



博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

地球磁层波动现象的观测 和模拟研究

王志强 翟浩 著



科学出版社

非外借



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

地球磁层波动现象的观测 和模拟研究

王志强 翟 浩 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以地球磁层波动现象为切入点,全面介绍磁层空间中各种类型的波动现象,包括超低频波、电磁离子回旋波、哨声模合声波、嘶声波和地磁脉动等。书中给出大量最新发现的卫星观测数据,详细介绍波粒相互作用的数值模拟方法和计算结果。全书共9章:第1章为绪论,主要是磁层空间中波与粒子情况的概述;第2章介绍磁尾等离子体片中的波动;第3章介绍非绝热加速形成的特殊的离子能通结构;第4~8章通过测试粒子模拟法详细研究了内磁层中各类波动与不同粒子发生共振相互作用的过程;第9章介绍地磁脉动的全球频率分布等。这些内容涵盖了磁层空间的不同区域,为从事地球磁层物理,尤其是等离子体波动现象和波粒相互作用过程及相关学科的研究人员提供了参考。

本书可供空间物理学方向的高年级本科生、研究生和研究人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

地球磁层波动现象的观测和模拟研究 / 王志强, 翟浩著. —北京: 科学出版社, 2017.11

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-055490-1

I. ①地… II. ①王… ②翟… III. ①地球磁层—地球观测—研究
②地球磁层—数值模拟—研究 IV. ①P353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 282010 号

责任编辑: 苗李莉 李 静 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 226 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

付小兵	傅伯杰	郭坤宇	胡 滨	贾国柱	刘 伟
卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪	万国华	王光谦
吴硕贤	杨宝峰	印遇龙	喻树迅	张文栋	赵 路
赵晓哲	钟登华	周宪梁			

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

序

空间物理学是一门正在迅速发展中的、应用性很强的基础学科。它把整个日地空间作为一个系统，研究地面 20~30 km 高度以上直至整个太阳系这一广阔的日地空间环境中的基本物理过程，是当代自然科学中最活跃的前沿科学之一。日地空间已经成为继地球、海洋和大气之后与人类的生存和发展息息相关的第四个重要领域，是人造卫星、宇宙飞船和空间站的飞行区域。空间物理研究将极大地促进人类开发和利用太空资源、为人类未来的生存和发展提供重要保障。

开展空间物理研究需要在广阔的宇宙空间和全球各地进行大量的观测，单靠一个国家的力量是难以达到的。所以国际合作在空间物理的发展过程中起着重要作用。国际地球物理年、国际地球物理协作计划、国际宁静太阳年、国际磁层研究计划，以及太阳活动极大年计划和中层大气计划等一系列国际合作计划极大地推动了空间物理的发展。首个由中国科学家提出中欧合作的“地球空间探测双星计划”，以及欧空局的“Cluster”星座计划等产生了一系列重要的研究成果。

在太阳风和地球磁场相互作用下，行星的磁场被太阳风压缩在一个有限的空间区域内，这个空间称为磁层。地球磁层空间是理想的天然等离子体实验室，存在着地面无法实现的物理条件和复杂的物理过程。磁层空间中复杂的等离子体波动现象，以及波粒相互作用过程是空间物理学界的国际热点研究问题。

该书在内磁层非线性效应方面的发现及工作具有重要创新性和学术价值，在内磁层中发现的与电磁离子回旋波相伴随的离子回旋相位成束结构具有重要的创新性，将有助于科学家深入的理解空间粒子加速过程。此外，该书还采取了观测数据分析和试验粒子模拟的方法，研究了粒子的非线性效应。结构层次清楚，体现了空间物理学最新研究动向，创新性和系统性强。

