

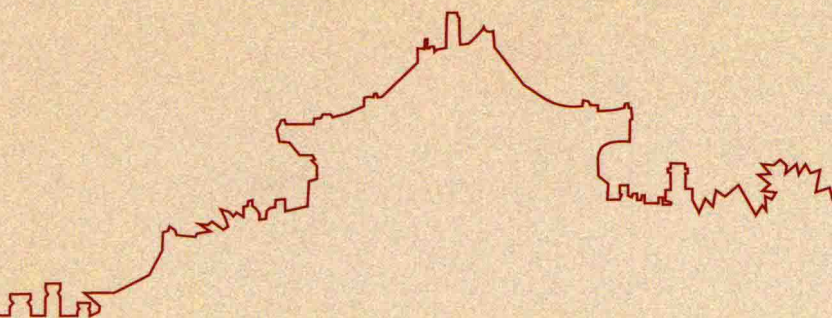
武汉大学优秀博士学位论文文库



磁场重联与等离子体湍流的 卫星观测研究

Satellite Observations of Magnetic Reconnection and
Turbulence in Space Plasma

黄狮勇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

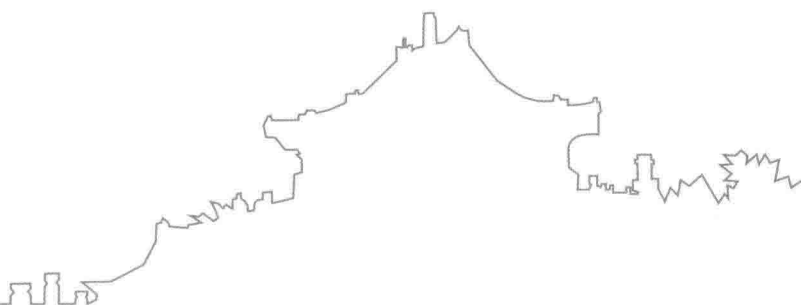
武汉大学优秀博士学位论文文库



磁场重联与等离子体湍流的 卫星观测研究

Satellite Observations of Magnetic Reconnection and
Turbulence in Space Plasma

黄狮勇 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

磁场重联与等离子体湍流的卫星观测研究/黄狮勇著. —武汉: 武汉大学出版社, 2016. 3

武汉大学优秀博士学位论文文库

ISBN 978-7-307-17254-8

I. 磁… II. 黄… III. ①等离子体—磁场—人造卫星—地球磁层—观测—研究 ②等离子体湍流—人造卫星—地球磁层—观测—研究 IV. ①P171.3
②P353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 281479 号

责任编辑: 王金龙 责任校对: 李孟潇 版式设计: 马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉市洪林印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 12.75 字数: 182 千字 插页: 2

版次: 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17254-8 定价: 30.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

武汉大学
优秀博士学位论文文库
编委会

主 任 李晓红

副主任 韩 进 舒红兵 李 斐

委 员 (按姓氏笔画为序)

马费成	邓大松	边 专	刘正猷	刘耀林
杜青钢	李义天	李建成	何光存	陈 化
陈传夫	陈柏超	冻国栋	易 帆	罗以澄
周 翔	周叶中	周创兵	顾海良	徐礼华
郭齐勇	郭德银	黄从新	龚健雅	谢丹阳

总 序

创新是一个民族进步的灵魂，也是中国未来发展的核心驱动力。研究生教育作为教育的最高层次，在培养创新人才中具有决定性意义，是国家核心竞争力的重要支撑，是提升国家软实力的重要依托，也是国家综合国力和科学文化水平的重要标志。

武汉大学是一所崇尚学术、自由探索、追求卓越的大学。美丽的珞珈山水不仅可以诗意栖居，更可以陶冶性情、激发灵感。更为重要的是，这里名师荟萃、英才云集，一批又一批优秀学人在这里砥砺学术、传播真理、探索新知。一流的教育资源，先进的教育制度，为优秀博士学位论文的产生提供了肥沃的土壤和适宜的气候条件。

