

基于多点卫星方法观测磁层顶磁重联现象

杨程, 王子鹏, 刘俊杰, 汪建行, 李思涵

摘要

磁重联作为等离子体基本物理过程广泛存在于各种空间中。由于之前的卫星时间和空间分辨率的限制, 对于磁重联所发生的小尺度的扩散区内的探测存在困难。本研究基于四颗 MMS 卫星在地球磁层中的观测数据, 我们尝试更全面地揭示磁重联扩散区的特征, 深入探讨了磁重联过程的物理机制和动力学行为。通过分析磁场、速度、密度、电场、电流等多种物理指标的变化, 尝试推断磁重联过程中的重要动态特征。研究发现了磁重联扩散区双极性磁场结构、离子等离子体速度的下降、高速电子出流和电子尺度电流片等现象, 为磁重联过程提供了重要线索。此外, 我们还探讨了电场对等离子体运动的影响、电流密度的分布情况以及能谱分布的特征。

关键词

磁重联过程; MMS 卫星; 地球磁层; 磁层顶

引言

磁重联作为一种能量转化过程, 在空间、天文和实验室等离子体中广泛发生, 对于等离子体物理的研究至关重要。特别是在地球磁层顶区域, 太阳风与地球磁场的相互作用引发了磁重联现象, 这一过程被认为是空间物理研究中的重要课题, 对于理解空间天气和物理相关理论具有重要意义。磁层顶是太阳风和磁层之间的交界区域, 承载着太阳风质量、动量和能量向地球磁层输送的关键功能。为了深入研究磁层顶磁重联过程及其衍生结构, 本项目采用了多点卫星观测方法。通过分析 NASA 于 2015 年发射的 MMS 卫星高精度数据, 旨在揭示磁层顶内部亚结构尺度对电流形成机制以及磁重联区域演化过程的影响。我们将利用 Matlab 对卫星数据进行分析, 并期望为磁重联形成机制与演化阶段提供新的认识和思路。这

项研究将为我们提供更全面、深入的磁层顶磁重联过程的认识。

1 磁重联过程及相关理论

1.1 磁重联的基本概念和物理机制

磁重联是一种等离子体物理学中的重要过程，涉及磁场线的重新连接和能量释，广泛发生在空间，天文和实验室等离子体中，是等离子体物理中最重要的能量转化过程之一。磁重联是一个多尺度的物理过程：从微观上，磁场重联是发生小尺度重联扩散区的磁场断开并重新连接的过程；从宏观上，磁场重联被认为是磁层动力学的主要驱动机制[1]。在磁重联中，原本分开的磁力线重新连接，导致磁场拓扑结构的变化。这个过程通常发生在等离子体中的磁重联区域，其中磁力线交错、扭曲或断裂，其主要效应还包括磁能释放、等离子体加热和粒子加速等现象。

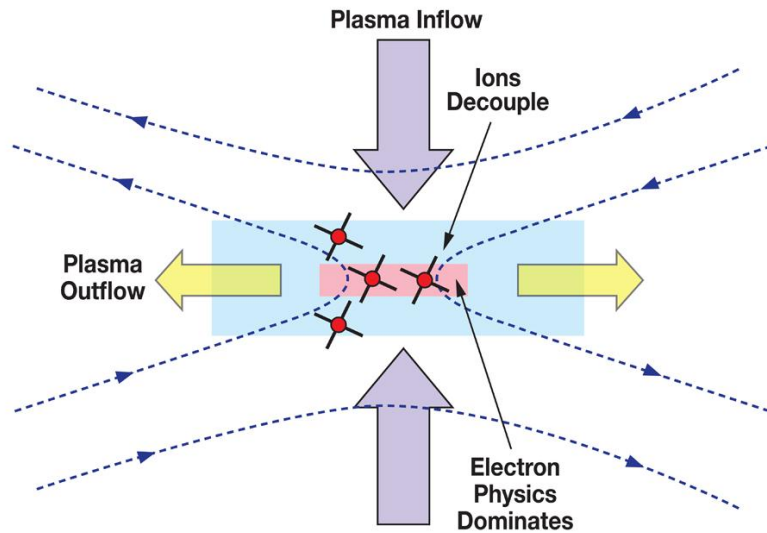


图 1 在这张磁重联的图片中，等离子体流动形成了一种等离子体流入 (Plasma Inflow) 的现象。这种流动导致了磁场线的断裂和重新连接，这个过程被称为磁重联 (Magnetic Reconnection)。在磁重联中，离子解耦 (Ion Decoupling)，也就是等离子体中的离子和电子被从彼此之间的耦合中解开。在这个过程中，电子物理占据主导地位 (Electron Physics Dominates)，因为它们比离子更容易移动。最终，等离子体经历了一种称为等离子体流出 (Plasma Outflow) 的现象，磁场线得以重新连接，形成了新的磁拓扑结构。

磁场线重新连接是磁重联的核心机制，形成于等离子体中。复杂的磁场结构

导致磁场线交错、扭曲或断裂，为磁场重新连接提供了条件。在这些区域内，原本分离的磁力线会重新连接，形成新的磁力线结构（如图 1 所示）。这一过程导致磁能的释放，将储存在磁场中的能量转化为等离子体内部的动能、热能等形式 [2]。这种能量释放过程使得等离子体加热加速，产生高温等离子体和加速的粒子流，对于太阳风与地球磁层相互作用、地球磁暴等现象具有重要影响。

1.2 磁重联发生的位置

磁重联的发生位置是一个备受关注的重要问题，发生在太阳大气、地球磁层等多种环境中。在地球磁层中，磁重联事件发生于地球磁层与太阳风磁场之间的交界处以及磁尾区域，导致地球磁层结构和活动的变化，如极光，磁暴等。在不同行星际磁场条件下，太阳风的多变性增加了磁层顶磁重联的复杂性。

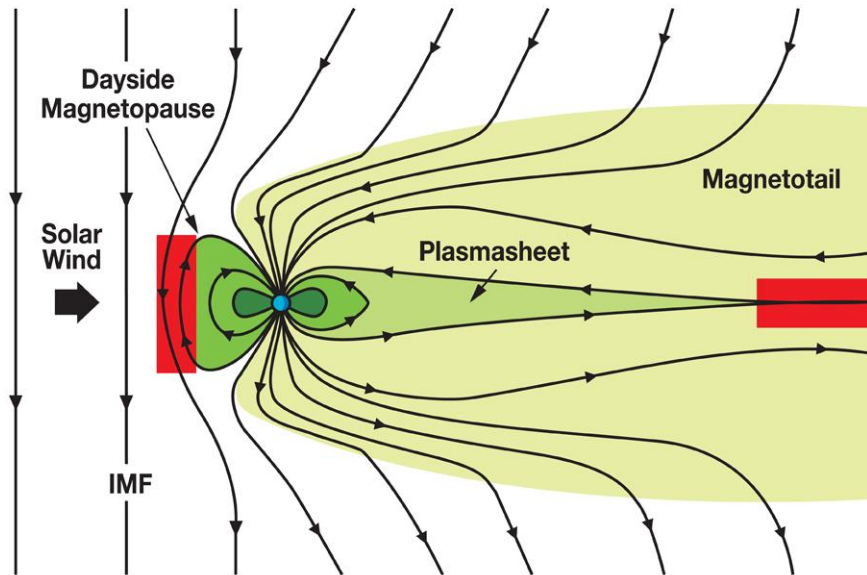


图 2 这张图片展示了地球磁层顶的主要结构。在图中可以看到日侧磁层顶（Dayside Magnetopause）与太阳风（Solar Wind）相互作用形成的等离子体片（Plasmasheet）。随着地球磁场的延伸，我们还可以看到磁尾（Magnetotail）在反日侧延伸。国际磁场（IMF）也在与地球的磁场相互作用，影响着磁层顶的结构和动态，其中日侧磁层顶和磁尾处就是磁层顶磁重联重点研究区域。

