

太阳爆发探测小卫星高能暴谱仪^{* *}

顾 强^{1,2†} 常 进^{1,3§}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院 北京 100039)

(3 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 太阳爆发探测小卫星(SMall Explorer for Solar Eruptions,简称 SMESE)是中国法国合作小卫星. SMESE 计划在下一个太阳活动峰年(—2011 年)发射上天,同时观测太阳上两类最剧烈爆发现象:耀斑和日冕物质抛射(CME),瞄准当代科学的前沿课题,同时兼顾空间天气学的应用需要. 高能暴谱仪(High Energy Burst Spectrometer,简称 HEBS)是太阳爆发探测小卫星上 3 大主要载荷之一,采用世界最新高能量分辨 LaBr₃ 闪烁探测器,观测太阳 10 keV—600 MeV 的高能辐射. 其能量分辨优于 3.0% @ 662 keV,高于目前通用闪烁探测器的 2 倍以上,可望在耀斑和 CMEs 的能量释放,粒子加速,以及耀斑和 CMEs 之间的关系研究方面取得突破.

关键词 太阳: X 射线、 γ 射线, 航天器: 仪器, 太阳: 日冕, 太阳: 耀斑

中图分类号: P 172; **文献标识码:** A

1 SMESE 简介

太阳爆发探测小卫星是中国法国合作小卫星. SMESE 利用法国空间局 Myraid 微小卫星平台,计划在 2011 年左右发射上天,进行为期 3 年的空间观测. SMESE 卫星轨道为 650 至 750 Km 的太阳同步轨道,平台指向精度优于 36arcsec. SMESE 卫星由三大主载荷组成:莱曼阿尔法太阳全日面高分辨望远镜和日冕仪 LYOT (LYman Orbiting Telescopes), 太阳远红外望远镜 DESIR (Detection of Eruptive Solar InfraRed emission), 太阳高能暴谱仪 HEBS (High Energy Burst Spectrometer). 图 1 为卫星有效载荷设计总图,下层左边的是高能暴谱仪.

LYOT 包括两个望远镜:莱曼阿尔法太阳全日面高分辨望远镜和日冕仪. 莱曼阿尔法太阳全日面高分辨望远镜的工作波长为 121.6 nm,视场为 1.2 个太阳半径,角分辨为 1.1arcsec. 日冕仪的工作波长同样为 121.6 nm,视场为 1.15 至 2.5 个太阳半径,角分辨为 2.3arcsec. 两个望远镜的时间分辨决定于太阳活动情况,最高可以达到 0.2s.

DESIR 的工作波长为两个:一个是 35 至 80 μm ,另一个是 100 至 250 μm . 它观测太

* 2007-06-25 收到原稿,2007-07-24 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10573039,10333040,10620150099)资助

† 顾强 guqiang_@hotmail.com

§ 常进 chang@pmo.ac.cn

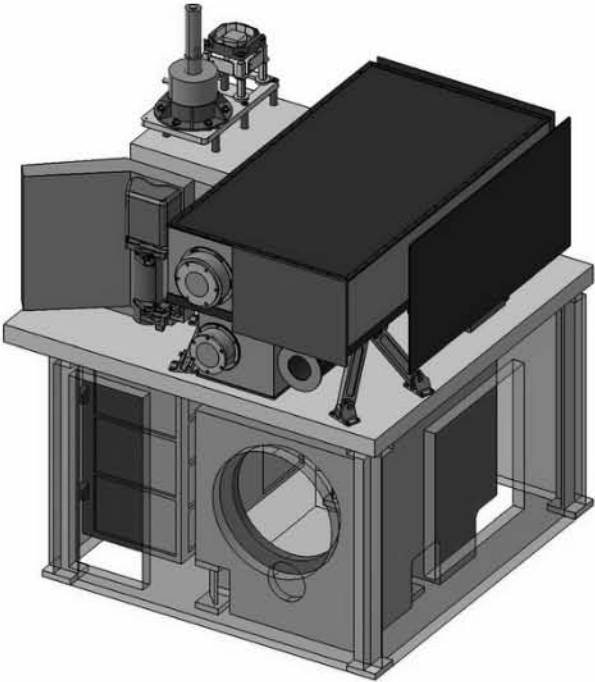


图 1 SMESE 卫星上的科学仪器

Fig. 1 The scientific instruments onboard SMESE satellite.

