

作为宇宙信使的X射线

袁为民^{1,2,†}

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(2 中国科学院大学 天文和空间科学学院 北京 100049)

2021-07-23 收到

† email: wmy@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20210803

X-rays as a cosmic messenger

YUAN Wei-Min^{1,2,†}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, School of Astronomy and Space Science, Beijing 100049, China)

摘要 60年前，里卡多·贾科尼团队用探空火箭首次探测到了来自太阳系以外的X射线辐射，从此打开了人类探索宇宙的一个全新的窗口。与我们所熟悉的可见光天空不同，在“看不见”的X射线宇宙，明亮的发光天体涵盖了黑洞、中子星、白矮星等致密天体，星系团和星系中弥漫的大量不可见的高温气体，以及各种剧烈的灾变事件。它们代表着宇宙中最为奇特的天体和极端的物理条件，如极强引力场、极强磁场和极高温。文章重点介绍最有代表性的X射线源，包括中子星和黑洞X射线双星、超大质量黑洞和活动星系核、星系团，以及伽马暴、超新星和潮汐瓦解恒星事件等爆发天体。

关键词

宇宙X射线源，黑洞，中子星，星系团，活动星系核，暂现源，X射线天文学

Abstract Sixty years ago, a team led by Riccardo Giacconi discovered the first cosmic X-ray source outside our solar system, opening a new window to explore the universe. Unlike the visual sky that our eyes are accustomed to, the “invisible” X-ray universe is alien and glows with compact objects such as black holes, neutron stars, white dwarfs, and hot diffuse gases within clusters of galaxies and galaxies, as well as assorted violent catastrophic events. They manifest the most exotic objects in the universe, as well as extreme physical environments such as the strongest gravity and magnetic fields, and the hottest regions. This article focuses on representative X-ray sources, mainly neutron star and black hole X-ray binaries, supermassive black holes and active galactic nuclei, clusters of galaxies, as well as eruptive events such as gamma-ray bursts, supernovae, and tidal disruption events.

Keywords cosmic X-ray sources, black holes, neutron stars, galaxy clusters, active galactic nuclei, transients, X-ray astronomy

1 来自“看不见”的宇宙的信使

1895年德国物理学家威尔海姆·伦琴(Wilhelm Röntgen)发现了以他名字命名的射线，也就是我们熟知的X射线。1901年首个诺贝尔物理学奖授予了伦琴，以表彰他的贡献。随后几十年的实验和理论研究，尤其是量子力学的研究，证实了X射线是一种电磁波或电磁辐射。典型的X射线波长是可见光的万分之一到百分之一量级。电磁辐射是人类观测和研究宇宙所依赖的主要信使。自古以来这一信使只有可见光，直到最近一百年，人类才开始逐渐打开其他波段窗口，包括红外、紫外和射电波段。而X射线窗口则经过了更加漫长的等待。这是由于地球大气的阻挡作用，使外太空的X射线无法到达地面(图1)，当然这对地球生命和人类来说无疑是件幸事。为了接收宇宙的X射线信号，需要将探测器放到几十千米以上的高空大气层，最好是太空的环地球轨道。因此，X射线天文学的诞生和发展必然是在人类有能力征服太空之后才得以实现。也正是基于这一原因，X射线天文学一直是空间科学的一个重要领域。

与射电天文学类似，X射线天文学的起步也是源于二战中发展起来的军事技术。20世纪40年代末，美国海军实验室利用俘获的德国V2火箭搭载的盖革计数器，探测到了来自太阳的X射线辐射。1962年，美国科学与工程公司的里卡多·贾科尼(Riccardo Giacconi)带领的团队利用改进后的探空火箭和盖革计数器，首次发现了太阳系之外的宇宙X射线源，即位于天蝎座(Scorpius)的Sco X-1(图2)^[1, 2]。随后多个团队竞相开展火箭和气球实验，探测到了更多的X射线源。然而，早期对这些源的精确定位和光学对应体证认十分困难。这些奇特的X射线源的本质困扰了天文学家相当长的时间。后来的研究证实，它们主要是银河系内的X射线双星、超新星遗迹，以及银河系外明

亮的活动星系核和星系团，等等。由于开启了X射线这一探索“看不见”的宇宙的新窗口，贾科尼获得了2002年诺贝尔物理学奖。

天体的X射线辐射产生于具有极端物理条件

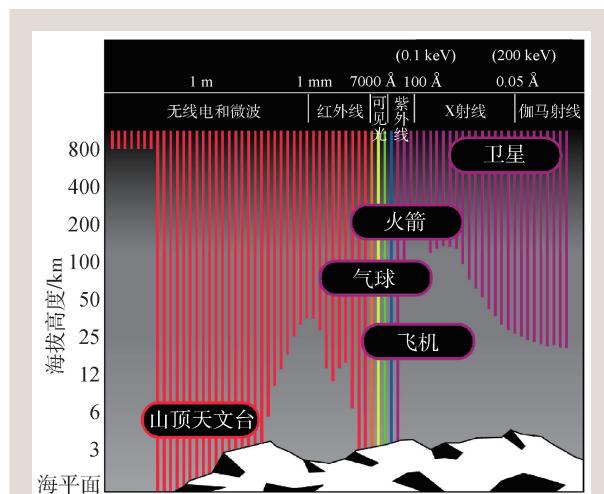


图1 地球大气对电磁波的透过率(图片来源于网络)

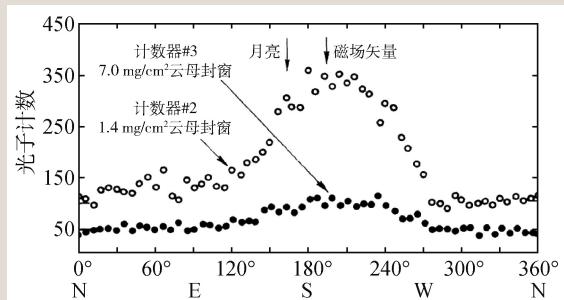


图2 1962年6月发现的首个宇宙X射线源Sco X-1的探测器计数(纵轴)沿扫描方位角方向(横轴)的分布^[2]。计数峰值对应的方向指示辐射来自天蝎座天区



图3 猎户座星空的光学和X射线(ROSAT卫星)图像(来自德国马普物理所)

(极高温, 极强引力场、磁场和激波等)的区域和过程。这些天体和区域往往是在可见光及其他电磁波段所无法看到的(图3)。发出X射线的天体从太阳和太阳系行星、恒星和恒星形成区、致密天体、超新星遗迹、星系和活动星系核、星系群和星系团, 到超新星和伽马暴等高能暂现和爆发天体等等, 涵盖了宇宙中大部分类型的天体^[3, 4]。随着SRG/eROSITA卫星的全天巡天的开展, 目前已发现超过一百万个X射线源, 预期不久将超过几百万个。X射线已成为人类赖以认知宇宙不可或缺的信使。

2 天体的X射线辐射和探测

2.1 天体X射线辐射的产生

与可见光相比, X射线表现出更为显著的粒子性, 辐射的基本量子单元称为光子。X射线光子能量为0.1—200 keV($1 \text{ keV} = 1.6 \times 10^{-9} \text{ erg}$), 为可见光的成百上万倍。如此高能量的光子是由能量更高的电子在速度发生改变的过程中产生的。产生X射线连续谱的微观辐射过程主要包括: 高能电子与其他荷电粒子相互作用产生的韧致辐射, 电子在磁场中运动产生的同步加速辐射, 电子与低能光子碰撞产生的逆康普顿散射^[5, 6]。对于原子序数较高的原子/离子(O、Si、Fe等), 某些电子壳层之间的能级差 ΔE 落入X射线光子能量范围, 由荧光过程或复合过程导致的电子在壳层之间的跃迁会产生特征线辐射, 最为常见的如铁的6.4 keV K α 发射线。

