

仰望星空

—— 探索黑洞的历程

李惕碛

中国科学院高能物理研究所

清华大学天体物理中心

一、天上与地下

二、空间天文

三、探测黑洞

四、仰望星空

一、天上与地下



宇宙射线



高山宇宙线观测站 云南东川



1966.3 邢台





2008年5月，震后的北川中学。

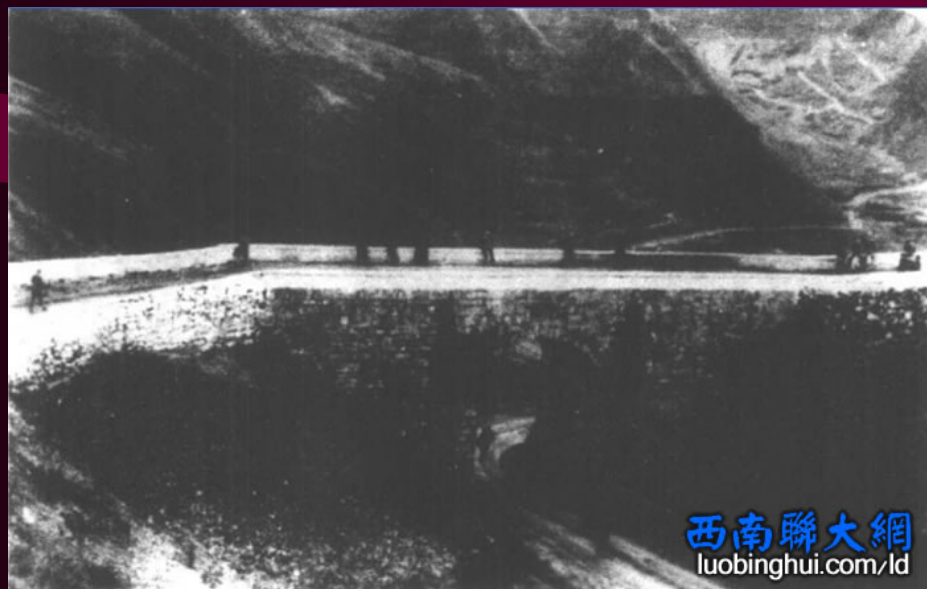


1939年8月，重庆市一所学校遭轰炸，三位教师站在瓦砾上。



1940年
重庆大轰炸





1938 西南联大湘黔滇旅行团
经过的湘黔交界处





杨振宁 吴大猷 马仕俊
(1949)



朱光亚 吴大猷 李政道
(1992)

二、空间天文

近代物理学的革命：X射线的发现

伦琴 1895 X射线 第一个诺贝尔物理奖

贝克勒尔、居理夫妇 1896 — 1899 α 、 β 射线 诺贝尔物理奖

维拉德 1900 γ 射线 诺贝尔物理奖

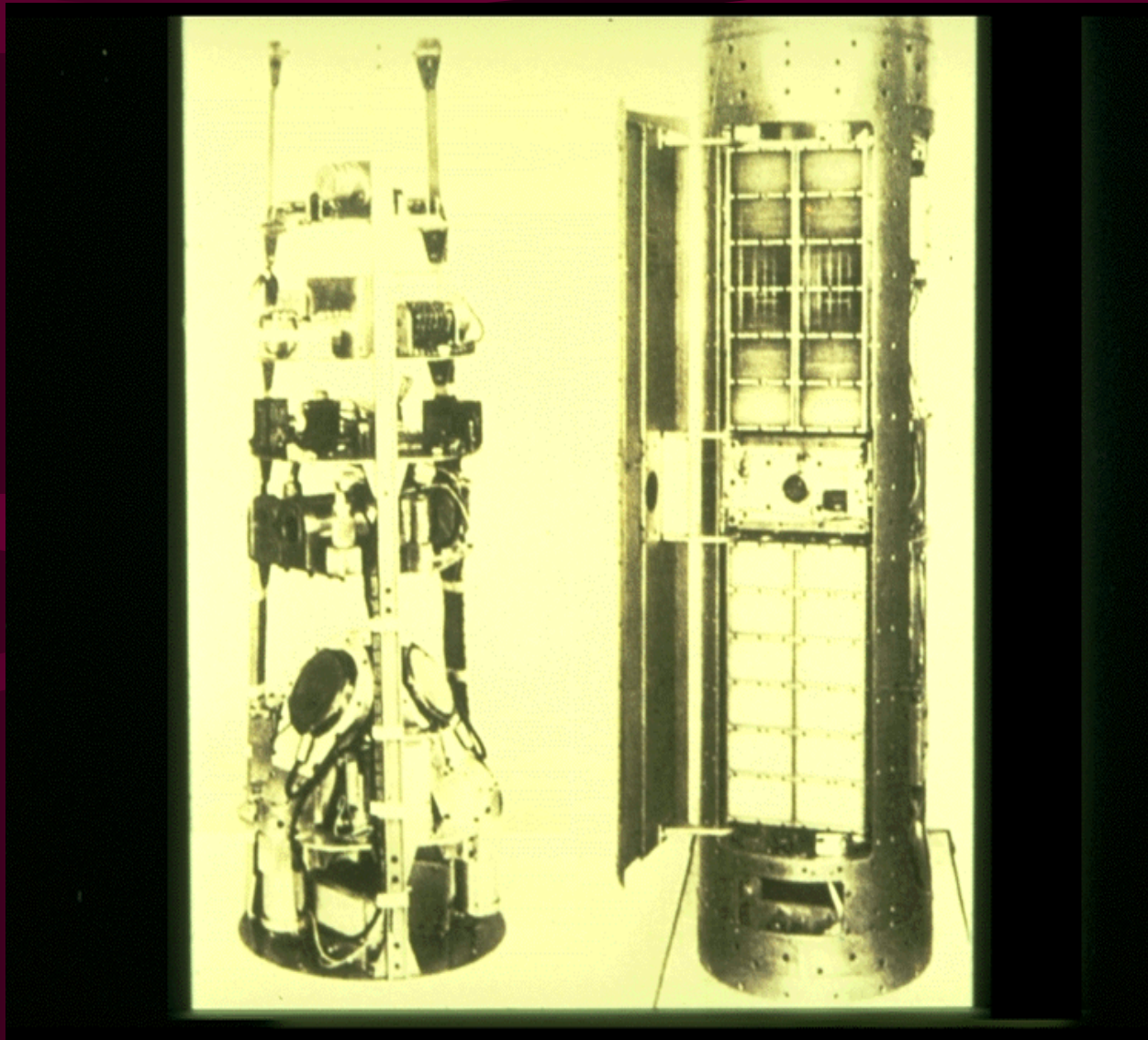
近代天文学的革命：空间X射线天文的诞生

贾科尼 (ASE-MIT-NASA)

1962 — 1970 X射线天文 2002年诺贝尔物理奖



“for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources”



The first experiment to detect cosmic X-rays

Giacconi et al., *Phys. Rev. Lett.*, 9, 439 (1962)

X 射线天文学的开拓 ($< 10 \text{ keV}$)

1 9 6 2 ASE-M I T 核科学实验室贾科尼 火箭探测发现存在
X 射线天体

1 9 6 5 小田 (M. O d a) 提出线性扫描调制方法

1 9 6 6 ASE-M I T 核科学实验室 火箭探测发现 S c o X — 1

1 9 7 0 N A S A — M I T X 射线天文卫星

U h u r u 上天

is necessary for the successful operation of the device. A complete analysis of the more general case of arbitrary wave and aperture with arbitrary relations has also been carried out. Experimental tests of this concept are now in progress, and will be reported upon when completed.

The axial mode control technique described here was independently conceived by V. Kravtsov in December 1963, in the course of research supported by a contract from the U.S. Air Force, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio; and by R. E. Hagman in June 1964, under the support of a contract from the U.S. Army Electronic Command, Fort Monmouth, N.J.

Made public in great preliminary experiments conducted at Hughes Research Laboratories using the "rotated mode" technique with $\alpha = 90^\circ$ have resulted in single-mode operation of a ruby laser under certain circumstances. Appropriate quarter-wave plates (usually 7 A/V plates) of sapphire were cut, polished and attached to the ends of an accurately-oriented $8''$, 8 mm diam, 1.54 cm long ruby rod, with the help of high refractive index cement. Silver reflectors were then evaporated on the quarter-wave plates, and transient mode selection was performed. The assembly was pumped in a double-elliptical cavity, and the spectrum of the output was examined using a Teyman-Grove monochromator. For certain subcritical observations of the assembly in the pumping cavity, single-frequency output was observed at pumping levels of up to $\sim 15\%$ above threshold. The reasons for subcritical dependence of the spectrum were not yet clear, although some possible explanations are being examined.

References

1. R. E. Hagman and R. J. McManis, *Appl. Opt.*, **1**, 31 (1962).
2. C. C. Tang, H. Vintsy, and G. A. DeSilva, *J. Appl. Phys.*, **36**, 2249 (1965); *Appl. Phys. Letters*, **2**, 222 (1965).
3. This case has been briefly described by J. M. Birch in *Quantum Electronics*, P. Garver and N. Bloembergen, eds. Columbia Univ. Press, New York, N.Y., 1964, 137, p. 113F.

High-Resolution X-Ray Collimator with Broad Field of View for Astronomical Use

Mitsuru Oda

The author is at the Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, on leave from the Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

Received 3 October 1966.

This work was supported in part by the U.S. Atomic Energy Commission and the National Aeronautics and Space Administration.

Several x-ray sources of astronomical origin have been found by rocket observations.^{1,2} In these observations Geiger counters and proportional counters with limited fields of view have been used as detectors. The accuracy of a measurement of the angular size of a source is limited by the angular width of the field of view of the detector which has been typically several degrees. This angular width cannot be made very small in experiments from spinning platforms because of the low quantum efficiency of the sources.

A collimator has been designed which permits greatly increased accuracy in the measurement of the angular size of the x-ray sources while using detectors with wide fields of view. The basic idea of the collimator is illustrated in Fig. 1. The collimator is composed of two identical grids which are made with wires of such diameter, d , and separations between wires are B each. The grids are separated by D . If the angular size of the source θ is much smaller than d/B rad, the two grids altogether are transparent or opaque to the source depending upon whether the shadow of wires of the front grid is on the wires or the gaps be-

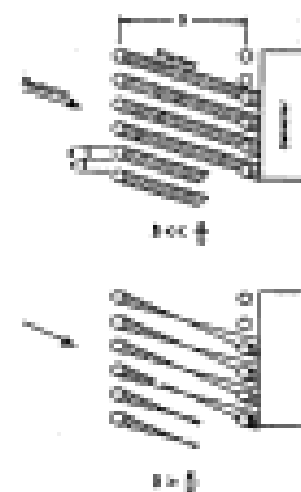


Fig. 1. Schematic diagram showing the collimator's principle.

tween wires of the rear grid. Therefore, the radiation flux through the two grids is modulated while the direction of the source with respect to the collimator moves, with the frequency which can be predicted by means of the design of the collimator and the movement of the relative direction of the source.

If, on the other hand, the angular size of the source is much larger than d/B rad, the shadow of the front grid on the rear grid is not clear and the flux is not modulated by the collimator. If the source is about as large as d/B rad, the flux will be partly modulated. Thus, the magnitude of the modulation of the flux while the source is in the field of view will tell us the size of the source.

Typical dimensions of a collimator which has been employed in rocket x-ray experiments are as follows: $d = 0.3$ mm, $B = 0.3$ mm, $D = 1.5$ cm, total area = 15.7 cm² (5.15 cm²), and resolution = 10 arc min. It is not impossible to design the collimator of the resolution of one arc min.

