

# X 射线在天体物理学的应用

王春燕<sup>1</sup> 陈岗<sup>2</sup> 王福合<sup>1</sup>

(1 首都师范大学物理系 100048; 2 北京第六十五中学 100010)

天体物理学是天文学与物理学的交叉学科,是 20 世纪自然科学发展的一个极其重要的分支。现代天体物理学的重要探测手段之一是借助射电技术设备接收并研究宇宙天体的辐射。这些辐射按波长可分为若干波段,如无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和  $\gamma$  射线等。按观测的电磁波段可分为光学天文学、射电天文学和空间天文学等。传统的观测是在地面上利用天文仪器进行的,但是由于射线在穿过大气层时被吸收,所以借助各种飞行器,在高层大气或大气外层空间区域进行探测。从 20 世纪下半叶以来,观测的范围在不断扩大,从可见光扩展到整个电磁波段,空间天文学就此诞生。目前,天文探测器可分为  $\gamma$  射线探测器、X 射线探测器、紫外探测器和近红外探测器等。中国将于 2016 年年底发射硬 X 射线调制望远镜(HXMT),其任务是定位探测中子星和黑洞等辐射 X 射线的高能天体以及其辐射 X 射线的高能物理过程,这将是 中国天文卫星的零突破。在 HXMT 发射之际,本文将介绍早期的 X 射线探测,整理列举已发射的 X 射线探测器,最后给出 X 射线探测的意义。

## 一、早期 X 射线探测

宇宙中天体无时无刻不在辐射 X 射线,天体中的 X 射线是从上百万度甚至上千万度(绝对温度)的炽热等离子体以热形式发射出来,或是通过涉及高能电子的相对论性过程以非热形式发射出来。因此,X 射线天文学的观测对象是从高温天体恒星(包括恒星发生的高能物理现象:超新星爆炸,中子星和黑洞吸积物质过程)到宇宙学距离的类星体等。

最初的 X 射线探测来源于美国海军研究实验室,1929 年,美国海军研究实验室提出在高海拔地区探测紫外线和 X 射线的建议。1948 年,在新墨西哥州的

白沙导弹试验场发射火箭,首次探测到太阳辐射的 X 射线,发现太阳是一个很强的 X 射线源。这些 X 射线来自太阳黑子和太阳的日冕,这些地区的温度可达数百万度。如果在太阳系之外,这样的辐射就很难被探测到了。此后美国海军研究实验室多次对恒星探测,寻找太空中的 X 射线源,但均未成功。

在美国海军研究实验室探测太阳以外的 X 射线源之后,人们开始怀疑是否存在太阳系之外的 X 射线源。20 世纪 60 年代,宇宙辐射 X 射线探测有了新进展。当时,意大利美籍的天体物理学家贾科尼(R. Giacconi)(见图 1)和美国天体物理学家罗西(B. Rossi)(见图 2)认为,天体可能存在 X 射线源。随后二人一起设计出新型的 X 射线望远镜,望远镜利用锥形的曲面镜来收集辐射。为此,贾科尼又成立了一个火箭试验组,以证明月亮反射的太阳辐射中存在 X 射线。但是,当火箭在高空飞行了十千米之后,他们虽未探测到从月亮反射的太阳 X 射线,却检测到来自其他地方很强的 X 射线,从火箭沿环形的飞行轨迹可以了解到,在整个太空中弥漫着 X 射线背景辐射。



图 1 贾科尼(Riccardo Giacconi, 1931-)



图2 罗西 (Bruno Rossi, 1905-1993)

这个意外的发现促进了 X 射线天文学的产生与发展，使人们进一步利用标准的光学方法识别和确定 X 射线源。他们确定了首次发现的 X 射线源是一颗远至天蝎座中的紫外恒星，名之为天蝎 X-1（其中 X 即 X 射线，1 是排序的数字）。不久又发现了别的 X 射线源，比较重要的有天鹅 X-1、X-2 和 X-3 等。这些新发现的 X 射线源大都是双星，而且往往是一颗恒星环绕着另一颗密度很大的恒星——中子星（甚至可以是黑洞）。外围恒星的气体流向密度大的恒星，并且在强大的引力场作用下被加速到极高的速度。这些气体原子彼此碰撞，并且在子星的表面磁场作用下而减速，释放出强大的 X 射线。这一发现让贾科尼获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖，也开创了宇宙 X 射线天文学。

