

CME 影响下 L1 点附近等离子体及共生微波 爆发的射电辐射机制研究^{*}

孙伟英^{1,2} 吴 季¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国科学院研究生院)

摘 要 CME 在产生和发展过程中与日冕和行星际介质相互作用并发出不同波长的射电辐射. 在研究了无 CME 时空间等离子体的各种辐射机制基础上, 统计分析了 1999 年 2 月至 1999 年 8 月期间有较大的 CME 发生情况下, 在 CME 影响下 L1 拉格朗日点附近等离子体参数发生变化后的射电辐射机制. 分析结果表明, 其射电辐射机制主要是轫致辐射、微量的回旋辐射和更加微弱的复合辐射. 此外, 分析讨论了 1999 年 2 月至 1999 年 8 月期间与 CME 共生的太阳微波爆发. 分析结果表明, 与 CME 共生的是微波逐渐型爆发、尖峰爆发, 其辐射机制主要是轫致辐射、回旋共振辐射、等离子体辐射及电子回旋脉泽辐射.

关键词 CME; 空间等离子体; 微波爆发; 辐射机制

中图法分类号 P 353

Study on the Radiation Mechanism of Plasmas Near L1 Point Affected by CMEs and the Associated Microwave Bursts

SUN Weiyang^{1,2} WU Ji¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract Coronal mass ejections are large-scale magnetic structures expelled from the sun due to MHD processes involving interaction between plasmas and magnetic field in closed field regions. Radiation with different wavelength is emitted because of reciprocity of coronal mass ejections with corona and interplanetary medium. A comprehensive survey is made on coronal mass ejections occurred from February 1999 to August 1999 which were observed by LASCO and the ground radio spectrometer in Purple Mountain Observatory and Yunnan Observatory. Special attentions are focused on the emission mechanisms of space plasmas near L1 (the first Lagrange point of solar-earth system) which are affected by very large coronal mass ejections. Statistical analysis is also made based on the study of the radiation mechanisms of space plasmas during quiet sun period. The results show that the dominating radiation mechanisms are bremsstrahlung, a small quantity of

^{*} 国家 863 项目 13 主题资助课题 (2001AA132030)

2004-06-15 收到原稿, 2005-03-03 收到修定稿

cyclotron radiation and a less quantity of recombination radiation. Moreover, solar radio microwave bursts which accompany with coronal mass ejections during February 1999 to August 1999 are analyzed. The findings indicate that they are gradual bursts and spike bursts. The dominating radiation mechanisms of the solar radio microwave bursts are bremsstrahlung, cyclotron resonant radiation, plasmas radiation and electronic cyclotron maser radiation.

Key words Coronal mass ejection, Space plasma, Microwave burst, Emission mechanism

1 引言

日冕是太阳大气的最外层, 广义的日冕包括几个太阳半径以外的太阳风区, 延伸到包括地球在内的太阳系空间. 日冕物质为高导电等离子体, 磁场与物质冻结在一起. 日冕的性质决定了行星际空间的性质^[1]. 日冕中存在的频繁瞬变现象主要是 CME. CME 是太阳日冕层中规模比太阳耀斑大许多倍的活动现象, 是空间天气灾害的最主要、最直接的驱动源. 在太阳活动最大年, 太阳每天产生大约 3 次 CME, 而在活动最小年, 大约每 5 天产生一次 CME. 对整个太阳活动周平均, 估计 CME 占 1 AU 附近黄道面内太阳风流的 7%^{[1],[2]}. 由于 CME 巨大的质量、高速度和能量, 在它们被从日冕抛射入行星际空间后, 必然会引起行星际空间太阳风等离子体参数发生改变, 高的磁场强度和等离子体密度是 CME 驱动的行星际扰动的常见特征^[3].

本文分析了空间等离子体的各种辐射机制; 统计了 1999 年 2 月至 1999 年 8 月期间, 在伴随有太阳射电爆发的较大 CME 影响下, 位于太阳和地球之间, 离地球 1.5×10^6 km 处的 L1 拉格朗日平动点附近等离子体参数的数据; 根据 CME 影响下 L1 点附近行星际空间等离子体的具体参数, 深入分析、研究了在 CME 影响下, L1 点附近的等离子体射电辐射机制. 此外, 根据中国科学院云南天文台及紫金山天文台射电频谱仪记录的太阳爆发事件的爆发时间、爆发频率范围等具体参数*, 分析讨论了伴随 CME 产生的太阳射电微波爆发的辐射机制及其与 CME 的关系.

