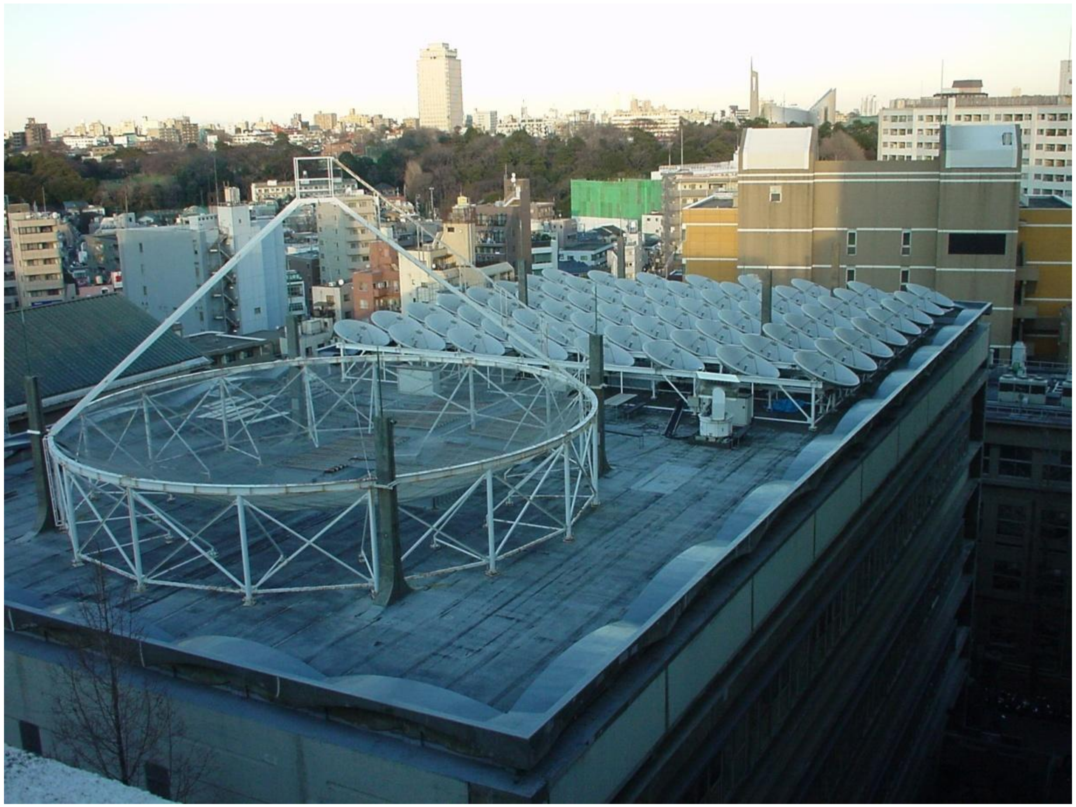
第11回高宇連研究会「多波長で探る高エネルギー現象」
早稲田大学　西早稲田キャンパス　2011年8月11日

NASU 1.4GHz Wide-field Surveyにおける電波トランジェント検出

早稲田大学　大師堂研究室
松村寛夫

早稲田大学　広域サーベイ観測システム



早稲田64素子電波干渉計（上）
那須パルサー観測所（右）

目次

<Reference>

Matsumura N., et al. 2007, AJ, 133, 1441
Matsumura N., et al. 2009, AJ, 138, 787

1. Nasu 1.4 GHz Wide-field Surveyの概要

◆Nasu 1.4GHz Wide-field Survey

- ✓主鏡 :20mφ 球面鏡×8
  （30mφ 球面鏡×1）
- ✓観測周波数 :1.4GHz±10MHz
- ✓観測範囲 :＋32°≦δ≦＋42°
- ✓イメージング:直接像合成方式
- ✓観測方式 :ドリフトスキャン方式
  - ・ビームの指向方向を固定
  - ・地球の自転を利用して赤緯方向にサーベイ
- ✓観測対象:
  変動電波源、トランジェント電波源

1.　Nasu 1.4 GHz Wide-field Surveyの概要

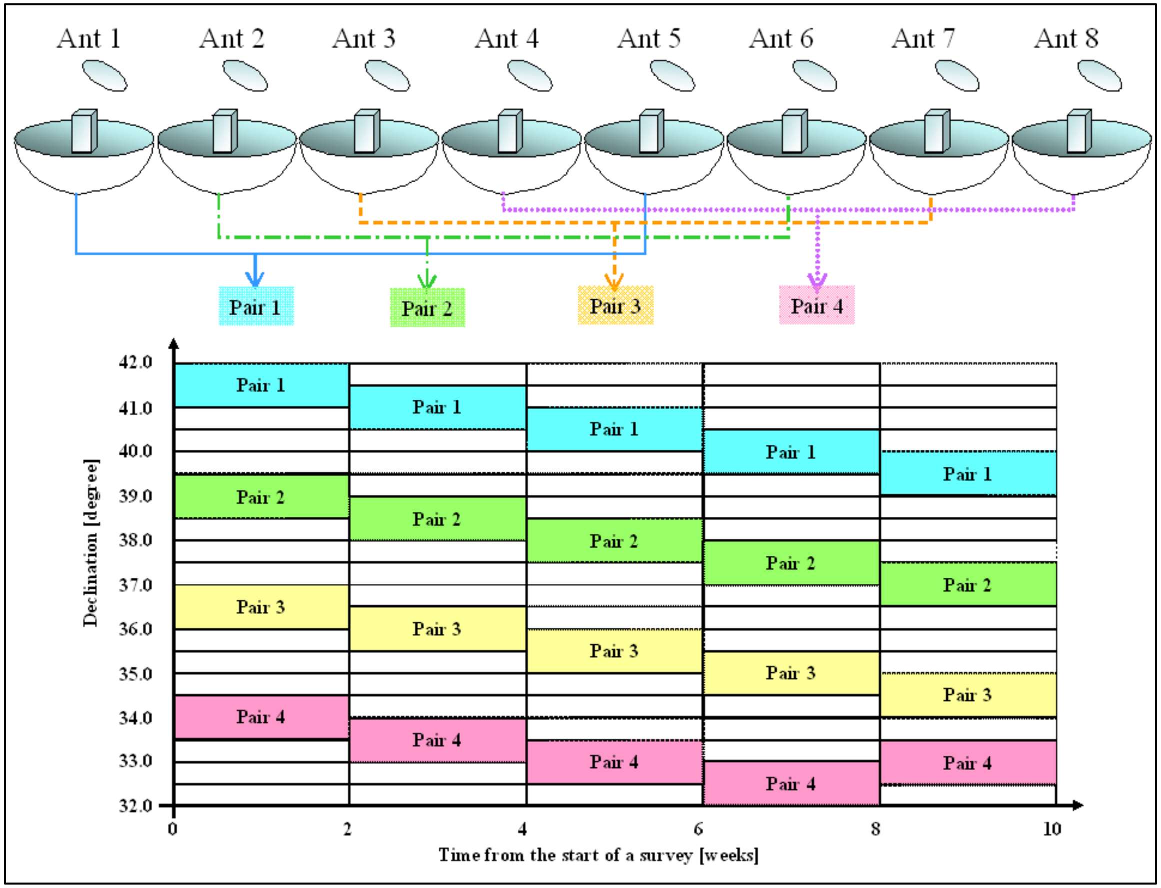
◆観測戦略

◇目的

空間＆時間次元における広域サーベイ

◇方法

2素子干渉計×4ペア＆ドリフトスキャン



✓ 空間次元
2素子干渉計の4ビームを空の異なる4方向（＝4赤緯ライン）に指向

✓ 時間次元
1観測ユニット～2週間（通常）（同じエリアを～14回観測）

・＋32°≦δ≦＋42°のサーベイ所要期間～3カ月

・4サーベイ／年
～4×2週／赤緯ライン・年
～4×14回／赤緯ライン・年

1.　Nasu 1.4 GHz Wide-field Surveyの概要

◆観測方法

✓ 2素子干渉計×4ペアのドリフトスキャン
✓ 180°　スイッチング

◇天体起源の受信フリンジF

φ :アンテナ間位相差, λ :波長, θ :天体の天頂角

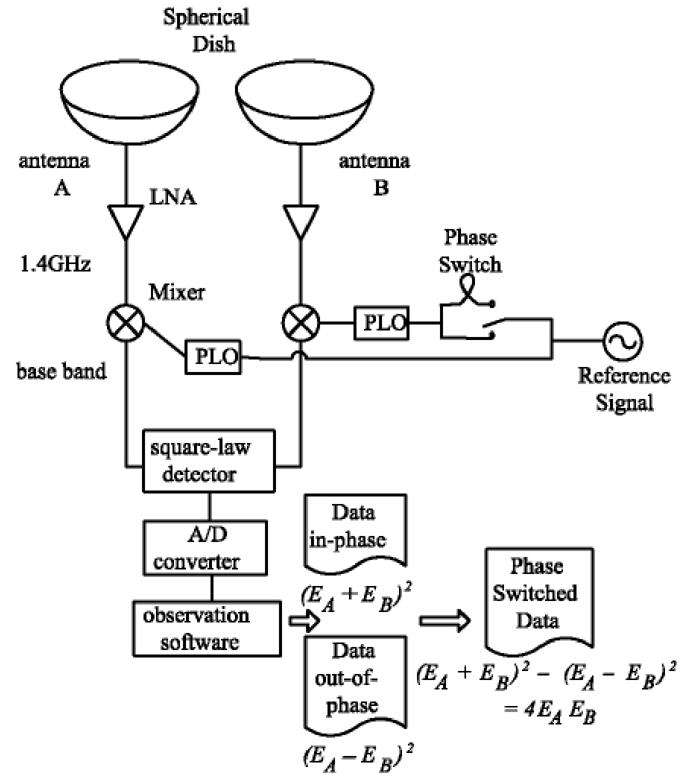
$$\phi = \frac{2\pi D}{\lambda}\sin\theta$$

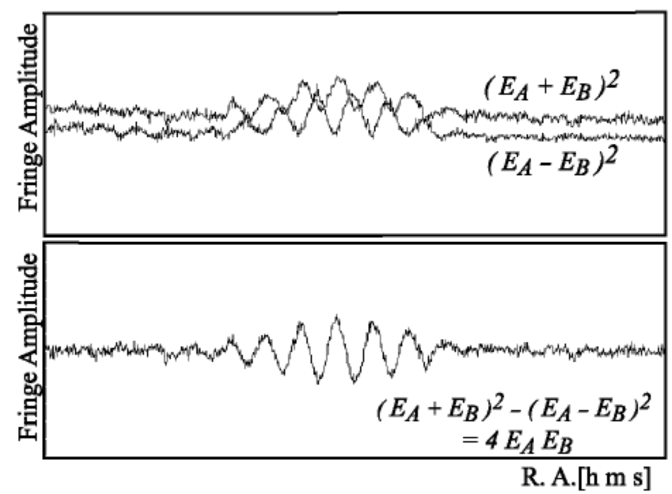
$$F = E_A E_B = E_A E_B \cos\phi \simeq {E_A}^2 \cos(\frac{2\pi D}{\lambda}\sin\theta)$$

$$F(\nu_0) = {E_\mathrm{A}}^2 \frac{1}{\Delta\nu}\int_{\nu_0-\Delta\nu/2}^{\nu_0+\Delta\nu/2} \cos(\frac{2\pi D}{\lambda}\sin\theta)d\nu$$

$$= {E_\mathrm{A}}^2 \cos(\frac{2\pi D\nu_0}{\lambda}\sin\theta)\frac{\sin(\pi D\sin\theta\Delta\nu/c)}{\pi D\sin\theta\Delta\nu/c}$$

