

《真空》

前言	2
1 真空是什么?	2
1.1 真空概念的变迁.....	2
1.2 零点能-量子真空	4
1.3 量子场论的真空.....	5
1.4 虚粒子 (virtual particle) 是什么?	6
2 真空效应	9
2.1 反常磁矩和兰姆位移.....	9
2.2 卡西米尔效应	10
2.3 计算卡西米尔力.....	12
2.4 实验证实卡西米尔效应.....	14
2.5 卡西米尔效应的应用.....	15
3 进一步扰动真空.....	16
3.1 动态卡西米尔效应.....	18
3.2 Unruh 效应	19
3.3 霍金辐射	20
4 宇宙学和真空.....	22
4.1 暗能量、宇宙常数.....	22
4.2 真空灾变	23
参考资料.....	24

前言

从古希腊时代开始，真空就是一个颇有争议的哲学议题，古希腊著名哲学家亚里士多德（Aristotélēs，前 384 年—前 322 年）说“大自然厌恶真空”！他认为真空在逻辑上是不可能的，这种真空观一直影响了后世 1000 多年。

由于现代科技的发展，人们对真空的认知已经与古希腊时代不可同日而语，然而，真空到底是什么？如何定义真空？它的物理属性、特点？有哪些理论诠释及实验证实？

本文概括了现代物理学对“真空”的探讨，包括概念、理论、及实验。

1 真空是什么？

1.1 真空概念的变迁

古希腊哲学家认为“真空”不可能存在！他们的理由是：空间必须装满物质才能传递物理作用。尽管这种简单原始的哲学想法，已经被之后的物理实验否定了，但听起来却又有点像如今量子场论的所谓“真空不空”的说法！在科学史上，哲学猜想与科学实验总是在矛盾和统一的反复斗争中催生理论的建立和发展。可以举出很多诸如此类的例子：光的粒子说和波动说，“以太”存在与否，古代的原子论，等等，真空概念之变迁也如此。

17 世纪时，意大利物理学家伽利略（Galileo Galilei，1564–1642）从虹吸现象，对古希腊真空哲学观提出了质疑。但第一次证实“真空”真正存在的，是伽利略的学生托里拆利（Evangelista Torricelli，1608–1647）在 1643 年发明的气压计。托里拆利用玻璃管和水银柱，向人们展示了一截在管中真实存在的“真空”！见图 1。

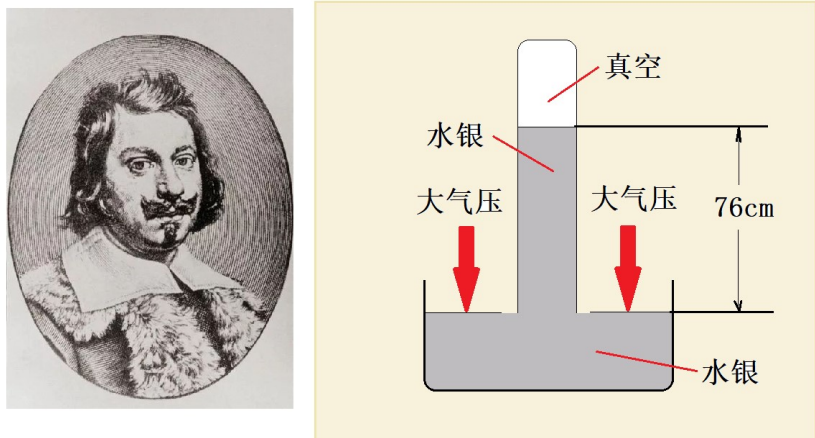


图 1: 托里拆利实验

从那时候开始，人们便有了对“真空”的粗略概念（没有大气），并得以解释许多现象。例如，热水瓶为什么能保温？因为瓶胆的两层玻璃之间被抽成了真空，其中没有了大气，便无法进行热传导，所以能保温。使用钨丝的电灯泡中是真空，灯丝缺乏氧气，才不会被很快地烧尽。

后来，真空概念从一个哲学名词，变成了一种有价值的工业工具和技术，用以达到某种实用的目的。人们将真空技术用于生活及科研的各个方面。企图得到更高更纯的真空，成为现代技术的目标之一。

不过，真空的定义是什么呢？多数人想象的真空应该是不存在任何物质、空无一物的空间状态。因为我们人类生活在地球上，生活在被大气层包围着的环境中，所以一般公众理解的真空，或者说接近“真空”的程度，是与容器中大气多少、气压的高低有关的。

那么，如果我们突破了大气层的限制，去到宇宙空间中，那是不是就身处“真空”中了呢？

答案是否定的，尽管宇宙空间中没有空气，但仍然不是空无一物。宇宙中充满了辐射能量，有各种各样的宇宙射线，及各种频率的电磁波，也包括我们大家熟悉的可见光波。

看来，没有物质、没有能量、“空无一物”的环境，在实际情况下是很难达到的。而就物理理论而言，那也是一种不可及的状态。所以，真空的定义一直随着科技的发展而变化，从“空无一物”到如今的“真空不空”。

1.2 零点能-量子真空

相对论和量子力学，为物理学带来了革命性的进展，也深化了真空的概念。

真空，概念上不同于空间，但却与空间有关。如前面所述，将真空理解为“空无一物”，便在实际上认可了牛顿的“绝对空间”，这已被相对论所摒弃。狭义相对论提出时空的相对性，广义相对论进一步认为时空与物质密切相关。因此，从相对论哲学意义上来看待真空，更偏向“真空不空”。

真空不空的概念，最早是与量子物理中零点能量的概念有关联。零点能原意指的是量子系统处于基态（绝对零度）时所拥有的能量。

零点能的概念最早出现在德国物理学家普朗克（Max Planck, 1858-1947）1912年发表的一篇文章中^[1]，他在重新表述他十几年前（1900年）开创的量子理论时提出的。

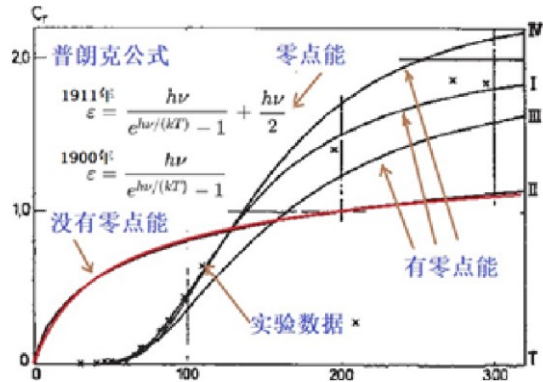


图 2：爱因斯坦用普朗克的辐射公式计算氢分子比热

1900年，普朗克解决黑体辐射问题时，从统计力学推导出了黑体辐射公式。之后，在1911年至1913年发表的一系列论文里，普朗克提出他的“第二量子理论”；他在重新推导的能量辐射子的平均能量中，给出了零点能量的表

