

CAMBRIDGE

等离子体物理与聚变能

Plasma Physics and Fusion Energy

[美] Jeffrey Freidberg 著
王文浩 等 译



科学出版社
www.sciencep.com

Plasma Physics and Fusion Energy

等离子体物理与聚变能

[美] Jeffrey Freidberg 著
王文浩等 译

科学出版社

北京

图字: 01-2009-7763 号

内 容 简 介

本书是在麻省理工学院的研究生课程“等离子体物理和聚变能”的一系列讲义的基础上形成的。内容叙述从世界能源需求的概述开始,然后是目前的能源生产方法、聚变在未来的潜在作用等。全书包括两部分,前一部分论述能源问题,诸如聚变能的产生、功率平衡、简单聚变反应堆的设计等;后一部分讲述聚变能发展所面临的基本等离子体物理学问题,包括宏观平衡和稳定、输运和加热等问题。

本书适合应用物理和核工程方面的研究生和研究人员阅读。书中搜集的作者在过去的二十多年的教学过程中积累的大量习题有助于读者对各章内容的理解。

图书在版编目(CIP)数据

等离子体物理与聚变能/(美)Jeffrey Freidberg 著;王文浩等译. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028606-2

I. 等… II. ①J… ②王… III. ①等离子体物理学 ②聚变反应
IV. ①O53 ②TL61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 158521 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

▲ 邮政编码 100717

[tp://www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

北京天鸿彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年11月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张: 40 1/4

印数: 1—3 000 字数: 787 500

定 价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

随着能源问题和环境问题日益突出,人们对未来的能源选择变得兴趣大增。特别是随着中国加入国际热核聚变堆(ITER)项目建设,“ITER”一如当年“哥德巴赫猜想”一词,已成为媒体和普通民众经常使用的热词。应当说,近30年来磁约束聚变研究的发展,已使得面向反应堆的聚变工程研究变得与等离子体物理研究同样引人注目。为适应这一形势和学科布局发展的需要,国内(大陆)很多有条件的高校纷纷开设了面向聚变研究的专业方向。这样,原先主要以高温等离子体物理内容为主的教材就显得不能很好地满足当前的需要。这本最新出版的(2007年版)美国麻省理工学院的教材《等离子体物理与聚变能》,正是以聚变反应堆建设为目标(而不是像以往教材那样仅仅是背景)来展开叙述的,特别适合用来弥补目前流行教材的不足。因此在科学出版社的大力帮助下,我们组织力量将它翻译介绍到国内来。

作者 Jeffrey Freidberg 是麻省理工学院(MIT)核科学与工程系的资深教授,多年来一直从事聚变等离子体物理和工程方面的研究,曾任 MIT 等离子体科学和聚变研究中心副主任,具有丰富的实践经验和理论造诣。本书是他对多年来从事研究生相关教学的一个总结,在内容的铺陈和深度的把握上,不仅做到了物理机理论述和工程技术要求之间的恰当平衡,而且提供了很多具体的聚变研究概念和观点,这些都是国内现有教材中着墨不多的遗珠之处。例如,从聚变堆反应应用前景的角度对多种磁约束球形进行描述,引入能量约束时间的经验定标律概念,各种加热技术之间的优劣比较及其经济成本分析等,这些以往仅出现在专业期刊或专著中的概念和术语进入教材,对学生进入相关领域后能够迅速准确地理解所从事的工作的意义,能够在学术研讨会上听懂别人的工作介绍甚至参与讨论,都有莫大的好处。

