

天宫2号POLAR探测器的低能X射线 在轨定标*

张 平^{1,2,3,4†} HAJDAS Wojtek⁴ 刘四明^{1,2‡} 苏 杨^{1,2}
李友平^{1,2} 陈 维^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210033)

(2 中国科学院暗物质和空间天文重点实验室 南京 210033)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

(4 Paul Scherrer Institut Villigen 5232)

摘要 伽马暴偏振探测仪(POLAR)是天宫2号实验室上搭载的一个 γ 射线偏振仪,于2016年9月15日搭载在天宫2号进入低轨运行,主要用于探测在50–500 keV能区的硬X射线辐射的线偏振. POLAR由25个模块组成,每个模块有64个塑料闪烁体棒,总计有1600个塑料闪烁体棒,具有较大的有效探测面积和视场. 在轨运行期间探测到多个小耀斑,它们的硬X射线光子能量通常小于50 keV,无法直接使用在轨和地面的高能定标结果来进行能谱分析. 结合拉马第太阳高能光谱成像探测器(RHESSI)对耀斑SOL2016112907能谱的观测和蒙特卡洛模拟,对耀斑期间被激活的闪烁体棒进行能量低于50 keV的低能相对定标. 虽然定标得到的能量阈值(~ 10 keV)和转换因子相对稳定,但是和高能定标给出的结果相比有显著差异,并且不同闪烁体棒显示出的差异没有明显的规律性.

关键词 太阳: X射线, 太阳: γ 射线, 太阳: 耀斑, 仪器: POLAR, 仪器: RHESSI, 仪器: 塑料闪烁体, 仪器: 定标

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 背景介绍

X/ γ 射线作为高能天体物理研究的一个窗口,由于其辐射机制和局部等离子环境以及电磁场特性密切相关,因此是研究极端天体物理环境下粒子加速机制的重要手段. 一般而言我们通过测量来自宇宙天体辐射的光子的能量、流强和方位以及偏振特性来全面了解辐射源的物理特性. 理论研究表明,大部分天体辐射产生的硬X射线具有一定的偏振特性,其偏振特性依赖于辐射机制、局部的磁场结构、高能粒子分布等辐射源的性

2019-05-28收到原稿, 2019-08-08收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11761131007), 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(114332KYSB 20170008), 中瑞科技双边合作(SSSTC)和国家留学基金委(CSC)联合项目(EG05-032016)资助

[†]pz.optical@gmail.com

[‡]liusm@pmo.ac.cn

质. 在 高 能 天 体 物 理 领 域, 由 于 高 能 光 子 流 量 低, 背 景 复 杂, 并 且 受 限 于 探 测 器 技 术, 大 部 分 探 测 器 主 要 探 测 辐 射 的 能 量、流 强 和 方 位, 偏 振 测 量 效 果 不 理 想, 误 差 较 大.

太 阳 是 离 我 们 最 近 的 高 能 辐 射 源, 其 高 能 辐 射 主 要 来 自 于 太 阳 耀 斑 和 日 冕 物 质 抛 射 过 程 中 的 非 热 辐 射 过 程. 耀 斑 作 为 最 剧 烈 的 太 阳 活 动, 其 磁 重 联 过 程 可 以 在 10^2 – 10^3 s 内 释 放 $\sim 10^{32}$ – 10^{33} erg 的 能 量^[1–2], 大 量 非 热 电 子 在 热 等 离 子 体 背 景 和 电 磁 场 中 被 加 速, 通 过 电 子 的 韧 致 辐 射 过 程 产 生 ≥ 10 keV 的 硬 X 射 线 辐 射. 一 般 认 为 其 非 热 辐 射 的 偏 振 度 约 为 20%, 并 且 观 测 上 如 果 要 区 分 不 同 的 辐 射 加 速 模 型, 偏 振 度 测 量 精 度 至 少 要 高 于 2%^[3]. 近 年 来 得 益 于 多 波 段 的 成 像 成 谱 观 测, 对 耀 斑 过 程 中 的 热 等 离 子 体 和 非 热 电 子 的 加 速 有 了 较 为 精 确 的 观 测, 但 是 由 于 观 测 的 投 影 效 应, 我 们 依 然 无 法 准 确 估 测 日 冕 硬 X 射 线 源 的 加 速 区 热 等 离 子 体 的 结 构 和 非 热 电 子 的 投 掷 角 分 布^[4].

太 阳 耀 斑 的 第 1 次 硬 X 射 线 偏 振 测 量 来 自 于 前 苏 联 的 实 验, 其 给 出 的 偏 振 度 大 概 在 2%–3% 到 20%–40%. Zhitnik 等^[5] 利 用 太 阳 活 动 的 近 地 复 杂 轨 道 观 测 卫 星 (CORONAS-F) 上 的 太 阳 分 光 偏 振 仪 (SPR-N) 探 测 到 的 25 个 样 本 给 出 的 偏 振 度 上 限 在 10–100 keV 范 围 内 为 8%–40% (3σ), 不 能 对 耀 斑 的 粒 子 加 速 机 制 模 型 进 行 有 效 的 区 分. RHESSI 是 主 要 用 于 观 测 太 阳 硬 X 射 线 和 γ 射 线 辐 射 特 性 的 卫 星^[6], 虽 然 其 携 带 了 一 个 Be 散 射 探 测 器 可 以 用 来 重 建 硬 X 射 线 调 制 曲 线, 实 现 测 量 来 自 伽 马 暴 (GRB) 和 太 阳 大 耀 斑 的 偏 振, 但 是 对 样 本 的 分 析 表 明 由 于 过 高 的 本 底 和 较 小 的 有 效 散 射 面 积, 没 有 办 法 有 效 区 分 偏 振 事 件 和 背 景 事 件^[7–9]. Suarez-Garcia 等^[10] 对 6 个 X 级 和 1 个 M 级 太 阳 耀 斑 的 RHESSI 数 据 的 偏 振 特 性 的 研 究 给 出 大 耀 斑 在 100–350 keV 能 量 区 间 1σ 置 信 度 内 的 硬 X 射 线 偏 振 度 约 为 2%–54%, 但 是 其 误 差 高 达 10%–26%, 不 能 作 为 有 效 的 偏 振 探 测 器.

