

日本におけるパルサー電波観測の歴史

○ 臼田64mパラボラ

平林・祖父江グループによる先駆的研究

河島グループによる先駆的研究。

(1.6GHz帯, 2.3GHz帯)を使用しMSPを対象。

PSR B1937+21 (1990.12ー), PSR B1855+09(1994.1ー)。



○ Nict鹿島グループによる本格的なパルサーVLBI及びMSP研究。

鹿島34mパラボラ(1.4GHz帯, 2.3GHz帯)を使用。鹿島＋臼田によるVLBI(1992ー)。高精度時刻標準としてのMSP研究(1992ー)。



○ 東北大森岡・三澤グループによる較正観測。

飯館31m×2変形パラボラ(325MHz帯、785MHz帯)を使用。

木星放射線帯からのシンクロトン放射観測が主目的(1997ー)。

較正電波源の1つとしてPSR B0329+54(P=0.714s)を観測(2001.10.4)。

Crabパルサー初観測(2009.2.20)→北氏卒論

○ 鹿島・臼田によるCrabパルサー観測。

Crabパルサー観測(2009.8.10) 鹿島34m 1.4GHz

鹿島34m、臼田64m (1.4GHz帯, 2.3GHz帯、8GHz帯)。

Our observations

○ 本格的な複数周波数バンド同時観測(鹿島・臼田＋飯館 2014.6ー)。

2014.9キャンペーン観測

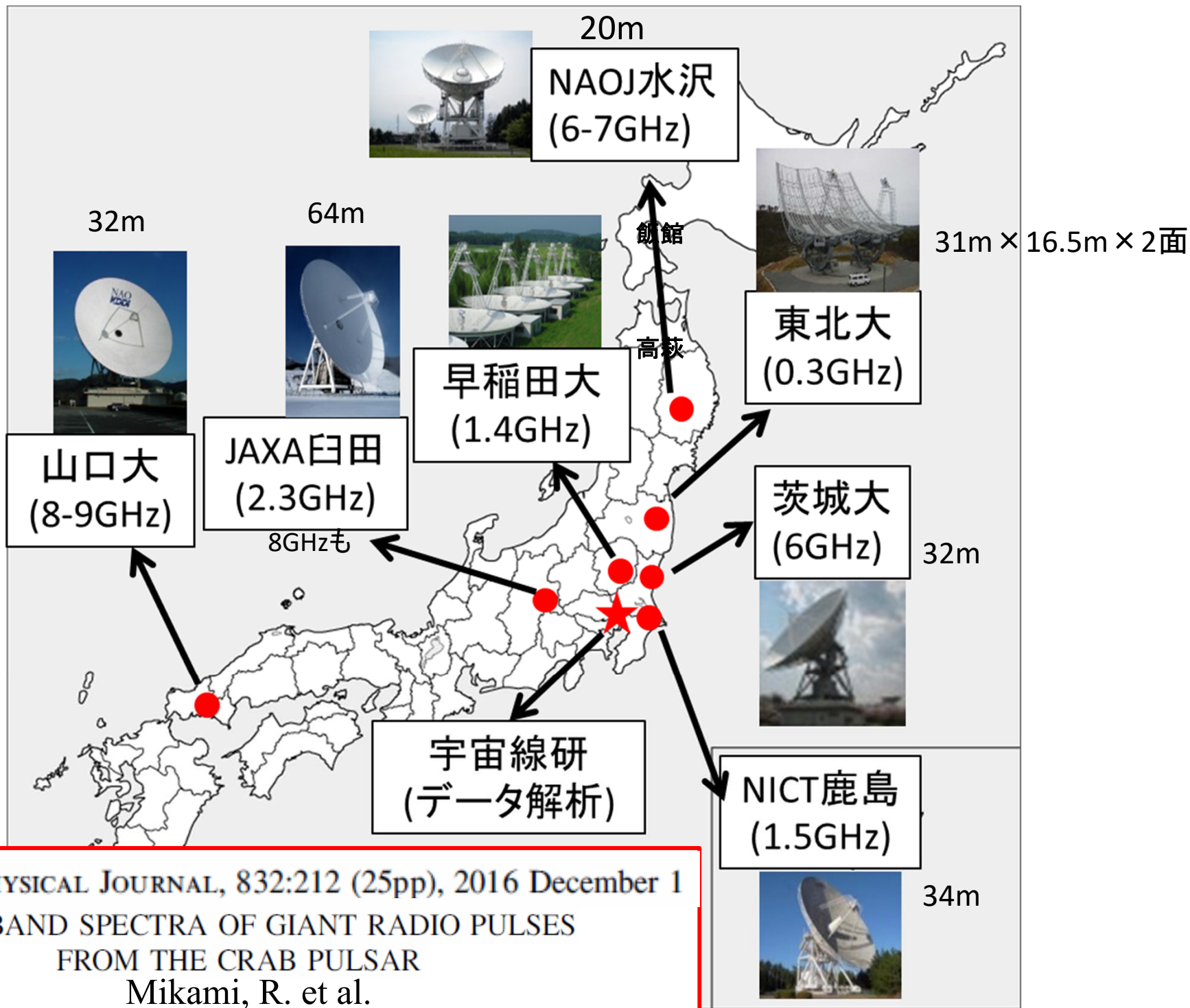
鹿島、臼田、飯館＋水沢20m(6GHz帯)、高萩30m(6GHz帯)、山口30m(8GHz帯)、那須20m(1.4GHz帯)。

2017.11キャンペーン観測(NICER X線観測と同時)

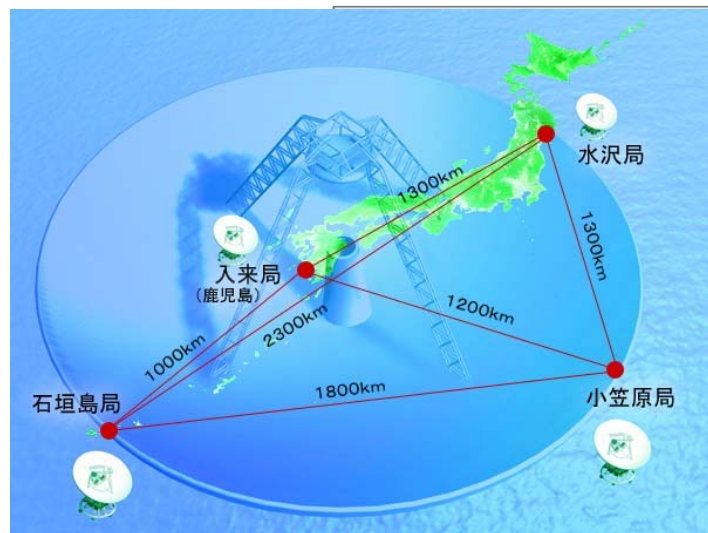
2014のアンテナ群に加え、VERA 水沢(2GHz)、入来、小笠原、石垣(22GHz)



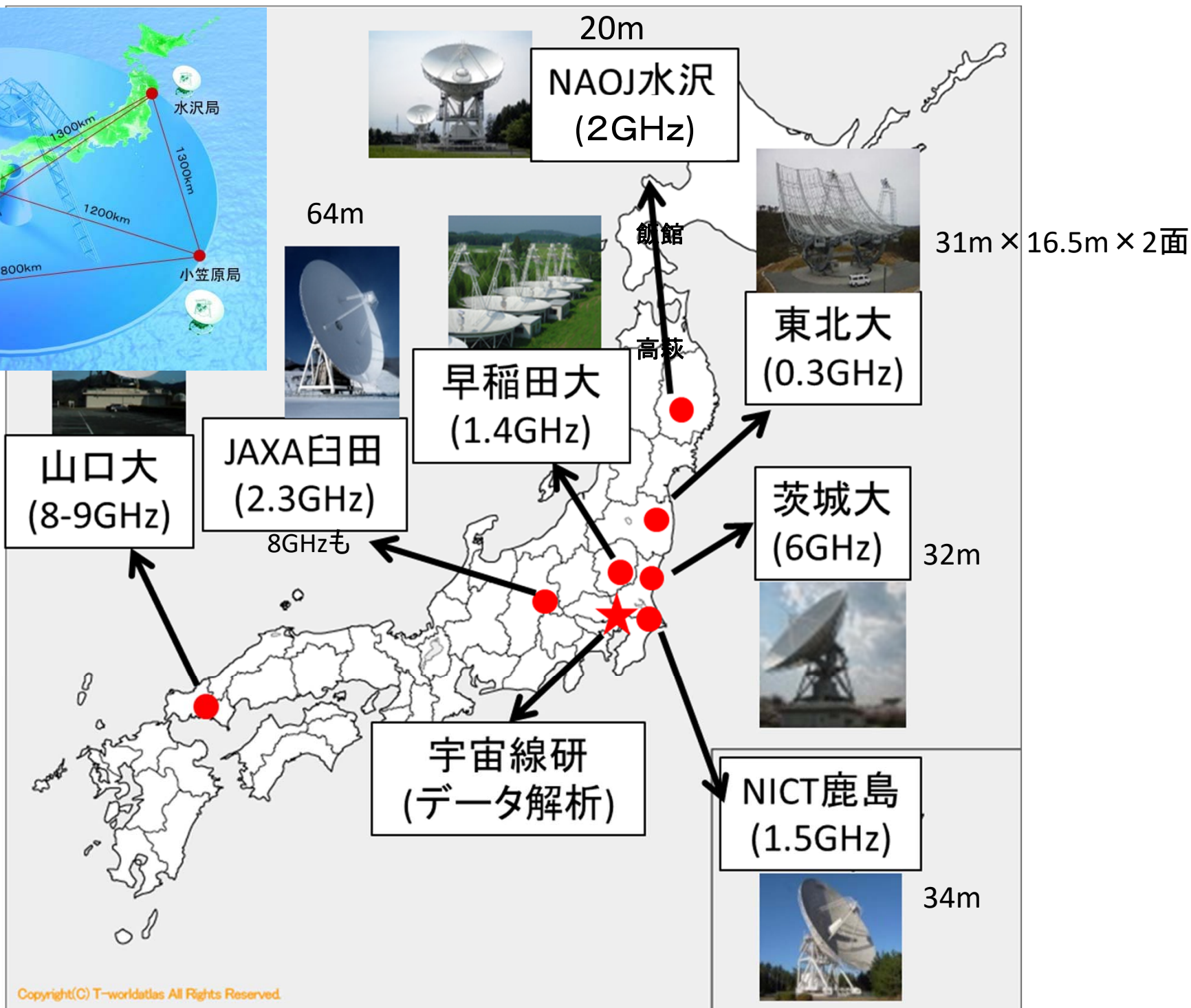
Crab campaign 2014 Sept



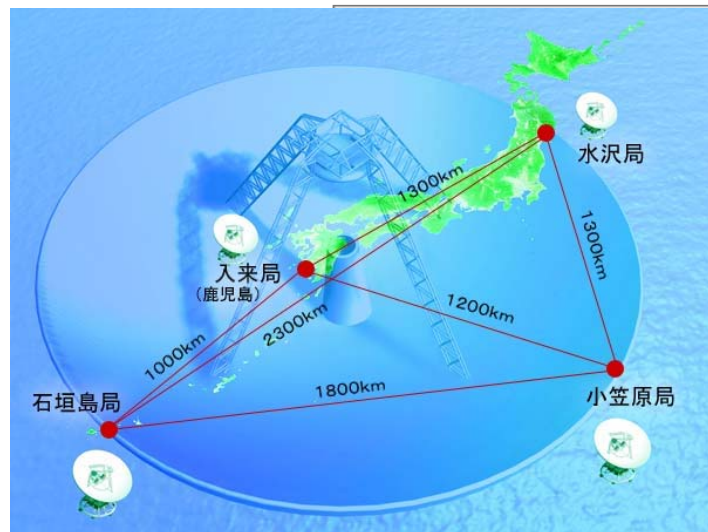
Crab campaign 2017.11.10



2017.11-
VERA4局
が加わった
(FRB探索の
ための装置の
Calibrationの
一環)

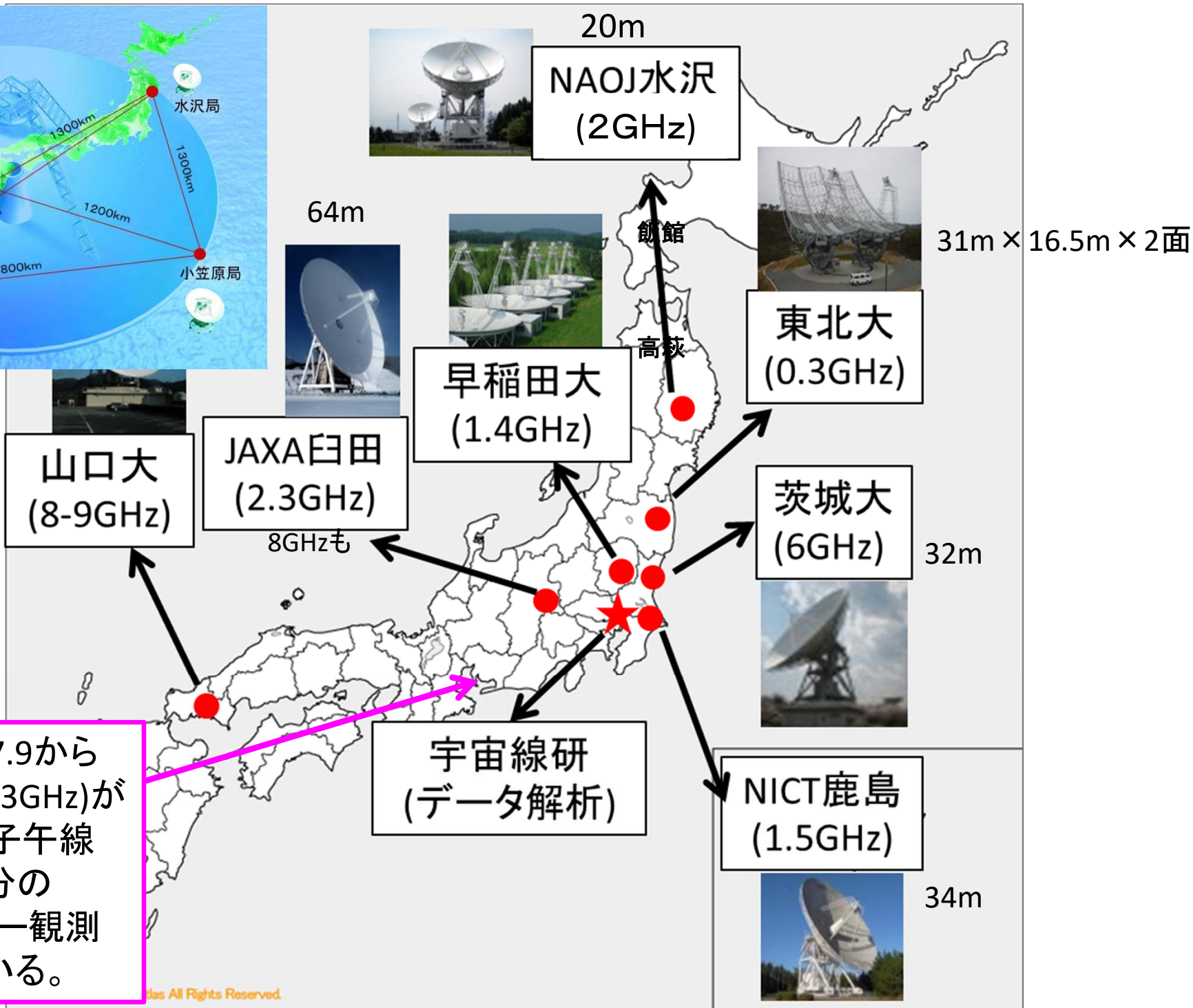


Crab campaign 2017.11.10

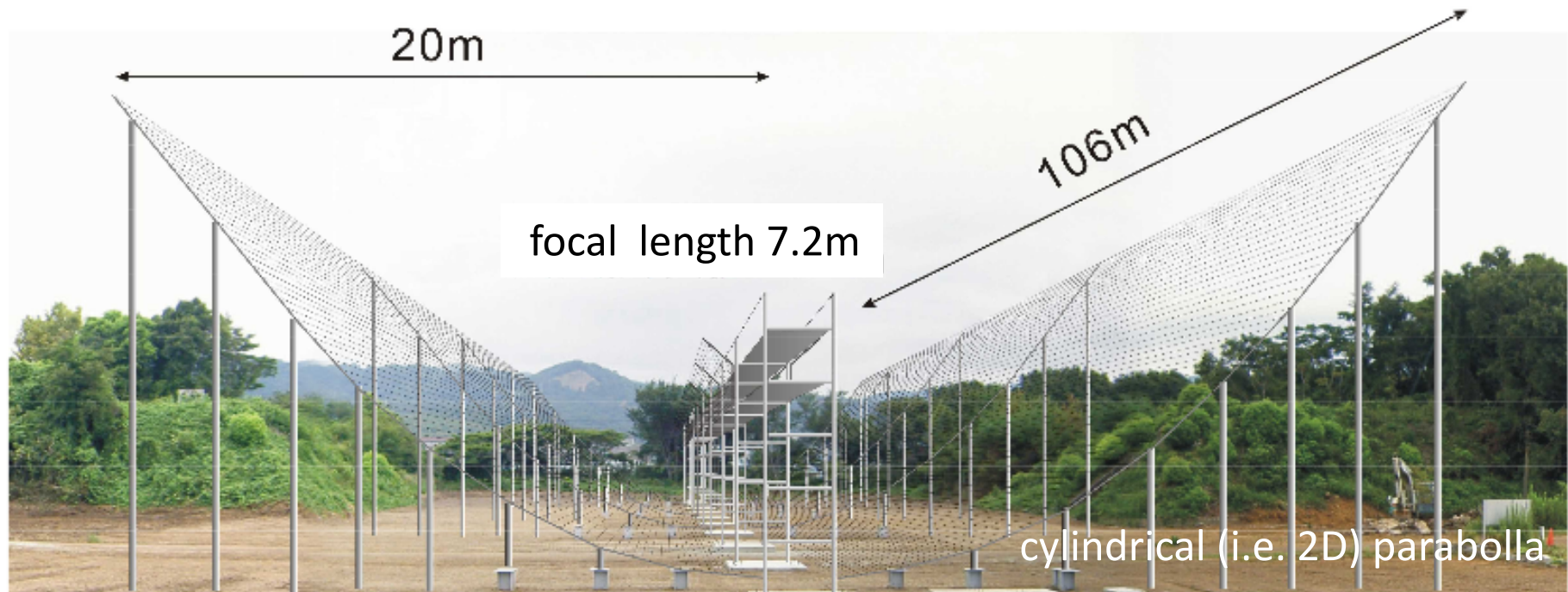


2017.11-
VERA4局
が加わった
(FRB探索の
ための装置の
Calibrationの
一環)

さらに、2017.9から
名大豊川(0.3GHz)が
ほぼ毎日、子午線
通過時±3分の
Crabパルサー観測
を開始している。



Toyokawa observatory
Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), Nagoya University
cylindrical UHF radio telescope (317-337MHz)



Aperture: 3344 m²

Efficiency: 59%

Tsys: 146K

開口面積日本第2位

1st largest: phased-array antenna in Shigaraki MU radar 8330m²

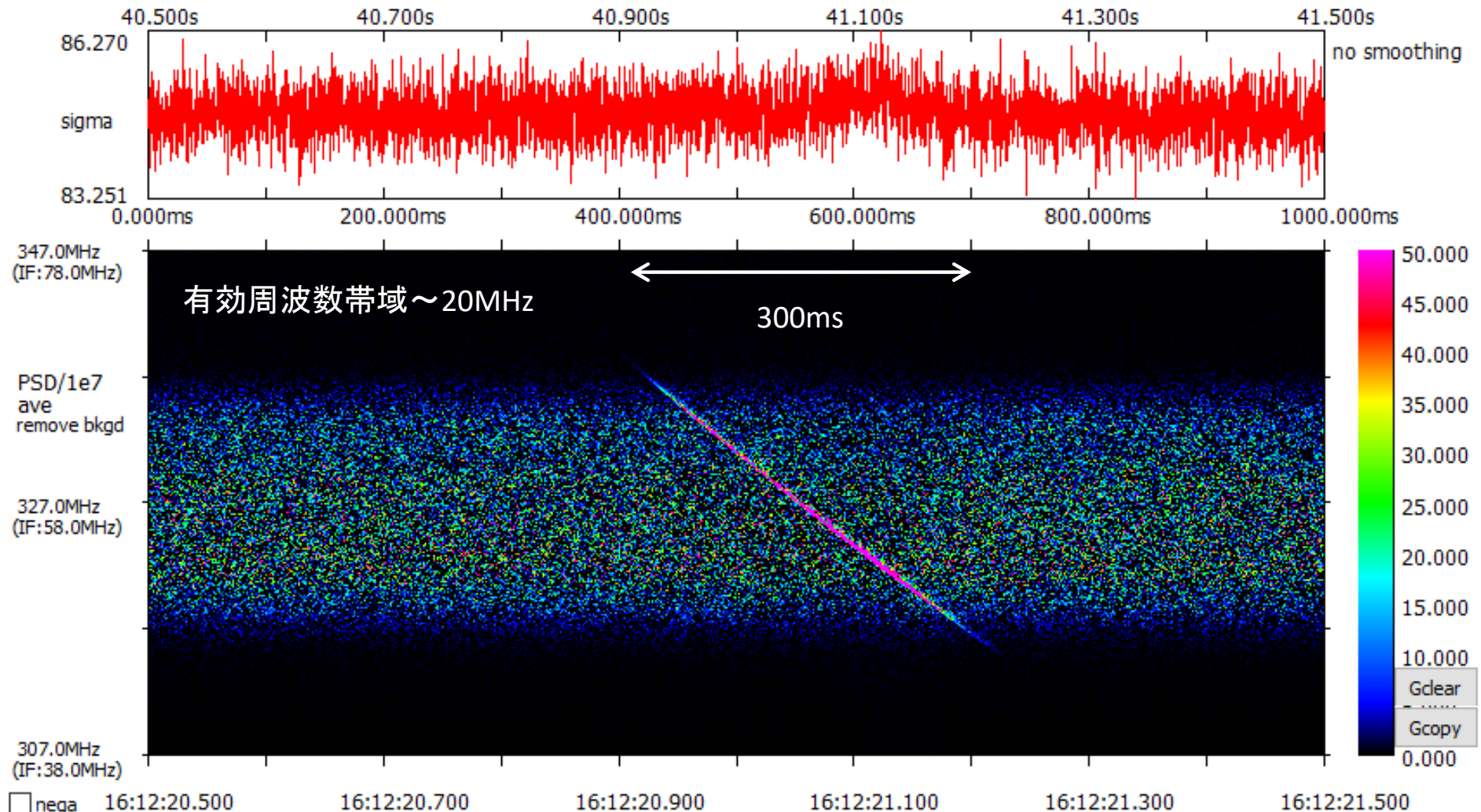
3rd largest: 64m parabola in Jaxa Usuda station 3217m²

主目的: 太陽風による電波シンチレーションを観測し、太陽風の速度、密度の情報を得る

→Crabは毎年6月中旬、太陽近傍を通過する。

その際、Crabパルサーの巨大電波パルスを用いて
太陽コロナの情報を得ることを目指す(名大ISEE 徳丸、俵)

豊川観測所によるCrabパルサーGRP検出例 (2016/11/24 16:12:20UT)



周波数帯域が広くアンテナが大面積であるぶん、飯館より高感度である。
(ただし、固定鏡のため、1日あたり数分間(子午線通過前後)の観測に限られる)

新しい試みについて

① 2017. 11. 7のCrabパルサー大グリッチ（観測史上最大）の検出

#10939

The Astronomer's Telegram

Post | Search | Policies
Credential | Feeds | Email

8 Nov 2017; 23:37 UT

[Previous]

A large glitch in the Crab pulsar (PSR B0531+21)

ATel #10939; *Benjamin Shaw (University of Manchester), Andrew Lyne (UoM), Cees Bassa (ASTRON), Rene Breton (UoM), Christine Jordan (UoM), Michael Keith (UoM), Mitchell Mickaliger (UoM), Benjamin Stappers (UoM), Patrick Weltevrede (UoM)*
on 8 Nov 2017; 16:16 UT

Credential Certification: Patrick Weltevrede (patrick.weltevrede@jodrellbank.manch.ac.uk)

Subjects: Radio, Neutron Star, Pulsar

Tweet

f Recommend 9

We have detected a large glitch event in the timing data of the Crab pulsar (PSR B0531+21) monitored routinely as part of the pulsar timing programme at the Jodrell Bank Observatory with the 42-ft and Lovell telescopes. The glitch occurred yesterday (Tuesday 7th Nov 2017) and our preliminary analysis indicates a fractional rotational spin-up of $dF_0/F_0 = (0.471 \pm 0.003) \times 10^{-6}$ (3 sigma), which makes it the largest glitch reported in this pulsar since its discovery in 1968 by more than a factor of two when compared to the glitches in the Jodrell Bank glitch database (<http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/glitches/gTable.html>). The glitch is consistent with a significant change in spin-down rate. The source is monitored with the Lovell radio telescope, but the glitch occurred while the source was being monitored with the Jodrell Bank radio telescope. We are encouraged to help refine the glitch characteristics and the effects seen at other wavelengths.

