

王娅冰^{1,2} 金远伟³ 顾斌^{1,2} 张雅男^{1,2}

富³He SEP 事件中电子经向分布及其日面传播研究

摘要

根据 ACE/ULEIS 卫星数据,确定了 2007-05—2010-01 太阳活动极小期内的 3 个独立富³He 太阳高能粒子(SEP)事件,并结合 STEREO 双星对相同事件的观测数据,研究了事件中电子的经向分布特征.结果表明:由耀斑引起的 3 个独立 SEP 事件,电子的经向分布宽度可达到 130°.计算表明,携带电子传播的日面波传播速度差异显著,电子的此类经向分布很可能是由于其在日面横向扩散所致.当观测点磁力线足点位于耀斑源区东侧时,电子的日面扩散速度更快.

关键词

太阳高能粒子;富³He SEP 事件;电子经向分布;电子日面传播;多卫星观测

中图分类号 P182

文献标志码 A

收稿日期 2014-11-14

资助项目 国家自然科学基金(11105075);江苏省高校“青蓝工程”(2012)项目;江苏省公派留学基金(JS2012-105)

作者简介

王娅冰,女,博士生,主要从事 SEP 事件的观测与理论研究. wyb0326@126.com

顾斌(通信作者),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事空间辐射及其效应研究. gubin@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 物理与光电工程学院,南京 210044

2 南京信息工程大学 空间天气研究所,南京,210044

3 南京工程学院 数理部,南京,211167

0 引言

太阳高能粒子(SEP, Solar Energetic Particle)事件是空间天气学的重要研究对象.根据不同的加速机制,SEP 事件一般分为“脉冲型”和“缓变型”两类.在脉冲型事件中,粒子主要通过太阳耀斑区磁力线的重联获得能量并被加速,而在缓变型事件中,粒子加速主要由日冕物质抛射(CME, Coronal Mass Ejection)驱动的激波引起^[1-2].研究表明,对于能量高于 100 MeV 的 SEP,其组成和日冕非常接近^[3].但是当能量低于 20 MeV 时,SEP 元素组成就出现了很大的变化^[3],这种现象在³He 同位素比例显著增强的富³He SEP 事件中尤为突出.其主要特征表现为³He/⁴He 比值较典型的日冕值 10⁻⁴至少高出 2 个数量级,同时伴有 Fe/O 比值及一些重离子丰度的增强^[4-6].近 40 年来,这些特征背后的非典型 SEP 加速及传输机制一直备受关注^[7].

对于³He 比例及重离子丰度增强的现象,可以用等离子体共振导致特定荷质比粒子的选择加速给出较为合理的解释^[8-12].另一方面,对不同粒子日面横向分布及其横向加速机制的理解是全面认识 SEP 性质与传播规律的重要方面.在 STEREO 双星发射之前,由于观测手段的限制,太阳活动的三维图像难以建立,相关粒子的横向分布与加速机制的争议也难以解决.

2006 年 10 月 25 日入轨的 STEREO 双星,沿着围绕太阳的轨道相对于地球相背而行,这使人们可以从不同角度对太阳活动进行多点观测.对单个 SEP 事件进行多点同时测量,有助于人们更好地研究 SEP 事件伴随的电子和离子的横向传播机制.2007 年 5 月到 2010 年 1 月属于太阳活动极小年,在此期间,太阳活动相对平静,人们可以观测相对独立的太阳活动,并观测单个源区导致的粒子分布特征.这有利于排除多源区的干扰,建立比较清晰的粒子传播和分布图像^[13].

本文根据 ACE 卫星的观测数据,选取了 2007 年 5 月到 2010 年 1 月间的 3 个独立富³He SEP 事件,进一步联合 SEEREO 双星的观测,发现这 3 个事件中,电子的经面分布比较宽阔,并通过日面传播模型,对电子经向分布进行了初步分析.

1 独立富³He SEP 事件的判定

对独立富³He SEP 事件的识别是本文研究的基础.本文选择了相对地球而言,位于太阳西半球的部分活动区,并以 ACE 卫星记录的能

量为 $0.32\sim 0.64\text{ MeV/nuc}$ 的 ^3He 粒子通量显著增加为依据,确定富 ^3He 事件的起点.事件的独立性条件为:每个事件发生前后半天内无其他太阳活动出现.

