

ADVANCES IN
SPACE PHYSICS

空间物理学进展

(第七卷)

史建魁 叶永烜 主编



科学出版社

(P-6430.01)

ADVANCES IN
SPACE PHYSICS

空间物理学进展

(第七卷)



www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-063131-2



9 787030 631312 >

科学出版社 地质分社

E-mail: earthscience@mail.sciencep.com

销售分类建议:空间物理/天文学

定价: 298.00 元

空间物理学进展

(第七卷)

史建魁 叶永烜 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

《空间物理学进展》是一部连续丛书，本次已经出版到第七卷。本卷主要内容可分为以下几个方面：①第1章为刘兆汉先生从事科学研究的简单经历和从事空间科学探测研究的文章；②第2章至第5章描述了利用卫星以及有关地基探测数据研究地球电离层和大气扰动变化方面的有关研究成果；③第6章和第7章描述了磁层空间波-粒相互作用和带电粒子与电流关系方面的研究成果；④第8章至第11章描述了有关太阳活动、日冕物质抛射和有关空间等离子体动力学的研究成果。

本书可供有关高等院校的教师、研究生以及空间物理和空间探测技术方面的研究工作者学习或参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间物理学进展. 第七卷 / 史建魁, 叶永恒主编. —北京: 科学出版社, 2019. 11

ISBN 978-7-03-063131-2

I. ①空… II. ①史… ②叶… III. ①空间物理学-研究进展
IV. ①P35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 243733 号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 姜德君 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 11 月第一次印刷 印张: 21 1/2

字数: 412 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

主编简介



史建魁，男，博士，中国科学院国家空间科学中心空间天气学国家重点实验室研究员，中国科学院大学教授，长期以来一直从事空间物理研究，曾在国内外学术期刊上发表论文 260 多篇；中国地球物理学会空间物理委员会主任，IAGA 中国委员会副主席兼秘书长，国际参考电离层 (IRI) 科学委员会委员，曾任中国-欧洲航天局 (ESA) 合作的地球空间双星探测计划卫星的科学数据系统中方负责人；1990 年获北京青年优秀论文奖 (现茅以升奖)，1997 年获中国地球物理学会傅承义基金青年优秀论文奖，2005 年获 ESA 对 Cluster 突出贡献奖，2015 年获 ESA/中国科学院对双星/Cluster 突出贡献奖，2010 年获国际宇航科学院 (IAA) 双星/Cluster 团队成就奖，2010 年获国家科学技术进步一等奖。



叶永焯，男，博士，台湾“中央”大学天文研究所教授，“中央”研究院院士，澳门科技大学太空研究所特聘访问教授，国际宇航科学院院士，美国地球物理学会会士 (AGU Fellow)，曾任职 (1978~1998) 德国马普太阳系研究所 (前身是太空大气研究所)，曾获中国科学院自然科学二等奖 (1998)、亚洲及大洋洲地球科学学会 Axford 奖章，长期以来一直从事天体物理和日地空间物理研究工作，研究专长为行星、太阳系等离子体物理以及太阳系小天体起源和构造等。曾执行 ESA 的乔图 (Giotto) 哈雷彗星任务、NASA 的伽利略木星任务、NASA 及 ESA 合作的卡西尼土星任务及 ESA 的露西达任务的科学实验工作。

前 言

在诸位的努力下《空间物理学进展（第七卷）》得以顺利出版。又一次延续从1987年第一卷开始的学术传统，向大家报道华人空间（太空）科学工作者的部分研究成果。本期特别高兴的是刘兆汉院士把他多姿多彩的求学经历，以及在电离层物理领域的好几个非常重要和极具先导性的工作一一指出，并且解释他为什么着力于永续发展研究，使他的学术生涯走出一条新路。他激发了很多后起之秀的兴趣。刘正彦和蔡龙治两位有关电离层研究的文章中所报道的科学成果，便是传承于此。刘立波及薛向辉所描述的赤道电离层电场和高层大气对地磁场响应的研究工作，如果配合第六卷的几篇相关报道一起看，便会领略到新一波的电离层物理研究的能量正在神州大地、海峡两岸凝聚和汇流。宗秋刚、程征伟、吴德金及李暉的研究文章，把我们带往更高更远的空间物理研究领域。可以说他们几位都可各代表一个重要的学术思路。所以很值得仔细阅读和参考。最后，姜杰和江朝伟的压轴文章，则是说作为离我们最近的恒星，太阳活动从内部到表面，尚有很多未解之谜。这也提醒我们，美国 NASA 的帕克（Park）太阳探测宇宙飞船不久将会到达目前最接近太阳的位置，使得地球人类对身旁的恒星及其磁场活动进一步探测和更详细准确地了解。我们将寄望于本卷作者和她（他）们的同事以及新一代青年学生，努力发扬光大空间物理学研究。