Dungey 在 1961 年首次提出了磁场重联的概念，将其引入了地球磁层的研究。迄今，人们已提出了多种磁重联模型 [3]。其中，在地球磁层中，地球磁层顶和地球磁尾是磁重联发生的两个最重要区域。在向阳面，太阳风动能经过一系

列复杂的过程转化为磁尾的磁能，而向阳面太阳风的磁能转化为热能和动能的过程微乎其微。地球磁尾的磁重联与向阳面的磁重联有很大的区别，在磁尾的重联过程中，磁能转化为热能和动能的过程是最重要的。这一过程不仅影响着地球磁层内等离子体的动力学，还对地球周围空间的物质输运产生着重要影响[4]。

其中一个重要的磁重联区域是日侧磁层顶（如图 2 左侧的红色矩形区域），这个区域是否发生磁重联的主要因素是磁层磁场与其上方的磁鞘磁场的剪切角。磁层磁场与其上方的磁鞘磁场的剪切角取决于位置和时间，在任意时刻，不同位置的剪切角分布在 0-180° 范围内。Swisda 等[5]预测了磁重联被抑制的条件，即当电流片两端的磁场剪切角和等离子体 β 值满足下面关系：

$$\Delta\beta > 2(L/\lambda_i)\tan(\theta/2)$$

其中 L 是等离子体压力梯度层的厚度， λ_i 是离子的惯性长度。Phan 等[6]利用 THEMIS 卫星数据证实了这一预测。他们发现磁重联可以发生在很大的剪切角和 β 值范围内，并且 β 值越小，重联可以在更小的剪切角下发生。这表明，在特定条件下，磁重联不一定需要电流片两边的磁场反平行。而这种方式被称为分量重联，通常发生在日下点附近并朝磁层顶两侧延伸，形成倾斜中性线模型。

另一个重要的磁重联区域是极尖区尾向（如图 2 靠右侧的红色矩形区域）。Twitty 等[7]使用 Cluster 数据统计了极尖区尾向的磁重联和行星际磁场的关系，结果表明磁重联只在行星际磁场北向时发生。这可能与极尖区附近的磁鞘等离子体 β 值相关，而 β 值与是否存在等离子体损耗层（plasma depletion layer, PDL）密切相关。在行星际磁场南向时，磁重联的发生被普遍观察到。而在北向时则有利于 PDL 的形成，为磁重联创造了条件。

当磁重联事件发生时，形成的等离子体沿着开放磁力线进入极尖区。通过观察这些等离子体的行为以及它们在电离层的反射情况，可以推断磁重联事件发生的位置位于磁层顶部[8]。Trattner 等[9]人利用了这种方法，并针对南向行星际磁场条件进行了研究。他们通过观察等离子体在极尖区的行为，计算出了磁重联事件的位置，并发现这些结果与理论模型的预测相一致。这表明最大磁场剪切角模型在预测磁重联事件位置方面是可靠的。

1.3 地球磁层顶与磁重联

行星磁场作为太阳/恒星风的障碍物，与其相互作用形成了一个被称为磁层

的空间区域。磁层顶区域是最重要的，因为它控制着物质、能量和动量进入和离开系统的通量，因此边界的运动对系统具有广泛的影响[10]。地球磁层顶区域的磁重联过程与地球磁层的关系是地球空间环境中一个重要而复杂的现象，和与太阳风的相互作用具有关键影响。

磁重联是地球磁层能量输送和转化的重要机制之一。在磁重联过程中，太阳风中的磁场与地球磁场发生重新连接，导致磁能的释放和等离子体的加热。这些过程直接影响地球磁层中等离子体的运动和分布，对地球磁层的能量输送和结构演化起到至关重要的作用。在磁重联过程中释放的能量可以加速等离子体粒子，产生极光等光学现象。此外，磁重联还可能导致地球磁场结构的变化，从而引发地球磁暴等强烈地磁活动。地球磁层顶区域的磁重联过程也与太阳风与地球磁层相互作用的全球性影响有关[11]。太阳风中的等离子体和磁场与地球磁场在磁重联过程中发生相互作用，影响地球磁层的结构和动态行为。这些相互作用对地球磁层中的等离子体输运、加热以及地球磁暴等现象的产生都有重要影响。

磁层顶磁重联是改变磁力线拓扑结构和能量转化的重要物理机制。虽然磁场重联产生的影响是很大尺度的，但是它是发生在磁力线交叉的 X 线附近很小的扩散区内。磁重联的宏观上特征已经更早的被进行了广泛的研究，然而其微观物理过程在之前仍然没有被很好的揭示出来。NASA 发射的 MMS 卫星首次提供了对电子惯性尺度的观测能力，从而为进一步揭示磁重联的微观物理带来了前所未有的机遇。自 MMS 卫星发射以来，人们已经通过其在磁层顶重联扩散区取得了一系列成果。地球磁层顶区域的磁重联过程与地球磁层的关系紧密相连，对地球磁层的结构、能量输送和动态行为具有重要影响。

2 MMS 卫星数据获取

MMS 卫星（Magnetospheric Multiscale）是 NASA 于 2015 年 3 月 12 日发射的一组由四颗相同卫星组成的四面体结构的卫星簇。这些卫星旨在研究地球磁层的微小尺度等离子体过程，包括磁重联扩散区、小尺度粒子加热加速等。

为了实现这一目标，MMS 卫星配备了各种仪器，用于收集粒子和场数据。然而，尽管这些卫星每天产生约 100 吉比特的数据，但平均只有其中的 4 吉比特能够传输到地面[12]。

该卫星簇的主要科学目标是研究磁重联的微观物理过程。MMS 卫星在科学研究中具有突出的地位，其数据特点主要体现在以下几个方面：

(1)小间隔与高精度数据：MMS 卫星在设计上具有史无前例的小间隔，可达到 10 公里以内，并且提供了高精度的数据。特别是在等离子体数据方面，MMS 卫星具有极高的时间分辨率，电子数据可达到 30 毫秒，离子数据可达到 150 毫秒，提供了极为精细的观测。