达式，即 $(1/2) h\nu$ ， h 是普朗克常数， ν 是量子谐振子的频率，见图 2 左上方的公式。

根据普朗克新表述的辐射公式，量子系统所拥有的能量不能低于零点能。普朗克当时并不很在意这个 $(1/2) h\nu$ ，但却很快地引起了正在研究统计中涨落公式的爱因斯坦（Albert Einstein, 1879—1955）的注意。爱因斯坦说“零点能可能真的存在！”并和他的助手奥托·施特恩一起写了一篇文章，假设双原子分子的旋转能含有零点能，并且所有双原子分子以同样角速度旋转，然后计算出双原子分子气体的比热。将氢气的理论比热与实验数据相互比较（图 2 的曲线），证明了零点能存在的必要性^[2]。

1927 年，德国物理学家海森堡（Heisenberg, 1901—1976）的不确定性原理从量子力学基础理论的角度，证实了量子系统不可能没有零点能。根据不确定性原理，动量和位置不能同时确定。例如，考虑一个处于谐振子势阱中的粒子，因为位置被限制了，动量便不可能为零，基态的能量也就不可能为零。因此，零点能与不对易关系紧密相连，也可以说，零点能是量子系统由于动量与位置不对易所引起的能量不确定性而产生的非零期望值。

在量子场论的语义下，零点能与真空能是一致的，因此，零点能的存在说明“真空不空”。

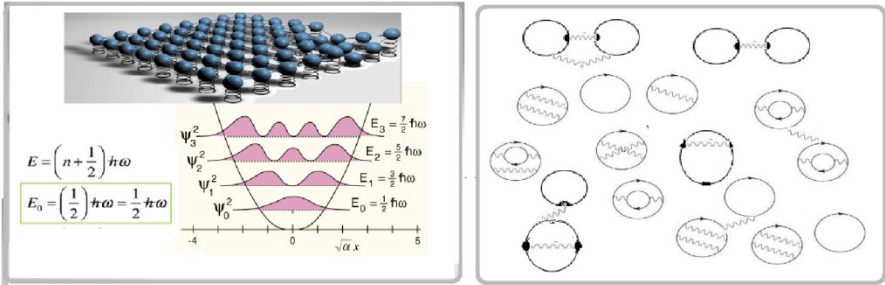
1.3 量子场论的真空

量子力学发展成量子场论。根据场论的观点，世界的本质是场，每一种粒子都有其对应的量子场：电子有电子场，质子有质子场，还有胶子场、夸克场等等。场无处不在，为万物之基础，粒子则被视为相应场的激发态，表现为波澜起伏的场中被激励而出现的“涟漪”。

量子场论中引进了粒子数算符以及生成算符及湮灭算符等，并给予了真空一个明确且量化的定义：真空是“在任何湮灭算符作用下都得到基态”的一种量子态。

用通俗的话说，真空态就是各种粒子数都已经降到最小值（0）的那种状态。这个定义也符合“空无一物”的说法。然而，根据量子物理中的不确定性原理，即使没有粒子没有辐射，也仍然会存在量子涨落。或者说，即使空无一物，也仍然真空不空！也许有人会问：既然没有“粒子”，量子涨落又是什么呢？物理学家给了一个名词：虚粒子。

在量子场论中，每个时空点都被看作是量子化的简谐振子，并与相邻振子有相互作用，见图 3a。每种谐振子的真空期望值为 $1/2(\hbar\nu)$ （图中所示是约化普朗克常数和角频率的乘积），因为谐振子可取的频率值为无穷多，从而导致无限大的零点真空能量。



(a) 量子场论的谐振子模型 (b) 描述真空的费曼图是各种圈图

图 3：真空模型

量子场论涉及繁杂艰深的数学运算，较直观的是用著名美国物理学家费曼（Feynman, 1918—1988）发明的费曼图（见下一节的简单介绍）来描述相互作用。费曼图描述的真空，是由各种各样所有可能的圈图组成，包括单圈或多圈的圈图。图 3b 展示了圈图的几个例子。这些圈图表示了真空中无休止的量子涨落：各种粒子在泡沫式的真空海洋中，随机生成又瞬间湮灭，它们被称为虚粒子。

1.4 虚粒子（virtual particle）是什么？

解释虚粒子之前，首先，通过一个例子，简单介绍一下费曼图。

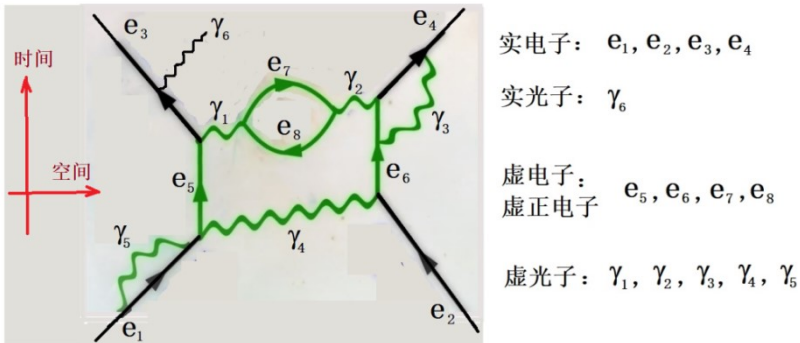


图 4：典型费曼图例子

图 4 所示是一个典型的费曼图例子，描述入射电子 e_1 和 e_2 相互作用，最后生成（出射）电子 e_3 和 e_4 的一种散射过程，最后还放出了一个光子 γ_6 。

费曼图也能描述其它粒子的散射，我们这儿只谈量子电动力学，或称 QED，它是描述电子和光子相互作用的理论。QED 中费曼图有如下简单规则：水平方向代表空间，垂直向上代表时间，实线代表电子，波浪线代表光子。

图 4 的过程中，除了入射出射粒子之外，还有许多中间过程中很快产生又很快消失了的粒子，即虚粒子，例如 e_5 和 e_6 、 γ_1 和 γ_2 等等。

必须注意，费曼图描述的并不是粒子运动的严格几何轨迹，可以看作一种“拓扑”结构。但费曼的图像能帮助我们到场论中的相互作用进行直观的形象思维，并且也能简化场论中的计算。

