

GENTNER-KASTLER-PREIS

Die Kraft aus dem Nichts

Eine verallgemeinerte Streutheorie auf Basis der Quantenoptik erlaubt es, den Casimir-Effekt für beliebige disjunkte Objekte zu berechnen.

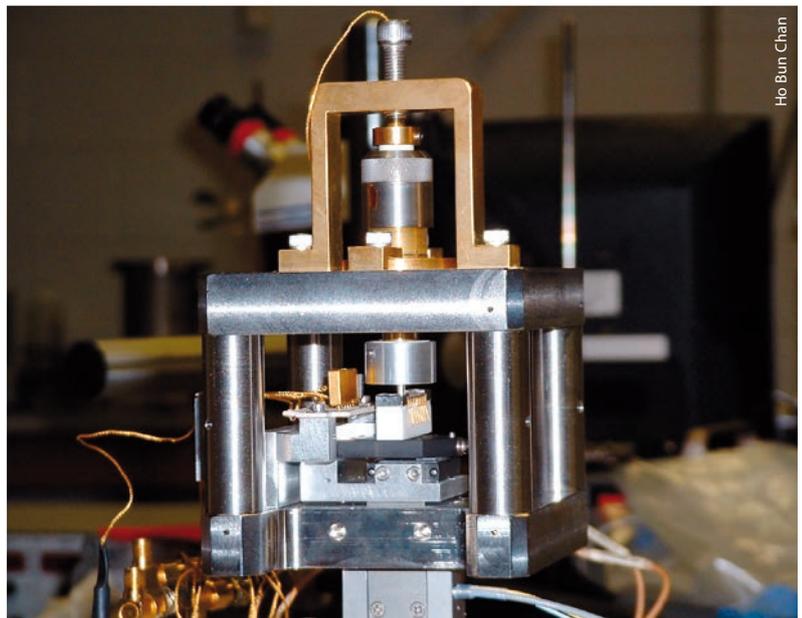
Astrid Lambrecht

Zwei Platten, die durch eine mikrometerbreite Lücke im Vakuum voneinander getrennt sind, spüren eine anziehende Kraft. Sie ist nach dem niederländischen Physiker Hendrik Casimir benannt, der ihre Existenz bereits 1948 vorhersagte. Doch wie kann eine Kraft zwischen zwei neutralen Platten entstehen, wenn dort Vakuum herrscht und diese Kraft weder durch Gravitation noch Elektrostatik zustande kommt?

Hendrik Casimir leitete diese unerwartete Kraft ab, als er die Energieänderung eines elektromagnetischen Feldes in Anwesenheit zweier Platten abschätzte und deren Abstand variierte. [1]. Seine Arbeit lieferte die Grundlage für unzählige Folgearbeiten über den Casimir-Effekt. Die zunächst verwandte formale Vorgehensweise bot allerdings nur begrenzte Einsicht in den zugrundeliegenden Mechanismus oder ein physikalisches Verständnis der Casimir-Kraft. Entsprechend galt sie lange vor allem als theoretische Kuriosität, obwohl Casimirs Arbeit zweifelsohne bahnbrechend war. Aktuell lebt das Interesse an dem grundlegenden Quanteneffekt wieder auf, der zudem in modernen physikalischen Experimenten und technischen Apparaturen zu berücksichtigen ist.

Hier möchte ich einen ergänzenden Blickwinkel auf den Casimir-Effekt vorstellen, der auf der Streutheorie elektromagnetischer Felder und auf Methoden aus der Quantenoptik beruht. Während die Casimir-Kraft zunächst als widersinnig erschien, weil sich zwischen den Platten nichts befindet, ist ihr Ursprung heute gut verstanden: Sie entsteht, wenn Vakuumfluktuationen räumlich eingeschlossen bzw. zwischen zwei Objekten gestreut werden. Zwischen den Platten befindet sich nicht etwa nichts, sondern ein quantenmechanisches Vakuum, das durchaus physikalische Effekte zeigt.

