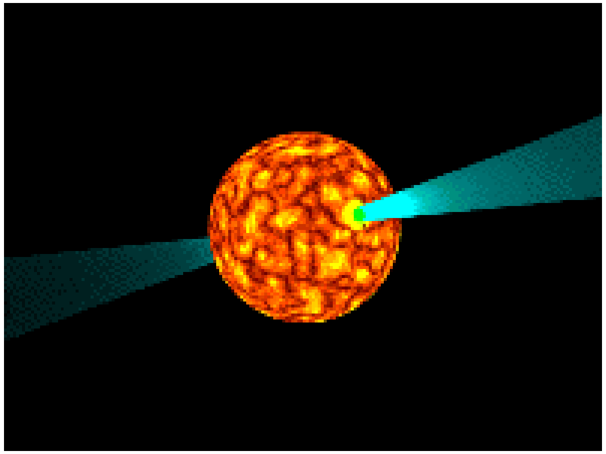
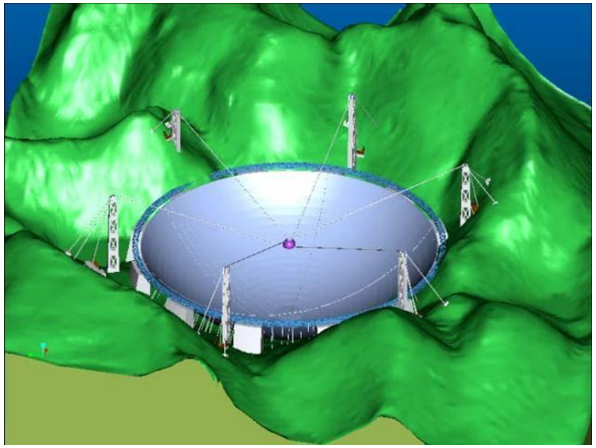
脉冲星发现50年—重要进展与那些往事





张承民　FAST - NAOC，　2017

报告内容简述

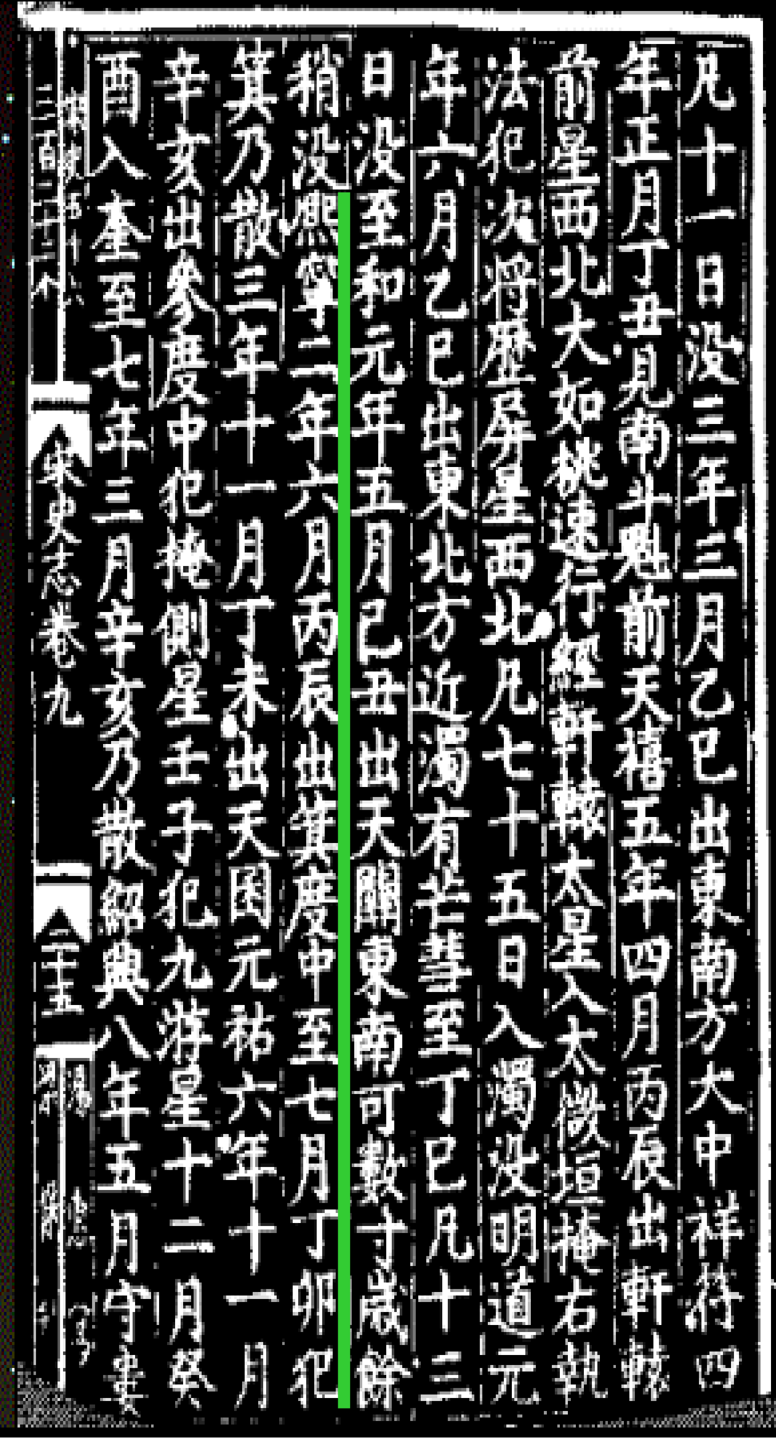
2017年是脉冲星发现50周年，作为二十世纪重大天文学发现之一，脉冲星在哪些方面延伸了我们关于宇宙的知识？双星脉冲星验证引力波和爱因斯坦广义相对论的进展如何？自1967年乔瑟琳·贝尔 (Jocelyn Bell)发现脉冲星以来，此领域两获诺贝尔奖，那么错失殊荣的贝尔女士经历了哪些难言的苦衷？ 借助多波段探索，从地面射电望远镜到空间高能探测器，天文学家发现了约2700颗各种类型的脉冲星（中子星），它们塑造认识致密天体的多方面视角，其涵盖的极端物理环境令人感叹，包括超级磁场、超级致密物质密度、超强引力场、高能辐射过程、恒星演化和超新星爆发过程等等，这为核物理、粒子物理、天体物理、爱因斯坦理论和宇宙学的检验提供天然实验室，其研究开拓了我们全景宇宙的视野。我国已经建成五百米口径射电望远镜（FAST），未来如何加入脉冲星新一轮大发现进程，报告也将细数道来。

1054年我国宋朝天文学家记录的超新星爆发SUPERNOVA EXPLOSION

Chinese Astronomer recorded Crab Nebula in 1054 AD, Song Dynasty.； **It is a great glory of Chinese Ancient**

After SUPERNOVA EXPLOSION – Crab Pulsar P=33ms

1054 Song Dynasty



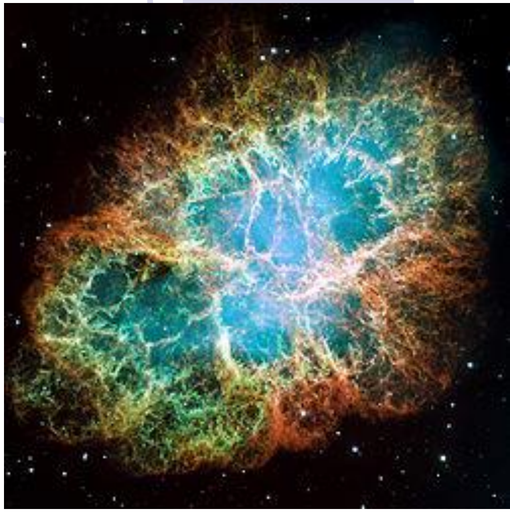
凡十一日沒三年三月乙巳出東南方大中祥符四
年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅
前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執
法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁沒明道元
年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三
日沒至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘
稍沒熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯
箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月
辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸
酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

宋史志卷九

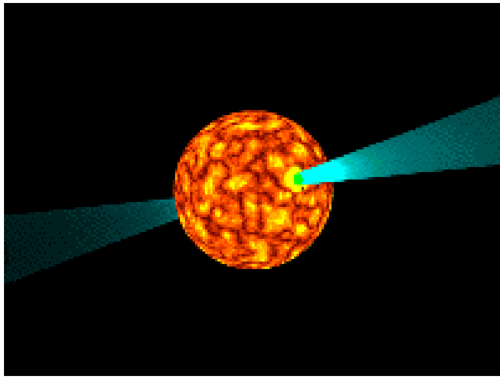
Chinese records of SN 1054

- 公元1054年7月4日（宋仁宗至和元年五月二十六日）《宋史·天文志》记载：“客星出天关东南可数寸，岁余稍末”；《宋会要》中记载：“嘉佑元年三月，司天监言：‘客星没，客去之兆也’。初，至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日”。这是关于一颗超新星的记载，它的残骸，就是我们现在看到的蟹状星云，中心是一颗脉冲星。

Crab Pulsar – SNR 1054



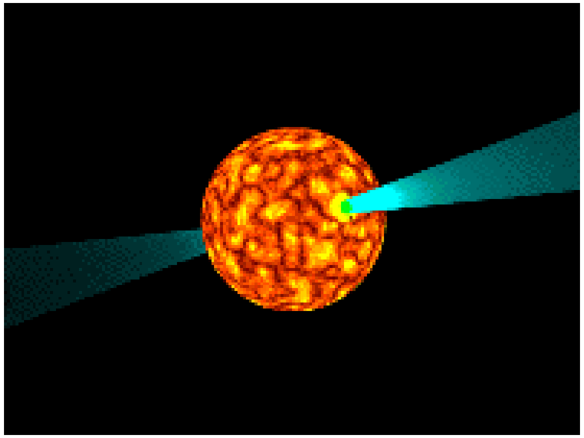
- 根据我国历史记载，在现在蟹状星云的位置上，曾经有过超新星爆发，即1054年7月4日出现的特亮的金牛座“天关客星”。它爆发过程中抛射出来的气体云，就应该是现在看到的蟹状星云。1942年，荷兰天文学家奥尔特以其令人信服的论证，确认蟹状星云就是1054年超新星爆发后形成的。(PSR B0531+21， 1968 discovery)