费曼图中可以简单地判定粒子的虚实。如图 4 所示，外线（入射出射）表示的粒子，是可观测的实粒子；而内线（绿色线）表示的，是不可观测的虚粒子。

对真空而言，费曼图都是闭圈（图 3b），没有外线，意味着没有入射出射的实粒子，因此，真空由大量（正反）虚粒子构成。

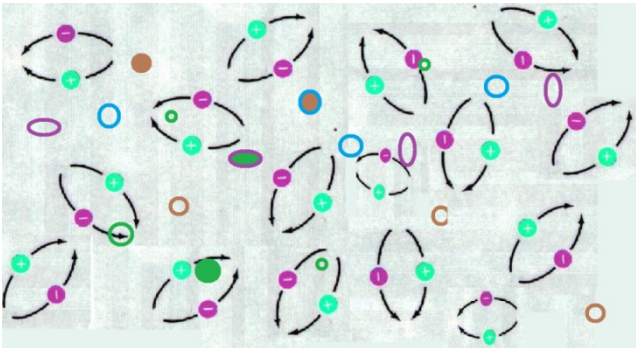


图 5：虚粒子构成了真空

虚粒子，意即虚构或假想的粒子，实际上是为量子场论中繁杂的数学计算而建立的一种解释性的直观概念。不仅仅真空布满了虚粒子，实粒子之间的相互作用过程中也少不了它们，图 4 所示的电子-电子散射问题便是其中一例。

量子理论不同于经典理论，即使是我们以为在脑袋里有清晰图像的实粒子（电子、光子等），在量子世界中也表现出难以理解的反常行为，何况还是“虚粒子”呢！

引进“虚粒子”的目的，是为了回答“相互作用是如何发生的？”这一类问题。例如，当两个电子互相接近时，它们会因为带着同样的负电荷而相互排斥。这种排斥显然是通过电磁场（光子）起作用的，但我们并不见它们互射（真实的）光子，那么，量子电动力学如何来描述这个排斥作用发生的过程？

因为“场”布满了整个时空，所以，场概念的引进避免了经典物理中的超距作用。QED中有不可分离的光子场和电子场。两个场之间相互作用的计算，要比粒子与粒子之间作用的计算复杂多了。它们的直观图像也不容易想象。也许可以打个不恰当的比喻：一锅白米粥与一锅黑米粥混在一块儿，沸腾后不停地冒泡使得“粥”分子之间相互影响，“涟漪”诱发“涟漪”，再诱发新的“涟漪”，将初始形态不断传播后构成最后的状态。

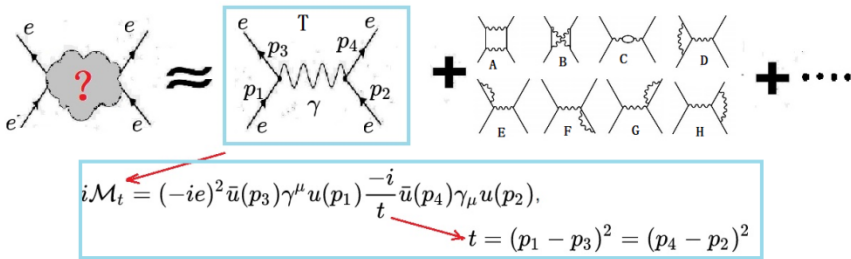


图 6：一个虚光子对应一个复杂的积分

两个电子通过电子场和光子场互相作用而散射的具体计算非常困难，像费曼这样的天才人物却能从中识破天机，将整个相互作用按照作用大小分成不同等级（+号之间）的许多项。这些项对应于他的路径积分思想中的多种可能性，即不同的路径，如图 6 所示。费曼认为，电子散射结果是所有路径贡献的总和，项数有无穷多，但最重要的贡献却来自于前几项。对电子散射而言，即使是第一项（蓝色方框所示），也对应了一个四维空间中的复杂积分，图 6 下面显示了被积函数的矩阵元。

虽然图 6 下面的公式很复杂，但它对应的费曼图却很简单（篮框），只有 2 个顶点，顶点之间是一条表征光子的波浪线。这个费曼图可以用一句简洁直观的说法来理解：“两个电子交换了一个虚光子！”

所以，所谓的虚光子，实际上表示的是那个复杂的公式！

但这个概念太好了，如此一来，图 6 后面的下一级费曼子图也就容易“解释”了，不过是引进更多“虚粒子”的说法而已。例如，加号之后四个顶点的图中，图（A）是先后交换了两次虚光子；图（C）是在交换一个虚光子的过程中，产生正负（虚）电子对但立即又湮灭了，等等。每一个可能的过程其实都对应一个冗长的数学表达式，通过积分可以计算出这个过程对总散射概率的贡献。但是，只要不计算，我们用虚粒子来理解它们。

所以，虚粒子是什么呢？它在数学上代表一个颇为复杂的积分，在物理上描述量子场之间某种复杂的相互作用。如果有人一定要问：“虚粒子真的存在吗？”，就其物理意义而言，相互作用当然存在。但尽管存在，却不是以在通常意义下人们所理解的“粒子”那种形态而存在的。

其实，量子场论中，无论虚粒子还是实粒子，都是场中的涟漪，都对应于某个数学描述。不过，实粒子可以持续存在并一直传播，是能够被探测器接收而观测到的“真实”粒子，而虚粒子短命且瞬变，在修成正果之前就消失了。既然虚粒子不可直接观测，也没有单一而且明确的物理图像，追究它是否真实存在就没有任何意义了，最好还是将它们理解为只是为了提供某种诠释性图像的一种概念化手段比较合适。

换言之，量子场论的真空不空的意思就是说，真空充满了虚粒子，充满了相互作用，或者说，充满了能量。

2 真空效应

2.1 反常磁矩和兰姆位移

量子场论中的真空被定义为所有的粒子数都为零，所以不存在实粒子。但由于 $1/2(h\nu)$ 基态能量的存在，真空被解释为“不空”的，充满了无穷多的、不停变换的虚粒子。

如何验证如上所述的这种真空理论呢？虚粒子虽然看不见摸不着，但是，它的真空涨落效应，却可以通过与实粒子的相互作用而被探测到。例如，真空涨落将引起电子磁矩偏离简单的玻尔磁子值， $a_e = (g-2)/2$ 。这个现象称为反常磁矩。美籍德裔物理学家库什（Kusch, 1911-1993）在精密测定电子磁矩中发现了反常电子磁矩。此外，美国物理学家兰姆（Lamb, 1913-2008）在氢谱精细结构的研究中发现了兰姆位移，兰姆和库什两位学者并因此而荣获 1955 年的诺贝尔物理学奖。

