

# 射电望远镜发展和脉冲星 的观测研究

吴鑫基

北京大学物理学院天文系

国家天文台乌鲁木齐天文站

## 祝贺射电天文暑期学校开学

我国射电天文始于1958年，从无到有，没有观测设备，没有人才。从办射电天文训练班开始。由王绶琯院士主持开讲，培养了第一批人才，成为我国射电天文事业的骨干。

今天，在贵州大学，旧景重现。所不同的是，我国天文学的发展进入了一个新的历史时期。

## 天文观测能力必须不断提高

- 天文学是一门“观测的科学”，望远镜的任务是看得见、看清楚、看仔细来自天体的电磁波。
- 望远镜做得愈大，聚光能力就愈强，就能看见原先看不见的范围。天文世界里看不见的范围太大了！我们仅仅看到了冰山一角。
- 望远镜的发展必然要与学科互动、成为“永远迫切”发展的目标。

## 我国射电天文发展新的历史时期

国际上天文学发展的步伐是非常快的。投入很大，每十年平均总投入不下六七十亿美元、把各类天文望远镜的功能“**升级一代**”。可以说是“**大规模、高速度、巨投入**”的发展。

我国的投入要小得多。1997年，LAMOST立项，经费2.4亿，揭开了新的发展时期。仅射电就有FAST、嫦娥探月VLBI、65米、80米、南极亚毫米波，射电日像仪、21厘米阵等，一个接着一个

# 射电望远镜发展 需要各方面的人才

- 今天的射电望远镜集当今最先进的技术于一身，需要多方面的尖端技术。从业者不仅要有专长，而且还要善于最大限度地从国内甚至世界的“技术资源”中吸取；还要适时地发展新技术。
- 还要善于与“地方发展”互动，取得地方领导和人民大众的支持。
- 研究射电天文需要了解其他波段天文研究的知识。

- 一，射电望远镜的发展和现状；
- 二，脉冲星的发现和研究意义；
- 三，射电脉冲星的观测技术；
- 四，乌站25米射电望远镜的脉冲星观测研究；

- 了解历史和现状，才能站得高！不仅可以借鉴其经验，还有可能使用权证所需的观测设备。
- 以脉冲星为例，体会射电观测的成就和意义。

# 第一讲 射电望远镜的 发展和现状

北京大学 吴鑫基

# 射电望远镜的发展和现状

- 一、射电天文观测到巨大进步
- 二、射电天文学的萌生
- 三、世界大型单天线射电望远镜
- 四、综合孔径射电望远镜
- 五、甚长基线干涉仪系统的发展



# 一，射电天文观测的巨大进步

## 射电波段的观测的突破

- 最初射电观测分辨率比光学差5个数量级，不能成像；
- 肉眼（0.6厘米） 波长550纳米，分辨率 23角秒  
100米射电望远镜，5厘米波长，分辨率125角秒
- 目前 哈勃空间望远镜 0.1角秒  
射电望远镜  $\sim 0.00125$ 角秒  
并能成像。

# 射电天文学成为诺贝尔物理学奖的摇篮

10项天文诺贝尔物理学奖中

射电望远镜发明 1项

射电观测成果 4项

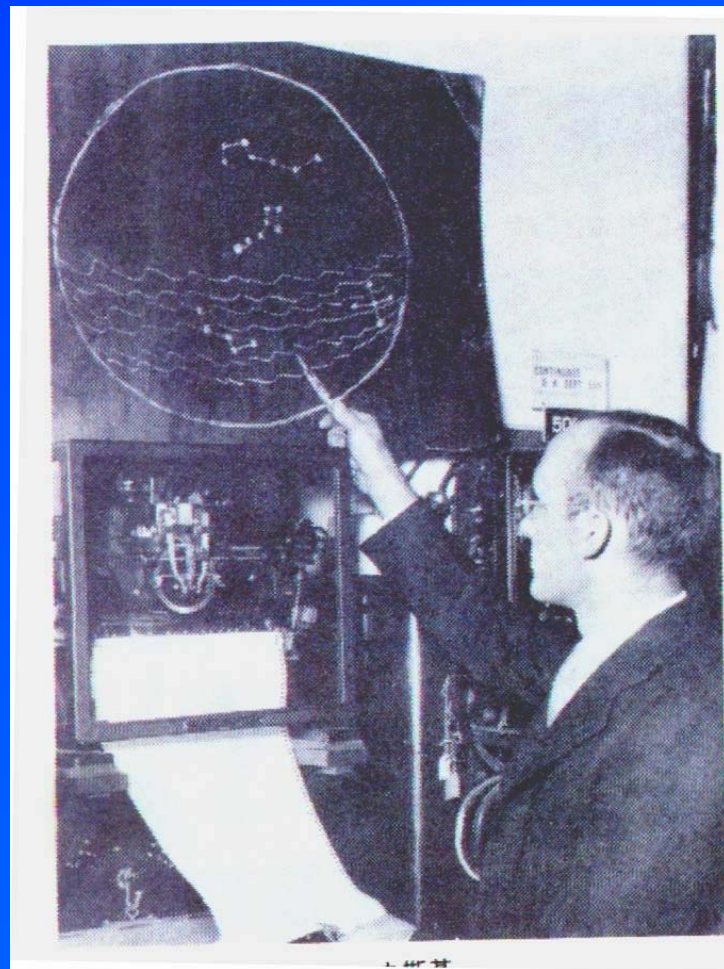
占50%

## 二、射电望远镜和射电天文学的萌生

- 在射电望远镜出现以前，天文学家对天体的射电辐射一无所知，甚至连天体有没有射电辐射也不知道。
- 伽利略发明光学天文望远镜以来，天文学家忙于利用光学望远镜观测天体，没有天文学家自觉地去寻找天体其他波段的辐射。

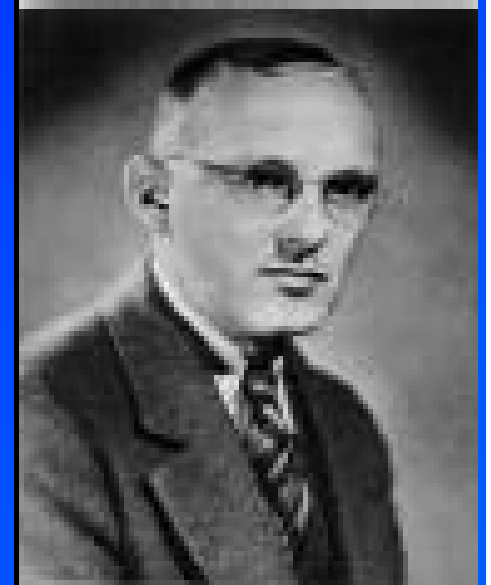
## 1, 射电天文的萌生

20世纪30年代初美国  
贝尔电话实验室的**央斯基**  
**基**发现银河系中心发射  
来的无线电波。



## 央斯基 K. G. Jansky

- 20世纪20年代末，贝尔电话实验室，央斯基负责研究短波无线电通讯中的静电干扰，意外地发现来自天体的无线电噪声。可贵之处在于
- 1932年，宣布接收到来自太阳的噪声；
- 1933年，指出来自银河系中心；
- 1935年，再次发表进一步的观测结果。

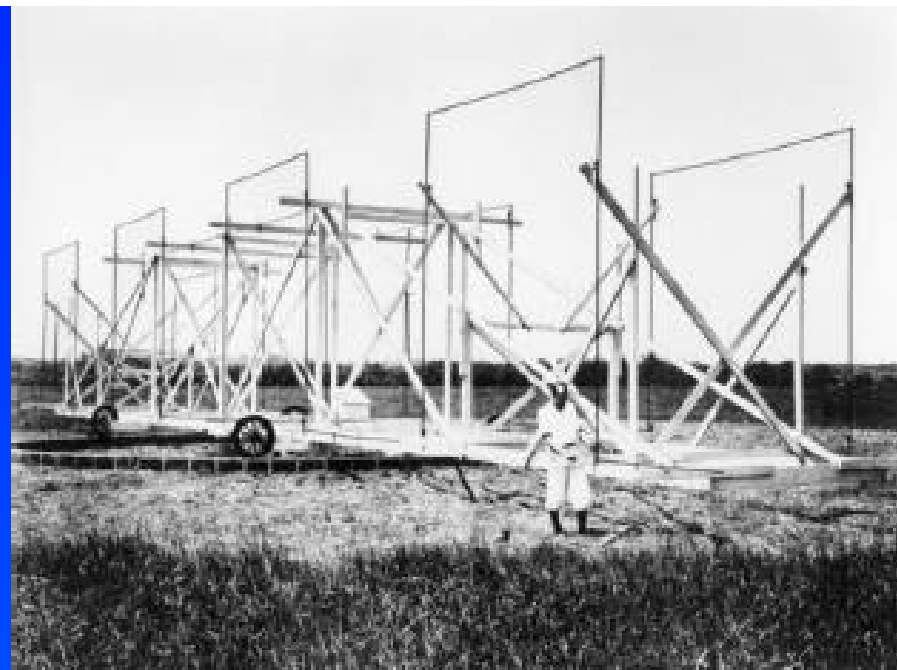


- 为了巡查天电干扰来自何方，天线必须具有方向性，能够灵活地转动。

- 1931年12月，央斯基设计

的天线长30.5米、高3.66米的天线阵，工作波长为14.6米。天线下面安上了四个轮子，20分钟可以绕中央的铅垂线旋转一周。

- 1932年1月发现一种十分微弱而又十分稳定的信号，来自银河系人马星座的方向。



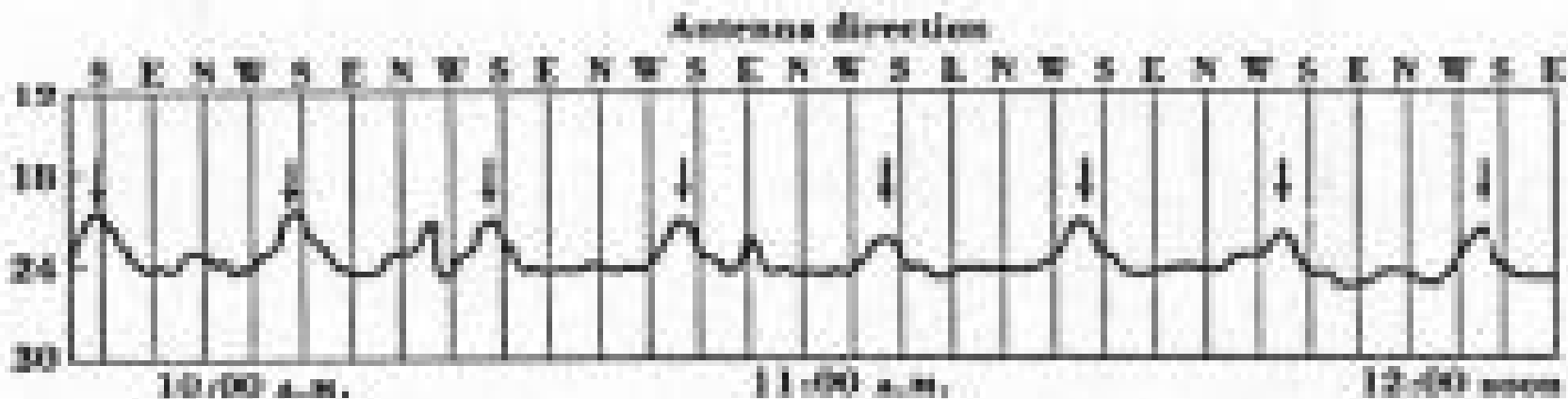


Fig. 16.11. A portion of one of Jansky's records from February, 1932. The changing direction of the peak indicates that the source cannot be on the earth.

发现一种十分微弱而又十分稳定，经过一年多的仔细观测和分析，确认是来自太阳系外某个确定的方向。天线指向银河系的某个部分，就会收到辐射，指向银河系中心处有最大响应。

# 雷伯 (Grote Reber)

- 无线电工程师
- 研制一台9.5米反射面射电望远镜
- 验证了央斯基的结果





- 得知央斯基发现宇宙射电辐射后，立即向贝尔实验室提出调去与央斯基一起研究射电天文学。没有成功。

- 决心用业余时间和自己的工资来实现梦寐以求的愿望。经过几年的努力，制成了世界上第一台射电望远镜。雷伯把它安装在自己家的后院里。



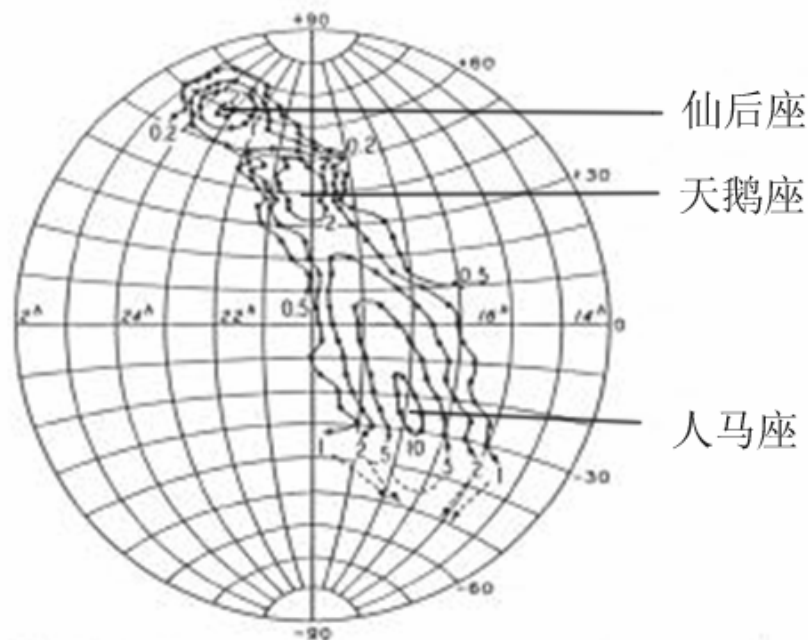
雷伯射电望远镜  
(放置在 NRAO)

## 观测结果

人类第一幅射电天图，  
给出银河系3个强射电源。

美国成为射电天文学的  
发源地。央斯基和雷伯是  
奠基人。

光学天文技术和射电技术差别太大，当时的天文学家基本上没有跟进。人民还没有仔细品尝这道美餐，第二次世界大战中断了射电天文的发展。



Grote Reber's map of the radio emission from the Milky Way.  
This was published by Reber in 1944. (Reprinted with permission from *The Astrophysical Journal*.)

## 2, 雷达技术促使射电观测技术发展

- 雷达对无线电信号非常灵敏，可以接收银河系、太阳的射电辐射及流星遗迹回波。雷达接收系统就是射电望远镜。
- 第二次世界大战中，雷达技术飞速发展，飞机载雷达要求小型化，雷达从米波到厘米波，为战后射电天文发展准备了绝好的条件（人员、设备和技术）。
- 英国和欧洲受德国威胁最大，雷达的发展更快。

- 二战中，英国雷达发现太阳射电爆发；
- 二战以后，由雷达改造的射电望远镜如雨后春笋般在世界各国出现。主要用于观测太阳。也有一些直径20~30米的抛物面望远镜。其性能已超越雷伯的望远镜。观测波段达到分米波和厘米波，空间分辨率提高了很多。
- 一些研制雷达的专家直接转向射电天文学的研究。射电天文学的研究蓬勃发展。

### 3, 我国的射电望远镜发展梗概

- 1958年开始。
- 契机是海南岛日环食，前苏联派观测团来观测，为迎接这次合作临时组队。之后，王绶琯先生受命实施发展射电天文的计划。
- 三件事：在北京举办为期一年的射电天文训练班；借苏联观测对一台射电望远镜，开始研制自己的射电望远镜；在沙河建立太阳射电观测站。

- 1958 ~ 1984 太阳射电

太阳射电望远镜，十余台；

- 1984 ~ 1993 宇宙射电

密云米波综合孔径；

上海和乌鲁木齐25米射电望远镜；

青海13.7米口径毫米波射电望远镜；

- 2006年之后掀高潮

北京50米、昆明40米、新疆21厘米天线阵和中国甚长基线干涉仪相继建成。贵州500米、上海65米、新疆80米、射电日像仪在建或筹建中)

## 4, 射电望远镜的两个重要公式

射电望远镜近80年的发展, 均围绕它们进行:

(1) 能接收到来自天体的微弱辐射

灵敏度的定义: 最小可测流量密度

$$S_{\min} \propto \frac{T_{\text{sys}}}{A\sqrt{\tau\Delta f}}$$

A为天线面积,  $\Delta f$ 是频宽,  $t$ 是观测时间

$T_{\text{sys}}$  接收系统温度, 流量密度单位:

(2) 能看清天体细节，有很高的空间分辨率

$$\theta (\text{弧度}) = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

- $\theta$ : 分辨角;  $\lambda$  波长;
- $D$ : 单天线望远镜的口径;  
 $D$ : 多天线望远镜的最长基线。

分辨角越小，分辨率越高。

- 光学波段的波长远比射电波段的短，光学望远镜的分辨率远比射电望远镜高。



## 5, 射电望远镜发展的经历

围绕这两个公式，不断提高望远镜的灵敏度和分辨率：

- 从小到大，从几米口径到100米，到300米；
- 从米波到厘米波，到毫米波和亚毫米波；
- 从单天线到多天线系统，基线从千米到5千米，到几十千米、几百千米、几千千米，甚至几万千米。
- 从地面到空间。

## 三，大型单天线射电望远镜

### 国际大型射电望远镜

- 英国Jodrell Bank 76米射电望远镜（1958）
- 澳大利亚Parkes 64米射电望远镜（1961）
- 美国Arecibo 305米射电望远镜（1963）
- 德国Bonn 100米射电望远镜（1972）
- 日本45米毫米波射电望远镜（1982）
- 美国15米亚毫米波射电望远镜（1987）
- 美国Green Bank 100 × 110射电望远镜（2000）