POLAR 是 由 中 国、瑞 士 和 波 兰 合 作 研 制, 搭 载 在 天 宫 2 号 实 验 室 上 的 一 个 γ 射 线 偏 振 仪, 于 2016 年 9 月 成 功 发 射, 主 要 用 来 测 量 50–500 keV 能 段 γ 射 线 的 线 偏 振 度 和 线 偏 振 方 位 角. 其 由 1600 个 塑 料 闪 烁 体 棒 组 成 25 个 模 块 (每 个 模 块 为 8×8 的 塑 料 闪 烁 体 阵 列), 采 用 的 是 原 子 序 数 较 低 的 塑 料 闪 烁 体 材 料. 其 测 量 原 理 是 高 能 光 子 在 低 系 数 的 塑 料 闪 烁 体 上 发 生 康 普 顿 散 射 的 效 率 较 高, 在 发 生 康 普 顿 散 射 后, 反 冲 电 子 使 闪 烁 棒 发 生 退 激 发, 产 生 荧 光; 而 散 射 光 子 则 在 其 他 棒 上 发 生 2 次 康 普 顿 散 射 或 者 光 电 吸 收, 直 到 散 射 光 子 的 能 量 被 完 全 沉 积 或 者 逃 逸 出 探 测 器, 通 过 收 集 荧 光 得 到 探 测 器 棒 中 所 沉 积 的 能 量. 基 于 重 建 最 大 光 子 沉 积 能 量 的 棒 的 位 置 的 统 计 分 布 可 以 给 出 源 的 γ 光 子 的 线 偏 振 度 和 方 向^[11] (图 1). POLAR 探 测 的 视 场 大 概 为 $1/3$ 天 区, 并 且 具 有 ~ 200 cm² 的 有 效 探 测 面 积 和 ~ 0.35 的 调 制 因 子, 使 其 可 以 对 GRB 和 太 阳 耀 斑 的 硬 X 射 线 的 偏 振 度 实 现 精 确 测 量. 并 且 对 于 X 级 耀 斑, 基 于 POLAR 的 蒙 特 卡 洛 模 拟 显 示, POLAR 的 偏 振 度 测 量 精 度 可 以 高 于 5% (见 文 献 [12]).

本 文 利 用 POLAR 的 在 轨 耀 斑 观 测 数 据, 结 合 RHESSI 的 能 谱 观 测, 给 出 在 耀 斑 期 间 峰 值 附 近 能 谱 的 演 化, 将 这 些 能 谱 作 为 POLAR 观 测 的 蒙 特 卡 洛 模 拟 的 输 入, 通 过 拟 合 模 拟 结 果 和 在 轨 观 测 的 结 果 对 POLAR 探 测 器 的 低 能 光 子 探 测 进 行 相 对 定 标, 并 把 有 关 结 果 与 在 轨 和 地 面 标 定 的 高 能 定 标 结 果 做 比 较, 给 出 相 应 的 讨 论 和 分 析.

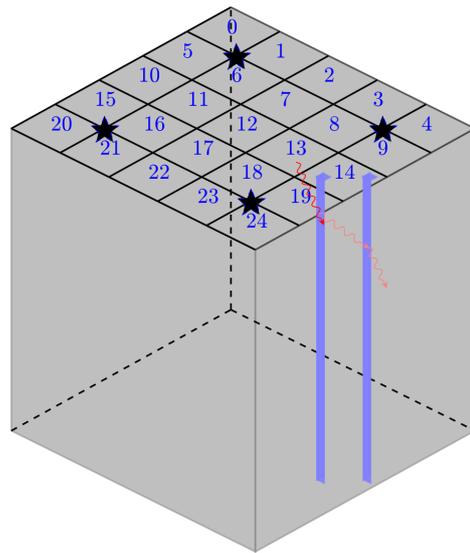


图1 POLAR原理示意图. 星号代表在轨定标源 ^{22}Na , 浅蓝色棒代表塑料闪烁体棒, 红线代表光子在探测器中的径迹.

Fig. 1 A cartoon for POLAR's detection mechanism. Stars indicate the locations of the in-orbit calibration sources ^{22}Na , light blue bars represent the plastic scintillator bars, and red lines show a photon trajectory in the detector.

2 POLAR的低能X射线在轨相对标定方法

POLAR塑料闪烁体材料的能量分辨率参数已经由实验室测定^[13], 基于Dietze等^[14]得到的经验公式, 我们估测在小于50 keV的低能区塑料闪烁体的能量分辨率 $\sim 20\%$, 在小于10 keV则低于50%. 对于高能的光子数据, 可以使用在轨的 ^{22}Na 源事例, 通过拟合康普顿边的方法得到对应的能量刻度因子^[15]. POLAR工作期间其高能在轨和地面定标显示POLAR的能量标度在实验室、模拟和在轨差别很小, 仪器表现符合预期^[16]. 其能量刻度因子和探测器模块的高压设置成线性关系, 而探测器温度对探测器的能量刻度因子影响则较小. 对于太阳耀斑来说, 因为观测到的耀斑都是小耀斑, 绝大部分耀斑的X射线光子都是源自热等离子体的韧致辐射. 低能光子在探测器里的康普顿散射效率较低, 闪烁体在低能部分的能量分辨率也较差, 考虑到探测器本身在低能端的非线性特性, 低能端无法直接采用在轨高能部分的标定, 而且POLAR在地面也并未做有效的低能定标. 我们要得到小耀斑的准确能谱信息, 则需要找到一个合适的低能相对定标源给出其相对的定标. 在同时段的硬X射线观测设备RHESSI能够非常好地给出观测到的太阳耀斑能谱信息, 并且在低能区RHESSI具有很高的分辨率. 因此我们可以把RHESSI的能谱观测作为POLAR在低能区相对定标的参考, 结合对POLAR观测的蒙特卡洛模拟, 来给POLAR进行相对定标.

为了得到较好的低能相对定标示例, 我们需要选择合适的耀斑事件, POLAR观测到的耀斑列表如附录表4所示. 考虑到高能定标的数据时间段为2016年11月19日, 我们主要考虑采用比较接近这个时间段, 并且探测器硬件基本参数设置一致的事件作为相对定标源. 综合表4以及参考POLAR高能定标的时间段^[16], 我们选择在轨时间比较接近, 仪

器的高压设定和温度等参数一致并且同时有POLAR和RHESSI观测的耀斑作为太阳耀斑的低能定标源. 空间本底的蒙特卡洛模拟^[16]显示弥漫X射线背景、正电子、中子、电子以及蟹状星云的背景会产生~10%的背景信号, 那么我们选择轨道远离大西洋异常区的事件, 有相对较低的轨道背景, 可以得到较高信噪比的耀斑数据. 综合以上考虑, 我们选择C7.5耀斑SOL2016112907作为低能相对定标源. 通过对比在轨高压设置(如图2), 可以看到POLAR耀斑期间和高能在轨定标时间段内的高压设置一致. 我们认为这个耀斑期间仪器的工作状态和高能在轨定标的时间段的状态是一致的, 并且可以利用RHESSI的观测作为合理的相对定标数据.

