

脉冲星的发现和意义

北京大学天文系
乌鲁木齐天文站
吴鑫基

脉冲星的四大发现

- 1967年贝尔和休伊什发现脉冲星
确认中子星的存在
- 1974年赫尔斯和泰勒发现脉冲星双星系统
间接验证引力波的存在
- 1982年贝克和库尔卡尼发现毫秒脉冲星
确认X射线双星与脉冲星的演化关系
- 1992年沃斯赞和弗雷尔发现脉冲星的行星
人类发现的第一个太阳系外的行星系统

一，中子星的预言

1，中子星的预言：

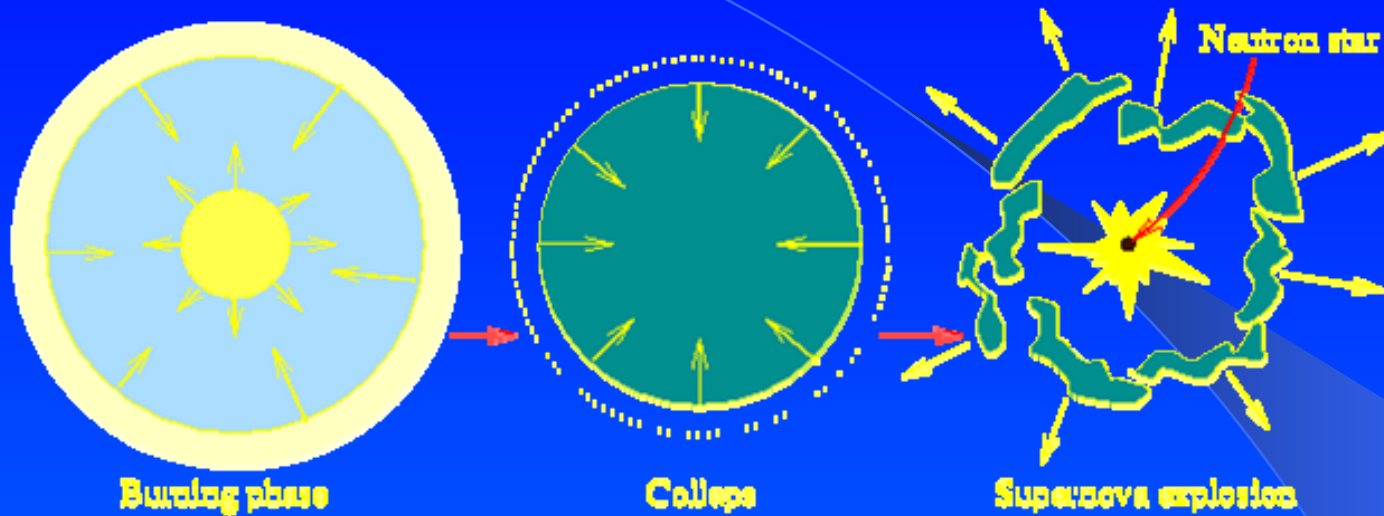
1932年，发现中子后预言，中子星存在

1939年，提出中子星的结构

1934年，提出超新星爆发可以产生中子星

1967年，指出蟹状星云中有一颗自转的磁
中子星

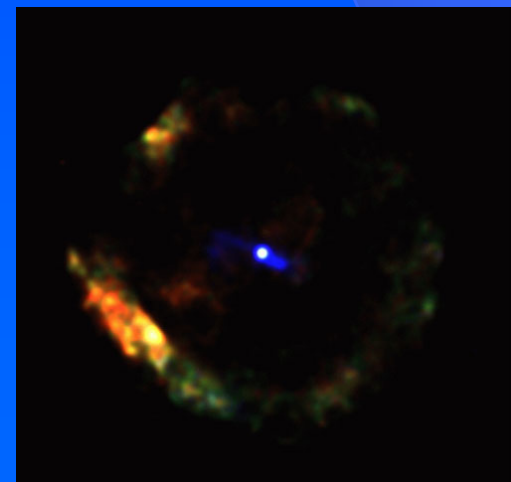
2, 脉冲星主要产生于超新星爆发:



塌缩质量超过1.4太阳质量, 形成中子星



角动量守恒
磁通量守恒.



3, 中子星形成的三个阶段

第一步：中子化过程

- 原子核中的中子越来越多；
- 密度大于 10^6 克/厘米³时，核外电子的能量大，可打进原子核，高能电子打入原子核，和质子相碰，形成一个中子和一个中微子（即发生逆 β 衰变反应）。
- 反应后，原子核中少了一个质子，多了一个中子，这个元素变为另一种元素。

第二步：自由中子发射过程

当原子核中的中子越来越多，中子的能量大到一定程度时，中子就有可能跑出原子核。

条件：密度达到或超过 4×10^{11} 克/厘米³。

第三步：原子核破裂形成中子流体

当密度超过 10^{14} 克/厘米³ 以后，原子核便完全离解，其中的质子和电子相碰变为中子，成为中子的海洋。但是中子星内还存在着很少量的质子和电子。

4, 简并电子气和白矮星的形成

恒星的热核反应停止，导致塌缩，密度增加，温度上升，原子核外电子全部电离，形成电子气。

根据泡利不相容原理，电子的能量状态是不连续的，只能取某些特定的值。同一个状态，只能允许一个电子占有。电子能量从低到高排列，低能态的占满了，就只能到高能态去。

当电子密度很高时，必然有很多电子处在高能态。具有非常高的速度，因此产生的简并电子气压非常高，可以与引力相抗衡。形成稳定的白矮星。

白矮星质量上限

当坍缩后的恒星质量超过一定的限度后，密度再加大，简并电子气就变为相对论性的了，就不可能形成稳定的白矮星。

相对论性 $p \propto \rho^{4/3}$

非相对论性 $P \propto \rho^{5/3}$

相对论性的物态方程得不到质量—半径关系，如果质量增加，不能通过调整半径使白矮星稳定。白矮星有一个质量上限：1.44个太阳质量。超过上限将演化为中子星或者黑洞。

5, 简并中子气和中子星的形成

密度超过 10^{14} 克/厘米³, 原子核便完全离解, 成为中子的海洋。中子气是简并的, 高密绝大部分中子处于很高的能态, 形成了极其巨大的简并中子气压。

简并中子气所形成的压力远远超过简并电子气压力, 成为可以抗衡引起星体坍缩的引力, 形成稳定的中子星。

如果坍缩后所形成的致密星的质量大于2个太阳质量时, 中子气简并压力也无法抗衡引力, 星体便只能一直收缩下去, 形成黑洞。

6, 中子星在哪里呢?

预言后的30多年,

一直不知道如何去搜寻中子星

问题:

没有人研究中子星辐射的理论模型;

没有去猜测其辐射特性;

如果有多种模型提出, 必定推动观测实验。

7, 蟹状星云能源之谜

- 射电、光学、X和 γ 射线辐射等所有频率的辐射加起来, 相当于十万个太阳的辐射。一团稀薄的气体, 其能量来自何方?
- 观测发现蟹状星云在加速膨胀, 每年约0.2角秒左右。能量由谁来提供?
- 同步辐射: 高能带电粒子和磁场来源?



8, 帕齐尼预言

(1967年发现脉冲星之前)

“蟹状星云中有一颗中子星，每秒自转多次、具有很强磁场，提供蟹状星云所需的能量。”

勇气: 首次预言非常快的自转，任何已经观测到的天体都没有这样快的自转。

首次预言非常强的磁场。也是没有先例。

熟知: 磁偶极辐射。由中子星的磁偶极辐射提供蟹状星云能量。

9, 休伊什发现蟹状星云中致密源

1965年他用行星际闪烁方法测出了蟹状星云中存在一个致密成分，角径0.2角秒，亮温度达到 10^{14}K 。

他指出，这个致密成分可能是1054年超新星爆发的遗留物。可惜，他并没有认识到这个致密源就是中子星。

二，1967年发现脉冲星

1，剑桥大学的闪烁望远镜

- 休伊什教授长期研究行星际闪烁，有很大的成就。只有角径很小的射电源，才会有闪烁现象，即信号起伏变化；
- 1965年，决定采用行星际闪烁技术大规模地确认类星体。研制专门用于行星际闪烁的大型射电望远镜。

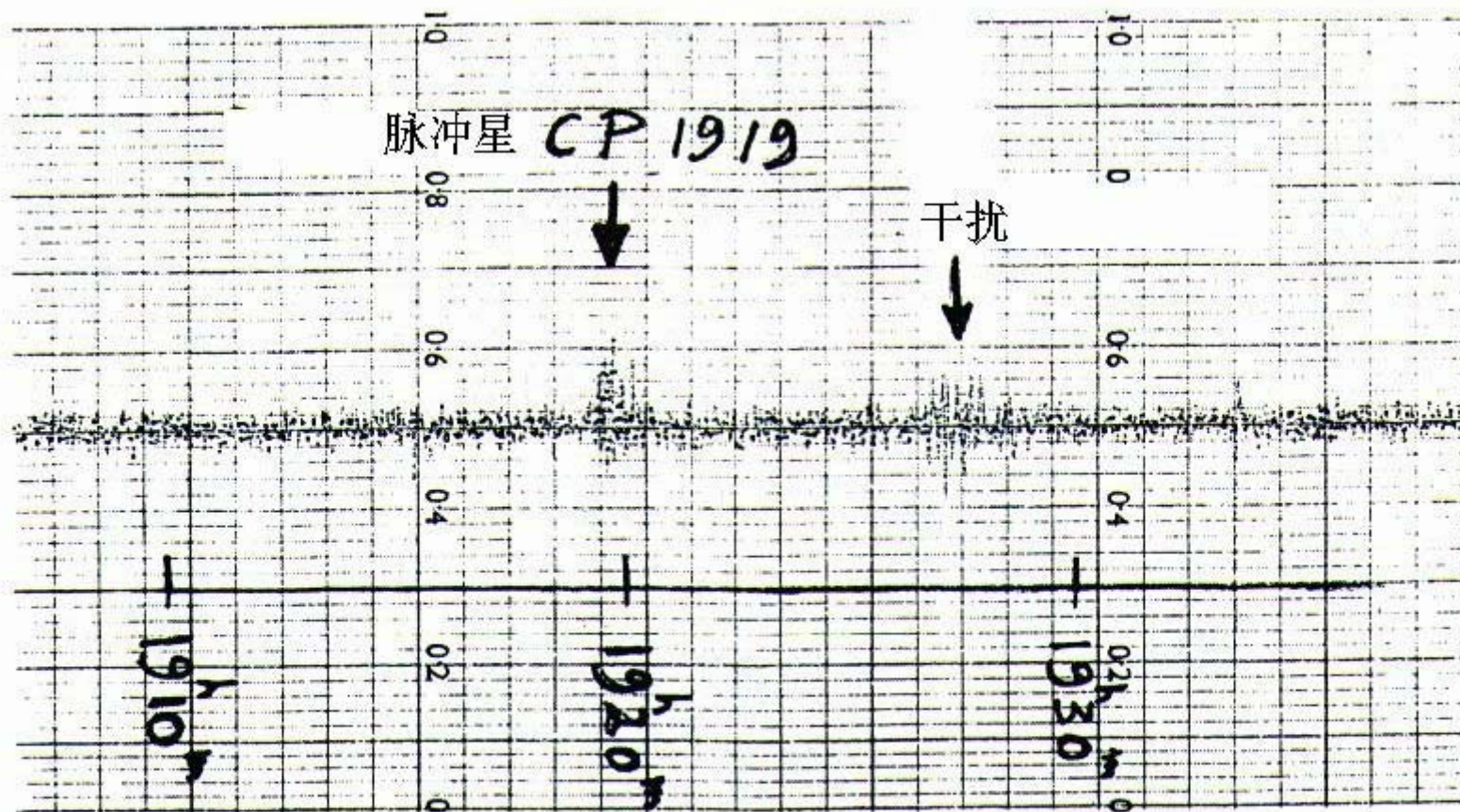
- 天线面积很大，达有2万1千多平方米
长470米宽45米宽的矩形天线阵，
- 3.7米的波长： 闪烁比较强；
- 时间分辨率
达到0.1秒。
- 望远镜造价
低，制造容易，
由老师和学生
共同完成。



