

基于宽波段 X 射线偏振及成像望远镜的大视场软伽玛偏振探测器模拟

常治¹ 李正伟¹ 刘聪展¹

¹(中国科学院高能物理研究所, 北京, 100049)

摘要 X 射线及软伽玛射线偏振探测能够帮助我们了解致密天体辐射区几何、磁场结构等方面的信息, 是进行高能天体物理研究的一种探针。宽波段 X 射线能与偏振望远镜 (WXPT) 预期将实现 3~500keV 能量范围的偏振测量, 将填补硬 X 射线偏振探测的空白, 并提升软伽玛射线偏振探测的灵敏度。大视场软伽玛偏振探测器是 WXPT 上的一个重要载荷, 其能量覆盖范围为 50~500keV, 由塑料闪烁体和 CsI 组成, 主要目标是开展伽玛暴的自主定位以及偏振探测。本文使用 Geant4 建立了大视场软伽玛偏振探测仪的物理模拟模型, 模拟结果显示其探测效率在灵敏能段内大于 15%, 对于典型 GRB 暴的最小可测偏振度为 8%。

关键词 伽玛暴, 软伽玛射线偏振, Geant4, 模拟。

中图分类号 P141

Simulation of the Wide Field soft gamma-ray Polarimeter in Wide band X-ray Polarization and imaging Telescope

Zhi Chang¹ Zhengwei Li¹ Congzhan Liu¹

¹ (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

Abstract Polarization measurements of X-rays and soft gamma-rays can reveal the geometry of the emission region, magnetic field structures, radiation mechanisms, and the environment along the propagation path, serving as a probe for astrophysical research. The Wide Band X-ray Polarization and imaging Telescope (WXPT) can perform polarization measurements over 3~500 keV, filling the gap in hard X-ray polarization measurement and improve the sensitivity of soft gamma-ray polarization observations. The wide-field soft gamma-ray polarimeter is an important payload on this telescope, covering 50~500 keV, and is composed of a plastic scintillator and CsI. Using Geant4, we carried out physics simulations of the wide-field soft gamma-ray polarimeter. The results show a detection efficiency greater than 15% and a minimum detectable polarization (MDP) of 8%.

Key words Gamma-Ray Burst, Soft gamma-ray polarization, Geant4, Simulation.

* 基金项目: 正式的名称类型 (编号)

投稿日期:

E-mail: changzhi@ihep.ac.cn

0 序言

天体物理理论研究表明,天体中的多数辐射过程都可以产生线偏振的 X/伽玛射线,并且其偏振度通常与天体辐射区域的磁场几何结构密切相关。因此,偏振度随着光子能量的演化曲线可以用来揭示天体的辐射机制,并对相关辐射模型加以限制。当前主流的伽玛暴模型主要有三种:电磁驱动和磁流体力学模型、火球模型和炮弹模型[1]。不同模型对伽玛光子线性偏振度给出了不同的理论预言,如图 1 所示。具有规则磁场的同步辐射模型(synchrotron model with ordered magnetic field, SO Model)能产生偏振度在 20%~70%的偏振光;具有随机磁场的同步辐射模型(synchrotron model with random magnetic field, SR Model)和康普顿拖拽模型(Compton drag model, CD Model)能产生偏振度典型值为 20%的偏振光,其中前者最大偏振只能达到 70%,后者则可高达 100%[2][3][4]。偏振测量不仅可以帮助区分伽玛暴的模型,还能够对模型参数做出更加具体和严格的限制。

