

# 太阳耀斑 $\gamma$ 射线辐射的统计特征和机制

徐永焯

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

SMM 和“火鸟”卫星上的  $\gamma$  射线探测器在 21 周太阳活动峰年探测到 200 多个太阳  $\gamma$  射线事件。从这些观测资料中获得一些太阳耀斑  $\gamma$  射线辐射的统计特征。本文介绍了其中重要的几种：耀斑出现率的分布、时间结构、事件大小、方向性、连续辐射同耀斑的其他辐射的关系、“MeV 多余”以及耀斑  $\gamma$  射线谱线辐射等。最后扼要叙述了太阳耀斑  $\gamma$  射线的辐射机制。

## 一、引 言

在太阳耀斑各种辐射中，比较重要的一种是  $\gamma$  射线辐射。它有连续和谱线两种辐射。在连续辐射中，0.1—1MeV 光子能量的  $\gamma$  射线来源于原始电子的韧致作用；10MeV 以上光子能量的高能辐射由两种机制产生，其一也是原始电子的韧致，其二是  $\pi$  介子衰变。 $\gamma$  射线谱线主要是高能质子和原子核同太阳大气层里粒子的核反应形成的。因此  $\gamma$  射线是通向太阳高能过程的窗口，观测它的能谱和时间结构不仅为了解太阳耀斑粒子加速和传输提供重要资料，也能为确定太阳大气中其他物理过程提供新的方法。

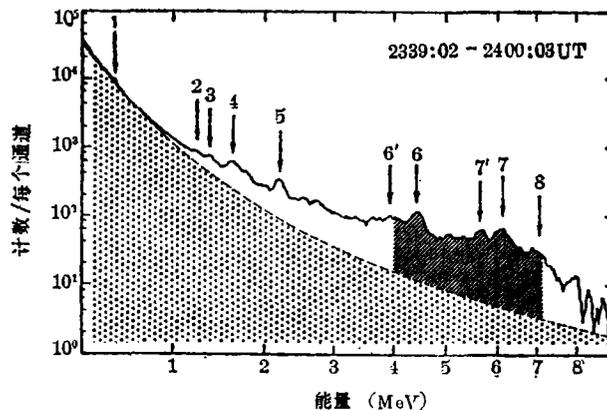


图 1 1982 年 12 月 7 日耀斑的 280 keV—9MeV 能量的计数谱。虚线：连续辐射；折线：连续与谱线辐射之和；斜线：核线作用区。(1) 0.511 MeV(正电子湮灭线)，(2) 1.24MeV( $^{56}\text{Fe}$ )，(3) 1.38 MeV ( $^{24}\text{Mg}$ )，(4) 1.63MeV( $^{20}\text{Ne}$ )，(5) 2.223MeV( $n\gamma$ )，(6) 4.43 MeV( $^{12}\text{C}$ )，(7) 6.13MeV( $^{16}\text{O}$ )，(8) 7.12MeV( $^{16}\text{O}$ )<sup>[28]</sup>

1990 年 3 月 15 日收到。

1990 年 6 月 25 日收到修改稿。

第一个太阳 $\gamma$ 射线证据是 Hirasima 等人提出的<sup>[1]</sup>, 第一个太阳耀斑 $\gamma$ 射线谱线是 1972 年 8 月 4 日和 7 日得到的。OSO-7 探测到该事件的 4 条谱线<sup>[2]</sup>, Prognoz-2 测量到它的连续辐射<sup>[3]</sup>。此后, HEAO-1 和 HEAO-3 相继于 1978 年和 1979 年再次探测到太阳耀斑 $\gamma$ 射线辐射<sup>[4,5]</sup>。这些早期观测在发现和证实太阳耀斑 $\gamma$ 射线存在方面做了重要工作, 但与 SMM 和“火鸟”(Hinotori)卫星相比, 它们还是相形见绌的。

SMM 和“火鸟”卫星分别发射于 1980 年 2 月 14 日和 1981 年 2 月 21 日。它们探测 $\gamma$ 射线的仪器分别为 $\gamma$ 射线光谱仪(简称 SMM/GRS)和 $\gamma$ 射线探测器(简称 SGR)<sup>[7]</sup>。到 1986 年 2 月为止, “火鸟”卫星在 300keV 以上光子能量上探测到 40 个耀斑, SMM 探测到 150 个。大量观测为进行统计分析提供了宝贵的观测数据。

## 二、耀斑 $\gamma$ 射线辐射的统计特征

SMM 发射前, 太阳耀斑 $\gamma$ 射线辐射观测资料很少, 没有统计意义, 本文所用的资料全部取自 SMM 和“火鸟”卫星的观测结果。

图 1 概括了太阳耀斑 $\gamma$ 射线谱的一般特征: 光子能量在 1MeV 以下没有强谱线, 全是连续辐射, 能谱形状和幂律谱类似(图中虚线)。光子能量在 1—7.5MeV, 谱线贡献很明显(图中折线)。光子能量在 7.5MeV 以上时谱线消失。光子能量在 4—7MeV 时主要是核作用线辐射区域(图上斜线)。

### 1. 连续辐射的统计特征

#### (1) 耀斑出现率的分布

图 2 是 1980 年 3 月—1981 年 10 月 SMM 探测的 $\gamma$ 射线耀斑时间分布图, 图上给出 300keV 以上耀斑的峰值光子能量、光学耀斑级别和观测日期。详细资料参看文献[8,9]。由这些资料不难得出:

(i) 耀斑的峰值光子能量和光学耀斑级别无关, 有些事件峰值光子能量很高, 却是光学上的亚耀斑(例如 1980 年 6 月 4 日和 1981 年 10 月 14 日事件)和小耀斑(例如 1980 年 6 月 21 日事件), 有些事件在光学上是 3 级以上大耀斑, 而在 300keV 以上光子能量上却没有明显的峰值光子流量;

