

# 探索极端宇宙——增强型X射线时变与偏振空间天文台

刘红薇<sup>1</sup> 纪龙<sup>2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 德国图宾根大学)

对浩瀚宇宙的探索我们从未止步,从1962年开始,有一批X射线望远镜被发射进入太空,比如说1999年7月发射的钱德拉(Chandra)和1999年12月发射的XMM-牛顿(XMM-Newton)卫星,但是中国一直没有自己的X射线天文望远镜,只能用国外的二手数据,科研就像在捡漏。直到2017年的夏天“慧眼”卫星发射升空,中国人第一次望向了那片属于自己的未知宇宙,“慧眼”卫星至今已在轨运行3年多,已获取了丰富的科学数据,取得了一系列重大科学成果,比如成功监测了2017年8月17日轰动全球的双中子星并合产生引力波事件;通过对X射线吸积脉冲星GRO J008-57的详细观测,直接测量到了迄今宇宙最强磁场,该结果于2020年8月发表在了国际著名期刊《天体物理学通讯》(*Astrophysical Journal Letters*, ApJL)上,观测到了距离黑洞最近的高速相对论喷流,其观测结果于2020年9月21日在国际著名期刊*Nature Astronomy*(自然\*天文学)发表等。可是“慧眼”只是个开始,“慧眼”主要目标是发现新的高能天体活动现象,但是“黑洞”附近有什么,中子星内部状态是什么,“慧眼”根本无法回答。于是更强大的空间天文台来了,它就是增强型X射线时变与偏振空间天文台(enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission, eXTP)(图1)。

eXTP是我国第一颗空间天文卫星“慧眼”的后续项目,也是我国下一代强大的空间天文台,并有望成为国际领先的旗舰级X射线空间观测设施,目前处于重大背景型号阶段(也就是通常的“方案阶段”),由中科院先导专项(二期)支持。由于搭载了

大面积准直型探测阵列和高精度的聚焦望远镜阵列,eXTP不仅探测性能较“慧眼”至少有一个数量级的提升,而且还有全新的观测能力,它能够将宇宙看得更精细、更准确。

## 一、eXTP的历史和简介

高能所在2007年牵头提出了建造X射线时变与偏振探测卫星(X-Ray Timing and Polarimetry Satellite,简称XTP),在中国科学院先导计划的支持下,由高能所牵头多家单位,先后完成了XTP预先研究课题、XTP背景型号和eXTP背景型号三个阶段的工作,目前处于重大背景型号的阶段,计划完成eXTP的初样研制工作。在背景型号研究过程当中,XTP团队主动寻求与国际科学家的仪器团队的合作。经过3年多的沟通和讨论,由于欧洲航天局(ESA)Cosmic Vision计划M3阶段候选项目之一欧洲原大型X射线时变天文台(Large Observatory For X-ray Timing,简称LOFT)卫星的科学目标和XTP基本一致,但是技术路线完全互补,因此2014年其团队集体加入了XTP项目,并计划贡献大面积X射线准直型望



图1 eXTP空间天文台示意图

望远镜和广角监视器,形成了增强型 XTP 概念(enhanced X-ray Timing and Polarimetry mission),即 eXTP。

eXTP 计划配置 4 种有效载荷(图 2): 能谱测量 X 射线聚焦望远镜阵列(Spectroscopy Focusing Array, SFA)、偏振测量 X 射线聚焦望远镜阵列(Polarimetry Focusing Array, PFA)、大面积 X 射线准直望远镜阵列(Large Area Detector, LAD)和广角监视器(Wide Field Monitor, WFM),其中前两个聚焦型载荷由中方牵头研制,LAD 和 WFM 由欧洲合作团队负责研制。卫星总重量预计 4.5 吨,长 9.4 m,宽 4.4 m (卫星非常大,就如 2X4 个姚明那么高,而大家所熟知的哈勃望远镜可见光波段的旗舰级空间天文台,总重量 11 吨,长 13 m,造价 15 亿美元),采用 550 km 圆轨道,倾角小于 2.5°,卫星计划在中国完成总装、集成和测试,采用长征 7 号或者长征 5 号运载火箭在海南文昌发射场发射。

eXTP 由中方发起并领导,主要由欧洲包括意大利、德国、瑞士、西班牙、法国等 20 多个空间天文发达国家的 100 多个研究所参与,很有可能是中国发起并领导的最大国际合作空间科学研究项目,计划 2027 年前后发射升空。

