PROCEEDINGS OF SCIENCE

拓宽X射线偏振测量波段的潜力

arXiv:2611.32885v1 [astro-ph.HE] 24 Nov 2026

Nicolas De Angelis[a], *

[a]*INAF-IAPS*，意大利罗马骑士谷路*100*号

电子邮箱： nicolas.deangelis@inaf.it

成像X射线偏振探测器（IXPE）已使X射线偏振测量成为常规的天体物理学诊断手段，但其灵敏度局限于2–8 keV能段；在该能段，气体中的光电效应能够得到最有效的利用。IXPE的观测结果提出的若干问题，以及高能天体物理学中的一些经典目标，都需要开展低于2 keV的偏振测量，以探测中子星、黑洞盘和耀变体的热辐射；同时也需要开展高于8 keV的偏振测量，以分离反射、回旋线，以及超新星遗迹、脉冲星风云和磁星的非热辐射。在近期一篇综述的基础上，我们讨论将能段拓展至约0.1–80 keV乃至更高范围的科学依据，以及能够实现这一目标的技术：渐变多层膜上的布拉格衍射、由具备到达时间测量能力的像素专用集成电路读出的光电气体成像仪、时间投影室和焦平面康普顿偏振仪，包括将这些技术组合到堆叠式焦平面中的方案。随后，我们总结这些技术在REDSoX和GOSoX、eXTP、XPP、WXPT，以及为欧洲航天局M8征集而提出的EXPO和PHEMTO中的实施情况或潜在应用；同时介绍宽视场暂现源偏振仪POLAR-2，并讨论将推动宽波段偏振测量任务设计的各种权衡。

高能宇宙源的多频行为—第十五届（*MULTIF2025*），*2025*年*6*月*9*日至*14*日，意大利巴勒莫蒙德洛

*发言人

© 著作权归作者所有，依据《知识共享署名—非商业性使用—禁止演绎 4.0 国际许可协议》（CC BY-NC-ND 4.0）发布。
保留文本和数据挖掘、人工智能训练及类似技术用于商业目的的所有权利。ISSN 1824-8039。由 SISSA Medialab 出版。

1. 开展高能宽带偏振测量的科学动机

自20世纪70年代首次探测到蟹状星云的偏振辐射后的近五十年间 [1, 2], , X射线偏振测量基本上一直未得到探索。成像X射线偏振探测器（IXPE）由美国国家航空航天局/意大利航天局小型探测器计划发射，于12月9日升空 2021 [3, 4], , 改变了这一局面：其三台望远镜均将一面掠入射镜与一台气体像素探测器（GPD）相连接[5], , 构成对2–8 keV能段敏感的成像光电偏振仪。之所以选择这一能段，是因为天体源在此处较为明亮、光学系统效率较高，并且预计大多数源类都将在一定程度上呈现偏振 [6]。IXPE已经观测了约一百个源，其运行时间也已延长至 2028 [7]。它测量了脉冲星风云（PWNe）的偏振 [8], 、超新星遗迹（SNRs）的偏振 [9], 、磁星的偏振 [10], 、吸积脉冲星的偏振 [11],、耀变体的偏振 [12, 13], 、塞弗特星系的偏振 [14, 15] 以及银河系中心分子云的偏振 [16],, 而观测结果往往与预期相悖。

这些结果确立了偏振测量作为一种与成像、光谱学和计时互补的诊断手段，但也显示出单一窄波段的局限性；该波段受光电截面和气体中光电子射程的能量依赖性所限制 [6]。在回顾参考文献 [6] 的基础上，并结合过去两年的最新进展，我们将讨论IXPE波段之外的科学问题（本节）、能够覆盖这些波段的技术（第 2节）以及正在应用这些技术的项目（第3节）。

1.1 软波段（低于2千电子伏）

孤立中子星的热谱峰值位于0.1–0.3千电子伏，在此处它们的通量比IXPE波段高出几个数量级：已知的旋转供能脉冲星中，约有100颗是热X射线发射源，其温度为 10^5–10^6 K。预计它们强大的磁场会使辐射发生偏振 [17], , 从而能够探测发射区域的几何结构 [6]。磁星也是如此，其中约有十颗位于高银河纬度 [6]。截至目前，IXPE已观测到七颗磁星，揭示出复杂的发射区域，并且偏振通常具有显著的能量依赖性 [10, 18–25]。真空双折射这一量子电动力学效应仍存在争议：射电脉冲星磁星1E 1547.0–5408 的高偏振曾被解读为该效应的标志 [23], , 但一项独立分析认为，单凭这一点并不足以构成有力证据 [24]。更大的样本以及覆盖热辐射峰值的波段，将有助于开展更清晰的检验。

黑洞双星中，约有十余个位于高银河纬度。在高软态，吸积盘会发出热辐射，而对 1 keV 以下能段进行偏振测量，可通过法拉第旋转和去偏振约束其磁场 [26] , 并可能揭示翘曲吸积盘 [6]。高同步辐射峰值（HSP）耀变体同样位于高纬度，其峰值在 0.1 至 10 keV 之间；IXPE 发现，其 X射线偏振度是较长波长处的两至三倍 [12, 13], , 并且在 Mrk 421 中观测到偏振角快速旋转，而较长波长处并未出现相应旋转[27]。在软波段进行测量，可以检验这两种行为之间的过渡是否平滑。由于星际吸收，软波段主要适用于高银河纬度天体，而上述所有类别都符合这一条件。

1.2 经典能段（2–8 keV）：灵敏度、分辨率与灵活性

即使在 IXPE 的波段内，大多数类别源的样本仍局限于最明亮的天体 [6]。若有效面积增大约十倍，样本范围便可扩展至更多塞弗特1型星系；它们的主要辐射源于热日冕中的康普顿化 [14], ，也可扩展至低同步辐射峰值（LSP）耀变体。IXPE 对这类天体目前仅获得了上限，而可靠探测将有助于厘清加速的是轻子还是强子 [28]。IXPE 的角分辨率为 25–30 角秒，但目前只有对蟹状星云脉冲星风云的观测充分发挥了这一优势 [8]。得益于硅孔光学元件和复制技术，角分辨率达到 5–10 角秒、有效面积达到数千平方厘米的光学系统正逐渐成为可能[2]；若性能提升 3–6 倍，就能详细研究脉冲星风云的形态，使至少另外七个脉冲星风云也能够纳入观测范围，并探测超新星遗迹激波附近的湍流和磁场方向 [6]。采用能量分辨率比 IXPE 高一倍的气体探测器看来是可行的，它将使超新星遗迹的热谱线得以排除，并将活动星系核的 Fe Kα 线、连续谱和吸收边区分开来 [6]。最后，作为小型探索者计划任务，IXPE 需要数天才能重新指向，这使其无法对快速瞬变源和暴发早期阶段进行偏振测量；向欧洲航天局提议的 EXPO 则通过宽视场监视器解决这一问题，可触发自主重新指向，并在约 50 秒内完成 [29]。

