

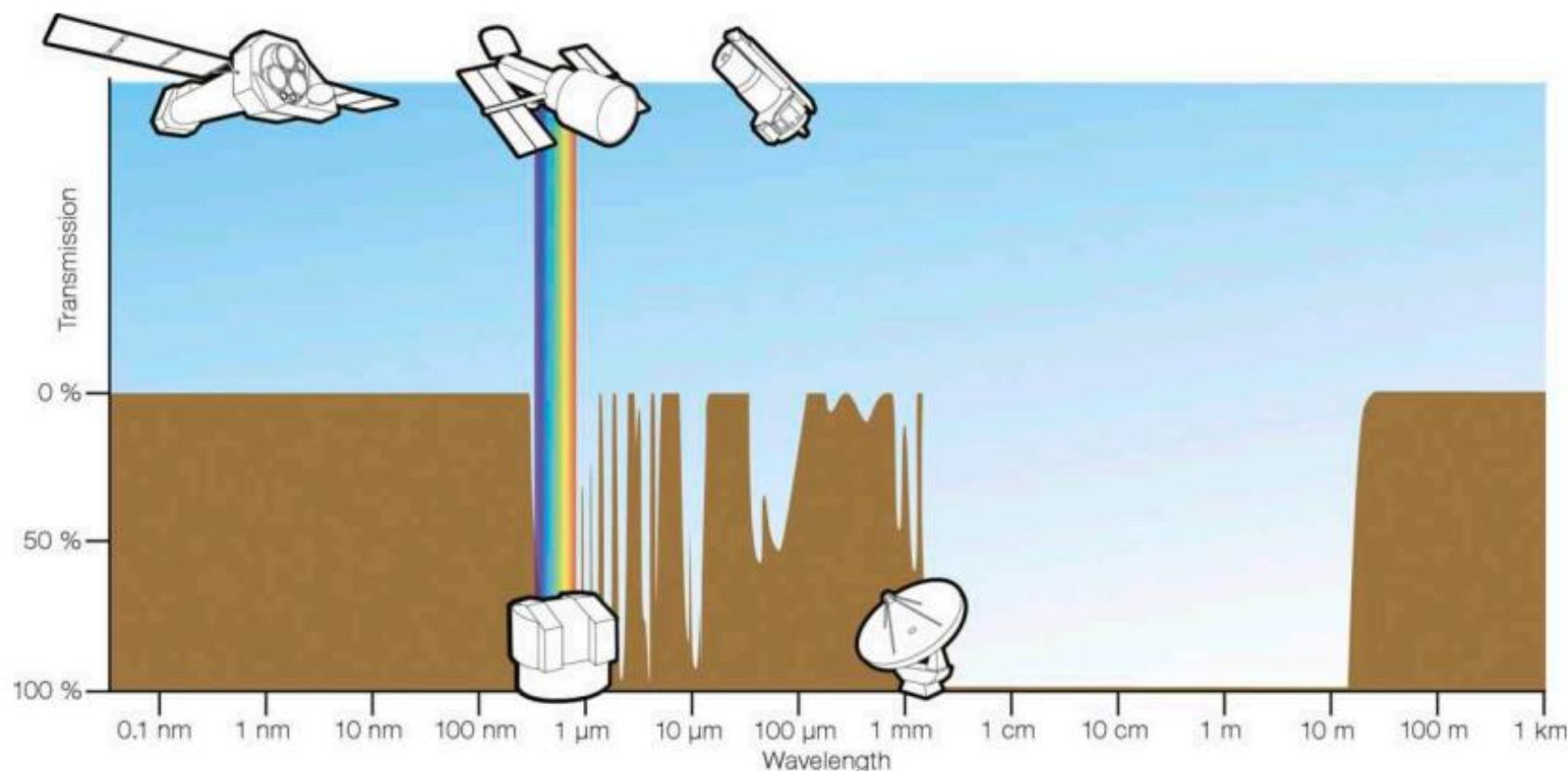
射电 脉冲星 射电脉冲星

曹顺顺
2021秋

射电天文诞生：贝尔实验室的央斯基于1932年为了测试跨洋电话业务的噪声，搭建了底座可以旋转的天线，结果认证了来自银河系中心的射电辐射。

当和平鸽从拥吻的恋人身边飞起，向大战阴云散去了的天空中飞去时，人们将曾经对准敌人的天线对准浩瀚的宇宙，向自然界表示想要交个朋友。

——二战后射电天文兴盛



为什么我们可以用射电望远镜看东西？——涉及天线的互易定理(reciprocity theorem)
(Rayleigh, Helmholtz, Carson……)

电动力学告诉我们，一个时变的电流/电荷分布可以激发出一个电磁场。
天线(aerial)是一个电流/电荷分布的载体，可以发射或接收电磁波。

与距离、天线朝向有关

互易定理：

假设有两个天线：一个是发射天线，
配备一个源(G)；一个是接收天线，
配备一个测量仪(M)。固定发射天线
和G的输出，将接收天线摆在使得
M有最大响应的位置处，将此时M
的响应值记为m。

