

Ефект на Казимир – сила от нищо¹

А. Ламбрехт

Какво ще стане, ако във вакуум поставите две успоредни огледала едно срещу друго? Първата ви реакция вероятно ще бъде – “нищо”. Фактически обаче двете огледала ще се привличат просто поради наличието на вакуум между тях. Това стряскащо явление е предсказано за пръв път от датския физик-теоретик Хендрик Казимир през 1948 г. и днес носи името ефект на Казимир, а съответната сила между огледалата е позната като сила на Казимир.

Много години на ефекта на Казимир бе гледано като на нещо, което е не повече от теоретичен куриоз. Напоследък обаче интересът към явлението избуя отново. Експериментаторите осъзнаха, че силата на Казимир влияе върху действието на микроприборите, а напредъкът в измервателната техника дава възможност силата да се регистрира и се измерва с все по-голяма точност.

Новият ентузиазъм бе разпален също и от физиците занимаващи се с фундаментална физика. Много физици предсказват наличие на допълнителни измерения в 10- и 11-мерните единни теории за фундаменталните взаимодействия.

Според тях допълнителните измерения може да променят представите ни за класическата Нютонова гравитация при субмилиметровите разстояния. Следователно измерването на силата на Казимир би помогнало за проверката на валидността на подобни радикални идеи.

Какво представлява ефектът на Казимир?

Фактът, че между две проводящи метални повърхности трябва да съществува сила на привличане, е предсказан от Казимир, който по това време изследва свойствата на колоидни разтвори в лабораториите на Филипс в Холандия. Свойствата на тези разтвори се определят от далечно действащи вандервалсови сили – сили на привличане между неутралните атоми и молекули.

Един от колегите на Казимир, Овербек, осъзнава, че създадената през 1932 г. от Фриц Лондон теория за произхода на силите на Ван дер Ваалс не обяснява добре експерименталните наблюдения в колоиди. Овербек помолил Казимир да изследва проблема и последният, работейки заедно с Дирк Полдер, открива, че взаимодействието между две неутрални молекули може да бъде описано коректно само ако се отчете крайната стойност на скоростта на светлината.

Скоро след това Казимир забелязва, че този резултат може да се интерпретира от гледна точка на флукуациите на вакуума. Именно тогава си задава въпроса какво би станало, ако във вакуума има не две молекули, а две обърнати едно срещу друго огледала. Именно тази работа води до прочутото му предсказание за наличие на сила на привличане между отразяващи повърхност.

Въпреки че наличието на сила на Казимир видимо противоречи на здравия разум, всъщност то е напълно разбираемо. В далечните времена на класическата механика представата за вакуум бе проста: вакуум би онова, което остава след като изпразните един съд от съдържащите се в него частици и понижите температурата до абсолютната нула. Квантовата механика обаче измени коренно представата за вакуума. Оказа се, че всички полета, в частност и електромагнитното, имат флукуации, т.е. във всеки даден момент тяхната истинска стойност се мени около една постоянна, средна стойност. Даже в идеалния вакуум при абсолютна нула съществуват флукуиращи полета, известни като “флукуации на вакуума”, чиято средна енергия съответства на половината от енергията на един фотон. Флукуациите на вакуума обаче не са никакви абстракции, плод на фантазията на физиците. Те притежават наблюдаеми

¹ Превод със съкр. от *Physics World*, септ., 2002.

последствия, които могат да се онагледят пряко на микроскопично равнище. Така например един възбуден атом не остава в това си състояние безкрайно дълго, а чрез спонтанно излъчване на фотон се връща в основното си състояние. Този преход е следствие от флукуациите на вакуума. Представете си, че се опитвате да балансирате подострен молив, поставен вертикално върху пръста на ръката ви. Моливът ще стои в това положение само при условие, че ръката е абсолютно неподвижна и нищо не нарушава равновесието. Наличието и на най-малкото смущение ще наруши равновесието и моливът ще падне в по-стабилно положение. По подобен начин флукуациите на вакуума предизвикват преходите на възбудените атоми в техните основни състояния.

Силата на Казимир е най-известният механичен ефект от флукуациите на вакуума. Да разгледаме пространството между две плоски огледала като кухня на резонатор. Всички електромагнитни полета притежават характеристичен спектър, съдържащ много и различни честоти. Когато вакуумът няма граници, всички честоти са еднакво важни. В пространството между огледалата обаче, където полето се отразява напред-назад, положението е различно. Полетата, чиито честоти са такива, че между огледалата се нанасят цяло число полуълни, се усилват. За тяхната дължина на вълната в кухнята се получава резонанс. За полетата с всички други дължини на вълната се получава отслабване. Флукуациите на вакуума се усилват или отслабват в зависимост от това, дали честотите им са резонансни или не.

