

首次火星探测任务
火星能量粒子分析仪科学数据产品说明

中国科学院国家天文台
兰州空间技术物理研究所/中国科学院近代物理研究所

目 录

1	概述.....	1
2	科学数据处理流程	1
3	在轨数据质量评估	2
3.1	伪事件分析.....	2
3.2	弥散事件分析.....	4
3.3	小结	8
4	数据分析参考方法	8
4.1	轻粒子数据分析	8
4.2	重离子数据分析	19
5	其他需要说明的问题.....	22
附录一	几何因子定义和计算说明.....	24
附录二	挡光片能损定标说明.....	27

1 概述

中国首次火星探测任务“天问一号”探测器 2020 年 7 月 23 日 12 时 41 分成功发射升空。火星能量粒子分析仪（MEPA）于 7 月 24 日 22 时 22 分首次开机工作，此后火星能量粒子分析仪在地火转移轨道和环火遥感使命轨道持续开机探测。

通过对火星能量粒子分析仪下传的在轨探测轻粒子原始数据及重离子原始数据进行分析，认为火星能量粒子分析仪在轨工作正常、状态稳定，且标定参数正确。但是，由于受视场外的事件影响，下传的原始探测数据中还额外混入了一些预期外的伪事件与弥散事件。考虑到伪事件的判断方法比较客观，且容易逐事件扣除，而弥散事件判断方法较为复杂，无法做到逐事件扣除。因此，火星能量粒子分析仪 2B 级数据发布时已经扣除了伪事件，而弥散事件的影响将由用户自行扣除。此外，本文还分别针对轻粒子和重离子的数据分析，给出了载荷研制方的分析建议，供用户参考。

2 科学数据处理流程

火星能量粒子分析仪数据预处理流程如图 2-1 所示。

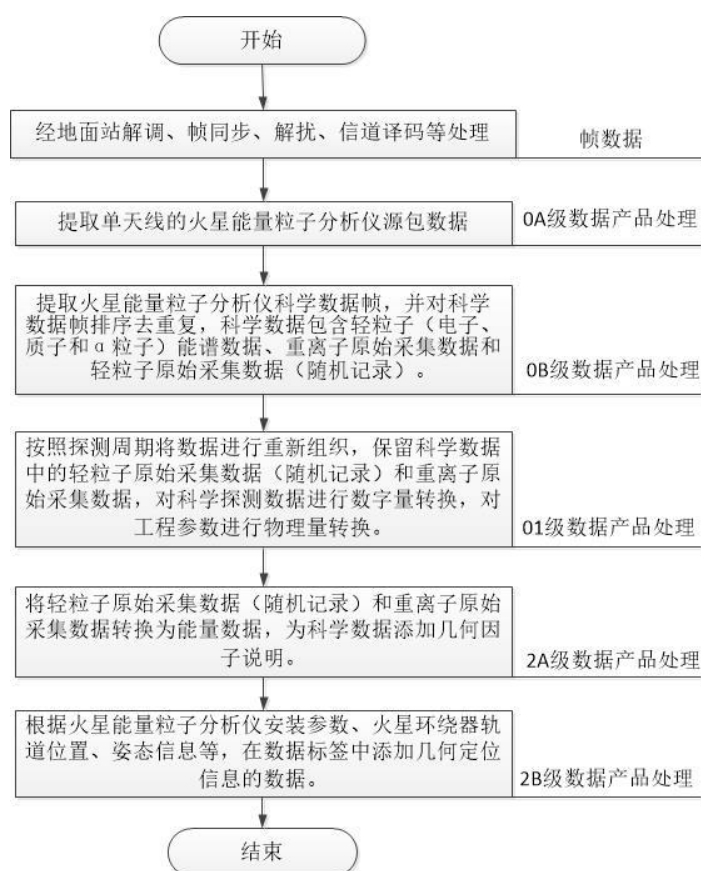


图 2-1 火星能量粒子分析仪数据预处理流程示意图

3 在轨数据质量评估

3.1 伪事件分析

由于火星能量粒子分析仪硅探测器 SD2 的高、中增益通道的数据均来自于同一个探测器，二者的区别只是电子学通道的增益倍数不一样。因此，对于真实入射的粒子，必然会同时在 SD2 的高、中增益通道上产生信号，且信号幅度之比应该是与电子学增益比相关的某个定值。即对于正常粒子触发事件，在 SD2 的高、中增益关联谱上应满足固定的线性关系。

图 3-1 为利用火星能量粒子分析仪下传的原始探测数据画出的 SD2 探测器的高、中增益通道的关联谱，其中 SD2M 表示 SD2 探测器中增益通道测得的 ADC 道值，SD2H 表示 SD2 探测器高增益通道测得的 ADC 道值。同时，为了对比方便，将轻粒子数据（蓝色点）和重离子数据（红色点）画在同一张图上。可以看出，除 SD2 高增益上饱和的事件外，大部分事件均满足在高、中增益上有线性关系，且线性比为定值，这些是符合预期的。但在能谱中还有三团预期之外的事件偏移了线性关系，已经在图 3-1 中将这三团事件圈出，这三团事件占总事件数的 3.5% 左右。由于这三团事件均明显偏离了正常的线性规律，不可能是正常入射的粒子产生，将其称为伪事件。

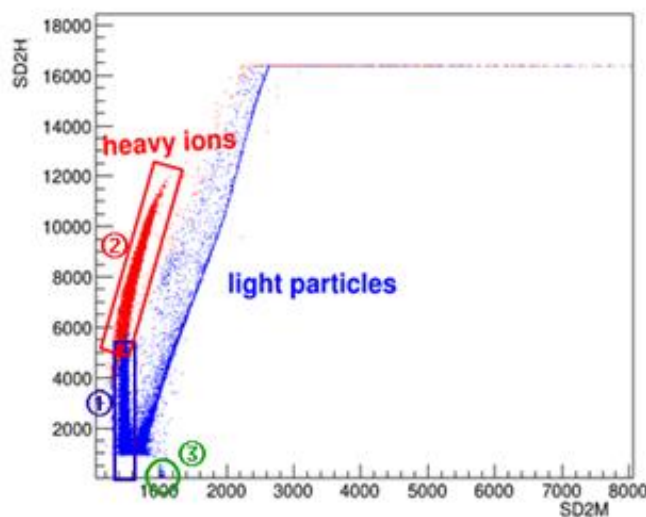


图 3-1 在轨原始数据在 SD2 探测器高、中增益通道的关联谱

载荷研制团队对伪事件的产生机理进行分析，认为图 3-1 中③区域的伪事件产生原因是在轨噪声增大引起的，而①②区域的伪事件是视场外入射粒子引起的深度饱和信号造成的。其机理如下：

SD2 探测器的高、中、低增益通道的信号来自同一个硅探测器，当一个入射粒子在 SD2 探测器中沉积能量时，根据电子学增益不同，高增益通道的信号幅度最大，中增益次之，低增益最小。考虑到电子学的供电能力限制，当信号幅度大到一定程度时，即会出现饱和。而信号幅度继续变大，进入深度饱和后，会引起信号尾部发生畸变，形成反冲信号（如图 3-2 所示）。当反冲信号幅度足够大，超过触发阈值之后，该深度饱和信号会产生两个触发信号，前一个是由真实入射粒子直接产生，后一个是由反冲信号产生。当入射粒子从视场外进入时，粒子会穿过反符合探测器，形成反符合触发信号；前一个触发信号与反符合探测器在时间上相符，会被反符合触发信号否决掉，而后一个触发信号比较滞后，不会被反符合触发信号否决，则会形成一个有效触发（如图 3-2 所示）。由于该有效触发代表的只是一个反冲信号，并不是一个真实入射粒子，因此是一个伪事件。对于视场内入射的粒子，前一个触发信号成为最终触发，而反冲信号形成的触发到来时，系统正处于数据采集的死时间内，不会响应该触发信号，即视场内入射不会产生伪触发。

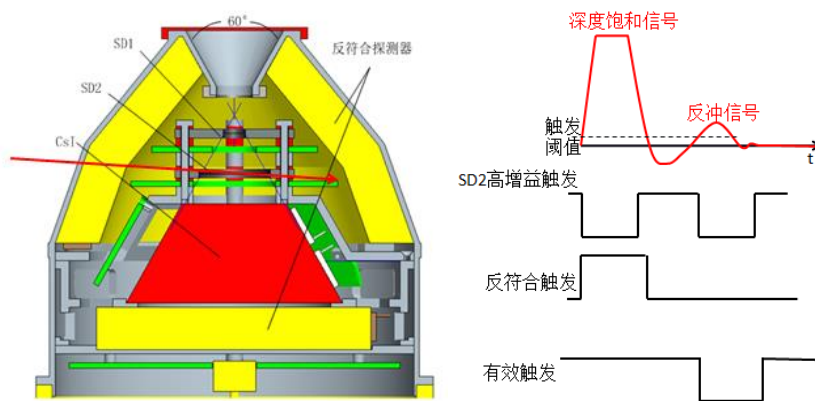


图 3-2 视场外入射粒子引起的深度饱和信号造成伪触发的机理

该机制得到了地面束流试验的验证。利用鉴定件产品开展了束流试验验证，图 3-3 左为束流试验现场照片，右图为束流入射示意图。此时，束流是先穿过反符合探测器，再击中 SD2 探测器上的，因此，SD2 探测器以及反符合探测器都可以产生信号，选择合适的束流，确保在 SD2 探测器中沉积的能量足够大、SD2H 通道能够产生两个触发信号。此时在 SD2 高、中增益关联谱上看到了和在轨数据完全相同的伪事件现象（如图 3-4 所示）。而当去掉反符合电压、使反符合探测器不工作，或者调整束流从视场内正入射时，伪事件现象均消失。这些结果验证了前述伪事件产生机制的正确性。

