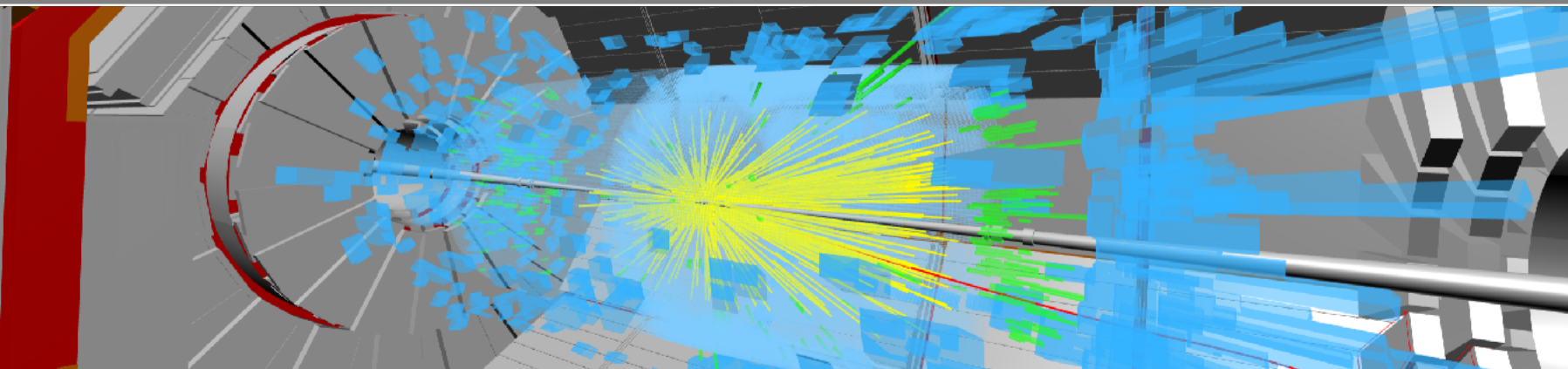


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 13. Vorlesung, Teil 1

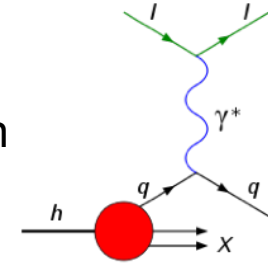
ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS

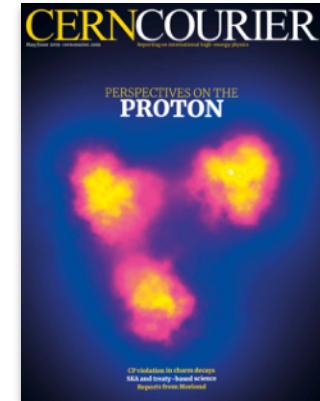


Kurze Wiederholung

- Tiefinelastische Streuung (*Deep Inelastic Scattering*, DIS)
 - Bsp.: Streuung von Elektronen/Neutrinos/Myonen mit Nukleonen
 - Wirkungsquerschnitt parametrisiert durch **Strukturfunktionen**
 - Partonmodell: Strukturfunktionen als gewichtete Summe aus **Partonverteilungen** (PDFs)
 - **Erweitertes** Partonmodell:
 - QCD-Wechselwirkung der Quarks und Gluonen
 - Proton = **drei Valenzquarks**
 - + **See** aus Quarks, Antiquarks, Gluonen
 - Bjorken-Skalierungsverhalten **verletzt**



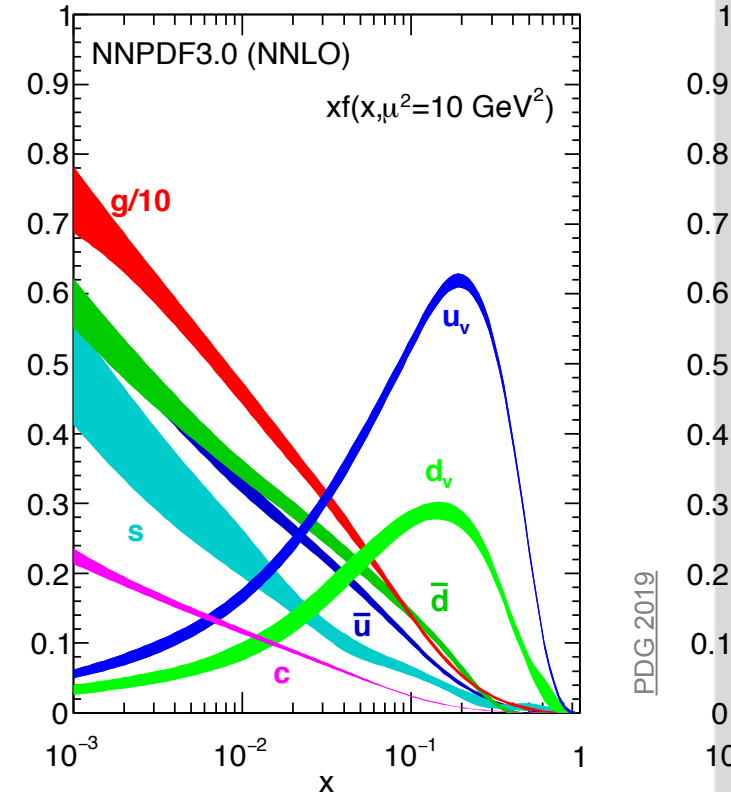
E2m, wikipedia commons



Ausgabe Mai/Juni 2019

Kurze Wiederholung

- Partonverteilungen:
 - **Universelle** Eigenschaften des Nukleons, nicht *ab initio* berechenbar
 - PDF aus Messungen bei festem Q^2
→ Q^2 -Evolution durch DGLAP-Gleichungen
 - Experimente mit **Fixed-Target**-Aufbauten und an **HERA, Tevatron, LHC**: Messung der Strukturfunktionen in tiefinelastischer Streuung und andere Prozesse
→ PDFs aus gemeinsamer Anpassung an mehrere Datensätze ("PDF-Fit")



Aufgabe 23

Welche der folgenden Aussagen zum Partonmodell sind korrekt?

