

# Charmante Verletzung

Der Nachweis der CP-Verletzung von Charm-Quarks bestätigt das Standardmodell – und öffnet eine Tür für die Suche nach Physik jenseits davon.

Ulf-G. Meißner

Die Dominanz von Materie über Antimaterie im Universum, die so genannte Baryonenasymmetrie, ist eines der großen Rätsel der Physik. Während zum Beispiel Wasserstoff in großen Mengen vorkommt, bedarf es komplexer und langwieriger Experimente, um Antiwasserstoff, bestehend aus einem Antiproton und einem Positron, im Labor herzustellen [1]. Seit der grundlegenden Arbeit von Andrei Sakharov im Jahr 1967 ist bekannt, dass eine der notwendigen Bedingungen für das Entstehen der Baryonenasymmetrie die Brechung der CP-Symmetrie ist [2]. Demnach führt eine Kombination von Ladungsumkehr und Paritätstransformation (Umkehr der räumlichen Koordination) zu abweichenden Ergebnissen. Im Standardmodell der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen, den Quarks und Leptonen, sind die starke und die elektromagnetische Kraft symmetrisch unter CP-Transformationen. Zwar führt die nichttriviale Struktur des Eichfeldvakuums der starken Wechselwirkung zu einer schwachen Verletzung der CP-Symmetrie. Der entsprechende Parameter ist aber so winzig [3], dass die Verletzung der CP-Symmetrie im Standardmodell ausschließlich der schwachen Wechselwirkung obliegt.

Die CP-Verletzung in der schwachen Wechselwirkung wurde 1964 am Brookhaven National Laboratory (New York, USA) erstmals in der Reaktion  $K_L^0 \rightarrow \pi\pi$  nachgewiesen [4]. James Cronin und Val Fitch erhielten dafür 1980 den Physik-Nobelpreis. Ein stärkerer Effekt zeigte sich Anfang des Jahrtausends in den Zerfällen von B-Mesonen, die ein schweres Beauty-Quark (b-Quark) enthalten [5, 6]. Dies steht im Einklang mit dem Modell von Cabibbo, Kobayashi und Maskawa (CKM) [7]. Darin sind die Quarkfelder gemischt: Die

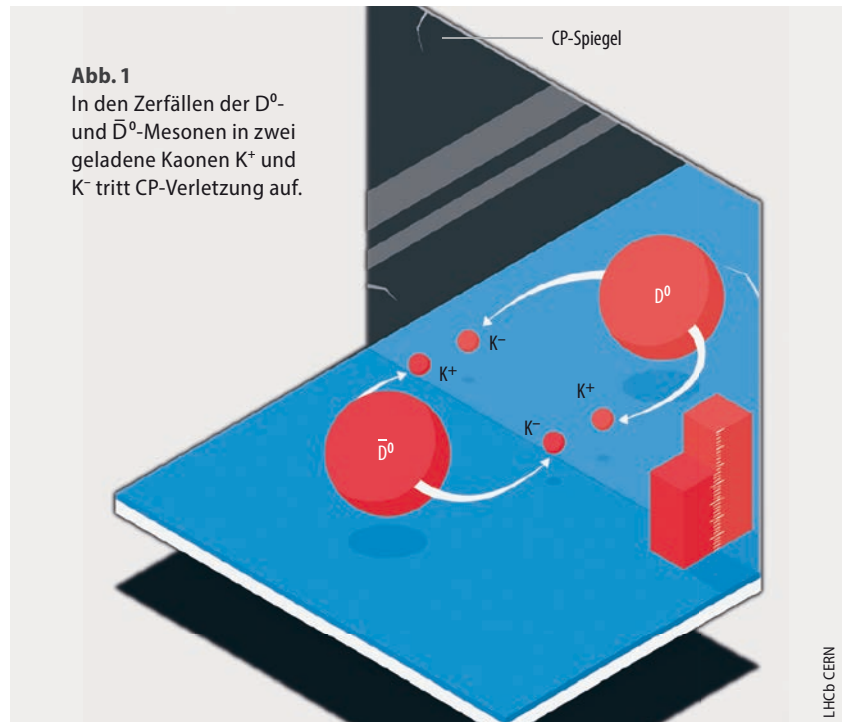


Abb. 1

In den Zerfällen der  $D^0$ - und  $\bar{D}^0$ -Mesonen in zwei geladene Kaonen  $K^+$  und  $K^-$  tritt CP-Verletzung auf.