## 二、eXTP 的优势

eXTP 是世界上在 0.5~30 keV 能区唯一同时具备大聚焦探测面积和大准直探测面积以及高灵敏度偏振测量能力的空间 X 射线天文台,其同样能区的探测面积是慧眼卫星的 30~100 倍,在关键的 6 keV 处的聚焦成像面积比欧洲下一代大型空间 X 射线天文台 ATHENA 卫星高近一倍。eXTP 主要目标

可概括为“一奇二星三极端”,即:通过观测黑洞、中子星或者夸克星,在极端的引力、磁场以及密度条件下检验和发展宇宙基本物理规律。

eXTP 的科学能力和先进性已获国际同行广泛认可,是中国发起和领导、多国参加的天文台级重大空间科学卫星项目。eXTP 项目的开展,无论在广度和深度上都将极大地促进我国在空间领域的国际合作,提升我国作为负责任航天大国的国际形象、影响力和领导地位,带动我国空间科学和技术的发展。不过,eXTP 也面临着激烈的国际竞争,例如美国在 2018 年 3 月份批准的一个概念研究计划 STROBE-X 就采用了与 eXTP 相似的设计思路,覆盖了 eXTP 的大部分科学目标,计划在 2028 年发射。

## 三、eXTP 的科学目标

如前所述,eXTP 主要的研究目标,由首席科学家张双南研究员总结为:“一奇二星三极端”。“一奇”指的是黑洞的奇点,“二星”指的是中子星和夸克星。“三极端”是对物理研究方向的总结,可以简单的描述为研究极端引力场、极端磁场、以及极端密度下的物理规律。自 20 世纪 60 年代 X 射线天文学诞生至今,这些问题一直是天文学家们研究的最核心问题。这里我们对这些研究课题做一下简略梳理。下面的内容主要引自 eXTP 的白皮书,但是考虑到篇幅限制,eXTP 的科学目标又极为多样,这里的总结难免挂一漏万,请感兴趣的读者查阅白皮书中的相关内容(参考文献①-⑤)。

### 1. 极端引力

黑洞是广义相对论预言的天体,它们广泛的存

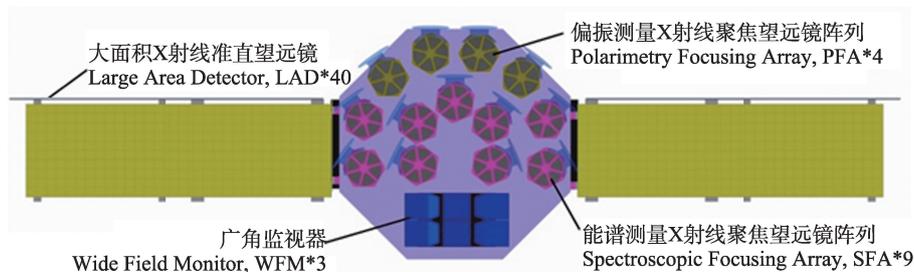


图2 eXTP有效载荷配置图

在于宇宙之中,并且已经被各方面的观测所证实。它们的特点是拥有超强的引力,强到甚至能够显著地扭曲时空。在强引力的作用下,在部分区域内,连光都无法逃逸出去,这个区域被称为“视界”(event horizon)。根据广义相对论,视界的大小与黑洞的自旋与质量有关。在视界之外,存在由气体或者等离子体组成的吸积盘。吸积盘附近存在复杂的辐射转移过程,最终导致的结果是辐射出X射线,可被我们的探测器观测到。在未来的10~20年,国际上最重要的观测设备之一就是中欧合作的eXTP卫星。我们通过X射线的天文学观测,可以测量黑洞的基本参数,以及验证广义相对论,研究强引力下的物理过程,这是现代天体物理的主要研究课题之一。

## 2. 极端密度

现代物理学的主要目标之一就是理解基本相互作用。在中子星中,由于强引力的存在,物质会被压缩到极高的核密度,这时候强相互作用开始起作用。所以,中子星是研究极端情况下物态方程的天然实验室。【作者注:物态方程主要描述的是温度、压强、密度之间的关系】我们在下图3中展示了中子星对应的、以及地球实验室中能达到的物态参数范围。例如,通过大型强子对撞机(LHC),我们可以制造极高温、低密度的物态;通过下一代的重离子对撞机,我们可以产生高温、高密度的物态。而中子星对应的物态范围与前两者十分不同,是低温、极高密度的物态,这在地球实验中目前还无法实现。目前的理论计算对这一参数空间也无法精确计算,即便是考虑最简单的情况(中子星由均匀的中子、质子、电子、缪子构成),计算中子星的物态方程也需要做大量的简化和假设。另外,在超高密度下,超子、夸克态的物质也可能会出现,这将导致着中子星可能存在多种不同的物态方程。