致力于建设高水平的研究型大学，武汉大学素来重视研究生培养，是我国首批成立有研究生院的大学之一，不仅为国家培育了一大批高层次拔尖创新人才，而且产出了一大批高水平科研成果。近年来，学校明确将“质量是生命线”和“创新是主旋律”作为指导研究生教育工作的基本方针，在稳定研究生教育规模的同时，不断推进和深化研究生教育教学改革，使学校的研究生教育质量和知名度不断提升。

博士研究生教育位于研究生教育的最顶端，博士研究生也是学校科学研究的重要力量。一大批优秀博士研究生，在他们学术创作最激情的时期，来到珞珈山下、东湖之滨。珞珈山的浑厚，奠定了他们学术研究的坚实基础；东湖水的灵动，激发了他们学术创新的无限灵感。在每一篇优秀博士学位论文的背后，都有博士研究生们刻苦钻研的身影，更有他们的导师的辛勤汗水。年轻的学者们，犹如在海边拾贝，面对知识与真理的浩瀚海洋，他们在导师的循循善

诱下，细心找寻着、收集着一片片靓丽的贝壳，最终把它们连成一串串闪闪夺目的项链。阳光下的汗水，是他们砥砺创新的注脚；面向太阳的远方，是他们奔跑的方向；导师们的悉心指点，则是他们最值得依赖的臂膀！

博士学位论文是博士生学习活动和研究工作的主要成果，也是学校研究生教育质量的凝结，具有很强的学术性、创造性、规范性和专业性。博士学位论文是一个学者特别是年轻学者踏进学术之门的标志，很多博士学位论文开辟了学术领域的新思想、新观念、新视阈和新境界。

据统计，近几年我校博士研究生所发表的高质量论文占全校高水平论文的一半以上。至今，武汉大学已经培育出 18 篇“全国百篇优秀博士学位论文”，还有数十篇论文获“全国百篇优秀博士学位论文提名奖”，数百篇论文被评为“湖北省优秀博士学位论文”。优秀博士结出的累累硕果，无疑应该为我们好好珍藏，装入思想的宝库，供后学者慢慢汲取其养分，吸收其精华。编辑出版优秀博士学位论文文库，即是这一工作的具体表现。这项工作既是一种文化积累，又能助推这批青年学者更快地成长，更可以为后来者提供一种可资借鉴的范式亦或努力的方向，以鼓励他们勤于学习，善于思考，勇于创新，争取产生数量更多、创新性更强的博士学位论文。

武汉大学即将迎来双甲华诞，学校编辑出版该文库，不仅仅是为百廿武大增光添彩，更重要的是，当岁月无声地滑过 120 个春秋，当我们正大踏步地迈向前方时，我们有必要回首来时的路，我们有必要清晰地审视我们走过的每一个脚印。因为，铭记过去，才能开拓未来。武汉大学深厚的历史底蕴，不仅在于珞珈山的一草一木，也不仅仅在于屋檐上那一片片琉璃瓦，更在于珞珈山下的每一位学者和学生。而本文库收录的每一篇优秀博士学位论文，无疑又给珞珈山注入了新鲜的活力。不知不觉地，你看那珞珈山上的树木，仿佛又茂盛了许多！

李晓红

2013 年 10 月于武昌珞珈山

摘 要

日地系统中绝大部分区域都充满了空间等离子体, 磁场重联和湍流是空间等离子体的两个基本物理过程。磁场重联可以在短时间内将磁能转化为等离子体的动能和热能, 并改变磁场的拓扑结构, 被认为与许多爆发性现象有关, 比如太阳耀斑和磁层亚暴等。等离子体湍流是天体物理中普遍存在的现象, 湍流可以对等离子体的传输和能量耗散过程起重要作用, 被普遍认为是太阳风加热的重要能量来源, 也是影响高能粒子传输效应的重要因素。磁场重联与湍流有密切的联系, 磁场重联可以驱动湍流的产生和发展, 而湍流可在重联过程中起耗散作用, 且能形成适宜磁场重联发生的磁场拓扑位形和等离子体条件, 诱发磁场重联。对磁场重联和湍流的研究将帮助我们了解和认识日地系统中发生的物理过程, 为空间天气的建模和准确预报奠定基础。

