



Pulsarの電波観測について

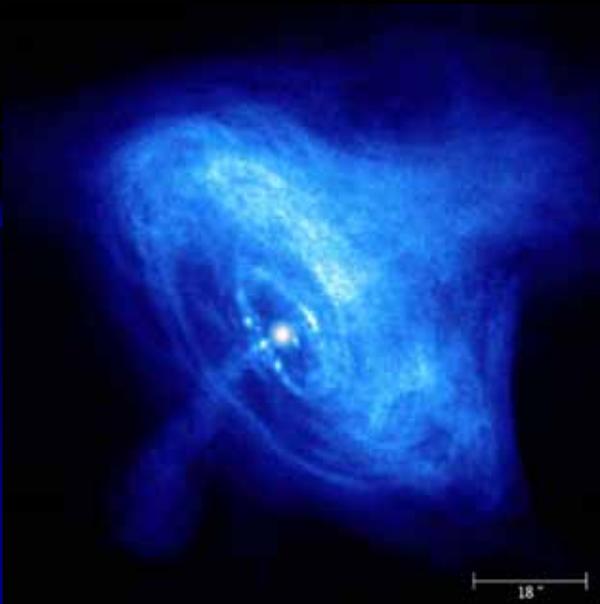
関戸 衛

情報通信研究機構 (NICT)

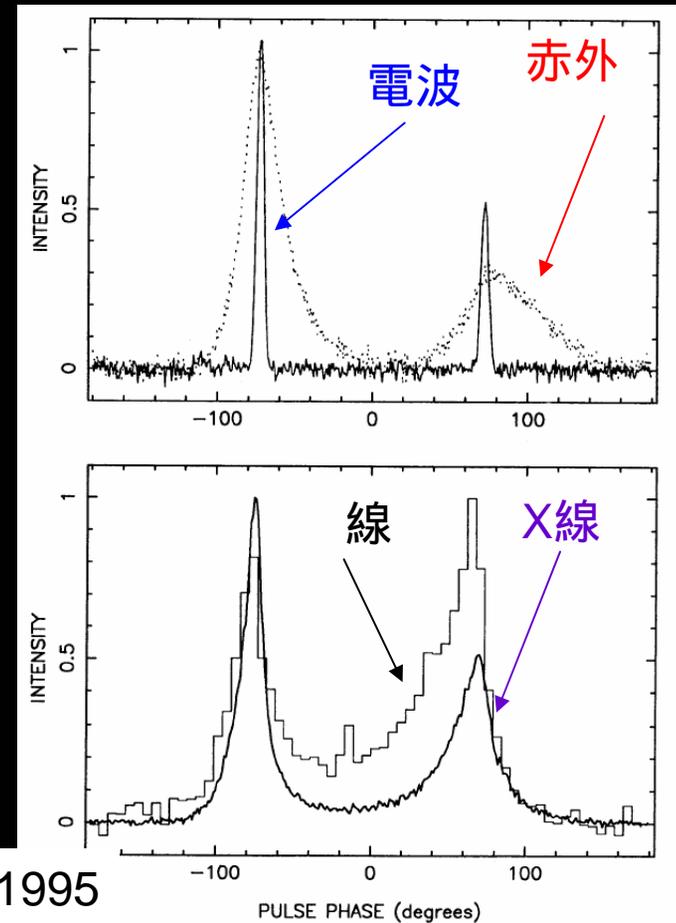
鹿島宇宙技術センター

Pulsar: 究極の物質状態に観測的に アクセスできる興味深い天体

- 磁場強度: $10^8 \sim 10^{14}$ Gauss @ 表面
- 重力: 10^9 G (地上の重力)
- 磁気圏の電位差: 10^{12} V



Crab Pulsar by Chandra(X-ray)



Lundgren et al., 1995

パルサーの特徴

- 中性子星
 - 高エネルギー現象、電波・X/ガンマ線
 - 偏波観測 放射領域
 - グリッチ 中性子星の構造
- 点源 = 高い空間周波数のコヒーレンス
 - シンチレーション 星間電子密度・揺らぎ
- パルス周期の高い安定度
 - 重力波の検出器として
- DMと距離の観測
 - 銀河系の電子密度構造
- タイミング観測とVLBI観測
 - 力学座標系とVLBI座標系の結合

電波観測から得られる量

- パルス周期 P 、変化率 \dot{P}

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

- 特性年齢

- 磁場

$$B = 3.2 \times 10^{19} \sqrt{P\dot{P}}$$

- 位置(α 、 δ)と固有運動(μ_α 、 μ_δ)、視差

- ディスパージョンメジャー

$$DM = \int n_e dl$$

- 直線偏向 位置角、ローテーションメジャー

- シンチレーションパラメータ

$$\Delta \nu_d, \Delta t_{\text{iss}}$$

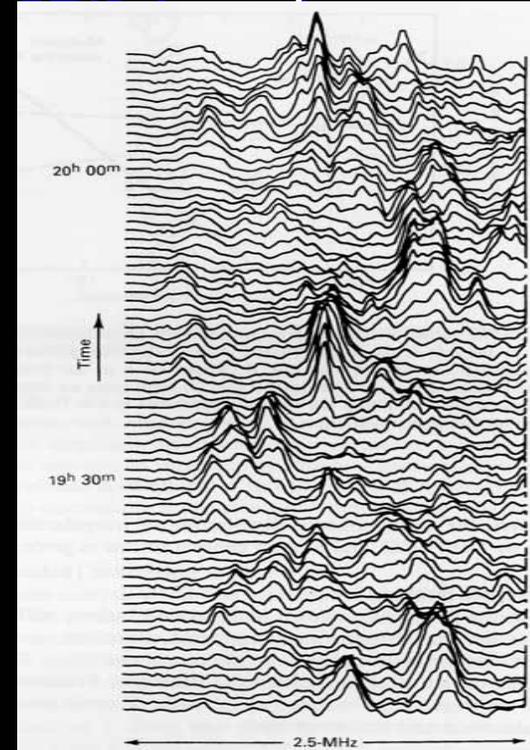
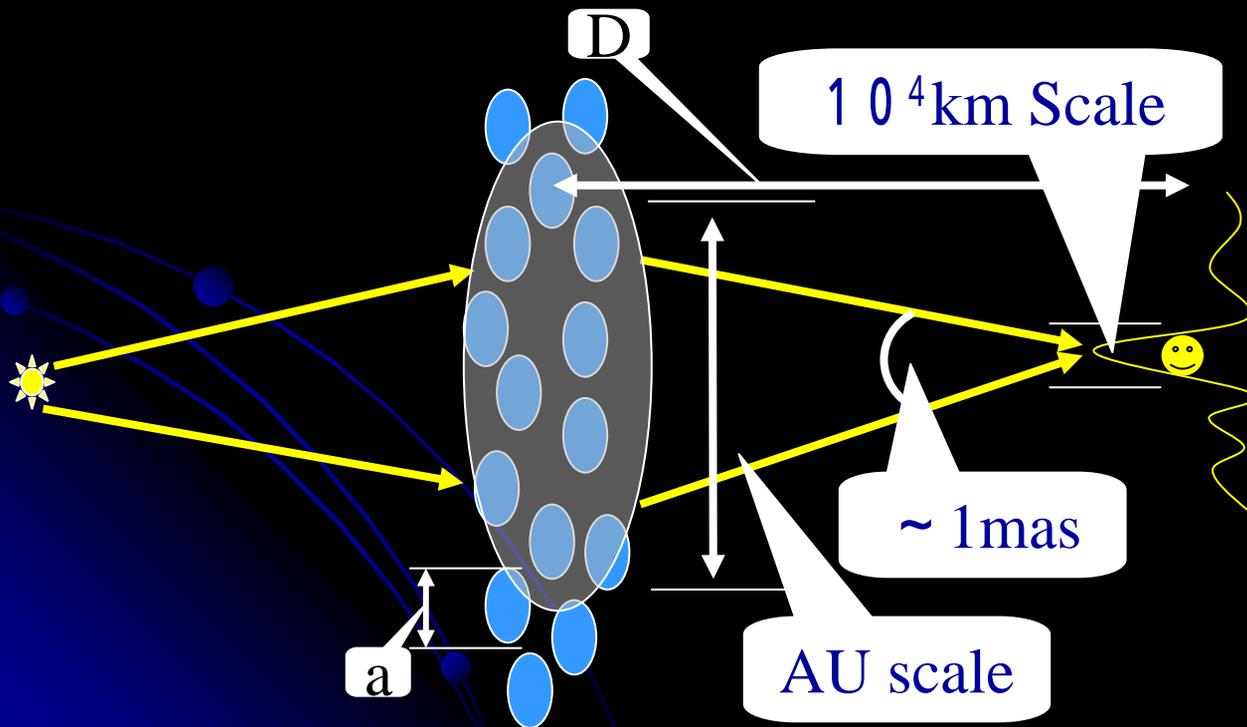
最近の研究の状況のレビュー

- シンチレーション
- パルサータイミング
- ジャイアントパルス
- 干渉計アストロメトリ
- 銀河の電子密度分布
- パルサーサーベイ

シンチレーションの観測

Pulsar特有の高い空間コヒーレンス

- 星間電離媒質を通過する事により**回折性(短期)**および**屈折性(長期)**の強度変動が観測される。(時間、周波数領域ともに変動する)