2, 贝尔和休伊什发现脉冲星

67年8月, 贝尔注意到一个发生在深夜的“闪烁源”。夜晚太阳风很弱, 强闪烁源是不会发生在夜晚的。

在排除了人为干扰和确认这个信号遵守恒星时以后, 休伊什认为可能是一颗来自太阳系之外的射电耀星。



6 AUG 1967

休伊什的贡献

- 研制行星际闪烁射电望远镜;
- 行星际闪烁观测计划和执行;
- 与贝尔一起检验“可疑的信号”最终确认发现脉冲星;
- 消除地球轨道运动的影响, 获得精确的周期;
- 从理论角度进行多方面探索: 干扰; 耀星; 外星人电报; 白矮星; 中子星等。

贝尔发现4颗脉冲星

- 贝尔在12月25日她又发现了第二个脉冲星。1968年1月，她全面地检查以前的多达5000米记录纸所记录下的资料，又发现了2个脉冲星。总共4颗脉冲星。
- 从此，脉冲星观测发现高潮迭起，但是不见休伊什和贝尔，为什么？射电望远镜不行。



PSR 0329+54, $P=0.715s$



PSR 0833-45, $P=89$ 毫秒



PSR 1937+21, $P=1.558$ 毫秒

来自宇宙天体的声音

3, 脉冲星就是自转磁中子星

(1), 脉冲星周期的主要观测特征

- 之一: 稳定而短的周期

周期1.5毫秒~8.5秒。十分稳定,可以和原子钟比美。5年观测起伏约0.3微秒。

- 之二: 周期缓慢的变长

脉冲星周期随时间十分缓慢地增加,变化率非常之小:

$$\dot{p} = 10^{-13} \sim 10^{-20} \text{ s/s}$$

(2)，脉冲星的周期是怎么来的？

天文上周期性现象是常见的，但都没有这样短。天文周期现象的三种来源：

- 1，双星的轨道运动周期
- 2，径向脉动周期
- 3，自转

由于周期太短，只能是体积非常小的致密星：
中子星或白矮星。

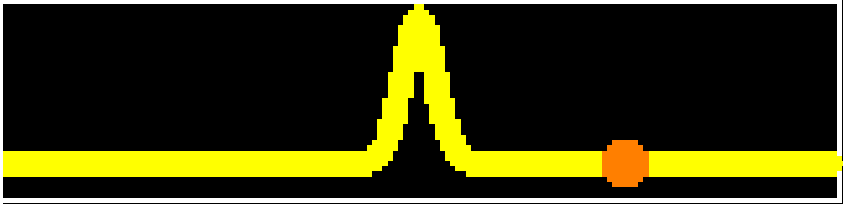
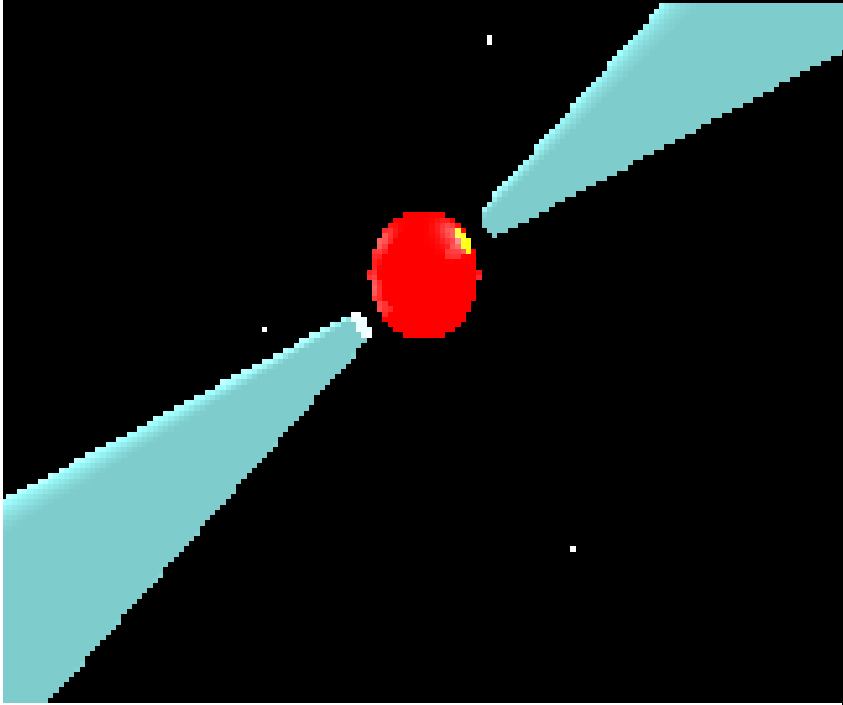
(3), 自转中子星

- 中子星双星的轨道周期 \Rightarrow 轨道周期变短与脉冲星周期越来越长的观测不符;
- 中子星径向振荡周期 \Rightarrow 周期不准确, 也不是越来越长的, 与观测不符。
- 中子星自转周期 \Rightarrow 周期稳定 \Rightarrow 周期逐渐变长。与观测特征相符, 确认是自转中子星

4, 脉冲星的磁极冠模型

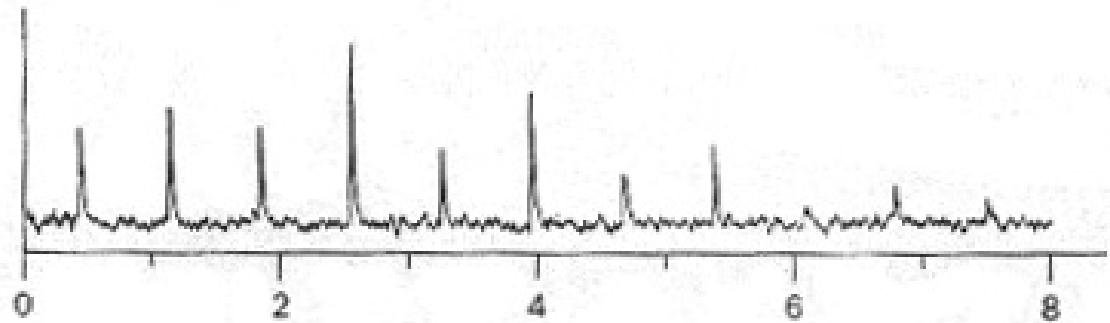
中子星具有非常强的磁场，在磁极冠区，带电粒子在磁场中运动发出曲率辐射，形成一个方向性很强的辐射锥，就像灯塔发出的两束光一样。辐射锥的中心是磁轴。一般地，磁轴和中子星自转轴不重合，所以当辐射锥和中子星一起转动扫过地球上的射电望远镜时，我们就接收到一个脉冲。

