

Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 19

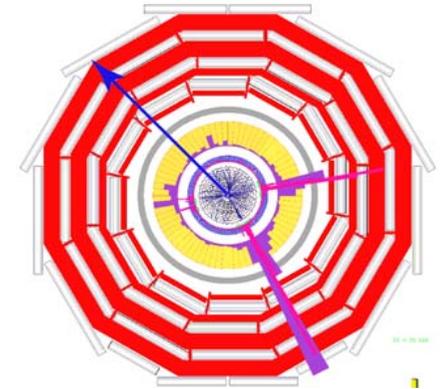
7. Grundlagen der Elementarteilchen-Physik

...

- 7.5 Symmetrien und Erhaltungsgrößen
 - P, C, T
 - Supersymmetrie

8. Moderne Elementarteilchen-Physik

- 8.1 Phänomene der Schwachen Wechselwirkung
- 8.2 Elektroschwache Vereinigung
- 8.3 Fundamentale Entdeckungen: W/Z-Bosonen, Top-Quarks, Higgs-Bosonen



c) Ladungskonjugation C

- Ladungskonjugation C (C-Parität)** : diskrete Symmetrie \Leftrightarrow multiplikative Quantenzahl, C angewandt auf Felder/Kräfte: $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$, $\vec{E} \rightarrow -\vec{E}$, $\vec{F} \rightarrow \vec{F}$
Teilchen-Antiteilchen Transformation mit der Änderung von allen ladungsartigen Quantenzahlen: $+Q \leftrightarrow -Q$, $+\mu \leftrightarrow -\mu$, $+B \leftrightarrow -B$, $+S \leftrightarrow -S$, ...
 \hookrightarrow alle Teilchen mit $B, S, Q \neq 0$ sind keine Eigenzustände von C

- Selbst-konjugierte Zustände**

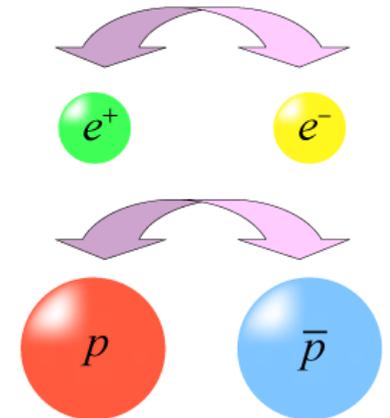
neutrale Teilchen ($Q = B = S = L = 0$) sind Eigenzustände von C mit der **Eigenparität +1, -1** da $C^2 |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$

Photon γ :

$C |\gamma\rangle = - |\gamma\rangle$ da Potenziale ($\phi \rightarrow -\phi$, $\vec{A} \rightarrow -\vec{A}$) bei $+Q \rightarrow -Q$
 $J^{PC} (\gamma) = 1^{--}$

neutrales π^0 :

$C |\pi^0\rangle = + |\pi^0\rangle$ da $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ (kein $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \gamma$, b.r. $< 3 \cdot 10^{-8}$)
 $J^{PC} (\pi^0) = 0^{-+}$

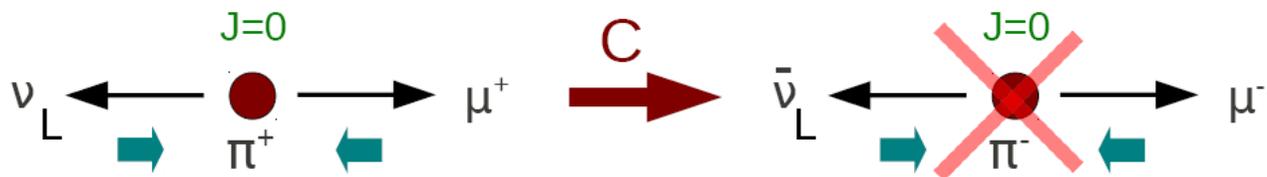


- Starke WW:** $p\bar{p} \rightarrow \pi^+ + X$
 $\qquad\qquad\qquad \rightarrow \pi^- + X$
 - EM WW:** $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 $\qquad\qquad\qquad \not\rightarrow \gamma\gamma\gamma$
- Verteilungen, Raten von π^+ , π^- gleich ($\pm 1\%$)
 $\frac{BR(\pi^0 \rightarrow 3\gamma)}{BR(\pi^0 \rightarrow 2\gamma)} < 3 \cdot 10^{-8}$

$$C |\pi^0\rangle = C |\gamma_1\rangle C |\gamma_2\rangle = C^2 |\gamma_1 \gamma_2\rangle = + |\pi^0\rangle \quad (C_\gamma = -1, C_{\pi^0} = +1)$$

$$C |\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3\rangle = - |\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3\rangle \neq |\pi^0\rangle$$

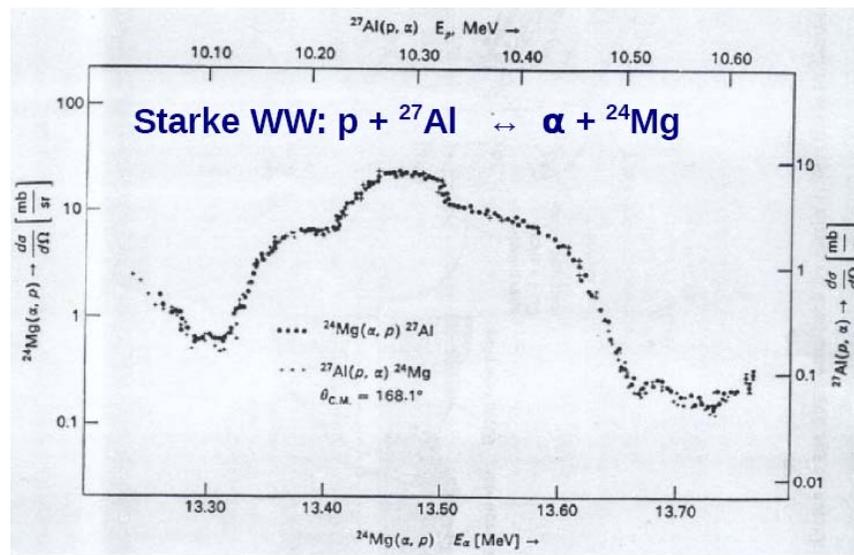
C-Parität maximal verletzt in Prozessen schwacher WW



d) Zeitumkehrinvarianz T

■ Zeitumkehrinvarianz :

Bei Teilchenreaktionen $a + b \rightarrow c + d$ ist bei T-Symmetrie der differentielle Wirkungsquerschnitt der 'Rückreaktion' $c + d \rightarrow a + b$ identisch



