

■ Super im Kollektiv

Wenn sich kollektive Anregungen in Quantenfilmen überlagern, entsteht eine neue infrarote Lichtquelle.

Gleich beginnt das Konzert. Die Konzerthalle ist mit kaphonen Tönen gefüllt, während die Instrumente gestimmt werden. Die Oboe kreischt, das Horn tönt laut. Einen Moment später erklingt perfekte Harmonie. Die Physik dazu ist einfach: Der Dirigent gibt den Instrumenten – harmonischen Oszillatoren – einen gemeinsamen Einsatz. Er sorgt dafür, dass sie phasengleich erklingen und Kohärenz einsetzen kann. Solche klassischen Analogien veranschaulichen häufig kohärente quantenmechanische Phänomene, übersehen dabei aber einen entscheidenden Punkt: Quantenteilchen sind grundsätzlich ununterscheidbar. In der Orchester-Analogie könnten wir nicht feststellen, welche Geige gerade spielt und welche schweigt. Der Physiker Robert Dicke hat sich mit diesem Problem vor etwa 60 Jahren beschäftigt [1]. Er fand heraus, dass die quantenmechanischen Phasen der Oszillatoren selbst dann zusammenhängen, wenn nur einer davon angeregt ist; zwei Geigen erklingen, obwohl nur eine davon mit dem Bogen gestrichen wird. Die Phasenkohärenz, auch Dicke-Effekt genannt, ist schwer zu realisieren [2]. Carlo Sirtori von der Universität Paris Diderot fand kürzlich mit seinen Kollegen Hinweise auf den Dicke-Effekt während der Emission von infrarotem (IR) Licht aus halbleitenden Nanostrukturen bei Raumtemperatur [3].

Dicke beschreibt in seiner Theorie, wie phasenkohärente kollektive Emission in einem Gas von nicht-wechselwirkenden identischen Atomen eintritt. Ein Atom kann die Energie eines Photons des Lichtfeldes, mit dem das Gas bestrahlt wird, absorbieren. Daraufhin geht es vom Grundzustand in einen angeregten Zustand über. Weil die Teilchen ununterscheidbar sind, ist nicht definiert, um welches Atom es sich handelt. Die „Sammlung“ von Atomen, die das Lichtfeld spüren, ist daher als eine quantenmechanische Überlagerung von

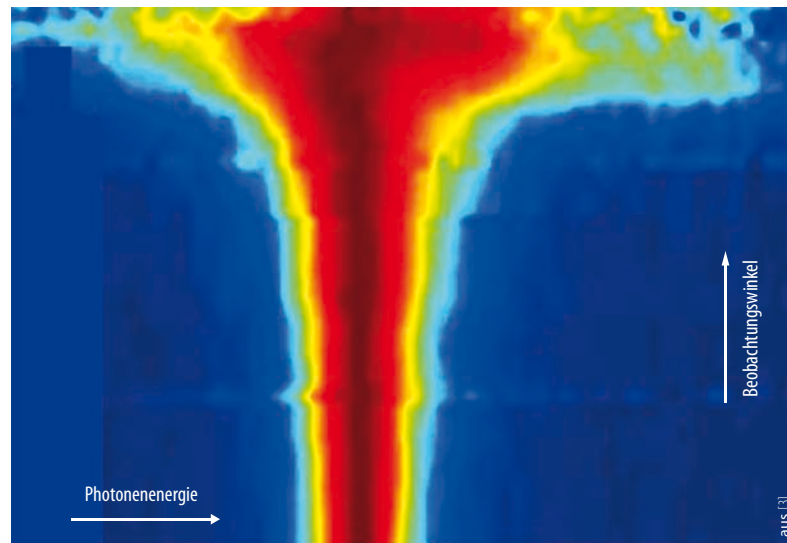


Abb. 1 Wenn in halbleitenden Nanostrukturen Superradianz aus Plasmonenemission entsteht, hängt die Breite des Energiespektrums des emittierten Lichts vom Beobachtungswinkel ab, wie es der Dicke-Effekt beschreibt. Nimmt der Win-

kel zu, vergrößert sich der Energiebereich mit hoher Intensität (rot) deutlich gegenüber dem Bereich niedriger Intensität (blau). Die größere spektrale Breite deutet auf eine kürzere, strahlende Lebensdauer der Plasmonanregung hin.

Teilchen im Grundzustand und im angeregten Zustand zu sehen – in etwa wie Schrödingers Katze. Je mehr Atome vorhanden sind, desto mehr Überlagerungen sind im System möglich. Daraus ergeben sich neue atomare Übergänge mit verschiedenen Übergangsraten. Unter bestimmten Bedingungen teilt sich jeder einzelne Übergang zwischen verschiedenen Atomen auf, sodass die Wechselwirkungsrate des Ensembles mit dem Lichtfeld ansteigt und die Atome kollektiv Licht emittieren (sog. Superradianz) – das atomare quantenmechanische Orchester spielt.