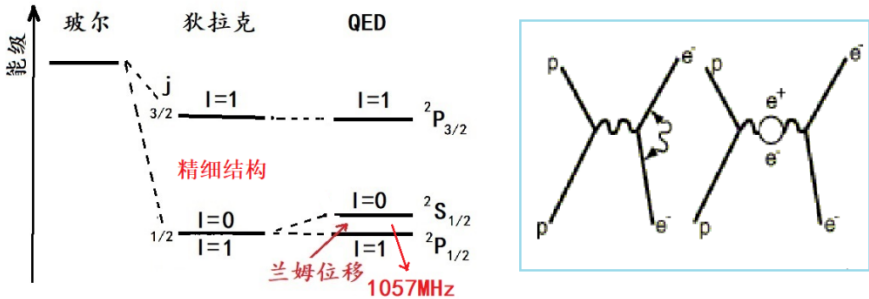


图 7：兰姆位移

兰姆位移证实了真空涨落和零点能的存在。兰姆位移的值约为 1000 兆赫（MHz），是很小的能量差。图 7 左图，比较了三种理论框架下的（部分）氢原子光谱：玻尔模型中的一个简并能级在狄拉克相对论理论下分裂成精细结构。然后，更为精细的兰姆位移可以用 QED 理论解释。氢原子基态能级是 13.6eV，精细结构只有基态数量级的十万分之一，兰姆位移又只有精细结构的十分之一。

图 7 右图是引起兰姆位移的相关费曼图，对应于电子自能和真空极化。可以直观理解为微小的零点振荡，“抹开”了原子的电子云，因此库仑位势被摄动了，使得两个能级（ $2s_{1/2}$, $2p_{1/2}$ ）的简并性被破坏。

2.2 卡西米尔效应

卡西米尔现象是最著名的真空效应。

如前所述，真空中充满了各种类型的虚粒子。可能有人会说：把这些虚粒子移走吧，那才是真正的真空！不过，从量子场论角度的分析解释，这是不可能做到的，可以被“移走”的，叫做实粒子，虚粒子是不可能被移走

的，因为实际上它们并不是什么“粒子”，而只是能量最低的“基态”，是永远存在、瞬息万变、不可分开、有能量的各种“场”、各种相互作用，混在一起的大杂烩！尽管如此，我们仍然喜欢使用“虚粒子”一词，因为它形象、简单，在一定的程度上抽象出了相互作用的本质。

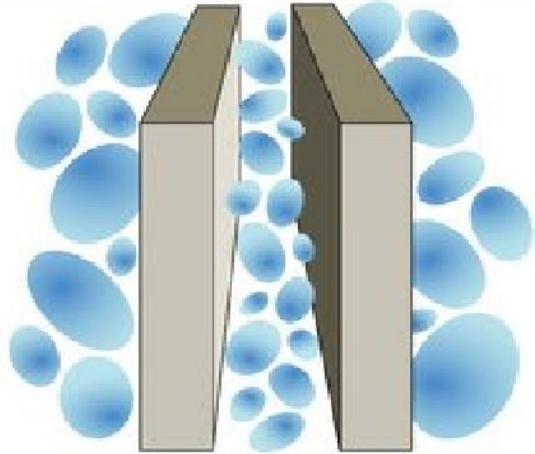


图 8：卡西米尔

那好，既然真空中有这么多具能量的虚粒子，那我们可不可以探测到它们的存在？有人又进一步地异想天开：能不能把这些能量释放一些出来，供人类利用呢？

释放出来？听起来有点像要造用永动机，可以暂不考虑，但想出某种方法探测真空能是可行的！并且，早在 70 多年前就有科学家作此建议，并有许多科学家一直在对此作孜孜不倦的探索！这就是：卡西米尔提出的卡西米尔效应。

亨里克·卡西米尔（Henrik Casimir，1900-2000）是荷兰物理学家，他在保罗·埃伦费斯特的指导下于莱顿大学学习，并获得理论物理博士学位。读博期间他曾经到哥本哈根研究所，追随玻尔做研究。玻尔当时在丹麦大名鼎鼎，实际上，那个年代的其他大物理学家也一样，被自己国家的民众广泛认可和崇敬，犹如现代的歌星影星。卡西米尔曾经讲过一个有趣的故事来说明当年玻尔的名气：他让他在荷兰的父母给在丹麦的他写一封信，信封上的地址只写“卡西米尔/尼尔斯·波尔，丹麦”，不写别的！果然，这

封信在几天之内就从荷兰准时到达了卡西米尔的手中。博士毕业后，卡西米尔又在泡利的指导下作博士后研究。

名师出高徒！才华横溢、成就颇丰的卡西米尔对理论物理有许多贡献。包括在数学上证明了半单李群的完全可约表示；提出了核四极矩假设，计算超精细结构；给出了顺磁弛豫现象的热力学解释；解决了超导态的热力学理论等。有名的卡西米尔效应是他二战后（1948年）在飞利浦物理实验室工作时提出的^[3]，这个效应的研究丰富了量子场论的真空观念，启发了科学家们对自然规律多方面的积极思考，其影响一直延续至今。

卡西米尔不仅是位优秀的理论物理学家，还从事多项工业方面的相关研究。不过，1930年代的学术界并不鼓励科学家参与考虑技术问题，卡西米尔是个特例。他同时重视理论和应用的所作所为，使科学大师们感到困惑。泡利就曾嘲讽地称卡西米尔为“总工先生”，并怀疑他是否能在工业环境中继续开展科学研究。事实证明卡西米尔这方面的远见卓识，他的后半生，作为飞利浦研究实验室的主任，完美地结合了科学和技术这两个不同的领域。卡西米尔成为两方面的领军人物。

科学和技术是相互依存的，提出卡西米尔效应的过程也证明了这点：这个发现产生于在飞利浦实验室对用于工业的石英粉末悬浮液的研究。如图8所示，卡西米尔效应指的是真空中两片中性（不带电）的金属板会出现吸力而互相靠近的现象。理想情形下，要求平板是无穷大和无穷薄的。这种似乎是无中生有的吸引力，在经典理论中是不会出现的，一般被解释为是量子场论的一个重要结果，因为它证实了零点能的存在。

晚年的卡西米尔将他的经验发展成一种研究模式，称其为科学—技术互惠模式，即科学研究和工业技术研发互相依存，共同发展的模式。

2.3 计算卡西米尔力

卡西米尔是在研究胶体分子间范德華（Van der Waals）力时，启发了卡西米尔力的计算。卡西米尔与 Polder 合作，考虑胶体分子问题的相对论修正之后，进一步思考两个宏观物体之间的色散吸引力问题。当他向玻尔（Bohr）谈论这项工作时，玻尔嘟囔着说了一句：这一定与零点能有关！敏感的卡西米尔受到启发后，完成了两平板之间吸引力的计算，得到了著名的卡西米尔力公式。

这是最广为人知的真空场及其场效应的例子。可以简单地用真空涨落来理解：两个平面之间的真空涨落不同于平面外面的真空涨落，其原因是因为靠得很近的平面限制了其中能容许的某些虚光子的频率（或波长）。