2 空间等离子体及太阳微波爆发的辐射机制

2.1 空间等离子体辐射机制

空间等离子体辐射过程与其内部状态有密切关

系. 由于太阳风等离子体中存在大量的以各种形式运动着的带电粒子, 由此引起的辐射过程也是多种多样的. 根据辐射过程的微观特性, 空间等离子体电磁辐射主要可以分为磁回旋辐射 (包括回旋辐射、回旋同步辐射、同步辐射)、韧致辐射、复合辐射、康普顿辐射及契伦柯夫辐射^{[4]-[6]}.

(1) 磁回旋辐射

处于磁场中的带电粒子受 Lorentz 力沿圆形轨道作回旋运动时, 将产生磁回旋辐射. 根据带电粒子速度范围可以将其分为 3 类: 当电子速度为非相对论性时, 称为回旋辐射; 当电子速度为弱相对论性时, 称为回旋同步辐射; 而当电子速度为相对论性时, 称为同步辐射. Lorentz 因子 $\gamma = \sqrt{(1 - (v/c)^2)^{-1}}$. 电子热运动速度 $v = \sqrt{8\kappa T_e / \pi m_e} \approx 6.2 \times 10^5 \sqrt{T_e}$ ^[11], 其中, 玻尔兹曼常数 $\kappa = 1.38 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹, 电子静质量 $m_e = 9.1095 \times 10^{-28}$ g. $\gamma = 1$ 的电子为非相对论性电子, $\gamma \leq 2$ 或 3 的电子为弱相对论性电子, $\gamma \gg 1$ 的电子为相对论性电子. 电子在磁场中作圆周运动的角频率称为回旋频率, $\omega_L = 10^4 \times eB/mc$, 其中, $m = m_e \times \gamma$, e 为基本电荷, c 为光速, B 为场强, 单位为 T.

当电子速度很低, 满足 $v \ll c$ 时, $\gamma = 1$. 电子回旋辐射是单色的, 其辐射频率就是拉摩频率, $10^4 \times eB/m_0c$. 在温度 T 约为 $5 \times 10^7 - 10^9$ K 的温度区域中, 电子速度 $v = 4.384 \times 10^9 - 1.96 \times 10^{10}$ cm·s⁻¹, 处于磁场中的电子产生回旋同步辐射, 辐射谱连续. 相对论电子在磁场中产生的同步辐射具有稳定的强辐射功率及覆盖范围很宽的连续辐射谱. 其大部分辐射集中在峰频 f_m 附近, 对于一个电子速度与磁场的夹角为 α 的电子, 峰频是 $f_m \approx 1 \times 10^{11} B E_{\text{MeV}}^2 \sin \alpha$ (Hz). 其中 E_{MeV} 是以 MeV 为单位的电子能量. 当辐射频率显著超过最高能量电子的峰频时, 同步辐射谱以指数形式随频率

* <http://srg.bao.ac.cn>

迅速下降. 辐射的临界频率 $f_c = 1.5\gamma^2 f_L$, f_m 约为 $0.3f_c$.

(2) 韧致辐射

在宇宙条件下, 重离子的加速和减速不大有效, 等离子体中的自由电子速度远远大于离子速度, 韧致辐射主要是由电子产生的^[12].

等离子体韧致辐射产生的射电波主要频率为 $f \approx v \times (2\pi b_0 \sqrt{\varepsilon^2 - 1})^{-1}$, 电子瞄准距离最小值 $b_0 = Ze^2(4\pi\varepsilon_0 m_0 v^2)^{-1}$, 其中, ε_0 为真空介电常数, Z 为核的原子序数. 双曲线轨道偏心率 $\varepsilon = [1 + (b/b_0)^2]^{1/2}$. 不同的瞄准距离对应着不同的辐射频率. 实际上, 电子热运动速度 v 及瞄准距离尽管已确定, 但其辐射也不是单色的, 而是在 $f_{pe}-f$ 范围内都有辐射, 电子等离子体频率 $f_{pe} \approx 10^4 \sqrt{N_e} \text{Hz}$.