阳相当于高于 10^{12} Hz 的射电发射,探测器像素为 245×325 ,单个像素大约为 44arcsec,可以提供太阳爆发时有关发射源位置和大小信息,时间分辨最高可以达到毫秒量级.

HEBS 主要由三个高能分辨大尺寸 ($7.6\text{ cm} \times 7.6\text{ cm}$) LaBr_3 闪烁体组成,观测太阳 10 keV—600 MeV 的高能辐射,能量分辨本领优于 $3.0\% @ 662\text{ keV}$,时间分辨可调,最高可以达到 32 ms.

3 个载荷组合在一起,观测太阳从远红外到 γ 射线的辐射,同时在一个卫星上观测如此宽的能段在世界上尚属首次. 与国际同类空间太阳观测卫星相比,尽管 SMESE 是个小卫星,但是它集中了中法 3 个小卫星的精华,即:

- (1) 世界上第一次在一个卫星上对太阳耀斑和日冕物质抛射进行交叉证认观测.
- (2) 世界上第一次采用一个探测器同时高分辨观测太阳 X 射线和高能 γ 射线辐射.
- (3) 世界上第一次在空间对太阳进行远红外成像观测.
- (4) 世界上第一次在莱曼阿尔法波段对太阳进行高分辨日面和近日冕观测.

2 高能暴谱仪科学目标

太阳高能暴谱仪 HEBS 是 SMESE 卫星上 3 大载荷之一. HEBS 主要是对太阳 10 keV 至 600 MeV 的高能辐射进行高能量分辨和高时间分辨的观测,它的主要技术指标见表 1.

表 1 HEBS 的主要技术指标
Table 1 Main characters of HEBS

Energy range	10 keV to 600 MeV
Energy resolution	3% @ 662 keV
Time resolution	1 s (solar quiet), 32 ms (solar eruption)
Effective area	> 60 cm ² @ 1 MeV
Sensitivity (300 keV~10 MeV)	better than 3×10^{-3} photons/cm ² /s

HEBS 的主要科学目标是研究太阳耀斑和 CME 的核心——高能物理过程. 它涉及到贮存在非稳态磁结构中磁能的快速释放、能量快速转化为加速粒子的动能及热等离子体的动能和热能、高能粒子在大气中的传输、周围大气的后继加热和次级响应过程、等离子体在空间的传播等等. 由于太阳硬 X 射线来自于加速的次相对论电子与周围大气物质作用所产生的韧致辐射, 而 γ 射线连续谱反映的是相对论性加速电子的韧致辐射以及高能离子与太阳大气作用所产生的 π 介子衰变的贡献, γ 射线谱线则是加速离子与太阳大气物质发生核反应的直接产物. 所以对 X 射线和 γ 射线的观测将能提供对加速粒子最直接的诊断. 早先的空间硬 X 射线观测已经显示, 耀斑触发的直接后果是脉冲硬 X 射线暴和 γ 射线暴, 其电子在几秒时间尺度内可加速到几百 MeV, 离子则被加速到几十 GeV, 在 $10^2 \sim 10^3$ 秒内释放 $10^{32} \sim 10^{33}$ erg 的能量^[1-3], 而产生硬 X 射线暴的非热加速电子所包含的总能量在耀斑释放总能量中占有举足轻重的比例, 这说明耀斑脉冲性能量释放和粒子加速是紧密联系在一起的. HEBS 主要是研究耀斑过程这一核心问题, 通过观测耀斑硬 X 射线和 γ 射线发射, 来研究太阳上磁化等离子体中的爆发式能量释放和粒子加速过程的本质, 并寻找局部爆发与日冕整体爆发的联系.

如果 SMESE 能够在 2011 年左右成功发射, 预期在 3 年的寿命期间, 可以观测到数千个太阳硬 X 射线暴、数百个太阳 γ 射线暴事件以及 100 个左右 γ 射线谱线耀斑.

3 高能暴谱仪探测器

3.1 探测器选择

国际上太阳高能观测已经有很长的历史, NaI 闪烁探测器(以 SMM 为代表)和 BGO 闪烁探测器(以 YOHKO 为代表)是空间太阳高能观测常用的设备. 由于技术成熟, 所以在空间太阳观测中用得最多, 有较高地探测效率, 大面积. 最主要的缺点是能量分辨本领与高纯 Ge 相比只有其 1/25, 典型值是在 662 keV 处为 7—8%.