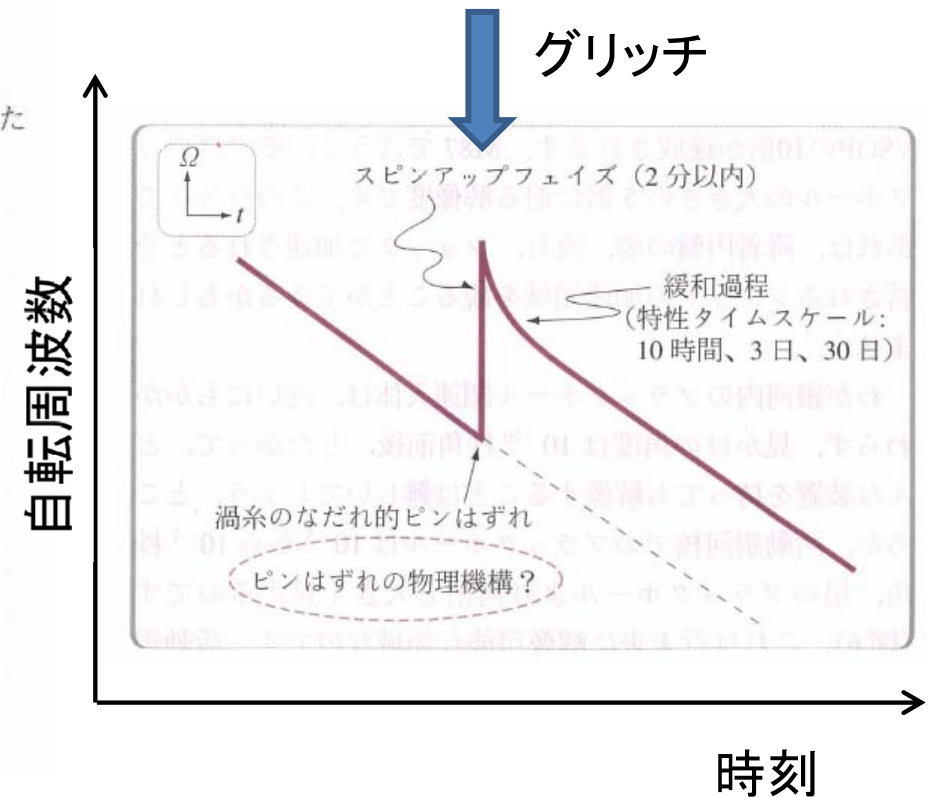
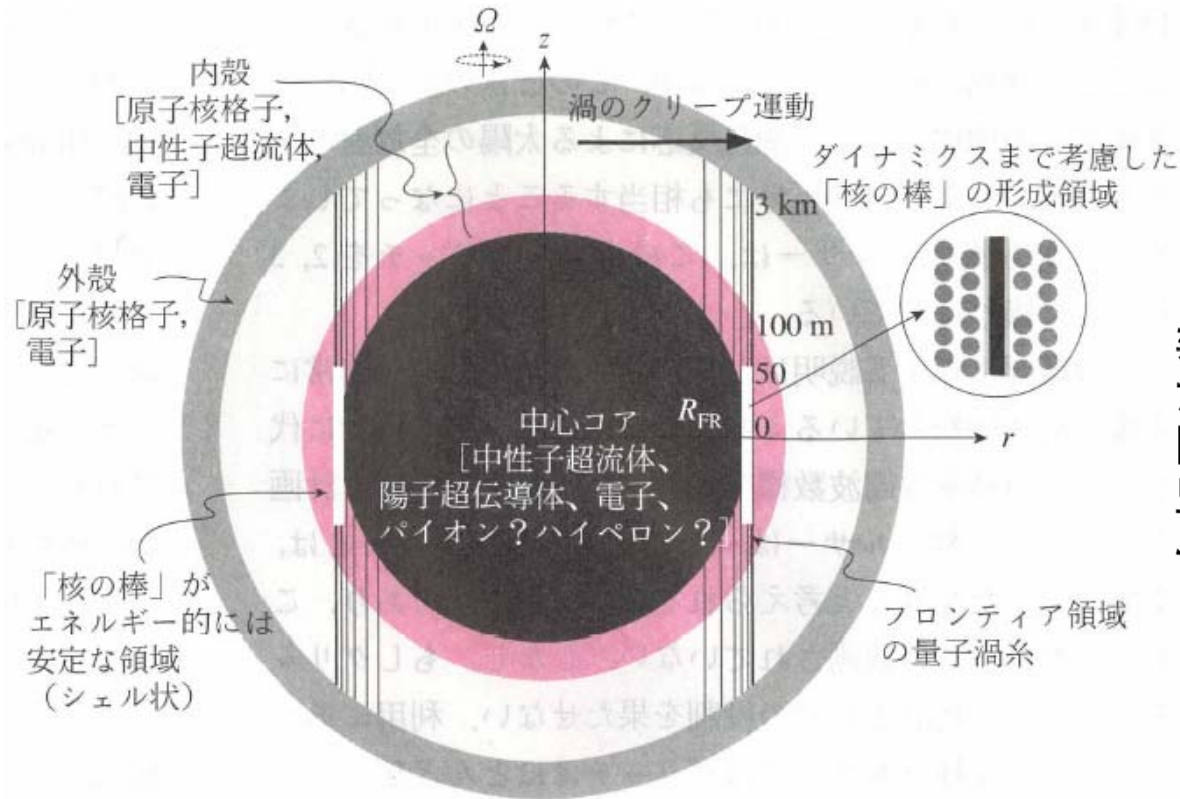
グリッチ発生時刻は11/7 13:19±4minと推定されているが、これまでのところ直接観測は報告されていない。(ハワイ上空あたり。多分、誰も見ていない)。

豊川のCrabパルサー観測データで
自前のグリッチ検出に成功(後述)
グリッチ最直近の観測は約4時間後

パルサーグリッチ理論の新展開

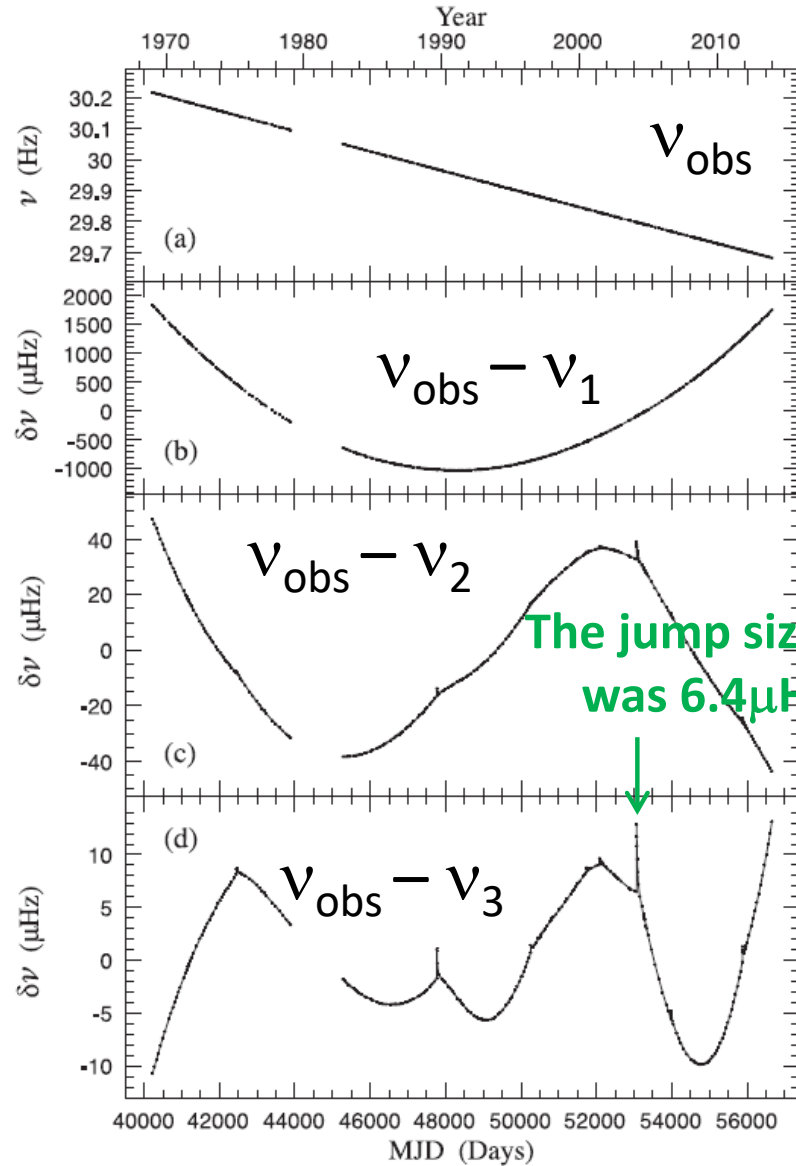
——中性子星内部の原子核構造と超流動との関わり——

望月 優子
伊豆山 健夫

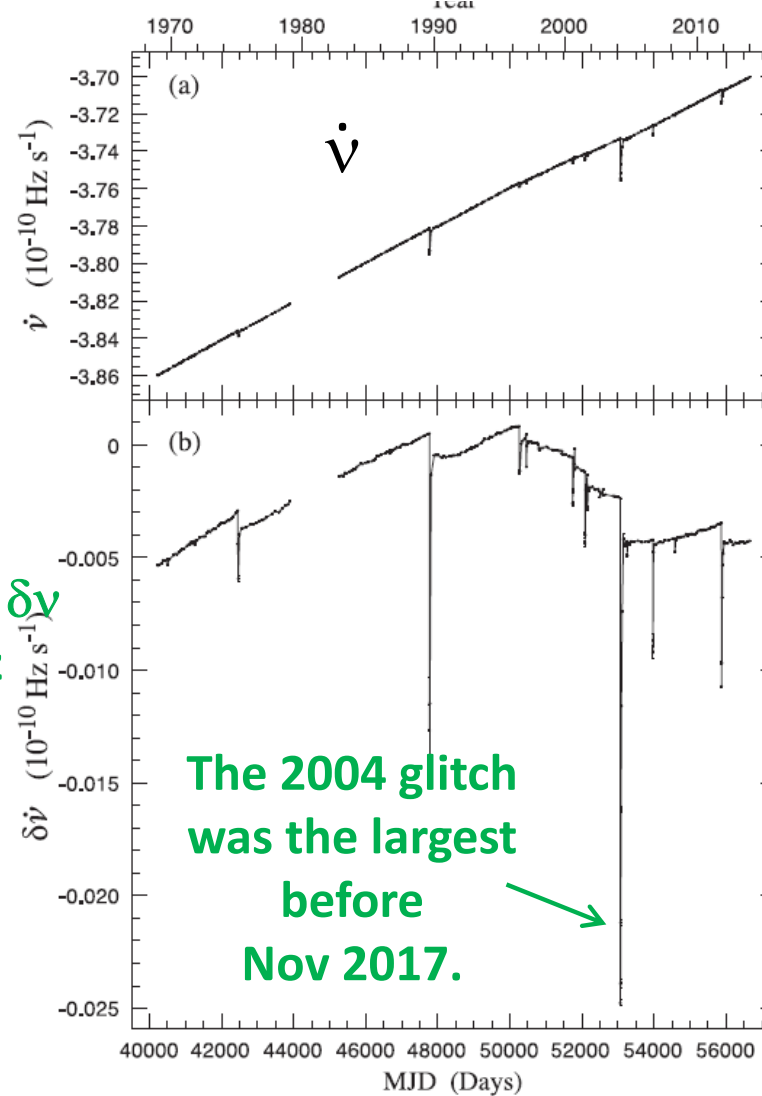


パルサー風放出による角運動量loss → crustに減速torque →
crust-core間の回転速度差発生 → 差が閾値を越えるとglitch発生

グリッチの回復期の自転周波数変化の詳細から、
中性子星の内部構造についての情報が得られると
理論的に期待されている



自転周波数変化



自転周波数一階微分の時間変化

Models

ν_1, ν_2, ν_3

①

②

③

$$\nu(t) = \nu_0 + \dot{\nu}_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{\nu}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \dddot{\nu}_0(t - t_0)t^3 + \delta\nu(t).$$

The jump size $\delta\nu$ of Nov 2017 glitch is $\sim 14\mu\text{Hz}$, twice larger than the 2004 glitch

The 2004 glitch was the largest before Nov 2017.

glitch前後数日間の平均パルス波形 ... 統計ゆらぎ以外、特に変化は見られず・豊川観測

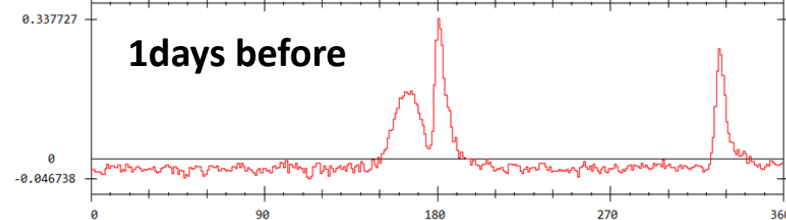
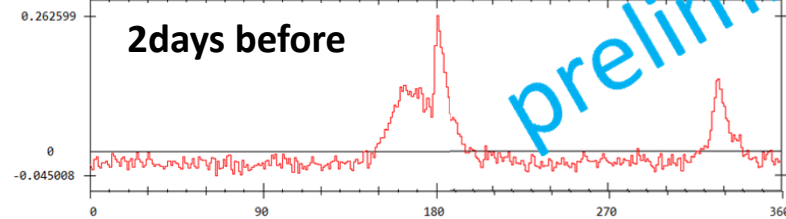
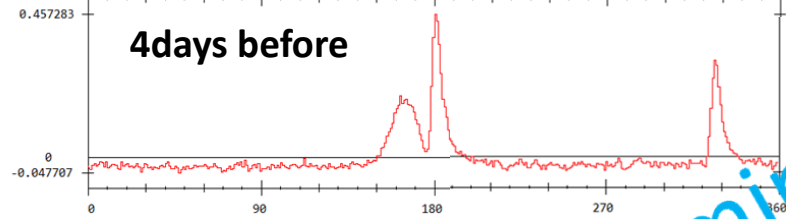
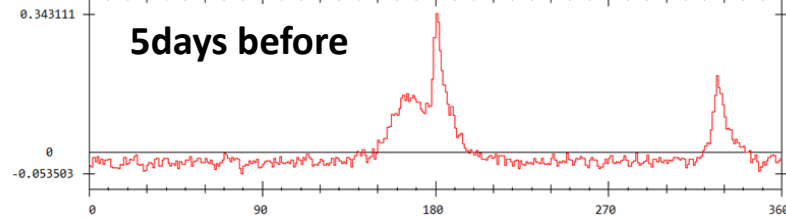
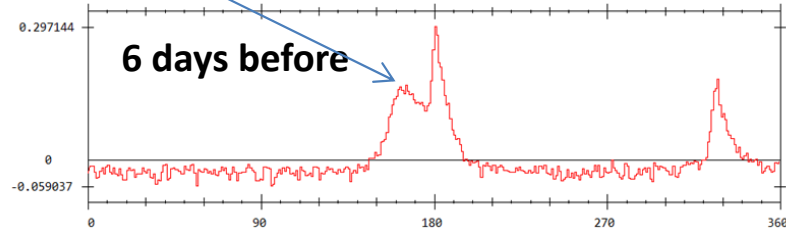
(317-337MHz)

precursor component main pulse interpulse

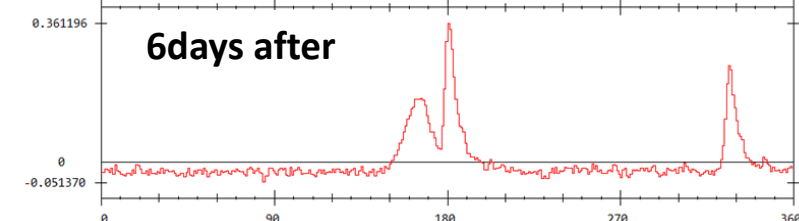
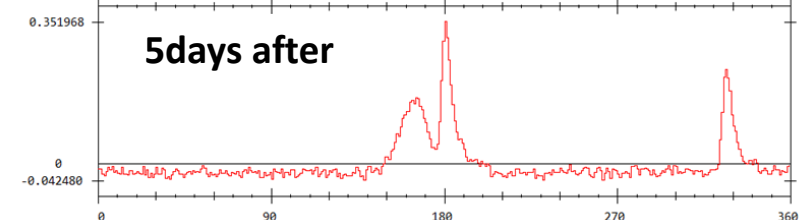
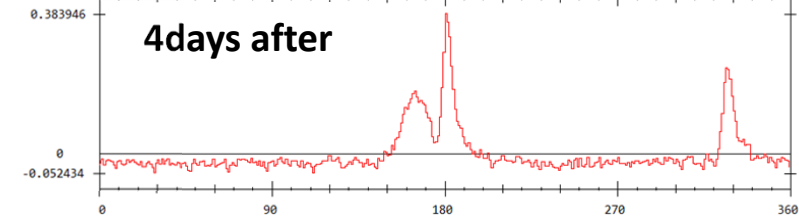
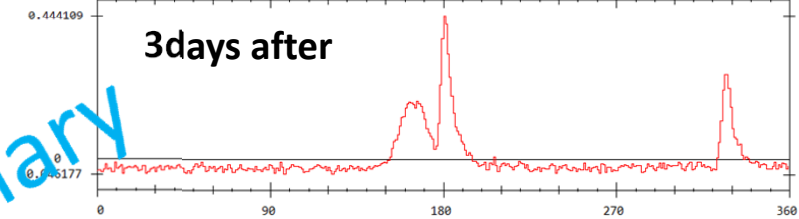
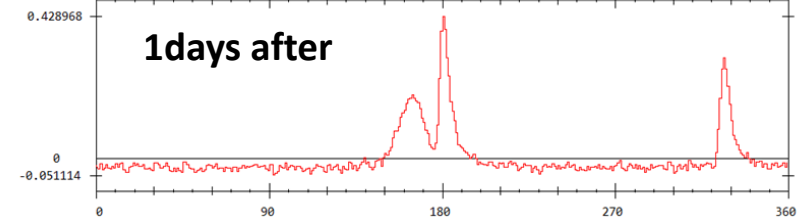
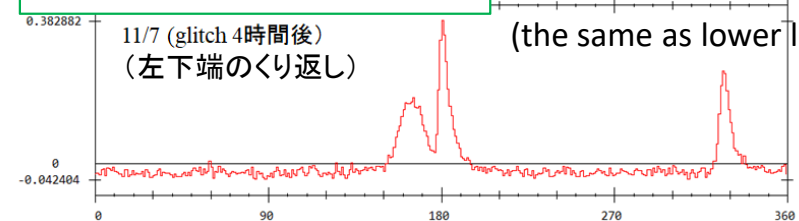
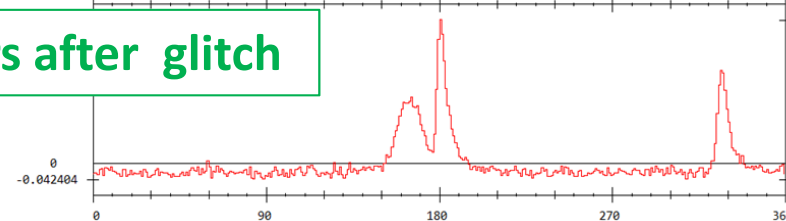
4 hours after glitch

time

time



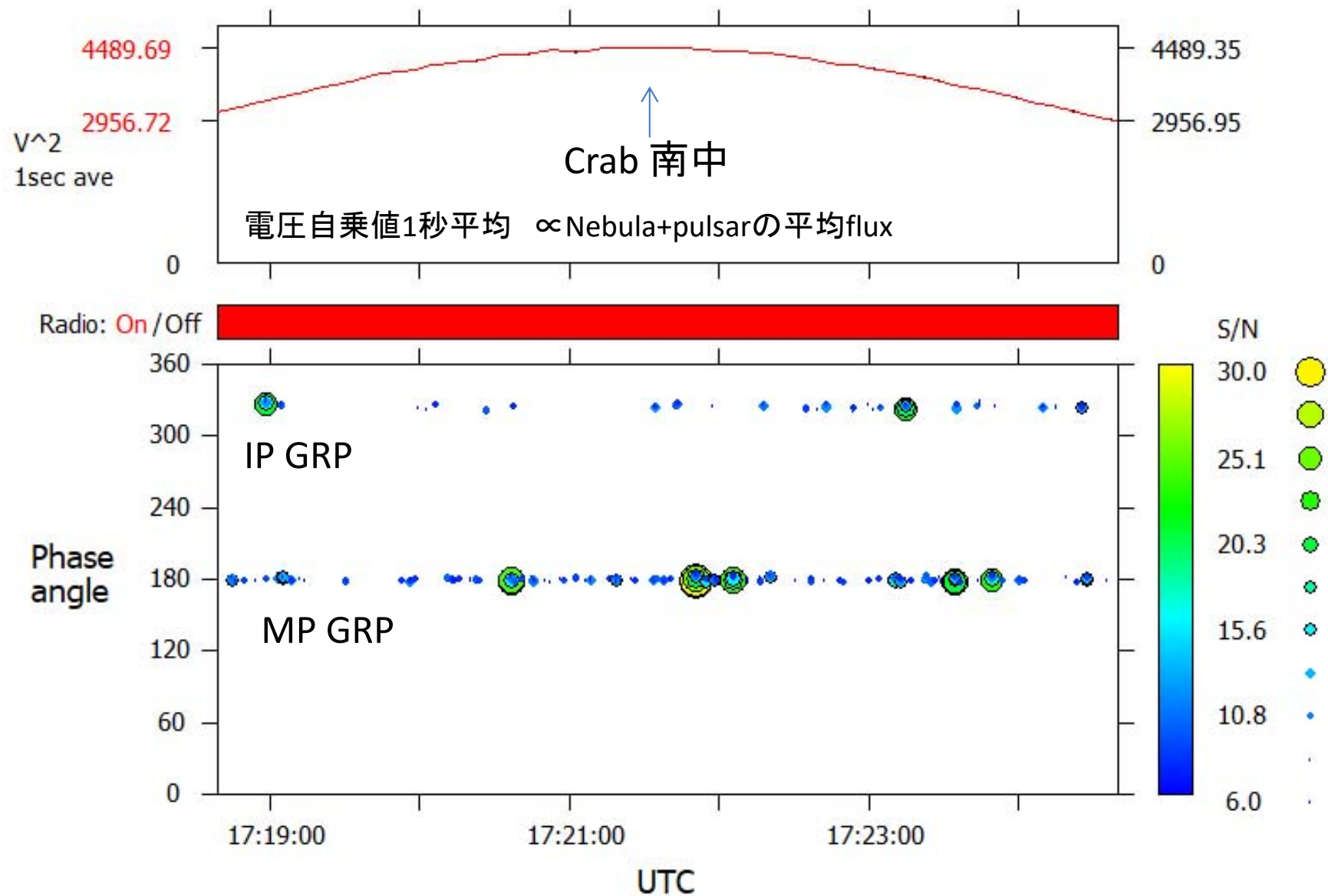
4 hours after glitch



preliminary

2017/11/6 (doy* 310) glitch 約20時間前

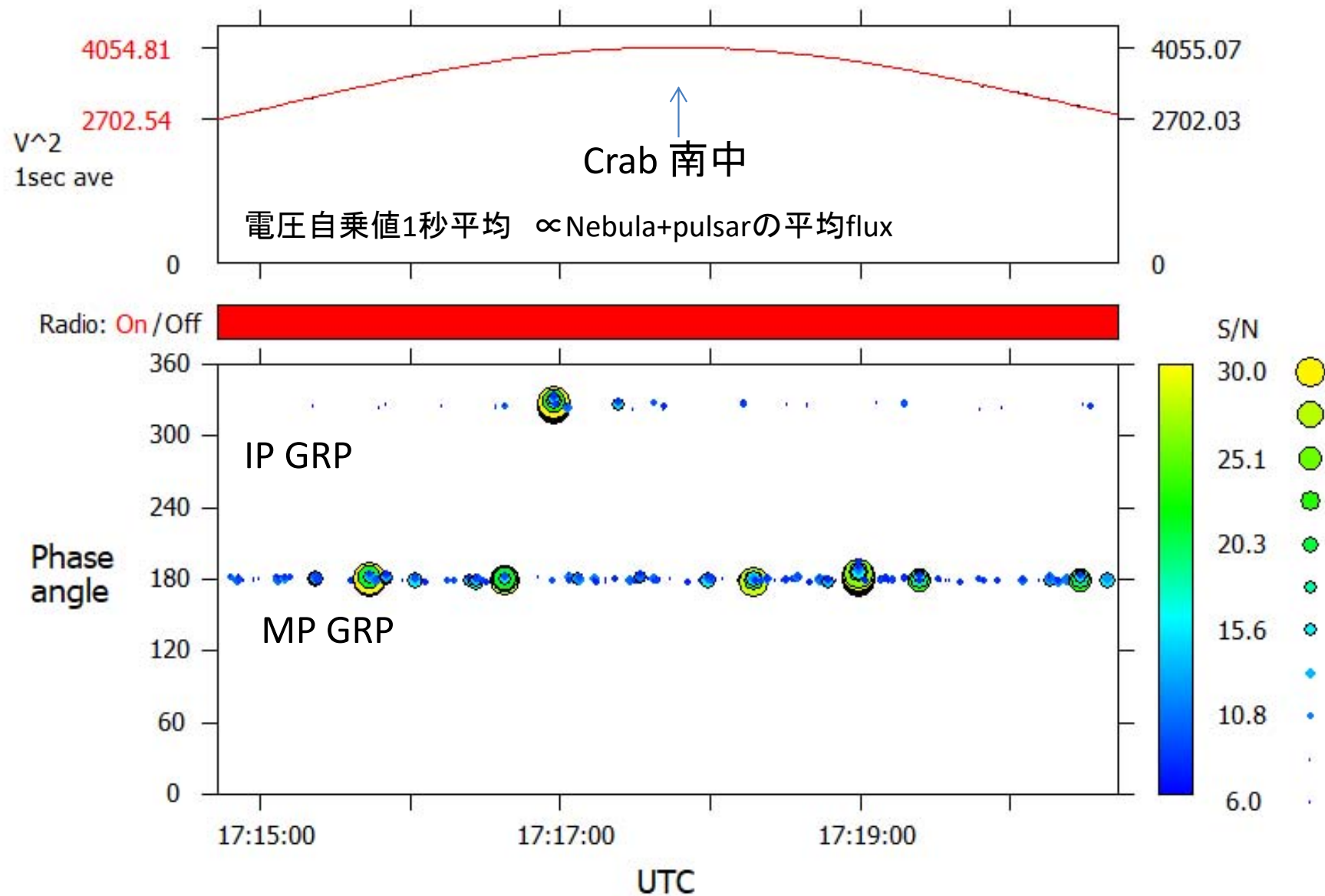
(317-337MHz)