研究磁场重联的动力学过程和结构是理解磁场重联的关键。在磁场重联区有丰富的波动现象和很强的波粒相互作用, 在不同的重联区哪种波动占主导, 这些波动对重联有什么作用, 是触发重联还是调制重联? 高能电子是磁场重联的重要产物, 在重联过程中, 电子是在哪些区域及以何种加速机制被加速的? 与重联相关的结构有什么样的性质, 对重联又有什么样的作用? 偶极化锋面被认为是重联新的区域, 它具有什么样的动力学结构和波动特征, 尺度如何? 空间等离子体中普遍存在湍流现象, 与重联相关的湍流有什么样的性质, 湍流对重联过程起着什么样的作用? 湍流在离子尺度耗散区的性质是怎样的? 湍流谱是否能够达到电子尺度? 如果可以, 那么在电子尺度是否存在频谱的拐点? 电子尺度以下的频谱是满足指数谱还是幂谱? 在电子尺度湍流耗散以何种方式进行? 等等。这些问

题都需要我们去解答。基于 Cluster 卫星观测数据,本研究尝试对以上的一系列问题进行了分析研究。

第 1 章是文献综述,介绍了日地系统中的太阳风、地球磁鞘和磁尾,概述了磁场重联和等离子体湍流的研究现状,并提出一些需要解决的问题。

第 2 章是卫星、探测仪器和分析方法的介绍,主要介绍了 Cluster 卫星及其搭载的仪器,对本研究所使用到的数据分析方法进行简单的描述。

第 3 章是我们对磁场重联动力学过程和结构的研究。首先分析了高 β 弱导向场重联扩散区的波动特性:通过分析 Cluster 卫星在磁场重联扩散区观测到的波动,发现在高 β 弱导向场的扩散区内,波矢在低频范围具有很强的斜向传播特性,实测的色散关系非常接近由热双流体模型和动力学理论得到的 Alfvén-whistler 模式,证实了之前理论所预测的在扩散区该模式波动的存在。然后,研究了磁场重联过程中电子加速:我们分析了在重联扩散区里两个磁岛和薄电流片的观测结果,在磁岛的核心区域存在密度耗空和很强的电流。高能电子仅仅在薄电流片和第二个磁岛中被观测到,最大的通量出现在第二个磁岛的核心区域。经过讨论,我们认为高能电子可能是首先在薄电流片中被加速,然后在磁岛中被束缚后进一步通过 betatron 加速和费米加速机制被加速;利用 Cluster 卫星在向阳侧的观测数据,我们首次在 ICME 的鞘区发现了一个有导向场非对称的重联事件的喷流区,喷流区的观测特征与快速重联理论预期和先前的观测一致。我们在高密度分界线一侧观测到高能电子通量的增强,能级高达 400keV。最后,研究与磁场重联相关的结构,包括通量管和偶极化锋面。我们通过分析在重联区两个连续出现的通量管中的核心场,认为通量管核心场是由之前存在的当地背景场 B_y 压缩形成,具有与背景场 B_y 相同的方向;研究了在磁尾观测到的多个地向传播的偶极化锋面,分析了锋面的动力学结构和波动特性,发现锋面是一个薄电流片,具有离子回旋尺度,锋面处能量主要通过电子耗散掉,锋面上有强电场且伴随有很强的电流增强。在锋面区域发现有很强的波动,包括在离子回旋频率附近的低频波动

和低频哨声波,并分析了这些波动的激发机制和对锋面的影响。根据偶极化锋面的形态特征,我们分析了三个典型锋面事件,得到锋面在晨昏方向的尺度,发现三个事件的晨昏尺度约为 $3.2R_E$,远大于 BBF 的晨昏尺度和之前估算的一个 DF 事件的尺度;报道了在近地重联区域附近陡峭的负偶极化锋面的卫星实地观测。该锋面在 B_z 快速降低前有一个短暂的生长,和地向流中正偶极化锋面刚好相反。我们详细分析了其结构、波动和粒子特征。

