

鹿島34m、臼田64mアンテナによるCrab パルサー観測から得られた Giant Radio Pulse の発生時間頻度分布

○関戸 衛(情報通信研究機構), 寺澤敏夫(東大宇宙線研究所), 岳藤一宏(情報通信研究機構), 竹内央(JAXA/宇宙科学研究所), 田中康之(広島大学)

Abstract

我々は、NICTの鹿島34mアンテナ、およびJAXA/ISASの臼田64mアンテナのL-bandおよびS-bandの受信機を使って、かに星雲のCrabパルサー(PSR B0531+21)から放射されるGiant Radio Pulse(GRP)の観測を行っている(日本天文学会2011年春季年会V44c, J46b; 日本天文学会2011年秋季年会V89a, 日本天文学会2012年春季年会A14a)。GRPの発生時間頻度はポアソン分布に従うことが報告されているが(Lundgren et al., ApJ453,433,1995; Karuppusamy et al., A&A 515,A36,2010)、我々の観測結果についてもGRPの検出頻度分布を調べたところ、GRPの出現頻度が無記憶性のポアソン分布に従うことを確認した。GRPをSNR>6で検出する平均時間間隔は、L-bandの場合、3~5秒、S-bandの場合30秒~1分であった。また、GRPフラックスの分布を調べると、Main PulseとInter Pulseでべき乗分布の傾きがそれぞれ異なることが確認された。パルスのエネルギーが単純にSNRに比例するとして計算すると出現確率密度分布の冪指数は、Main Pulseで-2.5~-2.8, Inter Pulseで-1.3~-2.0であった。

2. GRPの発生確率と時間間隔の分布

定数 $\lambda \geq 0$ に対して、自然数を値にとる確率変数 X が $P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$ を満たすとき、確率変数 X はパラメータ λ のポアソン分布に従うという。

λ を無記憶事象の単位時間当たりの平均発生回数とすると、時間 t の間の事象発生回数の期待値は λt であり、 N_t を t 時間幅に発生した事象の数として、その確率はポアソン分布に従い

$$P(N_t = k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

で表される。

この式を使って、時間間隔 t の間に少なくとも1回の事象が発生する確率は $P(N_t \geq 1) = 1 - e^{-\lambda t}$ であり、単位時間当たりの確率密度は(1)式のように指数分布に従う。

$$\frac{d}{dt} P(N_t \geq 1) = \lambda e^{-\lambda t} \dots\dots(1)$$

同様に事象が2回、3回起こる場合には、その時間間隔は

$$P(N_t \geq 2) = 1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t}$$

$$P(N_t \geq 3) = 1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t} - \frac{(\lambda t)^2}{2!} e^{-\lambda t}$$

の確率分布に従い、それぞれの単位時間当たりの確率密度関数は以下のようにあらわされる。

$$\frac{d}{dt} P(N_t \geq 2) = \lambda^2 t e^{-\lambda t} \dots\dots(2)$$

$$\frac{d}{dt} P(N_t \geq 3) = \frac{\lambda^3}{2} t^2 e^{-\lambda t} \dots\dots(3)$$

式(1)を観測から検出されたGRP(SNR ≥ 6)の発生時間間隔の分布にパラメータフィットさせてGRPの単位時間当たりの平均発生頻度 λ を推定すると、その λ によってGRPが2個、3個が受信される間隔の実測値が(2)式(3)式のポアソン分布から高い精度で予測できる(図2)。このことから、GRPはそれぞれの単発パルスが無記憶性の相関のない事象であることがわかる。

1. 観測

Crab Pulsar(B0531+21)やミリ秒パルサー(B1937+21)などいくつかのパルサーから、平均的なパルスFluxの数万倍以上の強力な単パルス(図1)が電波領域で放射されていることが知られており、Giant Radio Pulse (GRP)と呼ばれている。我々は、NICTの鹿島34mアンテナ及び、JAXA/ISASの臼田64mアンテナを使ってGRPの観測を行い、GRPの出現確率及び、強度分布について調べた。表1に鹿島34m及び臼田64mアンテナの受信機性能を示している。

