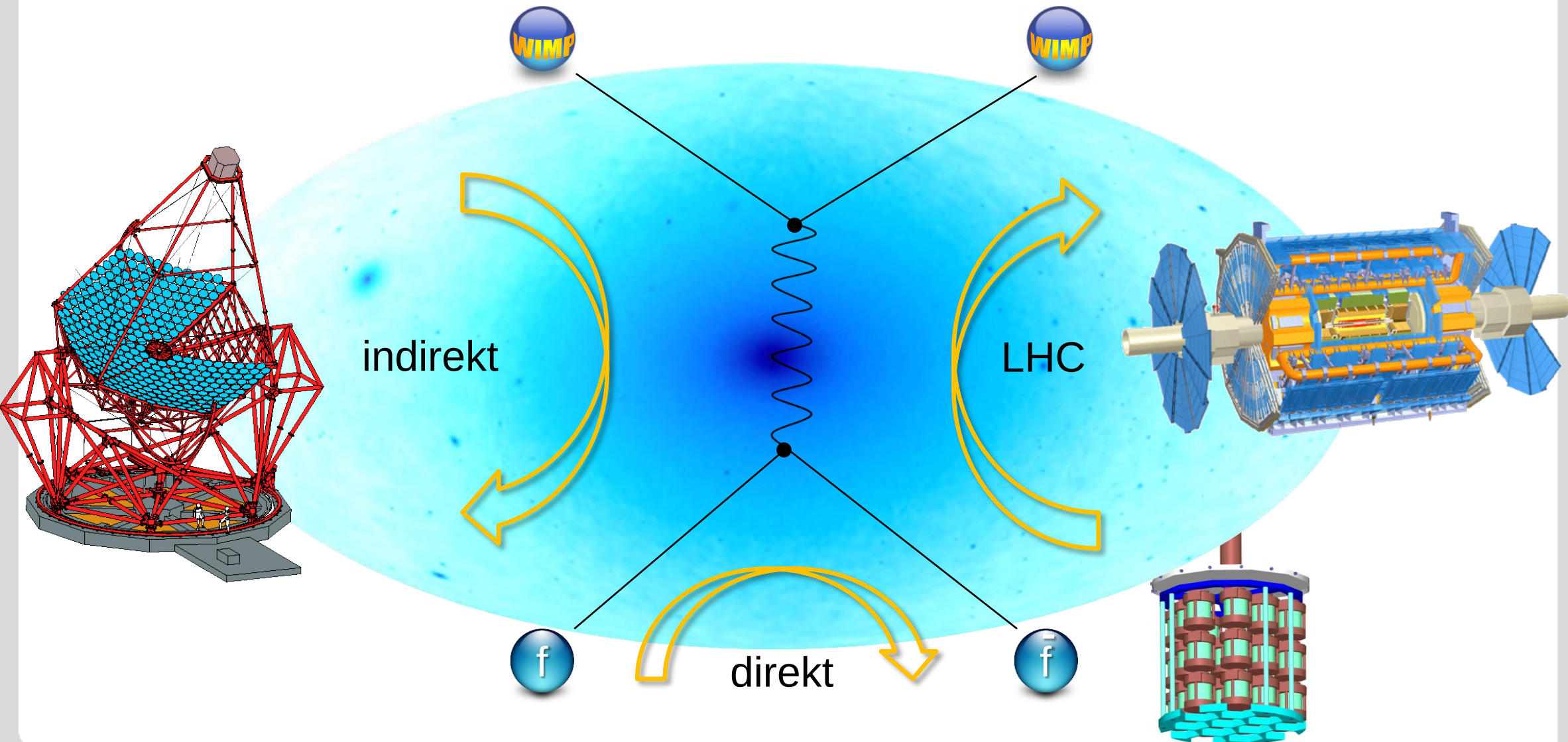
Erzeugung von Untergrund (α 's & Elektronen)

- **Radon-222**: Experimente zur Dunklen Materie, Sonnenneutrinos, $0\nu\beta\beta$ -Zerfall
- **Radon-219/220**: KATRIN



3. Dunkles Universum

Einführung, WIMP Kandidaten, Neutralino-Suche am LHC, indirekte Nachweismethoden, direkte Nachweismethoden, Axionen, Dunkle Energie

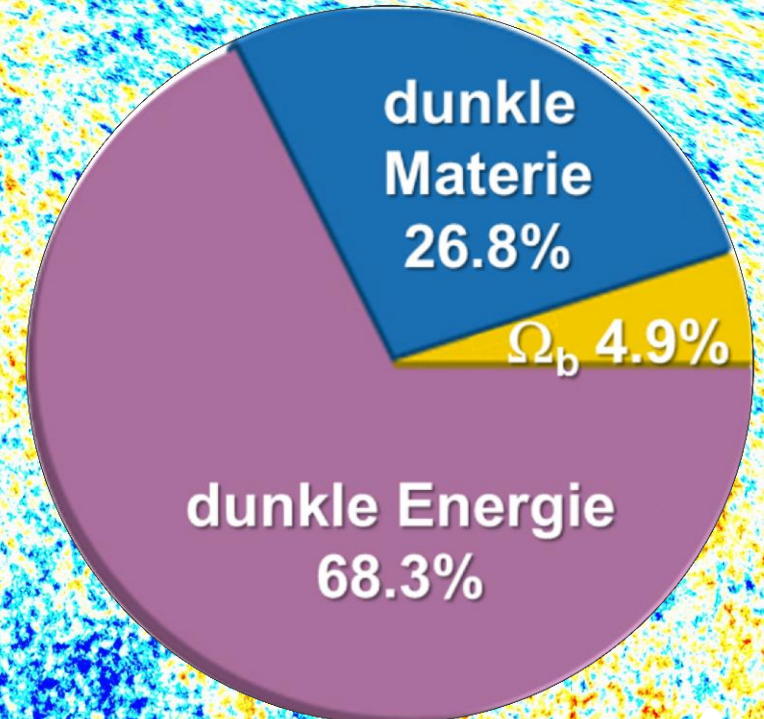


3.1 Einführung

- **Kalte Dunkle Materie** manifestiert sich auf allen kosmologischen (Gpc) & astrophysikalischen (Mpc - kpc) Skalen

- Teilchenphysikalischer Ursprung?

Halo aus
Dunkler Materie

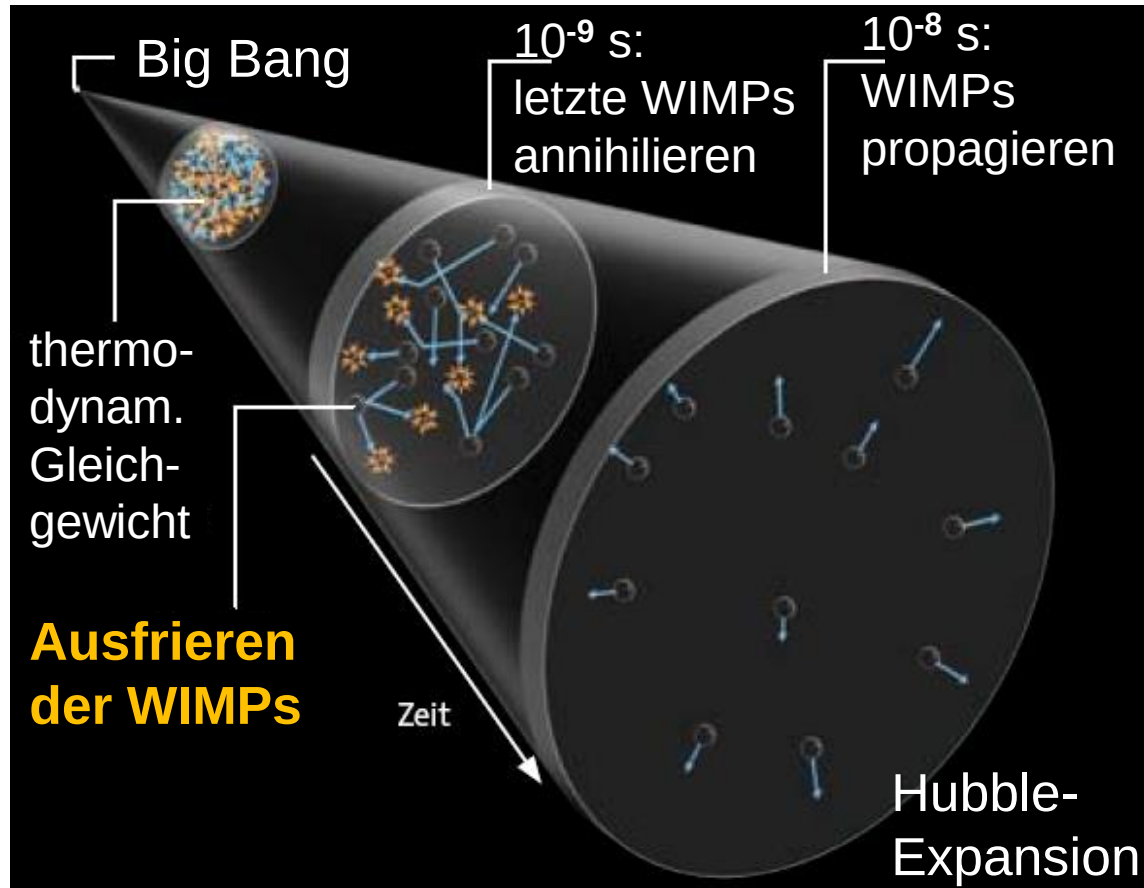


WIMPs im frühen Universum



■ Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs):

- nicht-baryonische, **thermische Relikte** aus dem Big Bang, die mit nicht-relativistischen Geschwindigkeiten propagieren
- Eigenschaften: nur schwach wechselwirkend, unterliegen der Gravitation



■ WIMP-Phasen:

- 1 – Erzeugung & Vernichtung im thermodynam. Gleichgewicht
- 2 – Entkopplung („Ausfrieren“)
- 3 – WIMP Propagation (nicht-relativistische Geschwindigkeit)

■ WIMP-Dichten:

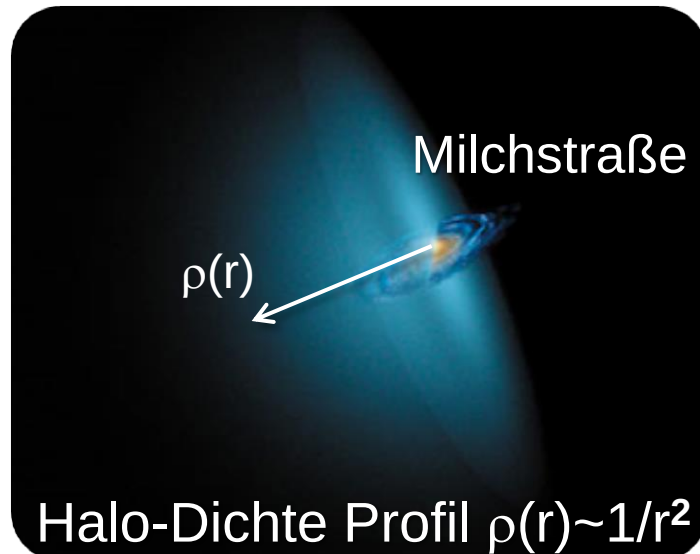
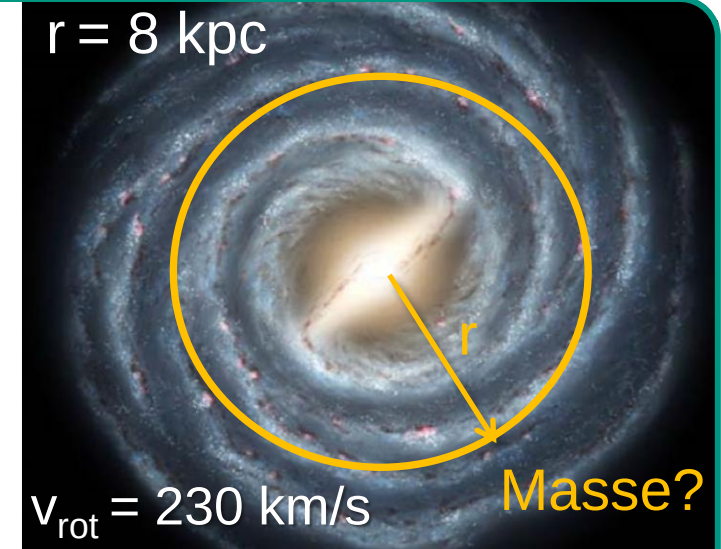
- im heutigen Universum (im Mittel)
 $\Omega_{\text{CDM}} \sim 0.27 \Leftrightarrow \rho_{\text{WIMP}} \sim 1 \text{ GeV/m}^3$

■ lokale WIMP Dichte ist wesentlich höher als *mittlere* WIMP-Dichte

- Abschätzung: Rotationsgeschwindigkeit der Sonne

$$\frac{v_{\text{rot}}^2}{r} = \frac{GM_r}{r^2} \quad \text{mit} \quad M_r = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho$$

$$\rho_{\text{lokal}} = \frac{3 v_{\text{rot}}^2}{4\pi r^2 G} \quad \Rightarrow \quad \rho_{\text{DM,lokal}} \sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3$$



$$\rho_{\text{DM,lokal}} \approx 10^5 \langle \rho_{\text{DM}} \rangle$$

- Lokale DM-Dichte:
wichtige Größe für
direkte WIMP Suche

$$\approx \rho_{\text{baryonisch}}$$



$$\rho_{\text{WIMP}} = 50 \text{ GeV}/150 \text{ cm}^3$$

3.2 WIMP-Kandidaten



schwache Wechselwirkung

$$\sigma_{EW} < 1 \text{ pb } (= 10^{-36} \text{ cm}^2)$$

energieabhängig

Standardmodell-Teilchen:

Neutrino-Wechselwirkung:

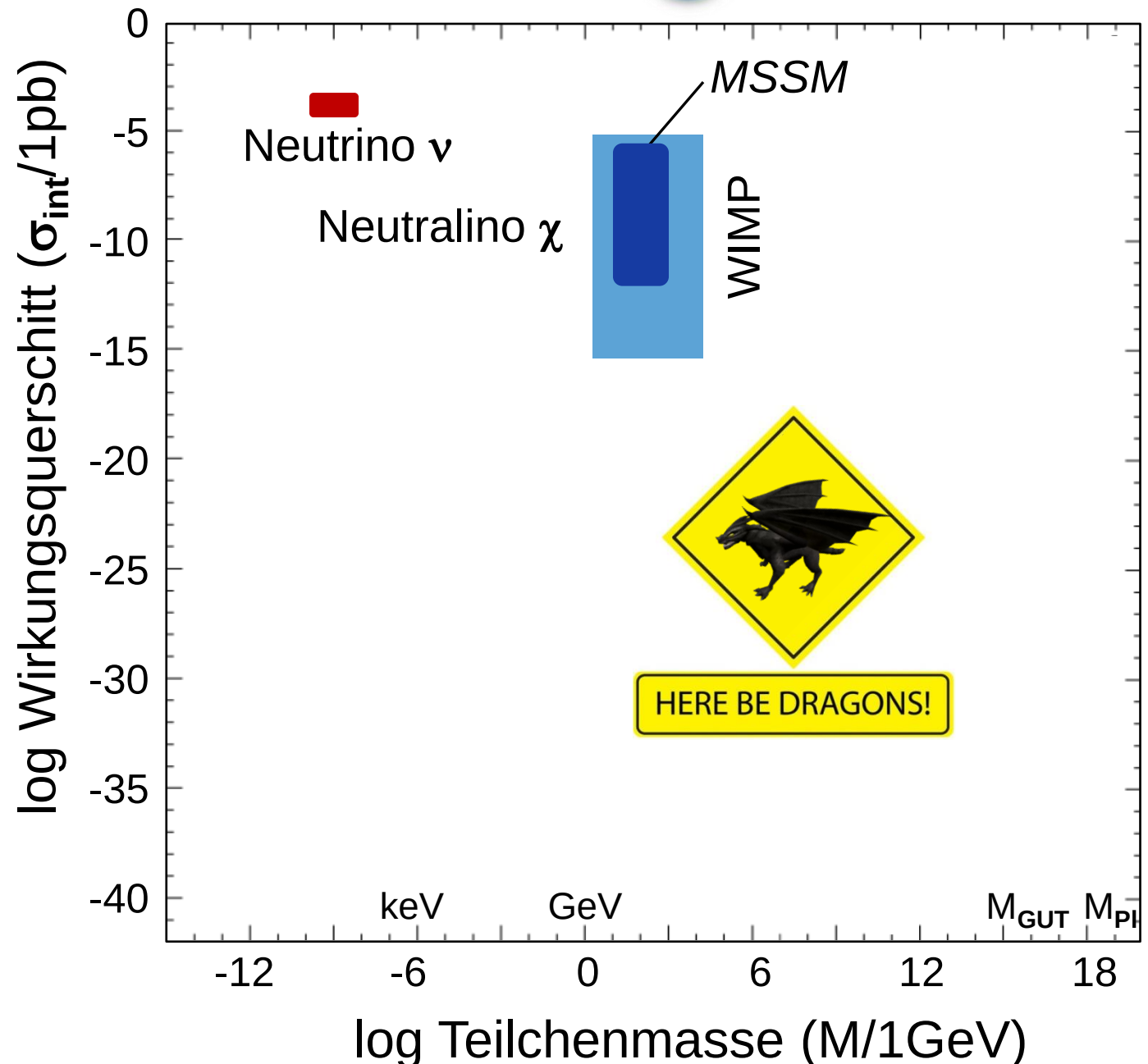
$$\begin{aligned}\sigma_{\nu,EW} &= 10^{-44} \dots 10^{-40} \text{ cm}^2 \\ &= 10^{-8} \dots 10^{-4} \text{ pb}\end{aligned}$$

Supersymmetrie-Teilchen:

Neutralino-Wechselwirkung:

$$\begin{aligned}\sigma_{\chi} &= 10^{-48} \dots 10^{-42} \text{ cm}^2 \\ &= 10^{-12} \dots 10^{-6} \text{ pb} \\ &\sim 10^{-2} \sigma_{\nu,EW}\end{aligned}$$

unterdrückt relativ zu $\sigma_{\nu,EW}$
durch Mischungseffekte



WIMP-Teilchenkandidaten für CDM

Axion

leichtes ($10^{-6} \dots 10^{-3}$ eV) WIMP, entsteht bei **nichtthermischen** Prozessen, postuliert in vielen String-Theorien, CP in der QCD

Axino

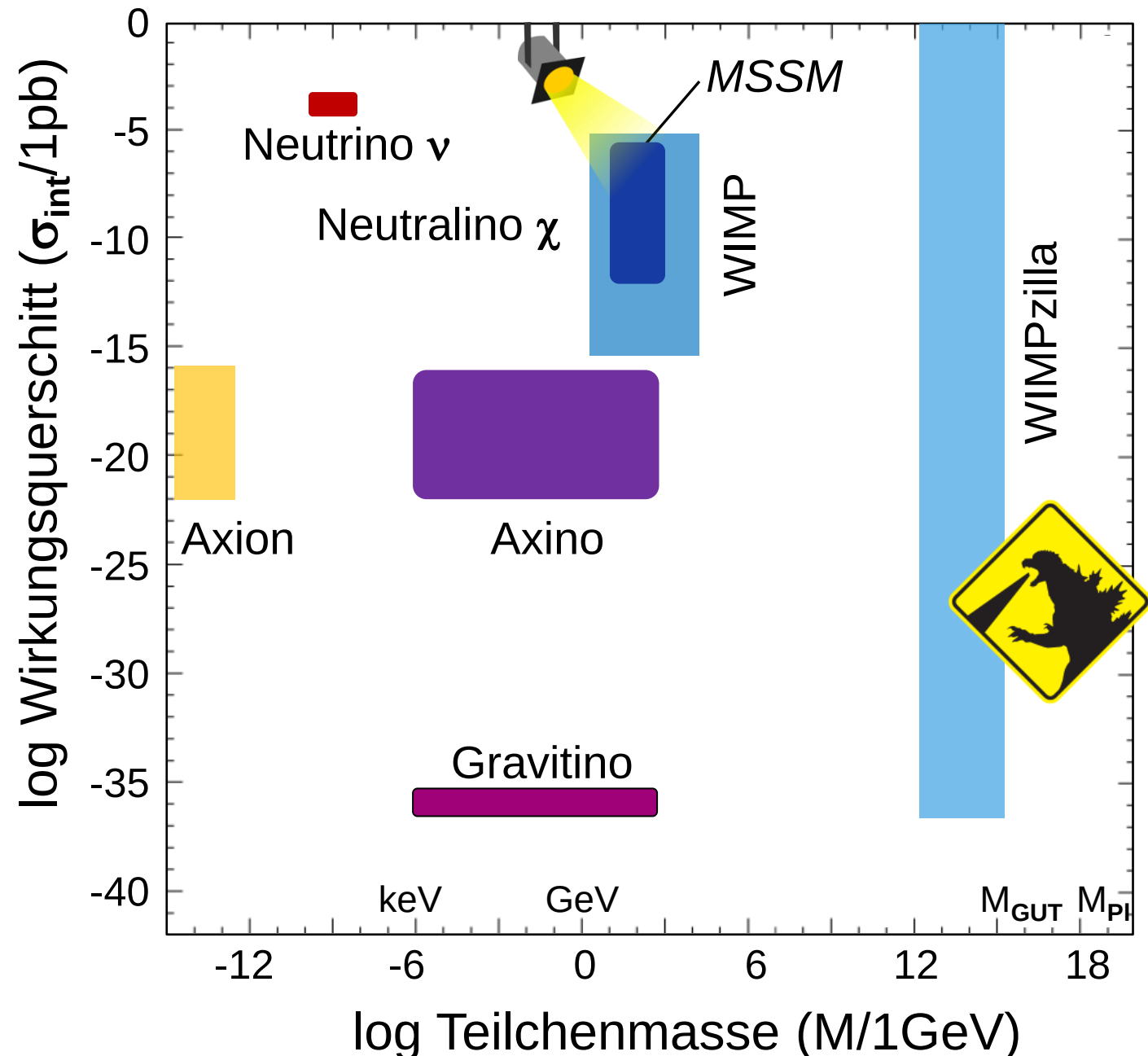
SUSY-Partner des Axions, aus Zerfällen von SUSY-Teilchen