In der Quantenmechanik weisen alle Felder – insbesondere elektromagnetische – Fluktuationen um einen Mittelwert auf. Selbst ein perfektes Vakuum am absoluten Temperaturnullpunkt enthüllt fluktuierende Felder. Bei diesen Vakuumfluktuationen handelt es sich um elektromagnetische Felder, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen wie jedes andere freie Feld. Sie haben eine mittlere Energie, die der Hälfte der Energie eines Photons pro Feldmode entspricht. Da sich Vakuumfluktuationen im Raum ausbreiten und eine mittlere Energie transportieren, üben sie auf die Oberflächen der Platten einen Druck aus – wie



Ho Bun Chan

ein Fluss, der gegen ein Schleusentor drückt. Dieser Vakuumstrahlungsdruck wächst mit der Energie, also der Frequenz, des Vakuumfeldes.

Kommen wir zur Ausgangssituation zurück, bei der zwei Spiegel im Vakuum nur durch eine schmale Lücke getrennt sind. Physikalisch gesehen formen die beiden Spiegel einen Resonator (Abb. 1). Das elektromagnetische Feld kann sich in seinem Innern nicht frei bewegen. Insbesondere wird ein Feld verstärkt, wenn ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge exakt in die Lücke zwischen den Spiegeln passen (Resonanz). Bei allen anderen Wellenlängen wird das Feld mehr oder weniger unterdrückt. Daraus ergibt sich eine wichtige Konsequenz für das Gleichgewicht des Vaku-

Blick auf den experimentellen Aufbau des Experiments aus Hongkong zur Messung der Casimir-Kraft

KOMPAKT

- Quantenmechanisch betrachtet ist das Vakuum nicht leer, sondern enthält fluktuierende Felder.
- Diese Vakuumfluktuationen werden je nach Wellenlänge zwischen den reflektierenden Platten verstärkt oder unterdrückt. Daraus resultiert die Casimir-Kraft.
- Mit einer generalisierten Streutheorie auf Grundlage der Quantenoptik lässt sich die Casimir-Wechselwirkungsenergie zwischen beliebigen disjunkten Objekten berechnen.
- Die Objekte sind dabei durch ihre Streueigenschaften charakterisiert, die von der Feldfrequenz, der Polarisation und dem Wellenvektor abhängen.

Dr. Astrid Lambrecht, Laboratoire Kastler Brossel, UPMC-Sorbonne Universités, CNRS, ENS-PSL Research University, Collège de France 4, place Jussieu, 75005 Paris, Frankreich – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Gentner-Kastler-Preises 2016 auf der DPG-Jahrestagung in Regensburg

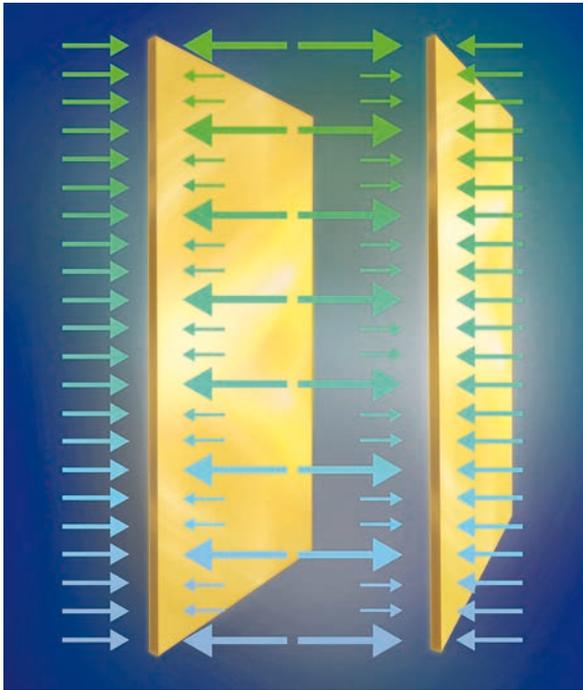


Abb. 1 Weil die Vakuumschwankungen innerhalb des Resonators abhängig von der Frequenz verstärkt oder unterdrückt werden, verbleibt eine resultierende Kraft, wenn man die Schwankungen innerhalb und außerhalb addiert.