1054年， Crab全球记录---
1967年，贝尔发现脉冲星
2017年， FAST

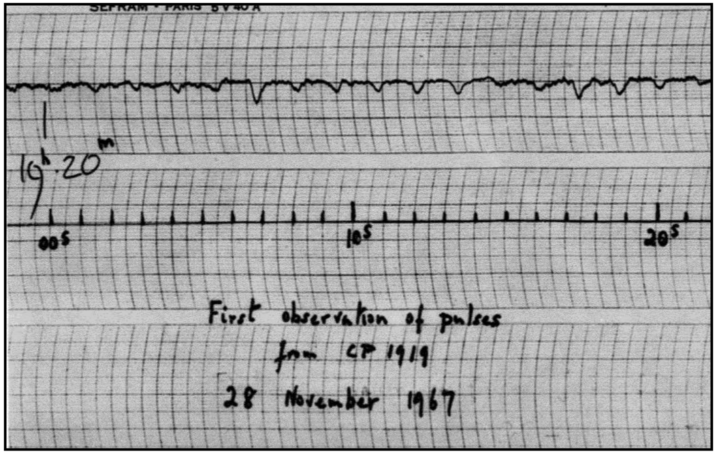
- Pulsar discovery of 50 years
- 脉冲星与引力波验证
- FAST Telescope & pulsar Survey

Part 1. Pulsar - 50 years



脉冲星发现 Pulsar Discovery - 1967

In 1967 剑桥大学博士研究生Jocelyn Bell 贝尔 observed a strange radio pulse， a period of 1.33 s



脉冲星-行星际闪烁
Interplanetary scintillation (IPS

- 周期信号来源 (origin of periodic signal)？

  IPS-min；point；

  Scott & Collins telescope 2； Pilkington – dispersion，distance

- LGM？ Little Green Men

  another pulse

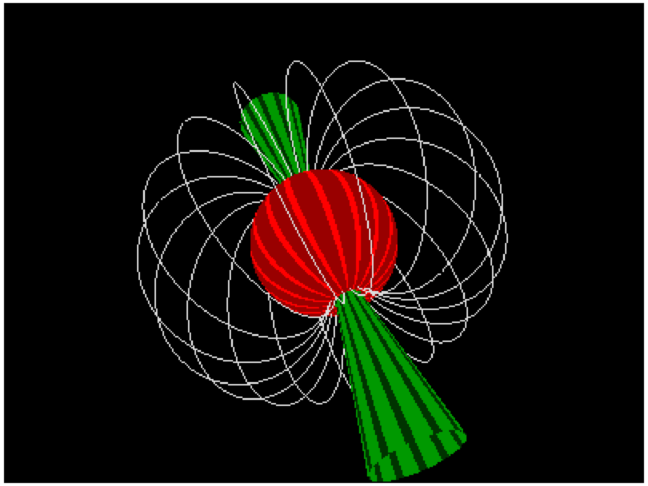
- 天体？那一种？What object？ Spin stable & fast

1967

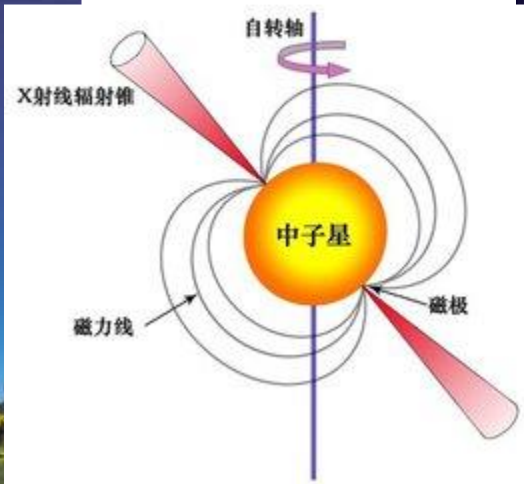
Cambridge Radio Astron Lab

脉冲星认证=转动中子星 Rotating Neutron Star

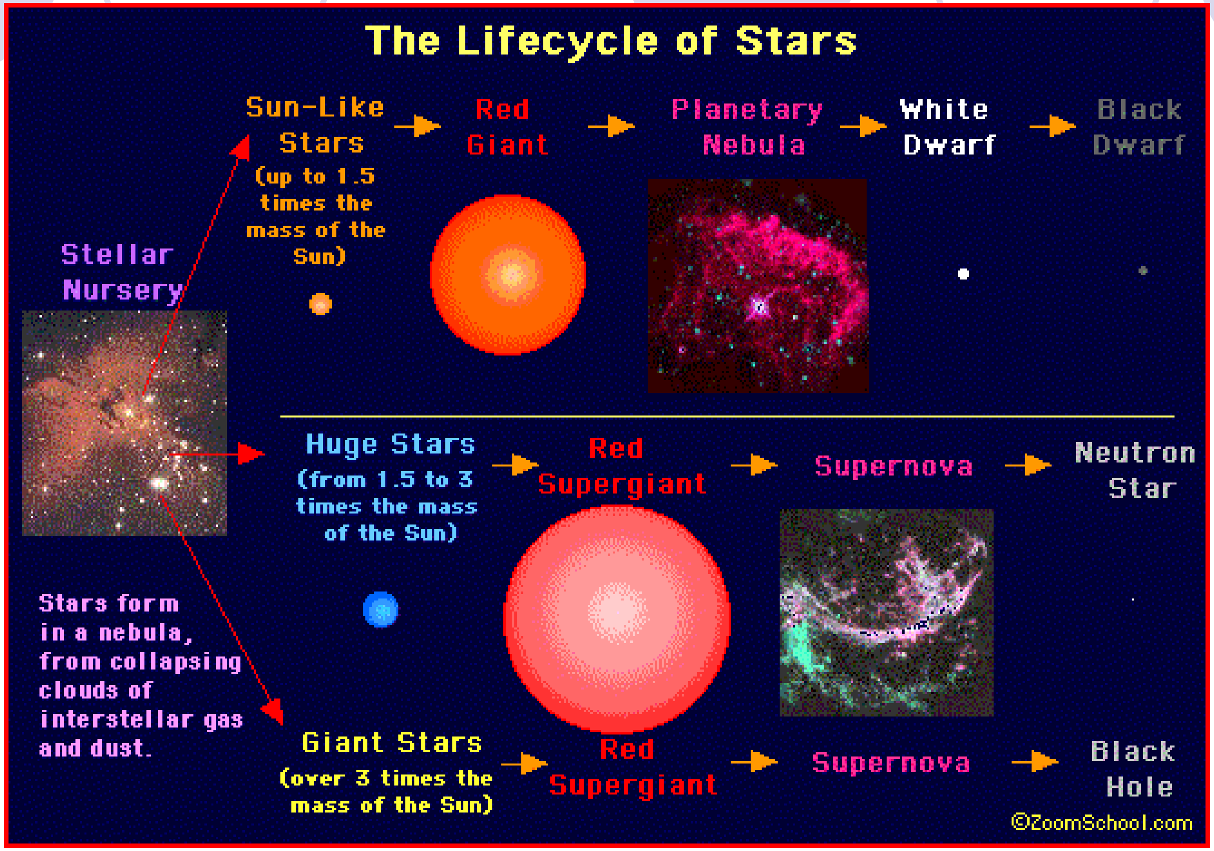
The 1st pulsar PSR 1919+21 discovered by J. Bell, in 1967, --A Pulsar Mother



脉冲星辐射：磁场极冠
Pulsar Beacon



脉冲星形成：大质量恒星-超新星爆发-中子星



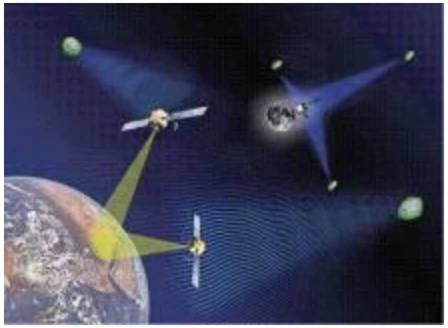
地球观测：银河系6-10万颗脉冲星，大部分中子星看不到

脉冲星特性：稳定转动 –脉冲星导航 Pulsars as clock

- Pulsar periods are incredibly stable and measured precisely: 常规脉冲星百万年慢一秒（~氢原子钟），毫秒脉冲星MSP10亿年慢一秒（~铯原子钟）， e.g.，PSR J0437-4715 自转周期P：

P=**5.757451831072007 +/- 0.000000000000008 ms**

- 磁偶极辐射 Pulsars lose energy & spin down:
- dP/dt =10**（-15） for normal pulsars
- dP/dt = 10**（-20） for MSPs



中子星历史简述 Brief History of NS

- 1932 Sir J Chadwick - 发现中子 discover neutron
- 1932 L Landau 预言中子星 NS
- 1933 W Baade & F Zwicky：NS-supernova
- 1939 J. Oppenheimer & G. Volkoff, >质量半径 NS
- 1967 J Bell & A Hewish, 发现radio 脉冲星
- 1971 R Giacconi，Cen X-3，自转周期P=4.84s, 1st X-ray 脉冲星（PSR）