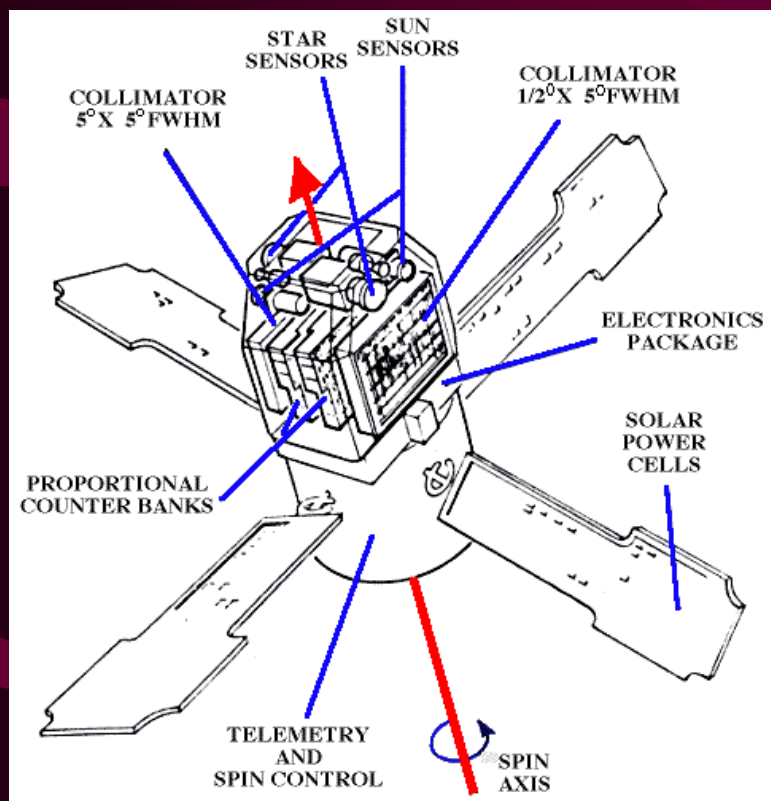
The special virtue of this collimator is that the total flux of a type detected while the source is in the field of view is practically independent of the angular resolution regardless of how fine a resolution is required.

The collimator has been used for the purpose of x-ray astronomy so far, but may find more general use in the determination of the angular size of a source of any soft radiation like ultraviolet light, infrared light, and corpuscular streams, when the direction of source is known approximately, but the flux is not strong enough to permit one to narrow the field of view of the detector and then scan the region of the source.

G. Clark, G. Giacinto, and M. Wade of MIT participated in developing this collimator. This collimator has been used for rocket x-ray observations in collaboration with R. Giacinto, R. Garber, and J. Watson, of American Science Ltd-Fairbairn, Inc.

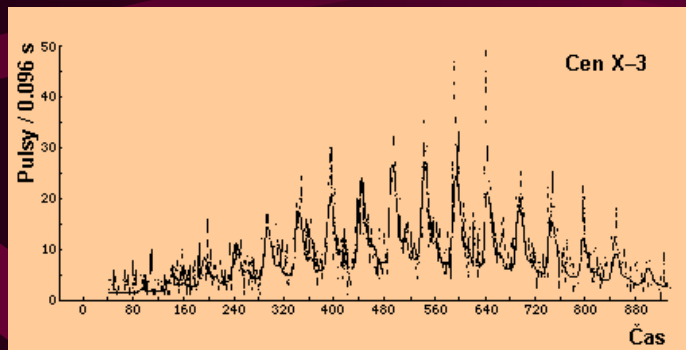
References

1. R. Giacinto, R. Garber, F. Pedini, and R. Rossi, *Phys. Rev. Letters*, **8**, 439 (1962).
2. G. Garber, R. Giacinto, F. Pedini, and R. Rossi, *Phys. Rev. Letters*, **11**, 328 (1963).
3. R. Bowyer, R. T. Byram, E. A. Chubb, and R. Finkelstein, *Nature*, **201**, 1367 (1964).

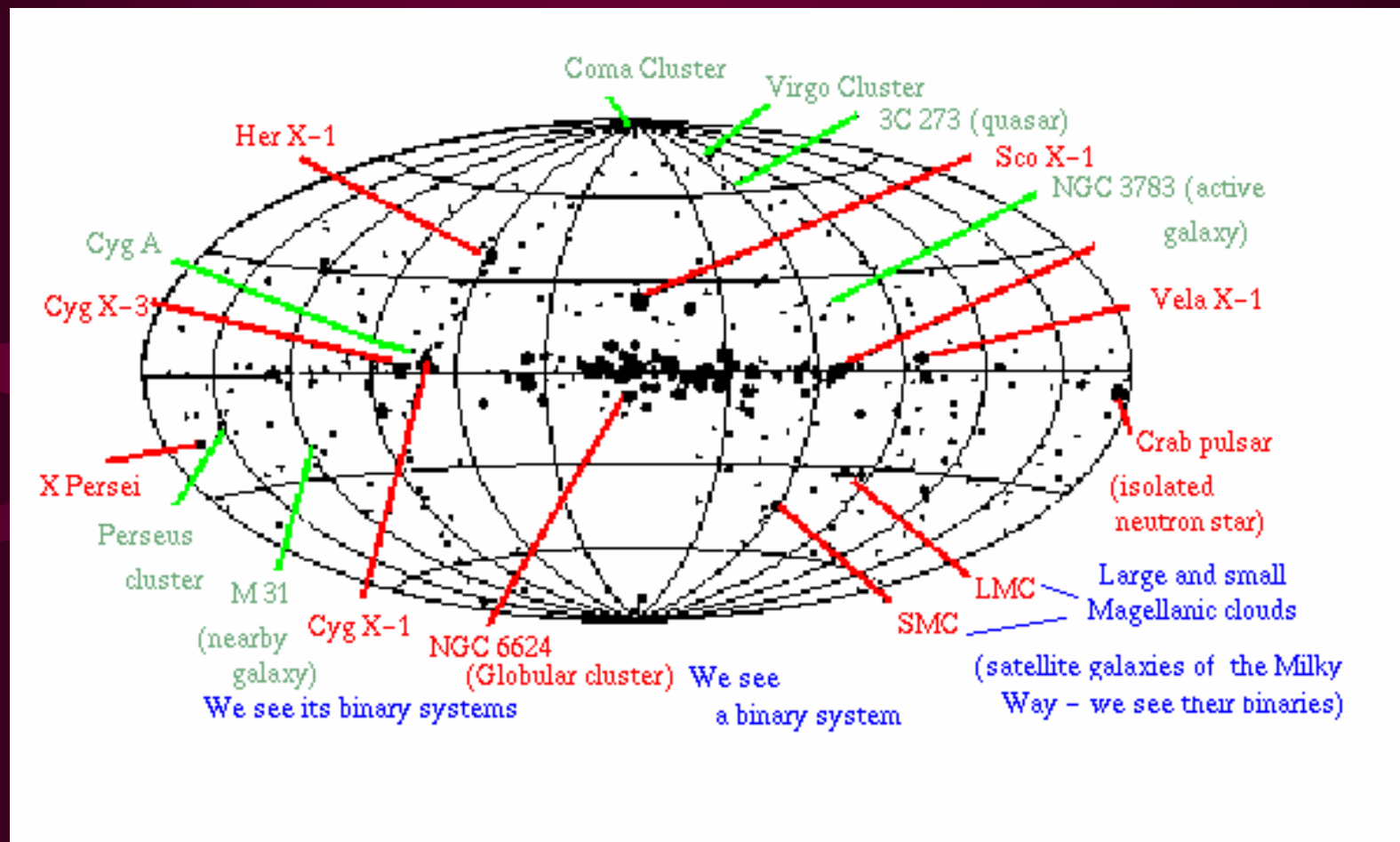


Uhuru

1970.12.12



Uhuru 巡天结果





Obituary: Minoru Oda (1923–2001)

Nature 410, 888 (19 April 2001)



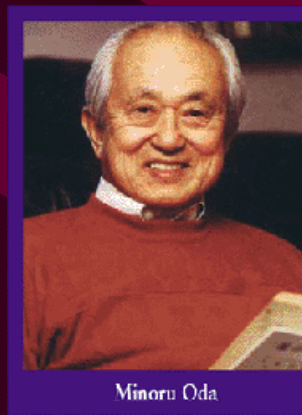
2002年诺贝尔物理学奖

贾科尼



1962

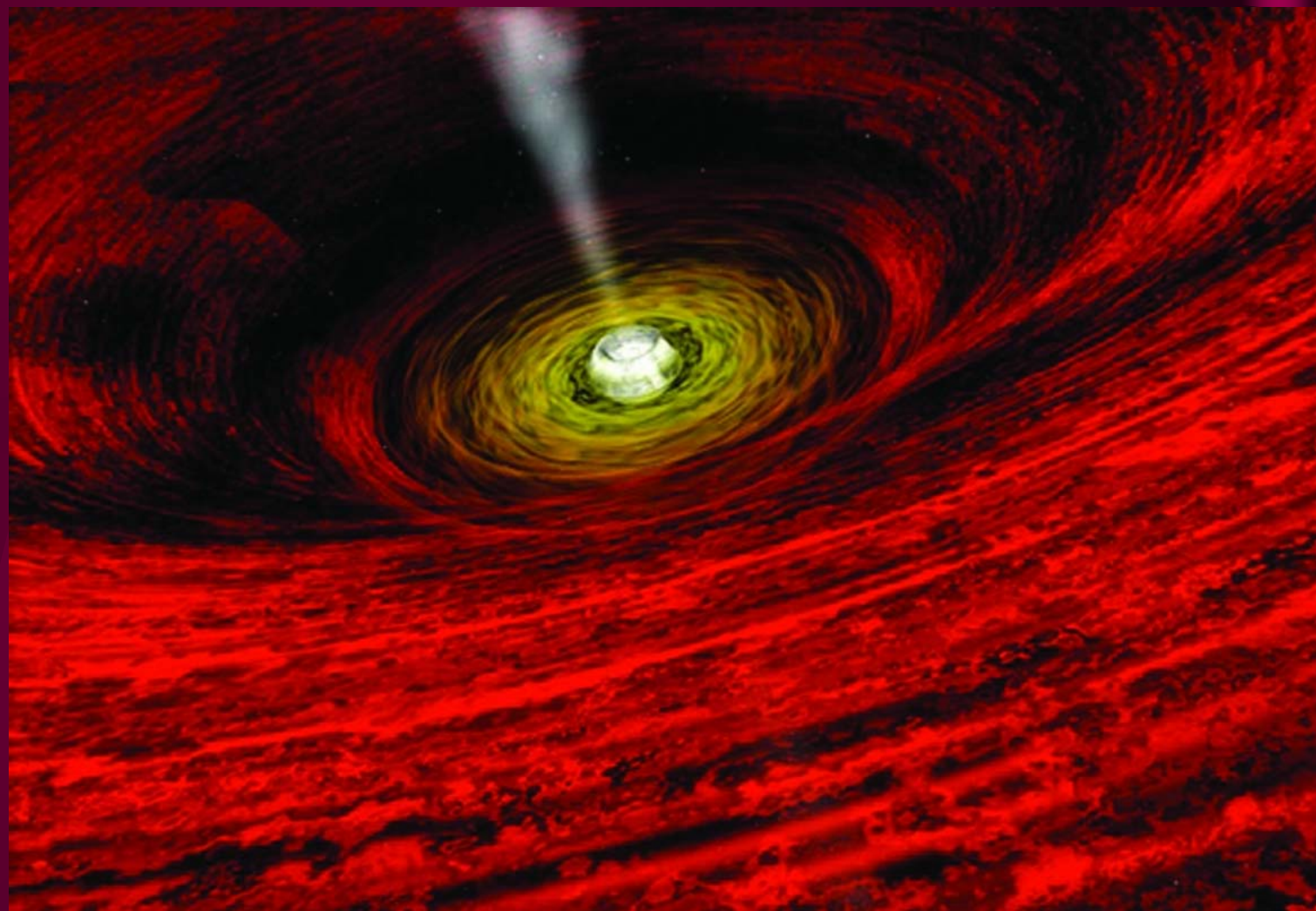
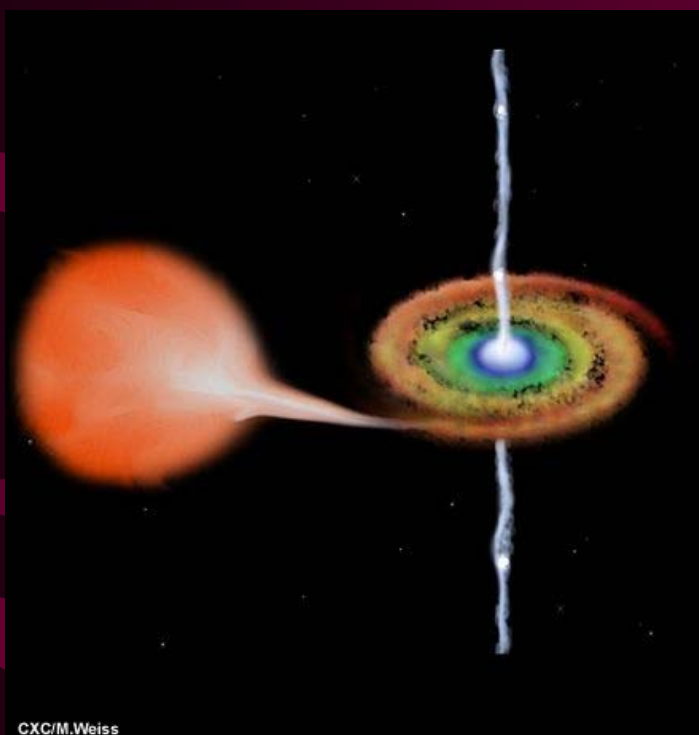
小田