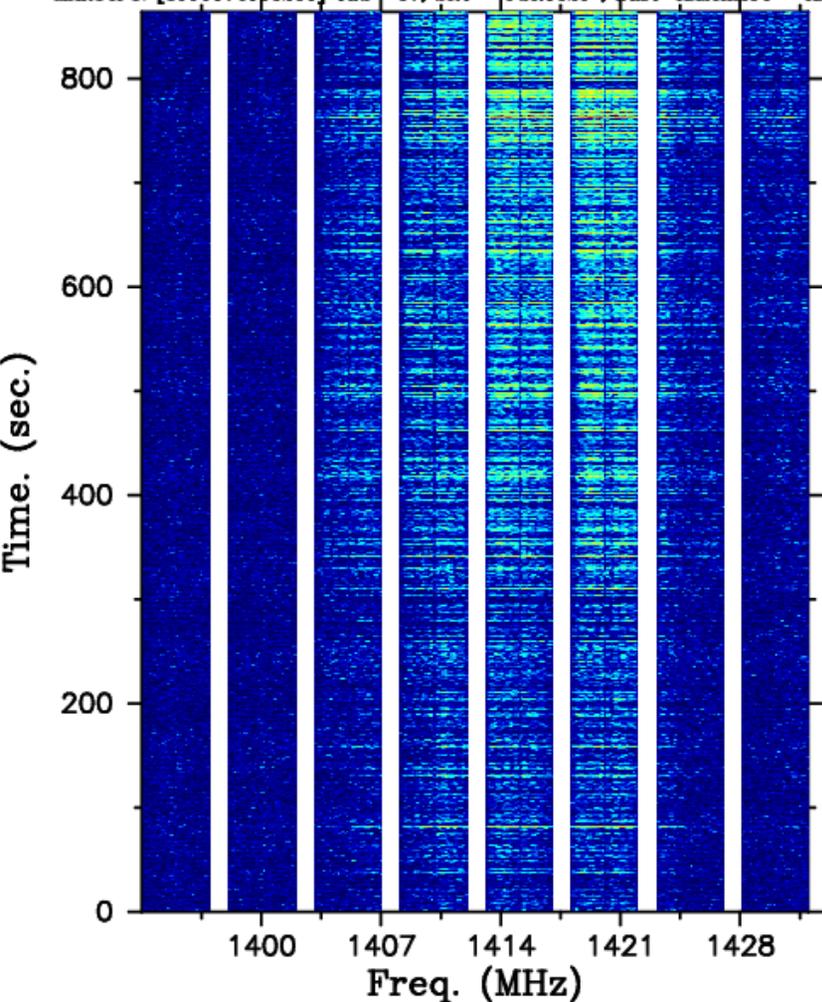
PSR0329+54 @ 1.4GHz

Cross Power Spectrum

$B_{sc} \sim 15\text{MHz}$

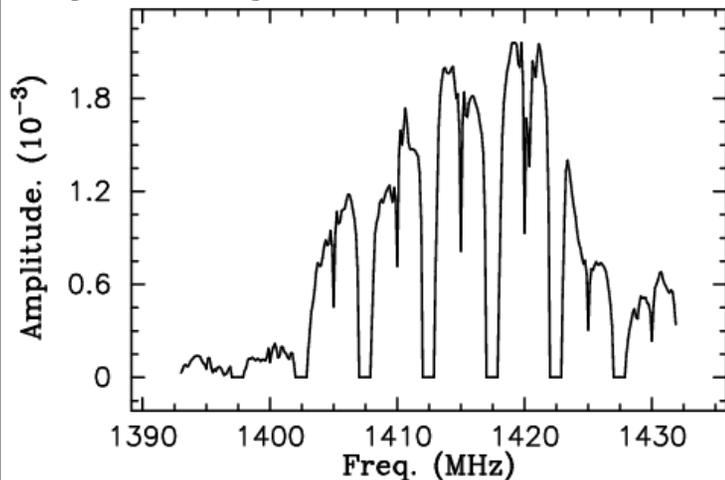
Dynamic Spectrum

MAR14P1: [1995074083230] OBS= 37, SRC = PSR0329 , Base=KASHIM34 - KALYAZIN



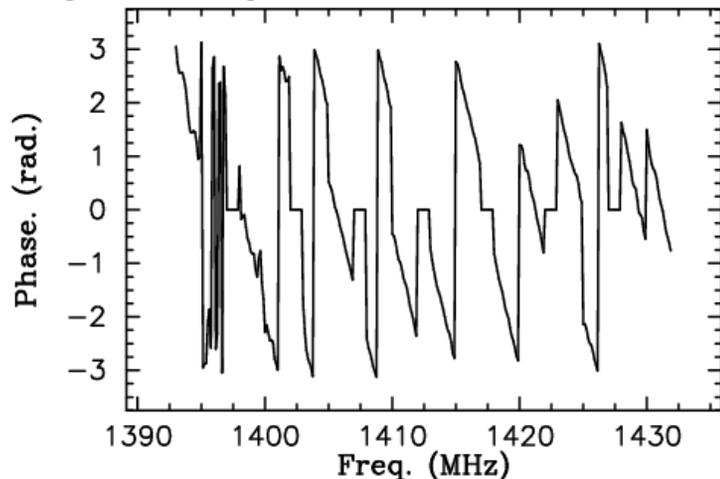
Cross Spectrum

14P1: [1995074083230] OBS= 37, SRC = PSR0329 , Base=KASHIM34 - KALY



Cross Spectrum

14P1: [1995074083230] OBS= 37, SRC = PSR0329 , Base=KASHIM34 - KALY



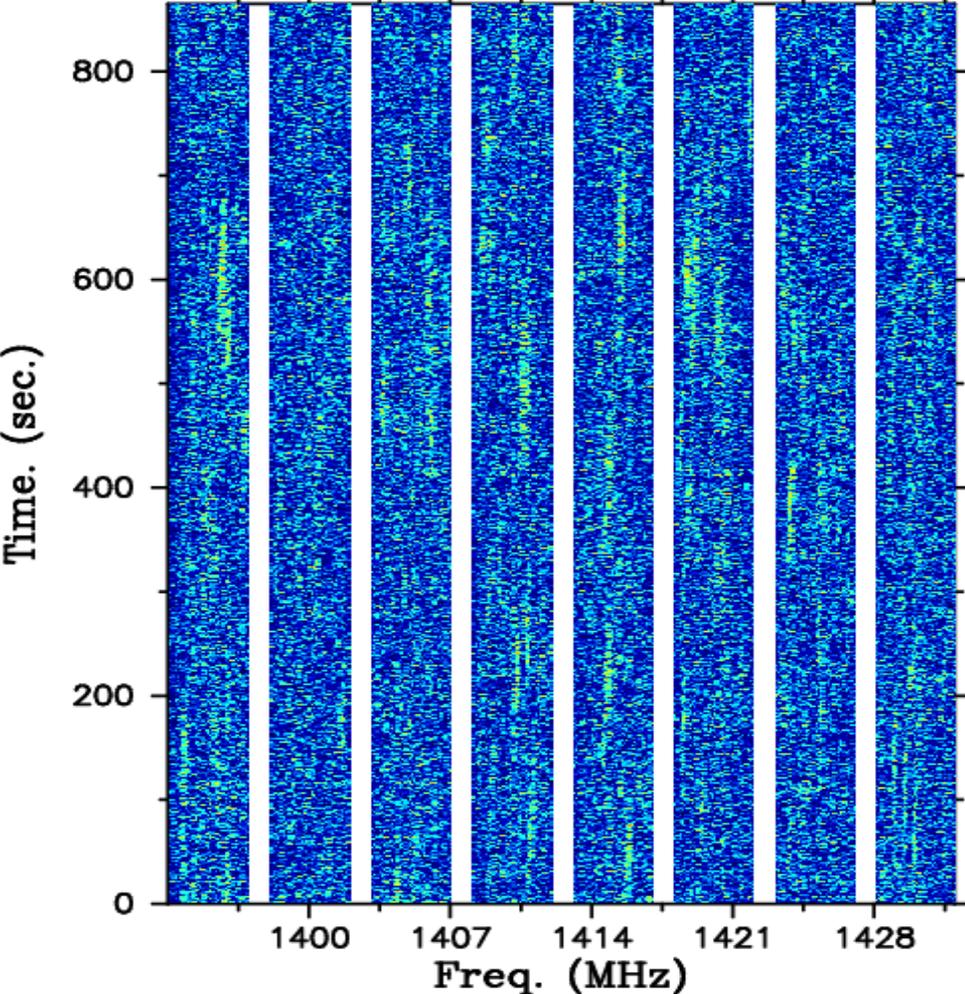
PSR1933+16 @ 1.4GHz

Cross Power Spectrum

$B_{sc} \sim 70-150\text{kHz}$

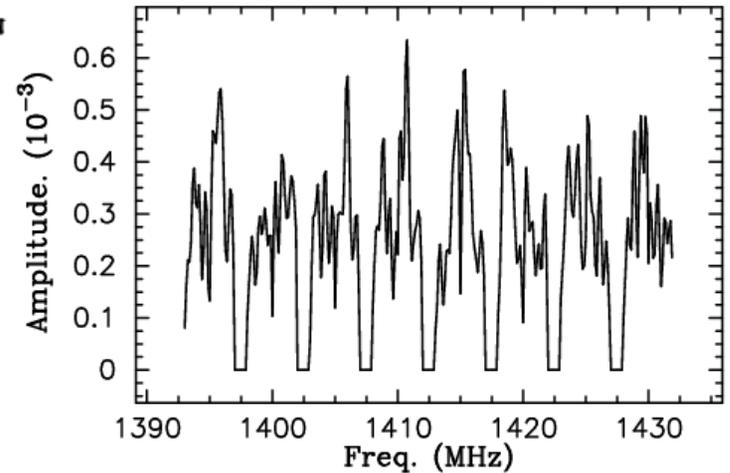