在此，还要特别感谢国家自然科学基金项目（No. 41674145）和空间天气学国家重点实验室专项基金以及中国科学院大学对本卷编写和出版的支持。

叶永烜
2019年9月

目 录

前言

第 1 章 从电机工程到太空科学	1
1.1 太空时代	1
1.2 电离层断层扫描 (Computerized Ionospheric Tomography, CIT)	3
1.3 中坳 VHF 雷达	6
1.4 太空天气 (space weather)	9
1.5 永续发展 (sustainable development)	11
1.6 结语	12
参考文献	13
第 2 章 利用卫星观测电离层闪烁	14
2.1 引言	14
2.2 台卫三号电离层闪烁观测	15
2.3 建立台卫三号电离层闪烁模式	29
2.4 结语	37
参考文献	38
第 3 章 电离层全电子含量测量与电子密度断层扫描成像	40
3.1 导言	41
3.2 电离层计算机断层扫描成像算法	43
3.3 电离层计算机断层扫描成像初始值	45
3.4 应用低纬电离层断层扫描网 (LITN) 系统于电离层计算机断层 扫描成像	47
3.5 应用 GPS 无线电波掩星观测于电离层计算机断层扫描成像	55
3.6 结论	63
参考文献	64
第 4 章 赤道电离层电场研究	68
4.1 引言	68
4.2 电离层发电机	69
4.3 赤道电离层电场平均特征	74
4.4 电离层电场日出增强	80
4.5 太阳耀斑期间电离层电动力学过程	92

4.6	磁暴期间电离层扰动电场	97
4.7	总结	107
	参考文献	108
第5章	中间层大气对地磁活动的响应	115
5.1	研究背景	115
5.2	数据介绍和处理方法	116
5.3	第23太阳活动周中间层大气密度的6.75天和9天周期变化	119
5.4	第24太阳活动周中间层大气密度的13.5天周期变化	126
5.5	极区和中纬度中间层大气密度对磁暴的响应	133
5.6	总结	144
	参考文献	144
第6章	地球磁层中 Pc3-5 波段的超低频波与带电粒子之间的相互作用	149
6.1	绪论	149
6.2	超低频波的产生:极型模、环型模及压缩模	152
6.3	磁层中超低频波与能量粒子相互作用	164
6.4	超低频波对带电粒子的快速加速	174
6.5	结束语和未决问题	179
	参考文献	181
第7章	离子对场向电流的贡献作用研究	188
7.1	研究背景	188
7.2	数据和方法	190
7.3	观测数据分析	192
7.4	讨论	199
7.5	总结	200
	参考文献	201
第8章	电子回旋脉泽辐射的新理论	205
8.1	引言	205
8.2	高能电子束的 ECM 辐射驱动机制	208
8.3	地球极光千米波辐射 (AKR) 及其吴李模型	209
8.4	卫星实地探测对吴李模型的观测验证	213
8.5	幂律谱高能电子束的低能陡化行为及其 ECM 辐射驱动机制	216
8.6	阿尔文波湍动对 ECM 辐射机制的影响	224
8.7	一个新的自洽 ECM 辐射机制	231
8.8	总结与展望	237
	参考文献	238

第 9 章 阿尔文波对行星际日冕物质抛射等离子体的加热	247
9.1 引言	247
9.2 行星际阿尔文波的诊断	249
9.3 外日球层 ICME 中阿尔文波的统计研究	252
9.4 同一 ICME 中阿尔文波的直接追踪	258
9.5 总结	262
参考文献	263
第 10 章 太阳活动周强度变化起源和预报的研究进展	267
10.1 引言	267
10.2 太阳活动周的观测特征	268
10.3 理解太阳活动周的主要理论模型	271
10.4 太阳周强度变化起源的解释	276
10.5 太阳活动周的预报	291
10.6 总结	304
参考文献	305
第 11 章 太阳爆发活动的三维复杂磁结构	311
11.1 引言	311
11.2 日冕磁场的数值研究方法	312
11.3 复杂三维磁场拓扑与重联	317
11.4 磁绳相关结构及其演化	320
11.5 结语	326
参考文献	327

第 1 章 从电机工程到太空科学

刘兆汉

(台湾“中央”大学 中坜)