我们可以通过测量中子星的参数(半径与质量)研究强相互作用,因为粒子之间的力会影响中子星的硬度(stiffness),而这又会反映在中子星的物态方程上。这导致的结论是中子星的半径-质量关系与

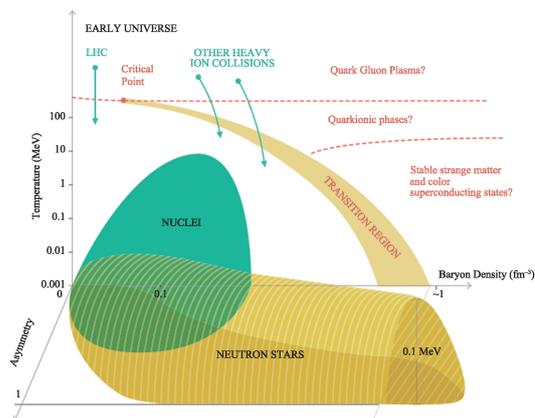


图3 中子星以及地球实验中允许物质的参数空间。  
此处考虑的参数为温度,重子数与核不对称

物态方程是一一对应的(如图4所示)。所以如果我们能够精确的(精度百分之几)测量多个中子星的半径与质量,通过与理论模型做对比,就可以确定他们对应的物态方程,进而理解低温、高密度状态下的强相互作用。

## 3. 极端磁场

### 3.1 磁星

在脉冲星中,有一类磁场极强( $10^{14} \sim 10^{15}$ 高斯)的天体,被称为磁星。他们释放磁能,辐射出X射线与伽马射线,在观测上表现为“软伽马射线复发源(soft gamma repeaters)”或“不规则X射线脉冲星(anomalous X-ray pulsar)”。在最近研究中表明,磁星与快速射电暴有关,这是近年来天体物理领域的热点问题。磁星的辐射强度不是稳定的,通常情况下会表现出不同时间尺度的变化,例如,短暴(burst)持续时间小于1秒,而大爆发(outburst)可长达数星期。磁星的暴发机制目前并不清楚,但是通常认为是由于中子星附近的强磁场的磁重连引起的(图图5(a))。利用eXTP,我们可以对磁星的磁场进行精确的测量,使用的方法被称为“质子回旋吸收特征”(proton cyclotron resonance scattering features)。基本原理是,在磁场中带电粒子绕磁感线做圆周运动,当磁场强度高到一定程度时候,绕转的轨道能级将被量子化(被称为“朗道能级”)。此时,强磁场将影响质子与电子的散射截面,在出射的电磁谱中

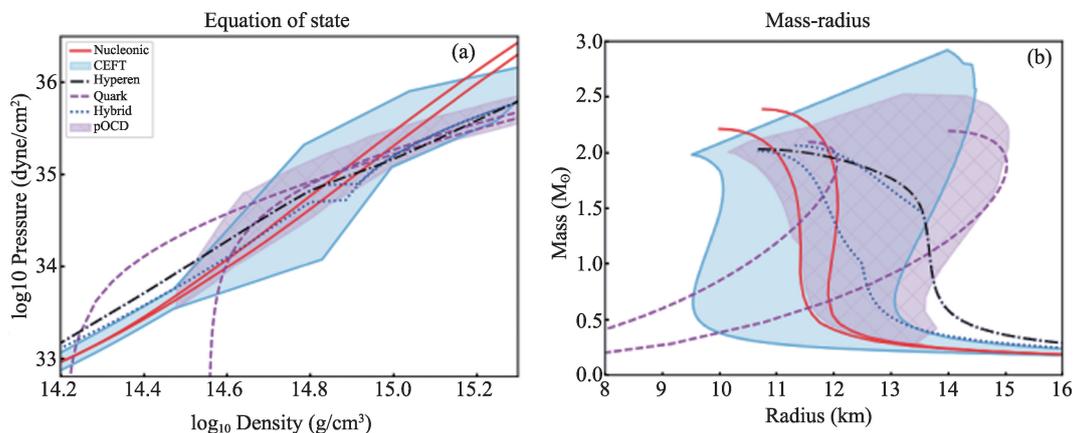


图4 不同假设下的物态方程,即压强-密度关系图(a)与其对应的中子星质量-半径关系图(b)

形成吸收结构(图 5(b))。研究回旋吸收结构,能精确的测量磁星的磁场强度,更好的理解磁星表面的磁场结构。除此之外,我们还将通过诸多时变性质研究磁星的磁场,例如,频率跳跃(glitch)、自由进动、制动指数(braking index)、星震等。

