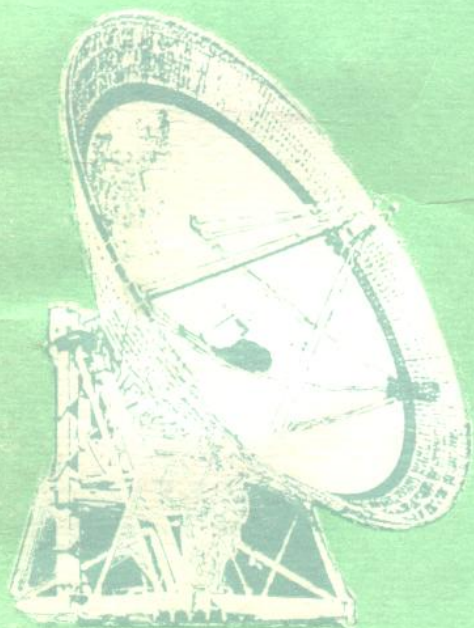


射电天文观测

向德琳 编著



科学出版社

射电天文观测

向德琳 编著



科学出版社

1990

内 容 简 介

本书阐述了射电天文观测的发展及其在现代天文学发展中所起的作用。主要内容包括各类射电观测设备的基本原理、结构和观测方法,射电天文观测对象,射电辐射机制,当今世界射电设备发展概况和趋势以及射电天文观测课题的发展及其对射电天文方法的要求等。本书资料丰富,图表文并茂。

本书可作大学天文专业有关课程的基本教材或主要参考书,也可供天文工作者以及微波天线和卫星地面站的工程技术人员参考。

射 电 天 文 观 测

向 德 琳 编 著

责任编辑 赵卫江

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年6月第 一 版

开本: 787×1092 1/32

1990年6月第一次印刷

印张: 81/8 插页: 2

印数: 001-600

字数: 186 000

ISBN 7-03-001512-6/P·292

定价: 8.90 元

目 录

第一章 射电天文观测方法的发展对现代天文学的贡献	(1)
一、射电天文学的 诞 生.....	(2)
二、射电天文观测的早期 发 展.....	(4)
三、射电观测的初步 成 就.....	(6)
四、射电望远镜的发展 简 史.....	(9)
五、射电天文观测方法的纵深 发 展.....	(12)
六、射电天文方法向短波端的延拓——毫米波射电天文学 的发展.....	(15)
七、现代天文学的前沿课题对发展射电天文观测方法的 要求.....	(24)
八、结 语.....	(28)
第二章 射电观测引言和射电望远镜的理论基础	(29)
一、有关射电观测对象的一些基本 知 识.....	(29)
二、射电观测设备 引 言.....	(46)
三、射电天文 测 量.....	(49)
四、射电望远镜的理论 基 础.....	(58)
第三章 主要的射电望远镜天线	(74)
一、连续孔径 天 线.....	(74)
二、非连续孔径 天 线.....	(94)
三、几台有代表性的抛物面天线结构及其细节的图片.....	(102)
第四章 综合孔径射电望远镜	(118)
一、孔径综合的 原 理.....	(118)
二、孔径综合的 方 法.....	(122)
三、孔径综合 设 备.....	(129)

第五章 当今射电观测设备发展的概况	(149)
一、近期投入使用的射电望远镜	(150)
二、建造中的射电望远镜	(159)
三、计划中的射电望远镜	(171)
四、毫米波、亚毫米波射电望远镜的发展	(175)
第六章 辐射计基本原理	(178)
一、引言	(178)
二、射电天文观测对象的信号的类型	(178)
三、射电天文信号的测量	(179)
四、基本的接收机系统	(181)
五、连续谱接收机的主要类别和组成	(183)
六、特殊用途的接收机	(188)
七、现代接收机系统的发展趋势	(191)
第七章 连续谱测量	(192)
一、测量原理	(192)
二、观测技术	(196)
三、观测精度	(199)
第八章 谱线观测基础	(201)
一、谱线观测的历史	(201)
二、谱线观测对设备的特殊要求	(202)
三、谱线观测的准备计算	(203)
四、谱线观测中开关类型的选择	(207)
五、谱线测量的校准问题	(212)
第九章 一个射电天文观测研究中心——美国国家射电天文台(NRAO)	(220)
一、概况	(220)
二、组织机构	(221)
三、NRAO的几个委员会	(225)
四、学术活动	(227)
五、观测设备	(229)
六、由各设备的观测选题分布看射电天文实测研究的发展	(243)

