

# 空间硬 X 射线调制望远镜\*

李惕碚<sup>1,2,†</sup> 吴枚<sup>1</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 清华大学天体物理中心 北京 100084)

**摘要** 用宇宙作为物理实验室,探索在地球上无法企及的条件下,例如极早期宇宙或黑洞视界附近强引力场中的物理规律,已成为新世纪物理学和天文学共同的前沿课题.空间天文观测是其中一个最重要的研究途径.自主研制和发放空间硬 X 射线调制望远镜(HXMT),实现中国空间天文卫星零的突破,是中国“十一·五”空间科学发展规划的目标之一.HXMT 将实现宽波段 X 射线(1—250 keV)巡天,其中在硬 X 射线波段具有世界最高灵敏度和空间分辨率,发现大批被尘埃遮挡的超大质量黑洞和未知类型天体,探测宇宙硬 X 射线背景辐射.HXMT 还将通过对黑洞和其他高能天体宽波段 X 射线时变和能谱的观测,研究致密天体极端物理条件下的动力学和辐射过程.基于成像技术创新提出 HXMT 项目迄今已有 15 年,能不能抓住技术创新所提供的科学机遇仍然是一个严重的挑战.

**关键词** 高能天体物理,黑洞,空间天文

## The hard X-ray modulation telescope mission

LI Ti-Pei<sup>1,2,†</sup> WU Mei<sup>1</sup>

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Using the universe as a unique laboratory for probing the laws of physics in regimes not accessible on Earth, such as the very early universe or strong gravity fields near the event horizon of a black hole, is a new common frontier between physics and astronomy. The hard X-ray modulation telescope (HXMT) mission is the first dedicated astronomy satellite in the 2006—2010 five-year plan for space science unveiled by the National Space Administration of China. The HXMT mission will perform a wide band (1—250 keV) all-sky survey with the best sensitivity and angular resolution in the hard X-ray range as a black hole finder and cosmic hard X-ray background observer, and make sensitive pointed timing and spectral observations for studying the underlying physics processes of black holes and other compact objects. Fifteen years have passed since the submission of the HXMT proposal based on a new imaging technique. It is still a challenge for China to see if the scientific opportunity created by such a technological innovation can be finally grasped.

**Keywords** high-energy astrophysics, black hole, astronomy from space

### 1 X 射线天文学的开拓

天体的高能辐射(X 射线、 $\gamma$  射线)被地球大气吸收,必须在地外空间才能被观测到.1962 年,美国科学工程公司一个青年核工程师贾科尼(R. Giacconi),联合麻省理工学院的学者,用探空火箭把 X 射线计数器放到高空,探测月面被太阳照射时产生

的荧光 X 射线,意外地在月亮和太阳以外的天区探测到一个很强的 X 射线源<sup>[1]</sup>.当时用的 X 射线探测器不能成像,只能测得宽视场中的 X 射线光子计数,不能确定 X 射线天体的位置.1965 年,在美国工作的日本学者小田(M. Oda)提出准直器调制定位

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000077600)资助项目  
2008-07-29 收到

† 通讯联系人. Email: litp@mail.tsinghua.edu.cn

方法<sup>[2]</sup>,可以利用简单的 X 射线计数器确定 X 射线源的方位. 1966 年,贾科尼、小田等将加了准直器的 X 射线探测器用火箭重新发射上天,测出这个 X 射线源在天蝎座,这就是人类发现的第一个宇宙 X 射线源天蝎座 X-1. 1970 年,采用这一技术的 X 射线天文卫星“Uhuru(自由号)”上天. Uhuru 实现了人类历史上首次 X 射线(2—20 keV)巡天,发现了 400 多个宇宙 X 射线源. 其后,贾科尼等发展了 X 射线掠射成像技术,发放了“爱因斯坦天文台”等 X 射线成像卫星,使 X 射线天文学走向成熟. 2002 年,贾科尼由于开拓了人类观测宇宙的新窗口——X 射线天文学而被授予诺贝尔物理学奖.

## 2 硬 X 射线天文

对于研究天体极端条件下的高能过程,光子能量高于 10—20 keV 的硬 X 射线是比 X 射线更重要的窗口. 例如,黑洞吸引周围物质形成吸积盘,其最后一个稳定轨道内边缘的温度达到数百万、上千万度,发射强烈的软 X 射线. 而从吸积盘边缘到黑洞视界的高温等离子体温度高达数十亿度,这个区域主要发射比软 X 射线能量更高的硬 X 射线. 所以,硬 X 射线是研究邻近黑洞强引力场区域时间、空间和物质性质的关键波段. 而且很多巨型黑洞被尘埃包围,软 X 射线无法穿透,只能用硬 X 射线探测器去发现它们. 上世纪 90 年代初,美国科学研究委员会天体物理委员会在规划未来十年美国天体物理发展的报告中指出,高能天文观测存在一个重要的缺口,就是硬 X 射线波段,预期这个波段将是非常富有成果的领域,报告将硬 X 射线成像列为优先级最高的 90 年代空间高能项目;美国宇航局也把硬 X 射线巡天列为 90 年代空间高能天体物理的首要任务.