此时若将G和M调换位置，或者说
让发射天线和接收天线互换角色，
M的响应值将仍为m。

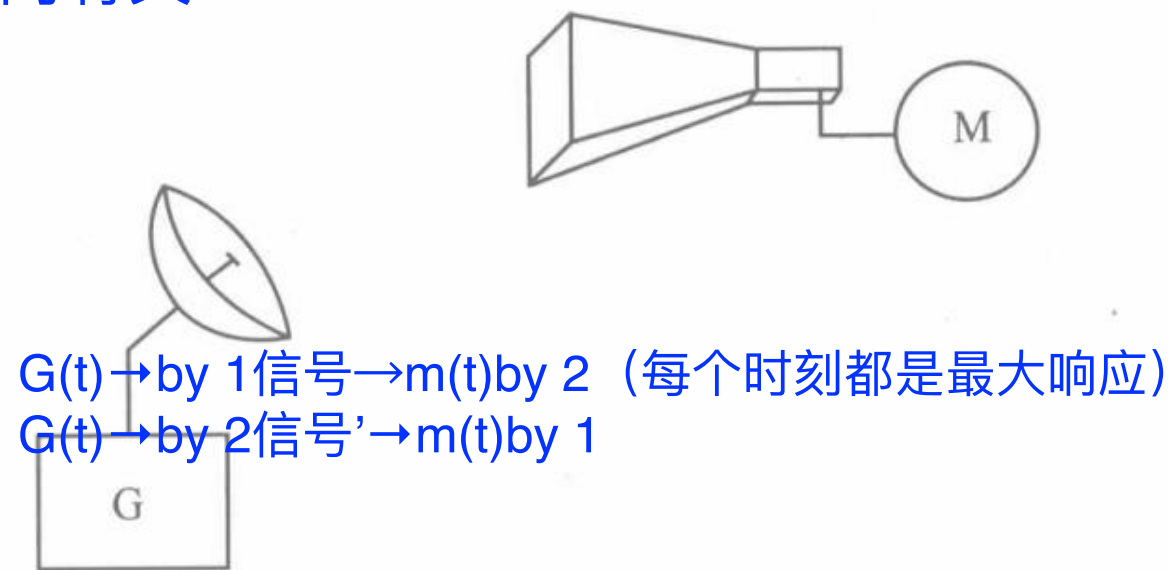
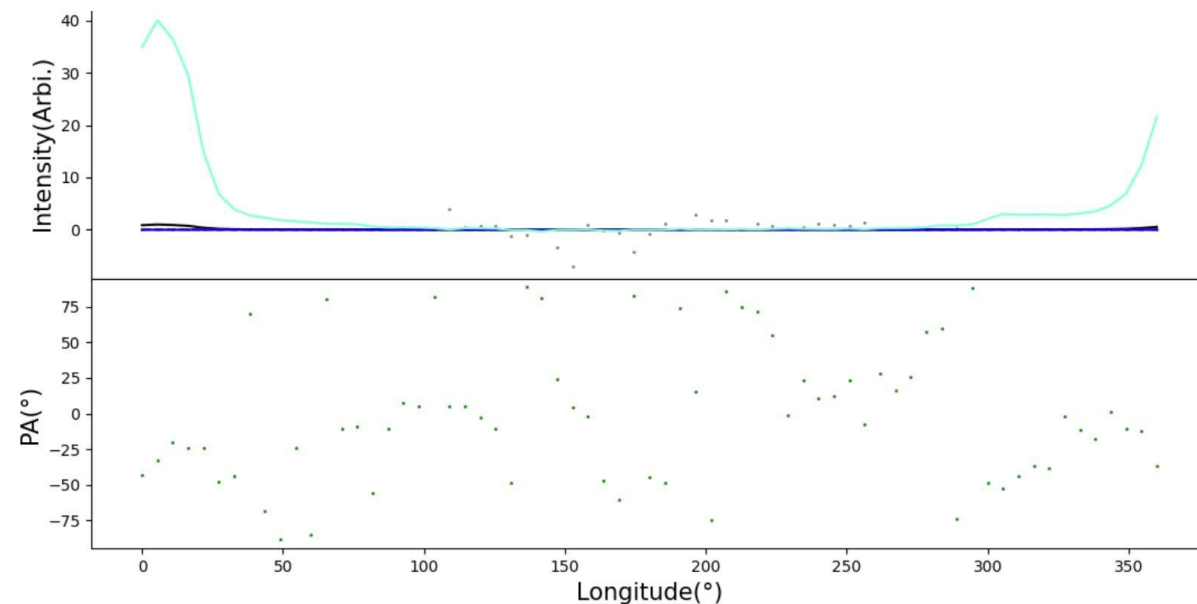
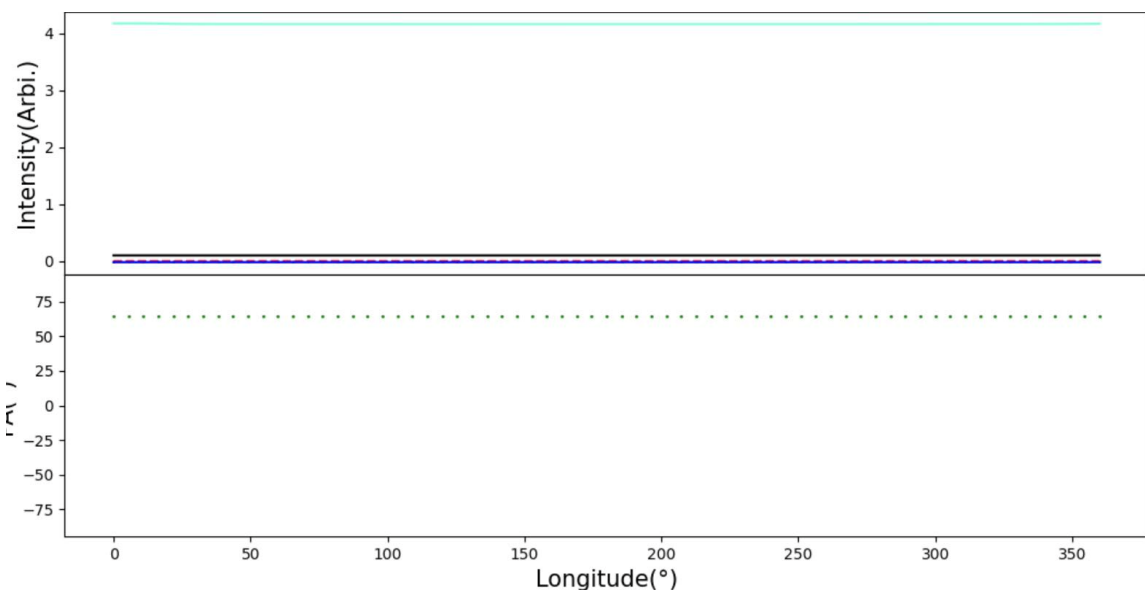


