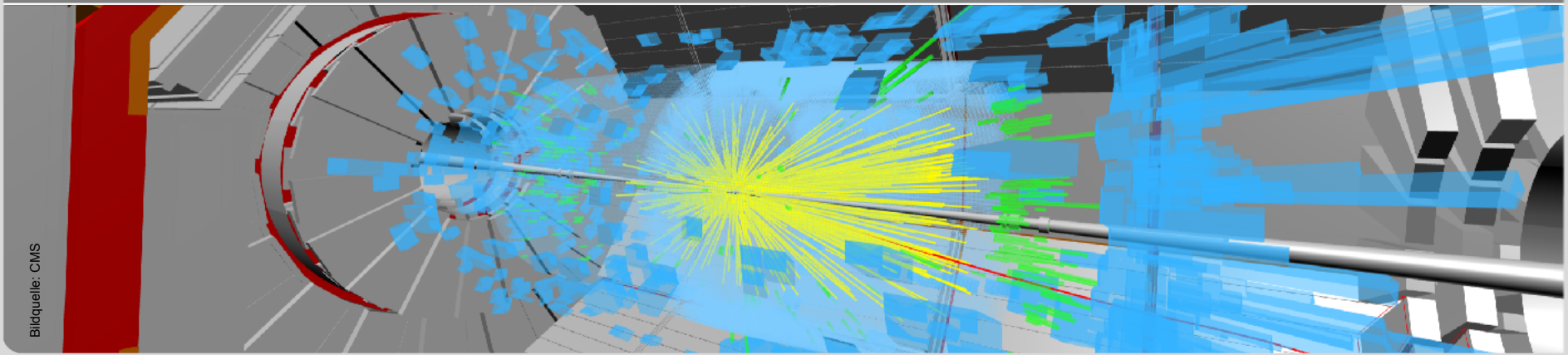
Karlsruher Institut für Technologie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 14. Vorlesung, Teil 1

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

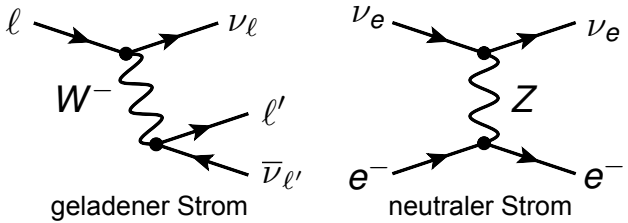


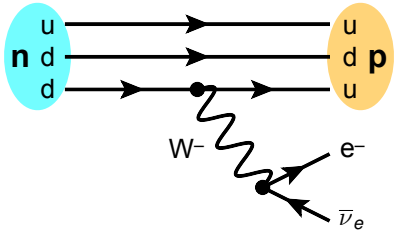
Bildquelle: CMS

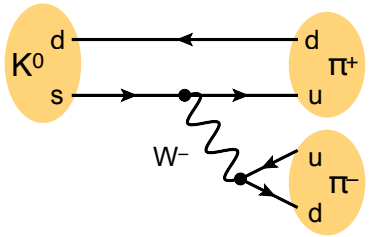
Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Kurze Wiederholung

- **Klassifikation** elektroschwacher Prozesse:
  1. leptonisch
  2. semileptonisch
  3. hadronisch







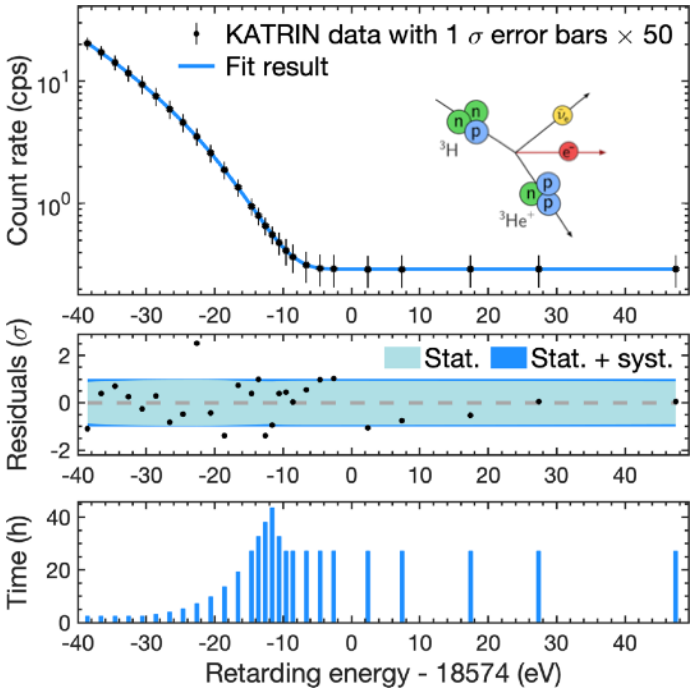
- **Vielfältige Phänomene**, reduzierbar auf 3 elementare Prozesse:
  - **Geladener Strom**: Austausch von **W-Bosonen**
    → Ladungs- und Flavoränderung, ggf. Paritätsverletzung
  - **Neutraler Strom:** Austausch von **Z-Bosonen**
  - Quarks in Hadronen gebunden: Beeinflussung durch **QCD-Effekte**

