

高等学校教材

宇宙电动力学 导论

许敖敖 唐玉华 编著

高等教育出版社

P142.7

512

高等学校教材

宇宙电动力学导论

许教教 编著
唐玉华

2/22

高等教育出版社

32523

内 容 简 介

本书系根据作者多年来在南京大学天文系为大学生和研究生讲授“宇宙电动力学”课程的讲义提炼、补充、整理而成。全书系统地介绍了天体物理、空间物理和地球物理等领域所需的等离子体物理和磁流体力学理论的基本内容，突出了那些在上述领域中应用特别广泛的重要理论和概念，增添了一般等离子体物理和磁流体力学书籍中很少论述的宇宙磁场位形、磁激波（包括无碰撞激波）、磁场快速湮灭以及带电粒子的加速等理论，它们是上述学科领域中至关重要的理论基础。

全书共分为九章，第一章至第六章可作为天体物理、空间物理和地球物理等专业高年级学生的教材或教学参考书；第七章至第九章则可作为上述专业的研究生学习等离子体不稳定性理论和带电粒子加速理论的教材或教学参考书。

本书也可供天体物理、空间物理和地球物理等领域中的科技人员使用和参考。

本书责任编辑：杨祥

高等学校教材

宇宙电动力学导论

许敖敖 唐玉华 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

江苏太仓印刷材料厂排版

上海中华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 24 字数 573,000

1987年6月第1版 1987年6月第1次印刷

印数 0,001—1,500

书号 13010·01378 定价 4.70 元

前 言

近廿多年来，随着观测技术(特别是空间探测技术)的飞速发展，积累了有关宇宙等离子体物理过程的大量新的观测资料。为了从理论上解释这些观测现象，使等离子体物理学及磁流体力学理论在天体物理、空间物理以及地球物理等领域中获得越来越广泛的应用。尽管已出版了不少优秀的等离子体物理及磁流体力学方面的著作，但它们中的绝大部分都不是专门为上述几个科学领域中的工作者和学生所写。本书集中了等离子体物理和磁流体力学中那些与天体物理、空间物理和地球物理关系最为密切的内容，并举例讨论了它们在宇宙等离子体物理过程中的可能应用。为此，我们把它命名为“宇宙电动力学导论”。

本书共分九章，前面三章由唐玉华撰写，后面六章由许教教撰写。与一般等离子体物理和磁流体力学书籍相比，本书有如下几个特点：

1. 既保持了对等离子体物理及磁流体力学基本原理的系统阐述；又突出了那些与宇宙等离子体物理过程关系密切的内容。例如关于等离子体宏观和微观不稳定性及其应用的讨论，就占据了较大篇幅。

2. 增添了不少一般等离子体物理和磁流体力学书籍很少讨论的内容。例如，宇宙磁场位形的理论，发电机理论，激波(包括无碰撞激波)，磁场快速湮灭理论和带电粒子的可能加速机制……。这些理论在天体物理、空间物理和地球物理中具有重要意义。