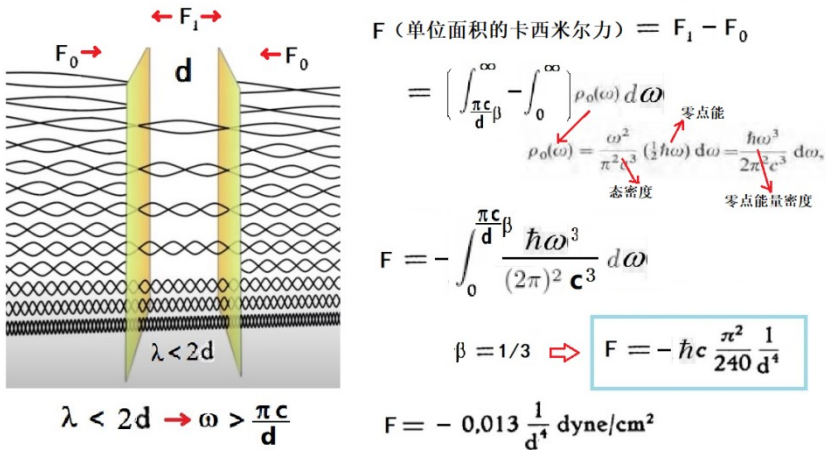


图 9：简单估算单位面积的卡西米尔力 F

例如，假设两个平面之间的距离为 d ，如图 9 所示，只有波长 λ 小于 $2d$ 的波动才能存在于两个平板之间。或者从粒子的角度来说，就是平板之间只能容纳频率 ν 大于 $c/(2d)$ 的光子。这样的话，束缚于平面之间的虚光子数，要比外面的虚光子数少很多，因此，涨落的能量也就更小。里外真空涨落的差异，对平板产生一个向内的推力 F （单位面积的力），使得它们表现为互相吸引的卡西米尔效应。

当我们计算真空零点能的时候，由于不确定性原理，所有频率的量子涨落模都需要考虑，用图 9 中的能量谱密度（ $\rho_0(\omega)$ ）的计算公式对所有的频率积分，这个计算显然会带来无穷大的零点能，这也正是量子场论紫外发散的体现。不过，当我们计算卡西米尔平板“里外”的两个真空涨落之差时，两个趋于无穷大的表达式相减，许多项互相抵消了，所以，会得出一个随着板间距离 d 变化的、有限大小的单位面积的卡西米尔力 F ，如图 9 右边蓝框中的表达式。

由图 9 中表达式可见，单位面积的卡西米尔力 F 与普朗克常数成正比，这正是量子效应的表现，因为根据经典电动力学，两个中性导体板之间不可能有经典力存在。同时， F 也和光速成正比，这是电磁场的特征常数，也因

为计算中考虑了相对论效应的缘故。此外， F 与板间距离 d 的四次方成反比，说明随着距离的减小， F 增加很快； F 的负号，则代表这是一个方向向内的吸引力。

卡西米尔力很小，只有在两平板距离非常之小时才可以被检测到。然而，该效应有令人惊叹之处。例如，考虑距离 $d=1$ 微米的情况，算出的卡西米尔压强大约是 1.3 mPa ，已经是一个宏观的数值。如果距离 $d=10$ 纳米（大概是一个原子尺度的 100 倍）时，卡西米尔效应能产生 1 个大气压的压力（ 101.3 千帕）！因此，卡西米尔力可以看作是量子效应在宏观上的体现。

2.4 实验证实卡西米尔效应

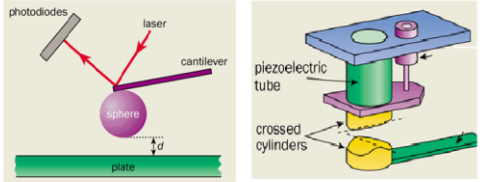
尽管可看作量子效应的宏观体现，仍然难以实验检测，其原因是因为实验条件要求太高：两个平行金属板相距很小距离（如 1 微米），还要做到“严格平行”，表面“纯净无杂质”，等等。因此，直到卡西米尔效应被预言的 10 年之后，斯帕纳伊（M. J. Sparnaay）才完成了对卡西米尔力的首次测量^[4]。实验的精度虽然不高，却证实了该效应的存在，第一次对检测卡西米尔力有了实践认知。

1997 年，当时在美国华盛顿大学的史蒂夫·拉莫洛克斯（Steve Lamoreaux）首次对卡西米尔的理论提供了坚定的实验证实^[5]。他们利用新的方法，对卡西米尔力进行了更精确的测量，

虽然卡西米尔（Casimir）最初的理论是用于平行板，但实际上以这种方式测量力是很困难的，因为很难将靠得很近、具有一定面积的两个金属板，对齐得足够好以得到精确的实验结果。对此，拉莫洛克斯在 1997 年实现了根本的突破，他们测量金属板和金属球之间的力，这种设置不需要精确对准两个平面，因为如图 10a 中的公式所示，这时候的卡西米尔力与平面的面积无关！

$$F_c(a) = 2\pi R \left(\frac{1}{3} \frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^3} \right)$$

from S. K. Lamoreaux (1997)



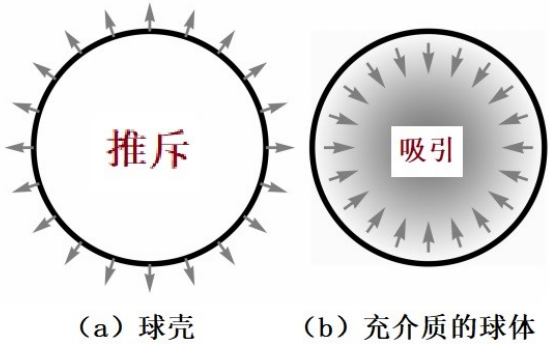
(a) 球面平面间卡西米尔力与平面面积无关

(b) 各种几何形状金属表面的卡西米尔效应

图 10: 测量卡西米尔效应的实验

拉莫洛克斯的实验结果在距离大约为 1 微米时，实验数据在 5%~10% 的误差内与理论一致。与之前的测量相比，这是一个了不起的成就。所以，拉莫洛克斯对方法的改进算是卡西米尔实验的一个里程碑。自此之后，物理学家们考虑、计算、测试了各种不同几何形状的金属表面之间的卡西米尔效应。

此外，卡西米尔力有时还表现为斥力^[6, 7]，不是通常的吸引力，和朗道一起写《理论物理学教程》的栗弗席兹最早计算了这种结构^[6]。如图 11 左边球壳上的卡西米尔力是排斥性的，如果将球中充满了介质（图 11 右图）又会变成吸引力。



(a) 球壳

(b) 充介质的球体

图 11: 卡西米尔效应的排斥和吸引作用

2.5 卡西米尔效应的应用

卡西米尔力最重要的意义是在于它是量子现象的宏观效应。近年来，不仅在其实验检测方面有突破，理论研究也有进展。一个有趣的事实是：卡西米尔当年的研究起始于对范德华力的计算，几十年之后，理论上已经证明，这看起来完全不同的两种力，本质上是一样的！都是起源于真空涨落^[8]，因此，两者的界限已经开始模糊，可以说范德华力其实是分子尺度的卡西米尔效应。有关范德华力和卡西米尔力的相关研究还涉及到一个有趣的事实：壁虎能爬墙的原因，原来用范德华力来理解，现在也可以将它说成是卡西米尔力，正是印证了“量子现象的宏观效应”那句话。

