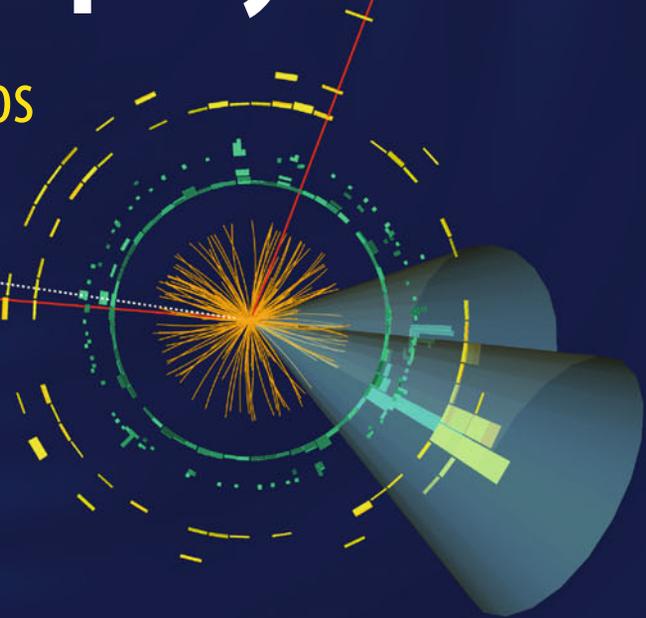


Philip Bechtle · Florian Bernlochner
Herbi Dreiner
Christoph Hanhart
Josef Jochum
Jörg Pretz · Kristin Riebe

Faszinierende Teilchenphysik

Von Quarks, Neutrinos
und Higgs
zu den Rätse
des Universums



SACHBUCH

 Springer

Faszinierende Teilchenphysik

Unseren Familien,
unseren Studierenden, der immer neuen Inspiration für unsere Neugier,
den engagierten Physiklehrerinnen und -lehrern, die ihre Schülerinnen
und Schüler für die Wunder der Natur begeistern

Philip Bechtle · Florian Bernlochner · Herbi Dreiner ·
Christoph Hanhart · Josef Jochum · Jörg Pretz ·
Kristin Riebe

Faszinierende Teilchenphysik

Von Quarks, Neutrinos und Higgs zu den
Rätseln des Universums

 Springer

Kontakt

faszinierendeteilchenphysik@listen.uni-bonn.de

ISBN 978-3-662-67903-6 ISBN 978-3-662-67904-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67904-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature, 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser und Caroline Strunz

Projektmanagement: Bianca Alton

Grafiken: Autoren

Satz: Autorensatz, auf der Grundlage der Vorlage von Glaeser/Polthier

Einbandabbildung:

Event Display (unten): CERN, ATLAS-Experiment; Sombropotential (oben): Kristin Riebe

Einbandgestaltung: deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

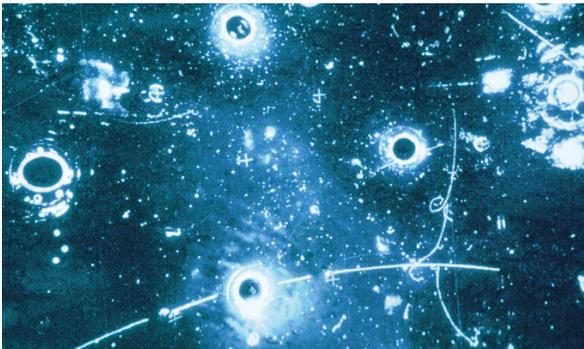
Woher kommen wir? Wie hat alles begonnen und wie hat es sich entwickelt? Wie entstand das Universum? Woraus besteht Materie? Fragen, die die Menschheit seit jeher bewegt haben und die wir dank unserer Forschung heute teilweise sogar beantworten können.

Menschen sind schon immer fasziniert von der Beobachtung der Gestirne und der Phänomene im Universum im Allgemeinen. Genauso faszinierend ist das „Unsichtbare“, sind die kleinsten Bausteine der Materie und ihr Zusammenwirken, denn erst durch die Untersuchung des Aufbaus der Materie gelangen wir auch zum Verständnis der astrophysikalischen Vorgänge: Astronomie, Astrophysik und Teilchenphysik sind eng miteinander verknüpft. Es sind die Modelle der Teilchenphysik gefragt, um die Eigenschaften der Materie am Anfang unseres Universums zu erklären.

Teilchenphysik befasst sich mit den fundamentalen Bausteinen der Materie und den grundlegenden Kräften, die zwischen ihnen wirken. Das Ziel ist Erkenntnisgewinn, insbesondere zur Beantwortung der eingangs erwähnten Fragen. Teilchenphysik ist Grundlagenforschung. Grundlagenforschung ist ein hohes kulturelles Gut, ein Wert an sich für unsere Gesellschaft: Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung sind fundamental für die Errungenschaften unserer Kultur, den technolo-



gischen Fortschritt und Wandel. Grundlagenforschung fördert das kritische Denken, erweitert den Horizont und fördert Kreativität und Innovationskraft. Die Basis jeder „Innovation“ bleibt die Erforschung der Grundlagen. Das Vertrackte an der Grundlagenforschung ist: Wirkliche Neuerungen, „disruptive Innovationen“, lassen sich nicht planen. Weil in dieser Forschung technologische Herausforderungen bestehen, die erst einmal gelöst werden müssen. Fast 50 Jahre hat es gedauert, um von der theoretischen Vorhersage des Brout-Englert-Higgs-Feldes bis zur experimentellen Verifikation, bis zur Entdeckung des Higgs-Bosons zu kommen. Aber warum konnten Brout, Englert und Higgs schon 1964 ihre Vorhersage erstellen? Offenbar beinhalten die Konzepte unserer Theorien ein tieferes Verständnis der Natur und nicht nur eine bloße Beschreibung der Phänomene.

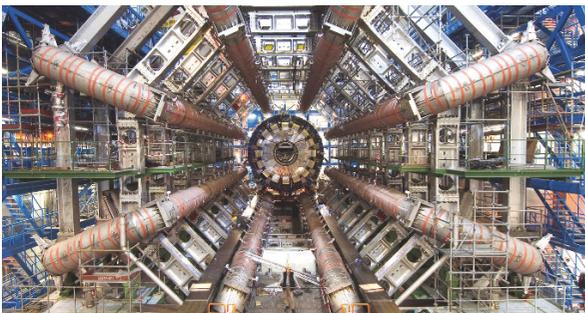


Die Entdeckung des Higgs-Bosons hat aber nicht nur die wissenschaftliche Welt bewegt, sie hat sehr viele Menschen fasziniert und tut dies heute, mehr als zehn Jahre danach, immer noch. Warum? Weil es hochinteressant ist, durch Forschung in Bereiche vorzudringen, die die Grundlage für unser Wissen und unser Dasein bilden. Hier berühren sich an vielen Stellen Wissen und Glauben, Wissenschaft und Philosophie. Das ist wirklich spannend. Vor ein paar Jahren wurden in

Großbritannien Studierende befragt, was sie zur Physik gebracht hat – und es waren genau diese großen, zum Teil esoterischen Fragen.

Grundlagenforschung bedeutet aber nicht „nur“ Wissensgewinn, sondern bewirkt auch sehr viel Technologieentwicklung. Dies ist der Grundsatz des „*virtuous circle*“, vom positiven, sich selbst verstärkenden Kreislauf: Grundlagenforschung – Innovationstreiber – angewandte Forschung – Innovationstreiber – weiterführende Grundlagenforschung. Dieser Kreislauf ist unerlässlich, um etwa in der Medizin, der Informationstechnologie oder der nachhaltigen Energieversorgung zu neuen Ansätzen und Lösungen zu gelangen. Dieser Kreislauf braucht aber Zeit, manchmal sehr viel Zeit.

Zurück zum Higgs-Boson: Auch nachdem die technologischen Herausforderungen bewältigt waren, brauchte es noch einige Jahre für Datennahme und Analyse, bis sich ein Signal, das die Existenz des Higgs-Bosons beweist, langsam aus den vielen Daten der LHC-Experimente herauschälte. Als die Analyse der Messungen die Nachweisschwelle überschritten hatte, war klar, dass wir tatsächlich verkünden konnten, dass wir dem letzten Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik auf die Spur gekommen waren. Dieser Erfolg wäre nicht möglich gewesen ohne die jahrelange Zusammenarbeit der vielen Beteiligten aus den Bereichen Technik, Ingenieurwissenschaften und Physik, aus aller Welt, aus verschiedenen Kulturen und vielen weiteren



unterschiedlichen Disziplinen. Internationale Zusammenarbeit ist ein wichtiger Schlüssel zum Fortschritt (nicht nur) in der Wissenschaft.

Aber war es das jetzt? Kann die Teilchenphysik damit als abgeschlossen gelten? Nein. Man kann Theorien immer nur in einem bestimmten Rahmen verifizieren. Ob das Standardmodell auch bei sehr viel höheren Energien, als wir sie überschauen können, gültig ist, wird sich erst in der Zukunft erweisen. Denn wie schon Alexander von Humboldt wusste: „Jedes Naturgesetz, das sich dem Beobachter offenbart, lässt auf ein höheres, noch unerkanntes schließen.“ Oder in anderen Worten: Mit jedem Erkenntnisgewinn eröffnen sich für uns neue Rätsel. Und genau das fasziniert mich persönlich so an der Forschung, insbesondere an der Teilchenphysik. Ja, wir haben das Standardmodell experimentell bestätigt. Ein Riesenerfolg. Es bleiben aber viele Fragen offen, die es nicht beantworten kann. Es beschreibt unter anderem nicht mal 5 % der Materie des Universums. Es wird höchste Zeit, dass wir die restlichen 95 % endlich verstehen lernen, dass wir tiefer in die Erforschung des Unsichtbaren vorstoßen. Die Suche nach Antworten auf fundamentale Fragen zu unserem Universum, seinen Ursprung und seine Entwicklung, bringt Forschungszweige und Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zusammen.

Bevor man solche große Fragen angehen kann, muss man natürlich die Grundlagen der Physik beherrschen. Hier schlägt das Buch die Brücke von den Grundlagen bis hin zu den vielen noch offenen Fragen. Auch wer nicht viel mathematischen Hintergrund hat, sich aber eingehender mit der Thematik auseinandersetzen möchte, ist hier richtig. Es lohnt sich, sich mit Teilchenphysik zu beschäftigen, es lohnt sich, in diesem Buch zu stöbern.

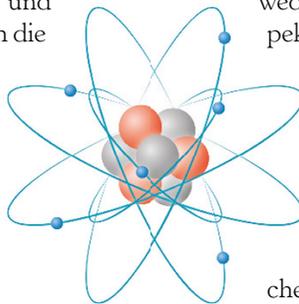
Teilchenphysik ist faszinierend.

