

# ELEMENTARTEILCHEN- PHYSIK

VON

GUNNAR KÄLLÉN

Institut für theoretische Physik der Universität Lund, Schweden



BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT · MANNHEIM

---

HOCHSCHULTASCHENBÜCHER-VERLAG

# INHALTSVERZEICHNIS

## I. EINLEITENDE BEMERKUNGEN

### KAPITEL 1. EINLEITUNG

1.1. Liste der Elementarteilchen . . . . .	21
1.2. Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen . . . . .	23
1.3. Das System der Einheiten . . . . .	25
1.4. Einige Bezeichnungen . . . . .	27
1.5. Relativistische Kinematik . . . . .	28
1.6. Die $S$ -Matrix . . . . .	32
1.7. Unitarität der $S$ -Matrix. Das optische Theorem . . . . .	36

### KAPITEL 2. MASSES DER ELEMENTARTEILCHEN

2.1. Allgemeine Bemerkungen . . . . .	38
2.2. Massen von Elektron, Proton, Neutron, Photon und Neutrino . . . . .	40
2.3. Die Masse des $\mu$ -Teilchens. . . . .	41
2.4. Masse des geladenen $\pi$ -Mesons und des $\mu$ -Teilchen-Neutrinos . . . . .	42
2.5. Die Masse des neutralen $\pi$ -Mesons . . . . .	44
2.6. Masse des geladenen $K$ -Mesons . . . . .	51
2.7. Die Masse des neutralen $K$ -Mesons . . . . .	52
2.8. Die Masse des $\Lambda$ -Teilchens . . . . .	54
2.9. Die Massen der geladenen $\Sigma$ -Teilchen . . . . .	54
2.10. Die Masse des neutralen $\Sigma$ -Teilchens . . . . .	57
2.11. Die Masse der $\Xi$ -Teilchen . . . . .	57

## II. STARKE WECHSELWIRKUNGEN VON TEILCHEN OHNE STRANGENESS

### KAPITEL 3. DIE QUANTENZAHLEN DES $\pi$ -MESONS. DER ISOTOPENSPIN

3.1. Spin des $\pi$ -Mesons. Allgemeiner Überblick . . . . .	59
3.2. Das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts . . . . .	60
3.3. Der Spin des geladenen $\pi$ -Mesons . . . . .	64
3.4. Der Spin des neutralen $\pi$ -Mesons . . . . .	66
3.5. Die Parität des $\pi$ -Mesons . . . . .	68
3.6. Qualitatives Bild des $\pi$ -Mesons als Ursprung für Kernkräfte . . . . .	70
3.7. Der Isotopenspin für ein Nukleon . . . . .	74

3.8.	Der Isotopenspin für zwei oder mehr Nukleonen . . . . .	77
3.9.	Der Isotopenspin für $\pi$ -Mesonen . . . . .	81
3.10.	Isotopenspin und zweite Quantisierung . . . . .	83

#### KAPITEL 4. DIE STREUUNG VON $\pi$ -MESONEN AN NUKLEONEN

4.1.	Überblick über die experimentelle Lage, Isotopenspin-Analyse . . . . .	88
4.2.	Winkelverteilungen und Streuphasenanalyse . . . . .	96
4.3.	Der Einfluß der Coulomb-Wechselwirkung auf die $\pi$ -Meson-Nukleon-Streuung . . . . .	100
4.4.	Vergleich mit experimentellen Daten . . . . .	102
4.5.	Mehrdeutigkeiten in der Bestimmung der Streuphasen . . . . .	108
4.6.	Die Polarisierung des gestoßenen Nukleons . . . . .	109
4.7.	Schlußbemerkungen . . . . .	111

#### KAPITEL 5. FORMALE THEORIE DER $\pi$ -MESON-NUKLEON- STREUUNG

5.1.	Grundgedanken des statischen Modells. Die Bewegungs- gleichung für das Mesonenfeld . . . . .	115
5.2.	Asymptotische Mesonenfelder. Die $S$ -Matrix . . . . .	117
5.3.	Nichtrelativistische Reduktionstechnik . . . . .	118
5.4.	Die Low-Gleichung . . . . .	121
5.5.	Der Hamilton-Operator der Wechselwirkung . . . . .	122
5.6.	Einführung der Streuphasen . . . . .	125
5.7.	Näherungsweise Behandlung der Low-Gleichung. Die Beiträge von Ein-Nukleon-Zuständen . . . . .	127
5.8.	Beiträge von Zuständen mit einem Nukleon und einem Meson . . . . .	129
5.9.	Die Ein-Meson-Näherung. Die Formel für die effektive Reichweite . . . . .	132
5.10.	Relativistische Reduktionstechnik . . . . .	138
5.11.	Reduktion des $S$ -Matrixelementes für die $\pi$ -Meson- Nukleon-Streuung auf skalare Amplituden . . . . .	143
5.12.	Spezialisierung auf die Vorwärtsstreuung . . . . .	146
5.13.	Dispersionsrelationen für die Vorwärtsstreuung; einleitende Diskussion . . . . .	147
5.14.	Beweis von Dispersionsrelationen für die Vorwärtsstreuung	149
5.15.	Der Vergleich mit experimentellen Daten . . . . .	157
5.16.	Schlußbemerkungen . . . . .	161