卡西米尔效应在纳米技术中有表现，对纳米尺度微型器件的设计和制造，既有不良的影响，也有好的应用，因为当距离小于几十纳米时，和其他力相比，卡西米尔力占了主导地位。例如，有可能使得本来可移动的部件粘结在一起，使得可移动元件坍塌到本来不动的元件上，对系统造成了巨大的破坏。人们也利用此类有害现象，达到有用的目的，例如有人开发了由卡西米尔力驱动的微型机械装置；有人在微米级机械组件 MEMS 的设计中，利用卡西米尔效应控制器件中导电板的运动，等等，此类研究方兴未艾。

总之，卡西米尔物理已经远远超出了 73 年之前最初研究工作探索的范畴，成为一个物理丰富的有趣而活跃的研究题目。

3 进一步扰动真空

卡西米尔效应等已经让我们切实地体会到了真空中虚粒子的存在，近几年科技界的绝活远不止这点。虚粒子不仅存在，一定的条件下还能“转化成”实粒子！这包括如下几个热门题材：卡西米尔动力学效应、黑洞的霍金辐射……我们将在下面介绍这些，以及真空与宇宙学的关联，等等。

英国理论物理学家斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking, 1942—2018），可算是中国公众眼中最熟悉的现代科学家。不仅仅是熟悉霍金这个名字，而是已经几乎将他神化，也将他对物理学的贡献有所夸大。轮椅上的霍金成为许多人心目中“天才科学家”的形象；他的《时间简史》和《果壳中的宇宙》等，成为最受欢迎的畅销书。中国民众本来就对现代物理学和现代宇宙学知之甚少，如今接触到这些读起来似懂非懂的科普读物以及媒体夸张不实的报道，不由得感觉眼界大开。于是，将有关黑洞的研究、有关宇宙学大爆炸模型的建立……等等现代物理学概念，统统归于霍金名下。许多中国人将霍金誉为当代的爱因斯坦，认为他是现代最伟大的物理学家。



图 12：霍金一家（1982 年左右？）

笔者第一次见到霍金，是在八十年代初跟随导师塞西尔·德威特去 Santa Barbara 参加的一次学术会议上。那时的霍金大概是图 12 所示的模样，尽管已经在轮椅上坐了多年，但面部表情基本正常。不过，作报告时所说的话已经无人能听懂，据说只有他的助理能明白，然后再翻译给大家听。

霍金的一生的确是一个奇迹，是人的精神意志战胜疾病的生命之奇迹。奇迹在于他患了罕见的“渐冻人症”，医生预言他只能活两年左右，他却活了 55 年！奇迹在于他不仅活了这么多年，还能够在轮椅上用他的超级大脑思考深奥的科学问题，为人类、为物理学，做出了超乎常人能做出的卓越贡献！

霍金并不是黑洞理论和宇宙标准模型的创始人。这两个理论都是在爱因斯坦广义相对论的框架下，许多物理学家们共同努力的成果。之后，人们企图将量子理论与引力理论结合在一起，这种想法也被运用到宇宙学中，霍金的研究领域就是这个方面，他可算是提出由广义相对论和量子力学联合解释的黑洞理论之第一人。在与此相关的研究中，霍金的贡献主要有两点。一是与英国数学物理学家罗杰·彭罗斯（Sir Roger Penrose, 1931-）共同合作提出了黑洞的奇性定理，另一项是关于黑洞会发放辐射的理论性预测，称之为霍金辐射。

对霍金辐射的解读与量子场论的真空概念有关，不过，在解释霍金辐射之前，我们首先介绍真空中另外两个类似的现象。

3.1 动态卡西米尔效应

从之前的介绍，我们知道真空不空，由各种虚粒子组成！换言之，真空的能量暗藏在虚粒子中，而虚粒子可以看成是瞬间生成又立刻湮灭的一对正反粒子。这个正反粒子对，在一定的环境下是否可以转化成实粒子呢？这个疑问已经在实验中被解答，被扰动的真空中，虚粒子转化成实粒子的现象已经被观察到。这个现象被称为动态（dynamical）卡西米尔效应。

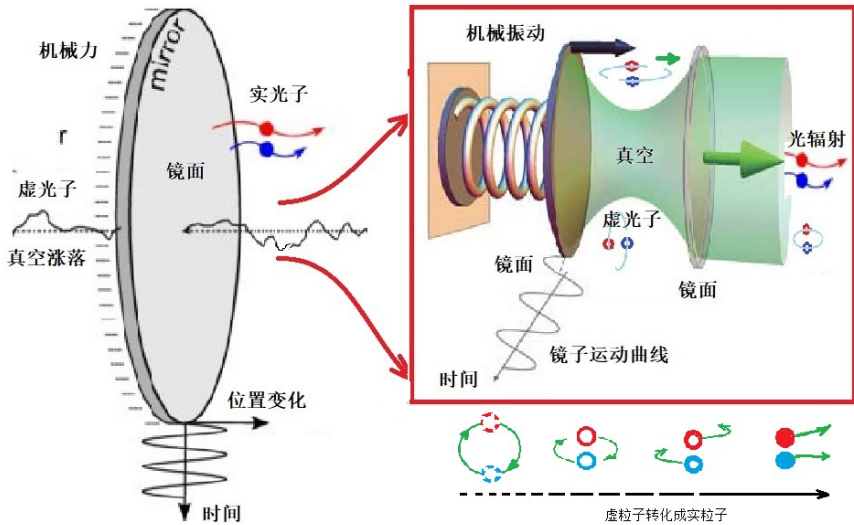


图 13：动态卡西米尔效应示意图

传统意义的卡西米尔力指的是相对静止的两平面之间的吸引，动态卡西米尔效应中的两面镜子则相对而言作快速移动（类似机械振动）。也就是说，相对之间有一个方向大小不断变化的加速度。

这个很快加速移动的镜面可以将虚光子变成真实的光子。其过程可以直观地理解为加速度的作用破坏了瞬间产生瞬间湮灭的正负粒子对之间的正常时间关系，时间变长，长到虚粒子成为实粒子而被发射出来，如图 13 右下图所示。

所谓“镜面的加速移动”未必见得要真用机械方法实现，可以有各种等效的模拟方法。2011年，瑞典哥德堡的研究人员实现了超导微波谐振器中的动态卡西米尔效应，检测到从真空中产生的微波光子^[9]。2013年3月，PNAS 科学期刊上的一篇文章，描述了约瑟夫森材料中的动态卡西米尔效应。

