

黑洞与它的研究者

赵 峰



地球上真有一个叫“黑洞”的地方，在印度的加尔各答。

那是一栋建筑内的一间石砌的囚室，英国殖民者用来关押犯人，通常可以关押 3~4 人。1757 年围绕这栋建筑发生了一场可怕的战斗。武装的印度民众与英军血战。战斗结束后，死伤惨重的胜利者愤怒地把 146 名战败者塞进这间囚室，关押了 10 个小时。第二天早晨，只有 23 名俘虏从“黑洞”中活着出来。

上世纪 90 年代有一位中国天文学家到印度开会，向印度朋友提出想看一下这个“黑洞”。印度朋友告诉他，那栋建筑已被拆除。中国学者表示不理解，说这样的地方在中国肯定不会拆，一定会留下来，作为向青少年进行爱国主义教育的场所。印度朋友赶紧解释：“你弄错了，不是英国人把印度人关在里面，是印度人把英国人塞到里面去了。”

一、历史上的黑洞

最早预言黑洞的人是法国的拉普拉斯和英国剑桥的迈克尔。他们生活在距今约 200 年前的拿破仑时代。拉普拉斯和迈克尔认为，宇宙中最大的星有可能是看不见的。星球越大，万有引力也越大，上抛物体逃离星球就越困难。当引力大到连光也会被拉回来的时候，外界的人就无法看到这颗星了。拉普拉斯等人根据万有引力定律和牛顿第二定律，作了简单计算。他们给出了这种看不见的暗星形成的条件 $r \leq 2GM/c^2$ ，其中 r 、 M 分别是星球的半径和质量， G 是万有引力常数， c 是光速。这就是说，半径 $r < 2GM/c^2$ 的星球，发射的光会被自己产生的万有引力拉回去，因而是看不见的。

拉普拉斯是法国著名数学家、物理学家和天文学家，与拿破仑生活于同一时代。他在 1796 年出版了科研专著《天体力学》。这本轰动一时的高水平科学巨著引起了拿破仑的注意，这位一向尊重学者和科学的独裁者在翻阅此书后，问拉普拉斯：“为什么书中没有提到上帝的作用？”拉普拉斯骄傲地回答：“陛下，我不需要这个假设。”在《天体力学》和拉普拉斯写的另一本科普书《宇宙体系论》中，都谈

到了暗星（黑洞）。他写道：“天空中存在着黑暗的天体，像恒星那样大，或许像恒星那样多。一个具有与地球同样密度，而且直径为太阳 250 倍的明亮星体，它发射的光将被自身的引力拉住。而不能被我们接收。正是由于这个道理，宇宙中最明亮的天体很可能却是看不见的。”

1799 年和 1808 年《天体力学》两次再版，在第二版中，作者继续谈论了“暗星”，但在第三版中有关内容却被删去了。这是因为托马斯·杨（Thoms Young）在 1801 年完成了光的干涉实验，使光的波动说战胜了微粒说。拉普拉斯觉得，自己建立在光的微粒说基础上的“暗星”假说失去了理论基础。

牛顿出生在伽利略逝世的 1642 年，惠更斯的年龄在他们二人之间。惠更斯提出波动说比牛顿提出微粒说要早，而且在两种学说的争论中占据上风。胡克推崇波动说，对年轻的牛顿提出的微粒说不以为然，二人为此搞得很不愉快。但是后来牛顿在力学研究中取得重大成就，威信大增，而且微粒说依据的力学理论比波动说依赖的波动理论成熟、简单、易懂，另外实验上又未观测到光的干涉现象，于是学术界纷纷放弃波动说，牛顿的微粒说取得了统治地位。这种情况持续了 100 多年，直至托马斯·杨完成光的干涉实验。

英国人托马斯·杨是历史上有名的神童、才子，14 岁时已通晓拉丁、希腊、法、意、希伯来、波斯和阿拉伯等多种语言。他在物理、化学、生物、医学、天文、哲学、语言、考古等领域都有贡献。托马斯·杨先当医生，研究视觉，发现了眼睛散光的原因，转而研究光学，完成了光的双缝干涉实验。他认识到光是横波，并提出了颜色的三原色原理。此后他又破译了埃及的拉希德石碑上的一些文字，对考古学做出了重大贡献。法国人商博良（另一位神童）在此基础上进一步努力，终于完全破译了碑上的文字。奠定了研究古埃及历史的文字学基础。

爱因斯坦的广义相对论发表后，人们发现，对于球对称星体， $r_g = 2GM/c^2$ 的曲面具有奇特的性质，不能用通常的球坐标来描写。 r_g 被称作星体的引力半径。包括爱因斯坦的朋友、著名英国天体物理学

家爱丁顿在内的许多人，对此曲面作了大量研究。1939年，美国物理学家奥本海默等人最先认识到，半径小于引力半径 $r_g=2GM/c^2$ 的星，光线逃不出来，因而是看不见的。1969年，美国物理学家惠勒称这种看不见的暗星为黑洞，这就是“黑洞”名称的由来。引力半径 r_g 就被定义为黑洞的半径。非常有趣的是，奥本海默用相对论预言的黑洞形成条件，与拉普拉斯等人用万有引力定律预言的黑洞形成条件完全相同。经典物理学认为万有引力是真正的力，黑洞是由于引力太大，光逃不出去而形成的。相对论认为万有引力不是真正的力，而是时空弯曲的表现，黑洞是由于时空弯曲得太厉害，致使光跑不出去而形成的。殊途而同归，真是太妙了！