umstrahlungsdrucks in dieser Situation: Außerhalb des Resonators tragen alle Feldfrequenzen gleichermaßen zum Strahlungsdruck bei. Innerhalb hängt der Beitrag davon ab, ob es sich bei der Feldfrequenz um eine Resonanz des Resonators handelt oder nicht. Liegt eine Resonanzfrequenz vor, ist der Vakuumstrahlungsdruck im Resonator stärker als außerhalb, sodass die Spiegel auseinander gedrückt werden. Andernfalls ist der Vakuumstrahlungsdruck im Resonator kleiner als außerhalb, und die Spiegel werden zusammen gedrückt.

Um die resultierende Kraft auf jeden Spiegel zu kennen, gilt es, die verschiedenen Beiträge aller Frequenzen im Einzelnen zu betrachten und zu addieren. Tut man dies für zwei planparallele, perfekt reflektierende oder dielektrische Spiegel, so findet man, dass die anziehenden Komponenten einen etwas größeren Einfluss haben als die abstoßenden. Für solche Spiegel ist die Casimir-Kraft daher anziehend und schiebt die Spiegel zusammen. Die Kraft F ist proportional zur Querschnittsfläche A der beiden Spiegel. Der Casimir-Druck ergibt sich als Kraft pro Flächeneinheit: $P = F/A \sim 1/d^4$. Er sinkt beispielsweise auf ein Sechzehntel, wenn sich der Abstand d der Spiegel halbiert. Abgesehen von diesen geometrischen Größen hängt der Casimir-Druck zwischen perfekt reflektierenden Spiegeln nur von Naturkonstanten wie der Lichtgeschwindigkeit und der Planck-Konstante ab.

Die Casimir-Kraft ist zu klein, um sie für Spiegel mit makroskopischen Abständen zu beobachten. Daher begegnet sie uns nicht im Alltag. Liegen die Abstände im Bereich einiger Mikrometer, lässt sich die Kraft aber messen. So spüren zwei Spiegel, die durch eine Lücke von einem Mikrometer getrennt sind, einen

anziehenden Casimir-Druck von etwa 1 mPa. Das ist ein Hunderttausendstel des typischen Atmosphärendrucks! Der Casimir-Druck scheint also winzig zu sein. Für zwei Spiegel mit einer Oberfläche von einem Quadratmillimeter führt der Druck von 1 mPa zu einer anziehenden Kraft von rund einem Nano-Newton. Weil die Casimir-Kraft aber stark vom Abstand der Spiegel abhängt, wird sie zur beherrschenden Kraft zwischen zwei neutralen Objekten, wenn deren Abstand deutlich weniger als einen Mikrometer beträgt.

Fundamentale Tests

Experimentalphysiker stellten daher vor etwa 15 Jahren fest, dass die Casimir-Kraft die Funktion von Mikro- und Nanomaschinen beeinträchtigen kann. Gleichzeitig erlauben seit zwei Jahrzehnten Fortschritte in der Messtechnik es, die Casimir-Kraft mit immer höherer Genauigkeit zu messen. Die neue Begeisterung wurde auch durch die Grundlagenphysik angefeuert, etwa durch die Vorhersage zusätzlicher Dimensionen in zehn- und elfdimensionalen verallgemeinerten Feldtheorien der fundamentalen Kräfte. Diese könnten dazu führen, dass die klassische Newtonsche Gravitation im Submillimeter-Bereich zu modifizieren ist [2–4].