Superradianz bezeichnet ein System, das durch Kohärenz sehr intensive Strahlung emittiert [1]. Sie ist schwierig nachzuweisen, weil die Atome vielen Anforderungen genügen müssen oder künstliche, atomähnliche Systeme mit zwei Energieniveaus erforderlich sind. Das untersuchte Volumen muss klein sein, etwa in der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichts, damit viele Atome des Ensembles das Lichtfeld gleich wahrnehmen. Außerdem muss die Wechselwirkung zwischen den Atomen vernachlässigbar sein, da-

mit keine Stöße auftreten, welche die Kohärenz zerstören. Zunächst betrachtete man atomare Gase, in denen der Abstand zwischen den Atomen so groß ist, dass der Dicke-Effekt schwach bleibt. Ein bemerkenswerter Nachweis der atomaren Superradianz gelang mit zwei einzelnen gefangenen Ionen [4].

Sirtori und seine Kollegen beobachteten den Dicke-Effekt bei der Lichtemission von halbleitenden Nanostrukturen, sog. „Quantum Wells“ (Quantenfilme). Ein Quantenfilm ist eine dünne Schicht eines Halbleiters, die zwischen andere halbleitende Materialien gepackt ist, um die Bewegung der Ladungen (Elektronen und Löcher) auf die Richtung senkrecht zur Schicht zu begrenzen. Wenn ein Strom durch einen Quantenfilm fließt, „fallen“ die Elektronen und Löcher „in den Potentialtopf“ des Films, rekombinieren und strahlen Licht ab. Im Allgemeinen beschreibt der harmonische Oszillator für ein Material sowohl die Absorption als auch Emission eines Photons. Jeder Oszillator ist durch eine bestimmte Resonanzfrequenz und Resonanzbreite charakterisiert. In der Quantenmechanik ist diese

Prof. Dr. John M. Lupton, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Regensburg, Universitätsstr. 31, 93053 Regensburg

Breite in erster Näherung proportional zum Inversen der Lebensdauer. Dies ist die Zeit, welche die absorbierte Photonenenergie im Atom oder atomähnlichen System erhalten bleibt, bevor sie wieder abgestrahlt wird. Für die meisten atomähnlichen Systeme erfolgt die Abstrahlung des Photons langsam (mehrere Nanosekunden), sodass die Resonanzbreite klein ist. Variieren die Resonanzfrequenzen in einem Bereich, der größer ist als die einzelnen Resonanzbreiten, so ist die Überlagerung der Oszillatoren mittels des Dicke-Effekts unterdrückt. Anstatt nun die Heterogenität zu reduzieren, wie es bei atomähnlichen Systemen allgemein üblich ist, erzeugte das französische Team sehr kurzlebige Anregungen der Quantenfilme: Plasmonen.

Plasmonen entstehen im Quantenfilm durch chemische Dotierung. Die zusätzlichen, frei beweglichen Elektronen schwingen um ein fest im Material verankertes Ion. Das Prinzip ist aus Metallen gut bekannt – schon im Mittelalter verliehen Goldsalze in der Glasschmelze den Kirchenfenstern eine vielfältige Farbenpracht. In Quantenfilmen ergeben sich die Plasmonen aus Übergängen zwischen diskreten Energieniveaus der Nanostruktur [5]. Ein Strom im Quantenfilm kann die Plasmonen anregen. Eine solche „Plasmonen-LED“ emittiert Licht in einem schmalen Band des Infraroten.

In Plasmonen oszillieren viele Elektronen gleichzeitig in Phase und agieren wie ein riesiger Dipol. Je größer er ist, desto schneller emittiert er Licht, und desto breiter ist die Resonanz des zugehörigen Oszillators. Die verschiedenen Plasmonen in Quantenfilmen bilden die elementaren Oszillatoren für den Dicke-Effekt. Sie sind nicht geordnet, weil ihre Resonanzfrequenzen variieren.

Sirtori und Kollegen erkannten, dass die große Resonanzbreite die Unordnung überwindet und die Plasmonen im Infraroten super-radiante Strahlung emittieren. Die Lebensdauer dieser Strahlung ist extrem kurz und beträgt nur etwa eine Femtosekunde. Dies leitet sich aus der spektralen Breite des erzeugten Lichts ab (Abb. 1). Die Schwingungsrichtung der Plasmonen wird durch die Ebene des Quantenfilms vorgegeben. Daher ist die Kopplungsstärke der Plasmonen über den Dicke-Effekt räumlich anisotrop. Die Stärke des Effekts – und somit die Lebensdauer des superradianten Dicke-Zustands – hängt vom Betrachtungswinkel ab. Eine zunehmende Kopplung verkürzt die Lebensdauer und führt zur beobachteten spektralen Verbreiterung.