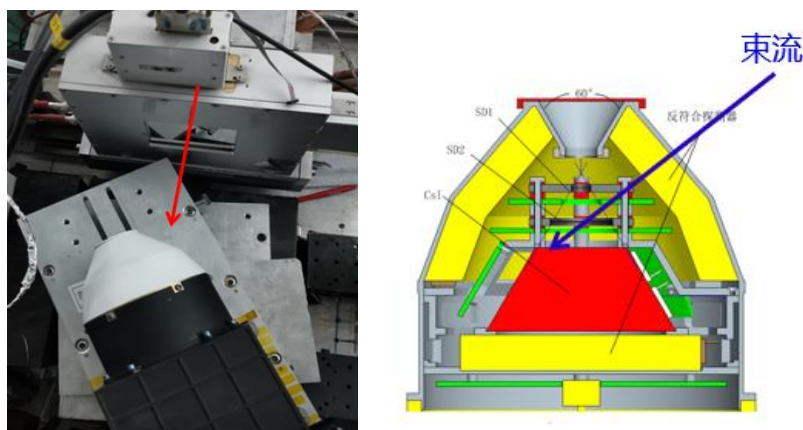


图 3-3 束流从视场外入射示意图
(左：现场照片；右：束流入射示意图)

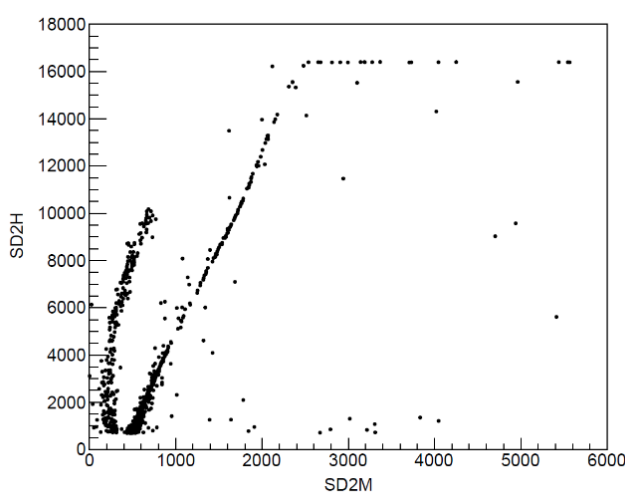


图 3-4 SD2H 及 SD2M 通道沉积能量的关联谱
(束流从视场外入射、且反符合探测器正常工作时)

3.2 弥散事件分析

对火星能量粒子分析仪在轨探测数据和地面标定数据进行对比分析(如图 3-5 所示), 其中左面两幅图是利用在轨探测数据画出的 SD2 探测器与 CsI 探测器的二维关联谱, 左上图为 SD2 的高增益通道与 PD 高增益通道关联谱, 而左下图为 SD2 的中增益通道与 PD 低增益通道关联谱。右边两幅图是地面的质子束流及 α 束流标定数据, 画出与左侧相同通道的二维关联谱并进行比较。可以看出, 左上二维谱中有一条明显的带子(红线圈出部分)与右上质子束流的结果是完全相符的, 而左下二维谱也有一条明显的带子(红线圈出部分)与右下 α 束流的结果也是完全相符的。这说明在轨结果与地面束流标定结果是相符的, 且左上图与左下图中圈出的事件就是质子及 α 粒子, 靠近左下角最亮的那团事件则是电子。

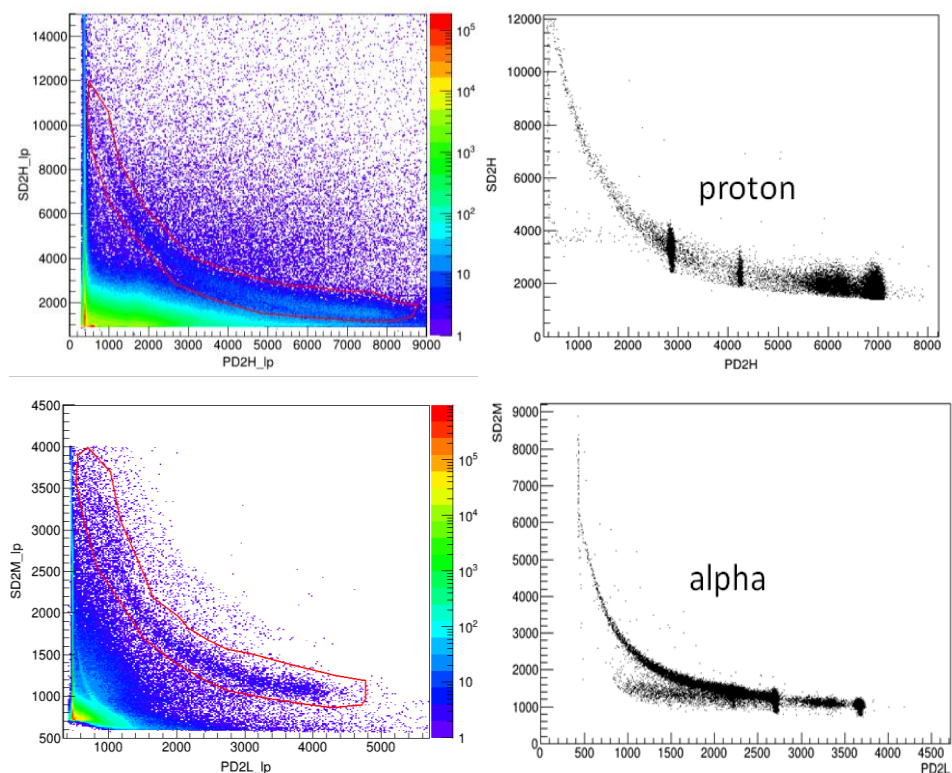


图 3-5 在轨探测数据与地面标定数据对比示意图

利用地面标定参数将探测器测得的 ADC 道值转换成能量，可以画出粒子在 SD2 探测器上的能损与总能量的二维谱，如图 3-6 所示。将其与质子、 α 粒子的仿真结果（黑色能带）对比，可以发现在轨探测数据中的质子、 α 粒子的能带与仿真结果中的质子、 α 粒子能带能够较好地吻合。这表明火星能量粒子分析仪设备在轨运行正常，标定参数正确。但是在确定的电子、质子及 α 粒子之间，还明显存在一些弥散事件，这些事件的产生原因，可以利用模拟分析来确定。

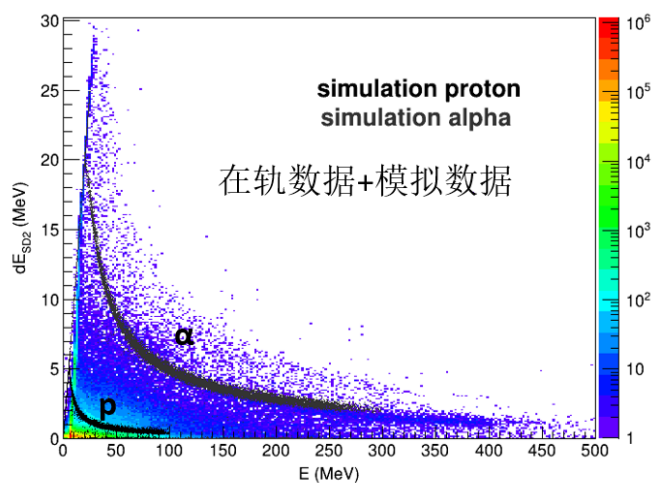


图 3-6 在轨数据与模拟数据对比示意图

在模拟程序中，设置电子、质子、 α 粒子从一个完整的球面源上均匀发射，以模拟空间中粒子各向同性入射。依据正样件探测器参数，在模拟程序中构建探测器（图 3-7 左所示）对应的 ΔE -E 模拟结果（如图 3-7 右所示）。此时，在 ΔE -E 二维谱上有明显的弥散现象。由于能量粒子分析仪结构特别紧凑，反符合探测器的光电读出器件粘贴在上部探测器的下表面以及下部探测器的侧面，这导致在上下两部分反符合探测器之间存在一条缝隙。

为了确认该缝隙的影响，重新配置了一个无缝隙的反符合探测器，其它参数不变（如图 3-8 左所示），此时模拟结果（如图 3-8 右所示）可以看出此时弥散现象基本已经消失了。由此可以断定，弥散事件的产生原因是由于正样件产品中反符合探测器的上、下两部分之间存在一条缝隙导致的。

弥散事件的形成机理如下：当粒子从该缝隙入射时，会进入碘化铯探测器中，大部分这样的粒子直接阻止在碘化铯探测器中，但也存在一定的概率在碘化铯探测器上发生散射而改变方向，如图 3-9 所示。对于直接阻止在碘化铯探测器中的事件，只在碘化铯探测器中产生信号，但硅探测器上不会有信号，这样的事件不能产生触发，不会被记录信息。若粒子在碘化铯上发生散射而改变方向，且散射粒子又进入到硅探测器中，则同时会在硅探测器和碘化铯探测器均有信号。这样的事件可以被记录下来，但又不满足以硅探测器为 ΔE 、以碘化铯探测器为 E 的关系，因此在 ΔE -E 二维谱上不一定落在电子、质子或 α 粒子能带所在的确定位置上，从而形成弥散事件。

