

Die Kraft kritischer Fluktuationen

In Stuttgart ist es erstmals gelungen, die kritische Casimir-Kraft in Flüssigkeiten direkt zu messen, eine vor 30 Jahren vorhergesagte klassische Kraft.

Der Physiker Hendrik Casimir arbeitete bei den N. V. Philips' Gloeilampenfabriken in Eindhoven an der Stabilität von kolloidalen Flüssigkeiten, als er 1948 eine dreiseitige Idee zu Papier brachte, die in der Quantenfeldtheorie für Furore sorgen sollte: Zwischen zwei parallelen leitenden Metallplatten sollte demnach eine attraktive Kraft wirken, welche unabhängig vom Material allein darin begründet ist, dass Quantenfluktuationen des elektromagnetischen Feldes durch die Platten unterdrückt werden [1]. Selbst im Vakuum und ohne elektrische Ladungen sollte diese Kraft wirken. Da elektrische Felder an perfekten Metalloberflächen stets verschwinden, können die möglichen Wellenvektoren senkrecht zu den Platten mit Abstand D nur Werte $k = \pi/Dn$ mit $n \in \mathbb{N}$ annehmen, die ein Vielfaches der elementaren Mode sind. Das Potential $\Phi(D) = E_D - E_\infty$ ist dann durch die Summe $E_D = \sum \frac{1}{2} \hbar \omega_k$ aller möglichen Grundzustandsenergien harmonischer Oszillatoren gegeben, d. h. durch die Eigenfrequenzen $\omega_k(D) = c|\vec{k}|$ des Feldes, die mit den gegebenen Randbedingungen möglich sind und daher vom Abstand D abhängen. Casimir zeigte, dass für die Kraft F asymptotisch $F = -\partial\Phi/\partial D = -(\hbar c \pi^2 A)/(240 D^3)$ gilt und diese Kraft neben der Plattenfläche A nur vom Planckschen Wirkungsquantum \hbar und der Lichtgeschwindigkeit c abhängt. Bei einem Abstand D von ca. 10 nm nimmt Casimirs Kraft sogar beachtliche Werte an und entspricht dem Atmosphärendruck. Daher fand Marcus Sparnaay bereits 1958 erste experimentelle Hinweise, genaue Messungen von F folgten aber erst ab 1997.

Das Faszinierende an Casimirs Überlegung ist ihr universeller Charakter: Für ein beliebiges System mit langreichweitigen Wechselwirkungen – wie bei masselosen Photonen – hängt die Grundzustandsenergie in der Regel

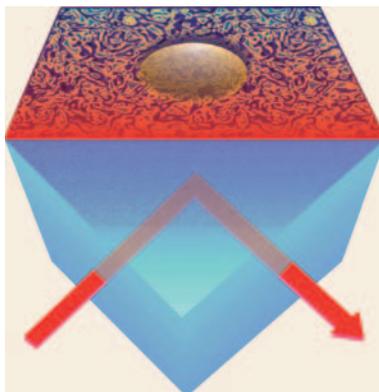


Abb. 1 Die kritische Casimir-Kraft, die durch Fluktuationen in einem Flüssigkeitsgemisch zwischen einer Kugel und einer Wand entsteht, beeinflusst die Bewegung der Kugel. Diese lässt sich durch die Totalreflexion eines Lasers an der Platte sehr genau bestimmen, da der Streubeitrag der Kugel exponentiell von ihrem Abstand abhängt.

von den Randbedingungen ab. Eine Änderung der Anordnung führt daher stets zu einer Kraft, die sich als Druck des Grundzustandes oder Vakuums verstehen lässt. So verursachen quantenmechanische Fluktuationen im Dipolmoment zweier Atome im Abstand R die attraktive van-der-Waals-Kraft proportional zu $1/R^8$, die zwischen allen Teilchen wirkt – selbst zwischen ungeladenen und nicht polarisierten. Casimir interessierte sich für eine solche „akademische Übung in Quantenelektrodynamik“, wie er es selbst ausdrückte, um das klassische Phänomen zu erklären, dass kolloidale Suspensionen ausflocken. Bereits vor Casimir haben Hamaker, Verwey und Overbeek diese anziehende van-der-Waals-Kraft dafür verantwortlich gemacht, dass Kolloidteilchen in Lösungen zusammenklumpen. Um ihre Experimente erklären zu können, mussten sie allerdings annehmen, dass die Kraft für große Abstände R nicht dem bis dahin für gültig angenommenen Abstandsgesetz ($\sim 1/R^7$) folgt, sondern aufgrund der retardierten elektromagnetischen Ausbreitung wie $1/R^8$ abnimmt. Dank Casimir war nun für solche attraktiven Fluktuationskräfte ein einfaches

universelles Prinzip bekannt, das sogar ihre quantitative Berechnung möglich machte.