图5.4 解释互易定理的示意图。G 是发电机，发送信号，M 是测量仪，测量接收的信号

互易定理告诉我们拿来发射信号的天线可以拿来接收信号，那我们把天线对准一些天区，试图得到一些东西，然而发现事情并不简单……

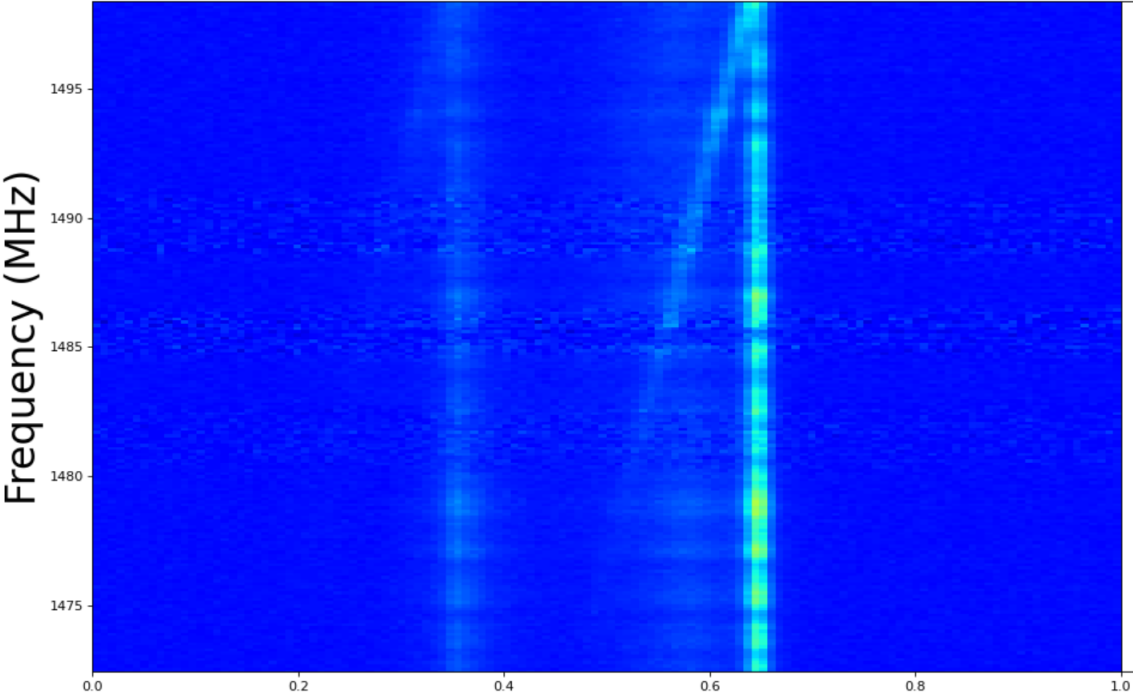
首先是噪声——一个至今没有办法得到完美处理的东西。
设备热噪声……环境噪声……

对于射电脉冲星的观测而言，基本的噪声往往在长时间上是不变的(基线)
(其实这个条件在精度比较高的观测中也无法保证……)，
可以叠加后直接扣掉(数据正比于 N ，噪声正比于 \sqrt{N} ，多叠加些周期信噪比就高了)：



