

Laborbedingungen in Beschleuniger-Experimenten sehr schwierig, denn der von der kosmischen Strahlung hervorgerufene starke Untergrund behindert den Nachweis der emittierten  $\gamma$ -Strahlung. Erst im vergangenen Jahr wurde die Reaktion  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  erstmals verlässlich über einen weiten Energiebereich gemessen und theoretisch interpretiert. Dadurch ließ sich die zugehörige Unsicherheit bei der  ${}^7\text{Li}$ -Produktion erheblich reduzieren [4]. Nun ist es am LUNA-Beschleuniger im italienischen Gran-Sasso-Labor gelungen, auch die Reaktion  ${}^2\text{H}(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$  zu vermessen [5]. Das Labor liegt tief unter der Erde in einem Autobahntunnel, wobei das fast 2000 m hohe Gran-Sasso-Massiv als Abschirmung für die kosmische Strahlung dient. Trotz der starken Abschirmung der Detektoren war der  $\gamma$ -Untergrund immer noch erheblich höher als das  $\gamma$ -Signal von der Kernreaktion. Die Auswertung erforderte deswegen eine komplexe statistische Analyse des gemessenen Gamma-Spektrums, um signifikante Aussagen über den Wirkungsquerschnitt machen zu können. Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen theoretischen Vorhersagen zum Wirkungsquerschnitt und reduzieren gleichzeitig die kernphysikalischen Unsicherheiten, die nun noch in

den Raten der verschiedenen Abbaureaktionen der beiden Lithium-Isotope bestehen. Das Lithium-Problem bleibt somit bestehen, seine grundsätzliche Lösung könnte aber auch woanders liegen.

Auch wenn über den Einfluss von Elementarteilchen oder auch Dunkler Materie auf die Prozesse zur Lithium-Produktion spekuliert wurde [6], deuten Beobachtungsergebnisse von Lithium-Häufigkeiten im interstellaren Staub von metallarmen Galaxien wie der kleinen Magellanschen Wolke auf andere Erklärungen hin. Die dort vorhandenen  ${}^7\text{Li}$ -Häufigkeiten stimmen gut mit den Vorhersagen des kosmologischen Standardmodells überein [7]. Für die Abweichungen in den stellaren Häufigkeiten könnten deswegen wohl auch bislang nicht klar identifizierte stellare Nukleosynthese-Prozesse in der ersten Generation von Sternen verantwortlich sein, da diese, bedingt durch ihren primordialen Kernbrennstoff, anders brennen müssten als heutige Sternengenerationen.

\*

Vielen Dank für Diskussion und nützliche Hinweise gehen an Brian Fields von der University of Illinois, Urbana Champaign, und Frank Strieder von der South Dakota School of Mines and Technology.

Michael Wiescher

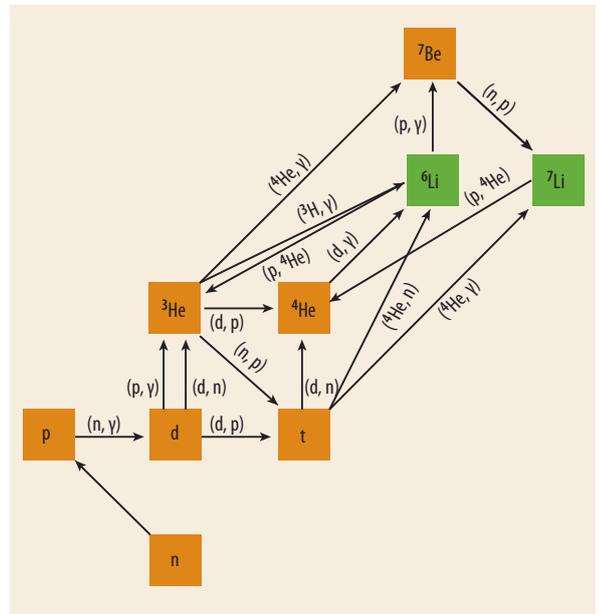


Abb. 2 Zum Aufbau der primordialen Isotope nach dem Urknall trägt ein komplexes Reaktionsnetzwerk bei.

