



射电天体物理学

A. G. 帕考尔楚克 著

科学出版社

内 容 简 介

本书根据美国1970年出版的《Radio Astrophysics》译出。书的特点是比較系统、全面地介绍了宇宙射电源的主要物理机制的理论和应用。书中的数学推导深入浅出,参考文献比較齐全。

本书主要供射电天文工作者使用,也可供等离子体物理、宇宙射线、高层大气物理等学科工作者参考。

RADIO ASTROPHYSICS

A. G. Pacholczyk

Freeman, 1970

射电天体物理学

A. G. 帕考尔楚克著
王绥瑄 郭成光 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1973年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1973年8月第一次印刷 印张:9 5/16

印数:0001—12,550 字数:204,000

统一书号:13031·95

本社书号:200·13—5

定价:0.95元

译 者 的 话

二十余年前射电天文学的诞生，在人类认识宇宙的行程中，展开了一个新的天地。

二十余年来，宇宙空间的无线电波不断地送来了新的宇宙信息；而我们面前出现的一个新的问题是，如何来理解这些信息。

目前的物理学知识，正如本书作者在第七章引言中所指出的，还远不足以解答宇宙无线电波所带来的全部问题。但是，天文学史的经验表明：每一个这种问题的解决，都将进一步扩大天文学的眼界，并对物理学的进展作出新的贡献。

本书的内容和结构反映在篇首的目录中。它的主要特点是，用了绝大部分的篇幅对宇宙射电现象中业已成熟的物理解释作了系统、详尽的介绍。因而可以认为，它的主要价值在于可以为进一步的探索担任一个比较可靠的响导。对于那些尚待解决、因而也是富有活力的问题，书中除了简要的评述外，还提供了比较完整的参考文献。

当然，对于目前射电天文上各种现象的理论见解，还远未达到可以取得一致的阶段。我们在翻译中尽量不离作者的原意，希望读者在使用中批判地吸收。对书中个别的明显错误，我们在译文中作了删改，并对一些文字表达上比较费解的地方加了译者注。

此外，根据习惯，许多涉及天文现象或射电天文学专用的无线电词汇，我们通常用“射电”二字来代替“无线电”。

作者前言

本书的主要对象是从事观测的射电天文学家和研究生，他们的工作牵涉到对射电天文资料的解释。在书中，我把重点放在目前认为是形成银河射电源和河外射电源的那些物理过程。对许多观测结果的解释和讨论，则只限于提一下参考文献；在当前射电天文学的发展阶段，对这种问题的介绍，看来最有用的还是那些评述性的论文。

本书材料的编写，取材于我在1965—1968年在亚利桑那（Arizona）大学讲授的射电天文学课程。我十分感谢许多同事和学生在这本书的写作过程中提供的帮助和意见[†]。

A. G. 帕考尔楚克

1969年3月于亚利桑那大学

[†] 以下详列致谢名单，从略。——译者注

预备读物表

理解本书材料，虽然不需具备天体物理学和射电天文学知识，但熟悉一下这两门科学的一些基本内容是有好处的。关于天体物理和射电天文方面的介绍性读物，推荐以下两本：

1. T. L. Swihart, *Astrophysics and Stellar Astronomy*, Wiley and Sons, New York, 1969.
2. J. L. Steinberg and J. Lequeux, *Radio Astronomy*, McGraw-Hill, New York, 1963.

然而，读者应当对以下的物理学方面有透彻的了解：(a) 经典力学，要达到文献 3 的水平，特别是要熟悉质点相对论力学，如文献 4 中第一至三章所给出的；(b) 经典电动力学，包括狭义相对论，如文献 4 中第四至九章或是文献 5 中所给出的。

3. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Mechanics*, Pergamon Press, Oxford; Addison-Wesley, Reading, Mass., 1960.
4. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields*, Pergamon Press, Oxford; Addison-Wesley, Reading, Mass., 1962.
5. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley and Sons, New York, 1962.