*doy=day of year

2017/11/7 (doy* 311) glitch 約4時間後

(317-337MHz)



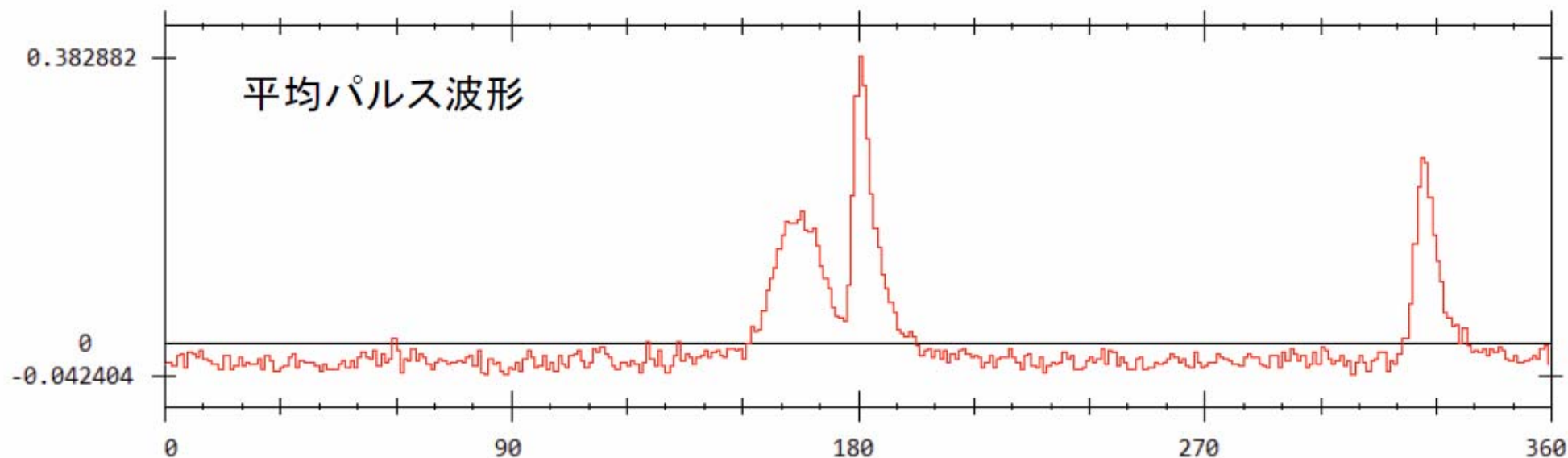
上図ではMPGRPが位相180度に整列するよう初期位相を調整

*doy=day of year

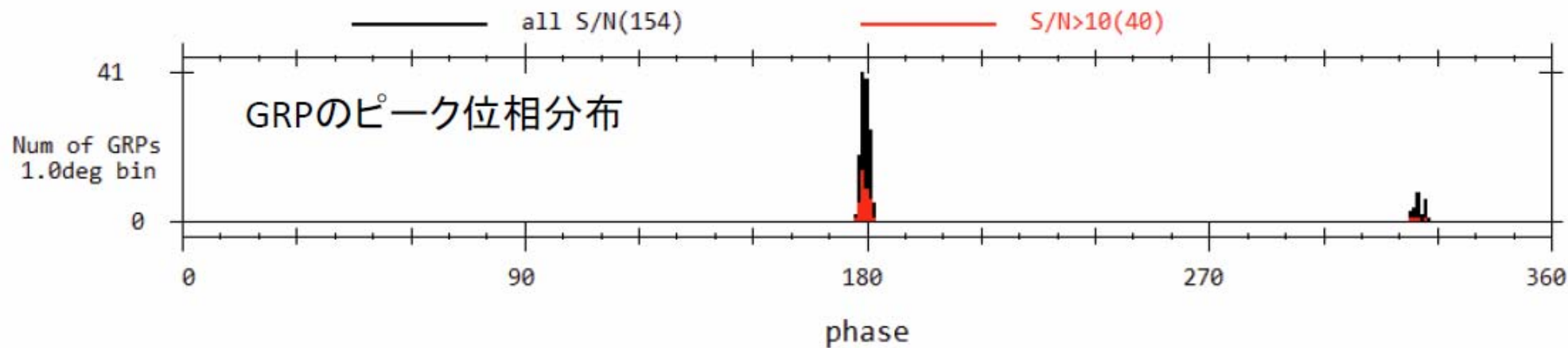
2017311_171443-172041.ch0.pax100usARRAY
171443-172041

グリッチの4時間後

PTDB	PdotTDB	nuTDB	nudotTDB15	DMtrial		
33.741910000000000	4.2023391500E-013	29.636733664	-369106.56853	56.76200		
phaseShift	tJPL(ms)	Nphase	gdelay(ms)	fmaxDM	FFratio	DMtrial
174.000	0.562	360	2123.828	333.000	0.9999380	56.76200



MP+IP_GRPid_TkyP_ch0_2017311171448-172039_SNgt6.txt



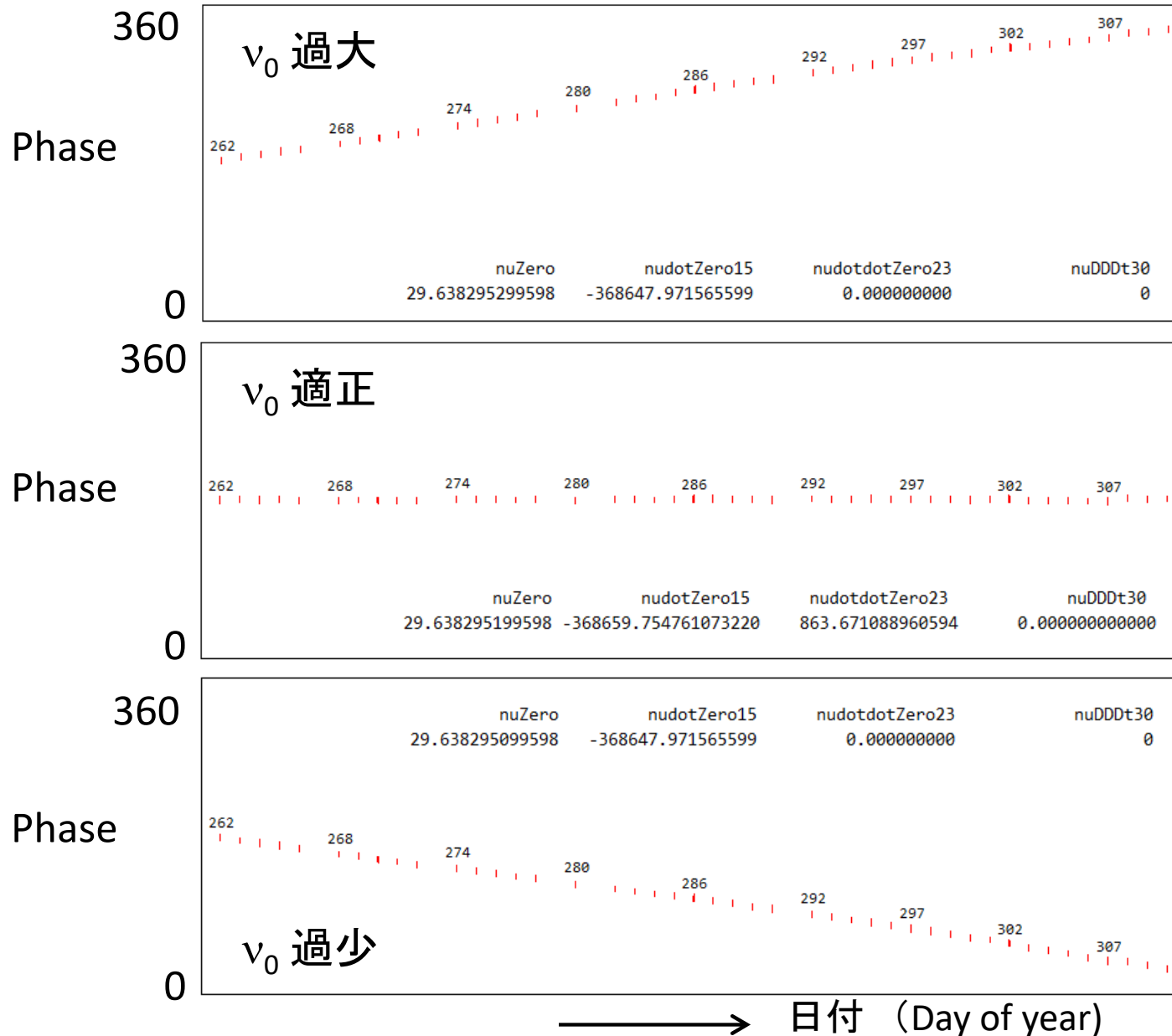
Glitch前 (2017/9/19-11/6)

豊川観測

周波数のTaylor展開、

$$v(t) = v_0 + \dot{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{v}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \dddot{v}_0(t - t_0)^3$$

の積分形(→phaseのTaylor展開)を用い、毎日のMain pulse GRPの位相が揃うように展開係数を決める。



Glitch前と同じ係数を11/7(311)以降に適用すると、...

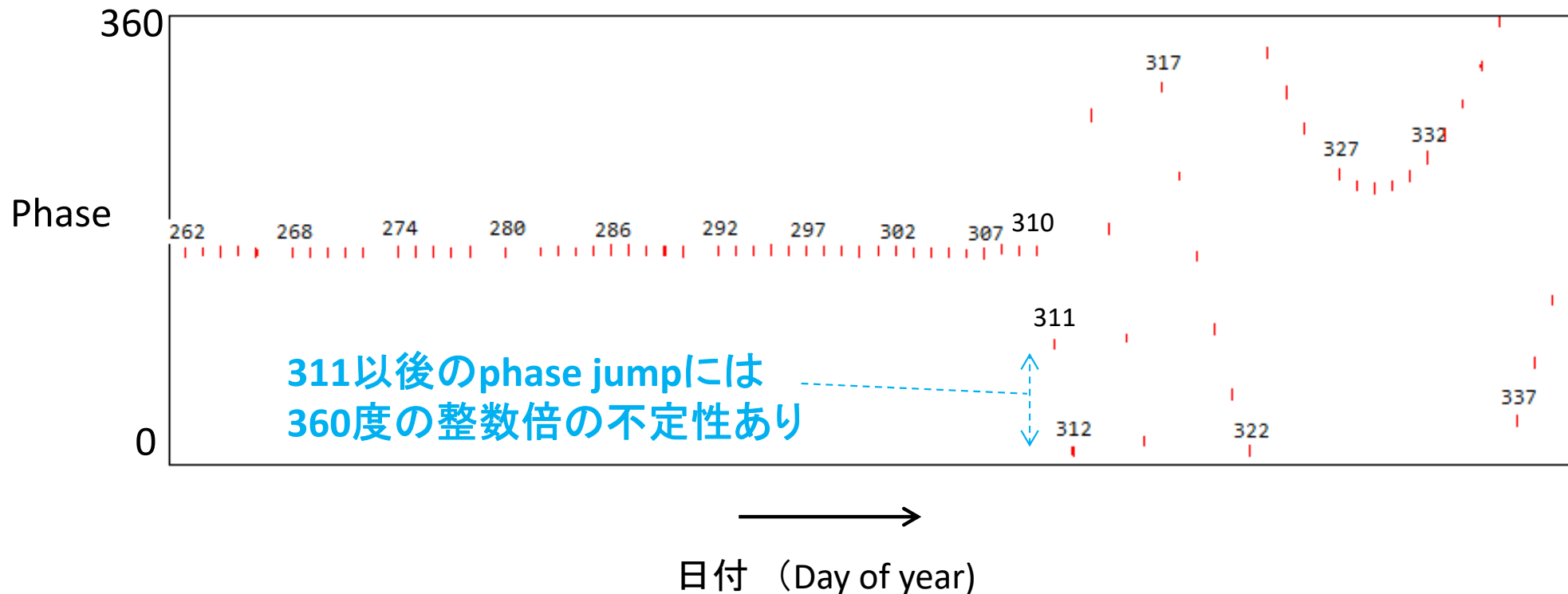
豊川観測

周波数のTaylor展開、

$$v(t) = v_0 + \dot{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{v}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \dddot{v}_0(t - t_0)t^3$$

の積分形(→phaseのTaylor展開)を用い、毎日のMain pulse GRPの位相が揃うように展開係数を決める。

Phaseは全く揃わず、11/6(310)と11/7(311)の観測時刻の間にglitchがあったことが明らか



Glitch後 (2017/11/7-12/5)

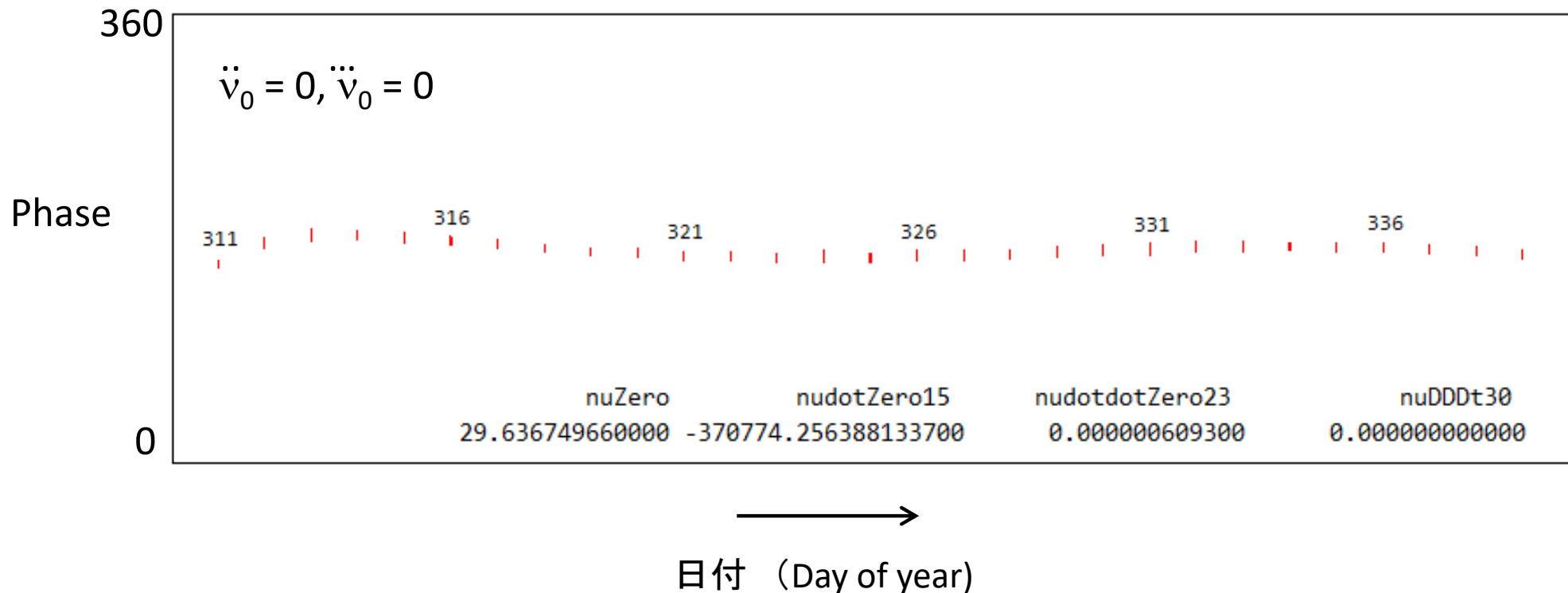
豊川観測

周波数のTaylor展開、

$$v(t) = v_0 + \dot{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{v}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \dddot{v}_0(t - t_0)^3$$

の積分形(→phaseのTaylor展開)を用い、毎日のMain pulse GRPの位相が揃うように展開係数を決める。

glitch後のデータだけを用いてfitting



Glitch後 (2017/11/7-12/5)

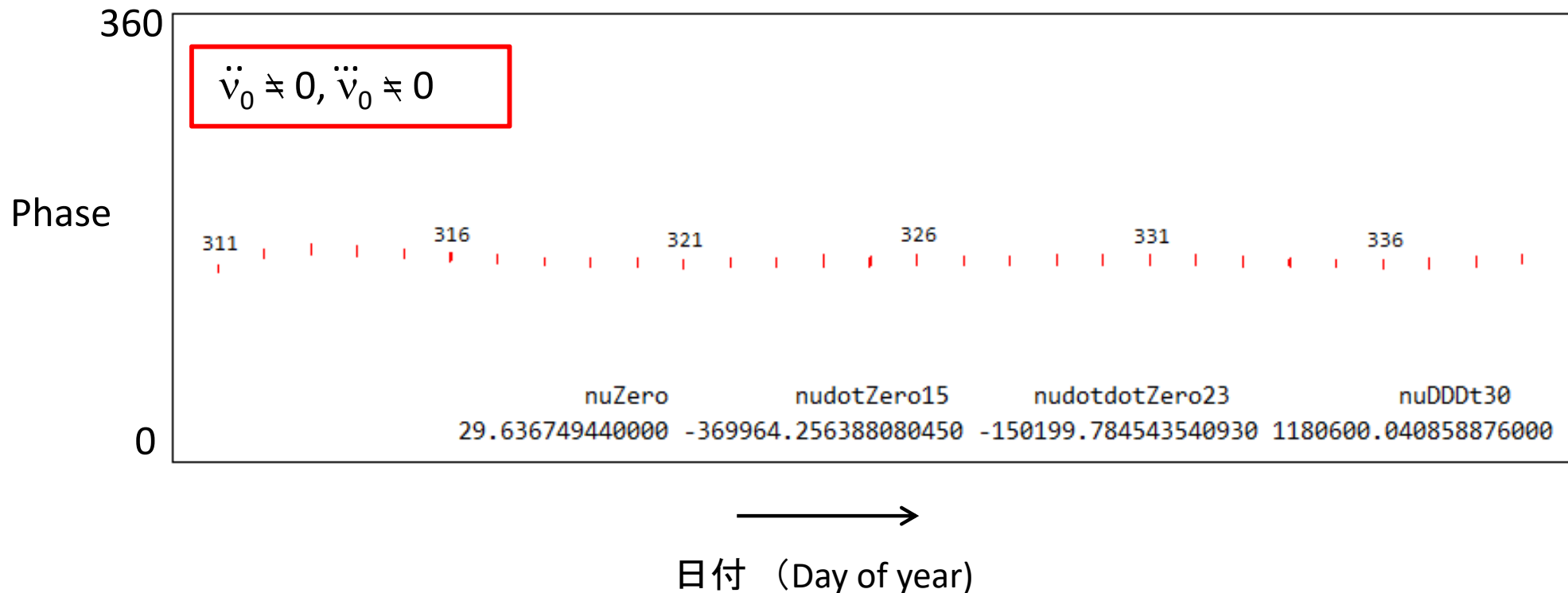
豊川観測

周波数のTaylor展開、

$$v(t) = v_0 + \dot{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{v}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \dddot{v}_0(t - t_0)^3$$

の積分形(→phaseのTaylor展開)を用い、毎日のMain pulse GRPの位相が揃うように展開係数を決める。

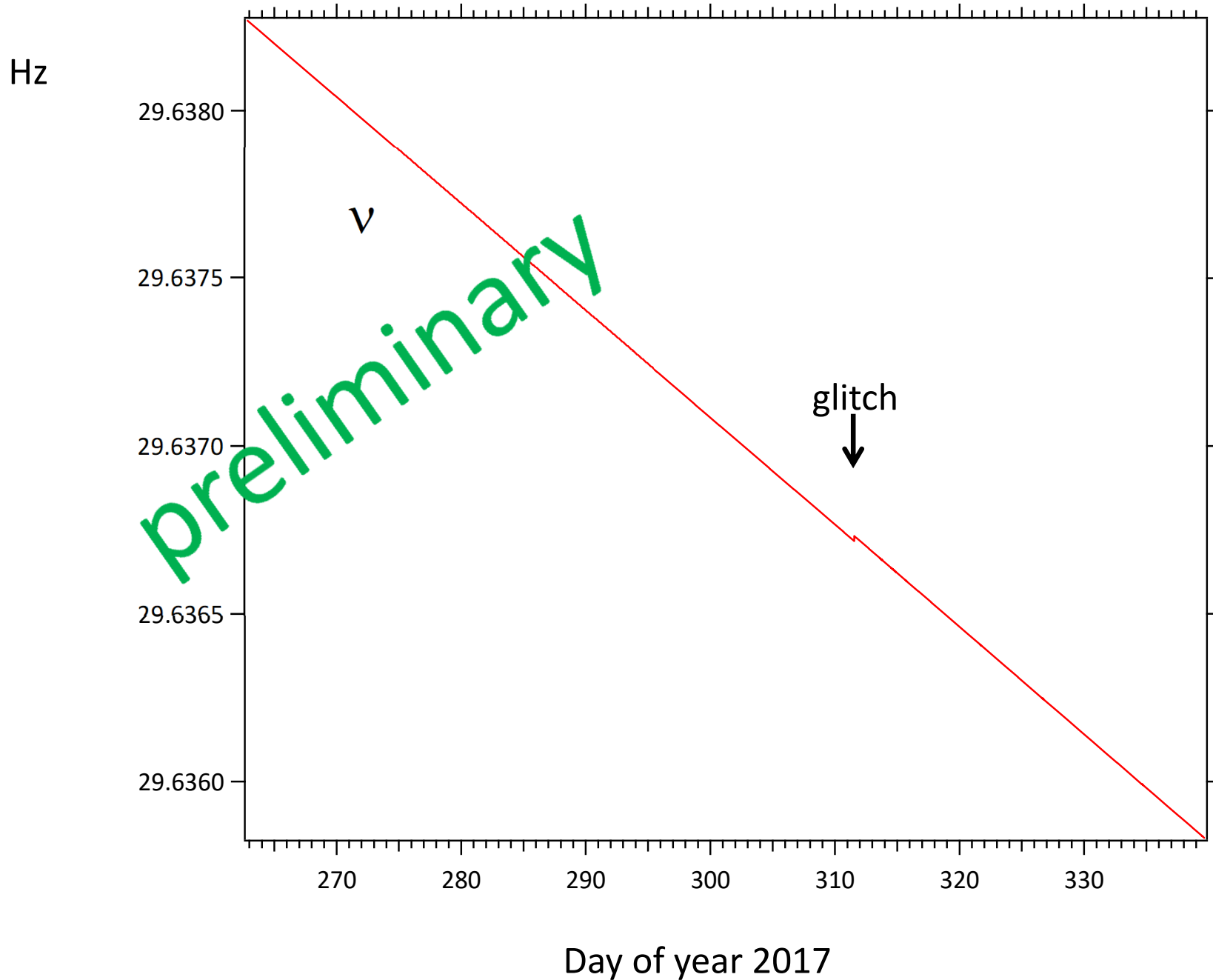
glitch後のデータだけを用いてfitting



Glitch前・後 (2017/9/19-11/6, 11/7-12/5)

