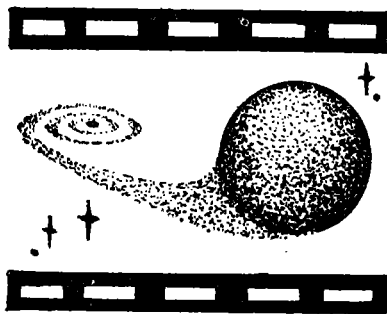


黑洞的吸积过程

卢炬甫



黑洞是由一个被称为视界的闭合边界所规定的时空区域。这个区域内的引力场是如此之强，以至于没有任何物质能从中逃逸，连光也不例外。也就是说，外部观测者不可能获得视界以内的任何信息。这使得黑洞成为宇宙中最神秘的天体。

对于只能研究视界以外的时空结构和物质运动的物理学家来说，黑洞又是一种最简单的物质形态。一个黑洞比一颗恒星、一块方糖或一个氢原子都要简单得多。任何物质一旦进入视界，就不可能再从外部区分它们原来的形状或成份，不可能再知道所进入的是重子、轻子、光子，亦或暗物质。组成黑洞的物质只保留三个物理参量，即质量、角动量和电荷。这就是所谓“黑洞无毛”定理。

实际上，黑洞的电荷又是不重要的。这是因为，电

磁作用比引力作用要强得多，而黑洞的周围也并非真空。一个带电黑洞就会迅速地吸引带异种电荷的物质而排斥同种电荷，从而达到或非常接近于电中性。所以，宇宙中的黑洞基本上只有两种：角动量为零即不转动的黑洞和角动量不为零即转动的黑洞。它们分别叫做 Schwarzschild 黑洞和 Kerr 黑洞（以下分别简称为 S 黑洞和 K 黑洞）。

黑洞的强大引力必然会不断吸引和捕获周围的物质。这个过程叫做吸积。吸积物质可能是星际气体与尘埃，或是近邻恒星的表层物质，或是恒星被黑洞的潮汐力整个地撕裂后的碎片。这些物质在向黑洞坠落的途中会不断地释放引力势能。对于 S 黑洞，释能效率（即物质落入视界之前所释放的引力能与其总质量能量之比）约为 6%；对于 K 黑洞，更高到约 40%。而作

年 4 月，他做了如下的试验：在边长为 1 厘米的红宝石立方体的两个相对的面上镀上银，以氙闪光灯的强光照射，观察到荧光光谱的线宽变窄，荧光寿命发生了变化，这可能是受激辐射在一定程度上的影响造成的。这个实验使梅曼大受鼓舞。他对红宝石样品和光学谐振腔做了进一步改善：把长约 1.9 厘米，半径为 0.95 厘米的红宝石圆柱体两端面磨平镀上银，置于螺旋形氙闪光灯中心，逐步增强闪光强度，发现荧光增强，谱线宽度变窄，方向性得到改善，梅曼相信他得到了激光振荡（图 3），这已是 1960 年夏天的事了，梅曼借记者招待会公布他的实验结果，这便是纽约时报上最初的

那篇报道的由来。

在梅曼首次成功以后不久，其他人也试制成功几种固体激光器，它们都与梅曼的相类似。人们翘首以待的气体激光器也在这一年年底宣告成功，12 月中旬，贾万等人利用放电在氩氛混合气体中得到了波长为 $1.15\mu\text{m}$ 的激光振荡，这是第一台能连续运转的气体激光器。

1960 年是不平凡的一年，现代科学技术的一个宠儿——激光器经过半个世纪的孕育，终于在这一年诞生了。这以后，各种激光器不断出现，其性能不断完善，应用越来越广泛，对现代科学技术的发展发生越来越深刻的影响。

“意外”事件的发生使激光器的发明走过了颇为曲折的道路。在科技史上重大的发现或发明大多不是一帆风顺的，这是因为科学发现和技术发明是一个探索性的认识过程，这个认识过程是曲折复杂的，不可能完全遵循一条预定的路程达到预期的目的，它既有目的性，又有意外性，而这种意外性有时恰恰给出了机遇，提供了重要的线索，导致了新发现、新发明乃至重大突破。此外，我们还可以从激光器的“意外发明”得到有益的启示：守株待兔的懒汉决不能得到这种机遇，只有锲而不舍的人才能获得它。

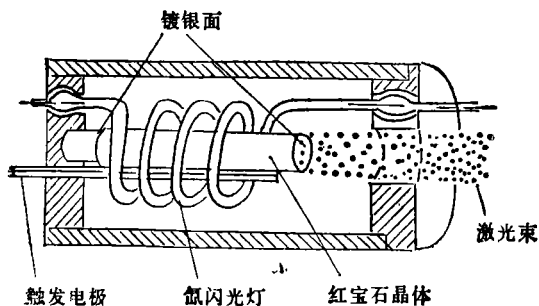


图 3 第一台红宝石激光器

为普通恒星能源机制的热核反应的释能效率只有0.7%。所以，黑洞吸积是一种非常有效的释能机制。

这一认识在天体物理上有着极为重要的意义。60年代天文学一系列划时代的发现中，包括类星体和X射线双星这两类高能天体。前者很可能是遥远星系的异常活动的核心部分(称为活动星系核)，其直径只有银河系这样的普通星系的十万分之一，而光度却比普通星系(即其中所有恒星辐射的总和)强上千倍。后者是质量与普通恒星相当的天体，但其X射线光度就比太阳的总辐射光度高四、五个量级。正是由于这些天体能源问题上的巨大挑战，使得对吸积过程的研究成为当代天体物理一个异常活跃的前沿领域。