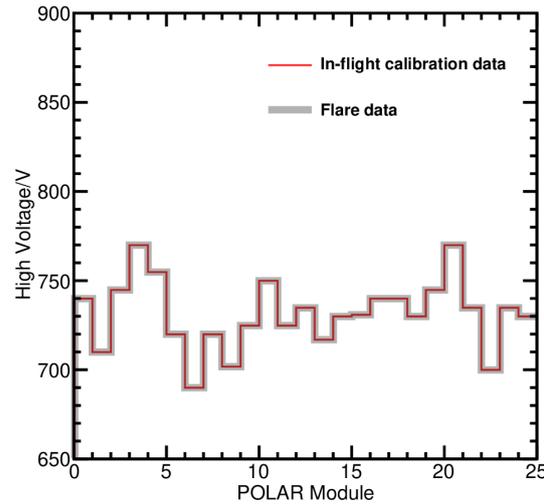


图 2 耀斑期间和在轨定标期间POLAR高压设置对比

Fig. 2 Comparison of POLAR high voltage settings during the flare and in-flight calibration

图3给出了SOL2016112907的扣除背景后的POLAR触发光变和RHESSI光变, 这些观测有非常好的对应关系. 为了更好地显示高能光变, RHESSI 12–25 keV和25–50 keV的光变分别增大3倍和30倍. 从光变上可以看出这个耀斑在25 keV以上的高能光子流量较小, POLAR观测的峰值部分和RHESSI 12–25 keV的观测对应得较好. 我们同时也给出在POLAR坐标系中X射线辐射源的角度坐标 $\theta \sim 52^\circ$, $\phi \sim 262^\circ$ (图3下图).

图4给出在耀斑期间(07:02—07:16 UT) POLAR 25个模块沉积事例的计数分布. POLAR下边的模块有比较高的计数, 左上模块的触发是由07:12 UT左右的GRB事件导致的, 其方位坐标为 $\theta \sim 42.6^\circ$, $\phi \sim 52.3^\circ$, ϕ 值与耀斑相差 $\sim 210^\circ$. RHESSI (总是指向太阳观测)并没有看到这个辐射源, 所以在我们的耀斑相对定标分析中不再分析这个GRB事件. 我们主要分析耀斑峰值附近响应比较高的下边的模块, 特别是模块14.

为了得到可靠的定标结果, 在25–50 keV峰值附近我们得到3个20 s的积分时间段 07:09:00—07:09:20 (T1), 07:09:20—07:09:40 (T2), 07:09:40—07:10:00 (T3)的RHESSI能谱. 我们使用热分量(vth)加截断幂律谱(bpow)模型拟合峰值处硬X射线能谱, 图5为T2时刻的能谱拟合, 表1给出了3个时间段的拟合参数演化, 可以看到能谱拟合中热分量的等离子体温度(T)可达22 MK, 非热分量主导了20 keV以上的流量, 其截断能量(E_{break})在15 keV左右. 非热幂律能谱非常软, 谱指数 $\alpha_2 \sim 4.0$.

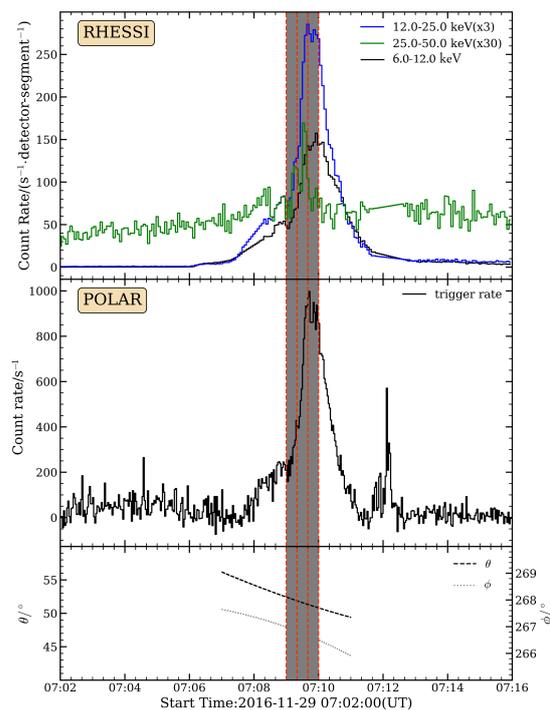


图3 耀斑SOL2016112907背景扣除后的POLAR触发光变(中间)和RHESSI(上)的观测对应, 耀斑25–50 keV流量峰值附近阴影部分为选择的能谱分析的时间片段; 下图是耀斑在POLAR探测器坐标系的位置变化.

Fig.3 Background subtracted lightcurve of flare SOL2016112907 from POLAR trigger data (middle) and RHESSI observation (top), and the shaded areas near the flare 25–50 keV flux peak are selected time slices for spectral analysis; the bottom panel shows the evolution of flare position in the POLAR coordinate system.

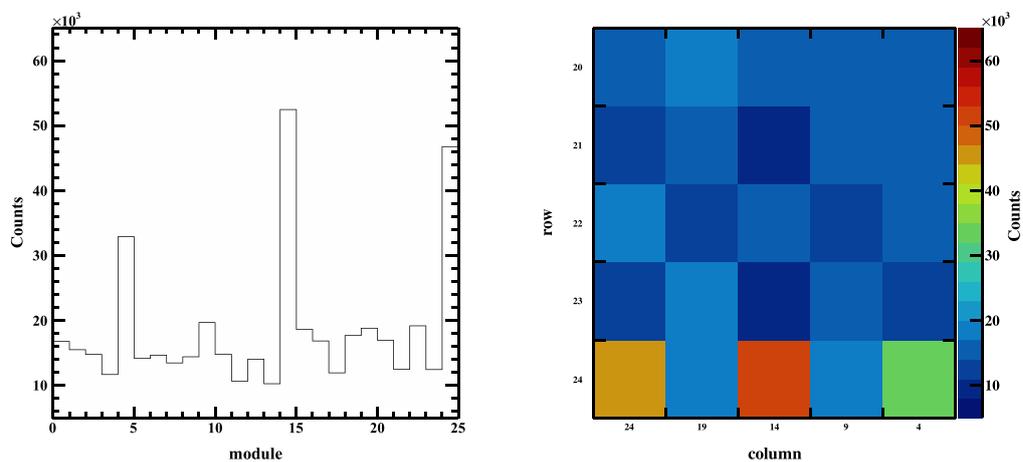


图4 左图为耀斑期间(07:02—07:16 UT)扣除背景后的POLAR 25个模块的计数分布; 右图为整个探测器2维计数投影图, 颜色对应于模块计数.

Fig.4 Left: counts distribution of the 25 modules of POLAR after background subtraction during the flare (07:02—07:16 UT); right: 2D counts distribution of the whole detector. Colors correspond to module counts.

