

Hartmut Machner

# **Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik**



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

XIII

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Historische Anfänge</b>                            | <b>1</b>  |
| 1.1 Aufgaben  | 4         |
| <b>2 Experimentelle Methoden</b>                        | <b>7</b>  |
| 2.1 Beschleuniger                                       | 7         |
| 2.1.1 Gleichspannungsbeschleuniger                      | 7         |
| 2.1.2 Linearbeschleuniger                               | 9         |
| 2.1.3 Kreisbeschleuniger                                | 11        |
| 2.2 Detektoren  | 16        |
| 2.2.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie          | 17        |
| 2.2.2 Messung der Ionisation                            | 23        |
| 2.2.3 Positionsmessung                                  | 25        |
| 2.2.4 Teilchenidentifizierung                           | 29        |
| 2.2.5 Zeitmessung                                       | 32        |
| 2.2.6 Energiemessung                                    | 34        |
| 2.2.7 Impulsmessung                                     | 35        |
| 2.3 Aufgaben  | 39        |
| <b>3 Globale Eigenschaften von Kernen und Nukleonen</b> | <b>43</b> |
| 3.1 Massen, Bindung                                     | 43        |
| 3.2 Streuexperimente                                    | 49        |
| 3.2.1 Die Methode                                       | 49        |
| 3.2.2 Streuung an einer harten Kugel                    | 51        |
| 3.2.3 Begriffe und Einheiten                            | 52        |
| 3.3 Quantenmechanik der Streuung                        | 55        |
| 3.3.1 Die Bom'sche Näherung                             | 58        |
| 3.3.2 Die Eikonal-Näherung                              | 58        |
| 3.3.3 Die Rutherford-Streuung                           | 59        |
| 3.4 Elastische Elektronenstreuung an Kernen             | 61        |
| 3.4.1 Formfaktoren und Mott-Streuung                    | 61        |
| 3.4.2 Ladungsverteilung von Kernen                      | 64        |
| 3.5 Streuung leichter Ionen an Kernen                   | 68        |
| 3.5.1 Das Kastenpotential                               | 68        |
| 3.5.2 Materieverteilung                                 | 69        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.6      | Elektromagnetische Momente. . . . .                          | 72         |
| 3.6.1    | Magnetische Momente. . . . .                                 | 72         |
| 3.6.2    | Elektrische Quadrupolmomente. . . . .                        | 76         |
| 3.7      | Ladungsverteilung der Nukleonen. . . . .                     | 79         |
| 3.8      | Partonen. . . . .  | 84         |
| 3.9      | Partialwellenzerlegung. . . . .                              | 86         |
| 3.9.1    | Wirkungsquerschnitte der elastischen Streuung. . . . .       | 86         |
| 3.9.2    | Totaler Wirkungsquerschnitt. . . . .                         | 88         |
| 3.10     | $\alpha$ -Zerfall. . . . .                                   | 92         |
| 3.10.1   | Gamow'sches Modell der Potentialdurchtunnelung. . . . .      | 92         |
| 3.10.2   | Spektroskopische Faktoren. . . . .                           | 98         |
| 3.10.3   | Protonen-Radioaktivität. . . . .                             | 100        |
| 3.10.4   | Cluster-Radioaktivität. . . . .                              | 100        |
| 3.11     | Halbklassische Beschreibung. . . . .                         | 101        |
| 3.12     | Die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung. . . . .                  | 104        |
| 3.12.1   | Das Deuteron. . . . .  | 104        |
| 3.12.2   | Nukleon-Nukleon-Streuung. . . . .                            | 110        |
| 3.12.3   | Feld-theoretische Beschreibung der Wechselwirkungen. . . . . | 116        |
| 3.13     | Aufgaben. . . . .  | 123        |
| <b>4</b> | <b>Kernmodelle</b>   | <b>127</b> |
| 4.1      | Fermi-Gas-Modell. . . . .                                    | 127        |
| 4.2      | Tröpfchenmodell. . . . .                                     | 130        |
| 4.3      | Das Schalenmodell. . . . .                                   | 137        |
| 4.3.1    | Sphärische Potentiale. . . . .                               | 137        |
| 4.3.2    | Spin-Bahn-Wechselwirkung. . . . .                            | 143        |
| 4.3.3    | Restwechselwirkung. . . . .                                  | 146        |
| 4.4      | Deformierte Kerne. . . . .                                   | 153        |
| 4.5      | Das optische Modell. . . . .                                 | 155        |
| 4.6      | Einteilchen-Anregungen. . . . .                              | 162        |
| 4.7      | Kollektive Anregungen. . . . .                               | 167        |
| 4.7.1    | Vibrationen. . . . .   | 168        |
| 4.7.2    | Rotierende Kerne. . . . .                                    | 170        |
| 4.7.3    | Transurane und Spaltung. . . . .                             | 177        |
| 4.8      | Aufgaben. . . . .  | 181        |
| <b>5</b> | <b>Ungebundene Systeme, Symmetrien</b>                       | <b>185</b> |
| 5.1      | Resonanzen in Kernen. . . . .                                | 185        |
| 5.2      | Riesenresonanzen. . . . .                                    | 191        |
| 5.3      | Erhaltungsgrößen. . . . .                                    | 194        |
| 5.3.1    | Raum-Zeitliche Verschiebungen. . . . .                       | 197        |
| 5.3.2    | Rotation. . . . .  | 198        |
| 5.3.3    | Halbzahlige Spins. . . . .                                   | 200        |
| 5.3.4    | Die Parität $P$ . . . . .                                    | 201        |
| 5.3.5    | Die Zeitumkehr $T$ . . . . .                                 | 203        |
| 5.3.6    | Der Isospin. . . . .   | 207        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.4      | Eigenschaften der Feldteilchen . . . . .                                   | 209        |
| 5.4.1    | Die Entdeckung des Pions. . . . .  | 209        |
| 5.4.2    | Spin des geladenen Pions. . . . .  | 211        |
| 5.4.3    | Isospin der Pionen. . . . .  | 212        |