- A. PDFs sind universelle Wahrscheinlichkeitsdichten für Partonen mit einem Impulsbruchteil x eines Nukleons.
- B. Der gesamte Impuls eines Nukleons wird von Spin-1/2-Partonen getragen.
- C. Für die Physik am LHC ist eine genaue Kenntnis der Proton-PDFs wichtig.
- D. Mit steigendem Impulsübertrag Q^2 beinhalten Nukleonen weniger Gluonen mit geringen Impulsen.
- E. In guter Näherung gibt es zusätzlich zu den Valenzquarks im Nukleon gleich viele Quarks und Antiquarks.

Kapitel 7

Elektroschwache Wechselwirkung

Einordnung und Übersicht

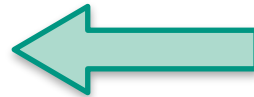
Kapitel 6:
Starke Wechselwirkung,
Quantenchromodynamik



Kapitel 7:
Elektroschwache Wechselwirkung

7.0 Einführung
7.1 Prozesse der elektroschwachen WW
7.2 Elektroschwache Vereinheitlichung
7.3 Schlüsselexperimente
7.4 Quarkmischung

Kapitel 8:
Moderne Teilchenphysik,
Standardmodell



Kapitel 7.0

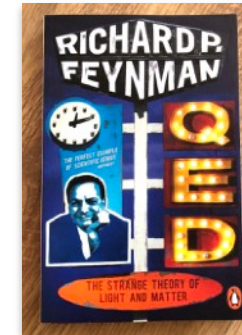
Einführung

■ Forschungsgeschichte

Quantenelektrodynamik (QED):

- 1920er/1930er Jahre: Quantentheorie der Wechselwirkung elektromagn. Strahlung mit Materie, Störungstheorie (Dirac, Bethe, Jordan, Weisskopf, Feshbach, Oppenheimer, ...)
- 1950er Jahre: Quantentheorie der Elektro- und Magnetostatik sowie der Elektrodynamik (Feynman, Tomonaga, Stückelberg, Schwinger)

→ erfolgreiches Vorbild für Eichtheorie der schwachen WW



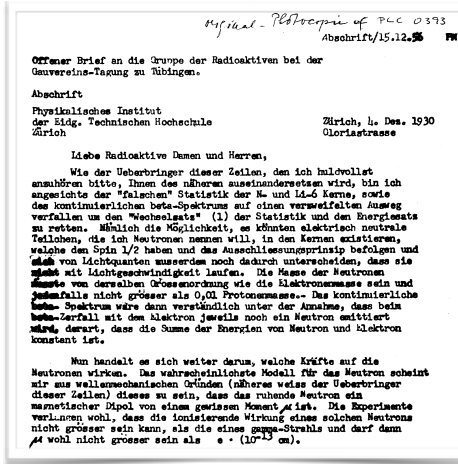
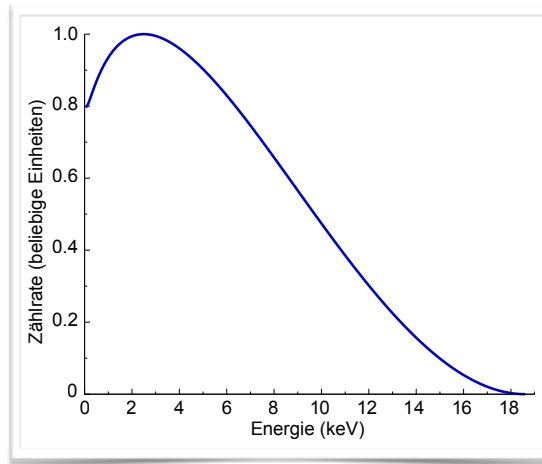
R. Feynman:
"QED - Die Seltsame
Theorie des Lichts und der
Materie"



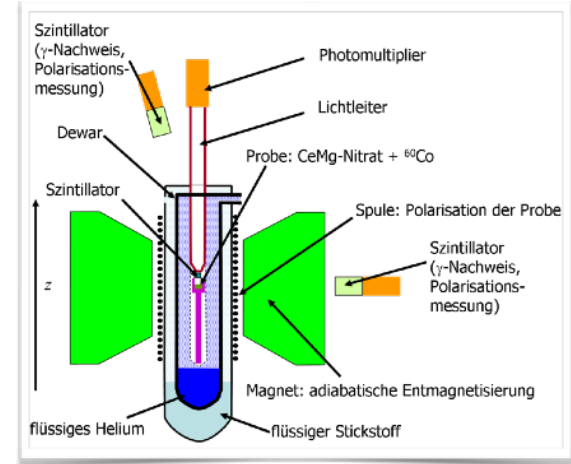
Erste Shelter Island Conference, 1947

Elektroschwache Wechselwirkung

- Forschungsgeschichte **schwache Wechselwirkung**:
 - 1914: kontinuierliches Betaspektrum
 - 1930er Jahre: Paulis Neutrino-Postulat → Fermi-Theorie des Betazerfalls
 - 1950er Jahre: Symmetrien P und C maximal verletzt (Wu, Goldhaber)



z. B. in W. Pauli: Wissenschaftlicher Briefwechsel, Bd. II (Springer 1985)

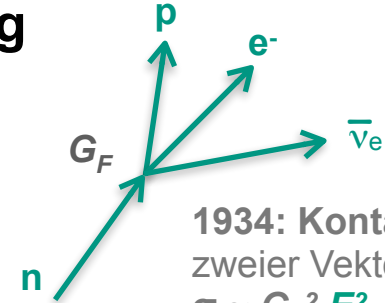


Pen88, Wu-Experiment_wikipedia.png, gemeinfrei

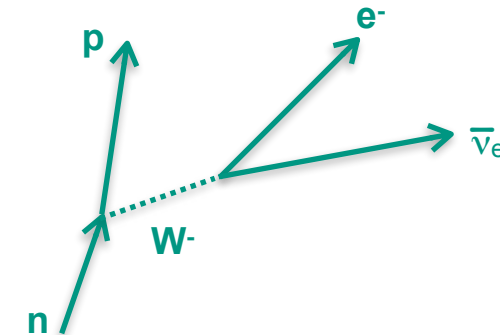
Elektroschwache Wechselwirkung

- Ab den späten 1950er Jahren: Entwicklung der **Elektroschwachen Vereinheitlichung**
- Aufbauend auf Fermis punktartiger “**4-Fermion-Wechselwirkung**” (Niederenergie-Näherung) und auf dem **Formalismus der QED**
- Einbindung der Austauschteilchen, dadurch in breitem Energiebereich gültig

