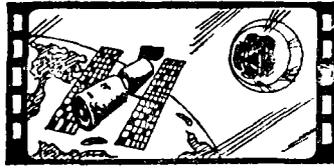


黑洞的“解剖学”

下 魏克 廖萍



体积就变得越来越小，密度则变得越来越高。其引力场变得极为强大，致使其周围的时空结构弯曲得自身折叠了起来。任何东西一旦陷入这样的时空结构，便

犹如落进了一个“无底洞”而不能复出，就连光也不例外。于是人们再也看不见这颗恒星了，剩下的乃是一个绝对“黑”的天体。“黑洞”的名称就是这样来的。

广义相对论的黑洞观

1915年，36岁的爱因斯坦创立了广义相对论。我们不妨说，这种关于时空与引力的崭新理论的精髓乃是：

物质告诉其周围的时空如何弯曲；弯曲的时空则告诉其中的物质如何运动。 这两句话的前一句说的是：在离任何质量(即引力源)都极其遥远的地方，时空是平坦的；但当你趋近一个大质量的物体(即强引力源)时，你就会发现那里的时空曲率在逐渐增大，引力场越强，时空的弯曲也越显著。第二句话说的是：在弯曲的时空中，物体总是沿着有可能遵循的各种路径中的最短者运行，犹如在平坦时空中物体永远沿直线行进一般。

那么，究竟什么是“时空”呢？

试想我们观看一个远达1亿光年(1光年是光在一年之中行经的距离，约 9.5×10^{12} 公里)的星系。我们看见的其实是该星系在1亿年以前的形象。由此可知，我们往太空中窥视得越深邃，也就在时间上回溯得越久远。你不可能把时间的流逝与空间的伸展截然分开，因为它们本来就是一个统一的集合体。这个集合体的名称就叫时空，它是四维的，其中空间占了三维，第四维则是时间。正如可以用尺沿各个方向量度空间的距离那样，也可以用钟来量度沿时间方向上的“距离”。

人们普遍认为，广义相对论乃是人类迄今所建立的有关引力的最精确、最完善、最优美的理论，而牛顿在三百多年前确立的经典理论，则是对引力的一种近似描述。

当然，牛顿的理论也相当精确而优美。例如，在向其他行星发射宇宙飞船或是派遣宇航员登月时，运用牛顿理论来计算飞船的轨道便足够了。由于在太阳和行星附近，或在其他许多恒星附近，引力通常都很微弱，因而时空只是略有弯曲而已。这就是在许多情况下牛顿理论均能奏效，而不必运用较为复杂的广义相对论的原因。

然而，时空确有严重弯曲的可能。这与本世纪中叶天文学家们的下述重大发现有关：一颗质量大于3倍太阳质量的垂死恒星，临终时将不可避免地在自身引力作用下坍缩。没有任何力量能抵挡住巨大的质量在引力作用下从四面八方往里挤压，于是这颗恒星的

史瓦西黑洞的解剖

太阳的引力场比地球引力场强大得多，所以太阳周围的时空要比地球周围的弯曲得更厉害。

要直观地想象四维时空弯曲的情状是异常困难的，但是我们可以采用一些辅助手段以窥其一斑。试想从太阳周围的四维时空中切割出一片二维的曲面(图1)，在远离太阳的地方因引力微弱，故时空平坦；在贴近太阳表面的地方引力最强，所以那儿的时空弯曲得最厉害。