豊川観測

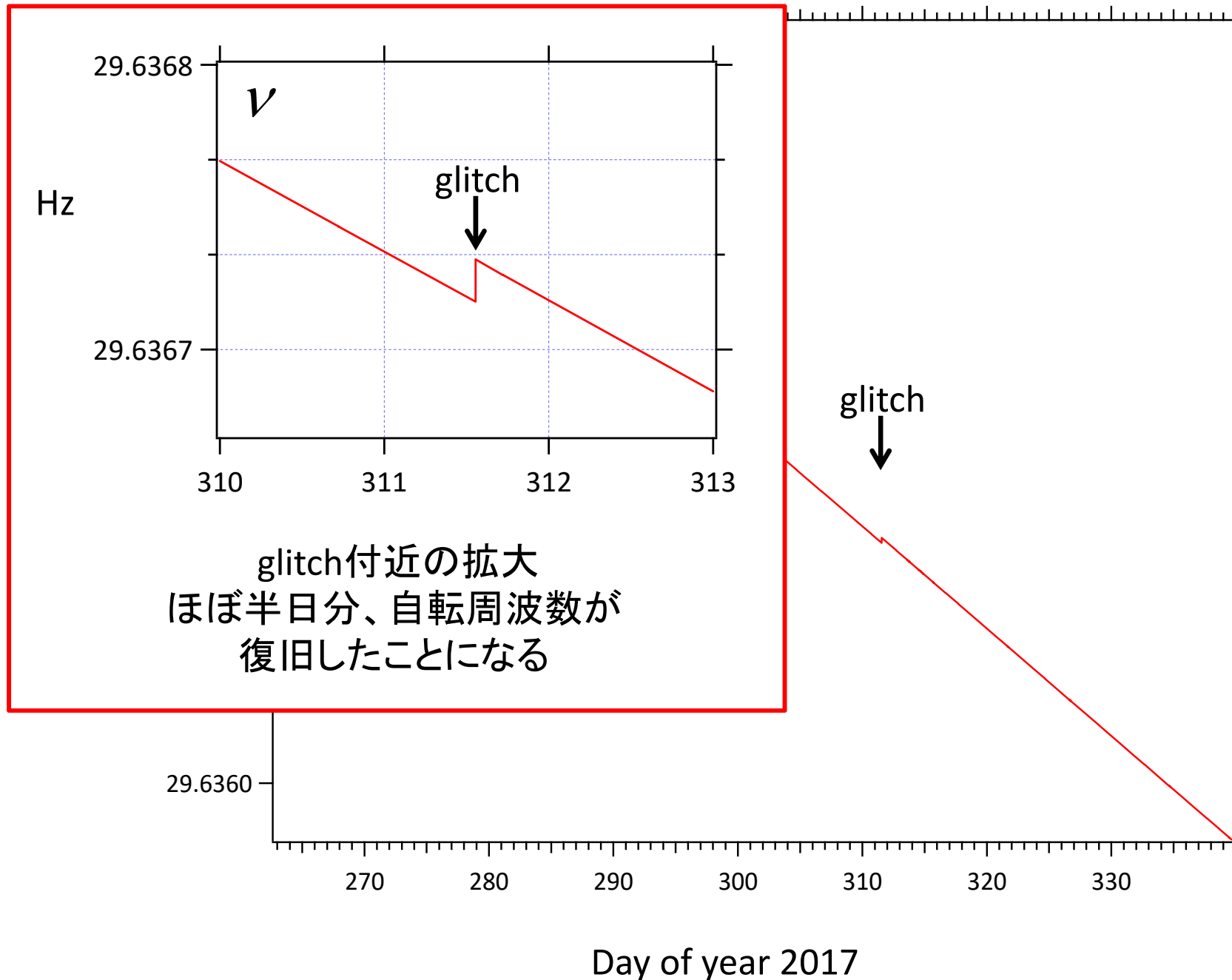
豊川データでもGlitchを境に $\sim 14\mu\text{Hz}$ のspin upを検出



Glitch前・後 (2017/9/19-11/6, 11/7-12/5)

豊川観測

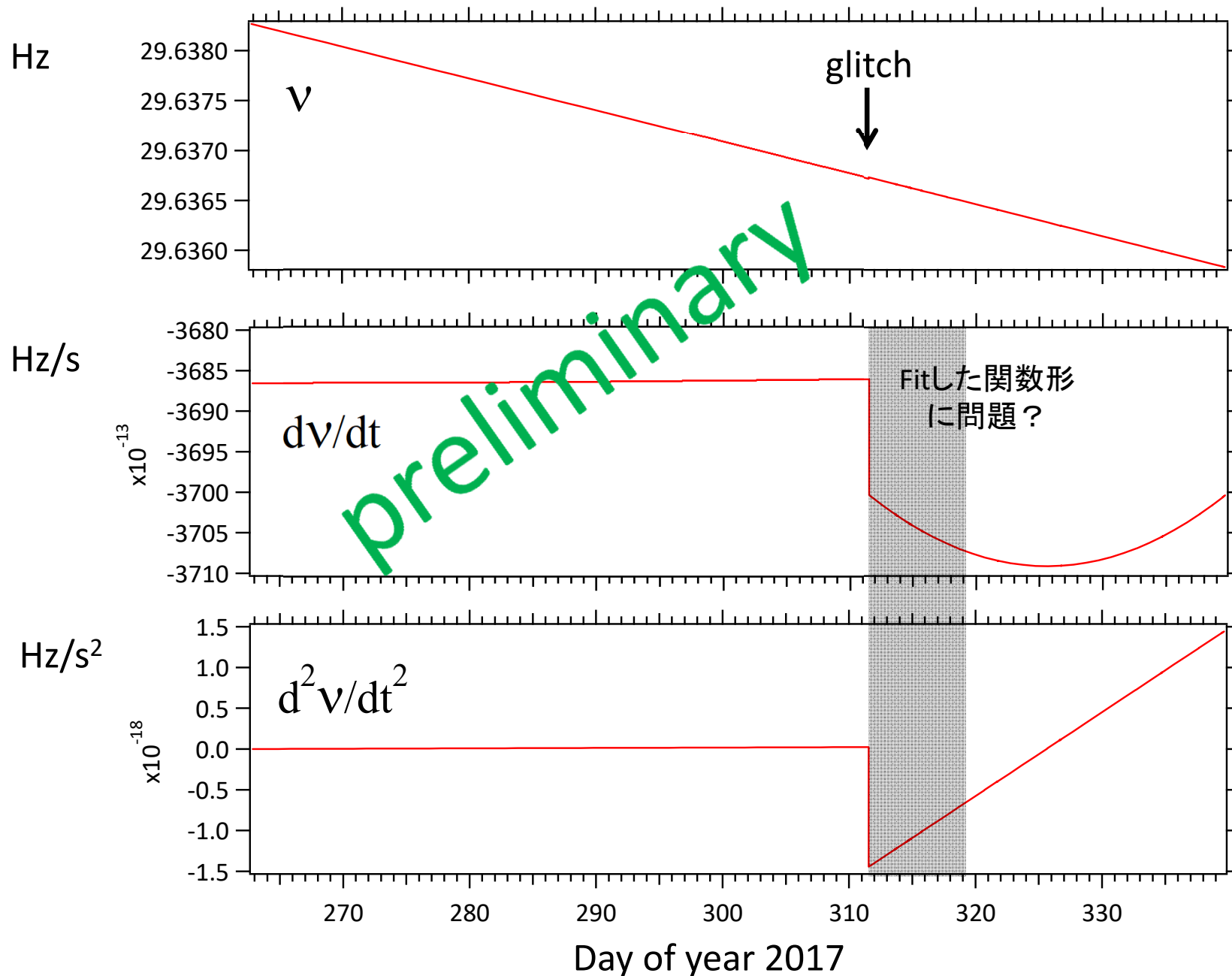
豊川データでもGlitchを境に $\sim 14\mu\text{Hz}$ のspin upを検出



Glitch前・後 (2017/9/19-11/6, 11/7-12/5)

豊川観測

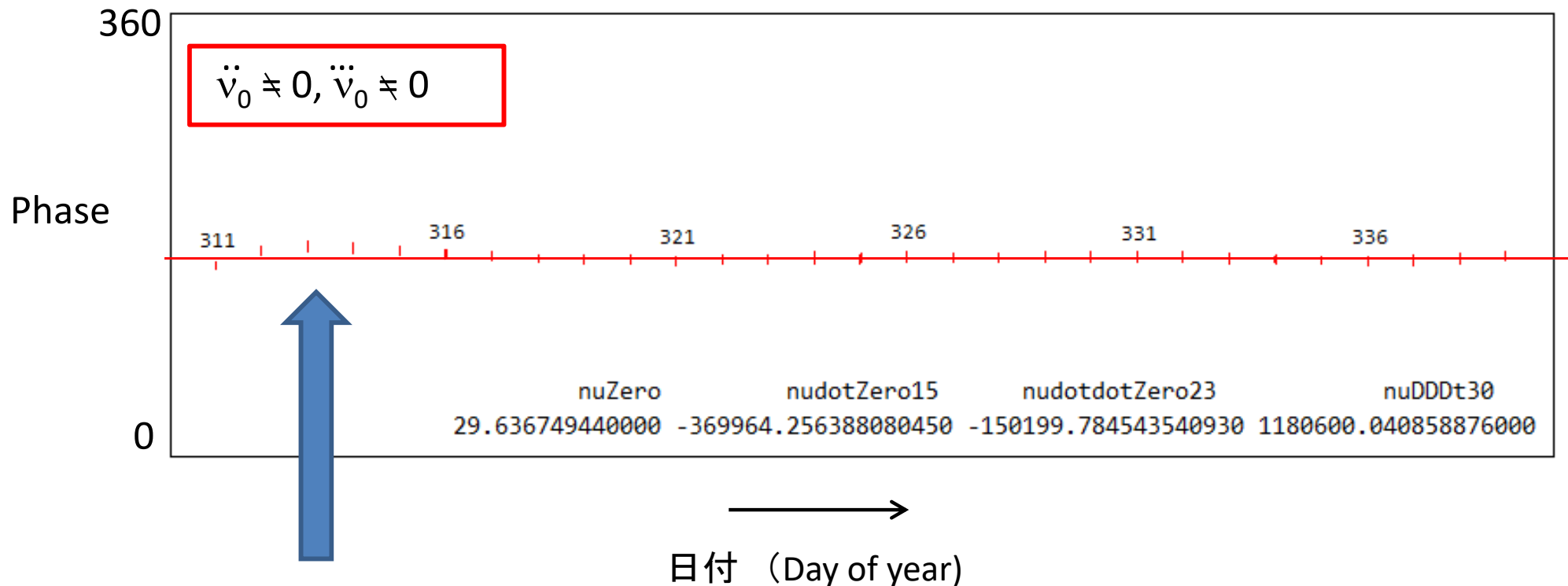
豊川データでもGlitchを境に $\sim 14\mu\text{Hz}$ のspin upを検出



周波数のTaylor展開、

$$v(t) = v_0 + \dot{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \ddot{v}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \dddot{v}_0(t - t_0)^3$$

の積分形(→phaseのTaylor展開)を用い、毎日のMain pulse GRPの位相が揃うように展開係数を決める。

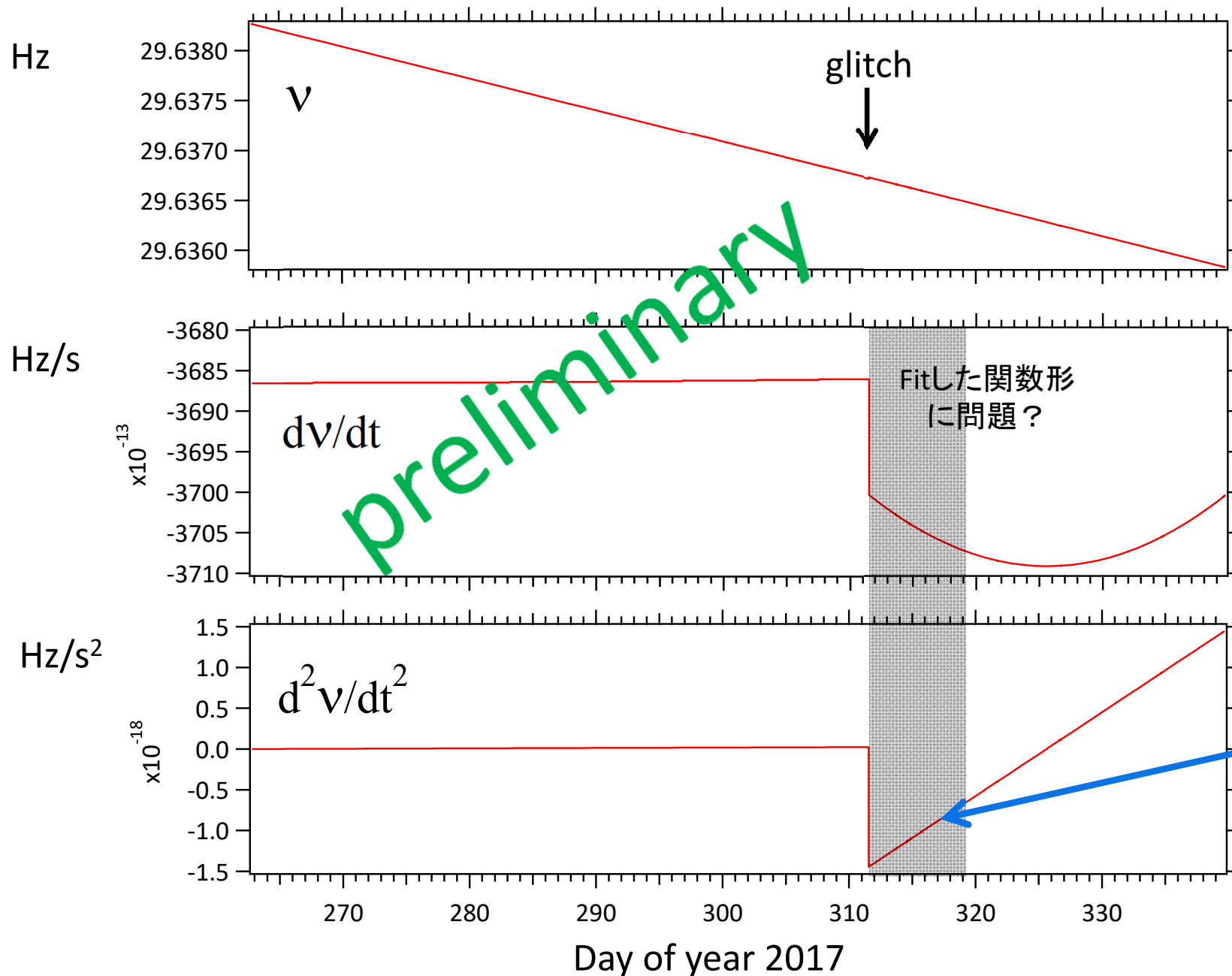


phaseにhumpが残っている。
Taylor展開では表しきれない。

Glitch前・後 (2017/9/19-11/6, 11/7-12/5)

豊川観測

豊川データでもGlitchを境に $\sim 14\mu\text{Hz}$ のspin upを検出



Braking index n

$$\dot{v} = -\kappa v^n$$

磁気双極子輻射なら3

$$\dot{v} = -\frac{8\pi^2}{3c^3} \frac{M^2 \sin^2 \alpha}{I} v^3$$

一般に、

$$n = \frac{\ddot{v} v}{\dot{v}^2}$$

Best fitの結果を信じると、glitch直後は

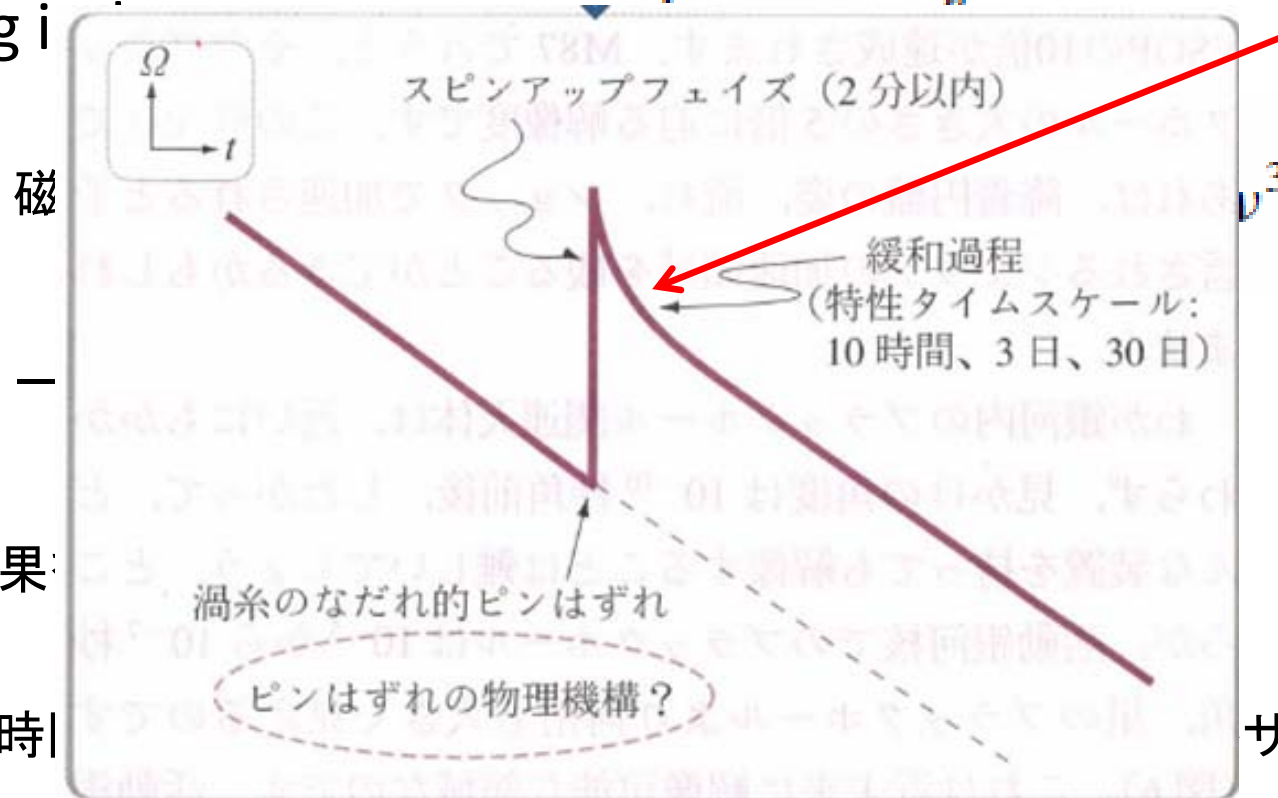
$$\text{Braking index } n \equiv \ddot{v} v / \dot{v}^2 = -1500 \sim -300 *$$

ただし、 n は時間的に変化(増加)し、5 Decには $\sim +300$ に。(Crabパルサーでは通常 $n \sim 2.5$)

* $\ddot{v}$ は本当に負か？($\ddot{v}$ の値は、glitch後何日にわたってfitを行うかにより大幅に変わる)
まだ誤差推定が甘い。

望月さんによると、量子化された渦糸の輸送により、glitch直後の n は+1000程度になることが期待されるとのこと(EOS, glitch size, 渦糸クリープモデルパラメタに依存)。しかし、 $n < -$ 数百を预言する中性子星内部構造理論は存在しないらしい？

Braking i



$\ddot{\nu} > 0$ として
描かれている

Best fitの結果:

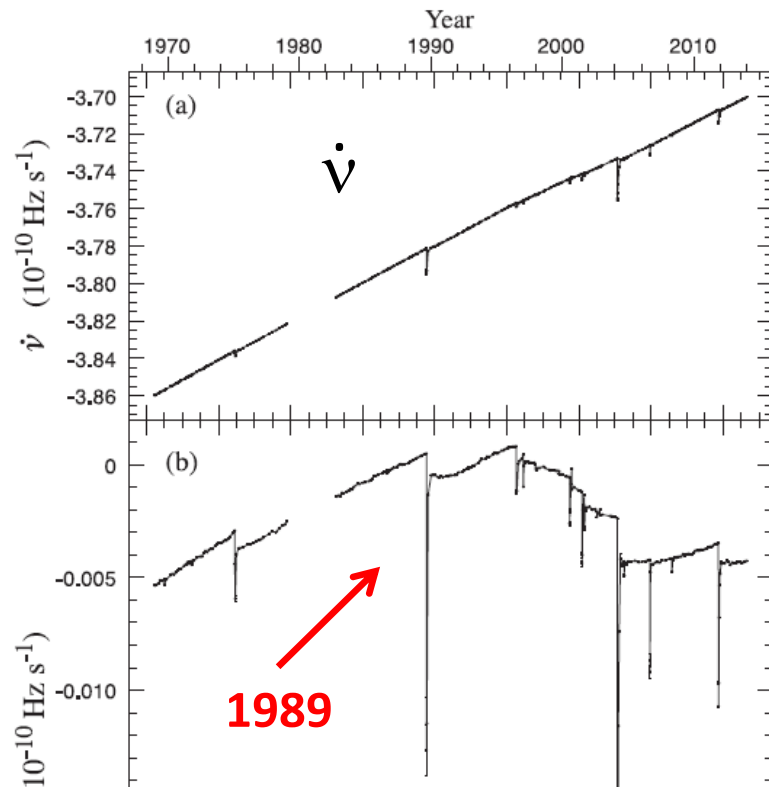
ただし、 n は時

サーでは通常 $n \sim 2.5$)

* $\ddot{\nu}$ は本当に負か? ($\ddot{\nu}$ の値は、glitch後何日にわたってfitを行うかにより大幅に変わる)
まだ誤差推定が甘い。

望月さんによると、量子化された渦糸の輸送により、glitch直後の n は+1000程度になることが期待されるとのこと(EOS, glitch size, 渦糸クリープモデルパラメタに依存)。しかし、 $n < -$ 数百を预言する中性子星内部構造理論は存在しないらしい?