(3) 复合辐射

当自由电子飞过带电 $+Ze$ 的离子近旁时, 可能被离子俘获, 复合成静电荷是 $+(Z-1)e$ 的离子, 同时产生复合辐射. 复合辐射谱除产生连续谱外, 又可在复合到高激发态后通过向低能级的跃迁方式辐射线光谱. 复合辐射产生可见光和紫外辐射.

(4) 康普顿辐射

相对论电子和辐射场中的光子碰撞时引起康普顿辐射. 它是 X 射线和 γ 射线天文学中的基本过程.

(5) 契伦柯夫辐射

真空中作等速运动的带电粒子不会产生辐射. 但是有介质存在时, 即使带电粒子作等速运动, 只要其速度大于该介质中光的相速度, 就会产生契伦柯夫辐射. 其实质是介质中大量粒子的集体效应. 运动粒子的作用只是提供一个使介质粒子加速的电场. 运动粒子本身的质量对辐射没有影响. 对给定热运动速度 v 的粒子, 产生契伦柯夫辐射的条件是折射率 $n^2(f) > (c/v)^2$.

2.2 太阳射电微波爆发

太阳射电爆发是叠加在太阳缓变射电上的一种强度急剧增加的射电辐射. 太阳射电爆发的起因有耀斑、CME、耀斑和 CME 的不同组合^[7]. CME 在产生和发展过程中与日冕和行星际介质相互作用并发出不同波长的射电爆发辐射, 主要包括米波爆发、分米波爆发、微波爆发^{[8],[9]}. 米波 (包括更长波) 爆发是一种在频率范围 $f \leq 300 \text{MHz}$ 中所观测

到的强度最大的射电爆发. 分米波爆发是频率范围在 $200 \text{MHz} \leq f \leq 1 \text{GHz}$ 所观测到的射电爆发. 微波爆发是在频率范围 $f > 1 \text{GHz}$ 中所观测到的射电爆发. 在微波区域, 对射电爆发强度和偏振的测量, 获得关于耀斑前活动区磁场的信息, 对了解耀斑的建立过程具有很重要的意义. 此外, 微波爆发的形态和时间结构能揭示出能量释放过程及包含高能电子在内的磁场在时间上的变化. 根据爆发的形态特性和频谱特性, 可以为有效地进行太阳活动预报, 获得太阳质子事件的警报方案提供理论基础. 本文着重考察伴随 CME 产生的太阳射电微波爆发事件. 微波爆发主要有脉冲爆发、逐渐型爆发、IV μ 型爆发、尖峰爆发 4 类^[5].

脉冲爆发是能量约为 $0.1-1 \text{MeV}$ 的电子在强度约为 $0.01-0.05 \text{T}$ 的磁场中作螺旋运动时, 在回旋频率的 $10-50$ 次谐波上发射的回旋同步加速辐射. 辐射的频率范围是 $3-30 \text{GHz}$. 持续时间大于 1min .

逐渐型爆发产生于热韧致辐射或热韧致辐射和回旋共振辐射的联合辐射. 辐射的频率范围是 $1-10 \text{GHz}$, 持续时间几分钟到几小时.

IV μ 型爆发是由于被激波所加速的高能电子在日冕磁环中产生的回旋同步加速辐射. IV μ 型爆发仅当出现大耀斑和激波时才会发生. 辐射的频率范围是 $1-30 \text{GHz}$. 持续时间约为 10 分钟.

尖峰爆发^[10]持续时间为几毫秒. 若是群, 爆发持续时间在 10 分钟左右. 辐射的频率范围在 $0.5-5 \text{GHz}$ 之间. 尖峰辐射的亮温可高达 10^{15}K . 尖峰辐射有两个最可能的辐射机制是等离子体辐射和电子回旋脉泽辐射. 其中, 电子回旋脉泽辐射是磁场相对强或者等离子体密度相对低时, 在电子回旋频率附近或者在其低次谐波附近的频率上的辐射.

