MDPI

文章单通道塑料和GAGG闪烁体条的立方星太阳偏振仪（CUSP）的能谱性能

Nicolas De Angelis[1],* , bhay Kumar[1], Sergio Fabiani[1],Ettore Del Monte[1],Enrico Costa[1],Giovanni Lombardi[1,2], Alda Rubini[1], Paolo Soffitta[1], Andrea Alimenti[1,3],Riccardo Campana[4,5],Mauro Centrone[6],Giovanni De Cesare[4], Sergio Di Cosimo[1], Giuseppe Di Persio[1],Alessandro Lacerenza[1],Pasqualino Loffredo[1],Gabriele Minervini[7], Fabio Muleri[1], Paolo Romano[8],Emanuele Scalise[1],Enrico Silva[1,3],Davide Albanesi[9], Ilaria Baffo[10], Daniele Brienza[11], Valerio Campomaggiore[9],Giovanni Cucinella[12],Andrea Curatolo[13],Giulia de Iulis[9], Andrea Del Re[9], Vito Di Bari[12], Simone Di Filippo[12],Immacolata Donnarumma[11],Pierluigi Fanelli[10],Nicolas Gagliardi[14], Paolo Leonetti[9], Matteo Mergè[11], Dario Modenini[13,14], Andrea Negri[12], Daniele Pecorella[13],Massimo Perelli[12], Alice Ponti[14], Francesca Sbop[9], Paolo Tortora[13,14],Alessandro Turchi[11],Valerio Vagelli[11],Emanuele Zaccagnino[11], Alessandro Zambardi[9] 和 Costantino Zazza[15]

[1] INAF-IAPS，意大利罗马 Fosso delCavaliere 路 100 号，邮编 00133；nicolas.deangelis@inaf.it[2] “马里奥·卢森蒂”企业工程系，罗马“托尔·维尔加塔”大学，Cracovia 路 50 号，意大利罗马，邮编 00133[3] 工业、电子与机械工程系，罗马“三大”大学，V. Volterra 路 62 号，意大利罗马，邮编 00146[4] INAF-OAS 博洛尼亚分部，Gobetti 路 93/3 号，意大利博洛尼亚，邮编 40129[5] 意大利国家核物理研究院博洛尼亚分部，Berti Pichat 大道 6/2 号，意大利博洛尼亚，邮编 40127[6] INAF-OAR，Frascati 路 33 号，意大利 Monte PorzioCatone，邮编 00040[7] INAF 总部，ParcoMellini 大道 84 号，意大利罗马，邮编 00136[8] INAF-OACT，S. Sofia 路 78 号，意大利卡塔尼亚，邮编 95123[9] DEDA Connect s.r.l.，VincenzoLamaro 路 51 号，意大利罗马，邮编 00173[10] DEIM，“图西亚”大学，Largo dell’Università，意大利维泰博，邮编 01100[11] 意大利航天局，del Politecnicosnc 路，意大利罗马，邮编 00133[12] IMT s.r.l.，Carlo BartolomeoPiazza 路 30 号，意大利罗马，邮编 00161[13] 工业工程系，博洛尼亚大学，Montaspro 路 97 号，意大利弗利，邮编 47121[14] 工业航空航天研究跨系中心，博洛尼亚大学，Carnaccini 路 12 号，意大利弗利，邮编 47121[15] DIBAF，“图西亚”大学，Largodell’Università，意大利维泰博，邮编 01100*　通讯作者：nicolas.deangelis@inaf.it

arXiv:2601.00485v1 [astro-ph.IM] 1 Jan 2026

A学术编辑：Matteo Duranti 和 Valerio Vagelli

R收稿:
R修订:
A接收:
P出版:

C引文：De Angelis，N.；Kumar，A.；Fabiani，S.；Del Monte，E.；Costa，E.；Lombardi，G.；Rubini，A.；Soffitta，P.；Alimenti，A.；Campana，R.；Centrone，M.；De Cesare，G.；Di Cosimo，S.；Di Persio，G.；Lacerenza，A.；Loffredo，P.；Minervini, G.；Muleri, F.；Romano, P.；S卡利塞，E.；席尔瓦，E.；阿尔巴内西，D.；Baffo, I.; Brienza, D.; Campamaggiore, V.; C乌奇内拉，G.；库拉托洛，A.；de Iulis，G.；Del Re, A.；Di Bari, V.；Di Filippo, S.；Donnarumma，I.；Fanelli，P.；Gagliardi，N。；Leonetti，P.；Mergè，M.；Modenini，D。；Negri，A.；Pecorella，D.；Perelli，M.；P onti，A.；Sbop，F.；Tortora，P.；Turchi，A.；Vagelli，V.；Zaccagnino，E.；Zambardi，A.；Zazza，C.。单通道塑料和GAGG闪烁体条的立方星太阳偏振仪（CUSP）的能谱性能。*Particles***2025年**，*1*，0。https://doi.org/

版权： © 2026 作者所有。已提交至 *Particles*，供考虑按照知识共享署名（CC BY）许可（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行开放获取出版。

摘要

太阳是距离地球最近的X射线天体物理源，因此是深入理解天体物理过程的绝佳研究对象。太阳耀斑尤其值得关注，因为它们与日冕物质抛射以及太阳大气中的磁重联区域有关。因此，耀斑不仅能为其产生区域内的物理过程提供重要信息，还能揭示高能带电粒子向地球发射和加速的情况，使其成为预测空间天气的有力工具。尽管太阳耀斑对于理解磁重联和粒子加速至关重要，但现有观测对其硬X射线偏振的约束仍然不足，而硬X射线偏振是区分相互竞争的理论模型的关键。为此，我们介绍正在研制中的CUbesat太阳偏振仪（CUSP），这项任务旨在对25-100千电子伏能量范围内的太阳耀斑进行偏振测量。CUSP由一个6U-XL平台组成，搭载一台双相康普顿偏振仪。该偏振仪的中央组件由四个 4×4 组塑料闪烁体阵列构成，每组均与多阳极光电倍增管耦合；其周围则环绕着四排细长的GAGG闪烁体条，每排八根，并与雪崩光电二极管耦合。滨松生产的这两类传感器分别由Weeroc的MAROC-3A和SKIROC-2A专用集成电路读出。在本文中，

我们介绍了在实验室中使用为飞行型号预定的专用集成电路开发板测得的单塑料闪烁体通道和GAGG通道的初步能谱性能。

关键词： 康普顿偏振测量；X射线仪器； γ-射线仪器；校准；闪烁体；雪崩光电二极管；光电倍增管；太阳耀斑；日球物理学；空间天气；磁重联过程

1. 使用 CUSP 进行太阳耀斑偏振测量

1.1. 太阳耀斑的物理机制与偏振测量的必要性

太阳耀斑是太阳系中能量最强的现象之一，源于储存在太阳日冕中的磁能突然释放。这些爆发现象通常与日冕物质抛射（CMEs）相关，会将带电粒子加速至相对论速度，将等离子体加热到数千万开尔文，并发出覆盖整个电磁波谱的辐射——从无线电波到伽马射线。太阳耀斑的脉冲阶段尤其以硬X射线（HXR）辐射为主（通常高于 20 千电子伏），其主要来源是加速电子与高密度色球层相互作用产生的非热韧致辐射 [1,2]。

尽管数十年来开展了多波段观测，关于磁重联区的几何形态、粒子加速过程，以及高能电子的俯仰角分布和束流化等关键问题，仍未得到解答。

仅凭光谱和成像观测，往往无法消除相互竞争的理论模型之间的歧义。X射线偏振测量能够探测电子束的各向异性以及耀斑区的磁场几何结构，为此提供了强有力的补充诊断手段 [3,4]。硬X射线中的线偏振程度和方向对加速电子的方向性（束流化分布与各向同性分布）、局部磁场构型（例如环结构几何形态、重联位置的朝向），以及相对于耀斑位置的观测角都很敏感。

理论模型预测，束流化电子产生的非热韧致辐射偏振度可达百分之几十，而热韧致辐射（来自高温、各向同性的等离子体）的偏振度则很低（至多几个百分点） [5,6]。因此，在25–100千电子伏能段进行偏振测量可以：（*i*）区分耀斑中的热辐射和非热辐射成分，（*ii*）约束加速区的几何形态（例如环顶主导还是足点主导），（*iii*）检验关于电子束流化和俯仰角分布的预测。

迄今为止，太阳耀斑硬X射线偏振测量仍是一片尚未充分探索的领域。以往的测量（例如来自 OSO-8、RHESSI、INTEGRAL 或 CORONAS-F 的测量）在统计上受到限制，往往只能给出上限或边缘性探测结果 [7–13]，尽管其中一些任务专门搭载了偏振仪。要捕捉耀斑快速、瞬变的演化过程，需要灵敏度高且时间分辨率高的专用仪器。立方星太阳偏振仪（CUSP）任务旨在填补这一空白，首次对太阳耀斑硬X射线偏振进行高显著性、时间分辨测量。

