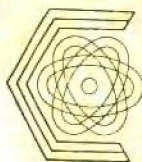
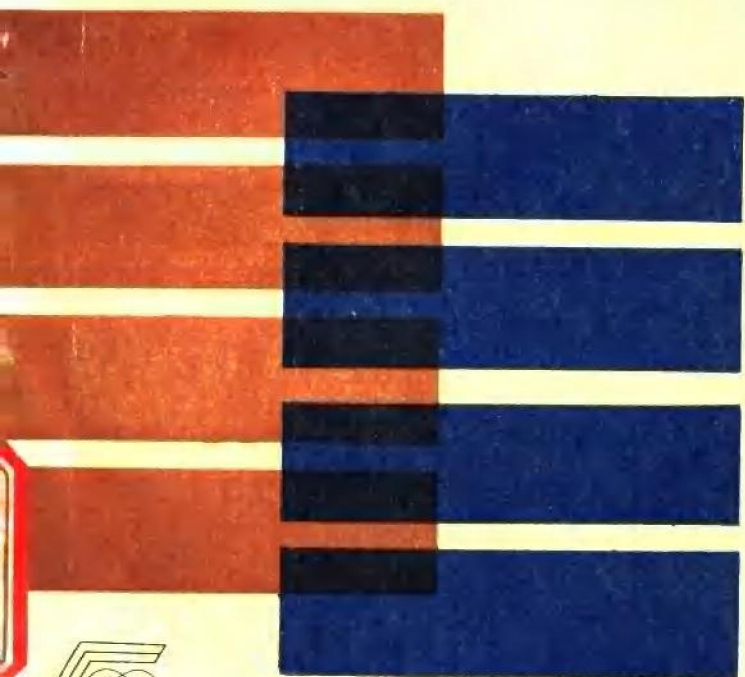


等离子体物理基础

[苏] B. E. 戈 兰 特 等著



原子能出版社

等离子体物理基础

[苏]B. E. 戈兰特 等著

马腾才 秦运文 译

唐福林 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述了现代等离子体物理的基础，包括弱电离和强电离的等离子体。既研究了没有磁场时的等离子体，也研究了有磁场存在时的等离子体。书中对决定等离子体性能的各种过程进行了详尽的分析，定性地讨论了这些过程的物理图象。

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ
В.Е. ГОЛАНТ, А.П. ЖИЛИНСКИЙ
И.Е. САХАРОВ
1977

等离子体物理基础

[苏]В.Е.戈兰特 等著

马腾才 秦运文 译

唐福林 校

原子能出版社出版

(北京·2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092¹/₃₂·印张15¹/₂·字数 345 千字

1983年1月第一版·1983年1月第一次印刷

印数001—3000·统一书号：15175·438

定价：1.90元

序 言

本书是在作者为列宁格勒加里宁工程学院的物理专业学生和约飞技术物理研究所开始在等离子体物理及其应用方面工作的科研工作者授课讲义的基础上写成的。其目的是系统地叙述现代等离子体物理的基础。并力图将决定等离子体行为的那些过程的足够详细和充分论证的定量分析同它们物理图象的定性讨论结合起来。

在第一章里讨论等离子体与物质其它状态相区别的主要特点。在第二章里描述显著影响等离子体行为的各种不同类型的碰撞,简单介绍了与碰撞特性有关的资料。在第三、五、六章里叙述等离子体性质的动力学描述方法(动力学方程和矩方程方法)。第四章是关于热力学平衡的等离子体,特别是电离平衡分析的阐述。第五章概括了偏离平衡及其对带电粒子速度分布函数的影响的动力学描述。在那里还讨论不同条件下电子在电场中的速度分布。第七章详细讨论没有磁场时弱电离和强电离等离子体中的带电粒子及其能量的输运过程。在给定输运系数的基础上分析了等离子体带电粒子的电离平衡和能量平衡。第八到十章讨论了磁场中的等离子体的性质。在第八章中描述等离子体带电粒子在不同位形的磁场中的运动。第九章包含存在磁场时的输运过程、带电粒子及其能量平衡的分析。这里也讨论了等离子体湍流对输运过程的影响。最后,在第十章里讨论完全电离等离子体在磁场中的行为,首先讨论磁约束等离子体的平衡和稳定性。