1956 年我进入台湾大学电机工程系就读，1960 年毕业，这四年大学本科的养成教育，帮助塑造了我几十年教研究生涯的格调。尤其是大一大二两年，我有机会接受了高水平的基础学科训练。记得当时普通化学课程用的是 Pauling 写的教科书，我第一次正式接触到量子力学就是在上大一化学读到原子分子结构时，当时就为它着迷。那时中学不教微积分，在台湾大学一年级，我第一次接受最初步的纯数学洗礼，有一阵每天沉浸在 ε 、 δ 的辩证中，锻炼自己的逻辑思考能力。这些经验培养了我对基础知识的喜爱及重视。大一以后，我以同样的心态去学习基础工程学科，虽然主修的是电机工程，但对物理数学等学科，我始终保持相当高的兴趣。1961 年我到美国布朗大学 (Brown University) 学习，这所学校没有电机系，所有与工程相关的科系集成一个工程学院 (School of Engineering)。我在台湾大学养成的学习方式，刚好配合得上布朗大学的环境。我选的课基本上是电机、物理、应用数学各占三分之一。我博士学位论文研究的项目是电浆 (等离子体) 对电磁波传播的影响，是一个与太空科技相关的题目。1965 年，我从布朗大学得到博士学位，当时正是美国所谓后 Sputnik 的时代，美国与苏联的太空竞赛，正如火如荼地进行中，这也是我生涯中第一个重要的机会。

1.1 太空时代

我在布朗大学学习的那段时间 (1961 ~ 1965 年)，正是美国高等教育进行转型的时候。主要的动因，是 1957 年 10 月 4 日苏联发射了人类第一颗人造卫星 Sputnik，在太空竞赛中，苏联拔得头筹，当时在美国造成举国震惊的冲击，大家都在怀疑美国科技及高等教育是否已落后，于是美国政府成立了国家航空航天局 (NASA)，提出在 1970 年登上月球的目标，并由政府从各方面挹注大量资源到高教系统。当时加利福尼亚州正式提出了研究型大学的理念，而许多大州也陆续响应，在各大学中成立了许多新的研究所及研究中心，当然，最新的领域就是太空科技，一时各校均以开发与太空科技相关的领域为学校发展的重要方向。位于 Urbana-Champaign 城的伊利诺伊大学就在其电机工程系中，建立了一个电离层射频实验室 (Ionospheric Radio Lab)，应用卫星发射的电磁波信号探测电离层。我

在 1965 年得到博士学位, 希望能留在学术界发展, 那时到传统的电机系找工作, 很难有机会进入较有名声的学校, 可是如果将范围扩大到包括太空科技相关的领域, 机会就大多了。因为我从大学开始到研究所选的课, 以及从事的博士学位论文研究工作, 都不是局限在传统的电机工程方面, 所以毫不犹豫地就投入这个新领域, 很顺利地进入伊利诺伊大学电机工程系中的电离层射频实验室, 也在这名列全美四大电机系之一的名系中, 开始了我的教研究生涯。

实验室在叶公节教授领导下, 当时领先全球, 最先利用从人造卫星发射的电磁波来测量地球表面百千米至数千千米高度的太空环境。众所周知, 电磁波传播所呈现出来的现象包括折射 (refraction)、反射 (reflection)、绕射 (diffraction)、散射 (scattering)、干涉 (interference)、衰减 (attenuation)、闪烁 (scintillation) 及吸收 (absorption) 等, 而它可被测量出的性质有振幅 (amplitude)、相位 (phase)、偏振 (polarization)、频率 (frequency)、波长 (wavelength) 等。这些现象及性质如何随太空环境改变就成为我研究的对象, 希望能通过测量它们, 获得相关太空环境的数据, 所用的观测方法, 是所谓卫星射频信标实验 (satellite radio beacon experiment), 当时我们采用的办法是测量信标电波的偏振, 根据电磁波在磁离子介质 (magneto ionic medium) 中的传播理论, 卫星传下的电波经过有磁离子介质性质的地球电离层, 其偏振会旋转, 这就是所谓的法拉第旋转 (Faraday Rotation)。其旋转角度和电离层全电子含量 (total electron content, TEC) 成正比, 当时我们用的仪器是测角仪 (goniometer), 测到的 TEC 是一个从卫星到地面接收站截面积为 1m^2 的管子中, 电离层电子的总量。其单位为 $1\text{TEC} = 10^{16}$ 电子/ m^2 。电离层中的电子上方受到磁层、太阳风的冲击, 下面受到低层大气各种气象波动的影响, 其时空的变化相当复杂, TEC 成为一个相当有用的参数, 可以提供一些关键的数据, 用以探讨大气中不同时空尺度的动力及物理现象, 包括各上下大气耦合的机制。很快地, 从观测数据中, 我们了解到大气中的内部重力波 (internal gravity wave) 在各类动力现象中都扮演重要的角色, 因此我开始学习电磁波以外的其他波动现象, 希望透过理论来解释观测到的 TEC 变化, 包括行进式电离层扰动 (traveling ionosphere disturbance, TID), 海啸 (tsunami) 引起的电离层波动, 火山爆发带动的全球大气扰动, 磁暴或台风激发的电离层扰动等。这些现象大致都是不同时空尺度的波动在电离层中传播的表现。因为研究这些波动现象, 同时也在系里开授相关课程, 叶公节教授和我写了一本专著 *Theory of Ionosphere Waves (I)*, 由 Academic Press 在 1972 年出版。

