

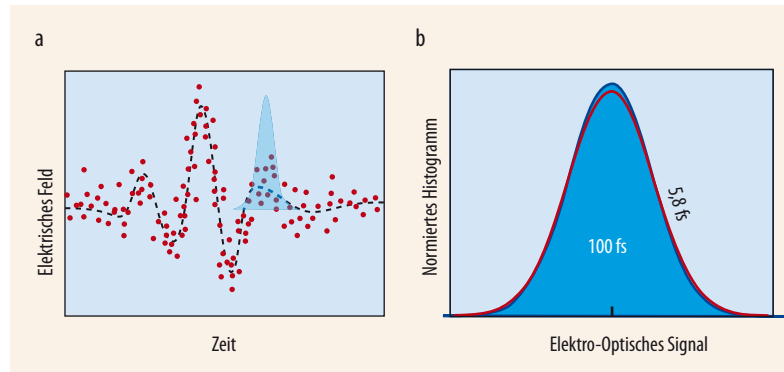
## Quantenfluktuationen vermessen

Der direkte Nachweis von Quantenfluktuationen eröffnet neue Wege für Quantenoptik und Spektroskopie im Terahertzbereich.

Quantenphänomene lassen sich vollständig beschreiben, wenn ihre Quantenverteilung bekannt ist, also beispielsweise die Dichtematrix oder eine Phasenraum-Verteilung wie die Wigner-Funktion. Obwohl die Erkenntnisse der Quantentheorie die rasanten Fortschritte in der Nanotechnologie, Quanteninformationstechnologie und -chemie antreiben, gibt es nur wenige Beispiele für tatsächlich gemessene Quantenverteilungen.

Quantenverteilungen sind zwangsläufig mit Fluktuationen verbunden, die verhindern, konjugierte Variablen wie Ort und Impuls eines Teilchens oder Phase und Amplitude einer Welle mit absoluter Genauigkeit zu messen. Dies steht im Einklang mit der Heisenbergschen Unschärferelation. Selbst das elektromagnetische Feld des Vakuums liefert nicht-verschwindende Messergebnisse, die so genannten Vakuum-Feld-Fluktuationen  $E_{\text{vak}}$  nahe des absoluten Nullpunkts. Technisch gesehen ist  $E_{\text{vak}}^2$  proportional zur Photonenenergie und umgekehrt proportional zum Volumen, das eine räumlich-zeitliche Lichtmode einnimmt.

1993 konnte die Gruppe um Michael Raymer von der Universität Oregon zeigen, dass man tatsächlich die Quantenverteilung einer einzelnen Lichtmode messen kann [1]. Das Feld mit Wellenlänge 1064 nm oszilliert  $2,82 \cdot 10^{14}$ -mal pro Sekunde. Das ist gegenwärtig noch zu schnell, um die Oszillation auch nur annähernd mit einem elektrischen Instrument direkt zu messen. Daher wurde die Quantenverteilung des elektrischen Feldes  $E$  anhand der von zwei Photodetektoren absorbierten Intensität ermittelt. Da die Intensität proportional zum zeitintegrierten Betragsquadrat von  $E$  ist, kann auch eine vergleichsweise langsame Elektronik diese messen. Um die Quantenverteilung von  $E$  präzise bestimmen zu können, ist es jedoch erforderlich, dass die Detektoren möglichst alle



**Abb. 1** Das elektrische Feld eines THz-Pulses (schwarze Linie) wird mit der Einhüllenden eines optischen Feldes (transparenter Bereich) überlagert (a): Wiederholte Messungen führen aufgrund der inhärenten Quantenfluktuationen zu einer Streuung der Ergebnisse der elek-

tro-optischen Detektion (rot), wenn der Gatepuls entlang der Zeitachse verschoben wird. Der Vergleich der Histogramme (b) aus  $10^8$  EOS-Signalen für optische Gatepulse von 5,8 fs (rote Linie) bzw. 100 fs Dauer (schattierter Bereich) macht die Quantenfluktuationen sichtbar.

Photonen absorbieren und sich aus den gemessenen Photonenzählraten die Wigner-Funktion ermitteln lässt [2, 3]. Im Experiment von 1993 absorbierten die Detektoren etwa 85 Prozent aller Photonen. Das reichte unter anderem aus, um deutliche Anzeichen für die Quantenverteilung des Vakuums zu liefern – ein wichtiger Fortschritt für die Quantenoptik [2 – 4].

