



进展

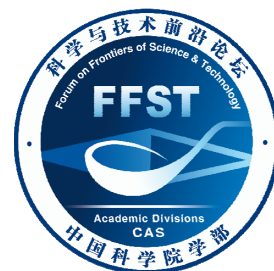
中国科学院学部 科学与技术前沿论坛 空间天气与人类活动专题

日地系统磁场重联现象研究

邓晓华*

南昌大学空间科学与技术研究院, 南昌 330031

* E-mail: dengxhua@gmail.com



收稿日期: 2012-11-05; 接受日期: 2013-03-13; 网络版发表日期: 2013-06-03

国家自然科学基金(批准号: 41174147, 40890163)资助

摘要 磁场重联是日地系统中普遍存在的一种爆发性现象,其主要作用在于将磁能转化为等离子体的动能和热能. 磁场重联同时也伴随着丰富的波动现象和高能粒子的产生. 它在太阳耀斑日冕物质抛射、磁层亚暴等众多空间灾害性事件中起关键作用. 这些空间灾害性天气影响人类技术系统的安全和运行的可靠性,可以极大地影响人类的日常生产和生活. 本文概述了磁场重联的基本观测特征以及研究中存在的主要问题,回顾了国内外对于该现象的主要研究进展,着重介绍了中国学者的主要贡献以及面临的机遇和挑战,探究了磁场重联研究未来的发展方向.

关键词

磁场重联
粒子加速
等离子体波动
空间天气

磁场重联(magnetic reconnection)是指相互靠近的磁力线的反平行分量发生断裂和重新联结现象,伴有磁场能量的突然释放并转化为等离子体的动能和热能,是空间和天体等离子体物理中的一个基本物理过程,在空间中爆发性物理现象产生过程中起着关键的作用. 这些爆发性物理现象包括太阳耀斑、磁层亚暴等.

磁场重联的研究已经有 50 多年的历史. 最早的磁场重联概念与太阳耀斑中的粒子加速有关. Giovanelli^[1]提出耀斑辐射可能是由太阳黑子磁场中性点附近的感应电场所加速的高能电子产生的. 随后, Parker^[2]以及 Sweet^[3]将最原始的磁场重联概念加以推广,从磁流体力学方程出发定量的描述了磁场重联. Dungey^[4]将磁场重联的概念用到行星际磁场和地球磁场的相互作用中. Sonnerup 等^[5]证实了磁层顶的重联提供了一种使太阳风向地球磁层传输质量,动量和能量的有效机制. Petschek^[6]模型创造

性的提出等离子体不需要全部通过扩散区来加速,大部分粒子可以通过沿磁分离线的慢激波被加速,重联率能得到极大的提高. 但该模型不能存在于高 β 的等离子体中,除非人为的在 X 线附近加上很强的电阻.

磁场重联发生在日地系统中,太阳大气中的磁重联、行星际空间的磁重联、地球磁层空间的磁重联. 这几个空间区域的物理条件不同,研究尺度不同,很多物理参数差六七个数量级,磁重联也各显特色. 从宏观和全面的视角审视不同环境的磁重联,有助于我们更深刻地认识磁重联的本质,在其本质的认识上取得突破. 2001 年, *Geospace Environment Modeling (GEM) Magnetic Reconnection Challenge*^[7]集中了世界上最优秀的空间等离子体数值模拟专家,利用不同的模型开展磁场重联研究,主要包括电阻磁流体力学, Hall 磁流体力学,混合粒子以及全粒子模拟等手段. 研究表明电子和离子的分离使得在离子扩散

中文引用格式: 邓晓华. 日地系统磁场重联现象研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 976-989

英文引用格式: Deng X H. Research of magnetic reconnection in Sun-Earth system (in Chinese). *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 43: 976-989

区内有 Hall 电流的产生, 并导致垂直于重联平面的 Hall 四极场^[8]. 电子和离子运动的分离, 极大的修正了传统的重联扩散区结构, 重联率同破坏电子冻结条件的机制无关, 只同离子动力学有关^[9,10], 如图 1 所示.

由于 Hall 效应, 不仅在离子扩散区存在四级磁场, 在垂直电流片方向还有指向中性片的 Hall 电场. 另外, 在磁分界线上由于 Hall 效应产生的高磁压导致了低密度区的出现^[11], 该区域内有强的波动和波粒相互作用^[12]. Hall 效应在磁场重联耗散区内的存在被卫星观测所广泛证实^[13-17], 如图 2 所示.

磁场重联研究一直是国际前沿和热点方向, 其关键问题包括无碰撞磁场重联的触发机制, 重联区

磁场拓扑结构和耗散机制, 高能粒子加速机制, 多时间和空间尺度耦合过程. 日地空间是天然的实验室, 人类可以通过卫星的遥测和局地观测并结合计算机模拟开展研究. 因此, 了解日地空间的磁重联现象有助于人们理解宇宙中发生的其他物理现象. 过去十年中, 我国科学家结合卫星观测, 数值模拟、理论研究, 围绕上述关键问题, 在日地空间关键区域, 在磁场重联的拓扑结构和动力学过程, 扩散区的结构和波粒子相互作用等方面取得一系列突破性进展, 取得系列国际前沿成果, 在国际空间界产生重大影响, 获得高度评价.

1 太阳大气三维磁结构和磁场重联研究

太阳风是一种来自太阳并影响地球空间环境的稀薄而炽热的电离气体, 由质子、 α 粒子、少数重离子和电子流组成的. 它们由太阳表面发出, 以 $300\sim 800\text{ km s}^{-1}$ 的速度“刮”到地球. Tu 等^[18]利用了一种新的方法, 综合 SOHO 观测到的复杂的物理现象, 获得了冕洞源区的物理特性: 太阳风高速流来自日冕漏斗结构, 在光球层上部 $2\times 10^4\text{ km}$ 的高度, 以 10 km s^{-1} 的速度发出. 在漏斗周围高度只有几千公里的小的磁回路给太阳风不断补给了等离子体流, 如图 3 所示. 通过磁重联等离子体从周围加入到漏斗中来, 它们最终将被加速形成太阳风. 该工作强调了磁通量浮现和磁重联重要性, 目前引用达 136 次. Wang 等^[19,20]与合作者一起发展了球坐标中 Euler 全隐式计算格式和多维时变流动的近似特征边界条件, 系统地进行了太阳大气动力学和日冕电流片中的磁场重联过程, 并出版了专著《磁场重联》^[21]. Zhao 等^[22]通过空间全日面磁场、多波段电磁辐射和日冕仪观测, 发现太阳活动中存在大尺度或全球尺度的磁场连接性和相互作用, 发展了在向量磁场中证认三维磁零点的微分拓扑方法(Poincare index).

2 行星际磁云边界层磁重联研究

在行星际物理方面, 长期以来传统观念认为行星际空间磁重联不会发生. 20 世纪 90 年代, Wei 等^[23]较早提出磁重联可以普遍发生在行星际空间的小尺度相互作用区的观点, 发展了对行星际磁重联及其高能电子加速机制的新认识.