При дискутиране на въпроса за произхода на силата на Казимир е важна величината налягане на лъчението. Всяко поле, дори и полето във вакуум, притежава енергия. Доколкото всички електромагнитни полета могат да се разпространяват в пространството, те оказват определено налягане върху повърхностите, върху които попадат. Това налягане на лъчението расте заедно с енергията, т.е. с честотата на електромагнитното поле. При резонансна честота налягането вътре в кухнята е по-голямо от външното налягане и това води до отблъскване на огледалата. Напротив, за честоти, които са далеч от резонансната, налягането на лъчението в кухнята е по-малко от външното и огледалата се привличат.

В резултат на всичко това се оказва, че онези компоненти на полето, които предизвикват привличане, леко превъзхождат другите, причиняващи отблъскване. За две идеални плоски успоредни огледала резултантната сила на привличане F е пропорционална на площта S на огледалата и зависи обратно пропорционално от четвъртата степен d от разстоянието между тях, т.е. $F \sim \frac{S}{d^4}$. Като се изключат тези

геометрични фактори, силата на Казимир зависи само от фундаментални константи – от константата на Планк и от скоростта на светлината.

Докато силата на Казимир, действаща между огледала, намиращи се на разстояние няколко метра едно от друго е твърде незначителна, тя може да бъде измерена, ако това разстояние е от порядъка на микрометри. Така например две огледала с площ от по 1 cm^2 , поставени на разстояние 1 mm , се привличат със сила на Казимир от порядъка на 10^{-7} N – приблизително колкото е теглото на водна капка с диаметър половин милиметър. Въпреки че тази сила изглежда малка, на субмилимикронни разстояния силата на Казимир е най-голямата сила, действаща между два неутрални обекта. Наистина, при раздалеченост от 10 nm – около сто пъти типичните атомни размери, ефектът на Казимир предизвиква еквивалента на налягане от 1 атмосфера.

Въпреки че във всекидневието си ние нямаме работа пряко с толкова малки разстояния, те са важни за наномасштабните структури и за микроелектромеханичните системи (МЕМС). Това са интелигентни прибори с микронни размери, които включват механични елементи и подвижни части. Към един такъв прибор са свързани електронни

елементи за обработка на получената от него информация или за управляване на подвижните му части. МЕМС имат множество възможни приложения в научните изследвания и в инженерството. В частност те вече се използват като сензори за налягане при въздушните възглавници в леките коли.

Доколкото МЕМС-приборите се произвеждат на микронно и субмикронно равнище, силата на Казимир може да предизвика сцепване на фините им елементи. Публикация по въпроса може да се намери във *Phys. Rev. B* 63 033402, 2001 г. Силата на Казимир може обаче да бъде и полезна. През 2001 г. в *Science* 291 1941 се описва използването ѝ за контрол на механичното движение в един МЕМС-прибор.

Измерване ефекта на Казимир

Когато през 1948 г. бе предсказан ефектът на Казимир, бе много трудно той да бъде измерен с наличните по онова време експериментални средства. Един от първите опити бе проведен през 1958 г. от Маркус Спарнай в лабораторията на Филипс в Айнховен. Той изследва силата на Казимир между две плоски метални огледала, направени от алуминий, хром или стомана. Силата се измерва чрез пружинна везна, чието удължение се определя по капацитета между пластинките. За да се избегне влиянието на електростатичната сила, огледалата се поддържат електронеутрални, като преди всяко измерване се допират едно до друго. Специални мерки са приложени за поддържане на огледалата в точно успоредно положение, тъй като силата на Казимир е много чувствителна към промени на разстоянието. Спарнай преодолява тези трудности и стига до заключението, че “резултатите не противоречат на теоретичното предсказание на Казимир”.

След тези ранни опити са създадени обаче сложни постановки, с чиято помощ ефектът на Казимир се изследва много по-лесно. Едно ново поколение измервания започват през 1997 г. Стив Ламор в Сиатъл измерва силата на Казимир върху една сферична леща с диаметър 4 cm и пластинка от оптичен кварц с диаметър около 2,5 cm, покрити с мед и злато. Лещата и пластинката са свързани с торзионно махало – усукваща се хоризонтална пръчка, окачена на тунгстенова нишка, поставена във вакуумиран цилиндричен съд. Когато лещата и пластинката се поставят на няколко микрометра разстояние една от друга, те се привличат със сила на Казимир и предизвикват усукване на махалото. Ламор установява, че експерименталните данни са в съгласие с теорията с точност до 5%.