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Kurze Wiederholung

- Beispiele:
  - Betazerfall: Fermi-Theorie, Fermi- und Gamow-Teller-Übergänge
  - Pionzerfall: Zerfall in Elektronen stark helizitätsunterdrückt, Myonen bevorzugt
- Präzisionsmessungen:
  - Untersuchung *“bekannter Physik”*, z. B. Neutrino-Ruhemasse, verlangt höchste Genauigkeit in Experiment und Theorie
  - Suche nach “neuer Physik” in Präzisionsdaten, eröffnet Bezüge zwischen z. B. Standardmodell und Kosmologie

Erste Neutrinomassen-Daten des KATRIN-Experiments, 2019

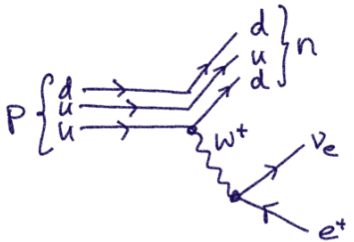


Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

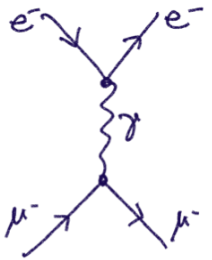
Aufgabe 25

- Welche der folgenden Prozesse werden primär über ein W- oder ein Z-Boson vermittelt?

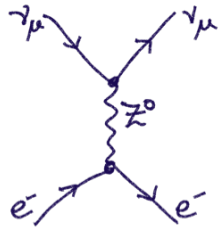
A. $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$



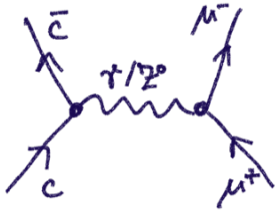
B. $\mu^- + e^- \rightarrow \mu^- + e^-$



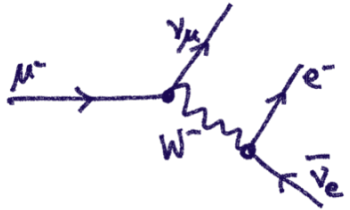
C. $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$



D. $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$



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



Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

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

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Karlsruher Institut für Technologie

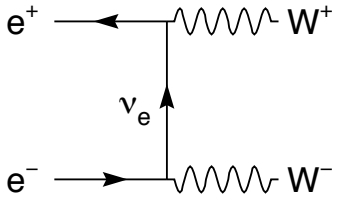
Kapitel 7.2

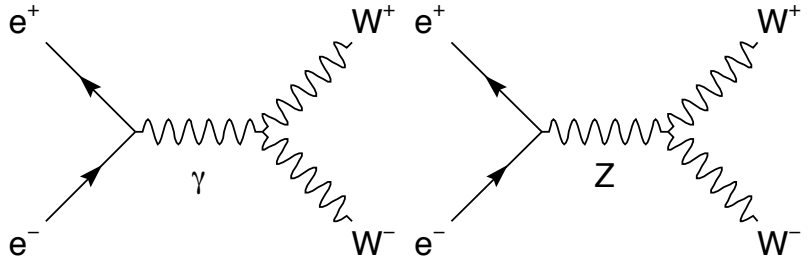
Elektroschwache Vereinheitlichung

Probleme der V–A-Theorie

- Historisch: V–A-Theorie als **Kontaktwechselwirkung** (vgl. Fermi-Theorie)

- Problem: **inkonsistente** Theorie mit **Divergenzen**
  - Erwartete **Wirkungsquerschnitte** wachsen quadratisch mit Schwerpunktsenergie: $\sigma \sim s \rightarrow$ Lösung: Austausch **massiver** W-Bosonen (Yukawa, Klein; 1938)
  - **WW-Paarproduktion** divergent in V–A-Theorie
    → Lösung: Kopplung **zwischen Eichbosonen**, massives **neutrales** Boson

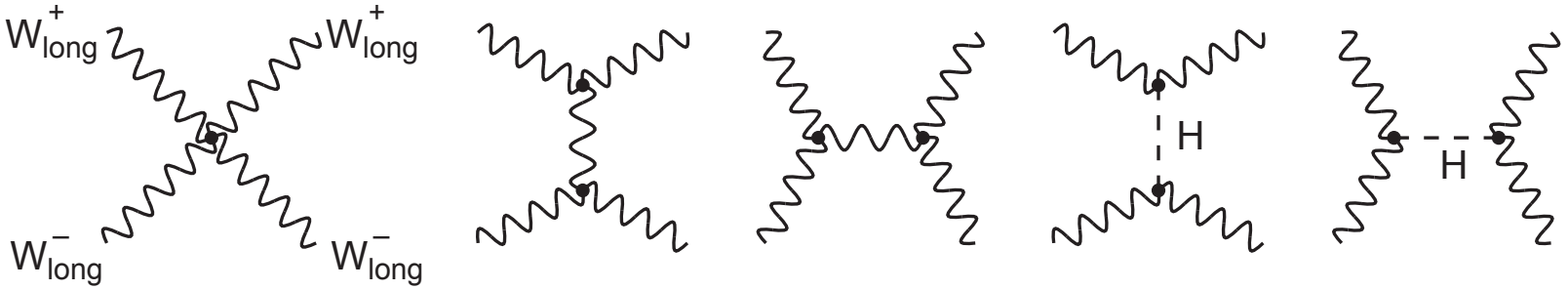




Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Probleme der V–A-Theorie

- Problem: **inkonsistente** Theorie mit **Divergenzen**
  - Streuung von **W-Bosonen mit longitudinaler Polarisation** divergent
    → Lösung: Austausch von **skalaren Teilchen**

