

# 统计观测模拟对比方法研究太阳高能粒子峰值强度与日冕物质抛射速度和源位置的相关性

祁诗阳<sup>1,2</sup>, 秦刚<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 国家空间科学中心,北京 100190;2.中国科学院大学 地球科学学院,北京 100049)

**摘要:**对于多个具有共同特性粒子事件,采用一种统计的数值模拟方法,即将观测事件根据几个指标进行分类排序,并通过寻找每一分组的中值作为特征值,然后将上百个事件转化为几个特征事件进行数值模拟,缩短了数值模拟时间,同时得以考察观测内在的物理规律,并运用此方法对太阳高能粒子峰值强度分别与日冕物质抛射速度以及位置之间的相关性做了研究,最后得出与观测结果相一致的结论.该方法是数值模拟与观测分析研究的最佳结合,弥补了观测结果无法拆分开来考察单因素对事件影响的缺陷,同时也减少了对大量单个事件数值模拟的次数.

**关键词:**太阳高能粒子;日冕物质抛射;数值模拟;多卫星观测

**中图分类号:**P353

**文献标志码:**A

太阳日冕层在几分钟至几小时内向外喷射出日冕物质称为日冕物质抛射(Coronal Mass Ejections, CME),当快速 CME 穿过太阳风时会产生强大的行星际激波,行星际激波会加速其周围的太阳风粒子,从而形成太阳高能粒子(Solar Energetic Particles, SEP).当太阳高能粒子传播到近地空间甚至地球磁层时,会对地球卫星、航天安全造成干扰,从而影响地球生产活动,所以太阳高能粒子是空间天气预报的研究重点之一.

研究表明,SEP 事件与相应的 CME 事件有很强的相关性.Kahler et al.<sup>[1-3]</sup>从各角度对其进行相关性研究,主要有 SEP 时间尺度、峰值强度与相应 CME 的速度、宽度、位置等的相关性研究<sup>[4-7]</sup>.对与 CME 相关的 SEP 事件的峰值研究主要依靠的数据是 LASCO/SOHO 对 CME 的观测和 GOES 对  $E > 10$  MeV 质子的观测.最近一些研究<sup>[8-9]</sup>用 GOES 卫星已发表的观测到的主要 SEP 事件列表研究高于 10 pfu( $1 \text{ pfu} = 1 \text{ p cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )的质子峰值强度,还有一些研究了弱一些( $< 10$  pfu)的 SEP 事件<sup>[10-11]</sup>.为证实 SEP 峰值强度与相应的 CME 速度有一定相关性<sup>[5]</sup>,一些研究<sup>[4,12]</sup>用 SEP 峰值强度的  $\lg$  值与观测到的 CME 前边速度做相关性分析,但分析显示对应图中的点较分散,相关性不强.Lario 等<sup>[13]</sup>在 2013 年通过分析 STEREO, ACE, SOHO, GOES 及 MESSENGER 卫星联合观测结果,研究了在太阳 24 周期的上升阶段(2009.10-2012.6) SEP 峰值强度在太阳高能粒子事件中与经度和径向之间的依赖关系.然而,通过对大型 SEP 事件与相应的 CME 的研究发现<sup>[14]</sup>,太阳上的活动源区域与 SEP 强度及 CME 速度无关,他们认为是连续爆发的两个 CME 之间的相互作用起了重要作用.

对于太阳高能粒子的研究,通常分为两方面:观测与数值模拟.在观测研究方面,一种方法是通过卫星各仪器的观测数据,来研究某一特殊粒子事件的各种特性;另一种方法是通过统计多个粒子事件的某种共同特性,来分析其内在物理规律.而在数值模拟研究方面一般是利用模型模拟单个粒子事件,通过输入相应观测得到的物理参数对某一粒子事件进行模拟研究.对此,数值模拟可以很好地结合观测结果对某一事件进行对比研究.而当面对大量的太阳高能粒子事件时,需要研究某种共同特性时,数值模拟则由于每个事件都要花费

收稿日期:2018-03-22;修回日期:2018-11-21.