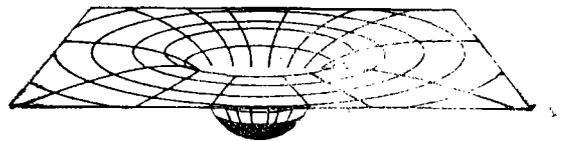


图1 太阳周围的时空弯曲，涂黑的部分代表太阳所在的位置。

来自遥远恒星的光线从太阳表面附近经过时，就随着时空的弯曲而偏离通常的直线路径。于是如图2所示，人们在太阳附近观测到的星象就会稍微偏离它们原有的位置。

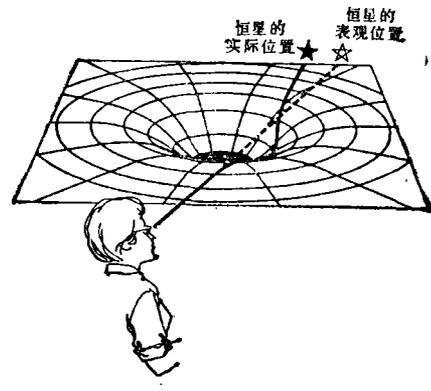


图2 星光在引力场中偏折

太阳的质量还不够大，它是不会变成黑洞的。所以我们来考察一颗质量更大，例如10倍于太阳的恒

星。在引力坍缩之前，其周围的时空仅仅稍有弯曲，所以它发出的光线也只是略有偏折。如图 3a 所示，该星射出的光线此时几乎是沿着直线行进的。

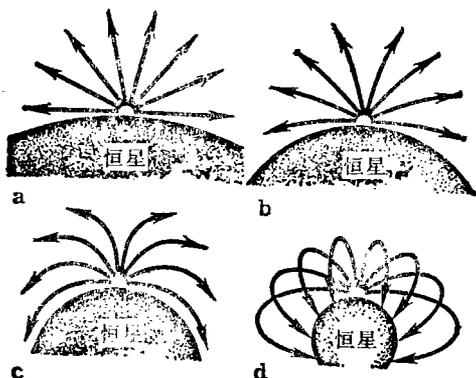


图 3 坍缩恒星射出的光线。a 表示坍缩前，b 和 c 代表坍缩中，d 表示已坍缩成一个黑洞

随着引力坍缩的开始和急速发展，该星的体积剧减而密度剧增，强大的引力场使其周围时空的曲率变得越来越大。于是，从星体表面射出的光线就偏折得越来越厉害，乃至仅在近乎垂直的方向上才有少量的光线逃逸出去。远方的天文学家将会看到这颗星正在迅速地变暗下去（图 3b 和 3c）。最后，在通常情况下将逃逸出去的光线终于全部被折回到坍缩恒星自身的表面（图 3d）。此时再也没有任何东西能从这颗恒星的引力场中逃逸出去，对地球上的观测者说来，它仿佛完全从宇宙中消失了。换句话说，这颗恒星终于变成了一个黑洞。

这时，人们就说它已经退缩到自己的**事件视界**中去了。人们不可能看见这个视界以内的任何事件。事件视界的直径与黑洞的质量成正比。例如，质量 10 倍于太阳的黑洞，其事件视界的直径约为 60 公里；质量 30 倍的，视界直径则为 180 公里。通常人们就把事件视界的直径说成是黑洞的直径。

大质量垂死恒星收缩到事件视界以内而形成黑洞之后，仍将在不断增大的自身引力作用下继续收缩，其周围的时空曲率亦随之继续增长，直到其全部物质被挤压成一个单一的点为止。这个点叫做**奇点**。在奇点上，具有无穷大的密度和压力，以及无穷大的时空曲率。

所以，这种黑洞的结构是极其简单的：一个事件视界包围着一个奇点（图 4），仅此而已！要注意的是，尽管人们常常把事件视界称为“黑洞的表面”，实际上在此“表面”上并不存在任何有形的东西。

广义相对论告诉我们，在引力场中时间流逝的进程会变慢。例如，一座大厦的顶层比底层离地球表面略远些，所以那里的地球引力场略小于底层，于是底层的钟就会比顶层的钟走得慢一些。不过，地球的引力

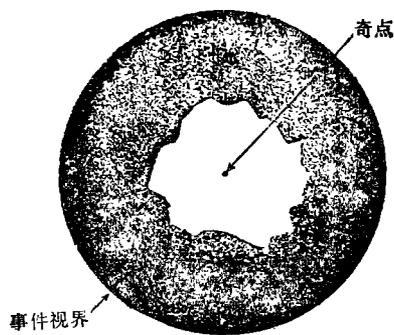


图 4 史瓦西黑洞的结构

场并不强，所以上述两只钟的差异也微乎其微。但是在黑洞附近，这种效应就非常明显。假如有一位宇航员正在向一个黑洞靠拢，那么你就会看到他的钟走得越来越慢，而一旦达到事件视界，他的钟在你看来就仿佛完全停住了。