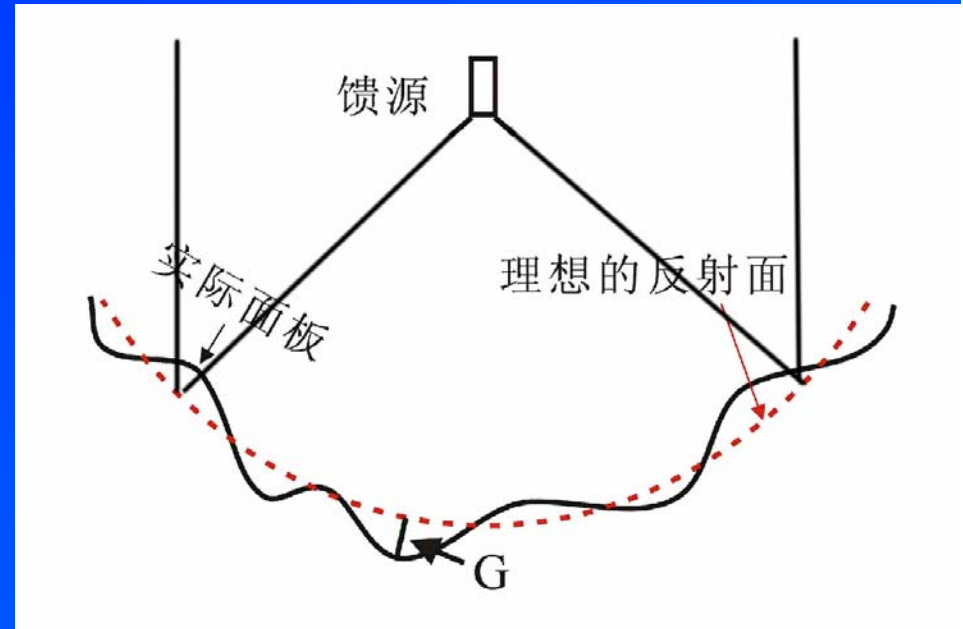
# 我国大型单天线射电望远镜

- 上海25米射电望远镜;
- 乌鲁木齐25米射电望远镜;
- 青海13.7米口径毫米波射电望远镜的建造。
- 北京密云50米射电望远镜
- 昆明40米射电望远镜
- 上海65米射电望远镜（建造中）
- 新疆80米射电望远镜（筹建中）
- 贵州500米射电望远镜（FAST）（建造中）

# 1, 建造大天线的困难:

## (1), 天线表面要求高精度

- 望远镜天线表面如果和理想抛物面有差别, 来自与抛物面主轴平行方向上的天体射电波不能会聚到焦点上。



- 只有当抛物面天线的表面精度达到 $1/20$ 波长。对短厘米波和毫米波, 精度要求更难达到。

## (2)，指向和跟踪精度要求高

对大型天线来说，分辨率比较高，特别是对短厘米波和毫米波，分辨率更高。如100米口径，1厘米波长，分辨角仅为25角秒。

要使望远镜的方向主瓣准确对准射电源要求指向精度很高。要跟踪射电源也比较难。这成为望远镜很重要的技术指标。

### (3)，天线变形造成影响

- 天线的自重，不同位置不同的影响
- 风力大小
- 温度变化
- 对厘米波段、毫米波段天线，影响更大，更难。

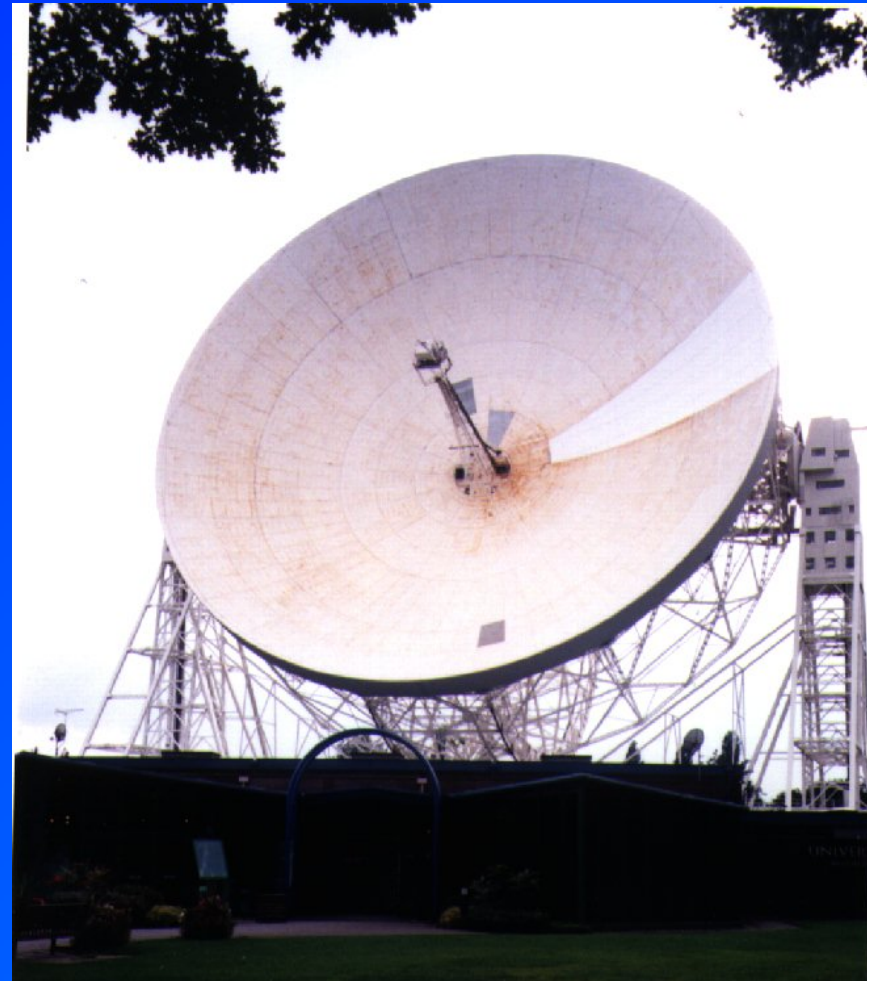
## 2, 英国是先锋, 是国际中心

- 二战后, 英国洛弗尔教授率先提出和领导研制了76米口径的大型射电望远镜, 主导了世界射电天文学从小型射电望远镜到大型射电望远镜过渡的一场技术革命。
- 至今, 1957年建成的76米口径射电望远镜仍然是七大单天线射电望远镜之一, 成为世界天文学发展史上的一个里程碑。

# 英国Jodrell Bank 76米射电望远镜

## 21厘米氢线迫使中途改变设计

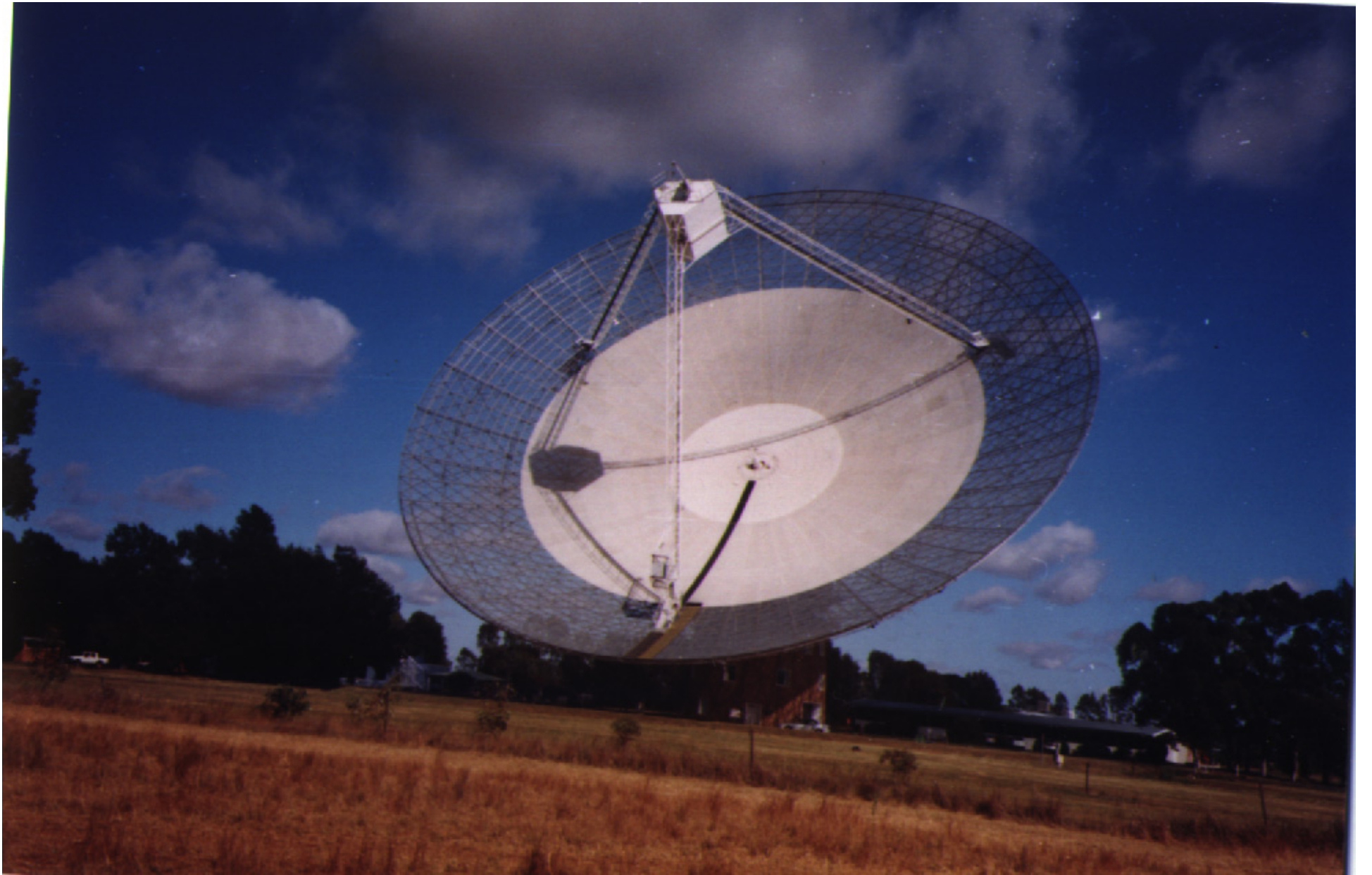
- 1951年，首次观测到银河21厘米中性氢谱线。
- 76米原设计最短1米，不能观测21厘米氢线！改变设计。改为21厘米，加工精度需要达到1厘米。改用金属面板。
- 1987年，改名为洛弗尔射电望远镜。





### 3, 南半球最大的帕克斯射电望远镜

- 望远镜于1958年动工，仅用2年半的时间就顺利完成，于1961年开始投入观测。
- 澳大利亚地广人稀。但却是天文学研究的大国，射电天文学研究更是世界领先。
- 这台南半球最大的射电望远镜管了半边天，对高南纬的射电源的观测成为它的专利。
- 接收系统不断改进，使灵敏度不断提高。



澳大利亚Parkes64米射电望远镜

# 多波束接收系统

## — 提高灵敏度和加快观测速度

- 多波束接收系统由13个馈源和自己的低温放大器和处理系统，技术复杂，相当庞大。
- 一次能看到的天区范围大了13倍。加快了巡查速度。或者增加对观测时间。
- 多波束接收系统进行中性氢的第一次巡天，将已有的中性氢区的样本增加百倍以上。
- 继而这个系统又用于脉冲星巡天，发现脉冲星的数量成倍的增加。

澳大利亚  
64米射电  
望远镜13  
波束馈源

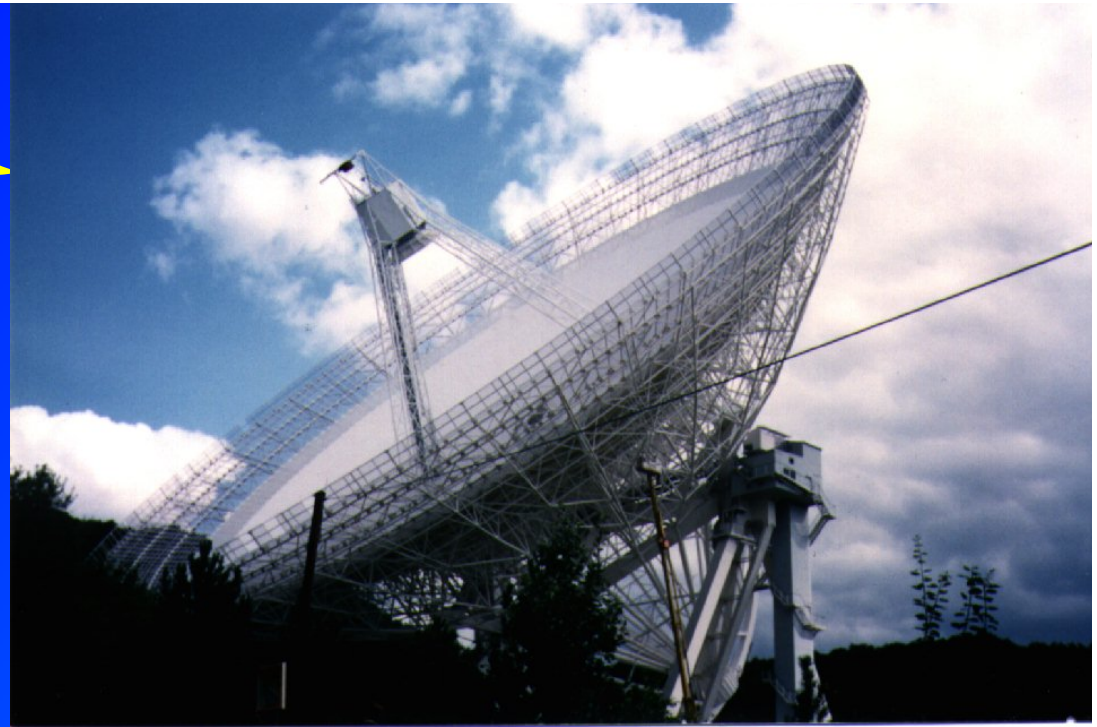


## 4, 德国口径100米射电望远镜

- 20世纪60年代末提出建造口径100米可跟踪射电望远镜, 而且要在毫米波观测。

- 最大难点是: 天线表面误差不能超过波长的 $1/20$ 。

天线运转过程中, 因天线自重量、风速、温度变形导致变形也不能超出 $1/20$ 波长。。

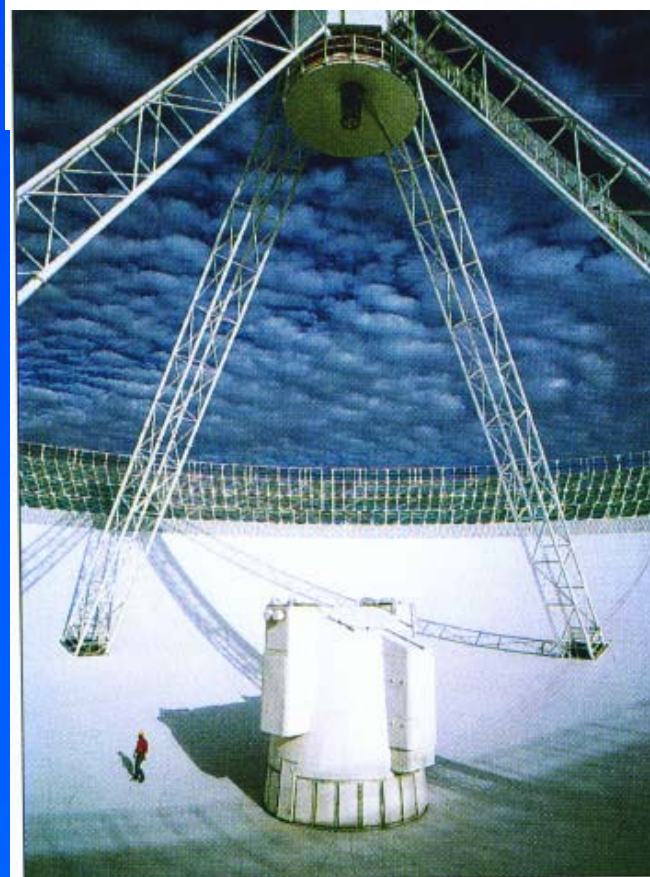
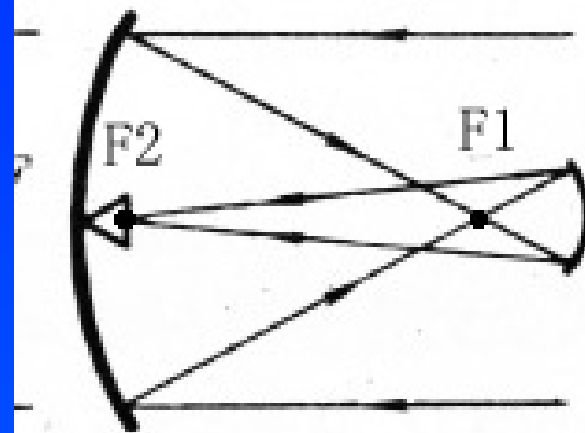


## 最大亮点：主动反射面系统

- 1968年开始建造，1972年8月1日投入观测。
- 100米口径天线表面是由2372块长3米、宽1.2米的金属板排成17个同心圆环而构成的。
- 首次把主动反射面技术引入射电望远镜的建造。在天线表面的每块金属板下面安装一种特殊的可调整的支撑结构，先精确地测出天线表面变形的情况，然后按照测得的数据，用电子方法控制机械装置调整面板，
- 光学望远镜在20世纪80年代已应用这一技术。

## 第二反射面和接收机

- 观测频带很宽：90厘米 ~ 3毫米；分成22个波段来配备接收机。
- 在主反射面焦点后面增加口径6.5米的凹椭球面的反射面，有两个焦点F1和F2，分别放两个馈源屋。（格雷果里在1663年发明）