MPIfR-Bonn Pulsar Group

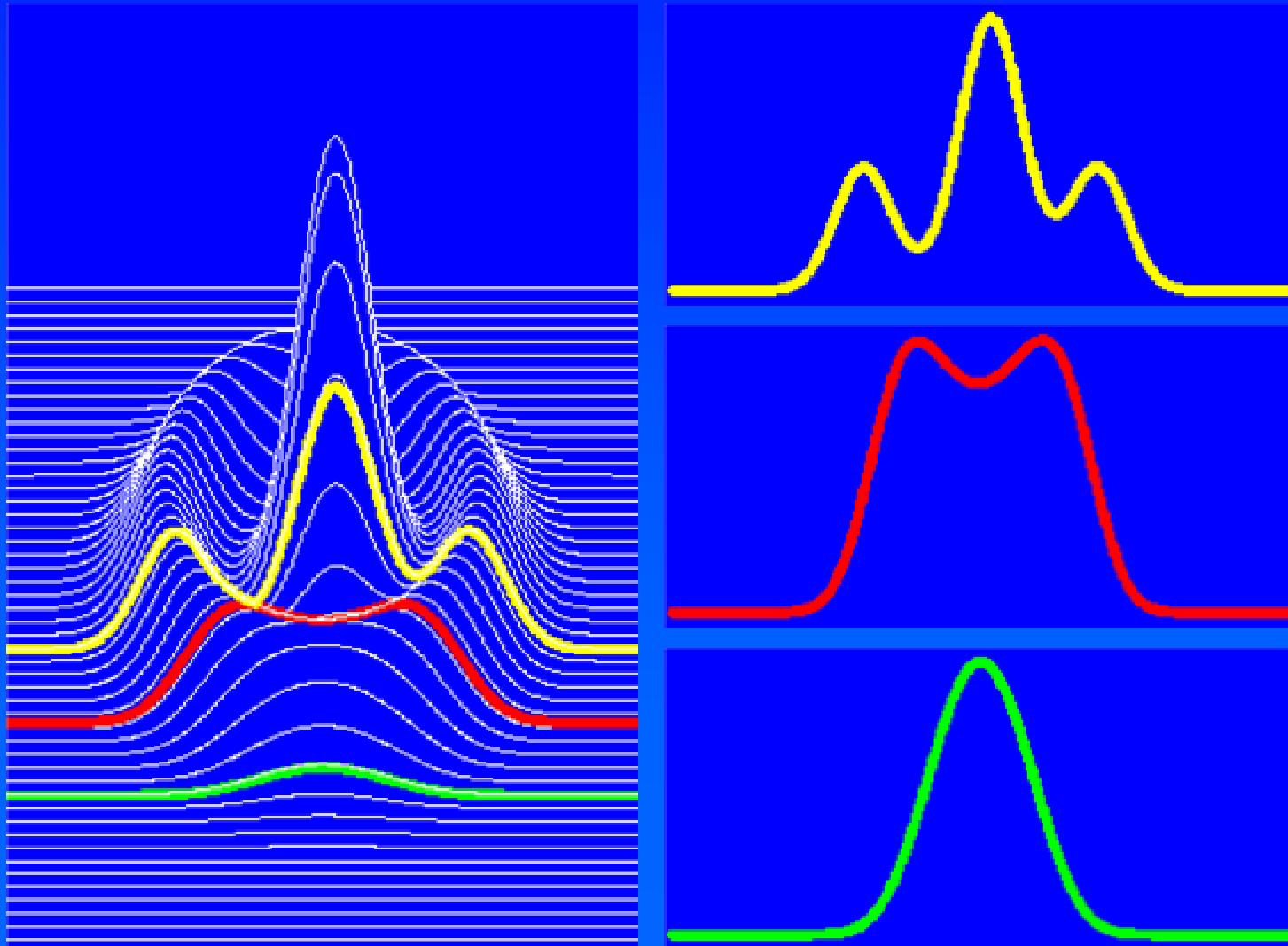


最早发现的4颗脉冲星之一
PSR0329 + 54的纪录
存在明显的周期性

磁极冠辐射模型和
脉冲的形成



5, 平均脉冲结构: 空心锥 + 核



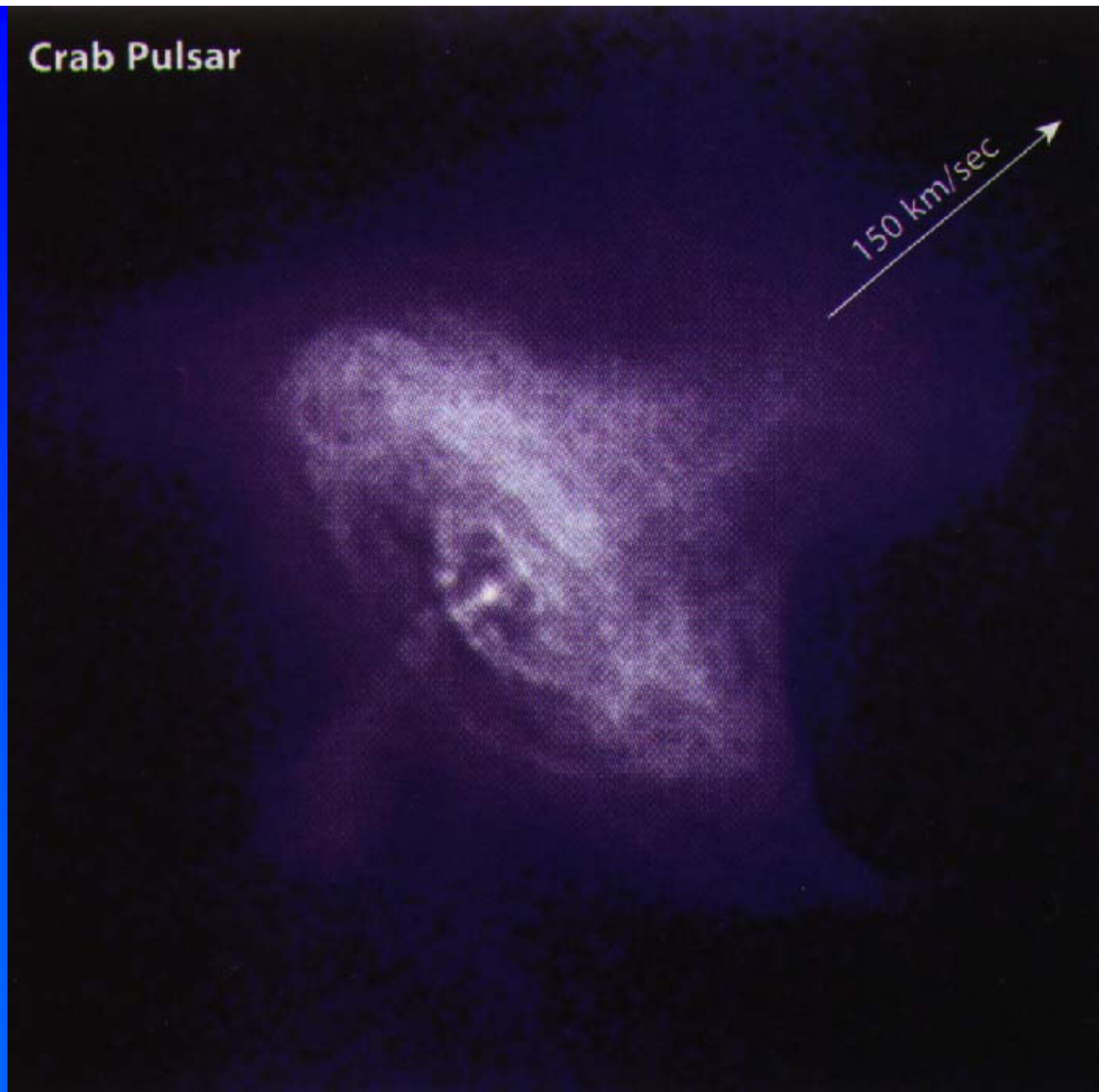
6, 极冠模型的证据

Crab和Vela超新星遗迹中的脉冲星的X射线观测:

- 1, 中子星的两个磁极会有方向性很强的辐射和高能带电粒子流, 会对周围的介质产生作用。
- 2, 因为磁极和自转轴不重合, 每个周期绕自转轴转一圈, 形成锥状。

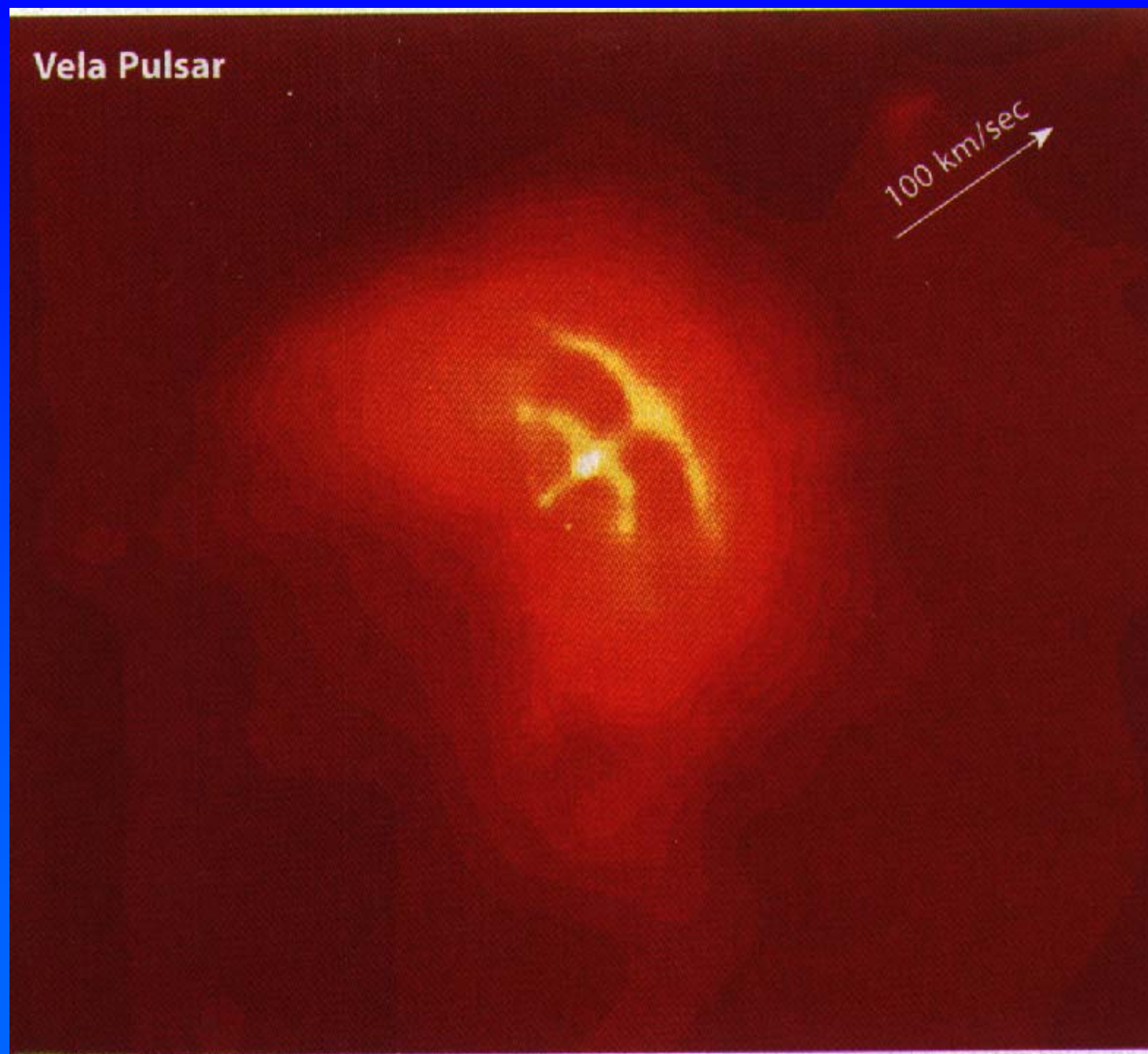
蟹状星云
脉冲星的
X射线观
测
脉冲星周
围有环状
物质围绕
中心的喷
流

Crab Pulsar



船帆座脉
冲星的X
射线观测

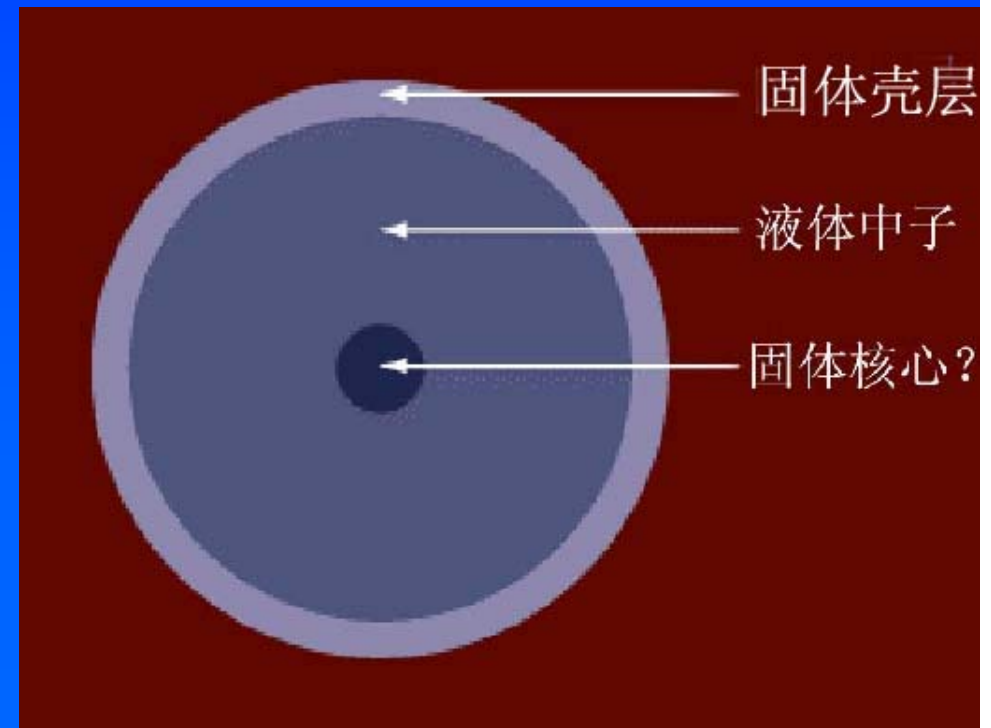
脉冲星周
围的情况
中心有
喷流



7, 开辟崭新的研究领域

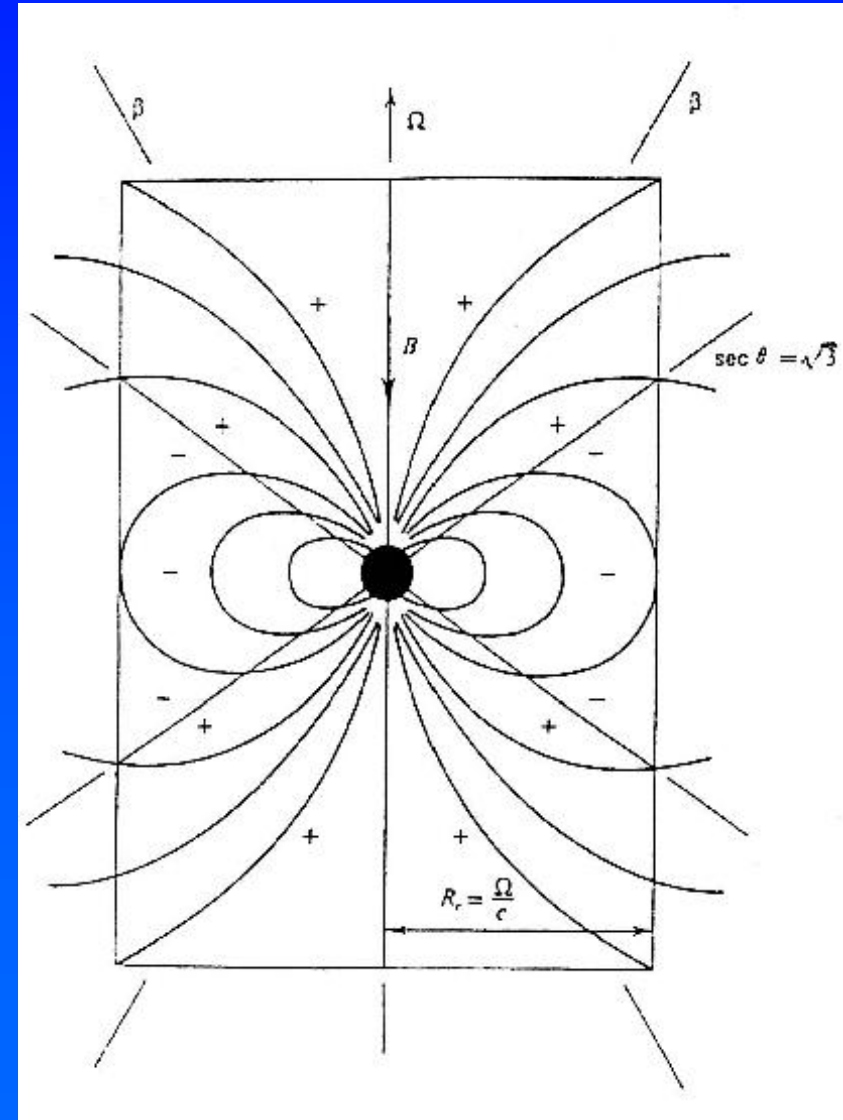
(1) 致密天体的内部结构的研究

- 中子星作为典型的致密天体，为研究致密天体的内部结构提供了极好的样品。
- 观测到周期突然变短及随机变化的现象，成为研究中子星内部结构及其变化的手段。



(2) 电荷分离等离子体物理

- 磁层范围：由脉冲星的光速圆柱来决定。
- 电荷分离：磁极区为正电荷；赤道区负电荷。



(3) 典型的非热辐射过程

- 脉冲星的辐射（射电、光学、X和伽马射线）都是非热辐射。同步辐射，曲率辐射和逆康普顿散射。
- 磁层包含了极端相对论性带电粒子，超强的等离子体波和极强的磁场的奇异的混合物。这些条件是其它天体所不具备的。