(ii)  $\gamma$ 射线耀斑出现的频率同黑子平均数增减无关。图 3 画出 300keV 以上光子能量每月探测的耀斑数和黑子平均数的关系, 从黑子活动来看, 预报值、观测值以及 8—20 个太阳活动周期的平均值在 1980 年 2 月—1981 年 10 月期间, 都处于下降时期, 而 SMM/GRS 每月观测的 $\gamma$ 射线耀斑数却没有任何下降的趋势。相反, 1981 年 10 月 14 日事件, 峰值光子流量还相当高。

(iii) 峰值光子能量高的事件成群出现, 图 2 上出现了 4 群。每两群间隔约 5 个月。仔细分析, 两群间隔 154 天。这就是 154 天 $\gamma$ 射线耀斑周期。这一周期是上一个太阳活动周期的重要发现。

#### (2) 时间结构

在 300keV 以上光子能量上,  $\gamma$ 射线耀斑的时间结构很不相同。持续时间: 10s 左右到

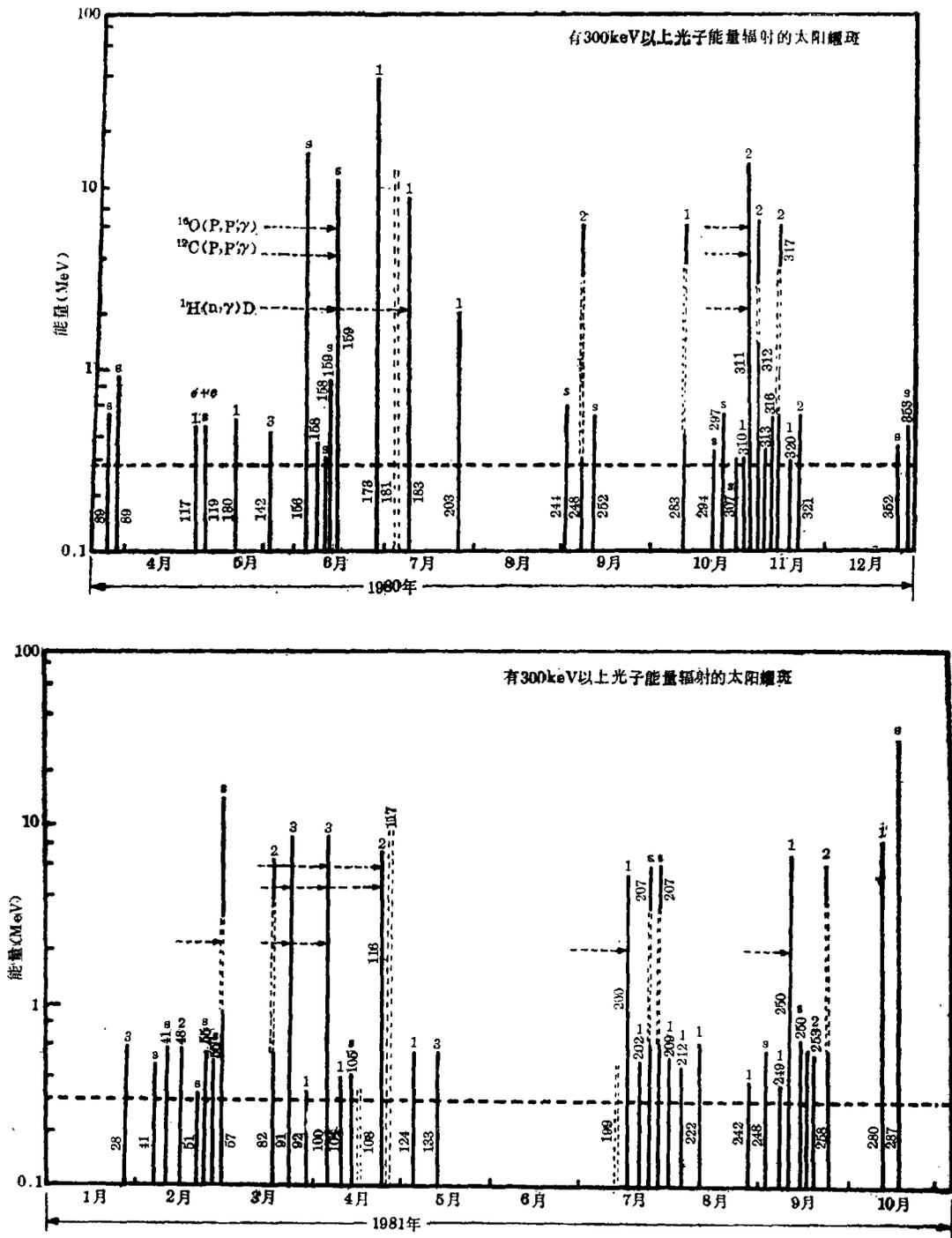


图 2 1980 年 3 月——1981 年 10 月  $\gamma$  射线耀斑出现时间分布图

竖线左边数字是耀斑出现的日期(从 1 月 1 日起计算), 竖线上端的数字和字母是光学耀斑级别。S——亚耀斑; 1——1 级耀斑; 2——2 级耀斑; 3——3 级耀斑; : : ——表示无代表性耀斑; .....是 SMM/GRS 探测器阈值<sup>[6]</sup>

