

# 坪野研究室輪講：論文紹介 (安東正樹)

J.W.T.Hessels et. al.

## 'A Radio Pulsar Spinning at 716Hz'

Science 331 (2006) 1901

REPORTS

### A Radio Pulsar Spinning at 716 Hz

Jason W. T. Hessels,<sup>1\*</sup> Scott M. Ransom,<sup>2</sup> Ingrid H. Stairs,<sup>3</sup> Paulo C. C. Freire,<sup>4</sup>  
Victoria M. Kaspi,<sup>1</sup> Fernando Camilo<sup>5</sup>

We have discovered a 716-hertz eclipsing binary radio pulsar in the globular cluster Terzan 5 using the Green Bank Telescope. It is the fastest spinning neutron star found to date, breaking the 24-year record held by the 642-hertz pulsar B1937+21. The difficulty in detecting this pulsar, because of its very low flux density and high eclipse fraction (~40% of the orbit), suggests that even faster spinning neutron stars exist. If the pulsar has a mass less than twice the mass of the Sun, then its radius must be constrained by the spin rate to be <16 kilometers. The short period of this pulsar also constrains models that suggest that gravitational radiation, through an *r*-mode (Rossby wave) instability, limits the maximum spin frequency of neutron stars.

The majority of neutron stars are observed to rotate slower than a few times a second; however, those in binary systems can reach spin rates of hundreds of times a

second through the transfer of angular momentum from their companion star (1, 2). Some of these neutron stars, termed millisecond pulsars, are persistent radio sources whose emission is

modulated at the star's spin frequency. Determining the maximum achievable rotation rate of a neutron star is important for a variety of astrophysical problems, ranging from understanding the behavior of matter at supra-nuclear densities to estimating the importance of neutron stars as gravitational wave sources for current and upcoming gravitational wave detectors. For more than 24 years, the 642-Hz pulsar B1937+21, which is the first millisecond pulsar ever found, has been the fastest spinning neutron star known (3). It has been argued that faster ones are exceedingly rare, if they exist at all (4).

Per unit mass, globular clusters (GCs) have many more millisecond pulsars than does the Galactic disk. This is due to the extremely high stellar densities in their cores ( $10^4$  to  $10^6$  pc<sup>-3</sup>), which promote the creation of binary systems (5) where a neutron star is spun-up (or "recycled")

# Low-mass X-ray binary

## ● Low-mass X-ray binary

### 小質量連星型X線星

電波パルサーの元と考えられている

伴星から中性子星への物質の降着

→ 磁極付近に落ち込む

磁場が弱いため一般にパルス成分はない

X線バースト源

ガスの重力エネルギーが解放されX線を放射

角運動量を中性子星に与える → 回転を加速

→ **パルサーのリサイクル**

### スピン速度の上限

LMXBの典型的な寿命  $\gg$  1kHzに達する時間

→ スピナップを制限する要因は？

**rモード不安定性による重力波放出** (重力波放出による 回転星の不安定性)

r-mode不安定性による摂動 → 角運動量を重力波により放出

回転が遅くなるとr-mode安定化

重力波と粘性がr-modeをdump → 平衡状態へ (ここまで1年くらい)

$$hc = 5.7 \times 10^{-23} (f/1\text{kHz})^{1/2} @ 20\text{Mpc}$$

これまで... 不安定性が起きる周波数は  $< 700\text{Hz}$ と予想されていた

**X線バーストによる観測**  $< 730\text{Hz}$  (90% C.L.)

→ **今回の発見で、高速回転星のより良いモデルが必要となった**



# X線バーストによるスピン周波数観測 (1)

## ● X線バーストによるスピン周波数観測

D.Chakrabarty, et al., Nature 424 (2003) 42  
'Nuclear-powered millisecond pulsars  
and the maximum spin frequency  
of neutron stars'

X線源 SAX J1808.4-3658

これまでに4回のX線バーストが観測されている

(Sept. 1996, Apr. 1998, Jan. 2000, Oct. 2002)