阅读本书第八章需要了解一些光谱学知识，例如文献 6 的材料，以及如文献 7 第 4 节叙述的谱线变宽过程的一些知识。

6. G. 赫兹堡, 原子光谱与原子结构(科学出版社)。
7. K. M. Böhm, "Basic Theory of Line Formation," In J. L. Greenstein, ed., *Stellar Atmospheres*, Univ. of Chicago Press, 1960. Chapter 3.

参考一下附录 1 的参考书，也会对读者有所帮助。

符 号

因为这本书是为天体物理学家而不是为无线电工程师写的,从头到尾将使用高斯系统单位。读者需要把通常用米、千克、秒单位给出的射电源实测辐射流量变换到厘米、克、秒单位(第一章),然后就不用再接触到米、千克、秒系统。为了把辐射表为厘米、克、秒单位,就要将给定的米、千克、秒值乘以 10^3 的因子,因为

$$1 \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{赫}^{-1} = 10^3 \text{ 尔格} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{赫}^{-1},$$

1 流量单位[†]

$$= 10^{-26} \text{ 瓦} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{赫}^{-1}$$

$$= 10^{-23} \text{ 尔格} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{赫}^{-1}。$$

可惜的是,贯穿全书都用同一组符号和保留学科中常用的符号的要求互不一致。因此,书中各章的符号将会略有变动;而且,即使在同一章里,还会有一个符号用在两个不同的量上的情形。然而,只要有某些程度的理解,这将不会引起混淆。以下是符号的表。

物理常数

$$c = 2.998E 10 \quad \text{光速}^{††}$$

$$h = 6.625E-27 \quad \text{普朗克常数}$$

$$e = 4.803E-10 \quad \text{电子电荷}$$

$$m = 9.108E-28 \quad \text{电子质量}$$

[†] 以后简称 f. u.——译者注

^{††} E 10表为 10^{10} , E-27代表 10^{-27} 。——译者注

$k = 1.380E-16$	玻耳兹曼常数
$mc^2 = 8.186E-07$	电子静能
$\Lambda_C = 2.426E-10$	康普顿波长
$\sigma_T = 6.653E-25$	汤姆逊截面

变换因子

1 电子伏 = $1.602E-12$ 尔格,	1 尔格 = $6.242E 11$ 电子伏
1 年 = $3.156E 07$ 秒,	1 秒 = $3.169E-08$ 年
1 秒差距 = $3.086E 18$ 厘米,	1 厘米 = $3.240E-19$ 秒差距

符号上方加记号

- 时间导数
- ^ 表明等离子体中同步加速器辐射的量

下角标和上角标

- c 逆康普顿散射;连续谱(第八章)
- E 单位能量间隔
- F 法拉弟旋转
- i, f 分别表示碰撞前和碰撞后瞬间;“起始值”和“终值”(第五章)
- I 介质中电离能量耗损
- K 连续谱
- L 谱线;实验室坐标系
- n 富里叶 n 次谐波(第三章)
- n, m 分别表示 E_n 及 E_m 能态
- nm 从能态 E_n 跃迁到 E_m
- R 静系
- S 同步加速器辐射;“在源上”测量(第八章)

- T 热辐射
- λ 单位波长间隔
- ν 单位频率间隔
- Ω 单位立体角
- (i) 两个垂直线偏振 $i = 1$ 和 $i = 2$, 方向 2 与磁场平行(第三章)
- \perp, \parallel 分别对一个给定方向垂直和平行的偏振
- $+$ 正离子
- $-$ 电子
- τ 推迟时间(第三章)
- $*$ 单位矢量;复共轭数(第三章)

拉丁字母

- A** 电磁矢势
- A_e 天线有效孔径
- A_{nm} 爱因斯坦自发发射系数
- $B(T)$ 普朗克函数 [(A.31) 式]
- B_{mn} 爱因斯坦吸收系数
- B_{nm} 爱因斯坦受激发射系数
- BWFN 天线第一零点束宽
- c_v 比热
- D 天线方向性[(1.15)式]
- e 质点电荷
- E 能量
- E** 电场
- $E_T = 1/\xi_{st}$ (第六章)
- E_L 电子分布的低能端截止
- E_H 电子分布的高能端截止;射电源中磁场总能量