KAPITEL 6. DIE PHOTOERZEUGUNG VON  $\pi$ -MESONEN

6.1. Qualitativer Vergleich zwischen der Photoerzeugung bei niedrigen Energien und der $\pi$ -Meson-Nukleon-Streuung . . .	164
6.2. Anwendung des Prinzips des detaillierten Gleichgewichts auf die Photoerzeugung des $\pi$ -Mesons . . . . .	167
6.3. Die Winkelverteilungen bei der Photoerzeugung von $\pi$ -Mesonen . . . . .	171
6.4. Die Polarisation des gestoßenen Kerns. Die Parität der höheren Nukleon-Resonanzen . . . . .	183

KAPITEL 7. VIELFACHERZEUGUNG VON  $\pi$ -MESONEN BEI DER  $\pi$ -MESON-NUKLEON-STREUUNG UND BEI DER PROTON-ANTIPROTON-VERNICHTUNG

7.1. Die Wechselwirkung zwischen zwei $\pi$ -Mesonen . . . . .	187
7.2. Die Erzeugung von $\pi$ -Mesonen bei der $\pi$ -Meson-Nukleon-Streuung . . . . .	188
7.3. Der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Streuung von $\pi$ -Mesonen an $\pi$ -Mesonen . . . . .	195
7.4. Vergleich mit experimentellen Daten . . . . .	197
7.5. Der Spin der $2\pi$ -Resonanz . . . . .	200
7.6. Der Isotopenspin der $2\pi$ -Resonanz. Das $\rho$ -Meson . . . . .	202
7.7. Prüfung der theoretischen Formel (7.34) . . . . .	206
7.8. Die Vielfacherzeugung von $\pi$ -Mesonen bei der Proton-Antiproton-Vernichtung. Das $\omega$ -Meson . . . . .	209
7.9. Phasenraumfaktoren für die Erzeugung von drei $\pi$ -Mesonen . . . . .	211
7.10. Der Phasenraumfaktor für den Zerfall des $\omega$ -Mesons. Dalitz-Diagramme . . . . .	214
7.11. Spin und Parität des $\omega$ -Mesons . . . . .	220
7.12. Das $\eta$ -Meson und andere mögliche Resonanzen im System mit vielen $\pi$ -Mesonen . . . . .	226

## KAPITEL 8. ELEKTROMAGNETISCHE FORMFAKTOREN DER NUKLEONEN

8.1. Einleitung . . . . .	234
8.2. Die Streuung von Elektronen in einem äußeren Potential . . . . .	234
8.3. Der Einfluß des Rückstoßes des Protons . . . . .	239
8.4. Der Einfluß der endlichen Ausdehnung und des anomalen magnetischen Moments des Protons . . . . .	243
8.5. Formfaktoren für das Proton und das Neutron . . . . .	247

- |      |   |     |
|------|---|-----|
| 8.6. | Experimentelle Ergebnisse für die Formfaktoren des Nukleons . . . . .   | 249 |
| 8.7. | Mögliche Zusammenhänge zwischen diesen Formfaktoren und den Resonanzen in Systemen mit vielen $\pi$ -Mesonen. . . . . | 253 |

### III. STARKE WECHSELWIRKUNGEN VON TEILCHEN MIT STRANGENESS

#### KAPITEL 9. DIE QUANTENZAHLN VON TEILCHEN MIT STRANGENESS

- |      |  |     |
|------|--|-----|
| 9.1. | Die gemeinsame Erzeugung von Teilchen mit Strangeness. Die Strangeness-Quantenzahl . . . . . | 257 |
| 9.2. | Der Isotopenspin von Teilchen mit Strangeness. Die Baryonenzahl . . . . .                    | 259 |
| 9.3. | Die Erhaltung des Isotopenspins bei Reaktionen von seltsamen Teilchen . . . . .              | 262 |