曹晋滨

2017 年 6 月于北京

前 言

地球磁层空间是一个由多种粒子构成的等离子体环境，受到太阳活动的影响磁层空间经常处在剧烈的扰动过程中，激发出多种类型的等离子体波动。由于磁力线从地球内部一直延伸至遥远的磁层空间中，波动就会沿着磁力线传播，因此磁层空间中的各种波动就可以通过卫星磁力仪以及地面地磁台站观测到。这些波动能与不同种类、不同能量的高能粒子发生非绝热加速和波粒共振相互作用等，改变粒子的投掷角、能量及分布函数等。高能粒子的突然出现会对飞行在其中的航天器和航天员的出舱活动造成严重威胁，因此了解磁层空间中波动的激发过程及其对高能粒子行为的影响就至关重要。本书综合利用国内外发射的科学探测卫星和地磁观测数据，以及计算机模拟等多种方法系统研究了磁层空间不同区域的波动特征，发现了大量未曾报告过的特殊现象并予以解释，对于深刻理解磁层波动现象具有重要参考价值。

本书共 9 章。第 1 章为绪论，介绍了磁层的结构、磁层空间中波与粒子情况的概述。第 2 章介绍了磁尾等离子体片中与地向周期性高速离子流相伴随的超低频波，发现了高速流波动的相位与磁场波动的相位大致反相关，与热离子温度波动的相位正相关，同时磁场波动与热离子温度波动呈相位反相关的特性。第 3 章利用欧空局 Cluster 卫星和中国 Double Star 等卫星数据首次在内磁层中发现大量与电磁离子回旋波相伴随的离子回旋相位成束结构。同时发现近地磁尾等离子体片中存在特殊的离子能量通量缺口结构，这一特殊结构可以作为判断非绝热加速离子发生的证据。第 4~8 章详细研究了内磁层中各类波动与不同粒子发生共振相互作用的过程。利用测试粒子模拟法系统研究了三种不同频带的电磁离子回旋波（氢带波、氦带波和氧带波）与环电流质子、氧离子和辐射带电子的非线性相互作用，以及夜侧合声波和嘶声波与辐射带电子发生的非线性相互作用。对于相位捕获和相位成束，以及粒子剧烈加速等现象进行了深入研究。研究表明内磁层中波与粒子的非线性相互作用具有一定的复杂性，根据波与粒子种类的不同作用效果差异很大，背景等离子体参数的改变对非线性相互作用也会产生巨大影响。这些非线性效应强烈地影响着内磁层粒子的分布情况，并与准线性理论的预期不尽相同。第 9 章利用全球地面台站磁场数据，发现了太阳风动压脉冲突降激发的地磁场场力线共振的全球分布特征。将太阳风动压在突然增强和减弱时对应的地磁脉动进行对比，结果表明地磁脉动的频率与磁层空腔的大小

呈反相关。发现了地磁脉动的二次谐波在日侧较强、夜侧较弱甚至消失的特征，表明二次谐波无法像基频波一样传播进入更深的磁层区域。同时发现磁层空腔/波导中的共振频率不仅由太阳风参数决定，也与观测点的磁地方时有关。

在本书即将出版之际，谨向为本书的出版提出宝贵意见的专家学者，以及中国博士后科学基金会和科学出版社的工作人员所付出的辛勤劳动表示诚挚的感谢！

在本书编写过程中，参考了许多文献，谨在此向所有参考文献的作者表示诚挚的谢意。由于编者水平有限，本书的不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

《博士后文库》序言

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地球的磁层	1
1.2 磁层中的粒子	9
1.3 磁层中的波动	12
1.4 卫星与仪器介绍	18
第 2 章 磁尾等离子体片中的波动	27
2.1 周期性高速流相伴随的超低频波	27
2.2 磁场的空间变化导致的离子非绝热加速	35
2.3 磁场的空间变化导致的离子非绝热加速	36
2.4 观测和统计结果	41
第 3 章 非绝热加速形成的特殊的离子能通结构	45
3.1 Cluster 卫星观测结果	45
3.2 离子能量通量“缺口”现象	56
3.3 离子的回旋相位成束现象	62
3.4 其他类似的观测事件	64
第 4 章 内磁层中波粒相互作用的模拟方法	74
4.1 测试粒子模型	74
4.2 粒子运动的回旋平均方程	76
4.3 无量纲参数 R	77
4.4 数值计算方法	79
第 5 章 电磁离子回旋波与环电流质子的非线性相互作用	83
5.1 氢带波与环电流质子的非线性相互作用	85
5.2 氦带波与环电流质子的非线性相互作用	92
5.3 氧带波与环电流质子的非线性相互作用	96
5.4 小结	99