(2)科学仪器：每颗 MMS 卫星都搭载了一系列相同的科学仪器，其中包括磁通门磁强计（FGM）、电场探针（EDP）、探测线圈磁强计（SCM）、电漂移仪器（EDI）、快速等离子体探测器（FPI）、能量粒子探测器（EPD）以及热粒子成分分析仪（HPCA）等。上述所有仪器在卫星上具体布局如图 3 所示。这些仪器覆盖了广泛的物理参数，包括磁场、电场、等离子体粒子的能量分布和成分等，提供了丰富的数据来源。

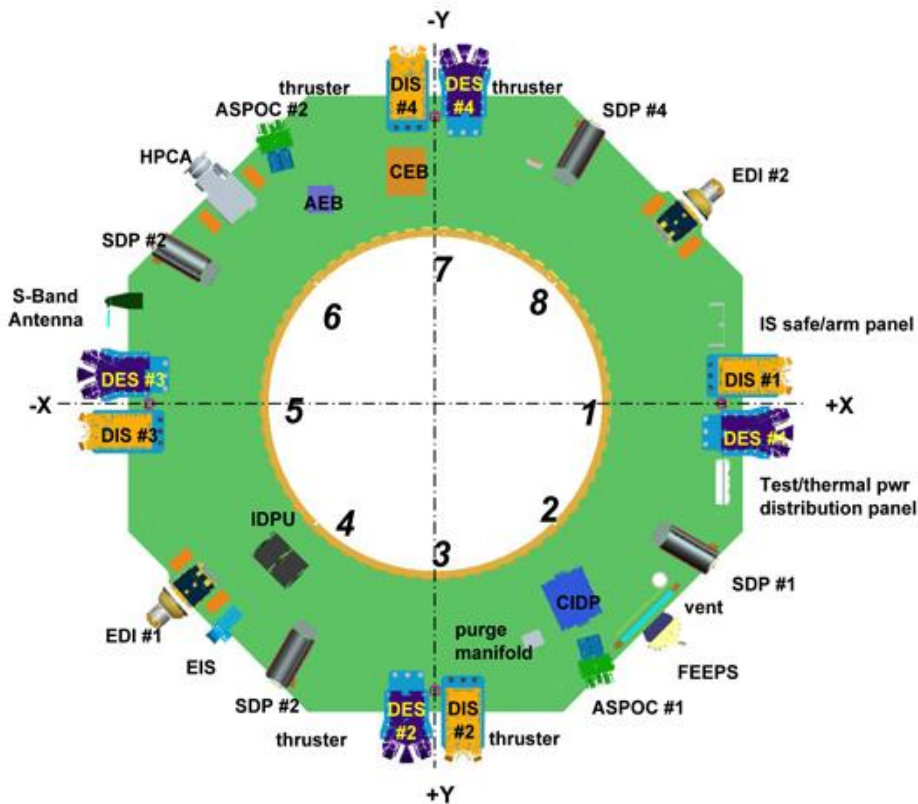


图 3 Magnetospheric Multiscale (MMS) 仪器载荷[13]。这张图片展示了 MMS 卫星搭载的仪器套件，包括等离子体分析仪（Plasma Analyzers）、能量粒子探测器（Energetic

Particle Detectors)、磁力计 (Magnetometers) 和电场仪器 (Electric Field Instruments), 以及用于防止航天器充电干扰的装置, 这些仪器将在扩散区域内外进行高灵敏度的测量。等离子体和场仪器将以前所未有的高 (毫秒级) 时间分辨率和准确性测量离子和电子分布以及电场和磁场。这些测量将使 MMS 能够定位和识别小型 (1-10 km) 和快速移动 (10-100 km/s) 的扩散区域, 确定它们的大小和结构, 并发现磁场的重新配置机制。MMS 将首次在重联点进行明确的等离子体组成测量, 而能量粒子探测器将远程探测重联发生的区域, 并确定重联过程如何产生大量的高能粒子。

(3)数据类型: MMS 卫星提供的主要数据类型包括三维直流磁场、三维电场、交流磁场、离子和电子的能谱、离子和电子的能量透视等。有关 MMS 卫星科学数据的详细获取和介绍, 请查阅 MMS 卫星数据中心网站: <https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/> 或 NASA 空间物理数据中心 (SPDF) 网站: <https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/mms/>。

为了探测磁重联区域, MMS 卫星采用了低倾角椭圆轨道, 覆盖了磁层顶和磁尾两个重要的磁重联发生区域。MMS 卫星的轨道设计分为两个时期。在第一时期 (2015 年 9 月 1 日至 2016 年 9 月 26 日), 轨道的远地点位于磁层顶附近 (12 RE) (如图 5 左图所示), 主要为了保证对磁层顶区域尽量长时间的探测。而在第二时期 (2017 年 1 月 31 日起), 轨道的远地点被调整得更远 (25 RE) (如图 5 左图所示), 以兼顾磁尾中性片和磁层顶区域。

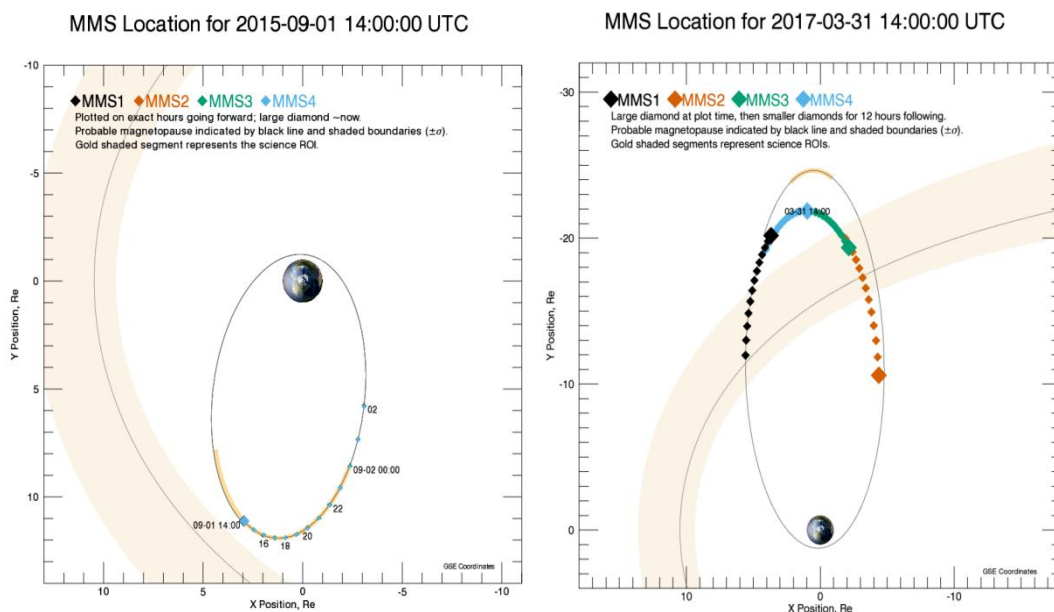


图 4 GSE 赤道平面投影显示了 MMS 卫星的轨道。钻石表示当前时间附近，黑线和阴影边界 ($\pm \sigma$) 近似表示磁层顶位置，金色阴影段表示科学 ROI。左图日期为 2015 年 9 月 1 日，事件发生在 UT 时间 14:00，轨道远地点大约为 12RE。右图日期为 2017 年 3 月 31 日，事件发生在 UT 时间 14:00，轨道远地点大约为 25RE。