- [1] M. Spite und F. Spite, *Nature* **297**, 483 (1982)
- [2] B. D. Fields, *Ann. Rev. Nuclear Particle Sci.* **61**, 47 (2011)
- [3] M. S. Smith, L. H. Kawano und R. A. Malaney, *Astrophys. J. Suppl.* **85**, 219 (1993)
- [4] A. Kontos, E. Uberseder, R. deBoer, J. Görres, C. Akers, A. Best, M. Couder und M. Wiescher, *Phys. Rev. C* **87**, 065804 (2013)
- [5] M. Anders et al. (LUNA Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **113**, 042501 (2014)
- [6] R. H. Cyburt, J. Ellis, B. D. Fields, F. Luo, K. A. Olive und V. C. Spanos, *J. of Cosm. & Astropart. Phys.* **5**, 14 (2013)
- [7] J. C. Howk, N. Lehner, B. D. Fields und G. J. Mathews, *Nature* **489**, 121 (2012)

## Die Körperform macht's

Formanisotropie kann für die Orientierung von Mikroorganismen im Gravitationsfeld sorgen.

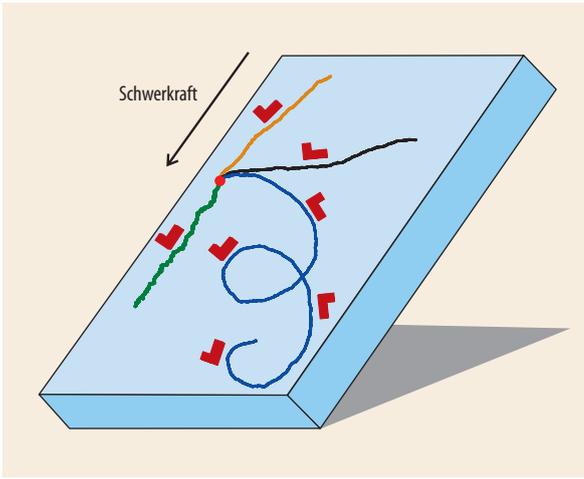
Für Mikroorganismen ist es lebensnotwendig, sich an äußeren Feldern zu orientieren – eine Eigenschaft, die man „Taxis“ nennt. So können Bakterien entlang eines chemischen Gradienten schwimmen und damit ihre Nahrungsaufnahme verbessern (Chemotaxis). Sie verwenden dazu auf molekularer Ebene einen Sensor für die Stoffkonzentration. Andere Mikroorganismen, wie Algen oder Pantoffeltierchen, schwimmen gegen die Gravitation nach oben (negative Gravitaxis), wo sie ebenfalls ein besseres Nahrungsangebot,

mehr Sauerstoff oder mehr Licht für die Photosynthese vorfinden. Allerdings ist derzeit immer noch unklar, ob die Mikroorganismen einen speziellen Sensor für die Richtung des Gravitationsfeldes besitzen. Rein physikalische Prinzipien reichen eigentlich schon aus, damit sie den Weg „nach oben“ finden [1].

In einer Zusammenarbeit von Experiment und Theorie haben sich Forscher um Clemens Bechinger (Stuttgart) und Hartmut Löwen (Düsseldorf) mit einem dieser physikalischen Prinzipien genauer be-

schäftigt und kürzlich gezeigt, dass die Form eines Mikroschwimmers maßgeblich sein Schwimmverhalten im Gravitationsfeld beeinflusst [2]. Insbesondere demonstrieren sie sehr eindrucksvoll die negative Gravitaxis mit einem formanisotropen Schwimmer in Gestalt eines L.

Künstlich fabrizierte Mikroschwimmer haben den Vorteil, dass man ausgeklügelte Sensoren für das Schwerfeld ausschließen kann. Ihr Verhalten ist daher mit rein physikalischen Mechanismen zu erklären. Zudem erlauben es künstliche Mikroschwimmer auch,



**Abb. 1** Beobachtet man künstliche Mikroschwimmer im Schwerefeld, dann zeigen sie je nach dessen Stärke, die bei zunehmender Neigung der Ebene abnimmt, folgende Schwimmrichtungen: nach unten (Sedimentation), nach oben (negative Gravitaxis) und zur Seite. Bei ausreichend kleinem Schwerefeld ergeben sich Schwimmtrajektorien ähnlich einer Zykloide.

die Körperform zu kontrollieren und die Schwimmgeschwindigkeit zu variieren. Die Stärke der Schwerkraft wird im Experiment über die Neigung der Ebene eingestellt (Abb. 1). Der für den Antrieb notwendige Feldgradient lässt sich mithilfe einer dünnen Gold-Beschichtung des kurzen Armes des L-förmigen Teilchen erzeugen. Wenn die Beschichtung durch einen Laser aufgeheizt wird, erwärmt sich das verwendete binäre Lösungsmittel und entmischt sich. Durch den Mischungsgradienten entsteht an der Unterseite des Armes eine Oberflächenströmung, die den Mikroschwimmer quasi durch die ruhende Flüssigkeit voranschleibt. Die resultierende Schwimmrichtung zeigt entlang des langen Armes. Durch Variation der Schwerkraft lassen sich nun unterschiedliche Trajektorien beobachten.

