

射电天文学的简单历史和常用概念

射电天体物理课 第一讲

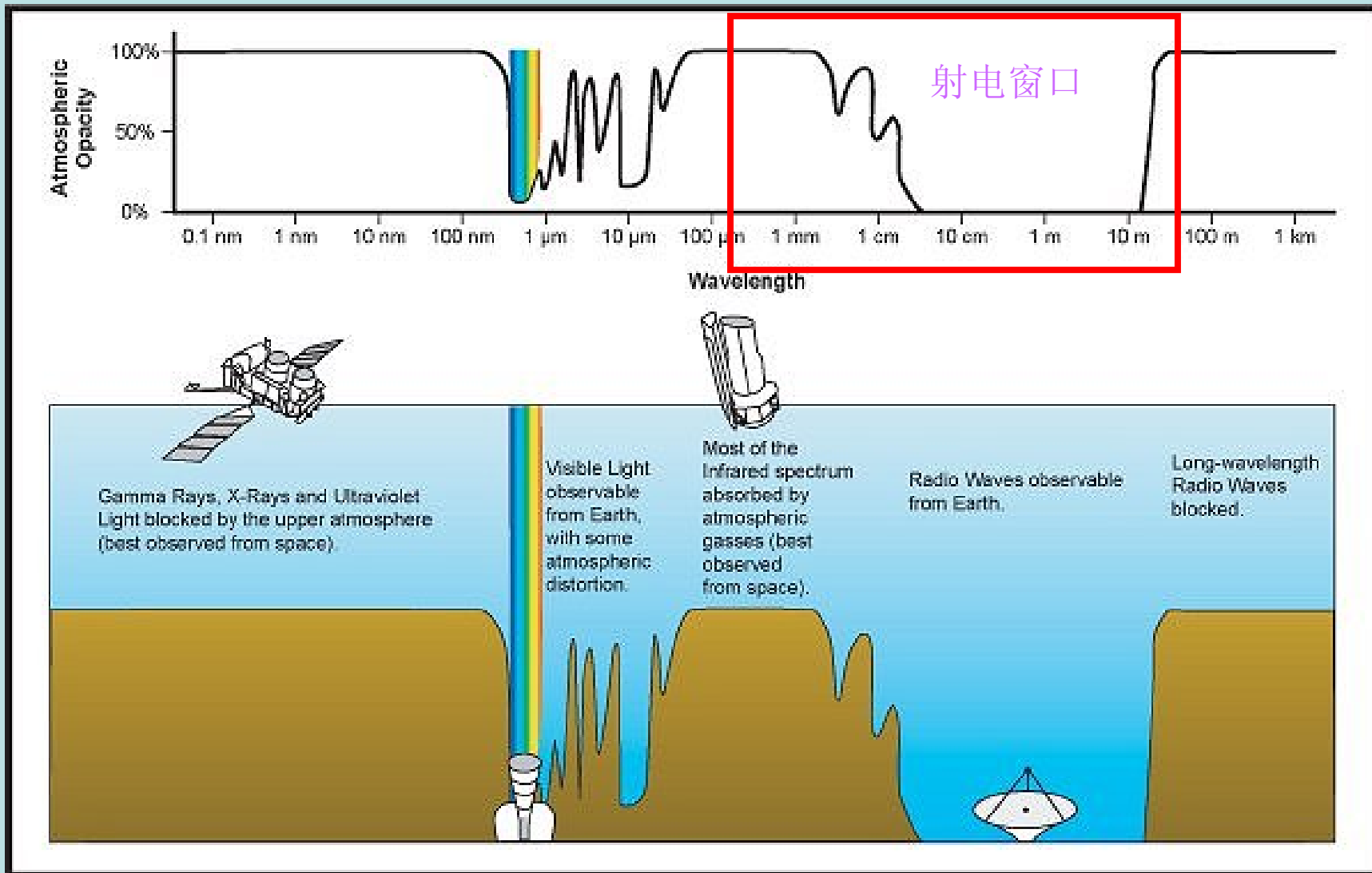
主讲人：南京大学天文系 王均智
junzhiwang@nju.edu.cn

2010年7月18日

什么是射电天文学