当然，这位宇航员自己并不能觉察到这一点。这是因为在他那里一切事情的进程都变慢了：他体内的新陈代谢，心脏跳动的节律……当他利用这一切来校验自己的钟时，他总是得出结论：钟始终走得很准，既不快也不慢。

在事件视界里面情况就更奇特了。我们可以说，在那里，时间和空间交换了它们所扮演的角色。这是一个非常抽象的论题，我们不妨用下面的方式来“意会”一下它的含义：

在日常生活中时间与空间在方向上有着根本的差异：你可以在空间的任何方向上进退自如，但只能顺着时间流逝的方向前进，而不能倒退，正在阅读这篇文章的你决不可能重新变成婴孩。在黑洞里，任何物体都只能朝一个方向一去不复返地撞到奇点上，丝毫也没有后退的余地，可在时间上却换来了某种自由……。

上面谈的乃是最简单的黑洞：它只具有质量，而不带电荷，并且也不旋转。早在 1916 年，德国天文学家卡尔·史瓦西就弄清了这类奇特天体的性质，因此人们又称其为“**史瓦西黑洞**”。在这之后仅仅几个月，这位才气横溢的科学家便去世了，终年 43 岁。

带电黑洞的解剖

除黑洞的质量外，我们能再谈论的恐怕只有它的电荷和旋转了。

我们可以浪漫地想象：分别用 10 倍太阳质量的奶油和铁块各制造一个黑洞。那么，由于质量相同，它们就有同样大小的事件视界。在视界内所有的质量疯狂地挤向奇点，奶油和铁块原先具备的一切特征便不复存在，你在视界外面根本无法分辨哪个黑洞的前身是奶油，哪个是铁块。所以，对于黑洞来说，根本谈不上什么温度、压强、颜色、气味、化学成分之类的问题。

克尔黑洞的解剖

我们虽然不能直接看见黑洞，但是仍可凭借黑洞对其周围物体的引力影响而知晓它的存在，并推算出它的质量。就这一点而言，情况倒有些象19世纪40年代从天王星的反常运动推算出必定还存在着一颗尚未露面的行星那样。所不同的则是，当年人们很快就在望远镜中真的找到了这颗新行星——海王星，但是你永远也不能指望用任何望远镜亲眼看见一个黑洞。

黑洞能被探测到，是因为它的质量能够对远处的其他物体发生影响。就此而论，电力也有完全类似的特征。所以，如果一个黑洞带电的话，那么也应该能在远处用适当的仪器测量出它所拥有的电荷总量。

总电荷正是黑洞的第二个重要特征，它对黑洞的时空结构具有重要的影响。在1916~1918年间，德国人里斯纳和丹麦人诺兹特隆首先研究了兼具质量与电荷(或磁荷)、但是不旋转的黑洞的特征。所以，这类黑洞又称里斯纳-诺兹特隆黑洞。

我们设想向一个史瓦西黑洞徐徐注入电子，从而使之带电，于是你会发现原先的事件视界便渐渐往里移动了。更令人惊奇的是，紧挨着奇点又出现了第二个事件视界。前者称为外事件视界，后者则称为内事件视界(图5a)。所以，在遥远的观测者看来，奇点外面就有两个位置，时间的流逝将在那里停住。

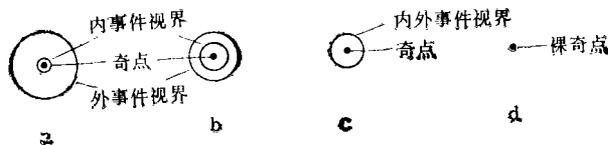


图5 带电黑洞的结构。a 电荷很少，b 电荷适中，c 电荷甚多，d 电荷极多

随着注入的电荷越来越多，外事件视界逐渐收缩，内事件视界则渐渐扩大(图5b)。最后，两个视界终于相合(图5c)。如果这时再注入更多的电荷，那么事件视界就会完全消失，而留下一个向外部世界暴露着的奇点——即所谓的“裸奇点”(图5d)！遥远的观测者可以看见裸奇点，宇航员甚至可以直接飞向这个无限弯曲的时空区域而不必穿过任何视界。不过，更深入的研究却告诉我们，在非常靠近奇点的地方引力变成了斥力，宇航员在那里将不是受到吸引而是受到排斥。所以，在非常靠近里斯纳-诺兹特隆黑洞奇点的地方乃是一种反引力区。