3. 着重于等离子体物理和磁流体力学基本概念的描绘和阐述是本书的另一个特点。书中尽量删去繁琐的数学推导，深入浅出

地帮助读者建立正确的物理概念。

本书前面六章可作为天体物理、空间物理及地球物理本科生的教材；第七章—第九章则可作为上述专业研究生学习等离子体不稳定性理论和带电粒子加速机制的入门教材。

限于篇幅，本书基本上未涉及等离子体的非线性理论。在后面有些章节中遇到等离子体的非线性效应时，也只是作了物理图象上的描述。

鉴于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，谨请读者及有关专家及时指正！

作 者

1986年春于南京大学

目 录

第一章 绪论	1
§1.1 引言	1
§1.2 等离子体基本参量	6
一、等离子体的独立参量 n 和 T	6
二、德拜长度	8
三、等离子体振荡频率	13
四、电导率	15
§1.3 动力论方程	24
§1.4 宇宙等离子体的特点	27
第二章 单粒子轨道理论	30
§2.1 均匀稳恒电磁场中粒子的运动	31
一、 $E=0$	31
二、有限 E 值	33
三、重力场	37
§2.2 非均匀磁场中的漂移——横向梯度漂移和曲率漂移	38
§2.3 随时间变化电磁场中的漂移	42
§2.4 缓渐不变量	46
一、磁矩不变量 μ	47
二、第二个缓渐不变量——纵向不变量 J 与费米加速机制	53
三、第三个缓渐不变量——磁通不变量 Φ	57
§2.5 带电粒子在地磁场中的运动	58
第三章 宇宙磁场位形理论	63
§3.1 宇宙磁场的特点	63
§3.2 偶极磁场和磁层	64
§3.3 无作用力场	71
一、势场	74

二、线性无力场	74
三、非线性无力场	77
§3.4 扇形磁场	84
第四章 磁流体力学理论及其在宇宙等离子体中的一些应用	88
§4.1 磁流体力学的基本方程	90
一、导电流体描述的适用性条件	90
二、磁流体力学方程	92
§4.2 完全电离等离子体的二流体模型、广义欧姆定律、冷等离子体方程	96
一、完全电离等离子体的二流体模型	96
二、广义欧姆定律	99
三、冷等离子体方程	103
四、矩方程与磁流体力学方程	105
§4.3 导电流体中磁场的变化	109
一、磁场的扩散效应	110
二、磁场的冻结效应	112
三、量级分析法(或称量纲分析法), 磁雷诺数 R_m 与导电流体中磁场的变化	118
§4.4 磁场应力	121
一、磁压力和磁张力	121
二、太阳黑子的平衡	125
三、“瓜籽效应”	126
§4.5 磁流体静力学	130
一、导电流体在磁场中的平衡与磁流体静力学方程	130
二、地球磁层尾的平衡位形	133
三、宁静日珥的平衡位形	138
§4.6 箍缩效应	149
一、平衡箍缩	149
二、动力箍缩	156
三、箍缩效应的一些应用	163
§4.7 发电机理论	166

一、一般讨论	166
二、天体有规磁场的维持	169
三、天体无规(局部)场的维持和放大的可能性	173
第五章 等离子体中的波动和能量的传输	176
§5.1 磁流体力学波动	178
一、阿尔芬波	179
二、可压磁流体中的波动	190
§5.2 冷等离子体中波动的一般理论	202
§5.3 CMA图	213
§5.4 热等离子体波	227
一、热等离子体中的低频波	227
二、热等离子体中的纵波	230
三、朗道阻尼的物理图象	239
四、等离子体波动的一般色散关系	243
第六章 宇宙等离子体中的激波	247
§6.1 流体力学激波的一般概念	250
一、平面激波的基本规律	250
二、激波的简单理论	254
§6.2 磁流体力学激波	258
一、间断面和相容性条件	258
二、磁激波的兰金-雨贡尼奥方程	262
三、平行于磁场方向的激波	264
四、垂直于磁场方向的激波	266
§6.3 激波的厚度	269
§6.4 磁场的快速湮灭——佩切克(petschek)机制	271
一、中性电流片的帕克-斯维特机制	272
二、导电流体不可压情况下的佩切克机制	276
三、导电流体可压情况下的佩切克机制	286
§6.5 一维非定常流动——简单波	289
§6.6 无磁撞等离子体中的激波	299