1.3 硬波段（高于 8 keV）

IXPE的能段涵盖了偏振测量的若干主要目标 [30]。在6 keV以上，塞弗特1型星系的能谱以吸积盘反射为主，而塞弗特2型星系的能谱则以电离锥或环面的散射为主。在NGC 4151中，反射成分在IXPE能段内仅占8%，在更高能量下则增至两倍，因此，反射成分的偏振（可揭示吸积盘的几何结构，并可能确定黑洞的自旋）尚未得到可靠测量 [14]。在反射占主导的圆规座星系中，环面的反射已得到测量，但电离锥的偏振仍大多未受约束 [15], , NGC 1068 [31]也是如此；利用覆盖宽能段的高效光谱偏振测量，可以测定这两种结构之间可能存在的错位 [32]。对于超新星遗迹，谱线和热辐射会妨碍对2–8 keV能段的研究 [9], ；而在铁谱线以上进行成像偏振测量，则可分离出同步辐射，并可能解释NuSTAR在仙后座A中探测到的特征 [33]。磁星的硬尾至少延伸至100 keV [34, 35]，在6–30 千电子伏进行偏振测量，则可探索硬尾从软成分过渡的情况。由于硬尾较暗，必须将本底保持在较低水平；成像可将本底限制在光学系统点扩散函数所覆盖的小区域内，从而实现这一点。吸积脉冲星的偏振程度低于预期 [11], ，而回旋谱线处的偏振（该谱线大多位于10 keV以上）仍未测量：目前尚不清楚其偏振程度是很高（~80%） [36] ，还是为零 [37, 38]。最后，分辨率为10–20角秒的硬X射线成像仪将使银河系中心云团的层析成像 [16] 更加清晰，并将其扩展至更多云团。

IXPE波段以上的首次测量来自XL-Calibur，这是一台搭载于气球的焦平面康普顿偏振仪，带宽为15–80千电子伏 [39] ，于2024年7月从埃斯兰日飞往加拿大。它测得蟹状星云在19–64千电子伏范围内的偏振度为(25.1 ± 2.9)%、角度为$(129.8 \pm 3.2)^\circ$ [40], ，以及天鹅座X-1硬态下的$5.0^{+2.7}_{-3.0}$%，其角度与射电喷流对齐 [41]；后者只是一个提示，而非探测结果（偶然概率为8.7%

（43小时后）。气球只能探测最明亮的天体，要让硬X射线偏振测量惠及广大人群，还需要卫星。天鹅座X-1就是一个例子：INTEGRAL发现其400千电子伏以上的辐射具有很强的偏振，且可能与喷流有关 [42], 而IXPE在2–8千电子伏测得的偏振度仅为4。0 ± 0。2% [43]；要联系这两个能区，还需要对中间能区进行偏振测量。

2. 现有或正在开发的技术

没有任何单一技术能够在 0.1 至 80 千电子伏的范围内实现最佳覆盖，因为最适用的过程会随能量而变化：在 ~0.7 千电子伏以下采用布拉格衍射，在~0.6 至 ~35 千电子伏范围内采用气体中的光电效应，在 ~20千电子伏以上采用康普顿散射（图1a）。灵敏度通常用 99% 置信度下的最小可探测偏振度表示 [44],

$$\mathrm{MDP}_{99} = \frac{4.29}{\mu\, R_S}\sqrt{\frac{R_S + R_B}{T}}, \tag{1}$$

其中， μ 为调制因子， $R_S = F\,A\,\varepsilon$ 为源计数率（F 光子通量， A 光学系统的有效面积，ε 探测效率）， R_B 为源区域的背景计数率， T 为曝光时间。当本底可忽略时，最小可探测偏振度$_{99}$ = 4。29/（$\mu\sqrt{FA\varepsilon T}$），因此品质因数 $\mu\sqrt{\varepsilon}$ 与光学系统的面积共同决定灵敏度。在气体探测器中，这两个因素此消彼长：较长的漂移距离能提高探测效率，但也会加剧扩散，使径迹变得模糊 [6]。图1b 展示了采用这些技术的各项任务和概念所覆盖的波段（第3节）。

2.1 渐变多层膜上的布拉格衍射（0.1–0.7 千电子伏）

当布拉格角接近 45° 时，入射面内的电场分量几乎被完全抑制，因此反射镜绕光束旋转时，反射强度的调制幅度接近 100%。天然晶体受限于带宽狭窄，而且只有少数晶体能在 45° 的 2–8 千电子伏范围内产生衍射；人工多层膜使软X射线的利用成为可能，而梯度厚度扩大了带宽，从而提高了效率 [6]。最先进的设计 [45] 将横向梯度多层膜镜（LGML）与临界角透射（CAT）光栅结合，并将光栅置于X射线镜附近：光栅按波长分散辐射，多层膜的梯度与这种色散相匹配，而以接近 45° 角度反射的辐射则由沿梯度方向排列的 CCD 记录。这种设计的优点包括：较宽的软波段（0.1–0.7 千电子伏）、整个波段内接近 100% 的调制、借助色散实现的极佳能量分辨率、较低的本底（因为信号幅度可与其在 CCD 上的位置相关联），以及便于堆叠的结构（第 2.7节），在更高能量下堆叠时镜面面积损失也很小 [6]。单次反射只能测量一个线偏振分量，因此需要将三个装置以不同方向放置，才能同时测量 I、 Q 和 U；或者让一个装置旋转，但这会降低对可变源的灵敏度。

该概念正由REDSoX进行验证。REDSoX是一枚由美国国家航空航天局资助的探空火箭（由五个复制的、焦距为2.5 m的镍制沃尔特-I型镜壳、48个周期为200 nm的CAT光栅以及三个彼此成120° 角的 大口径多层膜镜组成），其首次飞行计划于 2027 [46]年末进行，目标源为Mrk 421。其轨道版本GOSoX已入选NASA天体物理学先驱任务，计划于 2030 [47]发射：一颗小型卫星

