

American Association of Physics Teachers (AAPT), courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives

Chien-Shiung Wu

Ihr Nachweis der Quantenverschränkung und ihre frühen Photonenexperimente

Michelle Frank

Am Neujahrstag 1950 veröffentlichten Chien-Shiung Wu und einer ihrer Doktoranden, Irving Sharknov, auf nur einer Seite in Physical Review den weltweit ersten dokumentierten Nachweis von verschränkten Photonen in einem Labor. Einige Wissenschaftshistoriker:innen sind der Ansicht, dass dies ein früher Anstoß für die zweite Quantenrevolution war.

Chien-Shiung Wu wird oft als „die chinesische Marie Curie" bezeichnet, obwohl sie die meisten ihrer wissenschaftlichen Forschungen in den Vereinigten Staaten durchführte [1]. Sie ist vielleicht am ehesten für ihre Entdeckung der Nichterhaltung der Parität für Teilchen mit schwacher Wechselwirkung bekannt. Ihr Experiment trug dazu bei, dass Chen Ning Yang und Tsung-Dau Lee im Jahr 1957 den Nobelpreis erhielten. Trotz der Bedeutung ihrer Entdeckung wurde Wu weder in diesem Jahr noch danach bei der Nobelpreisvergabe einbezogen. Heute ist allgemein anerkannt, dass sie einen entscheidenden Schritt auf dem Weg zum Standardmodell der Elementarteilchen geleistet hat, und bisweilen wird argumentiert, dass ihre Entdeckung letztlich Antworten auf die Frage liefern könnte, warum es im Universum etwas und nicht nichts gibt. Mit anderen Worten: Die Nichterhaltung der Parität ist ein Hinweis darauf, warum sich Materie und Antimaterie in den frühesten Momenten des Kosmos nicht vollständig vernichtet haben. Wus Paritätsexperiment von 1956 wurde berühmt, weil es ein physikalisches Gesetz umstieß. Ihre wesentlichen Beiträge zu unserem Verständnis der Quantenverschränkung sind jedoch weniger bekannt und sollen daher hier gewürdigt werden.

Quantenphysikerinnen

Alle Beiträge dieser Serie finden sich online in einem Dossier unter folgendem Link: *https://pro-physik.de/dossiers/quanten-physikerinnen*.

© 2025 Wiley-VCH GmbH

◀ Chien-Shiung Wu auf einer Teilchenphysik-Konferenz in Israel im Jahr 1967

Aus China in die USA

Die 1912 geborene Chien-Shiung Wu wuchs in China in einer Zeit auf, in welcher der chinesische Nationalismus und politische Bewegungen wie die Neue Kulturbewegung und die chinesische Bewegung des 4. Mai neue Regierungs- und Gesellschaftsstrukturen sowie neue Rollen für Mädchen und Frauen forderten. Wus Vater eröffnete die erste Grundschule für Mädchen in der Region, und ihre Familie sorgte dafür, dass sie die bestmögliche Ausbildung erhielt. 1936 reiste Wu in die Vereinigten Staaten, um in Physik zu promovieren – in der sicheren Erwartung, mit ihrem Doktortitel wieder nach China zurückzukehren.

In den USA sah sie sich allerdings den neuen politischen Entwicklungen ausgesetzt, etwa den ausgrenzenden Einwanderungsgesetzen, der amerikanischen Kriegsführung und den Repressionen der McCarthy-Ära. Als die Vereinigten Staaten im Dezember 1941 in den Zweiten Weltkrieg eintraten, war Wu gerade Doktorandin an der University of California in Berkeley. Von diesem Zeitpunkt an unterbrachen die internationalen Konflikte für viele Jahre den Kontakt zu ihrer Heimat und ihrer Familie.

Frühe Experimente mit verschränkten Photonen

Wus frühe Arbeiten zur Quantenverschränkung begannen 1949 an der Columbia University, wo sie mit ihrem Doktoranden Irving Shaknov ein neues Experiment mit Materie und Antimaterie durchführte [2]. Ihre Ergebnisse zeigten, dass Photonenpaare aus der Elektron-Positron-Annihilation verschränkt sind, da diese selbst in einiger Entfernung von der ursprünglichen Wechselwirkung stets rechtwinklig zueinander polarisiert bleiben. Zum Zeitpunkt des Wu-Shaknov-Experiments von 1949 hatten die Physiker bereits die Grundlagen der Elektron-Positron-Kollisionen verstanden. Der amerikanische Physiker John Archibald Wheeler hatte jedoch ein Experiment vorgeschlagen, um zu zeigen, dass die entstehenden Photonenpaare auch orthogonal zueinander polarisiert sind. Dieser Aspekt der Paartheorie war es, der den aus Chile stammenden Laserphysiker Francisco Duarte Jahrzehnte später dazu veranlasste, ihn als „die Essenz der [Quanten-]Verschränkung" zu charakterisieren [3].