天頂角θ の時間変化は観測赤緯δ で決定
⇒ 天体起源の**受信フリンジF**は
波長λ ，観測周波数ν ，帯域⊿ν ，基線長D
および**観測赤緯δ** によって決定





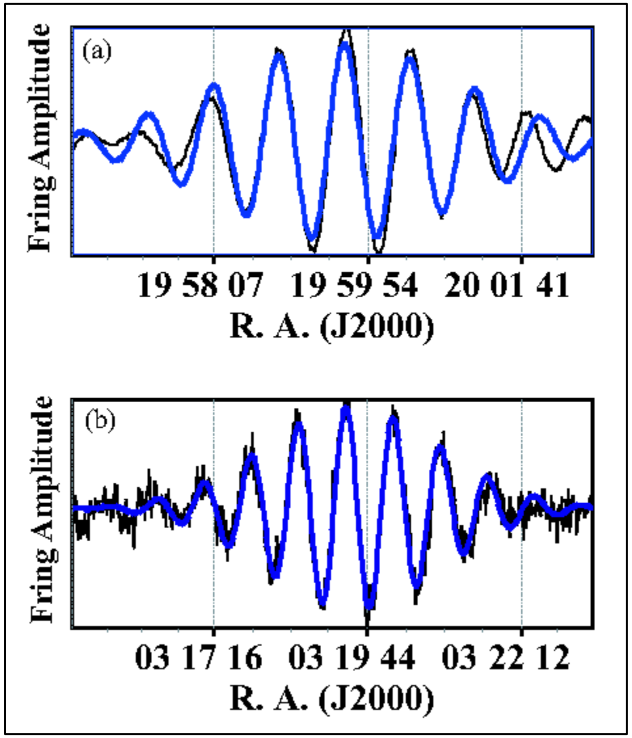
1.　Nasu 1.4 GHz Wide-field Surveyの概要

◇天体起源の受信フリンジF（つづき）

✓天体起源のフリンジ波形の特徴

・ 観測フリンジ周期
　＝観測赤緯δ の理論的フリンジ周期

・ビームのエンベロープ



◇解析方法

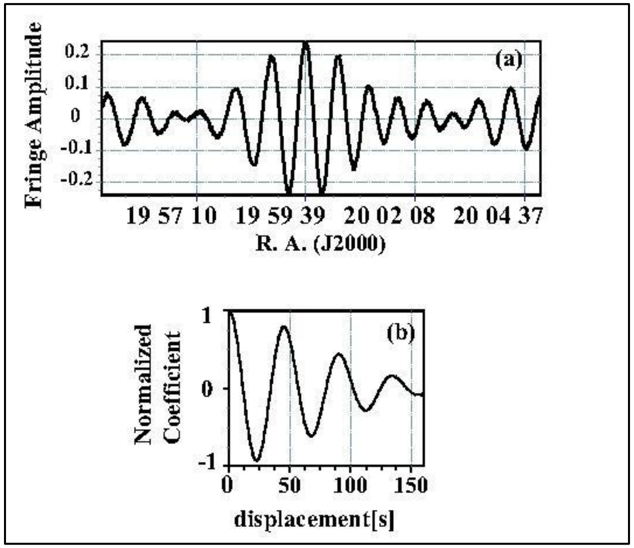
(1)観測フリンジ波形の自己相関：
　自己相関係数の周期と相関係数の算出

(2)相関係数の$\exp(-a^{-1}t) \times \cos(2\pi\ t/T)$とのフィッティング：観測フリンジ周期T と時定数a

(3)理論的フリンジ周期と観測フリンジ周期の一致性確認

(4)時定数aの検証：ビーム半値幅の半分以上か

(5)電波強度と赤経・赤緯の算出
　（天体起源のフリンジに対して）



2.　電波トランジェントの検出

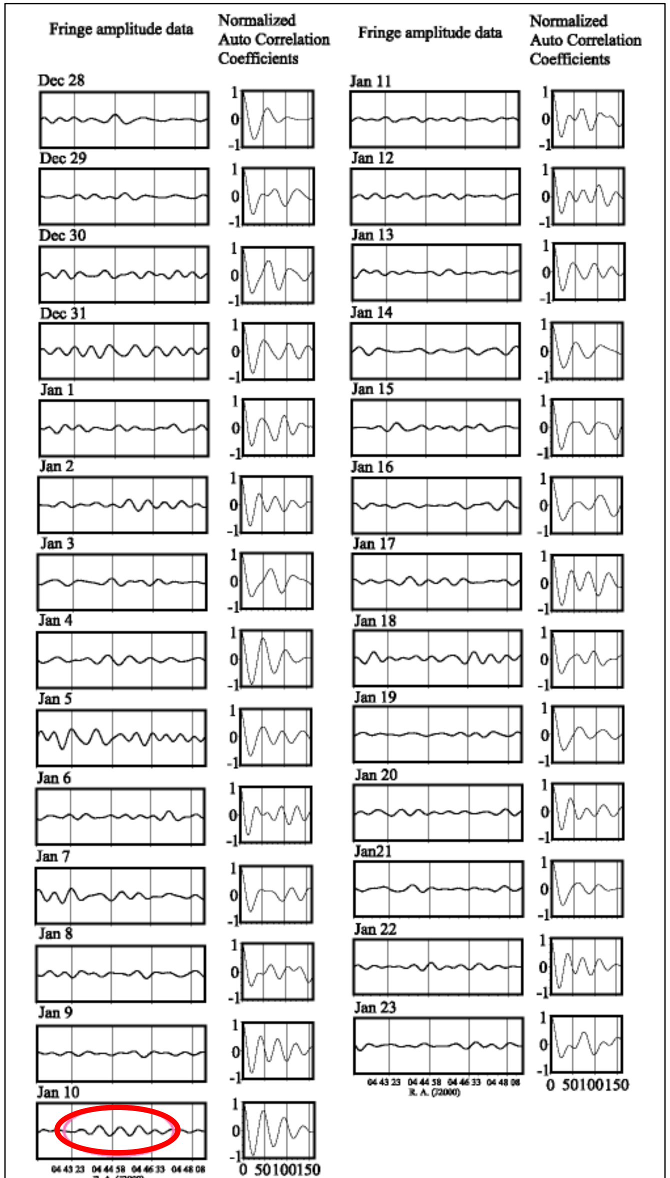
◆11個の電波トランジェント（2004～2006年）

- ✓ 2004年～2006年に11個（$F_{1.4GHz} \geqq 1Jy$） ⇒ **WJNトランジェント**
- ✓ 10個は1日のみ検出、1個は2日にわたり検出

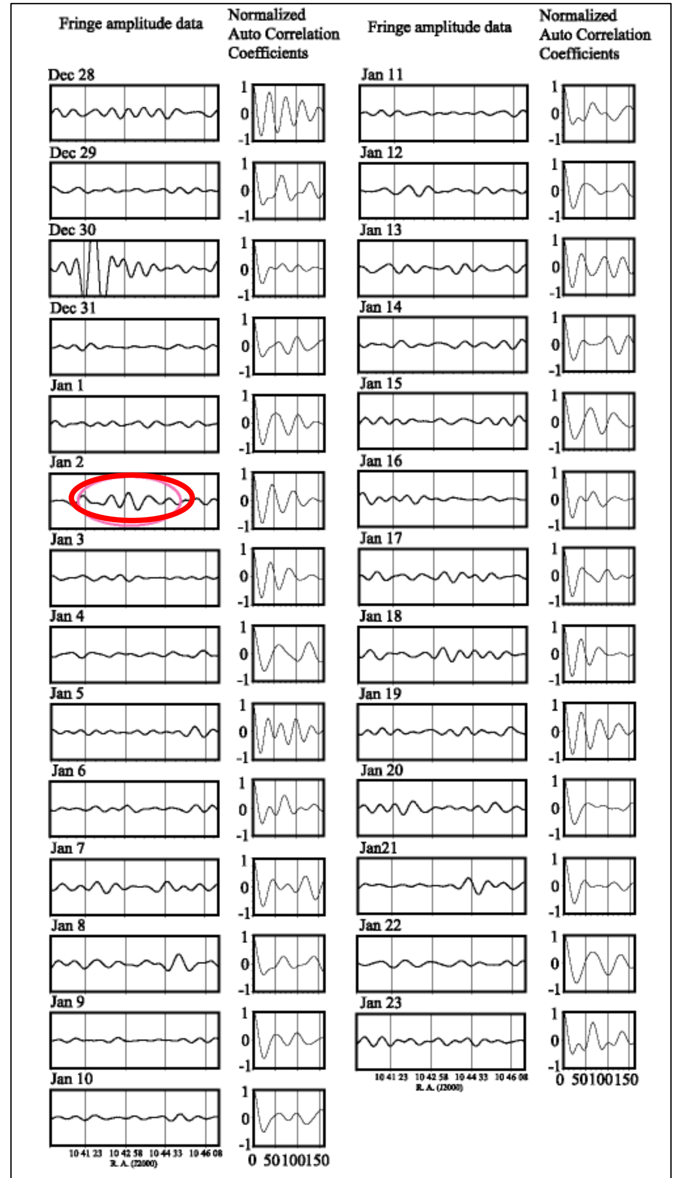
11個のWJNトランジェント

Name	δ (J2000.0)	b (J2000.0)	Flux Density	Detection Date	Paper
WJN J0200+4142	41°42′	~-19°	~2.7±0.5Jy	2005Feb10	Matsumura et al.(2009)
WJN J0202+4142	41°42′	~-19°	~4.1±0.9Jy	2006Dec24	
WJN J0205+4142	41°42′	~-19°	~4.3±0.6Jy	2006Dec26	
WJN J0445+4130	41°30′	~-3°	~1.8±0.2Jy	2005Jan10	Matsumura et al.(2007)
WJN J0645+3200	32°00′	~+13°	~1.2Jy	2005Mar24	Kida et al.(2008)
WJN J0951+3300	33°00′	~+51°	~1.8±0.3Jy	2006Jan12	Niinuma et al.(2009)
WJN J1039+3200	32°00′	~+61°	~1.7Jy	2005Mar 4	Kida et al.(2008)
WJN J1039+3300	33°00′	~+61°	~2.2±0.2Jy	2006Jan18	Niinuma et al.(2009)
WJN J1043+4130	41°30′	~+60°	~1.7±0.2Jy	2005Jan 2	Matsumura et al.(2007)
WJN J1443+3439	34°39′	~+65°	~1.5±0.3Jy ~3.0±0.3Jy	2005Feb13 2005Feb14	Niinuma el al.(2007)
WJN J1737+3808	38°08′	~+30°	~1.6±0.2Jy	2004May20	Kuniyoshi et al.(2007)