## 二、已发射成功的 X 射线天文卫星

X 射线天文学的诞生大大促进了空间天文学的发展，但这些最初的研究很困难，因为火箭的探测时间太短。火箭技术的进步得以开发出地球大气以外的研究领域，即使用卫星进行宇宙探测。

最先发射用以探测宇宙 X 射线的卫星是美国宇航局一系列小型天文卫星的第一颗——“乌呼鲁”（UHURU，斯瓦希里语为“自由”的意思）。这颗 X 射线探测卫星于肯尼亚的基地发射，于 1970 年 12 月 12 日进入离地面最高点为 560 千米，近地点为 520 千米的轨道，轨道倾角 3 度，每 96 分钟巡天一次，因发射当天正值肯尼亚独立 7 周年纪念日而取名“乌呼鲁”。借助“乌呼鲁”，科技工作者探测到包括 X 射

线双星、星系团、超新星遗迹等 339 个 X 射线源，并探测到了致密 X 射线双星和星系团内弥漫的 X 射线辐射，以及黑洞候选体天鹅座 X-1。在“乌呼鲁”之后，一些国家便投入大量资金以改进 X 射线探测装置，发射 X 射线天文卫星。

“乌呼鲁”的探测精度高于火箭的探测精度，甚至高出十倍。“乌呼鲁”被发射出一个星期之后所接收到的数据量高于以前所有探测数据之和。

贾科尼还研制出精度更高的 X 射线探测器名为 HEAO—II，1978 年 11 月 13 号发射，在发射成功后，为了纪念爱因斯坦诞辰 100 周年而更名为“爱因斯坦 X 射线望远镜”。它是第一台聚焦 X 射线望远镜，以往的 X 射线卫星带回来的都是一些数字数据，而“爱因斯坦天文台”装载了用于探测 X 射线的第一台成像装置，它的灵敏度和分辨率极高。HEAO—II 的发射目标是寻找新的 X 射线源以及定位和跟踪研究已知的 X 射线源（如天鹅 X-1），在发射后不久就带回来了很多重要的新发现，如许多活动星系（包括类星体）都是强大的 X 射线发射体，星系团包括大量的高温（数千万绝对温度）等离子体等，由于技术水平大为提高，还记录到比天蝎 X-1 的 X 射线辐射强度低百万倍的信号。“爱因斯坦 X 射线望远镜”的新发现使科学工作者对 X 射线双星得到更为详细的研究，其中有一些天体被作为黑洞的候选者。科学工作者还对超新星的遗迹进行分析，特别是星系团中各星系间大气的 X 射线辐射帮助科学工作者发现，在宇宙中存在暗物质并确定宇宙中所含暗物质总量。

1976 年，贾科尼还研发出更加先进的 X 射线探测器，而且体积庞大，并于 1999 年 7 月 23 日升空。这



图3 爱因斯坦 X 射线望远镜

台探测器原名为“高级 X 射线天体物理设备 (AXAF)” (见图 4), 在发射前一年, 为纪念著名的物理学家钱德拉塞卡 (S. Chandrasekhav) (见图 5) 而更名为“钱德拉” (Chandra)。钱德拉塞卡是印度裔美籍天体物理学家, 在 1983 年因白矮星的研究而获得诺贝尔物理学奖, 该发现中包含了著名的钱德拉塞卡极限。AXAF 的探测任务是“观测宇宙中温度高达数百万度区域而运动速度几乎接近光速的天体的高能活动, 从太阳系内的彗星到遥远的类星体都是它的观测范围”。比起光学望远镜 (如哈勃望远镜), “钱德拉”的成像性能和光谱分析性能在当时都是最优质的, 而且它可以进行定点跟踪观测, 发回来的图像有许多新发现, 如物质的组成、星系爆炸的原因等, 这些都大大促进了宇宙的构造与演化研究。所带回来的首批照片中, 就有一张非常清晰的超新星遗迹仙后座 A 的图像, 让天文学家们首次可以看到超新星遗迹中心的脉冲星, 解决了人们对于超新星爆发后的许多问题。