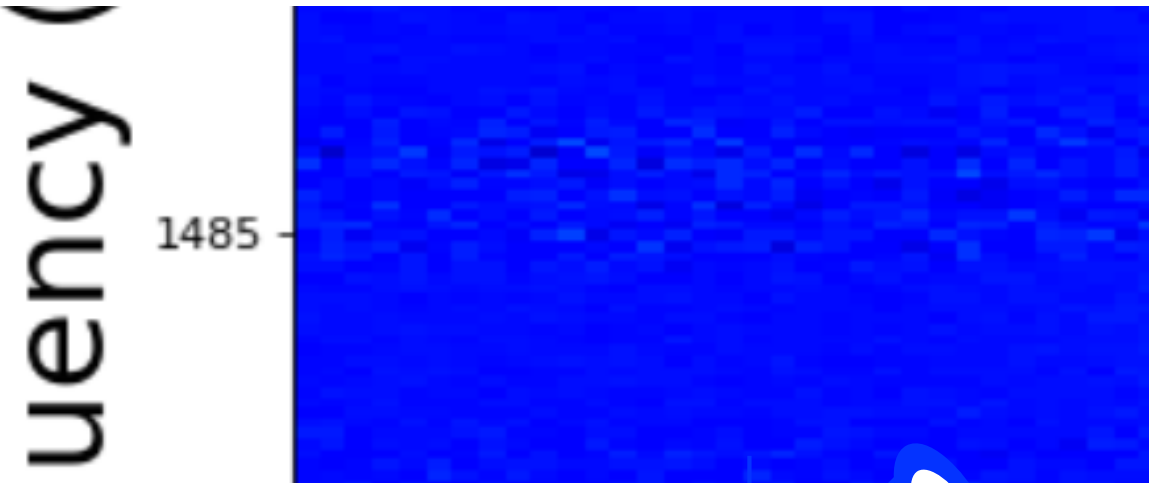
噪声之后是射频干扰(RFI): 其实这是一个专门的课题, 有很多很厉害的研究保障我们的观测, 消去各种射频干扰(比如来自通信卫星的……)。

但这里只考虑最简单的一种消干扰:
相比于我们的脉冲星信号, 射频干扰的特征之一是: 它只在一些特定频率产生, 且往往在时间上比较持续。如此, 我们可以去看一下数据的频谱, 把“异常”的频率排除出我们的数据处理。 斜线: 不属于频率探测范围内的信号被傅里叶变换

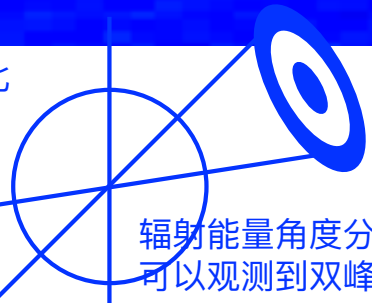


周期中的相位

两条竖线: 脉冲星南北极两次扫过

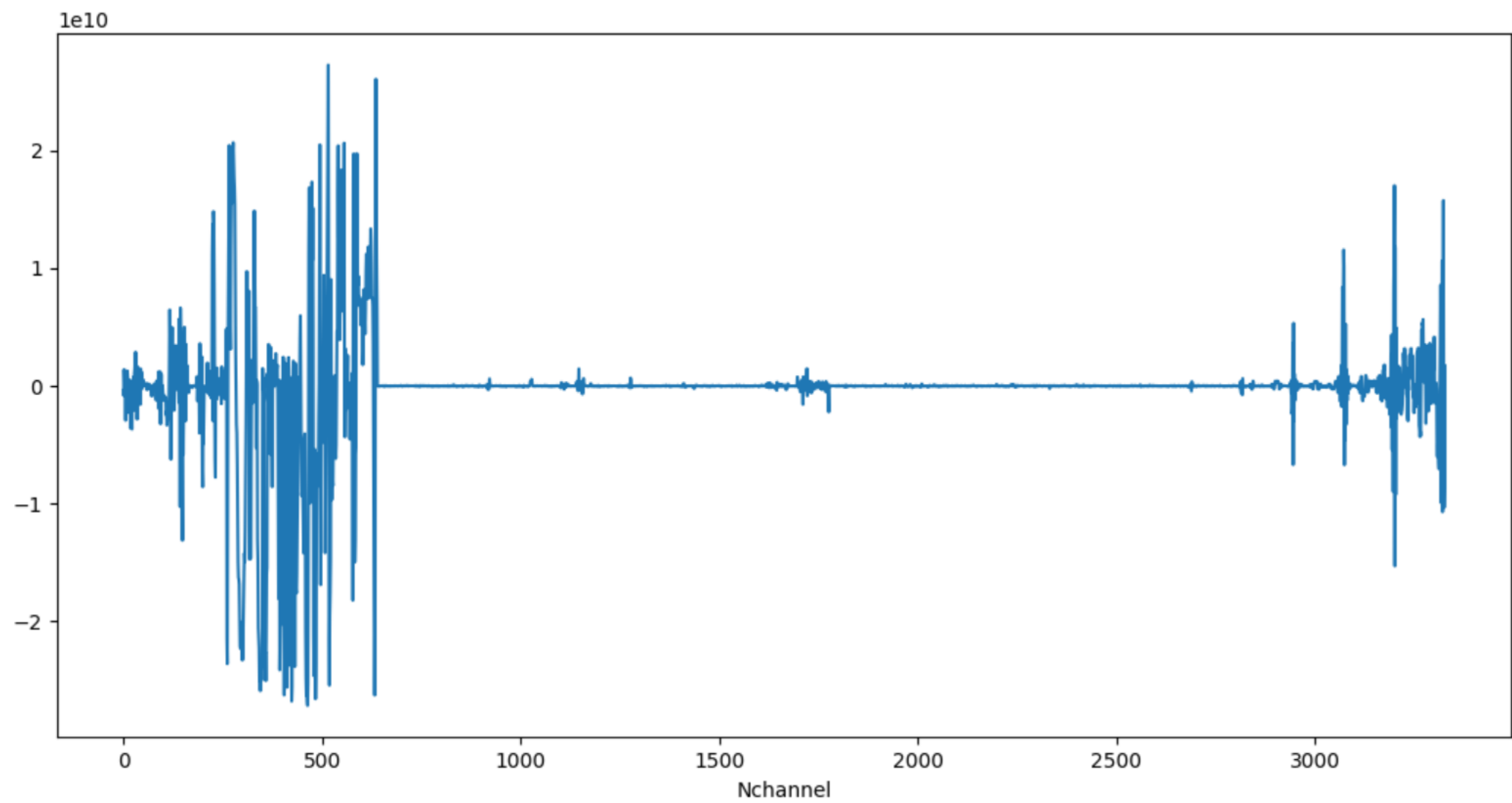


经验公式: “辐射锥”张角正比于周期-0/5次方 (自转越快, 共转半径越小, 开放磁力线越多, 辐射锥张角越大。)



