

三维磁重联观测研究进展

肖池阶^{①*} 王晓钢^② 濮祖荫^{③⑤} 马志为^④ 赵 辉^①
周桂萍^① 汪景琇^① 刘振兴^⑤

(① 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ② 北京大学物理学院, 北京 100871; ③ 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; ④ 浙江大学聚变理论与模拟研究中心, 杭州 310027; ⑤ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘要 磁重联是等离子体中最主要的能量转换过程, 在耀斑、CME 和磁层亚暴等空间等离子体物理和空间天气学过程以及磁约束核聚变的磁流体力学稳定性研究中起着关键作用, 是等离子体物理的一个基本问题. 除周期性边界条件, 如环形磁约束核聚变装置外, 一般情况下三维磁重联都发生在以磁零点为基点的磁场拓扑分形面上. 本文简要介绍三维磁重联中磁零点的理论和卫星观测进展, 并对今后的发展作一简要分析.

关键词 磁重联 磁零点 分形面 零点连线 X 点 X 线

磁重联是因为某种耗散或者电子动力学机制引起磁力线断开并重新联接, 导致等离子体中磁场拓扑形态改变的物理现象, 是等离子体物理中最主要的能量转换和输运过程之一. 它提供了一种将磁场能量快速转化为等离子体动能和热能的有效机制 [1,2]. 磁重联在太阳耀斑、日冕加热和日冕物质抛射、太阳风与磁层的相互作用、磁层亚暴等诸多重要的空间物理过程中起着关键作用, 是影响空间环境、空间天气的重要因素; 也是目前决定下一代磁约束核聚变装置长时间稳态运行的关键问题. 因此, 磁重联研究是空间物理、空间天气学和等离子体物理等领域的主要研究课题之一 [3,4].

目前主流的磁重联理论主要是基于Harris电流片模型及其推广, 如加有导向场的二维三分量模型(即物理量的空间变化是二维的, 但是磁场有三个分量)等. 但是, 数学计算和物理分析都证明Harris电流片模型下形成的磁重联线(一条磁场处处为零的曲线, 一般称为X-线)是结构不稳定的. 任何小的扰动都会把它转变成若干对磁场零点的连线. 而“二维三分量模型”则是在环形磁约束位形下提出的, 隐含了第三维方向的周期边界条件的假设 [5]. 因此, 磁重联从本质上来说是三维的.

除周期边界条件的情形外, 三维磁重联的磁场拓扑位形一般是以磁场零点及其特征线和

收稿日期: 2007-04-11; 接受日期: 2007-04-21

国家自然科学基金(批准号: 40390150, 40504021, 10575018, 40536030, 10603008, 10778613)、国家重大基础研究计划(编号: 2006CB806300)和中国科学院知识创新工程方向性项目(编号: KJ CX2-YW-T04)资助

* E-mail: cjxiao@ourstar.bao.ac.cn

分形面来表征的^[2,6]. 三维磁零点有 A, B, As和Bs等四种, 由该点磁场梯度矩阵的三个特征值和特征矢量来决定. 如果有一个特征值为零时, 三维零点退化为二维 X 点; 当三个特征值均不为零时, 由于磁场散度为零, 即三个特征值之和一定为零, 相应地三个特征值或者两正一负(B 型零点), 或者两负一正(A 型零点). 正特征值对应的特征矢量由零点向外, 负特征值对应的特征矢量指向零点. 两个同指向的特征矢量决定分形面(又称 Σ 面, 或者 Fan, Separatrix); 另一个相反指向的特征矢量决定 γ 线(或者称 Spine 线); 当一个零点与另一零点配对时, 其对应特征值最小的特征矢量相互指向对方, 形成零点连线(Separator, 即两个磁分形面的交线, 建议翻译为“分形线”, 见图 1(b)中紫色的箭头线). 其二维投影即熟知的 X 点, 对应于图 1(a)中的坐标原