2.　電波トランジェントの検出

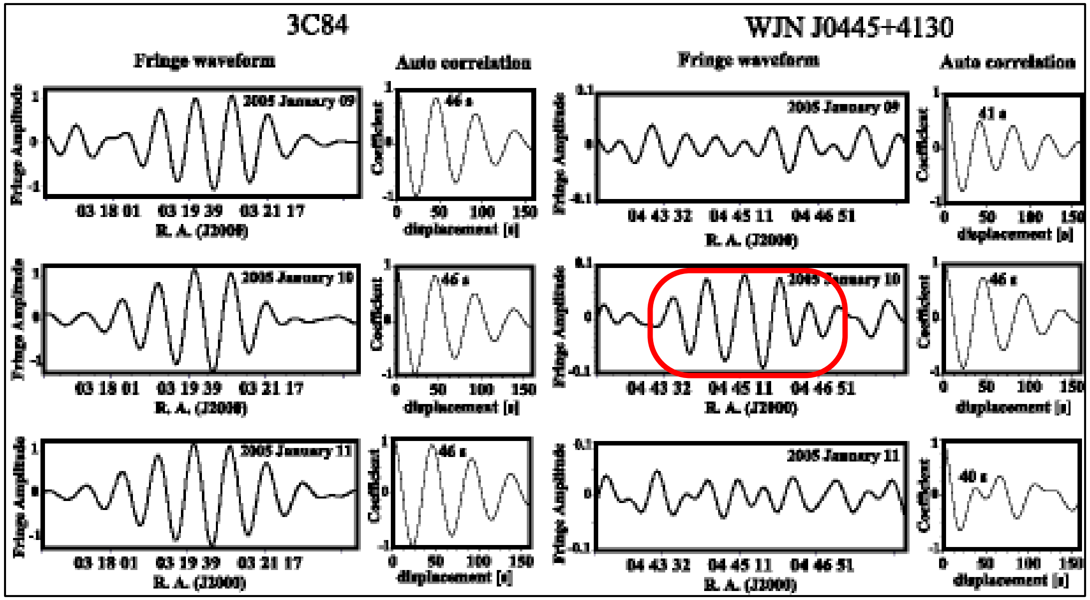


WJN J0445+4130 (2005Jan10)
全27日間のうち1日のみ検出



WJN J1043+4130 (2005Jan2)
全27日間のうち1日のみ検出

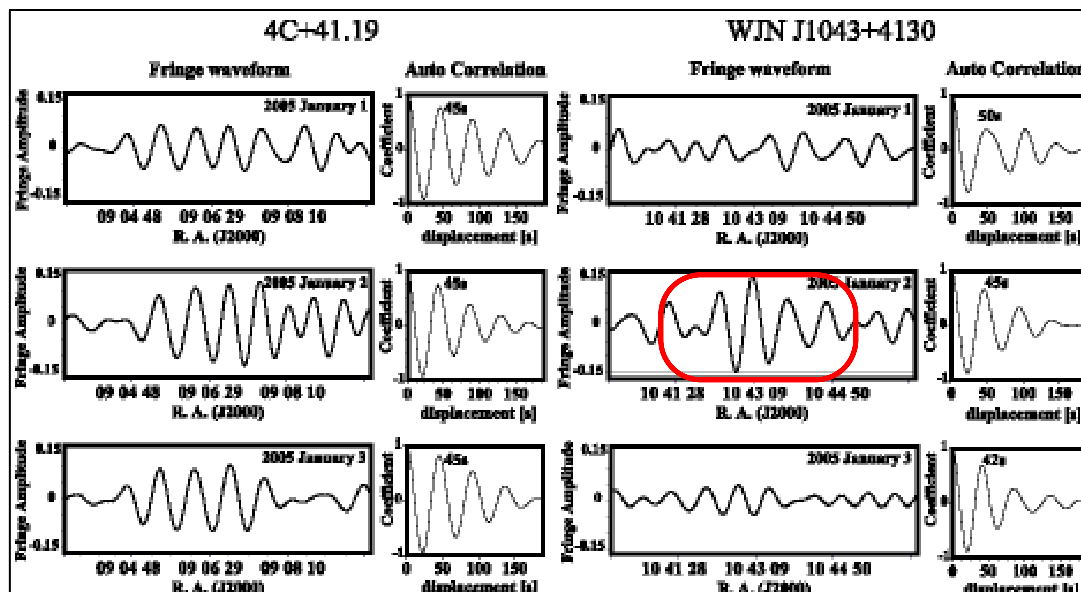
2.　電波トランジェントの検出



〜4分（ビーム幅）

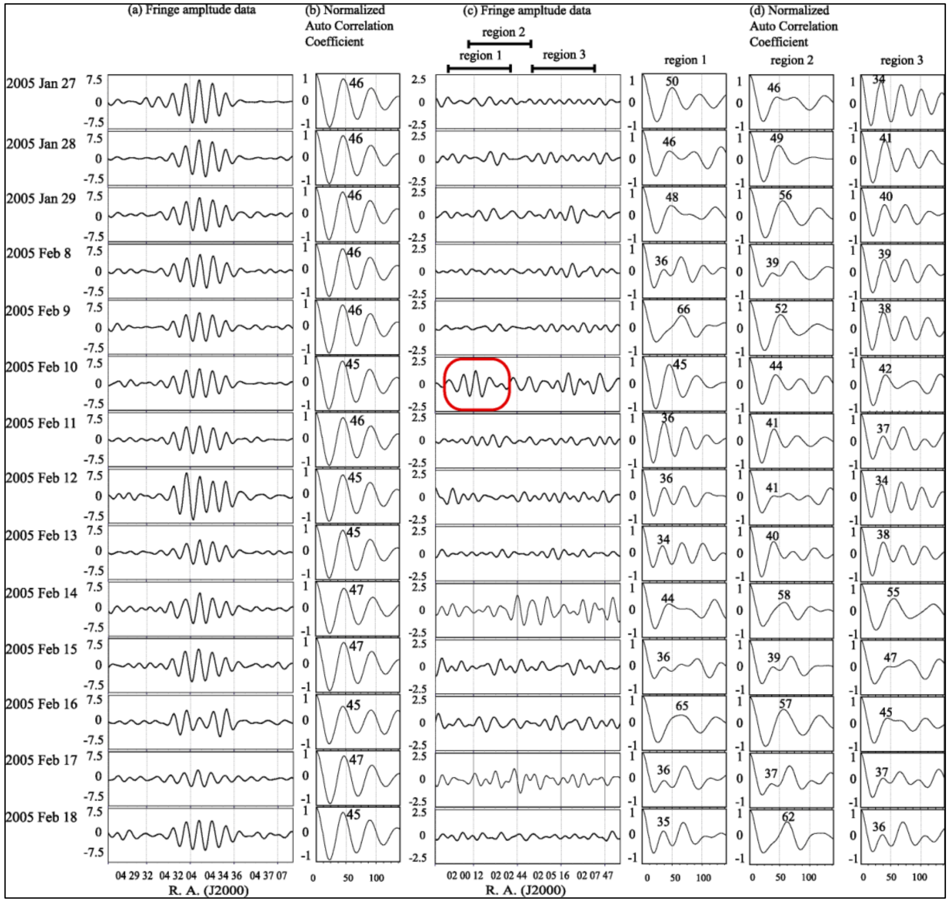
〜2日

WJN J0445+4130 (2005Jan10)
検出領域の計3日分のデータ

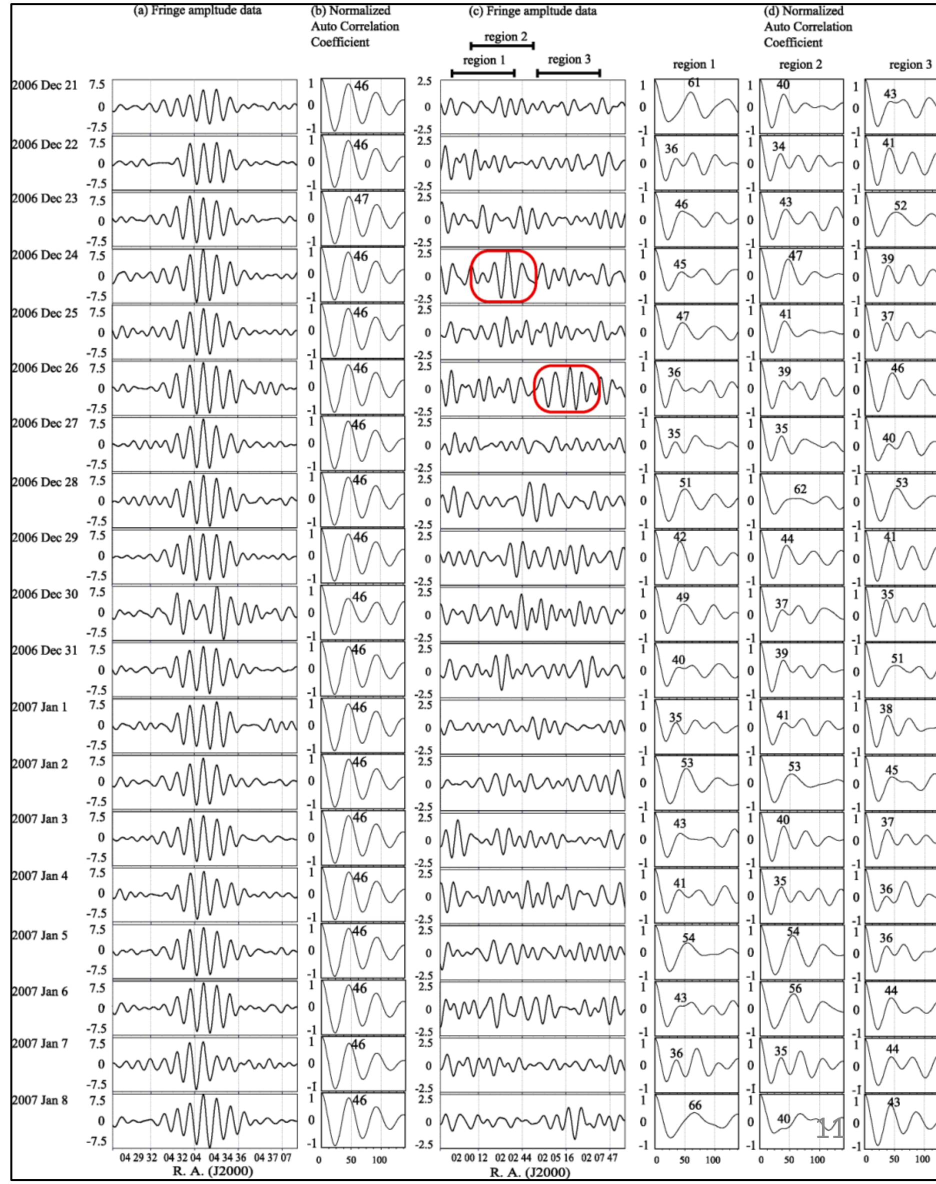


WJN J1043+4130 (2005Jan2)検出領域の計3日分のデータ

2.　電波トランジェントの検出



WJN J0200+4142 (2005Feb10)
全14日間のうち1日のみ検出



WJN J0202+4142&J0205+4142 (2005Dec24&26)
各トランジェントとも全19日間のうち1日のみ検出

2.　電波トランジェントの検出

◇WJNトランジェント(+41°　<δ　<＋42°　)の特徴

① $F_{1.4GHz}$ >1Jy
② 4分≦継続時間<2日
③ 高銀緯～低銀緯まで分布

赤緯＋41°　～＋42°　ラインの5個のWJNトランジェント

Name	δ (J2000.0)	b (J2000.0)	Flux Density	Detection Date	Paper
WJN J0200+4142	41°42’	~-19°	~2.7±0.5Jy	2005Feb10	Matsumura et al.(2009)
WJN J0202+4142	41°42’	~-19°	~4.1±0.9Jy	2006Dec24	
WJN J0205+4142	41°42’	~-19°	~4.3±0.6Jy	2006Dec26	
WJN J0445+4130	41°30’	~-3°	~1.8±0.2Jy	2005Jan10	Matsumura et al.(2007)
WJN J0645+3200	32°00’	~+13°	~1.2Jy	2005Mar24	Kida et al.(2008)
WJN J0951+3300	33°00’	~+51°	~1.8±0.3Jy	2006Jan12	Niinuma et al.(2009)
WJN J1039+3200	32°00’	~+61°	~1.7Jy	2005Mar 4	Kida et al.(2008)
WJN J1039+3300	33°00’	~+61°	~2.2±0.2Jy	2006Jan18	Niinuma et al.(2009)
WJN J1043+4130	41°30’	~+60°	~1.7±0.2Jy	2005Jan 2	Matsumura et al.(2007)
WJN J1443+3439	34°39’	~+65°	~1.5±0.3Jy ~3.0±0.3Jy	2005Feb13 2005Feb14	Niinuma el al.(2007)
WJN J1737+3808	38°08’	~+30°	~1.6±0.2Jy	2004May20	Kuniyoshi et al.(2007)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◆候補天体の調査

