arXiv:2302.00339v2 [physics.ins-det] 1 Sep 2023

用于空间天气应用的氢化非晶硅探测器

Grimani Catia[1,2†], Fabi Michele[1,2†], Sabbatini Federico[1,2†], Villani Mattia[1,2†], Antognini Luca[3], Bashiri Aishah[4,5], Calcagnile Lucio[6,7], Caricato Anna Paola[6,7], Catalano Roberto[8], 奇尔`a Deborah[2], Cirrone Giuseppe Antonio Pablo[8], Croci Tommaso[9,10], Cuttone Giacomo[8], Dunand Sylvain[3], Frontini Luca[11], Ionica Maria[9], Kanxheri Keida[12,9], Large Matthew[4], Liberali Valentino[11], Martino Maurizio[6,7], Maruccio Giuseppe[6,7], Mazza Giovanni[13], Menichelli Mauro[9], Monteduro Anna Grazia[6,7], Morozzi Arianna[9], Moscatelli Francesco[9,14], Pallotta Stefania[15,2], Passeri Daniele[9,10], Pedio Maddalena[14,9], PetaseccaMarco[4], Petringa Giada[8], Peverini Francesca[9,12], Piccolo Lorenzo[13], Placidi Pisana[10,9], Quarta Gianluca[6,7], Rizzato Silvia[6,7], Stabile Alberto[11], Talamonti Cinzia[15,2], Thomet Jonathan[3], Tosti Luca[9], Wheadon Richard James[13], Wyrsch Nicolas[3], Zema Nicola[9,16] 和 Servoli Leonello[9†]

[1]DiSPeA，乌尔比诺卡洛·博大学，圣基亚拉路 27 号，61029 乌尔比诺，意大利。[2]意大利国家核物理研究所佛罗伦萨分部，B. 罗西路 1 号，50019 塞斯托·菲奥伦蒂诺，佛罗伦萨，意大利。[3]洛桑联邦理工学院（EPFL），光伏与薄膜电子实验室（PV-Lab），马拉迪埃尔路 71b 号，2000 纳沙泰尔，瑞士。[4]医学辐射物理中心，伍伦贡大学，Northfields Ave，伍伦贡，新南威尔士州 2522，澳大利亚。[5]纳季兰大学，阿卜杜勒阿齐兹国王路，纳季兰，沙特阿拉伯。[6]意大利国家核物理研究所莱切分部，阿尔内萨诺路

，73100 莱切，Italy.

[7]萨伦托大学“恩尼奥·德·乔治”数学与物理系，阿尔内萨诺路，73100 莱切，意大利。[8]意大利国家核物理研究所南方国家实验室，圣索菲亚路 62 号，95123 卡塔尼亚，意大利。[9]意大利国家核物理研究所（INFN）佩鲁贾分部，A. 帕斯科利路，无门牌号，06123 佩鲁贾，意大利。[10]佩鲁贾大学工程系，戈弗雷多·杜兰蒂路 93 号，06125 佩鲁贾，意大利。[11]意大利国家核物理研究所米兰分部，切洛里亚路 16 号，20133 米兰，意大利。[12]佩鲁贾大学物理与地质系，A. 帕斯科利路，无门牌号，06123 佩鲁贾，意大利。[13]意大利国家核物理研究所（INFN）都灵分部，彼得罗·朱里亚路 1 号，10125 都灵，意大利。[14]意大利国家研究委员会材料研究所，A. 帕斯科利路，无门牌号，06123 佩鲁贾，意大利。[15]马里奥·塞里奥实验与临床生物医学科学物理系，莫尔加尼大道 50 号，50135 佛罗伦萨，意大利。[16]意大利国家研究委员会物质结构研究所，骑士沟路 100 号，罗马，意大利。*通讯作者：Leonello Servoli，leonello.servoli@pg.infn.it；Catia Grimani，catia.grimani@uniurb.it。

†这些作者对本项工作作出了同等贡献。

摘要

本文介绍了一种氢化非晶硅（a-Si:H）探测器的特性，该探测器用于监测太空太阳耀斑及强至极强高能质子事件的演变。本文评估了将质子测量范围扩展至数百兆电子伏的重要性与可行性。氢化非晶硅具有出色的耐辐射性能，可应用于强辐射环境下的医疗用途、粒子束表征，以及我们在此提出的空间天气科学应用。本文还讨论了X射线、电子和质子的临界通量探测限。

关键词： 空间天气，太阳高能粒子事件，氢化非晶硅，太阳活动

1 引言

沿载人和无人任务轨道进行空间天气预报和高能粒子通量监测，对于保护宇航员健康、确保太空中的仪器性能以及限制对地球基础设施造成的损害至关重要 Christl 等人 (2009); Armano et al (2018, 2019); Grimani 等人 (2020); Grimani 等人 (2021); Cid et al (2014); Taioli et al (2023)。在 1 au 处，能量高于数十兆电子伏的银河宇宙射线（GCRs）通量约为 0.1 particles cm^{-2} s^{-1} Gaisser (1991)。观测发现，在过去三个太阳活动周期中，近地 70 MeV/n 以上的 GCR 积分通量变化了四倍 Grimani 等人 (2021)。在渐进型太阳高能粒子（SEP）事件期间，观测到的高能粒子总通量可能在数天内增加数个数量级。如果事件的太阳源区与观测点之间存在良好的磁连接，这种增长可能在不到半小时内发生 Gri- mani et al (2009b)。与行星际日冕物质抛射（ICMEs）及激波抵达地球相关的范艾伦辐射带剧烈扰动（后者也是 SEP 加速的起因之一），会增加生活在玻利维亚和阿根廷南大西洋异常区高海拔地区人群所受的辐射剂量（其他纬度地区的研究见 Vernetto et al (2022)）。尽管美国国家航空航天局和欧洲航天局的帕克太阳探测器（Fox et al, 2016）及太阳轨道飞行器（Garc´ıa Marirrodriga et al, 2021; M¨ uller et al, 2020）等任务目前正在太空中研究太阳如何形成并影响日球层，但人们对行星际日冕物质抛射及相关太阳高能粒子事件的物理机制，以及它们对宇航员和地球居民的影响，仍缺乏充分研究。航天机构和科学界致力于协调多航天器连续监测与近地环境观测，以了解行星际粒子散射和输运效应的作用，从而估算单次太阳高能粒子事件对观测点的影响。近期，帕克太阳探测器、太阳轨道飞行器、STEREO Kaiser et al (2008)、贝皮科伦坡 Benkhoff et al (2010)、GOES/SEISS Kress et al (2020) 和 CSES-01/HEPD Martucci 等人 (2023) 观测到了广泛传播的事件：2020年11月29日事件 Kollhoff et al (2021) 和 2021年10月28日事件 Papaioannou 等人 (2022)。由于航天器轨道各不相同，这些任务在不同能量区间获得了截然不同的观测结果。2020年11月29日事件期间，观测到粒子加速至 40 兆电子伏；而第25太阳活动周的首次地面增强（GLE）Martucci 等人 (2023) 则与2021年10月28日事件相关。因此，从对载人和无人任务的影响来看，2020年11月29日事件不太值得关注，而2021年10月28日事件则并非如此。利用低成本、轻重量、低功耗的纳米卫星探测器，或在深空长期执行任务的探测器开展多点测量，可为了解 SEP 动态、粒子加速以及可能的粒子俯仰角分布提供宝贵线索。我们指出，SEP 俯仰角定义为……之间的夹角

粒子速度和标称行星际磁场矢量方向。目前，搭载在旨在研究太阳物理学各个方面的太空任务上的大多数太阳粒子探测器，能够测量最高达 100–200 MeV 的粒子微分通量。深藏于航天器内部的太空任务仪器所受的典型物质屏蔽量约为 10–15 g cm^{-2} （大致相当于宇航服的阻止本领）。因此，能量低于 100 MeV/n 的银河宇宙射线和太阳高能粒子强子在航天器深层充电以及宇航员吸收剂量中所起的作用较小 Christl 等人 (2009)。为完整起见，我们回顾一下，多年来有些仪器覆盖了更大的能量范围。2006年至2016年间，PAMELA 实验的磁谱仪在地球上空的半极椭圆轨道上，收集了数次太阳高能粒子事件期间能量高于 70 MeV/n 的质子和氦微分通量数据 Bruno 等人 (2018)，尤其监测了 2006年12月13日和12月14日事件的发展过程 Adriani 等人 (2011)。此外，一些近地仪器也能测量太阳和银河系质子的微分通量，例如 CSES-01 上的 HEPD Bartocci 等人 (2020)、GOES 上的 SEISS，以及空间站上的 AMS-02 Aguilar 等人 (2018); Faldi 等人 (2023)，测量上限分别可达 250 MeV、500 MeV 和 450 MeV 以上 n^{-1}。SOHO 上的 EPHIN K¨uhl 等人 (2015, 2017) 也在 1995年任务发射后，于第一个拉格朗日点收集最高达 700 MeV 的质子数据。EPHIN 测得的质子微分通量在数百 MeV 处的不确定性远高于 30%。基本上，所有这些实验都在 1 au 处或附近收集数据。利用搭载在遥远航天器上的仪器，对不同能量区间内广泛分布的质子观测时间序列进行比较，可为粒子传播提供宝贵的定性信息。遗憾的是，归一化问题使我们无法从这些测量中推断出精确的微分通量。太阳轨道飞行器 EPD/HET 仪器 Rodr´ıguez-Pacheco 等人 (2020); Freiherr von Forstner, Johan L. 等人 (2021); Mason, G. M. 等人 (2021); Wimmer-Schweingruber 等人 (2021) 在 0.28 至 1 au 之间收集数据。尽管 HET 合作组已努力将观测能量范围扩展至 1 GeV，但任务发射三年多后，欧洲航天局太阳轨道飞行器档案[1] 公开的数据仍仅限于 100 MeV。HET 合作组友好提供的 2020年9月银河宇宙射线质子数据（私人通信）显示，其通量约为 AMS-02 实验在太阳调制条件非常相似的 2019年10月测得的 450 MeV 以上数据的两倍 Aguilar 等人 (2021)。若在不同航天器上搭载一种能够监测数百 MeV 以内质子通量且不确定性小于 30% 的仪器，将有助于改善当前的观测现状。

本文探讨了研制一种用于太阳活动和太阳高能粒子观测的新型仪器的可行性，其观测能量可达数百兆电子伏。具体而言，我们旨在

[1] https://soar.esac.esa.int/soar/

在 INFNHASPIDE（用于电离辐射的氢化非晶硅像素探测器）项目框架内开发一种探测器，其敏感部分以氢化非晶硅（a-Si:H）为基础。这些传感器件采用标准的等离子体增强化学气相沉积（PECVD）工艺制造，厚度从数百纳米到数十微米不等。基底可耐受高达 100 Mrad 的总电离剂量Srour 等人 (1999)，并可承受注量达 10^{16}1 MeV 中子当量 cm^{-2} Menichelli 等人 (2022) 的位移损伤，以及注量达 10^{16} 24 GeV 质子 cm^{-2} Wyrsch 等人 (2006) 的复合损伤。基于氢化非晶硅的仪器在极端太阳高能粒子事件期间可提升其电流响应，而硅探测器在暴露于极高剂量后性能会下降Sato 等人 (2020)。此外，器件制造过程中采用低温沉积的可能性，使我们能够使用聚酰亚胺等塑料材料作为基底。制成的器件具有机械柔性、极薄且轻质的特点，易于适配圆柱体等曲面构型，从而确保较大的立体角覆盖范围。

