

观测宇宙的新窗口^{*}

——2002 年度诺贝尔物理学奖介绍

宋黎明^{1, †} 陆 焱²

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

(2 南京大学天文系 南京 210093)

摘 要 文章介绍了 2002 年诺贝尔物理学奖获得者贾科尼对 X 射线天文学的开创性贡献,特别介绍了贾科尼等在开拓空间观测和发展 X 射线成像技术这两个方面的工作.文章通过 X 射线天文学的诞生、X 射线天文卫星的发展介绍了 X 射线的空间观测对天体物理学的影响,对宇宙暗物质、双星中的吸积过程和 X 射线喷流现象等进行了简单介绍,并对高能天体物理学的发展给出了概略的描述.

关键词 X 射线天文,高能天体物理,空间天文观测

A new window for detecting the universe

——the 2002 Nobel prize for physics

SONG Li-Ming^{1, †} LU Tan²

(1 *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(2 *The Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract The pioneering contributions to X-ray astronomy made by Riccardo Giacconi who won the 2002 Nobel Prize for Physics are described, with emphasis on his extensive observations of the X-ray universe and development of X-ray imaging. The relationship between the advancement of astrophysics and the development of X-ray space observation is pointed out. The concepts of universal dark matter, binary accretion and X-ray jets are also presented. Finally, the outlook for high energy astrophysics is discussed.

Key words X-ray astronomy, high energy astrophysics, astronomy satellite

2002 年的诺贝尔物理学奖使得天文研究领域再次成为人们关注的焦点.瑞典斯德哥尔摩当地时间 10 月 8 日 11 :45(北京时间 8 日 17 :45),瑞典皇家科学院宣布 2002 年度的诺贝尔物理学奖将授予雷蒙德·戴维斯(Raymond Davis Jr,美国宾州大学物理天文系)、小柴昌俊(Masatoshi Koshiha,日本东京大学国际基本粒子物理中心)和里卡尔多·贾科尼(Riccardo Giacconi,美国华盛顿特区联合大学公司(Associated Universities Inc.)),以表彰他们在天体物理学领域的先驱性贡献.这里包括两项成就,前两位是因为宇宙中微子的探测,后一位是因为发现宇宙 X 射线源和探测技术方面的巨大贡献而获奖^[1].

天体物理学是利用物理学的技术、方法和理论,研究天体的形态、结构、化学组成、物理状态和演化规律的科学.由于不同能段的辐射携带了不同的信息,全面了解天体的辐射信息对天体的研究是非常重要的,同时在这一过程中也会促进观测技术、研究方法的进步.1859 年,基尔霍夫(Kirchhoff G R)利用光学棱镜对太阳进行了光谱分析,并对太阳光谱的吸收线进行了科学的解释,这是人类第一次对地球以外的宇宙天体进行的物理分析,标志着天体物理学的诞生.1895 年 11 月 8 日,伦琴(Röntgen W C)

* 2003-03-13 收到初稿,2003-05-12 修回

† 通讯联系人. E-mail: songlm@mail.ihep.ac.cn

在实验室观测到一种具有特别强穿透能力的特殊光线,可以透过人体显示骨骼图像并能显示薄金属中的缺陷,他称之为 X 射线,伦琴因为这个发现而获得了 1901 年的诺贝尔物理学奖,也是第一个诺贝尔物理学奖^[2]. X 射线的发现极大地推动了物理学和相关学科的发展,同样,对天体 X 射线的研究也极大地推动了天体物理学的发展.

地球上厚厚的大气层吸收了天体辐射的 X 射线、 γ 射线、紫外线及其他的高能射线,保护了地球上的生命.同时,由于大气层的吸收,X 射线的天文观测要在外层空间进行.天体辐射 X 射线的机制分为两类,一类称为热辐射,主要是由高温气体产生,另一类是非热辐射,和高能粒子联系在一起,所以通过天体的 X 射线辐射,可以研究天体上的高温、高能等相关的物理过程,对认识天体环境、高能加速机制和辐射机制是非常重要的. X 射线天文观测遇到的另一个问题是由于 X 射线的波长很短,使得 X 射线的反射系数很小,在对天体进行 X 射线观测时,不能像光学观测那样利用透镜对光线聚焦,这样就使得对天空的 X 射线成像观测非常困难.对天空 X 射线的成像观测,可以获得天空中 X 射线强度的精细分布,研究精细结构的能量分布、辐射机制等,对天体物理研究同样具有重要意义.贾科尼在开拓空间观测和发展 X 射线成像技术这两个方面都作出了先驱性的贡献.