根据上述标准,在 2007 年 5 月到 2010 年 1 月期间,本文挑选到 3 个符合条件的 SEP 事件.时间分别为:2007-05-23、2008-11-04 和 2010-01-16.图 1 是 ACE 卫星的 ULEIS (Ultra-Low-Energy Isotope Spectrometer)^[14] 装置观测到的这几个事件发生过程中, ^3He 通量的小时均值随时间的变化.其中,富 ^3He 事件的发生阶段如阴影部分所示.表 1 给出了富 ^3He 事件的发生时区,太阳活动的相关参数.图 2 给出了事件发生时,太阳、地球、ACE 和 STEREO 双星的相对位置.

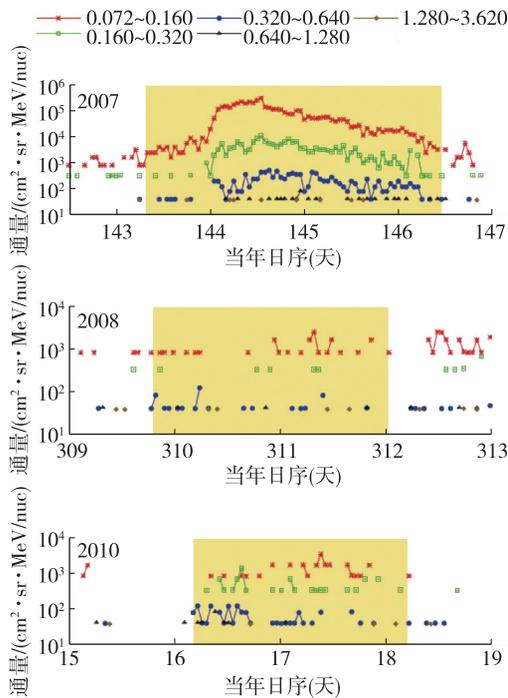


图 1 ACE/ULEIS 观测到的 ^3He 粒子积分通量变化 (3 个富 ^3He 事件的时间段如阴影部分所示)

Fig. 1 Time profile of the ^3He flux (ACE/ULEIS) of the selected SEP events (The durations of the ^3He -rich enhancement are highlighted)

表 1 富 ^3He SEP 事件的时间及相关太阳活动参数
Table 1 Period of the selected ^3He -rich SEP events, and the solar properties during the events

事件	2007-05-23	2008-11-04	2010-01-16
始末时刻	143.25—146.46	309.75—312.00	16.17—18.21
活动区编号 ^a	10956 β	11007 β	11040 β
活动区位置 ^a	N03W60	N35W47	N29W70
耀斑等级 ^b	C2	C2	very poor

注: a 参见 <http://solarmonitor.org>; b 以 GOES 卫星的 X 射线为依据.

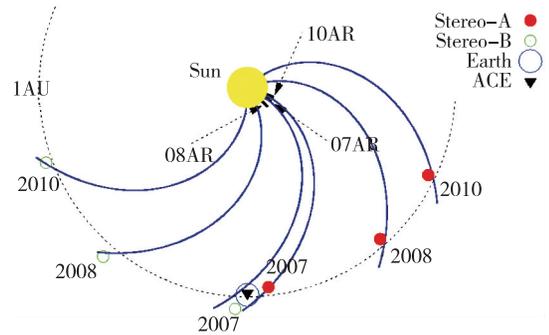


图 2 3 个 SEP 事件发生时, STEREO-A (红点), STEREO-B (绿圈), ACE (三角) 及太阳 (黄色) 活动区的位置分布 (事件源区位置用 07AR, 08AR, 10AR 标示)

Fig. 2 Arrangements of the STEREO-A (red point), STEREO-B (green circle), ACE (triangle) and the solar active region for the selected SEP events.

