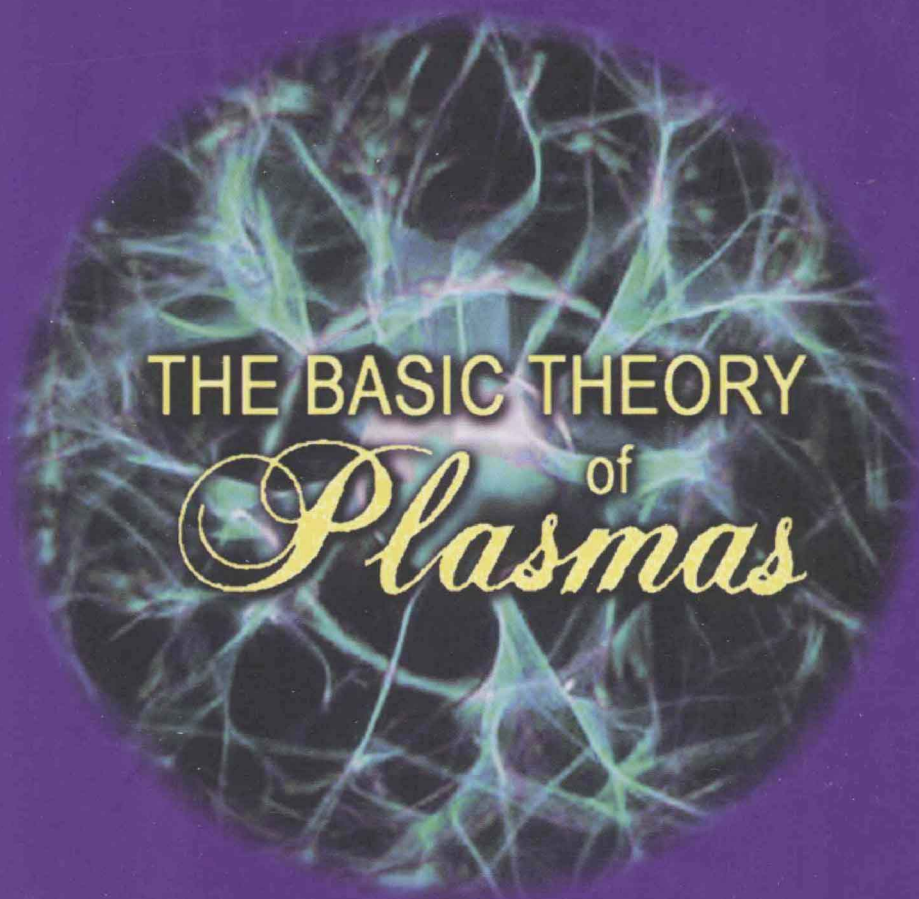




THE BASIC THEORY
of
Plasmas

电浆基本理论

赵凯华



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

THE BASIC THEORY
of
Plasmas

电浆基本理论

赵凯华



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书的主要内容为电浆的基本理论,内容丰富,条理清晰,数学推导极为细致全面,一方面介绍了电浆物理学的基本内容,另一方面清楚地论述了微观现象和宏观现象之间的区别和联系。全书共分成十章,包括粒子轨道理论、电浆的宏观理论、电浆里的波、电浆动理论、BBGKY 理论、无碰撞各向同性电浆中的波和不稳定性、无碰撞各向异性电浆中的波和不稳定性、漂移波和漂移不稳定性、参变激发、孤波、孤立旋涡、无碰撞击波等。

图书在版编目 (C I P) 数据

电浆基本理论 / 赵凯华著. —北京: 高等教育出版社, 2013.11

ISBN 978-7-04-034762-3

I. ①电… II. ①赵… III. ①等离子体物理学-高等学校-教材 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 001521 号

Dianjiang Jiben Lilun

策划编辑 忻 蓓
责任印制 刘思涵

责任编辑 胡凯飞

封面设计 杨立新

版式设计 于 婕

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 唐山市润丰印务有限公司
开 本 850 mm×1 168 mm 1/16
印 张 22.75
字 数 620 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2013 年 11 月第 1 版
印 次 2013 年 11 月第 1 次印刷
定 价 40.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 34762-00

开 场 白

一、Plasma, “等离子体”抑或“电浆”?