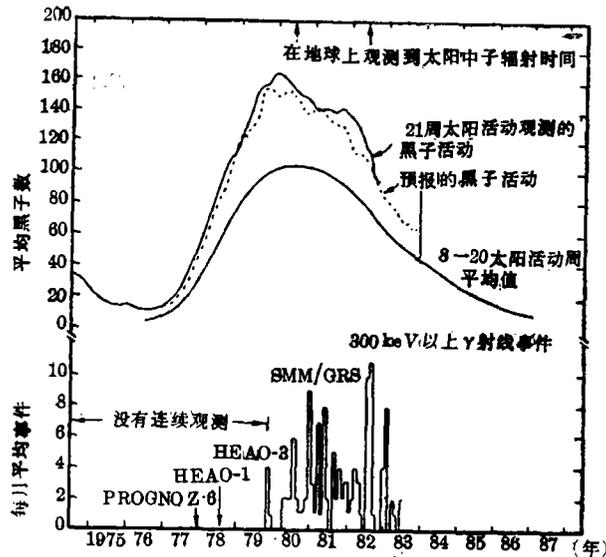


图 3 300keV 以上  $\gamma$  射线耀斑数和黑子平均数的关系。它表明不管黑子平均数由观测、预报得来的，还是 8—20 太阳活动周平均得来的，都和  $\gamma$  射线耀斑数没有对应关系<sup>[33]</sup>

20min 的都有。前者出现在尖峰脉冲中，后者出现在复杂的脉冲中。脉冲个数：典型耀斑由两个以上脉冲组成。单个脉冲可短到 10s，也可长到 2min。2min 的长脉冲出现在 20min 的长寿命事件里。最短的脉冲和 100keV 以下硬 X 射线“初级耀斑爆发”相类似。脉冲宽度：随耀斑而异，一般在  $4 \pm 1$ — $24 \pm 5$ s。脉冲结构：具有以下有趣特征：(i) 任何一个给定的事件，快慢脉冲总是分开的。脉冲持续时间粗略地与整个耀斑寿命成正比；(ii) 在一个事件中，辐射峰值时间同能量的关系有两种：高低能辐射峰值相同和高能比低能滞后<sup>[10-12]</sup>。高低能辐射峰值同时出现的事例是很多的。1982 年 2 月 8 日事件是一个很好的例子。图 4 是它的时间史。多波段测量的情况见[33]。高能比低能滞后的现象，Bespalov 称它是“最有挑战性的资料”<sup>[13]</sup>。Bai 等人较详细地分析了滞后时间同能量关系后指出，300keV 以上光子能量同 10—30keV 光子能量时间轮廓相比，滞后时间在几秒至几十秒之间<sup>[14,16]</sup>。其中有些耀斑滞后时间随光子能量增加平滑地增加，有些耀斑似乎在一定的光子能量上突然增加。Gardner 等<sup>[17]</sup>和 Yoshimori<sup>[18]</sup>也研究了高能比低能辐射峰值滞后。他们发现，在一些耀斑中，4.1—6.4MeV  $\gamma$  射线谱线辐射峰值比 300keV—1MeV 光子能量的辐射滞后 2—45s。滞后 45s 的事件出现在 1981 年 4 月 27 日大耀斑(图 5)中。此外，峰值滞后偶而还同耀斑类型有关：脉冲耀斑出现的峰值滞后短，渐变耀斑出现的峰值滞后长；(iii) 有些耀斑虽然高能辐射峰值比低能滞后，但各个能道脉冲开始的时间相同。这样的事件已发现两例，一例出现在 1980 年 6 月 7 日，一例出现在 1980 年 6 月 21 日。Forrest 和 Chupp 研究了这些事件<sup>[18]</sup>，发现对于 40—80keV、80—140keV、300—330keV 和 4.1—6.4MeV 等能道，在仪器分辨率范围内，脉冲开始时间是相同的，而高能峰值则明显比低能滞后。“火鸟”卫星在 300keV 以上光子能量上的测量结果也有类似时间结构<sup>[19]</sup>；(iv) 高能峰值滞后的时间似乎同渐变脉冲上升时间有关。

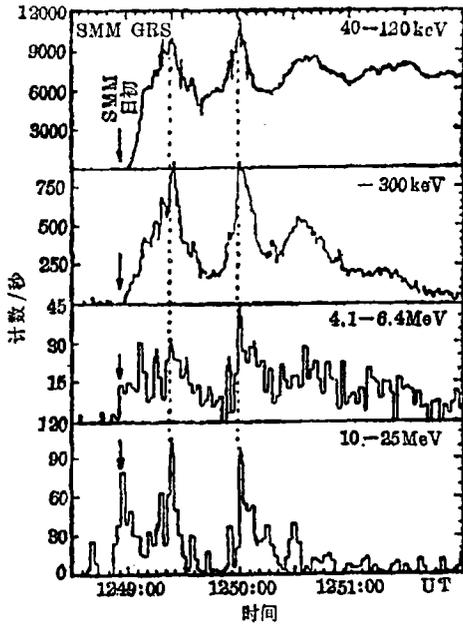


图 4 1982 年 2 月 8 日耀斑。由图可见，在 12<sup>h</sup>50<sup>m</sup> 的峰值中，在 SMM/GRS 时间分辨率(2s)以内，四个能道的峰值是同时的<sup>[33]</sup>

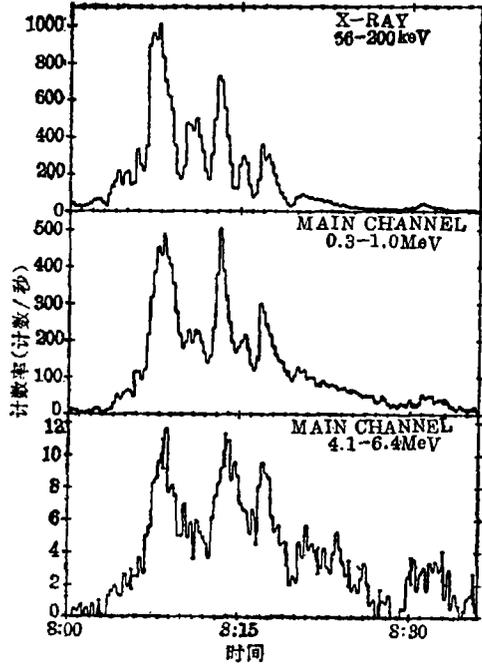


图 5 1981 年 4 月 27 日耀斑。在仪器分辨率范围内，3 个能道峰值的时间史<sup>[35]</sup>

(3) 事件大小分布

图 6 给出 86 个光子能量在 300keV—1MeV 范围的  $\gamma$  射线流量同事件数的关系。这个关系可用公式

$$F \propto S^{-0.5}$$

表示。其中  $S$  为 300keV—1MeV 能量范围内流量 (photon/cm<sup>2</sup>)， $F$  为流量大于  $S$  的事件数(此式只适用于  $S > 10$  photon/cm<sup>2</sup> 的事件。 $S < 10$  photons/cm<sup>2</sup> 的事件因仪器效率限制而有较大偏离)。图 6 上的曲线比 OSO-7 和 SMM/HXRBS 在低能范围测量的结果所作的图平一些。OSO-7 在硬 X 射能量范围测量了 100 个事件，结论是

