

相对论天体物理

袁业飞

(中国科学技术大学天文学系 230026)

广义相对论在弱场条件下,例如在地面实验室和太阳系中得到很好的验证,但还缺乏强引力场条件下的检验。广义相对论在强场下的检验,以及引力波的探测必须在包含中子星和黑洞这样致密天体的系统中进行,这是相对论天体物理最重要的研究课题。从天文学的角度来说,相对论天体物理的研究意义在于:黑洞或中子星吸积气体释放引力能是绝大多数高能天体源或现象,例如,X射线双星、活动星系核和伽玛射线暴等的能源;现代天文研究还发现,每个星系中心都有一个超大质量黑洞,甚至是双超大质量黑洞。黑洞吸积周围的气体释放的能量,通过反馈决定了星系核球的质量,即所谓的星系、活动星系核和大质量黑洞是共同演化的。因此,如何搜寻黑洞、中子星,以及极端致密的双星系统(重要的引力波源)是当今天文学与物理学研究中的重大基本问题。天体物理黑洞本身不发光,但是黑洞视界附近的气体和恒星(包括脉冲星)可以作为研究黑洞视界附近强引力场的探针。在本文中,我将简要介绍脉冲星、黑洞X射线双星和类星体、伽玛暴以及黑洞的探测和黑洞的基本参数测量,最后简单介绍引力透镜的基本原理和观测。

某天体引力场的强弱可以用如下的致密参数 ϵ 表征, ϵ 值越小,该天体的引力场越弱,当 ϵ 接近1表示引力场为强场。致密参数的定义为引力场中检验粒子的引力能与它静止质量对应的能量之比:

$$\epsilon = \frac{GMm/R}{mc^2} = \frac{GM/c^2}{R} \equiv \frac{R_g}{R},$$

其中 M 和 R 分别为天体的质量和半径, m 为检验粒子的静止质量, $R_g=GM/c^2$ 为星体的引力半径。对地球和太阳来说,它们的致密参数分别为 $\epsilon \sim 7 \times 10^{-10} \sim 2 \times 10^{-6}$,可以看出太阳系的引力场比较弱。中子星的典型质量约为1.4倍太阳质量,半径约为15千米,

它的致密参数为 $\epsilon \sim 0.1$ 。对黑洞来说,致密参数约为 $\epsilon \sim 1$,因此中子星表面和黑洞视界附近的引力场非常强。

1. 中子星和脉冲星

早在1932年,在查德威克发现中子之后不久,朗道就提出了中子星的概念。中子星是通过中子的费米简并压与自身引力相抗衡的处于流体静力学平衡的相对论性天体。类似于白矮星,中子星存在约为3.2倍太阳质量的最大质量—奥本海默极限。1934年,天文学家就猜测中子星诞生于超新星爆发,是大质量恒星死亡之后留下来的遗迹。早期对中子星热辐射的研究表明,中子星在观测上可能表现为半径约为10千米、中心波长在软X射线波段的热辐射源。富有戏剧性的是中子星却在1967年意外地以射电脉冲星的形式被发现了。随后大量的射电脉冲星被发现,中子星的概念才被普遍接受。典型脉冲星的表面磁场高达 10^{12} 高斯,自转在几毫秒到几秒之间。转动的磁场产生电场,电场加速脉冲星磁层中的带电粒子到相对论性速度,

