

Hans A. Weidenmüller

Chaos und Unordnung in physikalischen Systemen



Geboren 1933 zu Dresden. Physikstudium in Bonn und Heidelberg, Promotion 1957. Als Assistent bzw. Research Associate in Heidelberg (1957/8) und Minneapolis (1958/9), als Research Assistant und Assistant Professor am California Institute of Technology 1959-62. Gastprofessor (1962/3) und ordentlicher Professor für theoretische Physik (1963-72) an der Universität Heidelberg, seither ordentlicher Professor ad personam daselbst. Seit 1968 wissenschaftliches Mitglied und Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Zahlreiche Aufsätze zur Theorie der Kernstruktur und Kernreaktionen, insbesondere zu deren statistischen Aspekten, zum chaotischen Verhalten von Atomkernen und zur Theorie mesoskopischer Systeme in einschlägigen Zeitschriften. Zwei Bücher: *Shell-Model Approach to Nuclear Reactions* (mit C. Mahaux), North-Holland Publishing Co., Amsterdam 1969, und *Introduction to the Theory of Heavy-Ion Scattering* (mit W. Nörenberg), Springer Verlag, Heidelberg 1976. Zahlreiche mehrmonatige Forschungsaufenthalte an Universitäten in Europa, USA und Japan. Hauptherausgeber der *Zeitschrift für Physik A* 1973 – 88. Umfangreiche Aufgaben in der wissenschaftlichen Selbstverwaltung. Starkes Engagement für die deutsch-israelische wissenschaftliche Zusammenarbeit. — Adresse: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Postfach 102980, D-69029 Heidelberg.

Das Jahr am Wissenschaftskolleg war für mich in zweifacher Weise ein besonderes Geschenk. Einmal weil ich, von erheblicher administrativer Belastung befreit, endlich wieder Zeit hatte: Zeit zu arbeiten, Zeit für die gemeinsamen wissenschaftlichen Veranstaltungen am Kolleg, Zeit für private Zirkel mit anderen Fellows, aber auch Zeit für das breite kulturelle Angebot der Stadt. Es wirklich auszunutzen ist unmöglich; einen kleinen Teil davon wahrzunehmen, habe ich mich nach Kräften bemüht. Zum zweiten war dies ein besonderes Jahr deshalb, weil ich mich als theoretischen

scher Physiker nicht allein, sondern mit einer Gruppe von Kollegen mit ähnlichen wissenschaftlichen Interessen in Berlin befand. Das Kolleg hatte uns allen zusammen in großzügiger Weise den gemeinsamen Aufenthalt ermöglicht. Ich glaube, daß diese Form des Aufenthalts am Wissenschaftskolleg für theoretische Naturwissenschaftler besonders attraktiv ist. Der kontinuierliche Diskurs mit Fachkollegen, der für die meisten unentbehrlich ist, besteht nicht nur fort, er wird in Intensität und Qualität durch die Anwesenheit von Fellows mit gleichen Interessen aus geographisch weit auseinander liegenden Instituten sogar erheblich gesteigert. Zugleich haben die Teilnehmer die reizvolle Möglichkeit, am wissenschaftlichen Leben des Kollegs teilzunehmen.

Nach einigen Wochen intensiver Gespräche, in denen die Mitglieder der Gruppe ihre neueren Arbeiten den anderen in einem täglichen Seminar vorstellten, entwickelten sich diverse Kollaborationen der Fellows, die im wesentlichen zwei Themen zum Gegenstand hatten: Die Manifestation klassisch-chaotischer Systeme in Quantensystemen und die Theorie mesoskopischer Systeme mit hoher Störstellenkonzentration. Beiden Themen gemeinsam ist der stochastische Charakter theoretischer Modellierungen. Neben das Fellow-Kolloquium am Dienstag trat für die Gruppenmitglieder als gleichgewichtige wissenschaftliche Veranstaltung unser Gruppenseminar am Freitag, das wir das ganze Jahr hindurch fortführten, und das von Mitgliedern der Gruppe und von zahlreichen Besuchern bestritten wurde. Wir lernten die laufenden Arbeiten der Gruppenmitglieder ebenso kennen wie neue Gedanken und Ergebnisse anderer. Die wissenschaftliche Arbeit der Gruppe fand zwar im Kolleg statt, doch haben wir auch den Kontakt zu den Berliner Hochschulen und Forschungsinstituten gesucht. Ich habe mehrere Vorträge und Kolloquien gehalten.