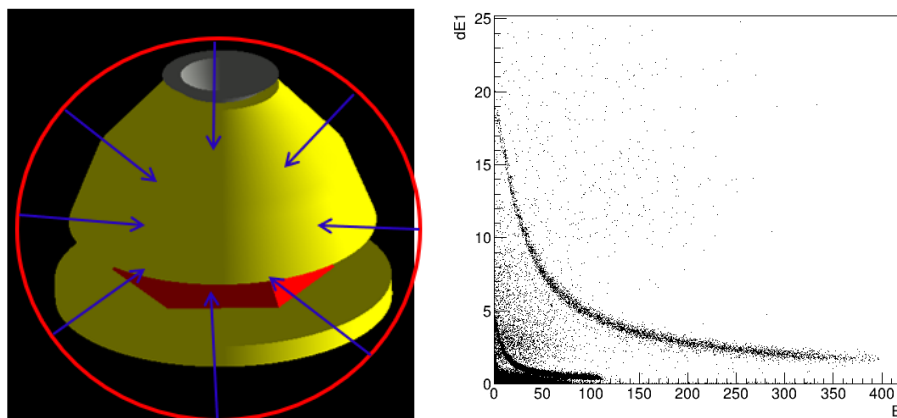


图 3-7 与正样件相同结构（上下反符合有缝隙）的探测器配置及模拟结果

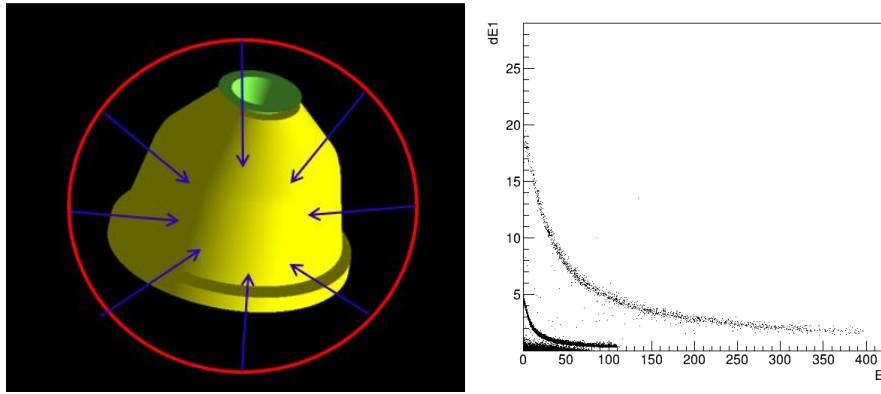


图 3-8 无缝隙的反符合探测器结构配置与模拟结果

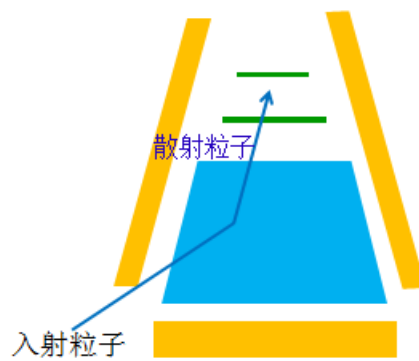


图 3-9 弥散事件产生机理示意图

利用火星能量粒子分析仪测得的在轨重离子原始数据绘制 ΔE -E 二维谱（如图 3-10 所示），可以看到在 ΔE -E 二维谱上事件明显呈许多条带状分布，这表明测到了各种元素的重离子。根据丰度信息，可以确定 C、O 元素的位置，但同时在该能谱的左下角，也可以看到非常明显的弥散事件。这些弥散事件和轻粒子 ΔE -E 二维谱中的弥散事件一样，也是由于从反符合探测器的缝隙里进入的事件影响导致的。

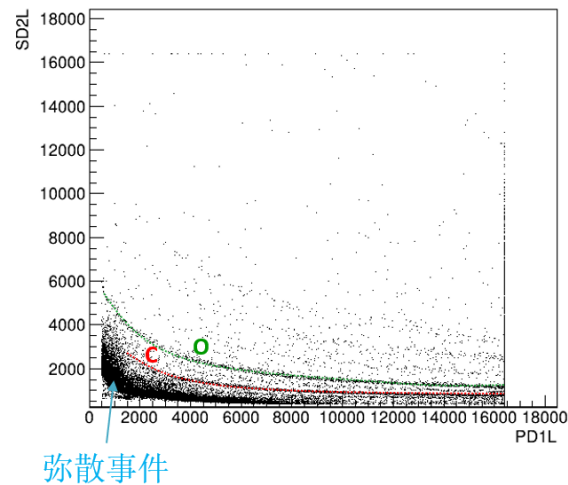


图 3-10 重离子事件 ΔE -E 二维谱

3.3 小结

通过对火星能量粒子分析仪下传的在轨探测轻粒子原始数据及重离子原始数据进行分析,可以认为火星能量粒子分析仪在轨工作正常,状态稳定,且标定参数正确。但是,由于受视场外的事件影响,数据中还额外混入了一些预期外的伪事件及弥散事件。在轨的 FPGA 数据处理程序不能区分伪事件与弥散事件,会将这些事件带入在轨能谱中,影响在轨能谱的准确性。因此,综合考虑科学数据产品的可用性和客观性,决定不发布轻粒子能谱科学数据产品,发布轻粒子原始数据和重离子原始数据。此外,考虑到伪事件的判断方法比较客观,且容易逐事件进行扣除,而弥散事件判断方法较为复杂,无法做到逐事件扣除。所以,发布的原始数据为经过了伪事件扣除后的数据产品,而弥散事件将由用户自行扣除。

4 数据分析参考方法

根据前文所述,发布的火星能量粒子分析仪 2B 级科学数据中包括轻粒子原始数据和重离子原始数据两部分,其中轻粒子数据只是在轨实测事件随机记录下传的结果,而重离子数据是在轨实测事件全部下传的结果。在发布的火星能量粒子分析仪 2B 级科学数据中用户应优先判断科学数据标志信息,判断该数据模式是否为正常科学数据模式。在正常科学数据模式下,轻粒子和重离子原始数据均已经完成了伪事件扣除,若科学数据标志为抽取科学数据模式,即选择了部分通道数据进行下传,这导致没有办法完成伪事件的基本判定从而致使伪事件无法扣除。因此科学数据标志为抽取科学数据模式时,不建议用户采用该模式数据进行科学分析。除伪事件扣除外,视场外入射引起的弥散事件未作扣除,需要由用户自行扣除。下面分别针对火星能量粒子分析仪轻粒子和重离子的数据分析,给出载荷研制方的分析建议,供用户参考。

4.1 轻粒子数据分析

(1) 粒子鉴别

由于火星能量粒子分析仪采用 ΔE -E 望远镜系统作为带电粒子鉴别及能量测量,可以利用能损及总能量的乘积(即 $\Delta E \cdot E$ 的值)来作为粒子鉴别的判据。用户可以参考载荷研制团队发表的文章(ShuWen Tang et al. Calibration of Mars Energetic Particle Analyzer(MEPA). Earth and Planetary Physics 4: 355-363, 2020)中 Table3 的内容(见表 4-1)来进行粒子鉴别。其中 ΔE 为 SD2 探测器的能损值, ΔE_1 为 SD1 探测器测得的能损值,

E 为 SD1、SD2 以及 CsI 探测器上测得的能损之和。

表 4-1 MEPA 在轨粒子鉴别判据

Particle Type	PID criteria (ΔE , E and ΔE_1 all in unit of MeV)
Electron	$\Delta E \cdot E \leq 20 \ \&\& \ \Delta E < 1 \ \&\& \ \Delta E > 0.05$
Proton	$(20 < \Delta E \cdot E \leq 150 \ \parallel \ (\Delta E \cdot E \leq 20 \ \&\& \ \Delta E > 1)) \ \&\& \ \Delta E_1 < 1$
Helium	$150 < \Delta E \cdot E \leq 1200 \ \parallel \ (\Delta E \cdot E \leq 150 \ \&\& \ \Delta E_1 \geq 1)$
Heavy ion	$\Delta E \cdot E > 1200$

逐事件利用表 4-1 中的判据进行分析，可以实现轻粒子种类的鉴别，确定每个事件到底是电子、质子还是 α 粒子事件。

(2) 粒子入射行为研究

利用在轨鉴别为质子的原始数据，分析能损与总能量的二维关联谱，发现在低能区域，实际上由两条线组成，即质子能谱上存在细致结构（如图 4-1 所示），且在 α 粒子的原始数据中也看到了同样的现象。这意味着测得的各种粒子均存在多种成分的混合，这些混合可能是由不同入射行为导致的，需要在数据分析中进行细致的研究。

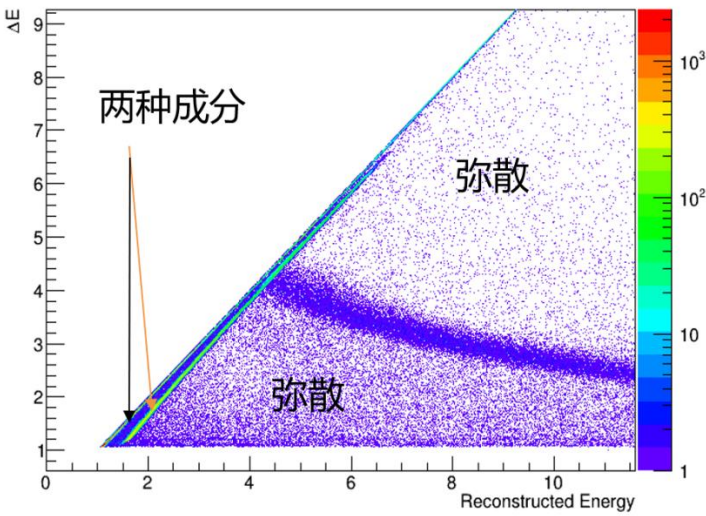


图 4-1 质子能谱的细致结构示意图

考虑到能量粒子分析仪的触发是由硅探测器产生的，且设计时调节触发阈值使得 SD1 的触发信号只能由重离子产生，轻粒子的触发均由 SD2 产生，故传回来的轻粒子原始数据，必然对应粒子穿过 SD2 探测器。图 4-2 为能量粒子分析仪的探测器结构，一共有 5 种可能的粒子入射方式。分别为：①从能量粒子分析仪的视场内正面入射，穿过了 SD1 及 SD2 探测器；②从视场外入射，穿过反符合探测器后进入到 SD2 探测器中；

③从上下反符合的缝隙入射，先在 CsI 探测器上发生散射，再进入 SD2 探测器中；④从上下反符合的缝隙入射，不经过 CsI 探测器，直接进入 SD2 探测器中；⑤从视场正面入射，但不经过 SD1 探测器，直接进入 SD2 探测器中。考虑到反符合探测器是参与触发的，当反符合探测器上有信号时，触发产生会受到抑制，因此采集到的数据中不包括第②种入射方式。

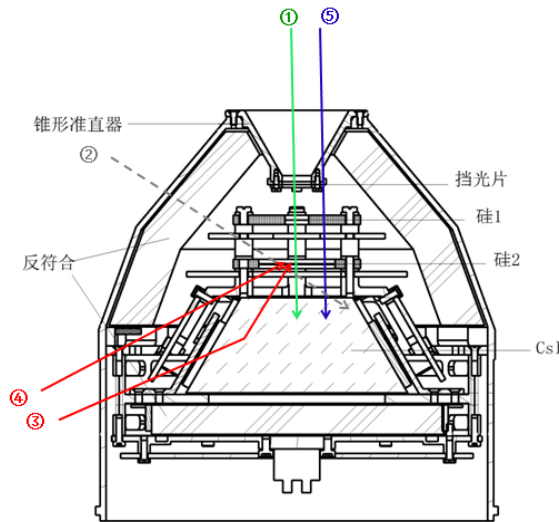


图 4-2 能量粒子分析仪可测得的各种入射方式示意图

在模拟程序中，可以清楚知道每一个粒子的入射行为，对各种入射方式做好标记，则可以分析不同入射行为对能谱的影响。图 4-3 以质子为例，展示了不同入射行为对质子 ΔE - E 二维能谱的贡献。图 4-3a 对应的是粒子从能量粒子分析仪的视场内正面入射，且同时穿过了 SD1 及 SD2 探测器；图 4-3b 对应的是粒子从上下反符合的缝隙入射，其中红色散点表示先在 CsI 探测器上发生散射，再进入 SD2 探测器中，而黑色散点表示不经过 CsI 探测器，直接进入 SD2 探测器中；图 4-3c 对应的是粒子从视场正面入射，但不经过 SD1 探测器，直接进入 SD2 探测器中；图 4-3d 为 a、b、c 三幅图叠加的结果。容易看到，图 4-3d 完全重复了在轨质子的实测结果（图 4-1）：既在低能部分看到了两条分离的线，也看到了随处可见的弥散现象。