Unterdessen haben es rasche technologische Fortschritte ermöglicht, auch Felder im Terahertz-Bereich ( $E_{\text{THz}}$ ) direkt zu messen, die typischerweise  $10^{12}$ -mal pro Sekunde oszillieren und damit Taktzeiten künftiger Computer erreichen. Solche Messungen nutzen den Pockels-Effekt aus, bei dem ein Feld den Doppelbrechungsindex eines anderen Feldes verändert. So kann man beispielsweise ein Terahertz-Feld durch einen nicht-linearen Kristall senden, um die Polarisation eines optischen Femtosekundenpulses als Funktion von  $E_{\text{THz}}$  zu drehen. Beim so genannten Elektro-Optischen Sampling (EOS) misst man den Drehwinkel, der direkt proportional zu  $E_{\text{THz}}$  ist. Da  $E_{\text{THz}}$  dabei kaum absorbiert wird, ist die Messung im Wesentlichen zerstörungsfrei.

Selbst im Idealfall produzieren wiederholte Messungen von

$E_{\text{THz}}$  eine Streuung der Ergebnisse aufgrund der Quantenfluktuationen (Abb. 1a): Beim EOS wird im Wesentlichen der Überlapp zwischen  $E_{\text{THz}}$  und der Intensität der Einhüllenden eines optischen Femtosekundenpulses (Gatepuls) gemessen. Da der Gatepuls zudem mit den Quantenfluktuationen überlappt, ist das EOS-Signal nicht nur proportional zu  $E_{\text{THz}}$ , sondern enthält auch inhärente Quantenfluktuationen. Trägt man viele EOS-Messungen in einem Histogramm auf, resultiert daraus direkt die Quantenverteilung von  $E_{\text{THz}}$  zu einem bestimmten Zeitpunkt. Wenn die klassische Amplitude von  $E_{\text{THz}}$  für alle Zeiten verschwindet, lassen sich die reinen Vakuumfluktuationen messen.

Auch wenn dieses Schema einfach klingt, erlaubte es zunächst keinen Nachweis echter Quantenfluktuationen eines THz-Feldes. Als technisch besonders anspruchsvoll erwies es sich, die optischen sowie die THz-Quellen zu kontrollieren und die Elektronik so weit zu perfektionieren, dass das triviale, klassische Rauschen nicht länger dominiert. Die Gruppe von Alfred Leitenstorfer von der Universität Konstanz ist seit Langem Vorreiter bei der Entwicklung von Quellen für und den Nachweis von THz-

Prof. Dr. Mackillo Kira, Universität Marburg, AG Theoretische Halbleiterphysik, Renthof 5, 35032 Marburg

Strahlung. Seiner Gruppe ist nun mit der erstmaligen Messung der Vakuumfluktuationen eines THz-Feldes (Frequenz 70 THz) mit Hilfe von EOS ein wichtiger Meilenstein gelungen [5].

Die Wissenschaftler verwendeten ein ausgeklügeltes Mess-Schema, bei dem die Dauer des Gatepulses zwischen 5,8 und 100 Femtosekunden variierte. Dies verringerte die Vakuumfeld-Amplitude  $E_{\text{vak}}$  um den Faktor 4,2. Neben dem reinen Quantenrauschen ist das EOS-Signal meist von klassischem Rauschen dominiert, was die Messung von  $E$  verhinderte. Die Konstanzer Gruppe hat diese Schwierigkeit überwunden, indem sie zeigte, dass ihr Aufbau zu einem deutlichen Anstieg von 4,7 Prozent in der gemessenen Pulsbreite (root-mean square) führt, wenn das Quantenrauschen auf den 4,2-fachen Wert steigt. In anderen Worten: Trotz des dominierenden klassischen Rauschens hat das Experiment  $E_{\text{vak}}$  sichtbar gemacht (Abb. 1b).

Als nächsten Schritt könnte sich die Messung von Vakuumfluktuationen zu einer vollständigen Rekonstruktion eines Quantenzustandes (Quantentomographie) erweitern lassen. Durch weitere Reduzierung des klassischen Rauschens müsste sich die Sichtbarkeit der Quantenfluktuationen über die beobachteten 4,7 Prozent erhöhen. EOS ließe sich dann nutzen, um Quellen zu charakterisieren, die rein quantenmechanische Lichtzustände erzeugen. Das könnte hochpräzise Messungen ermöglichen, deren Genauigkeit das Standard-Quantenlimit unterschreitet. Die Entwicklung von THz-Quantenlichtquellen sowie exakter Detektions-Schemata wären für die Untersuchung von Festkörpern unerlässlich, da THz-Felder Vielteilchen-Übergänge resonant anregen können. Daher könnten sich THz-Untersuchungen in Richtung Quantenspektroskopie [4] erweitern lassen, welche die Quantenfluktuationen des Lichts nutzt, um stark wechselwirkende Vielteilchen-Zustände direkt anzu-

regen und zu charakterisieren. Diese Möglichkeit hat die Entdeckung so genannter Dropletions gezeigt [6], die durch die Quantenfluktuationen optischer THz-Felder nachgewiesen wurden. Die Gruppe um Alfred Leitenstorfer hat nun den ersten entscheidenden Schritt zur THz-Quantenoptik bzw. -Spektroskopie getan.