Стимулирани от напредъка, постигнат от Ламор, и други изследователи опитват нови измервания върху ефекта на Казимир. Умар Мохидин и сътрудниците му от университета в Калифорния, Ривърсайд, например доближават една полистиролова сфера с диаметър 200 μm до върха на атомен микроскоп. В поредицата опити те доближават покритата с алуминий или злато сфера на 0,1 μm плосък диск, покрит също с тези метали. Резултантното привличане между сферата и диска се наблюдава по отклонението на лазерен лъч, отразен от плоската повърхност на малко лостче. С тази постановка силата на Казимир може да се измерва с точност 1% спрямо очакваната теоретична стойност. Томас Едерт в Стокхолм също използва атомен микроскоп за изучаване ефекта на Казимир. Той измерва силата между две съосни позлатени цилиндърчета с дължина 20 nm, чиито основи не са плоски, и резултатите му също сочат точност в рамките на 1% спрямо теорията.

Много малко от съвременните експерименти обаче измерват силата на Казимир с помощта на две плоски успоредни огледала. Причина за това е фактът, че по време на експеримента паралелността на огледалата трябва да се поддържа идеална, а това е трудно. Много по-лесно е да се доближи една сфера плътно до едно огледало, защото разстоянието между двата обекта в този случай е просто разстоянието между най-

близките им точки. Единственият недостатък при използване на сфера и плоско огледало е, че в този случай пресмятането на силата на Казимир не е толкова точно, колкото при две плоски огледала. В частност, трябва да се приеме, че за всяка точка приносът към силата на Казимир е абсолютно независим от приносите на другите точки. Това е така само ако радиусът на сферата е много по-голям от разстоянието между нея и равнината. Единственият съвременен експеримент, който повтаря оригиналната постановка на Казимир, е проведен от Джани Каруньо, Роберто Онофрио и техните сътрудници в Падуа. Те измерват силата между една твърда хромирана пластинка и плоската повърхност на пръчка от същия материал, поставена на разстояние 0,5 до 3 μm (G. Bressi et al. 2002, *Phys. Rev. Lett.* 88 041804). Изследователите намират, че измерените стойности на силата на Казимир са в съгласие с теоретичните предсказания в рамките на една точност от 15%. Това относително слабо съгласие между теория и експеримент е резултат от техническите трудности, съпровождащи експеримента.

Усъвършенствани пресмятания

Първият проблем при изследване ефекта на Казимир произтича от това, че реалните огледала не отразяват напълно всички честоти. Някои честоти се отразяват добре – даже почти идеално, докато други се отразяват слабо. Освен това за много високите честоти всички огледала стават прозрачни. Когато се пресмята силата на Казимир, трябва да отчита зависимостта на коефициента на отражение от честотата – един проблем, разглеждан в средата на 50-те години от Евгений Лифшиц, а след това и от Юлиан Швингер и от много други. В края на краищата се оказва, че измерената сила на Казимир между две реални метални огледала, които са поставени на разстояние 0,1 μm едно от друго, е само половината от теоретично предсказаната стойност за идеални огледала. Ако това различие не се вземе предвид при сравняване на опитните данни с теорията, тогава резултатите от измерванията може погрешно да се интерпретират като наличие на нова сила. При нашите пресмятания аз и колегата ми Серж Рейно отчетохме действителното поведение на огледалата, като използвахме физичните свойства на самите метали. Установихме, че най-простите твърдотелни модели на едно огледало са в съгласие с действителното поведение само над 0,5 μm .

Друг проблем при пресмятане на очакваната сила на Казимир за реални системи възниква от факта, че опитите никога не се правят при абсолютна нула – при каквото условие са правени първоначалните пресмятания на Казимир, а винаги при стайна температура. Това вкарва в играта наред с вакуумните флуктуации и топлинните флуктуации. Тези топлинни флуктуации могат да доведат до допълнително налягане на радиацията и да породят една по-голяма от очакваната сила на Казимир. Така например силата на Казимир между две плоски огледала, поставени на разстояние 0,7 μm едно от друго, при стайна температура е два пъти по-голяма, отколкото при абсолютната нула. За щастие, при стайна температура топлинните флуктуации са съществени само при разстояния над 1 μm , тъй като при малки разстояния дължината на вълната им е твърде голяма спрямо разстоянието и не може да настъпи резонанс.