Dynamic Spectrum

MAR14P1: [1995074024530] OBS= 16, SRC = PSR1933, Base=KASHIM34 - KALYAZIN



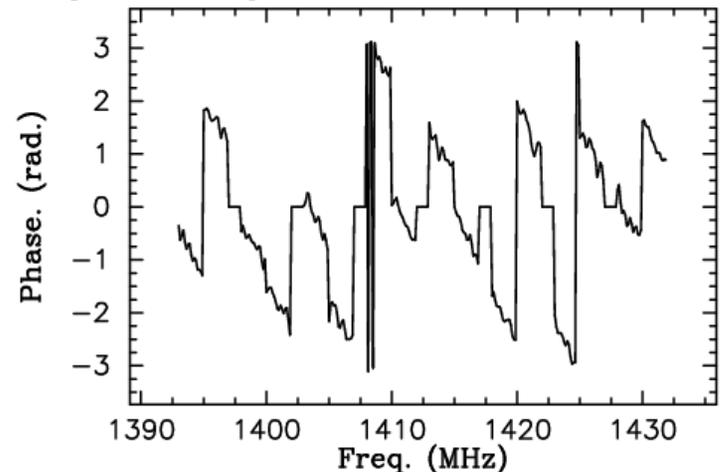
Cross Spectrum

14P1: [1995074024530] OBS= 16, SRC = PSR1933, Base=KASHIM34 - KALYAZIN



Cross Spectrum

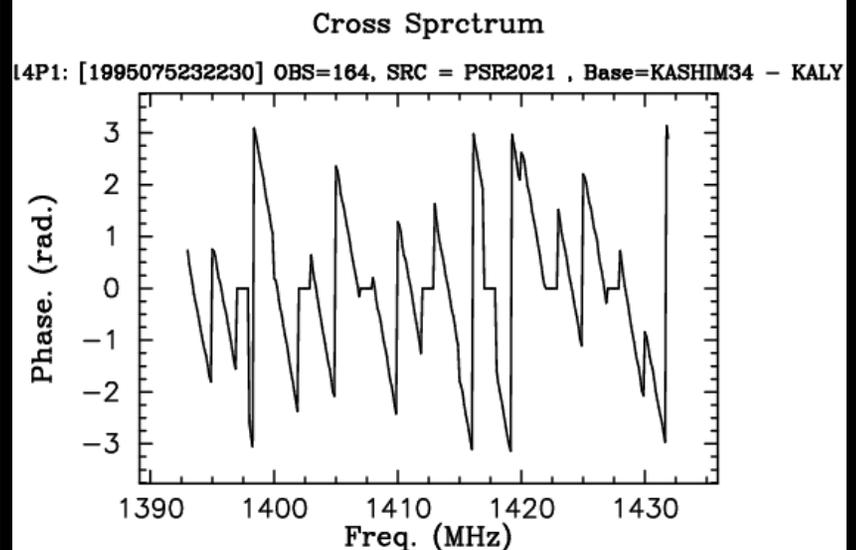
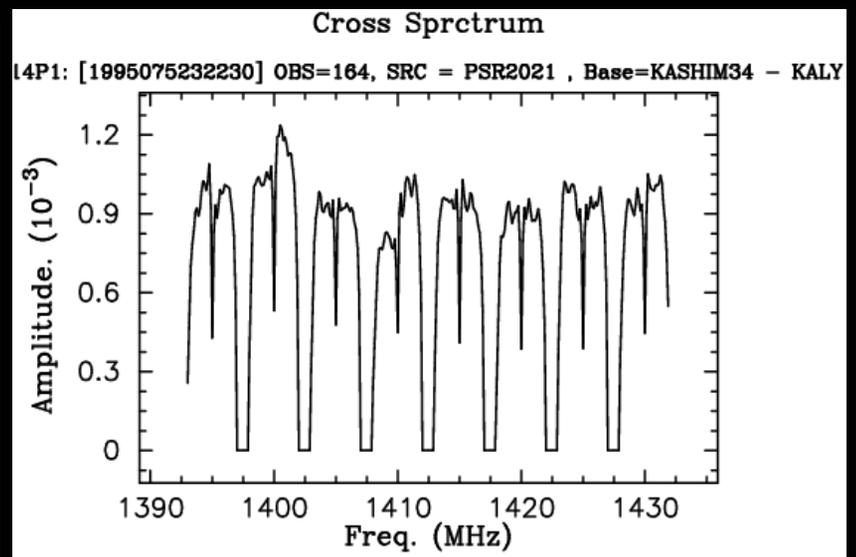
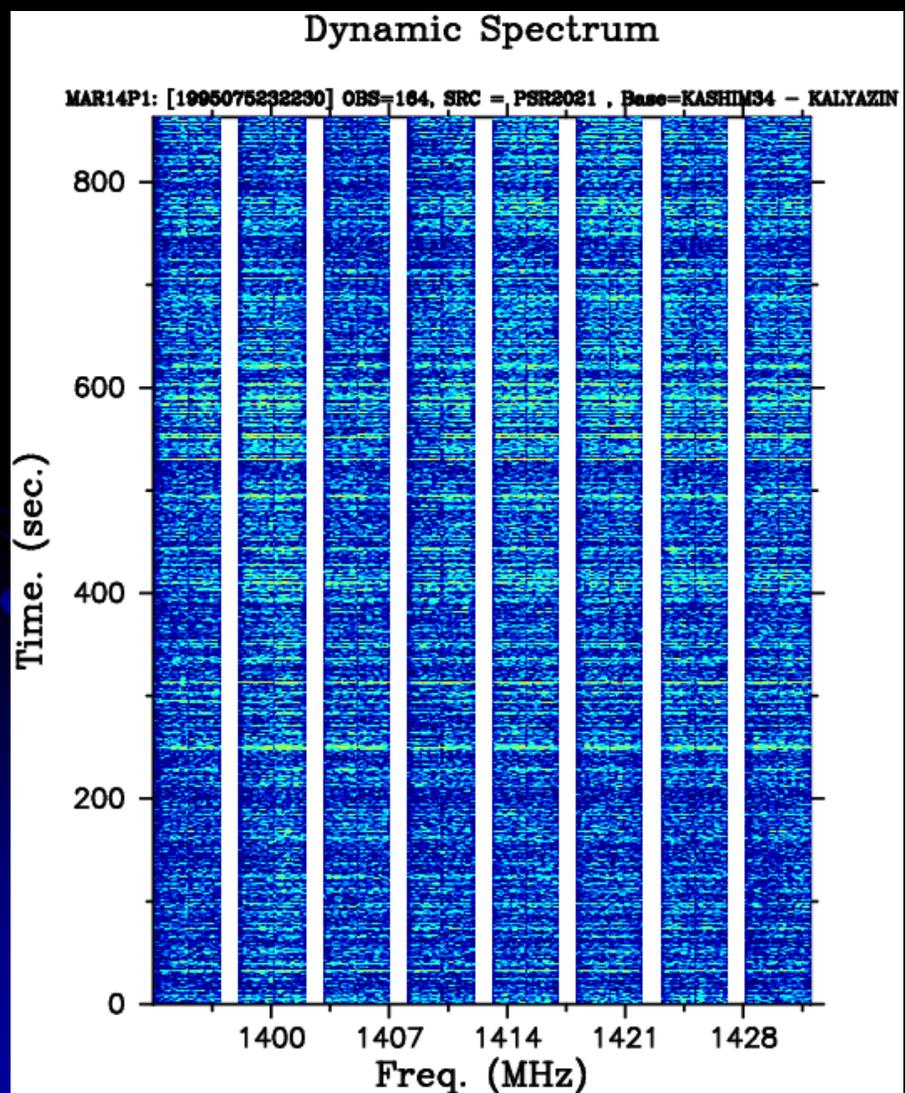
14P1: [1995074024530] OBS= 16, SRC = PSR1933, Base=KASHIM34 - KALYAZIN



PSR2021+51 @ 1.4GHz

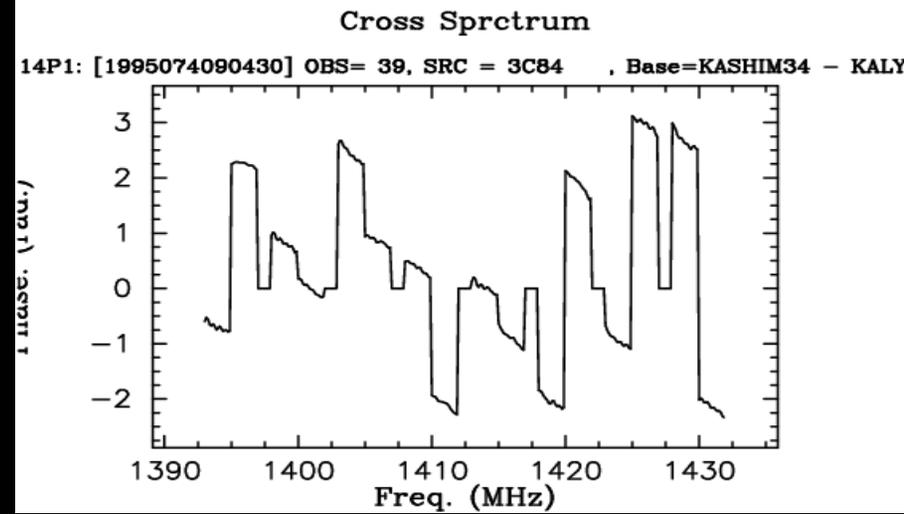
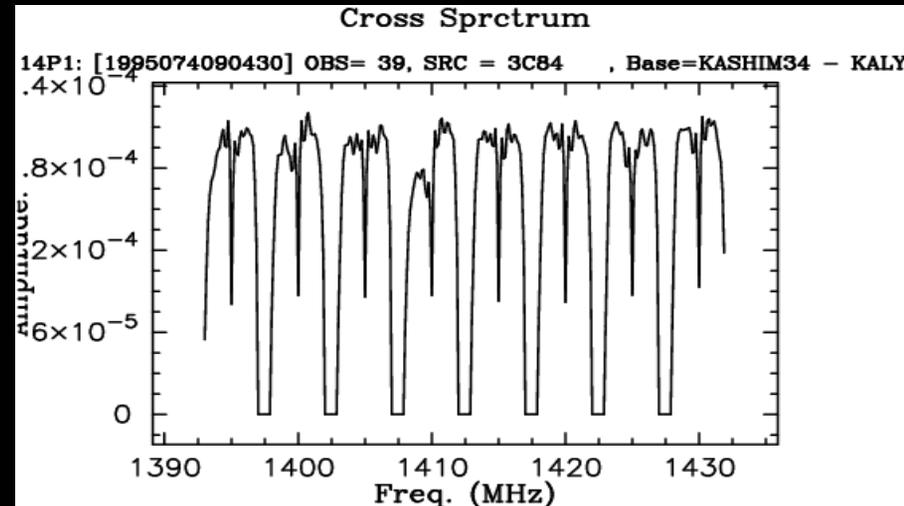
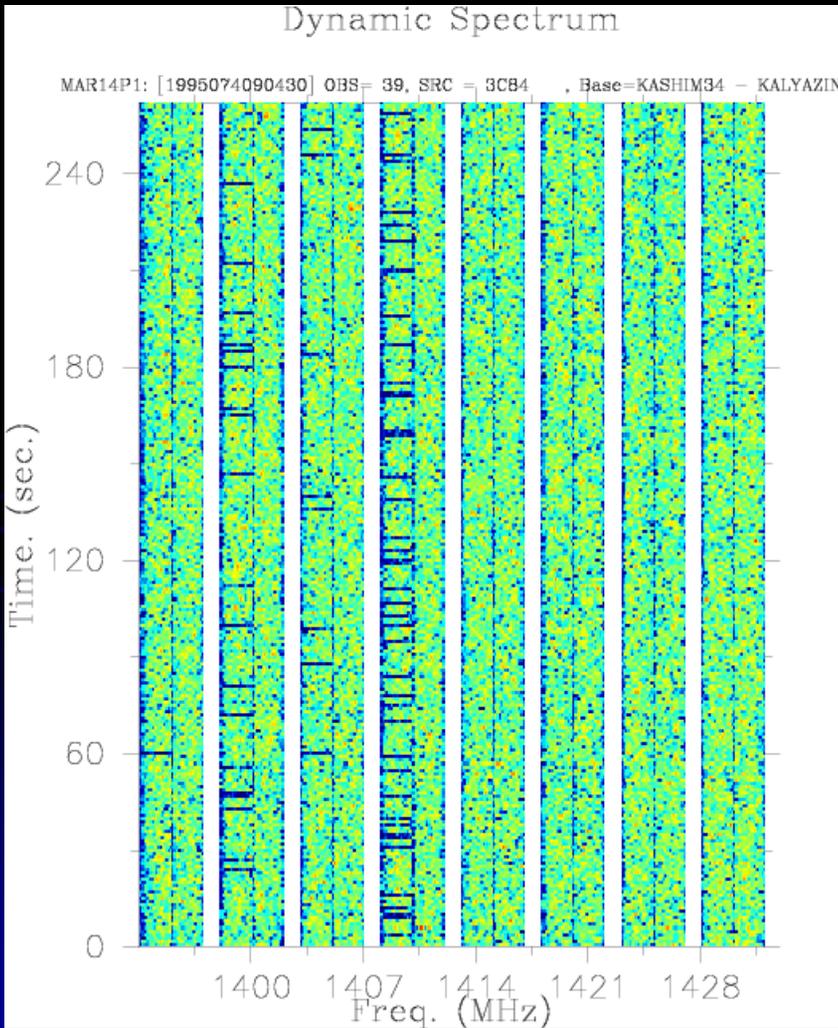
Cross Power Spectrum