恒星的演化

中子星尺度：太阳压缩到北京四环内

$2R \sim 20$ km； $M \sim M_{sun}$

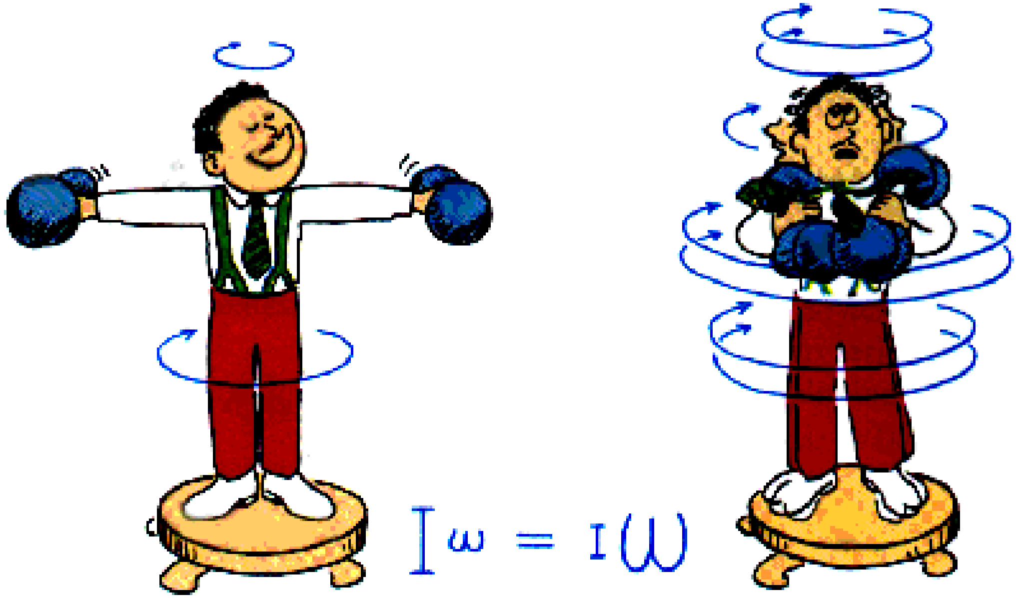
NS: Beijing City area

Football ? Soccer ?

脉冲星自转：角动量守恒

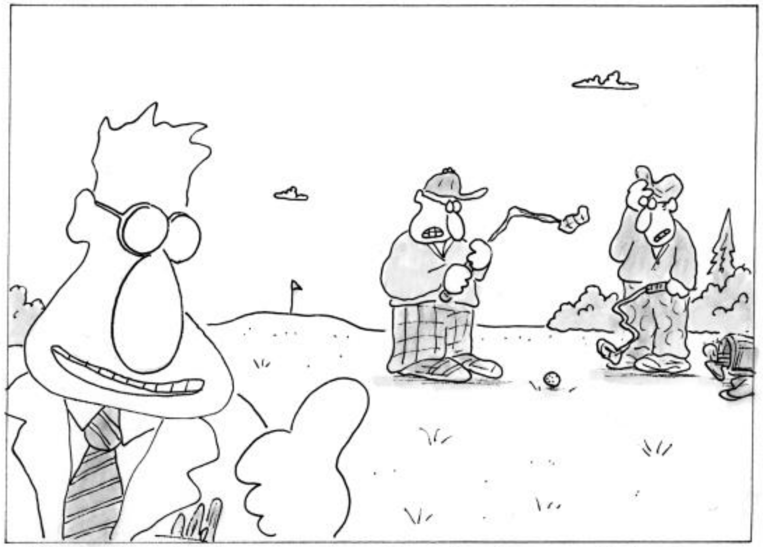
- Radius ~ 10 km
- Period ~ 0.001s – 10.0 s

Sun collapsing to ~10 km would rotate 700 times per second

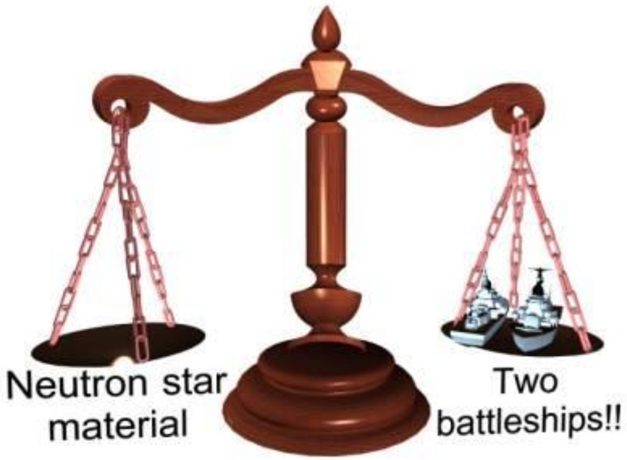


脉冲星的质量密度

- Radius ~ 10 km
- Period ~ 0.001s – 10.0 s
- Density ~ 10^{14}g/cc; 10^{14} times higher than that on Earth



"These golfers don't know it yet, but we've replaced their usual ball with one made from the core material of a neutron star."



脉冲星磁场：磁通守恒

NS Magnetic field ~ 10^{12} Gauss

Magnetic field of SUN ~ 100 G 》》 NS ~ 10^{12} G

磁通量守恒 magnetic flux conservation

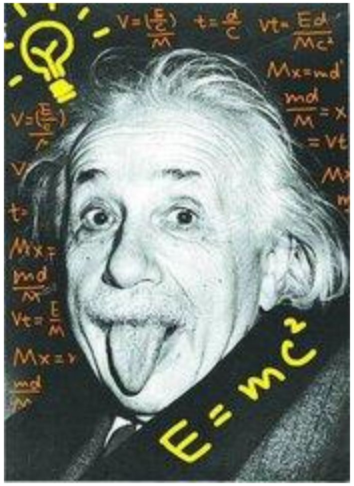
$$BR^2 = Const$$

$$\frac{B_1}{B_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

脉冲星引力场强度：超强=地球百亿倍

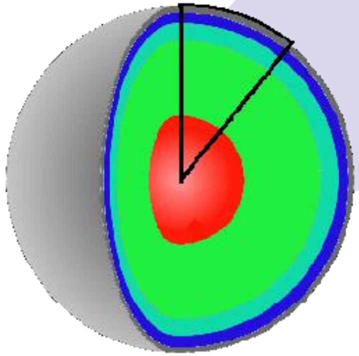
- GM/R ~ 0.3
- GM/Rsun ~ 10**(-6)
- GM/Rearth ~ 10**(-11)