$$F \propto S^{-0.9}$$

SMM/HXRBS<sub>2</sub> 测量了 6000 个事件，结论是

$$F \propto S^{-0.8}$$

就是说，流量大的事件同流量小的事件相比，前者出现在 300keV—1MeV 能量范围的比出现在低能的多。

Dermer 对这种高能分布较平的现象作了分析<sup>[20]</sup>，他认为这种分布可能是辐射各向异性

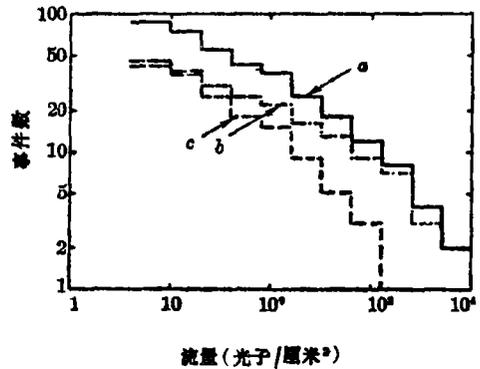


图 6 86 个耀斑的事件数同流量的关系<sup>[21]</sup>  
 a. 1980 年 2 月—1986 年 2 月 SMM/GRS 探测的所有 300 keV 以上光子能量的耀斑事件数和流量的关系  
 b.  $\theta \geq 60^\circ$  事件数同流量的关系  
 c.  $\theta < 60^\circ$  事件数同流量的关系

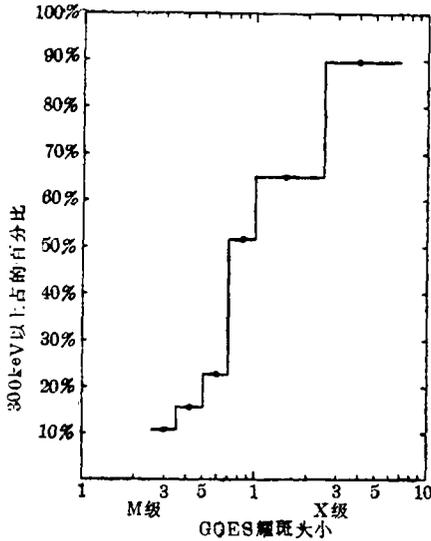


图 7 300keV 以上能量耀斑数在 GOES 卫星观测的耀斑数中占的百分比与 GOES 耀斑大小的关系<sup>[21]</sup>

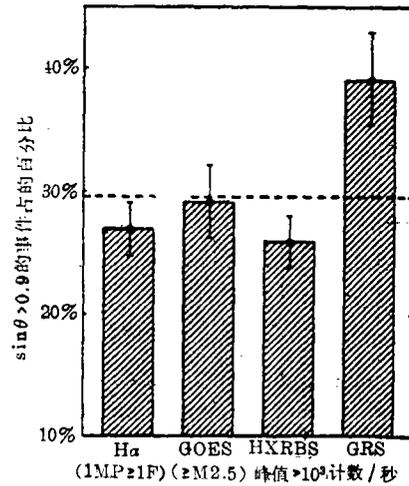


图 8  $\sin\theta > 0.9$  的 GRS 耀斑明显高于各向同性预计值，图中虚线是各向同性预计值<sup>[34]</sup>

随耀斑大小而增减所致。如果  $\gamma$  射线耀斑辐射的方向性与耀斑大小无关，则较平的分布意味着小耀斑把电子加速到高能效率比大耀斑高。

Vestrand 分析了 SMM/GRS 在 300keV—1MeV 光子能量范围测量的事件数和 GOES 卫星在 1—8 Å 测量的事件数的关系<sup>[21]</sup>。他把两颗卫星同时测量到的事件数在 GOES 卫星单独测得的事件数中占的百分比作为纵坐标，GOES 卫星测量事件的大小作为横坐标，绘制成图 (图 7)。图 7 表明，高能事件只出现在 M3 级以上 GOES 耀斑中，它们在 GOES 卫星单独测得的事件数中所占的百分比随 GOES 测量到的流量增加而增加，换句话说，300keV—1MeV 光子能量范围的事件数多少同 1—8 Å 低能辐射有关系。另一方面，GOES 卫星测量到而 SMM/GRS 没有测量到的事件，多数位于日面中心。这一统计表明，高能事件数的多少近似地正比于 1—8 Å 能量范围内软 X 射线耀斑的大小，且有向日面边缘集中的倾向。