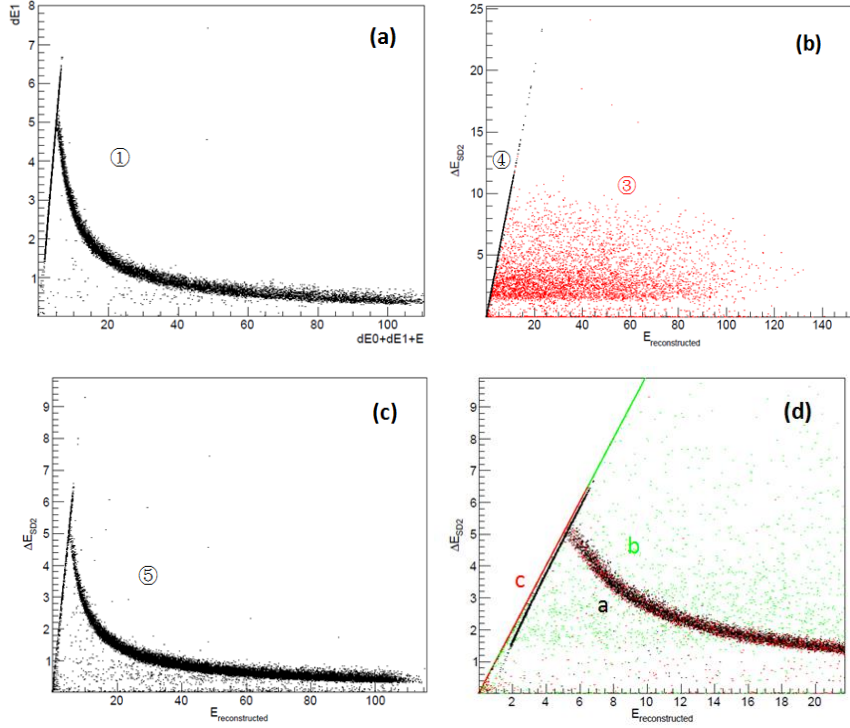


图 4-3 不同入射行为的事件在质子 ΔE - E 二维谱的分布模拟

同样，对于电子与 α 粒子，也存在以上几种入射方式的混合，并且 α 粒子与质子具有完全相似的能谱特征，即都能在低能部分看到两条分离的线，也能看到不同位置的弥散现象。但是对于电子，由于它与物质的相互作用过程更复杂，且 dE/dx 小得多，各种入射成分更难区分。由于 SD1 特别薄，电子在 SD1 探测器上的能损几乎可以忽略，因此，电子的 ΔE - E 二维能谱上（如图 4-4 所示），不能看到不同入射方式的结果明显分离的情况。此外，电子在 SD2 探测器上的能损较小，并不随入射能量的变化而改变，这让电子和弥散事件的区分变得比质子和 α 粒子更加困难。

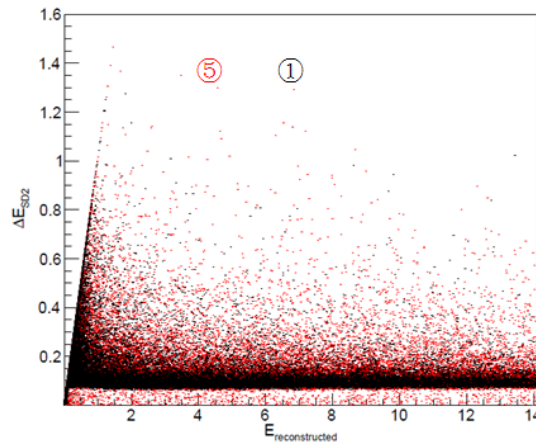


图 4-4 不同入射行为的事件在电子 ΔE - E 二维谱的分布模拟

在数据分析中，应该考虑到不同入射行为的粒子对能谱的影响，对于从视场外入射的事件，必须从数据结果中剔除。此外，视场外的事件对电子、质子及 α 粒子的影响是有差别的，需要根据不同粒子的影响，分别考虑相应的数据分析方法。

（3）视场外本底事件的扣除

根据上面的粒子入射行为研究可知，视场外的事件在 ΔE - E 二维谱上的位置分布不仅可以落在电子、质子、 α 粒子的确定能带之外、形成弥散事件，也可以落在电子、质子及 α 粒子的确定能带上。且对电子、质子及 α 粒子的能谱影响也是不一致的，需要根据粒子种类的不同分别进行考虑。

（a） α 粒子本底扣除

首先来看最简单的 α 粒子入射情况。图 4-5 为模拟得到的 α 粒子的 ΔE - E 二维谱，左侧红色的散点代表未穿透 SD2 探测器的事件，而右侧黑色的散点代表的是穿透 SD2 并阻止在 CsI 探测器中的事件。考虑到能量粒子分析仪对 α 粒子要求的探测范围是大于 25MeV，从图 4-5 可以看出，能量符合要求的 α 粒子事件全部都落在右侧的黑色带子上。因此， α 粒子的数据分析只需要考虑穿透 SD2 探测器并阻止在 CsI 探测器中的事件。具体到实验数据上，所有满足要求的 α 粒子事件均可以在 ΔE - E 二维谱中设置筛选条件来进行选择，如图 4-6 所示。值得注意的是，由于弥散事件分布范围很广，按照图 4-6 所示的条件选择的事件除了满足要求的 α 粒子之外，同时还选择了分布在该位置下的弥散事件。因此，还需要进一步扣除该位置下的本底事件。

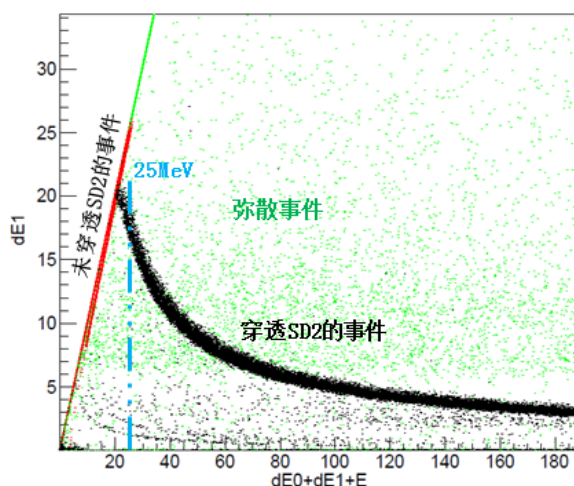


图 4-5 α 粒子的 ΔE - E 二维谱

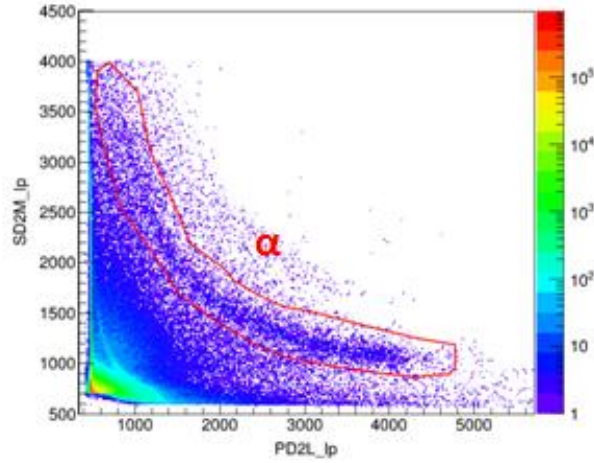


图 4-6 α 粒子事件粗略选择

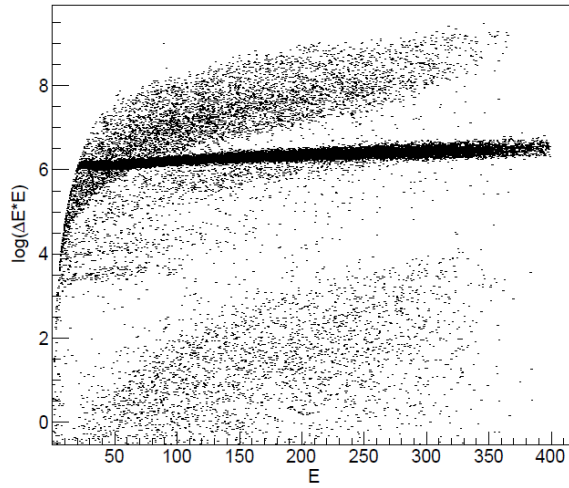


图 4-7 穿透 SD2 的 α 粒子事件 $\log(\Delta E \cdot E)$ 随粒子能量的关系（模拟数据）

做本底事件扣除时，首先构建一个参数 $\log(\Delta E \cdot E)$ ，利用模拟数据画出该参数与粒子总能量 E 的关联谱（如图 4-7 所示）。随着能量的变化， $\log(\Delta E \cdot E)$ 参数基本不变。并且由于视场外入射而导致的弥散事件对目标能带的污染主要集中在 100MeV 以下的区域，而 100MeV 以上区域内的弥散主要来自随机本底。根据以上特性，对在轨实验数据进行本底扣除时也可以依据能道分别采用两种不同的本底扣除方法。对于前 9 个能道（ $25\text{MeV} \leq E \leq 101.2\text{MeV}$ ），采用高斯函数结合线性函数来对实验数据进行拟合，其中高斯函数表示真正的 α 粒子事件分布，而线性函数表示由于视场外入射导致的弥散本底事件（如图 4-8 左所示）。对于后 7 个能道（ $101.2\text{MeV} < E \leq 300\text{MeV}$ ），采用高斯函数结合二次函数来对实验数据进行拟合，用高斯函数表示真正的 α 粒子事件分布，二次函数表示随机本底事件（如图 4-8 右所示）。

