

Kerne und Teilchen

Physik VI

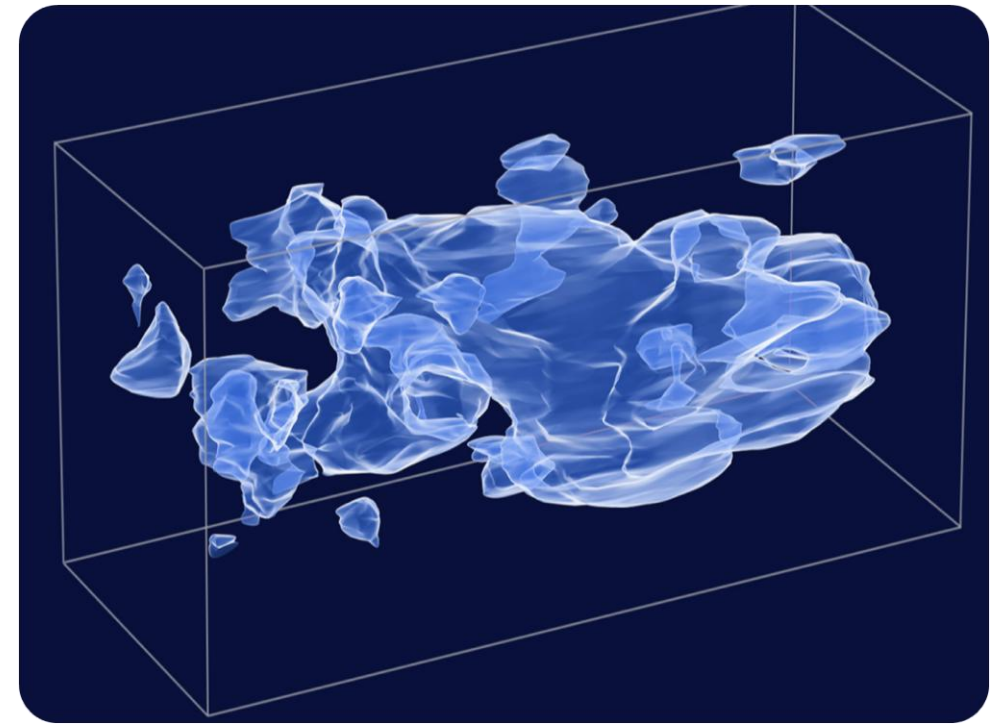
Vorlesung # 21 29.6.2010

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

- Supersymmetrie: R-Parität & Multiplette
- Dunkle Materie: Neutralinos

Schwache Wechselwirkung

- Klassifikation: leptonisch/semileptonisch
- Punktwechselwirkung
- Fermi Kopplung G_F
- Fermi- und Gamov-Teller Übergänge

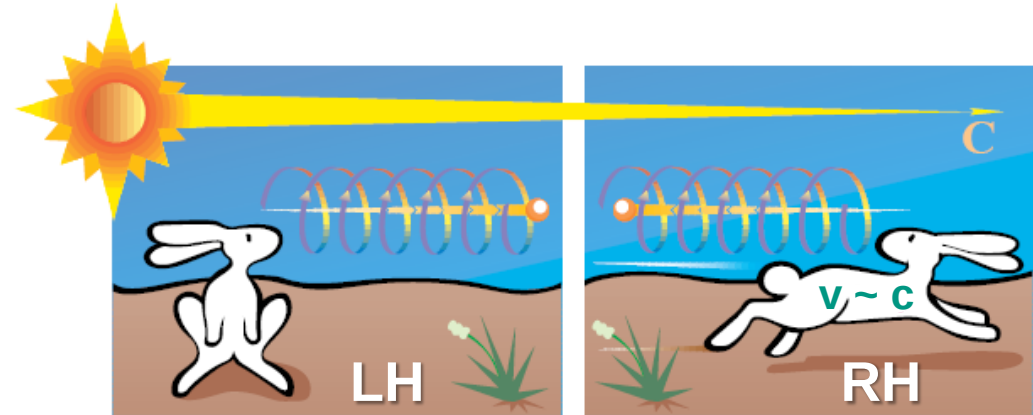


Verletzung von P und C



- **Verletzung der Parität** im Pionzerfall $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (μ/e -Verhältnis)
& im Myonzerfall $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ (e^+ -Impuls entlang μ^+ -Spin)

Helizität h : - linkshändige Fermionen
- rechtshändige Antifermionen
- h abhängig von β ,
↳ 'falsche' Helizität (e^+_L)
 $h \sim (1 - v/c)$

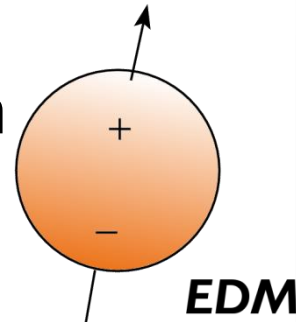


- **Ladungskonjugation C**

neutrale Teilchen (γ , η , π^0 , ν) & Fermion-Antifermion Paare (Mesonen: $c\bar{c}$, ...) sind Eigenzustände von C, Eigenwerte +1, -1, Beispiel: Photon: $J^{PC}(\gamma) = 1^{--}$

- **Zeitumkehrinvarianz T**

T-Invarianz wird von allen drei Wechselwirkungen eingehalten (aber $\cancel{CP}$)
ein permanentes elektrisches Dipolmoment d würde T verletzen
~ 50-jährige Suche nach dem EDM von Neutron, Elektron, Deuteron
(Physik jenseits des Standardmodells)



CP-Symmetrie, Supersymmetrie

■ CP-Symmetrie:

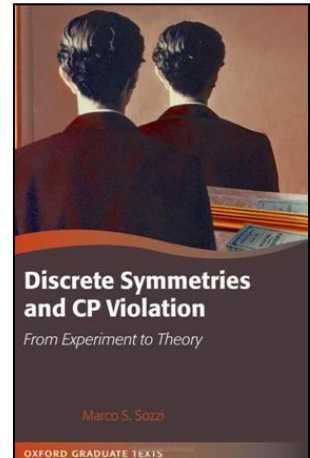
- CP-Verletzung bisher nur im System neutraler Mesonen (K^0 , B^0)
- Sacharov: $\nexists$ ist Grundvoraussetzung für #
Materie-Antimaterie Asymmetrie

■ CP-Symmetrie von Neutrinos, Higgs:

- masselose Neutrinos: rein LH Neutrinos, rein RH Antineutrinos
- massebehaftete ν 's:
Dirac-Fall – 4 Zustände: LH ν , RH ν , LH $\bar{\nu}$, RH $\bar{\nu}$
Majorana-Fall – 2 Zustände: LH ν , RH ν
- Wechselwirkung mit Higgs-Boson ändert Händigkeit

■ Supersymmetrie (SUSY):

