

# 高空大气物理学

上册

赵九章等编著

科学出版社

## 内 容 简 介

高空大气物理学分为上下两册。全书系统地叙述了高层大气中的各种物理过程、基本理论和研究方法。

上册包括高层大气结构和电离层物理学两部分。有关高层大气结构部分,首先详细地阐述了高层大气的结构特征:包括高层大气模式和近年来火箭和卫星的探测结果,高层大气中的扩散过程和能量平衡等问题,然后,论述了中层大气中发生的几种地球物理现象,如大气振荡与潮汐问题、声波的异常传播、流星及臭氧层的物理性质和形成理论等。

在电离层物理学部分中,着重介绍了研究电离层的几种实验方法,包括电离层的垂直探测、利用法拉第和多普勒效应的火箭和卫星探测、不均匀性的某些观测方法和哨声观测方法等。同时,还论述了磁离子理论及其应用,这是实验方法的理论基础。书中并叙述了电离层探测的某些结果和电离层动力学理论。

本书可供从事高空大气物理研究工作者和高等院校有关专业师生参考。

## 高空大气物理学

### 上册

赵九章等编著

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061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

\*

1965年5月第一版 开本:787×1092 1/16

1965年5月第一次印刷 印张:16

精装:0001—1,400 插页:7

平装:0001—1,000 字数:373,000

统一书号:13031·2110

本社书号:3227·13—15

定价:[科六] 精装本 2.90元  
平装本 2.30元

## 序

高空大气物理学的研究对象,是从 30 公里高空一直到行星际空间所发生的地球物理现象的物理过程。长期以来,地球物理学、气象学、天文学、物理学等方面的学者,对于在这一广大空间所发生的物理现象,进行了一系列的研究,并把研究的成果用之于生产实践;电离层的发现,以及以后的电离层物理学的研究,对于无线电波传播的应用,便是一个很好的例子。在基础研究方面,如大气潮汐,在拉普拉斯 [Laplace] 时代已经开始,经过将近二百年的继续研究,已获得了不少成果,这些研究成果已联系到高层大气结构、地磁场日变化、电离层运动等相关现象的研究;而大气潮汐的某些关键问题,尚有待今后进一步的研究。其他如高层大气的光化反应、磁暴及极光的观测和理论的研究,都已有数十年的历史。从科学发展历史来说,高空大气物理学可以算是一门较老的学科。

第二次世界大战以后,火箭已逐渐被利用于高空探测。1957 年,人造卫星的发射成功,人类从此就进入了征服宇宙空间的时代。仅仅在六、七年之间,通过人造卫星、宇宙火箭及载人飞船的发射,人们发现了大量的外空及星际空间的物理现象,从而开拓了空间物理学的研究阵地,为保障宇宙航行提供了重要的环境资料。高空物理学这一门古老学科,从此得到了新的生命力,进入迅速发展的时代。

从现代科学发展来看,高空大气物理学是一门边缘学科。首先,由于外空及星际空间的特点,需要一套特殊量度方法,因而必须充分运用现代新技术于高空大气物理的探测。其次,空间发生每一个物理现象,往往表现为多种相关形态的联系:一次太阳爆发,可以引起地磁层边界的变形、外辐射带内带电粒子分布的调整、宇宙线暴及磁暴的爆发、极光的活动、电离层的骚扰以及高层大气结构的变化。因此,进一步揭露高空物理现象的本质,必须充分运用现代技术,广泛积累由高空及地面测量得到的日地空间相关现象的客观事实,并深入掌握高空大气物理相关现象的变化过程,运用天文学、物理学、数学及地球物理学的成果,进行分析研究,通过各学科之间的相互渗透,使其开花结果。这不但推进了高空大气物理学的发展,反过来也推进了其他学科。目前各国都特别注意边缘学科,认为边缘学科是学术上的生长点,常常可以开辟学术上的新领域,解决国民经济上的重大科学问题。六十年代高空大气物理学的发展,充分证实了上面的论断。

1958 年以来,中国科学技术大学为了培养这方面的人材,开办了高空大气物理专业,六年以来,我们查阅了逾一千篇文献,在中国科学院地球物理研究所及中国科学技术大学,先后对高空大气物理所包括的内容,进行多次的系统报告及讲课,并经过多次整理修改,把讲义逐渐充实成为一本适用于教学与研究的参考书。但由于本学科涉及的范围极广,而它的发展又是十分迅速,空间物理现象每年每月都有新的发现,因此,本书所包括内容仍不免有许多遗漏和不妥之处,希望读者提出批评,以便今后修正。

本书共二十四章,分为上下两册,除第一章为绪论外,主要内容可以分为五个部分。第二章到第六章主要讨论高空大气的结构,第七章到第十二章讨论电离层物理学,第十三章

及十四章討論大气光化反应及气輝,第十五章到二十一章討論日地空間物理学,第二十二章到二十四章介紹高空探測方面及有关的技术系統。全书各章都附有参考文献,上下册书后都附有人名及內容索引,以便讀者查閱。