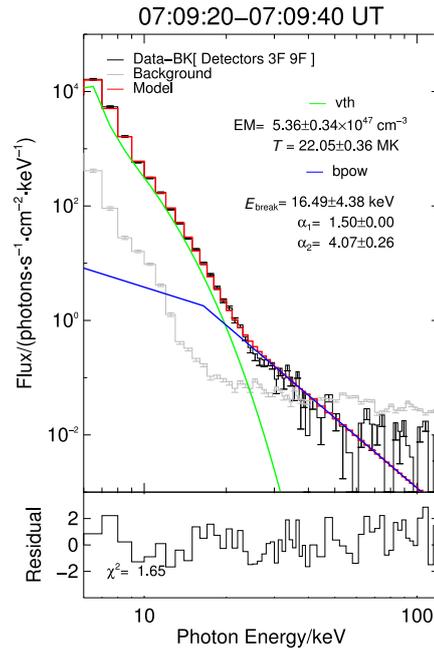


图 5 耀斑流量峰值附近的RHESSI X射线的能谱拟合, 其中, Data-BK表示减去背景的能谱, E_{break} 为截断能量, EM为热分量的发射度, T 为等离子体温度, α_1 为低于截断能量的幂律指数, α_2 为高于截断能量的幂律指数.

Fig. 5 RHESSI X-ray spectral fit near the flux peak, here, Data-BK is the spectrum after background subtraction, E_{break} is the break energy, EM is the thermal emission measure, T is the plasma temperature, α_1 is the power law index below break energy, and α_2 is the power law index above break energy.

表 1 3个时间段(T1, T2, T3)的能谱拟合结果
Table 1 The spectral fit results of 3 time slices (T1, T2, T3)

Time	$\theta/^\circ$	$\phi/^\circ$	T/MK	$E_{\text{break}}/\text{keV}$	α_2
T1	52.2	266.9	19.5	15.0 ± 2.9	4.82 ± 0.4
T2	51.6	266.8	22.1	16.5 ± 4.4	4.07 ± 0.26
T3	51.1	266.6	22.6	16.5 ± 9.8	4.01 ± 0.63

相对于POLAR探测器, 太阳耀斑在这里可以看作是一个点源. 表1还给出了耀斑位置在POLAR坐标系的变化($\theta \sim 52^\circ$, $\phi \sim 267^\circ$), 可以看出源位置的变化对我们结果的影响可以忽略. 而且阈值设定在5–40 keV范围内, POLAR的探测效率的变化很小, 但是在低能部分塑料闪烁体的能量响应表现出明显的非线性特征^[16], 为了尽可能减小非线性效应的影响, 我们在使用POLAR GEANT4软件包进行模拟的时候, 入射的 γ 光子流的能谱范围选择为10–300 keV. 这样不仅可以提高模拟效率, 还可以在探测器里有效沉积高能事例. 考虑到POLAR探测器在舱外的尺寸为 $450 \times 450 \times 250 \text{ mm}^3$, 模拟中我们在距离探测器300 cm的球面上放置一个半径40 cm的圆盘, 以表1给定的角度及其对应的能谱入射了 5×10^6 个 γ 光子, 以得到足够的事例和观测进行比较来实现相对定标.

光子在探测器里被反射或吸收会造成不同程度的能量衰减, 而且并非所有的沉积能量都会转变成荧光被收集. 在耀斑的谱模拟过程中, GEANT4模拟软件也考虑了这些

相互作用过程, 并且闪烁体棒的能量分辨率参数已经由实验室测定^[15]. 那么对于同样的 γ 光子谱输入, 稳定工作的POLAR探测器在蒙特卡洛模拟中所沉积的能量是可以和实际观测到的能量沉积相比较的. 但是由于光电倍增管的不均匀响应以及探测器本身集成系统的串扰, 也会造成实际测量能量的一些非线性响应^[17-18]. 为了尽量减小系统以及背景误差, 我们在具体做相对定标的时候, 只选取在耀斑峰值附近大量被激发的闪烁体棒作为分析对象. 在方法验证过程中, 主要是以模块14闪烁体棒7 (后面简称为模块14棒7)作为示例. 在比较窄的能谱范围内, 能量刻度参数是近似线性的. 在筛选沉积的有效事例时, 我们参考在轨定标对数据处理的流程^[16, 19], 对读出数据的基础噪音和共模噪音进行矫正, 并且剔除科学数据中标记的宇宙线事件(当某个时刻产生沉积的棒较多或者事例数过高), 得到耀斑期间的有效数据, 即我们所处理的事例. 由于在分析GRB偏振的时候对计数的精度要求较高, 因此在得到需要分析的数据后需要矫正响应的非线性影响, 再计算阈值和进行探测器整体之间串扰的修正. 定标源 ^{22}Na 产生的511 keV光子谱的康普顿边为340 keV, 拟合其模拟数字转换器(ADC)得到的道数(channel)能谱的康普顿边, 就可以确定探测器的能量刻度因子. 在耀斑事件过程中, 虽然耀斑持续时间较长, 但是大部分硬X射线的光子在50 keV以下, 其能谱没有一个特征能量的谱峰或康普顿边, 并且考虑到闪烁体棒在低能的分辨率较差, 所以在低能端无法通过简单的特征康普顿边做标定. 在相对定标时, 我们通过RHESSI能谱分析已经确定了入射到POLAR的光子谱以及方向, 如果探测器的响应是稳定的, 那么其所沉积的能量(E_{keV})谱 $N'_{\text{sim}}(E_{\text{keV}})$ 和经过矫正基础噪音和共模噪音的闪烁体棒上的沉积能量(E_{ADC})谱 $N'_{\text{obs}}(E_{\text{ADC}})$ 是可以对应的, 即在 $E_{\text{ADC}} = f_{\text{adc2kev}} E_{\text{keV}}$ 的能量刻度下 $N'_{\text{sim}}(E_{\text{keV}}) \propto N'_{\text{obs}}(E_{\text{ADC}})$, 并且其能量通道刻度因子 f_{adc2kev} 即是我们所需要得到的. 注意这里我们已经忽略了探测器串扰对结果的影响.

3 定标结果

图6左给出了在这个耀斑期间, POLAR模块14棒7的基准噪音. 可以看出在耀斑期间POLAR模块14闪烁棒7的基准噪音分布可以用高斯分布较好拟合, 其平均值(Mean) ~ 177.7 ADC道数(ADC channel), 均方差(σ) ~ 34.5 ADC channel. 由于基准噪音的读出频率为1 Hz, 每一秒都会有一个基础噪音的数据, 那么在相对较短的时间范围内可以认为闪烁体棒所在的模块的系统基准噪音是相对稳定的. 在后续的分析中, 我们将筛选出积分时间区间内的事例, 对每个事例通过减去前一秒的基准噪音来消除读出通道的基准噪音. 对扣除基础噪音后的事例, 我们再去除宇宙线事例以及在宇宙线事例后死时间 $< 10^{-4}$ s内的事例, 它们主要是宇宙线事件引起的次级响应, 并非正常的有效事例. 并且在单个模块中一些事例同时会有多个触发响应, 图6中表明这类事例的平均最大沉积能谱在 < 70 ADC channel有一个峰. 所以为了尽可能地减少非正常事例, 我们将所有平均最大沉积能量(AVMADC) < 70 ADC channel和宇宙线事例后死时间里的事例都去除, 从而得到沉积在POLAR中的正常事例. 筛选出我们所需要的正常事例后, 我们可以给出探测器模块的整体噪音水平即共模噪音. 这里我们筛选出没有触发并且没有和触发事例相邻的探测器闪烁体棒, 通过读出平均值的分布来给出单个模块的共模噪音分布^[16, 19], 图6右给出耀斑前背景(07:02:00—07:03:00 UT)、峰值(07:09:00—07:10:00

UT)和耀斑后背景(07:15:00—07:16:00 UT)分别为一分钟时间段的共模噪音分布. 可以看出耀斑前后的背景共模噪音基本一致, 在峰值处由于受耀斑事件的影响有一定偏移.