Die Suche nach skalenabhängigen Modifikationen des Schwerkraftgesetzes erstreckt sich derzeit bis zu so kleinen Abständen, dass bei diesen die Casimir-Kraft die Gravitation dominiert. Solche Tests sind wichtig, weil viele theoretische Modelle, welche die vier fundamentalen Kräfte der Natur vereinigen wollen, auf diesen Skalen bisher unentdeckte Kräfte vorhersagen. Jede Abweichung zwischen Experiment und Theorie kann daher ein Hinweis auf diese Kräfte sein. Liefern die Messungen keine Abweichungen, setzen sie den existierenden Theorien zumindest neue Grenzen. Damit jedoch Casimir-Tests des Gravitationsgesetzes sinnvoll möglich sind, ist es notwendig, theoretische Vorhersagen und experimentelle Messergebnisse sehr genau und unabhängig voneinander zu bestimmen und zu vergleichen. Insbesondere gilt es, systematische Effekte zu identifizieren und – falls möglich – zu beseitigen [5].

Bereits einige Jahre nach Casimirs Vorhersage gab es die ersten Experimente, um den Effekt nachzuweisen. In den anschließenden Jahrzehnten folgten Nachweise, die mittlerweile im historischen Kontext aufbereitet sind [6–8]. In den letzten zwanzig Jahren kamen moderne Messtechniken zum Einsatz, z. B. präzise Torsionspendel, Rasterkraftmikroskopie und Oszillatoren auf Basis mikroelektro-mechanischer Systeme (MEMS), welche die Messung der Casimir-Kraft mit neuer Präzision erlauben. Ausgehend von den Experimenten von Steve Lamoreaux [9] und Umar Mohideen [10] verzeichnete der Casimir-Effekt einen enormen Anstieg an experimentellen Aktivitäten und theoretischen Entwicklungen. Die Experimente haben sich seither so verbessert, dass sie sehr gute Genauigkeiten erreichen [11].

Eine Vielzahl von Experimenten basiert auf MEMS, bei denen die mechanischen Elemente und beweglichen Teile – wie winzige Sensoren und Antriebe – in ein Silikonsubstrat eingearbeitet sind (Abb. 2). Die elektronischen Komponenten sind mit Geräten verbunden, welche die Information der Sensoren verarbeiten oder die Bewegung der mechanischen Teile steuern. MEMS haben mittlerweile zahlreiche technische Anwendungen: Sie finden sich in Airbags als Drucksensoren, in Tintenstrahldruckern oder dienen als Beschleunigungsmesser oder Mikrofon in mobilen Geräten wie Smartphones oder Laptops.

Weil MEMS sich auf der Submillimeter-Skala produzieren lassen und Elemente auf Mikrometerabstand enthalten, kann die Casimir-Kraft dazu führen, dass diese winzigen Elemente eines Geräts miteinander „verkleben“. Diesen Effekt hat erstmals die Gruppe von Michael Roukes beobachtet [12], während George Palasantzas und Mitarbeiter die Details dazu untersuchten [13]. Allerdings kann die Casimir-Kraft auch die MEMS aktivieren: Wenn eine Platte oszilliert und einer anderen Oberfläche nahe genug kommt, kann die Casimir-Kraft die Schwingungsfrequenz der Platte verändern und nichtlineares Verhalten als Antwort des Oszillators induzieren [14].

Mit Verlusten rechnen

Um die Messungen der Casimir-Kraft mit theoretischen Werten zu vergleichen, sind Rechnungen nötig, die eine ebenso hohe Genauigkeit besitzen und die Experimente realistisch wiedergeben. Das betrifft unter anderem die sehr wichtigen Materialeigenschaften der Spiegel. Reale Spiegel reflektieren nicht alle Frequenzen gleichermaßen: Manche werden nahezu perfekt reflektiert, andere nur sehr schlecht. Insbesondere sind alle Spiegel für hohe Frequenzen, also große Energien, durchsichtig. Um die Casimir-Kraft zu berechnen, sind daher frequenzabhängige Reflexionskoeffizienten für die Spiegel zu berücksichtigen – ein Problem, das ursprünglich Jewgeni Lifshitz Mitte der 1950er-Jahre angeht. Ihm folgten Julian Schwinger und andere.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Berechnung der im Experiment erwarteten Casimir-Kraft besteht darin, dass reale Experimente niemals am absoluten Temperaturnullpunkt – wie in Casimirs Rechnungen ursprünglich vorausgesetzt – stattfinden, sondern in der Regel bei Raumtemperatur. Dadurch gibt es neben den Vakuumfluktuationen auch thermische Fluktuationen, die einen eigenen Strahlungsdruck erzeugen. Dieser führt häufig zu einer Kraft, die größer als die erwartete Casimir-Kraft ist. Allerdings ist bis heute das Verhalten dieser sog. thermischen Casimir-Kraft nicht vollständig geklärt. Denn Unterschiede zwischen der vorhergesagten und gemessenen thermischen Casimir-Kraft bleiben bestehen, wenn Verlustmechanismen im Material berücksichtigt werden: Diese Verlustmechanismen werden in Metallen dadurch verursacht, dass die Elektronen, die für die Leitfähigkeit sorgen, bei elastischen