高纯 Ge 半导体探测器是目前太阳高能观测的发展方向, 其优点是能量分辨本领非常高, 是 NaI 闪烁探测器的 25 倍, 尤其适合观测太阳 γ 射线谱线. 缺点是必须制冷, 其工作温度为低温 80 K 以下, 必须通过大面积被动式辐射制冷或者采用主动制冷. 由于它对功耗和重量要求都很高, 在一般的小卫星观测中受到限制. 另一个主要问题是辐射损伤, 高纯 Ge 晶体长时间暴露在空间高能粒子照射下, 其能量分辨本领和噪音会变差. 这对类似于 SMESE 这样的长寿命探测项目是很关键的.

随着技术的进步,2004 年国际上出现了类似于 LaBr_3 这样的闪烁晶体^[4],由于其高光产额(是普通 NaI 闪烁体的 1.3 倍)和发光均匀,其能量分辨本领可以达到普通 NaI 闪烁探测器的 3 倍. 由于高能量分辨本领,不需要制冷,又由于 La 和 Br 的高原子序数,探测效率也比高纯 Ge 高,该探测器一出现立即成为空间高能探测的首选. 国际上在计划中的多个卫星都将采用 LaBr_3 闪烁探测器^[5,6]. 表 2 列出了 LaBr_3 闪烁晶体与其他常用探测器的性能比较.

HEBS 探测器也将选用 LaBr_3 晶体,如果 SMESE 如期发射成功,这将是世界上第一次在空间采用此新技术观测天体的高能辐射.

表 2 LaBr_3 闪烁晶体与其他常用探测器的性能比较^[7]

Table 2 Main characteristics of LaBr_3 scintillator (comparison with common scintillators and Ge)^[7]

Parameter	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO	LaBr_3	Ge
Scintillation efficiency relative to NaI(Tl)	100%	45%	10%	130%	
Light decay constant (μs)	0.23	1.0	0.3	0.016	
Density(g/cm^{-3})	3.67	4.51	7.13	5.29	5.36
Energy resolution at 662 keV(FWHM)	7.5%	9.0%	13.5%	3.0%	0.3%
Highest Z (high-Z element)	53(I)	55(Cs)	83(Bi)	57(La)	32(Ge)

3.2 HEBS 探测器

整个 HEBS 探测器如图 2 所示,主探测器是 3 个直径为 7.6 cm,高度为 7.6 cm 的 LaBr_3 闪烁体,这是目前能得到的最大尺寸. 为了尽可能降低本底, LaBr_3 闪烁体外围包有 1.5 cm 厚的塑料闪烁体. 塑料闪烁体比 LaBr_3 闪烁体长 3 cm,可以降低光电管后部斜入射带电粒子本底.

反符合晶体上部有两个直径为 3 cm 的光电管,当带电粒子穿过探测器时,两个小光电管会有信号输出,根据这个信号可以判断主探测器输出的信号是本底还是太阳高能辐射. 模拟结果表明,此方案可以降低 97% 以上的高能带电粒子直接引起的本底. 另外我们还可以分析三个主探测器的输出信号之间的关系,以降低 30% 左右的高于 1 MeV 的宇宙 γ 射线本底和卫星次级 γ 射线本底.

主晶体后部是 3 个直径为 7.6 cm 的光电管,为了覆盖 10 keV 到 600 MeV 能段,一个阳极输出肯定无法覆盖如此宽的能段,每个光电管的阳极和 3 个打拉极都会输出信号,由于阳极和 3 个打拉极的增益不一样,不同的输出对应不同的能段,采用这个技术可以覆盖 10 keV 到 600 MeV 能段. 我们在实验室中曾采用该技术,

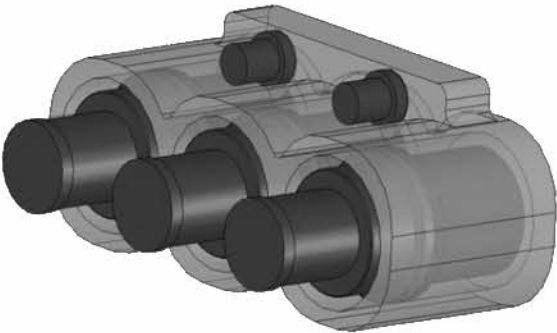


图 2 探测器结构简图
Fig. 2 Schematic drawing of the detector

在美国的一个气球项目上进行了观测(该项目采用 1 个光电管的 3 个打拉极观测 12 MeV 到 20 TeV 的能量沉积)^[8].