在第二次世界大战后的 1949 年,利用德国的 V2 火箭,美国海军实验室的弗瑞德曼(Herbert Friedman)小组将一个盖革计数器送上了太空,并发现了太阳的 X 射线辐射.1959 年,当时 28 岁的贾科尼开始了空间探索计划的旅程,贾科尼及其合作者制定了利用火箭探测空间 X 射线辐射的计划.1962 年 6 月 18 日,在经历了两次失败后,终于把 3 个盖革计数器放在火箭上发射到高空(实验装置见图 1).由于火箭在旋转,对天空的固定源来说,三个朝向不同方向的计数器将会记录到不同的强度,这样利用火箭的旋转和记录到的源强度调制曲线就能粗略估计 X 射线源的方向.这次空间飞行的原意是探测月亮反射的来自太阳的 X 射线荧光.在火箭的飞行过程中,仅在火箭到达最高点附近的时间段内适合天体观测,这个时间大约为 6min.这次观测没有发现来自月亮的 X 射线辐射,却意外地发现了太阳以外的第一个宇宙 X 射线源,同时还看到了银河系的 X 射线背景辐射.由于没有很好的准直器,使得空间分辨率很差,不能对 X 射线源进行精确的定

位,这个 X 射线源当时没有被证认出来,后来人们知道这个第一个被发现的太阳系外 X 射线源是天蝎座 X-1(Scorpius X-1).随后他们又发现了蟹状星云中的 X 射线源.随着进一步的研究,人们发现天蝎座 X-1 在 X 射线能段辐射的能量要比在可见光波段强数千倍,而蟹状星云在 X 射线能段辐射的能量比太阳强 10 亿倍.这是和正常恒星完全不同的天体,这些意外的发现成为推动 X 射线天文学的巨大动力,贾科尼等的工作开辟了天文学的一个新领域,这就是“X 射线天文学”.

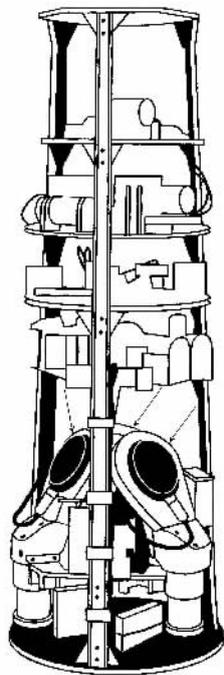


图 1 贾科尼及其合作者 1962 年发射的火箭探空装置(安装了三个盖革计数器.利用透过窗厚度的不同,三个计数器可以记录不同能量的 X 射线辐射.整个装置长约 1m)

很显然,火箭飞行 6min 的观测时间,对详细研究天体的辐射是远远不够的.为了扩展观测时间,1963 年,贾科尼和他的合作者一起提出利用卫星进行宇宙 X 射线巡天观测的计划.1970 年 10 月 12 日,贾科尼领导下的小组完成的第一颗 X 射线天文卫星(UHURU)成功升空.这个卫星采用自旋稳定模式,并安装了两套收集面积为 840cm^2 的正比计数器.在两年多的飞行中,UHURU 卫星完成了第一次的巡天观测,发现了 339 个 X 射线源,发现了致密 X 射线双星和星系团的弥漫 X 射线辐射.