辐射能量角度分布, 因此可以观测到双峰、三峰

有的干扰强的可以直接看频谱：



上面的两种观测修正是原理上非常复杂，但是在很多观测情况下很好处理的；
而下面介绍的两种修正，是原理上比较规整，但是相对来说处理起来复杂一点的。

(1) 消色散：频散量DM

光学是用滤光片，射电是调节天线基线等

信号相加，噪声平方相加再开根

由于我们的观测往往是一个**多频道**的观测（单频道信噪比一般较低……），所以不可避免地会出现色散的问题。下面我们来推导一下在一般星际环境中的电磁波色散

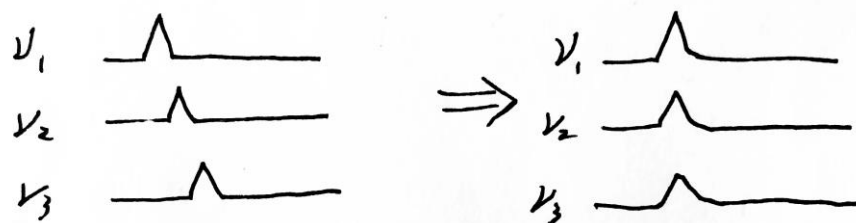
关系：on黑板 不同频率的到达时间不同（看的是波包→群速度）

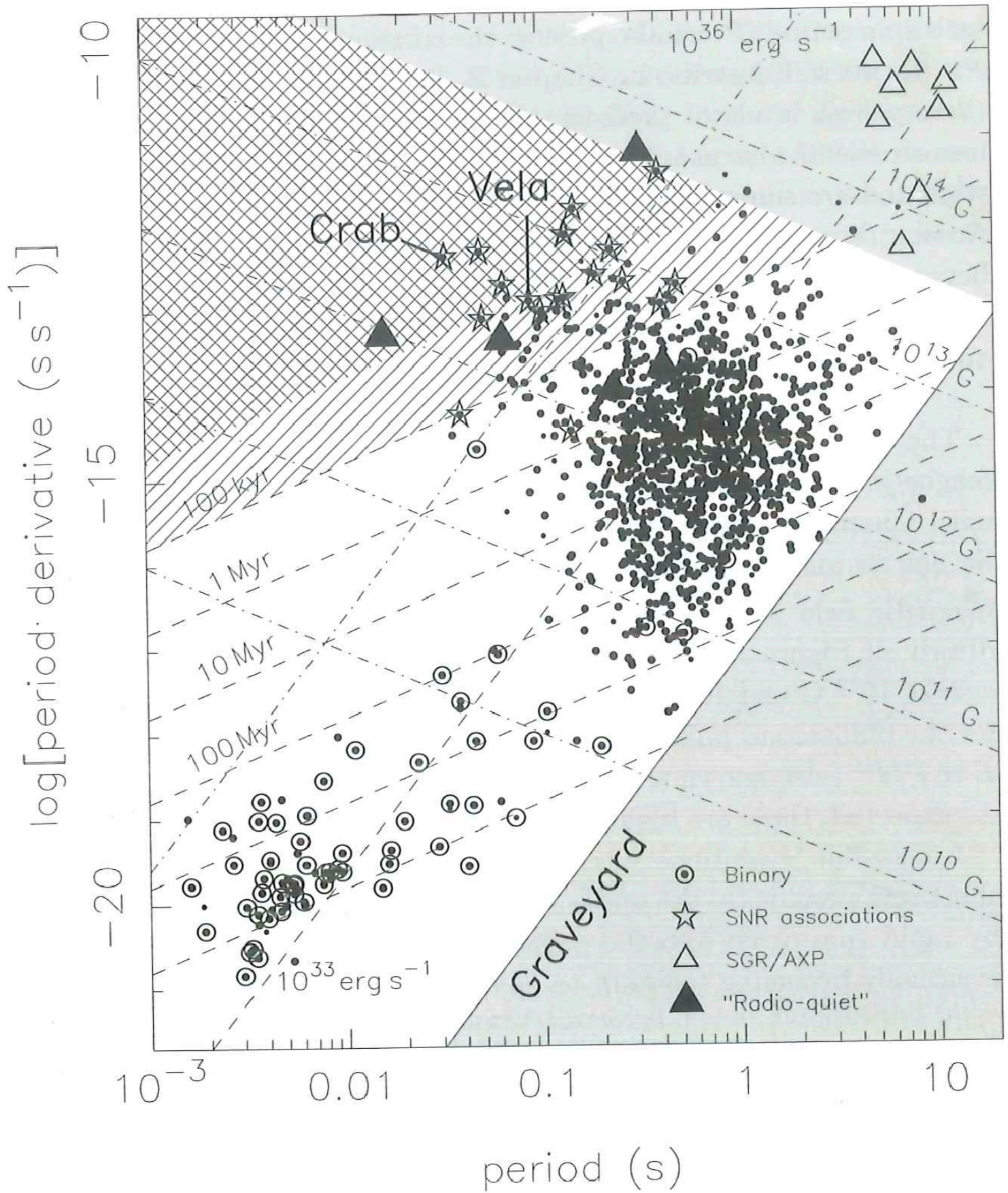
电磁波频率需要大于星际介质等离子体、地球电离层的等离子体频率。而后者远大于前者。

$$\Delta\tau_D = \frac{e^2}{2\pi cm_e} \left[\frac{1}{\nu_1^2} - \frac{1}{\nu_2^2} \right] \int_0^L N(l) dl$$