1938: Austauschboson (Yukawa, Klein *et al.*) verhindert Divergenz von σ bei hohen Energien
später: paritätsverletzende Ströme, V-A Struktur



1934: Kontaktwechselwirkung
zweier Vektorströme (V)
 $\sigma \sim G_F^2 E^2$ wächst unbegrenzt

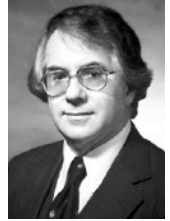


- Entwicklung der **Elektroschwachen Vereinheitlichung** mit drei **Forderungen**:
 - **Eichfreiheit**: Erfüllung einer zugrundeliegenden **Eichsymmetrie**
d. h. Effekte der Kraft sind gleich an allen Punkten in Raum und Zeit
 - **Renormierbarkeit**:
Theorie soll keine “unphysikalischen” Unendlichkeiten enthalten
 - Kompatibilität mit **empirischen Beobachtungen**:
z. B. Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung,
Massen der Eichbosonen (masseloses Photon, aber schwere W/Z ,
d. h. effektiv “versteckte/gebrochene” Symmetrie bei niedrigen Energien)

Elektroschwache Wechselwirkung

- Von der schwachen zur **elektroschwachen Wechselwirkung**:
 - 1958: **V–A-Theorie** („V minus A“), verbesserte Theorie der schwachen Wechselwirkung mit Paritätsverletzung (Feynman, Gell-Mann; Sudarshan, Marshak)
 - 1961: **vereinheitlichte Theorie** der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung mit Eichgruppe $SU(2) \times U(1)$ (Glashow)
 - 1964: Massen der Elementarteilchen durch **Higgs-Mechanismus** (Brout, Englert; Higgs; Goldstone, Jona-Lasinio, Nambu; Guralnik, Hagen, Kibble)
 - 1968: Anwendung des Higgs-Mechanismus auf $SU(2) \times U(1)$ -Symmetrie → **elektroschwache Theorie** (Salam, Weinberg)

S.L. Glashow



A. Salam



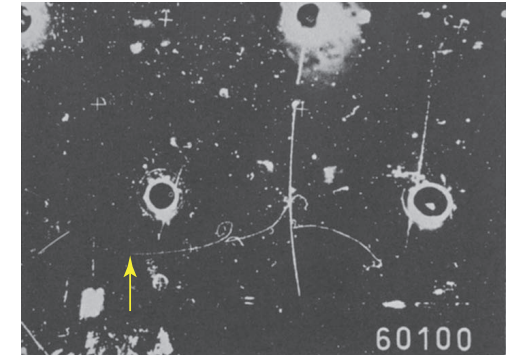
S. Weinberg



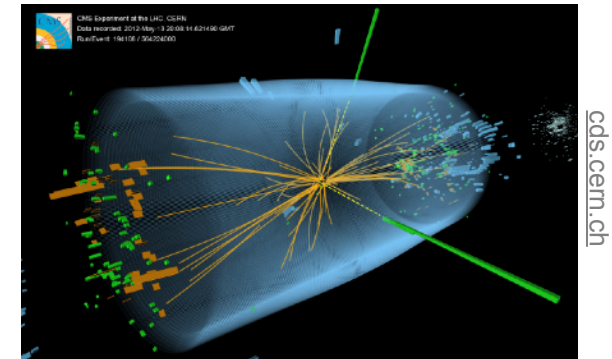
Elektroschwache Wechselwirkung

- Experimentelle und theoretische **Etablierung** der elektroschwachen Wechselwirkung:
 - 1971: **Renormierbarkeit** ($\approx$ mathematische Konsistenz) der elektroschwachen Theorie ('t Hooft, Veltman)
 - 1973: Entdeckung **neutrale Ströme** (CERN)
 - 1981: Entdeckung **W- und Z-Bosonen** (CERN)
 - ab 1989: **Präzisionsphysik** an der Z-Resonanz (CERN, SLAC)
 - 2012: Entdeckung **Higgs-Boson** (CERN)

Kandidat für neutralen Strom (1973)



Kandidat für Higgs-Boson-Zerfall in $\gamma\gamma$ (2012)



