

# INTRODUCTION TO PLASMA PHYSICS

## 等离子体物理学导论

[美] F.F.Chen 著 林光海 译



科学出版社

内 容 简 介

本书是作者在多年从事等离子体物理教学和科研工作的基础上，根据多年从事教学和科研工作的经验，结合国内外最新研究成果编写而成的。本书可作为高等院校物理系、应用物理系、电子信息工程等专业本科生的教材，也可供从事等离子体物理工作的工程技术人员参考。

# 等离子体物理学导论

## Introduction to Plasma Physics

[美] F. F. Chen 著  
林光海 译

北京

中国科学院图书馆 (CIP) 数据: 等离子体物理学导论 / (美) 陈·费·陈著; 林光海译. —北京: 科学出版社, 1998.

林光海，男，湖南长沙人，1954年毕业于中国科学院技术物理系，获学士学位。1957年毕业于中国科学院物理研究所，获硕士学位。1961年毕业于中国科学院物理研究所，获博士学位。1963年赴美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校攻读博士学位，1966年获博士学位。1967年回国，任中国科学院物理研究所副研究员。1971年任中国科学院物理研究所副所长。1978年任中国科学院物理研究所研究员。1983年任中国科学院物理研究所副所长。1988年任中国科学院物理研究所所长。1993年任中国科学院物理研究所党委书记。1998年任中国科学院物理研究所所长。1999年任中国科学院物理研究所党委书记。2003年任中国科学院物理研究所所长。2008年任中国科学院物理研究所党委书记。2013年任中国科学院物理研究所所长。2018年任中国科学院物理研究所党委书记。2023年任中国科学院物理研究所所长。

科学出版社

北京

图字：01-2016-1752 号

## 内 容 简 介

本书作者是实验等离子体物理学方面的出色科学家，在等离子体诊断和稳定性、气体放电、粒子束与等离子体相互作用、环形约束、漂移波、Q 装置、反常输运和红外激光器等方面皆有重要贡献。本书是作者在加利福尼亚大学洛杉矶分校多年为大学生讲授等离子体物理课程而在讲义基础上写成的，内容涉及等离子体流体方程、扩散和电阻率、分布函数和动力学方程、等离子体中各类不稳定性和朗道阻尼等。

本书可作为理工科大学物理系和电气工程系大学生或研究生学习等离子体物理学的入门教材，亦可供有关科学工作者自学。

Translation from English language edition:

*Introduction to Plasma Physics*

by Francis F. Chen

Copyright © Springer New York 1974

All Rights Reserved

### 图书在版编目(CIP)数据

等离子体物理学导论/ (美) 陈 (Chen, F. F.) 著; 林光海译. —北京: 科学出版社, 2016. 3

书名原文: Introduction to Plasma Physics

ISBN 978-7-03-047515-2

I. ①等… II. ①陈…②林… III. ①等离子体物理学 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044302 号

责任编辑: 钱 俊 周 涵/责任校对: 张凤琴

责任印制: 肖 兴/封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 303 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 译者简介



**林光海博士** (1942—2009)，生于上海，原籍浙江宁波，1964年毕业于中国科学技术大学化学物理系，物理力学专业。毕业后分配到中国科学院力学研究所工作。1981年8月作为CUSPEA研究生到美国科罗拉多大学学习，1983年取得科罗拉多大学物理学硕士学位，1985年获得该校化学物理学博士学位。后在该大学从事博士后研究。以后相继至德州农工大学，Solarex (BP solar)，Paratek Microwave和XsunX公司工作，担任首席科学家 (Chief Scientist, XsunX)、首席工程师 (Principal Engineer, Paratek Microwave)。一生从事过物理力学、激光、太阳能材料以及微波材料的研究和研发技术工作，公开发表的主要文章有68篇，译著1部和专利3个。

林光海博士的主要工作业绩概要如下：

在国内工作期间，从事过对流放电二氧化碳激光器的特性研究，强红外激光引起三氯化硼可见荧光的动力学和脉冲光-声-光效应研究，用膺势方法计算简单金属的弹性常数、Hugoniot曲线和状态方程，低气压系统流速和微小压差的测量，对流放电二氧化碳激光器的饱和特性等研究。

