

# 耀斑 $\gamma$ 射线观测与研究新进展

甘为群 林春梅

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

## 摘 要

耀斑  $\gamma$  射线研究近年来有了飞速的发展,这主要是得益于康普顿  $\gamma$  射线天文台、GRANAT 卫星和阳光卫星的新观测,以及对 GRS/SMM 资料的详细分析。简要概括了耀斑  $\gamma$  射线观测和研究近年来获得的主要进展,其中包括:超长时间  $\gamma$  射线暴、边缘强 2.223MeV 事件、大于 10MeV 耀斑日面分布、 $\gamma$  射线谱和连续谱、粒子的加速机制等,并展望未来的发展趋势。

关键词 太阳耀斑—X、 $\gamma$  射线

分类号: P182.52

## 1 引 言

1993 年曾评述过耀斑  $\gamma$  射线观测与研究的进展<sup>[1]</sup>。4 年过去了,该领域的研究又获得了巨大的发展。这主要得利于几颗卫星的新观测结果以及对老的 GRS/SMM 资料的详细分析。康普顿伽玛射线天文台 (CGRO)<sup>[2]</sup> 于 1991 年 4 月发射,至今仍在工作。它由 4 架仪器组成,能段覆盖 0.05MeV 至 30GeV,并具有区分  $\gamma$  光子与中子的能力。由于它的有效面积比 GRS/SMM 大,因而可测到更弱的  $\gamma$  射线发射,在它上天后不久就成功地捕获到了 1991 年 6 月系列大耀斑。原苏联和法国合作的高能卫星 GRANAT<sup>[3-5]</sup> 于 1989 年 12 月发射,它载有两台  $\gamma$  射线探测器,分别称为 Phebus 和 Sigma,其中光谱仪由一组 6 个 BGO 晶体探头组成,能段范围 0.1—15MeV,它在高能数据连续覆盖方面,具有不可替代的作用。因为自 1989 年 11 月底 SMM 陨落至 1991 年 4 月 CGRO 发射,GRANAT 是天上唯一的太阳高能探测卫星。其它短时间工作的还有原苏联卫星 GAMMA-1<sup>[6]</sup> 等。1991 年 8 月底日本发射的阳光 (Yohkoh) 卫星上载有一台宽波段光谱仪 (WBS)<sup>[7]</sup>,其  $\gamma$  射线部分由 BGO 晶体作为探头,能段范围 0.2—10MeV,由于它的发射错过了 1991 年 6 月大耀斑群的观测机会,至今未曾观测到特强的  $\gamma$  射线耀斑,但其良好的工作状态有望一直持续到 23 周年。与此同时,对 GRS/SMM 的深入研究也不断地取得新结果,这些正是近年来耀斑  $\gamma$  射线研究飞速发展的原因。

## 2 近年来的新课题

### 2.1 超长时间 $\gamma$ 射线耀斑

CGRO 对太阳耀斑观测一个最重大的成果就是发现了超长时间  $\gamma$  射线耀斑。Kanbach 等人利用 EGRET/CGRO 对 1991 年 6 月 11 日耀斑的观测发现<sup>[8]</sup>，来自  $\mu$  衰变及相对论性电子韧致辐射的高能  $\gamma$  射线 ( $> 50\text{MeV}$ ) 竟持续长达 8h。Rank 等人<sup>[9,10]</sup> 研究同一耀斑发现质子-中子俘获线  $2.223\text{MeV}$  发射持续了 5h 多。这一结果及长时间事件后来被多人反复证实<sup>[6,11,12]</sup>，超长时间  $\gamma$  射线耀斑的发现提出了一个非常重要的理论新问题：其离子的加速究竟是来自短暂的脉冲相然后长时间地被磁场所俘获，还是来自持续不断地加速过程？这方面的首次研究<sup>[13]</sup> 认为：加速主要是在脉冲相完成的。Lau 等人<sup>[14,15]</sup> 进一步指出，只要对湍动有一定的限制，且磁力线扭曲程度足够，质子在磁环中呆 8h 是有可能的。但 Akimov 等人<sup>[6]</sup> 通过分析 GAMMA-1 观测到的 1991 年 6 月 15 日超长时间耀斑指出，它不能用磁场俘获模型来解释，必须引入持续加速机制。持同一观点的人近来有增加的趋势<sup>[10-12,16,17]</sup>。但这一题目目前尚无定论。除了磁俘获和连续加速两个极端情况外，又有人提出一种中介过程<sup>[18]</sup>，即俘获和连续加速同时作用。