硬 X 射线成像比 X 射线成像困难得多. 上世纪 70 年代开始发展了编码孔径成像技术,它是用探测器阵列与编码孔板构成的编码孔径望远镜,记录不同方向入射的光子编码板投影的叠加,然后再借助于解调或者反演的数学方法求出影像. 上世纪 90 年代,欧洲和美国先后开始研制编码孔径成像的硬 X 射线卫星.

## 3 直接解调方法

我们于上世纪 90 年代初提出直接解调方法<sup>[3]</sup>,

用简单成熟的硬件技术可以实现高分辨和高灵敏度硬 X 射线巡天. 自从高斯发明最小二乘法以来,人们总是借助一些简化的最优化条件(如最小二乘条件、最大熵条件或最大似然条件)或线性数学变换(如傅里叶变换),实现由观测数据到真实对象的反演;直接解调方法则应用非线性的数学手段,直接解原始的测量方程,实现反演成像. 由于更充分地利用了数据中有关测量对象和测量仪器的信息,同样的数据经直接解调可以得到比传统方法好得多的反演结果. 把直接解调技术运用于实验设计,可以突破仪器内禀分辨的限制,用简单的非成像探测器扫描观测,实现高灵敏度和高分辨率的成像. 与复杂和昂贵的编码孔径成像系统相比,简单的准直探测器扫描数据直接解调成像的,分辨率高,同时噪音干扰被有效抑制,背景异常干净.

直接解调方法提出之初,用低分辨的非成像探测器能实现高分辨成像难以被接受,曾被称为“魔术”,直接解调成像结果甚至被怀疑为弄虚作假. 新方法取得认可经历了一个长期的过程:论证了方法的数学基础;用地面实验和球载硬 X 射线望远镜飞行验证了直接解调成像的可行性;应用直接解调技术重新分析多种国际空间天文卫星的档案数据,大大提高了其结果的质量(利用一些非成像卫星的数据实现了高分辨成像,并获得一些重要的天文发现). 经过十年左右的理论、实验和数据分析工作,国内外学者开始接受直接解调方法,例如 2002 年 7 月,欧洲空间局在意大利举行空间科学暑期讲习班,将“直接解调方法”列为成像方法课程.

## 4 硬 X 射线天文卫星 HXMT

1993 年,中国科学院高能物理研究所高能天体物理实验室研制的非位置灵敏硬 X 射线探测器 HAPI-4(见图 1),在高空气球飞行中对恒星级黑洞天鹅座 X-1 进行扫描观测,利用直接解调技术实现了高分辨硬 X 射线成像<sup>[4]</sup>. 在此基础上,作为“九五”重大科学工程侯选项目,我们提出用成熟廉价的探测技术建造和发放世界最高灵敏度和最高空间分辨本领的硬 X 射线调制望远镜 HXMT 的建议. HXMT 望远镜由 18 个准直 NaI/CsI 复合晶体单元构成,总面积为 5000 cm<sup>2</sup>,准直器视场为 1°×6°,探测能区为 20—250 keV,成像分辨率好于 5 角分. 1994 年 5 月,对该建议的评审结论是“空间高能 X 射线调制望远镜采用我国发展的直接解调成像方

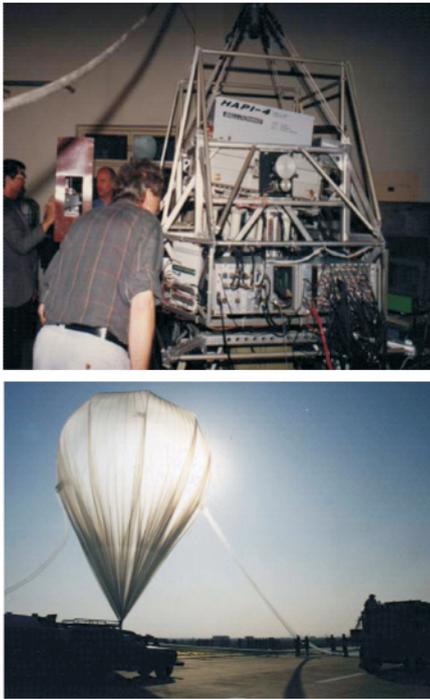


图1 球载硬 X 射线望远镜 HAPI-4(上)准备发放(下)