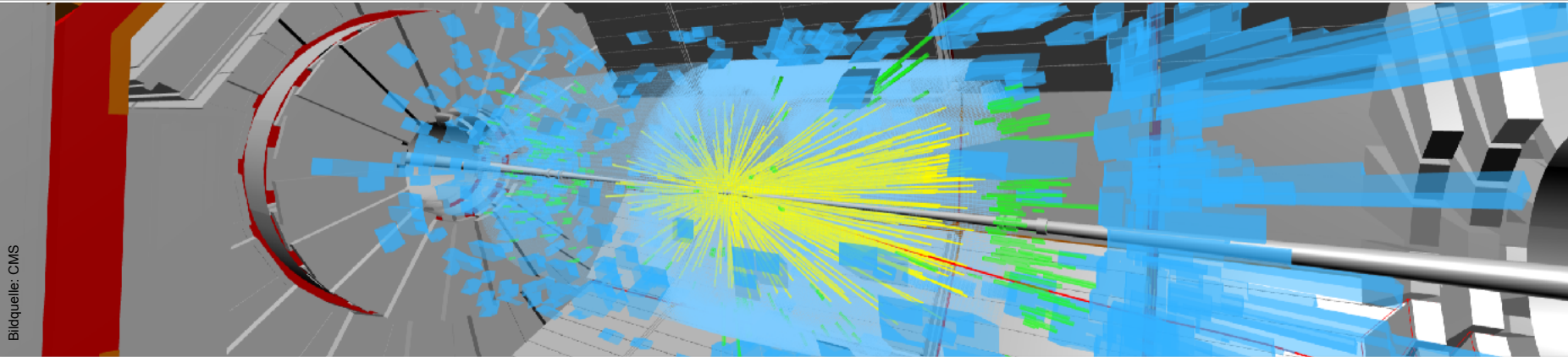
Aufgabe 24

- Welche Aussagen zur Theorie der elektroschwachen WW sind korrekt?
 - A. Die Kopplung der schwachen Wechselwirkung enthält Vektor- und Axialvektoranteile mit gleich großem Betrag und gleichem Vorzeichen.
 - B. Die elektroschwache Vereinheitlichung ist eine nach dem Modell der Quantenelektrodynamik erstellte Quantenfeldtheorie.
 - C. Renormierbarkeit impliziert (wie auch bei QED und QCD), dass der elektroschwache Lagrangian keine expliziten Massenterme enthält.
 - D. Bei Energien oberhalb von ca. 100 GeV manifestiert sich eine spontane elektroschwache Symmetriebrechung.
- Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS [[link](#)].

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 13. Vorlesung, Teil 2

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



Bildquelle: CMS

Aufgabe 24

- Welche Aussagen zur Theorie der elektroschwachen WW sind korrekt?
 - A. Die Kopplung der schwachen Wechselwirkung enthält Vektor- und Axialvektoranteile mit gleich großem Betrag und gleichem Vorzeichen.
 - B. Die elektroschwache Vereinheitlichung ist eine nach dem Modell der Quantenelektrodynamik erstellte Quantenfeldtheorie.
 - C. Renormierbarkeit impliziert (wie auch bei QED und QCD), dass der elektroschwache Lagrangian keine expliziten Massenterme enthält.
 - D. Bei Energien oberhalb von ca. 100 GeV manifestiert sich eine spontane elektroschwache Symmetriebrechung.
- Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS [[link](#)].

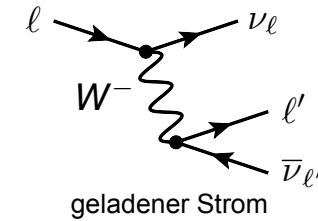
Kapitel 7.1

Prozesse der elektroschwachen Wechselwirkung

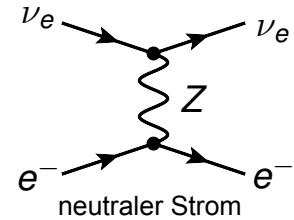
Klassifikation

- **Leptonische Prozesse:** ausschließlich **Leptonen in Anfangs- und Endzustand**, keine Beeinflussung durch QCD
- **Semileptonische Prozesse:** **Leptonen und Hadronen** im Anfangs- und/oder Endzustand, Bindung der Quarks i.d.R. nicht vernachlässigbar
- **Hadronische** (auch: nichtleptonische) Prozesse: ausschließlich Hadronen involviert, ggf. großer Einfluss der **Bindungszustände** der Quarks

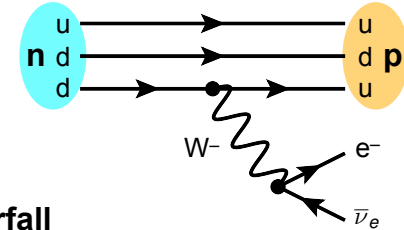
Zerfall eines Leptons



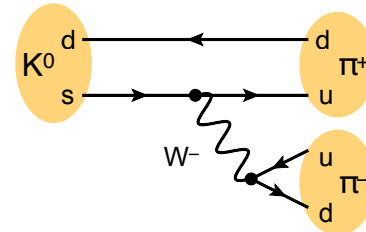
νe -Streuung



β -Zerfall



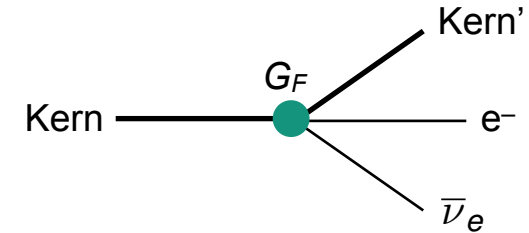
K^0_S -Zerfall



β-Zerfall: Zerfallskonstante

- Berechnung der Zerfallskonstante $\lambda = 1/\tau$: **Fermis Goldene Regel**

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} \underbrace{|\langle f | \mathcal{M}_{fi} | i \rangle|^2}_{\text{Dynamik}} \underbrace{\rho(E_f)}_{\text{Phasenraum}}$$



- **Dynamik** des Zerfalls (heute: geladener Strom)

- **Fermi-Theorie** der schwachen Wechselwirkung (1934): **Kontaktwechselwirkung** mit effektiver Kopplungskonstante G_F (Fermikonstante)
- Sehr gute Näherung, da alle Massen $\ll m_W$: ersetze Propagator des W-Bosons durch Konstante $\sim 1/m_W^2$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \left(\frac{g}{2\sqrt{2}} \right)^2 \frac{(\hbar c)^3}{(m_W c^2)^2}$$

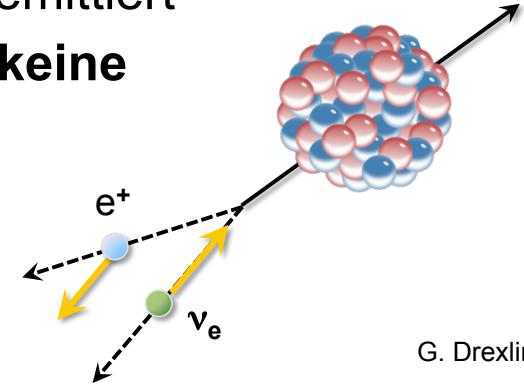
mit

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1,1663787(6) \text{ GeV}^{-2}$$