第 6 章	电磁离子回旋波与环电流氧离子的非线性相互作用	101
6.1	氢带波与环电流氧离子的非线性相互作用	102
6.2	氦带波与环电流氧离子的非线性相互作用	106
6.3	氧带波与环电流氧离子的非线性相互作用	108
6.4	小结	113
第 7 章	电磁离子回旋波与辐射带电子的非线性相互作用	115
7.1	氢带波与辐射带电子的非线性相互作用	116
7.2	氦带波与辐射带电子的非线性相互作用	120
7.3	氧带波与辐射带电子的非线性相互作用	121
7.4	小结	123
第 8 章	哨声模波与辐射带电子的非线性相互作用	124
8.1	电子运动的回旋平均方程	124
8.2	合声波与辐射带电子的非线性相互作用	125
8.3	嘶声波与辐射带电子的非线性相互作用	128
8.4	小结	131
第 9 章	地磁脉动的全球频率分布	133
9.1	行星际激波与地磁脉动	133
9.2	卫星观测	138
9.3	地磁观测	141
9.4	小结	151
参考文献		153
编后记		166

第1章 绪 论

1.1 地球的磁层

地球可以看成是一个巨大的磁性球体,在其内部有处于融化状态的铁和镍围绕着一个坚硬的铁质中心旋转运动,一般认为正是由这种流体运动所激发的电流产生了我们所熟知的地磁场。在近地空间,地球磁场可以近似看作偶极磁场,其磁轴与地球自转轴的夹角约为 11.5° ,随着磁场区域向外延伸,磁场的位形和强度逐渐受到太阳风的影响而产生变化。太阳风是一种来自太阳高层大气的高速等离子体流,主要由速度高达 $200\sim 800\text{ km/s}$ 的电子、质子和 α 粒子组成,并携带着行星际磁场、当太阳风抵达近地空间时,在向阳面,地球磁场的磁压与太阳风的动压相互制约平衡,使得其中的高能带电粒子难以侵入到地球大气而必须绕过地球磁场继续向前运动,而在背阳面,由于太阳风与地球的偶极磁场发生相互作用,把地球磁场的磁力线向后拉扯延伸到超过 200 个地球半径的行星际空间。于是形成一个被太阳风所包围的彗星状空腔,地球磁场就被包含在这个磁场区域里,这个空腔称为地球磁层。地球的磁层是空间中的一个区域。形状由地球内磁场、太阳风等离子体和行星际磁场(IMF)决定。磁层的边界也就是磁层顶基本呈子弹头形状,在地球处的宽度大约是 $15 R_E$,在夜侧磁尾逐渐变成一个圆柱状的结构,半径为 $20\sim 25 R_E$ 。磁尾最远处超过 $200 R_E$,至于如何结束的目前尚不清楚。

磁层是一个大的等离子体空腔结构。朝地向运动的太阳风压缩地磁场的日侧部分,于是产生了绵延几百个地球半径的磁尾。磁层形成的基本机制比较简单,地球偶极磁场暴露在带电粒子流中,整个磁层由两个边界条件控制:①磁层与太阳风的边界;②磁层和中性大气的边界。磁层的基本结构成分包括:弓激波和磁鞘、磁层顶、磁尾及内磁层(Otto, 2005)。

