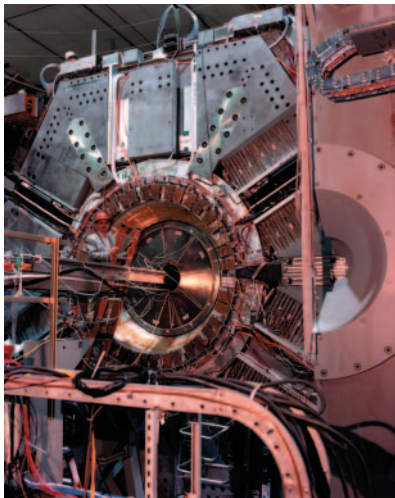


## Neue Ergebnisse von BaBar und Belle zur CP-Verletzung

Zur Überraschung vieler Physiker wurde 1964 durch den Nachweis des Kaon-Zerfalls  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$  entdeckt, dass die schwache Wechselwirkung nicht invariant unter der CP-Transformation ist, die ein Teilchen in sein Antiteilchen überführt (Ladungskonjugation C) und gleichzeitig eine Raumspiegelung (Parität P) durchführt. Das Phänomen der „CP-Verletzung“ ist seither eines der zentralen Themen der Teilchenphysik.

Durch Experimente zur CP-Verletzung erhofft man sich insbesondere wichtige Einblicke in die Physik jenseits des Standardmodells der elektroschwachen Wechselwirkung. Die CP-Verletzung hat auch



Das BaBar-Experiment am SLAC-Beschleuniger, USA, hat kürzlich Ergebnisse zur CP-Verletzung vorgestellt, die gut mit jenen des konkurrierenden Belle-Experiments in Japan übereinstimmen.

eine sehr unmittelbare Bedeutung für unsere Existenz, da sie eine der notwendigen Voraussetzungen für die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie in unserem Universum ist. Theoretische Studien deuten darauf hin, dass die CP-Verletzung im Standardmodell zu klein ist, um diese Asymmetrie zu generieren, und weisen daher bereits auf „neue“ Physik hin. Einerseits ist es vorstellbar, dass der Mechanismus zur Erzeugung dieser Asymmetrie mit sehr hohen Energieskalen zusammenhängt und daher in schwachen Zerfällen von Mesonen wie dem Kaon nicht in Erscheinung tritt. Andererseits gibt es etliche Szenarien neuer Physik, in denen auch neue Quellen für CP-Verletzung auftreten, die sehr wohl im Labor zugängliche Prozesse in Leidenschaft ziehen können. In diesem Zusammenhang sollte auch nicht vergessen werden, dass der

Ursprung der beobachteten Hierarchie der Quark- und Leptonmassen, der Mischungseffekte dieser Teilchen und der „Flavourdynamik“ im Allgemeinen noch im Dunkeln liegt. Es ist wahrscheinlich, dass die zur Lösung dieses zentralen Problems erforderliche neue Physik auch mit neuartigen CP-verletzenden Phänomenen zusammenhängt.

Seit der Entdeckung der CP-Verletzung wurden große Fortschritte durch weiterführende Studien des Kaonsystems gemacht, insbesondere durch die Kollaborationen NA48 (CERN) und KTeV (Fermilab), denen im Jahre 1999 der Nachweis der „direkten“ CP-Verletzung in Zerfällen von neutralen Kaonen gelang [1]. Dieser faszinierende Effekt läuft – im Gegensatz zur 1964 beobachteten „indirekten“ CP-Verletzung – direkt auf Zerfallsamplitudenniveau ab. Die entsprechenden Vorhersagen werden leider durch große Unsicherheiten beeinträchtigt, sind jedoch im Rahmen des Standardmodells von der gleichen Größenordnung wie die experimentellen Werte.