载流电荷数密度

$$\frac{\Delta\tau_D}{\mu s} = 1.34 \times 10^{-9} \left[\frac{DM}{\text{cm}^{-2}} \right] \left[\frac{1}{\left(\frac{\nu_1}{\text{MHz}} \right)^2} - \frac{1}{\left(\frac{\nu_2}{\text{MHz}} \right)^2} \right]$$





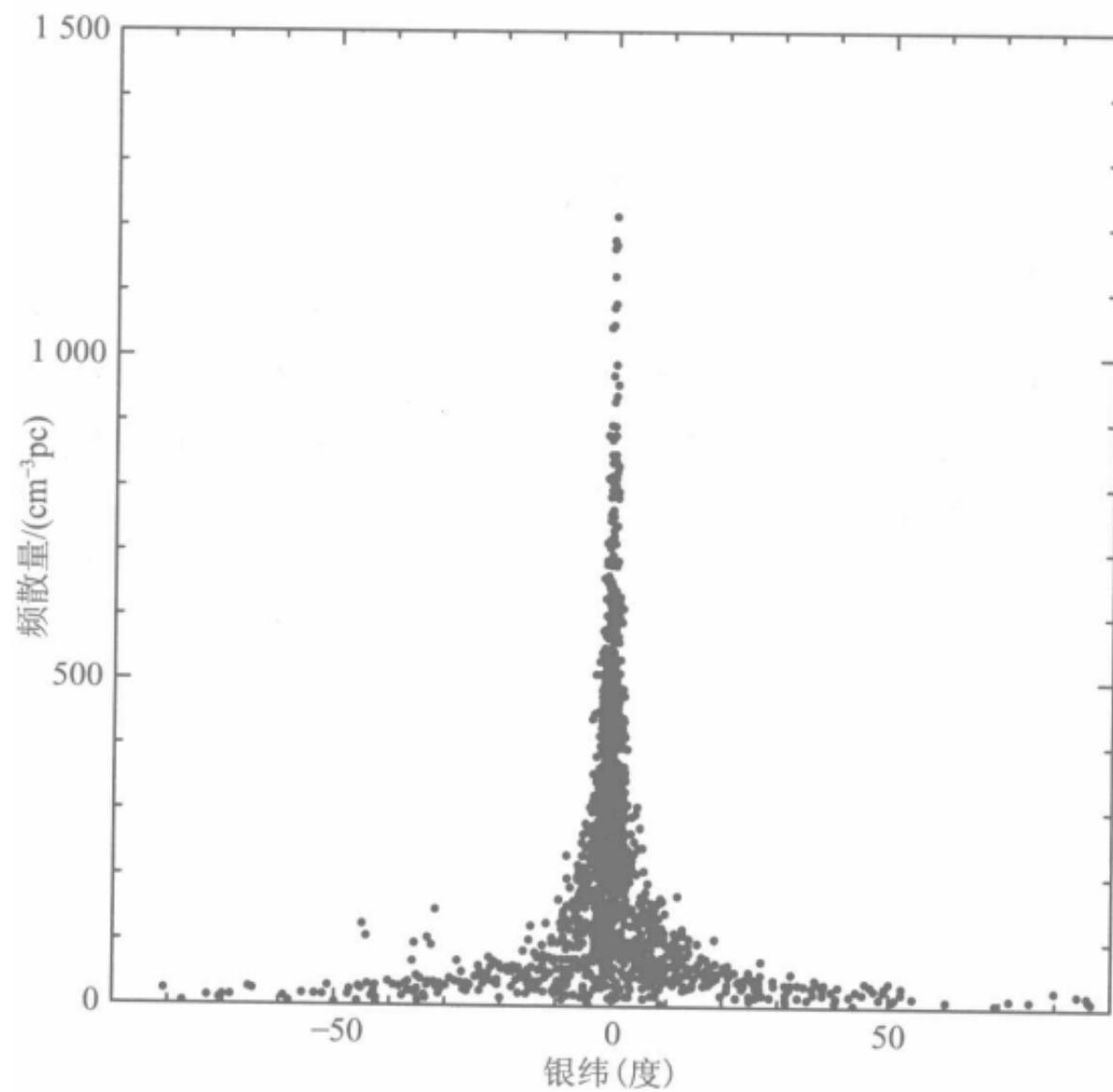


图 2.3 不同银纬脉冲星的频散量 DM

脉冲星常见DM值：
 $10^1 \sim 10^2 (\text{cm}^{-3}\text{pc})$

(2)消旋： 旋转量RM

星际环境中磁场是很常见的，它对我们的观测有明显的影响。

1845年法拉第在实验中发现，给光的传播方向上加上磁场，光在绝缘介质中的偏振会发生变化——法拉第旋转

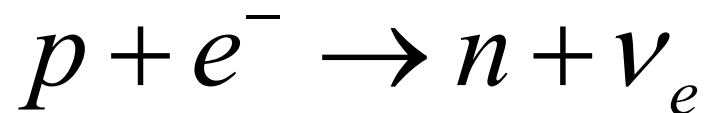
我们观测脉冲星等等射电源时经常关注其偏振，但偏振面从源出来传播的过程中会因为法拉第旋转而发生变化，我们需要了解这种变化怎么来的：推导on黑板