已制备出若干氢化非晶硅器件，并使其接受不同辐射源的照射：3 兆电子伏质子、6 兆电子伏电子、6 MV临床X射线束、实验室X射线管以及同步辐射。初步结果表明，电流与剂量率之间的探测器响应呈线性，误差范围为1–2%。此外，这些器件可在1.5–4.0 V/μm的电场下工作，也可完全不加偏置。后一特性对于空间应用而言十分重要，因为功耗是一项重要限制；对于医学物理中的剂量测定也同样重要。特别是，通过适当组合材料的有源层和无源层，这些器件可用于为任务配备低成本搭载模块，从多个观测点监测太阳高能粒子事件。

在第2 节中，我们介绍太阳高能粒子事件的特征及当前的观测情况。在第3 节中，介绍太阳高能粒子事件的发生与演变。在第4 节中，将氢化非晶硅作为探测材料进行介绍。在第5 节中，讨论使用氢化非晶硅传感器进行初步测试束实验的结果。在第6节中，基于蒙特卡罗模拟估算氢化非晶硅器件对光子、电子和质子的探测限。最后，在第7节中，阐述使用氢化非晶硅器件测量太阳高能粒子的策略。

2 太阳高能粒子

太阳粒子的短暂、短时（数小时）和渐进、长时（数天）增强分别与太阳耀斑和日冕物质抛射有关。脉冲事件是由太阳喷流中开放磁力线上的磁重联造成的 Reames (2021年)。人们认为，日冕物质抛射是由太阳磁场的突然扰动产生的。统计研究表明，日冕物质抛射的天空平面速度为 > 1000 千米/秒$^{-1}$ 且角宽度为 $> 120°$ 时，超过 90% 的情况下会将质子加速到 20 兆电子伏以上；不过，速度处于这一范围的日冕物质抛射仅占少数（百分之几）Lario 等 (2020年)；Alshehhi 和 Marpu (2021年)。

脉冲事件中加速粒子的最高能量约为 50 MeVMazur 等人 (1995)。纯粹的脉冲事件或渐进型事件十分罕见。耀斑和日冕物质抛射通常源自太阳的同一活动区。渐进型太阳高能粒子事件的演化特征是：对于与测量点磁连接良好的事件，粒子通量至少持续半小时上升，随后缓慢衰减数日。在最强烈的事件中，首次衰减阶段之后观测到的强烈增强，是日冕物质抛射和激波叠加所致。大多数太阳质子事件发生在太阳活动周期的第 5 至第 8 年Shea 和 Smart (2001)。需要指出的是，在大多数情况下，太阳高能粒子的能量低于 10 GeV，尽管文献中已有能量高达 50 GeV 甚至更高的粒子观测报告。特别是，在 1989年9月29日、1991年6月15日和1981年10月12日的地面增强事件中，测得的质子积分强度约为 $10^{-5}\ (\mathrm{cm}^2\ \mathrm{s}\ \mathrm{sr})^{-1}$，能量为 > 500 GeVKarpov 等人 (1997)。

行星际磁场的阿基米德螺旋结构，使太阳东经和西经区域产生的太阳高能粒子事件，其强度—时间廓线呈现不对称性。具体而言，与源自太阳东半球的事件相比，源自太阳西半球的事件更有可能在地球上被观测到。与渐变型事件相关的太阳高能粒子廓线特征，可用行星际日冕物质抛射所驱动的激波与探测航天器之间的直接磁连接来解释。此处及下文中，太阳高能粒子事件的起始时间是指：数十兆电子伏以上粒子的积分通量超过银河宇宙射线背景，且超出统计波动和短期变化的时刻。峰值则是指同一能量范围内积分通量达到最大值的时刻。起始时间对应于以最高能量观测到粒子的时段；人们认为，这一时刻对应于激波与通往航天器的磁力线相交的时刻，再加上粒子传播至航天器所需的时间。积分通量达到最大值的时刻，被认为表明航天器与激波中粒子加速效率较高的部分建立连接的时刻Dalla 等人(2003年）。当上游磁场几乎平行或垂直于激波法线时，分别会发生平行激波和垂直激波上的粒子加速。平行激波被认为是主要的太阳高能粒子加速器（参见Joyce 等人(2021年）及其中的参考文献）。例如，Zank 等人(2006年）讨论了垂直激波上的加速，并将其与平行激波上的加速进行了比较。在事件的第一阶段可以观测到粒子速度弥散，此时粒子按速度由快到慢的顺序到达（电子通量先于质子通量上升）；而在事件的最后阶段，则会观测到相同的时间廓线。在渐变型且磁连接良好的事件中，事件在太阳上被目视识别后的几十分钟内，就能探测到能量超过 1 吉电子伏特的粒子。随着事件演变，低能粒子的数量逐渐增加，而高能粒子则逐渐减弱。多年来，我们关于太阳现象的全部知识都来自

地球的视角在 ±7 之间变化。25° 日纬度。对尤利西斯号的观测进行比较 Wenzel 等人 (1992); Issautier 等人 (2008年), STEREO A 和 STEREO B Lario 等人 (2013), Helios 1 和 2 Lario 等人 (2006年); Qin 和 Wang (2015) 以及近期帕克太阳探测器、太阳轨道飞行器和贝皮科伦坡的观测，连同近地数据，为我们提供了宝贵线索，帮助了解太阳高能粒子传播如何随太阳纬度、经度以及与太阳的距离而变化。

由于太空中专用于探测能量高于 100-200 兆电子伏粒子的仪器数量有限，而测量从兆电子伏到尽可能高能量范围内的太阳高能粒子通量又十分重要，因此我们旨在研制一种坚固耐用的探测器，可搭载于深空长期任务或范艾伦辐射带等恶劣环境中的任务，用于监测强烈至极端的太阳高能粒子事件，并研究行星际日冕物质抛射穿越导致范艾伦辐射带放电的影响 Zhao 等人 (2019年); Adriani 等人 (2015).

3 太阳高能粒子事件的发生与预报

根据 Nymmik 模型，可以估算太阳高能粒子事件的平均发生率与注量及太阳活动的关系Nymmik (1999a,b)。必须根据粒子注量和粒子通量，研究行星际日冕物质抛射及太阳高能粒子事件对载人和无人航天任务以及地球基础设施的影响。事实上，具有相同注量的事件，其高能粒子通量的分布可能各不相同。

3.1 用于预报太阳高能粒子事件的太阳X射线和电子辐射

观测太阳发出的强软X射线和近相对论电子辐射，可用于预报太阳高能粒子事件Garc´ıa-Rigo 等 (2016年);N´u˜nez, Marlon (2018）。图 1 中报告了 RHESSI 实验测得的X射线能谱 Grigis,P.C.and Benz,A. O. (2004); Benz (2017）， 该测量是在2002年11月9日一次M级耀斑期间进行的。下文将以此观测作为评估我们所提出仪器性能的基准。

行星际电子由几个组成部分构成Grimani 等人(2009b)。稳态时，低于 30 MeV的电子大多在木星磁层中加速。图2 中的点划线和实线分别表示地球附近木星起源电子通量的最小值和最大值。木星电子通量的变化是由木星会合年期间地球与木星之间距离的变化造成的。高于30 MeV的电子主要来自银河系。30 MeV以上的虚线表示太阳活动极小期、全球太阳磁场负极性期间在地球附近观测到的银河系电子最大通量分量。在太阳高能粒子事件期间，相对论电子总是在

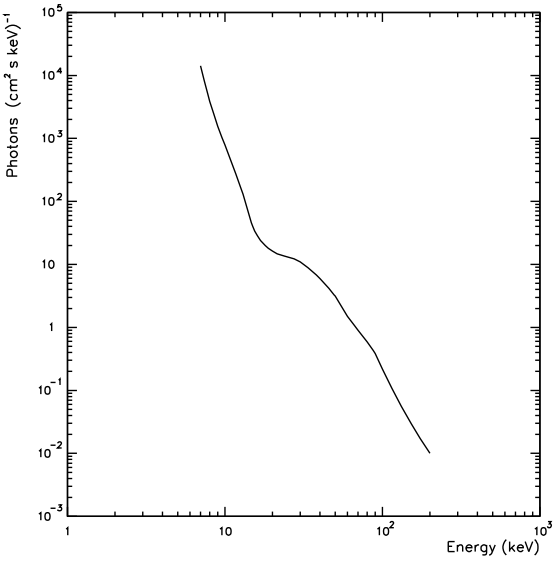


图 1 RHESSI卫星于2002年11月9日世界时13:14:16观测到的M级耀斑X射线能谱 Benz (2017)。

非相对论离子。根据 Posner Posner (2007年)（另见 Grimani 等人(2009a)），对于强度大于10质子（$\mathrm{cm}^2\ \mathrm{sr}\ \mathrm{s})^{-1}$ 、能量高于10 MeV的事件，尽管由于电子速度较高，两者出现的时间不同，但相对论性兆电子伏特电子和非相对论性50兆电子伏特质子通量呈现相似的时间剖面。Posner 还指出，如果质子通量没有在电子通量增加后的2–3小时内出现增长，那么之后就不会出现增长。图2中的顶部太阳电子能谱（虚线）具有两个不同的谱指数，代表在1973年9月7日发生的脉冲型太阳事件期间观测到的太阳起源电子通量。点线表示在1973年11月3日发生的渐变型事件期间观测到的电子能谱。在由激波加速过程引起的渐变型事件中，只观测到一个电子通量谱指数。虚线和点线是通过数据插值得到的（详情见Grimani 等人，2009b）。

3.2 太阳质子能谱

太阳粒子的观测能谱会随着事件的发展而变化，这是粒子在行星际介质中加速和传播的结果。尤其是，在大多数事件中，数十兆电子伏以上的太阳高能粒子能谱在初始阶段呈指数趋势，而在后期阶段呈幂律趋势（关于若干太阳高能粒子事件演变的详细研究，见Grimani 等人(2013）。

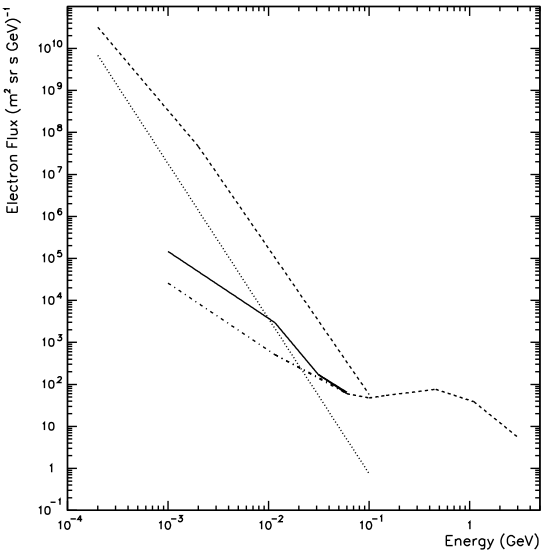


图2 地球附近太阳、行星际和银河系电子观测。顶部虚线表示在1973年11月7日的脉冲型太阳事件期间观测到的太阳起源电子通量。点线表示在1973年9月3日的渐变型事件期间观测到的电子通量。实线和点划线分别表示木星起源电子的最小和最大分量；而在约30兆电子伏以上，报告了全球太阳磁场负极性时期银河系起源电子的最大分量。此图改编自Grimani 等人(2009b)。

比较不同能量区间的质子时间序列，可以研究粒子到达情况与其能量的关系。对于这类研究，任何高于银河宇宙线背景的观测都能为粒子传播过程提供宝贵线索；对不同航天器收集的数据进行定性比较也很有意义。然而，为了通过蒙特卡罗模拟估算航天器深层充电和仪器性能，有必要持续监测粒子的高能微分通量。此外，为了获得可信的模拟结果，必须将高能粒子通量的不确定性控制在较低水平，因为这部分通量对深层充电和剂量率释放的影响最大。通常，由于粒子通量归一化方面的问题，比较不同仪器收集的观测数据并不成功。为此，为了估算我们提出的仪器可能观测到的光子和粒子数量，以下尽可能优先采用单台仪器测得的粒子通量。具体而言，我们将研究与以下太阳高能粒子事件演变相关的太阳质子能谱：1956年2月23日的事件Vashenyuk 等人 (2007)、2006年12月13日的事件Adriani 等人 (2016)，以及2021年10月28日的事件Papaioannou 等人 (2022)，并将其作为案例研究。事件开始时和峰值时的质子能谱参数化