卫星无线电信标 (Satellite Radio Beacon) 观测, 除了测量电离层 TEC 外, 其信号幅度也提供了另外有关电离层中电浆体的重要信息。这就是所谓的电离层闪烁 (ionospheric scintillation), 电离层中的电浆体受外在或内在不同动力因素的影响, 会产生各类型的不稳定现象, 导致电子密度形成在空间及时间上不规则的

变动,即所谓的不规则体(irregularity),电磁波传过这些通常在飘动的不规则体时,会被他们散射而偏离原来传播的方向,使得在地面上接收到的信号强度闪烁不定,这就是 Scintillation,这些闪烁的信号提供了信息,让我们研究电离层不规则体的物理特性及电浆体中各种不稳定现象的形成机制。但从闪烁信号中提取这些资料,需要根据电磁波在随机介质(random media)中传播的理论。这题目把电磁波、或然率、统计观念融在一起,相当令人着迷,也成为我们实验室主要研究项目之一。结合理论和观测数据,我们开发出一套包含多次散射的电离层闪烁理论。

1.2 电离层断层扫描 (Computerized Ionospheric Tomography, CIT)

卫星信标实验量测的 TEC,为我们提供数据,研究了许多电离层中的动力现象,但它无法告知我们这些现象发生于电离层中哪一个高度。TEC 无法提供垂直方向的分辨率。

这是信标实验最大的缺点,20世纪80年代中期,我和两位学生——一位是刚拿到博士学位的 Steve Franke,另一位是正要开始写论文的 Jeff Austen——开始讨论是否可以借用医学上应用颇广的计算机断层扫描(computerized tomography, CT)方法来解决这个问题。我们发现,如果在地面上设置多个接收站,各站同时接收一枚绕地球运转的低轨卫星所发出的信标信号,从而量出不同途径的 TEC,这样的实验情境与医学上所做的 CT 相当类似,应有可能做出电离层的二维影像。于是 Jeff 就以此为题,开始他的博士论文研究,并于1988年发表了第一篇有关电离层扫描(Computerized Ionospheric Tomography)的文章。图1.1为电离层扫描的举例说明。但真正建立多站观测链进行实际经常性观测则要等到90年代初期,即 Low-latitude Ionospheric Tomography Network (LITN) 开始运作以后。目前,利用不同的低轨卫星或 GPS 信号,不同研究单位,在全球建置了许多观测链,取得二维甚至三维的电离层影像, CIT 已成为广泛使用的电离层观测方法之一(图1.2,图1.3)。

1988年3~4月,我突然接到一通来自一位 Dr. Tom Yanck 的电话,他当时是 NASA-JPL 实验室主管 GPS 应用的工程师,他在电话中提到因为读到我们所发表有关 CIT 的文章,希望能与我们合作一起向 NASA 提一个大型卫星计划,参加成为 NASA 的 Earth Observing System (EOS) 卫星系列中的一部分。JPL 当时正在规划 GPS Geoscience Instrument (GGI) 计划,主要是开发 GPS Radio Occultation (GPSRO) 技术,希望将最新的 CIT 实验加入进去,所以邀请我为计划的共同主持人,于1988年提出申请。1989年,GGI 获得 NASA 全额批准,开始第一期为