✓検出位置エラーボックスと強度情報を元に、既知の観測結果と比較

✓参照元

・NASA/IPAC Extragalactic Database　・HEASARC　・NVSS, FIRST, 4C etc

WJN Name	Counterpart	Wavelength	$Flux_{1.4GHz}(mJy)$
WJN J0445+4130	1RXS J044434.9+410331	X-ray	
	4B 950523	γ-ray	
	4B 931016	γ-ray	
	4B 940222	γ-ray	
	4B 910912	γ-ray	
	NVSS J044424+414005	1.4 GHz	76.8
WJN J1043+4130	4B 940504	γ-ray	
	4B 960803	γ-ray	
WJN J0200+4142	NVSS J015851+420708	1.4 GHz	29.9
	NVSS J015848+414018	1.4 GHz	46.2
	B3 0157+418	1.4 GHz	92
	NVSS J020102+413537 [1]	1.4 GHz	39.7
	GRB 980313-	γ-ray	
	GRB 970918-	γ-ray	
	GRB 970327-	γ-ray	
WJN J0202+4142	B3 0159+418	1.4 GHz	167
	NVSS J020243+415440	1.4 GHz	23.7
	NVSS J020244+412355	1.4 GHz	22.8
	NVSS J020246+412136	1.4 GHz	15.1
WJN J0205+4142	NVSS J020438+415341	1.4 GHz	20.1
	B3 0201+415	1.4 GHz	85.6
	B3 0201+414	1.4 GHz	232

WJN Name	Counterpart
WJN J0200+4142	PGC 2190649
	PGC 2188870
	PGC 2192795
WJN J0202+4142	PGC 2180276
	PGC 2186642

X線　　　：WJN　J0445+4130のみ
ガンマ線：全WJNが過去に起こった
　　　　　ガンマ線バーストに対応
電波　　　：系外電波源、銀河

★位置がマッチする電波源が候補
　->増光率は18倍以上

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その1：　Inter Stellar Scintillation(ISS)

✓ ISSによる天体の強度変動

- 星間物質・電子密度ゆらぎの固有運動による変動≠天体固有の現象
- コンパクトな系外電波源の一般的ISSによる強度変動幅～平均強度の数10%

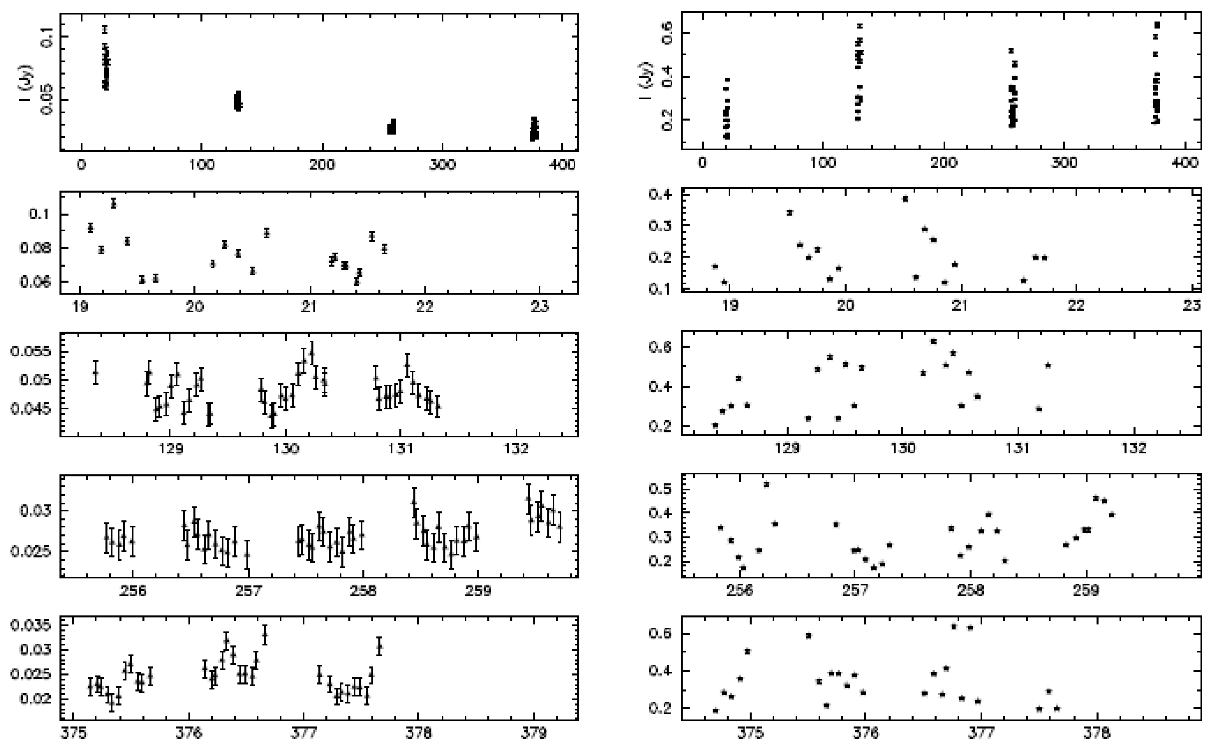


Figure 1. Examples of MASIV variability. J0949+5819 (left) and J1819+3845 (right). The top panel in each case shows all the total intensity data for the source against day number from 2002 January 1. The lower four panels show light-curves for each of the first four epochs. The horizontal scale is the same (four days) in each case.

MASIVによる5 GHzでのISS。
Lovell, J. E. J. et al. , 2007, ASPC, Vol. 365, p.279L

3. WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その1：　Inter Stellar Scintillation(ISS)（つづき）

✓ Extreme Scattering Event

・ISSの中でも最大の変動幅～50%

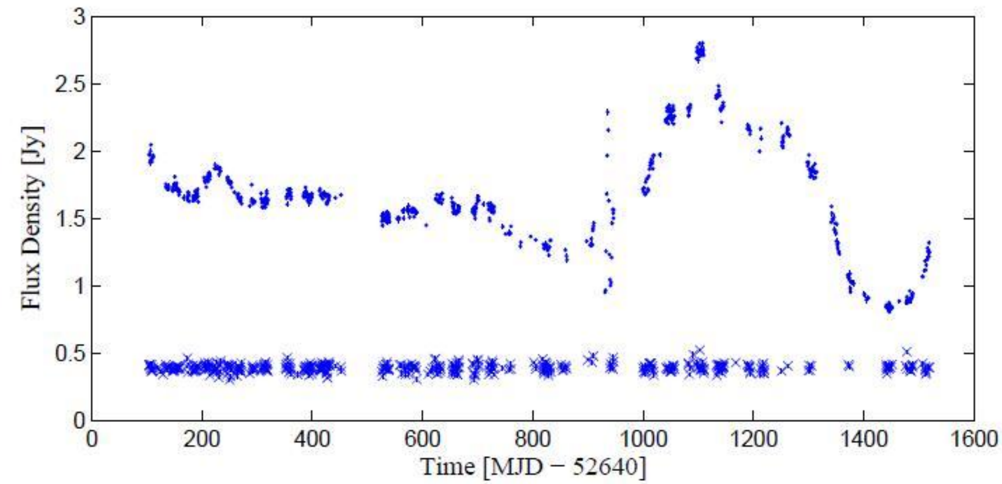
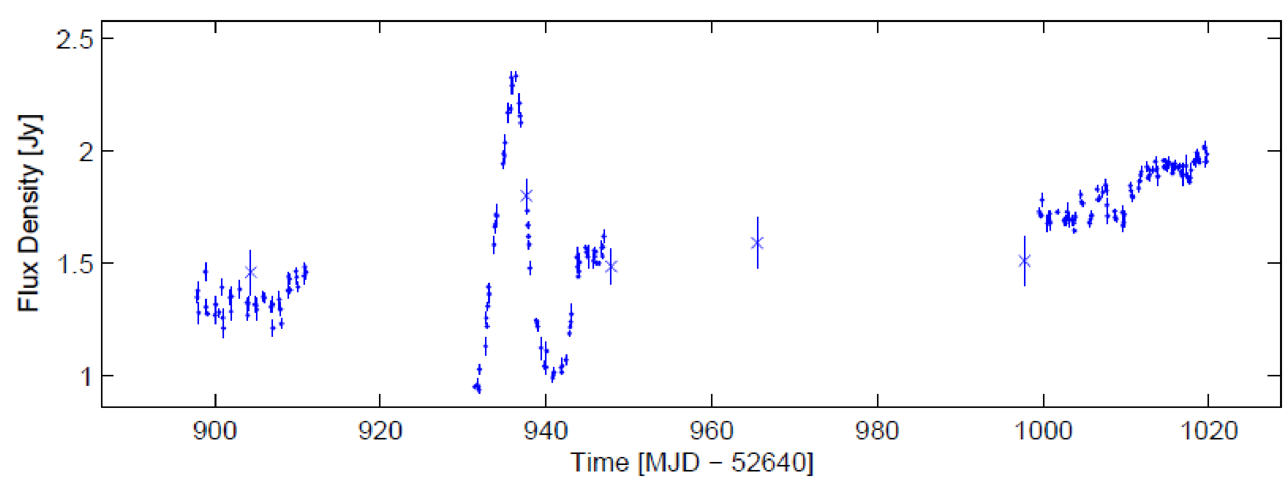


Fig. 1.— The 6.65 GHz lightcurve of AO 0235+164 (points) since 2003 Jan 1 (MJD 52640). The corresponding lightcurve of the calibrator, 3C 277, is shown (crosses), with 1.6 Jy subtracted from its flux densities for display purposes. The averaging time for each flux density sample is 12 hours.

