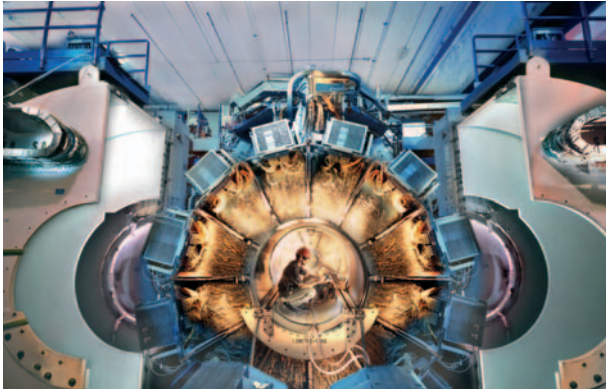


Neue Ergebnisse zur CP-Verletzung

Die CP-Verletzung wurde 1964 in Zerfällen neutraler K-Mesonen entdeckt und ist seither ein zentraler Aspekt der Elementarteilchenphysik. Unter diesem Phänomen versteht man die Tatsache, dass die schwache Wechselwirkung nicht invariant ist unter einer kombinierten Ladungskonjugations- und Paritäts-Transformation, bei der alle an ei-



Der BaBar-Detektor am SLAC in Stanford dient der Analyse von Zerfällen von B-Mesonen und ermöglicht damit ein tieferes Verständnis der CP-Verletzung (Foto: SLAC).

nem Prozess beteiligten Teilchen in ihre Antiteilchen übergehen (C) und gleichzeitig eine Raumspiegelung (P) durchgeführt wird. Sacharow erkannte 1967, dass die CP-Verletzung eine der drei Voraussetzungen dafür ist, dass im Universum eine Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie entsteht. Sie ist somit für unsere Existenz von unmittelbarer Bedeutung.

Die Erforschung der CP-Verletzung ist das Hauptziel der Experimente BaBar und Belle, die an den Beschleunigerzentren SLAC (USA) bzw. KEK (Japan) von internationalen Kollaborationen – unter Beteiligung deutscher Physiker – durchgeführt werden [1]. Die Beschleuniger erzeugen durch die Kollision von Elektronen und Positronen Paare von B- und \bar{B} -Mesonen, deren Zerfälle in leichtere Teilchen dann in den BaBar- und Belle-Detektoren analysiert werden. Die B-Mesonen sind Bindungszustände eines schweren \bar{b} -Quarks mit einem leichten u-, d- oder s-Quark, und können durch die schwache Wechselwirkung beispielsweise in Endzustände mit Pionen oder Kaonen zerfallen. Bei BaBar und Belle sind nur die entsprechenden B_u^+ - und B_d^0 -Mesonen zugänglich, während Hadroncollider das System der B_s^0 -Mesonen erschließen werden, insbesondere der LHC am CERN durch das LHCb-Experiment.

Im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik hängt die CP-Verletzung eng mit der Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM) zusammen [2]. Diese „Quarkmischungsmatrix“ beschreibt, wie stark die verschiedenen Quarks bei Prozessen der schwachen Wechselwirkung an die W^\pm -Bosonen koppeln. Dabei kann beispielsweise ein b-Quark durch Aussendung eines W^- -Bosons in ein u-Quark übergehen. Wie von Kobayashi und Maskawa 1973 gezeigt wurde, lässt sich die CP-Verletzung auf eine komplexe Phase in der Parametrisierung dieser unitären Matrix zurückführen – vorausgesetzt, es gibt (mindestens) drei Fermionengenerationen.

Dieser Mechanismus lässt sich auf elegante Weise durch das „Unitaritätsdreieck“ mit den Winkeln α , β und γ charakterisieren; sollte die CP-verletzende Phase in der CKM-Matrix verschwinden, so würde dieses Dreieck einfach zu einer Linie kollabieren. Die Winkel α , β und γ lassen sich einerseits aus CP-verletzenden Asymmetrien in B-Zerfällen direkt bestimmen. Andererseits ist es auch möglich, die Seiten des Unitaritätsdreiecks mittels CP-erhaltender Prozesse zu messen und daraus die Winkel indirekt zu gewinnen. Meist wird in diesen „CKM-Fits“ auch die CP-Verletzung im neutralen K-System berücksichtigt.

