

Respekt für Symmetrie

Physik-Nobelpreis 2008 für Entdeckung der spontanen Symmetriebrechung

Chris Quigg und Bruce D. Winstein

Yoichiro Nambu ist für viele seiner Kollegen auf der ganzen Welt seit langem eine Ikone. Sie alle haben die Verleihung des Physik-Nobelpreises 2008 an ihn „für die Entdeckung des Mechanismus‘ der spontanen Symmetriebrechung in der subatomaren Physik“ mit großer Wertschätzung begrüßt. Für jeden aufstrebenden Theoretiker bilden Nambus Beiträge ein wesentliches Element seiner Ausbildung, ganz besonders in der Teilchenphysik. Nambu erhält eine Hälfte des Nobelpreises, die andere teilen sich die beiden japanischen Physiker Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa.

Von den frühen Untersuchungen von Dispersionsrelationen, die eng mit den analytischen Eigenschaften von Streuamplituden zusammenhängen, über die Anfänge der Quantenchromodynamik als Theorie der starken Wechselwirkung bis zur Geburt der Stringtheorie und darüber hinaus war Nambu durchweg seiner Zeit voraus. Seine Ideen und seine Art zu denken durchdringen das Standardmodell der Teilchenphysik. Zugleich war die Untersuchung von Nambu-Goldstone-Moden, Spinwellen, „Zweitem Schall“ und deren Dämpfung in Magneten, Suprafluiden und Flüssigkristallen eines der zentralen Gebiete der Festkörperforschung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts.

Nambus Forschungsarbeiten weisen ihn als akribischen Denker aus, der die in einem Bereich gewonnenen Erkenntnisse auf unerwartete und aufschlussreiche Weise an anderer Stelle angewendet hat. Sein mathematisches Geschick ist gepaart mit einer scharfsinnigen physikalischen Intuition. Als Person ist Nambu ordentlich, ein bisschen förmlich, zurückhaltend und bescheiden – und durchdrun-



Yoichiro Nambu bei der Pressekonferenz an der University of Chicago nach der Bekanntgabe des diesjährigen Physik-Nobelpreises. Nambu kam 1954 nach

Chicago – also zu der Zeit, als die Ära Fermi zu Ende ging – und war dort Professor bis zu seiner Emeritierung 1991.

gen von einem subtilen Sinn für Humor. Es ist nicht ungewöhnlich, dass er jüngeren Kollegen dafür dankt, dass sie mit ihm seine fortschrittlichsten Ideen diskutieren. Sein langjähriger Kollege Peter Freund hat über Nambu ein einfühlendes Portrait veröffentlicht [1]. Von Nambu selbst ist ein Band mit ausgewählten Arbeiten erschienen [2], er hat aber auch für ein allgemeines Publikum geschrieben [3].

Versteckte Symmetrien aufgespürt

Wir Physiker haben gelernt, Symmetrien besondere Aufmerksamkeit zu schenken, vor allem wenn es sich um Symmetrien der Naturgesetze handelt. Aus der Erfahrung wissen wir, dass sich diese Symmetrien nicht notwendigerweise in den Folgerungen manifestieren müssen, die sich aus den Naturgesetzen ziehen lassen. Die Gesetze der Elektrodynamik, die bestimmen, wie sich die Moleküle in einem Tropfen Wasser anordnen, sind zwar invariant unter drei-

dimensionalen Rotationen. Aber bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts kristallisiert Wasser als Schneeflocke – eine näherungsweise ebene Struktur mit sechszähliger Symmetrie. Von der ursprünglichen $SO(3)$ -Symmetrie bleibt nur eine Subgruppe: der diskrete Satz C_6 der Rotationen um $\pi/3$ um eine einzige Symmetrieachse senkrecht zur Schneeflocke. Wenn ein physikalisches System unter gewissen Umständen nicht die gleiche Symmetrie aufweist wie die Gesetze, die es beschreiben, spricht man davon, dass die Symmetrie versteckt oder spontan gebrochen sei. In der Regel ist ein Phasenübergang von der spontanen Brechung einer Symmetrie begleitet.