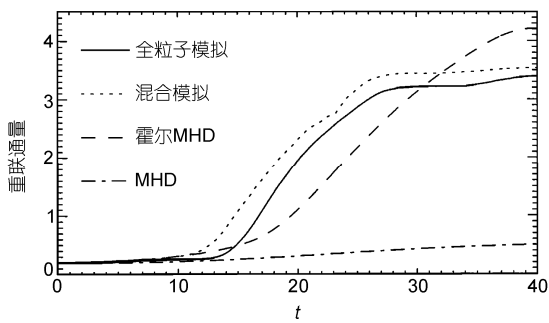


图 1 不同的数值模拟模型得到的重联率
据文献[7]

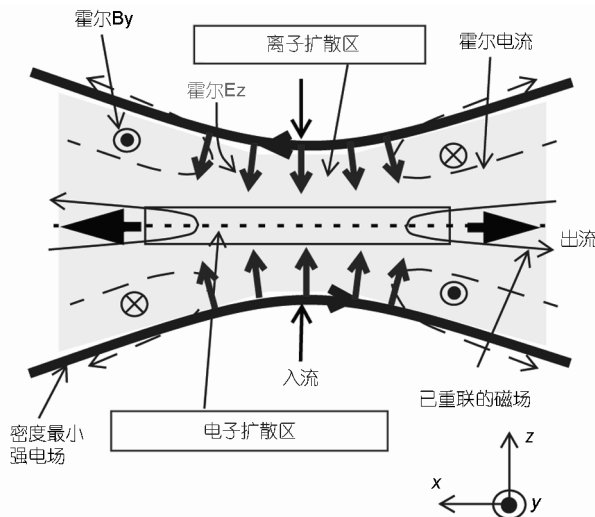


图 2 快速磁场重联的二维结构图
据文献[17]

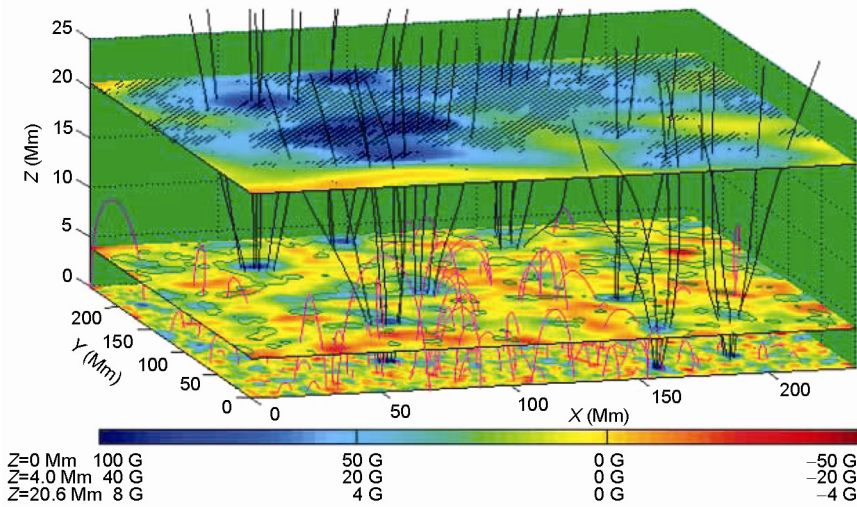


图3 太阳大气三维磁结构
据文献[18]

Gosling 等^[24]给出了行星际磁场重联事件的详细分析. 特别是 Phan 等^[25]于 2006 年通过对 Cluster 卫星, Wind 卫星以及 ACE 卫星联合观测的结果进行分析, 发现了在行星际空间中存在很大尺度的准稳态磁场重联, 其 X 线的特征尺度可以长达几百个地球半径. Wang 等^[26]研究行星际磁云边界层磁重联, 首次观测到行星际磁重联和在磁云边界层中找到伴随磁重联产生的高能电子, 提出高能电子在重联中混合加速机制. 行星际磁场中的间断面也有可能在某些条件下在广袤的行星际空间发生磁场重联, 如图 4 所示. Pang 等^[27]开展了行星际磁场间断面诱发磁鞘重联的三维混合模拟研究. 研究表明重联是以三维补级重联的形式发生的^[28].

3 地球磁层磁重联研究

太阳风通过向阳面磁层顶磁重联向地球空间传输能量, 并形成磁层-电离层等离子体对流; 这些能量储存在磁尾, 为磁暴和磁层亚暴提供了主要的能量来源. 向阳面磁重联过程一直是磁层物理和空间天气研究中的一个重要的课题. Liu 和 Hu^[29]突破了 30 多年来经典磁场重联的传统观念, 首次提出流体涡旋诱发磁场重联的新概念, 创建了涡旋诱发重联理论.

Deng 和 Matsumoto^[13]首次在日地空间发现了无

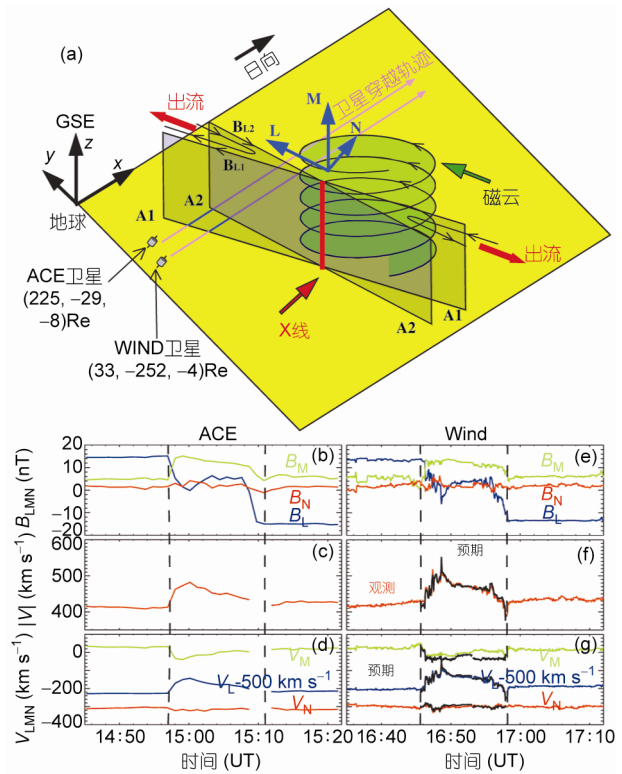


图4 行星际空间的大尺度的准稳态磁场重联

碰撞磁场重联的观测证据, 如图 5 所示, 该研究涉及困扰天体物理、空间物理和等离子体物理近半个世纪有关磁能快速释放机制的重大难题, 相关论文在

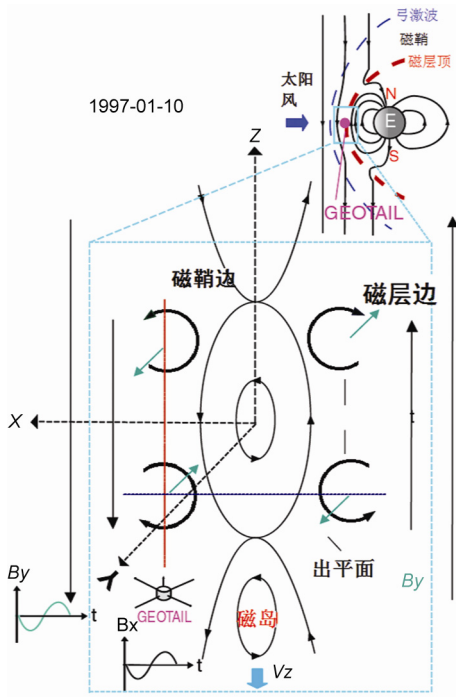


图5 磁层顶无碰撞磁场重联的观测证据

《自然》杂志上发表后, 受到国际空间界高度评价. 世界空间物理泰斗、太阳风的发现者 Parker 教授亲笔来信表示祝贺和赞赏. 该文被《自然》、《科学》等专文评论引用 142 次. Deng 等^[30]通过仔细分析和研究大量卫星观测数据, 在磁层尾部磁场重联 X 线两边发现由电子和离子去耦所导致的霍尔电流的直接证据, 研究了重联层微观结构, 首次在地球磁尾得到多 X 线的观测证据.