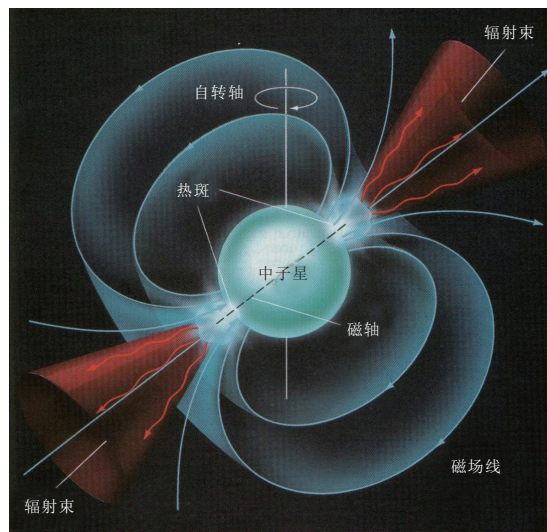


图1 射电脉冲星辐射的灯塔模型

相对论性带电粒子在磁场中辐射方向性很好的电磁波束。随着中子星的转动，辐射束可能周期性地扫过地球——类似于灯塔（如图 1），在观测上表现为脉冲星。射电脉冲星，以及后来发现的伽玛射线脉冲星都是孤立的中子星，它们的能源来自中子星的转动能，即所谓的转动供能的中子星。第二类中子星品种是磁星，磁星的磁场高达 10^{15} 高斯，但自转较慢，典型的周期为十几秒，它的转动能要远远低于它的磁能。处于宁静态的磁星在观测上表现为反常 X 射线脉冲星，爆发时，在观测上表现为软伽玛射线重复爆。无论是宁静态还是爆发态，磁星的能源主要来自磁场衰减释放的磁能。第三类品种是吸积供能的 X 射线脉冲星，首先它存在于双星系统中，伴星一般是一颗普通的恒星。中子星吸积伴星的气体，释放引力能，发射 X 射线热辐射，脉冲的周期性变化是由于双星相互掩食产生的。

脉冲星是宇宙中最精确的时钟，其信号周期的精确度能够超过原子钟，因此，轨道致密的脉冲星双星系统是理想的强引力场检验的实验室。脉冲星的伴星可以是另一颗中子星、白矮星、甚至黑洞。例如，脉冲星双星 PSR J0348+0432 由一颗质量约为 2 倍太阳质量的中子星和 0.17 倍太阳质量的白矮星组成，它们的轨道周期约为 2.46 小时。高的脉冲星质量和致密的轨道使得该系统可用于在强场条件下检验广义相对论。到目前为止，观测到的轨道衰减与广义相对论的理论预言完全吻合。另外，超新星爆发和致密双星的

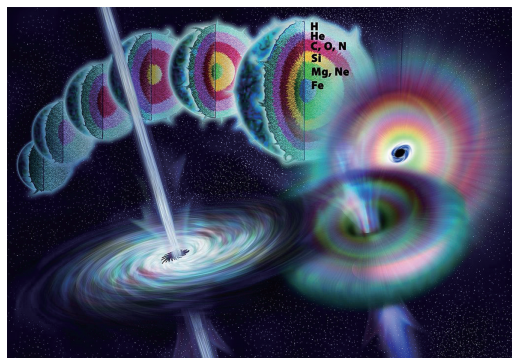


图 2 伽玛暴长暴的示意图。大质量恒星内部不断发生热核反应，使得轻元素不断合成重元素。当热核反应停止之后，气体压和辐射压不足以抵抗引力，恒星快速塌缩形成一个黑洞。在塌缩过程中，释放引力能和黑洞的转动能，沿着黑洞的自转轴形成伽玛暴

并合等剧烈爆发事件是重要的引力波波源（详见本刊 2015 年第 5 期（第 40 页）文章《引力波探测和引力波天文学》）。

2. 伽玛射线暴

伽玛暴是宇宙中短时标的伽玛射线波段的爆发现象，它的持续时间从几秒到十几秒之间，最长的可达千秒的量级（如图 2）。伽玛暴最早于 20 世纪 60 年代被美国发射的用于监测地面核爆炸试验的伽玛射线卫星探测到。由于伽玛射线卫星的空间定位精度很差，难以精确测定伽玛暴的空间方位和距离，阻碍了对伽玛暴本质的认识。1997 年意大利-荷兰的卫星 BeppoSAX 发现伽玛暴在爆发几个小时之后仍有 X 射线余辉辐射，大大提高了伽玛暴的定位精度，随后地面光学和射电望远镜跟踪观测发现了伽玛暴的光学余辉和射电余辉，对伽玛暴进行了精确定位，找到了它的寄主星系，确定伽玛暴处于宇宙学距离。伽玛暴爆发总能量与超新星爆发的总能量相仿，是宇宙中剧烈的爆发现象。伽玛暴的火球-激波模型成功地解释了伽玛暴余辉的辐射。在该模型中，先产生一个温度极高的火球，它以极端相对论的速度向外膨胀，当后面较快的物质追赶上前面较慢的物质之后发生碰撞，产生相对论的内激波，激波加热电子到相对论情形，相对论电子在磁场中运动，产生同步、逆康普顿辐射，这就是伽玛射线暴。相对论性物质继续像滚雪球一样扫过星际介质，产生外激波，外激波加速星际介质中的电子，相继产生 X 射线、光学、射电等波段的辐射，即余辉辐射。虽然火球-激波模型在解释余辉的观测方面很成功，但到目前为止，还不清楚伽玛暴的火球是怎么产生的。