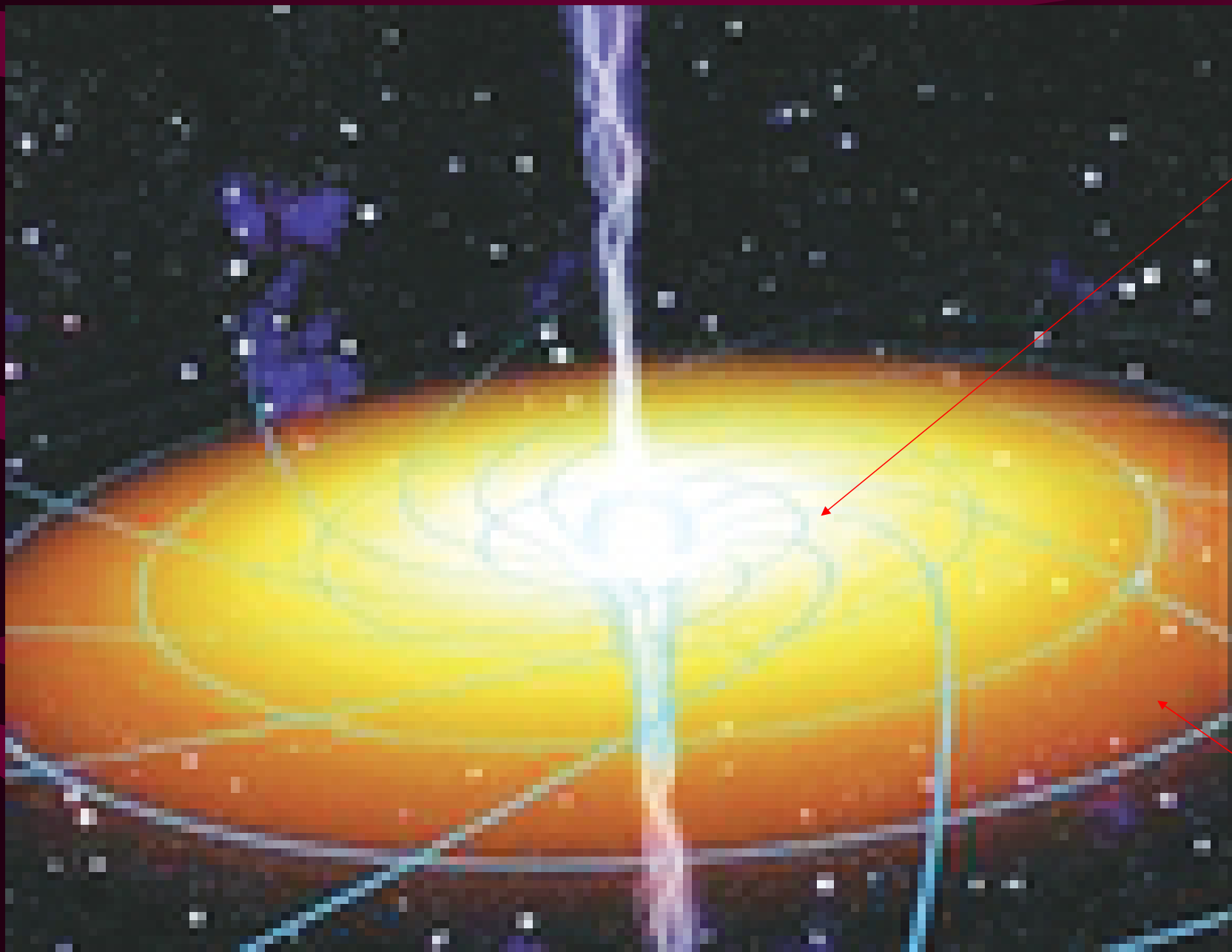


Minoru Oda



三、探测黑洞





~10亿度
(100 keV 硬X射线)

~1 千万度
(1 keV X射线)

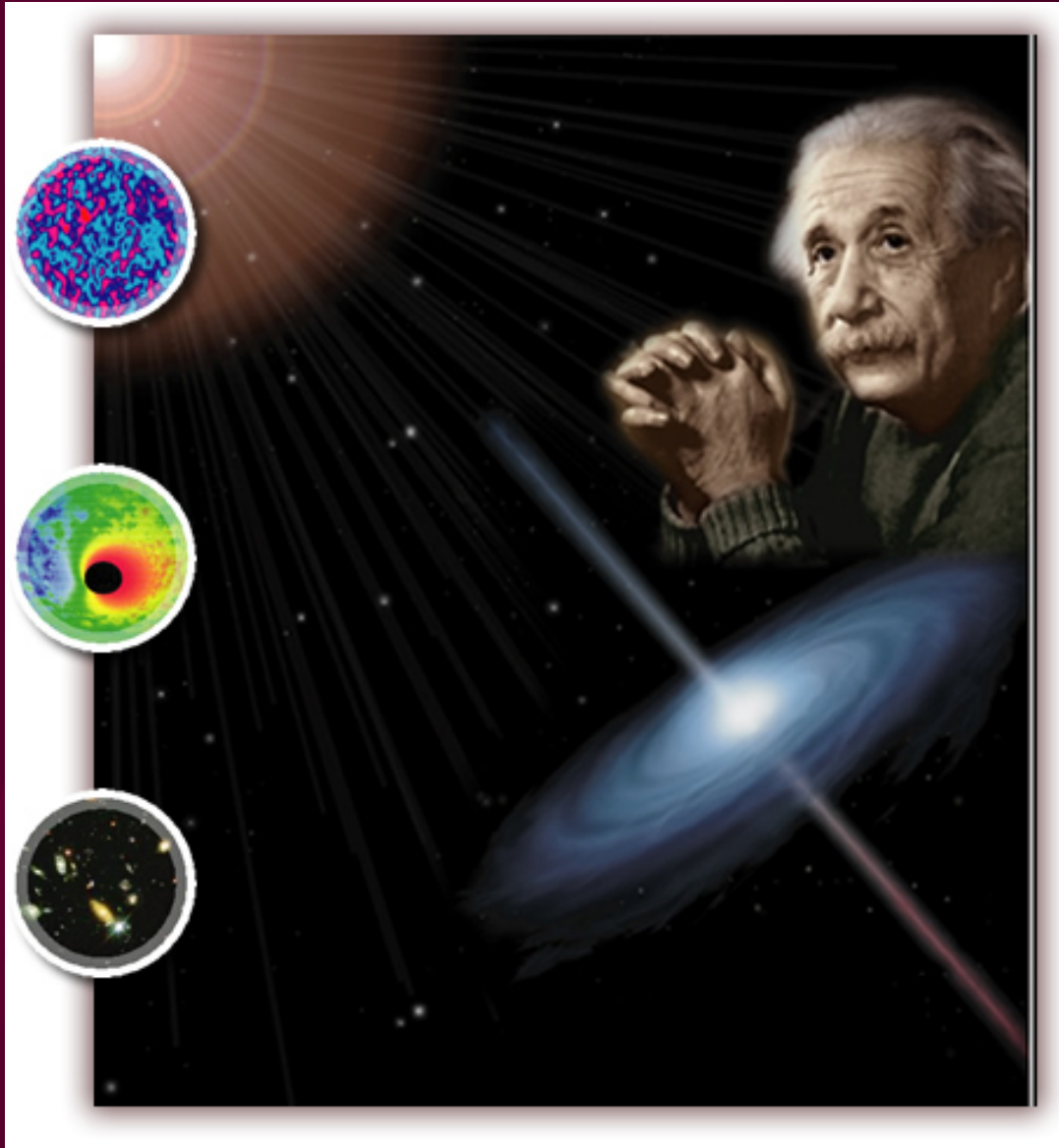
• Beyond Einstein

超越爱因斯坦

What powered
the Big Bang?

What happens
at the edge of
a black hole?

What is
dark energy?



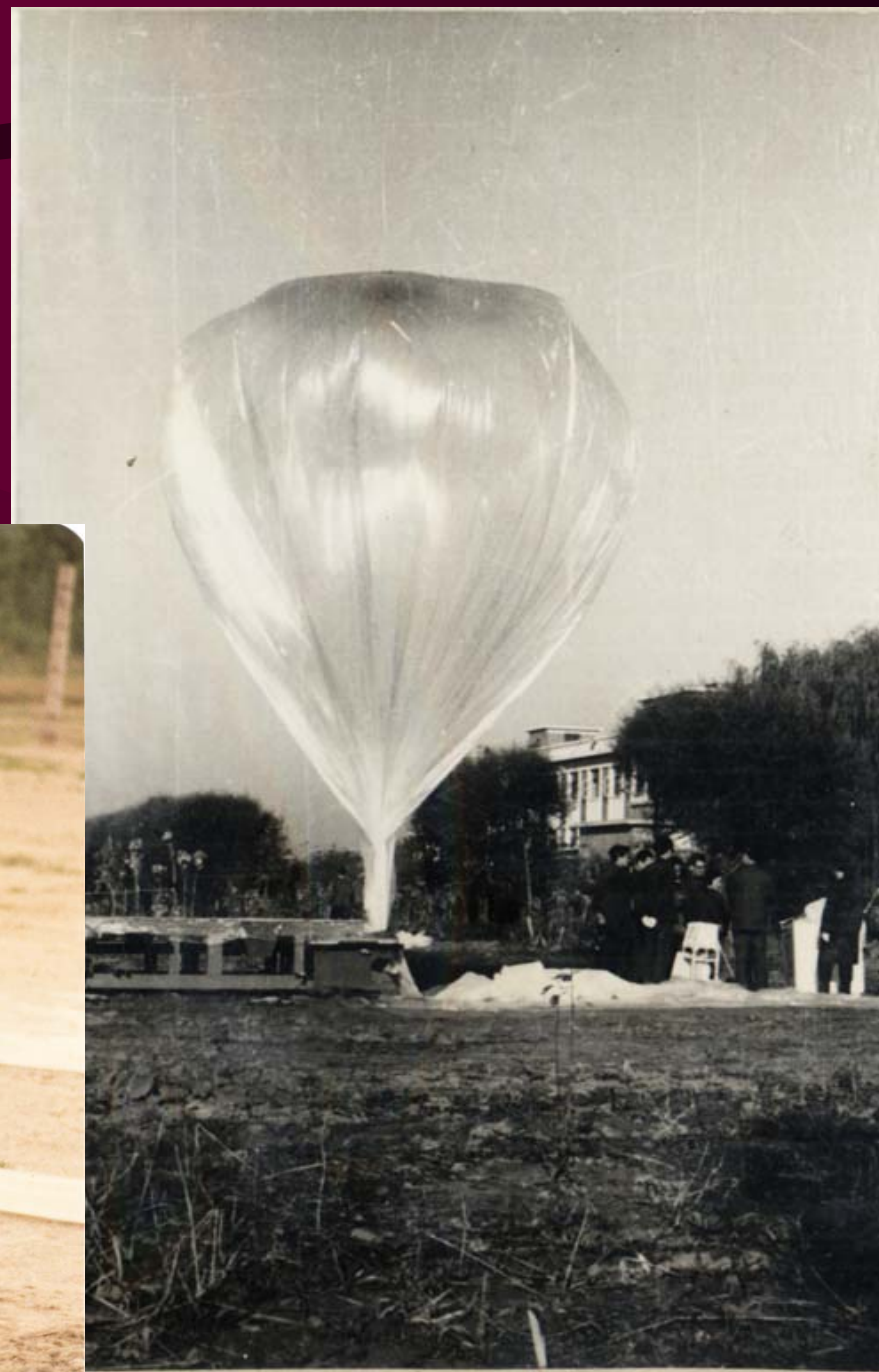
是什麼引發了
宇宙大爆炸?

在黑洞附近
發生了什麼?

什麼是暗能量?

2007.3.10 国防科工委发布我国《“十一五”空间科学发展规划》，提出我国“十一五”空间发展六大目标：一是实施国家中长期科技发展规划中的载人航天和月球探测工程；二是自主研制硬X射线调制望远镜，实现我国空间天文卫星零的突破，在黑洞物理研究等领域取得突破；...