磁场重联本质是三维过程. Parnell 等^[31]通过线性分析的方法研究了三维磁场零点的局部结构. Priest 和 Titov^[32]根据零点附近磁力线重新连接的方式, 提出了重联的三种模式, 分别是 spine 重联, fan 重联以及分离线重联. Wang 和 Wang^[33]提出了一种直接的、可靠的探测二维磁场零点的方法, Zhao 等^[22]将这种方法推广到三维向量空间. Xiao 等^[34,35]利用微分拓扑学的方法, 通过分析欧空局 Cluster 卫星的探测数据, 在地球磁尾首次观测到等离子体磁重联的磁零点和磁零点对, 如图 6 和图 7 所示. 欧空局科学部将三维磁零点的观测作为 Top Story 作了报道: “一

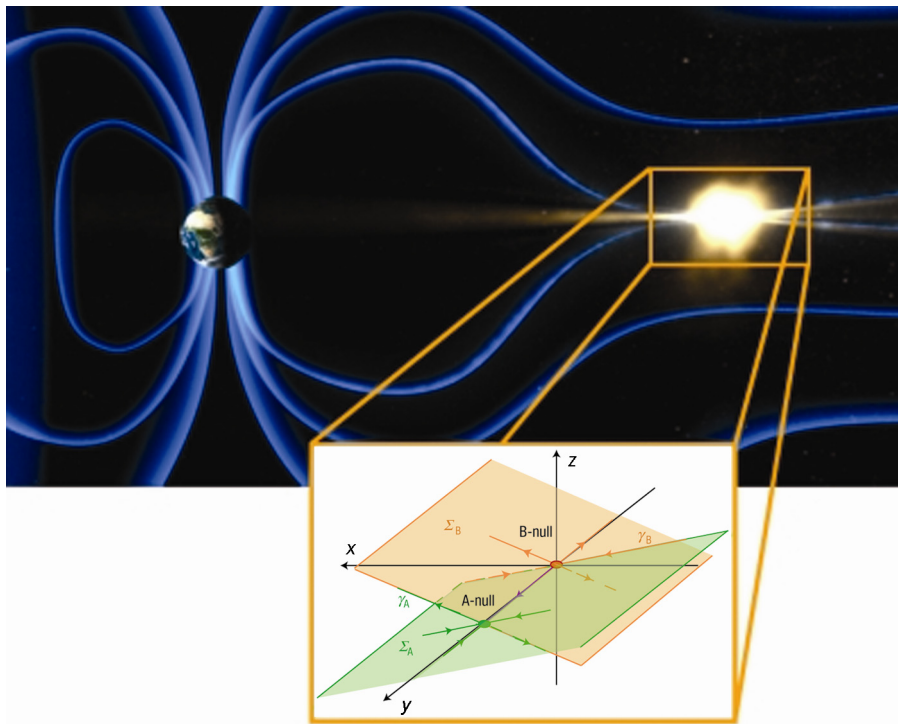


图6 三维单零点磁场重联的观测证据
据文献[35]

个由中国科学家领导的国际小组揭示了这一磁零点基本的拓扑和物理特性. 这一科学上的突破, 是一个杰出的成就”, “是 Cluster 计划的一个主要成果”. 2009 年和 2010 年欧空局两次列举 Cluster 探测 5 大成就, 该成果均位于榜首.

He 等^[36,37]建立了利用 Cluster 四颗卫星磁场和位置数据重构磁场的方法, 重构了双零点附近的磁场拓扑位型, 发现了电子尺度三维分离线重联的实地证据, 如图 7 所示. Deng 等^[38]观测到螺旋零点对. 通过传播和极化分析, 以及电磁场功率谱幂律关系确认了哨声波和低混杂波的存在, 观测到类似静电孤立波的波形, 研究了双零点附近的电子动力学特征, 揭示了多尺度的物理过程, 发现零点 fan 平面之间的夹角很接近于理论估计得到的哨声波群速度锥角最大值^[39]. 我国科学家关于磁零点的一系列开创性揭开了磁场重联最核心区域的神秘的面纱, 对于研究磁场重联的三维形态和动力学过程有重大意义.

关于磁场重联另一个关键问题磁重联究竟是发

生在高纬磁层顶, 还是发生在低纬磁层顶. 前者称为“反平行重联”模型^[40,41]; 后者则被称为“分量重联”模型^[42]. 卫星探测表明, 支持两种模型的观测证据都存在. 这一争论涉及磁层顶磁重联的发生条件和物理机制, 并与太阳风-磁层耦合密切相关, 受到国际空间物理学界高度的关注. Cluster 星座在高纬穿越磁层顶, TC-1 的轨道位于低纬区. 两者在磁层顶附近的协同观测, 为解决这一长期未决的争论, 提供了极好的机会. Pu 等^[43]借助卫星观测确立了“分量重联”的存在和重要性. 这一结果首先发表在双星首批成果专辑上. 磁重联权威科学家 Paschmann^[44]在评述文章对此做了详细介绍. 随后 Pu 等^[45]直接观测到磁层顶“分量重联”和“反平行重联”分别在低纬和高纬同时发生, 并获得磁层顶“S”型大尺度重联线的观测证据, S 型大尺度重联线如图 8 所示. 研究表明向阳面重联是一个整体性的过程, “反平行重联”和“分量重联”分别反映了磁零点附近和分形线附近磁重联的局域特性.

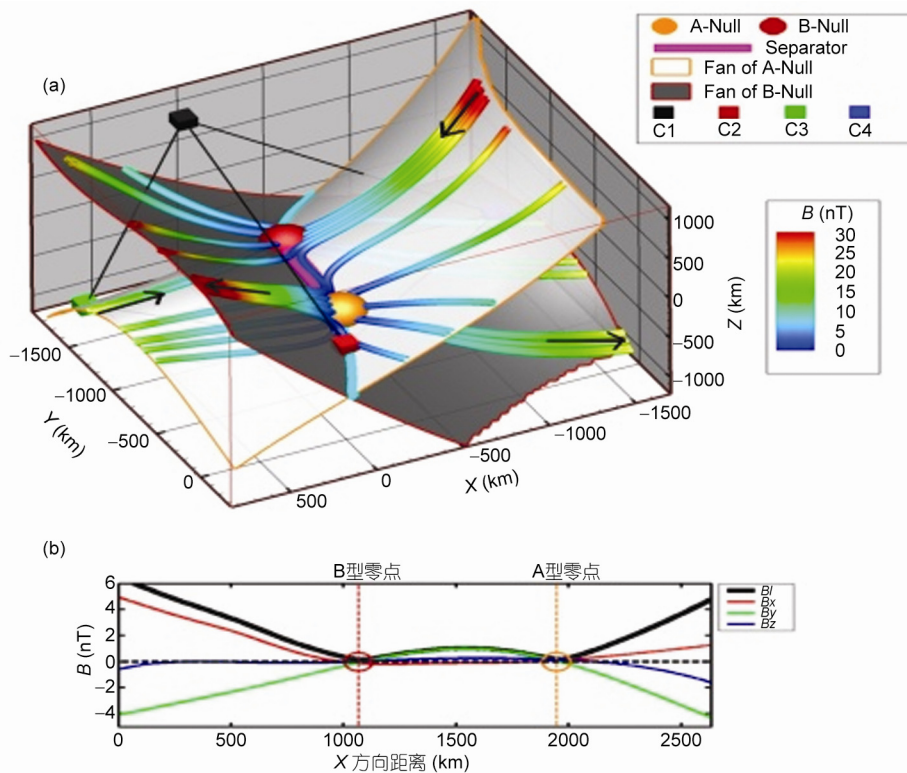


图 7 磁零点对的观测证据
据文献[36]

Dunlop 等^[46]联合分析空间多颗卫星的协同观测数据,研究了日侧磁层顶磁重联过程的三维形态.首次在日侧磁层顶相距 9 Re 的两点同时观测到了磁重联,证实磁重联可能在两个或多个位置同时发生,如图 9 所示.

4 实验等离子体磁场重联研究

Zhong 等^[47]通过精巧设计实验,在我国的“神光-II”激光装置上,利用激光等离子体的自生磁场构造了磁重联拓扑结构,产生了等离子体喷流;通过 Ryutov 磁流体标度变换理论,将激光等离子体与太

阳光球表面及冕区等离子体等价起来,实现了利用实验室小尺度磁流体研究大尺度天体磁流体相关现象的突破,如图 10 所示.