本书由笔者兼任主編,地球物理研究所及中国科学技术大学地球物理系有关同志分別編写各章节,其具体分工如下:緒論及高空大气結構,由赵九章等編写;电离层物理由李緝熙等編写,周燁等同志提出了許多指导性的意見;光化反应及气輝由范天錫等編写;日地空間物理由陈志強、刘传薪、章公亮、徐荣栏、赵九章編写;探測技术由赵九章等編写;陈英芳、王水、李緝熙編制全书索引;曾佑思、刘元壯繪制全书插图;赵九章最后对全书文字作了修改。

在整理編写过程中,北京大学有关同志提出了許多宝贵的意見,謹此致謝。

赵 九 章

1964年10月15日

## 常用符号表

<p><math>a</math> 声速</p> <p><math>A</math> 原子量, 振幅</p> <p><math>A_J</math> 焦耳常数</p> <p><math>A_{pq}</math> 矩阵元素</p> <p><math>A_\sigma</math> 吸收截面</p> <p><math>c</math> 光速</p> <p><math>C</math> 均方根速度</p> <p><math>c_p</math> 定压比热</p> <p><math>c_v</math> 定容比热</p> <p><math>C_r</math> 分子的最可几速度</p> <p><math>C_D</math> 阻力系数</p> <p><math>d</math> 直径, 恆星星等, 地面跳跃距离</p> <p><math>d_0</math> 分子直径</p> <p><b>D</b> 电位移矢量</p> <p><math>D</math> 扩散系数</p> <p><math>D_{12}</math> 双极扩散系数</p> <p><math>D_s</math> 色散常数</p> <p><math>e</math> 电子电荷量</p> <p><math>E</math> 能量</p> <p><b>E</b> 电场强度</p> <p><math>f</math> 频率</p> <p><math>f(\nu)</math> 分布函数</p> <p><math>f_H</math> 磁旋频率</p> <p><math>f_c</math> 临界频率</p> <p><math>f_N</math> 等离子体频率</p> <p><math>f_0</math> 穿透频率</p> <p><math>f_r</math> 接收频率</p> <p><math>f_c^{(0)}</math> 寻常波临界频率</p> <p><math>f_c^{(x)}</math> 非常波临界频率</p> <p><math>f_c^{(z)}</math> <math>z</math> 分量临界频率</p> <p><math>f_b</math> 拍频</p> <p><math>f_n</math> 鼻频</p> <p><b>F</b> 力, 场量</p> <p><math>F</math> 微分算子</p> <p><b>F<sub>W</sub></b> 风力</p>	<p><b>F<sub>E</sub></b> 电场力</p> <p><math>g</math> 重力加速度</p> <p><math>G</math> 天线增益系数, 声波衰减</p> <p><math>h</math> 高度, 地面高度</p> <p><math>h, h_n</math> 热力强迫振荡的大气等效深度</p> <p><math>\hat{h}, \hat{h}_n</math> 大气自由振荡的本征值</p> <p><math>h_c</math> 临界逃逸高度</p> <p><math>h'</math> 虚高度, 等效高度</p> <p><math>h_m</math> 最大电子浓度的高度</p> <p><math>h^{(m)}</math> 最大电离速率的高度</p> <p><math>H</math> 大气标高, 电磁波磁场强度</p> <p><math>H_n(\kappa_1, x)</math> 汉凯尔函数</p> <p><math>H_E</math> 外(地)磁场强度</p> <p><math>H_L</math> 外(地)磁场强度纵向分量</p> <p><math>H_T</math> 外(地)磁场强度横向分量</p> <p><math>i</math> <math>\sqrt{-1}</math></p> <p><math>I</math> 光亮度, 磁倾角</p> <p><math>I, I_0, I_\lambda</math> 辐射强度</p> <p><math>\mathcal{J}_m</math> 虚数部分</p> <p><math>I_d</math> 电子光分离系数</p> <p><math>j</math> 电流密度</p> <p><math>J</math> 热力激发因子, 形状因子, 电离速度</p> <p><math>J_n</math> 贝塞尔函数</p> <p><math>J^{(m)}</math> 最大电离速率</p> <p><math>J_0</math> 有效电离速率</p> <p><math>k</math> 玻尔兹曼常数, 波数</p> <p><math>k_{12}, k_{13}</math> 作用常数</p> <p><b>k</b> 波矢量</p> <p><math>K_m</math> 分子热导率</p> <p><math>K</math> 湍流热传导系数</p> <p><math>K_n</math> 克努曾数</p> <p><math>K_T(z), K_T(r, t)</math> 热传导系数</p>
--	--

$l$  波包经过的路线长度  
 $l(x, y, z)$  长度参数  
 $\bar{l}$  平均自由路程  
 $L$  厚度, 蒸发潜热, 电子消失项  
 $L_2(p)$  太阳半日气压分波  
  