UHURU 卫星的发现是非常重要的,例如,发现星系团中存在弥漫 X 射线辐射,说明其中有热气体,欲维持这些温度高达 10^8K 的高温气体,必然要

求一个很强的引力势阱存在,要维持这个势阱所需要的质量比可见的质量高出近 100 倍,也就是说,宇宙中有 90% 以上的物质可能是不发光的,这就是著名的宇宙暗物质问题^[3]. 宇宙中的暗物质是现代天体物理学和理论物理学中的核心问题之一,暗物质决定了宇宙大尺度结构、星系团以及星系的形成、演化和命运,天文学特别是高能天体物理学将为暗物质的研究作出重大贡献. 发现密近双星是 UHURU 卫星的另一贡献. 致密 X 射线双星指的是由一颗致密星和一颗正常恒星组成的双星系统. 这颗致密星可能是一个黑洞,也可能是一颗半径在十几公里、密度可和原子核的密度相比拟的中子星. 为什么这样的系统会有强烈的 X 射线辐射,这个问题促进了对吸积过程的研究. 我们知道,氢弹会释放出巨大的能量,实际上氢弹的巨大能量来源于核聚变,即由氢(H)元素转变为氦(He)元素的聚变,在这个过程中,每克物质释放的能量约为 $6 \times 10^{11} \text{ J}$,如果按爱因斯坦的质-能关系(静止质量为 m 的物质其能量为 mc^2 ,这里 c 为光速)来衡量的话,这个过程的能量释放效率为其静止质量的 0.7%,即 $\Delta E = 0.007mc^2$. 而在吸积过程中,伴星的气体会落到致密星上,如果致密星的半径为 10km,则在吸积过程中释放的引力势能可达静止质量的 10%,即 $\Delta E = 0.1mc^2$,这是巨大的能量释放过程. 进一步的研究还发现,在致密 X 射线双星系统中,X 射线的辐射区域非常靠近致密星,而这个区域的引力效应非常明显,人们可以利用 X 射线辐射来研究强引力场中的各种效应. UHURU 卫星的这些发现使得吸积成为现代天体物理中的一个基本的过程^[4],并促进了对黑洞、中子星的研究. X 射线双星的吸积图像如图 2 所示.

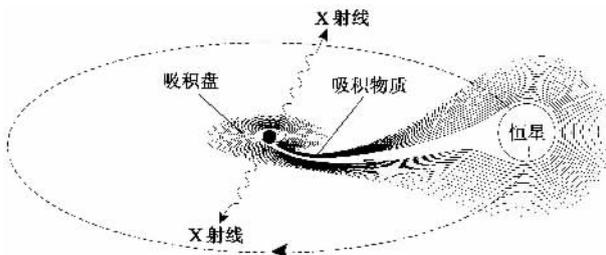


图 2 X 射线双星的吸积图像

(图右方为正常恒星,左方为致密星,致密星吸积来自主星的物质.在吸积过程中,释放的引力能是非常巨大的,使得致密星周围区域成为 X 射线辐射区)

贾科尼还对 X 射线天文观测作出了另一项重要贡献,由于 X 射线极易被介质吸收并且一般介质对于 X 射线的折射率近于 1,X 射线成像望远镜不

能用光学成像的折射系统汇聚光线,只能使射线以掠射方式(即入射射线与镜面夹角非常小)射入镜面,通过和镜面的反射来改变光线的方向,达到汇聚光线的目的,因此 X 射线成像望远镜又叫“掠射式 X 射线望远镜”(见图 3). 1960 年,贾科尼和罗西(Rossi B)提出了利用光的掠射原理进行太空 X 射线成像观测的设想^[5],这个设想被贾科尼和他的合作者进一步发展并付诸实施. 贾科尼领导了第一颗 X 射线掠射成像卫星 HEAO-2(Einstein)的建造,并于 1978 年 11 月 12 日发射升空. Einstein 卫星取得了极大的成功,它的分辨率最高可以达到 $2''$,贾科尼和罗西提出的利用掠射成像进行 X 射线天文观测的设想在 18 年后终于成为现实. 由于比以前高得多的灵敏度、空间分辨率和能量分辨率,Einstein 卫星可以研究弱得多的天体,可以进行弥散源的成像观测并进行能谱分析.

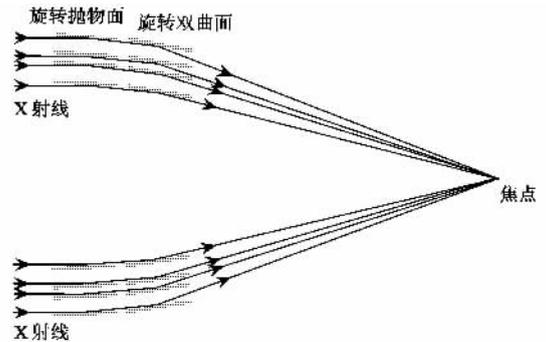


图 3 X 射线掠射聚焦成像示意图

(最前端是一个旋转抛物面,后面是一个旋转双曲面,通过掠射作用将 X 射线汇聚到焦点上)

1976 年,在 Einstein 卫星正在建造时,贾科尼等就提出了建造下一代天文卫星的提议,这颗卫星就是后来的 Chandra-AXAF. Chandra-AXAF 大大发展了 Einstein 卫星的技术,其空间分辨率更是达到了 $0.5''$,已经达到地面光学望远镜的空间分辨水平. 直到 1981 年,贾科尼一直在 AXAF 卫星科学委员会主席的位置上工作,为 AXAF 的建造作出了重要的贡献. 1999 年,耗资 15 亿美元的 AXAF 被发射升空,并得到了大量的结果.

