

Eines der größten ungelösten Probleme der modernen Teilchenphysik

Im Inneren des Atomkerns: Mit Hilfe von Theorie, Experiment und Simulation an Höchstleistungsrechnern, wie etwa am Leibniz-Rechenzentrum, sind Physiker dem Geheimnis der Quarks auf der Spur.

VON GERRIT SCHIERHOLZ

Abb. 1: Dreidimensionaler Querschnitt des (Raum-Zeit-) QCD Vakuums. Zu sehen sind Isoflächen positiver (rot) und negativer Polarisation (grün) der Quark-Antiquark-Paare.

NACH HEUTIGEM Wissensstand lassen sich nahezu alle beobachteten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschreiben. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass mehr als die Hälfte seiner 19 Parameter nicht sehr gut bestimmt sind. Das Standardmodell ist daher mit einer gewissen Willkür behaftet und kann sich in einem gewissen Rahmen den experimentellen Beobachtungen anpassen.

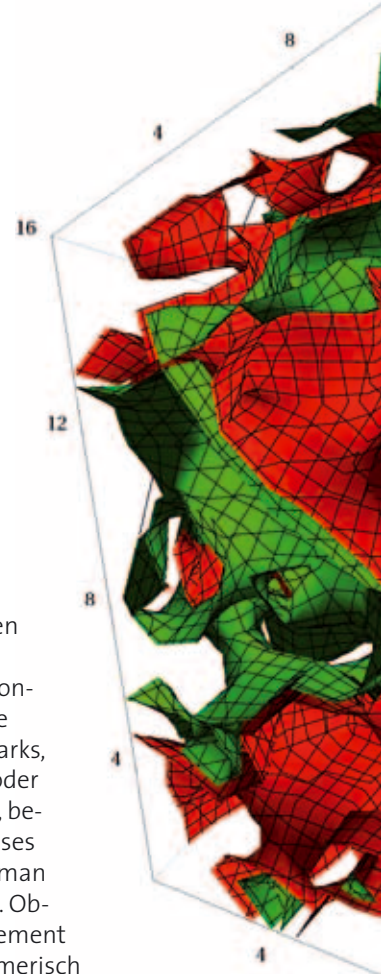
Von Quarks, Gluonen und Hadronen: die Quantenchromodynamik