(4) 星际介质的探针

- 天体辐射经过星际空间到达地球的传播过程中受到星际介质中电离气体的影响，
- 产生色散、法拉弟旋转等效应。
- 一般天体，这种效应无法测量。而脉冲星的脉冲特性使我们能够观测到这种效应，获得色散量、法拉第旋转角度、星际磁场。成为“星际介质的探针”。

(5) 极端物理条件天空实验室

- 超高密：每立方厘米约有一亿吨重；
- 超强磁场： $10^{12} \sim 10^{15}$ 高斯；

磁星（反常X射线脉冲星和软伽马射线再现源），磁场达到 10^{15} 高斯，高出1000倍，

- 超流、超导；
- 超强引力；

- 夸克星

(6) 脉冲到达时间的不规则变化研究

- 到达时间噪声 (Timing noise) : random fluctuation in pulse frequency with

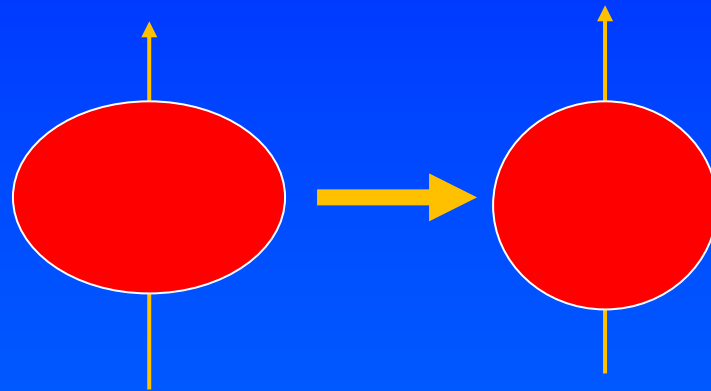
$$\delta \nu / \nu < 10^{-9}$$

- 周期突然变短 (Glitch) : pulse frequency suddenly increases with

$$10^{-9} < \Delta \nu / \nu < 10^{-6}$$

周期突然变短 (Glitches) : 中子星内部结构的探针

- 星震模型：由于中子星椭率发生变化



$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = -\Delta \varepsilon = -\frac{\Delta I}{I} = -2 \frac{\Delta R}{R}$$

$$\Delta \nu / \nu = 10^{-8}: \quad \Delta R = -0.1 \text{ mm}$$

- 中子超流涡旋模型：内部中子流体状态变化引起。

8, 休伊什获1974年诺贝尔奖

- 休伊什由于和贝尔一起发现了脉冲星，并把它证认为30多年前物理学家预言的中子星，震惊了科学界，获得了1974年诺贝尔物理学奖的殊荣。休伊什教授获奖是当之无愧的。
- 普遍认为，诺贝尔奖应该授予休伊什和贝尔两人。

1990年在国际会议上休伊什和中国学者合影





休伊什在国际学术会议上(1990)



2006年4月贝尔访问乌鲁木齐、北京、上海。
图为在乌鲁木齐作报告





贝尔与乌鲁木齐的天文爱好者

9, 脉冲星观测研究主要射电望远镜

- 美国Arecibo 305米射电望远镜
- 德国Bonn 100米射电望远镜
- 美国Green Bank 100 × 110米射电望远镜
- 英国Jodrell Bank 76米射电望远镜
- 澳大利亚Parkes 64米射电望远镜

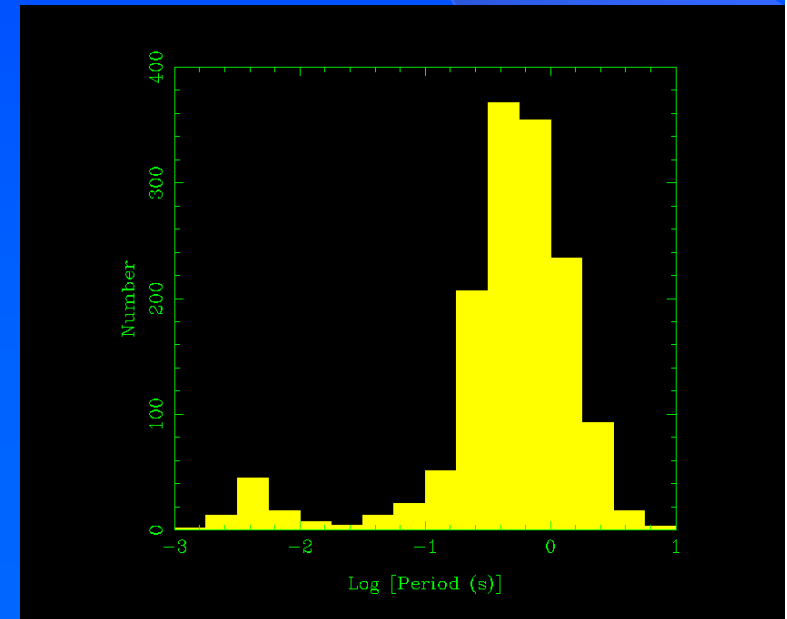
澳64米发现最多

美305米重要发现最多

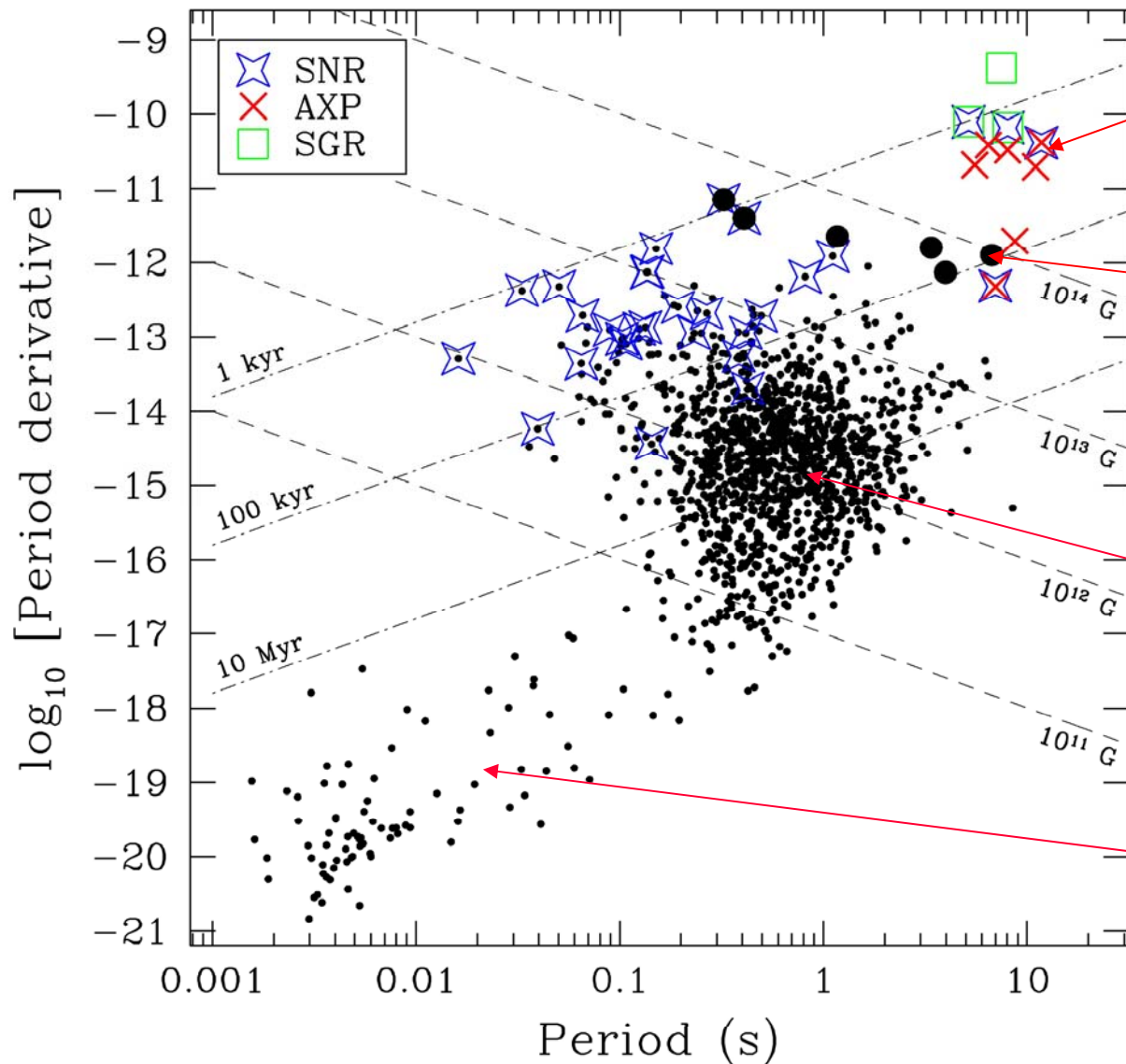
9, 当今脉冲星发现情况

40年发现脉冲星1791颗

- 毫秒脉冲星 ($P < 20\text{ms}$) 200
- 脉冲双星 (双星中有一颗是脉冲星) 130
- X-ray脉冲星 80
- 反常X-ray脉冲星 (AXP) 12
- 磁星 6 — $10^{15} - 10^{17}$ G
- 在星团中发现的 98
- 银河系之外 25
- 双脉冲星 1



反常X射线脉冲星 (AXP) & 软伽玛重复暴 (SGR)