Plasma 一词我国大陆一直作“等离子体”,在台湾由吴大猷先生倡导作“电浆”。本书作者曾发表文章,^①述说“等离子体”译名之不当,建议改称“电浆”,理由如下。

“等离子体”译名的缺点有三:一是太长(一般以二三字为宜);二是难以抽出其中任何一个单字来组成复合词;三是随着科学的发展,它已不能概括此词现代的含义。这些缺点都源于当初订名时企图把概念的解说包含在订名中,这往往是不可能的,正像一个人的名字不能完全表达他的身份、人品和性格一样。Plasma 的原意是有一定程度电离的气体,因它在整体上常保持电中性,故曰“等离子”。后来出现了 nonneutral plasma,就得译作“非中性等离子体”,使我们陷入“不等的等离子体”的尴尬局面。现在看来,像台湾那样把 plasma 一词直译作“电浆”是可取的。这样,plasma ion source 可译作“电浆离子源”,而不必叫做拗口的“等离子体离子源”。plasmon 可译作“电浆子”甚至“浆子”,而不必作“等离子体子”或“等离子体激元”,作“等离子子”也是不令人满意的。

有人说,“电浆”是什么东西?让人感到莫名其妙。其实对于外国人来说 plasma 一词也是莫名其妙的,有个 Plasma Center(等离子体研究中心)还被一般人误认为是献血站呢,因为 plasma 的原意是“血浆”。最早研究气体放电中 plasma 的人是朗缪尔(Irving Langmuir),plasma 一词也是他选订的,时间是 1927 年。据当时在朗缪尔手下工作的莫特-史密斯(Harold M. Mott-Smith)1967 年给友人的信中是这样回忆的:^②

……朗缪尔开始研究水银蒸气放电。他很快发明了他的探针。我做的是实验工作和大部分的数学推导,在盖斯勒(Geissler)管的阳极柱里和充气热离子管里,我们很快积累了水银电弧柱体内的离子密度和速度分布的许多数据。

我们注意到他们揭示的放电结构与我们的相似性,朗缪尔指出这件事的重要性和可能具有广泛的意义。我们努力为它取个名字。我们翻来覆去地考虑“均匀放电”、“平衡放电”这些名字;对于围绕电极的亮暗区则取名“辉光”、“晕”等。一天朗缪尔兴高采烈地来到说他想好了。他指出,放电的“平衡”部分的作用是一种基底,运载着各种粒子,如热电离丝发出的高速电子,气体杂质的分子和离子。这使他联想到血浆运载红血球、白血球和细菌的方式。所以他建议把我们的“均匀放电”叫做“plasma”。我们当然都同意。

不过后来我们骑虎难下了。在相当的一段时期里被医学杂志纠缠着要我们论文的复印本,甚至到现在还这样。物理界和化学界斜眼看这个陌生的名词,迟迟未接受它到自己的词汇中。工程界则把它当做了通用电器公司的商标。在我离开实验室以后很久,情况突然发生了可喜的变化,人人开始谈论 plasma 了。这发生在热核(聚变)成为政府资助的项目之前不久,终于给 plasma 盖上了体面的印记。

从这段回忆看来,朗缪尔为电离气体取“plasma”这个名字是有一定道理的,也许这个道理并不充分,曾经遭到同行的冷落。现在不同了,在所有使用拼音文字的国家里,朗缪尔的 plasma 和血

① 赵凯华,科技术语研究,2003,5(1):12;物理,2006,35(12):1067.

② H. M. Mott-Smith, *Nature*, 233(Sept. 1971), 219.

浆都是同样的拼法。约定成俗，习惯成自然，今天物理界说到 plasma 时已赋予它全新的含义，不再联系到血浆。我们的汉语不是拼音文字，不宜音译，于是译成了“等离子体”或“电浆”，前者完全意译，后者半直译半意译。科学名词照字面直译的作法未必不可取。随着科学的发展，一个名词的内涵是要扩展和延伸的，过分拘泥当前的认识赋予名词现有的含义，将来是会被动的。在这种情况下不如照字面直译，使字面上的意思与特定的含义联系不那么紧密，却可在概念发展时在称呼上与国际保持同步。在这种考虑下我支持“电浆”的译法，它既简短，又便于组成愈来愈长的复合词。

“等离子体”一词已沿用了五六十年，改得了吗？一个人改了名字，老朋友会在一段时间里很不习惯，对新朋友来说不存在这个问题。近来物理学名词审定委员会已初步决定，把“电浆”列为“等离子体”的别名，允许使用。^①万事总得有人带个头，我就来当这个带头羊，全书以“电浆”作为 plasma 的译名。

