

解读霍金有关黑洞的说法

张天蓉

斯蒂芬·霍金，这个在轮椅上过了大半辈子，却对理论物理中的黑洞研究作出非凡贡献的当代科学传奇人物，再次以他与黑洞有关的最新见解而震惊世界。据媒体报道，说他在日前发表的一篇文章中否定了自己过去的说法，认为黑洞其实是不存在的。

黑洞与霍金齐名，在物理学的专业词汇中，恐怕很难找出别的术语，能比“黑洞”一词更深入公众之心。40年之前，史蒂芬·霍金将量子论引入了黑洞的经典理论，提出霍金辐射（Hawking Radiation）的观点。而最近这位著名科学家为什么又否定了自己对黑洞的看法，认为黑洞不存在了呢？笔者仔细研究了霍金这篇名为《黑洞的信息保存与气象预报》(Information Preservation and Weather Forecasting For Black Holes)^①的论文之后，感觉霍金的原意与媒体渲染下造成的公众影响大相径庭。因而写此文章，尽力而为地为公众解读一下霍金与黑洞。

其实，霍金并不是否认黑洞的存在，而只是澄清有关黑洞的一些定义而已。

问题的实质来源于在微观时空范围内，广义相对论和量子理论的矛盾。两个理论都各自在不同的领域得到大量实验和观测的验证，而在黑洞研究中，两者却不那么和谐。其实这一直是理论物理学家试图要解决的问题。

1. 因引力而引起的问题

量子力学和相对论是20世纪物理学的两项重大成果。100年左右的历史中，大量实验事实和天文观

测资料分别在微观和宏观世界验证了这两个理论的正确性。然而，当这两个理论碰到一起的场合，却总是水火不相容，这其中的根本原因，都得归罪于“引力”（gravitation）这个桀骜不驯的家伙。从1687年牛顿发表万有引力定律，到爱因斯坦1915年的广义相对论，直到现在……百年来，一代又一代的理论物理学家们，倾注了无数心血，花费了宝贵光阴，至今仍然对它的本质知之甚少，难以驾驭。所幸的是，需要同时用到两个理论来解决引力问题的场合不多，或者可以说是非常之少。在研究宇宙和天体运动的大尺度范围内，广义相对论可用于解决引力问题，而在量子理论大显神通的微观世界中，引力非常微弱，大多数情况都可以对其效应不予考虑。然而，有两个例外的情况，必须既要用到量子力学，又要应用引力理论。它们一个是宇宙的开始时刻，即大爆炸的起点；另一个就是黑洞。在这两种情况下，尚未被物理学家统一在一起的引力和量子，便打起架来了。霍金对黑洞问题最新的说法，便是为了解决理论上的矛盾而提出的一种方案。

广义相对论的核心是引力场方程。方程的一边是物质的能量动量张量，另一边则是由四维空间的曲率及其导数组成的爱因斯坦张量。笔者当年的老师，著名美国物理学家约翰·惠勒曾经用一句话来概括广义相对论：“时空告诉物质如何运动，物质告诉时空如何弯曲”。这句话的意思就是说，时空和物质通过引力场方程联系到了一起。这种联系可以利用图1的比喻来说明。（a）图中，极重的天体放到一张有弹性

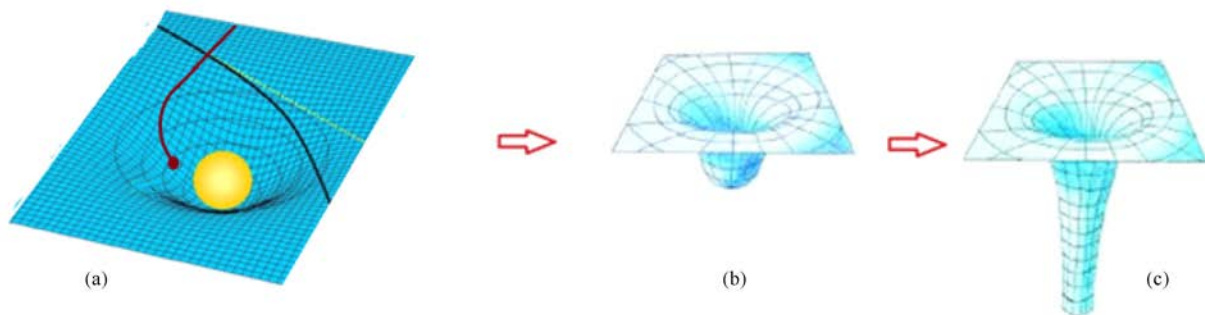


图1 引力引起时空弯曲到破裂

的蹦蹦网上，使网弯曲而下凹，这种下凹的空间形状又影响了这个天体以及周围其他物体的运动轨迹；(b)(c)两个图则表明：天体质量越大，空间弯曲越厉害。大到一定的程度，蹦蹦网被撑破而形成了一个东西全往下掉再也捡不起来的“洞”。

