

电磁波在 等离子体中的传播

[苏] B. Л. 金兹堡 著

科学出版社

电磁波在等离子体中的传播

[苏] B. Л. 金兹堡 著

钱善璿 译

戴世强 校

科学出版社

1978

2P72/11

内 容 简 介

本书主要讲述各种电磁波(无线电波、等离子体波、磁流体波等)在等离子体中的传播,全书共分八章,内容为电磁波在等离子体中传播的基本理论;波在各向同性均匀等离子体中的传播;波在均匀带磁等离子体中的传播;波在各向同性不均匀等离子体中的传播;波在不均匀带磁等离子体中的传播;无线电波从电离层上的反射;射电波在宇宙条件下的传播;变化电磁场作用下等离子体中的非线性现象等。

中译本是根据英译本(1970年第二版)转译的。原书列有1198篇参考文献,中译本只保留了前面的358篇文献。

本书可供电波传播,电离层物理,射电天文,等离子体物理和空间物理等方面的工作者和大学有关专业师生参考。

V. L. Ginzburg
THE PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC
WAVES IN PLASMAS
2nd ed., Pergamon, 1970

电磁波在等离子体中的传播

[苏] B. Л. 金兹堡 著

钱善培 译

戴世强 校

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

西安长安印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店代售

1978年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1978年9月第一次印刷 印张: 23 3/4

印数: 0001—3,600 字数: 539,000

统一书号: 13021·734

本社书号: 1056·13—3

定 价: 3.40 元

俄文第二版序言

近年来, 等离子体研究的规模日益扩大。仅在 1961~1965 年期间关于等离子体物理学的论文就发表了大约 12,000 篇。即使我们只考虑等离子体内各种波的传播问题以及直接有关的课题, 这五年内所发表的论文也仍然超过 1500 篇。

下面这些问题受到特别注意: (1) 存在粒子束及一般当粒子速度分布为非麦克斯韦分布时, 波在非平衡等离子体内的传播。这类问题显然和各种等离子体不稳定性的研究密切相关。(2) 计及空间色散时波的传播; 这个问题对于高温等离子体特别重要。(3) 各种非线性效应, 以及在等离子体中波的传播理论中计及非线性的一般问题。(4) 湍动等离子体中波的传播以及由密度起伏和其它不均匀性引起的波的散射。(5) 在有边界存在的情况下(例如充满等离子体的波导内)波的传播。

各种专门问题, 特别是地球电离层和磁层、行星际等离子体、实验室装置以及固态等离子体内波的传播和产生问题, 也受到很大的注意。

所有这些问题当然是彼此有联系的, 并且和已被彻底研究过的下述问题有关: 复介电常数的计算, 平衡“冷”等离子体内波传播的分析, 向磁流体力学的过渡等问题。因而有可能, 或许也有必要写一本关于等离子体内波传播的书, 把这些问题全部包括进去, 并以统一的观点加以阐述。然而, 从工作性质, 特别是从叙述的透彻和完整性来看, 这样做会带来很大的困难。这些困难归根结蒂是由于情况的极端多样性, 等离子

体的参数值有时差别很大,例如,金属内和星系际空间内的等离子体密度相差约 28 个数量级,而液体和晶体的密度则完全在1~2 个数量级范围内。因此,要最广泛地讨论等离子体物理问题,特别有可能会使叙述过份笼统和复杂,甚至在讨论简单的问题时也是这样。

出于这些原因,在编写第二版时,作者不打算大大扩充本书的篇幅。和以前一样,本书所论述的问题基本上不是最一般的等离子体中波的传播问题,而主要是范围比较窄的关于平衡“冷”等离子体中波传播的问题。然而,也用相当多的篇幅考虑了空间色散,从而涉及“热”等离子体。这样,我们就有可能考察在电离层、磁层和外层空间的研究中很重要的一些主要情形。唯一重要的例外就是在统计不均匀等离子体中的传播和散射。本书也不讨论等离子体不稳定性或者上面列举的某些其它方面的问题。然而,即使对于没有详细探讨的问题,我们也力图给出某些提示。正文中没有提到的附加文献就是为了这个目的而列出的*。情况和第一版时相似,唯一的变化就是沿着原来方向有了进一步的发展。