The sun is at the center and the active regions are indicated with 07AR, 08AR, and 10AR, respectively

为确证上述 SEP 事件的富 ^3He 事件属性, 本文绘制了各事件中 ^4He , ^3He , Fe 和 O 能谱, 如图 3 所示. 在 $0.04\sim 0.64\text{ MeV/nuc}$ 能量范围内, 事件 2007-05-23 和 2008-11-04 对应的 Fe/O 比分别为 0.2021 和 1.239 2. 在 $0.04\sim 0.32\text{ MeV/nuc}$ 的能量范围内, 事件 2010-01-16 的 Fe/O 比值为 0.1812. 这些比值都高于文献 [1, 15] 提出的日冕平均值 0.134^[1, 15]. 就 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比而言, 在 $0.072\sim 1.28\text{ MeV/nuc}$ 能量范围内, 各事件的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比依次分别为 0.008 4, 0.026 8 和 0.578 9, 比典型的日冕值 10^{-4} 高出接近或超过 2 个量级. 因此, 这 3 个 SEP 事件都是耀斑加速的脉冲型太阳高能粒子事件^[1, 9, 15-18]. 值得注意的是, 当能量低于 1 MeV/nuc 时, 各事件的 ^4He , ^3He , Fe 和 O 的积分通量谱具有很好的相似性, 说明 4 种粒子可能被同一机制所加速^[11, 19].

2 电子的经向分布及其日面传播分析

如图 2 所示, 在上述独立 SEP 事件发生时, STEREO-A 和 STEREO-B 间的夹角不断增加. 下面通过 STEREO 与 ACE 的联合观测, 研究 SEP 事件中电子的日面经向分布.

图 4 给出了各事件期间, STEREO/SEPT (Solar Electron and Proton Telescope)^[20] 的 ($65\sim 105\text{ keV}$) 能段和 ACE/EPAM (Electron, Proton, and Alpha Monitor)^[21] 的 ($62\sim 103\text{ keV}$) 能段记录电子通量随时间的变化. 对比发现, 在 2007-05-23 和 2008-11-04 事件中, 3 颗卫星均观测到非常清晰的电子通量增强

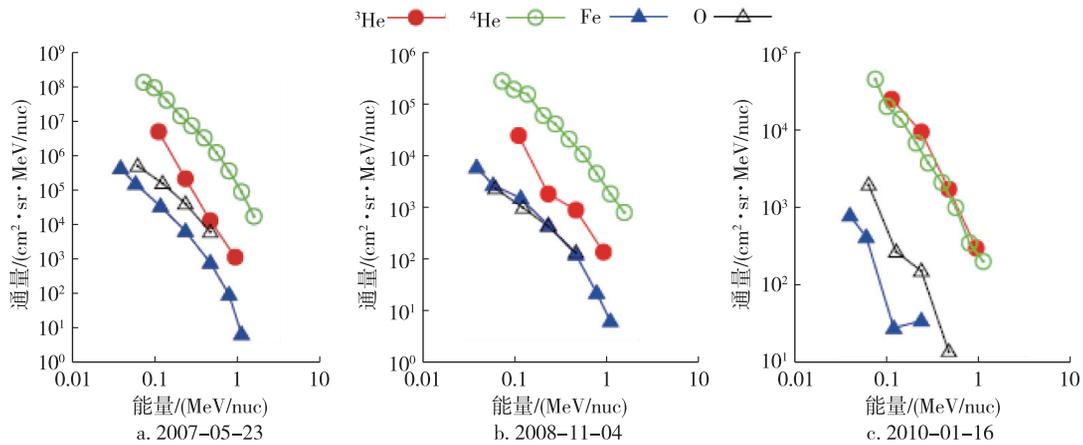


图3 ACE/ULEIS记录的3个SEP事件中⁴He,³He,Fe和O的积分通量能谱

Fig. 3 Energy spectrum of ⁴He, ³He, O, and Fe observed by ACE/ULEIS for the selected SEP events