2. 什么是黑洞？

黑洞是什么？虽然它绝对是一个有了广义相对论之后才有的概念，尽管黑洞一词是由约翰·惠勒在1968年才命名的，但我们仍然可以从经典力学的观点找到它在爱因斯坦时代之前的蛛丝马迹。1796年，著名物理学家拉普拉斯就曾经预言过类似黑洞的天体的存在：

“一个质量如250个太阳，而直径为地球的发光恒星，由于巨大引力的作用将不允许任何光线逃离它……”

其实，为了便于理解，我们可以给黑洞下一个比较通俗的定义：黑洞是一部分时空，其中的引力大到连光也不能逃离它。或者换言之，用牛顿力学的语言来说，“逃逸速度”超过光速的天体，就叫做黑洞！

根据我们在中学学过的牛顿经典力学，每个星体都可以算出一个物体可以逃离它的最小速度，即逃逸速度。从日常生活经验我们知道，当上抛一个物体，用的力气越大，就能使它得到更大的初速度，就能将它抛得越高，然后，它最后返回地球的时间也就越长。

如图2的左图所示，当被抛物体的速度大到一定的数字，能使这个物体绕着地球转圈，如果速度再增大，物体便能够逃离地球的引力，进到宇宙空间中，再也不回来了。这个临界速度，便是逃逸速度。事实证明，逃离地球的引力范围是完全可能的。当然，就我们个人而言，利用抛球的实验是做不到这点的，但是，人造的火箭和宇宙飞船做到了！科学家和工程师们使用这个理论，准确地计算了发射火箭和人造卫

星所需要的临界速度，成功地发射了不少人造天体。地球表面的逃逸速度大约为每秒11.2 km，这个数值相对于我们日常运动的速度来说，够快的了。但是，比起每秒钟30万 km 的光速来说，还太小太小。因此，我们不用担心，地球还远远不是一个黑洞！

天体表面的逃逸速度与天体的质量，以及天体的半径有关，简单地使用万有引力定律就可以得出它的计算公式：逃逸速度的平方与质量成正比，与半径成反比。那么，如果我们假设地球的质量是一个固定的数字，而由于某种原因（事实上不存在的原因），它的半径却不断地缩小又缩小，就好像是将一个弹性的橡皮球使劲压缩进一个越来越小的空间中，如同图2中右图的情形。在那种情形下，要想逃离这个天体所需要的速度会越来越大。当地球（或称之为具有地球质量的假想天体）的半径缩小到大约1/3 inch大小时，逃逸速度便增加到了光速的数值。我们都知道，任何实物和信息都不能跑得比光还快，因此，对那么一个装下了整个地球质量的弹子球而言，任何事物，即使是光，也都不能逃离它了。如此一来，这样的“地球”就转化成了一个黑洞！

根据牛顿力学计算逃逸速度不难，如果用爱因斯坦的广义相对论，事情当然要复杂许多，但基本思想是类似的。引力场方程的解，描述的是在一定的物质分布下时空的几何性质，它实际上是一个二阶非线性偏微分方程组，要想在数学上求得此方程组的解非常困难。一般来说，可以利用计算机求数值解，方程只在某些特殊情形下有解析解，比如，引力场方程的真空解是平直的闵可夫斯基四维时空；而物质分布为球面对称的准确解称为史瓦西解。

卡尔·史瓦西(Karl Schwarzschild, 1873 ~ 1916)是德国物理天文学家，他在爱因斯坦提出广义相对论后一个月左右，就在写给爱因斯坦的信中

给出了引力方程的第一个精确解——史瓦西解。从这个解可以得到与黑洞形成有关的史瓦西半径，与刚才我们用万有引力定律讨论的逃逸速度达到光速时的半径数值相符合。这个表征黑洞的特别参数后来被称为黑洞的事件视界(Event

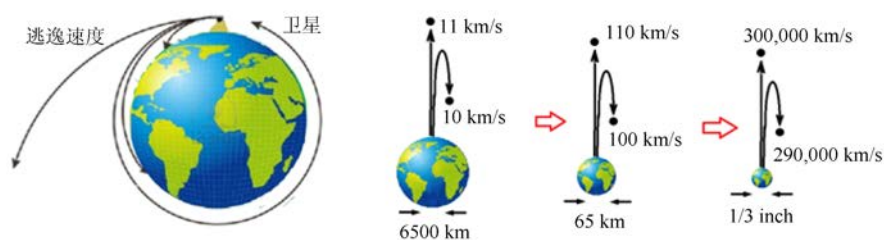


图2 逃逸速度

Horizon)。

值得一提的是，史瓦西是在第一次世界大战期间，作为一名军人，在前线服务于德国军队时得到他的著名史瓦西解的。并且，也就在第二年，他因为随部队到俄国战壕中染病，之后身亡。死时还不到43岁，也没有来得及看到他的这篇有关史瓦西解的相对论文章在期刊上发表。