比较流行的看法是，持续时间长于 2 秒的伽玛暴（长暴）起源于大质量恒星演化的晚期。恒星死亡之后先在核区形成一个快速转动的黑洞，黑洞吸积回落的物质释放引力能以及黑洞的转动能，从而形成火球。持续时间短于 2 秒的伽玛暴（短暴）起源于双中子星的并合，并合之后也是先形成一个恒星级质量的黑洞，黑洞吸积残余物质，释放引力能、磁能甚至黑洞的转动能，从而形成火球。无论是长暴还是短暴，在爆发和并合过程中，都会产生强大

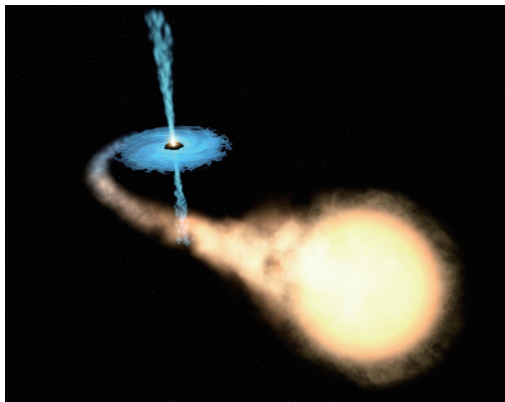


图3 黑洞 X 射线双星示意图。恒星级黑洞从其伴星吸积气体，释放引力能，最终转化为电磁辐射。垂直于吸积盘的两个带状结构是来自黑洞的双边喷流，喷流中非热化的相对论电子主要辐射射电辐射

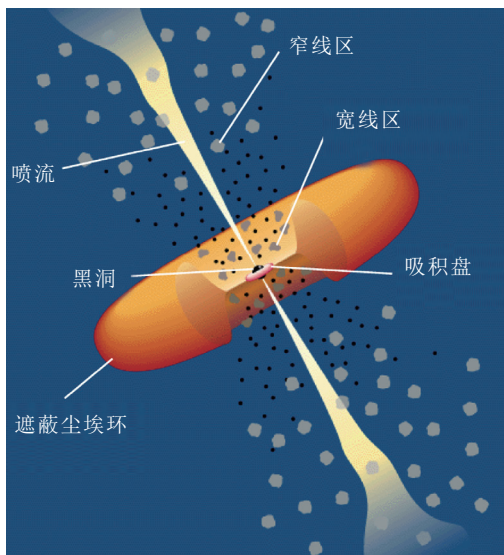


图4 活动星系核示意图。核区是超大质量黑洞和围绕黑洞旋转的吸积盘，黑洞吸积释能是活动星系核的能量来源。黑色小圆点为宽发射线的云团，谱线宽度达到每秒数千千米。较远处的灰色大圆点为窄发射线云团。垂直于吸积盘的两个带状结构是来自黑洞的双边喷流，经常在射电波段和伽玛波段被观测到

的引力波辐射，是地面高频引力波天文台（如 LIGO：美国的激光干涉引力波天文台）的主要观测对象。

3. 黑洞 X 射线双星、类星体

根据广义相对论，黑洞最基本的特性是它具有视界。一旦物质落入黑洞视界，最终落入其奇点。在宇宙中，到哪儿去发现黑洞呢？如何确认我们发现的黑洞候选者是真的黑洞呢？简单地说，恒星级黑洞一

般存在于银河系内的 X 射线双星中，超大质量黑洞（ $10^6 \sim 10^{10}$ 倍太阳质量）存在于类星体或星系的中心。而中等质量黑洞是否存在，存在哪儿还不确定，一种观点认为紧邻星系中发现的极亮 X 射线源的中心存在一个中等质量的黑洞。

根据恒星演化的理论，恒星级质量的黑洞是大质量恒星（大于约 8 倍太阳质量）演化的晚期发生超新星爆炸之后的产物。如果黑洞处于双星系统中，它会从其伴星中吸积气体，释放引力能而发射 X 射线辐射。因此，我们可以去银河系中的 X 射线双星系统中探测黑洞。由于中子星存在质量上限，在 X 射线双星中，如果通过双星的轨道运动测量到双星系统中的暗星体的质量大于中子星的质量上限（3.2 倍太阳质量），我们就可以认定它们是黑洞候选体。通过质量判据发现的第一个恒星级黑洞候选体是天鹅座 X-1。到目前为止，我们已经确认了二十多个黑洞双星系统，大约四五十个黑洞双星候选体。黑洞与其他致密天体最大区别是它不存在硬表面，物质和辐射落入黑洞之后就不会再辐射出来，因此，对于相同轨道周期的 X 射线双星系统（表征相同的吸积率），黑洞候选体双星系统的辐射光度要系统性低于中子星双星系统的辐射光度，间接证明了黑洞视界的存在。质量大于中子星质量上限并不能完全说明黑洞候选体存在视界。理论上还存在质量大于中子星质量上限的其他致密天体，例如玻色星。不过研究表明，在包含黑洞候选体的 X 射线双星系统中，如果黑洞候选体是玻色星等不存在视界的致密天体，随着吸积气体的堆积，在强引力场中会发生热核爆发，而轻易地被我们观测到，但我们在这类系统中并没有发现此类 X 射线爆发，进而进一步确认了黑洞候选体存在视界。