1956年2月23日事件的数据见原文 Vashenyuk 等人(2007年），而对于2006年12月13日事件，经过缩减的 χ^2 数据是根据意大利航天局宇宙射线数据库中报告的数据计算得出的[2]。关于2021年10月28日的事件，值得指出的是，EPD/HET 仪器的数据和不确定性见太阳轨道器档案。在数据不确定性范围（100%）内，拟合结果非常吻合。根据 Grimani 等人(2013），通过考虑指数函数、幂律函数以及带指数截止的幂律函数，找到了对各事件不同阶段数据的最佳拟合。结果见表 1。

3.2.1 1956年2月23日太阳高能粒子事件

日期为1956年2月23日的太阳高能粒子事件与 GLE 5 相关，当中子监测器（NM）的计数增加约5000% Vashenyuk 等人(2007年）。

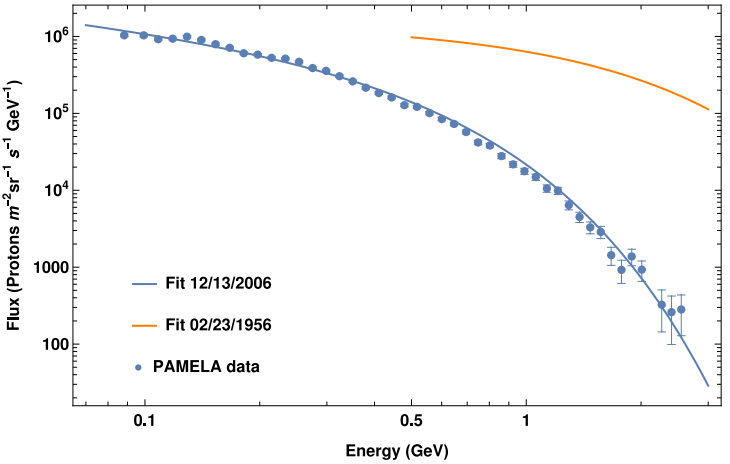


图 3 1956年2月23日和2006年12月13日太阳高能粒子事件发生初期的质子通量。曲线表示对数据的最佳拟合（见表 1）。

这是过去七十年间观测到的强度最高的事件，其特点是粒子加速能量超过 2 吉电子伏特。世界时 04:00 时，中子监测器观测到了事件的起始；世界时 06:00 时，观测到了衰减阶段。事件起始阶段和峰值阶段的拟合函数见图 3和 4 以及表1。

3.2.2 2006年12月13日太阳高能粒子事件

使用 PAMELA 低地球轨道卫星实验于2006年12月13日和12月14日开展的太阳高能粒子事件测量涵盖了

[2]https://tools.ssdc.asi.it/CosmicRays/

Table 1 Parameterizations of proton energy spectra during the evolution of SEP events of different intensities (see Figs. 3-5). E indicates the proton energy in GeV. The spectra are meant in protons $(m^2\ sr\ s\ GeV)^{-1}$. Reduced χ^2 (χ^2_{red}) and number of degrees of freedom (ndof) have been reported as an estimate of the goodness of the data fitting except for the February 23, 1956 event for which we have adopted the parameterization of the proton fluxes reported in the original paper and where no data points were shown Vashenyuk et al (2007). Measurement instruments are indicated.

			χ^2_{red}	ndof
February 23, 1956 (inferred at the top of the atmosphere from NM data)				
Onset 4:00 UT	$1.5 \times 10^6 \exp(-E/1.16)$		-	-
Peak 4:30 UT	$1.2 \times 10^7 E^{-5.39}$		-	-
December 13, 2006 (Pamela satellite experiment)				
Onset 3:18-3:49 UT	$4.47 \times 10^5 \exp(-E/0.33) E^{-0.51}$		1.26	41
Peak 4:33-4:59 UT	$1.54 \times 10^5 \exp(-E/0.29) E^{-1.54}$		1.72	37
October 28, 2021 (Solar Orbiter/HET instrument)				
Onset 15:35-16:35 UT	$1.32 \times 10^9 E^{2.81}$	$0.020 \leq E \leq 0.042$	0.0050	7
	$2.12 \times 10^6 E^{0.78}$	$0.042 \leq E \leq 0.080$	0.0084	6
	$7.50 \times 10^6 \exp(-E/0.135) E^{1.06}$	$0.080 \leq E \leq 0.90$	-	-
	$5.73 \times 10^3 E^{-4.58}$	$0.90 \leq E \leq 2.41$	1.12	7
Peak (*NM*) 17:30-18:20 UT	$9.66 \times 10^6 E^{-0.0875}$	$0.020 \leq E \leq 0.040$	0.0012	7
	$6.45 \times 10^5 E^{-0.93}$	$0.040 \leq E \leq 0.073$	0.0044	5
	$1.03 \times 10^6 \exp\left(-\frac{E}{0.157}\right) E^{-0.94}$	$0.073 \leq E \leq 0.480$	-	-
	$2.55 \times 10^3 E^{-4.72}$	$0.480 \leq E \leq 2.250$	2.0344	12
Peak (*space*) 20:35-22:35 UT	$3.11 \times 10^5 E^{-1.30}$	$0.020 \leq E \leq 0.036$	0.0093	5
	$4.18 \times 10^4 E^{-1.90}$	$0.036 \leq E \leq 0.072$	0.0021	6
	$1.58 \times 10^4 E^{-2.27}$	$0.072 \leq E \leq 0.580$	0.0007	1

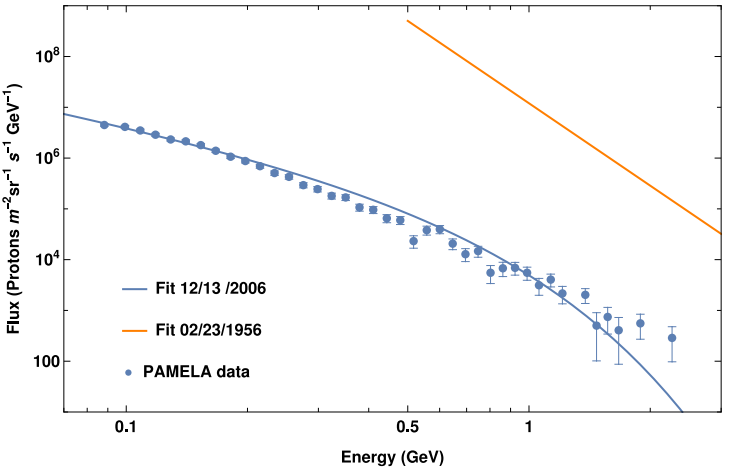


图 4 与图3 相同，展示了太阳高能粒子事件峰值时的情况。

能量范围为 70 兆电子伏至 2 吉电子伏特Adriani 等人(2011) 的测量精度前所未有。在图 3 和 4 中，我们报告了与 2006 年 12 月 13 日发生的两次事件中较强的一次相关的起始质子通量和峰值质子通量（浅蓝色圆点）。此次事件期间测得的质子通量拟合函数也列于表 1中。约化 χ^2 (χ^2_{red}) 以及每个函数的自由度数量（ndof）也列于同一张表中。2006年12月14日发生的事件非常微弱，因此本文不予讨论。

3.2.3 2021年10月28日太阳高能粒子事件

2021年10月28日，太阳高能粒子事件经大气层中的宇宙射线核输运后，由距离太阳不同的多艘航天器、近地空间任务以及中子监测器探测到Papaioannou 等人(2022年)。只有当初级宇宙射线的能量大于 500 兆电子伏时，大气层才无法阻挡次级粒子。能量高于 2 吉电子伏特的加速质子与此次事件相关。图 5 展示了此次事件演变过程中测得的质子通量。100 兆电子伏以下的数据由搭载在太阳轨道飞行器上的 EPD/HET粒子探测器收集，该航天器几乎与地球处于同一直线上。我们将事件起始时的 HET 数据（小圆点）、地球上观测到峰值时的数据（小三角形）以及太空中观测到峰值时的数据（小方块），与根据事件起始时的中子监测器观测（大圆点）和地球大气层顶部峰值时的中子监测器观测（大三角形）估算的数据进行了比较。太空中观测到峰值时（小方块）并未观测到地面增强事件。换言之，太空中观测到的事件峰值对应的粒子能量小于 500 兆电子伏。这些观测表明，必须在太空中监测能量至少达到数百兆电子伏的太阳高能粒子事件，因为这一能量范围对空间天气最为重要。我们采用分段直线对数据进行了最佳拟合，因为单一函数无法很好地再现观测结果的趋势。质子的参数化

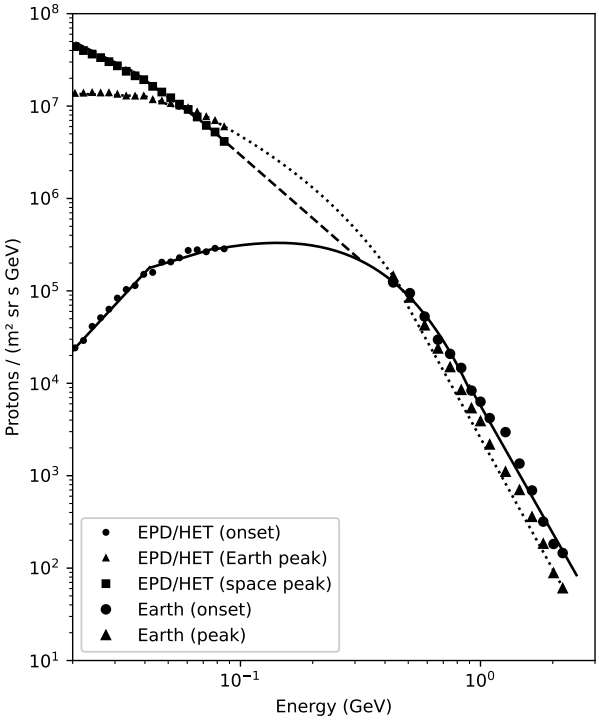


图5 2021年10月28日观测到的太阳高能质子通量。小实心圆点表示事件开始时由 EPD/HET实验在太空中采集的观测数据。根据高于 450 MeV 的中子监测器观测，在大气层顶部推算出的大圆点表示事件同一阶段的地球观测数据。小三角形是地球观测峰值时（大三角形）的太空 HET测量。实心方块对应太空 HET测量的峰值。穿过数据点的线表示事件各阶段不同能量区间的最佳拟合直线（见表 1）。

能谱列于表 1 中，并给出了约化 χ^2 以及自由度数量。我们使用了合理的插值函数来填补缺失数据的空白。

在图 6 中，我们报告了事件开始时的2021年10月28日太阳高能粒子数据。HET 数据分别在 50 兆电子伏至 100 兆电子伏（蓝线）、50 兆电子伏至 400 MeV（红线）以及 50MeV 至 600 MeV（黑线）的范围内进行了参数化。对于 100 MeV 以上的部分，采用了根据高能中子监测器测量并外推至大气层顶部所得的插值数据（浅蓝线）作为输入数据。可以看出，在后一种情况下，当太阳活动极小期银河宇宙射线超过太阳起源粒子时，直至 1 GeV 的范围内与数据吻合得相当好。