MMS 卫星的数据通常分为三种模式：爆发 (Burst) 模式、快速 (Fast) 模式和慢速 (Slow) 模式。其中，最关键的是爆发模式，其时间仅占轨道周期的 2-4%，但数据量却约占总数据量的 74%。爆发模式主要选取重点关注区域的，有潜在研究价值的时间段，并且在这些时间段内，各仪器提供最高精度的数据。重点关注区域以外的其他时间段主要是快速模式，约占 50% 的时间，但仅占总数据量的约 24%。而在其他区域的时间段，则主要采用慢速模式，数据量仅占总数据量的约 1.5% [14]。

为了获取和处理 MMS 卫星的数据，我们通过 NASA 的网站 (<https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/mms>) 获取了各种仪器观测到的数据文件，这些数据以 CDF (Common Data Format) 格式存储，其中包含了以下类型的数据：

- (1) 视角 1 (ASP1) 数据 - Aspect 1 (ASP1) Data
- (2) 视角 2 (ASP2) 数据 - Aspect 2 (ASP2) Data
- (3) 视角板载校准 (ASPOC) 数据 - Aspect On-Board Calibration (ASPOC) Data
- (4) 数字信号处理 (DSP) 数据 - Digital Signal Processing (DSP) Data
- (5) 电子漂移仪器 (EDI) 数据 - Electron Drift Instrument (EDI) Data
- (6) 电场双探头 (EDP) 数据 - Electric Field Double Probe (EDP) Data
- (7) 能量粒子探测器 - 电子离子光谱仪 (EPD-EIS) 数据 - Energetic Particle Detector - Electron Ion Spectrometer (EPD-EIS) Data
- (8) 飞行眼能量粒子传感器 (FEEPS) 数据 - Fly's Eye Energetic Particle Sensor (FEEPS) Data
- (9) 磁通门磁力计 (FGM) 数据 - Fluxgate Magnetometer (FGM) Data
- (10) 快速等离子体探测器 (FPI) 数据 - Fast Plasma Investigation (FPI) Data
- (11) 快速勘测模式 (FSM) 数据 - Fast Survey Mode (FSM) Data
- (12) 热等离子体组成分析仪 (HPCA) 数据 - Hot Plasma Composition Analyzer (HPCA) Data

(13)机构 (MEC) 数据 - Mechanisms (MEC) Data

(14)空间船舶电位控制模式 (SCM) 数据 - Spacecraft Potential Control Mode (SCM) Data

这些数据涵盖了 MMS 卫星不同仪器观测到的多种类型的科学数据，包括磁场、等离子体、粒子等各个方面的观测数据。

3 Matlab 绘图与分析方法

3.1 图像绘制

我们使用 Matlab 的 irf 包绘制了磁重联过程中涉及的各种物理指标的图像。首先，我们下载了所需的数据，包括磁场、速度、密度、电场等信息。然后将数据规范的储存，接着，对数据进行处理，包括变换到 LMN 坐标系、计算速度分量、计算电场、计算电流密度等。最后，利用 irf_plot 函数将所需的物理指标以合适的格式绘制在图中，包括磁场分量、能谱图、速度分量、电流密度、电场分量以及等离子体角分布。

3.2 图像分析

绘制的图像提供了关于磁重联过程中各种物理指标的变化情况。通过分析这些图像，我们可以得出以下结论：卫星经过磁层顶时磁场分量发生了的变化，包括强度的增减和方向的变化；速度分量展现了离子和电子在重联过程中的运动特征，包括平行和垂直于磁场方向的分量变化；密度的变化反映了等离子体在重联过程中的聚集和稀疏现象；电场的变化说明了电场对等离子体运动的影响，包括加速和减速效应；电流密度图揭示了等离子体中电流的分布情况，反映了重联过程中的电流结构；能谱图提供了等离子体的能量分布情况，以及等离子体角分布的信息。我们使用 Matlab 提供的各种函数和工具对这些物理指标进行了分析，通过观察图像中的趋势和变化，研究磁重联过程中的等离子体加热、电场加速等现象，并进一步理解磁重联的物理过程。同时，对图像中的特征进行定量分析，以获取更深层次的物理信息，并与前人已有理论模型进行比较，以验证和解释观测结果。对绘制的图像进行物理指标变化分析的方法和技巧包括对磁场、速度、电子和离子分布函数等进行分析，以及观察能量耗散情况和等离子体能谱，研究其与其他物理指标的相互作用和动力学行为。

4 磁重联过程分析

4.1 MMS 数据传输策略分析

MMS2015年3月12日发射时，进入 28° 倾斜轨道，地心远地点和近地点分别为1.2地球半径（RE）和12 RE。任务的第一阶段专注于白昼磁层顶。在外磁层（地心距为9-12RE）进行良好控制的四面体形态飞行（如图5所示），其中，卫星间距离从160公里开始，逐渐减小至40公里、20公里和10公里，持续6个月。除了在两个月内，星间距离每周交替变化为40公里和10公里外，自那时起，卫星间距离一直保持在10公里，直至2016年3月1日结束了磁层顶探测。

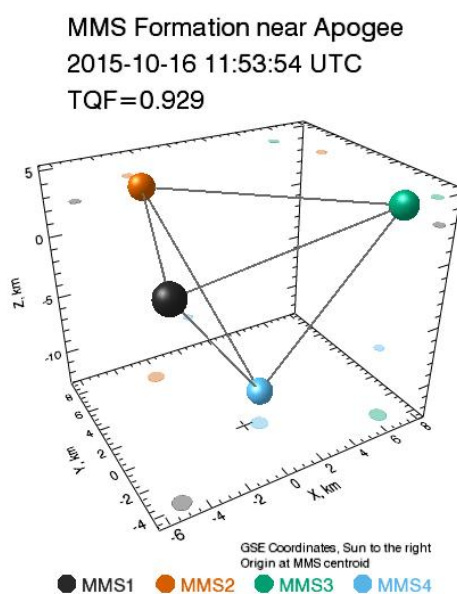


图5 MMS四面体构型在2015年10月16日11:53:54协调世界时（UTC）的GSE坐标中，太阳位于右侧，以MMS质心为原点。四面体质量因子（TQF）为0.929，该值用于比较实际四面体与正则四面体的关系。MMS构型处于近地点附近。[15]