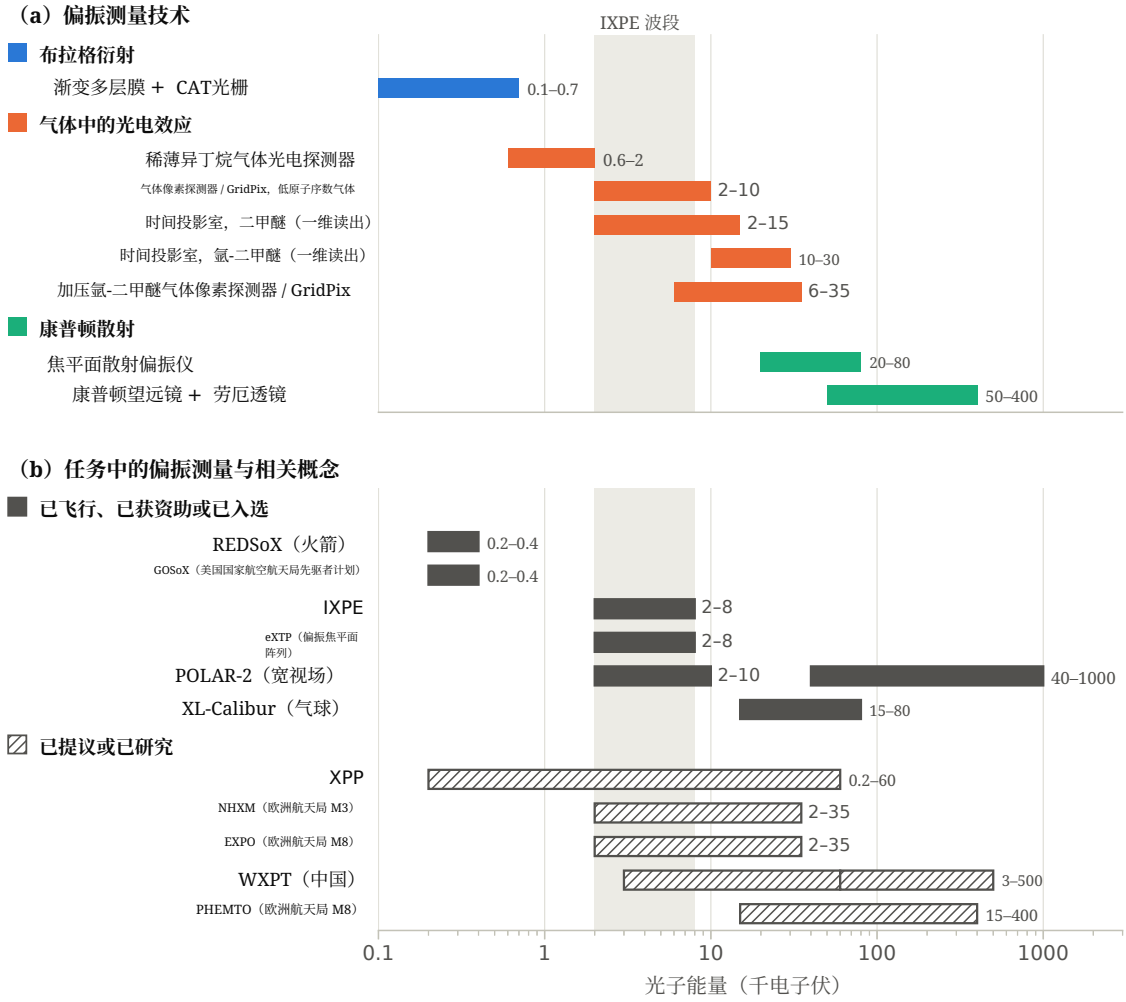


图1： （a）第2 节所述偏振测量技术的能量覆盖范围，以及（b）文中讨论的任务和相关概念。阴影波段为IXPE的2–8千电子伏范围。各范围仅为示意，取自文中引用的文献。（b）中的实心条表示已经执行、获得资助或已获选定的任务；斜线条表示已提出或正在研究中的概念。POLAR-2的两条条带分别表示其低能和高能偏振仪（LPD和HPD）；POLAR-2是一种不带光学系统的宽视场仪器。WXPT的条带在60千电子伏处划分，60千电子伏是其焦平面偏振仪的上限；在此之上，宽视场偏振仪将波段扩展至500千电子伏。

用于0.2–0.4千电子伏波段，配合 $E/\Delta E \sim 100$，预计在一年内对十多个目标源达到3–10%的最小可探测偏振度，滚转速率不超过 1°/秒。

2.2 2千电子伏以下的稀薄气体（0.6–2千电子伏）

低于 2 千电子伏时，光电子射程会迅速缩短。以异丁烷为基础的稀薄混合气体可在低于 1 千电子伏时提供一定的成像灵敏度，并曾为 XEUS任务[48]进行研究。压力 P 降低时，扩散会随着 $\sqrt{d_l/P}$ 增大，因此漂移间隙 d_l 必须较短（0.5 厘米或更短），但可能导致不完整电荷事件所占比例增加

	IXPE 气体像素探测器（XPOL-III）	GridPix（Timepix3）
像素图案	六边形， 50 μ米间距	正方形， 55×55 μ米^2
信号输出	模拟	数字（ToT）
径迹成像	2-D	3-D
传输间隙中的扩散（二甲醚， μ米 rms）	55	8
每像素噪声（e^- 均方根）	50（30）	60
最小阈值（e^-）	2300（150）	500（ToT/ToA）

表 1： 采用 Timepix3 专用集成电路的 IXPE 气体像素探测器和 GridPix，改编自参考文献 [6]。括号内的数值为 XPOL-III 的预期值。

收集；氦的扩散过强，需要加入淬灭剂；而对偏振不敏感的俄歇电子则将下限设在约 600 电子伏，即碳的 K壳层能量。此类装置在高于 2 千电子伏时几乎完全透明，而薄氮化硅窗口的性能会优于聚丙烯或聚酰亚胺窗口 [6]。

2.3 气体像素探测器和GridPix（2–10千电子伏）

气体像素探测器 [49, 50] 开启了经典能段的偏振测量：光电子的径迹漂移至倍增级后，由像素专用集成电路读出，从而获得入射点和发射角；发射角在偏振方向附近达到峰值。IXPE探测器 [5]具有1厘米的漂移间隙，其中填充800毫巴的二甲醚（DME），并配备一个气体电子倍增器（GEM）和一块包含105,600个六边形像素、像素间距为 50 μ的CMOS专用集成电路；这一最优配置在IXPE选型之前已确定，预计微调不会改变 [6]。其主要缺点是1.1毫秒的死时间；XPOL-III专用集成电路可将eXTP的死时间降至0.15毫秒 [51]；对于采用 ~1500 厘米^2,的光学系统（如XMM-牛顿）或更大的光学系统，则需要更显著的改进 [6]。

Medipix系列的专用集成电路（ASIC），Timepix3 [52] 和 Timepix4 [53], 会在每个像素中记录到达时间（ToA，标称分辨率分别为 1.5625 ns 和 195 ps）以及超过阈值的时间（ToT，与能量成正比）。Timepix3 具有 256×256 边长为 55 μm 的方形像素，且在每平方厘米 40 Mhits^{-2} s^{-1}的计数率以下几乎没有死时间，而 Timepix4 则可扩大视场，或在焦距更长时保持视场不变。ToA 可生成三维径迹，从而有望改善光电子方向的测定，进而提高调制因子。在 GridPix 中， [54, 55]，安装在介电柱上的金属网格（ InGrid ） 50 μ 高，可在传输间隙中不产生额外扩散的情况下实现倍增（GEM 的均方根扩散为 8，而此处为 55 μm；见表1），并消除了 GEM 上电荷附着造成的像素依赖、率依赖增益损失；这种损失在飞行中难以校准。目前仍有三个问题尚待解决 [6]。（i）探测器本体对 DME 的吸收（可能是胶黏剂所致）造成了 ~20 % 的效率损失；仔细选择材料或采用另一种低扩散、低Z 混合物（异丁烷、CO_2）或可解决这一问题。（ii）网格要求在 ASIC 上涂覆一层薄 Si_3N_4 涂层以防止火花放电，其对充电效应的影响仍需评估。（iii）必须证明方形且略大的像素不会引入伪调制；或者证明可以像针对 GPD 所做的那样，通过广泛的校准活动对其建模并予以扣除。

