

一种寻找太空中磁零点的新方法

磁重联是自然界中一种将磁场能量转换为粒子动能和热能的基本等离子体物理过程。它也被认为是造成恒星耀斑、日冕物质抛射、伽马射线暴、磁层亚暴、银河系中心高能辐射、以及核聚变中的扰动等一系列爆发性现象的直接原因。在三维空间，磁重联通常情况下发生在磁场为零的地方(即磁零点)。在磁零点处，粒子是非磁化的，因而只受到电场力的作用。研究磁零点的性质和拓扑结构对理解磁重联中的能量转换和离子加速过程具有十分重要的意义。

在理论和模拟工作中，磁零点的性质和拓扑结构已经研究得比较清楚了。但是在卫星实地测量中，由于卫星的数量十分有限(通常情况下只有一颗或者四颗卫星)，磁零点的性质以及拓扑结构很难被彻底了解清楚。为了寻找空间中的磁零点，以前一般使用“庞加莱指数”(PI)。这种方法利用了四颗卫星的观测数据计算指数 PI，当 $PI=\pm 1$ 时，说明磁零点在卫星组成的四面体结构内部，而当 $PI=0$ 时，则说明磁零点在四面体的外部。这种方法具有很多的局限性，包括：(1) 它会错误判断 PI 的正负，从而错误判断磁零点类型。(2) 它对数据的精度有很高的要求，低精度的磁场数据中很难发现零点。(3) 它会受到仪器测量误差的影响(比如磁场 Z 分量的补偿)。一个很小的变化就能导致完全不同的计算结果。(4) 它还会受到卫星间距的影响。当四颗卫星距离较近时，该方法很难找到磁零点。只有当卫星间隔足够大时，该方法才能发现零点。(5) 它也不能发现四面体之外的磁零点以及精确求出磁零点的位置。

考虑到以上这些缺陷以及“庞加莱指数”不能重构磁零点拓扑位形的事实，以北航国际交叉科学研究院符慧山教授为首的研究团队花了 3 年时间开发出了一种新的方法——命名为 FOTE。该方法不仅能够克服“庞加莱指数”的多种缺陷(如上面所说的数据精度、仪器误差和卫星间距)，还能够确定三维磁零点的类型，以及判断这些零点是否具有二维的特征。另外，它还能重构磁场的拓扑位形。团队成员利用大量 3D 动力论模拟数据反复验证了 FOTE 在磁力点位置判断和磁场位型重构方面的准确性，得出结论：(1) 对于孤立磁零点，当卫星间距小于 1 个离子惯性尺度，而同时卫星和零点之间的距离小于 0.5 个离子惯性尺度时，该方法很准确。(2) 对于零点对，该方法同样非常准确，除了在磁场分界线上(分界线上的磁场是非线性的)。研究团队定义了一个参数来确定 FOTE 方法的准确性。该参数越小，结果就越准确。利用 FOTE 方法，团队成员重构了辐射状磁零点的磁场拓扑结构(图 1)和螺旋状磁零点的拓扑结构(图 2)，发现重构的结果和理论预测是一致的。

这些成果已经作为封面文章发表在地球物理学著名期刊 *Journal of Geophysical Research* (JGR)上(图 3)。它对美国宇航局(NASA)今年发射的 MMS 卫星计划非常有用，尤其是对研究电子尺度的磁重联很有用。

符慧山, 宇航学院, 教授, 青年千人, *E-mail: hsfu@buaa.edu.cn*

参考文献

[1]Fu, H. S., et al. (2015), How to find magnetic nulls and reconstruct field topology with MMS data?. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 3758–3782. doi: 10.1002/2015JA021082.