3 数据分析

根据 LASCO 记录 * 的关于 CME 的数据以及中国科学院云南天文台以及紫金山天文台射电频谱仪的太阳爆发事件图表, 统计出的 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日发生的 CME 以及在 CME 影响下 L1 点附近行星际空间等离子体参数值如表 1 所示. 在 CME 影响下 L1 点附近等离子体的参数数据全部取

* www.spaceweather.com

表 1 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日 CMEs 的统计结果及对应的 L1 拉格朗日点附近行星际空间等离子体参数值

Table 1 The CMEs accompany with solar radio burst and parameters of interplanetary space plasma nearby L1 Lagrange point during 1999-02-01 to 08-28

序号	时间	传播速度 / (km·s ⁻¹)	爆发波段 / GHz	持续时间 / min	时间	B/nT	N _e /cm ⁻³	T _e /K
1	02-12	730	1.42,	60	02-15		4.5	234 832
2	02-13	874	1.42, 2.84	3, 5	02-16		2.3	265 616
3	02-14	690	2.84	10	02-17		7.2	215 168
4	02-22	509	1.42, 2.84	3, 4	02-25	7	7.4	53 201
5	03-08	1015	1.42	3, 13	03-11	6.8	25.6	265 766
6	03-15	660	1.42, 2.84	7, 10	03-18	6.4	5.5	71 982
7	03-17	972	2.84	2	03-20	5.5	20.8	1 162 579
8	03-18	1 234	2.84	3	03-21	10	8.2	29 435
9	04-02	1 068	2.84	10	04-05	4.4	4.2	155 916
10	04-04	1 203	1.42, 2.84	10, 21	04-07		4.4	18 248
11	04-05	801	2.84	2	04-08		12.6	47 105
12	04-07	549	1.42	4	04-10		2.5	230 228
13	04-08	455	1.42	3	04-11		2.9	321 644
14	04-10	695	1.42, 2.84	27, 4	04-13	4.8	3.2	193 093
15	04-11	185	2.84	8	04-14	4.3	5.9	99 405
16	04-14	497	1.42	18	04-15	4.6	2.9	99 912
17	04-15	521	1.42	5	04-18	5.1	17.5	35 445
18	05-01	579	1.42, 2.84	7, 4	05-04		4.6	39 008
19	05-02	424	2.84	6	05-05		23.3	53 726
20	05-06	436	2.84	14	05-09	4.2	3.6	105 581
21	05-07	490	2.84	21	05-10		1.3	402 019
22	05-08	772	1.42, 2.84	4, 2	05-11		0.6	97 136
23	05-09	843	2.84	18	05-12	9.4	11.3	35 445
24	05-10	920	1.42	25	05-13	15.2	26.5	39 897
25	05-14	609	1.42, 2.84	5, 5	05-17		10.9	6 201
26	05-17	602	2.84	6	05-20	3.9	3	83 010
27	05-21	938	2.84	5	05-24	7.8	28.3	37 487
28	05-23	496	1.42	10, 5	05-26	4.7	7	52 130
29	05-25	421	1.42	4	05-28		6.2	40 066
30	06-01	1 772	1.42	5	06-04	6.5	4.8	99 405
31	06-04	2 230	1.42, 2.84	10	06-07	3.1	13.7	27 152
32	06-05	300	1.42, 2.84	4, 5	06-08	9.5	33.6	24 969
33	06-15	708	1.42, 2.84	4, 4	06-18	6.9	15.8	171 217
34	06-26	581	2.84	6	06-29	4.5	0.9	61 035
35	06-27	903	2.84	12	06-30		0.3	117 029
36	06-29	634	2.84	6	07-02	7	8.4	181 622
37	06-30	1 049	2.84	20	07-03	5.9	2.7	271 008
38	07-02	711	2.84	3, 4, 6	07-05		2.2	10 961
39	07-04	458	2.84	7	07-07		5.1	59 965
40	07-08	498	2.84	6	07-11	5.1	9.2	6 772
41	07-11	389	2.84	6	07-14	3.9	16.7	71 559
42	07-28	721	2.84	31, 6, 40	07-31		2.1	279 599
43	08-01	1 159	2.84		08-04	13.2	19.4	15 909
44	08-20	812	5.70	2.5	08-23		12.7	143 924
45	08-25	624	5.70	8.5	08-28	5.1	1	100 930