3. 事件视界内外有别

根据广义相对论，如果星体在一定条件下发生了引力塌缩，塌缩到史瓦西半径形成黑洞之后，还会继续塌缩下去。直到最后，所有的物质将高度密集到一个“点”，一个被称为奇点的点。当然，这在实际情形下是不可能的，只不过是理论描述的一种数学模型。但无论如何，我们可以想象为，在塌缩之后，所有物质都高度集中在一个很小的范围之内。

因此，根据广义相对论，我们可以如此表述黑洞的数学模型：黑洞是一个质量密度无穷大的奇点，被一个半径等于史瓦西半径的事件视界围绕着，如图3中的(a)图所示。

任何物质和信息都不能逃离黑洞，所以，我们看不见黑洞。但这并不等于我们不能感知它。我们能从它的引力而探测到它的存在。当我们位于黑洞事件视界之外的空间中时，黑洞对附近物体的作用，仍然符合万有引力定律。换句话说，像我们刚才所举的例子，如果地球半径真的逐渐缩小到了一个弹子球，地球成为了一个黑洞，地面上的一切都将会随着而趋向那个奇点而毁灭。但是，对于地球的卫星月亮而言，地球的这个变化对它的运动几乎没有影响。月亮还是那个月亮，还是照样转它的圈，不管中心处是6400 km半径的地球，还是塌缩到了一颗弹子球大小的黑洞！

根据广义相对论，不仅能计算出黑洞的事件视界，即黑洞的边界，还预言了在黑洞的事件视界之内，时空的种种奇怪性质。这儿仅举一个有趣的例子予以说明。

设想爱丽丝和鲍勃一同坐着宇宙飞船旅行到了黑洞附近。悲剧突然发生了：勇敢却又莽撞的爱丽丝掉进了黑洞，而将一筹莫展的鲍勃留在了事件边界之外，如图3的(b)所示。根据广义相对论的结论，有关爱丽丝穿过了边界，但尚未到达奇点之前的情况，黑洞外的观察者鲍勃看到的，和爱丽丝自己感受到的，是完全不同的。鲍勃看到爱丽丝越来越接近视界，并且是越来越慢地接近视界，而且，她的消息传过来花费的时间也越来越长，越来越长，最后变成无限长，也就等于没有了消息。所以，对鲍勃来说，爱丽丝消失不见了。而掉进了黑洞事件视界的爱丽丝呢，却对自己的危险浑然不知，没有什么特殊的感受，始终快乐地作为自由落体飘浮着，完全不知道自己已经穿过了黑洞的边界，再也回不去了！直到后来，她真正靠近了黑洞中心的那个奇点。不过那时候很可悲，爱丽丝还来不及进行任何思考，就被巨大的引力撕得粉碎了。

在20世纪70年代以前，物理学家一直沿用黑洞的上述广义相对论模型。但是，黑洞的引力是如此之巨大，尺寸又是如此之小，对引力的量子理论跃跃欲试的理论物理学家们，自然而然地将手伸进了这个迷宫。70年代初，理论物理学家雅各布·贝肯斯坦(Jacob Bekenstein)研究了黑洞的熵及其热力学性质；史蒂芬·霍金则提出黑洞也有辐射，即霍金辐射。

霍金认为，根据量子场论，在黑洞的事件视界边缘附近，由于真空的涨落，将不断发生粒子反粒子的产生和湮灭。因为处于视界边缘，很大的可能性，

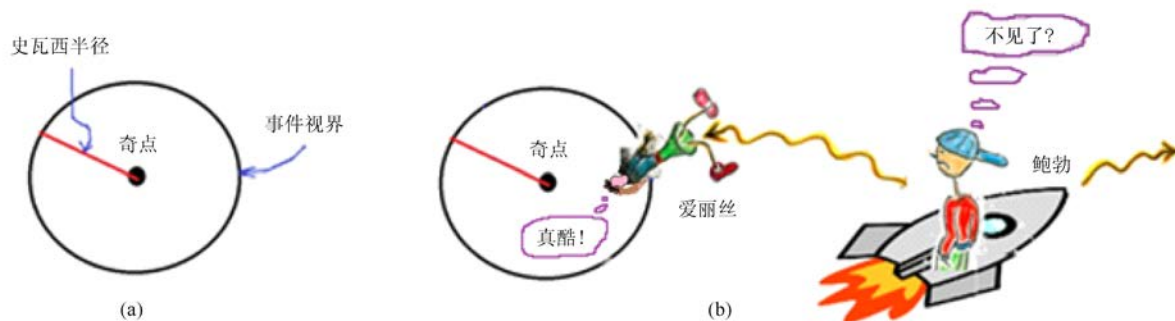


图3 黑洞的广义相对论模型

这两个粒子中的一个将掉入黑洞，另一个则表现为像是黑洞的辐射。由于这种被称之为霍金辐射的现象，黑洞将不断地缓慢地损失能量。最终的结果会导致所谓的“黑洞蒸发”。很长时间之后，黑洞将完全消失。这个消失是彻底消失，用此文最开始所举的地球半径缩小的例子来说明的话，就是说：地球转化成的黑洞完全蒸发掉了，没有了，所以，月亮再也不能绕着它转圈了！