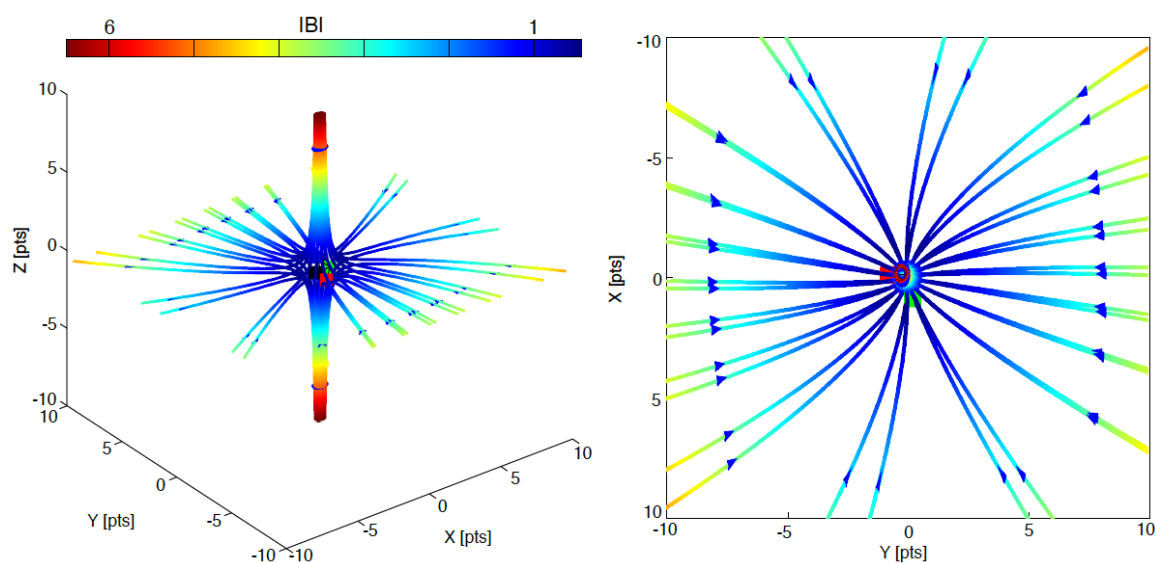


图 1 用 FOTE 方法重构的辐射状磁零点, 3-D (左) 和 2-D (右)

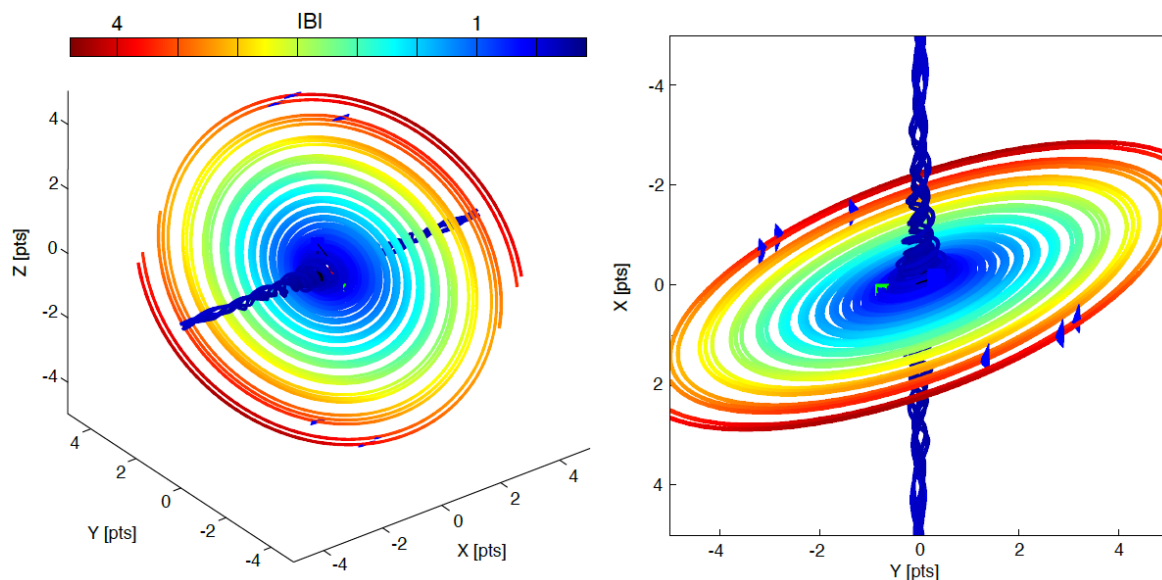


图 2 用 FOTE 方法重构的螺旋状磁零点, 3-D (左) 和 2-D (右)