SGRs,
AXPs

High B
Radio
Pulsars

Radio
Pulsars

Millisecond
Radio
Pulsars

三，1974年发现脉冲双星

1，最先进的脉冲星巡天计划

1973年J. 泰勒教授新的巡天观测计划：
发现短周期、远距离的脉冲星。

- 用世界上最大射电望远镜，阿雷西伯305米口径。
- 消色散接收机（32通道）
- 计算机采集观测数据和处理资料
必然导致超越前人的成就。

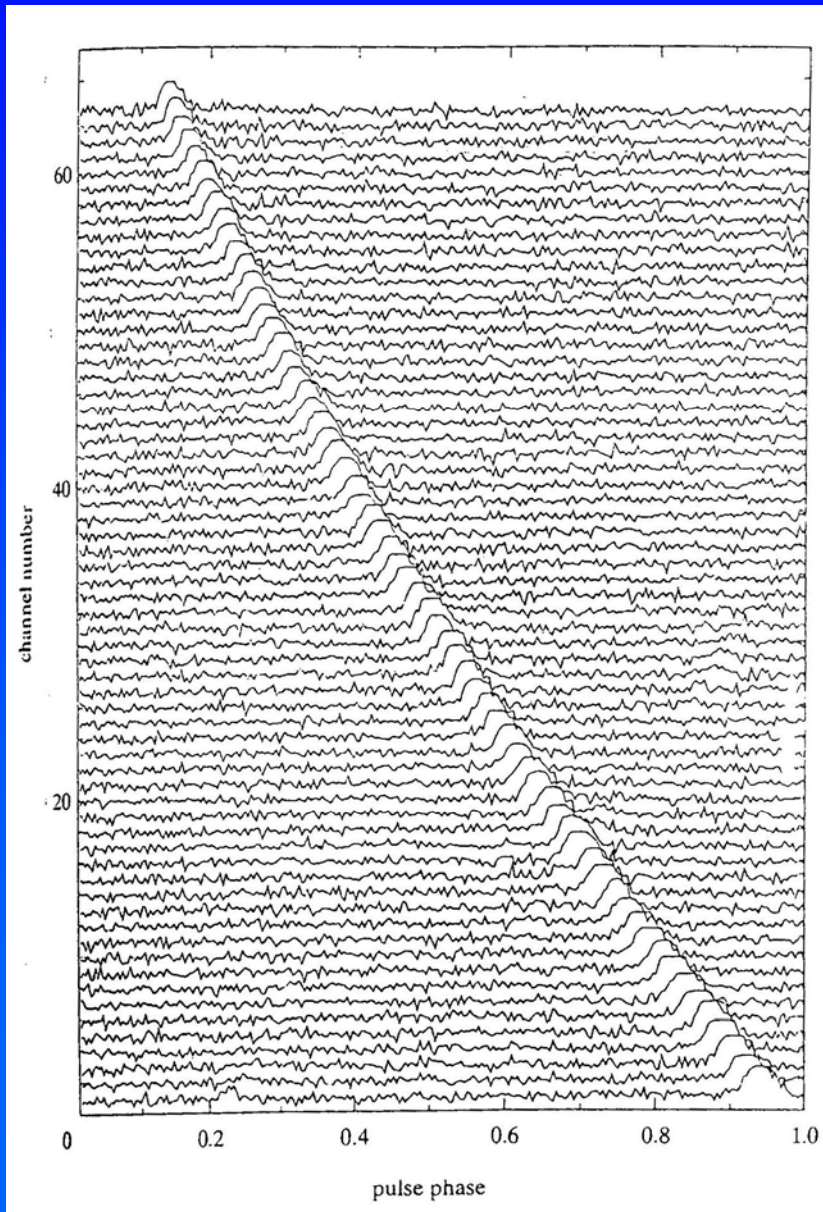
巡天发现新脉冲星

未知：位置、周期、色散量、脉冲宽度

主要方法：尝试

周期分析 1968年在记录纸上直观看出来粗略周期，
然后消除地球轨道影响

消色散 泰勒首1974年次采用
1988年 Parkes 巡天才采用，不久又
采用多波束技术。成为世界上最成功的巡天。



Parkes 64通道

纵坐标：频率通道数

横坐标：到达时间

(用周期表示)

图：PSR1641-45的
观测结果

高频信号先到达

2, 爱因斯坦广义相对论的预言

任何具有质量的物体作加速运动都应该产生引力辐射。经历半个世纪也没有得到实验的验证。

引力波源的性质

低频波段： $1 - 10^{-4}$ Hz；银河系中短周期双星；长周期大黑洞双星；

- 甚低： $10^{-7} - 10^{-9}$
- 极低： $10^{-15} - 10^{-18}$ ；宇宙初始背景引力波

引力波探测器

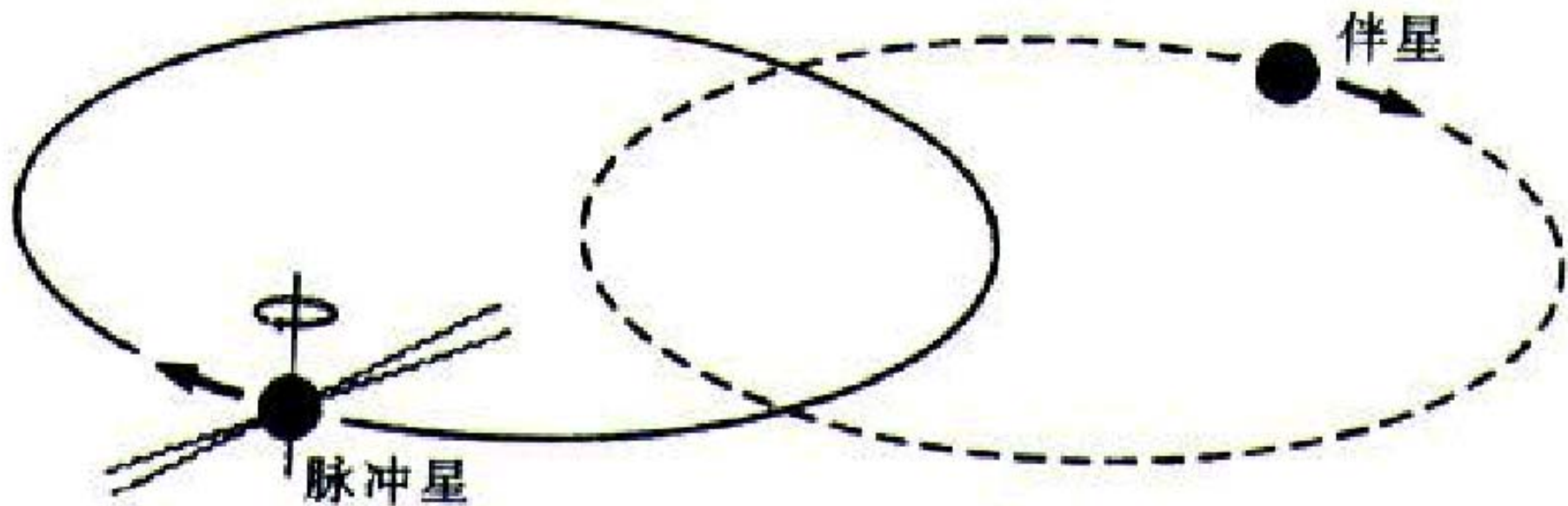
- 引力波能使物体发生扭曲和变形，
- 引力波天线是一根棒，测量它极小扭曲和变形来确定是否接收到引力波。

3, 赫尔斯发现脉冲双星

J. 泰勒教授的研究生，选择泰勒的脉冲星巡天课题作为博士论文。

获得机会站在脉冲星观测研究的最前沿。

- 一举发现40颗脉冲星，其中1颗为双星系统
- 赫尔斯独自到阿雷西伯观测，几经周折，独立判断发现了第一个脉冲双星系统。



PSR1913 + 16射电脉冲双星轨道示意图

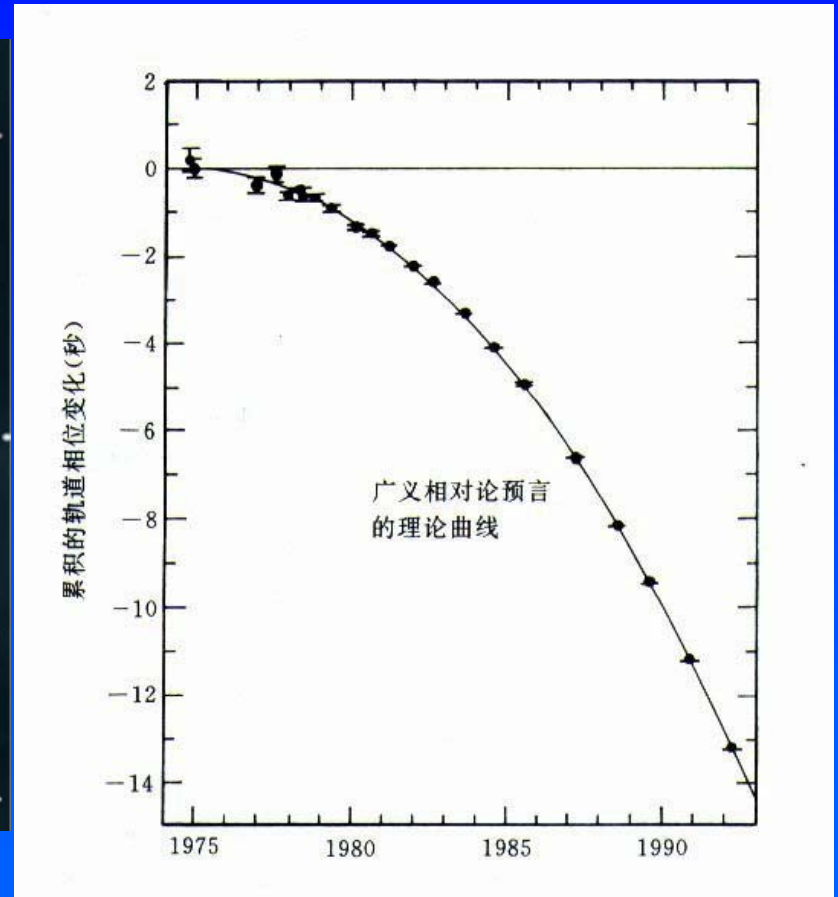
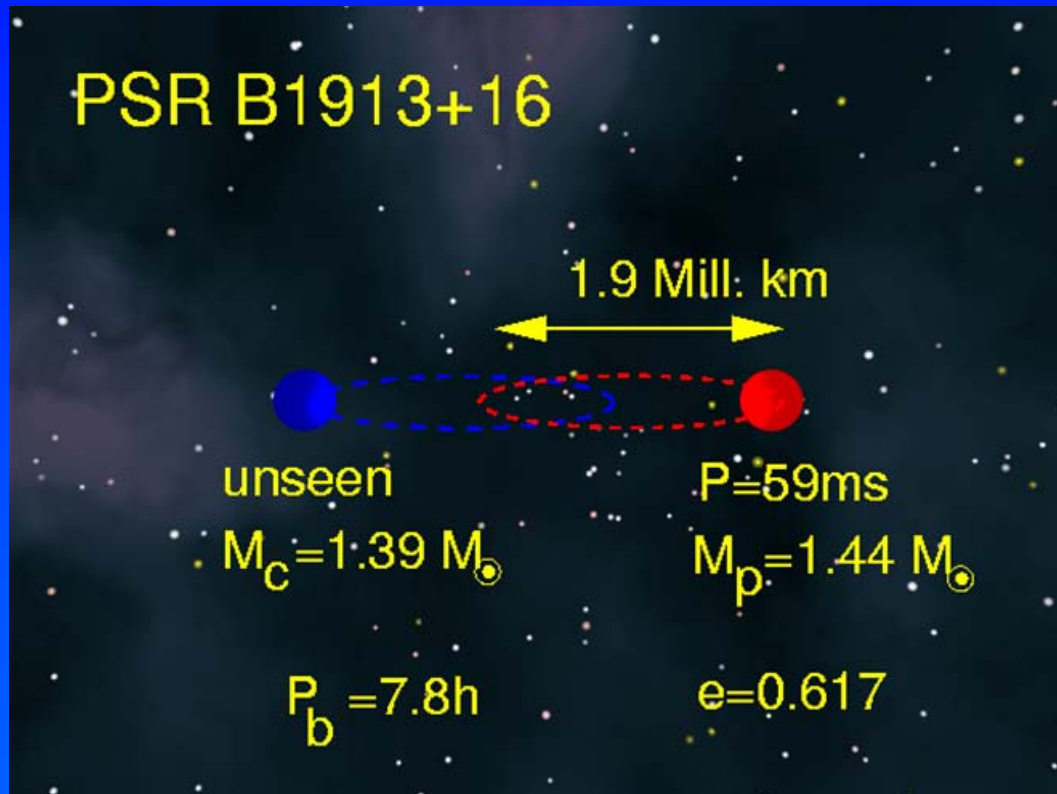
- 双中子星系统，轨道周期7.75小时，
 偏心率0.617。
- 广义相对论理论推算，轨道周期的变化率
 为 -2.6×10^{-12} 秒/秒。

4, 泰勒奋斗20载, 验证引力波

- 根据广义相对论, 可以计算出双中子星系统有很强的引力辐射。引力辐射将会导致双星系统轨道运动周期变短。如果我们能够测量出脉冲双星轨道周期的变化, 便能间接地确认引力辐射的存在。

赫尔斯和泰勒获1993年诺贝尔物理学奖。

脉冲星: 最成功的引力波实验室



由于引力辐射, 导致轨道半径
每天缩短 1cm!