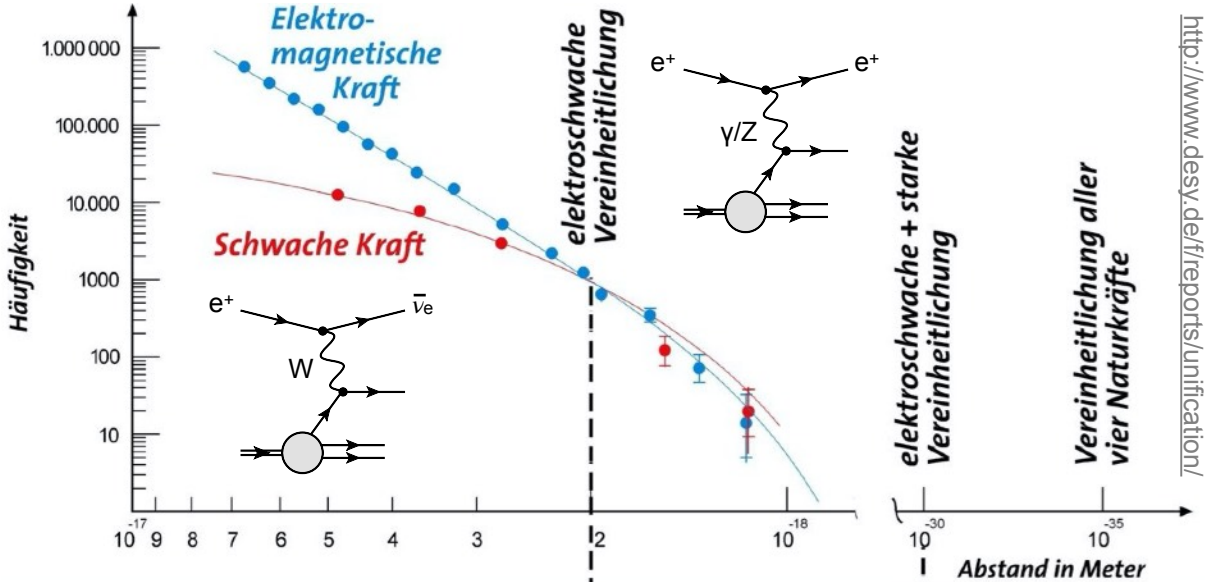


- Gesucht: **konsistente Theorie der schwachen Wechselwirkung** mit zusätzlichem **neutralem Eichboson** (→ Z-Boson) und **skalarem Teilchen** (→ Higgs-Boson; $m_H < (8\pi\sqrt{2}/(3G_F)^{1/2}$)

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Glashow, Salam, Weinberg (1961–1968): **vereinheitlichte** Theorie der **elektromagnetischen** Wechselwirkung und der **schwachen** Wechselwirkung → **dieselbe Kopplung** bei sehr hohen Energien



Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Erster Versuch: weiteres **neutrales schweres Eichboson** (Spin 1)
  - W-Bosonen als **Triplett** (W^1, W^2, W^3) des schwachen Isospins mit $I_3 = \pm 1, 0$
  - SU(2)-Gruppe (vgl. Pionen) ➜ Auf- und Absteigeoperatoren für Isospin:

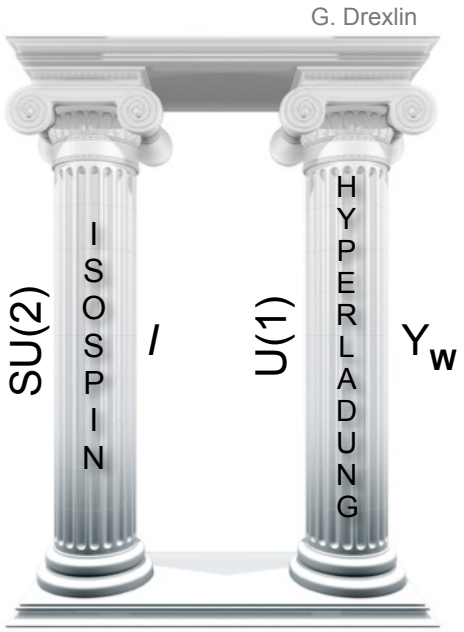
$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(W_\mu^1 \mp W_\mu^2 \right), \; W_\mu^0 = W_\mu^3$$

- Vorhersage: W^0 koppelt (wie $W^\pm$) nur an linkshändige Teilchen ➜ **Widerspruch** zu Experiment: neutrales Boson koppelt auch an rechtshändige Teilchen

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Besser: zusätzliche U(1)-Symmetrie der **schwachen Hyperladung** (≠ U(1)-Symmetrie der QED) → neues Feld mit Eichboson B_μ)
  - Nur **linkshändige** Teilchen koppeln über **schwache Isospinladung** an W_μ-Feld
  - **Alle** Teilchen koppeln über schwache **Hyperladung** an B_μ-Feld
- Beachte: W^0 und B sind **keine** physikalischen Teilchen! → Mischung über **"Weinberg-Drehung"**