Die zentrale Frage ist nun, ob wir letztlich ein konsistentes Bild für das Unitaritätsdreieck erhalten oder auf Widersprüche stoßen, deren Ursprung jenseits des Standardmodells liegen könnte. Szenarien für „neue“ Physik sind meist auch mit neuen CP-verletzenden Prozessen verbunden, die sich experimentell in schwachen Zerfällen von Mesonen äußern können. Außerdem deuten Modellrechnungen zur Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie darauf hin, dass die CP-Verletzung im Standardmodell nicht ausreicht, um die beobachtete Baryon-Asymmetrie im Universum zu erklären. Allerdings könnten hier auch bisher unbekannte CP-verletzende Effekte bei sehr hohen Energien die zentrale Rolle spielen [3].

Die Messungen der BaBar- und Belle-Kollaborationen ermöglichten bereits 2001 den Nachweis CP-verletzender Effekte in den Zerfällen $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_S$ und $\bar{B}_d^0 \rightarrow J/\psi K_S$, für die eine theoretisch saubere Bestimmung der Größe $\sin 2\beta$ möglich ist. Dies war die erste Evidenz für CP-Verletzung außerhalb des

Systems der K-Mesonen und ein Meilenstein in der Erforschung dieses Phänomens. Die kürzlich [4] veröffentlichten neuen BaBar- und Belle-Ergebnisse sind in sehr beeindruckender Weise miteinander konsistent und entsprechen einem Weltmittelwert von $(\sin 2\beta)_{\psi K} = 0,725 \pm 0,037$, der perfekt mit den CKM-Fits übereinstimmt. Wie die BaBar-Kollaboration jetzt durch Analyse spezieller Zerfälle zeigen konnte, wird die Lösung $2\beta \sim 46^\circ$, die dem Standardmodell entspricht, mit großer Wahrscheinlichkeit gegenüber $2\beta \sim 134^\circ$, was auf neue Physik hinweisen würde, bevorzugt.

Für die bisher im B-System nachgewiesene CP-Verletzung spielt die B_d^0 - \bar{B}_d^0 -Mischung eine Schlüsselrolle, denn dadurch geht beispielsweise ein ursprünglich vorhandenes B_d^0 -Meson im Laufe der Zeit in eine Linearkombination aus B_d^0 und \bar{B}_d^0 über. Da nun sowohl B_d^0 - als auch \bar{B}_d^0 -Mesonen in den selben Endzustand $J/\psi K_S$ zerfallen können, kommt es durch die B_d^0 - \bar{B}_d^0 -Mischung zu Interferenzeffekten, die wiederum – im Rahmen des Standardmodells aufgrund der Phase in der CKM-Matrix – eine „mischungsinduzierte“ CP-Verletzung in den gemessenen, zeitabhängigen Übergangsraten zur Folge haben.

Darüber hinaus gibt es jedoch auch die „direkte“ CP-Verletzung. Dieser Effekt hat *nichts* mit der genannten Mischung oder der analogen K^0 - \bar{K}^0 -Mischung zu tun und tritt stets dann auf, wenn ein Zerfall über mindestens zwei verschiedene dynamische Prozesse abläuft, die sich insbesondere durch ihre CP-verletzenden schwachen Phasen (resultieren im Standardmodell aus der CKM-Matrix) und starken Phasen (Einfluss der starken Wechselwirkung) unterscheiden. Durch das Zusammenspiel dieser Beiträge entsteht dann – direkt in den entsprechenden Zerfallsamplituden – eine CP-verletzende Asymmetrie.