1.2. 康普顿偏振测量

由于高能光子的穿透性，硬X射线波段的偏振测量颇具挑战。传统偏振仪（例如布拉格晶体、光电偏振仪）在高于 ∼10 千电子伏时效率会下降。相比之下，康普顿散射偏振测量利用偏振光子散射截面的方位角不对称性。

康普顿散射的微分截面由克莱因-仁科公式给出 [14]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2}\left(\frac{E'}{E}\right)^2\left[\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - 2\sin^2\theta\cos^2\phi\right] \tag{1}$$

其中，r_e 为经典电子半径（2.8×10^{-15} m），E 和E' 分别为入射光子和散射光子的能量，θ 为极向散射角（入射光子与散射光子方向之间的夹角），ϕ 为方位散射角（散射平面与入射光子的偏振矢量之间的夹角）。

余弦$^2\,\phi$ 关系（方程式（1））表明，光子更倾向于沿着垂直于其偏振矢量的方向散射。对于一组光子，在存在偏振通量的情况下，其散射角的方位分布会呈现不对称性（亦称为调制曲线）。该调制的相对振幅与源的偏振度（PD）直接相关，而调制的相位则给出偏振角（PA）。

调制因子（μ_{100}）用于量化仪器对偏振的灵敏度:

$$\mu_{100}(\theta) = \frac{N_{\max}(\theta) - N_{\min}(\theta)}{N_{\max}(\theta) + N_{\min}(\theta)} = \frac{\sin^2\theta}{\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - \sin^2\theta} \tag{2}$$

其中，$N_{\max}$ 和$N_{\min}$ 分别为方位分布中的最大计数和最小计数。当$E \ll 511$ 千电子伏（电子静止质量能量）时，调制在 $\theta = 90^\circ$ （正交散射）处达到最大，此时 $\mu_{100} \approx 1$（对于100%偏振光，调制为100%）。

偏振仪灵敏度的一个衡量指标——99%置信度下的最小可探测偏振度（MDP）——定义为 [15]:

$$\mathrm{MDP}_{99\%} = \frac{4.29}{\mu_{100}\sqrt{R}}\sqrt{\frac{R+B}{T}} \tag{3}$$

其中，R 和B 分别为源计数率和本底计数率，T 为观测时间。

因此，高调制因子和高效探测对于实现较低的MDP值、探测低偏振信号至关重要。

*1.3. CUSP*偏振仪：仪器设计与工作原理

CUbesat太阳偏振仪（CUSP）是一项由意大利航天局（ASI）Alcor计划资助开发的6U-XL立方星任务，旨在利用双相康普顿偏振仪测量25–100 千电子伏能段太阳耀斑的线偏振。仪器的计算机辅助设计如图1 所示，图中还展示了其探测工作原理。仪器由一个包含64根塑料闪烁体条的散射体阵列（采用低Z材料以最大限度增强康普顿散射）组成，由四个16通道多阳极光电倍增管（MAPMT）读出；阵列周围环绕着一圈由32块铈掺杂GAGG（$Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$:Ce）闪烁晶体构成的吸收体（采用高Z材料以最大限度增强光电吸收），由雪崩光电二极管（APD）读出。滨松的R7600-03-M16-Y002 Ultra Bialkali多阳极光电倍增管和S16554-55S雪崩光电二极管分别由Weeroc的MAROC-3A和SKIROC-2A专用集成电路读出。散射体的基准材料为Eljen的PVT基EJ-204闪烁体，同时也在研究同一材料系列中的其他材料。

当入射的硬X射线光子在散射体中相互作用时，会发生康普顿散射，并沉积部分能量，随后被GAGG闪烁体吸收，如图1所示。方位散射角（ϕ）根据散射事件与吸收事件的相对位置重建

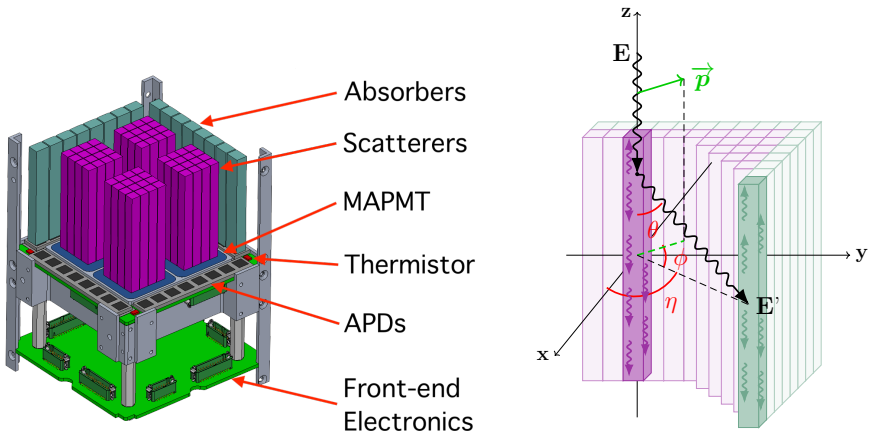

图1。**左：**CUSP硬X射线偏振仪敏感部件的部分计算机辅助设计。**右：**康普顿偏振仪工作原理示意图。入射光子在探测器的一个区段中发生康普顿散射，沉积部分能量，这些能量转化为闪烁光，并由闪烁体条末端的光传感器收集。随后，散射光子在仪器的另一个区段中被吸收，从而可以确定初级光子的方位散射方向。

。通过累积大量此类事件，可以构建调制曲线，并据此推导出偏振度（PD）和偏振角（PA）。钨准直器将偏振仪的视场缩小至 ±36°，并分别使用铝/钛滤片和铝/钛/钨滤片作为散射体和吸收体的滤片，以滤除软X射线和电子。

对基准太阳耀斑的模拟 [6] 表明，对于持续时间为240秒的X1.2级耀斑，CUSP的最小可探测偏振度将达到3.9%。CUSP的最小可探测偏振度要求为：在25–100千电子伏能量范围内，对观测时间为240秒的X1.2级太阳耀斑，最小可探测偏振度为5%。有关CUSP科学前景和任务概念的更多详情，请参阅 [16]。

为了验证 CUSP 偏振仪中散射体和吸收体的读出链路及能谱性能，我们组装了基于这两种探测器的单通道装置，并通过 ASIC 开发板进行读出。 [17], 中报告了使用该装置获得的初步结果；本文将详细介绍在实验室测得的两种探测链路的能谱性能。

2. 单通道能谱性能

2.1. 散射体

单通道散射体的测试装置采用一根塑料闪烁体条，外包数层 100 μ微米厚的聚四氟乙烯（PTFE；又称特氟龙）胶带，并使用定制机械夹具和光学耦合脂与一只滨松 R7600-03-M16-Y002 UBA 多阳极光电倍增管的一个通道耦合。组件置于避光箱内，多阳极光电倍增管通道由一块连接至计算机的 MAROC-3A 开发板读取；计算机配备了用于 ASIC 配置和数据采集的 C# 图形用户界面软件。图 2中展示了该装置的示意图，以及暗箱内探测器组件的照片。

将具有特征峰且能量范围符合研究需求的各种放射性同位素置于塑料闪烁体上方，采集能谱。MAROC-3A提供三种用于触发的不同成形器：单极性快速成形器（fsu）、双极性快速成形器（fsb1）和半双极性快速成形器（fsb2） [18]。单极性快速成形器可对微弱信号触发，电荷低至50 fC甚至更低；半双极性快速成形器则适用于非常强的信号。本文研究了“fsu”和“fsb1”，不过预计单极性快速成形器是

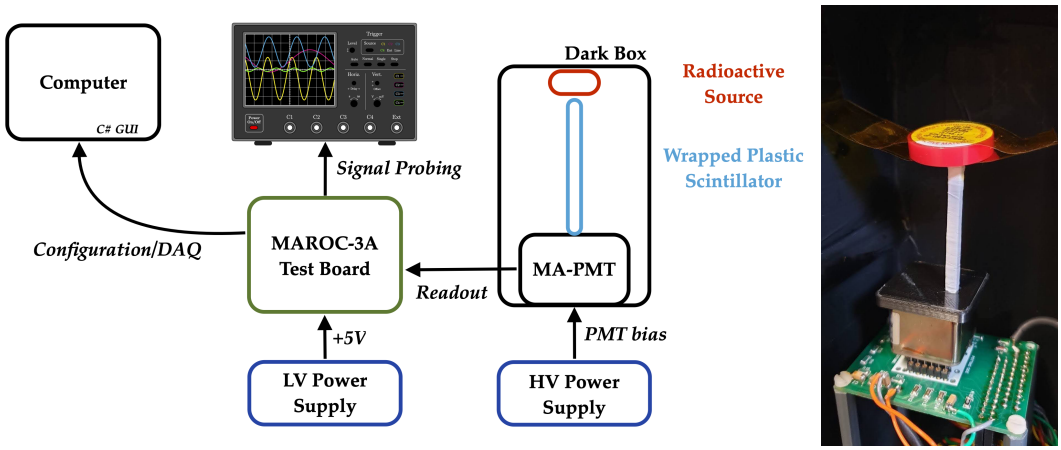

图 2。**左：**展示用于表征 CUSP散射器的实验室装置的示意图。MAROC-3A 开发板正在读取用于读出塑料散射器的 MA-PMT。**右：**用 PTFE胶带包裹并与一个 MA-PMT 通道耦合的塑料闪烁体条。将一个 $A^{109}Cd$ 放射源置于闪烁体上方，并将整个组件放入暗箱中。