Meine wissenschaftlichen Arbeiten in diesem Jahr sind durch die eben beschriebene gemeinsame Unternehmung geprägt und teilweise in Zusammenarbeit mit zwei weiteren Fellows, Axel Müller-Groeling und Thomas Seligman, entstanden. Mein Wunsch, auch mit anderen Mitgliedern der Gruppe zusammenzuarbeiten, scheiterte am Umfang der bereits begonnenen Vorhaben. Allen Mitgliedern der Gruppe schulde ich Dank für intensive Diskussionen, vielfache Anregungen und konstruktive Kritik.

Mit vier Themen habe ich mich in Berlin wissenschaftlich auseinandergesetzt: Mit Permanentströmen in mesoskopischen Ringen, mit der semiklassischen Näherung à la Bloch-Balian-Gutzwiller für Systeme identischer Teilchen (Bosonen und Fermionen), mit Quantensignaturen für klassisch-chaotische Dynamik und mit chaotischem Verhalten von Atomkernen. Wie in der Physik üblich, sind die Ergebnisse nicht Teil eines Buches, sondern sind oder werden als Originalartikel in diversen Zeit-

schriften (*Europhysics Letters*, *Nuclear Physics A*, *Physica*, *Physical Review A* und *B*, *Physical Review Letters*) veröffentlicht. Teilergebnisse wurden als eingeladene Vorträge auf zwei Konferenzen — „Frontiers in Condensed-Matter-Physics“ an der Bar-Ilan University in Israel im März und „Perspectives in Nuclear Structure“ am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen im Juni – vorgetragen. Im folgenden werde ich meinen resp. unseren Beitrag zu den genannten Themen behandeln.

1. Permanentströme in mesoskopischen Ringen

Quantenkohärenz ist ein zentrales Thema in der Physik mesoskopischer Systeme, und der Permanentstrom, den ein Magnetfeld, welches die Öffnung eines mesoskopischen Ringes durchsetzt, als thermodynamischen Gleichgewichtszustand hervorruft, ist eine empfindliche Probe für diese Kohärenz. Um so beunruhigender ist die Tatsache, daß die seit etwa drei Jahren vorliegenden Meßwerte an Proben im diffusiven Bereich um mindestens zwei Größenordnungen von der Theorie abweichen. Letztere benutzt das Modell unabhängiger Elektronen im Zufallspotential als Simulation der Streuung an den Störstellen und liefert im Ensemblemittel viel zu kleine Werte für den Strom. Die allgemeine Vermutung geht dahin, daß die in der Theorie bisher vernachlässigte Coulombwechselwirkung zwischen den Elektronen für die große Diskrepanz verantwortlich ist.

Zur Klärung dieses Sachverhalts haben sich A. Müller-Groeling und ich analytisch und numerisch mit der Theorie ringförmiger Proben beschäftigt, die entweder strikt eindimensional sind oder so dünn, daß sie nur wenige transversale Elektronenzustände unterhalb der Fermikante besitzen. (Wir verfügen über analytisch gewonnene Einsichten, die auch für echt zweidimensionale Proben gelten, aber eine numerische Simulation für solche Proben war nicht möglich.) In solchen Proben haben wir den Einfluß der (abgeschirmten) Coulombwechselwirkung, von Störstellenstreuung und periodischem Potential auf den Permanentstrom am Nullpunkt der absoluten Temperatur untersucht. Dabei haben wir den Symmetrieforderungen an die Eigenfunktionen, die sich aus Pauliprinzip und Elektronenspin ergeben, besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Allerdings zeigt sich, daß der Strom von solchen Symmetrieeigenschaften allenfalls schwach abhängt.