这一统计结果同 Dermer 的推论相符<sup>[20]</sup>，也同辐射的方向性观测一致。

#### (4) 方向性

300keV 以上光子能量辐射的方向性曾用两种方法研究过。

(i) 统计研究日面中心和边缘两种耀斑出现频率的变化和能谱变化，即求出日心角  $\theta < 64^\circ$  的耀斑在耀斑总数中占的百分比  $f_L$ ， $\theta > 64^\circ$  的耀斑在耀斑总数中占的百分比  $f_E$  以及  $\theta = 64^\circ$  两边耀斑的幂律谱指数，把  $\theta < 64^\circ$  的耀斑视为日面中心耀斑， $\theta > 64^\circ$  的视为边缘耀斑。对 SMM/GRS 探测的 150 个耀斑统计结果表明： $\theta > 64^\circ$  的  $f_L$  明显高于各向同性预期值，也明显高于  $H_\alpha$  耀斑、GOES 耀斑以及 SMM/HXRBS 观测的耀斑 (图 8)。100 多个边缘附近的耀斑， $f_L$  超出各向同性预期值  $2.5\sigma$ ，其中高能耀斑超出  $3\sigma$ 。比较  $\theta = 64^\circ$  两边的幂律谱指数， $\theta > 64^\circ$  的耀斑也比  $\theta < 64^\circ$  的硬，两边的谱指数相差 0.5 左右。这些分析表明，300

keV—1MeV 的耀斑分布明显有边缘增多现象。

不仅 300keV—1MeV 的耀斑有边缘增多的倾向, 10MeV 以上的高能耀斑也有。后者是从 14 个耀斑中提炼出来的。在 1980 年 2 月—1986 年 12 月探测的 12 个 10MeV 以上的耀斑中, 只有 2 个位于  $\theta < 64^\circ$  区域。所占比例是 17%, 因此 10MeV 的高能辐射源比 300keV—1MeV 辐射源方向性更强。

高能连续辐射是高能电子韧致作用产生的, 辐射源边缘增多现象一定同高能电子各向异性分布有关。Dermer 和 Ramaty 曾用两维角分布电子计算过韧致辐射<sup>[22]</sup>, 这种分布是: (a) 峰值强度在光球切面上, (b) 在径向上是高斯分布。结果表明, 取各向同性的核线成份和选取适当的电子分布参数, 300keV—1MeV 和 10MeV 以上光子能量上观测到的方向性可以得到解释。Petrosian 对不同光子能量计算了硬 X 射线和  $\gamma$  射线的方向性<sup>[23]</sup>。考虑到各向同性电子向下注入磁环以及注入后磁环里的传输效应后, 得到的结果和 SMM 观测结果相符。

(ii) 立体测量, 即比较不同空间位置的几颗卫星同时测量一个耀斑所得的流量。在 1978 年 10 月 1 日至 1980 年 10 月 31 日期间, PVO 卫星和 ISEE-3 卫星联合测量了 44 个高能耀斑, 其中 39 个两颗卫星都观测到了。PVO 和 ISEE-3 的仪器视角  $\theta_P$  和  $\theta_I$  分别在  $0^\circ$ — $88^\circ$  之间,  $|\theta_P - \theta_I|$  在  $1^\circ$ — $66^\circ$  之间。不计视角差, 在 150keV、350keV 和 750keV 三个能量上, 两颗卫星测量的光子流量是相关的<sup>[24]</sup>。换句话说, 立体观测没有发现系统的方向性。即使有方向性, 对于  $90^\circ$  视差, 估计也不会超过  $2.5\sigma$ 。

从理论上讲, 300keV—1MeV 和 10MeV 以上光子能量的辐射主要是原始电子韧致的结果, 如果原始电子有方向性, 则它产生的辐射存在方向性是确定无疑的。用其他方法测量结果也发现此辐射存在方向性。因此立体测量结果表明了什么是值得探讨的。

#### (5) $\gamma$ 连续辐射同其他耀斑辐射的关系

(i) SMM 前 2.5 年观测资料表明, 300keV—1MeV 光子能量的连续辐射可和各种  $H_\alpha$  耀斑有关, 但有  $\gamma$  射线辐射的事件绝大多数是 B 级  $H_\alpha$  耀斑。B 级耀斑是亮耀斑, 因此  $\gamma$  射线连续辐射可能同耀斑亮度有关。分析最强的  $\gamma$  射线谱线  ${}^1\text{H}(n, \gamma)\text{D } 2.223\text{MeV}$  线得,  $\gamma$  射线谱线主要是厚靶作用的结果<sup>[25]</sup>。由这两种观测我们猜想,  $\gamma$  射线可能产生于高密度区域。

(ii) Kawabata 等人分析了“火鸟”卫星前 8 个月观测的  $\gamma$  射线事件同 35GHz 峰值流量密度  $> 300\text{s.f.u.}$  的大射电爆发的关系<sup>[27]</sup>。在这 8 个月内, Hinotori/SGR 探测到 7 个  $\gamma$  射线耀斑, 它们都同 35GHz 峰值流量密度  $> 300\text{s.f.u.}$  的大爆发有关; 反之, 所有 35GHz 峰值流量  $> 300\text{s.f.u.}$  的大爆发都伴有  $\gamma$  射线耀斑。由此看来,  $\gamma$  射线耀斑和峰值流量  $> 300\text{s.f.u.}$  的 35GHz 射电爆发有一一对应关系。在这 7 个  $\gamma$  射线事件中, 只有 3 个有  $\gamma$  射线谱线辐射, 其余 4 个仅有连续辐射。这表明同 35GHz 大射电爆发有关的  $\gamma$  射线耀斑不一定辐射  $\gamma$  射线谱线。这种对应关系可能由强  $\gamma$  射线连续辐射引起的。不管耀斑在日面上位置如何,  $\gamma$  射线耀斑和 35GHz 大射电爆发的一一对应关系对射电源区磁场位形提出了限制, 即磁场是高度扭结的或者是不规则的。

(iii) 在一些耀斑中,  $\gamma$  射线的时间轮廓和 HXR 相似<sup>[26]</sup>。也有高能峰值比低能峰值滞后和辐射源边缘增多等现象。但不是所有  $\gamma$  射线耀斑都有 HXR 爆发, 也不是有 HXR 爆发

