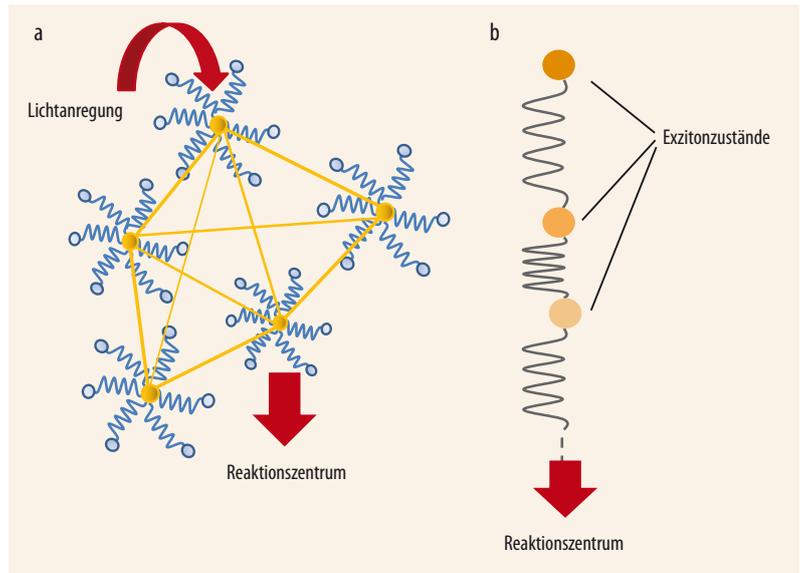


## ■ Ein quantenmechanischer Trichter

Spielen nicht-klassische Schwingungen eine zentrale Rolle bei der Photosynthese?

In der Natur vorkommende Photosysteme sind ein eindrucksvolles Beispiel biologischer Ingenieurskunst. Trotz der sowohl feuchten als auch warmen Bedingungen sind Aggregate aus Pigmenten und Proteinen darin zu biologischen Transportnetzwerken angeordnet. Deren Aufgabe besteht darin, die bei der Absorption von Licht in einer „Antenne“ entstandene Anregung (Exziton) zu einem Reaktionszentrum zu leiten. Dort baut sich mithilfe der Energie dieser Anregungen ein transmembranes elektrisches Potential auf, das die für Stoffwechselvorgänge von Bakterien und höherentwickelten Pflanzen notwendige Photochemie auslöst [1]. Die Quanten-Ausbeute eines solchen, typischerweise wenige Pikosekunden dauernden Prozesses ist nahezu perfekt, insbesondere bei sehr schwachem Licht. Wie die Natur diese beachtliche Leistung vollbringt, fasziniert Biologen und chemische Physiker seit Jahrzehnten.

Die Entwicklung mehrdimensionaler Laserspektroskopischer Methoden im sichtbaren Spektrum ermöglicht es heutzutage, die Dynamik innerhalb der Aggregate auf einer Femtosekunden-Zeitskala zu untersuchen. Kürzlich durchgeführte Experimente haben gezeigt, dass die Anregungsenergie kohärent zum Reaktionszentrum geleitet wird, wobei in der Dynamik markante langlebige Oszillationen auftreten [2, 3]: Anstatt thermisch aktiviert durch den Komplex zu „hüpfen“, propagiert die Anregung über mehrere Pigmente delokalisiert und wellenartig zum Reaktionszentrum. Diese Ergebnisse sind bei Theoretikern auf großes Interesse gestoßen. Einerseits ist nicht offensichtlich, warum Kohärenzeffekte langlebig und bei Raumtemperatur beobachtbar sein sollen. Falls sie andererseits wirklich auf für den Transport relevanten Zeitskalen existieren, stellt sich die Frage, ob die Kohärenz quantitativ mit der Effizienz der biologischen Funktion verknüpft



Bei der Photosynthese absorbiert die „Antenne“ des Lichtsammelkomplexes Photonen, wodurch Exzitonen entstehen. Ein Netzwerk aus gekoppelten Pigmenten (a, gelb) in einer Proteinmatrix leitet die Anregungen zum Reaktionszentrum. Fluktuationen aufgrund der Proteinbewegung und der intramoleku-

laren Schwingungen koppeln an jedes Pigment (blaue „Federn“). Im Exzitonbild vermitteln resonante Schwingungsmoden (b, Federn) den Energietransfer von einer Stufe der Exzitonenzustände zur nächsten. Diese Federn verhalten sich offenbar quantenmechanisch.

ist. Oder anders: Existieren überhaupt nichttriviale Quanteneffekte in der Biologie?

Die Beobachtung einer kohärenten Dynamik in Pigment-Protein-Komplexen wurde gründlichen theoretischen Analysen unterzogen. Sie stellen die bisherige Vorstellung in Frage, nach der die exzitonische Energie wie in einem Trichter mittels rein inkohärenter (thermischer) Relaxation zum Reaktionszentrum geleitet wird. An diese Stelle ist ein komplexes Wechselspiel zwischen der für die Exzitonbildung verantwortlichen elektronischen Dipolkopplung und der Phononenumgebung getreten [4, 5]. Demnach führen Schwingungsmoden der Proteinbewegung zu einem breitbandigen Rauschen und einer daraus resultierenden schnellen Relaxation kohärenter exzitonischer Superpositionen. Molekulare Schwingungsmoden, die quasi-resonant mit exzitonischen Übergängen sind, sorgen dagegen für einen intrinsischen Pumpmechanismus, der die Kohärenz regeneriert [5]. Darüberhinaus scheint die nichttri-

viale exzitonische Struktur überaus geeignet dafür zu sein, Umgebungsfuktuationen für den effizienten gerichteten Energietransport an eine bestimmte Stelle auszunutzen. Hierbei fungieren photosynthetische Komplexe als Phononenantennen, welche Umgebungsfuktuationen aktiv ausnutzen [6].