 $m$  质量  
 $m_1$  单个粒子质量  
 $m'$  动力米  
 $m_t$  总质量  
  
 $M$  马赫数, 克分子量, 分子, 分子质量, 复数  
 折射指数  
 $M_n$  共振放大倍数  
 $\bar{M}$  平均克分子量  
 $M_L$  月球质量  
 $M_{pq}$  矩阵元素  
  
 $n$  中性粒子浓度, 相折射指数  
 $n_g$  羣折射指数  
 $n^{(m)}$  最大电离速率高度的  $n$  值  
 $N$  电子浓度  
 $N_r$  分子数  
 $N_l$  电子线密度  
 $N_m$  最大电子浓度  
 $N_+$  正离子浓度  
 $N_-$  负离子浓度  
  
 $p$  压力  
 $\bar{p}$  平均压力  
 $\bar{p}$  大气平衡潮  
 $[p_n(0)]_{热}$  热力激发的地面气压变化值  
 $[p_n(0)]_{潮}$  潮汐激发的地面气压变化值  
 $P_n(z)$  勒让德函数  
 $P_r$  接收功率  
 $P_t$  发射功率  
 $\mathbf{P}$  电极化强度矢量  
 $P_p$  相路程  
 $P_g$  羣路程  
  
 $q$  入射光子数  
 $Q$  热量, 电离指数  
 $Q'$  吸收光子数  
 $Q_T$  横向传播  
 $Q_L$  纵向传播

$r$  距离, 半径  
 $\mathbf{r}$  位移矢量  
 $R$  普适气体常数, 太阳黑子数  
 $R_E$  地球半径  
 $Re$  雷诺数  
 $\mathfrak{R}$  偏振度  
 $\mathfrak{R}_e$  实数部分  
 $\mathfrak{R}^{(0)}$  寻常波偏振度  
 $\mathfrak{R}^{(x)}$  非常波偏振度  
 $|R|$  反射系数  
 $|R^{(0)}|$  寻常波反射系数  
 $|R^{(x)}|$  非常波反射系数  
  
 $s$  弧长  
 $s_\lambda$  反射太阳辐射  
 $S$  面积, 太阳辐射强度  
 $S_1(p), S_1(T)$  太阳全日气压和温度分波  
 $S_2(p), S_2(T)$  太阳半日气压和温度分波  
 $S_3(p)$  太阳 1/3 日气压分波  
 $\bar{s}$  平均能流  
 $S_n$  能流  
 $S_\lambda$  入射太阳辐射  
 $S_E$  吸收太阳辐射  
 $S_0$  一天内入射太阳辐射  
 $S_B$  垂直向太阳辐射  
 $S_c$  地面放射辐射  
 $S_f$  辐射通量  
 $S_o$  臭氧放射辐射  
 $S_a, S'_a$  大气放射辐射  
 $S(z)$  辐射差额  
 $S_\infty$   $h \rightarrow \infty$  的太阳辐射强度  
  
 $t$  时间, 地方时  
 $t_L$  地方太阳时  
 $T$  绝对温度  
 $\bar{T}$  平均绝对温度  
 $T_l$  电离层半厚度  
  
 $u$  速度分量  
 $U$  热力势  
 $U(\epsilon, y)$  函数  
 $U_c$  常值风速  
  
 $v$  速度, 速度分量  
 $\bar{v}$  平均速度

$v_f$  特征速度  
 $v_r$  相对速度  
 $v_p$  相速度  
 $v_g$  羣速度  
 $\nabla_d$  双极扩散速度  
 $\nabla_t$  垂直漂移速度  
 $\nabla_w$  水平风速  
 $v_0$  不均匀体乱运动均方根速度  
 $v_s$  带电粒子运动速度  
 $V$  体积  
 $V$  水平漂移速度  
  
 $w$  速度分量  
 $W$  几率  
 $W$  风速  
 $W_0$  散射波总能量  
  
 $x$  相当厚度, 距离  
 $X$  臭氧含量,  $\frac{\omega_N^2}{\omega^2} = \frac{4\pi N e^2}{m\omega^2}$   
  
 $Y$  有效加热系数,  $\frac{\omega_H}{\omega}$   
 $Y_L$   $Y$  的纵向分量  
 $Y_T$   $Y$  的横向分量  
  
 $z$  高度  
 $\Delta z$  水平层的厚度  
 $Z$  地面天顶距,  $\frac{\nu}{\omega}$   
 $Z_c$   $\frac{\nu_c}{\omega}$   
  
 $\alpha$  赤经, 方向余弦, 复合系数, 浑浊度  
 $\alpha_m$  调节系数  
 $\alpha_T$  热扩散系数  
 $\alpha_0$  有效复合系数  
 $\alpha_e$  电子辐射复合系数  
 $\alpha'_e$  电子分解复合系数  
  
 $\beta$  大气标高的垂直梯度, 方向余弦, 清晰度,  $\frac{\nu_s}{c}$   
 $\beta_\lambda$  散射系数  
 $\beta_t$  电子附着系数