### 2.2 超高能 $\gamma$ 射线耀斑

GRS/SMM 所能探测到  $\gamma$  射线光子的最高能量为  $140\text{MeV}$ ，在 SMM 工作期间，即 1980 年 2 月至 1989 年 11 月底，大约有 6 个耀斑具有大于  $140\text{MeV}$  的辐射，而大于  $10\text{MeV}$  的耀斑约有 25 个<sup>[8]</sup>。目前的  $\gamma$  射线探测器由于具有更高的灵敏度，可以测到更加弱的  $\gamma$  射线发射。CGRO 对 1991 年 6 月 11 日耀斑的观测显示其具有大于  $1\text{GeV}$  的辐射<sup>[8]</sup>。Akimov 等人基于 GAMMA-1 对 1991 年 6 月 15 日耀斑的观测发现，其  $\gamma$  射线能量可大于  $2\text{GeV}$ <sup>[6]</sup>。如此高能  $\gamma$  射线耀斑对离子加速机制提出了新的要求。

### 2.3 边缘强 $2.223\text{MeV}$ 线事件

耀斑  $\gamma$  射线谱中一个显著的特征是具有  $2.223\text{MeV}$  线发射，它是中子被质子俘获所产生的。由于俘获区发生在光球，因而该线有很强的临边变弱效应<sup>[19,20]</sup>，对边缘耀斑几乎分辨不出有  $2.223\text{MeV}$  线发射。然而对这一规律唯一的例外是 GRS/SMM 观测到的 1989 年 9 月 29 日耀斑<sup>[21]</sup>，它发生在日面之后 (W98S25)，然而却呈现很强的  $2.223\text{MeV}$  线发射。在排除了  $^{32}\text{S}$  以及日面其它小耀斑等多种因素的可能影响之后，文献<sup>[21]</sup> 认为粒子作用区的范围在空间上十分弥散，可覆盖达  $10^\circ$  的区域，来自这一弥散区的发射占脉冲分量的发射约 10%，因此只有在脉冲分量被日面挡住之后，才能观测到弥散区发射。近来有人认为，该耀斑可能是耀斑后日冕物质抛射 (CME) 驱动激波加速产生  $\gamma$  射线的例子<sup>[22]</sup>。另一种观点认为是大范围日冕激波加速产生空间延伸的  $\gamma$  射线发射<sup>[23]</sup>。这种空间延伸发射的解释尚有待未来  $\gamma$  射线像观测的证实。

### 2.4 大于 $10\text{MeV}$ $\gamma$ 射线耀斑的日面分布

基于 GRS/SMM 早期观测结果，Rieger 等人<sup>[24]</sup> 首次发现具有大于  $10\text{MeV}$   $\gamma$  射线发射的耀斑均靠近日面的边缘，这一发现后来被 Vestrand 等人<sup>[25]</sup> 研究 21 周期间完整的 SMM 观测资料进一步证实。一般认为，这反映了加速高能电子或离子的各向异性<sup>[26]</sup>，并由此产生了一系列的理论工作<sup>[27-29]</sup>。这一发现曾被认为是太阳物理史上的重要发现之一<sup>[30]</sup>。然而它在太阳活动第 22 周却面临挑战。

GRS/SMM 对 22 周上升期的观测显示, 大于 10MeV  $\gamma$  射线耀斑可发生在日面的任何位置 [31]。这一结果被 CGRO 的观测进一步证实 [32,33]。对 Phebus/GRANAT 在 1991 年至 1994 年期间的耀斑观测结果统计显示 [34], 大于 10MeV 发射的日面分布确实不满足 Rieger 分布。这就提出了一个问题: Rieger 分布是与太阳的磁活动周期有关还是纯属偶然? 因此在太阳活动 23 周峰年期间继续探测大于 10MeV  $\gamma$  射线耀斑显得十分重要。

2.5 耀斑  $\gamma$  射线前兆发射

Rieger 在详细分析 GRS/SMM 早期观测结果时, 就 3 个大耀斑 (大于 10MeV 辐射) 给出了  $\gamma$  射线前兆发射特征 [35]: 4.1—6.4MeV 及 10—25MeV 光变曲线显示在耀斑上升相具有一个明显的爆发峰, 而这一爆发在 114—200keV 及其以下能量却不明显, 该爆发的核线发射很弱, 其谱具有“电子占优耀斑” [36] 的特点。图 1 给出了一个例子。目前尚未见到对耀斑  $\gamma$  射线前兆发射的理论解释。