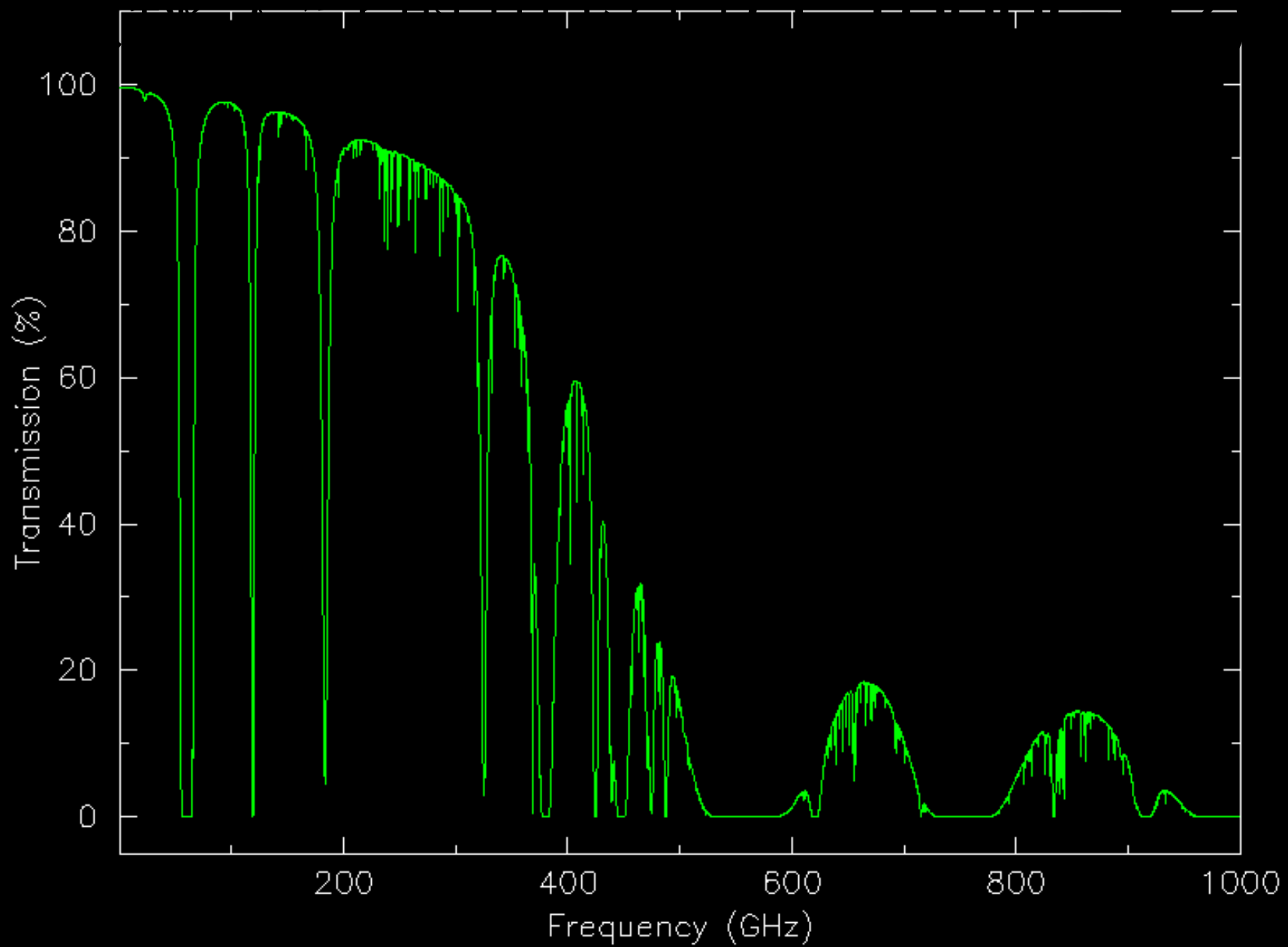
- 射电天文学就是利用射电技术探测天体辐射来进行天文系研究的一门学科
- 射电天文学诞生于20世纪30年代
- 目前的射电天文覆盖的波长约为30米至300微米 (频率为10MHz到1THz)
- 射电天文观测为现代天文学的发展作出了巨大的贡献

