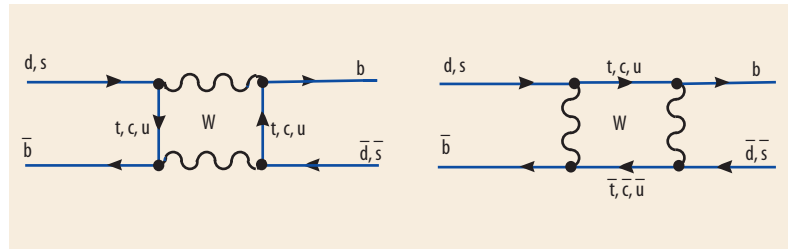


Warum gibt es Materie im Universum?

Die D0-Kollaboration am Fermilab misst eine unerwartet hohe CP-Verletzung, die zur Baryonenasymmetrie im Universum beitragen könnte.

Eine der großen unbeantworteten Fragen der Urknalltheorie ist der Ursprung der Materie. Besteht das frühe Universum nur aus Energie, so kann diese durch Paarerzeugung exakt gleich große Mengen von Materie und Antimaterie bilden. Dies erzeugt demnach nicht den beobachteten Überschuss an Materie im Vergleich zu Antimaterie – man spricht hier von Baryonenasymmetrie. Beginnt der Kosmos dagegen mit einer ungleichen Menge von Materie und Antimaterie, löscht die inflationäre Phase diese Asymmetrie fast vollkommen aus.

Der russische Physiker und Dissident Andrei Sakharov fand 1967 eine Lösung zu diesem Problem [1]: Die fundamentalen Gesetze der Physik müssen unter anderem die Paritätssymmetrie P (Raumspiegelung) und die CP-Symmetrie (Ladungskonjugation und Raumspiegelung) verletzen, dann kann sich eine Baryonenasymmetrie dynamisch aus symmetrischen Anfangsbedingungen ergeben. Wenige Jahre zuvor waren diese Symmetrieverletzungen zur Überraschung vieler Teilchenphysiker gefunden worden: 1955 hatten



Neutrale B-Mesonen, bestehend aus einem Anti-b- und einem d- (B_d) oder s-Quark (B_s), gehen durch den Austausch von Quarks und W-Bosonen spontan in

ihre Antiteilchen über und umgekehrt. Der Effekt wird Flavor-Oszillation genannt.

Lee und Yang die Verletzung der P-Symmetrie in der schwachen Wechselwirkung postuliert, kurz darauf hatte u. a. Wu den Effekt nachgewiesen; 1964 hatten Christenson, Cronin, Fitch und Turlay einen kleinen CP-verletzenden Effekt beim Zerfall von Kaonen gefunden. Die Anwendung der CP-Transformation auf einen beliebigen Teilchenprozess entspricht der komplexen Konjugation der auftretenden Kopplungen. Sind alle Kopplungen einer Theorie reell, erhält sie die CP-Symmetrie.

Der nächste Schritt bestand darin, die CP-Verletzung mittels einer komplexen Kopplungskonstanten in die physikalischen Grundgleichungen einzubauen. Dies gelang

Kobayashi und Maskawa 1973 [2]. Zu dieser Zeit kannte man drei verschiedene Quarks: das Up- und Down-Quark, aus denen die Nukleonen bestehen, sowie das Strange-Quark, das in den „seltsamen“ Kaonen vorkommt. Um eine komplexe Kopplung zu erhalten, postulierten Kobayashi und Maskawa drei Fermionfamilien mit insgesamt sechs verschiedenen Quarks – ihr Modell wird als CKM-Mechanismus bezeichnet. Neben den drei bekannten sollte es noch das Charm-, das Bottom- und das Top-Quark geben. Tatsächlich tauchten diese drei in den immer leistungsfähiger werdenden Teilchenbeschleunigern in den folgenden Jahren auf. Dennoch galt der CKM-Mechanismus lange Zeit als spekulativ. Erst als Ende der 1990er-Jahre zwei große so genannte B-Fabriken in Stanford, USA, und am KEK in Japan ihre Arbeit aufnahmen, bestätigten sie ihn endgültig.

