

marer Skala aufzulösen [6]. Im Experiment wurde eine antiferromagnetische Spitze verwendet, deren Spinpolarisation durch das „unterste“ Atom gegeben ist. Auf diese Weise lässt sich die magnetische Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe praktisch völlig unterdrücken. Die im Experiment an jedem Punkt der Probe gemessene differentielle Leitfähigkeit enthält einen Term, der nur von der Spinpolarisation der Spitze (der des untersten Spitzenatoms), derjenigen

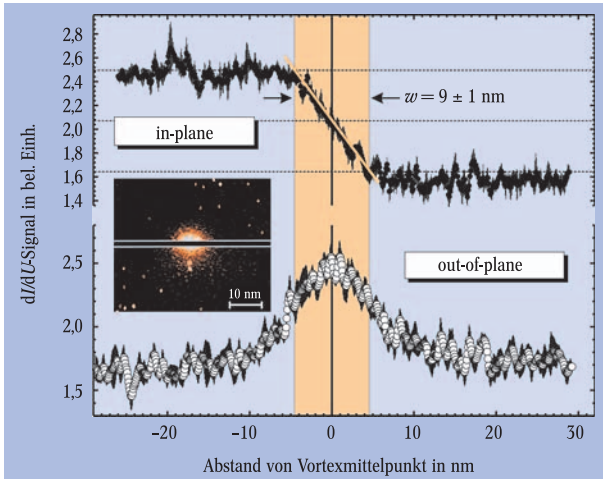


Abb. 2: Die differentielle Leitfähigkeit ist ein Maß für Magnetisierung. Bewegt man die Spitze des Rastertunnelmikroskops längs der im Insert gezeigten Linien durch den magnetischen Wirbel, so wechselt die Magnetisierung in der Ebene („in-plane“) das Vorzeichen, während die Magnetisierung senkrecht dazu („out-of-plane“) im Wirbelkern maximal wird. Die Breite w des Wirbelkerns beträgt rund 10 nm. Der Insert zeigt die „out-of-plane“-Komponente der Magnetisierung. (aus [2])

der Probe und dem Winkel zwischen der Magnetisierung von Probe und Spitze abhängt. Damit ist es möglich, bei festgehaltenem magnetischem Moment der Spitze direkt die lokale Magnetisierung der Probe mit atomarer Auflösung zu vermessen.

Die SP-RTM setzt Ultrahochvakuum (UHV) und adsorbatfreie Oberflächen voraus, sodass sich die üblichen nanostrukturierten Proben nicht eignen. Statt dessen nutzte die Hamburger Gruppe das selbstorganisierte Wachstum von Eisen auf (110)-Einkristalloberflächen von Wolfram. Dort bilden sich nach dem Aufdampfen von etwa zehn Monolagen Eisen unter geeigneten Bedingungen ovale Inseln mit Abmessungen von 200–500 nm in der langen und 150–250 nm in der kurzen Richtung, deren typische Dicke etwa 8–9 nm beträgt. Wie die lithographisch hergestellten Kreisscheiben weisen auch diese Proben ei-

nen Vortextkern auf, der mittels der Spin-polarisierten Tunnelmikroskopie untersucht werden kann. Verwendet man Spitzen mit magnetischem Moment parallel bzw. senkrecht zur Oberfläche, so lässt sich die Magnetisierung sowohl in der Ebene als auch senkrecht dazu bestimmen (Abb. 2). Die gemessene Breite des Vortextkerns liegt bei 9 ± 1 nm, in guter Übereinstimmung mit der theoretisch abgeschätzten Breite von 6,4 nm. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen damit nach langer Zeit die theoretischen Vorhersagen zur Ausdehnung und Form des Vortextkerns, die im Limes verschwindend dünner Scheiben nur von der material-spezifischen Austauschkonstante und der Sättigungsmagnetisierung abhängen sollten.