一、无碰撞等离子体	299
二、无碰撞等离子体中激波的一般讨论	300
三、基本方程式	302
四、无碰撞等离子体中激波结构的分类	304
五、守恒关系和相容性条件	307
六、在麦克斯韦分布下的兰金-雨贡尼奥关系式	309
七、地球的弓激波	316
第七章 等离子体的宏观不稳定性与宇宙中的活动现象	319
§7.1 引言	319
§7.2 电流不稳定性	334
一、柱电流箍缩不稳定性物理图象	334
二、存在纵向磁场的线箍缩面电流等离子体柱的不稳定性	339
三、具有体电流分布的箍缩等离子体柱的不稳定性	348
四、有流动情况下箍缩等离子体柱的扭曲不稳定性	353
五、电流不稳定性在太阳活动区物理上的一些应用	361
§7.3 瑞利-泰勒不稳定性	367
一、无磁场情况下的瑞利-泰勒不稳定性	367
二、磁流体中的瑞利-泰勒不稳定性	371
三、重力场中等离子体-磁场(真空)边界的稳定性问题	381
四、另一种瑞利-泰勒型不稳定性——磁场的非均匀性 所引起的不稳定性	385
五、宇宙等离子体中的应用实例：克鲁斯卡-史瓦西不稳定性 和宇宙 γ 射线爆	388
§7.4 开尔文-赫姆霍兹不稳定性	392
一、流体力学切向间断面的不稳定性	292
二、经典的流体力学开尔文-赫姆霍兹不稳定性	397
三、磁流体力学的开尔文-赫姆霍兹不稳定性	401
四、开尔文-赫姆霍兹不稳定性应用	408
§7.5 交换不稳定性、磁力线剪切和端结的致稳效应	415
一、磁场中低 β 等离子体的交换不稳定性	416
二、萨德姆条件	425

三、磁力线剪切和端结的致稳效应	429
§7.6 有限电阻不稳定性	433
一、片箍缩有限电阻不稳定性	435
二、柱面形状的电阻不稳定性	461
三、无碰撞等离子体中的撕裂模不稳定性 和磁尾动力学	467
四、中子星吸积盘的撕裂模不稳定性 与快速X射线爆	473

第八章 等离子体的微观不稳定性及其对宇宙物理过程的可能影响

§8.1 引言和伏拉索夫方程	479
一、引言	479
二、几种动力论方程	481
三、无碰撞等离子体与伏拉索夫方程	490
§8.2 静电波(朗缪尔波)与朗道阻尼, 等离子体静电不稳定性 判据	500
一、等离子体中的静电波和朗道阻尼	500
二、静电不稳定性判据	515
§8.3 川流(束流)不稳定性	528
一、二川流不稳定性(二束不稳定性)	527
二、束-等离子体不稳定性	530
三、比尤内门(Buneman)不稳定性	535
四、热运动对上述几种不稳定性可能影响	537
五、离子声波不稳定性	539
六、讨论及应用	545
七、等离子体中另一种由电流驱动的不稳定性——电流相关不稳定性	553
§8.4 速度分布各向异性引起的不稳定性	556
一、一般讨论	557
二、沿磁场方向传播的不稳定模式	564
三、赫利斯不稳定性	569
四、损失锥不稳定性	573
§8.5 漂移不稳定性	579
一、非均匀等离子体平衡态的分布函数	580

二、漂移波	584
三、漂移不稳定性	589
四、影响漂移不稳定性增长的因素	592
五、漂移回旋不稳定性	596
六、对具有简化结构的磁层顶中低混杂漂移波不稳定性讨论	598
§8.6 等离子体的微观不稳定性与反常电导率	607
一、引言	607
二、反常电导率理论	610
三、反常电导率的具体计算	625
四、结论和讨论	631

第九章 加速带电粒子的可能机制

§9.1 费米加速机制	635
一、费米加速的观测基础和物理基础	635
二、费米统计加速的理论基础	636
三、一阶费米加速和二阶费米加速	642
四、费米加速机制的能谱	643
五、讨论和应用	651
§9.2 电双层(或称空间电荷层、鞘层)理论	654
一、电双层的定义和性质	655
二、定常电双层的基本理论	659
三、电双层的实验和观测及其在宇宙等离子体中应用的实例	676
§9.3 等离子体湍动加速	685
一、引言	685
二、激发等离子体波湍动的因素	691
三、产生等离子体波湍动的基本理论	694
四、处理调制不稳定性的理论方法	702
五、在天体物理中强等离子体波湍动对电子的加速	709
§9.4 激波加速	713
一、激波波前附近粒子加速的一般原理	713
二、由微波加速的粒子能谱	717
三、无碰撞激波对粒子的加速	721

四、激波加速中的波-粒子相互作用	734
五、随机加速的一些应用	742
§9.5 低频电磁波加速	744

第一章 绪 论

§1.1 引 言

宇宙电动力学(即宇宙等离子体物理学)是研究宇宙空间中与电磁过程有关的各种物理现象的一门学科。众所周知,宇宙中绝大部分的物质处于等离子体状态,等离子体状态又叫物质的第四态。物质由于温度不同,从而导致构成物质的微观粒子之间的结合和凝聚程度亦不同,以致呈现不同的物态。

