



## 高能天体物理学研究与发展\*

文/张双南

中国科学院高能物理研究所 北京 100049

**【摘要】** 文章将高能天体物理学的内容局限在以下范围:(1)研究的天体限制在黑洞、中子星、超新星遗迹和 $\gamma$ 射线暴;(2)研究的手段限制在对X射线和 $\gamma$ 射线空间观测。然后描述了高能天体物理学研究进展和意义,近期国内外发展和我国的未来规划,包括战略目标、有关科学计划和空间项目。最后提出了我国未来相关研究领域发展的策略和措施建议。

**【关键词】** 空间天文,高能天体物理学,黑洞,中子星,超新星遗迹, $\gamma$ 射线暴

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2012.01.010

目前学术界对于“高能天体物理学”的研究内容并没有标准的定义。考虑到本专题中其他文章所覆盖的内容和篇幅所限,本文将“高能天体物理学”的研究内容人为地局限在以下的范围:(1)研究的对象限制在黑洞、中子星、超新星遗迹和 $\gamma$ 射线暴;(2)研究手段限制在对X射线和 $\gamma$ 射线空间观测。

由于本文并不是一般的综述和评述,作者并没有按照常规的做法直接引用参考文献,而是在需要的地方推荐读者参考最近国内学者主写的综述和评述文章,而且以发表在中文期刊《天文学进展》的文章为主。

### 1 高能天体物理学研究进展和意义

#### 1.1 黑洞

目前得到观测证认存在的黑洞主要有处于双星系统中约10倍于太阳质量的恒星

级黑洞(双星系统中的另一个天体是普通的恒星)和处于几乎每个星系中心的质量为百万到百亿太阳质量之间的超大质量黑洞<sup>[1]</sup>。普遍认为,恒星级黑洞是大质量恒星演化到最后引力塌缩形成的,但其具体的形成过程、形成的初始条件,以及它们和超新星爆发、 $\gamma$ 射线暴、超新星遗迹的关系都是还没有解决的问题。最近10年,对超大质量黑洞观测研究的一个主要进展就是,发现了超大质量黑洞的质量与其宿主星系的很多宏观性质有密切的相关,表明超大质量黑洞的增长过程和星系的演化是密不可分的。观测上也发现,由几百个星系组成的星系团中心的一个超大质量黑洞的活动可以对整个星系团的性质和演化产生重大的影响。但是超大质量黑洞的增长过程和种子黑洞的形成机制、超大质量黑洞对星系和星系团的反馈机制及其对宇宙演化的影响等重要和深

\* 收稿日期:2011年10月24日

刻的问题都还没有得到解决。最近的研究表明,中等质量黑洞可能处于矮星系、星团的中心和极亮X射线源中,但是它们存在的确凿证据、形成和演化机制以及它们和超大质量黑洞的种子黑洞的关系都还处于探索研究阶段<sup>[2]</sup>。

如图1所示,这些不同尺度黑洞系统共同的重要天体物理过程就是吸积和喷流<sup>[3,4]</sup>,以及它们对于周围环境的反馈作用和对不同尺度天体系统演化的影响<sup>[5]</sup>。由于黑洞视界本身无法被直接观测到,我们对于黑洞基本性质的了解基本上是通过其周围吸积盘辐射的电磁波来进行的,比如黑洞存在的证据、黑洞增长的过程、黑洞的自转<sup>[1,6]</sup>。黑洞的吸积盘表现出丰富多彩的行为,比如类似太阳大气的多层结构、“能谱态转换”、准周期振荡、极低和极高的辐射效率、外流和相对论喷流等。这些现象背后的深刻物理联系和机制以及和黑洞本身物理性质的关系都是天体物理的前沿热点问题。视超光速相对论喷流是黑洞吸积系统(和少数吸积中子星系统)所独有的、非常壮观的天体物理现象,反映了这些致密天体附近极端物理条件下物质和能量的特殊行为,可作为宇宙中特殊的实验室研究在地球上的实验室中难以或者不可能开展的基础科学研究。

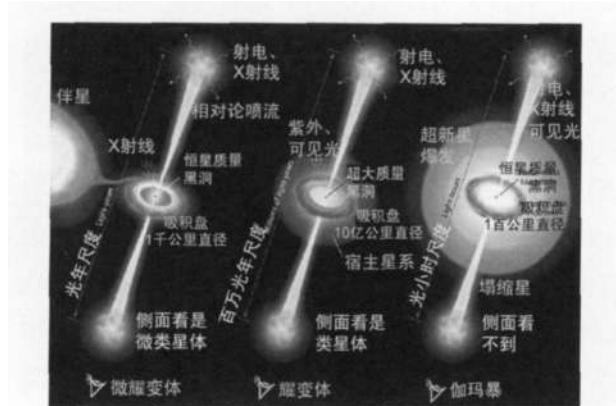


图1 三种具有非常不同的观测特征和极其不同的质量、时间尺度、大小、亮度以及天体物理环境的天体物理系统

## 1.2 中子星

Chandrasekhar 关于致密天体的状态方程的研究获得了物理学诺贝尔奖。中子星的发现和利用中子星双星系统研究与引力波辐射已分别被授予

诺贝尔物理学奖。在中子星被发现之后的近半个世纪里,人们对于中子星的认识有了巨大的进步,中子星的研究不但促进了对恒星演化的理解,而且中子星作为基础物理的实验室对于理解核物质在低温和高密度情况下的性质(这对于理解强相互作用的物理规律非常重要)还起了推动作用。中子星双星系统也是我们验证广义相对论效应的实验室,目前对广义相对论理论的最精确验证就是在中子星双星系统实现的。