类星体是 20 世纪 60 年代天文学的四大发现之一。类星体典型的观测特征是：在光学上是类恒星状天体；光谱中有较强的发射线；巨大的本征光度（因为在宇宙学距离上）；明显的短时标光变（说明辐射区域小）；强烈的 X 射线辐射（强引力场）；部分类星体存在明显的喷流；非常宽的辐射能谱（从射线、红外、光学、紫外、X 射线到伽玛射线）。现在已经基本确认，类星体的能源来自活动星系中心高达 10 亿倍太阳质量

的超大质量黑洞吸积气体所释放的引力能。另外，观测和理论都表明，星系中心存在大质量的黑洞，星系核球的恒星质量与星系中心超大黑洞的质量存在很好的相关性，揭示出超大黑洞在星系中心普遍存在，大质量黑洞与活动星系核和星系是共同演化的。因此，我们可以去星系中心搜寻超大质量黑洞。有趣的是，通过恒星动力学方法，已成功测量出银河系中心黑洞的质量约为四百万倍太阳质量。通过射电甚长基线干涉测量，进一步确认银河系中心的暗天体的质量集中在十几倍的引力半径之内，基本排除了其他非黑洞模型的可能性。

4. 黑洞基本参数测量

天体物理的研究表明，黑洞本身不发光，但是黑洞视界附近的气体和恒星（包括脉冲星）可以作为研究黑洞视界附近强引力场的探针。中子星表面或黑洞视界附近的强引力场非常强，引力势阱非常深，带有一定初始角动量的气体或物质落入中子星表面或黑洞视界附近形成吸积盘，释放引力能并加热气体，产生 X 射线（恒星级黑洞吸积）或光学 - 紫外（超大质量黑洞吸积）连续谱辐射。引力能也可能通过磁能释放，加热吸积盘上更高温度的冕。来自吸积盘冕区的硬的、非热幂律辐射照射到相对较低的冷物质吸积流，产生具有一定偏振度的反射成分和含有丰富的原子荧光发射线谱，特别是 6.4 keV 附近的 Fe K α 线。另外，吸积盘冕中的硬 X 射线如果发生光变，将进一步导致反射辐射和发射线谱的光变。由于来自黑洞或中子星吸积盘的连续谱辐射，吸积盘或冕辐射的光变以及发射