基金项目:国家自然科学基金(NNSFC 41574172)

作者简介(通信作者):祁诗阳(1990-),女,河南新乡人,中国科学院国家空间科学中心博士研究生,研究方向为空间物理学, E-mail: qsyxiaoyi@163.com.

一定的时间去模拟而需要花费出较多的计算时间. Qi et al.<sup>[7]</sup>提出了一种新的模拟方法,对多个事件进行统计分类,然后进行数值模拟研究. Qi et al.<sup>[7]</sup>首先将观测数据根据几个指标进行分类并排序,并通过寻找每一分组的中值作为特征值的方法,将上百个事件转化为几个特征事件进行数值模拟,并考察其内在的物理规律.例如,每个事件都有物理量  $A$  和  $B$  对应的不同值,先将所有事件按照物理量  $A$  从小到大排序,将其分为  $m$  组找其中中值即得到  $m$  个特征值  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . 同样地,再将所有事件按照物理量  $B$  进行排序、分组、取中值,得到特征值  $B_1, B_2, \dots, B_n$ . 接下来,将物理量  $A\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  和  $B\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$  一一进行组合得到  $\{A_1, B_1\}, \{A_1, B_2\}, \dots, \{A_1, B_n\}, \dots, \{A_m, B_n\}$ , 并作为输入参数进行  $m \times n$  次数值模拟,得到输出量  $\{C_{mn}\}$ . 由于此种数值模拟方法可以控制物理量  $A$  保持不变,改变物理量  $B$  的值来考察单因素物理量  $B$  对事件物理量  $C$  的影响( $AB$  互换亦然),所以该方法既弥补了没有足够的观测数据可以使物理量  $A$  恒定而物理量  $B$  多变所带来的统计样本量不足的缺陷,也减少了大量单个事件数值模拟的次数. 该方法是数值模拟与观测分析研究很好地结合. Qi et al.<sup>[7]</sup>运用此方法对 SEP 时间尺度中的 TD(the duration of the SEP intensity above 0.5Ip, SEP 强度高于半峰值的持续时间)与 CME 速度以及宽度做了相关性研究,得出了与直接用观测数据做处理分析的结果相一致的结论,即 SEP 时间尺度 TD 随 CME 速度与宽度呈正相关的关系. 同时还得出仅从观测分析中无法得到的结论,解决了 Kahler<sup>[6]</sup>通过分析观测数据提出的 CME 速度与宽度中的哪个因素是影响 SEP 时间尺度的主要因素的问题,即 SEP 时间尺度 TD 主要依赖于 CME 速度而独立于 CME 宽度. 本文将采用此方法,对 SEP 的峰值强度与 CME 速度、宽度、源位置经度等因素的相关性进行研究.

本文运用 Kahler<sup>[6]</sup>分析的数据,通过 SPTC 程序<sup>[15]</sup>进行数值模拟来研究 CME 峰值强度,并将本文的结果与 Kahler<sup>[6]</sup>中的作对比. 第 1 节介绍 SEP 三维聚焦传播模型,并简要的通过数值模拟来介绍 SEP 峰值强度的概念;第 2 节对数据进行分析,并介绍参数的选择;第 3 节对数值模拟的结果进行说明,并与观测对比;第 4 节对结果进行讨论.