バーストは数週間続く

LMXB (Low-mass X-ray binary)と知られている

401Hzでスピン回転 (自転), 公転周期 2時間

弱い磁場 ( $<10^{10}$ G)

2002年のバーストを観測

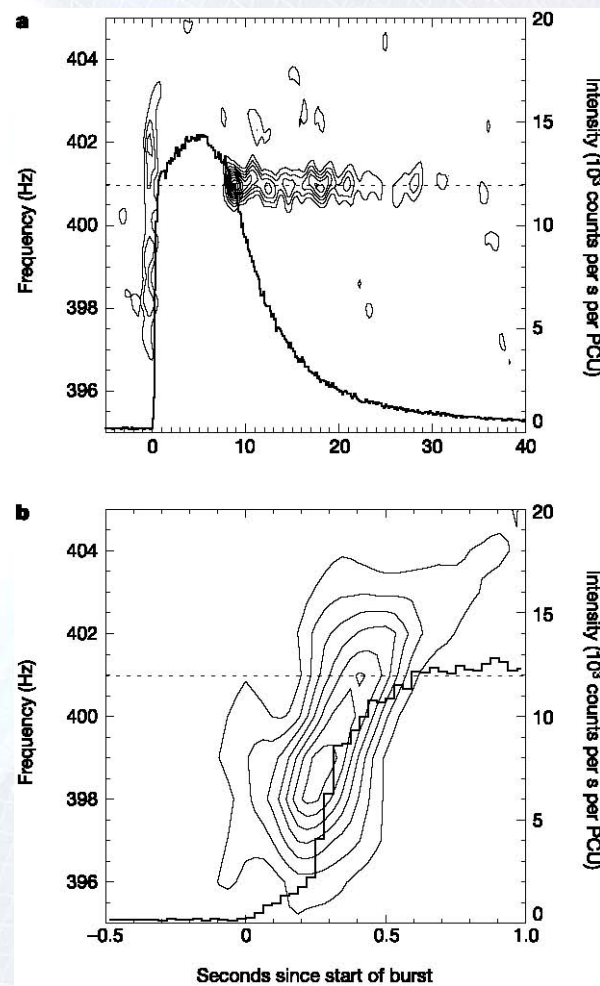
Oct. 15- Nov. 26 (2002) の約700,000秒

RXTE (Rossi X-Ray Timing Explorer)で観測

Oct. 15,17,18,19 の4回大きなバースト

→ これまでで最も明るいイベント

観測期間中 3-5%の振幅変動 (400.97521Hz)を検出



# X線バーストによるスピン周波数観測 (2)

## ● X線バーストによるスピン周波数観測 (続き)

最初, 急速に周波数が上がる

... 燃えている表層が、星の自転に収束していく様子

→ 最も明るくなると、振動成分が無くなる

... 光球 (photosphere) が輻射圧で飛ばされるため

→ 振動成分が、再び現れる

パルサーのスピン周波数とほぼ同じ周波数

(少しovershoot – 磁場の効果)

全フラックスに対する振幅：定常状態

(accretion-powered pulsations)と同等

バースト前後の振動成分の位相を比較

→ バースト後の位相はほぼ揃っている (6%の誤差)

バースト前の位相より、平均11%進んでいる

(わずかな周波数の違いに起因)