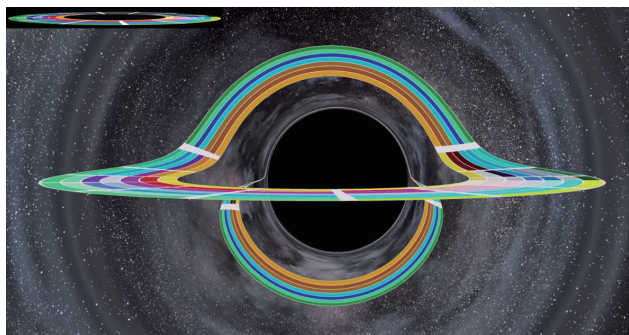


图 5 黑洞视界附近吸积盘的形态。左上角小图显示的是吸积盘在平直时空中的图像。图中明显显示了强引力场中的引力透镜效应（Oliver 等，2015）

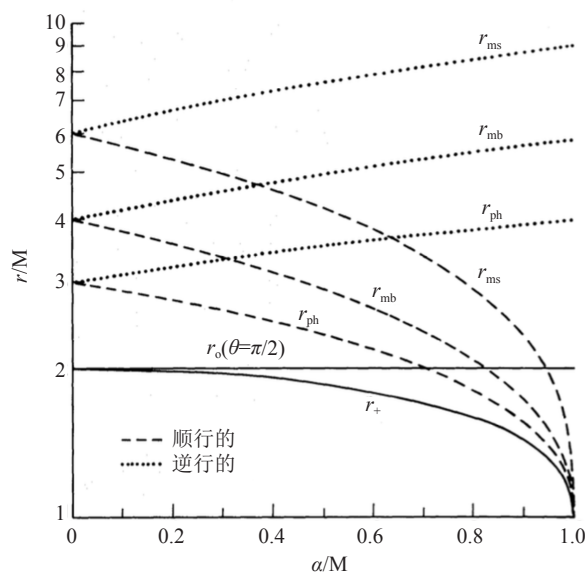


图 6 黑洞周围各种特征轨道半径与黑洞自旋的关系。其中 r_{ms} 为黑洞的最后稳定圆轨道半径，一般认为那是黑洞吸积流的内半径（Bardeen et al. 1972）

线谱都来自致密星吸积盘的内区，包含辐射区的几何、吸积流速度场和强引力场的信息，是探测强引力场中物理过程的主要探针。

黑洞只有三个基本的参数：质量、角动量和电荷。天体物理黑洞一般不带电。黑洞质量的测量相对比较容易，在弱引力场下就可以进行，也就是说利用牛顿力学就可以测量黑洞的质量。例如，我们可以通过测量围绕银河系中心运行的恒星的轨道，得到银心黑洞的质量。而黑洞自旋（单位质量角动量）的测量极其困难！原因在于，自旋是一种纯广义相对论效应，没有经典力学对应。在广义相对论中，星体的转动能与质量等价，必然影响时空的弯曲。另外，自旋效应是短程的，只有在黑洞视界附近才显著。

对于恒星级黑洞，它们距离地球大多约有几千光年，而吸积盘的内区只有几十千米，而且它的辐射主要在 X 射线能段，目前以及将来很长一段时间 X 射线望远镜还无法分辨吸积流的内区。对于超大质量黑洞，它们大多位于宇宙学距离上，目前的观测手段依然无法分辨黑洞吸积盘尺度。幸运的是，银河系中心黑洞的视界在天空上的张角约为 20 微角秒，是最大的一个。与银河系近邻的星系 M87 中心的黑洞视界在天空的张

角约为银心黑洞的一半。甚长基线干涉射电望远镜阵的分辨率已接近或即将达到吸积盘内部区域。原则上可以通过将理论上得到的银河系中心黑洞吸积流射线图像的大小和形状与观测比较,得到黑洞自旋的大小以及黑洞吸积流的动力学和辐射信息。

黑洞吸积流的辐射主要来自黑洞视界附近,对黑洞的自旋很敏感,1997 年张双南提出了基于吸积盘的连续谱的理论模型,拟合观测到的 X 射线连续谱测量恒星级黑洞自旋的方法。该方法目前是一种相对比较成熟的方法,这主要得益于如下两个事实:第一,恒星级黑洞吸积盘的热辐射占主导;第二,恒星级黑洞质量和吸积盘的倾角可以通过双星的轨道运动以及喷流的张角精确测量。需要指出的是,随着黑洞吸积率的提高,吸积盘上气体的径向运动速度增加,吸积盘的厚度也增加,导致吸积盘的自遮蔽效应会显著影响吸积盘的连续谱。因此,选择低光度时(对应黑洞吸积率较低的情况)的状态来测量黑洞的自旋才是比较可靠的。到目前为止,利用此方法已经给出了大约十几个黑洞双星的黑洞自旋参数的估计。连续谱拟合法测量黑洞自旋对活动星系核并不有效。原因是吸积盘内区的温度随黑洞质量增加而减少,来自吸积盘的 X 射线辐射并不占主导,活动星系核中普遍存在的显著

的软 X 射线超辐射成分会严重改变黑体辐射的谱型甚至淹没该辐射成分。另外,来自超大质量黑洞吸积盘的热辐射的峰值在紫外波段,缺乏观测数据。还有就是超大质量黑洞的质量测量精度不高。因此,这一方法只可能在极少数的特殊的吸积盘热辐射主导的 AGN 中得到可能的应用。