在固态中,粒子之间的结合最紧密,在液态中次之,在气态中则最松散。当物质达到气态以后,如果继续从外界得到能量,粒子又可以进一步分裂为带负电的电子和带正电的离子,这就是电离。

实际上,在绝对温度不等于零的任何气体中,总有若干粒子是电离的,但数量太少,不会使气体性质发生质的改变。当由于某种自然(如高温天体上)或人为的原因,使带电粒子浓度超过一定数量(通常约需大于千分之一)以后,气体的行为在许多方面虽然仍与寻常流体相似,但这时中性粒子的作用退居次要地位,整个系统将受带电粒子的运动所支配,对外界电磁场敏感,且表现出一系列新的性质。象这样部分或完全电离的气体,它们由带电粒子和中性粒子组成,且表现出集体行为的一种准中性气体叫做等离子体。关于“准中性”的意义将在§1.2节中阐述。所谓“集体行为”所包含的意义如下:

考虑作用在一个分子上的力,由于分子是中性的,在分子上不存在净电磁力,而重力是可以忽略的。在这个分子与另一个分

子碰撞前，它不受扰动地运动，这时碰撞支配了粒子的运动。在由带电粒子组成的等离子体中，情况就完全不同。当带电粒子运动时，它们能引起正电荷或负电荷的局部集中，从而产生了电场。而电荷的运动也引起电流，以致产生磁场。这些场影响了远处其它带电粒子的运动，由于库仑力的长程性所以带电粒子之间的相互作用力为长程力。所谓长程力是力随距离的增大，下降较缓慢。即在较远距离还有相互作用力。例如在某一稍许带电区域中任意两个距离为 r 的带电粒子之间的相互作用力当距离增加时，力按与距离的平方成反比的规律减少。而随着距离的增加，区域内的平均粒子数的增长率正比于 r^3 ，所以对于区域内任一带电粒子来说，区域内粒子数的增长率远大于其所受作用力的减少率。结果任一给定粒子受到大量的、远处的连续相互作用力，它的影响要比受附近粒子的较小的相互作用力的影响大得多。所以“集体行为”指的是不仅取决于局部条件而且也取决于远距离区域等离子体状态的运动。它是由库仑长程力所支配的等离子体的基本属性。

只要一离开地球大气，就遇到构成范阿伦辐射带和太阳风的等离子体，以后就遨游在等离子体的王国之中。这是因为无论在恒星内部及大气层，或气态星云、星际星云等均具备了电离的条件。

从沙哈方程可知，处于热动平衡的气体的电离量为

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{16} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/kT} \quad (1.1-1)$$

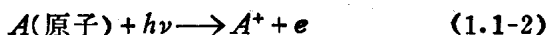
这里的 n_i 和 n_n 分别为已知电离原子和中性原子的密度（每立方米的粒子数）， T 是气体温度（开）， k 是玻耳兹曼常数， U_i 是气体的电离能——使最外层电子离开原子所需的焦耳数。对于室温下的

普通空气,我们可以取 $n_n \approx 3 \times 10^{25}/\text{米}^3$, $T \approx 300\text{开}$, $U_i = 2.32 \times 10^{-18}$ 焦耳(对氮气),由(1.1-1)式得

$$\frac{n_i}{n_n + n_i} \approx \frac{n_i}{n_n} \approx e^{-12.1}$$

当气体温度升高时,在 kT 达到 U_i 的几分之一以前,它一直保持低电离度.若温度再升高, $\frac{n_i}{n_n}$ 急剧增加,气体就处于等离子体状态.温度再进一步升高,使得电离度大于等于千分之一,等离子体就完全电离.这就是在达百万度的高温天体中存在等离子体,而地球上不存在等离子体的缘由.

对于低温稀薄的星际气体、星际星云中,由于恒星灼热的辐射,使星际气体区域和星际星云中的原子吸收光子而产生光电离



光电离是稀薄等离子体中的主要电离过程.