Mit der Entwicklung der Spin-aufgelösten Rastertunnelmikroskopie sind die Hamburger Physiker einem lange gehegten Traum der Magnetiker, nämlich der Abbildung magnetischer Strukturen mit atomarer Auflösung und Einzelspin-Empfindlichkeit, einen großen Schritt nähergekommen. Die Auflösung der inneren Spinstruktur des Vortextkerns ist dafür ein weiteres eindrucksvolles Beispiel, welches sicher auch zur zukünftigen Weiterentwicklung magnetischer Speicher mit höchster Datendichte beitragen wird.

GÜNTER BAYREUTHER UND
DIETER WEISS

- [1] E. Feldtkeller und H. Thomas, Phys. Kondens. Mater. **4**, 8 (1965).
- [2] A. Wachowiak, J. Wiebe, M. Bode, O. Pietsch, M. Morgenstern, R. Wiesendanger, Science **298**, 577 (2002).
- [3] J. Raabe, R. Pulwey, R. Sattler, T. Schweinböck, J. Zweck, D. Weiss, J. Appl. Phys. **88**, 4437 (2000).
- [4] M. Schneider, H. Hoffmann, J. Zweck, Appl. Phys. Lett. **79**, 3113 (2001).
- [5] T. Shinjo, T. Okuno, R. Hassdorf, K. Shigeto, T. Ono, Science **289**, 930 (2000).
- [6] M. Bode, M. Getzlaff, R. Wiesendanger, Phys. Rev. Lett. **81**, 4256 (1998); S. Heinze, M. Rode, A. Kubetzka, O. Pietzsch, X. Nie, S. Blügel, R. Wiesendanger, Science **288**, 1805 (2000); Eine alternative Methode wurde vorgestellt von W. Wulfhekel, J. Kirschner, Appl. Phys. Lett. **75**, 1944 (1999).

Hintergründige Polarisation

Die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ist linear polarisiert – im Einklang mit kosmologischen Modellen des Urknalls

In den letzten Jahren vollzog sich eine Revolution in der Kosmologie: Präzise Messungen der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund bestätigten eindrucksvoll das Urknallmodell, untermauerten die Idee der kosmologischen Inflation und erlaubten es erstmalig, kosmologische Parameter genau zu bestimmen. Der zugrundeliegende physikalische Mechanismus ist anschaulich zu verstehen: Hochsymmetrische, allgemein-relativistische Weltmodelle fordern, dass das Universum aus einem heißen, dichten Anfangszustand entstand. Zunächst war es undurchsichtig, weil Photonen an den vorhandenen Ladungen gestreut wurden. Als es nach 400000 Jahren genügend abgekühlt war, dass Atome entstehen konnten, wurde es durchsichtig. Die Photonen konnten sich von da an ungehindert ausbreiten. Sie verloren Energie durch die kosmische Expansion, umgeben uns aber heute noch als kosmischer Mikrowellenhintergrund (Cosmic Microwave Background, CMB) [1].

Der weitaus überwiegende Teil der Materie im Universum wechselwirkt nicht elektromagnetisch und wird daher Dunkle Materie genannt. Kosmische Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen entstanden durch Gravitationskollaps aus winzigen Schwankungen in der Dichte der Dunklen Materie, die schon sehr früh im Universum angelegt worden waren. Diese „Saatfluktuationen“ prägten dem CMB Temperaturschwankungen auf, die wiederum das beigemischte kosmische Plasma aus geladenen Teilchen komprimierten. Dessen Druck stieg, bis er der Gravitation die Waage halten konnte, dann expandierte das Plasma wieder, wodurch der Druck sank und die Gravitation wieder zu komprimieren begann. Wenn diese akustischen Schwingungen phasenkorreliert einsetzten, was etwa im Modell der kosmologischen Inflation möglich ist, sollten die Temperaturschwankungen im CMB charakteristische Muster zeigen, deren Größe durch die Wellenlänge der Grundschwingung und ihrer Obertöne bestimmt ist (vgl. [2]).