地球大气窗口



Atmospheric Transmission: **Mauna Kea**

PWV: 1.50 mm



射电天文学简单历史回顾

- Karl Jansky (Bell Lab) 1932年 发现银河系射电辐射
- Grote Reber 在自家后院 利用自制望远镜观测银河系射电连续谱发射(1937-)
- Harold Ewen 和Edward Purcell 发现HI 21cm谱线 (1951年)
- 20世纪60年代4大天文发现 (星际分子、微波背景辐射、脉冲星以及类星体)
- CO分子谱线的发现 (1970)

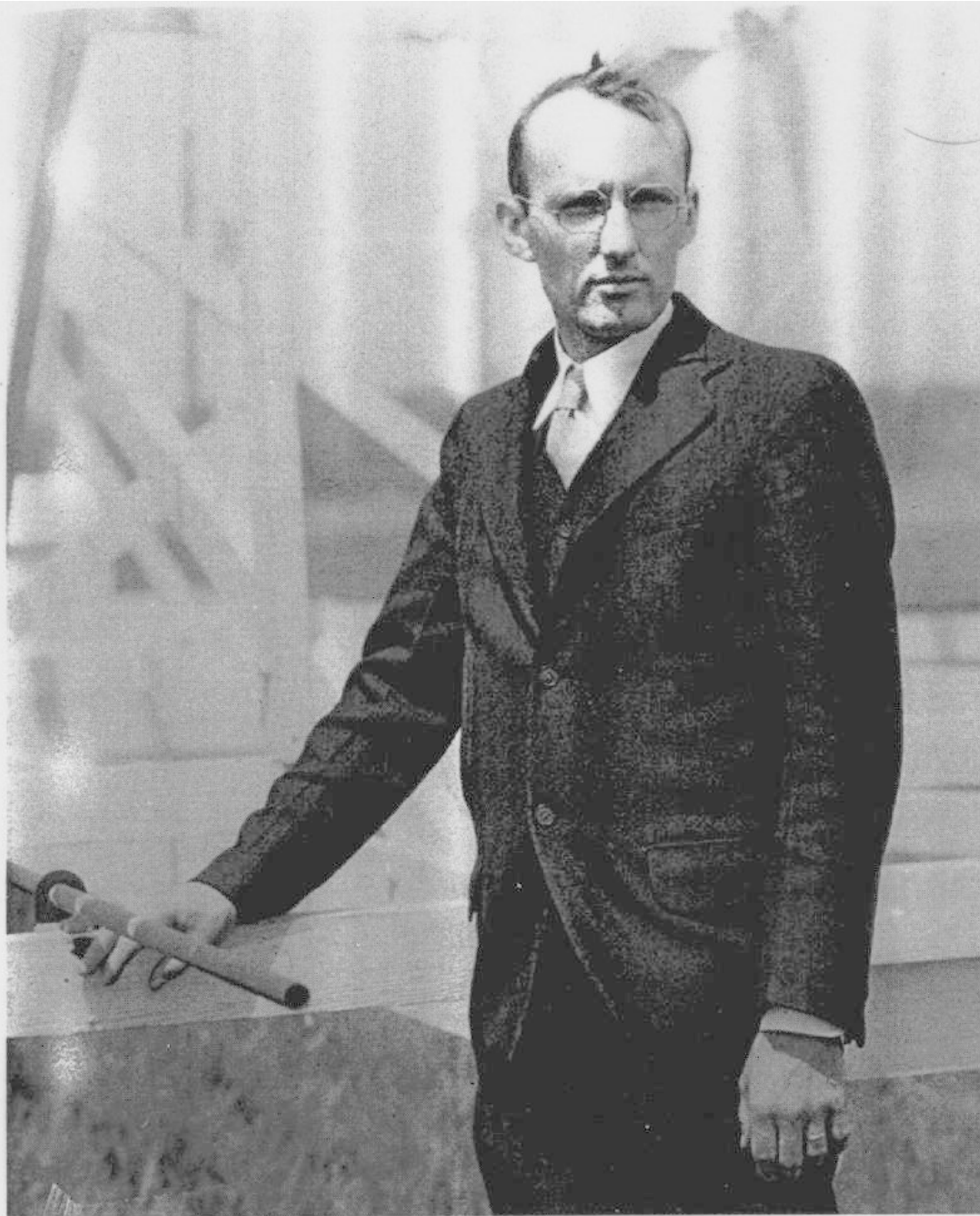
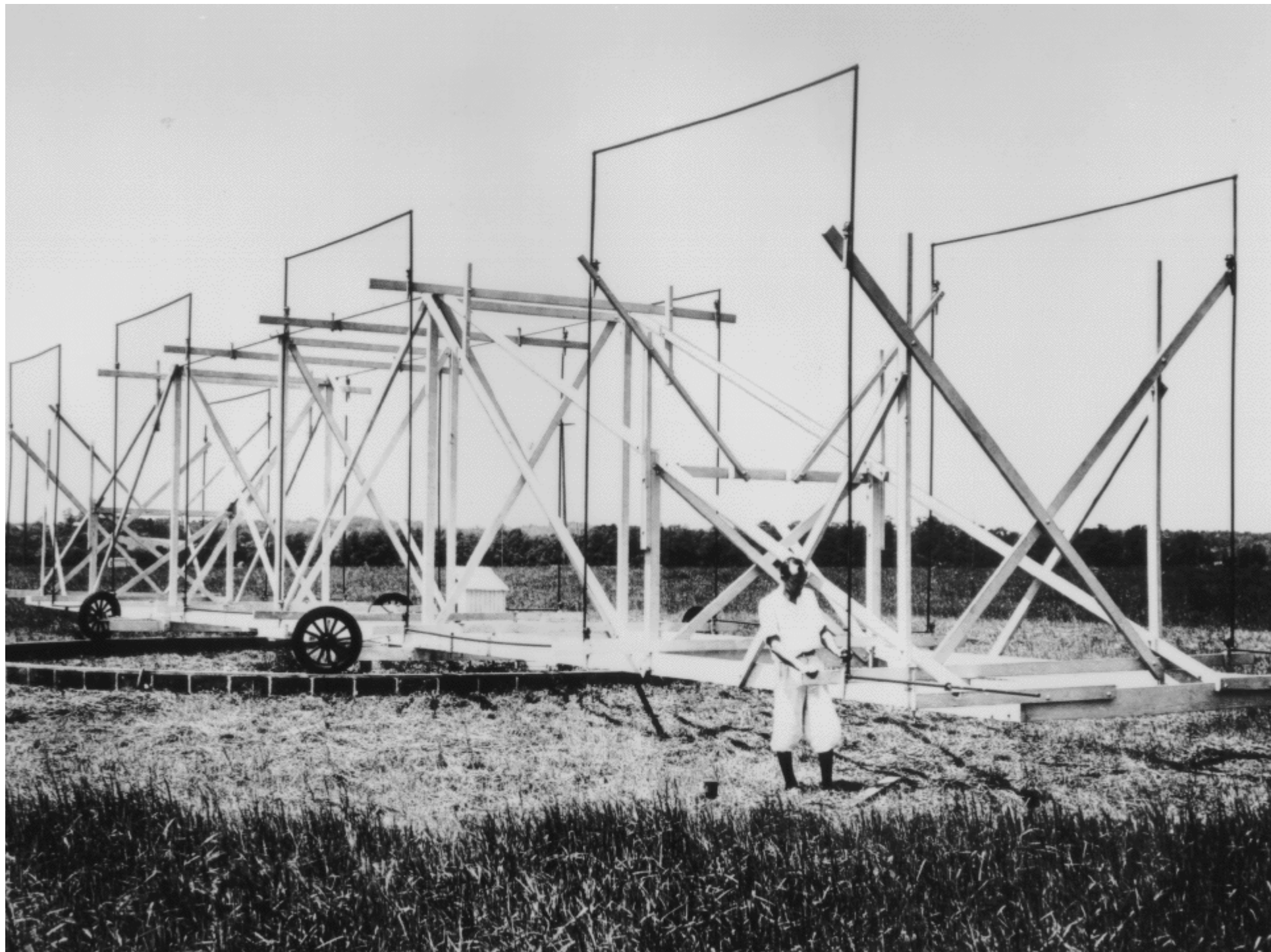