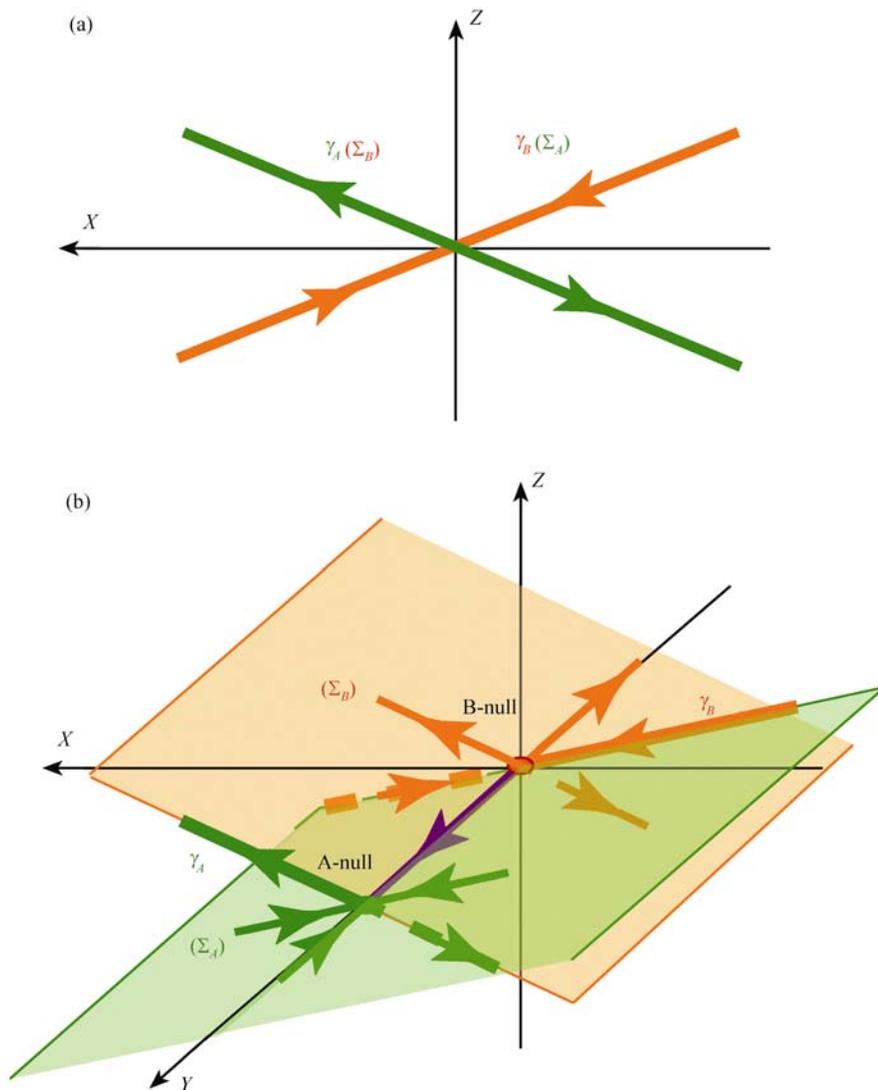


图 1 磁重联的(a)二维结构和(b)三维结构. (b)中绿色零点为 A 型, 两条指向零点的特征线决定分形面 Σ_A , 一条背离零点的特征线决定 γ_A 线; (b) 中红色零点为 B 型, 两条背离零点的特征线决定分形面 Σ_B , 一条指向零点的特征线决定 γ_B 线. A~B 零点对的二维投影即(a)中 X-点

点位置. 如果这种类似“X-点”的 A, B 型零点的 γ 线上有场向电流迭加, 就形成 As, Bs 型零点. 磁场零点及其连线在二维磁重联图像里投影成 X-点(X-point), 而 γ 线及 Σ 面的投影则是 X-点伸出的“臂”(即 separatrix, 本文中译为分形面). 这些零点及其周围的特征线(零点连线及 γ 线)和特征面(分形面)形成不同磁场拓扑区域的分界. 磁重联过程中的磁力线断开和重新联接就发生在这些拓扑分界面、线上. 因此, 磁场零点的存在是三维磁重联的典型特征; 两个磁场零点的连线及其周围的特征线和特征面构成三维磁重联的完整拓扑结构.

尽管三维磁重联的理论模型、特别是运动学与拓扑模型研究在物理、数学的不同领域里已经发展得比较完整, 但这些理论模型是否正确反映了物理世界及其本质, 一直缺少实验与观测结果支持.

