

宇宙等离子体

H. 阿尔文 著

科学出版社

宇宙等离子体

H. 阿尔文 著

戴世强 译

徐荣栏 张冬梅 校

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是等离子体物理方面的一部专著,共分六章,前二章着重描述实验室等离子体与空间等离子体之间的关系;第三章阐明阿尔文等人提出的新处理方法——等离子体磁场描述与电流描述的结合形式,以说明等离子体的主要特性必须用电路来描述;第四章介绍一些新的发现;第五章讨论太阳系起源的问题;第六章论述对宇宙观点的修正。本书取材新颖、论理精辟。著者阿尔文是世界上著名科学家,1970年曾荣获诺贝尔奖。

本书可供天体物理、空间物理、等离子体物理方面的研究工作者参考,也可供有关专业的教师和学生阅读。

H. Alfvén
COSMIC PLASMA
D.Reidel Publishing Company, 1981

宇 宙 等 离 子 体

H. 阿尔文 著

戴世强 译

徐荣栏 张冬梅 校

责任编辑 夏墨英

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

1987年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987年 8 月第一次印刷 印张: 7 1/2

印数: 0001—1,250 字数: 160,000

统一书号: 13031·3582

本社书号: 5091·13-5

定价: 1.80 元

译者的话

本书作者阿尔文教授是世界著名的宇宙物理学家，曾与涅尔 (L. Neel) 教授共同获得1970年度诺贝尔物理学奖金。近半个世纪以来，他一直孜孜不倦地从事宇宙等离子体研究，在许多方面取得了卓越的成就。已发表的重要专著有：《宇宙电动力学》(1963)*、《太阳系的起源》(1976)，现在这本书可以看作以上两书的续篇。

这本专著出色地综述了近二十年来有关空间等离子体研究的新成果，全书篇幅不大，却写得很有特色，内容丰富、取材新颖，并且发表了许多颇有影响的精辟的见解。例如，强调实验和观测在宇宙等离子体研究中的重要意义；敢于摒弃经典理论中不切实际的陈腐观念，着重阐明了宇宙等离子体物理学的二重性，指出传统的磁场描述只能解释一部分空间等离子体现象，而对大量的空间问题来说必须应用新颖的电流描述，即通过引进等效电路、分析各种电流体系、计及边界条件，全面地研究宇宙等离子体；书中还综述了他和他的学派在天体起源和演化问题上的观点，强调了等离子体效应的重要作用，并在批判分析大爆炸宇宙论的基础上，提出了物质-反物质湮没作为天体演化能源的论点，值得引起注意。与阿尔文的其它专著一样，本书强调物理直观，叙述深入浅出，尽可能回避复杂的数学分析，读者只要有一定的物理学基础就可理解书中的大部分内容，如果读过《宇宙电动力学》，本书内容就更容易掌握了。

• H.阿尔文, C.-G.菲尔塔玛著,《宇宙电动力学》,科学出版社,1974。

基于上述原因，本书可以作为立志从事空间物理研究的大学生、研究生和科技人员的重要参考书，也可供研究等离子体物理学、基本粒子物理学、宇宙论和哲学的有关人员阅读。

阿尔文教授对中国人民一直怀着友好的感情，曾数次来我国访问、讲学。几年前，他就把此书打字稿赠送给校者之一徐荣栏教授，后来又赠送新书，值此中文版问世之际，我们谨向他致以衷心的感谢。

限于译校者的水平，译文疏漏不当之处在所难免，请读者不吝指正。

中 译 本 序

《宇宙等离子体》英文版大约于五年前写成。时至今日，由于这一研究领域在迅速发展，人们不禁要问，这本专著是否已经过时？回答是一分为二的。书中只有很少的论述显得有些陈旧，但许多尝试性叙述的观点，现在却更经得起推敲了，而且人们还发现了一系列新现象。

本书的中心思想是：等离子体物理学研究从根本上来说更应从实验-观测出发，而不是从数学-理论出发。影响深远的查普曼-柯林的“电离气体理论”及其极为繁杂的进一步阐述，并未能完全成功地解释实验事实。人们已发现了十几个用这些过于理想化的理论模式所没有预见到的重要现象，其中有些现象甚至在发现后也难以从理论上作出解释，诸如电偶层（§ 2.6），临界速度（§ 4.6），宇宙演化的等离子体-行星子过渡阶段的三分之二收缩（§ 3.2）以及使空间呈细胞状结构的薄电流片的形成（§ 2.10）。

本书的前两章主要论述等离子体物理学中磁场描述和电流描述的二重性，这是一个十分基本但很少公开讨论的问题。人们习惯于采用磁场描述，而对电流描述则常常甚至不屑一提。正如§ 2.3.1、§ 2.3.2特别是§ 2.3.3中所指出的，这样做很容易导出能量传递的“磁合并”的错误理论，因为从§ 2.5的陈述中我们可以看到，等离子体的性态取决于流动着电流的整个电路（第三章）。象大多数磁合并理论那样