在图7 中，我们报告了 HET 在此次事件高峰期间于太空中（浅蓝色小点）收集的观测，以及地球上由中子监测器观测并外推至大气层顶的观测（浅蓝色大点）

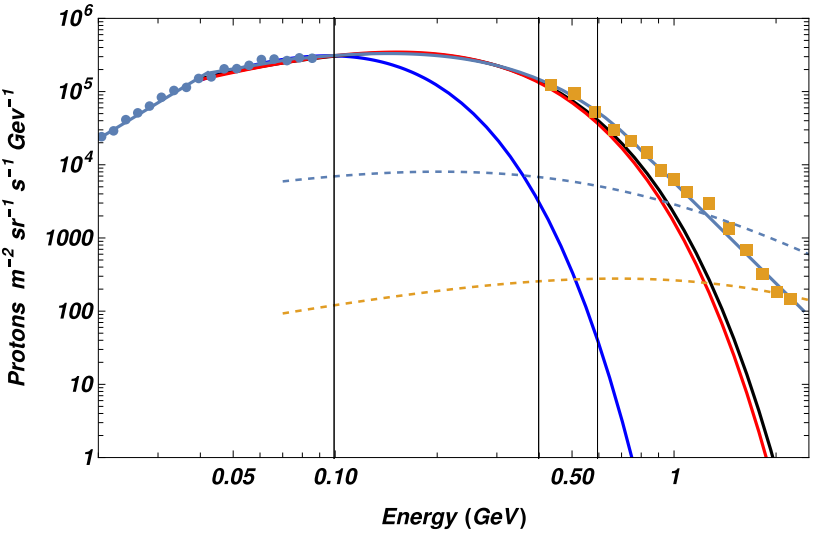


图6 2021年10月28日事件开始时的 EPD/HET 数据（浅蓝色实心圆点）。事件同一阶段根据中子监测器观测推断的数据（橙色实心方块）。通过用折线穿过数据点，对总体通量进行了参数化（浅蓝色曲线）。粗蓝线表示对 50 MeV 以上、100 MeV 以下的 EPD/HET 数据进行的最佳拟合。若将 50 MeV 至 400 或 600 MeV 的数据纳入拟合，则得到红色和黑色曲线。虚线表示太阳活动极小期（浅蓝色）和太阳活动极大期（黄色）的银河宇宙线背景。

。太空中的质子峰值参数化至 600 MeV。同样在这种情况下，将最高至 400 或 600 MeV 的数据纳入参数化后，结果更加吻合（图7）。总之，为了在吉电子伏能区可靠估算太阳高能粒子通量，需要对 50 MeV 至 400–600 MeV 范围内的微分通量进行低不确定度测量。这也说明并促使我们竭尽全力设计和制造一种新型仪器，以测量太空中最高达数百兆电子伏的太阳高能粒子通量。

4 氢化非晶硅作为探测材料

多年来，氢化非晶硅一直用于制造光电子学相关器件，例如太阳能电池、薄膜晶体管及其他应用 Street（2000）。人们提出了多种制备器件级氢化非晶硅的方法，但由于等离子体增强化学气相沉积法能够稳定地在大面积衬底上制备均匀且高质量的材料，因此它是应用最广泛的方法 Matsuda（2017）。非晶硅因其固有的无序结构而具有很强的抗电离辐射损伤能力，但要获得探测器级器件，必须减少材料内部悬挂键的数量。为此，需要在材料中引入氢，使悬挂键钝化，从而减少缺陷和复合中心。钝化大多数悬挂键所需的氢含量最低约为原子百分比 1%。氢含量的增加

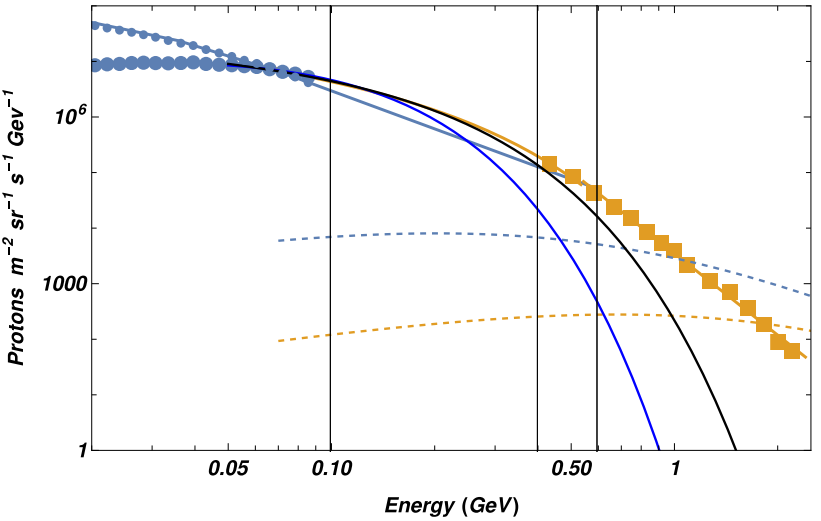


图 7 2021年10月28日太阳高能粒子事件期间，在太空中观测到事件峰值时收集的 EPD/HET 数据（浅蓝色小点），以及地球上观测到事件峰值时根据中子监测器数据外推至大气层顶部所得的数据（浅蓝色大点和橙色方块）。浅蓝色曲线表示对太空中事件峰值对应数据的最佳拟合。若没有其他测量数据，该拟合无法合理地延伸至 600 MeV 以上。粗蓝线表示在太空中收集的 EPD/HET 数据（大点）的参数化。高于 50 MeV 且低于 400 MeV 或 600 MeV 的数据可得到相同的参数化（黑线）。这些参数化旨在与橙色曲线进行比较；橙色曲线表示对太空观测数据以及地球上观测到事件峰值期间使用中子监测器收集的数据的最佳拟合。虚线曲线的含义与图 6 相同。

会增大带隙，从而降低器件的背景电流，而 ∼14% 是获得探测器级器件的典型数值 Wyrschand Ballif (2016)。带隙也取决于沉积条件，例如温度。典型的沉积温度应介于 100 ℃（以减少材料中的缺陷数量）和 350 ℃（以避免氢解吸）之间，通常约为 200 ℃Matsuda (2017)。这一工艺温度范围使得能够在各种衬底上沉积薄层或制造器件，其中包括塑料材料薄层，例如聚酰亚胺 S¨oderstr¨om et al (2008);Menichelli 等人(2023)。在柔性薄衬底上沉积小面积器件的能力，为多个领域的应用带来了可能性，包括：安装在带电粒子加速器真空/空气分界面处的仪表法兰，以及用于测定放射治疗临床射束实际给予患者剂量的透射探测器；这类器件厚度极薄、可弯曲或弯折，几乎可制成任何适用的几何形状，也适用于空间应用。

在 HASPIDE项目的研究计划中，已制造并测试了若干未经优化的器件，测试时既使用了电离辐射束，也未使用电离辐射束。图 8 展示了 4 个面积为 4x4 mm^2 、厚度为 8 的二极管。2 μm，这些二极管是在同一制造批次中沉积的。接触层分为两种类型

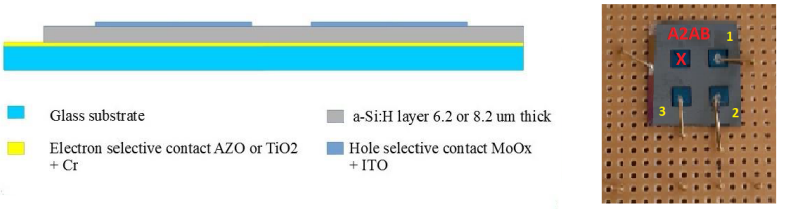


图8 原型器件 A2AB：在玻璃基底上设置带有电荷选择性接触的 4 个二极管；4x4 mm^2 面积，8.2 μm 厚度；（左）单个二极管方案；（右）安装在用于测试的电子电路板上的器件照片。标有 X 的二极管无法工作。

：标准 p-i-n 二极管，其两个接触层分别为 p 型掺杂（含硼原子）和 n 型掺杂（含磷原子），中间由氢化非晶硅本征层隔开；以及采用电荷选择性接触（CSC）的二极管，其两个接触层使用金属氧化物：空穴接触使用 MoOx，电子接触使用 TiO2 或掺铝氧化锌（AZO），以获得不同的电子和空穴迁移率 Menichelli 等人 (2022年）。器件由精密源表施加偏置并读取，以记录电流，测量频率为∼ 1Hz。

对于预期的临床和空间应用，器件能够在 ∼ 0 V 偏置下工作是一项重要性能。两种电极方案原则上都具备这一特性，但仍需进行深入研究。

5 使用光子束、电子束和质子束对氢化非晶硅器件进行测试

多种器件，包括 p-i-n 二极管和 CSC，已在多个设施中针对噪声、漏电流以及电离辐射束进行了表征：X 射线光子（管电压最高达 50 kV）、6 MV 临床光子束、6 MeV 电子束和 3 MeV 质子束 Menichelli 等人 （2022年、2021年）。[3]

测量被测器件电流信号的流程如下：(i) 在未进行辐照的情况下启动数据采集，以测量漏电流；(ii) 对传感器进行辐照（例如，使用X射线光子）；最后，(iii) 在辐照后再次测量背景噪声。

电流测量的不确定度（包括封装）根据束流关闭时（图中红色峰值9）和开启时（图中绿色峰值9）的测量值分布确定。被测器件的测量值分布显示，其背景电流约为 20 pA，噪声为 10 pA，其中包括未优化实验装置的影响；而在存在 X射线束时，电流升至数百 pA，噪声仅略有增加（12 pA），其中包括传感器响应不确定度

[3]用于束流测试的设施：有关低于 50 千电子伏的光子，请参见 Menichelli 等人 (2023年）。有关兆电子伏范围内的光子：澳大利亚核科学与技术组织墨尔本分部，https://www.ansto.gov.au/facilities/australian-synchrotron。有关质子：布林迪西 CEDAD，http://www.cedad.unisalento.it/。有关电子：https://www.sbsc.unifi.it/。

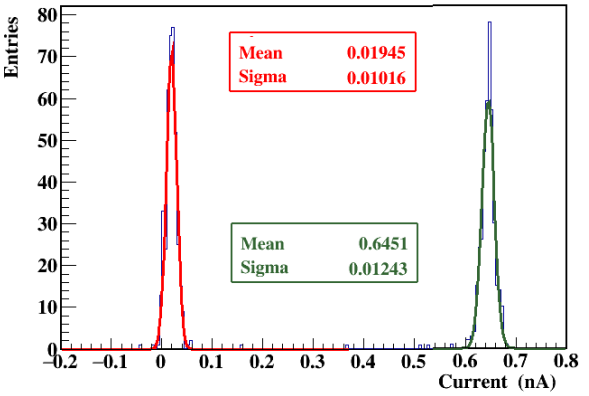


Fig. 9 背景电流（红色峰）和信号（绿色峰）的噪声测定) duri辐照期间。噪声以高斯峰的宽度表示。

以及束流稳定性。器件受到辐射照射所产生的电流信号，是通过从稳定后进行的测量值中减去束流开启前测得的背景电流而获得的。

同一生产批次所生产器件的均匀性取决于沉积工艺， ∼ 20图中的二极管最差为 % 8，而近期沉积在 Kapton 上的二极管批次均匀性也达到了 5%。整个偏置范围内的方差小于 20%，确保所有器件在交叉校准后均可使用同一读出链 Menichelli 等人(2023年);Large 等人 (2023年)。

在本研究中，通过确定测量不确定度来评估信号的探测限十分重要。评估时，我们考察了受测量装置和测量仪器影响的背景电流波动。在测试活动期间，我们发现电流噪声介于 2 至 10 pA 之间，其大小主要取决于测量装置，而非传感器特性。下文将采用 5 pA 作为整个测试活动的合理平均值，同时也作为近期优化结果的最坏情况（见表 2）。