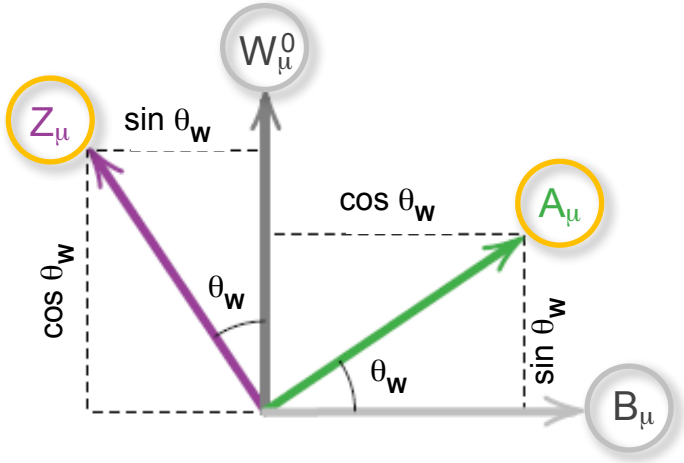


Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Elektroschwache Vereinheitlichung

- Darstellung als **Drehung im schwachen Isospin-Raum**:

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_W & \sin\theta_W \\ -\sin\theta_W & \cos\theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W^0_\mu \end{pmatrix}$$



- **Weinberg-Winkel** θ_W misst die Stärke der elektromagnetischen relativ zur schwachen Wechselwirkung: **$e = g \sin\theta_W$**

- Experimenteller Wert aus ν-e Streuung, Z^0-Breite: **$\sin^2\theta_W \approx 0{,}23$**

  [$a_W \sim g \cdot g$ etwa 4x stärker als $a_{em} \sim e \cdot e$ nur Propagator-Term führt zu geringerer effektiver Stärke!]

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Elektroschwache Quantenzahlen

- Quantenzahlen der Fermionen: Unterscheidung nach **Chiralität**
  - **Linkshändige** Fermionen (rechtshändige Antifermionen): **Isospin-Dubletts**
    → Übergänge innerhalb der Dubletts: **Austausch von W±-Bosonen**

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ e^-\end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu^-\end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau^-\end{pmatrix}_L,$$

Leptonen

$$\begin{pmatrix}u\\ d'\end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix}c\\ s'\end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix}t\\ b'\end{pmatrix}_L$$

Quarks

$$\text{mit } I = \frac{1}{2}, \begin{cases} I_3 = +\frac{1}{2} \\ I_3 = -\frac{1}{2} \end{cases}$$

q': Quarkmischung (→ später)

  - **Rechtshändige** Fermionen (und linkshändige Antifermionen):
    Isospin-Singuletts ($I = I_3 = 0$) → **keine** Kopplung an W-Bosonen

$$e_R^-, \nu_{eR}, \quad \mu_R^-, \nu_{\mu R}, \quad \tau_R^-, \nu_{\tau R}$$

Leptonen

$$u_R, d'_R, \quad c_R, s'_R, \quad t_R, b'_R$$

Quarks

✗: im Standardmodell nicht enthalten

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Elektroschwache Quantenzahlen

- Erinnerung: **Gell-Mann–Nishijima-Formel** $Q = I_3 + \frac{Y}{2}$
  → elektroschwache Quantenzahlen:

Fermion	Chiralität	Isospin (I, I_3)	Hyperladung Y	Ladung Q (e)
Neutrinos: ν_e, ν_μ, ν_τ	L	(1/2, +1/2)	–1	0
	R	im Standardmodell nicht enthalten		
Geladene Leptonen: e^-, μ^-, τ^-	L	(1/2, –1/2)	–1	–1
	R	(0, 0)	–2	–1
up-artige Quarks: u, c, t	L	(1/2, +1/2)	+1/3	+2/3
	R	(0, 0)	+4/3	+2/3
down-artige Quarks: d', s', b'	L	(1/2, –1/2)	+1/3	–1/3
	R	(0, 0)	–2/3	–1/3

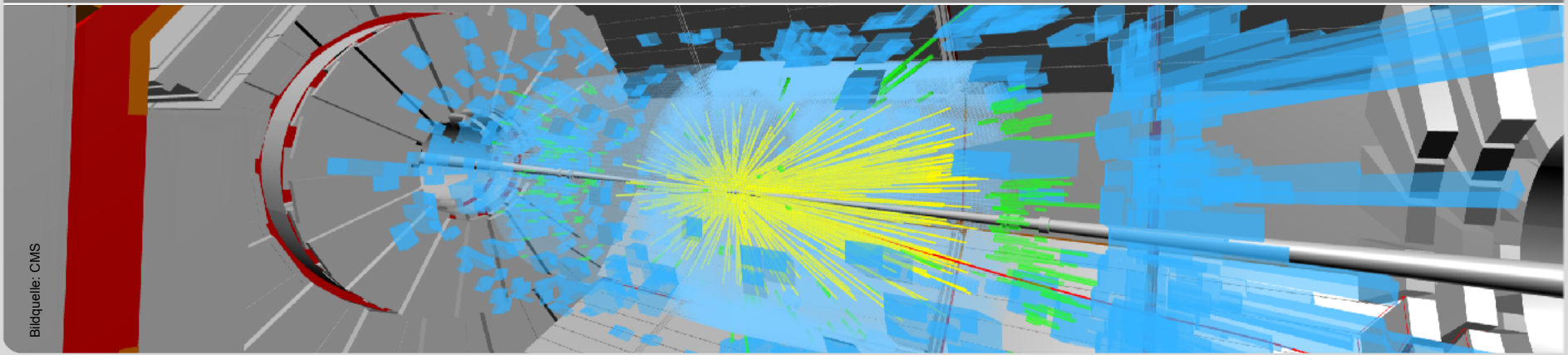
Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Karlsruher Institut für Technologie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 14. Vorlesung, Teil 2

