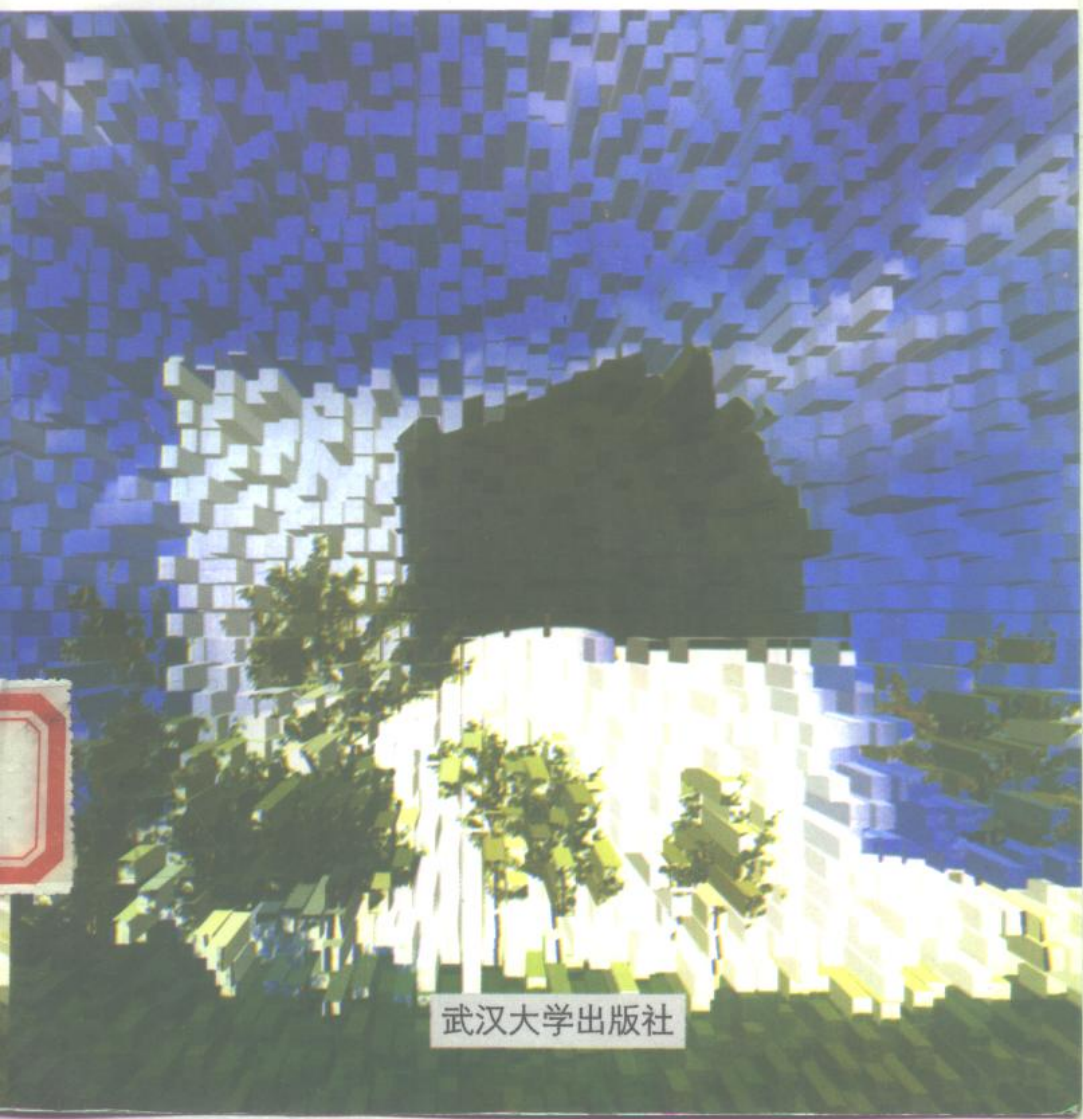


武汉大学本科生系列教材

电离层物理概论

熊年禄 唐存琛 李行健 编著



武汉大学出版社

电 离 层 物 理 概 论

熊年禄 唐存琛 李行健 编著

武 汉 大 学 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

电离层物理概论/熊年禄, 唐存琛, 李行健编著. —武汉:
武汉大学出版社, 1999. 5

ISBN 7-307-02672-4

I. 电… II. ①熊… ②唐… ③李… III. 电离层物
理学 IV. P352

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 31613 号

武汉大学出版社出版

(430072 武昌 珞珈山)

湖北科学技术出版社黄冈印刷厂印刷

(436100 湖北省黄冈市宝塔大道 85 号)