按照黑洞形成的条件，半径为 6400 千米的地球，形成黑洞时只有乒乓球大小。半径为 70 万千米的太阳，形成黑洞时半径只有 3 千米，密度高达每立方厘米 100 亿吨，在奥本海默那个时代，人们知道的密度最大的物质是构成白矮星的物质，密度为每立方厘米 0.1~100 吨。密度为每立方厘米 100 亿吨的物质，简直不可思议！当时人们认为，这样密的天体根本不可能存在。包括爱因斯坦在内的大多数物理学家都不相信会有黑洞存在。

不久，第二次世界大战爆发，奥本海默受命主持原子弹的研制工作，有关黑洞的研究被搁置下来。战后，作为“原子弹之父”的他光荣了一段不长的时间，随即被美国联邦调查局怀疑“里通外国”，向苏联泄露了核机密，其根据仅仅是奥本海默有同情共产主义的言行。这一冤案 20 多年后才由美国总统约翰逊平反。不过，长期生活在郁闷之中的奥本海默，再也没有返回到黑洞的研究中。

上世纪 60 年代，密度为每立方厘米 1 亿~10 亿吨的中子星被发现，上述黑洞的密度只比中子星高 10 倍，因此这样的天体不再是不可想象的了。实际上，黑洞密度与它的质量平方成反比，大质量黑洞的密度不一定很高。例如，相当于 1 亿个太阳质量的星系级大黑洞，其密度与水差不多。进一步的研究表明，黑洞内部是真空，谈论黑洞的密度毫无疑义！下面我们将看到这一点。

相当于太阳质量的恒星形成白矮星、中子星与黑洞时的半径和密度

	太阳	白矮星	中子星	黑洞
半径	70 万千米	1 万千米	10 千米	3 千米
密度	1.4 克/立方厘米	1 吨/立方厘米	3 亿吨/立方厘米	100 亿吨/立方厘米

二、球对称黑洞

最简单的黑洞是球对称的，称为史瓦西黑洞(图 1)。史瓦西黑洞在引力半径 $r_g=2GM/c^2$ 处，形成一张奇异的球面，在 $r=0$ 的中心处，存在一个奇点。

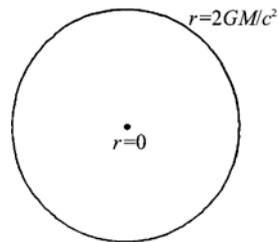


图 1 史瓦西黑洞

这张奇异的球面，就是黑洞的边界，物理学家称其为视界，意思是可见区域的边界。这就是说，视界以内的任何东西（包括光）均不可能跑出视界，或者说，黑洞内部的东西都跑不出来。所以，洞外的人不可能得到黑洞内部的信息。

史瓦西黑洞的视界，同时是无限红移面。广义相对论认为，时空弯曲的地方，钟走得慢，弯曲越厉害，钟走得越慢。太阳表面的钟就比地球上的钟慢。这种现象表现为，太阳表面发射的光，其光谱线比地球上同种元素的光谱线频率要低、波长要长，即光谱线的位置要向红端移动。这种现象称为引力红移。人们早已观测到太阳光谱的这种红移，认为这是对广义相对论的一个验证。然而太阳表面的时空“弯曲”得不够厉害，观测这一效应十分困难。黑洞表面处的时空，“弯曲”得非常厉害，致使那里的钟变得无穷慢。从地球上看来，黑洞表面的钟完全停止不走了。如果在那里放置一个光源，从地球上看来，此光源射出的光会发生无限大的红移，频率会减小到零，波长会增大到无穷大。实际上，外界根本看不见这样的光。如果一艘宇宙飞船趋近黑洞，静止于无穷远处（例如远离黑洞的地球上）的观测者将看到：飞船越接近黑洞，走得越慢。飞船内的时间过程也越来越慢，那里的人好像逐渐凝固成塑像。另一方面，由于飞船发出的光线的红移越来越大，而且单位时间内从飞船逃到无穷远的光子数越来越少，飞船将变得越来越红，越来越暗，逐渐冻结在黑洞的表面上，消失在那里的黑暗中。但是，广义相对论告诉我们，对于飞船上的人来说，情况并不是这样。他除了感到潮汐力越来越大之外，感觉不到任何异常。他将在有限的时间里（飞船上的时间）穿过视界进入黑洞。要想知道他进入黑洞后的情况，我们要先介绍一下黑洞的内部结构。

在此之前先谈一下什么是潮汐力。站在地球上的人，受到地球的万有引力。由于人的头和脚

离地心的距离不同(相差他的身高),它们受到地球的引力也略有差别,大概是两、三滴水的重量。万有引力的这个差,就叫做潮汐力。地球上海洋的涨潮落潮,就是因为向着月亮一面的海水,与背着月亮一面的海水,离月亮的距离不同,所受月亮的万有引力有差别,这个差别引起了海水的上涨。这就是潮汐力名称的由来。另外,地球上各点受月球引力的方向,有会聚的趋势,因此,除向、背月亮两面的海水由于潮汐力而上涨外,侧面的海水则由于引力的会聚趋势而产生落潮。此外,太阳也对海水有类似影响,涨潮落潮实际是月亮和太阳引力的综合效应。