真空涨落产生的粒子反粒子对，有点像刚才例子中的爱丽丝和鲍勃。只不过正反粒子对是凭空随机产生的，不像两个活人，是父母生出来的。但它（他）们符合的经典运动图像可以类比。

既然霍金开了一个头，将量子论引入了黑洞研究中，人们便蜂拥而至。然而，至今 40 年过去了，除了遭遇到许多困难，提出了几个悖论之外，可以说成果甚少。

首先，黑洞由星体塌缩而形成，形成后能将周围的一切物体全部吸引进去，因而黑洞中包括了大量的信息。而根据“霍金辐射”的形成机制，辐射是由于真空涨落而随机产生的，所以并不包含黑洞中任何原有的信息。但是，这种没有任何信息的辐射最后却导致了黑洞的蒸发消失，那么，黑洞原来的信息也都全部丢失了。可是量子力学认为信息不会莫名其妙地消失。这就是黑洞的信息悖论。

此外，形成“霍金辐射”产生的一对粒子是互相纠缠的。量子纠缠态是量子理论最基础的概念之一，已经被各种实验所证实。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，也没有理由改变它们的纠缠状态。既然仍然互相纠缠，就等效于可以互通信息，这点显然与相对论预言的结果相矛盾。

4. 边界上的争论

理论物理学家们一直为解决信息悖论及黑洞相关的其他问题而努力，提出了各种方案和理论。近一年多来，争论愈演愈烈，2013 年，美国加州大学圣芭芭拉分校四位理论物理学家（AMPS）发表了一篇文章：《黑洞：互补性或是防火墙？》*Black Holes: Complementarity or Firewalls?*。

文章的四个作者中以理论物理学家约瑟夫·玻尔钦斯基（Joseph Polchinski）为首。他们提出“黑洞火

墙”悖论。（作者注：Firewall 可以翻译成防火墙，但在这儿的意思不是“防火”的墙，而是“着火”的墙，故翻为“火墙”）。他们认为，在黑洞的视界周围，存在着一个因为霍金辐射而形成的能量巨大的火墙。当量子纠缠态的粒子之一，或者说爱丽丝，穿过视界掉到这个火墙上时，并不是像广义相对论所预言的，悠悠然什么也不知道，毫无知觉地穿过视界被拉向奇点，而是立即就被火墙烧成了灰烬。原来的量子纠缠态也在穿过视界的瞬间便会立即被破坏掉。

这篇论文把矛盾集中到了黑洞的边界——事件视界上。就此争论表态，霍金于 2013 年 8 月份在加州圣巴巴拉卡维利理论物理研究所召开的一次会议上发表了讲话。而霍金 2014 年 1 月 22 日发表的文章便是基于这个会议发言。

为了解决这个矛盾，霍金提出了一个新的说法，认为事件视界不存在，而代之以一个替代视界叫做表现视界（apparent horizon），认为这个所谓的表现视界才是黑洞真正的边界。并且，这一边界只会暂时性地困住物质和能量，但最终会释放它们。

因此，霍金的文章并没有否定黑洞的存在，只是重新定义了黑洞的边界。

黑洞问题争论的实质，是广义相对论和量子理论的矛盾。只有当有了一个能将两者统一起来的理论框架，才能真正解决黑洞的问题。当初，广义相对论和量子理论是由 20 世纪初期经典物理学晴朗的天空中小小的“两朵乌云”而发展起来的。没想到在 100 年之后，这两片已经厚实的大云朵仍然合不到一起。近几年来，理论物理界关于黑洞问题的讨论、争执、激动、迷惑，就是这两片云彩接触时产生的绚丽火花。

作者简介：张天蓉，女，科普作家。美国德州奥斯汀大学理论物理博士。研究课题包括相对论、黑洞辐射、路径积分等。出版的科普读物：《蝴蝶效应之谜：走近分形与混沌》、《世纪幽灵：走近量子纠缠》、《新东方夜谭》、《美国房客》等。还曾参编第六版《十万个为什么》物理卷。

① Hawking, S. W. Preprint at <http://arxiv.org/abs/1401.5761> (2014)