在俄文第一版 1960 年出版以后,除了大量原始论文以外,还出现了若干评论和专著来论述等离子体中波的传播。大体说来,这些评论和专著都是有价值的指导性著作(本书正文中引用了这些著作),它们对各种问题的处理或许比本书更简明,更有效。然而,除有明显欠缺之处外,我们不打算修改现有的叙述。读者只能通过查阅其它书籍来了解对这个论题的不同的处理。

这一版中的新材料包括关于空间色散的考虑,某些非线性效应,脉冲的传播,能量问题以及一些其它问题。凡对读者有用或方便的地方,我们重复叙述了某些内容,并给出浅显的

* 在中译本中已删去附加文献。——译者注

解释。英文版第一版(1964 年)中所作的改正和变动已包括进去。本书还利用了阿格拉诺维奇和金兹堡(1966)合著的《晶体光学中的空间色散和激子理论》一书中作者所写的材料。
(下略)

B. Л. 金兹堡

1966 年 4 月 莫斯科

符 号†

N	电子(数)密度
$N_{\max}$	层中的最大电子密度
N_n	中性粒子(原子,分子)密度
N_+	正离子密度
N_-	负离子密度
$N_+ + N_- = N_i$	离子密度
T	等离子体温度或(离子温度和电子温度不相等时) 离子温度(一律用开耳芬温标给出)
T_e	电子温度
T 和 T_0	脉冲宽度和振荡周期(主要出现在 § 21 中)
M	重粒子(离子,原子和分子)质量
λ	波长
$\frac{2\pi c}{\omega} = \lambda_0$	真空中的波长
$\frac{2\pi c}{\omega_H} = \lambda_H$	(10.1)定义的波长
ω	角频率
$\omega/2\pi = f$	频率
r	矢径
$\mathbf{k}_0 - iq = \mathbf{k}$	波矢量
$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c}(n - i\kappa)\mathbf{s}$	
$\mathbf{s} = \mathbf{k}/ \mathbf{k} , s=1$	均匀平面波的波矢量

† 不常出现的符号没有列出。在许多情况下还省略脚标(例如,正文中有效截面用带有相应脚标 m, i 等的 q 表示,而这里只给出符号 q)。用同一个字母表示的各量通常不在同一节中出现。电子的电荷和质量,光速以及量子常数照例用 e, m, c 和 $\hbar$ 表示。应当指出,本书中采用相位因子 $e^{i\omega t}$,而在文献中常常遇到 $e^{-i\omega t}$ 。

$\sqrt{4\pi e^2 N/m} = \omega_0$	等离子体频率
$\omega + i\gamma = \omega'$	复频率; $p = i\omega' = i\omega - \gamma$
γ	阻尼系数 ($E = E_0 e^{i\omega t} \cdot e^{-\gamma t}$)
$\mathbf{E}$	电场
$\mathbf{H}$	磁场, 本书中认为它和磁感应 $\mathbf{B}$ 完全相等
$\mathbf{e}, \mathbf{h}$	微观场
$\mathbf{H}^{(0)}$	(恒定)外磁场
$\mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} = \mathbf{D}$	电感应(电位移)
$E_{\pm}$	$= E_x \pm iE_y$ (11.10)
$\mathbf{g}$	E 的富里叶变换
$\mathbf{P}$	介质的电极化
Φ	电场的势(对于势场, $\mathbf{E} = -\text{grad}\Phi$)
$\mathbf{j}$	传导电流密度
$\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = \mathbf{j}'$	电荷运动引起的总电流密度;
	$\frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + 4\pi \mathbf{j} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + 4\pi \mathbf{j}'$
$\text{div} \mathbf{D} / 4\pi = \rho$	'自由电荷'密度, 即微观电荷密度
$\text{div} \mathbf{E} / 4\pi = \rho'$	平均微观电荷密度
$\varepsilon - i \cdot \frac{4\pi\sigma}{\omega} = \varepsilon'$	复介电常数
ε	介电常数
σ	电导率
$\varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}, \varepsilon'_{ij}$	分别表示介电常数张量, 电导率张量
$\left(\varepsilon_{ij} - i \cdot \frac{4\pi\sigma_{ij}}{\omega} \right)$	和复介电常数张量
n	折射指数; n 和其它量的脚标 1, 2, 3 分别对应于非常波, 寻常波和等离子体波
$n - i\kappa = \tilde{n}$	($\sigma = 0$ 时用)
κ	吸收(阻尼)指数
κ	玻耳兹曼常数 $= 1.38 \times 10^{-16}$ 尔格/度 (常以 κT 的形式出现)