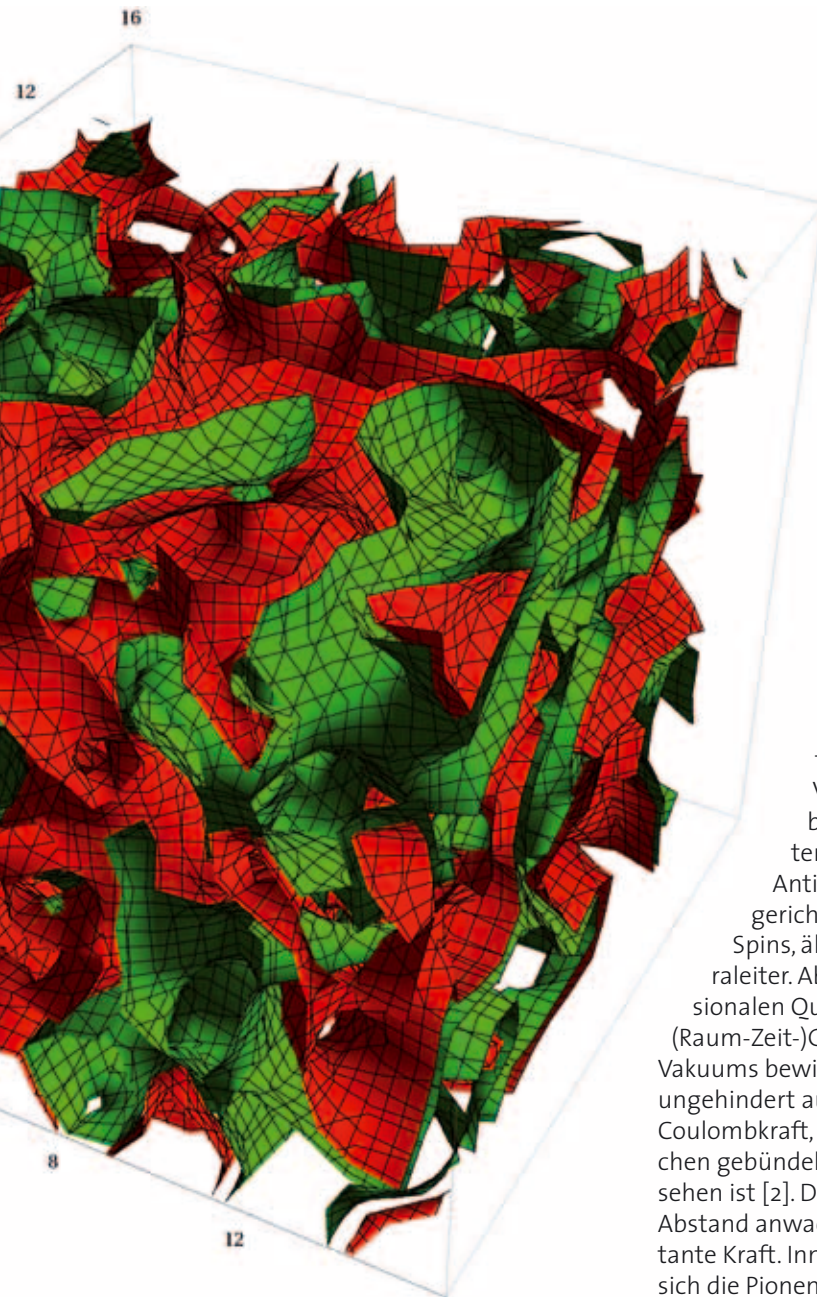
Alle diese Parameter beinhalten Quarks. Sie sind schlecht bestimmt, da die Experimente nicht die Eigenschaften von Quarks und Gluonen – den Bausteinen der Materie – messen, sondern von Hadronen, in denen sie eingeschlossen sind. Die moderne Theorie der starken Wechselwirkung, d. h. der Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen, ist die Quantenchromodynamik (QCD). Sie beschreibt eine der drei im Standardmodell zusammengefassten Kräfte. Die beiden anderen Kräfte sind die elektromagnetische und die schwache Kraft. Um das Standardmodell zweifelsfrei zu testen und eventuelle Hinweise auf neue Physik außerhalb dieses Modells zu erhalten, ist es daher eine der dringendsten Aufgaben der Teilchenphysik, die Quantenchromodynamik mit einer Genauigkeit jenseits der experimentellen Fehler zu lösen.

Im Gegensatz zur Coulombkraft der elektromagnetischen Wechselwirkung verschwindet die Kraft, mit der sich Quarks gegenseitig anziehen, nicht bei großen Abständen, sondern nimmt den

unvorstellbar großen Wert von 15.000 Newton an, was einem Gewicht von 15 Tonnen entspricht. Quarks treten daher nie als freie Teilchen in der Natur auf, sondern entweder als Paare von Quarks und Antiquarks, bekannt als Mesonen, oder als Triplets von Quarks, bekannt als Baryonen. Dieses Phänomen bezeichnet man als Quark Confinement. Obwohl das Quark Confinement mittlerweile zu den numerisch gesicherten Eigenschaften der Quantenchromodynamik zählt, ist sein dynamischer Ursprung nach wie vor ein großes Rätsel. Es ist zweifelsfrei eines der größten ungelösten Probleme der modernen Teilchenphysik. Antworten darauf, wie genau Quarks und Gluonen miteinander wechselwirken, wie sie sich in Gefangenschaft der Hadronen verhalten und wie sie mit wenigen Parametern den „Zoo“ von Hunderten von Teilchen und Kernen beschreiben können, lassen sich daher nur durch Untersuchungen des Spektrums und der Struktur der Hadronen gewinnen. Die Erforschung der inneren Freiheitsgrade der Hadronen und ihre Abbildung auf die fundamentalen Felder der Quantenchromodynamik ist eines der vorrangigen Ziele der weltweit führenden Forschungslabors Brookhaven National Lab, CERN, DESY, FZ Jülich, GSI, Jefferson Lab, J-PARC und LNF Frascati, um nur einige zu nennen, im Verbund mit theoretischen Untersuchungen.