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



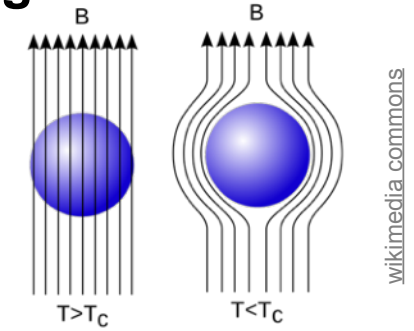
Bildquelle: CMS

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Spontane Symmetriebrechung

- Problem: **Mischung von Zuständen** W^0 und B (Weinberg-Drehung) nur möglich, wenn die Zustände ähnliche Massen (Energien) haben.
  - Statt dessen: Masselose Photonen, große Massen der W/Z-Bosonen.
  - Symmetrie ist offenbar grundlegend verletzt.

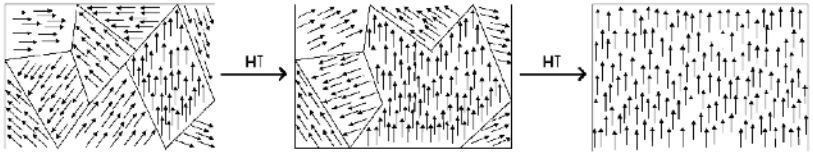
- Lösung inspiriert aus der Physik der **Phasenübergänge**:
  - Postulat einer **spontanen Symmetriebrechung**
  - “Unsymmetrischer Grundzustand des Vakuums”, bekannt vom Ferromagnetismus und vom Meissner-Ochsenfeld-Effekt in der Supraleitung



Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Spontane Symmetriebrechung

- Beispiel Ferromagnet:
  - Magnetisierung M und kritische Curie-Temperatur T_C
  - **$T > T_C$:** therm. Bewegung verhindert Ausrichtung der Dipole
    ➜ keine Magnetisierung des Grundzustandes, Rotationssymmetrie
  - **$T < T_C$:** magn. Dipole richten sich spontan aus ➜ Magnetisierung
    Weißsche Bezirke ➜ Brechung der ursprünglichen Symmetrie
    Grundzustand ist energetisch entartet



4lex, CC BY-SA 3.0

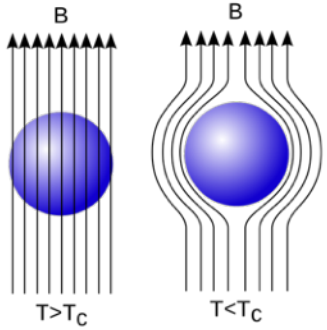
- Analogie zum Higgs-Mechanismus:
  - Für $T < T_C$ ist eine Kraft erforderlich,
    um die Spins aus der Vorzugsrichtung herauszulösen
  - Im ferromagnetischen Zustand besitzen Träger der magn. Eigenschaft
    in Bezug auf Rotation eine endliche “Masse”

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Spontane Symmetriebrechung

- Beispiel Meissner-Ochsenfeld-Effekt, Sprungtemperatur T_C
  - **$T > T_C$:** Magnetfelder breiten sich ungehindert im Supraleiter aus
    $T < T_C$: Magnetfelder aus dem Supraleiter verdrängt, bis auf Oberfläche
    ➜ externer Beobachter: “endliche Reichweite” des Magnetfelds im Supraleiter bzw. “von Null verschiedene Masse” von Photonen

- Analogie zum Higgs-Mechanismus:
  - Für $T < T_C$: korrelierte Cooper-Paare mit definierter Energie des supraleitenden Grundzustandes
    ➜ Induzierter Strom kompensiert äußeres B-Feld
  - Spins können sich nicht mehr frei ausrichten, da Phase der Cooper-Paare korreliert ist ➜ Symmetriebrechung

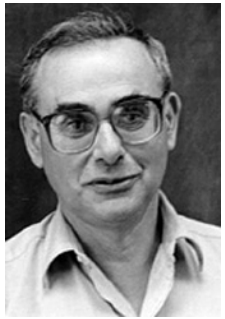


wikimedia commons

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Das Nambu-Goldstone-Boson

- Goldstone-Theorem (1961):
  spontan gebrochene **globale kontinuierliche Eichsymmetrie** führt zusätzliche **masseloser Spin-0-Teilchen** ein (Nambu-Goldstone-Bosonen)
- Anwendung ursprünglich in der Physik der kondensierten Materie (z. B. Nambu 1960) und später in der Quantenfeldtheorie verallgemeinert
- Beispiel: Pionen als “Pseudo-Goldstone”-Bosonen durch spontane Brechung der chiralen Flavor-Symmetrie in der QCD (mit expliziter Brechung durch Quarkmassen)