在研究生学习期间，主要进行用分子束、激光荧光和质谱技术研究离子和分子的电荷转化反应，研究用倍频、三倍频和混频钇铝石榴石激光泵浦各种不同燃料来得到各种波段的激光。

在博士后期间，主要用化学蒸气沉积法、等离子体增强化学蒸气沉积法和热丝沉积法研究和发展无定形硅材料以及它的合金薄膜，并用质谱技术研究材料的生长动力学。

在德州农工大学的八年间，(1) 研制三结式无定形硅太阳能产生氢气装置以及研究氢气和氧气的演变规律，研究光电催化剂以降低电解水的临界电位。(2) 主管由能源部和太阳能研究所提供的太阳能氢气合同下的四个项目和一个外包项目，研究太阳能氢气生产工艺，海水电解法以及有关半导体和电解质界面的课题。(3) 发展稳定的无定形硅合金材料，采用等离子体增强的化学蒸气沉积法研制稳定的掺杂无定形硅太阳能电池。最早提出并运用金属刻蚀方法制成具有纳米结构的化学共振装置。发展新型无毒性的抗腐蚀剂。研究腐蚀机制和铝的腐蚀保护，发展熔融盐氧化技术及废物的电化学氧化处理。

在美国石油公司（后为英国石油公司）太阳能分公司 Solarex (BP solar) 工作期间，管理一平方英尺试点生产线和两个研发薄膜沉积系统。研发新型快速的工艺和流程，用以得到高产量、高成品率及高效稳定的太阳能电池组件。然后推广这种快速工艺和流程到八平方英尺的大生产线。研发用于空间太阳能电池的新流程。改善了前界面（导电玻璃到无定形硅）和后界面（无定形硅到氧化物导电层）的性能，发展了新的快速沉积法和新的隧道结构，提高了太阳能电池效率。通过对流程的数据分析，找出流程对产量、参量和成品率的统计影响。研发在线诊断方法。组装在线残余气体分析仪跟踪和诊断工作气体的情况。统管各种光学仪器，建立了测量量子效率及电压电流关系的工作站。

在 Paratek Microwave 公司期间，领导薄膜研发部门，研发以钛酸钡锶为基体的薄膜陶瓷材料，用于制造微波天线、过滤器、相位转换器、可变频率振荡器和相位延迟器。研发新的低偏压可变电容器，用于便携式微波通信。研发最佳沉积条件和工艺流程。应用脉冲激光沉积法、有机金属沉积法和氩离子溅射沉积法来获得介电薄膜陶瓷材料。采用紫外线和远紫外光印刷蚀刻技术，湿式腐蚀和离子反应干式腐蚀技术来制成不同结构的电压调控可变电容器。在研发中解决了钛酸钡锶薄膜材料的几个关键问题：消除了材料不稳定性和漏电问题，提高了材料的品质因素。这样就为这种材料在微波和视频领域的应用打开了门路。

在 XsunX 公司期间，设计 100MW 无定形硅太阳板生产线，研发试验性生产线的

## 中译本再版序言

《等离子体物理学导论》中译本最初于1980年由人民教育出版社出版。之后不久，译者林光海先生通过中美联合培养物理研究生计划（CUSPEA）到美国攻读博士。大约十年前，有国内朋友告诉他该译本在国内很受读者欢迎，建议他再版译本。于是，他委托北京的朋友去人民教育出版社咨询，出版社希望他稍作修改可以考虑再版。但当时工作太忙，他没有精力考虑这个问题。不幸的是，繁忙的工作使他倒下。2008年10月，他从意大利威尼斯出差回来不到一个月，就被诊断得了癌症，经过一年多的治疗就走了。

近几年，再版的建议又提出来了。作为妻子，我要考虑这个问题。我在网上了解到，该书被国内不少高等院校作为大学生、研究生的参考书在使用，也被不少的科研论文所引用。网上可以下载到本书中译版的电子版。我看到有网友评论本书“等离子体物理经典之作”“很经典的教程”“经典的等离子体书籍”“经典的教材，可惜绝版了”。也有网友提出，“要是有人整理一下就好了”。网友的这些评论鼓舞了我，我决定将它整理再版，决不让它绝版！