3.3 探测器性能

HEBS 有效面积随能量的变化情况见图 3,图中实线是 HEBS 的有效面积随能量变化曲线,虚线是 SMM 卫星上 γ 射线谱仪有效面积随能量变化曲线^[9],从图中可见探测器有效面积在 1 MeV 处,大约为 70 m²,与 SMM 相比,相当于 SMM 卫星上的 γ 射线谱仪的 65%,但 SMM 卫星上的 γ 射线谱仪的重量是 HEBS 的 8 倍左右.

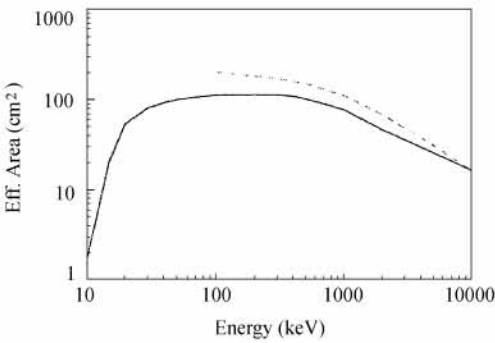


图 3 HEBS 的有效面积随能量的变化情况

Fig. 3 Effective area of HEBS as a function of energy

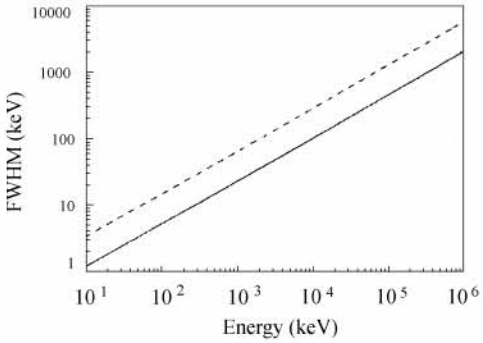


图 4 HEBS 的能量分辨随能量的变化情况

Fig. 4 Energy resolution of HEBS as a function of energy

HEBS 的能量分辨随能量的变化情况见图 4,图中实线是 HEBS 的能量分辨率随能量变化曲线,虚线是 SMM 卫星上 γ 射线谱仪能量分辨率随能量变化曲线^[9],从图中可以看到 HEBS 的能量分辨本领比 SMM 卫星上 γ 射线谱仪提高了 2 倍以上.

图 5 是 2003 年 11 月 2 日用 HEBS 观测太阳爆发高能电磁辐射模拟结果.图 6 是太阳高能辐射光子谱,该结果由 RHESSI 的观测结果(图 7)得到.从图中可见,相比较于 RHESSI 观测结果,尽管 RHESSI 采用高纯锗半导体,能量分辨本领比 HEBS 要高得多,但 HEBS 的 C 线和 O 线要比 RHESSI 清楚.这是由于 RHESSI 没有本底抑制系统,本底比 HEBS 高,另外探测器有效面积也比 HEBS 小,所以灵敏度要比 HEBS 低.

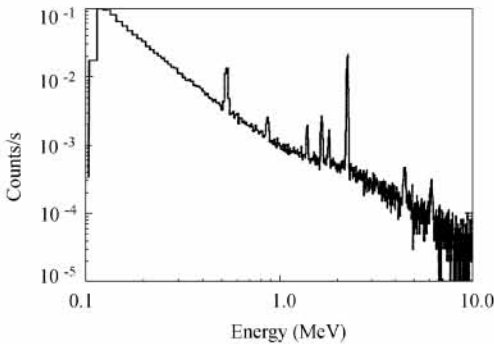


图 5 2003 年 11 月 2 日用 HEBS 观测太阳爆发高能电磁辐射模拟结果

Fig. 5 Simulated energy spectrum for the Nov. 2, 2003 flare by HEBS

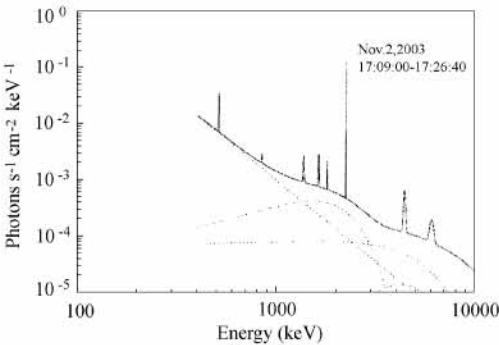


图 6 2003 年 11 月 2 日太阳爆发高能电磁辐射光子谱
Fig. 6 Photon spectrum for the Nov. 2, 2003 flare