### 3.2 检验量子电动力学 (quantum electrodynamics, QED)

几十年前量子电动力学就预言,磁场会影响光线的传播,简言之,磁场会使不同偏振态的光(寻常光与非寻常光)的折射系数产生差异,而这会引起真空双折射现象(vacuum birefringence)。但是由于该现象极为微弱,直到现在我们都无法在实验室中找到观测证据。在强磁场中,QED引起的真空极化将更为显著,可以用来检验QED效应。QED效应主要表现在影响中子星的X射线辐射的偏振度,在图6中,我们展示了不同情况下(考虑与不考虑真空极化)理论预言的线偏振度。同时,通过偏振度的研究也可以研究中子星的磁场。因为在强磁场的光线传

播中,偏振方向是随着磁场绝热演化的,换言之,当磁场方向发生变化,寻常/非寻常光将保持其原始的偏振状态。目前,X射线偏振观测方兴未艾,在未来的几年内,将有数个天文卫星项目发射,其中eXTP是最重要的一个,因为eXTP能够同时结合能谱、时变与偏振三维信息,打开X射线天文学的新窗口。

## 四、eXTP的天文台科学

中小型天文卫星科学目标和用户团队比较集中,在卫星发射之前就确定了研究目标和观测计划。而有些大型天文卫星就好像地面的天文台一样,用户来自于整个天文界的天文学家,其观测目标和计划主要由这些用户提案,再经过专家评审来确定,这一类天文卫星被称为天文台。其中一些空间天文台规模特别大,卫星上面的科学仪器(望远镜)功能特别强大,不但能够满足大量用户的需求,而且科学寿命特别长,通常能够在10年甚至更长的时期都能够保持丰富的科学产出,比如大家熟悉的哈勃空间望远镜就是可见光波段的旗舰级空间天文台,而钱德拉(Chandra)和XMM-牛顿(XMM-Newton)则是X射线波段的旗舰级空间天文台,这三个天文台都是20世纪发射运行的,至今依旧“炯炯有神”。

eXTP在“三极端”核心科学目标之外,由用户按照自己的科学思想利用eXTP强大的科学能力提出观测目标和设计观测计划,可以研究非常丰富的天文现象,其中WFM将起重要的作用,WFM将是

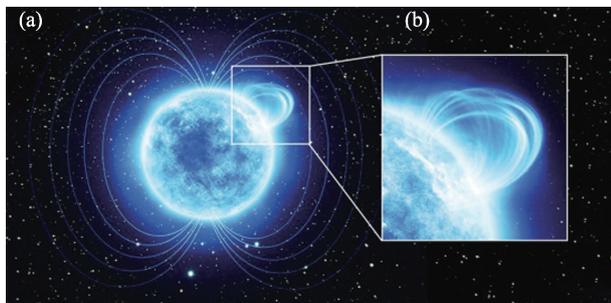


图5 磁星磁场结构的艺术想象图

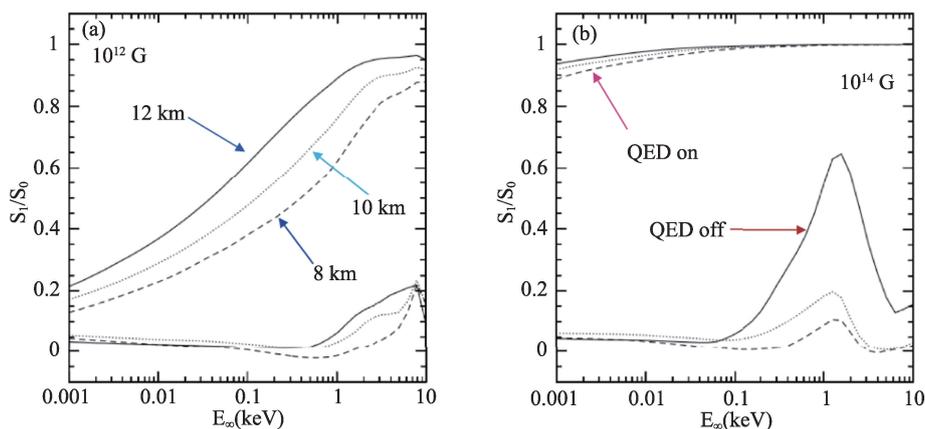


图6 在不同条件下,理论推测的强磁场中子星的辐射的线偏振度

该能区最灵敏的大视场相机,不但可以监视大批已知源的活动,而且可以发现众多的新爆发源和现象,包括伽马暴、引力波电磁对应体,快速射电暴(FRB)的高能对应体等,将为eXTP的另外三个望远镜提供大量机遇观测目标。