2.4 时间投影室（2–30千电子伏）

Black等人设计了一种将调制因子与量子效率解耦的探测器，即时间投影室（TPC）[56]。漂移场垂直于光轴，一维读出装置位于侧面，不处于吸收路径上，因此漂移长度以及扩散在探测单元深度方向上保持恒定，从而可以实现非常厚且效率高的偏振仪。漂移时间提供径迹的第二个坐标，但由于起始时间未知，相互作用点无法定位，因此该装置必须绕光束旋转，以抵消其系统效应。其缺点包括缺乏成像能力，因而无法观测 IXPE 已证明至关重要的扩展源（超新星遗迹 [9], 脉冲星风云 [8], 分子云 [16]）；较高的本底无法从同一次曝光中扣除，而且会因会聚光束在厚探测器中的吸收而变得模糊 [57]；此外还需要旋转，这使得研究周期性不规则的源更为复杂，并需要多个装置 [6]。该技术已达到足够的成熟度，但为 GEMS [58] 建造飞行装置比预期困难，任务最终因项目规划方面的原因被取消。TPC 仍可用于堆叠构型（第2.7节），其灵敏平面与光子光束平行。

2.5 加压氩成像仪（6–35 千电子伏）

要实现高于 6 千电子伏、最高达 30–35 千电子伏的灵敏度，需要使用加压氩和厚探测腔。已有研究测试了采用 2 巴压力、2 厘米厚氩-二甲醚混合物的气体像素探测器 [59], ，并为欧洲航天局 M3 征集项目中的新硬X射线任务（NHXM）提出了采用 3 厘米厚、3 巴压力的方案 [60, 61], 。该任务配备了四台焦距为 10 米的多层望远镜、一台类似 IXPE 的低能偏振仪（LEP，2–10 千电子伏）和一台中能偏振仪（MEP，5–35 千电子伏）。在光学系统面积相近的情况下（~500 相比之下，IXPE 为 ~600 厘米^2），计算得出，LEP 对于 0.5 毫蟹源、观测 10 天时的最小可探测偏振度为 5.1%，而 IXPE 为 5.5%；MEP 的灵敏度以毫蟹为单位则差 ~34%，因此一台 LEP 和两台 MEP 的配置较为均衡 [6]。此外，还测试了一台充有 1 巴氩-二甲醚（60:40）、厚度为 7.8 厘米的时间投影室，其测试能量最高达 16 千电子伏[62]。在高能段，仪器背景主要由地球反照造成，其随能量升高而衰减的速度比天体光谱慢，因此必须提升背景抑制能力：可利用径迹拓扑 [57], （如正比计数器所采用的方法），并可考虑使用主动反符合来排除最小电离粒子；这些方案均可通过 GridPix 实现。成像探测器还能在同一幅天空图像中测量背景，其范围受光学系统点扩散函数限制，比非成像设备的面积小几个数量级 [6]。

2.6 焦平面康普顿偏振仪（20–80 千电子伏及更高能量）

在 ~20 千电子伏以上，采用氩混合物的光电效应偏振测量开始与康普顿偏振测量展开竞争，二者可能在20–30千电子伏范围内重叠；氪混合物尚待研究，但其较高的荧光产额可能使其不具吸引力。迄今为止，焦平面康普顿偏振仪仅搭载气球飞行过，X-Calibur [63] 和XL-Calibur [39], ，并曾提议用于PolariS [64] 以及美国国家航空航天局小型探索者计划的PolSTAR [65]。它们包含两个阶段 [66]：低原子序数的散射体（锂、铍或塑料闪烁体 [67]；有机晶体的效果不如预期[68]）和吸收体。被动构型在卫星上可实现5–6千电子伏的阈值，在气球上则为15–20千电子伏 [6], ，但其本底较高，需要高效的主动屏蔽；XL-Calibur采用铍散射体，周围环绕四层CZT探测器和一块厚的锗酸铋

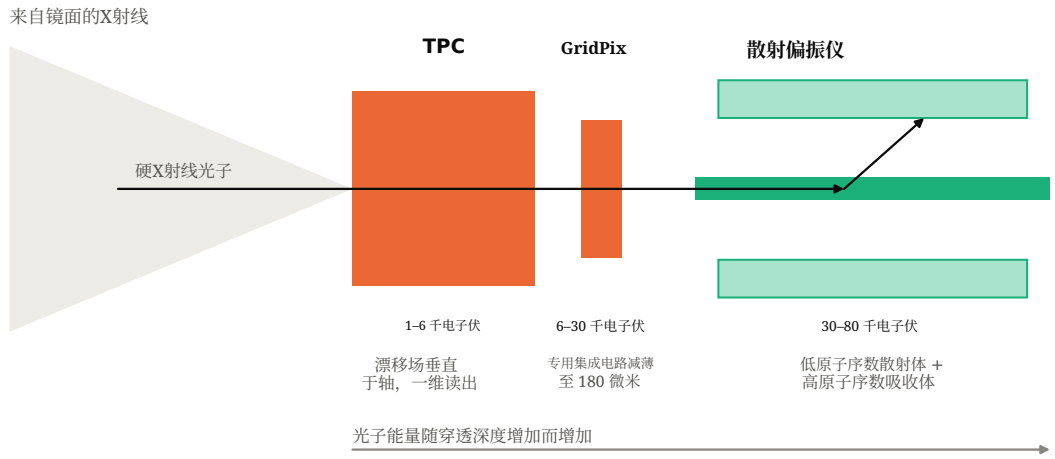


图2： 参考文献中提出的三级堆叠式焦平面偏振仪示意图 [6]：一种针对1–6 千电子伏进行调谐的时间投影室，其漂移场垂直于光轴并采用一维读出；其后连接一个针对6–30 千电子伏的薄型GridPix成像仪，以及一个散射偏振仪——一种用于30–80 千电子伏的低Z散射体，周围环绕高Z吸收体。图中比例不代表实际尺寸。