Klassische Fluktuationen tun's auch

Ob die Fluktuationen durch die Quantennatur des elektromagnetischen Feldes entstehen oder als klassische Schwankungen in Materie aufgrund der thermischen Energie, spielt für Casimirs Überlegung eine geringe Rolle. So fluktuiert z. B. die Dichte jeder Flüssigkeit, verursacht durch die molekulare Bewegung der Moleküle. Diese thermischen Fluktuationen werden in der Nähe eines Phasenübergangs zweiter Ordnung sogar unbegrenzt groß und langreichweitig, weshalb man sie „kritisch“ nennt. Michael Fisher und Pierre-Gilles de Gennes haben bereits 1978 vorhergesagt, dass das Unterdrücken von solchen kritischen Fluktuationen in einer Flüssigkeit zwischen zwei Platten eine analoge klassische Kraft zur Folge haben sollte [2]. Diese hängt, im Unterschied zu Casimirs Kraft, aber von der Temperatur ab. Je näher man einem kritischen Punkt kommt, desto größer sollte diese „kritische“ Casimir-Kraft sein. Eine erste indirekte Beobachtung gelang 1999 Moses Chan und Rafael Garcia, die die Dicke eines dünnen Heliumfilms auf einem Kupfersubstrat maßen [3]. In der Nähe des superfluiden kritischen Punktes wurde dieser dünner, was sich durch einen quantitativen Vergleich mit der Theorie als ein Effekt der kritischen Casimir-Kraft erklären ließ.

Christopher Hertlein und Kollegen ist es nun mithilfe eines Kolloidteilchens gelungen, die kritische Casimir-Kraft mit einer Auflösung von einem Femtonewton (10^{-15} N) direkt zu messen [4]. Die binäre Flüssigkeitsmischung von Wasser und Lutidin zeigt bei der kritischen Temperatur $T_c \approx 34^\circ\text{C}$ einen kritischen Punkt, an dem sich die beiden Flüssigkeiten entmischen.

Eine in diese kritische Flüssigkeit eingetauchte Siliziumplatte mit einer Kolloidkugel aus Polystyrol (Durchmesser ca. 3 μm) in einem Abstand $D \approx 100 \text{ nm}$ unterdrückt die thermischen Fluktuationen zwischen der Platte und der Kugel, sodass eine kritische Casimir-Kraft entsteht. Wie misst man aber solche kleinen Kräfte? Die Stuttgarter Experimentalphysiker um Clemens Bechinger nutzen auch hier interessanterweise die thermischen Fluktuationen; diesmal aber die Brownsche Bewegung der Polystyrolkugel im Potential der kritischen Casimir-Kraft. Durch Stöße mit Molekülen der Flüssigkeit führt die Kugel einen zufälligen Tanz aus, wobei die Wahrscheinlichkeit für einen Abstand D zur Platte gemäß der Boltzmann-Verteilung als proportional zu $\exp\{-\Phi(D)/k_B T\}$ gegeben ist. Misst man, mit welcher Häufigkeit der jeweilige Abstand D auftaucht, erhält man direkt das Wechselwirkungspotential $\Phi(D)$ zwischen Kugel und Wand (Abb. 1). Wird der Abstand $T - T_c$ zur kritischen Temperatur T_c kleiner, so werden die Fluktuationen langreichweitiger und die kritische Casimir-Kraft größer – bis zu 600 Femtonewton (Abb. 2).

Analog zur Universalität des Vorfaktors $\hbar c \pi^2 / 240$ in Casimirs Kraftgesetz ist auch die Temperatur- und Abstandsabhängigkeit der kritischen Casimir-Kraft durch ein allgemeines Gesetz gegeben, das nicht mehr von den Details

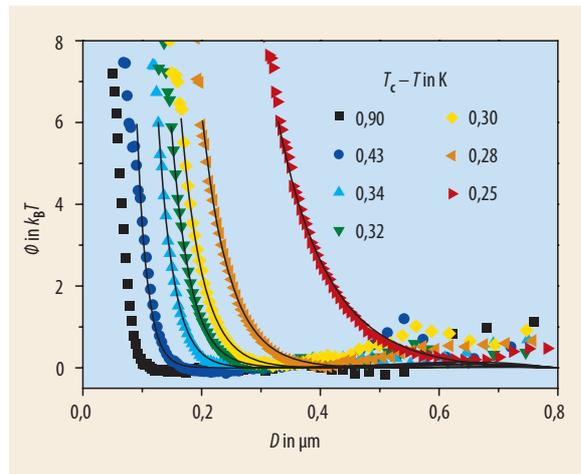


Abb. 2 Die kritische Casimir-Kraft bzw. das zugehörige Potential $\Phi(D)$ werden umso größer, je stärker sich die Temperatur T dem kritischen Wert T_c annähert, an dem sich die Flüssigkeiten entmischen. Die durchgezogenen Linien zeigen die Ergebnisse der Theorie.

des konkreten Systems abhängt. Die Theoriegruppe von Siegfried Dietrich hat diese universellen Skalenfunktionen bestimmt und mit den Experimenten verglichen (Abb. 2). Die Ergebnisse stimmen hervorragend überein und bestätigen einmal mehr den Verdienst der Statistischen Feldtheorie beim Verständnis kondensierter Materie.