2.6 高能延伸相的再确认

著名的 1982 年 6 月 3 日大耀斑具有这样的特征: 脉冲相达到极大后, 在大于 25MeV 波

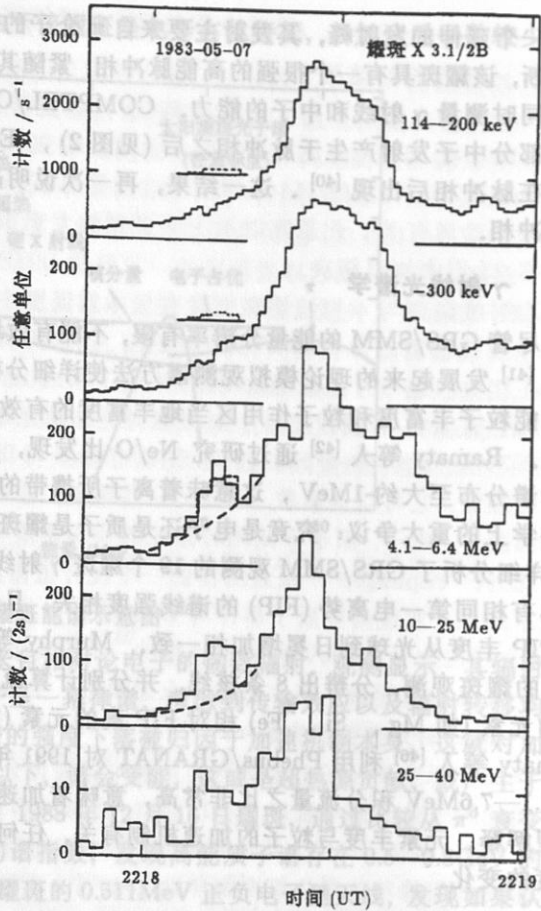


图 1 耀斑  $\gamma$  射线前兆发射的一个例子 [35]

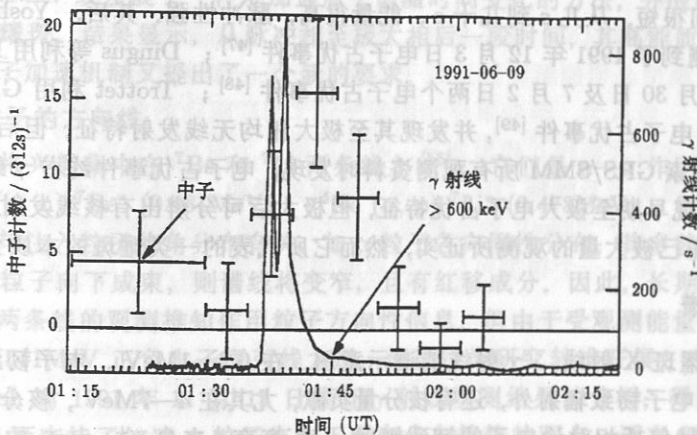


图 2 1991 年 6 月 9 日耀斑中子发射与  $\gamma$  射线探测时间轮廓比较 [39]

段有一个延伸的发射峰,其发射主要来自 $\pi$ 介子的衰变<sup>[37]</sup>。根据 $\gamma$ 射线观测结果及中子测量推断,该耀斑具有一个很强的高能脉冲相,紧随其后还有一个更高能的延伸相<sup>[38]</sup>。CGRO具有同时测量 $\gamma$ 射线和中子的能力。COMPTEL/CGRO对1991年6月9日耀斑观测<sup>[39]</sup>显示大部分中子发射产生于脉冲相之后(见图2),EGRET/CGRO也探测到大于20MeV的 $\gamma$ 射线在脉冲相后出现<sup>[40]</sup>。这一结果,再一次说明高能延伸相的存在,其加速机制可能有别于脉冲相。