Um die Quantenchromodynamik bei makroskopischen Abständen zu lösen, bedient man sich der Formulierung auf dem Gitter und numerischer Simulationen. Gegenwärtig ist die Gitter-





auf ≤ 3 GeV begrenzt sind.

Wünschenswert sind Gitter mit einer Ausdehnung von 7 Fermi und Frequenzen bis hinauf zu 10 GeV, um ebenfalls das bottom Quark zu beherbergen. Dafür sind nach heutigem Kenntnisstand Rechenressourcen im Bereich von > 1 Exaflop-Jahr erforderlich.

Die Besonderheiten des QCD-Vakuums

Der grundlegende Unterschied der Quantenchromodynamik zu den anderen Wechselwirkungen liegt in der Natur des Vakuums. Simulationen mit chiralen Fermionen haben gezeigt ([1] s. Literaturverzeichnis auf S. 65), dass das Vakuum eine laminare Struktur besitzt, bestehend aus kohärenten Schichten virtueller Quark-Antiquark-Paare mit entgegengesetzt gerichteten Impulsen und antiparallelen Spins, ähnlich den Cooper-Paaren im Supraleiter. Abbildung 1 zeigt einen 3-dimensionalen Querschnitt des 4-dimensionalen (Raum-Zeit-)Gitters. Die spezielle Struktur des Vakuums bewirkt, dass sich die Kraftlinien nicht ungehindert ausbreiten können wie im Falle der Coulombkraft, sondern zu engen Flussschläuchen gebündelt werden, wie in Abbildung 2 zu sehen ist [2]. Das Resultat ist ein linear mit dem Abstand anwachsendes Potential und eine konstante Kraft. Innerhalb dieser Schichten können sich die Pionen, die Träger der Kernkraft, nahezu frei bewegen, was die spontane Brechung der chiralen Symmetrie und der damit verbundenen kleinen Masse des Pions erklärt. Ob sich aus diesen Beobachtungen ein Modell zum Verständnis des Quark Confinements ableiten lässt, bedarf weiterer Untersuchungen.

QCD (LQCD) die einzige bekannte Methode, um verlässliche Aussagen der Quantenchromodynamik bei allen Skalen (von den höchsten Energien bis hinunter zu makroskopischen Abständen) zu gewinnen. Dabei kommen Monte-Carlo-Verfahren, wie sie aus der statistischen Mechanik bekannt sind, zum Einsatz. Die Genauigkeit der Rechnungen ist einzig durch die Rechenkapazität beschränkt. Gegenwärtig sind Simulationen auf Gittern der räumlichen Ausdehnung von wenigen Fermi (1 Fermi = 1.015 m) und nahezu physikalischen Quarkmassen möglich, wobei die Frequenzen der dynamischen Freiheitsgrade

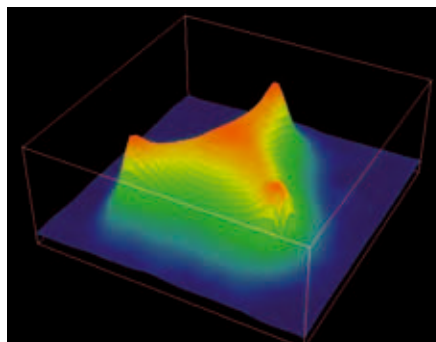


Abb. 2: Energieverteilung des Nukleons. Deutlich zu erkennen sind die Flussschläuche, die die Quarks zusammenhalten.