Auswirkungen des T-Operators: Felder/Kräfte: $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$, $\vec{E} \rightarrow \vec{E}$, $\vec{F} \rightarrow \vec{F}$, $\vec{v} \rightarrow -\vec{v}$

■ Zeitumkehrinvarianz & Wechselwirkungen:

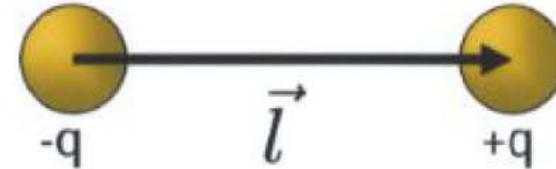
Die T-Invarianz wird von allen 3 Wechselwirkungen eingehalten

Ausnahmen: Verletzung der CP-Invarianz im $K^0-\bar{K}^0$ und $B^0-\bar{B}^0$ System impliziert auch Verletzung der T-Invarianz in diesen beiden Systemen

Elektrisches Dipolmoment (EDM) & T-Invarianz:

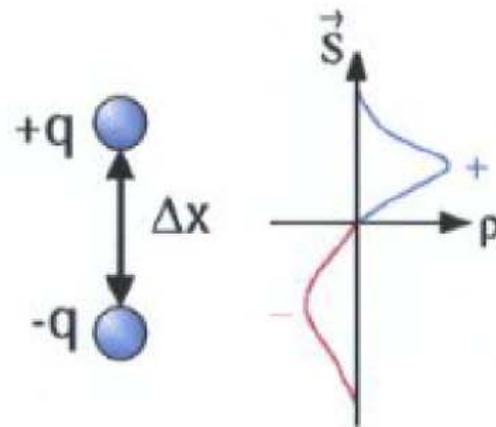
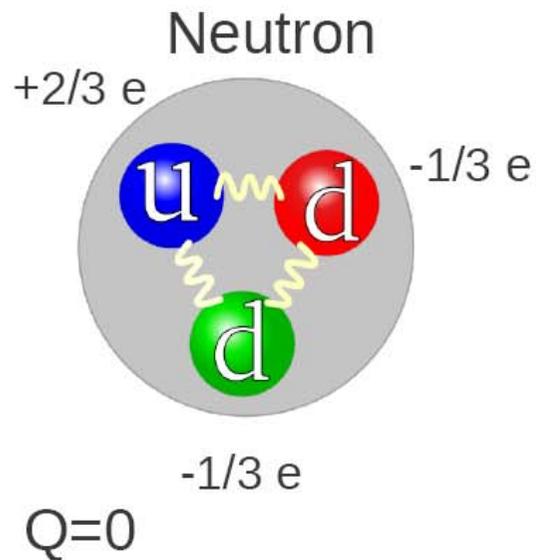
Elektrisches Dipolmoment:

$$\vec{d} = q \cdot \vec{l}$$



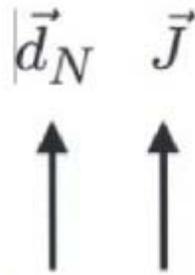
Statische Ladungsverteilung:

$$\vec{d} = \int \vec{x}' \rho(\vec{x}') d^3x'$$

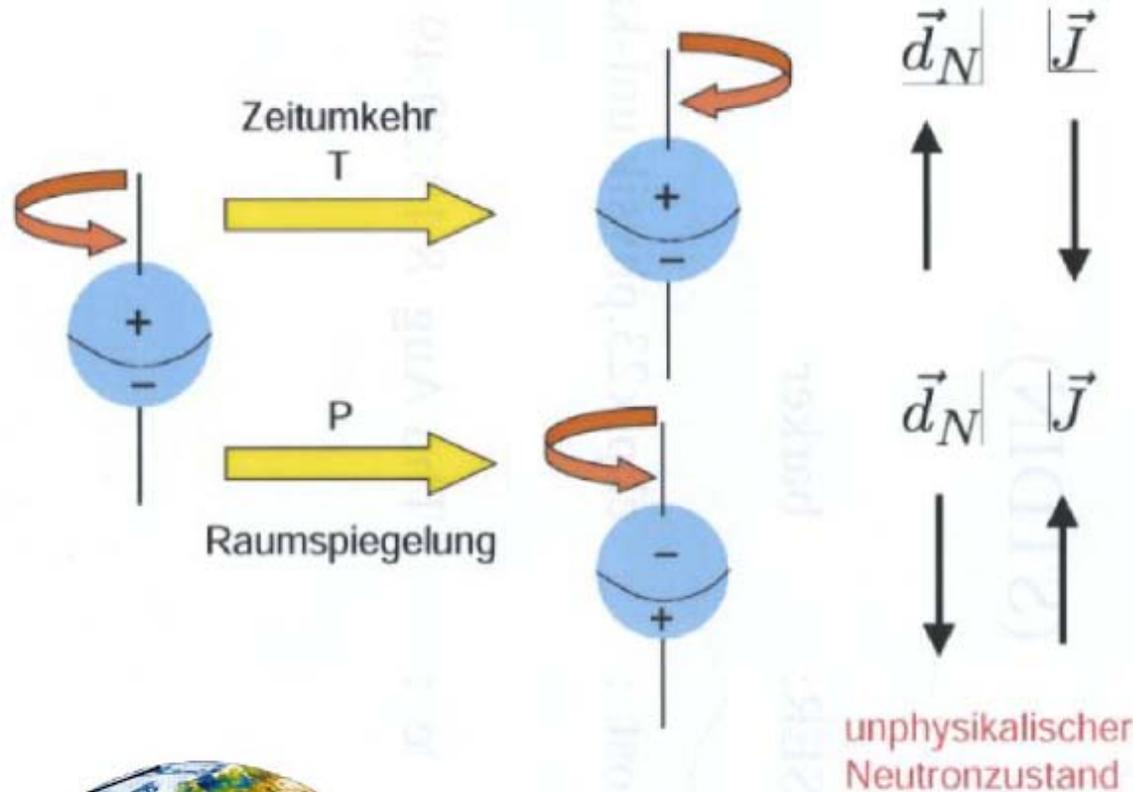


Asymmetrische Verteilung der zeitlich gemittelten pos. und negativen Ladungsverteilungen
 → el. Dipolmoment