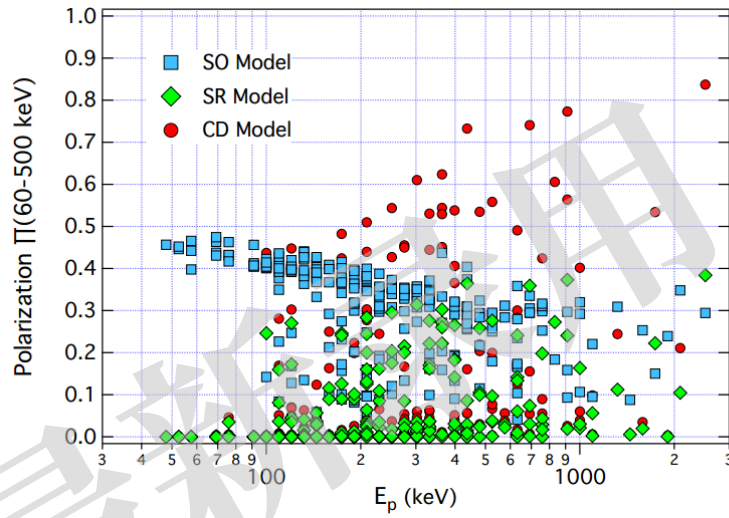


图 1 不同伽玛暴模型预言的偏振度[3]。

Figure 1 The Predicated Polarization Degrees for different Gamma-ray Busrt Models

在硬 X 射线能段,比如自转驱动的脉冲星高能非热辐射起源、在吸积反馈物理机制以及活动星系核形态结构等方面,高灵敏度的硬 X 射线偏振测量可以为解决一系列问题带来突破[5]。近年来,随着高位置分辨和高能量分辨的探测器技术突破和发展,高灵敏度的偏振探测与高角分辨率 X 射线成像观测已经成为下一代天文望远镜的重要发展目标。

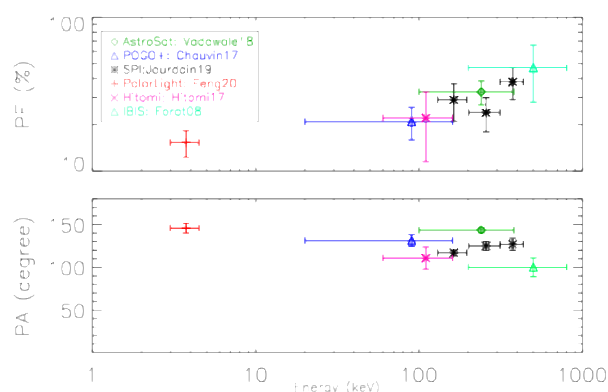


图 2 不同空间高能望远镜对 Crab 的偏振测量结果[1]

Figure 2 Polarization detection for Crab (or total Crab) with time of measurement by various instruments.

图 2 给出了一些典型的空问高能望远镜对 Crab 的偏振观测结果[6]。由此上可以发现目前的高灵敏度偏振观测主要集中在软 X 射线和软伽玛射线，而 8~30 keV 能区的 X 射线和 MeV 能区的伽玛射线的偏振观测目前仍然处于空白。现有卫星的偏振观测谱段覆盖有限，很难实现多波段的高灵敏度、高角分辨的偏振观测。因此我们提出了宽波段 X 射线偏振与成像望远镜 (Wide band X-ray Polarization and imaging Telescope, WXPT) 项目，该望远镜将同时具备 X 射线和伽玛射线的能谱与偏振观测能力。

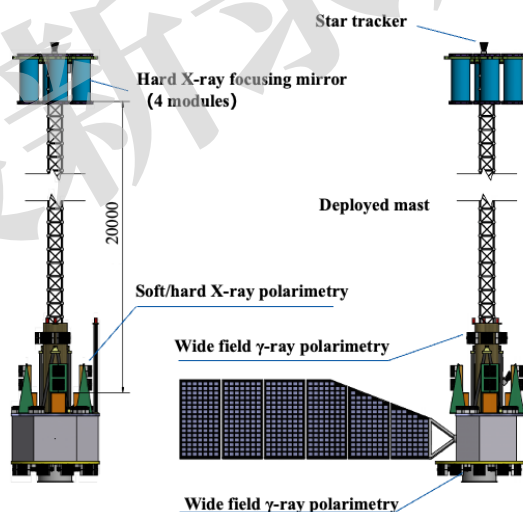


图 3 WXPT 卫星结构和载荷的概念设计

Figure 3 Schema of WXPT satellite and payload

WXPT 卫星结构及载荷的概念设计见图 3，包含了两个望远镜，分别是软/硬 X 射线偏振仪和大视场软伽玛偏振仪，分别实现 3~60keV 和 50~500keV 能区的 X 射线及软伽玛射线偏振高灵敏度探测。大视场软伽玛射线偏振仪的主要科学目标是开展伽玛暴的监测以及偏振测量，具备伽玛暴的自主定位能力，从而可以更好的实现能谱与偏振的同时观测。本文主要介绍了 WXPT 的大视场软伽玛偏振仪的模拟仿真建模，基于模拟结果计算了对典型伽玛暴的观测能力。

