

zwischen optimalem Klonen und rein spontaner Emission variieren. Aus dem Vergleich der in den beiden Fällen gemessenen Wahrscheinlichkeiten, beide Photonen gleichermassen polarisiert vorzufinden, ergibt sich eine Güte von 0,81, ebenfalls nahe des optimalen Wertes für das Verdoppeln eines Qubits.

Klonen von Photonen ist also gar nicht so schwer! Dennoch wird die Physik wohl von einer Klondibatte verschont bleiben. Auch wenn man irgendwann Schrödinger-Katzen klonen sollte, sie werden nie identisch sein.

WOLFGANG TITTEL

- [1] H. K. Cummins, C. Jones, A. Furze, N. F. Soffe, M. Mosca, J. M. Peach und J. A. Jones, Phys. Rev. Lett. **88**, 187901 (2002).
- [2] A. Lamas-Linares, C. Simon, J. Howell und D. Bouwmeester, Science **296**, 712 (2002).
- [3] S. Fasel, N. Gisin, G. Ribordy, V. Scarani und H. Zbinden, <http://de.arxiv.org/abs/quant-ph/0203056>.
- [4] W. Tittel, J. Brendel, N. Gisin, G. Ribordy und H. Zbinden, Phys. Bl. Juni 1999, S. 25.

## Berry-Phase gemessen

**Transportmessungen in mesoskopischen Ringen aus GaAs zeigen Hinweise auf die geometrische quantenmechanische Berry-Phase von Elektronenspins.**

Knapp zwanzig Jahre sind bereits vergangen seit Michael Berrys grundlegender Arbeit zu der später nach ihm benannten geometrischen Phase in der Quantenmechanik [1]. Bereits oder erst, schließlich beruht ihre Existenz allein auf den fundamentalen Gesetzen der Quantenmechanik, die schon ein halbes Jahrhundert länger bekannt sind. Nach frühen Experimenten aus der Festkörperphysik [2] gelang es nun Jeng-Bang Yau und Kollegen von der Princeton University, die Berry-Phase in einem mesoskopischen Ring aus GaAs nachzuweisen [3].

Die Berry-Phase tritt auf in Quantensystemen, die von veränderlichen äußeren Parametern  $\mathbf{R}(t)$  (z. B. Magnetfeld) abhängen – vorausgesetzt, die Parameter ändern sich adiabatisch, das heißt so langsam, dass sich ein Eigenzustand  $|\psi_n(0)\rangle$  des Systems zum Zeitpunkt  $t=0$  zu einem Eigenzustand  $|\psi_n(t)\rangle$  des Systems zum Zeitpunkt  $t$  ent-

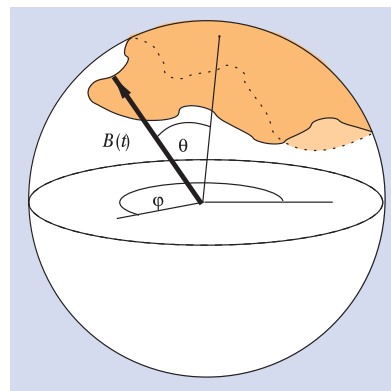
wickelt. Wenn wir nun die Zeitentwicklung des Zustands  $|\psi_n(t)\rangle$  durch Einsetzen in die Schrödinger-Gleichung berechnen, so finden wir neben der üblichen dynamischen Phase eine weitere Phase  $\gamma_g$ . Dieser wurde jedoch in den Anfängen der Quantenmechanik keine Aufmerksamkeit geschenkt, denn sie lässt sich durch die Wahl von anderen Eigenzuständen „wegtransformieren“. Aber Vorsicht! Für einen geschlossenen Weg,  $\mathbf{R}(0)=\mathbf{R}(T)$ , geht dies nicht mehr: Die Phase  $\gamma_g$  ist unabhängig von dieser Wahl. So kam Michael Berry zu der entscheidenden Erkenntnis, dass  $\gamma_g$  beobachtbare Auswirkungen haben kann. Die Berry-Phase  $\gamma_g$  hängt übrigens nur von der Form des Weges  $\mathbf{R}(t)$  ab und nicht etwa davon, wie dieser (adiabatisch) in der Zeit durchlaufen wird. Effekte, die von geometrischen Phasen verursacht sind, waren bereits vor Berry bekannt, wie dies in [4] ausführlich beschrieben ist.