30 Prozent Raum für Korrekturen

In den B-Fabriken fand man im Einklang mit dem CKM-Mechanismus zahlreiche große CP-verletzende Effekte bei den B-Mesonen, das sind Quark-Antiquark-Bindungszustände, die ein Bottom-Quark enthalten. Die Übereinstimmung von Theorie und Experiment lässt aber gegenwärtig immer noch Raum für Korrekturen am CKM-Mechanismus von bis zu 30 Prozent.

Trotz dieser und weiterer zahlreicher Erfolge lässt das Standard-

KURZGEFASST

Gravitationskonstante ausgependelt

Zwei neue Resultate für die Gravitationskonstante G liegen drei bzw. enorme zehn Standardabweichungen unterhalb des vom Committee on Data for Science and Technology (CODATA) empfohlenen Richtwerts von $6,67428 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. Systematische Fehler an den Messungen der Gruppen in den USA und China, die mithilfe eines Laserinterferometers an einem Torsionspendel bzw. mit Präzisionszeitnahmen an einem solchen Pendel gemacht wurden, sind bislang nicht bekannt, sodass sich die Diskrepanzen noch nicht erklären lassen. Der nächste CODATA-Richtwert dürfte nun nach der Neufestlegung Anfang 2011 niedriger ausfallen. *J. Luo et al., Phys. Rev. Lett.* **102**, 240801 (2009); *H. V. Parks und J. E. Faller, Phys. Rev. Lett.* **105**, 110801 (2010)

Heiße Brownsche Bewegung

Physiker der Universität Leipzig erklären anhand einer analytischen Beschreibung, wie die Brownsche Zickzackbewegung von Teilchen abläuft, wenn diese wärmer sind als die Lösung, in der sie sich befinden. Dann sind nicht mehr die Temperatur und die Zähigkeit der umgebenden Flüssigkeit entscheidend, sondern von der neuen Theorie vorgegebene effektive Werte. Mittels Goldnanopartikeln, die ein Laser heizt und ein zweiter verfolgt, bestätigten die Leipziger ihre Berechnungen experimentell. Die neuen Erkenntnisse zeigen auf, wie genau die Bewegungen solcher „Nanoheizquellen“ manipuliert werden können. *D. Rings et al., Phys. Rev. Lett.* **105**, 090604 (2010)

modell der Teilchenphysik viele Fragen offen und es fehlen Bausteine der Natur, wie die Teilchen der dunklen Materie. Auch reichen die im Standardmodell enthaltenen CP-verletzenden Kopplungen nicht aus, um das Ausmaß der Baryonenasymmetrie im Universum zu erklären; hierzu sind weitere, neue Quellen der CP-Verletzung erforderlich. Daher sucht man aktuell nach Erweiterungen des Standardmodells, die das bisherige Modell im Grenzfall kleiner Energien ergeben. Diese Anstrengungen laufen unter dem Namen „Suche nach neuer Physik“ – ein Hauptmotiv für den Bau des großen Teilchenbeschleunigers LHC am CERN bei Genf, der kürzlich in Betrieb ging.

Im Standardmodell wandelt sich ein B_s -Meson (Strange- und Anti-Bottom-Quark) über den Austausch von zwei W-Bosonen und zwei Quarks in ein Anti- B_s -Meson um (Abb.). Dabei dominiert der Austausch eines Top-Quarks. Das einfachste Modell für neue

Physik besteht darin, die drei bekannten Teilchenfamilien um eine weitere zu ergänzen, d. h. um ein zusätzliches t' -Quark (gleiche Quantenzahlen wie das Top-Quark, aber schwerer) und ein b' -Quark. Entsprechend muss man für die Bestimmung der Umwandlungsrate von B_s -Mesonen in Anti- B_s -Mesonen neben bisherigen Diagrammen noch eines berücksichtigen, bei dem ein t' die Rolle des t-Quarks übernimmt. Dabei gilt zu beachten, dass sich bei diesem neuen Physikmodell auch die Kopplungen der ursprünglichen Diagramme ändern.