Prof. Dr. Günter Bayreuther und Prof. Dr. Dieter Weiss, Institut für Angewandte und experimentelle Physik, Universität Regensburg, 93040 Regensburg

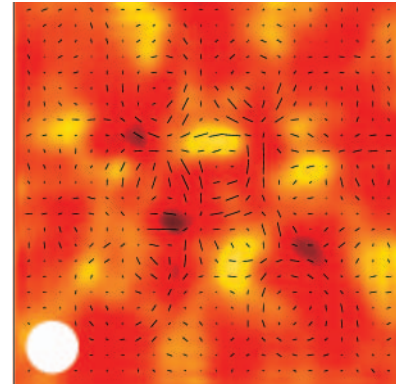
Ende der 1940er Jahre wurde die Temperatur des CMB vorhergesagt. Entdeckt wurde er 1964 eher zufällig. Ein erster Nachweis der erwarteten Schwankungen gelang 1992. In den letzten Jahren gelang es mit Ballonexperimenten, die akustische Grundschiwingung in den Temperaturschwankungen erstmals zweifelsfrei nachzuweisen; ihre Wellenlänge entspricht einer Winkelgröße von etwa einem Grad. Auch das zweite akustische Maximum wurde inzwischen gefunden. Die Sensation besteht nicht allein darin, dass diese Messungen theoretische Vorhersagen bestätigten, die auf sehr einfachen Symmetrieanahmen beruhen. Noch eindrucksvoller ist, dass sich aus zahlreichen verschiedenen kosmologischen Messungen, von denen diejenigen am CMB nur eine Art sind, zum ersten Mal in der Geschichte der modernen Kosmologie ein konsistentes Bild des Universums ergibt (vgl. [3]).

Eine weitere Vorhersage der Theorie des CMB betrifft dessen Polarisation. Als die Hintergrundstrahlung freigesetzt wurde, war das Universum bereits auf etwa 3000 K

abgekühlt. Die Streuung zwischen Photonen und Elektronen des kosmischen Plasmas lässt sich demnach als Thomson-Streuung beschreiben. Dabei hängt die Winkelverteilung der gestreuten Intensität von der Polarisationsrichtung der einfallenden Strahlung ab. Fällt also aus einer Richtung unpolarisierte Strahlung ein, ist die gestreute Strahlung in der Regel polarisiert, und zwar abhängig vom Winkel zwischen ein- und ausfallender Strahlung. Wenn das streuende Elektron aus allen Richtungen gleichmäßig bestrahlt würde, würde sich dieser Effekt wegmitteln. Wegen der bereits angelegten Dichteschwankungen waren die Elektronen des kosmischen Plasmas aber schon in anisotrope Strahlung eingebettet, als der CMB frei wurde, und deshalb bleibt auch nach der Mittelung über alle Richtungen eine Netto-Polarisation übrig. Unsere Vorstellung von der Entstehung des CMB erfordert also, dass er linear polarisiert sein muss (vgl. [4]). Die Intensität des polarisierten Hintergrunds sollte bei etwa 10% derjenigen des unpolarisierten liegen. Da

die Temperaturschwankungen im Bereich einiger $10 \mu\text{K}$ liegen, werden Polarisationschwankungen im μK -Bereich erwartet.

Der Gruppe von John Carlstrom von der University of Chicago ist es



nun zum ersten Mal gelungen, die Polarisation des CMB zu messen (Abb.) [5]. Sie verwendete dazu das Degree Angular Scale Interferometer, kurz DASI, das aus 13 Elementen besteht, die variabel angeordnet werden können. Jedes einzelne Element fokussiert die einfallende Mikrowellenstrahlung auf polarisationsempfindliche Detektoren, wo sie nachgewiesen wird. DASI operiert

Temperatur- und Polarisationskarte der kosmischen Hintergrundstrahlung, aufgenommen mit dem DASI-Teleskop. Die Farbe kodiert die Temperaturabweichungen vom Mittelwert zwischen $-200 \mu\text{K}$ (schwarz) und $+200 \mu\text{K}$ (gelb). Länge und Orientierung der schwarzen Striche geben den Polarisationsgrad und die -richtung an. Der weiße Kreis illustriert die Winkelauflösung des DASI-Experiments (aus [5]).

zwischen 26 und 36 GHz. Die Winkelauflösung wird durch die Anordnung der 13 Elemente bestimmt; in der gewählten Konfiguration betrug sie 20 Bogenminuten.