$\frac{2\omega\kappa}{c} = \mu$	吸收系数
μ_0, μ_Ω 和 $\mu_{\pm\Omega}$	调制和交扰调制深度(只出现在 § 39 中)
μ	磁导率
ξ_i, ξ_0	(8.68)定义的量
$\int \mu ds = \tau$	光学厚度
τ	弛豫时间;自由时间
ν	碰撞频率;脚标 m 和 i 对应于与分子和离子的碰撞
ν_{eff}	有效碰撞频率
v	速度
$\bar{v}$	平均速度(即算术平均速度 $\bar{v} = \sqrt{8\kappa T/\pi m}$)
v_T	$= \sqrt{\kappa T/m}$
β	$= \frac{v v}{c}$
β_T	$= \sqrt{\kappa T/mc^2}$
W	能量
δ	一次碰撞中电子传递给重粒子的能量的平均比率
$\frac{2}{M} \frac{m}{M} = \delta_{el}$	弹性碰撞的 δ 值
$\frac{1}{2} m v^2 = K$	电子动能
$\tau \bar{v} = \frac{\bar{v}}{\nu_{eff}} = l$	平均自由程*
S	碰撞积分
$f(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})$	分布函数
$f_0(v), \mathbf{v} \cdot \mathbf{f}_1(v)/v$	分布函数的对称部分和非对称部分
$f_{00}(v)$	麦克斯韦分布函数
$\varphi(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})$	分布函数对其平衡值的偏离
D	德拜长度[在 $T_0 = T$ 和 $N_+ = N$ 的情形下, $= \sqrt{\kappa T/8\pi e^2 N}$]
α	$= 16 \pi D^3 N = 2 \kappa T D / e^2$
θ	散射角

θ	波阵面法线和 z 轴之间的夹角
θ_0	层边界上的 θ 值(入射角); 在 § 19 和 § 20 中, $\alpha(z) = \sin\theta(z)$ 和 $\alpha_0 = \sin\theta_0$
q	截面
$\frac{c}{n} = v_{ph}$	相速度
$\frac{d\omega}{dk} = v_g$	群速度
θ	波矢量 $\mathbf{k}$ 和 $\mathbf{v}_g$ 之间的夹角
α	$\mathbf{k}$ 和外磁场 $\mathbf{H}^{(0)}$ 之间的夹角
χ	$\mathbf{H}^{(0)}$ 和 z 轴之间的夹角(只出现在 § 29 中)
$\frac{ e H^{(0)}}{mc} = \omega_H$	电子迴旋频率
$\frac{ e H^{(0)}}{Mc} = \Omega_H$	离子迴旋频率
Ω	调制频率(只出现在 § 39 中)
u	$\left. \begin{aligned} &= \frac{\omega_H^2}{\omega^2} \\ &= \frac{4\pi e^2 N}{m\omega^2} = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \\ &= \frac{v_{eff}}{\omega} \end{aligned} \right\} \text{无量纲参数}$
v	
s	
u_M	$= \frac{\Omega_H^2}{\omega^2} \quad (10.3)$
u_L	$\left. \begin{aligned} &= u \cos^2 \alpha \\ &= u \sin^2 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (11.36)$
u_T	
$\frac{E_{y1,2}}{E_{x1,2}} = K_{1,2}$	正常波-1 和-2 的偏振系数
p_e	电子压力
p_i	离子压力
ρ_M	介质密度
ρ_0	未扰介质密度
$V \sqrt{\partial p / \partial \rho_M} = u_0$	声速