MIT/Quantumdiaries

J. Goldstone

U.Chicago/nobelprize.org

Y. Nambu
Nobelpreis 2008

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

- Standardmodell: SU(2)-Symmetrie des schwachen Isospins
  - Nicht-abelsche SU(*N*)-Eichtheorien („Yang-Mills-Theorien”) erlauben nur **masselose Eichbosonen**, Grund: Eichinvarianz **verletzt** für massive Eichbosonen
  - Aber experimentell: W-Boson besitzt **große Masse** (z. B. aus G_F)
- Mechanismus zur Einführung von massiven Eichbosonen ohne Verletzung der Eichinvarianz: **spontane Symmetriebrechung** (SSB)
  (Brout, Englert; Higgs; Goldstone, Jona-Lasinio, Nambu; Guralnik, Hagen, Kibble)
  - Erinnerung SSB: Grundzustand besitzt nicht Symmetrie der Lagrange-Dichte
  - SSB durch Einführung eines neuen komplexen **skalaren Feldes** („Higgs-Feld”) → spezielle **Form des Potenzials** führt zu SSB → W-/Z-Masse

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Higgs: die Party-Analogie

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:

Zeichnung: CERN

D. J. Miller, persönl. Webseite

David Miller
(Prof., University College London)
➜ O-Ton auf Youtube
➜ Originaltext
➜ symmetrymagazine.org

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Higgs: die Party-Analogie

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:

wikimedia commons

featuring
Margaret Thatcher
as a particle

Zeichnung: CERN

D. J. Miller, persönl. Webseite

David Miller
(Prof., University College London)
➜ O-Ton auf Youtube
➜ Originaltext
➜ symmetrymagazine.org

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Higgs: die Party-Analogie

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

Zeichnung: CERN

D. J. Miller, persönl. Webseite

David Miller
(Prof., University College London)
➜ O-Ton auf Youtube
➜ Originaltext
➜ symmetrymagazine.org

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Higgs: die Party-Analogie

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

Zeichnung: CERN

D. J. Miller, persönl. Webseite

David Miller
(Prof., University College London)
➜ O-Ton auf Youtube
➜ Originaltext
➜ symmetrymagazine.org

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

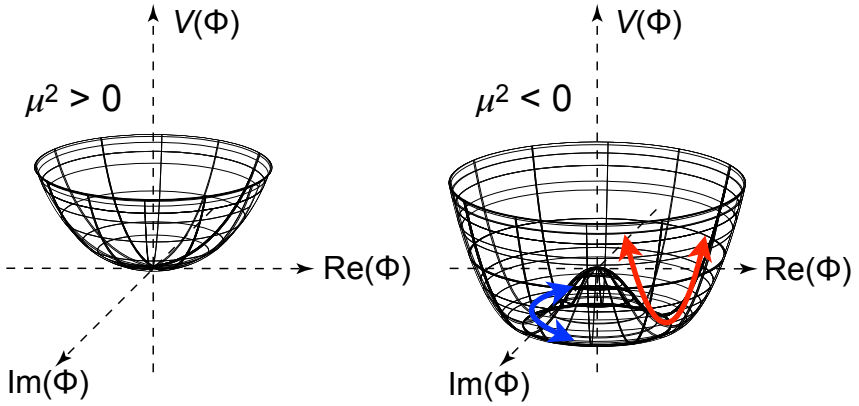
Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

- **Higgs-Feld**: zusätzliches komplexes skalares Feld

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

  - Isospin-**Dublett** ($I = 1/2$, $I_3 = \pm 1/2$)
  - Schwache Hyperladung: $Y = 1$
  - Φ^4-Potenzial („Mexican Hat"):

$$V(\Phi) = \mu^2(\Phi^\dagger\Phi) + \lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2$$



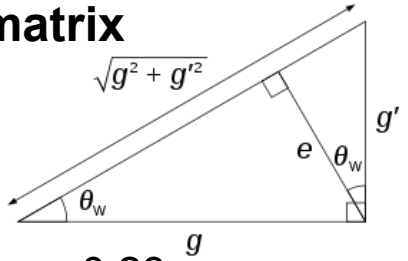
- Spontane Symmetriebrechung für $\mu^2 < 0$ und $\lambda > 0$:
  - Im Minimum: „Vakuumerwartungswert" $\langle|\Phi_0|\rangle = v/\sqrt{2} \neq 0$ mit $v = \sqrt{\frac{-\mu^2}{\lambda}}$
  - Drei Freiheitsgrade für W-/Z-Massen, ein Higgs-Boson

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Kopplungen und Mischungswinkel

- Kopplungen der elektroschwachen Eichgruppe $SU(2)_L \times U(1)_Y$:
  - $SU(2)_L$-Kopplungskonstante g für Kopplung an $W^{0,\pm}$
  - $U(1)_Y$-Kopplungskonstante g' für Kopplung an B
- **Physikalische** Eichbosonen (Masseneigenzustände):
  - **2 massive geladene** Eichbosonen ($W^{\pm}$), **1 massives neutrales** Eichboson (Z)
  - **1 masseloses neutrales** Eichboson: Photon A
- Zusammenhang zwischen (B_μ, $W^0{}_\mu$) und (A_μ, Z_μ): **Mischungsmatrix**

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_W & \sin\theta_W \\ -\sin\theta_W & \cos\theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W^0_\mu \end{pmatrix} \quad \text{mit } \cos\theta_W := \frac{g}{\sqrt{g^2 + g'^2}}$$



  - θ_W: **schwacher Mischungswinkel** (Weinberg-Winkel), exp: $\sin^2\theta_W \approx 0{,}23$