本书是由 SUNIST 聚变实验室全体师生集体翻译的。具体分工(依章节顺序)如下:第1章,谢会乔、王文浩;第2、3章,吴彦斌(东华大学);第4、5章,王文浩;第6、7章,李明;第8章,赵爱慧;第9、10章,王文浩;第11、12章,曾龙;第13章,李明、谭熠;第14章,王文浩;第15章,高喆;第16章,王文浩。序言、致谢以及附录等也由王文浩翻译。为方便读者查询,我们将原书的术语表按中文音序重新进行了编排,所注页码已改为中文版该词实际所在页的页码。译者一直认为,中文教材乃至各种专著中书末缺少术语表是一大缺憾,不方便读者检索。因此我们对原书的这一惯例予以保留。全书由王文浩进行最后的统一校订和润色,部分章节进行了互校,并请中国科学院物理研究所王龙研究员进行了审阅。

ii 译者序

由于我们对聚变科学的诸多分支了解得不够全面,理解存在偏差,英译能力亦难达信、达、雅的最高境界,因此译文中一定存在各种疏忽甚至误译,请读者发现后不吝来函指正,联系方式:whwang@mail.tsinghua.edu.cn。

最后,我们要感谢科学出版社刘红梅编辑的大力支持,是她的充分信任和积极购买原书的版权,才有了今天这本教材的中文版。我们还应感谢本书的责编孙力维女士,是她不懈的努力和严谨细致的工作,才使我们享受到阅读的快乐。

译者

2010年7月2日于清华园

序 言

《等离子体物理学和聚变能》是一本关于等离子体物理学的教科书。等离子体物理学的主要使命是磁约束聚变能。我们的目标是为半个世纪以来,为实现聚变能梦想所必需的等离子体物理学提供一个广泛而严谨的概述。

本书采用的叙述方法适用于应用物理系或核科学与工程系的教学。材料的选取、内容展开的顺序,以及始终紧贴能源这个最终目标的连贯且富于故事性的事实的铺陈,均带有服务于应用学科的特征。具体来说,本书从简单的核聚变反应堆设计出发。这个设计是基于核物理原理、能量平衡以及一些基本工程限制给出的,其要点不是对该领域诸多方面进行评价,而是指出基本设计几乎不需要考虑等离子体物理学。然而,由这个设计得到的一个重要结论是,要实现磁约束聚变能,等离子体就必须满足一整套条件。具体来说就是设计必须遵循一套特定的压强、温度、磁场和等离子体几何参数值。因此,从一开始这些条件就界定了等离子体的参数范围。在此之后,等离子体物理学家的任务就是去发现满足这些要求的各种实现方式,由此自然形成一系列独立成篇的问题,包括宏观平衡及其稳定性、运输和加热等问题。因此,我们以聚变能为核心构成了整本书的框架,即等离子体物理学共同体的使命就是找到利用等离子体来实现能源的方法。

为什么要写这样一本书呢?在过去几年里,全球都面临着开发新的可靠能源的压力,这使得聚变研究在国际上受到了空前重视。随着最近下一代国际热核实验反应堆(ITER 计划)协议的签署,我预计参加聚变计划的新的学生和青年科学家的人数会大幅度增加。虽然聚变成为商业上可行的能源还有很长的路要走,但 ITER 的出现大大增强了全球范围内业已存在的对等离子体物理和核聚变研究的兴趣。虽然科学上和工程上存在的问题使其具有难以置信的挑战性,但因这种能源系统具有无尽的燃料、近乎完善的环境效应和强有力的经济竞争力等优点,使其对新的学生和研究人员具有巨大的吸引力。

本教科书的读者对象都有谁呢?他们是高年级本科生、入学第一年的研究生和刚跨入这一领域的年轻科学家。总体上说,本书既有旨在发展物理直觉的深入的物理解释,也包括许多厘清等离子体物理中各种数学难点的详细推导。因此,这本书非常适于聚变领域的新人独立阅读。书中还给出了作者在麻省理工学院 20 多年的教学过程中积累起来的内容广泛的习题。

如果将过多的解释和详细推导都包括进来,那将使本书显得过于庞大。因此,我

们对所用的材料进行了仔细的选择。要决定哪些该选进来,哪些必须割爱实在是一个艰难的抉择。我采用的取舍标准是:为新人提供一个对磁约束聚变能源中所有重要问题的良好的初步理解。因此,书中材料主要集中在聚变能源所要求的等离子体物理范围内,而起初最容易描述的当属宏观流体模型。