谱线引力红移， z=0.23 （2002）



验证爱因斯坦广义相对论：强引力场

中子星物质结构



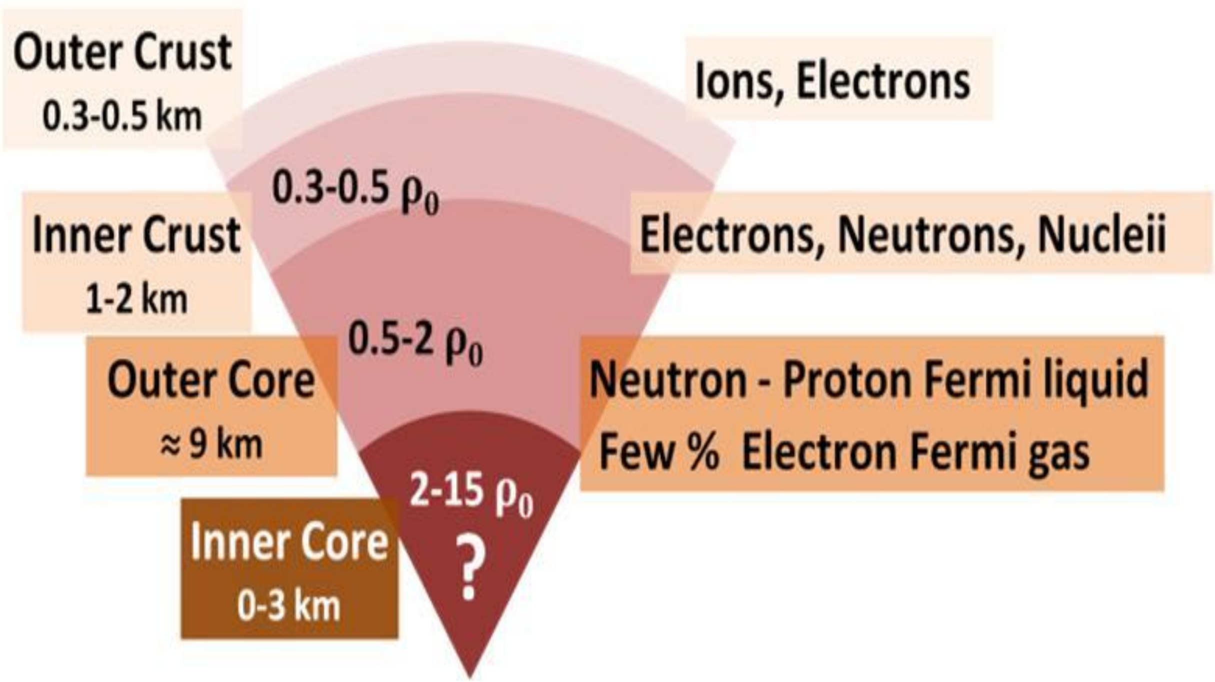
表面大气：H，Fe

外壳：离子、电子

内壳：中子超流

外核：中子质子电子

内核：夸克？



Nuclear Density ~ 2.8*10**14 g/cc

Supernova remnant and PSR
脉冲星与超新星遗迹

- 蟹状星云Crab Nebula 1054

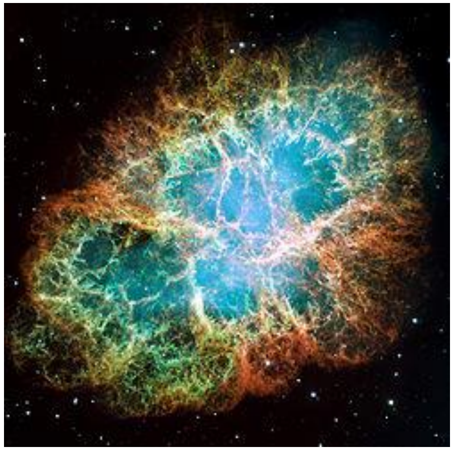
  PSR， P=0.033s
- Vela Nebula 1968发现

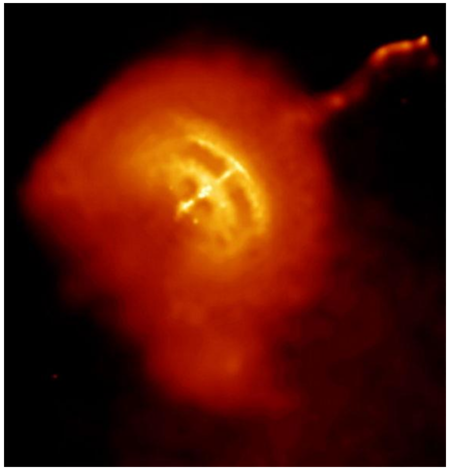
  PSR， P=0.059s

  脉冲星运动 – SNR遗迹关系

  SNR 1987A – NO pulsar

  Pulsar motion



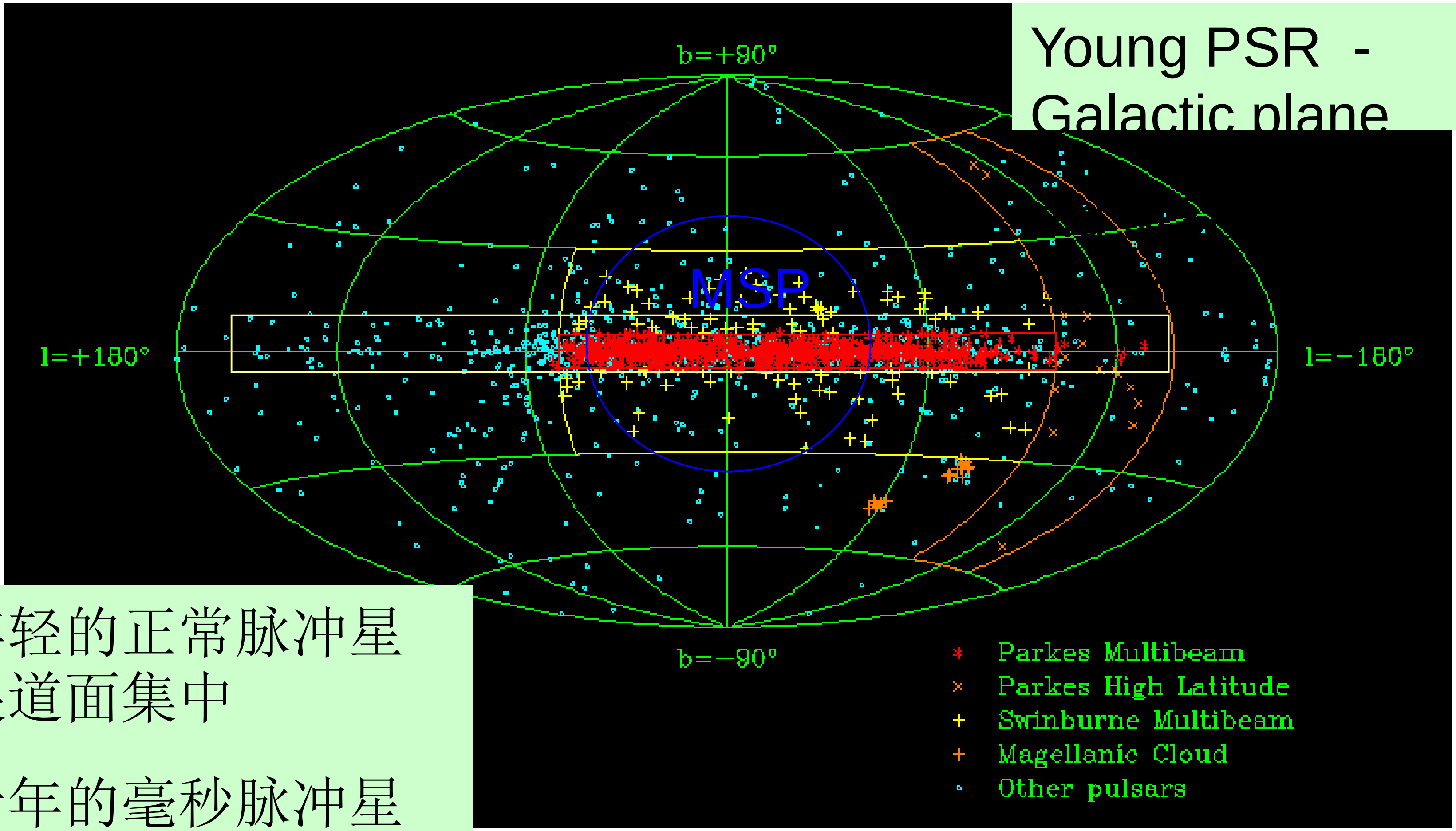


Galactic Distribution of Pulsars

脉冲星空间分布 – 自行运动

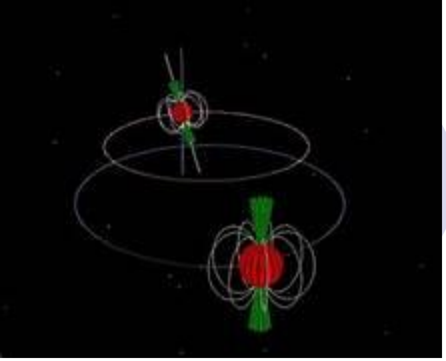
速度V~ 400-500 km/s

Young PSR -
Galactic plane



年轻的正常脉冲星银道面集中

老年的毫秒脉冲星银心区集中



双星脉冲星 Binary PSR

脉冲星拥有行星的发现虽然看起来显得意外，在这方面还有更加意外的发现，那就是双星脉冲星。

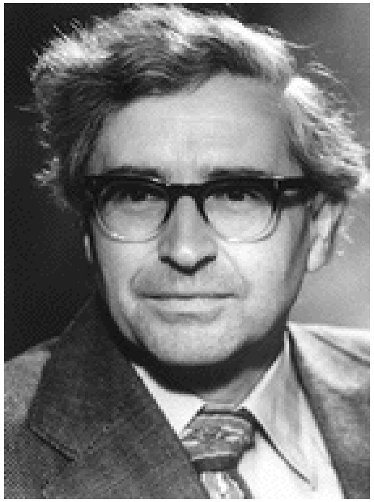
赫尔斯(Hulse)是研究生，他被当作泰勒(Taylor)的助手派往波多黎各的阿雷西博，用大射电望远镜观测脉冲星，那是当时最好的射电望远镜， 他发现了一种奇怪的电波，离第一颗脉冲星的发现仅仅过了七年，人们对脉冲星的了解还很肤浅，当时赫尔斯还不能立刻确信他所看到的周期变化就是事实，经过反复观测后，他才确定该系统是双体。他把这个消息电告泰勒，泰勒立刻赶往阿雷西博，他们进一步研究后认为这是一个双脉冲星，并且一起确定了双星的周期和两颗天体之间的距离。

于是，第一颗双脉冲星就是这样被发现了，这个发现在1993年被授予诺贝尔奖，这样有关脉冲星的发现就有了两项诺贝尔奖。

脉冲星与诺贝尔奖：Nobel Prize = No Bell Prize

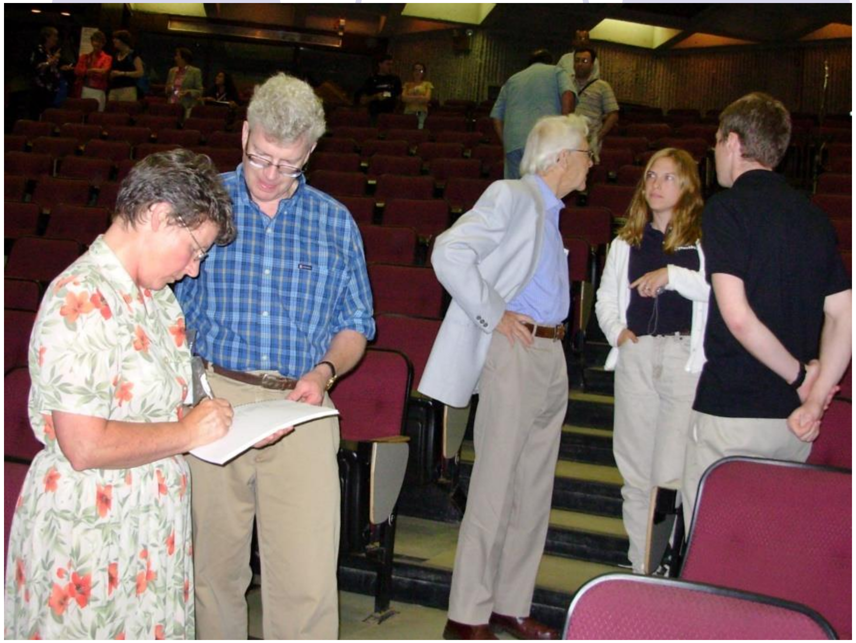
- 1974, A. Hewish; First Pulsar discovered by J. Bell
- 1993, R. Hulse, J. Taylor, Binary Pulsar, PSR 1913+16, Gravitational Radiation
- 2002， Riccardo Giacconi， X-ray source， X-ray Pulsar