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Kopplungen und Massenskalen

- Zusammenhang der Massen und Kopplungen:

$$m_W c^2 = \frac{v}{2} g, \qquad m_Z c^2 = \frac{v}{2}\sqrt{g^2 + g'^2} = \frac{m_W c^2}{\cos\theta_W}, \qquad m_\gamma = 0, \qquad m_H c^2 = \sqrt{-2\mu^2}$$

→ Vorhersage: **Massenverhältnis** der Eichbosonen, $\cos\theta_W \approx 0{,}88$

- Kopplung an das Photon: $e = g \sin\theta_W = g' \cos\theta_W$
  - $e \approx 0{,}5\, g$: Photonenkopplung **schwächer** als W-Kopplung
  - Aber: schwache Wechselwirkung schwächer als elektromagnetische Wechselwirkung (größere Kopplungskonstante, aber **kurze Reichweite** durch massiven W-Boson-Propagator)

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Higgs-Vakuumerwartungswert

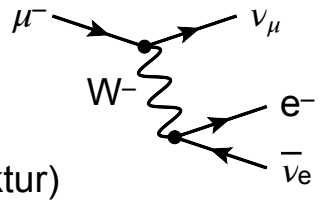
- Charakteristische Energieskala der elektroschwachen Theorie: **Higgs-Vakuumerwartungswert *v*** (engl.: vacuum expectation value, vev)
- Wert von *v* aus elektroschwachen Prozessen bei **niedriger Energie** ($\ll m_W c^2$) bestimmbar:
  - Vergleich von **W-Boson-Propagator** mit **Kontaktwechselwirkung**

$$(m_W c^2)^2 = \left(\frac{g}{2\sqrt{2}}\right)^2 \frac{\sqrt{2}\,(\hbar c)^3}{G_F} \stackrel{!}{=} \frac{v^2}{4} g^2 \rightarrow v^2 = \frac{(\hbar c)^3}{\sqrt{2}\,G_F} \approx (246\,\mathrm{GeV})^2$$

  - G_F genau messbar in **Myonzerfall**: Zerfallsbreite

$$\Gamma(\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu) = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2}{192\pi^3(\hbar c)^6}(m_\mu c^2)^5(1+\Delta)$$

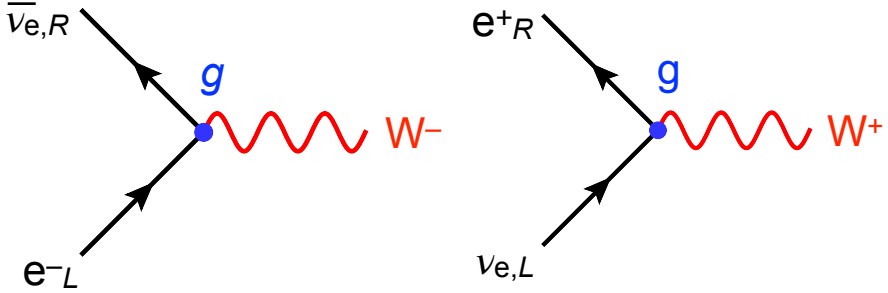
(Δ kleine Korrektur)



Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

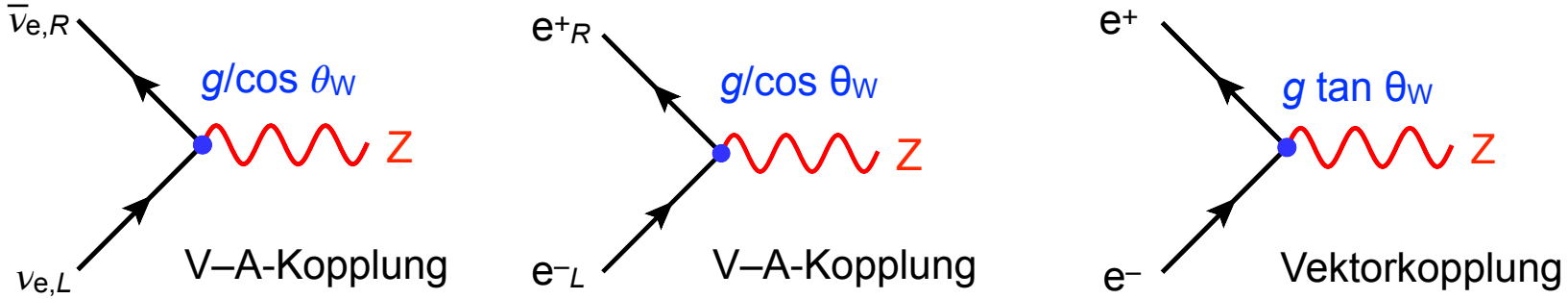
Geladene und neutrale Ströme

- **Geladene Ströme**: Austausch von W-Bosonen (reine V–A-Kopplung)



reine V–A-Kopplung:
linkshändige Teilchen,
rechtshändige Antiteilchen

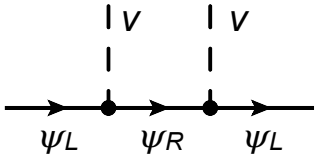
- **Neutrale Ströme**: Austausch von Z-Bosonen