最适用于散射体信号，因为塑料闪烁体的闪烁预计只能产生少量光学光。采用整形器峰值时间为50–142 ns的慢整形器读取电荷信号。使用“fsu”和“fsb1”快速整形器进行触发时测得的 ^{55}Fe、 ^{241}Am和 ^{109}Cd能谱如图3所示。两种情况下均可观察到 ^{55}Fe的5.95 keV谱线、^{241}Am在18.0 keV附近的谱线叠加（详见第2.2节），以及 ^{109}Cd在23.108 keV附近的谱线叠加。^{109}Cd在22.984 keV处有一条$K_{\alpha 2}$ 谱线，分支比为4.31%；在23.174 keV处有一条$K_{\alpha 1}$ 谱线，分支比为8.12%， [19],由此得到的加权能量为23.108 keV。

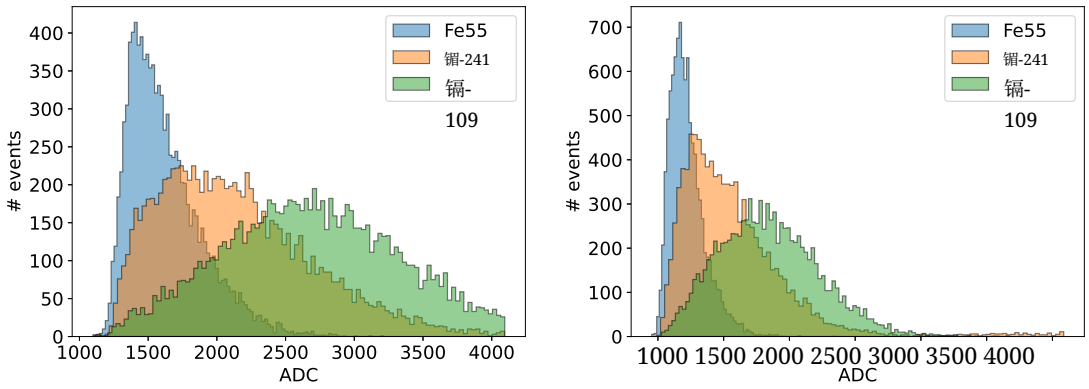

图 3。**左：**使用单极性快速成形器、0.2 的前置放大器增益和 840 V 的偏置电压，通过 EJ-204闪烁体条测得的 ^{55}Fe、 ^{109}Cd 和 ^{241}Am 能谱。**右：**在 820 V 偏置电压和 0.15 的前置放大器增益下，使用 MAROC-3A 的双极性快速成形器1测得的相同能谱。

由于 Eljen 的 EJ-204塑料闪烁体具有较高的闪烁效率（10400 光子/MeV），因此将其用作散射材料的基准。其他闪烁体，如 EJ-228 或 EJ-230，闪烁效率略低，但与多阳极光电倍增管的量子效率具有更好的光谱兼容性。因此，也在研究它们作为潜在散射材料的可行性。闪烁体与传感器之间的光谱兼容性，即闪烁体发射光谱与量子效率光谱之间的兼容性

[1] Eljen EJ-204 – https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212 – *Con* 于*2025*年*9*月*19*日咨询。

通过将闪烁体能谱与多阳极光电倍增管能谱相乘，计算传感器的能谱，从而得到图中所示的光子探测概率密度谱4。该图还显示了前文提到的三种闪烁体在^{241}Am 放射源下获得的能谱。尽管 EJ-228 和 EJ-230 的闪烁效率略低，但它们似乎能够实现更高效的光收集。

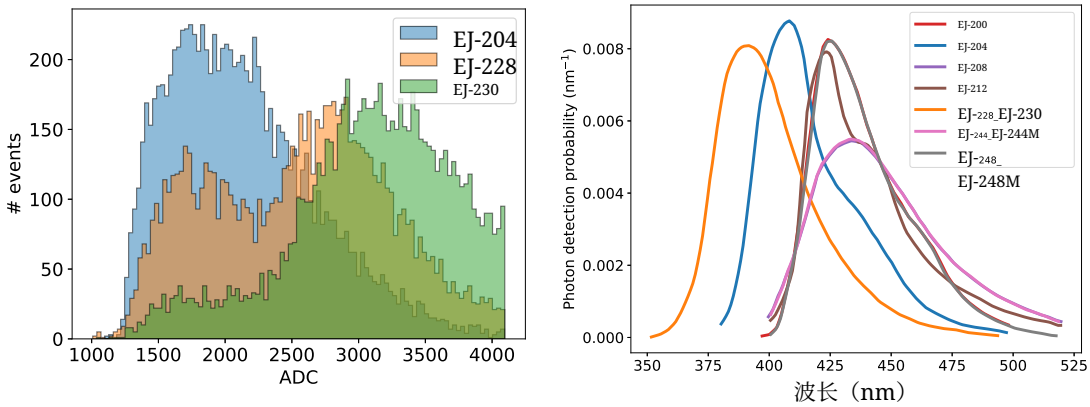

图4。左： ^{241}Am能谱，使用偏置电压为840 V的单极性快速成形器，测量三种塑料闪烁体得到。**右：** 各种PVT基闪烁体的闪烁能谱与滨松R7600-03-M16-Y002多阳极光电倍增管的量子效率进行卷积后的结果。

除了闪烁效率和与多阳极光电倍增管的光谱兼容性之外，选择塑料闪烁体材料时的另一个关键考量因素，是从闪烁体条中获得的光输出比例。该比例是指在经历界面损耗后，实际到达探测器入口的闪烁光所占的比例。这一比例会受到闪烁体形状的影响，但更重要的是取决于闪烁体抛光表面的粗糙度，而粗糙度又与材料的柔软程度直接相关 [20]。表1 给出了Eljen生产的各种塑料闪烁体的积分光谱兼容性，即每个闪烁光子对应的探测到的光子数（或光电子数），以及材料的闪烁效率和闪烁体的光产额，即在假设所有闪烁体的光输出比例均为0.3时，每单位沉积能量对应的探测到的光子数。该比例取决于闪烁体表面的粗糙度；粗糙度会改变闪烁体与传感器之间的光子损耗，从而导致闪烁效率较高的材料由于表面更粗糙而产生较低的光产额 [20]。因此，表1 中列出的许多塑料闪烁体材料将在未来进行研究，以确定哪种材料能够为我们的设计提供最佳的光收集效果。

影响仪器响应的另一个重要量是光学串扰，即实际事件发生所在通道的相邻通道中检测到的光量。图5展示了单根包裹塑料条与通道 1 耦合时采集的能谱，以及其他 15 个通道的能谱。部分与通道 1 相邻的通道，其能谱在暗噪声峰之上出现了额外信号。根据这些能谱，可以提取从通道 1 泄漏至相邻通道的光量比例，并计算出光学串扰图，如图5所示。除直接相邻和对角相邻的通道外，其他大多数通道的串扰均可忽略（在统计涨落范围内）；直接相邻通道的光学串扰为 8–11%，对角相邻通道则为 1–2%。

使用完整的塑料闪烁体阵列，可以得到更准确的串扰值；与单个塑料闪烁体耦合到一个多阳极光电倍增管通道相比，这种配置更具代表性。不过，光学串扰主要源于多阳极光电倍增管入口处厚 0.8 mm 的“紫外玻璃”，因此这里给出的串扰估算值是很好的近似值。所得数值也与 POLAR 的光学串扰相符；POLAR 是一种

闪烁体材料	光谱兼容性（光电子/光子）	闪烁效率（光子/1 MeV e⁻）	光产额（光电子/千电子伏）
EJ-200	0.35	10’000	1.036
EJ-204	0.37	10’400	1.142
EJ-208	0.33	9’200	0.913
EJ-212	0.34	10’000	1.019
EJ-228	0.38	10’200	1.152
EJ-230	0.38	9’700	1.096
EJ-244(M)	0.33	8’600	0.854
EJ-248(M)	0.34	9’200	0.950

表1. Eljen 的各种 PVT基闪烁体的积分光谱响应比较。光产额，即闪烁体中每单位沉积能量所检测到的光学光量，是在假设闪烁体光输出比例为 0.3 的情况下计算得出的，也就是说，只有 30% 的光学光被传感器收集。该数值会因金刚石抛光获得的表面粗糙度而异，而表面粗糙度又取决于材料本身 [20]。