法,如能确认则可望成为世界上第一台高能 X 射线的高灵敏度、高分辨率的成像望远镜,在硬 X 射线天体的发现和研究方面作出重大贡献。技术(硬件)储备较好,主要问题是作为核心的方法有待确认”。

经过多年时间,直接解调方法慢慢地被较多人认可。1998年,为利用直接解调新技术开拓空间天文前沿,44位物理、天文和空间科学技术方面的学者(包括9位在海外的中国学者)联合提出国家重点基础研究发展规划(973)项目建议书。2000年,973项目“天体高能辐射的空间观测与研究”立项。2000—2005年,在973项目支持下,中国科学院高能物理研究所和清华大学合作建成HXMT望远镜主探测器1:1地面样机(见图2)。地面样机对放射源扫描成像结果(如图3),证实了用HXMT实现高分辨率成像的可行性。

## 5 硬 X 射线巡天

1993年提出的HXMT卫星项目,期望能在欧美之前,以好于5角分的分辨率实现硬 X 射线的首次成像巡天,发现大批被尘埃遮挡的超大质量黑洞和其他高能天体。当时,欧洲刚开始研制基于编码孔径成像技术的INTEGRAL卫星,由2500个硬 X 射线/ $\gamma$ 射线探测单元组成,总面积 $2500\text{ cm}^2$ ,设计的成像

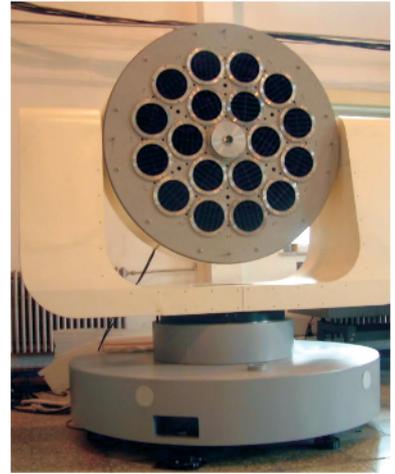


图2 HXMT地面样机

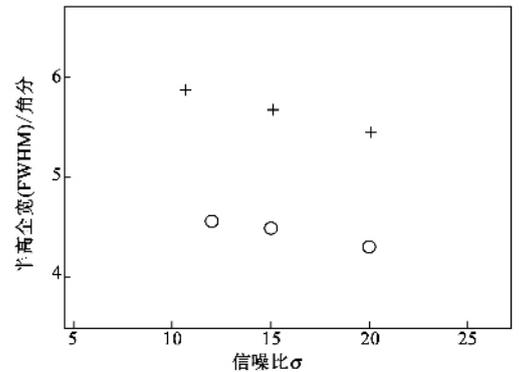


图3 地面样机测得的HXMT角分辨率。十字叉是只用6个探测单元成像的结果,空心圆为12个探测单元成像的结果

角分辨率为15角分。HXMT的成像分辨率和灵敏度比INTEGRAL好得多,但技术难度和造价却低得多,领先实现硬 X 射线巡天是完全可能的。可惜的是,由于对直接解调新方法的疑虑,HXMT项目立项被长期拖延,而INTEGRAL卫星却于2002年成功发射上天。INTEGRAL虽然不是为实现巡天设计的卫星,但鉴于硬 X 巡天的重要性,INTEGRAL上天后用累积大量局部天区成像的方式努力实现大天区成像,发现了几十个以前没有看到的超大质量黑洞。随后,2004年美国又发射了可以实现硬 X 射线巡天的编码孔径成像望远镜SWIFT,角分辨率为14角分。虽然HXMT仍然可以实现灵敏度、空间分辨率和曝光均匀性比INTEGRAL和SWIFT更好的巡天,能发现更多的硬 X 射线天体,但中国实现人类首次硬 X 射线巡天的难得的历史性机遇已经丧失。

## 6 超越爱因斯坦

“超越爱因斯坦”是 21 世纪美国 NASA 的一个重大的空间科学计划,其科学目标是了解(1)是什么驱动了宇宙大爆炸(2)黑洞附近时间、空间和物质的性质(3)什么是暗能量。“超越爱因斯坦”计划通过对宇宙大爆炸、黑洞和暗能量的空间科学观测,寻求物理科学新的突破。