### 五、eXTP的国际影响力

自从增强型X射线时变与偏振(eXTP)空间天文台项目于2007年提出以来,其科学发现能力获得了国际学术界的高度认可,国际影响力迅速增加,截至2020年10月,直接引用eXTP的学术论文共有354篇,其中201篇为审稿论文,其余为会议论文。

这些论文,少部分是引用eXTP的相关技术,但大部分论文主要指出,有很多重要的科学问题无法基于目前的天文观测数据获得解决,迫切需要eXTP的强大科学能力。这些论文指出,eXTP将在诸如黑洞附近极强引力场中的物理规律、中子星内部极高密度下的物质性质和中子星的极强磁场中的真空涨落等一系列极端宇宙的重要科学问题方面取得突破,同时eXTP对暗物质粒子的搜寻、引力波暴电磁波对应体等新兴多信使和时域天文学的很多重大科学问题的解决也非常重要。

图7是从国际上使用最为广泛的美国NASA的天体物理数据系统(Astrophysics Data System, <https://ui.adsabs.harvard.edu/>)获得的近年来引用eXTP的论文情况(数据截止到2020年10月10日)。可以看

到,这些文章的数量从2010年开始逐年增多,2016年开始快速增加而且势头不减,表明国际学术界日益认识到了eXTP的科学意义,eXTP的国际学术影响力快速增加。这些论文的总引用量高达3095次,总阅读量50981次。这些论文中由eXTP项目组发表的文章共9篇,其中5篇为审稿文章,总引用量为235,阅读量为4163,仅占引用eXTP的文章总数的3%,说明绝大多数引用eXTP的论文都是eXTP团队以外的国际学术界发表的。这些文章的国外作者主要来自于意大利、波兰、德国、英国、俄罗斯、葡萄牙、印度、罗马尼亚、巴西、荷兰、美国、法国、丹麦、日本、芬兰、瑞典、捷克、加拿大、埃及、巴基斯坦、西班牙等二十多个国家。

### 六、总结

由于综合了大面积X射线聚焦望远镜阵列、大面

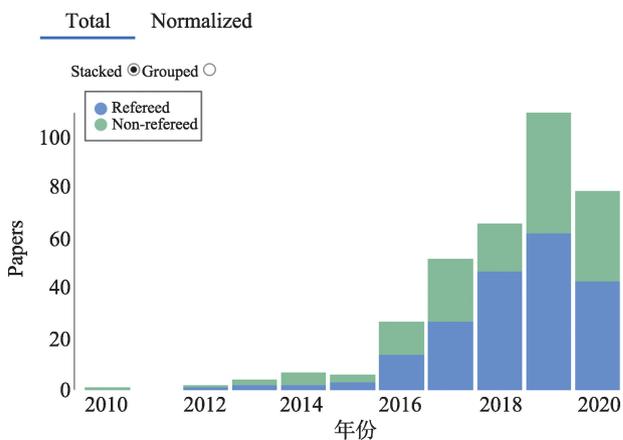


图7 直接引用eXTP项目的论文分布图

积准直型望远镜阵列、高灵敏度X射线偏振望远镜的综合能力,在测量黑洞自转,检验引力理论,测量中子星质量半径关系并限制其内部核物质状态方程,研究脉冲星辐射机制和磁场结构模型等方面,eXTP相比于国际上其他的卫星,综合性能将有一个数量级的提高,同时还利用了偏振X射线观测的新维度约束。eXTP作为综合天文台也将观测各类高能天体,探测伽马射线暴和引力波电磁对应体,带来海量科学产出。eXTP项目的实施,将使我国成为国际高能天文研究的领跑者,将占据重要前沿科学研究的制高点。

### 参考文献

- ① Alessandra De Rosa, et al., SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62, 029504
- ② Andrea Santangelo, et al., SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2019 62, 029501
- ③ Andrea Santangelo, et al., SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62, 029505
- ④ Anna L. Watts, et al., SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62, 029503
- ⑤ Shuang-Nan Zhang, et al., SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, 62, 029502



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;  
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

### 欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2020年《现代物理知识》每期定价10元,全年6期60元,欢迎新老读者订阅。

需要过去杂志的读者,请按下列价格付款。

2010~2019年单行本每期10元;2010~2015年合订本每本60元。

### 订阅方式

- (1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。
- (2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识\*\*年\*\*期”)  
名称:中国科学院高能物理研究所  
开户行:工商银行北京永定路支行  
账号:0200004909014451557
- (3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;
- (4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;  
淘宝购买链接:  
<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w400-2-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>  
微店购买链接:  
<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>  
或扫描下方二维码:



淘宝网购刊



微信购刊