Gravitino

SUSY-Partner des Gravitons, nur gravitative Wechselwirkung

WIMPzilla

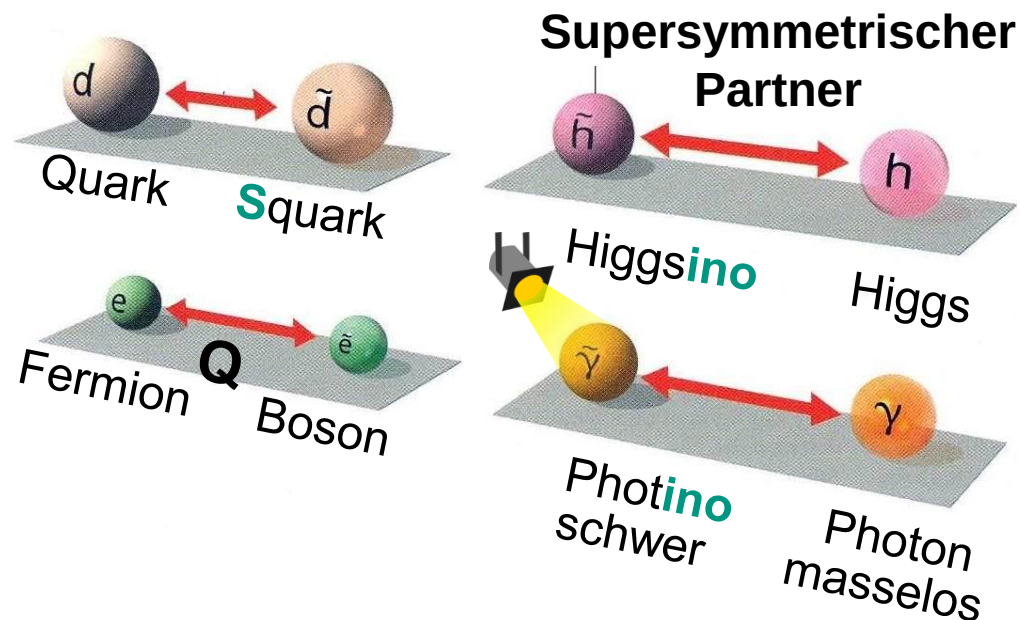
extrem massereiche, nichttherm. Relikte (Krümmungseffekte)



Supersymmetrie (SUSY)

■ Supersymmetrie: Bosonen $\leftrightarrow$ Fermionen

- SUSY postuliert Superpartner zu den SM-Teilchen
- neutraler Superpartner (χ^0) : idealer WIMP Kandidat (CDM)



■ Spin differiert um $\Delta s = \frac{1}{2}$

$$\begin{aligned} Q |Boson\rangle &= |Fermion\rangle \\ Q |Fermion\rangle &= |Boson\rangle \end{aligned}$$

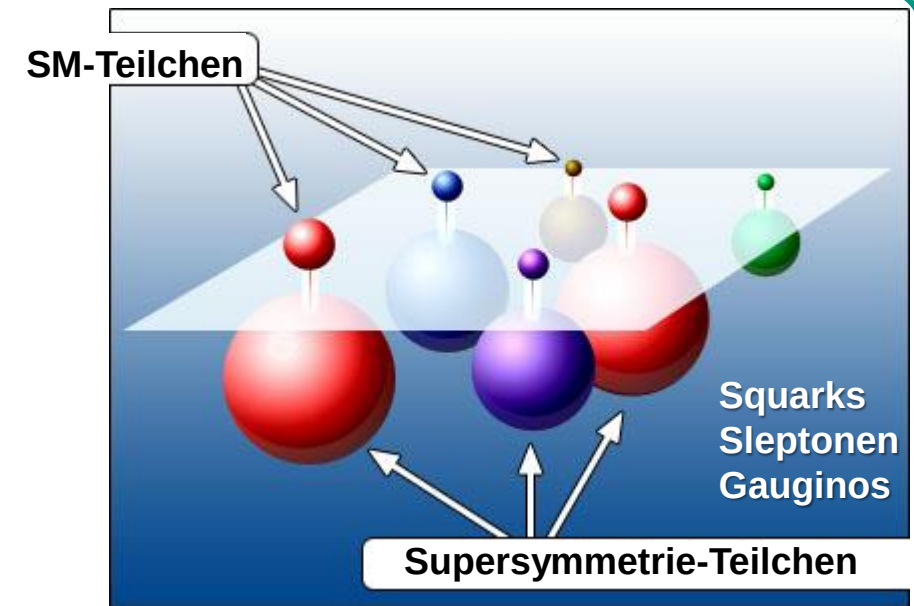
Q: SUSY-Operator mit Spin $\frac{1}{2}$
transformiert **Boson** $\leftrightarrow$ **Fermion**
 $\Rightarrow$ SUSY = Raumzeit-Symmetrie

- 1973: erste supersymmetrische Quantenfeldtheorie (**Wess-Zumino Modell**) durch Julius Wess (Karlsruhe) Bruno Zumino (CERN)



Julius Wess
(1934-2007)
Leiter des KIT Instituts
für Theoretische Physik
von 1968-1990

- **Supersymmetrie – eine spontan gebrochene Symmetrie:**
 - quantenmechanisches Vakuum ist nicht invariant unter einer supersymmetrischen Transformation, sonst wären Massen von SM- & SUSY Teilchen gleich

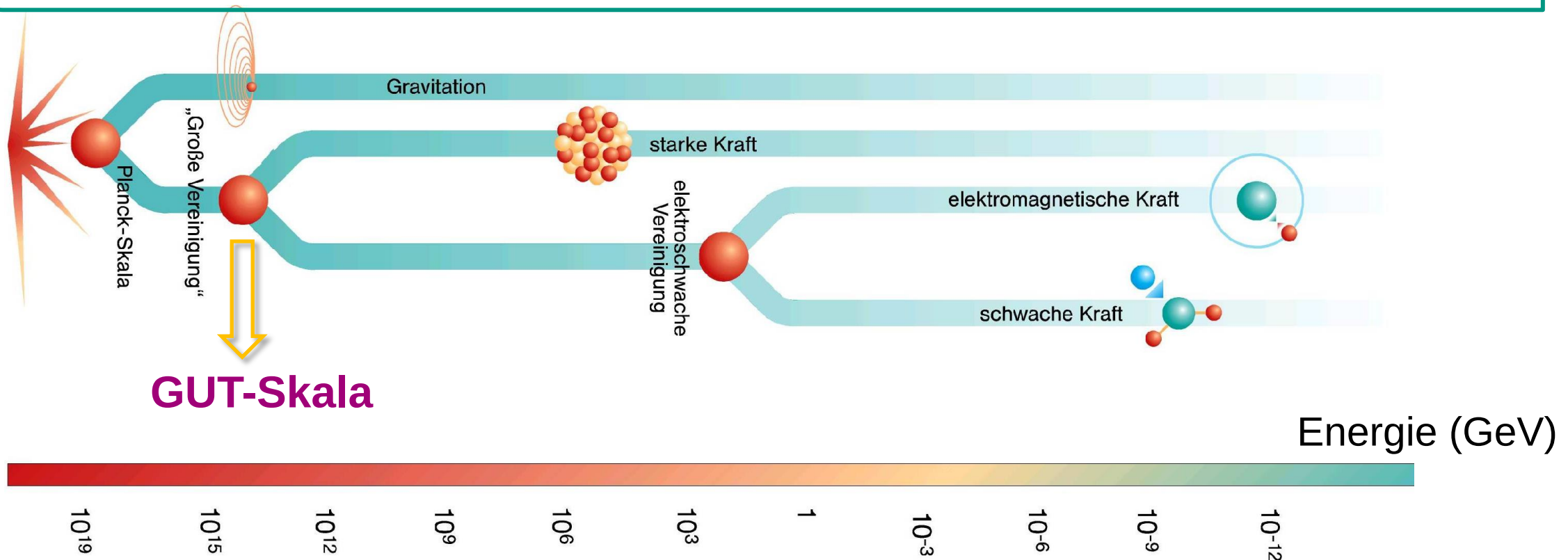


- ↪ **Massenunterschiede zwischen SM- und SUSY-Teilchen!**
SM-Teilchenmassen $\ll$ SUSY-Teilchenmassen (0.1-10 TeV)
- ↪ Skala der Symmetriebrechung wird erwartet bei Energien ~ 1 TeV
dadurch: Lösung des **Hierarchieproblems** $M_H \ll M_{\text{Planck}}$
(2012: leichtes SM-Higgs-Boson mit Masse $M_H = 125$ GeV)
- ↪ weshalb Symmetriebrechung bei ~ 1 TeV? (neues Hierarchie-Problem!)