## 1 模型及数值模拟

根据以前的研究<sup>[16-17]</sup>建立太阳高能粒子的传输模型. 三维聚焦传输方程为<sup>[16-19]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} = & \nabla \cdot (\kappa_{\perp} \cdot \nabla f) - (v_{\mu} \hat{\mathbf{b}} + \mathbf{V}_{sw}) \cdot \nabla f + \frac{\partial}{\partial \mu} (D_{\mu\mu} \frac{\partial}{\partial \mu}) + \\ & p \left[ \frac{1-\mu^2}{2} (\nabla \cdot \mathbf{V}_{sw} - \hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{b}} : \nabla \mathbf{V}_{sw}) + \mu^2 \hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{b}} : \nabla \mathbf{V}_{sw} \right] \frac{\partial f}{\partial p} - \\ & \frac{1-\mu^2}{2} \left[ -\frac{v}{L} + \mu (\nabla \cdot \mathbf{V}_{sw} - 3\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{b}} : \nabla \mathbf{V}_{sw}) \right] \frac{\partial f}{\partial \mu}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $f(x, \mu, p, t)$  是回旋平均分布函数,  $x$  是非旋转的日面坐标系下的位置,  $t$  是时间,  $\mu, p, v$  分别是粒子投掷角余弦、动量、速度,  $\kappa_{\perp}$  和  $D_{\mu\mu}$  分别是粒子横向扩散系数和投掷角扩散系数,  $\mathbf{V}_{sw} = V_{sw}\hat{\mathbf{r}}$  是径向太阳风速度,  $L = (\hat{\mathbf{b}} \cdot \nabla \ln B_0)^{-1}$  是由背景磁场  $B_0$  和沿局部磁场的单位矢量  $\hat{\mathbf{b}}$  决定的磁聚焦长度. (1)式包括了大部分重要的传输机制: 粒子沿磁场的运动、随太阳风对流、投掷角扩散、磁汇聚、横向扩散,以及各向异性的绝热冷却.

扩散系数根据文献<sup>[20]</sup>确定,根据非线性引导中心理论<sup>[21]</sup>近似地将横向扩散系数以分析的形式<sup>[22-23]</sup>设置如下,

$$\kappa_{\perp} = v l_d^{2/3} \lambda_{\parallel}^{1/3} (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{b}}), \quad (2)$$

其中,  $l_d$  是控制横向扩散系数的参数. 假设粒子投掷角扩散远快于横向扩散,为了简便,设  $\kappa_{\perp}$  独立于  $\mu$ . 粒子在平行方向上的平均自由程  $\lambda_{\parallel}$  可以写为<sup>[24-26]</sup>:

$$\lambda_{\parallel} = \frac{3v}{8} \int_{-1}^{+1} \frac{(1-\mu^2)^2}{D_{\mu\mu}} d\mu, \quad (3)$$

平行方向上的扩散系数  $\kappa_{\parallel}$  可以写为  $\kappa_{\parallel} = v \lambda_{\parallel} / 3$ .

采用文献<sup>[27-28]</sup>对投掷角扩散系数建立的模型,

$$D_{\mu\mu}(\mu) = GvR_L^{s-2} \{ |\mu|^{s-1} + h \} (1 - \mu^2), \quad (4)$$

其中,  $G$  是控制  $D_{\mu\mu}(\mu)$  的参数,  $v$  是粒子速度,  $R_L = pc/(|q|B_0)$  是粒子 Larmor 半径, 考虑太阳风中投掷角扩散在  $\mu = 0$  时的非线性效应<sup>[29-30]</sup>, 取  $h = 0.01$ .

为了模拟粒子喷射, 将激波作为移动的高能粒子源, 边界条件如下<sup>[31]</sup>:

$$f_b = a\delta(r - v_s t) \left(\frac{r}{r_c}\right)^\alpha \exp\left[-\frac{|\phi(\theta, \phi)|}{\phi_c(p)}\right] p^\gamma H(\phi_s - |\phi(\theta, \phi)|), \quad (5)$$

其中,  $\phi(\theta, \phi)$  是源中心到粒子喷射任意点  $(\theta, \phi)$  的夹角,  $\gamma$  是源粒子的谱指数,  $\alpha$  和  $\phi_c$  是激波加速强度系数.

根据模型, 将输入激波速度、激波宽度、太阳风速度、源位置等物理量, 输出通量以及各向异性等参数, 运用 SPTC 程序<sup>[15]</sup> 进行数值模拟. 由此便可以得到峰值强度. 如图 1 所示, 通过输入参数: 激波速度  $v_s = 1\ 600\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激波宽度  $W_s = 103.85^\circ$ 、太阳风速度  $v_{sw} = 502.2\ \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、源位置在 N10W48. 即可得到 SEP 通量、各向异性随时间变化图. 图 1 中, 上图表示 SEP 通量 flux 随时间变化, 下图表示各向异性随时间变化, 上图中红色横虚线表示太阳高能粒子通量峰值