新华书店湖北发行所发行

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月第 1 次印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 14.375 插图: 1

字数: 370 千字 印数: 1—2000

ISBN 7-307-02672-4/P·4 定价: 15.50 元

本书如有印装质量问题, 请寄承印厂调换

内 容 简 介

本书从电离层的光化效应、电磁效应、动力学效应和热学效应出发,详尽地叙述了电离层形成、形态、运动、非线性和气象控制等物理特性。本书收集资料丰富翔实,叙述由浅入深,既有大量的实验观测结果总结,又有一定深度的理论分析。本书可作为大专院校空间物理、无线电物理、广播通信等专业研究生的教材和相关专业本科生的参考书,也可作为从事电离层研究的科学工作者的参考书。

53.651
1

1-622/17 编者例言

电离层的研究是一门古老而又全新的课题。从 18 世纪末无线电科学兴起、马可尼(Marconi)实现世界第一次无线电报传输后,随着政治、经济和军事上的需要,电离层物理及无线电波传播的研究得到了蓬勃发展。在现代无线电通信、广播、电视和无线电定位等应用领域中,无不包容与涉及到电离层研究的最新和已取得的最重要的成果,而新的无线电应用领域的开发又促进着电离层物理的深入研究。新成果层出不穷,特别是随着高速、大容量计算机的出现及卫星火箭等高技术的应用,更使得电离层物理的研究成为一门综合性很强的前沿学科。

多年来,特别是新中国成立后,在我国政府有关部门的关怀指导下,我国电离层物理研究方兴未艾。为提供人类赖以生存的近地空间环境知识作出了显著的贡献。为了培养与训练电离层研究领域中的专门人才,壮大我国在该领域里的科技队伍,坚持不懈地开展电离层研究,保持我国在电离层研究方面的特色,《电离层物理》课程于 20 世纪 80 年代初在武汉大学应运而生。

本书根据编者多年在武汉大学开设的电离层物理课程讲义,几经修改,反复使用,多次易稿而成。编者希望能从电离层的光化学效应、电磁效应、热力学和动力学效应四方面总结与阐述电离层物理研究已取得的理论与实验成果。介绍该领域的最新研究动向和发展趋势。特别是在有关讨论中,注意尽可能多地引用与介绍我国研究者所取得的研究成果。

本书在第一章简要叙述电离层物理研究发展史及主要研究内

容后,第二章阐述了作为电离层背景的大气运动学和动力学基本理论,主要讨论影响电离层行为的大气定常运动与波动。第三章从光化学效应出发,阐述了电离层形成的基本理论——Chapman理论及有关应用。第四章对电离层形成理论应用于上电离层时,引入了动力学效应和电磁效应的修正项——输送过程。第五章以丰富的实验统计资料揭示出实际电离层对基本理论的“异常”。正是这种“异常”激励着研究者在电离层研究领域中去探索新的方法与理论,以求更新的发展。为更加详尽地了解电离层结构,第六章基于无线电统计学理论讨论了电离层的精细结构。现代关于高、低纬电离层不均匀体的许多重要知识都来源于此。电离层存在着许多用线性理论难以解释的非线性现象。第七章采用的非线性理论方法将使问题的解决简洁明了。使许多“异常”的电离层现象得到正确的解释。电离层非线性在现代高科技应用中有广阔的前景。例如空间太阳能发电站电力向地面传送,电离层甚低频(VLF)无线电信号激发用于海底通信和 VLF 信号跨电离层传输等。将电离层作为整个高层大气的一部分加以研究是电离层研究观念上的重大转变与突破。基于此,第八章引进了电离层气象控制的若干基本概念、理论和观测结果。它们是电离层动力学与热力学效应的体现。各种综合探测手段与测量方法为电离层研究的理论发展提供了坚实的实验资料基础。实用中又最能体现理论研究新成果。第九章用较大篇幅专门介绍了电离层研究常用的探测手段及资料分析方法。

电离层研究是一个从实践到理论,理论指导实践,而实践又促进新的理论产生的过程。在此过程中,许多科学工作者呕心沥血,毕终身精力于斯,取得了大量辉煌成就。由于编者教学经验及学识水平有限,书中对许多工作者的成就引用与总结难免挂一漏万,恳请读者斧正。