数倍（<10倍）程度の強度変動はISSの可能性あるが・・・
WJNトランジェントの増幅率（≧18倍）と一致しない。



Blazar AO 0235+164のESE。
(Senkbeil et al., 2008, AJ,672, pp. L95-L98)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その2:　Pulsar

✓ 受信電波強度の変動

A. HewishらによるPulsarの発見(1967年)の頃からよく知られている。

(1)パルス間の変動:　pulsarに固有の現象

(2)数分～数時間以上にわたる変動:　ISSによって発生

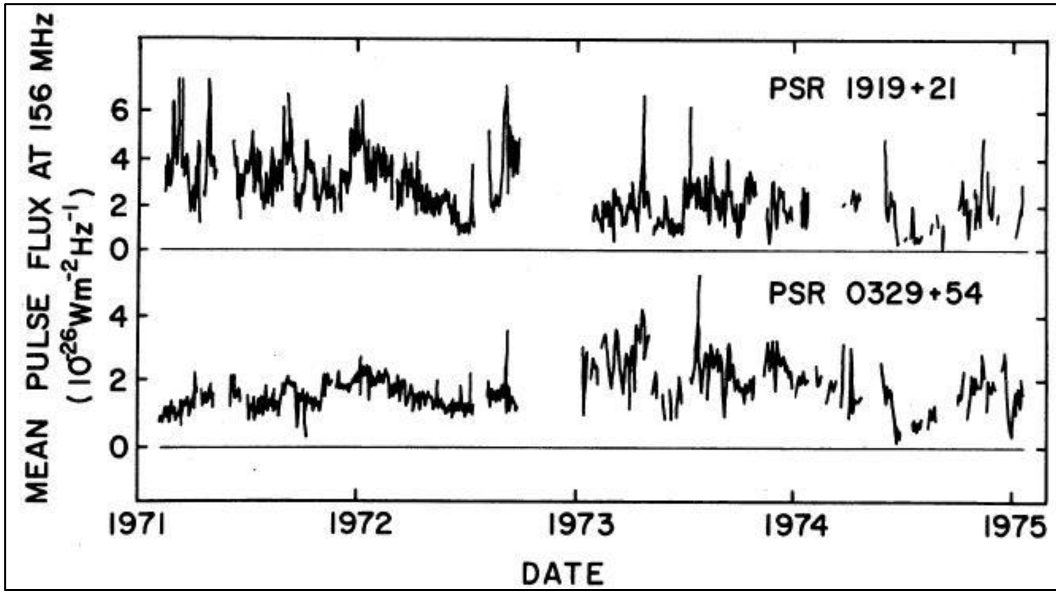


FIG. 1. Daily mean pulse flux measurements for PSR 0329+54 and PSR 1919+21 taken over four years at 156 MHz.

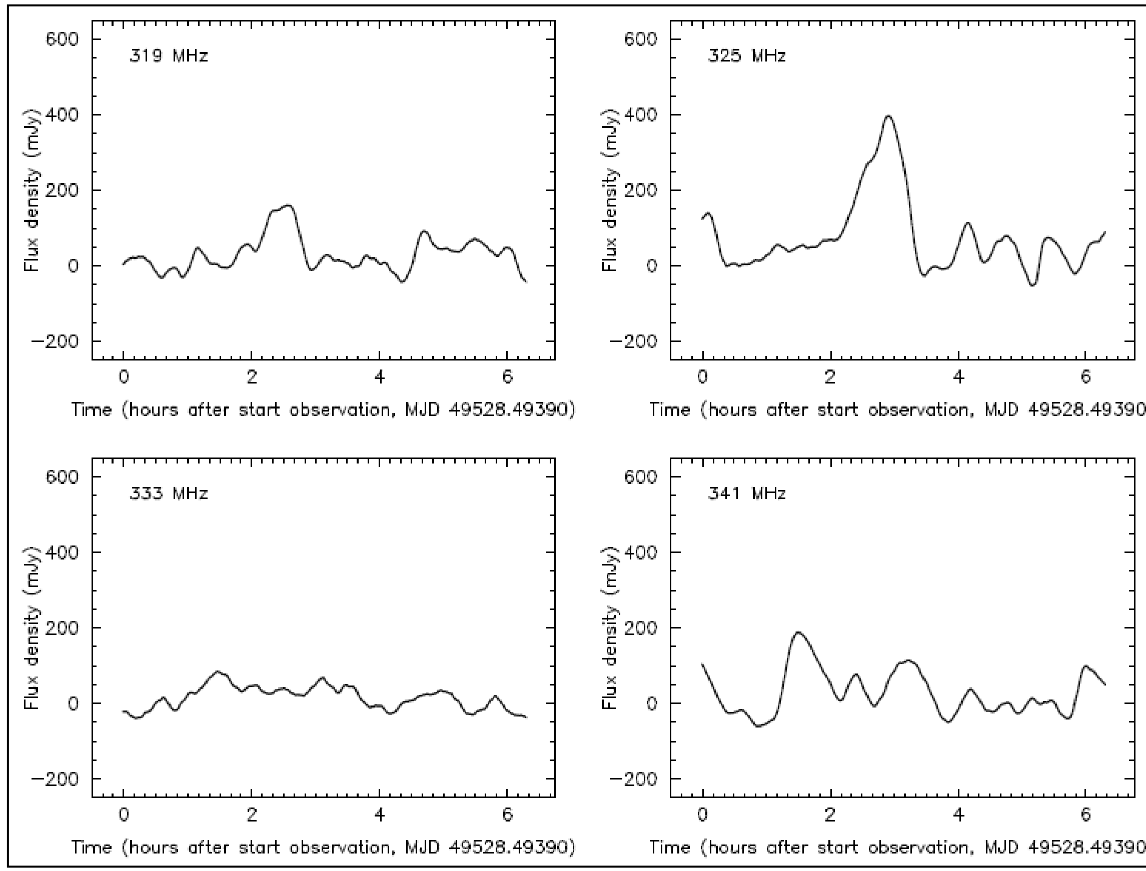
4年間の156MHzでの観測においてpulsarのフラックス密度をモニターした結果。プロットの積分時間～4H。(David J. Helfand et al., 1977, AJ)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇<u>候補天体その2:　Pulsar</u>(つづき)

✓ PulsarのISSによる　強度変動の特徴

- ・低周波数(＜1GHz)で検出
- ・狭帯域(数MHz)で現れる



WJNトランジェント検出における
　観測周波数1.4GHz±10MHz
　積分時間1秒
に一致しない。

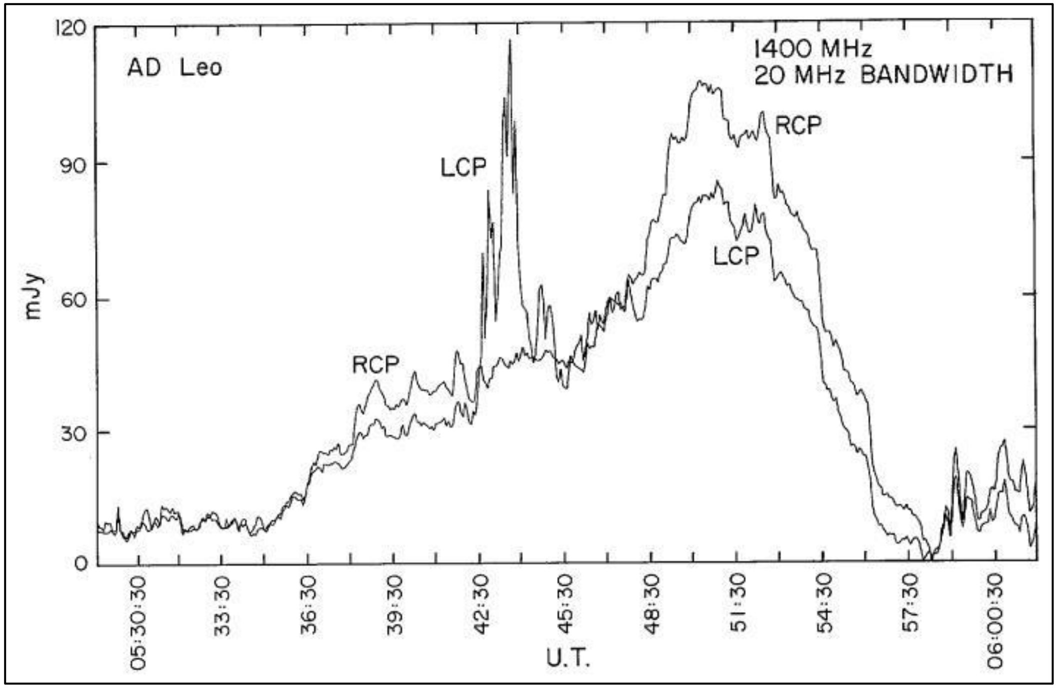
PSR 0655+64の325MHz帯の観測結果。
(T. J. Galama et al., 1997, A&A)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その3:　Flare star

- ✓ 電波領域でのパルス状のフレア
- ✓ ピークの強度～100mJyレベル
- ✓ パルス状のフレアの継続時間 ～数秒

WJNトランジェントの継続時間・強度及び、観測(偏波情報なし)と
一致しない



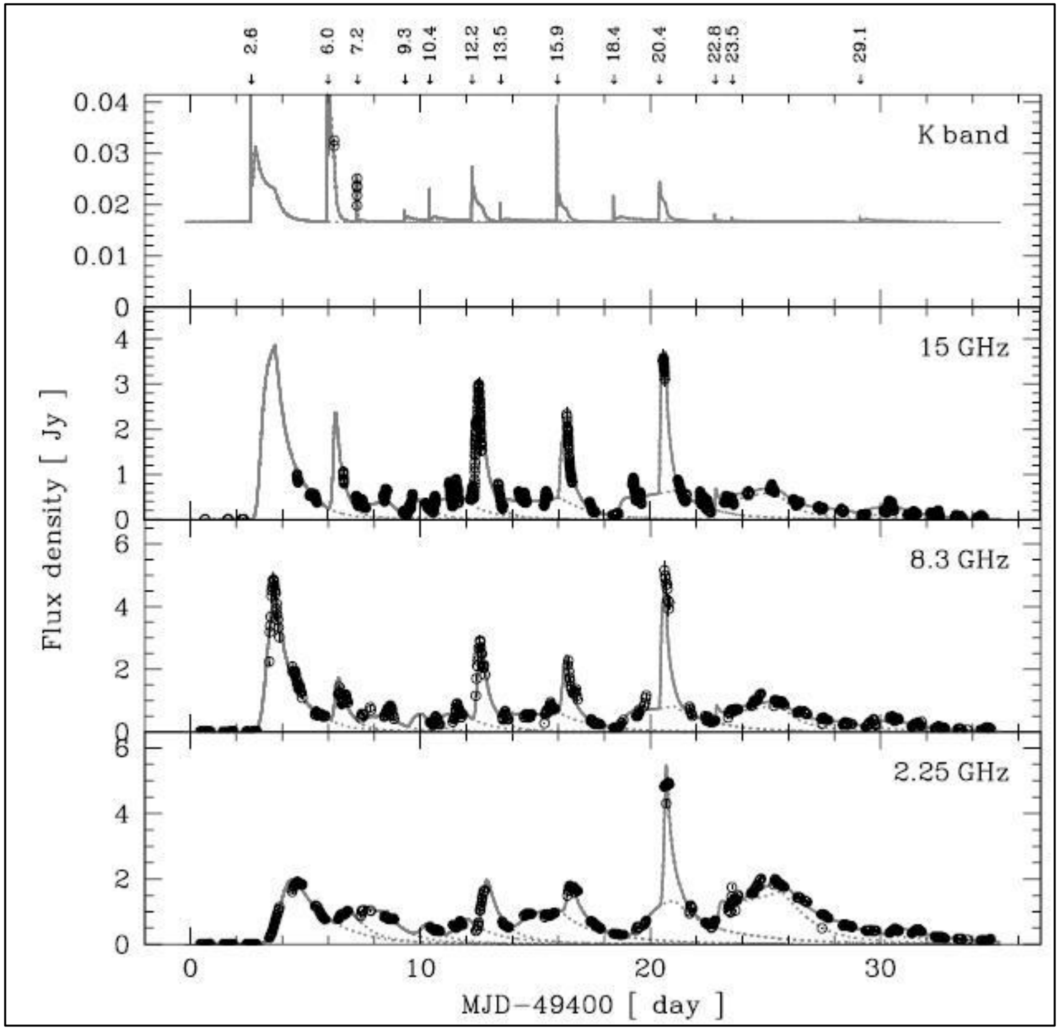
AD Leoの1.4GHzにおけるフレア。
(Kenneth R. Lang et al., 1983, AJ)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その4:X-ray binary, Microquasar