| 5.4.4    | Spin und Parität des Photons. . . . .                                      | 214        |
| 5.4.5    | Schwellenproduktionen. . . . .   | 215        |
| 5.5      | Empirische Erhaltungssätze. . . . .  | 218        |
| 5.5.1    | Ladungserhaltung. . . . .  | 218        |
| 5.5.2    | Folgerungen aus der Existenz und aus dem $\beta$ -Zerfall des Neutrons . . | 221        |
| 5.6      | Das $\pi\pi$ -Nukleon-System. . . . .                                      | 222        |
| 5.6.1    | Die $\pi\pi$ -Nukleon-Wechselwirkung. . . . .                              | 222        |
| 5.6.2    | Nukleonenresonanzen. . . . .   | 225        |
| 5.7      | Resonanzen im $\pi\pi$ -System. . . . .                                    | 229        |
| 5.7.1    | Zweipionen-Systeme. . . . .  | 229        |
| 5.7.2    | Dreipionen-Systeme. . . . .  | 231        |
| 5.8      | Die Strangeness. . . . .   | 234        |
| 5.9      | $\pi$ -Zerfälle und die C-Konjugation. . . . .                             | 238        |
| 5.10     | Aufgaben. . . . .  | 241        |
| <b>6</b> | <b>Quarkonia und die starke Wechselwirkung</b>                             | <b>247</b> |
| 6.1      | Multipletts leichter Quarks. . . . .                                       | 247        |
| 6.1.1    | Anordnungen in Multipletts, Quarks. . . . .                                | 247        |
| 6.1.2    | Quarkmassen. . . . .   | 255        |
| 6.1.3    | Farbe. . . . .   | 261        |
| 6.1.4    | Quarklinien. . . . .   | 261        |
| 6.2      | Schwere Quarks. . . . .  | 263        |
| 6.2.1    | Die Entdeckung des Charms. . . . .   | 263        |
| 6.2.2    | Die Entdeckungen des Bottom- und des Top-Quarks. . . . .                   | 267        |
| 6.3      | QCD, Jets und Gluonen. . . . .   | 270        |
| 6.3.1    | Quark-Quark-Potential. . . . .   | 270        |
| 6.3.2    | Die laufende Kopplungskonstante. . . . .                                   | 274        |
| 6.3.3    | Das Saitenmodell. . . . .  | 277        |
| 6.3.4    | Nichtresonante $\pi\pi$ -Erzeugung. . . . .                                | 279        |
| 6.3.5    | Gluonenabstrahlung. . . . .  | 282        |
| 6.3.6    | Die Gluon-Gluon-Wechselwirkung. . . . .                                    | 285        |
| 6.4      | Struktur der Nukleonen. . . . .  | 287        |
| 6.4.1    | Skaleninvarianz. . . . .   | 287        |
| 6.4.2    | Das Quark-Parton-Modell. . . . .   | 293        |
| 6.4.3    | Neutrinostreuung. . . . .  | 296        |
| 6.4.4    | Skalenbrechung und Impulsverteilung der Gluonen. . . . .                   | 297        |
| 6.5      | Eichinvarianz. . . . .   | 299        |
| 6.5.1    | Nicht-Abel'sche Eichtransformationen. . . . .                              | 299        |
| 6.5.2    | Spontane Brechung der globalen Symmetrie: Goldstone-Mode . . . .           | 303        |
| 6.5.3    | Spontane Brechung der lokalen Symmetrie: Higgs-Mode. . . . .               | 306        |
| 6.5.4    | Higgs-Mechanismus und Isospin. . . . .                                     | 307        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.6      | Chirale Störungstheorie. . . . .  | 308        |
| 6.6.1    | Chiraler Grenzfall. . . . .   | 308        |
| 6.6.2    | Partiell erhaltener axialer Strom. . . . .  | 310        |
| 6.6.3    | TTTr-Streuung. . . . .  | 311        |
| 6.6.4    | Offene Probleme. . . . .  | 313        |
| 6.7      | Streuung von Hadronen bei hohen Energien. . . . .                                 | 316        |
| 6.8      | Aufgaben. . . . .   | 320        |
| <b>7</b> | <b>Die elektroschwache Wechselwirkung</b>   | <b>325</b> |
| 7.1      | Leptonen. . . . .   | 325        |
| 7.1.1    | Eigenschaften geladener Leptonen. . . . .   | 325        |
| 7.1.2    | Die Neutrino-Hypothese. . . . .   | 330        |
| 7.2      | Der nukleare $\beta$ -Zerfall, Fermi's Theorie. . . . .                           | 332        |
| 7.3      | Verletzung der Paritätserhaltung, Helizität der Leptonen. . . . .                 | 338        |
| 7.3.1    | Das Wu-Experiment. . . . .  | 339        |
| 7.3.2    | Der Zerfall des $\Lambda$ -Hyperons. . . . .                                      | 341        |
| 7.3.3    | Die Helizität der Leptonen. . . . .   | 343        |
| 7.4      | Die V - A-Wechselwirkung. . . . .   | 345        |
| 7.5      | Test der V - A-Theorie. . . . .   | 348        |
| 7.6      | Der neutrale, schwache Strom. . . . .   | 352        |
| 7.7      | Die Feldbosonen der schwachen Wechselwirkung. . . . .                             | 354        |
| 7.8      | Schwache Zerfälle von Teilchen mit Strangeness. . . . .                           | 358        |
| 7.9      | Verallgemeinerung auf sechs Quarks. . . . .                                       | 359        |
| 7.10     | Die Vereinheitlichung der elektrischen und der schwachen Wechselwirkung . . . . . | 362        |
| 7.11     | Oszillationen, CV -Verletzung. . . . .  | 366        |
| 7.11.1   | Das Zweizustandsproblem. . . . .  | 366        |
| 7.11.2   | Die neutralen Kaonen. . . . .   | 369        |
| 7.11.3   | Oszillation und Regeneration. . . . .   | 371        |
| 7.11.4   | Verletzung der CV- und der T-Invarianz. . . . .                                   | 373        |
| 7.11.5   | CV-Verletzung im Standardmodell. . . . .  | 381        |
| 7.12     | Neutrinos. . . . .  | 386        |
| 7.12.1   | Drei Leptonenfamilien. . . . .  | 387        |
| 7.12.2   | Sonnenneutrinos. . . . .  | 389        |
| 7.12.3   | Atmosphärische Neutrinos. . . . .   | 393        |
| 7.12.4   | Neutrinooszillationen. . . . .  | 395        |
| 7.13     | Aufgaben. . . . .   | 402        |
| <b>8</b> | <b>Kerne in exotischen Zuständen</b>  | <b>407</b> |
| 8.1      | Hyperkerne. . . . .   | 407        |
| 8.2      | Mesonische Atome. . . . .   | 411        |
| 8.3      | Schwerionenphysik bei mittleren Energien. . . . .                                 | 414        |
| 8.3.1    | Heiße Kerne. . . . .  | 414        |
| 8.3.2    | Weitere Thermometer. . . . .  | 418        |
| 8.3.3    | Thermalisierung. . . . .  | 419        |
| 8.3.4    | Die Zustandsgleichung. . . . .  | 423        |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 8.4 | Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma . . . . . | 425 |
| 8.5 | Nukleares Brennen, Neutronensterne. . . . . | 428 |
| 8.6 | Aufgaben. . . . .                           | 433 |