自磁暴基础数据库. 磁暴基础数据库中 * 星际磁场、等离子体密度、温度数据来源于美国 NASA. $B(\text{nT})$ 、 $N_e(\text{cm}^{-3})$ 、 $T_e(\text{K})$ 分别是 L1 点附近磁场总强度平均值, 等离子体电子密度, 等离子体电子温度. 太阳宁静期间一个天文单位附近等离子体参数的典型值^[11]: 电子密度 $N = 7.1 \text{ cm}^{-3}$, 电子温度 $T_e = 1.4 \times 10^5 \text{ K}$, $B = 7 \times 10^{-9} \text{ T}$. 应该指出的是, 表 1 中的 CME 事件不是 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日全部的 CME 事件, 没有太阳射电爆发伴随的 CME 事件未包含在表 1 中.

表 1 中第 2 列的时间指的是观测到太阳表面出现 CME 的时间; 第 6 列的时间指的是 CME 若向地球方向传播, 到达近地空间的大约时间; 传播速度为 CME 的传播速度. 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间, 共有 49 次较大的 CME 产生时有太阳射电爆发伴随. 4 次分别发生于 3 月 11 日, 3 月 14 日, 5 月 3 日, 8 月 2 日的 CME. LASCO 未记录下相应的近地行星际空间等离子体参数的数据. 由表 1 可见, 其余的 45 次伴随有太阳射电爆发的 CME 导致了 L1 点附近行星际空间扰动. L1 点附近行星际空间磁场总强度平均值波动范围 $B = 3.1 - 15.2 \text{ nT}$ (有 18 次 LASCO 未记录下磁场总强度平均值); 等离子体电子密度波动范围 N_e 为 $0.3 - 33.6 \text{ cm}^{-3}$; 等离子体电子温度波动范围 T_e 为 $6201 - 402019 \text{ K}$. 伴随 CME 产生的太阳射电爆发主要为 1.42 GHz , 2.84 GHz , 5.70 GHz , 分别属于 L 波段, S 波段, C 波段.

①由表 1 可知, 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间, L1 点附近行星际空间等离子体电子温度波动范围 T_e 为 $6201 - 402019 \text{ K}$. 而温度小于 $5 \times 10^7 \text{ K}$ 的等离子体为非相对论等离子体, 所以 L1 点附近行星际空间的等离子体在 CME 驱动的行星际扰动的影响下仍属于非相对论等离子体范畴, 其磁致辐射是回旋辐射. 电子热运动速度 $v = \sqrt{8\kappa T_e / \pi m_e} \approx 6.2 \times 10^5 \sqrt{T_e}$, $v_{\max} \approx 6.2 \times 10^5 \sqrt{T_{e,\max}} = 3.931 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 电子回旋辐射频率为 $\omega_L = 1.8 \times 10^7 B \text{ s}^{-1}$; 电子速度 $v \leq c$ 时, 除了以基频 ω_L 为主的辐射外, 还有 $2\omega_L, 3\omega_L, \dots$. 选取 $B_{\max} = 15.2 \times 10^{-9} \text{ T}$, $\omega_L \leq 2.736 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $2\omega_L \leq 5.472 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $3\omega_L \leq 8.208 \times 10^3 \text{ s}^{-1}, \dots$. 由以上辐射频率的计算结果可知, 太阳宁静期间的等离子体回旋辐射频率 $\omega'_L = 1.26 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 小于 CME

驱动的行星际扰动的影响下等离子体的回旋辐射频率. 但是, 只有非常弱的 1000 次以上的谐波成分其频率才达到通常所指的射电频率 ($\geq 10^7 \text{ s}^{-1}$). 所以, 考察 CME 驱动的行星际扰动的影响下 L1 点附近行星际空间等离子体的射电辐射时, 回旋辐射只产生非常微弱的射电波段电磁波.