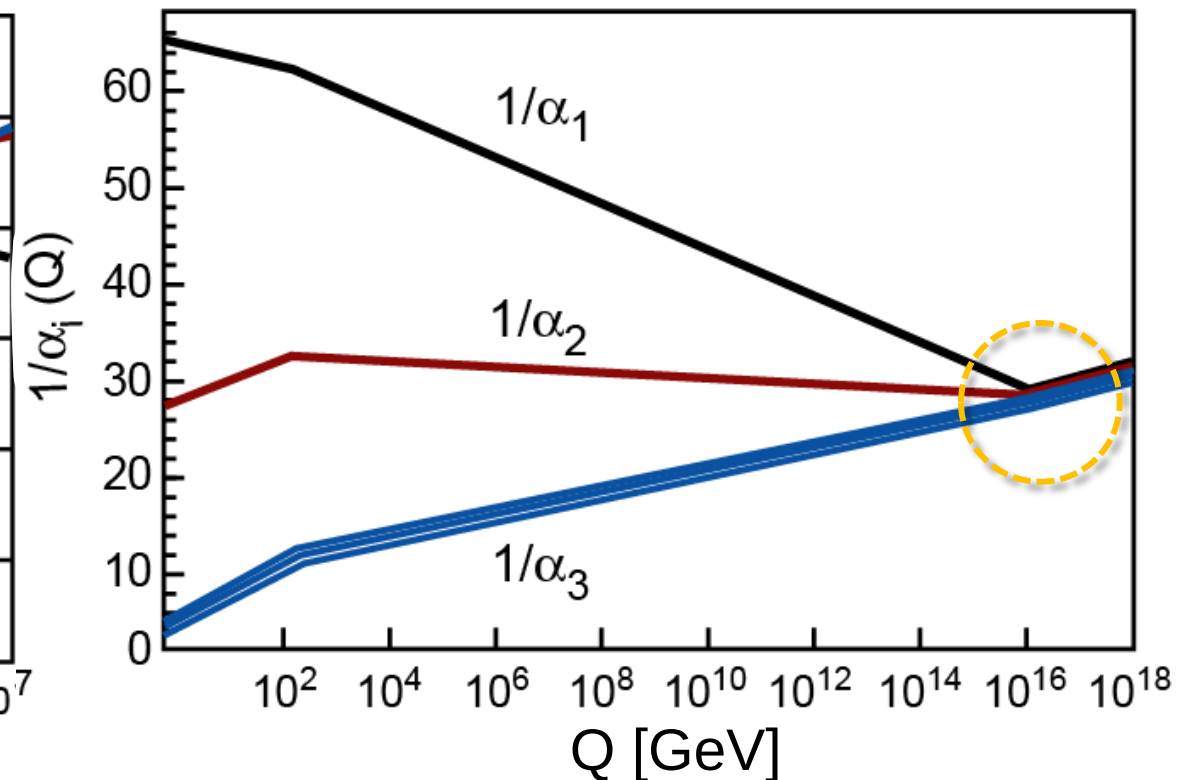
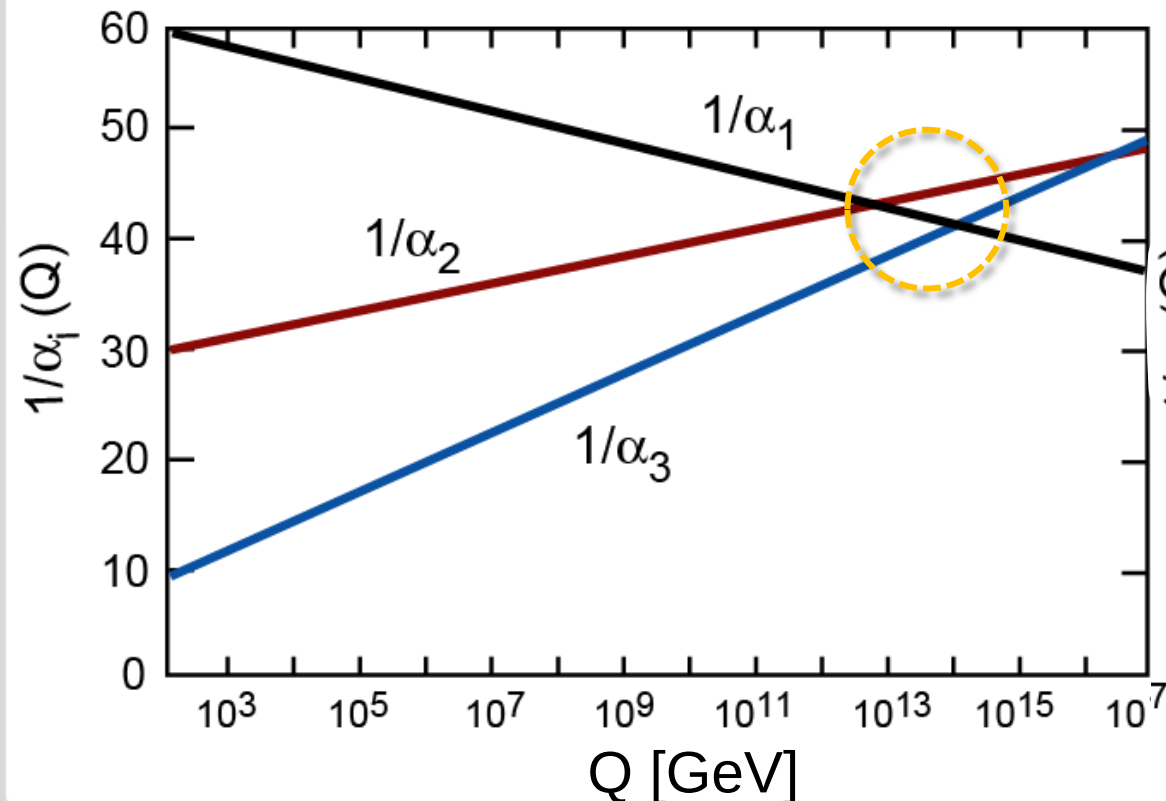
■ Indirekte Hinweise auf SUSY-Existenz durch:

- Vereinheitlichung der energieabhängigen Eichkopplungen $\alpha_i(E)$ der drei Wechselwirkungen (elektromagnetisch, schwach, stark) bei einer (extrem hohen) Energieskala $\Lambda_{\text{GUT}} < M_{\text{Planck}}$

↪ **Grand Unified Theorien (GUTs)**



- **Verlauf der** Eichkopplungen: α_1 : elektromagnetisch α_2 : schwach α_3 : stark
- **Standardmodell (SM):** kein Schnittpunkt der 3 Eichkopplungen α_i
- **Minimales supersymmetrisches Standardmodell (MSSM):**
Eichkopplungen werden vereinigt bei $M_{\text{GUT}} \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ GeV}$



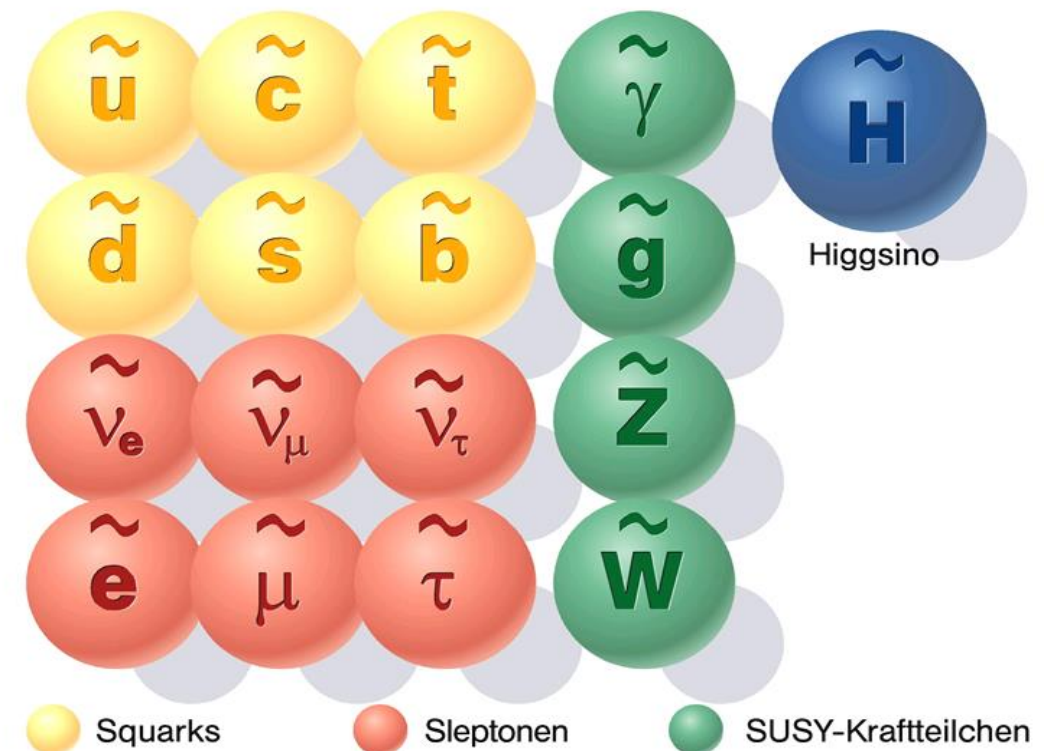
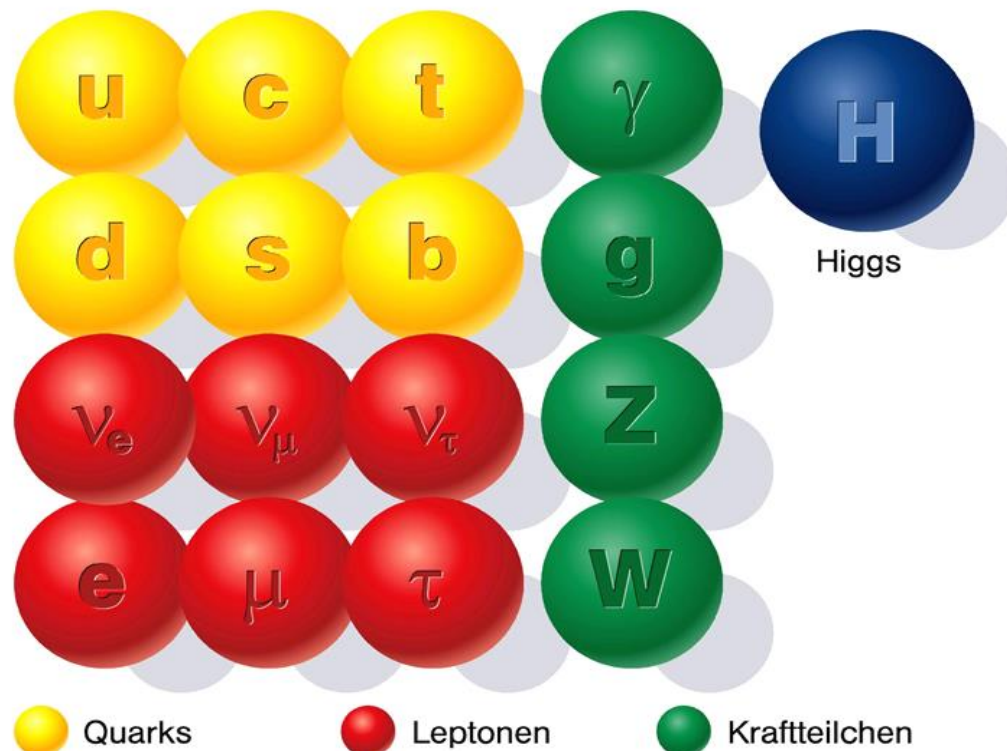
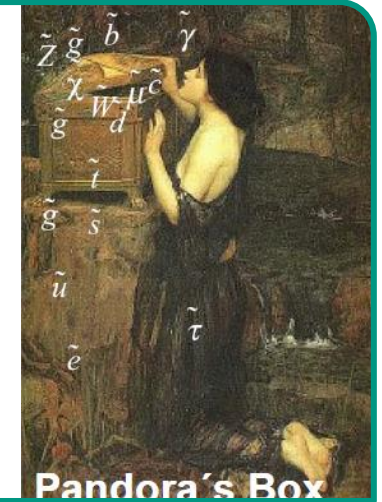
Supersymmetrie: MSSM