## 2.7 $\gamma$ 射线光谱学

尽管GRS/SMM的能量分辨率有限,不能有效地观测核线的轮廓,但反演谱法及Murphy等人<sup>[41]</sup>发展起来的理论模拟观测谱方法使详细分析谱(至少强度)成为可能,并业以成为研究高能粒子丰富度和粒子作用区当地丰富度的有效手段。应该说,这一领域的研究目前十分活跃。Ramaty等人<sup>[42]</sup>通过研究Ne/O比发现,为了避免该值过大,要求加速离子谱保持幂律谱分布至大约1MeV,这意味着离子所携带的能量可与电子相比拟,甚至更大,从而导致科学上的重大争议:究竟是电子还是质子是耀斑的能量主导(详见文献<sup>[43]</sup>)。Share等人<sup>[44]</sup>详细分析了GRS/SMM观测的19个耀斑 $\gamma$ 射线光谱,发现耀斑等离子体丰度各不相同,但具有相同第一电离势(FIP)的谱线强度相关,且低FIP与高FIP谱之比可相差4倍,这与低FIP丰度从光球到日冕增加相一致。Murphy等人<sup>[45]</sup>利用OSSE/CGRO对1991年6月4日的耀斑观测,分辨出8条核线,并分别计算流量比以研究当地丰度,结果发现,FIP值低的元素(如Mg、Si、Fe)相对FIP高的元素(如C、N、O)丰度之比有增加的趋势。Ramaty等人<sup>[46]</sup>利用Phebus/GRANAT对1991年6月1日耀斑的观测,发现1.1—1.8MeV与4.1—7.6MeV积分流量之比非常高,意味着加速粒子中的重元素丰度增加,并用薄靶作用模型解释。元素丰度与粒子的加速机制有关,任何有效的加速机制都必须能够解释加速粒子丰度的变化。

## 2.8 电子占优事件的再证实

电子占优事件是Rieger和Marschhaeuser在GRS/SMM对1989年3月6日耀斑观测中首次发现的<sup>[36]</sup>。其主要特征是 $\gamma$ 射线连续谱中缺乏核线,很可能是高能电子韧致辐射占优,往往爆发持续时间很短,从几s到几十s,能量很高,脉冲性强。其后,Yoshimori等人利用WBS/Yohkoh观测到了1991年12月3日电子占优事件<sup>[47]</sup>;Dingus等利用EGRET/CGRO观测到1991年6月30日及7月2日两个电子占优事件<sup>[48]</sup>;Trottet利用GRANAT观测到1990年5月24日电子占优事件<sup>[49]</sup>,并发现其至极大相均无线发射特征,但后期有2.223MeV线发射。我们在搜索GRS/SMM所有观测资料时发现,电子占优事件约占 $\gamma$ 射线耀斑总数的1/4,另有1/4呈现早期至极大电子占优特征,但极大后可分辨出有核线发射。因此看来,电子占优事件的存在已被大量的观测所证实,然而它所代表的一类耀斑的本质至今仍是谜。

## 2.9 $\gamma$ 射线能谱

图3显示了耀斑X射线、 $\gamma$ 射线能谱示意图。在0.3—1MeV,电子韧致辐射为主,在1—10MeV,除了电子韧致辐射外,还有核分量贡献,尤其在4—7MeV,核分量常常占优。对10MeV以上的贡献包括相对论电子的韧致辐射、 $\pi^0$ 衰变、来自 $\pi^+$ 、 $\pi^-$ 的次级电子或正电子韧致辐射。这些都是比较清楚的事实。最近几年,关于能谱的解释有一些进展。Petrosian