Kürzlich sind Edward O'Reilly und Alexandra Olaya-Castro vom University College London noch einen bedeutenden Schritt weitergegangen und haben gezeigt, dass der nichtklassische Charakter der Phononenfluktuationen mit der Transporteffizienz verknüpft sein kann [7]. Dies ist ein erster Indikator dafür, dass Verbindungen zwischen einem spezifischen Quantenverhalten und der für die biologische Funktion entscheidenden Prozesseffizienz existieren.

O'Reilly und Olaya-Castro betrachten ein prototypisches Dimer, welcher repräsentativ ist für Interband-Transportpfade in verschiedenen Lichtsammelkomplexen wie den Antennen von Cyanobakterien, Kryptophyten oder dem LHClI-

Komplex höherentwickelter Pflanzen, dem wohl häufigsten Sammelkomplex. Die Struktur dieser Systeme ist typischerweise so, dass die exzitonische Aufspaltung aufgrund der langreichweitigen elektrostatischen Wechselwirkung quasi-resonant ist mit einer hochenergetischen intramolekularen Schwingungsmoden. Einfallendes Licht lenkt die zunächst thermische Verteilung der molekularen Bewegung aus dem Gleichgewicht aus. Den resultierenden, durch Vibrationen unterstützten Energietransfer analysieren O'Reilly und Olaya-Castro, um nicht-klassische Merkmale in der sich ergebenden Schwingungsbewegung zu identifizieren. Hierzu verwenden sie quantenoptische Methoden zur Bewertung der Strahlungsfeldcharakteristika und Analyse der Fluktuationsstatistik. Das bemerkenswerteste Resultat besteht jedoch in dem Nachweis, dass nichtklassische Merkmale und der Transport der Exzitonenbesetzung auf Zeitskalen unter einer Piko-sekunde und bei Raumtemperatur korreliert sind. Dieses Ergebnis gilt auch bei inkohärenter Bestrahlung wie durch die Sonne und liefert eine quantitative Verbindung zwischen dem Auftreten von Quantenmerkmalen und effizientem Energie-transport in einem prototypischen System. Aktuelle Messtechniken kombiniert mit transienter, kohärenter, ultraschneller Phononen-spektroskopie sollte es erlauben, dieses Phänomen experimentell zu

verifizieren, eventuell unter Verwendung künstlicher Dimere. Die zu Grunde liegende Annahme, dass Nichtgleichgewichts-Schwingungen eine Vielzahl von Prozessen verstärken, von der Ladungstrennung bis hin zu Detektionsvorgängen, erweitert das Anwendungsspektrum der Resultate aus [7] über den Energietransport in Lichtsammelkomplexen hinaus. Dies ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer positiven Antwort auf die Frage, ob Quanteneffekte in biologischen Systemen eine Rolle spielen. Von einem theoretischen Standpunkt aus besteht die große Herausforderung jedoch darin, die identifizierten fundamentalen Mechanismen zur Aufrechterhaltung kohärenter Dynamik bei Umgebungstemperatur auf deutlich größere Netzwerke zu erweitern, welche der Dynamik der tatsächlichen biologischen Komplexe entsprechen.

Robert Rosenbach und  
Susana F. Huelga

- [1] R. E. Blankenship, *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*, Wiley-Blackwell (2001)
- [2] G. S. Engel et al., *Nature* **446**, 782 (2007)
- [3] E. Collini et al., *Nature* **463**, 644 (2010)
- [4] N. Christensson, H. F. Kauffmann, T. Pullerits und T. Mančal, *J. Phys. Chem. B* **116**, 7449 (2012)
- [5] A. W. Chin et al., *Nature Phys.* **9**, 113 (2013)
- [6] M. del Rey, A. W. Chin, S. F. Huelga und M. B. Plenio, *J. Phys. Chem. Lett.* **4**, 903 (2013)
- [7] E. J. O'Reilly and A. Olaya-Castro, *Nature Comm.* **5**, 3012 (2014)

## KURZGEFASST

### ■ Tarnkappe für Wärme

Zwei Forschergruppen von Universitäten aus Singapur haben einfache dreidimensionale Tarnkappen für den diffusiven Wärmefluss entwickelt. Diese können ein Hindernis – einen kugelförmigen Hohlraum in Stahl bzw. wärmeleitendem Silikon – verbergen. Dazu kleideten sie die Innenwand des Hohlraums mit Kupfer bzw. einer Doppellage aus einer Legierung und Polystyrol aus. In beiden Fällen war dadurch ein Objekt im Hohlraum wärmeisoliert und somit für den fließenden Wärmestrom unsichtbar. H. Xu et al., *Phys. Rev. Lett.* **112**, 054301 (2014) und T. Han et al., *Phys. Rev. Lett.* **112**, 054302 (2014)

### ■ Obere Grenze des Dipolmoments

Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik postulieren eine winzige Asymmetrie in der Ladungsverteilung des Elektrons, d. h. ein endliches elektrisches Dipolmoment. Forscher der ACME-Kollaboration aus den USA und Kanada haben mit Messungen am polaren Molekül Thoriummonoxid gezeigt, dass die obere Grenze für das elektrische Dipolmoment des Elektrons  $|d_e|$  mit 90 % Sicherheit kleiner als  $8,7 \times 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm}$  ist. In bisherigen Experimenten lag diese Grenze noch um eine Größenordnung höher. *The ACME Collaboration*, J. Baron et al., *Science* **343**, 269 (2014)