屏蔽体 [69]。主动构型仅凭符合事件即可实现低得多的本底，但阈值更高，即使在卫星上也达到 ~20 千电子伏 [68]。单个散射体无法成像；在 ~10米多层膜光学系统的焦点处配置分段式散射体（由16–36个 ~4–9毫米^{2}的元件组成），便可实现 ~1 角分的粗略成像，这正是为PolariS提出的构型。利用薄化硅漂移探测器或硅光电倍增管 [70] 读取散射体和吸收体的两侧，可能实现一种具有更低本底和更高调制的三维康普顿偏振仪。其灵敏度难以预测：一项针对NHXM [60], 的研究采用主动塑料散射体和圆柱形吸收体，假定存在触发效率且不考虑本底，得出对1.8毫蟹状星云源的最小可探测偏振度为6%；这一数值仍需通过模拟、测试和XL-Calibur数据加以验证。

在多层膜反射镜达到的 ~80 千电子伏以上，聚焦依靠劳厄透镜实现；劳厄透镜通过晶体中的透射衍射实现聚焦（PHEMTO采用弯曲的硅和锗晶体）。PHEMTO将这种透镜与多层膜反射镜结合，置于堆叠式硅/碲化镉康普顿望远镜前方；该望远镜通过测量双重康普顿事件来测量偏振 [71]（第3节）。

2.7 堆叠式构型

覆盖 0.1–80 千电子伏的任务可以采用多仪器有效载荷，为每个波段配备一台经过优化的望远镜（镜面和探测器）；也可以采用一台望远镜，在焦平面更换仪器。前一种方案能优化每台望远镜，但会分散有效面积；后一种方案能节省镜面，却无法高效覆盖整个波段，也无法同时覆盖 [6]。第三种方案则是利用高通光量、高分辨率的多层膜反射镜，沿光轴堆叠具有互补灵敏度的探测器，使未被一个探测器吸收的光子能够到达下一个探测器。有人提出过这一方案 [73, 74], , 而 LEP 后方配置康普顿偏振仪的方案早已是 NHXM 的组成部分 [60]。

一种自然的双元系统是在顶部配置一个时间投影室（2–15 千电子伏采用二甲醚，或10–30 千电子伏采用氩-二甲醚），通过薄铍窗连接到散射偏振仪，将波段扩展至80千电子伏；之所以说这种配置自然，是因为时间投影室的灵敏平面与光束平行；然而，如果没有成像，

它会失去第 1 [6]节中相当一部分的科学价值。成像堆叠系统需要灵敏平面垂直于光束，并且探测器足够薄，以限制被动材料中的吸收，即专用集成电路及其电路板中的吸收。Timepix3晶圆最初厚度为 800 μ，可以减薄至180 μ而不损失性能，这使其在20千电子伏下的透射率达到85% [6]。采用薄电路板，或在专用集成电路下方开孔，并视情况配备铍窗，即可实现堆叠成像系统：气体级必须位于焦点处，而鉴于硬X射线光学系统的会聚角很小，散射级可以容忍一定程度的离焦。图2所示的更具雄心的三级堆叠系统，则将一个时间投影室、一个GridPix和一个散射级置于同一台望远镜上。最近已有文献详细描述了一种设计：将低能（2–8 千电子伏）或中能（6–30 千电子伏）成像光电偏振仪与有源康普顿偏振仪（20–80 千电子伏）堆叠，同时配备覆盖0.3–80千电子伏的能谱成像相机 [75]。

3. 结论与展望

第1 节的科学目标与第2 节的技术正汇聚为一系列项目。这些项目合在一起，覆盖了从0.2千电子伏到数百千电子伏的范围（图1b）。我们将根据它们的状态进行总结，然后讨论它们所体现的权衡。

3.1 项目

已升空、获资助或入选。IXPE [3], 其运行时间已延长至 2028 [7], , 在未来数年内仍将是经典能段中唯一的聚焦式偏振仪。由中国主导、计划于 2030 [76, 77], 发射的eXTP将搭载偏振测量聚焦阵列，其气体像素探测器由XPOL-III专用集成电路读出；该阵列具有更大的通光量，但能量范围相近 [29]。在软波段，REDSoX计划于2027年末升空，GOSoX计划于2030年发射（第2节），因此将在同一时期实现首次向0.2–0.4千电子伏的扩展。在高能段，XL-Calibur已在15千电子伏以上进行了首次焦平面测量（第1节）。

拟议概念方案。 X射线偏振探测器（XPP）是美国国家航空航天局的一项探测器级概念方案，可在0.2至60千电子伏范围内进行偏振测量 [73]。宽能带X射线偏振望远镜（WXPT）是一项小型（约500千克）中国概念方案，由高能物理研究所于2017年提出，计划于2030年代发射。该方案采用焦距为10.16米的多层膜反射镜，将X射线依次聚焦到TPC偏振仪（3–10千电子伏）和康普顿偏振仪（10–60千电子伏）上，同时利用宽视场软伽马射线偏振仪将波段扩展至500千电子伏 [78]。这些镜面基于硅孔光学元件和深度渐变W/Si多层膜制成，在20–30千电子伏处的反射率可达约25% [79]。

已有两个概念提交至欧洲航天局的M8征集。增强型X射线偏振观测台（EXPO） [29], 计划于2041年前后发射，以三大支柱为核心：覆盖2–35 keV的偏振测量、约50秒内实现类似Swift的自主重新指向，以及同步光谱学。其偏振仪采用两种类型的GridPix探测器（配备InGrid的Timepix3，见第2.3节）：两台低能偏振仪配有充入1 bar压力Ne/DME（80/20）的1厘米气室，覆盖2–10 keV；三台中能偏振仪配有充入3 bar压力Ar/DME（60/40）的3厘米气室，并配备GAGG反符合探测器，覆盖6–35 keV。它们位于相同的嵌套式Wolter-I镜组之后，镜组焦距为7.5米，在1 keV时半能宽为10角秒，到10 keV时增至14角秒，且

在重叠波段内，其有效面积约为IXPE的三倍。第六台望远镜搭载一台光谱成像相机，由CMOS探测器与一块碲锌镉探测器堆叠而成，可实现最高至35 keV的同步光谱观测；此外，一台源自SVOM/ECLAIRs的宽视场编码孔径仪器（4–150 keV，约2 sr）负责触发自主重新指向。高能模块化望远镜偏振观测台（PHEMTO） [71]是一台硬X射线能谱成像偏振仪。在其M8方案中，一面镀有铂/碳和钨/硅多层膜（1–80 keV）的镜面与一枚劳厄透镜（50–400 keV）共用20米焦距，该焦距通过可伸展桁杆实现；两者将光线聚焦到一台堆叠式硅/碲化镉康普顿望远镜上，该望远镜通过高于 ~15 keV的双重康普顿事件进行偏振测量。其目标包括研究年轻超新星遗迹的同步辐射截止、磁星的硬尾，以及弥合IXPE与INTEGRAL之间的能谱空隙。在十项提案中，这两个概念均入围评估第二阶段，但都未进入欧洲航天局于2026年11月保留用于初步研究的四个候选方案之列；M8遴选预计将于2030 [72]。