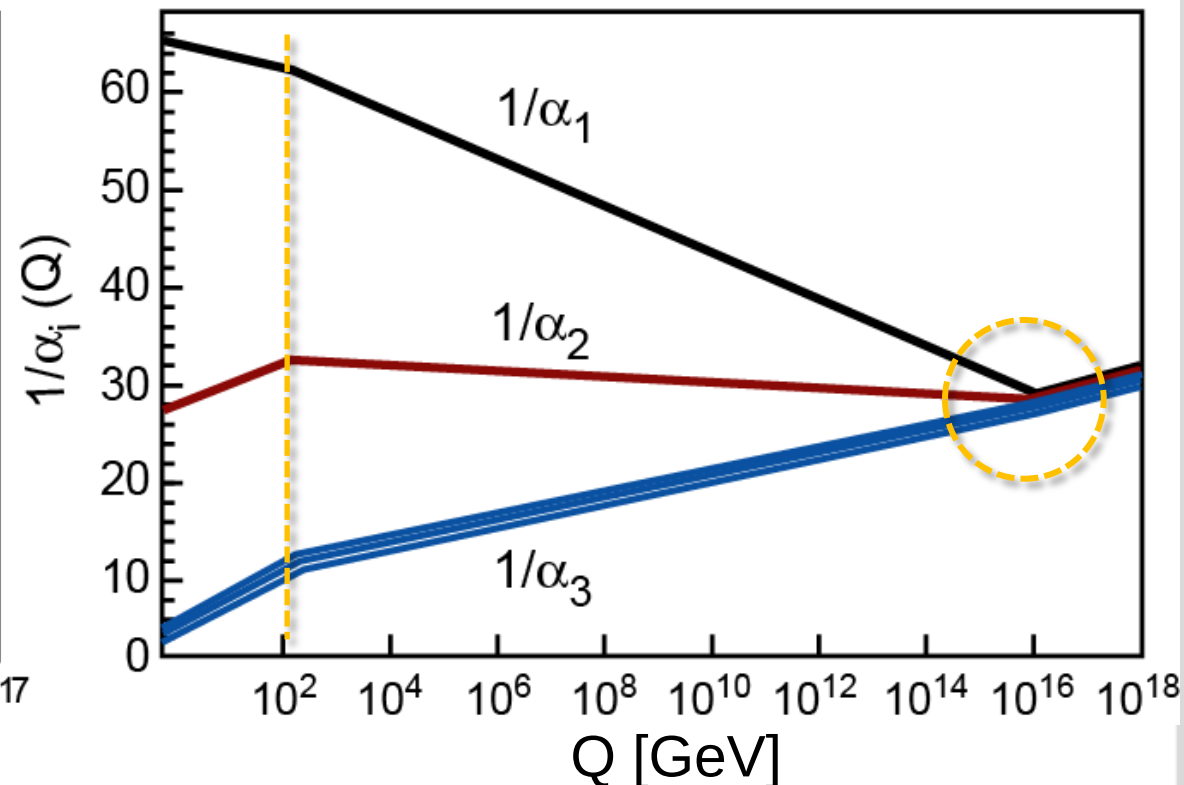
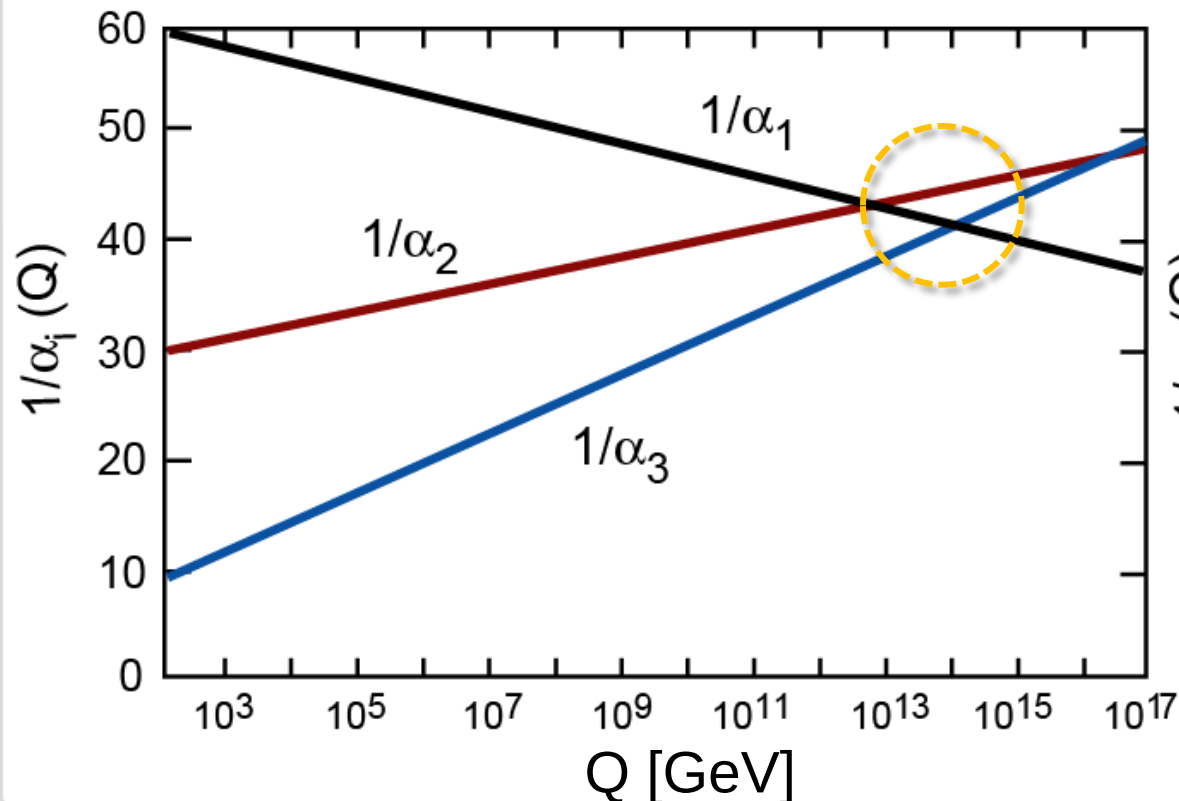
- Boson-Fermion Symmetrie: Operator Q
- spontan gebrochene Raumzeit-Symmetrie
- wesentliche Beiträge von Julius Wess (U Karlsruhe, ITP)
durch das Wess-Zumino-Modell



Julius Wess (1934-2007)

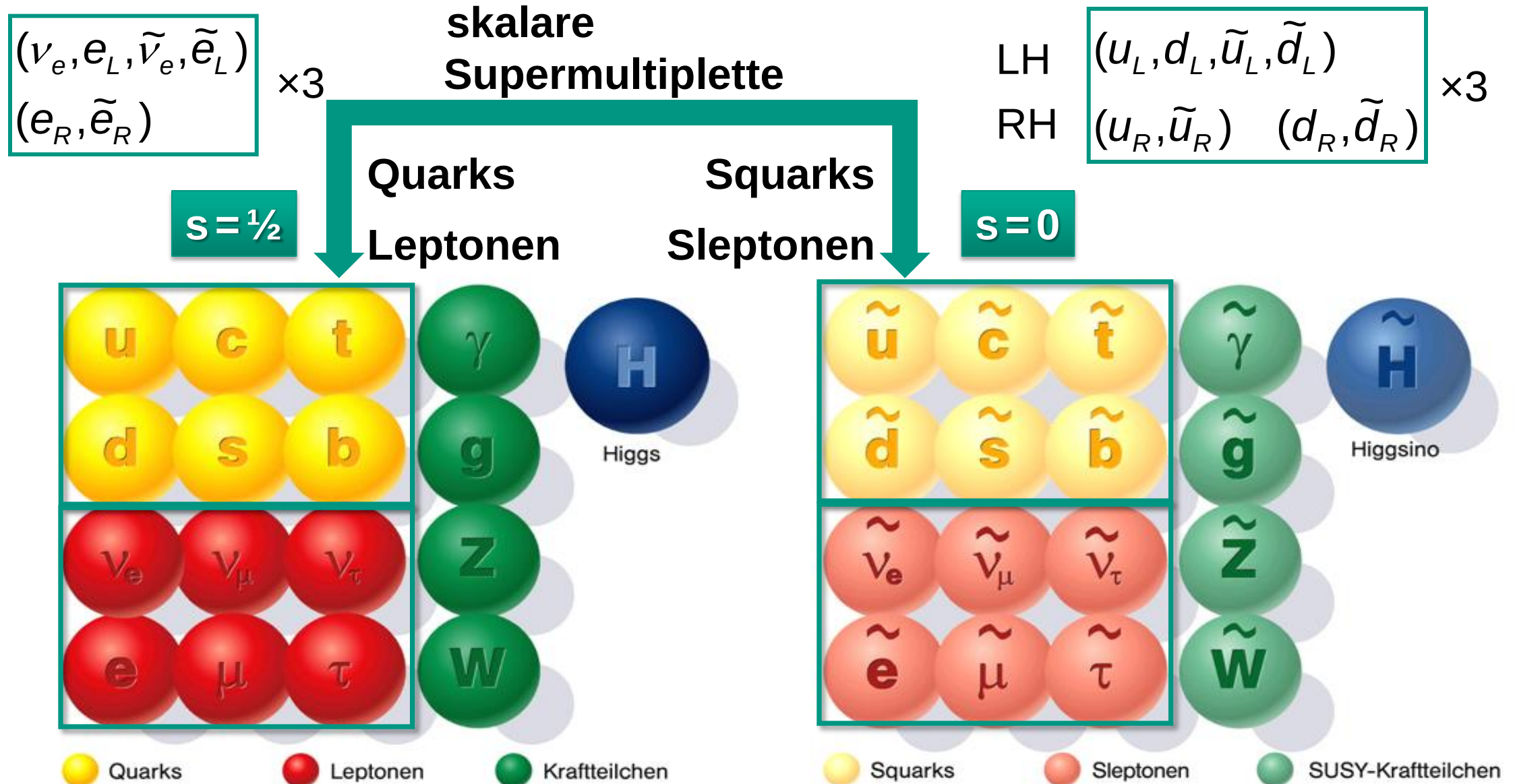
SUSY & Vereinheitlichung der Kräfte

- **Grand Unified Theorien** (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 $M_{\text{GUT}} = 2 \times 10^{16} \text{ GeV}$