第一章 射电天文观测

方法的发展对现代天文学的贡献

射电天文学是一个相对新的天文学分支，它使用射电望远镜系统在无线电波段（见图1.1）研究来自深空（包括各类天体）的射电波。

为什么射电天文学在几乎是天文学科的每一个分支领域里都成功地取得了快速和重要的进步呢？首先是由于射电波可以穿透弥漫着尘埃和雾霾的星际空间，使得射电源可以在大得多的距离上被探测到。所以较之最大的光学望远镜，射电天文观测提供了更大的可能来探测最遥远的深空，使我们可以藉助于射电望远镜“看到”目前在许多方向上因视野限制而“看不到”的现象。其次是射电量子的低能特性。量子 $E = hf$ ，能量的交换单位，对于射电波来说是小的，因为比起光波和 X射线，它的

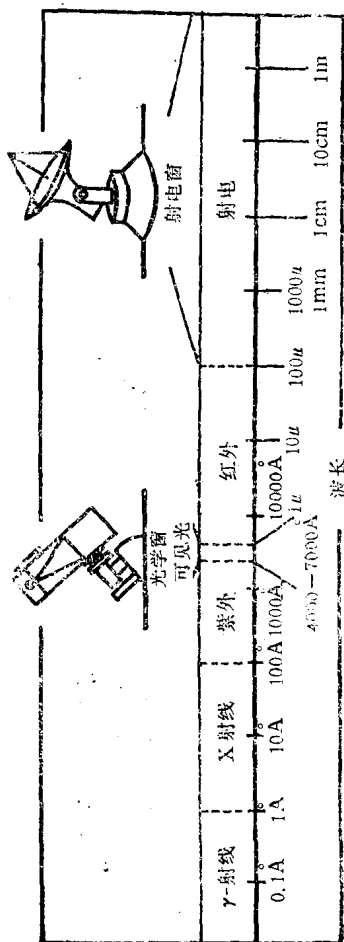


图1.1 电磁谱。

频率 f 低得多。所以射电波的价值不仅在于发射射电光子(量子)的辐射源温度低,而且在天体物理现象中释放的能量很易导致产生大量低能光子,从而发射射电波。射电天文方法还可以确定宇宙的基本构造单元——氢原子——的位置,即使在极冷的星际空间区域。这样,射电天文学就使得我们有可能对宇宙作一种新的描绘。它的诞生与发展极大地推动了天文学的发展。

一、射电天文学的诞生

1888年Hertz第一次在实验室获得了无线电波。1894年Lodge预见到太阳发生的辐射会延伸到可见光谱以外长得多的波段上。通过他在利物浦大学做过的实验,他清楚地认识到为了探测到这样的长波辐射实验必须用高灵敏度的仪器。法国的Nordman等人的早期尝试性试验之所以失败,也是因为电子技术和知识都不够先进,不能足够的保证他们成功。没想到的是三十年后,对来自天文源的射电波的发现却是当研究大气对无线电通讯的影响时偶然得到的。

对地球外射电波的第一次观测,是美国贝尔电话实验室的Jansky在1930年开始的。他建造了一台工作在15m波长的可旋转的简陋天线(图1.2)用以研究发出大气干扰引起通讯接收噪音的方向。到1931年他发现无线电噪音来自三种途径:本地和远方雷雨,以及遍布于银河系的地球外噪音。1933年他进行了银河系中心的探测,确认地球外源的最大强度来自银河系的中心。为了证实他的认识,他建议建造一台米波抛物面反射天线来作进一步的观测,但他没有得到支持。另一位美国无线电工程师Reber追随Jansky的发现,于1937年在自己家的后花园中自费建造了一台9.5m直径的抛