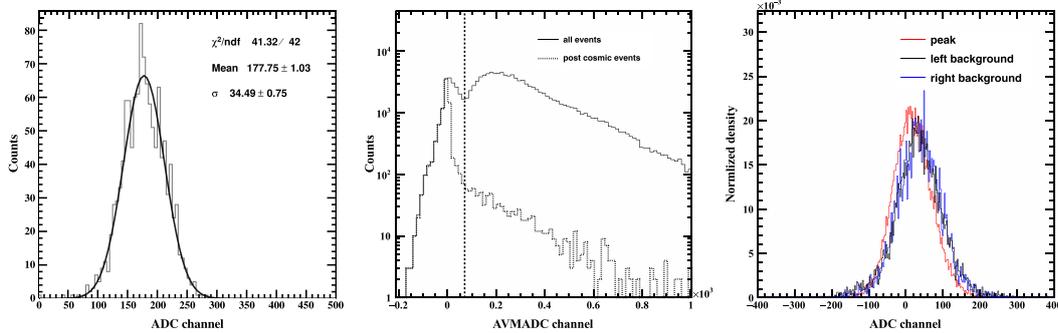


图 6 左图为耀斑期间POLAR模块14棒7的基准噪音分布(灰线)及其高斯拟合(黑线); 中间为扣除基准噪音后平均最大沉积能量的能谱图(实线)和扣除宇宙射线之后的次级响应的平均最大沉积能谱(虚线), 点线为70 ADC channel分割线; 右图为模块14在耀斑前背景(黑线), 峰值(红线)以及耀斑后背景(蓝线)的共模噪音分布.

Fig. 6 Left: distribution of the pedestal noise of module 14 bar 7 during the flare (gray line) and its Gaussian fit (black line). Middle: distribution of the averaged maximum energy deposition of all events (solid line) and post cosmic ray events (dashed line), the dotted line stands for 70 ADC channel line.

Right: Common noise of module 14 at background before the flare (black line), peak (red line), and background after the flare (blue line).

图7左为我们矫正基础噪音和共模噪音后, 筛选出的正常事例随时间演化, 可以看出在耀斑期间有明显的读出通道增强和事例数增多, 但是依然有一些和耀斑无关的背景事例. 这些事例无法通过事例的筛选来剔除, 需要从耀斑能谱中直接扣除. 图7右图给出了对这个闪烁体棒背景的线性拟合, 其斜率(slope) $\sim -0.0001 \text{ counts} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 背景流量较低 $\sim 10 \text{ counts} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. 根据空间背景的蒙特卡洛模拟分析^[20]在南大西洋异常区(SAA)之外的背景主要由弥散的宇宙X射线背景主导, 其产生的背景流量 $\sim 5.4 \text{ counts} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 另外还有正电子、中子、电子以及蟹状星云所产生的背景, 总的背景大约会产生 $\sim 16 \text{ counts} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 和我们观测到的背景相当. 图8左图显示耀斑前(07:02:00—07:03:00 UT), 耀斑后(07:15:00—07:16:00 UT)背景能谱没有明显变化, 我们因此可以结合拟合曲线扣除我们分析时间段里的非耀斑背景事例谱.

图8右图为我们得到的扣除背景谱后在峰值处(07:09:20—07:09:40 UT)的积分沉积能谱, 即模块14棒7的未定标ADC channel谱. 探测器闪烁体棒有一个触发阈值, 在能谱上则可以利用误差函数拟合低能端ADC channel谱来确定沉积谱的阈值范围^[19]. 在图8右图中可以看到误差函数的拟合, 误差函数的中心(center) $\sim 192 \text{ ADC channel}$, 宽度(width) $\sim 61 \text{ ADC channel}$, 那么可以计算得到模块14棒7的通道阈值范围 $\sim 278 \text{ ADC channel}$.

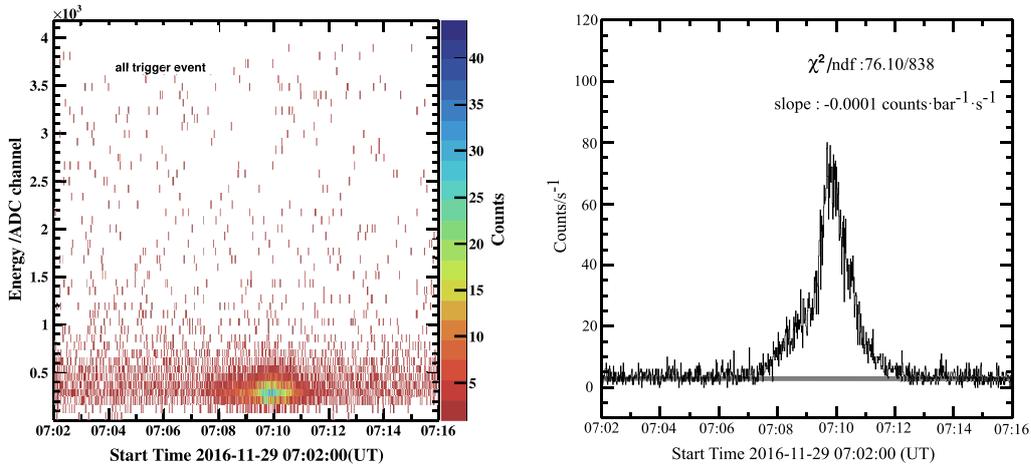


图 7 左图为耀斑期间模块14棒7扣除基准噪音和共模噪音并筛选出正常事件后所有探测到的事件随时间的演化; 右图为经过事件筛选后模块14棒7的时变曲线(黑色线)以及其背景的线性拟合(灰色线)。

Fig. 7 Left: temporal evolution of all normal events recorded by module 14 bar 7 after removing pedestal noise and common noise during the flare; right: the flare lightcurve (black line) of module 14 bar 7 after events selection and a linear fit to the background (gray line).