Jocelyn Susan Bell Burnell



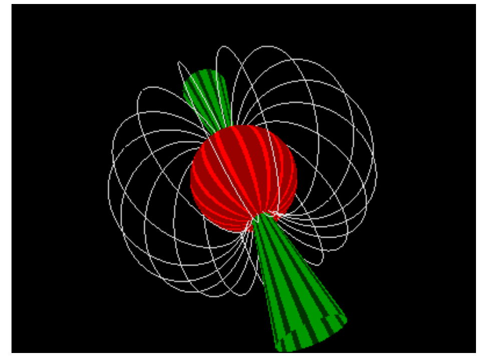
两位脉冲星发现者再次相遇 2007

PSR discoverers meet again

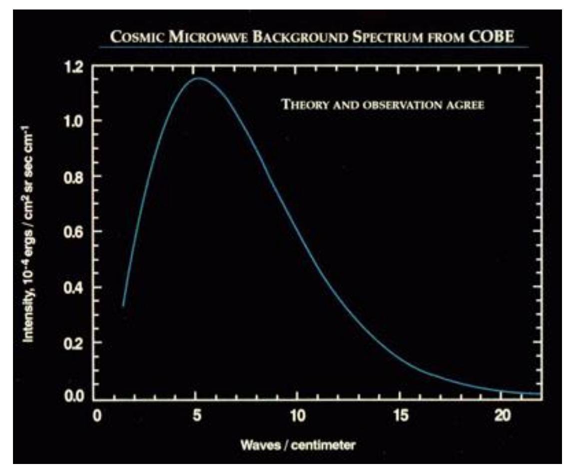


20世纪：four astronomy big discoveries

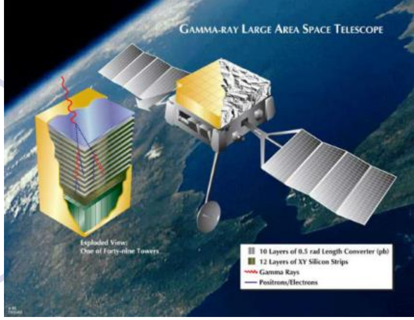
- 脉冲星 pulsar
- 类星体 quasar
- 星际分子 interstellar molecule
- 微波背景辐射 microwave background radiation



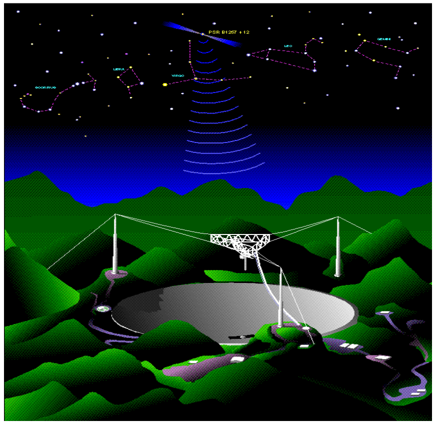
1963年测到了星际羟基(OH)、之后水汽(H2O)、氨(NH3)和甲醛(H2CO)分子，



脉冲星进展 1967-2017



Ground-Space， ~> 2700颗脉冲星
X-ray (RXTE Accreting NS >100 ?),
Gamma - ray (FERMI > 200)
地面射电观测-空间高能卫星观测，
波段： 射电、X-射线、伽马射线

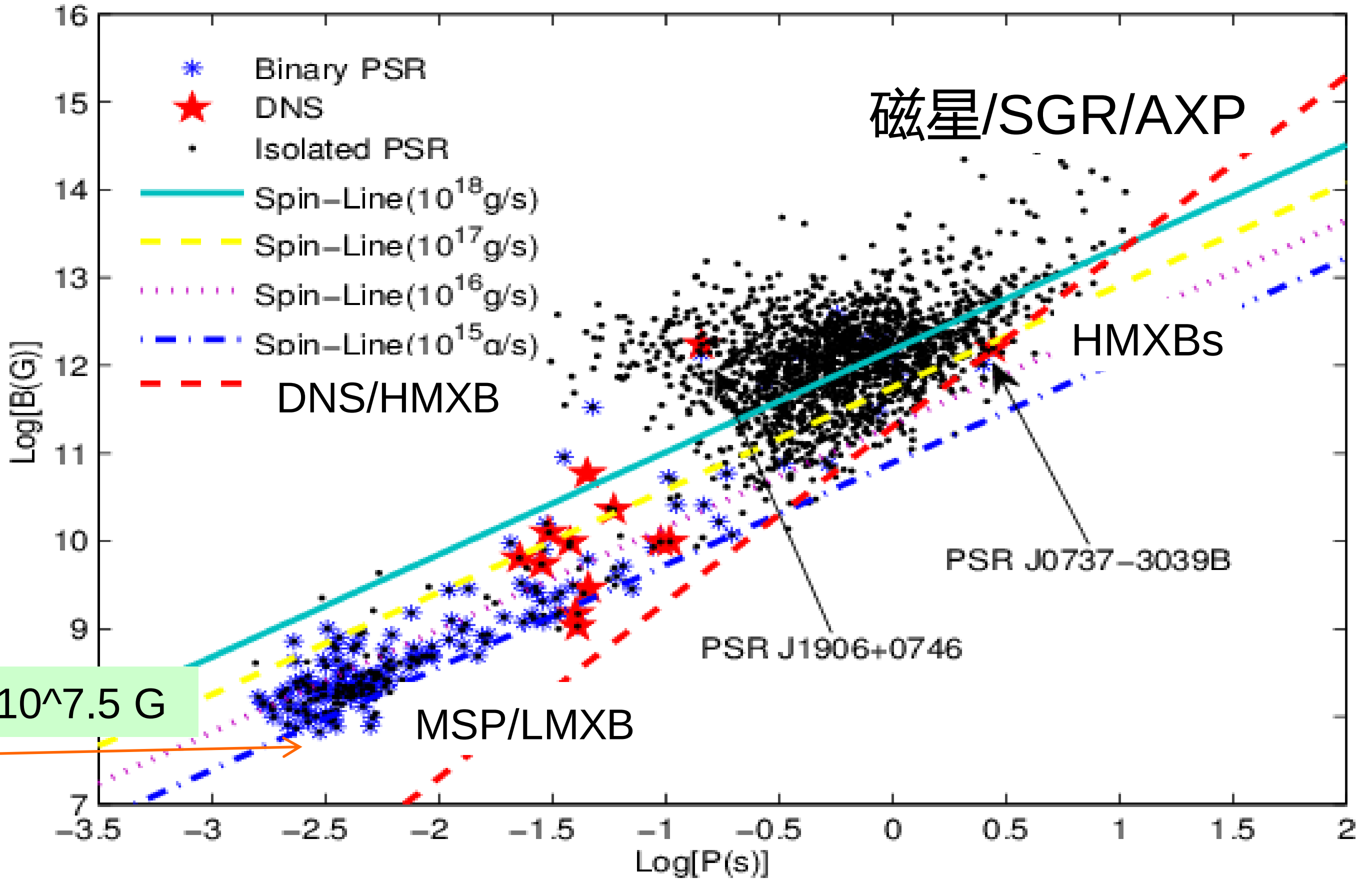


脉冲星发现50周年 1967-2017

- Pulsar： ~ 2700 (radio) + ~ 200 (X/G-ray)
- PSR Binary： ~ 272, NS/WD/Planet
- MSP: ~ 303， P<10ms，60% binary
- Mag Field: ~$10^{7.5\text{-}15}$ G; <B>~10^{12} G
- Spin period: 1.4 ms—8.5s 射电, <P>=0.5s
- 波段：Radio, Optical, X-ray, Gamma-ray

First MSP in 1982 (670 Hz); Fastest MSP (716 Hz)

脉冲星磁场-周期图 B-P diagram



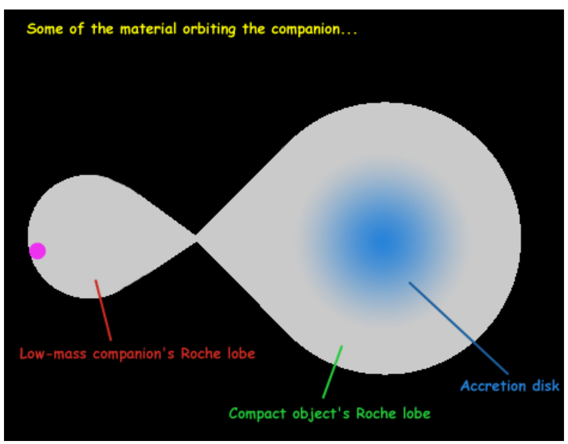
Bottom field of 10^7.5 G

PSR-Millisecond Pulsar=MSP

two types

Normal Pulsars: SNR 超新星爆发

- Formed in supernova
- Periods between 0.03 and 10 s
- Relatively young (< 107 years)
- Mostly single (non-binary)



双星系中子星X 射线源-毫秒MSP

MSP：双星系中NS吸积加速

- MSPs are very old (~109 years).
- Mostly binary； B-P low 低
- ‘recycled’ by accretion from binary
- accretion spins up NS to milliseconds
- During the accretion X-ray binary

那些脉冲星重要观测 1967-2017

- 1st Pulsar：   1967
- Glitch: 1968
- Crab-SNR: 1968
- 1st Binary：   1974,
- M,GW,GR
- 1st Ac X-ray: 1974
- 1st Cyclorton: 1978
- 1st MSP: 1982
- 1st Rot X-ray: 1970
- 1st Gam: 1980
- XINS: 1990
- PSR+planet 1990

- GC: 1990
- RXTE: AMXP 1996
- AMXP-MSP 2000
- Giant Glitch 2000
- Doule PSR 2003
- 6.67 HR, 2006
- RRAT：   2006
- CCo   2007
- FERMI 2008
- SGR+RADIO 2012
- ULX-NS 2014