## 5, 美国格林班克100米口径射电望远镜

- 1988年, 91.5米射电望远镜突然坍塌。
- 决心建造世界上最

大的可跟踪射电望远镜。标新立异设计成歪脖子。天线表面上和正上方空无一物, 有效接收面积大, 避免支撑架造成的反射和衍射。

- 在口径208米的对称旋转抛物面上, 截取下100米×110米的一部分。





## 高度自动化的调控系统

- 激光测距系统，测出天线表面形变，发出指令通过马达把主反射面和第二反射面调整好。测量精度非常高，也非常快。
- 天线由2004块金属板拼成，每块金属板四个角上安装上由计算机控制的小型马达驱动器，保证反射面不偏离理想抛物面。



## 6, 阿雷西博雷达射电望远镜

- 口径为305米的阿雷西博射电望远镜，并不是为了天文学研究的需要，而是为了研究地球电离层。后来天文学研究喧宾夺主。成为世界上最灵敏的射电望远镜和雷达。



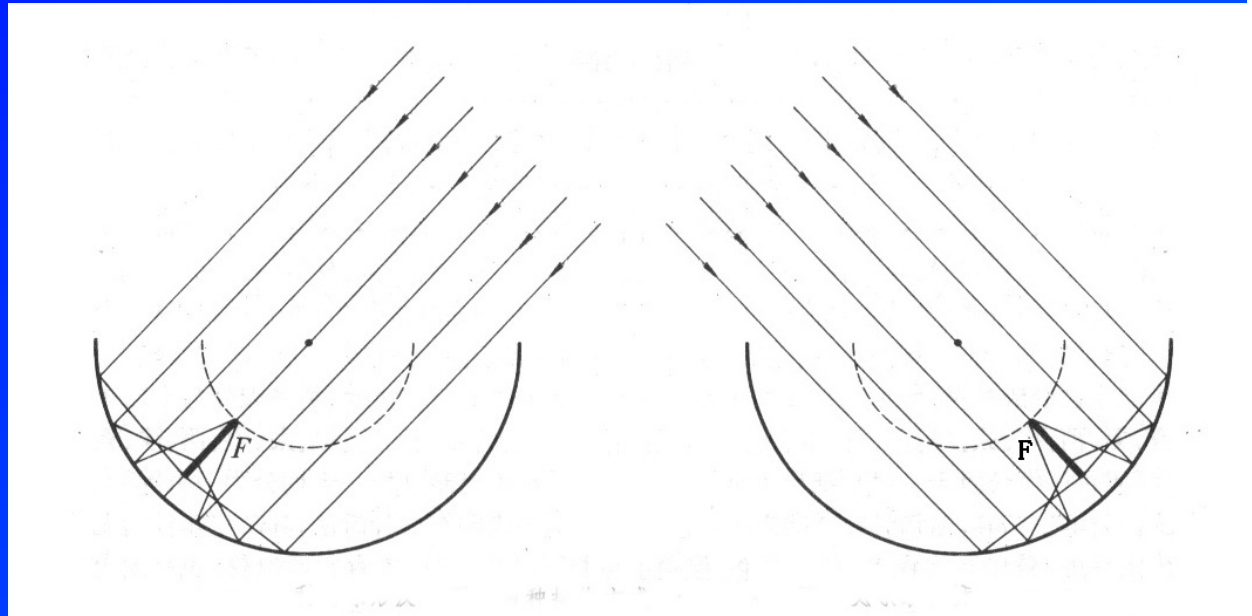
## 球面天线的特点

1, 没有主光轴, 便于观测不同方向的射电源;

2, 聚焦在一条线上。对馈源要求复杂;

3, 用球面的不同部分观测不同的天区馈源要相应的移动。观测是使用面积的直径为200米。

如果是抛物面, 300米口径, 5厘米波长, 方向图主瓣0.7角分, 天线不动, 只能观测非常小的天区。





美国Arecibo 305米射电望远镜馈源系统很重约900吨. 也很复杂。观测时要迅速移动到相应的地方。

## 6, 毫米波射电望远镜

- 世界上口径最大的日本野边山的45米，1982年建成。工作波长在1毫米到1厘米范围。每块面板可以由遥控方法来调整。在主反射面的焦点处放置一个4米直径的子反射面。调整子反射面的位置可以改善因主反射面变形造成的影响。



## 7, 亚毫米波射电望远镜

最大口径（15米）亚毫米波射电望远镜1987年完成。放置在夏威夷。建成后改以Maxwell的名字命名，简称JCMT。

抛物面天线由276块可以调整的面板组成。为防止温度的影响，望远镜放置天文圆顶中，天线前面还有加上一片保护层。接收机由液态氮冷却到4k，甚至更低。



## 8, 空间毫米波和亚毫米波射电望远镜

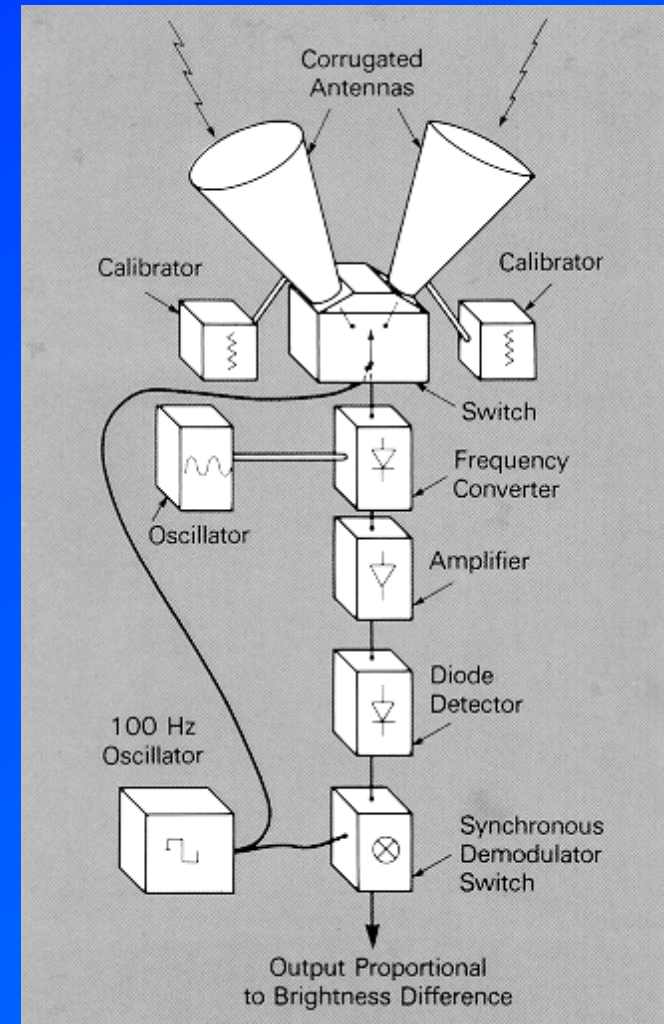
---

### 宇宙微波背景辐射黑体谱的确认

- 3K黑体辐射谱强度峰值在波长为0.2厘米附近。需要在70厘米到亚毫米波频率范围上进行测量。
- COBE携带的较差微波辐射计 (DMR) 和远红外频谱仪 (FIRAS) 的波段覆盖是9.6毫米 ~ 0.1毫米;
- WMAP携带从13.6 ~ 3.3mm的接收设备

## COBE 较差微波辐射计

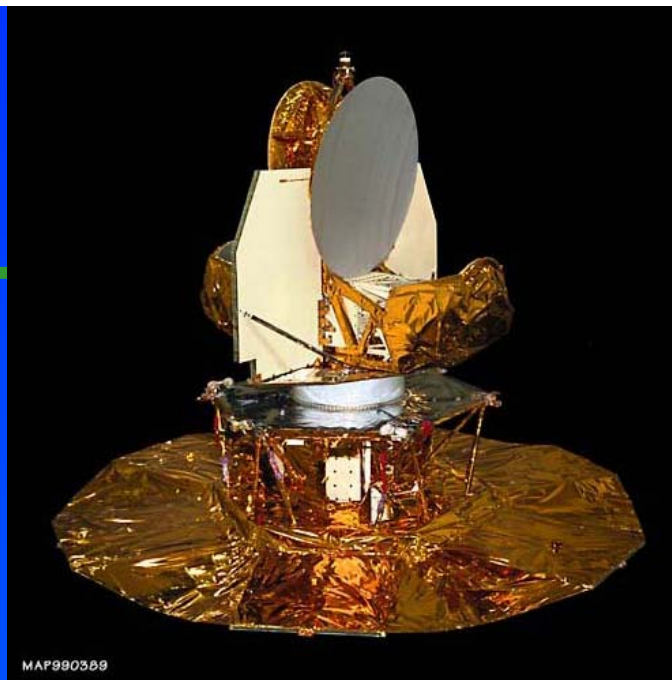
- 3套接收机，分别为3.3，5.7和9.6毫米。
- 接收机输入端，交替地与两个喇叭天线相连接，它们指向天空不同的部分，检测出温度差。
- 两个天线分别的COBE飞行器自转轴两边各30度。天线的方向束为7度。



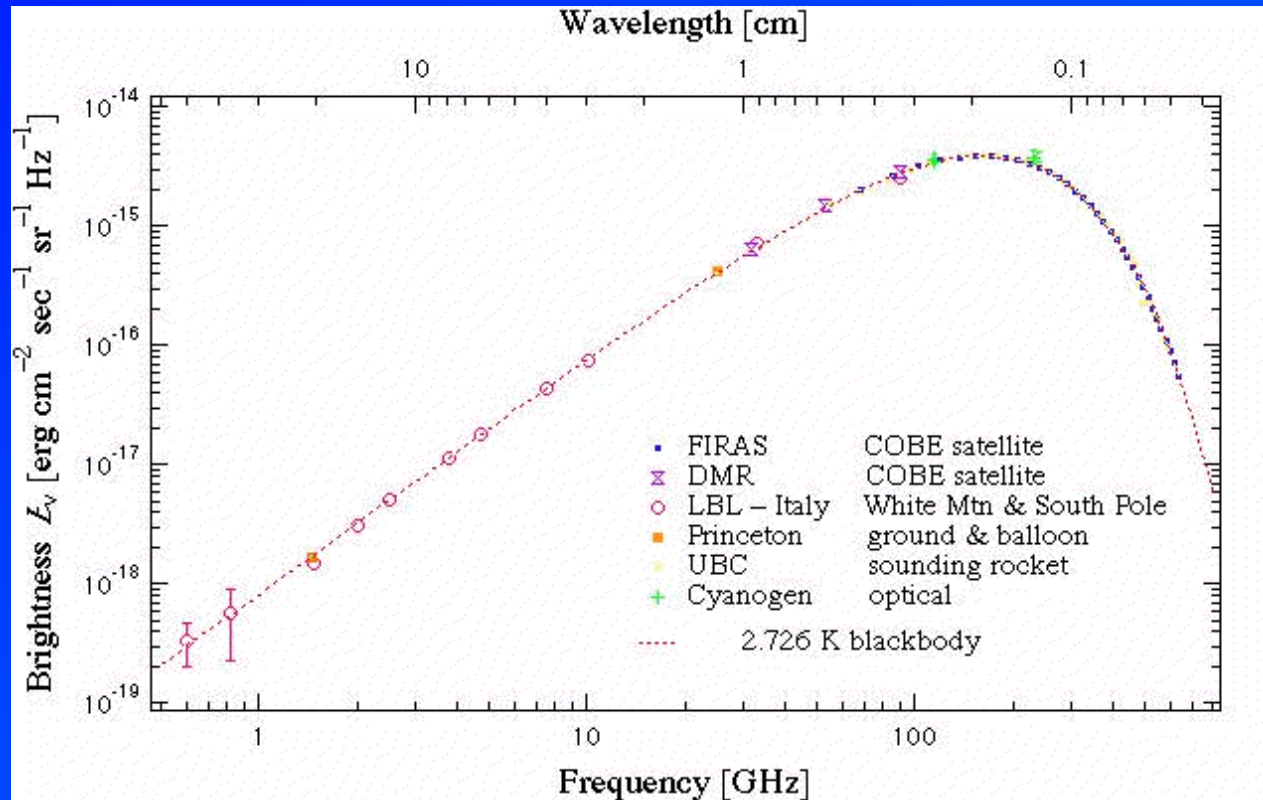


## WMAP的观测系统

- 一对背靠背的天线，指向分开140度的天区口径 $1.4 \times 1.6$ 米；
- 致冷式高灵敏放大器，有5个分离的频段，从22到 90 GHz (13.6 ~ 3.3mm)。
- 整个观测台处在可展开的遮护板的阴影之中，这遮护板也提供太阳能；
- 分辨率：至少 $0.3^\circ$  (全天的观测)



# 宇宙微波背景辐射频谱



马瑟公布FIRAS观测结果：观测值与黑体辐射谱的符合很好，拟合温度2.726k，精度达到万分之三。

## 9, 我国大型单天线射电望远镜

- 上海25米射电望远镜 (1986) ;
- 乌鲁木齐25米射电望远镜 (1993) ;
- 青海13.7米口径毫米波射电望远镜 (1996) 。
- 北京密云50米射电望远镜 (2006)
- 昆明40米射电望远镜 (2006)
- 上海65米射电望远镜 (建造中)
- 新疆80米射电望远镜 (筹建中)
- 贵州500米射电望远镜 (FAST) (建造中)

## (1)，上海25米射电望远镜

- 25米射电望远镜于1986年建成，1987年投入使用。第一台大一些的射电望远镜。
- 进行甚长基线干涉观测的，很快就在国际VLBI观测网中占有一席之地。1994年成为欧洲网正式成员。欧洲网由于上海25米口径射电望远镜的加入，使基线长了3倍多，提高分辨率3倍多。

## 叶叔华院士站立15分钟的故事

- 在70年代末，叶叔华为了建造25米口径射电望远镜的事去电子工业部找主管处长，处长说声不行以后就不再理她。
- 她在处长办公桌不远的地方足足地站了15分钟，感动了处长，帮她联系去见了部长，并成功地获得支持。上海25米射电望远镜顺利开建。她继而促成了建造乌鲁木齐25米射电望远镜。

上海天文  
台25米射  
电望远镜  
(1987)



专门为甚长基线干涉观测研制的，国际联网观测的重要成员。

# 出色的VLBI观测和实验室

- VLBI观测
  1. 喷流与吸积物理
  2. 活动星系核的辐射
  3. 天文脉泽与分子谱线
  4. VLBI天体测量的应用
- VLBI技术发展和我国VLBI网中心
  1. 硬盘记录系统
  2. 实时VLBI
  3. VLBI相关处理机的研制

## (2), 乌鲁木齐25米射电望远镜

- 1993年11月建成。
- 南山站处在欧亚大陆连接点, 使欧洲VLBI网观测精度提高了4-5倍。
- 单天线观测以脉冲星和星际分子为主, 其中以脉冲星的研究最为出色, 在国际上相当大小望远镜中的脉冲星观测也是最出色的,
- 已具备观测甲醛、羟基和氨分子的能力。





# 乌站25米望远镜接收机全部更新 性能提高很多

## 25m射电望远镜各波段接收机及系统性能表

波段 (cm)	中心频率 (MHz)	本振频率 (MHz)	带宽 (MHz)	极化	中频幅度 (dBm)	系统温度 (k)	注入噪声 (k)	主波束 HPBW	DPFU (k/Jy)	天线效率 %	状态
92	327	无	20	LPC	-38	145	44				测试
49	612	无	120	LPC	-38	130	40				测试
30	1000	700	400	LPC	-38	130	40		0.06		使用
<b>18</b>	1560	1300	320	LPC RPC	-38 -38	20.6 22	8.8 3.7	28.4'	0.088	50	使用
<b>6</b>	4915	4620	370	LPC RPC	-56 -56	21.5 21.5	1.7 1.7	9.4'	0.093	64	使用
<b>13</b>	2235	2020	370	RCP	-42	48	40	20.1'	0.096	55	使用
<b>3.6</b>	8400	8080	400	RCP	-40	55	21	6.0'	0.093	54	使用
1.3	23050	22000	1900	LCP	-38	190	14		0.057	32	研制

参加国际、国内VLBI联测重要的波段



6cm 波段接收机



18cm 波段接收机

## 乌站25米脉冲星观测的能力的提升

1996年：首次观测、单通道观测，观测能力：8颗

1999年：模拟多通道消色散系统，观测能力：74颗

2002年：制冷双极化18cm接收机改造，

观测能力：280颗

2009年：数字消色散系统终端

~ 300颗，包括20颗毫秒脉冲星

观测能力不断提高：不断改进接收机；有坚持不懈

的课题组；有配套的技术人员。

### (3), 德令哈毫米波 13.7米射电望远镜

- 1978年筹建, 1990年基本建成。1.3厘米波段的接收机, 开始观测氨和水分子的谱线。
- 1996年, 研制完成3毫米波段制冷接收机, 正式开始毫米波的观测。
- 近些年, 观测能力提升很快。



## 亚毫米波射电望远镜和超导接收机

- 2001年紫金山天文台研制完成移动式亚毫米波望远镜。观测波长

0.6毫米。天线口径30厘米，采用超导接收机前端，致冷系统达到4K。

- 德国退役亚毫米波射电望远镜（口径3米）赠送我国，确定放置在羊八井。观测站在筹建中。





## 望远镜性能提升状况

3mm波段SIS超导接收机，锁相本振  
控制系统更新

面板精度提高达到0.1mm，波束70”，指向精度优于10”；安装在高透明天线罩内

多谱线中频和后端系统

- 三路均为1024通道的AOS谱线接收
- 连续谱: BW 800MHz

## (4), 3米口径亚毫米波射电望远镜

- 德国退役亚毫米波射电望远镜（口径3米）赠送我国。
- 由国台负责，确定放置在西藏羊八井。观测站在筹建中。

## (5), 北京密云50米 射电望远镜

- 2006年4月底完成。
- 原来计划主要观测脉冲星

后来改为探月专用设备。北京密云观测站。天线高56米，总重680吨。表面为抛物面形状，分为七环，中心为金属实板面，半径为30米；外环为内径6.5cm的丝网面，径宽20米。