DM=56.7656, 2010/339 16:46:39

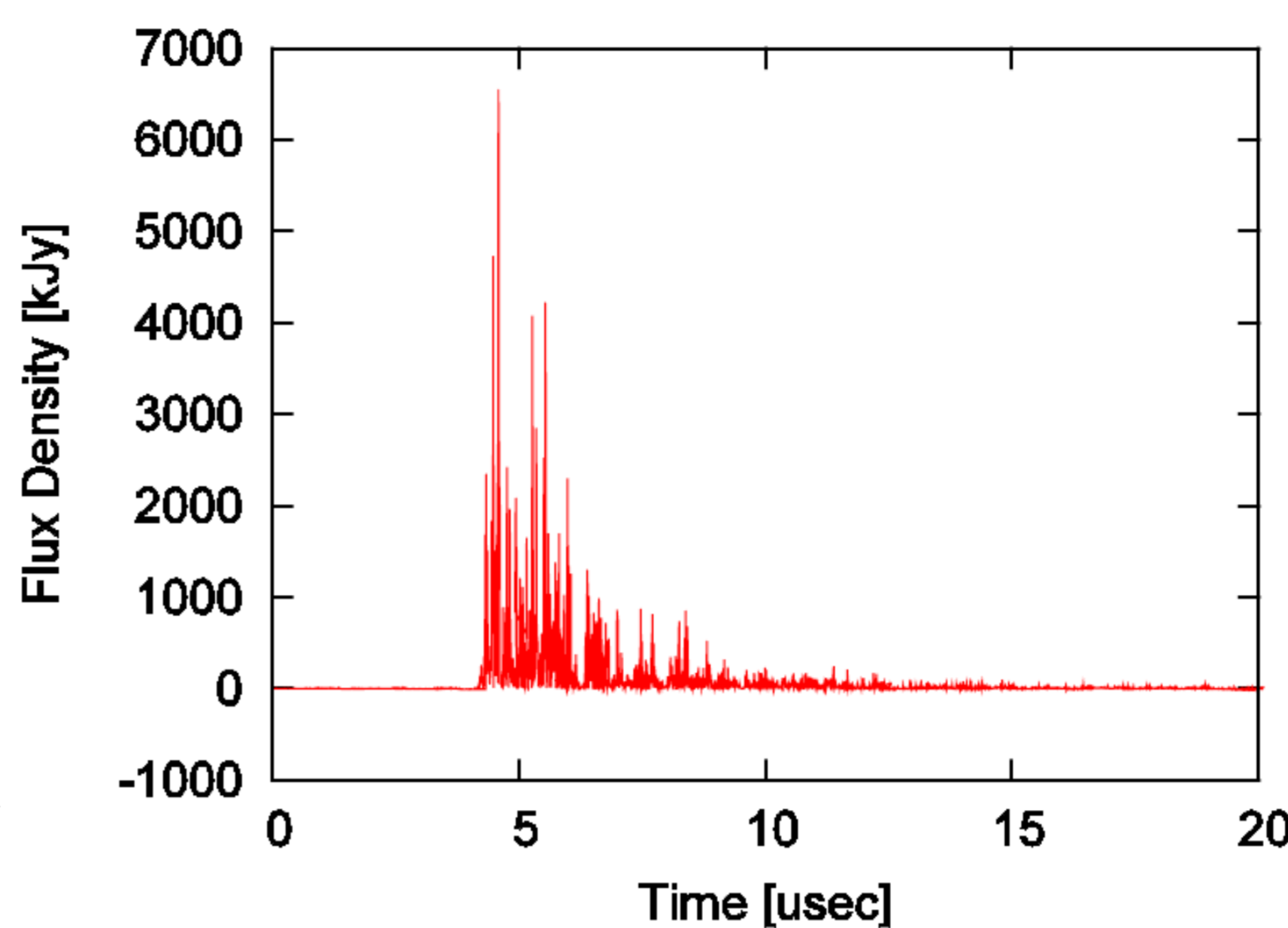


図1. 鹿島34mアンテナ(L-band)で観測されたGRPの例。星間電離媒質によるマルチパスによるパルスブロードニングが確認できる。またGRPの単パルスは多くの鋭いパルスによって構成されていることがわかる。

表1. 観測で使った鹿島34m及び臼田64mアンテナの受信機性能。

Antenna	Usuda 64	Kashima34	
Diameter	64	34m	
Freq.	1.4	2.3	1.4 GHz
Beam size	11.5	7.0	21.7 arc min
Efficiency	0.5	0.5	0.6
Tsys	50	40	40 K
SEFD (EI=90)	68.6	85.8	202.7 Jy
EI=75	71.1	88.8	209.8 Jy
EI=45	97.1	121.3	286.6 Jy
EI=13	305.1	381.4	900.9 Jy
Tausus-A	872.1	762.7	872.1 Jy
Noise(EI=90)	941	848	1075 Jy
EI=75	943	851	1082 Jy
EI=45	969	884	1159 Jy
EI=13	1177	1144	1773 Jy