等人<sup>[50]</sup>研究了1989年3月6日耀斑, 由于该耀斑呈电子占优特征, 其加速质子数较少, 因

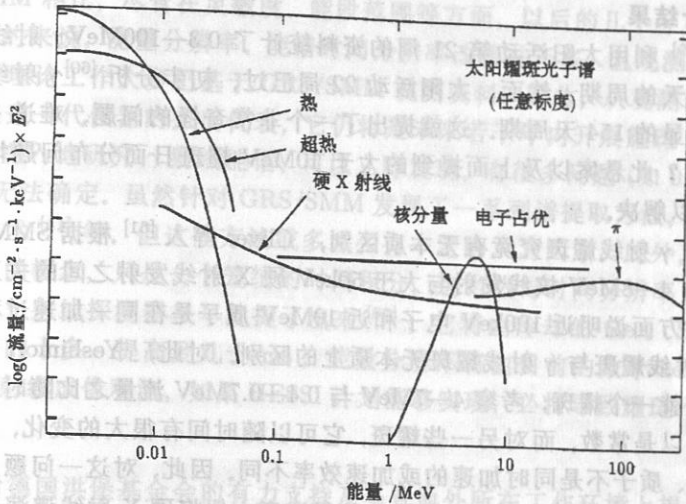


图3 耀斑能谱示意图<sup>[38]</sup>

此高能端不可能是  $\pi^0$  衰变贡献, 而一定来自相对论电子的韧致辐射。观测显示, 其辐射在近 50MeV 处有强度下落现象。如果加速电子呈一幂律谱, 考虑到传输效应以及辐射转移均不能解释观测到的强度下落, 这种偏离幂律谱的强度下落被归因于加速机制本身, 这就对加速机制提出了新的要求。在低能端约 100keV 以下, 谱会变陡, 这或是超热源贡献, 或产生于加速机制本身<sup>[51]</sup>。Alexander 等人<sup>[52]</sup>研究了1988年12月16日耀斑, 通过比较从  $\pi^0$  衰变的多普勒宽度获得的谱指数和从  $\gamma$  射线获得的谱指数, 发现高能质子谱存在 0.5—0.8GeV 的高端截止能量。Gan 等人<sup>[53]</sup>最近研究了同一耀斑的 0.511MeV 正负电子湮灭线, 发现如果认为高能质子是幂律谱, 则含入  $\mu^+$  衰变所计算的 0.511MeV 线流量远远大于观测值, 这意味着, 加速质子谱在 0.5GeV 处存在高端截止能量, 这一结果与 Alexander 等人的结果一致。另外, 如何从现有的  $\gamma$  射线能谱中获得加速质子能谱随时间的变化, 是一个十分重要的问题。Gan<sup>[54]</sup>最近基于 2.223MeV 线发展了一种求加速质子谱随时间变化的方法, 并应用于 GRS/SMM 观测到的 3 个大耀斑, 结果显示, 从脉冲相至极大相后一段时间, 其高能质子谱呈单调的变硬趋势。这对离子加速机制又提出了一个新的要求。

## 2.10 高能粒子的方向性

近来人们将兴趣集中在  ${}^7\text{Be}$  和  ${}^7\text{Li}$  两条线上<sup>[55]</sup>, 它们是  $\alpha$ - $\alpha$  作用的产物, 其反应过程分别为  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}^*$  (0.431MeV)、 ${}^4\text{He}(\alpha, p){}^7\text{Li}^*$  (0.478MeV)。很早就认为<sup>[56,57]</sup> 这两条线的形状与注入粒子的角分布有关。如  $\alpha$  粒子各向同性分布, 其多普勒致宽将使两线混合起来; 如  $\alpha$  粒子向下成束, 则谱线将变窄, 且有红移成分。因此, 长期以来, 人们一直期望能通过对这两条线的观测推知作用粒子方向性信息, 但由于受观测能量分辨率的限制以及此二条线靠 0.511MeV 正负电子湮灭线太近, 使得这类研究较难开展。Yoshimori 等人<sup>[58]</sup>从 WBS/Yohkoh 对 1991 年 11 月 15 日耀斑  $\gamma$  射线观测结果的分析, 得到该两条线分别有 7% 的红移, 从而支持了加速  $\alpha$  粒子有向下成束分布趋势的观点。近来 Share 等人详细分析 GRS/SMM 观测到 19 个强耀斑的  $\alpha$ - $\alpha$  线, 发现加速  $\alpha$  粒子的向下成束分布几乎可排除<sup>[55]</sup>。

对此,尚需进一步研究,特别是有待于高能量分辨率的观测。

### 2.11 一些新统计结果

Rieger 等人<sup>[59]</sup>利用太阳活动第 21 周的资料统计了 0.3—100MeV $\gamma$  射线耀斑发生的频率,发现存在 154 天的周期。然而,太阳活动 22 周已过,初步分析<sup>[60]</sup> $\gamma$  射线耀斑发生的频率,并未显示有明显的 154 天周期。这就提出了一个非常奇怪的问题,难道 154 天周期与太阳的磁活动周有关?此悬案以及上面提到的大于 10MeV 耀斑日面分布问题均期望能在太阳活动第 23 周中加以解决。

X 射线耀斑与  $\gamma$  射线耀斑究竟有无本质区别, Cliver 等人<sup>[61]</sup>根据 SMM 的观测资料统计了  $\gamma$  射线耀斑的 4—8MeV 核线发射与大于 50keV 硬 X 射线发射之间的关系,发现它们之间存在相关,这一方面说明近 100keV 电子和近 10MeV 质子是在同一加速过程中产生的,另一方面也说明 X 射线耀斑与  $\gamma$  射线耀斑无本质上的区别。对此, Yoshimori 等人<sup>[62]</sup>的结果则有所不同。他们就一个耀斑,考察 4—7MeV 与 0.4—0.7MeV 流量之比随时间的变化,发现对有些耀斑,它可以是常数,而对另一些耀斑,它可以随时间有很大的变化,他们认为,在后一种情况中,电子、质子不是同时加速的或加速效率不同。因此,对这一问题目前尚无定论。