Prof. Dr. Rolf-Dieter Heuer,
CERN Director General 2009–2015

Über dieses Buch

Das Buch, das Sie hier in Händen halten, stellt die vielen verschiedenen Aspekte der Kern- und Teilchenphysik auf rund 150 Doppelseiten vor. Hierbei haben wir uns nicht nur auf die Präsentation der Ergebnisse beschränkt, sondern zeigen auch die Methoden, Möglichkeiten und Grenzen der modernen Forschung. Wir befinden uns in einer vielfältigen und teils hoch spezialisierten Forschungslandschaft. Daher haben sich notwendigerweise Teilgebiete der Physik herausgebildet, die sich den verschiedenen Aufgaben widmen. Viele experimentelle Untersuchungen brauchen Teilchenbeschleuniger, also Anlagen, die Teilchen auf hohe Energie beschleunigen. Diese werden von Forschenden der Beschleunigerphysik in Zusammenarbeit mit Ingenieurinnen und Ingenieuren entwickelt und betrieben. Ein Beschleuniger selbst liefert aber noch keine für die Teilchenphysik verwertbaren Daten – dazu sind dedizierte Messinstrumente nötig, die in der Experimentalphysik erforscht, aufgebaut und betrieben werden. Schließlich widmet sich die theoretische Physik der Entwicklung mathematischer Strukturen, mit denen wir die Natur beschreiben und erklären. Sie versucht so einerseits, die in verschiedenen Messungen gewonnenen Daten mathematisch zu erfassen und andererseits, Vorhersagen abzuleiten.

Um diese Vielschichtigkeit abzubilden, besteht das Autorenteam aus Forschenden der Physik mit sehr unterschiedlichen wissenschaftlichen Hintergründen: Philip Bechtle und Florian Bernlochner arbeiten als Experimentalphysiker in der Hochenergiephysik. Jörg Pretz hat seinen Fokus auf niedrige Energien gelegt und beschäftigt sich auch mit Fragen der Beschleunigerphysik. Der Forschungsschwerpunkt von Josef Jochum ist die experimentelle Astroteilchenphysik mit einem Hauptaugenmerk auf Neutrinos. Herbi Dreiner und Christoph Hanhart sind theoreti-



sche Physiker, wobei ersterer seinen Schwerpunkt auf die Hochenergiephysik und die Physik jenseits des Standardmodells legt und letzterer auf die Physik innerhalb des Standardmodells bei kleinen und mittleren Energien mit Fokus auf die starke Wechselwirkung. Kristin Riebe ist Astrophysikerin und widmet sich der Vermittlung von Wissen in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit sowie der Gestaltung von Webseiten, Grafiken, Visualisierungen – und manchmal auch Büchern.

Wir haben uns in diesem Buch bewusst dagegen entschieden, uns am historischen Ablauf der Entwicklungen zu orientieren. Stattdessen präsentieren wir vor allem den heutigen Erkenntnisstand. Das Buch ist modular aufgebaut: In einem Artikel auf je einer Doppelseite wird das in Titel und Untertitel genannte Thema möglichst umfassend diskutiert, ergänzt durch Querverweise auf andere Doppelseiten, die entweder Grundlagen legen oder bestimmte Aspekte vertiefen. Das heißt auch, dass einzelne Artikel für sich allein gelesen werden können, und dass dasselbe Thema aus unterschiedlichen Blickwinkeln und mit unterschiedlichen Vertiefungsgraden im Buch mehrmals vorkommen kann.

Wir hoffen, dass Sie dies als bereichernd wahrnehmen. Unser Ziel ist es, auf diese Weise Einblicke in unser extrem spannendes Forschungsgebiet zu vermitteln. Dabei war uns sehr daran gelegen, die Sachverhalte zwar korrekt darzustellen, dabei jedoch den eigentlich notwendigen mathematischen Apparat weitgehend außen vor zu lassen. Ob uns dieser Spagat gelungen ist, können nur Sie selbst beurteilen – über ein entsprechendes Feedback und konstruktive Kritik würden wir uns sehr freuen.¹

¹ faszinierendeteilchenphysik@listen.uni-bonn.de

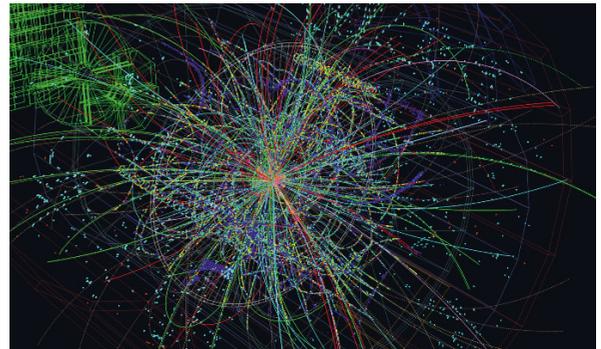
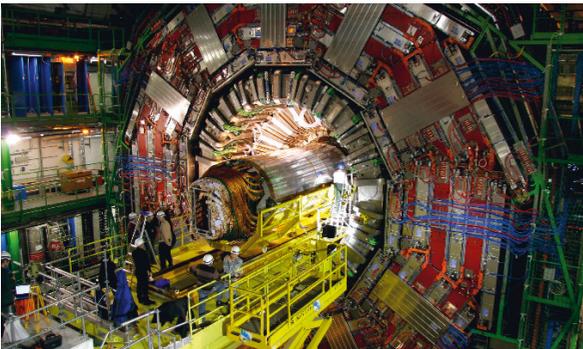
Das Buch ist in folgende Themenbereiche aufgeteilt: Kapitel 1 bietet eine allgemeine Übersicht und beschreibt, wovon dieses Buch handelt. Darauf aufbauend legt Kapitel 2 allgemeine konzeptionelle Grundlagen, die in den Kapiteln 3 und 4 in experimentelle und theoretische Richtung vertieft werden. In den Kapiteln 5 und 6 beschreiben wir, mit welchen konkreten Apparaturen und Methoden das Unsichtbare in der subatomaren Welt sichtbar gemacht werden kann. In Kapitel 7 und 8 stellen wir die Elemente des „Standardmodells“ vor, der besten bekannten Theorie der fundamentalen Bausteine und Wechselwirkungen, um dann in Kapitel 9 zu zeigen, wie gut diese Theorie bereits experimentell bestätigt ist. Allerdings gibt es immer noch offene Fragen. Diesen haben wir Kapitel 10 gewidmet. Die daraus abgeleiteten Suchen nach möglicher Physik jenseits des Standardmodells stellen wir in Kapitel 11 vor. Auch aus Astronomie und Kosmologie lernen wir einiges über die Teilchenphysik. Mit dieser spannenden Forschung und einer Beschreibung der Verbindung des Größten mit dem Kleinsten schließen wir das Buch in Kapitel 12.

Es ist nicht notwendig, dem Aufbau des Buches zu folgen, sondern Sie können sich natürlich auch gemäß Ihren Interessen entlang unterschiedlicher Linien durch das Buch bewegen. Hierbei kann Ihnen das ausführliche Glossar am Ende des Buches Hilfestellung leisten, in dem wiederholt auftauchende Begriffe und Konzepte knapp beschrieben werden. Albert Einstein

wird der Satz zugeschrieben „Man sollte die Dinge so einfach wie möglich erklären – aber nicht einfacher.“ Weil wir einen recht umfassenden Überblick über die Kern- und Teilchenphysik bieten wollen, konnten wir die komplexeren Themen nicht einfach weglassen. Daher sind notwendigerweise einige Artikel keine leichte Kost, worauf wir manchmal auch explizit hinweisen. Wir möchten Sie ermutigen, trotzdem weiterzulesen. Auch ohne jeden Artikel im Detail verstanden zu haben, sollten sich die späteren Inhalte, aufgrund der modularen Struktur des Buches, größtenteils unabhängig von anderen erschließen.

Nun bleibt uns also nur noch Ihnen bei der Lektüre dieses Buches viel Spaß zu wünschen. Hoffentlich gelingt es uns, Ihre Neugierde in vielen Aspekten zu befriedigen und Ihr Interesse für das zu wecken, was es noch zu entdecken gibt.

Philip Bechtle,
Florian Bernlochner,
Herbi Dreiner,
Christoph Hanhart,
Josef Jochum,
Jörg Pretz
und
Kristin Riebe



Inhalt

Vorwort VII
 Über dieses Buch IX
 Inhalt XI



1 Die Welt der Teilchen I
 Eine weltweite Reise in die Teilchenphysik – Bildhafte Eindrücke von Teilchendetektoren 2
 Was ist Teilchenphysik – Eine fundamentale Wissenschaft im Wechselspiel mit anderen 4
 Ursprünge der Teilchenphysik – Wie und wer? 6
 Längenskalen und Einheiten – Von riesig groß bis zu winzig klein – alles Physik 8
 Die Elementarteilchen – Die Bausteine der Welt 10
 Die vier Grundkräfte der Natur – Vier sehr ungleiche Partner 12
 Das Quarkmodell – Wie Quarks das Teilchenchaos zähmten 14
 Was ist eigentlich ein Elementarteilchen? – Gibt es immer kleinere Bausteine? 16
 Was ist Antimaterie? – Science Fiction oder Realität? 18
 Detektoren im Alltag – Einen Teilchendetektor tragen wir im Kopf 20
 Wie macht die Physik Fortschritte? – Eine komplizierte Suche nach einfachen Antworten 22
 Experimentelle Forschung in der Teilchenphysik – Verschiedene Experimente für verschiedene Fragestellungen 24
 Hintergründe zur wissenschaftlichen Methode – Der Unterschied zwischen „Wahrheit“ und „Wissen“ 26
 Vorstellung und Realität – Verschiedene Beschreibungen funktionieren 28

2 Allgemeine Grundlagen 31
 Energie und Leistung – Kilowattstunden, Elektronenvolt, ... wie hängt das alles zusammen? 32
 Spezielle Relativitätstheorie – Wie schnell ist schnell? 34
 Kinematik – Impuls und Drehimpuls 36
 Beschleunigung und Strahlung – Wer beschleunigt, der strahlt 38
 Grundkonzepte der Quantenmechanik – Von Pfeilen und Elektronen 40
 Zufall und Vorhersage – Quantenmechanik *at work* 42

Spin – Eine eigentümliche Größe der Quantenmechanik.....	44
Das Prinzip von Streuexperimenten – Atomares Billard.....	46
Feynman-Diagramme – Grafische Darstellungen von Wechselwirkungen.....	48
Produktion, Zerstörung und Zerfall von Teilchen – Wie Teilchen aus Teilchen entstehen können.....	50
Resonanzen – Wenn alles zusammenpasst.....	52
Über die Reichweite von Wechselwirkungen – Von intergalaktischen Abständen zur Größe von Atomkernen	54
Symmetrien – Schön und praktisch.....	56
Spontane Symmetriebrechung – Die versteckte Symmetrie	58
3 Experimentelle Grundlagen.....	61
Wie funktioniert ein Beschleuniger? – Mit elektrischen Feldern zu hohen Energien.....	62
Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie – Warum wir überhaupt Teilchen in Messgeräten nachweisen können	64
Halbleiterdetektoren – Die Multitalente: von der Handykamera bis zum LHC.....	66
Gasbasierte Detektoren – Messen, wo gar kein Detektor zu sein scheint	68
Szintillatoren und Photomultiplier – Die großen Augen der Teilchenphysik.....	70
Orts- und Impulsmessung – Woher kommen wir, wohin gehen wir: fundamentale Fragen auch für Teilchen	72
Energiemessung von Teilchen – Wie viele Kalorien isst der Detektor?	74
Signaturen von Teilchen – Fußabdrücke von Teilchen in den Detektoren.....	76
Čerenkov-Strahlung und Teilchenidentifikation – Schneller als Licht	78
Statistik – Die mathematische Beschreibung von Zufall	80
Messunsicherheiten – Jeder macht Fehler.....	82
Simulationen in der Experimentalphysik – Welche Beobachtung wird wirklich vorhergesagt?	84
4 Theoretische Grundlagen.....	87
Anwendungen der speziellen Relativitätstheorie – Relativität im Teilchenphysikalltag.....	88
Fermionen und Bosonen – Die Basis nicht nur der Chemie	90
Äußere und innere Symmetrien – Zur Schau gestellt oder versteckt?	92