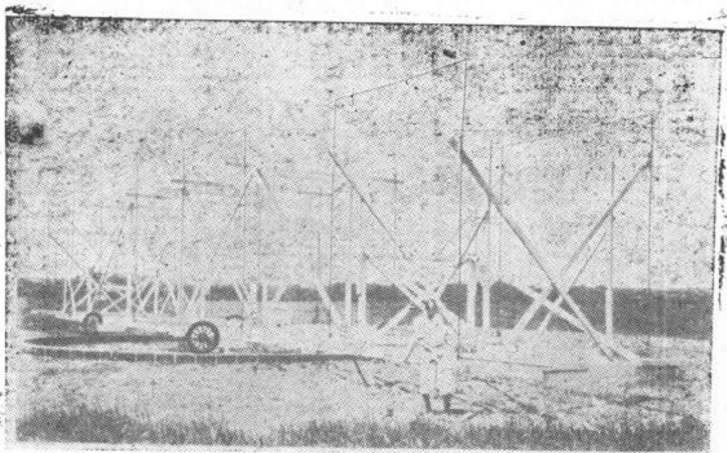


图1.2 央斯基 (Jansky) 天线. 这是 K.G. Jansky 在 1930—32 年为检测来自银河系的射电发射所用的仪器的一台精密的复制品。

这台天线长 30m, 高 3.7m, 可以在一个圆形的轨道上旋转。工作波长 14.6m。现存于美国国家射电天文台 (NRAO) (在西弗吉尼亚州的 Green Bank), 由贝尔电话实验室赠送。Jansky 用原天线发现了来自银河系的射电波, 他的发现为一个新的科学分支——射电天文学铺平了道路。

物面反射天线, 这是为天文研究建造的第一台射电望远镜 (见图 1.3), Reber 开始在 9 cm 波长上进行实验并且持续了若干年。这是基于他的两点假定: (1) 在短波长上观测, 他能达到较好的分辨本领*; (2) 如果遵从普朗克黑体定律, 接收到的功率应当大些。不过在 9 cm 和 33cm 上他没有探测到天体的射电辐射, 而最终他在改变观测波长到 1.87 m 时得到了成功, 在这个波长上他得到了第一幅银河系的射电图 (1944 年发表)。这个图揭示出银河系射电扰动的中心在人马座, 几个次级大

- 一个望远镜的分辨角 (又称角分辨率) 如果是 1° , 指的是这个望远镜能辨别夹角为 1° 的两个方向来的射线, 小于 1° 的两个方向来的射线它就不能辨别, 或说小于 1° 的细节它就不能辨认。这个角度越小, 望远镜的分辨本领就越高。天文上常常用角分 ($1' = 1^\circ/60$) 和角秒 ($1'' = 1'/60$) 为单位来描述望远镜的分辨角 (它是分辨本领, 即分辨率的倒数)。

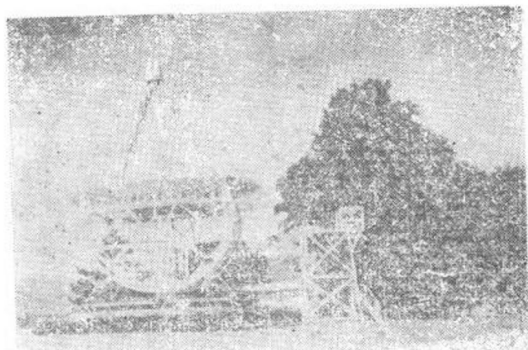


图1.3 Reber 望远镜。这是1937年在美国伊利诺伊州的惠顿由G.Reber建造的9.6m直径的抛物面天线的原件。用这台天线发现了分立的强射电发射区,如现在我们知道的天体,蟹状星云,巨射电星系天鹅座A等。同时通过对射电源的描图扩展了发现新现象的观测方法。这台天线也安放在NRAO,仍不时用于测试新的接收机和监视射电干扰源。

出现在天鹅座、仙后座、大犬座和船尾座,极小出现在英仙座。Reber还进一步提出这种辐射可能产生于电离星际氢的电子和质子之间的碰撞。

二、射电天文观测的早期发展

第一次认识到来自太阳的射电辐射是在1942年,就是那一年Reber在发表银河系射电天图的同时就提出了他观测到的长波辐射可能是由日冕引起的。一位英国科学家Hey在军事部门负责分析军队雷达设备中出现的干扰,他根据工作在4—8 m的观测站来的报告,做出了太阳辐射强的射电辐射,而且这个现象和日面上的大黑子有联系的结论。但由于