本书没有包含的那些内容大都是聚变工程上很少讨论的问题。我们对等离子体动力学理论(如弗拉索夫方程和福克-普朗克方程)也进行了少量讨论。让我有点意外的是,直到本书的第15章,我才第一次真正感到需要用到动力学理论的详细结果(即射频加热和电流驱动的碰撞阻尼率),随后我用简单、直观的单粒子分析进行了推导。我认为对第一次接触这门课的学生来说,全面了解所涉全部问题的最佳方法,特别是要强调等离子体物理学的自洽统一性,莫过于将重点放在宏观流体模型上,这样更容易将物理直觉与实验现实联系起来。理想情况下,在此基础上接着进行动力学理论的学习将是掌握聚变等离子体物理的一个合乎逻辑的步骤。在这种研究中,本书描述的许多课题都将在标志着当代聚变研究前沿的更高级水平上得到分析。

从本书的篇幅上可以清楚地看到,要全面详细地讲完所有内容需要两个学期。但是通过摘要选讲,将它用于一个学期的课程也是可行的。先决条件是读者具有本科物理和数学的坚实基础,具体要求包括:①数学应学过偏微分方程;②力学;③基本流体动力学;④电磁理论(即静电学、静磁学和波的传播)。经验表明,物理或大多数工程学科的本科学位学历都能够提供令人满意的准备。

最后,我希望这本书能使得下一代聚变研究人员受益,这是决定建设国际核聚变实验堆——世界上第一个反应堆规模的燃烧等离子体实验堆——的一个重要目的。

致 谢

书中的材料是多年研究和教学的结果。众多朋友、同事和学生,以及不胜枚举的其他人的卓越贡献才使本书得已出版。在此,我对他们的帮助、合作以及同志般的情谊深表感谢。

麻省理工学院的许多人也值得特别感谢。Bob Granetz, Ian Hutchinson, Ron Parker 和 Abhay Ram 等人所教授的课程也与本书的内容有密切关系。我很感谢他们让我分享他们的讲义和教学经验。

麻省理工学院的很多同事非常友善地阅读了本书的章节,并向我提供了有价值的反馈意见,为此我要感谢 Paul Bonoli, Leslie Bromberg, Peter Catto, Jan Egedal, Martin Greenwald, Jay Kesner, Jesus Ramos 和 John Wright 等人。麻省理工学院的其他同事也慷慨地花时间参与了详细讨论,为此我要向 Darin Ernst, Joe Minervini, Kim Molvig, Miklos Porkolab 和 Steve Scott 等人表达我诚挚的谢意。

聚变界的许多朋友和同事也阅读了部分书稿,并向我提供了宝贵意见,特别是第 13 章,这一章描述了当今聚变方面的许多概念。为此我要感谢下述几位的帮助,他们是 Dan Barnes 和 Dick Siemon (场反位形),Riccardo Betti 和 Dale Meade (托卡马克和聚变反应堆),Alan Boozer 和 Hutch Neilson (仿星器),Bick Hooper (球马克),Martin Peng (球形托卡马克)和 John Sarff (反场箍缩)。

特别感谢我的同事 Don Spong 为本书封面制作了鲜明的图示。

正如人们所料,准备手稿是一项繁重的工作。我非常感谢麻省理工学院的研究生干部(其中许多人现在是专职研究人员)为本书准备了插图。为此我要感谢 Joan Decker, Eric Edlund, Nathan Howard, Alex Ince-Cushman, Scott Mahar 和 Vincent Tang。特别感谢 Vincent Tang 对全部手稿的内容和版式进行了校对。我的助手 Liz Parmelee 也在书稿的整个筹备工作方面提供了宝贵的行政和组织方面的支持。

剑桥大学出版社各位同仁在书稿的出版方面——从最初写作本书的意向到最后出版——提供了巨大帮助,他们是 Simon Capelin(出版总监),Lindsay Barnes (助理编辑),Dan Dunlavey 和 Emma Pearce(制作编辑),以及 Maureen Storey(文本编辑)。