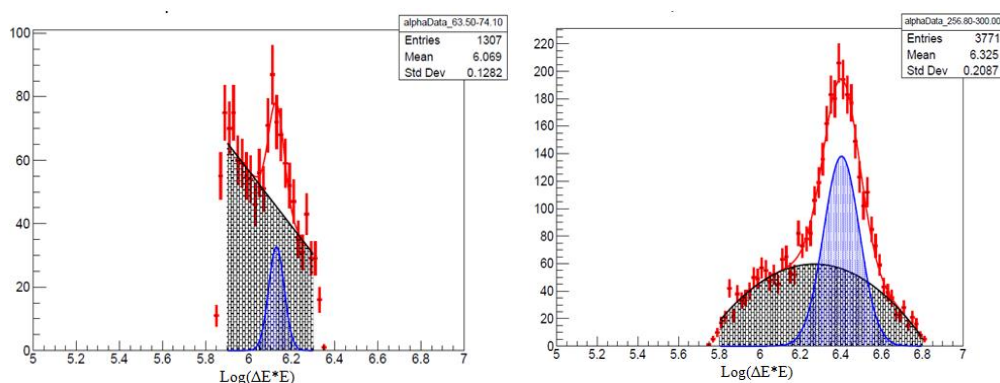


图 4-8 α 粒子事件的本底扣除方法结果示意图

(b) 质子本底扣除

图 4-9 为模拟得到的质子的 ΔE - E 二维谱，与 α 粒子的情况类似，该能谱同样是由左侧未穿透 SD2 探测器的事件以及右侧穿透了 SD2 探测器的事件组成。但由于指标要求对质子的探测范围是 2-100MeV，该能量范围同时包括了穿透 SD2 以及未穿透 SD2 探测器的事件。质子本底扣除时，穿透 SD2 探测器的事件以及未穿透 SD2 探测器的事件需要分开进行考虑。

对于穿透 SD2 探测器的质子事件，数据分析的方法和 α 粒子的数据分析是相同的。同样先选择穿透 SD2 并阻止在 CsI 中的事件（如图 4-10 所示），然后对选择条件内的区域进行本底扣除。而对于未穿透 SD2 探测器的事件，则需要采用其它方法。图 4-9 中左侧沿斜线分布的点代表未穿透 SD2 探测器的事件，这些事件包括图 4-2 中的①、④、⑤ 3 种不同的入射方式，其中红色散点表示从视场正面入射、不经过 SD1 探测器直接进入 SD2 探测器中的事件，绿色的散点表示从视场外入射、不经过 CsI 探测器只在 SD2 探测器上沉积能量的事件，而黑色散点代表从视场正面入射、同时在 SD1 探测器与 SD2 探测器上沉积能量的事件，并且绿色散点的位置与红色散点的位置是重合的，只利用 SD2 单个探测器不能区分这几种不同入射方式的质子事件。

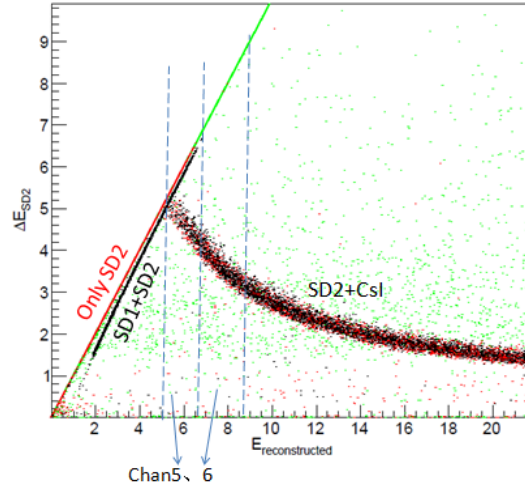


图 4-9 质子的 ΔE - E 二维谱

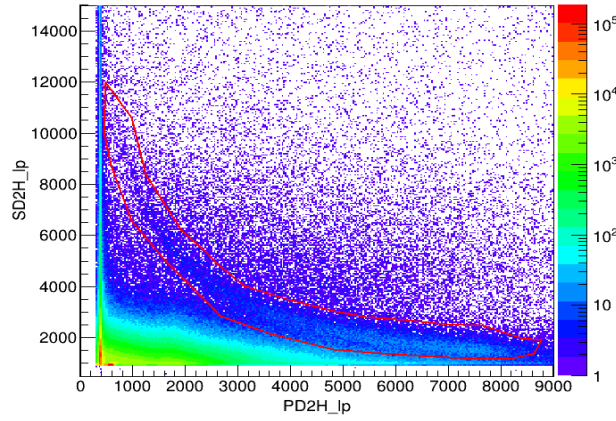


图 4-10 穿透 SD2 探测器的质子事件粗略选择

图 4-11 为利用 SD1 探测器与 SD2 探测器组成望远镜系统测得的质子 ΔE - E 关联谱，从这张能谱上，可以看到先穿透 SD1 再阻止在 SD2 中的事件、同时穿透 SD1 与 SD2 的事件、以及不经过 SD1 探测器只在 SD2 探测器上沉积能量的事件这三种不同的入射方式能清晰分开。为了有效剔除视场外进入探测器的事件，对于未穿透 SD2 探测器的低能质子采用 SD1 及 SD2 探测器组成的望远镜进行探测。此外，从图 4-9 上还能看到，对于质子能谱上的第 5 及第 6 道事件，由于粒子入射角度的差别，同样的入射能量，入射角度小的粒子可以穿透 SD2 探测器，而入射角度大的粒子不能穿透 SD2 探测器。因此，质子能谱中这两个能道的数据分析需要采用以上两种方法叠加处理。

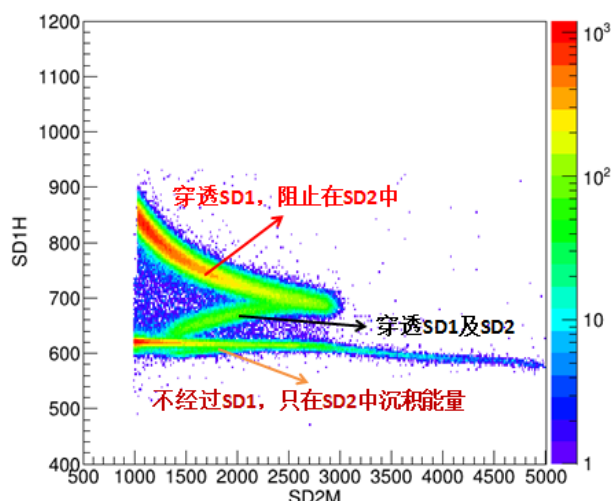


图 4-11 利用 SD1 及 SD2 组成的望远镜系统测得的质子 ΔE -E 二维谱

(c) 电子本底扣除

质子与 α 粒子与物质的相互作用只有电离过程，而电子与物质的相互作用过程要更加复杂，除了电离过程之外，还存在多次散射以及韧致辐射。因此，电子在 ΔE -E 二维谱上的分布并不是一条细窄的能带，而是本身就具有一定范围的弥散。此外，由于电子在硅探测器及 CsI 探测器中的能损 dE/dx 值非常小，对于超薄的 SD1 探测器而言，电子在 SD1 探测器上的能损是可以忽略的，因此没法利用 SD1 上的能损来区分视场内与视场外入射的电子。图 4-12 为模拟得到的各种不同入射方式的 ΔE -E 二维谱，图中的①③④⑤编号对应的粒子入射方式与图 4-2 所示中的标注相同，可以看到，视场内入射和视场外入射的结果几乎是完全重叠的。只利用实验数据，不可能区分电子的入射方式，并对从视场外进入的电子事件进行扣除。因此，电子的视场外事件修正需要采用和质子、 α 粒子完全不同的方法来进行。

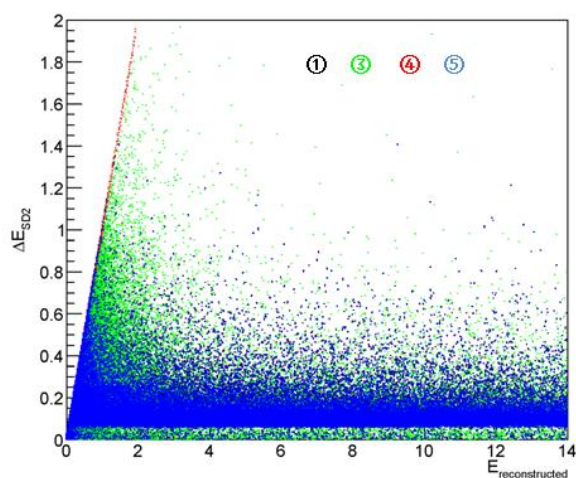


图 4-12 不同入射行为的事件在电子 ΔE -E 二维谱的分布模拟

考虑到在模拟程序中，可以清楚知道每一个电子的入射行为，可以计算出电子总能谱中每一个能道上从视场内进入的事件所占的比例。假设模拟程序中探测器的结构配置以及电子的入射情况与实际情况相符，则该比例值可以用公式（4-1）表示，其中 $i=1、2、……、16$ ，表示第 i 能道数， NS_i 表示模拟数据中第 i 能道的电子总数， ns_i 表示模拟数据中第 i 能道中从视场内入射的电子数目， $F(i)$ 代表电子能谱第 i 道的视场内事件占总事件的比值。

$$F(i) = \frac{ns_i}{NS_i} \quad (4-1)$$

从前述视场外本底事件扣除过程可以注意到：不管是电子、质子还是 α 粒子的本底扣除，都不是逐事件进行扣除的，需要累积足够统计量的数据，再进行本底扣除。累积更多统计事件，可以降低本底扣除过程中的统计误差，但需要更长的数据累积时间，从而导致数据的时间分辨率变差。具体的时间段划分方式，可由用户权衡统计误差及时间分辨率之间的关系，自行决定。