$$\Delta\psi = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^2} \frac{1}{\nu^2} \int_0^L B_{//} N(z) dz$$
$$\frac{\text{RM}}{\text{rad} \cdot \text{m}^{-2}} = 8.1 \times 10^5 \int_0^{L/\text{pc}} \left(\frac{B_{//}}{\text{Gs}} \right) \left(\frac{N}{\text{cm}^{-3}} \right) d\left(\frac{z}{\text{pc}} \right)$$
$$\frac{\Delta\psi}{\text{rad}} = 8.1 \times 10^5 \left(\frac{\lambda}{\text{m}} \right)^2 \int_0^{L/\text{pc}} \left(\frac{B_{//}}{\text{Gs}} \right) \left(\frac{N}{\text{cm}^{-3}} \right) d\left(\frac{z}{\text{pc}} \right)$$

DM和RM的修正都对频率有明确的依赖关系，可以借此去计算或拟合DM与RM.

在观测不断发展的同时，有一些理论物理学家把目光转向一些奇怪的东西：

Landau(1932): 普通物质星压缩——中子化



原子核电荷越大，中子越多，来提供强力约束。但中子星还有重力约束

正常物质(密度 $\sim 1\text{g/cm}^3$)被压缩到核物质密度($\sim 10^{14}\text{g/cm}^3$)
电子数密度大大增加，费米能增大好几个数量级使得上述反应平衡右移