Dong 等^[48]利用激光等离子体实验构造了相似的磁重联结构,来研究重联过程中 EDRs 的特征.

5 金星磁场重联观测

数十年来空间探测器已经确认在地球、水星、木星和土星磁层中频繁发生着磁场重联现象.直到最近,科学家们仍旧不认为在一颗像金星这样不拥有磁场的大行星周围会存在这种重联现象. Zhang 等^[49]

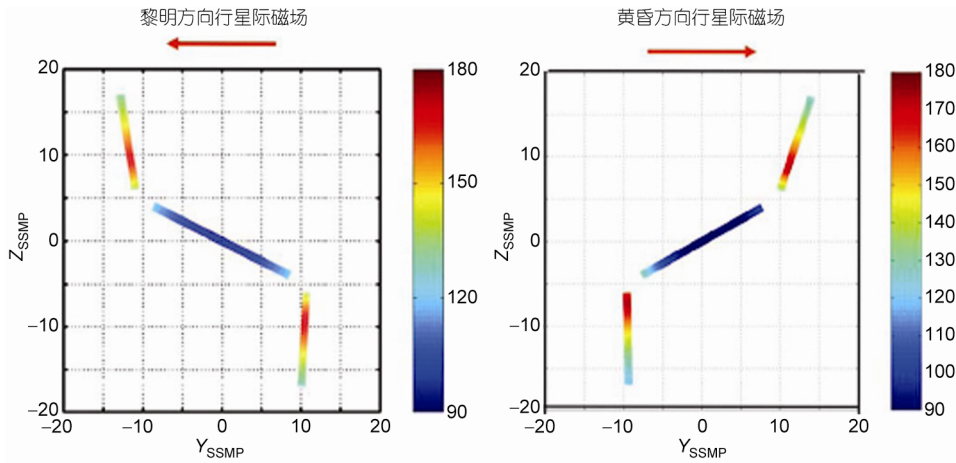


图 8 S 型大尺度重联线

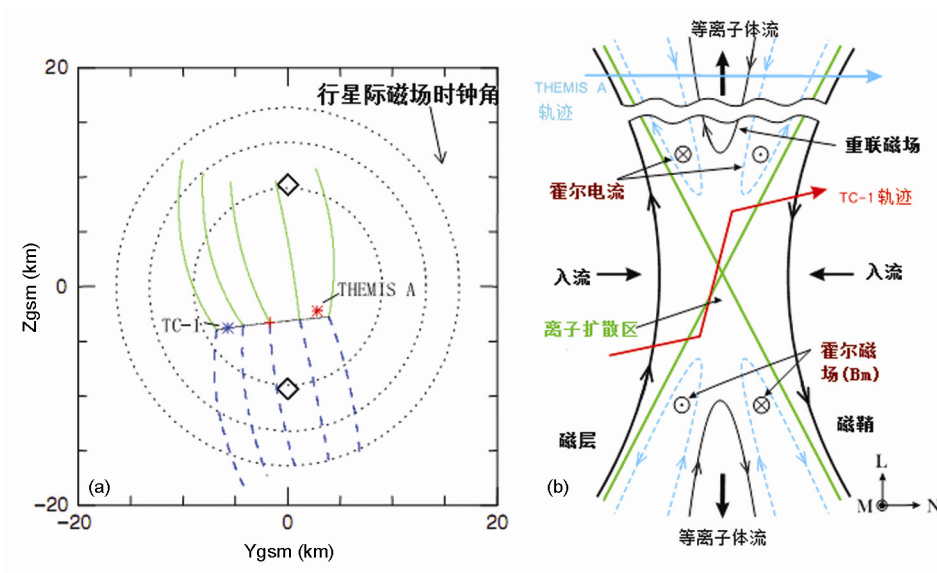


图 9 磁层顶的磁场重联观测证据

利用欧洲金星快车的磁场探测数据, 首次在金星
的诱发磁层中发现了磁场重联现象, 并提出磁场重联
是导致金星上大气尤其是水分子逃逸的重要机制之
一, 如图 11 所示. 这一发现对金星大气演化和气候
变化研究具有重要意义.

6 伴随磁场重联的波与粒子加速

Matsumoto 等^[50]首次观测伴随磁场重联的静电
孤立波和静电调制波. 如图 12 所示. Wei 等^[51]注
意到哨声波在重联开始前 30 s 出现, 这是一个潜在的

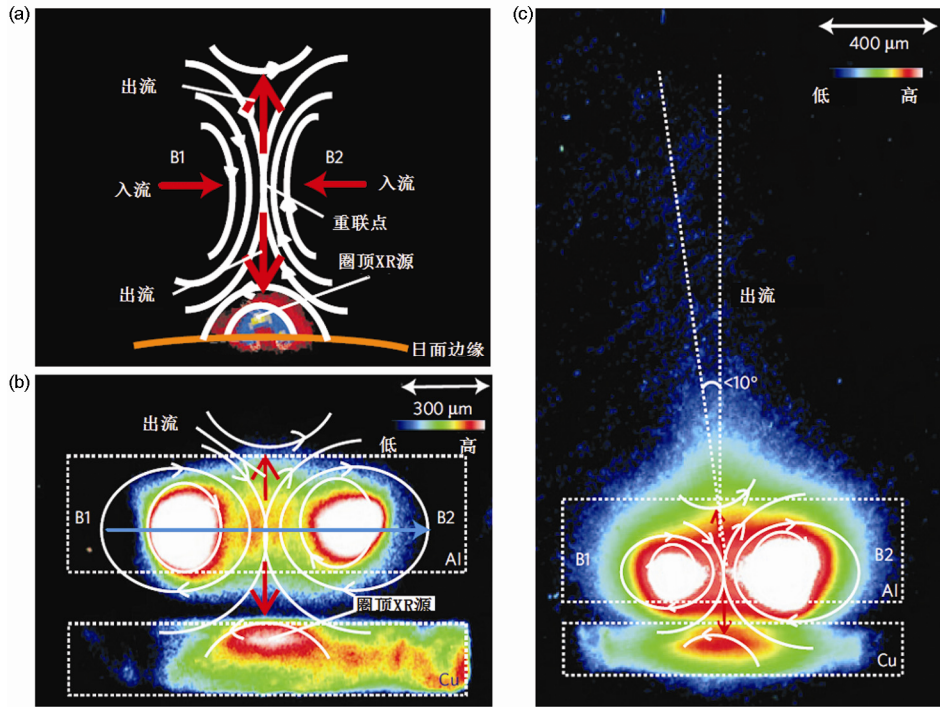


图 10 “神光- II”激光装置磁重联现象研究

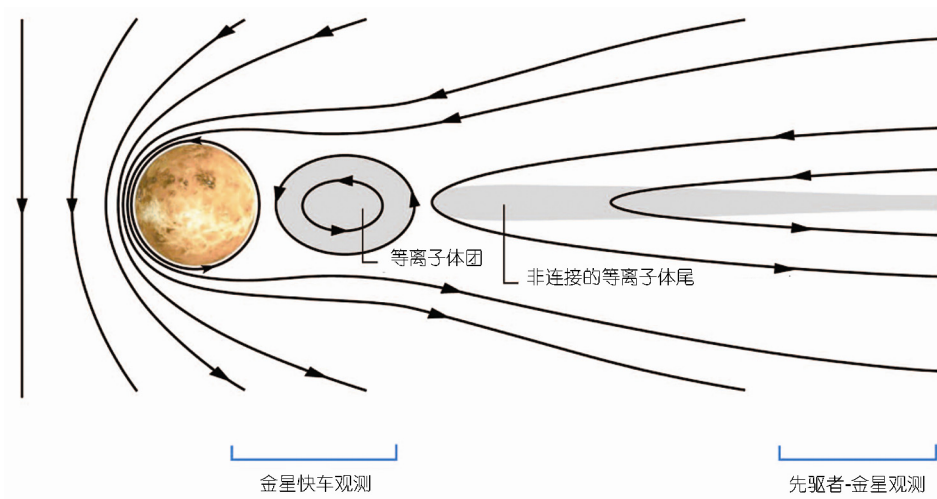


图 11 金星附近的磁场重联
据文献[49]