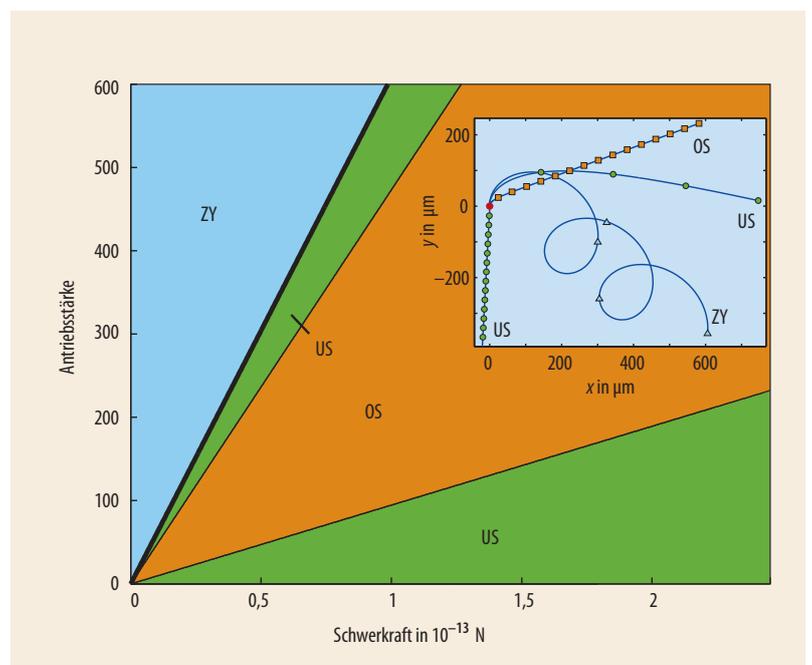
Um die Experimente verstehen und einordnen zu können, gehen wir der Reihe nach vor. Passive kugelförmige Kolloidteilchen sinken in einem homogenen Gravitationsfeld mit einer Geschwindigkeit proportional zum Quadrat ihres Radius nach unten ( $v \propto a^2$ ), weil sich Gravitationskraft ( $\propto a^3$ ) und Reibungskraft ( $\propto v a$ ) die Waage halten. Durch ihre Brownsche oder thermische Bewegung entsteht das bekannte exponentielle Dichteprofil. Mit einem Antrieb

werden kugelförmige Teilchen homogener Dichte zu Schwimmern, deren Schwimmrichtung eine ungehinderte Brownsche Bewegung ausführt. Man kann zeigen, dass sie wieder ein exponentielles Dichteprofil ausbilden, allerdings mit größerer Sedimentationslänge, weil sich aus kinetischen Gründen eine leicht polare Ordnung der Schwimmer einstellt [3, 4]. Erst „bodenlastige“ Schwimmer, deren Massenschwerpunkt nicht mit dem Kugelmittelpunkt zusammenfällt, erfahren ein Drehmoment, das ihre Schwimmrichtung entgegen dem Gravitationsfeld ausrichtet [5].<sup>1)</sup> Wenn ihre Schwimmgeschwindigkeit die Sedimentationsgeschwindigkeit überkompensiert, können sie letztendlich konstant nach oben schwimmen.

Die Autoren untersuchen nun einen weiteren, in der Literatur diskutierten Mechanismus für negative Gravitaxis. Mikroschwimmer homogener Dichte, deren Körperform aber „vorne und hinten“ unterschiedlich ist, richten sich aufgrund ihrer anisotropen Reibung ebenfalls im Gravitationsfeld aus [6]. Der Grund dafür lässt sich am Beispiel einer passiven Hantel plausibel machen, die aus einer

großen und einer kleinen Kugel gleicher Massendichte besteht, miteinander verbunden durch einen vernachlässigbar dünnen Stab. Weil die große Kugel schneller fällt, zieht sie die kleinere mit sich nach unten. Das Drehmoment der Schwerkraft relativ zum Massenschwerpunkt verschwindet bei beliebiger Orientierung der Hantel. Übrig bleibt das Drehmoment aufgrund der Reibungskräfte, welche die Kugeln beim Absinken erfahren. Dadurch dreht sich die Hantel in die stabile Orientierung entlang der Vertikalen. Auch das passive L-Teilchen mit seiner fehlenden Achsensymmetrie besitzt eine stabile Orientierung und sedimentiert mit einer leichten Kippung nach rechts (Abb. 1). Generell gilt, dass der bauchigere Teil passiver Objekte den größeren Reibungswiderstand besitzt und immer nach unten zeigt.