■ MSSM

Minimales Supersymmetrisches Standard Modell):

105 neue physikalische Parameter:

- Teilchenmassen (Skalare, Gauginos,...),
- CP-Phasen
- Mischungswinkel



Supersymmetrie: cMSSM

■ cMSSM (constrained MSSM)

Reduktion auf **5 physikalische Parameter**

↪ vereinheitlichte Teilchen-Massen bei GUT-Skala

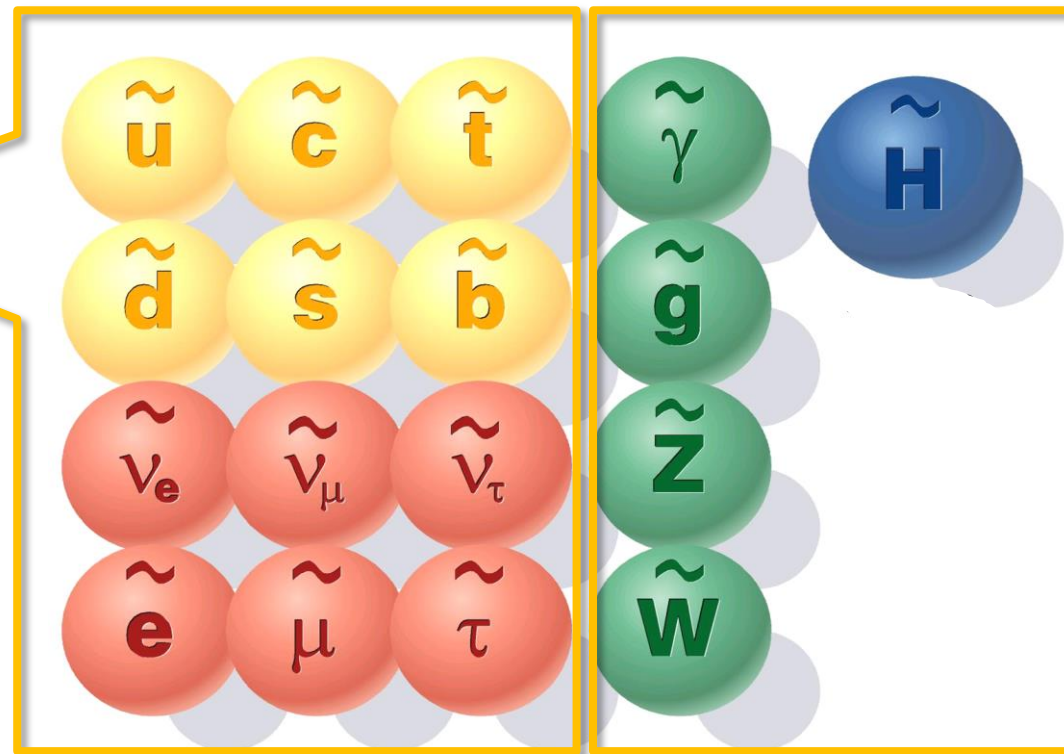
$m_{1/2}$ = Masse aller Spin $1/2$ SUSY-Teilchen

m_0 = Masse aller skalaren SUSY-Teilchen



skalare
Teilchen
 m_0

Squarks
Sleptonen

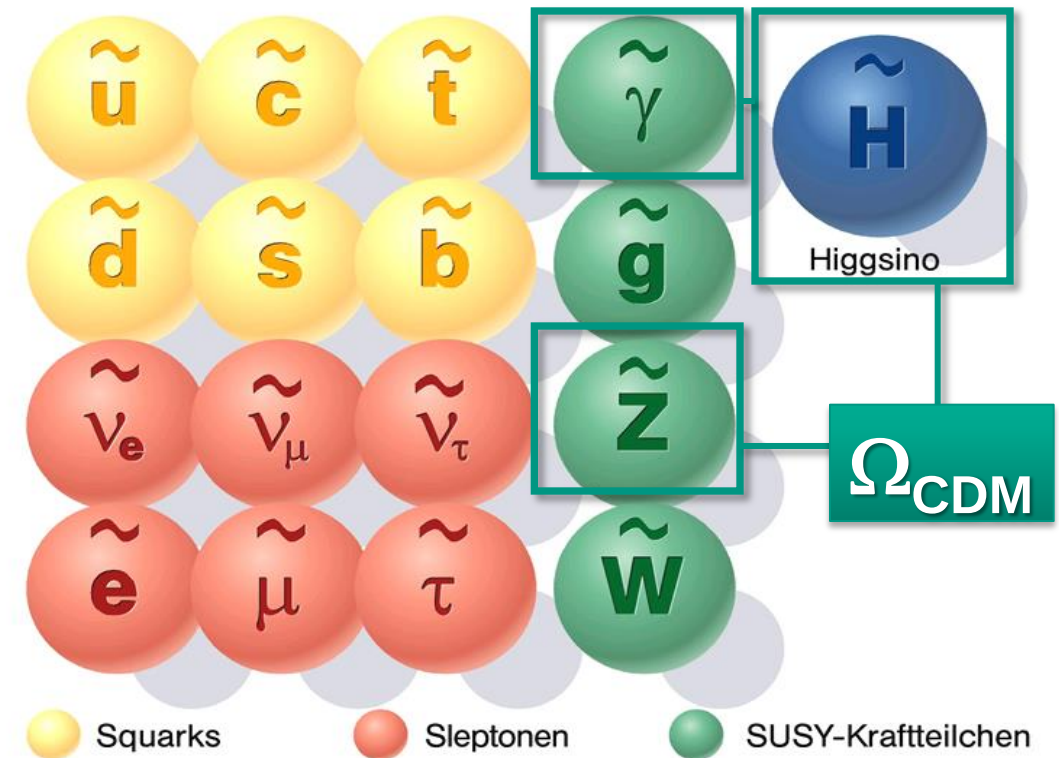
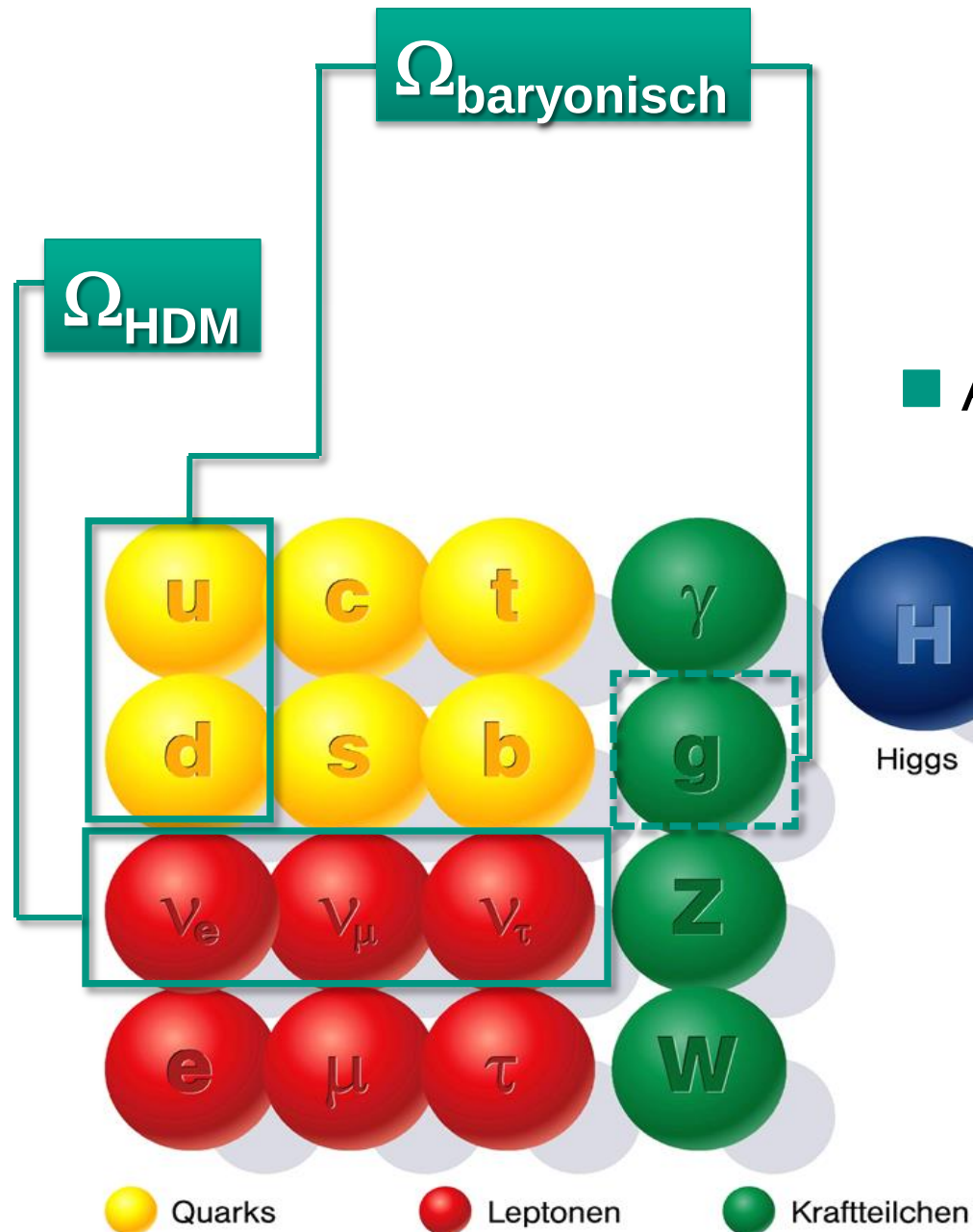