的耀斑一定有  $\gamma$  射线辐射。简言之，两者不是一一对应的。

(iv) 除了单独同  $H_{\alpha}$  耀斑、HXR 耀斑和 35GHz 大射电爆发相关外，还有一些耀斑中  $\gamma$  射线同许多辐射有相同的时间史。在这方面有两个事件比较突出，一个发生在 1972 年 8 月 4 日和 7 日<sup>[3]</sup>，另一个发生在 1982 年 2 月 8 日。

#### (6) “MeV 多余”

观测表明，在  $\gamma$  射线耀斑中，存在两种辐射：连续辐射和线辐射。图 1 概括了这两种辐射。平滑曲线代表连续辐射，平滑曲线上方的折线是连续辐射和谱线叠加。平滑曲线上方的多余部份是由离子核反应产生的谱线贡献的，故称为“MeV 多余”。“MeV 多余”出现在 1—7.5MeV 光子能量范围，是宽窄两种  $\gamma$  射线谱线贡献的。

在 SMM/GRS 探测的 150 个耀斑中，90 个可作能谱分析，其中 50% 在 4—8MeV 能量范围内有“MeV 多余”。可见这不是个别现象。图 9 从另一种角度得到同样的结论。在图上，左上角和右下角都没有点子弥散。前者说明没有单独的质子事件，后者说明没有单独的电子事件。不言而喻，质子事件和电子事件是相伴而生的。因此，现在一般认为，280keV 以上光子能量的连续辐射都是与核线辐射相伴而生的。前面说过，不管 SMM/GRS 的观测还是 Hinotori/SGR 的观测， $\gamma$  射线连续辐射的耀斑总比线辐射的耀斑多，这似乎同上面的结论相矛盾。对这一矛盾的现象现在的解释是：探测器对核线辐射不够灵敏。因为如果耀斑大小有一阈值，在阈值以下只有电子加速，质子不加速，则核线辐射一定在探测器灵敏度以下。

据统计分析，“MeV 多余”与其他辐射有以下关系：

(i) 20% 2B 级以上光学耀斑同 4—8 MeV 多余有关；

(ii)  $X_2$  级以上 GOES(1—8 Å 软 X 射线) 耀斑，50% 有明显的 4—8MeV 多余；

(iii) 峰值流量  $\geq 1200$  s.f.u 的 9 GHz 爆发有明显的 4—8MeV 多余；

(iv) 电子/质子流量比增加的太阳高能粒子耀斑，一般同 4—8MeV 多余有关；

这些关系再次表明，太阳耀斑中广泛存在核线辐射。

## 2. 太阳耀斑 $\gamma$ 射线线辐射

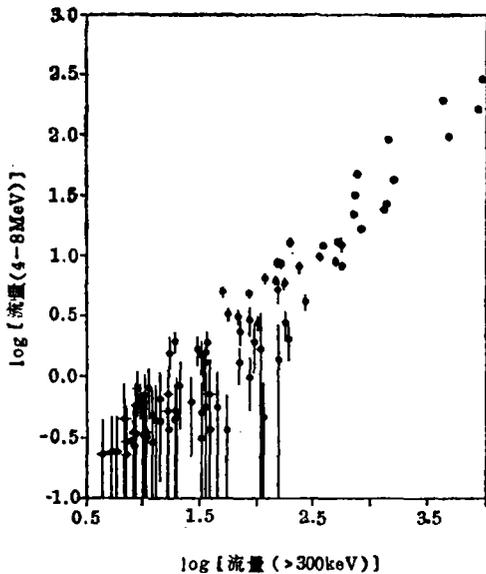


图 9 4—8MeV 多余同 300keV 以上光子流量关系<sup>[22]</sup>

Lingenfelter 和 Ramaty 预计，耀斑产生的

高能原子核流量很强时，将同太阳大气中的原子核进行核反应产生  $\gamma$  射线谱线。1972 年 8 月 4 日和 7 日大耀斑时第一次测量到这样的谱线。当时记录到 4 条谱，能量是 0.51 MeV、2.2 MeV、4.4 MeV 和 6.2 MeV。经证认，它们依次是正电子湮灭线，中子俘获线， $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  核退激线。这是一些强线。除此以外，还有一些弱线。在 1—7.5 MeV 范围内，太阳耀斑  $\gamma$  射线谱线主要有：6.129 MeV ( $^{16}\text{O}$ )，4.439 MeV ( $^{12}\text{C}$ )，2.313 MeV ( $^{14}\text{N}$ ) 或 2.223 MeV ( $n\gamma$ )，

1. 634MeV( $^{20}\text{Ne}$ ), 1.369MeV( $^{24}\text{Mg}$ )或1.238MeV( $^{56}\text{Fe}$ )和0.511MeV( $\beta^+$ )。

在一些太阳耀斑中产生了巨大的高能粒子云,它们一部分被抛到行星际空间,一部分留在太阳上同太阳大气层作用产生 $\gamma$ 射线谱线。一般留在太阳上产生谱线的流量用核线峰值流量代表;抛到行星际空间的用10MeV质子峰值流量代表。如果留在太阳大气层里的粒子和抛到行星际空间的粒子有同样的起源,那么10MeV质子峰值流量和核 $\gamma$ 射线峰值流量应当有关。因此 $\gamma$ 射线谱线和SEP(太阳高能粒子)相应关系的测量对于了解太阳耀斑中粒子起源和加速是非常必要的。现已用IMP-8、ISEE-3和Helios等卫星测量了45个事件的10MeV质子峰值流量,事件的 $\gamma$ 射线谱线峰值流量已由两种方法得到:(1)用SMM/GRS直接测量;(2)用ISEE-3上HXR实验资料计算。比较两种峰值流量后发现:巨大的 $\gamma$ 射线谱线流量事件产生巨大的粒子流量,反之,巨大的粒子流量事件不一定产生可观测的核 $\gamma$ 射线谱线<sup>[20]</sup>。另一方面,从4—8MeV能量范围的核线比率、2.223MeV流量、 $\pi^0$ 衰变辐射以及中子能谱测量得知,有些耀斑,留在太阳大气层里的粒子和抛到行星际空间的粒子的能谱相同,说明它们有相同的起源;有些耀斑留在太阳大气层里的粒子和抛到行星际空间的粒子的能谱不同,说明它们有不同的起源。