Plasmonen unterscheiden sich als ausgeschmierte Quasiteilchen deutlich von diskreten Atomen und zeigen dennoch viele verschiedene exotische Interferenzphänomene

[6, 7]. Auch in der aktuellen Arbeit besitzen die Plasmonen Eigenschaften, die aus der atomaren Quantenoptik auf anderen Zeit- und Längenskalen bekannt sind.

Eine Anwendung des plasmonischen Dicke-Effekts liegt in der Erzeugung ultraschneller monolithischer Strahlungsquellen für die IR-Spektroskopie. Dabei werden Moleküle und molekulare Komplexe mittels ihrer besonderen atomaren Vibrationen identifiziert. Im Gegensatz zu Schwarzkörperstrahlung sind die spektrale Breite und Pulsdauer beim plasmonischen Dicke-Effekt regelbar und erleichtern so den Nachweis der Vibrationen. Da die plasmonische Superradianz einsetzt, bevor die Elektronen der Plasmonen ihre Energie durch Ohmsche Erwärmung verlieren, könnte sie in optoelektronischen Bauelementen zum Einsatz kommen und ein völlig neues Fachgebiet der plasmonen-basierten Optoelektronik begründen.^{#)}

John M. Lupton

- [1] R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99 (1954)
- [2] M. Gross und S. Haroche, Phys. Rep. **93**, 301 (1982)
- [3] T. Laurent et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 187402 (2015)
- [4] R. G. DeVoe und R. G. Brewer, Phys. Rev. Lett. **76**, 2049 (1996)
- [5] A. Delteil et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 246808 (2012)
- [6] A. Christ et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 183901 (2003)
- [7] N. Verellen et al., Nano Lett. **9**, 1663 (2009)

#) Dieser Text ist eine bearbeitete Übersetzung von Physics **8**, 104 (2015)

KURZGEFASST

■ Magisches Cadmium

Einem internationalen Forscherteam ist es erstmals gelungen, die Bindungsenergien der neutronenreichen Isotope ^{129}Cd , ^{130}Cd und ^{131}Cd zu bestimmen. Sie zeigten am Ionenseparator ISOLDE des CERN mit einem Flugzeit-Massenspektrometer, dass die Bindungsenergie bei ^{130}Cd ein Maximum erreicht. Beim Element Cadmium findet man also eine magische Neutronenzahl von $N = 82$. Weil ^{130}Cd sehr stark gebunden ist, wird das Isotop in Sternexplosionen besonders häufig erzeugt. Das Ergebnis hilft zu verstehen, wie es zu dem ausgeprägten Maximum in der Elementhäufigkeit bei einer Massenzahl von $A \approx 130$ kommt. D. Atanasov et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 232501 (2015)

■ Fokussierter Tsunami

Tsunamiwellen entstehen durch Seebeben. Um die Bewohner der Küsten rechtzeitig zu evakuieren, arbeiten Forscher an effizienten Frühwarnsystemen. Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation zeigten, dass schon geringe Schwankungen der Meerestiefe, z. B. durch kleine Berge oder Täler, die Energie der Wellen fokussieren, wenn sie auf engem Raum zusammenstehen. Da man die Meerestiefe heute noch nicht mit ausreichender Genauigkeit bestimmen kann, sollen die kleinen Variationen in zukünftigen Vorhersagen statistisch berücksichtigt werden. H. Degueldre et al., Nature Physics (2015), doi:10.1038/nphys3557

■ Elektronen noch stabiler

Auf der Suche nach „neuer“ Physik hat die Borexino-Kollaboration im Laboratori Nazionale del Gran Sasso untersucht, ob Elektronen in Neutrinos und Photonen zerfallen. Falls diese Reaktion stattfindet, wäre mit der Ladungserhaltung ein fundamentaler physikalischer Grundsatz verletzt. Dies scheint jedoch nicht der Fall zu sein: Mit den Daten, welche die Forscher in mehr als einem Jahr sammelten, kamen sie auf eine mittlere Lebensdauer, die etwa zwei Größenordnungen länger ist als die vorherige Obergrenze. Die Reaktion findet seltener als einmal in $6,6 \times 10^{28}$ Jahren statt. M. Agostini et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. Lett. **115**, 231802 (2015)