

CP-Verletzung in Zerfällen von neutralen B-Mesonen

Am 5. Februar 1999 präsentierte die CDF-Kollaboration am Fermilab bei Chicago Evidenz für CP-Verletzung in Zerfällen von neutralen B-Mesonen (B^0) [1]. CP ist die kombinierte Symmetrieoperation von Ladungskonjugation C und Parität P, wobei C Teilchen und Antiteilchen vertauscht und P alle Koordinaten am Ursprung spiegelt. Schon in den fünfziger Jahren wurde entdeckt, daß die schwache Wechselwirkung weder unter C noch unter P erhalten ist, wohl aber unter der kombinierten Symmetrieoperation CP. CP-Verletzung wurde zum ersten Mal 1964 im Zerfall $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ entdeckt und ist seitdem ausschließlich in Zerfällen neutraler K-Mesonen beobachtet worden.

CP-Verletzung bedeutet, daß die mikroskopischen Gesetze nicht völlig symmetrisch sind und daß es eine Asymmetrie im Verhalten von Materie und Antimaterie gibt. Im Falle des K-Systems, so zeigten M. Kobayashi und T. Maskawa im Jahre 1972, läßt sich die CP-Verletzung sehr elegant und vollständig im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik erklären, wenn man die Existenz von drei Generationen von Quarks und Leptonen annimmt. Die schwache Wechselwirkung der Quarks untereinander wird durch eine unitäre Matrix V_{CKM} parametrisiert. Die Unitarität führt zu Beziehungen zwischen den Elementen der Matrix, die Wichtigste davon läßt sich geometrisch durch ein Dreieck in der komplexen Ebene veranschaulichen. Ein Maß für die CP-Asymmetrie ist einer der Winkel dieses Dreiecks $\sin 2\beta$.

Tatsächlich ließ die Entdeckung von Teilchen der damals noch nicht entdeckten dritten Generation nicht lange auf sich warten. So wurde im Jahre 1975 das τ -Lepton von Martin Perl und seinen Mitarbeitern entdeckt. Im Jahre 1977 folgte die Entdeckung des b-Quarks durch Lederman und Kollegen am Fermilab, und 1995 wiesen die CDF- und D0-Kollaborationen das Top-Quark nach [2]. Damit sind heutzutage alle Teilchen der dritten Generation bis auf das τ -Neutrino nachgewiesen.

Das heutige Universum besteht nur aus Materie, während im Frühstadium des Urknalls ein Gleich-

gewicht zwischen Materie und Antimaterie herrschte. Für diese Entwicklung ist CP-Verletzung eine notwendige Voraussetzung. Allerdings sind die bei K-Mesonen beobachteten und vom Standardmodell erwarteten CP-Effekte zu klein, um diese Asymmetrie erklären zu können. Dies wird als ein Hinweis auf neue Physik jenseits des Standardmodells angesehen.

Das Standardmodell sagt starke CP-verletzende Effekte in einigen seltenen Zerfällen von B-Mesonen, d. h. Mesonen, die b-Quarks enthalten, vorher. Zur experimentellen Überprüfung dieser Vorhersagen wurden in den vergangenen Jahren am SLAC in den USA und am KEK in Japan neue e^+e^- -Beschleuniger, die sogenannten B-Fabriken, und dazugehörige Experimente aufgebaut, die im Laufe dieses Jahres mit der Datennahme beginnen werden [3]. Auch das am DESY im Bau befindliche Experiment HERA-B hat die gleiche Zielsetzung.

Das CDF-Experiment hat in den Jahren 1992 – 1995 am Tevatron-Collider Daten von Proton-Antiproton-Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von 1,8 TeV aufgenommen, darunter auch eine sehr große Zahl von Ereignissen mit B-Hadronen. Insgesamt sind mehr als 5×10^9 B-Hadronen erzeugt worden, aber nur ein kleiner Bruchteil konnte anhand von charakteristischen Zerfällen vom großen Untergrund getrennt werden. Das Verhältnis des Produktionswirkungsquerschnittes von $b\bar{b}$ -Quark-Paaren zum totalen Wirkungsquerschnitt am Tevatron beträgt ca. 8×10^{-4} . Zu den aufgenommenen Ereignissen gehört auch der Zerfall $B^0(\bar{B}^0) \rightarrow J/\psi K_S^0$, wobei die beiden geladenen Myonen ($\mu^+\mu^-$) vom Zerfall des J/ψ Trigger des CDF-Detektors auslösen. Dieser Endzustand ist ein CP-Eigenzustand: $CP |J/\psi K_S^0\rangle = -|J/\psi K_S^0\rangle$. Dieser Zerfall ist von besonderem Interesse, weil es für ihn möglich ist, die Größe der CP-Asymmetrie theoretisch zu berechnen und auf fundamentale Größen des Standardmodells zurückzuführen. Allerdings ist der Zerfall $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ relativ selten, er findet nur einmal in 50000 Zerfällen des B^0 -Mesons statt. Mit den ca. 400 von CDF gefundenen Ereignissen gelang aber eine erste CP-Analyse. CP-Verletzung manifestiert sich darin, daß ein unterschiedlicher Anteil von B^0 im Vergleich zu \bar{B}^0 in diesen Endzustand zerfällt und dieser Unter-

schied zudem von der Zeit abhängt, zu der das B^0 -Meson zerfällt:

$$\frac{dN}{dt}(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) \neq \frac{dN}{dt}(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$$

