

BIOPHYSIK

Grünalgen wackeln sich in den Takt

Der Erfinder des Mikroskops, Antonie van Leeuwenhoek, staunte schon im 17. Jahrhundert über die Vielfalt von Lebensformen, die in einem Wassertropfen wimmeln. Viele dieser Mikroschwimmer nutzen zur Fortbewegung schlagende Geißeln. Die Grünalge *Chlamydomonas* schwimmt beispielsweise wie ein Brustschwimmer mit zwei Geißelarmen, die genau im Takt schlagen müssen. Unser aus Physikern und Biologen bestehendes Team konnte zeigen, wie dies den Zellen gelingt: Geraten die Geißeln einmal außer Takt, dann wackelt die Zelle und synchronisiert die beiden Geißeln wieder durch mechanische Kräfte – ohne Sensoren oder chemische Signale.

Pflanzen brauchen Licht zum Wachsen. Einzellige Grünalgen wie *Chlamydomonas* können zum Licht schwimmen (Abbildung 1). Dabei nutzen sie ihre beiden Geißeln, 10 μm lange Zellfortsätze, die 30- bis 50-mal pro Sekunde schlagen. Damit die Zelle geradeaus schwimmt, müssen beide Geißeln im Takt schlagen.

Jede der beiden Geißeln ist ein Oszillator, die beide im Gleichtakt schwingen [1]. Diese Synchronisation ist ein universelles Phänomen: Schwingende elektronische Schaltkreise können sich synchronisieren, Fußgänger synchronisieren ihre Schritte auf einer wankenden Brücke. Entdeckt hat es Christiaan Huygens im Jahr 1655, als er beobachtete, wie zwei Pendeluhren im Takt schwingen. Tatsächlich koppelte ein Balken die beiden Uhren, indem er mechanische Kräfte übertrug

(siehe Physik in unserer Zeit 2012, 43 (1), 40) (Abbildung 2).

Die Grünalgen verwenden ein ganz ähnliches Prinzip [2]: Schlagen beide Geißeln genau im Takt, so ist der Antrieb spiegelsymmetrisch, und die Zelle schwimmt geradeaus. Geraten die beiden Schwimmarme jedoch einmal aus dem Takt, so beginnt die Zelle zu wackeln [4]. Diese Wackelbewegung ändert die mechanischen Kräfte, welche die umgebende Flüssigkeit auf die Geißeln auswirkt.

Dreht sich zum Beispiel die Zelle nach links, so addieren sich zwei Bewegungen: Die Rotation der gesamten Zelle und die Schlagbewegung der linken Geißel relativ zum Zellkörper. Die linke Geißel führt also eine größere Bewegung relativ zur Flüssigkeit aus, wenn sie in ihrem Schlagzyklus fortschreitet. Damit verbunden sind erhöhte hydrodynamische

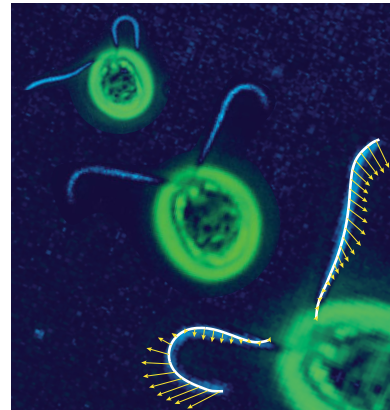
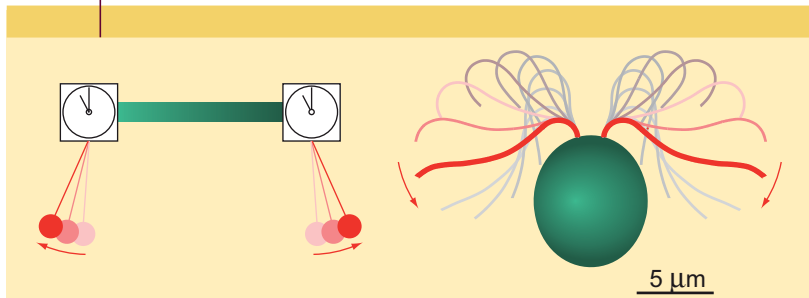


Abb. 1 Die Grünalge ist ein Mikrobrustschwimmer. Mechanische Kräfte halten ihre beiden Schwimmarme im Takt (Grafik: MPI f. molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden).

