

Der Schlüssel zum CP-Problem

Physik-Nobelpreis 2008: von Fermi zu Kobayashi und Maskawa

Ahmed Ali

Mit Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa zeichnet die Königlich-Schwedische Akademie der Wissenschaften zwei Physiker aus, die in einer langen Tradition der theoretischen Physik in Japan stehen. Angefangen bei Hideki Yukawa, der 1949 als erster Japaner den Physik-Nobelpreis für die Vorhersage von Mesonen erhielt, bis hin zu den diesjährigen Preisträgern Nambu, Kobayashi und Maskawa, beruht diese Tradition darauf, ein tiefes mathematisches Denken auf die richtigen physikalischen Fragen anzuwenden. Kobayashi und Maskawa teilen sich eine Hälfte des Preises für „die Entdeckung des Ursprungs der Symmetriebrechung, die die Existenz von mindestens drei Quarkfamilien in der Natur vorhersagt“.

Die Fünfziger- und Sechzigerjahre des vorigen Jahrhunderts prägten die Teilchenphysik wie keine andere Phase. An der Universität in Nagoya war Shoichi Sakata mit seiner Schule maßgeblich an der theoretischen Entwicklung beteiligt. 1956 schlug Sakata als erster ein einheitliches Modell für Elementarteilchen vor mit jeweils drei Grundbausteinen für die Hadronen (Proton, Neutron und Λ -Teilchen) bzw. Leptonen (Elektron, Muon und Neutrino) [1]. Das Sakata-Modell spielte eine entscheidende Rolle für die Entwicklung der unitären Symmetrie, einem Organisationsschema, das sich bei der Klassifizierung der Hadronen und ihrer Wechselwirkungen als sehr nützlich erwies. Später, im Jahr 1964, ersetzten die von Murray Gell-Mann und George Zweig „erfundenen“ Quarks die Sakata-Teilchen (Sakaton) als Konstituenten der Materie. Eine weitere bahnbrechende Idee der Nagoya-Schule, die Flavour-Mischung von Neutrinos, liefert den theoretischen Rahmen,



Toshihide Maskawa zeigt bei einer Pressekonferenz in Kyoto stolz die Veröffentlichung von 1973, die ihm und Makoto Kobayashi den Physik-Nobelpreis bescherte.

um Neutrinooszillationen zu analysieren [2].

Die japanischen Zeitungen berichteten damals oft über die Nagoya-Gruppe und insbesondere über Sakata. Als High-School-Student in Nagoya, wo er 1940 geboren wurde, las Maskawa einen dieser Zeitungsberichte, der einen so großen Eindruck bei ihm hinterließ, dass er sich entschied, in der Sakata-Gruppe theoretische Physik zu studieren. Sehr ähnliche Beweggründe führten auch Kobayashi, der 1944 ebenfalls in Nagoya geboren wurde, zu Sakata.

Im Westen versuchten damals die meisten Teilchenphysiker, die Dynamik der starken Wechselwirkung mit phänomenologischen Methoden zu erklären, und selbst Murray Gell-Mann sah die Quarks eher als mathematische Objekte denn als dynamische Bausteine an. Auf der anderen Seite der Erde, in Nagoya, vertrauten Sakata und seine Gruppe jedoch unbeirrbar darauf, dass die Hadronen aus kleineren Konstituenten zusammengesetzt sind. Dieses Vertrauen sowie die in der Luft liegende Idee der Flavour-Mischung waren entscheidend dafür, dass es Kobayashi und Maskawa gelang, das Phäno-

men der CP-Verletzung bei Prozessen der schwachen Wechselwirkung aufzuklären.