最后,感谢我的妻子凯伦在我编写书稿时提供的无尽支持和鼓励。她还帮忙校对了很大一部分文稿校样。

单 位 制

本书采用标准的 MKS 单位制。唯一的例外是温度。聚变等离子体物理学领域目前的常见做法是将玻尔兹曼常数 k 合并到温度内,即出现 kT 的地方总是代之以 T ,即 $kT \rightarrow T$,其中 T 的单位是能量(焦耳)。

还有一些表示“实用”单位的导出单位,除非另有说明,这些单位说明如下:

数密度	n	10^{20} m^{-3}
温度	T	keV
压强	p	大气压(atm)
磁场	B	特[斯拉](T)
电流	I	兆安(MA)
小半径	a	米(m)
大半径	R	米(m)
约束时间	τ_E	秒(s)

目 录

第一部分 聚变能

第 1 章 聚变与世界能源	3
1.1 引 言	3
1.2 现有的能源方式	4
1.3 聚变能的作用	14
1.4 本章总结	17
参考书目	17
第 2 章 聚变反应	18
2.1 引 言	18
2.2 核反应与化学反应	18
2.3 裂变核能	20
2.4 聚变核能	21
2.5 结合能曲线	25
2.6 本章总结	30
参考书目	31
习 题	31
第 3 章 聚变功率的产生	33
3.1 引 言	33
3.2 截面、平均自由程和碰撞频率的概念	34
3.3 反应速率	37
3.4 分布函数、聚变截面、聚变功率密度	41
3.5 辐射损失	46
3.6 本章总结	50
参考书目	51
习 题	52

第 4 章 聚变反应堆功率平衡	53
4.1 引 言	53
4.2 零维能量守恒关系	53
4.3 磁约束聚变的一般功率平衡关系	55
4.4 稳态零维功率平衡	55
4.5 等离子体内的功率平衡	57
4.6 反应堆功率平衡	61
4.7 聚变反应堆的时变功率平衡	66
4.8 本章总结	73
参考书目	73
习 题	74
第 5 章 简单磁约束聚变反应堆设计	76
5.1 引 言	76
5.2 一般磁约束聚变反应堆	76
5.3 反应堆关键设计参数计算	78
5.4 设计目标,工程和核物理方面的基本限制	79
5.5 反应堆设计	82
5.6 本章总结	94
参考书目	95
习 题	96

第二部分 聚变能等离子体物理学

第 6 章 磁约束聚变概述	101
6.1 引 言	101
6.2 等离子体的基本描述	102
6.3 单粒子行为	103
6.4 自洽模型	104
6.5 磁流体力学平衡及其稳定性	105
6.6 磁约束聚变概念	105
6.7 输 运	106
6.8 加热和电流驱动	107

6.9 聚变研究的未来	109
参考书目	109
第7章 聚变等离子体定义	110
7.1 引 言	110
7.2 等离子体对稳恒电场的屏蔽——德拜长度	111
7.3 等离子体对振荡电场的屏蔽——等离子体频率	115
7.4 低碰撞频率和集体效应	118
7.5 对磁约束聚变等离子体的额外约束	121
7.6 宏观行为和碰撞的关系	123
7.7 本章总结	123
参考书目	124
习 题	124
第8章 单粒子运动——导心理论	126
8.1 引 言	126
8.2 单粒子运动的基本性质	128
8.3 均匀稳恒磁场中的运动	129
8.4 稳恒磁场 B 和电场 E 下的运动: $E \times B$ 漂移	134
8.5 垂直梯度的场下的运动: ∇B 漂移	138
8.6 弯曲磁场中的运动: 曲率漂移	142
8.7 真空磁场中 $V_{\nabla B}$ 漂移和 V_{κ} 漂移的综合	145
8.8 时变电场 E 和磁场 B 中的运动: 极化漂移	146
8.9 平行梯度场下的运动: 磁矩和磁镜	152
8.10 本章总结	161
参考书目	162
习 题	163
第9章 单粒子运动——库仑碰撞	166
9.1 引 言	166
9.2 库仑碰撞——数学推导	167
9.3 试探粒子碰撞频率	173
9.4 再论磁镜	180
9.5 高能离子的慢化	183
9.6 逃逸电子	189
9.7 净交换碰撞	193