根据对太阳耀斑 $\gamma$ 射线连续和谱线辐射的观测资料统计分析,太阳耀斑 $\gamma$ 射线辐射有以下特征:

(1)产生300keV以上光子能量 $\gamma$ 射线辐射的耀斑是很多的,它们多数位于日面边缘附近;

(2)除了仪器灵敏度限制、一些耀斑没有观测到核线辐射外,所有300keV以上光子能量的 $\gamma$ 射线耀斑都观测到核线辐射;

(3)有些耀斑在仪器时间分辨率(2s)内, $\gamma$ 射线和HXR辐射的时间轮廓是一致的。HXR辐射多半是非相对论性电子韧致作用产生的。它和 $\gamma$ 射线线辐射在时间上的一致性,说明这些耀斑中核过程和非相对论性电子有某种联系。

(4)太阳耀斑 $\gamma$ 射线辐射表现出复杂的能谱:300keV—1MeV光子能量主要是连续辐射,它们是原始电子韧致作用产生的。除了几条核退激线和正电子湮灭线外,离子作用线贡

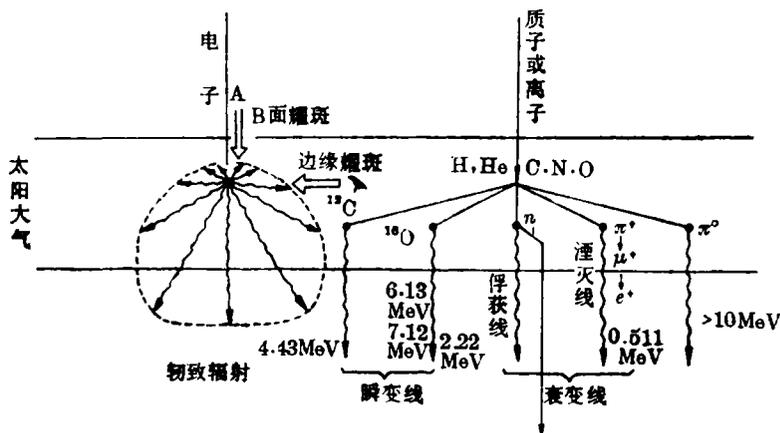


图 10 太阳耀斑 $\gamma$ 射线辐射机制<sup>[20]</sup>

献很小。在 1—7.5MeV 光子能量上, 原始电子韧致作用产生的连续辐射和核反应产生的线辐射迭加在一起。10MeV 以上光子能量又以原始电子韧致辐射为主, 但在 70MeV 以上,  $\pi^0$  衰变辐射起主要作用。

耀斑  $\gamma$  射线能谱是由其辐射机制决定的, 分析了它的能谱, 我们来讨论其辐射机制。

### 三、辐 射 机 制

同太阳耀斑  $\gamma$  射线最有关的辐射机制如图 10 所示。按照母体粒子是电子还是质子分为两类: 原始电子韧致和离子作用。

#### 1. 电子韧致

在 0.1—1MeV 和 10MeV 以上光子能量上, 大量连续辐射是原始电子非热韧致产生的, 除了几条核退激线和正电子湮灭线外, 离子作用的贡献微乎其微。Bai<sup>[29]</sup>利用 Koch 和 Motz<sup>[30]</sup>给出的电子—质子韧致截面和 Haug<sup>[31]</sup>的电子—电子韧致截面, 计算了加速电子同完全电离氢等离子体作用产生的光子谱, 并指出: 如果假设电子谱是幂律谱, 则 10—80keV 的谱也是幂律谱。在较高的能量上能谱变硬。在 400keV 以上能谱又变为幂律谱。

#### 2. 离子作用

获得  $\gamma$  射线的离子作用可分为三种: 核退激、中子俘获和正电子湮灭。它们相对重要性取决于高能粒子能量。

(1) 核退激线。在太阳耀斑中, 凡瞬时核线辐射则是核退激产生的。在 1—10MeV 光子能量内, 它们比连续辐射强。核退激线有三种成分: 窄线、宽线和准连续线。

窄线:  $\Delta E/E \sim 0.02$ , 由加速质子和  $\alpha$  粒子同太阳大气中 He 和重核作用产生的。最强的核退激线是  $^{12}\text{C}(4.438\text{MeV})$  和  $^{16}\text{O}(6.129\text{MeV})$ 。Ramaty 等人讨论过各种核退激线的截面<sup>[32]</sup>。

宽线:  $\Delta E/E \sim 0.2$ , 由大气中氢、氦和高能重离子作用激发产生的。

准连续线: 各种高能级跃迁线混合的结果。

(2) 中子俘获线。加速离子同周围大气作用产生的中子有两种归宿: 逃离太阳和留在太阳大气中。逃离太阳的中子, 在衰变之前到达地球附近, 为环绕地球运行的空间飞行器探测, 也可为地面中子探测器测量。留在太阳大气里的中子在衰变之前可被一些原子核俘获。其中  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$  反应不产生辐射, 而  $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$  产生 2.223MeV 线。由于此线产生于光球, 在边缘耀斑中它有强烈的衰减, 对非边缘耀斑, 它是最强的谱线。

(3)  $\pi$  介子衰变的  $\gamma$  射线谱线。产生  $\pi$  介子需要有 100MeV 以上能量的质子, 不管通过  $\pi^0$  介子的瞬时衰变, 还是从  $\pi^\pm$  衰变到正负电子, 都得到 10MeV 以上能量的光子。正负电子由于库仑碰撞、韧致和同步加速等过程失去能量而慢下来。热化以后, 正电子或者直接同周围电子湮灭产生两条 0.511MeV  $\gamma$  射线谱线, 或者经过正电子素同周围电子湮灭。在后一种情况下, 25% 的时间得到两条 0.511MeV 谱线, 75% 的时间得到三条能量小于 0.511MeV 的谱线。