- ✓ AndewらによるX-ray binaryからの電波での輻射の検出(1968年)
- ✓ 電波領域でも輻射変動

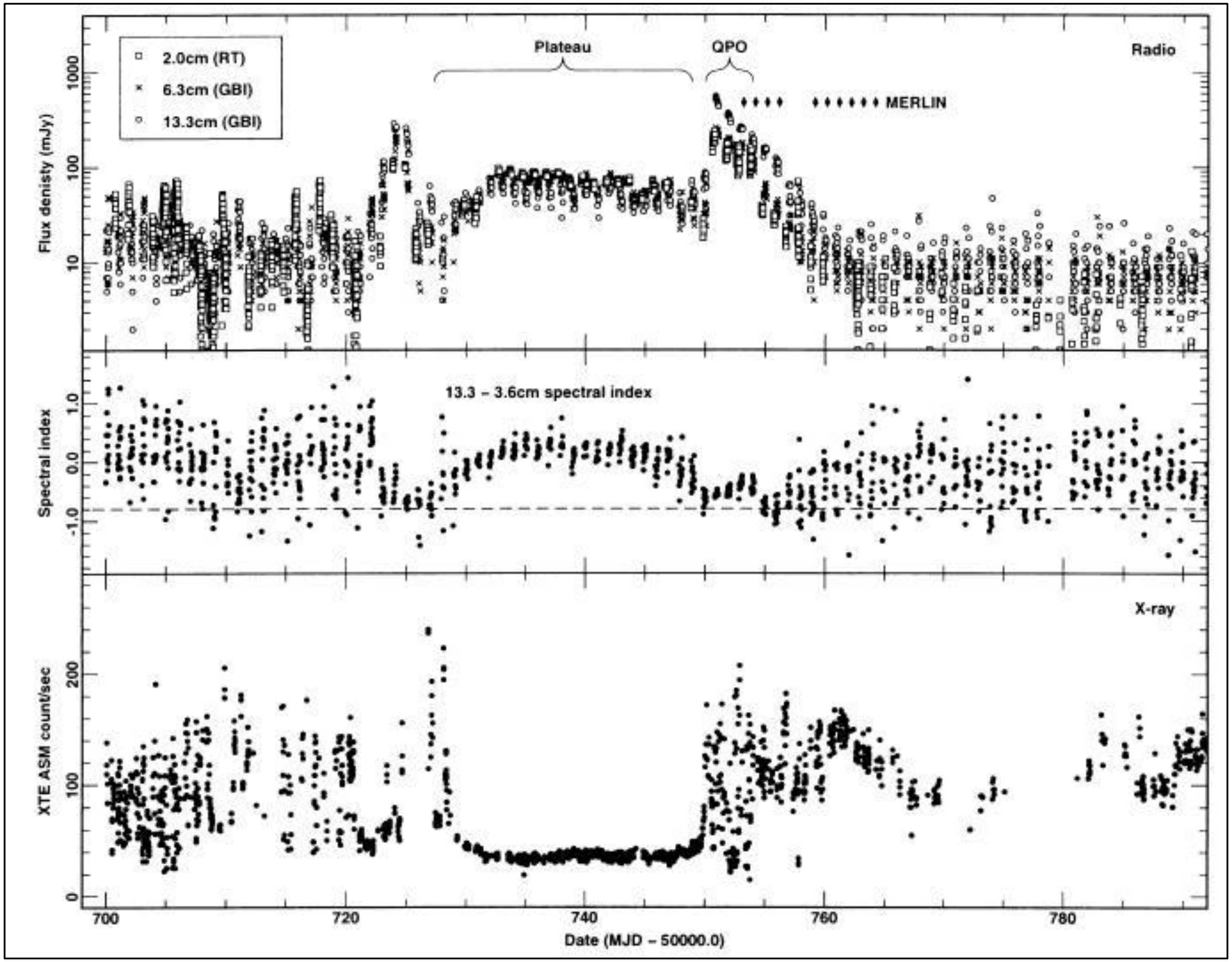
(例)Cygnus X-3
1970年代にはJyレベルのバースト
(T. Daishido 1974) を検出。



Cygnus X-3の2001年のアウトバースト。
(E. J. Lindfors et al., 2008, A&A)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その4：X-ray binary, Microquasar（つづき）



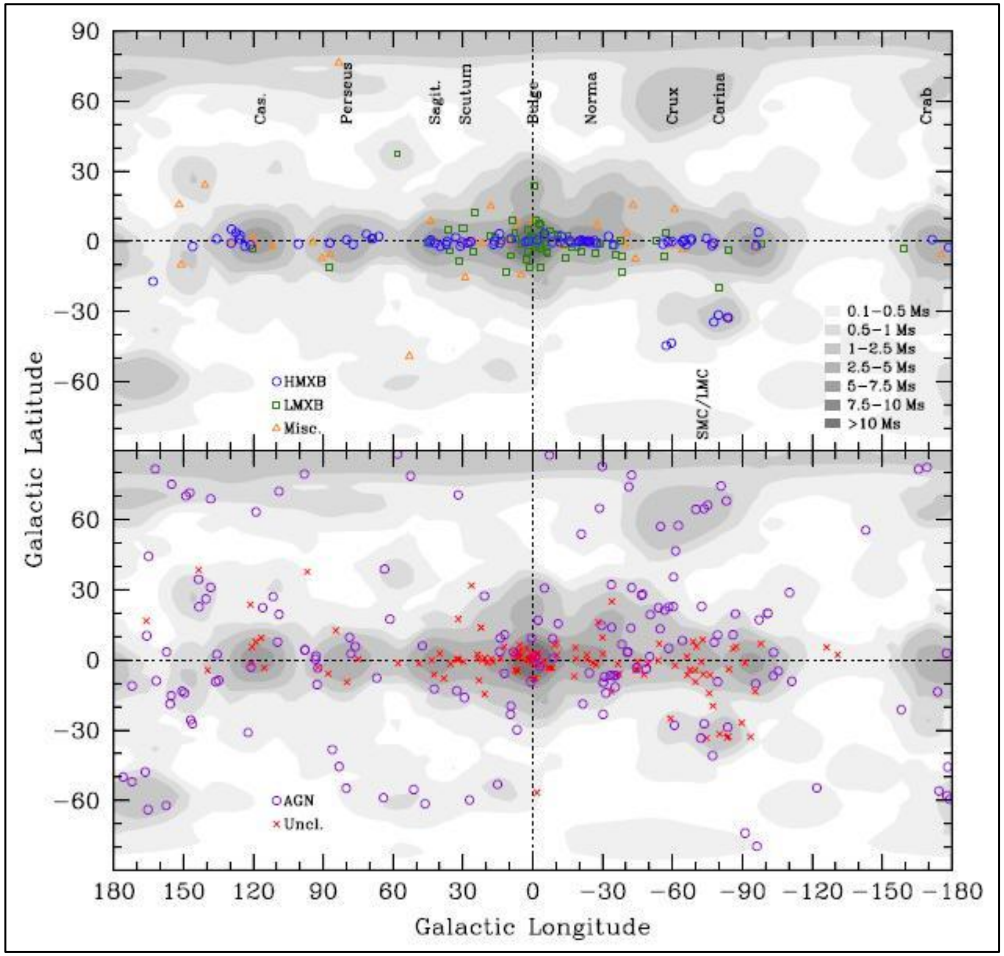
GRS 1915+105 のフレアを電波とX線で観測した結果。2 GHz-15 GHzで～数100mJyのフレアを検出。(R. P. Fender et al., 1999, MNRAS)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その4：X-ray binary, Microquasar（つづき）

- ✓ INTEGRAL-ISFRIは最初の4年で LMXB 82個、HMXB 78個を検出
  - ・LMXB 9個、HMXB 7個が| b |＞10°
  - ・$|b|_{MAX,\ LMXB}$～38°　$|b|_{MAX,\ HMXB}$～45°
- ✓ WJN J1043+4130(b～+60°)は除外
- ✓ X線での候補天体をもつのは WJN J0445+4130（b～−3°）のみ
- ✓ 他のWJNトランジェントはX線で候補天体ないので除外

WJN J0445+4130はX-ray binary, Microquasarの可能性あり

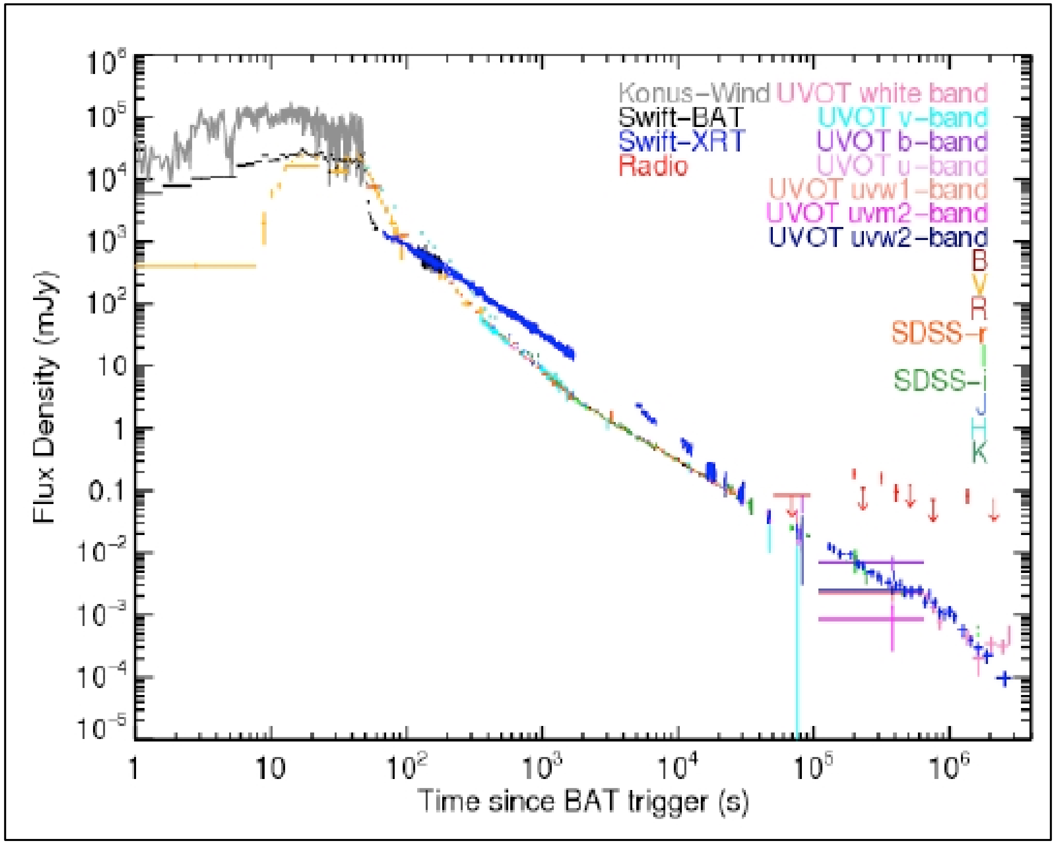


INTEGRALにおいて最初の4年間に検出された天体の銀河座標における分布。
(A. Bodaghee et al., 2008, A&A)

3. WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その5：GRB radio afterglow

- ✓ 多波長領域において観測。
- ✓ 電波でのGRB afterglow観測のタイミングはバースト後数日経過。
- ✓ 電波でのafterglowは増光→ピーク→減光の時間発展
- ✓ 従来の観測における検出強度のピーク値：μ Jy～mJyのレベル



