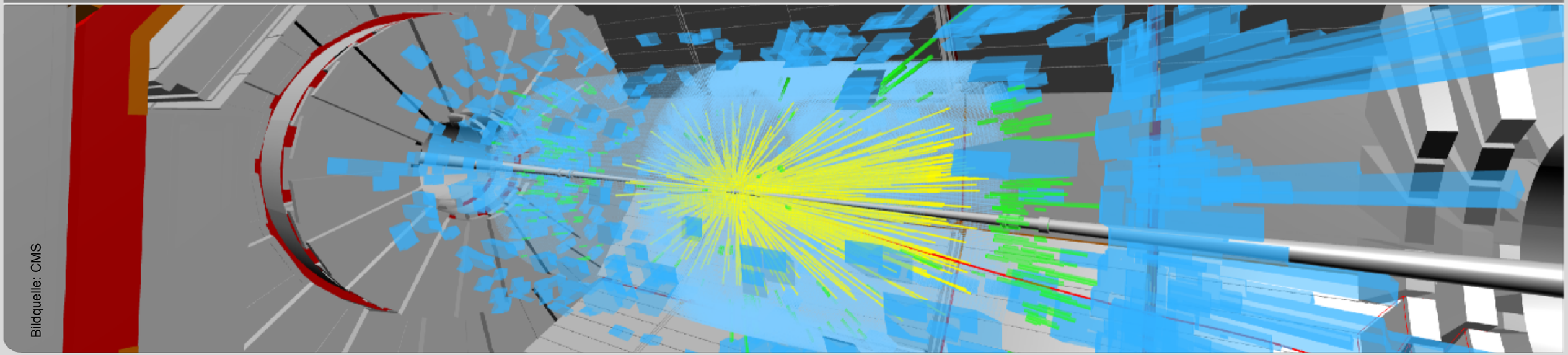
Karlsruher Institut für Technologie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 9. Vorlesung (Teil 1)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



Bildquelle: CMS

Auflösung Aufgabe 17

- Woher kommen die Elemente im Universum?

A. Die leichten Elemente werden kurz nach dem Urknall erzeugt, die schweren Elemente in späteren Phasen.

B. Der Anteil von primordialem Helium im Universum ist abhängig vom Verhältnis von Protonen und Neutronen einige Sekunden nach dem Urknall.

C. Alle Elemente werden aus Neutroneneinfang und Betazerfall erzeugt.

D. Elemente oberhalb der Eisengruppe werden durch Protoneneinfang erzeugt.

E. Als Quelle der auf der Erde ankommenden Sonnenneutrinos spielt der CNO-Zyklus eine untergeordnete Rolle gegenüber der pp-Kette.

Kurze Wiederholung

- Kernphysik: **breite Anwendung** in Technik und Grundlagenforschung
- **Kerntechnische Anwendungen:** Energiegewinnung möglich durch Spaltung schwerer Kerne oder Fusion leichter Kerne
  - **Kernspaltungsreaktoren:** Leicht- und Schwerwasserreaktoren im Einsatz, mit unterschiedlichen Brennstoff- und Moderator-Materialien
  - **Kernfusionsreaktoren:** zwei wesentliche Bauformen (Tokamak, Stellarator), bislang keine Nettoproduktion nutzbarer Energie
- **Medizintechnik** und medizinische **Diagnostik**: NMR, Tracer, …
- Viele weitere Beispiele und Querverbindungen: Kriminalistik, Kunstgeschichte, Umwelttechnik, Paläontologie, …

Kurze Wiederholung

- **Primordiale Nukleosynthese**: leichte Elemente D, ^{3}H, ^{4}He, ^{7}Li
  - Keine stabilen Kerne mit $A = 5$ und $A = 8$ → keine schwereren Elemente
  - Vorhersage für **Massenanteile** leichter Elemente, z. B. Heliumanteil $Y_P \approx 0{,}25$ → Grundpfeiler der Urknalltheorie
- **Kernfusion** in Sternen:
  - Hauptreihensterne: **Wasserstoffbrennen** (pp-Reaktion)
  - Massive Sterne: katalytisches Wasserstoffbrennen (CNO-Zyklus)
  - Höhere Temperaturen: **Schalenbrennen** (3α-Prozess, …, Si-Brennen)
- Schwere neutronenreiche Kerne: Anlagerung von Neutronen durch **r-Prozess** (Neutronensterne, Supernovae) und **s-Prozess** (schwere Sterne)

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 5

Symmetrien und Erhaltungssätze

Überblick

- Symmetrien und Erhaltungssätze: **zentrales Element** moderner physikalischer Theorien, z. B.
  - Klassische Physik: Hamilton-Formalismus
  - Quantenmechanik: quantenmechanische Phase, Parität der Wellenfunktion
  - Festkörperphysik: (diskrete) Symmetrien in Kristallen
  - Noether-Theorem: Verknüpfung (kontinuierlicher globaler) Symmetrien mit Erhaltungssätzen
- Kern- und Teilchenphysik: **Verallgemeinerung** bekannter Konzepte aus klassischer Physik und Quantenmechanik
  - Wechselwirkungen im Standardmodell: aus (lokalen) Eichsymmetrien folgt Dynamik der Theorie, z. B. Farb-SU(3) → QCD
  - Innere Symmetrien, z. B. Parität von Teilchen
  - Neue Quantenzahlen, z. B. Flavorquantenzahlen der Quarks (up, down, …)

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 5.1

Symmetrien und Quantenzahlen

Klassische kontinuierliche Symmetrien

- **Kontinuierliche Symmetrien** in physikalischem System:
  - Invarianz unter **infinitesimaler** Symmetrieoperation
  - Beispiel Rotationssymmetrie: beliebige Drehung aus infinitesimalen Drehungen konstruierbar → Invarianz unter beliebiger Drehung
  - Mathematische Darstellung: **Lie-Gruppen**
- **Noether-Theorem** (Noether 1918):
  „Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße" → klassische Raum-Zeit-Symmetrien