* $\ddot{\nu}$ は本当に負か？ → 過去にも観測例があった

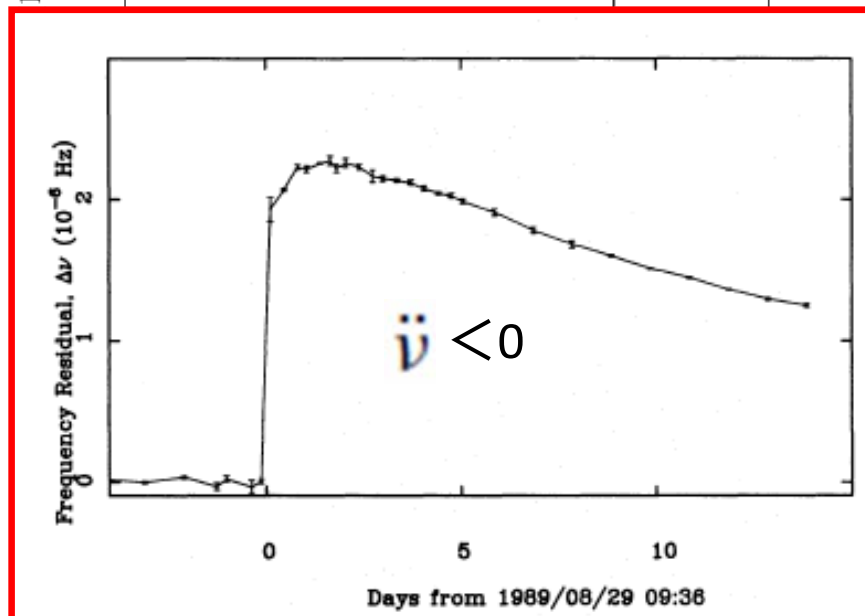
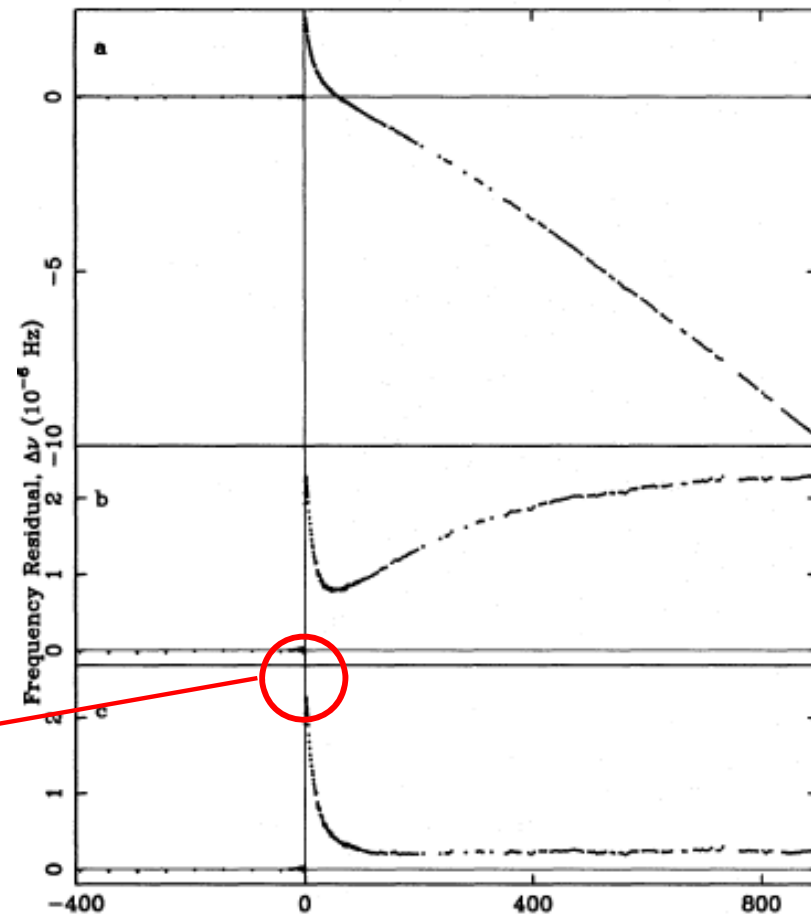


Mon. Not. R. Astron. Soc. **265**, 1003–1012 (1993)

23 years of Crab pulsar rotational history

A. G. Lyne, R. S. Pritchard and F. Graham Smith

University of Manchester, Nuffield Radio Astronomy Laboratories, Jodrell Bank, Macclesfield, Ch



今後どうなるか？

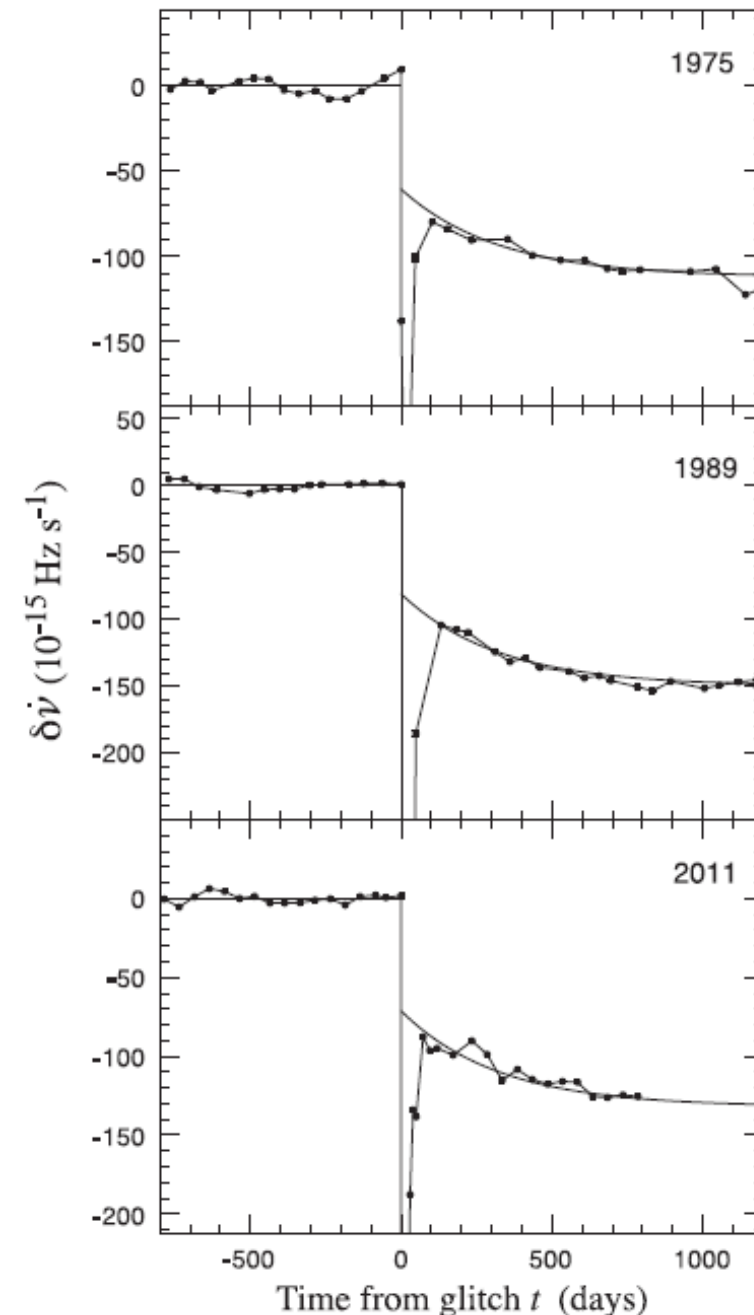
Recovery after the glitch

2 phases

- (1) Rapid recovery ~20-100 days
- (2) Slow exponential recovery with characteristic time ~ 320 days

$$\delta\dot{\nu} = \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ \Delta\dot{\nu}_p \times (0.46 \times \exp(-t/320) - 1.0) & \text{if } t > 0, \end{cases}$$

現在、glitchから約60日が経過したところ。
回復には今後2,3年かかるだろう

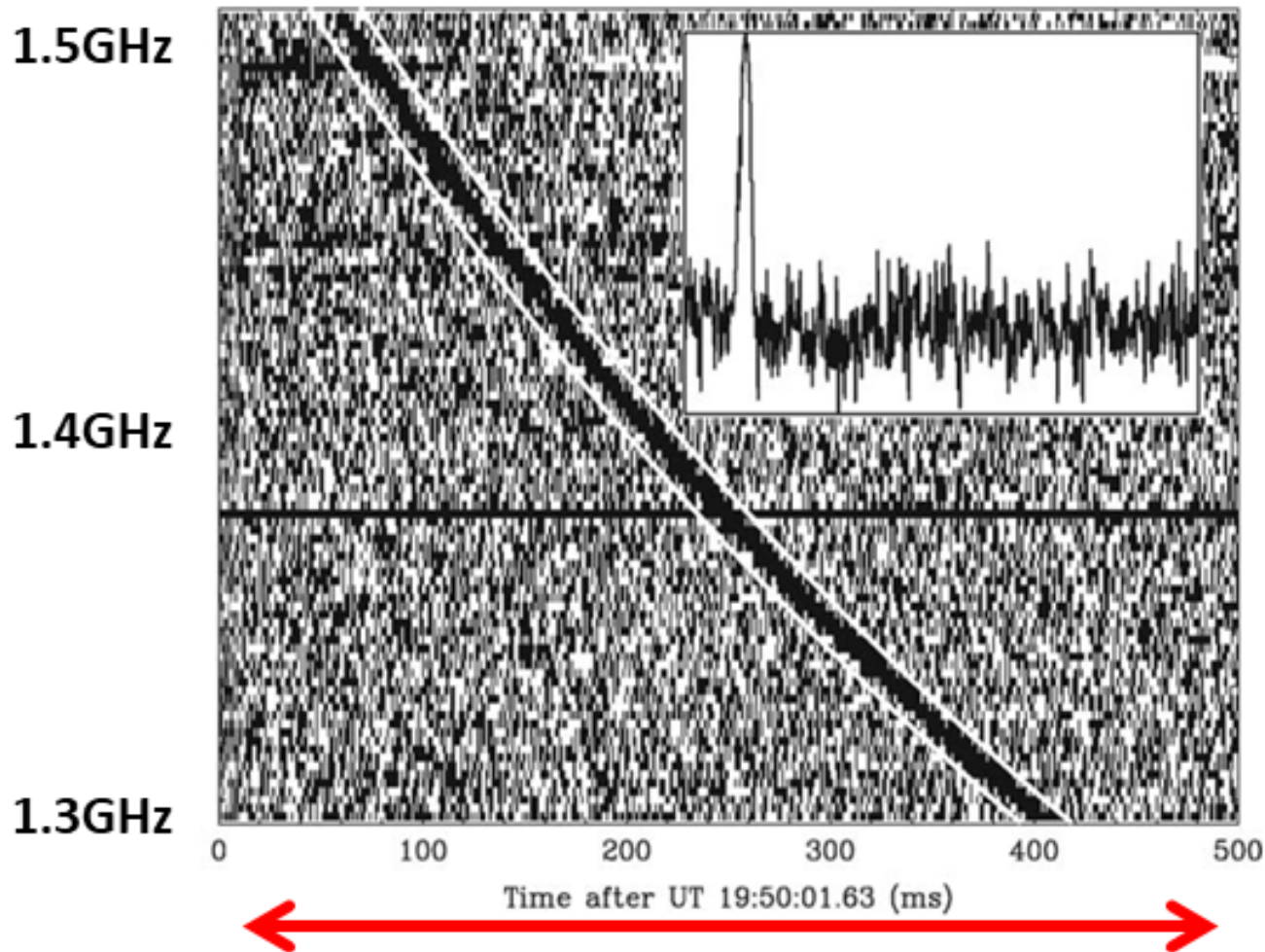


新しい試みについて

② 日本最初のFRB探索の試み → 2017.3天文学会poster資料参照

FRB(Fast Radio Burst)の発見

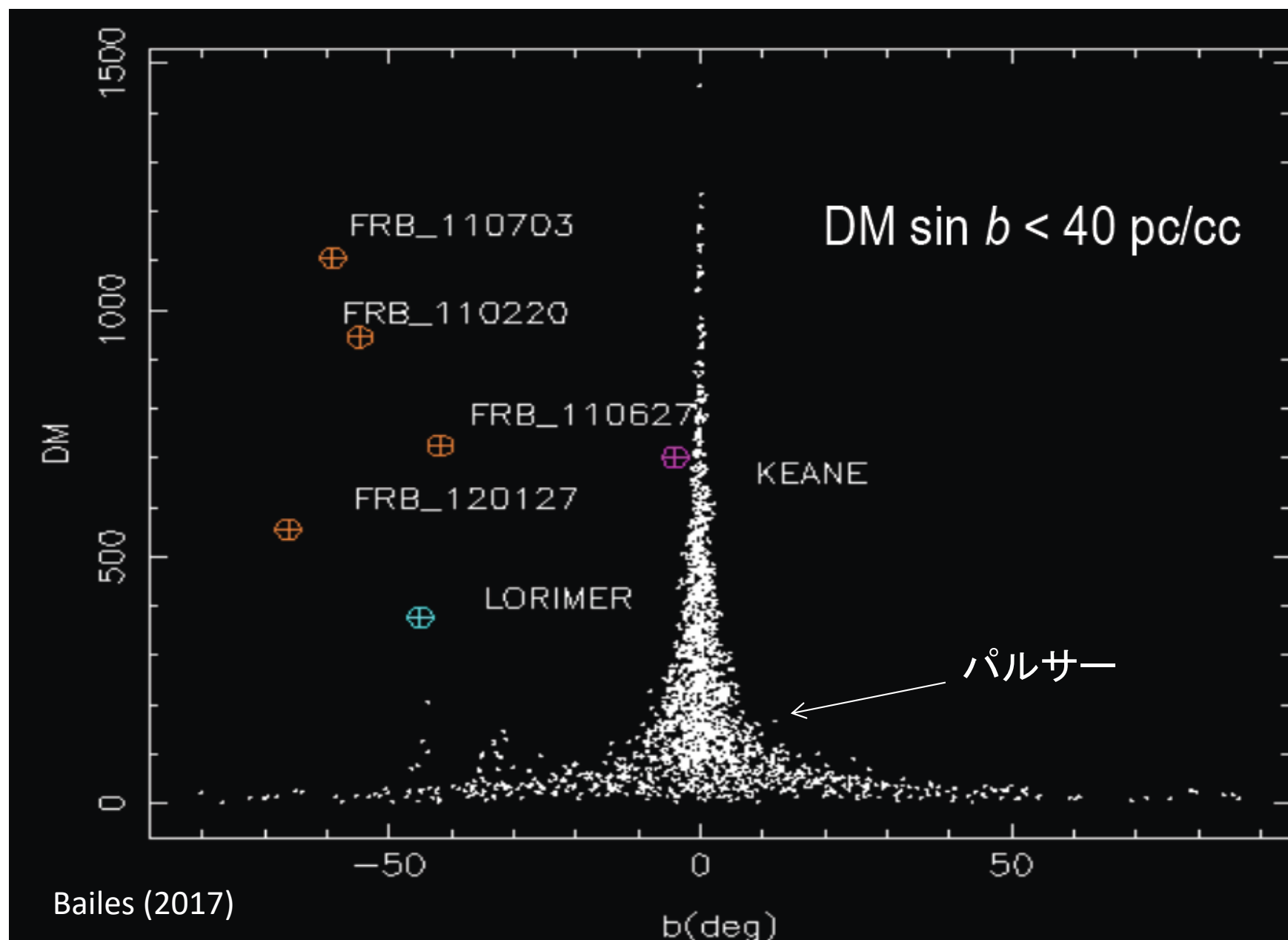
(Lorimer et al., 2007, Science)



↑DM ~ 375 pc cm $^{-3}$

DM ~ 375 pc cm $^{-3}$ は銀河系内の電波源と考えるには高すぎる。

FRBのDMはパルサーのDMの銀河緯度依存性とははっきり違う



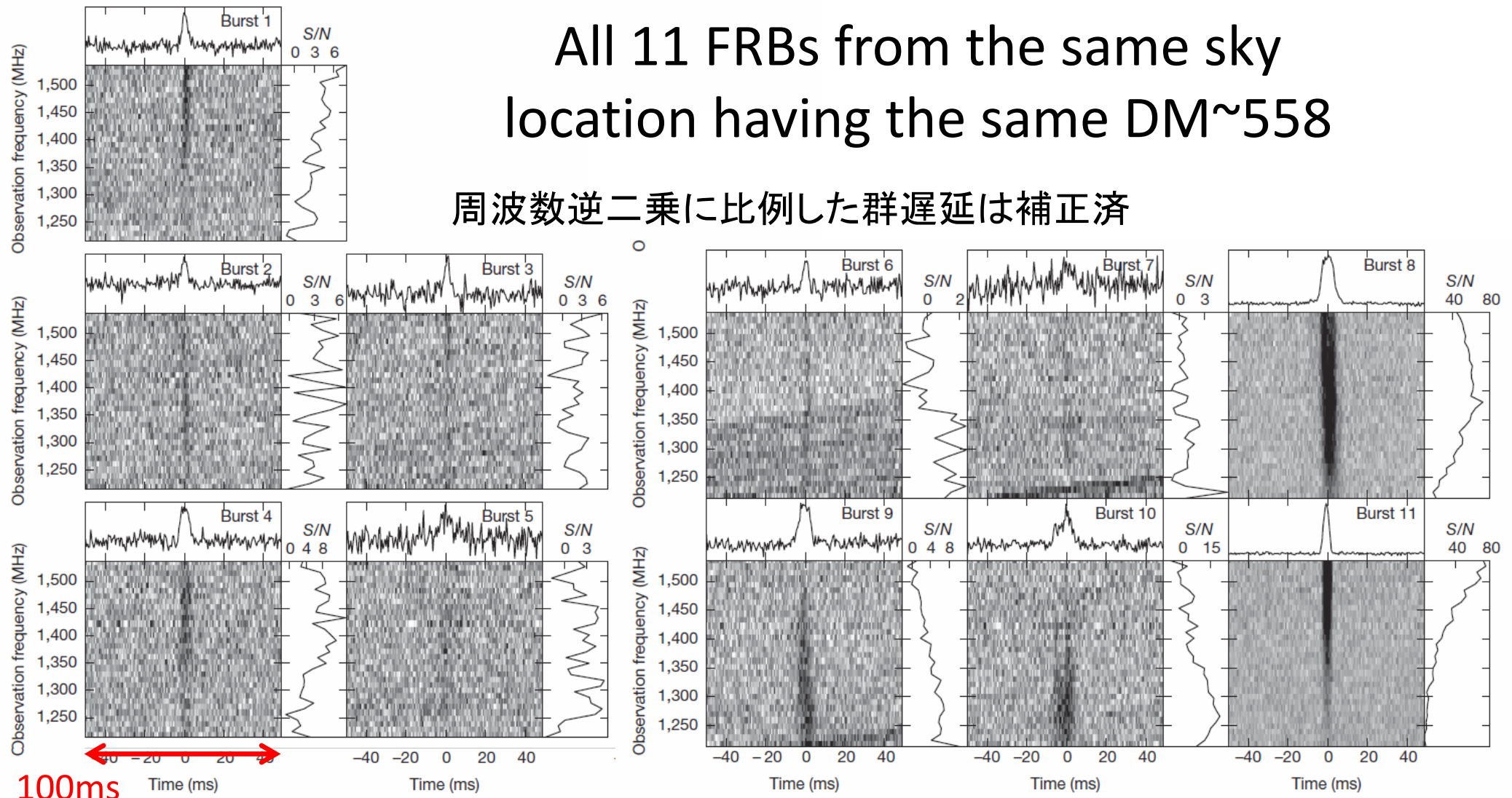
銀河緯度

A repeating fast radio burst

L. G. Spitler¹, P. Scholz², J. W. T. Hessels^{3,4}, S. Bogdanov⁵, A. Brazier^{6,7}, F. Camilo^{5,8}, S. Chatterjee⁶, J. M. Cordes⁶, F. Crawford⁹, J. Deneva¹⁰, R. D. Ferdman², P. C. C. Freire¹, V. M. Kaspi², P. Lazarus¹, R. Lynch^{11,12}, E. C. Madsen², M. A. McLaughlin¹², C. Patel², S. M. Ransom¹³, A. Seymour¹⁴, I. H. Stairs^{2,15}, B. W. Stappers¹⁶, J. van Leeuwen^{3,4} & W. W. Zhu¹

All 11 FRBs from the same sky
location having the same $DM \sim 558$

周波数逆二乗に比例した群遅延は補正済



A direct localization of a fast radio burst and its host

S. Chatterjee¹, C. J. Law², R. S. Wharton¹, S. Burke-Spolaor^{3,4,5}, J. W. T. Hessels^{6,7}, G. C. Bower⁸, J. M. Cordes¹, S. P. Tendulkar⁹, C. G. Bassa⁶, P. Demorest³, B. J. Butler³, A. Seymour¹⁰, P. Scholz¹¹, M. W. Abruzzo¹², S. Bogdanov¹³, V. M. Kaspi⁹, A. Keimpema¹⁴, T. J. W. Lazio¹⁵, B. Marcote¹⁴, M. A. McLaughlin^{4,5}, Z. Paragi¹⁴, S. M. Ransom¹⁶, M. Rupen¹¹, L. G. Spitler¹⁷ & H. J. van Langevelde^{14,18}

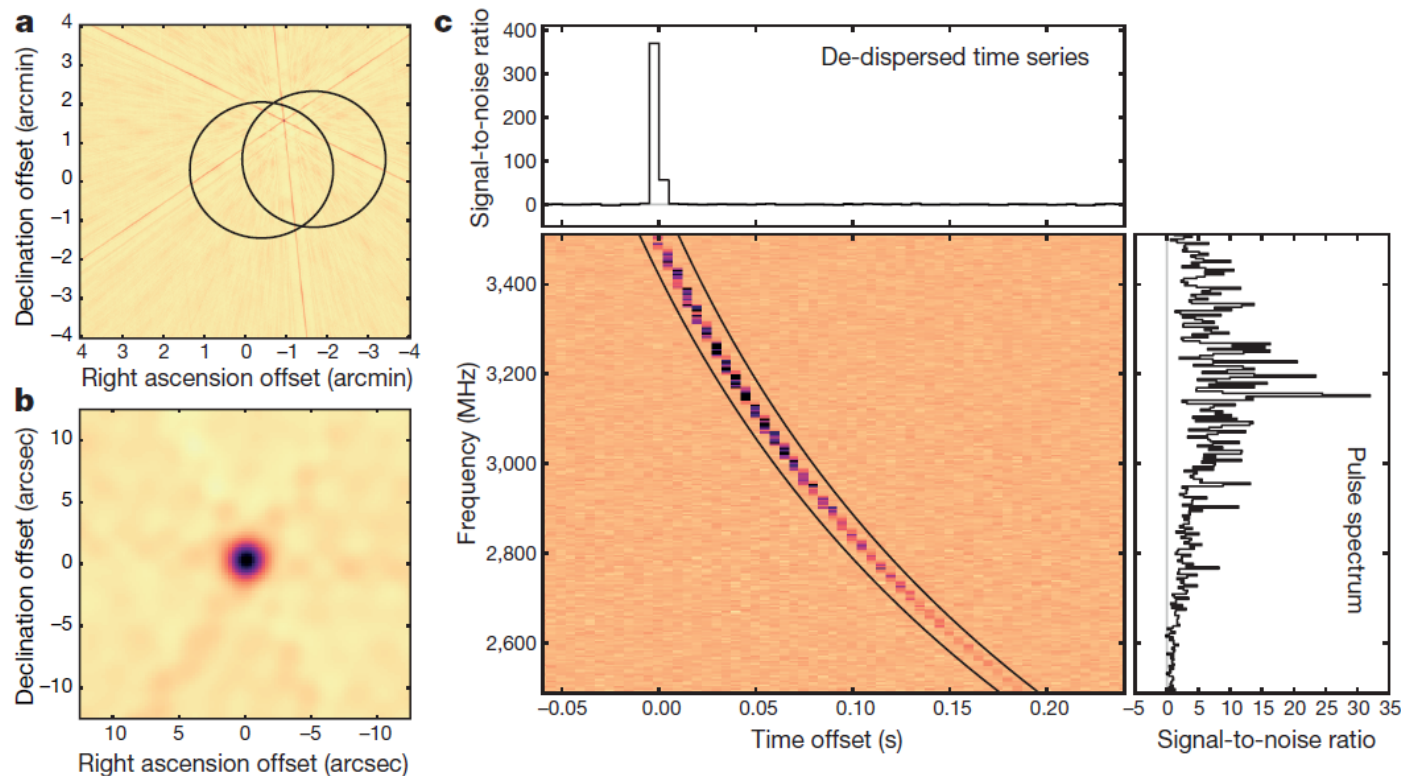


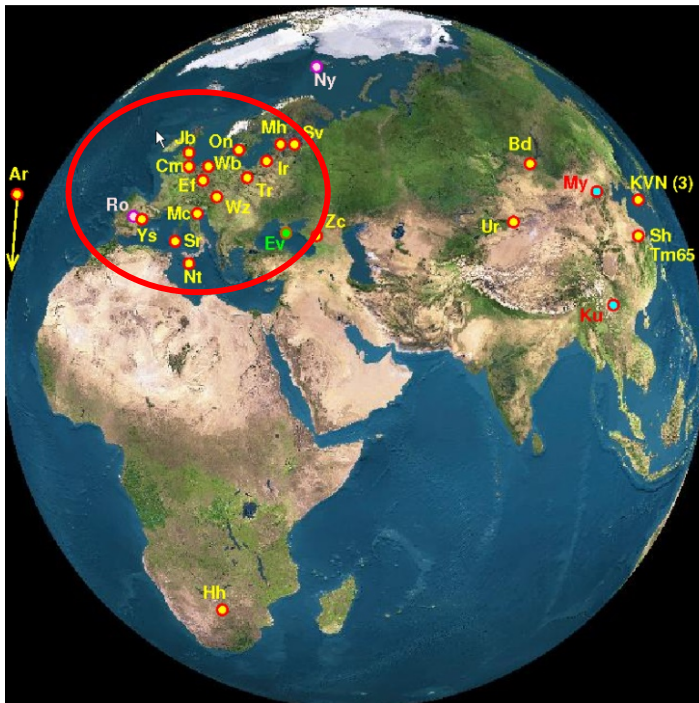
Figure 1 | VLA detection of FRB 121102.