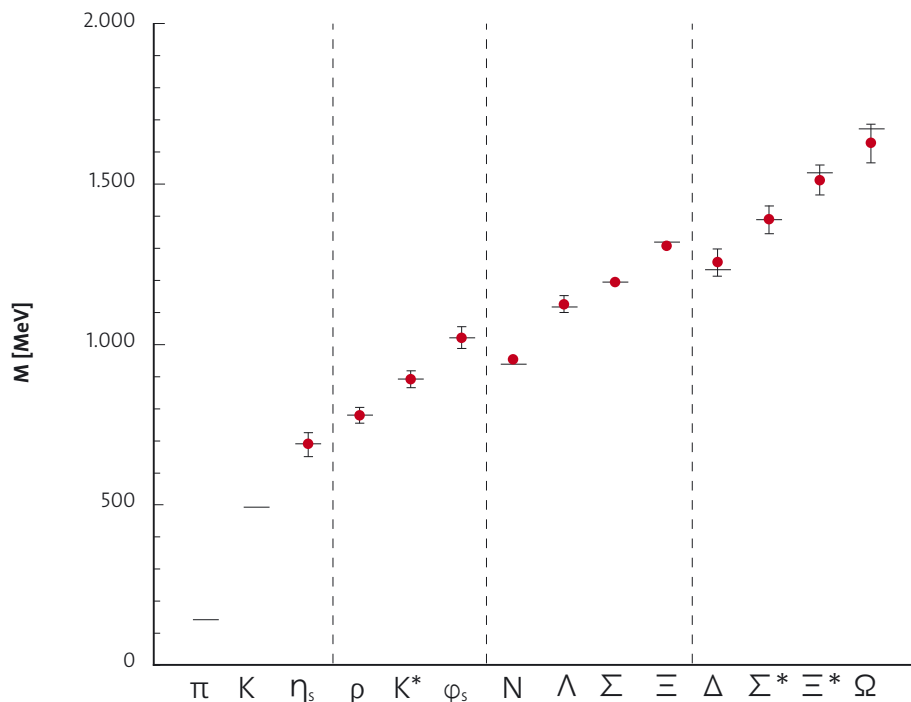
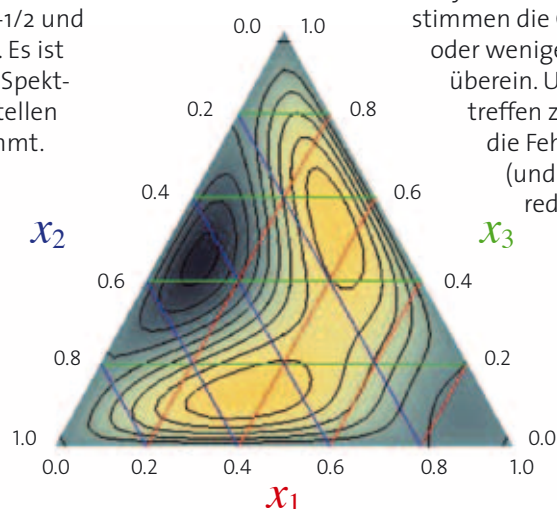


Abb. 3: Das Spektrum der Hadronen (horizontale Linien), verglichen mit dem Experiment (rote Kreise). Die Massen der π und K Mesonen dienen der Bestimmung der leichten up, down und strange Quarkmassen.

Das Spektrum der Hadronen

Die Berechnung der Massen der Hadronen verfolgt zwei Ziele: erstens den quantitativen Vergleich der Quantenchromodynamik mit der Natur und zweitens zu verstehen, wie die Massen zustandekommen. Die Masse des Nukleons, also aller Bausteine eines Atomkerns, ist z. B. etwa hundertmal schwerer als die Summe der darin enthaltenen Quarkmassen, und selbst für verschwindende Quarkmassen würde sich an der Masse des Nukleons nicht viel ändern. Abbildung 3 zeigt das Spektrum der pseudoskalaren und Vektormesonen sowie der isospin-1/2 und isospin-3/2 Baryonen [3]. Es ist erstaunlich, wie gut das Spektrum mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt.