9.8 本章总结	200
参考书目	201
习 题	201
第 10 章 自洽的双流体模型	204
10.1 引 言	204
10.2 流体模型的性质	205
10.3 质量守恒	207
10.4 动量守恒	210
10.5 能量守恒	214
10.6 本章总结	220
参考书目	222
习 题	222
第 11 章 磁流体力学——宏观平衡	224
11.1 宏观平衡和稳定性的基本问题	224
11.2 从双流体模型推导磁流体力学模型	225
11.3 从导心理论推导磁流体力学模型	231
11.4 磁流体力学平衡——定性描述	236
11.5 磁流体力学平衡模型的基本性质	238
11.6 径向压强平衡	240
11.7 环向力平衡	247
11.8 本章总结	267
参考书目	267
习 题	268
第 12 章 磁流体力学——宏观稳定性	270
12.1 引 言	270
12.2 稳定性的一般概念	271
12.3 磁流体力学不稳定性的物理图像	276
12.4 理想磁流体力学稳定性问题的一般方程	280
12.5 无限大均匀等离子体——磁流体力学波	286
12.6 直线 θ 箍缩	290
12.7 直线 Z 箍缩中的 $m=0$ 模	293
12.8 直线 Z 箍缩中的 $m=1$ 模	296
12.9 本章总结	300

参考书目	301
习 题	302
第 13 章 磁约束聚变概念	305
13.1 引 言	305
13.2 悬浮偶极器(LDX)	307
13.3 场反位形(FRC)	316
13.4 表面电流模型	322
13.5 反向场箍缩(RFP)	328
13.6 球马克	343
13.7 托卡马克	349
13.8 仿星器	390
13.9 简单聚变反应堆回顾	403
13.10 本章总结	407
参考书目	409
习 题	411
第 14 章 输 运	414
14.1 引 言	414
14.2 一维柱形等离子体中的输运	416
14.3 求解输运方程	429
14.4 新经典输运	442
14.5 经验定标关系	460
14.6 输运理论在聚变点火实验中的应用	474
14.7 本章总结	488
参考书目	489
习 题	490
第 15 章 加热与电流驱动	493
15.1 引 言	493
15.2 欧姆加热	495
15.3 中性束加热	498
15.4 波加热和电流驱动的基本原理	509
15.5 冷等离子体色散关系	526
15.6 无碰撞阻尼	528
15.7 电子回旋加热(ECH)	544

15.8	离子回旋加热(ICH)	554
15.9	低杂波电流驱动(LHCD)	566
15.10	本章总结	581
	参考书目	582
	习 题	584
第 16 章	聚变研究的未来	588
16.1	引 言	588
16.2	等离子体物理研究现状	588
16.3	ITER	592
16.4	示范聚变电站(DEMO)	598
	参考书目	598
附录 A	$\langle \sigma v \rangle$ 的解析推导	599
附录 B	加速电荷的辐射	604
B.1	辐射场定义	604
B.2	时变源的 A 和 ϕ 的计算	604
B.3	应用到单个加速粒子的情形	607
B.4	E 和 B 的计算	608
B.5	辐射功率的计算	608
附录 C	布泽坐标的推导	610
C.1	一般的坐标变换	610
C.2	到布泽坐标叉积形式的部分简化	611
C.3	到布泽坐标梯度形式的部分简化	612
C.4	去掉自由函数 \tilde{f} 和 \tilde{g}	613
C.5	将物理量引入到布泽坐标系	614
C.6	布泽坐标系下的导心轨道	617
附录 D	坡印亭定理	619
	主题词索引	621

第一部分
聚 变 能