$\gamma$   $\frac{c_p}{c_v}$ , 方向余弦, 电子脱落系数  
 $\gamma'$  温度递减率  
 $\Gamma$  伽玛函数  
  
 $\delta$  赤纬, 波矢与射线方向的夹角  
 $\delta_\lambda$  大颗粒散射系数  
  
 $\epsilon$  介电常数  
 $\epsilon_i$  换热效率系数  
 $\epsilon(h)$  臭氧浓度  
 $\epsilon_{ij}$  介电常数分量  
 $\bar{\epsilon}$  介电常数张量  
 $\epsilon$  气体的电离电位  
  
 $\zeta$  高度参数, 角度  
  
 $\eta$  高度, 滞性系数, 台站之间距离  
 $\bar{\eta}$  海洋平衡潮  
  
 $\theta$  余纬  
 $\theta, \theta_c$  角度  
 $\Theta$  电波对电离层平面分层介质的入射角  
 $\Theta_{l,n}(\theta)$  霍格函数  
  
 $\kappa$   $(\gamma - 1)/\gamma$ , 吸收指数  
  
 $\lambda$  波长, 经度  
 $\lambda_i$   $N_i/N$   
  
 $\mu$  流星的平均质量,  $\sec \chi_h$ , 导磁率,  $\cos \theta$   
  
 $\nu$  碰撞频率, 粘性率  
 $\nu_c$  临界碰撞频率  
  
 $\xi$  台站之间距离  
 $\xi(x, t)$  高度参数  
 $\xi_0$  不均匀体尺度  
  
 $\rho$  密度  
 $\bar{\rho}$  平均密度  
 $\rho_A$  相关函数  
  
 $\sigma$  大气振荡频率, 电导率  
 $\bar{\sigma}$  电导率张量

$\sigma_0$	纵向电导率	$\phi$	方向角
$\sigma_1$	横向电导率	$\Phi$	位势高度, 电流函数, 地磁纬度
$\sigma_2$	霍耳电导率	$\chi$	天顶距离
$\sigma_3$	$\sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}$	$\chi(z, \theta, \lambda)$	速度场散度
$\Sigma$	积分电导率	$\psi$	粒子对磁力线的投掷角, 大气潮汐速度势
$\tau$	扩散时间, 温度的原始变化, 时间间隔, 脉冲持续时间, 时角	$\psi_n(\theta, \lambda)$	特征函数
$\tau'$	温度的派生变化	$\psi_s$	水平静电场势
$\tau^*$	亮度有效因子	$\omega$	角频率
$\tau_i$	积分臭氧量, 切应力	$\omega_N$	等离子体角频率
$\tau(h)$	沿光路的臭氧厚度	$\omega_H$	磁旋角频率
$\tau_0$	时间单位	$\omega_{HL}$	$\omega_H$ 的纵向分量
$\tau(x, y, z)$	时间参数	$\omega_{HT}$	$\omega_H$ 的横向分量
$\tau_s$	衰减时间	$\Omega(z, \theta, \lambda)$	潮汐位势
$\tau_e$	回波持续时间	$\Omega$	偏振面旋转角
$\varphi$	地理纬度		



# 目 录

序	iii
常用符号表	x
<b>第一章 緒論</b>	<b>1</b>
§ 1.1 高空大气物理学的研究对象和任务	1
1. 大气结构	1
2. 电离层	2
3. 日地空间物理	2
§ 1.2 高空大气物理学的研究方法	2
1. 间接方法	2
2. 直接方法	3
3. 探空火箭研究的进展概况	3
4. 卫星、宇宙火箭及宇宙飞船的探测	5
§ 1.3 目前空間探测所取得的主要成果和存在的主要問題	6
1. 高层大气结构的研究方面	6
2. 地球附近和星际空间的宇宙辐射方面	7
3. 电磁場方面	8
4. 研究月球背面	8
5. 试验研究行星际物质的气体成分	9
6. 电离层	9
7. 紫外线及软 X 射线	9
参考文献	9
<b>第二章 高空大气的結構及动力学和热力学特征</b>	<b>11</b>
§ 2.1 大气的区界	11
§ 2.2 高层大气模式	13
§ 2.3 高层大气的扩散过程	16
1. 高层大气的混合与扩散分离	16
2. 扩散方程	18
3. 扩散判据	21
§ 2.4 高层大气的能量平衡	22
1. 高层大气能量平衡方程	22
2. 太阳光波辐射对大气热状况的影响	23
3. 平流层大气的热状况	24
4. 中层大气的热状况	26
5. 热层大气和外层大气的热状况	26
§ 2.5 外层大气結構与太阳活动的关系	28