采用类似多阳极光电倍增管的伽马射线暴偏振仪，其串扰范围为 10% 至 15% [20]。映射图垂直方向上的串扰不对称性可能是由于闪烁条相对于多阳极光电倍增管通道中心存在轻微错位；今后采用封装包裹式闪烁体阵列的专用机械结构时，这一问题很容易得到解决。光学串扰会影响仪器能量阈值，因为与X射线相互作用的通道所产生的部分光学光会泄漏到相邻通道，因此应尽可能降低串扰。此外，还应通过仿真结合实验室测量，全面表征光学串扰，以便将其引起的系统效应纳入能谱和偏振响应矩阵。

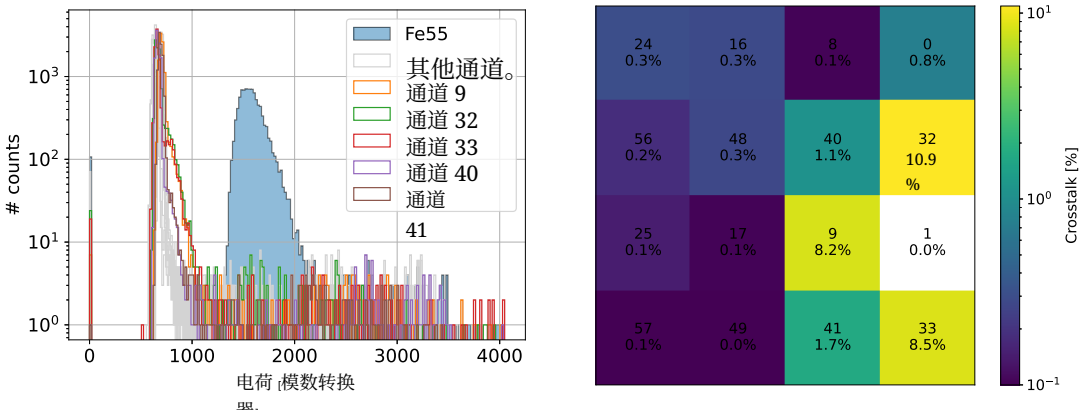

图5. 左图： 多阳极光电倍增管的 16 个通道测得的能谱，其中通道 1 与一个包裹式塑料闪烁体耦合，其上放置了 ^{55}Fe，而其他所有通道均由不透光夹具覆盖（见图2右图）。从通道 1 相邻通道的能谱中可以看到，光学串扰是通过多阳极光电倍增管的入射窗产生的。 **右图：** 串扰图显示，直接相邻通道的光学串扰最高可达 10.9%，而非相邻通道的串扰并不显著。每个方格均标出了通道 ID 和串扰值。

对于极向散射角为 90° 的康普顿散射事件（即康普顿能量沉积最大时），25 和 100 千电子伏入射光子通过康普顿散射分别沉积 1.17 和 16.4 千电子伏能量。因此，CUSP 的 25–100 千电子伏能量范围对应于塑料散射体中 1.17–16.4 千电子伏的康普顿能量沉积。散射体的动态范围可利用 ^{109}Cd 能谱估算，该能谱已在图 6 中进行了拟合。对于每个偏置电压，可将 23.108 千电子伏的全能峰位置（来自前文提到的两条谱线）换算为模数转换器读数

通过不同偏置电压之间的 PMT增益比 [21]，可以估算在所有三个高电压下能量（千电子伏）与电荷（模数转换器读数）的关系，如图 6 所示。23.108 千电子伏的峰位可用于确定基于开发板的吸收体采集链路所能达到的能量动态范围。

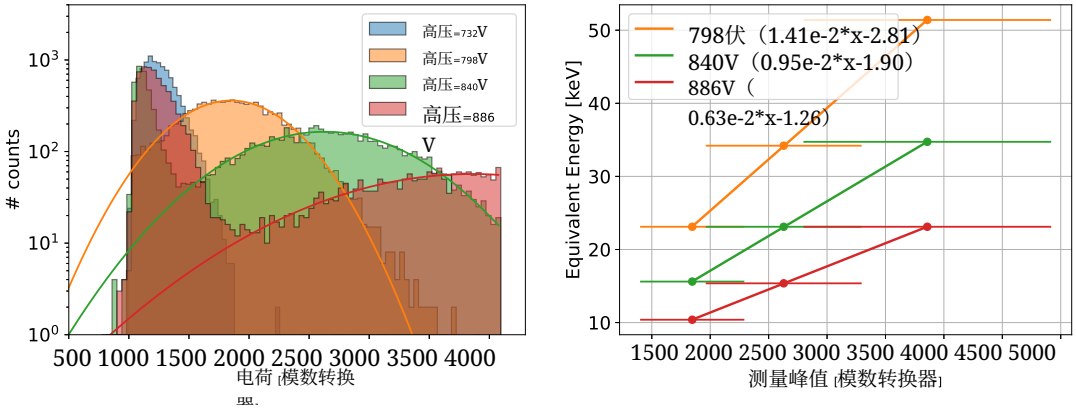

图6。左： ^{109}Cd 在不同光电倍增管偏置电压下采集的能谱。**右：**假定给定电压，并根据光电倍增管增益对高电压的依赖关系应用增益比，得到的 23.108 千电子伏 ^{109}Cd 特征（两条谱线加权，详见正文）的等效能量随全能峰位置的变化。

测得的电荷与阈值数字值之间的转换关系如图7 所示，同时还给出了噪声率随阈值变化的关系。需要注意的是，阈值刻度是反向的，即较高的数模转换器值对应较低的电压。根据不同偏置电压下测得的噪声率，开发板配置可用的最低阈值为 733 数模转换器，此时噪声率仍很容易控制（≪1 MHz），只需应用数百纳秒量级的康普顿符合时间窗。该阈值尚未经过优化，因为 Weeroc 设计 ASIC开发板的目的是进行功能测试，因此无法提供最佳性能。因而，此配置的噪声相当大；未来使用定制电子学，应能轻松实现低得多的阈值。733 数模转换器阈值对应 762 模数转换器的电荷，以下将其视为散射体的能量阈值。能量上限按 4096 模数转换器对应的能量计算。利用这一电荷范围以及 Cd 全能峰位置将电荷转换为能量，即可计算出吸收体的能量范围随光电倍增管偏置电压的变化关系，如表2所示。

在 886 V 的电压下，所达到的动态范围为 3.55–24.62 千电子伏；此处未考虑 ASIC饱和效应，这种效应可能会影响高能量处的线性度以及能量上限。虽然康普顿能量沉积的目标能量范围为 1.17–16.4 千电子伏，因此该配置未能达到目标，但采用针对降噪进行优化的定制电子学，将显著改善低能量下的性能，并有助于降低能量阈值。目前，作为 CUSP B阶段工作的一部分，正在开发一款采用专用电子学而非开发板的原型机，详见第2.3节。

2.2. 吸收体

为测试吸收体采集链路，我们开发了与散射体测试类似的配置。该配置以一根包裹着 PTFE胶带的 GAGG闪烁体条为基础，并与滨松的一只单通道S8664-55雪崩光电二极管 [22] 耦合。该传感器采用带引脚的陶瓷封装和环氧树脂，而飞行用S16554-55S雪崩光电二极管采用表面贴装封装和硅树脂。不过，传感器本身相同。探测器组件再次

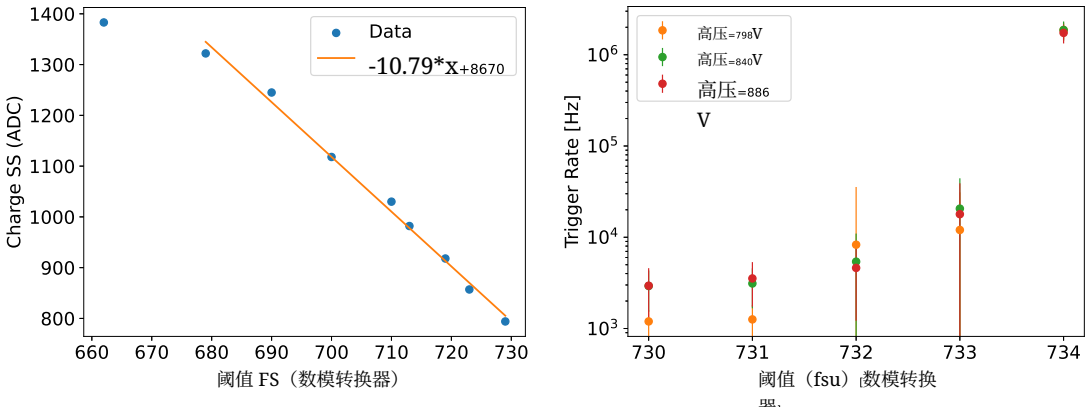

图7。左：数字阈值转换为数字化电荷的关系。需要注意的是，阈值刻度是反向的，即较低的数模转换器值对应较高的阈值。**右：**不同光电倍增管偏置电压下，单极性快速成形器的噪声触发率随阈值变化的关系。