Part 2.　脉冲星与引力波

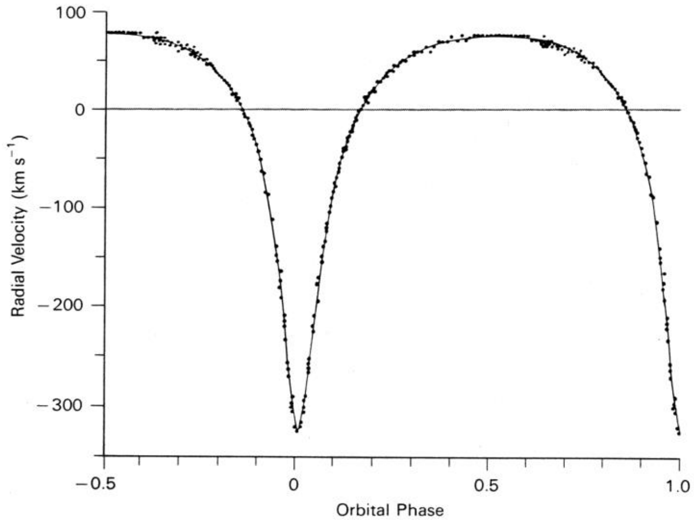
脉冲星和引力波：双星 PSR B1913+16

Discovered by Hulse & Taylor in 1974

Pulse period: 59 ms

Orbital Period: 7h 45m

Double NS system 双中子星系统

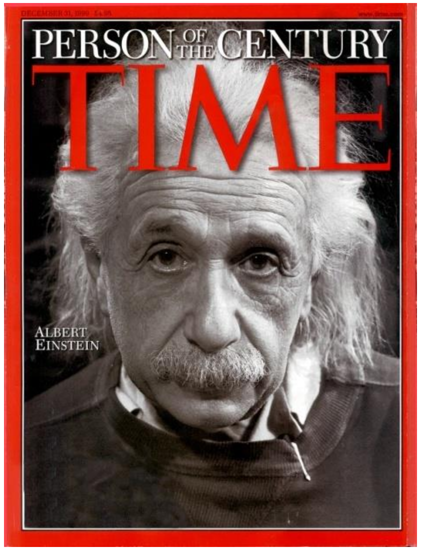


periastron velocity:
~ 0.001 c （光速/1000）

Arecibo 305-meter Radio Telescope

脉冲星-广义相对论验证

Century Person



GR, 1915

Red-shift 红移

Precession (LT?) 进动

Deflection 光线偏折

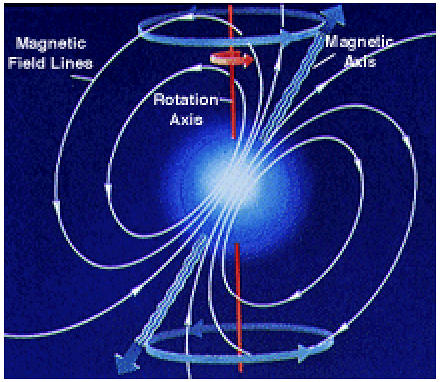
Shapiro Delay 时间延迟

Grav. wave？ 引力波

Black Hole？ 黑洞

COSMOLOGY？宇宙

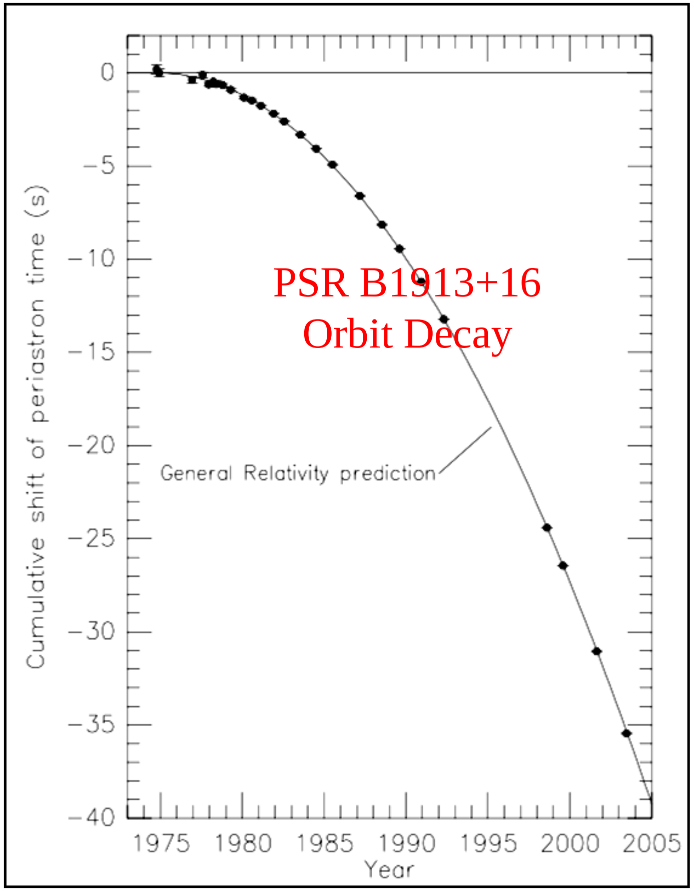
致密星体-强引力场，相对论引力理论实验室



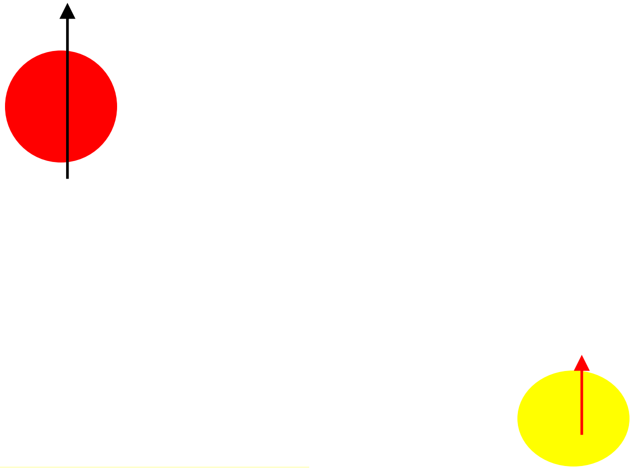
引力波验证---脉冲星双星轨道收缩

- orbital motion of two stars in PSR B1913+16 generates gravitational waves
- Energy loss causes decrease of orbital period
- 轨道收缩每年~6厘米