逆反应会同时存在

但同时，一个反应不可能彻底进行，还有质子电子等等的剩余
——这为“中子星”作为脉冲星的物理实际候选体提供了线索

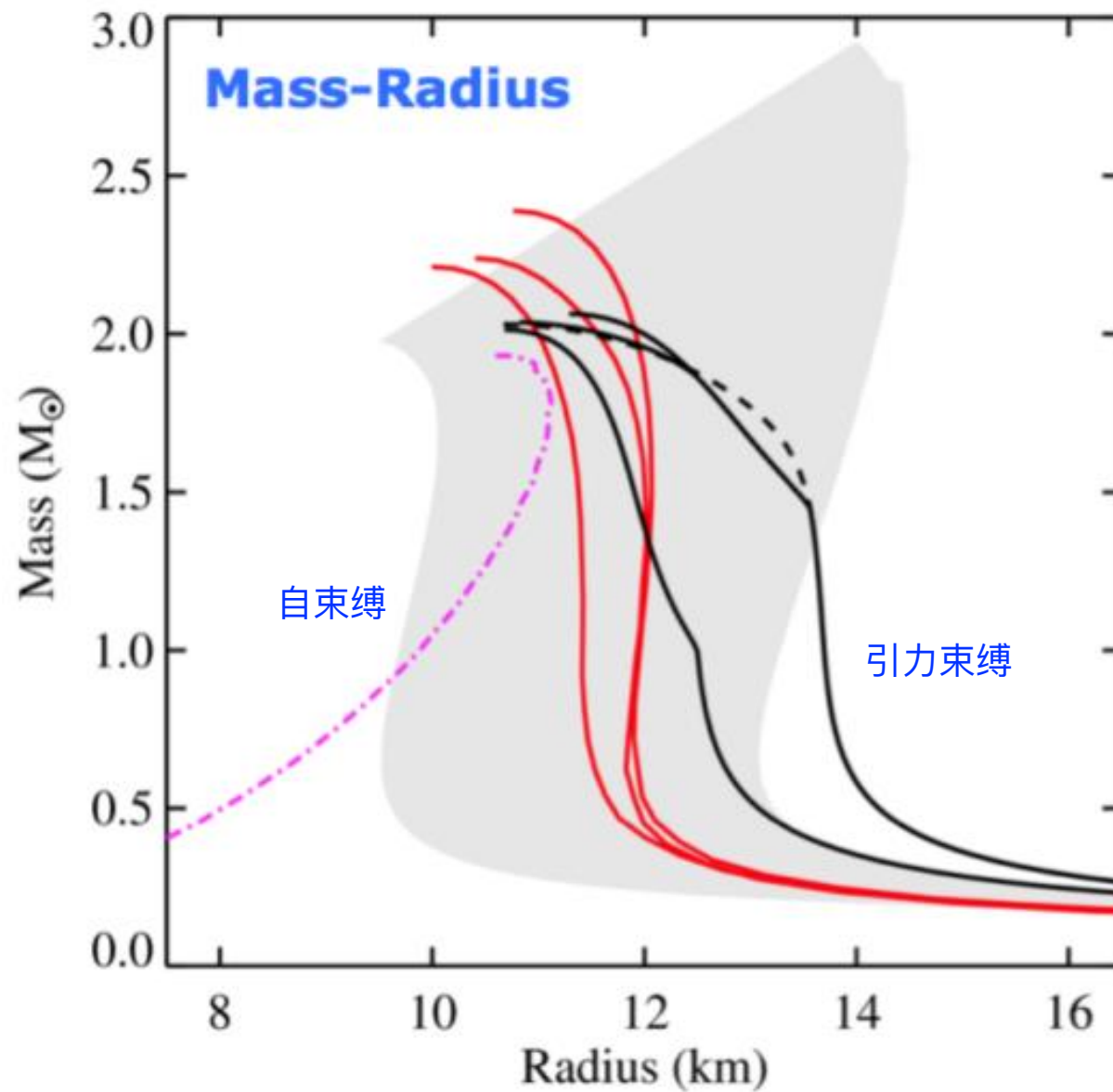
即：足够致密（质量半径在一定范围内），还得有电磁现象（强电磁场）

真的全是中子，就没有电磁信号

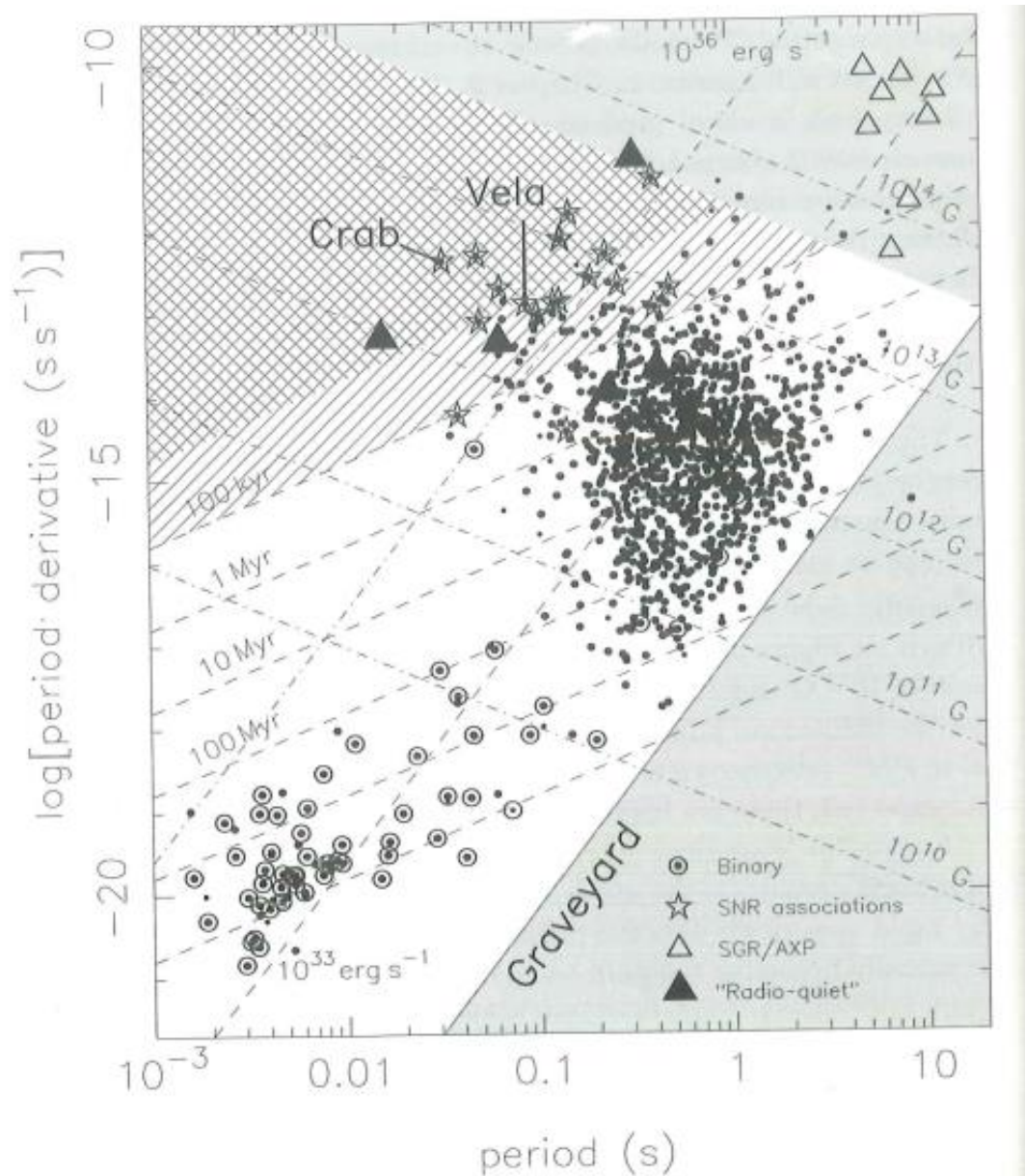
脉冲星物态?
大原子核

早期: TOV方程+.....

引力束缚系统
自束缚系统



Credit: Watts, Espinoza, Xu 2015



Normal pulsar: 周期0.1~10秒
 Millisecond pulsar: 周期ms量级

毫秒脉冲星由双星系统中吸积形成
 “recycled”

“Graveyard”死线——脉冲星熄灭

其他脉冲星类天体:

RRAT

Magnetar(转得慢, 磁场大)

FRB……? maybe……

脉冲星辐射机制——至今没有解决

来看一下迄今做得最好的RS模型(1975)——见另一个文件

Thank you.