Die erste Theorie der schwachen Wechselwirkung hatte Enrico Fermi im Jahr 1934 formuliert, um den Betazerfall $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ zu erklären [3]. In heutiger Sprache ist dies ein Prozess der geladenen schwachen Wechselwirkung, $d \rightarrow u W^- \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$, da er durch den Austausch eines geladenen W-Bosons zustande kommt.¹⁾ Später wurden weitere schwache Prozesse entdeckt wie der leptonische Zerfall $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ oder der Zerfall $\Lambda \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$. Da das Λ -Hyperon ein strange-Quark enthält, die Zerfallsprodukte aber nicht, spricht man bei diesem Zerfall von einem Strangeness-verletzenden Prozess ($\Delta S = 1$ -Prozess), $s \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$, im Gegensatz zu dem oben erwähnten Betazerfall (ein $\Delta S = 0$ -Prozess). Die Kopplungskonstanten der Zerfälle von Myon, Neutron bzw. Λ hatten messbar unterschiedliche Stärken, und ein großes Problem in dieser Epoche bestand darin, diesen Unterschied zu verstehen. Weisen diese Zerfälle auf drei von Grund auf verschiedene Kräfte hin, gekennzeichnet durch drei Kopplungen G_μ , G_n und G_Λ ? Oder lassen sie sich durch eine

1) Prozesse, die durch den Austausch von neutralen Z^0 -Bosonen zustande kommen (neutrale schwache Ströme), waren damals noch nicht bekannt.

universelle Fermi-Wechselwirkung beschreiben, allerdings mit unterschiedlichen Wellenfunktionen der beteiligten Zustände?

Die Mischung macht's

Die Grundidee, um diese Fragen zu beantworten, geht auf den Italiener Nicola Cabibbo zurück [4], der 1963 am CERN arbeitete und einen früheren Vorschlag von Murray Gell-Mann und Maurice Levy aufgriff [5].²⁾ Nach Cabibbo unterscheiden sich die Eigenzustände der geladenen schwachen Wechselwirkung (welche über W^\pm -Bosonen koppeln) und die Eigenzustände der starken Wechselwirkung (also solche, die über Gluonen koppeln). Im Quark-Modell mit drei Quarks u (up), d (down) und s (strange) bedeutet dies z. B., dass die geladenen W^- -Bosonen nicht an $\bar{u}d$ - und $\bar{u}s$ -Kombinationen koppeln, sondern an die lineare Kombination $\bar{u}d'$, wobei $d' = d \cos \theta + s \sin \theta$ mit dem Rotations-

winkel oder Cabibbo-Winkel θ ist. Cabibbo zeigte, dass sich alle weltweit vorhandenen Daten von Hadronen- und Leptonen-Zerfällen, egal ob s-Quarks involviert sind oder nicht, mit einer einzigen Kopplungskonstante G_F und dem Winkel θ beschreiben lassen. Demnach gilt $G_\mu = G_F$, $G_n = G_F \cos \theta$ und $G_\Lambda = G_F \sin \theta$. Auch die leptonen Mesonen-Zerfälle $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ und $K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ passen in dieses Schema, mit $G_\pi = G_F \cos \theta$ und $G_K = G_F \sin \theta$. Diese Arbeit erlaubte es, an der universellen Fermi-Kopplungskonstante festzuhalten, und eröffnete eine neue Welt der Quarkmischung. Die Königliche Schwedische Akademie der Wissenschaften bezeichnete Cabibbos Arbeit denn auch als Meilenstein auf dem Gebiet schwacher Wechselwirkungen. Umso erstaunlicher ist es, dass Cabibbo bis jetzt keinen Nobelpreis verliehen bekam!

Dieses Modell mit drei Quarks versagte jedoch bei der Beschreibung von Prozessen mit K-Mesonen, bei denen $\Delta S=2$ gilt (der $\bar{s}d \rightarrow \bar{s}d$ -Übergang). Zur Lösung



Makoto Kobayashi hat schon vor Jahren das Arbeitsgebiet gewechselt und beschäftigt sich heute mit der Stringtheorie.

dieses Problems schlugen Sheldon Glashow, John Iliopoulos und Luciano Maiani 1970 ein viertes Quark vor [6].³⁾ Mit der Einführung dieses Charm-Quarks c bilden die vier Quarks zwei „Dubletts“ (u, d) und (c, s), und die Quarkmischung lässt sich als (2×2) -Rotationsmatrix schreiben. 1973 entdeckten Samuel Ting und Mitarbeiter in Brookhaven bzw. Burton Richter und Mitar-

2) Gell-Mann und Levy hatten vorgeschlagen, dass zwei verschiedene Kräfte für die $\Delta S=0$ - bzw. $\Delta S=1$ -Prozesse verantwortlich sind.