表 2 暴露于不同类型电离辐射的器件特性。V2 和 V4 表示安装在同一插座上的两个不同焊盘。

传感器名称	焊盘（V2，V4）	A2AB1	A3AC2	UOW429
接触类型	p-i-n	CSC	CSC	p-i-n
面积 [mm^2]	0.5x0.5	4.0x4.0	4.0x4.0	5.0x5.0
厚度 [μm]	10.0	6.2	8.2	10.0
噪声水平 [pA]	2.0	8.0	5.0	2.5

如果我们将典型器件的探测限定义为 5σ，则意味着最小电流信号为 25 pA。

本研究中针对空间天气应用的氢化非晶硅，其基本特性包括器件噪声、电离辐射通量响应的线性度，以及器件灵敏度，即与特定沉积能量相对应的电流信号。我们使用多种具有不同接触类型（CSC 或 p-i-n）的器件（像素、条带、焊盘）测量了线性度（见表 2），并采用了多种束流类型。例如，图 10 展示了剂量率（使用经认证的剂量计测量）与信号之间的关系；所用 CSC 器件面积为 4x4 mm^2，厚度为 8。2 μm，在两种偏置电压（0 V，蓝色；20 V，红色）下接受 X 射线束辐照。另见 Menichelli 等人(2022年）。这两种偏置电压代表了薄器件的合理范围。

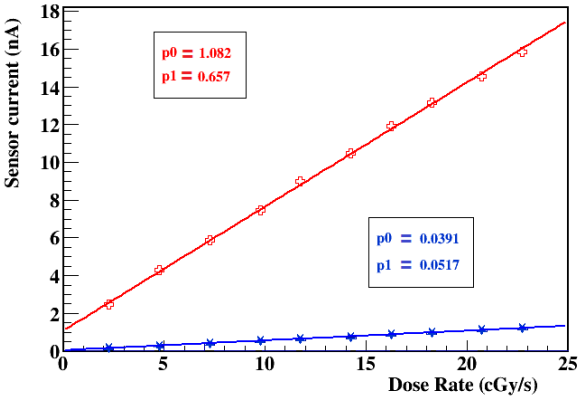


图10 A2AB1 CSC器件在0 V偏置（蓝色）和20 V偏置（红色）下剂量率与信号之间的线性相关性。参数 p0 和 p1 分别表示图中以实线绘出的数据线性拟合的截距和斜率。

在整个剂量率范围内，两种偏置下响应的线性度平均均在1.6%以内；在低剂量率值下，与拟合线的最大偏差为5%。灵敏度从657 pA· cGy^{-1} s^{-1}（20 V偏置）变化至52 pA· cGy^{-1} s^{-1}（0 V偏置），低了一个数量级。由于假设电流噪声为5 pA，若测量阈值设为5σ，则可测得的最小能量沉积从 ~ 0.4mGy s^{-1}（20 V偏置）变化至 ~ 0.5 cGy s^{-1}（0 V偏置工作）。p-i-n器件也获得了类似结果，详见Menichelli 等人（2021年）。表3报告了多个传感器暴露于不同电离辐射束下所获得的结果。

根据收集到的数据，我们可以得出一些结论：

•CSC和p-i-n器件均具有足够的辐射测量灵敏度（ $>$ 数十 pC·厘戈瑞$^{-1}$），且噪声较低（ $<$ 10 pA）；

表3 不同类型电离辐射照射下器件的响应。

电离 辐射	传感器 Name	Bias [V]	灵敏度 [纳库仑 厘戈瑞$^{-1}$]	5σ 探测 数值 [厘戈瑞]	线性度 [%]
γ X射线	A2AB1	0.0	0.052	0.260	$\sim$ 1.6
γ 50 kV X射线	A2AB1	20.0	0.657	0.040	$\sim$ 1.6
γ 50 kV X射线	A3AC2	30.0	2.040	0.045	$\sim$ 1.0
γ 临床（6 兆电子伏）	UOW429	0.0	0.049	0.245	$\sim$ 1.5
e^- 6 兆电子伏临床	UOW429	0.0	0.065	0.325	$\sim$ 1.5
3 兆电子伏质子	PAD V2	20.0	0.025	0.400	$\sim$ 5
3 兆电子伏质子	PAD V4	20.0	0.030	0.330	$\sim$ 5

- 正如预期，偏置电压是提高灵敏度的重要参数。

6 特定氢化非晶硅器件的探测限估算

本段中，我们考察一种实际可行的氢化非晶硅器件的性能，以估算与太阳耀斑相关的不同类型电离辐射的最低可探测通量，首先使信噪比达到 ≥ 5。

在本例中，我们采用一种“虚拟”器件，其特性与表 2 中报告的相似：面积为 4x4 mm^2 ， 10 μm 厚，电流噪声为 5 pA。该器件的几何因子为 0.5 cm^2 sr。为了同时提高几何因子和灵敏度，例如，我们可以选择制造一个面积为单个器件 25 倍的大型器件，尺寸为 20x20 mm^2, ；也可以将 25 个 4x4 mm^2 器件组成二维阵列并进行并行读出。下文将这两种等效方案均称为 H-SPACE。H-SPACE 设计的最终方案很可能取决于整个测量系统测得的噪声。

器件的漏电流随面积增大，而电流噪声随面积的平方根增大。因此，在评估粒子探测阈值时，我们合理地假设 H-SPACE 装置的噪声按面积比的平方根缩放，即按其面积与小型器件面积之比的平方根缩放，系数为 5。这使噪声达到 25 pA，进而使 5σ 探测水平的上限达到 125 pA。以器件 A3AC2 测得的灵敏度为参考，并将剂量率换算为每秒沉积能量后，沉积能量达到 105 兆电子伏/秒是获得 S/N >5 的下限，而当能量沉积为 ~ 21 兆电子伏/秒时，S/N 达到 1。对于目前的仪器初步设计，我们旨在估算入射太阳高能粒子在氢化非晶硅器件中产生的剂量率及相应电流。未来对氢化非晶硅传感器及其电子学的改进或许能使我们测量单个粒子，但这有待未来进一步完善。要将电流测量结果换算为粒子通量，我们将借助蒙特卡罗模拟和束流测试。

在太空中，使用多个传感器覆盖不同立体角范围可能会大有助益。值得指出的是，在为 HASPIDE 项目规划的研发活动中，H-SPACE 设备的灵敏度预计会进一步提升。对于当前的研究，H-SPACE 装置中的带电粒子能量损失分布代表了实际能量损失的下限，因为这里只考虑了正入射到传感器面积上的粒子，而这一条件严格来说仅适用于光子。

下文使用 FLUKA蒙特卡罗程序模拟 H-SPACE装置的性能 Battistoni 等 (2014年）；B¨ohlen 等 (2014年）；Vlachoudis(2009）。目前，我们通过将 c-Si 的密度降低 10%，从而考虑氢化非晶硅的特性；因此，单位长度和单位能量产生的电子数也相应降低，因为该数量与材料密度成正比 Workman 等 (2022年）。

6.1 光子计数率探测极限

探测器中入射光子产生的电流信号很大程度上取决于光子能量分布，该分布决定了光子在敏感材料中的相互作用概率；此外，由于氢化非晶硅层的厚度较小，电流信号还取决于光电子或康普顿电子是否仅部分被俘获。

太阳耀斑期间观测到的光子通量主要集中在 10 千电子伏以下 Grigis, P. C. 和 Benz, A. O. (2004）；Benz（2017）（见图 1）。因此，我们重点关注能量范围为 3-20 千电子伏的光子，在该范围内，光电效应是氢化非晶硅敏感体积中发生的主导过程。

表4 报告了多个光子能量（范围为 3–20 千电子伏）下的平均能量沉积，以及探测所需的入射光子最低速率。由于预计电流测量将以 1 Hz 的频率进行，因此估算了给定能量的光子每秒所需的最低能量沉积量。可以看出，随着光子能量增加，探测所需的光子数也会增加，这是因为光子在氢化非晶硅器件中的相互作用概率降低，而且（影响较小）光电子的全部能量更难被器件吸收。相互作用光子的百分比也列于表4。例如，图11 显示了穿过 H-SPACE装置的 10 千电子伏光子的能量沉积分布。采用上述设定的 105 MeV 能量沉积阈值，要使信噪比达到 5，抵达器件的 10 千电子伏光子的探测限为 1。$4 \cdot 10^5$ 秒$^{-1}$。结合这些结果，并对图1 中报告的 2022年11月9日 M级耀斑在 7 至 16 千电子伏范围内的光子通量进行积分后发现，在 H-SPACE装置中，该能量范围内的探测限得以满足，主要贡献来自 7–10 千电子伏光子。若将测量光子能量范围缩小至 5 千电子伏，显然能够提高对该耀斑或更强的（X级）太阳耀斑的探测能力。

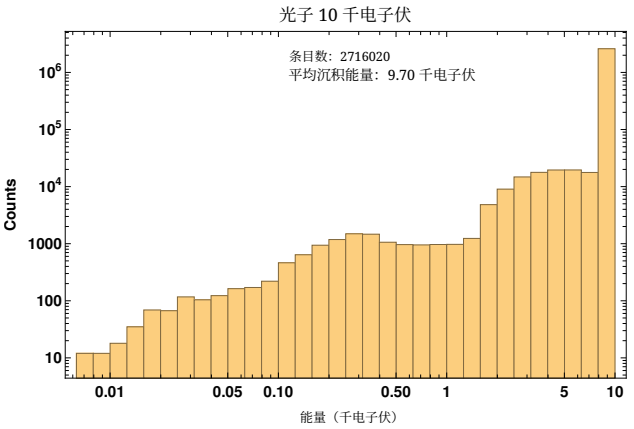


Fig. 11 FLUKA 模拟 H - SPACE 器件。

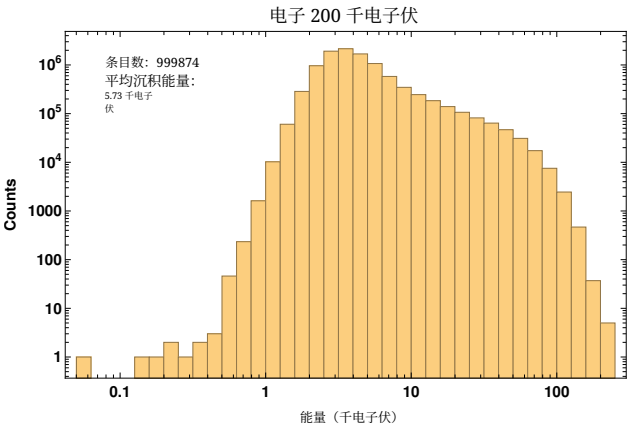
表4 单色光子通量下的速率探测限， 5σ 。

能量γ （千电子伏）	能量$deposited$ （千电子伏）	相互作用光子 (%)	可检测的最小光子率 使用 HASPIDE-SPACE（光子/秒）
3.0	3.0 ± 0.3	0.87	$4.0{\cdot}10^4$
5.0	4.9 ± 0.4	0.40	$5.4{\cdot}10^4$
7.0	6.9 ± 0.6	0.18	$8.5{\cdot}10^4$
8.0	7.8 ± 0.8	0.13	$1.0{\cdot}10^5$
10.0	9.7 ± 1.3	0.08	$1.4{\cdot}10^5$
15.0	14.0 ± 3.1	0.04	$3.8{\cdot}10^5$
20.0	17.5 ± 5.6	0.009	$6.7{\cdot}10^5$

6.2 电子率探测限

薄硅层中电子能量沉积的实验结果见Meroli 等人(2011）； Dourki 等人(2017）。表5 总结了模拟所得的沉积能量，以及垂直入射到 H-SPACE 传感器表面的可探测电子每秒最低数量。参照图2 中报告的低至 200 千电子伏的太阳电子能谱（低于 200 千电子伏的能量可参见例如Dresing 等人(2020年））， 我们对 50–1000 千电子伏的能量范围进行模拟，因为更高能量粒子对电流信号的贡献可以忽略不计。例如，图12 显示了 200 千电子伏电子产生的沉积能量分布。尽管该分布延伸至 200 千电子伏，其平均值仍为 5.7 千电子伏。