光电倍增管偏置电压（V）	798	840	886
光电倍增管增益（10^6） [21]	1.99±0.05	2.95±0.05	4.43±0.05
使用参考高压=798V校准的能量（千电子伏）	23.108	34.20	51.40
使用参考高压=840V校准的能量（千电子伏）	15.61	23.108	34.73
使用参考高压=886V校准的能量（千电子伏）	10.39	15.37	23.108
测量峰值（模数转换器）	1846 ± 446	2629 ± 667	3858 ± 1060
能量阈值（762 模数转换器）（千电子伏）	7.91	5.34	3.55
能量上限（4’096 模数转换器）（千电子伏）	54.77	37.01	24.62

表2。 三种光电倍增管偏置电压下能量动态范围的确定。光电倍增管增益值通过拟合滨松数据手册中的增益与高电压关系图得出 [21]。

置于避光盒中，并使用一块通过 LabVIEW 软件控制的 SKIROC-2A 开发板采集信号。装置示意图和单通道探测器组件的照片如图 8所示。为限制系统功耗，仅使用 ASIC 的模拟部分；此外，由于数字部分的死时间较长，无法满足本应用对快速事件读出的要求 [23]。

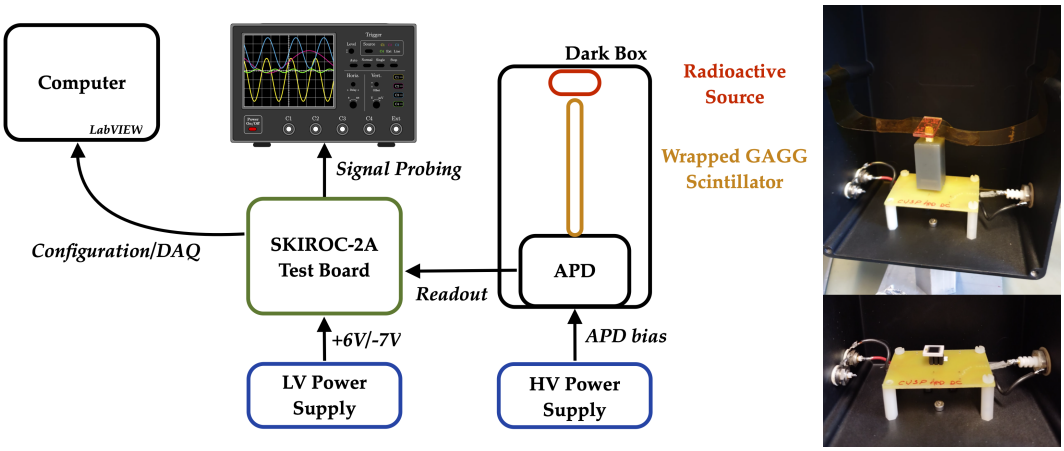

图 8。左：用于表征 CUSP吸收体的实验室装置示意图。SKIROC-2A 开发板读出与 GAGG吸收体耦合的雪崩光电二极管。**右：**安装在 RC滤波板上的雪崩光电二极管（底部），与包裹好的 GAGG闪烁体条耦合；其上放置了一个 ^{241}Am 放射源（顶部）。

首先，在不使用闪烁体的情况下进行测试，直接将一个 ^{55}Fe 放射源置于雪崩光电二极管上方。此时，铁源发出的 5.95 千电子伏能量被雪崩光电二极管中硅的耗尽层吸收，雪崩光电二极管直接充当 X射线探测器。通过扫描雪崩光电二极管的偏置电压，测得 5.95 千电子伏光电峰随雪崩光电二极管增益的变化，如图 9所示。根据这些能谱计算雪崩光电二极管本身的能量分辨率，结果也绘于图 9中。雪崩光电二极管的能量分辨率远优于 GAGG，因此可以认为，能量分辨率的主要影响因素来自闪烁体本身。

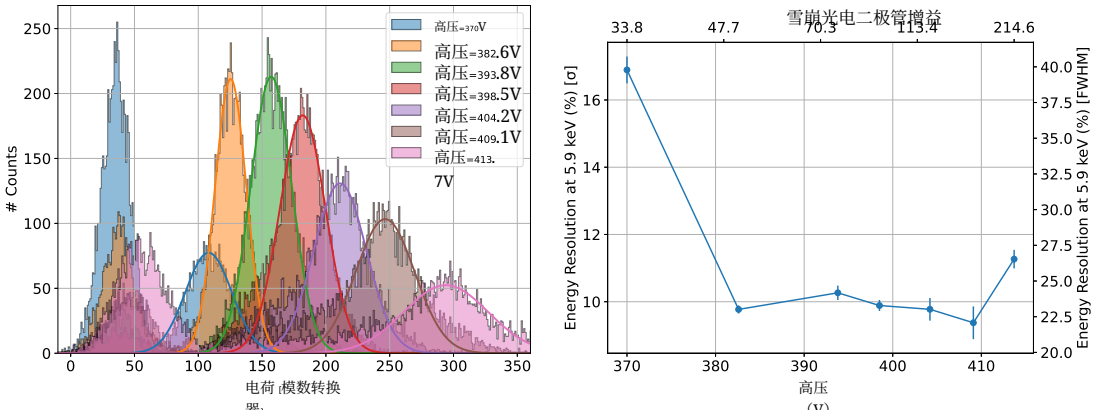

图 9. 左图：在不同偏置电压下使用雪崩光电二极管直接测得的 ^{55}Fe 能谱**右图：**雪崩光电二极管的能量分辨率与其偏置电压和增益的关系。370 V 处的数据点人为偏高，这是因为 ^{55}Fe 峰已达到阈值，因此发生了失真。

吸收体通道（雪崩光电二极管与包裹的GAGG闪烁体耦合）正在使用特征发射线位于 25-100千电子伏范围内的放射源进行测试。除了用于散射体能量刻度的 ^{109}Cd之外，我们还使用了 ^{241}Am、 ^{57}Co、 ^{155}Eu和 ^{129}I放射源。这5种放射源的吸收体能谱

如图10所示，APD偏置电压为382和410 V时的能谱如下。这些能谱已减去702的噪声基线。41 ± 0.14 模数转换器计数。根据APD数据手册 [22] 以及专门进行的APD表征测量 [24],我们知道，这两个电压下的雪崩光电二极管增益分别约为50和100。

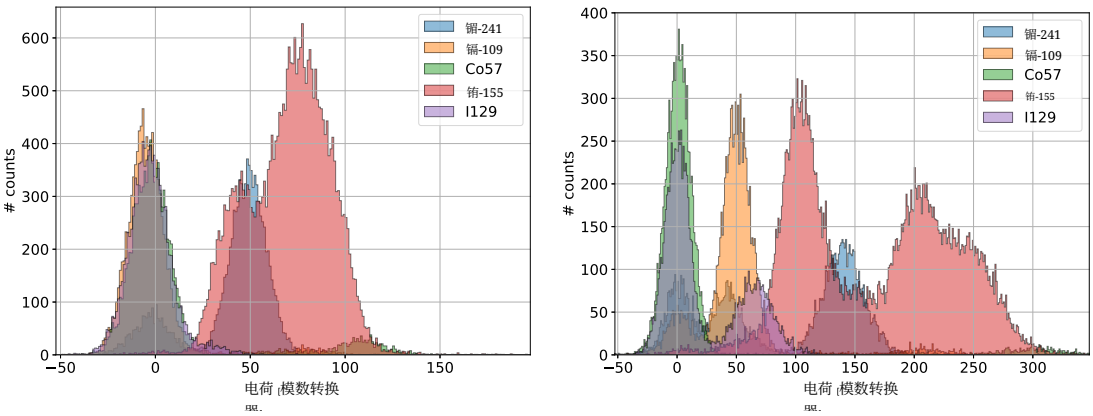

图10。**左：**偏置电压为 382 V 时测得的 ^{241}Am、 ^{109}Cd、 ^{57}Co、 ^{155}Eu 和 ^{129}I 能谱。**右：**偏置电压为 410 V 时测得的相同能谱。

图11 展示了偏置电压为 410 V 时的拟合能谱，此时增益足够高，可以区分所有峰。^{109}Cd 不仅显示了与塑料中相同的 23.108 千电子伏附近的谱线叠加，还显示了 88.0 千电子伏谱线。 ^{241}Am 源显示出谱线叠加（16.8 千电子伏 $L_{\beta 2}$ + 17.74 千电子伏 $L_{\beta 1}$ + 20.81 千电子伏 $L\gamma$），其加权能量平均值为 18 千电子伏。由于能量分辨率不足以区分这些谱线，因此它们表现为单条谱线。13.95 千电子伏的 Np L_α 低于阈值，因此不会对测得的 18 千电子伏峰产生贡献。除此之外，还观察到了来自 ^{241}Am 的 59.541 千电子伏谱线。^{155}Eu 的特征线位于 42.996、86.546 和 105.309 千电子伏；而 ^{129}I 在 29.621 千电子伏处有一条谱线， ^{57}Co 在 122.061 千电子伏处有一条谱线。这些特征能量的数值取自 [19,25,26]。

