

Helmut Hilscher

# Elementare Teilchenphysik

FACETTEN



# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| <b>Vorwort</b>  | IX |
| <b>I Wozu immer größere Teilchenbeschleuniger?</b>                                      | 1  |
| 1 Ein empirisches Exponentialgesetz für Beschleuniger                                   | 1  |
| 2 Auf den Impulsübertrag kommt es an!   | 4  |
| 3 Masse aus Energie   | 11 |
| 4 Der Wirkungsquerschnitt als Maß aller Dinge   | 17 |
| Veranschaulichung des Begriffes „Wirkungsquerschnitt“                                   | 17 |
| Allgemeine Definition des Wirkungsquerschnitts  | 19 |
| Differentielle Querschnitte   | 20 |
| 5 Die Luminosität als Gütesiegel für Speicherring-<br>Kollisionsmaschinen               | 24 |
| <b>II Das Standardmodell der Teilchenphysik</b>   | 26 |
| 1 Die fundamentalen Teilchen und ihre Wechsel-<br>wirkungen - ein Überblick             | 27 |
| 2 Die Geschichte der Quarks   | 41 |
| Der Teilchenzoo der Hadronen  | 41 |
| Mysteriöse Ordnungsschemata der Hadronen  | 42 |
| Die Geburt des Quarkmodells   | 44 |
| „Farbe“ überwindet Schwierigkeiten  | 48 |
| „Quarkonia“ und zwei schwere Quarks; Hadronen mit „Charm“<br>und „Beauty“               | 50 |
| Top, die Wette gilt: Quarks im Sechserpack  | 54 |
| 3 Die Quarks sind keine mathematische Fiktion: einige<br>„Existenzbeweise“              | 61 |
| Tiefinelastische Lepton-Nukleon-Streuung - Es leben<br>Rutherford und die Neutrinos!    | 62 |
| Jets, Jets, Jets ...  | 72 |
| Vergleich von Wirkungsquerschnitten   | 76 |
| <i>Proton-Proton- und Pion-Proton-Wechselwirkung</i>                                    | 76 |
| <i>Leptonen- und Hadronenerzeugung durch Elektron-Positron-<br/>        Vernichtung</i> | 80 |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| 4  | Atomphysik bei höchsten Energien  | 84  |
|  | Wie sich die Bilder gleichen! Die drei Ebenen der Spektroskopie   | 84  |
|  | Quantenzahlen zur Wiederholung  | 89  |
|  | <i>jj-Kopplung</i>  | 90  |
|  | <i>LS-Kopplung</i>  | 90  |
|  | Quarkatome und Hadronenspektren   | 92  |
|  | Positronium und Quarkonia   | 95  |
|  | <i>Das Positron-Elektron-Atom Positronium</i>   | 95  |
|  | <i>Quarkonia: Charmonium und Bottomonium</i>  | 97  |
| 5  | Quantenchromodynamik (QCD), die Theorie der Starken Wechselwirkung  | 100 |
|  | Rote, grüne und blaue Quarks  | 102 |
|  | Farbkleber  | 103 |
|  | Vakuum ist nicht Vakuum oder „laufende“ Kopplungskonstanten   | 105 |
|  | Asymptotische Freiheit und warum es keine freien Quarks gibt  | 108 |
| 6  | Die Extravaganzen der Schwachen Wechselwirkung  | 110 |
|  | Wie schwach ist die Schwache Wechselwirkung?  | 111 |
|  | Symmetrieverletzungen am laufenden Band   | 115 |
|  | <i>Die Natur unterscheidet zwischen rechts und links</i>  | 115 |
|  | <i>Das seltsamste Duo im Teilchenzoo: das neutrale K-Meson <math>K^0</math> und sein Antipartner <math>\bar{K}^0</math></i> | 119 |
|  | <i>Die Natur unterscheidet zwischen Materie und Antimaterie</i>   | 121 |
|  | <i><math>K^0 - \bar{K}^0</math>-Mischung - eine quantenmechanische Spielwiese</i>   | 123 |