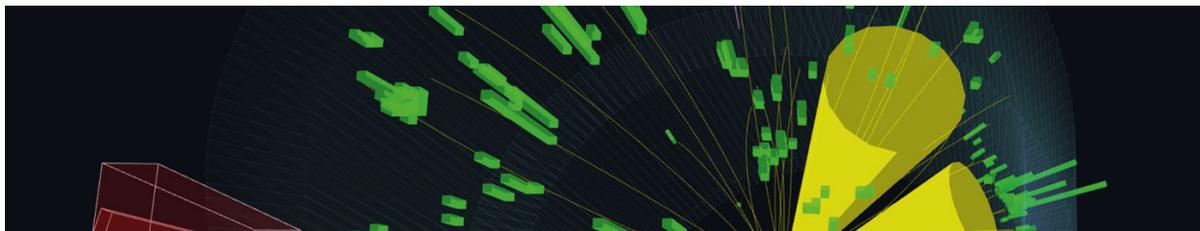


Eichsymmetrien – Versteckte Symmetrien als Ursprung der Kräfte.....	94
Das Noether-Theorem – Symmetrien bedingen Erhaltungsgrößen	96
Feynman-Diagramme II – Eine Bastelanleitung.....	98
Quantenfeldtheorie – Erzeugung und Vernichtung von Teilchen.....	100
Schleifen – Quantenmechanische Spezialeffekte	102
Renormierung – Die Zähmung der Unendlichkeit.....	104
Präzise Berechnung des nicht vollständig Lösbaren – Wie man trickreich der Natur ihre Geheimnisse entlockt	106
Simulationen in der theoretischen Physik – Wie Computer das Unerreichbare erreichen	108



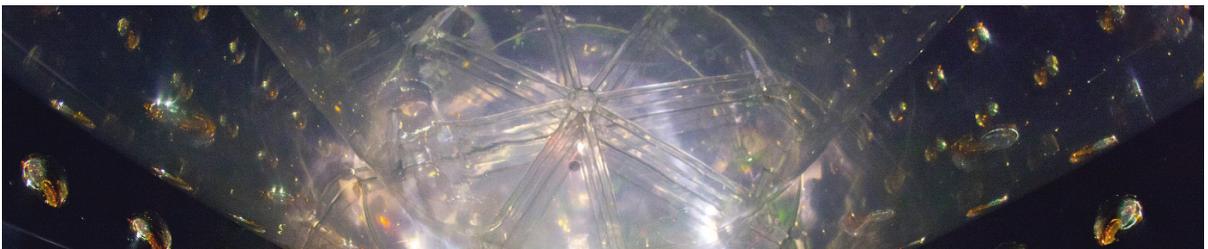
5 Detektoren und Beschleuniger.....	111
Der LHC-Beschleunigerkomplex am CERN – Von der Wasserstoffflasche bis zur Kollision.....	112
Strahlführung – Nur nicht auf die schiefe Bahn geraten.....	114
Plasmabeschleunigung – Ein Beschleuniger, der auf einen Küchentisch passt.....	116
Beschleuniger in der Medizin – Diagnose und Therapie	118
Röntgenstrahlung – Das geht unter die Haut	120
Synchrotronstrahlung – Quellen besonderen Lichts.....	122
Typische Detektoren an Beschleunigern – Groß und Klein unter den Detektoren	124
Große Detektoren tief im Berg – Die schwierige Jagd nach Neutrinos	126
Tiefemperaturdetektoren – Höchste Ansprüche bei tiefsten Temperaturen	128
Flüssige Edelgase als Detektoren – Seltene Flüssigkeiten zur Suche nach seltenen Teilchen.....	130
Teilchenfallen – Eingesperrte Teilchen	132
Positronen-Emissions-Tomographie – Nützliche Antimaterie-Vernichtung im Körperinneren	134
Magnetresonanztomographie – Mit dem Spin ins Innere des Körpers blicken.....	136
6 Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikmessungen	139
Trigger und Datenverarbeitung – Der Weg der Nadel im Heuhaufen vom Detektor auf die Festplatte.....	140
Datenauswertung – Aus sehr vielen Informationen das Spannende herausfinden.....	142
Identifikation der Teilchensorte über die Masse – Teilchen spielen „Wer bin ich?“	144

Die Bestimmung von Messunsicherheiten – Lieber besser messen als länger messen.....	146
Schlüsse ziehen aus Statistik – Wann ist etwas zu unwahrscheinlich, um wahr zu sein?.....	148
Veröffentlichen, was es nicht gibt – Nichts zu finden ist ein wichtiges Ergebnis.....	150
Ein Beispiel für die Entdeckung eines Teilchens – ... anhand des Higgs-Bosons.....	152
Was sind „Blinde Analysen“? – Der Placebo-Effekt bei Forschenden	154
Wie korrigiert man falsche Entdeckungen? – Korrekturverfahren in der Teilchenphysik	156
Neuronale Netzwerke und maschinelles Lernen – Mit Köpfchen zu neuen Erkenntnissen.....	158
Die Erfindung des World Wide Web – Offene weltumspannende Wissenschaft für eine offene Gesellschaft	160

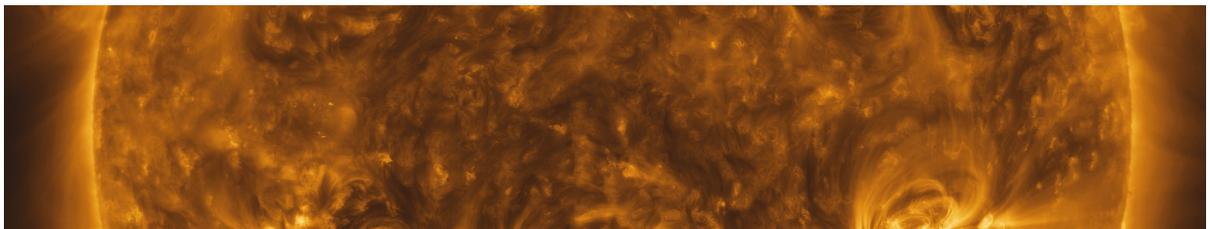


7 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	163
Elektromagnetismus – Die alltägliche Kraft.....	164
Die schwache Wechselwirkung – Verwandlung ist möglich	166
Up, Down, Rechts und Links – Wer ist mit wem verwandt?.....	168
Die unsichtbare Breite des Z-Bosons – Es gibt nur drei Neutrinos!	170
Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell – Das Higgs-Boson als Spielverderber.....	172
Spontane Symmetriebrechung II – Woher kommt das Photon?	174
Spontane Symmetriebrechung III – Was hat die bottom-Quark-Masse mit dem Higgs-Zerfall zu tun?	176
Diskrete Symmetrien: <i>P</i> - und <i>CP</i> -Verletzung – Gespiegelt ist ganz was anderes.....	178
Der Pion-Zerfall – Links, rechts, schneller, langsamer: Das macht einen Unterschied	180
Der Weg zu sechs Quarks in drei Familien – Wer wechselwirkt mit wem?	182
Neutrinos – Die außergewöhnlichen Leichtgewichte unter den Elementarteilchen	184
Neutrinooszillationen – Wankelmütige Neutrinos	186
8 Die Besonderheiten der starken Wechselwirkung	189
Quantenchromodynamik – Von 1 nach 3: kleiner Unterschied mit großer Wirkung.....	190
Confinement – Warum es keine freien Quarks gibt.....	192
Die Suche nach freien Quarks – Oder wie man sich von der Statistik täuschen lassen kann.....	194
Die laufende Kopplung – Ein Scheinriese?.....	196

Die Struktur des Protons – Ein reichhaltiges Innenleben	198
Quarkverteilungen im Proton – Mehr als nur drei Quarks	200
Kann man Quarks und Gluonen sehen? – Das Unerreichbare wird sichtbar	202
Woher kommt unsere Masse? – Verkehrte Welt?	204
Gitter-QCD – Der Supercomputer macht's möglich	206
Der Quarkmasseneffekt – Warum wir den Massenunterschieden der Quarks unsere Existenz verdanken ...	208
Von Nukleonen zu Kernen – Welch Vielfalt aus zwei Bausteinen	210
Die Karlsruher Nuklidkarte – Vom Tal der Stabilität	212
Exotische Zustände – Ein neuer Teilchenzoo?	214
Die ^{14}C -Altersbestimmung – Archäologie mithilfe von Kernphysik	216
9 Der Triumph des Standardmodells und darüber hinaus	219
Die Entdeckung der neutralen Ströme – Der erste Durchbruch des Standardmodells	220
Die zufällige Entdeckung des J/ψ – Der zweite Durchbruch des Standardmodells.....	222
Die Entdeckung von W - und Z -Boson – Von der Beobachtung eines Stroms zur Entdeckung eines Teilchens	224
Entdeckung und Besonderheit des top-Quarks – Das schwerste bekannte Elementarteilchen	226
Warum ausgerechnet das Standardmodell? – Präzisionsphysik am LEP und Vorhersage des Higgs-Bosons	228
Die Entdeckung des Higgs-Bosons – Ultimativer Triumph des Standardmodells	230
Ist es wirklich das Higgs-Boson? – Experimentelles Portrait eines Teilchens.....	232
Präzisionsexperimente – 0,001 159 652	234
Das Myon – Schweres Schwesterteilchen des Elektrons	236
Überprüfung von Neutrinooszillationen – Eindrucksvolle Bestätigung einer Abweichung.....	238
Messung der Neutrinomasse – Kleinste Masse – größte Waage	240
Die Verletzung der CP -Symmetrie in B -Mesonen – Leben wir im Spiegel oder davor?	242
Seltene Zerfälle von B -Mesonen – Winzige Hinweise auf große Neuigkeiten?	244
Gestaltwandler unter sich – Von Charme, Schönheit und seltsamen Teilchen	246
Die Vermessung des CKM-Dreiecks – Das große Treffen	248
Die Hürden des Erfolgs – Worüber neue Theorien springen müssen.....	250



10 Die Grenzen des Standardmodells.....	253
Warum wir weitersuchen – Ungelöste Probleme im Standardmodell	254
Neutrinomassen – Warum so klein?	256
GUT – Die große Vereinheitlichung.....	258
Supersymmetrie – Wie viel Symmetrie ist möglich?.....	260
Extra-Dimensionen – Vielleicht ist die Gravitation ja gar nicht so schwach	262
Stringtheorie – Eine vibrierende Schnur als Vereinheitlichung	264
Urknall – Das erste Teilchenlabor.....	266
Dunkle Materie – Eine Herausforderung für die Elementarteilchenphysik	268
Dark Sector: Dunkle Energie – Eine Herausforderung für die Kosmologie und Elementarteilchenphysik....	270
Das starke CP-Problem – Wie Theoretiker Probleme wegwaschen.....	272
Ist das Leben auf der Erde ein Zufall? – Verstehen wir, warum Leben entstehen konnte?	274
11 Die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells	277
Ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen? – Die Suche nach dem neutrinolosen doppelten β -Zerfall	278
Neue Teilchen am LHC – Suchen mit einer konkreten Idee.....	280
Das unspezifische Unbekannte am LHC – Suchen ohne konkrete Idee.....	282
Zusätzliche Raumdimensionen am LHC – Wohin verschwindet die Gravitation?	284
Das Rätsel der Dunklen Materie – Woher wissen wir, wonach wir suchen müssen?.....	286
Direkte Suche nach der Dunklen Materie – Auf der Jagd nach unsichtbaren Teilchen.....	288
Materie und Antimaterie – Warum gibt es uns überhaupt?	290
Teilchenphysik im Weltall – Hoch hinaus	292
Die Suche nach elektrischen Dipolmomenten – Wo ist die Antimaterie geblieben?	294
Die Suche nach Axionen – Zwei Fliegen mit einer Klappe.....	296
Protonenzerfall – Lang lebe das Proton!.....	298
Supernovae als Teilchenphysiklabore – Dramatische Ereignisse mit ungeahnten Fähigkeiten	300
12 Die Verbindung des Größten mit dem Kleinsten	303
Baryogenese – Wieso gibt es (fast) keine Antimaterie im Universum?.....	304
Nukleosynthese im Urknall – Helium, Neutrinos und die Materie-Antimaterie-Asymmetrie	306