3.2 Unruh 效应

动态卡西米尔效应描述的是两面镜子相对振动时真空态的变化情况。如果不是来回振动，而是将这种想法扩展到匀加速坐标系统，则得到安鲁辐射。换句话说，假设 Alice 和 Bob 二人分乘两艘相对作匀加速运动的飞船，他们看到的真空会是一样的吗？上世纪 70 年代几位物理学家的研究就是为了回答这个问题。现在我们将此称为安鲁效应。有时也称为傅苓-戴维斯-安鲁效应（Fulling - Davies - Unruh effect），因为它由以下三位人士提出：史蒂芬·傅苓（1973 年）、保罗·戴维斯（1975 年）以及 1976 年的威廉·安鲁^[10]。

安鲁效应的意思是说：假设 Alice 的环境是真空态（没有实粒子，温度 $T=0$ ），那么，相对于 Alice 作匀加速运动的 Bob 就不是处于真空态，他会感受到自己处在一个温暖的宇宙背景中，如图 14 所示。Bob 可以观测到惯性观察者 Alice 无法看到的黑体辐射。他可测到一个与其加速度 a 成正比的、不为零的温度 T ，见图中的公式。换言之，他的周围环境不是只有虚粒子的“真空”！

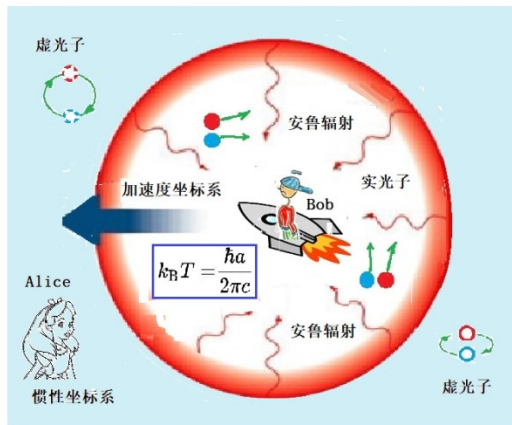


图 14：安鲁效应（Unruh effect）

安鲁效应说明：惯性参考系中观测到的量子基态，与加速参考系中的观察者能看到的真空态是不一样的。真空与观测的参考系有关！这再一次说明了真空不空，也不可能“空”。

3.3 霍金辐射

上面两个现象都是加速运动对真空的影响。根据等效原理，加速度和引力场是等效的。也就是说，在强大的引力场附近，也有可能发生“虚光子”转化成“实光子”产生辐射的现象。“霍金辐射”就是一个典型的例子。

首先简单介绍一下黑洞物理的历史。爱因斯坦 1915 年创建的广义相对论，将引力几何化，解释为弯曲时空的曲率，与量子理论没有任何关系。所以，广义相对论相对于“量子论”而言，是经典的理论。经典黑洞，便是这个经典理论的特解，可以被简单的几个参数所描述，由此惠勒提出了“黑洞无毛定理”。无毛的意思是“少毛”，例如，以德国天文学家卡尔·施瓦西（Karl Schwarzschild, 1873—1916）命名的施瓦西黑洞，只有质量、角动量以及电荷三个参数，即黑洞三毛。

惠勒对黑洞研究颇深。一次，惠勒和他的一个博士研究生，以色列裔美国物理学家雅各布·贝肯斯坦（Jacob Bekenstein, 1947 年-2015 年）在悠然自得地喝下午茶时，惠勒突发奇想，问学生道：“如果你倒一杯热茶到黑洞中，会如何？”这是一个难于回答的问题，因为热茶既有热量又有熵，但一切物质被黑洞吞下后就消失不见了，那么，热茶的热量和熵到哪里去了呢？

指导教授的问题，令年轻学子日夜苦思，也激发了他无比的想象力。贝肯斯坦认为，为了保存热力学第二定律，黑洞一定要有“熵”！贝肯斯坦的黑洞熵概念立刻带来一个新问题：如果黑洞具有熵，那它也应该具有温度，如果有温度，即使这个温度再低，也就会产生热辐射。

最早认识到黑洞会产生辐射的人并不是霍金，而是莫斯科的泽尔多维奇，霍金开始时不赞同贝肯斯坦提出的“黑洞熵”，后来从泽尔多维奇等人的工作中吸取了营养，得到启发，意识到这是一个将广义相对论与量子理论融合在一起的一个重要开端。于是，霍金进行了一系列的计算，最后承认了贝肯斯坦“表面积即熵”的观念，提出了著名的霍金辐射^[11]。

黑洞辐射不是一个简单的公式就能了事的，首先得说明辐射的物理机制。根据霍金的解释和计算，黑洞辐射产生的物理机制是黑洞视界周围时空中的真空量子涨落。在黑洞事件边界附近，量子涨落效应必然会产生出许多虚粒子对。这些粒子反粒子对的命运有三种情形：一对粒子都掉入黑洞；一对粒子都飞离视界，最后相互湮灭；第三种情形是最有趣的：一对正反粒子中携带负能量的那一个掉进黑洞，再也出不来，而另一个（携带正能量的）则飞离黑洞到远处，形成霍金辐射。这些逃离黑洞引力的粒子将带走一部分质量，从而造成黑洞质量的损失，使其逐渐收缩并最终“蒸发”消失，见图 15。

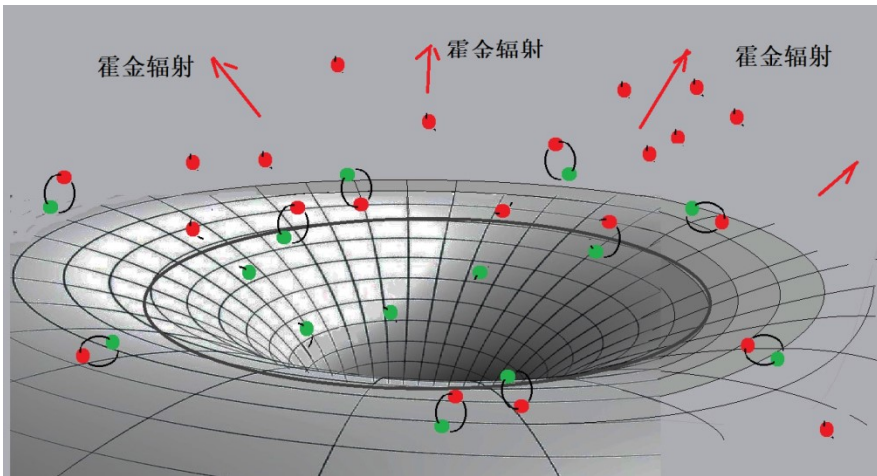


图 15：霍金辐射

霍金的分析迅速成为第一个令人信服的量子引力理论，但目前尚未实际观察到霍金辐射的存在。

并且，霍金辐射的机制将导致“信息丢失”，可是量子力学认为信息不会莫名其妙地消失。这就造成了黑洞的信息悖论。在霍金生命的最后十几年，黑洞专家们对此的争论和探讨不断，似乎发起了一场“战争”，在美国斯坦福大学教授伦纳德·萨斯坎德（Leonard Susskind, 1940 年—）的《黑洞战争》一书中，对此有精彩而风趣的叙述^[12]。