目前美国的 Chandra-AXAF 卫星和欧洲的 XMM-Newton 卫星正在运行. 这些天文卫星的升空,取得了巨大的成功,开阔了我们的眼界,给出了宇宙新的 X 射线图像,极大地促进了 X 射线天文学的发展. 天文卫星灵敏度的提高,使得可研究的天体数目急剧增长,如 UHURU/Ariel/HEAO-1 等天文卫星探测源的数目约为 1 000 个. Einstein 卫星观测

的源的数目约为 7 000 ,而 AXAF - Chandra/XMM - Newton 一年观测的源约为 40 000 个.天文卫星能量分辨率的提高,使得可以识别出元素的谱线(见图 4),进行成分和元素合成过程的研究,为天体演化理论和元素组成提出新的课题.由于极高的空间分辨率,卫星可以分辨很小角尺度上的结果,如发现了 X 射线喷流(见图 5),使得喷流成为天文上的又一奇观,促进了喷流和黑洞的研究.由于 X 射线成像的高精度,源的定位也达到了很高的精度,这就使得其他波段对这些源的观测、证认成为可能,促进了对天体的多波段研究.

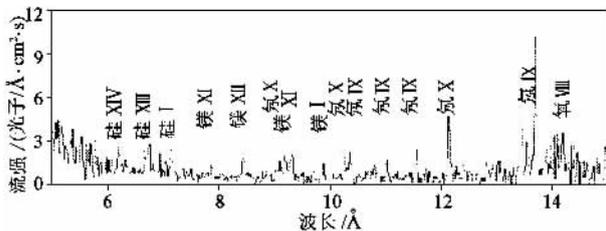


图 4 Chandra - AXAF 观测到的活动星系核 NGC4151 的元素谱线^[6]

(图中横坐标为波长,单位为 Å,纵坐标为流量.图中显示的为元素在不同电离态下对不同能态跃迁的谱线,如硅 I 线为硅原子的谱线,硅 XIII 线为硅原子电离掉 12 个电子后的谱线,其余类同.通过这些谱线可以研究辐射区的组成、丰度、温度、压力等,通过这些数据可以对天体的元素丰度、元素合成过程、天体的演化等问题进行研究)

现在,我们知道,X 射线辐射是天体高能现象最重要的表征之一,X 射线天文学的研究目标遍及各个层次的天体:从正常恒星到星系、星系团,直到最远的类星体.X 射线可以发生在高温等离子体中,也可以由某些非热过程引起.X 射线辐射机制的研究还导致对天体的一种重要产能机制的重视,使吸积理论成为当代理论天体物理的一大支柱,促进了对致密天体的深入观测和研究.X 射线天体物理学的研究促进了我们对黑洞、宇宙暗物质、致密天体和极端条件下物理过程的了解,并用于对基本物理理论进行检验.另一方面,在天体的极端条件下,一些基本的物理过程和规律将起着更为显著的作用,通过对这些天体的研究,有可能发现新的物理过程和规律.我们有理由相信,在未来物理思想变革的过程中,高能天体物理将扮演重要的角色.贾科尼创建了 X 射线天文学,实际上,也开创了蓬勃发展着的高能天体物理学.

目前,X 射线天文学已经发展成为一门可以与光学天文学和射电天文学相媲美的学科,是目前最

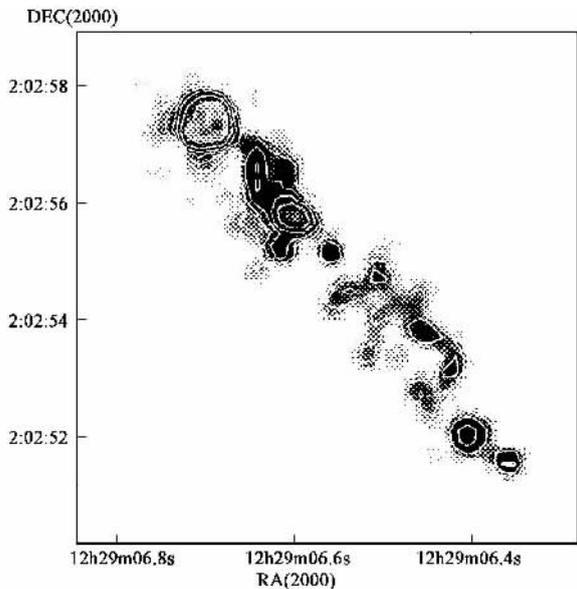


图 5 Chandra - AXAF 观测到的 3C273 在 0.2 - 8keV 的 X 射线喷流,横坐标为赤经(RA),纵坐标为赤纬(DEC)(3C273 是一个类星体,朝向右下方的是由 3C273 发出的 X 射线喷流,其空间角尺度为 8",这个喷流的实际长度大于 60 万光年)^[6]

活跃的研究领域之一.随着一系列天文卫星的升空,大量的观测资料将使我们对宇宙的认识更加深入,高能天体物理学将在人们了解宇宙的进程中发挥更大的作用.