Das Nobel-Komitee betont die von Nambu entdeckten, weitreichenden Folgerungen aus den versteckten Symmetrien im subatomaren Reich, das durch die relativistischen Quantenfeldtheorien beschrieben wird. Seine Einsichten stoßen dort ein neues Tor auf, ursprünglich gingen sie aber aus dem scheinbar entfernten Schauplatz der Supraleitung hervor. Dort weist der

Chris Quigg, Theoretical Physics Department, MS106, Fermi National Accelerator Laboratory, P.O. Box 500, Batavia, IL 60510 USA;
Bruce D. Winstein, Department of Physics, University of Chicago, 5640 S. Ellis Ave., Chicago, IL 60637 USA

Yoichiro Nambu promovierte an der Universität Tokyo bei Shinichiro Tomonaga und verbrachte dann zwei Jahre am renommierten Institute for Advanced Study in Princeton. Anschließend ging er nach Chicago, wo dieses Foto 1969 entstand.

Univ. of Chicago, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives



supraleitende Grundzustand in der mikroskopischen Bardeen-Cooper-Schrieffer-Theorie nicht die Eichsymmetrie der zugrunde liegenden Theorie, der Elektrodynamik, auf. Nambu fand, dass dieses Fehlen der Eichsymmetrie kein Defizit der BCS-Theorie ist, sondern dass darin gerade der Schlüssel liegt, um die Eigenschaften des Supraleiters zu verstehen [4]. Der supraleitende Grundzustand ist eine Konsequenz der spontan gebrochenen Eichsymmetrie der Elektrodynamik – der Freiheit, die Phase der Elektron-Wellenfunktion an jedem Punkt im Raum unabhängig voneinander zu ändern. Nambu zeigte, dass die wundersamen Eigenschaften des Supraleiters – einschließlich des gänzlich widerstandslosen Stromflusses und des Meißner-Effekts, d. h. des Hinausdrängens des magnetischen Flusses – aus der spontanen Brechung der kontinuierlichen Phasensymmetrie $SO(2)$ zur Untergruppe C_2 folgt. Diese Phasenrotationen um π ändern das Vorzeichen der Elektronenwellenfunktion.

Wie Nambu bemerkte, zieht die spontane Brechung der Eichsymmetrie kollektive Anregungen nach sich, deren Frequenz im Grenzfall großer Wellenlängen verschwindet

und die daher masselosen Teilchen entsprechen. Seine Vermutung, dass solche masselosen Spin-0-Teilchen immer dann auftauchen müssen, wenn eine kontinuierliche Symmetrie spontan gebrochen wird, führte zum Goldstone-Theorem, das in vielen Gebieten der Physik von Bedeutung ist [5]. Solche masselosen skalaren Teilchen sind heute als Nambu-Goldstone-Bosonen bekannt.

Für die bekannten Beispiele von versteckten Symmetrien, wie die spontane Magnetisierung eines Eisenstücks, die Kristallisation und die Supraleitung, hängt der Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung mit den Eigenschaften der Stoffe zusammen. Nambu erkannte, dass das Vakuum selbst – der Zustand niedrigster Energie – eine gebrochene Symmetrie aufweisen kann [6]. Diese Idee wandte er auf die schwache Wechselwirkung an, die für den nuklearen Betazerfall verantwortlich ist. Nach der Entdeckung der Paritätsverletzung war gerade bekannt geworden, dass sich die schwache Wechselwirkung auf Vektor- und Axialvektorströme zurückführen lässt.¹⁾ Wie beim elektromagnetischen Strom bleibt auch hier der schwache Vektorstrom

erhalten, sodass eine Kontinuitätsgleichung erfüllt ist. Nambu stellte sich die Frage, ob dies auch für den schwachen Axialvektorstrom gilt.

Erhaltungssätze sind über das Noethersche Theorem mit kontinuierlichen (globalen) Symmetrien verknüpft. Diese Verbindung gilt sogar, wenn die Symmetrie spontan gebrochen ist. Während es sich bei der Symmetrie in der Elektrodynamik um die bereits erwähnte elektromagnetische Eichinvarianz handelt, folgt der erhaltene Vektorstrom beim Betazerfall aus der Isospinsymmetrie der Kernphysik. Eine als chiral bekannte Symmetrie, die mit einer Invarianz unter unabhängigen globalen Transformationen von links- und rechts-händigen Nukleonen einhergeht, würde einen erhaltenen Axialstrom implizieren. Aber eine exakte chirale Symmetrie kollidiert sofort mit der experimentellen Realität: Wäre diese Symmetrie tatsächlich wirksam, so müssten Proton und Neutron masselos sein. Wäre sie spontan gebrochen, müsste ein Isospin-Triplett von masselosen, spinlosen Teilchen mit ungerader Parität existieren. Keine der beiden Möglichkeiten trifft jedoch zu.