部队的安全制度,他的报告直到1946年才得以发表。同年美国贝尔电话实验室的 Southworth 在厘米波段对宁静太阳的射电辐射作了第一次成功的观测。同样的原因限制了这项科学结果的及时传播,他的论文于1945年才公诸于众。Hey 提出的和太阳活动联系的强辐射, Southworth 观测得到的正常太阳的射电辐射,即宁静太阳的热辐射,以及 Reber 提出的来自日冕的长波射电在时间上是太阳射电天文学最早的发现。

1944年提出的一个7年后被观测证实的理论预言是射电天文学的另一个里程碑,那就是 Van de Hulst 提出来的,关于来自中性氢原子的基态能级的超精细结构之间的跃迁(21 cm谱线)应该是可以探测到的预言。

同年Hey等在建立预测V₂火箭轰炸系统时发现了在高度100km左右的短散射回波以及进入天线系统的外部无线电噪音,并且发现这种不希望有的噪音主要就是最初Jansky发现的宇宙射电辐射。1945年他们证实了短散射回波就是来自流星余迹的雷达反射,并由此确定了流星辐射和速度,发现了白昼流星雨。1946年他们发现了第一个分立的宇宙射电源天鹅座A。同年,一个大的太阳黑子使他们建立了太阳黑子和耀斑的主要射电性质。此后,来自太阳和银河系分立射电源的射电辐射以及来自流星余迹的雷达回波都相继发展为射电天文学的重要分支。

二次大战后Lovell和Ryle等人在英国曼彻斯特建造了一个类似于研究流星余迹雷达的预期研究宇宙线簇射的雷达。但电车和工厂等城市干扰驱使他们搬到大学植物系的一块属地——Jodrell Bank,在那里他们意识到用雷达难以探测到宇宙线簇射,因而把注意力转向研究流星回波,继后转到射电天文的其它分支。从此,两个欧洲著名的大学射电天文研究中

心建立起来了,这就是剑桥大学的 Martin Ryle 和 曼彻斯特大学的 Bernard Lovell 领导下的两个小组.

几乎在欧洲射电天文研究活动开展的同时,澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的 Pawsey 在澳建立了一个同样著名的射电天文小组.可以说,澳大利亚的射电天文学是以在悉尼港附近 Dover Heights 建立的第一架海面干涉仪为标志于1946年开始发展起来的.实际上射电天文学作为一个新的重要的科学领域也是这个时期诞生的.虽然美国的 Jansky 在1932年发现了来自银河方向的射电波,但导致射电天文学深入发展时期到来的是在澳大利亚1946年作出的若干发现.这就是第一,我们的太阳具有温度高达 $10^6\text{ }^\circ\text{C}$ 的大气或称日冕;第二,在黑子附近区域不时发生非常强大的射电波(见图1.4,早期的太阳爆发记录);第三,天空中存在着发射

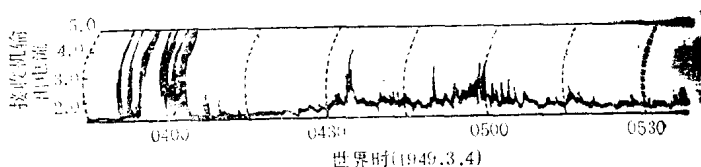


图1.4 早期的太阳爆发记录.迭加在来自太阳的相对稳定的射电辐射背景上的是偶发的高强度爆发.它的持续期依赖于不同的起源机理,可以由几秒到几小时.在长波段它们更强和更复杂.

射电波的点源(称射电星),它们并不和明显的天体成协.澳大利亚在为研究来自地球以外的射电波以及确定射电星的位置而发展观测仪器和技术方面起了先驱者的作用.例如早期在澳大利亚发展的 Mills 十字天线.