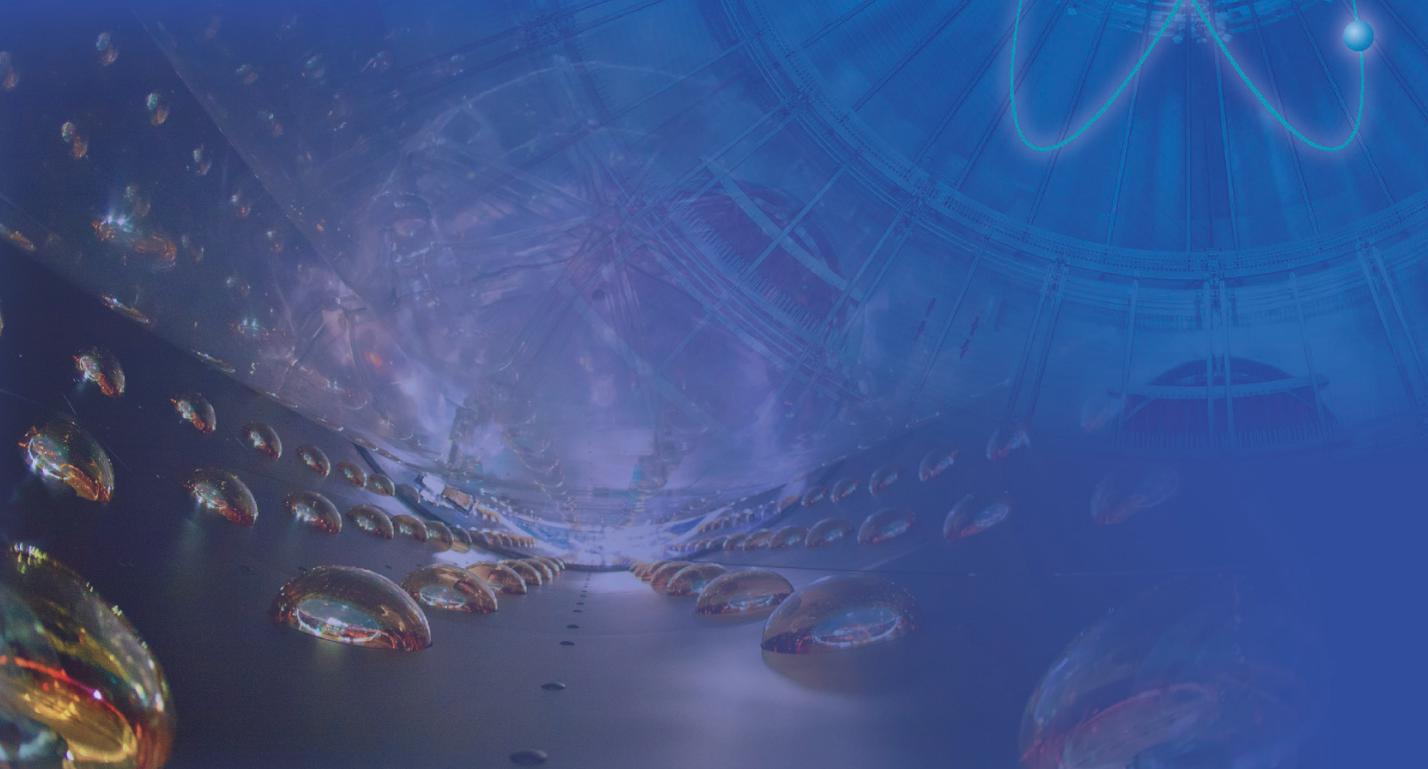
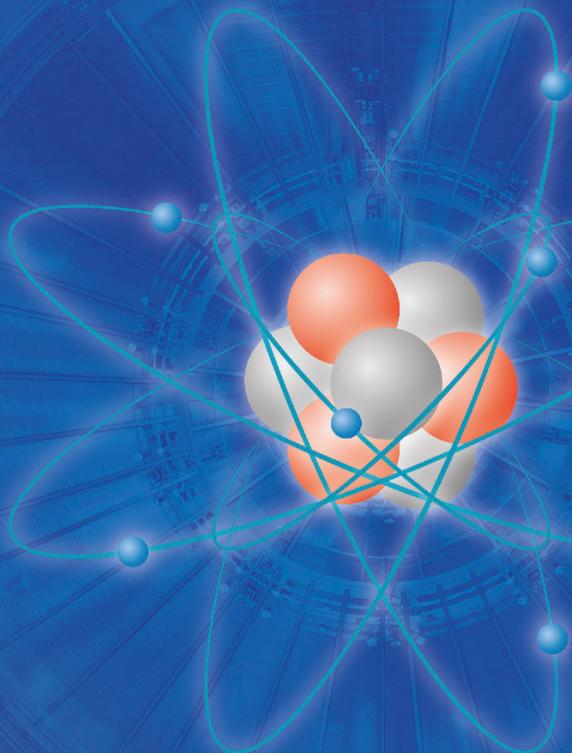
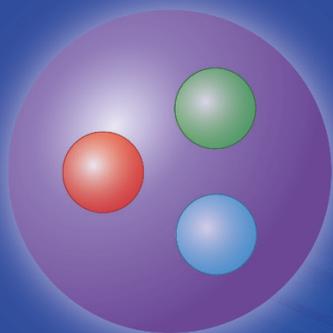
Elemententstehung in Sternen – Wie war das mit dem Sternenstaub?	308
Kosmischer Mikrowellenhintergrund – Ein Blick ins frühe Universum und seine Zusammensetzung	310
Das Größte und das Kleinste – Einfluss der Neutrinomasse auf die großräumige Struktur im Universum...	312
Kosmische Strahlung – Teilchen aus dem All	314
Ultrahochenergetische kosmische Strahlung – Die Suche nach den kosmischen Hochleistungsbeschleunigern	316
Multimessenger-Astronomie – Neue Blicke ins Teilchen-Universum	318
Neutrinos von der Sonne – Ein Blick ins Innere der Sonne.....	320
Die Entwicklung des Universums – Blick in die sehr ferne Zukunft	322



Lohnt sich das alles?	325
Danksagung.....	327
Die Eigenschaften der Elementarteilchen – Übersicht und Tabellen.....	328
Glossar.....	329
Bildnachweis.....	345
Index	352
Das Autorenteam.....	360

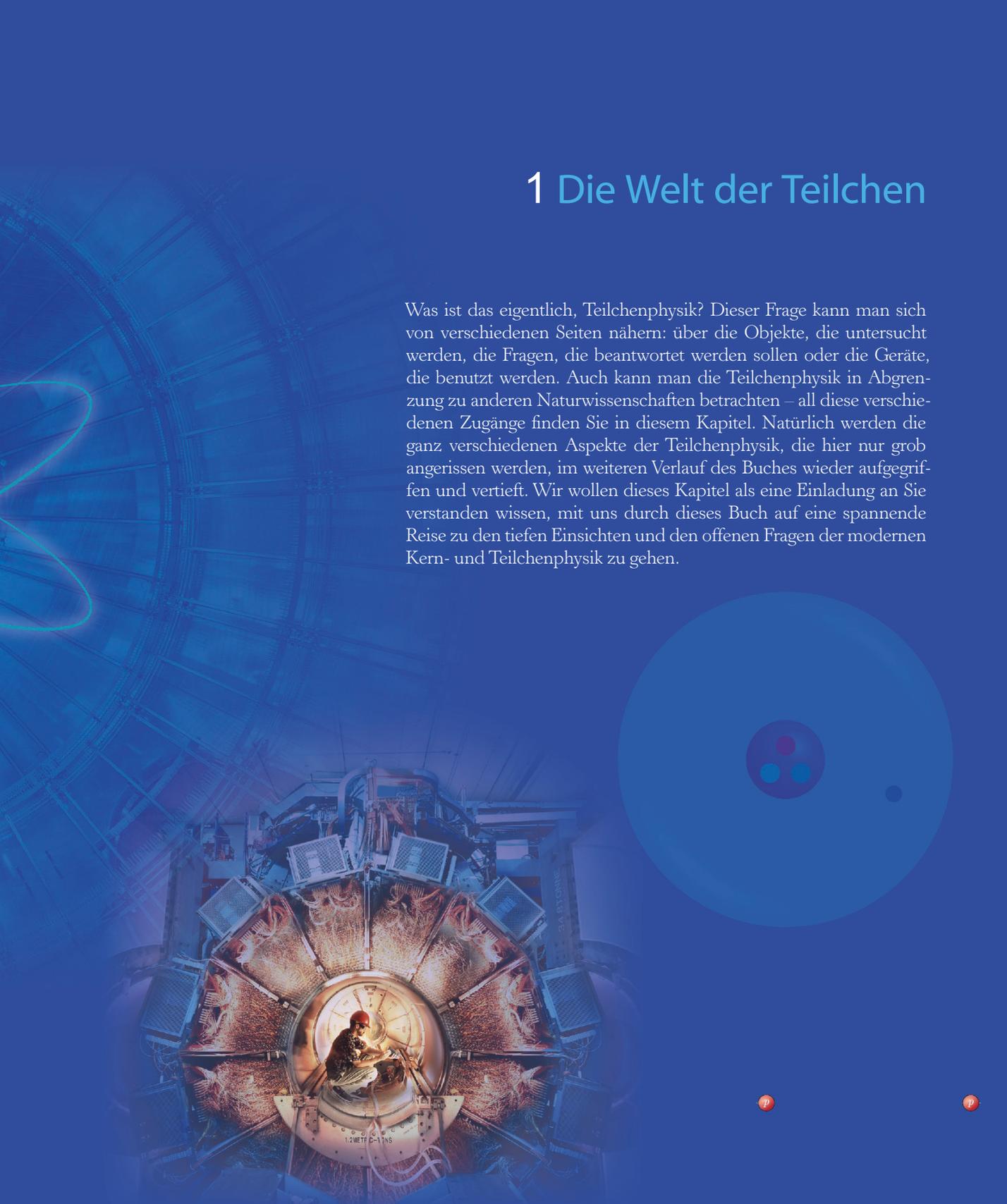
Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.