- E_c 射电源中相对论性电子总能量
 E_p 射电源中重质点总能量
 \mathcal{E} 能量;辐射标度 [(6.2)式]
 \mathcal{E}_E 静电能
 \mathcal{E}_T 热能
 f 相空间中质点分布函数
 F 流量
 \mathbf{F} 力,特别是洛伦兹力[(A.16)式]
 F_A 射电源视流量[(1.7)式]
 F_N 非偏振辐射流量
 F_P 全偏振辐射流量
 \mathbf{F} 力密度,特别是洛伦兹力密度
 g 能级统计权
 $G(\vartheta, \varphi)$ 天线方向增益[(1.18)式]
 \mathbf{H} 磁场强度
 HPBW 天线半功率点束宽
 \mathcal{H} 哈密顿量
 I 辐射强度[(A.7)式]
 I_A 射电源视亮度[(1.8)式]
 I_N 非偏振辐射强度
 I_P 全偏振辐射强度
 I_S 射电源平均亮度[(1.9)式]
 \mathbf{j} 净电流密度[(2.49)式]
 \mathbf{J} 总电流密度[(2.51)式]
 J 平均强度[(A.14)式]
 \mathbf{J}_{conv} 对流电流密度[(2.50)式]
 k 波数
 \mathbf{k} 向观测者的方向, $\equiv \mathbf{R}_0^*$

- L 抛物面天线直径;光度[(7.3)式]
 m 质点质量
 M 质点质量
 n 折射指数;富里叶谐波数(第三章)
 \mathbf{n} 面的法线;瞬时电子速度方向, $\equiv \boldsymbol{\beta}^*$
 N 质点数密度
 N_0 电子能量分布 $N_E = N_0 E^{-\gamma}$ 中的常数
 \mathcal{N} 质点数目
 \mathcal{N}_0 电子能量分布 $\mathcal{N}_E = \mathcal{N}_0 E^{-\gamma}$ 中的常数
 \mathbf{p} 动量
 p 同步加速器辐射功率;标量压强
 p_{rad} 辐射压强[(A.20)式]
 p_i 广义动量
 \mathbf{P} 电子动量(第五章)
 $P(\vartheta, \varphi)$ 天线方向图
 \mathbf{q} 热流矢量[(2.35)式]
 q_i 广义坐标
 \mathbf{r}_C 导中心[(2.98)式]
 r_H 在磁场中电子迴转半径[(2.94)式]
 \mathbf{r}' 体积元 $d\tau$ 的矢径(第三章)
 $\mathbf{r}(t)$ 点电荷矢径
 R 电阻(第一章)
 \mathbf{R} 即时坐标,特别是观测者的矢径
 \mathbf{R}_0 观测者与点电荷体积元之间的矢径, $= \mathbf{R} - \mathbf{r}'$
 s 沿视线路程长度
 S 表为波长单位的干涉仪基线;源函数[(A.23)式]
 t 时间
 t' 推迟时间, $= t - [R_0(t')/c]$ (第三章); 从相对论

性电子喷射开始后的时间(第六章)

- T 绝对温度
- T_A 天线温度[(1.24)式]
- T_B 亮温度[(1.25)式]
- T_e 电子温度
- T_R 接收机噪音温度
- u 质点本速度
- u_{rad} 辐射能量密度[(A.19)式]
- U 斯托克斯参量[(A.8)式]
- U 相空间中质点速度
- v 质点速度
- v_T 均方根质点速度
- V 电压;斯托克斯参量 [(A.9)式]; 干涉仪可见度函数的幅度[(1.46)式]
- V 质点平均速度[(2.28)式]
- V_{gr} 群速度
- V_{ph} 相速度
- V_r 径向速度
- V_A 阿尔芬速度
- V_S 声速
- \mathcal{V} 干涉仪的复可见度函数[(1.46)式]
- w 磁不均匀性(磁镜)速度
- W 光子能量(第五章);功率;以及单位频带功率
- W_A 天线输出功率
- W_I 干涉仪平均输出功率
- W_R 接收机单位频带噪音功率
- $x = v/v_C$
- $x_H = v/v_H$