FIG. 1—Karl Guthe Jansky, about 1933.

Karl Jansky
(1905-1950)



银河系射电辐射(Grote Reber)

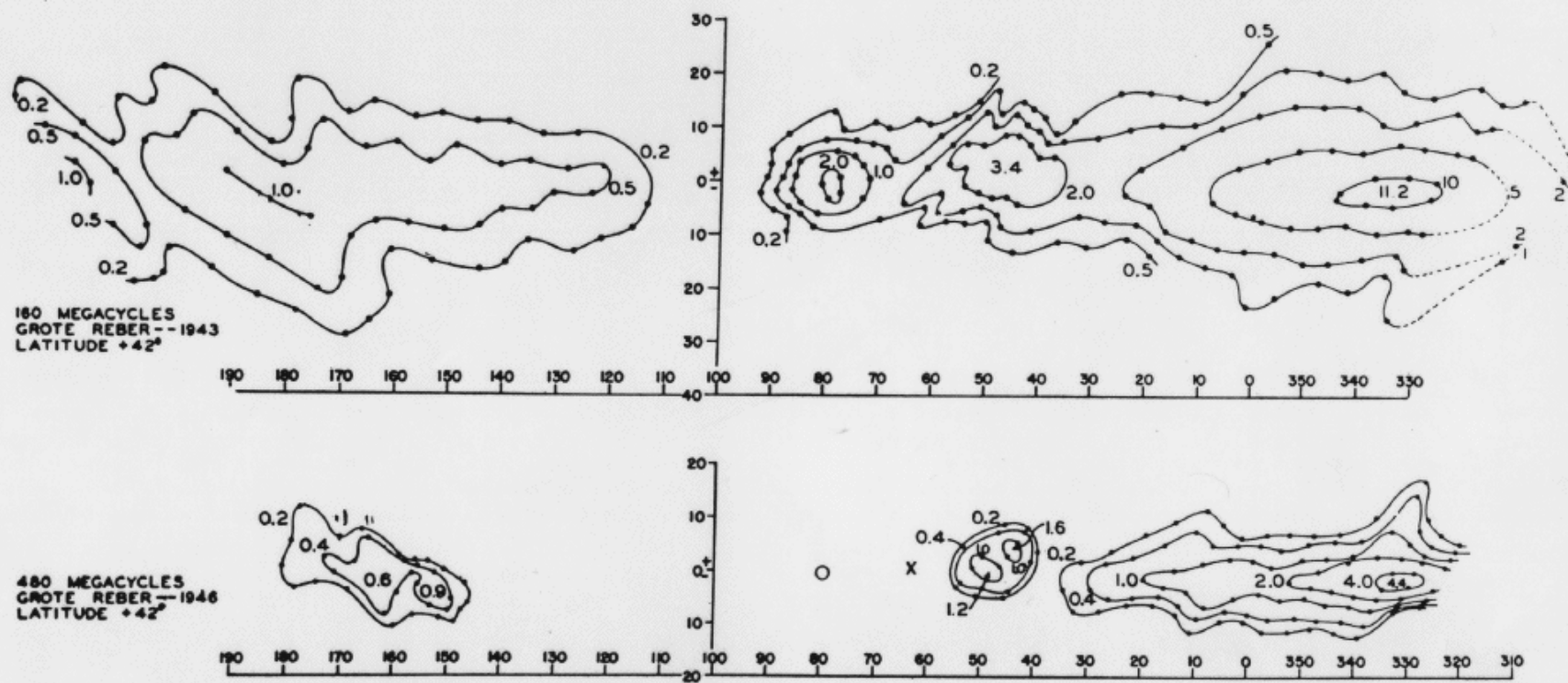


FIG. 7—Contours of constant intensity at 160 MHz and 480 MHz, taken at Wheaton, Illinois.

和射电天文有关的诺贝尔奖

- 综合孔径技术 (1974) Martin Ryle
- 脉冲星的发现 (1974) Antony Hewish
- 宇宙微波背景辐射的发现 (1978) Penzias & Wilson
- 脉冲双星的发现 (1993) Hulse & Taylor
- Charles H. Townes (1964)?

射电望远镜简单分类和部件

- 单镜：结构简单、但是空间分辨率低
- 干涉仪：大大提高空间分辨率，但是结构复杂、难以探测延展源
- 部件：天线(主镜)、接收机、频谱仪(相关机)

射电天文学常用概念和名词

- 天线温度：表征流量
- 速度：表征频率(波长)
- 波束(**beam**)：表征空间分辨率
- 视场：这个和其它波段的含义类似

亮温度 T_B 天线温度 T_A

- 普朗克函数:
$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

- 辐射强度 I_ν , 可以用其对应的黑体的温度来描述: 假定 $I_\nu = B(\nu, T)$, 温度 T 和辐射强度一一对应, 这个温度称为亮温度 T_B , 在很多情况下, 也会用瑞利-金斯近似下的表达式 ($h\nu \ll kT$, 高温、低频)
- 而在实际观测时, 测到的是一定的空间立体角内的平均辐射流量 F_ν (它是 I_ν 对空间立体角的积分值), 在空间立体角已知的情况下, 可以将望远镜测到的辐射流量归算到一个在此立体角内的平均辐射强度, 从而可以得到一个对应的温度, 这个温度称为天线温度 T_A