Um nun eine Vorstellung der geometrischen Bedeutung der Berry-Phase zu erhalten, betrachten wir einen Spin 1/2 in einem Magnetfeld  $\mathbf{B}(t)$ , welches seine Richtung im Laufe der Zeit ändert. Wenn  $\mathbf{B}$  genügend stark ist, bleibt der Spin parallel (oder antiparallel) zu  $\mathbf{B}$  ausgerichtet, was der adiabatischen Annahme entspricht. Physikalisch bedeutet dies, dass der Spin viele Male um das Feld präzessieren kann, bevor dieses seine Richtung wesentlich ändert. Für eine geschlossene Kurve von  $\mathbf{B}(t)$  ist die Berry-Phase der halbe Raumwinkel, welchen  $\mathbf{B}(t)$  aufspannt –  $\gamma_g$  ist demnach ein geometrisches Objekt (Abb. 1).

Wie aber lässt sich die Berry-Phase experimentell nachweisen? Wie D. Loss, P. M. Goldbart und A. V. Balatsky gezeigt haben, lässt sie sich in mesoskopischen Systemen beobachten, da sie Auswirkungen auf den elektrischen Strom durch einen phasenkohärenten, wenige Mikrometer großen Ring in einem inhomogenen Magnetfeld hat [5]. Elektronen kommen hierbei auf der einen Seite des Ringes herein und fließen, analog zum Doppelspaltversuch, gleichzeitig durch beide Arme des Ringes. Die Bewegung des Elektronenspins durch den Ring führt zu einer Berry-Phase, ähnlich wie die bewegte Ladung eines Elektrons zu einer Aharonov-Bohm-Phase. Da beide Anteile der kohärenten Überlagerung das Mag-

netfeld in jeweiligen Arm des Ringes erfahren, akkumulieren sie unterschiedliche Phasen. Kommen die Anteile auf der anderen Seite des Ringes wieder zusammen, interferieren sie konstruktiv oder destruktiv: Es fließt viel oder wenig Strom; das so entstehende Interferenzmuster im Strom gibt Aufschluss über die Berry-Phase.

Die adiabatische Annahme ist für Halbleiterringe mit experimentell erreichbaren Feldstärken gerechtfertigt. Dies selbst für ballistische Ringe, in denen die Elektronen nicht streuen und sich also zügig durch das Magnetfeld bewegen. Anstelle eines externen inhomogenen Magnetfeldes führt auch ein effektives Magnetfeld, welches mittels der Spin-Bahn-Kopplung erzeugt wird, zu einer Berry-Phase [6]. Bewegt sich nämlich ein Elektron durch ein homogenes elektrisches Feld, entsteht im Ruhesystem des Elektrons ein an den Spin koppelndes Magnetfeld. Dieses effektive Magnetfeld steht senkrecht zur



**Abb. 1:** Die Berry-Phase  $\gamma_g$  ist eine geometrische Phase, die ein quantenmechanischer Zustand in einem sich adiabatisch verändernden äußeren Feld erhalten kann. Für ein Spin-1/2-Teilchen in einem Magnetfeld  $B$  ist  $\gamma_g$  die Hälfte des vom Magnetfeld eingeschlossenen Raumwinkels (orange); die parallele oder antiparallele Ausrichtung des Spins definiert das Vorzeichen von  $\gamma_g$ .

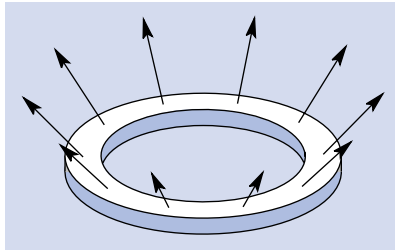
Bewegungsrichtung, zeigt also während eines Umlaufes durch den Ring in radiale Richtung. Durch Kombination mit einem äußeren homogenen Magnetfeld senkrecht zum Ring lässt sich ein inhomogenes Magnetfeld mit beliebiger Neigungsachse, wie in Abb. 2 gezeigt, erzeugen.