PDG

β-Zerfall: Fermi-Übergänge

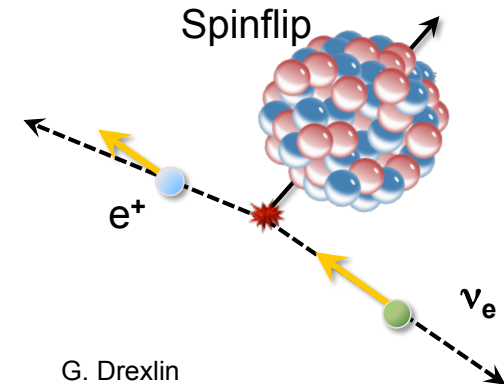
- Beobachtung: Leptonen (e , ν_e) bevorzugt **parallel** emittiert mit antiparallelen Spins, keine Vorzugsrichtung → **keine Änderung** von **Kernspin** ($J_f = J_i$) und **Parität**
- Theoretische Beschreibung: **Vektorkopplung** → Analogie zur elektromagnetischen Wechselwirkung, **Paritätserhaltung**
- Übergangsmatrixelement: $M_{fi} \approx \text{const.} \cdot G_F$
 - In guter Näherung konstant, **unabhängig von Kernstruktur**
 - Physikalisches Argument: de-Broglie-Wellenlängen von Elektron und Neutrino viel größer als Kernradius → Überlapp der Wellenfunktionen mit **gesamtem Kern**



G. Drexlin

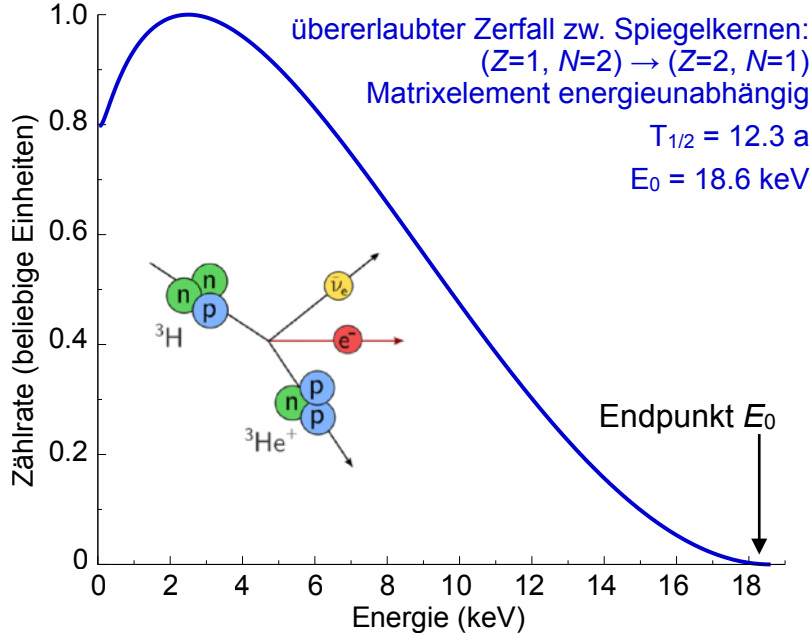
β -Zerfall: Gamow-Teller-Übergänge

- Beobachtung: Leptonenimpulse bevorzugt **antiparallel**, bei parallele Spins. **Vorzugsrichtung** relativ zu Kernspin (siehe Wu-Experiment)
→ Kern: **Spinflip** ($\Delta S = \pm 1$) möglich, **keine** Änderung der **Parität**
- Theoretische Beschreibung:
Axialvektorkopplung
→ **Paritätsverletzung**
- Auch möglich: **Mischung** aus Gamow-Teller- und Fermi-Übergang



β-Zerfall: Phasenraum

Elektronen-Energiespektrum für ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$



nach Zykure, [KATRIN_Spectrum.svg](#), CC BY-SA 3.0

• Gesucht: Energiespektrum $\frac{d\lambda}{dE_e} = \frac{2\pi}{h} \underbrace{|\langle f | M_f | i \rangle|^2}_{\sim \text{const.} \cdot G_F^2} \frac{d\mathcal{S}}{dE_e}$

• Erinnerung: $\frac{d\lambda}{d^3p} = \frac{V}{(2\pi\hbar)^3} \xrightarrow{p \approx \hbar k} \frac{d\lambda}{dp} = \frac{V}{(2\pi\hbar)^3} 4\pi p^2$
 $\rightarrow \frac{d^2\mathcal{S}}{dp_e dp_\nu} = \frac{dne}{dp_e} \cdot \frac{dn\nu}{dp_\nu} = \frac{(4\pi)^2 V^2}{(2\pi\hbar)^6} p_e^2 p_\nu^2$

mit $E_0 = E_e + E_\nu + E_k \approx E_e + E_\nu$

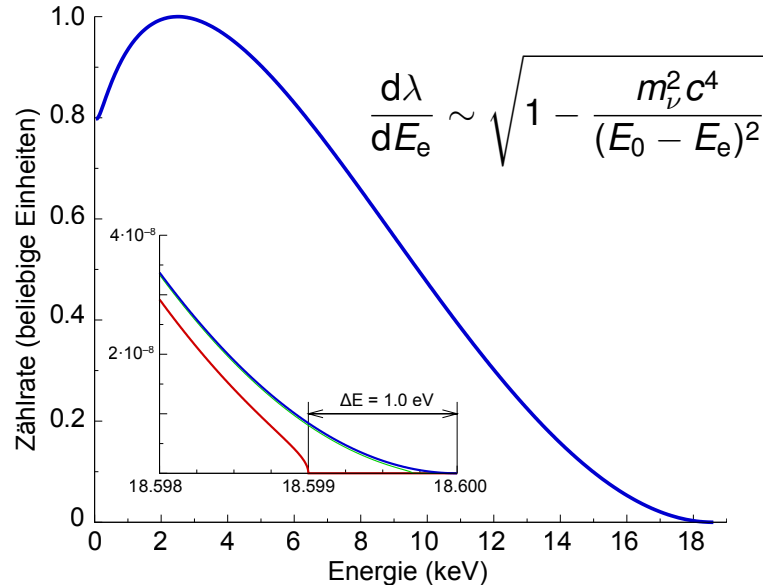
$$E_\nu^2 = p_\nu^2 c^2 + m_\nu^2 c^4 \rightarrow \frac{dp_\nu}{dE_\nu} = \frac{E_\nu}{\sqrt{E_\nu^2 - m_\nu^2 c^4}}$$