同样适用于恒星级黑洞和超大质量黑洞系统的自旋测量方法是所谓的相对论宽铁线的谱线轮廓拟合法。铁 K_{α} 荧光辐射线来自吸积盘的内区,内区吸积流的运动速度接近光速,因此,吸积流作轨道运动导致的多普勒效应、相对论性运动的集束 (beaming) 效应、强引力场中的引力红移效应与引力透镜效应,以及黑洞自旋导致的时空拖曳效应最终导致相对论性的铁 K_{α} 谱线的典型轮廓为不对称性的双峰结构,加上一个红端的长翅。假设吸积盘的内区为黑洞最内稳定圆轨道,因此,黑洞自旋越大,谱线的轮廓展得越宽,红翅拉得越长。目前相对论性的宽铁线只在少数的活动星系核和黑洞 X 射线双星中观测到,提供了黑洞存在的间接但却有力的观测证据。同样,吸积盘的 X 射线反射谱也强烈依赖于黑洞的自旋。因此,原则上通过拟合观测所得的宽铁线轮廓及 X 射线反射成分可以测量黑洞的自旋。到目前为止,此方法已经成功应用

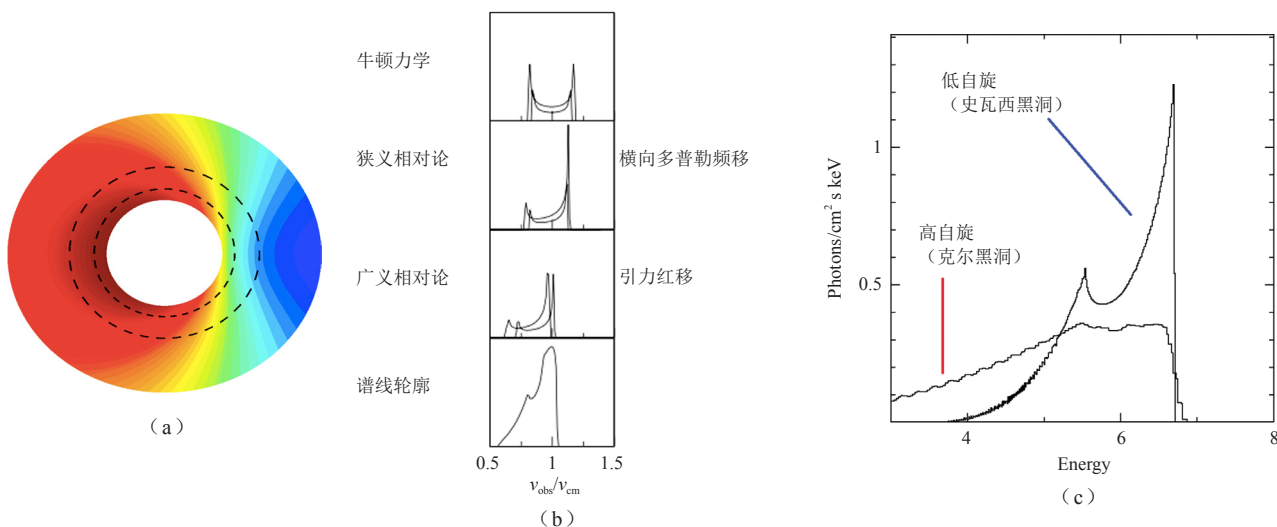


图 7 (a) 相对论吸积盘的铁线强度分布的理论图像,不同颜色代表谱线频率的变化。(b) 相对论性宽发射线的产生机理:牛顿力学中的多普勒效应,狭义相对论中的集束效应和广义相对论中的引力红移效应等 (Fabian et al., 2000)。(c) 宽发射线轮廓与黑洞自旋的关系

于 10 多个黑洞 X 射线双星和少量的活动星系核中。

除了连续谱观测和谱线轮廓的观测，吸积盘辐射的时变观测也是测量黑洞 X 射线双星中黑洞质量和自旋的有效方法。利用时变研究分析发现，黑洞 X 射线双星中存在频率值大约在 150~450 Hz 之间的高频准周期振荡 (QPO)，准周期是两个物理频率之间的拍频，其中一个为吸积流的开普勒转动速度，另一个频率如果与黑洞的自旋有关的话，准周期振动将是测量黑洞自转非常有效和最为精确的方法。当然，此方法的最大不确定性在于模型，现在还不非常确定其中一个频率是否是黑洞自转导致的进动频率，不过，观测似乎表明，QPO 值不随光度的变化而变化，应该只依赖于黑洞的质量和自旋。在中子星系统中，人们也发现了高频 QPO 现象，准周期如果与中子星的自转和开普勒角速度有关的话，QPO 提供了一种测量中子星质量的方法，对中子星内部致密核物质的状态方程提供了一种限制。