迄今这个领域中的研究，主要注重于吸积物质产生的辐射。这里的基本问题是找到一种将引力能转变为辐射的机制。一般说来，吸积物质会具有不可忽略的角动量(对于活动星系核，这可能是由于星系的自转;对于X射线双星，吸积星是X射线源，吸积物质来自伴星，两颗星相互绕转)，因而不大可能是沿径向直接下落，即呈球对称吸积，而更可能是沿螺旋形轨道边旋转边下落，形成一个扁平的盘状物，这就是吸积盘。吸积物质一般是流体。盘中各个相邻环之间转动角速度的差异就会导致切向摩擦，亦即粘滞。很可能正是这种粘滞作用不断地将引力能转化为热能，再以辐射形式散发出去(有关吸积盘的通俗介绍，请见拙文“天体物理中的吸积盘”，《科学》第41卷第3期)。

对于黑洞物理学家来说，研究吸积过程和吸积盘的意义更在于，这是迄今唯一可行的探测黑洞存在的途径。从观测的角度，黑洞只能从外部来研究，只能通过其周围物质的行为来追溯。对于活动星系核，虽然现有观测手段还不足以直接分辨其中的吸积盘，但综合所有观测事实，黑洞吸积是最好的、无与抗衡的物理模型。那里的黑洞，很可能是质量为太阳 10^4 — 10^{10} 倍巨型黑洞。对于恒星级黑洞，由于X射线双星都在银河系内或邻近星系中，观测证认似乎比较容易。事实上并不尽然。这里的困难在于如何判别X射线源究竟是黑洞还是中子星。中子星周围引力场强度与黑洞不相上下。被中子星吸积的物质也能发出强X射线。然而，在理论上，这两种天体是有明确区别的。例如，中子星的质量有一个上限，约为三倍太阳质量，而黑洞质量没有上限。又如，中子星有一个固体表面，吸积物质会撞击并最终停留在该表面上，而黑洞的吸积物质则是穿过视界而隐没。这一区别很可能造成二者X射线辐射精细特征的诸多差异。再有，中子星常有很强的偶极磁场。吸积物质(等离子体)会被迫沿磁力线偏转，落向两个磁极，于是吸积盘结构被破坏。而这是对黑洞所不会发生的情况。但是，运用这种种区别所证认的恒星级黑洞，目前比较可靠的总共还只有三、四个。这使黑洞物理学家感到仍然任重道远(有关黑洞

观测证认的状况，请见拙文“黑洞：上下求索”，《科学》第44卷第4期)。

无论是着眼于解答高能天体的能源问题，还是致力于研究吸积盘的辐射(人类获得的天体信息绝大部分是通过电磁辐射)，亦或是醉心于寻找黑洞，在所有这些的背后，似乎都有一个更基本也许又更带学究气的问题，就是吸积流体的运动形式。在一定的程度上，这个问题是可以回避的。比如说，仅由能量守恒，就可以由释放的引力能来得出吸积盘的总光度，并不需要涉及盘中流体运动的细节。但当问题深入到辐射的精细特征时，吸积流运动的精确知识就有决定性的意义了。

支配吸积流运动的基本方程是广义相对论的流体力学方程。1972年，Michell将Bondi于1952年发表的球对称吸积的牛顿理论推广到广义相对论，得出了S黑洞吸积流运动的第一个精确解，即球对称解。但是，实际的吸积流往往是有角动量的，其运动也就不应是球对称而更可能是轴对称的，即取盘吸积的模式。本文作者在1985—1988年的几篇论文中，得到了S黑洞吸积流运动的第二个解，即有角动量流体的轴对称解。其大意于下。吸积流在远离黑洞处的径向速度是亚声速的，而以光速穿过视界。因而必定存在声速点，即由亚声速转变为超声速的位置。对于一定的角动量，最多可能有两个形式上的声速点，其中一个是非物理的即不可实现的。另外两个物理上可能的声速点分别对应着两个不同的吸积率(即单位时间被黑洞吸积的物质质量)，而得以实现的声速点又只能是其中一个，且总是对应较小吸积率的那一个。也就是说，吸积流角动量一定时，其运动解总是唯一的。这被国外学者称之为“唯一性定理”。当吸积流角动量变化时，会导致声速点的跳跃，从而造成吸积率的变化亦即辐射光度的变化(光度取决于吸积率)。这可能是一种黑洞特有的光变机制。

同时，作者还探讨了更繁难一些的K黑洞吸积流运动，也得到了一个解。有趣的是，对于正转吸积流(即与黑洞自转方向相同，这正是天体物理中实际最可能的情况)，当黑洞自转角动量足够大时，S黑洞具有的双声速点现象不再出现。离黑洞较近的那个声速点总不能实现，吸积流运动总在较远处就变成超声速。不转或慢转黑洞所有的那种光变机制不存在于快转黑洞的情况。这有可能提供一种从观测上区分S黑洞与K黑洞的途径(迄今无法从观测上区分这两种黑洞)。

总的说来，作者这些工作只是点滴的、初步的。还有许多问题需要深入探讨。这些理论结果如何付诸观测验证，还悬而未决。希望有更多的有志青年共同努力，揭开包括黑洞之谜在内的一个个宇宙之谜。