In der knapp eine Seite langen Veröffentlichung von Wu und Shaknov kommt das Wort „Verschränkung" allerdings nicht vor. Stattdessen diskutierten die beiden jenen Test für die „Paartheorie", den Wheeler 1946 vorgeschlagen hatte. Sie entschieden sich unter anderem deshalb für diesen Test, weil andere ähnliche Experimente ohne schlüssige Ergebnisse geblieben waren. Wu war zuversichtlich, dass ein neuer Szintillationszähler ihre Erfolgsaussichten verbessern würde. In der Tat erzielte sie damit außergewöhnliche Resultate. Das Experiment zeigte „eine hundertfache Steigerung der Koinzidenzzählrate" im Vergleich zu den früheren Ergebnissen anderer und belegte, dass der von Wheeler vorgeschlagene Test funktionierte. Vor allem aber gelang es Wu und Shaknov damit, zum ersten Mal verschränkte Photonen im Experiment nachzuweisen.

Shaknov verlor im Mai 1952 sein Leben im Koreakrieg. Bei einem Aufklärungsflug für die Marine wurde sein Flugzeug abgeschossen. Die Ergebnisse zu verschränkten Photonen gerieten schon bald nach ihrer Veröffentlichung in Vergessenheit.

Eine „Kettenreaktion" in der Quantenphysik

Zwanzig Jahre später wiederholte Wu ihr Experiment aus dem Jahr 1949 zusammen mit Leonard Kasday, einem neuen Doktoranden an der Columbia University, und Jack Ullman, einem Postdoc, der sich ihnen anschloss. Diesmal verbesserten die Forscher ihre Messwinkel und verwendeten andere Materialien in ihrer Apparatur. Außerdem sprachen sie die Verschränkung explizit an. Die neuen Ergebnisse bestätigten die ursprünglichen Erkenntnisse von 1949 und erschienen zwischen 1971 und 1975 in drei Artikeln [4].

Die Gesamtheit der Experimente bildete die Grundlage für andere Physikerinnen und Physiker, die sich fragten, ob verborgene Variablen die mysteriösen Verbindungen zwischen räumlich getrennten Photonen erklären könnten. John Clauser, ebenfalls Absolvent der Columbia University, konzipierte den ersten offiziellen Bell-Test und führte ihn zusammen mit mehreren Kollegen durch, um nach Hinweisen auf versteckte Variablen zu suchen [5]. Das Experiment von Clauser überschnitt sich zeitlich eng mit Kasdays Arbeit unter Wu. Später inspirierte es nicht



AIP Emilio Segrè Visual Archives

Chien-Shiung Wu beim Zusammenbau eines elektrostatischen Generators am Smith College

© 2025 Wiley-VCH GmbH



American Association of Physics Teachers (AAPT), courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives

Chien-Shiung Wu mit drei ihrer Mitarbeiter:innen im Labor an der Columbia University

zuletzt Alain Aspect und Anton Zeilinger dazu, Clausers Experiment zu verfeinern und zu verbessern. Dabei fanden sich keine Hinweise auf versteckte Variablen. Im Jahr 2022 erhielten Clauser, Aspect und Zeilinger schließlich den Physik-Nobelpreis „für ihre Experimente mit verschränkten Photonen, mit denen sie die Verletzung der Bell-Ungleichungen nachgewiesen und Pionierarbeit in der Quanteninformationswissenschaft geleistet haben" [6].

Noch vor der Bekanntgabe der Nobelpreise 2022 veröffentlichte die Physikhistorikerin Indianara Silva einen Artikel, der gerade zur rechten Zeit kam [7]. Sie zeigte darin die entscheidende Ereigniskette auf, die Chien-Shiung Wu mit den Nobelpreisträgern des Jahres 2022 verbindet. Silvas argumentierte folgendermaßen:

- Clauser wurde zu seinem ersten Test für versteckte Variablen inspiriert, nachdem er die Arbeit von John Stewart Bell gelesen hatte.
- Bell wiederum wurde durch eine 1957 von David Bohm und seinem Doktoranden Yakir Aharanov verfasste Arbeit über versteckte Variablen inspiriert.
- Und genau diese Arbeit von Bohm und Aharanov stützte sich auf das Experiment von Wu und Shaknov aus dem Jahr 1949 [8].

Silvas Forschungen zeigten die Zusammenhänge sehr klar auf. Die Arbeit von Wu inspirierte Bohm. Bohm inspirierte Bell. Bell inspirierte Clauser dazu, über sein nobelpreisgekröntes Experiment nachzudenken. Mehr noch, heute wissen wir, dass Clauser, bevor er seinen eigenen Bell-Test begann, auch Wu konsultiert hatte.