引力辐射引起轨道周期
变化与理论预言的一致

四，1982年发现毫秒脉冲星

1，特别的4C21.53射电源

1977年，一个名叫4C21.53的射电源引起人们的关注。经过几年的探索，确认在它的附近有一个名叫1937 + 215的射电源，它具有强偏振、幂律谱、致密等脉冲星所具有的特性。

人们相信它就是一颗脉冲星。

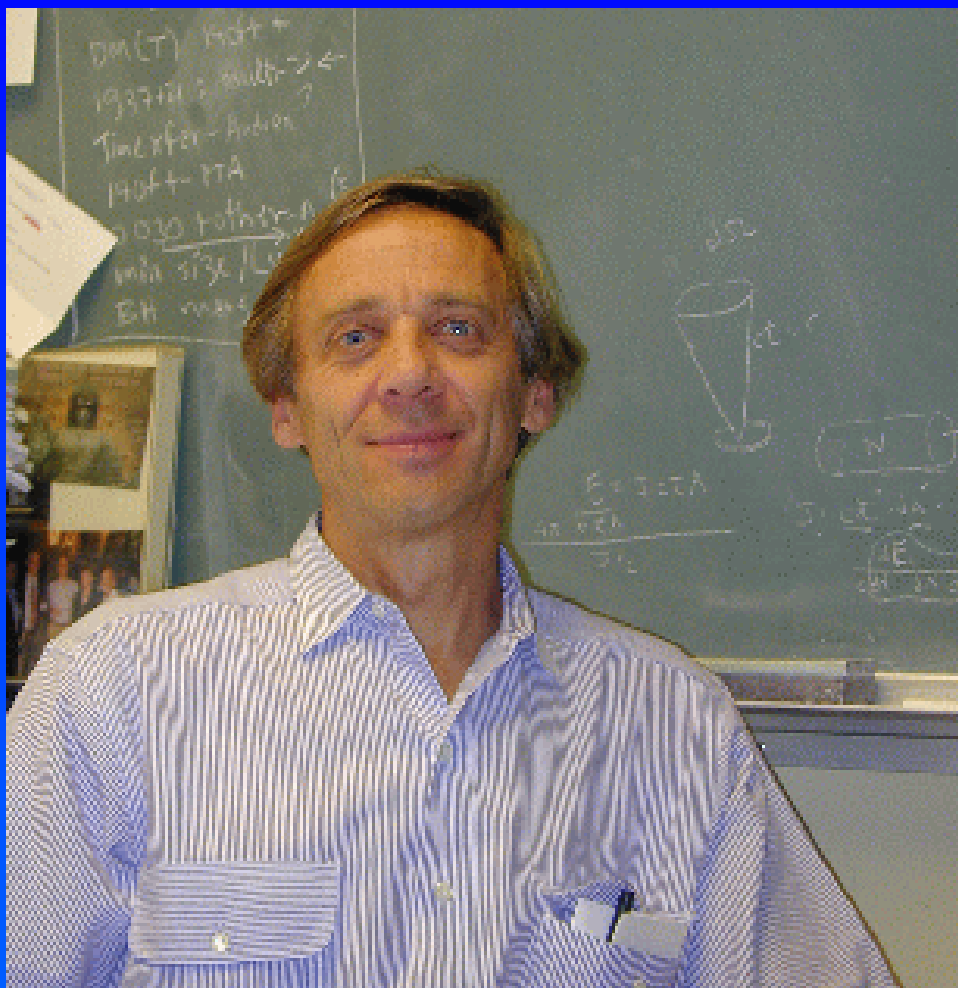
2, 休伊什教授等均未获成功

几个观测小组失败，没有找到这个射电源辐射的周期结构；

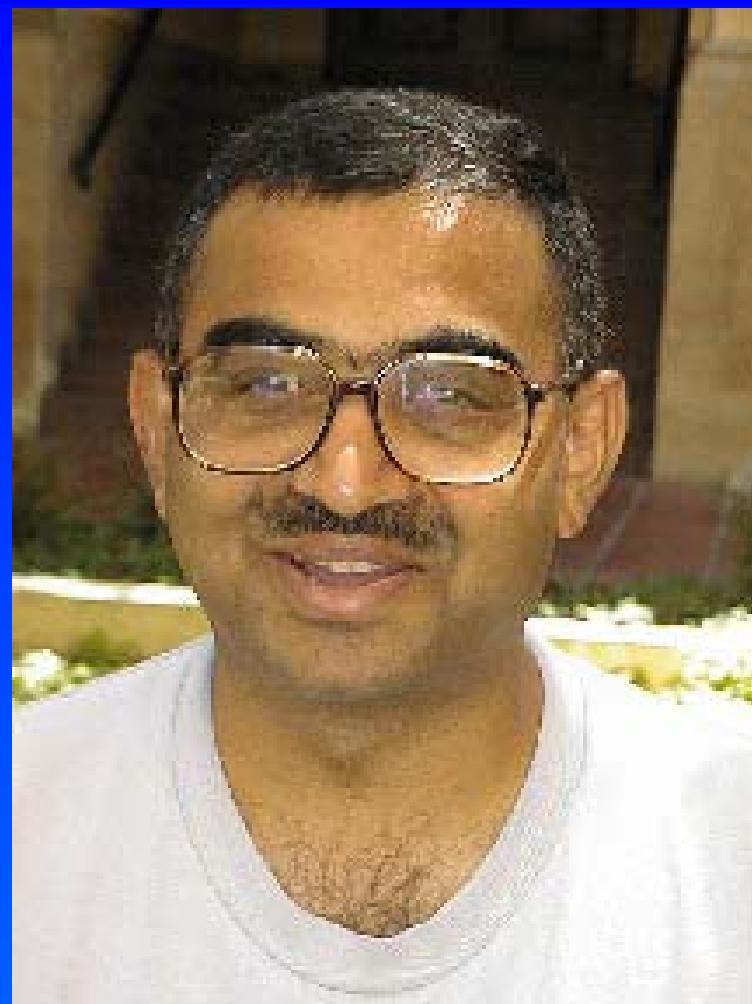
脉冲星的发现者休伊什教授也一无所获。1983年，他在北京天文台访问，谈到当时他离成功只有一步之遥，他采用的时间分辨率已是3毫秒，没有采用更短的时间分辨率。

3, 贝克教授和库尔卡尼博士

- 采用世界上最大的射电望远镜，研制消色散能力很强的接收机，特别是使接收系统对非常短的周期灵敏，采用0.5毫秒的时间常数。获得成功。
- 新发现的毫秒脉冲星PSR1937+214
周期最短 只有1.6毫秒
自转每秒600次!



Backer, D. C. 美国加利福尼亚
大学天文系教授



Kulkarni, S. R. 美国加利
福尼亚技术学院
1983年获博士学位

4, 毫秒脉冲星是新的—类脉冲星

毫秒脉冲星

正常脉冲星

1.6-30毫秒 (周期短)

33毫秒 - 8.5秒

$10^8 \sim 10^{10}$ (年龄老)

$10^3 \sim 10^7$

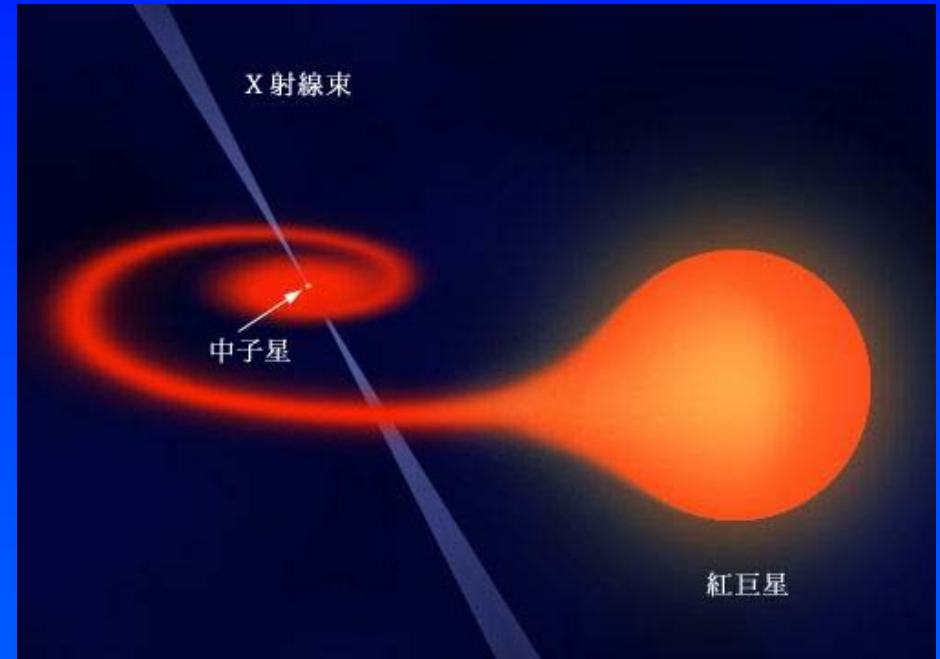
$10^8 \sim 10^{10}$ G (磁场弱)

$10^{11} \sim 10^{13}$ G

正常脉冲星的周期越短, 年龄越小, 磁场越强。而毫秒脉冲星则相反。

5, 毫秒脉冲星从X射线脉冲双星演化而来

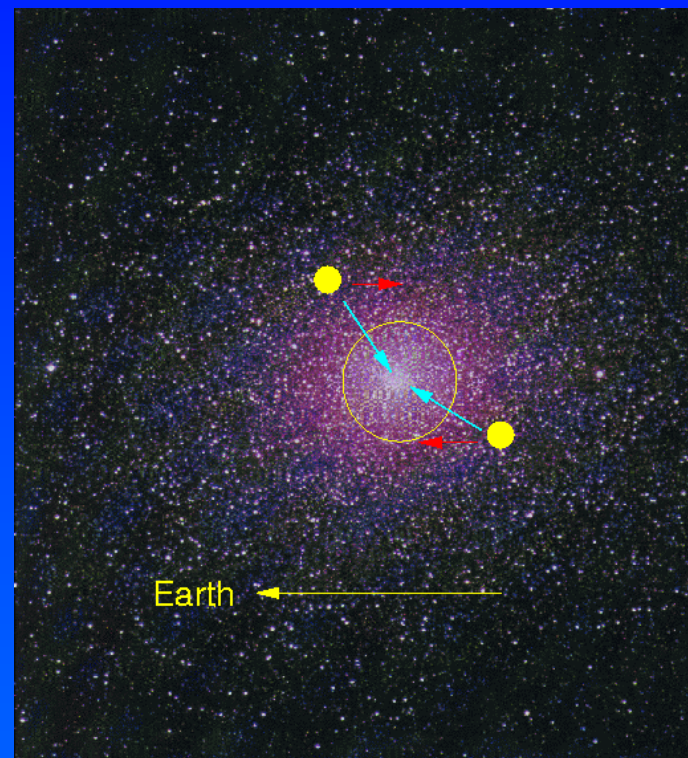
- 1979年以来发现X射线脉冲双星系统。
- 武仙座X-1, 辐射X射线, 周期分别1.24秒, 周期由长变短, 自转加速, 吸积伴星物质所致。
- 毫秒脉冲星经历了X射线脉冲双星自转加速阶段, 使周期短到毫秒量级。



6, 毫秒脉冲星成为球状星团的探针

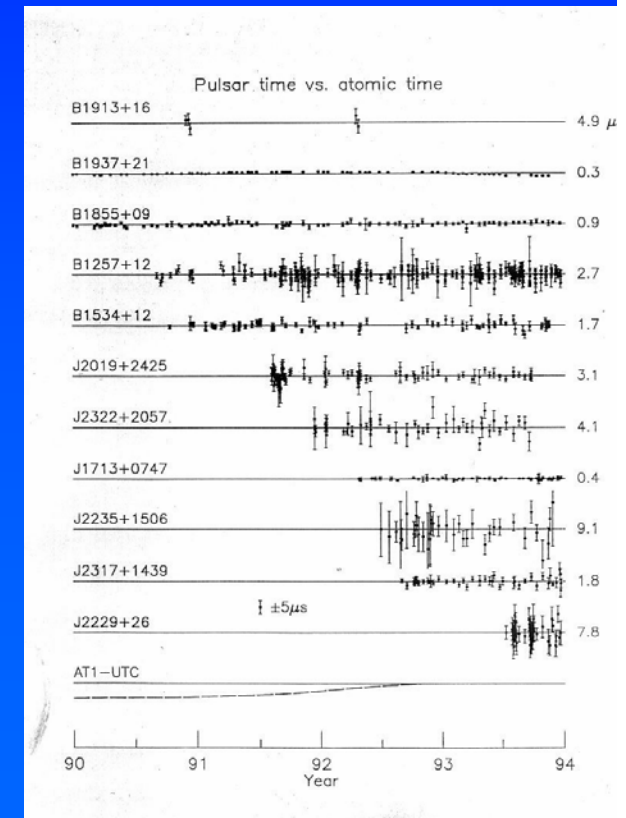
球状星团的形状近似为球形，由大量恒星组成的集团。

- 球状星团中 X 射线双星比较多，毫秒脉冲星也多。
- 在球状星团杜鹃座47中发现24个毫秒脉冲星，至少有13个是双星系统。
- 球状星团成为毫秒脉冲星的乐园，毫秒脉冲星又成为研究球状星团中心性质的探针。