Ψ	偏振平面的旋转角度, 就如 $E = E_0 e^{-i\omega\Psi/c}$ 式中出现的量
Ψ'	$= \frac{d\Psi}{dz}$ 等
φ	波的相位
R	幅度反射系数
D	幅度透射系数
$\frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H} = \mathbf{S}$	电磁能通量
f_{cr}	临界频率
z_m	抛物线层的半厚度
z_a	视高度
L_0	光程
L_{gr}	群程
Δt_{ph}	相延迟时间
Δt_{gr}	群延迟时间

目 录

俄文第二版序言	xi
符号	xiv
第一章 电磁波在等离子体中传播的基本理论	1
§ 1. 概论。各种情形下的等离子体参数	1
波在等离子体中传播的各种情形	1
等离子体参数	2
等离子体的特性	4
§ 2. 基本方程。采用的近似的性质	5
场方程。线性电动力学中的本构方程	5
频率色散和空间色散, 以及它们在等离子体中的重要性	9
忽略空间色散时的场方程(“冷”等离子体)	13
一维问题。平面波	16
等离子体振荡	18
各种类型的波的传播	19
第二章 波在各向同性均匀等离子体中的传播	22
§ 3. “冷”等离子体的复介电常数: 初等理论	22
ϵ 和 σ 表达式的初等推导	22
有效场	26
所得公式的适用范围	30
等离子体的磁导率。空间色散的考虑	32
§ 4. 玻耳兹曼方程方法	34
分布函数和玻耳兹曼方程	34
强电场内的等离子体	36
分布函数的形式和弱场内分布函数的方程	38
输运截面。德拜屏蔽	42

动力论公式的应用范围	48
§ 5. 等离子体中的微观过程	50
等离子体中的微观过程。各类粒子的守恒方程	50
等离子体中非平衡电子的慢化时间	56
分布函数对平衡形式的偏离。对电离层的估计	61
§ 6. 等离子体的介电常数和电导率; 动力论	64
一般关系	64
电子-分子碰撞	66
电子-离子碰撞	68
电子间碰撞所起的作用	70
电离层内的碰撞频率	72
低频情形	75
任意频率的一般情形	77
离子-离子碰撞和离子-分子碰撞	81
色散关系	84
§ 7. 电磁(横)波在均匀等离子体中的传播	84
折射指数和吸收指数	84
不存在吸收时波的阻尼	88
极限情形下 n 和 κ 的表达式	88
实频率和复频率	90
§ 8. 空间色散的考虑。等离子体波和声波	91
等离子体(纵)波。空间色散的宏观考虑	91
动力论	98
等离子体中的契仑柯夫辐射。等离子体波的吸收	104
等离子体波的吸收和拟线性理论	112
离子的作用。声波	122
准流体力学方法	125
双温度等离子体内的纵波	126
§ 9. 基本公式的总结	130
横波	131
等离子体内的纵波	136

第三章 波在均匀带磁等离子体中的传播	140
§ 10. 复介电常数张量	140
恒定磁场对等离子体性质的影响	140
复介电常数张量, 初等理论	142
张量 ε'_{ij} 的性质	144
其它坐标系中的张量 ε'_{ij}	146
动力论	149
离子运动的影响	153
§ 11. 高频波在带磁等离子体中的传播	158
折射指数 $n_{i,j}$ 和吸收指数 $\kappa_{1,2}$ 的表达式	158
一些特殊情形	162
与磁场成任意夹角 α 时波的传播	168
啸声的传播和金属中‘螺旋波’的传播	172
波的偏振	173
正常波. 小 α 角情形	176
吸收的考虑	181
准纵向传播和准横向传播	184
两个相干正常波的传播. 偏振平面的旋转(法拉第效应)	186
临界碰撞频率和色散关系的本性重根	189
$n_{1,2}(\nu)$ 和 $\kappa_{1,2}(\nu)$ 曲线图	192
离子对高频波传播的影响	195
带磁等离子体对电磁波的吸收和发射	198
§ 12. 存在磁场时的空间色散和等离子体波: 热运动的考虑	202
向各向同性等离子体的极限过渡	202
各向异性介质中空间色散的考虑	204
准流体力学近似	206
带磁等离子体中的等离子体波	210
动力论	211
无碰撞吸收的本质	212