（4）抽样比值提取

由于受 MEPA 数据传输带宽的限制，只有部分的轻粒子原始数据能够传输回来，传回来的数据是对在轨全部原始数据的随机抽样。定义在轨实测轻粒子总计数与抽样传回来的轻粒子计数之间的比值为抽样比，该值用符号 R 表示。抽样比值 R 可以根据公式（4-2）来进行计算，其中 n 代表 t 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻传回来的轻粒子抽样计数，而 N 代表 t 时刻到 $t+\Delta t$ 时刻轻粒子的在轨总计数。根据随机抽样的原理，抽样比值 R 只和当时的在轨数据量有关，而和轻粒子种类及能量没有关系。载荷研制团队已经对这一结果进行了验证。

$$R(t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} N(t)dt}{\int_t^{t+\Delta t} n(t)dt} \quad (4-2)$$

具体到火星能量粒子分析仪 2B 级数据，在轨轻粒子总计数对应的是 $e/p/he$ 触发计数，而传回的轻粒子抽样计数对应的是下传的 $e/p/he$ 事件总数（该值等于 $e/p/he$ 有效事件数与 $e/p/he$ 伪事件数之和）。用户可以利用这两个数值、并根据公式（4-2）来计算抽样比 R 的值。

（5）在轨有效能谱反演

经过前面几个步骤，我们利用传回来的抽样原始数据实现了粒子种类鉴别、剔除了

视场外的事件，并得到了原始数据传输的抽样比 R 。保留下来的事件认为全部为视场内有效入射的事件，利用这些事件以及抽样比 R 可以反演得到在轨的有效能谱。质子和 α 粒子的在轨能谱可以利用公式（4-3）来计算，其中 s 取 p 或 α 分别代表质子和 α 粒子， ch 取 1、2、……、16，表示能道数， $\int_t^{t+\Delta t} n'_{s,ch}(t)dt$ 代表了利用抽样原始数据计算得到的从 t 至 $t+\Delta t$ 时间段剔除了伪事件及视场外事件后的有效能谱，而 $R \cdot \int_t^{t+\Delta t} n'_{s,ch}(t)dt$ 代表在轨获得的有效能谱。而电子的在轨有效能谱可以利用公式（4-4）来计算，同样 ch 表示能道数， R 表示抽样比，而 F 表示电子能谱视场内事件占总事件的比值，根据公式（4-1）由电子的模拟数据计算得到，而 $\int_t^{t+\Delta t} n_{e,ch}(t)dt$ 是代表剔除伪事件后，从 t 至 $t+\Delta t$ 时间在 ch 能道上积累的计数。

$$N(s, ch, t) = R(t) \cdot \int_t^{t+\Delta t} n'_{s,ch}(t)dt \quad (4-3)$$

$$N(e, ch, t) = R(t) \cdot F(ch) \int_t^{t+\Delta t} n_{e,ch}(t)dt \quad (4-4)$$

利用公式（4-3）及（4-4）可以计算出电子、质子和 α 粒子各个能道在轨测得的有效计数随时间的关系，以图 4-13 为例进行说明。图 4-13 从左至右分别为电子、质子及 α 粒子某能道的有效计数随在轨工作时间的变化关系，其中每个数据点代表积累了 24 小时的实验数据。可以看出，质子及 α 粒子在平静期计数比较平稳，而当 SEP 爆发时计数会发生了较为明显的变化。这提示数据分析过程中的时间段划分方式是比较重要的。考虑到平静期的计数率较低、粒子通量变化慢，而爆发期的计数率较高、粒子通量变化快，在进行时间段划分时，可以考虑对于平静期的数据按照稍长一段时间划分成一个数据点，这样可以降低统计误差；而对于爆发期的数据则可用稍短一段时间划分成一个数据点，这样数据点更多，便于及时观测爆发期间通量的变化情况。

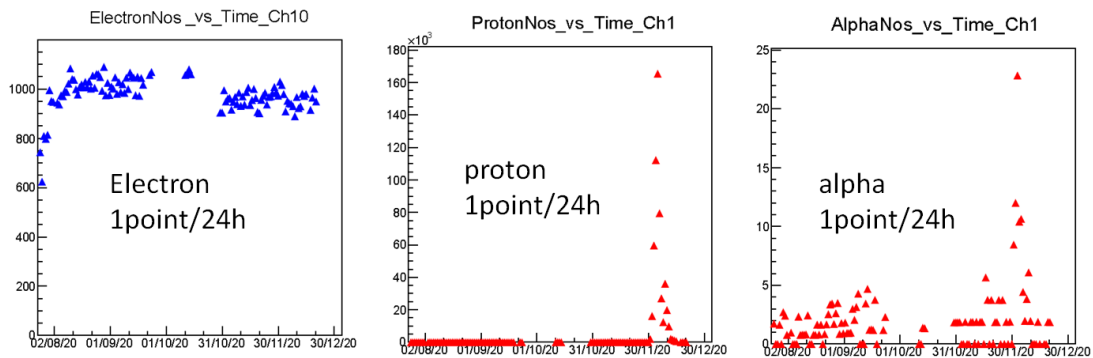


图 4-13 电子、质子、 α 粒子的在轨有效能谱随时间变化关系

利用得到的粒子在轨有效能谱计数，再结合几何因子值就可以得到空间环境中粒子的能谱通量。图 4-14 展示了能量粒子分析仪在 2020 年第 334 天至 350 天测得的四个不同能道的环境通量数据，并与 SOHO 上的同类载荷得到的结果进行了比较。可以看到，能量粒子分析仪测得的数据和 SOHO 测得的数据吻合得比较好，并且由于二者所处轨道位置不同对数据的影响在图上也有明显的体现。

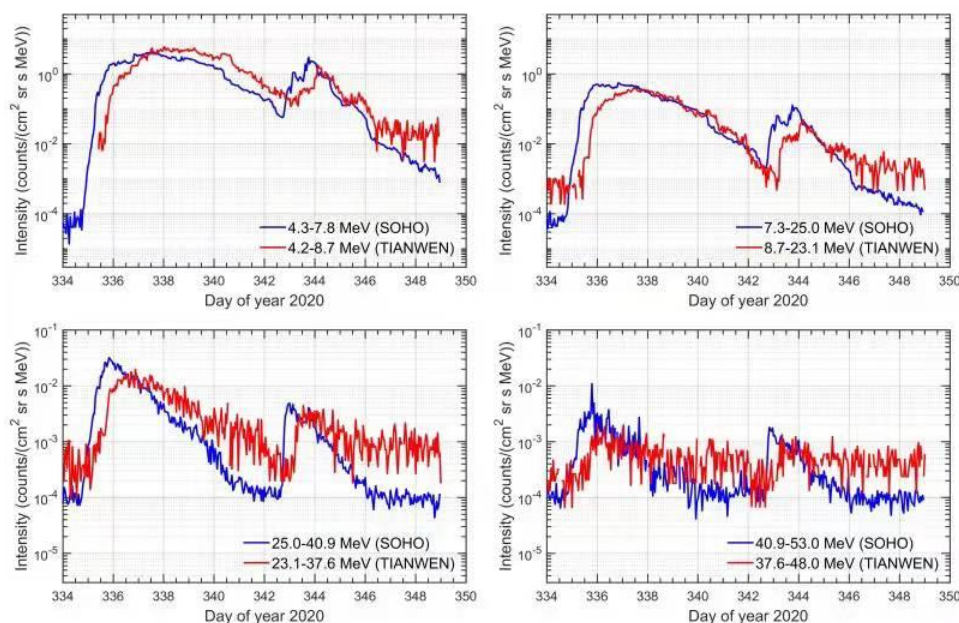


图 4-14 MEPA 测得的质子能谱通量与其他同类载荷同时间段测量结果对比图

4.2 重离子数据分析

由于重离子的事件率较低，火星能量粒子分析仪设计时选择将在轨实测的重离子数据全部下传。因此，和轻粒子的原始数据不同，重离子数据不需要再利用抽样比来反演在轨真实探测计数情况，直接对数据进行分析即可。

重离子的数据分析主要包括三个环节，分别是粒子鉴别、能量修正以及本底事件剔除。

(1) 粒子鉴别

重离子的粒子鉴别可以利用 SD2 探测器测得的能损值 ΔE 以及 CsI 探测器测得的剩余能量 E 组成的二维谱来分析。在该 ΔE - E 二维谱图上，可以看到重离子事件明显呈许多条带状分布（如图 4-15 所示），这些能带代表测到的各种元素的重离子事件，且相邻两条能带之间的元素质子数 Z 值相差 1。考虑到在各种重离子元素中，C 和 O 元素的丰度是最高的、且能带之间的 Z 值相差 2，可以确定 C、O 元素的位置，而 C、O 中间那条丰度较低的能带则为 N。确定了 C、N、O 之后，依据能带相邻关系以及空间中重

离子元素丰度的奇偶效应，可以依次确定其他的重离子种类。

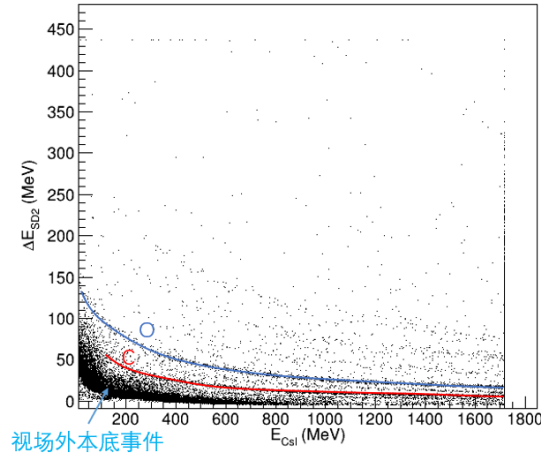


图 4-15 利用 ΔE - E 二维谱进行重离子的粒子鉴别

值得注意的是，由于重离子事件率较低，为了达到较为清晰的粒子鉴别，要求重离子事件达到一定的统计，这需要累积足够长时间的数据才能实现。

(2) 能量修正

火星能量粒子分析仪的能量测量是由硅探测器与 CsI 探测器共同实现的，其中入射带电粒子在硅探测器上的能量损失与信号幅度的关系是较为线性的，而 CsI 晶体由于存在猝灭效应，光输出量（对应实测 ADC 道值）与能量沉积之间的关系是非线性的，且非线性关系与粒子种类也有关系。一般来说，粒子越重（ Z 越大），偏离线性关系越严重。