此外, Kiplinger<sup>[63]</sup>最近所作的一个统计值得注意。他将硬 X 射线谱演化与高能质子事件联系起来,发现高能质子事件与 C 类硬 X 射线耀斑相关性最好。在 22 个 C 类耀斑中,竟有 18 个对应大于 10MeV 高能质子事件,而在其余的 130 个样品中,仅有 4.6% 对应高能质子事件。这说明高能质子事件起源于上层大气,受激波加速。

### 2.12 耀斑的分类更臻完善

从行星际空间粒子直接探测的角度可将耀斑分为两类<sup>[64]</sup>:脉冲事件和渐变事件,这主要可从高能粒子的元素丰富度上加以鉴别。对脉冲事件, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 、Fe/O 较高( $\approx 1$ ),且电子丰富,而 H/He 较低( $\approx 10$ ),持续时间数小时,有射电 III、V 型爆,硬 X 射线发射呈脉冲性,该类耀斑在太阳峰年的发生频率每年约 1000 个。而渐变事件则质子丰富, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ ( $\approx 0.0005$ )、Fe/O( $\approx 0.1$ ) 低, H/He 却高( $\approx 100$ ),持续时间达几 d,伴随射电 II、IV 型爆及日冕物质抛射,这类耀斑的发生频率每年仅 10 个左右,文献<sup>[64]</sup>详细给出了两类事件的元素丰度差异及变化规律,它们实际上代表着不同的加速机制,反映了不同的波-粒子相互作用过程。

### 2.13 关于加速机制

目前主要有三种加速机制:随机加速、激波加速、电场加速。最近 Miller 等人对此进行了总结<sup>[65]</sup>。理论模型必须能解释加速粒子的能量上限、加速时标及加速效率、加速粒子的元素丰度增加等。一般认为,渐变事件中的粒子由 CME 驱动的激波加速;而脉冲事件中的粒子由等离子体波回旋共振相互作用加速。哨声波被认为对相对论电子加速非常有效,级联 Alfvén 波可有效加速离子及解释 ${}^3\text{He}$ 、重离子丰度的增加,且不需要预加速过程<sup>[66]</sup>。电场加速似乎只对应产生小于 200keV 的非热电子<sup>[67]</sup>。尽管目前有些模型可以解释加速离子中的丰度反常,但至今尚无一个模型可以解释观测到的能谱。看来,对加速机制的研究似落后于观测。

## 3 展 望

经过最近两三年的高速发展之后,耀斑  $\gamma$  射线研究将进入一个暂时的平稳时期,这主要

是因为太阳目前处于极小活动年, 不能期望观测上有新的重大发现。

与 GRS/SMM 相比, 尽管在灵敏度、能段范围等方面, 以后的几个  $\gamma$  射线探测器占有一定的优势, 但总的来说, 能量分辨率、能谱时间分辨率改善并不多, 且观测耀斑数目少。目前精细的能谱分析理论工作大多仍基于 GRS/SMM 观测资料。因此, 从观测能谱的角度而言, GRS/SMM 仍是这一代仪器的杰出代表, 它仍将是未来若干年内开展耀斑  $\gamma$  射线理论研究的主要资料来源。深入地研究  $\gamma$  射线能谱, 可以立即发现, 有很多问题 (如 0.511MeV 线轮廓究竟怎样) 目前尚无法确定。虽然针对 GRS/SMM 发展了一系列谱提取方法, 如谱反演法<sup>[68]</sup>、多分量谱拟合技术<sup>[41]</sup>等。但这些方法或多或少有一定的人为因素。此外, 目前的  $\gamma$  射线谱研究很少有演化的概念, 只是一个笼统的时间积分, 这当然与时间分辨率及仪器的灵敏度不高有关。下一代  $\gamma$  射线探测器很早就提了出来<sup>[69]</sup>, 它将由冷却的 Ge、Si 作为探头, 时间分辨率将由目前的十多 s 提高到几十 ms, 能量分辨率将由目前的数十 keV 提高到 1keV 左右, 并将进行  $\gamma$  射线成像观测, 如果 HESSI 计划能够实现, 必将导致耀斑  $\gamma$  射线研究的一场新的革命。