1 Die Welt der Teilchen

Was ist das eigentlich, Teilchenphysik? Dieser Frage kann man sich von verschiedenen Seiten nähern: über die Objekte, die untersucht werden, die Fragen, die beantwortet werden sollen oder die Geräte, die benutzt werden. Auch kann man die Teilchenphysik in Abgrenzung zu anderen Naturwissenschaften betrachten – all diese verschiedenen Zugänge finden Sie in diesem Kapitel. Natürlich werden die ganz verschiedenen Aspekte der Teilchenphysik, die hier nur grob angerissen werden, im weiteren Verlauf des Buches wieder aufgegriffen und vertieft. Wir wollen dieses Kapitel als eine Einladung an Sie verstanden wissen, mit uns durch dieses Buch auf eine spannende Reise zu den tiefen Einsichten und den offenen Fragen der modernen Kern- und Teilchenphysik zu gehen.



Eine weltweite Reise in die Teilchenphysik

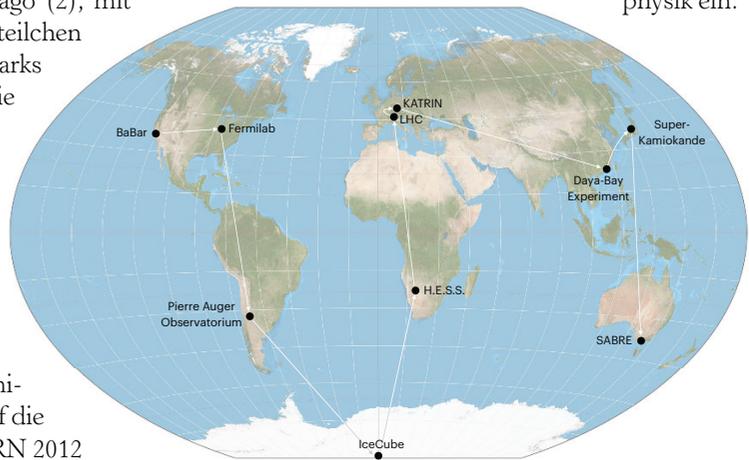
Bildhafte Eindrücke von Teilchendetektoren

Teilchenphysik ist ein weltumspannendes Forschungsfeld: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus sehr vielen Nationen arbeiten vereint, um unser Universum und dessen Bausteine besser zu verstehen. Wie diese Forschung funktioniert, ist der Inhalt dieses Buches. Bevor wir uns dem Inhalt zuwenden, sollen die Bilder auf dieser Seite einen Eindruck von der Vielfalt der Forschung in der Teilchenphysik vermitteln.

Die abgebildeten Experimente laden uns von West nach Ost auf eine Weltreise ein: angefangen beim BaBar Experiment am Stanford Linear Accelerator Center in der Nähe von San Francisco (1), welches die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie (CP -Verletzung \downarrow) erforscht hat, zu einer Beschleunigerkavität am Fermilab in der Nähe von Chicago (2), mit welcher das bisher schwerste Elementarteilchen entdeckt wurde (Entdeckung des top-Quarks \downarrow). Weiter geht es nach Argentinien in die sprichwörtliche Pampa, wo das Pierre Auger-Observatorium (3) inmitten von Weidetieren hochenergetische Teilchen (\downarrow) aus dem Weltall erforscht. Von dort reisen wir zum Südpol, wo das IceCube-Experiment (4) (Detektoren tief im Berg \downarrow) kosmische Neutrinos untersucht. Über das H.E.S.S.-Experiment (Multimessenger-Astronomie \downarrow) in Namibia im Süden Afrikas (5) geht es zurück auf die Nordhalbkugel nach Genf (6), wo am CERN 2012 das Higgs-Boson (\downarrow) entdeckt wurde. Anschließend reisen wir nach Deutschland, genauer nach Karlsruhe-

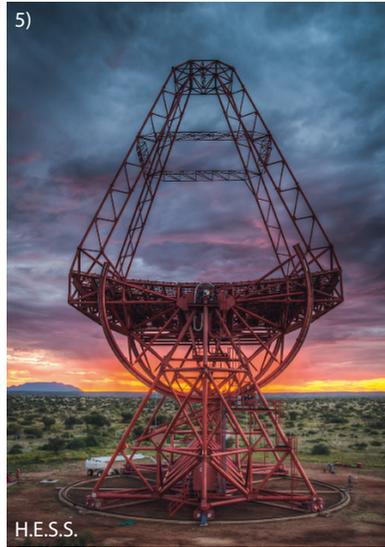
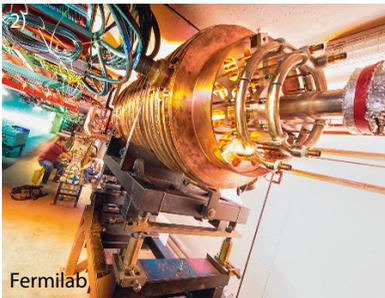
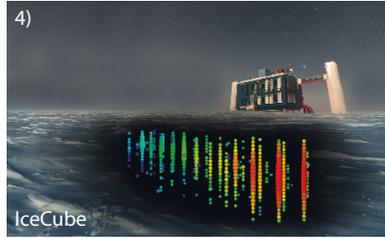
he (7), wo mit dem KATRIN-Experiment Neutrinos (\downarrow) untersucht werden. Von Europa aus bringt uns das Daya-Bay-Experiment (Neutrinooszillationen \downarrow) nach China (8) und in die geheimnisvolle Welt der nur schwach wechselwirkenden Neutrinos. Diese und vieles andere, wie zum Beispiel der mögliche Zerfall von Wasserstoffkernen (GUT \downarrow), werden auch in Japan am Super-Kamiokande-Experiment (9) erforscht. Das letzte Bild zeigt den Bau der Experimentierhalle des SABRE-Detektors, der in einer Goldmine in Australien (10) nach Dunkler Materie (\downarrow) suchen wird.

So wie die gezeigten Experimente die Welt umrunden, laden die folgenden Kapitel zu einer Reise durch die Welt der Teilchenphysik ein.



Teilchenphysik ist ein weltumspannendes Forschungsfeld: Lage der abgebildeten Experimente.

Die Verletzung der CP -Symmetrie in B -Mesonen \rightarrow S. 242
 Entdeckung und Besonderheit des top-Quarks \rightarrow S. 226
 Ultrahochenergetische kosmische Strahlung \rightarrow S. 316
 Große Detektoren tief im Berg \rightarrow S. 126
 Multimessenger-Astronomie \rightarrow S. 318



Mit 10 Teilchenphysikexperimenten um die Welt: von Kalifornien (oben links) nach Genf in die Schweiz (unten Mitte) über Deutschland (oben rechts) nach Australien (unten rechts)

- Die Entdeckung des Higgs-Bosons → S. 230
- Messung der Neutrinomasse → S. 240
- Neutrinooszillationen → S. 186
- GUT → S. 258
- Dunkle Materie → S. 268



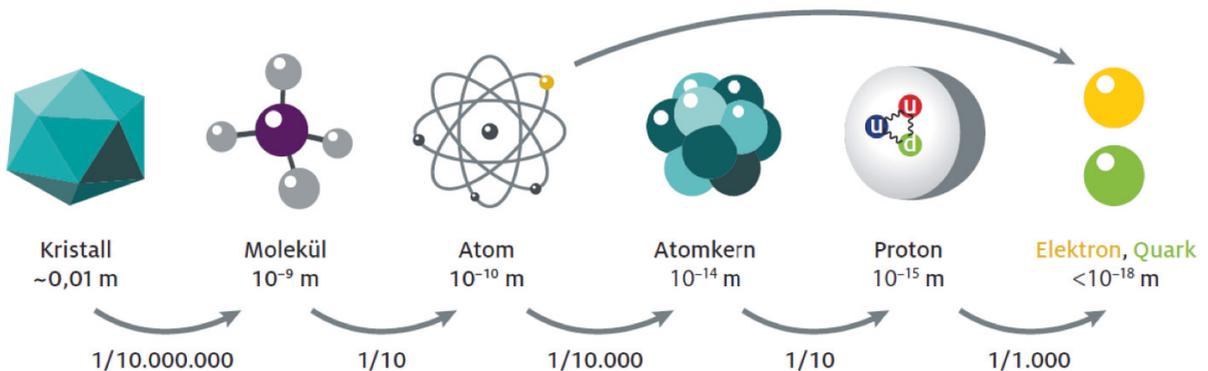
Was ist Teilchenphysik

Eine fundamentale Wissenschaft im Wechselspiel mit anderen

Auf einen Satz gebracht ist es das Ziel der Teilchenphysik, die fundamentalen Bausteine (\downarrow) der Natur und die Gesetze, nach denen sie miteinander wechselwirken (\uparrow), zu finden. Die Suche ist nicht neu; das Wissen, das wir heute haben, dagegen schon: Mit zunehmend verfeinerten experimentellen und theoretischen Methoden sind viele Generationen von Forschenden immer tiefer in die Materie eingedrungen und haben der Natur immer fundamentalere Geheimnisse entlockt. Den gegenwärtigen Stand dieser spannenden Suche stellen wir in diesem Buch vor.

Machen das nicht alle Naturwissenschaften? Ja, aber dennoch ist es möglich, die verschiedenen Bereiche voneinander abzugrenzen. Sehen wir uns dazu das Bild unten an. Hier werden Objekte sehr unterschiedlicher Größe gezeigt und entsprechend befassen sich unterschiedliche Bereiche der Physik mit deren Un-

tersuchung. So sind unter anderem Kristalle Untersuchungsobjekte der Festkörperphysik. Moleküle und Atome werden in der Molekül- und Atomphysik untersucht – diese und vor allem deren Reaktionen untereinander sind natürlich auch Forschungsgegenstand der Chemie; und baut man damit komplexere Strukturen, bewegen wir uns im Bereich der Biologie. Die Wechselwirkung von Licht mit Materie ist Forschungsgegenstand der (Quanten-)Optik. Befasst man sich mit noch kleineren Objekten, den Atomkernen oder gar den Bausteinen ihrer Bausteine, den Quarks, dann befindet man sich in der Kern- oder Teilchenphysik. Die letzten beiden Disziplinen haben einen großen Überlapp, und wir wollen in diesem Buch nicht immer zwischen ihnen unterscheiden. Spannend ist, dass sich die Physik des Allergrößten, die Astronomie oder gar die Kosmologie, und die Physik des Allerkleinsten, die Teilchenphysik, begegnen: Nur gemeinsam können sie die Ge-



Was findet man, wenn man einen Kristall in seine Bausteine zerlegt?

Die Elementarteilchen → S. 10

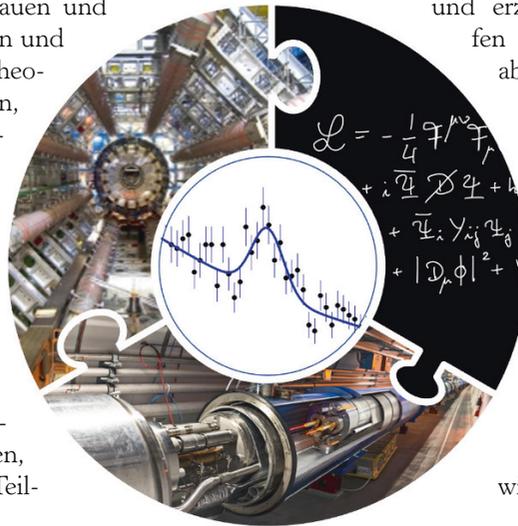
Die vier Grundkräfte der Natur → S. 12

schichte und Zusammensetzung des Universums (\downarrow) sowie die elementare Struktur der Materie erkunden. Das entscheidende Element, das die Teilchenphysik von anderen Bereichen der Physik abgrenzt, ist also ihre Suche nach den fundamentalen Bausteinen und welche Kräfte zwischen ihnen wirken – und natürlich auch, wie daraus die uns umgebende Materie entsteht.