贾科尼的研发工作大大提高了观测的水平, 他们的研究工作使当今的宇宙观也发生了很大的变化。在



图 4 钱德拉



图 5 钱德拉塞卡 (Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910-1995)

20 世纪中叶, 宇宙稳恒的观点占据着主流的地位, 恒星和星系处于平衡之中, 而宇宙的演化是缓慢的。今天的观测表明, 从 X 射线天文学发展看, 宇宙中有大量的能量被释放出来, 许多星体比地球小得多, 但质量却大得惊人, 也就是说, 这些小天体的密度大得惊人。而对这些天体及其演化过程的研究, 大都得益于 X 射线天文学的研究。

到目前为止, 世界上已发射成功了许多 X 射线天文卫星, 我们将搜集的已发射成功的 X 射线天文卫星列于表 1 中。

表 1 已发射成功的 X 射线天文卫星

| 国家           | 名称           | 简称        | 发射时间       |
|--------------|--------------|-----------|------------|
| 美国 (9)       |              |           |            |
| 美国           | 乌呼鲁          | Uhuru     | 1970.12.12 |
| 美国           | 轨道太阳天文台七号    | OSO-7     | 1971.9     |
| 美国           | 小型天文卫星二号     | SAS-2     | 1972.11    |
| 美国           | 小型天文卫星三号     | SAS-3     | 1975.5     |
| 美国           | 轨道太阳天文台八号    | OSO-8     | 1975.6.21  |
| 美国           | 宇宙线探测卫星二号    | COS 一 B   | 1975.8.9   |
| 美国           | 高能天文台一号      | HEAO 一 I  | 1977.8.12  |
| 美国           | 爱因斯坦天文台      | HEAO 一 II | 1978.11.13 |
| 美国           | 漫射 X 射线谱仪    | DXS       | 1993.1.13  |
| 美国           | 罗西 X 射线计时探测器 | RXTE      | 1995.12.30 |
| 美国           | 钱德拉 X 射线天文台  | AXAF      | 1999.7.23  |
| 英国 (2)       |              |           |            |
| 英国           | 哥白尼          | OA0-3     | 1972.8.21  |
| 英国           | 羚羊五号         | Ariel-5   | 1974.10.15 |
| 英国           | 羚羊六号         | Ariel-6   | 1979.6.2   |
| 日本 (3)       |              |           |            |
| 日本           | 天鹅           | Hakueho   | 1979.2.21  |
| 日本           | 天马           | Tenma     | 1983.2.20  |
| 日本           | 银河           | Ginga     | 1987.2.5   |
| 日本           | ASTRO-H      | ASTRO-H   | 2016.2.12  |
| 荷兰 (1)       |              |           |            |
| 荷兰           | 荷兰天文卫星       | ANS       | 1974.8     |
| 欧洲空间局 (2)    |              |           |            |
| 欧空局          | 欧洲 X 射线卫星    | EXOSAT    | 1983.5.26  |
| 欧空局          | 牛顿 X 射线天文台   | XMM       | 1999.12    |
| 联合研制 (5)     |              |           |            |
| 德国 / 英国 / 美国 | 伦琴 X 射线天文卫星  | ROSAT     | 1990.6.1   |
| 日本 / 美国      | 飞鸟           | ASCA      | 1993.2.20  |
| 意大利 / 荷兰     | BeppoSAX     | BeppoSAX  | 1996.4.30  |
| 日本 / 美国      | 朱雀           | Astro-E2  | 2005.7.10  |



20世纪70年代，美国发射了八颗X射线探测器，其中包括两颗里程碑式的天文台，即“乌呼鲁”和“爱因斯坦天文台”；英国也成功发射了三颗X射线天文卫星；到了70年代末，日本也成功发射了第一颗X射线天文卫星“天鹅”号。

