

# 卡西米尔效应浅析:机理、测量与意义

李 维

(南京师范大学物理科学与技术学院 江苏 210024)

霍光耀

(天津城市建设学院基础部 天津 300384)

如果让两块金属面板在真空中相对放置会发生什么情况呢?你的第一反应也许是“根本不会有任何事情发生”。而实际上,两块金属面板将由于真空的存在而相互吸引。这一令人惊奇的现象是由荷兰理论物理学家亨德里克·卡西米尔(Hendrik Casimir)于1948年最先预言的,这种现象现在被称为卡西米尔效应。真空中两个金属面板之间的相互作用力被称为卡西米尔力。卡西米尔效应是一种有关真空涨落的量子现象。

## 一、卡西米尔效应的机理

在早期的经典力学中,真空的概念是很简单的。如果一个容器倒空其内的所有物质并将其温度降低到绝对零度,则容器内部所剩余的空间即为真空。然而,量子力学的出现却完全改变了我们对真空的定义。根据量子力学的测不准原理,不可能同时以较高的精确度得知一个粒子的位置和动量。因此,当温度降到绝对零度时粒子必定仍然在振动,真空内充满着各种飞逝的粒子与电磁场。一方面,由普朗克对黑体腔内电磁场的处理以及许多其他关于电磁场分析的例子可知,电磁场可以看作是一系列具有各种频率的简谐振动的集合,电磁场局域形状不同会导致这些振动模的频率分布不同。一般情况,这些振动模的数目为无穷多,也即电磁场的自由度为无穷多。另一方面,从量子力学观点来看,腔内电磁场是一个具有各种频率的量子谐振子的集合,这个集合称为量子电磁场。其中,具有某一频率和某一量子数 $n$ 的量子态就是量子电磁场在该频率下的一种激发态,而 $h$ 就是该频率下相应的场量子。量子电磁场的基态,也即没有任何频率的场量子的态称为量子电磁场的真空态,这也是从量子逻辑观点所理解的经典物理学的真空态。这个真空态显然不是一无所有的“虚无”,它只是指明不存在任何场量子 $h$ 而已。仿佛一段紧绷未经激励的弦,其上虽无任何振动模存在,但并非是一无所有的“虚无”,而是一个物理系统的最低能量状态。由于量子谐振子的基态存在零点振动和相应的零点能,量子电磁场的基态也存在着零点振动和零点能。量子电磁场

的所有模的零点振动称为量子电磁场的“真空涨落”。虽然涨落的平均值为零,但平方平均值不为零。于是,按量子逻辑,经典物理学中的真空其实具有能量,它便是所有量子谐振子零点能之和。

真空涨落并不只是物理学家头脑中的抽象概念,而是具有可观测性,可以在微观尺度内的实验中被直接探测出来的。卡西米尔效应就是其中之一。在卡西米尔效应中,一对金属平板之间的狭窄空间可以被看作一个腔。电磁场在腔中来回反射。如果某个振动模的半波长的整数倍恰好等于腔长,则该振动模将被增强,振动模的频率对应于“腔共振”状态。与此相反,不符合“腔共振”条件的其他振动模将被抑制。因此,金属板间的狭窄空间只容许电磁场振动模中的高频成分(模式)存在其间,而其他那些波长较大的成分则被金属板挡在外部空间。这一点类似于地下的隧道管,一般收音机的电磁波长大于隧道口径时就无法收到信号,而在两块金属板间同样也会阻止波长大于其间隔距离的电磁场进入。

由于电磁场携带能量,所以它们在传播时会物体表面施加压力,称为“电磁场的辐射压力”。这种辐射压力随电磁场的能量(因而随电磁场的频率)的增加而增加。在卡西米尔效应中,由于排除了波长较长的成分,金属板间存留的能量密度要比金属板外的能量密度低得多。因此,金属板间的辐射压力将小于金属板外的辐射压力,作用在金属板两侧的辐射压力之差使两板有相互靠拢的趋势;而一旦它们靠得更近,两者之间产生的吸引力就会更强。

## 二、卡西米尔效应的测量

自卡西米尔发表他的实验方案以来的半个世纪里,由于实验条件的限制,卡西米尔效应只不过在理论上吸引了人们的好奇心,却一直未曾被测量过,这种局面到20世纪90年代后期才开始有所改变。1997年美国科学家拉穆尔克斯(Lamoreaux)最先实现了对卡西米尔效应的测量。他的实验比卡西米尔本人提出的设想要复杂,即采用了所谓的“球-板结构”。整个装置由镀有铜和金的直径为4厘米的金属球和大约2.5厘米见方的镀金石英平板组成,并