3) Tatsächlich hatten James Bjorken und Sheldon Glashow das vierte Quark schon 1964 vorgeschlagen.

beiter am SLAC das Charm-Quark als gebundenen Zustand J/ψ aus c und \bar{c} .

Kobayashi und Maskawa erweiterten in ihrer jetzt mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Arbeit von 1972 dieses Quark-Quartett und postulierten zwei weitere Quarks, um die 1964 entdeckte CP-Verletzung zu erklären. Bereits 1956 hatten Tsung Dao Lee und Chen Ning Yang argumentiert, dass die schwache Wechselwirkung nicht invariant unter der Paritätstransformation sei (P entspricht der Raumspiegelung), was kurze Zeit später durch Experimente bestätigt wurde. Wie sich zeigte, verletzt die schwache Wechselwirkung auch die C-Operation, die Teilchen und Antiteilchen vertauscht. Aber die Symmetrie unter CP, also die gleichzeitige P- und C-Transformation, galt noch immer als „heilig“. Daher war es eine große Überraschung, als 1964 James Cronin, Val Fitch und Mitarbeiter den Zerfall $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ entdeckten, der untersagt ist, wenn CP eine exakte Symmetrie ist. K_L („K-long“) und K_S („K-short“) sind jeweils Linearkombinationen des Kaons K^0 und seines Antiteilchens \bar{K}^0 und haben eine lange bzw. kurze Lebensdauer. Phänomenologisch lässt sich die CP-Verletzung durch einen kleinen komplexen Parameter ϵ_K in der Mischungsrelation von K^0 und \bar{K}^0 parametrisieren.⁴⁾

Auch in Nagoya war die CP-Verletzung ein beliebtes Thema für Diskussionen. Insbesondere diskutierten die Theoretiker die Frage, ob sich die CP-Verletzung im Rahmen der renormierbaren Eichtheorien der einheitlichen elektroschwachen Wechselwirkungen erklären lässt. Dieses heutige Standardmodell hatten Steven Weinberg und Abdus Salam 1967 bzw. 1968 unabhängig voneinander veröffentlicht. Kobayashi und Maskawa hatten sich bereits in Nagoya, wo sie 1972 bzw. 1967 promovierten, dieser Frage gewidmet. 1970 ging Maskawa als Assistenzprofessor an die Universität Kyoto, wohin ihm zwei Jahre später Kobayashi folgte. Dort griffen sie das Thema wieder auf und entdeckten über die Sommerferien gemeinsam einen

Mechanismus der CP-Verletzung, den sie am 1. September 1972 zur Veröffentlichung einreichten [7].

Im ersten Teil dieser historischen Arbeit versuchten sie mühsam, die CP-Verletzung in das Quartett-Schema zu integrieren, kamen dabei aber zu dem Schluss, dass dies nicht möglich ist, ohne neue Felder einzuführen. Unter den Möglichkeiten, solche neuen Felder einzuführen, diskutierten sie ein Modell mit sechs Quarks, von denen jeweils drei die Ladung Q bzw. $Q-1$ haben. Nach heutigem Sprachgebrauch bedeutet das die Einführung eines weiteren Quark-Dubletts (t, b) zusätzlich zu dem Quartett (u, d) und (c, s). Dies erforderte die Erweiterung der (2×2) -Rotationsmatrix zu einer unitären (3×3) -Matrix, die inzwischen als Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM) bekannt ist.