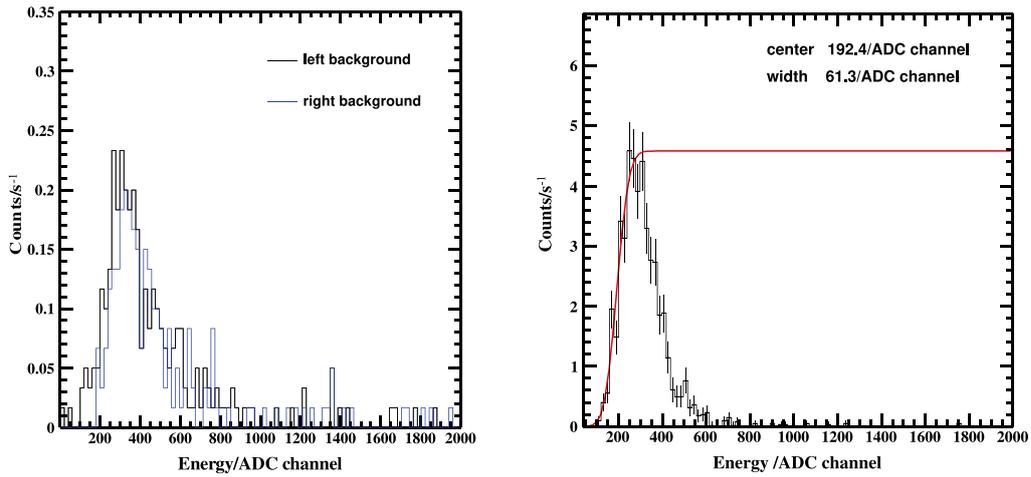


图 8 左图为耀斑前(07:02:00—07:03:00 UT)(黑线)和耀斑后(07:15:00—07:16:00 UT)(蓝线)的背景谱; 右图为模块14棒7在07:09:20 UT到07:09:40 UT扣除背景谱后的20 s积分沉积谱, 红色曲线为阈值附近的误差函数的拟合。

Fig. 8 Left: background spectra before the flare (07:02:00—07:03:00 UT) (black line) and after the flare (07:15:00—07:16:00 UT) (blue line). Right: 20 s integration deposition spectrum of module 14 bar 7 from 07:09:20 UT to 07:09:40 UT after background subtracted, the red line is a error function fitting near the threshold.

通过线性变换 $E_{\text{ADC}} = f_{\text{adc2kev}} E_{\text{keV}}$, 由观测得到的ADC谱可以和基于RHESSI观测能谱的蒙特卡洛模拟沉积能谱做比较. 这里我们还需要考虑闪烁体棒激发阈值对沉积能谱的影响, 即利用前面拟合ADC谱得到的误差函数对模拟沉积能谱加权. 然后通过最小化能量阈值之上的观测和模拟能谱的 χ^2 给出相应的相对定标参数 f_{adc2kev} 和能量阈值 $E_{\text{threshold}}$. 图9给出了在峰值处(07:09:20—07:09:40)观测和模拟的能谱拟合, 其误差棒

为归一化的统计误差, 拟合的 χ^2 为0.25. 由Xiao等^[16]在轨定标的结果知道模块14棒7高能端的阈值 ~ 18.57 keV、 $f_{\text{adc}2\text{keV}} \sim 14.4$ ADC channel \cdot keV⁻¹, 而由RHESSEI谱重建的相对定标得到的3个时间片段(T1, T2, T3)的标定参数, 如表2所示, 拟合得到的阈值 ~ 14 keV, 小于高能端的阈值. 拟合得到 $f_{\text{adc}2\text{keV}}$ 的均值和方差分别为20.5 ADC channel \cdot keV⁻¹和0.07 ADC channel \cdot keV⁻¹. 在峰值时间段内低能刻度因子较为稳定. 但是拟合给出的相对定标参数和高能端使用²²Na源事例的康普顿边得到的结果差别显著.

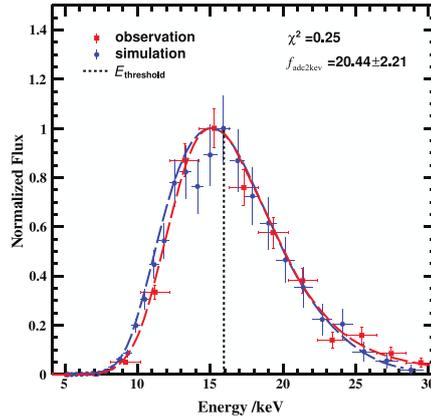


图 9 T2观测能谱和模拟能谱的比较, 虚线为阈值能量 $E_{\text{threshold}}$, 蓝色线代表模拟能谱, 红色线代表观测标定能谱.

Fig. 9 Comparison of observed spectrum and simulated spectrum for T2, dashed line is the threshold energy $E_{\text{threshold}}$, blue line is simulation spectrum, and red line is calibration observation spectrum.

表 2 3个时间段(T1, T2, T3)的定标参数

Table 2 Calibration parameters of 3 time intervals (T1, T2, T3)

Time	χ^2	$E_{\text{threshold}}/\text{keV}$	$f_{\text{adc}2\text{keV}}/(\text{ADC channel} \cdot \text{keV}^{-1})$
T1	0.06	14.53 ± 0.73	20.58 ± 3.62
T2	0.25	14.56 ± 0.67	20.44 ± 2.21
T3	0.08	13.60 ± 0.59	20.60 ± 1.92

应用同样的定标方法我们对耀斑流量峰值附近20 s积分时间间隔里能谱峰值计数率 > 1 counts \cdot s⁻¹ (激活)的闪烁体棒进行了定标. 表3可以看到不同的棒定标给出的能量阈值和通道能量转换因子也不同, 这个结果和高能端的在轨定标结果类似, 其能量和ADC通道的线性关系如图10所示. 所有激活的闪烁体棒的定标及其和高能端的对比结果如图11, 激活的闪烁体棒约为41个, 分布于5个模块(M4、M9、M14、M19、M24), 在POLAR最外面的3排, 约占POLAR整个探测器的塑料闪烁体总数的 $\sim 3\%$, 它们探测到的有效事例和相对定标的结果在不同闪烁体棒上没有明显的规律性, 对比能量阈值低能端(Low threshold)和高能端(High threshold)没有表现出明显的差异, 符合较好; 能量通道刻度因子 $f_{\text{adc}2\text{keV}}$ 低能端的定标(Low factor)对比高能端(High factor)差异同样没有表现出明显的规律性. 这一结果表明POLAR矩阵式的设计导致探测效率依赖源的方向. 在这个耀斑期间只有一侧的探测器模块有较强的响应, 并且其中被激活的闪烁体棒也主要集中于源方向一侧的棒.