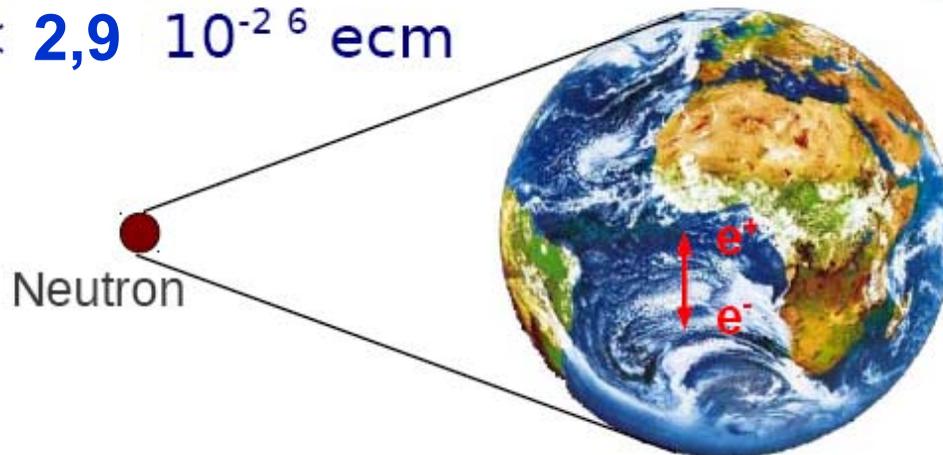
Zeitlich
gemittelt:



Falls $d_N \neq 0$
→ T,P verletzt



Experimentell:
 $d_N < 2,9 \cdot 10^{-26} \text{ ecm}$

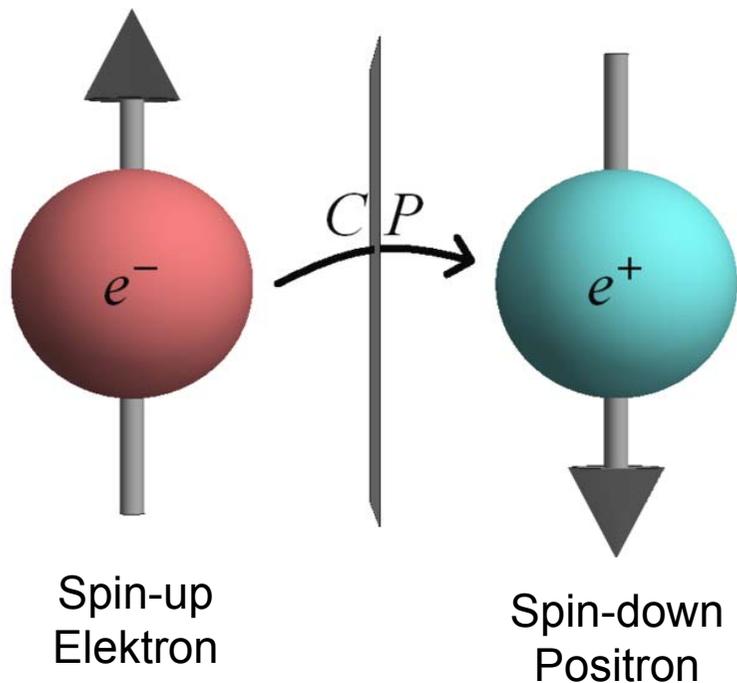


Wenn Neutron so groß wie die Erde
wäre, dann würde d_N 2 Elementarladungen,
die $2 \mu\text{m}$ getrennt sind,
entsprechen

e) CP - Symmetrie

■ CP - Symmetrie:

- CP-Verletzung bisher nachgewiesen nur im System der neutralen Kaonen (Cronin & Fitch, Nobelpreis 1980) und im System der neutralen B^0 -Mesonen

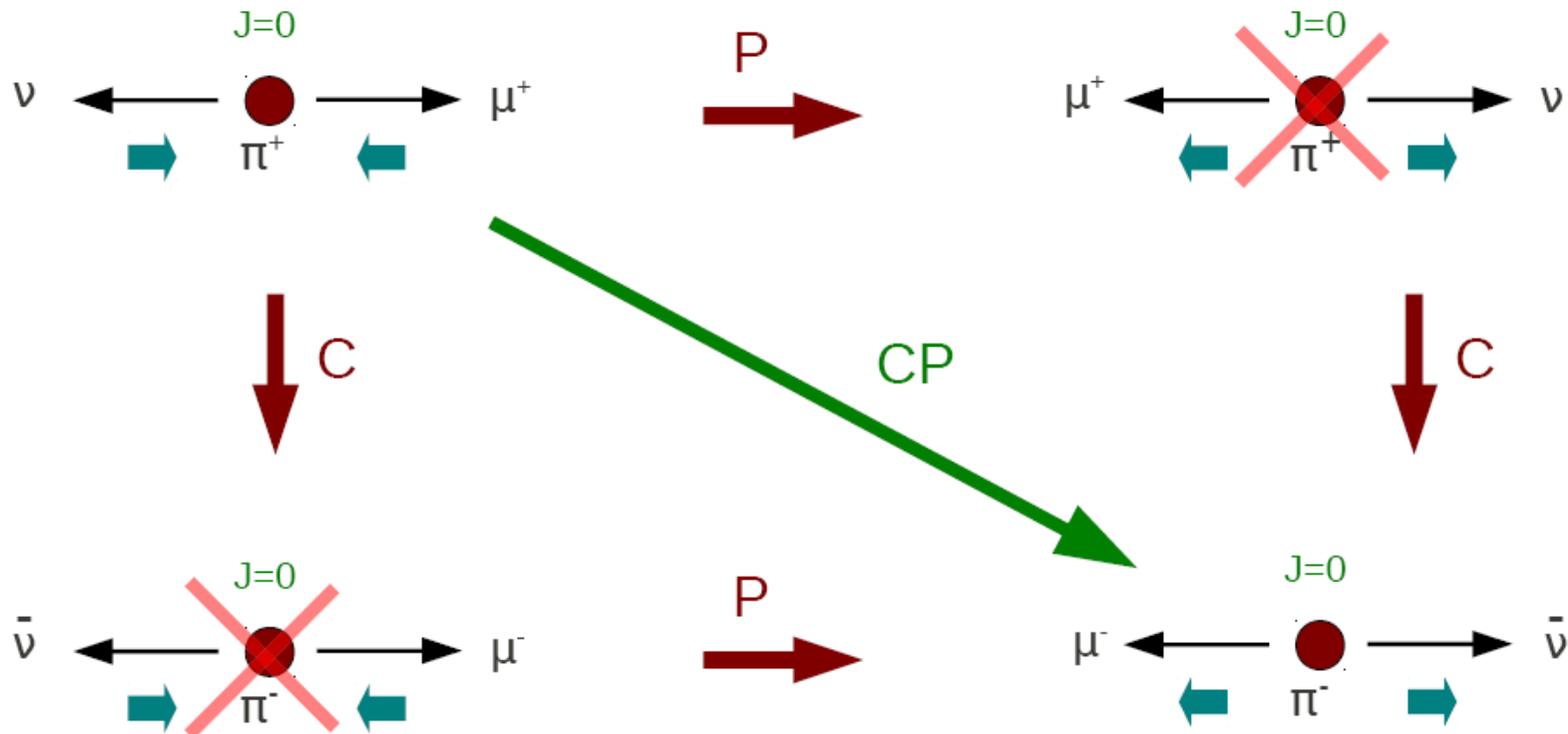


■ CP - Verletzung:

- **Sacharow**: CP-Verletzung ist notwendig für die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum (Baryogenese)
- ist die CP-Verletzung bei den Mesonen groß genug?
- gibt es CP-Verletzung bei den Leptonen?



Illustration der CP-Symmetrie im Pionzerfall



Fast alle bekannten Vorgänge erhalten CP

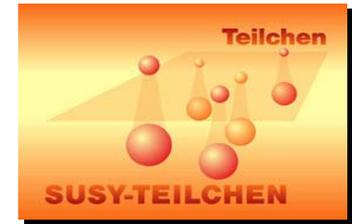
1964: Entdeckung von CP-Verletzung in K-Zerfällen
(Christenson, Cronin, Fitch, Turlay)

f) Zusammenfassung Symmetrien

| Erhaltungsgröße | Wechselwirkung | | | Beispiele, Bemerkungen |
|-------------------------------------|----------------|------------------------|---------|---|
| | stark | schwach | elekt.- | |
| Energie | Ja | Ja | Ja | ✓ |
| Impuls | Ja | Ja | Ja | ✓ |
| Drehimpuls | Ja | Ja | Ja | ✓ |
| Q (Ladung) | Ja | Ja | Ja | $e^- \rightarrow \nu_e + \text{"neutral" "no"}$ |
| B (Baryonenzahl) | Ja | Ja | Ja | $e^+ e^- \rightarrow p \bar{p}$ ✓; $p + n \rightarrow \pi^+ \pi^0$ "no" |
| L_e, L_μ, L_τ (Leptonenzahl) | Ja | Ja | Ja | $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ✓ |
| I (Isospin) | Ja | Nein: $\Delta I=0,1/2$ | Nein | $n \rightarrow p + e^- + \nu$; $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ |
| Strangeness, Charme, ... | Ja | Nein: $\Delta=0,1$ | Ja | $\Lambda \rightarrow \pi^- + p$; $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ |
| P (Parität) | Ja | Nein | Ja | Nachweis: Wu-Experiment |
| C (Ladungskonjugation) | Ja | Nein | Ja | Landau: C-Verletzung \leftrightarrow P-Verletzung |
| CP | Ja | Nein | Ja | Schwache Verletzung im K^0 -Zerfall (ca. 10^{-3}) |
| T (Zeitumkehr) | Ja | Nein | Ja | Bsp: $p + {}^{27}\text{Al} \rightarrow \alpha + {}^{24}\text{Mg}$ nur auf 10^{-3} gesichert |
| PCT | Ja | Ja | Ja | ? |

| | |
|-------------------------|--|
| Additive Quantenzahlen: | $Q, B, L, S^*, C^*, B^*, T^*$ (strangeness, charme, bottom, top) |
| Multiplikative QZ: | C, P, T |

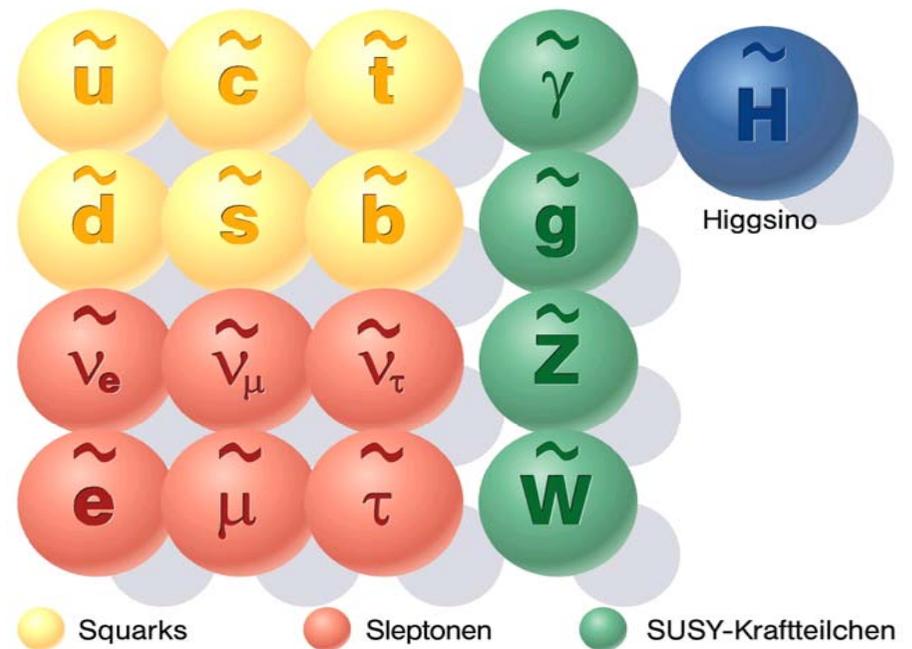
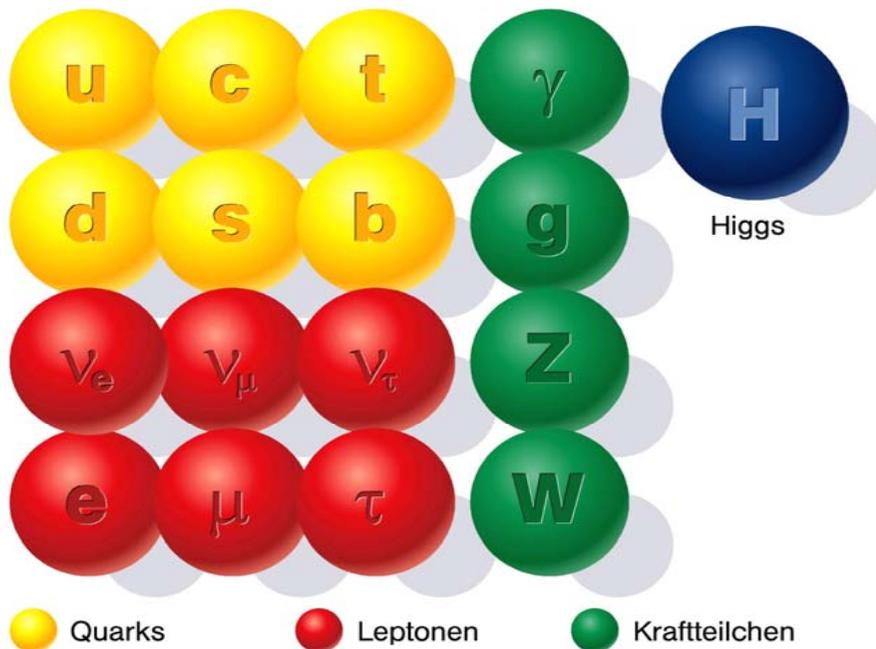
g) Supersymmetrie (hypothetisch)