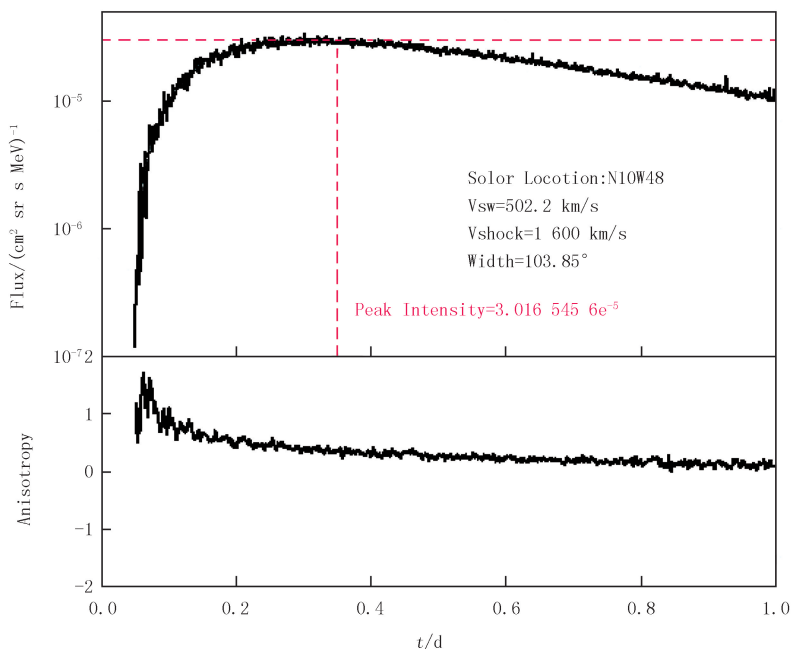


图 1 数值模拟 SEP 通量、各向异性随时间变化图

Fig.1 Numerical simulation of SEP flux, anisotropy with time

强度  $I_p = 3.016\ 545\ 6 \times 10^{-5}$  pfu, 红色竖虚线表示峰值对应的时间. 由此, 即可以通过任何一个 CME 事件的参数进行数值模拟得到其引发的 SEP 通量强度.

## 2 观测数据分析

使用文献[6]中列表统计的由 Wind 卫星上的 EPACT 仪器观测到的 20 MeV SEP 事件和 SOHO(Solar and Heliospheric Observatory) 卫星上的 LASCO 仪器观测到的与之相关的 CME 事件进行分析. 文献[6]中的表 1 包括了 CME 爆发的时间、CME 爆发时在太阳上的位置、CME 的速度、CME 的宽度, 以及由此引发的 SEP 事件的时间尺度和峰值强度. 列表涵盖了从 1996 年到 2008 年的 217 个事件. 对其中参数信息完整的 204 个事件进行研究<sup>[7]</sup>.

在对数据的选取分组上, 采用文献[7]的方法, 将信息完整的 204 个事件按照经度排序划分为 5 组, 平均每组 41 个事件, 并将对应组内经度排序的中值作为该经度范围的特征值. 接着在每一经度组内先按照 CME 速度从小到大排列细分成 4 小组, 选取对应组的中值作为特征值, 再在每一经度组内按照 CME 宽度大小排序并细分成 3 小组, 选取 3 个经度范围进行研究, W33-W60, W62-W90 和 W100-bWL, 对应的中值分别是 W48, W77 和 W115. 其中 bWL 为包括西边界之后的源, 相应的特征值如表 1 所示, 将每一经度分组下的 CME 速度和宽度一一组合, 运用本文的模型进行数值模拟, 可以得到相应 SEP 峰值强度  $I_p$ .

## 3 对比研究

统计观测方法得到的数值模拟结果如图 2 所示, 黄色、红色、黑色分别代表经度在特征值是 W48, W77, W115 的范围下的模拟结果, 对应颜色的直线是对各自经度下模拟结果的拟合, 它们可以直观地表现出数值

模拟散点的趋势.图 2 上的每一个数据点均来自表 1 所列的一组数值模拟值,每个经度范围有 12 组数值模拟即 12 个数据点,但由图 2 同一位置经度下的同一 CME 速度不同 CME 宽度的峰值几乎重合可知,CME 宽度几乎不影响 SEP 峰值强度.且由直线单调递增的趋势我们可知,CME 速度越大,对应的 SEP 事件其通量峰值强度越高.由于在整体位置上黄线(W48)高于红线(W77)高于黑线(W115),可以得出结论,源位置越往西的 SEP 事件峰值越低.