② 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间, L1 点附近行星际空间等离子体电子密度波动范围 N_e 为 $0.3 - 33.6 \text{ cm}^{-3}$. 等离子体韧致辐射产生的电磁波频率范围为 $f_{pe} - f$. $f_{pe,\max} \approx 10^4 \sqrt{N_{e,\max}} = 5.8 \times 10^4 \text{ Hz}$, 韧致辐射产生的射电波主要频率 $f \approx v \times (2\pi b_0 \sqrt{\varepsilon^2 - 1})^{-1} = v \times 2\pi b$. 因为电子瞄准距离最小值 $b_0 = Ze^2(4\pi\epsilon_0 m_0 v^2)^{-1} = 2.015 \times 10^7 v^{-2}$, $f > f(b_0) = 1.266 \times 10^8 v^{-1} \geq 6.178 \times 10^{15} \text{ Hz}$. 由 f_{pe} 和 f 的具体计算结果可见, 考察在 CME 驱动的行星际扰动的影响下 L1 点附近行星际空间等离子体的射电辐射时, 韧致辐射会发射出较强的射电波段电磁波.

③复合辐射频率主要在可见光和紫外区域, 对射电波段的电磁辐射贡献非常微弱. 此外, 康普顿辐射是相对论电子和辐射场中的光子碰撞时引起的辐射. 由表 1 可知, L1 点附近行星际空间的等离子体在 CME 驱动的行星际扰动的影响下仍属于非相对论等离子体范畴, 所以考察时可以忽略康普顿这种辐射机制.

④ L1 点附近行星际空间的等离子体是完全电离的, 由表 1 可知, 磁场强度很小, 在几个到几十个 nT 的数量级, 在这种情况下, 等离子体介质折射率 $n < 1$, 不会发生契伦科夫电磁辐射过程.

⑤由表 1 可见, 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间, CME 产生时伴随的辐射波段为 1.42 GHz (短分米波段) 太阳射电微波爆发 21 次, 2.84 GHz (长厘米波段) 太阳射电微波爆发 33 次, 辐射频率为 5.70 GHz (长厘米波段) 太阳射电微波爆发 2 次. 爆发持续时间在 14 min 以上的有 10 次, 爆发持续时间在 5 min 以下 (包含 5 min) 的有 28 次, 爆发持续时间在 6—14 min 的有 22 次.

微波脉冲爆发辐射是能量约为 $0.1 - 1 \text{ MeV}$ 的电子在强度约为 $0.01 - 0.05 \text{ T}$ 的磁场中作螺旋运动发射的电磁波, 频率范围大约为 $3 - 30 \text{ GHz}$, 辐射的峰频 $f_m \approx 1 \times 10^{11} B E_{\text{MeV}}^2 \sin \alpha (\text{Hz})$. 显然, 峰频大于 5 GHz 的太阳射电微波爆发不是脉冲爆发. 由表

* http://www.geomag.ac.cn/online/data/data5_index.asp

1 可知, 所有太阳射电爆发的持续时间均在几分钟到几小时范围内, 符合逐渐型爆发的时间特征. 逐渐型爆发的产生机制是热韧致辐射或热韧致辐射和回旋共振辐射的联合辐射. 其中热韧致辐射强度随辐射频率的增大而减小, 回旋共振辐射主要集中在基频 $\omega_L = 1.8 \times 10^{11} B$ 上, 除了以基频 ω_L 为主的辐射外, 还有 $2\omega_L, 3\omega_L, \dots$. 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间的太阳射电爆发事件可能产生于逐渐型微波爆发. IV_{μ} 型爆发仅当出现大耀斑和激波时才会发生. 由 NOAA 太阳耀斑的数据报告可以看出, 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间无 X 类大耀斑发生. 尖峰爆发的辐射频率范围是 0.5—5 GHz, 辐射机制可能是等离子体辐射或电子回旋脉泽辐射, 考察 1999 年 2 月 1 日至 8 月 19 日期间持续时间在 10 min 左右的太阳射电微波爆发, 辐射的频率在此范围内. 因此, 表 1 中的持续时间在 10 min 左右的太阳爆发辐射机制可能是等离子体辐射或电子回旋脉泽辐射.