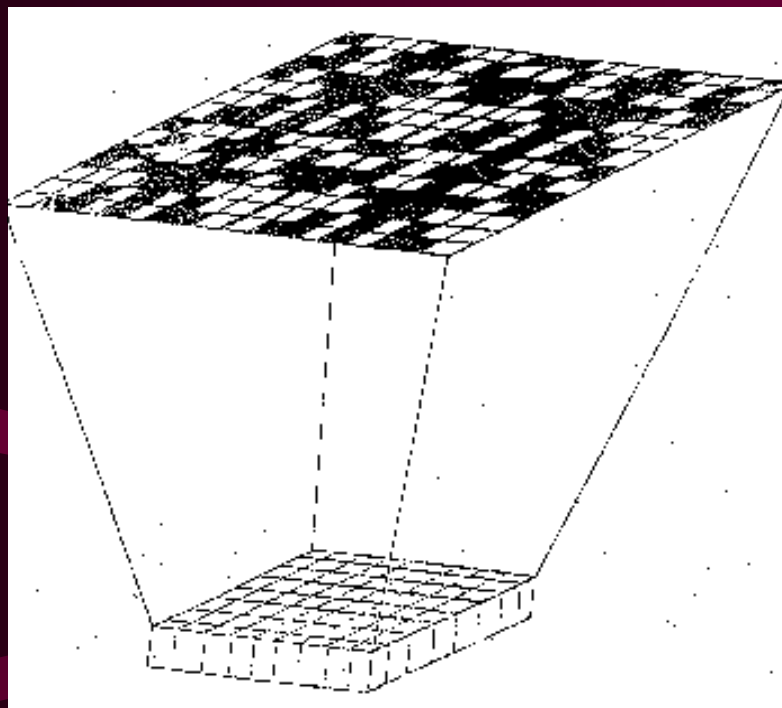


80年代初，香河



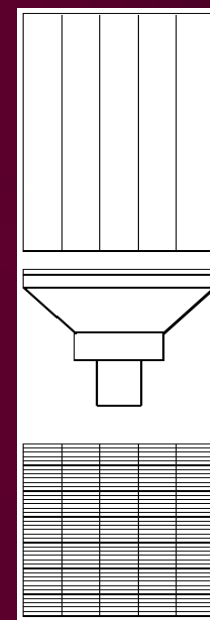
1988 巴西

硬X射线成像（90年代初）



1473 cm^2 93×99 pixels

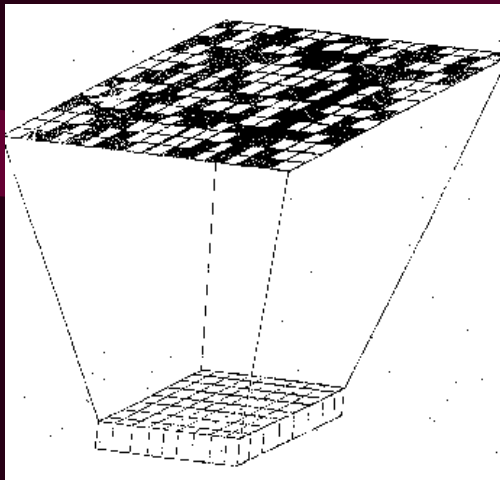
编码口径成像望远镜



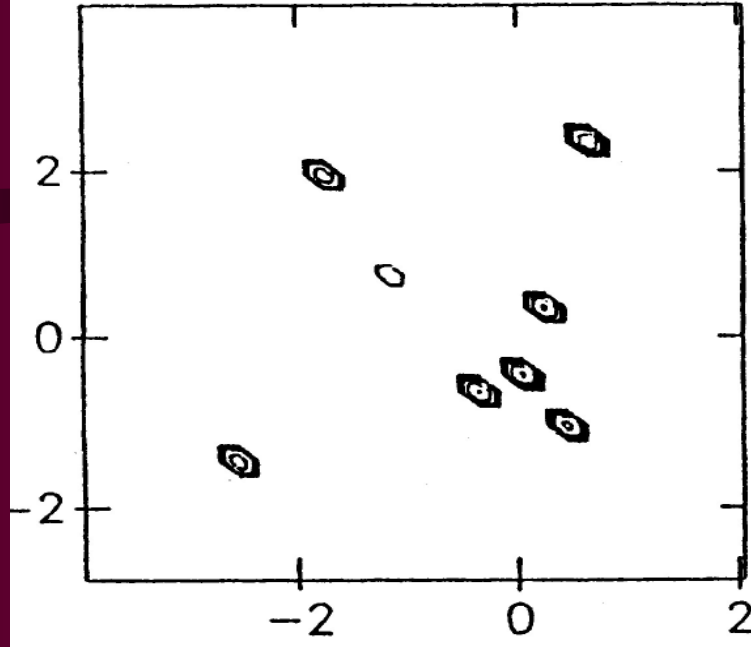
$2 \times 700 \text{ cm}^2$ $5^\circ \times 0.5^\circ$ FWHM aperture

准直扫描望远镜

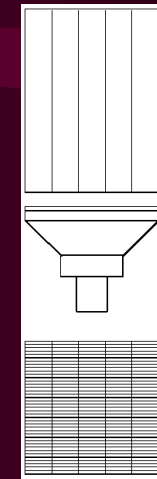
直接解调方法



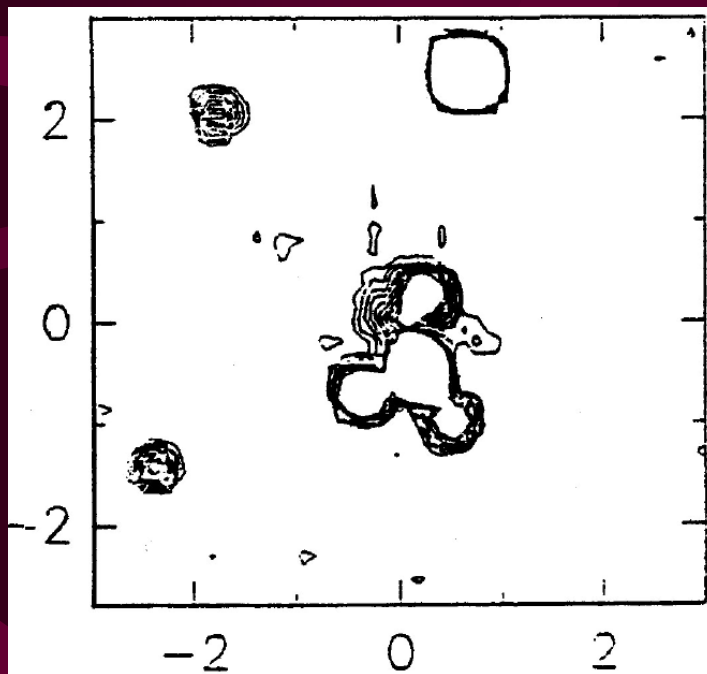
1473 cm² 93 × 99 pixels



Object

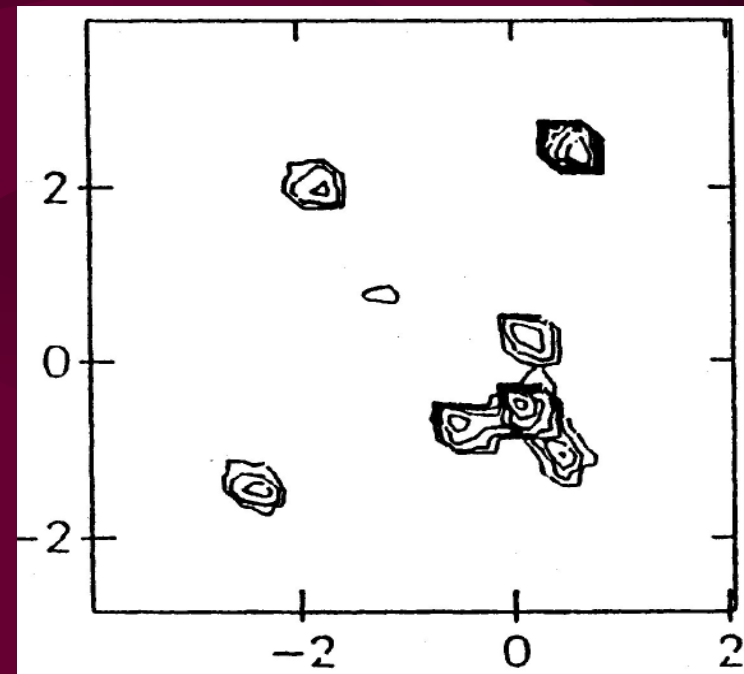


2 × 700 cm² 5° × 0.5°



CAM ($\Delta_0 = 0.3^\circ$)

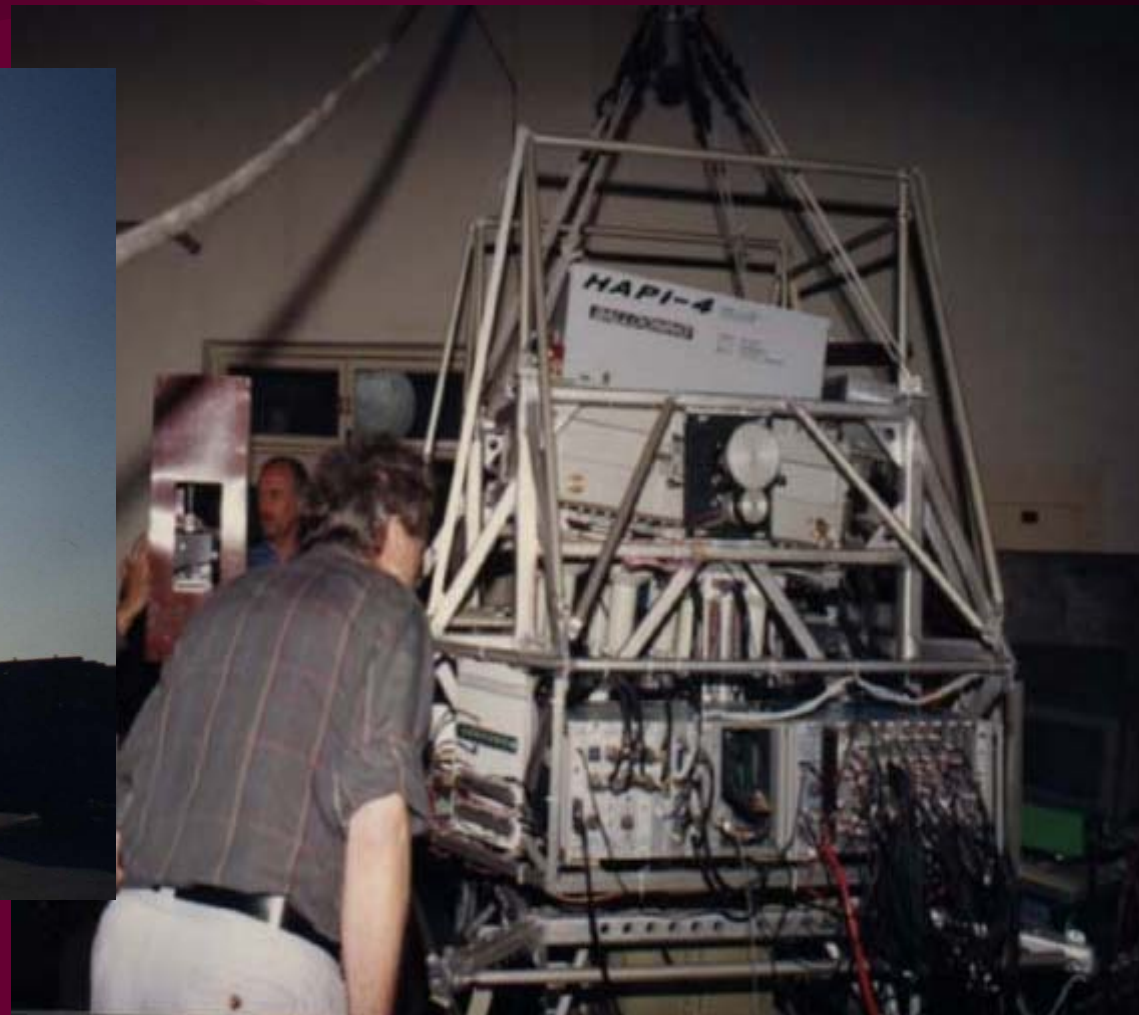
Lei F. et al., *Exper. Astron.* 1, 285 (1991)