致谢 作者感谢德国洪堡基金会的有力支持及马普地外所在工作环境中提供的方便。

### 参 考 文 献

- 1 甘为群, 张和祺. 天文学进展, 1994, 12: 169
- 2 Hudson H S. In: Johnson W N ed. Proc. GRO Sci. Workshop, Greenbelt, Maryland, 1989, 4-351
- 3 Talon R, Trotter G, Vilmer N et al. Solar Phys., 1993, 147: 137
- 4 Vilmer N. Ap. J. Suppl. Ser., 1994, 90: 611
- 5 Terekhov O V. Astron. Lett., 1996, 22: 362
- 6 Akimov V V, Ambroz P, Belov V et al. Solar Phys., 1996, 166: 107
- 7 Yoshimori M, Okudaira K, Hirasima Y et al. Solar Phys., 1991, 136: 69
- 8 Kanbach G O, Bertsch D L, Fichtel C E et al. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1993, 97: 349
- 9 Rank G, Diehl R, Licht G G et al. AIP Conf. Proc., 1994, 294: 100
- 10 Rank G, Bennett K, Bloemen H et al. AIP Conf. Proc., 1996, 374: 219
- 11 Bersch D, Hartman R, Hunter S et al. Bull. Am. Astron. Soc., 1997, 29: 782
- 12 Murphy R J, Share G H. Bull. Am. Astron. Soc., 1997, 29: 783
- 13 Mandzhavidze N, Ramaty R. Ap. J., 1992, 396: L111
- 14 Lau Y T, Northrop T G, Fim J M. Ap. J., 1993, 414: 908
- 15 Lau Y T, Ramaty R. Solar Phys., 1995, 160: 343
- 16 Ryan J M, McConnell M M. AIP Conf. Proc., 1996, 374: 200
- 17 Mandzhavidze N, Ramaty R, Bertsch D L et al. AIP Conf. Proc., 1996, 374: 225
- 18 Ramaty R, Mandzhavidze N. AIP Conf. Proc., 1996, 374: 533
- 19 Wang H T, Ramaty R. Solar Phys., 1974, 36: 129
- 20 Hua X M, Lingenfelter. Solar Phys., 1987, 107: 351
- 21 Vestrand W T, Forrest D J. Ap. J., 1993, 409: L69
- 22 Ramaty R, Mandzhavidze N. AIP Conf. Proc., 1996, 374: 533
- 23 Cliver E W, Kahler S W, Vestrand W T. 23rd Inter. Cosmic Ray Conf. Proc., 1993, 3: 91
- 24 Rieger E, Reppin C, Kanbach G et al. 18th Inter. Cosmic Ray Conf. Proc., 1983, 4: 83
- 25 Vestrand W T, Forrest D J, Chupp E L et al. Ap. J., 1987, 322: 1010
- 26 Rieger E. Solar Phys., 1989, 121: 323
- 27 McTiernan J M, Petrosian V. Ap. J., 1991, 379: 381
- 28 Mandzhavidze N, Ramaty R. Ap. J., 1992, 389: 739