按照电子能谱分布特征, X射线辐射通常分为热和非热两个大类。前者包括处于局域热力学平衡态的稀薄高温等离子体产生的热韧致辐射或对低能光子的逆康普顿散射, 以及光学厚辐射区产生的黑体辐射。辐射能谱在光子能量 $E \sim kT$ ($k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数)以上呈指数衰减式的截断。当电子温度或黑体有效温度足够高($T > 10^6 \text{ K}$), 辐射的峰值将落在X射线

能段。而远离热平衡态的电子能谱分布产生的X射线称为非热辐射。绝大部分非热X射线源的能谱呈现出幂率谱, 这是由于电子能量分布是幂律谱所导致的(注: 某些热辐射在远离截断频率且范围有限的能段里也会近似为幂率谱)。有些天体发出能量很高的硬X射线甚至伽马射线, 表明存在相对论性的高能电子(洛伦兹因子 $\gamma \gg 1$)。

由于X射线光子能量高, 电子的辐射冷却时标很短。因此, 在持续辐射的X射线源中, 必须存在某种能量注入以加速/加热电子, 如电磁场和激波。所以说, X射线揭示了宇宙中温度极高的天体和物质的存在, 或者是大量能量急剧释放的机制, 这些往往都是由某些极端条件下的物理过程引起的。

X射线光子与物质会产生相互作用。在光子能量 $E < 60 \text{ keV}$ 时, 光电效应占主导地位。由于银河系充满了星际介质, 来自天体的几个keV以下的低能光子会被部分或完全吸收。吸收强度取决于光传播路径上的气体柱密度, 在低银纬方向吸收最为严重。在约60 keV以上, 光与物质的作用则被电子的康普顿散射主导。正是这些效应使得宇宙X射线辐射不能穿透地球大气层(1 keV的X射线在空气中的传播距离不到1 cm)。此外, 天体X射线在传播路径上还会受星际尘埃颗粒的散射, 形成晕状结构。

2.2 探测技术和手段

与大多数天文探测不同, X射线的探测一般是以单光子进行的, 可以记录每个光子的到达时间、能量、在探测器上的位置。经过数据处理可以同时获得源的流强及其光变、能谱和方位(二维图像), 也可以通过测量光电子的径迹得到光子的偏振方向。探测技术包括X射线光学系统(望远镜)和探测器^[7, 8]。

X射线不能像可见光和无线电波那样被反射。早期的X射线观测只能通过在探测器前面加准直器, 用以限制视场, 避免其他方向的源的干扰。还可以通过准直器扫描天空或转动视场, 获

得计数率随时间变化的调制信号，从而实现源的粗略定位(如慧眼-HXMT)。对同时需要大视场和点源定位的观测，可采用小孔成像(如MAXI)，或更多地采用编码板(随机分布的很多孔径，如Swift/BAT)，加上大面积的二维位置敏感探测器。随着1978年X射线聚焦成像技术在爱因斯坦天文台上的成功应用，X射线天文学才进入了真正意义上的望远镜观测时代。对于几十keV以下的X射线，可以通过连续两次在光滑曲面上的掠射反射，实现聚焦成像。通常采用的光学系统是旋转抛物面加旋转双曲面(Wolter-I型望远镜)，并使用多层嵌套的共焦镜面以增大光子接收有效面积(图4)。90年代以后的X射线望远镜大部分采用了该技术。由于此类望远镜视场不超过 1° — 2° ，不能用来开展大视场观测。近年来出现的龙虾眼微孔(MPO)聚焦成像技术可以实现大视场的X射线掠入射聚焦成像。

X射线探测器正是利用了光子与物质相互作用的原理。X射线光子在介质中通过电离或散射，将能量传给所产生的光电子或康普顿电子。获得动能的电子在探测器介质中与其他原子碰撞，进一步电离或激发径迹上的原子，产生更多的电子或激发态原子。探测器通过放大并收集所产生的电或可见光信号，实现对入射X光子的记录^[7, 8]。常用的X射线探测器有以下几种主要类型：气体正比计数器、晶体闪烁探测器、微通道板(MCP)探测器、CCD和CMOS探测器、碲锌镉半导体探测器、高能量分辨率的微量能器、X射线偏振探测器等。在CCD前加透射或反射光栅，还可以获得点源的高分辨X射线光谱。

2.3 重要的X射线天文卫星

2.3.1 早期X射线卫星

1970年，NASA发射了首颗X射线天文卫星Uhuru，对X射线天空进行全天巡天普查，开启了X射线观测宇宙的新纪元。Uhuru解开了Sco X-1等天体之谜，并发现了339个X射线源(图5)，

包括位于银河系外的活动星系核和星系团。之后美国和欧洲相继开展了后续空间卫星探测，包括Ariel-V(英国)、ANS(荷兰)、SAS-3、OSO-8和HEAO-1(美国)等，获得了更多关于宇宙X射线源的数据。早期X射线天文卫星多采用准直器加气体正比计数器的技术。

2.3.2 近代的X射线卫星

NASA于1978年发射的爱因斯坦天文台是首颗搭载Wolter-I型聚焦X射线望远镜的卫星，其高空间分辨成像能力和高探测灵敏度引发了X射线天文观测的革命。1980—1990年间国际上发射了几颗各具特色的准直型X射线卫星，包括欧洲空间局(ESA)的EXOSAT和日本的GINGA。德国1990年发射的以伦琴命名的ROSAT卫星(Röntgen Satellite)，首次利用聚焦望远镜完成了深度全天巡天，发现了十几个X射线源。1993年日本发射的ASCA卫星首次成功使用CCD作为

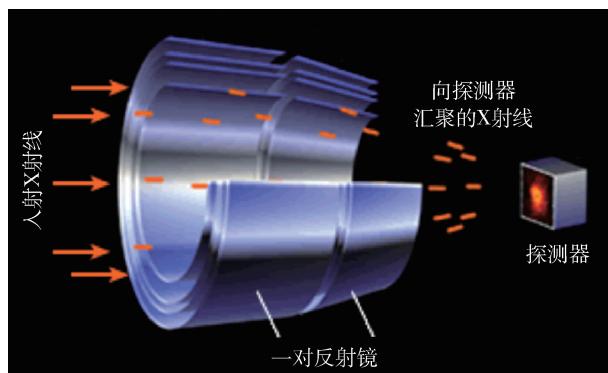


图4 X射线聚焦望远镜成像原理(来自NASA)

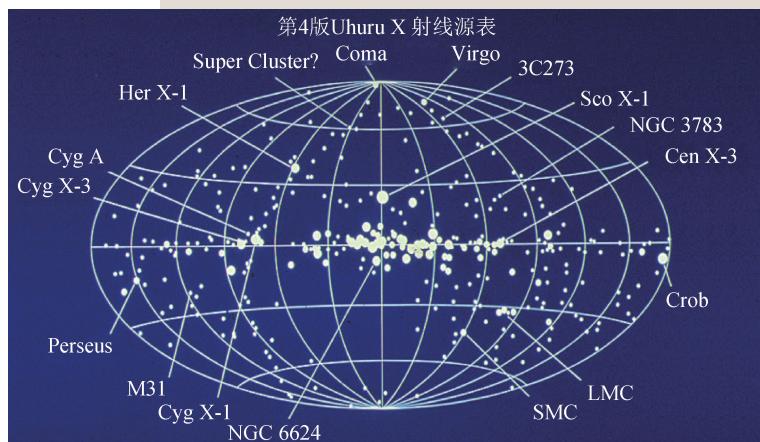


图5 由Uhuru卫星获得的首个全天巡天的339个X射线源的天球分布，大小表示源的亮度(来源NASA)