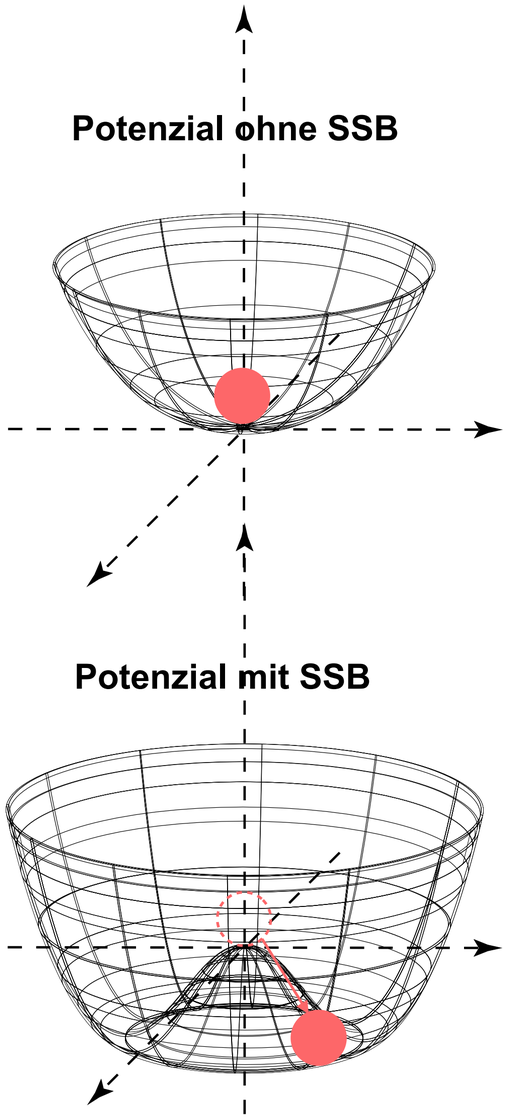
Symmetrie	Erhaltungsgröße	Bedeutung
Translationsinvarianz	Impuls	Homogenität des Raums
Zeitliche Invarianz	Energie	Homogenität der Zeit
Rotationsinvarianz	Drehimpuls	Isotropie des Raums

Globale und lokale Symmetrien

- **Globale** vs. **lokale** Symmetrie:
  - **Global**: dieselbe Symmetrieoperation an jedem Raum-Zeit-Punkt
  - **Lokal**: Symmetrieoperation Funktion des Ortes $x = (\mathbf{r},t)$
  - Analogie: Zeitangabe in koordinierter Universalzeit (UTC) oder lokaler Zeit
  - Beispiel: quantenmechanische **Phase**
    - **Global**: Physik unverändert unter $\psi(x) \rightarrow U\psi(x) = \exp[i\alpha]\,\psi(x)$
    - **Lokal**: Physik unverändert unter $\psi(x) \rightarrow U(x)\psi(x) = \exp[i\alpha(x)]\,\psi(x)$
      $\rightarrow$ Elektrodynamik = Eichtheorie
- Standardmodell beruht auf **lokalen Eichsymmetrien**

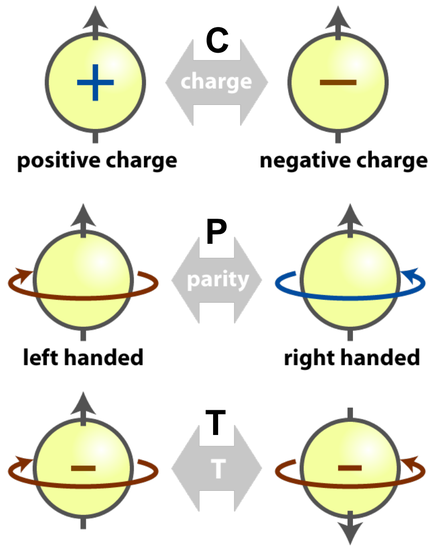
Spontane Symmetriebrechung

- Spontane Symmetriebrechung (SSB):
  - **Bewegungsgleichung** eines Systems (z. B. dargestellt durch Lagrange-Dichte) **invariant** unter Symmetrieoperation, aber **Grundzustand nicht**
  - Konsequenz: **Phasenübergang** zwischen unsymmetrischem und symmetrischem Zustand
- Standardbeispiel: **Ferromagnet**
  - Oberhalb Curie-Temperatur: Rotationssymmetrie (bis auf Kristallfeld)
  - Unterhalb Curie-Temperatur: Vorzugsrichtung der Magnetisierung
- Teilchenphysik: **Brout-Englert-Higgs-Mechanismus** (→ später)



Diskrete Symmetrien im Standardmodell

- **Diskrete Symmetrien** eines physikalischen Systems:
  - Invarianz unter **nicht-kontinuierlichen** Symmetrieoperationen
  - Beispiel: Paritätsoperation = Punktspiegelung am Ursprung (**r** → **–r**)
  - Mathematische Darstellung: **diskrete Gruppen**
- Diskrete Symmetrien für Spin-1/2-Fermionen im Standardmodell:



Ladungskonjugation C: dieselbe Physik mit umgekehrtem **Ladungsvorzeichen** → Unterscheidung **Teilchen/Antiteilchen**

Parität P: dieselbe Physik bei Punktspiegelung am Ursprung (**r** → **–r**) → Unterscheidung der **Händigkeit** (genaue Definition später)

Zeitumkehr T: dieselbe Physik, wenn Zeit rückwärts abliefe ($t \rightarrow -t$) → Unterscheidung der **Bewegungsrichtung**

Symmetrien und Quantenzahlen

- Quantenzahlen in der Quantenmechanik:
  - **Charakterisierung** eines Quantensystems über Quantenzahlen
  - Mindestens eine Quantenzahl: **Energieeigenwert** des Hamiltonoperators
  - Weitere Quantenzahlen: für n unabhängige Operatoren $\hat{O}_i$, die mit Hamiltonoperator **kommutieren** $\rightarrow$ n Quantenzahlen
  - Verknüpfung mit **Symmetrien**, z. B. im Wasserstoffatom: Rotationssymmetrie von Orbitalen $\rightarrow$ Drehimpulsquantenzahl ℓ

- Additive und multiplikative Quantenzahlen:
  - **Additive** Quantenzahlen: **Summe** der Quantenzahlen in jedem Prozess erhalten (z. B. elektrische Ladung)
  - **Multiplikative** Quantenzahlen: **Produkt** der Quantenzahlen in jedem Prozess erhalten (z. B. Parität und Ladungskonjugation, später: nicht erhalten in elektroschwacher Wechselwirkung)

Intrinsische Quantenzahlen

- Quantenzahlen von Quarks, Hadronen und Leptonen:
  - **Interne** Symmetrien → **intrinsische** (additive) Quantenzahlen
  - Fundamentale **Eichsymmetrien** in Lagrange-Dichte → Quantenzahlen: Ladung Q, schwacher Isospin I_3, schwache Hyperladung Y, Farbladung
  - Weitere „zufällige" Symmetrien im Standardmodell: Baryonenzahl, Leptonen(familien-)zahl, Flavorquantenzahlen

- Baryonenzahl: $B \equiv \frac{N_\mathrm{q} - N_{\bar{\mathrm{q}}}}{3}$

  mit $N_{\mathrm{q}(\bar{\mathrm{q}})}$ Zahl der (Anti-)Quarks

  - Im Standardmodell zufällig **erhalten** → Proton (= leichtestes Baryon) stabil

Teilchen	B	Antiteilchen	B
Quark	+1/3	Antiquark	–1/3
Baryon	+1	Antibaryon	–1
Lepton	0	Antilepton	0
Meson	0		

Leptonenzahl

- **Leptonenzahl**: $L \equiv N_\ell - N_{\overline{\ell}}$
  - Leptonen: $L = +1$, Antileptonen: $L = -1$
  - Alle anderen Teilchen: $L = 0$
  - Im Standardmodell zufällig **erhalten**

Die Leptonen

	Elektrische Ladung		Elektrische Ladung
Elektron	–1 e	Elektron-Neutrino	0
Myon	–1 e	Myon-Neutrino	0
Tau	–1 e	Tau-Neutrino	0