Diese beiden Effekte – neue Teilchen in den zum Prozess beitragenden Diagrammen und Änderung der Kopplungen der ursprünglichen Standardmodellldiagramme – können in den meisten neuen Physikmodellen, z. B. der supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells, auftreten. Eine Strategie bei der Suche nach neuer Physik besteht darin, Präzi-

sionsrechnungen im Rahmen des Standardmodells mit Präzisionsmessungen zu vergleichen. Eine signifikante Abweichung wird dann als Beitrag von Neuer Physik interpretiert. Die Crux dabei ist, die Unsicherheiten bei der Theorie und beim Experiment sehr genau unter Kontrolle zu halten. Bei den Rechnungen erschwert meist schon die Berücksichtigung der starken Wechselwirkung – der Quantenchromodynamik – dieses Vorhaben beträchtlich. Derartige Präzisionsrechnungen wurden z. B. für CP-Asymmetrien von semileptonischen Zerfällen neutraler B-Mesonen (hier treten neben einem Meson im Endzustand auch Leptonen wie das Elektron auf) durchgeführt. Dabei muss man auch die in der Abb. gezeigten Diagramme berücksichtigen. Um QCD-Effekte unter Kontrolle zu haben, versieht man die Diagramme mit zusätzlichen Gluonen und entwickelt anschließend die Zerfallsraten in inversen Potenzen der Bottom-Quark-Masse

Prof. Dr. Alexander Lenz, Theoretische Physik, Technische Universität Dortmund, Otto-Hahn-Str. 4, 44227 Dortmund, und Institut für theoretische Physik, Universität Regensburg, Universitätsstraße 31, 93053 Regensburg

(Heavy Quark Expansion). Das Endergebnis sind verschwindend kleine Werte für die semileptonischen CP-Asymmetrien.

Mitte Mai stellte die D0-Kollaboration am Fermilab bei Chicago einen CP-verletzenden Effekt bei diesen Asymmetrien vor [3], der 42-mal größer ist als die Standardmodellvorhersage [4]. Die statistische Signifikanz dieser Abweichung beträgt 3,2 Sigma. Ab drei Sigma spricht man von einer Evidenz für ein Phänomen, die Erfahrung zeigt jedoch, dass sich auch Drei-Sigma-Effekte immer wieder in Wohlgefallen auflösen. Endgültige Klarheit darüber, ob dieser große Effekt

in der Natur wirklich vorkommt, müssen weitere Messungen am Tevatron sowie die ersten Resultate des LHCb-Experiments bringen.

Dennoch wurde bereits darüber spekuliert, ob dieser riesige Effekt möglicherweise den Ursprung der Materie erklären könnte, indem er die fehlende „Menge“ an CP-Verletzung liefert. In etlichen Theoriearbeiten, die seit dem D0-Ergebnis erschienen sind, untersuchten die Autoren verschiedene Modelle der neuen Physik als mögliche Ursache für den großen CP-verletzenden Effekt. Viele dieser Modelle enthalten zwar nennenswerte CP-verletzende Effekte, sie liegen jedoch meist

unter dem Wert der D0-Messung. Weitere theoretische Arbeiten und präzisere Messungen müssen nun zeigen, ob der bei D0 gemessene Effekt das Rätsel der Baryonenasymmetrie lösen kann.

Alexander Lenz

- [1] A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **5**, 32 (1967); JETP Lett. **5** (1967) 24
- [2] M. Kobayashi und T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973)
- [3] V. M. Abazov et al. (D0 Collaboration), Phys. Rev. D **82**, 032001 (2010); V. M. Abazov, et al. (D0 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 081801 (2010)
- [4] A. Lenz und U. Nierste, JHEP **0706**, 072 (2007)

■ Lückenschluss an der Oberfläche

Experimente an Bi_2Se_3 -Kristallen ergaben, dass sich die Zustände an der Oberfläche topologischer Isolatoren als Dirac-Fermionen beschreiben lassen.