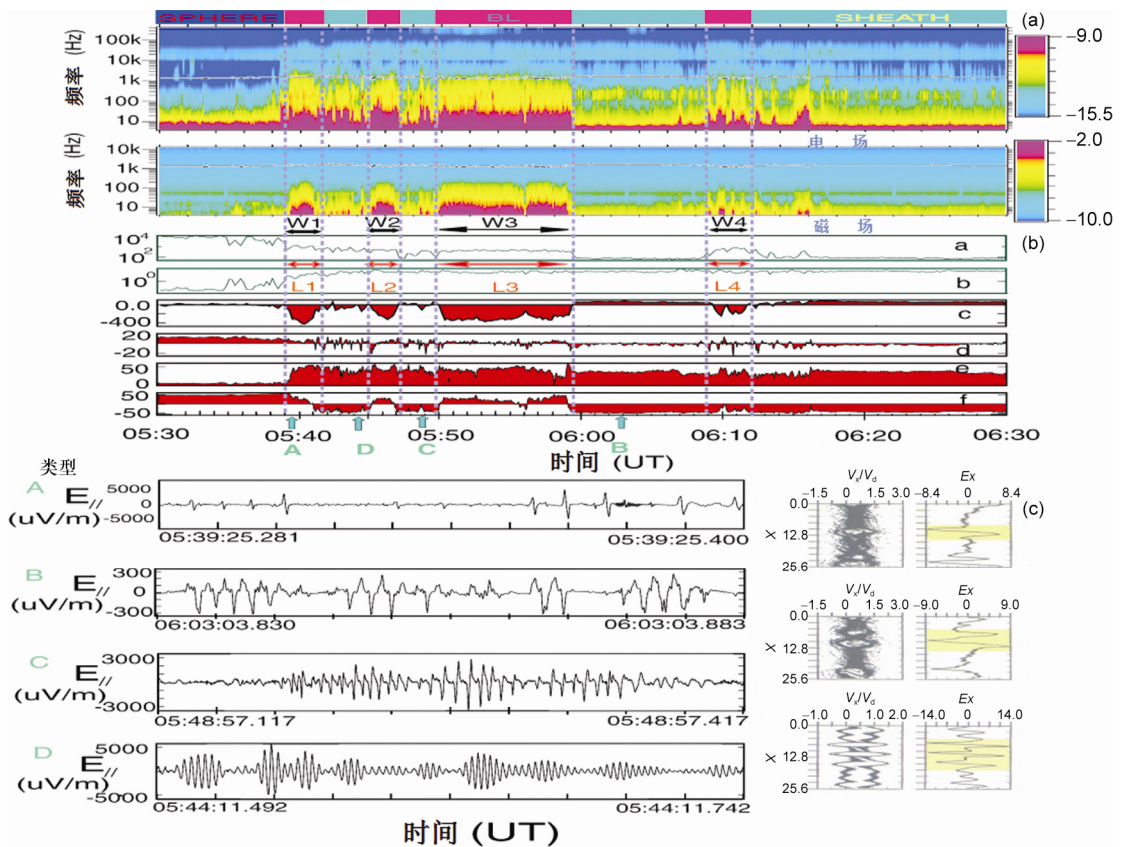


图 12 磁场重联附近的静电孤立波和调制波

图(b)从上至下依次为离子温度(eV)、等电子体密度(cm^{-3})、等电子体速度(km s^{-1})、磁场三分量 B_x , B_y , B_z (nT)

能够提供重联产生所需反常电阻的波动. 这个哨声波在重联产生后大大增强, 其频率变得越来越高, 如图 13 所示. 重联前后波的特性的不同表明重联前和重联后的哨声波是由不同的机制产生, 被列为 Cluster 卫星计划的重大成果(top story).

Zhou 等^[52]在磁场重联扩散区内观测到了静电的和电磁的低混杂漂移波. 静电波存在于磁分形线上, 而在中心电流片高 β 区发现了电磁模式的低混杂波, 这是首次在重联扩散区内观测到低混杂漂移波的电磁模式. 由反常电阻提供的电场远大于 Bale 等^[53]在磁层顶估算的数值, 但是小于 Vlasov 模拟得到的结果. Zhou 等^[54]探测到扩散区内在分界线上的密度耗空区. 该密度耗空区内存在复杂的波粒相互作用, 存在有低混杂波和哨声波, 并伴随有平行电子束, 其中的低混杂波可能对重联过程中电子的加速起一定作用. Huang 等^[55]分析卫星穿越磁场重联扩散区观测到

的低频波, 证实了在高 β 重联区在有弱导向场情况下, 主要的波为高斜向传播的波模, 该波模符合 Alfvén-Whistler 色散关系, 如图 14 所示.

Wang 等^[56]利用 Cluster 卫星观测资料, 在地球的磁尾发现了一个存在于重联扩散区中心的次级磁岛, 并发现次级磁岛的存在可有效地加速电子, 如图 15 所示.

高能粒子注入是磁层亚暴一个重要的组成部分, 而高能粒子的产生机制则是亚暴注入的一个长期未能解决的问题. 最新的粒子模拟研究表明偶极化锋面可以由瞬态(transient)磁场重联产生^[57]. 最近 THEMIS 卫星观测发现了从-20 地球半径到-10 地球半径间地向传播的偶极化锋面^[58-60]. Deng 等^[59]有关偶极化锋面的文章在国际上引起广泛关注, 连续几个月被 JGR 列为最有影响和关注的文章首列, 如图 16 所示. Zhou 与 UCLA 合作, 通过开展大尺度动

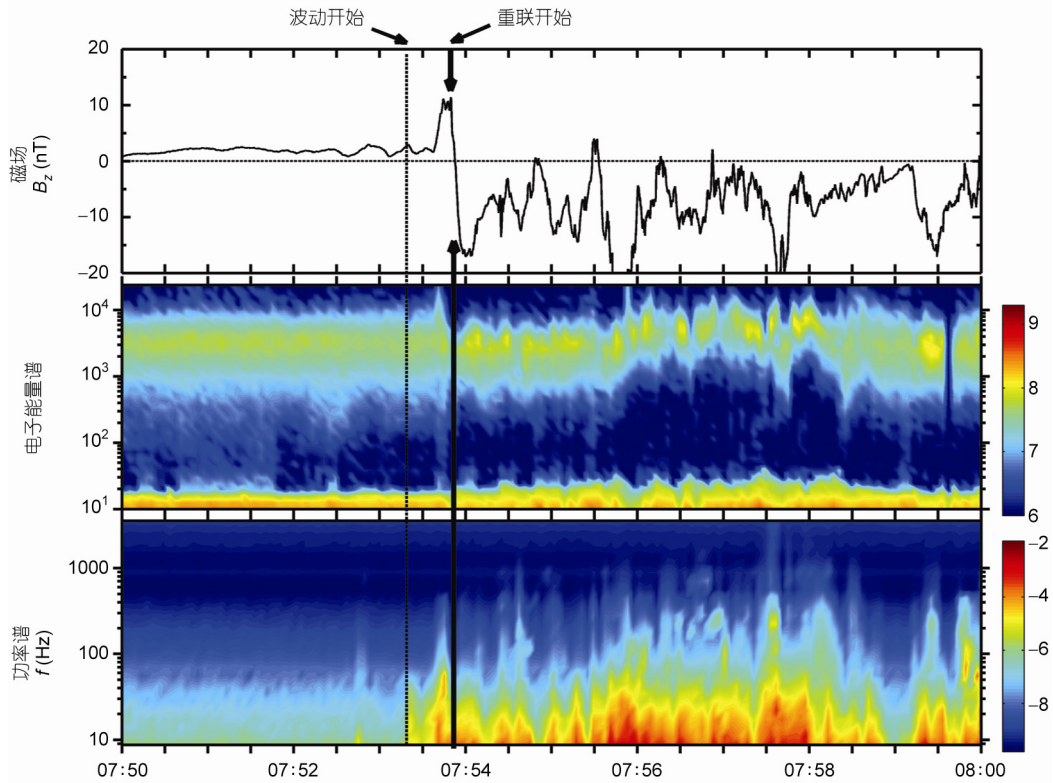


图 13 磁场重联前后的哨声波
据文献[51]修改

力学模拟, 首次确认了绝热 **Betatron** 加速对近地偶极化锋面的电子加速起主导作用. Ashour-Abdalla 等^[61]认为粒子加速跟能量有关, 磁重联附近只能产生几 keV 的电子, 而更高能的电子是在随高速等离子体流一起运动的偶极化过程中产生的, 如图 17 所示.