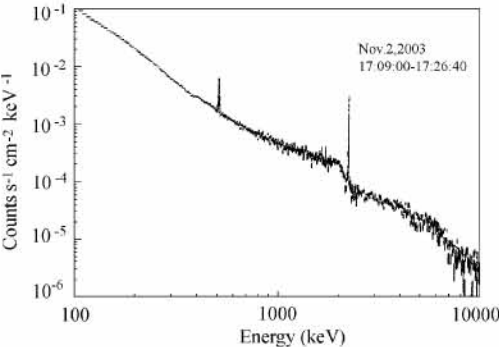


图 7 RHESSI 观测 2003 年 11 月 2 日太阳爆发高能电磁辐射所得到的能谱.
Fig. 7 Energy spectrum for the Nov. 2, 2003 flare observed by RHESSI

3.4 大尺寸 LaBr₃ 晶体实验室测试结果

直到 2005 年底世界上才有大尺寸(7.6 cm×7.6 cm)LaBr₃ 晶体,其性能能否满足 HEBS 的科学需求是 SMESE 科学组最关心的问题. 下图是我们实验室对 2006 年 Saint Gobain 公司生产的大尺寸 LaBr₃ 晶体测试结果,光电倍增管采用 HAMAMATSU 公司的 R1848-05 宇航级光电管,光电管与晶体之间采用普通的硅脂耦合.

图 8 是探测器观测 Am-241, Co-57 放射源所得到的能谱,从图中可见探测器在 59.5 keV 处能量分辨本领为 14%,在 122 keV 处为 7.5%,在探测下限可达到 5 keV,完全可以满足 HEBS 探测下限 10 keV 的要求. 图 9 是观测 Cs-137 放射源所得到的结果,能量分辨率在 622 keV 处为 3.5%. 尽管与 HEBS 要求的 3.0%还有差距,但是考虑到 R1848-05 宇航级光电管是 10 年前的老产品,其量子效率及光谱响应与最新产品有差距^[10],所以 HEBS 要求的能量分辨率达到 3.0%是完全可行的.

图 10 是探测器在同样的高压下观测地面宇宙线与大气作用后产生的 Muon 粒子穿过探测器后的能量沉积谱,根据 Monte Carlo 模拟,该谱应该在 72.1 Mev 处呈现一个峰位. 该信号是从光电管打拉极输出的.

我们标定了光电管打拉极和阳极的增益关系,发现 Muon 粒子能量沉积峰与低能段一起满足线性关系,没有任何饱和现象. 图 11 是探测器输出的信号幅度与入射能量的关

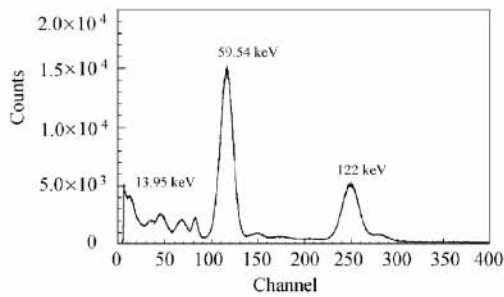


图 8 实验室 LaBr₃ 探测器测量 Am-241,Co-57 能谱
Fig. 8 Spectra of Am-241 and Co-57 measured by LaBr₃ detector

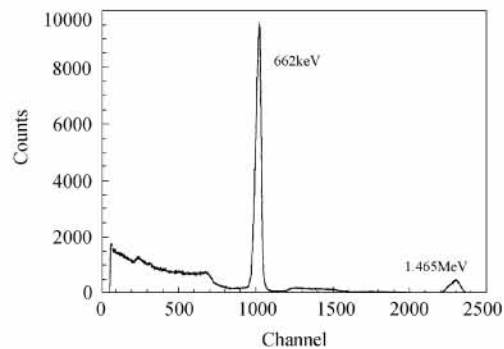


图 9 实验室 LaBr₃ 探测器测量 Cs-137(662 kev)能谱
Fig. 9 Spectrum of Cs-137 measured by LaBr₃ detector