目前观测到的几乎所有的中子星都是如图2所示的脉冲星(除少数处于低质量x射线双星中的中子星外),很多脉冲星的脉冲到达地球观测地的时间极为稳定,可与人造最稳定的时钟媲美甚至超过人造时钟的稳定度。这些精确的时钟不但可以作为天然的时钟提供时间基准、为处于深空的空间飞行器提供时间校对和导航,而且还可以用来探测其他天体产生的引力波信号。但目前对于脉冲星的脉冲辐射机制、脉冲稳定度的产生和破坏机制以及中子星的长期演化过程都还没有从根本上得到理解,影响了脉冲星的充分利用。

中子星的表面磁场强度在自然界中是最高的,而且远远超过人造最强磁场的强度。因此利用中子星可以研究在其他任何地方都无法研究的极强磁场物理,可以检验量子电动力学预言的一系列强磁场下的物质的特殊行为。观测发现,不同脉冲星的表面磁场强度的分布在大于 $10^7$ 和小于 $10^{14}$ 高斯之间,而通常年老脉冲星的表面磁场强度比年轻脉冲星低,表明脉冲星的磁场存在长期衰减。脉冲星磁场的产生和演化机制与中子星的内部结构和状态密切相关,但目前还没有得到满意的理解。根据脉冲星的自转变慢率可以计算出脉冲星的年龄,观测却发现很多脉冲星的年龄都远远大于和其成协的超新星遗迹的年龄。由于超新星爆发同时产生该超新星遗迹和该中子星,上述年龄的不一致就产生了孪生子年龄不一的严重矛盾。最近的研究表明,这个矛盾可能是由于计算中子星年龄时忽略了中子星磁场的衰减过程。

脉冲星还表现出众多丰富多彩的天体物理现

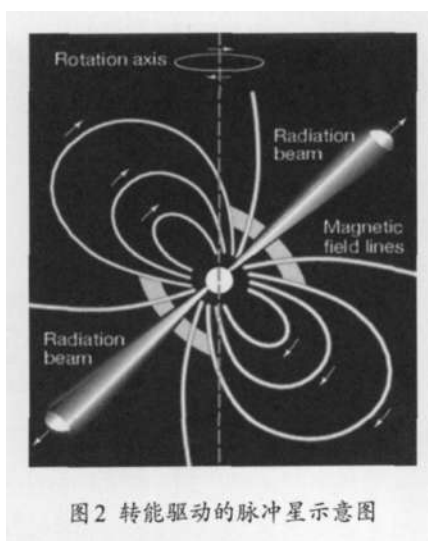


图2 转能驱动的脉冲星示意图

象。最近观测发现了瞬时出现的脉冲星,它们在大部分时间不产生脉冲,无法观测到,表明脉冲星的实际数量比以前观测到的多很多。观测到有些脉冲星的自转周期存在“慢 glitch”,有些存在周期性的变化。而大部分中子星的周期长期变化也不是完全规则的,存在所谓的“timing noise”。有关机制仍然没有得到很好的理解。

有些中子星处于双星系统中,当观测到的脉冲星和另一个天体没有直接的作用时,通过研究其双星系统轨道的变化和演化能够对广义相对论做出严格的检验。当其中的另外一个天体是一个恒星时,恒星的气体就可能被中子星吸积形成和中子星作用的吸积盘。由于吸积流的存在,这些系统一般情况下不表现为射电脉冲星,而主要表现为X射线脉冲星、X射线爆发源、Z-源或者atoll-源。近十几年X射线观测在吸积中子星系统中发现了千赫兹准周期振荡现象<sup>[7]</sup>,有可能用来检验广义相对论效应和测量中子星的基本性质。同时由于吸积流到达中子星表面之后会产生各种观测效应,比较黑洞和中子星吸积双星的X射线辐射也可以研究吸积盘物理。最近观测到有些中子星双星系统产生 $\gamma$ 射线,可能是不处于活动吸积状态的中子星的脉冲星风和其伴星作用所加速的高能粒子的辐射。

脉冲星研究的另外一个重要的意义就是寻找夸克星,其内部的物质不是由中子主导,而是由超核物质密度的夸克物质主导。是否存在夸克星以及夸克星的性质,对检验强相互作用理论至关重要。但是观测上如何有效地区分中子星和夸克星仍然是没有解决的重要前沿问题<sup>[8]</sup>。