值此书出版之际,编者特别感谢曾给本书予以鼓励和帮助的所有专家与教授。编者也特别感谢对本书出版予以大力支持的武

汉大学教务处和武汉大学出版社领导,并感谢陈宝联同志为本书画了所有的插图。

最后,编者对所有给予此书以指导帮助和关心的人们表示最诚挚的谢意。

编 者

1997年2月于武汉大学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 电离层物理研究简史	1
§ 1.2 电离层物理研究的主要内容	3
§ 1.3 电离层物理研究的最近发展	4
第二章 中性大气层	6
§ 2.1 中性大气层结构	6
§ 2.2 大气动力学	14
2.2.1 中性大气运动方程	14
2.2.2 地转风和热成风	17
§ 2.3 大气波动	20
2.3.1 基本方程组的线性化	20
2.3.2 大气声重波(次声波)	23
2.3.3 等温大气的脉冲响应	30
2.3.4 大气潮汐波	36
2.3.5 大气行星波(大气长波,慢波、罗斯比波)	37
§ 2.4 热层模式、热层风	38
2.4.1 热层模式——温度和密度分布	39
2.4.2 热层风	42
第三章 电离层的形成	53
§ 3.1 电离层的一般特性	53

3.1.1	分层结构	53
3.1.2	电中性	53
3.1.3	离子组成的分布特征	53
3.1.4	电子、离子及中性气体温度	55
3.1.5	磁等离子体参量	56
§ 3.2	连续性方程	58
3.2.1	电离层的两类过程	58
3.2.2	光化学平衡和漂移平衡	59
3.2.3	电离层的惰性	59
§ 3.3	光吸收和光电离	61
3.3.1	光吸收和光学深度	61
3.3.2	光电离	64
3.3.3	Chapman 函数 $Ch(\chi)$	65
§ 3.4	电离产生率	68
3.4.1	产生率的解析解	68
3.4.2	产生率的数值解	71
3.4.3	微粒电离	73
§ 3.5	损失过程	78
3.5.1	离子反应速率	78
3.5.2	离子反应	79
3.5.3	离子损失过程	80
§ 3.6	电离层 E 层与 F1 层的形成	83
3.6.1	线性损失和平方律损失	83
3.6.2	Chapman 层和抛物层	85
3.6.3	F 层分裂	87
§ 3.7	D 层的离解复合	91
3.7.1	D 层的离化	91
3.7.2	D 层离子平衡方程、有效复合系数	92

第四章 电离层中的漂移与扩散	98
§ 4.1 连续性方程中的输运项	98
4.1.1 离子、电子运动速度	98
4.1.2 运动方程	99
4.1.3 碰撞频率	101
§ 4.2 等离子体漂移	104
4.2.1 单粒子运动、迁移率	104
4.2.2 风力漂移	107
4.2.3 电力漂移	109
4.2.4 “赤道异常”现象和 Martyn 漂移理论	110
§ 4.3 电离层电导率	113
4.3.1 电导率	113
4.3.2 层电导率、Cowling 电导率	116
4.3.3 高度积分电导率	120
§ 4.4 等离子体扩散	121
4.4.1 重力场中的双极扩散	122
4.4.2 扩散平衡	124
4.4.3 多离子成分的等离子体扩散	126
4.4.4 极风	129
§ 4.5 发电机理论	134
4.5.1 大气发电机与电动机	134
4.5.2 S_q 电流系	134
4.5.3 发电机方程	135
4.5.4 赤道电急流(Equatorial Electron Jet)	139
4.5.5 场向(纵向)电流	139
4.5.6 观测资料	142
§ 4.6 极区电流系	143
4.6.1 晨昏电场与磁层对流	143
4.6.2 环电流与场向电流	149

4.6.3	极光电流和 S_q^p 电流系	152
4.6.4	极区电流系	154
§ 4.7	F2 层的形成	155
4.7.1	F2 层峰的形成	155
4.7.2	中性风和电场的影响	159
第五章	电离层异常现象	164
§ 5.1	引言	164
§ 5.2	D 层	164
5.2.1	D 层行为	165
5.2.2	电离层和低层大气的关系	169
§ 5.3	E 层和 F1 层	170
5.3.1	正常 E 层	170
5.3.2	F1 层	172
§ 5.4	F 层参量	172
5.4.1	确定 F 层参量的方法	173
5.4.2	F 层参量值及其对正常值的偏离	174
§ 5.5	F 层异常	177
5.5.1	引言	177
5.5.2	F2 层峰的周日变化	180
5.5.3	年度、半年度和季节异常	181
5.5.4	夜间 F 层的维持	182
5.5.5	赤道异常	183
5.5.6	中纬谷和极区 F 层	190
§ 5.6	太阳扰动的电离层效应	193
5.6.1	太阳耀斑	193
5.6.2	电离层突然骚扰(SID)	194
5.6.3	质子暴和极盖吸收事件(PCA)	196
5.6.4	磁暴	197