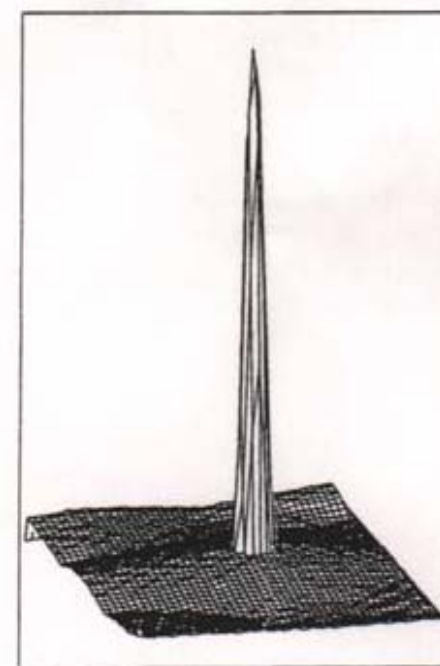
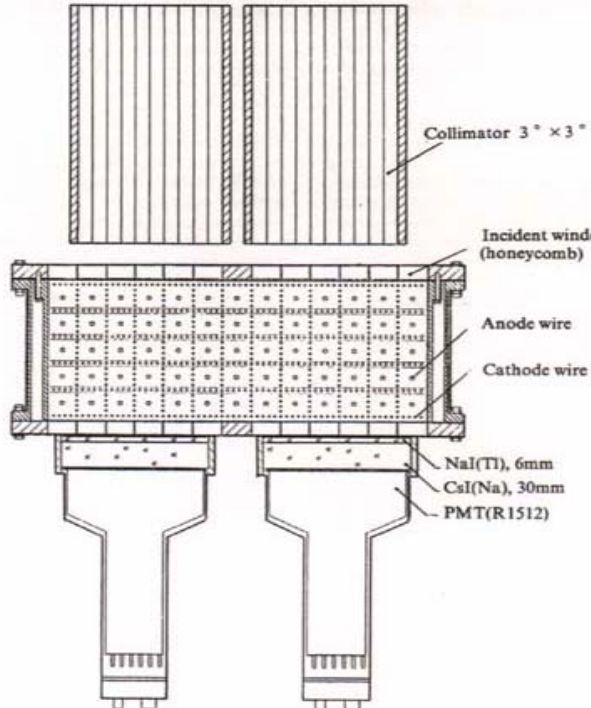


SCT ($\Delta_0 \cong 2.5^\circ$)

Li T.P & Wu M., *Astrophys. Space Sci.*,
215,213 (1994)

球载硬 X 射线望远镜 H A P I - 4





HAPI-4 / IHEP

1993. 9. 25

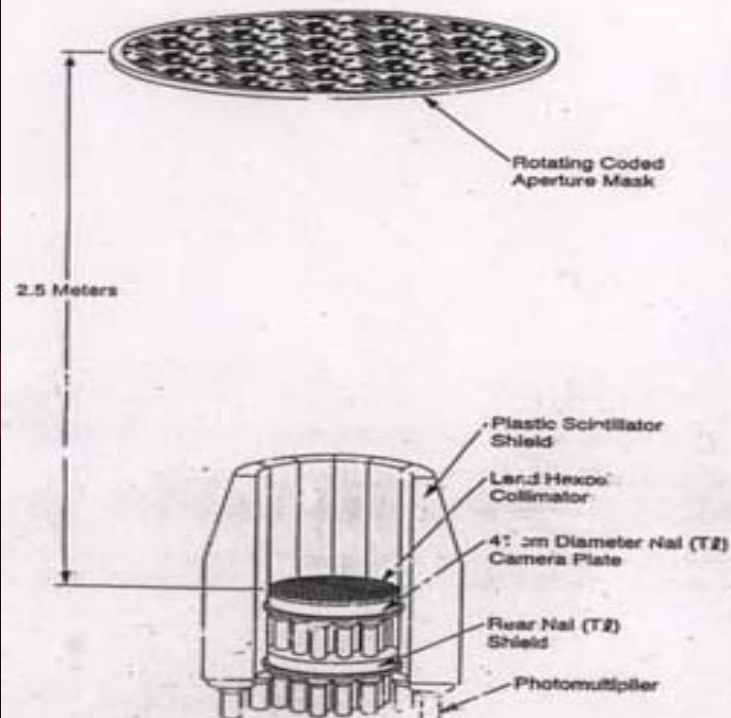
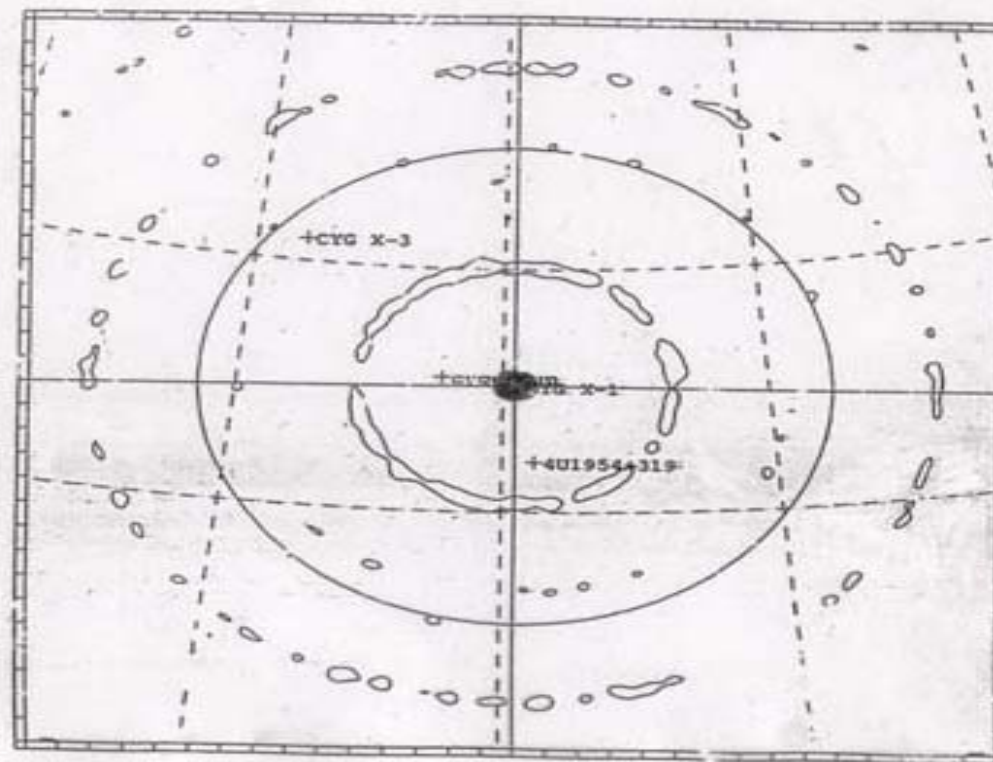


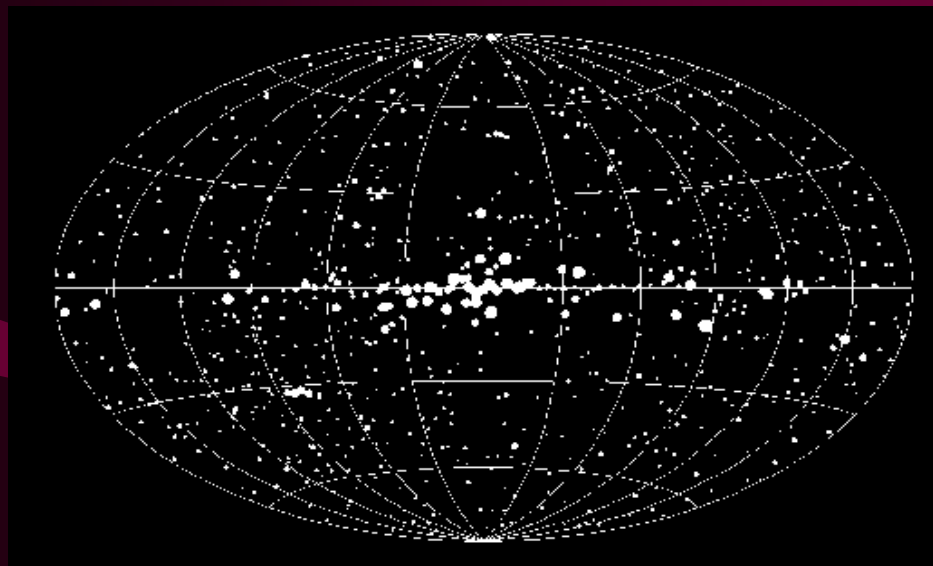
FIG. 1—Schematic diagram of the GRIP instrument as configured for the 268, D 3, and D771 observations. For the D86 observation the collimator was absent, and a different coded mask was used as described in the text.



GRIP / Caltec

1993. 9. 20

硬X射线调制望远镜HXMT (1993 —)



基于成像方法的创新，建造世界最高灵敏度和角分辨的空间硬X射线望远镜，完成人类首次硬X射线成像巡天，发现大批超大质量黑洞，深入研究中子星和黑洞强引力场中的动力学和高能辐射过程，实现我国在一个重要的基础科学前沿的跨越式发展

- X 射线巡天 （美国）：

1965 线性扫描准直调制方法 (LMC)

1966 火箭飞行测定 SCO X-1 位置

1970 X 射线巡天卫星Uhuru上天

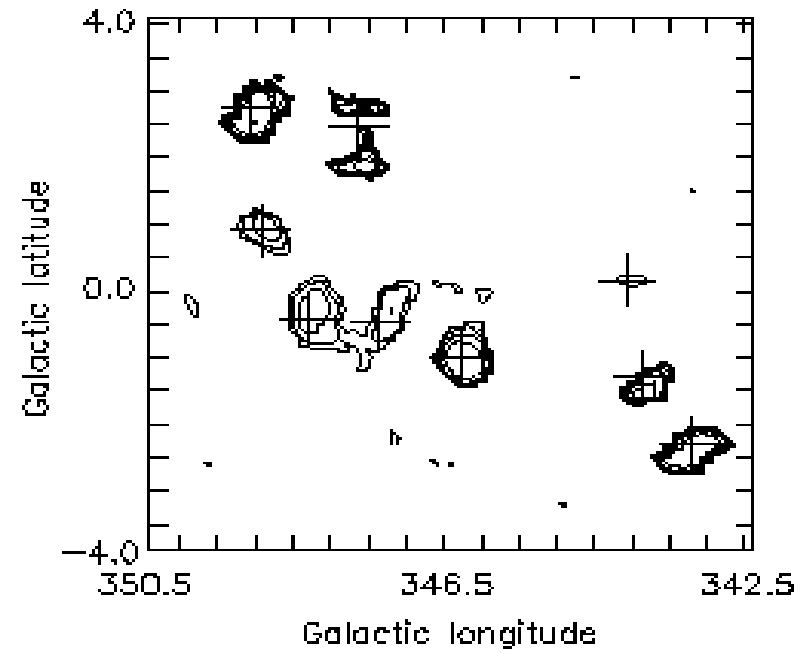
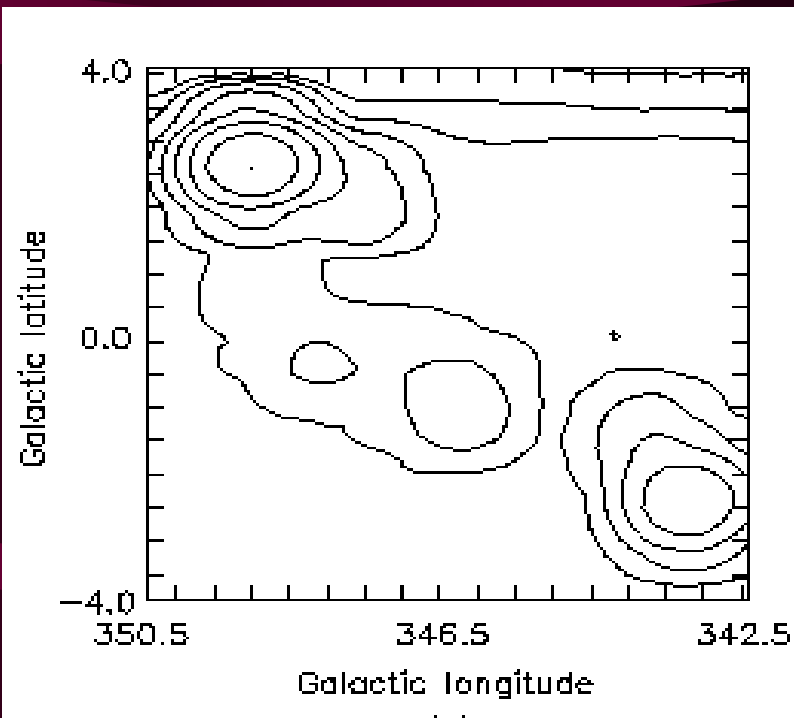
- 硬 X 射线巡天 （中国）：