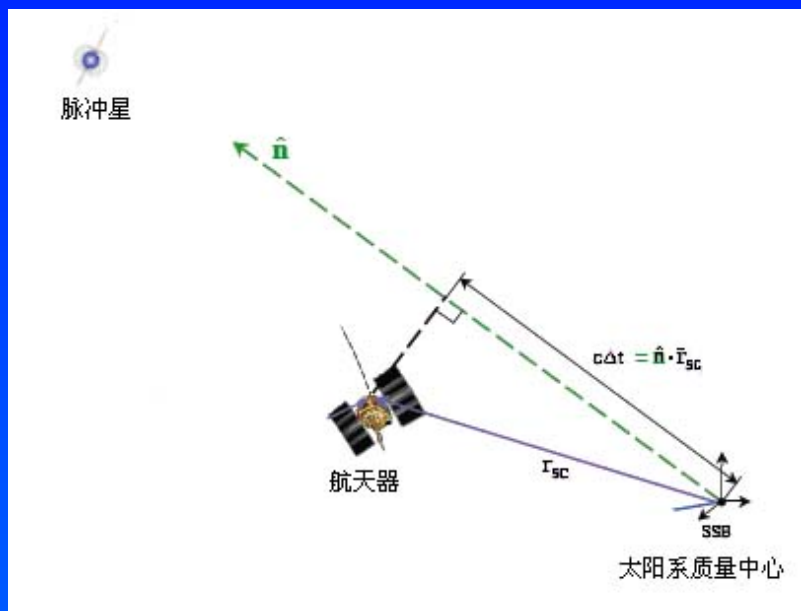


7, 由毫秒脉冲星组成的脉冲星钟

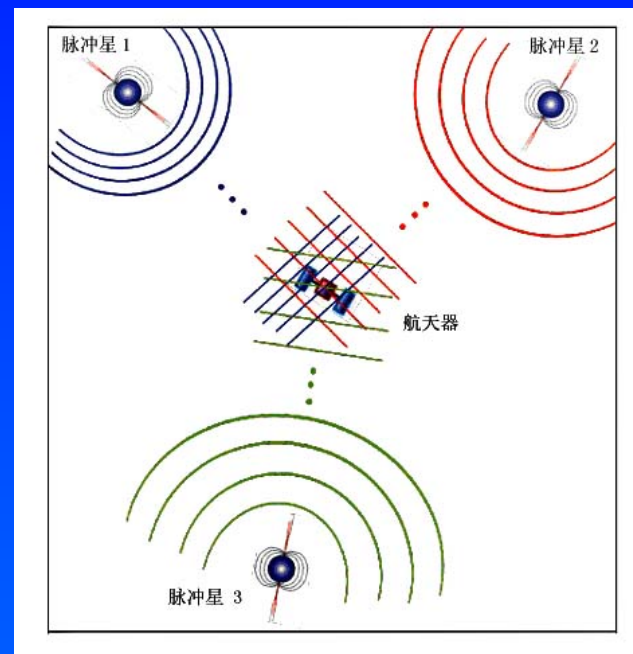
- 毫秒脉冲星周期的高度稳定性在宇宙天体中是绝无仅有的。长期稳定性与原子钟相当。
- 脉冲星PSR1937+21五年中周期的随机起伏只有0.3微秒。
- 由多颗周期噪声最小的毫秒脉冲星组成一个“脉冲星钟”。
- 测量宇宙初始背景引力波对毫秒脉冲星周期的微小影响，来确认这种引力波的存在。



8, 毫秒脉冲星的应用 - 脉冲星自主导航



脉冲星、航天器和太阳系质心 (SSB) 位置的关系。



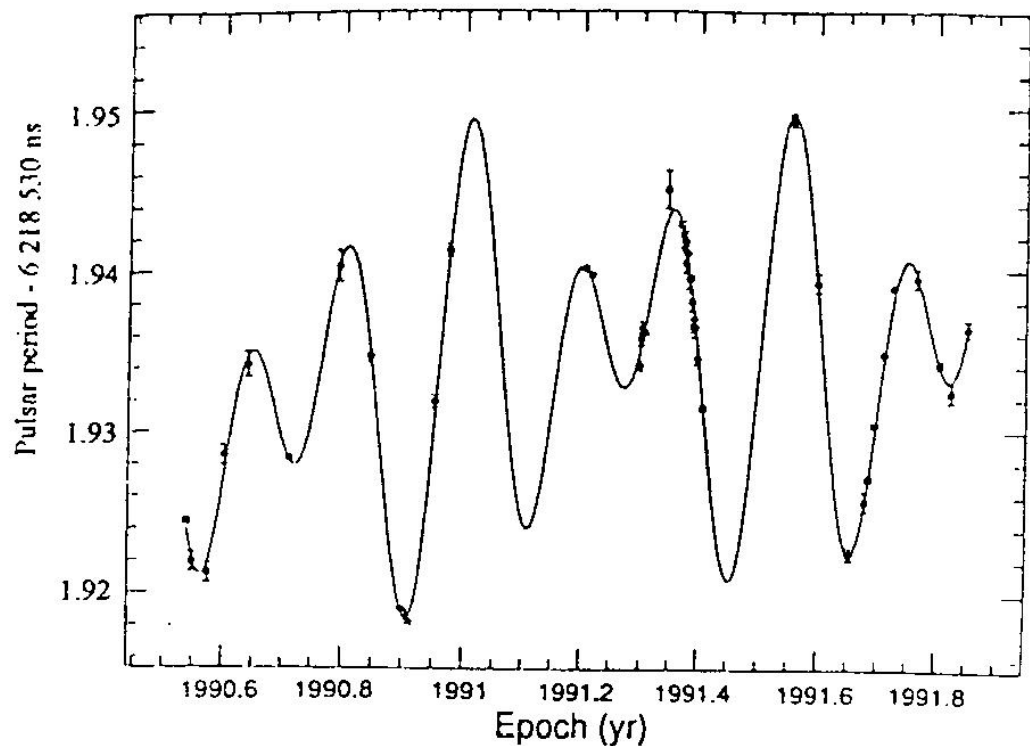
分析来自不同方向的脉冲到达航天器和太阳系质心的时间就估计航天器位置。

五，脉冲星的行星系统的发现

1，毫秒脉冲星巡天

1990年2月， A. 沃斯赞和D. A. 弗雷尔用阿雷西博射电望远镜在430MHz频率的毫秒脉冲星高银纬毫秒脉冲星巡天；

发现脉冲星PSR1257 + 12的脉冲到达时间资料很独特，无法用单脉冲星或脉冲双星来解释。



脉冲到达
时间测量
获得周期
变化的数
据，用2个
行星系统
来拟合，
符合得很
好！

1992年确认PSR1257+12 ($P=6.2\text{ms}$) 有的两个行星

1, 公转周期66.6天, 3.4个地球质量

2, 公转周期为98.2天, 2.8个地球质量

2, 捷足先登: 发现太阳系外行星系统

- 第一个发现的太阳系外行星系统, 促进光学观测搜寻太阳系外行星。至今已超100个。
- 其搜寻方法值得借鉴; 归功于高精度的脉冲到达时间的观测。
- 行星系统的形成: 由于脉冲星强烈的星风和辐射, 致使伴星瓦解。
- 不可能是原来恒星的行星系统。不能期望行星上存在生命的可能。

3, 世纪论文

Nature 主编从Nature上世纪发表的论文中选出21篇，庆祝物理学的创造性和多样性。其中天文2篇，全是脉冲星：

第一篇是Hewish的发现脉冲星的论文；

第二篇就是发现毫秒脉冲星行星系统的论文。

六，双脉冲星双星系统的发现

1，目前已有百多个射电脉冲双星系统

- 大多数射电脉冲双星的伴星是白矮星；有6例双中子星系统；还有几例中子星和主序星双星系统。
- 天文学家最感兴趣的双射电脉冲星系统终于在2004年发现。被美国《科学》期刊评为2004年十大科技突破之一。

2, 澳Parkes射电望远镜发现

PSRJ0737 - 3039A/B

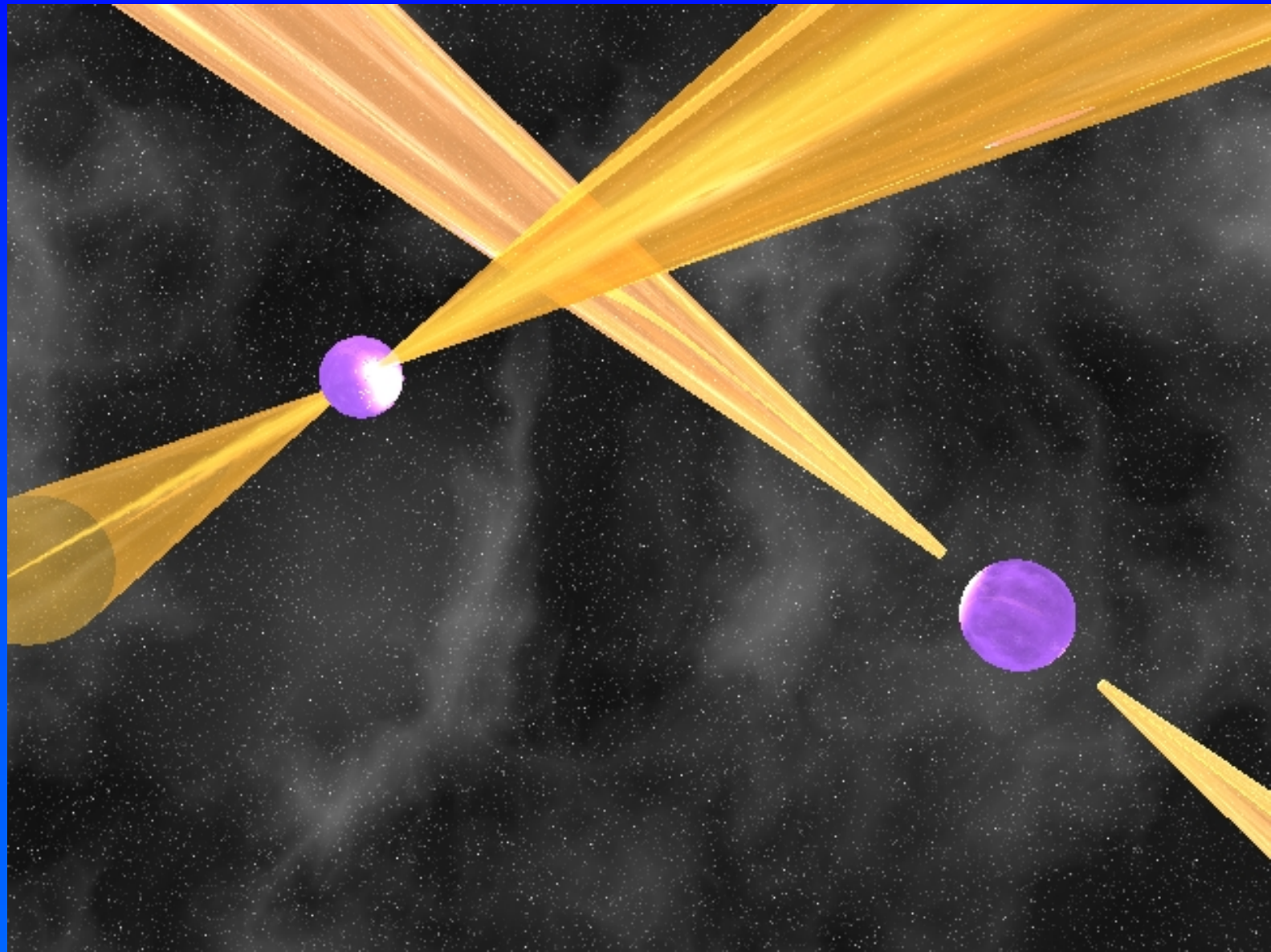
A 22ms B 2.77s

双脉冲星系统, 轨道倾角87度

2.4小时的轨道周期和极其高速
的轨道运动1%光速

B的脉冲辐射在2.4小时中仅有10分
钟处于发射状态

$M_a=1.337$ $M_b=1.251$ 太阳质量



3, 毫秒脉冲星演化

- 一个正常脉冲星和一个毫秒脉冲星的组合：佐证了公认的“毫秒脉冲星是由X射线双星演化来的猜想。
- 双星系统中，质量大的先爆发，形成中子星，接受伴星物质成为X射线脉冲星，获得自转加速，形成毫秒脉冲星，第二颗恒星超新星爆发后形成正常脉冲星。