三、射电观测的初步成就

即便是简述继后在射电天文领域中最重要成就也并不

容易,这里只提几件较早的结果. 1946年美国Dicke和Berlinger在1.25cm波长上探测到来自月球的热射电辐射. 美国陆军通讯兵团和匈牙利的Bey得到了来自月球的雷达回波. 1948年Bolton在澳大利亚用第一台海面干涉仪第一次对一个分立的射电源金牛座A和一个目视银河系天体——蟹状星云(1054年超新星遗迹)作了肯定的证认. 1950年Brown和Hazard对仙女座大星云的星系进行了第一次探测. Smith在剑桥发展了非常精确的定位方法,导致1951年证认出天鹅座A为非常遥远的星系. 1951年首次观测到的21cm氢线(见图1.5(a))就是由美国的Ewen和Purcell以及荷兰的Muller和Oort几乎同时取得的,随后又得到澳大利亚的Christiansen和Hindman的观测证实. 他们在对银河系的研究中最为成功地开拓了这条谱线在天文学研究中的潜力. 图1.5(b)是1951年Ewen和Purcell发现21cm谱线所用的喇叭天线.

在Van de Hulst预言了21cm氢线之后,最重要的早期理

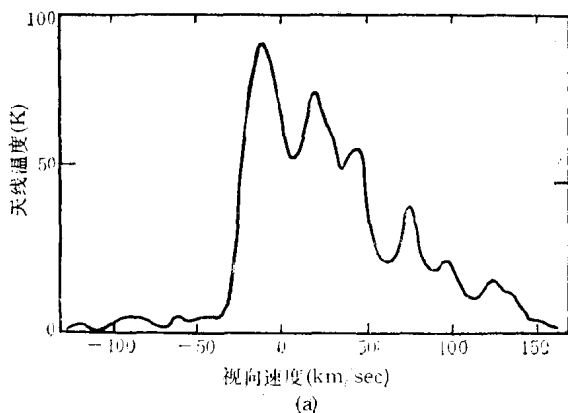


图1.5(a)21cm(1420 MHz)氢线的谱线轮廓. 曲线的几个峰对应于来自一些氢云的多普勒位移信号. 这些云以不同的速度运动,故而它们处在离我们不相同的距离上.

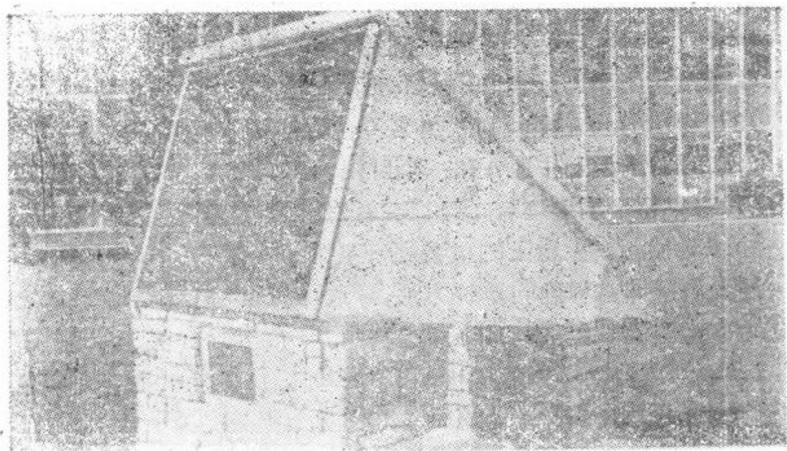


图1.5(b) 1951年3月 H.I.Ewen 和诺贝尔奖金获得者 E.M. Purcell就是用这台简单的喇叭天线发现了由银河系中性原子氢气体发射的21cm (1420MHz)谱线。

论成就是瑞典天文学家Alfven和Herlofson以及苏联天文学家Shklovsky作出的“同步加速过程是各类天体源中占优势的强连续射电辐射的重要的起源”的论断。

射电天文观测研究现在已在世界各地开展起来了。Jansky的第一个发现是在美国作出的,之后相继的发现是在英国出现的。虽然在那之后的很长一段时期中,这方面的兴趣仍由Reber在美国保持着它的生命力,而对于射电天文在美国得到的真正支持却是在不久以后的事。最重要的射电研究中心此后不久也在世界许多其它国家陆续建立了起来,如澳大利亚、荷兰、法国、加拿大、苏联、日本等等。