地球磁层保护地球上的生命免受来自宇宙的高能粒子与射线的危害,如果没有磁层,地球上的一切生命将会消失。火星只有很小甚至几乎没有磁场,其过去曾经存在的海洋与大气被认为可能与受到太阳风的直接作用相关。金星大气层的消失,以及大部分水的消融很大程度上也是受到太阳风的影响(Svedhem et al., 2007)。

对地球磁场的研究始于17世纪,英国科学家 William Gilbert 在其著作《磁

石论》中指出地球表面的磁场与小磁性球体相似。在 20 世纪 40 年代, Walter M. Elsasser 提出了发电机模型, 他认为地球的磁场来自于地球铁质外核的运动 (Elsasser, 1947, 1950)。通过使用磁强计, 科学家可以从时间与经纬度尺度来研究地球磁场的变化。在 40 年代末期, 人们开始使用火箭探索太空。在 1958 年, 美国发射了首颗探险家 1 号卫星, 用来探测大气层上的宇宙射线。探险家 1 号观测到了辐射带的存在, 并被探险家 3 号在晚些时候所证实。1959 年, Thomas Gold 在研究太阳风与地球磁层相互作用时, 首次提出“磁层”一词 (Gold, 1959)。根据地球磁层内离子体密度、速度等性质的不同, 可以将地球磁层划分成磁层顶、磁尾、等离子体幔、中性片、等离子体层和等离子体片等, 在磁层顶外还存在磁鞘与弓激波。

内磁层包括等离子体层、辐射带和环电流。等离子体层由低能量($\sim 1\text{ eV}$)且相对高密度($10^3/\text{cm}^3$)的等离子体构成。这些等离子体来自电离层, 与地球共转运动。其边界叫做等离子体层顶, 与由共转电场作用下的闭合粒子漂移轨道和对流电场形成的开放漂移轨道的边界非常接近。等离子体层顶位于 L 指数 3~5, 由磁活动强度决定。辐射带包括两个主要部分: 内带和外带。内带位于 $L < 2$, 由高能质子($0.1\sim 40\text{ MeV}$)构成; 外带由 keV 至 MeV 范围内的电子构成。环绕地球西向漂移的高能离子构成了西向环电流, 主要由能量范围在 10~200 keV 的质子构成 (Koskinen, 2013)。图 1.1 给出了磁层的整体结构图。