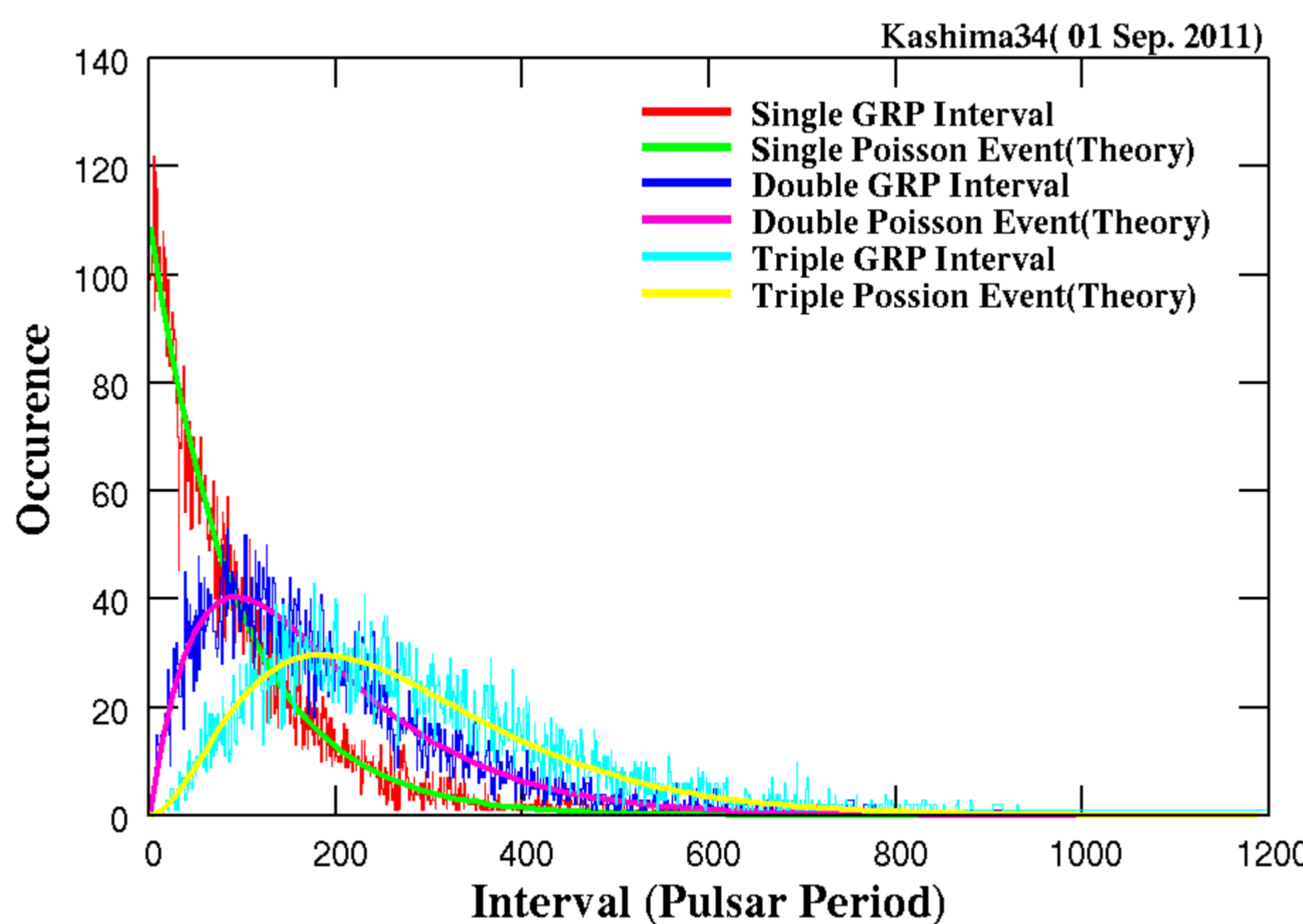


図2. 観測の結果得られたGRPの平均発生間隔(赤線)に対して平均発生頻度 λ を(1)式で推定すると、GRPが2個(青色)及び3個(水色)受信される時間間隔の分布はこのパラメータを使った(2)、(3)式により高い精度で予測される。

表2. GRPの観測を行った2010年~2011年のエポックと解析の結果得られたGRPの平均発生間隔

Epoch	Antenna	Band	GRP rate [1/period]	平均出現間隔	
				[period]	[sec]
2010Apr06	Kas34	L-band	0.00617	162.1	5.36
2011Mar22	Usd64	L-band	0.00690	144.9	4.79
2011Mar22	Usd64	S-band	0.00110	909.1	30.07
2011Sep01	Kas34	L-band	0.01074	93.1	3.08
2011Oct17	Kas34	L-band	0.00679	147.3	4.87
2011Oct17	Usd64	S-band	0.00053	1886.8	62.42