1 软伽玛偏振探测原理

能量为 50~500 keV 范围内的软伽玛射线与塑料闪烁体之间的相互作用主要是 Compton 散射。如图 4(左图)所示,入射的伽玛光子打在探测器闪烁体 A 上,发生 Compton 散射,部分能量形成反冲电子在闪烁体上沉积,散射光子携带剩余能量与探测器闪烁体 B 发生下一次的相互作用。通过两次相互作用的 A、B 探测器可以计算得到散射光子的出射方位角,如图 4(右图)所示。根据 Klein-Nishina 公式,可以得出散射光子的方位角分布与光子电场矢量相关,偏振光子散射后的方位角分布不是各向同性,非偏振光子的散射方位角是各向同性。因此通过对散射后光子方位角分布的测量,可以获得光子的电场矢量数据,从而重建出入射伽玛光子的偏振信息[5][7]。

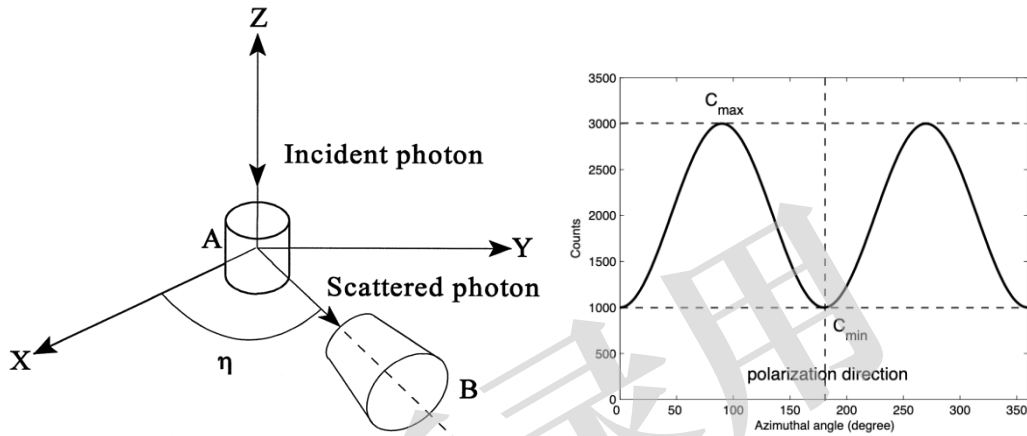


图 4 Compton 散射作用测量偏振的原理(左)及典型方位角分布示意图(右)

Figure 4 Principle of polarization detection based on Compton scattering (left) and the typical azimuthal angle distribution diagram (right, the vertical dash line representing the polarization angle of the input photons)