二、电浆的定义

粗略地讲，电浆就是电离了的气体，其中或多或少地包含一定数量的正负离子，在大多数情况下负离子就是电子。在热力学平衡态下气体电离靠温度，一个标志性的参量是离子平均热运动动能（可用 $k_B T$ 表征， k_B 为玻耳兹曼常量）与离子间库仑势能（可用 e^2/d 表征， d 为粒子间平均距离）之比：

$$\Pi \equiv \frac{k_B T d}{e^2} = \frac{k_B T}{e^2 n^{1/3}}, \quad (0.1)$$

式中 n 是游离电子的数密度。 $\Pi \ll 1$ 时气体的电离度是很低的， $\Pi \gg 1$ 时气体完全电离。即使气体电离度很低，它的电导率已很可观，其性质与未电离的中性气体也有很大的差别，我们亦可称之为“电浆”。不过更典型的电浆应属于 $\Pi \gg 1$ 的情况。

电浆的最主要特征，是带电粒子间的相互作用（库仑力）是长程的，其力程等于无穷大。不过一个带电粒子的周围会被带相反电荷的粒子包围起来，将库仑力在一定距离上屏蔽掉。这概念首先是德拜（Peter Joseph William Debye）在研究电解溶液时提出来的，称为德拜屏蔽。按平衡态的统计力学推算，德拜屏蔽距离 [见第四章(4.56)式]

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T}{4\pi e^2 n}}. \quad (0.2)$$

运用统计力学的条件是以德拜屏蔽距离为半径的球体内粒子的数目 N_D 足够多：

$$N_D = \frac{4\pi \lambda_D^3 n}{3} \gg 1. \quad (0.3)$$

将(0.2)式代入(0.3)式可以看出

$$N_D = \frac{\Pi^{3/2}}{6\sqrt{\pi}} = 0.094 \Pi^{3/2}. \quad (0.4)$$

所以 $\Pi \gg 1$ 与 $N_D \gg 1$ 条件是一致的。通常称(0.3)式中的 N_D 为电浆参量(plasma parameter)，对于典型的电浆， $N_D \gg 1$ 。

电浆里的一种典型的振荡称为电浆振荡(plasma oscillation)，其角频率为[见第三章(3.26)式]

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m}}. \quad (0.5)$$

而电子与离子两体碰撞的有效频率为[见第四章(4.153)式]

① 《物理》杂志，39 卷(2010)4 期，283。

$$\nu_{ei} = \frac{4\pi n Z e^4 \ln \Lambda}{\sqrt{8m} (k_B T)^{3/2}}. \quad (0.6)$$

式中 m 为电子质量, Z 为正离子的电荷数, $\ln \Lambda$ 称为库仑对数, 其中 $\Lambda = 3N_D$. ν_{ei} 与 ω_{pe} 之比为

$$\frac{\nu_{ei}}{\omega_{pe}} = \frac{Z \ln \Lambda}{3\sqrt{8} N_D}. \quad (0.7)$$

对于氢和它的同位素, $Z=1$, 而在广阔的 n 、 T 参量范围内取库仑对数 $\ln \Lambda = 10$ 是很好的近似, 从而

$$\frac{\nu_{ei}}{\omega_{pe}} \approx \frac{1.8}{N_D} \sim \frac{1}{N_D} \ll 1. \quad (0.8)$$

归纳起来, 电浆的定义可包含以下三点:

(1) 电浆近似

$N_D \gg 1$, 德拜球里有大量带电粒子, 它们处于集体相互作用之中。

(2) 准电中性

在大于 λ_D 以上的空间尺度下电浆的平衡态是准电中性的。

(3) 无碰撞近似

在电浆振荡的时间尺度下动理过程中电磁场的作用超过了两体碰撞。

以上三点最基本的是第(1)点。

传统的物质聚集态有三: 温度最低的是固态, 温度升高些是液态, 温度更高了是气态。比气态温度再高, 是电浆态。它具有与普通气态相当不同的性质, 人们称它为物质第四态。

序

三十多年前发生在我国的那场空前浩劫刚刚过去,物理学界和天文学界对电浆的基本理论产生强烈的渴求。我除了在北大物理系和地球物理系天文专业为研究生和青年教师讲授“等离子体理论”之外,还被邀请到中国科学院物理所和力学所、南京大学天文系和紫金山天文台等单位讲授此课。当时随讲随编,积累了一些零散的油印讲义,流传在外。后来我本人兴趣转移,也就没有再关心这些讲义。到了20世纪90年代,一位在九所(北京应用物理和计算数学研究所)工作的朋友告诉我,该所一遍一遍地重印我当年的那些讲义。2000年更有该所的一位博士研究生刘红,自愿地将我的这些讲义录成电子版,并胶印成书。应该抱歉的是我当时另有兴奋点,完全没有认真校对和修改该稿。不过自那时起我开始萌发了把这些陈年讲稿整理成书的念头。