Reibungskräfte (Abbildung 3), wodurch sich deren Schwimmzug verlangsamt. Denn wird die Last größer, dann schlägt die Geißel langsamer – genau wie der Motor eines Autos, das einen Anstieg bewältigen muss. Die Schnelligkeit des Geißelschlages ist also an die Bewegung des Körpers gekoppelt.

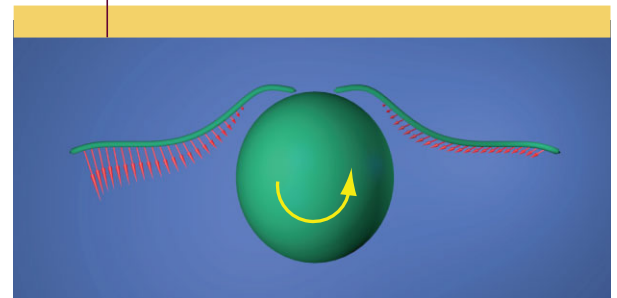
In unseren Experimenten konnten wir diese Lastabhängigkeit zum ersten Mal live messen [5]. Indem wir schwimmende Zellen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera filmten und Zell- und Geißelbewegung sehr präzise vermaßen, konnten wir genau beobachten, wie sich die Geschwindigkeit des Geißelschlages bei einer Drehbewegung der Zelle ändert.

ABB. 2 | SYNCHRONISATION VON OSZILLATOREN



Links: Zwei Pendel schwingen genau spiegelverkehrt im Gleichtakt. Ein Balken (grün) koppelt die beiden Uhren und verursacht dadurch deren Synchronisation. **Rechts:** Die Grünalge *Chlamydomonas* schwimmt mit zwei Geißeln, die jeweils ein stereotypes Schlagmuster vollführen. Damit die Zelle geradeaus schwimmen kann, müssen beide Geißeln synchron schlagen. Geraten die Geißeln einmal außer Takt, so beginnt die Zelle zu „wackeln.“ Dieses Wackeln spielt eine ähnliche Rolle wie die Schwingungen des Balkens im linken Bild [2].

ABB. 3 | GEISSELBEWEGUNG



Wenn sich die Zelle dreht (gelber Pfeil), während ihre beiden Geißeln schlagen, so nimmt für die eine Geißel die Reibung mit der umgebenen Flüssigkeit zu, während sie für die andere Geißel abnimmt. Dadurch verlangsamt beziehungsweise beschleunigt sich der Schlag der jeweiligen Geißel. Dies ist der Grund, warum Wackelbewegungen der Zelle beide Geißeln nach einer Störung immer wieder in Gleichtakt bringen.

PHYSICS NEWS

Die Massensumme aller drei Neutrino-Arten liegt bei 0,32 eV. Diesen Wert leiten britische Kosmologen aus Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung und von Gravitationslinsen ab. Ein anderes internationales Team schließt aus Daten des Sloan Digital Sky Survey auf **eine Summenmasse von 0,23 eV** (95 % CL). Beide Gruppen setzen voraus, dass Neutrinos einen Einfluss auf die Entstehung großer Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen hatten. Die kleinste obere Grenze für das Elektron-Neutrino beträgt nach Laborexperimenten 2 eV (R. A. Battye, A. Moss, Phys. Rev. Lett. **2014**, *112*, 051303; arxiv.org/abs/1308.5870 088102 und A.G. Sanchez et al., arxiv.org/abs/1312.4854v1).

+++

Eine einfache Methode zur Umwandlung von Radiosignalen in optische Signale haben Physiker der Universität Kopenhagen entwickelt. Das Gerät besteht aus einer Siliziumnitridmembran, die an ihrer Unterseite mit einem Aluminiumüberzug verspiegelt ist. Radiowellen versetzen diese Folie in Schwingungen, die sich über einen elektrischen Schwingkreis auf eine Lichtwelle übertragen lassen. Anwendungen in der Kommunikationstechnik sind denkbar (T. Bagci et al., Nature **2014**, *507*, 81).

+++

Den ersten Asteroiden mit einem Ringsystem hat ein internationales Astronomenteam bei einer Sternbedeckung gefunden. Demnach ist der etwa 250 km große Asteroid Chariklo von zwei jeweils 3 und 7 km dicken Ringen in Abständen von 391 und 405 km umgeben. Sie bestehen vorwiegend aus Eisparkeln (F. Braga-Ribas et al., Nature **2014**, *507*, 471; www.mpg.de/8036086/asteroid_chariklo).