被安装在一个悬挂在钨丝上的水平扭摆的端部；一台激光器可以以 0.01 微米的精度测量扭摆的扭转，向一组压电元件施加的一股电流使金属板移动；而一个电子反馈系统则抵消这一移动，使扭摆保持静止。卡西米尔效应就表现为保持摆的位置所需的电流的变化。实验显示测量结果与卡西米尔对这一特殊的板间距和几何构形所预测的理论结果相差不超过 5%。但该实验只获得 10 ~ 15 焦耳的能量。1998 年，莫海登 (Mohideen) 等人在 0.1 ~ 0.9 微米的范围内，用原子显微镜重新测量了上述“球 - 板结构”的卡西米尔效应，结果实验与理论偏差达到 1%。另外，瑞典的埃德斯 (Ederth) 也利用原子显微镜研究了卡西米尔效应，他测量了两个相互成 90° 放置、相距 20 纳米的镀金圆柱体之间的卡西米尔效应，其实验结果与理论期待值的偏差在 1% 以内。

然而，在上述实验中很少有人采用原始组态——两块平行金属板来测量卡西米尔效应，原因是这种组态要求实验中两个金属板必须保持绝对平行，而这是很难做到的。让一个球接近一个板面是容易的，因为这两个物体之间的距离只不过是两个物体之间最近的点之间的距离。利用球和金属板测量卡西米尔效应的唯一缺点是此时两物体之间的卡西米尔力的计算不如一对平行金属板之间的卡西米尔力计算得精确。尤其是不得不假设每一个点对卡西米尔力的贡献是相互独立的，而这只有当球的半径远大于球和平板之间的距离时才成立。

最近，意大利科学家卡鲁哥诺 (Carugno) 及其合作者们利用卡西米尔的原始组态结构进行了实验。他们测量了间距为 0.5 ~ 3 微米的镀铬硬板与一个由同样材料制成的悬梁表面之间的卡西米尔效应。研究者发现，测得的卡西米尔力与理论期待值的相对偏差在 15% 以内，实验与理论相差较大表明实验中存在着技术难点。

为了克服上述问题，美国理论物理学家克罗斯 (Krause) 提出了一些新的设想。他认为金属材料本身也会对卡西米尔效应的强度产生影响，这种影响来源于金属的电性质与真空的相互作用。另一方面，板与板之间的相互作用也都与金属的原子结构以及它的电性质等有关。为此他建议，可以先测试不同情况下的卡西米尔力大小的差别。最近，他们采用同一种金属元素的不同同位素来测试卡西米尔力，因为同位素既具有相同的电性质，又有着不同的原子核和引力作用。如果测得的卡西米尔力大小不

同，就意味着存在着新的物理效应。为了精确起见，还应同时考虑各种不同的同位素在金属电性质方面带来的微小的差别，但这与卡西米尔力大小的改变相比要小一万倍左右，因此这个差别可以忽略不计。这项实验的另一优点是它测定的是卡西米尔力之间的差别，而不是卡西米尔力本身的绝对值，从而使测得的结果可以减少对某些理论假设的依赖性。

### 三、卡西米尔效应的意义

通过对行星运动的观测，牛顿于 300 多年前确定了宏观意义上的万有引力定律，卡文迪许测定引力常数也有 200 多年历史。近年来理论物理学的发展使一些科学家认为，在非常微小的尺度上，引力与距离的平方反比律可能不成立。因此，用更精密的实验测量微小尺度上的引力，成为非常受关注的研究课题。美国科学家日前采用频率为千赫兹的共鸣振荡技术，测量了相隔 108 微米物体之间的引力，这是迄今为止最精密的引力测量实验。这一实验给寻找引力定律背离的努力确定了一个新的尺度上限，即 108 微米。在用新型装置进行的实验中并未发现任何异常现象。

然而，在更小的尺度会如何？可能将取决于对卡西米尔效应的实验验证。美国科学家冈拉克 (Gundlach) 等人已经指出万有引力在更短的距离范围内可能失效，卡西米尔力将居于主导地位。按照卡西米尔的预言，卡西米尔力将显著异于牛顿的万有引力作用。除两板面之间的卡西米尔力  $F$  正比于板面的面积外，并且每当两个板面间的距离  $d$  减半时，卡西米尔力将增至原来的 16 倍，即  $F \propto 1/d^4$ 。尽管对于相距几米远的一对平板来说，卡西米尔力确实太弱，无法被探测到。但如果两个板面之间的距离在微米量级以内时，它们之间的卡西米尔效应是可以被探测到的。例如，两个面积为 1 平方厘米、相距 1 微米的板面之间具有的相互吸引的卡西米尔力的大小约为  $10^{-7}$  牛顿，大致相当于一个直径为 0.5 毫米的水滴所受的重力。虽然这种力看起来很小，但在低于微米的距离之内，卡西米尔力却成为两个中性物体之间最强的力。实际上，在 10 纳米的距离上，卡西米尔效应产生的力的作用相当于一个大气压。因此，未来对于卡西米尔效应的精密实验验证具有重要的理论和实践意义。

另外，根据力与能量变化的联系，检测卡西米尔力就有可能判断零点能是否存在。因此，对于卡西米尔效应的研究将为零点能的存在寻找实验判据，并为零点能的提取提供一条出路。