Detaillierte theoretische Analysen haben gezeigt, dass sich Bindungszustände eines  $\bar{b}$ -Quarks mit einem u-, d- oder s-Quark – so genannte B-Mesonen – besonders gut dafür eignen, die Beschreibung der CP-Verletzung durch das Standardmodell experimentell streng zu überprüfen. Das zentrale Element ist hierbei eine unitäre Matrix, die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, kurz CKM-Matrix. Einfach gesprochen enthält diese Matrix die „Kopplungsstärken“ der geladenen Stromwechselwirkungen der Quarks, durch die beispielsweise ein b-Quark unter Emission eines  $W^-$ -Bosons in ein c-Quark übergehen kann. Im Jahre 1973 zeigten Kobayashi und Maskawa, dass zur Parametrisierung dieser Matrix im Falle dreier Fermionengenerationen neben reellen Größen auch eine komplexe Phase erforderlich ist, die die Beschreibung CP-verletzender Effekte im Standardmodell erlaubt [2]. Aus der Unitarität der CKM-Matrix folgt das so genannte Unitaritätsdreieck, das eine anschauliche Darstellung der CP-Verletzung im Standardmodell ermöglicht. Durch CP-verletzende Effekte in B-Mesonzerfällen lassen sich die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  dieses Dreiecks direkt messen. Andererseits können aus der theoretischen Interpretation experimenteller Daten zur  $B_{d,s}^0 - \bar{B}_{d,s}^0$ -

Mischung und zu semileptonischen  $b \rightarrow (u,c)\ell \bar{\nu}_\ell$ -Zerfällen die Seiten des Unitaritätsdreiecks bestimmt werden. Weitere Einschränkungen folgen aus der „indirekten“ CP-Verletzung im Kaonsystem. Durch Kombination dieser Informationen in „CKM-Fits“ lassen sich  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  im Rahmen des Standardmodells vorhersagen. Ziel ist es nun, das Unitaritätsdreieck durch eine Vielzahl von Messungen auf unterschiedliche Art und Weise zu bestimmen und somit den Kobayashi-Maskawa-Mechanismus der CP-Verletzung einer strengen Überprüfung zu unterziehen.

In diesem Jahrzehnt gibt es enorme Anstrengungen, dieses vielversprechende Programm zu realisieren, wobei die experimentelle Bühne gegenwärtig von den „B-Fabriken“ am SLAC (USA) und KEK (Japan) mit den Experimenten BaBar [3] und Belle [4] beherrscht wird, die von internationalen Kollaborationen – auch unter Beteiligung deutscher Physiker – betrieben werden. Bereits im Sommer 2001 gelang diesen Experimenten durch den Nachweis CP-verletzender Effekte im System der B-Mesonen ein erster Meilenstein, da dieses Phänomen seit 1964 nur in Kaonzerfällen experimentell zugänglich gewesen war. Der Nachweis gelang durch den Vergleich der Zerfälle  $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_S$  und  $\bar{B}_d^0 \rightarrow J/\psi K_S$ , deren CP-verletzende Ratenasymmetrie im Standardmodell durch  $\sin 2\beta$  charakterisiert ist und eine theoretisch saubere Bestimmung dieses Parameters erlaubt. Die Messungen basierten auf  $32 \cdot 10^6$  bzw.  $31,3 \cdot 10^6$  von BaBar und Belle beobachteten  $B\bar{B}$ -Paaren und waren nicht in völliger gegenseitiger Übereinstimmung. Mit inzwischen  $88 \cdot 10^6$  bzw.  $85 \cdot 10^6$   $B\bar{B}$ -Paaren wurde die Statistik seither erheblich verbessert, und kürzlich wurden folgende neue Resultate für  $\sin 2\beta$  veröffentlicht [5]:

$$0,741 \pm 0,067(\text{stat}) \pm 0,033(\text{syst})$$

(BaBar) bzw.

$$0,719 \pm 0,074(\text{stat}) \pm 0,035(\text{syst})$$

(Belle)

Die stark reduzierten Unsicherheiten und die Übereinstimmung beider Experimente sind sehr beeindruckend. Unter Berücksichtigung früherer Resultate der Kollaborationen OPAL (CERN), ALEPH (CERN) und CDF (Fermilab) ergibt sich nun der neue Weltmittelwert  $\sin 2\beta = 0,734 \pm 0,054$ , der sehr gut mit den oben skizzierten CKM-Fits