2008年以后,我手头的其它事情告一段落,就开始整理这份讲稿。在此过程中,中国科学院理论物理所的刘寄星学弟给了我大量帮助。他不仅极力鼓励我出书,而且为我复印和下载了许多书籍和资料。我告诉他,我原来的讲稿基本上是线性的,非线性理论几乎空白。这样出书是不行的,怎样补充非线性部分,我还没有想好。他当时正在北大讲授“高等等离子体物理 II”课,听我说了之后立即把他印发给学生的讲义和有关的文献资料给了我,并建议应重点写的非线性理论内容。我这本书的非线性理论部分基本上采纳了他的建议。在本书初稿完成后,他还通读了全书,作了详细的勘误和补充建议。刘寄星,是我最应该感谢的人。此外,我在整理和写作书稿的过程中参考了我的学长于敏院士在九所的油印讲义;三十年前和我一起上讲台的陈秉乾教授曾记录和整理了许多我们的讲稿,成为整理成本书的基础。在此谨对他们都表示诚挚的谢意。

本书着重讲的是电浆的基本理论,应用问题是其它专著的任务,我们几乎都不涉及。本书特点之一是有较详细的数学推导,写完了一看,全书大部分篇幅堆砌了长长的数学式子。这正是电浆理论的特点,数学运算特别繁难复杂。如果把许多推导都略过去,着重讲结论,版面会显得清爽得多,但这就难为了想认真掌握电浆理论的读者,他们要把这些推导补出来可不是件轻松的事。推导详尽,这也是当年我们的讲课受听众欢迎的原因之一。当然在数学推导之外不能不讲物理意义,但很多物理意义要在推导的过程中体现出来,譬如在推导中用了怎样的近似,从这里体会所得公式的适用条件。

本书电磁学公式一律采用高斯单位制。

本书的错误在所难免,作者的电子信箱是 khzhao@pku.edu.cn,热忱地希望读者和同行来信指正。

赵凯华

2010年6月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一章 粒子轨道理论	1
§ 1. 导向中心 漂移	1
1.1 正交场中的电场漂移	1
1.2 在与磁场正交的重力场中的漂移	2
1.3 磁场梯度漂移	3
1.4 磁场曲率漂移	4
§ 2. 变化磁场中的浸渐不变量	5
2.1 磁矩的浸渐不变性	5
2.2 磁镜	6
2.3 纵向浸渐不变量 费米加速	7
2.4 范艾伦辐射带 第三个浸渐不变量——磁通	7
§ 3. 强激光电浆粒子加速	8
第二章 电浆的宏观理论	10
§ 1. 磁流体力学基本方程	10
1.1 磁流体方程	10
1.2 物态方程(理想气体)	11
1.3 电磁方程	11
§ 2. 磁通量冻结 阿尔文波 磁感应线重联	12
2.1 磁通量冻结定理	12
2.2 阿尔文波	13
2.3 磁感应线的重联	14
§ 3. 静态平衡	14
3.1 平衡方程	14
3.2 θ 箍缩	15
3.3 Z 箍缩	16
3.4 螺旋箍缩	16
§ 4. 不稳定性	17
4.1 什么是“不稳定性”?	17
4.2 微扰的计算	17
4.3 边界上的衔接与本征方程	19
4.4 稳定性判据	21
§ 5. 击波	23
5.1 磁流体力学击波	23
5.2 击波面前后的阶跃条件	23
5.3 击波的压缩性	26
5.4 波前的厚度	27
§ 6. 色散介质电动力学基本方程	27
6.1 宏观电动力学方程	27
6.2 极化强度 $\mathbf{P}$ 与磁化强度 $\mathbf{M}$ 电位移矢量 $\mathbf{D}$ 和磁场强度 $\mathbf{H}$	28
6.3 场方程和介质响应方程的傅里叶变换式	29
6.4 σ 、 ϵ 、 μ^{-1} 之间的关系	31