来自黑洞吸积流的 X 射线辐射应该是有偏振的。偏振辐射来自两个方面，一是来自冕的反射成分（包括线辐射），二是来自吸积流本身的辐射，这主要是由于吸积流具有有限的厚度，来自盘上的热辐射在吸积盘的大气中被自由电子散射，从而产生约 5% 左右的偏振度。偏振信息将提供区别于光谱和时变信息之外的独立参数空间，从而可以更加精确地限制黑洞系统。吸积盘的偏振性质会受到相对论效应的强烈影响，尤其是越靠近黑洞的辐射，偏振性质（包括偏振度和偏振角）影响越大。对于热谱而言，能量越高的光子，通常是产生于越接近于黑洞的区域，由于相对论效应越强，所以高能光子的偏振效应更为显著。我们可以通过拟合偏振度和偏振角随能量的变化曲线，从而得到中心黑洞的自旋。此方法的优势在于它同时可以限制吸积盘内区的倾角，从而我们可以推断盘是否倾斜，这是目前其他方法所不能做到的。可惜的是，目前还没有 X 射线偏振的天文观测设备在运行。

来自冕区的硬 X 射线连续谱的光变与反射成分以及荧光辐射线之间的时间延迟 (time lag) —— 反响测量，即反射成分时变的数据和时间分辨的光谱数据将会是检验广义相对论的重要的探针。活动星系核光变

波段的反响测量已非常成熟，通过长期监测活动星系核连续谱和发射线谱的光变，测量出连续谱与来自宽线区云团的宽发射线的时延，可用于测量黑洞的质量。宽线区云团一般位于几千个黑洞引力半径之外，不能用于检验广义相对论。而 X 射线反响观测测量的是硬 X 射线穿越黑洞视界尺度的时间延迟，主要物理过程发生在吸积流的最内区，因此是重要的强引力场的探针。例如，我们可以通过分析该时延，测量强引力场中的 Shapiro 时延。时延测量的优点是，它测量的是绝对的物理尺度，如果与谱线轮廓拟合和时变测量相结合，可以测量黑洞的质量，那么通过谱拟合，可以得到实际的物理尺度，提供致密天体周围时空的直接测量。

5. 引力透镜现象

广义相对论预言光线在引力场中会发生偏折，观测者会看到由于光线弯曲而形成的一个或多个像，类似经典光学中凸透镜成像，这就是引力透镜现象。光线在引力场的偏折现象已在日全食的时候通过观测恒星的光掠过太阳表面发生偏折而被证实。在黑洞视界附近或中子星表面强引力场中的引力透镜现象还没有被观测到。到目前为止，观测到的引力透镜现象都是在弱场情况下发生的，即光线发生偏折的区域要远大于天体的史瓦西半径。根据星像的多少，可以分为强引力透镜、弱引力透镜、微引力透镜等。