- 有六个频段。327MHz ~ 12000MHz。



## (6)，昆明40米射电望远镜

- “探月”工程催生。仅用了2年的时间建成。
- 接收机仅有13厘米和3.6厘米两个波段，这是国际上常用的甚长基线干涉观测波段。
- 抛物面天线表面内径26米为板状面板，外圈27米至40米为网状结构。内圈的27米可在短厘米波观测。





## (7) 正在建造的上海65米口径射电望远镜

- 主动反射面
- 观测波段可达7毫米
- 经费 2.1亿

2009年举行奠基



## (8) 新疆80米 (筹建中)



- 大于英国76米和澳64米
- 经费估计: 1.6亿
- 自治区支持5000万
- 主要观测波段:  
18厘米 ~ 1.36厘米
- 新台址: 奇台县境内

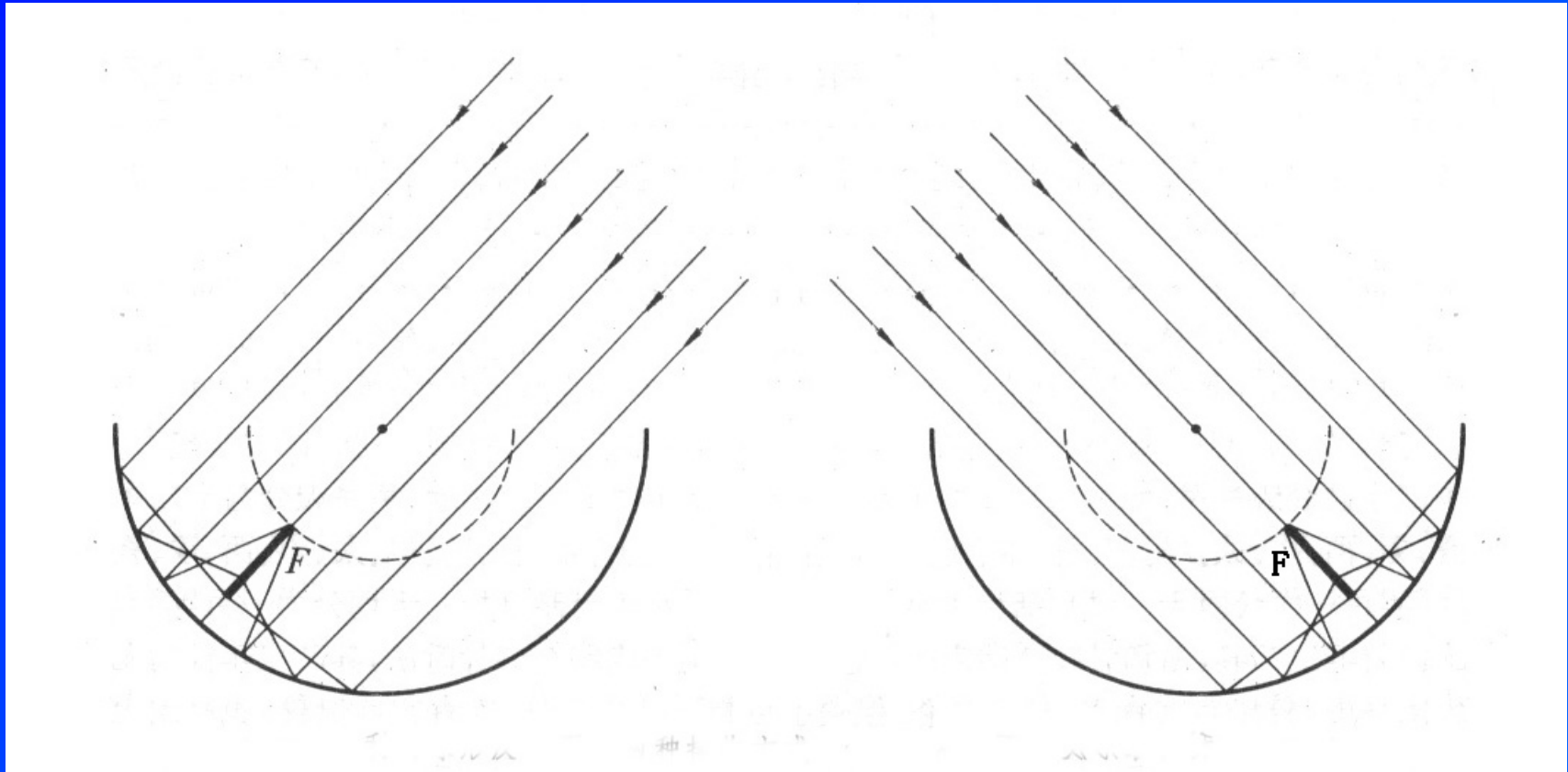
## (9)，在建造中的500米口径射电望远镜 (FAST)

### 21世纪的国际射电望远镜和中国的方案

1993年在日本都召开的国际无线电科学联合大会上，包括中国在内的十个国家联合倡议，建造接收面积无1平方公里的新一代大型射电望远镜，简称SKA。又被称为“21世纪的国际射电望远镜”。这是所有射电天文学家梦寐以求的。

- 我国发起国之一，提出了一个很受欢迎的建造方案，成为4个候选方案之一：**在贵州山区建造30个类似阿雷西博那样的大型射电望远镜，组成一个覆盖几十千米范围的射电望远镜阵列。**
- 要建几十个类似阿雷西博一样的射电望远镜，贵州喀斯特峰丛洼地很多，仅平塘县就有合适的洼地170多个，峰距在200米至600米。其中，峰距500米以上的有15个。

## 用球面的不同部分观测不同的天区 馈源要相应的移动



如果是抛物面，300米口径，5厘米波长，方向图主瓣  
0.7角分，天线不动，只能观测非常小的天区。

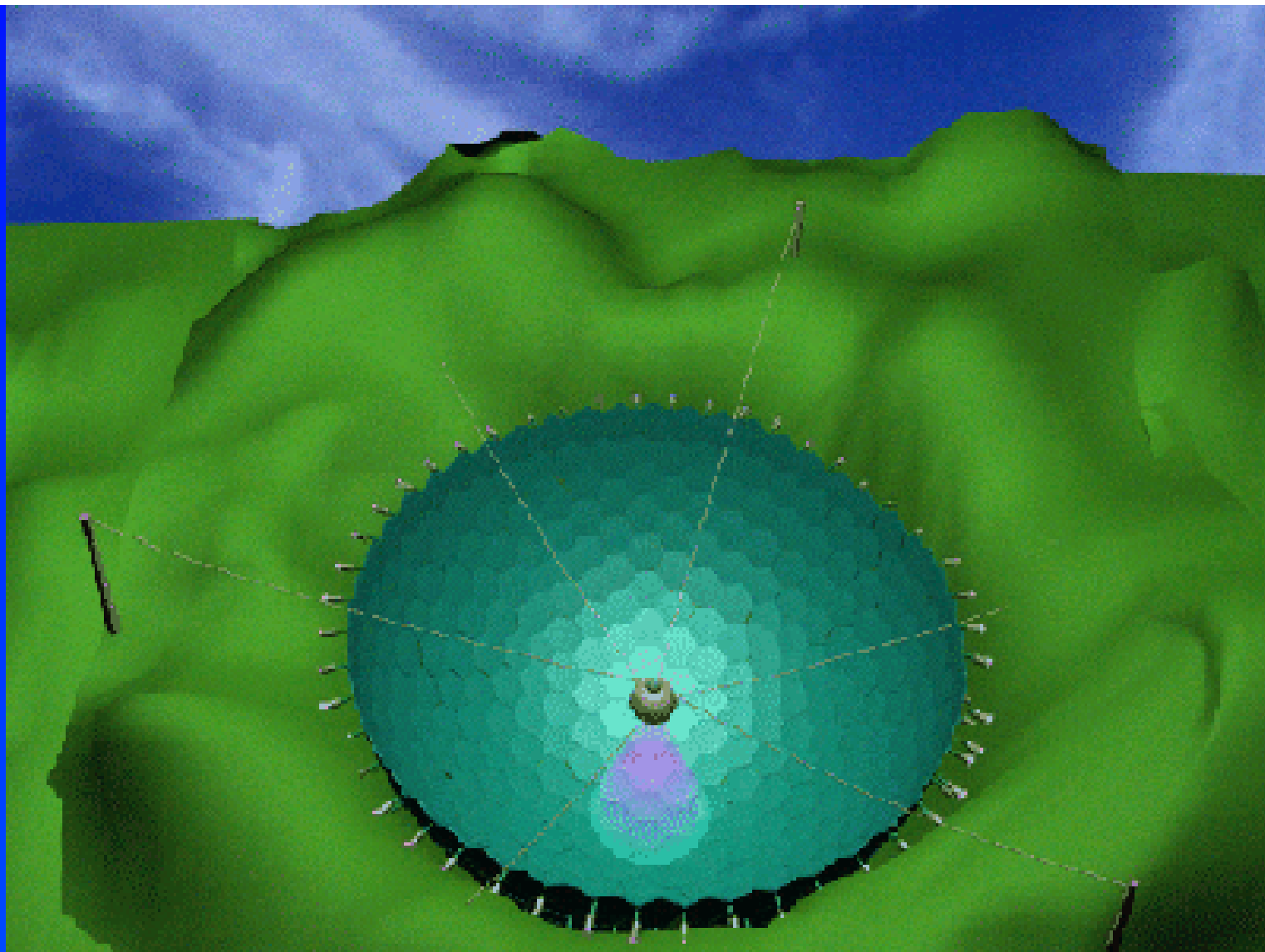
## 500米口径射电望远镜（FAST）

- 1997年7月，提出要独立建造一面世界最大单口径球面望远镜的计划。
- “500口径球面射电望远镜预研”成为中国科学院重点支持的创新项目简称FAST。
- 1963年建成美国阿雷西博射电望远镜，一直是世界最大。FAST 计划就是要超越阿雷西博。
- 阿雷西博望远镜有局限性。固定天线天区范围不够大。分辨率也比不上综合孔径和甚长基线干涉仪。

- FAST的天区覆盖为70%；阿雷西博射电望远镜33%；德国100米为75%；美国110×100为80%；澳大利亚64米射电望远镜为90%。
- FAST的灵敏度，比口径为100米射电望远镜可以提高一个数量级，比阿雷西博望远镜高一倍。
- FAST有宽的频率覆盖，可进行0.13–5GHz范围内的连续谱和射电谱线观测。

贵州

世界最大口径射电望远镜



500米口径射电望远镜



## 贵州政府和人民坚决支持

- 无线电环境绝对要好。贵州无线电管理局已经明确，以大窝凼为中心，半径5公里范围内严禁设置任何无线发射设备。
- 十三年以来，贵州省三任省委书记、省长，贵州省各相关厅局和各级地方政府对FAST项目给予了高度关注和全力支持，始终如一。
- 平塘县的乡亲们热烈欢迎。



贵州乡民欢迎建造500米射电望远镜

## FAST的技术路线和优势

- 采用主动反射面技术使部分天线表面变为抛物面，相当于有一系列的不同指向的300米口径抛物面天线，从而只需在抛物面的焦点处放置馈源和接收机前端，因此平台就小得多、轻得多了。当然，也需要移动平台以适应观测不同方向的射电源的需要。

## 灵敏度大提高

- FAST: 500口径, 观测时实际使用口径为300米;
- 阿雷西博: 305米口径, 观测时实际使用口径为200米;
- 观测灵敏度比阿雷西博的观测高出一倍多。  
比口径为100米射电望远镜高一个数量级,

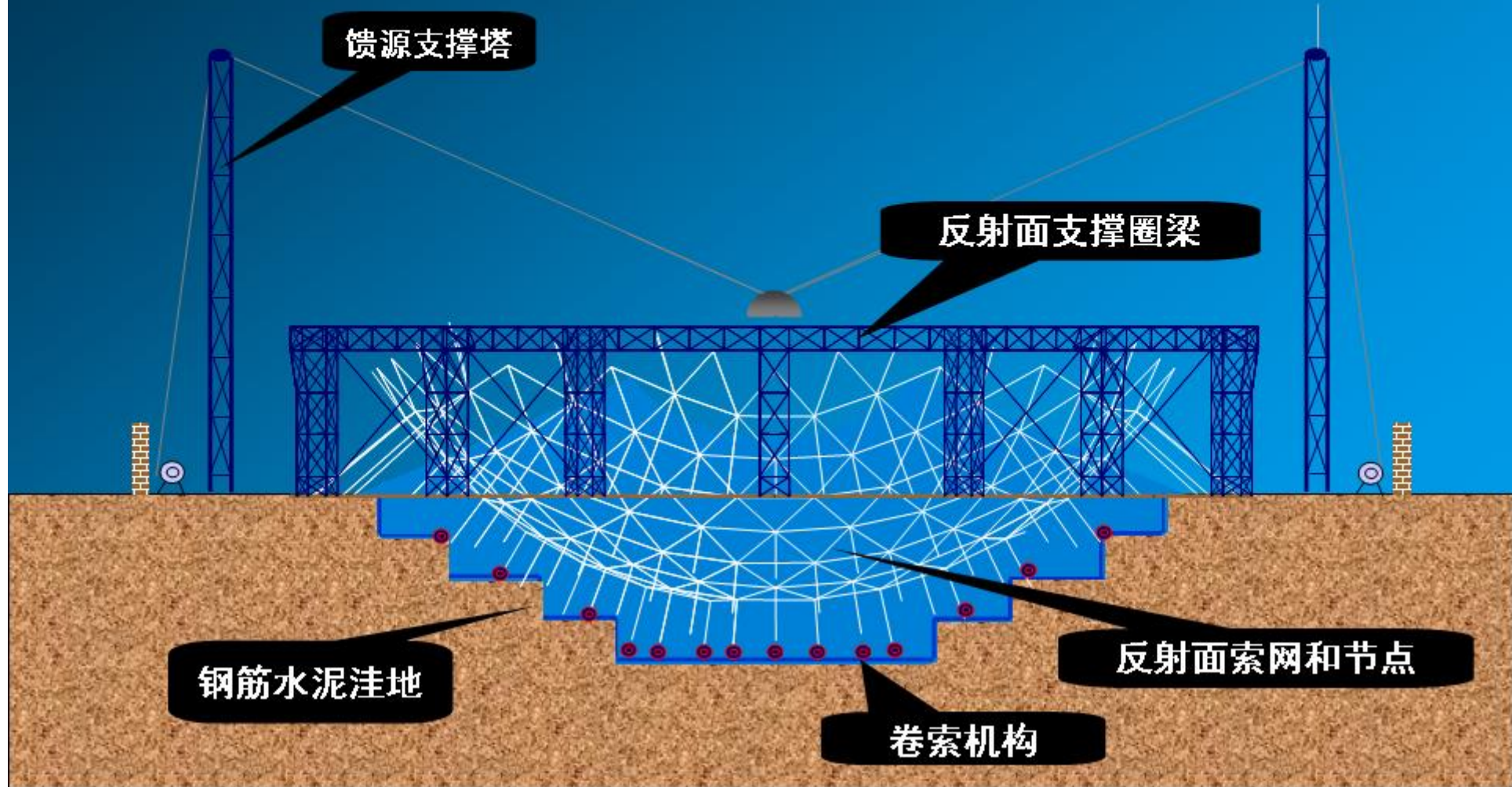
## 关键技术实验和FAST模型

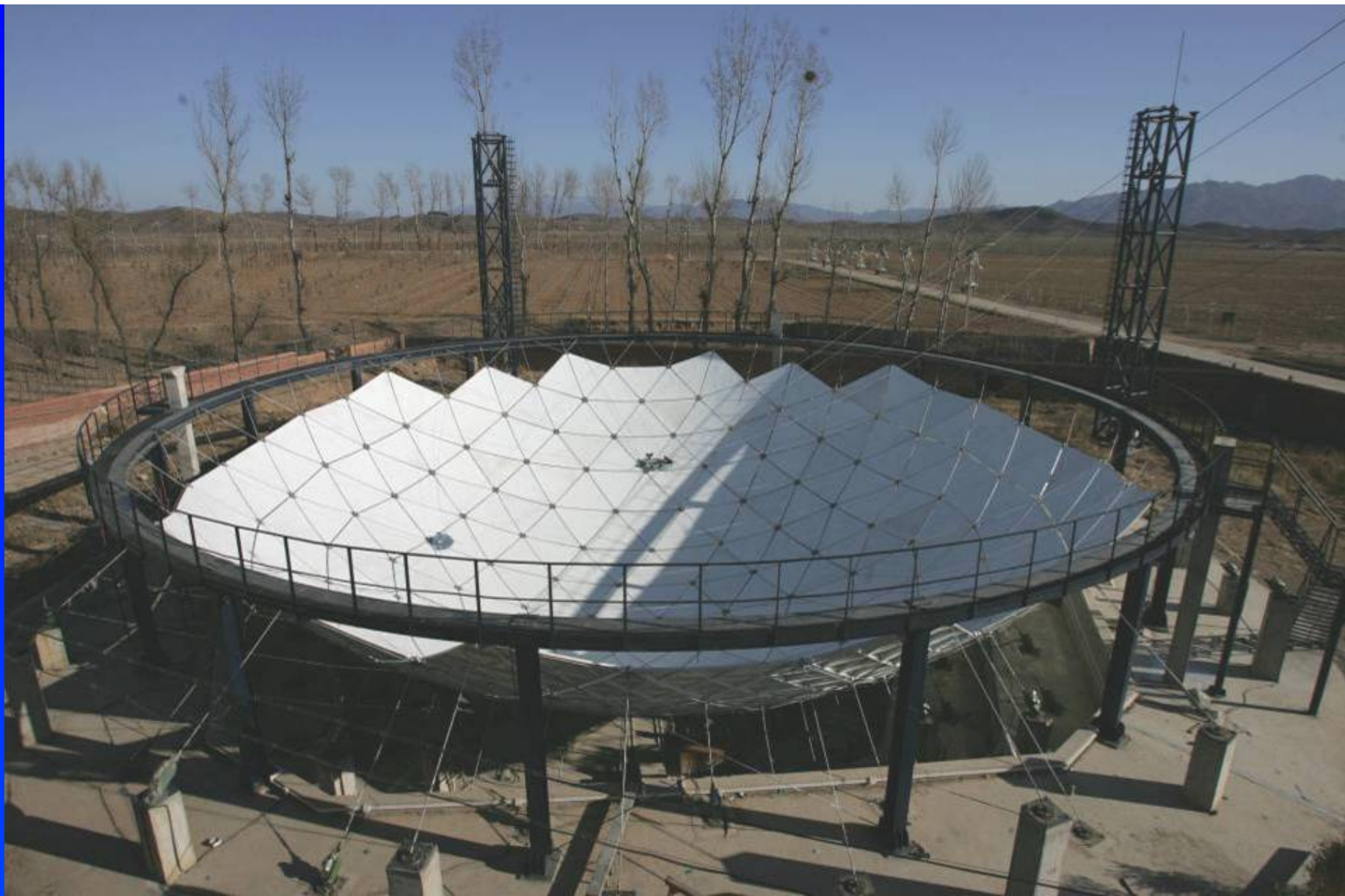
- FAST的模型口径50米。把主动反射面和馈源支撑和运动的研究成果体现出来，因此是一台关键技术实验的射电望远镜。