§ 2.6 外层大气	32
1. 大气的逃逸及大气层的高界	32
2. 大气中氦的逃逸	36
参考文献	38
<b>第三章 大气振荡、高空大气中的潮汐现象</b>	<b>39</b>
§ 3.1 引言	39
§ 3.2 大气振荡现象概述	40
1. 太阳全日气压分波 $S_1(p)$	41
2. 太阳半日气压分波 $S_2(p)$	41
3. 太阳 1/3 日气压分波 $S_3(p)$	43
4. 太阴半日气压分波 $L_2(p)$	43
§ 3.3 大气振荡理论的基本方程及其边界条件	44
§ 3.4 大气的自由振荡	50
1. 西伯尔特大气模式	50
2. 线性递减模式	51
3. 两层模式	53
§ 3.5 大气的强迫振荡	54
1. 拉普拉斯潮汐方程	54
2. 潮汐强迫振荡	56
3. 热力强迫振荡	59
§ 3.6 共振理论的讨论	63
1. 共振理论的解释	64
2. 粘滞性及分子热传导的影响	65
3. 非线性项的讨论	66
参考文献	67
<b>第四章 大气中声波的异常传播</b>	<b>69</b>
§ 4.1 大气中声波异常传播概述	69
§ 4.2 大气中声波传播的射线理论	69
1. 声线方程	69
2. 温度梯度的影响	72
3. 风场的影响	72
§ 4.3 大气中声能的传播	74
1. 平流层中声能的传播	74
2. 对流层中声能的传播	76
3. 空气粘滞性及热传导对声能的阻尼作用	78
§ 4.4 中层大气温度分布的计算	79
1. 声波的下降角法	79
2. 走时曲线法	80
参考文献	82
<b>第五章 利用流星辉迹来探测高空大气的结构参数</b>	<b>83</b>
§ 5.1 流星的类别与组成	83

§ 5.2 流星的观测——目测与摄影观测 .....	86
§ 5.3 流星的加热制动和游离理论 .....	87
1. 林德曼-多布逊理论 .....	88
2. 运用高速稀薄气体动力学来讨论流星的加热和制动过程 .....	89
3. 奥辟克理论-赫尔洛夫生处理方法 .....	94
§ 5.4 利用光学观测的流星数据计算高空大气密度 .....	97
1. 阻力方程 .....	97
2. 质量损失方程 .....	98
3. 光亮度方程 .....	98
4. 计算大气密度的公式 .....	98
§ 5.5 流星观测的无线电方法 .....	101
1. 流星电离辉迹的形成及其特征 .....	101
2. 无线电波在流星辉迹上的反射 .....	102
3. 根据无线电回波观测的流星数据来研究高层大气的标高、密度和气压 .....	103
参考文献 .....	106
<b>第六章 大气的臭氧层</b> .....	<b>107</b>
§ 6.1 引言 .....	107
§ 6.2 臭氧的吸收光谱 .....	108
§ 6.3 臭氧层厚度的测量 .....	109
1. 测量原理 .....	109
2. 测量仪器——多布逊臭氧光度计 .....	111
3. 测量结果 .....	112
4. 夜间臭氧含量 .....	113
§ 6.4 大气臭氧的垂直分布 .....	113
1. 直接探测 .....	114
2. 间接测量臭氧垂直分布方法 .....	116
§ 6.5 臭氧垂直分布理论 .....	119
§ 6.6 臭氧对平流层大气的增温作用 .....	124
§ 6.7 平流层大气的热量平衡 .....	125
1. 太阳辐射的吸收 .....	125
2. 地面辐射能的吸收 .....	126
3. 臭氧层中的本身放射辐射 .....	127
§ 6.8 臭氧层的变化与天气的关系 .....	128
参考文献 .....	129
<b>第七章 电磁波在电离层中传播的理论基础</b> .....	<b>131</b>
§ 7.1 引言 .....	131
§ 7.2 均匀磁离子介质的结构关系式 .....	131
§ 7.3 电磁波在均匀磁离子介质中的传播 .....	135
§ 7.4 艾普利通-哈特里色散公式的分析(略去碰撞项) .....	136
1. 不考虑外磁场的情形, $Y = 0$ .....	136
2. 纵向传播的情形, $Y_T = 0, Y_L = Y$ .....	137