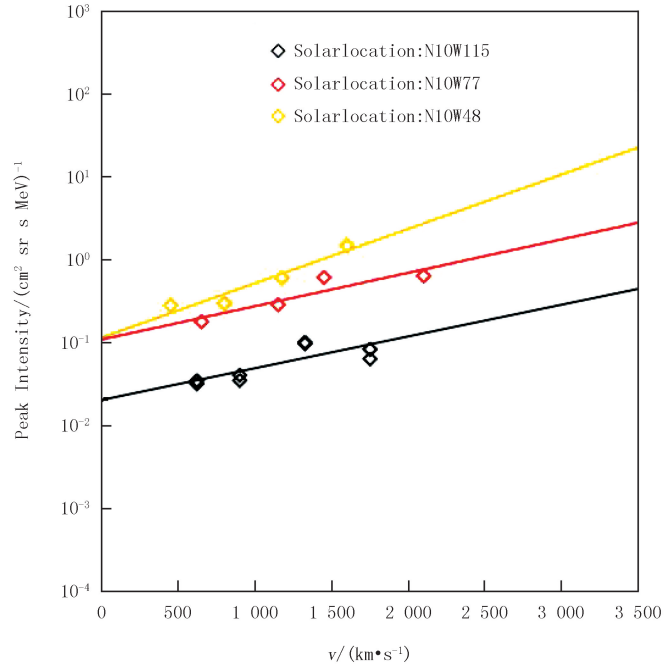


图 2 SEP 峰值强度与 CME 速度相关性图

Fig.2 Correlation between SEP peak intensity and CME velocity

表 1 数值模拟中用到的激波速度、宽度、源位置参数

Tab.1 Parameters such as shock velocity, width, source location used in numerical simulation

源位置					
N10W48		N10W77		N10W115	
$v_s/(km \cdot s^{-1})$	$W_s/(\circ)$	$v_s/(km \cdot s^{-1})$	$W_s/(\circ)$	$v_s/(km \cdot s^{-1})$	$W_s/(\circ)$
450	167	650	223	620	190
450	298	650	261	620	268
450	360	650	360	620	360
800	167	1 150	223	900	190
800	298	1 150	261	900	268
800	360	1 150	360	900	360
1 175	167	1 450	223	1 325	190
1 175	298	1 450	261	1 325	268
1 175	360	1 450	360	1 325	360
1 600	167	2 100	223	1 750	190
1 600	298	2 100	261	1 750	268
1 600	360	2 100	360	1 750	360

为了检验数值模拟的结果,对观测数据做了分析,如图 3 所示,蓝点和红点分别为源位置在 E0-W90 和 W90-WL 范围的 SEP 事件,对其进行线性拟合.图中虚线给出了一定的拟合范围,即源位置在 E0-W90 范围内点的拟合直线斜率为 $(1.47 \times 10^{-3} \pm 1.59 \times 10^{-4})$ ,截距为 $(-2.78 \pm 0.223)$ ;源位置在 W90-WL 范围内点的拟合直线斜率为 $(7.69 \times 10^{-4} \pm 5.08 \times 10^{-4})$ ,截距为 $(-2.36 \pm 0.501)$ .通过对观测数据的分析,可以得到结论:CME 速度越大相应的 SEP 事件通量峰值强度越高,且源位置越往西的 SEP 事件峰值强度越低.



在对观测数据的分析中,源位置范围最初划分的是 E0-W50, W50-W90, W90-WL, 以此来一一对应的数值模拟典型特征源位置值是 W48, W77, W115.然而由于观测误差较大,很难分出源位置在 E0-W50 和 W50-W90 两个范围的事件的峰值强度与 CME 速度关系拟合直线,因此将两位置范围合并,即 E0-W90.