Въпреки че за сега температурната зависимост на силата на Казимир не е изследвана опитно в детайли, тя трябва да се отчита при пресмятания за разстояния над 1 μm . Много изследователи са се занимавали с този проблем за идеално отразяващи огледала, включително Лифшиц и Швингер през 50-те години. В по-ново време с него се занимават Михаил Бордаг в Лайпциг, Бо Сернелиус в Линкьопинг, Галина Климчицкая и Владимир Мостепаненко в Парайба (Бразилия), а така също и нашата група в Париж. И наистина за известно време температурната зависимост на силата на Казимир бе предмет на горещи дебати сред физичната общност. Различни

противоречия вече изглежда са разрешени и това даде допълнително мотивация за опитно наблюдаване на влиянието на температурата върху силата на Казимир.

Трети и последен проблем при пресмятане на силата на Казимир произтича от факта, че в действителност огледалата не са идеално гладки. Най-често те се правят чрез покриване на повърхността им с тънък метален слой чрез разпрашване. По този начин обаче се получават слоеве с гладкост приблизително 50 nm. Докато неравности с такъв размер са невидими за невъоръженото око, те влияят върху измерванията на силата на Казимир, тъй като тя е извънредно чувствителна към малки промени на разстоянието. Мохидин и групата му в Калифорния наскоро използваха деформации на повърхността, за да покажат, че две повърхности могат също да породят странична сила на Казимир, която действа паралелно, а не перпендикулярно на повърхностите на огледалата. За опитите си те правят специални огледала, чиито повърхности са изкривени синусоидално. Те местят огледалата успоредно едно на друго, така че един връх на едното огледало минава последователно над върховете и доловете на другото. Оказва се, че при това страничната сила на Казимир се изменя синусоидално в зависимост от фазовата разлика между нагънатостите на двете повърхности. Размерът на силата бе около 10 пъти по-малък от обикновената сила на Казимир между две огледала, поставени на същото разстояние. Страничната сила се дължи също на флукуациите на вакуума.

Меран Кадар и сътрудниците му в MIT са пресметнали теоретичната стойност на силата между две идеално отразяващи “накъдрени” огледала, докато Мохидин и колегите му оценяват страничната сила за метални огледала и получават много добро съгласие с опита. Може да се окаже, че страничната сила на Казимир води и до други последици за микромашините.

Нова физика?

Ефектът на Казимир би могъл да играе роля при точните измервания на сили в нано- и микрометровия диапазон. Законът на Нютон за гравитацията е проверяван многократно при макроскопични разстояния чрез наблюдения върху движенията на планетите. До сега обаче никой не е успял да провери закона за разстояния от порядъка на микрон с каквато и да е точност. Такива проверки са важни, защото много теоретични модели, които опитват да обединят четирите фундаментални сили в природата предсказват съществуването на до сега неоткрити сили, които биха могли да действат при подобни мащаби. Всяко отклонение на експеримента от теорията би могло да бъде указание за наличие на нови сили. Но не всичко е загубено и дори, когато двете стойности съвпадат: в този случай измерванията ще установят нови, по-широки граници на валидност на съществуващите теории.

Йенс Гундлак и колегите му от Калифорния, например, използват торзионно махало за определяне на гравитационната сила между две маси при разстояния между тях от 10 μm до 220 μm . Техните измервания потвърждават, че Нютоновата гравитация действа и в този диапазон, но при по-малко разстояния доминира силата на Казимир. Междувременно Джошуа Лонг, Джон Прайс и колегите им от университета в Колорадо, заедно с Ефраим Фишбах и сътрудниците му от университета Пардю опитват да елиминират изцяло ефекта на Казимир при гравитационните опити в субмилиметровия диапазон чрез гризлив подбор на използваните в опитите материали.

Тази статия само загатва за множеството експерименти и теоретични изследвания, свързани с ефекта на Казимир. Много групи например изследват какво би се случило, ако взаимодействието между две огледала е не чрез електромагнитното поле, при което се обменят безмасови бозони (фотони), а чрез полета, състоящи се от масивни фермиони, например кварки или неутрино. Същевременно други

изследователски колективи изследват ефекта на Казимир при други топологии, като листа на Мьобиус и обекти с формата на тор.

Независимо от интензивните изследвания в тази област, много проблеми около ефекта на Казимир остават нерешени. В частност на пръв поглед наивният въпрос за силата на Казимир в една отделна куха сфера е все още предмет на оживени дебати. Хората не са сигурни дори в това, дали тази сила се стреми да свие или да раздуе сферата. Самият Хендрик Казимир е разглеждал този проблем още през 1953 г., докато е търсел стабилен модел на електрона. Сега, половин век по-късно, изглежда, че мистериите около силата на Казимир ще ни забавляват още дълго.