第 4 章是关于在不同区域和不同尺度的湍流研究。首先我们研究了较大导向场的高速重联 jet 的湍流特征,发现磁场频谱在低频惯性区满足 Kolmogorov 谱 $f^{-5/3}$,在耗散区是陡峭的频谱 $f^{-2.8}$ 。湍流在小于质子尺度是间歇性的。湍流在波矢空间是准 2D 的,其实测的色散关系满足通过 Vlasov 动力学理论计算出来的 Alfvén-whistler 模。由湍流提供的反常电阻产生的电场接近典型的磁尾重联电场,且远大于没有导向场时估测的电场。然后,我们研究了太阳风湍流在离子尺度的特征。统计结果表明,湍流在波矢空间是强各向异性的,Alfvén-whistler 波模在太阳风湍流中占主导作用。从 k 频谱中发现在离子回旋尺度附近有明显的拐点,在惯性区和耗散区之间存在一个转换区。最后,我们利用 Cluster 卫星 SCM 仪器测量的高分辨的数据研究电子尺度湍流。我们选取了 10 年 SCM 仪器在 BM 时的太阳风事件,统计结果发现大量的频谱在电子回旋半径的 Doppler 平移频率 f_{pe} 有明显的拐点。幂谱拟合结果表明,在 f_{pe} 以下谱指数有比较窄的分布,且中心约在 -2.8 附近,而在频谱拐点之上,谱指数的分布更广,峰值约在 -3.8 处,符合理论和模拟的预测;我们选取了 6 年的磁鞘观测事件,对磁鞘电子尺度湍流谱进行了统计研究,结果清晰地证实了地球磁鞘湍流在电子回旋尺度存在清晰的拐点,且在电子回旋尺度之下有新的幂谱,谱指数约为 -5.24。这些统计工作揭示了湍流在电子尺度普遍特性。结合观测到的比较广的谱指数分布以及先前的观测,表明在电子尺度湍流可能不存在普适性频谱。

第 5 章是对本书的总结和对将来工作的展望。

Abstract

There are full of space plasma in the solar-terrestrial environment. Magnetic reconnection and turbulence are two basic physical plasma processes. Magnetic reconnection can transfer magnetic energy into plasma thermal and kinetic energy in a short time, and changes the topology of magnetic field, thus it is suggested as being related to many explosive phenomena, such as solar flare, magnetosphere substorm. Turbulence is a universal phenomenon in the astrophysical physics, and plays an important role in the plasma transport and energy dissipation. Turbulence is widely believed as the important source of solar wind heating, and important factor that affect the transport of energetic particles. There is close relation between magnetic reconnection and turbulence. Magnetic reconnection can drive turbulence and lead it full development, while turbulence play dissipation role during magnetic reconnection, and can form the topology of magnetic field and plasma condition to trigger magnetic reconnection. The study of magnetic reconnection and turbulence can help us to understand the different physical processes in solar-terrestrial environment, and lay the foundation for the modeling and prediction in space weather.

The study of the dynamic process and structure of magnetic reconnection is critical to understand reconnection. There are rich wave activities, and wave-particle interaction in the reconnection region. Which waves dominate in the different reconnection region? What's role these waves play in reconnection, trigger or mediate the reconnection process? Energetic electrons are the important offspring of magnetic

reconnection. Where and how the electrons are accelerated during reconnection? What are the properties of related structures, and what the roles that they play in the reconnection? Dipolarization front is believed as the new regime of reconnection. What are kinetic structures, wave properties, and scales of dipolarization front? Turbulence is a universal phenomenon in space plasma. What are properties of turbulence that is related to magnetic reconnection? What's the role that turbulence plays in the reconnection process? What the properties at the ion scale and electron scale turbulence? Are there breakpoints at the electron scales? Below the electron scales, what's the scaling of spectra? Is it exponential or power law spectra? What's the mechanism that energy dissipates at the electron scale? All these questions need us to answer. Based on Cluster data, we investigate some questions as shown above in this book.

In the first chapter, we introduce the solar wind, terrestrial magnetosheath and magnetotail in the solar-terrestrial environment, summarize the research advancements related to magnetic reconnection and turbulence, and point out the remaining questions to be resolved.

In the second chapter, we introduce the instruments and analysis methods. We give a reference to Cluster spacecraft and onboard instruments, and describe the analysis methods in this thesis.