我开始和原著者 Francis F. Chen 教授联系，得到了他的大力支持。但是外国版权问题难住了我。我先后向几个国内和香港有关出版社联系。最终在去年，得到了科学出版社钱俊先生的大力支持。在谈到外国版权问题时，我决定自己支付版权费用。最后双方谈妥，由家属出版面费和电子版，书中的图以及编辑工作由科学出版社负责。

今年6月底，我完成了《等离子体物理学导论》的电子版文字录入工作并交给科学出版社编辑。在此首先我要感谢《等离子体物理学导论》原著 *Introduction to Plasma Physics* 作者 Francis F. Chen 教授的大力支持，感谢陈骝教授帮我修改个别翻译的句子，以便从科学上更加通俗易懂。特别要感谢的是网友们的真诚留言，给我出版再版的勇气！感谢读者们复制和下载这本书，使它发挥应有的价值。感谢清华大学、上海东华大学、中国人民解放军防化研究院、河北大学、中科院等离子体物理研究所等高校、研究所以及各位科研工作者多年来传播和使用这本书。在决定再版的同时，母校中国科学技术大学出版社李雅晴老师也表示了支持，如果需要，科大可以考虑出版，成为我的后盾。我的大学同学中科院力学研究所研究员朱如曾、中科院物理研究所副研究员徐丽雯、原中科院物理研究所做受控热核反应研究的同事（现在纽约）张淳沅都给了我很大的支持。他

们指出“这是一件有意义的事，是值得做的。”在制作电子版过程中，密西根州立大学的大学同学黄瑞平自告奋勇帮我制作英文版的照片并寄给我，使我的电子版以及校对工作顺利进行。在此一并表示感谢！

修订再版的书稿基本保留了原来的译本内容，通过科学出版社的文字修饰后，会给大家一个新的再版译本。在此对科学出版社的朋友们表示感谢。

为了纪念译者林光海先生，我们家属在新版译本里加上林先生的简历以及照片，并且由林先生的十岁孙子林杨在老师的帮助下设计了本书新的封面。

总之，我代表我的家人向大家表达深深的谢意！

何木芝

2015年12月15日于休斯顿

# 前 言

本书由等离子体物理学大学课程的讲课笔记发展而成，在加利福尼亚大学洛杉矶分校已经使用了许多年。随着人们对受控聚变兴趣的增加和等离子体物理学广泛地运用于空间研究和相对论性天体物理学，同热力学和量子力学这些课程一起，等离子体学习成为大学学生的基本经验的一部分就有了意义。虽然本书的主要目的是作为一本大学四年级或三年级学生都能真正理解的教科书，但我希望本书也适用于其他领域（如固体物理或激光物理）的科学家，使他们不用做太大努力就能熟悉等离子体。

本书遵循两条指导原则：不把代数步骤留给读者当练习；不让代数掩盖物理。大都由于等离子体是作为两个相互贯穿的流体来处理的，这两相对抗的宗旨才能在很大程度上得到满足。至少对于低密度等离子体现象，双流体图像要比单流体处理既容易理解又更精确。

本书的前几章对部分学生来说，几乎不需要作什么准备，但后面几章却有意识地联系上了学生的推理能力。在九周或十周的学季中，有可能学完前六章半。这几章经过精心选择，仅保留了必不可少的内容。最后的两章半内容可以用于一学期的课程或作为附加读物。为了清楚地解释朗道阻尼，本书做了相当大的努力——采用了与周线积分知识无关的一种方法。我感谢奥尼尔（Tom O'Neil）和施米脱（George Schmidt）在简化最初由道森（John Dawson）给出的物理图像时所给予的帮助。