J.-B. Yau, E. P. De Poortere und M. Shayegan verwenden einen GaAs-Ring mit Spin-Bahn-Kopplung und untersuchen dessen elektrischen Widerstand als Funktion des äußeren Magnetfeldes. Dieser zeigt Interferenzmuster, verursacht durch Berry- und Aharonov-Bohm-Phasen. Zudem treten Effekte einer zusätzlichen Phase auf, die von den unterschiedlichen Geschwindigkeiten der beiden Spinrichtungen herrührt. Die Autoren zeigen, dass sie das gemessene Interferenzmuster (bzw. dessen Fourier-Transformierte) nur dann

mit einem theoretischen Modell in Übereinstimmung bringen können, wenn sie die Berry-Phase berücksichtigen. Deshalb folgern sie, dass diese in dem von ihnen betrachteten System auftritt.

Im Gegensatz zu Halbleitern ist in Metallen die Geschwindigkeit der Elektronen größer, sodass we-

**Abb. 2:** Mithilfe eines Ringes im inhomogenen Magnetfeld  $B$  ist es möglich, die Berry-Phase in einem Interferenzexperiment zu messen. Die Richtung von  $B$  ändert sich entlang des Ringes, nicht aber der Betrag. Solche Felder finden sich z.B. oberhalb eines geeigneten Stabmagneten oder werden effektiv durch Spin-Bahn Kopplung erzeugt.



sentlich höhere Feldstärken für die Beobachtung der Berry-Phase notwendig wären. Diese Einschränkung ist jedoch für diffusive Ringe (im Regime der schwachen Lokalisierung) aufgehoben, wie dies in weiteren Arbeiten von D. Loss et al. gezeigt wurde [7]. Die diffusive Bewegung entsteht durch elastische Streuung an Störstellen; dies beeinträchtigt zwar die Bahn der Elektronen, nicht aber deren Phasenkohärenz. Wie in ballistischen Ringen treten deshalb Interferenzeffekte aufgrund der Berry-Phase auf, die Elektronen bleiben jedoch viel länger in einer Region mit einer bestimmten Magnetfeldrichtung. So ist die adiabatische Annahme bereits für typischerweise 500 Gauß gerechtfertigt [8]. Diese Vorhersagen für Metalle wurden jedoch noch nicht im Experiment bestätigt. Daher sind auch in Zukunft spannende Experimente zu den faszinierenden geometrischen Phasen zu erwarten.

HANS-ANDREAS ENGEL  
UND DANIEL LOSS

Dipl.-Phys. Hans-Andreas Engel und Prof. Dr. Daniel Loss, Universität Basel, Klingelbergstrasse 82, 4056 Basel, Schweiz

1) Die Grenzen der angegebenen Intervalle beziehen sich auf den 5–95%-Konfidenzbereich, das heißt, die Grenzen werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% unter- bzw. überschritten.

2) Earth Simulator: [www.es.jamstec.go.jp](http://www.es.jamstec.go.jp)

Dr. Ulrich Cubasch, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg

- A. V. Balatsky, Phys. Rev. Lett. **65**, 1655 (1990).  
 [6] A. G. Aronov und Y. B. Lyanda-Geller, Phys. Rev. Lett. **70**, 343 (1993).  
 [7] D. Loss, H. Schoeller und P. M. Goldbart, Phys. Rev. B **48**, 15218 (1993).  
 [8] H.-A. Engel und D. Loss, Phys. Rev. B **62**, 10238 (2000).