Supermultiplette – Quarks & Leptonen

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



- **Supermultiplette:** SM-Eichbosonen & Superpartner-Eichfermionen

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

Eich- / vektorielle Supermultiplette

Eichbosonen

$$s=1$$



$$s=1$$

n  Kraftteilchen

Gauginos
wechselwirken
über die
Eichsymmetrien

Gauginos

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

1 Photino
U(1)
8 Gluinos
SU(3)_c
1 Zino
SU(2)
2 Winos
SU(2)_L



 SUSY-Kraftteilchen

- **Supergravitation:** unter Einbeziehung der Gravitation wird die SUSY von einer globalen in den Status einer **lokalen Eichsymmetrie** erhoben

Gravitino $\tilde{G}$ ($s=3/2$) mit Masse $m_{3/2}$ ist Superpartner des Gravitons G ($s=2$)

Gravitino = Kandidat für das LSP & dunkle Materie im Kosmos

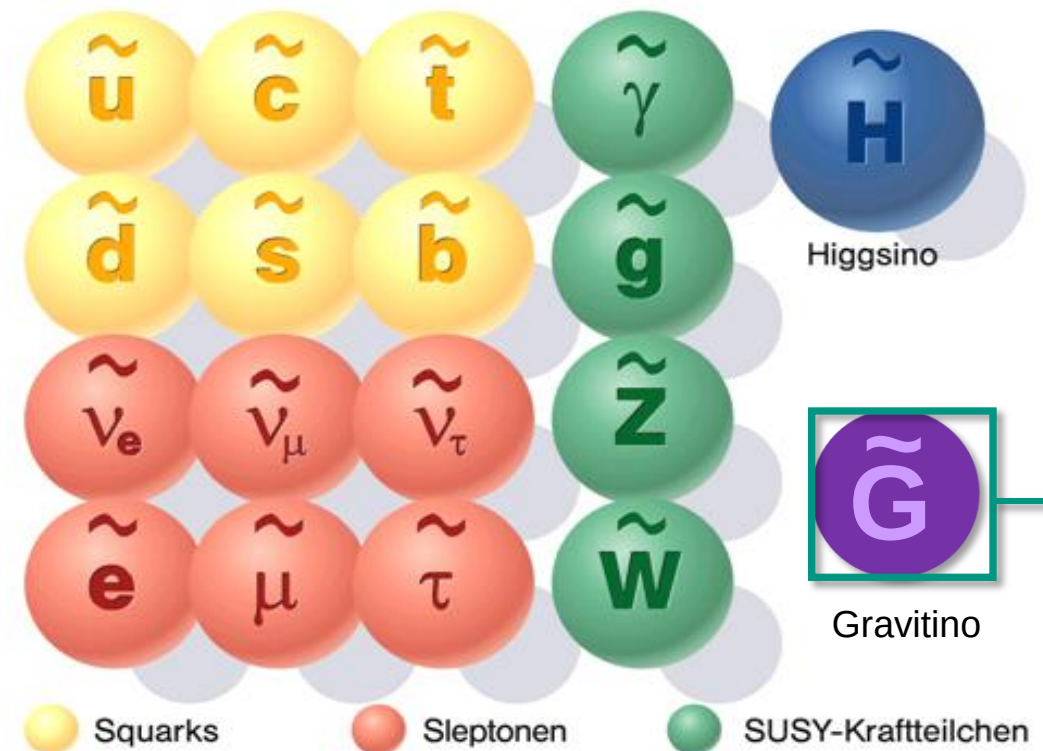
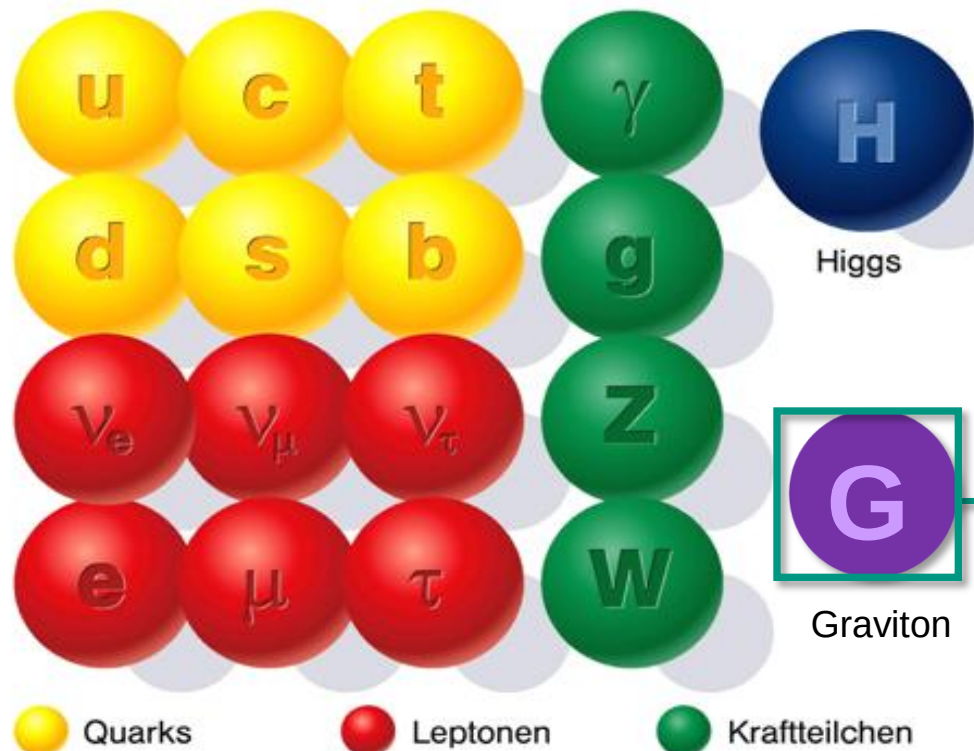
$s=2$

$(G, \tilde{G})$

$s=3/2$

Graviton

Gravitino



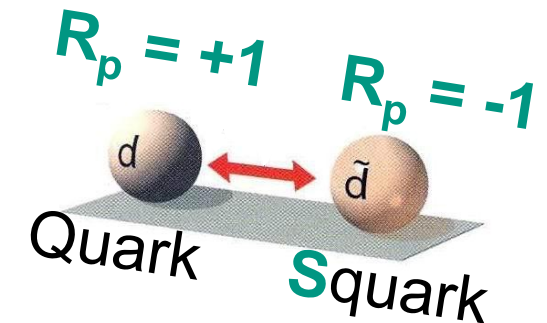
Supersymmetrie: R-Parität

- SUSY führt eine neue multiplikative Quantenzahl ein: **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

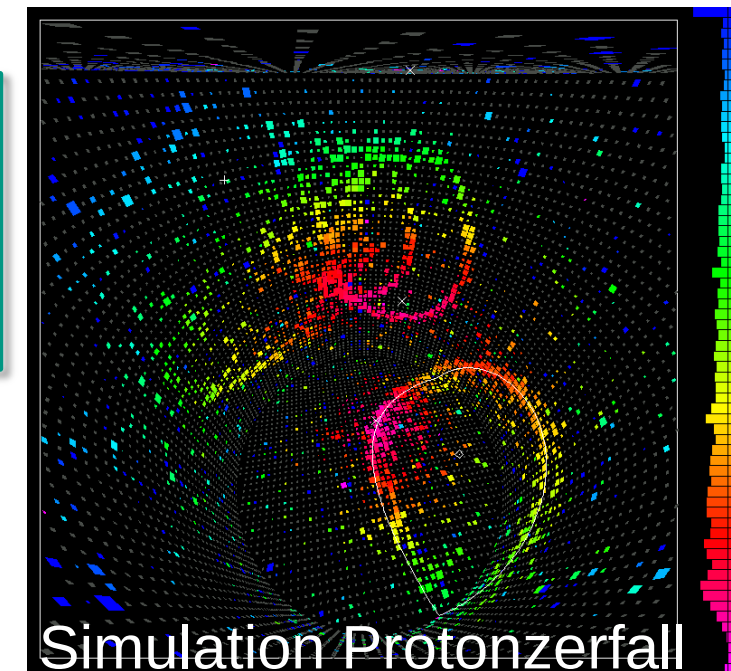
SM-Teilchen: **$R_p = +1$** (gerade) , Superpartner: **$R_p = -1$** (ungerade)