T_A 和 T_B 的差异

- 亮温度 T_B 是描述测量量的，对应于辐射强度 I_ν
- 而天线温度 T_A 则是描述天体的内在特性的物理量，对应于辐射流 F_ν
- 如果在望远镜的波束内，天体的辐射是均匀的，那么天线温度 T_A 和亮温度 T_B 只差一个望远镜的效率因子 η ： $T_B = T_A / \eta$
- 否则， T_A 将是波束内的一个平均

射电上常用到的其它温度概念

- 主波束温度 $T_{mb} = T_A / \eta$
- 系统温度 T_{sys} 是表征望远镜灵敏度的一个物理量，越小越好
- 激发温度 T_{ex} : 由布居数定义，玻尔兹曼分布
- 旋转温度 T_{spin} : 这个在HI的时候会用到，其实就是 T_{ex}
- HII区的电子温度
- 运动学温度 T_k : 粒子运动定义的温度，麦克斯韦分布

射电谱线观测中速度的定义

- Radio define:

$$v = \frac{\Delta\nu}{\nu} \times c$$

- Optical define:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \times c$$

- 由于射电天文中测量到的是频率，所以速度定义一般是用前者，但是对于河外源，有时为了和光学波段的一致性，也会使用后者

射电望远镜的分辨率和视场

- 单镜：分辨率由衍射极限决定，视场由其光学结构以及焦平面放置的接收机的数目决定
- 干涉仪：分辨率由最长基线以及工作频率决定，视场由单个望远镜的主波束大小决定

单镜观测模式

- 位置调制模式: position switching
- 频率调制模式: frequency switching
- Beam switching
- OTF