Eine hilfreiche Analogie zum Vorgehen der Teilchenphysik ist der Indizien-Beweis in der Kriminologie: Wir sehen, was vorgefallen ist (z. B. dass es im Universum fast keine Antimaterie (\downarrow) gibt, obwohl im Urknall eigentlich Materie und Antimaterie in nahezu gleicher Zahl entstanden sein sollten) und versuchen zu ergründen, wie es dazu gekommen sein kann. Das Ermittlungsteam der Teilchenphysik hat viele beteiligte Gruppen: die Forschenden der Experimentalphysik, die Detektoren entwickeln, bauen und betreiben, Beweise einsammeln und Hypothesen testen; die der theoretischen Physik, die versuchen, entweder für die Beobachtungen ein beschreibendes mathematisches Modell zu finden oder eine bestehende Theorie zu höherer Genauigkeit auszuarbeiten, um der Beobachtung gerecht zu werden; und nicht zuletzt die Forschenden der Beschleunigerphysik, die all die Untersuchungen erst möglich machen, indem sie die notwendigen Teilchenstrahlen der passenden Energie bereitstellen. Auch leisten jede Menge enga-

gierte und hochqualifizierte Technikerinnen und Techniker ihren wertvollen Beitrag zu diesem spannenden Bereich der Grundlagenforschung. Die speziellen Momente in dieser Art der Forschung entstehen, wenn ein Puzzlestück auf seinen Platz rückt und den Blick auf größere Zusammenhänge erlaubt, die einem vorher verschlossen waren; eben ähnlich dem Kriminalisten, dem auf einmal aufgeht, wie all die Hinweise auf die Lösung des Falles weisen. Aber an dem Punkt geht die Grundlagenforschung weiter: Mindestens genauso aufregend ist es, wenn eine Vorhersage, an der man mitgearbeitet hat, experimentell bestätigt wird. Es sind diese Momente, die einen Beruf in der Teilchenphysik so besonders, so spannend machen.

In diesem Buch werden wir die verschiedenen Bereiche der Kern- und Teilchenphysik vorstellen und erzählen, wie sie ineinandergreifen und sich ergänzen. Vor allem aber wollen wir berichten, wo wir mit der Teilchenphysik stehen: Welch wunderbaren Schatz, welch fantastische kulturelle Errungenschaft das sogenannte *Standardmodell* der Elementarteilchenphysik darstellt, wie erfolgreich es ist – aber auch, wo es an seine Grenzen stößt, was es nicht erklären kann und mit welchen Methoden man der Natur zu entlocken versucht, wie eine mögliche noch fundamentalere Theorie der Welt aussehen kann.



Die Entdeckung des Higgs-Bosons – eine enge Zusammenarbeit aus Theorie, Beschleuniger- und Experimentalphysik

Ursprünge der Teilchenphysik

Wie und wer?

Als Anfang der modernen Teilchenphysik kann man die Entdeckung des Elektrons durch Joseph J. Thompson im Jahre 1897 betrachten. Er experimentierte mit einer Kathodenstrahlröhre, wie sie in den Bildern gezeigt ist. Dies ist ein kleiner Beschleuniger, ähnlich wie er früher in Fernsehgeräten eingebaut war.

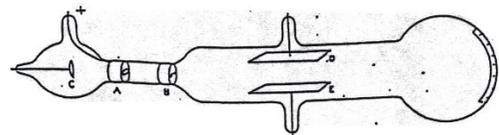
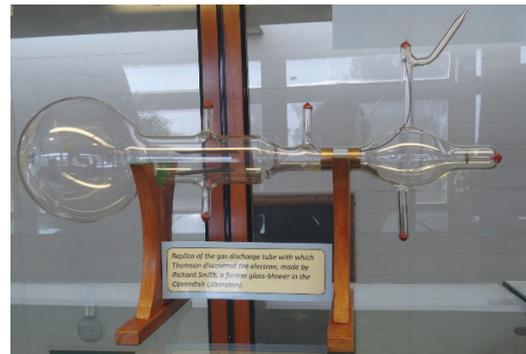
Die Funktion kann man anhand der Zeichnung erklären. Am Punkt *C* wird ein Draht auf negativem Potential erhitzt, dadurch treten Elektronen aus. Diese werden zur Anode *A* (auf positivem Potential) beschleunigt und anschließend durch die auf Erde gelegte Blende *B* fokussiert. Im elektrischen Feld zwischen den Platten (*D*, *E*) werden sie abgelenkt, bevor sie rechts auf den Beobachtungsschirm treffen. Durch die Ablenkung im elektrischen Feld kann man das Verhältnis von elektrischer Ladung zur Masse der Teilchen (q/m) bestimmen. Dieses war immer gleich, für beliebiges Beschleunigungspotential und beliebigem Ablenkungsfeld, was für ein Elementarteilchen sprach.

Auf ähnliche Weise hatte Eugen Goldstein bereits 1886 ionisierte Gasatome, darunter auch Wasserstoff (H^+), in einer Anodenstrahlröhre untersucht. Er beobachtete viele verschiedene Werte von q/m , und erst sehr viel später (1898) wurde das Teilchen mit dem größten Verhältnis von q/m von Wilhelm Wien als Proton identifiziert.

Nachbau der Kathodenstrahlröhre von J.J. Thompson (oben) und Originalzeichnung der Kathodenstrahlröhre von J.J. Thompson (unten). In der Glasröhre im Foto fliegen die Elektronen von rechts nach links; in der Zeichnung umgekehrt.

1911 entdeckten Ernest Rutherford, Hans Geiger und Ernest Marsden den Atomkern und 1932 James Chadwick das Neutron, jeweils mithilfe von Streuexperimenten. Damit waren die Bausteine der Atome bestimmt.

Henri Becquerel und Marie Curie entdeckten 1896 die Radioaktivität, die α -, β - und γ -Strahlung. Die α -Strahlen stellten sich als Heliumkerne heraus und, wie wir heute wissen, ist der Prozess durch die starke Wechselwirkung bestimmt. β^- -Strahlung besteht aus energetischen Elektronen, der β -Zerfall ist durch die schwache Wechselwirkung bestimmt. Die γ -Strahlung besteht aus energetischen Lichtteilchen, den Photonen, die Albert Einstein 1905 als Quanten der elektromagnetischen Kraft (QED) einführte.



¹ Eine sehr gute Geschichte der Elementarteilchenphysik von den Anfängen bis 1950 ist das Buch von A. Pais *Inward Bound*, Oxford University Press (nur auf Englisch).

Von Nukleonen zu Kernen → S. 210

Das Noether-Theorem → S. 96, Symmetrien → S. 56

Diskrete Symmetrien: P - und CP -Verletzung → S. 178

Somit gab es schon 1896 erste Hinweise auf die drei grundlegenden Kräfte des Standardmodells der Teilchenphysik, sowie ab 1905 Hinweise, dass sie quantisiert sind, also durch Austauschteilchen vermittelt werden.¹ Dann wurde 1936 das erste Teilchen jenseits unserer gewöhnlichen Materie in kosmischen Strahlen entdeckt, das Myon, und man konnte wirklich nur mit dem Physiker Isidor Rabi fragen: „Wer hat das denn bestellt?“ Die Antwort wissen wir bis heute nicht.

Viele der Physikerinnen und Physiker, die zu dieser Entwicklung beigetragen haben, sind allgemein bekannt, so wie Marie Curie und ihre Mitentdeckung der Radioaktivität, Albert Einstein und seine Idee der Relativität, Niels Bohr und sein Atommodell, oder Erwin Schrödinger und seine Katze. In der Würdigung der Entwicklung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik wurden viele Nobelpreise vergeben. Wir wollen aber nicht verhehlen, dass die öffentliche Würdigung des Beitrags von Wissenschaftlerinnen zu diesen Entwicklungen in der Vergangenheit leider oft unterrepräsentiert war. Daher soll an dieser Stelle besonders auf wichtige historische und aktuelle Beiträge von Frauen in den letzten 125 Jahren hingewiesen werden. Sie haben es geschafft, trotz widriger Umstände² außerordentliche Beiträge zu liefern, die oft nicht entsprechend gewürdigt oder öffentlich beachtet wurden. Exemplarisch nennen wir hier neun Frauen, deren Beiträge auch direkt relevant für dieses Buch sind:

Marie Curie (1867–1934) hat die Radioaktivität mitentdeckt und grundlegende Beiträge zum Verständnis geleistet. Sie war die erste Person, die zwei Nobelpreise (Physik: 1903, Chemie: 1911) in den Naturwissenschaften erhielt.

Lise Meitner (1878–1968) entdeckte mehrere Kernisotope (↓). Sie ist die Mitentdeckerin der Kernspaltung und lieferte die erste physikalische Erklärung dafür.

Emmy Noether (1882–1935) war eine mathematische Physikerin, die den grundlegenden Zusammenhang zwischen Symmetrien und Erhaltungsgrößen (↓) fand.

Maria Goeppert Mayer (1906–1972) lieferte entscheidende Beiträge zum Verständnis der Kernstruktur und erhielt dafür 1963 den Nobelpreis.

Chien-Shiung Wu (1912–1997) entdeckte 1956 experimentell die Paritätsverletzung (↓).

Vera Rubin (1928–2016) führte Messungen der Rotationskurven in Galaxien durch, was ein entscheidender Beitrag zur Entdeckung der Dunklen Materie (↓) war.

Helen Edwards (1936 — 2016) machte entscheidende Beiträge zu supraleitender Beschleunigertechnologie und ermöglichte so Beschleuniger wie das Tevatron und den LHC.

Helen Quinn (1943–) machte entscheidende Vorschläge zum Verständnis der *CP*-Symmetrie in der starken Wechselwirkung (↓) und trug zu den großen Vereinheitlichungstheorien (↓) bei.

Fabiola Gianotti (1969–) war Leiterin (Sprecherin) des ATLAS-Experiments am LHC, als das Higgs-Boson (↓) 2012 entdeckt wurde. 2016 wurde sie die erste Frau als Directrice Générale des CERNs.



Fabiola Gianotti
am CERN

² Elsa Neumann wurde 1899 als erste Frau in Deutschland in Physik promoviert (Berliner Universität). Annette Zippelius wurde 1988 (!) die erste Lehrstuhlinhaberin für Physik (Universität Göttingen).