6.5 电浆电动力学方程小结	32
§ 7. 介电张量的解析性质与色散介质中电磁能量的传输	33
7.1 克拉默斯-克勒尼希关系式	33
7.2 电磁场能量的传输方程	34
§ 8. 色散方程与简正模	36
8.1 简正模的色散关系	36
8.2 简正模的偏振	37
8.3 简正模的传输	38
8.4 波速与波面	39
8.5 两个简正模的例子	40
第三章 电浆里的波(二流体理想 MHD 理论)	44
§ 1. 二流体模型与广义欧姆定律	44
1.1 二流体模型	44
1.2 广义欧姆定律	44
1.3 广义欧姆定律的几种近似形式	45
§ 2. 各向同性电浆里的波	46
2.1 各向同性冷电浆里的波	46
2.2 各向同性热电浆纵波的色散关系	47
2.3 各向同性热电浆纵波高频支	48
2.4 各向同性热电浆纵波低频支	49
2.5 小结	50
§ 3. 各向同性电浆里的不稳定性	50
3.1 束流电浆不稳定性	50
3.2 巴涅曼不稳定性	53
§ 4. 各向异性冷电浆里的波(一)色散 截止与共振	53
4.1 色散关系	53
4.2 截止	55
4.3 共振	55
§ 5. 各向异性冷电浆里的波(二) $\mathbf{k} // \mathbf{B}_0$ 和 $\mathbf{k} \perp \mathbf{B}_0$	58
5.1 平行磁场的波	58
5.2 垂直磁场的波	61
§ 6. 各向异性冷电浆里的波(三)CMA 图	62
6.1 参量空间分区	62
6.2 各区的模式数	62
6.3 各区模式波法面的拓扑类型	64
6.4 各区模式的命名	65
§ 7. 各向异性冷电浆里的波(四)任意方向	65
7.1 阿尔文波	66
7.2 离子回旋波(SL 模式)	67
7.3 高频($\omega \gg \Omega_i$)波段	68
§ 8. 各向异性热电浆里的波	70
8.1 色散关系	70
8.2 最低频($\omega \ll \Omega_i$)长波($k \rightarrow 0$)模式	73

8.3 离子回旋波($\omega \approx \Omega_i$)与离子声波	75
8.4 哨声波与电子回旋波	75
8.5 相速大于 c 的高频电磁波	76
8.6 小结	76
第四章 电浆动理论	78
§ 1. 引言	78
1.1 概率分布函数	78
1.2 动理方程	79
1.3 与流体力学方程的关系——矩方程	80
§ 2. 玻耳兹曼方程	81
2.1 基本假设	81
2.2 两体碰撞力学	82
2.3 碰撞积分	83
2.4 碰撞参量与散射截面	84
2.5 玻耳兹曼方程的性质	86
§ 3. 由福克-普朗克方程导出的弛豫时间	89
3.1 电浆中相互作用的特点	89
3.2 福克-普朗克方程的一般形式	91
3.3 试探粒子问题	92
3.4 按两体碰撞模型推导福克-普朗克方程中的系数	94
3.5 朗道方程	95
3.6 多体关联效应	96
3.7 弛豫时间的计算	97
§ 4. 输运系数	102
4.1 电浆中输运过程的宏观规律	102
4.2 用简化碰撞积分计算输运系数	103
4.3 双极扩散	107
4.4 完全电离气体里的碰撞频率和输运系数	108
§ 5. 符拉索夫方程	111
5.1 电浆里各种过程的时间尺度	111
5.2 自治场	111
5.3 符拉索夫方程的性质	112
第五章 BBGKY 理论	114
§ 1. 刘维方程与 BBGKY 品级方程	114
1.1 刘维方程	114
1.2 S 个粒子的约化分布函数	115
1.3 BBGKY 品级方程	115
§ 2. 平衡态分布函数和集团展开	117
2.1 吉布斯分布	117
2.2 短程力情形	118
2.3 库仑力情形	119
§ 3. BBGKY 品级方程的集团展开	121
3.1 约化分布函数的集团展开与关联函数	121