证实广义相对论；间接证实引力波



Double Pulsars PSRJ0737-3039
双脉冲星系统-再次检验引力波



MSP is firstly formed, Porb=2.4 hr

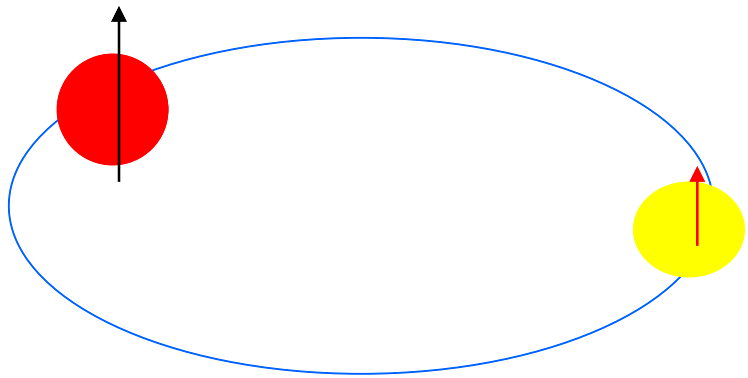
P=22.7 ms， B~109 Gauss, 1.34 $M_\odot$

P=2.8 s，B~1012 Gauss, 1.25 $M_\odot$

脉冲星双星系-引力波导致轨道收缩

Binary Pulsar PSR1913+16
Double Pulsars PSRJ0737-3039

Parkes： Lyne et al 2004; Burgay et al. 2003, van den Heuvel 2004



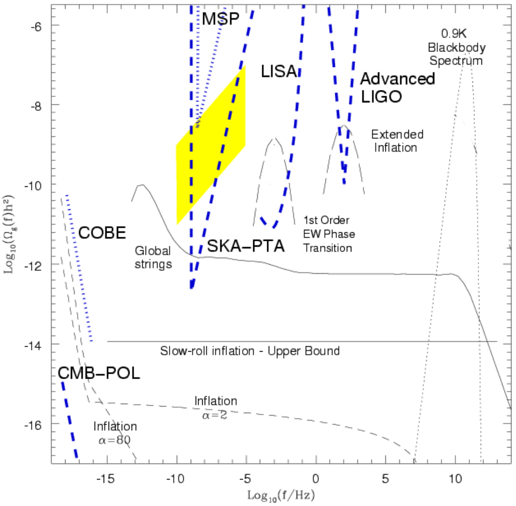
Firstly formed PSR,

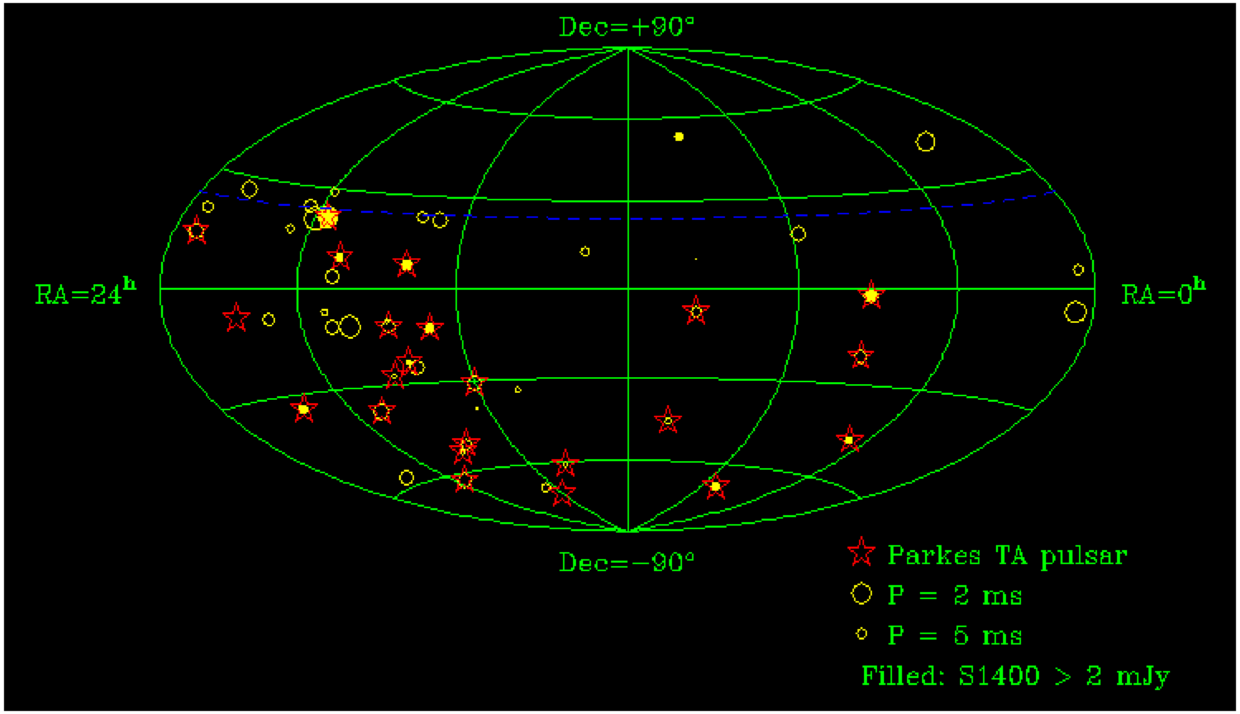
P=22.7 ms， B~109 Gauss, 1.34 $M_\odot$

P=2.8 s， B~1012 Gauss, 1.25 $M_\odot$

引力波直接探测：毫秒脉冲星阵列

GW: Millisecond Pulsar Array

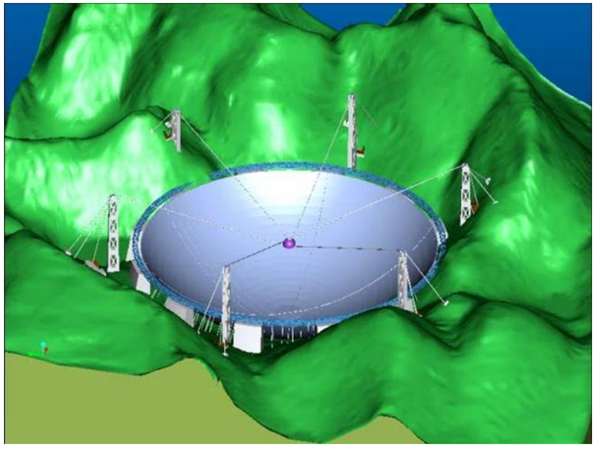




40 颗MSP，P < 20 ms；Nano－second，TOA

Parkes＋Arecibo：灵敏度？FAST：灵敏度！

Part 3. FAST telescope & Pulsar



Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST)

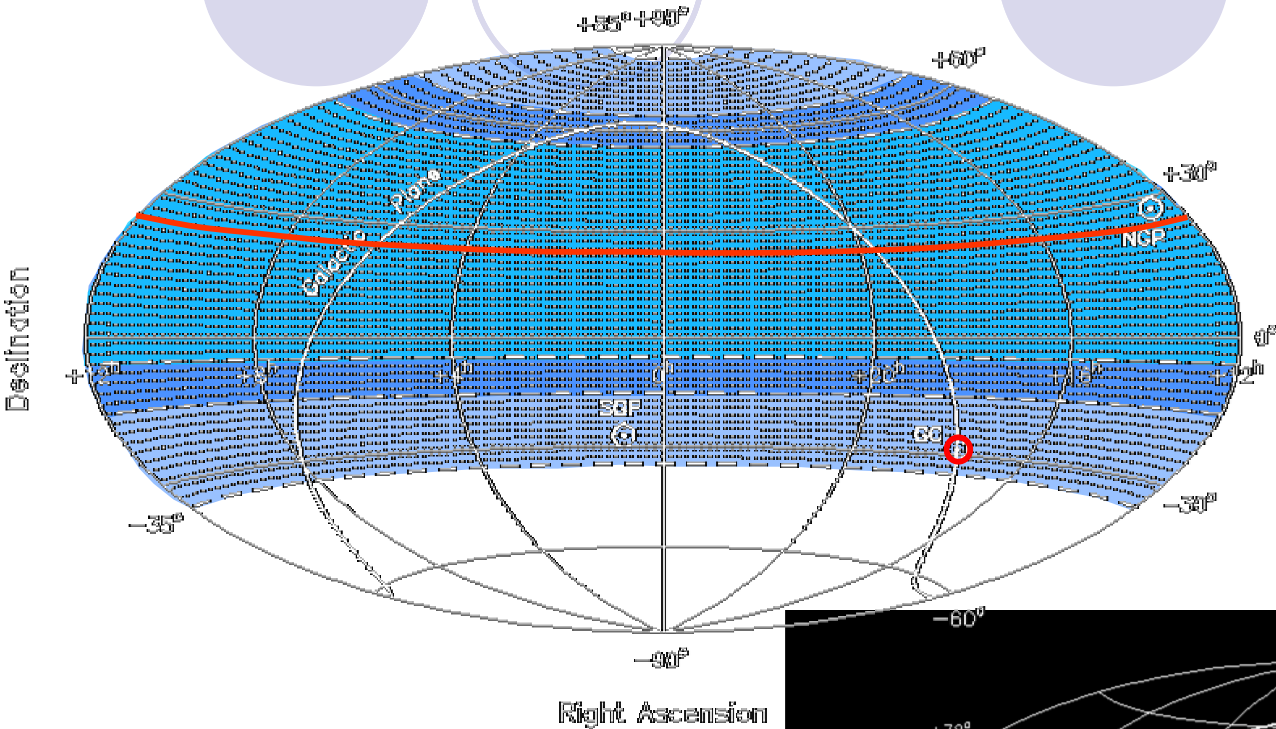
- Unique Karst depression as the site
- Active main reflector
- Cable - parallel robot feed support

FAST Site: south of China, Guizhou

Location: N25.647222° E106.85583 °

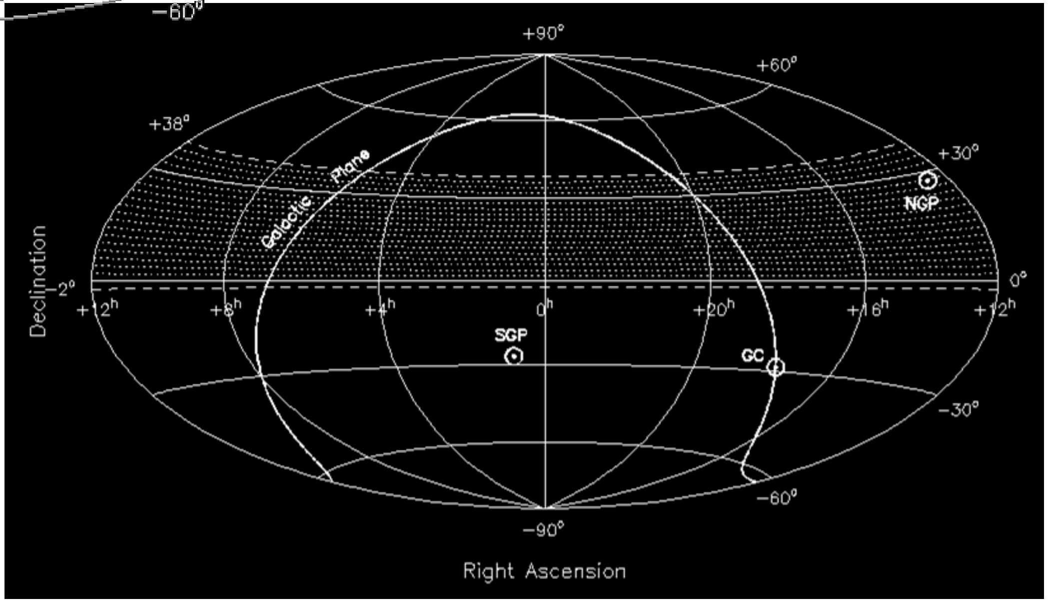
Karst

Opening angle – FAST sky coverage



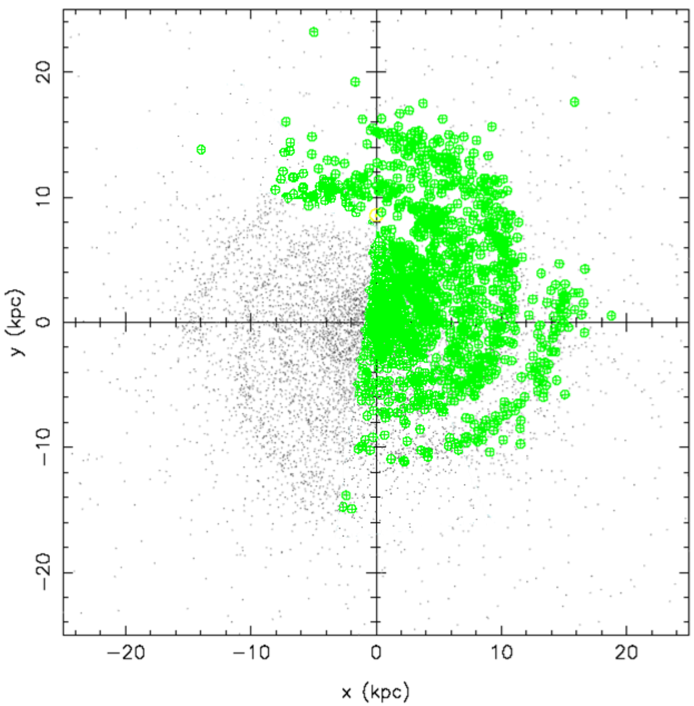
Sky coverage
ZA 30 deg
ZA 40 deg
ZA 60 deg
FAST Zenith

Sky coverage： zenith angle 40°



FAST Pulsar Survey

~ 60,000 detectable pulsars in Galaxy, half in FAST view



FAST ~ 4000 PSRs (Nan et al. 2011; Smits et al. 2010

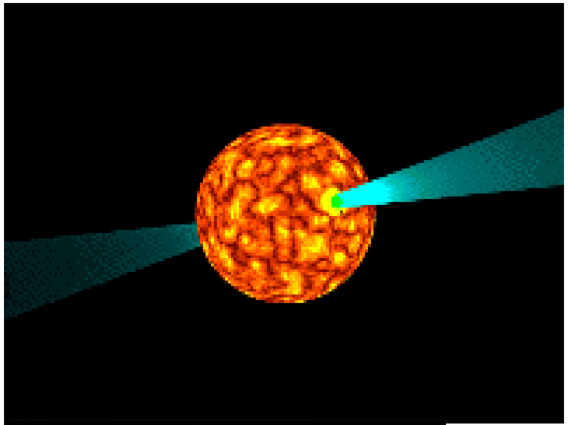
Rare objects:

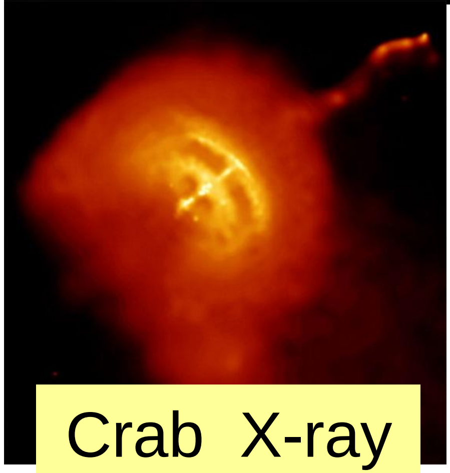
MSP; < 1 ms submillisecond - QS;
Doule Pulsar-binary; PSR+Black hole

Low magnetic field MSP; SGR - radio
Long spin period PSR; etc.