## Anhang

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>A</b> | <b>Fourier-Transformationen</b>                      | <b>437</b> |
| <b>B</b> | <b>Die Raum-Zeit</b>                                 | <b>439</b> |
| B.1      | Vierervektoren. . . . .                              | 439        |
| B.2      | Lorentz-Transformationen. . . . .                    | 440        |
| B.3      | Kovariante Formulierung der Elektrodynamik. . . . .  | 441        |
| <b>C</b> | <b>Kinematik und Phasenraum</b>                      | <b>443</b> |
| C.1      | Kinematik . . . . .                                  | 443        |
| C.2      | Zweikörper-Kinematik . . . . .                       | 446        |
| C.3      | Dreikörper-Kinematik. . . . .                        | 449        |
| C.4      | Methode der fehlenden Masse. . . . .                 | 455        |
| C.5      | Rapidität . . . . .                                  | 455        |
| <b>D</b> | <b>Addition von Drehimpulsen</b>                     | <b>457</b> |
| <b>E</b> | <b>Die Dirac-Gleichung</b>                           | <b>459</b> |
| E.1      | Wellengleichungen. . . . .                           | 459        |
| E.2      | Lösungen der Dirac-Gleichung . . . . .               | 463        |
| <b>F</b> | <b>Matrizelemente aus Feynman-Graphen</b>            | <b>465</b> |
| F.1      | Regeln der QED. . . . .                              | 465        |
| F.2      | Regeln der QCD. . . . .                              | 468        |
| <b>G</b> | <b>Generatoren für die Gruppe <math>SU(3)</math></b> | <b>471</b> |
| <b>H</b> | <b>Quantenzahlen der Mesonen</b>                     | <b>475</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                          | <b>477</b> |
|          | <b>Index</b>   | <b>489</b> |