Spin $1/2$
Teilchen
 $m_{1/2}$

Supersymmetrie

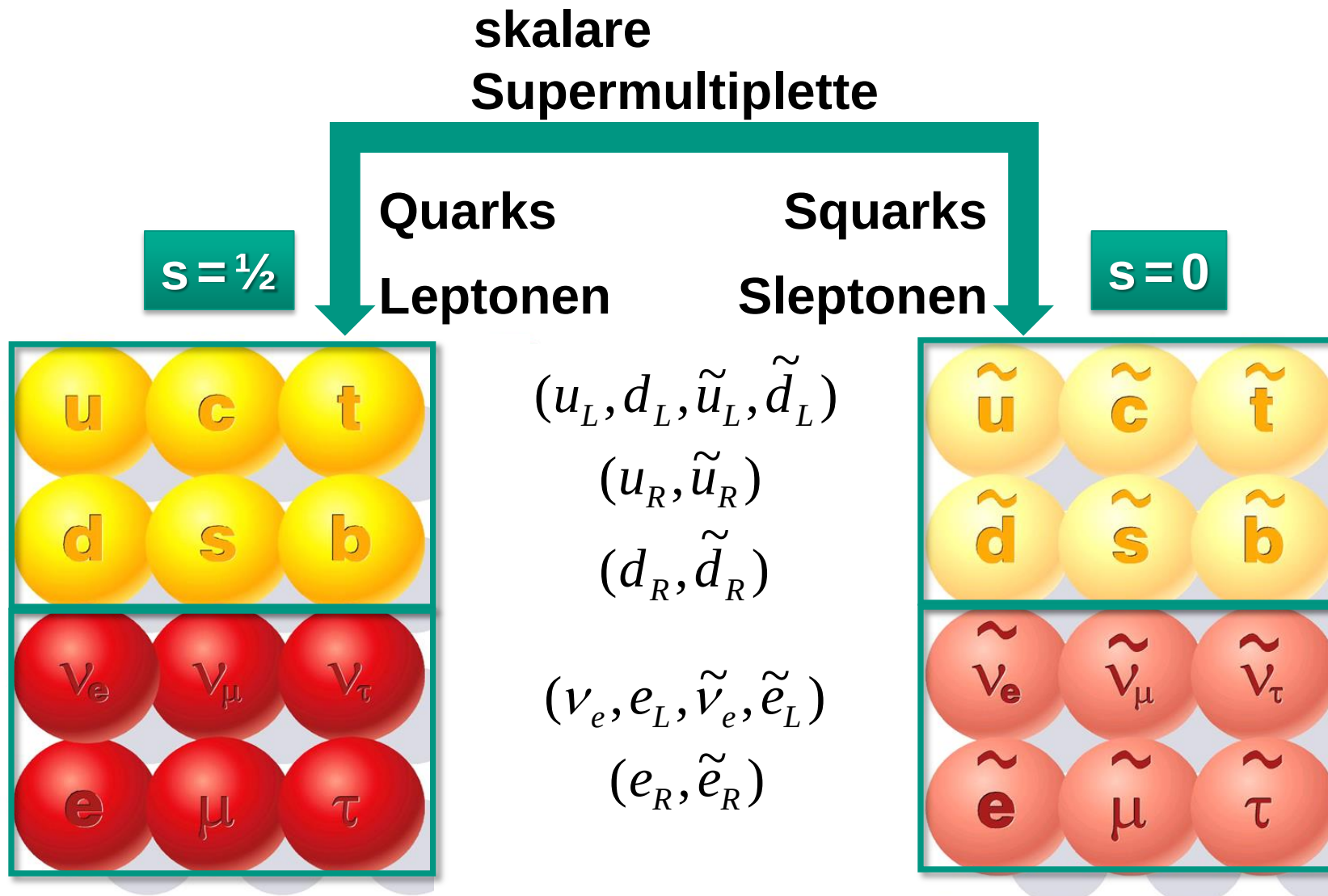


■ Aufbau der Materie: Baryonen, CDM, HDM

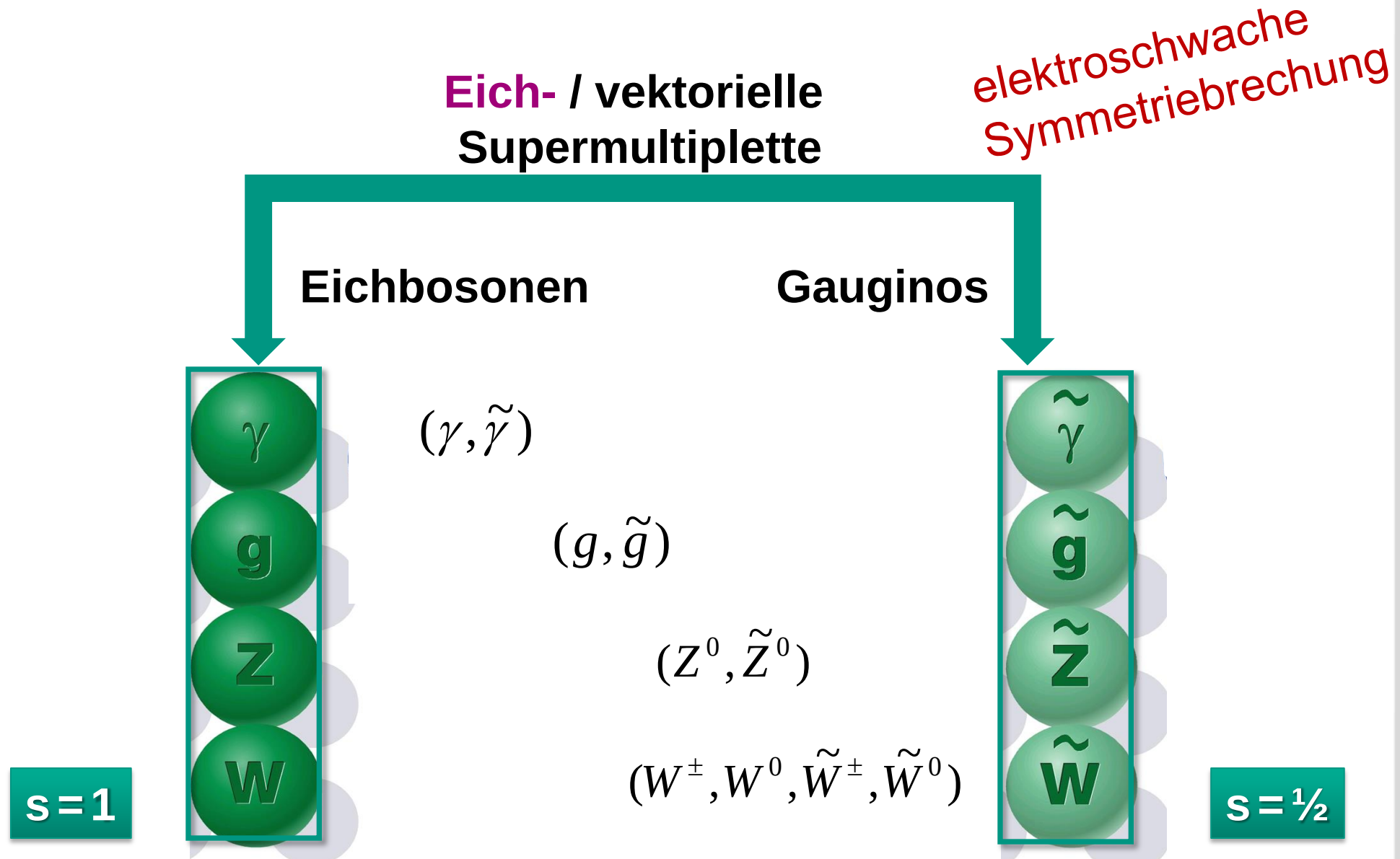


Supermultiplette – Quarks & Leptonen

- **Supermultiplette:** SM-Teilchen & Superpartner mit $N_{\text{Fermionen}} = N_{\text{Bosonen}}$



Supermultiplette – Eichbosonen



Supermultiplette – Higgsbosonen

2 Higgs-Multiplette: $Y = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

$$H_u (H_u^+, H_u^0, \tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0) \text{ für } Q = +\frac{2}{3} e$$

$$H_d (H_d^-, H_d^0, \tilde{H}_d^-, \tilde{H}_d^0) \text{ für } Q = -\frac{1}{3} e, \ell^\pm$$



Supermultiplette

Higgs

Higgsino

5 physikal. Zustände: $h, H, A, H^\pm$



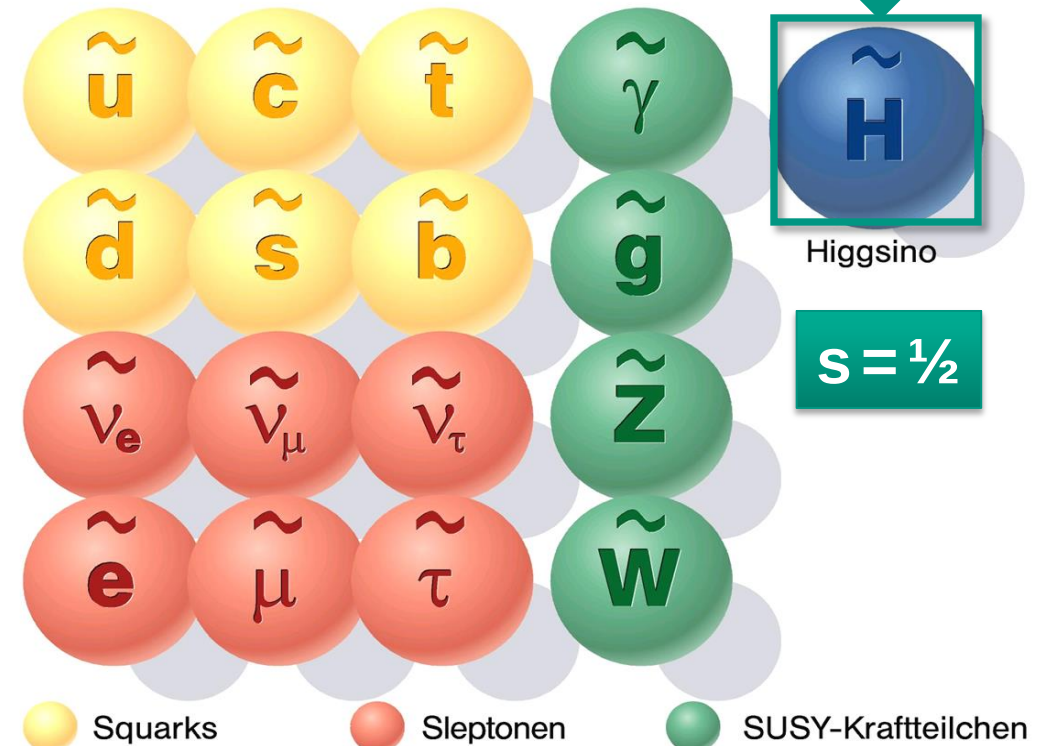
Higgs

$s = 0$



Higgsino

$s = \frac{1}{2}$



- **Supergravitation:** unter Einbeziehung der Gravitation wird SUSY von einer globalen in eine **lokale Eichsymmetrie** erhoben

- **Gravitino $\tilde{G}$** ($s = 3/2$) mit Masse $m_{3/2}$
Superpartner von Graviton G ($s = 2$)