现在介绍史瓦西黑洞的内部结构。广义相对论告诉我们,黑洞内部的时空坐标要发生互换,原来的时间 t 成为空间坐标,而径向坐标 r 则成为时间坐标。所以黑洞内部的等 r 面不再是球面,而成为了等时面。对于黑洞,时间方向指向 $r=0$ 的奇点处。这样,等 r 面成为“单向膜”,任何进入黑洞的物质只能向 r 减小的方向运动,不能停留、也不可能反向运动,而且没有任何力和任何物质结构能够抗拒这种运动。这是因为,这不是一般的运动,而是一个时间发展的过程,什么力量都不能抵挡,不能不顺着时间方向前进。黑洞内部整个是单向膜区,黑洞的边界(视界)是单向膜区的起点。由于任何物质均不能在单向膜区停留,单向膜区处于真空状态。可以说,黑洞内部,除去 $r=0$ 的奇点外,全部是真空区。

广义相对论指出,进入黑洞的飞船和任何其他物质都将在有限时间内穿越单向膜区到达奇点。应该说明,时空坐标互换指的是黑洞外部观测者用来描述黑洞的那套时空坐标,不是飞船上宇航员用的那套时空坐标。飞船上的宇航员在穿越视界时,并未感到自己的时空坐标和时空概念有任何变化。用他自己的钟衡量,飞船将在有限时间内到达奇点。他感觉到的唯一变化是受到的潮汐力越来越大,最后终于把飞船及他自己撕碎,并压入体积为零的奇点($r=0$ 处)。值得注意的是,由于时空坐标互换, $r=0$ 现在不是黑洞的“球心”,而是时间的终点。这就是说,飞船和宇航员在经历有限时间之后,就到达了时间的终点。或者说,他们的时间将在有限的经历中结束。也可以说,经过有限的时间,他们就处在时间之外了。至于“时间之外”是什么意思?今天的自然科学还不能回答。

黑洞外的观测者,看到趋近黑洞表面的飞船逐渐变慢、变暗、变红、冻结并消失在黑洞的表面处,认为飞船永远也没有进入黑洞。但飞船上的观测者则觉得自己没有什么异样感觉就进入了黑洞,只是潮汐力越来越大,在有限的时间内就被压入奇点,处于时间之外了。从进入黑洞到压入奇点,这一时间非常短,对于质量相当于太阳的黑洞(半径3千米),只须不到1秒钟。

黑洞是任何物体都能掉进去,进去就再也出不来的星体。按照广义相对论,还存在白洞。白洞是黑洞的时间反演。它的内部也是单向膜区,只不过时间方向从奇点 $r=0$ 处指向视界 $r=r_g$ 处。所以它的单向膜的单向性与黑洞相反。白洞可以把内部的一切物质抛出来,但任何东西都不能落进白洞。白洞只是广义相对论的一种预言,它可能违背热力学第二定律。因此白洞是否存在,目前尚无定论。

三、转动的黑洞

转动的黑洞称为克尔黑洞,它是旋转轴对称的,比静止球对称的史瓦西黑洞复杂得多。它的视界与无限红移面不再重合,而且有两个视界和两个无限红移面。如图2所示,两个视界像一大一小两个核桃的壳,外无限红移面像一个橘子的外皮,内无限红移面则像一个花生的外壳。外视界与外无限红移面之间是外能层区,内视界与内无限红移面之间是内能层区。在黑洞的中心还存在一个奇环。

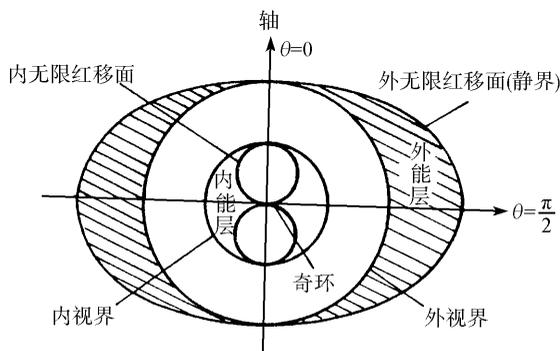


图2 克尔黑洞

克尔黑洞的边界是外视界,不是外无限红移面。穿过外无限红移面进入外能层的飞船,仍可能逃出去。但如果进入外视界,就逃不出去了。内、外视界之间是时空坐标互换区,也就是单向膜区。飞船在这里不能停留,更不能掉头飞回去,而只能穿过内视界,进入内能层区或到达奇环附近。不过,内视界里面的时空区,不再是单向膜区。进入克尔黑