这两种方案相辅相成：EXPO以光电技术为基础，继承IXPE的技术积累，将波段向硬X射线的低能端拓展并提高观测速度；PHEMTO则进入康普顿区间，并实现最高至400 keV的聚焦。在气体成像探测器后方叠加一个康普顿探测级，如第2.7节所述的设计那样，可将EXPO型载荷的波段拓宽至 ~80keV。

宽视场暂现源偏振仪。针对暂现源的非聚焦宽视场偏振仪也在考虑拓宽波段。伽马射线暴（GRB）的瞬时辐射峰值位于数百千电子伏至MeV范围，但其偏振预计会随能量变化，且不同竞争模型的预测各异：在耗散光球模型中，偏振随能量降低而增强；在同步辐射光子占主导的低能区，偏振则在MeV峰及以上消失 [80], ；而在同步辐射模型中，最大偏振度会随局部能谱变陡而增大[81], ，因此偏振也可能随能量升高而增强 [82]。要检验这一点，必须对同一次暴发的X射线和伽马射线波段进行偏振测量；康普顿偏振仪POLAR在数十千电子伏处灵敏度较低，无法做到这一点 [83]。POLAR-2 [83, 84], 计划于2028年左右在中国空间站发射，因此将康普顿偏振仪（HPD；塑料闪烁体由硅光电倍增管读出，40–1000 keV）与气体光电偏振仪（LPD；2–10 keV，视场约为 $90^\circ \times 90^\circ$）结合起来，采用与第2节相同的两种过程和职责分工。LPD的电荷耗散型气体微通道板能够应对暂现源高且快速变化的通量，并将首次开展软X射线偏振的宽视场巡天。由于没有光学系统，其灵敏度仅足以探测明亮的暴发：预计每年约有十个伽马射线暴的LPD最小可探测偏振度低于100%，每年有一至两个暴发可由两台偏振仪联合测量，灵敏度足以检验该模型 [83]。这一宽视场方案可与大型聚焦望远镜的快速重新指向能力互为补充，后者正是EXPO提出的方案。

其他波段。在伽马射线能量范围内，电子对产生占主导地位，偏振信息编码在正负电子对的方位角分布中。第2节介绍的时间投影室（TPC）技术由 HARPO 采用；HARPO 是一台用作伽马射线望远镜和偏振仪的时间投影室 [85], 。此外，GRAINE项目正在开发乳胶望远镜，以极高精度记录这些电子对，用于亚GeV/GeV伽马射线 [86]。

3.2 讨论

上述项目针对同一组问题给出了不同答案。在我们看来，它们所做的选择才是设计宽波段偏振测量任务时真正需要考虑的问题。

专用望远镜与堆叠式焦平面。 这两种方案并不互斥，EXPO两者兼用。它的六个镜面模块完全相同，针对不同波段进行调校的是探测器：适用于2–10 keV的气体混合物、压力和深度，并不适用于6–35 keV，因此两台望远镜专用于前一个波段，三台专用于后一个波段。这样，每个偏振仪都经过优化，代价是每个波段的镜面面积较小；而光谱成像相机则将CMOS与CZT探测器堆叠在同一焦点上，使未被前者吸收的光子能够到达后者，因此单个镜面即可覆盖0.5–35 keV。将偏振仪本身堆叠起来，可使镜面在每个波段都保持完整面积，但代价是前级的透射率降低，且对探测器设计的要求更高（减薄的专用集成电路、窗口、后级的离焦容差；见第 2.7节）。首版EXPO设计采用了这一方案，在每个气体探测器后方堆叠一个康普顿偏振仪 [75]。成像是区分两者的关键：时间投影室（TPC）效率高、调制效果好，但若不具备成像能力，就无法开展第 1节所述的大部分扩展源科学研究，并且需要旋转来平滑伪调制效应；而GridPix堆叠则保留了成像能力，也因此能够在光学系统的点扩散函数范围内进行本底扣除。

波段重叠与校准。 IXPE带来的经验是，系统效应，尤其是伪调制，可以通过在地面和在轨使用偏振源与非偏振源进行细致校准来加以控制 [7]。采用不同几何结构的新型探测器，例如具有方形像素的 GridPix，也必须证明其表现同样可靠。因此，相邻仪器的波段部分重叠颇有价值：例如 EXPO 低能与中能偏振仪之间的 6–10 千电子伏波段重叠，或光电探测级与康普顿探测级之间的 20–30 千电子伏波段重叠。其价值不仅在于提升灵敏度，还在于能够交叉检验不同探测器之间，以及后一种情况下不同技术之间的系统效应。

能谱学与重新指向。 偏振仪的光子数量有限，且能量分辨率适中，因此，要拟合各个能谱成分的偏振特性，就需要在相同时间区间内，同时获取同一源分辨率更高的能谱；E
XPO 配备的光谱成像相机以及 PHEMTO 配备的硅和碲化镉探测器，均将此需求纳入设计。时间域是专用任务可以超越 IXPE 的第二个维度；IXPE 的观测计划受到其重新指向速度缓慢的限制。

小型和中型任务。 软波段可由 GOSoX 等小型任务进行探测，因为布拉格技术受益于较高的调制，却不需要大面积。相比之下，经典波段和硬波段需要 M级反射镜所提供的有效面积，以及与之相配的焦距。这两种方法互为补充：EXPO 型任务若与 GOSoX 同时观测，或许再加上一个基于康普顿效应的任务，便可覆盖超过两个数量级的能量范围；第2节中列出的未决问题，例如 DME吸附、GridPix 的 Si_3N_4保护层、低阈值主动式康普顿偏振仪以及本底抑制，正是未来几年实验室工作应着力解决的问题。

总而言之，低于 2 千电子伏和高于 8 千电子伏的偏振测量，旨在探究 IXPE 提出但无法回答的问题：中子星的热辐射与量子电动力学物理、活动星系核中反射的几何结构、磁星热成分与非热成分之间的转变，以及超新星遗迹和脉冲星风云的非热辐射。将波段两端各拓宽十倍以上的技术已经具备，或即将得到验证，多个项目也正在应用这些技术。未来几年，随着软能段偏振仪首次升空、IXPE 持续取得成功，以及中型任务迎来新的机遇，我们将看到 X射线偏振测量的波段究竟能够拓宽到什么程度。