2005年建造完成。有四根吊塔；反射面支撑梁；钢筋水泥地；反射面索网；卷索机构。

- 馈源平台实验的现场照片。
- 成功地观测到中性氢谱线。

# FAST 密云50米模型建造过程





FAST50米模型：这台望远镜模型配备接收机以后，成功地观测到中性氢谱线。

# 馈源实验：西电两级控制联调实验





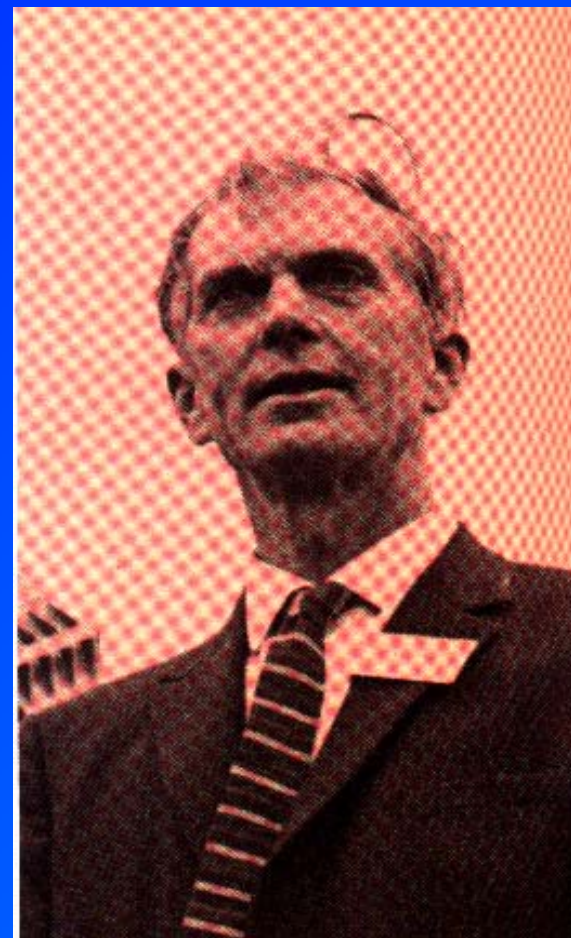
## 十年努力，终成国家科学 大工程项目

- 历经10年的研究，完成了主动反射面、馈源索支撑等关键技术的可行性研究，各项关键技术均取得突破，已无技术风险，具备参与国家重大科学工程遴选立项的条件。
- FAST成为“十一五”十二个大科学工程之一，获得6亿多人民币的经费支持。
- 我国射电天文终于能有一样“世界第一的射电天文望远镜了”。

## 四，综合孔径射电望远镜

### 1，赖尔的故事

- 1918年生于英格兰，幼年就喜爱天文，中学时是业余无线电爱好者。
- 1939年牛津大学物系毕业后就到剑桥大学卡文迪什实验室从事雷达天线的研制。
- 二战时，应征入伍。曾从事有关雷达系统。战后，回到卡文迪什实验室，从事射电天文研究。



## 2, 努力实现分辨率超过光学望远镜的梦想

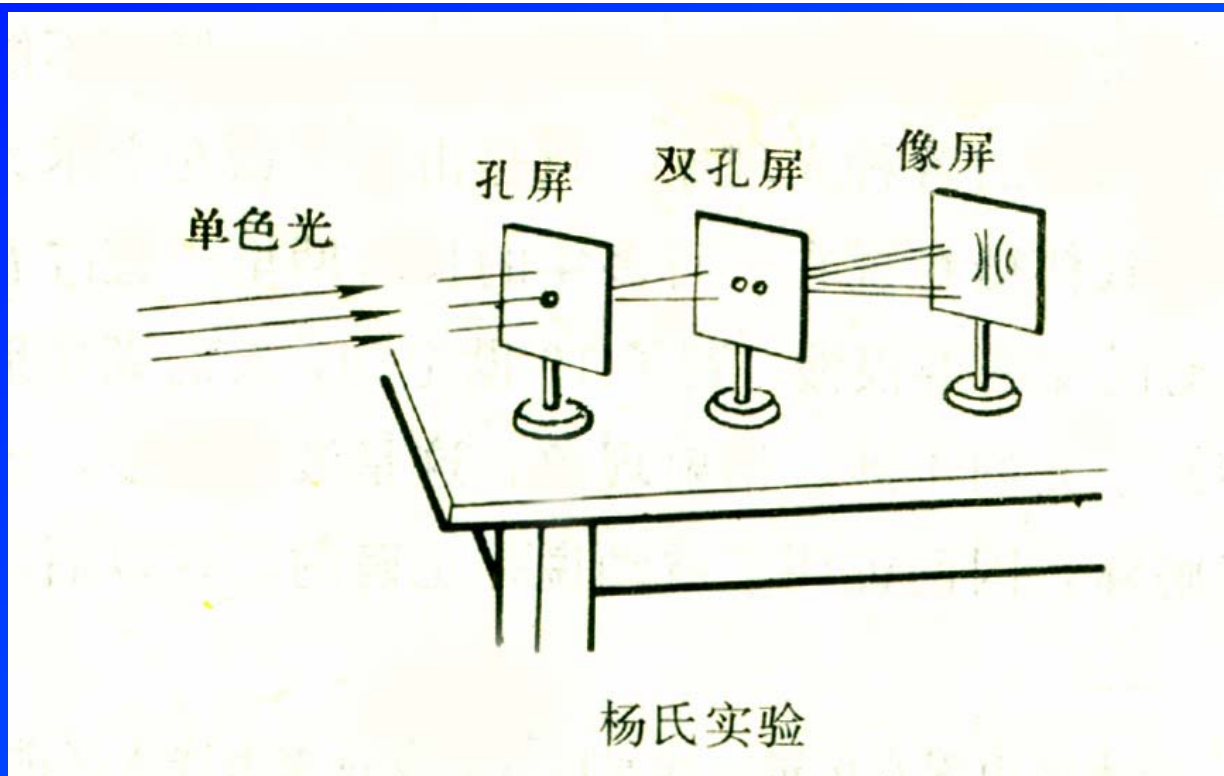
- 波长越短，分辨率越高。射电厘米波段的波长比可见光要长10万倍，相同口径时，分辨率要差10万倍。
- 射电望远镜无法像光学望远镜那样获得天体的照片，只能用一支粗笔来画等强度图。
- 建造大型天线提高分辨率的办法遇到不可逾越的困难！射电天文学的发展要求另找出路！

## 光的干涉

1801年托马斯·杨在实验室实现光的干涉，证明光是一种波。

单色光射到第一屏的单孔，成为一个点光源，再射到第二屏的双孔，成为振动相同的两个波源。在光屏上出现干涉条纹。

在20世纪，把这个光学的干涉实验应用到射电天文，彻底改变其落后状态。



## 干涉仪大大提高分辨率

- 分辨率公式

$$\theta (\text{弧度}) = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

D为两面天线之间的距离。

- 利用小口径天线获得高分辨能力。

取干涉仪的基线100千米，波长5厘米时，分辨率为0.1角秒，达到大型光学望远镜的分辨率。

- 进一步增加基线，就可以超过光学望远镜了。

## 综合孔径望远镜——化整为零

可以看成:

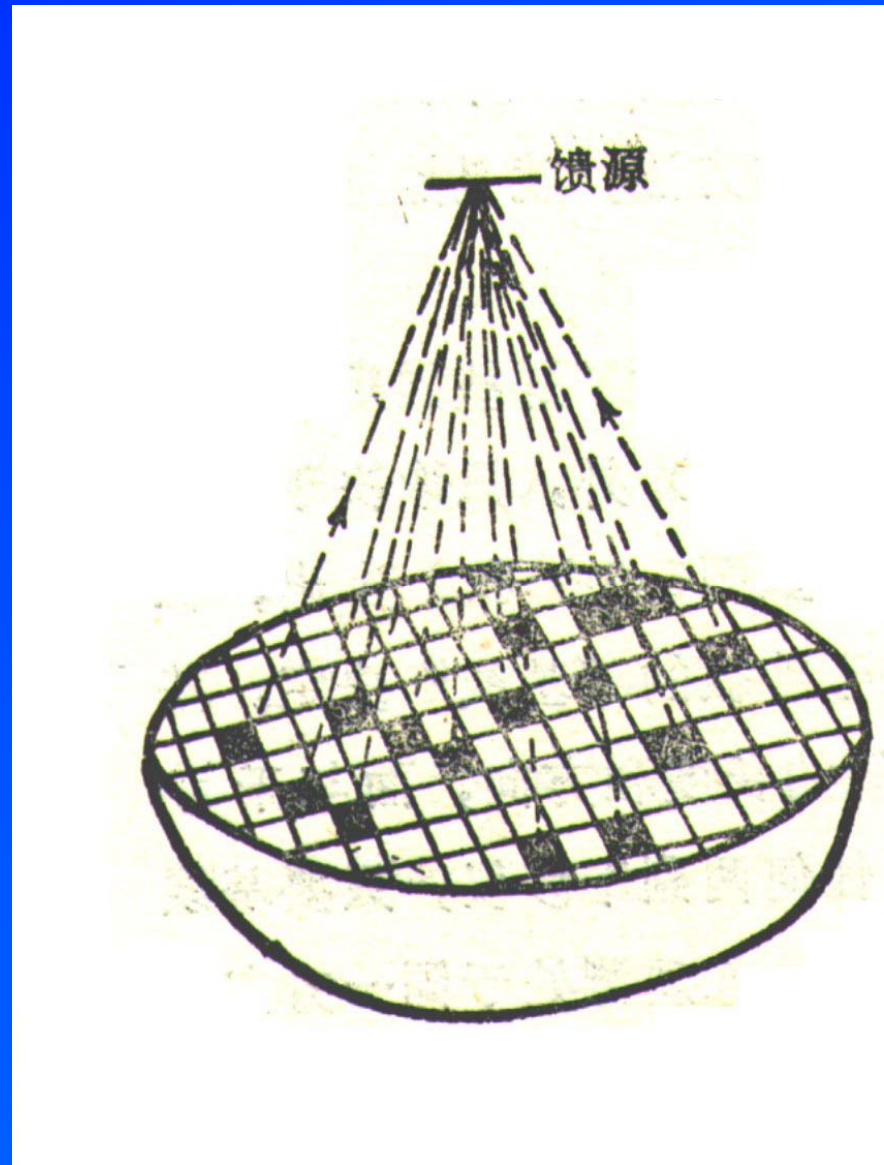
1, 许多基线长短  
不同的双天线干涉仪

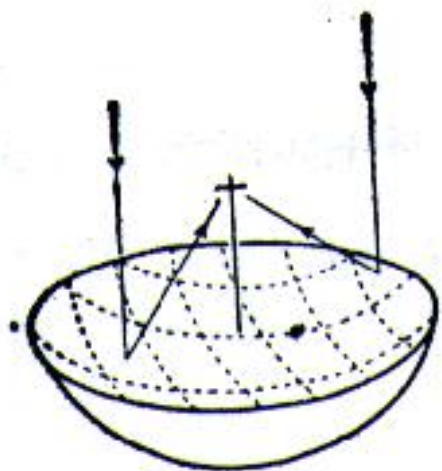
化整为零!

2, 资料处理:

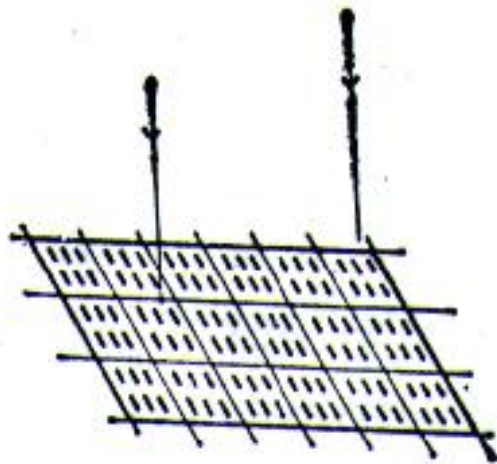
把各个双天线干涉仪  
的资料合起来处理

聚零为整!

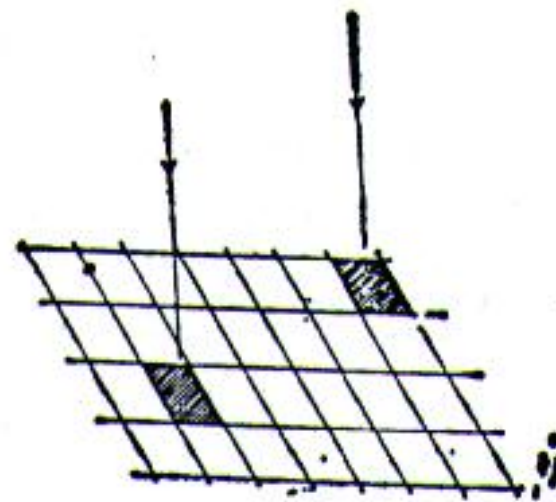




(a)



(b)



(c)

旋转抛物面

振子阵

两单元

## 原理之一:

### 把大天线分解为小单元

- 设想把大抛物面天线分成许多小单元，小单元的两两组合相当于许多副干涉仪。
- 在馈源上汇集所有两两组合的干涉波，每副干涉仪取下的数据是独立的。
- 借助计算机对全部独立数据进行处理，可以得到和单个大型抛物面的分辨率效果。



## 原理之二:

### 只需取不同间距的数据来进行处理

- 抛物面分成许多小单元，有很多方向相同、间距相同的单元对，其分辨率是相同的。
- 只需取不同间距和方向的数据来进行处理，可以得到相同的效果。

问题简化了！

## 原理之三:

### 并不需要同时的观测数据

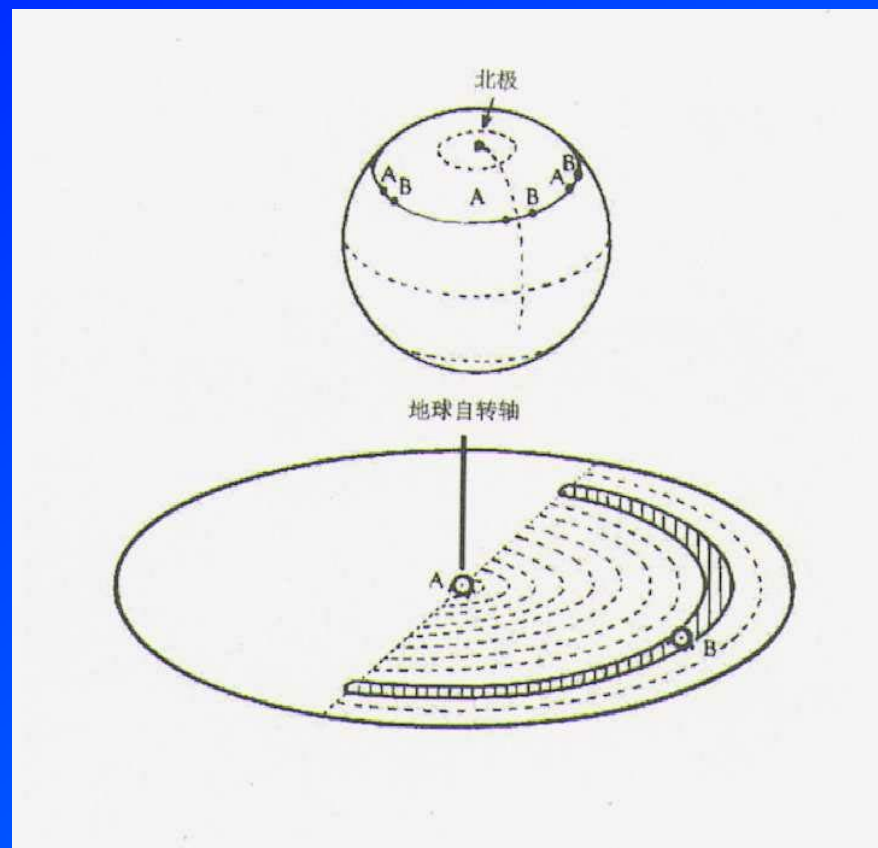
- 如果射电源是稳定的，可以用不同时间的观测数据进行处理。(局限性，对于变源不能用)
- 只用2面天线就可综合。一面固定，以它为中心，画一个圆，等效于一个“大天线”，另一面可以移动，逐次放到“等效大天线”的各个位置，每放一个地方进行一次射电干涉测量。
- 各次测量的数据一起进行处理。