In the third chapter, we study the dynamic process and related structure of magnetic reconnection. Firstly, we report the wave properties in reconnection diffusion region with high β and weak guide field. We find the wave vectors are high perpendicular to the ambient magnetic field, and the observed dispersion relation is close to Alfvén-whistler mode that is deduced from hot two fluid models and kinetic theories, which confirms the theory predication, in the high β and weak guide field reconnection diffusion region. Secondly, we study the electron acceleration during magnetic reconnection. We analyze two magnetic islands and thin current sheet, where density depletions are in the core region of the islands and intense currents therein. Energetic

electrons are only observed in the thin current sheet and in the second magnetic island. The greatest enhancement is near the core of the second island. These energetic electrons may have been first accelerated in the thin current sheet, and then trapped and further accelerated in the magnetic island by betatron and Fermi acceleration. Using Cluster observations, we identify an asymmetric reconnection exhaust with a moderate guide field in the sheath of ICME. The features of reconnection exhaust are consistent with fast reconnection predictions and previous observations. We observe enhancement of energetic electron fluxes with energy up to 400 keV at one pair of separatrices in the higher density hemisphere. Finally, we show the investigation of the structure related to reconnection, including flux rope and dipolarization front. We analyze two consecutive flux ropes in the same reconnection diffusion region, and suggest that the core field inside flux rope is formed by the compression of such preexisting local ambient magnetic field B_y , has the same direction of local B_y . We study multiple dipolarization fronts (DFs) observed by the Cluster spacecraft in the magnetotail, and investigate kinetic structures and wave properties. It is found that DF is thin current sheet with the scale of ion gyroradius. The magnetic energy is mainly dissipated by electrons in the DF layer. There are intense electric field and strong current in the DFs. The wave activities include waves around ion gyrofrequency and high frequency whistler wave. We discuss generation mechanism of these waves. According to the DF shape, we analyze three typical DF events, and find the dawn-dusk scale with value of $>3.2R_E$, which are much larger than the scale of BBF and the scale of DF that is estimated by Nakamura et al. (2005). In addition, we report the tailward propagating negative DF near a reconnection region. This DF shows a transient small positive increase in the B_z component before it increases sharply, opposite to the positive DF in the earthward flow. We analyzed the structures, waves and particles around this DF.

In the fourth chapter, we report the study of turbulence in different

region and different scales. Firstly, we show the observations of turbulence in the high speed reconnection jet in the presence of large guide field. We found that magnetic spectrum follows Kolmogorov spectrum $f^{-5/3}$ in the low frequency, while in the dissipation range, the spectrum has steeper scaling $f^{-2.8}$. The turbulence is intermittent below the proton scale. The wave vectors of turbulence are quasi-2D in the wave vector space, and the observed dispersion relation is consistent with Alfvén-whistler mode deduced from Vlasov kinetic theory. The electric field due to the anomalous resistivity provide by turbulence is close to the typical reconnection electric field in the magnetotail, which is much larger than the case without guide field. Secondly, we make statistical study solar wind turbulence at ion scales. The result proves that the turbulence is strongly anisotropic in wave vector space within universal solar wind condition. The Alfvén-whistler wave mode is dominant in the solar wind turbulence. There is a clear breakpoint around ion gyroradius scale in the k spectra. A transition range is between the inertial and dissipation range. Thirdly, we use the Cluster-Search Coil (SCM) data to study the electron scale turbulence. We choose ten years solar wind data when SCM are in the burst mode, and the statistical results show that there are breakpoints in the Doppler shifted frequency f_{ρ_e} of electron gyroradius. Below f_{ρ_e} , the power laws have narrow distribution, and the center is around ~ -2.8 , while above f_{ρ_e} , the power laws have wide distribution with the peak around -3.8 , consistent with the previous observations and theory predication. We select magnetosheath events among six years data, and investigate magnetosheath turbulence at the electron scale statistically. The results clearly prove that there are clear breakpoints at the electron gyroradius in the magnetosheath turbulence. Below the electron gyroradius, there is a new power law spectrum with slope ~ -5.24 . All these work show the universal properties of turbulence at the ion scale and electron scale. Combined earlier observations that showed exponential-like scaling with the reported wide

distribution of the slopes here, it indicates that the physics of the electron scales is possibly not universal.

In the seventh chapter, we conclude the work in this book, and make an outlook for future work.