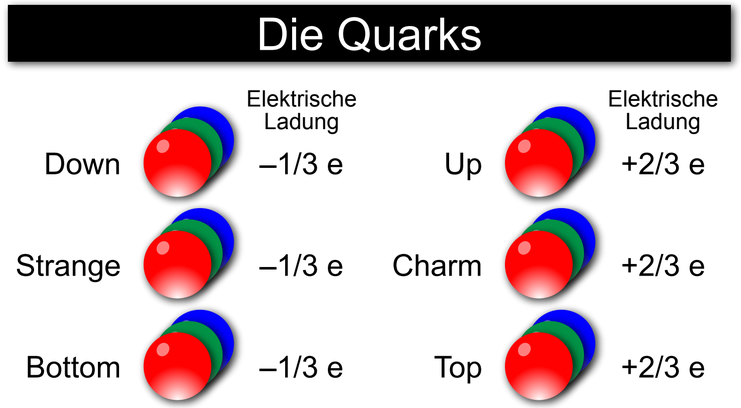
- **Leptonenfamilienzahl**: L_e, L_μ, L_τ
  - Separate Quantenzahlen für drei Leptonengenerationen, $L_{e,\mu,\tau} = +1$ (–1) für (Anti-)Leptonen der entsprechenden Familie, $L_{e,\mu,\tau} = 0$ sonst
  - Im Standardmodell **verletzt** durch **massive Neutrinos** (→ später)
- **Bemerkung**: Baryonenzahl B und Leptonenzahl L verletzt in vielen Theorien jenseits des Standardmodells, aber häufig ***B – L* erhalten**

Flavorquantenzahlen

- **Flavorquantenzahlen** der Quarks:

Quantenzahl	Quark	Antiquark
Starker Isospin T_3	u/d: ±1/2	$\bar{u}/\bar{d}$: ∓1/2
Strangeness S	s: –1	$\bar{s}$: +1
Charm C	c: +1	$\bar{c}$: –1
Beauty (Bottomness) B'	b: –1	$\bar{b}$: +1
Truth (Topness) T	t: +1	$\bar{t}$: –1

  - Konvention: Flavorquantenzahl besitzt **dasselbe Vorzeichen wie Ladung**
  - **Erhalten** in starker und elektromagnetischer Wechselwirkung, **verletzt** in schwacher Wechselwirkung (geladene Ströme **ändern** Flavor)



Starke Hyperladung:

$$Y_S \equiv B + S + C + B' + T$$

→ Zusammenhang mit elektrischer Ladung: **Gell-Mann–Nishijima-Formel**

$$Q = T_3 + \frac{Y_S}{2}$$

Kurze Zusammenfassung

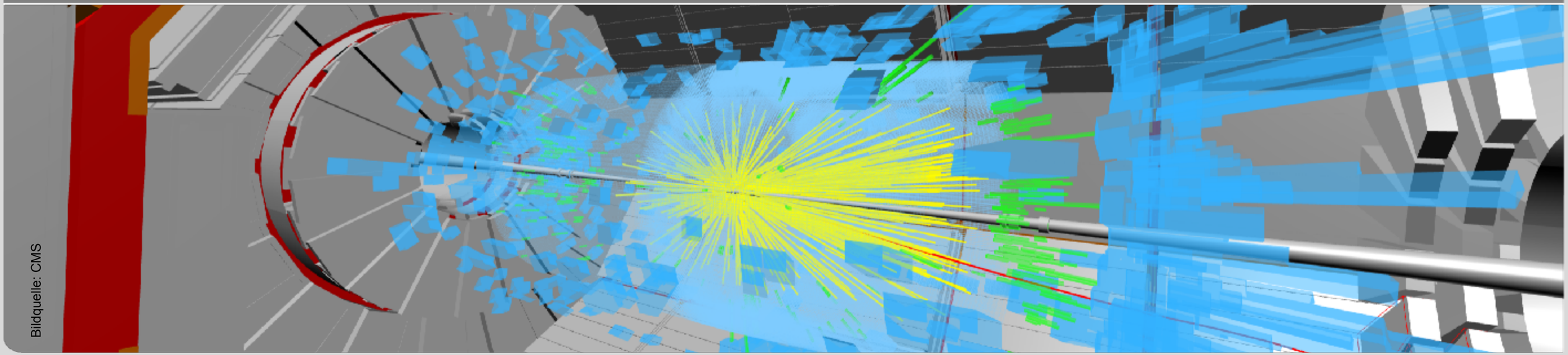
- Unterscheidungen: **diskrete** vs. **kontinuierliche Symmetrien**, **globale** vs. **lokale Symmetrien**
- Noether-Theorem: Verbindung von Symmetrien und **Erhaltungssätzen**
- Quantenmechanik: Verbindung von Symmetrien mit **Quantenzahlen**
- Symmetrien und Quantenzahlen im Standardmodell:
  - **Eichsymmetrien**: lokale kontinuierliche Symmetrien → Dynamik
  - **Diskrete** Symmetrien C, P, T und Kombinationen (→ nächstes Kapitel)
  - **Intrinsische** Quantenzahlen von Quarks, Hadronen und Leptonen: Ladung, schwacher Isospin, schwache Hyperladung, Farbladung, Baryonenzahl, Leptonen(familien-)zahl, Flavorquantenzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 9. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



Bildquelle: CMS

Wiederholung: Symmetrien & Quantenzahlen

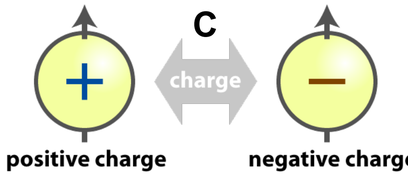
- Unterscheidungen: **diskrete** vs. **kontinuierliche Symmetrien**, **globale** vs. **lokale Symmetrien**
- Noether-Theorem: Verbindung von Symmetrien und **Erhaltungssätzen**
- Quantenmechanik: Verbindung von Symmetrien mit **Quantenzahlen**
- Symmetrien und Quantenzahlen im Standardmodell:
  - **Eichsymmetrien**: lokale kontinuierliche Symmetrien → Dynamik
  - **Diskrete** Symmetrien C, P, T und Kombinationen (→ nächstes Kapitel)
  - **Intrinsische** Quantenzahlen von Quarks, Hadronen und Leptonen: Ladung, schwacher Isospin, schwache Hyperladung, Farbladung, Baryonenzahl, Leptonen(familien-)zahl, Flavorquantenzahlen

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 5.2

Diskrete Symmetrien: C, P, T

Ladungskonjugation



- Allgemein: **diskrete** Symmetrien → **multiplikative** Quantenzahlen
- Mathematisch: selbstinverse Abbildung (Involution) für Eigenfunktionen