Mackillo Kira

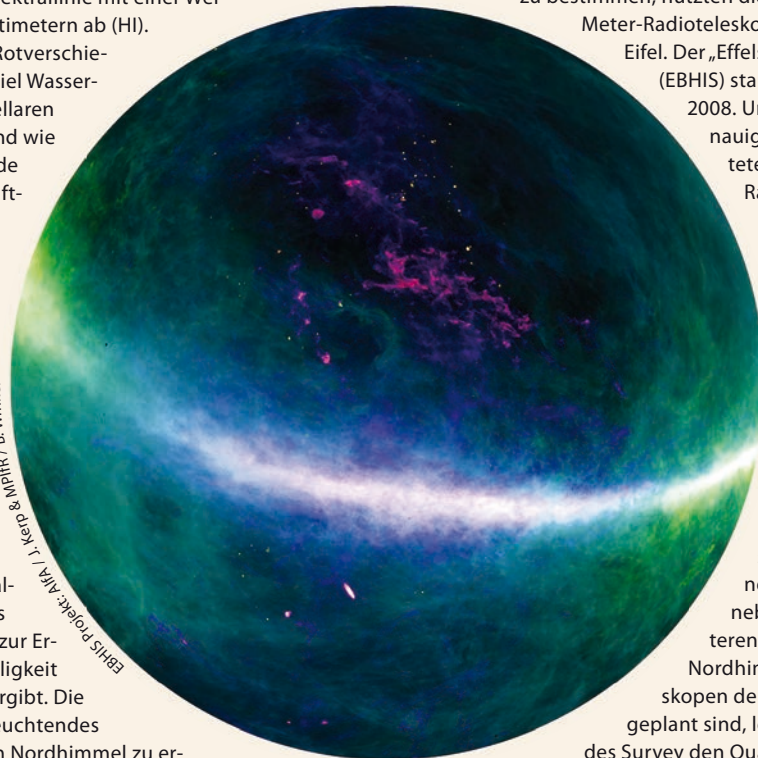
\*

Ich danke Ulrich Huttner und Linda Grigat für die Hilfe bei der Übersetzung des Textes.

- [1] D. T. Smithey et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 1244 (1993)
- [2] U. Leonhardt, Measuring the Quantum State of Light, Cambridge University Press, Cambridge (1997)
- [3] W. Vogel und D. G. Welsch, Quantum Optics, Wiley-VCH, Weinheim (2006)
- [4] M. Kira und S. W. Koch, Semiconductor Quantum Optics, Cambridge University Press, Cambridge (2011)
- [5] C. Riek et al., Science **350**, 420 (2015)
- [6] A. E. Almand-Hunter et al., Nature **506**, 471 (2014)

GESCHÄRFTER BLICK AUF DEN NORDHIMMEL

Neutraler atomarer Wasserstoff strahlt eine schwache, aber charakteristische Spektrallinie mit einer Wellenlänge von 21 Zentimetern ab (HI). Ihre Intensität und Rotverschiebung verraten, wieviel Wasserstoff sich im interstellaren Medium befindet und wie er sich relativ zur Erde bewegt. Wissenschaftler der Universität Bonn und des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie veröffentlichten nun eine komplette Karte des Nordhimmels im Licht der 21-Zentimeter-Linie, die 30-mal genauer ist als ihre Vorgänger: Die Farbkodierung entspricht der Radialgeschwindigkeit des Wasserstoffs relativ zur Erde, während die Helligkeit die Intensität wiedergibt. Die Milchstraße ist als leuchtendes Band quer über dem Nordhimmel zu erkennen. Die helle Ellipse unterhalb ist unsere Nachbargalaxie Andromeda; die rötlichen Flecken oberhalb sind nahegelegene Galaxien.



Um Intensität und Rotverschiebung der 21-Zentimeter-Linie zu bestimmen, nutzten die Forscher das 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg in der Eifel. Der „Effelsberg-Bonn HI Survey“ (EBHIS) startete bereits im Jahr 2008. Um die vorliegende Genauigkeit zu erreichen, stateten die Forscher das Radioteleskop zunächst mit einem neuen Empfänger aus, der speziell entwickelte Hochgeschwindigkeitschips benutzt. Dieser deckt eine Fläche von der Größe des Vollmonds ab, sodass der komplette Nordhimmel in fünf Jahren kartiert wurde – fast zehnmal schneller als ohne den neuen Empfänger. Da neben EBHIS keine weiteren Kartierungen des Nordhimmels mit Radioteleskopen der 100-Meter-Klasse geplant sind, legen die neuen Daten des Survey den Qualitätsstandard fest, um in naher Zukunft die Verteilung des neutralen Wasserstoffs in der Milchstraße zu untersuchen. (KS) B. Winkel et al., Astron. Astroph. **585**, A41 (2016)