PS mode

- 为了减掉天空背景的辐射在接受到的总的信号中的贡献，需要测出天空的发射
- 具体的做法就是，在观测源一定的时间后(一般是1分钟左右)，在源的附近，找一个没有发射的天空，观测同样时间，然后2者相减

Beam switching

- 这个观测模式是靠摆动副镜来实现快速的ON-OFF切换
- 这个模式的优势是能够快速切换on-off(1秒以内的时间), 从而减少大气随时间变化所导致的不确定性, 以达到获得好的谱线基线的目的
- 缺点是这种观测模式off点都很近, 很多情况下难以使用这种模式

FS mode

- 在某些情况下，很难找到一个没有信号的天空区域作为背景(比如测银河系内的HI 21cm谱线时)，这个时候，需要利用其它途径来解决
- 频率调制，就是不变换天空中的指向位置，但是改变频率，作为off

OTF (on-the-fly)

- 这种观测模式可以认为是一种改进的ps模式
- 能够很有效的进行成图观测研究
- 操作方式是，不同于ps模式，望远镜不是在跟踪天上的某一个位置，而是一直在扫描，并且快速的计数，这样使得在读数时间内，望远镜指向的区域基本上还是一个波束大小，在扫描天空的源一段时间后，在附近找一个off点进行观测，然后按照观测者的需要将这些原始数据重新计算并采样，得到谱线的成图数据

射电干涉仪的一般观测模式

- 干涉仪观测时需要进行相位校准，流量校准，以及 **bandpass** 的校准(对谱线观测模式)
- 相位校准源需要隔一段时间(约半小时)观测几分钟，用来记录大气带来的相位和流量变化，需要用点源(类星体)来作相位校准源
- 流量校准源要求这类源流量不随时间变化，经常用行星、大行星的卫星或者几个经过常年监测流量基本上不变化的类星体
- **Bandpass** 校准需要源的辐射中没有谱线，经常使用强的类星体或者行星
- **Bandpass** 和流量校准源都需要比较辐射比较强，能够在很短的时间达到好的信噪比，这2者有时可以合用

射电望远镜的主要性能指标

- 灵敏度
- 空间分辨率(干涉仪的必要性)
- 工作频率
- 带宽(谱覆盖范围)
- 谱分辨率
- 时间分辨率(这个对脉冲星观测很重要)
- 视场
- 系统稳定性

射电常用的流量单位

- 单镜一般用天线温度 T_A 或者主波束温度 T_{mb} 来表示流量，单位用K
- 干涉仪一般使用单位频率的流量 F_ν ，单位用Jy，是为了纪念射电天文学的开创者Karl Jansky
- 注意：K和Jy之间的转换，需要知道beam的大小

灵敏度的估算

- 单镜：口径、天线效率、系统温度、谱分辨率、积分时间
- 干涉仪：总的有效口径、系统温度、谱分辨率、积分时间、源的大小与分辨率的匹配

Moment的定义及其物理意义

- Moment 0 : $M_0 = \int F_v dv$

- Moment 1 : $M_1 = \frac{\int F_v \times v dv}{M_0}$

- Moment 2 : $M_2 = \sqrt{\frac{\int F_v \times (v - M_1)^2 dv}{M_0}}$

课后作业

- 推导一下radio define 和optical define得到的速度两者之间的关系
- Moment 0, 1, 2各代表什么物理意义?
- 计算利用普朗克公式和瑞利-金斯公式 ($h \nu \ll kT$) 得到的亮温度之间的差异, 对于温度为5K, 20K, 50K的黑体, 其在频率为3GHz、30GHz以及300GHz处, 利用瑞利-金斯公式计算得到的亮温度分别是多少?