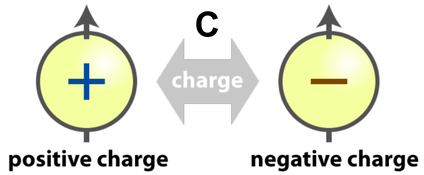
$$\hat{C}^2 |\psi\rangle = C(\hat{C} |\psi\rangle) = C^2 |\psi\rangle \stackrel{!}{=} |\psi\rangle \rightarrow C = \pm 1$$

- **Elektrodynamik**: minimale Kopplung (auch: minimale Substitution)

$$p_\mu \rightarrow p_\mu - qA_\mu$$

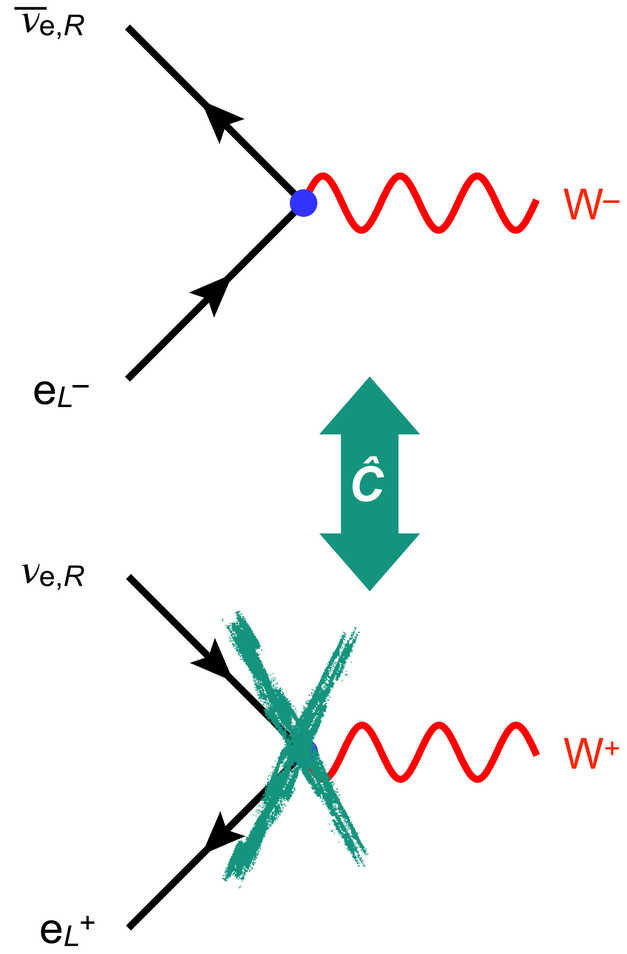
- Ladungskonjugation für $A_\mu = (\phi/c, \mathbf{A})$: $A_\mu \rightarrow -A_\mu$
- Ladungskonjugation für $\mathbf{E} = -\text{grad}\ \phi - \partial\mathbf{A}/\partial t$: $\mathbf{E} \rightarrow -\mathbf{E}$
- Ladungskonjugation für $\mathbf{B} = \text{rot}\ \mathbf{A}$: $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{B}$
- Ladungskonjugation für Kräfte: $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v}\times\mathbf{B})$: $\mathbf{F} \rightarrow +\mathbf{F}$

C: Erhaltung und Verletzung

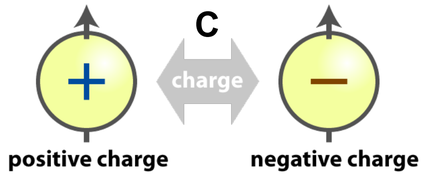


Karlsruher Institut für Technologie

- Starke und elektromagnetische Wechselwirkungen: **C erhalten**
  → dieselbe Physik mit Teilchen und Antiteilchen
- Elektroschwache Wechselwirkung:
  C „maximal verletzt"
  - Ladungskonjugierter Prozess **existiert nicht** in Prozessen mit Austausch von W-Bosonen
  - Gleichzeitig: **Parität P maximal verletzt**
  - Details zur C- und P-Verletzung bei W-Bosonen-Austausch → später



Ladungskonjugation



- **Neutrale** Teilchen: **Eigenzustände** der Ladungskonjugation, z. B.
  - Photon: identifiziert mit Vierepotenzial $A_\mu \rightarrow$ ändert Vorzeichen unter $\hat{C}$

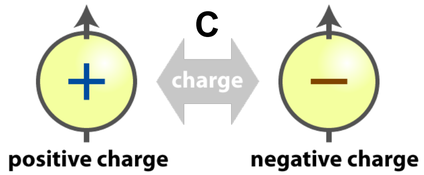
$$\hat{C}\,|\gamma\rangle = -\,|\gamma\rangle$$

  - Neutrales Pion: Zerfall in zwei Photonen (C-Symmetrie erhalten)

$$\hat{C}\,|\pi^0\rangle = \hat{C}\,|\gamma\gamma\rangle = (-1)^2\,|\gamma\gamma\rangle = +\,|\pi^0\rangle$$

- Transformationen zwischen **Teilchen** und **Antiteilchen**:
  - Alle **ladungsartigen Quantenzahlen** umgekehrt: $+Q \rightarrow -Q$, $+B \rightarrow -B$, …
  - Beispiel: $\hat{C}\,|\mathrm{u}\rangle = |\overline{\mathrm{u}}\rangle$ (up-Quark → up-Antiquark)
  - Teilchen mit ladungsartigen Quantenzahlen ≠ 0: **keine C-Eigenzustände**

Ladungskonjugation



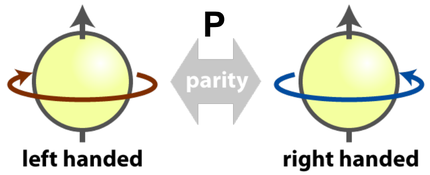
Karlsruher Institut für Technologie

- **Teilchen-Antiteilchen-Paare**: Eigenzustände von $\hat{C}$
  - Häufig in Teilchenreaktionen der starken Wechselwirkung produziert (Baryonenzahlerhaltung)
  - Eigenwert abhängig von relativem Bahndrehimpuls ℓ zwischen Teilchen und Antiteilchen und Spin s des Paares:

$$\hat{C}\,|q\bar{q}\rangle = (-1)^{\ell+s}\,|q\bar{q}\rangle$$

  - Beispiel: J/ψ = gebundener c$\bar{c}$-Zustand, „Vektormeson" mit $\ell = 0$, $s = 1$ $\rightarrow$ Eigenwert $C = -1$

Parität



- Paritätsoperation = **Punktspiegelung** am Ursprung

Größe	Erläuterung	Eigenwert	Beispiel
Skalar		+1	Temperatur: $\hat{P}T = +T$
Vektor		–1	Orts- und Impulsvektor: $\hat{P}\,\mathbf{r} = -\mathbf{r}, \quad \hat{P}\,\mathbf{p} = -\mathbf{p}$
Axialvektor (Pseudovektor)	Vektor × Vektor	+1	Drehimpuls, B-Feld: $\hat{P}\,\mathbf{L} = +\mathbf{L}, \quad \hat{P}\,\mathbf{B} = +\mathbf{B}$
Pseudoskalar	Axialvektor · Vektor	–1	Helizität: $\hat{P}h = \hat{P}\dfrac{\mathbf{s}\cdot\mathbf{p}}{\lvert\mathbf{s}\rvert\lvert\mathbf{p}\rvert} = -h$