Für den Fall, dass die chirale Symmetrie nicht nur spontan gebrochen, sondern sogar nur näherungsweise gelten würde, folgerte Nambu scharfsinnig, dass das Teilchen-Triplett nicht masselos sein müsste, sondern wesentlich leichter als die anderen stark wechselwirkenden Teilchen wie das Proton und das Neutron. Die drei Pionen, π^+ , π^0 und π^- , die Hideki Yukawa in den 30er-Jahren als Träger der Kernkraft eingeführt hat, wiegen etwa ein Siebtel der Protonenmasse und passen perfekt in dieses Bild. Heute nennen wir die leichten Teilchen, die bei der spontanen Brechung einer näherungsweise gültigen Symmetrie entstehen, pseudo-Nambu-Goldstone Bosonen. Sie tauchen in so unterschiedlichen Szenarien wie der Kosmologie und den „little Higgs-Modellen“ der elektroschwachen Symmetriebrechung auf.

In zwei gemeinsamen Arbeiten mit Giovanni Jona-Lasinio formu-

1) Ein Axialvektor ändert sein Vorzeichen bei einer Punktspiegelung nicht, im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Vektor. Beide Ströme sind notwendig, um die P-Verletzung in die Theorie integrieren zu können.

lierte Nambu ein explizites Arbeitsmodell, in dem die Nukleonenmasse im Wesentlichen aus einer Selbstenergie hervorgeht, analog zum Auftreten der Energielücke in der Supraleitung [7]. Nach der Einführung einer kleinen „nackten“ Nukleonenmasse und unter der Annahme, dass die chirale Symmetrie spontan gebrochen ist, erscheinen die Pionen dabei als leichte gebundene Nukleon-Antinukleon-Zustände. Dieses Modell nahm drei Jahre vor der „Erfindung“ der Quarks unser gegenwärtiges Verständnis der Massen von stark wechselwirkenden Teilchen im Rahmen der Quantenchromodynamik vorweg und hat als Vorlage für viele nachfolgende theoretische Entwicklungen gedient.

Ein weiterer zentraler Fortschritt für das Standardmodell der Teilchenphysik geht auf Francois Englert und Robert Brout, Peter Higgs sowie Gerald Guralnik, Richard Hagen und Tom Kibble zurück [8]. Diese entdeckten, wie sich das Goldstone-Theorem umgehen lässt: Wenn eine lokale Eichsymmetrie spontan gebrochen ist, entsteht aus den vermeintlichen Nambu-Goldstone-Bosonen der dritte Polarisationszustand von massiven Spin-1-Eichbosonen.²⁾ Der Prototyp dafür ist eben jenes massive Photon in einem supraleitenden Medium, das den Meißner-Effekt erklärt. Steven Weinberg und Abdus Salam entwickelten aus dieser Einsicht den essenziellen Beitrag zur elektroschwachen Theorie [9]. Auf diesen Aspekt richtet sich unsere Aufmerksamkeit, wenn der Large Hadron Collider am CERN beginnt, die TeV-Skala zu erkunden.

Post von Nambu

Eine wenig bekannte Facette von Nambus Verhältnis zu Experimenten hat sich einem von uns, Bruce Winstein, Mitte der 70er-Jahre erschlossen. Zu dieser Zeit gab Winstein als junger Assistentenprofessor einen Sommerkurs über Wellen und Optik. In einem der Laborversuche wiederholten Studenten das berühmte Michel-

son-Morley-Experiment, das die Existenz des Äthers widerlegte. Winstein berechnete die Transferfunktion des Michelson-Interferometers und überprüfte sein gewonnenes Ergebnis im Labor. Als er die Weglänge des Laserlichts so einstellte, dass sich eine destruktive Interferenz ergab, beobachtete er jedoch merkwürdige Verzerrungen des Strahlflecks.

Sogleich machte er sich auf die Suche nach einem Kollegen, mit dem er über diese seltsame Beobachtung diskutieren konnte. Einzig Yoichiro Nambu war an diesem Sommertag in seinem Büro. Nambu stimmte Winsteins Analyse der Apparatur zu und versprach, über das merkwürdige Ergebnis nachzudenken. Seinem Wort treu bleibend, rief Nambu am Abend seinen jungen Kollegen zuhause an. Nach einigen Diskussionen gelangten sie zu dem Schluss, dass Mehrfachreflexionen von der Oberfläche des Strahlteilers die Ursache sein müssten, was man mit einem Strahlteiler von unterschiedlicher Dicke überprüfen könnte. Doch beim Laborpersonal ließ sich kein anderer Strahlteiler auftreiben. Im flott voranschreitenden Sommerkurs fehlte schließlich die Zeit, um der Beobachtung weiter nachzugehen.