假定一个黑洞带有大量的正电荷，那么其强大的电场就很容易将周围星际气体与尘埃中的原子撕碎，并将由此产生的大量电子摄入黑洞，使黑洞本身变成电中性的。因此，尽管带电黑洞具有许多引人入胜的性质，但是真实的黑洞并不会带大量的电荷。相比之下，旋转黑洞在天体物理学中倒比它重要得多。

所有的恒星都在自转。由于角动量守恒，当它们坍缩时，随着半径的缩小自转速度便急剧地增大。可以预期黑洞实际上都在旋转着。

旋转是黑洞的第三个特征。由于黑洞拖曳着其周围的时空一起转动，所以人们有可能在远处测量它的转动情况。1963年，数学家克尔首先弄清了不带电的旋转黑洞的时空特征，故这类黑洞又称为克尔黑洞。

再做一个假想的实验：用照相机闪光灯发出一个闪光。在平坦时空中，这些光将向四面八方均匀地传播，从而形成一个不断膨胀的球形光壳，球心便是闪光灯本身。如果在一个史瓦西黑洞附近发出闪光，那么膨胀的球形光壳就会被拉向黑洞。离黑洞越近，膨胀光壳就被拉得越厉害。当闪光灯在事件视界处开启时，膨胀光壳就会完全处于闪光灯所在位置的内侧(图6)。这是因为光无法越出视界，而只能静止在那里。如果你也想停在事件视界上不动，那么你也必须以光速往外跑，否则就会立即被吸入视界。所以史瓦西黑洞的事件视界也就是它的“静止极限”。

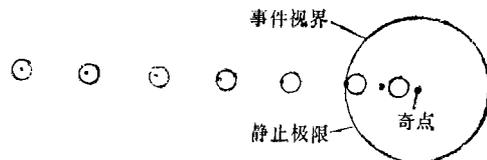


图6 史瓦西黑洞附近的闪光灯实验，小亮点代表闪光灯，小圆圈代表膨胀球形光壳。事件视界处的闪光灯发出的球形光壳完全在闪光位置的**内侧膨胀。静止极限就是事件视界本身。

现在我们到一个克尔黑洞附近去做同样的实验。这时，一方面也象史瓦西黑洞那样，强大的引力场把膨胀光壳往里拖，另一方面，黑洞的旋转拖曳着周围的时空，时空进而又拖着膨胀光壳一起朝黑洞旋转的方向跑。两者相结合，就使事件视界上方存在一种特定的位置，在那里膨胀光壳正好处于闪光灯开启时所在那一点的同一侧(图7)。也就是说，旋转黑洞的静止极限位于事件视界的上空。飞往一个克尔黑洞的宇航员将发现，在到达事件视界之前很久，他就不得不以光速运动才能保持静止。

于是，在克尔黑洞的静止极限和事件视界之间就有了一个很特殊的时空区域，在那里你无法保持静止，却仍能设法从中跑出来。这个区域叫做“能层”。

能层有一个极有趣的特点。如果一个物体落入能层并碎成了两片，那么其中的一片将会掉入事件视界并永远“消失”，另一片却可以带着黑洞的一部分转动能量重新飞出来。当然，黑洞的转动也会因此而稍稍减慢。

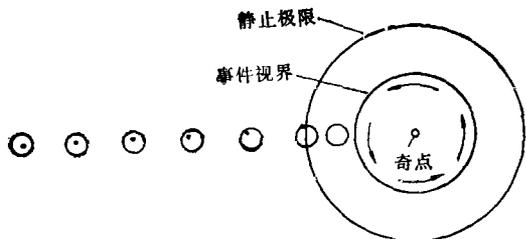


图7 克尔黑洞附近的闪光灯实验，膨胀球壳既被拉向黑洞又被拖着围绕黑洞打转，结果使静止极限位于事件视界的上空。

我们不妨畅想，在一个克尔黑洞周围建造一座太空城，并安装一条伸入能层但仍位于事件视界外面的传送带。它可以不断地把城市垃圾带进能层，然后倒入事件视界。垃圾与装载它们的车斗一分开，就好像一个物体碎成了两片。垃圾被黑洞吞食，传送带上的车斗则获得了能量。每倒一次垃圾，传送带就增添一些能量，因而越转越快。在这条传送带上安装一台发电机，就可以为这座城市的居民提供大量的电能（图8）。