X射线探测器。意大利—荷兰的BeppoSAX卫星采用宽视场监视器和窄视场望远镜协同观测，首次探测到伽马暴X射线余辉并成功对其精确定位。其他著名的卫星还有RXTE(NASA), Suzaku(JAXA)，以及探测伽马暴X射线的HETE-2(美国)等。

X射线天文学的历程也记载了光荣的失败。例如微量能器高分辨光谱仪，经过几次努力至今尚未成功(最近的一次是JAXA的Hitomi卫星)。

2.3.3 在轨运行的X射线卫星

大型空间天文台Chandra(NASA)(图6)和XMM-Newton(ESA)均采用Wolter-I型聚光望远镜和CCD探测器，并配有高分辨光栅光谱仪。Chandra具有目前最高的成像空间分辨率和弱源探测灵敏度，而XMM-Newton具有最大的光子接收面积，以获取高信噪比X射线光谱和光变数据。美国的NuSTAR首次实现了在硬X射线(10—79 keV以上)能段的聚光成像。大视场时域天文监测设备有伽马暴卫星Swift(NASA)和国际空间站

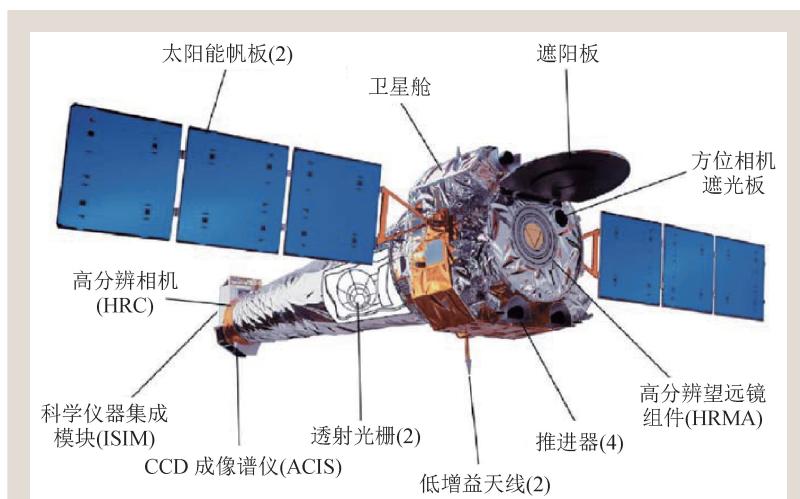


图6 NASA的Chandra X射线天文台(来自NASA)

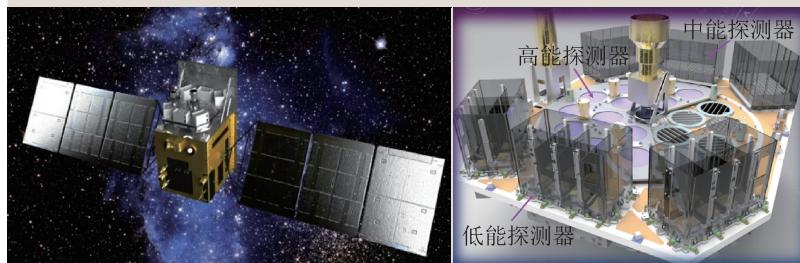


图7 慧眼-HXMT卫星艺术图(左)和科学载荷(右)(来自中科院高能物理研究所)

上搭载的X射线全天监视器MAXI(JAXA)。近年来发射的有多波段天文卫星AstroSAT(印度)，国际空间站搭载的NICER(NASA), SRG/eROSITA(德国/俄罗斯)，后者将ROSAT全天巡天拓展到更高能段和更高灵敏度。我国首颗X射线天文卫星慧眼-HXMT(图7)于2017年发射运行。慧眼采用传统的准直器加探测器，具有X射线能段宽(1—250 keV)和在硬X射线大有效面积的优势。

3 极端宇宙的信使

3.1 致密天体——X射线双星

1960年代，Sco X-1及其他宇宙X射线源的发现提出了令人兴奋而富有挑战的难题。为什么一颗在光学波段极为普通的13等恒星，能发出几万倍于太阳总辐射光度的X射线，且呈现出毫秒级、大幅度的光变？这一问题直到Uhuru卫星上天并观测了另外两个X射线源Her X-1和Cen X-3

之后才有了答案。首先是探测到了几秒周期的精准的X射线脉冲信号，因此辐射是由一颗高速旋转的中子星发出的。此外，光变曲线呈现出周期性的掩食现象，表明中子星处于一个双星系统中，而且是密近双星系统，很可能有物质交流。中子星是理论预言的大质量恒星塌缩后形成的致密天体，主要由处于简并态的中子构成^[9]，其存在被1967年射电脉冲星的发现所证实。

中子星极端致密，1个太阳质量(M_{\odot})的中子星半径约为10 km。从远处被吸积到致密天体(质量M, 半径R)表面的物质将释放巨大的引力势能，单位质量的释能率 $\Delta E = GM/R \approx 10^{20} \text{ erg g}^{-1}$ (G 为引力常数)。假设单位时间内的物质吸积率为 \dot{M} ，转换为辐射的光度 $L = \eta \dot{M} c^2$ (c 为光速)，质能转换效率

为 $\eta = GM/(Rc^2)$ ；用典型中子星的参数， $\eta \approx 0.15$ 。可以看出，吸积的质能转换效率比热核反应 $\eta \approx 0.007$ (氢燃烧为氦) 要高一个量级以上。因此，中子星能产生光度远高于恒星的辐射。如果辐射过于强大，辐射压平衡引力，将使吸积停止；因此，一个稳定的各向同性吸积产能天体存在一个理论上的光度上限，即爱丁顿光度 $L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} = 3.2 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) L_{\odot}$

为太阳光度 $3.85 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$)。可见，一颗中子星 (质量 $1.4 - 2 M_{\odot}$) 通过吸积伴星物质，可以解释包括 Sco X-1 在内的一些亮 X 射线源。致密天体表面附近发生的过程 (自由落体) 的时标 $t_{\text{dyn}} \sim (2R^3/GM)^{1/2} \approx 10^{-4} \text{ s}$ ，可以解释观测到的毫秒级 X 射线光变时标。通过测量 X 射线脉冲到达时间及伴星光学谱线的多普勒移动在轨道周期里的变化，人们进一步证实了其双星本质，并测量了双星轨道参数和中子星质量。

在接下来几十年，X 射线观测在银河系和近邻星系中发现了更多具有双星特性的 X 射线源。它们由一个致密天体和一个正常的恒星构成，称为 X 射线双星。根据恒星性质的不同，X 射线双星分为两大类，高质量 X 射线双星(HMXB) 和低质量 X 射线双星(LMXB)。在物理上对应于从恒星到致密天体的物质转移的两种完全不同的形式。目前的观测已经发现约 500 颗 X 射线双星，主要分布在银河系以及邻近的大小麦哲伦云星系^[10, 11]。对有质量测量的中子星，质量分布在 $1 - 2 M_{\odot}$ 之间，大部分在 $1.4 M_{\odot}$ 附近(本文不涉及致密星为质量更小的白矮星的激变变星系统)。

一部分 X 射线双星中的致密星的质量超过中子星的质量上限 ($3 M_{\odot}$ 左右)，因此只能是黑洞。黑洞视界大小由史瓦西半径表征 ($R_{\text{sch}} = 2GM/c^2$)；理论上质量 $1 M_{\odot}$ 的黑洞， $R_{\text{sch}} = 3 \text{ km}$ 。由于黑洞没有一个真实的物理表面，自身也没有磁场，导致观测性质与中子星系统有显著的不同。由于吸积物质的一部分能量可以被带入黑洞而不被辐射出来，其质能转换效率具有较大的不确定性，一般认为在最内稳定轨道附近， $\eta \sim 0.1$ 左右