参考文献

[1] *R. Novick*、*M. C. Weisskopf*、*R. Berthelsdorf*、*R. Linke* 和 *R. S. Wolff*，《蟹状星云*X*射线偏振的探测》，《天体物理学杂志》*174*，*L1*（*1972*）。[2] *M. C. Weisskopf*、*E. H. Silver*、*H. L. Kestenbaum*、*K. S. Long* 和 *R. Novick*，《在未受脉冲星污染的情况下对蟹状星云*X*射线偏振进行精密测量》，《天体物理学杂志》*220*，*L117*（*1978*）。[3] *M. C. Weisskopf* 等，《成像*X*射线偏振探测器（*IXPE*）：发射前》，*J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 8*，*026002*（*2022*）。[4] *P. Soffitta* 等，《成像*X*射线偏振探测器的仪器》，*Astron. J. 162*，*208*（*2021*）。[5] *L. Baldini* 等，《用于 *IXPE* 任务的气体像素探测器的设计、构造与测试》，《天体粒子物理学》*133*，*102628*（*2021*）。[6] *P. Soffitta*、*E. Costa*、*N. De Angelis* 等，《关于宽能段偏振测量*X*射线任务可能方向的思考》，*Galaxies 12*，*47*（*2024*）。[7] *P. Soffitta* 等，《借助 *IXPE* 开启*X*射线偏振测量的未来：经验教训与后续步骤》，*arXiv:2601.00764*（*2026*）。[8] *N. Bucciantini* 等，《对蟹状脉冲星及蟹状星云开展同时空分辨和相位分辨的*X*射线偏振测量》，*Nat. Astron. 7*，*602*（*2023*）。[9] *J. Vink* 等，《利用 *IXPE* 探测仙后座*A*的*X*射线偏振》，《天体物理学杂志》*938*，*40*（*2022*）。[10] *R. Taverna* 等，《来自磁星的偏振*X*射线》，*Science 378*，*646*（*2022*）。[11] *V. Doroshenko* 等，《利用 *IXPE* 偏振测量确定*X*射线脉冲星几何》，*Nat. Astron. 6*，*1433*（*2022*）。[12] *I. Liodakis* 等，《耀变体*X*射线偏振表明激波中存在粒子加速》，《自然》*611*，*677*（*2022*）。

[13] L. Di Gesu 等，《成像X射线偏振探测器对平均流量状态下 Mrk 421 的X射线偏振观测》，《天体物理学杂志通讯》938，L7（2022）。[14] V. E. Gianolli 等，《利用 IXPE 揭示塞弗特星系 NGC 4151 中热X射线日冕的几何结构》，Mon. Not. R. Astron. Soc. 523，4468（2023）。[15] F. Ursini 等，《利用成像X射线偏振探测器绘制圆规座星系的核周区域》，Mon. Not. R. Astron. Soc. 519，50（2023）。[16] F. Marin 等，《X射线偏振证据表明人马座A*曾在约200年前发生耀发》，《自然》619，41（2023）。* G. G. Pavlov 和 V. E. Zavlin，《孤立中子星热X射线的偏振》，《天体物理学杂志》529，1011（2000）。[17] S. Zane 等，《磁星 1RXS J170849. 发出的强烈X射线偏振信号》，《天体物理学杂志通讯》944，L27（2023）。[18] R. Turolla 等，《IXPE 和 XMM-牛顿对软伽马射线重复暴 SGR 的观测》，《天体物理学杂志》954，88（2023）。0–400910J. Heyl 等，《探测到来自磁星 1E 的偏振X射线辐射》，Mon. Not. R. Astron. Soc. 527，12219（2024）。[19] M. Rigoselli 等，《IXPE 探测到来自磁星 1E 的高度偏振X射线》，《天体物理学杂志通讯》985，L34（2025）。1806–20R. Stewart 等，《磁星 1E 的X射线偏振》，《天体物理学杂志通讯》985，L35（2025）。[20] R. E. Stewart 等，《射电脉冲星磁星中的真空双折射与偏振X射线辐射》，《自然》（2026），doi:10.1038/s41586-026-10859-z，arXiv:2509.19446。2259+586R. Taverna 等，《磁星真空双折射的漫长探索：1E 1547. 及其难以捉摸的确凿证据》，《天体物理学杂志》1002，102（2026）。[21] R. Taverna 等，《IXPE 对新磁星源 EP J223759. 的观测》，arXiv:2609.25958（2026）。1841–045S. W. Davis、O. M. Blaes、S. Hirose 和 J. H. Krolik，《磁场与非均匀性对吸积盘光谱及偏振的影响》，《天体物理学杂志》703，569（2009）。[22] L. Di Gesu 等，《发现耀变体 Mrk 421 喷流中的X射线偏振角旋转》，Nat. Astron. 7，1245（2023）。1841–045H. Zhang 和 M. Böttcher，《耀变体轻子与强子喷流模型中的X射线和伽马射线偏振》，《天体物理学杂志》774，18（2013）。[23] P. Soffitta 等，《EXPO：面向天体物理学的快速宽能带X射线偏振测量实现跨越式发展》，Proc. SPIE（2026），arXiv:2608.20898。

[30] H. Krawczynski等人，《硬X射线偏振测量的科学前景》，《天体粒子物理学》34，550（2011）。[31] F. Marin等人，《射电宁静活动星系核黄金标准NGC 1068的X射线偏振测量》，arXiv:2403.02061（2024）。[32] R. W. Goosmann和G. Matt，《利用X射线偏振测量发现NGC 1068中的错位外流》，《皇家天文学会月刊》415，3119（2011）。[33] B. W. Grefenstette等人，《定位仙后座A中能量最高的电子》，《天体物理学杂志》802，15（2015）。[34] D. Götz、S. Mereghetti、A. Tiengo和P. Esposito，《磁星作为持久硬X射线源：INTEGRAL发现SGR 1900+14中的硬尾》，《天文学与天体物理学》449，L31（2006）。[35] K. Makishima、T. Enoto、H. Yoneda和H. Odaka，《NuSTAR确认磁星1E 1547.0−5408的36 ks硬X射线脉冲相位调制》，《皇家天文学会月刊》502，2266（2021）。[36] P. Mészáros、R. Novick、A. Szentgyorgyi、G. A. Chanan和M. C. Weisskopf，《X射线偏振测量的天体物理学意义与观测前景》，《天体物理学杂志》324，1056（1988）。[37] I. Caiazzo和J. Heyl，《吸积X射线脉冲星的偏振——I. 新模型》，《皇家天文学会月刊》501，109（2021）。[38] I. Caiazzo和J. Heyl，《吸积X射线脉冲星的偏振——II. 武仙座X-1》，《皇家天文学会月刊》501，129（2021）。[39] Q. Abarr等人，《XL-Calibur——第二代气球载硬X射线偏振测量任务》，《天体粒子物理学》126，102529（2021）。[40] H. Awaki等人，《XL-Calibur对蟹状星云偏振硬X射线辐射的测量》，《皇家天文学会月刊通讯》（2025），doi:10.1093/mnrasl/slaf026，arXiv:2503.14307。[41] H. Awaki等人，《XL-Calibur对天鹅座X-1的偏振测量进一步约束其硬态X射线辐射的起源》，arXiv:2507.23126（2025）。[42] P. Laurent、J. Rodriguez、J. Wilms、M. Cadolle Bel、K. Pottschmidt和V. Grinberg，《来自银河系黑洞天鹅座X-1的偏振伽马射线辐射》，《科学》332，438（2011）。[43] H. Krawczynski等人，《偏振X射线约束黑洞X射线双星天鹅座X-1中的吸积盘—喷流几何结构》，《科学》378，650（2022）。[44] M. C. Weisskopf、R. F. Elsner和S. L. O'Dell，《理解X射线偏振探测与测量的品质因数》，SPIE会议录7732（2010），arXiv:1006.3711。[45] H. L. Marshall等人，《软X射线偏振仪火箭实验演示（REDSoX偏振仪）》，SPIE会议录10397，103970K（2017）。