1992 扫描调制直接解调成像方法

1993 气球飞行 Cyg X-1 成像

提出硬 X 望远镜 H X M T 建议

2005—2008 卫星立项

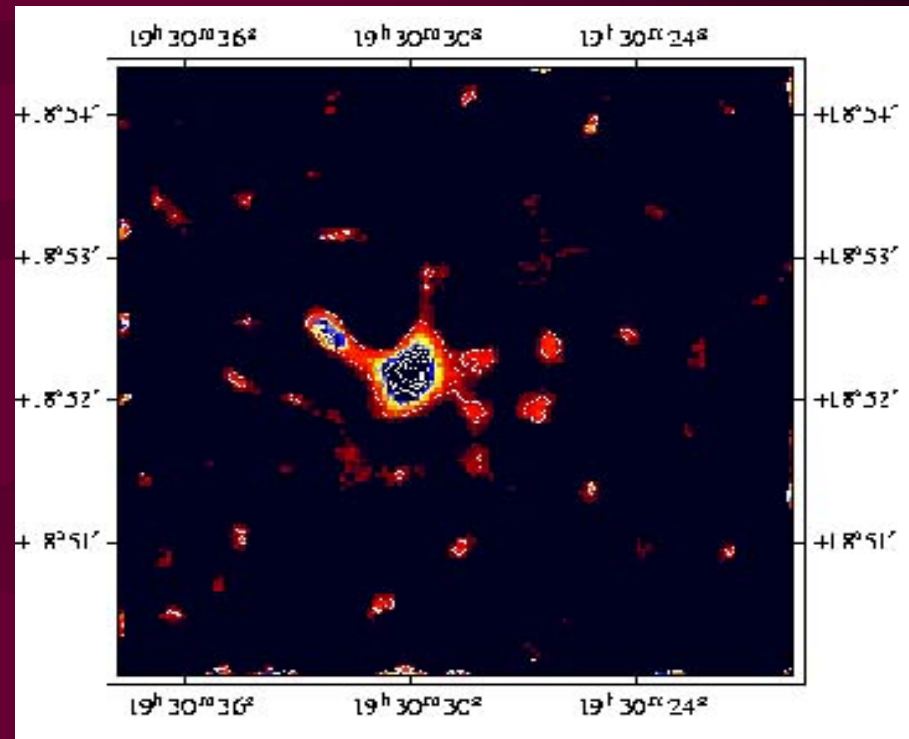
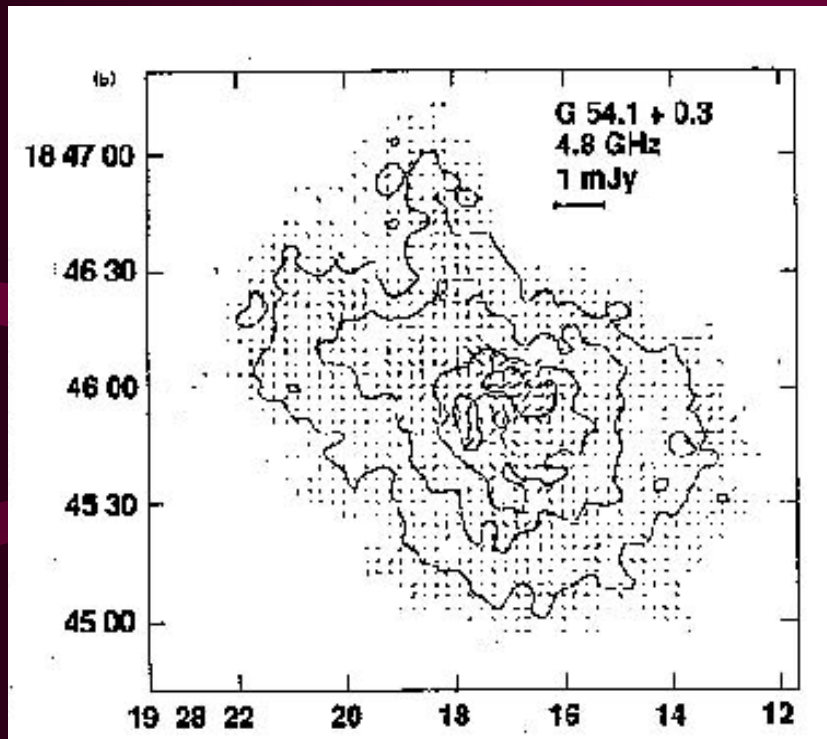


EXOSAT-ME 对银心区的扫描观测结果

直接解调后的结果

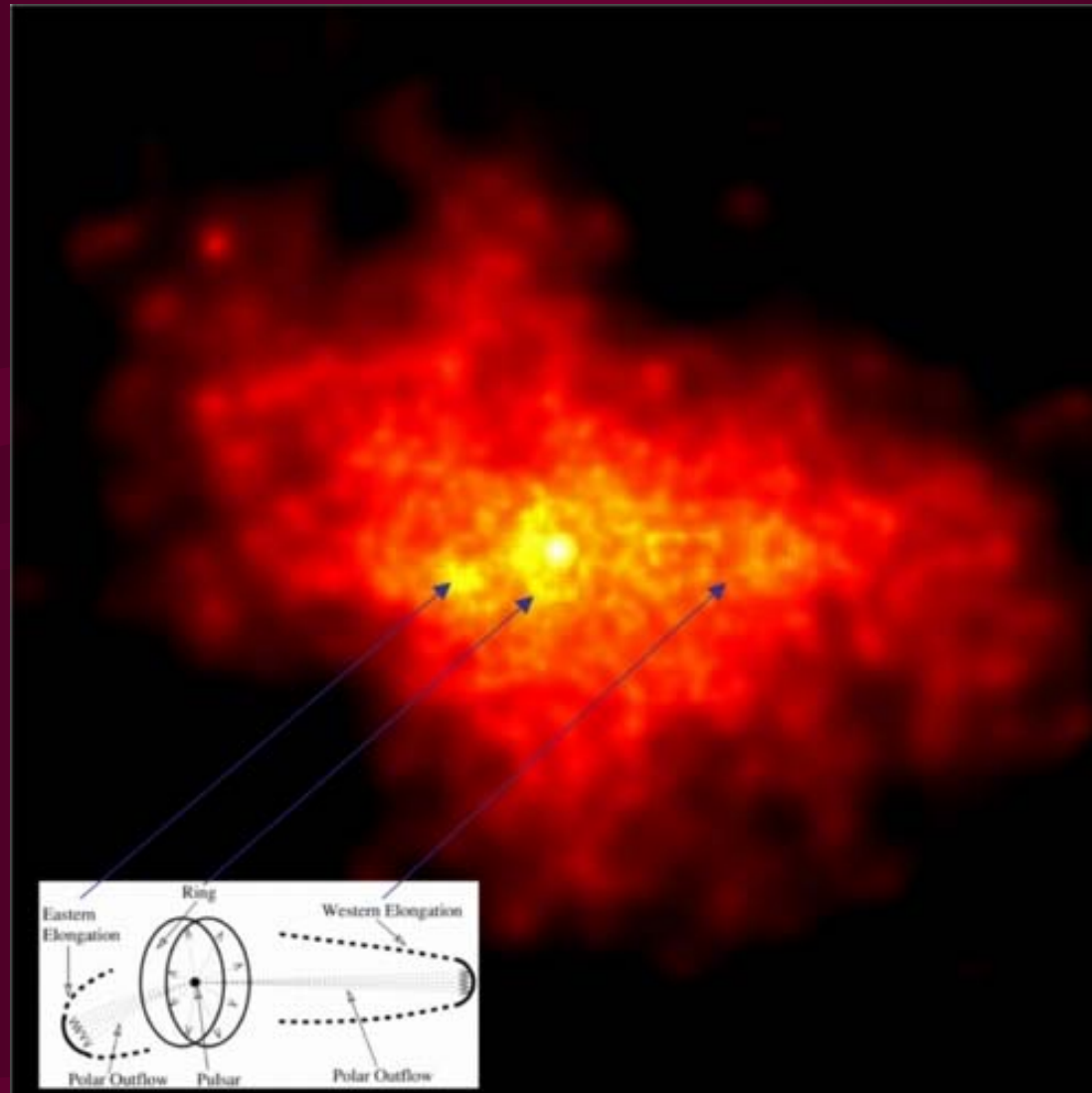
Lu et al. 1996, *Astron. Astrophys. Suppl.* 115, 395

Rosat / PSPC 的直接解调成像



1999年，卢方军用直接解调方法分析德国X射线卫星Rosat数据，发现了超新星遗迹 SNR G54.1+0.3 的X射线喷流

HEASARC
PICTURE OF THE WEEK



Credit: F. J. Lu *et al.*, 2002, *Astrophysical Journal*, 568, L49-L52



NASA

National Aeronautics and
Space Administration

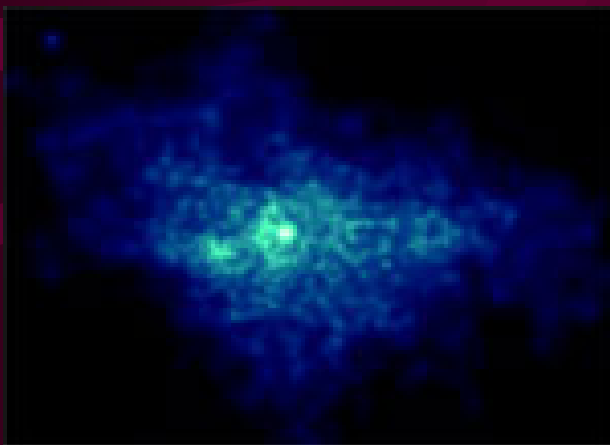
News Release

Marshall Space Flight Center - Huntsville, Ala. 35812
<http://www.msfc.nasa.gov/news>

For release: 06/25/02

Release #: 02-159

Astronomers discover 'bulls-eye' pulsar in supernova remnant



Using two telescopes including NASA's Chandra X-ray Observatory, astronomers have found the "bulls-eye" pulsar in a bright ring of high-energy particles in a distant supernova remnant.

This discovery will help scientists better understand how neutron stars channel enormous amounts of energy into particles moving near the speed of light. The Marshall Center manages the Chandra program.

Photo: Chandra image of the distant supernova Remnant SNR G54.1+0.3
(Credit: NASA/CXC/UMass/F. Lu et al.)

“The features Chandra found appear to be due to the energetic flow of radiation and particles from a rapidly spinning neutron star formed during a supernova event,” said Fangjun Lu of the University of Massachusetts at Amherst who led the X-ray research.

Lu and colleagues informed Fernando Camilo of Columbia

2002年6月28日

参 考 消 息

科学技术

· 7 ·

参 考 消 息

CANKAO XIAOXI 新华通讯社主办

国内统一刊号: CN11-0048 参考消息报社出版

2002年6月28日

星 期 五

第 15840 期

【美国《科学日报》网站6月26日文章】题：天文学家在超新星残骸中发现脉冲星

马萨诸塞大学和哥伦比亚大学的天文学家在一个遥远的超新星残骸的高能粒子组成的光环中发现了“牛眼”（Bullseye）脉冲星。这一发现是通过美国航天局的钱德拉X射线观测台和阿雷西沃射电望远镜观测到的，它将有助于科学家更好地了解中子星是如何将巨大的能量传送到以接近光速运动的粒子中的。

钱德拉观测台观测到的SNR G54.1+0.3超新星残骸的图像显示，在一片高能粒子扩展星云中有一个被光环和两个类似急流结构包围的明亮点状中心源。射电望远镜的数据显示，这个中心亮源是一个中子星或脉冲星，每秒钟旋转7次。

X射线研究负责人、马萨诸塞大学的卢方军（音）说：“钱德拉所观测到的现象似乎是一颗在超新星爆炸时形成的高速旋转的中子星的辐射和粒子能量流动造成的。”

哥伦比亚大学的费尔南多·卡米洛说：“这一发现是钱德拉的高分辨率和阿雷西沃的改进功能合作快速解开科学难题的典范。我们期望在了解年轻中子星的特性方面继续取得实质性进展。”

中子星周围的强烈电子场使粒子加速形成高速自两极喷射而出的急流以及从赤道飞离的盘状物质和反物质。随着赤道流在星云中撞击成粒子和磁场，一道冲击波就形成了。冲击波使粒子加大到极高能量，使其在X射线的观测中闪光并产生光环。粒子继续从光环和急流中涌出进入跨度接近6光年的扩展星云。

天文学家发现“牛眼”脉冲星

蟹状星云的表兄弟

——中科院高能物理所卢方军博士谈“牛眼”脉冲星及其星风云

□ 本报记者 肖洁

今年早些时候,美国有关媒体刊登了关于发现“牛眼”脉冲星的报道。由于发现并研究脉冲星特别是年轻脉冲星对研究极端物理条件下物质的性质具有重要意义,该发现引起了天文学界的广泛重视。该项目负责人卢方军博士是中国科学院高能物理研究所的青年天文学家,当时他正在马萨诸塞大学进行合作研究。近日,记者采访了不久前归国的卢方军。