$B_{sc} > 40\text{MHz}$



Cross Power Spectrum

3C84 @ 1.4GHz



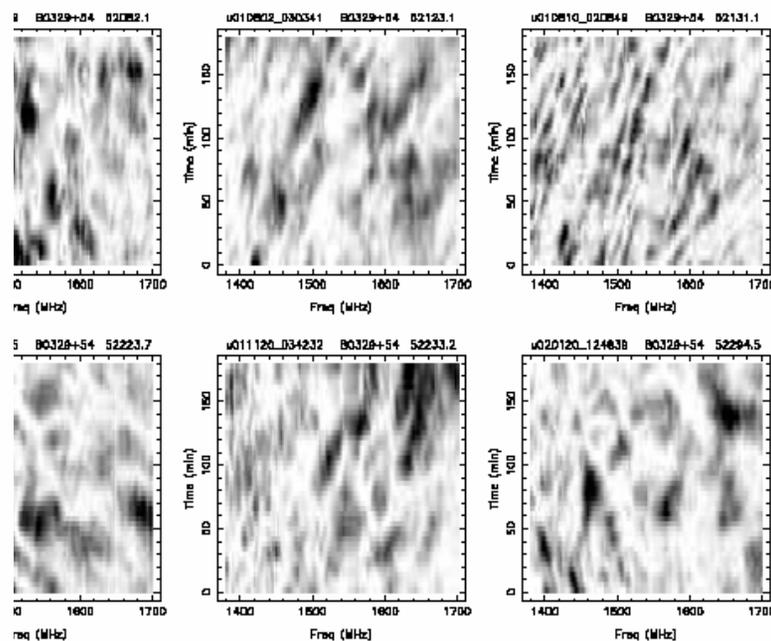
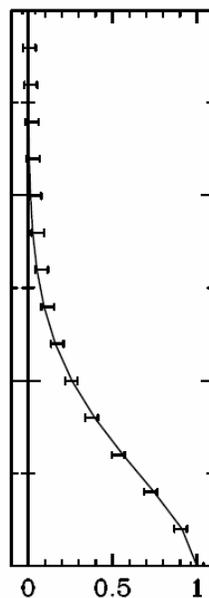
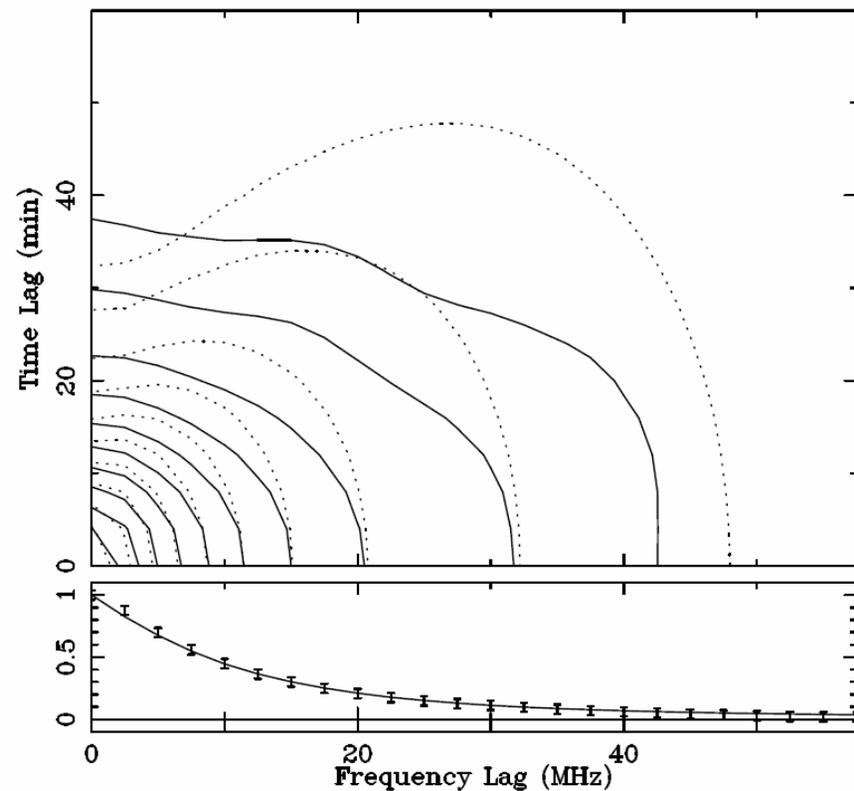
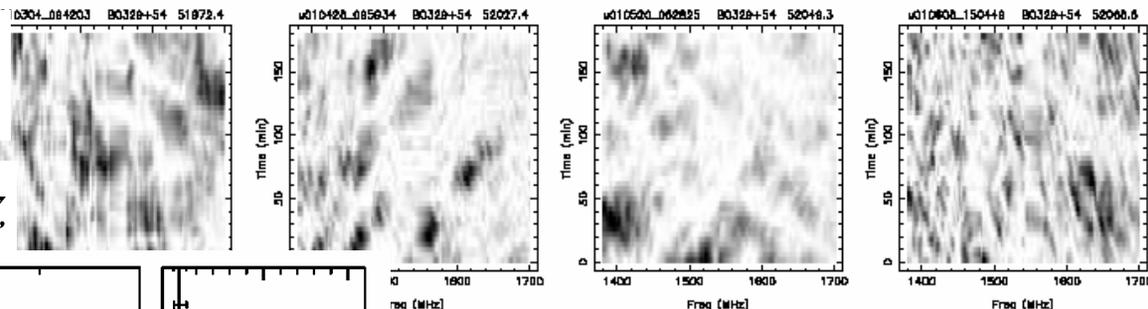
ダイナミックスペクトルの例

Scintleのサイズ $\Delta\nu_d, \Delta t_{iss}$

$$\Delta\nu_d \propto \nu^{4.4}$$

$$\Delta t_{iss} \propto \nu^{1.2}$$

$$\Delta t_{iss} = 17 \text{ min.} \quad \Delta\nu_d = 14 \text{ MHz}$$



PSR0329+54 by W.Na

Urumuqi 25m @ 1.4GHz BW320MHz

偏波観測

パルサーの信号は、高い割合で直線偏光しており、その観測から放射領域を推定する。

PSR B0906-49 by M.Kramer et al.(2008)

<観測> パークス64m 両偏波

周波数: 1.4G(256MHz)

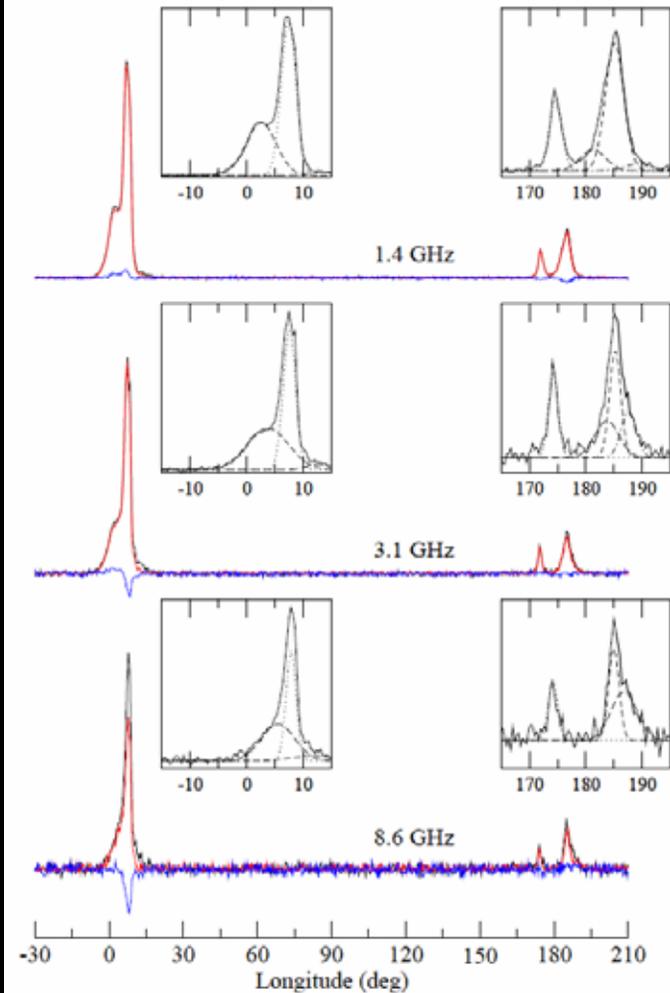
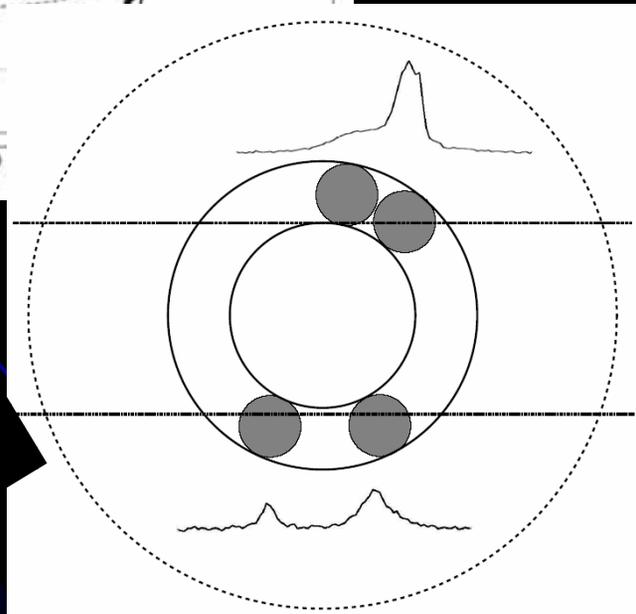
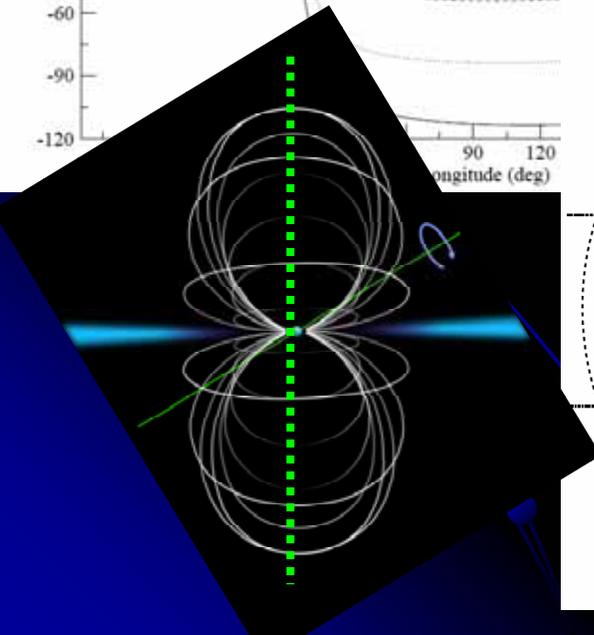
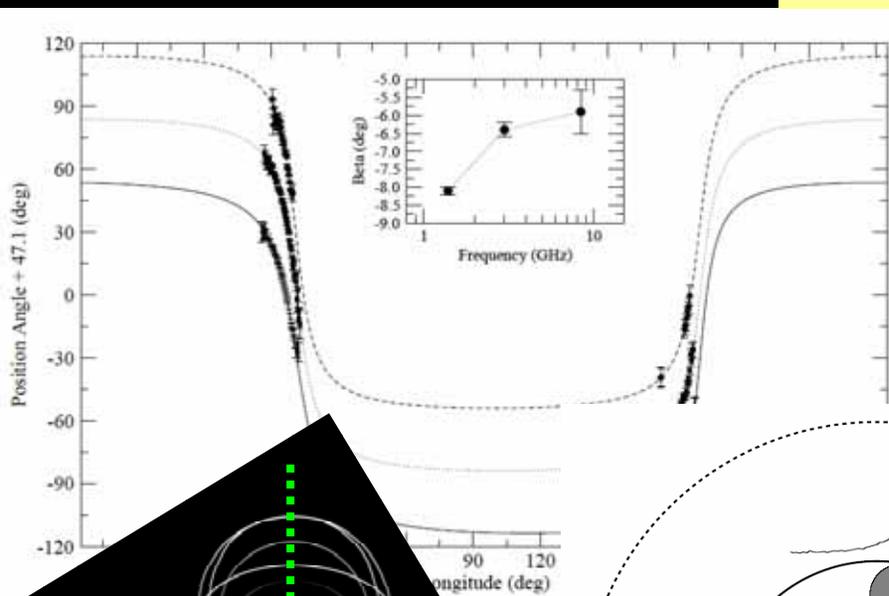
100% linear pol.

3.1GHz(1024MHz)

100%linear pol.