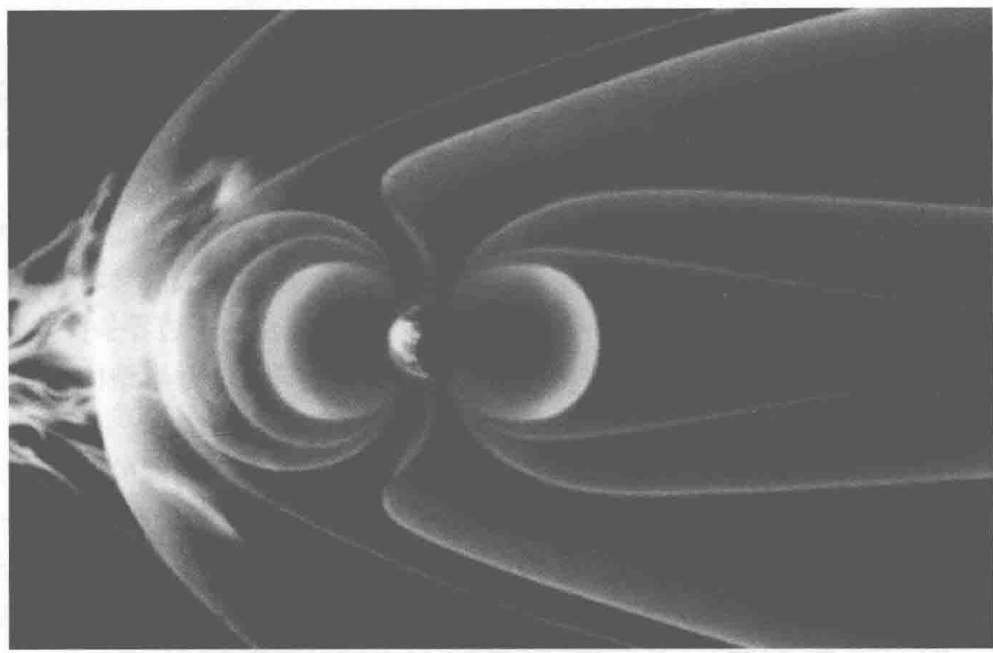


图 1.1 地球磁层结构图

1.1.1 太阳风和弓激波

太阳的质量通过三种方式流失，即太阳风、日冕物质抛射（CMEs）和太阳高能粒子（SEP）。这些现象是从物质的角度来理解太阳的活动变化。此外，耀斑和电磁辐射代表了其他主要的太阳活动变化。快速的太阳风起源于如冕洞等的开放场区域，而日冕物质抛射起源于闭合场区域。行星际等离子体指的是太阳风和其中传输的日冕物质抛射。日冕物质抛射经常可以达到超阿尔芬速度，并会驱动快模激波。几乎所有的日冕物质抛射都与耀斑相关，并伴随电子和离子的加速，以及不同长度的电磁辐射。太阳风中混合了来自太阳的电子和离子，大部分是质子，还包括少量的阿尔法粒子。当超音速太阳风粒子流吹向磁层顶时，受到地球磁场的阻碍而在地球前端形成弓激波。地球弓激波的概念是由 Ian Axford 和 Paul Kellogg 于 1962 年分别独立提出的，并于 1963 年由卫星观测所证实。弓激波的上游是太阳风与行星际磁场，而下游则是磁鞘。当速度超过 400 km/s 的太阳风穿过弓激波时，速度会迅速衰减为亚音速并绕过磁层顶向磁尾流动，这对保护地球免受太阳风高能粒子的影响有着巨大的作用。弓激波的厚度为 100~1000 km，其在日地连线上的位置距离地心 15~20 个地球半径。

1.1.2 磁鞘、磁层顶和等离子体幔

磁鞘是磁层顶与弓激波之间的区域，厚度为 3~4 个地球半径。由于太阳风的作用，磁鞘中的磁场会定期衰减导致其难以完全偏转太阳风中的高能带电粒子。磁鞘中的等离子体密度为 $20\sim 30\text{ cm}^{-3}$ ，大大高于弓激波但又低于磁层顶，被认为是两者间的过渡区域。在迎向太阳风的一侧，磁鞘距离地心大约 10 个地球半径，而在下风侧由于太阳风的压力导致其向磁尾明显延伸，其确切位置与宽度随着太阳活动的强弱而改变。

磁层顶是地球磁层与太阳风的外边界，将磁层等离子体与太阳风等离子体分隔开，磁层顶的位置是由太阳风的动压与地球磁场的磁压相互平衡制约而决定的。在向阳侧，磁层顶可以近似看成一个椭圆面，而地球位于该椭圆面的焦点上。当太阳活动平静时，磁层顶在日地连线方向上距离地心约 10 个地球半径，在两极可以增加到 12~13 个地球半径。随着太阳活动逐渐增强，太阳风动压随之增加，最多可将磁层顶压缩至距地心 6~7 个地球半径。

等离子体幔与磁层顶相邻，内部等离子体从磁鞘向磁尾流动，从极尖区一直延伸到整个磁尾边界区域。其中等离子体密度为 $0.01\sim 1\text{ cm}^{-3}$ ，能量大约为 100 eV，尾向流速度为 100~200 km/s。等离子体幔中质子的速度约为相邻磁鞘内质子速度的一半，并且平行于磁力线的速度远远低于垂直于磁力线的

速度。等离子体幔可以从向阳面磁层顶向磁尾电流片输送动量和质量，影响电流片内部平衡，当行星际磁场长时间保持南向分量时，这种影响极其显著，等离子体幔也会比平常显得更厚一些。