Parität in der Quantenmechanik

- Paritätsoperator: $\hat{P}$ ⇝ Punktspiegelung am Ursprung
  - $\hat{P}\,|\psi(\vec{r},t)\rangle = |\psi(-\vec{r},t)\rangle$
  - Projektionsoperator: $\hat{P}^2 = \mathbb{1}$
  - Falls ψ Eigenfunktion von $\hat{P}$:

    $\hat{P}\,|\psi(\vec{r},t)\rangle = |\psi(-\vec{r},t)\rangle = P\,|\psi(\vec{r},t)\rangle$

    (P: Eigenwert)

    gerade / ungerade Eigenfunktion: $P = \pm 1$
  - Beispiel: Kugelflächenfunktionen

    $\hat{P}\,Y_{lm}(\theta,\phi) = Y_{lm}(\pi-\theta,\phi+\pi) = (-1)^l\,Y_{lm}(\theta,\phi)$
  - Projektion auf gerade / ungerade Eigenfunktionen:

    $\hat{P}_\pm \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\mathbb{1} \pm \hat{P}\right)$

    ⇝ $\hat{P}_\pm\,|\psi(\vec{r},t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\psi(\vec{r},t)\rangle \pm |\psi(-\vec{r},t)\rangle\right) \equiv |\psi_\pm\rangle$

    ⇝ $\hat{P}\,|\psi_\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\psi(-\vec{r},t)\rangle \pm |\psi(\vec{r},t)\rangle\right) = \pm\,|\psi_\pm\rangle$

Anwendung: Multipolübergänge

- **Gammastrahlung** = elektromagnetische Übergänge in Kernen
  - Klassifikation nach **Multipolordnung** (vgl. Atomphysik)
    → Formulierung von **Auswahlregeln** für erlaubte Übergänge
  - Messung über **Winkelverteilungen** in Gammaspektroskopie
- Ansatz für Klassifikation von Gammastrahlung: **Multipolentwicklung** der Wechselwirkung des Kerns mit elektromagnetischen Feldern
  - Fermis Goldene Regel: Zerfallskonstante aus Matrixelement & Phasenraum

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} \left|\langle \psi_\mathrm{f} | \mathcal{M}_\mathrm{fi} | \psi_\mathrm{i} \rangle\right|^2 \rho(E_\mathrm{f})$$

  - Matrixelement: **elektromagnetische** Wechselwirkung $\sim \frac{e}{m}\,\mathbf{p}\cdot\mathbf{A}$

Auswahlregeln

- **Auswahlregeln** für Gammastrahlung:
  - Drehimpulserhaltung: Änderung des Gesamtdrehimpulses **J** durch relativen Drehimpuls **L** und Spin **s** des emittierten Photons: $\Delta\mathbf{J} = \mathbf{J}_f - \mathbf{J}_i = \boldsymbol{\ell} = \mathbf{L} + \mathbf{s}$
  - Charakterisierung des Anfangs- und Endzustands: Eigenwerte des Paritätsoperators ($P_{i,f}$) und des Gesamtdrehimpulsoperators ($J_{i,f}$)
- Elektromagnetische Wechselwirkung: **Paritätssymmetrie erhalten**
  - Multipolentwicklung: **Kugelflächenfunktionen** $Y_{\ell m}$ mit **definierter** Parität
  - **Multipolordnung** gegeben durch **Eigenwert** von ℓ
  - Elektrische Übergänge Eℓ: $P_f \cdot P_i = (-1)^\ell$
  - Magnetische Übergänge Mℓ: $P_f \cdot P_i = (-1)(-1)^\ell = (-1)^{(\ell+1)}$

Anwendung: Multipolübergänge

- Niedrigste Multipolmomente (Eigenwert Drehimpulsänderung: $\ell = 1$):
  - **Elektrischer Dipolübergang** (E1): Wechselwirkung mit elektrischem Dipolmoment $\mathbf{d} = e\mathbf{r}$ → Zerfallskonstante

$$\lambda_{\mathrm{E1}} = \frac{e^2}{3\pi\epsilon_0\hbar^4 c^3} E_\gamma^3 \left|\langle\psi_f|\mathbf{r}|\psi_i\rangle\right|^2$$

  - **Magnetischer Dipolübergang** (M1): Wechselwirkung mit magnetischem Dipolmoment $\boldsymbol{\mu} = e/(2m)(\mathbf{L} + g\mathbf{s})$ → Zerfallskonstante

$$\lambda_{\mathrm{M1}} = \frac{\mu_0}{3\pi\hbar^4 c^3} E_\gamma^3 \left|\langle\psi_f|\boldsymbol{\mu}|\psi_i\rangle\right|^2$$

(mit **L** Drehimpuls, **s** Spin, g gyromagnetischer Faktor)

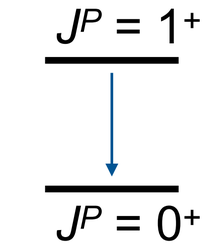
Auswahlregeln

- Austauschteilchen: **einzelnes Photon**
  - **Drehimpulserhaltung** (Erinnerung: $\boldsymbol{\ell = L + s}$):

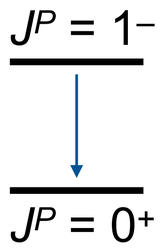
    $\mathbf{J}_f = \mathbf{J}_i + \boldsymbol{\ell} \quad \rightarrow |J_f - J_i| \leq \ell \leq J_f + J_i$

  - Photon = masseloses Spin-1-Teilchen: $s = 1$, zwei transversale Polarisationen $m_s = \pm 1$ → kein Multipolübergang $J_i = 0 \rightarrow J_f = 0$
  - Photon kann zusätzlich relativen Drehimpuls L forttragen
- Zusammenfassung: **Auswahlregeln**
  - Dipolübergänge E1, M1: $\Delta J \equiv |J_f - J_i| = 0, \pm 1$
  - Quadrupolübergänge E2, M2: $\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2$
  - Multipolübergänge Eℓ, Mℓ: $\Delta J = 0, \ldots, \pm \ell$
  - Übergänge mit $J_i = 0 \rightarrow J_f = 0$ verboten
  - Parität für Eℓ: $P_f P_i = (-1)^{\ell}$, Parität für Mℓ: $P_f P_i = (-1)^{(\ell+1)}$

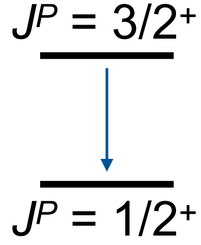
Beispiele (nach Bethge):