• 此文系本书作者H.阿尔文所著。——译者注

的局部理论必须由计及整个电路的全局理论取代。

毫无疑问，人们现在开始转而倾向于电流描述。1982年召开了关于磁层电流的一次会议 (Potemra, 1984)*，1984年Lyons-William出版了一本专著，第一次根据带电粒子的运动和电流对磁层现象作了详尽的数字描述，指出了磁场描述的局限性，并断言：磁力线合并重联可以直接将能量从磁场传递给带电粒子这一点仍有待证实。

然而，大多数已发表的文章仍然还应用往往是错误的磁合并概念。这些文章应转变成电流-粒子描述才可被认真采纳。

将等离子体现象从一个区域推广到另一个区域的可能性为研究天体等离子体物理学提供了一个非常有效的途径 (§ 1.2, 图1.3)，关于这一点仍然仅为最先进的天体物理学家所认识。当磁层现象被更普遍地推广到天体物理状况之时，天体物理学将会出现一个巨大的飞跃。

本书第四章描述的一系列现象中，有些是新近发现的，有些则在另一些有关领域中已为人们所熟知，但它们在宇宙物理学中的重要性尚未受到充分注意。其中一个重要现象是引起场向电流趋于细束状流动的箍缩效应 (§ 2.4.3)。在许多场合下，这使得我们有可能绘出电路图 (第三章)，从而常常获得比用其它方法给出的重要过程的更为清晰的图案。然而，电路元往往是非线性的，使电路很难分析。

另一个重要现象是1982年里萨 (Risø) 讨论会和1984年茵斯布鲁克 (Innsbruck) 讨论会上探讨过的静电偶层现象，它与其它场向电场一起在磁层中产生千伏量级的电压。

* T.A. Potemra, editor, American Geophysical Monograph 28, American Geophys. Union, Washington D.C., 1984.

降，在太阳中产生兆伏到千兆伏量级的电压降（例如，在被看作太阳耀斑的爆发电偶层中）（§ 2.6）。Carlqvist提出了相对论性电偶层理论，将磁层电流体系推广到日球情形中，并进一步推广到星系电流体系，他认为星系条件下甚至可能发生高达 10^{14} 伏的电压降。

诸如磁层顶中的电流层的发现表明，空间有将其自身分划成“细胞”的普遍倾向，这一点具有深远的意义。

本书第五章述及的宇宙演化论（太阳系起源）是进展得最为神速的领域，在分析太阳系谱带结构时发现的临界速度已发展成为宇宙科学的一个令人感兴趣的新领域，这是因为（最早由慕尼黑的Haerendal小组进行的）火箭探测证明了它在高电离层研究中的重要作用（Haerendal 和 Möbius, 1982）*。

对宇宙演化论更有重要意义的是Voyager飞行器对土星环精细结构的测量结果，其理论依据是局部共转，在§ 2.3中加以概述。由于这方面内容已在Alfvén和Arrhenius的专著《太阳系演化》（1976）中作了详尽叙述，本书就不赘述了。该理论阐明了等离子体-行星子过渡在土星环演化史中的重要性以及它如何引起2:3比例因子收缩的。理论预测以非常惊人的方式获得了证实，使我们有可能以高于1%的精度再现发生于宇宙演化时代（40亿到50亿年前）的事件。以此为开端，宇宙科学从推测转向真正的科学。

关于宇宙论的第六章表明，空间研究也在改变着天体物理学的这个领域。对于反物质的存在性的传统的异议似乎已销声匿迹，宇宙可看成关于物质与反物质对称的。支持大爆

* G. Haerendal and E. Möbius, Workshop on Alfvén's critical velocity effect, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching bei München, West Germany, 1982.

炸假设的论据看来正在消失。

三、四个世纪以前，伽里略发明了望远镜，使我们改变了对于宇宙环境的认识。同样，科罗廖夫发射的苏联第一颗人造卫星以及范艾伦发展的尖端测量技术给空间物理研究带来了类似的巨大变化。结果是，实验室测量和磁层测量向天体物理现象的外推，正在使天体物理学发生着只有哥白尼-伽利略革命才可比拟的深刻变化。

本书的目的正是试图阐明这次革命将遵循的方向。

H. 阿尔文

序 言

本书的一般背景和目的在第一章中详细叙述。正如§ 1.7中所述，本书按照如下的原则写成：“当严格性看来要与简单性发生矛盾时，优先考虑简单性。”这就是说，希望本书有较为众多的读者。不仅研究生，而且高年级大学生都应该能够至少读懂此书的大部分内容。