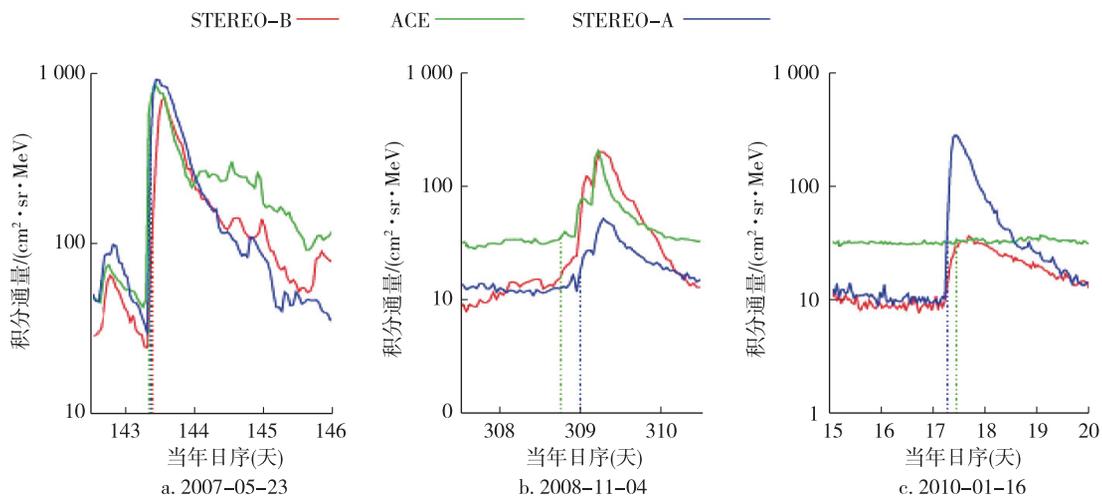


图4 SEEREO-A,ACE和SEREO-B观测到的SEP事件期间,电子积分通量-时间关系曲线

(STEREO/SEPT的能段为65~105 keV,ACE/EPAM的能段为62~103 keV)

Fig. 4 Time profile of the electron fluxes during the selected SEP events.

The energy band of the STEREO/SEPT and ACE/EPAM are 65-105 keV and 62-103 keV, respectively

现象,这说明电子的分布角度不小于观测时3颗卫星间的最大角距离.对于2010-01-16事件,ACE观测到的电子通量变化较小.计算表明,在SEP事件开始前,ACE观测的电子通量的平均值 $\mu=31.2312$,标准差 $\sigma=0.4599$.在活动期间其电子通量最大值达到37.2820,超过 $\mu+\sigma$ 的值31.6911.虽然ACE观测的电子通量的增长不明显,但由于其处于STEREO-A和STEREO-B之间,且事件发生前后并无其他活动区爆发,因此这里ACE仅观测到微弱的电子强度变化,可能与活动区磁场的形态有关.该SEP事件中电子实际跨度应该不小于STEREO-A,STEREO-B的夹角,即 133° .

本文对³He离子的角度分布做了同样的分析,发现3个事件中,离子并未被STEREO-A,STEREO-B同时观测到.可以推断,在这些较小的独立SEP事件中,实际的电子经向分布远大于离子经向分布,最大角度可能达到 130° .这和Wiedenbeck等^[13]对2008-11-04事件分析后得到的结论类似.

已有的研究表明:粒子垂直于磁场的行星际扩散、光球足点及活动区表面磁力线的横向扩展、SEP事件起始阶段日冕物质抛射引起的行星际磁场的扭曲、粒子源区加速条件的差异等多种因素都可能影响SEP中离子和电子的横向运动^[2,13].近几年,人们

对太阳活动区附近的小冕洞的研究表明,其可能会对富 ^3He SEP 事件中粒子的加速和传输存在影响^[22-25].在本文选取的 3 个较弱的独立 SEP 事件发生期间,日地空间的大规模扰动和行星际激波等电子加速可能性相对较少.可以假设电子在日地空间沿着磁力线传播,粒子的横向扩散主要发生在日面,因此,电子日面传播速度与电子扩散行为关系密切.