Eigenzustände in der Massen- und in der Flavorbasis sind nicht identisch. Das entspricht der Mischung, die von den verschiedenen Neutrinotypen wohlbekannt ist. Damit lässt sich die Wahrscheinlichkeit parametrisieren, dass sich beispielsweise ein b-Quark in ein Up-Quark (u-Quark) umwandelt. Wenn die CP-Symmetrie verletzt ist, unterscheidet sich diese Wahrscheinlichkeit von derjenigen, dass die Antiteilchen transformieren, also aus einem  $\bar{b}$ -Quark ein  $\bar{u}$ -Quark wird. Im Standardmodell beschreibt dies die CKM-Matrix, für deren Entwicklung Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa 2008 den Physik-Nobelpreis erhielten. Diese im Standardmodell enthaltene CP-Verletzung ist allerdings viel zu schwach, um die Baryonenasymmetrie zu erklären.

Die erwartete Asymmetrie muss sich in einem Unterschied der Zerfallsstärken von Mesonen im Vergleich zu ihren Antiteilchen zeigen. In Systemen mit seltsamen Quarks

(s-Quarks) hat die Abweichung eine Größenordnung von  $10^{-3}$ , während sie für Mesonen mit b-Quarks Werte bis zu 0,7 erreichen kann. Dies beruht auf der wesentlich höheren Masse des b-Quarks. Das s-Quark und das b-Quark besitzen genau wie das Down-Quark eine Ladung von  $-e/3$ . Das CKM-Modell sagt für Systeme mit Quarks der Ladung  $+2e/3$  wesentlich kleinere CP-Verletzungen voraus. Beispielsweise wird in Zerfällen von Mesonen, die ein Charm-Quark (c-Quark) enthalten, mit Asymmetrien von  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$  gerechnet [8]. Daher blieben bisher weltweit alle Versuche erfolglos, die CP-Asymmetrie in Zerfällen von D-Mesonen, den leichtesten Teilchen, die ein c-Quark enthalten, und ihren Antiteilchen nachzuweisen: Alle Ergebnisse waren konsistent mit Null.

Weil der erwartete Effekt sehr klein ist, muss die Anzahl der untersuchten D- und  $\bar{D}$ -Mesonen sehr groß sein, um die Asymmetrie mit hinrei-

chender Signifikanz nachzuweisen – Millionen solcher Zerfälle gilt es zu beobachten. Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN ist eine äußerst effektive Charm-Fabrik: Dort entstehen aufgrund der hohen Kollisionsenergie der Protonen große Mengen an D- und  $\bar{D}$ -Mesonen sowie anderer Teilchen mit c-Quarks. Der LHCb-Detektor ist speziell konstruiert [9], um Teilchen mit c- und b-Quarks effizient nachzuweisen. Einzigartige Möglichkeiten der Teilchenidentifikation erlauben es insbesondere, Teilchen und ihre Antiteilchen extrem zuverlässig zu separieren.

Dadurch gelang der LHCb-Kollaboration vor kurzem die erste Messung von CP-Verletzung in Zerfällen von Charm-Quarks [10]. Um systematische Fehler zu minimieren, wurden die Zerfälle neutraler D-Mesonen ( $D^0$ ) und ihrer Antiteilchen ( $\bar{D}^0$ ) in zwei Endzustände  $f$  genauestens vermessen. Für den Endzustand mit zwei geladenen Kaonen  $K^+$  und  $K^-$  (Abb. 1) und mit zwei geladenen Pionen  $\pi^+$  und  $\pi^-$  wurde die Asymmetrie

$$A(f) = \frac{N(D^0 \rightarrow f) - N(\bar{D}^0 \rightarrow f)}{N(D^0 \rightarrow f) + N(\bar{D}^0 \rightarrow f)}$$

bestimmt. Hierbei ist  $N$  die Anzahl der beobachteten Zerfälle, die an LHCb für  $f = K^+K^-$  etwa 53 Millio-

nen betrug. Die Differenz der Asymmetrien der beiden Endzustände  $A(K^+K^-) - A(\pi^+\pi^-)$  ergibt sich zu  $(-1,54 \pm 0,29) \times 10^{-3}$ . Dies ist 5,3 Standardabweichungen von Null verschieden und etabliert somit die CP-Verletzung für Charm-Quarks. Dieser Wert ist mit den meisten Rechnungen im Standardmodell verträglich, wenn auch am oberen Ende.