für festes E_e : $\frac{dE_0}{dE_e} = 1$

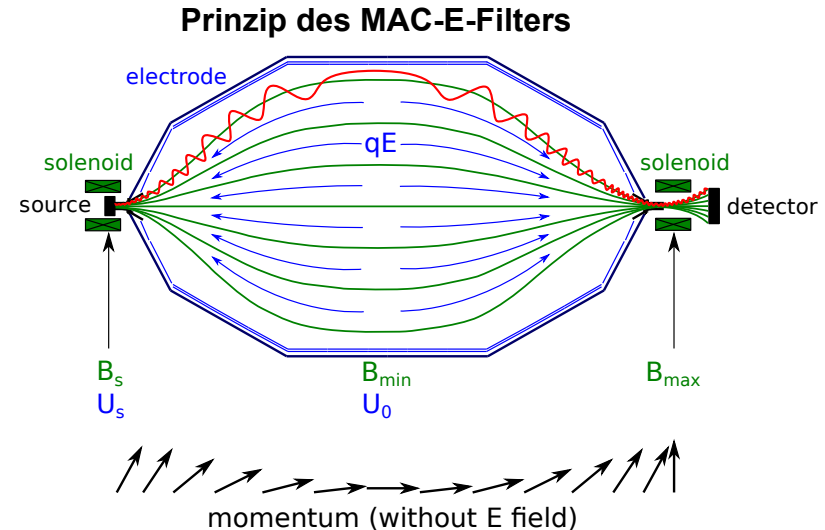
$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{d^2\mathcal{S}}{dp_e dE_e} &= \frac{(4\pi)^2 V^2}{(2\pi\hbar)^6} \frac{1}{c^3} p_e^2 (E_\nu^2 - m_\nu^2 c^4) \frac{E_\nu}{\sqrt{E_\nu^2 - m_\nu^2 c^4}} \\ &= \frac{(4\pi)^2 V^2}{(2\pi\hbar)^6} \frac{1}{c^3} p_e^2 (E_0 - E_e)^2 \underbrace{\sqrt{1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{(E_0 - E_e)^2}}}_{\rightarrow 1 \text{ für } m_\nu \rightarrow 0} \end{aligned}$$

Messung der Neutrinomasse

- Bestimmung der **Neutrinomasse** aus der Form des Elektron-Energiespektrums am Endpunkt → KATRIN-Experiment



nach Zykure, [KATRIN_Spectrum.svg](#), CC BY-SA 3.0



N. Wandkowsky, [Doktorarbeit](#), KIT 2013

Das KATRIN-Experiment

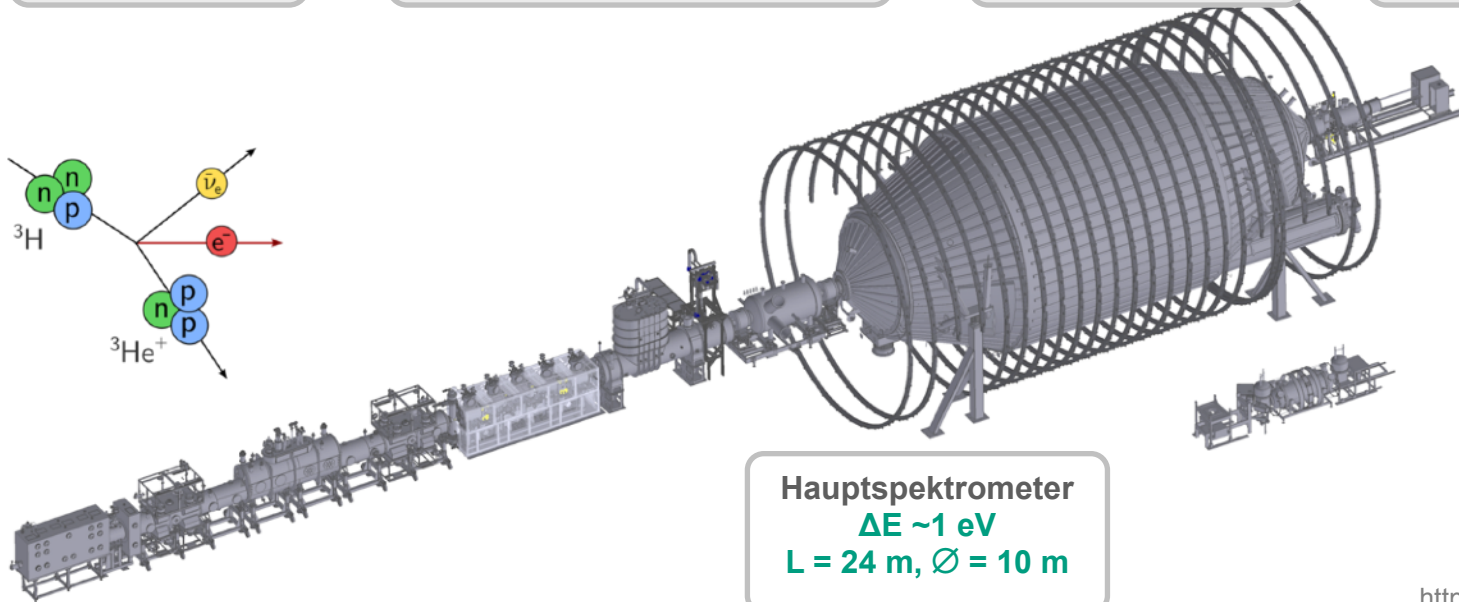
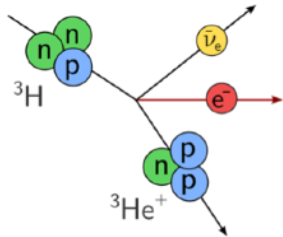