8.6GHz(512MHz)

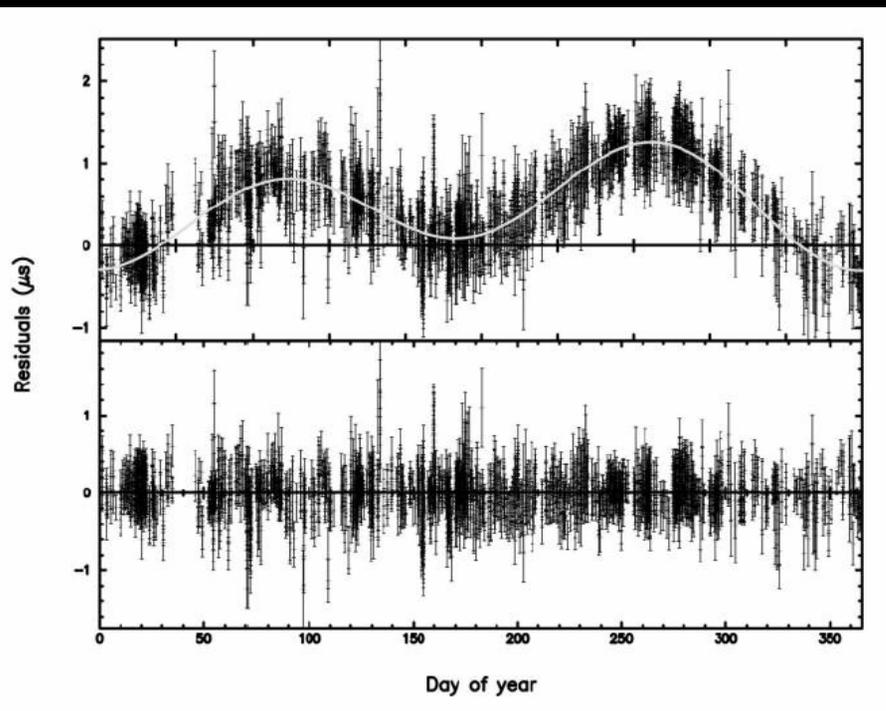
70%linear pol.



パルサータイミング

- 位置、固有運動、年周視差、DM, P, dP/dt
- パルス周期の安定したパルサーについては高精度のアstrometryが可能。

J0437-4715: $\mu = 6.6 \pm 0.5 \text{ mas}$

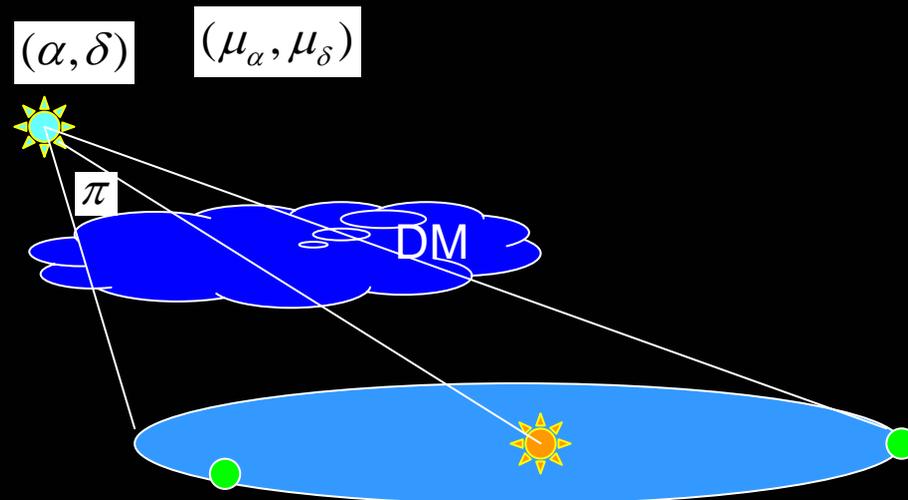


$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

$$\dot{E} = 4\pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3}$$

$$B_s = \sqrt{\frac{3Ic^3 P \dot{P}}{8\pi^2 R_N^6}} \approx 3.2 \times 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ (Gauss)}$$

$$B_{LC} = \left(\frac{R_N}{R_{LC}}\right)^3 B_s = 3 \times 10^8 \sqrt{\frac{\dot{P}}{P^5}} \text{ (Gauss)}$$

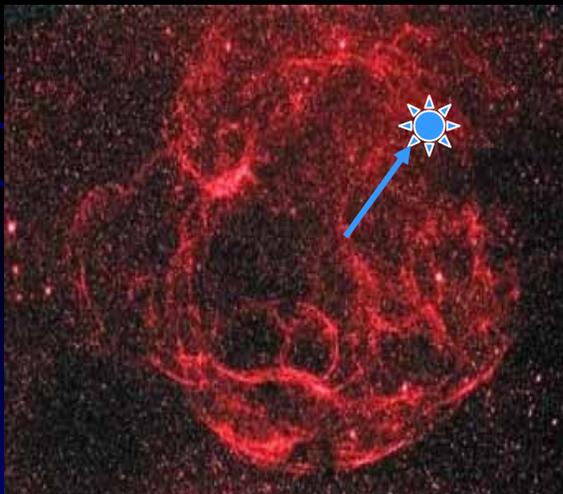


Signature of Parallax by Verbiest et al.(2008)

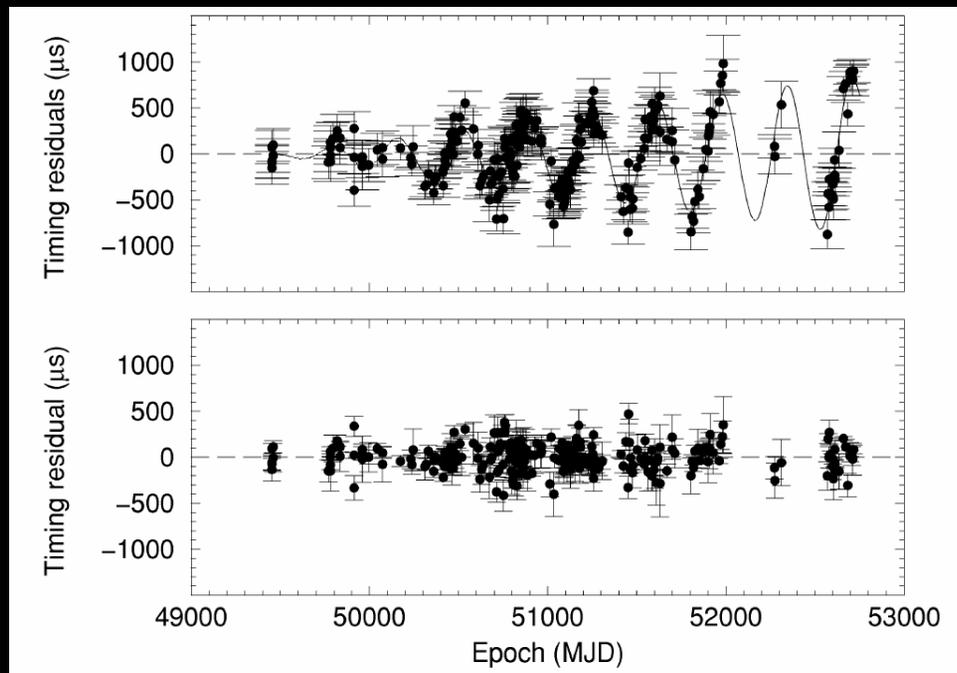
パルサータイミング

- 若いパルサーはタイミングノイズがあって、タイミング観測データから固有運動を推定するのは通常困難 => 干渉計観測
- しかし最近、**タイミングノイズのある若いパルサー**でも固有運動の推定ができる方法をJodrell Bankで開発した(Hobbs et al.2003)
- J0538+2817:タイミングから固有運動を推定(-41(3), 47(57)) mas/yr
- 超新星残骸S147との関係を同定。Kinematic age=30kyr <<Characteristic age=618kyr

S147(Sofue et al., 20kyr)



Proper motion of J0538+2817
by Kramer et al.(2008)



パルサータイミング(連星パルサー)

視差よりも高い精度で距離測定できる！！

- Verbiest et al.,(2008)はPSR J0437-4715の距離を $157.0 \pm 2.4\text{pc}$ (1.5%)で推定した
- 通常の視差の観測の誤差
 - Sato et al.,(2008) NGC281 $2.82 \pm 0.24\text{kpc}$ (8.5%) $=6.6 \pm 0.5\text{mas}$
 - Choi et al.,(2008) VY Canis Majoris $0.88 \pm 0.08\text{mas}$ (9%)
- Shklovskii効果(見かけの視線加速度運動)をつかうと。。

$$\dot{P}_b^{obs} = \dot{P}_b^{int} + \dot{P}_b^{Gal} + \dot{P}_b^{kin}$$

$$\dot{P}_b^{obs} = 3.73e-12$$

$$\dot{P}_b^{int} = \dot{P}_b^{GR} = -4.2e-16$$

$$\dot{P}_b^{Gal} = -2.3e-14$$

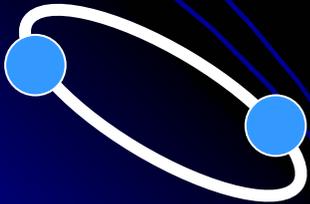
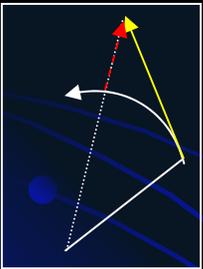
$$P_b = 5.74104... \text{day}$$

$$\mu = 140.852 \text{mas} / \text{yr}$$

$$\dot{P}_b^{obs} - \dot{P}_b^{Gal} \approx \dot{P}_b^{kin} = \frac{\mu^2 D}{c} P_b$$

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dP_b}{P_b} + \frac{d\dot{P}_b}{\dot{P}_b} = 7 \times 10^{-6} + 3 \times 10^{-7} + 1.5 \times 10^{-2}$$