Mathematiker wie Kenkichi Iwasawa hatten die Eigenschaften solcher Matrizen bereits Jahre zuvor untersucht [8], aber erst Kobayashi und Maskawa brachten sie auch in das Blickfeld der Physiker. Eine unitäre (3×3) -Matrix weist vier Freiheitsgrade auf, die sich als drei Rotationswinkel θ_i ($i = 1, 2, 3$) und eine Phase δ , die nicht wegtransformiert werden kann, ausdrücken lassen [7]. Unter CP-Transformation ändert diese Phase das Vorzeichen, im Gegensatz zu den Phasen, die durch die starke Wechselwirkung zustande kommen. Daher kann CP-Verletzung in Prozessen auftreten, bei denen mindestens zwei Amplituden mit unterschiedlichen komplexen CKM-Matrixelementen zu dem gleichen Endzustand beitragen. Durch Interferenz können dann konstruktive bzw. destruktive Beiträge zu den Teilchen- und Antiteilchenprozessen entstehen.

Triumph des Standardmodells

Indem sie eine dritte Familie von Quarks postulierten, fanden Kobayashi und Maskawa den Schlüssel, um das CP-Rätsel zu lösen. Damit die Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen erhalten bleibt, musste auch eine dritte Familie

der Leptonen existieren. Dieses Tauson τ^\pm wurde 1975 durch die Gruppe um Martin Perl am SLAC entdeckt.⁵⁾ 1977 wiesen Leon Lederman und Mitarbeiter das b -Quark (beauty oder bottom mit $Q=-1/3$) als gebundenen $b\bar{b}$ -Zustand (Υ -Resonanz) nach; kurz darauf folgten die Entdeckungen von B -Mesonen und Λ_b -Baryonen. Die Suche nach dem sechsten Quark, dem t -Quark (truth oder top mit $Q=+2/3$), endete 1995 erfolgreich am Fermilab.

Die KM-Theorie erklärt nicht nur den CP-verletzenden Parameter ϵ_K , sondern auch die sog. direkte CP-Verletzung in K -Meson-Zerfällen, welche am CERN (NA48) und Fermilab (KTEV) nachgewiesen wurde [9]. Damit ist klar, dass die CP-Verletzung auf der schwachen Wechselwirkung (also in den Kopplungen $\bar{u}_i d_j W^-$ und $u_i \bar{d}_j W^+$) beruht und nicht auf einer neuen Wechselwirkung, wie der von Wolfenstein ins Spiel gebrachten superschwachen Wechselwirkung [10].

In den vergangenen Jahren standen Arbeiten zur CP-Verletzung in Zerfällen von B -Mesonen im Mittelpunkt des Interesses. Für solche Experimente sind die Umstände günstig: Die B -Mesonen haben eine relativ lange Lebenszeit in der Größenordnung von Piko-sekunden, die Massendifferenz im B^0 - \bar{B}^0 -Komplex ist relativ groß, wie zuerst 1987 von der ARGUS-Kollaboration bei DESY gemessen wurde [11], und technisch ist es möglich, e^+e^- -Kollisionen mit asymmetrischen e^+ - und e^- -Strahlen durchzuführen. Dies erlaubte ein extrem reiches experimentelles Programm an den beiden Experimenten BELLE und BABAR am KEK bzw. am SLAC. Zu den Highlights gehören Messungen von CP-Asymmetrien in etlichen hadronischen B -Mesonen-Zerfällen [12], wie $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$, $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $B \rightarrow K\pi$, $B \rightarrow DK$ usw., die wiederholt den KM-Mechanismus der CP-Verletzung bestätigt haben [13]. Insbesondere sind die CP-Asymmetrien bei den K -Mesonen und den B -Mesonen untereinander und mit dem globalen CKM-Bild kompatibel. Diese Synthese ist ein großer Triumph des Standardmodells!

4) Also, $K_L = K_2 + \epsilon_K K_1$ und $K_S = K_1 + \epsilon_K K_2$, wobei $CP(K_1) = +1$ und $CP(K_2) = -1$.