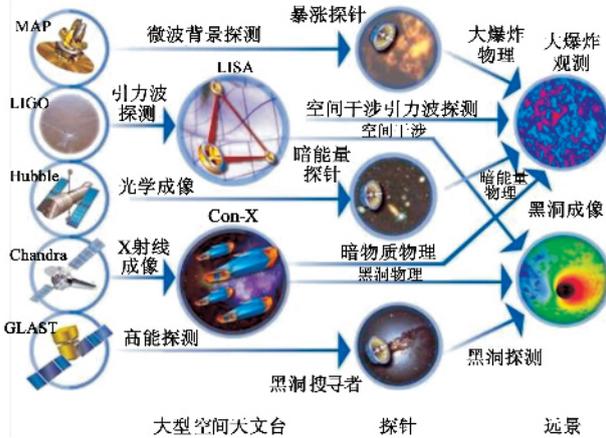


图 4 “超越爱因斯坦计划”路线图(图中的英文如 MAP, LIGO, LISA, Hubble, Chandra 等都是卫星的名称)

HXMT 是发现黑洞和研究致密天体强引力场中动力学与高能过程的强有力的实验装置。在“超越爱因斯坦”计划的下一代黑洞搜寻者(Black Hole Finder Probe)之前, HXMT 能够以最高灵敏度和分辨率发现大批被尘埃遮挡的超大质量黑洞和其他未知类型高能天体,并研究宇宙硬 X 射线背景的性质。HXMT 卫星的低能(1—15 keV)、中能(5—30 keV)和高能(20—250 keV)三个望远镜都是准直型探测器,直接解调扫描数据可以实现高分辨和高灵敏度成像以及对弥散源的成像;而大面积准直探测器又能获得特定天体目标的高统计和高信噪比数据,使 HXMT 既能实现大天区成像,又能通过宽波段时变和能谱观测研究天体高能过程,有机会为实现“超越爱因斯坦”的目标作出独到的贡献。

HXMT 建议提出 3 年后,笔者之一于 1996 年 8 月初在香港召开的“21 世纪华人天文学会议”上介绍了这个项目<sup>[5]</sup>。报告的结束语说:“由于在硬 X 波段具有前所未有的灵敏度和成像能力, HXMT 卫星将对空间天文的发展做出重要贡献。对于中国,这是一个难得的机遇去实现人类首次硬 X 射线高灵敏度和高分辨率巡天,这也是对于中国科学界及其领

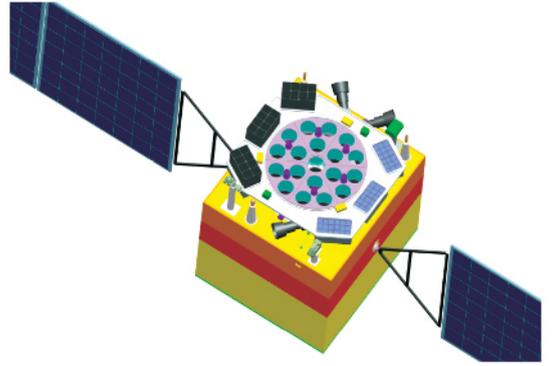


图 5 HXMT 卫星

导者的判断力、自信心与勇气的一个挑战”。

报告结束,来自台湾在美国 NASA 戈达特飞行中心工作的著名理论天体物理学家丘宏义教授从头排的座位站了起来,兴奋地挥动着手臂说:“太好了,我们可以超过美国人了!”他接着讲了一个故事:小田因为发明 X 射线调制器实现 X 射线天体定位和第一颗 X 射线卫星上天而变得很有名气;当他从美国回到日本时,受到天皇接见。天皇问他:“小田先生,你发明的这个调制器有什么用处?”小田答道:“没有什么用处,最重要的用处就是能够得到陛下的接见!”

小田于 1965 年提出准直调制方法时,在美国光学杂志发表的文章篇幅不足一页,次年用火箭飞行测得第一个宇宙 X 射线源 4 年后, X 射线卫星 Uhuru 就升空了,实现了 X 射线巡天的开拓。我们在 1992 年建立直接解调方法,也用了 1 年时间由气球飞行实现了对天鹅座 X-1 的直接解调成像。但是, 15 年过去了,从丘先生激动地期待算起也已经过去了 12 年,至今硬 X 射线调制望远镜卫星的工程立项还未能完成。作为在中国从事科学研究的工作者,十多年来我们不断地聆听要努力创新的教导,或承受没本事创新的指责,无缘体味小田式的幽默洒脱。面对激烈的国际竞争,我们仍然在努力着和祈望着新方法所提供的科学机遇不至于最终被完全地丧失掉。

### 参考文献

- [1] Giacconi R, Gursky H, Paolini F *et al.* Phys. Rev. Lett., 1962, 9 :439
- [2] Oda M. Appl. Opt., 1965, 4 :143
- [3] Li T P, Wu M. Astrophys. Space Sci., 1994, 215 :213
- [4] Lu Z G *et al.* Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A, 1995, 362 :551
- [5] Li T P. In Proc. of 21st Century Chinese Astronomy Conference. Cheng K S, Chan K L eds. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997. 170