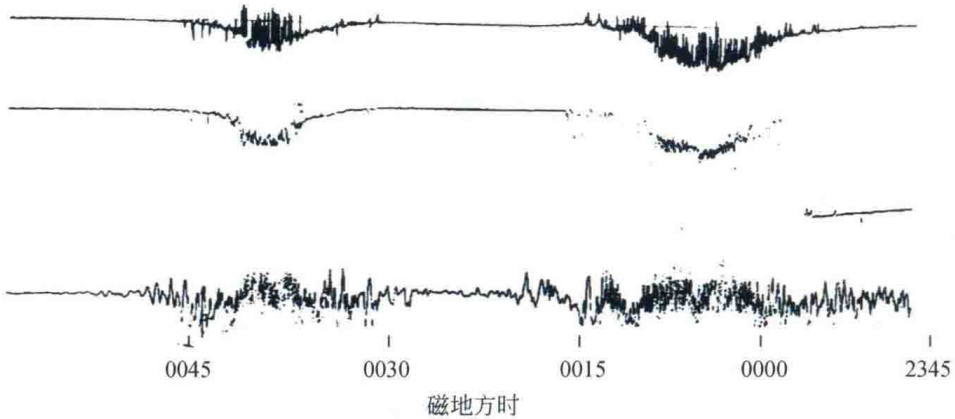
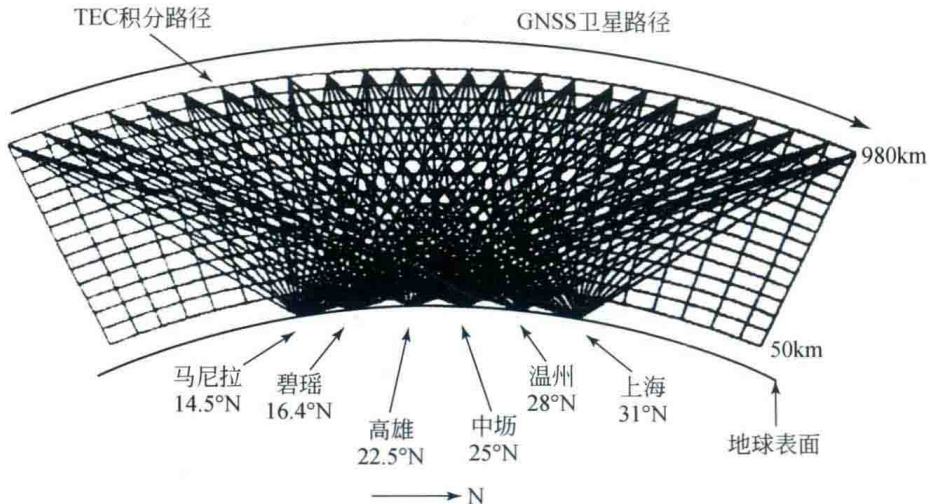


图 1.1 卫星无线电信标实验的有关结果

磁赤道上空的电离层常在日落后由于 Rayleigh-Taylor Instability 引发生成电浆气泡 (equatorial ionosphere Bubble), 从约一百千米高度上升至七八百千米, 沿途经过一系列不稳定性的活动, 产生大小不同的电浆不规则体, 导致通过的电波产生闪烁现象。卫星无线电信标技术是观测此现象最重要的方法之一。图中显示位于 Natal, Brazil 的接收站同时接收由同步卫星 Marisat 1 及 SMS 1 发出的信标讯号, 观测到电离层赤道气泡 (Ionospheric Equatorial Bubble) 及同时产生的电离层闪烁现象 (Ionosphere Scintillation)。图中有三条时序曲线, 上面两条显示由测角仪从两颗卫星发出的信标讯号测出电离层 TEC 减量的时序, 显示有两个气泡通过, 造成电离层不稳定, 产生不规则体, 影响传过的电波而产生闪烁现象, 呈现于图中第三条讯号振幅强度的时序上面

时三年的研究, 团队成员三年下来, 在 GPS Radio Occultation 及 Ionospheric Tomography 方面, 均有不少进展, 但到 1992 年, NASA 因经费及其他因素, 重组其 EOS 计划, 停止了对 GGI 计划的支持, 原来规划正式发射卫星的第二期计划, 就无法实践了。我当时已离开美国, 暂时就没有继续这方面的工作。