某些读者会对使用 cgs 静电单位制感到苦恼。当然，争论单位制是毫无意义的；任何经验丰富的物理学家都能用完整的逻辑为他所爱好的单位制辩护。附录 I 解释了本书使用的单位制，选择这个单位制是为了避免不必要地写出  $c$ ， $\mu_0$  和  $\epsilon_0$ ，并同等离子体物理学的大多数研究报告一致。

我衷心感谢塔特（Lisa Tatar）小姐和布朗（Betty Rae Brown）夫人在辨认我的潦草手稿时所做的富有高度直觉力的工作，感谢兰伯特（Tim Lambert）先生在绘图时所做的同样努力，特别要感谢陈（Ande Chen），她忍受了很多个寂寞之夜。

弗朗西斯 F. 陈  
(Francis F. Chen)

1974 年于洛杉矶



# 目 录

中译本再版序言	172
前言	186
<b>第 1 章 引言</b>	1
1.1 等离子体在自然界的存在	1
1.2 等离子体的定义	2
1.3 温度的概念	3
1.4 德拜屏蔽	6
1.5 等离子体参量	8
1.6 等离子体判据	8
1.7 等离子体物理学的应用	10
<b>第 2 章 单粒子运动</b>	13
2.1 引言	13
2.2 均匀的 $E$ 场和 $B$ 场	13
2.3 非均匀 $B$ 场	18
2.4 非均匀 $E$ 场	24
2.5 随时间变化的 $E$ 场	26
2.6 随时间变化的 $B$ 场	27
2.7 导向中心漂移的概述	28
2.8 绝热不变量	29
<b>第 3 章 作为流体的等离子体</b>	34
3.1 引言	34
3.2 等离子体物理学与普通电磁学的关系	35
3.3 流体运动方程	38
3.4 垂直于 $B$ 的流体漂移	45
3.5 平行于 $B$ 的流体漂移	48
3.6 等离子体近似	49
<b>第 4 章 等离子体中的波</b>	50
4.1 波的表示法	50
4.2 群速度	51

4.3	等离子体振荡	52
4.4	电子等离子体波	55
4.5	声波	60
4.6	离子波	61
4.7	等离子体近似的有效性	63
4.8	离子波和电子波的比较	63
4.9	垂直于 $B$ 的静电电子振荡	65
4.10	垂直于 $B$ 的静电离子波	70
4.11	下杂化频率	72
4.12	$B_0=0$ 的电磁波	73
4.13	实验应用	75
4.14	垂直于 $B_0$ 的电磁波	78
4.15	截止和共振	81
4.16	平行于 $B_0$ 的电磁波	82
4.17	实验结果	84
4.18	磁流体波	87
4.19	磁声波	90
4.20	基本等离子体波的概述	92
4.21	CMA 图	93
<b>第 5 章 扩散和电阻率</b>		97
5.1	弱电离气体中的扩散和迁移率	97
5.2	扩散引起的等离子体衰变	99
5.3	稳恒态解	103
5.4	复合	105
5.5	穿过磁场的扩散	106
5.6	完全电离等离子体中的碰撞	111
5.7	单流体 MHD 方程	116
5.8	完全电离等离子体中的扩散	118
5.9	扩散方程的解	119
5.10	玻姆扩散和新经典扩散	121
<b>第 6 章 平衡和稳定性</b>		126
6.1	引言	126
6.2	磁流体平衡	127
6.3	$\beta$ 的概念	129
6.4	磁场进入等离子体的扩散	130
6.5	不稳定性分类	132