|  | <i>Pinguine im Teilchenzoo</i>  | 126 |
|  | Was ist los mit den Neutrinos?  | 129 |
|  | <i>Haben Neutrinos eine Masse?</i>  | 130 |
|  | <i>Probleme mit den Sonnenneutrinos</i>   | 135 |
|  | <i>Neutrinooszillationen</i>  | 147 |
| <b>III Symmetrien in der Teilchenphysik und die „Weltformel“</b> |   | 154 |
| 1  | Eine Klassifikation   | 154 |
|  | Kontinuierliche (äußere) Raum-Zeit-Symmetrien   | 155 |
|  | Diskrete äußere Symmetrien  | 156 |
|  | <i>Raumspiegelung und Parität</i>   | 156 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Ladungskonjugation</i>   | 158 |
| <i>Zeitumkehr und CPT-Theorem</i>   | 158 |
| Kontinuierliche (innere) dynamische Symmetrien  | 159 |
| <i>Die Erhaltung der elektrischen Ladung</i>  | 160 |
| <i>Die Erhaltung der Baryonenzahl</i>   | 162 |
| <i>Die Erhaltung der Leptonenzahl</i>   | 163 |
| 2 Eichinvarianz und Elektromagnetisches Feld  | 164 |
| Worüber sich Naturwissenschaftler seit jeher den Kopf<br>zerbrochen haben   | 164 |
| Die Lorentzinvarianz der Maxwellschen Gleichungen   | 168 |
| <i>Die kovariante Form der Maxwellschen Gleichungen</i>   | 168 |
| Eichinvarianz der Klassischen Elektrodynamik  | 169 |
| <i>Globale und lokale Symmetrien</i>  | 169 |
| <i>Lokale Eichinvarianz</i>   | 170 |
| Warum das Photon keine Masse hat  | 175 |
| 3 Unter dem Geleit der Eichsymmetrie auf dem (steinigen)<br>Weg zur „großen Vereinigung“ aller fundamentalen<br>Naturkräfte | 179 |
| Gruppentheorie als Wegzehrung   | 179 |
| Verallgemeinerte Eichtransformationen   | 181 |
| <i>Aller Anfang ist schwer</i>  | 185 |
| Der große Durchbruch: Vereinigung der Elektromagnetischen<br>und der Schwachen Kraft  | 188 |
| <i>Der Higgs-Mechanismus</i>  | 188 |
| <i>Das Weinberg-Salam-Modell (WSM)</i>  | 190 |
| <i>Die experimentelle Überprüfung des Weinberg-<br/>        Salam-Modells</i>   | 193 |
| Eichtheorie der Farben und die Starke Kraft   | 196 |
| Die „große Vereinigung“   | 199 |
| <b>IV Teilchenphysik und Kosmologie</b>   | 205 |
| 1 Die Symbiose zweier Naturwissenschaften   | 205 |
| 2 Das Standard-Urknallmodell der Kosmologie   | 209 |
| Fakten und Annahmen   | 209 |
| <i>Unveränderlichkeit der physikalischen Gesetze</i>  | 209 |
| <i>Homogenität und Isotropie des Weltalls; das kosmologische<br/>            Prinzip</i>                                    | 209 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
|   | <i>Das Weltall expandiert</i>  | 211 |
|   | <i>Dynamik des expandierenden Universums</i>   | 215 |
| 3 | Entwicklungsgeschichte des frühen Universums   | 221 |
| 4 | Probleme mit dem Standardmodell  | 229 |
|   | Das Horizontproblem  | 230 |
|   | Das Flachheitsproblem  | 231 |
|   | Das inflationäre Universum   | 232 |
| 5 | Das Problem der dunklen Materie  | 237 |
| 6 | Urknall-Nukleosynthese und die Zahl der Generationen<br>der fundamentalen Teilchen (Leptonen und Quarks) | 239 |
|   | <b>Rück- und Ausblick</b>  | 247 |
|   | <b>Literaturverzeichnis</b>  | 254 |
|   | <b>Weiterführende Literatur</b>  | 260 |
|   | <b>Namen- und Sachwortverzeichnis</b>  | 270 |