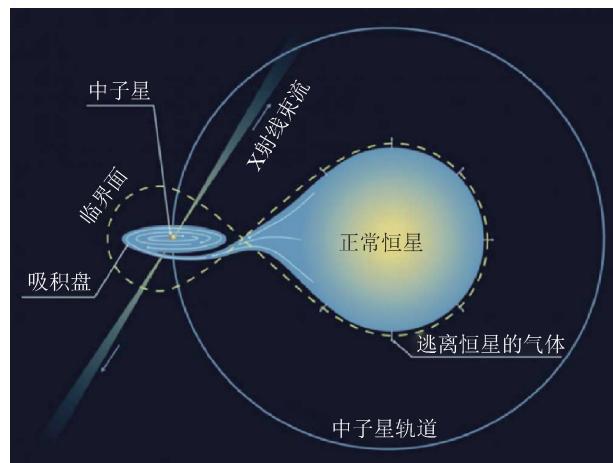


图 8 致密星为中子星的低质量 X 射线双星(来自网络)

(0.06—0.42，对应自旋从低到高)。

3.1.1 中子星 X 射线双星

高质量 X 射线双星的伴星为早型(O、B 型)的大质量恒星 ($> 10 M_{\odot}$)，其强烈的星风为致密天体提供了吸积物质(典型的如 Cen X-1)。HMXB 的中子星通常具有由强磁场构成的磁层，吸积物质到达磁层后被迫沿磁力线运动到达磁场极区，撞击中子星，加热极区附近表面，通过韧致和同步加速机制辐射 X 射线。由于中子星自转，辐射区域扫过观测者，因此观测到周期性的脉冲辐射^[12]。在伴星为 Be 星的一个 HMXB 子类中，人们还观测到间歇性的 X 射线爆发。Be 星星风损失相对 O/B 超巨星较弱，但会在赤道面附近抛射物质形成一个盘；当致密天体穿过盘时，会吸积物质，产生 X 射线耀发^[13]。

低质量 X 射线双星的伴星为经过演化的低质量恒星(一般小于 $1 M_{\odot}$)，其物质充满洛希瓣并经过内拉格朗日点流向致密星(典型的如 Sco X-1)。由于吸积物质具有角动量，会在致密星周围形成一个相对较大的吸积盘，盘物质通过向外转移角动量而最终落向致密星(图 8)。LMXB 一般没有 X 射线脉冲，这很可能是由于它们的磁场相对 HMXB 中子星较弱。有趣的是，在一些 LMBX 中却观测到了另一个表征中子星的特征——X 射线暴(X-ray bursters)。X 射线暴由 ANS 卫星在 1975 年首次发现^[14]，暴发快速上升，持续几秒到 1000 s，间歇期 $10^3 - 10^6 \text{ s}$ ，能量可达到 $10^{39} - 10^{40} \text{ erg}$ 。



图9 高质量黑洞X射线双星Cyg X-1附近天区的光学观测图像(左)和艺术想象图(右)(来自NASA)

X射线暴的能谱与黑体谱一致，通过测量暴辐射随时间下降的光度和温度(峰值约为 3×10^7 K)，可以测出辐射区的半径为10—15 km，与中子星半径吻合。大部分的暴是由于吸积物质(H/He)在中子星表面堆积后被压缩、加热后发生的不稳定热核反应所产生的。

中子星的状态方程(压强—密度关系)是一个长期困扰物理学界的基本问题，涉及中子星内部究竟由何种物质所组成并处于何种状态。通过测量质量和半径，可以限制中子星状态方程。LMXB的X射线呈现出毫秒级的短时标光变，上世纪八九十年代发现其光变具有准周期震荡(QPO)现象。其中的千赫兹QPO非常接近紧靠中子星的吸积盘内半径处的开普勒频率^[15, 16]。由于盘的内边缘不应小于最内稳定圆轨道半径 r_{isco} ，QPO可以用来限制中子星的质量和半径。近年来，NICER通过测量表面X射线热斑的转动，精确地测量了中子星的质量和半径，如脉冲星PSR J0030+0451的质量为 $1.4 M_\odot$ ，半径12.5 km，对中子星状态方程提出了新的限制^[17]。

观测上也探测到了孤立的X射线中子星。其辐射由自转动能驱动，如蟹状星云中心的脉冲星^[18]，或者来自于磁能，即超强磁场的磁陀星^[19]。后者由于强磁场中的不稳定性过程，会引发强烈的X射线甚至伽马射线的爆发。最近，包括我国慧眼卫星在内的X射线观测发现了一例快速射电暴(FRB)实际上来自银河系内的一颗正在活动的磁星^[20]。

3.1.2 黑洞X射线双星

早在20世纪60年代，人们就在HMXB天鹅

座X-1(Cyg X-1)(图9)中发现了黑洞存在的间接证据^[21]。通过光学光谱观测其超巨星伴星的轨道运动速度和周期，发现Cyg X-1的主星质量 $>15 M_\odot$ ，显著超出了中子星的质量上限($3 M_\odot$ 左右)，只能是一个黑洞。此后在LMC X-3和其他双星系统中也发现了黑洞存在的证据。Cyg X-1和LMC X-3都是HMXB，而且是持续X射线辐射源。1975年，Ariel-V和SAS-3卫星探测到了一个极为壮观的

X射线暂现源A0620-00^[22]。后续的观测发现这是一个LMXB，主星质量约 $7 M_\odot$ ，推测是一个黑洞。此后的大视场X射线监视器(如RXTE/ASM和目前在轨运行的MAXI)发现了更多这类黑洞LMXB暂现源，也称为X射线新星(X-ray Nova)。它们占据了已知黑洞X射线双星的大多数，大部分时间处于宁静态，长达几年或几十年。由于某种不稳定性，吸积率突然增加而产生X射线耀发。目前已探测到70多个黑洞X射线双星候选体，经由动力学质量测量确认的有20多个^[23]。绝大多数位于银河系的银盘上，少数位于大小麦哲伦云中。X射线双星中，可靠的(经动力学测量的)黑洞质量范围约为 $4\text{--}21 M_\odot$ ，其中质量最大的是Cyg X-1^[24]。通常把小于100倍太阳质量的黑洞称为恒星级黑洞。

黑洞是广义相对论预言的时空的奇点，其发现对天体物理和基本物理研究具有重要意义。自此，黑洞不再只是物理学家和数学家纯粹的理论演绎，而是可观测的实际存在。由于X射线辐射往往来自靠近黑洞视界的区域，因此可以作为探针检验各种强场下的相对论效应。此后的X射线观测更多集中在发现和研究黑洞周围各种复杂的现象，同时也促进了黑洞吸积和喷流理论的发展。

观测显示，黑洞X射线双星的辐射强度和能谱在几个所谓的光谱态之间跃变，同时还伴随着射电辐射的变化^[23]。在高软态，X射线由来自标准吸积盘的辐射主导，呈现出软的多温黑体谱^[25]。盘的内区温度最高为 $(1\text{--}2)\times 10^7$ K，辐射峰值在几keV。同时也观测到较弱的高温冕的辐射，及其被吸积盘反射的连续谱和铁线成分。这

是由于当吸积率超过百分之几的爱丁顿吸积率时，标准吸积薄盘稳定存在并延伸至黑洞附近的最内稳定轨道。而当吸积率低于该临界值时，吸积盘内区将被低密度、离子温度更高(维里温度约 10^{12} K)的径移主导吸积流(ADAF)^[26]所取代。由于离子-电子库仑碰撞低效，能量不能有效地传给电子(温度约 10^9 K)并被辐射出来，大部分引力势能被带入黑洞，在观测上表现为低硬态^[27, 28]。热吸积流中电子的同步自康普顿散射主导了X射线辐射。有趣的是，发出射电辐射的喷流的产生和性质也随着光谱态的不同而变化^[23]。目前我们对吸积态(光谱态)的转变是如何发生的仍然不清楚。一种可能的解释是热吸积流与相对较冷的吸积盘相互作用(蒸发和凝聚效应)的结果^[29]。某些X射线双星的X射线也有来自相对论性喷流的贡献(如微类星体)。