强引力透镜是指经过引力透镜之后各个星像之间

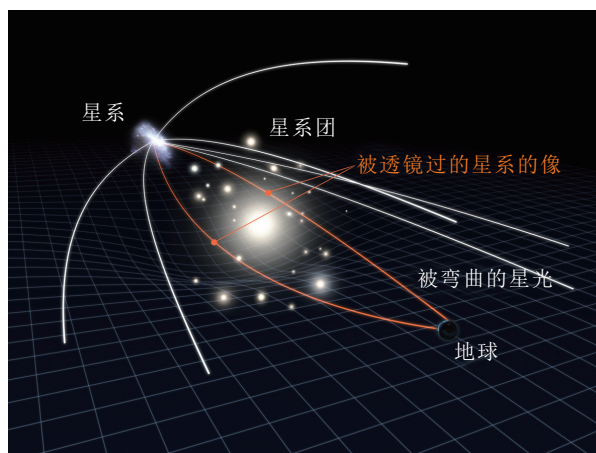


图 8 强引力透镜示意图。观测源为遥远的类星体或星系，透镜天体是光路上的星系团

的角间距大于望远镜的角分辨率，形成双像、多像以及环半弧和弧。典型的强引力透镜现象中光源是遥远的星系或类星体，透镜天体是较近一点的星系团。当源和观测者的连线位于星系团的中心区域或位于星系的核心区域，一般就会发生强引力透镜现象，且强引力透镜的放大率很大，因此较强的增亮效应，强引力透镜是天赐的宇宙望远镜，可用于研究较远、较暗的背景星系。例如，MACSJ1149.6+2223 是红移为 0.544 的一个大质量的星系团（质量约为 2.5×10^{15} 太阳质量），利用该星系团作为透镜天体，并利用当前世界上最强大的两台空间望远镜：哈勃空间望远镜和斯皮策红外空间望远镜，天文学家发现了可能是迄今为止宇宙最遥远星系 MACSJ149 - JD，该星系的红移高达 9.6！诞生于大爆炸后大约 3 亿年，恰好处在宇宙被称为“黑暗时期”的演化阶段，那时的宇宙还处于其婴儿时期。反过来，强引力透镜还用来做星系、星系团的质量测定，目前存在的主要问题是测量结果依赖于星系和星系团质量分布的模型。强引力透镜还可以用来测量哈勃常数，主要原理是两个星像在宇宙尺度上走不同的路径，导致到达地球观测者的时间不一样，可以根据该时间差测量它们的路径差，而该路径差依赖于哈勃常数。

弱引力透镜现象中光线的偏折角比较小，只能观测到像的亮度变亮和形状改变，可观测的天体增多。弱引力透镜系统主要包括星系团（透镜天体）——前景星系（源）、星系——前景星系、宇宙大尺度物质密度场——宇宙中的星系等各种系统。弱引力透镜测量是一种统计测量，可以观测很多个源的弱引力效应，通过统计分析，得到弱透镜天体的性质。例如，通过比较没有弱引力透镜现象时已知的星系的分布，与观测到的被扭曲的星系的分布情况可以得到弱透镜天体的性质，估算出构成它的星系或星系团的质量，这是宇宙学中相当重要的一种天体质量测量方法。再例如宇宙大尺度结构没有确定的位置，探测宇宙引力透镜效应主要通过形变相关函数来限制宇宙密度场的功率谱，进一步结合宇宙微波背景、Ia 型超新星和星系巡天的测量，可用于测量宇宙基本参数。

微引力透镜现象是由前景运动的透镜天体产生的

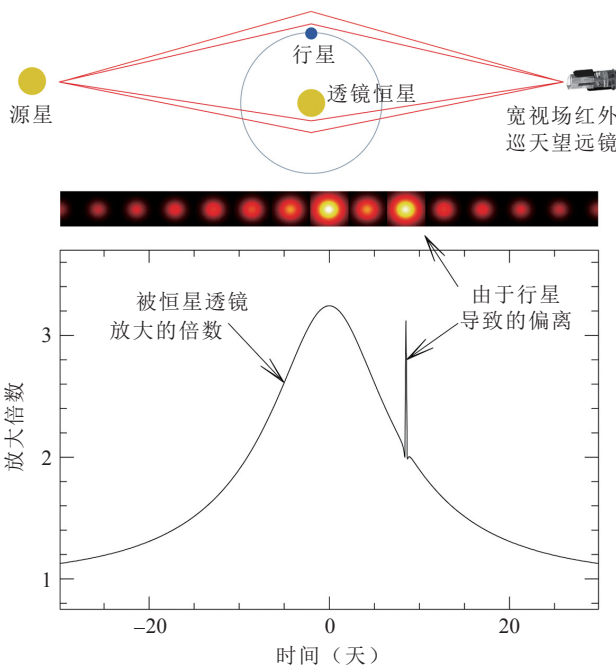


图 9 通过微引力透镜法探测系外行星示意图。纵指标表示背景星的亮度。图形中间的彩条形象地显示了背景星的亮度随时间的变化，其中整体的亮度变化是由于恒星的微引力透镜效应导致的，第二个亮度变化是由于行星的微引力透镜效应导致的亮度变化

透镜现象，透镜天体一般为恒星级质量的小天体，例如恒星—行星系统中的恒星和行星，因此光的偏转非常小，通常通过微引力透镜只能观测到当透镜天体穿过光路过程中导致的光源的瞬间增亮现象。微引力透镜效应最早提出用于探测银河系中不发光的暗天体，原先认为它们可能是暗物质的候选体。利用微引力透镜效应还可以探测太阳系外行星。当太阳系外恒星—行星系统穿过我们监测的背景星与地面望远镜的光路的时候，先是产生恒星的微引力透镜效应，在观测上表现为背景星亮度的增加，当恒星偏离光路，背景星的亮度下降的时候，这时由于围绕恒星公转，行星回到光路上，产生第二次引力透镜效应，与第一次微引力透镜效应相比，第二次对背景星亮度的增加倍数要小一些。通过发现两次一大一小的微引力透镜效应，可以探测到新的太阳系外行星。总之，引力透镜是天体物理中最重要的研究工具和手段之一，在宇宙学暗物质、暗能量、大尺度上的引力和系外行星探测上都发挥着巨大作用。