↪ Superpartner zerfallen nur in Superpartner

leichtestes SUSY Teilchen mit $R_p = -1$ ist stabil:
LSP (Lightest Supersymmetric Particle)

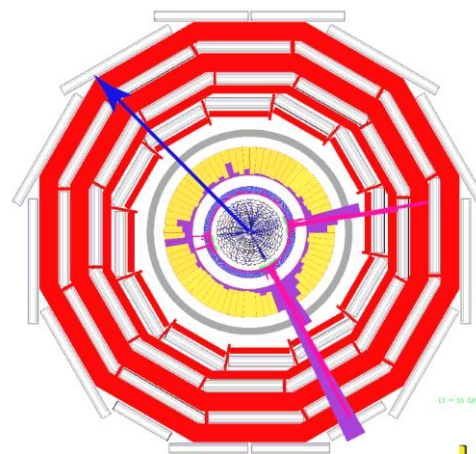
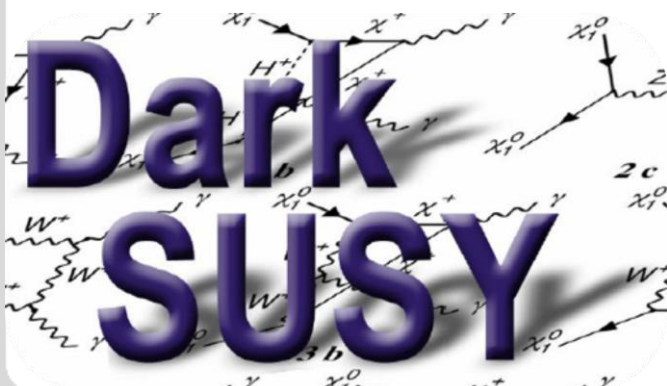
↪ **stabiles LSP ist Kandidat für dunkle Materie**

R-Parität wurde zunächst eingeführt um einen schnellen Protonzerfall zu verhindern ($p \rightarrow \pi^0 + e^+$)
experimentelle Untergrenze: $T_{1/2} > 10^{32}$ Jahre



Supersymmetrie & dunkle Materie

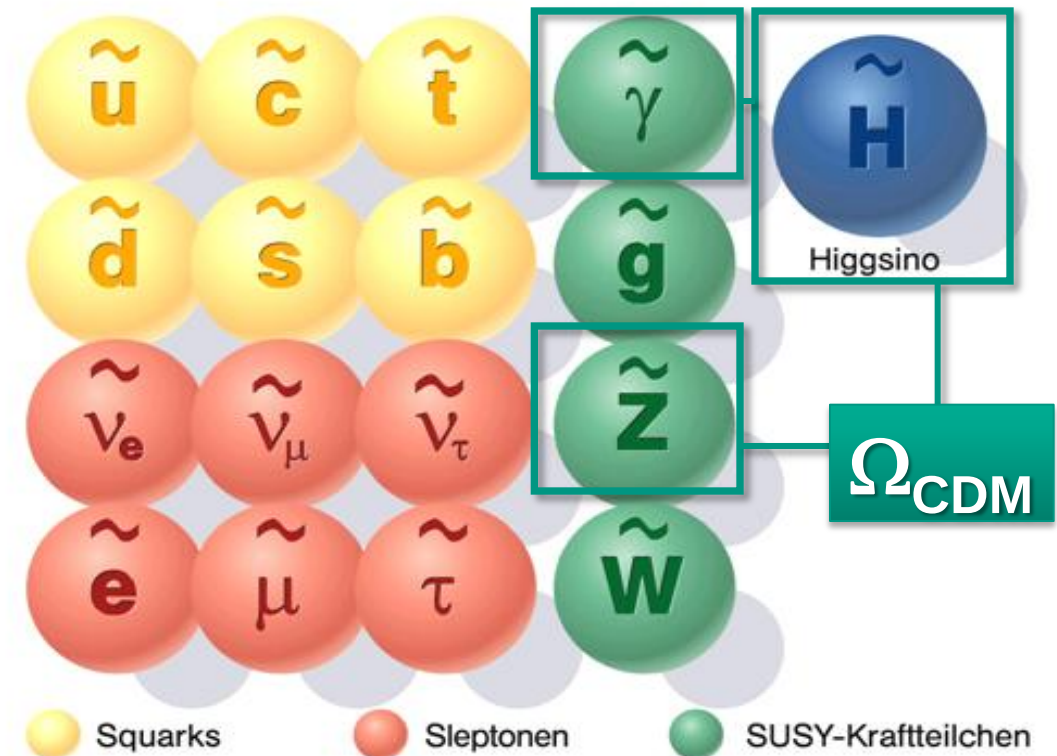
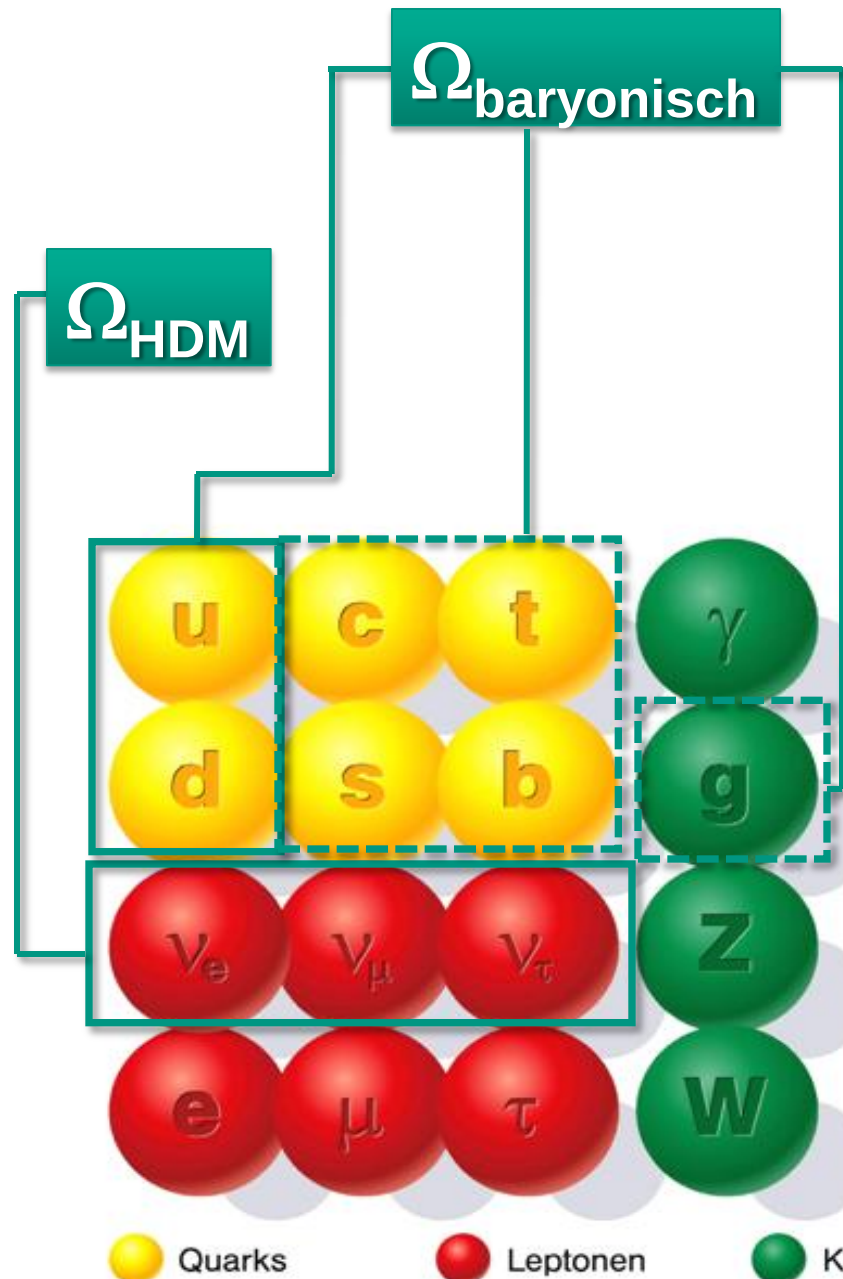
- das leichteste SUSY-Teilchen sollte durch die R-Parität über kosmologisch Zeiträume stabil sein – kalte dunkle Materie (**C**old **D**ark **M**atter, **CDM**)
 - CDM-Eigenschaften: neutral, $\Omega_{\text{CDM}} = 0.22$, nur schwach wechselwirkend
 - SUSY-Teilchen mit diesen Eigenschaften: **Neutralino** $\tilde{\chi}^0$
 - 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