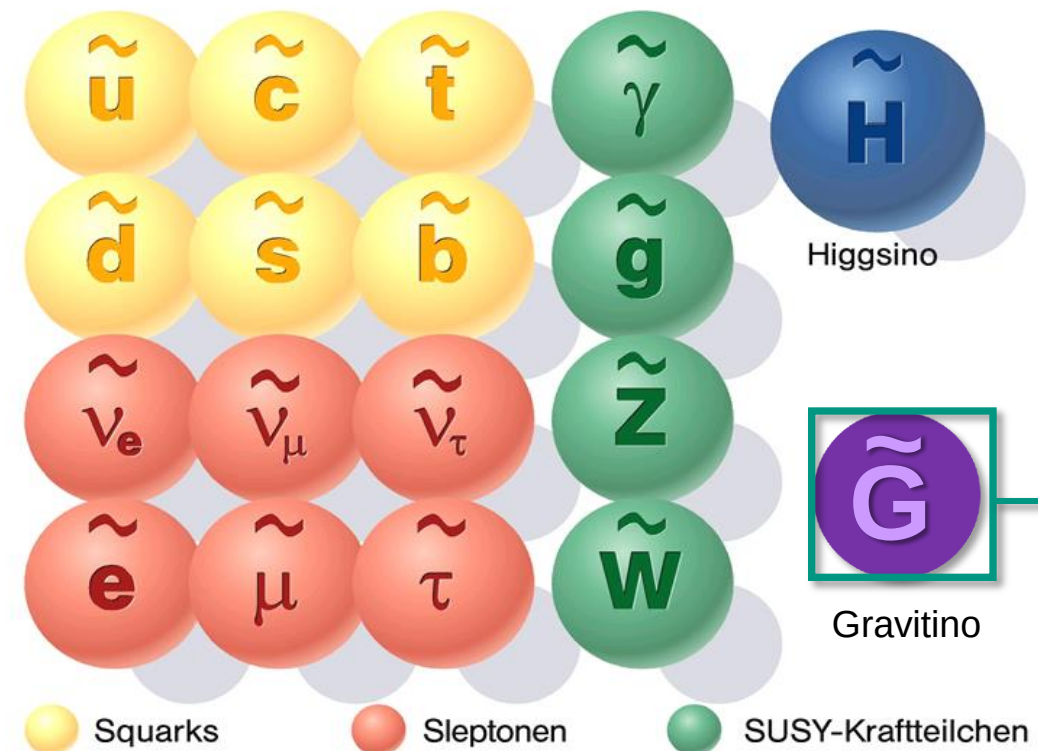
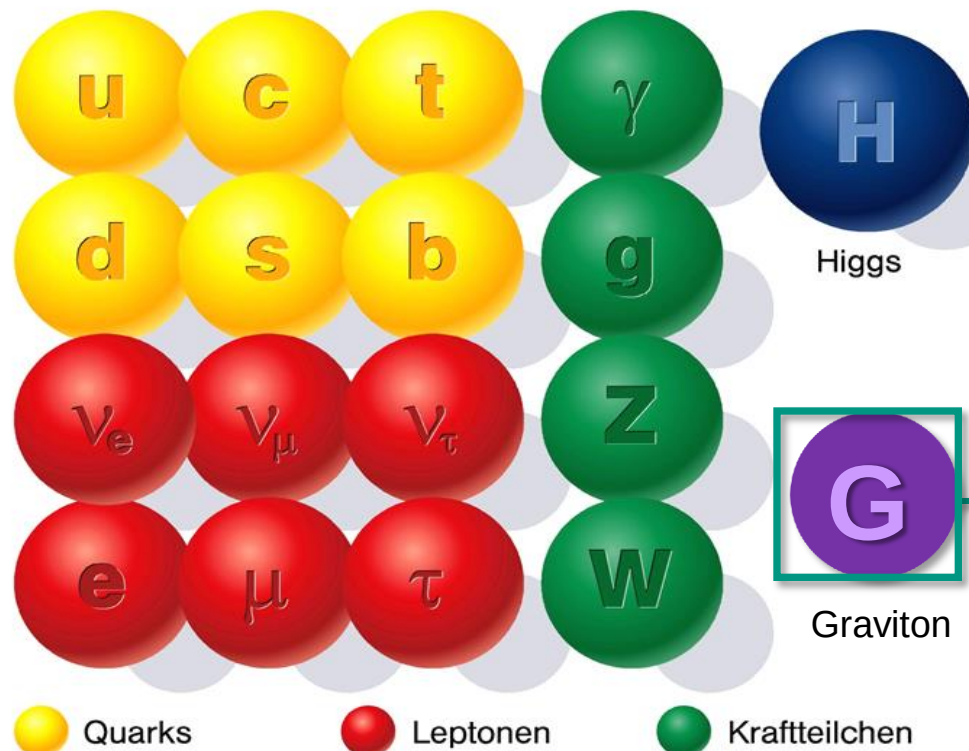
$s = 2$

$(G, \tilde{G})$

$s = 3/2$

Graviton

Gravitino



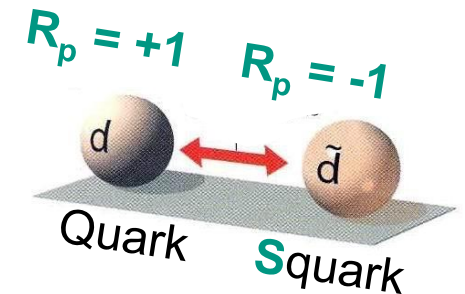
Supersymmetrie: R-Parität & LSP

- leichtestes SUSY Teilchen (LSP) als WIMP-Kandidat muss kosmologisch stabil sein
- Einführung einer neuen multiplikativen Quantenzahl **R-Parität R_p**

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

bzw.

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



R_p verknüpft mit **B**: Baryonenzahl, **L**: Leptonzahl, **S**: Spin

- SM-Teilchen: $R_p = +1$ (gerade) $\Leftrightarrow$ Superpartner: $R_p = -1$ (ungerade)
➡ **Superpartner können nur in Superpartner zerfallen**

- Konsequenz:
leichtestes SUSY Teilchen mit $R_p = -1$ ist stabil:
LSP (Lightest Supersymmetric Particle)
➡ **stabiles LSP ist WIMP-Kandidat für CDM**

■ Eigenschaften des LSP:

- keine elektromagnetische/starke Wechselwirkung
- neutral, da keine gebundenen Zustände mit Baryonen (Bsp: Auftreten exotischer Isotope) beobachtet

↪ keine Squarks, geladene Sleptonen, Charginos, ... als LSP!

■ neutrale Superpartner in der SUSY:

- **Sneutrinos** ($s=0$, Skalare: $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$)



$s=0$

- **Gravitinos** ($s=3/2$, Fermionen: $\tilde{G}$)



$s=3/2$

- **Gauginos** / neutrale Eichbosonen ($s=1/2$, Fermionen)
Photino $\tilde{\gamma}$, Zino $\tilde{Z}^0$ & 2 neutrale Higgsinos $\tilde{H}^0$



$s=1/2$

■ Sneutrinos als LSP ?

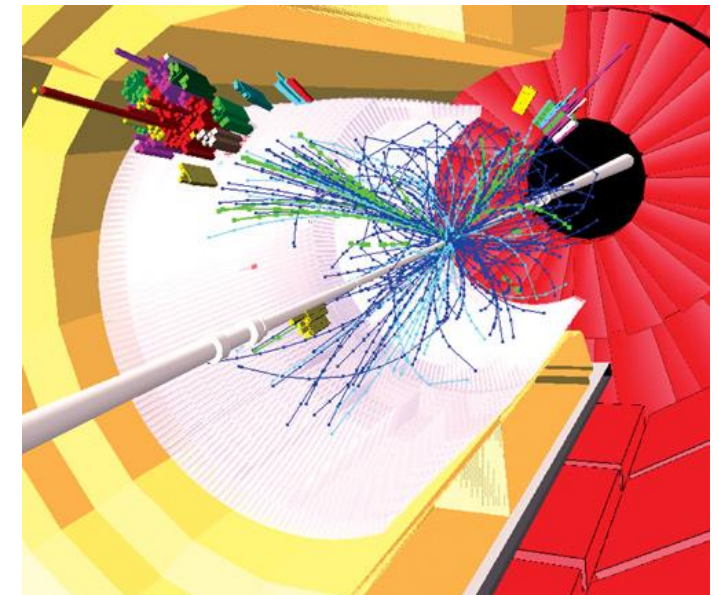
- **Sneutrinos** = skalare Superpartner der SM-Neutrinos ν_e, ν_μ, ν_τ
- ebenfalls rein linkshändig (schwache Wechselwirkung)
- identische Wechselwirkungsstärke relativ zu ν 's
- Sneutrinos mit $M(\tilde{\nu}) > 100 \text{ GeV}$ sind nicht die dominante CDM-Komponente, da dann ihre Dichte im Universum durch rasche Annihilationsprozesse vor dem Ausfrieren zu gering ist



$$(\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau)$$

■ Sneutrinos-Limits an Beschleunigern

- LEP: Z^0 Breite schließt $M(\tilde{\nu}) < 45 \text{ GeV}$ aus
- am LHC bisher keine Hinweise auf Sneutrinos
- Massengrenze $M(\tilde{\nu}) > 0.5 - 1 \text{ TeV}$ (2011)



Mischungen von Gauginos & Higgsinos

■ SUSY-Teilchen mit identischen Quantenzahlen mischen!

analoge Mischungs-Effekte wie bei SM-Teilchen
(Beispiel: Neutrinos, vgl. Kap. 4.2 in ATP-II)

Flavour-Eigenzustände

Gauginos & **Higgsinos** = Flavour-Eigenzustände

↪ existieren nur zum Zeitpunkt ihrer Wechselwirkung

↪ diese Zustände haben keine definierte Masse!



Massen-Eigenzustände

Neutralinos & **Charginos** = Massen-Eigenzustände

↪ WIMPs während ihrer Propagation (Universum)

↪ die Flavour-Anteile definieren die Wechselwirkungsstärke (z.B. bei Annihilation, Streuung)!