2 大视场软 γ 偏振仪仿真

2.1 探测器介绍

大视场软伽玛偏振仪采用模块化设计,单个模块的布局采用塑料闪烁体和高 Z 闪烁晶体(CsI)混合编排组成探测器阵列的方式,不同探测器模块安装的朝向不一样。通过不同朝向探测器模块的计数率差异实现伽玛暴的自主定位。我们首先建立了塑料闪烁体棒阵列的 Geant4 模型,比较了 6×6 、 8×8 、 10×10 、 12×12 等多种阵列对应的调制因子,发现单个探测器阵列大于 10×10 以后所测到的调制度增加缓慢,因此单个探测模块的规模不宜过大。考虑到 ASIC 读出通道数的限制,我们将每个探测模块的规模设定为 9×10 ,即每个模块包含 8×8 的塑料闪烁体棒+26 根 CsI 棒,每 2 个模块按照 1×2 的方式排列成一个探测单元,采用 3 块 32 通道的 ASIC 即可实现读出。如图 5 所示,其中蓝色塑料闪烁体棒,外层安装高 Z 材料(CsI)闪烁体做成的闪烁体棒。每根闪烁体棒的长度为 20cm,横截面为 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。单个模块的几何面积为 57.6cm^2 ,共计安装 66 组,即总的探测面积达到了 3800cm^2 。如此构成的探测器阵列与 POLAR[7]、GRAPE[8]等项目方案相比,该探测器阵列的排布方式综合了现有几个设计方案的优点,既保留了大视场高灵敏度的特点,也同时因为在每个探测模块的两个边缘部分使用了高 Z 材料闪烁体棒,从而同时具备了测量能谱的能力。同时为了

可以实现不同方向入射的偏振测量，每根闪烁体棒均采用双端读出的方式，因此在沿着棒的方向具有了一定的位置分辨能力。不同于 POLAR 无法实现 GRB 的自主定位，WXPT 的大视场软伽玛偏振仪通过实现康普顿作用的三维位置重建以及不同朝向探测器模块的计数率差异，从而实现了伽玛暴的自主定位[9][10]。实现了伽玛暴的自主定位之后，在开展能谱与偏振的联合拟合时，具有更好的灵敏度。WXPT 软伽玛偏振仪与 POLAR 的升级版即 POLAR-2 的具体参数对比见表 1。

	WXPT 大视场软伽玛偏振仪	POLAR-2
能量范围	50-500keV	HPD: 20~800keV LPD: 2~10keV BSD: 10~2000keV
有效面积	$\geq 3000 \text{ cm}^2$	HPD: $\sim 1000 \text{ cm}^2$ LPD: $\sim 290 \text{ cm}^2$ BSD: $\sim 400 \text{ cm}^2$
视场	$> 1.5 \text{ pi}$	HPD: $180^\circ \times 180^\circ$ LPD: $90^\circ \times 90^\circ$ BSD: $120^\circ \times 120^\circ$
MDP	$< 10\% (10^{-6} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2})$	HPD: $10\% (6 \times 10^{-6} \text{ erg} / \text{cm}^2)$
定位能力	$\leq 1^\circ$	$\sim 1^\circ$

表 1 参数对比

Table 1 Performance Parameters

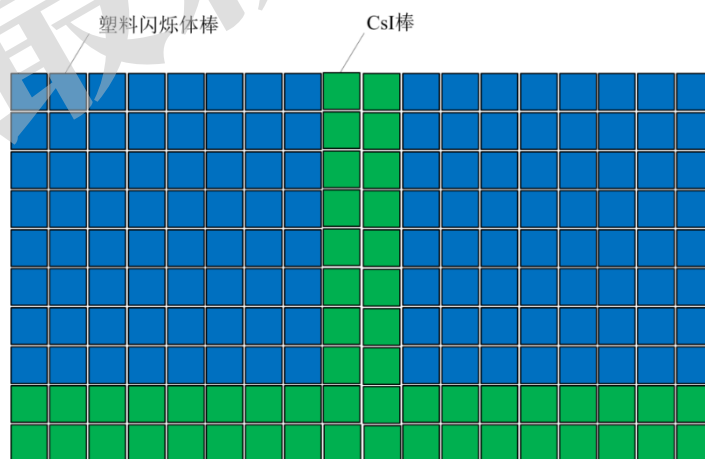


图 5 WXPT 大视场软伽玛偏振仪棒的排列方式示意图

Figure 5 The arrangement of the bars in wide-field soft gamma-ray polarimeter

2.2 模拟

我们基于 Geant4[11]（版本 11.3.2）建立了单个探测器模块的几何质量模型，如图 6 所示，对偏振特性以及探测效率进行了仿真计算。其中塑料闪烁体和 CsI 闪烁体棒外层均包裹了 0.065mm 的 ESR 反射膜，用来提升光子的收集效率。模拟过程除了使用标准的物理过程