6.6	双流不稳定性 .....	133
6.7	“重力”不稳定性 .....	136
6.8	电阻漂移波 .....	139
<b>第7章</b>	<b>动力学理论介绍 .....</b>	<b>142</b>
7.1	$f(v)$ 的意义 .....	142
7.2	动力学理论方程 .....	146
7.3	流体方程的推导 .....	150
7.4	等离子体振荡和朗道阻尼 .....	152
7.5	朗道阻尼的意义 .....	156
7.6	朗道阻尼的物理推导 .....	163
7.7	BGK 和范坎彭模 .....	167
7.8	实验证实 .....	168
7.9	离子朗道阻尼 .....	170
<b>第8章</b>	<b>非线性效应 .....</b>	<b>172</b>
8.1	引言 .....	172
8.2	鞘层 .....	174
8.3	离子声激波 .....	178
8.4	有质动力 .....	183
8.5	参量不稳定性 .....	185
8.6	等离子体回波 .....	194
8.7	非线性朗道阻尼 .....	197
<b>第9章</b>	<b>受控聚变介绍 .....</b>	<b>199</b>
9.1	受控聚变问题 .....	199
9.2	磁约束: 环 .....	202
9.3	磁镜 .....	212
9.4	箍缩装置 .....	215
9.5	激光骤变 .....	219
9.6	等离子体加热 .....	221
9.7	聚变技术 .....	223
9.8	结束语 .....	224
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>226</b>
I	单位制 .....	226
II	有用的常数和公式 .....	227
III	有用的矢量关系 .....	228
<b>英中文对照索引</b>	<b>.....</b>	<b>230</b>
<b>习题索引</b>	<b>.....</b>	<b>240</b>

# 第1章 引言

## 1.1 等离子体在自然界的存在

人们经常说，宇宙中物质的99%以等离子体状态存在，也就是以带电气体的形式存在，它们的原子离解成正离子和负电子。这种估计也许不是很精确，但鉴于恒星的内部及大气层、气态星云和大量的星际氢都是等离子体，这种估计无疑是合理的。在我们周围，只要一离开地球的大气，就遇到了构成范艾伦辐射带(Van Allen radiation belts)和太阳风(solar wind)的等离子体。然而，我们日常生活中所遇到的等离子体却只限于几个实例：闪电、北极光(aurora borealis)的柔和辉光、荧光管或霓虹灯内的导电气体、火箭尾气内的少量电离。我们生活在宇宙的1%之中，在我们这里，等离子体并不天然地存在。

从萨哈方程(Saha equation)可以看到上述论点的理由，萨哈方程告诉我们，处于热平衡的气体的电离量是

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/KT} \quad (1-1)$$

这里， $n_i$  和  $n_n$  分别是已电离原子和中性原子的密度（每立方厘米的粒子数）， $T$  是气体温度(K)， $K$  是玻尔兹曼常量， $U_i$  是气体的电离能——使最外层电子离开原子所需的尔格数（本书用 cgs-esu 单位）。对于室温下的普通空气，我们可以取  $n_n \approx 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ （习题 1-1）， $T \approx 300 \text{ K}$ ， $U_i \approx 14.5 \text{ eV}$ （对氮气），其中  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg}$ ①。从方程(1-1)预期的电离分数  $n_i/(n_n + n_i) \approx n_i/n_n$  是微乎其微的

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 10^{-122}$$

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。温度再升高， $n_i/n_n$  急剧增加，气体就处于等离子态。温度的进一步增加，使得  $n_n$  低于  $n_i$ ，等离子体最终变成完全电离的。这就是在温度达百万度的天体中存在等离子体，而地球上不存在等离子体的理由。生物很难与等离子体共存——至少不能与我们谈到的那类等离子体共存。在高温下等离子体的自然存在是“物质第

①  $1 \text{ erg} = 1 \times 10^{-7} \text{ J}$ 。

“四态”名称的由来。

虽然我们并不想强调萨哈方程，然而应当指出它的物理意义。气体中原子的热能具有一个分布，当原子偶尔受到一次高能（足够打出一个电子）碰撞时，原子就被电离。在冷气体中，由于一个原子必须通过一系列“有利的碰撞”才被加速到远高于平均值的能量，因此这种高能碰撞很少发生。方程(1-1)中的指数因子表示快速原子数随  $U_i/KT$  指数下降。一旦一个原子被电离，它就保持带电直到遇到一个电子时为止；那时，它极可能与一个电子复合而再次变成中性原子。复合率显然依赖于电子密度，我们认为电子密度与  $n_i$  相等，所以平衡离子密度应当随  $n_i$  减少，这就是方程(1-1)右边出现因子  $n_i^{-1}$  的原因。恒星际媒质中存在等离子体是由于  $n_i$  值低（约每  $\text{cm}^3$  一个），因而复合率低。