### 1.3 超新星遗迹和 $\gamma$ 射线暴

大质量恒星演化到最后形成中子星或者黑洞的时候能够产生剧烈的超新星爆发,而白矮星在吸积物质或者和另一个白矮星并合的时候也会产生超新星爆发,释放大量的能量并带走爆发前白矮星的大部分物质,爆发之后留下的残骸就是超新星遗迹<sup>[9]</sup>。这些爆发携带的大量动能物质在向外膨胀过程中和星际介质作用产生激波,能够有效地把带电粒子加速到远远超过地球上人造加速器所能够达到的能量。通过观测超新星遗迹的高能粒子的辐射可以研究其遗迹中高能粒子的加速机制以及银河系宇宙线的起源。超新星遗迹当年龄超过10万到百万年后,就混合到了星际介质中,无法观测到了。有些超新星爆发还会把部分物质抛出星系,成为星系际介质。因此超新星爆发是宇宙物质和能量循环,以及重元素丰度演化的主要过程。研究超新星遗迹的统计性质,也能够理解星系中最近的恒星的形成,同时对于理解星系的演化也很重要。

由于在银河系内几百年才会发生一次超新星爆发,而其他星系的超新星遗迹在超新星爆发初期很难观测到,1987年在大麦哲伦星云(实际上是紧邻银河系的另外一个星系)中看到的超新星爆发(SN1987A)就成为了研究超新星遗迹早期演化的最佳实验室。根据观测到的该超新星爆发的光变和光谱,推测该爆发应该产生1个中子星或者黑洞,但至今在这个超新星遗迹中还没有找到任何致密天体。此外,爆发几年之后在光



中国科学院



学波段由哈勃空间望远镜观测到的三环结构和 Chandra X 射线望远镜看到的单环结构任何模型都没有预言过,对大质量恒星晚期演化理论和超新星爆发模型提出了重大挑战。

如图 3 所示, $\gamma$ 射线暴是宇宙中最剧烈的天体活动现象<sup>[10,11]</sup>,所产生的各向同性 $\gamma$ 射线辐射的总能量在秒量级的时间内能够达到  $10^{54}$  erg, 比普通的超新星爆发的辐射高几个数量级。目前观测到的 $\gamma$ 射线暴主要是两类, $\gamma$ 射线辐射脉冲短于大约 2 秒的事件可能产生于 2 个中子星的并合过程,而更长的事件则可能来自于大质量恒星演化到最后塌缩形成高速转动的磁中子星或者恒星级黑洞的过程,前者是引力波直接探测的最佳候选天体之一。观测到的 $\gamma$ 射线脉冲一般认为来自于形成的致密天体和吸积盘产生的极端相对论喷流的内激波。伴随 $\gamma$ 射线暴的光学和 X 射线的余晖一般认为来自喷流和周围介质作用产生的外激波,通过余晖的观测可以研究 $\gamma$ 暴的周围环境、喷流的性质以及 $\gamma$ 暴之后中心致密天体持续活动的情况。尽管经过了近 40 年多个天文卫星和大量地面望远镜的观测研究,目前对于 $\gamma$ 暴产生的基本过程(中心发动机机制),喷流的产生、加速、组成和结构等基本问题仍然没有得到根本的理解。

由于 $\gamma$ 射线暴有极强的辐射和穿透能力,目前能够观测到来自红移超过 8,也就是宇宙大爆炸后很短时间内产生的 $\gamma$ 射线暴,因此可以用 $\gamma$ 暴来研究宇宙的恒星形成历史,宇宙第一代恒星的性质,以及高红移宇宙的物质分布和星系的性质。此外,有些长 $\gamma$ 射线暴的某些观测特征还可作为测量高红移宇宙天体距离的“标准烛光”,研究高红移宇宙的膨胀历史和暗能量的性质。尽管暗能量的发现者被授予了 2011 年诺贝尔物理学奖,但暗能量的性质仍然很不清楚<sup>1</sup>。