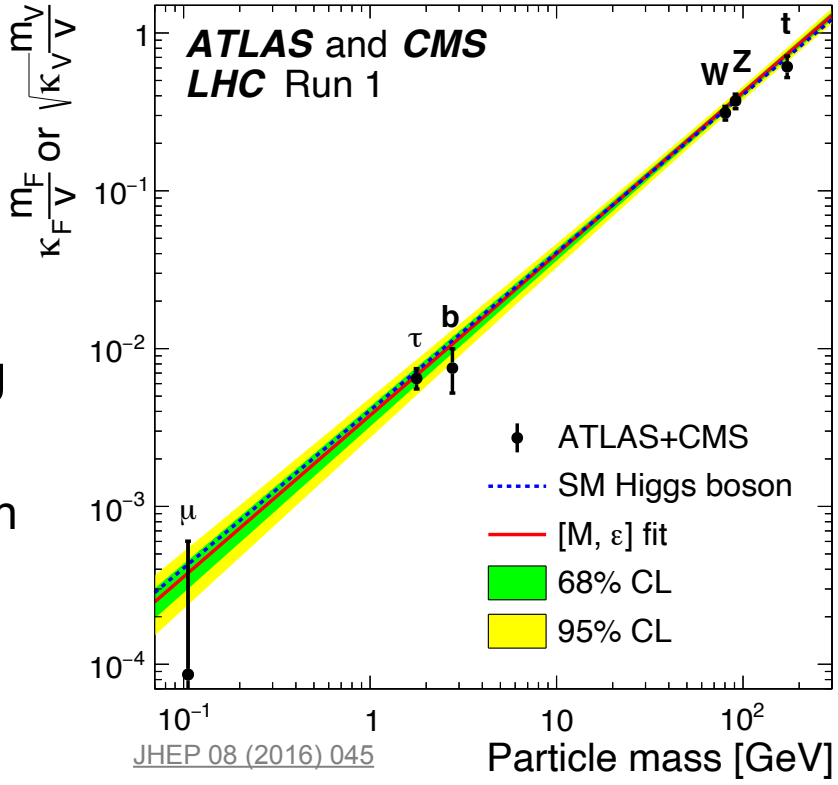


Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Higgs-Bosonen und Teilchenmassen

- Higgs-Mechanismus:
  - Massen der **Eichbosonen** durch spontane Symmetriebrechung
  - Kopplungsstärke ~$m_{W/Z}^2$
- **Doppelrolle** des Higgs: Massen der **Fermionen** durch **Yukawa-Kopplung**
  - Kopplungsstärke $y_f \sim m_f$
  - Kopplung links-/rechtshändiger Teilchen mit Higgs-Vakuumerwartungswert v





Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Aufgabe 26

- Welche der folgenden Aussagen zum Higgs-Mechanismus sind korrekt?
  A. Durch die Kopplung ans Higgs-Feld bekommen sowohl die Eichbosonen als auch die Fermionen des Standardmodells ihre Masse.
  B. Das Standardmodell sagt die Masse des Higgs-Bosons voraus.
  C. Spontane Symmetriebrechung bedeutet, dass der Grundzustand eines Systems nicht die Symmetrie der Lagrange-Dichte besitzt.
  D. Ohne den Higgs-Mechanismus wird für die Streuung longitudinaler W-Bosonen bei hohen Energien ein zu großer Wirkungsquerschnitt erwartet.
  E. Die typische Energieskala der elektroschwachen Wechselwirkung ist durch die Higgs-Boson-Masse gegeben.
- Bitte beantworten Sie die Frage anonym auf ILIAS [link].

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

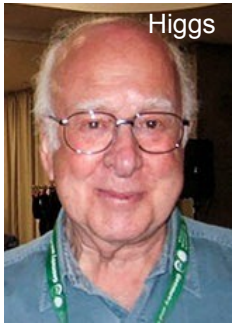
Kurze Zusammenfassung

- V–A: **keine konsistente Theorie** der schwachen Wechselwirkung
- Lösung: **Vereinheitlichung** von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung zu **elektroschwacher Wechselwirkung**
  - Geschickte Kombination zweier **unabhängiger** Wechselwirkungen mit zugehörigen ladungsartigen Quantenzahlen **Isospin** und **Hyperladung**
  - Problem: Eichinvarianz verbietet massive Eichbosonen
- Physikalische Eichbosonen: $W^{\pm}$, Z, Photon
  - Z, Photon: Mischung aus W^0 und B mit **schwachem Mischungswinkel θ_w**
  - Prozesse: **geladene Ströme** (W-Bosonen-Austausch) und **neutrale Ströme** (Z-Bosonen-Austausch)

Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.

Kurze Zusammenfassung

- Massive Eichbosonen: **Brout-Englert-Higgs-Mechanismus**
  - Einführung eines neuen komplexen skalaren Feldes: **Higgs-Feld**
  - **Massive Eichbosonen** $W^{\pm}$, Z durch Kopplung an Higgs-Feld (3 Freiheitsgrade des Higgs-Feldes)
  - **Higgs-Boson** als Anregungszustand des Higgs-Feldes (1 Freiheitsgrad)
  - **Fermionenmassen** durch zusätzlichen Mechanismus mit **demselben** Higgs-Feld: **Yukawa-Kopplung**



Prof. U. Husemann/Prof. K. Valerius, Vorlesungsunterlagen. Nur zum KIT-internen vorlesungsbegleitenden Gebrauch, Weitergabe und anderweitige Nutzung verboten.