Einen Monat nach Kursende erhielt Winstein überraschend ein Päckchen mit einem neuen Strahlteiler. Damit konnte er nun im Labor das erwartete Verhalten beobachten. Sogleich wollte er Nambu aufsuchen, um ihm davon zu berichten. Doch der war verreist. Das Laborpersonal reagierte ahnungslos, als Winstein ihnen für den neuen Strahlteiler danken wollte. Einige Zeit später überraschte Nambu Winstein mit der Frage, ob er den Strahlteiler erhalten habe. Doch woher wusste Nambu von der neuen Apparatur? Nun, er selbst hatte das rätselhafte Päckchen in die Post gegeben! Den Strahlteiler hatte er in einem Laden gefunden, als er Zubehör für einen Laser gekauft hatte, den er mit seinem Sohn im Keller seines Hauses baute. Selbst langjährige Kollegen wussten nicht, dass Nambu auch ein begeisterter Amateur-Experimentator war.

In die Lehrbücher eingegangen ist Yoichiro Nambu jedoch als berühmter Theoretiker. Seine wegweisende Arbeit über gebrochene Symmetrien ist dabei nur ein Teil seines wissenschaftlichen Vermächtnisses. Sein Einfluss ist allgegenwärtig und wird die Physik auch weiterhin bereichern.

- [1] *P. Freund*, *A Passion for Discovery*, World Scientific, Singapore (2007), Kapitel 17, *The Serene Sensei*
- [2] *T. Eguchi* und *Y. Nishijima* (Hrsg.), *Broken Symmetry*, Selected Papers by Y. Nambu, World Scientific, Singapore (1995)
- [3] *Y. Nambu*, *Quarks: Frontiers in Elementary Particle Physics*, World Scientific, Singapore (1985)
- [4] *Y. Nambu*, *Phys. Rev.* **117**, 648 (1960)
- [5] *J. Goldstone*, *Nuovo Cim.* **19**, 154 (1961); *J. Goldstone*, *A. Salam* und *S. Weinberg*, *Phys. Rev.* **127**, 965 (1962)
- [6] *Y. Nambu*, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 380 (1960)
- [7] *Y. Nambu* und *G. Jona-Lasinio*, *Phys. Rev.* **122**, 345 (1961) und *Phys. Rev.* **124**, 246 (1961)
- [8] *F. Englert* und *R. Brout*, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 321 (1964); *P. W. Higgs*, *Phys. Lett.* **12**, 132 (1964) und *Phys. Rev. Lett.* **13**, 508 (1964); *G. S. Guralnik*, *C. R. Hagen* und *T. W. B. Kibble*, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 585 (1964)
- [9] *S. Weinberg*, *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1264 (1967); *A. Salam*, in: *Elementary Particle Theory: Relativistic Groups and Analyticity: Proceedings of the 8th Nobel Symposium*, hrsg. von *N. Svartholm*, Almqvist & Wiksell, Stockholm (1968), S. 367

2) Ein masseloses Spin-1-Teilchen wie das Photon hat nur zwei transversale Polarisationsfreiheitsgrade. Im Gegensatz dazu verfügt ein massives Spin-1-Teilchen auch über einen longitudinalen Polarisationsfreiheitsgrad.

DIE AUTOREN

Chris Quigg arbeitet seit über 30 Jahren am Theoretical Physics Department des Fermilab, dessen Leiter er zehn Jahre lang war. Quigg ist derzeit als Alexander-von-Humboldt-Gastprofessor am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe und regelmäßig als Gastwissenschaftler am CERN. Er hat an der Yale University und der University of California in Berkeley Physik studiert bzw. promoviert.

Bruce Winstein war nach seinem Studium und der Promotion Anfang der 70er-Jahre zwei Jahre lang am MPI für Physik in München, bevor er an die University of Chicago ging, wo er seither Professor ist. Nachdem er sich viele Jahre lang mit experimenteller Teilchenphysik beschäftigt hat, insbesondere der CP-Verletzung in Zerfällen von K-Mesonen, liegt sein Interesse nun bei der beobachtenden Kosmologie. Winstein ist Gründungsdirektor des Kavli Institute for Cosmological Physics.



Mariana Cook