- 29 Ramaty R, Miller J A, Hua X M *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1990, 73: 199
- 30 Hudson H S. *Solar Phys.*, 1987, 113: 1
- 31 Vilmer N. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 90: 611
- 32 Suleiman R, Forrest D, McConnell M *et al.* *AIP Conf. Proc.*, 1994, 294: 21
- 33 Schneid E J. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1996, 120: 299
- 34 Terekhov O V, Kuzmin A G, Sunyaev R A *et al.* *Astron. Lett.*, 1996, 22: 362
- 35 Rieger E. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 90: 645
- 36 Rieger E, Marschhaeuser H. In: Wingler R M, Kiplinger A L eds, *Proc. Max'91 Workshop, Estes Park, Colorado*, 1991, 3: 68
- 37 Chupp E L. *AIP Conf. Proc.*, 1996, 374: 3
- 38 Hudson H S, Ryan J. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1995, 33: 239
- 39 Ryan J, Forrest D, Lockwood J *et al.* *AIP Conf. Proc.*, 1994, 294: 89
- 40 Schneid E J, Brazier K T S, Kanbach G *et al.* *AIP Conf. Proc.*, 1994, 294: 94
- 41 Murphy R J, Share G H, Letaw J R *et al.* *Ap. J.*, 1990, 358: 298
- 42 Ramaty R. *Ap. J.*, 1995, 455: L193
- 43 甘为群. *天文学进展*, 1998, 16: 222
- 44 Share G H, Murphy R J. *Ap. J.*, 1995, 452: 933
- 45 Murphy R J, Share G H, Grove J E *et al.* *AIP Conf. Proc.*, 1996, 374: 184
- 46 Ramaty R, Mandzhavidze N, Barat C *et al.* *Ap. J.*, 1997, 479: 458
- 47 Yoshimori M, Takai Y, Morimoto K *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1992, 44: L107
- 48 Dingus B L, Sreekumar P, Bertsch D L *et al.* *AIP Conf. Proc.*, 1994, 294: 177
- 49 Trotter G. *AIP Conf. Proc.*, 1994, 294: 3
- 50 Petrosian V, McTiernan J M, Marschhaeuser H. *Ap. J.*, 1994, 434: 747
- 51 Petrosian V. *AIP Conf. Proc.*, 1994, 294: 162
- 52 Alexander D, Dunphy P P, MacKinnon A L. *Solar Phys.*, 1994, 151: 147
- 53 Gan W Q, Rieger E. *Solar Phys.*, 1997, submitted
- 54 Gan W Q. *Ap. J.*, 1998, 496: 992
- 55 Share G H, Murphy R J. *Ap. J.*, 1997, 485: 409
- 56 Kozlovsky B, Ramaty R. *Astrophys. Lett.*, 1977: 19
- 57 Murphy R J, Hua X M, Kozlovsky B *et al.* *Ap. J.*, 1990, 351: 29
- 58 Yoshimori M, Morimoto K, Suga K *et al.* In: Uchida Y, Kosugi T, Hudson H S eds. *Magneto Dynamic Phenomena in the Solar Atmosphere Prototypes of Stellar Magnetic Activity*, Dordrecht: Kluwer, 1996, 573
- 59 Rieger E, Share H, Forrest D J *et al.* *Nature*, 1984, 312: 623
- 60 Oliver R, Ballester J L. *Solar Phys.*, 1995, 156: 145
- 61 Cliver E W, Crosby N B, Dennig B R. *Ap. J.*, 1994, 426: 767
- 62 Yoshimori M, Suga K, Morimoto K *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1994, 90: 639
- 63 Kiplinger A. *Ap. J.*, 1995, 453: 973
- 64 Reames D V. *AIP Conf. Proc.*, 1996, 374: 35
- 65 Miller J A, Cargill P J, Emslie A G *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 14631
- 66 Smith D F, Miller J A. *Ap. J.*, 1995, 446: 390
- 67 Benka S G, Holman G D. *Ap. J.*, 1994, 485: 469
- 68 Marschhaeuser H. PhD thesis, Garching bei Munich: Max-Planck-Institute of Extraterrestrial Physics, 1993
- 69 Dennis B R *et al.* *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1996, 28: 941



# The New Progress of Observations and Studies on Solar Flare Gamma-Rays

Gan Weiqun Lin Chunmei

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

## Abstract

Due to the new observations obtained by CGRO, GRANAT, YOHKOH, and other satellites, and due to detailed analyses based on the data of the GRS/SMM, the studies on solar flare  $\gamma$ -rays have developed greatly. This paper summarizes the recent progresses in both observations and studies, which include: very long duration  $\gamma$ -ray bursts; intense 2.223 MeV line event off the solar limb; the helio-distribution of the  $\gamma$ -ray flares with an emission above 10 MeV; the spectroscopy of solar  $\gamma$ -rays (lines plus continuum); the acceleration mechanisms; and so on. At last we prospect the near future of the subject.

**Key words** solar flare—X,  $\gamma$ -rays

GRBM 可以接收到来自整个  $4\pi$  立体角范围内的  $\gamma$  暴，但是它的定位能力很差。正如前所述，由于 2 个 WFC 具有很大的视场，它们随时都监视着约占 5% 的天区面积。每当 GRBM 探测到 10<sup>-8</sup> erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 的  $\gamma$  暴时，GRBM 的 WFC 就会发出警报，由地面站接收并传回地面站。地面站会根据 GRBM 探测到的  $\gamma$  暴的方位角和能量，通过调整卫星姿态将 NFI 指向  $\gamma$  暴源。NFI 包括两个仪器 LECS 和 MECS，其中 LECS 工作于 0.1—10 MeV 能段，定位精度可达 50' 左右，而 MECS 工作于 2—10 keV 能段。