übereinstimmt, die  $0,6 \leq \sin 2\beta \leq 0,9$  ergeben. Der Weltmittelwert für  $\sin 2\beta$  impliziert  $2\beta \sim 47^\circ$  oder  $133^\circ$ , wobei der erste Wert konsistent mit dem Standardmodell ist, während die zweite Lösung neue Physik zur Folge hätte, die bevorzugt im Sektor der  $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ -Mischung angesiedelt wäre. Die direkte Unterscheidung zwischen beiden Lösungen durch die Bestimmung von  $\cos 2\beta$  ist ein wichtiger Aspekt zukünftiger Messungen.

Das Physikprogramm der B-Fabriken ist sehr reichhaltig und beschränkt sich nicht auf Analysen von  $B_d \rightarrow J/\psi K_S$  und ähnlichen Prozessen [6]. Andere Schlüsselzerfälle zur Erforschung der CP-Verletzung sind beispielsweise  $B \rightarrow \pi K$ ,  $B \rightarrow \pi\pi$  und  $B \rightarrow \phi K$ . Auch zu diesen Zerfällen gibt es bereits sehr interessante Ergebnisse der B-Fabriken und theoretische Interpretationen, wobei jedoch die Unsicherheiten für genauere Schlussfolgerungen gegenwärtig noch zu groß sind.

Interessante Perspektiven für die B-Physik eröffnen sich künftig auch am Tevatron (Fermilab) durch das System der  $B_s$ -Mesonen, das bei

BaBar und Belle nicht zugänglich ist. In der Ära des LHC werden sich dann  $B_s$ -Zerfälle noch sehr viel detaillierter untersuchen und vielfältige weiterführende Studien des B-Systems durchführen lassen, insbesondere bei LHCb (CERN) und BTeV (Fermilab). Auch in der Theorie gibt es noch viele offene Fragen, deren Klärung eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Experiment und Theorie voraussetzt.

ROBERT FLEISCHER

- [1] V. Fanti et al. (NA48), Phys. Lett. **B465**, 335 (1999); A. Alavi-Harati et al. (KTeV), Phys. Rev. Lett. **83**, 22 (1999); K. Kleinknecht, Phys. Bl., Juli/August 2001, S. 89
- [2] M. Kobayashi und T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973)
- [3] www.slac.stanford.edu/BFROOT/; M. Kunze, K.R. Schubert und B. Spaan, Phys. Bl., Mai 1999, S. 27
- [4] <http://belle.kek.jp/>
- [5] 31st Int. Conf. on High Energy Physics, Juli 2002, www.ichep02.nl/; B. Aubert et al. (BaBar), hep-ex/0207042, K. Abe et al. (Belle), hep-ex/0208025
- [6] Für einen ausführlichen Übersichtsartikel, siehe R. Fleischer, Physics Reports **370**, 531 (2002) [hep-ph/0207108]

## Quantenfelder à la carte

**Welle oder Teilchen nach Belieben – erstmals wurden periodischer Kollaps und phasenkohärente Wiederherstellung eines stark wechselwirkenden bosonischen Quantenfeldes im optischen Gitter realisiert.**

In der Welt der kalten Atome hat sich viel getan, seit 1995 das erste Bose-Einstein-Kondensat (BEC) erzeugt wurde [1]. Bei Temperaturen von nur wenigen hundertmilliarden Kelvin über dem absoluten Nullpunkt zeigen ganz normale Gase ein völlig ungewohntes Verhalten, das nur durch die gleichzeitige Wellennatur der Teilchen und den Teilchencharakter des Materiewellenfeldes zu verstehen ist.

Der Forschergruppe um T. Hänsch und I. Bloch am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching gelang nun mit zwei spektakulären Experimenten der Nachweis des Teilchencharakters entarteter bosonischer Gase. In beeindruckender Klarheit wurde zuerst der Quantenphasenübergang vom superfluiden Zustand eines BE-

Dr. habil. Robert  
Fleischer, TH  
Division, CERN,  
CH-1211 Genf 23