## 1.2 等离子体的定义

当然，不是任何电离的气体都能称作等离子体；在任何气体中总会存在某些小电离度。下面是一个有用的定义：

**等离子体是带电粒子和中性粒子组成的表现出集体行为的一种准中性气体。**

现在，我们必须确定“准中性”（quasineutral）和“集体行为”（collective behavior）的意义。准中性的意义将在第 1.4 节清楚地阐述。“集体行为”所包含的意义如下：

考虑作用在一个分子（如普通空气的一个分子）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，这些碰撞支配了粒子的运动。作用在中性气体上的宏观力（像扬声器产生的声波）通过碰撞传给单个原子。在有带电粒子的等离子体中，情况则完全不同。当这些电荷到处运动时，它们能引起正电荷或负电荷的局部集中，就产生了电场。电荷的运动也引起电流，因而产生磁场。这些场影响了远处其他带电粒子的运动。

我们考虑等离子体中相距为  $r$  的两个稍许带电区域的相互影响（图 1-1）。A 和 B 之间的库仑力随  $1/r^2$  减小而减小。然而，对给定的立体角（即  $\Delta r/r = \text{常数}$ ），B 中能影响 A 的等离子体体积随  $r^3$  增加而增加。所以，即使相距很远的等离子体元也存在相互作用力。正是这个长程库仑力给出了等离子体种类繁多的可能运动，并且丰富了称作等离子体物理学的研究领域。事实上，最有意义的结果是关于所谓“无碰撞”等离子体，在那里长程电磁力与普通局部碰撞引起的力相比是如此之大，以至于可以完全忽略后者。“集体行为”这个词指的是不仅取决于局部条件而且取决于远距离区域等离子体状态的运动。

“等离子体”这个词看来是一个误称，这个词来自希腊文  $\piλάσμα$ ,  $-ατοξ$ ,  $τό$ ，它多少带有塑造或制造的含义。由于集体行为，等离子体并不趋于顺从外界影

响，而经常表现出好像有自己的癖性。

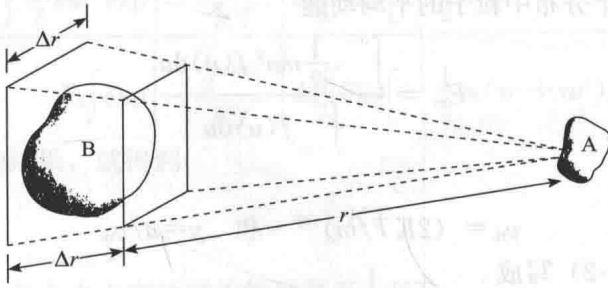


图 1-1 说明等离子体中静电力的长程性

### 1.3 温度的概念

在进一步讨论问题以前，应评论和扩充我们对“温度”的物理概念。处于热平衡的气体，其粒子有一切速度，这些速度的最可几分布称作麦克斯韦分布。为简单起见，我们考虑一种气体，它的粒子只能在一维上运动（这不是完全无价值的，例如，强磁场可约束电子，使之只能沿着场力线运动）。一维的麦克斯韦分布由方程 (1-2) 给出

$$f(u) = A \exp\left(-\frac{1}{2}mu^2/KT\right) \quad (1-2)$$

其中， $f$  是速度在  $u \sim u + du$  范围内每立方厘米的粒子数， $\frac{1}{2}mu^2$  是动能， $K$  是玻尔兹曼常量

$$K = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$$

密度  $n$  或每立方厘米的粒子数由方程 (1-3) 给出 (图 1-2)

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) du \quad (1-3)$$

常数  $A$  与密度  $n$  的关系是 (习题 1-2)

$$A = n \left( \frac{m}{2\pi KT} \right)^{1/2} \quad (1-4)$$

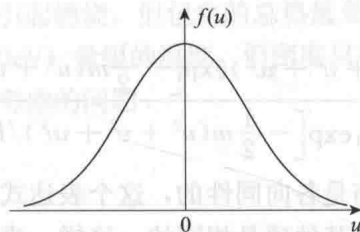


图 1-2 麦克斯韦速度分布

分布的宽度由常数  $T$  来表征, 我们称  $T$  为温度. 为了了解  $T$  的确切意义, 我们可以计算这个分布中粒子的平均动能

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m u^2 f(u) du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du} \quad (1-5)$$