本书是作者多年来与许多同事进行富有启发性的讨论的产物。这里，我要特别提到在斯德哥尔摩和拉若勒的两个研究组，他们给我以很大的帮助。在此作者谨向他们深表谢意。

(致谢略)

目 录

译者的话	i
中译本序	iii
序 言	vii
第一章 总论	1
1.1. 等离子体物理学的理论研究和实验研究	1
1.2. 实验室中和空间中的等离子体现象	5
1.2.1. 尺度换算步骤	5
1.2.2. 模拟实验	7
1.2.3. 实验室研究与空间研究的比较	8
1.3. 等离子体的磁场描述和粒子描述	9
1.4. 经典理论的现状	11
1.5. 边界条件, 对电路的依赖关系	12
1.6. 宇宙论和太阳系起源	13
1.7. 本书的目的	13
第二章 空间等离子体中的电流	15
2.1. 物理学中的二重性	15
2.2. 等离子体物理学中与微粒有关的现象	16
2.3. 磁力线	17
2.3.1. 磁层的磁场描述和电流描述	18
2.3.2. 磁层中的粒子运动	20
2.3.3. 关于稳恒磁层中“磁力线重联”和“合并”的 结论	21
2.4. 细束	22
2.4.1. 细束的观测	22

2.4.2.	放电的收缩	29
2.4.3.	箍缩效应, 贝内特关系	30
2.4.4.	无作用力磁场中的细束状电流	31
2.4.5.	磁绳理论	34
2.4.6.	离子泵	35
2.4.7.	金星电离层中的磁通绳	35
2.5.	等离子体局部特性参数和电路	35
2.5.1.	边界条件	37
2.5.2.	“不可见”的能量传递	37
2.5.3.	“磁合并”理论	38
2.6.	电偶层	39
2.6.1.	电偶层的一般特性	39
2.6.2.	磁层中的电偶层	43
2.6.3.	电偶层中的能量释放	45
2.6.4.	爆发的电偶层	45
2.6.5.	有一电偶层的电路	46
2.7.	作为“电缆”的场向电流	48
2.8.	一个扩张的电路	49
2.9.	不同类型的等离子体区域	50
2.9.1.	“被动的”等离子体区域	50
2.9.2.	“主动的”等离子体区域	50
2.9.3.	等离子体电缆	51
2.9.4.	主动和被动等离子体区域在电离层中的 反映	52
2.9.5.	边界电流片	53
2.10.	空间的细胞状结构	54
2.11.	主动等离子体区域的精细结构	55
第三章	电路	57
3.1.	电流模型的重要性	57

3.1.1.	粒子描述	57
3.1.2.	不同类型的电流	58
3.1.3.	电路与运动等离子体之间的能量传递	60
3.2.	极光电路	66
3.3.	被等离子体包围的旋转的磁化物体	70
3.4.	日球电流体系	72
3.4.1.	“扇形结构”和赤道电流层	72
3.4.2.	日球电流模型的建立	73
3.4.3.	日球电路的特性	75
3.4.4.	到星系尺度的外推: 双射电源	76
3.5.	磁尾、彗星和金星电路	79
3.5.1.	磁尾电路和磁亚暴	79
3.5.2.	彗星中的电流体系	81
3.5.3.	金星磁层中的电流体系	81
3.6.	磁层电路	83
3.6.1.	零级近似: 单粒子问题	84
3.6.2.	一级近似: 等离子体通量很小的情形	84
3.6.3.	三种一级近似电路	87
3.6.4.	一级近似电流产生的现象	89
3.6.5.	二级近似, 实际等离子体流动	90
3.6.6.	磁场变化	90
3.6.7.	锋面电路 (激波阵面电路)	90
3.6.8.	磁层顶电路	91
3.6.9.	太阳风-极光电路	92
3.6.10.	磁尾电路	92
3.6.11.	三级近似以及与观测的比较	93
3.6.12.	三环模型	93
3.7.	其它磁层	97
3.8.	日珥电路和太阳耀斑	97
3.9.	太阳风的加速	98