这些拟合得到的特征能量可用于将模数转换器中的数字化电荷转换为整个吸收体能量范围内以千电子伏为单位的沉积能量。能带范围内电荷到能量转换的线性度如图 12 所示，同时还展示了根据每个测得光电峰的半高全宽（FWHM）计算得出的能量分辨率随能量的变化。能量分辨率与能量的关系可用 1/E 的二阶多项式平方根很好地描述，且与文献报道的 GAGG 晶体在室温下的能量分辨率相当。

通过将一枚 ^{55}Fe 放射源置于 GAGG 晶体上方，研究了高数据率导致的堆积效应；对于该放射源，5.95 keV 谱线在闪烁体中的能量沉积低于阈值。然而，如图 13 所示，在采用 382 V 和 410 V 偏置电压采集的能谱中，由高活度 ^{55}Fe 放射源模拟的高数据率可能导致超过阈值的堆积事件。事实上，使用活度为 168 兆贝可的放射源时，在 382 V 电压下可以观察到一个触发峰，这是因为多个 5.95 keV 能量沉积在短于电子学积分时间的时间尺度内发生于 GAGG 中（电子学积分时间为 50–100 ns，晶体衰减时间为 ~90 ns），导致闪烁光累积形成超过阈值的信号，而系统将其视为单个事件。410 V 时这一效应不那么明显，因为较高的增益使系统能够触发单个 5.95 keV 光子，其事件率高于堆积事件率。由于明亮耀斑的预期最大事件率为数十 kHz，这种堆积效应不应影响仪器运行。不过，仍应使用下一代原型设计进一步研究，以确保它不会显著影响探测器对明亮太阳耀斑的能谱偏振响应。

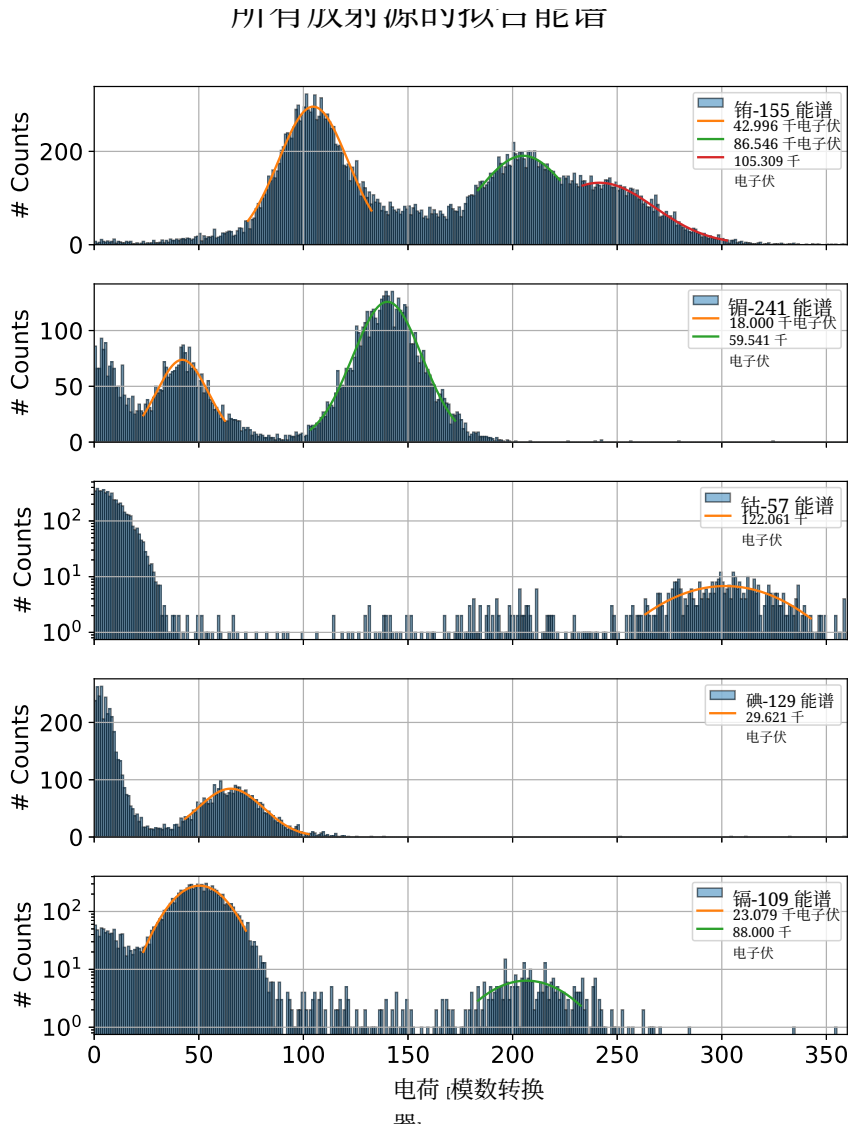

图11. 图中所示5种放射源的能谱 10 已针对特征线进行拟合，其能量已在正文中总结。

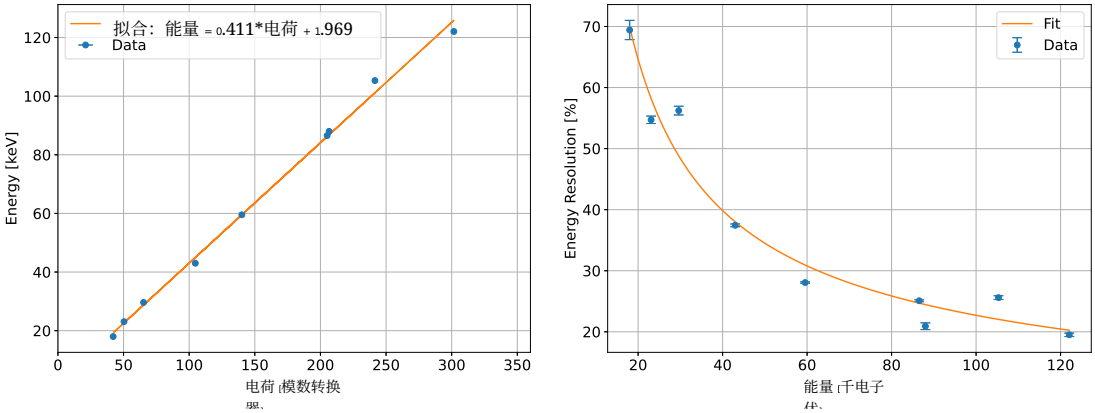

图12. 左图： 根据各种已知放射性同位素的理论发射特征得到的能量（千电子伏）与拟合线位置（模数转换器）之间的关系。**右图：** GAGG吸收体的能量分辨率（半高全宽）与能量之间的关系。

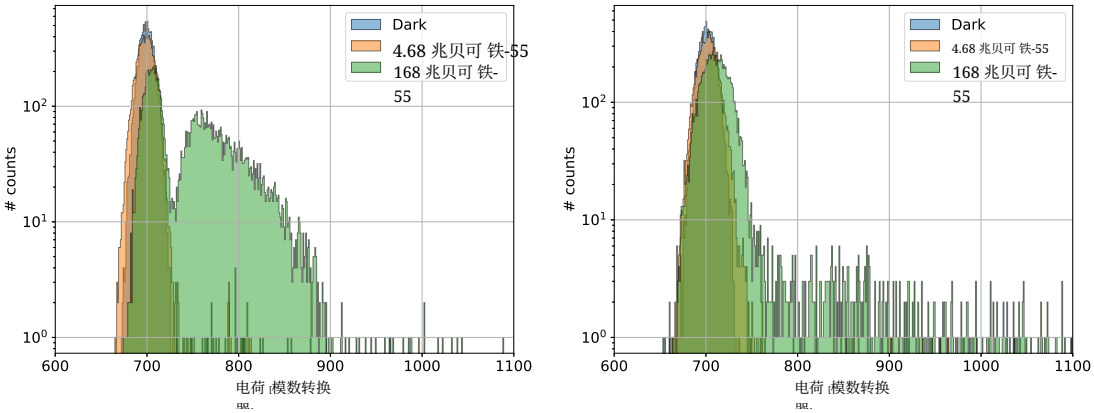

图13。左： ^{55}Fe放射源在两种不同放射性活度（4.68和168兆贝可）下的能谱，与偏置电压为382 V时的暗能谱进行比较。^{55}Fe的5.95 keV谱线低于阈值，但在事件率极高时，堆积效应会引发触发事件。**右：**偏置电压为410 V时的相同结果。由于增益较高，系统开始对单个5.95 keV光子触发，因此这一效应不太明显；较高增益主导了能谱。