7 机遇与挑战

磁场重联允许磁场拓扑结构快速变化并且导致磁能的转换和高能粒子加速. 磁场重联在空间天气的驱动和引发过程中起着十分关键的作用. 我国科学家针对磁场重联核心问题, 在关键区在磁场重联触发机制, 拓扑结构, 波动和粒子加速等方面取得一系列具有重要国际影响的创新工作. 我国科学家已组成具有卫星和地面数据处理, 大规模三维计算机模拟(全粒子, 混合粒子和 **MHD**)和理论分析各具特

色的创新团队. 相关单位和团队已开展富有成效的合作与交流.

有关磁场重联研究主要利用卫星在近地空间卫星局地探测, 太阳日冕活动的遥测, 计算机数值模拟和实验室观测开展工作. 磁场重联研究各个手段和方法各有其优势也有其局限性. 局地观测可以给出观测点的很详尽有关局部电磁场和粒子分布细节, 但是不能提供总体结构和整体性质. 而相反, 遥测可以提供大尺度的特性和宏观物理过程信息, 利用遥测技术可以得到有关重联位置、范围和控制因素等信息, 使我们获得有关重联的时间连续性, 电流片的稳定性, 结构和运动信息. 日冕硬 X 线的观测提供观测太阳耀斑粒子加速的一个极其有用的工具, 利用 **RHESSI** 观测可以追踪它的源并给出它们频谱细节, 但受到视向观测的限制使观测缺乏足够的空间和时间分辨率. 数值模拟是非常有用的工具, 它可以区分和研究在不同条件下对重联有重要作用的不同物

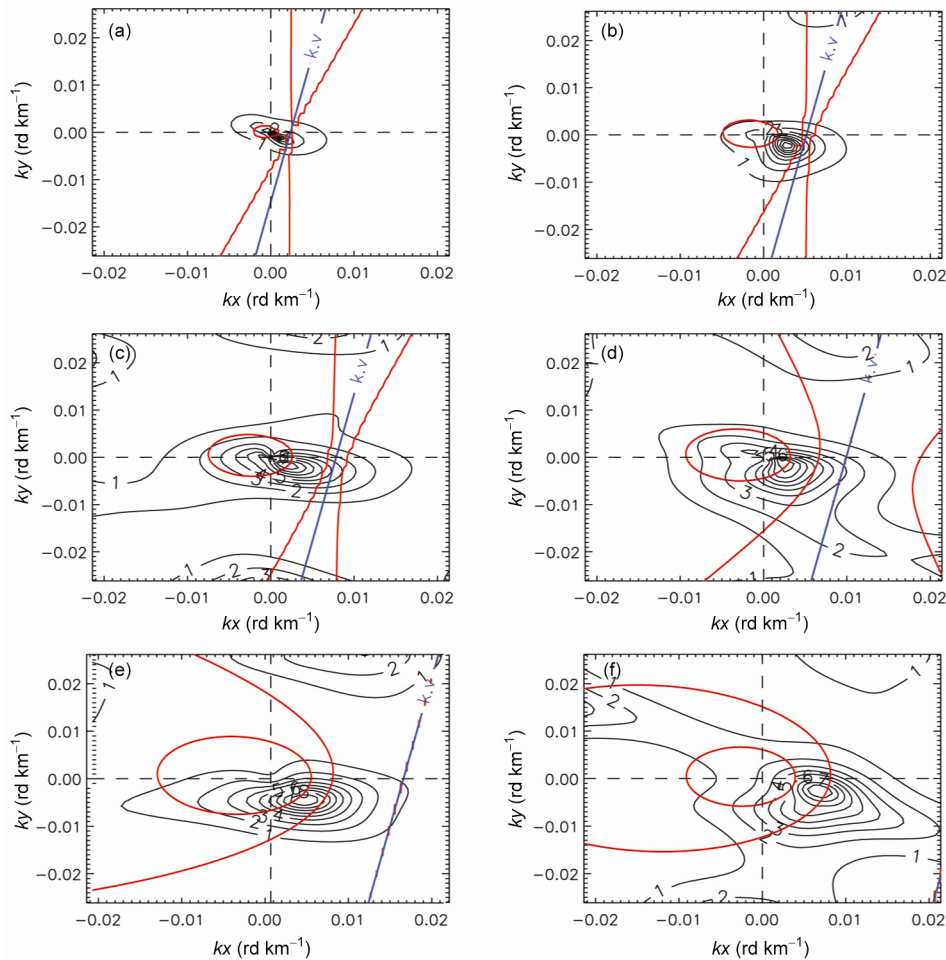


图 14 磁场波动能量分布(MFED)的二维示意图

理机制, 比如导向场和反平行重联, 湍动和分层重联, 瞬态和稳态重联. 但真实的三维数值模拟受到当前计算机的计算能力限制. 实验室等离子体在多点实地探测电磁场具有优势, 但等离子体具有相对高的碰撞率, 研究的系统尺度有限, 带电粒子的诊断有限.

三维磁场重联涉及多空间和时间尺度. 目前关于磁场重联是稳态还是瞬态, 较强导向场下的三维重联拓扑结构、反常电阻产生机制、粒子的加速机制和波粒相互作用, 包含多个电流片和多重磁岛的湍动等离子体重联、重联喷流区的间断面和磁尾粒子加速过程等关键问题仍悬而未解. 目前, 在不同的环境下(太阳、行星际、磁层、实验室)的磁场重联研究以

及空间探测和数值模拟还是相互分散, 各自为阵. 发生在日地空间中的磁场重联是唯一能同时进行局部探测和遥感成像观测. 急需将日地空间磁场重联作为一个整体, 利用遥感和局部探测, 结合数值模拟, 针对磁场重联的触发机制、重联区的结构和耗散机制、粒子加速机制、多尺度耦合过程重要核心科学问题, 从多角度和利用多种方法, 组织相互联系和支撑项目, 形成团队, 联合攻关, 实现重点突破, 形成中国的特色和体系. 同时开展中国自主创新的探测仪器研制和推动未来卫星探测计划实施, 确立我国空间研究的国际地位和扩大国际影响, 为人类空间环境研究, 空间信息和资源开发与应用作出中国人的贡献.