→ arcsec uncertainty

The Repeating Fast Radio Burst FRB 121102 as Seen on Milliarcsecond Angular Scales

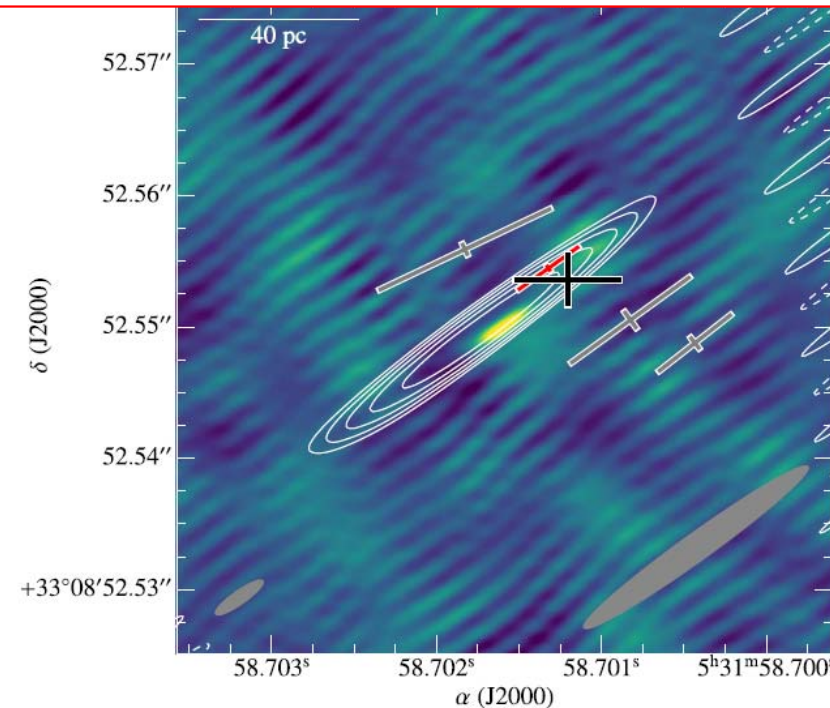
B. Marcote¹, Z. Paragi¹, J. W. T. Hessels^{2,3}, A. Keimpema¹, H. J. van Langevelde^{1,4}, Y. Huang^{5,1}, C. G. Bassa², S. Bogdanov⁶,
G. C. Bower⁷, S. Burke-Spolaor^{8,9,10}, B. J. Butler⁸, R. M. Campbell¹, S. Chatterjee¹¹, J. M. Cordes¹¹, P. Demorest⁸,
M. A. Garrett^{12,4,2}, T. Ghosh¹³, V. M. Kaspi¹⁴, C. J. Law¹⁵, T. W. Li¹⁶, M. M. MacLeod^{9,10}, S. M. Ransom¹⁷, G. S. S. ¹³,
P. Scholz¹⁸, A. Seymour¹³, A. Siemion¹

4 crosses (red and gray) show the positions of 4 bursts
A black cross shows their average.



European VLBI network (EVN)

http://www.evlbi.org/intro/evn_map.png



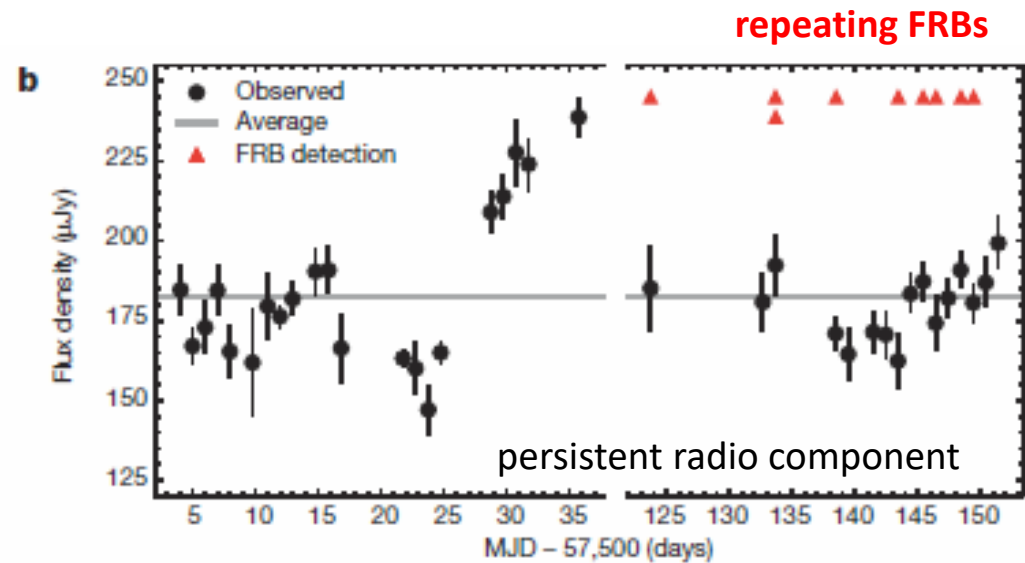
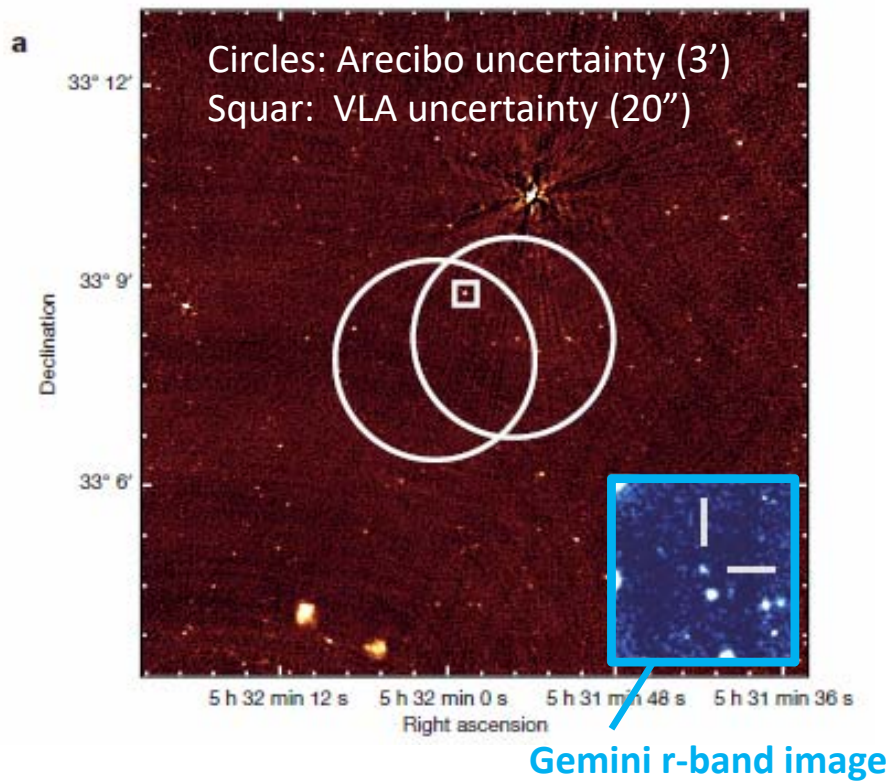
Persistent at 1.7GHz: white contours

Persistent at 5GHz: color scale

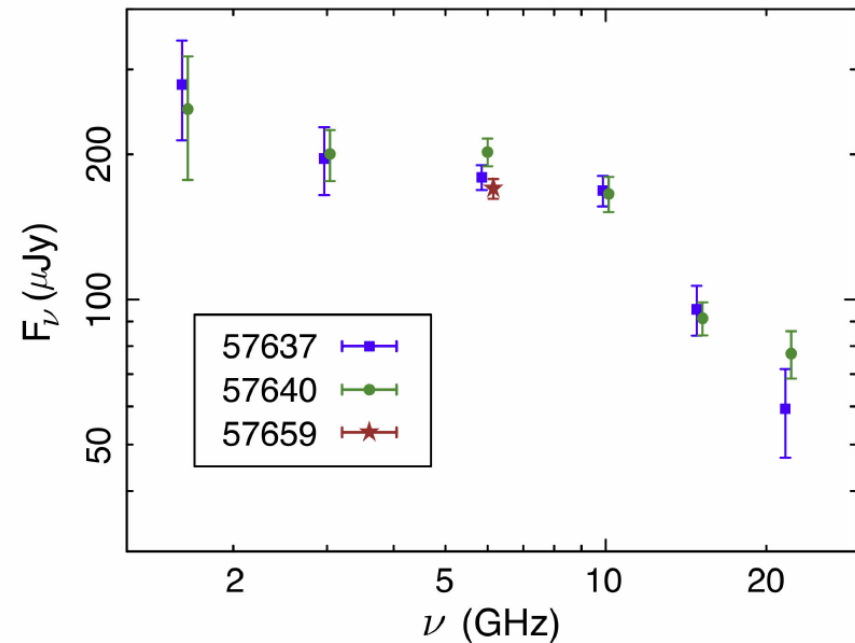
→ milliarcsec uncertainty

FRB 121102

In addition to the repeating FRBs, a persistent counterpart is found (radio & optical).

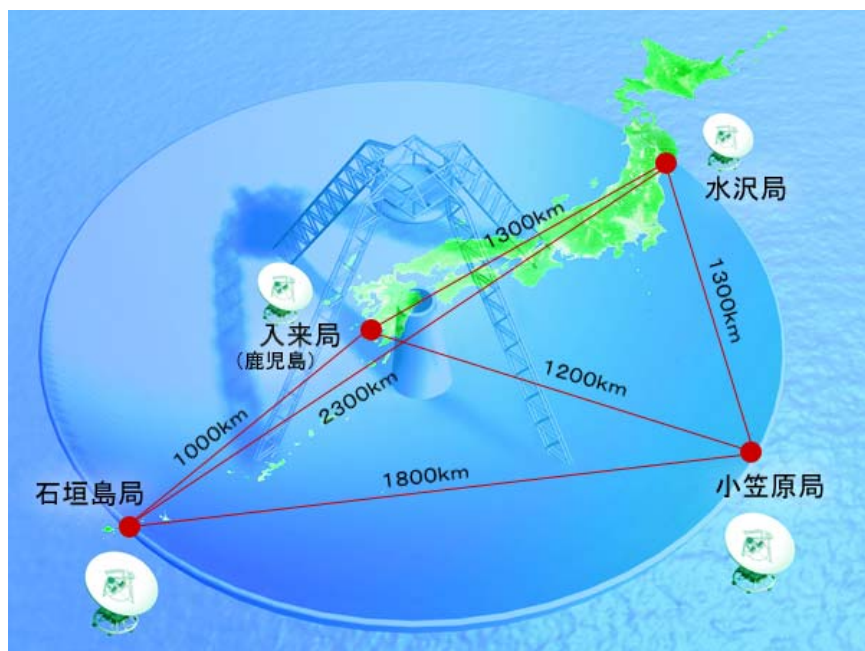


VLA spectrum of the persistent counterpart to FRB121102.
The spectrum is non-thermal and inconsistent with a single power law.

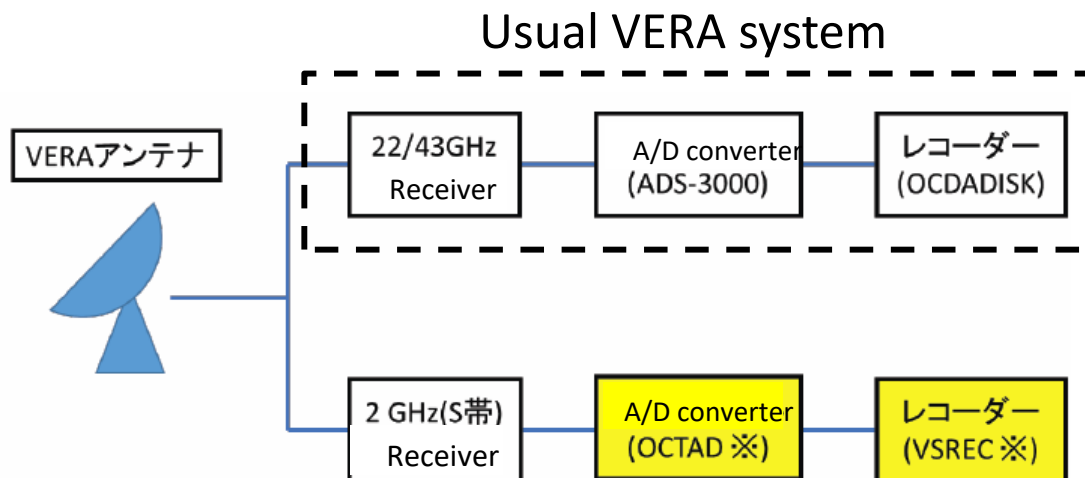


新しい試みについて

② 日本最初のFRB探索の試み



通常の VERA 観測は22、43GHz帯で行われるが、FRB探索には周波数が高すぎる。我々は測地観測に使われる2GHz帯のシステムを活用し、VERA22/43GHzの通常観測に並行したFRB探索実行を検討している。

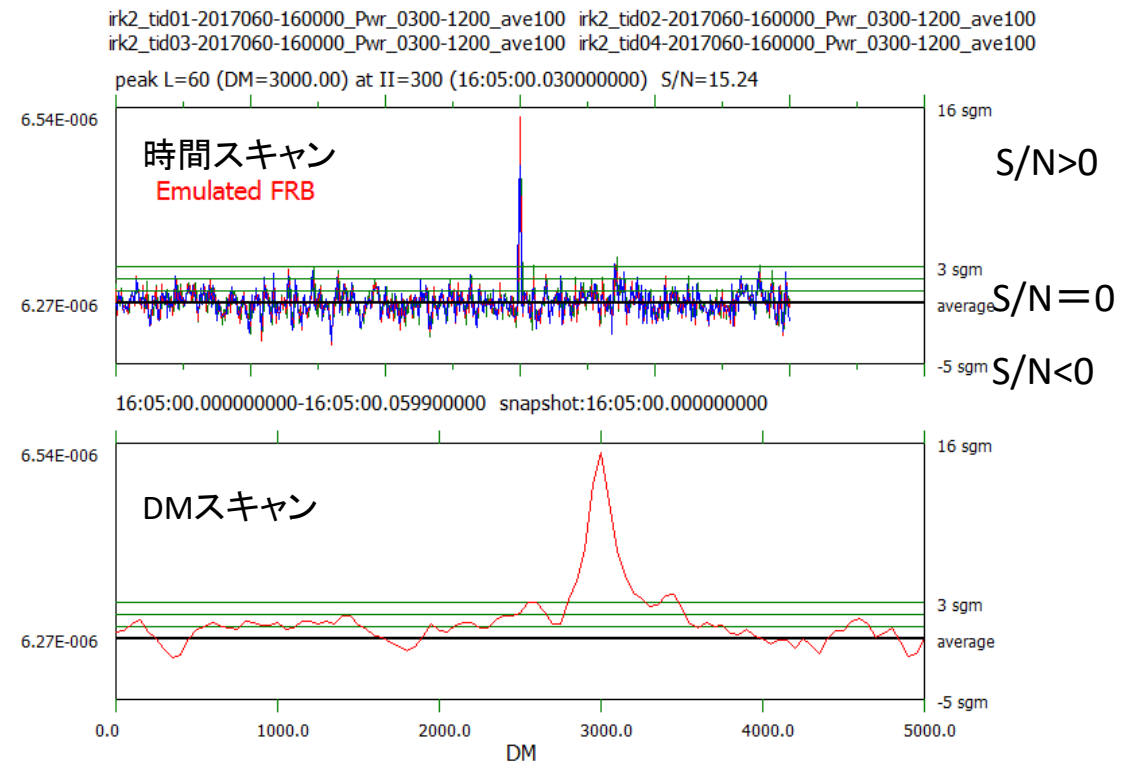
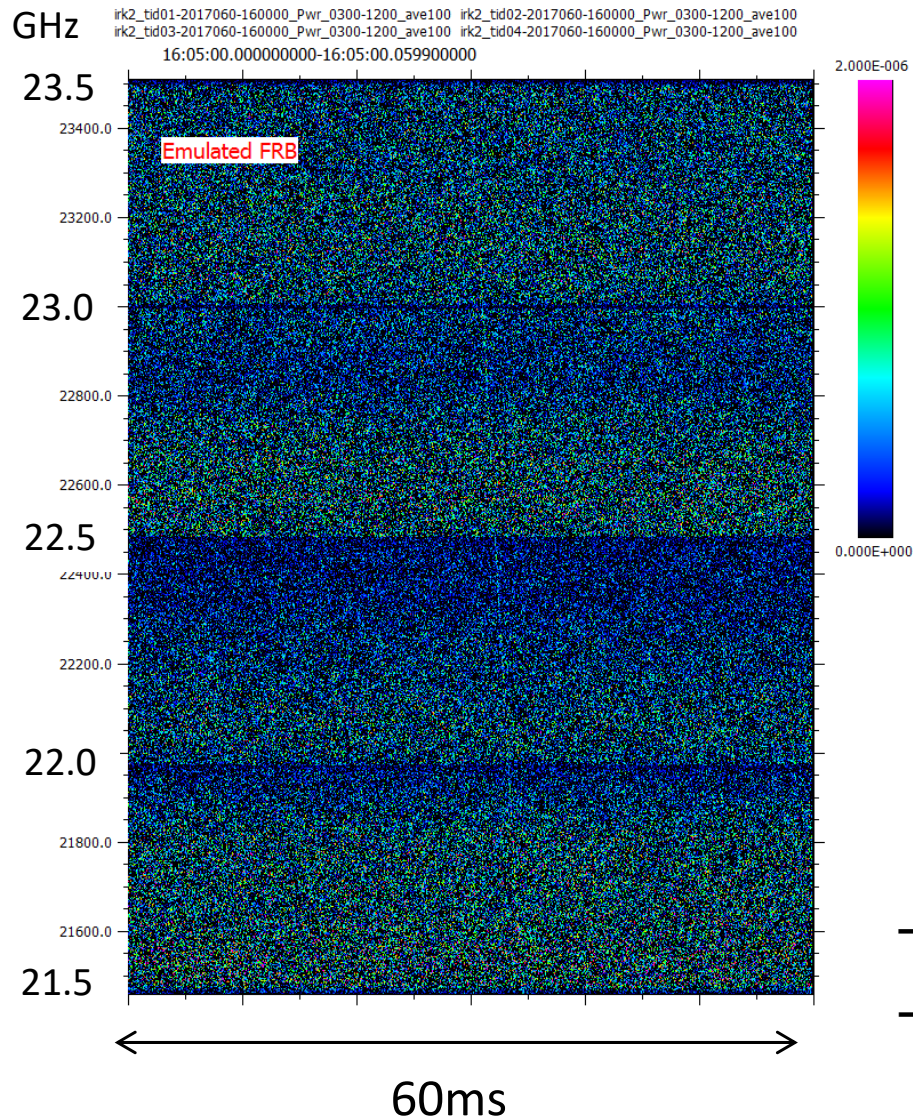


2GHzシステムは22/43GHzシステムと同時に並列に動作させることが可能であり、22/43GHzの観測スケジュールで決まる視野に対してFRB探索を実施する。

2GHz帯による本格的FRB探索は来年度以降に開始予定だが、それに先行する試験観測として、VERAによるluminous gap transient PTF10iamの準定常電波源サーチ (FRB121102での準定常電波源発見にヒント。檜山さんのアイデア*でyoung neutron starのありそうな天体) で得られた22GHzデータ2時間×2回のなかにFRBが見出されないか、調べてみた。

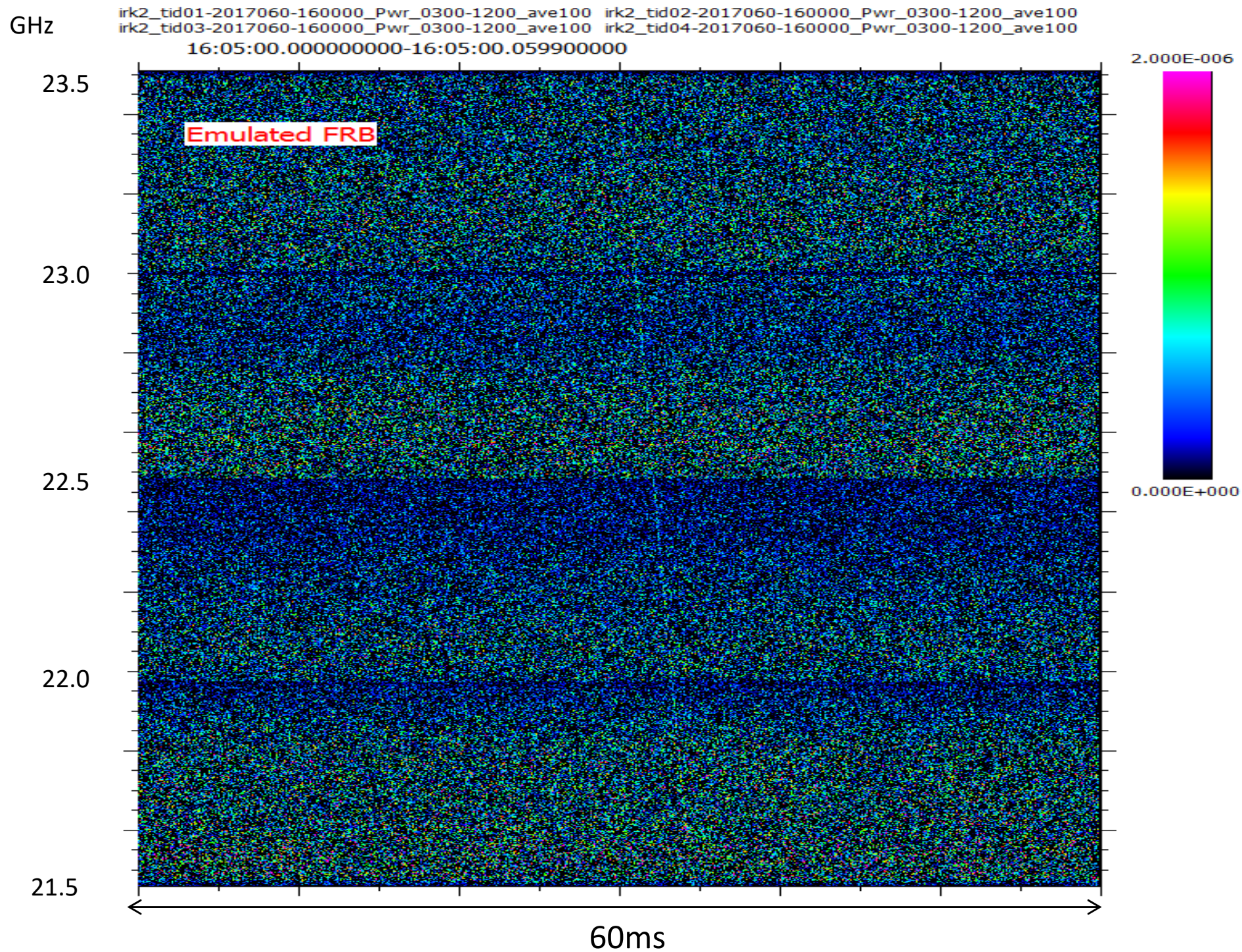
期待されるFRB (S/N=15, DM=3000を想定)

*arXiv:1701.04815



上: 正しいDM値(=3000)を用いてdedispersionした場合に
得られるパルス波形(横軸は時間、50ミリ秒間)。
下: 上で得られたパルス時刻を固定し、DM値を0から5000
まで振って得られるパルス強度変化。3000にピークあり。

期待されるFRB (S/N=15, DM=3000を想定)

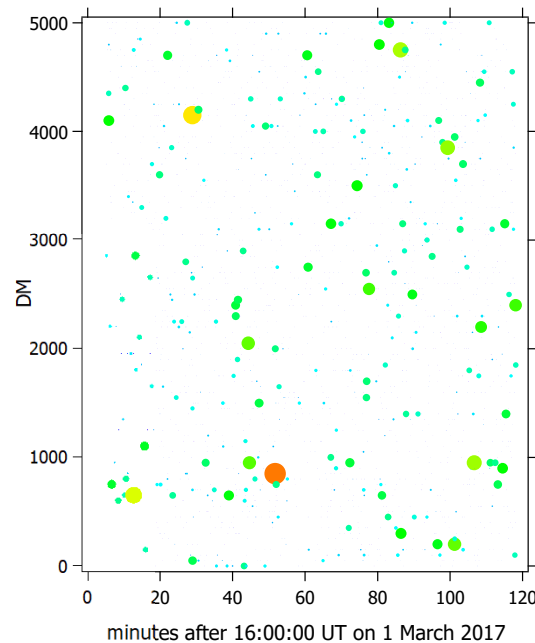


FRB探し(日本初!)