Molekulare
Tritiumgasquelle
 $10^{11} \text{ e}^- / \text{s}$

Tritium-Pumpen & e⁻ Transport
 T_2 -Reduktionsfaktor $> 10^{14}$

Hochauflösende
Energiesmessung
MAC-E-Filter

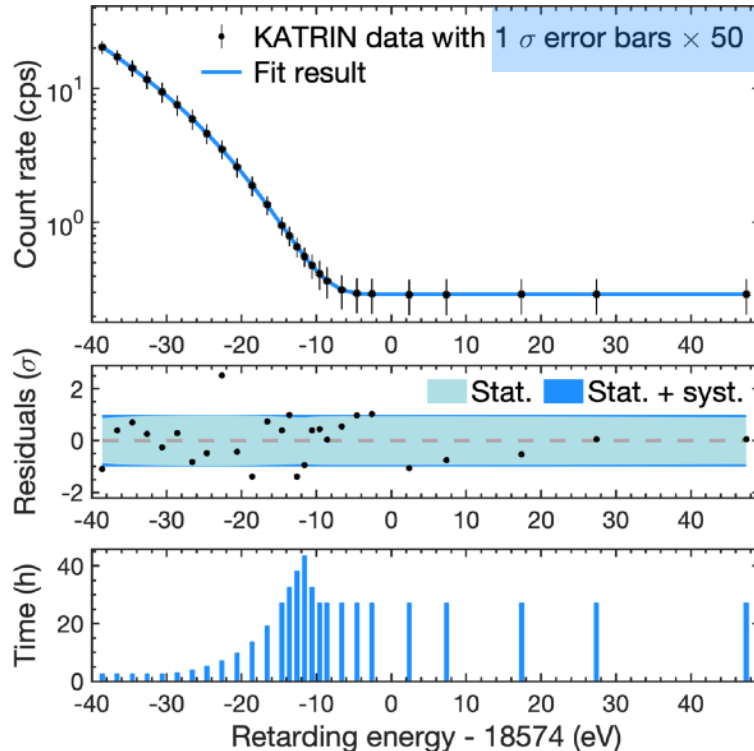
Elektronen-
Detektor
 $< 1 \text{ e}^- / \text{s}$



Hauptspektrometer
 $\Delta E \sim 1 \text{ eV}$
 $L = 24 \text{ m}, \varnothing = 10 \text{ m}$

<http://www.katrin.kit.edu>

Erstes Ergebnis zur Neutrinomasse



Frühjahr 2019: Ca. 2 Millionen Ereignisse im Energiebereich $[E_0 - 40 \text{ eV}, E_0 + 50 \text{ eV}]$

Fit der Daten mit Spektrum-Modell:

$$m_\nu^2 = (-1.0^{+0.9}_{-1.1}) \text{ eV}^2/c^4$$

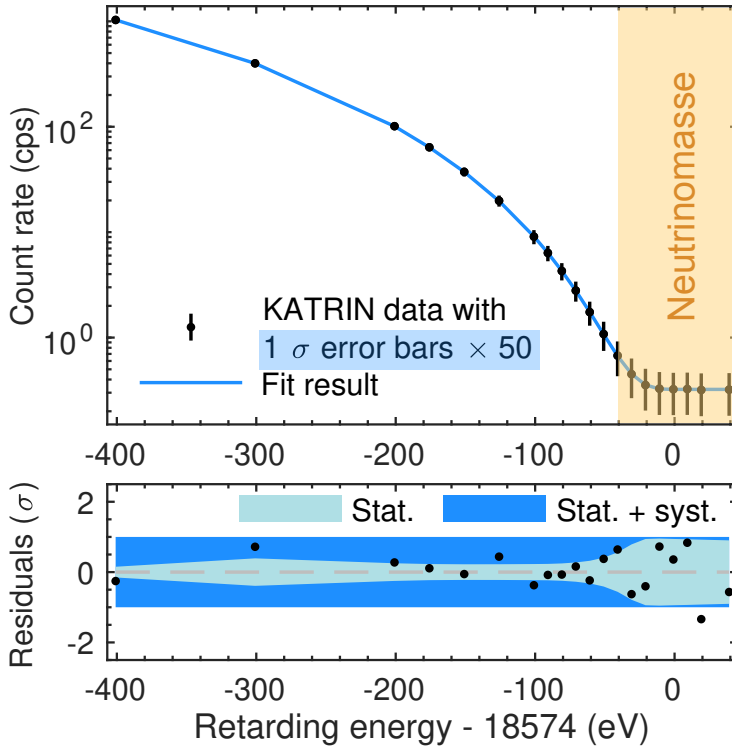
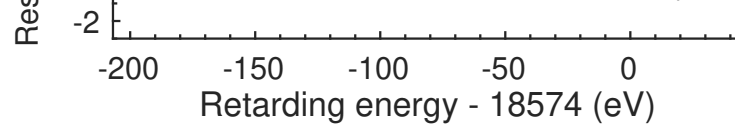
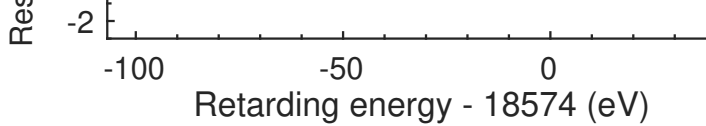
→ **Neue Obergrenze:**

$$m_\nu < 1.1 \text{ eV}/c^2 \quad (90\% \text{ CL})$$

Verbesserung um Faktor ~ 2 mit erst 4 Wochen Daten (geplant: gesamt ca. 5 Jahre)



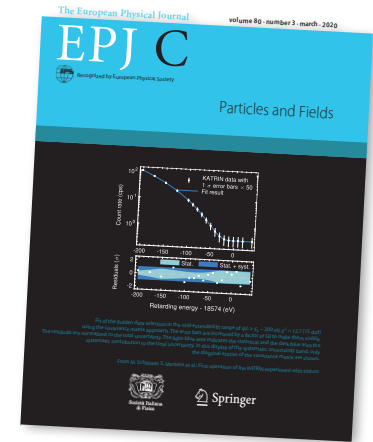
KATRIN-Kollaboration,
Nov. 2019



... auch in **ausgedehntem Energiebereich** ca. 400 eV unterhalb des Endpunktes

Hier: Daten aus der Inbetriebnahmephase im Frühjahr 2018 (geringer Tritium-Durchsatz)

Frage nach “**Neuer Physik**” in schwacher Wechselwirkung?