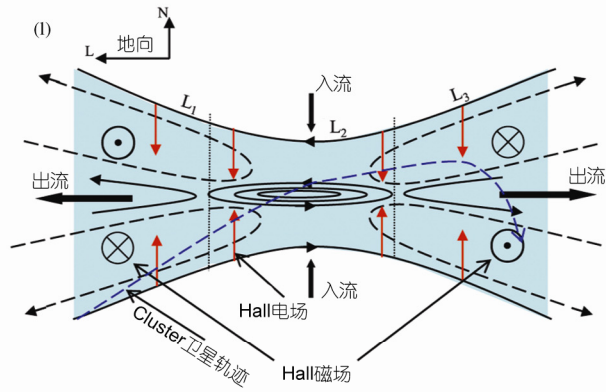
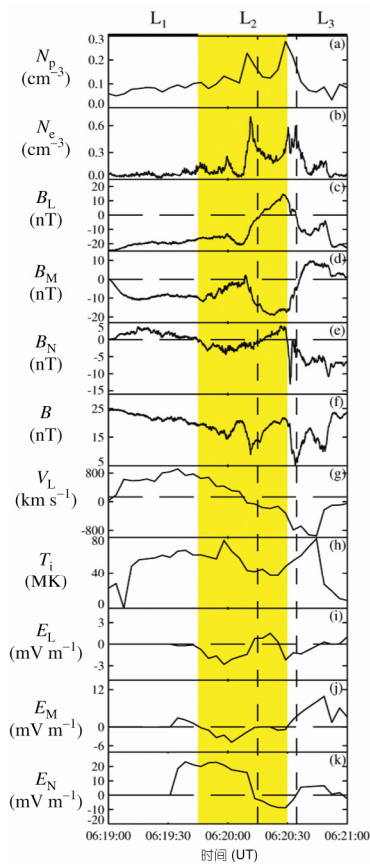


图 15 磁场重联耗散区的磁岛

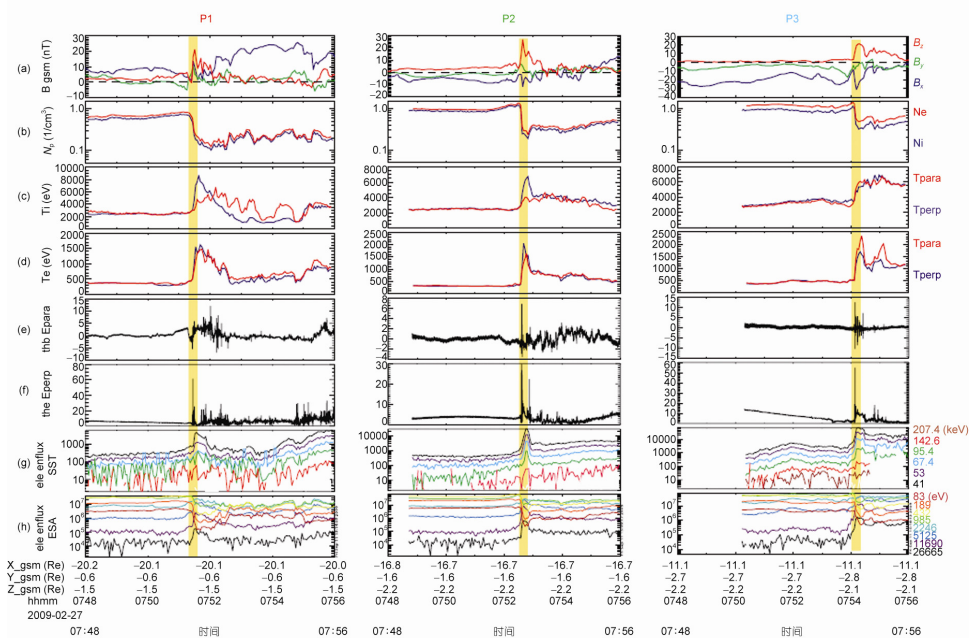


图 16 伴随着偶极化锋面的高能电子

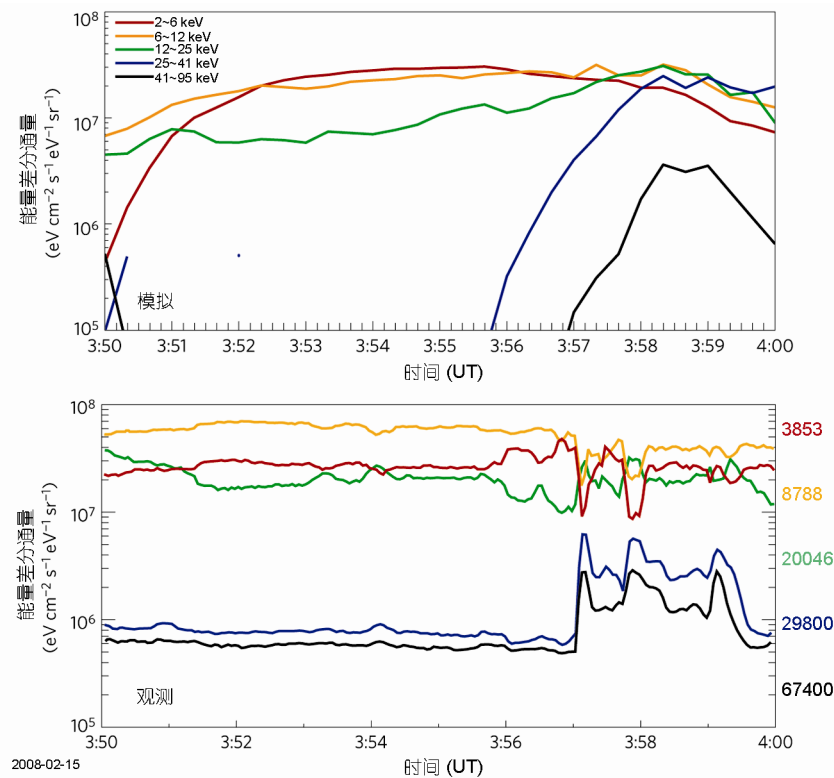


图 17 试验粒子模拟与观测结果的比较

致谢 感谢中国科技大学王水院士、中国科学院魏奉思院士、北京大学涂传诒院士、中国科学院刘振兴院士、北京大学濮祖荫教授和其他相关学者的大力支持和讨论, 感谢国家自然科学基金委资助与支持。

参考文献

- 1 Giovanelli R G. A theory of chromospheric arcs. *Nature*, 1946, 158: 81–82
- 2 Parker E N. Sweet's mechanism for merging magnetic field in conducting fluids. *J Geophys Res*, 1957, 62: 509–520
- 3 Sweet P A. The neutral point theory of solar flare. In: Lehnert B, ed. *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*. London: Cambridge University Press, 1958. 123
- 4 Dungey J M. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys Rev Lett*, 1961, 6: 47–48
- 5 Sonnerup B U Ö, Paschmann G, Papamastorakis T, et al. Evidence for magnetic field reconnection at the Earth's magnetopause. *J Geophys Res*, 1981, 86: 10049–10067
- 6 Petschek H E. Magnetic field annihilation. In: *ASS-NASA Symposium on the Physics of Solar Flares*. NASA Spec Publ, 1964. 425–439
- 7 Birn J, Drake J F, Shay M A, et al. Geospace Environmental Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge. *J Geophys Res*, 2001, 106: 3715–3719
- 8 Sonnerup B U Ö. Magnetic field reconnection. In: Lanzerotti L J, Kennel C, Parker E, eds. *Solar System Plasma Physics*. Amsterdam: North-Holland, 1979. 45–108
- 9 Birn J, Hesse M. Geospace Environment Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge: Resistive tearing, anisotropic pressure and Hall effects. *J Geophys Res*, 2001, 106: 3737–3750
- 10 Pritchett P L. Collisionless magnetic reconnection in a three-dimensional open system. *J Geophys Res*, 2001, 106, A11: 25961–25977
- 11 Shay M A, Drake J F, Rogers B N, et al. Alfvénic collisionless magnetic reconnection and the Hall term. *J Geophys Res*, 2001, 106:

- 3759–3772
- 12 Retino A, Vaivads A, Andre M, et al. Structure of the separatrix region close to a magnetic reconnection X-line: Cluster observations. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L06101
 - 13 Deng X H, Matsumoto H. Rapid magnetic reconnection in the Earth's magnetosphere mediated by whistler waves. *Nature*, 2001, 410: 557–560
 - 14 Øieroset M, Phan T D, Fujimoto M, et al. *In situ* detection of collisionless reconnection in the Earth's magnetotail. *Nature*, 2001, 412: 414–417
 - 15 Runov A, Nakamura N, Baumjohann W, et al. Current sheet structure near magnetic X-line observed by cluster. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1579–1582
 - 16 Vaivads A, Khotyaintsev Y, Andre M, et al. Structure of the magnetic reconnection diffusion region from four-spacecraft observations. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 105001
 - 17 Borg A L, Øieroset M, Phan T D, et al. Cluster encounter of a magnetic reconnection diffusion region in the near-Earth magnetotail. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L19105
 - 18 Tu C Y, Chen Z, Marsch E, et al. Solar wind origin in coronal funnels. *Science*, 2005, 308: 519–523
 - 19 Wang S, Lee L C, Wei C Q, et al. A mechanism for the formation of plasmoids and kink waves in the heliospheric current sheet. *Sol Phys*, 1988, 117, 1: 157–169
 - 20 Wang S, Zheng H N. Nonlinear saturation of streaming tearing instability. *Chin Sci Bull*, 1992, 37, 18: 1541–1545
 - 21 王水, 李罗全. 磁场重联. 合肥: 安徽教育出版社, 1994
 - 22 Zhao H, Wang J X, Zhang J, et al. A new method of identifying 3D null points in solar vector magnetic fields. *Chin J Astro Astrop*, 2005, 5, 5: 443–447
 - 23 Wei F S, Schwenn K, Hu Q, et al. Magnetic reconnection events in the interplanetary space. *Sci China Ser E*, 1997, 40: 463–471
 - 24 Gosling J T, Skoug R M, McComas D J, et al. Direct evidence for magnetic reconnection in the solar wind near 1 AU. *J Geophys Res*, 2005, 110: A01107
 - 25 Phan T D, Gosling J T, Davis M S, et al. A magnetic reconnection X-line extending more than 390 Earth radii in the solar wind. *Nature*, 2006, 439: 175–178
 - 26 Wang Y, Wei F S, Feng X S, et al. Energetic electrons associated with magnetic reconnection in the magnetic cloud boundary layer. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 195007
 - 27 Pang Y, Lin Y, Deng X H, et al. Three-dimensional hybrid simulation of magnetosheath reconnection under northward and southward interplanetary magnetic field. *J Geophys Res*, 2010, 110: A03203
 - 28 Linton M G, Longcope D W. A model for patchy reconnection in three dimensions. *Astrop J*, 2006, 642: 1177
 - 29 Liu Z X, Hu Y D. Local magnetic reconnection caused by vortices in the flow field. *Geophys Res Lett*, 1988, 15: 752–755
 - 30 Deng X H, Matsumoto H, Kojima H, et al. Geotail encounter with reconnection diffusion region in the Earth's magnetotail: Evidence of multiple X lines collisionless reconnection? *J Geophys Res*, 2004, 109: A05206
 - 31 Parnell C E, Smith J M, Neukirch T, et al. The structure of three-dimensional magnetic neutral points. *Phys Plasmas*, 1996, 3: 759–770
 - 32 Priest E R, Titov V S. Magnetic reconnection at three-dimensional null points. *Philosoph Transactions Royal Soc A-Math Phys Engineering Sci*, 1996, 354: 2951–2992
 - 33 Wang H N, Wang J. Two-dimensional magnetic singular points and flares in solar active regions. *Astron Astrophys*, 1996, 313: 285–296
 - 34 Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, et al. *In situ* evidence for the structure of the magnetic null in a 3D reconnection event in the Earth's magnetotail. *Nat Phys*, 2: 478–483
 - 35 Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, et al. Satellite observations of separator line geometry of three-dimensional magnetic reconnection. *Nat Phys*, 3: 609–613
 - 36 He J S, Zong Q G, Deng X H, et al. Electron trapping around a magnetic null. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L14104
 - 37 He J S, Marsch E, Tu C Y, et al. Reconfiguration of the coronal magnetic field by means of reconnection driven by photospheric magnetic flux convergence. *Astron Astrophys*, 2010, 510: A40
 - 38 Deng X H, Zhou M, Li S Y, et al. Dynamics and waves near multiple magnetic null points in reconnection diffusion region. *J Geophys Res*, 2009, 114: A07216
 - 39 Singh N. Interpretation of solar wind reconnection exhaust in terms of kinetic Alfvén wave groupvelocity cones. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L13106
 - 40 Crooker N U. Dayside merging and cusp geometry. *J Geophys Res*, 1979, 84: 951–959

- 41 Luhmann J G, Walker R J, Russell C T, et al. Patterns of potential magnetic field merging sites on the dayside magnetopause. *J Geophys Res*, 1984, 89: 1739–1745
- 42 Cowley S W H. Comments on the merging of non antiparallel field. *J Geophys Res*, 1976, 81: 3455–3458
- 43 Pu Z Y, Xiao C J, Huang Z Y, et al. Double Star TC-1 observation of magnetic reconnection at the dayside magnetopause: A preliminary study. *Ann Geophys*, 2005, 23: 2897–2901
- 44 Paschmann G. Recent in-situ observations of magnetic reconnection in near-Earth space. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19109
- 45 Pu Z Y, Zhang X G, Wang X G, et al. Global view of dayside magnetic reconnection with the dusk-dawn IMF orientation: A statistical study for double star and cluster data. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L20101
- 46 Dunlop M W, Zhang Q H, Bogdanova Y V, et al. Extended magnetic reconnection across the dayside magnetopause. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 025004
- 47 Zhong J Y, Li Y T, Wang X G, et al. Modelling loop top X-ray source and reconnection outflow with intense lasers. *Nat Phys*, 2010, 6: 984–987
- 48 Dong Q L, Wang S J, Lu Q M, et al. Plasmoid ejection and secondary current sheet generation from magnetic reconnection in laser-plasma interaction. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 215001
- 49 Zhang T L, Lu Q M, Baumjohann W, et al. Magnetic reconnection in the new Venusian magnetotail. *Science*, 2012, 336: 567–570
- 50 Matsumoto H, Deng X H, Kojima H, et al. Observation of electrostatic solitary waves associated with reconnection on the dayside magnetopause boundary. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1326
- 51 Wei X H, Cao J B, Zhou G C, et al. Cluster observations of waves in the whistler frequency range associated with magnetic reconnection in the Earth's magnetotail. *J Geophys Res*, 2007, 112: A10225
- 52 Zhou M, Deng X H, Li S Y, et al. Observation of waves near lower hybrid frequency in the reconnection region with thin current sheet. *J Geophys Res*, 2009, 114: A02216
- 53 Bale S D, Mozer F S, Phan T D. Observation of lower hybrid drift instability in the diffusion region at a reconnecting magnetopause. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 2180
- 54 Zhou M, Pang Y, Deng X H, et al. Density cavity in magnetic reconnection diffusion region in the presence of guide field. *J Geophys Res*, 2011, 116: A06222
- 55 Huang S Y, Zhou M, Sahraoui S. Wave properties in the magnetic reconnection diffusion region with high b : Application of the k -filtering method to cluster multispacecraft data. *J Geophys Res*, 2010, 115: A12211
- 56 Wang R S, Lu Q M, Du A M, et al. *In situ* observations of a secondary magnetic island in an ion diffusion region and associated energetic electrons. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 175003
- 57 Sitnov M I, Swisdak M, Divin A V. Dipolarization fronts as a signature of transient reconnection in the magnetotail. *J Geophys Res*, 2009, 114: A04202
- 58 Runov A, Angelopoulos V, Sitnov M I, et al. THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L14106
- 59 Deng X H, Ashour-Abdalla M, Zhou M, et al. Wave and particle characteristics of earthward electron injections associated with dipolarization fronts. *J Geophys Res*, 2010, 115: A09225
- 60 Zhou M, Ashour-Abdalla M, Deng X H, et al. THEMIS observation of multiple dipolarization fronts and associated wave characteristics in the near-earth magnetotail. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L20107
- 61 Ashour-Abdalla M, El-Alaoui M, Goldstein M, et al. Observations and simulations of nonlocal acceleration of electrons in magnetotail magnetic reconnection events. *Nat Phys*, 2011, 7: 360–365