Hipparcos, HST よりもよい



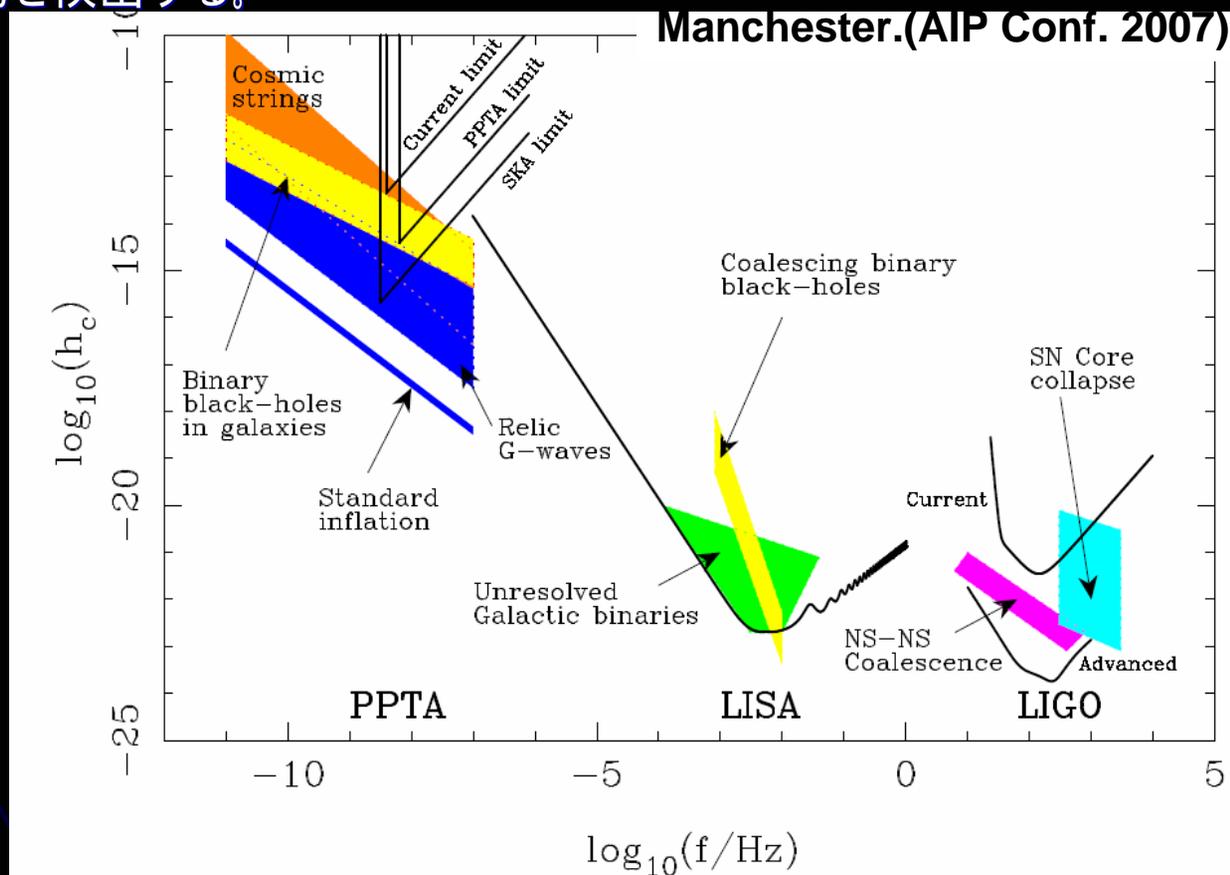
パルサータイミング:重力波検出

- パークスパルサータイミングアレイ (PPTA): 20個のミリ秒パルサーを2-3週間おきに観測し、その安定度を計測している。
- 太陽系外の精密な時計 = 複数のミリ秒パルサーから構成される時系 と地上の時系 (TT) を比較することで重力場変動を検出する。

複数の方向のパルサーの観測で重力波(4重極子放射)の到来方向も得られる。

= 10^8 sec(10年) 10光年程度の波長の重力波検出を目指す

パルサーのタイミング観測精度 $1e-7$ sec で10年 ($3.e8$ sec) の観測を行うと $3.e-15$ の安定度。

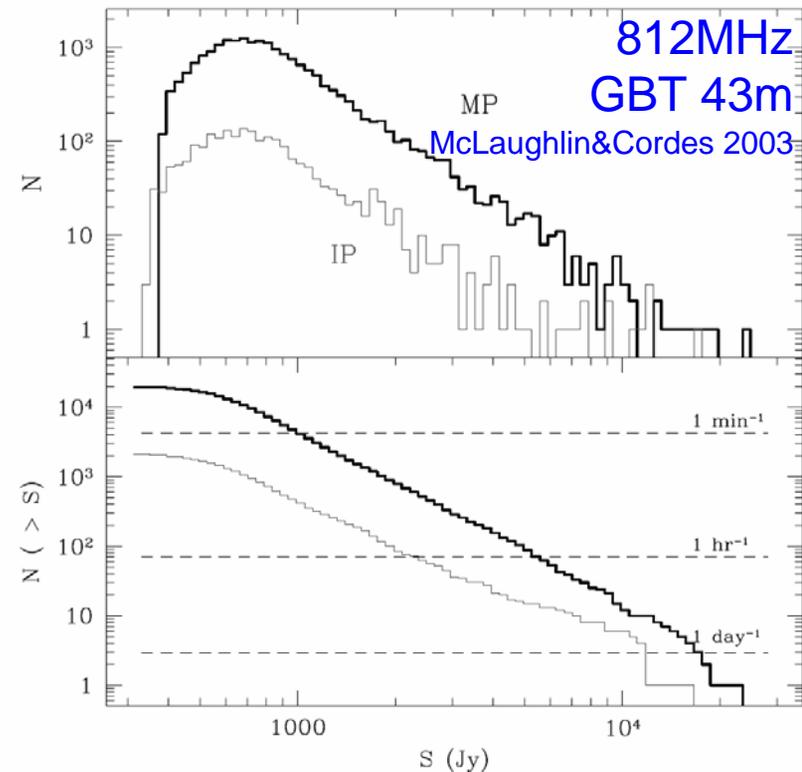
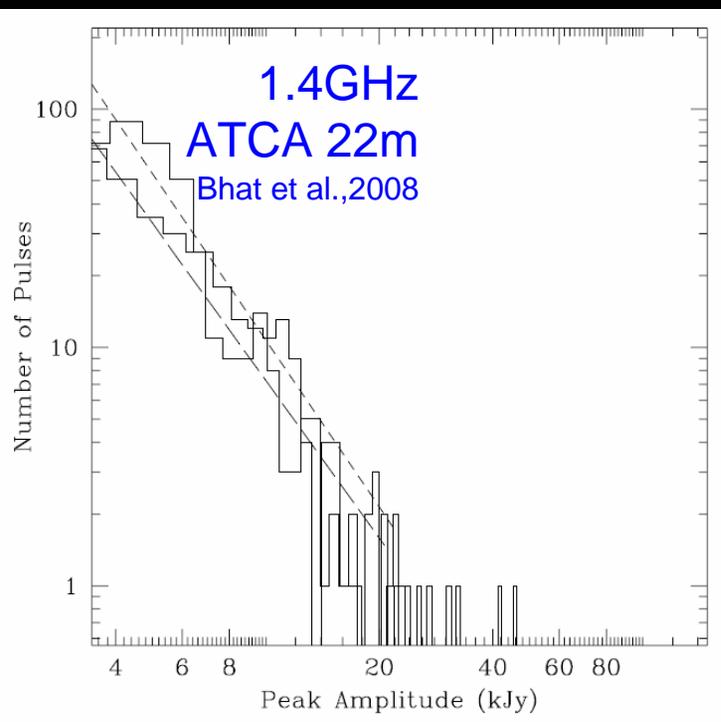


ジャイアントパルス (GP)

Crab(B0531+21), B1937+21, J1823-3021, B0540-69

- ピークのパルスフラックスが45 kJy (幅0.5us)にもなる強力なパルスが観測されている(23mJy). Crab Pulsar [Cordes et al.,2004;Bhat et al.,2008]
- 弱い(1.5Jy以下)成分と別の明確なメカニズムで、パルスの強度分布はエネルギーのべき乗に従う(通常ガウス分布or指数分布)
- X-線と電波での相関はない(Lundgren et al.,ApJ1995)
- 2ns幅のパルス(2000Jy)を発見,(Hankins et al.,Nature2003)
 - 放射領域60cm 等価輝度温度 10^{37} K

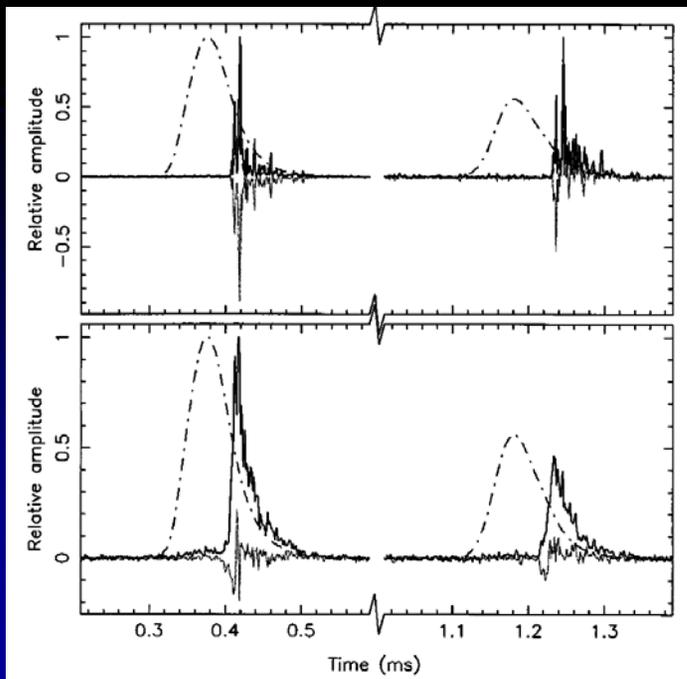
$$\frac{dN}{dS} \propto S^{-\alpha}; \alpha = 3.5$$



ジャイアントパルス (GP)

PSR B1937+21 ($P=1.56\text{ms}$, $F_{1.4}=16\text{mJy}$: 40Jy/pulse)

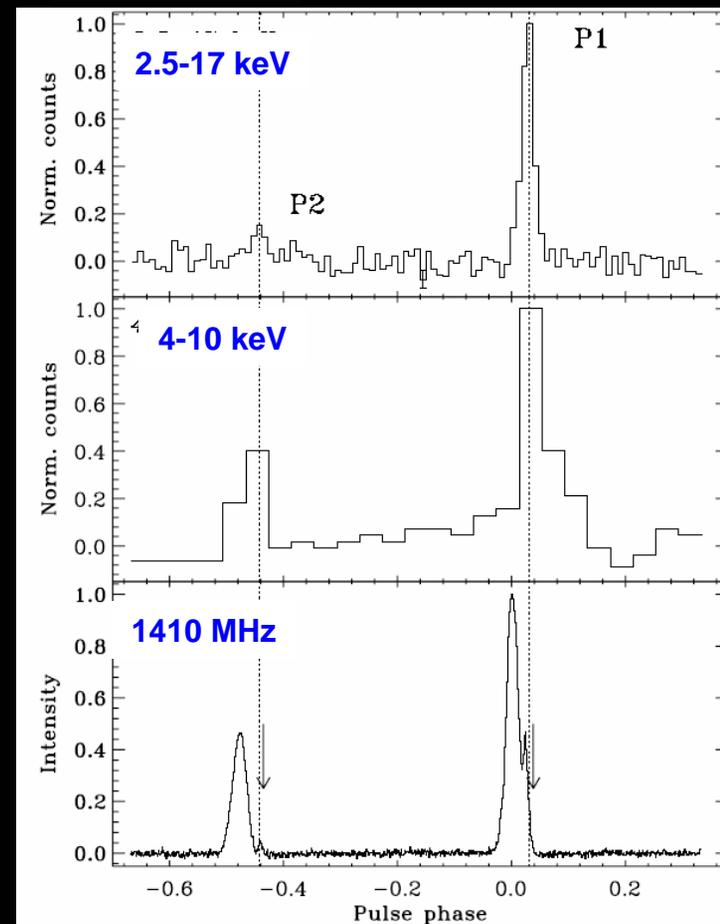
- 1996年(Gognard et al., ApJL)ミリ秒パルサーB1937+21でもGPが発見された。
- 平均的な強度の300倍(12000Jy/pulse)のパルスが観測されている。
- X-線(RXTE)と電波(1.4GHz)で同位相に近いパルスが確認されている。(Cusumano et al., A&A2003)
- GPがほぼ100%円偏光している