5) Das zugehörige Neutrino ν_τ hat im Jahr 2000 das DONUT-Experiment am Fermilab nachgewiesen.

Diese Bestätigung machte ihn glücklicher als die Bekanntgabe des Nobelpreises, sagte Maskawa in seiner ersten Reaktion. Darin drückt sich seine Geradlinigkeit aus, seine klare Art zu argumentieren und die vollkommene Gelassenheit, für die er bekannt ist. Maskawa blieb der Universität Kyoto treu und wurde Direktor am Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP), wo er heute als emeritierter Professor weiter arbeitet. Kobayashi hingegen verließ Kyoto 1979 und ging zur High Energy Accelerator Research Organization KEK in Tsukuba, wo er Direktor des Institute of Particle and Nuclear Physics wurde und seit 2006 als emeritierter Professor tätig ist. Kobayashi war von Anfang an ein zurückhaltender Mensch, eher schüchtern, und er ist so geblieben. Seine erste Reaktion auf die Nachricht der Nobelpreisverleihung ist typisch für ihn: Er fühle sich geehrt, den Preis für eine lange zurückliegende Arbeit zu erhalten.

Von der Fermi-Theorie des Betazerfalls im Jahre 1934 bis zu

unserem jetzigen Verständnis der schwachen Wechselwirkung und der CP-Asymmetrien war es eine lange und faszinierende Reise, die durch die enge Zusammenarbeit von Theorie und Experiment zustande kam. Die KM-Theorie hat eines der großen Rätsel gelöst, nämlich wie sich die CP-Asymmetrien in hadronischen Zerfällen erklären lassen. Trotz dieses großen Erfolges ist ziemlich sicher, dass sich die beobachtete Baryon-Asymmetrie des Universums, also das Vorherrschen von Materie über Antimaterie, nicht durch diesen Mechanismus erklären lässt. Hierfür ist wohl „Physik jenseits des Standardmodells“ unverzichtbar. Diese zu entdecken ist die nächste experimentelle Herausforderung!

- [1] S. Sakata, Prog. Theor. Phys. **16**, 686 (1956)
- [2] Z. Maki, M. Nakagawa und S. Sakata, Prog. Theor. Phys. **28**, 870 (1962)
- [3] E. Fermi, Z. Phys. **88**, 161 (1934)
- [4] N. Cabibbo, Phys. Rev. Lett. **10**, 531 (1963)
- [5] M. Gell-Mann und M. Levy, Nuovo

Cim. **16**, 705 (1960)

- [6] S. L. Glashow, J. Iliopoulos und L. Maiani, Phys. Rev. D **2**, 1285 (1970)
- [7] M. Kobayashi und K. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973)
- [8] K. Iwasawa, Ann. of Math. **50**, 507 (1949)
- [9] vgl. K. Kleinknecht, Physik Journal, August/September 2008, S. 37
- [10] L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. **13**, 562 (1964)
- [11] H. Albrecht et al. [ARGUS Collaboration], Phys. Lett. **B192**, 245 (1987)
- [12] B. Aubert et al. [BABAR Collaboration], Phys. Rev. Lett. **89**, 201802 (2002); K. Abe et al. [Belle Collaboration], Phys. Rev. D **66**, 071102 (2002)
- [13] vgl. A. Höcker und H. Lacker, Physik Journal, Juli 2006, S. 33

DER AUTOR

Ahmed Ali beschäftigt sich seit mehr als 35 Jahren mit der Theorie der schwachen Wechselwirkung. Er studierte Physik an der Universität Islamabad (Pakistan) und promovierte 1971. Danach hat er am Abdus Salam International Center for Theoretical Physics in Trieste, am Stevens Institute of Technology, New Jersey, an der Universität Hamburg sowie am CERN gearbeitet. Im Jahr 2000 ernannte ihn die Universität Hamburg zum Professor.