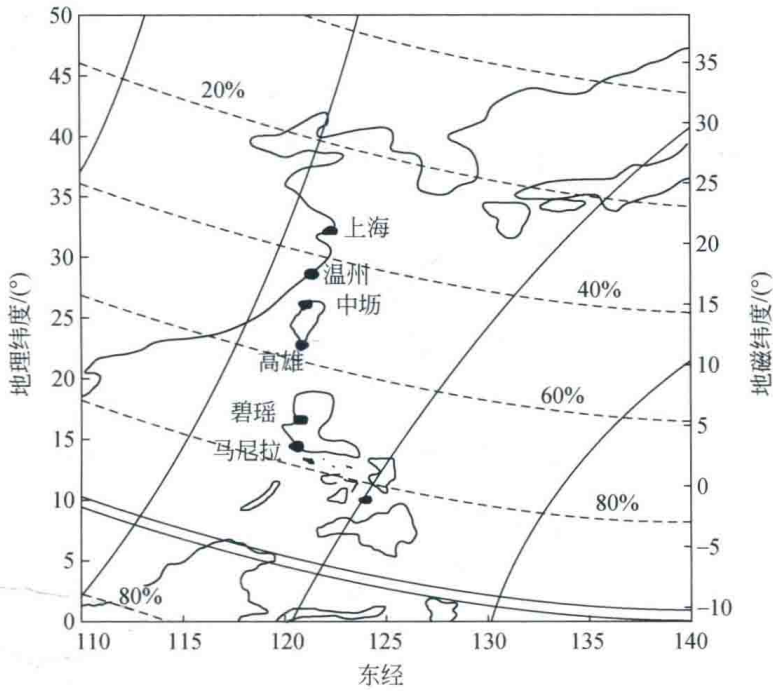
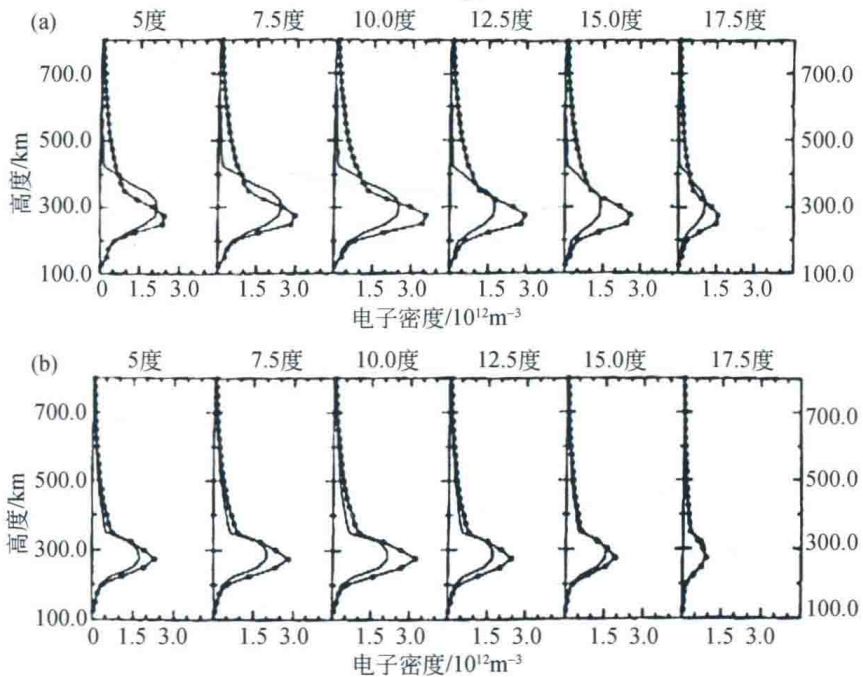


图 1.2 电离层计算机断层扫描 (CIT)

应用 LITN 设在上海、温州、中坵、高雄、碧瑶、马尼拉的地面站用 CIT 方法研究发生于 1995 年 10 月 24 日的日食对电离层的影响。图中显示各站地理位置及不同程度的日食过程