■ Supersymmetrie (SUSY):

ist eine Raum-Zeit Symmetrie, die **Bosonen** mit **Fermionen** verknüpft & durch supersymmetrische Partnerteilchen das bekannte Spektrum der Teilchen des Standardmodells (SM) verdoppelt

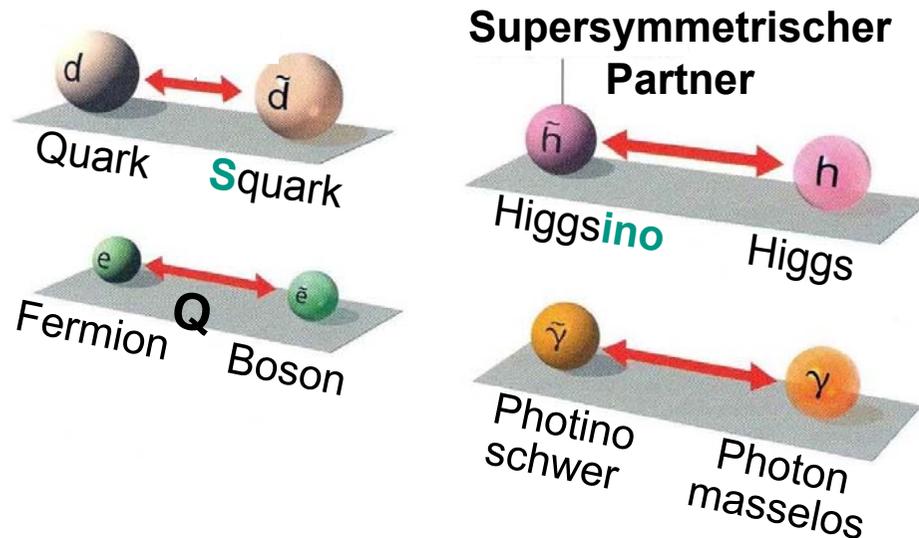
- **Superpartner der SM-Teilchen:** bosonische Partner für Fermionen
fermionische Partner für Bosonen





Julius Wess (1934-2007)

- **SUSY-Operator Q** transformiert Boson \leftrightarrow Fermion :



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

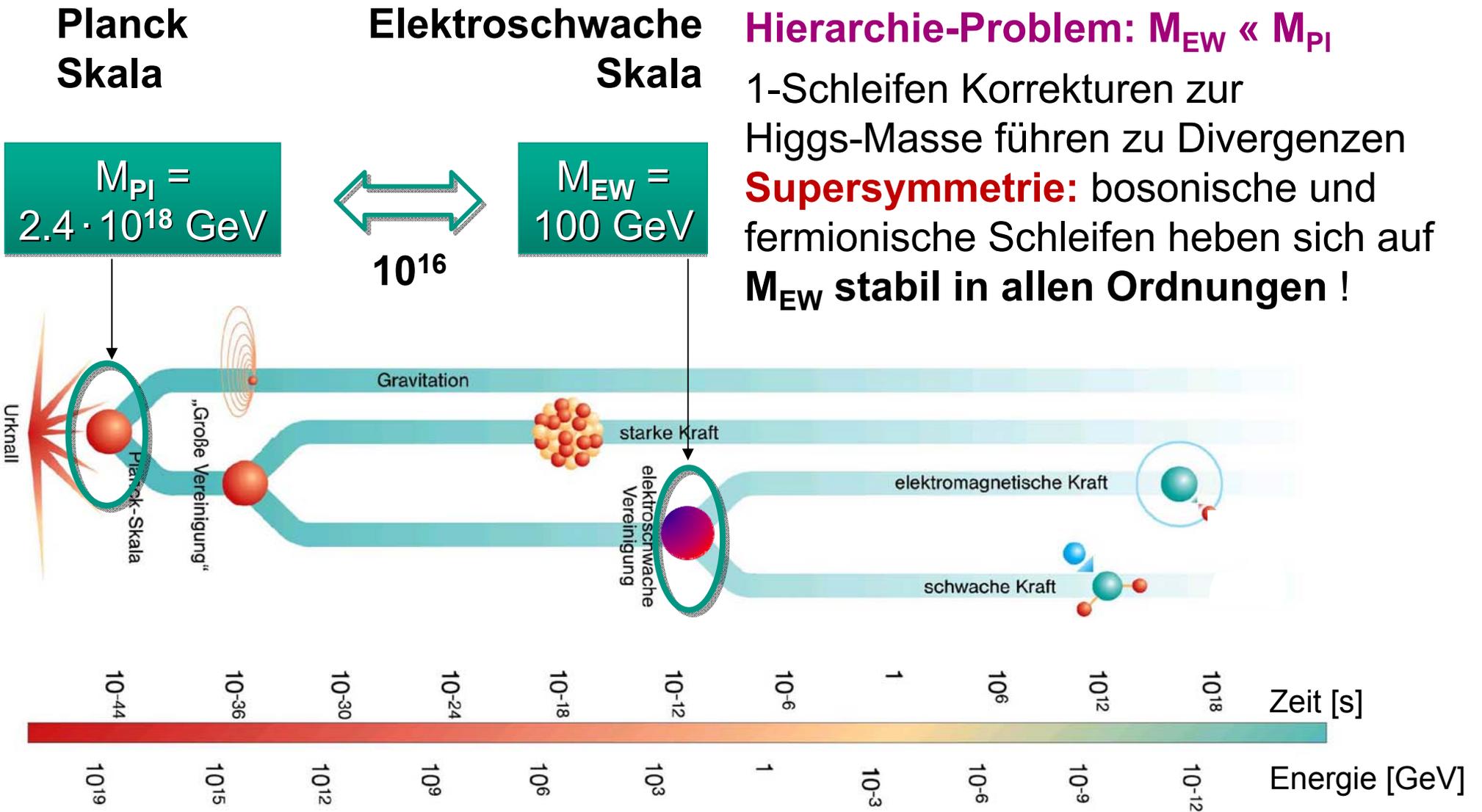
Spin von SM-Teilchen und SUSY-Teilchen differiert um $\Delta s = 1/2$