+++

Lebende biologische Zellen haben Forscher der Universität Göttingen erstmals mit hochenergetischer Röntgenstrahlung untersucht. Mit der verwendeten Röntgenstrahlquelle PETRA III am DESY konnten sie bei Belichtungszeiten von 0,05 s Veränderungen im Nanometerbereich verfolgen. Für ihre Analyse verwendete das Team spezielle Krebszellen (B. Weinhausen et al., Phys. Rev. Lett. **2014**, *112*, 088102; journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.112).

+++

Moleküle, die nahe an der Zerreißgrenze rotieren (Superrotatoren), hat ein Team von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) erstmals exakt vermessen. Bei den Molekülen N₂ und O₂ fanden sie eine Rotationsfrequenz von mehr als 10 THz. Damit ist ihre Rotationsenergie vergleichbar mit der Bindungsenergie (A. Korobenko et al., Phys. Rev. Lett. **2014**, *112*, 113004; journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.112.113004).

Die Messergebnisse entsprechen auch den Vorhersagen eines theoretischen Modells, das wir entwickelt hatten, um die Synchronisation in dieser schwimmenden Zelle zu erklären. Modellrechnungen zeigen, dass die Wackelbewegung den Schlag der Geißeln genau so verlangsamt und beschleunigt, dass die beiden Geißeln wieder in Takt geraten.

Nicht nur *Chlamydomonas* schwimmt mit Geißeln. Baugleiche Zellfortsätze treiben auch Spermien an, wenn sie zum Ei schwimmen (siehe Physik in unserer Zeit **2011**, *42* (4), 196). In unseren Atemwegen gibt es sogar ganze Teppiche von Geißeln, die Schleim und Schmutzpartikel aus den Atemwegen transportieren. Für einen effektiven Transport müssen

diese Geißeln ebenfalls im Takt schlagen, vergleichbar den Galeerensklaven eines antiken Ruderboots. Es wird vermutet, dass dieser Massensynchronisation ebenfalls eine mechanische Kopplung zugrunde liegt.

- [1] R. Goldstein et al., Phys. Rev. Lett. **2009**, *103*, 168103.
- [2] B. M. Friedrich et al., Phys. Rev. Lett. **2012**, *109*, 138102.
- [3] A. Vilfan, Physics **2012**, *5*, 107.
- [4] K. Polotzek et al., New J. Phys. **2013**, *15*, 045005.
- [5] F. Geyer et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA. **2013**, *110*, 18058.

Benjamin Friedrich, MPI für Physik komplexer Systeme, Dresden
Veikko Geyer, MPI für Zellbiologie und Genetik, Dresden, und Yale University, New Haven

KOSMOLOGIE

Einblicke in die Geburt des Universums

Der erste Nachweis von Gravitationswellen, die im Urknall entstanden sind, ist möglicherweise einem Team von Radioastronomen gelungen. Mit dem Teleskop Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization (Biceps 2) wiesen sie eine Polarisation der Strahlung nach, wie sie die Theorie des inflationären Universums vorhersagt.

Die Kosmische Hintergrundstrahlung entstand im heißen Urgas, als das Universum 380 000 Jahre alt war. Sie enthält aber auch Informationen über den Urknall selbst, der häufig mit der Phase der inflationären Expansion gleichgesetzt wird. Demnach expandierte das Universum in der Geburtsphase für den Bruchteil einer Sekunde mit Überlichtgeschwindigkeit, anschließend dehnte es sich mit Unterlichtgeschwindigkeit bis zur heutigen Größe aus.

Wenn diese Hypothese stimmt, dann sind in der Phase der inflationären Expansion Gravitationswellen entstanden. Diese Raumzeit-Wellen haben zu einer Polarisation der Strahlung geführt, die sich noch heute in der kosmischen Hintergrundstrahlung nachweisen lassen sollte. Dies gelang nun eventuell dem Team um

John Kovac vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

Allerdings ist der Messwert etwa doppelt so groß wie erwartet, und einige Kritiker warnen vor einer nicht berücksichtigten Kontamination des Polarisationssignals durch Effekte in der Milchstraße [2]. Deswegen warten die Kosmologen gespannt auf die Daten des Weltraumteleskops Planck, deren Analyse bis zum Spätsommer fertig sein soll.

Die Erzeugung der Gravitationswellen im Urknall war ein quantenphysikalischer Vorgang: Es entstanden Gravitonen, also Teilchen des Gravitationsfeldes. Damit beinhaltet diese mögliche Entdeckung auch Hinweise auf eine Theorie der Quantengravitation.

- [1] bicepkeck.org
- [2] arxiv.org/abs/1404.1899

TB