载荷研制方在地面标定过程中发现，电子、质子及 α 粒子等轻粒子在 CsI 探测器中的猝灭效应不太显著，可以使用线性的能量响应函数来计算 CsI 探测器上沉积的能量值。而对于其他重离子，它们在 CsI 探测器中的猝灭效应比较严重，必须采用非线性的能量响应曲线来计算 CsI 探测器上沉积的能量值。上述线性能量响应函数如公式(4-5)所示，非线性的能量响应函数如公式（4-6）所示。两式中 E 均为粒子在 CsI 中的沉积的总能量，其中（4-5）中的 k 、 b 为常数，ADC 值为扣除台基后的 ADC 道值，式（4-6）中的 a_0 、 a_1 、 a_2 为常数， Z 为入射粒子的核电荷数， A 为入射粒子的质量数， L 为 CsI 的光输出量，对应的也是扣除台基后的 ADC 道值。

$$E_{rec} = k \times ADC + b \quad (4-5)$$

$$L(E_{true}, A, Z) = a_0 + a_1(E_{true} - a_2 A Z^2 \ln(1 + \frac{E_{true}}{a_2 A Z^2})) \quad (4-6)$$

$$E_{rec}(E_{true}, A, Z) = b_0 + b_1(E_{true} - b_2 A Z^2 \ln(1 + \frac{E_{true}}{b_2 A Z^2})) \quad (4-7)$$

由结合式（4-5）和式（4-6）可得式（4-7），其中 E_{rec} 为 2B 级数据中发布的未经过猝灭效应修正的能量值，而 E_{true} 为真实在 CsI 中沉积的能量值。考虑到重离子在 CsI 中的沉积能量计算曲线不是唯一确定的，而是与粒子的种类 A、Z 值还有密切关系，必须先做完粒子鉴别后，才能确定使用哪条曲线来计算准确的能量值。而粒子鉴别并不是一个简单过程，重离子数据发布时无法做到针对每一种粒子分别计算在 CsI 探测器中的真实沉积能量，而是对于所有的重离子先按照如式（4-5）的线性函数关系计算出一个未考虑猝灭效应的能量。用户自己做完重离子种类鉴别之后，再根据粒子种类选择式（4-7）中合适的非线性函数，进行猝灭效应的修正。式（4-7）中具体参数如下所示：

参 数	b_0	b_1	b_2
参数值	-0.857	0.8748	-0.0931

由于载荷研制指标关于重离子能量测量只要求了 25MeV-300MeV 的范围，因此在开展重离子标定实验时也只主要覆盖了上述能量范围，实际上能量粒子分析仪对重离子的能量测量范围可拓展至几个 GeV 以上。关于 CsI 的能量猝灭效应修正涉及到高 Z、高能事件，只能依靠束流实验给出的刻度参数进行外推估算。

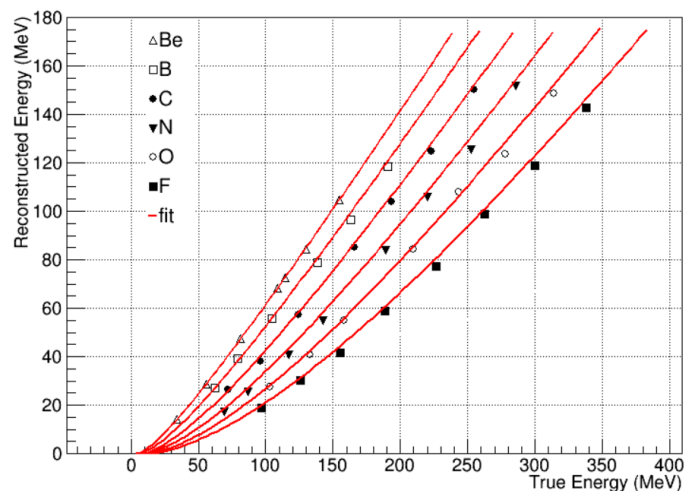


图 4-16 CsI 对重离子的能量修正曲线

（3）本底事件剔除

与轻粒子的本底事件一样，重离子数据中的本底事件主要来源于视场外入射的粒子的影响，在图 3-10 中的 ΔE -E 二维谱图上，对应的本底事件已经在图的左下方标注出来。可以看到视场外本底事件主要影响的是低能、低质量区域的重离子事件测量。Li、Be 元素区域看不到明显的能带，B、C、N 元素只能看到高能区域的清晰能带、而低能区域明显受到了视场外本底事件的污染。更高质量区域则看不到受视场外本底事件污染的

迹象。对于低能、低质量区域的重离子数据，可以结合 SD1 探测器及仿真来进行分析，排除视场外本底事件的污染。

5 其他需要说明的问题

本文第 4 章介绍了载荷研制团队提供的数据分析参考方法，原则上，用户利用该方法可以分析得到各种粒子的能谱信息，再结合几何因子就能够计算粒子在空间环境中的通量分布。但还有几个问题需要进行补充说明，以免因理解偏差对数据分析结果造成影响。

首先，载荷研制团队目前提供的几何因子是在对地面定标结果和探测数据分析的基础上，由仿真计算得到的。在仿真时做了 2 项简化处理。首先，假定粒子在空间环境中是各向同性分布的，这与实际情况可能有差别；其次，在仿真中只孤立的考虑了能量粒子分析仪自身的结构，并没有考虑载荷在环绕器上的安装环境带来的影响，这与实际情况也会有一定差异的。此外，文档所给的几何因子是有效几何因子，即由自身几何结构决定的几何因子乘以探测效率。探测效率则取决于探测器的触发系统及用户做数据分析时所涉及到的具体分析方法。因此，载荷研制团队基于上述条件提供的几何因子供用户参考、使用（几何因子计算方法详见附录一），用户可以自行判断是否能满足自身需求。后续，如果载荷研制团队根据探测数据对几何因子进行更新，将会及时发布更新结果。

其次，发布的 2B 数据中的能量是指粒子在 SD1、SD2 及 CsI 探测器中沉积的能量，将这三者相加可以得到利用能量粒子分析仪仪器实际测得的粒子能量，但实测能量并不完全等同于入射粒子在空间中携带的能量。入射粒子在进入火星能量粒子分析仪的灵敏探测区域之前，已经在挡光片上损失了部分能量，挡光片能损定标结果详见附录二。

最后，图 5-1 给出了关于轻粒子的 ΔE - E 二维谱，通过局部放大可以清楚的鉴别质子和 α 粒子事件，但图中质子和 α 粒子事件之间有明显的空隙所在，这是对部分弥散事件做赋零操作所致。由于火星能量粒子分析仪的三个子探测器 SD1、SD2 及 CsI 探测器均有多个增益通道，一共有 11 个测量通道，当火星能量粒子分析仪对一个在轨事件进行测量时，11 个测量通道均有信号，但数据发布时，三个探测器只能各传回一个能量值，因此数据预处理时，需要对增益通道进行选择。以 SD2 探测器为例，为了使发布的能量数据更加准确，对于能量沉积比较小的电子及质子应该选择高增益通道，对于能量沉积中等的 α 粒子应该选择中增益通道，而对于能量沉积较大的重离子事件应该选择低增益通道。利用不同通道的计算出来的能量略有差别，这种差别会导致对于原始 ADC 道值

连续分布的弥散事件在进行能量转换后， ΔE - E 二维谱上原本位置相邻但选用不同增益通道转换的区域会有部分重叠，为避免用户将重叠部分的事件误解为一种新的粒子，对该重叠部分的能量值进行了赋零操作，这才有了图 5-1 中的空隙。考虑到该部分事件本来就是应该剔除的弥散事件，因此，在数据预处理时进行此赋零操作不会对用户关心的数据造成影响。

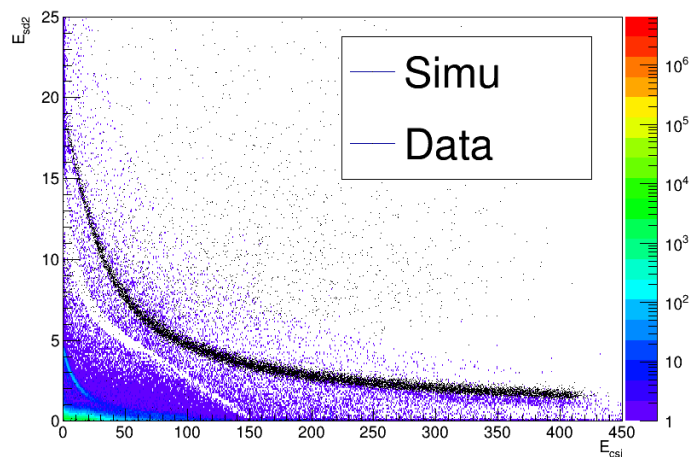


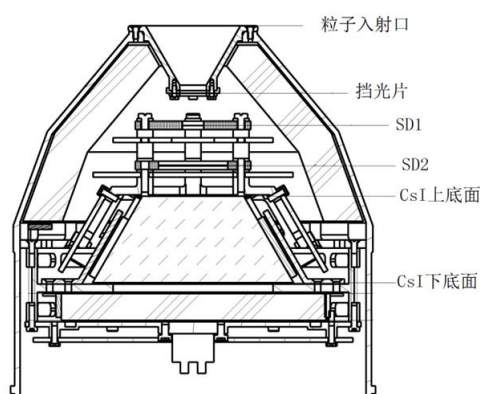
图 5-1 轻粒子 ΔE - E 二维谱

附录一 几何因子定义和计算说明

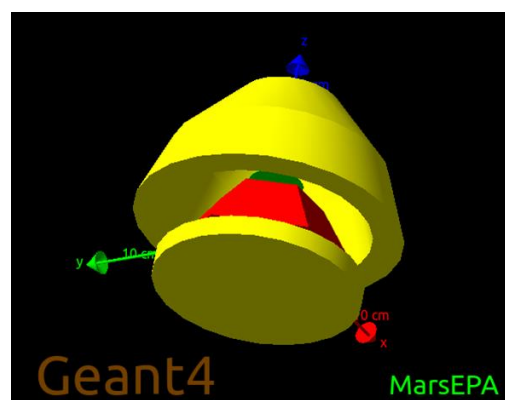
处于各向同性粒子辐射场中的探测器，其探测到的粒子计数率 N 正比于粒子通量 J ，正比系数 G 被称为几何因子，可以用如下公式表示：

$$G = \frac{N}{J}$$

本文档中的几何因子表征探测器对各向同性粒子的收集能力，只与探测器本身的结构有关。几何因子的标定可以利用机械测量加仿真的手段得到。在火星能量粒子分析仪安装过程中，用机械测量手段得到火星能量粒子分析仪各个部件的安装参数；然后以测量得到的机械参数作为输入量，在 Geant4 仿真程序中构建一个和真实探测器相同的结构；最后在仿真程序中设置球面源，能量分析仪包络在球面源内，粒子在球面源各向同性发射，记录穿过挡光片并且能够被火星能量粒子分析仪测得的计数。几何因子大小可以根据定义计算得到。在仿真程序中，对于不同能量以及不同种类粒子的几何因子分别进行独立计算。