• x •

- $x_L = v/v_L$
 $x_M = v/v_M$
 $x_T = v/v_T$
 $X_{F/R}$ 费米能级对静能的比值[(2.13)式]
 $X_{H/R}$ 磁能对静能的比值[(2.83)式]
 $X_{T/E}$ 热能对库伦能的比值[(2.10)式]
 $X_{T/F}$ 热能对费米能级的比值[(2.12)式]
 $X_{T/H}$ 热能对磁能的比值[(2.84)式]
 $X_{T/R}$ 热能对静能的比值[(2.11)式]
 Y 以 mc 为单位的电子动量(第五章)
 z 红移[(7.1)式]
 Z 原子数

希腊字母

- $\alpha = v/v_s$; 起始或最终的光子方向和电子运动方向之间的角度(第五章); 频谱指数
 α_B 统计回旋加速器加速参量[(2.105)式]
 α_F 统计费米加速参量[(2.110)式]
 $\beta = v/c$
 $\tilde{\beta} = d\chi_F/ds$
 $\beta_T = v_T/c$
 $\gamma = E/mc^2 = (1 - \beta^2)^{-1/2}$
 $\delta = \kappa/\tilde{\beta}$ [(3.68)式]; 光子偏振平面与散射平面之间的角度(第五章)
 ε 发射系数
 e 热能密度; 以 mc^2 为单位的光子能量(第五章)
 ε_m 天线漏泄因子[(1.17)式]
 ε_M 天线束效率[(1.16)式]

- $\zeta = \gamma v_0 / v_c = v_s / v_0 \gamma$; 电子能量耗损方程中的系数 [(6.11) 式]
- $\eta = \beta_s$ [(3.68) 式]; 电子速度 β 方向和指向观测者的方向 k 之间的角度; 电子能量耗损方程中的系数 [(6.11) 式]
- η_F 费米加速参量 [(2.112) 式]
- θ 电子速度和磁场方向之间的角度; 散射角度: 即光子起始和最终方向之间的角度 (第五章)
- ϑ 磁场和向观测者方向之间的角度
- κ 改正了受激辐射后的吸收系数 [(A.41) 式]
- $\bar{\kappa}$ 吸收系数 [(A.22) 式]
- λ 波长; 以及 $\cos \theta$, θ 为散射角 (第五章)
- λ_i 等离子体中质点临界碰撞参量 [(2.1) 式]
- λ_0 等离子体中质点平均自由程 [(2.3) 式]
- λ_P 等离子体中质点之间的平均距离 [(2.4) 式]
- λ_D 德拜长度 [(2.9) 式]
- λ_E 电子波的特征长度 [(2.76) 式]
- λ_F 跟磁镜碰撞的平均自由程
- $\lambda_m = \lambda(\nu_m)$
- Λ 光子波长 (第五章)
- $\mu \equiv \cos \alpha$, α 为光子偏振面和散射面之间的交角 (第五章)
- ν 频率
- ν_{RF} 信号频率
- ν_{IF} 接收机中频
- ν_{LO} 接收机本机振荡器频率
- ν_C 碰撞频率 (第二章); 临界频率 [(3.28) 式]
- $\nu_S = 2\nu_0^2 / 3\nu_G \sin \vartheta$ [(4.10) 式]