Nachdem die direkte CP-Verletzung 1999 von den NA48 (CERN) und KTeV (FNAL) Kollaborationen in Zerfällen neutraler K-Mesonen entdeckt wurde [5], gelang es in diesem Sommer sowohl an BaBar als auch an Belle, sie auch im B-System zu beobachten [6, 7]. Diese Entdeckung wurde durch die Analyse der Zerfälle $B_d^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ sowie den hierzu CP-konjugierten Prozessen $\bar{B}_d^0 \rightarrow K^- \pi^+$ möglich. Da ein B_d^0 -Meson nicht in den Endzustand $K^- \pi^+$ zerfallen kann, tritt hier – im

Dr. Robert Fleischer, CERN, Department of Physics, Theory Division, CH-1211 Genf 23

Gegensatz zu $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_S$ – keine Mischung induzierte CP-Verletzung auf. Wie ein genaueres theoretisches Studium zeigt, sollten jedoch die Voraussetzungen für direkte CP-Verletzung in den Zerfällen $B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-$ im Standardmodell erfüllt sein. Die Physiker der BaBar-Kollaboration suchten in 227 Millionen $B\bar{B}$ -Paaren nach diesen Prozessen und fanden insgesamt 1606 ± 51 Ereignisse, davon 910 Zerfälle $B_d^0 \rightarrow K^+\pi^-$ sowie 696 Zerfälle $\bar{B}_d^0 \rightarrow K^-\pi^+$. Die CP-verletzende Asymmetrie (Differenz durch Summe der Ereignisse) beträgt $A_{CP} = -0,133 \pm 0,030$ (stat) $\pm 0,009$ (syst). Dieses einfache Zählexperiment macht das unterschiedliche Verhalten der B_d^0 - und \bar{B}_d^0 -Mesonen und die direkte CP-Verletzung offensichtlich. Das neueste Resultat der Belle-Kollaboration ist damit konsistent und lautet $A_{CP} = -0,101 \pm 0,025$ (stat) $\pm 0,005$ (syst). Interessante Hinweise von Belle auf eine große direkte CP-Asymmetrie in $B_d^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ -Zerfällen [8] wurden von BaBar bislang noch nicht bestätigt.

Die theoretische Interpretation von A_{CP} ist aufgrund des Einflusses

der starken Wechselwirkung problematisch. Diese Effekte lassen sich jedoch mit Hilfe der SU(3)-Flavoursymmetrie und den Messdaten für $B \rightarrow \pi\pi$ -Zerfälle berücksichtigen. Das hieraus resultierende Bild stimmt mit den neuen experimentellen Resultaten überein, so dass auch die direkte CP-Verletzung in den $B_d \rightarrow \pi^\mp K^\pm$ -Zerfällen dem Standardmodell keine Probleme zu bereiten scheint [9].

Jedoch gibt es auch Hinweise auf mögliche Widersprüche zum Kobayashi-Maskawa-Mechanismus. Ein interessantes Beispiel ist der Zerfall $B_d^0 \rightarrow \phi K_S$, der – ähnlich wie $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_S$ – eine Messung von $\sin 2\beta$ erlaubt, allerdings durch völlig andere dynamische Prozesse hervorgerufen wird. Das neueste Belle-Ergebnis lautet $(\sin 2\beta)_{\phi K} = 0,06 \pm 0,33 \pm 0,09$, wohingegen BaBar das Resultat $0,50 \pm 0,25^{+0,07}_{-0,04}$ bekannt gab [4]. Der neueste Belle-Wert hat sich auf das Standardmodell zubewegt, signalisiert allerdings noch immer eine mögliche Abweichung zu $(\sin 2\beta)_{\psi K} = 0,725 \pm 0,037$. Es gibt auch eigenartige Muster in den Verzweungsverhältnissen gewisser $B \rightarrow K\pi$ -Zerfälle, die auf ein bestimmtes Szenario

neuer Physik hinweisen könnten; sollte dies tatsächlich der Fall sein, würden wir auch in einigen seltenen B- und K-Zerfällen, insbesondere $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$, spektakuläre Abweichungen vom Bild des Standardmodells erhalten [9].

Neben den in diesem Artikel skizzierten neuen BaBar- und Belle-Ergebnissen gibt es eine Vielzahl weiterer interessanter Resultate. In den nächsten Jahren wird sich das Bild der CP-Verletzung und der Quarkmischung weiter kontinuierlich verbessern, sodass – durch intensive Wechselwirkung zwischen Theorie und Experiment – noch tiefere Einblicke in diesen spannenden Themenkomplex zu erwarten sind.