定义

$$v_{th} = (2KT/m)^{1/2} \quad \text{和} \quad y = u/v_{th} \quad (1-6)$$

我们能将方程 (1-2) 写成

$$f(u) = A \exp(-u^2/v_{th}^2)$$

将方程 (1-5) 写成

$$E_{av} = \frac{\frac{1}{2} m A v_{th}^3 \int_{-\infty}^{\infty} [\exp(-y^2)] y^2 dy}{A v_{th} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) dy}$$

可用分部积分法求出分子中的积分

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot [\exp(-y^2)] y dy &= \left\{ -\frac{1}{2} [\exp(-y^2)] y \right\}_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} -\frac{1}{2} \exp(-y^2) dy \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2) dy \end{aligned}$$

约去积分后, 得到

$$E_{av} = \frac{\frac{1}{2} m A v_{th}^3 \frac{1}{2}}{A v_{th}} = \frac{1}{4} m v_{th}^2 = \frac{1}{2} K T \quad (1-7)$$

于是, 平均动能是  $\frac{1}{2} K T$ .

我们很容易将这个结果推广到三维, 得到麦克斯韦分布是

$$f(u, v, w) = A_3 \exp\left[-\frac{1}{2} m(u^2 + v^2 + w^2)/K T\right] \quad (1-8)$$

其中

$$A_3 = n \left( \frac{m}{2\pi K T} \right)^{3/2} \quad (1-9)$$

平均动能是

$$E_{av} = \frac{\iiint_{-\infty}^{\infty} A_3 \frac{1}{2} m(u^2 + v^2 + w^2) \exp\left[-\frac{1}{2} m(u^2 + v^2 + w^2)/K T\right] du dv dw}{\iiint_{-\infty}^{\infty} A_3 \exp\left[-\frac{1}{2} m(u^2 + v^2 + w^2)/K T\right] du dv dw}$$

注意到, 由于麦克斯韦分布是各向同性的, 这个表达式对  $u, v, w$  都是对称的. 因此分子中三项的每一项与其他项是相同的. 这样一来, 我们只需要计算第一项并乘以 3, 得到

$$E_{av} = \frac{3A_3 \int \frac{1}{2} \mu u^2 \exp\left[-\frac{\frac{1}{2} \mu u^2}{KT}\right] du \iint \exp\left[-\frac{1}{2} m(v^2 + w^2)/KT\right] dv dw}{A_3 \int \exp\left[-\frac{\frac{1}{2} \mu u^2}{KT}\right] du \iint \exp\left[-\frac{1}{2} m(v^2 + w^2)/KT\right] dv dw}$$

采用我们前面的结果，就得到

$$E_{av} = \frac{3}{2} KT \quad (1-10)$$

普遍的结果是：每个自由度的平均能量等于  $\frac{1}{2} KT$ 。

既然  $T$  和  $E_{av}$  是如此紧密相关，所以在等离子体物理学中，温度通常用能量单位来表示。为了避免在所包含维数上发生混淆，所以不用  $E_{av}$  而用对应于  $KT$  的能量来表示温度。对于  $KT = 1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{erg}$

$$T = \frac{1.6 \times 10^{-12}}{1.38 \times 10^{-16}} = 11\,600$$

于是转换因子是

$$1\text{eV} = 11\,600\text{K} \quad (1-11)$$

一个  $2\text{eV}$  的等离子体指的是它的  $KT = 2\text{eV}$ ，或者说在三维（空间）中它的  $E_{av} = 3\text{eV}$ 。