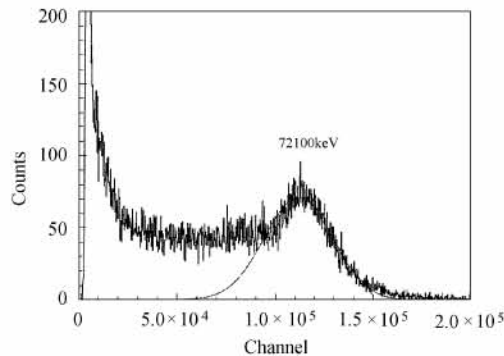


图 10 LaBr₃ 探测器观测的 Muon 粒子能量沉积谱
Fig. 10 Energy deposit spectrum by Muon particles

系,从图中可见,在 5 kev 到 72 Mev 的范围内,探测器输出与入射能量呈线性.

4 总结

根据以上分析,HEBS 目前的设计,其能量分辨率要高于 SMM 为代表的空间闪烁探测器,有效面积在 1 MeV 处相当于 SMM 的 65%,由于采用了本底抑制系统,所以灵敏度

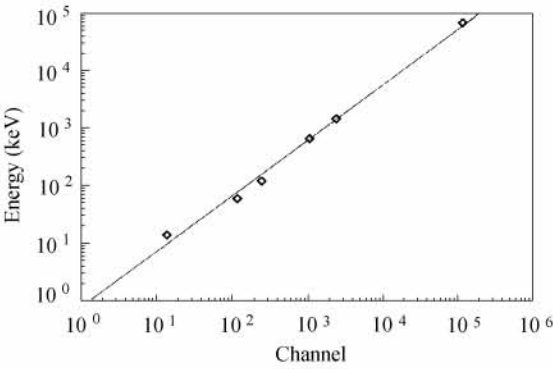


图 11 LaBr₃ 探测器信号大小与入射能量的关系

Fig. 11 The relation between the output of LaBr₃ detector and the incident energy

高于 RHESSI, 完全满足 SMESE 对 HEBS 的科学需求.

参 考 文 献

1 Akimov V V, Leikov N G, Kurt V G, et al. in Ryan J M & Vestrand W T (eds), High Energy Solar Phenomena—A new era of Spacecraft Measurements, AIP Conf. Proc. 1994,294;130

2 Akimov V V, Ambroz P, Belov A V, et al. Solar Physics,1996,166;107

3 Kanbach G, Bertsch D L, Fichtel C E ,et al. A&AS ,1993,97;349

4 Van Loef E V D, Dorenbos P, Van Ejik C W E, et al. Applied Physics Letters, 2001, 79; 1573

5 Cherry M L, Blosier P F, Case G L, et al. Proc. 29th International Cosmic Ray Conference,2005,5;407

6 Kozyrev A S. Proc. Lunar and Planetary Science XXXVII(2006), in press

7 Gehrels N, Crannell C J, Forrest D J, et al. Solar Physics,1988,118?;233

8 Guzik T G. Proc. 26th International Cosmic Ray Conference,1999, 5;9

9 Forrest D J, Chupp E L, Ryan J M, et al. Solar Physics,1980, 65;15

10 http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/R6091_TPMH1114E02.pdf

The High Energy Burst Spectrometer for SMESE mission

GU Qiang^{1,2} CHANG Jin^{1,3}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Graduate school of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

(3 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

ABSTRACT Small Exploration for Solar Eruptions (SMESE) is a joint mission between France and China to investigate the two main types of eruption events on the Sun: Coronal Mass Ejections (CME) and solar flares, and their relationship. SMESE will be launched around 2011, providing a unique opportunity of detecting and understanding eruptions at the maximum activity phase of the solar cycle in a wide range of energies. The payload consists of three instrument packages: LYOT (a suit of two UV and EUV imagers and a Lyman coronagraph), DESIR (an Infra-Red Telescope working at 35 and 150 μ m) and HEBS (High Energy Burst Spectrometer).

HEBS aims at observing hard X-ray and gamma-ray emissions from the energetic eruptions on the Sun like solar flares. HEBS consists of three 3 inch diameter by 3 inch long cylinder of LaBr₃ scintillator placed within a well shaped plastics scintillator antineutrino shield. It covers energy range from 10 keV to 600 MeV. The energy resolution at 662 keV of HEBS has been measured to be 3.5% full width at half-maximum (FWHM) at room temperature. Such high energy resolution has not been achieved with any of the established inorganic scintillators.

Key words Sun; X-rays, gamma rays, Space vehicles; instruments, Sun; corona, Sun; flares