FAST首选目标： Crab Pulsar (1054年)

- Crab Pulsar is one of most luminnous PSRs in FAST view
- Supernova Remnant PSR，年龄已知
- FAST initial operating, monitor, test system, standrad
- FAST 试运行，监测，定标





Crab X-ray

X 射线图片

FAST高灵敏度、北天区； 高亮度；多波段观测PSR；

数据丰富； 1054-遗迹年代清楚

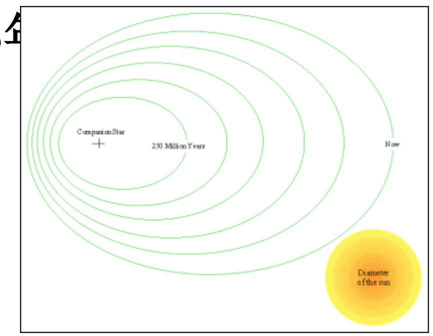
FAST重要目标1：脉冲星-黑洞双星

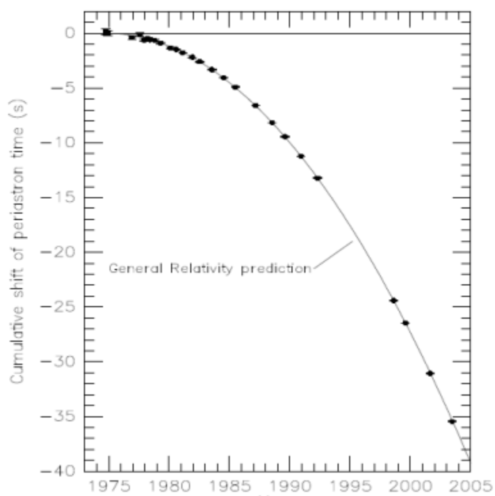
Pulsar-Neutron Star (1974) PSR B1913+16

间接验证引力波

在0.2%精度检验相对论

1993

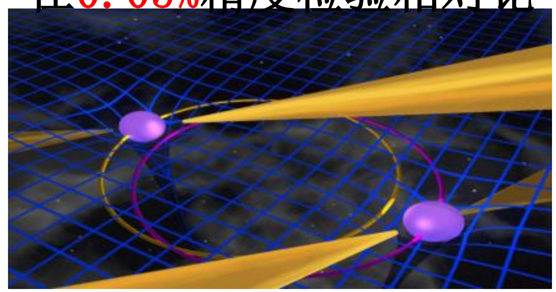


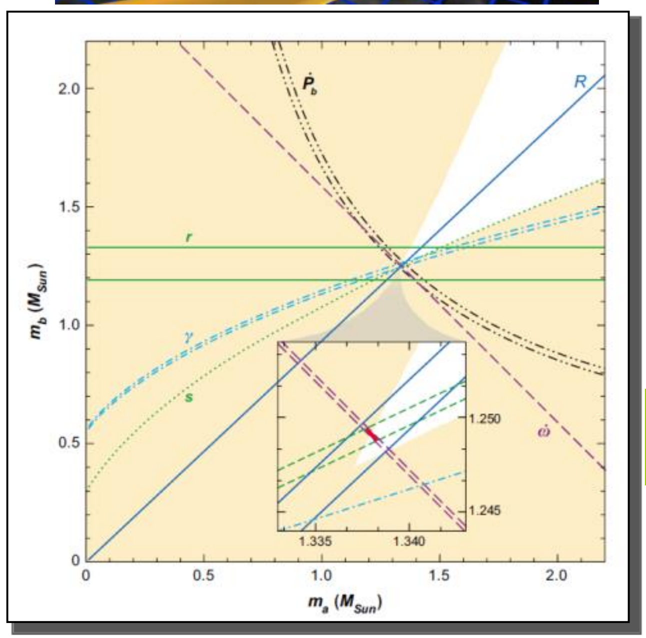


Pulsar-Pulsar (2004)

PSR J0737-3039A/B

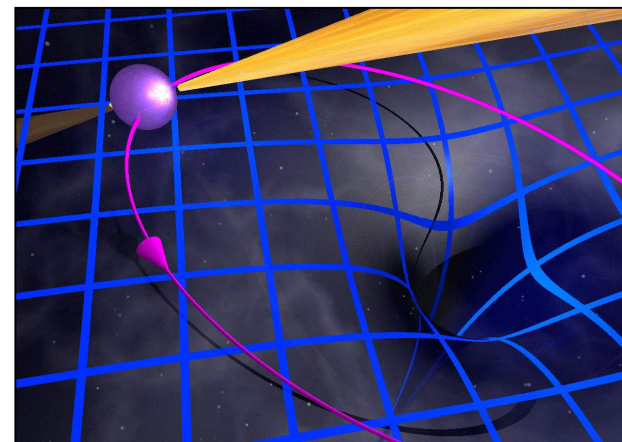
在0.05%精度检验相对论





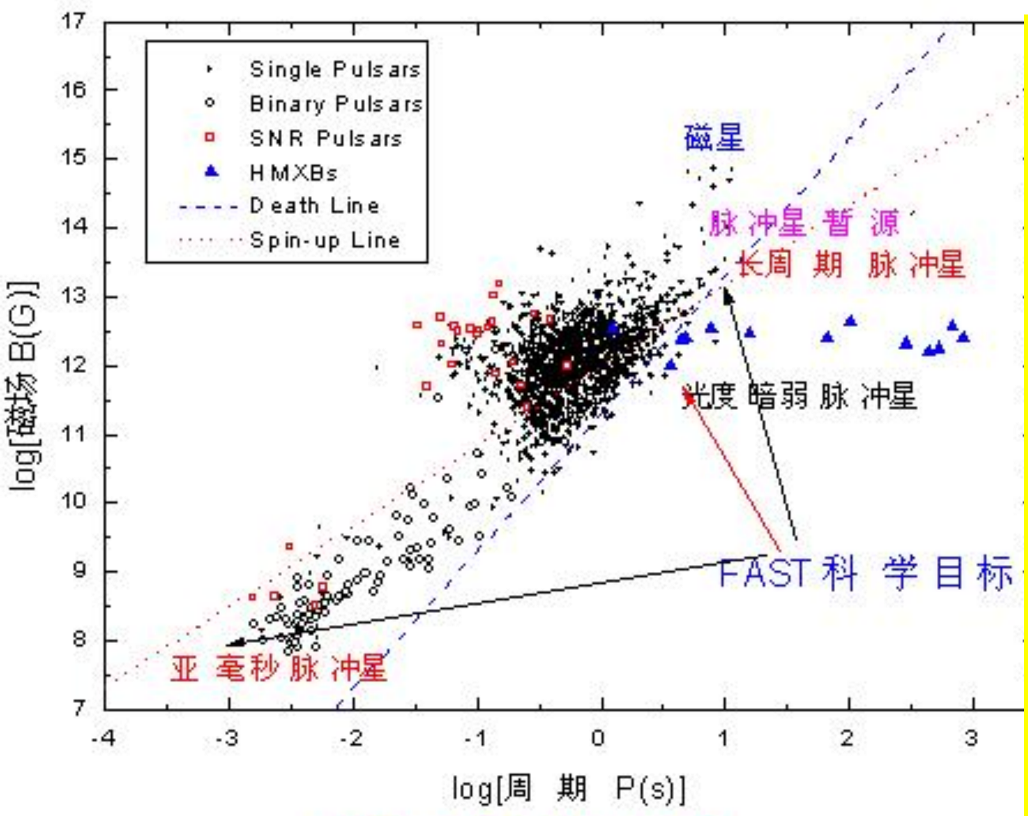
Pulsar-BH

BH physics and precise measurement of GR effects，引力波验证



How to search?

FAST重要目标 2



脉冲星磁场自旋周期图

长周期脉冲星：P>10s

暗弱脉冲星：Radio quiet

射电-高能转换MSP

亚毫秒脉冲星P < 1ms

低磁场MSP：B=10^7 G

FERMI 费米radio quiet

河外与球状星团脉冲星
afterglow: SGR /GRB

脉冲星50年总结与展望

- 脉冲星延伸我们关于宇宙认识:
- 恒星演化过程，约束超新星；
- 物理学天然实验室，具有极端天体环境，超强磁场，等离子体物理应用，高能与射电辐射机制，核物理，爱因斯坦相对论验证，引力波检验；高温高压过程，粒子物理过程。
- 紧密双星吸积与演化过程；
- 宇宙最精准的钟-导航 ；
- 新物理学与各种常数检验；
- 提升天文学观测设备能力。

From Crab to FAST ---- pulsar link

FAST Observation: Binary Pulsars in Globular Clusters

Total number of pulsars: 144, in 28 globular clusters， most are MSP 毫秒脉冲星

Formation：

1. Star density high

--- More binaries

2. Capture events

--- Significant mechanism of binary formation