射电天文学的令人惊异的标志之一就是一直对发现意外的天文现象作着杰出的贡献。这里只举六十年代天文学的四大发现为例。在澳大利亚使用Parkes的64米直径的射电望远镜,用月掩射电源的射电天文方法,以高精度确定了3C273的

位置,从而导致了第一个类星体的发现. 关于星际分子 虽早在三十年代已观测到 CH , CH^+ 和 CN 的紫外吸收谱,但大量星

际分子的发现还是利用了射电天文的谱线测量新技术,继1963年美国Weinreb等人在仙后座A射电源处观测到18 cm的OH的两条主线吸收谱之后实现的(见图1.6). 1965年美国天文学家Penzias和Wilson合作研制了包括6米喇叭天线和氦致冷参考源的用于卫星通讯的低噪

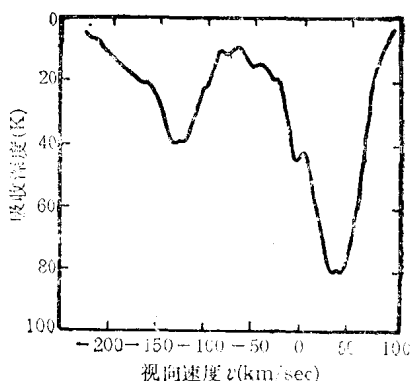


图1.6 射电源Sgr A的星际羟基(OH)的18cm的吸收谱。横轴是速度(v),纵轴是吸收深度。

音接收系统,他们在测量银晕气体的射电强度时,在7.35cm波段发现了3 K宇宙微波背景辐射. 为此他们两人于1978年获得了诺贝尔物理学奖金. 1967年,在英国剑桥大学的Mulard射电天文台Hewish和他的研究生贝尔用米波偶极子阵在研究行星际介质引起的河外射电源闪烁的过程中发现了脉冲星, Hewish为此获得1974年诺贝尔物理学奖金.

四、射电望远镜的发展简史

射电天文学是天文学和无线电科学相结合的一个学科,是在无线电波段用无线电方法来研究天文学的一个代表现代天文学技术特征的分支学科. 因而它的进展和无线电技术的进展紧密地联系在一起. 射电望远镜发展的每一次长足的进步总是毫无例外地为射电天文研究的发展,树立一个新的里

程碑。这里我们概括一下各类射电望远镜发展的简单历史进程,从而增进我们认识它在射电天文学发展中所起的作用。正如前述,世界上第一个射电望远镜是Jansky于1932年在美国建成的。他更深入地研究了噪声来源,确认了噪音来自地球之外,这个认识上的进步表征着一门新兴的学科——射电天文学的诞生。由于这个重大的成就,自1966年起Jansky这个名字被全世界同行们用来作为射电天文的基本测量单位——射电流密度——的名称。一个Jansky记作 $1J_y = 10^{-26} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$ 。世界上第一台超综合孔径射电望远镜是由Ryle于1962年5月在英国建成的。他把移动几台天线之间的相对距离的方法和利用地球自转的方法结合在一个射电望远镜系统上,用以实现使用相对小得多的实质的天线结构来取得相当于极大口径的单天线所能取得的同样的效果。由于这个成就Ryle荣获了1974年诺贝尔物理学奖金。1967年8月Broten等人首次在加拿大利用一台相距200m的双天线干涉仪(每个天线都分别使用了原子钟来达到同步,这就是VLBI技术的雏型)取得了最早的观测结果。5月他们把天线距离延伸到3100km,也成功地取得了观测结果。一个月后,Bare等人利用独立的多天线干涉仪基本上重复了加拿大的试验。同年,Moran等人在美国利用多天线独立干涉仪首先获得了谱线测量的结果。由于这方面的成就,于1971年加拿大Broten等人的小组和美国国家射电天文台Bare等人和麻省理工学院Moran等人组成的小组光荣地得到了美国科学与艺术研究院的Runiford奖金。