## 2 高能天体物理学的发展

和其他天文学的分支一样,高能天体物理学

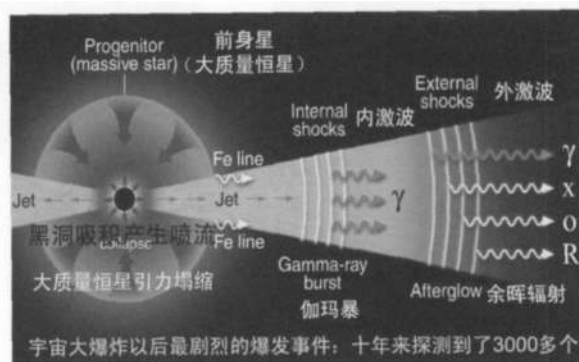


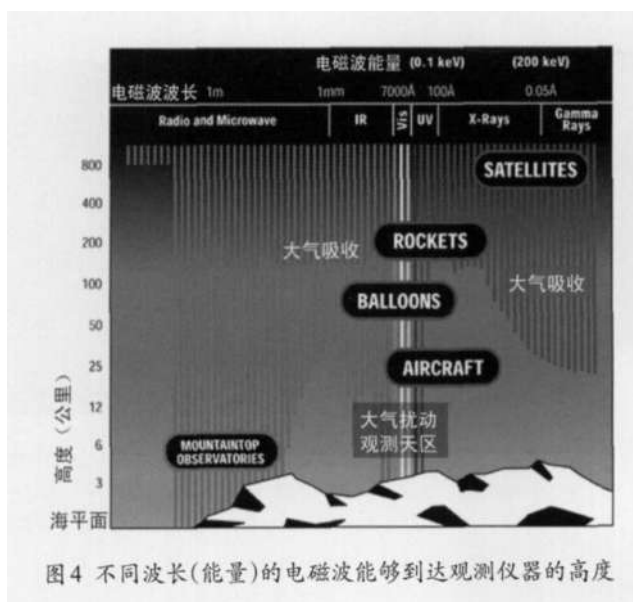
图3 一种可能产生伽玛射线暴的示意图

也是观测驱动的学科,正是 Giacconi 等人开创的空间 X 射线天文观测突破了地球大气对来自宇宙的 X 射线的吸收(如图 4 所示),建立了这个硕果累累、至今方兴未艾的前沿学科<sup>2</sup>。半个多世纪以来,一大批空间 X 射线和 $\gamma$ 射线天文卫星的观测大大拓展了人类对于宇宙和宇宙中的天体的认识,目前仍然有约 10 个空间 X 射线和 $\gamma$ 射线天文卫星在运行之中,比较重要的包括美国的 Chandra X 射线天文台、Fermi  $\gamma$ 射线天文台、Swift  $\gamma$ 射线暴卫星和 RXTE X 射线卫星,欧洲的 XMM-Newton X 射线天文台、Integral  $\gamma$ 射线天文台,日本的 Suzaku X 射线卫星和置于国际空间站的 MAXI X 射线仪器。遗憾的是,中国作为空间大国,至今尚未发射一颗空间天文卫星,仅仅在“神舟 2 号”飞船上进行过初步的 $\gamma$ 射线天文观测试验。未来几年国际上仍然将陆续有几颗空间 X 射线天文卫星发射运行,包括美国的 NuSTAR 和 GEMS X 射线天文卫星、日本的 NeXT (Astro-H) X 射线天文卫星、印度的 ASTROSAT X 射线天文卫星、俄罗斯-德国合作的 Spectrum-X X 射线天文卫星等,预期将掀起高能天体物理研究的新高潮<sup>[12]</sup>。

进入新世纪后,我国发布了《中长期科学和技术发展纲要》,其中优先主题“大尺度物理规律和深层次物质结构”明确了有关的高能天体物理研究内容。为落实该纲要,国防科工委制定《十一五空间科学发展规划》,计划在“十一五”期间完成我

1 这是诺贝尔奖历史上很少、甚至可能是第一次授予了仍然几乎完全没有得到理解的科学发现,凸显了暗能量发现的重大科学意义

2 Giacconi 因此于 2002 年以开创探索宇宙的新窗口而获得了诺贝尔物理学奖



国自主提出的以黑洞、中子星等致密天体为主要观测研究对象的“硬X射线调制望远镜”(HXMT)天文卫星,以及中法国际合作以 $\gamma$ 射线暴为主要观测研究对象的SVOM天文卫星。但是由于体制、经费等原因,该规划在“十一五”期间基本上没有得到实施。

中国天文学会深入调研了中国天文学的发展现状,提出了包括空间天文在内的各个领域的发展策略<sup>[13]</sup>。中科院在“十一五”期间开展了“空间科学项目发展规划战略研究”<sup>[14-16]</sup>,研究报告提出了空间天文领域的未来发展的战略目标以及3个研究计划,这些计划目前正在积极实施或规划中,预期在几年后中国的空间天文卫星和其他平台的天文仪器将提供高能天体物理研究的大批重要数据,使我国科学家在有关前沿领域的研究进入国际前沿甚至引领某些重要的研究方向。

## 2.1 我国空间天文发展的战略目标

我国从上世纪80年代开始,就成功地进行过多次球载X射线天文观测,90年代,研制的空间天文分系统(超软X射线探测器、硬X射线探测器、 $\gamma$ 射线探测器)搭载“神舟2号”,成功观测到数十例宇宙 $\gamma$ 射线暴。上世纪90年代早期提出的“硬X射线调制

望远镜”<sup>[17]</sup>经过近10年的预研,已完成关键技术攻关和背景型号研究,于2011年正式立项。我国空间实验室POLAR $\gamma$ 射线暴偏振测量仪器和中法合作SVOM $\gamma$ 暴多波段探测卫星的实施将使我国在 $\gamma$ 暴探测领域跻身国际前沿。

由此可见,我国的空间高能天文观测具有很好的基础,属于空间天文发展的优势领域。在HXMT的硬X射线巡天和对一些强源进行定点观测研究、POLAR和SVOM对 $\gamma$ 暴捕捉观测研究后,需要通过对大批宇宙高能辐射源开展系统和更加高精度的观测,深入研究恒星、星系、星系团等各种尺度宇宙的演化,宇宙中各种剧烈爆发现象产生的物理过程、极端相对论喷流和高能粒子加速过程,以及黑洞、中子星等极端天体的物理性质和强引力、强磁场中的物理规律。为此,强烈需要后续更先进的、天文台级别的空间高能天文项目完成这些科学研究,使我国在该空间天文主导领域处于国际先进行列。