Im Experiment, das von Felix Kümmel, Doktorand in Stuttgart, durchgeführt wurde, ist die Stärke des Antriebs homogen über den kurzen Arm des L-Schwimmers verteilt. Bei starker Schwerkraft sedimentiert der Schwimmer nach unten. Bei abnehmender Schwerkraft nimmt die passive Sedimentationsgeschwindigkeit ab und die



**Abb. 2** Im Zustandsdiagramm der Theorie, in dem die dimensionslose Antriebsstärke versus Schwerkraft aufgetragen ist, findet man folgende Trajektorien (Inset): nach unten sedimentierend (US), nach oben schwimmend (OS, negative Gravitaxis) und zykloidartig (ZY).

<sup>1)</sup> Die Volvoxalge ist ein Beispiel für einen solchen bodenlastigen Schwimmer.

Schwimmgeschwindigkeit reicht für nach oben gerichtete Trajektorien, also negative Gravitaxis, aus (Abb. 1, orange Linie). Der Antrieb erzeugt durch die L-Gestalt allerdings auch eine Rotation des Schwimmers, die der reibungsinduzierten Rotation die Waage hält. Dadurch neigt sich die gerade Schwimmtrajektorie gegenüber der Vertikalen. Die reibungsinduzierte Rotation nimmt durch Kippung der Ebene immer weiter ab und kann letztendlich die antriebsinduzierte Rotation nicht mehr kompensieren. Der L-Schwimmer dreht sich, während er voranschwimmt, und es entstehen Trajektorien, die Zykloiden ähneln (Abb. 1, blaue Linie). Durch ein ausgefeiltes Modell ist es Borge ten Hagen, Doktorand in Düsseldorf, gelungen, dieses Szenario in der Theorie exakt zu reproduzieren, aber auch Vorhersagen für ein modifiziertes Schwimmerdesign zu machen. Das Zustandsdiagramm in den Parametern Antriebsstärke und

Schwerkraft beschreibt alle möglichen Trajektorientypen (Abb. 2).

Durch ihre Arbeit klären und verdeutlichen die Autoren, wie die Formanisotropie von Mikroschwimmern ihr Verhalten im Schwerefeld bestimmt. Neben der negativen Gravitaxis finden sie bei den Schwimmtrajektorien auch einen Übergang zu den Zykloidbahnen. Mit diesen neuen Erkenntnissen kann die Dynamik von Mikroorganismen im Schwerefeld aus einem neuen Blickwinkel betrachtet werden. So bleibt zu klären, ob Pantoffeltierchen genügend formanisotrop sind, damit sie auf Zykloidbahnen schwimmen.

Sehr interessant sind kollektive Bewegungsformen, die unter dem Einfluss eines Schwerefeldes entstehen, etwa beim Phytoplankton, einer Vielzahl kleinster Algen und Bakterien, welches das ökologische Gleichgewicht in Meeren bestimmt. Durch negative Gravitaxis in Kombination mit einem Scherfluss

bildet es unterhalb der Meeresoberfläche dünne ausgedehnte Schichten mit einer Dicke zwischen Zentimetern und Metern [7]. Mit Hilfe künstlicher Mikroschwimmer lassen sich auch solche Biokonvektionsmuster viel detaillierter untersuchen, was zu einem tieferen Verständnis natürlicher Abläufe beitragen kann.

**Holger Stark**

**Prof. Dr. Holger Stark**, Technische Universität Berlin, Institut für Theoretische Physik, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin

- [1] *A. M. Roberts*, *J. Exp. Biol.* **213**, 4158 (2010)
- [2] *B. ten Hagen*, *F. Kümmel*, *R. Wittkowski*, *D. Takagi*, *H. Löwen* und *C. Bechinger*, *Nature Communications* **5**, 4829 (2014)
- [3] *J. Palacci*, *C. Cottin-Bizonne*, *C. Ybert* und *L. Bocquet*, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 088304 (2010)
- [4] *M. Enculescu* und *H. Stark*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 058301 (2011)
- [5] *K. Wolff*, *A. Hahn* und *H. Stark*, *Eur. Phys. J. E* **36**, 43 (2013)
- [6] *A. M. Roberts* und *F. M. Deacon*, *J. Fluid Mech.* **452**, 405 (2002)
- [7] *W. M. Durham*, *J. O. Kessler* und *R. Stocker*, *Science* **323**, 1067 (2009)