Unsere Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Unter Vernachlässigung der Coulombwechselwirkung unterdrückt die Störstellenstreuung den Permanentstrom sehr stark. Das gilt in Ab- und in Anwesenheit eines periodischen Potentials. Die Coulombwechselwirkung konterkariert diese Unterdrückung sehr effektiv. Das ist das wesentliche Ergebnis der Arbeit. Es gibt Hinweise darauf, daß selbst schwache kurzreichweitige und abstoßende Kräfte (schwach im Vergleich zu einer realistischen

Abschätzung der abgeschirmten Coulombwechselwirkung) den Strom in die Nähe des Wertes bringen, den er ohne Störstellenstreuung hätte. Analytisch können wir zeigen, daß ohne Störstellenstreuung und ohne periodisches Potential die Coulombwechselwirkung keinen Einfluß auf den Strom hat. Das periodische Potential als solches beeinflußt den Strom ebenfalls nicht. In Kombination mit der Coulombwechselwirkung reduziert es den Strom.

Leider lassen sich unsere Resultate nicht unmittelbar auf den realistischen Fall dreidimensionaler Proben anwenden. Sie zeigen aber, daß die Coulombwechselwirkung einen bestimmenden Einfluß auf den Wert des Permanentstroms hat. Um so erstaunlicher ist der Umstand, daß die Theorie offener mesoskopischer Systeme, also insbesondere die Theorie der universellen Leitwertschwankungen, die Meßdaten unter Vernachlässigung der Coulombwechselwirkung wenigstens semiquantitativ erklären kann. Diese Tatsache bedarf der Klärung.

2. Diskrete Symmetrien und semiklassische Quantisierung

In den letzten Jahren haben neue Resultate zur semiklassischen Näherung zu einem tieferen Verständnis des Zusammenhangs zwischen spektralen Eigenschaften von Quantensystemen und klassischer Mechanik geführt. Das gilt insbesondere für solche dynamische Systeme, die im klassischen Grenzfall vollständig chaotisch sind. Beispielsweise ist die Niveaudichte semiklassisch die Summe zweier Terme. Der erste gibt die mittlere Niveaudichte, ausgedrückt durch ein Integral über den klassischen Phasenraum. Für Billards reduziert sich dieser Ausdruck auf die Weylformel. Der zweite Term ist die Gutzwillersche Summe über periodische Bahnen und liefert Korrekturen zur mittleren Niveaudichte. In Einzelfällen kann man daraus das volle Quantenspektrum gewinnen.

Eine bisher wenig behandelte Frage betrifft die Erweiterung dieser theoretischen Ergebnisse auf Systeme identischer Teilchen oder, allgemeiner gesprochen, auf Systeme, deren Hamiltonfunktion eine Punktsymmetrie besitzt. Im Falle identischer Teilchen wäre eine derartige Erweiterung die Brücke zur quantenmechanischen Vielteilchentheorie. Die Möglichkeiten einer solchen Erweiterung sind augenfällig. Mit H. M. Sommermann, einem Gast am Heidelberger Institut, hatte ich begonnen, dieser Frage nachzugehen. In Berlin habe ich die Untersuchungen fortgesetzt, teils allein, teils in Zusammenarbeit mit T. H. Seligman.

Die Grundidee des Vorgehens ist die folgende: Üblicherweise schreibt man die Niveaudichte als Spur über die Greensche Funktion und ersetzt die Spur dann durch ein Phasenraumintegral, wozu man im Falle der mittleren Niveaudichte die Wignertransformation benutzt, im Falle der Gutzwillersumme das Feynmansche Pfadintegral. Letzteres wird nach der

Methode der stationären Phase ausgerechnet, das führt schließlich auf die klassischen periodischen Bahnen. Im Fall identischer Teilchen (etwa Fermionen) wird der Ausdruck unter der Spur durch Einfügung eines Projektionsoperators modifiziert, der auf die Zustände der gewünschten Symmetrie (etwa antisymmetrische Zustände) projiziert. Das weitere Vorgehen ist ungeändert, führt aber auf neue Ausdrücke.

