

〔瑞典〕H. 阿尔芬 C.-G. 菲尔塔玛 著

宇宙电动力学

科学出版社

4

42

宇宙电动力学

(基本原理)

〔瑞典〕 H. 阿尔芬 著
C.-G. 菲尔塔玛

戴世强 译

科学出版社

1974

内 容 简 介

宇宙电动力学是近年来获得迅速发展的一门学科,专门研究宇宙空间中与电磁过程有关的各种物理现象。本书叙述宇宙电动力学的基本原理,着重于阐明问题的物理本质,并利用比较简单明了的物理图象,以代替某些复杂的数学演算。全书包括五章,第一章介绍宇宙中的电磁现象及其重要性;第二章描述单个带电粒子在磁场中的运动;第三章叙述磁流体力学理论和实验、观测结果,最后两章阐述等离子体的性质。

本书可供从事天体物理、热核反应、气体放电以及有关学科的人员阅读,亦可供高等院校物理系师生参考。

Hannes Alfvén and Carl-Gunne Fälthammar
COSMICAL ELECTRODYNAMICS
(Fundamental Principles)
Oxford University Press, 1963

宇宙电动力学

(基本原理)

[瑞典] H. 阿尔·芬 著
C.-G. 菲尔塔玛 著
戴世强 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1974 年 8 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32
1974 年 8 月第一次印刷 印张: 7 9/16
印数: 0001—9,220 字数: 195,000

统一书号: 13031·237

本社书号: 388·13—3

定价: 0.95 元

中 译 本 前 言

宇宙的起源和演化问题已成为当代科学中的一个重要课题。宇宙等离子体物理学是探索这一问题必不可少的重要学科，因而近年来发展得很快，研究者越来越多。本书作者之一汉斯·阿尔芬对等离子体物理学(特别是宇宙等离子体物理学)进行过多年研究，在许多方面作了开创性的工作。

本书阐述宇宙电动力学(即宇宙等离子体物理学)的基本原理。作者强调理论与实验密切结合的观点，利用简单直观的物理模型来描述一些基本概念，深入浅出，明白易懂。而且书中对于粒子轨道理论、磁流体力学波和不稳定性以及等离子体分类等方面的叙述有独到之处。因此，它是等离子体物理学的一本较好的入门书。但本书对磁流体力学激波、等离子体湍流等课题都未详尽叙述，而且因为出版较早，没有反映近年来的研究成果，对有关课题感兴趣的读者，可以参阅国内外最近发表的文献和著作。

本书的翻译工作是在 郭永怀 教授的鼓励 and 指导下完成的，并曾得到徐复、胡文瑞、徐荣栏等同志不少帮助，最后校订时还参考了陈光明同志的译稿，谨此一并致谢。

第 二 版 序 言

出版《宇宙电动力学》第一版的目的是希望人们注意这个尚处于发展初期的研究领域。该书前四章专门阐述等离子体物理学和磁流体力学的基本原理,后三章探讨它们在磁层(magnetosphere)、行星际空间、太阳物理和宇宙辐射问题中的应用(宇宙论问题中的应用已在作者另一本专著^①中讨论)。

在本书第一版问世后的十五年间,由于当代两项最重大的研究——热核研究和空间研究,使这一学科有了迅速发展。热核研究使我们对磁流体力学和等离子体有了进一步认识;空间研究中有大部分工作专门探索地球周围空间的磁流体力学现象。

这种情况使作者在准备编写第二版时颇感困难。为了使本书篇幅不致过于庞大,我们在此只限于阐明基本原理,也就是第一版前四章所包括的内容。我们希望以后再编写几本有关应用方面的专著。

热核研究和空间磁流体力学探索的最重要而又最困难的任务之一,是把理论和实验或观测紧密地结合起来。所以本书偏重于物理方面,而不是数学方面的叙述。为了使从事实验或观测的科学工作者容易读懂,在必要时,往往对一些公式不作严密的推导。

和第一版一样,本书也是在和尼古拉·赫洛夫逊(Nicolai Herlofson)教授作了多次讨论后写成的。本院几位同事以及在丹麦里萨的张泽田博士也曾提出过有益的建议和批评,谨向他们表示感谢。