Bonn 100m
Cusumano et al., 1996

430MHz
Arecibo305m
Cognard et al., 1996

$$\alpha = 2.8$$



ジャイアントパルス (GP)

PSR B1937+21 ($P=1.56\text{ms}$, $F_{1.4}=16\text{mJy}$: 40Jy/pulse)

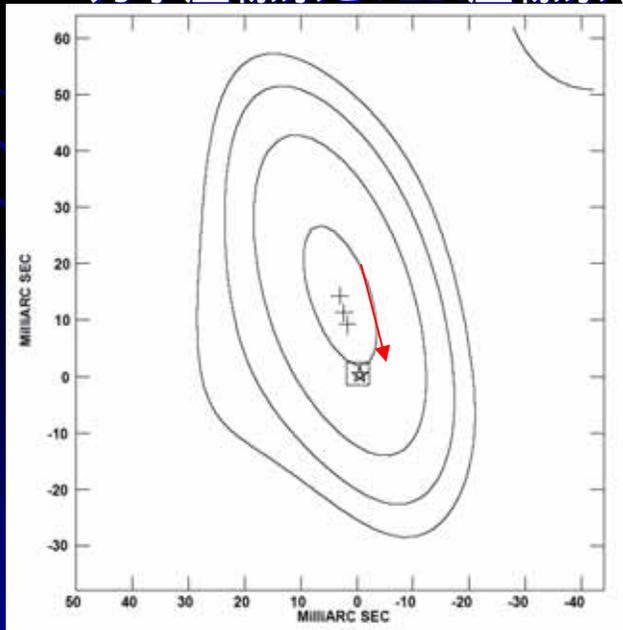
- 通常のパルスと異なるエネルギー頻度分布 (Power Law)
- ガンマ線、X線とGP(電波)で相関がない(Lundgren et al.,1995)、ある (Romani&Johnston2001,Cusumano et al.,2003).
- PSR1937+21のGPは90%以上の偏波率でLHCP
- GPの観測されているパルサーは、光円柱での磁場強度が最も強いものばかり

RADIO PULSARS WITH HIGHEST B_{lc}

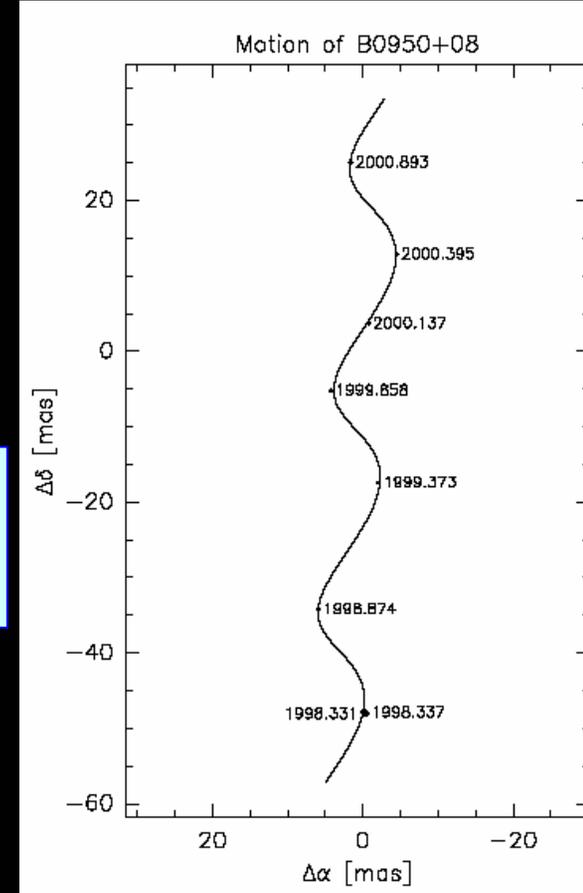
Name	P (ms)	\dot{P} ($10^{-15} \text{ s s}^{-1}$)	B_{lc} (10^5 G)
B1937+21	1.56	1.1×10^{-4}	9.8
B0531+21	33.4	4.2×10^2	9.3
B1821-24	3.05	1.6×10^{-3}	7.2
B1957+20	1.61	1.7×10^{-5}	3.6
B0540-69	50.4	4.8×10^2	3.5
J0218+4232	2.32	7.5×10^{-5}	3.1
J1823-3021A	5.44	3.4×10^{-3}	2.5
J0034+0534	1.88	6.7×10^{-6}	1.6
J2229+6114	51.6	7.8×10^1	1.3
J0205+6449	65.7	1.9×10^2	1.2

アストロメトリ

- パルサータイミング (安定度の高いパルサー)
- 干渉計 (VLBI)
 - 年周視差の計測 (Brisken, Chaterejee with VLBA)
 - 距離 = \times パルサーの速度 (μd)、電子密度 ($n=DM/d$)
 - 若いパルサー
 - 固有運動 SNRとの関係
 - ミリ秒パルサー (タイミングと干渉計の比較)
 - 力学座標系とVLBI座標系 (ICRF)との結合

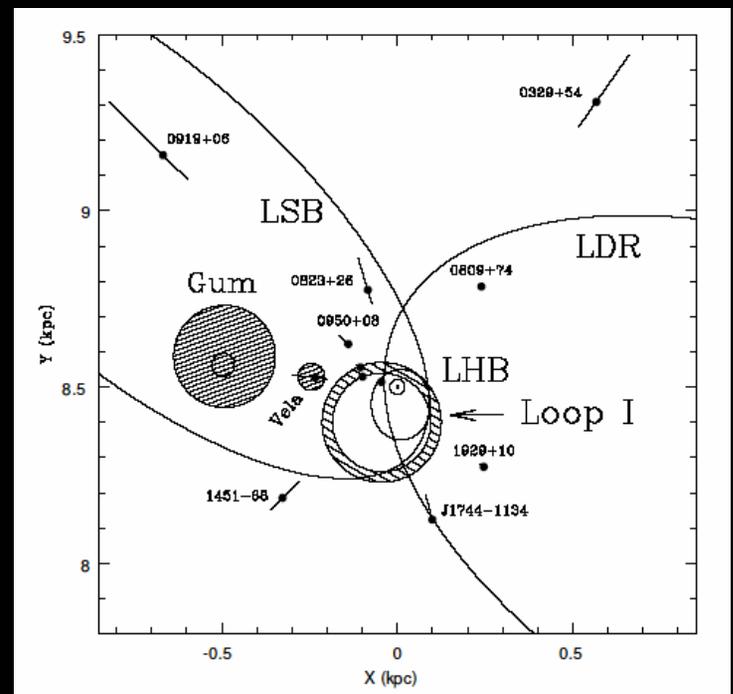
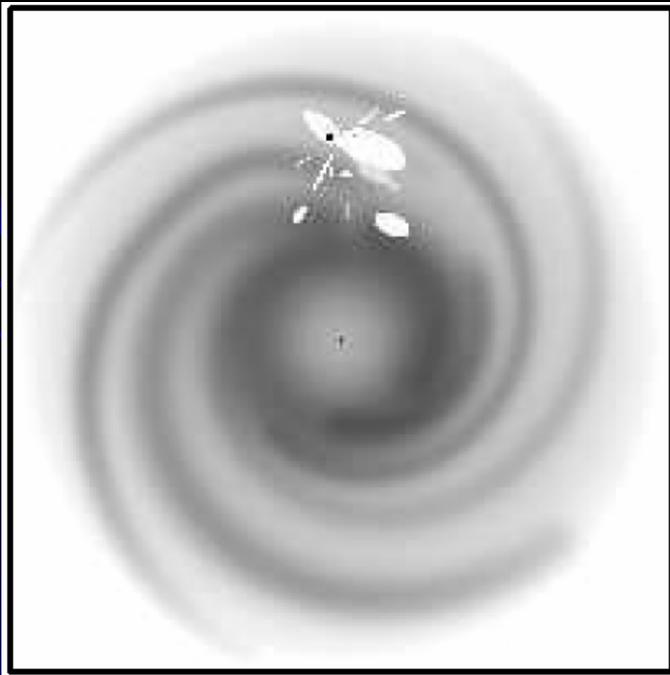


1410-1730MHz
VLBA
Brisken et al.(ApJ2000)



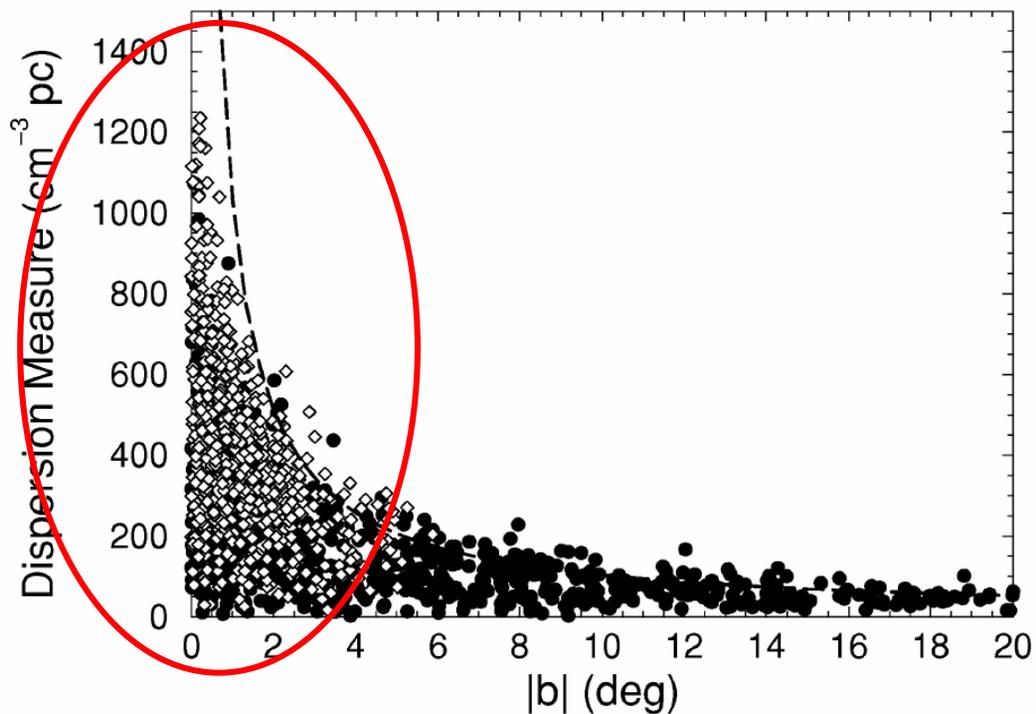
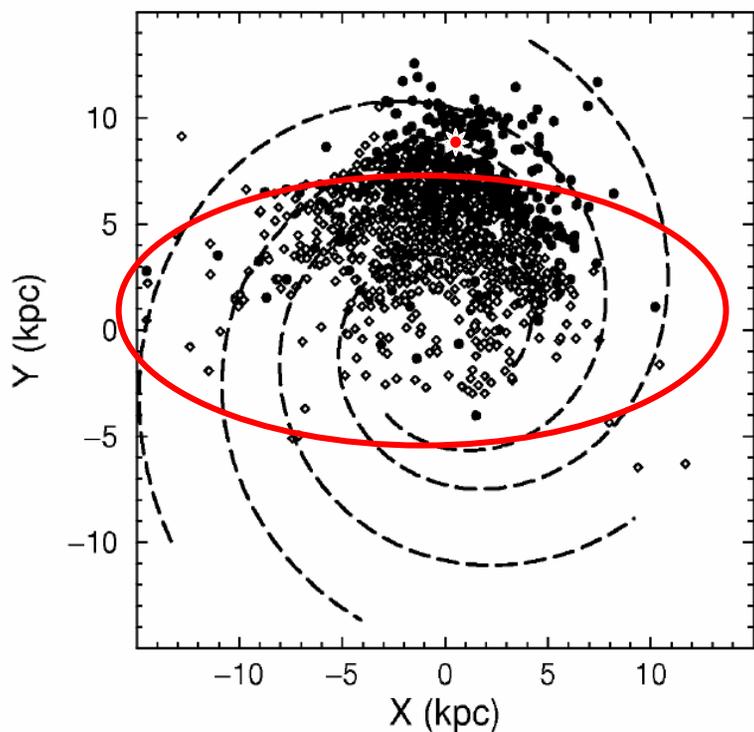
銀河系電子密度分布モデル