## 四、结 束 语

在太阳耀斑各种辐射中， $\gamma$  射线占据最高能电磁辐射的位置，它是耀斑中加速粒子同太阳大气层里周围气体成分相互作用的产物。因此太阳耀斑  $\gamma$  射线的观测与研究，为认识太阳高能粒子行为，特别是加速提供了最直接的工具。

太阳  $\gamma$  射线研究开始于 1958 年，自第一次观测到耀斑  $\gamma$  射线谱线以来，大量观测资料已经得到并且已经利用这些资料作了初步分析研究。本文介绍的是太阳耀斑  $\gamma$  射线研究结果的一部分。从我们的介绍中可见，太阳  $\gamma$  射线耀斑同太阳上高能过程密切相关，同太阳物理中许多课题有联系。这是一门新兴的太阳物理分支学科，虽然年轻，却具有极强的生命力，并已成为当代太阳物理研究的前沿。对这样一门具有广阔前途的新兴学科，我们应努力了解它，研究它。目前，在我们国家虽然还没有探测这种辐射的设备，但在理论研究上应为它的发展作出我们应有的贡献。

## 参 考 文 献

- [1] Hirasima, Y. et al., *Acta Phys. Hungaricae (suppl. 2)*, 29 (1969), 683.
- [2] Chupp, E. L., *Nature*, 241 (1973), 333.
- [3] Talon, R. et al., in *IAU Symp.*, No. 68, p. 315, (1975).
- [4] Hudson, H. S. et al., *Ap. J. Letters*, 236 (1980), L91.
- [5] Prince, T. A. et al., 18th Int. Cosmic Ray Conf. Papers, 4 (1983), 79.
- [6] Forrest, D. J. et al., *Solar Phys.*, 65 (1980), 15.
- [7] Okudaira, K. et al., 17th Int. Cosmic Ray Conf., SH-1 (1981), 11.
- [8] Rieger, E. in *Hinotori Symp. on Solar Flare*, ed. by Y. Tanaka et al., p. 246, (1982).
- [9] Yoshimori, M. et al., in *Hinotori Symp. on Solar Flare*, ed. by Y. Tanaka et al., p. 230, (1982).
- [10] Vlahos, L. et al., in *Energetic Phenomena on the Sun*, Proc. of the Solar Maximum Mission Workshop, chapter 2, ed. by M. R. Kundu, (1985).
- [11] Bai, T. and Dennis, B. R., *Ap. J.*, 292 (1985), 699.
- [12] Bai, T., *Ap. J.*, 308 (1986), 912.
- [13] Bespalov, P. A. et al., *Solar Phys.*, 114 (1987), 127.
- [14] Bai, T. et al., *Solar Phys.*, 86 (1983), 409.
- [15] Vilner, N. et al., *Astron. Astrophys.*, 108 (1982), 306.
- [16] Yoshimori, M., *J. Phys. Soc. Japan*, 53 (1984), 4489.
- [17] Gardner, B. M. et al., *Bull. Ann. Astron. Soc.*, 13 (1981), 903.
- [18] Forrest, D. J. et al., *Nature*, 5 (1983), 291.
- [19] Yoshimori, M., *Solar Phys.*, 86 (1983), 375.
- [20] Dermer, C. D., *Ap. J.*, 323 (1987), 795.
- [21] Vestrand, W. T., *Solar Phys.*, 118 (1988), 95.
- [22] Dermer, C. D. et al., *Ap. J.*, 301 (1986), 962.
- [23] Petrosian, V., *Ap. J.*, 209 (1985), 987.
- [24] Kane, S. R., *Solar Phys.*, 113 (1987), 145.
- [25] Zirin, H., in *Astrophysics of the Sun*, chapter 11, (1988).
- [26] Sakuri, K., 18th Int. Cosmic Ray Conf. Vol. 4, SP-sessions, p. 93, (1983).
- [27] Kin-Aki, Kawabata, et al., in *Hinotori Symp. on Solar Phys.*, ed. by Y. Tanaka, et al., p. 169, (1982).
- [28] Rieger, E., *Solar Phys.*, 121 (1989), 323.
- [29] Bai, T., *Studies of Solar Hard X-Rays and Gamma Rays: Compton Backscatter Anisotropy, Polarization and Evidence for Two Phases of Acceleration*, Ph. D. thesis, University of Maryland, (1977).

- [30] Koch, H. W. and Motz, J. W., *Rev. Mod. Phys.*, 31 (1959), 920.  
[31] Haug, E. Z., *Naturforsch.*, 30a (1975), 1099.  
[32] Ramaty, R., in *The Physics of the Sun*, ed. by P. A. Sturrock et al., p. 201, (1986).  
[33] Chupp, E. L., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 22 (1984), 359.  
[34] Vestrand, W. T. et al., *Ap. J.*, 322 (1987), 1010.  
[35] Forrest, D. J. et al., *Solar Phys.*, 118 (1988), 123.

(责任编辑 舒似竹)

## The Statistical Characteristics and Mechanisms of Solar Flare Gamma-ray Emissions

Xu Yongxuan

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

During the 21th solar active cycle, about two hundred solar  $\gamma$ -ray flares were observed by the  $\gamma$ -ray spectrometer on SMM and the  $\gamma$ -ray detector on Hinotori satellite. Analyses of these observational data give us a number of statistical characteristics concerning solar flare  $\gamma$ -ray emission. In this paper we present several important characteristics, i.e. distribution of the occurrence rate for flares, time structure, distribution of event size, directivity, the relation of  $\gamma$ -ray continuum with other kinds of emissions, "MeV excess", as well as solar flare  $\gamma$ -ray line emissions. Finally, emission mechanisms of solar flare  $\gamma$ -rays are briefly described.