模拟结果清楚地表明，可以通过测量在器件中沉积大量能量的低能电子，获得探测所需的最低电子率。将 200-250 千电子伏范围内的电子通量积分，并考虑 H-SPACE 的几何因子后，我们得到 ~ 1450 电子/秒。对于太阳而言，这一结果并不令人满意



F图12 FLUKA模拟的200千电子伏电子在H-SPACE装置中的能量损失。

表5 五种 σ 单能电子通量的探测限。

能量（千电子伏）	沉积能量（千电子伏）	最低可探测电子率 使用 HASPIDE-SPACE（电子/秒）
50.0	28.9 ± 16.0	$3.6{\cdot}10^{3}$
100.0	12.1 ± 13.4	$8.7{\cdot}10^{3}$
200.0	5.7 ± 7.3	$1.8{\cdot}10^{4}$
250.0	4.7 ± 5.6	$2.2{\cdot}10^{4}$
300.0	4.1 ± 4.7	$2.6{\cdot}10^{4}$
500.0	3.3 ± 3.7	$3.2{\cdot}10^{4}$
1000.0	2.8 ± 3.3	$3.8{\cdot}10^{4}$

电子探测的信噪比 ~ 0.1。然而，Dresing 等人（2020年）表明，低于 100 千电子伏时，太阳电子能谱相对于更高能量处仍保持幂律或折断幂律趋势。原则上，将电子测量的能量下限扩展至 50 千电子伏，可使沉积能量增加 2.5 倍以上，粒子通量增加 5 倍以上。我们将通过比较蒙特卡罗模拟和束流测试结果，评估电子探测的信噪比相对于其他粒子本底的提升幅度。

6.3 质子率探测限

在表6 中，我们报告了以不同能量垂直入射到 H-SPACE 灵敏区域的质子的平均能量损失。还报告了在信噪比为 5 时实现探测所需的最小质子率。与光子和电子的情况相同，表6 显示了具有信噪比 ≥ 5的最小可探测质子率如何随质子能量变化。对于我们的方案而言，能够监测 3 MeV（图13）至 400 MeV（图14）之间的太阳质子十分重要。

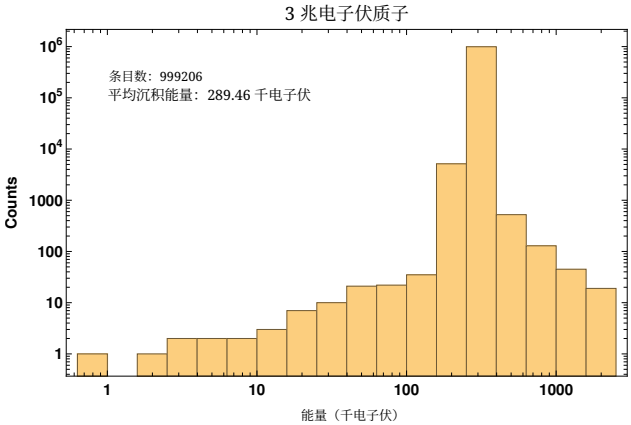


Fig. 13 FLUKA 模拟了 3 MeV 质子在 H-SPACE 装置中的能量损失。

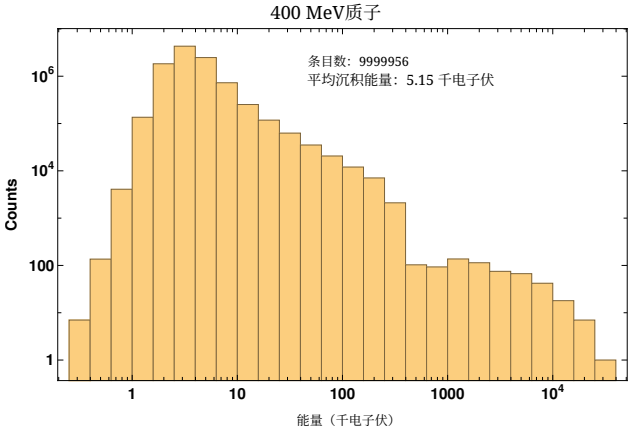


Fig. 14 FLUKA 模拟了 400 MeV质子在 H-SPACE 装置中的能量损失。

平均能量沉积介于 5.1 千电子伏和 289.5 千电子伏之间。这意味着，为使 H-SPACE装置达到信噪比 $= 5$，穿过该装置所需的质子/秒数量也按相同的倍数变化。

我们使用表 6 评估表 1 和图 3-7中报告的太阳高能粒子事件中 H-SPACE 传感器的探测能力：

- 1956年2月23日：图 3 显示了事件开始时测得的质子能谱；对测量可用的 500–700 兆电子伏范围内的能谱进行积分，得到 ~ 224 个质子/秒穿过我们的器件。FLUKA 模拟表明，该质子通量对应的平均能量沉积为 963 千电子伏，即无法探测到。当然，在太空中也能测量能量较低的粒子。

- 1956年2月23日：图 4 显示了峰值处的能谱。对于与上述相同的能量区间，我们得到 55250 质子/秒，对应 238 兆电子伏，

表6 5σ处单能质子的速率探测限。

能量（兆电子伏）	沉积能量（千电子伏）	可检测的最小质子速率与 HASPIDE-SPACE（质子/秒）
3.0	289.5 ± 19.5	$3.6{\cdot}10^{2}$
5.0	141.5 ± 14.5	$7.4{\cdot}10^{2}$
10.0	75.6 ± 14.5	$1.4{\cdot}10^{3}$
20.0	43.1 ± 24.9	$2.4{\cdot}10^{3}$
50.0	21.0 ± 34.5	$5.0{\cdot}10^{3}$
70.0	16.3 ± 35.1	$6.4{\cdot}10^{3}$
100.0	12.4 ± 30.7	$8.5{\cdot}10^{3}$
200.0	7.6 ± 30.8	$1.4{\cdot}10^{4}$
400.0	5.1 ± 35.2	$2.1{\cdot}10^{4}$
600.0	4.3 ± 40.4	$2.6{\cdot}10^{4}$

即信噪比为 2.3，因此处于可能的探测范围内。对于银河宇宙射线/太阳高能粒子区分，2.5–3 的探测限仍可保留区分太阳高能粒子动态与噪声的能力。

• 2021年10月28日：该事件的数据在太阳轨道器档案中可查到低至几兆电子伏的部分。图 5 显示了事件开始时测得的质子通量（黑点）。如果我们考虑能谱更为丰富的 80-100 兆电子伏能量区间，对数据进行积分后可得 ~ 10 质子/秒穿过H-SPACE装置，对应于 0.15 兆电子伏/秒的沉积能量，也就是说，该事件不会被检测到；

• 2021年10月28日：图5 显示了峰值处测得的质子通量（黑色方块）。再次考虑峰值对应的80-100兆电子伏能量区间，对数据进行积分后，我们得到 ~ 142 质子/秒，对应2.0兆电子伏/秒的沉积能量。在这种情况下，该事件也无法被探测到。

• 对于2006年12月13日的事件，也会得到类似的结果；该事件的强度与2021年10月28日的事件相近。

总之，仅使用一层H-SPACE装置，我们只能在极端罕见事件的峰值期间，探测到能量高于数百兆电子伏的太阳高能粒子质子通量，其信噪比为 > 3。

7 一种初步的演示装置与测量策略

我们未来的工作将致力于证明，可以构建一个演示装置，其中传感器和材料分别构成有源层和无源层，用于监测太空中的太阳耀斑以及中等强度太阳高能粒子事件的演变。区分不同粒子种类和光子，并尝试测量质子的微分通量，将在很大程度上取决于光子、电子和质子抵达仪器的时间。X射线将最先抵达，并在第一层传感器中停止。相对论电子和质子随后将几乎同时抵达，但我们测得的电流

由于两种粒子穿透不同厚度被动材料层的穿透特性各不相同，每个传感器平面测得的信号也会因电子和质子而异。在第一个平面，我们将观测电子和质子。在探测器深处，我们将测量质子穿过不同数量灵敏平面时产生的电流，具体数量取决于粒子的能量。目前，我们无法跟踪强烈太阳高能粒子事件的起始阶段，但应能在粒子能量降低时捕捉到事件峰值。为了提升仪器性能，我们将开展一项长期束流测试计划，使用千电子伏范围的光子、兆电子伏范围的电子以及不同能量的质子。实验数据将与蒙特卡罗模拟结果进行对照。我们将基于真实事件观测，模拟仪器从耀斑探测到质子抵达期间的性能。基本上，我们将采用Klein 等人（2022年）针对2021年10月28日事件所述的方法。

7.1 软X射线

一种能够探测 $4\ \sigma$ 能量高于 5 千电子伏的光子的器件，可利用现有的氢化非晶硅在聚酰亚胺基底上的沉积技术制造Menichelli 等人(2023年），同时考虑在传感器顶部沉积数百纳米厚的金属层，以屏蔽可见光。为进一步提高器件的探测能力，我们可以使用相同的灵敏层，并通过符合方式将电流信号相加。

7.2 电子

对于同一事件，电子通常会比光子晚几十分钟到达传感器，因此原则上，我们可以使用用于探测光子的同一器件来探测这些粒子，探测能量低至 50 千电子伏。我们将开展经测试束测量验证的详细蒙特卡罗模拟，以精确估算电子探测所需的电流信号，并研究该信号与置于氢化非晶硅灵敏区域前方材料的厚度以及基底厚度（300 纳米或可行）之间的关系。

7.3 质子

测量太阳质子的能谱需要特别谨慎。在第3.2.3节中，我们指出，能够在中强事件期间测量能量高达 400 MeV 的太阳质子的探测器，将使我们能够在银河宇宙射线本底之上，可靠地估算吉电子伏能区的粒子微分通量。从表6 中可以看出，降低仪器中的质子能量可显著改善信噪比。利用被动材料层使质子能量降级的技术已广为人知，并应用于多个领域。因此，我们建议使用被动材料层（通常为钨[4]），一举实现两个目的：降低质子的能量

[4]https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions

并吸收能量耗尽的质子，从而能够测量能量高达 400 MeV 的质子微分通量。由于 50 keV 的电子与数百 MeV 的质子速度相近，这些粒子会同时到达仪器。然而，由于这些电子和质子在被动材料中的传播能力截然不同，我们能够区分这两种粒子。

为估算质子通量，将把电流测量结果转换为穿透不同层被动材料的质子数。为实现这一目标，我们将同时采用蒙特卡罗模拟和束流测试。特别是，由于太阳高能粒子事件演化过程中太阳粒子空间分布的变化，以及粒子在被动材料中的相互作用，仪器将在束流的不同入射角下进行测试。在太空中，在主仪器周围以零偏压覆盖立体角的单个传感器也可能有所帮助。仪器应包含约 8 cm 的钨，以垂直阻止入射的 75% 的 400 MeV质子。辐射监测器的典型重量和功耗分别为 1 kg 和 1 WDesorgheret al (2013）。为限制粒子从侧面穿过仪器所产生的影响，我们需要使用额外的被动材料包围仪器的灵敏部分；因此，可能需要放宽 1 kg 的严格重量要求，而通过将偏置功率限制在几伏，功耗仍可保持竞争力。实际限制将根据可能分配的航天任务的约束条件确定。安装在不同厚度钨板之间的灵敏平面数量，以及包围氢化非晶硅传感器的被动材料，将通过未来的蒙特卡罗模拟进行优化。