4 结论与讨论

综上所述, 对 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间在 CME 驱动的行星际扰动的影响下, L1 点附近行星际空间的等离子体电子密度、电子温度和行星际空间磁场总强度等参数变化的分析, 得出不同的 CME 对近地行星际空间的影响是不同的. 也即等离子体电子密度、电子温度的变化与 CME 的产生机理、强弱以及是否向着地球方向传播有直接的关系. 但是, 在 CME 影响下, L1 拉格朗日点附近行星际空间的等离子体仍然属于非相对论等离子体范畴. 其射电辐射机制主要是韧致辐射及微量的回旋辐射和更加微弱的复合辐射. 此外, CME 产生时伴随有太阳射电微波爆发, 分析结果表明, 1999 年 2 月 1 日至 8 月 28 日期间的太阳射电微波爆发辐射机制主要有热韧致辐射、回旋共振辐射、等离子体辐射及电子回旋脉泽辐射.

通过对 L1 点附近的等离子体射电辐射机制以及 CME 产生时伴随的太阳射电微波爆发辐射机制的研究, 可以为确定星载二维成像综合孔径辐射计的探测频段提供理论基础, 有效地进行星载二维成像综合孔径辐射计的研制, 拓展辐射计的应用领域, 使其在更有效地预报地球空间天气, 对可能的

地球空间天气事件进行预警等方面获得更广泛的应用. 下一步还需要深入考察大量的射电辐射空间观测资料, 具体计算韧致辐射、回旋辐射、等离子体辐射及电子回旋脉泽辐射射电波段谐波分量的辐射强度、亮温, 从而确定辐射计的具体探测频段.

参考文献

- [1] Gopalswamy N. Coronal mass ejections: Initiation and detection. *Adv. Space Res.*, 2003, **31**(4):869—881
- [2] Kaplan S A, Tsytovich V N. *Plasma Astrophysics*. Oxford and New York: Pergamon, 1973
- [3] Chen Xiaojuan, Ji Shuchen. Radio moving type IV bursts and coronal mass ejections. *Pub. Yunnan Obs.*, 1999, **2**:24—29. in Chinese (陈晓娟, 纪树臣. 射电运动 IV 型爆发和日冕物质抛射. 云南天文台台刊, 1999, **2**:24—29)
- [4] Bekefi G. *Radiation Processes in Plasmas*. New York: Wiley, 1966
- [5] Zhao Renyang, Jin Shengzhen, Fu Qijun. Solar radio microwave burst. Beijing: Science press, 1997, 30—35. in Chinese (赵仁扬, 金声震, 傅其骏. 太阳射电微波爆发. 北京: 科学出版社, 1997, 30—35)
- [6] Rybicki G B, Lightman A P. *Radiative Processes in Astrophysics*. New York: John Wiley and Sons, 1979, 30—35
- [7] Li Chunsheng, Fu Qijun. Studies of coronal mass ejections and associated radio bursts with the cooperative observations of ground-based and spaceborne instruments. *Prog. Astron.*, 2002, **20**(3):211—222. in Chinese (李春生, 傅其骏. 日冕物质抛射与共生射电爆发的地面和空间联测研究. 天文学进展, 2002, **20**(3):211—222)
- [8] Xie Ruixiang, Wang Min, Yan Yihua, Duan Changchun. Preliminary analysis of a joint observation of the complex solar radio burst of 1998 September 23. *Chin. Astron. Astrophys.*, 2002, **26**(3):308—319
- [9] Babcock R R, Pareer J T. Spectral characteristics of solar radio bursts associated with shortwave fadeouts. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1975, **37**(9): 1 227—1 230
- [10] Wang Mi, Fu Qijun, Xie Ruixiang. Polarization observations of solar microwave spike emission at high temporal and spectral resolutions. *Acta Astrophys. Sinica*, 2000, **20**(2):179—188. in Chinese (汪敏, 傅其骏, 谢瑞祥. 太阳微波尖峰辐射的高时间、高频率分辨率偏振观测. 天体物理学报, 2000, **20**(2):179—188)
- [11] Kivelson M G, Russell C T. *Intradtuction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- [12] Sun Weiying, Wu Ji. The study on bremsstrahlung of plasma in 1AU during quiet sun and solar flare period. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(6): 412—420. in Chinese (孙伟英, 吴季. 太阳宁静及耀斑期间 1AU 附近等离子体辐射机制研究. 空间科学学报, 2004, **24**(6): 421—420)