受信強度の点でWJNトランジェントと一致しない。

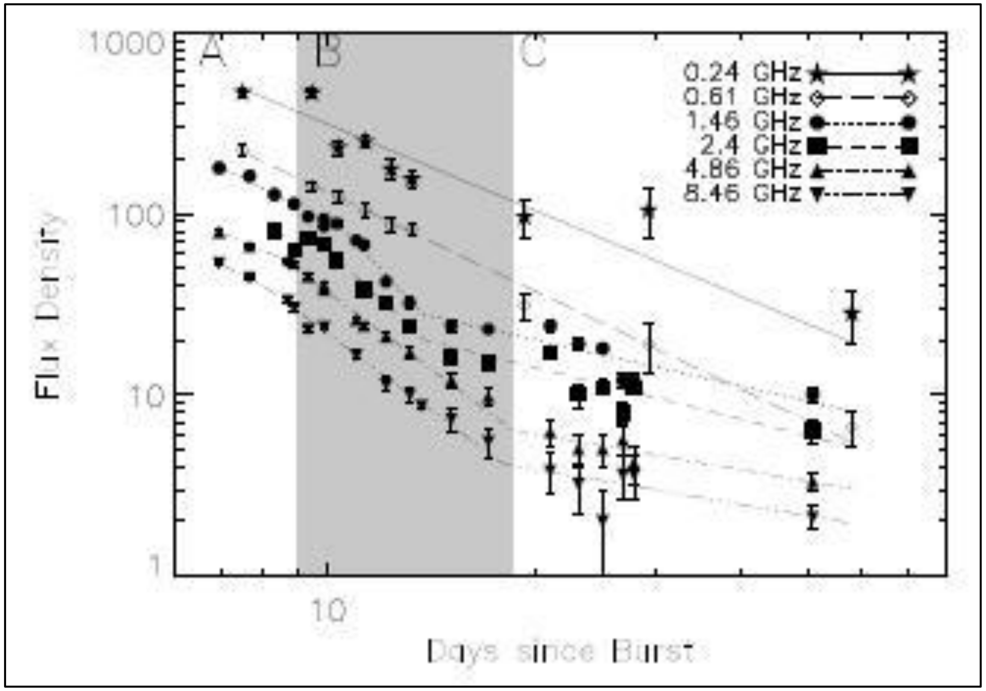
GRB080319B の追観測による残光の時間経過。電波での強度はピークでもmJyレベル。
(J. L. Racusin et al., Nature)

3.　WJNトランジェントの候補天体

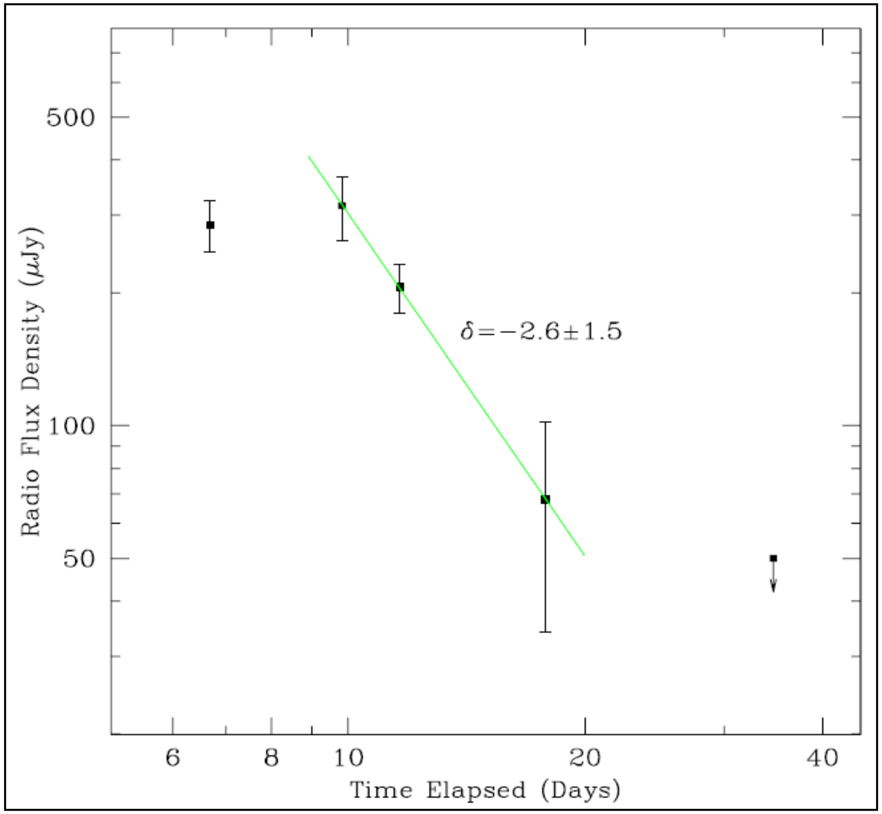
◇候補天体その6： Soft Gamma-ray Repeater(SGR)

- ✓ SGR：強力な磁場をもつ中性子星
- ✓ ガンマ線フレア起因の電波： フレア後、数日経過時点（100mJy以下）から減衰
- ✓ 時間発展から、電波でのピークはフレアの数日後 ：ピーク強度＜＜Jy
- ✓ 普段は弱いX線源

WJNトランジェントと一致しない



SGR1806-20のフレア(2004Dec)の電波追観測。
(P. B. Cameron et al., 2005)

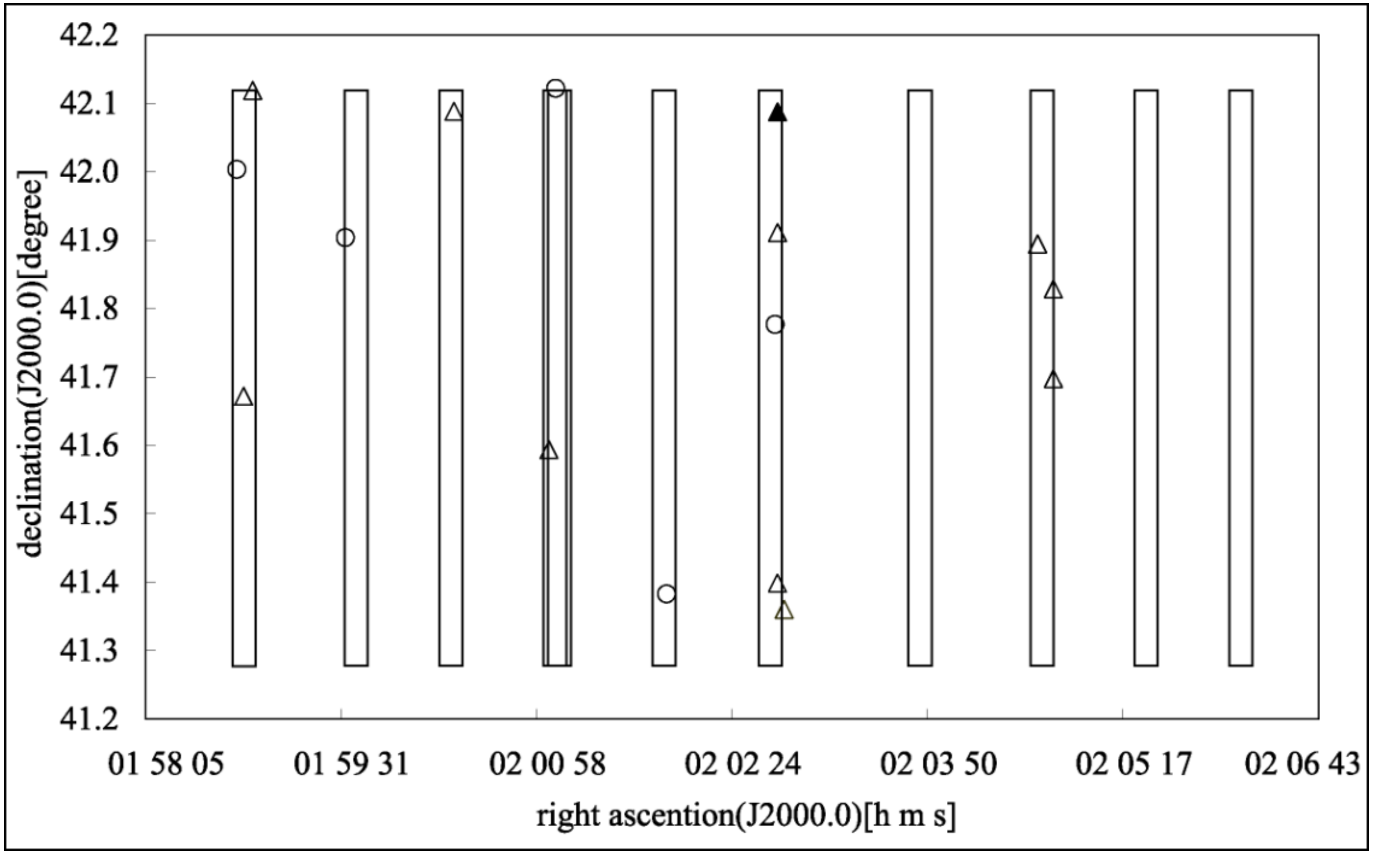


SGR1900+14(1998 Aug)の電波追観測。
(D. A. Frail, S. R. Kulkarni & J. S. Bloom)

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その7：AGN

- ✓ WJNトランジェント（WJN J0445+4130 除く）：｜b｜＞10°
- ✓ 短時間で急激に増光から減光：AGNのフレア？
- ✓ ガンマ線検出器EGRET によって検出されたガンマ線源の多くはblazar



3個のトランジェント(δ ～+41.7°)の位置エラーボックスと候補天体。
○：銀河，△：系外電波天体，▲：blazar（B3 0159+418）

3.　WJNトランジェントの候補天体

◇候補天体その7：AGN（つづき）

✓ AGNはX線領域での輻射と関連がよく知られている

✓ 4個のWJNトランジェント（WJN J0445+4130 除く）はX線源候補なし

✓ **4個のWJNトランジェントの候補天体：下記の特徴を持つ特殊なAGNの可能性**

・普段、電波とX線で非常に弱い輻射

・時折、強い電波フレアを起こす･･･Doppler Boost？

上記特徴を持つ天体でない場合：　新しいタイプのトランジェント電波源の可能性？

WJNトランジェント（赤緯＋41°　～＋42°　）の候補天体

Name	b (J2000.0)	Flux Density	Candidate type
WJN J0200+4142	~-19°	~2.7±0.5Jy	AGN (usually faint in X-ray & radio)
WJN J0202+4142	~-19°	~4.1±0.9Jy	AGN (usually faint in X-ray & radio)
WJN J0205+4142	~-19°	~4.3±0.6Jy	AGN (usually faint in X-ray & radio)
WJN J0445+4130	~-3°	~1.8±0.2Jy	X-ray binary/Microquasar
WJN J1043+4130	~+60°	~1.7±0.2Jy	AGN (usually faint in X-ray & radio)

4. Source Density

◆電波トランジェントの存在密度

✓ Nasu 1.4 GHz WJN transient（Matsumura et al. 2009）
Aerial density using 9 detections ～8.7×10^{-7}[arcmin^{-2}]

✓ Sub-mJy transient survey in archival data（Bower et al. 2007）
- VLA 944 epoch archival data (～22 year)
- **2 epoch survey detection rate** = 1.5±0.4 [deg^{-2}], Flux＞370μ Jy
- 2σ upper limit ～6 [deg^{-2}], Flux＞90μ Jy, Year-long transients
～1.9[deg^{-2}], Flux＞200μ Jy, 2 months transients