天体物理的黑洞是相对简单的天体，只需用质量和角动量(自旋)两个参数描述。自旋会影响黑洞视界的大小及其附近的最内稳定圆轨道(半径 r_{ISCO} ，在该轨道之内物质将很快落入黑洞)。 r_{ISCO} 的大小取决于黑洞的自转角速度^[30]。对于不转动的史瓦西黑洞， $r_{\text{ISCO}}=3R_{\text{sch}}$ ；若自旋方向与粒子同向， $R_{\text{sch}} < r_{\text{ISCO}} < 3R_{\text{sch}}$ 。因此，可以通过得到 r_{ISCO} (以 R_{sch} 为单位)从而估计黑洞的自旋。观测上，一般是假设在高软态下吸积盘向内延伸到 r_{ISCO} ，即 $r_{\text{in}}=r_{\text{ISCO}}$ ，并通过测量吸积盘内半径 r_{in} 来实现。目前有两种方法估算 r_{in} ：一是通过用吸积盘的多温黑体辐射模型拟合X射线能谱^[31]，这是因为盘辐射的最高温度和光度取决于 r_{in} ；另一种是拟合吸积盘内区发出的铁发射线轮廓和反射连续谱，因为它们会被引力红移和相对论多普勒效应所畸变^[32](图10)，其程度取决于 $r_{\text{in}}/R_{\text{sch}}$ 。目前这两种方法都给出了X射线双星中黑洞自旋的估值，结果表明自旋分布在一个弥散较大的范围。Cyg X-1 黑洞转动最快，接近极限自旋^[33]。

黑洞X射线双星同样存在毫秒级

X射线光变。在几个LMXB光变曲线中检测到了成对出现的千赫兹QPO，频率比为3:2，这可能是由 r_{isco} 附近的某种共振机制引发的。共振频率与黑洞质量成反比^[23]。

3.2 超大质量黑洞和活动星系核

活动星系核(AGN)是指那些具有强烈电磁辐射或相对论性物质喷流的星系核心，辐射波段很宽，有些几乎覆盖了整个电磁波谱^[34]。极亮的AGN在光学图像上具有类似恒星点源的形态，也称为类星体(quasar)。20世纪60年代类星体的发现，使人们开始意识到AGN的巨大能量是由星系中心的一个大质量甚至超大质量黑洞(10^5 — $10^{10} M_{\odot}$)驱动的。黑洞吸积周围气体，将其引力能释放转化为辐射及外流/喷流的动能。在早期非成像的X射线巡天中，只有最近和最亮的AGN被探测到。爱因斯坦天文台发现几乎所有AGN都是强X射线辐射源。AGN的X射线一般都显示出短时标(几个小时到天量级)的光变。这一观测性质表明X射线辐射区很小；由事件因果律可以限制其尺度 $< c \times \Delta t$ (Δt 为最短光变时标) $< 10^{14}$ cm量级，几倍的日地距离。基于如此高的光度和致密的

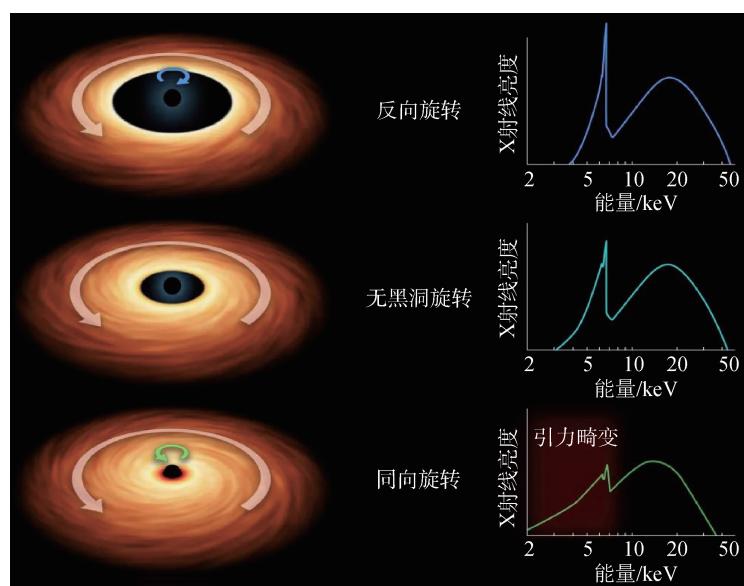


图10 黑洞自转对其周围吸积盘上发出的X射线辐射谱(反射连续谱和Fe线)的影响

辐射区，基本上可以排除其他的AGN起源模型。

强烈和变化的X射线辐射是AGN的主要特征之一，X射线巡天也成为发现AGN的重要手段。1992年，ROSAT在软X射线波段的全天巡天发现了8万个X射线源，其中一半以上经过多波段观测证认发现都是AGN^[35]。近年来Chandra和XMM-Newton也探测到大量AGN。在硬X射线能段，Swift/BAT(14—170 keV)和NuSTAR(3—79 keV)揭示了大量在低能X射线(几keV以下)被遮蔽的AGN^[36]。总体上，无遮蔽软的AGN对应于可以直接看到中心引擎的I型(有宽的光学发射线)。遮蔽的AGN对应于光学光谱的II型(无宽发射线)，即由于观测视线与AGN尘埃环法线夹角较大，中心辐射区被外部尘埃环所遮挡。从X射线能谱的光电吸收效应可以测量尘埃环的等效氢柱密度为 10^{22} — 10^{23} cm $^{-2}$ 。因此，X射线观测对检验AGN的统一模型、研究遮蔽尘埃环性质起到了关键的作用(图11)。

明亮AGN的辐射总光度跨越很宽的量级 10^{42} — 10^{48} erg·s $^{-1}$ ，而X射线占整个辐射光度的10%—30%。超大质量黑洞对应的爱丁顿光度 $L_{\text{Edd}} = 10^{43}$ — 10^{48} erg·s $^{-1}$ ，由此，明亮AGN的黑洞吸积基本上不显著超出爱丁顿极限，一般在0.01—1倍左右。从X射线双星发展来的标准吸积盘理论同样适用于AGN。但由于吸积盘辐射面积增大，通过辐射损失能量较快，盘内区最高温度比X射线双星中低约两个量级，只有约10⁵ K^[25]。

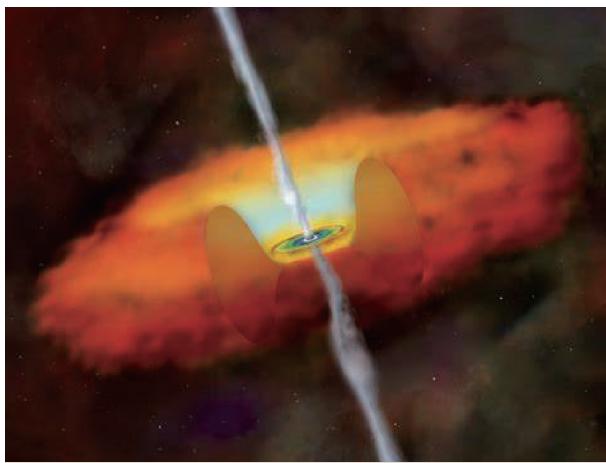


图11 活动星系核的示意图(来自网络)