■ elektroschwache Gauginos (4) und Higgsinos (4) mischen zu:

- **4 Neutralinos** (4 Massen-Eigenzustände)
- **4 Charginos** (2 Masseneigenzustände mit je 2 Ladungszuständen)

Charginos:

- die 2 geladenen SUSY-Gauginos, d.h. die Wino-Eichbosonen $\tilde{W}^+ \tilde{W}^-$ & die 2 geladenen Higgsinos $\tilde{H}^+, \tilde{H}^-$ weisen identische Quantenzahlen auf:
↳ Mischung zu 2 Fermion-Massenzuständen, den **Charginos** $\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$

Flavourbasis

$$\tilde{W}^+ \quad \tilde{W}^- \quad \tilde{H}_u^+ \quad \tilde{H}_d^-$$

Mischungs-



Matrix

Massenbasis

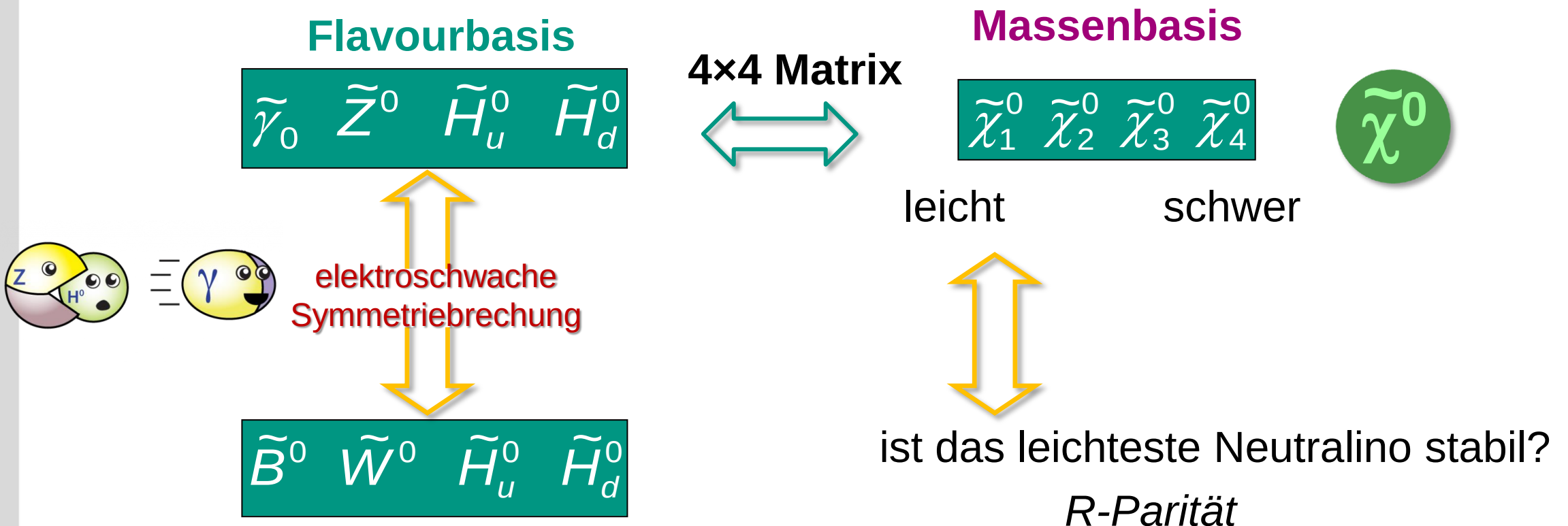
$$\tilde{\chi}_1^\pm \quad \tilde{\chi}_2^\pm$$

leicht schwer



Neutralinos:

- die 2 neutralen supersymmetr. Eichbosonen (Gauginos) Bino $\tilde{B}^0$ & Wino $\tilde{W}^0$ (bzw. Photino $\tilde{\gamma}$ & Zino $\tilde{Z}^0$) & die 2 neutralen Higgsinos $\tilde{H}^0$ haben identische Quantenzahlen & mischen zu den **4 Neutralinos χ^0**



■ thermische Erzeugung:

- Teilchen sind im heißen frühen Universum im thermischen Gleichgewicht durch Wechselwirkungsprozesse
- bei Ausfrieretemperatur T_{fr} wird Häufigkeit Ω_i und free-streaming Länge λ_i (CDM/HDM) festgelegt
- Beispiel: LH Neutrinos ν_i (**HDM**), LH Sneutrinos $\tilde{\nu}_i$ Neutralinos $\tilde{\chi}^0$ (**CDM**)



■ nicht-thermische Erzeugung:

- Teilchen sind im heißen frühen Universum **nicht** im thermischen Gleichgewicht, ihre Wechselwirkungsprozesse sind zu schwach
- Häufigkeit Ω_i daher festgelegt durch Zerfallsraten der Mutterteilchen, Oszillationsraten
- Beispiel: RH Neutrinos ν_i (**WDM**), RH Sneutrinos $\tilde{\nu}_i$ Axionen a (**CDM**)



- **leichtestes Neutralino** $\tilde{\chi}_1^0$: Linearkombination aus Bino, Wino & Higgsinos

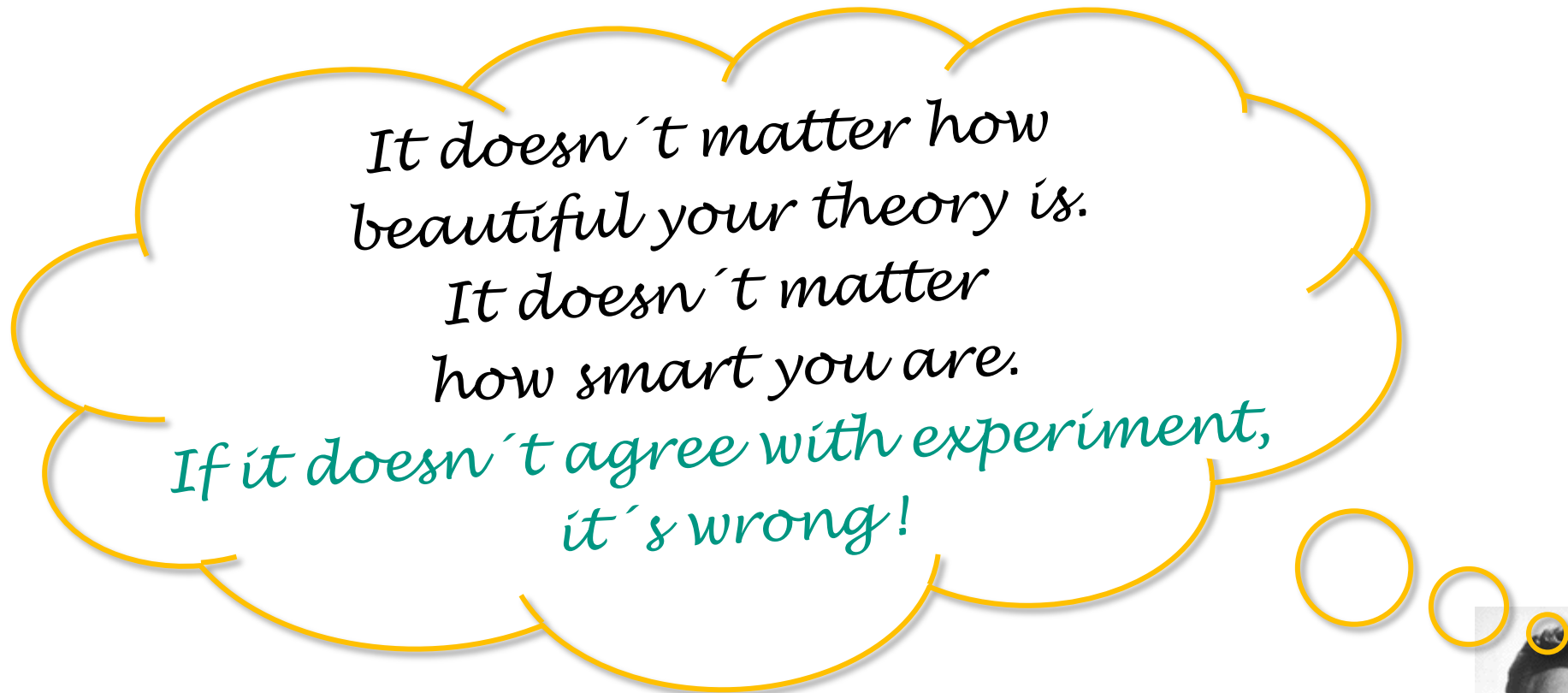


$$\tilde{\chi}_1^0 = c_1 \cdot \underbrace{\tilde{B}^0}_{\text{Gaugino-Anteil}} + c_2 \cdot \underbrace{\tilde{W}^0}_{\text{Gaugino-Anteil}} + c_3 \cdot \underbrace{\tilde{H}_u^0}_{\text{Higgsino-Anteil}} + c_4 \cdot \underbrace{\tilde{H}_d^0}_{\text{Higgsino-Anteil}}$$

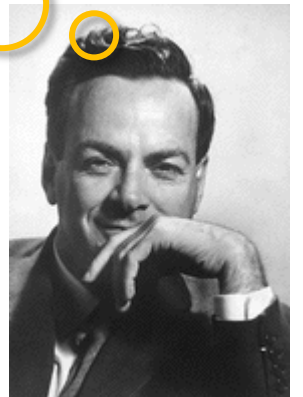
- Parameter c_i sind sehr stark modellabhängig:
 - MSSM: Erwartung $c_1 \gg c_2, c_3, c_4$ (LSP = Bino)
 - NLSP ist das Wino, Higgsinos sind i.a. sehr schwer
 - NUHM: $c_{3,4}$ dominant (Higgsino)

- **leichtestes supersymmetrisches Neutralino** χ_1^0 **ist als LSP ein idealer WIMP-Kandidat für CDM** (aber Massen $m_{1/2} < 1.5$ TeV erforderlich!)

Eigenschaften: neutral, nur schwach wechselwirkend, Fermion mit $s = 1/2$
kosmologisch stabil (da R_p -Erhaltung),
Majorana-artig: **Neutralino ist sein eigenes Antiteilchen**
schwer (TeV-Skala), daher nicht-relativistisch bei T_{fr}



Richard P. Feynman



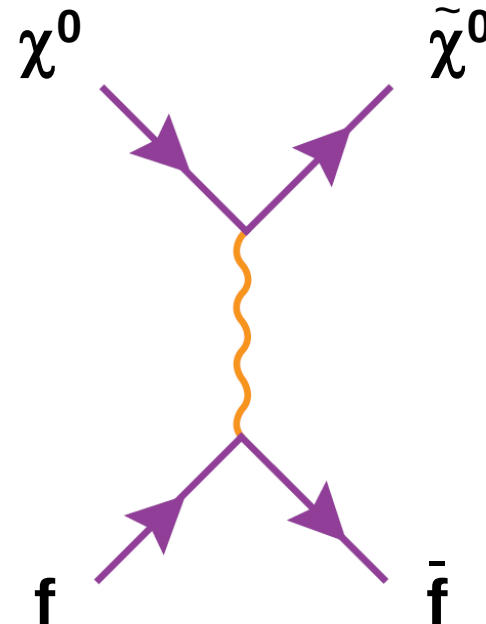
Supersymmetrie auf dem Teststand

Annihilation von
Neutralinos in
CDM-Halos

Kap. 3.4

indirekt

Streuung von
Neutralinos in
Detektor



direkt

Kap. 3.5

Erzeugung von
Neutralinos an
pp-Collider

LHC

Kap. 3.3