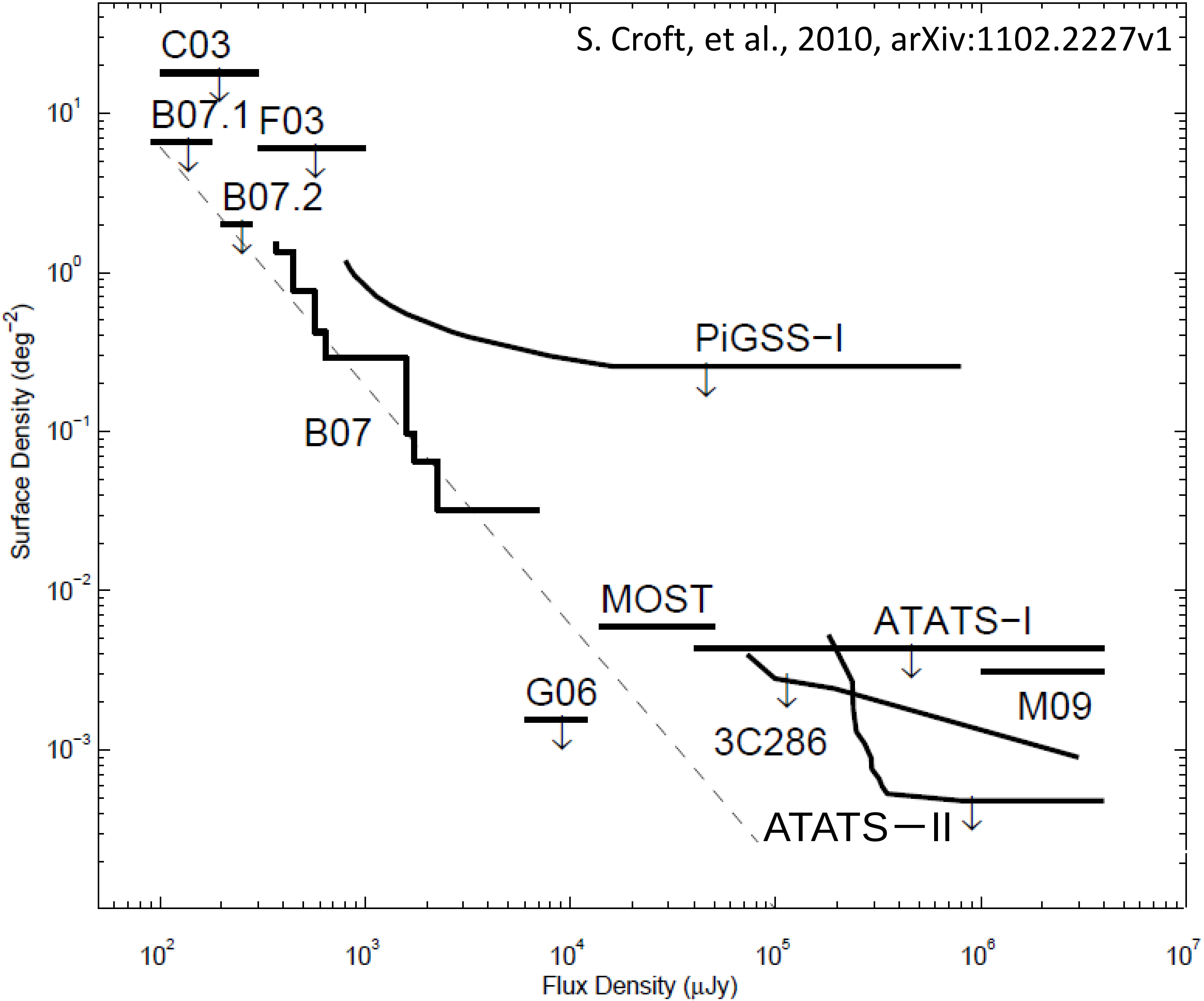
✓ Allen Telescope Array Twenty-centimeter Survey (ATATS)
- 12 epoch survey at 1.4 GHz
- Upper limit of **2 epoch rates** using **Non-detection** in ATATS, reported in ATATS-I (Croft & Bower et al. 2010), ATATS-II (Croft & Bower et al. 2011)

Properties of ATATS-II

Center Frequency [MHz]	Band Width [MHz]	Observation Period	Effective Epoch (good data)	Separation of Epochs [day]	Survey Area [deg^2]	Integration Time [minute]
1430	104.9	2009 Jan- Apr	11	1-40	564	～2 [a]

[a] 1minute (6×10s scans) in ATATS-I

4.　Source Density



4. Source Density

◆ATATSとのSource Densityの比較

ATATSと同一の定義にてWJN transientのSource Densityを算出・比較

◇定義

2 epoch rate R by S. Croft et al.(2010), Bower et al.(2007, 2010)

$R = N_t / (N_e - 1) A$

N_t : number of transients,

N_e : number of epochs,

A : coverage area, deg^2 (peak flux density of transients > S)

◇計算方法

- ✓ 3種のレート R （95% upper limit, 95% lower limit, 検出数）を算出
- ✓ 95% limitsとして N. Gehrels (1986)のsingle-sided limitの表を利用

$\sum_x \lambda_u^x e^{-\lambda u} / x! = 1 - CL$, $x = 0, 1, \cdots, n$,

$\sum_x \lambda_l^x e^{-\lambda l} / x! = CL$, $x = 0, 1, \cdots, n-1$, $n \neq 0$

λ_u: upper limit, CL: confidence level, n: number of detection

λ_l : upper limit

- ✓ Non-detection(n=0)の観測では $N_t = \lambda_u = 2.996 \fallingdotseq 3$ (CL=0.95 : 95%)

4. Source Density

◇結果

2 epoch rate $R = N_t / (N_e - 1) A$,

for transients with peak flux S, timescales of minutes to days

Parameters of ATATS-II

Name	Observation Period	N_e	A[deg2]	Detection	95% λ_u	95% λ_l
ATATS-II	2009 Jan-2009 Apr	11	564	0	2.996	

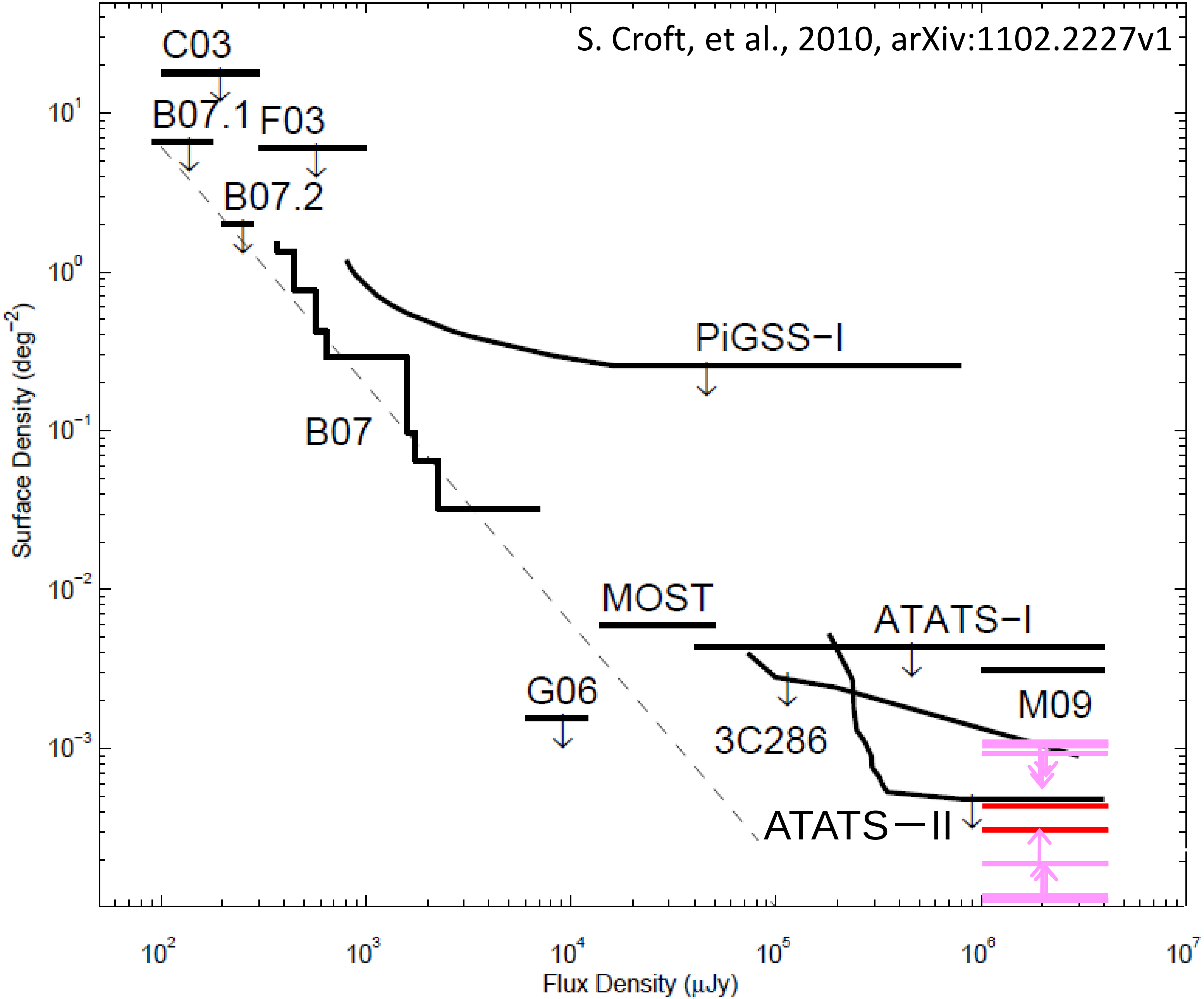
Parameters of Nasu 1.4GHz Wide-field Survey at 41°　≦δ≦42°

Name	Observation Period	N_e	A[deg2]	Detection	95% λ_u	95% λ_l
Unit 1	2004 Dec-2005 Jan	27	269.62	2	6.296	0.818
Unit 2	2005 Jan-2005 Feb	14	269.62	1	4.744	0.355
Unit 3	2006 Dec-2007 Jan	19	269.62	2	6.296	0.818

2 epoch rates of ATATS and Nasu 1.4 GHz Wide-field Survey at 41°　≦δ≦42°

Name	95% upper limit R	95% lower limit R	R based on detection	Peak flux S [mJy]
ATATS-II	5.31×10^{-4}			S≧232
Unit 1	8.98×10^{-4}	1.17×10^{-4}	2.85×10^{-4}	S≧1000
Unit 2	1.35×10^{-3}	1.01×10^{-4}	2.85×10^{-4}	S≧1000
Unit 3	1.30×10^{-3}	1.69×10^{-4}	4.12×10^{-4}	S≧1000

4. Source Density



5. 結論

◆NASU 1.4GHz Wide-field Surveyにおいて
2004～2006年に11個のWJNトランジェントを検出

◇+41° ＜δ ＜+42° のWJNトランジェント5個の候補天体タイプ：
1個(|b|～3°)：X-ray binary/Microquasar
4個(|b|～19°, 60°)：
普段はX-ray & radioで弱い輻射のAGN

◇WJNトランジェントのSource Density(2epoch rate) R [deg^{-2}]：
WJNトランジェントが検出された観測ユニットを用いた場合

$$2.85\times10^{-4} \leqq R \leqq 4.12\times10^{-4} \quad (<5.31\times10^{-4} \text{ in ATATS-II})$$

★検出されなかった観測ユニットを含め、
これまでの全蓄積データを用いれば、Rはさらに低下の見込み
⇒定義・仮定を精査・検討
⇒電波トランジェントサーベイのための確率論的な検討