3. 橫向传播的情形。 $Y_T = Y, Y_L = 0$ .....	137
4. 一般传播的情形 .....	138
§ 7.5 艾普利通-哈特里色散公式的分析(考虑碰撞項).....	139
§ 7.6 电磁波的偏振 .....	142
§ 7.7 电磁波在电离层中传播的近似描写 .....	145
§ 7.8 羣速度 .....	147
1. 不考虑外磁場的情形。 $H_E = 0$ .....	147
2. 考虑外磁場的情形。 $H_E \neq 0$ .....	148
参考文献 .....	150
<b>第八章 研究电离层的若干实验方法</b> .....	152
§ 8.1 脉冲方法垂直探测电离层 .....	152
§ 8.2 从頻高特性曲綫获得电子浓度随高度的垂直分布 .....	156
§ 8.3 反散射探测 .....	161
§ 8.4 电离层吸收和电子碰撞頻率的測量 .....	165
§ 8.5 利用法拉第效应研究电离层 .....	170
§ 8.6 利用多普勒效应研究电离层 .....	172
§ 8.7 探針方法 .....	177
参考文献 .....	178
<b>第九章 电离层的若干探测結果</b> .....	180
§ 9.1 电子浓度的高度分布 .....	180
§ 9.2 正常 $E$ 层 .....	183
§ 9.3 正常 $F$ 层 .....	186
§ 9.4 正常 $D$ 层 .....	189
§ 9.5 $E_s$ 层.....	190
§ 9.6 电离层的突然騷扰 .....	193
§ 9.7 电离层暴 .....	194
参考文献 .....	195
<b>第十章 电离层形成理論及其动力学特征</b> .....	197
§ 10.1 卡普曼的形成理論, 卡普曼层的性質 .....	197
§ 10.2 关于卡普曼理論的若干討論 .....	201
§ 10.3 連續方程 .....	204
§ 10.4 馬丁的漂移理論 .....	207
§ 10.5 电离层的电导率和半周日电流体系 .....	212
参考文献 .....	217
<b>第十一章 电离层不均匀結構及其运动</b> .....	218
§ 11.1 有关电离层不均匀結構的某些概念 .....	218
§ 11.2 从电离层返回的无线电波的統計特性 .....	221
§ 11.3 不均匀結構的相关分析 .....	224
§ 11.4 不均匀結構的某些观测結果 .....	228

§ 11.5 有关电离层不均匀结构的某些理论解释 .....	232
参考文献 .....	233
<b>第十二章 哨声和甚低频发射现象</b> .....	<b>235</b>
§ 12.1 哨声和甚低频噪声的分类 .....	235
§ 12.2 哨声理论 .....	236
§ 12.3 吱声 .....	240
§ 12.4 甚低频发射的行波管理论 .....	241
§ 12.5 甚低频发射的迴旋加速器辐射理论 .....	243
§ 12.6 利用哨声和甚低频发射现象研究外层大气 .....	245
参考文献 .....	246
内容索引 .....	247
主要人名索引 .....	250

三  
乙

# 第一章

## 緒論

### § 1.1 高空大气物理学的研究对象和任务

高空大气物理学是研究平流层以上大气的结构、成分状态以及在其中发生的地球物理现象的物理过程的学科。它虽有較长久的历史，但过去这些研究工作多半只有科学上的意义，与实际生活联系較少。由于高空飞行技术及遙测定位技术的限制，过去只能用間接的方法进行研究，后来由于远距离无綫电通訊和高空飞行研究的发展，为高空大气层的研究提供了有利条件，这門科学便进一步为人們所重視。自从使用火箭进行直接探测之后，最近十多年來，高空大气物理学便有了較迅速的发展。1957年苏联首先成功地发射了人造卫星，接着又成功地发射了三个宇宙火箭，以及一系列的卫星和卫星式宇宙飞船；美国于1958年发射探险者卫星成功后，也不断发射各种类型的卫星，都收集到不少高空物理的資料。由于探测技术的发展，为这門学科提供了新的內容<sup>[1]</sup>，同时也大大地扩充了它所研究的領域；它不仅研究地球大气的物理现象，而且已經扩大到星际及行星际空間去了。

高空大气物理学是一門綜合性的科学，就其所涉及的范围来講，从地球起一直扩展至太阳和整个行星际空間；从研究方法来講，又需要各种各样現代科学技术装备。目前，有各种不同专业的学者都参加了这門学科的研究，如天体物理学、地球物理学、无綫电物理学、空气动力学以及各种技术专业等。

高空大气物理学是联系着天体物理和地球物理的一門边缘科学，它所包括的內容概括地可以分为以下三个部分。

### 1. 大气结构

这部分的主要任务是研究地球、月亮和其他行星上大气的起源、发展、空間分布、大气的动力学和热力学、以及它們与行星际空間介質及太阳活动之間的关系；研究关于高能粒子、电磁場和物質間相互作用的大气现象；研究地球高层大气与其表层大气环流之間的关系；估計大气对仪器及空間飞行的各种影响。根据目前这方面的发展状况，具体地又可以分为下面几个科学問題：

(1) 空間物理探测方法的研究。

(2) 高空大气的压力、密度和温度随高度的分布規律，以及这些结构参数随着緯度和季节的变化。

(3) 高层大气的成分随高度的变化規律，包括扩散混合、光化分解及复合等过程，对高空大气成分分布的影响。

(4) 研究太阳輻射远紫外綫、軟X射綫部分，并确定这些輻射在中层大气中的传播、

吸收、光化反应以及电离效应。

(5) 高层大气的能量平衡。

(6) 高层大气环流与低层大气环流之间的相互影响及扰动的传输过程。

## 2. 电 离 层

这部分的主要任务是研究行星际间电离层区域的结构(包括地球和行星的电离层)和电波的传播;研究电离现象与太阳短波辐射、高能粒子以及电磁场间的相互作用;估计电离层对于直接探测所使用的仪器和空间飞行的影响。具体进行下面几方面的研究工作:

(1) 测定电离层的电子浓度。

(2) 研究电离层的微观过程和形成理论。

(3) 研究电离层的大小不均匀结构,探索如何利用它为通讯服务。

(4) 大功率脉冲的远距离传播。

## 3. 日地空间物理

这部分主要研究地球及宇宙空间电磁场的起源及空间分布,宇宙空间电磁场与物质的相互作用过程;研究高能粒子的起源、运动特征、空间分布及瞬时变化;研究太阳微粒辐射与地球磁层及高空大气相互作用过程中所发生的各种现象,例如磁暴和极光现象;研究这种高能粒子对于空间飞行的影响。

自从人类发射宇宙火箭和宇宙飞船以来,现代科学技术已进入新的领域。许多过去所不能研究的重大科学问题,现在已开始成为研究的对象,并已取得了一些新的资料。宇宙空间已成为人类的一个广阔的科学实验园地,而这个广大实验园地的条件,是在地面所难以模拟的。例如稀薄气体的放电现象,由于碰撞而引起的气体电离,光化反应等都是在极大的空间尺度中进行的。物理实验室中,带电粒子在威尔逊(Wilson)实验室的轨迹不过几厘米,而在高空则伸展至数千公里。实验室内的气体放电现象,必须在玻璃器皿内进行,而在高空放电现象就不受器皿的影响。另外,高空中电子和离子存在的时期较长,它们所产生的效应也不容易在实验室观测到。宇宙空间中所发生的这些物理化学现象,已愈来愈引起天文物理学家、气象学家、地球物理学家、物理学家、力学家以及各种工程师们的重视。随着空间探测技术的迅速发展和科学数据的日趋丰富,高空大气物理学的领域及研究任务将会更快的扩大起来。

### § 1.2 高空大气物理学的研究方法

高空大气的研究方法,一般可以分为直接方法和间接方法两类。

#### 1. 间 接 方 法

在高空飞行工具和无线电遥测技术没有发展之前,研究高空大气所采用的方法一般都是间接的。这种方法是对许多与高空物理状态有关的地球物理现象,进行系统的研究,从大量资料的分析以及相关现象的研究中,可以间接推出高空大气的情况。例如:研究高空大气的间接方法之一是流星辉迹,这种方法是根据流星的速度、流星辉迹的出现和隐没的高度、流星的亮度等观测资料来推算大气中层的密度。根据这种方法所得到的密度,

表现出一种很重要的现象，即在中层大气中约在 50 公里处出现高温，该现象为其他间接方法及火箭探测所证实。这个高度上温度的增加，是由于臭氧吸收太阳辐射的紫外线部分而引起的。另外一种间接方法是声波的异常传播，这种方法是根据声波异常传播最高点的高度和特征速度，推算出 60 公里以下的大气温度，该方法同样也发现在 50 公里左右出现高温。此外，还可以根据极光、大气的气压振荡、气辉、地磁场变化以及太阳辐射的吸收光谱等间接方法，来取得高层大气的密度、温度和成分的资料。这些结果与用火箭直接探测所得的资料是相符的。

间接探测的另一种方法是无綫电传播法，它是目前最有效的一种间接探测方法。无綫电波从地面投射入电离层而又返回地面的过程中，带给我们许多有关电离层物理状态的科学数据。这种方法可以在世界各地广泛的进行，因此，它所得到的电离层数据比火箭和人造卫星来得多。

## 2. 直接方法

人类处于大气底层，关于高层大气的结构以及在高空中所发生的各种自然现象，一直是地球物理学家所注意的对象。从十八世纪中叶，人们就设想利用风筝或气球做为飞行工具来探测高空的情况。十八世纪末，各国都有人利用气球飞往低空进行观察。1887 年，俄国学者门捷列夫（Менделеев）院士曾经乘坐气球飞到 2.5 公里的高空，他带有气压计、磁强计来测量高空的压力和地磁场。但是在气球吊篮内进行工作，由于高空气压稀薄、气温剧降、工作条件是非常艰苦的。门捷列夫当时就指出，如要往更高处飞行，就必须用密封气球仓。这个理想一直到 1931—1932 年，才由比利时物理学家比加（Piccard）教授所实现，当时他所达到的高度是 16 公里左右。此后，在 1934 年苏联和美国都用气球升到 22 公里的高空，这是人类搭乘气球所达到的最高记录。可是不幸得很，三位苏联探空专家都英勇地牺牲了。

为了保证生命安全，为了又经济又方便地探测低空气象，在十九世纪末年，气象学家就制出自动记录低空气象的探测仪，将此仪器利用气球带到低空进行测量。1901 年，法国泰桑德博（T. de Bort）首先从这些探空资料中发现了同温层。此后在 1928 年，苏联气象学家莫尔恰诺夫（Молчанов）创造了无綫电探空仪，气球在上升过程中就可以通过无綫电波把探测结果传送到地面上来。这是无綫电遥测技术在高空探测中最初的应用。利用无綫电探空气球进行高空探测，目前已成为各国气象局的日常业务工作了，这种探空气球一般只能达到 20 公里左右，最高的记录是 47 公里。