表 3 耀斑期间有显著信号的闪烁体棒的相对定标和在轨定标参数的对比
Table 3 Comparison of cross calibration and in-flight calibration parameters in plastic bars with a strong signal during the flare

Index	Module	Bar	Total events	Low threshold /keV	High threshold /keV	High factor /((ADC channel · keV ⁻¹))	Low factor /((ADC channel · keV ⁻¹))
1	24	1	280	11.77	10.99	18.51	17.28
2	24	2	280	13.68	14.43	16.06	16.94
4	24	4	153	12.42	14.11	16.25	18.45
5	24	5	343	14.32	13.63	18.05	17.19
6	24	6	219	15.33	15.44	18.61	18.75
7	24	7	168	14.12	12.81	17.55	15.92
18	14	2	175	12.29	11.5	19.26	18.02
19	14	3	269	12.16	11.13	17.57	16.09
20	14	4	171	12.37	10.47	20.09	16.99
23	14	7	920	14.56	20.6	14.44	20.44
24	9	0	183	12.86	11.82	16.87	15.5
25	9	1	180	12.5	11.91	15.91	15.16
33	4	1	159	15.63	13.79	14.47	12.76
34	4	2	89	15.58	17.61	14.37	16.24
35	4	3	162	12.22	13.05	15.71	16.78
36	4	4	227	12.88	9.97	18.69	14.47
37	4	5	114	12.32	14.92	15.35	18.59
42	24	10	536	12.8	8.23	17.47	11.24
43	24	11	443	14.09	11.69	19.06	15.81
44	24	12	173	14.05	11.37	19.83	16.05
45	24	13	202	14.3	11.41	19.56	15.61
47	24	15	115	14.95	13.12	18.1	15.88
55	19	15	300	14.54	20.83	14.34	20.53
58	14	10	122	12.82	8.86	20.27	14.01
59	14	11	180	17.44	12.88	18.23	13.47
60	14	12	122	13.81	13.88	16.4	16.48
62	14	14	1233	14.54	12.87	17.31	15.32
63	14	15	1283	15.46	14.69	13.58	12.9
73	4	9	131	15.07	14.67	15.19	14.78
74	4	10	102	13.67	10.69	16.88	13.2
75	4	11	187	15.32	12.2	16.26	12.95
76	4	12	134	14.78	13.81	17.54	16.4
82	24	18	91	15.69	13.03	16.67	13.85
83	24	19	156	13.64	14.88	20.12	21.96
87	24	23	783	18.13	14.65	16.64	13.45
95	19	23	592	14.18	14.18	12.96	12.96
102	14	22	174	19.6	21.39	14.07	15.36
103	14	23	535	11.92	12.16	15.86	16.17
113	4	17	71	17.39	14.43	12.5	10.38
115	4	19	108	16.32	13.13	20.89	16.81

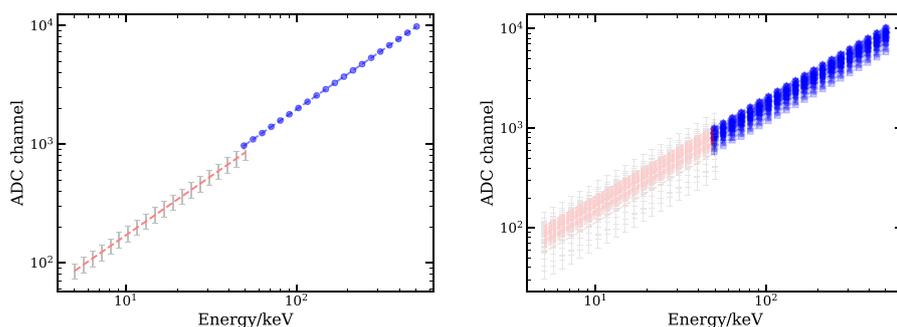


图 10 图中为能量标定后, 能量和ADC通道的线性关系, 红色为低能端, 灰色为误差棒, 蓝色为高能端. 左图为模块14棒7的线性关系图; 右图为所有标定的闪烁体棒的线性关系图.

Fig. 10 The linear relation between energy and ADC channel, red is low energy band, gray is error bar, and blue is high energy band. Left: the linear relation of module 14 bar 7; right: the linear relation of all calibration bars.

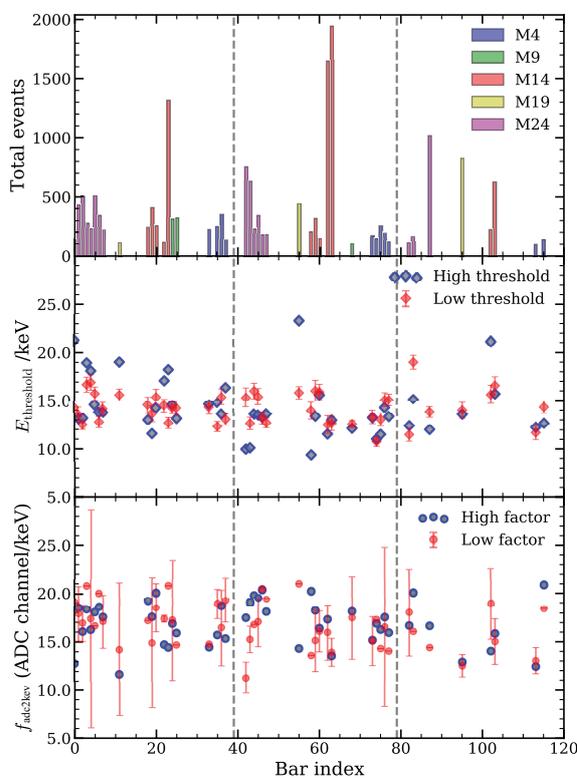


图 11 POLAR下3排棒的定标参数. 上图为每个棒耀斑期间记录的有效事例数; 中图和下图分别为高低能端定标阈值的能量以及对应的定标的能量通道刻度因子的对比. 其中M代表POLAR模块, 灰色虚线代表不同排分割线.

Fig. 11 Calibration parameters for the bars in the bottom three rows of POLAR. The top panel gives the total number of events recorded by each bar; the middle panel and the bottom panel are the comparison of threshold energy and conversion factors obtained via calibration in low and high energy ranges, respectively. M stands for POLAR module, and the dashed line is the line between different rows.