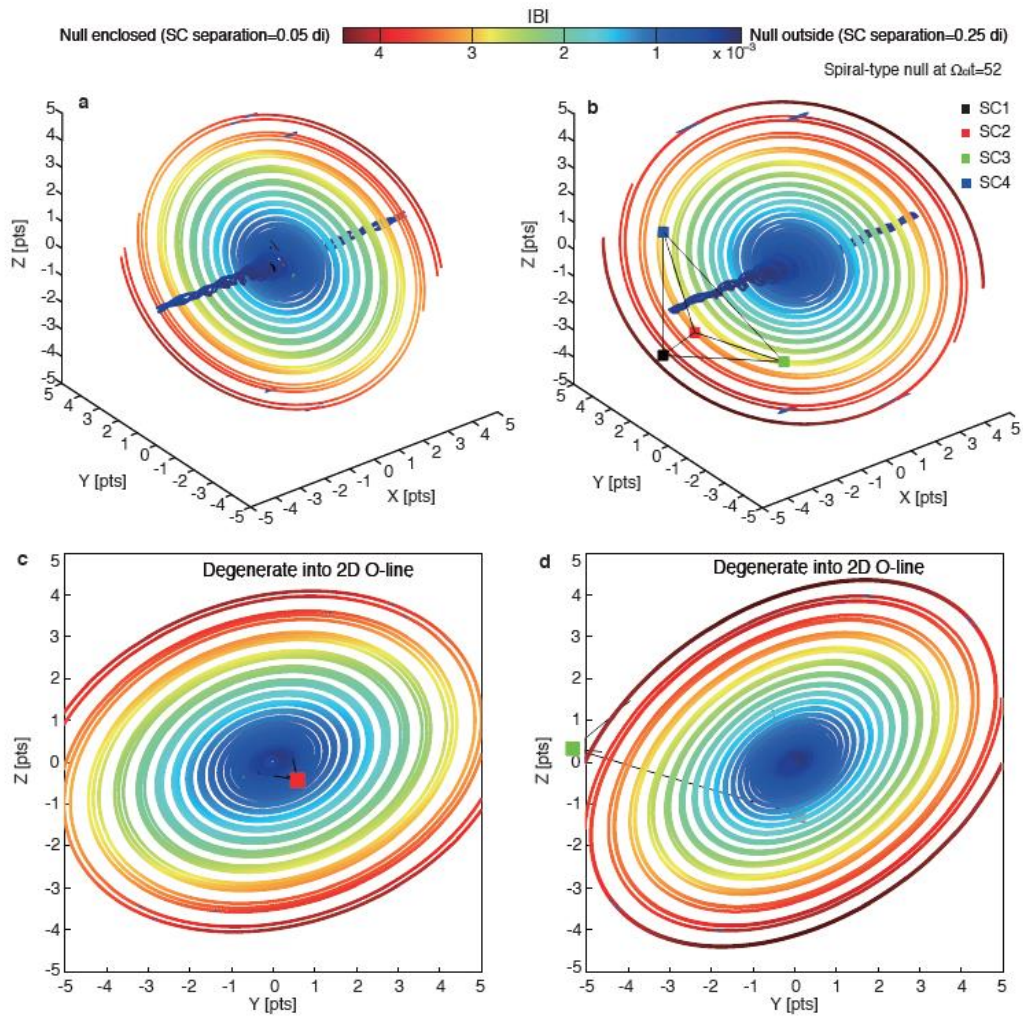


图 3 JGR (Volume 120, Issue 5) 封面