该战略研究提出的目标为“研究宇宙天体的高能过程和黑洞物理,以黑洞等极端天体作为恒星和星系演化的探针,理解宇宙极端物理过程和规律”。为实现上述战略目标,提出了3个科学计划,分别为“黑洞探针”、“天体号脉”和“天体肖像”,每个计划都将通过一个或多个空间天文仪器观测等研究得到实施。上述计划中前两个计划已开始实施,预研的部分项目是以高能天体物理的研究对象为主要观测对象。我国正在建造中的空间站是一个功能强大的大型空间科学实验平台,将开展高能天体物理的前沿观测研究。下面简要介绍这些科学计划中有关高能天体物理的项目和主要科学目标。

## 2.2 “黑洞探针”计划

“黑洞探针”计划的科学目标是通过观

测宇宙中的各种黑洞等致密天体以及 $\gamma$ 射线暴,研究宇宙天体的高能过程和黑洞物理,以黑洞等极端天体作为恒星和星系演化探针,理解宇宙极端物理过程和规律。

“黑洞探针”计划将回答以下几个重要的前沿科学问题:(1)黑洞等极端和致密天体的性质是什么?(2)黑洞等极端和致密天体是如何和它们周围的环境相互作用的?(3)极高密度、极强磁场和极端引力场中的物理规律是什么?(4)大质量恒星是如何演化和最后形成黑洞等致密天体的?(5)超大质量黑洞是如何形成和增长的?(6)超大质量黑洞在星系及宇宙大尺度结构的形成和演化过程中起什么作用?

“黑洞探针”计划拟实施的项目为:

“硬X射线调制望远镜”(HXMT)。计划2015年发射运行。如图5所示,HXMT将在一颗近地轨道中型卫星上携带以高能X射线探测器为主和中、低能X射线探测器为辅的若干科学仪器,能区覆盖1—250 keV,其核心科学目标是:(1)通过宽波段的巡天发现大批新的和新类型的天体、尤其是高度遮挡的黑洞和中子星系统,理解它们的形成环境和演化过程;(2)通过对重要黑洞双星、中子星双星等天体的宽波段能谱测量和高精度时变测量,理解黑洞、中子星等致密天体附近的极端动力学、高能粒子加速和高能辐射过程。

中法合作多波段伽玛暴探测“空间变源监视器”(SVOM)。计划2015年发射。SVOM将在一颗小卫星平台上携带可见光(中国)、软X射线望远镜(法国)、硬X射线成像仪(法国)、 $\gamma$ 射线监视器(中国)等多波段科学仪器,其核心科学目标是:(1)发现和快速定位各种伽玛射线暴,引领国际伽玛暴研究;(2)全面测量伽玛暴的电磁辐射性质,提供伽玛暴的基本参数,从而理解大质量恒星的演化、伽玛暴的爆发机制及极端相对论喷流的产生和输运过程;(3)探测离我们最远、产生最早的天体,利用伽玛暴研究宇宙的早期演化、暗物质和暗能量的宏观性质。



图5 硬X射线调制望远镜空间运行示意图

“ $\gamma$ 暴偏振探测项目”(POLAR)。计划2014年发射运行。将在中国空间实验室天宫二号上面携带一个国际上第一个专用的 $\gamma$ 射线暴偏振测量仪器,预计将对理解 $\gamma$ 暴的爆发和喷流机制发挥决定性的作用,并有可能检验有些量子理论模型。

### 2.3 “天体号脉”计划

“天体号脉”计划的科学目标就是对天体的各种波段的电磁波和非电磁波辐射进行高测光精度和高定时精度的探测,理解各种天体的内部结构和各种剧烈活动过程。

宇宙中各种天体的电磁波辐射信号随时间的变化提供了天体内部结构和天体活动的基本信息。恒星、白矮星和中子星的周期性光变对理解它们的性质起了决定性的作用。美国RXTE X射线天文卫星发现了很多中子星和恒星级质量黑洞系统的丰富多彩的快速光变行为,但仍然没有从根本上理解中子星的内部结构和状态方程,没有准确地测量到黑洞的自转参数的分布,没有对中子星和黑洞吸积物质和产生相对论喷流的动力学过程给出详细的描述。由于中子星表面和黑洞视界附近的电磁波辐射主要集中在X射线波段,因此需要实施“天体号脉”计划,对这些天体的X射线辐射进行高测光精度和高定时精度的探测。

由于天体的X射线测光和定时的探测相对X射线成像和光谱观测较为容易和成熟,而下一代X射线辐射高测光精度和高定时精度的主要技术要求是大卫星平台,因此利用我国先进和相对成熟的大卫星平台率先实施“天体号脉”计划具有技术和