4 总结与展望

经过半年多的观测, POLAR成功探测到了多个太阳耀斑, 但是由于探测到的耀斑在 高能段的辐射较弱, 无法使用地面或在轨定标的参数对所探测到的耀斑进行比较准确的能谱和辐射偏振测量. 我们通过结合RHESSI的硬X射线能谱观测, 给出了通过模拟对观测能谱进行相对定标的方法. 分析表明在非康普顿模式下POLAR塑料闪烁体可以探测到低能的 γ 光子, 并且由于具有较大的有效面积相对于RHESSI可以探测到更多的高能光子事例. 为了和更高能段的地面实验室、模拟和在轨标定结果做比较, 我们选择和POLAR在轨标定相近的时间段且仪器设置不变情形下的耀斑事件对POLAR的低能段进行相对定标. 在确定耀斑的位置和能谱后, 我们利用RHESSI观测得到的能谱作为POLAR蒙特卡洛模拟的输入, 得到相应的探测器沉积能谱. 通过合理的事例筛选和背景扣除得到的POLAR ADC channel能谱可以和模拟得到的沉积能谱比较得到相应探测器棒的能量触发阈值和能量通道刻度因子 $f_{\text{adc}2\text{kev}}$. 虽然在耀斑期间这些定标参数比较稳定, 但是和 高能端的定标结果相比, 两者有较为显著的差别. 我们的分析还表明阵列式的模块排列导致探测器之间相互遮挡, 显著压低了中间9个模块的计数率. 未来探测器设计上要尽量避免各模块相互遮挡.

参考文献

- [1] Emslie A G, Kucharek H, Dennis B R, et al. JGR, 2004, 109: A10104
- [2] Emslie A G, Dennis B R, Holman G D, et al. JGR, 2005, 110: A11103
- [3] Leach J, Petrosian V. ApJ, 1983, 269: 715
- [4] Jeffrey N L S, Kontar E P, Bian N H, et al. ApJ, 2014, 787: 86
- [5] Zhitnik I A, Logachev Y I, Bogomolov A V, et al. SoSyR, 2006, 40: 93
- [6] Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. SoPh, 2002, 210: 3
- [7] Wigger C, Hajdas W, Arzner K, et al. ApJ, 2004, 613: 1088
- [8] Coburn W, Boggs S E. Nature, 2003, 423: 415
- [9] Rutledge R E, Fox D B. MNRAS, 2004, 350: 1288
- [10] Suarez-Garcia E, Hajdas W, Wigger C, et al. SoPh, 2006, 239: 149
- [11] Produit N, Barao F, Deluit S, et al. NIMPA, 2005, 550: 616
- [12] Hajdas W, Bao T W, Batsch T, et al. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2015, 3: 272
- [13] Orsi S, Haas D, Hajdas W, et al. NIMPA, 2011, 648: 139
- [14] Dietze G, Klein H. NIMPR, 1982, 193: 549
- [15] Zhang X F, Hajdas W, Xiao H L, et al. NIMPA, 2018, 879: 47
- [16] Xiao H L, Hajdas W, Wu B B, et al. APh, 2018, 103: 74
- [17] Xiao H L, Hajdas W, Wu B B, et al. APh, 2016, 83: 6
- [18] Zhang X F, Xiao H L, Yu B X, et al. NIMPA, 2015, 797: 94
- [19] Li Z H, Kole M, Sun J C, et al. NIMPA, 2018, 900: 8
- [20] Suarez-Garcia E. X-Ray Polarization: RHESSI Results and POLAR Prospects. Switzerland: University of Geneva, 2010

In-flight Low Energy X-ray Calibration of POLAR Detector on TianGong2

ZHANG Ping^{1,2,3,4} HAJDAS Wojtek⁴ LIU Si-ming^{1,2} SU Yang^{1,2}
LI You-ping^{1,2} CHEN Wei^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033)

*(2 Key Laboratory for Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing 210033)*

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(4 Paul Scherrer Institut, Villigen 5232)

ABSTRACT POLAR is a γ -ray burst polarimeter on board TianGong2 space lab, which was launched into low earth orbit in 2016 September 15. It is designed to measure the linear polarization of hard X-ray in the 50–500 keV energy range. The detector has 25 modules, and each module has 64 plastic scintillator bars. With a total number of 1600 plastic scintillator bars, POLAR has a very large effective detection area and field of view. During its in-orbit operation, POLAR detected multiple small flares. Those hard X-ray photons are usually less than 50 keV and can not be analyzed directly by applying in-orbit and ground high energy calibration results. With simultaneous RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) observations of a flare SOL2016112907, this paper calibrates smaller than 50 keV low-energy response of POLAR with Monte Carlo simulations. We find that energy threshold (~ 10 keV) and conversion factor obtained via calibration are relatively stable, but they are different from values obtained via calibration in high-energy range, and there is no evident pattern in these differences.

Key words Sun: X-rays, Sun: gamma rays, Sun: flare, instrumentation: POLAR, instrumentation: RHESSI, instrumentation: plastic scintillator, instrumentation: calibration

附录 POLAR对太阳耀斑的观测

虽然是在太阳活动谷年发射运行, POLAR依然探测到了十几个太阳耀斑事件, 结合RHESSI硬X射线观测以及静止环境观测卫星(GOES)软X射线观测的耀斑列表, 我们得到POLAR所探测到的耀斑列表4. 从表4中, 可以看到POLAR耀斑列表中探测到的16个耀斑中有11个是C级, 5个是B级耀斑, 都是较小的太阳耀斑. 有3个耀斑没有对应的RHESSI观测, RHESSI有对应观测的耀斑50–300 keV能段的计数率都低于 10^2 counts/s, 但是POLAR更大的视场和有效探测面积使其能探测到大量的光子.

表 4 POLAR观测到的耀斑列表
Table 4 Solar flares list observed by POLAR

No.	Start Time (UT)	Peak Time	GOES class	RHESSI peak rate		POLAR peak rate	$\theta/^\circ$	$\phi/^\circ$
				6–12 keV	50–300 keV			
1	12/10/2016 11:51	11:54	C1.1	1648	32	1210	40.2	227.2
2	28/11/2016 07:55	08:03	C1.4	/	/	2481	68.6	267.6
3	29/11/2016 07:03	07:10	C7.5	480	46	2600	50.8	266.5
4	29/11/2016 12:05	12:11	C2.6	80	30	2957	64.4	263.9
5	30/11/2016 01:14	01:19	C6.0	/	/	3200	70.2	268.4
6	30/11/2016 15:22	15:25	C2.3	/	/	924	40.6	262.6
7	02/12/2016 14:37	14:47	B2.1	34	6	5700	109.4	241
8	05/12/2016 10:47	10:53	B1.9	88	11	5300	54.8	121.3
9	10/12/2016 16:45	17:25	C4.0	2544	73	1000	140.1	66
10	10/01/2017 18:05	18:07	B5.7	720	21	5000	63.9	263.1
11	21/01/2017 06:23	06:36	C1.2	816	10	7300	141.5	130.4
12	27/03/2017 22:53	22:53	B5.3	36	15	3068	43.4	257.8
13	28/03/2017 00:11	00:25	C1.1	1008	18	3550	69.3	266.1
14	28/03/2017 03:18	03:22	C3.1	8176	21	1328	62.9	263.3
15	28/03/2017 04:47	04:54	C3.2	7408	17	850	70.5	266.6
16	28/03/2017 09:38	09:42	B4.0	232	11	9645	44.6	258.1