7.4 氢化非晶硅器件改进

目前正在进行的研发计划有望提升我们仪器灵敏层的探测能力。我们可以评估以下方案：

- 增大传感器表面积：我们预计电流信号会线性增加，而噪声会随器件面积的平方根增加；
- 增加传感器厚度；厚度可达 $30\ \mu$m，增益系数为 ~ 3；
- 将噪声降至 1 pA 以下：我们目前正在开发一款采用 28纳米工艺的读出芯片；预计这可将噪声降低 2–5 倍；
- 提高灵敏度：我们正在试验不同的接触类型和沉积技术，增益系数有望达到 ~ 5。

最后，探测器设计的优化、最终几何因子的估算以及应采用的探测器单元数量，都应根据搭载该仪器的任务目标进行评估。如果该仪器旨在监测极端太阳高能粒子事件（注量大于 10^8 质子/cm^2），则可采用一个单元，其首层为用于探测 X 射线和电子的特殊层，后接 4 层灵敏层和 4 层无源层，总计不超过

厚度小于 8 cm；为了监测强至中等强度事件的演变（类似于 2006年12月13日发生的事件），可以考虑配置多个单元，使几何因子增加至少 40 倍。最后，应考虑使用至少四台仪器，以观测相对于航天器—太阳方向的不同立体角，从而研究 SEP俯仰角。

8 结论

在本研究中，我们报告了一项初步研究：采用氢化非晶硅作为太阳光子、电子和质子监测的活性材料。我们证明，最高达 400 MeV 能量范围的质子测量，使我们能够合理地将太阳高能粒子数据的参数化范围扩展到 1 吉电子伏特以上，而这正是空间天气最关注的能量范围。目前，这一方法仅在极端事件的峰值期间可行。未来专门开展的蒙特卡罗模拟和研发活动将推动探测器设计的优化。这项初步研究为应对航天机构未来提出的开发创新型太空仪器的需求奠定了基础。

致谢。 我们感谢匿名审稿人提出的建设性意见，这些意见帮助我们大幅改进了稿件。

HASPIDE项目由INFN通过CSN5资助，并部分获得“佩鲁贾储蓄银行基金会”RISAI项目（编号：2019.0245）的支持。F. Peverini获得了由PON计划资助的博士奖学金。

声明

• 经费支持 HASPIDE项目由INFN通过CSN5资助，并部分获得“佩鲁贾储蓄银行基金会”RISAI项目（编号：2019.0245）的支持。

• 利益冲突/竞争性利益 作者声明不存在任何利益冲突。

• 伦理审批“不适用”
• 参与同意：不适用
• 发表同意：不适用
• 数据和材料的可用性：论文中提及的所有数据均可公开获取。

• 代码可用性：可应要求提供代码

• 作者贡献 概念构思：Catia Grimani、Leonello Servoli；方法：Leonello Servoli、Mattia Villani、Federico Sabbatini、Catia Grimani、Lucio Calcagnile、Anna Paola Caricato、Maurizio Martino、Giuseppe Maruccio、Anna Grazia Monteduro、Gianluca Quarta、Silvia Rizzato；正式分析与调查：Leonello Servoli、Catia Grimani、Mattia Villani、Federico Sabbatini,

Roberto Catalano、Giuseppe Antonio Pablo Cirrone、Tommaso Croci、Giacomo Cuttone、Luca Frontini、Maria Ionica、Keida Kanxheri、Matthew Large、Valentino Liberali、Giovanni Mazza、Mauro Menichelli、Arianna Morozzi、Francesco Moscatelli、Stefania Pallotta、Daniele Passeri、Maddalena Pedio、Marco Petasecca、Giada Petringa、Francesca Peverini、Lorenzo Piccolo、Pisana Placidi、Alberto Stabile、Cinzia Talamonti、James Richard Wheadon；原始稿件准备：Catia Grimani、Leonello Servoli；审阅与编辑：Mattia Villani、Federico Sabbatini、Michele Fabi、Lucio Calcagnile、Anna Paola Caricato、Roberto Catalano、Giuseppe Antonio Pablo Cirrone、Tommaso Croci、Giacomo Cuttone、Sylvain Dunand、Luca Frontini、Maria Ionica、Keida Kanxheri、Matthew Large、Valentino Liberali、Maurizio Martino、Giuseppe Maruccio、Giovanni Mazza、Mauro Menichelli、Anna Grazia Monteduro、Arianna Morozzi、Francesco Moscatelli、Stefania Pallotta、Daniele Passeri、Maddalena Pedio、Marco Petasecca、Giada Petringa、Francesca Peverini、Lorenzo Piccolo、Pisana Placidi、Gianluca Quarta、Silvia Rizzato、Alberto Stabile、Cinzia Talamonti、James Richard Wheadon、Nicolas Wyrsch；经费获取：Leonello Servoli；资源：；监督：Catia Grimani、Leonello Servoli。

参考文献

Adriani O、Barbarino GC、Bazilevskaya GA 等（2011）利用 PAMELA 探测器在太空中观测到的 80 兆电子伏$^{-1}$-3 吉电子伏$^{-1}$ 范围内的 2006年12月13日和14日太阳粒子事件。《天体物理学杂志》742(2):102。https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/102, https://arxiv.org/abs/arXiv:1107.4519 [astro-ph.SR]

Adriani O、Barbarino GC、Bazilevskaya GA 等（2015）PAMELA 实验测得的低地球轨道俘获质子通量。《天体物理学杂志快报》799(1):L4。https://doi.org/10.1088/2041-8205/799/1/L4，https://arxiv.org/abs/arXiv:1412.1258 [astro-ph.EP]

Adriani O, Barbarino GC, BazilevskayaGA 等（2016）勘误：“PAMELA 实验探测到的宇宙射线正电子各向异性搜索” ¡A href=“/abs/2015ApJ...811...21A”¿（2015，《天体物理学杂志》，811，21）¡/A¿。《天体物理学杂志》818(1):100。https://doi.org/10.3847/0004-637X/818/1/100

Aguilar M, Ali Cavasonza L, Alpat B 等（2018）利用国际空间站上的阿尔法磁谱仪观测宇宙质子和氦通量中的精细时间结构。Physical Review Letters 121:051,101。https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.051101，网址 https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.051101

Aguilar M、Cavasonza LA、Ambrosi G 等（2021年）国际空间站上的阿尔法磁谱仪测量的2011年至2019年每日质子通量的周期性，范围为1至100吉伏。Phys Rev

Lett 127:271,102. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.271102，网址https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.127.271102

Alshehhi R, MarpuPR（2021年）使用无监督深度聚类检测日冕物质抛射。Sol Phys 296(6):104. https://doi.org/10.1007/s11207-021-01854-w

ArmanoM、Audley H、Baird J 等（2018）LISA Pathfinder 上重复性银河宇宙射线通量骤降及一次福布什下降的特征与能量依赖性。《天体物理学杂志》854:113. https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa774, https://arxiv.org/abs/arXiv:1802.09374 [physics.space-ph]

Armano M, Audley H, Baird J 等（2019）福布什下降和<2 日银河宇宙射线通量的非重复性变化：LISA Pathfinder 研究。《天体物理学杂志》874(2):167。https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0c99，https://arxiv.org/abs/arXiv:1904。04694 [physics.space-ph]

Bartocci S、Battiston R、Burger WJ 等（2020）2018 至 2020 年间，CSES-01 卫星搭载的高能粒子探测器（HEPD）测得的 40-250 MeV 范围内银河系宇宙射线质子能谱。《天体物理学杂志》901(1):8。https://doi.org/10.3847/1538-4357/abad3e

Battistoni G、Boehlen T、Cerutti F 等（2014）FLUKA 代码概述。载于：核应用超级计算联合国际会议 + 蒙特卡罗，第 06005 页，https://doi.org/10.1051/snamc/201406005

Benkhoff J, van Casteren J, Hayakawa H, 等（2010）Bepi-Colombo——水星的全面探测：任务概述与科学目标。《行星与空间科学》58(1-2):2–20。https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.09.020

Benz AO（2017）耀斑观测。《太阳物理学生活评论》14(1):2。https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3

B¨ohlen TT, Cerutti F,Chin MPW, 等（2014）FLUKA代码：高能与医疗应用方面的发展与挑战。《核数据表》120:211–214。https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049

Bruno A, Christian ER, de Nolfo GA, 等（2018）PAMELA任务观测到的太阳高能粒子事件。载于：AGU秋季会议摘要，页码 SH51C–2831

Christl M, Adams Jr. JH, Kuznetsov EN 等（2009）太阳高能粒子谱仪（SEPS）概念。载于：国际宇宙射线大会，国际宇宙射线大会

Cid C、Palacios J、SaizE 等（2014年）论极端地磁暴。《空间天气与空间气候》4：A28。https://doi.org/10.1051/swsc/2014026

Dalla S、Balogh A、Krucker S 等（2003年）高日心纬度太阳高能粒子事件的性质，以及对加速和传播模型的约束。《地球物理研究快报》30（19）。https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2003GL017139, URLhttps://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL017139, https://arxiv.org/abs/https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2003G

Desorgher L、Hajdas W、Britvitch I 等（2013）欧洲航天局新一代辐射监测仪。载于：2013年第14届欧洲辐射及其对元件和系统影响会议（RADECS），第1–5页

DourkiI,Westermeier F, Schopper F 等（2017）用于快速成像应用的薄型直接电子探测器的表征与优化。《仪器学报》12:C03,047–C03,047。https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/03/C03047

Dresing N, Effenberger F,G´omez-Herrero R 等（2020年）利用 STEREO/SEPT 对 12 年间观测到的太阳高能电子能谱进行的统计结果。《天体物理学杂志》889(2):143。https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab64e5，网址 https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab64e5

Faldi F, Bertucci B, Tomassetti N 等（2023年）使用 AMS-02 仪器实时监测国际空间站外的太阳高能粒子。《林琴科学院物理与自然科学汇刊》34(2):339–345。https://doi.org/10.1007/s12210-023-01156-2

Fox NJ, Velli MC, Bale SD, et al（2016年）《太阳探测器+任务：人类首次造访我们的恒星》。《空间科学评论》204(1-4)：7–48。https://doi.org/10.1007/s11214-015-0211-6

Freiherr von Forstner,Johan L., Dumbovi´c, Mateja, M¨ostl, Christian, et al（2021年）2020年4月隐匿型日冕物质抛射在0.8至1 au之间的径向演化——太阳轨道飞行器与近地观测到的福布希下降对比。《天文学与天体物理学》656：A1。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039848，URL https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039848

Gaisser TK（1991年）《宇宙射线与粒子物理学》

Garc´ıa Marirrodriga C, Pacros A, Strandmoe, S. 等（2021年）太阳轨道飞行器：任务与航天器设计。《天文学与天体物理学》646：A121。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038519，网址 https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038519

Garc´ıa-RigoA, N´u˜nez M、Qahwaji R 等（2016）用于航天发射运行风险估算的太阳高能粒子事件和太阳耀斑预测与预警系统。《空间天气与空间气候》6:A28。https://doi.org/10.1051/swsc/2016021

Grigis, P. C., Benz, A. O.（2004）脉冲太阳X射线耀斑的光谱演化。《天文学与天体物理学》426(3):1093–1101。https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041367，URL https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041367

Grimani C、Fabi M、Finetti N 等（2009a）LISA任务期间行星际电子的作用。《经典与量子引力》26:215,004。https://doi.org/10.1088/0264-9381/26/21/215004

Grimani C, Fabi M, Finetti N,等（2009b）LISA任务期间行星际电子的作用。《经典与量子引力》26:215,004。https://doi.org/10.1088/0264-9381/26/21/215004

Grimani C, Fabi M, Finetti N, 等（2013）100兆电子伏/核子以上能量太阳粒子事件的光谱形状。载于：《物理学杂志：会议系列》，第012159页，https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012159