由于MMS仪器的采样率非常高，而S波段遥测系统到深空网络的有限下行速率，因此需要一种通过突发模式选择要发送到地面的数据的系统。这个功能很重要，因为只有总数据的少数百分比可以以突发模式传输。在MMS上实现了两种选择突发模式数据的方法：（1）一个机载系统，评估10秒间隔的突发模式数据，并根据预期的重联特征对它们进行优先级排序；（2）科学家参与的系统，科学家查看汇总数据，选择可能被机载系统错过的边界穿越和其他特征[16]。

4.2 磁层顶穿越事件分析

对于磁重联事件的选取我们参考了 Webster (2018) [17]等归纳的事件列表。通过选择 2015 年 10 月 16 日 10:33 的时间点作为研究对象，我们对这个事件进行了进一步分析。根据表格所示数据，在这个时间点，我们进行了对应的数据分析和图像绘制。在该时间点附近，MMS 卫星经历了一系列显著的磁场和等离子体参数变化。这些变化可能与磁重联过程中的电子扩散区事件有关。

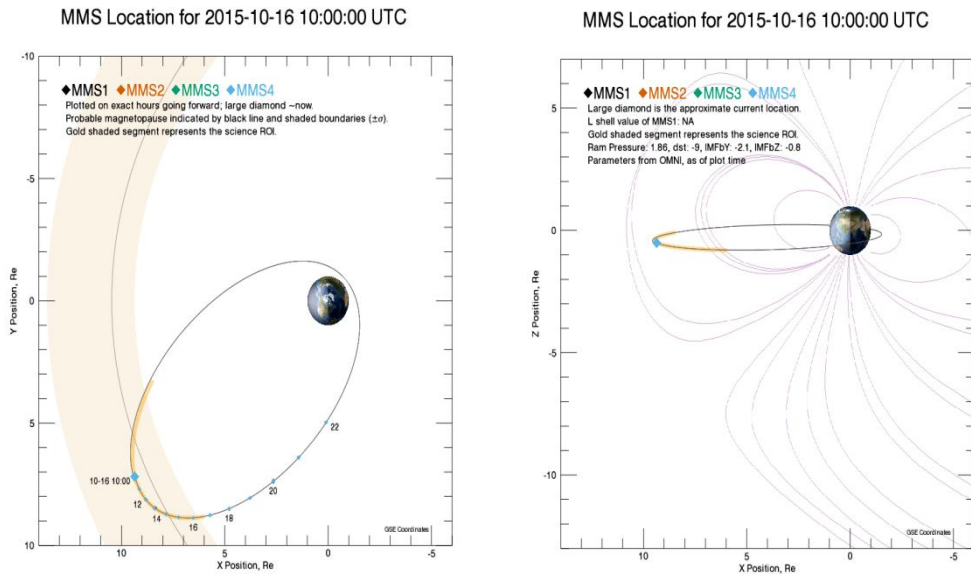


图 6 GSE 赤道平面投影显示了 MMS 卫星的轨道，日期为 2015 年 10 月 16 日 10:00。左图：卫星位置准确时间点图，大钻石表示当前时间所处位置。黑色线和阴影边界 ($\pm\sigma$) 近似表示的磁层顶位置。金色阴影区域代表科学上感兴趣的区域。右图：地球磁场结构及太阳风参数示意图。大钻石标记表示卫星当前位置。金色阴影段表示科学 ROI。太阳风动压为 1.86，Dst 值为-9，IMF B_y 为-2.1，IMF B_z 为-0.8。数据来源：OMNI 数据库。

图 5 呈现了 2015 年 10 月 16 日磁层顶穿越事件时 MMS 卫星的四面体构型，图 6 展示了该事件（2015 年 10 月 16 日 10:00）的卫星轨道图。而图 7 则展示了 MMS1 在日侧进行磁层顶穿越时周围 20 秒的数据。这些数据以边界法线坐标系呈现，其中 N 指向磁层顶的法线方向，L 指向重联场的方向，而 M 大致指向 X 线方向。在这段时间内，航天器首先位于磁层外部，等离子体密度较高（约 15 cm^{-3} 以上，最大值达到 30 cm^{-3} ），磁场指向南方 ($B_L < 0$)，切向速度相对较低

(VL 约 80 km/s, VM 约 30 km/s)。在 10:48:40 UT 左右, 卫星探测到 BM 的正负
 双极结构, 可能对应磁重联离子扩散区的霍尔磁场结构, Hall 磁重联模式指在理想
 磁流体模式中加入 Hall 效应的考虑, 即:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{u} \times \mathbf{b} + \eta \mathbf{J}$$