KATRIN-Kollaboration,
März 2020

Exkurs: Pfade zu “Neuer Physik” ?

Präzisionsspektroskopie β -Zerfall

Tritium beta decay with additional emission of new light bosons

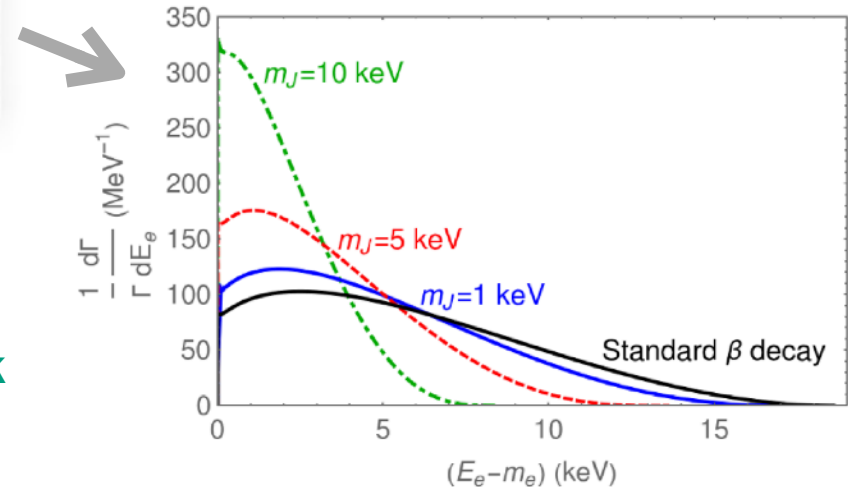
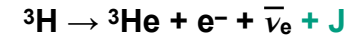
Arcadi, Rodejohann *et al.*, [JHEP 01 \(2019\) 206](#)

Präzisionsspektroskopie Molekülphysik

A Study of New Physics Searches with Tritium and Similar Molecules

Hollik *et al.*, [arXiv:2004:11274](#)

Bsp.: leichtes pseudoskalar Boson J

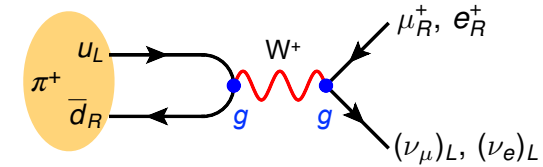


Vielfältige Ideen für Tests auf “exotische” Erweiterungen des Standardmodells

Zerfall geladener Pionen

- Semileptonischer Prozess:

- **Paritätsverletzung**: W-Boson koppelt nur an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen
- In guter Näherung: **Kontaktwechselwirkung** à la Fermi
- **Gebundene** Quarks im Anfangszustand: **Formfaktor**



- Experimentell: Zerfall in Positron + Neutrino **stark unterdrückt** (PDG 2018)

$$\frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)} = 1,2327(23) \cdot 10^{-4}$$

- Zunächst **unerwartetes** Resultat, da Kopplung an e und μ **gleich** („Leptonenuniversalität“) und **größerer Phasenraum** für Elektronen ($m_e \ll m_\mu$)

Zerfall geladener Pionen

■ Erklärung: Impuls- und Drehimpulsbetrachtung

■ Pion = **Pseudoskalar** → Gesamtdrehimpuls 0

■ Zweikörperzerfall: entgegengesetzte Impulse

■ Neutrinomasse $m_\nu \approx 0$: Helizität des Neutrinos festgelegt (LH)

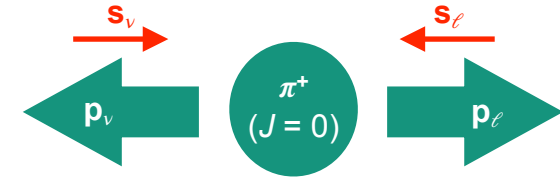
→ Lepton kann nur mit „**falscher**“ **Helizität** (LH) emittiert werden

■ **Helizität $\neq$ Chiralität**: Spinor eines massiven Teilchens mit **fester Helizität** (hier: LH): **Mischung** von rechts- und linkshändigen Komponenten

$$|\ell_{\text{LH}}\rangle = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{pc}{E + mc^2} \right) |\ell_L\rangle + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{pc}{E + mc^2} \right) |\ell_R\rangle \approx \frac{1}{2} (1 + \beta) |\ell_L\rangle + \frac{1}{2} (1 - \beta) |\ell_R\rangle$$

■ Relativistischer Boostfaktor des Leptons ($m_\nu \approx 0$): $\beta_e \approx 0,99997$, $\beta_\mu \approx 0,27$

→ signifikante **Beimischung rechtshändiger Chiralität** nur für Myonen



Aufgabe 25

- Welche der folgenden Prozesse werden primär über ein W- oder ein Z-Boson vermittelt?
- A. $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
 - B. $\mu^- + e^- \rightarrow \mu^- + e^-$
 - C. $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$
 - D. $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
 - E. $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$
- Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS [[link](#)].

Kurze Zusammenfassung

- **Klassifikation** elektroschwacher Prozesse:
leptonisch, semileptonisch, hadronisch
- **Vielfältige Phänomene**, reduzierbar auf folgende elementaren Prozesse
 - **Geladener Strom**: Austausch von **W-Bosonen**
→ Ladungs- und Flavoränderung, ggf. Paritätsverletzung
 - **Neutraler Strom**: Austausch von **Z-Bosonen**
 - Quarks in Hadronen gebunden: Beeinflussung durch **QCD-Effekte**
- Beispiele:
 - Betazerfall: **Fermi-Theorie**, Fermi- und Gamow-Teller-Übergänge
 - Pionzerfall: Zerfall in Elektronen stark **helizitätsunterdrückt**