- baryonische & dunkle Materie (CDM, HDM)



Supersymmetrie

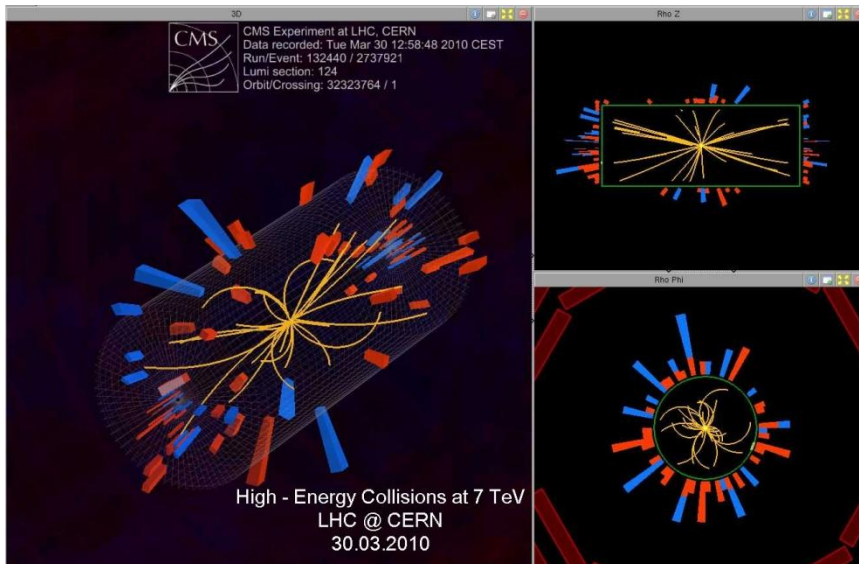
■ **MSSM** (**M**inimales **S**upersymmetrisches **S**tandard **M**odell):

105 neue physikal. Parameter:

- Massen (Skalare, Gauginos,...)
- CP-Phasen
- Mischungswinkel (Neutralinos & Charginos), ...

■ **CMSSM** (Constrained MSSM) –

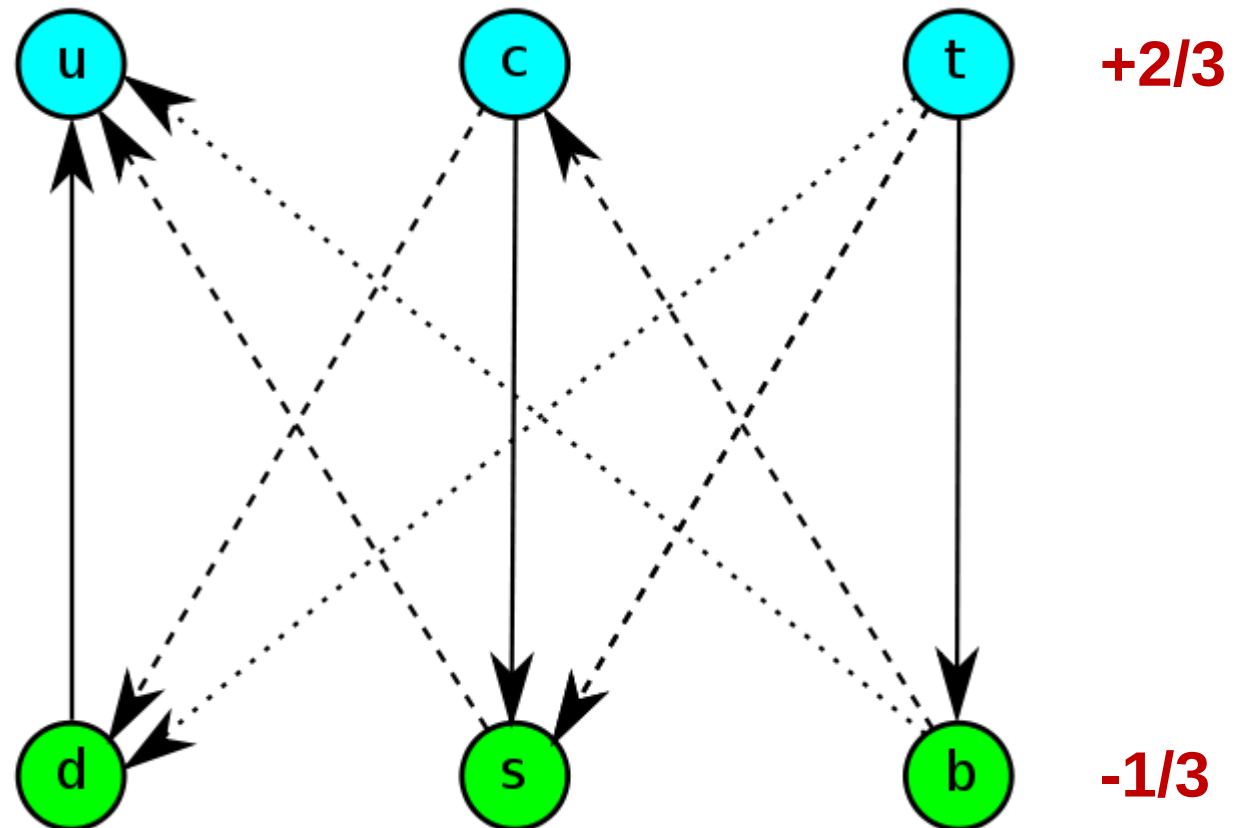
- vereinheitlichte Teilchen-Massen bei der GUT-Skala
- Reduktion auf **5 freie Parameter**



9. Schwache Wechselwirkung

■ schwache Wechselwirkung:

- **flavourändernde Übergänge** zwischen den Quarks ($d \rightarrow u$, $c \rightarrow s$, $t \rightarrow b$)
- **geladene** ($W^\pm$) und **neutrale** (Z^0) Ströme
- **Verletzung von Erhaltungssätzen**: Parität P (chirale Symmetrie), Ladungskonjugation C, CP-Symmetrie, Familien-Leptonenzahl $L_{e,\mu,\tau}$, (Leptonenzahl L?)



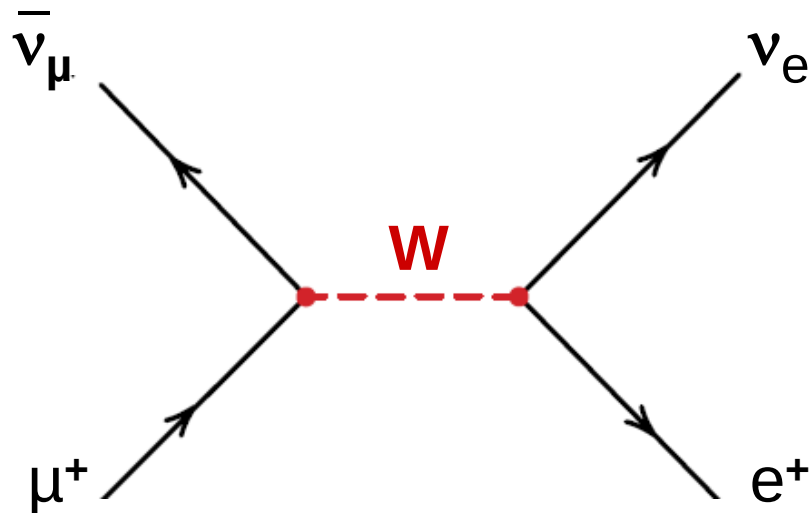
9.1 Klassifikation schwacher Prozesse

■ rein leptonische Prozesse:

- ausschließlich **Leptonen im Anfangs- und Endzustand**
- wichtige Beispiele für rein leptonische Kanäle:
 μ -Zerfall $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ τ -Zerfall: $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$,
- Bestimmung der Kopplungsstärke G_F der schwachen Wechselwirkung
- **keine Beeinflussung durch hadronische Prozesse** (starke Ww.)

$$\ell + \bar{\nu}_\ell \rightarrow \ell' + \bar{\nu}_{\ell'}$$

elementare Reaktion: Kopplung von 2 Strömen



β -Zerfall des Myons

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\tau = 2.2 \mu\text{s}$$

semileptonische Reaktionen

■ rein leptonische Prozesse:

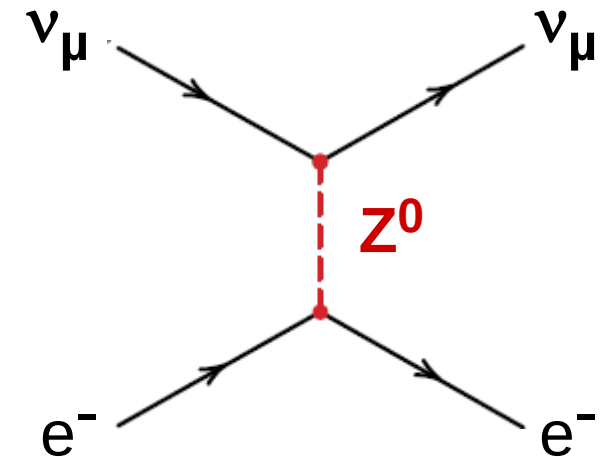
Neutrino-Elektron Streuung

- Streuung zwischen punktförmigen rein schwach wechselwirkenden Teilchen
- **CC**: geladene Ströme (W-Bosonen)
- **NC**: neutrale Ströme (Z⁰-Bosonen)
- bei der ν_e -e Streuung (und der $\bar{\nu}_e$ -e Streuung) kommt es zu einer CC/NC

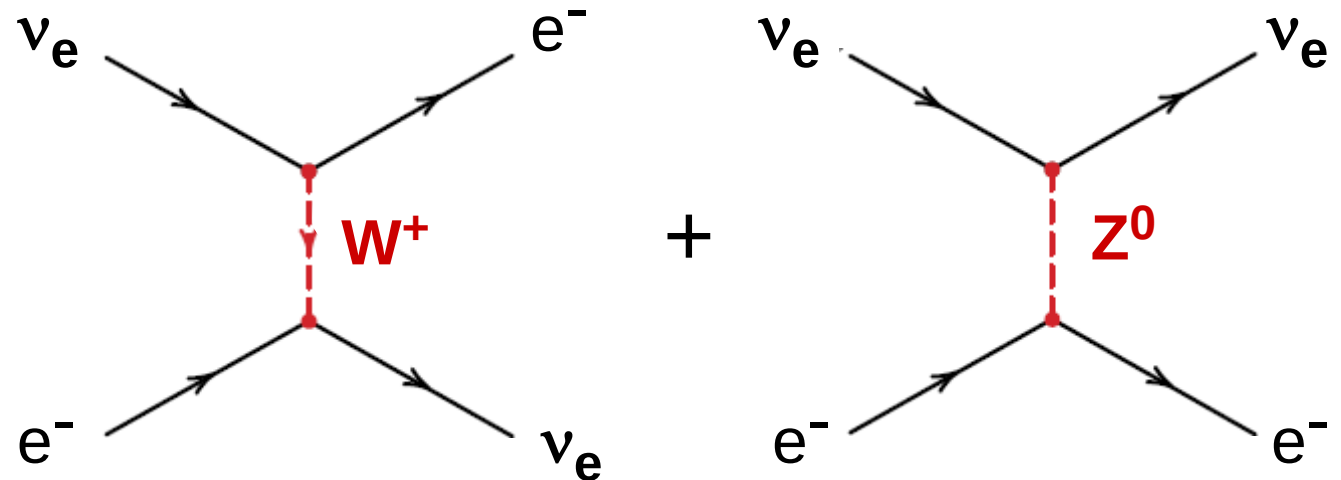
Interferenz der Ströme

-

$$\text{NC: } \nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$



$$\text{CC+NC: } \nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$



semileptonische Reaktionen

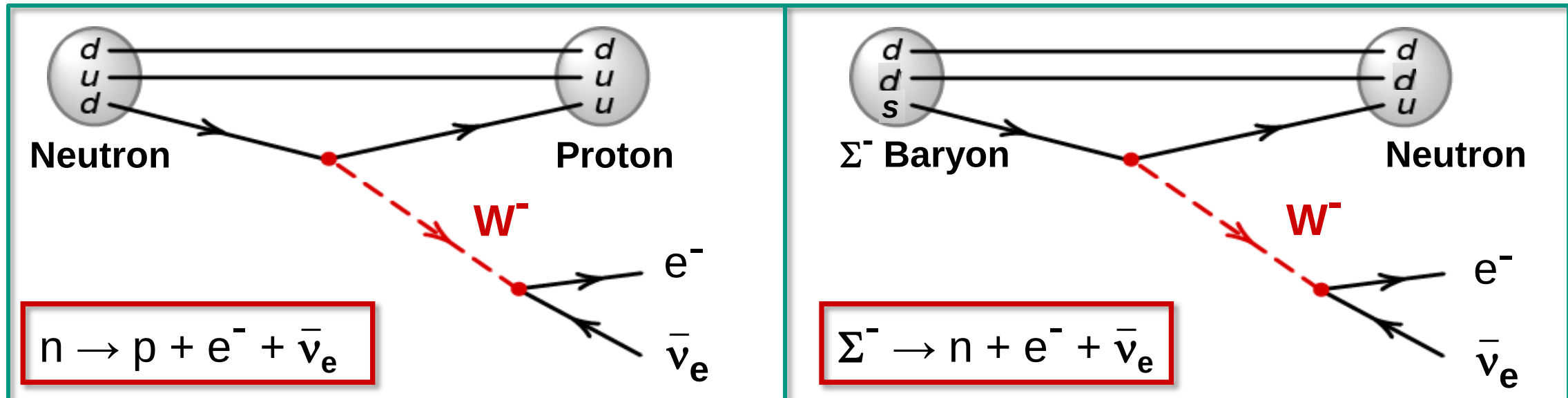
■ semi-leptonische Prozesse:

- neben Leptonen sind auch Hadronen im Anfangs- und Endzustand
- wichtige Beispiele semi-leptonischer Kanäle:
n-Zerfall, Kaon-Zerfall: $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$
- für semileptonische Zerfälle von Hadronen mit Strangeness $S \neq 0$ gilt

$$\Delta S = \Delta Q$$

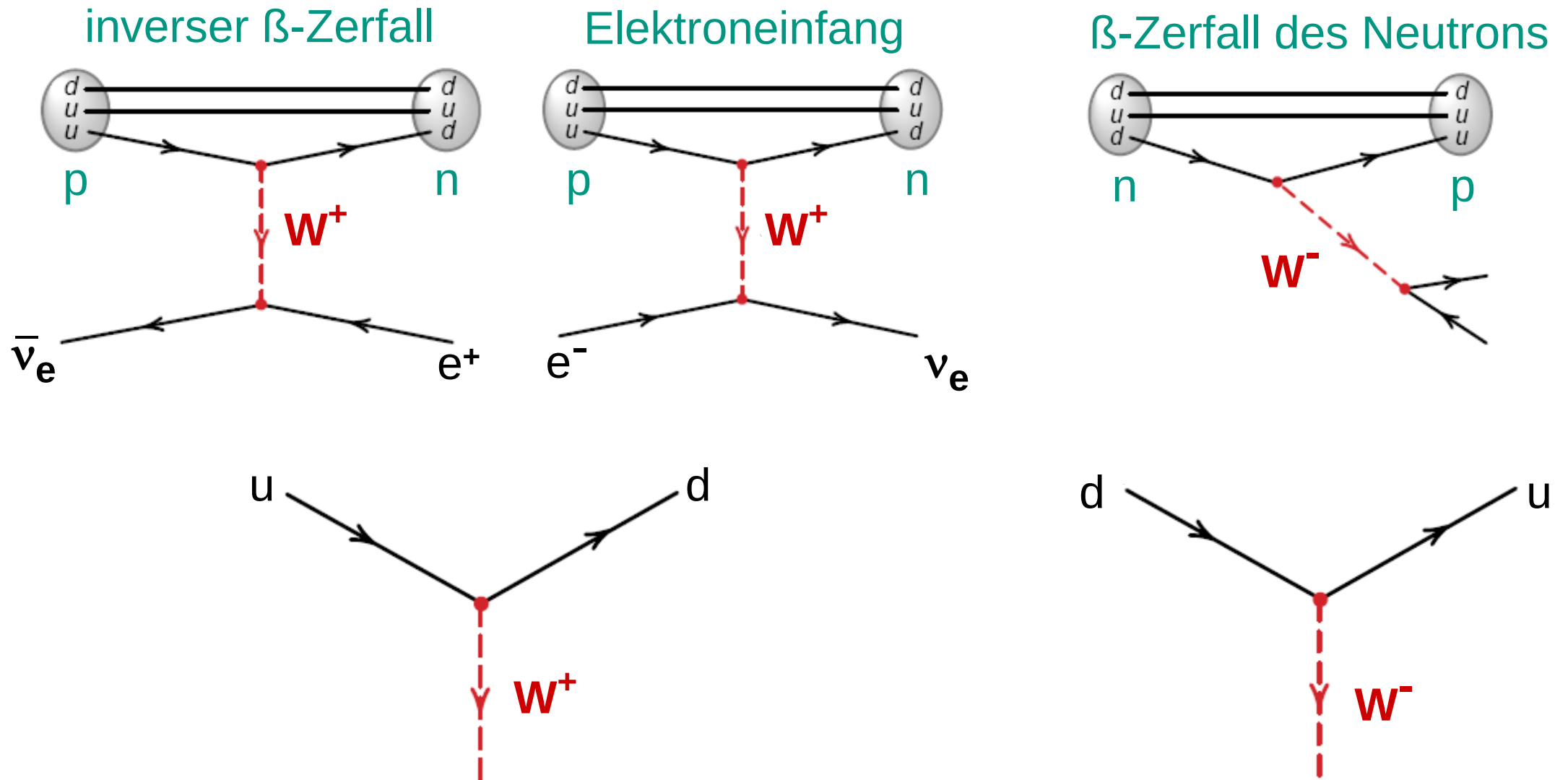
Quarkflavours: $s \rightarrow W^- + u$, $\bar{s} \rightarrow W^+ + \bar{u}$