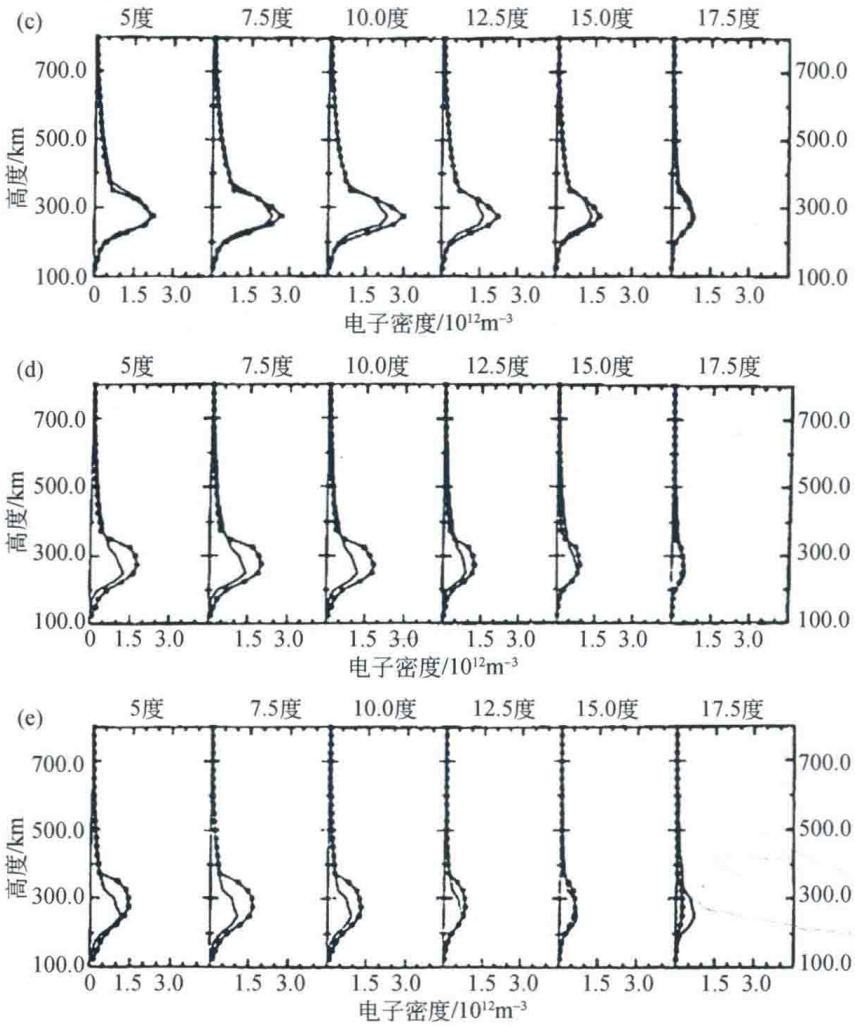


图 1.3 LITN 观测之电离层日食现象

从北纬 5 度到 17.5 度差距 2.5 度的六个电离层电子密度剖面, 在日食过程中各地电子密度变化情形, (a) 1430 (b) 1515 (c) 1530 (d) 1630 (e) 1730LT, 实线代表日食当天数据, 点线代表参考日 (10/25) 数据

1.3 中坳 VHF 雷达

太空科学研究非常国际化, 全球许多研究单位各有所长。1974 年, 我有机会到位于德国 Lindau 镇的 Max Planck Institute for Astronomy (MPIA) 做一学期的访问, 刚好碰到他们成立了一个新的研究小组 SOUSY, 目标是建造一个新型的特高频 (VHF) 雷达, 用以观测大气。当时国际太空物理界, 都对一位秘鲁科学家 Ron Woodman 所做的工作特别关注。他利用美国 NSF 设在秘鲁 Jicamarca 的雷达, 在晴空状况下, 量到从一公里左右到近 20 公里高空的风速。该数组雷达运作频率为

49.92MHz 的 VHF 波段，原来是以 Incoherent Scatter 模式运作来研究电离层，没想到在没有电子的平流层，也可收到雷达回波信号。Woodman 认为这段波段的雷达信号，因受大气中乱流引起的微小温度或气压变化，发生背散射而产生回波信号。德国的 SOUSY 就规划建构一座主要用以观测中层大气的 VHF 雷达，进一步验证 Jicamarca 的结果，借此开启一套地基监控中层大气的技术，也特别请了 Woodman 为 MPIA 的客座顾问，我适逢其会，进入 VHF 雷达这个新领域，回 Illinois 后，我们的实验室开始与美国 NOAA 的科学家合作在校旁的农地上，建了一座命名为 Flatland 的 VHF 雷达，继续这方面相关技术与科学的研究。观测的大气区域是所谓中层大气，从 1 公里左右到 100 公里上下，因为这区域除偶尔靠发射火箭或气球外，很少有机会长期观测其中各种现象，所以一直被大气科学家们称为未知层 (ignosphere)。现在因为 VHF 雷达的开发，有了 Ground Based 的观测工具，国际上开始讨论如何组织起来研究这未知层。一位伊利诺伊大学教授 Sidney Bowhill 是其中的领导者，他在 20 世纪 80 年代初期建议由国际科学联合会 (ICSU) 下的日地物理科学委员会 (Scientific Committee Of Solar Terrestrial Physics, SCOSTEP) 组织并领导一个国际研究计划 Middle Atmosphere Program (MAP)，以十年为期，研究中层大气中的物理、化学及动力等相关现象，他推荐我担任 SCOSTEP 的科学秘书长 (scientific secretary)，协助他推动 MAP 的开展，当时 SCOSTEP 的主席是澳大利亚科学家 Keith Cole，委员会中除 MAP 外，尚有与磁层及太阳物理相关的计划正在推行中，但 MAP 成为那段时期 (80 年代) 最主要的工作，除德国与美国外，日本也投入巨额资源，在京都大学建了 MU 雷达，也在印度尼西亚建立了赤道 VHF 雷达。