Abb. 4: Die Distributionsamplitude (Bethe-Salpeter Wellenfunktion) des Protons. Helle Flächen bedeuten große Dichte, dunkle Flächen kleine Dichte.



Die Massen der Hadronen haben ihren Ursprung zum allergrößten Teil in der kinetischen Energie E , mittels $m=E/c^2$, die in den Flussschläuchen gespeichert ist, die die Quarks zusammenhalten (Abb. 2). Die Masse der Nukleonen macht insgesamt ca. 95 % der beobachteten Masse des Universums aus.

Auf der Suche nach Erweiterungen des Standardmodells

Auskunft über die schwache Wechselwirkung erhält man vornehmlich aus den elektroschwachen Zerfällen der Hadronen. Zu den bestimmenden Faktoren zählen die Kopplung α_s der Quarks und Gluonen, die Massen der Quarks und die Elemente der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM)-Matrix. Die CKM-Matrix verknüpft die QCD-Basiszustände mit den Basiszuständen der schwachen Wechselwirkung. Neben dem Quark

Confinement sind Ursprung und Massen der Quarks, die ihren Ursprung außerhalb der Quantenchromodynamik haben, eines der großen Rätsel der Teilchenphysik. Sie bilden eine starke Motivation, nach Erweiterungen des Standardmodells zu suchen, die eine einfache Erklärung bieten. Die Berechnungen von α_s und der Quarkmassen nähern sich der notwendigen Genauigkeit. Die CKM-Matrix ist unitär. Neue Physik außerhalb des Standardmodells könnte dieses Bild zerstören. Die Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Unitarität der CKM-Matrix. Innerhalb der heutigen Genauigkeit und systematischer Unwägbarkeiten stimmen die Gitterrechnungen mehr oder weniger mit dem Experiment überein. Um endgültige Aussagen treffen zu können, ist es nötig, die Fehler auf wenige Prozent (und möglichst darunter) zu reduzieren.

Die Struktur der Hadronen

Die Bedeutung von Gittersimulationen für das Verständnis der Struktur der Hadronen kann nicht überschätzt werden. Die LQCD ist unbestritten ein unersetzliches Werkzeug, um die neueren Experimente an den führenden Forschungslabors zu interpretieren und zukünftige Experimente vorzubereiten.

Von primärem Interesse sind die Partonverteilungen (Parton: generischer Begriff für Quark und Gluon) im Nukleon. Um z. B. die Produktionsrate des Higgs-Bosons am Teilchenbeschleuniger LHC zu bestimmen, wird die Impulsverteilung der Partonen (relativ zum Gesamtimpuls des Protons) $q(x)$ benötigt. Experimentell lässt sich $q(x)$ nur in einem engeren Bereich $x_{\min} < x < x_{\max}$ experimentell bestimmen, bedingt durch kinematische Grenzen. LQCD dagegen kann Momente $\langle x^n \rangle = \int_0^1 dx x^n q(x)$ berechnen. Beide Informationen sind komplementär.

