

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 μ -Teilchens.	41
2.4. Masse des geladenen π -Mesons und des μ -Teilchen-Neutrinos	42
2.5. Die Masse des neutralen π -Mesons	44
2.6. Masse des geladenen K -Mesons	51
2.7. Die Masse des neutralen K -Mesons	52
2.8. Die Masse des Λ -Teilchens	54
2.9. Die Massen der geladenen Σ -Teilchen	54
2.10. Die Masse des neutralen Σ -Teilchens	57
2.11. Die Masse der Ξ -Teilchen	57

II. STARKE WECHSELWIRKUNGEN VON TEILCHEN OHNE STRANGENESS

KAPITEL 3. DIE QUANTENZAHLEN DES π -MESONS. DER ISOTOPENSPIN

3.1. Spin des π -Mesons. Allgemeiner Überblick	59
3.2. Das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts	60
3.3. Der Spin des geladenen π -Mesons	64
3.4. Der Spin des neutralen π -Mesons	66
3.5. Die Parität des π -Mesons	68
3.6. Qualitatives Bild des π -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 π -Mesonen	81
3.10.	Isotopenspin und zweite Quantisierung	83

KAPITEL 4. DIE STREUUNG VON π -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 π -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 π -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 π -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 π -MESONEN

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

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

7.1. Die Wechselwirkung zwischen zwei π -Mesonen	187
7.2. Die Erzeugung von π -Mesonen bei der π -Meson-Nukleon-Streuung	188
7.3. Der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Streuung von π -Mesonen an π -Mesonen	195
7.4. Vergleich mit experimentellen Daten	197
7.5. Der Spin der 2π -Resonanz	200
7.6. Der Isotopenspin der 2π -Resonanz. Das ρ -Meson	202
7.7. Prüfung der theoretischen Formel (7.34)	206
7.8. Die Vielfacherzeugung von π -Mesonen bei der Proton-Antiproton-Vernichtung. Das ω -Meson	209
7.9. Phasenraumfaktoren für die Erzeugung von drei π -Mesonen	211
7.10. Der Phasenraumfaktor für den Zerfall des ω -Mesons. Dalitz-Diagramme	214
7.11. Spin und Parität des ω -Mesons	220
7.12. Das η -Meson und andere mögliche Resonanzen im System mit vielen π -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 π -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 Ξ^* mit Strangeness -2	309
11.6.	Die Resonanz K^* mit Strangeness ± 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 β -ZERFALLS

13.1.	Einführung. Die statistische Gestalt des β -Zerfallsspektrums	354
13.2.	Der Hamilton-Operator der β -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.	β -Zerfall polarisierter Kerne. Invarianz der β -Wechselwirkung unter Zeitumkehr	378
13.9.	Die Zweikomponententheorie des Neutrinos	383
13.10.	Erhaltung der Leptonen	389

KAPITEL 14. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN DES μ -TEILCHENS

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

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

KAPITEL 15. SCHWACHE WECHSELWIRKUNGEN DES π -MESONS

15.1.	Einleitung	434
15.2.	Gewöhnlicher π -Mesonen-Zerfall	435
15.3.	Elektronischer Zerfall des π -Mesons	440
15.4.	Unterschied zwischen Elektron-Neutrino und μ -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 π -Mesonen	449
16.3.	Der Zerfall des positiven K-Mesons in drei π -Mesonen. Der Spin des K-Mesons	450
16.4.	Der Zerfall neutraler K-Mesonen in zwei π -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 π -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 Λ -Teilchens	494
17.4.	Asymmetrieparameter beim Zerfall des Λ -Teilchens	495
17.5.	Polarisation des Nukleons im Endzustand beim Zerfall des Λ -Teilchens	501

17.6.	Asymmetrieparameter bei den Zerfällen des Σ -Teilchens	504
17.7.	Asymmetrieparameter für den Zerfall eines Teilchens mit beliebigem Spin. Spin und Asymmetrieparameter des Ξ -Teilchens	510
17.8.	Die relative Parität zwischen dem K-Meson, dem Nukleon und dem Λ -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 Drehimpulseigenzuständen	554
A3.5.	Wechselwirkende Felder	558

INDEX	563
-----------------	-----