“过瘾”的研究

谈起这次研究发现,卢方军笑着用“很过瘾”这个词来形容。对于天文学工作者来说,做出重大的发现需要难得的机遇,但是不懈的努力和合理的方法也很重要。

1999年夏天,被派往德国马普学会地外物理研究所进行合作研究的卢方军得到了一批超新星遗迹的图片。这批图片是由德国X射线天文卫星ROSAT拍摄的,但是因为空间分辨率的关系,图片不清晰。卢方军通过我国学者创建的直接解调成像方法重建了比较清晰的图像,并发现其中一个超新星遗迹G54.1+0.3存在X射线的喷流状结构。于是,他请同事宋黎明从日本获得了另一颗卫星拍摄的X射线光谱资料。X射线的图像和光谱表明,G54.1+0.3的X射线辐射是高能粒子产生的,而高能粒子则应是来源于该遗迹中一颗未知的中子星。他们将研究结果发表在2001年5月欧洲出版的《天文与天体物理学报》上。

有了上述工作的基础,卢方军着手向正在天空运行的美国大型X射线卫星钱德拉(Chandra)望远镜申请观测时间,因为钱德拉的空间分辨率

是ROSAT的80倍。他的申请从众多的提案中脱颖而出,得到了11个小时对G54.1+0.3的观测时间,并于2001年6月6日~7日进行了观测。2001年6月下旬,卢方军受邀前往美国马萨诸塞大学进行合作研究,G54.1+0.3是其主要研究内容。数据分析的结果展现了G54.1+0.3中围绕中心点源清晰的X射线环以及和环近乎垂直的羽毛状结构。

这是迄今发现的和著名的蟹状星云最相近的天体。其中心点源对应着一颗中子星,X射线环对应着集中于中子星赤道的相对论性粒子流,而羽毛状结构则源于中子星的轴向喷流。利用多普勒效应,卢方军他们得到以近乎光速运动的高能粒子流经过激波后的群体速度为 0.4 ± 0.1 倍光速,这是对激波后相对论性流体的速度进行的首次直接且精确的测定。该速度还证实了中子星星风中占主导地位的是高能粒子而不是磁场。中子星周围的明亮X射线结构也预示着中子星是相当年轻的。

年轻中子星的自转周期多在0.1秒左右,而钱德拉卫星在成像观测模式下的时间分辨率为3.2秒。为了进一步研究中心中子星的性质,卢方军和美国哥伦比亚大学的费尔南多·卡米洛(Fernando Camilo)等合作,用世界最大的、直径305米的阿雷西博(Arecibo)射电望远镜探测来自G54.1+0.3中心中子星的射电脉冲。结果发现该中子星是一颗自转周期为137毫秒、年龄约为3000年的年轻脉冲星,证实了根据X射线数据得出的关于该中子星的所有推论。

他们的研究成果在美国权威学术期刊《天体物理学报》发表。美国航空航天局(NASA)也将他们的研究成果作为重要成果向公众和媒体发布。因为脉冲星及其周围的X射线环呈牛眼形,该脉冲星被命名为

“牛眼”脉冲星。

待解的谜团

卢方军说,目前,关于“牛眼”脉冲星还有很多工作要做。因为观测带来了意想不到的结果,也带来了疑问。例如,根据一般的超新星爆发理论,在爆发后可以观测到来自被激波加热的周围星际物质和被返回激波加热的抛射物的热辐射。许多超新星遗迹的辐射结构都和理论预言的相同。但是,和蟹状星云一样,G54.1+0.3非常奇怪,它的X射线辐射是高能电子在磁场中的同步辐射,钱德拉在它及其周围区域没有探测到任何对应于爆炸抛射物和星际介质的热辐射成分。一种可能的解释是:在某些情况下,超新星爆发的前身星所发出的强光加热了星周物质,周围空间膨胀而物质密度变得非常小,而爆炸激波和抛射物可能还在这样一个空腔中运动,受激波加热的星际介质数量比较少,相应的返回激波也比较弱,不足以加热爆炸抛射物。对G54.1+0.3的进一步研究,将能检验上述模型并了解爆发前恒星的物理性质。

卢方军向记者介绍了他领导的国际合作小组正在和计划进行的工作。首先,他们将通过美国的罗西X射线时变探测器(RXTE)卫星和阿雷西博射电望远镜测量“牛眼”脉冲星的周期演化,研究脉冲星射电辐射区和X射线辐射区之间的几何关系。

其二,利用美国国立射电天文台的甚大射电望远镜阵(VLA)研究星

风云在不同频率处的精细结构并和X射线图像进行对比分析。和辐射射电波的高能粒子相比,辐射X射线的高能粒子寿命更短,X射线辐射反映的是年轻的高能粒子在空间的分布,而射电辐射则对应着更老一些的高能粒子的空间分布。因此,X射线和射电辐射的对比分析可以给出高能粒子在星云中的运动轨迹。星云和周围环境之间肯定存在相互作用,但天文学家直到现在为止还没有在任何脉冲星星风云中观测到这种作用区。已经获得的部分射电数据和X射线数据显示,卢方军他们很可能在G54.1+0.3中发现了作用区存在的观测证据。

他们还将利用钱德拉卫星的高时间分辨工作模式研究“牛眼”脉冲星X射线辐射在不同脉冲位相处的能谱特性。

不小的差距

这次的研究涉及了长时间和多方面的国际合作,谈及目前我国天体物理学与国际先进水平的差距,卢方军觉得目前我国科研工作者的困难在于很难获得高性能设备的观测时间。因为我们起步较低,而各国的学者都在提申请,如果不能进入前沿领域,提出高质量的提案,就很难被批准,获得好的研究数据。有时候,我国的天文工作者只能对一些二手数据,或者是一些处理难度较大的数据进行研究。情形有点像淘金,我们淘的可能是人家已经淘过的水。不过还

是可以发现“金子”。卢方军对我国老一辈学者发展起来的数据处理方法充满了自豪,我们“在对处理结果的可靠性估计和微弱信号的提取方面处于世界领先水平”。卢方军还说,我们应致力于发展自己的高能天文探测卫星。因为条件所限,我们不可能和国外比仪器性能,但利用创新性的数据处理方法指导仪器设计,我们则可以用比较简单的仪器获得重要的研究成果。据了解,在国家“973”项目的支持下,相关的高能卫星研制正在进行。

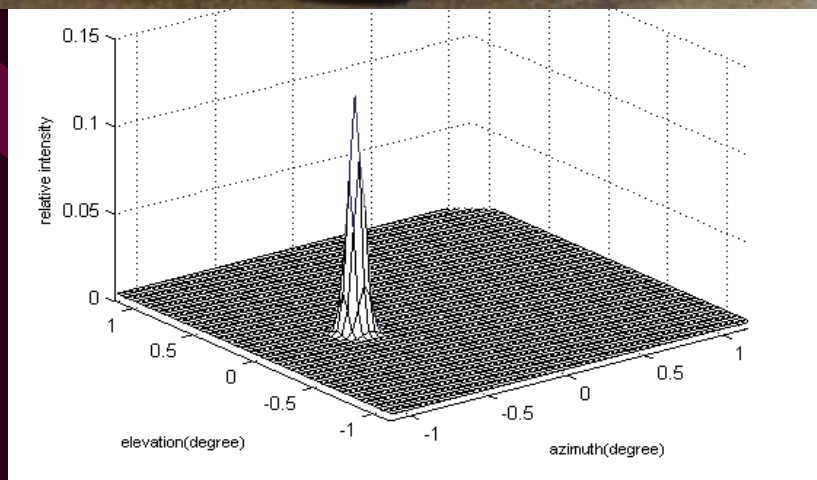
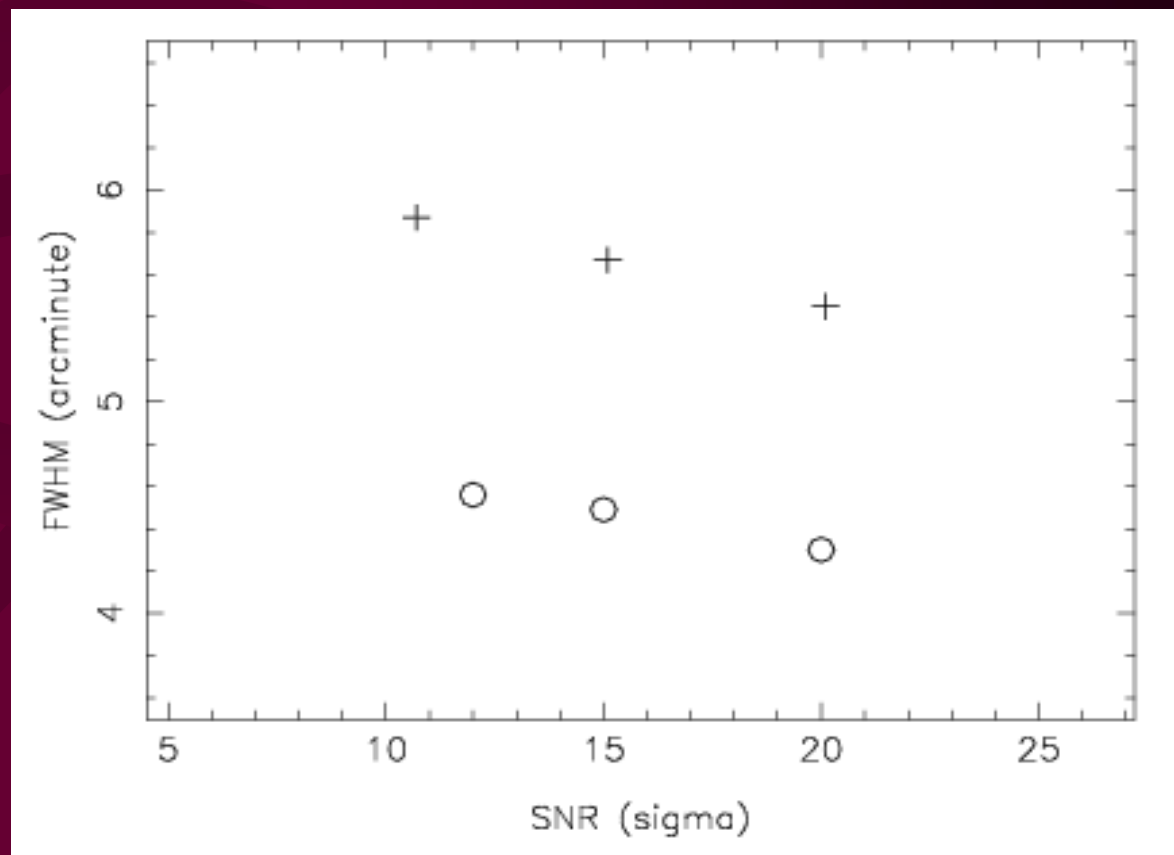
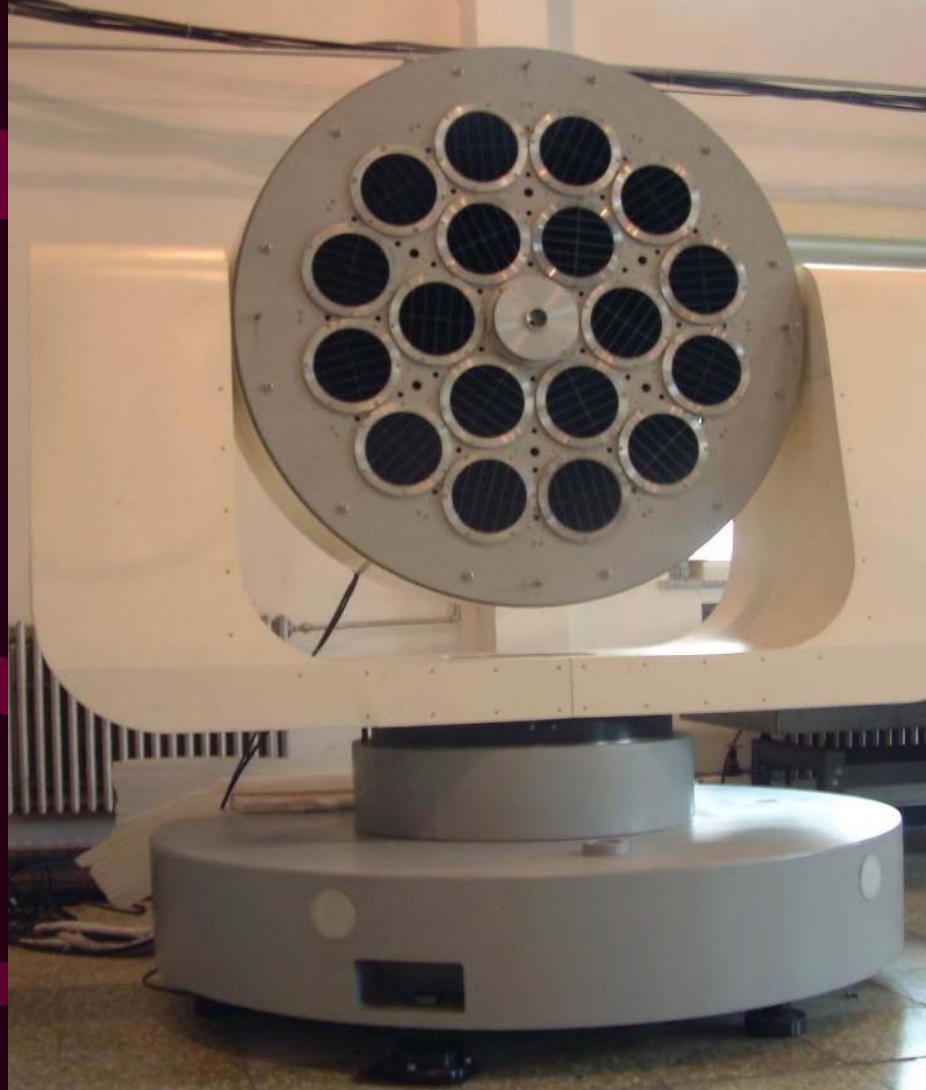
差距还体现在科普的层次上。国外的科研机构非常重视科普宣传,如研究所设立“开放日”,科研成果要向公众发布等。卢方军告诉记者,当国外媒体报道了他的研究发现后仅仅两天,就有两位北卡罗来纳州的中学生发电子邮件给他,索要相关数据回去研究。美国还有中学生在老师的指导下,因发现脉冲星而获“西屋”大奖。相比之下,可能国内的天文爱好者大多还停留在追逐流星雨、彗星和日食的层次。