Eine weitere fundamentale Größe ist die Distributionsamplitude $\Phi(x_1, x_2, x_3, \mu^2)$ des Nukleons, eine Art Bethe-Salpeter Wellenfunktion. Mit ihrer Hilfe lässt sich eine Fülle von exklusiven Prozessen beschreiben. Darüber hinaus gibt $\Phi(x_1, x_2, x_3, \mu^2)$ Auskunft über die Verteilung der Gesamtenergie (Masse) auf die drei Valenzquarks, woraus sich Rückschlüsse auf die Dynamik der Quarks ziehen lassen. Abbildung 4 zeigt die Distributionsamplitude des Protons bei einer Auflösung von $\mu=0.1$ Fermi als Funktion der relativen Energien der Quarks [4], worin x_i die Energie des konstituierenden up Quarks bezeichnet und x_2, x_3 die Energien der up und down Zuschauer-Quarks ($x_1+x_2+x_3=1$). Es zeigt sich, dass praktisch die Hälfte der Energie auf das konstituierende up Quark entfällt ($x_1 \approx 0.5$), während die Zuschauer-Quarks stark gebunden sind und jeweils nur ein Viertel der Gesamtenergie ausmachen ($x_2 \approx x_3 \approx 0.25$).

Trotz einiger Teilerfolge ist die innere Struktur der Hadronen, insbesondere der Ursprung des Spins des Nukleons, weitgehend unerforscht. Neuere theoretische Konzepte ermöglichen es,

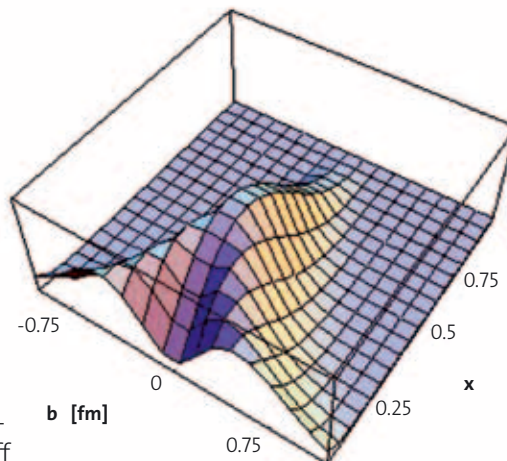


Abb. 5: Die Partonverteilung des up Quarks im Proton als Funktion der relativen Energie x und des Abstandes b vom Schwerpunkt des Protons (in Fermi).

die Verteilung von Ladung und Spin im Nukleon dreidimensional darzustellen [5], in Form von verallgemeinerten Partonverteilungen. Abbildung 5 zeigt die Wahrscheinlichkeit, ein up Quark mit Relativenergie x im Abstand b vom Zentrum des Protons zu finden bei einer Auflösung von 0.1 Fermi. Während die energieschwachen Quarks ($x \rightarrow 0$) breit über die gesamte Ausdehnung des Protons verteilt sind, halten sich die energiereichen Quarks ($x \rightarrow 1$) vornehmlich im Zentrum des Protons auf. Verallgemeinerte Partonverteilungen (wie in Abb. 5 gezeigt) sind nicht direkt experimentell zugänglich. Hier sind Gittersimulationen ein besonders gesuchtes Werkzeug, um zu verstehen, wie die Quantenchromodynamik letztendlich funktioniert.

Simulationen zur Erforschung der Struktur der Hadronen gehören zu den schwierigsten Aufgaben der LQCD. Als Gegenleistung erhält man jedoch Einsichten von unschätzbarem Wert in die Dynamik der Bausteine der Materie. Untersuchungen der Struktur der Hadronen werden uns noch über Jahre hinaus beschäftigen.

DER AUTOR

Der Teilchenphysiker Prof. Dr. Gerrit Schierholz forscht am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) der Helmholtz-Gemeinschaft. Die Ergebnisse seiner Arbeiten basieren u. a. auf Berechnungen am Höchstleistungsrechner des Leibniz-Rechenzentrums.

Literatur

- [1] E.-M. Ilgenfritz et al., Physical Review D76 (2007), 034506; V. Weinberg, DESY-THESIS-2008-055
- [2] H. Ishie et al., Nuclear Physics A721 (2003), 899
- [3] W. Bietenholz et al., Physical Review D84 (2011), 054509
- [4] V. Braun et al., Physical Review D79 (2009), 034504; PoS LATTICE2011 (2011), 175
- [5] A. Sternbeck et al., PoS LATTICE2011 (2011), 177