(G4EmStandardPhysics) 外，还加入了与偏振有关的物理过程 (G4EmLivermorePolarizedPhysics)。

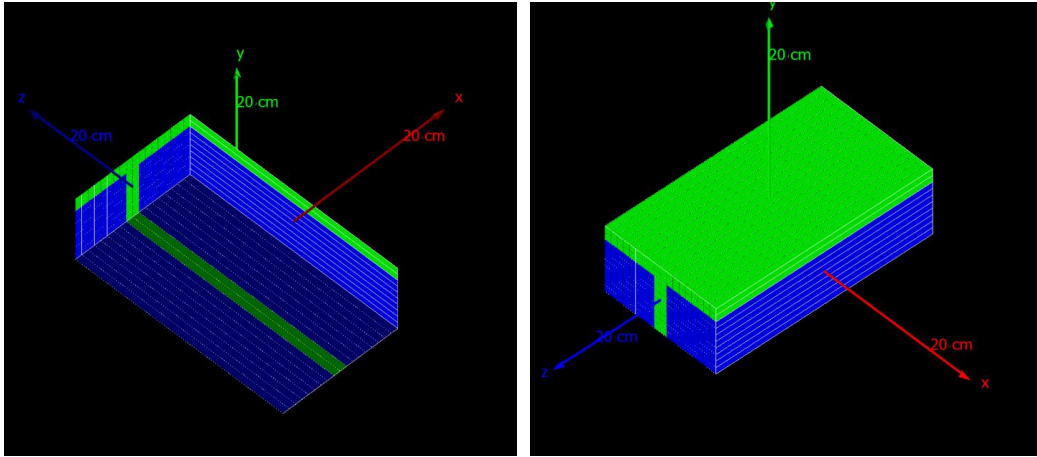


图 6 Geant4 中建立的单个探测器模块质量模型示意图

Figure 6 The Geometry of single detector module constructing in Geant4

本文将闪烁体棒的长度方向定义为 Z 轴方向，沿着 Z 轴正向入射定义为正入射。将在两根闪烁体棒里都沉积了能量，即入射在塑料闪烁体棒上沉积能量，然后在第二根塑料闪烁体棒或 CsI 闪烁体棒中沉积能量，定义为被探测到的有效事例。

本文首先对比了两种情况，一种是伽玛事例只在两根塑料闪烁体棒沉积能量，另一种则是包括了在一根塑料闪烁体棒与一根 CsI 闪烁体棒中均沉积了能量的情况。本文模拟了入射伽玛光子能量在 10keV, 50keV 以及 500keV 情况下的探测效率。探测效率模拟的结果如表 2 所示，在塑料闪烁体棒中加入了 CsI 闪烁体棒之后康普顿事例的探测效率明显提升，从而提升能谱以及流强的测量精度。

入射能量 (keV)	PS	PS+CsI
10	1.4%	1.6%
50	22.6%	39.2%
100	21.3%	40.8%
500	17.8%	42.0%

表 2 不同实例筛选标准对应的探测效率

Table 1 The efficiency results in simulation

本文基于 Geant4 模型分别仿真了 100%线偏振光与非偏振光产生的调制曲线，对比了只考虑闪烁体棒的康普顿事例与考虑 CsI 闪烁体棒的康普顿事例，仿真结果如图 7 与图 8 所示。图 7 与图 8 中的左图是 100%线偏振光的未修正调制曲线，中图是非偏振光的调制曲线，可以看到因探测器的几何布局以及闪烁体棒的几何尺寸，导致了一个非偏振的调制情况。