H. 阿尔芬 C.-G. 菲尔塔玛

1962 年于斯德哥尔摩皇家工程学院

① 指 H. Alfvén, "On the origin of the solar system", Clarendon Press, Oxford (1954)——译者注

目 录

中译本前言.....	i
第二版序言.....	ii
第一章 总论	1
§ 1.1 引言.....	1
§ 1.2 宇宙物理学中的磁场.....	3
§ 1.3 感应电场.....	9
1.3.1 匀速运动物质中的感应电场	9
1.3.2 旋转物体中的感应电场	12
§ 1.4 正、负空间电荷的近似相等	15
参考文献.....	15
第二章 带电粒子在磁场中的运动	19
§ 2.1 引言.....	19
§ 2.2 带电粒子在均匀静磁场中的运动.....	20
2.2.1 未扰运动	20
2.2.2 非磁力作用下或由孤立的磁场不均匀区引起的扰 动运动。引导中心	22
2.2.3 回旋中心的运动。惯性力	25
§ 2.3 缓变磁场.....	28
2.3.1 磁场随时间变化的情况	28
2.3.2 磁场梯度沿磁场方向有分量的情况	30
2.3.3 磁场梯度在垂直于磁场方向有分量的情况	31
2.3.4 总平均速度	33
2.3.5 沿弯曲磁力线运动的效应	35
2.3.6 磁镜	36
2.3.7 寝渐不变量	38
2.3.8 实验和观测	44
§ 2.4 带电粒子在偶极磁场中的运动。斯笃默方法.....	45

2.4.1 模型实验	48
§ 2.5 带电粒子在偶极磁场中的运动。微扰法	48
2.5.1 关于微扰法的适用性	48
2.5.2 带电粒子在偶极磁场中的漂移运动	50
2.5.3~2.5.5 带电粒子在偶极磁场赤道面附近的运动	54
§ 2.6 电场对带电粒子在磁场中运动的影响	57
2.6.1 赤道面内的运动	58
2.6.2 沿磁力线的振动	60
2.6.3 在偶极磁场中带电粒子的运动区域和禁区	61
§ 2.7 在变化磁场中带电粒子的加速	64
2.7.1 寝渐的动量变化概述	64
2.7.2 单级加速	66
2.7.3 多级过程	67
2.7.4 磁泵	67
§ 2.8 在磁场中运动的带电粒子辐射损失	71
参考文献	73
第三章 磁流体力学	77
§ 3.1 引言	77
磁流体力学波	78
§ 3.2 定性讨论	78
3.2.1 不可压缩流体的情形	78
3.2.2 可压缩流体的情形	79
§ 3.3 基本方程	80
3.3.1 磁力项	81
§ 3.4 不可压缩流体中的平面波。均匀磁场	82
3.4.1 无穷电导率	84
3.4.2 有限电导率	86
3.4.3 磁流体力学波当作磁力线的振动	87
3.4.4 磁流体力学波当作电磁波的一种特殊情形	88
3.4.5 磁流体力学波的反射和透射	90
§ 3.5 不可压缩流体中任意形式的波	92
3.5.1 无穷电导率	94
3.5.2 关于科里奥利力效应的注记	95

§ 3.6 不可压缩流体中的磁流体力学涡环·····	96
§ 3.7 流团的磁流体力学振荡·····	97
§ 3.8 可压缩媒质中的磁流体力学波。磁声波·····	99
3.8.1 基本方程的线性化和简化·····	99
3.8.2 色散关系和传播模式·····	101
§ 3.9 磁流体力学适用性的判据·····	107
§ 3.10 磁流体力学波的实验观测·····	112
磁流体力学的其他应用·····	113
§ 3.11 有磁场时导电液体的定常运动·····	113
3.11.1 由磁场引起的各向异性。实验·····	114
3.11.2 费拉罗等旋定律·····	115
§ 3.12 磁流体静力学·····	118
3.12.1 无作用力磁场·····	119
§ 3.13 磁流体力学稳定性·····	122
3.13.1 扭绞磁场的稳定性·····	124
3.13.2 不稳定性的模型实验·····	126
§ 3.14 产生宇宙磁场的机制·····	127
3.14.1 柯林定理·····	128
3.14.2 自激发电机·····	129
3.14.3 扭曲不稳定性模型·····	131
3.14.4 等离子体环实验·····	132
3.14.5 由不稳定性引起的磁场放大·····	134
参考文献·····	136
第四章 等离子体 ·····	141
§ 4.1 引言·····	141
§ 4.2 概述·····	143
4.2.1 放电概论·····	143
4.2.2 相似变换·····	144
4.2.3 等离子体的一般性质·····	146
§ 4.3 等离子体中的碰撞过程·····	151
4.3.1 弱电离等离子体中的电流·····	153
4.3.2 等离子体中的库仑碰撞·····	157
4.3.3 弱电场中高度电离等离子体中的电流·····	162