史瓦西黑洞和里斯纳-诺兹特隆黑洞都是球对称的，它们的奇点是位于中央的一个点。克尔黑洞则绕着一个轴旋转，它是轴对称的，但在不同的方向上具有并不全同的时空性质。其最重要的结果之一，便是克尔黑洞的奇点变成了一个“奇区”——位于黑洞中央的一个环，故又称“奇环”。它位于黑洞的赤道面内，旋转轴正好通过奇环的中心。一名宇航员只要不是沿着赤道面飞往黑洞的中心，就可以从奇环内穿过而抵达它的另一侧。在那里，引力变成了斥力，黑洞把物质和光线推开。所以人们又称这个时空区域为“负宇宙”或“反引力宇宙”。

存在反引力宇宙，是不带电的旋转黑洞与带电但不旋转的黑洞之间最显著的差异。但另一方面，它们的事件视界却具有非常相似的特征。少量的旋转导致

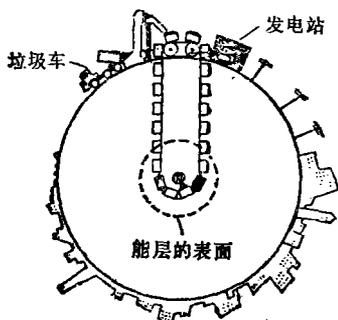


图8 克尔黑洞周围的太空城垃圾倒入能层，传送带从黑洞汲取能量。安装在传送带上的发电机为居民提供大量的电能。

紧挨奇环的地方出现第二个事件视界(图9a)，更快的旋转则使外事件视界收缩、内事件视界扩大(图9b)。当黑洞转得非常快时，内、外视界就会相遇(图9c)。但如果转得比这更快，那么一切视界都将消失，而仅留下一个裸奇环(图9d)。

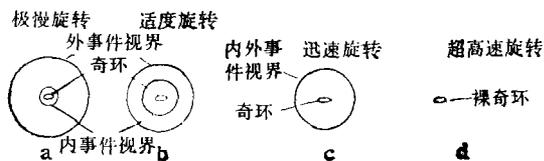


图9 克尔黑洞的结构

更深入的解剖——兼结束语

本世纪六、七十年代之交，人们终于查明，黑洞的质量、电荷、角动量乃是远方的观察者所能观测到的仅有的三个物理量，它们对黑洞作了完整的描述。这就是著名的“黑洞无毛定理”（图10），“无毛”的寓意是指黑洞没有任何复杂繁琐的细节。

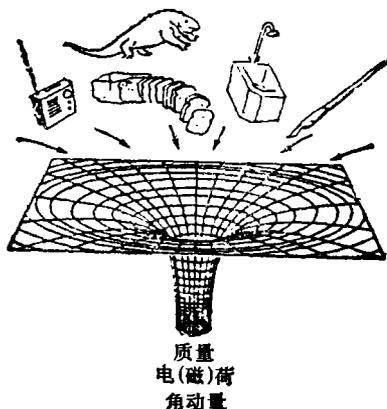


图10 掉入黑洞的所有信息都失去了，唯有质量、电荷(或磁荷)、角动量没有被“吃掉”。这就叫做“黑洞无毛定理”。

由“黑洞无毛”可知，最复杂的黑洞当推既旋转又带电的那一类。它们又称为克尔-纽曼黑洞，其时空特征直到1965年方始查明。但是，正如里斯纳-诺兹特隆黑洞一样，此类黑洞实际存在的可能性看来微乎其微。

前文所解剖的还都只是“经典黑洞”。当我们使用量子力学这把解剖刀时，黑洞又会呈现出种种更神奇的特征。例如，事件视界以内的粒子可以通过“隧道效应”穿透小黑洞的引力位垒而逃逸出来；这时，黑洞仿佛是在“蒸发”，于是人们就可以为它定义某种温度，黑洞进而也就有了自己的热力学……。

凡此种种，皆大有引人入胜之处。只是我们这堂解剖课，无论如何也该到此结束了。