在射电天文学兴起的短短几十年中,在射电天文方法不断地为天文事业作着巨大贡献的年月里,各类射电望远镜是如何突飞猛进地发展的呢?图1.7直观地概括了射电天文观测设备发展的历程,它由分辨率的提高来表征。在三十年代初

期, Jansky建造的第一台射电望远镜角分辨率几乎是 10^5 角秒. 随着工作波长的缩短和更大的天线系统的建立, 射电望远镜的分辨率稳定地提高. 1962年美国国家射电天文台建成91m直径中星仪式射电镜. 1963年澳大利亚Parkes建成64m全动抛物面天线射电望远镜. 同年在波多黎各的阿雷西波建成了300m直径(它的口径至

今独居世界射电望远镜之首)的固定式球面望远镜. 1965年在法国的南锡建成 $200\text{m} \times 35\text{m}$ 的改型的Kraus型射电望远镜, 次年在加拿大的阿尔贡昆则建成了46m的射电望远镜. 这一类镜子用在厘米到分米波段, 角分辨率在 10^3 — 10^2 角秒范围. 当今最大的全动抛物面射电镜当推西德的100m射电镜(见图1.8). 在短厘米波段, 它的角分辨率已达 $30''$ 左右. 虽然更大型又精密的望远镜可以建造, 但用普通方法建造获得好于 $6''$ 角分辨率的望远镜在经济上似乎不现实.

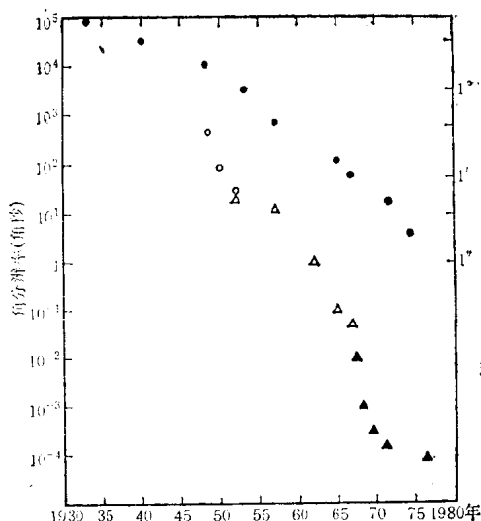


图1.7 连续孔径射电镜和各种干涉仪系统的角分辨率的改进。

- 连续孔径射电望远镜
- 干涉仪
- △ 无线电微波接力干涉仪
- ▲ 磁带记录干涉仪

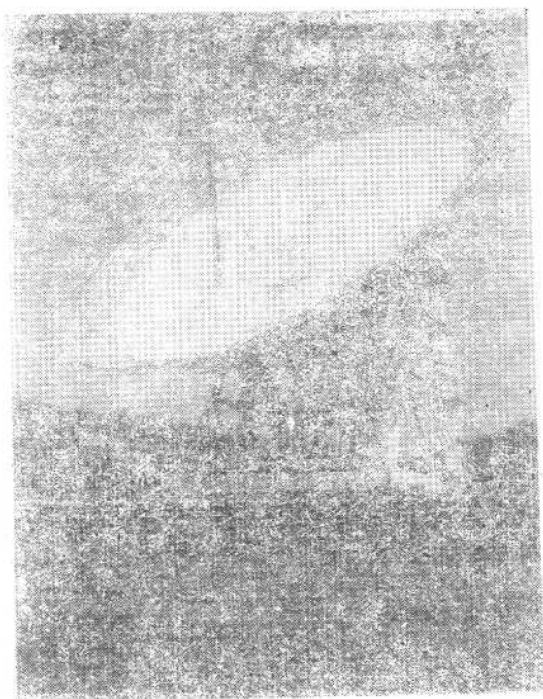


图1.8 西德 Effelsberg (波恩附近)的直径100m的全动抛物面天线射电望远镜。

五、射电天文观测方法的纵深发展

射电望远镜的分辨率和它的接收天线的直径成正比,但是为了提高分辨率而增大口径受到许多实际条件的限制。为此,射电天文学家很早就把注意力转向干涉技术。从五十年代的二元干涉仪发展到七十年代的复杂的综合孔径阵。传统的干涉仪间距快速地由几百米增加到几公里。在短厘米波