霍金相信他的研究结果，只好认为信息就是“丢失”了。战争的另一方则强调量子力学的结论，认为信息不可能莫名其妙地丢失。形成黑洞之前星体的信息，以及黑洞形成后掉入黑洞物质的信息，都保存在黑洞视界的二

维球面上，犹如一张储存立体图像信息的“全息胶片”，在霍金辐射过程中，这些信息应该会以某种方式被重新释放出来。

之后，霍金对黑洞的信息丢失问题，发表了一系列文章，提出一些新的说法。例如他曾经认为事件视界不存在，宣称黑洞不黑，应该叫做“灰洞”；又说，黑洞并非无毛，而是长满了软毛，提出“软毛定理”之类的。此外，形成“霍金辐射”产生的一对粒子是互相纠缠的。处于量子纠缠态的两个粒子，无论相隔多远，都会相互纠缠，即使现在一个粒子穿过了黑洞的事件视界，另一个飞向天边，似乎也没有理由改变它们的纠缠状态，对此的解释也难以使人信服。近年来，弦论学家们在黑洞信息丢失问题上有些进展，也涉及到对“时间空间”以致真空概念的理解，我们在此均不予详述。

4 宇宙学和真空

4.1 暗能量、宇宙常数

宇宙学的主流观点将真空能量和宇宙中的暗能量联系在一起。暗能量又和爱因斯坦在广义相对论的引力场方程中引入的“宇宙常数”一项有关。引力场方程可表达如下：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

Diagram labels and their corresponding terms in the equation:

- 曲率张量** (Curvature tensor) points to $R_{\mu\nu}$.
- 曲率标量** (Curvature scalar) points to R .
- 度规张量** (Metric tensor) points to $g_{\mu\nu}$.
- 宇宙常数** (Cosmological constant) points to Λ .
- 引力常数** (Gravitational constant) points to G .
- 能量-动量张量** (Energy-momentum tensor) points to $T_{\mu\nu}$.

Additional annotations above the equation:

- (时空几何有关)** (Related to spacetime geometry) is positioned above the left side of the equation.
- (物质-能量分布有关)** (Related to matter-energy distribution) is positioned above the right side of the equation.

图 16: 爱因斯坦的引力场方程

方程中的 Λ 即为宇宙常数。爱因斯坦最早加上这一项的目的是企图得到一个稳恒静态的宇宙图景，但当天文学家爱德温·哈勃 (Edwin Hubble, 1889-1953) 观察到宇宙并非处于稳恒静态，而是在不断膨胀的事实之后，爱因斯坦懊恼遗憾不已，认为是他“一生中最大的错误”，要“撤回”他的宇宙常数。

这个有趣而古怪的宇宙学常数不仅多次困惑爱因斯坦，也曾经给宇宙学家们带来反复多变的疑难。物理学家们根据天文观测的实际数据来调整常数的正负号，决定对它的取舍。比如，在 1998 年以前，人们认为宇宙是在减

速膨胀，不需要宇宙常数这一项，便将它的值设为 0。而在 1998 年的观测事实证明了宇宙是在加速膨胀之后，物理学家们又将它请了回来，用以解释宇宙为什么加速膨胀。但是，问题又来了：这个宇宙常数到底是个什么东西？它为什么不是零？

4.2 真空灾变

物理学家们暂时将宇宙常数解释为真空能量，于是，宇宙常数变成了“暗能量”的同义词。但怎样计算真空能量密度却是物理学中尚未解决的一个大问题。如果把真空能量当作是所有已知量子场贡献的零点能的总和的话，这样得出来的结果比天文观测得到的宇宙常数值大了 120 个数量级，这差异被称为真空灾变！因此，这种“暗能量即真空能”的等同很难令人信服，被惊叹为“物理史上最差劲的理论预测”！物理学者认为这是当今物理理论的重大瑕疵。

我们在此不详细介绍真空涨落与宇宙常数的关系，感兴趣的读者，可参考笔者宇宙学方面的一本科普读物^[13]。

迄今为止，暗能量和暗物质一样，依然是宇宙中最大的未解之谜之一。此外，真空是空间的一种状态，而空间时间的概念，尽管已经被层层深化，但仍旧始终困惑着科学家和哲学家们。

因此，真空的本质仍然有待深入理解，需要物理学家们更多的、或许是永无止境的探索。

参考资料

- 【1】Max Planck, Über die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung, Annalen der Physik 37, 642-656(1912).
- 【2】A. Einstein and O. Stern, Einige Argumente für die Annahme einer molecular Agitation beim absoluten Nullpunkt, Ann. Phys.(4) 40, 551 (1913).
- 【3】Casimir H B G. On the attraction between two perfectly conducting plates. Proc K Ned Akad Wet, 1948, 51:793-795.
- 【4】Sparnaay M J. Measurements of attractive forces between flat plates. Physica, 1958, 24:751-764.
- 【5】Lamoreaux S K. Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 mm range. Phys Rev Lett, 1997, 78:5-8.
- 【6】Lifshitz, E. M. The theory of molecular attractive forces between solids. Sov. Phys. JETP 2, 73–83 (1956)
- 【7】Boyer T H. Quantum electromagnetic zero-Point energy of a conducting spherical shell and the Casimir model for a charged particle. Phys Rev, 1968, 174 (5) :1764-76.
- 【8】Klimchitskaya, G. L.; Mostepanenko, V. M. (July 2015). "Casimir and van der Waals Forces: Advances and Problems". Proceedings of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (517): 41–65. arXiv:1507.02393
- 【9】Wilson, C. M.; Johansson, G.; Pourkabirian, A.; Simoen, M.; Johansson, J. R.; Duty, T.; Nori, F.; Delsing, P. (2011). "Observation of the Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Circuit". Nature. 479 (7373): 376–379.
- 【10】William G. Unruh: Notes on Black Hole Evaporation. Phys. Rev. D 14 870, 1976
- 【11】Hawking, S.W. (1974). "Black hole explosions?". Nature 248 (5443): 30 – 31.
- 【12】[美]伦纳德·萨斯坎德著，李新洲等译，《黑洞战争》[M]，湖南科技出版社，2010年，pp. 155-210。
- 【13】张天蓉. 永恒的诱惑-宇宙之谜[M].北京:清华大学出版社，pp.123-148，2016年12月。