1.1.3 磁尾

在背阳侧，地球磁场被拉伸到数百地球半径之外，形成了一个半径约为 20 个地球半径的巨大圆柱形空腔，这个空腔被称之为磁尾。磁尾是重要的能量储存区域，也是连接太阳风与内磁层的关键因素，太阳风与行星际磁场的剧烈变化不仅会导致磁尾位置形状的改变，也会影响其内部的磁场能量转换 (Nishida, 2000)。等离子体片在磁尾中间平面区域，厚度约为 10 个地球半径，其内边界在距地心 4~10 个地球半径，是储存磁层热等离子体的主要区域。等离子体片是磁层动力学的关键区域之一，也是内磁层与极光高能粒子的源头。等离子体片中的一些现象，如高速流、等离子体涡流等，在磁层—电离层耦合过程中起着重要作用。中性片位于等离子体片中心区域，该处有很高的越尾电流密度与极弱的磁场强度，并在两侧磁场方向反转。在中性片北侧，磁场方向指向太阳；在中性片南侧，磁场方向背离太阳。正是由于这种磁场分布，大大增加了中性片的不稳定性，人们可以经常观测到各种磁重联现象的发生。近地磁尾的三个主要等离子体区域为：尾瓣、等离子体片边界层 (PSBL) 及等离子体片。

在尾瓣中，等离子体密度很低，基本上小于 0.1 cm^{-3} ，有时甚至低于可测量的范围。离子和电子谱的强度也很弱，只有很稀少的一些能量范围在 5~50 keV 的粒子。经常会观测到一些来自地球的冷离子，这些离子具有明显的电离层离子的特征。有明显的证据证明尾瓣一般位于开磁力线上 (Antonova, 1996)。

这一区域的离子的流速一般为几百千米每秒，基本上平行或反平行于当地磁场。双向的离子流经常在这里观测到，分别沿着磁力线朝地向或尾向运动。离子密度大约为 0.1 cm^{-3} ，粒子的热能往往小于动能。等离子体片边界层一般位于闭合磁力线上。

等离子体片这一区域也被叫做“中心等离子体片”，来强调其与等离子体片边界层的不同。由速度对称分布的千伏特热粒子构成，数密度 $0.1 \sim 1 \text{ cm}^{-3}$ ，比等离子体片边界层略高。这一区域的离子流速比离子热速度小很多，离子的温度基本为电子温度的七倍。等离子片大部分区域位于闭合磁力线上，尽管有时候也包含一些等离子体团，也就是不与地球或太阳风磁场相连的闭合的磁通量管。等离子体片边界层则是空的磁尾瓣和热等离子体片之间的过渡区。

磁尾的等离子体是动态的。远磁尾的重联将反日向流动的磁幔等离子体对流注入沿着磁力线地向运动的离子流中，这些离子流在近地强磁场区被镜面反射，又形成了反日向的离子流。这样双向的离子流会产生不稳定性，激发各种等离子体波动，最终将等离子体流的动能转换为热能，产生了热的、缓慢流动的等离子体片。

等离子体片和外辐射带的构成包括两种主要成分：氢离子（大量存在于太阳风和地球上层电离层中）和氧离子（大量存在于电离层，却在太阳风中找不到）。电离层起源的氧离子在平静时期处于适中的量级，但是到了磁活跃时期却与氢离子一样丰富。这一结果表明等离子体片中粒子的构成混合了太阳风和电离层起源的粒子，平静时期主要是太阳风起源的粒子，活跃时期主要是电离层起源的粒子。