mit $|\Delta S| = 1$, Beispiel: $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ mit $|\Delta S| = +1$ und $|\Delta Q| = +1$



semileptonische Reaktionen

- semileptonische Prozesse und fundamentaler $W^\pm$ -Vertex & (u,d) Quarks

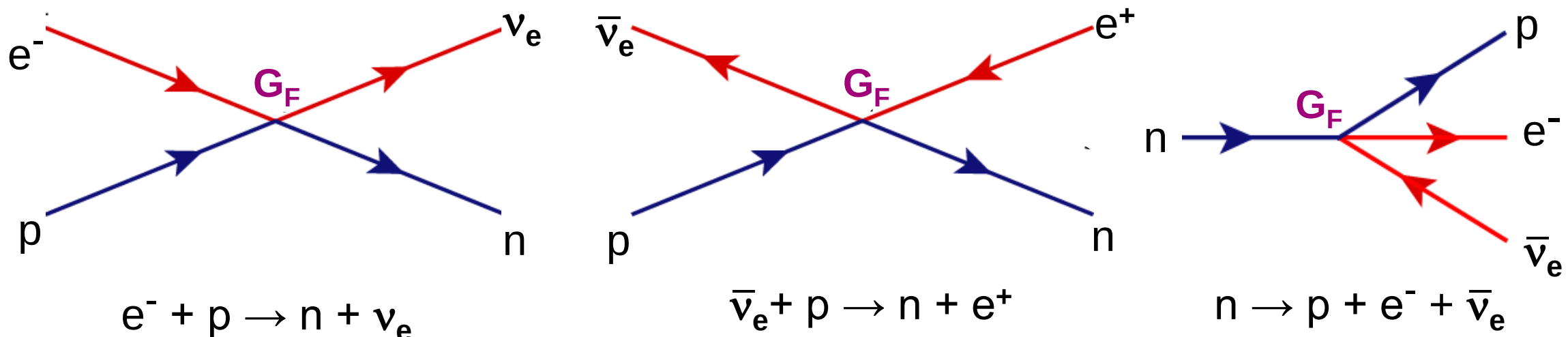


β -Zerfall als Punktwechselwirkung

■ Punktwechselwirkung:

- extrem geringe Reichweite der sehr massiven $W^\pm$ - Bosonen
 $R \sim 1/M_W \sim 0.002$ fm (zum Vergleich: Ladungsradius Proton: 0.862 fm)
- schwache Wechselwirkung kann bei niedrigen Energien als **Fermi'sche Punktwechselwirkung** approximiert werden
- Stärke der 4-Fermion-Kopplung wird durch die dimensionsbehaftete Fermi-Konstante G_F beschrieben

$$M_{fi} = G_F \int \psi_n \psi_p^* \psi_e^* \psi_\nu^* d^3\vec{r} \quad \text{mit} \quad \psi_e = e^{i\vec{p}_e \cdot \vec{r}} \quad \psi_\nu = e^{i\vec{p}_\nu \cdot \vec{r}}$$



■ Fermi-Kopplungskonstante:

- die geringe Reichweite der massiven W-Bosonen ($\sim 1/M_W \sim 0.002$ fm) kann als **Fermi'sche Punktwechselwirkung** approximiert werden
- Stärke der Fermi-Kopplungskonstante G_F der Punktwechselwirkung wird aus der Zerfallskonstante λ spezieller (Fermi)-Zerfälle bestimmt, wobei mit Fermi's Goldener Regel gilt: $\lambda \sim G^2 \cdot |M|^2$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{m_e^5 c^4}{2\pi^3 \hbar^7} \cdot f \cdot G_F^2 \cdot |M_{fi}|^2$$

- für bestimmte (Fermi-) β -Übergänge wie $^{14}\text{O} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu_e$ gilt $|M_F|^2 = 1$, damit ergibt sich G_F zu:

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1.16637 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2} = 8.96 \times 10^{-5} \text{MeV fm}^{-3}$$

Fermi-Kopplungskonstante und g

- die Konstante G_F ist **dimensionsbehaftet** & nur bei niedrigen Energien gültig, Verletzung der Unitarität bei $E_{\text{CMS}} > 740 \text{ GeV}$
- im Vergleich zur Darstellung mit dem entspr. Propagatorterm von Vektorbosonen ergibt sich

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = \frac{\sqrt{2}}{8} \cdot \frac{g^2}{M_W^2}$$

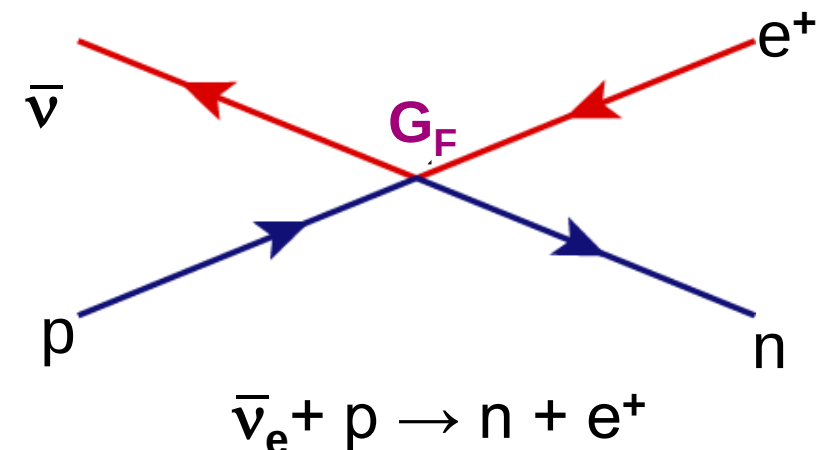
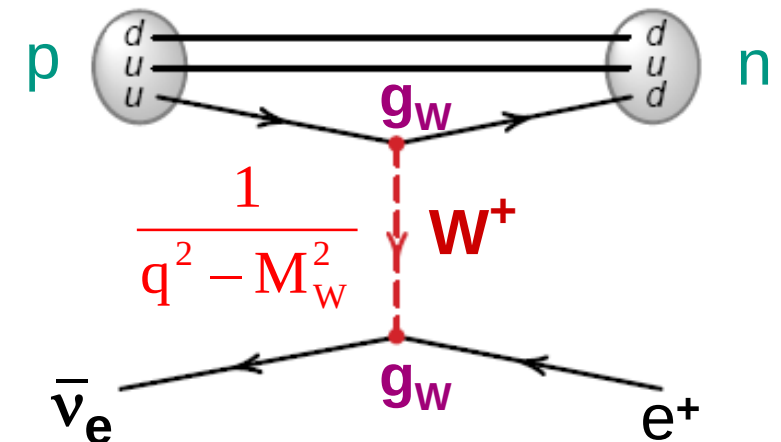
(Vorfaktoren sind historisch bedingt)

bei kleinem q^2 ist Fermi-Theorie eine effektive Theorie der schwachen Ww.:

Propagator $1/(q^2 - M_W^2) \rightarrow 1/M_W^2$ (punktförmig)

- dimensionslose Kopplung $\alpha_W = g^2 / (\hbar c)$
 - analog Feinstrukturkonstante $\alpha_{\text{em}} = e^2 / (\hbar c)$
 - mit $\alpha_W \sim 1/30$ & $\alpha_{\text{em}} = 1/137$ gilt $\alpha_W > \alpha_{\text{em}}$!!

inverser β -Zerfall

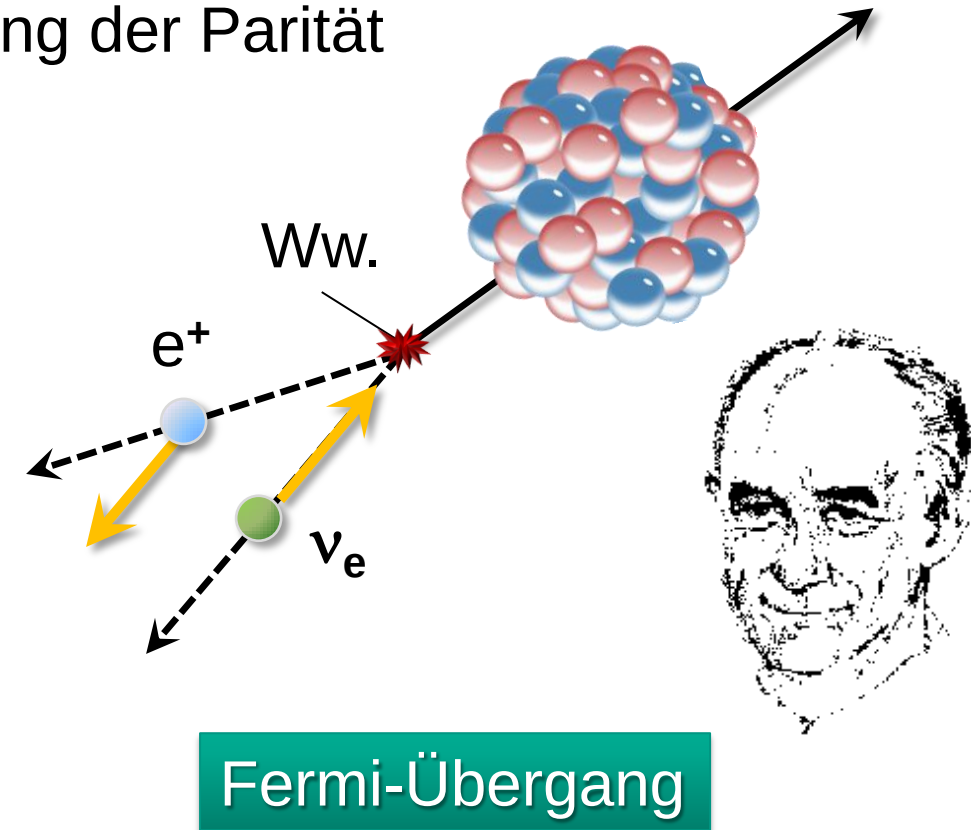


■ Fermi-Übergänge:

- die **Spins** der beiden Leptonen sind **antiparallel** $\vec{s}_e \uparrow \downarrow \vec{s}_\nu$ ($\Sigma \vec{s} = 0$)
- der Gesamtdrehimpuls j der Leptonen verschwindet ($j = L + s = 0$)
- die beiden Leptonen werden parallel emittiert $\vec{p}_e \uparrow \uparrow \vec{p}_\nu$
- die Spinrichtung des Nukleons im Kern ($n \rightarrow p$) ändert sich nicht
- für den Kernspin gilt: $\mathbf{J}_f = \mathbf{J}_i$, keine Änderung der Parität

■ Vektor-Wechselwirkung:

- Fermi'sche Theorie entstand in enger Analogie zur elektromagnet. Ww.
- Kopplung von 2 Strömen
- aus der Richtungskorrelation der beiden Leptonen und $h(\nu_e) = -1$:
($e^+ \nu_e$) Paar mit $\vec{s}_\ell$ und $\vec{p}_\ell$ entspricht Vektor **Fermiübergang = Vektorübergang**
mit Kopplung g_V , d.h. es gilt $\mathbf{G}_F = g_V$



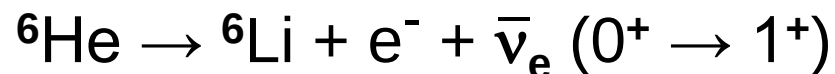
Gamow-Teller Übergänge

■ Gamow-Teller-(GT)-Übergang:

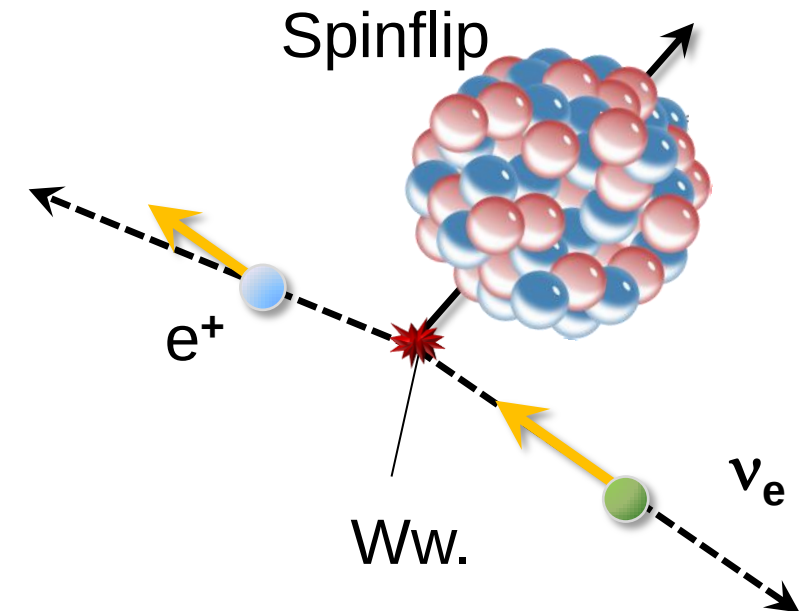
- die Spins der beiden Leptonen sind parallel
- Gesamtdrehimpuls j der Leptonen $j = 1$ ($\uparrow\uparrow$)
- bei GT-Übergängen kommt es zu einem **Spinflip des Nukleons**

$$|J_f - J_i| \leq j(=1) \leq J_f + J_i$$

- - bei GT: keine $J_f = J_i$ Übergänge, d.h. $J_i = 0 \rightarrow J_f = 0$ ist reiner Fermi-Übergang
- Beispiel eines Gamow-Teller Übergangs:



- - Transformation entspricht einem Axialvektor: Leptonen-Spins parallel $\uparrow\uparrow$, Leptonen-Emission erfolgt in die entgegengesetzte Richtung, d.h. ν_e & e^+ zeigen antiparallele Impulse p_e $\uparrow\downarrow$



Gamow-Teller-Übergang

■ Dirac-Gleichung für freie Teilchen:

- bildet die Grundlage der relativistischen Quantenfeldtheorien:

$$\left(i\hbar \cdot \gamma^\mu \cdot \frac{\partial}{\partial x^\mu} - mc \right) \Psi(x^\mu) = 0$$

- **Observable** ergeben sich aus bilinearen Formen der Art $\bar{\Psi} \Omega \Psi$

■ Eingruppierung der Operatoren Ω_i :

- Grundlage ist Verhalten unter Paritätstransformation P

$$\text{skalar} \quad -\Omega_S : \quad S \equiv \bar{\Psi} \Psi$$

$$\text{vektoriell} -\Omega_V : \quad V^\mu \equiv \bar{\Psi} \gamma^\mu \Psi$$

$$\text{pseudoskalar} -\Omega_P : \quad P \equiv \bar{\Psi} \gamma^5 \Psi$$

$$\text{axialvektoriell} -\Omega_A : A^\mu \equiv \bar{\Psi} \gamma^\mu \gamma^5 \Psi$$

$$\text{tensoriell} -\Omega_T : \quad T^{\mu\nu} \equiv \bar{\Psi} (\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu) \Psi$$

5 Lorentzinvariante
Darstellungen