$\ell = 1$, $P_f \cdot P_i = 1$
→ M1-Übergang



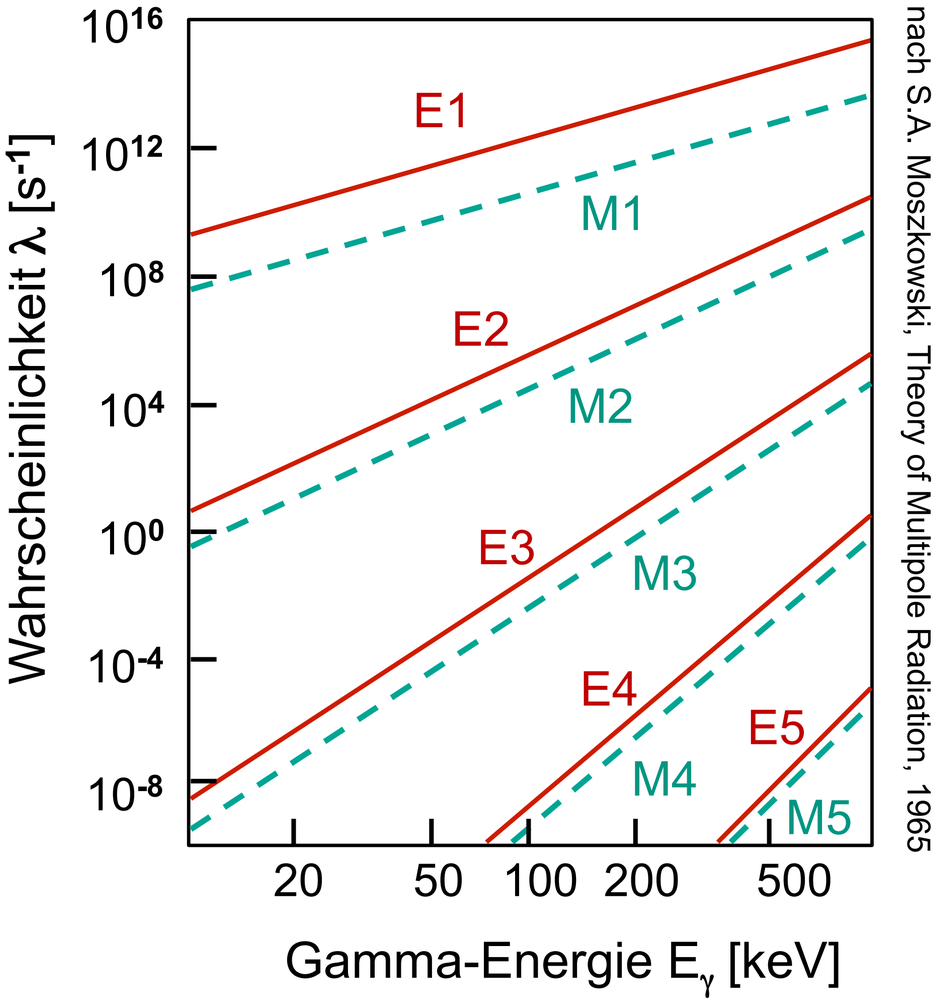
$\ell = 1$, $P_f \cdot P_i = -1$
→ E1-Übergang



$1 \leq \ell \leq 2$, $P_f \cdot P_i = 1$
→ gemischter M1- und E2-Übergang

Zerfallskonstante

- Gesamter Gammazerfall: **Überlagerung** erlaubter Übergänge
  - „Wichtigkeit” über **Zerfallskonstante λ**
  - Dieselbe Multipolordnung: Zerfallskonstante für Mℓ **kleiner** als für Eℓ (zusätzlicher Faktor v/c), höhere Multipolordnungen **stark unterdrückt**
  - Beispiel $3^+ \rightarrow 1^+$-Übergang:
    E2, M3, E4 erlaubt, E2 dominant
  - Beispiel ^{110m}Ag:
    erster erlaubter Übergang $6^+ \rightarrow 2^-$ (M4)
    → metastabiles **Kernisomer** mit $t_{1/2}$ = 249,8 d
- Starke **Energieabhängigkeit**: $\lambda \sim E_\gamma^{2\ell+1}$



Kurze Zusammenfassung

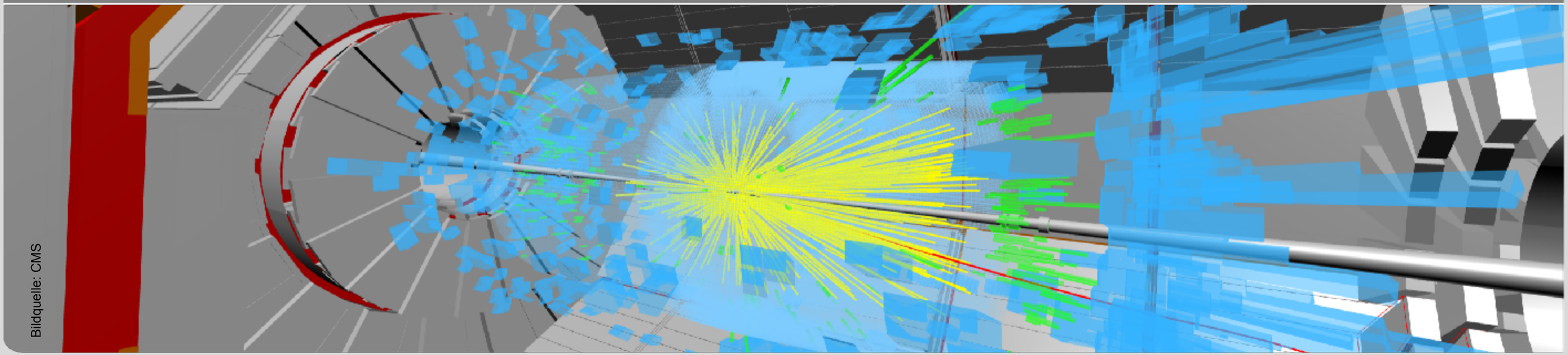
- Ladungskonjugation C: **Teilchen ↔ Antiteilchen**
  - Eigenzustände: neutrale Teilchen und Teilchen-Antiteilchen-Paare
- Parität P:
  - Geometrisch: **Punktspiegelung** am Ursprung
  - Skalar: $P = +1$, Pseudoskalar: $P = -1$, Vektor: $P = -1$, Axialvektor: $P = +1$
- Anwendung: **Auswahlregeln** für Gammastrahlung von Kernen
  - **Paritätserhaltung** für elektromagnetische Prozesse
    → Entwicklung in Kugelflächenfunktionen mit definierter Parität
  - Elektrische und magnetische **Multipolübergänge** Eℓ, Mℓ
  - Zusammenhang mit **Zerfallskonstante**: höhere Ordnungen ℓ stark unterdrückt

Karlsruher Institut für Technologie

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2020 – 9. Vorlesung (Teil 3)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS



Bildquelle: CMS

Kurze Wiederholung

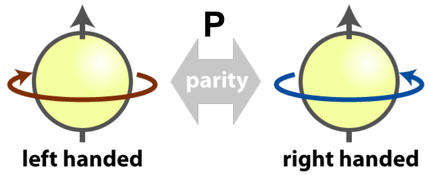
- Ladungskonjugation C: **Teilchen** ⟷ **Antiteilchen**
  - Eigenzustände: neutrale Teilchen und Teilchen-Antiteilchen-Paare
- Parität P:
  - Geometrisch: **Punktspiegelung** am Ursprung
  - Skalar: $P = +1$, Pseudoskalar: $P = -1$, Vektor: $P = -1$, Axialvektor: $P = +1$
- Anwendung: **Auswahlregeln** für Gammastrahlung von Kernen
  - **Paritätserhaltung** für elektromagnetische Prozesse
    → Entwicklung in Kugelflächenfunktionen mit definierter Parität
  - Elektrische und magnetische **Multipolübergänge** Eℓ, Mℓ
  - Zusammenhang mit **Zerfallskonstante**: höhere Ordnungen ℓ stark unterdrückt

Karlsruher Institut für Technologie

Kapitel 5.2

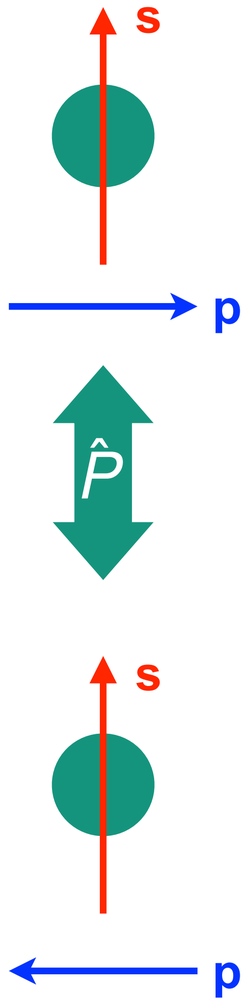
Diskrete Symmetrien: C, P, T

Eigenparität

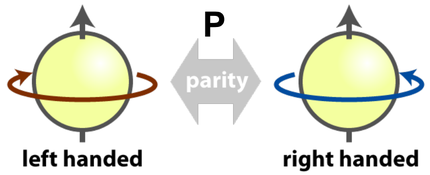


Karlsruher Institut für Technologie

- Betrachte Parität von Teilchen mit Impuls **p** und Spin **s**
- **Eigenparität** fundamentaler Teilchen:
  betrachte Paritätsoperation im Ruhesystem
  - **Fermionen**: Teilchen und Antiteilchen haben **entgegengesetzte** Parität (Konsequenz der Dirac-Gleichung)
  - **Bosonen**: Teilchen und Antiteilchen haben **dieselbe** Parität
- Übliche **Konvention** zur Festlegung der Eigenparität:
  - Fermionen (z. B. p, n, e): Paritätseigenwert $P = +1$
  - Quarks und Leptonen: $P = +1$
  - Antiquarks und Antileptonen: $P = -1$
  - Mesonen: zusätzlich relativer $q\bar{q}$-Drehimpuls: $P = (-1)^{\ell+1}$



Eigenparität

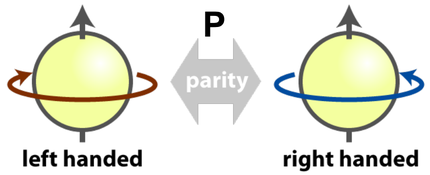


- Eigenparität von **Photonen**: $P = -1$ und Spin 1 („Vektorteilchen”)
  - Klassische Konvention für Parität von A_μ, so dass **E** Vektor, **B** Axialvektor:

$$\hat{P}A_\mu = \hat{P}(\phi/c, \mathbf{A}) = (\phi/c, -\mathbf{A})$$

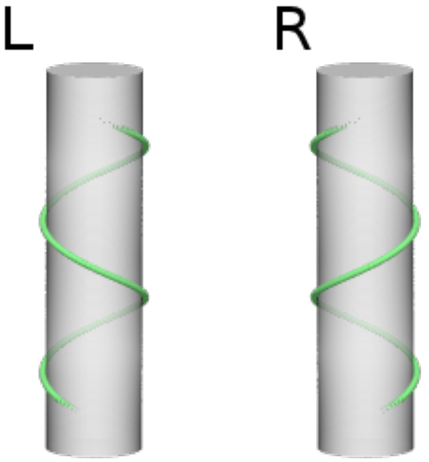
  - Quantenzahlen des Photons in spektroskopischer Notation: $J^{PC} = 1^{--}$
- Eigenparität von **Pionen**: $P = -1$ und Spin 0 („pseudoskalares Teilchen”)
  - „Mesisches Atom”: Einfang π^- durch Deuteron $\rightarrow$ Übergang in Zustand mit $\ell = 0$
  - Beobachtung: Absorption des π^- in Kern mit Prozess $\pi^- + \mathrm{d} \rightarrow \mathrm{n} + \mathrm{n}$
  - Beträge der Spins: $s(\mathrm{d}) = 1$, $s(\pi) = 0 \rightarrow$ mit $\ell = 0$: Gesamtdrehimpuls $J = 1$
  - Parität des Deuterons: d = p + n $\rightarrow P = +1$
  - Parität im Endzustand: 2 Neutronen = identische Fermionen $\rightarrow P = -1$
  - Folgerung für Parität des Pions: ***P* = –1**

Helizität = Drehsinn



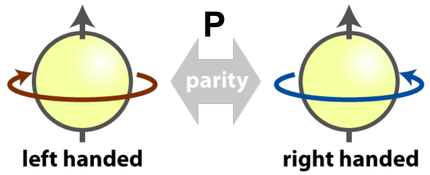
Karlsruher Institut für Technologie

- Helizität *h*: Projektion von **Spin** auf **Impulsrichtung** → pseudoskalar
- Helizität definiert **Drehsinn** eines Systems:
  - **Rechts**drehung (RH): Spin **parallel** zu Impuls
  - **Links**drehung (LH): Spin **antiparallel** zu Impuls
- Helizität physikalischer Systeme:
  - **„Gute" Quantenzahl**: vertauscht mit Hamiltonoperator
  - **Nicht lorentzinvariant**: für massive Teilchen kann immer Bezugssystem gefunden werden, in dem sich Impuls umkehrt, Spin aber nicht
  - Für massive Spin-1/2-Fermionen: vier Zustände
    → Teilchen/Antiteilchen jeweils mit $h = \pm 1$



Imalipusram, Helix_diagram-de.png, CC BY-SA 3.0

Chiralität = Händigkeit



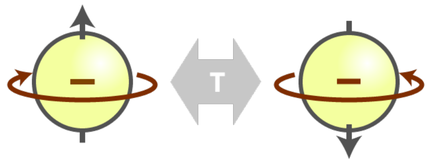
Karlsruher Institut für Technologie

- Abstrakte Eigenschaft von Fermionen:
  Chiralität = Eigenwert eines **Spinors** unter Operator $\gamma^5 = i\,\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$
  - Falls $\gamma^5\,u(p) = +u(p)$: u(p) Spinor eines **rechtshändigen** Teilchens
  - Falls $\gamma^5\,u(p) = -u(p)$: u(p) Spinor eines **linkshändigen** Teilchens
  - Paritätsoperation: Umwandlung linkshändige $\longleftrightarrow$ rechtshändige Spinoren
  - **Projektion** der rechts- und linkshändigen Komponenten beliebiger Spinoren