## 原理之四：地球自转效应的利用

上图：天线A和B的运动

下图：天线B在地球自转12小时中位置的变化。

- 地球自转一周，A天线绕B天线一周，描绘出一个圆路径。相当于把可移动天线逐次地放到“等效大天线”各个地方。
- 由于系统的对称性，只需要12小时的观测。



## 计算任务繁重

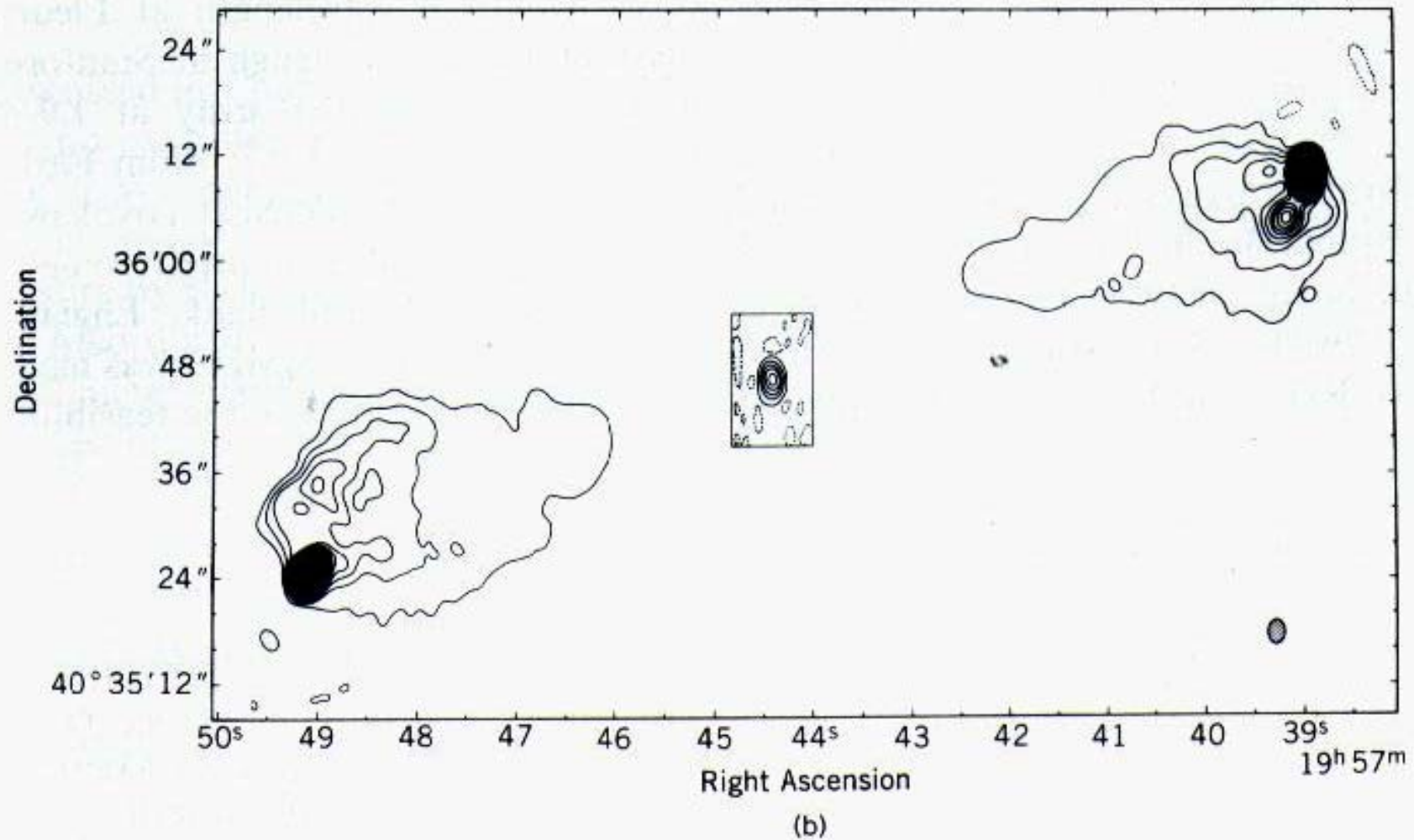
- 综合孔径原理在1954年已由实验证实是正确的，但因要处理异常多的观测数据，计算量特别大，在50年代还没有储存容量足够大、计算速度足够高和的计算机来完成资料的傅里叶变换。
- 到了60年代随着计算机的发展，综合孔径射电望远镜的发展才有了可能。

### 3, 剑桥大学5千米基线 综合孔径射电望远镜

- 8面天线，口径13米；  
基线5千米东西向排列；  
4面可移动，放在长1.2  
千米的铁轨上；4面固定，间距为1.2千米。
- 现在天线重新布局，将3面天线移到南北方向。
- 观测波长最短2厘米，分辨率已可与大型光学望远镜媲美了。1971年建成。



# 天鹅座强射电星系（射电双源）



射电展源的二维图象

## 4、美国甚大阵综合孔径射电望远镜

- 在20世纪五六十年代，中性氢观测备受关注。美国哈佛大学首先发现的。因此，拟建口径为183米的特大型射电望远镜天线。
- 但是，综合孔径发明，使美国人倾倒，改变初衷，决定建更强大的综合孔径射电望远镜。
- 在灵敏度、分辨率、成像速度和频率覆盖四个方面全面超过英国剑桥大学的综合孔径射电望远镜。

## 威力强大的甚大阵

- 从1961年开始，经过20年的努力完成。
- 27架口径25米的可移动的抛物面天线组成，分别安置在三条铺有铁轨的轨道上，呈Y形。二条臂长21千米，另一条臂长20千米。每条臂上放置9架天线。
- 工作波段最短可达到0.7厘米，最高分辨角为0.05角秒，优于地面上的大型光学望远镜了。





## 5, 荷兰威斯特博尔克 综合孔径射电望远镜

- 1966年荷兰开始, 1970年7月建成, 比剑桥5千米还早。
- 14面直径25米抛物面天线, 东西基线长2700米。10面固定, 4面可以在铁轨上移动。
- 望远镜于比剑桥5千米综合孔径望远镜的灵敏度要高出6.5倍。



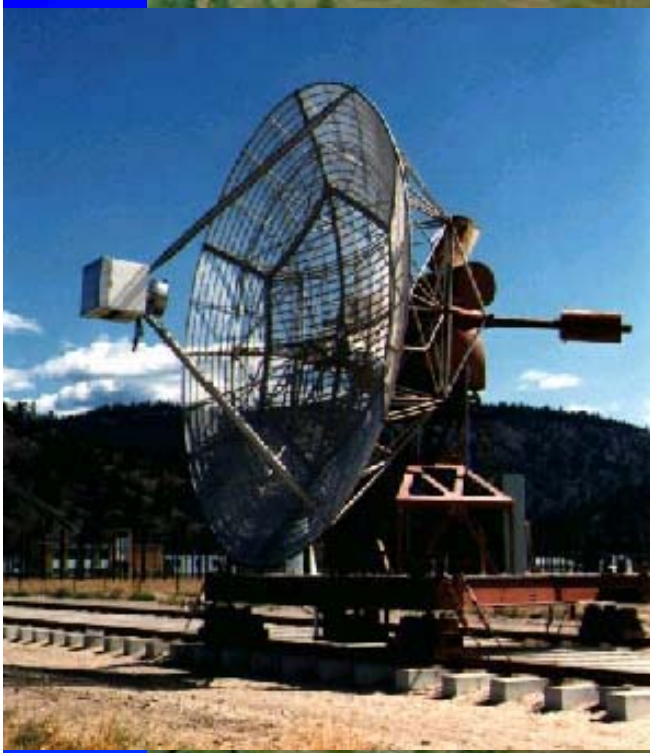
## 6, 澳大利亚望远镜致密阵 (ATCA)

- 建国200周年献礼项目之一。1988年建成。由六面22米口径的天



线组成，一面固定，五面放在铁轨上。

- 观测波段为21厘米到3毫米，目前国际上特有的主要用于毫米波观测的最大综合孔径望远镜。
- 南半球灵敏度和分辨率最高的综合孔径射电望远镜，



7, 加拿大Dominion射电天体物理台综合孔径射电望远镜由口径7面9米天线组成, 其中3面天线可以在铁轨上移动。 基线1千米, 频率408MHz和1400MHz.

## 8, 印度米波综合孔径射电望远镜

- 印度选择米波和分米波段。1994年建成。在米波段的灵敏度超过了

美国的甚大阵。米波是特殊波段，环境干扰比较大，技术要求低，经费少。

- 30台直径为45米的抛物线天线组成，14面在中心区，16面沿3个臂分布。最长基线是25千米。



## 9, 英国多天线干涉仪系统 (MERLIN)

- 1980年投入观测
- 由7台射电望远镜组成。
- 基线长度达到217千米。分辨率比美国VLA高约10倍，达到 0.01角秒。
- 采用微波接力的方法顺利信息传输。剑桥大学望远镜的信号需要五次接力送到焦德班克。现在改用光纤连接，传输的观测信息更全面。



## 10, 日本野边山日像仪:

T字形排列, 东西长488.96, 米, 南北220.06米,  
天线口径0.8米; 84面天线。工作频率17GHz和34GHz。  
分辨率10角秒。



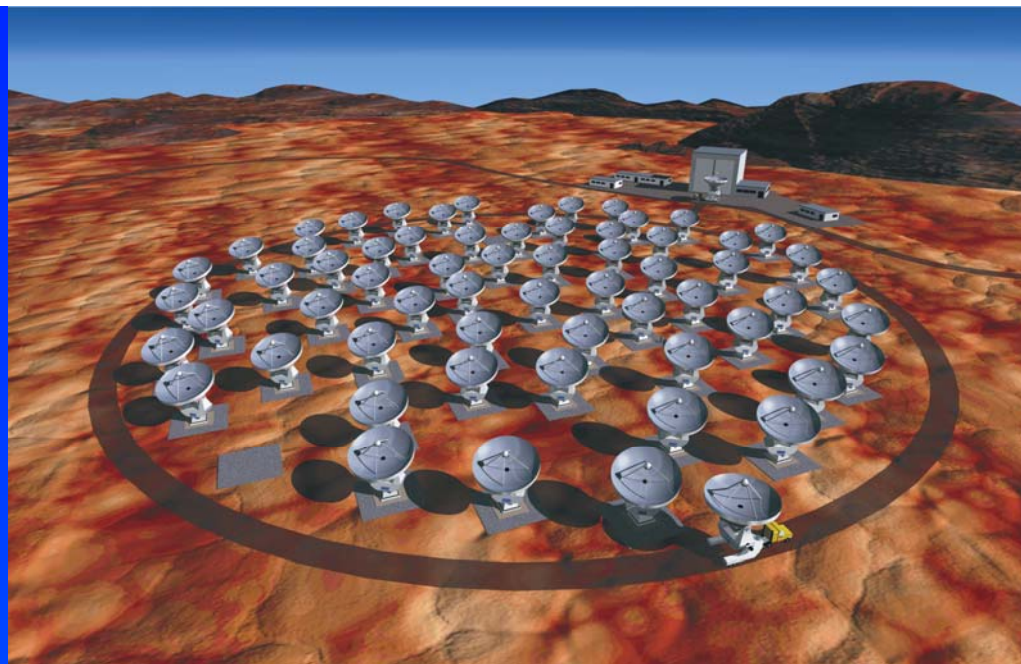
## 10, 亚毫米波阵



- 世界上第一个亚毫米波阵 (SMA), 属美国史密松天文台于2003年底启用。
- 由8面口径6米的天线所组成, 台湾提供两面天线。最短基线为8米, 最长基线为509米。观测波长1.3毫米到0.43毫米。最高分辨率达0.15角秒。
- 馈线长度要求做到丝毫不差, 特别是不能容忍长度的无规变化。否则就不可能很好的进行成像观测。
- SMA 放置在夏威夷岛

## 11, 智利阿塔卡玛毫米波/亚毫米波阵

- 建造中, 简称为ALMA。  
国际合作项目。



- 64面12米口径天线组成。观测波长从1厘米到0.3毫米, 指向误差小于 $0.6''$ 。天线最小间距150米, 最大间距14千米。空间分辨率达到10毫角秒, 比美国甚大阵和哈勃空间望远镜好10倍。成像速度快、质量好。
- 第二步要增加12面口径7米和4面口径12米的天线。



## 12, 我国的多天线射电观测系统

- 国台密云米波综合孔径
- 国台新疆21厘米阵
- 国台内蒙古射电日像仪

## 密云综合孔径 射电望远镜

- 1963年，米波多天线干涉仪开始建造，1967年完成第一期工程。

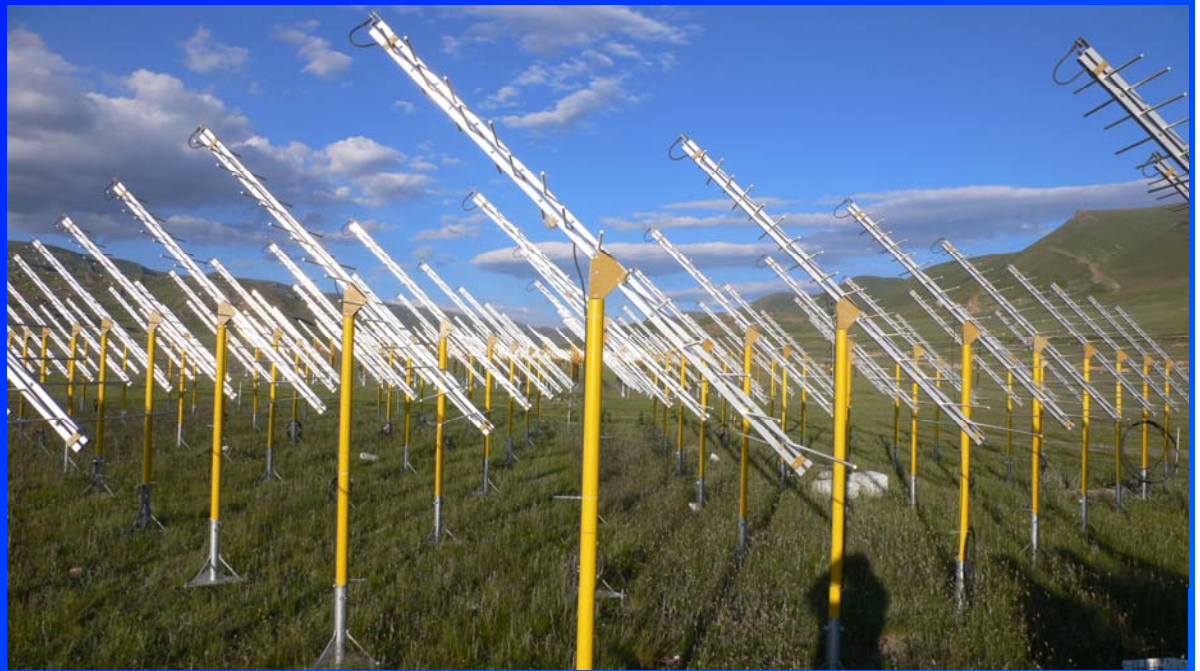


- 之后就开始改为综合孔径。直到1984年，才最后完成。这个频率上观测占有一席之地。
- 由28面9米天线组成，东西排列，位置固定，最长基线为1080米。观测效率高，不用移动天线。

- 我国首先进入宇宙射电。选择低频是对的，一是空白，一是造价低技术比较简单。在初创时期只能这样。在高分辨率射电观测方面作出成绩。低频巡天和一些射电展源的观测，在国际上有一定的发言权。
- 加拿大综合孔径类似，7面天线，但频率比较高：1400和400MHz，科学寿命比我们的长。
- 天文投入不够，国内的技术水平还不高。

## 21厘米射电 阵列 (21CMA)

- “宇宙第一缕曙光”即第一批恒星



发出的光芒，会导致发射氢原子21厘米谱线。

- 宇宙膨胀速度很快，红移值约为6到20之间，21厘米波长红移变长为1.5米~6米之间。低频射电观测成为发现“宇宙第一缕曙光”的唯一手段。

- 新疆天山山脉乌拉斯台山谷

## “21厘米天线阵”的结构

- 东西基线长6千米，分布了41组天线阵列；
- 南北基线4.1千米，分布40组天线阵列。等效接收面积达40000平方米。
- 每组阵列由127个对数周期天线单元组成。相当于一面独立的天线。
- 始终观测北极天区100平方度的视场。长时间观测以获得高灵敏度。阵列天线固定在地面。

# 国台厘米-分米波日像仪的设计

- 40面4.5米直径网状天线。频率范围在0.4-2GHz之间，50个频率点上成像。
- 60面2米直径金属板天线。观测频率在2-15GHz之间，可在32个频率点上成像。
- 最长基线为3km，分辨率达到1角分-1.8角秒。
- 内蒙大草原上。