4.3.4 强电场中的高度电离等离子体。逃逸电子	163
§ 4.4 双极扩散	165
参考文献	167
第五章 磁等离子体	169
§ 5.1 引言。等离子体的分类	169
5.1.1 高密度等离子体, $\lambda \ll \rho$	169
5.1.2 中等密度等离子体, $\rho \ll \lambda \ll l_c$	170
5.1.3 低密度等离子体, $l_c \ll \lambda$	170
5.1.4 宇宙物理学中的磁等离子体	175
5.1.5 磁等离子体性质的概述	177
§ 5.2 磁等离子体理论	178
5.2.1 等离子体的微观描述和宏观描述	178
5.2.2 漂移速度和宏观速度间的关系	179
5.2.3 宏观方程	181
5.2.3.1 三组元流体模型	181
5.2.3.2 运动方程和广义欧姆定律	184
5.2.3.3 电导率的数值	187
§ 5.3 横向电导率和霍耳电导率	189
5.3.1 阻止霍耳电流的效应	191
5.3.2 等效电路	192
5.3.3 关于非均匀等离子体中垂直于磁场的电流	194
§ 5.4 磁力线的冻结	197
5.4.1 宏观模型	197
5.4.2 微观模型。低密度等离子体	199
§ 5.5 等离子体不均匀性的形成	200
5.5.1 放电的收缩	201
5.5.2 箍缩效应。贝内特关系	202
5.5.3 无作用力磁场中的丝状电流	203
§ 5.6 磁等离子体中的扩散	207
5.6.1 平行于磁场的扩散	207
5.6.2 横越磁场的扩散	208
5.6.3 双极扩散	209
5.6.4 中等密度和低密度等离子体中由磁场不均匀性引	

起的扩散	209
5.6.5 反常扩散	210
§ 5.7 等离子体的磁特性	211
5.7.1 热动平衡中的等离子体	211
5.7.2 扩散的、弱电离的等离子体	213
5.7.3 磁约束的完全电离等离子体	215
§ 5.8 磁等离子体的膨胀川流	216
5.8.1 电场和磁场	217
5.8.2 高能带电粒子的加速	222
5.8.3 粒子的环向漂移	223
§ 5.9 分布函数	224
5.9.1 分布函数应满足的方程	225
5.9.2 平衡分布	227
5.9.3 应力张量	227
参考文献	229

第一章 总 论

§ 1.1 引 言

近来,在宇宙物理学中,电磁过程引起了人们极大的注意,现在已普遍地认识到电磁过程对许多不同的现象来说都是极其重要的。地球内部存在产生地球基本磁场的电磁过程;电离层中的电流使地磁场发生变化,在磁暴期间,这种变化特别显著,与此同时,在地磁极周围某些区域内产生发光现象(极光)。这些现象是和离开地球更远处的其他电磁现象相联系的。地磁场对大约十倍于地球半径的区域内的状况发生作用,有时我们把这种区域称为磁层。空间研究的测量发现磁层中存在着复杂的、迅速变化的电流。在某些区域(辐射带或范艾伦带)内,还存在着被磁场捕获的大量的、高能带电粒子。

地球的电离层和磁层中的状态受行星际空间中电磁现象的影响,而后者又受太阳的影响。太阳上有许多电磁现象,我们称之为“太阳活动”(黑子、日珥、耀斑等)。太阳普遍磁场的存在表明:在太阳的较深层内电磁现象也一定是重要的。在其他星球中电磁现象也是重要的,最明显的是磁变星,其中已观测到的磁场达 30000 高斯以上。在恒星际空间和星系际空间中,电磁现象也可能有决定性的意义,虽然对那里的情况我们还了解得不很多。