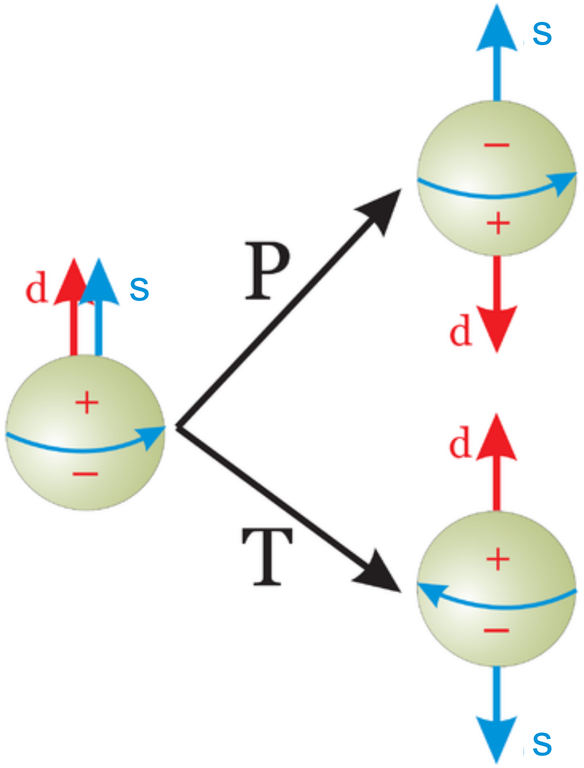
$$\hat{P}_R = \frac{1}{2}(1+\gamma^5), \quad \hat{P}_L = \frac{1}{2}(1-\gamma^5)$$

- Relevanz:
  - Für **masselose** Teilchen bzw. $E \gg mc^2$: **Chiralität = Helizität**
  - Elektroschwache Wechselwirkung: W-Bosonen koppeln nur an **linkshändige Teilchen** und **rechtshändige Antiteilchen** → Parität **maximal verletzt**

Zeitumkehr



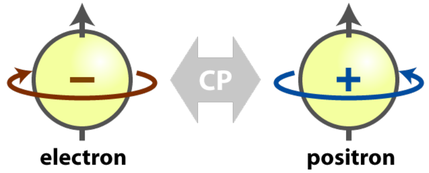
- Zeitumkehroperation T: $t \rightarrow -t$ und komplex konjugierter Spinor
  - T-Invarianz für Teilchenreaktionen: **derselbe Wirkungsquerschnitt** für Hin- und Rückreaktion
  - Quantenmechanische Formulierung subtil…
- **Elektrisches Dipolmoment d** des Neutrons (EDM):
  - Spinachse = einzige ausgezeichnete Richtung
  - **d** Vektor, **s** Axialvektor → **d** ≠ 0: Verletzung von T und P
  - nEDM (PSI): $|\mathbf{d}| < 1{,}8 \cdot 10^{-26}\ e$ cm (PRL 124 (2020) 081803)
- BaBar: **T-Verletzung direkt beobachtet**
  - Vergleich von Hin- und Rückreaktion bei B-Mesonen (Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 211801)



Knecht, NEDM_PT_violation.png, gemeinfrei

CPT-Theorem und CP-Symmetrie

- **CPT-Theorem** (Pauli, Lüders, 1957): jede lokale lorentzinvariante Quantenfeldtheorie ist invariant unter gemeinsamen Transformationen von C, P und T
- Kombinierte **CP-Symmetrie**: Umwandlung eines Teilchens in ein Antiteilchen mit umgekehrter Chiralität (z. B. rechtshändiges Elektron ↔ linkshändiges Positron)



- **Elektroschwache** Wechselwirkung (W- und Z-Bosonen-Austausch): auch kombinierte **CP-Symmetrie verletzt** (kleiner Effekt)
  → CPT-Theorem: T-Symmetrie ebenfalls verletzt

C, CP und Baryonenasymmetrie

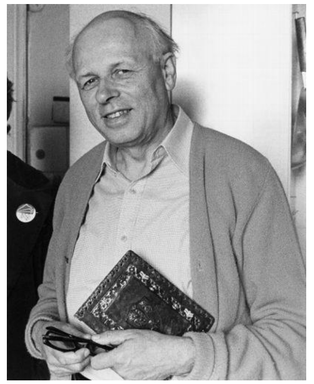
- Diskrete Symmetrien und Entstehung des Universums:
  - Nach Urknall: ungefähr dieselbe Zahl der Baryonen n_b und Photonen n_γ, aber große **Baryonenasymmetrie** η beobachtet

$$\eta \equiv \frac{n_\mathrm{b} - n_{\overline{\mathrm{b}}}}{n_\gamma} \approx 6 \cdot 10^{-10}$$

  - Interpretation: Paarvernichtung von Materie und Antimaterie während Phase der **Baryogenese** (zeitlich vor primordialer Nukleosynthese) bis auf 1:10^9

- **Notwendige Bedingungen** für Baryonenasymmetrie: für Prozesse im frühen Universum muss gelten (A. Sacharow, JETP Lett. 5 (1967) 24)
  - Nichterhaltung der Baryonenzahl
  - Verletzung der C- und der CP-Symmetrie
  - Kein thermisches Gleichgewicht

A. Sacharow



© BELGA_SCIENCE

Aufgabe 18

- Welche Aussagen über die C-, P- und T-Symmetrie sind korrekt?
  A. Neutrale Teilchen sind Eigenzustände der Ladungskonjugation, Teilchen mit ladungsartigen Quantenzahlen ungleich Null nicht.
  B. Ist eine physikalische Theorie nicht zeitumkehrinvariant, sind die Wirkungsquerschnitte für Hin- und Rückreaktion unterschiedlich.
  C. Die Eigenparität von Teilchen und Antiteilchen ist gleich.
  D. Im Grenzfall masseloser Teilchen sind Chiralität und Helizität gleich.
  E. Die Chiralität ist eine gute Quantenzahl, aber nicht lorentzinvariant.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
  https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Kurze Zusammenfassung

- Fundamentale Teilchen: **Eigenparität**
  - **Helizität**: Projektion von Spin auf Impulsrichtung
    → **Drehsinn** (nicht lorentzinvariant)
  - **Chiralität**: Eigenwerte unter γ^5 → **Händigkeit**
    → Paritätsoperation P: **linkshändige** ↔ **rechtshändige** Teilchen
- Zeitumkehr T: **derselbe Wirkungsquerschnitt** für Hin-/Rückreaktion
- **Kombinierte** Symmetrien:
  - CPT-Theorem: jede lokale lorentzinvariante Quantenfeldtheorie invariant unter kombinierter CPT-Transformation
  - Verletzung der C und CP-Symmetrie: Voraussetzung für beobachtete **Baryonenasymmetrie** im Universum (Sacharow-Kriterien)