经济可行性。已启动预先研究的X射线时变和偏振卫星(XTP)项目,计划2012年进入背景型号研究,2020年左右上天,使中国在高能天体物理领域达到国际领先。

## 2.4 “宇宙灯塔”计划

中国空间站空间天文探测计划——“宇宙灯塔计划”,拟使用中国的空间站作为天文观测和物理实验平台,探索和实验利用宇宙中遥远X射线脉冲星的X射线信号作为天然和超稳定的永久时间脉冲信号实现航天器自主定位和导航,捕捉宇宙中各种天体快速变化的信号,研究宇宙中剧烈和极端物理过程,搜寻占宇宙中产生引力的物质中85%的暗物质的湮灭所产生的 $\gamma$ 射线或者其他次级粒子,并通过普查巡天和长期监视等手段探测多种天体的各种信号研究宇宙的起源和演化,测量占宇宙组份73%的暗能量的属性。因此中国空间站不但要使用宇宙中自然灯塔服务于人类,也要探测宇宙中各种携带宇宙奥秘的灯塔的信号,同时也是中国科学家放置于太空的一个瞩目的灯塔,向中国和全世界的科学家不断发送她所探测到的携带宇宙奥秘和基础物理规律的大量信号。

目前论证的空间天文实验和项目中,除了以暗能量和暗物质为主要研究对象的大型设施之外,还有若干具有独创和先进的科学思想、有望把我国的高能天体物理研究带上一个新的高峰的项目。例如,“X射线紫外全天监视器”将首次采用极轻重量的聚焦型望远镜构成X射线全天监视器,采用衍射/透射光学系统构成紫外全天监视器,预期将发现大批新的天体和天文现象,包括黑洞吞噬恒星这类稀有但是极为重要的事件;“偏振与全天监视仪”将是继空间实验室POLAR实验之后新型的X射线偏振设备,不但可以对 $\gamma$ 暴的X射线偏振做出精细的测量,而且也能够对一批中子星和黑洞的X射

线偏振进行测量;“银河系温热气体光谱绘图仪”是未来可预见的唯一能够全面测量银河系的重要组成部分——温热气体的性质的仪器,对于我们理解银河系恒星形成历史和物质循环将起重要作用。

## 3 策略和措施建议

“空间科学项目发展规划战略研究”之“空间天文与太阳物理领域”研究报告中详细论述了多项对未来中国的空间天文发展的措施建议,在此仅对其部分内容做简要概述并加以适当补充。

### 3.1 坚持科学发展观:“创新”和“做大”平衡发展

实验和观测有两种类型:(1)把已有实验和设备做得更大,获得更多的知识,这当然是很有价值的,而且实验的风险也比较小;(2)做全新的实验,获得新的观测和测量,得到新的知识,这更加重要,但是项目的风险比较大,并不总是能够成功。这两种类型对于人类认识自然规律都起了十分重要的作用,需要平衡发展。从科学发展历史上看,前者的作用是循序渐进的,后者起的作用则往往是开拓和突破性的。

我国科学研究的水平和规模与发达国家相比都有明显的差距,决策水平和经验也都需要进一步提高,对项目失败的承受能力也比较弱。而经济和社会的高速和健康发展又为我国的科学研究提出了很高的要求和提供了快速增长的资源。在这种情况下,需要平衡对两种类型的项目的支持,通过“做大”在持续取得科学研究成果的同时积累经验 and 培养队伍,通过“创新”取得科学突破,发展新技术,引领前沿。

### 3.2 加强新型探测技术的研发和支持空间项目概念研究

空间天文的发展离不开先进的空间天文探测技术,包括能在空间环境下对各种波长的电磁波进行探测的探测器以及相关的



光学、电子学、制冷、辐射防护等技术。长期以来我国没有建立系统支持关键空间天文探测技术研发的机制,故在空间天文探测方面和国际的差距是巨大和明显的。形成了一方面在望远镜和探测器技术还不成熟的情况下为了追求先进的科学目标必然导致立项的风险大并且立项以后的关键技术攻关周期又很长(当然研制周期过长又使得最后的项目失去先进性而错失科学机遇)、另一方面为了降低风险和缩短关键技术攻关周期又只能选择保守的技术方案而被迫放弃最先进的科学目标的两难困境。

因此需要加强在各个波段的新型空间天文探测器、新型探测方法和探测原理的研究和前期关键技术攻关,全面提升空间天文成像、定时、时变、光谱、偏振等观测能力。鼓励提出并优先支持基于中国学者提出和发展的新方法、新原理和新技术的空间天文项目,以及发展目标比较明确的新技术研究。把技术创新性和科学竞争性作为遴选空间天文项目的主要原则。

2009年10月中科院启动了“空间科学预先研究项目”,至今已支持和启动了两期的项目,其目标是通过部署空间科学预先研究项目集群,对至2025年拟开展的空间科学卫星计划和必需的关键技术进行先期预研。这是我国空间天文发展的极为重要的一步,但是目前投入的经费还是偏低。建议除中科院外,我国其他部门,如中国国家航天局(国防科工局)、科技部、基金委和教育部等部门对包括空间天文在内的空间科学项目的技术发展、关键技术和概念研究给予大力支持,共同促进中国空间科学的良性和快速发展。