附图 1 机械结构示意图



附图 2 探测器仿真构建示意图

首先，在火星能量粒子分析仪的安装过程中，测量各机械部件的安装参数，火星能量粒子分析仪机械结构如附图 1 所示，测量结果如附表 1 所示。

其次，在仿真程序中按照机械测量结果构建探测器，如附图 2 所示。

然后，根据指标要求的能量范围设置各向同性发射的电子、质子及 α 粒子辐射场，并将火星能量粒子分析仪放置其中，根据电子、质子及 α 粒子的在轨能道划分，按能道记录火星能量粒子分析仪的实测计数。

最后，根据公式 $G=N/J$ 计算各种粒子各个能道的几何因子值。

附表 1 能量粒子分析仪各机械部件安装情况测量记录

机械部件名称	轴向位置 (mm)	水平倾角(°)	偏心参数 (mm)
锥面上口	0	0	0
挡光片	27.5	0.03	0.13
SD1	37.09	0.11	0.18
SD2	51.95	0.10	0.14
CsI 上表面	63.70	0.13	0.16

载荷研制团队按照给定的方法做出 e/p/he 16 个不同能道下的几何因子（如附表 2 所示）和重离子不同能道下的几何因子（如附表 3 所示），供用户参考和使用。

附表 2 电子、质子及 α 粒子各能道的几何因子

能道序号	电子		质子		α 粒子	
	能道划分 (MeV)	几何因子 (cm^2sr)	能道划分 (MeV)	几何因子 (cm^2sr)	能道划分 (MeV)	几何因子 (cm^2sr)
1	[0.1,0.13)	0.08	[2, 2.6)	0.20	[25, 29.2)	0.21
2	[0.13,0.18)	0.11	[2.6, 3.3)	0.21	[29.2, 34.1)	0.22
3	[0.18, 0.25)	0.16	[3.3, 4.2)	0.20	[34.1, 39.8)	0.21
4	[0.25, 0.33)	0.19	[4.2, 5.3)	0.21	[39.8, 46.5)	0.21
5	[0.33, 0.45)	0.21	[5.3, 6.8)	0.20	[46.5, 54.3)	0.22
6	[0.45, 0.60)	0.23	[6.8, 8.7)	0.21	[54.3, 63.5)	0.24
7	[0.60, 0.81)	0.23	[8.7, 11.1)	0.22	[63.5, 74.1)	0.24
8	[0.81, 1.10)	0.25	[11.1, 14.1)	0.22	[74.1, 86.6)	0.26
9	[1.10, 1.48)	0.27	[14.1, 18.1)	0.24	[86.6, 101.2)	0.29
10	[1.48, 1.99)	0.30	[18.1, 23.1)	0.26	[101.2, 118.1)	0.32
11	[1.99, 2.69)	0.36	[23.1, 29.4)	0.33	[118.1, 138)	0.39
12	[2.69, 3.63)	0.52	[29.4, 37.6)	0.42	[138., 161.2)	0.51
13	[3.63, 4.89)	0.77	[37.6, 48.0)	0.79	[161.2, 188.3)	0.86
14	[4.89, 6.60)	0.96	[48.0, 61.3)	1.23	[188.3, 219.9)	1.16
15	[6.60, 8.90)	1.07	[61.3, 78.3)	1.44	[219.9, 256.8)	1.39
16	[8.90, 12)	1.20	[78.3, 100)	1.58	[256.8, 300)	1.50

注：有效几何因子的计算与用户选取事件样本的方法密切相关，即有效几何因子计算因不同分析方法而不同。附表 2 几何因子的计算不考虑实际事件样本选取方法，仅考虑输入通量和探测到的粒子数来得到几何因子的计算结果，供用户参考和使用。

附表 3 典型重离子各能道的几何因子

能道序号	能道划分 (MeV)	几何因子 (cm ² sr)				
		C	N	O	Ne	Si
1	[25, 29.2)	0.10	0.15	0.14	0.14	0.16
2	[29.2, 34.1)	0.13	0.12	0.15	0.13	0.17
3	[34.1, 39.8)	0.13	0.17	0.17	0.16	0.13
4	[39.8, 46.5)	0.15	0.10	0.14	0.13	0.14
5	[46.5, 54.3)	0.14	0.13	0.14	0.16	0.14
6	[54.3, 63.5)	0.12	0.14	0.12	0.15	0.16
7	[63.5, 74.1)	0.15	0.11	0.11	0.15	0.13
8	[74.1, 86.6)	0.12	0.14	0.14	0.16	0.14
9	[86.6, 101.2)	0.14	0.14	0.16	0.14	0.16
10	[101.2, 118.1)	0.13	0.13	0.14	0.13	0.14
11	[118.1, 138)	0.13	0.13	0.15	0.15	0.13
12	[138., 161.2)	0.13	0.14	0.14	0.15	0.13
13	[161.2, 188.3)	0.14	0.14	0.12	0.14	0.13
14	[188.3, 219.9)	0.15	0.14	0.15	0.14	0.13
15	[219.9, 256.8)	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14
16	[256.8, 300)	0.15	0.14	0.14	0.15	0.13

注：附表 3 几何因子的计算不考虑实际事件样本选取方法，仅考虑输入通量和探测到的粒子数来得到几何因子的计算结果，供用户参考和使用。

附录二 挡光片能损定标说明

挡光片位于火星能量分析仪前端（如附图 1 所示），用于阻挡太阳光和微流星体。但是，挡光片在遮挡太阳光的同时，也会降低入射粒子的能量。因此，为了得到更准确的粒子入射能量，需要加回粒子在挡光片上沉积的那部分能量值。

带电粒子与物质之间的相互作用满足 Bethe-Bloch 公式（附-1），式中常数 $\kappa = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071(\text{MeV cm}^2/\text{g})$ ， $N_A=6.022\times10^{23}\text{mol}^{-1}$ 为阿伏加德罗常数， $r_e = e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e c^2)=2.818\times10^{-13}\text{cm}$ 为经典电子半径， m_e 为电子的静止质量， Z 和 A 分别为介质原子的原子序数和质量数， z 为入射粒子的电荷数， γ 为 Lorentz 因子， δ 为密度效应项， $x=X\rho$ 为介质的质量厚度(g/cm^2)， I 为介质的电离常数（也称平均激发能，有效电离电位等）。 E_{kin}^{\max} 为入射粒子与静止的电子碰撞时传递给电子的最大动能。

$$-\frac{dE}{dx} = \kappa z^2 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} E_{kin}^{\max} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

（附-1）

对于挡光片来说，其材料及厚度均为定值，带电粒子在挡光片中的能损只与粒子的种类及速度（对应粒子能量）相关。因此，利用火星能量粒子分析仪测得带电粒子的能量及种类，就可以由式附-1 计算出挡光片中的能损。

根据机械测量的结果，挡光片的 Ti 膜的厚度为 2.1 μm 。由于目前发布的是轻粒子与重离子的原始能量数据，地面数据分析时，可以利用挡光片的厚度值依据公式附-1 计算所需的挡光片能损。能损的精度主要来自挡光片厚度的测量误差，厚度的测量误差好于 0.1 微米，因此，对于 2.1 微米的 Ti 膜，能损定标的精度好于 4.7%。

载荷研制团队根据火星能量粒子分析仪能道划分方式，选择每种粒子的能道中心值来计算其在挡光片上的能损，得到了电子、质子、 α 粒子在挡光片上的能损矩阵（附表 3），供用户参考、使用。

附表 3 电子、质子及 α 粒子在挡光片上的能损矩阵

能道序号	电子		质子		α 粒子	
	能道划分 (MeV)	能损 (MeV)	能道划分 (MeV)	能损 (MeV)	能道划分 (MeV)	能损 (MeV)
1	[0.1,0.13)	0.00201	[2, 2.6)	0.081978	[25, 29.2)	0.152132
2	[0.13,0.18)	0.001728	[2.6, 3.3)	0.070228	[29.2, 34.1)	0.134869
3	[0.18, 0.25)	0.001437	[3.3, 4.2)	0.059913	[34.1, 39.8)	0.117841
4	[0.25, 0.33)	0.001361	[4.2, 5.3)	0.050326	[39.8, 46.5)	0.10343

能道序号	电子		质子		α 粒子	
	能道划分 (MeV)	能损 (MeV)	能道划分 (MeV)	能损 (MeV)	能道划分 (MeV)	能损 (MeV)
5	[0.33, 0.45)	0.001119	[5.3, 6.8)	0.042401	[46.5, 54.3)	0.091033
6	[0.45, 0.60)	0.001199	[6.8, 8.7)	0.034758	[54.3, 63.5)	0.07995
7	[0.60, 0.81)	0.001044	[8.7, 11.1)	0.028079	[63.5, 74.1)	0.069748
8	[0.81, 1.10)	0.000954	[11.1, 14.1)	0.022784	[74.1, 86.6)	0.061162
9	[1.10, 1.48)	0.000969	[14.1, 18.1)	0.018763	[86.6, 101.2)	0.054079
10	[1.48, 1.99)	0.000932	[18.1, 23.1)	0.015263	[101.2, 118.1)	0.047251
11	[1.99, 2.69)	0.000921	[23.1, 29.4)	0.012299	[118.1, 138)	0.041774
12	[2.69, 3.63)	0.000978	[29.4, 37.6)	0.010089	[138., 161.2)	0.036511
13	[3.63, 4.89)	0.000929	[37.6, 48.0)	0.008121	[161.2, 188.3)	0.032033
14	[4.89, 6.60)	0.000966	[48.0, 61.3)	0.006775	[188.3, 219.9)	0.028321
15	[6.60, 8.90)	0.000958	[61.3, 78.3)	0.005562	[219.9, 256.8)	0.024785
16	[8.90, 12)	0.000957	[78.3, 100)	0.004572	[256.8, 300)	0.022126