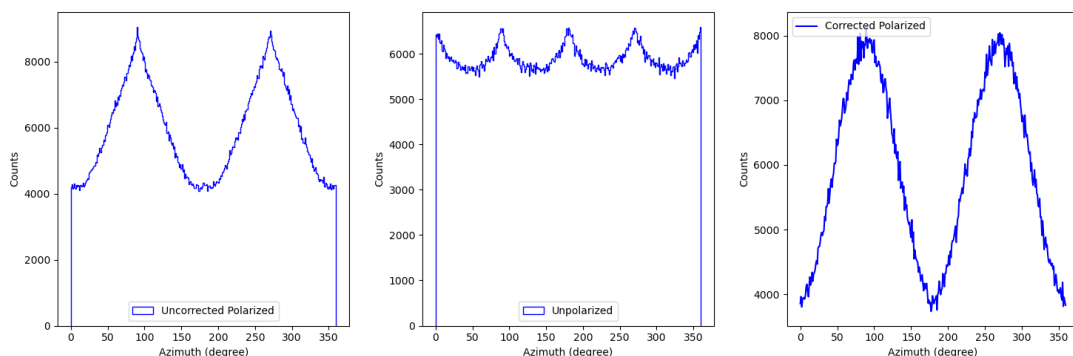


图 7 只考虑塑料闪烁体棒的调制曲线。左图入射光为 100%线偏振时直接得到调制曲线，中图为非偏振光的调制曲线，右图入射光为 100%线偏振时修正后的调制曲线。

Figure 7 Modulation curve considering only the plastic scintillator bars

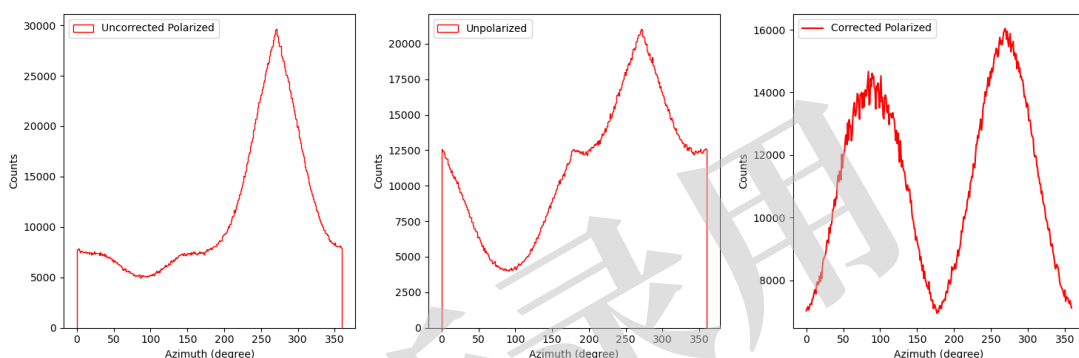


图 8 考虑 CsI 闪烁体棒的调制曲线。同图 7。

Figure 8 Modulation curve considering both the plastic scintillator bars and CsI

我们需要利用非偏振光对探测器几何尺寸引入的调制进行修正，利用如下公式[5]：

$$n_i' = n_i \frac{\bar{m}}{m_i}$$

其中 n_i 为偏振光方位角分布计数、 $\bar{m}$ 为非偏振光方位角分布计数平均值， m_i 为非偏振光方位角分布计数， n_i' 为修正后的偏振光方位角分布计数。修正后的偏振光调制曲线如图 7 与图 8 中的右图所示。可以看到即便是修正后的 CsI 闪烁体棒事例调制曲线，调制曲线仍然不对称，主要是因为单个探测器模组的 CsI 分布不对称所导致。因此，在考虑偏振测量的灵敏度情况下，本文重点研究了塑料闪烁体棒事例对应的调制曲线。增加 CsI 闪烁体棒目前主要还是用于能谱以及 GRB 的定位算法，不在本文的讨论范围内。

修正后的偏振光散射光子按照方位角 ϕ 的统计分布即调制曲线，如图 9 所示，满足余弦分布的公式

$$C = A \cos\left(2\left(\phi - \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right)\right) + B$$

拟合得到参数 A、B 以及 ϕ_0 ，其中 ϕ_0 即为偏振角，由拟合参数得到调制因子 $\mu = A/B$ 。调制因子正比于入射光子的偏振度，用 100%线偏振光实测偏振测量仪的调制因子 μ_{100} ，即可得到任意入射 X 射线的偏振度为 $P = \mu/\mu_{100}$ 。