### 3.3 发展亚轨道空间科学(天文)实验和验证能力

国外的空间天文发展的经验和教训都表明,仅仅通过实验室研发和环模实验并不能全部和彻底解决所有的关键技术和最大限度地降低卫星和其他空间平台的科学仪器失败的风险,而基于高空气球和探空火箭等亚轨道空间科学天文实验和验证能力是关键。在空间亚轨道进行低成本的技术

验证的同时,有些实验还能够取得重大的科学发现,凝练和提升正式的空间天文项目的科学思想,最终形成最佳空间天文项目。比如,南极气球BOOMERANG宇宙微波背景辐射观测实验提供了宇宙平坦性的最强烈证据,支持了利用超新星发现宇宙暗能量的结果,为后续的空间宇宙微波背景观测实验打下了良好的基础;中国学者参加并做出了重大贡献的南极气球ATIC宇宙线观测实验发现了可能是暗物质湮灭信号的迹象,推动了各种暗物质探测实验,也促进了日本放置于空间站的CALET项目和中国的暗物质探测卫星等重要项目的立项。

我国于上世纪70年代末开始发展高空科学气球,在80—90年代形成了具有国际竞争力的高空科学气球能力,为我国空间天文技术尤其是高能天体物理实验技术的发展做出了不可替代的贡献。但是由于种种原因,该能力目前没有继续为空间天文的发展服务,如果不能及时得到扭转,将成为我国未来空间天文发展的一个制约因素。因此建议提供专项经费支持高空科学气球系统作为我国未来空间天文发展的一个亚轨道实验平台,在可见光、红外、硬X和 $\gamma$ 射线等波段进行天文仪器的实验和先导天文观测。建议同时积极发展在南极开展长时间气球的技术,尽早建立南极气球飞行基地。探空火箭尽管有效观测时间较短,但是能够到达100—300公里的高度,基本上突破了地球大气对于所有电磁波波段的限制,能够在紫外和软X射线波段进行天文仪器的实验和先导天文观测,对其发展也应予以重视。

### 3.4 建立合理的空间科学(天文)经费预算

目前我国对于大型科研设施的经费支持普遍存在重中间、轻两头的问题,也就是重视设施的建设,忽略支撑体系、前期的研发、后期的运行和科学研究。其实这个问题国外也是存在的,但在其决策过程中科学家的咨询意见会对这些问题进行一定的修正。比如,2008年美国NASA行政部门提出的天体物理领域的预算结构,是典型的“重中间、轻两头”的预算。但是经过科学家建议修改后



的预算结构,整个预算比较平衡,支撑体系和技术研发等项目立项前的投入大大增加,项目的立项放到了较晚的阶段,降低了项目本身的建造和运行的费用,对于数据分析和理论以及实验室天体物理的研究有了较大的增加,值得我国有关部门参考。

### 3.5 理顺空间科学(天文)项目的经费支持渠道

空间科学任务具备系统性、集成性、复杂性和创新性都很强的特点,一项空间科学任务从预研到任务完成往往需要数年甚至数十年的时间,所需经费体量大,因此空间科学研究更需要稳定的支持经费和渠道。但是目前的状况是,一方面对空间科学计划缺少常规稳定的经费支持,另一方面与空间科学计划相匹配的支持经费迟迟不能到位,重大的研究计划无法按期开展,造成最佳探测时机的错失,并导致无法实现预定的科学目标,使得即便科学家提出了先进的科学计划也无法按时实施的窘迫境地,不仅严重挫伤了科学家和研究人员的积极性和工作热情,更重要的是会进一步拉大我国与世界先进水平的差距,进而影响到相关技术领域的发展以至国家的创新发展战略,其负面影响是多方面的,应该给予高度重视。

与此同时,目前我国仍存在空间科学计划财政支持渠道不畅通的情况:主管民用航天的国家航天局对口财政部的国防司,但国防司不管空间科学的财政经费;主要开展空间科学研究的中科院对口财政部教科文司,但教科文司的范围又不包括空间、航天,造成我国空间科学研究缺少财政投入渠道,严重影响了我国空间科学的发展。目前经国家批准、由中科院负责实施的“空间科学先导”项目在一定程度上缓解了上述问题,但是仍然没有彻底解决空间科学长期的经费支持问题。

此外,空间项目的地面应用系统的经费

通常不在项目预算里面,而必须另外向国家发改委申报也是一个严重的问题,比如HXMT和SVOM两个卫星项目的地面应用系统经费还没有得到落实,极有可能严重影响项目的正常研制和科学成果的获得。如此条块分割的不利体制和局面在世界范围内都是罕见的,亟待改革和改进。

因此建议我国成立类似美国航空航天局职责明确的全面负责空间科学发展、规划 and 管理的政府主管机构,明确发展模式,理顺发展思路,科学规划、稳步实施,焕发出我国空间科学事业的勃勃生机,使我国承担起大国的责任,在新的世纪为人类文明的发展和进步做出中国人应有的贡献。