Das Standardmodell ließ sich demnach mit einer weiteren Messung bestätigen. Das ist aber alles andere als langweilig! Weil hier die CP-Verletzung so klein ist, öffnet das Ergebnis ein weiteres Fenster zur Suche nach der Physik jenseits des Standardmodells. Viele dieser Modelle sagen eine CP-Verletzung der Größenordnung  $10^{-3}$  voraus, die sich in Systemen mit c-Quarks viel leichter bemerkbar machen sollte als in Zerfällen von Mesonen, die s- oder b-Quarks enthalten. Die bisherige Genauigkeit der Messung reicht zwar noch nicht für weitere Schlüsse aus, aber eine verbesserte Datensammlung und damit höhere Statistik könnten Mesonen mit c-Quarks zu einem weiteren Labor machen, um nach der notwendigen CP-Verletzung jenseits des Standardmodells zu suchen. Damit tragen die c-Quarks nochmals zu unserem Verständnis der subatomaren Physik bei.

Nun bleibt die Frage, welche Art von Präzisionsmessung zuerst die CP-Verletzung über das CKM-Modell hinaus etablieren wird. Das Wettrennen zwischen vielen Laboratorien weltweit ist in vollem Gange.

[1] G. Baur et al., Phys. Lett. B **368**, 251 (1996); M. Amoretti et al., Nature **419**, 456 (2002)  
 [2] A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **5**, 32 (1967) [JETP Lett. **5**, 24 (1967)]  
 [3] F.-K. Guo et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 062001 (2015)  
 [4] J. H. Christenson et al., Phys. Rev. Lett. **13**, 138 (1964)  
 [5] B. Aubert et al. [BaBar Collaboration], Phys. Rev. Lett. **87**, 091801 (2001)  
 [6] K. Abe et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. **87**, 091802 (2001)  
 [7] M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973)  
 [8] I. I. Bigi and A. I. Sanda, Camb. Monogr. Part. Phys. Nucl. Phys. Cosmol. **9**, 1 (2009)  
 [9] A. A. Alves, Jr. et al. [LHCb Collaboration], JINST **3**, S08005 (2008)  
 [10] R. Aaij et al. [LHCb Collaboration], Phys. Rev. Lett. **122**, 211803 (2019)

## Autor

**Prof. Dr. Ulf-G. Meißner**, Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik, Bethe Center for Theoretical Physics, U Bonn, 53115 Bonn und Institute for Advanced Simulation, Institut für Kernphysik, Jülich Center for Hadron Physics, FZ Jülich, 52425 Jülich

## Kurzgefasst

### Rekord vom Krebsnebel

Als Überrest der bei Tag sichtbaren Supernova 1054 strahlt noch heute der Krebsnebel im Sternbild Stier. Auch Photonen mit Energien im TeV-Bereich stammen von dort. Kürzlich hat ein japanisch-chinesisches Team eine Rekordenergie von mehr als 100 TeV nachgewiesen. Die Forscher nutzten das Tibet Air Shower Array in Yangbajing, China, um Richtung und Energie der Photonen zu bestimmen. Mit dem Tibet Muon Detector Array sortierten sie muoneninduzierte Ereignisse aus.

M. Amenomori et al. (Tibet ASy Collaboration), Phys. Rev. Lett. **123**, 051101 (2019)

### Hochpräzise Falle

Mit der doppelten Penning-Ionenfalle Alphaspektroskopie ist es Physikern vom MPI für Kernphysik in Heidelberg gelungen, den

$g$ -Faktor eines Bor-ähnlichen Ions mit fünf Elektronen mit einer bisher nicht erreichten Unsicherheit von  $1,4 \cdot 10^{-9}$  zu bestimmen. Dazu berechneten sie die Magnetisierung 13-fach geladener Argon-Ionen aus einer Frequenzmessung mit Alphaspektroskopie. Hochpräzise QED-Rechnungen stimmen mit dem Wert von  $g = 0,66364845532(93)$  bis auf die siebte Dezimalstelle überein. Das ebnet den Weg für eine präzise Messung der Feinstrukturkonstanten.

I. Arapoglou et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 253001 (2019)

### Rotierende Moleküle

Ein 125 Pikosekunden langer Film zeigt, wie ein Carbonylsulfid-Molekül um die eigene Achse rotiert. Die einmalige Aufnahme setzt sich aus 651 Einzelbildern zusammen. Federführend waren Physiker vom DESY Ham-

burg und vom Berliner Max-Born-Institut an dem Experiment beteiligt. Zwei zeitlich abgestimmte Infrarotlaserpulse versetzten die Moleküle in kohärente Rotation. Ein weiterer langwelliger Laserpuls diente dazu, die Lage der Moleküle zu bestimmen. Viele Bilder zeigen quantenmechanische Effekte wie die Unschärferelation, wenn das Molekül gleichzeitig in verschiedene Lagen ausgerichtet erscheint.

E. T. Karamatskos et al., Nat. Commun. **10**, 3364 (2019)