世界领先水平：

频率覆盖最宽；

成像频点最多：

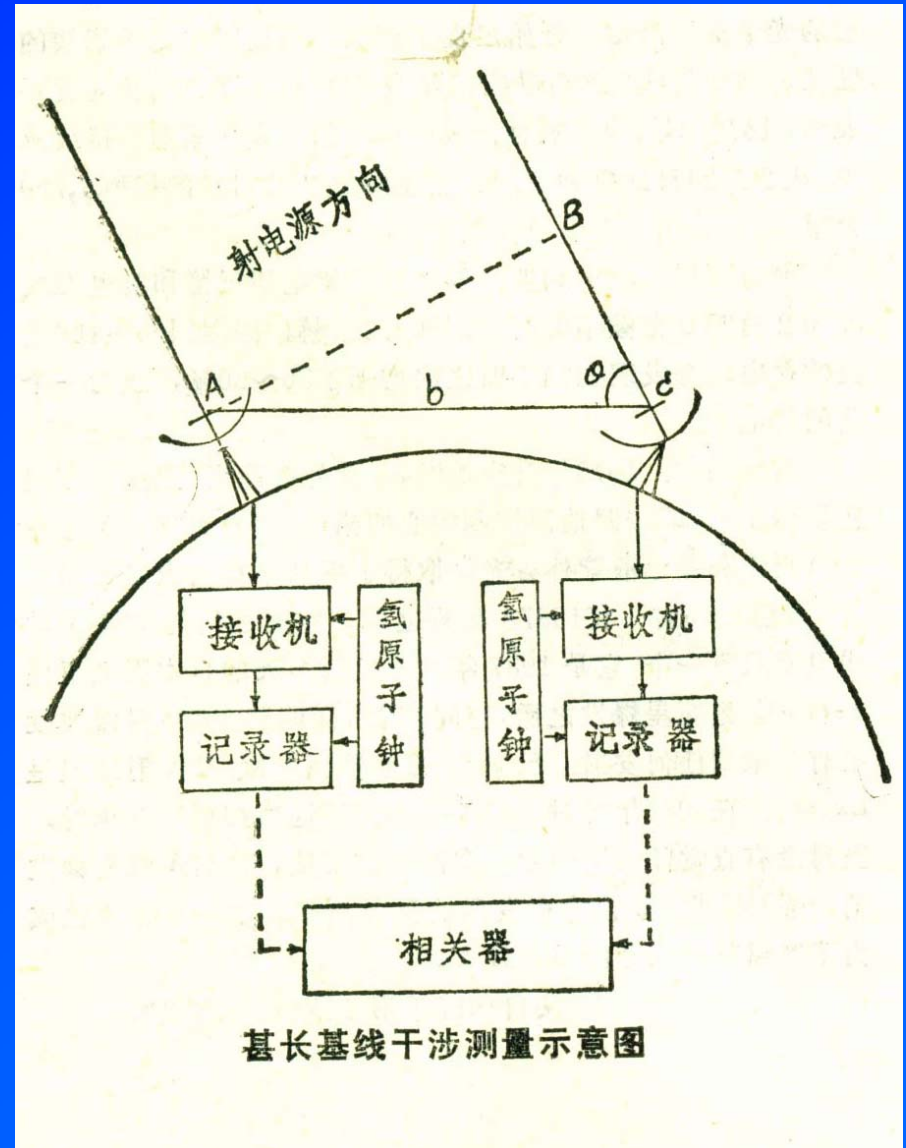


## 五，甚长基线干涉观测

- 取消馈线，两面天线可以放得尽量远的，故称甚长基线干涉仪。分辨率可达毫角秒~微角秒。大大超过大型光学望远镜。
- 已经实现洲际和空间甚长基线干涉网。
- 我国上海和乌鲁木齐的两台射电望远镜加入欧洲网，还将建设由4台射电望远镜组成的中国甚长基线干涉网。

# 1, 甚长基线干涉观测原理

- 两台射电望远镜有独立的接收机、本振（原子钟）和记录器；
- 在记录上打上原子钟时标，保证同时观测；
- 用原子钟做频率标准，保证观测同一波段；
- 观测结果事后由相关器处理。





## 实现三个相同

- 各台射电望远镜观测记录同一个射电源、在同一时刻发出的、同一频段的信号。满足这“三个相同”，记录在磁带上的各台射电望远镜的观测数据才是相关的，输入相关处理器后就能实现干涉。
- 这与用馈线把两面天线接收到的射电源信号送到一起相加的效果是一样的。

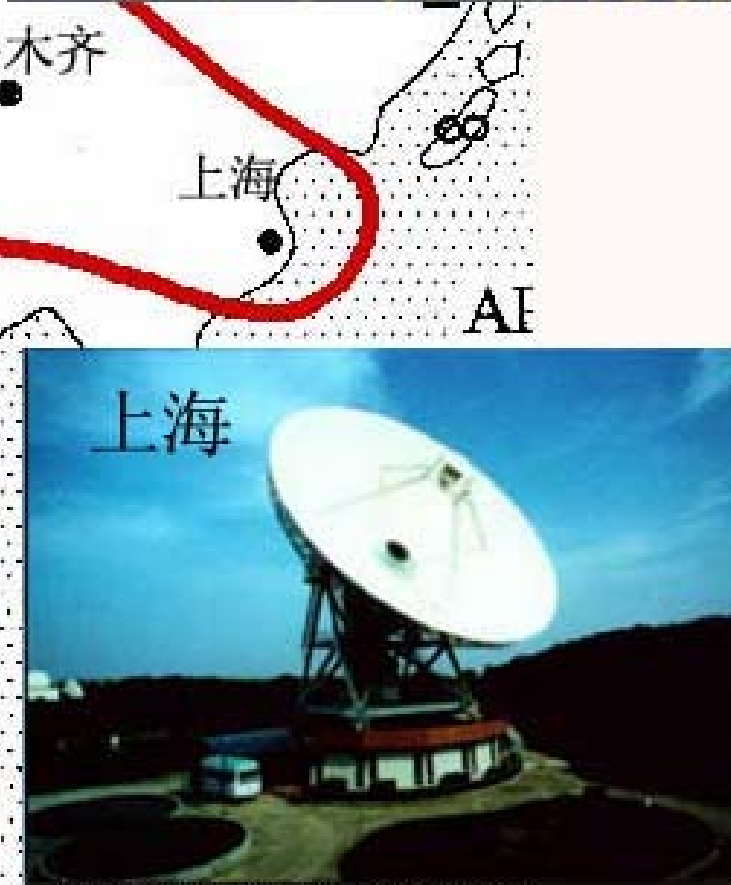
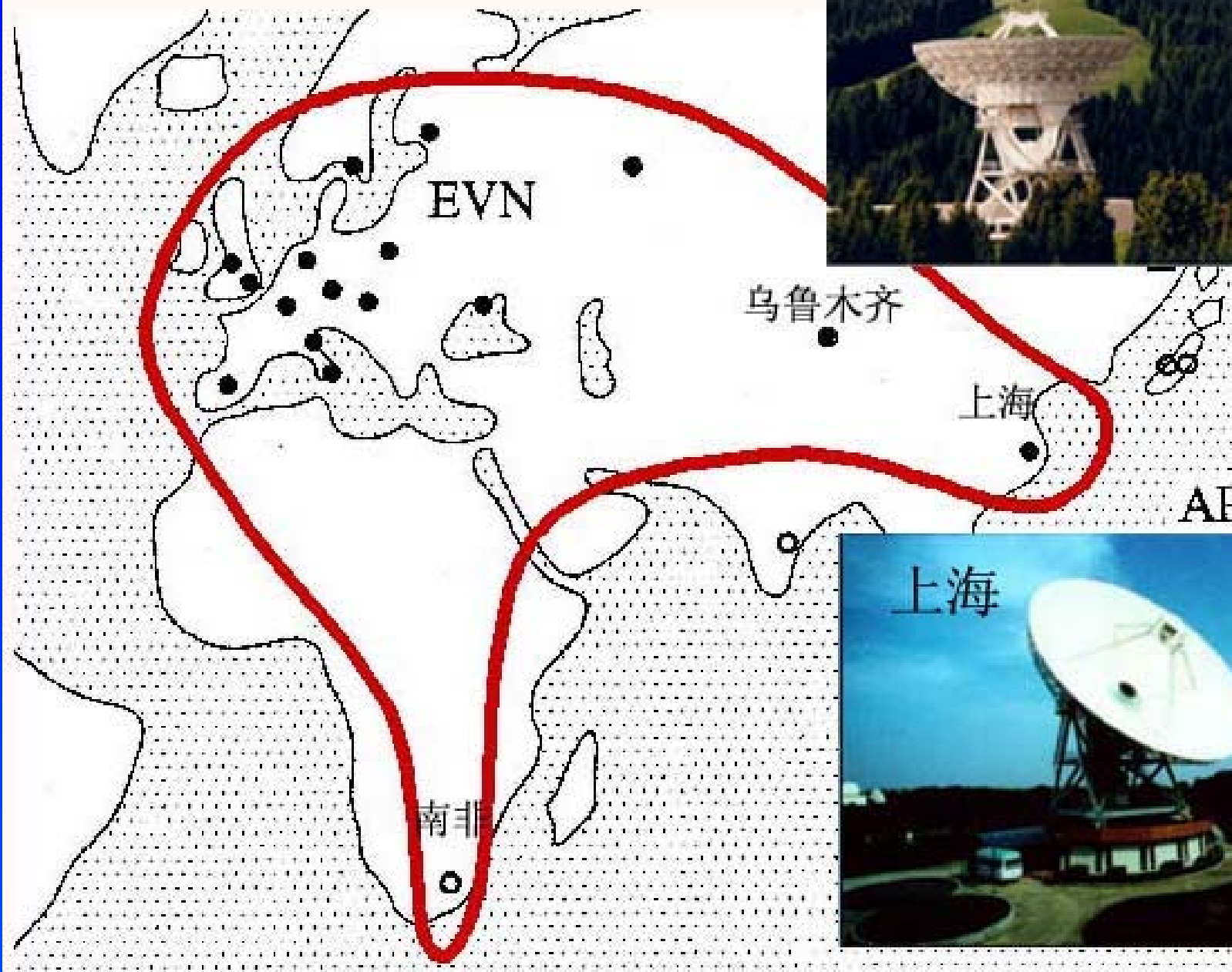
## 原子钟应用于甚长基线干涉仪

- 一般干涉仪共用一个本机振荡器，频率不稳定，同时影响两台射电望远镜，依然能保证接收天体同一频段的辐射。
- 独立观测采用频率极端稳定的原子钟作为本振，观测过程中频率不变。
- 在观测时把原子钟的时间和观测数据一起记录在磁带上，很容易确定两台射电望远镜同时观测的时刻。

## 2, “名不副实”的欧洲网

- 1980年联合建立欧洲甚长基线干涉观测网, 简称EVN。
- 欧洲网所覆盖的地区还不够大, 邀请中国和南非参加, 形成非常长基线的VLBI网。
- 上海25米射电望远镜的加入, 使基线长了3倍多;
- 乌鲁木齐射电望远镜的参加, 使分布更合理, 观测精度提高了4-5倍。

# 名不副实的欧洲网





阿雷西博

烏魯木齊

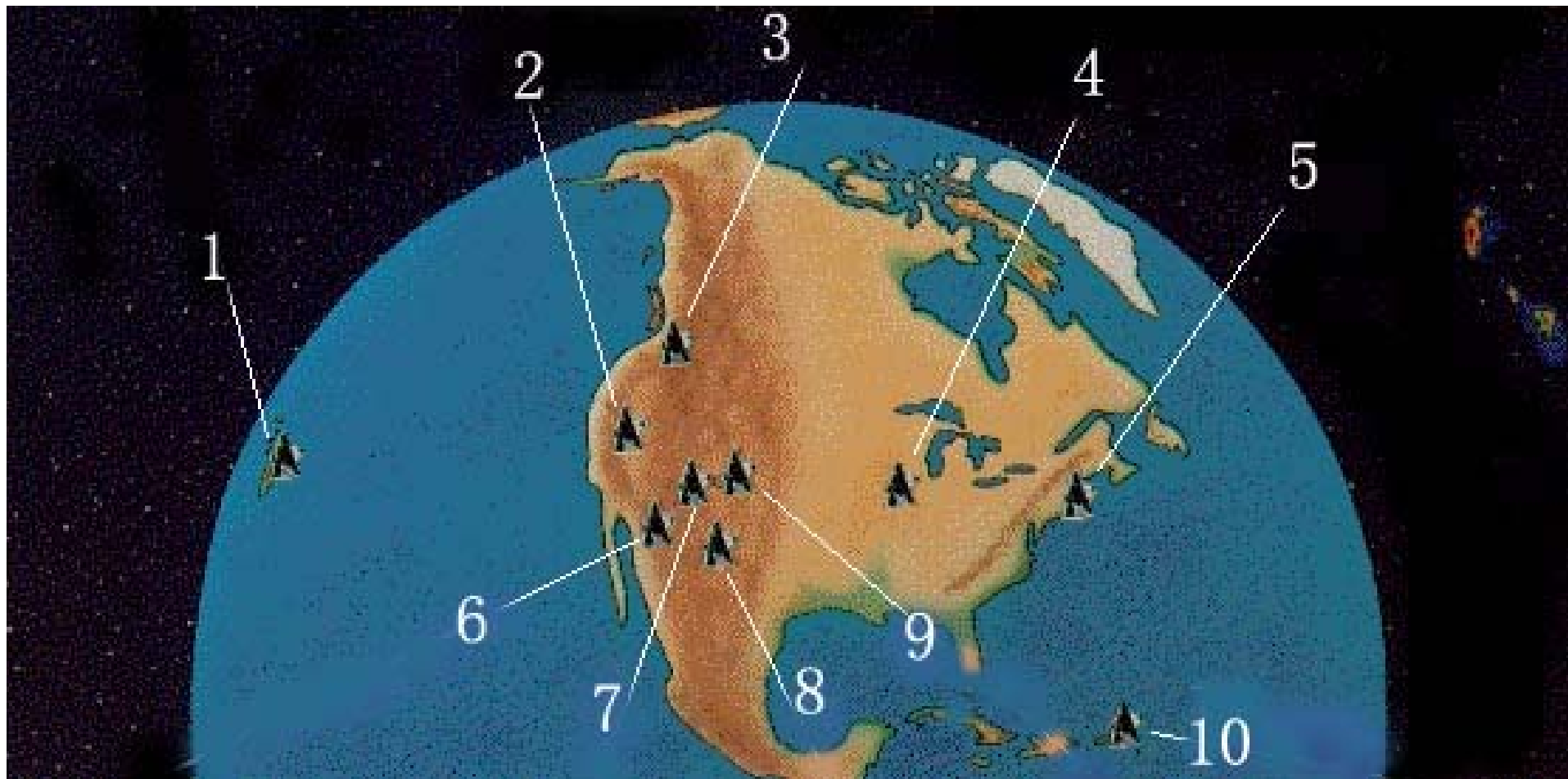
上海

南非約翰內斯堡

EVN Members MAG 03/2002

### 3, 美国甚长基线干涉阵VLBA

- 1986年开始，1993年5月完成。
- 由十台射电望远镜组成，性能完全一样，从东部维尔京岛到西部的夏威夷岛，基线跨度8600千米，最小基线为200千米。观测波长90厘米~3.5毫米。分辨率达到亚毫角秒级。比最好的光学望远镜的分辨率高2~3个数量级，
- 设立了“动态观测时间”的申请。如3.5毫米的VLBA观测



### 3, 美国甚长基线干涉阵 (VLBA) (1993)

- 10台25米口径射电望远镜一模一样;
- 从美国东部到西部的夏威夷, 约8600千米;
- 最短波长达到 3.5 mm

## 4, 甚长基线干涉空间观测

- 天文观测对分辨率的要求是无止境的，再提高分辨率，就要突破地球大小的限制，发展空间VLBI技术；
- 首次实验：美国宇航局的工作数据传送卫星天线（4.9米）与地面日本64米、45米和澳70米射电望远镜实验成功。