### 3.6 建立空间天文国家实验室

国际上空间天文发达国家都建有高水平的空间天文专业实验室,例如美国的哥达空间飞行中心(GSFC)和喷气动力实验室(JPL)等等对于领导、实施和运行先进的大型空间天文项目都起了不可替代的作用。我国目前急需成立空间天文国家实验室,该实验室整合我国从事空间天文科学研究和仪器研制的主要力量,使之成为我国空间天文的综合研究中心和平台,引领我国空间天文的长期发展和高水平人才培养,在国际上具有较高的学术地位和显示度,能够展示中国科技水平、综合国力以及太空和平利用的一个重要窗口,并在深空探测、脉冲星导航、空间天气预报以及牵引空间高技术发展等方面满足国家重大战略需求。

建议在“十二五”期间成立“空间天文国家重点实验室”,经过“十二五”期间的建设,该实验室的整体水平和规模将得到很大的提升,争取在“十三五”期间升级成为国家实验室。

#### 主要参考文献

- 1 Zhang S N. Astrophysical black holes in the physical universe, in Astronomy Revolution: 400 Years of



中国科学院

- Exploring the Cosmos (York D G, Gingerich O, Zhang S. N. eds), Taylor & Francis Group LLC/CRC Press, 2011.
- 2 Feng H, Soria R. Ultraluminous X-ray Sources in the Chandra and XMM-Newton Era, *New Astronomy Reviews*, in press (2011arXiv1109.1610F), 2011.
- 3 袁峰. 黑洞吸积理论及其天体物理学应用的近期发展(I). *天文学进展*, 2007a, 25: 101-113.
- 4 袁峰. 黑洞吸积理论及其天体物理学应用的近期发展(II). *天文学进展*, 2007b, 25: 285-294.
- 5 Zhang S N. Similar phenomena at different scales: Black holes, the Sun,  $\gamma$ -ray bursts, supernovae, galaxies and galaxy clusters. *Highlights of Astron*, 2007, 14: 41-62.
- 6 汪定雄. 黑洞旋转能量的电磁提取及其在天体物理中的应用. *天文学进展*, 2007, 25: 193-205.
- 7 王静, 张承民, 尹红星等. 中子星 X 射线双星中 kHz QPO 现象的理论解释. *天文学进展*. 2011, 29: 277-290.
- 8 岳友岭, 徐峰, 来小禹等. 夸克物质与夸克星. *天文学进展*, 2007, 26: 214-231.
- 9 田文武, 杨雪娟. 当前超新星遗迹研究中的若干热点问题. *天文学进展*, 2010, 28: 97-111.
- 10 董云明, 陆 . Swift 时代伽马暴的观测及研究进展. *天文学进展*. 2008, 26: 41-61.
- 11 Zhang B. Gamma-Ray Bursts in the Swift Era. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2007, 7: 1-50.
- 12 张双南. 世界空间高能天文发展展望. *国际太空*, 2009, (12).
- 13 中国科学技术协会主编, 中国天文学会编著. 2007—2008 天文学学科发展报告. 北京: 科学技术出版社, 2008.
- 14 中国科学院空间科学项目中长期发展规划研究课题组. 中国空间科学项目中长期发展规划(2010-2025), 2008 年 10 月.
- 15 中国科学院空间领域战略研究组. 太空之路—2050 年空间科技领域发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.
- 16 吴季, 张双南, 王赤. 中国空间科学中长期发展规划设想. *国际太空*, 2009, (12).
- 17 卢方军. 透视宇宙的眼睛——“硬 X 射线调制望远镜”. *国际太空*, 2009, (12).

## Research and Development of High Energy Astrophysics

Zhang Shuangnan

(Institute of High Energy Physics, CAS 100049 Beijing)

**Abstract** In this article, high energy astrophysics restricted to the following: (1) Astrophysical objects studied are restricted to black holes, neutron stars, supernova remnants and gamma-ray bursts; (2) Research methods are restricted to space X-ray and gamma-ray observations. We then describe the recent research progress and significance, domestic and international development plans, including strategic goals, relevant science programs and space projects in high energy astrophysics. Finally we make several suggestions on strategies, management and funding in order to advance this field in the future.

**Keywords** space astronomy, high energy astrophysics, black hole, neutron star, supernova remnant, gamma-ray burst

**张双南** 中科院高能物理所研究员, 粒子天体物理中心主任和院粒子天体物理重点实验室主任, 国家天文台空间科学部首席科学家和 X 射线成像实验室主任(兼职)。1962 年 12 月出生。1984 获清华大学学士学位, 1989 年获英国南安普敦大学博士学位, 1989—1992 年美国宾西法尼亚大学博士后。1992 年起, 曾先后任美国大学空间研究协会高级科学家、阿拉巴马大学(Huntsville 校区)助理教授、副教授、教授。2002—2009 年清华大学特聘教授。主要研究方向为空间天文仪器和高能天体物理。至 2011 年 9 月, 共发表 SCI 文章超过 180 篇, 总引用超过 4 200 次。E-mail: zhangsn@ihep.ac.cn