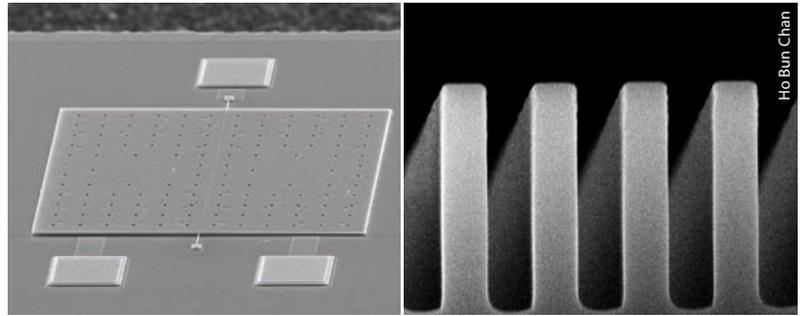


Abb. 2 Dank mikroelektro-mechanischer Systeme (MEMS, links) ließ sich die Casimir-Kraft für präzise strukturierte Silizium-Gitter (rechts) noch genauer messen. Die Platte links ist etwa einen halben Millimeter lang. Die Höhe der Struktur rechts beträgt etwa einen Mikrometer.

Stößen mit anderen Elektronen, Atomrümpfen oder Phononen Energie verlieren. Dieser Energieverlust stellt die Grundlage für den elektrischen Widerstand von Metallen dar. Jüngste Messungen der Casimir-Kraft zwischen Gold- [11] und Nickeloberflächen [15] scheinen theoretische Modelle zu stützen, die diese Verlustmechanismen vernachlässigen. Andererseits ist wohlbekannt, dass Gold und Nickel Metalle mit elektrischem Widerstand und endlicher elektrischer Leitfähigkeit sind. Die Frage nach der Temperaturabhängigkeit der Casimir-Kraft ist daher nach wie vor Gegenstand der aktuellen Forschung.

Geometrie und Streuung

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil, der bei einer genauen Berechnung des Casimir-Effekts für experimentelle Bedingungen berücksichtigt werden muss, ergibt sich aus der Geometrie des Versuchsaufbaus: In der Regel zielen die Experimente auf den Effekt zwischen einer ebenen Platte und einer Kugelfläche, da dann die Parallelität der Oberflächen nicht gewährleistet sein muss (Abb. 3). Aus Sicht der Quantenoptik haben die Anordnungen Kugel/Platte bzw. Platte/Platte aber sehr unterschiedliche Eigenschaften, wenn man sie als Resonator betrachtet. Unsere Gruppe in Paris hat daher die Anordnung Kugel/Platte im Detail mit Schwer-

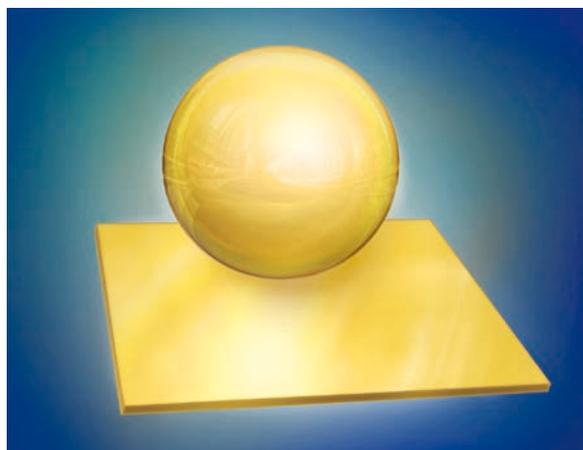


Abb. 3 Experimente weisen den Casimir-Effekt in der Regel zwischen einer sphärischen und einer ebenen Fläche nach.