Die Zerfallszeit wird aus der Distanz des Zerfallsvertex vom primären Kollisionspunkt mit Hilfe eines hochauflösenden Siliziumstreifendetektors ermittelt. Allerdings ist die exakte Vertexinformation nur bei 50 % der 400 Ereignissen vorhanden.

Falls vorhanden, wird die Vertexinformation benutzt und zur Optimierung der Asymmetriemes-

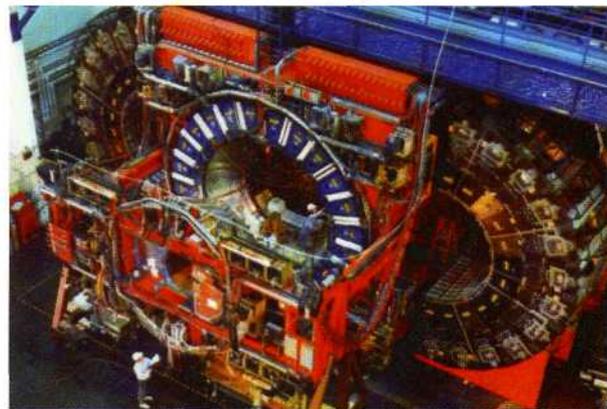


Abb. 1: Der CDF-Detektor, mit dem CP-Verletzung im Zerfall von B-Mesonen beobachtet wurde, geöffnet in der Wartungshalle. Im Zentrum des zylindrisch aufgebauten Systems befinden sich der Vertexdetektor sowie die Spurenkammer, durch die während der Datennahme die Strahlen in einem Vakuumrohr laufen.

sung verwendet. Sie ist aber nicht zwingend erforderlich, da man auch einen Effekt beobachtet, wenn man über die Zeit integriert. Um die Asymmetrie zu messen, muß man feststellen, ob der beobachtete Zerfall ursprünglich von einem B^0 oder \bar{B}^0 stammt. Dies bezeichnet man als *Flavor Tagging* (*Tagging* zu deutsch Markierung). Bei CDF wurden hierzu drei verschiedene Methoden angewandt. Die ersten beiden gehen von der Annahme aus, daß zu jedem B-Hadron im Ereignis auch ein Anti-B-Hadron zu finden ist, da diese fast ausschließlich in starker Wechselwirkung paarweise erzeugt werden. So sucht man entweder nach einem Lepton (Elektron oder Myon) aus dem semi-leptonischen Zerfall des zweiten B-Hadrons oder man bestimmt die Ladung der Hadronen, die vom Zerfall des zweiten B-Hadrons herrühren (*Jet Charge*, s. Abb. 2). Aus der Ladung des Leptons oder des Jets ergibt sich, ob es ursprünglich ein B^0 oder ein \bar{B}^0 war, welches letztendlich in ein $J/\psi K_S^0$

zerfallen ist. Die dritte Methode (*Same Side Tagging*) bestimmt die Ladung eines Pions, das räumlich mit dem untersuchten B^0 am engsten korreliert abgestrahlt wurde. Bei einem B^0 handelt es sich um ein π^+ , während ein \bar{B}^0 von einem π^- begleitet wird. Abbildung 2 zeigt schematisch den Zerfall $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ und die verschiedenen *Tagging*-Me-

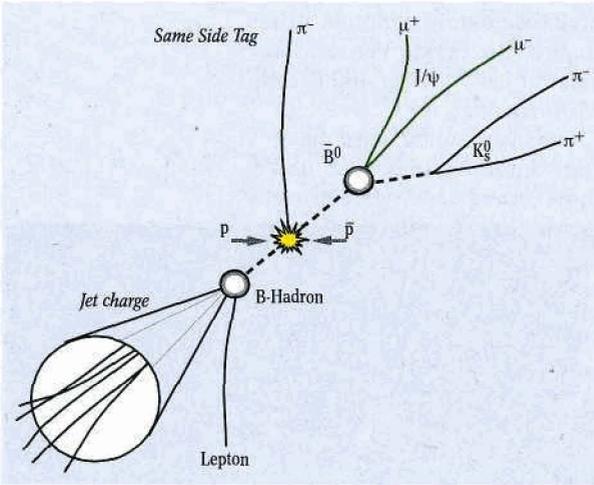


Abb. 2:

Für die Untersuchung der CP-Verletzung ist der Zerfall von neutralen B-Hadronen von besonderem Interesse. B-Hadronen werden paarweise in Proton-Antiproton-Kollisionen erzeugt. Sie haben eine relativ lange Lebensdauer von 1,6 ps und legen in dieser Zeit im Mittel etwas mehr als einen mm zurück. Gezeichnet ist der Zerfall \bar{B}^0 in ein J/ψ - und ein K_S^0 -Meson. Das J/ψ zerfällt anschließend über dessen prompten Zerfall in zwei entgegengesetzt geladene Myonen ($\mu^+\mu^-$) nachgewiesen. Das K_S^0 mit einer Lebensdauer von etwa 90 ps zerfällt hauptsächlich in zwei entgegengesetzt geladene Pionen ($\pi^+\pi^-$). Die Signatur sind also vier geladene Spuren: zwei Myonen, deren invariante Masse der J/ψ -Masse entspricht, und zwei Pionen, die sich zu einem K_S^0 kombinieren lassen. Darüber hinaus deutet die Abbildung die verschiedenen Methoden an, mit denen sich feststellen läßt, ob es ursprünglich ein B^0 oder ein \bar{B}^0 war, welches letztendlich in ein J/ψ - und ein K_S^0 -Meson zerfallen ist (*Flavor Tagging*, siehe Text).

thoden. Die Güte einer *Tagging*-Methode wird durch zwei Größen charakterisiert: der Effizienz $\varepsilon = (\text{Anzahl der markierten Ereignisse}) / (\text{Anzahl aller Ereignisse})$ und der *Dilution* (zu deutsch: Verwässerung), einem Maß für die Reinheit der *Tagging*-Methode:

$$D = (N_r - N_f) / (N_r + N_f),$$

wobei N_r die Anzahl der „richtig“ markierten und N_f die Anzahl der falsch markierten Ereignisse ist. $D < 1$ bedeutet, daß eine mögliche Asymmetrie „verwaschen“ wird. Das Produkt εD^2 ist ein Maß für die statistische Aussagekraft der Messung. So besagt ein Wert von $\varepsilon D^2 = 6,3\%$, daß ein Datensatz von 400 Ereignissen dieselbe statistische Aussagekraft hat wie 25 Ereignisse mit perfektem *Tagging*.

Nachdem alle Effekte berücksichtigt wurden, erhält CDF das fol-

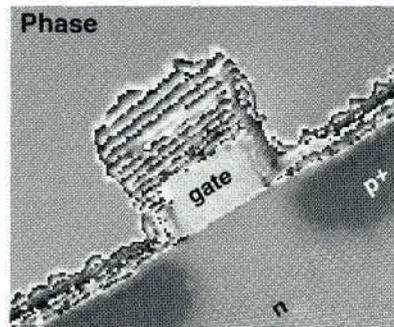
gende Ergebnis: $\sin 2\beta = 0,79^{+0,41}_{-0,44}$ (stat. + syst.), wobei der Fehler hauptsächlich statistischer Natur ist. Dieses Ergebnis ist eine wesentliche Verbesserung bisheriger Messungen und bedeutet, daß $\sin 2\beta$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 13:1 größer als Null ist. Die Messung ist die erste signifikante direkte Beobachtung von CP-Verletzung in B^0 -Meson-Zerfällen und stimmt mit den Vorhersagen des Standardmodells überein, nach denen $\sin 2\beta = 0,75 \pm 0,09$ gilt.

HANS WENZEL

- [1] <http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/bottom/cdf4855/cdf4855.html>
- [2] siehe z. B.: W. Hollik, T. Müller, Phys. Bl., Februar 1997, S. 127
- [3] Im Maiheft wird in den Phys. Blättern ein Übersichtsartikel über das Experiment am SLAC erscheinen.

Blick in den Transistor

Alle 18 Monate verdoppelt sich die Leistungsfähigkeit von Computenchips – so das „Moore'sche Gesetz“, das in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder auf's Neue bestätigt wurde. Diese Steigerung ist nur durch immer kleinere Strukturen möglich: Derzeit sind 180 nm große Strukturen „state of the art“, innerhalb eines weiteren Jahrzehnts werden Transistoren aus nur noch einigen tausend Atomen bestehen und um die 100 nm groß sein. Dies setzt eine bislang unerreichte Präzision der einzelnen Fertigungsschritte voraus, von denen die Dotierung ein ganz wesentlicher ist



Phasenbild eines „burried channel PMOS“-nm, aufgenommen mit Elektronenhologra. Das zweidimensionale elektrostatistische Po die p-leitenden Bereiche, die die source-leitenden Kanäle dazwischen mit dem aufsteigenden Potentialbild entspricht der dunkelste Grste einer Spannung von +0,45 V. Die Schwellspannungsdifferenzen größer als 2π zurückfö

Dr. Hans Wenzel,
Institut für Experimentelle Kernphysik,
Universität Karlsruhe