5.6.5 电离层暴	200
第六章 电离层的精细结构	207
§ 6.1 电离层不均匀体反射无线电波的统计特性	207
6.1.1 电离层中的不均匀体	207
6.1.2 不均匀体反射的无线电波波场的统计特性	209
§ 6.2 散射波束的能量(功率谱)	215
§ 6.3 信号振幅的时间相关、随机运动的速度	218
§ 6.4 空间相关系数、波束的角谱、小尺度 不均匀体的尺寸	222
§ 6.5 不均匀体的扩散膨胀	225
§ 6.6 电离层的浑浊度和电子浓度的起伏	234
6.6.1 不均匀体的散射截面	235
6.6.2 垂直入射时的电子浓度起伏 $(\delta N)^2$	240
6.6.3 斜投射时的电子浓度起伏 $(\delta N)^2$	243
§ 6.7 电离层不均匀体实验观测结果的总结	247
§ 6.8 电离层不均匀体的漂移、电离层风	250
6.8.1 测量漂移速度的方法	251
6.8.2 $\mathbf{V}$ 的主要测量结果	254
§ 6.9 电离层不均匀体产生机理的某些探讨	256
§ 6.10 电离层不均匀体研究的近况	257
6.10.1 射电星闪烁	258
6.10.2 扩展 F 层	261
第七章 电离层的气象控制	267
§ 7.1 电离层行进式扰动(TID)	268
§ 7.2 电离层 F 层中的内波	269
§ 7.3 内重力波对无线电波信号产生的高频多普勒 (HF-Doppler) 频移	272

§ 7.4	E_s 形成的风剪变理论	276
§ 7.5	大气涡度方程、位涡守恒	280
7.5.1	大气涡度方程	280
7.5.2	位势涡度守恒原理	281
§ 7.6	罗斯比(Rossby)波的水平传播	283
7.6.1	β -平面	283
7.6.2	罗斯比数	284
7.6.3	静态行星波与行进式行星波	284
§ 7.7	罗斯比波的垂直传播	286
7.7.1	对数压力坐标中的流体力学方程组	287
7.7.2	行星波垂直传播的纬向平均涡度方程与 扰动位涡方程	288
7.7.3	对流层中行星波向上传播条件	292
§ 7.8	行星波与纬向平均气流的相互作用	294
§ 7.9	平流层与中层大气的能量	300
§ 7.10	行星波对低电离层的影响	301
7.10.1	无线电波冬季吸收反常	301
7.10.2	行星波上传时大气环流状态变化对冬季 吸收反常的影响	302
7.10.3	行星波上传使中层加热及其对电波吸收的影响	303
§ 7.11	行星波对 VLF 和 LF 电波传播的影响	309

第八章 电离层的非线性效应..... 311

§ 8.1	电磁场中等离子体的非线性效应	312
8.1.1	电磁场中电子电导率和介电常数	312
8.1.2	电子碰撞频率与电子温度的关系	314
8.1.3	电子在波场作用下的加温	315
8.1.4	等离子体场 E_p , 等离子体非线性的产生	318
8.1.5	伸缩非线性	319

§ 8.2	无线电波对电离层的非线性作用	320
8.2.1	强电波对电离层电子和离子的加热	320
8.2.2	电离层电子和离子浓度扰动	322
8.2.3	低电离层中强电波的影响	323
§ 8.3	无线电波的自作用	329
§ 8.4	电波调制的改变	334
8.4.1	强波振幅调制的变化	335
8.4.2	谐波的产生和非线性检波	338
§ 8.5	电波的互作用	340
8.5.1	交叉调制	341
8.5.2	受扰区内传播的电波吸收变化	344
8.5.3	组合频率电波的产生	346
§ 8.6	波的断裂	349
§ 8.7	电离层非线性现象的其他特征	351
8.7.1	电波折射的变化	351
8.7.2	电离作用	352
8.7.3	不稳定性的激发	352
第九章	电离层探测技术简介	354
§ 9.1	磁离子理论的主要结果	356
9.1.1	相速度和群速度	356
9.1.2	A-H 公式	357
9.1.3	色散曲线	360
9.1.4	折射指数面	363
§ 9.2	垂直入射探测	364
9.2.1	电离层对电波的反射	364
9.2.2	垂测仪和电离图	365
9.2.3	顶部探测	369
9.2.4	电子浓度参数和剖面	371