- **Supersymmetrie – eine spontan gebrochene Symmetrie:**

Vakuum ist nicht invariant unter supersymmetrischen Transformationen

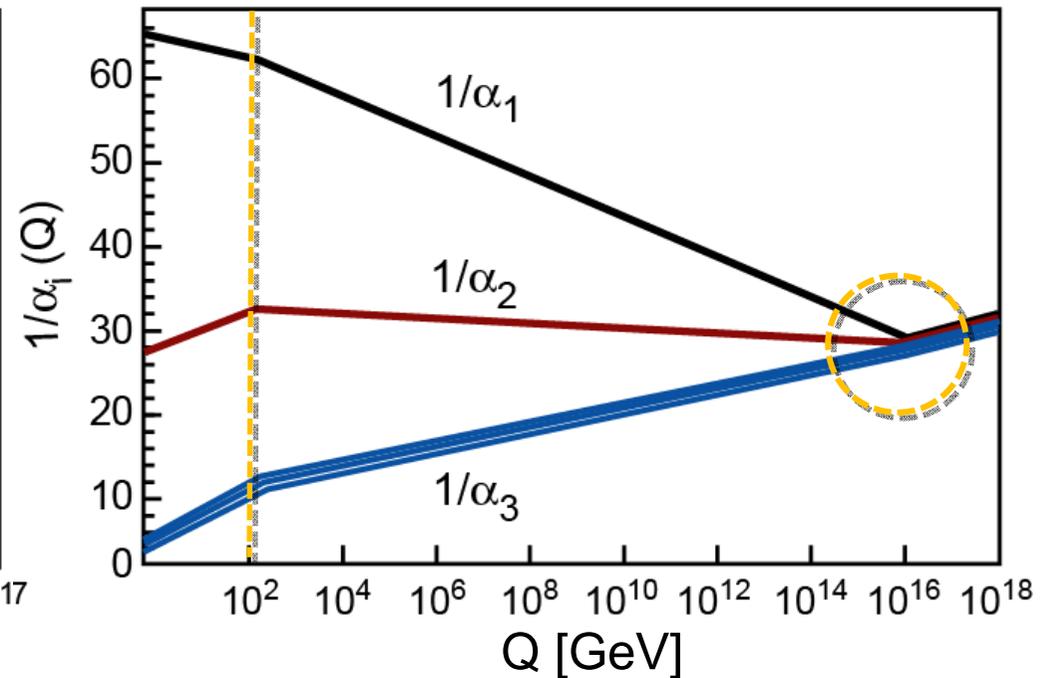
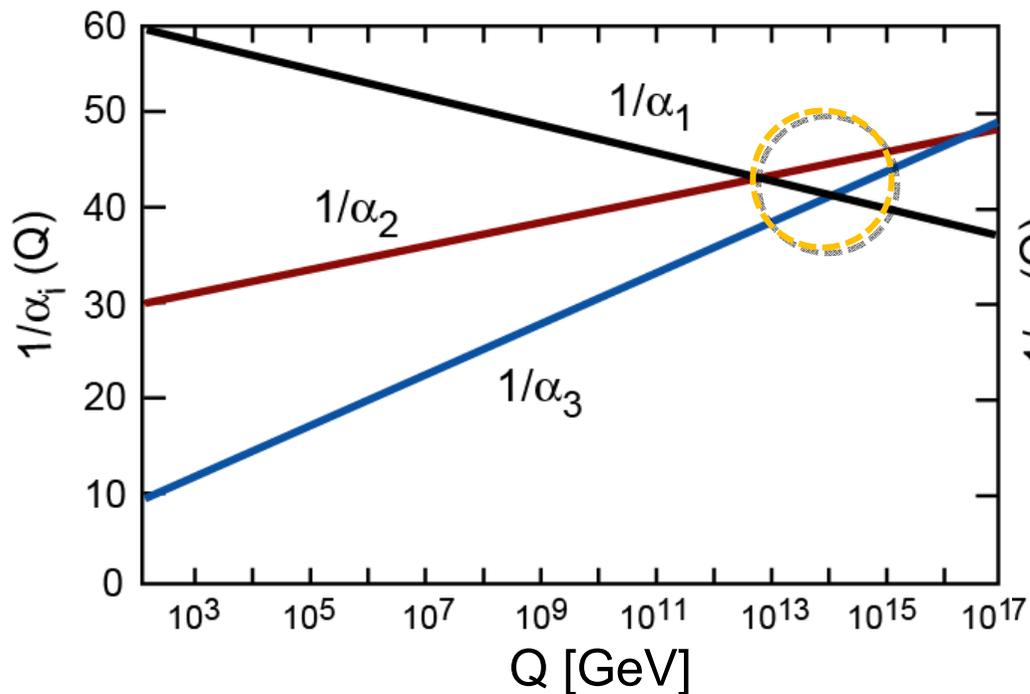
- ↳ Massenunterschiede zwischen SM und SUSY-Teilchen!
- ↳ Skala der Symmetriebrechung sollte bei $E \sim 1 \text{ TeV}$ liegen