3.2 关联函数方程中各项数量级的比较	122
3.3 各种动理方程对驱动项的取舍	123
§ 4. 沿特征曲线积分和 $\mathcal{L}_t$ 算符	124
4.1 基本方程	124
4.2 齐次方程的通解	124
4.3 $\mathcal{L}_t$ 算符	125
4.4 柯西问题	126
§ 5. 建立动理方程	127
5.1 博戈留波夫的浸渐假设	127
5.2 玻耳兹曼方程	127
5.3 朗道方程	129
5.4 莱纳尔-巴列斯库方程	131
§ 6. 小结	132
附录 A 莱纳尔-巴列斯库方程的推导	134
A.1 朗道算符	134
A.2 傅里叶变换式的一般形式	134
A.3 求二体关联函数 $g_2(12)$	135
A.4 碰撞积分	139
第六章 无碰撞各向同性电浆中的波和不稳定性 (Vlasov 理论)	141
§ 1. 各向同性电浆里纵波的色散关系	141
1.1 弗拉索夫-泊松方程的线性化	141
1.2 傅里叶-拉普拉斯变换	141
1.3 拉普拉斯反演积分的解析性质	142
1.4 色散方程	144
§ 2. 朗缪尔波与朗道阻尼	144
2.1 单一组分的色散方程	144
2.2 玻姆-格罗斯频率和朗道阻尼	145
2.3 与简正模分析法的关系	146
2.4 与磁流体力学理论比较	146
2.5 朗道阻尼的定性解释	146
2.6 自由冲流、相混合与电浆回波	147
§ 3. 离子声波	148
3.1 两组分电浆的色散方程	148
3.2 离子声波	149
3.3 离子朗缪尔波	150
§ 4. 各向同性电浆里横波的色散关系与电磁波	150
4.1 弗拉索夫-麦克斯韦方程的线性化与介电张量	150
4.2 麦克斯韦分布时的介电张量	152
4.3 电磁波	153
§ 5. 束流不稳定性	154
5.1 电浆里的微观不稳定性	154
5.2 潘若斯判据	154
5.3 尾隆不稳定性 and 束流电浆不稳定性	156

5.4 纵向电流驱动离子声波不稳定性 and 巴涅曼不稳定性	157
§ 6. 准线性理论	159
6.1 电浆中的湍动	159
6.2 多体关联方程序列	159
6.3 关联方程中各项的数量级	161
6.4 准线性动理方程	162
6.5 共振区和非共振区的扩散系数	163
6.6 尾隆不稳定性	166
§ 7. 非线性朗道阻尼	170
7.1 粒子的轨道	170
7.2 波能的演化方程	172
7.3 分布函数的演化	172
7.4 $\sin(kx'_0)$ 的演算	173
7.5 非线性衰减率 (增长率)	175
附录 B 电浆色散函数和雅可比椭圆函数	177
B.1 电浆色散函数	177
B.2 椭圆积分和椭圆函数	177
B.3 一些公式的推导	180
第七章 无碰撞各向异性电浆中的波和不稳定性 (Vlasov 线性理论)	186
§ 1. 有匀强恒磁场时的色散方程	186
1.1 弗拉索夫-麦克斯韦方程组	186
1.2 麦克斯韦方程组的拉普拉斯-傅里叶变换	187
1.3 沿无扰轨道积分求一级弗拉索夫方程的形式解	187
1.4 色散方程	189
1.5 准静电波的色散方程 介电响应函数	190
1.6 介电张量矩阵的具体表达式	191
1.7 介电响应函数的表达式	192
§ 2. 各向异性电浆里的波	193
2.1 各向异性冷电浆里的波	193
2.2 各向异性热电浆里的波	194
§ 3. 切连科夫共振吸收	194
3.1 色散方程	194
3.2 低频 ($\omega \ll \Omega_i$) 波段	195
3.3 哨声 ($\Omega_i \ll \omega \ll \Omega_e $) 波段	199
3.4 高频 ($\omega \gg$ 或 $\sim \omega_{pe}$, $ \Omega_e $) 波段	200
§ 4. 回旋共振吸收	201
4.1 离子回旋共振	201
4.2 电子回旋共振	202
§ 5. 交叉重联的几支波的阻尼	202
5.1 色散方程与介电张量	203
5.2 色散关系	204
5.3 阻尼	204
§ 6. 回旋振荡	206