Keywords: Magnetic Reconnection, Turbulence, Electron Acceleration, Magnetic Island, Dipolarization Front

目 录

引 言	1
第 1 章 日地系统介绍, 磁场重联和等离子体湍流的研究概述	5
1.1 日地系统介绍	5
1.1.1 太阳风	6
1.1.2 地球磁鞘	8
1.1.3 地球磁尾	9
1.2 磁场重联的研究现状	11
1.2.1 磁场重联的基本概念	11
1.2.2 空间等离子体中磁场重联的观测	13
1.2.3 磁场重联与波动的耦合	16
1.2.4 磁场重联过程中的粒子加速	19
1.2.5 磁场重联相关结构简介	20
1.3 空间等离子体中湍流研究简述	25
1.3.1 湍流研究概述	25
1.3.2 湍流在离子尺度的研究	25
1.3.3 湍流在电子尺度的研究	27
1.3.4 磁场重联与湍流	28
1.4 磁场重联和等离子体湍流需要解决的一些问题	29
第 2 章 卫星仪器及观测方法	31
2.1 Cluster 卫星	31
2.1.1 电磁场探测仪器	32
2.1.2 等离子体探测仪器	33

2.1.3 波动探测仪器	34
2.2 数据分析方法	35
2.2.1 MVA 方法	35
2.2.2 Timing 方法	36
2.2.3 Curlometer 方法	37
2.2.4 k -filtering 方法	37
第3章 磁场重联动力学过程和结构的研究	40
3.1 重联区波动特征观测	41
3.2 磁场重联过程中电子加速初探	52
3.2.1 磁尾磁场重联扩散区的电子加速观测	53
3.2.2 ICME 鞘区重联喷流区高能电子观测	61
3.3 磁场重联相关结构的观测研究	67
3.3.1 重联区多磁通量管观测	69
3.3.2 偶极化锋面的特性研究	76
3.4 本章小结	101
第4章 空间等离子体湍流研究	104
4.1 重联高速流的湍流特性初探	105
4.2 太阳风离子和电子尺度湍流统计分析	113
4.2.1 太阳风离子尺度湍流统计分析	115
4.2.2 太阳风电子尺度湍流统计分析	133
4.3 磁鞘电子尺度湍流观测分析	146
4.4 本章小结	152
第5章 研究结论与展望	155
5.1 研究结论	155
5.2 研究展望	157
参考文献	159
致 谢	185

引 言

日地系统主要包括太阳上层大气、日地行星际空间、地球磁层、地球电离层和地球中高层大气等,除地球中层大气外,其他区域都充满了空间等离子体。日地系统是一个复杂系统,包含各种等离子体物理过程,如磁场重联、湍流、离子加速加热等,涉及多个时间和空间尺度,不同的空间区域之间是相互联系的,在不同空间区域内发生的各种复杂现象,都是一些共同的等离子体过程起主导作用,并有着共同的基本规律。日地系统中许多活动对人类生活都有重大影响,比如磁暴引发的高能粒子进入电离层后,可以极大地改变电离层特性,影响电波通讯,同时,产生的高能电子可能损坏近地轨道上的卫星和威胁宇航员的安全。

欧洲空间局于 2000 年发射的 Cluster 4 颗卫星,主要目标是探测和研究近地空间环境的各种等离子体过程,比如磁层、磁鞘、磁尾和太阳风,它在空间中形成四面体结构,而且四颗卫星之间的距离可根据科学研究的要求进行调控,从几十公里(小于离子惯性长度)到近 2 个 Re (磁流体力学尺度)。卫星搭载了测量电磁场、波动和等离子体的仪器,可以提供高精度的电场、磁场、波动和等离子体数据。通过 Cluster 4 颗卫星可以分辨空间环境的三维尺度结构,可以较好地地区分物理现象的空间变化和时间演化,实现对电流和磁场梯度以及曲率的实地测量。本研究是基于 Cluster 卫星的观测数据进行的。

磁场重联和湍流是空间等离子体中的两个基本物理过程。对磁场重联和湍流的研究有利于帮助我们了解和认识日地系统中的各个物理过程,为空间天气的建模和准确预报奠定基础。

磁场重联可以在短时间内将磁能转化为等离子体的动能和热