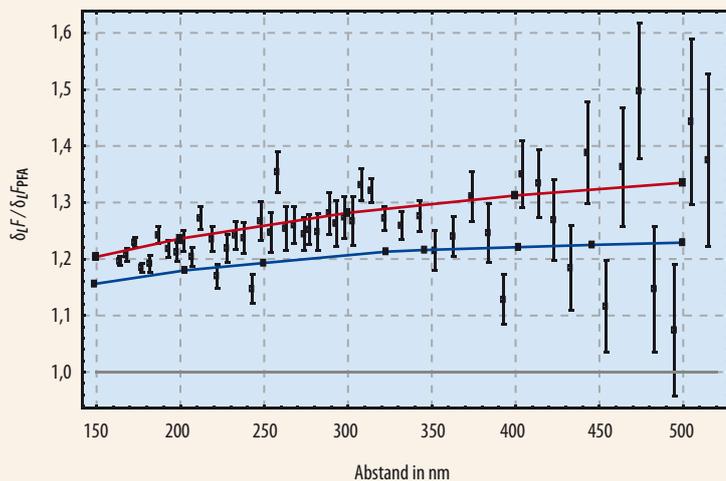


Abb. 4 Vergleich von berechnetem und gemessenem Casimir-Kraft-Gradienten zwischen einer Goldkugel und Silizium-Gittern abhängig vom Platten-Abstand: Die berechneten Daten (rote Linie be-

rechnet für Raumtemperatur, blaue Linie für Temperatur Null) ergaben sich über einen Streuungs-Ansatz für die entsprechenden experimentellen Parameter.

punkt auf dem Zusammenspiel von geometrischen Effekten und Materialeigenschaften der Oberflächen untersucht [16].

Zuvor wurden Geometrien, die von der Platte-Platte-Konfiguration abwichen, über eine Näherungsmethode berechnet. Diese besteht darin, die gekrümmte oder strukturierte Oberfläche zunächst in viele kleine Elemente zu zerlegen, die alle parallel zur Platte orientiert sind. Zwischen jedem dieser Elemente und der Platte ist die Casimir-Kraft zu berechnen. Zuletzt werden alle Casimir-Kräfte aufsummiert. Diese Näherungsmethode ist als „Proximity Force Approximation“ (PFA) bekannt. Sie funktioniert immer dann recht gut, wenn die Geometrie nicht stark von einer Platte-Platte-Konfiguration abweicht. Ihr Nachteil besteht aber darin, dass sie eigentliche geometrische Effekte nicht beschreiben kann, da sie jede Konfiguration vollkommen auf die Platte-Platte-Geometrie zurückführt.

Aus diesem Grund haben wir eine generalisierte Streutheorie auf quantenoptischer Basis entwickelt, die es erlaubt, die Casimir-Wechselwirkungsenergie zwischen beliebigen disjunkten Objekten zu bestimmen [17]. Im Rahmen dieser Theorie berechnet man die Casimir-Wechselwirkung nicht nur für parallele Platten, sondern auch für Kugeloberflächen, Nanostrukturen, Moleküle und Atome. Die Objekte sind dabei durch ihre Streueigenschaften charakterisiert, die im Allgemeinen von der Feldfrequenz, der Polarisation und dem Wellenvektor abhängen. Daher ist es nötig, das Material und seine strukturellen Eigenschaften beim Vergleich mit experimentellen Daten zu berücksichtigen. Ein Beispiel ist die berechnete Casimir-Kraft zwischen einer nanostrukturierten Oberfläche und einer Kugel, die gut mit den experimentellen Daten der Gruppe von Ho Bun Chan aus Hongkong übereinstimmt (**Abb. 4**) [18, 19].