X線バーストのパルス周波数は、

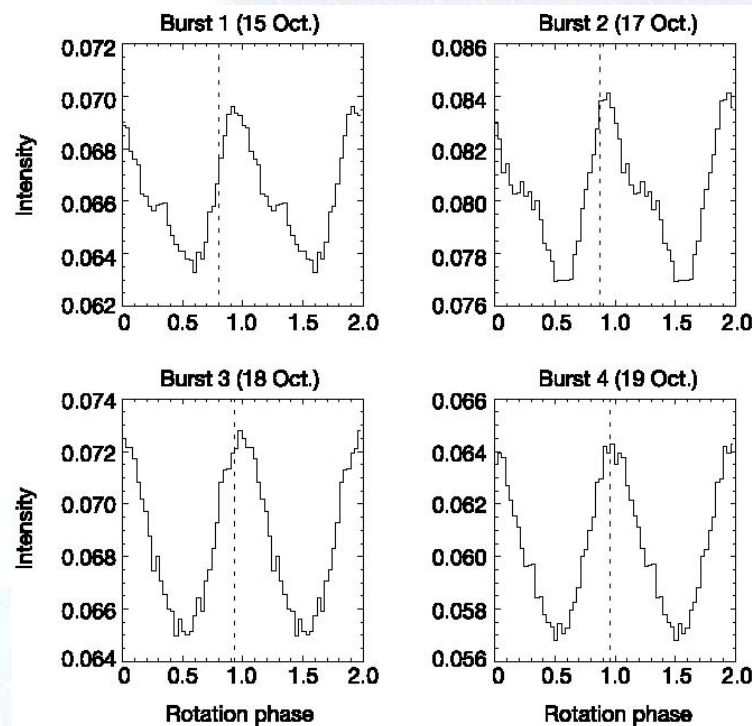
中性子星の自転周波数を表している証拠を得た

電波観測では、周波数依存性がある

X線バーストでは、高い周波数まで同じ効率で検出できる

→ 11個のX線バースト源, ベイズ統計 → 最大周波数は 760Hz (90% C.L.)

その後、2個のサンプルを加え、730Hz (90% C.L.) とした (2005年)



# イントロダクション

## ● 連星パルサー PSR J1748-2446ad の発見

### ミリ秒パルサー

多くの中性子星は数Hzで自転している

その一方、連星では、伴星からの角速度の輸送により、  
数百Hzの自転周波数が実現される → ミリ秒パルサー

➡ では、実現可能な最大自転周波数は？  
... 高密度物質の理解から  
重力波振幅の見積りまで幅広い問題

これまでの最高周波数

連星パルサー PSR B1937+21 (PSR J1939+2134)

自転周波数 642Hz

これより早いものは24年間見つかっていなかった

今回、より早い自転周波数を持ったパルサーを発見

連星パルサー PSR J1748-2446ad

自転周波数 716Hz

球状星団 Terzan 5 にある

口径100mの電波望遠鏡 Green Bank Telescope による観測

Nov. 10, 2004に発見, Jan. 8, 2005 に確認観測

# Green Bank Telescope

## ● Green Bank Telescopeでの観測 National Radio Astronomy Observatory

(NARO, West Virginia, USA,  
79° 53' 23.42"W, 38° 25' 59.26" N)

口径 110x100 m

全方位観測可能な電波望遠鏡

受信面：非球面 → 入射電波を邪魔しない

2209個のアクチュエータで形状を保つ

Aug. 2000に first light

## 球状星団 (Globular Cluster) Terzan5の観測

星密度が高い ( $10^4$ - $10^6$  pc<sup>-3</sup>)

→ 連星系がしやすい

ミリ秒パルサーが多く発見されている

(GCで発見された1/4のミリ秒パルサー)