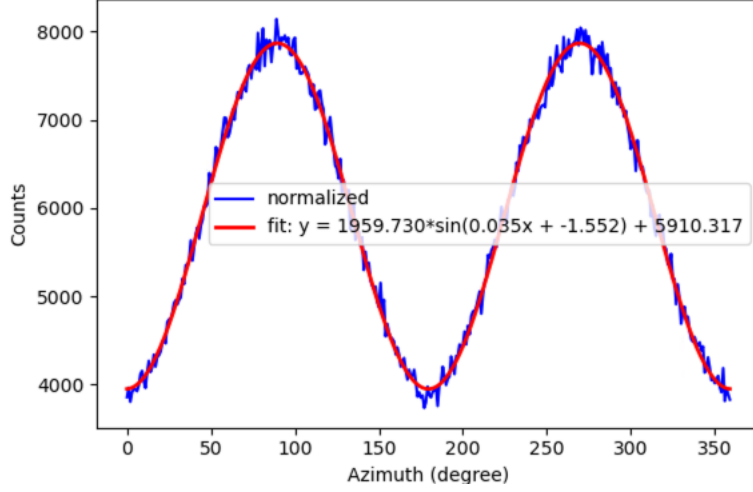


图 9 模拟 100%线偏振光调制曲线

Figure 9 The modulation curve with 100% linearly polarized lights

我们模拟得到了从 10keV 到 500keV 的塑料闪烁体棒康普顿探测效率曲线以及调制因子曲线。从探测效率曲线可以发现在能量低于 20keV 的时候探测效率不到 10%。本文的模拟只考虑了有能量沉积，未考虑塑料闪烁体棒能量下阈值的影响，因此探测效率偏理想。在高能段的仿真结果更可靠，因此我们将可探测下阈值确定为 50keV。在 50keV 到 500keV 范围内塑料闪烁体棒康普顿散射事例的效率均在 15%以上。模拟得到的调制因子则是从 50keV 到 500keV 的范围内是先增加，当超过 100keV 后，调制因子则开始减小，模拟得到的调制因子在 0.245 到 0.33 之间。

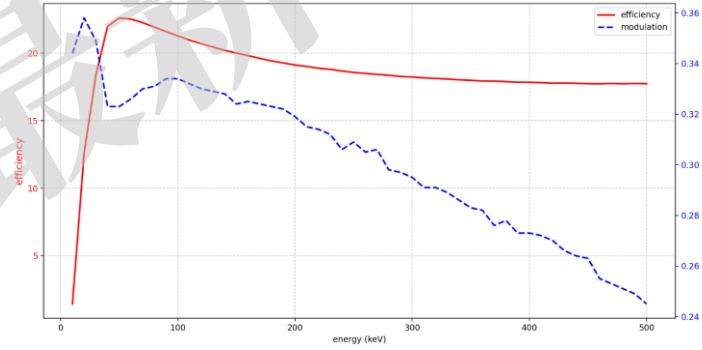


图 10 模拟得到的塑料闪烁体探测效率和调制因子

Figure 10 The efficiency and the modulation factor of the plastic scintillator

由模拟计算的探测效率、调制因子以及 3000cm² 的有效面积，考虑 GRB 典型谱为一个 Band 谱，

$$D(x) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha \exp \left(-\frac{E}{E_0} \right), & (\alpha - \beta E_0) \geq E, \\ A \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\alpha - \beta} e^{\beta - \alpha} \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta, & (\alpha - \beta E_0) \leq E. \end{cases}$$

对应的归一化参数 A 为 $8.7 \times 10^{-4} \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1}$, $\alpha = -1.0$, $\beta = -2.3$, $E_{peak} = 230 \text{ keV}$, 假设积分时间 2s, 根据最小可测偏振度 (minimum detectable polarization, MDP) 公式

$$\text{MDP} = \frac{429\%}{\mu R_s} \sqrt{\left(\frac{R_s + R_{BG}}{t_{\text{obs}}} \right)}$$