洞的飞船比进入史瓦西黑洞的飞船要幸运得多，此飞船虽然飞不出克尔黑洞了，但也不至于撞在奇环上。宇航员们可以驾驶飞船在奇环附近飞来飞去。如果高兴，还可以穿一下奇环玩玩。但这一玩可不得了！假如飞船从环的下面往上钻，宇航员会发现他没有从环的上部出来，而是进入了另一个世界，那里只有万有斥力，没有万有引力。如果飞船从环的上面往下钻，结果也相同。

进入黑洞内部的宇航员，开始时小心翼翼，惟恐撞在奇环上。但不久他就会明白，自己只要不进入奇环所在的赤道面，就不会撞到奇环上。即使他故意想往上撞，也撞不上去。奇环好像有一股魔术般的排斥力，不让飞船靠近它，只有奇环所在的赤道面是个例外。在赤道面上，奇环对飞船有一股吸引力，宇航员必须小心，不要被它吸过去。

也有的研究表明，我们宇宙的克尔黑洞的内部，可能是另一个宇宙的克尔白洞的内部。这就是说，可能与另一个宇宙相通。进入克尔黑洞的飞船，有可能从另一个宇宙的白洞中冒出来。还有人认为，其实这个白洞也可能处在我们的宇宙中，也就是说，这一对克尔黑、白洞同在一个宇宙中。进入克尔黑洞的飞船有可能从我们宇宙的某一个克尔白洞中冒出来。不过，后来的研究表明，克尔黑洞的内部不稳定，稍有扰动，上述通道就会被阻断。因此，从黑洞钻进去，然后从白洞钻出来是根本不可能的。

比较麻烦的是，奇环附近有“闭合类时线”。用这条线描述的人可以回到自己的过去，造成因果循环，这显然与我们的常识相违背。

假如克尔黑洞越转越快，其单向膜区就会越来越薄，最后内、外视界重合，形成所谓“极端黑洞”。这种黑洞的单向膜区退化为一层膜。如果再转得快一点，这层膜就会消失。视界没有了，奇环裸露在外面。由于奇环是人类认识的不可知区，或者说是任何规律和任何事实均不确定的区域。裸露的奇环会使整个时空的因果性受到破坏。为了避免出现这种荒谬现象，英国著名相对论专家彭若斯提出所谓“宇宙监督假设”。此假设认为：存在一位宇宙监督，它禁止裸奇点（奇环）的出现。也就是说，自然界不允许裸奇点（奇环）出现，不允许形成极端黑洞。注意，此假设并没有说明裸奇点（奇环）不能出现的物理原因。宇宙监督假设使我们想起了当年“自然害怕真空”的说法。“自然害怕真空”的背后，是存在大气压强。

宇宙监督假设的背后也必然存在某个物理因素。

出现“宇宙监督”这个说法，与西方人的文化背景有关。古罗马的时候，城市里有一种监督官，禁止人们不穿衣服在街上走。彭若斯也“任命”一位宇宙监督，不准奇点裸着出现在宇宙中，奇点必须穿上衣服，这个衣服就是黑洞，就是视界。黑洞内部的奇点，不能把信息传到黑洞外部，不会影响黑洞外的因果关系。

还有一种不仅转动而且带电的黑洞，称为克尔-纽曼黑洞，这是最一般的稳态（不随时间变化）黑洞，其构造与克尔黑洞非常相似，两个视界，两个无限红移面，两个能层，中心有一个奇环。其视界、无限红移面、能层和奇环的形状也与克尔黑洞差不多。但有一个区别是，进入克尔-纽曼黑洞内部的飞船不仅不能从奇环的上、下方撞到奇环上，也不能从奇环所在的赤道面上撞到奇环。奇环对一切方向飞来的物体及飞船，均有一股不可抗拒的排斥力，把它们拒之于门外。因此，进入克尔-纽曼黑洞的宇航员完全不用担心他们的飞船撞上奇环，尽可以放心地在黑洞内自由翱翔。

四、黑洞无毛与面积不减

对于不转动、不带电的史瓦西黑洞，人们只了解构成它的物质总质量 M ，其他什么都不了解。对于转动的克尔黑洞，只了解组成它的物质的总质量 M 、总角动量 J ，其他什么都不了解。对于转动、带电的克尔-纽曼黑洞，人们对组成它的物质，也只了解总质量 M 、总角动量 J 和总电荷 Q ，其他什么都不了解。经过研究，人们得出黑洞“无毛定理”。毛就是信息。这个定理说，黑洞是无毛的，或者说黑洞只有三根毛。也就是说，形成黑洞的物质失去了 M 、 J 、 Q 之外的全部信息。黑洞外的观测者，根本无法了解构成黑洞的物质的成分、结构和性质，所能测到的只是它的总质量、总角动量和总电荷。黑洞是一种“忘本”的星体，它不记得自己形成黑洞之前是一颗什么样的星，也不记得形成黑洞的经历和自己的寿命。

1972年，30岁的英国青年物理学家霍金，提出黑洞“面积定理”。这个定理指出，黑洞的表面积随时间变化只能增加、不能减少。物质落入黑洞、两个黑洞相撞等导致黑洞面积增加的过程，是可以发生的。而一个黑洞分裂为两个黑洞的情况，由于会导致黑洞总面积减少，因而是不可能发生的过程。