2.3. 符合

康普顿偏振仪的工作原理要求对散射事件和吸收事件进行符合读取。具体而言，偏振事件能够确定方位散射方向，其构成是一个双重事件；按照标称事件拓扑[2]，，其中一次击中发生在塑料条中，另一次发生在GAGG闪烁体中。使用两个ASIC开发板的符合逻辑功能通过NIM模块进行信号转换，并在两条并行采集链路均收到事件时应用符合逻辑来测试。该设置的示意图显示了逻辑功能正常，见图14。BNC BL-2模拟脉冲发生器用于向两个评估板注入符合信号。两个板发出的触发信号经ORTEC 551和TENNELEC TC451模块转换为晶体管-晶体管逻辑信号。随后将这两个晶体管-晶体管逻辑信号输入CANBERRA 2144A符合模块，其输出作为保持信号馈入MAROC-3A板；当SKIROC-2A板上的吸收体通道触发时，该信号用于查找散射体信号。

目前，Weeroc公司正在为偏振仪原型开发一套定制前端电子学（FEE），该系统基于MAROC-3A 和 SKIROC-2A 专用集成电路，由 Xilinx 的 Artix®-7 FPGA 控制并负责读出15。如图所示，该原型的当前设计包括四排 GAGG 闪烁条，每排 8 根，与飞行设计相同；它们环绕着一个单独的多阳极光电倍增管（MAPMT），该光电倍增管耦合到一组 4×4 塑料闪烁体。得益于专用电子学，这一原型将具有更优的性能，并使我们能够更深入地表征仪器的能谱性能及其寄生偏振响应，换言之，也就是会扭曲偏振测量响应的仪器效应。目前，作为 CUSP 任务 B 阶段的一部分，该原型正在建造中。散射体和吸收体闪烁体块都将装配在环氧树脂机械结构中，结构内设有条状增强镜面反射膜（ESR），用于包覆闪烁体，其反射率高于特氟龙 [20]。

[2] 其他事件拓扑，例如塑料+塑料事件（即光子在一根塑料条中发生散射，随后被另一根塑料条吸收），可考虑用于增大仪器进行偏振测量时的有效面积。不过需要注意的是，与单相偏振仪的情况一样，双塑料事件的调制因子较低，因此对入射光子的偏振不那么敏感。未来阶段将根据测量和模拟结果评估这些事件的潜在用途。

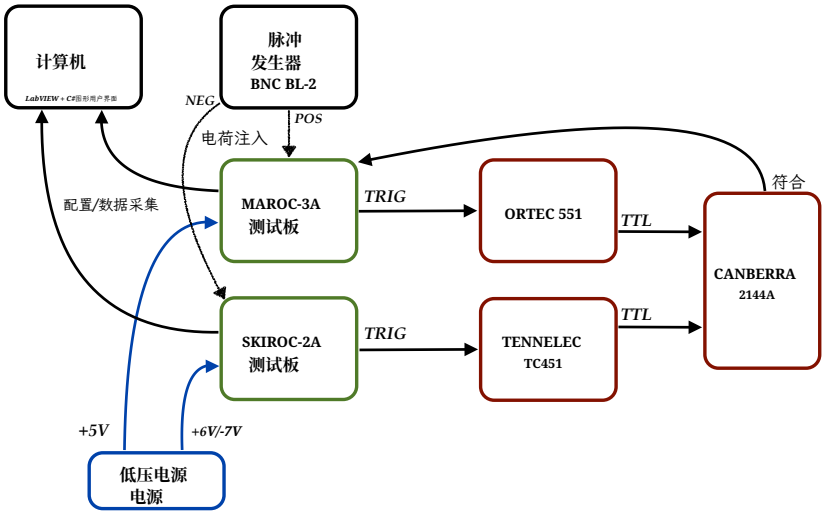

图14。 通过对两块 ASIC 开发板进行脉冲注入，测试康普顿符合逻辑所用装置的示意图。

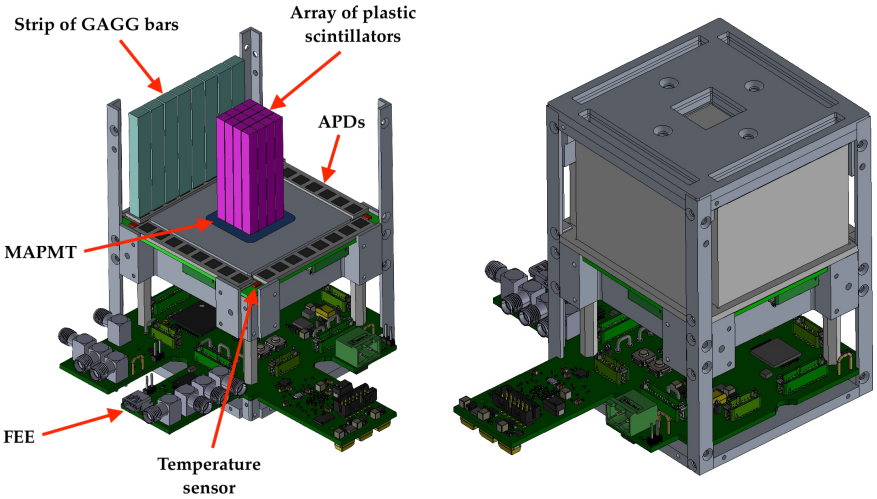

图15。**左：** 为 CUSP B阶段开发的偏振仪原型敏感部件的计算机辅助设计。**右：** 原型完整组件的计算机辅助设计。

3. 结论

立方星太阳偏振仪（CUSP）是一项由意大利国家天体物理研究所（罗马）（INAF-IAPS）牵头的合作项目，正在开发一颗6U-XL立方星。它将搭载一台灵敏度覆盖25–100千电子伏的双相康普顿偏振仪，旨在对太阳耀斑开展硬X射线偏振测量。尤其是，CUSP将为太阳耀斑中的磁场几何结构、粒子加速和能量释放机制提供前所未有的约束。凭借高灵敏度、高时间分辨率和专门设计的观测策略，CUSP将弥合理论模型与观测数据之间的差距，推动基础日球物理学和应用空间天气研究的发展。除太阳物理学外，CUSP还能够对进入其视场的明亮X射线源进行光谱偏振观测，将其科学影响拓展至天体物理学的其他领域。例如，它能够对伽马射线暴等明亮放射源进行有意义的偏振测量；偏振测量是未来深入了解这些放射源的关键技术之一 [27,28]。

基于使用 ASIC 开发板进行数据采集的单通道原型，已报告散射体和吸收体探测器的初步能谱性能结果。尽管这些单通道原型的设计远未优化，结果仍证明了两条采集链路均能正常工作，并展现出良好的能谱灵敏度；未来采用专用电子学后，低能区性能还有提升空间。事实上，使用并非针对性能测量进行优化的开发板，已达到 3.55 千电子伏的能量阈值。对于极向散射角为 90° 的 25 千电子伏光子，所需的能量阈值为 1.17 千电子伏；要达到这一要求，必须提高噪声抑制能力，而目前正在为 CUSP 开发的定制电子学应能合理实现这一目标。我们将在偏振仪原型上仔细表征探测器的能谱和偏振响应，以确保充分了解并控制所有系统效应。电子学速度足够快，能够采集最强耀斑的数据，因此预计不会发生堆积效应。我们将根据监测到的温度校正偏置电压，以保持增益稳定；光学串扰以及残余的阈值和增益不均匀性等其他系统误差来源，也将纳入偏振仪的响应中加以考虑，以防止出现虚假的偏振探测结果。

根据意大利航天局的审批情况，发射目前计划于2027年末或2028年初进行，CUSP任务现已进入原型研制阶段（B阶段）。虽然能谱性能只能通过单通道探测器进行研究，但目前正在建造一台具有代表性的飞行用康普顿偏振仪原型，以便通过实验室测量详细表征仪器的能谱偏振响应，并完善我们对太阳耀斑及其他相关明亮放射源偏振的灵敏度估算。

作者贡献： N.D.A.完成了实验室测量、数据分析并撰写了本文。A.K.协助进行了GAGG吸收体的实验室测量。S.F.和E.D.M.协助搭建实验室装置，并就实验室测量和数据分析提供指导。E.C.和P.S.就实验室测量和数据分析提供了建议。G.L.和A.R.协助搭建实验室装置。A.K.、S.F.、E.C.和R.C.协助审阅了本文。所有其他作者均为CUSP团队成员，分别负责有效载荷开发与仿真（意大利国家天体物理研究所）、卫星平台（IMT s.r.l.）、有效载荷电子设备（DEDA Connect s.r.l.）、任务分析（博洛尼亚大学）、地面段（“图西亚”大学）或项目管理（意大利航天局）。所有作者均已阅读并同意本文的出版版本。