电子在日面传播的经度范围 θ 是过卫星的磁力线在太阳表面的足点(下文称 F 点)与太阳活动源点(下文称 S 点)之间的经向夹角.设 Δ_0 为源区 S 点相对于卫星的经度, Δ_1 为与卫星连接的行星际磁力线的日面足点 F 相对于卫星的经度, $\Delta_1 = \omega_{\text{sun}} l / V_{\text{sw}}$, 其中 ω_{sun} , l 和 V_{sw} 分别为太阳自转角速度、日地平均距离及平均太阳风速度.于是 $\theta = \Delta_0 - \Delta_1$. 当 $\theta > 0$ 时, F 点位于源区的东侧,反之, F 点位于源区的西侧.另一方面,电子在日面传播的时间 $t = t_F - t_S$, 是源区爆发时刻 t_S 与电子离开日面时刻 t_F 之差. t_S 由 GOES 卫星观测的 X 射线峰值时刻决定, t_F 由卫星观测到电子的起始时刻 t_{ob} 减去电子沿着磁力线传播时间 $t_{\text{space}} = l_p / v_e$ 得到.其中 l_p 为电子走过的磁力线长度, v_e 是电子的相对论速度.在以卫星位置与日心连线为轴的极坐标中, (r_i, ϕ_i) 表示磁力线上某点的极坐标,则

$$l_p = \int dl = \sum (r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos(\phi_{i+1} - \phi_i)).$$

其中, r_i 和 ϕ_i 的关系为:

$$r_i = r_{\text{sun}} - (V_{\text{sw}} / \omega) \times \phi_i.$$

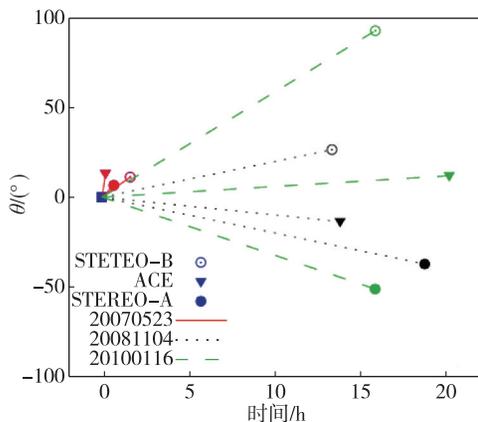


图 5 电子日面传播的角度-时间分布
(负值角代表足点位于源区的西侧)

Fig. 5 Map of the spread angle and transport time of electrons along heliographic surface (The negative angle means that the foot point locates at the west of the source region)

王娅冰,等.富 ^3He SEP 事件中电子经向分布及其日面传播研究.

图 5 给出了本文研究的 3 个 SEP 事件中,电子从耀斑爆发时刻($t=0, \theta=0$)起,在日面传播的时间 t 和离源区角度 θ 的关系.从各线的斜率大小可以看出,对于不同事件,在不同角度的观测位置,电子在日面传播的经向速度差异显著.2007-05-23 事件对应的电子日面传播速度最大,其 ACE 观测对应电子日面传播速度达到 275.2 km/s, STEREO-A 和 STEREO-B 卫星观测的电子的日面速度分别为 33.506 5 和 22.7 km/s.结合图 1 中 ^3He 数据发现,该事件中 ^3He 通量值明显高于其他事件.因此该事件中,当卫星之间经向分布较小时,电子和离子的加速效率较高,但具体机制仍有待进一步研究.

对于 2008-11-04 事件,位于源区东侧的 STEREO-B 对应的电子平均速度最大,为 6.4 km/s, STEREO-A 次之,为 6.3 km/s, ACE 对应的电子平均速度最小,为 3.2 km/s.2010-01-16 事件中,位于源区东侧的 STEREO-B 对应的电子平均速度为 18.9 km/s,西侧的 STEREO-A 对应速度为 10.4 km/s, ACE 对应速度最小,为 1.9 km/s.电子的传播速度是日面等离子体波动的速度^[26].对 2008-11-04 和 2010-01-16 事件而言,ACE 卫星的磁力线足点比较靠近源区,其对应的日面波传播速度较小.这一现象可能的原因是耀斑爆发初期,日面波动主要以垂直于日面的径向传播为主,沿日面的经向扩散加速并不显著.比较 STEREO-A 和 STEREO-B 观测到的电子日面波动角速度,可知当足点位于源区东侧时,波动速度相对较大,更利于电子的传播.这与太阳自转引起的磁力线偏转有关.