磁场零点测量的困难在数学上表现为空间孤立点的测度为零; 在物理上则体现在即使在接近零点的区域, 磁场强度测量的相对误差都趋向无穷大. 幸运的是, 数学上发展的Poincare指数的方法可以用来确定无散矢量场中的孤立奇点的存在. 若记包围点 p 的紧致无边光滑流形 M 到矢量场 V 中的映射为 f , 则点 p 的Poincare指数 P_i 即 f 的定向映射度, 或映射 f 对 $z = f(p)$ 的环绕数^[7]. 具体做法是: 将实验室坐标系(S-空间)中的任意一点 p 以如下方式映射到磁空间(B-空间), 即以 p 点的磁场归一化后的三个分量作为其在B-空间的像点 p' 的三个坐标分量. 如果 p 点是磁场的零点, 则其像点 p' 显然是B-空间的坐标原点. 因此, 若将 p 点邻域中任一足够小的包含 p 点的闭合曲面映射到B-空间, 这个闭合曲面在B-空间所张的立体角的代数和除以 4π 后所得值即为Poincare指数. 如果 p 点是磁场的零点, 则Poincare指数为 ± 1 , 否则为零. Greene首先提出可以用Poincare指数诊断磁零点^[8]. 显然, 磁零点的三维特性要求至少有空间四点同时测量, 因为至少需要不共面的空间四点来确定一个封闭曲面.

由于实验室中等离子体测量的空间分辨率很低, 关于磁重联区三维结构的测量主要依赖对太阳大气的遥测和日地空间中的卫星局地测量. 在太阳大气的磁重联观测方面, 由于到目前只有光球层的有效磁场测量, 色球层以上包括日冕中的磁场只能根据磁荷法、势场或无力场等假设, 从光球磁场外推得到. 从而根据等离子体分布结构或磁力线整体位形来推测磁零点的存在^[9-12]. Zhao等人^[13]则首次引入三维Poincare指数方法, 在基于势场外推和无力场外推得到的日冕磁场中诊断出有磁零点的存在.

目前三维磁场结构的直接观测只能依赖欧洲空间局Cluster卫星^[14]提供的空间四点观测手段. 利用Cluster卫星四点观测数据, 基于Poincare指数的磁零点诊断方法^[8,13], Xiao等在分析Cluster卫星2001年9月15日穿越地球磁尾等离子体片期间的探测数据时, 基于二维霍尔磁重联图像发现了一个磁重联事件^[15], 并且在此重联区中心区域发现了Bs型磁零点存在的证据^[16]. 这是首次以观测数据为基础, 证实自然界中磁零点的存在. 进一步的分析表明, Bs型磁零点的螺旋结构的尺度大约为离子惯性长度(即霍尔效应的特征尺度), 从而揭示霍尔效应可能在三维磁重联中起重要作用.

在2001年10月1日Cluster穿越磁尾等离子体片期间, 观测到另一个典型的磁重联事件^[17-21]. Xiao等^{1,2)}用Poincare方法在此事件中不但找到了其余三种类型(A, B, As)的磁零点, 而且诊断出A-B零点对和B-As零点对, 并得到A-B零点对具有图1(b)所示的拓扑结构. 综合交叉

1) Xiao C J, Wang X G, Pu Z Y, et al., Satellite observations of separator line geometry of three-dimensional magnetic reconnection, Nature Physics, 2007 (under review)

2) 肖池阶, 王晓钢, 濮祖荫, 等. 关于磁重联区三维磁零点的卫星观测研究, 北京大学学报, 2007 (待发表)

小波分析, 线性插值等多种分析方法, 还发现在重联电流片最中心区的三维分形线(零点连线)上存在低杂波频率的振荡, 并测出了振荡的偏振方向与色散关系. 该振荡在平行分形线方向的波长大约为离子惯性长度, 而在垂直分形线方向的波长约为电子惯性长度(即电子趋肤深度). 这一观测与粒子模拟看到低杂波频率的振荡主要在重联电流片的中心区发展起来的结果符合得很好 [22]. 而前人只在重联区边缘观测到低杂波频率的振荡, 并且否定重联电流片中心区有低杂波频率的振荡存在 [23]. 事实上重联区边缘的磁分形面在磁场拓扑上与分形线具有类似的性质(分形线即为两个磁分形面的交线)——物理上均属于电子惯性区, 而且这两个区域都观测到明显的电子密度下降. 而这种下降正是激发低杂波不稳定性的必要条件. 因此在这方面的深入研究有助于进一步发展关于磁重联主要物理过程、特别是有关的电子动力学过程的新的理论模型.

磁重联的三维磁场结构以及相关物理现象是日地空间多时空尺度物理过程的典型问题, 也是卫星空间观测和等离子体物理研究相互推动的一个重要领域; 进一步的研究将有助于更深入地了解日地空间一些重要等离子体物理问题, 如电子惯性区的波现象, 以及这些结果对重联率及对磁层物理问题如磁层与行星际磁场耦合与相互作用、亚暴有关的磁尾重联过程的触发机制的影响等.