## ■ Hitzige Fragen

**Zwei neue Modelle zeigen, dass Klimaschutz notwendig ist, sich aber erst längerfristig bemerkbar macht.**

„Wie wird sich das Klima in den nächsten drei Jahrzehnten entwickeln?“ Dies ist die Standardfrage, mit der jeder Klimaforscher nach einem Vortrag konfrontiert wird. Eine weitere Frage lautet: „Wie groß sind die Fehlerbalken bei den Temperaturvorhersagen?“ Auf beide Fragen lieferte der im Sommer 2001 veröffentlichte Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC) noch keine bzw. nur sehr vorläufige Antworten [1]. Hunderte von Wissenschaftlern hatten fünf Jahre lang das derzeitige Wissen über das Klima und seine Veränderlichkeit zusammengefasst und in dem 1000 Seiten langen Bericht veröffentlicht. Als Nebenprodukt dieser Arbeit wurden Wissenslücken deutlich und entsprechende Forschungsarbeiten angeregt. Nun sind zwei Veröffentlichungen erschienen, die sich mit den eingangsgestellten Fragen befassen und den IPCC-Bericht ergänzen. Auf der Grundlage von sehr unterschiedlichen Modellen kommen beide Arbeiten zum Ergebnis, dass die Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten unabhängig vom Emissionsszenarium ist und dass die vom IPCC genannten Obergrenzen für die Temperaturerhöhung innerhalb der nächsten 100 Jahre deutlich übertroffen werden können [2, 3].

Die englischen Autoren Stott und Kettleborough verwenden ein volles dreidimensionales gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell, um die Variationen im Klimasystem auf Zeitskalen von Stunden bis zu Jahrhunderten zu berechnen. Das Modell erlaubt es, die Reaktion des Klimasystems auf Veränderungen des natürlichen Antriebes (Schwankungen der Sonnenintensität, Vulkane) sowie der anthropogenen Faktoren (Treibhausgase, Aerosole)

während des 20. Jahrhunderts und für das 21. Jahrhundert zu berechnen. Allerdings benötigt es eine sehr hohe Rechnerleistung, sodass sich nur eine beschränkte Anzahl von Simulationen durchführen lässt. Die Autoren verwenden komplexe statistische Techniken, um die Klimaänderung im 20. Jahrhundert nachzuweisen und zu beschreiben, und benutzen diese Analyse, um die Schwankungsbreite des zukünftigen Klimas abzuschätzen und einzugrenzen. Auf diese Weise erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die mit dem Klimamodell vorhergesagten Temperaturänderungen.

In der zweiten Veröffentlichung eines schweizer Teams [3] wird ein vereinfachtes Klimamodell eingesetzt, in dem nur die Nord-Süd-Veränderung der Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung, die Nord-Süd- und Vertikalbewegung der Wassermassen im Ozean sowie seine Salzgehalt- und Temperaturverteilung explizit berechnet werden; alle weiteren Größen werden parametrisiert. Da dieses einfache Modell nur geringe Anforderungen an die Rechenleistung stellt, lassen sich sehr viele Simulationen (in dieser Arbeit 25 000!) mit verschiedenen Parameterkombinationen durchrechnen. Aus diesen Simulationen wurden diejenigen ausgewählt, welche die während des 20. Jahrhunderts beobachtete Meeresoberflächentemperatur und Wärmeaufnahme im Ozean am besten wiedergeben. Sie wurden dann weitergeführt, um IPCC-Szenarien für das 21. Jahrhundert und eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der zukünftigen Temperaturänderung zu berechnen.

Unabhängig von der Methode erhalten beide Forschergruppen folgende Ergebnisse:

- In den nächsten Dekaden ist die Erwärmung unabhängig davon, wie sich die Emissionen verändern. Dieses kommt durch die starke Dämpfung durch den Ozean und durch den Aerosoleffekt. Für die Dekade 2020–2030 kommt die schweizer Gruppe auf einen Temperaturanstieg von 0,5 bis 1,1 °C und das englische Forscherteam auf 0,3 bis 1,3 °C gegenüber dem Jahrzehnt 1990–2000.<sup>1)</sup>
- Die angegebenen Obergrenzen überschreiten deutlich die vom IPCC genannten Grenzen. Die Unsicherheiten in dem Temperaturanstieg sind dabei zu gleichen Teil-

- [1] M. V. Berry, Proc. R. Soc. London, Ser. A **392**, 45 (1984).  
 [2] A. F. Morpurgo, J. P. Heida, T. M. Klapwijk, B. J. van Wees und G. Borghs, Phys. Rev. Lett. **80**, 1050 (1998); P. Mohanty und R. A. Webb, Phys. Rev. Lett. **84**, 4481 (2000).  
 [3] Jeng-Bang Yau, E. P. De Poortere und M. Shayegan, Phys. Rev. Lett. **88**, 146801 (2002).  
 [4] A. Shapere und F. Wilczek, Geometric Phases in Physics (World Scientific, Singapore, 1989).  
 [5] D. Loss, P. M. Goldbart und