3.10. 从日核到极光的能量传递	100
第四章 宇宙等离子体理论	103
4.1. 经典理论及其困难	103
4.1.1. 反向偏转	104
4.2. 电离	105
4.2.1. 光、粒子辐射和电流产生的电离	105
4.2.2. 等离子体与中性气体之间的过渡	108
4.3. 宇宙丰度和分化	110
4.3.1. 宇宙丰度	110
4.3.2. 对化学分化的观测	110
4.3.3. 由于电离势不同而产生的分离	111
4.3.4. 由质量差别产生的分离	112
4.3.5. 由于蒸发压力不同而产生的分离	112
4.4. 湍流	112
4.5. 磁通放大	115
4.5.1. 宇宙磁场的产生	115
4.5.2. 自激发电机	116
4.5.3. 自激发电机理论	117
4.5.4. 磁通放大机理	117
4.5.5. 扭曲不稳定性产生的宇宙磁场	118
4.6. 临界速度	121
4.6.1. 早期太阳系中临界速度的预测	121
4.6.2. 实验发现	121
4.6.3. 理论	122
4.6.4. 临界速度和空间研究	123
4.7. 尘埃等离子体	124
4.7.1. 作为等离子体一部分的固体粒子	124
4.7.2. 电磁制约和引力制约的固体粒子的运动	124
4.8. 恒星际云的形成和演化	125
4.8.1. 三种特殊情形	127

4.8.2.	无作用力磁场和细束的产生	128
4.8.3.	磁场是促成还是阻碍收缩?	129
4.8.4.	恒星际暗云的箍缩	130
4.9.	双物质等离子体	131
4.9.1.	双物质等离子体的性质	131
4.9.2.	湮没反应	132
4.9.3.	双物质等离子体发出的辐射	135
4.9.4.	关于双物质等离子体的主要问题	137
4.9.5.	物质与反物质的分离	138
4.9.6.	关于物质和反物质的共存问题	140
4.10.	高能现象	141
4.10.1	能源和加速过程	142
4.10.1.1.	变化着的磁场	142
4.10.1.2.	电偶层中的加速	142
4.10.1.3.	湮没	143
4.10.1.4.	引力	144
4.10.2.	磁泵	145
4.10.3.	宇宙线加速的区域	147
4.10.3.1.	日球宇宙辐射和星系宇宙辐射	147
4.10.3.2.	星系宇宙线的起源	149
第五章	太阳系的起源	150
5.1.	我们怎样来再现远古时代	150
5.2.	资料的来源	150
5.3.	磁层结果的冲击	151
5.3.1.	主动等离子体区域和被动等离子体区域	152
5.3.2.	外部驱动的电 流	152
5.4.	促成宇宙云形成和收缩的电磁效应	154
5.5.	原始宇宙云中的化学分离	155
5.6.	内部产生的电 流	157
5.7.	谱带结构和临界速度	157

5.8. 形成过程中的太阳系	162
5.8.1. 恒星际云	162
5.8.2. 原恒星的形成	163
5.8.3. 行星-卫星的形成	164
5.8.4. 形成中的太阳系的观测	166
5.9. 伴生学和“伴生原理”	167
第六章 宇宙论	169
6.1. 宇宙论的状况	169
6.1.1. 历史概观	169
6.1.2. 大爆炸假说	172
6.1.3. 均匀模型和不均匀模型	173
6.1.3.1. 空间的细胞状结构	174
6.1.3.2. 宇宙中的质量分布	174
6.1.3.3. 总星系的质量和施瓦茨席尔德极限	177
6.1.4. 哈勃膨胀	177
6.1.4.1. 哈勃参数	177
6.1.4.2. 总星系演化的欧几里德模型	179
6.2. 物质与反物质的共存	182
6.2.1. 物质-反物质对称性	182
6.2.2. 物质和反物质细胞	183
6.2.3. 细胞尺度: 是星系尺度还是小一些?	184
6.2.4. 对称星系的结构	185
6.2.4.1. 太阳系	185
6.2.4.2. 彗星库	187
6.2.5. 对反物质存在性的异议	188
6.3. 湮没作为一种能源	189
6.3.1. 反物质存在性的论证	189
6.3.2. 两类物质电磁辐射的相似性	191
6.3.3. 湮没过程产生的辐射	191
6.3.4. 莱顿夫罗斯特层和细胞壁上的湮没	191

6.3.5.	宇宙云中的湮没	192
6.3.6.	降落到相反种类物质的恒星上的物体	193
6.3.7.	双物质星的模型	195
6.3.7.1.	双物质星模型 I	196
6.3.7.2.	恒星的碰撞	197
6.3.7.3.	双物质星模型 II	198
6.3.7.4.	双物质星的可观测的性质	199
6.3.7.5.	蓝移	199
6.3.7.6.	类星体情况概述	200
6.3.7.7.	连续的X射线背景辐射	202
6.4.	欧几里德空间中的哈勃膨胀	203
6.4.1.	若干类星体的非宇宙论红移	203
6.4.2.	对类星体红移的非宇宙论解释的后果	204
6.5.	总星系演化的一个模型	205
6.5.1.	原总星系	206
6.5.2.	哈勃膨胀的动能	207
6.5.3.	原总星系的形成	208
6.5.4.	其它的宇宙论问题	209
6.6.	其它总星系	210
6.7.	讨论	211
6.8.	结束语	212
参考文献		214