## 4 讨论

从以上数值模拟图与观测图都可以看出,SEP 事件峰值随 CME 速度增大而增大,几乎不随 CME 宽度变化而改变,随源位置偏西而降低.另一方面,速度越大,位置造成的差异越大.为了清晰地对比两图,将横纵坐标统一.从观测图可看出,由于点分布较为弥散,直观上并不容易看出 SEP 峰值与 CME 速度以及源位置的相关性.而由于数值模拟的事件都是有代表性的特征事件,则可以准确地看出规律.

本文论述的统计观测模拟对比方法的优点是可以通过对多个事件的研究,选取不同物理量的分组特征值,组合得到特征事件进行数值模拟,考察其共同现象背后的物理机制.但是该方法还有提升的空间,即事件增多、分组增多,统计性增强.

**致谢:**基金支持:国家自然科学基金(41574172);数据来自 NASACDAW 网站(cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov);这项工作是在天津国家超级计算机中心进行的,计算均在天河一号(A)上进行.

## 参 考 文 献

- [1] Kahler S W, Hildner E, Van Hollebeke M. A. I. Prompt solar proton events and coronal mass ejections [J]. *Solar Physics*, 1978, 57: 429-443.
- [2] Kahler S W, Sheeley N R Jr, Howard R A, et al. Associations between coronal mass ejections and solar energetic proton events [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 9683-9693.
- [3] Kahler S W, Cliver E W, Cane H V, et al. Solar Energetic Proton Events and Coronal Mass Ejections Near Solar Minimum [J]. *International Cosmic Ray Conference*, 1987, 3: 121.
- [4] Kahler S W, Crooker N U, Gosling J T. The polarities and locations of interplanetary coronal mass ejections in large interplanetary magnetic sectors [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 9919-9924.
- [5] Kahler S W. The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 20947-20956.
- [6] Kahler S W. A Comparison of Solar Energetic Particle Event Timescales with Properties of Associated Coronal Mass Ejections [J]. *The*