因此AGN吸积盘的辐射主要在难以观测的极紫外、以及紫外和光学波段。接下来的问题是，AGN强烈的X射线是从何而来的呢？BeppoSAX、CGRO/OSSE等卫星搭载的硬X射线探测器观测到在100—200 keV以上的高能截止，并以热谱的指数形式衰减^[37]。这将X射线的起源指向黑洞附近存在的高温的冕(电子温度约10⁹ K)——极高能量的电子通过逆康普顿散射，将吸积盘的光学光子散射到X射线能区。

GINGA、ASCA及后来的卫星观测到大部分AGN的X射线能谱还叠加了一个来自吸积盘的反射(吸收加散射效应)成分，峰值20—30 keV，并具有很宽的、不对称的6.4—6.7 keV铁的K α 荧光发射线。对反射成分和宽铁线的研究证实了黑洞吸积盘的存在^[38]。最新的时变观测可以测量反射成分与直接辐射之间光变的时延，由此可以定出冕与吸积盘的相对距离。观测数据表明，大部分X射线来自黑洞10倍史瓦西半径之内的区域，并位于盘面的上方。尽管盘冕的唯象模型可以较好地解释观测结果，但对于盘冕是如何形成和被加热的这一基本问题，目前尚未有物理上自洽的理论模型。一般认为磁重联很可能至少部分提供了冕的加热^[39]。最新的理论研究提出对星风等热气体的吸积可以提供冕辐射需要的能量^[40]。

由于辐射区靠近黑洞，AGN的X射线可以作为强引力场及相对论效应的探针，包括光线弯曲、引力红移和相对论性展宽等效应。与黑洞X射线双星类似，宽的铁K α 线和反射成分可以用来限制黑洞自旋^[41](图10)。XMM-Newton和NuSTAR卫星测量了约20个AGN黑洞的自旋，发现大部分具有较高或极端自旋^[42]。但这一结论是否具有代表性仍存在争议。

与X射线双星相比，X射线光变的QPO现象只在少数几个AGN中被观测到^[43]。有意思的是，共振频率与黑洞质量成反比这一关系可以从恒星级黑洞一直延伸到大质量黑洞范围^[44]。这是因为QPO频率很可能与黑洞视界的线性尺度相关。类似的，观测还发现超大质量黑洞X射线光变的特征时标也与恒星级黑洞满足一个统一的关系^[45]。

这两个关系都可以用来估计黑洞质量。

近年来, Chandra 和 XMM-Newton 的高灵敏度观测发现很多星系中心存在弱活动的低光度 AGN, X 射线辐射相对明亮 AGN 低几个量级(同等黑洞质量), 揭示了其黑洞的物质吸积率低了几个量级。这些星系中心黑洞附近的吸积是由高温而稀薄的辐射低效吸积流 ADAF 主导, 很可能对应于 X 射线双星中的低硬态。由于 AGN 的态转变时标太长(正比于黑洞质量), 难以观测到态的转变。近年来发现了一些可能与 AGN 态转变相关的现象, 但尚未有令人信服的观测证据。

大约 10%—15% 的 AGN 发出强烈的射电辐射, 来自于准直的、速度接近光速的相对论性喷流及与喷流末端相连的射电瓣。这些与 X 射线双星中的喷流相类似, 但具有更大的整体洛伦兹因子和喷流功率。射电强 AGN 的 X 射线普遍更强、高能光子更多, 这是由于来自喷流 X 射线的贡献^[46], 其辐射产生于喷流中相对论性电子的同步加速辐射或逆康普顿散射(种子光子为来自于喷流或吸积盘/尘埃环的低能光子)。Chandra 的高空间分辨成像可以分辨近邻 AGN 喷流上的 X 射线辐射结构。喷流的形成仍然是难解之谜。可能的机制有提取黑洞自转能或吸积盘能量两类模型, 并且磁场在喷流准直和加速中起到了至关重要的作用^[47]。

宇宙中是否普遍存在 10^2 — $10^4 M_{\odot}$ 的中等质量黑洞? Chandra 和 XMM-Newton 的观测在近邻星系中发现了一些偏离星系中心的明亮 X 射线点源, 其光度超过典型的 X 射线双星, 被称为超亮 X 射线源(ULX)^[48]。大部分的 ULX 被证实是河外的 X 射线双星, 喷流的相对论集束效应使观测到的 X 射线得到增强。但有少量 ULX 的确很可能包含中等质量黑洞。其中一个可靠的候选体是 M82 星系中偏离核心的源 M82 X-1, 其 X 射线 QPO 频率和光度支持其黑洞质量约为 $400 M_{\odot}$ ^[49]。近年来通过引力波也探测到了大于 $100 M_{\odot}$ 黑洞的存在。更多中等质量黑洞的探测将能帮助我们理解种子黑洞, 以及黑洞的形成和演化。

3.3 宇宙 X 射线背景辐射

在 1962 年, 贾科尼等人发现首个 X 射线源的同时, 也发现了宇宙中存在弥散的 X 射线背景(CXB)辐射。在之后几十年里, CXB 的起源一直是一个谜。其 X 射线能谱在约 30 keV 处存在一个峰值, 直到 Chandra 和 XMM-Newton 等卫星开展高空间分辨、高灵敏度深场观测, 才开始真正对 CXB 的组分进行分解。目前, 10 keV 以下的软 X 射线 CXB 可以几乎完全被分解为离散的 X 射线点源, 主要包括活动星系核、星系团和普通星系里的 X 射线双星等天体^[50]。而硬 X 射线 CXB 目前只有约 30% 的流量可以被分解为点源^[51]。

4 炽热宇宙的信使

星系团是宇宙中最大的引力束缚系统。其成员星系数目从几十到上万。典型的星系团尺度为 1 — 10 Mpc ($1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年}$)。早期的天文光学观测发现成员星系运动的速度弥散很大, 达 100 — 1400 km/s , 表明星系团内维里质量比所有成员星系质量估计值的总和要大几十倍。在火箭探测的时代人们就已经观测到来自星系团的 X 射线。1971 年 Uhuru 卫星证认了星系团的 X 射线来自延展的弥散辐射而非点源, 由此发现了星系团中高温热气体的存在^[52]。此后, 多颗 X 射线卫星对星系团进行了大量的观测, 特别是 Chandra 和 XMM-Newton 获得了大样本星系团的 X 射线成像和光谱数据。辐射谱为电子与离子相互作用发出的热韧致连续谱, 叠加上多种元素离子的特征发射线, 最显著的是高价铁离子在 6.7 keV 附近的发射线。这些发射线表明 X 射线辐射气体为重子物质, 元素丰度为太阳丰度的几分之一。从连续谱和发射线能量测量出的热气体温度高至 2 — 9 千万 K。这些团内介质充满了整个星系团, 且温度随半径变化不大(图 12)。而 X 射线面亮度及由此计算出的气体密度从中心向外迅速降低。基于流体静力学平衡和团内介质气体状态方程, 可以估算整个星系团的总质量以及 X 射线气体的质量。结

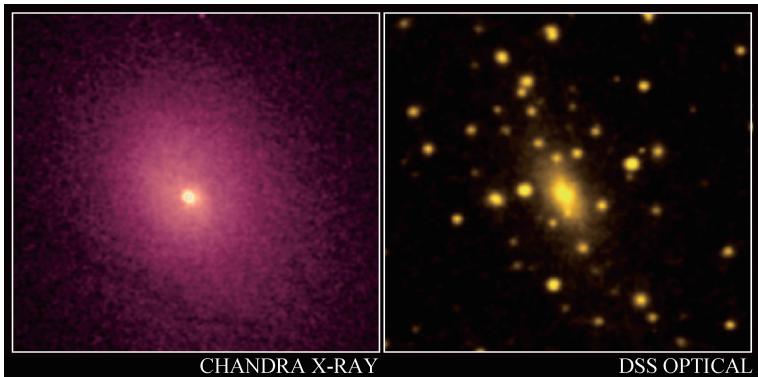


图12 观测得到的星系团Abell 2029的X射线(左图: Chandra卫星)和光学图像(右图: DSS)