6.1 O 波的电子回旋振荡	206
6.2 O 波的离子回旋振荡	207
6.3 X 波的电子回旋振荡	208
6.4 X 波的离子回旋振荡	209
§ 7. 均匀各向异性电浆里的束流不稳定性	210
7.1 介电张量	210
7.2 伯恩斯坦模不稳定性	211
7.3 纵向弱束驱动哨声波	213
§ 8. 速度分布各向异性引起的不稳定性	216
8.1 漏失锥不稳定性	216
8.2 水龙带不稳定性	219
附录 C 贝塞耳函数 磁化电浆介电张量的推导	222
C.1 贝塞耳函数与变形贝塞耳函数	222
C.2 电导率张量表达式中对 φ 和 t 的积分	224
C.3 麦克斯韦分布下介电张量表达式的推导	227
C.4 有束流时介电张量表达式的推导	228
C.5 各向异性双温度麦克斯韦分布时的介电张量	230
第八章 漂移波和漂移不稳定性	232
§ 1. 不均匀性引起的漂移	232
1.1 密度梯度和温度梯度引起的漂移流	232
1.2 不均匀磁场漂移的等效重力场模拟	233
1.3 粒子的轨道	234
§ 2. 介电响应函数	235
2.1 定常弗拉索夫方程的 0 级解	235
2.2 $f_a^{(1)}$ 的形式解	236
2.3 $f_a^{(1)}$ 的拉普拉斯-傅里叶变换与介电响应函数	237
2.4 无扰轨道计算	238
2.5 对 φ' 和 t 的积分	239
2.6 对 $v_\perp$ 和 $v_\parallel$ 的积分	239
2.7 低频近似	241
§ 3. 离子漂移波的槽纹不稳定性	241
3.1 电浆色散函数在 $k_\parallel = 0$ 时的展开	241
3.2 色散关系	242
3.3 槽纹不稳定性	243
§ 4. 电子漂移波-离子声波及其不稳定性	244
4.1 电浆色散函数在 $k_\parallel \neq 0$ 时的展开	244
4.2 快慢离子声波	245
4.3 有限拉莫尔半径效应	246
§ 5. 回旋动理方程	248
5.1 变换到导向中心坐标	248
5.2 平衡分布	249
5.3 微扰分布	250
5.4 平直磁感应线特例	251
§ 6. 剪切磁场对不稳定性的遏止	253

6.1 剪切磁场的描述	253
6.2 本征方程的推导	254
6.3 非齐次方程与齐次方程的关系	256
6.4 与薛定谔方程类比	258
6.5 复势阱中的本征模	259
6.6 磁场的剪切对普适不稳定性的遏止	264
附录 D 若干公式的推导和论证	268
D.1 到回旋动理坐标的变换(8.88)式	268
D.2 磁感应线曲率矢量 $\mathbf{K}$ 的表达式(8.112)	269
D.3 朗斯基行列式 $W_{12}(s)$ 与 x 无关	269
第九章 参变激发	271
§1. 引言	271
§2. 一般色散方程	272
2.1 问题的提出	272
2.2 有质动力	272
2.3 傅里叶-拉普拉斯变换	273
2.4 低频方程	274
2.5 高频方程	275
2.6 色散方程	276
§3. 衰变成两个纵波	277
3.1 色散方程	277
3.2 低频模的介电函数	278
3.3 共振衰变不稳定性	279
3.4 衰变成抗性准离子模	280
3.5 衰变成阻性准离子模	280
3.6 调制不稳定性	281
3.7 振荡双流不稳定性	282
§4. 拉曼散射	283
4.1 色散方程	283
4.2 低频模的介电函数	284
4.3 共振拉曼背散射	285
4.4 被抗性准电子模散射	285
4.5 被电子朗道阻尼散射(康普顿散射)	285
4.6 共振拉曼前散射	286
4.7 纯增长的前散射	287
§5. 布里渊散射	287
5.1 被离子声波散射	287
5.2 被抗性准离子模散射	288
5.3 被阻性准离子模散射	288
5.4 垂向调制——丝状不稳定性	289
5.5 斜向调制	289
5.6 甚低频调制	290
§6. 泵波衰变成两个电浆子	290
6.1 电子流体力学方程	290
6.2 色散关系	292

6.3 不稳定增长率和阈值	293
§ 7. 电浆子的级联散射和 BE 凝聚	294
7.1 级联散射	294
7.2 级联系列中的能量转移和各级的强度分布	295
7.3 电浆子的 BE 凝聚	298
第十章 孤波 孤立涡旋 无碰撞击波	299
§ 1. 孤波与孤子	299
1.1 什么是孤波与孤子?	299
1.2 逆散射法	301
1.3 非线性薛定谔方程	302
§ 2. 电浆里的孤子	303
2.1 离子声波孤子	303
2.2 电浆中离子声波孤子的实验观察	306
2.3 朗缪尔波孤子	307
2.4 朗缪尔孤子的实验观察	310
2.5 电浆子的坍塌与波和粒子相互作用的增强	311
§ 3. 孤立涡旋	312
3.1 自然界中的涡旋	312
3.2 长谷川-三间方程	313
3.3 方程的解	315
3.4 漂移涡旋波的碰撞特性	318
§ 4. 无碰撞击波	319
4.1 无碰撞击波与 MHD 击波的不同	319
4.2 线性波的考量	320
4.3 波前剖面的计算	320
4.4 几点讨论	324
附录 E KdV 方程与逆散射法	326
E.1 KdV 方程的初始值问题	326
E.2 散射问题	326
E.3 散射数据的演化	326
E.4 逆散射问题(一)——构建 Marchenko 积分方程	329
E.5 逆散射问题(二)——解 Marchenko 积分方程	331
E.6 逆散射问题(三)——从 $\psi(k, x)$ 到 $u(x)$	332
E.7 初始分布为 δ 函数情形	332
E.8 初始分布为双曲正割函数的一般情形	334
E.9 无反射双孤子情形	337
E.10 有反射双孤子情形	339
名词索引	342
符号索引	347