ROBERT FLEISCHER

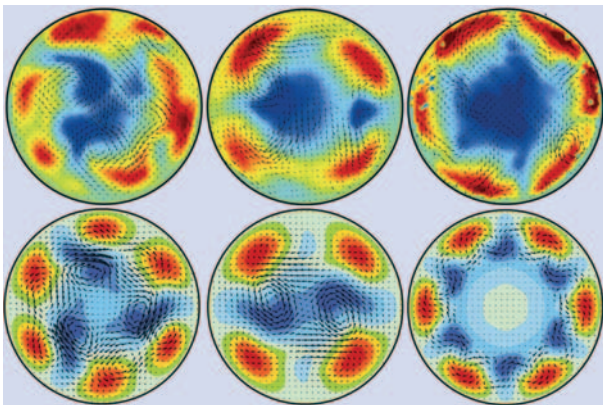
- [1] M. Kunze, K.R. Schubert und B. Spaan, Phys. Bl., Mai 1999, S. 27
- [2] R. Fleischer, Phys. Bl., November 2002, S. 18
- [3] W. Buchmüller, DESY 03-068 [hep-ph/0306047]
- [4] 32nd Int. Conf. on High Energy Physics, Beijing, China, 16. –22. August 2004, <http://ichep04.ihep.ac.cn/>

- [5] K. Kleinknecht, Phys. Bl., Juli/August 2001, S. 89
- [6] B. Aubert et al. [BaBar Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93**, 131801 (2004)
- [7] Y. Chao et al. [Belle Collaboration], hep-ex/0408100
- [8] K. Abe et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. Lett. **93**, 021601 (2004)
- [9] A.J. Buras, R. Fleischer, S. Recksiegel und F. Schwab, Phys. Rev. Lett. **92**, 101804 (2004); Nucl. Phys. B **697**, 133 (2004)

Wie die Turbulenz einsetzt

Der Übergang zur Turbulenz in einer strömenden Flüssigkeit ist ein alltägliches Phänomen. Wenn man einen Wasserhahn langsam aufdreht, geht das anfangs laminare Fließen über in eine unregelmäßige, chaotische Strömung. Dabei erhöht sich die Reibung, sodass für den gleichen Durchsatz ein höherer Wasserdruck notwendig ist. Obwohl der Turbulenzübergang in Rohrströmungen von grundlegender Bedeutung für viele Anwendungen ist, steht eine befriedigende Erklärung bis heute aus. Nun ist es Hof et al. erstmals gelungen, numerisch vorhergesagte wellenartige Wirbel sichtbar zu machen und damit eine fundamentale dynamische Eigenschaft des Übergangs zu beobachten [1].

Untersuchungen zum Einsetzen von Turbulenz haben eine lange Geschichte. 1839 beobachtete Hagen zwei unterschiedliche Zustände der Rohrströmung [2]. Rund 50 Jah-



Beim Übergang zur Turbulenz in der Rohrströmung organisiert sich die Strömung um laufende Wellen herum, die sich im Experiment durch Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit nachweisen lassen. Die Querschnitte durch die Rohrströmung wurden bei verschiedenen mittleren Geschwindigkeiten gemessen. Der Vergleich zwischen beobachteten (oben) und berechneten (unten) Wirbelmustern zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Pfeile deuten die Geschwindigkeit in der Querschnittsebene und damit die Wirbel an, die Farben zeigen die Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeit längs der Rohrachse vom laminaren Profil an. Gebiete mit höherer bzw. niedrigerer Geschwindigkeit sind rot bzw. blau markiert (aus [1]).

re später erkannte Reynolds, dass der Übergang zwischen den beiden Regimen nur von einer dimensionslosen Größe $Re = DU/\nu$ abhängt, wobei U die über den Rohrquerschnitt gemittelte Geschwindigkeit, D der Rohrdurchmesser und ν die kinematische Viskosität der Flüssigkeit sind [3].