书末附有文献目录,它包括近年来用俄语出版的等离子体物理方面的主要教科书和专著,以及文集《等离子体理论

问题》（《Вопросы теории плазмы》）中的评论文章。

由于本书篇幅有限，我们不可能讨论与等离子体中波的激发和传播有关的问题。对此读者可根据列举的专著和评论文章来进行了解。

在写这本书的过程中，我们得到了列宁格勒工程学院物理电子学教研室等离子体实验室同事们的很大帮助。谨此向他们表示谢意。

主 要 符 号

- a 等离子体半径
- \mathbf{a} 加速度
- b_α α -类粒子的迁移率
- c 光速
- D_α α -类粒子的扩散系数
- D_A 双极扩散系数
- D_α^T 热扩散系数
- D_v 速度空间中的扩散系数
- D_H 磁场扩散系数
- d 偶极矩
- \mathbf{E} 电场强度
- e 电子电荷
- E 内能
- E_{lm} 从能级 l 到能级 m 的跃迁能量
- $E_{0j} = E_j$ 能级 j 的激发能
- E_i 电离能
- F 六维分布函数
- \mathbf{F} 力
- $f(\theta)$ 散射幅度
- $f_\alpha(v)$ α -类粒子的速度分布函数
- f_v 总速度分布函数
- f_K 能量分布函数
- f_0, f_1 分布函数的各向同性和定向

- 分量
- G** 作用于单位体积等离子体的力
- g* 统计权重
- H** 磁场强度
- $H_{k_1^{(*)}, k_2, \dots, k_n}^{(*)}$ 厄米-切贝舍夫多项式
- h** **H**方向单位矢量
- $\hbar = h/2\pi$ 普朗克常数
- J_s s 阶第一类贝塞尔函数
- j* 电流密度
- I* 电流
- $i = \sqrt{-1}$
- K* 动能
- k^q q -过程常数
- k* 波数
- K_α α -类粒子的热传导系数
- L* 等离子体特征尺度
- L_α α -类粒子碰撞截面的库仑对数
- l* 长度
- M** 动量矩
- m_α α -类粒子的质量
- N* 粒子数
- n_α α -类粒子的密度
- n* 带电粒子的密度
- P* 功率

- P_E 电场加热单位体积等离子体的功率
- p_α α -类粒子的动量
- \vec{P}_α α -类粒子的动量通量张量
- p_α α -类粒子的压强
- p_H 磁压强
- $Q_{\alpha\beta}$ 单位时间内 α -类粒子同 β -类粒子相碰撞的次数
- Q_α α -类粒子的能量通量密度
- q_α α -类粒子的热通量密度
- q 环形磁捕集器的稳定性安全因子
- R 六维径向矢量
- R 曲率半径
- $R_{\alpha\beta}$ α -类粒子同 β -类粒子相碰撞时作用于 α -类粒子的摩擦力
- $R_{\alpha\beta}^T$ α -类粒子同 β -类粒子相碰撞而引起的热力
- r 距离
- \mathbf{r} 径向矢量
- r_H 原子半径
- r_s 强相互作用半径
- r_D 德拜半径
- S 面积
- $S_{\alpha\beta}^q$ 描述 α -类粒子同 β -类粒子之间的 q -型碰撞的动力学方程的碰撞项

- S_0, S_1 电子分布函数分量方程的碰撞项
- $s_{\alpha\beta}^q$ α -类粒子同 β -类粒子之间的 q -型碰撞的总截面
- $s_{\alpha\beta}^t$ 弹性碰撞运输截面
- $s_{\alpha\beta}^n, s_{\alpha\beta}^l, s_{\alpha\beta}^h$ 非弹性碰撞总合截面, 伴随有低能量损失的非弹性碰撞截面, 伴随有高能量损失的非弹性碰撞截面
- T 温度
- T_α α -类粒子的温度
- t 时间
- U 相互作用势能
- u 定向速度 (平均速度)
- u_α α -类粒子的定向速度
- u_E, u_n, u_T, u_p 在电场中和由密度、温度及压强梯度作用而产生的运动的定向速度分量
- $u_{d\alpha}$ α -类粒子的漂移速度
- u_p, u_g 波的相速度和群速度
- V 六维速度矢量
- V 体积
- v 速度
- v_α α -类粒子的速度
- v_0 质心速度
- $v, v_{\alpha\beta}$ α -类粒子和 β -类粒子之间的相对速度

$\mathbf{v}'_{\alpha}, \mathbf{v}', \mathbf{v}'_{\alpha\beta}$	碰撞之后的速度矢量
$v_{T\alpha} = (3T_{\alpha}/m_{\alpha})^{1/2}$	热速度
W	能量
\mathbf{w}	速度的无规分量
Z_{α}	α -类粒子的电荷数
α	复合系数
β	动力压强与磁压强之比值
Γ_{α}	α -类粒子通量密度
Γ_v	速度空间的通量密度
γ	不稳定性增长率
γ	绝热指数
$\Delta q = q' - q$	碰撞时 q 量的变化
δ_{ik}	克罗内克尔符号
$\delta p_x, \delta x$	动量和坐标的量子力学不确定性
ϵ	介电常数
ξ	瞄准距离
ξ	等离子体体积元位移
η	电离度
η_{α}	α -类粒子的反射系数
ϑ	散射角
$K_{\alpha\beta}$	α -类粒子同 β -类粒子碰撞时的能量传输系数
Λ	扩散长度
Λ	扰动波长 (第十章)
$\lambda_{\alpha\beta}$	α -类粒子在同 β -类粒子碰撞之前的自由程