面积定理，不禁使人想起热力学中的“熵”。熵是物质混乱度的量度。热力学第二定律指出，自然过程（孤立或绝热系统）中熵只能随时间增加，不可能减少。但是黑洞面积与熵是风马牛不相及的两种东西，这样去联想它们，是不是太荒唐了呢？

热力学告诉人们，如果黑洞有熵，就同时应该有温度。难道黑洞真的有温度吗？为此人们展开了热烈讨论。1973年霍金、巴丁、卡特等卓有成就的黑洞专家联名发表了一篇论文，声称：可以模仿热力学定律给黑洞定义一个温度，但黑洞的温度不能看作真实温度，因为黑洞没有热辐射（不可能有任何物质跑出黑洞！），而有真实温度的物体，应该有热辐射。但是几个月后，霍金就宣称，他已证明黑洞有热辐射，黑洞的温度是真实的。

五、黑洞的热辐射

众所周知，通常的时空中，真空涨落不断产生虚的正反粒子对，其中一个粒子具有正能，另一个具有负能。它们产生后很快湮灭。由于存在的时间极短，我们观测不到它们。假如有人试图去观测，由于虚粒子对存在时间极短，时间-能量测不准关系导致的能量增量，会掩盖住它们，使我们测不到它们。霍金指出，如果上述真空涨落发生在黑洞表面附近，则会导致明显的物理效应。这是因为黑洞内部的时空与外部时空不同，允许负能粒子存在。在视界（黑洞表面）附近产生的虚正反粒子对，可能像通常一样湮灭，也可能一起掉进黑洞。这两种情况都不导致明显效应。然而还有第三种情况：负能反粒子（或粒子）掉进黑洞，正能粒子（或反粒子）飞向远方。由于黑洞内部允许负能态存在，负能反粒子穿过单向膜落到奇点上，使那里的能量减少。而减少的能量正好等于飞向远方的正能粒子的能量。这一总过程，相当于黑洞发射了一个正能粒子。霍金说：黑洞表面附近所产生的正反粒子对，其中负能反粒子落入黑洞，顺着时间前进，落向奇点，使那里的能量减少，正能粒子则从视界处飞向远方。这一过程相当于奇点发射一个正能粒子，逆着时间前进到达视界，然后被视界散射，再顺着时间飞向远方。

需要说明的是，黑洞表面附近产生的虚粒子对，不可能出现正能粒子（反粒子）落入黑洞，负能反粒子（粒子）飞向远方的情况，这是由于黑洞外的时空是普通时空，不允许实的负能粒子或负能反粒子存在。

霍金又指出，虚的正反粒子对，本来是相互关

联的量子纯态，负能的一个粒子落入黑洞后，失去了几乎全部信息，割断了与外面正能粒子的联系，于是纯态变成了混合态。根据信息论，信息相当于负熵，上述过程丢失大量信息，产生熵。所以，黑洞的这种辐射应该有热性质。

霍金用量子场论的方法，严格证明了上述过程，并得出黑洞辐射是热辐射（黑体辐射）的结论。为了纪念霍金的功绩，人们把黑洞热辐射称作霍金辐射（图3）。

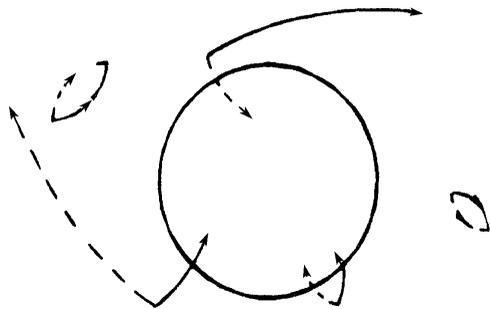


图3 霍金辐射

黑洞存在温度，具有热辐射。包括处于基态的史瓦西黑洞在内的一切黑洞，都不再是死亡了的星体，不再是恒星演化的终态。应该说恒星的演化没有终态。黑洞不断吸积周围的物质和能量，同时不断地向周围发出热辐射。黑洞是一颗具有生命力的星体。然而，大黑洞的温度极低，质量越大的黑洞，温度越低。太阳质量的黑洞温度只有绝对温度 10^{-6} 开。所以大黑洞的热辐射很难观测到。但是小黑洞具有高温，10亿吨重的小黑洞，温度高达 10^{12} 开。

黑洞越吸收外界辐射，自身质量越大、温度越低。越向外发出辐射，自身质量越小、温度越高。小黑洞最后会发生爆炸。这种情况与黑洞具有负的热容量有关。通常的热力学系统热容量都是正的，所以，一旦达到热平衡，就会是稳定的。黑洞的负热容量，使它与外界热辐射很难达到稳定的热平衡。当黑洞与外界热辐射温度相同时，它们处于热平衡态。这时如果出现一个微扰，使黑洞温度略低于外界，黑洞就会吸收外界的热辐射，负热容使吸热后的黑洞温度进一步降低，这将导致它吸收更多的热辐射，温度再进一步降低……热平衡被完全打破。如果微扰使黑洞温度略高于外界，黑洞将对外界放出热辐射，负热容使放热的黑洞升温，导致给予外界更多的热辐射，黑洞再进一步升温，最后导致黑洞爆炸消失。