经费支持： 本研究由意大利航天局（ASI）通过 Alcor计划资助，作为 ASI-INAF合同 n. 2023-2-R.0 项下立方星太阳偏振仪（CUSP）任务开发工作的一部分。

数据 Av 可用性声明：数据包含在该 rticle。

利益冲突：本文报告的放射性活度由意大利航天局资助，且该局也批准了本文 s
发表。

缩略语

本文使用了以下缩略语：

APD 雪崩光电二极管 ASI 意大利航天局 ASIC 专用集成电路
CAD 计算机辅助设计 CME 日冕物质抛射 CUSP 立方星太阳
偏振仪 ESR 增强型镜面反射器 FEE 前端电子学 GAGG 钆铝
镓石榴石 GUI 图形用户界面 HXR 硬X射线 MAPMT 多阳极
光电倍增管 MDP 最小可探测偏振度 PMT 光电倍增管
PTFE 聚四氟乙烯 PVT 聚乙烯基甲苯 SMD 表面贴装器件
UBA 超双碱

参考文献

1. Temmer, M. 日冕物质抛射的运动学性质。《Astronomische Nachrichten》2016, 337, 1010–1015. https://doi.org/10.1002/asna.201612425. 2. Nagasawa, S.; Kawate, T.; Narukage, N.; Takahashi, T.; Caspi, A.; Woods, T.N. M级太阳耀斑热辐射和非热辐射的时间演化研究。《The Astrophysical Journal》2022, 933, 173. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ ac7532. 3. Zharkova, V. V..; Kuznetsov, A. A..; Siversky, T. V.. 太阳耀斑中各向异性分布高能电子的诊断——I. 硬X射线韧致辐射。《A&A》2010, 512, A8. https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811486. 4. Jeffrey, Natasha L. S..; Saint-Hilaire, Pascal.; Kontar, Eduard P.. 通过未来的X射线偏振测量任务探测太阳耀斑加速电子分布。《A&A》2020, 642, A79. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038626. 5. Emslie, A.G.; Brown, J.C. 热源产生的太阳耀斑硬X射线韧致辐射的偏振和方向性。《Astrophysical Journal, Part 1》，第237卷，1980年5月1日，第1015-1023页。1980, 237, 1015–1023. 6. Saint-Hilaire, P.; Krucker, S.; Lin, R.P. 双足点太阳耀斑硬X射线光谱特征的统计调查。《Solar Physics》2008, 250, 53–73. https://doi.org/10.1007/s11207-008-9193-9. 7. Tindo, I.P.; Ivanov, V.D.; Mandel'stam, S.L.; Shuryghin, A.I. 关于X射线太阳耀斑辐射的偏振。《Solar Physics》1970, 14, 204–207. https://doi.org/10.1007/BF00240179. 8. Tindo, I.P.; Ivanov, V.D.; Mandel'stam, S.L.; Shuryghin, A.I. X射线太阳耀斑偏振的新测量结果。《Solar Physics》1972, 24, 429–433. https://doi.org/10.1007/BF00153385. 9. Tindo, I.; Ivanov, V.; Valní˘cek, B.; Livshits, M. 对'Intercosmos-4'卫星在三次X射线太阳耀斑期间所进行偏振测量的初步解释。《Solar Physics》1972, 27, 426–435. 10. Tramiel, L.J.; Novick, R.; Chanan, G. 关于产生太阳耀斑中5–20 keV X射线的电子各向同性的偏振证据。《Astrophysical Journal, Part 1》（ISSN 0004-637X），第280卷，1984年5月1日，第440-447页。1984, 280, 440–447. 11. Boggs, S.E.; Coburn, W.; Kalemci, E. 两次X级太阳耀斑的伽马射线偏振测量。《The Astrophysical Journal》2006, 638, 1129. https://doi.org/10.1086/498930. 12. Suarez-Garcia, E.; Hajdas, W.; Wigger, C.; Arzner, K.; Güdel, M.; Zehnder, A.; Grigis, P. 使用RHESSI测量的太阳耀斑X射线偏振。《Solar Physics》2006, 239, 149–172. 13. Zhitnik, I.A.; Logachev, Y.I.; Bogomolov, A.V.; Denisov, Y.I.; Kavanosyan, S.S.; Kuznetsov, S.N.; Morozov, O.V.; Myagkova, I.N.; Svertilov, S.I.; Ignat'ev, A.P.; 等. 由

CORONAS-F卫星上的SPR-N仪器测量的太阳耀斑硬X射线偏振、时间和光谱参数。《Solar System Research》2006, 40, 93–103. https://doi.org/10.1134/S0038094 60602002X. 14. Klein, O.; Nishina, Y. 狄拉克新相对论量子动力学所描述的辐射经自由电子散射。《Zeitschrift für Physik》1929, 52, 853–868. https://doi.org/10.1007/BF01366453. 15. Weisskopf, M.C.; Elsner, R.F.; O'Dell, S.L. 关于理解X射线偏振探测和测量的优值指标。《International Society for Optics and Photonics》，SPIE，2010，卷7732，第77320E页。https://doi.org/10.1117/12.857357. 16. Fabiani, S.; Monte, E.D.; Alimenti, A.; Campana, R.; Centrone, M.; Costa, E.; Angelis, N.D.; Cesare, G.D.; Cosimo, S.D.; Persio, G.D.; 等. 立方星太阳偏振仪（CUSP）：任务概述II。载于《天文学紫外、X射线和伽马射线空间仪器学XXIV》会议论文集；Siegmund, O.H.; Hoadley, K.，编。International Society for Optics and Photonics，SPIE，2025，卷13625，第136250F页， [arXiv:astro-ph.SR/2508.00661]. https://doi.org/10.1117/12.3064310. 17. Angelis, N.D.; Kumar, A.; Fabiani, S.; Monte, E.D.; Costa, E.; Lombardi, G.; Soffitta, P.; Alimenti, A.; Campana, R.; Centrone, M.; 等. CUbesat太阳偏振仪（CUSP）原型的开发与校准。载于《硬X射线、伽马射线和中子探测器物理学XXVII》会议论文集；Cherepy, N.J.; Fiederle, M.; James, R.B.，编。International Society for Optics and Photonics，SPIE，2025，卷13621，第 1362108, [arXiv:astro-ph.IM/2508.00642]. https://doi.org/10.1117/12.3064407. 18. MAROC-3A专用集成电路数据手册v1.1-2。19. 布鲁克海文国家实验室核数据库（NuDat）。https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/indx_dec.jsp – 查阅于2025年7月12日。20. De Angelis, N.; Cadoux, F.; Husi, C.; Kole, M.; Mianowski, S. 通过光学表征和模拟优化塑料闪烁体与SiPM探测器的光输出：POLAR-2案例研究。《Journal of Instrumentation》2025, 20, P02010. https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/02/P02010. 21. 滨松R7600U系列光电倍增管数据手册。22. 滨松Si雪崩光电二极管S8664系列数据手册。23. SKIROC-2A专用集成电路数据手册v0.2。24. Alimenti, A.; Cologgi, F.; Fabiani, S.; Torokhtii, K.; Silva, E.; Del Monte, E.; Baffo, I.; Bonomo, S.; Brienza, D.; Campana, R.; 等. 用于空间X射线康普顿偏振仪的雪崩光电二极管校准系统的设计与测试。《Sensors》2024, 24. https://doi.org/10.3390/s24248016. 25. Thompson, A.; Lindau, I.; Attwood, D.; Liu, Y.; Gullikson, E.; Pianetta, P.; Howells, M.; Robinson, A.; Kim, K.J.; Scofield, J.; 等.《X射线数据手册》。加州大学劳伦斯伯克利国家实验室X射线光学与先进光源中心，2009年10月。26. Abbene, L.; Iniewski, K.K.《用于X射线探测的高Z材料：材料属性与表征技术》；Springer Nature，2023。27. Bozzo, E.; Amati, L.; Baumgartner, W.; Chang, T.C.; Cordier, B.; De Angelis, N.; Doi, A.; Feroci, M.; Froning, C.; Gaskin, J.; 等. 太空伽马射线暴探测的未来展望。《Universe》 **2024**, *10*, [arXiv:astro-ph.IM/2404.11808]. https://doi.org/10.3390/universe10040187. 28. De Angelis, N. 利用未来空间仪器探讨伽马射线暴科学的若干主题。《Frontier Research in Astrophysics – IV (FRAPWS20)》，PoS **2025**, [arXiv:astro-ph.HE/2510.00707].

免责声明/出版商说明: 所有出版物中包含的声明、观点和数据仅代表各位作者和贡献者个人，并不代表 MDPI 和/或编辑的观点。对于因内容中提及的任何思想、方法、说明或产品而造成的人员或财产损害，MDPI 和/或编辑概不负责。