气球能够上升是借助于空气的浮力。但是随着高度的增加，空气密度将按指数函数向上递减，当到达 40—50 公里处，空气已不能给气球以任何浮力。再往高空探测，就必须采用火箭。

随着高空飞行工具（如火箭、人造卫星、宇宙火箭和宇宙飞船等）的迅速发展，空间探测技术也在飞跃的前进，目前空间探测的范围，已由地球低层大气跨进了宇宙空间。下面我们将对这些探测工具的发展概况作一简要的介绍。

## 3. 探空火箭研究的进展概况

火箭是探测地球高层大气（30 公里以上）的重要工具，近年来有了迅速的发展，下面



分別介紹苏联、美国以及日本的火箭探空的发展情况。

苏联：早在 1929 年，苏联即研制了第一个 OPM-1 型液体火箭发动机，1933 年 8 月 17 日，利用 ГИРД-1 型液体发动机发射了第一个火箭。在不断改进火箭结构以及喷气技术的基础上，于 1949 年初，就利用气象火箭及地球物理火箭开始进行高层大气的探测。苏联利用一种直接测量温度和压力的气象火箭，在国际地球物理年期间，共发射了 125 个，取得了 80 公里以下的大气压力、密度和温度的资料。为了探测较高一层大气的规律，还发射了四种地球物理火箭，取得了 110—470 公里间高空的许多宝贵资料。

美国：早期，在 1929 年首次发射了戈达德 (Goddard) 设计的液体火箭。1945 年，曾利用民兵 (Wac-Corporal) 火箭进行探空，它载重 25 磅，高达 44 哩。1946 年春开始，采用德国的 V-2 火箭进行系统的探测，由 1946 年至 1951 年，共发射了 66 个，取得了 120 公里以下大气的压力、密度和温度的资料。1947 年冬，首次发射了空蜂 (Aerobee) 火箭，至 1957 年约发射了 250 多个。同时，还把空蜂火箭发展了许多型号。美国另外还发射了：海盗 (Viking) 液体火箭，奈克-凯君 (Nike-Cajun) 固体火箭，奈克-狄康 (Nike-Deacon) 二级固体火箭，及 ASP (Atmospheric sounding projectile) 型火箭等。

日本：日本的火箭研究是在东京大学生产研究所系川教授领导下，从 1955 年 2 月开始的。1957—1958 国际地球物理年期间，利用卡帕 ( $\kappa$ ) 型火箭进行探测。在此以前，先用“铅笔” (Pencil) 火箭进行了一系列的实验。这是世界上公布的火箭中最小的一种，长度只有 9—12 吋，直径为 0.7 吋，重量小于半磅，速度为亚音速到跨音速，于 1955 年 4 月首次发射。卡帕型的第二步是“婴孩” (Baby) 火箭，包括三个系列：Baby-S, Baby-T, Baby-R。第一次发射是在 1955 年 8 月份。卡帕系列火箭主要是用来探测电离层、宇宙线、地球磁场、气晕、大气压力、温度和高空风等资料。除卡帕系列火箭外，日本还在发展兰姆达 ( $\lambda$ ) 系列火箭，在 1962 年末已可上升到 500 公里以上。缪 ( $\mu$ ) 系列火箭预计于 1964 年到 1965 年内发射，高度可达 1000—2000 公里，用来测量内辐射带。

目前即使在人造卫星发展迅速的情况下，利用火箭探空仍有其必要性，原因如下：

(1) 可以对地球表面 30 公里到 150 公里范围作有效的科学研究。因为气球只能达到 30 公里左右的高度，而一般卫星不能低于 150 公里，再低会由于空气阻力而迅速坠入地面。故 30 公里到 150 公里间的剖面观测必须利用火箭进行。

(2) 由火箭探空工作中所获得的初步资料，可指导试验设备的发展，以后可把这些技术应用到人造地球卫星中去，因为发射一次火箭的成本较发射一次卫星的成本要低得多。

(3) 发射小型的探空火箭，要求地面设备较少，场地准备工作也较为简便，有可能在短时间内发射出去。探测出现时间短的地球物理及天文物理现象，例如太阳爆发、磁暴及日蚀等，就必须利用火箭。而发射人造卫星的准备工作时间是以天计算的。

火箭探测项目，大致归纳如下：

(1) 大气结构参数：测量各高度上的大气压力、密度、温度及大气成分。

(2) 光学特性：测量大气各层气晕的强度，研究在这些高度上气晕发生的原因，以及大气中光的散射等。

(3) 紫外线及 X 射线：空气对于太阳辐射象一个过滤器，波长小于  $0.29\mu$  的光波不能透过大气。火箭进入高层大气，可以测量太阳光谱的紫外线及 X 射线部分，确定这些辐射对于电离层形成的作用。