9.2.5 数字测高仪	376
§ 9.3 斜向探测	376
9.3.1 斜传播、跳距和最大可用频率	376
9.3.2 有关定理	378
9.3.3 平面抛物层中的斜传播	380
9.3.4 斜测电离图	382
9.3.5 Chirp 雷达	385
§ 9.4 返回斜向探测	386
9.4.1 聚焦效应	387
9.4.2 最小时延与 $P'(f)$ 曲线	390
9.4.3 电离图分析	395
9.4.4 MUF 的确定, FXZ 选频系统	397
§ 9.5 多普勒和法拉第测量	399
9.5.1 波的频率和相位变化	400
9.5.2 微分多普勒技术	403
9.5.3 法拉第旋转	406
9.5.4 一些实验结果	410
§ 9.6 哨声测量	412
9.6.1 射线方向	415
9.6.2 群速度和时延	416
9.6.3 电离层与磁层参量的确定	419
§ 9.7 电波吸收测量	420
9.7.1 电波的振幅变化	420
9.7.2 电离层吸收	421
9.7.3 吸收的测量技术	425
9.7.4 电波 A3 吸收测量中的定标	428
9.7.5 吸收测量的应用	433
附录 1 参考文献索引	435
附录 2 关于(7.7.13)式和(7.7.14)式的推导	438

第一章 绪 论

地球电离层是地球高层大气被电离了的部分。其较低部分称为电离层,而较高部分则称为磁层。按无线电工程师协会(IRE)的定义,电离层是以地面 60km 以上到磁层顶之间的整个空间,在那里“存在着大量的自由电子,足以影响无线电波的传播”。而磁层则是“地磁场对电子运动有决定性影响的那部分电离层”。

§ 1.1 电离层物理研究简史

纵观电离层物理研究的发展史,它是一部从实验到理论总结,理论反过来又指导新的实验,新的实验结果又促进新理论的提出与发展的历史。早在 18 世纪,人类就已观测到地磁场中小的周日变化。1839 年, Gauss 推测这些变化起源于大气层中的电流, Stewart 于 1882 年第一次提出著名的“大气发电机”理论。随后由 Schuster(1908)和 Chapman(1919)等人以定量的形式进一步发展。

1887 年, Hertz 证实电磁波存在的实验导致了无线电科学的兴起。1890 年, 俄国人 Popov 进行了短距离无线电报传输试验。1896 年, 意大利人 Marconi 获得了无线电报的第一个专利之后, 随着每次实验的成功而增加了传输距离。1901 年 12 月, 他成功地进行了从英格兰到加拿大东海岸的跨越大西洋的无线电传输试验, 这个结果为当时流行的绕射公式所不能解释。于是, 1902 年美国 Kennelly 和欧洲人 Heaviside 独立地指出高层大气中的导电层反射无线电波是 Marconi 跨越大西洋无线电通信成功的原

因。自此以后的一个时期内,人们称这种能反射无线电波的导电层为“Kennelly-Heaviside 层”。

Taylor(1903)和 Flerming(1906)先后提出太阳紫外线是上层大气层中气体的电离源的理论。1925 年,Appleton 和 Barnett, Breit 和 Tuve 用脉冲探测的实验证实了理论的正确性。实验还证明,白天 Kennelly-Heaviside 层的高度大约是 100km。Appleton 相继发现回波从不同高度上反射回来。他开始用字母 E、F 来表示从较低的层与较高的层反射回的信号电矢量,后来又用 D、E、F 这些字母表示相应的层。R. A. Waston 于 1926 年使用了“电离层”(ionosphere)这个术语。

实验工作的发现,迅速推动了理论工作的进展,Hulburt(1928)和 Chapmann(1931)关于大气层电离及电离层形成理论被公认为电离层现代理论的起点。1932 年,Appleton 建立了完整的磁离子理论,并提出了计算电波折射指数的 Appleton-Hatree 公式。

第二次世界大战期间及战后,由于政治、经济和军事上的需要,电离层及无线电波传播的研究得到了空前迅速的发展。1957 年苏联第一颗人造地球卫星的发射成功,开创了空间科学的新纪元。1957~1958 年的国际地球物理年及 1964~1965 年的国际宁静太阳年期间实施了两个国际合作研究计划,给地球物理的研究,尤其是电离层的研究以巨大推动。到 80 年代,地面及空间飞行器上的许多新探测技术的使用,以及电子计算机的发展和应用,得到了大量有关电离层的新知识,并逐步完善了对磁层的认识。

在电离层及电波传播研究发展的历史长河中,业余无线电爱好者是一支活跃的队伍。正是他们在第一次世界大战之前就发现了波长在 200 米附近的信号能跨越北大西洋传播。1923 年初,波长下降到 90 米(3.3MHz)的实验获得成功。结果指出,频率越高,信号越强。

在我国,电离层研究开始得较晚。第二次世界大战之前,我国