研究表明，只有把黑洞装在一个盒子里，并使盒子里充满与黑洞同温的热辐射，而且辐射的质量不超过黑洞质量的 1/4 时，热辐射才能与黑洞处于稳定热平衡状态。

霍金最初公布的热辐射证明，是以史瓦西黑洞为例给出的。他和他的一些同行，又用各种不同的方法证明了克尔黑洞和克尔-纽曼黑洞能够产生热辐射，不过，这些证明都是针对自旋为整数的玻色子以及静质量为零、自旋为半整数的费米子的。不包括电子、中子、质子等静质量不为零的费米子。温度足够高的热辐射，不仅由光子组成，而且应该含有各种粒子成分。我们通常见到的热辐射只含有光子，是因为温度不够高的缘故。1976 年，钱德拉塞卡对弯曲时空中描述电子、中子、质子运动的狄拉克方程，作了数学上的简化，为解决上述粒子的辐射准备了条件。1980 年，我国的一个小组，最先严格证明了上述黑洞热辐射电子、质子和中子。

六、不等价的真空

在霍金提出黑洞有热辐射的前夕，加拿大物理学家安鲁 (W. G. Unruh) 预言了一个非常有趣的效应：惯性观测者认为的真空状态，在作匀速直线运动的观测者看来，不再是真空，而是充满热辐射的状态。辐射温度正比于他的加速度。这个效应被称作安鲁效应。研究表明，安鲁效应与霍金效应有相同的本质。

安鲁的结论是惊人的。然而，由于大部分物理工作者不熟悉广义相对论，也由于这一效应过于微弱，目前在实验中还观测不到，这一杰出的工作至今还不为世人所注意，只有少数人知道有这个已被预言但尚未观测到的效应存在。

安鲁等人认为，加速观测者感受到的热效应是一种量子效应，它是由于不同“时间坐标”对应不同的“真空”而造成的。按照狄拉克的思想，真空不空，有零点能存在。通常的物理学都是在平直的闵氏时空的惯性系中讨论的，所以物理学中所说的真空，通常都是指惯性系中的真空，此真空由闵氏时间来定义，可称为闵氏真空。闵氏真空的虚粒子涨落形成零点能。当我们在作匀加速直线运动的伦德勒系中观测时，我们用的时间是伦德勒时间，而不再是闵氏时间。用伦德勒时间也可定义一个真空，可称为伦德勒真空。需要强调的是，伦德勒真空不是闵氏真空，它的能量零点比闵氏真空的能量零点低，因此，闵氏真空的零点能在伦德勒观测者看来就是高

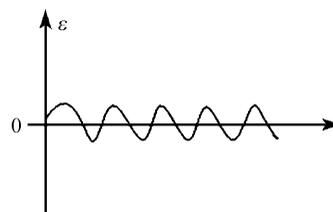


图 4 闵氏时空零点能示意图

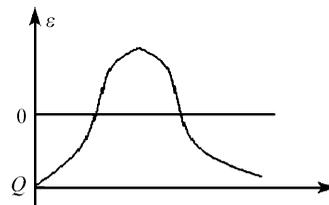


图 5 伦德勒时空能级示意图，真空能量的零点下降到 Q 点，闵氏真空的零点能以热能形式出现

于真空零点的能量，是真实可测的能量。这种能量以最简单的形态出现，那就是具有黑体谱的热辐射状态。因此，伦德勒观测者觉得自己浸泡在热浴之中。

我们看到，“真空”不是绝对的，依赖于参考系的选择，温度也不是绝对的，也依赖于参考系的选择。我们还看到，真空态与热平衡态有共同的本质，选择不同的能量零点，二者之间可相互转化。

七、黑洞的信息疑难

在黑洞热性质的研究取得很大进展的同时，许多粒子物理学家表示对霍金辐射有保留意见。理由是，纯粹的热辐射几乎带不出任何信息。如果黑洞真的辐射到最后，全部转化为热，则形成黑洞的那些物质带进去的信息将从宇宙中彻底消失。这不仅会破坏轻子数守恒、重子数守恒等许多重要的物理定律，而且信息不守恒将使正在创建的量子引力理论不满足么正性，这将给已经取得辉煌成就的量子场论带来重大危机。

霍金与另一位相对论专家索恩 (Kip Thorne) 曾与粒子物理学家普瑞斯基 (John Preskill) 打赌，霍金与索恩认为黑洞会造成信息丢失，普瑞斯基则认为不会。普瑞斯基等人认为落入黑洞的信息，一部分会被霍金辐射带出黑洞 (即霍金辐射不会是纯热谱)，另一部分会在黑洞蒸发到最后时作为“炉渣”留下来。2004 年 7 月，霍金突然宣布他输了，普瑞斯基赢了，黑洞不会使信息丢失，理由是以前把黑洞描述得过于理想化，真实的黑洞会通过热辐射泄漏或残留信息。索恩表示不同意霍金的意见，这件事不能由霍金一个人说了算。普瑞斯基则表示没有

听懂霍金的报告，搞不清楚为什么自己赢了。遗憾的是，霍金当时作的只是一个定性的科普报告，其中一个公式都没有。2005年6月霍金终于发表了一篇有关此问题的论文，但其中只有两个半公式。可以说至今还未见到他承诺要发表的包括计算内容的科研论文，人们仍然难以了解其中的“奥妙”。