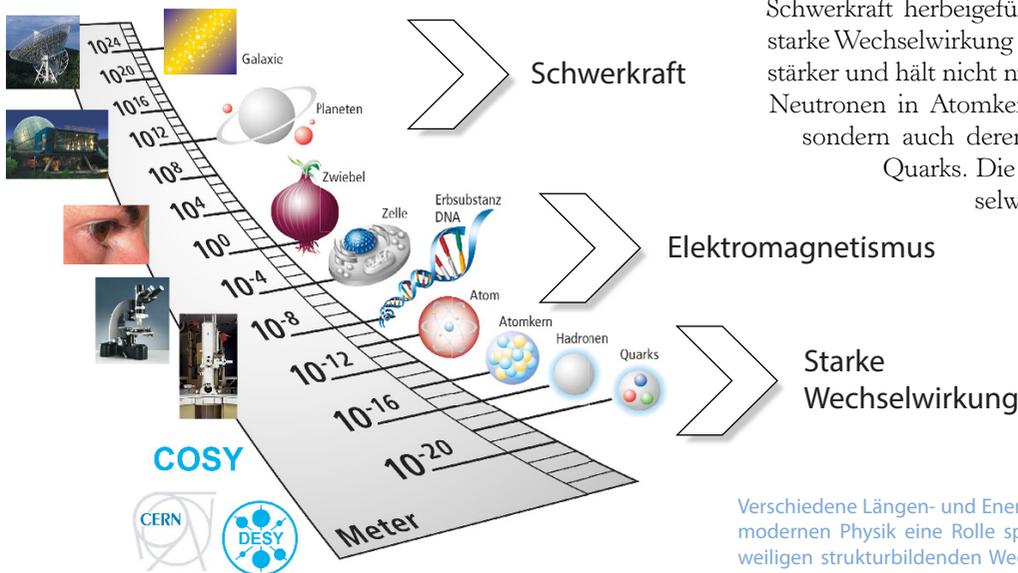
Längenskalen und Einheiten

Von riesig groß bis zu winzig klein – alles Physik

In diesem Buch spielen jede Menge unterschiedliche Längenskalen eine Rolle: Da gibt es zum einen die gigantische Ausdehnung des Universums, der Galaxien und Planetensysteme, die wir durch einen Blick in den Nachthimmel nur erahnen können. Andererseits gibt es die Objekte unseres Alltags: von kilometerhohen Gebirgen über biologische und chemische Abläufe, die durch die typische Größe von Atomen charakterisiert sind, bis hin zu subatomaren Prozessen im Atomkern. Wie in der Abbildung angedeutet, dominieren auf den verschiedenen Skalen unterschiedliche Kräfte, die zu entsprechend unterschiedlichen Phänomenen führen.

Strukturbildend in Planetensystemen, Galaxien und dem Universum ist die Schwerkraft oder Gravitation, die mit großem Abstand schwächste aller Kräfte. Sie hat als einzige eine unendliche Reichweite (und warum das so ist, ist ziemlich spannend und wird im Artikel zur Reichweite (↓) beschrieben). Die Abläufe um uns herum werden durch den stärkeren, aber wegen der Abschirmung durch unterschiedliche Ladungen kurzreichweitigeren Elektromagnetismus bestimmt. Er sorgt für die Struktur der Atomhüllen, molekulare Bindungen, aber auch die Strukturen von festen Körpern und so ziemlich allen Vorgängen, die wir mit unseren Sinnen wahrnehmen können und die nicht von der

Schwerkraft herbeigeführt werden. Die starke Wechselwirkung ist noch deutlich stärker und hält nicht nur Protonen und Neutronen in Atomkernen zusammen, sondern auch deren Bausteine, die Quarks. Die schwache Wechselwirkung hingegen



Verschiedene Längen- und Energieskalen, die in der modernen Physik eine Rolle spielen, sowie die jeweiligen strukturbildenden Wechselwirkungen. Die schwache Wechselwirkung trägt nicht zur Strukturbildung bei und erscheint daher nicht im Bild.

ist sehr schwach und zeigt sich vor allem in radioaktiven Zerfällen wie dem β -Zerfall des Neutrons.

Die Stärke einer Wechselwirkung und ihre Reichweite bestimmen die Größe der Strukturen, die durch sie entstehen können. Da die Schwerkraft eine unendliche Reichweite hat und ihre Stärke mit der Masse der beteiligten Objekte wächst, erschafft sie Strukturen, die im wahrsten Sinne des Wortes gigantisch sind. Aus der eigenen Erfahrung mit dem Elektromagnetismus wissen wir alle, dass z. B. handelsübliche Magnete auf eine Entfernung von wenigen Zentimetern aufeinander wirken. Ein in der Ausdehnung deutlich größerer Magnet ist die Erde, deren Magnetfeld sowohl Kompassnadeln bewegt als auch die Erde vor dem Schauer geladener Teilchen aus dem All schützt. Spannend für dieses Buch wird es mit der Wirkung des Elektromagnetismus auf atomarer Ebene mit typischen Ausdehnungen von 10^{-10} m. Die starke Wechselwirkung ist auf subatomarer Ebene relevant, also innerhalb von Atomkernen, 10^{-15} m. Auf noch kleineren Skalen wirkt die schwache Wechselwirkung. Sie ist mit einer Reichweite von 10^{-18} m so schwach und kurzreichweitig, dass sie nicht zur Strukturbildung beiträgt.

Wie in der Abbildung dargestellt, beschäftigt sich die moderne Physik mit Längenskalen, die über 30 Größenordnungen umfassen. Je weiter man sich auf der Abbildung von den Objekten des Alltags entfernt, desto größer werden die Geräte, die man zu deren Betrachtung braucht. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Auflösung gesteigert werden muss. Die Astronomie nutzt dazu riesige Teleskope oder schaltet sogar viele Teleskope zusammen, um tief ins All schauen zu können. Will man sich andererseits ein Bild von sehr kleinen Objekten machen, reicht ein optisches Mikro-

skop schnell nicht mehr aus. Hier kann man jedoch den Zusammenhang zwischen der quantenmechanischen Wellenlänge und dem Impuls einer Sonde nutzen (Quantenmechanik \downarrow): Je größer die Energie und damit der Impuls, desto kleiner die Wellenlänge und somit auch das Objekt, das man noch „sehen“ kann. Ein Elektronenmikroskop erlaubt auf diese Weise Einblicke auf Atomebene. Will man jedoch noch genauer hinsehen, so muss man die Wellenlänge der Sonde weiter verringern. Dazu benötigt man Beschleuniger (\downarrow), mit immer größerer Energie.

Natürlich benutzen Forschende, die sich mit den sehr verschiedenen Systemen befassen, unterschiedliche Einheiten. Innerhalb unserer Galaxis ist z. B. das Lichtjahr eine nützliche Längenskala, also die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Das sind etwa 10^{16} m. Im Alltag sind wir an Kilometer, Meter und Zentimeter gewohnt – welche Einheit wir benutzen, hängt davon ab, wovon wir sprechen: Für die Entfernung Hamburg-München benutzen wir Kilometer, für die Dicke einer Schraube Millimeter. Atome haben eine Ausdehnung von 10^{-10} m – diese Längenskala wird Angström, Å, genannt. Atomkerne haben eine Größe von 10^{-15} m – die Längenskala heißt *Fermi* oder *Femtometer*, mit dem Symbol „fm“.

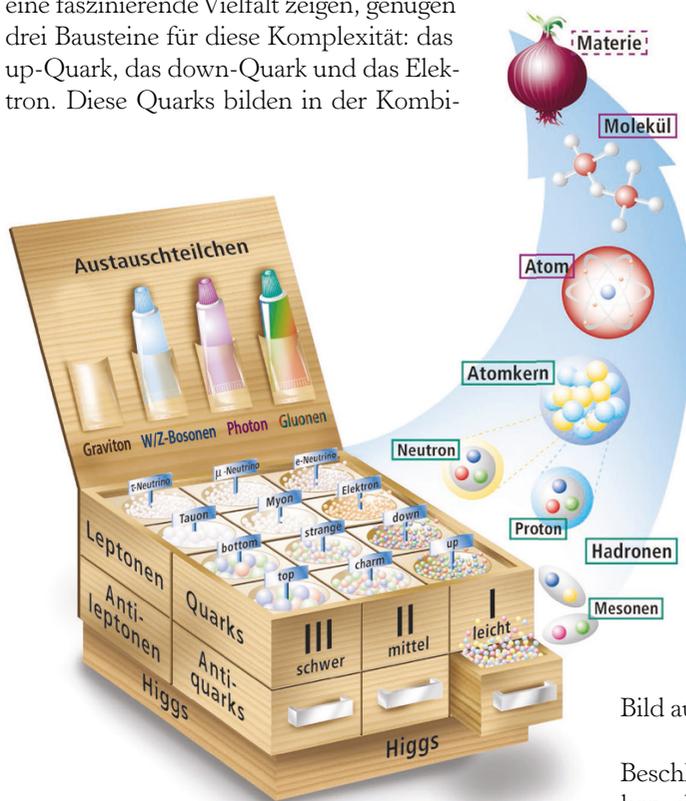
Entsprechendes gilt auch für Massen (m) und Energien (E). Da nach Einstein $E = mc^2$ (\downarrow) gilt, mit der Lichtgeschwindigkeit c , wird in der Teilchenphysik typischerweise nicht zwischen diesen beiden Größen unterschieden. So hat z. B. ein Proton eine Masse von $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg = $938 \text{ MeV}/c^2 = 938 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2$, wobei das Elektronenvolt (eV) die Energie ist, die ein Elektron nach Durchlaufen eines elektrischen Potentials von einem Volt gewinnt.

Die Elementarteilchen

Die Bausteine der Welt

Elementarteilchen (\downarrow) werden als *elementar*, also punktförmig und nicht zusammengesetzt, angenommen. Sie bilden nach unserem gegenwärtigen Verständnis die fundamentalen Bausteine der Natur. Obwohl alles um uns herum und auch wir selbst eine faszinierende Vielfalt zeigen, genügen drei Bausteine für diese Komplexität: das up-Quark, das down-Quark und das Elektron. Diese Quarks bilden in der Kombi-

nation up-up-down das Proton und der Kombination up-down-down das Neutron. Aus diesen setzen sich die Kerne der Atome zusammen (\downarrow), deren Hüllen die Elektronen bilden.



Die Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen

Darüber hinaus entstehen in Zerfällen, wie dem Neutron- β -Zerfall, noch Elektron-Antineutrinos, und es gibt auch Atomkerne, in denen gebundene Protonen in gebundene Neutronen zerfallen, wobei die Antiteilchen von Elektron und Elektron-Antineutrino, das Positron und das Elektron-Neutrino, entstehen. Natürlich haben auch Proton und Neutron Antiteilchen; diese treten zwar nicht signifikant in der Natur auf, können aber in Beschleunigern erzeugt werden.

Die in diesem Artikel benannten Elementarteilchen bilden die sogenannte erste *Familie* (im Bild links die Schublade „I – leicht“). Es hat sich gezeigt, dass alle Mitglieder der Familie notwendig sind, damit die Theorie mathematisch konsistent ist. Die Anzahl der Familien ist durch die Theorie nicht festgelegt. Die Eigenschaften der Mitglieder der verschiedenen Familien sind in der ersten Tabelle (\downarrow) am Ende des Buches und im

Bild auf der rechten Seite aufgelistet.

Beschleunigerexperimente haben gezeigt, dass es neben der gerade beschriebenen ersten Familie noch zwei weitere gibt: Der zweiten gehören strange- und

Was ist eigentlich ein Elementarteilchen? \rightarrow S. 16

Von Nukleonen zu Kernen \rightarrow S. 210

Tabellen: Die Eigenschaften der Elementarteilchen \rightarrow S. 328

charm-Quark sowie das Myon und sein Neutrino an, der dritten bottom- und top-Quark und das Tauon mit seinem Neutrino. Heute wissen wir, dass es keine weitere Familie gibt. Warum es drei sind, wissen wir nicht.