Im Anschluss an Silvas Veröffentlichungen erschienen weitere Arbeiten, die Wus Bedeutung für die Verschränkungsgeschichte herausarbeiten. Chon-Fai Kam, Chen-Ning Zhang und Da Hsuan Feng haben zum Beispiel Wus Bedeutung für die Verschränkung hervorgehoben und Yu Shi hat wertvolle neue Details beigetragen [9]. Das Wu-Shaknov-Experiment und die nachfolgenden Arbeiten von Kasday, Ullmann und Wu werden zu Recht als entscheidende Grundlage und Sprungbrett für die nachfolgenden Verschränkungsexperimente gefeiert.

Eine Türöffnerin

Als Wu ihre zweite Runde von Verschränkungsexperimenten leitete, waren die neuen Bürgerrechtsgesetze gerade in den Universitäten angekommen. Sie drängte die Leitung der Columbia University unermüdlich dazu, ungerechte Hindernisse zu beseitigen, die Frauen von der vollen Teilhabe an der Wissenschaft und der akademischen Welt abgehalten hatten, und leitete neben ihrer Vollzeittätigkeit einen Fakultätsausschuss, der zur Durchsetzung der neuen Schutzbestimmungen beitrug [10]. Wus außergewöhnliche physikalische Entdeckungen und ihre bahnbrechende Führungsrolle waren selbst miteinander verschränkt. Diese starke Kombination hat Wu schon zu Lebzeiten zu einer Ikone gemacht und nach ihrem Tode im Jahr 1997 steht sie bis heute für die volle und faire Teilhabe von Frauen an der Physik.

Literatur

[1] Vgl. ausführlicher *M. Frank*, Scientific American (2023): www.scientificamerican.com/article/ the-little-known-origin-story-behind-the-2022-nobel-prize-in-physics, für eine noch detaillierte Darstellung mit vollständigen Referenzen: *M. Frank*, in: *P. Charbonneau* et al. (Hrsg.), Women in the History of Quantum Physics, Cambridge University Press, Cambridge 2025, S. 277

[2] *C.-S. Wu* und *I. Shaknov*, Phys. Rev. **77**, 136 (1950)

[3] *J. A. Wheeler*, Ann. N. Y. Acad. Sci. **XLVIII**, 219 (1946); *F. Duarte*, Eur. Phys. J. H **37**, 311 (2012)

[4] *L. Kasday*, Experimental Test of Quantum Predictions for Widely Separated Photons, in: *B. d. Espagnat* (Hrsg.), Proc. Int. Sch. Phys. Fermi, Course IL, Academic Press, Cambridge (Mass.) 1971, S. 195; *L. Kasday*, Dissertation, Columbia University, New York 1972, https://doi.org/10.7916/5q2y-3494; *L. Kasday, J. Ullman* und *C.-S. Wu*,Il Nuovo Cimento B **25**, 633 (1975)

[5] *D. Kaiser*, How the Hippies saved Physics, W. W. Norton & Company, New York, London 2011; *O. Freire*, The Quantum Dissidents, Springer, Heidelberg 2015

[6] *J. Bell*, Physik Physique Физика **1**(3), 195 (1964); www.nobelprize.org/prizes/physics/ 2022/summary

[7] *A. M. Maia Filho* und *I. Silva*, Rev. Bras. Ens. Fis. **41**(2) (2019), https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0182; *I. Silva*, Chien-Shiung Wu's Contributions to Experimental Philosophy, in: *O. Freire Jr.* (Hrsg.), The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations, Oxford University Press, Oxford 2022

[8] *D. Bohm* und *Y. Aharonov*, Phys. Rev. **108**, 1070 (1957)

[9] *C.-F. Kam, C.-N. Zhang* und *D. Feng*, Physics Today, Dezember 2024, S. 28: https://digital.physicstoday.org/physicstoday/library/page/december_2024/28/; *Yu Shi*, arXiv:2502.06458 (2025)

[10] C. S. Wu Papers, Box 6, Rare Book and Manuscript Library, Columbia University

Die Autorin



Michelle Frank hat einen Juris Doctor von der University of Michigan und einen M.A. in Biography and Memoir vom CUNY Graduate Center. Sie war 2023/24 Sloan Fellow am Leon Levy Center for Biography und wurde 2024/25 zum Public Scholar des National Endowment for the Humanities gewählt. Sie arbeitet derzeit an einer Biografie über Chien-Shiung Wu, die demnächst bei Basic Books und Ebury Press/Penguin Random House erscheinen wird.

Dr. Michelle Frank, Leon Levy Center for Biography

© 2025 Wiley-VCH GmbH