不过，诺贝尔奖获得者威尔塞克(F.Wilczek)与他的学生派瑞克(M. Pailkh)的论文给出了支持信息守恒的一种具体计算。派瑞克等人指出，霍金虽然在论证黑洞产生热辐射的时候，声称这是一种量子隧道效应。然而他在具体计算中并未用到隧穿过程，甚至没给出势垒的位置。派瑞克考虑能量守恒后认为，黑洞辐射时自身质量的减少将造成黑洞半径收缩，这种收缩会导致势垒的出现。考虑上述修正之后，派瑞克等得到的黑洞辐射谱不再是严格的黑体谱，因而会有信息随同辐射从黑洞中逸出。他们进一步指出，这一结果与量子理论的么正性一致，也与量子力学理论所预期的“没有信息丢失”的结果精确一致。总之，他们认为能量守恒所导致的热谱修正项的出现，似乎保证了黑洞热辐射过程的信息守恒。

最近，我们把派瑞克等人的工作推广到更为一般的稳态黑洞。研究表明，派瑞克等从霍金辐射导致黑洞收缩，进而得出热谱修正项的结果具有普遍意义。对各种黑洞，不管辐射粒子是否有静止质量，是否带电，均可推出与派瑞克论文一致的结果。然而，我们注意到一个重要的情况，派瑞克的计算只在辐射过程为准静态的可逆过程时才成立。但正如前文所述，黑洞的热容量为负，黑洞与外界不存在稳定的热平衡，不论黑洞辐射还是吸收，原则上都与外界存在温差，过程一定是不可逆的，一定会有不可逆熵产生，不可能出现派瑞克预期的只存在可逆的熵流动的情况。因此，派瑞克的工作有很大局限性，还不能证明黑洞辐射过程保证信息守恒及量子理论的么正性。

对于黑洞造成的信息佯谬其实可以从两方面看。一方面，物理学中有能量守恒、动量守恒、电荷守恒等许多守恒定律，但没有“信息守恒定律”。相反，如果信息论中把信息看作“负熵”的观点正确，而且信息熵与热力学熵确实有相同的本质，那么信息原则上应该不守恒。这是因为热力学第二定律的灵魂就在于“熵增加”，在于指出自然过程的不可逆性。既然熵不守恒，信息当然不会守恒。

另一方面，霍金2006年7月的意见也应当重视，

我们确实有可能把黑洞想象得太理想化了。黑洞的热辐射有可能偏离黑体谱，黑洞蒸发的最后也有可能留下部分炉渣。总之，真实的黑洞过程不会保证信息守恒，但也可能会有部分信息从黑洞中泄漏或残留到最后。

八、坚强的天才

黑洞热辐射的发现，是黑洞研究的重大突破，也是时空理论的重大突破。这种辐射，后来被称为霍金辐射。霍金的老师西阿玛声称，霍金的重大发现，使他成为20世纪最伟大的物理学家之一。西阿玛还说，自己对广义相对论研究有两个重大贡献，第一是培养了霍金这个学生，第二是动员了数学家彭若斯来研究相对论。

当霍金在剑桥大学第一次报告他的这一发现时，会议主持者在他报告结束后总结道：“刚才，霍金教授作了一个精彩的报告，当然，都是胡扯！”后来，人们才慢慢接受了霍金的研究结果。包括那位主持人在内，都承认他是正确的。为了进一步征求意见，霍金来到苏联。他作完报告后，苏联著名物理学家泽尔多维奇和斯塔诺宾斯基（即发现转动黑洞有自发辐射的那个人）表示，霍金说黑洞有辐射是对的，但那是指转动或带电的黑洞。实际上，他们未听懂霍金的工作，以为霍金谈的是激发态黑洞的那种辐射，而那种辐射不是黑体辐射，不具有热性质。霍金立刻表示，自己谈的不是以前发现的那种辐射，而是一种新的辐射，是热辐射。不仅激发态黑洞，而且基态的史瓦西黑洞都有这种辐射。泽尔多维奇和斯塔诺宾斯基要求看一下霍金的手稿。他们二人对照手稿计算了一夜，第二天见到霍金说：“向你祝贺，你发现了新的辐射。”

霍金诞生于1942年1月8日，正是伽利略逝世300周年的那一天。中小学时期，霍金的学习成绩并不十分突出，作业不整洁，字也写得不好。但也许是由于他喜欢独立思考的缘故，同学们给他起了个外号叫爱因斯坦。霍金喜欢与要好的同学探讨和争论问题，内容从宗教、神学到无线电、天文、物理无所不谈。他们讨论过宇宙起源是否需要上帝帮助，也讨论过宇宙中遥远星系发生红移的原因。少年时代的霍金不相信宇宙膨胀的说法，认为红移必定是由于其他原因造成的，例如光线在长途跋涉中累了以至于变红。霍金从小就对宇宙表现出极大兴趣，但学校里的物理课却一点未能吸引他，他觉得物理课十分枯燥，远比不上化学那么有趣，化学课