- ν_0 等离子体频率[(2.72)式]
 ν_1 光学厚度为 1 时的频率
 ν_G 拉莫尔频率[(2.57)式]
 ν_H 电子迴转频率[(2.93)式];以及 $\nu_c(E_H)$
 $\nu_m = 0.29\nu_c$
 $\nu_M = \nu_c(E = kT)$
 $\nu_T = \nu_c(E_T)$
 $\nu_L = \nu_c(E_L)$; 谱线频率(第八章)
 ξ 电子能量耗损方程中的系数[(6.11)式]
 π_{ij} 运动压强张量[(2.32)式]
 Π 偏振度[(1.39)式]
 Π_{ij} 总压强张量[(2.31)式]
 ρ 质量密度[(2.27)式]
 σ 表面面积;干涉仪可见度函数的相位[(1.46)式]
 Σ 总散射截面
 $\frac{d\Sigma}{d\Omega}$ 微分散射截面
 τ 接收机积分常数;光学厚度 [(A.27) 式。“光学厚度”的名称,当然不单是对光学波段而言。]
 $\tau_m = \tau(\nu_m)$
 τ_c 对康普顿耗损的电子寿命
 τ_s 对同步加速器辐射耗损的电子寿命
 φ 电磁标势
 ϕ 磁通量;电子反冲角:即入射光子和反冲电子之间的角度(第五章)
 χ y 轴和最终光子在垂直于电子速度的 yz 平面上的投影之间的角度(见图 5.5)
 χ_F 法拉弟旋转角

- χ_H 图 3.10 中的角度
- ψ 电子原始速度 (即在包含磁场和观测者方向的平面上的瞬时速度) 方向与观测者方向之间的角度; 起始光子和散射光子偏振方向之间的角度 (第五章)
- ω 角频率 = $2\pi\nu$ (对所有下角标)
- \underline{Q} 立体角
- Ω_A 天线束面积 [(1.4) 式]
- Ω_m 天线旁瓣立体角 [(1.14) 式]
- Ω_M 天线主瓣立体角 [(1.13) 式]
- Ω_s 射电源所含的立体角

目 录

预备读物表	iv
符号	v
第一章 射电天文测量	1
1.1 导言 射电窗	1
1.2 天线对投来的辐射的响应	5
1.3 天线对偏振辐射的响应	15
1.4 天线系统 干涉仪	18
1.5 接收机	25
第二章 磁场中的等离子体	29
2.1 引言	29
2.2 玻耳兹曼方程 等离子体的流体力学描述	36
2.3 等离子体中波的传播	48
2.4 带电质点在磁场中的运动	58
2.5 带电质点的电磁加速	62
第三章 在真空条件下, 相对论性电子在磁场中的 辐射(同步加速器辐射)	71
3.1 引言	71
3.2 一个被加速的电荷产生的电磁场	71
3.3 在真空中单个电子同步加速器辐射的频谱分布	74
3.4 电子集体的同步加速器辐射	81
3.5 同步加速器辐射的偏振	94

第四章	等离子体中的同步加速器辐射	104
4.1	各向同性稀薄等离子体中的同步加速器辐射	104
4.2	等离子体中同步加速器辐射的吸收	108
第五章	电子散射引起的频谱中能量的再分布	111
5.1	引言	111
5.2	在电子静坐标系中的康普顿散射	111
5.3	康普顿散射截面	114
5.4	在实验室坐标系中的电子散射	117
第六章	分立射电源频谱的解释	127
6.1	引言 分立射电源的频谱	127
6.2	T类频谱的讨论	128
6.3	同步加速器频谱 相对论性电子的能量分布	130
6.4	C_L 类频谱的讨论	138
6.5	C_H 类频谱的讨论	140
6.6	S类频谱的讨论	145
第七章	射电源中的物理状态	146
7.1	引言	146
7.2	射电源同光学目标的证认 射电源的结构和 偏振	147
7.3	分立射电源的特性	150
第八章	射电谱线	157
8.1	引言	157
8.2	21厘米氢线	158
8.3	分子谱线	164
8.4	复合谱线	172
附录 1	辐射场	176
附录 2	特殊函数表	189