另外,与电子的大角度横向扩散行为不同的是, ^3He 离子的经面分布规律并不很宽,说明电子和离子的加速机制存在明显的区别.相对于离子而言,电子质量较小,更易及时响应日面波动状态,可以作为研究日面波动的有效探针.日面波动速度的大小与事件爆发的强度(即能量输出)、波的运动方向、日冕磁场等均有关系.要理解这些现象,需要运用源区磁图(MDI, Michelson Doppler Imager)和不同波段极紫外成像(EUV)及 EIT 波相结合的手段进行综合分析.这是我们下一步研究的方向.

3 结论

本文根据 STEREO-A, STEREO-B 和 ACE 的 3 颗卫星观测数据,以太阳活动极小年中较小的独立典型的富 ^3He SEP 事件为样本,研究了 SEP 事件伴

随的高能电子的角度分布及其日面传播速度.在3个事件中 STEREO 双星均测到了电子通量的明显提高.尤其是在 2010-01-16 事件中,电子的经面分布不小于 133° ,远大于离子的分布角度.设电子沿 parker 螺旋线传播,对电子日面横向传播速度研究表明,日面波动的传播速度差异极大.在 2008-11-04 和 2010-01-16 事件爆发初期,ACE 观测到的电子日面角速度较低,可能是由于耀斑爆发时电子主要沿垂直日面的磁力线运动有关.由于日球自转效应,波动向 SEP 源点东侧运动时速度可能较快.

为进一步深入理解 SEP 事件中电子的运动状态,需要对更多的独立和非独立的富 ^3He 事件进行综合性统计分析.将源区磁图(MDI)和不同波段极紫外成像(EUV)及 EIT 波相结合是必要的途径.在未来的工作中,将在本文工作的基础上,进一步提高事件筛选算法,结合 MDI 分析和 EIT 波模拟等手段,并考虑电子投掷角散射对电子分布各向异性的影响,全面分析 SEP 事件中电子的传播图像,以期对相关空间天气现象的理解和预报提供依据.

致谢:感谢美国阿拉巴马大学(亨茨维尔分校)李刚教授的指导和帮助.