#### KAPITEL 10. DIE STREUUNG VON K-MESONEN AN NUKLEONEN

- |       |   |     |
|-------|---|-----|
| 10.1. | Überblick über die experimentelle Situation . . . . .   | 267 |
| 10.2. | Phasenanalyse für die Streuung von positiven K-Meson an Nukleonen . . . . .                                   | 271 |
| 10.3. | Die Streuung von negativen K-Meson an Nukleonen . . . . .   | 275 |
| 10.4. | Der Einfluß von Massendifferenzen auf die Ladungsaustauschstreueung. Spitzen im Wirkungsquerschnitt . . . . . | 285 |

#### KAPITEL 11. RESONANZEN MIT NICHTVERSCHWINDENDER STRANGENESS

- |       |  |     |
|-------|--|-----|
| 11.1. | Resonanzen, die bei der Streuung von negativen K-Meson an Protonen direkt beobachtet werden . . . . .  | 291 |
| 11.2. | Resonanzen, die mit Hilfe von Wechselwirkungen im Endzustand bei der Streuung von K-Meson an Protonen im ( $T=0$ )-Zustand beobachtet werden . . . . .           | 298 |
| 11.3. | Resonanzen, die mit Hilfe von Wechselwirkungen im Endzustand bei der Streuung von negativen K-Meson an Protonen im ( $T=1$ )-Zustand beobachtet werden . . . . . | 302 |
| 11.4. | Die Bestimmung des Spins einer Resonanz aus der Winkelverteilung ihrer Zerfallsprodukte . . . . .  | 307 |
| 11.5. | Die Resonanz $\Xi^*$ mit Strangeness $-2$ . . . . .  | 309 |
| 11.6. | Die Resonanz $K^*$ mit Strangeness $\pm 1$ . . . . .   | 312 |

## IV. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN

## KAPITEL 12. SYMMETRIEOPERATIONEN

12.1.	Einleitung . . . . .	319
12.2.	Raumspiegelungen in Theorien ohne zweite Quantisierung . . . . .	320
12.3.	Raumspiegelungen in Theorien mit zweiter Quantisierung . . . . .	322
12.4.	Raumspiegelungen für wechselwirkende Felder . . . . .	327
12.5.	Ladungskonjugation für freie Felder . . . . .	328
12.6.	Ladungskonjugation für wechselwirkende Felder . . . . .	332
12.7.	$G$ -Parität . . . . .	335
12.8.	Zeitumkehr in der klassischen Physik . . . . .	339
12.9.	Zeitumkehr in der gewöhnlichen Quantenmechanik . . . . .	342
12.10.	Zeitumkehr in einer Theorie mit zweiter Quantisierung . . . . .	344
12.11.	Das $CPT$ -Theorem . . . . .	349

KAPITEL 13. THEORIE DES  $\beta$ -ZERFALLS

13.1.	Einführung. Die statistische Gestalt des $\beta$ -Zerfallsspektrums . . . . .	354
13.2.	Der Hamilton-Operator der $\beta$ -Wechselwirkung . . . . .	357
13.3.	Nichtrelativistische Näherung für die Nukleonen . . . . .	361
13.4.	Auswahlregeln für erlaubte Zerfälle . . . . .	365
13.5.	Übergangswahrscheinlichkeiten und Winkelkorrelationen für unpolarisierte Teilchen . . . . .	366
13.6.	Vergleich mit experimentellen Daten für unpolarisierte Teilchen . . . . .	369
13.7.	Zerfallswahrscheinlichkeiten und Winkelkorrelationsfunktionen, wenn man die Polarisation des Elektrons beobachtet . . . . .	375
13.8.	$\beta$ -Zerfall polarisierter Kerne. Invarianz der $\beta$ -Wechselwirkung unter Zeitumkehr . . . . .	378
13.9.	Die Zweikomponententheorie des Neutrinos . . . . .	383
13.10.	Erhaltung der Leptonen . . . . .	389

KAPITEL 14. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN DES  $\mu$ -TEILCHENS

14.1.	Einleitung. Grundlegende experimentelle Tatsachen . . . . .	397
14.2.	Der Hamilton-Operator der Wechselwirkung für den normalen Zerfall des $\mu$ -Teilchens . . . . .	398
14.3.	Die Zerfallswahrscheinlichkeit des $\mu$ -Teilchens . . . . .	401
14.4.	Zerfallsspektrum für unpolarisierte $\mu$ -Teilchen und unpolarisierte Elektronen. Lebensdauer des $\mu$ -Teilchens . . . . .	406
14.5.	Zerfall polarisierter $\mu$ -Teilchen . . . . .	411