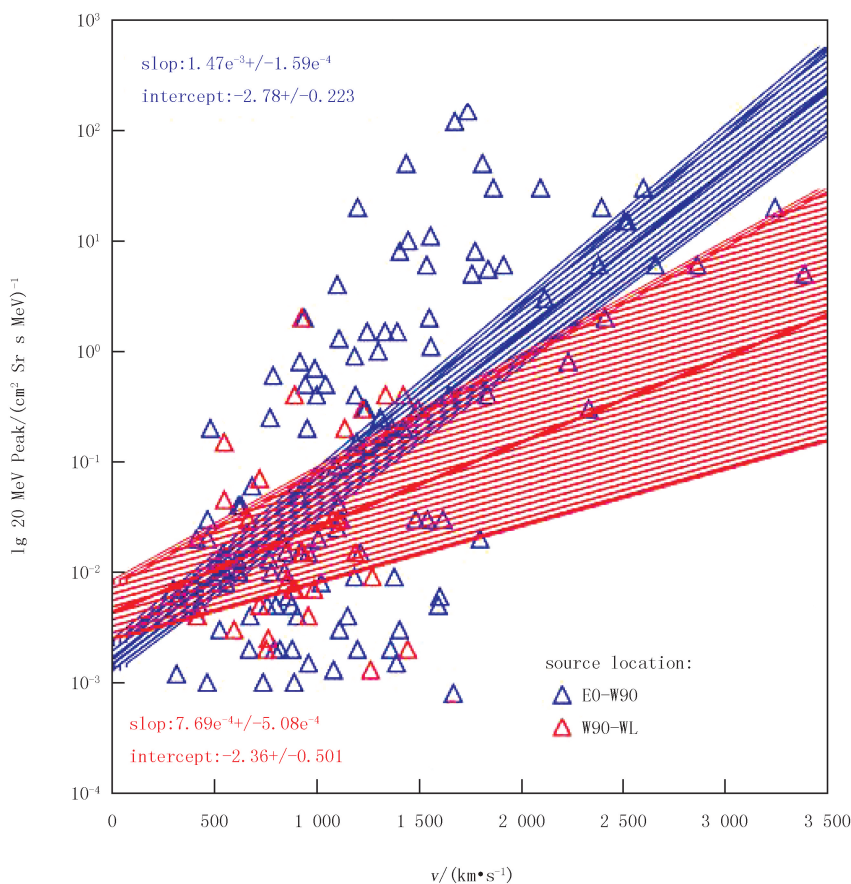


图3 观测分析 20MeV SEP 事件通量峰值强度与 CME 速度 (cdaw 列表中的速度) 相关性图  
Fig.3 Correlation between the observed peak intensity of 20MeV SEP events and CME velocity (in the cdaw list)

- Astrophysical Journal, 2013, 769:110.
- [7] Qi S Y, Qin G, Wang Y. Numerical simulations of solar energetic particle event timescales associated with ICMEs [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2017, 17:033.
- [8] Reinard A A, Andrews M A. Comparison of CME characteristics for SEP and non-SEP related events [J]. Advances in Space Research, 2006, 38:480-483.
- [9] Kumar P, Barniol Duran R. On the generation of high-energy photons detected by the Fermi Satellite from gamma-ray bursts [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2009, 400:L75-L79.
- [10] Wang Y M, Pick M, Mason G M. Coronal Holes, Jets, and the Origin of 3He-rich Particle Events [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 639:495-509.
- [11] Gopalswamy N, Yashiro S, Akiyama S, et al. Coronal mass ejections, type II radio bursts, and solar energetic particle events in the SOHO era [J]. Annales Geophysicae, 2008, 26:3033-3047.
- [12] Kahler S W, Vourlidas A. Fast coronal mass ejection environments and the production of solar energetic particle events [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2005, 110(A9):A12S01.
- [13] Lario D, Aran A, Gómez-Herrero R, et al. Longitudinal and Radial Dependence of Solar Energetic Particle Peak Intensities: STEREO, ACE, SOHO, GOES, and MESSENGER Observations [J]. The Astrophysical Journal, 2013, 767:41.
- [14] Gopalswamy N, Yashiro S, Krucker S, et al. CME Interaction and the Intensity of Solar Energetic Particle Events [J]. Coronal and Stellar Mass Ejections, 2005, 226:367-373.
- [15] Wang Y, Qin G, Zhang M. Effects of Perpendicular Diffusion on Energetic Particles Accelerated by the Interplanetary Coronal Mass Ejection shock [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 752:37.
- [16] Qin G, Zhang M, Dwyer J R. Effect of adiabatic cooling on the fitted parallel mean free path of solar energetic particles [J]. Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2006, 111:8101.
- [17] Zhang M, Qin G, Rassoul H. Propagation of Solar Energetic Particles in Three-Dimensional Interplanetary Magnetic Fields [J]. The Astrophysical Journal, 2009, 692:109-132.
- [18] Skilling J. Cosmic Rays in the Galaxy: Convection or Diffusion? [J]. The Astrophysical Journal, 1971, 170:265.
- [19] Schlickeiser R. Cosmic Ray Astrophysics [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2002.
- [20] Burger R A, Krüger T P J, Hitge M, et al. A Fisk-Parker Hybrid Heliospheric Magnetic Field with a Solar-Cycle Dependence [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 674:511-519.
- [21] Matthaeus W H, Qin G, Bieber J W, et al. Nonlinear Collisionless Perpendicular Diffusion of Charged Particles [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2003, 590:L53-L56.
- [22] Shalchi A, Bieber J W, Matthaeus W H, et al. Nonlinear Parallel and Perpendicular Diffusion of Charged Cosmic Rays in Weak Turbulence [J]. The Astrophysical Journal, 2004, 616:617-629.
- [23] Shalchi A, Li G, Zank G P. Analytic forms of the perpendicular cosmic ray diffusion coefficient for an arbitrary turbulence spectrum and applications on transport of Galactic protons and acceleration at interplanetary shocks [J]. Astrophysics and Space Science, 2010, 325:99-111.
- [24] Jokipii J R. Cosmic-Ray Propagation. I. Charged Particles in a Random Magnetic Field [J]. The Astrophysical Journal, 1966, 146:480.
- [25] Hasselmann K, Wibberenz G. Scattering of charged particles by random electromagnetic field [J]. Z Geophys, 1968, 34:353-388.
- [26] Earl J A. The diffusive idealization of charged-particle transport in random magnetic fields [J]. The Astrophysical Journal, 1974, 193:231-242.
- [27] Beeck J, Wibberenz G. Pitch angle distributions of solar energetic particles and the local scattering properties of the interplanetary medium [J]. The Astrophysical Journal, 1986, 311:437-450.
- [28] Teufel A, Schlickeriser R. Analytic calculation of the parallel mean free path of heliospheric cosmic rays. II. Dynamical magnetic slab turbulence and random sweeping slab turbulence with finite wave power at small wavenumbers [J]. Astronomy and Astrophysics, 2003, 397:15.
- [29] Qin G, Shalchi A. Pitch-Angle Diffusion Coefficients of Charged Particles from Computer Simulations [J]. The Astrophysical Journal, 2009, 707:61-66.
- [30] Qin G, Shalchi A. Detailed numerical investigation of 90° scattering of energetic particles interacting with magnetic turbulence [J]. Physics of Plasmas (1994-present), 2014, 21:042906.
- [31] Kallenrode M B, Wibberenz G. Propagation of particles injected from interplanetary shocks: A black box model and its consequences for acceleration theory and data interpretation [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978-2012), 1997, 102:22311-22334.