λ_{α}	α -类粒子的德布洛依波长
$\mu_{\alpha\beta}$	α -类粒子同 β -类粒子相碰撞的折合质量
μ	磁矩
$\nu_{\alpha\beta}$	α -类同 β -类粒子碰撞的频率
$\nu_{\alpha\beta}^i(\nu)$	弹性碰撞输运频率
$\nu_{\alpha\beta}^n(\nu), \nu_{\alpha\beta}^h(\nu), \nu_{\alpha\beta}^l(\nu)$	非弹性碰撞频率 (相应的是总合频率, 伴随高的和低的能量损失的碰撞频率)
$\overline{\nu_{\alpha\beta}}$	带权重 ν^2 的平均碰撞频率
$\overrightarrow{\pi}$	粘性张量
ρ_e	电荷密度
ρ	物质密度
$\rho_{H\alpha}$	α -类粒子的拉莫尔半径
Σ	统计和
σ	电导率
$\sigma_{\alpha\beta}(\vartheta)$	α -类同 β -类粒子碰撞的微分截面
τ	特征时间
$\tau_{\alpha\beta}$	α -类同 β -类粒子碰撞之间的平均时间
$\tau_{\alpha\beta}^T$	α -类与 β -类粒子之间的能量交换平均时间
Φ	磁通
$\varphi(r)$	静电势
φ	子午角
κ_{α}	α -类粒子的温度传导系数

Ψ	波函数
ψ	散射 (子午) 角
Ω	立体角
ω	频率
$\omega_{H\alpha}$	α -类粒子的回旋频率
ω_p	等离子体频率
$d^3r = dx dy dz$	体积元
$d^3v = dv_x dv_y dv_z$	速度空间体积元
$d^3R = d^3r d^3v$	六维相空间体积元

算 符

grad	梯度
div	散度
Δ	拉普拉斯算符
rot	旋度
grad _v	速度空间梯度
div _v	速度空间散度
$\delta/\delta t$	描述碰撞时量的变化速率的算符
$\langle \rangle$	平均算符

下 角 标

α, β	粒子类别
e	电子
i	离子
e	等离子体以外的区域
i	等离子体内部的区域
a	中性原子

- A 双极特征
- E 与电场有关的量
- H 与磁场有关的量
- j 与电流有关的量
- ∥ 平行于磁场的方向
- ⊥ 垂直于磁场的方向
- t 与在垂直于磁场的平面内作用的力相平行的方向
- g 等离子体边界参数值

上 角 标

- q 碰撞类型
- e 弹性碰撞
- n 非弹性碰撞
- h 伴随高能量损失的非弹性碰撞
- l 伴随低能量损失的非弹性碰撞
- i 电离
- E 与电场有关的量
- H 与磁场有关的量

目 录

序言	1
主要符号	1
第一章 绪论	1
§ 1.1 电离气体和等离子体	1
§ 1.2 等离子体的准电中性	3
§ 1.3 等离子体里带电粒子运动的特点	8
§ 1.4 等离子体参数	11
第二章 等离子体中的碰撞	16
§ 2.1 守恒定律对粒子碰撞的应用	16
§ 2.2 碰撞的描述方法	24
§ 2.3 碰撞的积分特征量	34
§ 2.4 带电粒子之间的弹性碰撞	40
§ 2.5 电子同原子的弹性碰撞	47
§ 2.6 离子同原子的弹性碰撞	55
§ 2.7 电子同原子的非弹性碰撞	59
§ 2.8 电子同原子碰撞时的电离	66
§ 2.9 离子同原子的非弹性碰撞	70
§ 2.10 电子同离子的碰撞复合	74
§ 2.11 带电粒子同固体表面的相互作用	80
第三章 带电粒子的动力学方程	86
§ 3.1 分布函数	86
§ 3.2 动力学方程	90
§ 3.3 动力学方程的碰撞项	95
第四章 平衡等离子体	105
§ 4.1 平衡等离子体分布函数	105
§ 4.2 平衡分布函数的建立	110