1.1.4 等离子体层

地球磁场受到太阳风的作用，使得地磁场的磁力线向后弯曲，在向阳面形成一个包层，而背阳面的磁力线向远处延伸，这样就在地球周围形成一个被太阳风包裹住的、彗尾状的磁层空间。在近地空间，磁层磁场近似于偶极磁场。在中高纬度的电离层高度（70~1000 km），偶极磁场近似位于垂直方向。因此电离层的带电粒子就可能自由地沿着磁力线向上运动，进入较高的磁层区域，并被束缚在地磁场的磁通量管中，沿着闭合的路径漂移。同一根磁通管可以经过几天的时间来重填，经过复杂的过程，最终形成了高密度的通量管。这些由几个电子伏能量、温度小于 1 eV 的带电粒子围绕地球就形成了一个稠密的冷的等离子体区域，即等离子体层。等离子体层位于电离层的上方，是一个巨大的环状结构，内部充满了大量冷等离子体。其中等离子体主要成分为电子、质子、氢离子与氧离子。20 世纪 60 年代初期，Gringauz (1969) 和 Carpenter (1968) 分别利用地面哨声观测和卫星对地观测发现了等离子体层，并发现这一区域的粒子密度呈现随着高度缓慢下降的趋势，到达 3~5 个地球半径的距离之后，等离子体的密度会突然下降形成一个很陡的边界，即等离子体层顶。通常情况下，当赤道面上的粒子密度在 0.5 个地球半径的距离内下降 0.2 倍，就可以认定是到达了等离子体层顶的位置了。也有定义将电子密度在 0.5 个地球半径高度内变化 5 倍以上的地方定义为等离子体层顶 (Carpenter and Anderson, 1992)。总之等离子体层的外边界被称为等离子体层顶，其厚度不到一个地球半径。在太阳活动平静时，等离子体层顶距地心 5~6 个地球半径。而当太阳活动剧烈时，等离子体层顶的位置被压缩到 4 个地球半径之内。等离子体层基本上是一个环向对称的结构，类似于一个“面包圈”，沿着子午线方向的截面与偶极磁场的形状类似。等离子体

层内粒子温度较低，内层粒子的温度大约为 0.3 eV。外层的温度相对较高，在等离子体层顶附近粒子的温度为 1 eV。而在等离子体层外的等离子体槽区，温度可以达到 100 eV 至 100 keV（黄娅，2011）。

一般认为等离子体层是由电离层中逃逸出来的电子与离子在大尺度旋转电场与对流电场的共同作用下漂移形成的，并随着地球一起公转。等离子体层顶形状也并不完全是对称的，其形状位置随磁地方时会产生变化，具有明显的晨昏不对称性，在 15:00~22:00 MLT（磁地方时，magnetic local time）时等离子体层顶明显向外延伸，形成一个凸起区域，被称为黄昏隆起区。等离子体层是辐射带与环电流中高能粒子的主要来源，其中低温、高密度的冷等离子体对于运行其中的中低轨道航天器有着显著的影响。等离子体层内除了电子外，还有 H^+ 、 He^+ 和 O^+ 、 O^{++} 、 He^{++} 等其他微量成分。早期的地面哨声观测和卫星观测发现，等离子体层内 H^+ 的成分约占 90%， He^+ 约占 10%，其他的均为微量元素。因此，通常认为 H^+ 和 He^+ 的密度分布及其变化可以代表整个等离子体层的特征。

等离子体层是磁层的重要组成部分，在整个磁层粒子环境中占有重要地位。等离子体层的低能粒子会对该区域运行的卫星等航天器的安全带来影响。如果航天器在运行的过程中始终与这些低能的等离子体保持接触，等离子体层可以看成是一个很强的电离源。等离子体的寄生电流就会在航天器上产生磁矩，影响航天器的姿态控制，严重时甚至会干扰航天器的正常运行。低能等离子体也能引起航天器的表面带电，造成飞行器的电流泄露，增加无用功耗，还可能引起高压系统的短路。如果航天器表面的电位过高，就可能导致放电打火，产生电流或者电磁脉冲，对航天器上的电子器件及卫星的电子学系统产生影响。此外，航天器的表面电位较高就会吸附一些污染物，导致航天器表面性能的恶化。低能量等离子体在飞行器表面沉积，以及表面高电位所吸附带来的污染物都会污染光学镜头，并改变其光学性能。这些低能的等离子体对航天器的危害作用与等离子体层的分布状态和运动状态有着极大的关联。虽然构成环电流和辐射带的粒子的能量要比等离子体层的能量高很多，但是由于等离子体层所处的空间位置大部分和环电流及辐射带重合，环电流和辐射带都会直接受到等离子体层的影响，构成了磁层-电离层耦合的重要方面。