其实,在研究脉冲星方面,我们的老祖先有着非常了不起的贡献。卢方军在论文中称“牛眼”脉冲星为蟹状星云的“表兄弟”。而蟹状星云是最著名的超新星遗迹,在公元前1054年7.8月间,是我国古代的天文学家观测并记录到了爆发前恒星的死讯。但是在科技迅猛发展的今天,我们要想在天文学和天体物理学领域与国际先进水平缩小差距,还将有很长的路要走。

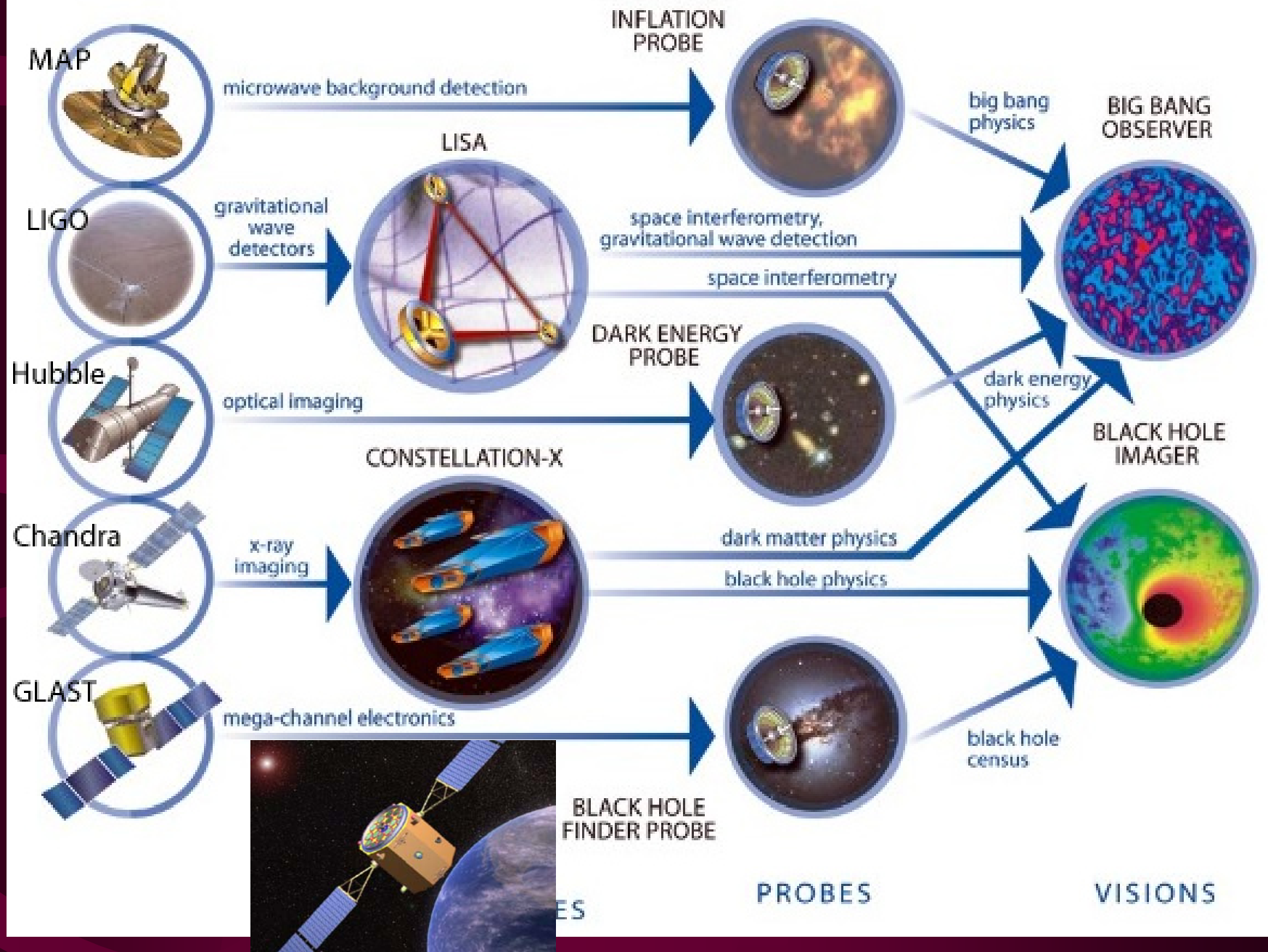
直接解调方法的可行性论证

1、原理可行性（1993 — 2000）

2、HXMT工程可行性（2000—2005）



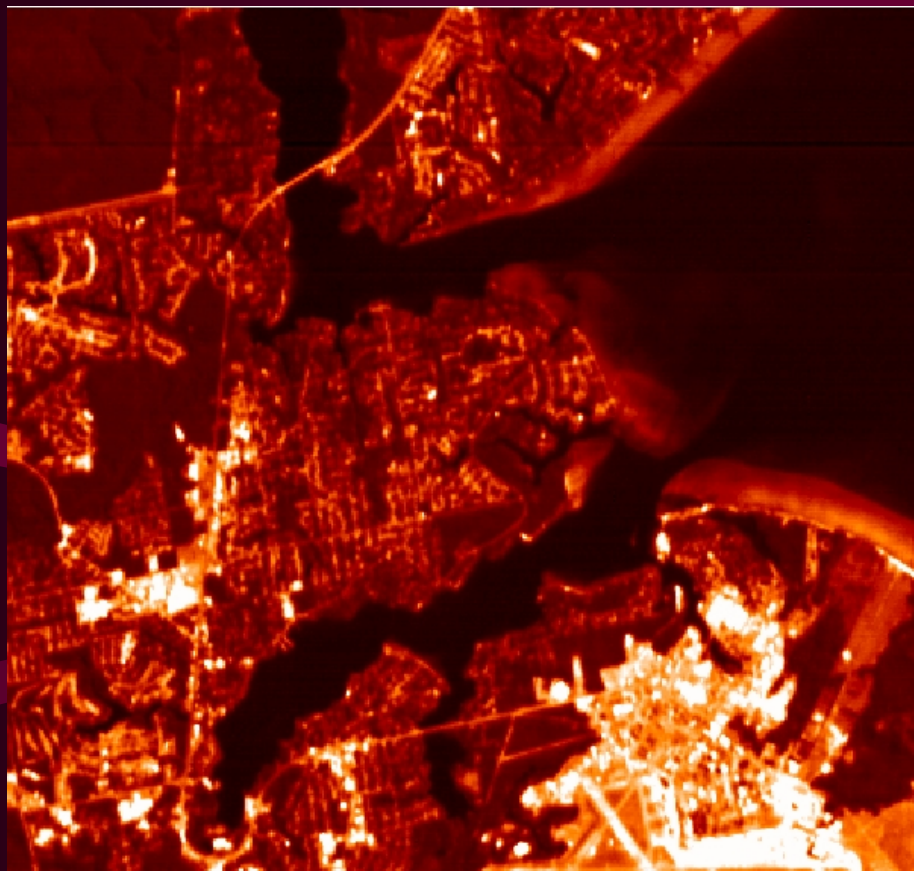
+ 用6个探测器的数据成像
o 用12个探测器的数据成像



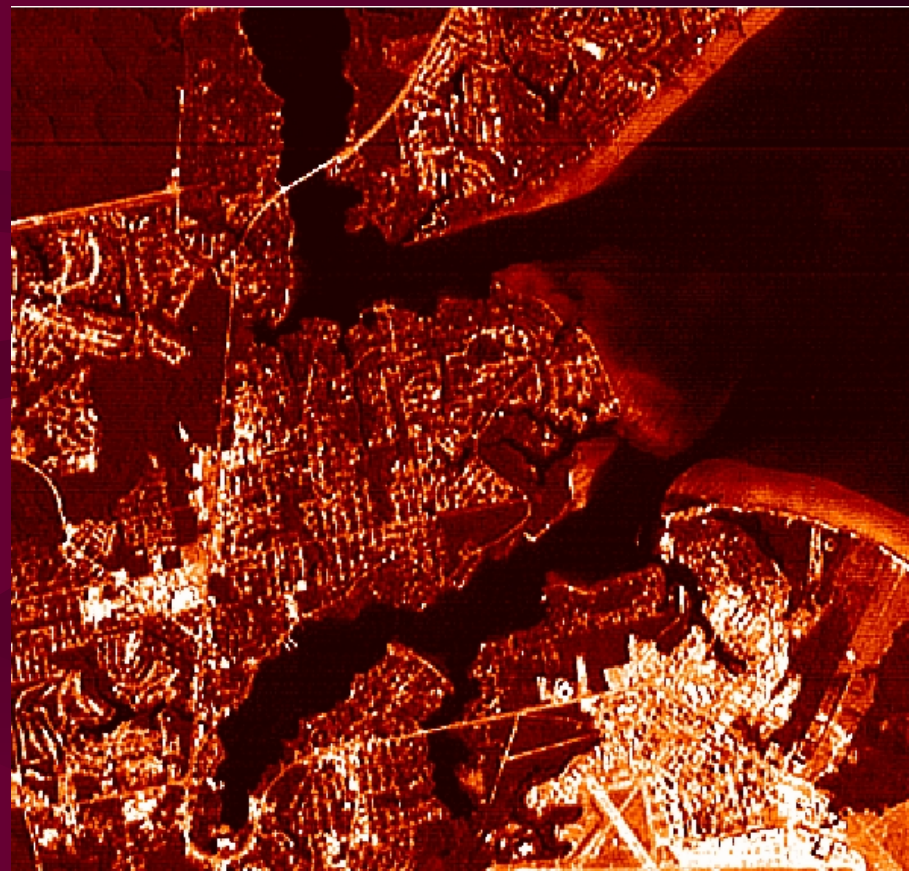
HXMT

四、仰望星空

资源一号卫星对地观测数据处理



原始对地观测图象



直接解调方法处理后的结果

《仰望星空》

温家宝

我仰望星空，
它是那样寥廓而深邃；
那无穷的真理，
让我苦苦地求索、追随。

我仰望星空，
它是那样庄严而圣洁；
那凛然的正义，
让我充满热爱、感到敬畏。

我仰望星空，
它是那样自由而宁静；
那博大的胸怀，
让我的心灵栖息、依偎。

我仰望星空，
它是那样壮丽而光辉；
那永恒的炽热，
让我心中燃起希望的烈焰、响起春雷。

“一个民族有一些关注天空的人，他们才有希望；一个民族只是关心脚下的事情，那是没有未来的。我们的民族是大有希望的民族！我希望同学们经常地仰望天空，学会做人，学会思考，学会知识和技能，做一个关心世界和国家命运的人。”

2007.5.24

谢谢！