[46] S. N. T. Heine等人，《软X射线偏振仪火箭实验演示（REDSoX）首次飞行的设计与测试进展》，arXiv:2607.27639（2026）。[47] H. L. Marshall等人，《美国国家航空航天局先驱者：全球轨道软X射线偏振仪（GOSoX）》，arXiv:2608.02891（2026）。[48] L. Pacciani等人，《天文学用光电效应X射线偏振仪的灵敏度：气体混合物和压力的影响》，SPIE会议录4843，394（2003）。[49] E. Costa等人，《用于研究黑洞和中子星的高效光电效应X射线偏振仪》，《自然》411，662（2001）。[50] R. Bellazzini等人，《用于X射线天文学的密封式气体像素探测器》，《核仪器与方法物理研究A辑》579，853（2007）。[51] M. Minuti等人，《XPOL-III：用于高通量X射线偏振测量的新一代超大规模集成电路CMOS专用集成电路》，《核仪器与方法物理研究A辑》1046，167674（2023）。[52] T. Poikela等人，《Timepix3：具有65K通道、同步到达时间/超阈时间和稀疏读出的混合像素读出芯片》，《仪器学杂志》9，C05013（2014）。[53] X. Llopart等人，《Timepix4：一种大面积像素探测器读出芯片，可在四侧进行拼接并提供低于200 ps的时间戳分箱》，《仪器学杂志》17，C01044（2022）。[54] H. van der Graaf，《GridPix：用于气体探测器的集成读出系统，以像素芯片作为阳极》，《核仪器与方法物理研究A辑》580，1023（2007）。[55] C. Ligtenberg等人，《基于Timepix3芯片的GridPix探测器性能》，《核仪器与方法物理研究A辑》908，18（2018）。[56] J. K. Black等人，《利用微结构气体探测器TPC进行X射线偏振测量》，《核仪器与方法物理研究A辑》581，755（2007）。[57] A. Di Marco等人，《处理IXPE偏振测量数据中的本底》，《天文学杂志》165，143（2023）。[58] J. E. Hill等人，《GEMS X射线偏振仪的设计与鉴定》，SPIE会议录8443（2012）。[59] S. Fabiani等人，《氩-DME成像光电偏振仪的性能》，SPIE会议录8443（2012）。[60] P. Soffitta等人，《新型硬X射线成像与偏振测量任务的一组X射线偏振仪》，SPIE会议录7732，77321A（2010）。[61] G. Tagliaferri等人，《NHXM天文台》，《实验天文学》34，463（2012）。[62] T. Takeda等人，《用于高能X射线的TPC偏振仪的研制与性能验证》，SPIE会议录11444，114445Y（2020）。

[63] Q. Abarr等，使用由NICER、Swift XRT和BAT以及Fermi GBM支持的X-Calibur硬X射线偏振仪观测GX 301-2远拱点耀斑，《天体物理学杂志》891，70（2020）。[64] K. Hayashida等，PolariS硬X射线成像偏振仪，《SPIE论文集》9905，99051A（2016）。[65] H. S. Krawczynski等，使用偏振光谱望远镜阵列（PolSTAR）进行X射线偏振测量，《天体粒子物理学》75，8（2016）。[66] E. Del Monte、S. Fabiani和M. Pearce，康普顿偏振测量，载于《X射线与伽马射线天体物理学手册》，C. Bambi和A. Santangelo编（施普林格，2023），第127页。[67] E. Costa，硬X射线范围内的散射偏振测量，《仪器》8，20（2024）。[68] S. Fabiani等，有源焦平面康普顿偏振仪散射体的表征，《天体粒子物理学》44，91（2013）。[69] N. K. Iyer等，XL-Calibur反符合屏蔽罩的设计与性能，《核仪器与方法物理研究A辑》1048，167975（2023）。[70] F. Muleri等，在康普顿X射线偏振仪中探索第三维度，《SPIE论文集》13093（2024）。[71] P. Laurent等，PHEMTO：高能模块化望远镜偏振观测台，《实验天文学》51，1143（2021）。[72] ESA，研究等离子体宇宙的七航天器天文台，ESA科学新闻，2026年11月19日。[73] K. Jahoda等，X射线偏振探测器任务概念，arXiv:1907.10190（2019）。[74] P. Soffitta等，炽热而狂暴宇宙的偏振视图，《实验天文学》51，1109（2021）。[75] F. Muleri等，未来十年的焦平面X射线偏振测量仪器，《粒子》（2026），arXiv:2606.20337。[76] S. N. Zhang等，eXTP——增强型X射线时变与偏振测量任务，《中国科学：物理学力学天文学》62，29502（2019）。[77] P. Zhou等，使用eXTP开展天文台科学，arXiv:2506.08367（2025）。[78] Q.-Q. Yin、Z.-W. Li和C.-Z. Liu，宽波段X射线偏振望远镜（WXPT），第44届国际空间研究委员会科学大会，第44卷，第1874页（2022），摘要E1.12-0031-22，ADS 2022cosp...44.1874Y。[79] Z. Cai等，WXPT任务硅孔光学元件上深度渐变W/Si多层膜的沉积与性能，《实验天文学》62，2（2026），doi:10.1007/s10686-026-10065-9。

[80] C. Lundman、I. Vurm和A. M. Beloborodov，耗散光球模型中伽马射线暴的偏振，《天体物理学杂志》**856**，145（2018）。[81] R. Gill、J. Granot和P. Kumar，伽马射线暴瞬时辐射中的线偏振，《皇家天文学会月刊》**491**，3343（2020）。[82] M.-X. Lan、H.-B. Wang、S. Xu、S. Liu和X.-F. Wu，内激波模型下伽马射线暴瞬时阶段的偏振预测，《天体物理学杂志》**909**，184（2021）。[83] M. Kole、N. De Angelis、J. He、H. Liu、J. Sun、F. Xie和J. Zaid，*POLAR-2*任务的设计与科学展望，《创新空间研究技术》**1**，2（2026），arXiv:2510.02016。[84] N. De Angelis，下一代空间康普顿偏振仪的研制及伽马射线暴瞬时辐射的能量分辨偏振分析，博士论文，日内瓦大学（2023），doi:10.13097/archive-ouverte/unige:173869。[85]P. Gros等，*HARPO*性能测量：作为伽马射线望远镜和偏振仪的时间投影室，《天体粒子物理学》（2018），doi:10.1016/j.astropartphys.2017.10.008，arXiv:1706.06483。[86] Y. Nakamura等，乳胶望远镜中亚*GeV/GeV*伽马射线产生的正负电子对的新型高精度测量系统，arXiv:2406.18335（2024）。