Seit ein paar Jahren sorgt in der Festkörperphysik eine neue Materialklasse für Furore – die topologischen Isolatoren (für aktuelle Übersichtsartikel siehe [1]). Im Volumen verhalten sich diese „Zwitermaterialien“ wie gewöhnliche Isolatoren, aber am Rand wie Metalle (Abb. 1). Nach der Theorie entsprechen die metallischen Randzustände Dirac-Fermionen, also masselosen ultrarelativistischen Teilchen mit einer linearen Energie-Impuls-Relation, ganz ähnlich wie das für Elektronen in Graphen der Fall ist [2].¹⁾ Vor kurzem ist es zwei Arbeitsgruppen in China und Japan unabhängig voneinander gelungen, den spektakulären Nachweis von solchen Dirac-Fermionen an der Oberfläche eines topologischen Isolators zu erbringen [3, 4].

Ein den topologischen Isolatoren verwandtes Phänomen ist vom Quanten-Hall-Effekt (QHE) bekannt [5]. Aufgrund eines starken Magnetfelds, das senkrecht zu einem zweidimensionalen Elektroengas anliegt, lokalisieren darin die Volumenzustände, tragen also nicht zum Stromfluss bei, während weiterhin leitende Randzustände existieren. In topologischen Isolatoren treten solche Randzustände

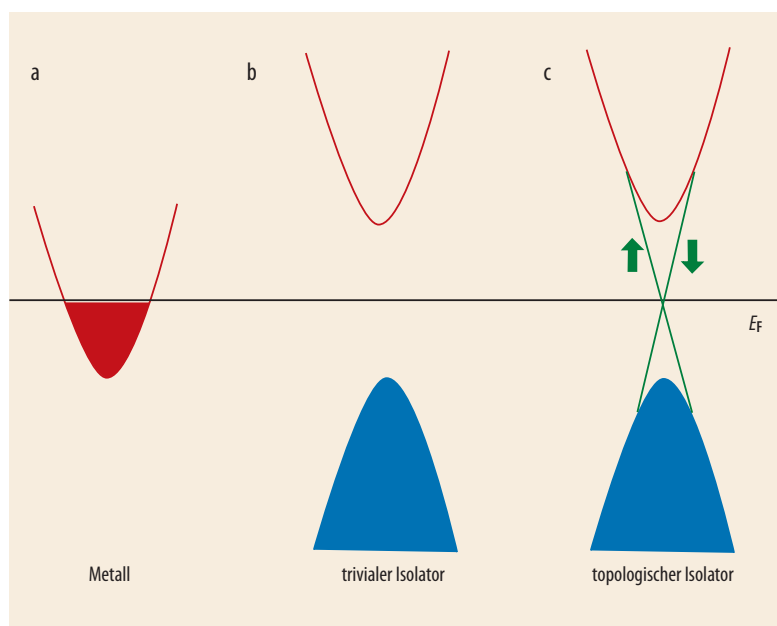


Abb. 1 Die Bandstrukturen eines Metalls (a), eines trivialen Isolators (b) und eines topologischen Isolators (c) unterscheiden sich auf charakteristische Weise. E_F bezeichnet die Fermi-Energie, unterhalb derer alle Zustände besetzt sind. Die Rand-

zustände des topologischen Isolators (grün) liegen in der Bandlücke zwischen Leitungs- (rot) und Valenzband (blau). Sie sind Dirac-Fermionen und beschreiben immer Paare von Zuständen mit entgegengesetztem Spin (grüne Pfeile).

auch ohne den Einfluss externer Felder auf, und zwar immer in Paaren mit entgegengesetztem Spin-Freiheitsgrad. Diese Tatsache erweist sich als besonders wichtig für die Stabilität der Randzustände gegenüber der Streuung an Störstellen.

Was ist eigentlich das Topologische an diesen Isolatoren? Mathematiker nutzen das Konzept der Topologie, um geometrische Körper unter Dehnungen oder Stauchungen (Homöomorphismen) zu klassifizieren. Beispielsweise haben eine Kugel und ein Teller

1) Allerdings existieren in Graphen noch zusätzliche Entartungen durch Valley- und Spin-Freiheitsgrade.