14.6.	Zerfall des $\mu$ -Teilchens ohne Erhaltung der Leptonenladung . . . . .	416
14.7.	Hypothese vom erhaltenen Vektorstrom . . . . .	418
14.8.	$\mu$ -Teilcheneinfang . . . . .	427

## KAPITEL 15. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN DES $\pi$ -MESONS

15.1.	Einleitung . . . . .	434
15.2.	Gewöhnlicher $\pi$ -Mesonen-Zerfall . . . . .	435
15.3.	Elektronischer Zerfall des $\pi$ -Mesons . . . . .	440
15.4.	Unterschied zwischen Elektron-Neutrino und $\mu$ -Teilchen-Neutrino . . . . .	443

## KAPITEL 16. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN DER K-MESONEN

16.1.	Einleitung und Übersicht über die experimentelle Situation . . . . .	448
16.2.	Der Zerfall des positiven K-Mesons in zwei $\pi$ -Mesonen . . . . .	449
16.3.	Der Zerfall des positiven K-Mesons in drei $\pi$ -Mesonen. Der Spin des K-Mesons . . . . .	450
16.4.	Der Zerfall neutraler K-Mesonen in zwei $\pi$ -Mesonen. Die $K_1^0$ - und $K_2^0$ -Teilchen . . . . .	458
16.5.	Regeneration des $K_1^0$ -Mesons. Der Massenunterschied zwischen $K_1^0$ - und $K_2^0$ -Mesonen . . . . .	461
16.6.	Die Regel $\Delta T = \frac{1}{2}$ für nichtleptonische Zerfälle des K-Mesons . . . . .	467
16.7.	Der Zerfall des neutralen K-Mesons in drei $\pi$ -Mesonen . . . . .	472
16.8.	Leptonische Zerfälle der K-Mesonen . . . . .	474
16.9.	Die Auswahlregel $\Delta Q = \Delta S$ . . . . .	477
16.10.	Energiespektrum bei den leptonischen Zerfällen der K-Teilchen . . . . .	480

## KAPITEL 17. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN DER BARYONEN

17.1.	Einleitung und Übersicht über die experimentelle Situation . . . . .	490
17.2.	Zerfälle mit $ \Delta S  = 2$ . . . . .	491
17.3.	Isotopenspin beim Zerfall des $\Lambda$ -Teilchens . . . . .	494
17.4.	Asymmetrieparameter beim Zerfall des $\Lambda$ -Teilchens . . . . .	495
17.5.	Polarisation des Nukleons im Endzustand beim Zerfall des $\Lambda$ -Teilchens . . . . .	501

17.6.	Asymmetrieparameter bei den Zerfällen des $\Sigma$ -Teilchens . . . . .	504
17.7.	Asymmetrieparameter für den Zerfall eines Teilchens mit beliebigem Spin. Spin und Asymmetrieparameter des $\Xi$ -Teilchens . . . . .	510
17.8.	Die relative Parität zwischen dem K-Meson, dem Nukleon und dem $\Lambda$ -Teilchen . . . . .	517

## ANHANG I. DREHIMPULS

A1.1.	Elementare Eigenschaften der Drehimpulsoperatoren. Kugelflächenfunktionen . . . . .	523
A1.2.	Addition von Drehimpulsen. Clebsch-Gordan-Koeffizienten und 3-j-Symbole . . . . .	525
A1.3.	Umkopplung von Drehimpulsen. Racah-Koeffizienten und 6-j-Symbole . . . . .	529
A1.4.	Tensoroperatoren . . . . .	532

## ANHANG II. DIE DIRAC-GLEICHUNG

A2.1.	Grundbegriffe . . . . .	539
A2.2.	Transformationsverhalten unter Lorentz-Transformationen . . . . .	539
A2.3.	Lösung der freien Dirac-Gleichung mit ebenen Wellen . . . . .	541
A2.4.	Summation über Polarisationsrichtungen. Auswertung von Spuren . . . . .	543
A2.5.	Nichtrelativistische Grenze der Dirac-Gleichung . . . . .	546
A2.6.	Die Stromdichte der Dirac-Theorie . . . . .	547

## ANHANG III. ZWEITE QUANTISIERUNG

A3.1.	Quantisierung eines freien, neutralen Skalarfeldes . . . . .	549
A3.2.	Quantisierung eines freien, geladenen, skalaren Feldes . . . . .	552
A3.3.	Quantisierung eines freien Spinorfeldes . . . . .	553
A3.4.	Entwicklung nach Drehimpulzeigenzuständen . . . . .	554
A3.5.	Wechselwirkende Felder . . . . .	558

INDEX . . . . .	563
-----------------	-----