20世纪80年代，一些国家的科学经费大幅下降，导致80年代只发射了三颗X射线卫星。在70年代占主导地位的美国却一颗都没有发射，其原因是因为美国的经费主要用于大天文台的计划，如探测可见光的哈勃空间望远镜、探测 $\gamma$ 射线的康普顿 $\gamma$ 射线天文台、探测X射线的钱拉德X射线天文台以及探测红外光谱的斯皮策空间望远镜，而这些天文台都是在90年代之后推出的。英国虽然在占主要地位的欧洲空间局（简称欧空局—ESA）于1983年5月26日发射了EXOSAT，但是它单独发射X射线卫星却也结束于Ariel-6。剩下两颗是由日本发射的，分别是1983年2月20日发射的天马（Tenma）和1987年2月5日发射的银河（Ginga）。虽然80年代发射的X射线卫星少，但却有很大的进步，其探测活动大大推动了X射线天文学时域分析和光谱分析的研究，推进了X射线天文学的进步。

20世纪90年代，只有美国单独发射了X射线卫星，除了AXAF外，美国还发射了漫射X射线谱仪（DXS）、罗西X射线计时探测器（RXTE）等。此外还有联合研制的伦琴X射线天文卫星（简称ROSAT，参与国家为德国、英国和美国；见图6）、“飞鸟”（参与国家日本和美国）和BeppoSAX（参与国家意大利和荷兰），

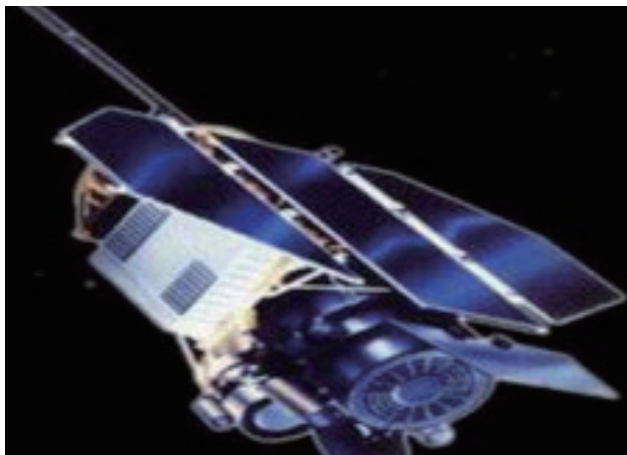


图6 伦琴X射线天文卫星

以及欧空局研制的“牛顿”X射线天文台卫星。

伦琴X射线天文卫星（ROSAT）是一个改进版的HEAO—II，携带着由德国研制的比HEAO—II的X射线成像望远镜还要大的X射线成像望远镜（XRT），三个聚焦设备中有两个德国研制的位置灵敏的正比计数器（PSPC）和美国研制的高分辨率成像（HRT）设备，此外还有英国研制的紫外望远镜（由美国宇航局于1990年6月1日发射）。ROSAT的探测任务是全天扫描式探测和对选定的X射线源定位探测，选定的目标由三个国家商议决定。最后对选定的目标源进行定位探测，不仅发现了贾科尼一直寻找月球反射的X射线，而且还发现了温度极低的彗星也辐射X射线；还发现，超新星遗迹和星系团的详细形态，探测到更暗的中子星以及中子星Geminga的脉冲周期等。

进入21世纪，日本成为X射线卫星发射的主力，先与美国联合研制的“朱雀”（Astro-E2）于2005年7月10日发射。2016年2月12日又发射了第六颗X射线卫星ASTRO-H（见图7）。ASTRO-H由日本和美国多家机构联合开发的，装配有利用尖端科技开发的两种X射线望远镜和四种接收X射线的检测仪器，所装载的软X射线谱仪能够分辨出以万计的X射线“颜色”，同时也能拍摄出高清图片，能够大大增进对X射线天体的了解。该卫星发回的数据有利于认识宇宙的演化过程如研究巨大黑洞如何成长，验证极限状态如在超高密度和超高强磁场下的物理现象。但遗憾的是，该卫星与地面失去联系，虽然日本一直没有放弃与卫星恢复通信的尝试，但未能成功，此后只能转