如果我们想要理解所有这些现象,并建立有关的物理学理论,首先必须认识到,我们现有的物理学知识主要基于实验室中所获得的经验。当我们试图把这种由经验概括而成的定律应用到宇宙现象时,要作很大程度的外推,而外推是否合理只能通过理论和观测的比较来检验。经典力学曾经非常成功地被外推到天文学的领

域,以致只在阐述近几十年来最精密的观测所揭示的一些现象时,它才不适用。事实证明,原子理论,特别是光谱学,应用到宇宙现象时,也同样是成功的。实际上,经典力学和光谱学已经成为探索我们周围宇宙的两个极其宝贵的工具。

在十九世纪当经典电动力学得到发展的时候,它只能直接应用到宇宙物理学中的几个特殊问题。只是在经典电动力学和流体力学结合起来形成磁流体力学之后,才有了更普遍的应用。为了更深刻地理解宇宙物理学中的电磁现象,我们还必须进一步把磁流体力学和等离子体物理学结合起来。

在宇宙物理学中研究电磁学的初期,人们注意到一些现象,例如地球的基本磁场和宇宙辐射的产生等等,这些现象看来似乎很神秘,以致有些作者认为:要解释它们必须求助于新的自然定律。进一步的研究证明这种观点是错误的,现在对这些现象至少有了在定性上讲得通的理论。目前我们几乎没有理由怀疑,在广义相对论给出的宇宙的空间、时间尺度的数量级范围内,所有普通的物理学定律依然适用。

电磁现象在宇宙物理学中之所以这样重要,主要原因在于:存在着影响空间中带电粒子运动的天体磁场。在某些条件下,电磁力远远超过引力。为了说明这一点,假定粒子在地球离太阳的距离 R_s 上(位置矢量为 $\mathbf{R}_s$) 以地球的轨道速度 $\mathbf{v}$ 运动。如果粒子是中性的氢原子,那么它只受太阳引力的作用(可以略去磁场对可能产生的原子磁矩的影响)。若 M 是太阳质量, m 是原子质量, γ 是引力常数,引力即为

$$\mathbf{f} = -\gamma M m \frac{\mathbf{R}_s}{R_s^3}.$$

如果原子是一次电离的,行星际磁场在地球轨道附近的场强是 $\mathbf{B}$, 那么在磁场作用下,离子和电子(电荷 $e = \pm 4.8 \times 10^{-10}$ 静电单位)所受的力是

$$\mathbf{f}_m = \frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

行星际磁场的磁场强度数量级为 10^{-4} 高斯,于是

$$f_m/f \approx 10^7.$$

这说明,只要物质是电离的,行星际磁场和恒星际磁场远比引力场重要。

另一方面,因为电子和离子受的力 f_m 方向正好相反,在许多情况下,作用在电子和离子上的力可能相互抵消。例如,假若考察一块由相同数目的电子和离子组成的电离云,那么取到一级近似,作用于电离云上的电磁力合力为零。(二级效应,例如磁场不均匀性引起的效应可能仍是重要的。)电离云在磁场中的运动引起电子和离子的分离,而这种极化效应又产生一个限制分离的电场。在某些条件下,电场可能在附近的导体中产生电流,以致出现异常复杂的现象。

上述例子一方面说明宇宙物理学中电磁力的重要性,另一方面也说明电磁现象的复杂性。在本章的其余各节中,我们讨论宇宙物理学中的电场和磁场;在第二章中,我们将探讨单个带电粒子在这种电磁场中的运动;在宇宙中,电磁场和导电物质运动的耦合现象十分普遍(参阅 Dungey, 1958),这种耦合引起复杂的磁流体力学现象,这方面的内容将在第三章探讨;当导电物质由电离气体(等离子体)组成时,单个粒子的热运动导致若干重要的现象(抗磁性、双极扩散等等),严格说来,对这类现象的研究已超出了磁流体力学范围,因而将在有关等离子体的两章(第四、五章)中予以讨论。