经常发生一些意想不到的事情，例如爆炸之类。霍金的父亲则极力主张他学医，或者学生物。但年轻的霍金有自己的主意。他认为物理学比化学、医学、生物学更基本，是最基础的科学。物理学和天文学涉及他感兴趣的那些关于宇宙的基本问题，所以他最终选择物理作为自己一生的研究领域。

霍金 17 岁考入牛津大学。他觉得理论物理有两个方向可供他选择：一个是宏观的、大尺度时空的宇宙学，另一个是微观的、小尺度的基本粒子物理。他认为基本粒子缺乏合适的理论，虽然科学家发现了许多粒子，但他们做的只不过是和植物学一样把粒子进行分类。霍金对这样的研究不感兴趣。他认为宇宙学已经有了一个很好的理论，即爱因斯坦的广义相对论，因此他选择了这个方向。当时，牛津大学没有人研究宇宙学，于是霍金在牛津毕业后，就到剑桥大学去作研究生。

不幸的是，20 岁的霍金在牛津毕业的前一年，患了严重的不治之症——进行性肌肉萎缩。起初此病发展很快，霍金 23 岁结婚时，已不得不拄拐杖。但他顽强地与疾病斗争，在物理领域做出了一个又一个杰出贡献。他与彭若斯一起证明了奇点定理，又独自证明了黑洞面积定理，还进一步证明了黑洞热辐射的存在。

刚做研究生时，霍金原本想追随著名相对论天体物理学家霍伊尔。霍伊尔当时正在研究稳恒态宇宙模型。该模型认为宇宙膨胀过程中，不断有物质从真空中产生，宇宙中物质的密度始终保持恒定。霍金对这个模型非常感兴趣，但是霍伊尔不要他，他只好跟了一位原来未曾听说过的西阿玛教授。西阿玛有一个特点，就是不主动管研究生，你愿意做什么研究就做什么。但西阿玛总是在办公室坐着，学生可以随时找到他。对于学生提的问题，西阿玛会给他介绍有关的专家，有关的书籍，也会提一些富有启发性的建议。霍金一开始看不起西阿玛，后来逐渐认识到西阿玛是一位非常适合自己的好老师。他给了霍金充分的时间，充分的选题自由，并给了他最需要的帮助——介绍别的专家。事实表明，西阿玛的确是极好的导师。当前世界上最优秀的相对论专家，几乎有 1/3 是他的学生，除霍金外，还有卡特、瑞斯、艾利斯等。

刚做西阿玛的研究生时，霍金仍对霍伊尔的稳恒态宇宙模型感兴趣，常跑到霍伊尔研究生纳里卡的办公室去，帮他计算。在计算中他发现霍伊尔的

稳恒态模型有难以克服的内在困难，应该否定。霍金博士论文的前一部分，就是证明稳恒态模型不对。博士论文的后一部分是关于奇点定理的。西阿玛把牛津大学的数学教授彭若斯拉过来研究相对论，又介绍霍金认识了他，霍金从彭若斯那里学到了现代微分几何。当时彭若斯已经给出了奇点定理的第一个证明。该定理是说任何一个物理时空都一定存在时间有开始或有结束的过程。霍金在看了彭若斯的证明后，自己给出了奇点定理的第二种证明。不过霍金最初的证明有漏洞，后来他又重新给出了完美的证明。霍金从此展开了他的研究生涯。

糟糕的是，霍金的病发展很快，不久就不能行走。他坐在特制的小车上，用手按动小车上的按钮前后行走。他把书和杂志复印后在一个长条桌上一张张铺开，然后驱动小车慢慢移动，边移边看。他说话越来越困难，只有他的妻子、学生、私人医生和护士可以听懂他的讲话，后来不得不给他装了个电子发声器。唯一健全的是他的大脑，不仅健全，而且超常。他不使用纸笔，于是把所有知识都储存于大脑，并在那里思考计算，然后口述让助手写在黑板上，与别人讨论。霍金以超常的毅力对理论物理做出了极其杰出的贡献。

霍金在生活上非常乐观。他患病初期，还参加划船比赛，他已无力划桨，但坚持掌舵。全身瘫痪后仍去参加舞会，他把电钮一按，小车高速旋转，不小心压了别人的脚趾。有一次，他从一个山坡下来，故意开玩笑让小车往下冲，“结果我们的这位引力专家，被万有引力一下子抛进了路边的花丛里”。1985 年霍金第一次来中国访问，曾到中国科技大学和北京师范大学讲学。他坚持要看举世闻名的长城，几个中国学生把他连人带车抬上了居庸关。后来，他又两次访问中国，并先后在中国科技会堂和人民大会堂向公众发表科普演讲，深受中国人民的敬仰。

愉快的霍金早已突破了医生预言的寿命界限，他的思想仍然在爱因斯坦的弯曲时空中遨游。霍金不赞同爱因斯坦对量子力学的看法。针对爱因斯坦“上帝不掷骰子”的说法，他反驳道：“上帝不仅掷骰子，而且有时掷到我们看不见的地方去了。”那看不见的地方，就是黑洞。

（北京师范大学物理系 100875）

本文素材取自即将由高等教育出版社出版的作者编写的《物理学与人类文明》一书。