Bereits Reynolds erkannte, dass in Rohrströmungen erst Störungen mit endlicher Amplitude den Übergang zur Turbulenz auslösen. In der Theorie lassen sich jedoch mithilfe der linearen Stabilitätsanalyse nur infinitesimal kleine Störungen einfach behandeln, und dies ist einer der Gründe dafür, dass das theoretische Verständnis für den Übergang zur Turbulenz in Scherströmungen nur langsam vorankam. Für andere Fälle, beispielsweise die Strömung zwischen einem rotierenden inneren und einem stationären coaxialen äußeren Zylinder (zirkuläre Couette-Strömung), waren die theoretischen Untersuchungen erfolgreicher. In Übereinstimmung mit dem Experiment ergibt die Stabilitätsanalyse, dass die laminare Strömung bei einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit instabil wird und stattdessen axialsymmetrische Wirbel (Taylor-Wirbel) auftreten, deren Amplitude mit der Reynolds-Zahl wächst. Nach weiteren Instabilitäten, bei denen neue Strömungsmuster auftauchen (man spricht dann von Verzweigungen oder Bifurkationen), ergibt sich ein gradueller Übergang zur Turbulenz. Bei der Rohrströmung oder der Strömung zwischen zwei parallelen Platten, die sich relativ zueinander mit der Geschwindigkeit U bewegen (ebene Couette-Strömung), setzt die Turbulenz jedoch plötzlich und voll entfaltet ein, während die Stabilitätsanalyse selbst bei beliebig großen Reynolds-Zahlen eine laminare Strömung voraussagt. Es ist heute zwar möglich, turbulente Strömungen mit Reynolds-Zahlen von einigen Tausend in guter Übereinstimmung mit den beobachteten Eigenschaften zu simulieren [4], aber ein detailliertes Verständnis des Übergangsprozesses ist damit noch nicht gewonnen.

Obwohl bei der ebenen Couette-Strömung und der Rohrströmung keine Hinweise auf Bifurkationen bei endlichen Re -Werten gefunden wurden, hat sich dennoch die Überzeugung gehalten, dass neben der elementaren Lösung der laminaren Strömung auch andere relativ einfa-

che Lösungen existieren. Da davon auszugehen ist, dass diese Lösungen instabil sind, sind numerische Methoden in der Regel nicht in der Lage, sie direkt zu erzeugen, so wie sie auch im Experiment normalerweise nicht zu beobachten sind.

Eine Möglichkeit, diese Lösungen zu erzeugen, besteht darin, ein allgemeineres Problem mit einem zusätzlichen Parameter zu behandeln, das bei einem speziellen Wert des Parameters der ebenen Couette- oder der Rohrströmung entspricht. Die erwünschten Lösungen werden gefunden, indem man bei den als Funktion des neuen Parameters auftretenden Instabilitäten die abzweigenden Lösungen über sekundäre Verzweigungen bis hin zu den genannten speziellen Parameterwerten verfolgt. So kann man sich etwa die ebene Couette-Strömung als Grenzfall der zirkulären Couette-Strömung bei kleinem Abstand zwischen den Zylindern vorstellen. Die mittlere Winkelgeschwindigkeit ist dabei der zusätzliche Parameter, der nur im Spezialfall der ebenen Couette-Strömung verschwindet [5]. Alternativ kann man im Falle der ebenen Couette-Strömung zwischen horizontalen Platten durch Heizen der unteren Platte und thermischen Auftrieb eine zusätzliche Instabilität bewirken [6]. Man kann aber auch eine willkürliche Kraft einsetzen, um einen Verzweigungspunkt zu erhalten, von dem aus ein Lösungszweig bis zu einem Punkt, an dem die Kraft verschwindet, verfolgt wird [7]. Mit dieser Methode wurden für die Rohrströmung tertiäre Lösungen in der Form von laufenden Wellen gewonnen [8, 9], während die entsprechenden Lösungen für die ebene Couette-Strömung stationär sind. Der Begriff „tertiär“ weist darauf hin, dass sich diese Lösungen über zwei Bifurkationen aus der verallgemeinerten elementaren Lösung entwickelt haben.

Eine dominierende Komponente dieser laufenden Wellen sind walzenähnliche Wirbel mit Achsen parallel zur mittleren Strömung. Diese Walzen verteilen Impuls um und glätten daher das Profil des mittleren Flusses. Dadurch wird das Profil nahe der festen Wand steiler, sodass die viskose Spannung anwächst. Um den gleichen Massenfluss durch das Rohr wie bei der laminaren Strömung zu erreichen, ist ein größerer Druckgradient erforderlich. In der gleichen Weise ist bei der ebenen Couette-Strömung eine höhere