等离子体可以同时具有几个温度是颇有意义的。离子和电子经常具有不同温度  $T_i$  和  $T_e$  的独立麦克斯韦分布。这是因为离子之间或电子之间的碰撞率大于离子和电子之间的碰撞率。这样，每一种粒子能处于自身的热平衡中，而等离子体也许不能持续足够长时间使两个温度相等。当存在磁场  $\mathbf{B}$  时，连单一种类粒子（如离子）都可能有两个温度。这是因为沿着  $\mathbf{B}$  作用在一个离子上的力与垂直  $\mathbf{B}$  作用在一个离子上的力是不同的（由于洛伦兹力）。这样，垂直于  $\mathbf{B}$  和平行于  $\mathbf{B}$  的速度分量可能属于具有温度  $T_{\perp}$  和  $T_{\parallel}$  的不同麦克斯韦分布。

在结束对温度概念的评论之前，我们应当消除流行的错误概念，即高温必须意味着大量的热。人们在听到荧光灯管内电子温度大约是  $20\,000\text{K}$  时，通常感到惊讶：“啊！并不感到那么热呀！”当然，也必须考虑到热容量。在荧光灯管内的电子密度远低于大气压下的气体密度，电子以它们的热速度打击壁而传递到壁的总热量，并不是那么大的。每个人都有这样的经验，知道香烟灰落在手上是不伤手的。虽然其温度高到足够引起燃烧，但包含的总热量是不大的。很多实验室的等离子体具有  $1\,000\,000\text{K}$  ( $100\text{eV}$ ) 量级的温度，但密度只有  $10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ，因此壁的变热并不是一个需要严重考虑的问题。

## 习题

1-1 在下列条件下，计算理想气体的密度（以  $\text{cm}^{-3}$  为单位）：



(a) 在  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $760\text{Torr}^{\text{①}}$  压力下的密度. 这就叫做洛施密特常数 (Loschmidt number).

(b) 在室温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ), 真空度为  $10^{-3}\text{Torr}$  下的密度. 这是实验家所熟知的一个有用的数.

1-2 对于归一化的一维麦克斯韦分布,

$$\hat{f}(u) = A \exp(-mu^2/2KT)$$

使

$$\int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(u) du = 1$$

导出常数 A.

## 1.4 德拜屏蔽

等离子体行为的一个基本特性是它具有屏蔽掉作用于它上面的电势的能力. 假定在等离子体内插入两个和电池相连的带电球, 以试图在等离子体内部引进一个电场 (图 1-3). 球会吸引相反电荷的粒子, 几乎立刻就在负电球周围形成离子云, 在正电球周围形成电子云. (我们假定, 介电层实际上阻止了等离子体在表面上的复合, 或者尽管存在着复合, 但电池容量大到足够保持这个电势.) 倘若等离子体是冷的, 而且不存在热运动, 则云中的电荷刚好与球上的电荷一样多; 屏蔽就是完全的, 在云外面的等离子体内部就会不存在电场. 另外, 如果等离子体温度是有限的, 处在云边缘 (此处的电场弱) 的那些粒子就有足够的热能逃逸出静电势阱. 此时, 云“边缘”出现在势能近似等于粒子热能  $KT$  的半径上, 而屏蔽是不完全的.  $KT/e$  量级的电势能够漏入等离子体中并引起有限的电场.

下面我们计算这种电荷云的近似厚度. 设想用一个完全透明的栅极, 使  $x=0$  平面的电势  $\phi$  保持在  $\phi_0$  值 (图 1-4). 我们希望计算  $\phi(x)$ . 为简单起见, 我们假定离子-电子质量比  $M/m$  是无限大, 所以离子不运动, 而形成均匀正电荷本底. 更确切地说,  $M/m$  足够大, 使得在实验的时间尺度上, 离子的惯性阻止了它们有效地运动. 一维泊松方程为



图 1-3 德拜屏蔽

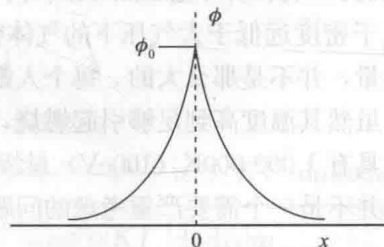


图 1-4 等离子体中接近栅极处的电势分布

①  $1\text{Torr} = 1\text{mm Hg} = 133.3\text{Pa}$ .