参考文献

References

- [1] Reames D V. Coronal abundances determined from energetic particles [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15 (7): 41-51
- [2] Wiedenbeck M E, Mason G M, Cohen C M S, et al. Observations of solar energetic particles from ^3He -rich events over a wide range of heliographic longitude [J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 762 (1): 54-62
- [3] Oda M, Nishimura J, Sakurai J. *Cosmic ray astrophysics* [M]. Tokyo: Asakura Publishing Company, Ltd, 1983
- [4] Desai M I, Mason G M, Dwyer J R, et al. Acceleration of ^3He nuclei at interplanetary shocks [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2001, 553 (1): L89-L92
- [5] Torsti J, Kocharov L, Laivola J, et al. High-energy ^3He -rich solar particle events [J]. *Solar Physics*, 2003, 214 (1): 177-193
- [6] Wang D Y. Ions preheated in ^3He -rich solar particles events [J]. *Chinese Physical Letters*, 2003, 20 (10): 1891-1894
- [7] Kocharov L G, Dvoryanchikov Ya V, Slivka M. On possibilities of explaining the dependence of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio on energy [C]. // 18th International Cosmic Ray Conference, 1983, 4: 59
- [8] Fisk L A. ^3He -rich flares: A possible explanation [J]. *Astrophysical Journal*, 1978, 224: 1048-1055
- [9] Varvoglis H, Papadopoulos K. Selective nonresonant acceleration of $^3\text{He}^{2+}$ and heavy ions by H^+ cyclotron waves [J]. *Astrophysical Journal*, 1983, 270 (2): L95-L98
- [10] Temerin M, Roth I. The production of ^3He and heavy ion enrichment in ^3He -rich flares by electromagnetic hydrogen cyclotron waves [J]. *Astrophysical Journal*, 1992, 391 (2): L105-L108
- [11] Mason G M, Mazur J E, Halmilton D C. Heavy-ion isotopic anomalies in ^3He -rich solar particle events [J]. *Astrophysical Journal*, 1994, 425 (2): 843-848
- [12] Hovestadt D, Klecker B, Scholer M, et al. Ionic charge state measurements during He^+ -rich solar particle events [J]. *Astrophysical Journal*, 1984, 281: 463-467
- [13] Wiedenbeck M E, Mason G M, Gomez-Herrero R, et al. Observations of a ^3He -rich SEP event over a broad range of heliographic longitudes: Results from STEREO and ACE [C]. // 20th International Solar Wind Conference, AIP Conference Proceedings, 2010, 1216: 621-624
- [14] Mason G M, Gold R E, Krimigis S M, et al. The Ultra-Low-Energy Isotope Spectrometer (ULEIS) for the ACE spacecraft [J]. *Space Science Reviews*, 1998, 86 (1/2/3/4): 409-448
- [15] Mewaldt R A, Looper M D, Cohen C M S, et al. Energy spectra, composition, and other properties of ground-level events during solar cycle 23 [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 171 (1/2/3/4): 97-120
- [16] Mazur J E, Mason G M, von Rosenvinge T T. Fe-rich solar energetic particle events during solar minimum [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23 (10): 1219-1222
- [17] Wibberenz G, Cane H V. Multi-spacecraft observations of solar flare particles in the inner heliosphere [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 650 (2): 1199-1207
- [18] Cohen C M S, Mewaldt R A, Leske R A, et al. Solar elemental composition based on studies of solar energetic particles [J]. *Space Science Reviews*, 2007, 130 (1/2/3/4): 183-194
- [19] Mason G M, Dwyer J R, Mazur J E. New properties of ^3He -rich solar flares deduced from low-energy particle spectra [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2000, 545 (2): L157-L160
- [20] Müller-Böttcher S, Falenski J, et al. The solar electron and proton telescope for the STEREO mission [J]. *Space Science Reviews*, 2008, 136 (1/2/3/4): 363-389
- [21] Gold R E, Krimigis S M, Hawkins III S E, et al. Electron, Proton, and Alpha monitor on the advanced composition explorer spacecraft [J]. *Space Science Reviews*, 1998, 86 (1/2/3/4): 541-562
- [22] Nitta N V, Mason G M, Wiedenbeck M E, et al. Coronal jet observed by Hinode as the source of a ^3He -rich solar energetic particle event [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2008, 675 (2): L125-L128
- [23] Mason G M, Nitta N V, Cohen C M S, et al. Solar energetic particle ^3He -rich events from the nearly quiet sun in 2007-2008 [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, 700 (1): L56-L59
- [24] Bučik R, Mall U, Korth A, et al. ^3He -rich SEP events observed by STEREO-A [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1539 (1): 139-142

- [25] Bučík R, Innes D E, Mall U, et al. Multi-spacecraft observations of recurrent ³He-rich solar energetic particles [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 797(1): 71-82
- [26] 方成, 丁明德, 陈鹏飞. 太阳活动区物理 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2008
- FANG Cheng, DING Mingde, CHEN Pengfei. Physics of solar active regions [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2008

Characteristics of longitudinal distribution and heliographic transport of electrons in the ³He rich SEP events

WANG Yabing^{1,2} JIN Yuanwei³ GU Bin^{1,2} ZHANG Ya'nan^{1,2}

- 1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210044
 2 Institute of Space Weather, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210044
 3 Department of Mathematics and Physics, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167

Abstract In this paper, three independent ³He-rich solar energetic particle (SEP) events during the solar minimum from May 2007 to January 2010 were identified using ACE/ULEIS data. The observations of the twin satellites, STEREO-A and B, indicate that the longitudinal distribution of these energetic electrons originated from the minor flare induced SEP events might be extended to about 130 degree. On the assumption that the heliographic transportation accounts for the longitudinal distribution, calculations show that, here exists a magnificent difference in the longitude transport speed of the electron carrying waves, and these electrons moves faster to east than to west from the active particle source.

Key words solar energetic particles (SEP); ³He-rich SEP events; the longitudinal distribution of electrons; the heliographic transmission of electrons; observation of multi-satellite