图13 星爆星系M82的多波段合成图像。X射线(蓝色)是Chandra观测图像,来自弥散的热气体;光学(黄绿色)是哈勃望远镜观测,来自星系盘上的恒星;红外(红色)是Spitzer卫星观测,来自被抛射出的冷气体和尘埃(来自NASA)

果表明,大的星系团(如Coma、Perseus)总质量为 $10^{15} M_{\odot}$ 量级,X射线热气体占百分之十几,而可见的星系和恒星只占百分之几^[53]。因此,星系团是由暗物质主导的引力束缚系统。实际上,星系团内介质的极高温度,正是对应于具有如此巨大质量的一个维里化系统的维里温度(正比于系统的质量与尺度之比)。

冷却流是星系团研究中长期困扰学界的一个问题;理论预期,由于强X射线辐射,团中心区域的气体将很快冷却并向中心下沉,密度增加甚至会有大量恒星形成。但观测上并没有看到显著的预言的现象。近年来的X射线和其他波段观测表明,星系团中心星系(通常为巨椭圆星系)中心的

超大质量黑洞的(间歇性)活动会为星系团中心注入能量,维持星系团的中心气体温度^[54]。

作为宇宙中最大的引力塌缩系统,星系团的形成、演化和质量分布函数留下了宇宙组成、早期密度涨落和大尺度结构形成过程的印记。对遥远星系团的大样本X射线观测结果可以用来检验和限制宇宙学模型,研究暗物质和暗能量^[55]。因此,发现大样本的遥远的星系团对宇宙学研究至关重要。

恒星爆发(starburst)形成星系也发出强的X射线。在大量新近形成的恒星星族中,那些大质量恒星快速演化,在晚期抛射出大量气体物质,之后塌缩产生超新星。气体被大量超新星的巨大外流动能加热到几百万度,并被驱离至离星系很远的距离。这些炽热的气体辐射出所观测到的大尺度的弥散软X射线(图13)。

在银河系和近邻星系中的超新星遗迹也发出X射线。其X射线性质不尽相同,既有来自热气体的辐射,也有来自激波的非热辐射。来自太阳系附近的恒星X射线辐射也被探测到,它们来自恒星高温冕的辐射;有些恒星活动还会产生大幅度的X射线耀发^[4]。

5 动态宇宙的信使

X射线的宇宙充满了各种各样的变化,甚至剧烈的爆发。X射线暂现源、天体爆发和光变的时标跨越了很宽的范围,从秒以下到年、或更长。由于暂现源和天体爆发不可预测,对它们的探测需要大瞬时视场的“全天监视器”。从X射线天文学诞生起,X射线时域监测一直是一个活跃的领域,迄今已发射运行的大视场监视器包括Ariel-V/ASM, RXTE/ASM, Beppo-SAX/WFC, HETE-2, Swift/BAT, MAXI等。由于涉及的物理过程能量巨大,典型的暂现和剧烈变化天体的辐射峰值通常在高能电磁波段——即X和伽马射线,如超新星、伽马暴、X射线双星和AGN的耀

发、大质量黑洞的耀发等等。以下简单介绍几类高能暂现天体。

伽马暴(GRB)在爆发峰值时是宇宙中最为明亮的天体。1967年由美国的空间核武器监视系列卫星 Vela 偶然发现。伽马暴分为长暴和短暴两大类。短伽马暴的即时辐射持续时间从几分之一秒到 2 s，而长伽马暴可持续时间从几秒到几千秒范围。伽马暴的即时爆发辐射大多延伸至 X 射线波段。实际上一些伽马暴监视器主要探测能段就是在硬 X 射线。在即时辐射之后，跟随着余辉辐射，波段延伸到了能量更低的 X 射线、光学、红外和射电波段，可持续小时到天的量级。由于伽马射线和硬 X 射线探测器对源的定位能力有限，伽马暴的距离和起源之谜直到 1997 年才被揭开。BeppoSAX 卫星的软 X 射线望远镜通过对余辉的快速捕捉，精确定位了伽马暴，使得其光学余辉和寄主星系得以被证认^[56]。目前在轨运行的 Swift 卫星，通过其搭载的软 X 射线望远镜 XRT 及其快速机动能力，证认了大样本伽马暴的寄主星系并测量了其红移(距离)。目前已探测到了几千个伽马暴，极大地增进了对其本质和物理过程的理解。

长暴起源于大质量恒星($>25M_{\odot}$)的中心塌缩，而短暴起源于双中子星或黑洞—中子星并合。双中子星并合引力波事件 GW170817 及与其成协的短伽马暴的探测证实了短暴的物理起源^[57]，也引发了对伽马暴研究的新的热点。在这些灾变事件中，新形成的黑洞或大质量中子星通过吸积剩余物质产生相对论性喷流(洛伦兹因子 $\gamma \sim 100$)。喷流物质相互作用产生激波，引发伽马及 X 射线的即时辐射。之后喷流与星际介质的相互作用产生外激波，进一步产生在 X 射线和更低能波段的余辉辐射。由于高度的相对论集束效应，辐射被限制在半张角几度($\theta \sim 1/\gamma$)的辐射锥内，辐射时标被压缩，而强度被剧烈放大。经过集束效应改正的真实辐射能量约为 10^{51} erg ^[58]。

未来研究的重点将关注高红移伽马暴、特殊伽马暴、以及与引力波事件成协的伽马暴(引力波电磁波对应体)。目前 Swift 卫星已经探测到 7 个红移 6 以上的伽马暴，最远伽马暴的红移为 8.2。红

移 6—20 的伽马暴可以示踪那些照亮宇宙“黑暗时代”的第一、二代恒星，并作为“灯塔”探索早期宇宙的黎明和再电离时期、第一代星系和早期星际介质。

超新星激波暴(shock breakout)是理论上预言的超新星爆发最早产生的电磁辐射，持续时间非常短暂，只有几秒到 1000 s。在恒星内核塌缩之后，中心产生高温激波并向外传播；当激波到达恒星表面，会产生短暂但非常明亮的电磁波辐射，其峰值在软 X 射线和紫外波段。而通常在可见光波段的超新星爆发要在数天之后才会被观测到。激波暴观测可用来验证超新星爆发的基本物理模型，估计前身星半径、星风分布和密度等。由于持续时间短、能谱较软、相对暗弱，迄今只观测到几个候选事例，最典型的是 Swift/XRT 偶然发现的 SN 2008D^[59]。

天文学家们推测，星系中心普遍存在大质量和超大质量黑洞，其绝大多数在绝大部分时间里处于沉寂状态。当一颗恒星进入到黑洞潮汐半径以内，将被潮汐力撕裂。一部分物质将落向黑洞，引起吸积率的突然增加并产生强烈的软 X 射线、紫外和光学耀发，之后随时间衰减。这就是黑洞潮汐瓦解恒星事件(TDE)(图 14)，很早就被理论所预言^[60]。对绝大多数宁静星系而言，TDE 是探索其中心所推测存在黑洞的几乎唯一的手段。此外，TDE 还为研究黑洞吸积物理提供了一个有着吸积率完整演化过程的理想实验室。目前在 X



图 14 黑洞潮汐瓦解恒星事件的艺术想象图(来自 NASA, S.Komossa)