- [12] BESIII Collaboration, Study of  $\Psi$  decays to  $\Xi^0 \bar{\Xi}^0$  and  $\Sigma(1385)^0 \bar{\Sigma}(1385)^0$  final states [J]. Phys Lett B, 2017, 770: 217-225.
- [13] BESIII Collaboration, Study of  $J/\Psi$  and  $\Psi(3686)$  decay to  $\bar{\Lambda} \Lambda$  and  $\bar{\Sigma}^0 \Sigma^0$  final states. [J] Phys Rev D 2017, 95: 052003.
- [14] 黄性涛, 马连良, 王孔森, 等. 最小二乘法运动学拟合程序设计[J]. Chin Phys C, 2003(9): 27.

## Monte Carlo study of measurement of $\Xi(1530)^- \rightarrow \gamma \Xi^-$ at BESIII

Ji Qingping, Zhou Yizhuo

(College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxing 453007, China)

**Abstract:** Based on BOSS framework of BESIII Collaboration, by using the 1 225 M inclusive  $J/\Psi$  events produced by BESIII data production group, the possibility for measuring the branching fraction of  $\Xi(1530)^- \rightarrow \gamma \Xi^-$  at BESIII was studied. Taking this 1 225 M inclusive  $J/\Psi$  events as background sample and exclusive Monte Carlo sample as signal sample, assuming the signal significant to be  $3\sigma$  and  $5\sigma$  by controlling the signal event, the corresponding branching fractions were obtained.

**Keywords:** hyperon rare radiative decay; BESIII detector; Monte Carlo study; branching fraction

[责任编辑 杨浦]

(上接第 16 页)

## Study of the correlations between SEP peak intensity with CME speed and source location by the simulation of statistical observation and their comparison method

Qi Shiyang<sup>1,2</sup>, Qin Gang<sup>1,2</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the multiple SEP events with common characteristics, we summarize a statistical simulation method proposed in the previous work. The observation events are classified and sorted according to several indicators, and with the method of picking out the median value of each group as the typical value, hundreds of events are refined into several characteristic events to simulation. Thus, the numerical simulation time is simplified, and single variable can be controlled and its influence on the researched quantity can be investigated. We used this method to study the correlation between SEP peak intensity with the CME speed and the longitude position, and the corresponding conclusions were obtained by comparing observational data analysis. This method makes up for the defects that the effect of a single factor on the event is always incapable by the observation analysis. It also simplifies the numerical simulations number of the multiple individual events. The method is a good combination of numerical simulation and observation analysis.

**Keywords:** Solar energetic particle; coronal mass ejections; numerical simulation; multi-spacecraft observations

[责任编辑 陈留院]