我们已经知道,宇宙物质几乎都是等离子体.同时观测表明,宇宙中还普遍存在影响空间中带电粒子运动的磁场.并且,通常电磁力的作用远远超过引力的作用.下面举一例说明之.设粒子在地球离太阳的距离 R 处,以地球的轨道速度 v 运动,如果粒子是中性的氢原子,那末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, G 是引力常数.则引力为

$$f = -GMm \frac{R}{R^3} \quad (1.1-3)$$

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 B ,那末在磁场作用下,离子和电子所受的力为

$$f_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.1-4)$$

设行星际磁场强度的数量级为 10^{-8} 特斯拉，于是

$$\frac{\vec{f}_m}{f} \approx 10^7 \quad (1.1-5)$$

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。

宇宙中，除一些特殊区域外，静电场通常是不重要的，电场一般是由磁场决定的。有磁场时，只有相对于一定的坐标系，电场才是确定的。设在“静止”坐标系中电场和磁场是 \mathbf{E} 和 \mathbf{B} ，另一坐标系以速度 \mathbf{v} 相对于原坐标系运动，可用相对论转换公式来计算运动坐标系中的场 \mathbf{E}' 和 \mathbf{B}' 。场的平行于 \mathbf{v} 的分量保持不变，而垂直于 \mathbf{v} 的分量按下列形式变换：

$$\mathbf{E}' = \frac{\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1.1-6)$$

$$\mathbf{B}' = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{v} \times \mathbf{E}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1.1-7)$$

由于宇宙中静电场通常很小，又速度一般远小于光速，故在宇宙物理学中，通常认为电磁场量分别为

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.1-8)$$

$$\mathbf{B}' = \mathbf{B} \quad (1.1-9)$$

(场的平行于 \mathbf{v} 的分量也包括在矢量内)。

亦即磁场与坐标系的选择无关，电场却与测量它的坐标系相关。

人们对地球以外天体磁场和宇宙磁场效应的研究，只有六、七十年的历史。自1918年海耳(Hale)首次测得黑子磁场后，拉摩(Larmor)于1919年提出了第一个维持黑子磁场的发电机理论。卅年代，柯林(Cowling)提出了太阳黑子磁场也许是等离子体垂直流引起深层磁场对流的结果；查普曼(Chapman)和费拉罗(Ferraro)进行了与地磁暴理论有关的电离气体流射入磁偶极场的行为的研究；其后费拉罗提出了等旋定律；同时期哈特曼和拉扎勒(Lazarus)等用水银和其它导电液体在实验室中研究磁流体理论。从1940年到1950年瑞典科学家阿尔芬(Alfvén)的工作，使磁流体力学和宇宙电动力学成为一门独立学科。阿尔芬首次阐明了冻结效应；预言了磁力线与流体的耦合将产生一种新的波——阿尔芬波；提出了太阳内部的磁流体波传播到太阳表面产生太阳黑子磁场的理论；引进了粒子在磁场中回旋漂移时“引导中心”的概念；发展了地磁暴理论和太阳系起源理论。对宇宙电动力学的发展作出了卓越的贡献。五十年代，埃耳沙塞(Elsasser)对磁流体力学波、发电机理论作出了重大的贡献。1957年开始，受控热核反应中有关磁约束等离子体研究成果公开发表后，加强了国际间的合作，大大促进了宇宙电动力学的发展。六十年代，主要研究了磁场的产生、磁湮灭和磁等离子体不稳定性。自1973年开始，皮丁顿(Piddington)首先向“经典”理论进行了挑战。由空间观测资料获得了大量有关行星际介质、行星和地球磁层的知识，磁流管理论和磁层理论得到进一步的发展。在木星、太阳(及其它行星)、蟹状星云、银河系、射电星系和类星体中均观测到宇宙电动力学效应。许多长期以来困惑不解之谜，借助于宇宙电动力学得到了圆满的解释。研究表明，在某些情况下，宇宙电动力学效应是决定天体形态的最主要的因素。由此可见宇宙电动力学是研究宇宙物理的有力工具。