第一章 粒子轨道理论

在电浆中,带电粒子之间的电磁相互作用是长程的,其运动具有集体的性质,在这种情况下,讨论单个带电粒子在给定电磁场里的运动似乎并不明智。然而由于粒子轨道理论简单,且由它导出的某些关键性概念,有时对进一步的电浆理论有相当的启发作用,故而本书由这里切入。

粒子轨道理论的适用性显然是有条件的。首先电浆必须非常稀薄,不仅粒子间的碰撞不重要,长程的集体作用也可忽略。此外,如果带电粒子环绕磁场的快速拉莫尔(Larmor)回转运动可以滤掉的话,则由阿尔文(Hannes Alfvén)提出的导向中心模型和浸渐不变量的概念就可在粒子轨道理论中起关键作用。这要求下列参量是可用作微扰展开的小参量:

$$\varepsilon_L = \frac{R_L}{L}, \quad \varepsilon_T = \frac{T_L}{T}, \quad (1.1)$$

式中 R_L 为拉莫尔半径, T_L 为拉莫尔周期, L 和 T 分别为磁场非均匀性的特征长度和变化的特征时间。

本章全章忽略辐射效应,并假定粒子能量较低,运动是非相对论性的。设组分 α 的粒子电荷和质量分别为 q_α 和 m_α , 它处在位置 $\mathbf{r}_\alpha(t)$, 在电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{B}$ 中运动,其运动方程为

$$m_\alpha \ddot{\mathbf{r}}_\alpha = q_\alpha \left[\mathbf{E}(\mathbf{r}_\alpha, t) + \frac{1}{c} \dot{\mathbf{r}}_\alpha \times \mathbf{B}(\mathbf{r}_\alpha, t) \right]. \quad (1.2)$$

$\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 的分布是预先给定的,电浆粒子的电荷与电流对它们的影响应可忽略不计,否则粒子轨道理论不适用。

§ 1. 导向中心 漂移

1.1 正交场中的电场漂移

在均匀的恒磁场 $\mathbf{B}$ 中,带电粒子的速度 $\mathbf{v}$ 可分解为 $v_{\parallel}$ 和 $v_{\perp}$ 两个分量,前者使粒子沿磁感应线作匀速运动,后者使粒子绕磁感应线作拉莫尔进动,两者的合成,粒子的轨道呈螺旋状(图 1-1)。拉莫尔半径 R_L 和拉莫尔周期 T_L 分别为

$$R_L = \frac{mc v_{\perp}}{qB}, \quad T_L = \frac{2\pi mc}{qB}, \quad (1.3)$$

式中 q 和 m 分别为粒子的电荷和质量。拉莫尔角频率为

$$\Omega = \frac{2\pi}{T_L} = \frac{qB}{mc}. \quad (1.4)$$

现设除均匀恒磁场 $\mathbf{B}$ 外还有一与之正交的均匀恒电场 $\mathbf{E}$ 。取直角坐标系 z 轴沿 $\mathbf{B}$, x 轴沿 $\mathbf{E}$ (见图 1-2), 则带电粒子的运动方程为

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{q}{m} \left(E + \frac{1}{c} \dot{y} B \right) = \frac{q}{m} E + \Omega \dot{y}, \\ \ddot{y} = -\frac{q}{mc} \dot{x} B = -\Omega \dot{x}. \end{cases} \quad (1.5)$$

解此方程组的一个简便方法是作如下变量代换:

$$\zeta \equiv x + iy. \quad (1.6)$$

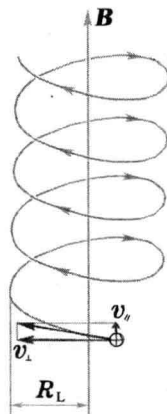


图 1-1 均匀磁场中带正电粒子的轨迹