Um störende atmosphärische und thermische Einflüsse zu verringern, wurden die Polarisationsmessungen an der Amundsen-Scott-Südpolstation durchgeführt. In zwei aufeinander folgenden Südpolarnächten wurden zwei Felder am Himmel mit je $3,4^\circ$ Radius insgesamt 271 Tage lang beobachtet. Diese Felder waren zuvor sorgfältig ausgewählt worden, um störende Vordergrundemission zu vermeiden.

Mit diesem Experiment gelang der Nachweis, dass die kosmische Mikrowellenstrahlung in den beiden beobachteten Feldern tatsächlich linear polarisiert ist. Gleichzeitig wurde auch die unpolarisierte Strahlung in denselben Feldern beobachtet. Die Intensität der polarisierten Strahlung hat nicht nur die erwartete Amplitude von etwa einem Zehntel derjenigen der unpolarisierten Strahlung. Darüber hinaus lässt sich aus der Amplitude der Temperaturschwankungen als Funktion ihrer Größe vorhersagen, wie die Amplitude der Polarisationschwankungen mit deren Größe variieren sollte, und auch diesen Test hat das DASI-Experiment zweifelsfrei bestanden. Eine Batterie weiterer sorgfältiger Tests schließt aus, dass die nachgewiesene Polarisation einen anderen Ursprung haben könnte als die Thomson-Streuung des CMB 400000 Jahre nach dem Urknall.

Die genaue Messung der Polarisation gehört nun zu den wichtigsten Zielen weiterer Experimente, von denen der bereits operierende NASA-Satellit MAP und der für 2007 geplante ESA-Satellit Planck die wichtigsten sein werden. Vollständige Himmelskarten der Temperatur- und Polarisationschwankungen im CMB werden es dann erlauben, die Grundlagen der Kosmologie mit bisher ungeahnter Genauigkeit festzulegen.

MATTHIAS BARTELMANN

- [1] *M. Bartelmann*, *Sterne und Welt-
raum*, Mai 2000, S. 337
- [2] *M. Bartelmann*, *Phys. Bl.*, September 2001, S. 41
- [3] *M. Bartelmann*, *Phys. Bl.*, Juni 2000, S. 14
- [4] *W. Hu, M. White*, *New Astronomy* 2, 323 (1997)
- [5] *J. Kovac et al.*, <http://arXiv.org/abs/astro-ph/0209478>

Dr. Stefan Strauf und
Priv. Doz. Dr. Peter
Michler, Institut für
Festkörperphysik,
Universität Bremen,
Otto-Hahn-Allee,
28359 Bremen

Identische Photonen „auf Bestellung“

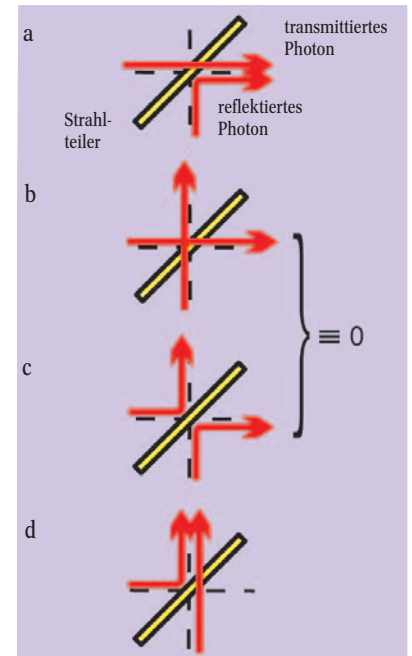
Mit Halbleiter-Quantenpunkten in Mikroresonatoren lassen sich einzelne und vollständig identische Photonen für die Quanteninformationsverarbeitung erzeugen.