GBTで30個発見

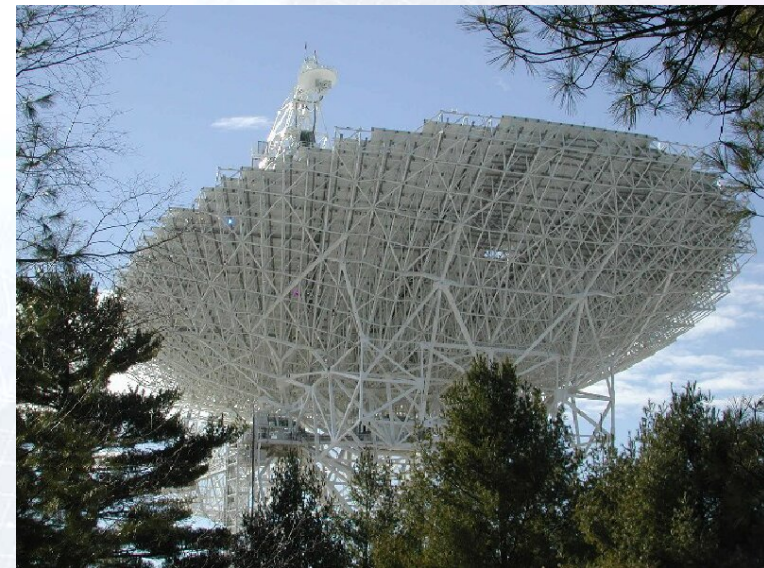
## PSRJ1748-2446adの観測

Nov. 10, 2004に発見, Jan. 8, 2005 に確認観測

中心周波数 1950MHz, 帯域 600MHz

768スペクトルチャンネル, 81.92  $\mu$ s sample

1度の観測：6-7時間



# PSRJ1748-2446ad

## ● PSRJ1748-2446ad の観測結果

連星系を構成している

26時間周期の円軌道

伴星 0.14  $M_{\text{solar}}$

軌道の40%で食を受ける (2GHz帯で)

食の領域 5-6  $R_{\text{solar}}$

星間の距離 4-5  $R_{\text{solar}}$

→ 伴星は、主系列星, まだ質量を供給している

食の期間は変動する, 星をまったく観測できないこともある

## パルス観測

パルス周波数 716Hz

358Hzの倍波ではない

358Hz周期でデータを折り返す

→ 位相が180度ずれた

同じ振幅の2つのピーク

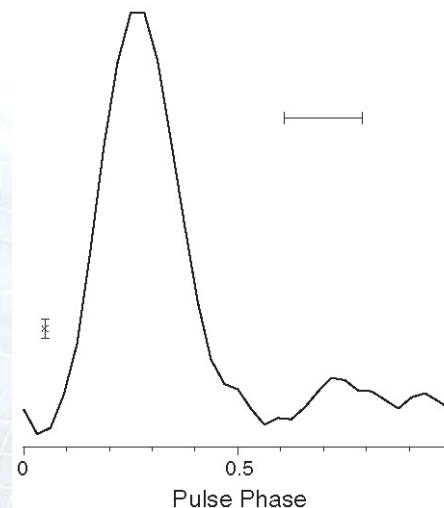
## 図: Pulse Profile

54時間分のデータ

32 phase bins

時間分解能  $\sim 300 \mu\text{s}$

小さなinterpulseがある



Parameter	Value
<i>Rotational parameters</i>	
Pulse period $P$ (s)	0.00139595482(6)
Period derivative $ \dot{P} $ (s/s)	$\leq 6 \times 10^{-19}$
Pulse frequency $\nu$ (Hz)	716.35556(3)
Frequency derivative $ \dot{\nu} $ (Hz/s)	$\leq 3 \times 10^{-13}$
Epoch (MJD)	53500
<i>Orbital parameters</i>	
Orbital period $P_{\text{orb}}$ (days)	1.09443034(6)
Projected semi-major axis $x$ (light-seconds)	1.10280(6)
Time of ascending node $T_{\text{ASC}}$ (MJD)	53318.995689(12)
Eccentricity $e$	$< 0.0001$
<i>Derived quantities</i>	
Companion minimum mass $M_{2,\text{min}}$ ( $M_{\odot}$ )	0.14
Dispersion measure DM ( $\text{pc cm}^{-3}$ )	235.6(1)
Flux density at 1950 MHz $S_{1950}$ (mJy)	0.08(2)
Characteristic age $\tau_c$ (years)	$\geq 2.5 \times 10^7$
Surface magnetic field $B_{\text{surf}}$ (G)	$\leq 1.1 \times 10^9$
Spin-down luminosity $\dot{E}$ (erg/s)	$\leq 1.3 \times 10^{37}$

# 星の大きさ-質量の関係

## ● 高密度星の状態方程式

### 状態方程式に対する制限

J. M. Lattimer, M. Prakash, Science 304 (2004) 536

$$v_{\max} = 1045 (M/M_{\text{solar}})^{1/2} (10\text{km}/R)^{3/2} \text{ [Hz]}$$