1981 年春，我回到台湾，在台湾大学母系客座，当时台湾各大学中有不少从国外学成回来的年轻教授，努力想将台湾地区学术研究水平提升，我那时刚好在 SCOSTEP 中参与 MAP，想到 MAP 中最重要的观测工具及研究工作就是 VHF 雷达，如果在台湾建一座 VHF 雷达，那参与的研究人员，与国际上的同行，大致可以站在相同的起始点上，因为所建的工具及所研究的项目都是新的。于是我向对太空及高层大气有兴趣并有些基础的“中央”大学建议由其主导建造一座 VHF 雷达 (图 1.4 为当时规划建造 VHF 雷达时的留影)，经过数年努力，“中央”大学得到支持，在德国 SOUSY 同僚援助下，于 1986 年成功建构了“中坜特高频雷达”，这是一个品字形的数组天线组合，操作频率为 52MHz，每一数组有 64 具八木天线，各可独立操作，如图 1.5 所示，是东南亚地区第一座 VHF 雷达，我本人协同许多科学家及研究生用它开发了多项新的观测技术，如空间雷达干涉法 (spatial domain interferometer, SDI)，频域雷达干涉法 (frequency domain interferometer, FDI)，斜向天线技术 (Oblique Spaced Antenna Technique) 等，也用它取得的观测数据来研究一些有趣的大气现象如 Lee Waves、台风眼、对流层-平流层交换、雨滴分布、闪电及几种大气不稳定现象等。图 1.6 展示了利用中坜 VHF

雷达测风结果与其他方法的比较。



图 1.4 规划建设中坳 VHF Radar

1983 在“中央”大学讨论中坳雷达之设置。左起：刘兆汉、叶公节、Juergen Rottger、赵寄昆

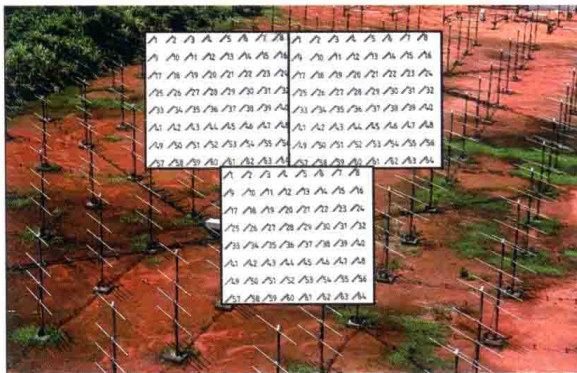


图 1.5 中坳 VHF Radar

一个品字形的数组天线，每一正方块模块有 64 具八木天线，运行频率：52.2MHz，峰值功率：60kW，最大占空比 2%

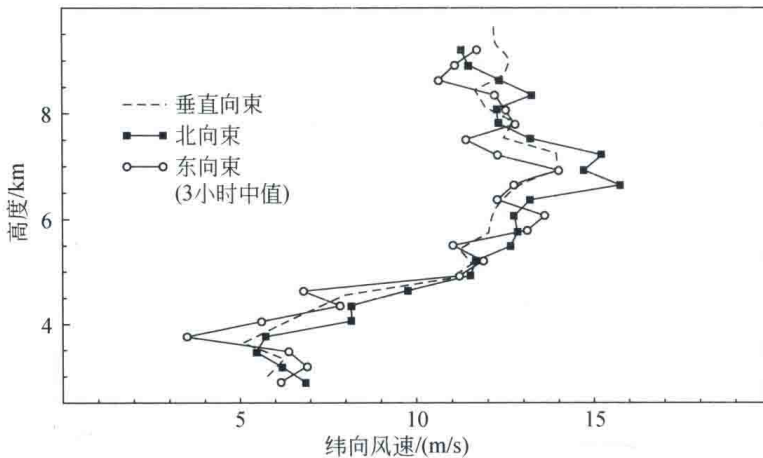


图 1.6 利用中坳 VHF 雷达开发斜向无线技术 (OSAT)

图中比较 OSAT 及其他方法所测风速。OSAT 可用以测风场的一些特性如散度和旋度等