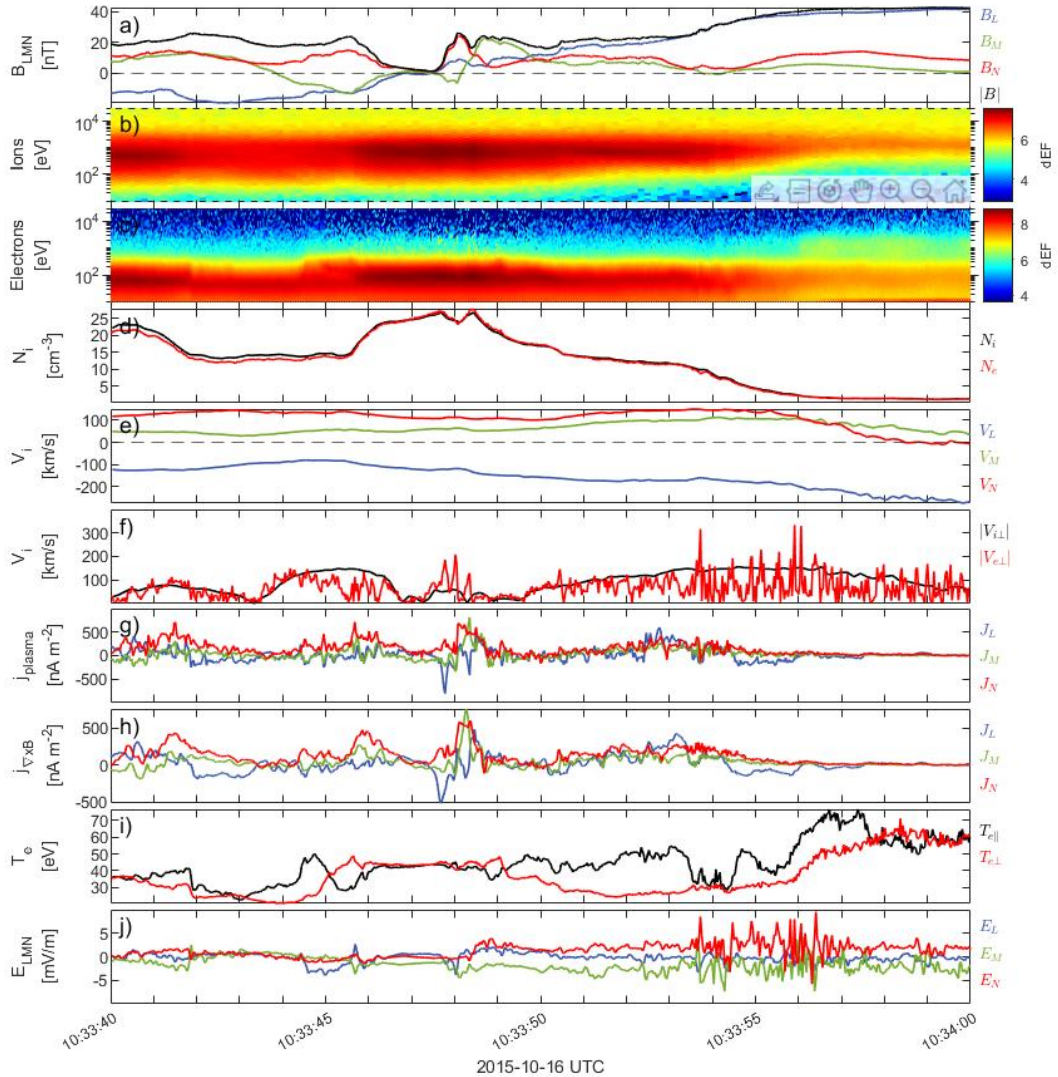


图 7 该图展示了 2015 年 10 月 16 日的数据, 当时磁层边界向外移动导致 MMS 卫星
 从磁层外部的磁鞘进入磁层内部。各种矢量参数以 LMN 坐标系 (边界法线坐标系) 表示,
 其中 N 指向边界并远离地球; L 垂直于 N 并且位于重联平面中 (几乎沿磁层磁场方向); 而
 M 垂直于 L、N 平面 (通常向西)。这些方向是通过对 10:33:40 至 10:34:00 UT 之间的磁场
 数据进行方差分析确定的。图 (a) BM 双极结构可能对应磁重联离子扩散区的霍尔磁场结
 构。图 (h) 中的红色轨迹显示了一个增强的电流结构 (10:33:47-10:33:49), 而蓝色轨迹
 显示了一个略有不同双重结构的场向电流 (J_L)。图 (i) 和 (j) 显示, 在磁层顶开始出现微

弱的电子加热和电场，向内延伸一秒钟左右。

如图 8，是一个标准的 Hall 磁重联模式：一个较小的电子扩散区被包含在一个较大的离子扩散区之中。在 Hall 磁重联模式中，空间等离子体的特性起着关键作用。空间等离子体通常是非常稀薄的，而等离子体参量发生显著变化的特征时间远小于带电粒子之间的平均碰撞时间。因此，空间等离子体一般是无碰撞的，没有经典意义上的电阻，这意味着空间等离子体中的磁重联实际上是无碰撞的。

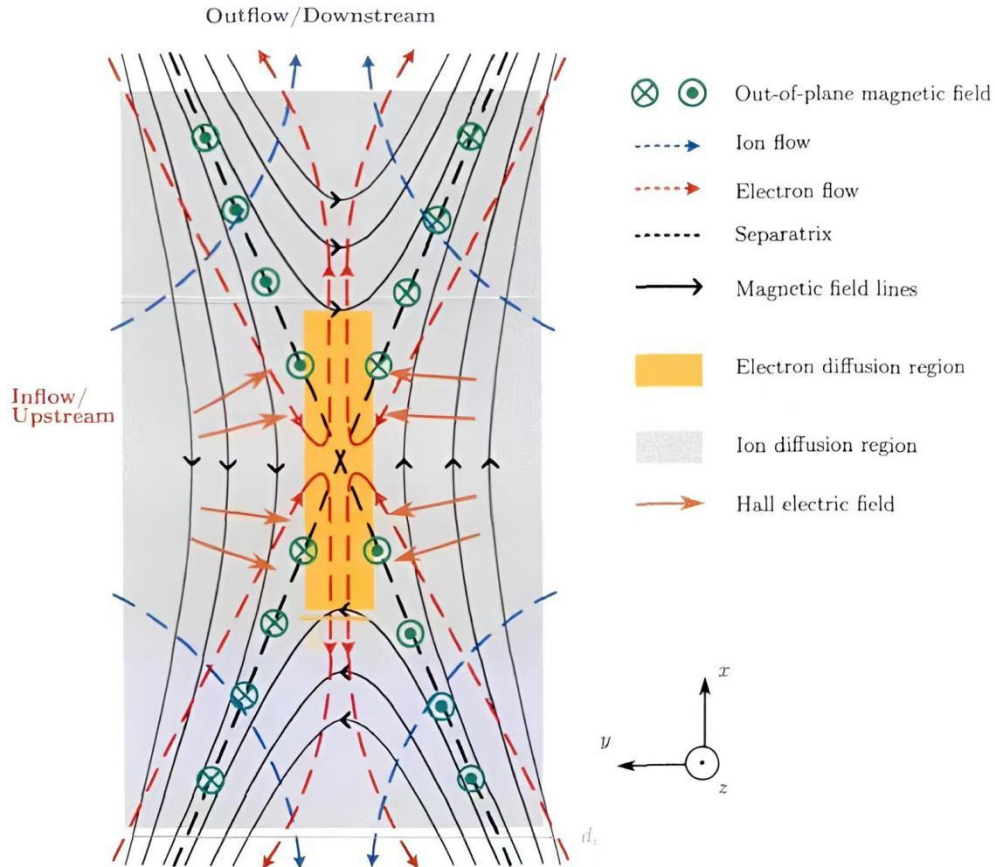


图 8 Hall 磁重联模式示意图。本示意图展示了 Hall 磁重联模式的典型结构，其中一个小的电子扩散区被包含在一个较大的离子扩散区之中。包括了上游信息、下游信息、外部地面、离子流、电子流、等离子体区域、磁场线、电子扩散区域、离子扩散区域和 Hall 电场等元素。在离子扩散区内，电子与离子的运动不再耦合，而是分离的。（引自于贤彩[18]）

GEM (Geospace Environmental Modeling)磁重联的系列研究表明，Hall 效应在磁重联中起着决定性的作用。通过不同的数值模拟方法对相同条件下的二维磁重联问题进行研究，结果显示，包含了 Hall 项的磁流体、混合模拟和粒子模拟方法得到的重联速度几乎相等，同时重联区域有多层次结构。

在离子的惯性尺度以外，等离子体冻结在磁力线上，并以 Alfvén 速度流出电流片的两端。在离子惯性长度的尺度以内，电子冻结在磁力线上，而离子则不能被冻结在磁力线上，因此电子和离子的运动是分离的，由此产生的 Hall 效应决定了磁重联的速度。电子和离子的这种分离运动可产生在重联平面内的电流，并形成垂直重联平面的磁场分量。此外，电子出流速度可远远大于 Alfvén 速度。在更小的电子惯性长度的尺度内，即使电子的运动也不能冻结在磁力线上，电子的惯性项及电子压强的各向异性在此区域起着主要作用。由于电子的惯性长度远小于离子的惯性长度，整体的重联速度是由 Hall 效应决定的。