射线波段已经探测到20多例，包括具有相对论性喷流的TDE^[61, 62]。对TDE和沉寂黑洞的进一步研究还有待发现和观测更大样本，尤其是事件发生早期的数据。

中国科学院正在研制中的爱因斯坦探针(EP)卫星将是发现和研究TDE、X射线超新星、高红移伽马暴及其他X射线暂现源的有力设备^[63]。

6 未来展望

国际上，现有的Chandra、XMM-Newton、Swift、MAXI、NuSTAR、AstroSAT、SRG/eROSITA等X射线卫星/探测器还将继续运行。特别是SRG/eROSITA卫星将完成10 keV以下能段的深度全天巡天，预期将发现两百万个活动星系核和超过十万个星系团。在国内，慧眼-HXMT卫星和引力波暴电磁对应体探测卫星(GECAM)将继续运行，开展对银河系内X射线源、伽马暴和其他明亮爆发源的观测。这些卫星将会继续推进我们对

X射线宇宙的认识。展望未来，X射线天文学将继续聚焦于极端天体、炽热天体和动态天体的研究。明年将发射的JAXA/NASA的XRISM将再次冲击微量能器的高分辨能谱观测这一期待已久的目标，NASA的IXPE将是首颗致力于X射线偏振探测的卫星，欧空局的旗舰型综合X射线天文台Athena+，集大口径、高能谱分辨率等能力于一身。在国内，几年之内将发射中法联合伽马暴卫星SVOM，搭载硬X射线成像仪的先进天基太阳天文台ASO-S，发现和研究X射线暂现源和变源的爱因斯坦探针(EP)卫星，以及中国空间站的伽马暴偏振探测器POLAR-2。处于立项论证阶段的有大型X射线时变和偏振天文台eXTP、探测宇宙热重子物质的HUBS等。这些设备的运行观测，将与理论研究一起，进一步增进我们对极端、炽热和动态宇宙的认识。

致谢 感谢金驰川、张澍、凌志兴、潘海武、刘禾阳、程华清、李东悦等人的阅读和修改。

参考文献

- [1] Tucker W, Giacconi R. The X-ray Universe. Harvard University Press, 1985
- [2] Giacconi R, Gursky H, Paolini F *et al.* Phys. Rev. Lett., 1962, 9: 439
- [3] 王绶琯,周又元 主编. X射线天体物理学. 北京,科学出版社, 1999
- [4] Seward F, Charles P. Exploring the X-ray Universe(2nd ed.). Cambridge Univ. Press, 2010
- [5] Rybicki G B, Lightman A P. Radiative Processes in Astrophysics. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2004
- [6] 尤峻汉. 天体物理中的辐射机制. 北京:科学出版社, 1998
- [7] Fraser G W. X-ray detector in astronomy. Cambridge University Press, 2009
- [8] Arnaud K, Smith R, Siemiginowska A eds. Handbook of X-ray Astronomy. Cambridge Univ. Press, 2011
- [9] Oppenheimer J R, Volkoff G M. Physical Review, 1939, 55: 374
- [10] Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. A&A, 2006, 455: 1165
- [11] Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. A&A, 2007, 469: 807
- [12] Melia F. High-energy astrophysics. Princeton University Press, 2009
- [13] Corbet R H D. A&A, 1984, 141: 91
- [14] Grindlay J *et al.* ApJ, 1976, 205: L127
- [15] Strohmayer T E *et al.* ApJ, 1996, 469: L9
- [16] van der Klis M. ARA&A, 2000, 38: 717
- [17] Miller M C, Lamb F K, Dittmann A J *et al.* ApJ, 2019, 887: L24
- [18] Rosswog S, Brueggen M. Introduction to high energy astrophysics. Cambridge University Press, 2011
- [19] Duncan R C, Thompson C. ApJ, 1992, 392: L9
- [20] Li C K, Lin L, Xiong S L *et al.* Nature Astronomy, 2021, 5: 378
- [21] Bowyer S, Byram E T, Chubb T A *et al.* Science, 1965, 147: 394
- [22] Elvis M *et al.* Nature, 1975, 257: 656
- [23] Remillard R A, McClintock J E. ARA&A, 2006, 44: 49
- [24] Miller-Jones J C A, Bahramian A, Orosz J A *et al.* Science, 2021, 371: 1046
- [25] Frank J, King A R, Raine D J. Accretion Power in Astrophysics. Cambridge University Press, 1992
- [26] Narayan R, Yi I. ApJ, 1994, 428: L13
- [27] Yuan F, Narayan R. ARA&A, 2014, 52: 529
- [28] Esin A A, McClintock J E, Narayan R. ApJ, 1997, 489: 865
- [29] Liu B F, Yuan W, Meyer F *et al.* ApJL, 1999, 527: 17
- [30] Bardeen J M, Press W H, Teukolsky S A. ApJ, 1972, 178: 347
- [31] Zhang S N, Cui W, Chen W. ApJL, 1997, 482: 155
- [32] Fabian A C, Wilkins D R, Miller J M *et al.* MNRAS, 2012, 424: 217

- [33] Zhao X, Gou L, Dong Y *et al.* ApJ, 2021, 908:117
- [34] Netzer H. The physics and evolution of active galactic nuclei. Cambridge Univ. Press, 2013
- [35] Voges W. Ad.Sp. R, 1993, 131:391
- [36] Michael K, Benny T, Claudio R *et al.* ApJ, 2017, 850:74
- [37] Dadina M. A&A, 2008, 485:417
- [38] Tanaka Y *et al.* Nature, 1995, 375:659
- [39] Liu B F, Mineshige S, Shibata K. ApJL, 2002, 572:173
- [40] Liu B F, Taam R E, Qiao E *et al.* ApJ, 2015, 806:223
- [41] Fabian A C, Rees M J, Stella L *et al.* MNRAS, 1989, 238:729
- [42] Reynolds C. Space Science Review, 2014, 183:277
- [43] Gierliński M, Middleton M, Ward M *et al.* Nature, 2008, 455:369
- [44] Zhou X L, Yuan W, Pan H W *et al.* ApJL, 2015, 798:5
- [45] McHardy I M, Koerding E, Knigge C *et al.* Nature, 2006, 444:730
- [46] Yuan W, Brinkmann W, Siebert J. A&A, 1998, 330:108
- [47] Cao X. ApJ, 2014, 783:51
- [48] Kaaret P, Feng H, Roberts T P. ARA&A, 2017, 55:303
- [49] Pasham D, Strohmayer T E, Mushotzky R F. Nature, 2014, 513:74
- [50] Luo B, Brandt W N, Xue Y Q. ApJS, 2017, 228:2
- [51] Krivonos R A, Bird A J, Churazov E M *et al.* NewAR, 2021, 9201612
- [52] Gursky H *et al.* ApJL, 1971, 167:81
- [53] Vikhlinin A *et al.* ApJ, 2006, 640:691
- [54] Fabian A C *et al.* MNRAS, 2006, 366:417
- [55] Vikhlinin A *et al.* ApJ, 2009, 692:1060
- [56] van Paradijs J *et al.* Nature, 1997, 386:686
- [57] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D *et al.* ApJL, 2017, 848:12
- [58] Zhang B, The Physics of Gamma-Ray Bursts. Cambridge University Press, 2018
- [59] Soderberg A M, Berger E, Page K L *et al.* Nature, 2008, 453:469
- [60] Rees M J. Nature, 1988, 333:523
- [61] Komossa S. JHEAp, 2015, 7:148
- [62] Saxton R, Komossa S, Auchettl K *et al.* SSR, 2020, 216:85
- [63] 袁为民, 张臣, 陈勇 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2018, 48:039502



卓凌机电
FOR VACUUM · FOR CRYOGENICS

一站式真空低温设备 及应用方案



PFEIFFER VACUUM



Agilent Technologies
离子泵 吸气泵



VAT
PASSION. PRECISION. PURITY.



SHI
Cryogenics Group

VAT角阀



普发分子泵



安捷伦
离子泵



VAT插板阀



普发质谱仪



VACGEN
位移台



住友
低温泵



住友
制冷机



VACGEN
微漏阀



TSL视窗





联系人
刘鑫

www.zlvacuum.com

更多产品和联系方式可查看