4, 检验爱因斯坦广义相对论和引力波理论最理想的实验室

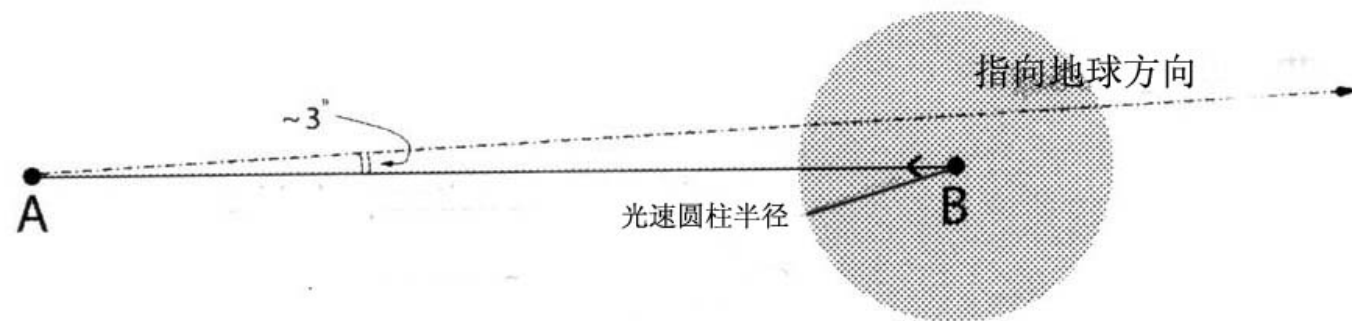
- 轨道周期仅为2.4小时，轨道比较圆，椭率为0.088，平均速度达到0.1%光速，两个脉冲星之间距离最近，引力辐射更强，一年就可以观测到轨道明显的变化。
- 对双脉冲星系统的初步观测已经测出广义相对论的4种效应，与理论值符合得很好。

5, 双中子星并合

- 引力辐射将导致两颗中子星将逐渐接近，最后并合，可能形成一个黑洞。中子星并合事件会产生非常强烈的引力波，可能被最灵敏的引力波探测器发现。
- 双脉冲星的轨道周期短，并合时间要，大约需要8500万年。大约十年就可以发生一次并合事件。而按PSR1913 + 16情况估计，100年才有可能发生一次并合事件；

6, 脉冲星的磁层研究

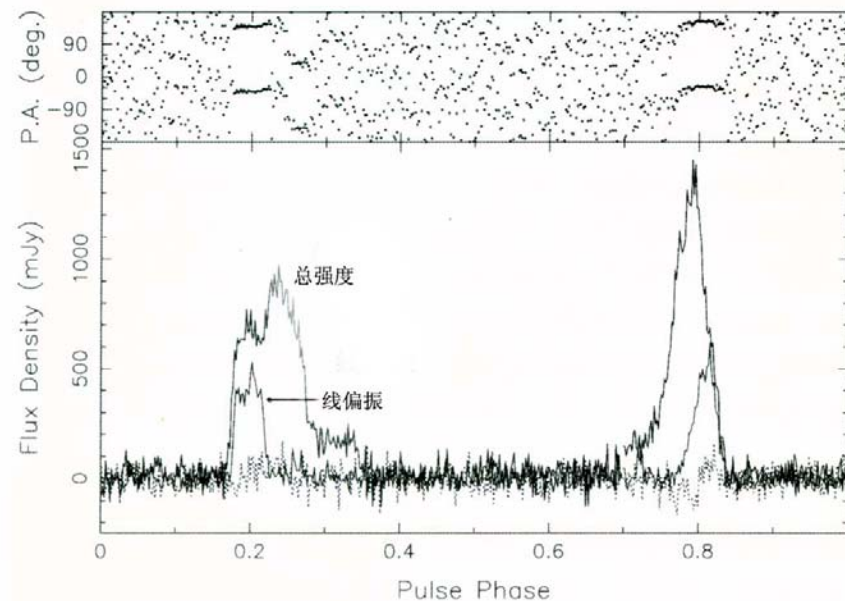
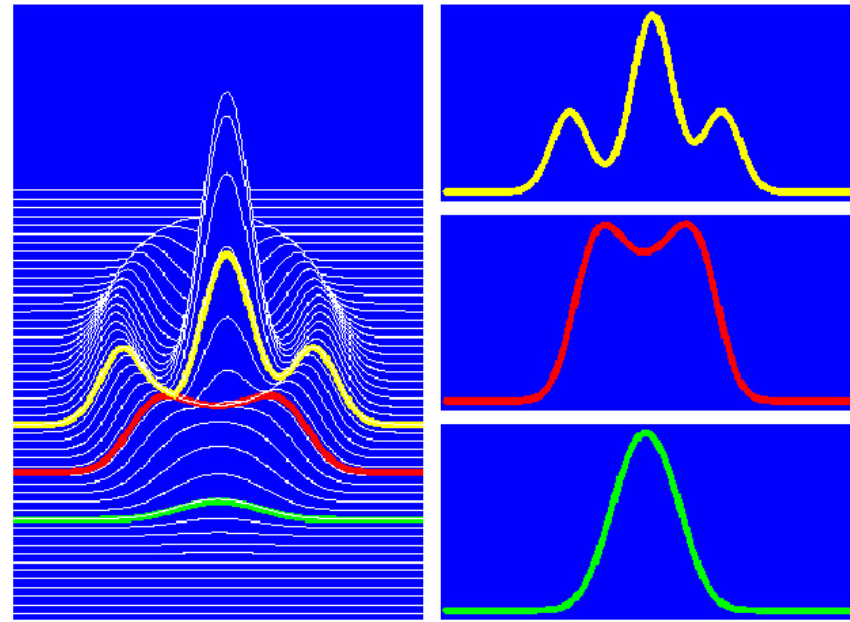
B脉冲星的光速圆柱半径比A脉冲星得100倍，当A运动到B的后面，有30秒时间A的射电波通过B的磁层，是研究B脉冲星磁层的好机会。



7, 近星点的进动和脉冲轮廓的变化

- 双脉冲星系统中，A星和B星的轨道进动比水星大得多，分别为每年75度和71度。可进一步检验广义相对论理论。
- 更有意义的是，轨道的进动将会引起脉冲轮廓的变化，甚至使脉冲星从我们的视线中消失。

- 脉冲星平均脉冲轮廓是视线扫过辐射锥的一维形状。
- 由于轨道的进动将引起辐射锥的进动，脉冲形状会发生变化。
- 右图是A星的平均脉冲偏振观测结果。脉冲轮廓形状会不会变？怎么变？

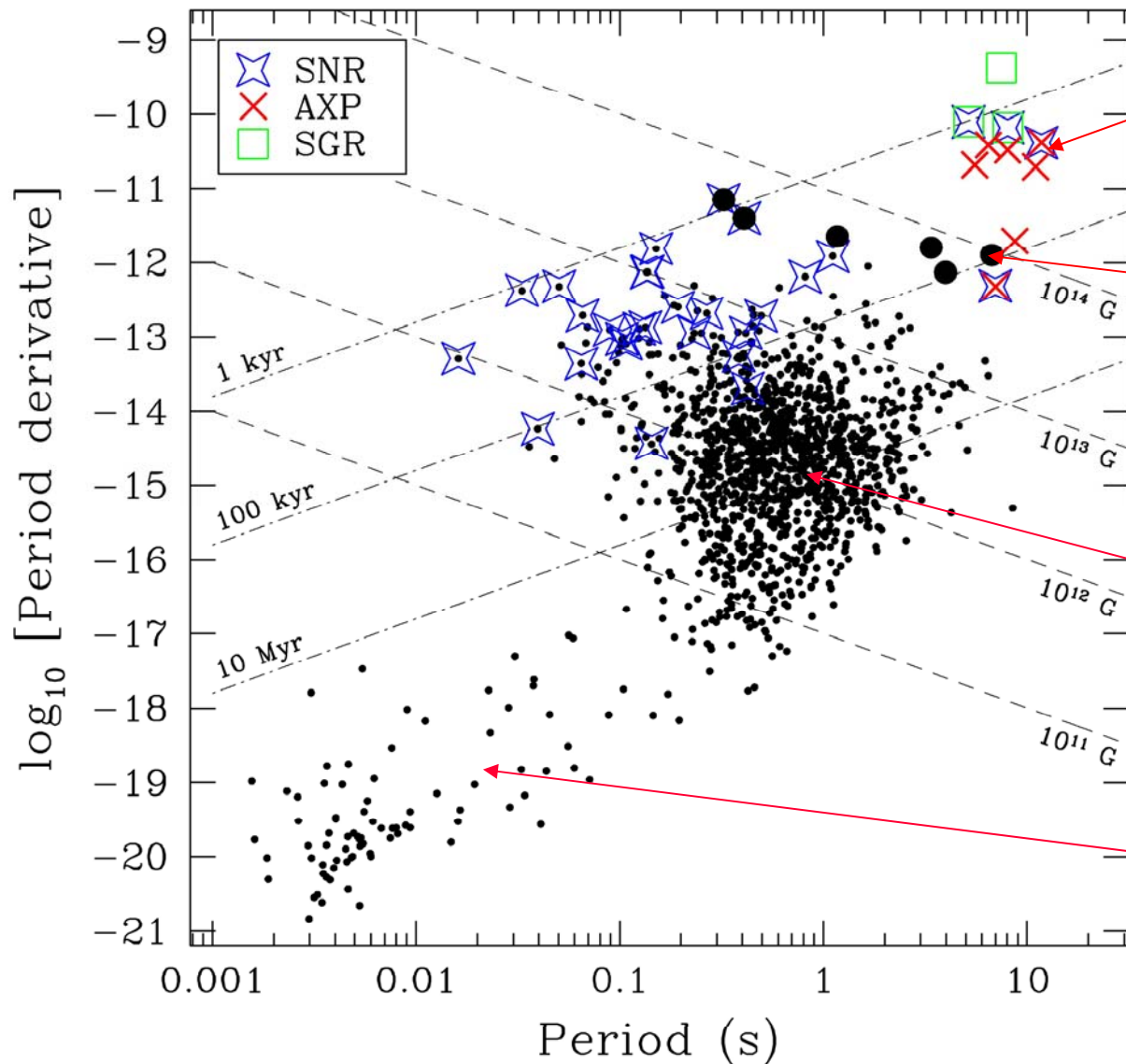


当今脉冲星发现情况

40年发现脉冲星1791颗

- 毫秒脉冲星 ($P < 20\text{ms}$) 200
- 脉冲双星 (双星中有一颗是脉冲星) 130
- X-ray脉冲星 80
- 反常X-ray脉冲星 (AXP) 12
- 磁星 $6 - 10^{15-17} \text{ G}$
- 在星团中发现的 98
- 银河系之外 25
- 双脉冲星 1

反常X射线脉冲星 (AXP) & 软伽玛重复暴 (SGR)



SGRs,
AXPs

High B
Radio
Pulsars

Radio
Pulsars

Millisecond
Radio
Pulsars