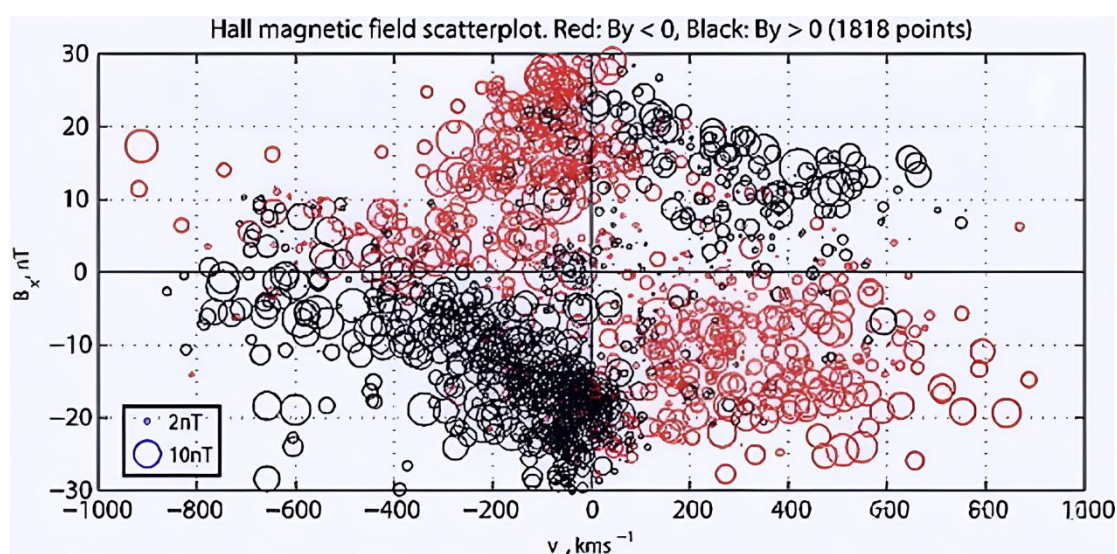


图 9 霍尔磁场以及霍尔电场在磁场 B_x 和离子速度 V_x 所确立的重联平面中的统计分布，其中黑色（红色）圆圈表示正值（负值）。（引自 Eastwood et al[19]）

因此，在 Hall 磁重联模式中，电子和离子的分离运动导致了磁重联过程中的特殊磁场结构，在入流方向上形成垂直于电流片的双极电场。典型的 Hall 磁重联模式包括一个小的电子扩散区被包含在一个较大的离子扩散区中。在离子扩散区中，电子与离子不再耦合在一起，而磁感线仅仅与电子冻结在一起，导致电子的较大入流速度提高了重联率。同时由于洛伦兹力引起电子与离子的脱耦运动，产生了平面内的霍尔电流体系，形成了磁四级场等特殊的磁场结构（如图 9）[20]。与此同时，通过等离子体矩（图 7g）和磁场（图 7h）计算得到的电流信号都出现了明显的增强。

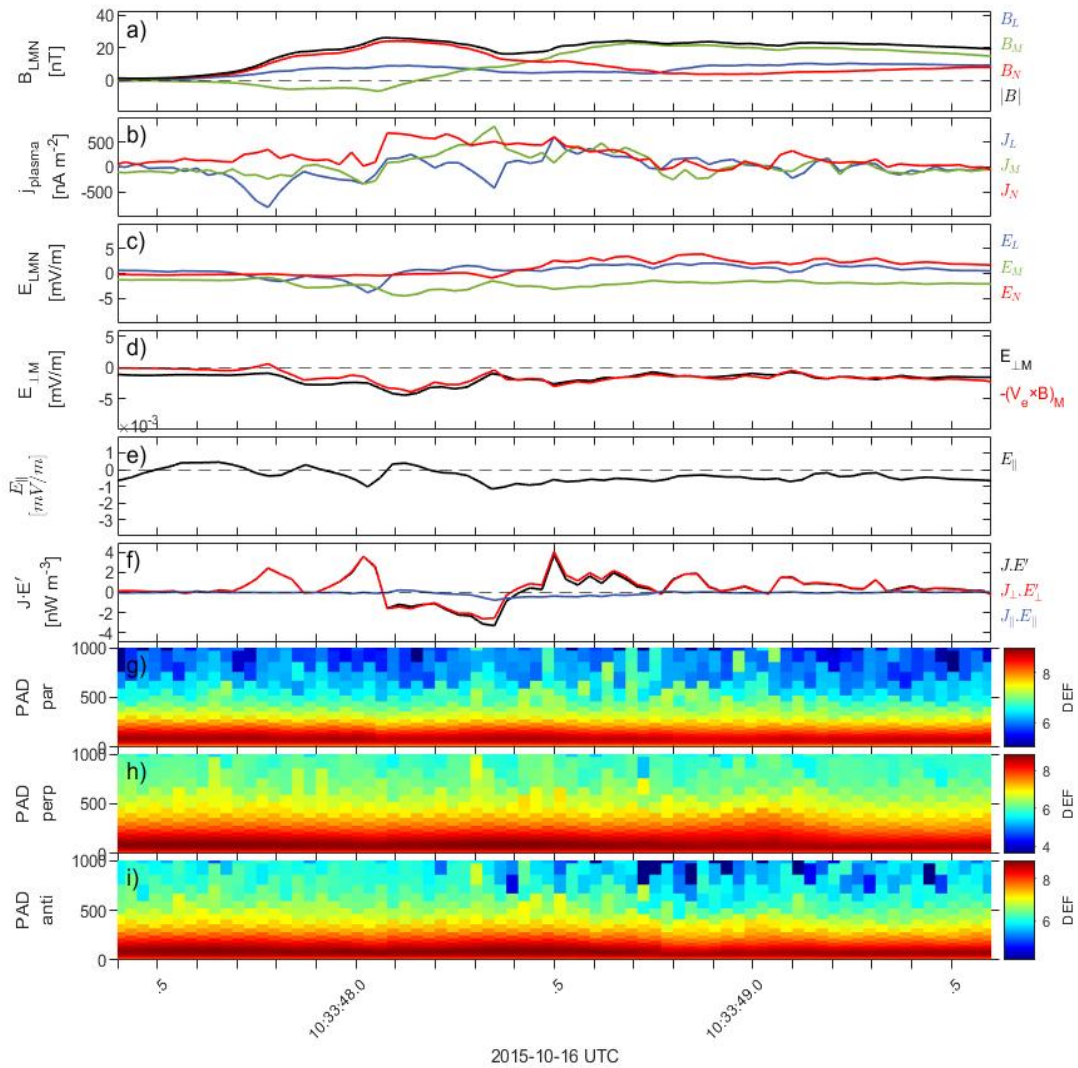


图 10 该图将图 9 局部区域进行了放大，展示了 2015 年 10 月 16 日从 10:33:47 UT 开始的 MMS2 航天器的数据，持续 3 秒。与图 6 相同，使用了边界法线坐标。