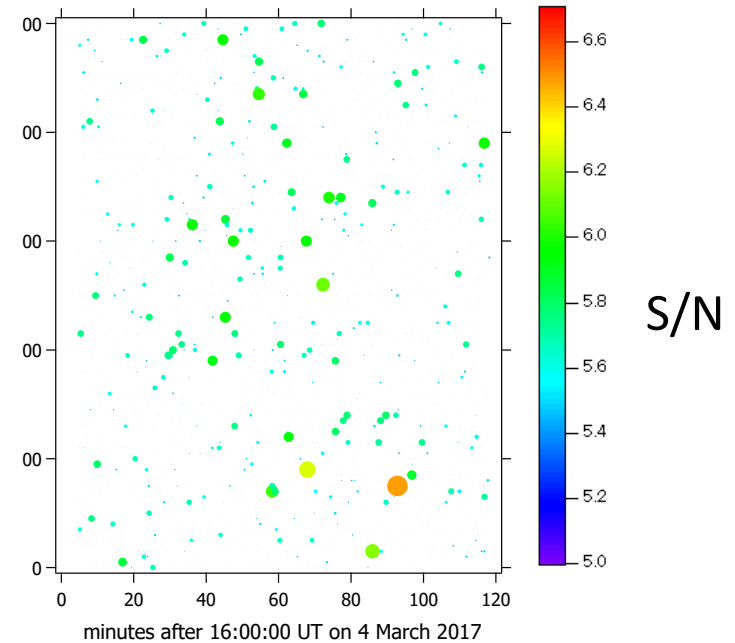
VERAによるVLBI観測は3/1、4の二日、各2時間行われた。その生データについて、時間・DMの2次元スキャンの結果から、 $S/N > 5$ のFRB候補を拾い出した。

preliminary

2017/03/01



2017/03/04

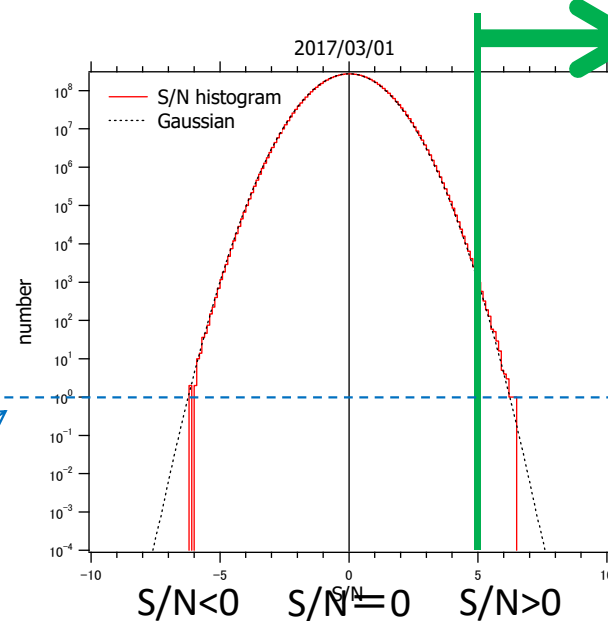


FRB候補($S/N > 5$)

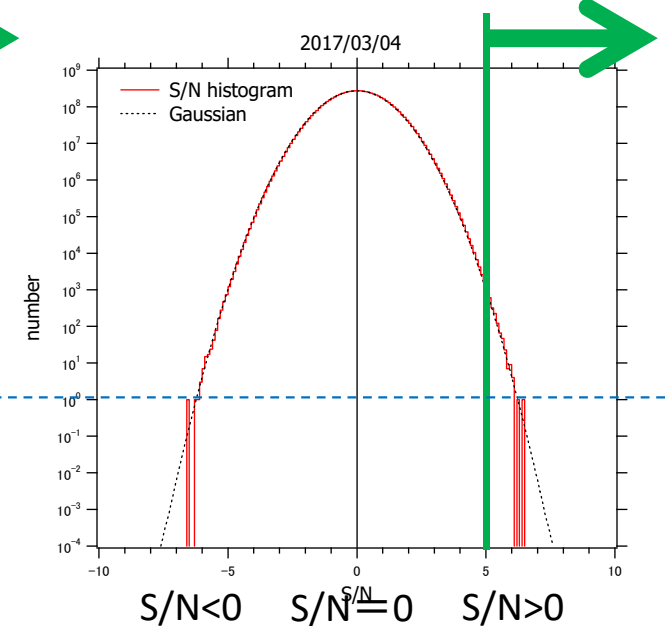
全ての $100\mu\text{s}$ データ点*
(全時間×DMスキャン
500個)の S/N を求め、
 S/N に対する数分布を示
した結果。綺麗に正規
分布に乗る。

*2時間/ $100\mu\text{s}$ ×500=360億個

検出限界
(各期間で候補1つ)



FRB候補($S/N > 5$)

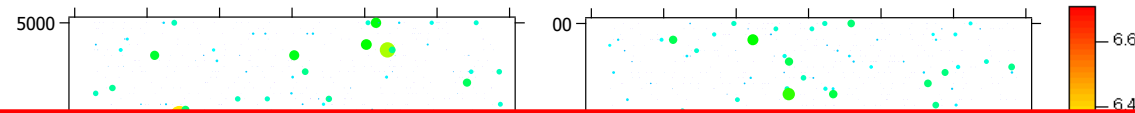


残念ながら検出されず

FRB探し(日本初!)

2017/03/01

2017/03/04



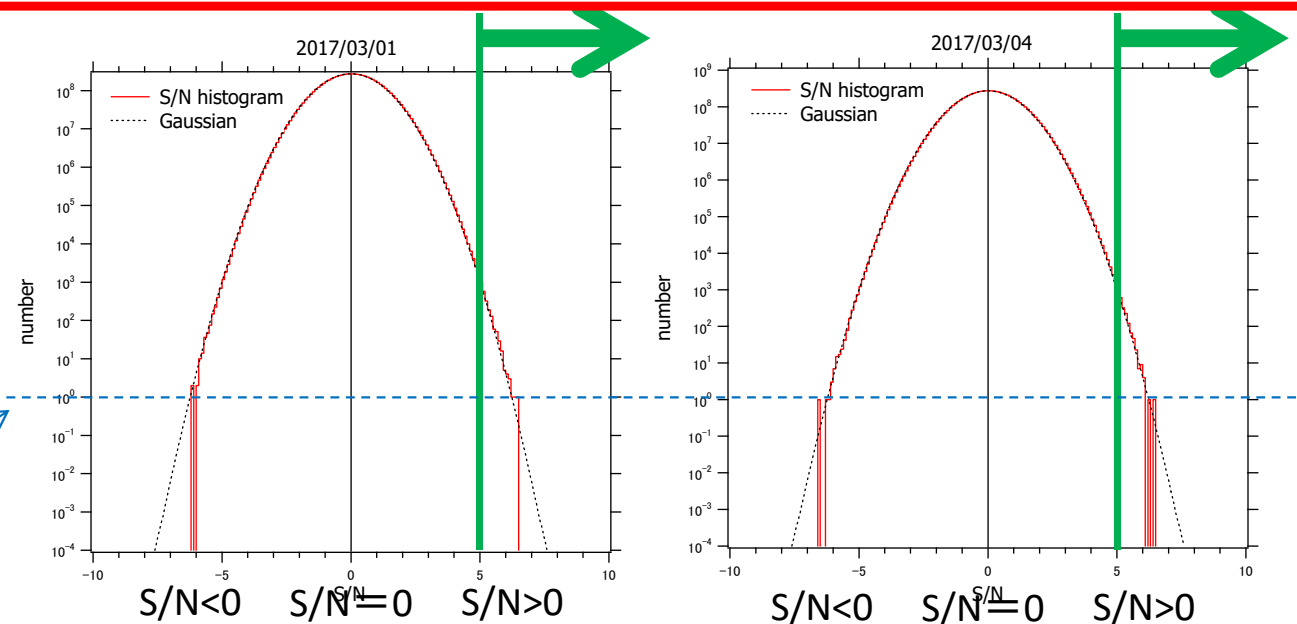
統計的に有意に「FRBを検出した」と言えるためには、 $S/N > \sim 8$ のイベントが欲しい。 $S/N=8$ は約20Jy相当であり、それ以上のFRBは検出されなかった。(時間幅100 μ 秒で積分しているので、対応するFRBのエネルギーは $20\text{Jy} \times 100\mu\text{秒} = 2\text{Jy} \cdot \text{ms}$ となる。)

$$*1\text{Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$$

全ての100 μ 秒データ点*
(全時間 $\times$ DMスキャン
500個)のS/Nを求め、
S/Nに対する数分布を示
した結果。綺麗に正規
分布に乗る。

*2時間/100 μ 秒 $\times$ 500=360億個

検出限界
(各期間で候補1つ)



残念ながら検出されず

日本におけるパルサー・FRBの電波観測の現状

寺澤敏夫（理研iTHES・東大宇宙線研）

Contents:

日本での観測の歴史

新しい試みについて

- ① 2017. 11. 7のCrabパルサー大グリッチ（観測史上最大）の検出
- ② 日本最初のFRB探索の試み

付録

W210c

Fast Radio Burst(FRB)

寺澤敏夫¹、本間希樹²、木坂将大³、

関戸衛⁵、岳藤一宏⁵、北元⁶、

1:理研、2:国立天文台、3:青山学院大学、4:山口大学、

Fast Radio Burst(FRB)は大きなdispersion measure (DM)～数百-数千 pc cm⁻³を持つ低周波帯(数GHz以下)での短時間(ミリ秒程度)の電波バーストである。FRBの正体は依然不明だが、何らかのコンパクトな天体現象に伴って発生したコヒーレントな電波パルスが宇宙論的距離に渡って銀河間プラズマ内を伝搬してきたものと解釈されており、ブラックホール・中性子星合体イベントなどとの関連の可能性が興味を集めている。FRBの観測は日本では未経験であるが、我々はVERAネットワークの空きチャンネルを利用した探査(2GHz帯を想定)を検討中である。

探索ソフトウェアの準備状況

青木貴弘⁴、新沼浩太郎⁴、藤澤健太⁴、
土屋史紀⁶、三澤浩昭⁶、竹内央⁷

5:情報通信研究機構、6:東北大学、7:宇宙航空研究開発機構

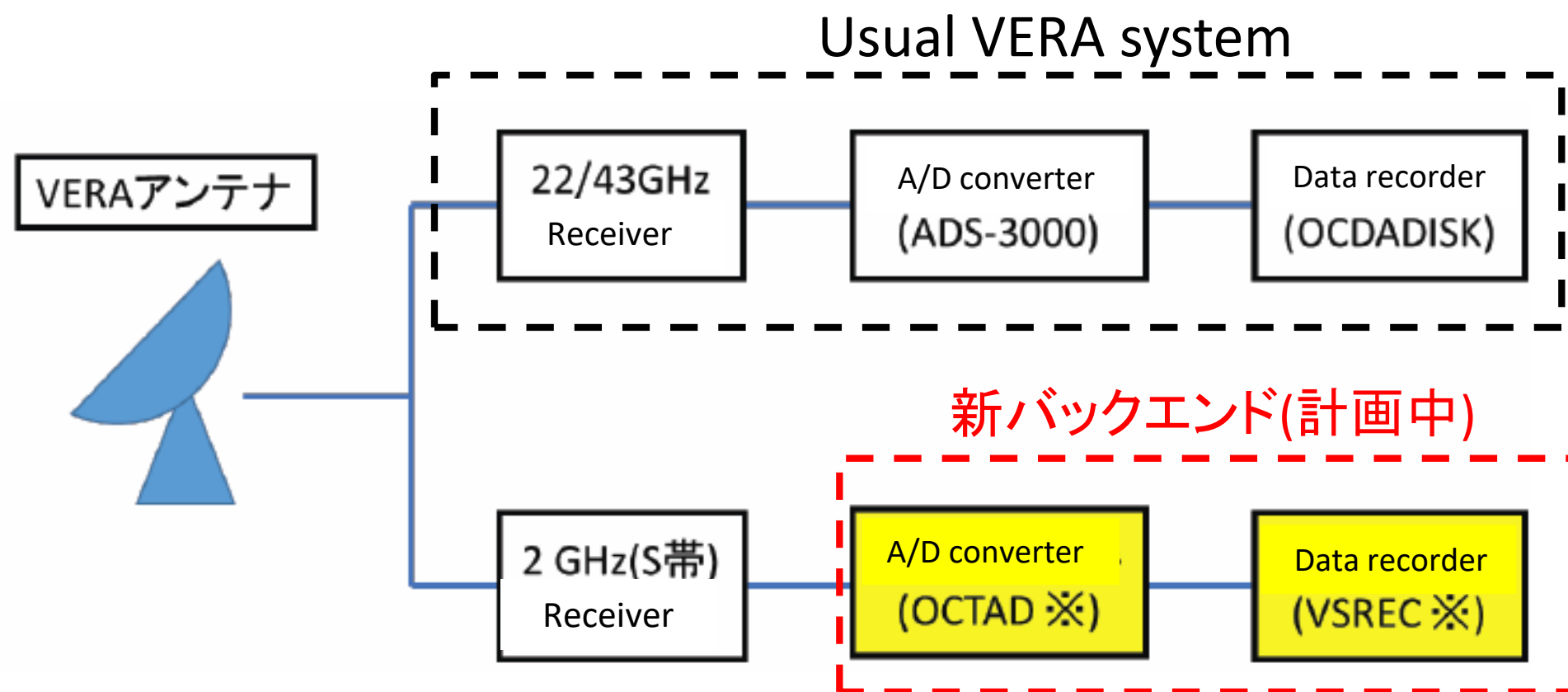
周知のように、FRBはかにパルサーの巨大電波パルスGRPと現象的に類似しており、GRP観測の経験(cf. Mikami et al., ApJ, 832:212,2016)を役立てることができる。我々は作成した擬似FRBデータを用いて、FRB探索の要となるDM最適値決定について、(1)Coherent法と(2)Incoherent法の優劣を比較した。それにより、実際のデータ解析にあたって、

- ややS/Nが悪いが高速な(2)の方法を施して候補を絞り、
- それらに対し精度は高いが遅速な(1)の方法を施す、

という手順が現実的であるとの結論を得た。



通常の VERA 観測は22、43GHz帯で行われるが、FRB探索には周波数が高すぎる。我々は測地観測に使われる2GHz帯のシステムを活用し、VERA22/43GHzの通常観測に並行したFRB探索実行を検討している。



2GHzシステムは22/43GHzシステムと同時に並列に動作させることが可能であり、22/43GHzの観測スケジュールで決まる視野に対してFRB探索を実施する。

VERA2GHzで検出可能なFRB強度・期待数の見積もり

VERA 2GHz システムの SEFD(System Equivalent Flux Density) は概ね 10^4Jy である (開口能率 30%、システム温度 300K 常温)。バンド幅 $B=200\text{MHz}$ 、積分時間 $T=1\text{ms}$ の場合、ノイズレベル N は

$$N = \frac{1}{0.88} \frac{SEFD}{\sqrt{2BT}} = \frac{1}{0.88} \frac{10^4 \text{Jy}}{\sqrt{2 \times (2 \times 10^8) \times 10^{-3}}} \sim 18 \text{ Jy} \quad (1)$$

と見積もられる (ここで分母の 0.88 は 2 ビット記録に対する量子化効率である。)。これまでに報告された 18 個の FRB のうち、最も明るい FRB150807 のフラックス $S=120\text{Jy}$ と同程度の FRB が VERA システムに入感すれば、 $S/N=120/18=6.7$ で検出されることになる。一方、それ以外の 17 個の FRB は $0.3 \sim 30\text{Jy}$ であったので、残念ながら VERA2GHz システムでは検出が困難である。ここで、 $S \geq 120\text{Jy}$ の FRB 発生率 $R_{>120\text{Jy}}$ は全 FRB 発生率 R_{FRB} の $1/18$ と仮定し、 $R_{\text{FRB}}=7 \times 10^3 (\text{day} \cdot \text{sky})^{-1}$ とすると (Champion et al., 2016)、 $R_{>120\text{Jy}} = 400 (\text{day} \cdot \text{sky})^{-1}$ を得る。2GHz で VERA20m 鏡の視野は $(\lambda/D)^2 = (15\text{cm}/20\text{m})^2 = 5.6 \times 10^{-5} \text{str}$ であるので、予想 FRB 検出率は $S \geq 120\text{Jy}$ に対し、

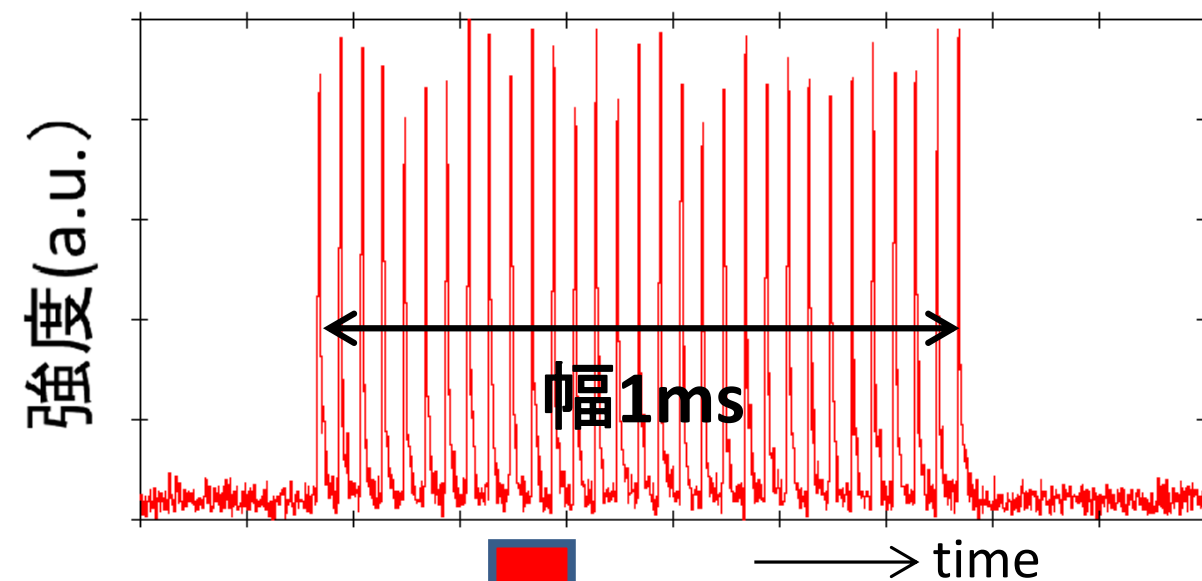
$$400 \times \frac{5.63 \times 10^{-5}}{4\pi} \text{ day}^{-1} = 1.8 \times 10^{-3} \text{ day}^{-1} = 0.75 \times 10^{-4} \text{ hour}^{-1} \quad (2)$$

となる。VERA 2GHz の新バックエンドの完成後は、通常の VLBI 観測と相乗りで FRB 探索を行う予定であり、年間合計 2000 時間のデータ蓄積が可能とすれば、年あたり 0.15 個の FRB 検出を狙うことになる。なかなか厳しい数字であるが、発生数の見積もりには大幅な不定性があるし、数年間の観測の結果、不検出であっても FRB 発生率の上限決定には寄与できる。

擬似FRBデータの生成(DM=300 pc cm⁻³の例)

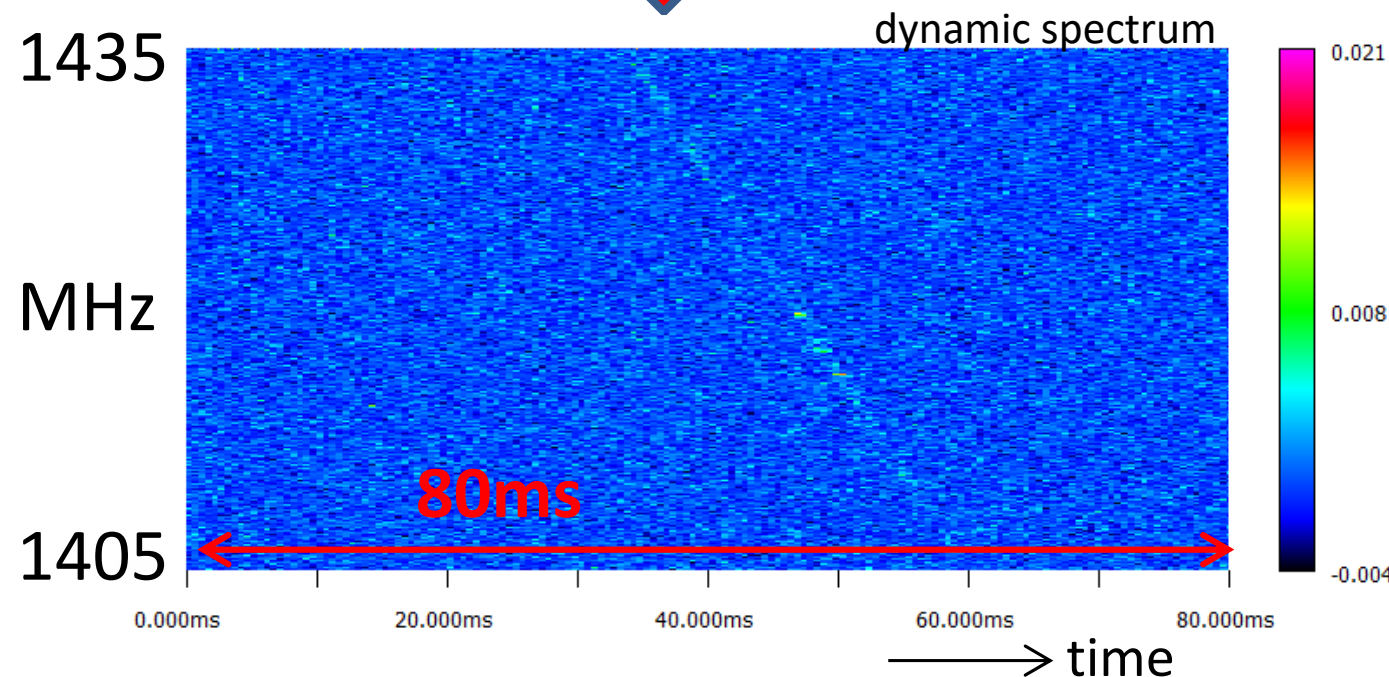
Model-1

Crab巨大電波パルスの観測データ(幅30 μ 秒)を31個並べる。鹿島のデータをもとにしたので帯域が1405-1435MHzになっているが、これは適宜調整可能。



DM=300pc cm⁻³相当のcoherent anti-dedispersion*を施す

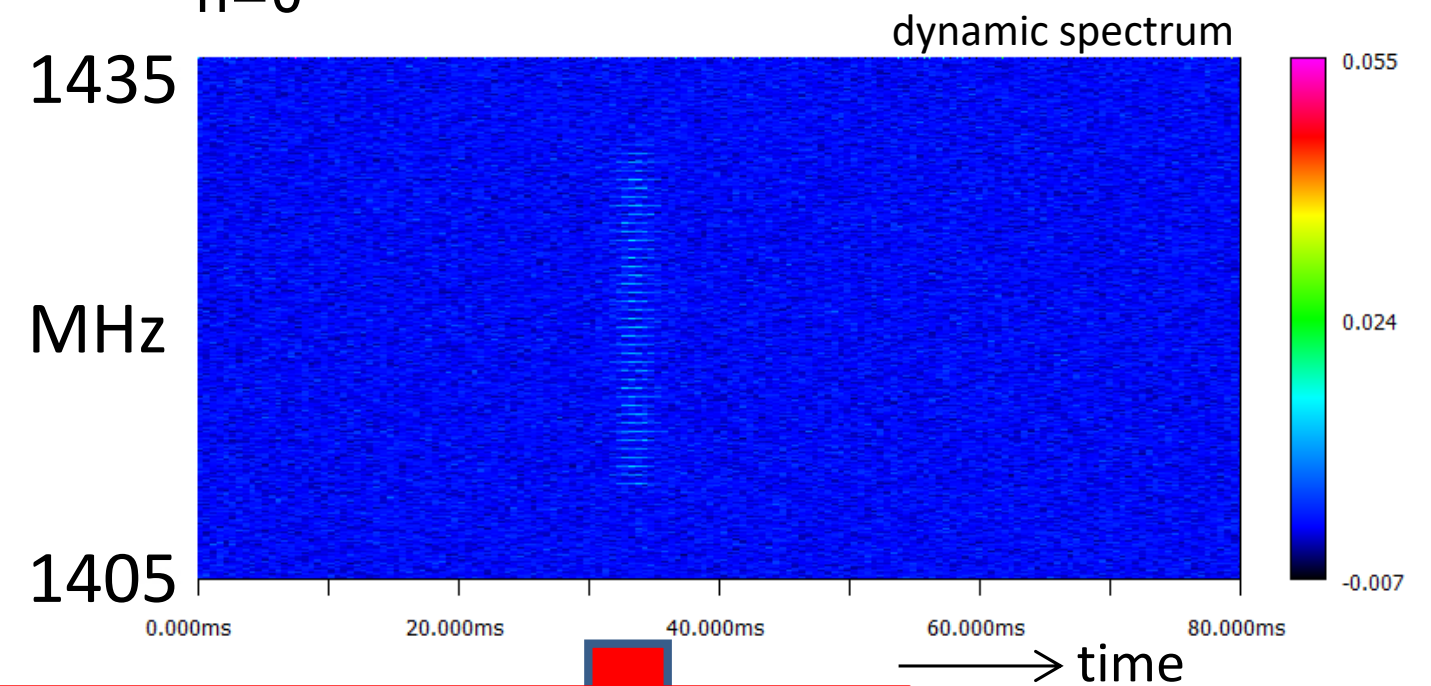
(適宜、乱数によるノイズを加える)