用基尔霍夫定律和爱因斯坦系数法计算吸收系数 ...	218
对于纵向传播($\alpha=0$)动力论的结果	223
任意角 α 时的共振吸收	230
契仑柯夫吸收区(共振频率 ω_{∞} 附近)	240
低频寻常波	250
小结	251
§ 13. 关于等离子体动力学的一些论述	252
磁流体力学近似	252
准流体力学近似	255
纯电子-离子等离子体和弱电离气体的运动	259
磁场内弱电离气体的定常运动。地球电离层	263
§ 14. 低频波和磁流体波的传播	266
引言	266
磁流体波	267
低频波: 准流体力学近似。纵向传播	275
磁流体力学公式的适用范围	279
接近 $\frac{1}{2}\pi$ 的 α 角。‘混合’共振	280
离子磁迴旋共振区	283
分子的作用	285
热运动。动力论的一些结果: 速度变化, 不存 在碰撞时的阻尼	287
§ 15. 基本公式的总结	293
第四章 波在各向同性不均匀等离子体中的传播	301
§ 16. 引言。几何光学近似	301
波动方程。平面分层介质	301
对平行平面分层介质的精确解	302
近似解	303
几何光学近似	304
同一问题的更严格的处理	308
几何光学近似不适用的情形。全内反射	311

无线电波从电离层上的反射	315
完全无反射层	316
弱反射。一般层情形下 $ R $ 的内插公式	317
从导数 $\frac{dn}{dz}$ 的间断面上的反射	320
§ 17. 波动方程的精确解(线性层, 抛物线层或 $\epsilon' =$	
$\frac{a}{(b+z)^a}$ 的层)	323
引言	323
无吸收的线性层	324
有吸收的线性层	327
无吸收抛物线层	331
$\epsilon' = \frac{a}{(b+z)^a}$ 的层	334
§ 18. 任意厚度的‘对称’层和‘过渡’层中波的反射	
和透射	337
四参数平滑层	337
“对称”层	337
“过渡”层。向明显分界面的极限过渡	340
§ 19. 波的斜入射	
一般关系。电矢量垂直于入射平面的波	341
几何光学近似	344
射线处理	346
电矢量位于入射平面内的波	347
波磁场的方程	351
§ 20. 各向同性不均匀等离子体内传播的电磁波场的一个	
特性。电磁波和等离子体波的相互作用	352
现象的物理描述	352
波动方程的解	354
△ 空间色散和各种非线性效应的考虑	362
等离子体波形成的考虑。不同正常波之间的相	
互作用	367

等离子体中纵波和横波的相互转化和相互作用	374
§ 21. 脉冲信号的传播	378
脉冲场的富里叶表示	378
准单色脉冲的传播(不考虑脉冲的扩展)	380
波的相速度和群速度	382
脉冲的扩展	384
所用近似的适用范围和某些更精确的结果	392
§ 22. 色散介质中的能量密度。存在吸收时等离子体 中的信号速度	396
引言	396
无吸收色散介质中的能量密度	397
吸收介质的情形	401
有吸收的等离子体(模型)中的能量密度	405
振子集体中的能量密度	406
等离子体波中的能量密度	407
有吸收的介质中的信号速度。对等离子体的应用	408
第五章 波在不均匀带磁等离子体中的传播	412
§ 23. 引言。几何光学近似	412
波动方程	412
几何光学近似	413
几何光学近似的适用范围	417
层的近边界区域和此区域内正常波的相互作用	420
§ 24. 脉冲的传播	424
各向异性介质中的群速度矢量	424
带磁等离子体的情形	430
群速度矢量, 射线方向和能通量矢量	435
脉冲在不均匀介质中的传播	440
脉冲在吸收介质中的传播	442
§ 25. 波从不均匀层上的反射	446
波从层上的反射。 $\alpha=0$ 和 $\alpha=\frac{\pi}{2}$	446