§ 4.3	电离平衡	113
§ 4.4	等离子体的局部平衡	120
第五章 在电场中带电粒子的分布函数		123
§ 5.1	电场对带电粒子速度分布函数的影响	123
§ 5.2	求解动力学方程的方法	125
§ 5.3	电子的碰撞积分	132
§ 5.4	在电场中电子同原子的弹性碰撞起决定性影响时的电子分布函数	141
§ 5.5	非弹性碰撞对电子分布函数的影响	147
§ 5.6	电子-电子碰撞对电子分布函数的影响	159
§ 5.7	磁场对电子分布函数的影响	166
§ 5.8	交变电场中的电子分布函数	172
§ 5.9	关于电场中的离子分布函数	178
第六章 分布函数矩方程		183
§ 6.1	分布函数的矩	183
§ 6.2	矩方程推导	187
§ 6.3	等离子体组元的粒子平衡方程和运动方程	195
§ 6.4	能量和热通量平衡方程	206
第七章 无磁场等离子体中的输运过程		218
§ 7.1	弱电离等离子体中带电粒子的定向运动和能量输运	218
§ 7.2	电子的迁移率、扩散系数和热传导系数	225
§ 7.3	输运过程机制	231
§ 7.4	双极扩散	236
§ 7.5	弱电离等离子体带电粒子和能量的平衡方程	242
§ 7.6	定态气体放电等离子体中带电粒子和能量的平衡	249
§ 7.7	电离不稳定性	258
§ 7.8	等离子体衰变	266
§ 7.9	强电离等离子体中的定向运动	271
§ 7.10	强电离等离子体中的能量输运	278

§ 7.11 逃逸电子效应·····	281
第八章 等离子体的带电粒子在磁场里的运动·····	290
§ 8.1 关于静磁场的某些性质·····	290
§ 8.2 带电粒子在均匀磁场里的运动·····	299
§ 8.3 在均匀磁场里带电粒子的漂移·····	304
§ 8.4 带电粒子在缓变磁场里的运动·····	310
§ 8.5 用于约束带电粒子的某些磁场位形·····	316
§ 8.6 等离子体里的逆磁效应·····	324
§ 8.7 在垂直于磁场的电场里等离子体的极化·····	330
§ 8.8 等离子体横越磁场的运动·····	332
第九章 磁场里的输运过程·····	337
§ 9.1 弱电离等离子体的带电粒子在磁场里的定向速度 和热通量·····	337
§ 9.2 电子的迁移率, 扩散系数和热传导系数·····	346
§ 9.3 带电粒子和它们能量横越强磁场的输运机制·····	352
§ 9.4 在磁场中弱电离等离子体里带电粒子的平衡与 双极扩散·····	364
§ 9.5 强电离等离子体的带电粒子横越磁场的定向运动·····	372
§ 9.6 在强电离等离子体里能量的横向输运·····	390
§ 9.7 关于环形磁场位形里的输运过程·····	396
§ 9.8 漂移不稳定性和等离子体的带电粒子在磁场中的反 常扩散·····	407
第十章 磁约束等离子体·····	419
§ 10.1 磁流体力学方程·····	419
§ 10.2 在磁场中等离子体的平衡·····	428
§ 10.3 关于磁约束等离子体的稳定性·····	434
§ 10.4 在磁场里等离子体边界的稳定性·····	440
§ 10.5 载流等离子体柱的平衡与稳定性·····	456
§ 10.6 环状等离子体的平衡与稳定性·····	469

第一章

绪论

§ 1.1 电离气体和等离子体

在绝对温度不为零的任何气体中，都有一定数量的原子电离，即除中性粒子外，还存在带电粒子——电子和离子。但是，只有在带电粒子的密度达到其建立的空间电荷限制着自身运动时，带电粒子才对气体的性质产生显著的影响。随着密度的上升，这个限制变得越来越重要。当密度足够大时，正负带电粒子之间的相互作用，使得在与气体体积线度可相比拟的体积内维持宏观电中性；这时，宏观电中性的破坏会引起强电场的出现，从而能很快恢复电中性。正是这样密度的电离气体称为**等离子体**。这个名词是美国物理学家朗缪尔在 1923 年提出来的。

因此，在带电粒子密度足够大的情况下，电离气体转变为等离子体。获得等离子体最自然的方法，是把气体加热到粒子平均能量可以与原子或分子的电离能相比较时的温度。在温度显著小于电离能的时候，离子密度与中性原子密度的比值很小。这个比值随温度上升而上升，并且当粒子平均能量接近电离能的时候，气体转变为实际上是完全电离的等离子体。

因为加热处于气态(第三态)的物质可以得到等离子体，有时又把等离子体称为**物质的第四态**。跟所有气体一样，平