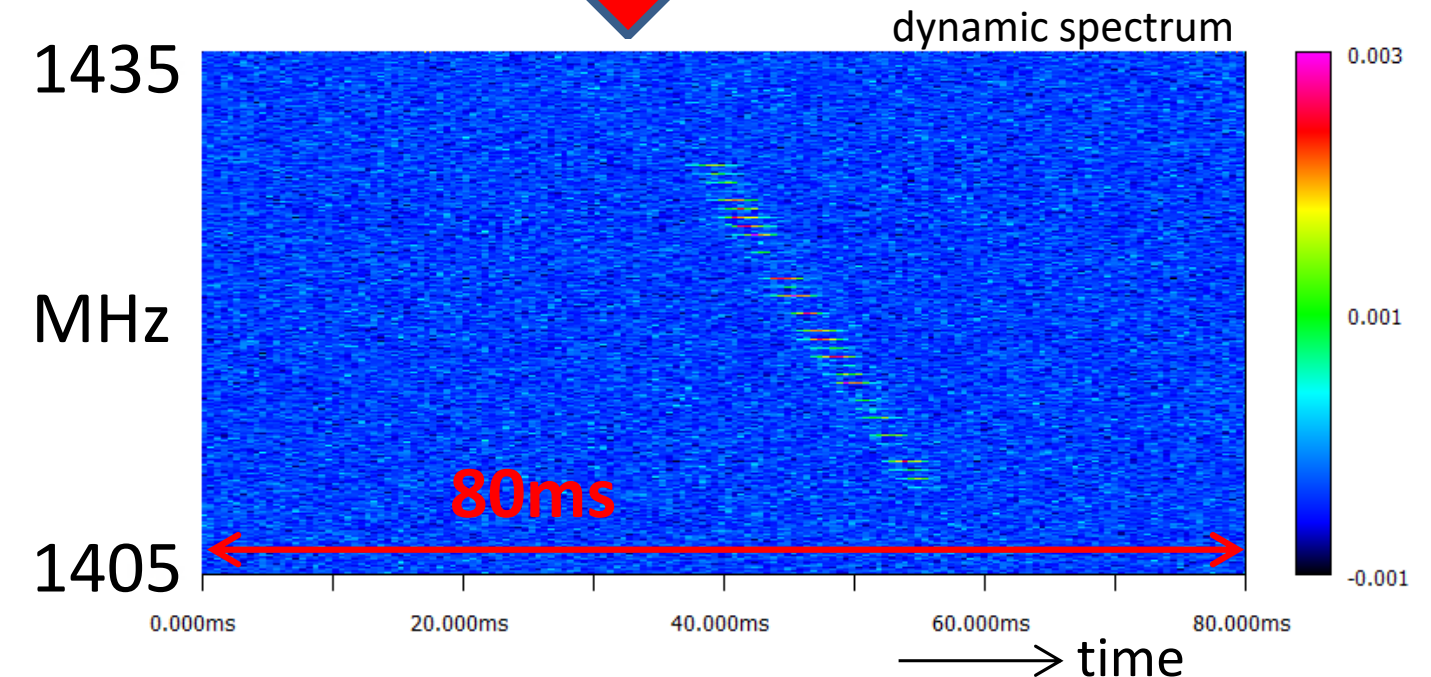
Model-2

1410-1430MHzに間隔0.5MHz の41個のGauss型パルス(幅 $\tau=1$ ms)を作って合成する。

$$\sum_{n=0}^{40} \exp(-t^2/2\tau^2) \exp(2\pi f_n t)$$



*パネル7に注記



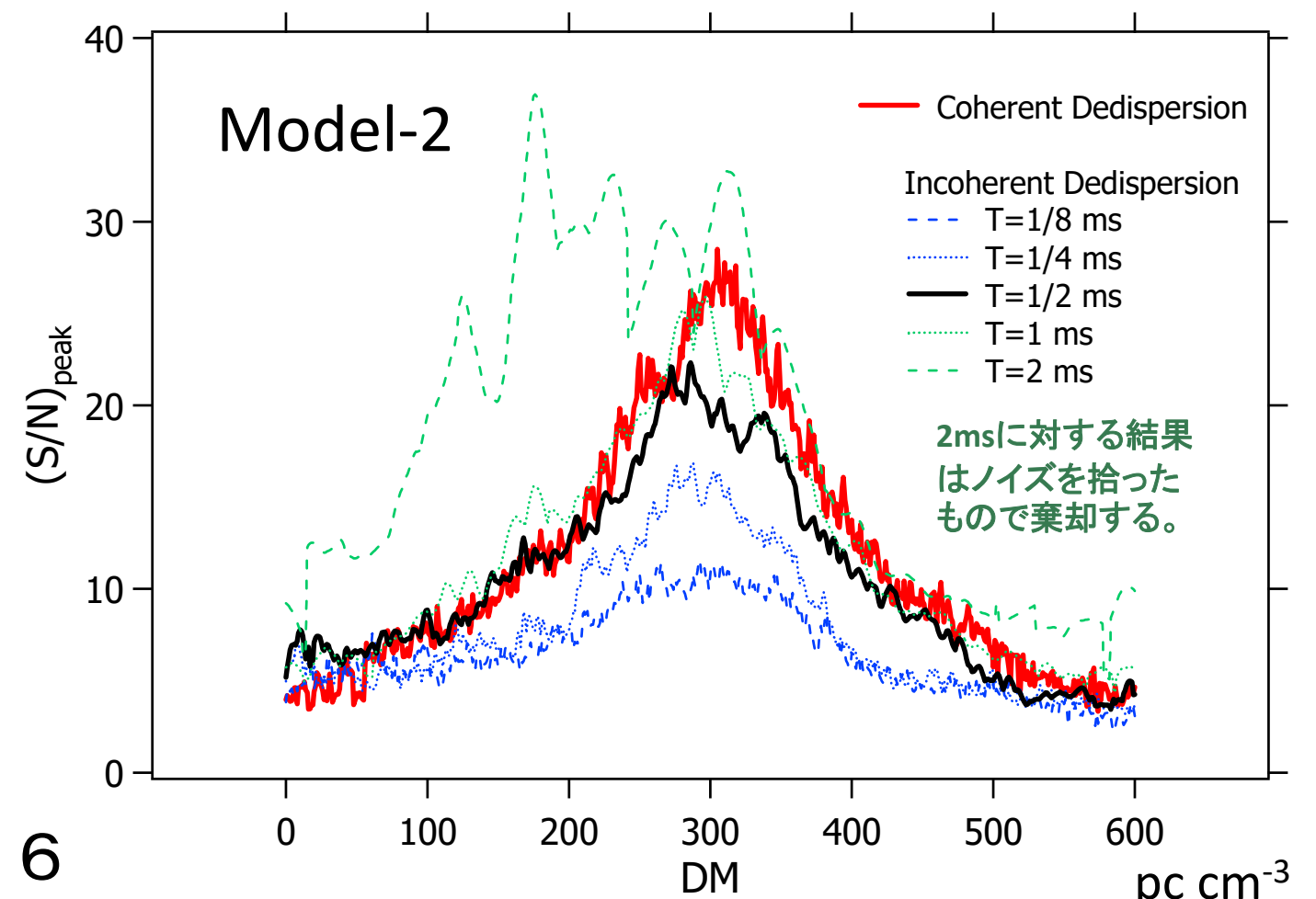
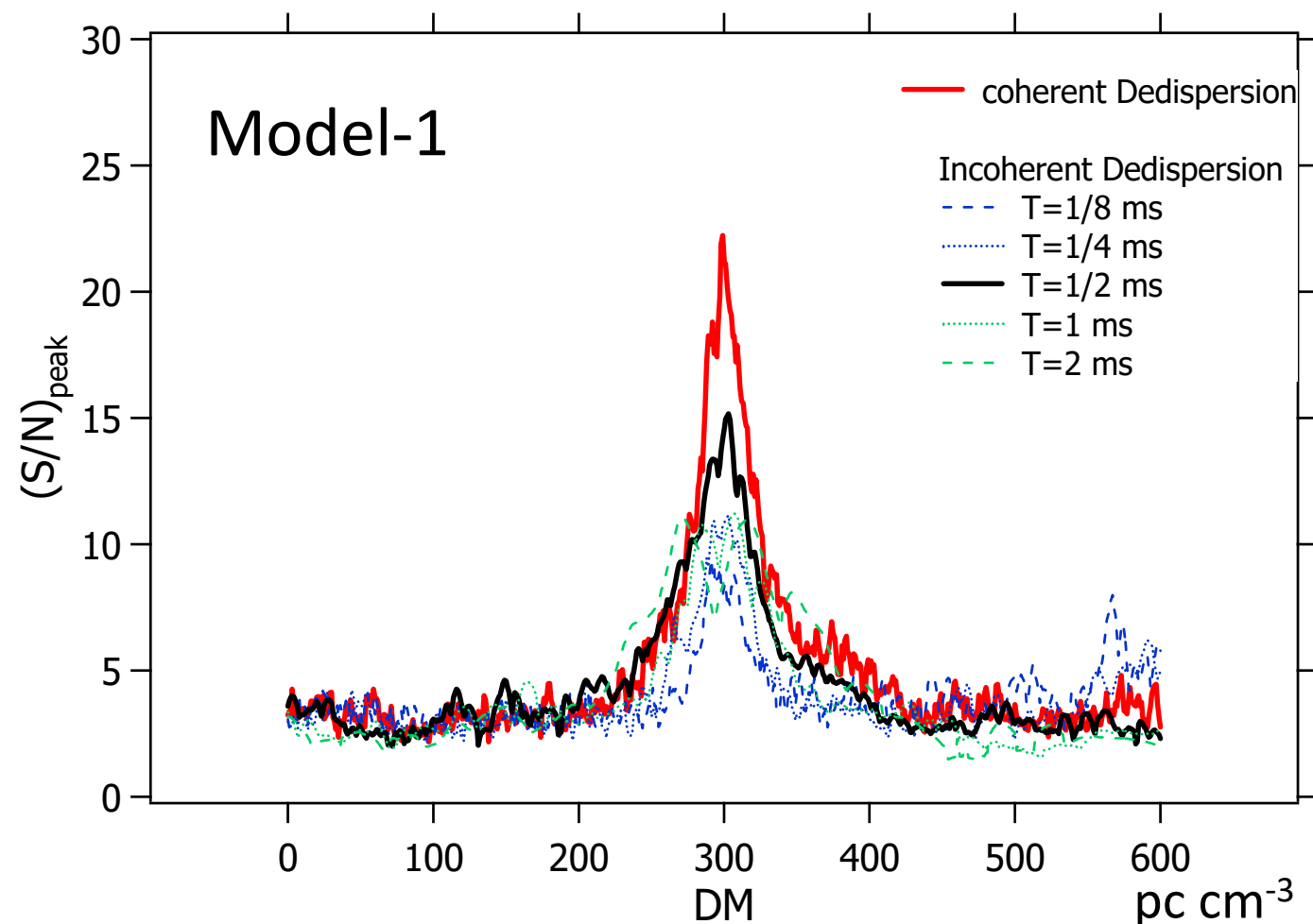
擬似FRBデータの解析例

左のパネルで得た擬似FRBデータを解析して、仮定されたDM値を求め直すことを試みた。方法には2つあって、それぞれ、

(1) Coherent Dedispersion, (2) Incoherent Dedispersion

である((1)、(2)の方法の詳細は最下段のパネル7, 8参照)。(1)では、探索範囲のDM最大値に対するFRB時間幅の2倍以上のデータをまとめてFourier変換(順逆各1回)しなければならず処理時間がかかる欠点がある。一方、(2)では短い時間幅 T のFourier変換を[全時間幅/ T]回施すだけでよく処理時間が短い*が、S/Nが悪い欠点がある。これらの優劣比較のため、擬似FRBデータModel-1,-2それぞれについて(1)、(2)の方法を適用した結果を下の2つの図に示す。これにより、(2)の方法であっても T の値を適切に選べば、(1)の方法の70-80%の $(S/N)_{\text{peak}}$ が得られることが示された。

* (1)での1回のFourier順変換と同程度の時間で済む



DM探索の方法 (1) Coherent Dedispersion

$$\hat{P}(t) = \int \hat{p}_{\text{obs}}(f) \exp(i2\pi f t) df \quad (\text{eq.1})$$

観測データ
(アンテナ電圧値)  周波数
Fourier成分 Fourier順変換 試行値として与える

$$\hat{P}_0(\tilde{t}) = \int \hat{p}_{\text{obs}}(f) \exp \left\{ i2\pi f \tilde{t} - i2\pi \alpha \frac{DM}{f} \right\} df \quad (\text{eq.2})$$

Dedispersed Data
(復元されたパルス原波形)

 Fourier逆変換 複素空間における位相回転操作

Remark: α は物理定数で、 $\alpha = \frac{e^2}{2\pi m_e c} = 4.148808 \times 10^9 \text{ [MHz pc}^{-1}\text{cm}^3]$

今回の解析例では、各例について、全長80ms(128Msps→1024万点)のFourier変換を2回*、600個のDM試行値毎に行った(Intel i7-4600U CPU@2.10GHzで処理時間は約15分)。Fourier逆変換で得られる原波形のピークのS/Nを最高にするDMを最適値として採用する。

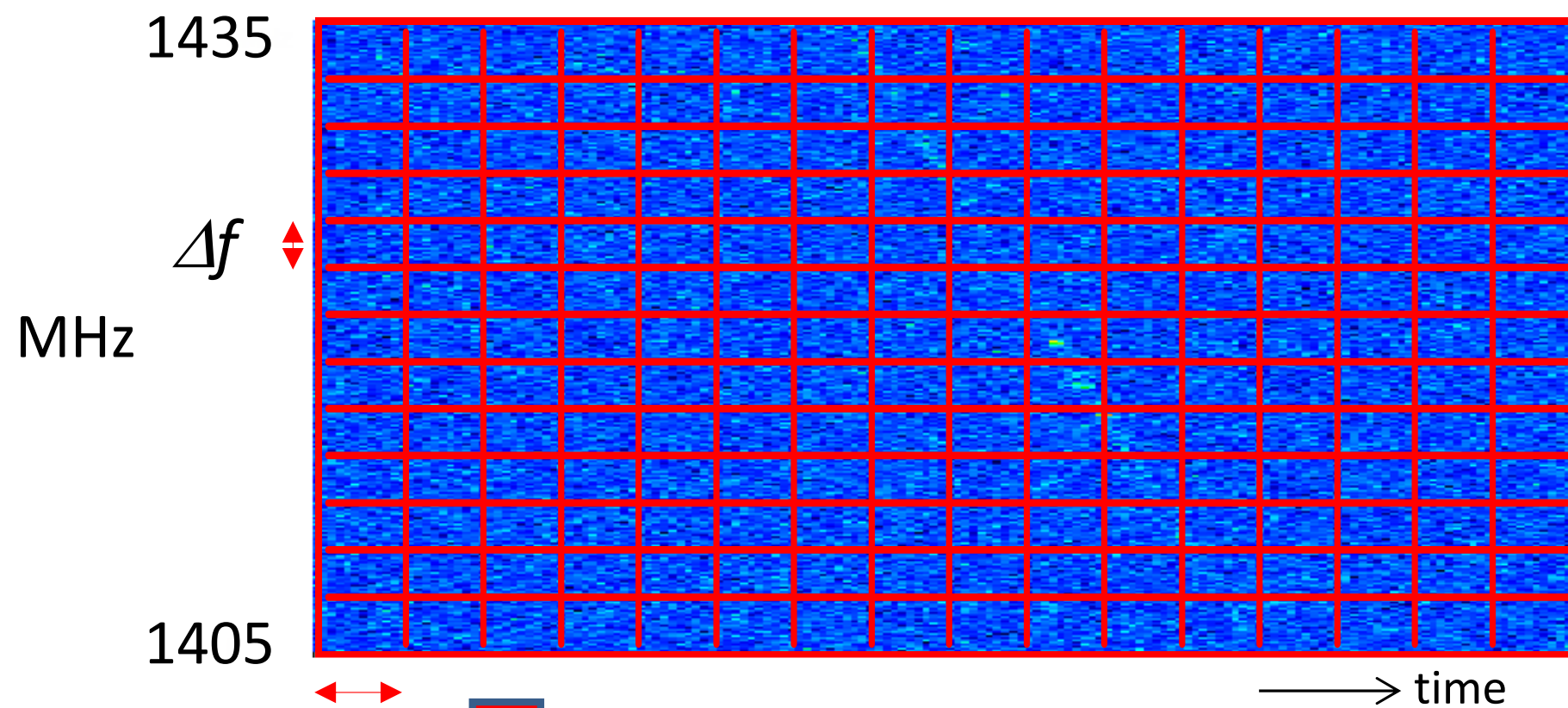
*2回のFourier変換のうち、順変換はDM値によらないので、最初の1回で得られた $\hat{p}_{\text{obs}}(f)$ を記憶しておけば、600回必要なのは逆変換のみとなる。

*coherent anti-dedispersion (パネル5)についての注記

発生源での原パルス波形から伝搬遅延後(with DM)のパルス波形を得るには、原パルスのFourier成分を求め、それに対し、DMの符号を正負逆転させたくえで(eq.2)の操作を施せばよい。

DM探索の方法 (2) Incoherent Dedispersion

(ソフトウェア・フィルタバンク法)



短時間 T のFourier変換($T=1/\Delta f$)を全期間にわたって繰り返し、ダイナミックスペクトルを得る(2D格子サイズ($T, \Delta f$))。これは周波数幅 Δf のサブバンドにデータを分割することと等価である。左図では($T, \Delta f$)=(0.5ms, 2kHz)とした。

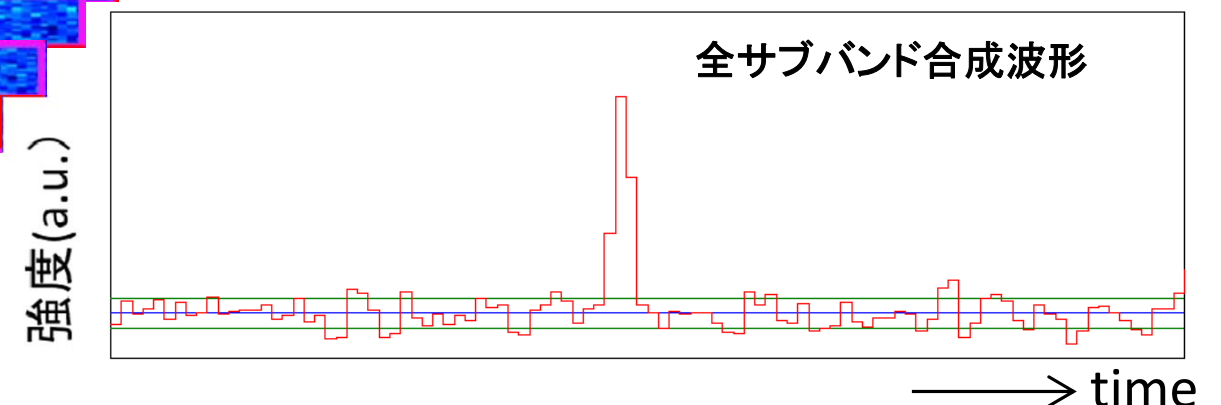
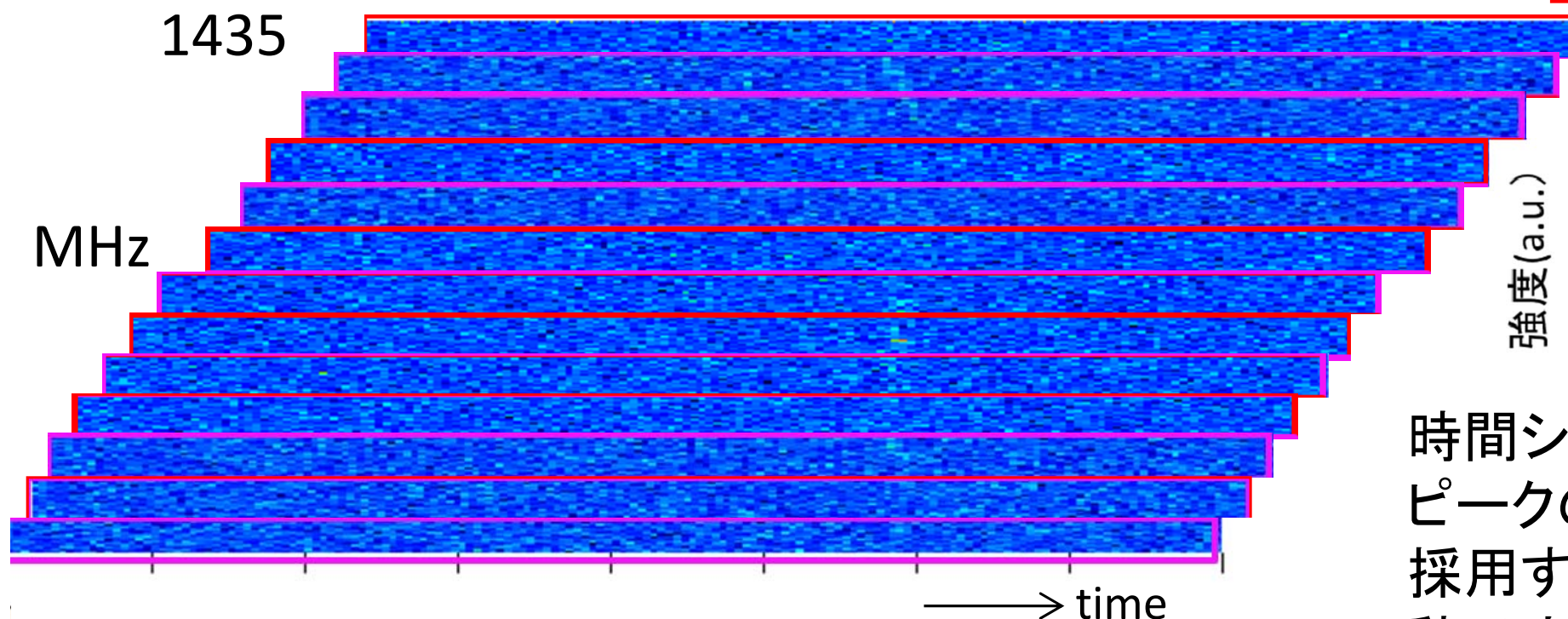
注意: 左図に描いた $T, \Delta f$ の格子は模式的であり、実際の格子サイズはもっと小さい(縦~ピクセル、横~数ピクセル)。

最適DM値の探索を $T=0.125\sim 2\text{ms}$ の範囲で試行し、 $T=0.5\text{ms}$ を最適とした。

DM試行値に応じた群遅延補正(時間シフト)を各周波数サブバンド毎に繰り返す。

群遅延の公式:

$$\delta t = \frac{2e^2}{m_e c} (f_1^{-2} - f_2^{-2}) DM$$



時間シフト後の全サブバンド合成波形(↑)のピークのS/Nを最大にするDM値を最適値として採用する。処理時間は最初のFFTを合わせて数秒以内と、方法(1)に比べて圧倒的に早い。