# 日本甚长基线干涉空间观测站 (VSOP)

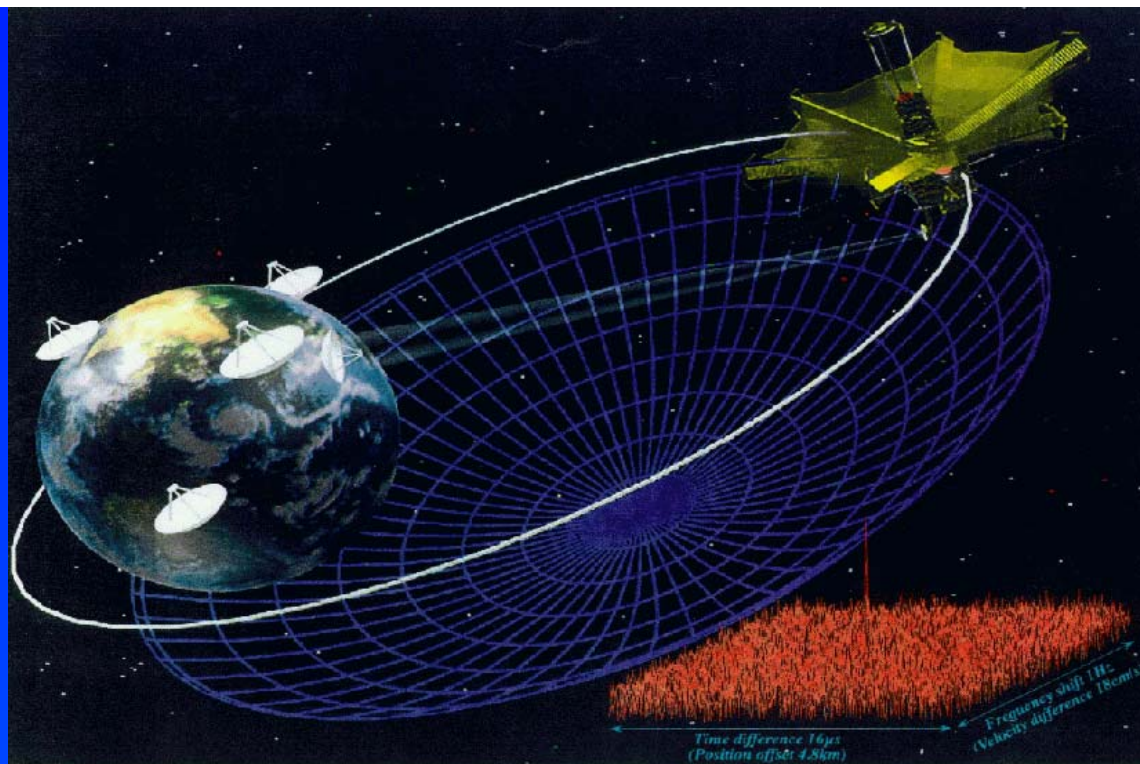
1997年完成

- 口径为8米的射电望远镜在太空，轨

道周期约6小时，近地点为560千米，**远地点为21000**千米。观测波长18cm，6cm和1.3cm；

相同波长的分辨率比地面VLBI网提高了三倍以上。

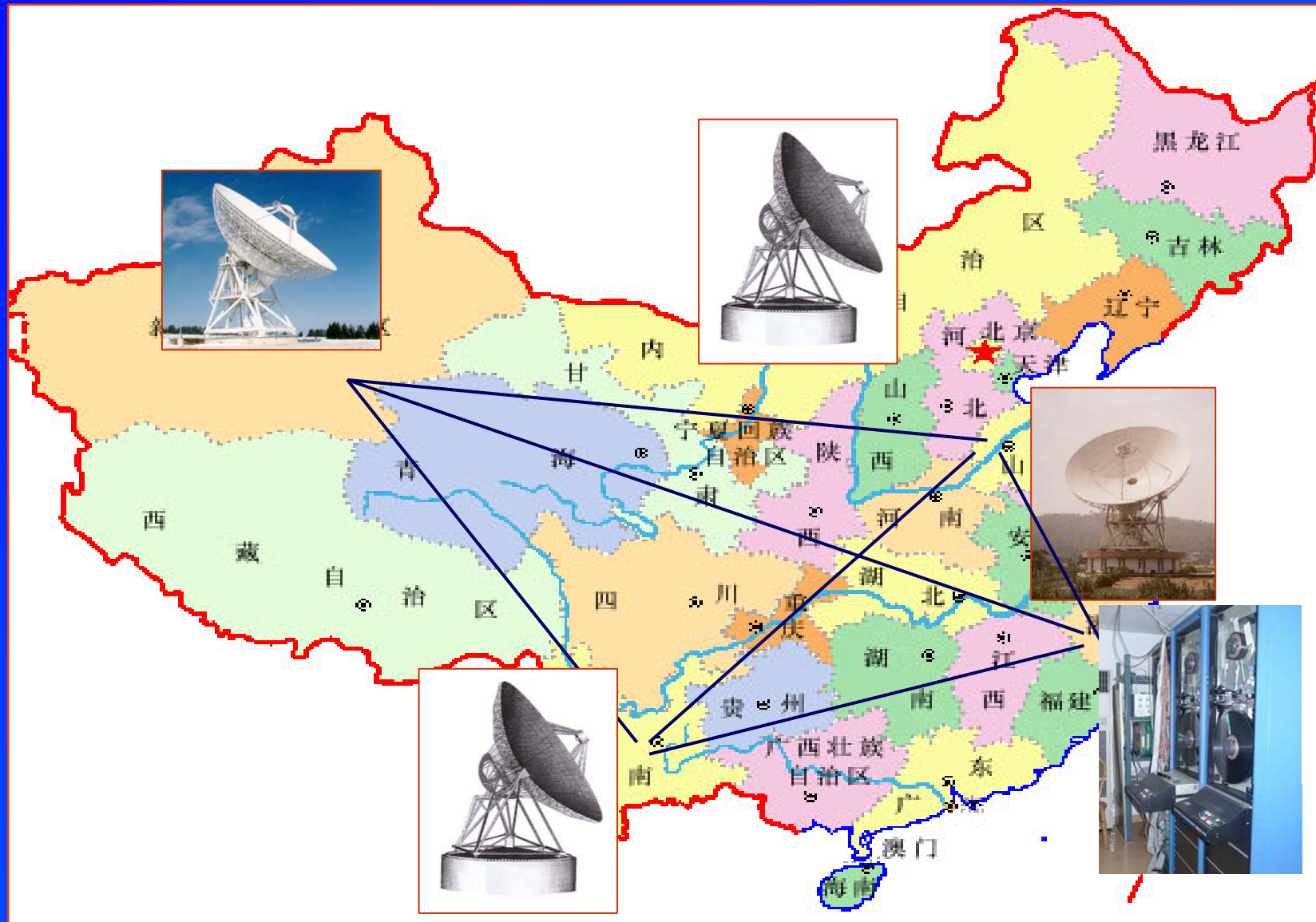
- 已经停止工作，正在研制下一代。



## 5, 嫦娥探月观测和我国VLBI网的建立

- 为了嫦娥一号的发射，快速建立了自己的甚长基线干涉网。上海天文台是数据资料中心。
- 4台射电望远镜的位置和彼此之间的距离：最短基线是上海到北京的1114千米，最常基线是上海与乌鲁木齐之间达3249千米。这是一个令人羡慕的数字，最长基线距离比著名的英国多天线干涉仪的最长基线要长10多倍。在3.2厘米波长上的分辨率达到2.5毫角秒。

# VLBI测轨网的台站分布



## 天体物理课题观测能力急需提高

- 最长基线3500千米，分辨率比较高，作为一个国家自主的VLBI系统很重要。但是目前天体物理课题的观测能力还太差。
  - 就脉冲星的自行观测来说，美国的VLA、英国MERLIN和美国VLBA均有很多观测。
  - 我国的VLBI的观测能力有限，郭丽等成功地获得PSR0329+54的位置和自行，位置的精度很高。
- 但是，能观测的脉冲星数目太少。

## 六，关注其他波段的观测研究

- 多波段研究很重要，
- 目前脉冲星已进入全波段观测研究的阶段；
- 类星体的发现始于射电观测，但寻找射电源的光学对应天体，才发现其巨大的红移，寻找类星体的候选者有用上行星际闪烁的观测研究。
- 伽玛暴的X射线余辉、光学余辉、射电余辉的观测在伽玛暴发现近30年后才实现，艰难曲折。富有戏剧性，简单介绍一下。

## 宇宙 $\gamma$ 射线爆发

- 美国维拉卫星在监视前苏联的核实验时发现宇宙 $\gamma$  射线爆发。
- 天空中最突出、最令天文学家兴奋的对象之一。
- 康普顿 $\gamma$ 射线天文台，平均每天发现一个 $\gamma$ 射线爆发。

# 1、 $\gamma$ 射线爆发特征

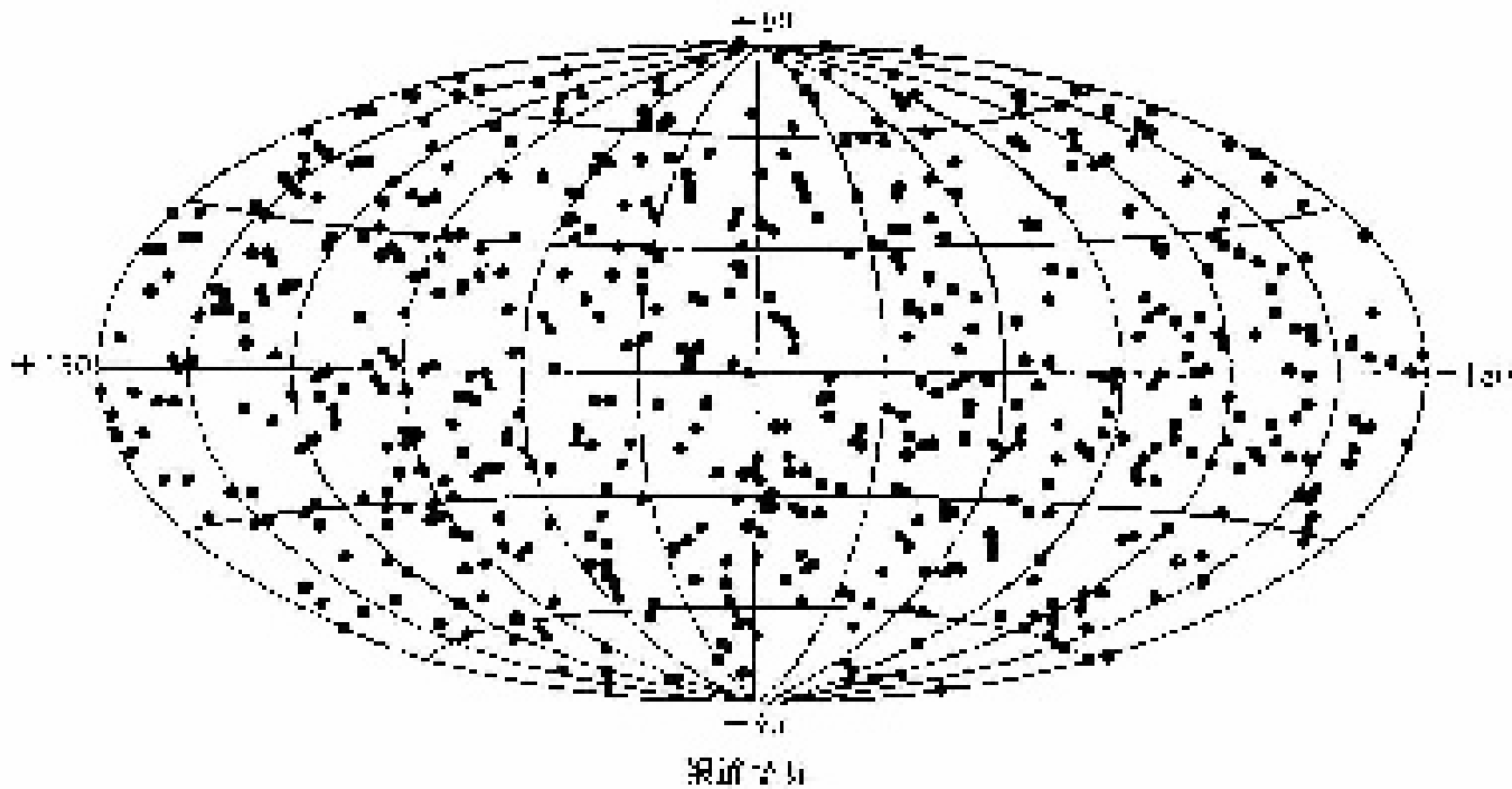
- 辐射变化剧烈而迅速，呈脉冲状。上升时间为0.2秒，最快的可达毫秒量级。爆发持续时间从0.1秒至100秒。
- 通常，一个脉冲结束后，紧接着有第二个、第三个脉冲出现（脉冲数可以有1至5个）。
- 某些强爆发源的直径不超过1,500千米。
- 不知道爆发源的距离，不知道哪一个爆发最强。

## 2, $\gamma$ 射线爆发源的空间分布

- 早期的观测无法确定射线爆发源的方位，无法讨论爆发源的空间分布。
- 康普顿天文台发射之后，能确定方位，但仍无法确定距离。找不到对应的已知天体。无法讨论其真实分布。
- 至今发现的 $\gamma$  射线爆发源已超过2500多个，分布显示出非常好的各向同性。



391个 $\gamma$ 射线暴

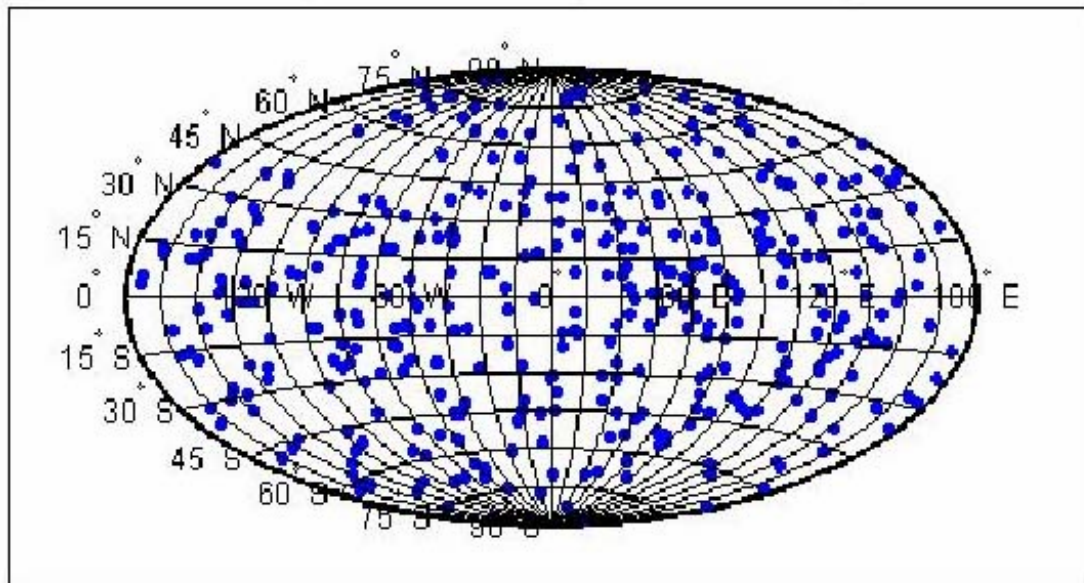


$\gamma$ 射线暴发生的位置和强度的全天星图  
显示出非常好的各向同性

### 3, $\gamma$ 射线爆发源是银河系里的中子星吗?

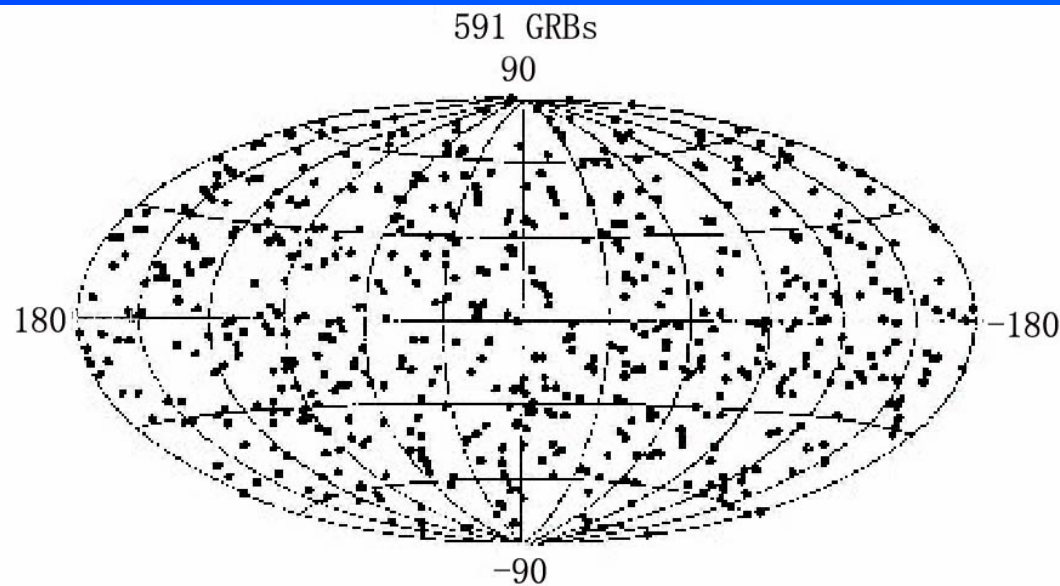
- 少数学者认为是银河系中的老年中子星。可能显示出均匀分布。前人的结果要求老年中子星离太阳系很近, 在50 ~ 500 pc之内。
- 一种研究结果(对年龄为  $10^9$ — $10^{10}$ 年的老年中子星, 进行模拟分析)获得的空间分布, 经修正后, 与观测到的gamma射线暴的分布很像。

(b) The corrected angular distribution of pulsars within 1.0kpc from the Solar



经过修正后的、在  
距离太阳1.0kpc之  
内的507 颗老年中  
子星 ( $10^9$ 年) 的分  
布

591个Gamma射线暴  
的分布



## 4, $\gamma$ 射线爆发源是河外天体吗?

- 爆发发生在银河系之外, 因此能很好地解释其空间分布的各向同性。这是当前流行的看法。
- 遥远的距离导致爆发的能量必须异常的大: 相当于超新星爆发; 两颗中子星碰撞合并; 一颗中子星被黑洞所吞食时产生的能量。

距离确定困难: 爆发停止就完全消; 定位精度低, 几度范围内无法找到对应的已知天体。

### 3, $\gamma$ 射线暴的X射线余辉

- 美国学者居多，但是没有成功。
- 意大利的“贝波”X射线卫星，国内国际均不看好，拖了10年，于96年发射。
- “贝波”主要观测银河系X射线源，监测  $\gamma$  射线暴是附带任务。结果上天仅1年多，就发现了  $\gamma$  射线暴的X射线余辉。 X射线观测定位精度高，也就能确定位置了。

- $\gamma$  射线暴来得突然，方向不准，要求大视场X射线望远镜或照相机配合。
- “掠射式”X射线望远镜，分辨率高，视场非常小。为了扩大视场，采用古老的小孔成像方法，视场大、灵敏度差。但有1万多个小孔，加到一起灵敏度就高了。
- 1997年1月11日，“贝波”记录到第一个  $\gamma$  射线暴的X射线余辉。

## 4, 光学余辉的发现和红移的测量

- 1997年2月27日, “贝波”发现位于猎户座的  $\gamma$  射线暴, 同时发现一个很亮的X射线源。误差框为6角分, 此范围至少有几千颗恒星。
- 对比赫歇尔望远镜拍摄的两张照片, 发现 GRB970228的光学余辉。
- 1997年5月8日, “贝波”又发现一个  $\gamma$  射线暴及 X射线余辉和光学余辉, 并测出红移是0.835, 相当于60亿光年的距离。

## 5, 射电余辉和近红外余辉的发现

- 1997年5月8日的这个暴的射电余辉被甚大阵3.5厘米波段观测发现。射电源的光度变化非常大，是闪烁现象。爆发后膨胀，角径变大，闪烁现象消失。表明火球以光速膨胀。
- 伽玛暴是河外天体，很远。射电流量不会太高。FAST、65米和80米应该能看见一部分。25米射电望远镜有没有机会，也需争取。



## 总结

- 我国射电天文进入大发展时期，急需人才！人才种类，培养途径，来源！
- 已经建成的观测设备，提高观测能力，大有可为，需付出持续的能力（50米哈40米）。这讲未涉及接收机系统，将在脉冲星观测中讲。
- 在建任务繁重，待解决的难题不少；
- 未来项目的争取，如南极亚毫米波、80米天线阵、SKA等。调研、立项、解决关键技术问题。