PSR J1748-2446adの場合

2M\_solarの質量を仮定

→ 半径16km

1.4M\_solarの質量を仮定

→ 半径14.4km

特定のモデルをrule out してはいない

星の質量が分かっている

円軌道の為、

相対論的效果が見えにくい

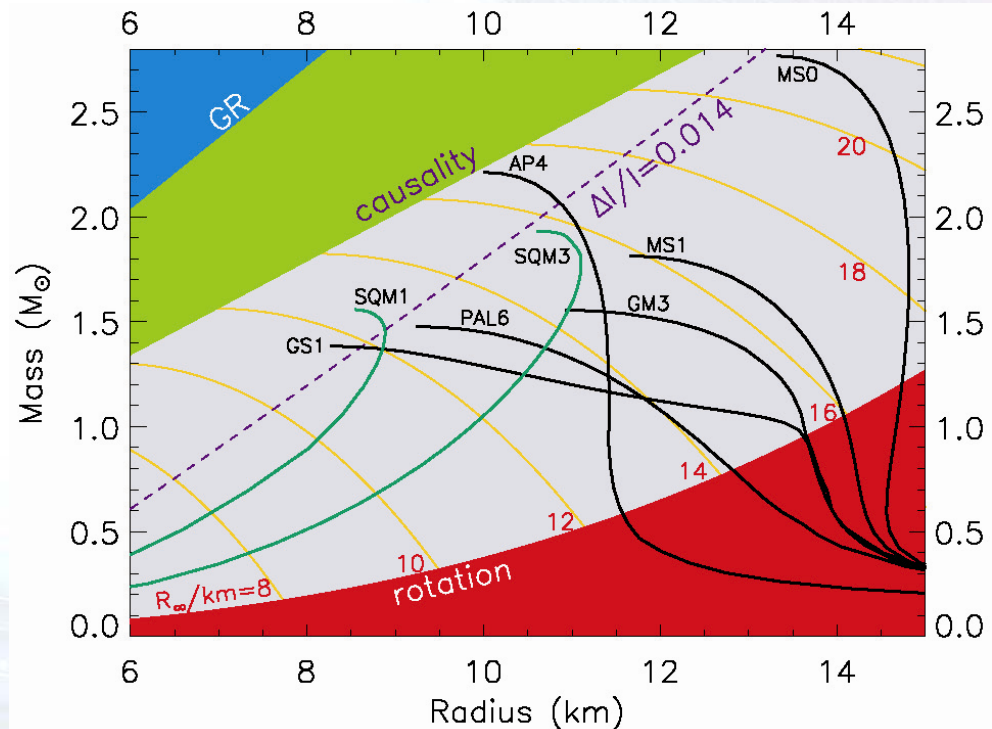


Fig. 2. Mass-radius diagram for neutron stars. Black (green) curves are for normal matter (SQM) equations of state [for definitions of the labels, see (27)]. Regions excluded by general relativity (GR), causality, and rotation constraints are indicated. Contours of radiation radii  $R_{\infty}$  are given by the orange curves. The dashed line labeled  $\Delta/I = 0.014$  is a radius limit estimated from Vela pulsar glitches (27).



# Selection Effects

## ● スピン周波数-観測し易さの関係

### 電波パルサーの観測

... 早い周波数のパルサーに対して感度が低下しやすい (selection effect)

### 今回の観測

PSR J1748-2446O (596Hz) の倍波(1192Hz), 4倍波成分も観測できている

→ 早い信号に対しても十分高い感度がある

連星系発見の機会は、伴星からの物質に影響されている可能性

知られているミリ秒パルサーの最も高速な5つのうち、

4つが食の影響を受けている

### 回転エネルギーの損失

... スピン周期の3乗に比例

→ 高速スピンしているパルサー

の大部分は、伴星から流れ込む星間物質で隠されている可能性

### 低い電波周波数の観測

... 幾つかのパルサーの食が長くなる

(今回の観測 : 2GHz帯, 多くの観測 1.4GHz帯)