Hierarchieproblem & SUSY

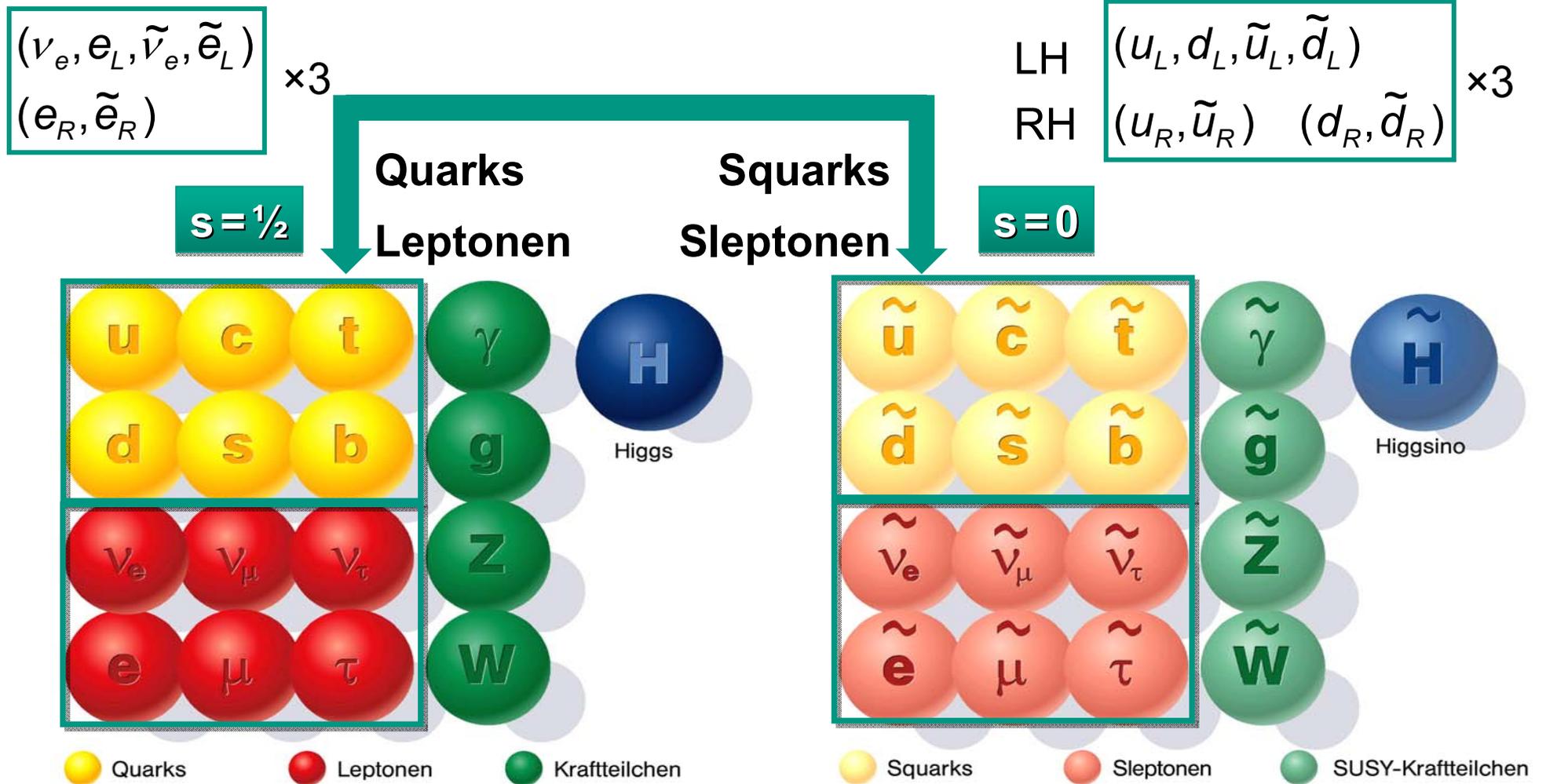


SUSY & Vereinheitlichung der Kräfte

- **Grand Unified Theories** (GUTs) erwarten Vereinheitlichung der Stärke der elektromagnetischen, starken & schwachen Eichkopplungen bei $M_{\text{GUT}} < M_{\text{Pl}}$
- **Standardmodell (SM):** kein Schnittpunkt der 3 Eichkopplungen α_i
- **MSSM: minimales supersymmetrisches Standardmodell:** Eichkopplungen α_1 : elektromagnetisch α_2 : schwach α_3 : stark vereinigt bei $M_{\text{GUT}} = 2 \times 10^{16} \text{ GeV}$



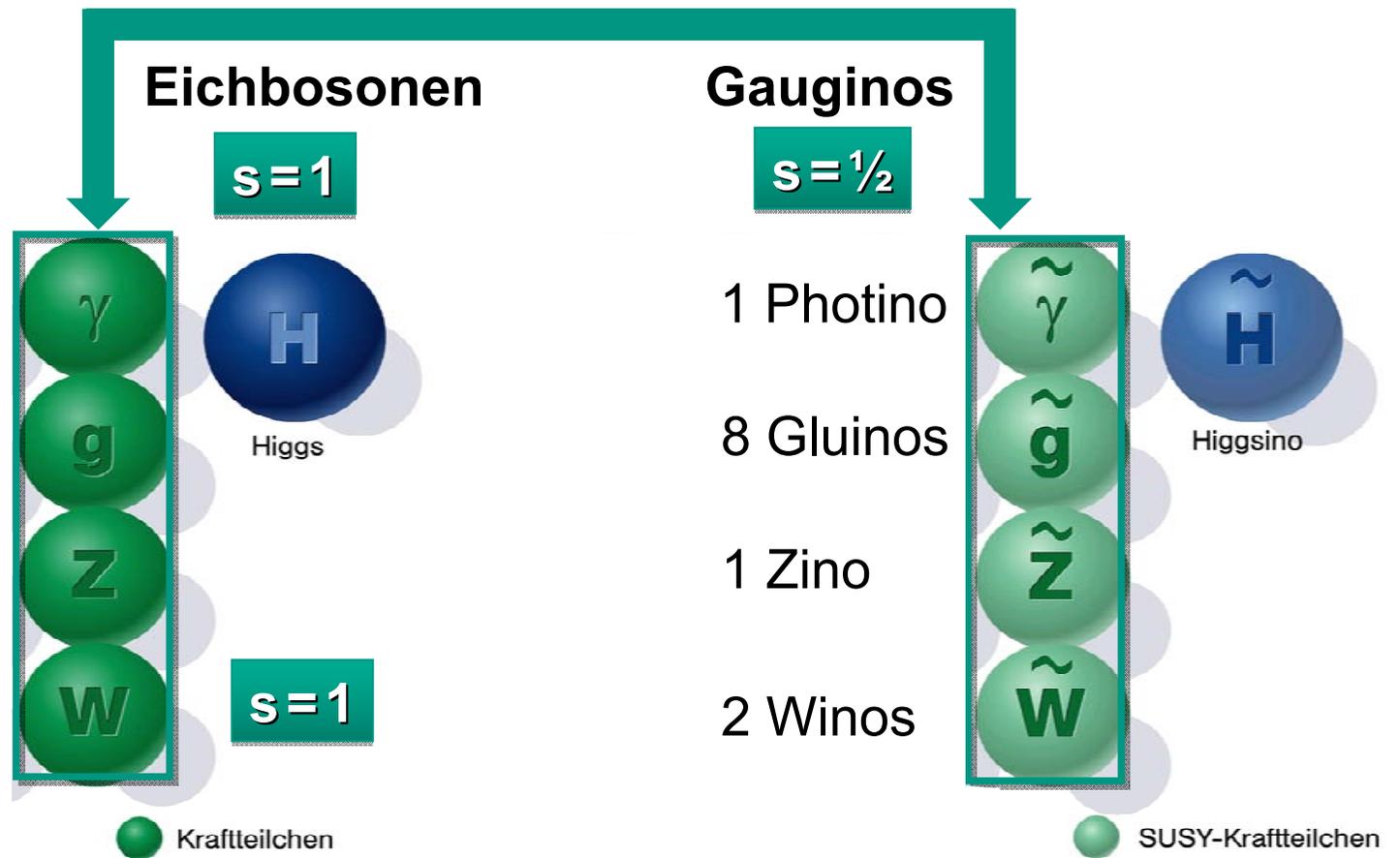
- SM-Teilchen & Superpartner, $N_{\text{Fermionen}} = N_{\text{Bosonen}}$