以上介绍的工作只是三维磁重联观测研究的开始. 对磁重联的三维拓扑结构以及相关电子动力学问题深入研究才能促进理论模型的进一步发展. 特别是霍尔效应的三维特征, 磁层中磁零点的产生、分布规律, 分形面及其周围的流场位形等等, 以及对重联区各种波动的激发与传播等都需要进一步探讨. 这些都需要进一步通过卫星观测与数值模拟发展新的理论.

参 考 文 献

- 1 王水, 李罗权. 磁场重联. 合肥: 安徽教育出版社, 1998
- 2 Priest E, Forbes T. Magnetic Reconnection-MHD Theory and Applications, Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 3 McPherron R L. Physical processes producing magnetospheric substorms, In: Jacobs J, eds. Geomagnetism, London: Academic Press, 1991. 593—739
- 4 NASA Office of Space Science. Sun-Earth Connection Roadmap: Strategic Planning for the Years 2000-2020, Washington, DC: NASA, 1997
- 5 Furth P H, Killeen J, Rosenbluth M N. Finite-resistivity instabilities of a sheet pinch. Phys Fluids, 1963, 6(4): 459—484
- 6 Lau Y-T, Finn J M. Three-dimensional kinematic reconnection in the presence of field nulls and closed field lines. Astrophys J, 1990, 350: 672—691 [DOI]
- 7 张筑生. 微分拓扑讲义. 北京: 北京大学出版社, 1996
- 8 Greene J M. Locating three-dimensional roots by a bisection method. J Comp Phys, 1992, 98(2): 194—198 [DOI]
- 9 Filippov B. Observation of a 3D magnetic null point in the solar corona. Sol Phys, 1999, 185: 297—309 [DOI]
- 10 Antiochos S K. The magnetic topology of solar eruptions. Astrophys J, 1998, 502: L181—L184 [DOI]
- 11 Aulanier G, DeLuca E E, Antiochos S K, et al. The topology and evolution of the Bastille day flare. Astrophys J, 2000, 540: 1126—1146 [DOI]
- 12 Fletcher L, Metcalf T R, Alexander D, et al. Evidence for the flare trigger site and three-dimensional reconnection in multi-wavelength observations of a solar flare. Astrophys J, 2001, 554: 451—463 [DOI]
- 13 Zhao H, Wang J X, Zhang J, et al. A new method of identifying 3D null points in solar vector magnetic fields. Chinese J Astron & Astrophys, 2005, 5(5): 443—447 [DOI]
- 14 Escoubet C P, Schmidt R, Goldstein M L. Cluster – Science and Mission Overview. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt R, eds. The Cluster and Phoenix Missions, Dordrecht: Kluwer Acad Publishers. 1997. 11—32
- 15 Xiao C J, Pu Z Y, Wang X G, et al. Cluster measurements of fast magnetic reconnection in the magnetotail. Geophys Rev Lett, 34, 2007, L01101, doi:10.1029/2006GL028006

- 16 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. *Nature Physics*, 2006, 2(7): 478—483 [\[DOI\]](#)
- 17 Ronuv A, Nakamura R, Baumjohann W, et al. Current sheet structure near magnetic *X*-line observed by cluster. *Geophys Res Lett*, 2003, 30, doi:10.1029/2002GL016730
- 18 Wilber M, Lee E, Parks G K, et al. Cluster observations of velocity space-restricted ion distributions near the plasma sheet. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, doi:10.1029/2004GL020265
- 19 Cattell C, Dombeck J, Wygant J, et al. Cluster observations of electron holes in association with magnetotail reconnection and comparison to simulations. *J Geophys Res*, 2004, 110, doi:10.1029/2004JA010519
- 20 Wygant J R, Cattell C A, Lysak R, et al. Cluster observations of an intense normal component of the electric field at a thin reconnecting current sheet in the tail and its role in the shock-like acceleration of the ion fluid into the separatrix region. *J Geophys Res*, 2005, 110, A09206, doi:10.1029/2004JA010708
- 21 Imada S, Nakamura R, Daly P W, et al. Energetic electron acceleration in the downstream reconnection outflow region. *J Geophys Res*, 2007, 112, A03202, doi:10.1029/2006JA011847
- 22 Scholer M, Sidorenko I, Jaroschek C H et al. Onset of collisionless magnetic reconnection in thin current sheets: Three-dimensional particle simulations. *Phys Plasmas*, 2003, 10(9): 3521—3527 [\[DOI\]](#)
- 23 Bale S D, Mozer F S, Phan T. Observation of lower hybrid drift instability in the diffusion region at a reconnecting magnetopause. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(24), 2180, doi:10.1029/2002GL016113