其中 μ 、 R_s 、 R_{BG} 和 t_{obs} 分别表示调制因子、信号计数率、本底计数率和曝光时间。为了对偏振观测灵敏度进行限制,特别是考虑对于典型暴,短时标内光子计数远大于本底计数的情况,忽略掉本底计算得到了理想情况下的最小可测偏振度。由此我们计算得到在 50~500keV 范围,对于典型 Band 谱的 GRB 最小可测偏振度为 8%。

3 结论

本文基于实现多波段的高灵敏偏振与能谱偏振探测的科学目标提出了宽波段的 X 射线偏振与能谱望远镜(WXPT)的概念。WXPT 上将携带一个大视场的软伽玛偏振仪实现伽玛暴的自主定位,并实现 GRB 的能谱与偏振同时观测。大视场射线偏振探测仪由塑料闪烁体棒和 CsI 闪烁体棒的阵列组成,能量覆盖为 50~500keV。本文建立了软伽玛偏振仪的 Geant4 物理仿真模型,仿真得到在正入射的情况下载 50~500keV 范围的探测效率大于 15%。只考虑在两个塑料闪烁体棒中沉积能量的康普顿事例,仿真得到的调制因子在 0.245 到 0.33 之间。结合探测效率、探测的几何面积、调制因子,考虑测量的典型 Band 谱的 GRB 的最小可测偏振度可达 8%,具有良好的伽玛暴偏振测量能力。后续我们将研究不同朝向、不同位置的多模块布局,结合单根闪烁体棒双端读出的方式,研究自主定位算法以及能谱与偏振的联合拟合算法,完成大视场软伽玛偏振仪的详细设计。

致谢

本工作受到了北京市科协 2023-2025 年度青年人才托举工程项目的支持。

参考文献

- [1] LYUTIKOV M, PARIEV V I, BLANDFORD R D. Polarization of prompt gamma-ray burst emission: evidence for electromagnetically dominated outflow[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **597**: 998-1009
- [2] HILL J E, MCCONNELL M L, BLOSER P, *et al.* POET: Polarimeters for energetic transients[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, **1065**(1): 331-337
- [3] TOMA K, SAKAMOTO T, ZHANG B, *et al.* Statistical properties of gamma-ray burst polarization[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, **698**(2): 1042
- [4] COVINO S, GÖTZ D. Polarization of prompt and afterglow emission of gamma-ray bursts[J]. *Astronomical & Astrophysical Transactions*, 2016, **29**(2): 205-214
- [5] LEI F, DEAN A J, HILLS G L. Compton polarimetry in gamma-ray astronomy[J]. *Space Science Reviews*, 1997, **82**(3): 309-388
- [6] CHATTOPADHYAY T. Hard X-ray polarimetry—an overview of the method, science drivers, and recent findings[J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 2021, **42**(2): 106
- [7] XIAO Hualin, DONG Yongwei, WU Bobing, *et al.* POLAR gamma ray burst polarimeter onboard TG-2 spacelab[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(1): 32-36, 43 (肖华林, 董永伟, 吴伯冰, 等. TG-2 伽玛暴偏振探测仪 POLAR[J]. 载人航天, 2015, **21**(1): 32-36, 43)
- [8] MCCONNELL M L, BLOSER P F, ERTLEY C, *et al.* Current status of the GRAPE balloon program[C]//*Proceedings of SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*. Montréal: SPIE, 2014: 91443P

- [9] LIAO Jinyuan, LUO Qi, ZHU Yue, *et al.* The localization method of GECAM and simulation analysis[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, **50**(12): 129510 (廖进元, 罗琦, 朱玥, 等. GECAM 定位方法及模拟分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, **50**(12): 129510)
- [10] CONNAUGHTON V, BRIGGS M S, GOLDSTEIN A, *et al.* Localization of gamma-ray bursts using the *Fermi* gamma-ray burst monitor[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **216**(2): 32
- [11] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* GEANT4—a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, **506**(3): 250-303

常治, 男, 1990 年 2 月出生于山东省邹城市, 现为中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心助理研究员, 主要研究方向为探测器技术及天体物理理论分析等。

最新录用