Wenn insbesondere die Wechselwirkung zwischen Atomen und Molekülen betrachtet wird, sind die Streueigenschaften durch die atomare oder molekulare Antwortfunktion auf das einfallende elektromagnetische Vakuumfeld gegeben. Die Wechselwirkungskraft zwischen einzelnen Atomen und der Oberfläche eines Festkörpers heißt Casimir-Polder-Kraft nach Hendrik Casimir und Dirk Polder, die diese Kraft 1948 vorher-sagten [20]. Wechselwirkungskräfte zwischen Atomen und Molekülen sind die wohlbekannten Van-der-Waals-Kräfte.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang zu betonen, dass im Rahmen der Streutheorie alle diese Kräfte – die Casimir-, die Casimir-Polder- und die Van-der-Waals-Kraft – den gleichen Ursprung haben. Sie werden durch die elektromagnetischen Quanten-Vakuumfluktuationen vermittelt und lassen sich daher im Rahmen der Streutheorie identisch behandeln. Das gilt selbst dann, wenn sich das am Anfang gegebene Bild eines Resonators auf einzelne Streuprozesse wie bei Atomen oder Molekülen reduziert. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode besteht in einer einheitlichen Behandlung und einem verallgemeinerten physikalischen Verständnis der Wechselwirkungen.

Literatur

- [1] H. B. G. Casimir, Proc. K. Ned. Akad. Wet. **51**, 793 (1948)
- [2] E. Fischbach und C. L. Talmadge, The Search for Non-Newtonian Gravity, Springer (1998)
- [3] E. G. Adelberger et al., Prog. Part. Nucl. Phys. **62**, 102 (2009)
- [4] I. Antoniadis et al., C. R. Physique **12**, 755 (2011)
- [5] A. Lambrecht und S. Reynaud, Int. J. Mod. Phys. A **27**, 1260013 (2012)
- [6] E. Elizalde und A. Romeo, Am. J. Phys. **59**, 711 (1991)
- [7] P. W. Milonni und M.-L. Shih, Contemp. Phys. **33**, 313 (1992)
- [8] S. K. Lamoreaux, Phys. Today **60**, 40 (2007)
- [9] S. K. Lamoreaux, Phys. Rev. Lett. **78**, 5 (1997)
- [10] U. Mohideen und A. Roy, Phys. Rev. Lett. **81**, 4549 (1998)
- [11] R. S. Decca et al., Phys. Rev. D **75**, 077101 (2007)
- [12] E. Buks und M. L. Roukes, Europhys. Lett. **54**, 220 (2001)
- [13] M. Sedighi und G. Palasantzas, J. Appl. Phys. **117**, 144901 (2015)
- [14] H. B. Chan et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 211801 (2001)
- [15] A. A. Banishev et al., Phys. Rev. B **88**, 155410 (2013)
- [16] A. Canaguier-Durand, P. A. Maia Neto, A. Lambrecht und S. Reynaud, Phys. Rev. Lett. **104**, 040403 (2010)
- [17] A. Lambrecht et al., New J. Phys. **8**, 243 (2006)
- [18] Y. Bao et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 250402 (2010)
- [19] R. Guérout et al., Phys. Rev. A **87**, 052514 (2013)
- [20] H. B. G. Casimir und D. Polder, Phys. Rev. **73**, 360 (1948)

DIE AUTORIN

Astrid Lambrecht hat nach der Diplomarbeit bei Fritz Haake in Essen bei Elisabeth Giacobino in Paris promoviert. Nach einem Postdoc-Aufenthalt am MPI für Quantenoptik in Garching in der Gruppe von Theodor Hänsch ging sie 1996 an das Laboratoire Kastler Brossel der ENS in Paris und ist dort seit 2007 Directrice de Recherche. Für ihre Arbeiten wurde sie 2005 mit dem Aimé Cotton Preis der Société Française de Physique sowie 2013 mit einer Silbermedaille des CNRS ausgezeichnet.



Rehner / DPG