Grimani C, Fabi M, Lobo A, 等（2015）银河宇宙射线通量短期变化期间LISA Pathfinder测试质量充电。《经典与量子引力》32(3):035001。https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/3/035001

Grimani C, CesariniA,FabiM,等（2020年）第24太阳周衰减阶段日地拉格朗日点L1处反复出现的银河宇宙射线通量调制与地磁活动。《天体物理学杂志》904(1):64. https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbb90，URL https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbb90

Grimani C, AndrettaV,Chioetto P, 等（2021年）太阳轨道飞行器搭载的 Metis 仪器的宇宙射线通量预测与观测。《天文学与天体物理学》656:A15. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140930，https://arxiv.org/abs/arXiv:2104.13700 [高能天体物理学]

Grimani Cea（2022年）弥合蒙特卡罗模拟与LISA Pathfinder测试质量充电测量之间的差距，以服务于LISA。《天文学与天体物理学》666:A38。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243984，https://arxiv.org/abs/arXiv:2208.08849 [高能天体物理学]

Issautier K、Hoang S、LeChat G 等（2008年）尤利西斯任务：漫长旅程的终结。载于：Charbonnel C、Combes F、Samadi R（编），SF2A-2008，第551页

Joyce CJ、McComas DJ、Schwadron NA 等（2021年）日冕物质抛射经过0.3至1天文单位期间的高能粒子演化。《天文学与天体物理学》651:A2。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039933

KaiserML, Kucera TA,DavilaJM, etal(2008年) STEREO任务：简介。《空间科学评论》136(1-4):5–16. https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0

Karpov SN, Miroscnichenko LI, Vashenyuk EV (1997) 基于巴克桑地下闪烁望远镜数据搜寻来自太阳的超高能粒子。载于：国际宇宙射线大会，第157页

Klein KL, Musset S, Vilmer N, et al (2022年) 2021年10月28日的相对论性太阳粒子事件：日冕内粒子加速及其逃逸的证据。《天文学与天体物理学》，663:A173. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243903

Kollhoff A,Kouloumvakos A, LarioD, et al(2021年) 太阳轨道飞行器于2020年11月29日观测到的首个大范围太阳高能粒子事件。《天文学与天体物理学》 656:A20. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140937

Kress B, Rodriguez J, Onsager T（2020）《GOES-R 地球空间环境原位套件（SEISS）：地球空间高能粒子的测量》，第243–250页。https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00020-2

K¨uhl P, Banjac S, Dresing N 等（2015）2012年5月17日和2014年1月6日太阳高能粒子事件期间的质子强度谱。《天文学与天体物理学》576：A120。https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424874

K¨uhl P, Dresing N, Heber B 等（2017）1995年至2015年间质子能量高于500 MeV的太阳高能粒子事件：SOHO/EPHIN测量结果。《太阳物理学》292(1)：10。https://doi.org/10.1007/s11207-016-1033-8, https://arxiv.org/abs/arXiv:1611.03289 [physics.space-ph]

Large MJ, Bizzarri M, Calcagnile L, 等（2023年）用于同步辐射微束放射治疗的氢化非晶硅高通量X射线探测器。《医学与生物学物理学》68(13):135010。https://doi.org/10.1088/1361-6560/acdb43

Lario D, Kallenrode MB, Decker RB, 等（2006年）太阳4–13兆电子伏和27–37兆电子伏质子峰值强度和注量的径向和纵向依赖性：Helios和IMP 8观测。《天体物理学杂志》653(2):1531–1544。https://doi.org/10.1086/508982

Lario D，Aran A，G´omez-Herrero R 等（2013）太阳高能粒子峰值强度的经度和径向依赖性：STEREO、ACE、SOHO、GOES 和 MESSENGER 观测。《天体物理学杂志》767(1)：41。https://doi.org/10.1088/0004-637X/767/1/41

Lario D、Kwon RY、Balmaceda L 等（2020）未观测到≥20 MeV质子的快速宽角日冕物质抛射。《天体物理学杂志》889(2):92。https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab64e1

Martucci M、Laurenza M、Benella S 等（2023）CSES-01 卫星搭载的高能粒子探测器（hepd-01）观测到的第25太阳活动周首次地面增强事件。《空间天气》21(1):e2022SW003,191。https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2022SW003191，网址 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022SW003191，e2022SW003191 2022SW003191，https://arxiv.org/abs/https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2022S

Mason, G. M., Ho, G. C., Allen, R. C., 等（2021年）太阳活动极小期太阳轨道飞行器观测到的宁静期低能离子能谱。《天文学与天体物理学》656:L5。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140540，网址 https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140540Matsuda A（2017）非晶硅和微晶硅，第1–1页。https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9 25Mazur JE、Mason GM、Klecker B（1995）脉冲型太阳耀斑中超过每核子10兆电子伏的重离子加速。《天体物理学杂志快报》448:L53。https://doi.org/10.1086/309589Menichelli M、Bizzarri M、Boscardin M 等（2021）三维几何结构氢化非晶硅探测器的制造及平面原型的初步测试。《仪器》4-5:32。https://doi.org/10.3390/instruments5040032Menichelli M、Bizzarri M、Boscardin M 等（2022年）氢化非晶硅 p-i-n二极管及电荷选择性接触探测器中的位移损伤。https://doi.org/10.36227/techrxiv.19555042.v3Menichelli M、Bizzarri M、Boscardin M 等（2022年）采用电荷选择性接触、用于构建三维探测器的平面氢化非晶硅传感器测试。《仪器学报》17(03):C03,033。https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/03/C03033，网址 https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/03/C03033Menichelli M、Bizzarri M、Calcagnile L 等（2022年）在柔性衬底上开发薄型氢化非晶硅探测器。arXiv电子预印本 arXiv:2211.17114。https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.17114，https://arxiv.org/abs/arXiv:2211.17114 [物理学-仪器与探测器]Menichelli M、Antognini L、Bashiri A 等（2023年）柔性衬底上氢化非晶硅传感器的X射线鉴定。载于：2023年第九届传感器与接口技术进展国际研讨会（IWASI），第

190–193，https://doi.org/10.1109/IWASI58316.2023.10164611

Meroli S、Passeri D、Servoli L（2011）超薄硅层中带电粒子的能量损失测量。《仪器学报》6：P06,013。https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/06/P06013

M¨uller D、St. Cyr OC、Zouganelis I 等（2020）太阳轨道飞行器任务——科学概述。《天文学与天体物理学》642：A1。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467，网址 https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467

N´u˜nez，Marlon（2018）根据太阳软X射线和近相对论电子的观测预测与太阳高能粒子事件连接良好的情况。《空间天气与空间气候》8：A36。https://doi.org/10.1051/swsc/2018023，网址https://doi.org/10.1051/swsc/2018023

Nymmik R（1999a）根据太空测量和月岩同位素数据推断的太阳高能粒子事件分布函数。载于：第26届国际宇宙射线大会（盐湖城），第268–271页

Nymmik R（1999b）太阳活动、太阳高能粒子事件发生频率与太阳高能粒子事件分布函数之间的关系。载于：第26届国际宇宙射线大会（盐湖城），第280–283页

Papaioannou A、Kouloumvakos A、Mishev A 等（2022）第25太阳活动周的首次地面增强事件，发生于2021年10月28日。《天文学与天体物理学》660：L5。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142855，https://arxiv.org/abs/arXiv:2202.07927 [天体物理学.SR]

Posner A（2007）利用相对论电子对太阳高能离子事件辐射危害进行最长1小时的预报。《空间天气》5：S05,001。https://doi.org/10.1029/2006SW000268

Qin G, Wang Y（2015）对 Helios 1、helios2 和 IMP 8 观测到的渐进型太阳高能粒子事件进行模拟。《天体物理学杂志》809(2):177。https://doi.org/10.1088/0004-637X/809/2/177，网址 https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/809/2/177

Reames DV（2021年）《太阳高能粒子：理解源区、加速与传播的现代入门》，第978卷。https://doi.org/10.1007/978-3-030-66402-2

Rodr´ıguez-Pacheco J, Wimmer-Schweingruber RF, Mason GM 等（2020年）太阳轨道飞行器任务的高能粒子探测器——高能粒子仪器套件。《天文学与天体物理学》642：A7。https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935287，网址 https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935287

Sato K、Hara K、Onaru K 等（2020年）硅条传感器在辐照至质子注量为 10^{17}n$_{eq}$ /cm^{2}时的特性。核科学研究中的《仪器与方法》A 982:164507。https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164507

Shea MA、Smart DF（2001年）太阳质子和地面增强事件的发生频率：1955-2000年。载于：国际宇宙射线大会，第3401–3404页

Srour J、Jr G、Lo D 等（1999年）耐辐射非晶硅太阳能电池中的损伤机制。《核科学》IEEE Transactions on 45:2624 – 2631。https://doi.org/10.1109/23.736506

Street R（2000年）《非晶硅技术与应用》。https://doi.org/10.1007/978-3-662-04141-3

S¨oderstr¨om T、Haug FJ、Terrazzoni-Daudrix V 等（2008年）柔性光伏用非晶硅薄膜太阳能电池的优化。《应用物理学杂志》103(11):114,509。https://doi.org/10.1063/1.2938839，网址https://doi.org/10.1063/1.2938839，https://arxiv.org/abs/https://doi.org/10.1063/1.2938839

Taioli S、Dapor M、Dimiccoli F 等（2023年）低能电子在 LISA 测试质量块充电过程中的作用。《经典与量子引力》40(7):075001。https://doi.org/10.1088/1361-6382/acbadd，https://arxiv.org/abs/arXiv:2209.12791 [physics.space-ph]

Vashenyuk EV、Balabin YV、Gvozdevsky BB 等（2007年）1956—2005年大型地面增强事件中相对论性太阳宇宙射线的特征。《俄罗斯科学院通报：物理学》71(7):933–937。https://doi.org/10.3103/S106287380707012X

Vernetto S、Laurenza M、Storini M 等（2022年）Testa Grigia高海拔研究站（海拔3480米）的中子剂量率长期测量。《辐射物理与化学》193:109972。https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.109972

Vlachoudis V（2009）Flair：一款功能强大且易于使用的FLUKA图形界面。载于：国际数学、计算方法与反应堆物理会议（M&C2009），纽约州萨拉托加斯普林斯，第790–800页

Wenzel KP, Marsden RG, Page DE 等（1992）尤利西斯任务。《天文学与天体物理学增刊》92：207

Wimmer-Schweingruber RF、Pacheco D、Janitzek N 等（2021年）太阳轨道飞行器高能粒子探测器在内日球层进行高能粒子测量的第一年，已投稿至《天文学与天体物理学》

WorkmanRL、BurkertVD、Crede V 等（2022）《粒子物理学评论》。《理论与实验物理学进展》2022年(8):083C01。 https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097

Wyrsch N、Ballif C（2016）非晶硅基粒子探测器综述：单粒子探测的探索。《半导体科学与技术》31(10):103005。 https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/10/103005

Wyrsch N、Miazza C、Dunand S 等（2006年）非晶硅粒子传感器的抗辐射能力。《非晶态固体杂志》352:1797–1800。
https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.10.035

Zank GP、Li G、Florinski V 等（2006年）垂直激波处的粒子加速：模型与观测。《地球物理研究杂志：太空物理》111(A6)。 https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005JA011524, 网址https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005JA011524, https://arxiv.org/abs/https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2005JA

Zhao H、Johnston WR、Baker DN 等（2019年）基于范艾伦探测器测量的辐射带电子能谱特征及其演变。Journal ofGeophysicalResearch: Space Physics 124(6):4217– 4232。
https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019JA026697,
URLhttps://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JA026697,
https://arxiv.org/abs/https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JA