Die Halbleiter-Quantenoptik ist ein faszinierendes neues Forschungsgebiet mit großem Einfluss auf viele Bereiche der Grundlagenphysik und mit dem Potenzial, die Kommunikationssysteme zu revolutionieren. Das Interesse an diesem Forschungsfeld hat aufgrund der Entwicklung von qualitativ hochwertigen Quantenpunkten und Mikroresonatoren sowie der Aussicht auf völlig neuartige Bauelemente in den letzten Jahren ständig zugenommen. So benötigt beispielsweise das sich schnell entwickelnde Gebiet der Quanten-Informationsverarbeitung Lichtquellen, die auf Bestellung einzelne Photonen oder Photonenpaare mit starken Quantenkorrelationen emittieren können (vgl. [1]). Santori und Kollegen [2] von der University of Stanford haben nun gezeigt, wie sich mit einer Einzelphotonenquelle auf Halbleiterbasis Photonen erzeugen lassen, die vollkommen identisch sind, obwohl sie völlig unabhängig voneinander und zu unterschiedlichen Zeitpunkten emittiert werden. Diese Arbeiten können als ein erster Schritt für die Implementierung von logischen Gattern mit einzelnen identischen Photonen für einen optischen Quantencomputer angesehen werden [3].

Befinden sich zwei Photonen in derselben Mode des elektromagnetischen Feldes, stimmen sie also in all ihren Eigenschaften in Frequenz und Polarisation überein, so tritt der bosonische Charakter identischer Quanten zutage. Ein überraschender Effekt zeigt sich z. B. bei der Interferenz zweier identischer Photonen, die aus unterschiedlichen Richtungen auf einen 50/50-Strahlteiler treffen (Abb.). Mithilfe der Quantenelektrodynamik berechnen sich die Wahrscheinlichkeiten für Reflexion bzw. Transmission der Photonen aus dem Quadrat der Summe der Wahrscheinlichkeitsamplituden *sämtlich möglicher Wege* der Photonen. Für identische Photonen heben sich nun die Amplituden dafür, dass entweder beide transmittiert oder beide reflektiert werden (Abb. b, c) ge-

rade auf; die Amplituden interferieren destruktiv. Es scheint, als ob sich die Photonen „verabredet“ hätten, den Strahlteiler stets *gemeinsam* über den gleichen Ausgang zu verlassen (Abb. a, d).

Die Ununterscheidbarkeit identischer Photonen wurde experimentell erstmals 1987 von Hong, Ou



Treffen zwei Photonen an einem 50/50-Strahlteiler aufeinander, so gibt es für die Reflexion bzw. Transmission vier Realisierungsmöglichkeiten: Entweder wird eines der beiden Photonen transmittiert und das andere reflektiert (Fall a und d), oder es werden entweder *beide* Photonen transmittiert (b) oder *beide* Photonen reflektiert (c). Handelt es sich um zwei *identische Photonen*, die *zeitgleich* eintreffen, so interferieren nach den Regeln der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeitsamplituden für die Fälle (b) und (c) gerade destruktiv. Es scheint dann so, als ob sich die Photonen „verabredet“ hätten den Strahlteiler stets *gemeinsam* über den gleichen Ausgang zu verlassen. Dieses Experiment zum Nachweis der Ununterscheidbarkeit zweier Photonen wurde von Santori und Kollegen [1] für völlig *unabhängige* Photonen demonstriert, die von einem Halbleiter-Quantenpunkt emittiert wurden.

und Mandel an der University of Rochester nachgewiesen [4]. Als Photonenquelle diente ein nichtlinearer Kristall, der mit einem Laser bestrahlt wurde. Ein Teil des einfallenden Lichts wurde dabei über eine nichtlineare Wechselwirkung in ein simultan erzeugtes Zwillingpaar von Photonen konvertiert. Die beiden Photonen verlassen den Kristall jeweils in unterschiedliche Raumrichtungen, sodass sie entweder *von links* oder *von unten* auf dem Strahlteiler eintreffen können