电磁现象对太阳系的形成很可能有决定性意义,关于这一问题的讨论可以参阅另一本专著(Alfvén, 1954)和最近的论文(Alfvén, 1962; Alfvén 和 Wilcox, 1962)。

§ 1.2 宇宙物理学中的磁场

由于地磁场和由一个磁偶极子产生的磁场相似,我们先叙述偶极磁场的一些性质,供以后参考。引进以偶极子为原点、极轴

平行于磁矩 $\mathbf{a}$ 的球坐标系, 其坐标为 (r, θ, φ) (图 1.1), 并令纬度 $\lambda = (\pi/2) - \theta$, 于是磁场为

$$\mathbf{B} = -\text{grad}\phi, \quad (1)$$

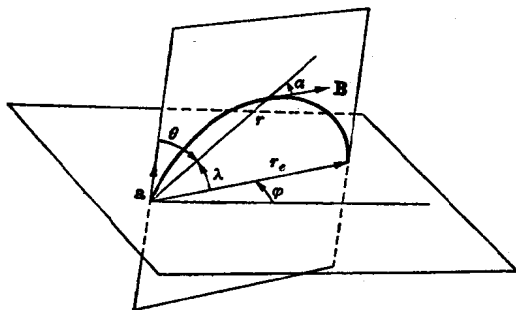


图 1.1 偶极子 $\mathbf{a}$ 的磁力线

其中

$$\phi = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{a \sin \lambda}{r^2}. \quad (2)$$

$\mathbf{B}$ 的分量为

$$B_r = B_p \sin \lambda, \quad (3)$$

$$B_\lambda = -\frac{1}{2} B_p \cos \lambda, \quad (4)$$

$$B_\varphi = 0.$$

总场强为

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_\lambda^2 + B_\varphi^2} = \frac{1}{2} B_p \phi = \frac{a\phi}{r^3}, \quad (5)$$

其中

$$B_p = \frac{2a}{r^3}, \quad (6)$$

$$\phi = \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}. \quad (7)$$

B_r 代表磁场的“垂直”分量, B_λ 为“水平”分量^①. 磁力线方程为

$$r = r_c \cos^2 \lambda, \quad (8)$$

$$\varphi = \text{常数},$$

① 在地磁场中,“垂直分量”方向以向下为正

其中 r_e 是磁力线和赤道面 ($\lambda = 0$) 的交点到原点的距离。磁力线和位置矢量的夹角 α 由下式给出:

$$\tan \alpha = \frac{1}{2} \cot \lambda, \quad (9)$$

或者

$$\sin \alpha = \frac{\cos \lambda}{\phi}, \quad (10)$$

$$\cos \alpha = \frac{2 \sin \lambda}{\phi}. \quad (11)$$

磁场的“倾角”是 $\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$ 。

沿给定磁力线的总场强也可以写成

$$B = \frac{a}{r^3} \phi = \frac{a}{r_e^3} (\cos \lambda)^{-6} \phi = \frac{a}{r_e^3} \eta, \quad (12)$$

其中

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}}{\cos^6 \lambda}. \quad (13)$$

在直角坐标系 (x, y, z) 中, 有

$$B_x = 3xz \frac{a}{r^5}, \quad (14)$$

$$B_y = 3yz \frac{a}{r^5}, \quad (15)$$

$$B_z = (3z^2 - r^2) \frac{a}{r^5}, \quad (16)$$

其中

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

在一级近似下, 地磁场是一个偶极场。根据地磁数据可以确定位于地心的偶极子的偶极矩为 $a = 8.1 \times 10^{25}$ 高斯·厘米³, 对应的磁极上的场强是 0.62 高斯。这一“中心偶极子”的轴与地球表面交于两个对偶点: 北纬 78.3°、西经 69.0° 和南纬 78.3°、东经 111.0°

(Chapman 和 Bartels, 1940, 645 及 648 页).

给出地磁场最佳近似的磁偶极子是偏心的, 它从地心向北纬 6.5° 、东经 161.8° 方向移动了 342 公里, 其轴与地面交于两点: 南纬 76.3° 、东经 121.2° 和北纬 80.1° 、西经 82.7° (Chapman 和 Bartels, 1940, 651~652 页). 最近, 计算表明偏心偶极子是离开地心向外运动着的(见 Singer, 1958, 239 页).