1.1.5 环电流

在地球周围 2~9 个地球半径之间，存在着围绕地球西向运动的电流被称作环电流。这种电流的中心位于赤道平面处，电流大小会随着磁暴的发生而发生巨大变化，造成地球表面磁场水平分量的降低。环电流中存在着大量被

地磁场捕获的高能量离子，能量在 1 keV 到几百 keV 之间，这些离子从东向西进行漂移运动。环电流的能量主要是离子携带的，主要成分包括电子、氢离子、氦离子和氧离子，此外还包括一些二价的氦离子和氧离子，以及碳离子和氮离子等，粒子数密度为 $0.1\sim 10\text{ cm}^{-3}$ 。这些粒子主要来源于等离子体片，而等离子体片中的粒子则来自太阳风和电离层。因此，可以说环电流粒子的来源是太阳风离子注入和地球电离层上行离子。早期研究认为环电流粒子主要来源于太阳风，而太阳风中 95% 的成分是质子，因此质子是环电流的主要离子成分。而电离层中的离子因为能量比等离子体片中的能量低很多，并不被认为是环电流粒子的来源。随着在磁层中发现了大量来自于电离层的氧离子之后，人们开始重新思考磁层等离子体的来源和加速机制。大量卫星观测研究表明电离层可以为等离子体片区提供足够数目的等离子体，特别是在近地等离子体片内。在极区电离层的粒子加速过程可以增加电离层离子到达等离子体片中的能量。尤其是在地磁活动剧烈的时期，电离层氧离子外流增加，而氢离子外流相对较小，这表明造成氧离子外流的过程是与太阳活动和地磁活动剧烈程度密切相关的。在强磁暴期间，氧离子急剧增加导致环电流快速增强，并使得氧离子在环电流中的占比大幅增加。这种变化会影响环电流的电荷交换过程，也会影响波粒相互作用造成的粒子损失过程。

磁暴和亚暴等活动会增强磁层对流，进而加强离子从等离子体片注入进环电流的过程。在磁层亚暴期间，伴随着磁场偶极化的发生，磁层在几分钟之内会产生一个脉冲电场。脉冲电场驱动等离子体片内粒子向同步轨道区域漂移，形成一个陡峭的高能等离子体边界，称为注入边界。当粒子朝地球方向对流时，由于第一和第二绝热不变量的守恒，粒子的能量会增加。地磁场的降低程度一般用 Dst 指数来表示，也是判断磁暴发生的重要参数。Dst 指数是反映低纬度地区磁场水平分量相对于宁静时期的变化值。在磁暴主相期间，加速后的高能带电粒子从磁尾注入到内磁层。对流场增强时，粒子向内漂移；而对流场较弱时，粒子被捕获。在开放的漂移路径上粒子从磁层顶逃逸。当环电流能量的衰减程度大于粒子注入时的增强程度时，磁暴进入恢复相时期。在强磁暴中，常常观测到两个恢复阶段。首先是 Dst 指数的迅速增强，接着是相对缓慢的增强到暴前水平。第二个恢复阶段则需要一天到数天的时间（王馨悦，2006）。

1.1.6 辐射带

20 世纪初有人提出太阳在不停地发出带电粒子，这些粒子被地球磁场俘获，在地球上空形成一个带电粒子带。辐射带的发现始于 1958 年，