Pulsar	Spin frequency (Hz)	$P_b$ (days)	$M_{2,\min}$ ( $M_\odot$ )	Eclipse fraction	Location
J1748-2446ad	716.358	1.0944	0.14	0.4	Terzan 5
B1937+21	641.931	isolated			Galaxy
B1957+20	622.123	0.3819	0.021	0.1	Galaxy
J1748-2446O	596.435	0.2595	0.035	0.05	Terzan 5
J1748-2446P	578.496	0.3626	0.37	0.4	Terzan 5
J1843-1113	541.812	isolated			Galaxy
J0034-0534	532.714	1.5892	0.14	0	Galaxy
J1748-2446Y	488.243	1.17	0.14	0	Terzan 5
J1748-2446V	482.507	0.5036	0.12	0	Terzan 5
B0021-72J	476.048	0.1206	0.020	0.1*	47 Tucanae

\*B0021-72J is eclipsed only at radio frequencies <1 GHz.

➡ より高い周波数帯での観測が望ましい

# 重力波振幅

## ● 重力波振幅の上限値

重力波振幅の上限値をスピンダウンレートから見積もる  
(スピンアップしている系では妥当ではないが....)

PSR J1748-2446ad

スピン周期  $P = 0.001395$  [s]

周期変化率  $Pd \leq 6 \times 10^{-19}$  [s/s]

距離  $r = 8.7$  [kpc]

(スピン周期変化率は上限値でしかない)

重力波振幅の上限値

$$h_{\max} = \sqrt{\frac{GI \dot{P}}{r^2 c^3 P}}$$

➡  $h_{\max} = 1.3 \times 10^{-27}$   
( $f = 1432$  Hz)

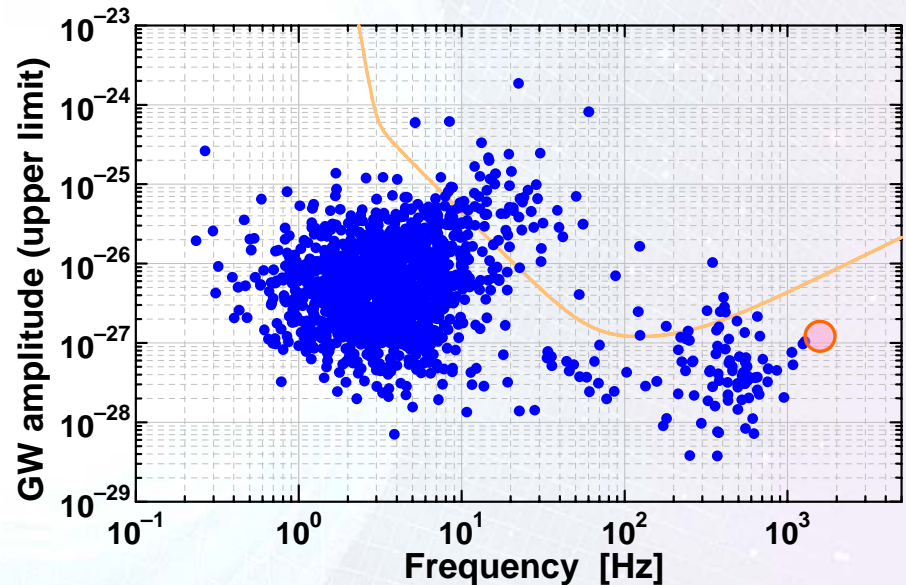
LIGO S1の解析結果 (PSR J1939+2134)

スピン周期  $P = 0.001557$  [s] (641Hz)

周期変化率  $Pd \leq 1.05 \times 10^{-19}$  [s/s]

距離  $r = 5.0$  [kpc]

➡  $h_{\max\_theory} = 8.9 \times 10^{-28}$   
 $h_{\max\_obs} < 1.4 \times 10^{-22}$   
(95% C.L.)



B. Abbott et al., Phys. Rev. D 69 (2004) 082004

おわり

終