利用球谐函数展开可以对地磁场作更精确的近似描述(见 Chapman 和 Bartels, 1940, 639 页). 此法原先为高斯(1838)采用, 高斯的分析指出, 撇开“扰动”不谈(这种扰动在地面上很少超过 1%), 地球的基本磁场是由地壳内的源所产生的.

如果忽略外源, 磁场可以写成

$$\mathbf{B} = -\text{grad } \phi, \quad (17)$$

其中

$$\phi = R_e \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{R_e}{r}\right)^{n+1} T_n, \quad (18)$$

$$T_n = \sum_{m=0}^{m=n} (g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\theta). \quad (19)$$

在这些表达式中, r, θ, φ 如图 1.1 所示, R_e 是地球的平均半径, P_n^m 是缔合勒让德函数(见 Chapman 和 Bartels, 1940, 609 页), 高斯系数 g_n^m 和 h_n^m 决定复极子的强度和方向. 因为地球的基本磁场是缓慢地变化着的, 所以这些系数略微随时间而变化. 有人分析过 1945 年代的磁场(Vestine 等人, 1947; Hultqvist, 1958a, b)和 1955 年代的磁场(Finch 和 Leaton, 1957). 现在, 正在使用由人造卫星携带的地磁仪来绘制地磁场图.

在电离层和地球周围空间中的电流使磁场有所改变, 它引起磁场的迅速变化(“磁暴”)以及缓慢的、半永久性的变化. 这些电流所引起地面磁场的变化很少超过原场强的 1%, 但在磁层的外缘, 相对变化可能要大得多.

其它行星上也可能存在磁场. 木星的射电发射表明木星有磁

场存在(Radhakrishnan 和 Roberts 1960 年的文章)。最近,在离金星中心 41000 公里处的空间探测器测量,未发现金星有磁场 (Smith 等人, 1963)。

空间探测器“月球”2 号的测量结果表明: 月球上不存在强度大于 10^{-3} 高斯的磁场。

太阳磁场最初是在太阳黑子中发现的 (Hale, 1908)。十年之后,又观测到太阳的普遍磁场 (Hale 等人, 1918)。从那时起,随着观测技术的大大改进,广泛地进行了光球塞曼效应的测量 (见 H. W. Babcock 和 H. D. Babcock, 1955 的评述)。人们发现光球中有三种磁场: (1) 普遍磁场, 可在日面高纬度处观测到; (2) 双极磁场区域, 当场强很大时, 和黑子、耀斑、冕流等一起出现; (3) 单极磁场区域, 在低纬度处出现。双极磁场可能非常强 (达 4000 高斯)。如果简单地解释一下测量结果, 结论是: 普遍磁场和单极磁场的强度数量级为 1 高斯, 在 1957 年以前, 普遍磁场反平行于地磁场, 由于磁场极性改变, 自 1958 年起, 两磁场便相互平行了 (H. D. Babcock, 1959)。然而在强烈的磁湍流的光球中, 对于弱磁场塞曼效应测量的解释是值得怀疑的 (Alfvén 和 Lehnert, 1956)。情况还可能这样: 穿过太阳表面的大部分磁通量束成非常细的细丝, 以致使用目前的技术无法观测到, 而观测实际上只适用于细丝间的媒质 (见 5.5.3 节)。这里必须承认: 关于太阳的普遍磁场的情况, 我们还了解得不很确切。

太阳内部的磁场不能直接观测到, 但如果根据太阳黑子的磁流体力学理论 (Alfvén, 1943) 来解释, 太阳黑子区的替续表明: 在光球和太阳中心之间的区域内, 有一个磁矩为 $a = 2.1 \times 10^{33}$ 高斯·厘米³ 的普遍磁场。这个结果最好能从另一个角度来证实。

通常认为日冕的射线结构是由太阳磁场引起的。日冕的射线结构伸展到远离太阳表面处, 但在很远处看来, 它和偶极磁场也并不相似, 原因在于行星际空间中的电流不可忽略。这种电流产生行星际磁场, 由于媒质在其中运动, 这一磁场又产生行星际电场。正是行星际的电磁场支配着地球附近发生的现象, 引起极光和磁暴,