在图 10 (a)，大约在 10:33:47 UT 秒处，平面磁场达到零点，并且引导磁场开始增强。即使电流延伸到磁层之外的范围内，仍然观察到加速和加热的迹象。同时图 7f 中，在以下时间点 10:33:47.7UT、10:33:48.0UT 和 10:33:48.5UT 及其持续时间清晰的表现了很强的能量转化 ($J \cdot E > 0$)。以上这些现象与磁重联扩散区特征相符。

4.3 总结

通过对 2015 年 10 月 16 日的 MMS 卫星数据进行分析，我们得出了关于磁

重联过程中各种物理指标变化的重要结论。在磁重联过程中，我们观察到磁场分量的明显变化，对应着小尺度的电流片结构。同时很强的电流强度，以及磁能到粒子能量的结果都表明卫星经过了磁重联扩散区。我们还注意到等离子体速度分量的变化，速度出现明显下降，这可能与磁场重新连接和等离子体流动的相互作用有关。电场分量的变化说明了电场对等离子体运动的影响，包括加速和减速效应。电场的变化可能与磁重联过程中的电流结构和能量转换有关。电流密度图展示了等离子体中电流的分布情况，揭示了重联过程中的电流结构。而能谱图则提供了等离子体能量分布情况的信息，有助于对等离子体动力学行为和加热过程进行研究。

5 结论

本研究通过分析 MMS 卫星在磁重联过程中所观测到的数据，深入探讨了地球磁层中磁重联现象的物理机制和动力学行为。主要的研究发现和成果如下：

磁场变化：我们观察到了磁场分量的明显变化，包括强度的增减和方向的变化。这些变化对应着磁重联过程所必须的电流片结构。同时 **BM** 双极结构对应着磁重联离子扩散区的霍尔磁场结构。

速度和密度变化：在磁重联事件期间，我们发现了对应着电子出流区的高速电子流。密度在扩散区也有轻微加强，可能是由等离子体加热加速导致。

电场和电流密度：我们研究了电场和电流密度的变化，发现电场对等离子体运动的影响，以及磁重联过程中电流结构的分布情况。

能谱分析：通过能谱分析，我们得到了等离子体的能量分布情况，等离子体加热和加速过程与磁重联过程密切相关。

研究中分析的时间较短，因此可能限制了对磁重联现象的全面理解和得出更多结论，同时未能捕捉到磁重联现象的全部特征，也限制了对磁重联过程中潜在变化的理解。为了克服这一不足，未来的研究可以考虑使用更多事件的数据进行分析，以获取更全面的认识和得出更多结论。

总之，本研究利用 MMS 卫星数据深入研究了地球磁层中磁重联现象。主要发现包括磁场变化、速度和密度变化、电场和电流密度变化以及能谱分析结果。然而，研究时间较短，可能限制了对磁重联现象的全面理解和结论的深入推断。

未来研究应考虑使用更多事件的数据以获得更全面的认识。

参考文献

[1] Dungey J. W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 6(2): 47–48

[2] 王水, 李罗权. 磁场重联. 合肥: 安徽教育出版社, 1999. 1-4. WANG Shui, LEE Lou-Chuang. *Magnetic Reconnection*. Hefei: Anhui Education Press, 1999. 1-4.

[3] Sweet P A. The neutral point theory of solar flares. In: B. Lehnert Ed. *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*. London: Cambridge Univ. Press, 1958. 123-152.

[4] 曹晋滨, 马志伟, 路立, 周国成, 刘振兴. 地球磁层顶磁场重联的动力学过程[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(05): 597-604

[5] Swisdak M., Opher M., Drake J. F., et al. THE VECTOR DIRECTION OF THE INTERSTELLAR MAGNETIC FIELD OUTSIDE THE HELIOSPHERE[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 710(2): 1769 – 1775.

[6] Phan T. D., Paschmann G., Gosling J. T., et al. The dependence of magnetic reconnection on plasma β and magnetic shear: Evidence from magnetopause observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(1): 11 – 16

[7] Twitty C. Cluster survey of cusp reconnection and its IMF dependence[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(19): L19808.

[8] Rae, I. J. et al. Energy deposition in the ionosphere through a global field line resonance. *Ann. Geophys.* 25, 2529 – 2539 (2007).

[9] Trattner, K. J., Mulcock, J. S., Petrinec, S. M., & Fuselier, S. A. (2007). Location of the reconnection line at the magnetopause during southward IMF conditions. *Geophysical Research Letters*, 34(3), L03108. <https://doi.org/10.1029/2006GL028397>]]

[10] Archer, M.O., Hietala, H., Hartinger, M.D. et al. Direct observations of a surface eigenmode of the dayside magnetopause. *Nat Commun* 10, 615 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08134-5>

[11] Zuo, P., Feng, X., Xie, Y. Wang, Y. & Xu, X. A statistical survey of dynamic pressure pulses in the solar wind based on WIND observations. *Astrophys. J.*, 808, 83 (2015).

[12] Magnetospheric Multiscale Mission Website. Southwest Research Institute.
<https://mms.space.swri.edu/>

[13] MMS Instruments Overview. NASA Goddard Space Flight Center.
<https://mms.gsfc.nasa.gov/instruments.html>

[14] Burch, J. L., & Phan, T. D. (2016). Magnetic reconnection at the dayside magnetopause: Advances with MMS. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7196 – 7205. <https://doi.org/10.1002/2016GL069787>

[15] MMS Science Data Center Plots. Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder.
<https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/plots/>

[16] Rice C R, Chen L, Gershman D, et al. Dynamics of the Storm Time Magnetopause and Magnetosheath Boundary Layers: An MMS - THEMIS Conjunction[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(4)

[17] Zhou, M., Berchem, J., Walker, R. J., El-Alaoui, M., Goldstein, M. L., Lapenta, G., Deng, X., Li, J., Le Contel, O., Graham, D. B., Lavraud, B., Paterson, W. R., Giles, B. L., Burch, J. L., Torbert, R. B., Russell, C. T., Strangeway, R. J., Zhao, C., Ergun, R. E., Lindqvist, P.-A., & Marklund, G. (2018). Magnetospheric Multiscale Observations of an Ion Diffusion Region With Large Guide Field at the Magnetopause: Current System, Electron Heating, and Plasma Waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(3), 1834-1852. <https://doi.org/10.1002/2017JA024517>

[18] 于贤彩. 磁场重联分界线区域电子动力学过程研究[D]. 中国科学技术大学, 2023. DOI:10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000797.

[19] Eastwood, J. P., Phan, T. D., Øieroset, M., & Shay, M. A. (2010). Average properties of the magnetic reconnection ion diffusion region in the Earth's magnetotail: The 2001-2005 Cluster observations and comparison with simulations: AVERAGE ION DIFFUSION REGION STRUCTURE. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A8), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009JA014962>

[20] 黄灿, 王荣生, 陆全明, 等, 无碰撞磁场重联中的电子密度空穴和 B_y 的四极型分布. *科学通报*, 2009, 54: 3852 – 3857