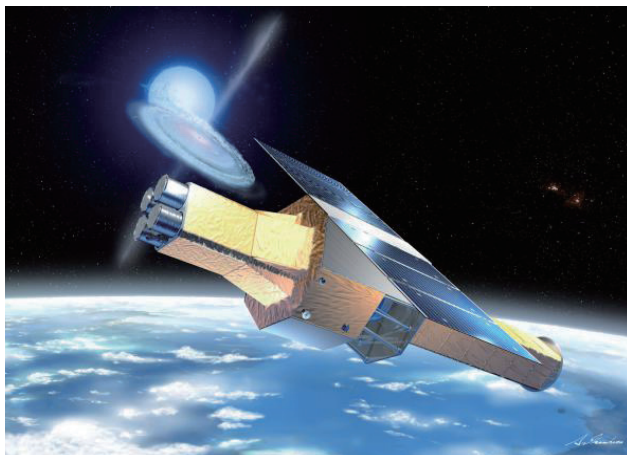


图7 ASTRO-H

向事故原因调查的工作。

### 三、X 射线探测的意义

从已往的 X 射线天文卫星和发回来的数据看，X 射线天文学已逐渐走向揭秘高温高能天体以及发生一些高温高能的物理现象，新兴的 X 射线天文学逐渐走向了成熟。

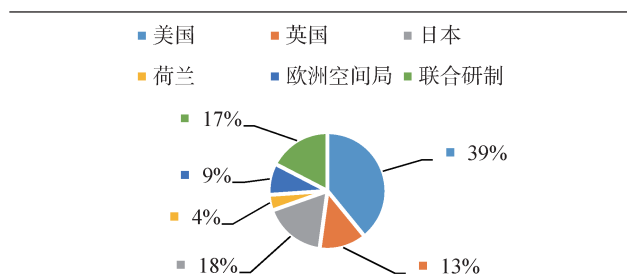
在 20 世纪 60 年代空间望远镜即天文卫星的发展，将天文学从射电天文学进入到空间天文学。今天，天文学已经进入空间天文学的多波段天文学时代，X 射线天文学又是全波段天文学的重要组成部分，因此对天体辐射的 X 射线探测具有重要的意义。

X 射线天文学的核心问题是引发源的 X 射线辐射的物理过程，科技工作者研究这些物理过程，以揭秘恒星的演化和宇宙的起源问题。因此当前 X 射线天文学的观测包括新 X 射线源的探测，确定源位置，观测源的大小和结构，探测离散源和弥漫性背景辐射，研

究 X 射线源变化。通过探测天体中高温高能的恒星以及恒星演化的终极产物白矮星、中子星和黑洞等，再对这些源进行定位研究，如探测致密星的高温高密强磁场等极端的物理过程等，通过这些研究进一步揭秘恒星的演化和宇宙的起源等问题。

最后，中国科学院高能物理研究所研制的新的 X 射线天文卫星即将发射，作者预祝发射成功，并圆满地完成科学探测的工作，借此推动中国科技事业的发展。

表 2



### 科苑快讯

#### 蓝色叶片帮助植物从阳光中获得额外能量

地球上的生命几乎都依赖于植物将光转化为化学能量的这种能力。进行这种转换的微小工厂是叶绿体，它们原地不动，吸收所有照射到自己身上的光。但是情况也不尽然。英国的一个研究组在《自然植物》(Nature Plants) 上报告，发现了一种荫生秋海棠 *Begonia pavonina*，其叶片上的光吸收器官会促进光的吸收。

典型的叶绿体包含称为类囊体的膜结合隔室，它们以一种有些随机的方式互相堆叠在一起。然而在这种秋海棠中堆叠更规律，并产生了光子晶体。这些晶体阵列强烈反射蓝光，赋予叶片彩虹般的光彩。但是更重要的是，它们在叶片上集中了更丰富的绿色、红色波长光的能量吸收器官。结果使这种秋海棠的叶片比其他森林低洼处生长的植物多吸收了将近 10% 的能

量。听起来好像这 10% 似乎不算什么，但是对于身处马来西亚密林天蓬般浓荫下的这种秋海棠来说，这点额外能量就已足够挤垮其他竞争者。



(高凌云编译自 2016 年 10 月 24 日 [www.science-mag.org](http://www.science-mag.org))