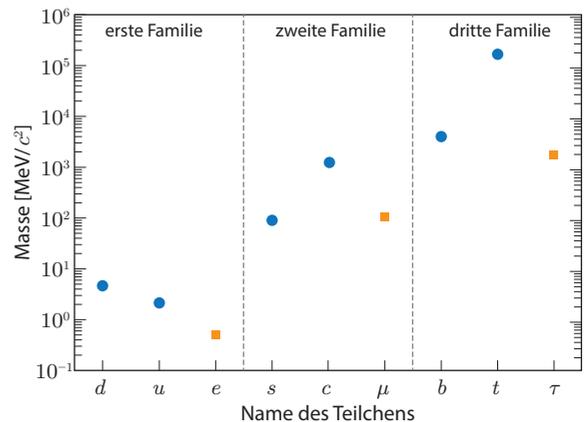
Die Massen der Elementarteilchen sind im Bild unten rechts dargestellt. Sie werden nicht vom Standardmodell vorhergesagt, sondern sind Parameter des Modells, die aus Messwerten bestimmt werden müssen. Es soll hierbei nicht unerwähnt bleiben, dass, da es Quarks nur eingeschlossen in größeren Verbänden gibt (Confinement \downarrow), und ihre Massen auch nur einen Teil zur Gesamtmasse der aus ihnen zusammengesetzten Teilchen beitragen (\downarrow), die Bestimmung der Quarkmassen kompliziert ist.

Die Teilchenmassen geben Rätsel auf: So ist nicht verstanden, warum sie so viele Größenordnungen überspannen: Ein top-Quark ist ungefähr so viel Mal schwerer als ein up-Quark, wie ein Elefant schwerer als ein Feuersalamander ist. Auch ist unverstanden, warum in der ersten Familie das positiv geladene Quark das leichtere ist, wohingegen es in den beiden anderen Familien das schwerere ist. Aber dass das up-Quark leichter ist als das down-Quark, ist gut so, denn sonst gäbe es kein Leben auf der Erde, wie wir es kennen (Quarkmasseneffekt \downarrow).

Neben den gerade beschriebenen Bausteinen der Materie werden im Standardmodell auch die Feldteilchen der Wechselwirkungen, die als Überträger der Kräfte fungieren, als elementar angenommen. Diese sind für den Elektromagnetismus das Photon (γ), für die schwache Wechselwirkung das elektrisch neutrale Z-Boson sowie die beiden geladenen W-Bosonen (W^+ und W^-) und für die starke Wechselwirkung die acht

Gluonen, die selbst die starken Ladungen tragen, und zwar in Kombinationen aus den drei Ladungen (rot (r), grün (g), blau (b)) und ihren Antiladungen (\bar{r} , \bar{g} , \bar{b}). Ihre Eigenschaften sind in der zweiten Tabelle am Ende des Buches zusammengefasst. Obwohl die Gravitation noch nicht Teil des Standardmodells ist, wird ihr trotzdem ein Austauscheteilchen, das Graviton zugeschrieben, auch wenn es noch nicht entdeckt ist. Schließlich gibt es noch das Higgs-Boson (\downarrow). Seine Rolle im Standardmodell ist es, den Elementarteilchen ihre Massen zu geben. Es ist das einzige spinlose (\downarrow) Elementarteilchen und ist als Letztes der Bausteine des Standardmodells 2012 entdeckt worden.

Der Steckbrief der Elementarteilchen wird natürlich erst komplett, wenn man auch noch ihre weiteren Eigenschaften, wie Spin, Ladungen, Baryonenzahl und Leptonenzahl zuordnet – diese sind ebenfalls in den Tabellen am Ende des Buches angegeben.



Teilchenmassen im Vergleich. Die blauen Kreise zeigen die Quarkmassen, die Quadrate in Orange die der geladenen Leptonen. Die Massen der Neutrinos sind sehr klein und daher nicht gezeigt.

Confinement → S. 192

Woher kommt unsere Masse? → S. 204

Der Quarkmasseneffekt → S. 208

Die Entdeckung des Higgs-Bosons → S. 230

Spin → S. 44

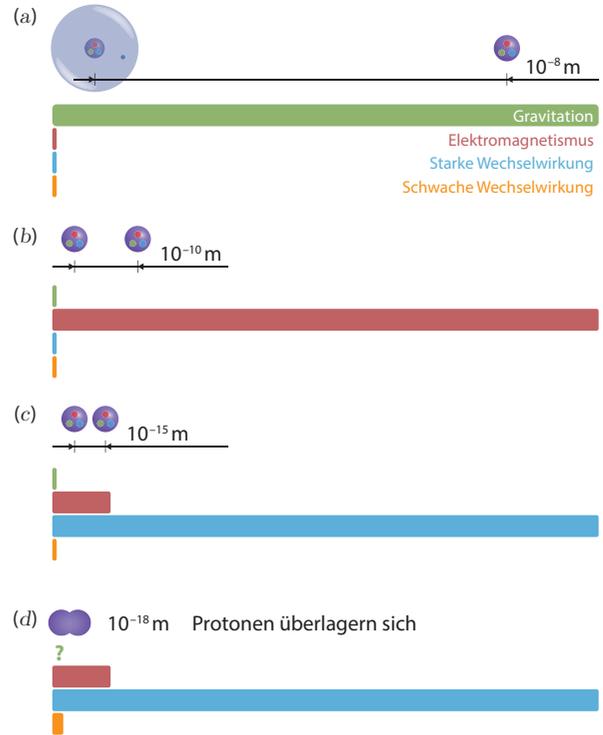


Die vier Grundkräfte der Natur

Vier sehr ungleiche Partner

Wir kennen vier fundamentale Kräfte: die Gravitation, den Elektromagnetismus, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Die letzten drei sind im Standardmodell der Elementarteilchenphysik zusammengefasst. Die Wechselwirkungen des Standardmodells sind alle nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Die Kräfte werden durch den Austausch von Austauschteilchen vermittelt. Man nimmt an, dass das auch für die Gravitation gilt. Die vier Grundkräfte unterscheiden sich drastisch in Reichweite (\downarrow) und Stärke und sind dementsprechend für sehr unterschiedliche Systeme relevant, die deshalb sehr unterschiedliche Eigenschaften entwickeln (Skalen \downarrow).

Um das gerade Gesagte zu verdeutlichen, möchten wir Sie auf eine Reise, eine „Gedanken“-Reise, einladen. Stellen Sie sich vor, wir reisen auf einem Proton und nähern uns einem Wasserstoffatom – also einem anderen Proton mit einem Elektron in seiner umgebenden Hülle. Beginnen wir unsere Reise bei $1\ \mu\text{m}$ (also $10^{-6}\ \text{m}$ – in etwa die Dicke eines Haares) Abstand von dem nach außen elektrisch neutralen Atom, welches etwa $10^{-10}\ \text{m}$ groß ist (siehe Bild, a). Aus dieser Entfernung heben sich die Wirkungen der elektrischen Ladungen von Elektron und Proton im Wasserstoffatom auf. Dadurch wird der Elektromagnetismus abgeschirmt und die sehr schwache Anziehung der Gravitation ist die einzige Kraft, die nennenswert auf unser Proton wirkt, wodurch es zu dem Atom hingezogen wird. Das ändert sich jedoch drastisch, sobald wir auf atomare Abstände an den Atomkern herankommen, also in die Elektronenhülle eindringen (b). Nun „sieht“ unser



Die relative Wichtigkeit der Grundkräfte bei verschiedenen Abständen – die Balkenlänge deutet die relative Stärke der Kräfte an.

positiv geladenes Proton den ebenfalls positiv geladenen Atomkern. Zwar ist die Gravitationskraft wegen des kleineren Abstands nun 100 Millionen mal stärker als zuvor, aber das ist vernachlässigbar wenig gegen die elektromagnetische Abstoßung, die unser Proton nun zu spüren bekommt. Die Gravitation ist bei diesen Ab-

ständen über 30 Größenordnungen schwächer als der Elektromagnetismus, vermittelt durch den Austausch von Photonen. Andererseits befinden wir uns noch viel zu weit von dem Atomkern entfernt, als dass die starke Wechselwirkung schon eine Rolle spielen könnte. Hier draußen ist diese selbst gegen die Gravitation noch vernachlässigbar. Die Vielfalt der uns umgebenden Natur ist somit vor allem vom Elektromagnetismus bestimmt. Er lässt beispielsweise Farben leuchten und hält all die vielen Stoffe um uns herum, wie Holz, Steine und Metall, zusammen. Die Effekte der starken Wechselwirkung sind indirekt, da sie (im Wechselspiel mit dem Elektromagnetismus) festlegt, welche Atomkerne (\downarrow) mit welchen Kernladungen stabil sind.

Um die Reise fortzusetzen, stellen wir uns vor, dass wir schnell genug sind, um die erwähnte elektrische Abstoßung zu überwinden (c). Dann passiert etwas Drastisches, sobald unser Proton einen weiteren Faktor 100.000 näher an das Kern-Proton herangekommen ist (wir ignorieren jetzt mal, dass die Protonen nicht unterscheidbar sind, obwohl dies zu spannenden Effekten führt – siehe Artikel zu Fermionen und Bosonen \downarrow): Die starke Kraft setzt ein, und zwar zunächst über den Austausch leichter Quark-Antiquark-Systeme – nun hat der Elektromagnetismus keine Chance mehr.

Bei noch kleineren Abständen ($< 10^{-15}$ m) beginnen die Protonen zu überlappen (d). Nun wird die starke Kraft direkt durch den Austausch von Gluonen zwischen den Bausteinen der Protonen, den Quarks, vermittelt. An der Hierarchie zwischen den Kräften ändert das jedoch wenig: Die starke Kraft ist weiterhin die stärkste, danach folgt die elektromagnetische. Allerdings wird bei diesen kleinen Abständen auch die schwache Wechselwirkung, vermittelt durch den Aus-

tausch von W - und Z -Bosonen, relativ stark. Bei einem Abstand von 10^{-18} m ist sie jedoch immer noch einen Faktor 10.000 schwächer als die starke Kraft und einen Faktor 100 schwächer als der Elektromagnetismus. Bei solch kleinen Abständen kann man der Gravitation keine Kraft mehr zuordnen, da innerhalb eines Protons eine hohe Energiedichte herrscht und somit die Gravitation nicht nur zwischen den Quarks wirkt – hier wäre dann eine Quantengravitation notwendig, für die es noch keine Theorie gibt.

Welche Kraft dominiert, hängt demnach davon ab, wie nahe sich die untersuchten Teilchen kommen. Aber auch davon, welche Teilchen beteiligt sind. Wie stark die Kräfte z.B. bei einem gegebenen Abstand sind, hängt dann sowohl von der Masse des Austauschteilchens als auch von der Wahrscheinlichkeit ab, dass ein Materieteilchen ein solches Austauschteilchen abstrahlt. So ist bei kleinen Abständen, wie oben ausgeführt, die starke Wechselwirkung zwischen Quarks sehr viel wichtiger als z.B. der Elektromagnetismus, aber zwischen Elektronen spielt sie keine Rolle, da Elektronen keine Gluonen abstrahlen.

Unter den Kräften des Standardmodells nimmt die schwache Wechselwirkung eine Sonderrolle ein: Sie ist so schwach und kurzreichweitig, dass sie keine stabilen Strukturen ausbilden kann. Allerdings ist sie die einzige Wechselwirkung, die Teilchentypen ändert – sie kann z.B. ein down-Quark in ein up-Quark umwandeln. Das passiert z.B. im Neutron- β -Zerfall (Produktion und Zerfall \downarrow). Ohne die schwache Wechselwirkung wären Neutronen stabil. Außerdem braucht all die reichhaltige Physik der Neutrinos die schwache Wechselwirkung, aber diese Geschichte wird in anderen Artikeln erzählt.