参 考 文 献

[1] Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Prize in Physics 2002, Press Release; Advanced Information; Information for the Public

[2] 郭奕玲,沈慧君.诺贝尔物理学奖(1901—1998).北京:高等教育出版社,施普林格出版社,1999.1—10 [Guo Y L, Shen H J. The Nobel Prize in Physics (1901—1998). Beijing: High Education Press, Springer Press, 1999. 1—10 (in Chinese)]

[3] 温伯格著.邹振隆,张历宁译.引力论与宇宙论.北京:科学出版社,1984 [Weinberg S. Zhou Z L, Zhang L N trans. Gravitation and Cosmology—Principles and Applications of the General Theory of Relativity. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese)]

[4] Shapiro S, Teukolsky S. The Physics of Compact Objects. New York: John Wiley & Sons, 1983

[5] Giacconi R, Rossi B. Journal of Geophysical Research, 1960, 65 773

[6] 选自美国 Chandra - AXAF 网站: <http://chandra.harvard.edu>

DNA 模板纳米粒子自组装 及其在纳米电子器件中的可能应用*

朱春玲^{1, 2} 刘允萍² 黄文浩² 陈祖耀^{1, †}

(1 中国科学技术大学化学系 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学精密机械与仪器系 合肥 230026)

摘要 以生物分子为模板进行的纳米粒子自组装之所以受到人们的广泛关注,主要是追求其在纳米电子器件的成功应用.文章结合近年来国内外研究工作和本实验室小组成员的一些相关工作,综述了 DNA 模板的无机纳米粒子自组装形成有序纳米结构及其在纳米电子器件上应用的研究进展,讨论了此种组装技术的局限性并展望其发展前景.

关键词 DNA 模板 纳米粒子自组装 纳米结构 纳米电子器件

DNA as a template in directing the self-assembly of nanoparticles

ZHU Chun-Ling^{1, 2} LIU Yun-Ping² HUANG Wen-Hao² CHEN Zu-Yao^{1, †}

(1 Chemistry Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Department of Precision Machinery and Instrument, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract We review recent achievements in the assembly and control of nanoparticles with DNA as a template, including typical patterns of the self-assembled nanostructures and custom designed nanoelectronic devices. In addition, new ideas and directions for future research on biomolecule-mediated assembly of active devices and biomolecule-based devices are presented.

Key words DNA template, self-assembly, nanostructure, nanoelectronic devices

1 引言

在纳米粒子的自组装技术中, DNA 分子或其片段作为一种组装模板引起人们广泛的关注^[1]. 值得注意的是, DNA 分子或其片段在用作纳米团簇组装中是一种很有特色的模板. 这种模板与简单有机分子模板不同, 其组装过程不仅通过模板与纳米团簇的简单相互作用, 也可通过与纳米团簇结合的低聚核苷酸分子与模板间的分子识别来实现. 众所周知, DNA 分子是由两条脱氧核苷酸通过碱基配对组合而成, 具有完善和严密的分子识别功能, 使得组装过程具有高度的选择性, 或者说, 定向组装的功能要强

得多. 组装后, 模板的破坏也很容易, 只要将组装起来的纳米团簇加热到一定温度时, 随着 DNA 分子的受热而碱基配对性被破坏, 纳米团簇将重新分散. 再者, 随着现代生物学和分子生物技术的发展, 将 DNA 进行任意裁剪或用不同种类官能团进行化学修饰, 各种大量的具有特定长度和特定序列的 DNA 可以在 DNA 合成器中自动生成等等, 凡此种均为采用 DNA 来精确控制纳米粒子组装的不同复杂结构提供了强有力的手段^[2]. 应该强调, 由于自组装驱动力总的来源于纳米团簇外包敷分子的分子识

* 国家自然科学基金(批准号 50003008)资助项目

2002-11-29 收到初稿, 2003-02-17 修回

† 通讯联系人. E-mail: czy@ustc.edu.cn