Nach diesem Verfahren wurde mit H. M. Sommermann die Weylformel für identische Teilchen in niederster Ordnung im Planckschen Wirkungsquantum berechnet. Numerische Beispiele für Systeme mit drei Freiheitsgraden zeigen gute Übereinstimmung mit exakter Diagonalisierung selbst in der Nähe des Grundzustandes. Diese Linie wird von H. Sommermann in Santa Barbara weiterverfolgt. — Für die Gutzwillersumme ergibt sich eine wesentliche Modifikation. Das Pauliprinzip bewirkt eine Veränderung der Amplitude, mit der die periodischen Bahnen zur Summe beitragen, ohne daß indessen neue Terme in der Summe aufträten. Derzeit arbeite ich mit T. H. Seligman an einer Verallgemeinerung dieses Ergebnisses auf Gruppen von Punktsymmetrien, die die Hamiltonfunktion invariant lassen.

3. Quantensignaturen für klassisch-chaotische Dynamik

Seit etwa zwölf Jahren ist bekannt, daß die Quantenspektren klassisch-chaotischer Systeme unter gewissen Bedingungen Fluktuationseigenschaften haben, die mit denen eines Ensembles von Zufallsmatrizen — des Gaußschen orthogonalen Ensembles — im Limes großer Matrixdimension übereinstimmen, während integrable Systeme Poissonstatistik haben. Diese Tatsache wird häufig benutzt, um Quantenspektren auf klassisch-chaotische Dynamik zu testen. Die entsprechenden Eigenschaften von Eigenfunktionen sind viel weniger gut verstanden. Ziel der mit L. Benet und T. H. Seligman gemeinsam durchgeführten Arbeit war es, eine ähnlich deutliche Signatur für Wellenfunktionen zu finden, die es erlaubt, klassisch-chaotische von klassisch-regulärer Dynamik zu unterscheiden.

Dazu wurde im Quantenfall der Einfluß einer Störung auf ein klassisch-reguläres System mit dem auf ein klassisch-chaotisches System verglichen. Um den Vergleich sinnvoll zu gestalten, mußte eine universell gültige Definition der Stärke einer Störung entwickelt werden. Es zeigt sich, daß die Verschmierungsbreite (*spreading width*) ein geeignetes Maß liefert. Dann wurde der Einfluß der Störung untersucht, indem die Eigenfunktionen des vollen Systems (inklusive Störung) nach den Eigenfunktionen des ungestörten Systems entwickelt wurden. Die Verteilung der Entwicklungskoeffizienten ist für klassisch-reguläre und klassisch-chaotische Systeme völlig verschieden; diverse Momente dieser Verteilung erweisen sich als geeignete Maße für klassisches Chaos.

4. Chaotisches Verhalten von Atomkernen

In der Kernspektroskopie hat in den letzten Jahren die Frage an Gewicht gewonnen, inwieweit die Spektren auf klassisch-chaotische Dynamik hinweisen. Schon seit langem ist bekannt, daß das bei mittelschweren und schweren Kernen an der Neutronenschwelle der Fall ist. In neuerer Zeit verdichten sich die Hinweise, daß schon bei viel geringeren Anregungsenergien ein solches Verhalten eintritt. Das führt zur Frage, bis wohin detaillierte Spektroskopie physikalisch sinnvoll ist und welche Freiheitsgrade im Kern reguläres dynamisches Verhalten aufweisen. Diese Frage wieder hängt eng zusammen mit der nach den charakteristischen Zeitskalen dieses Vielteilchenproblems.

Als Vorbereitung auf einen eingeladenen Vortrag auf einer Kernspektroskopiekonferenz im Herbst habe ich die neue Literatur gesichtet, geordnet und zusammengefaßt. Die eng mit dem Thema verknüpfte Frage nach der Symmetriebrechung in klassisch-chaotischen Quantensystemen hat durch neue Experimente zur Paritätsverletzung bei der Streuung polarisierter Neutronen an schweren unpolarisierten Kernen Auftrieb erhalten. Die Meßdaten zeigen eine unerwartete Asymmetrie im Vorzeichen. Auch zu diesem Thema habe ich einen eingeladenen Vortrag auf der Konferenz in Kopenhagen erarbeitet.

Für mich waren das Jahr wissenschaftlich ertragreich, der Aufenthalt am Kolleg anregend und fruchtbar. Die vielfältigen Gespräche mit den Fellows empfinde ich als eine bleibende Bereicherung, für die ich dankbar bin.