- Pulsarの距離、DMなどから銀河系の電子密度モデルが作られている。(J.Cordes,2004)
- この電子密度モデルを使って、DMしか求められていないパルサーの距離や、パルサーの統計的平均速度などが推定されている。



パルサーサーベイ

- パークスマルチビームパルサーサーベイ (PMPS): 13ビーム
 - Taylor Catalog(1993): 558のパルサー
 - PMPS: 742の新しいパルサーを発見
- 現在の1789のパルサーが登録されたカタログがATNFから提供されている。
<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>



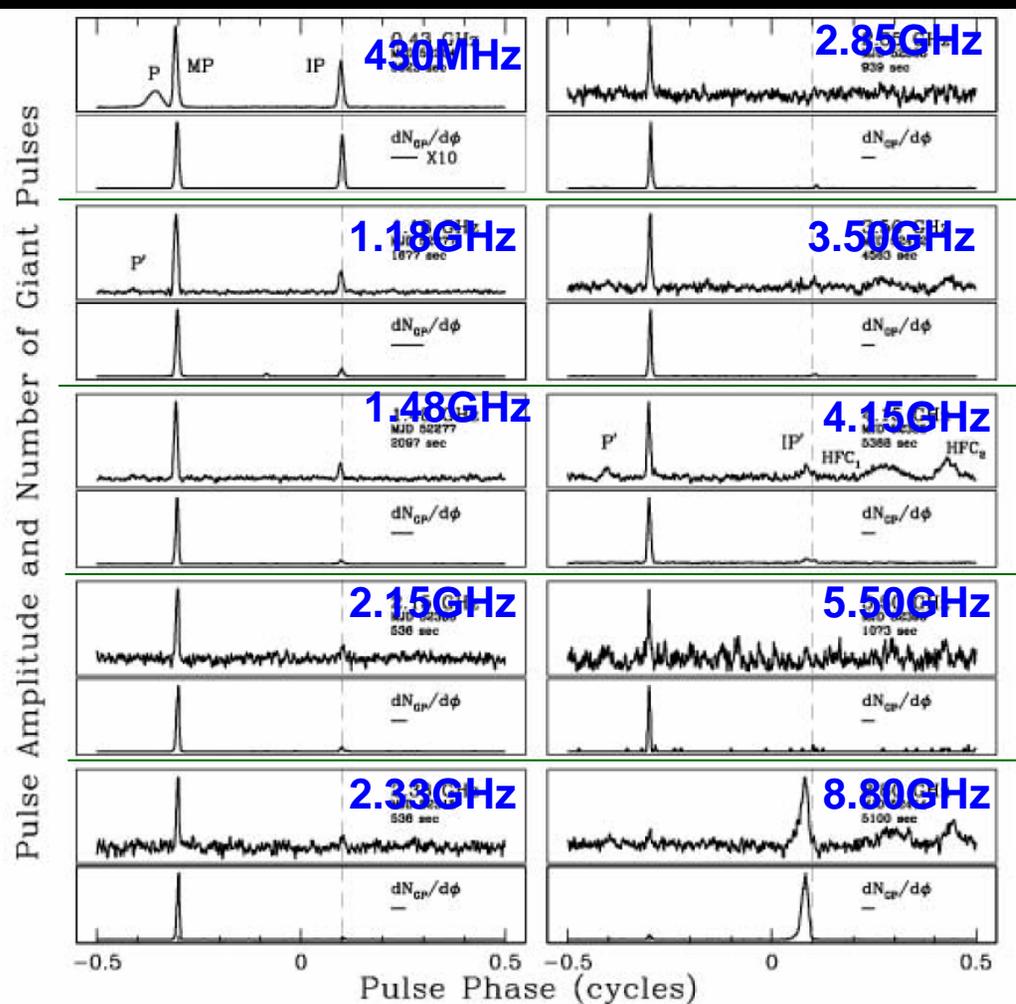
まとめ：SKAに期待されているところ

- **銀河系のパルサーの探索**：中性子星－BH連星系、1k Hz以上で高速回転しているパルサーなどのexoticな天体の発見 中性子星の内部状態の理解
- 宇宙論的または中性子星連星の衝突などの**重力波の検出**
- 多くのパルサーの固有運動、年周視差、DM, RMなどの観測を通して、**銀河系の電子分布・磁場構造の解明**

ジャイアントパルス (GP)

Crab pulsar

- メインパルス、インターパルスの主要なエネルギーはGPである



← Pulse Profile

← GP Histogram

←

Cordes et al., (ApJ, 2004)
Arecibo 305m
同時観測ではない。

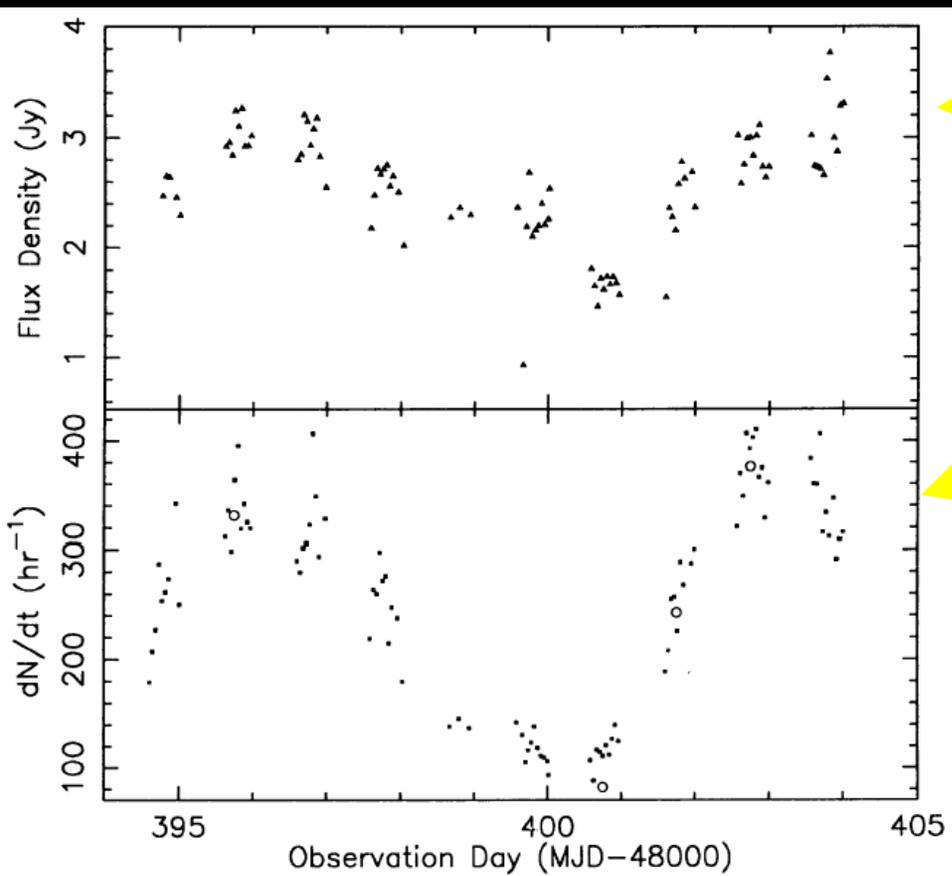
ジャイアントパルス (GP)

Crab pulsar

- GPはISM起源ではなく、中性子星本体から来ている

Lundgren et al., (ApJ, 1995)

GBT 43m



Refractive シンチレーション

GP (120 Jy以上) の出現頻度は
RISSでは説明できない

観測帯域幅 20MHz

$$\Delta\nu_d = 100\text{kHz} @ 800\text{MHz}$$

$$\Delta t_{RIS} = 2 - 5\text{days} @ 800\text{MHz}$$

WAVEFIT (Hobbs et al.2003)

~ Whitening of residual ~

- タイミング解析残差から、周期成分を除いていく。
- 除く周期成分の数は除くべき最小の構造から決める。
- 固有運動の成分に影響を与えず、固有運動推定が可能となる

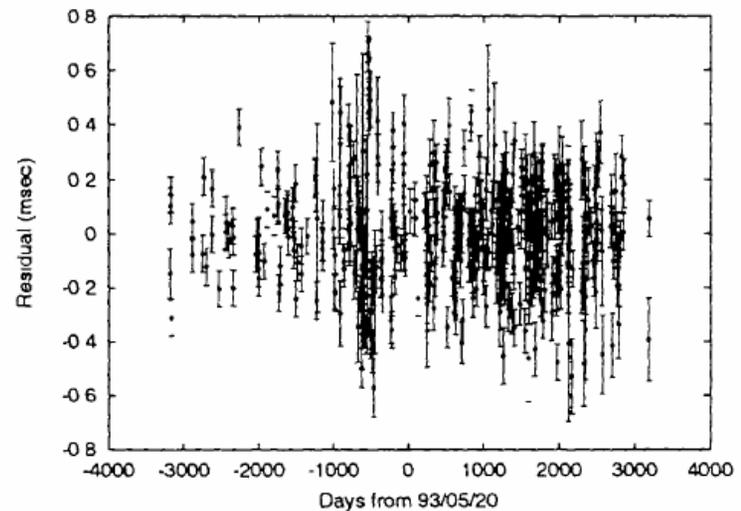
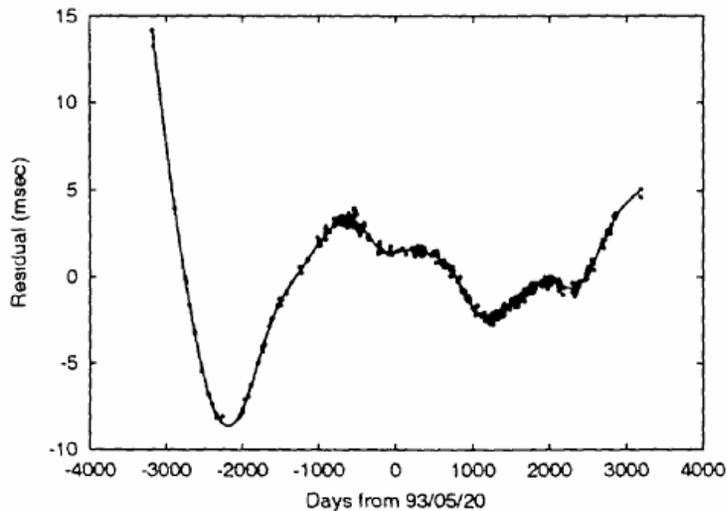


Figure 1. The timing residuals for PSR B0450-18, (a) pre- and (b) post- whitening.