Gegenüber Casimirs elektromagnetischen Feldern besteht der enorme Vorteil der kritischen Materiefluktuationen darin, dass man ihre Stärke durch die Temperatur kontrollieren und Oberflächen chemisch einfach modifizieren kann. Dadurch gelang es bei den Experimenten, die Kraft der kritischen Flüssigkeitsfluktuationen gemäß der theoretischen Vorhersage zu verändern und sogar ihr Vorzeichen umzukehren. Sind Kugel und Platte aus dem gleichen

Material, so ist die Kraft stets attraktiv. Ist die Kugel hydrophob, die Platte aber hydrophil, so ist die kritische Casimir-Kraft repulsiv. Dies könnte zu interessanten technischen Anwendungen bei Nanomaschinen führen, da in mikroelektronisch-mechanischen Systemen attraktive Kräfte oft zu einem Systemversagen führen. Durch eine geeignete Oberflächenbehandlung der Komponenten lässt sich dies mit einer repulsiven Casimir-Kraft eventuell vermeiden.

Klaus Mecke

- [1] H. B. G. Casimir, Proc. Kon. Nederl. Akad. Wet. B **51**, 793 (1948)
- [2] M. E. Fisher und P.-G. de Gennes, Acad. Sci Paris B **287**, 207 (1978)
- [3] R. Garcia und M. H. W. Chan, Phys. Rev. Lett. **83**, 1187 (1999)
- [4] C. Hertlein, L. Helden, A. Gambassi, S. Dietrich und C. Bechinger, Nature **451**, 172 (2008)

Prof. Dr. Klaus Mecke, Institut für Theoretische Physik, Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstraße 7, 91058 Erlangen

KURZGEFASST

■ Lichtjahre entfernt

Unter Ausnutzung von Lichtechos ist es gelungen, den Abstand des Cepheiden RS Pup mit einer Genauigkeit von einem Prozent zu messen. Wie alle Cepheiden ist RS Pup ein veränderlicher Stern, dessen Helligkeit innerhalb von 41 Tagen um einen Faktor 5 variiert. Da RS Pup sich in einem staubigen Nebel befindet, kann uns das Licht direkt oder nach der Streuung an einem Staubkorn erreichen. Aus der sich daraus ergebenden Laufzeitdifferenz haben Astronomen die Entfernung zu 6500 Lichtjahren bestimmt. Diese Messung ist rein geometrisch und beruht nicht auf Annahmen über die Physik der Sterne selbst. Das Wissen über den Abstand von RS Pup ist wichtig, um die Beziehung zwischen Pe-

riode und Helligkeit der Cepheiden zu kalibrieren.

P. Kervella et al., Astron. Astrophys. **480**, 167 (2008)

■ Mehr Effizienz bei der Photosynthese

Mithilfe von Silber-Nanopartikeln lässt sich die Effizienz von Lichtsammelkomplexen, den zentralen Funktionsträgern für das Einsammeln von Licht bei der Photosynthese, um den Faktor 18 steigern. Um dies zu erreichen, nutzten Münchner Forscher winzige Silberinseln als Unterlage für die Lichtsammelkomplexe. Wurden diese mit Licht bestrahlt, zeigten sie eine deutlich höhere Fluoreszenz. Dieses Verfahren sollte sich auf künstliche Lichtsammelkomplexe anwenden lassen, die zu völlig neuartigen

Solarzellen führen könnten.

S. Mackowski et al., Nano Lett. **8**, 558 (2008)

■ Weltbeste Atomuhr

Eine Strontium-Uhr geht erst nach 200 Millionen Jahren um eine Sekunde falsch – ein Weltrekord für eine Uhr mit neutralen Atomen. Für die Messung fingen die Wissenschaftler vom National Institute of Standards and Technology 4000 Strontium-Atome in einem optischen Gitter ein, das mittels Infrarotlaser realisiert wurde. Dies reduziert die Atombewegung stark und erhöht damit die Genauigkeit der Atomuhr. Genauer ticken bislang nur Quecksilberionen, doch laufen Ionenuhren weniger zuverlässig. D. Ludlow et al., Scienceexpress, 14. Februar 2008, doi 10.1126/science.1153341