■ SM-Eichbosonen & Superpartner-Eichfermionen

$$\begin{matrix} (g, \tilde{g}) & (\gamma, \tilde{\gamma}) \\ (W^\pm, \tilde{W}^\pm, Z^0, \tilde{Z}^0) \end{matrix}$$

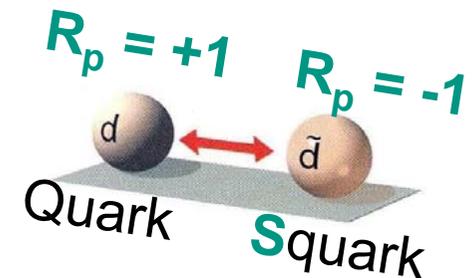
Gauginos
wechselwirken
über die
Eichsymmetrien



Supersymmetrie: R-Parität

- SUSY führt eine neue multiplikative Quantenzahl ein: **R-Parität R_p**

$$R_p = (-1)^{3B+L+2S} \quad \text{bzw.} \quad R_p = (-1)^{3(B-L)+2S}$$



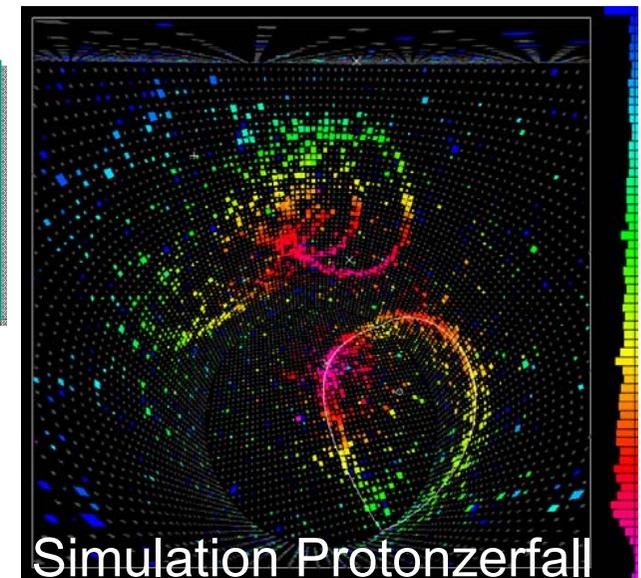
R_p verknüpft mit **B**: Baryonenzahl, **L**: Leptonzahl, **S**: Spin

SM-Teilchen: **$R_p = +1$** (gerade), Superpartner: **$R_p = -1$** (ungerade)

↪ Superpartner zerfallen nur in Superpartner

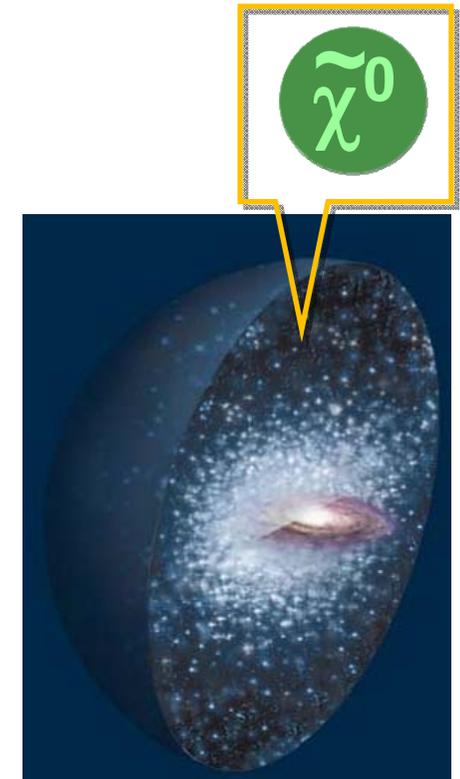
Leichtestes SUSY Teilchen ist stabil:
LSP (**L**ightest **S**upersymmetric **P**article)
↪ **stabiles LSP ist Kandidat für dunkle Materie**

R-Parität wurde zunächst eingeführt, um
Protonstabilität zu erklären ($p \rightarrow \pi^0 + e^+$)
experimentelle Untergrenze: $T_{1/2} > 10^{33}$ Jahre



Supersymmetrie & dunkle Materie

- Das leichteste SUSY-Teilchen sollte wegen Erhaltung der R-Parität über kosmologische Zeiträume stabil sein → kalte dunkle Materie (**C**old **D**ark **M**atter)
 - CDM-Eigenschaften: neutral, nur schwach wechselwirkend
 - SUSY-Teilchen mit diesen Eigenschaften: **Neutralino $\tilde{\chi}^0$**
 - Neutralinos sind die Masseneigenzustände der Gauginos
 - erwarteter Massenbereich $M(\tilde{\chi}^0)$: 10 GeV – 1 TeV
 - Suche nach Neutralinos:
 1. LHC – fehlende Energie & Transversalimpuls
 2. Cherenkov-Teleskope – Vernichtung der $\tilde{\chi}^0$ im Halo
 3. direkter Nachweis – Dark Matter Experimente (LXe, ...)



Supersymmetrie: spezielle Modelle

- **MSSM** (**M**inimales **S**upersymmetrisches **S**tandard **M**odell):
105 neue physikal. Parameter:
 - **Massen** (Skalare, Gauginos,...)
 - **CP-Phasen**
 - **Mischungswinkel** (Neutralinos & Charginos), ...
- **CMSSM** (Constrained MSSM) –
 - vereinheitlichte Teilchen-Massen bei der GUT-Skala
 - Reduktion auf **5 freie Parameter**