3. GRPのFlux分布

Crab Pulsarのパルス波形は、Main Pulseと周期的にほぼ180度の位相関係にあるInter Pulse からなる。検出されたGRPをMain PulseとInter Pulseで分けて信号対雑音比(SNR)のヒストグラムをとると図3のようになる。

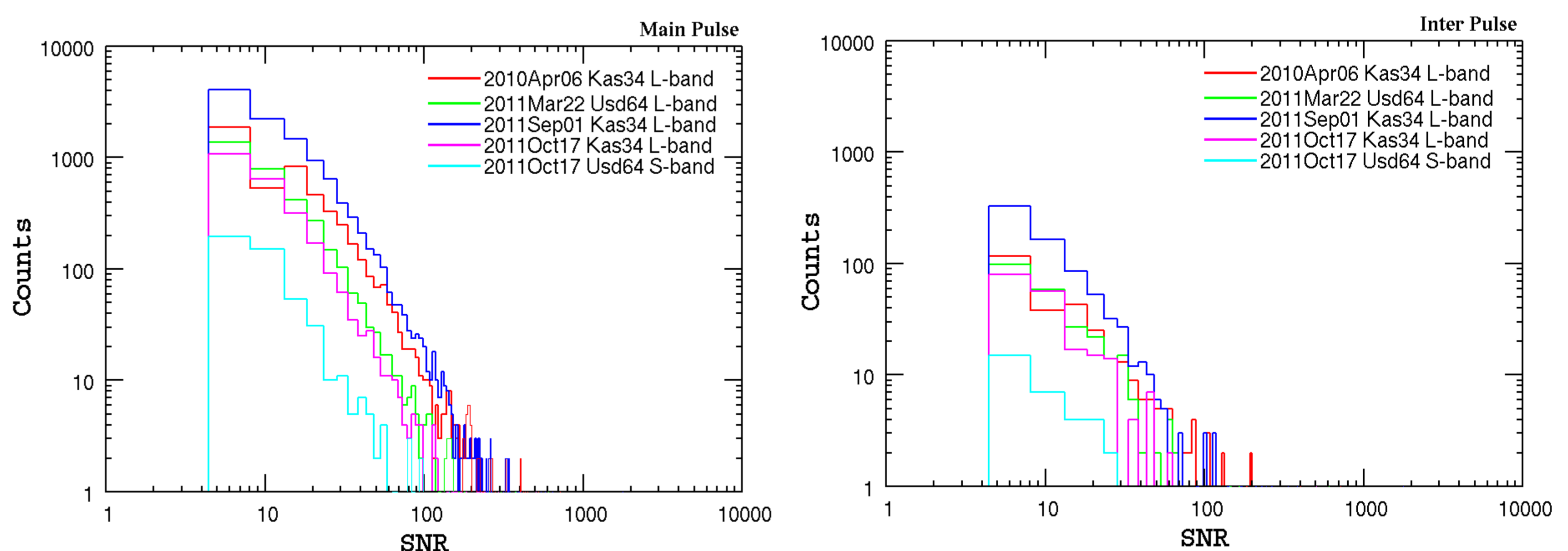


図3. 信号対雑音比(SNR ≥ 6)のヒストグラムをMain Pulse(左)とInter Pulse(右)について示す。近似的に横軸のSNRをパルスのFluxとみなすことができる。

SNRをパルスのエネルギーに変換するには、観測周波数及び仰角に応じたシステム雑音温度の評価が必要であるが、表1に示すようにシステム雑音温度は主に、パルサーの背景にあるかに星雲(Taurus-A)のFluxに支配されており、臼田64m、鹿島34mアンテナのシステム雑音(SEFD)はどちらもほぼ1000Jyであるから(表1)、図3の横軸は近似的にパルスのエネルギーとみなすことができる。カウント数は観測時間に依存するため、長時間の観測を行えばヒストグラムは形を変えずに上方に平行移動するはずである。各観測結果を平行移動してパルスのエネルギー分布をMain PulseとInter Pulseで揃えてみると図4のように、それぞれ異なるべき乗の分布に従うことがわかる。

4. まとめ

- 鹿島34m、臼田64mアンテナを使ってCrab PulsarのGRP観測を実施し、GRPの発生確率分布がポアソン分布に従うことが確認された。これによりGRPが無記憶事象であることがわかる。平均発生(検出)頻度は受信周波数(受信感度とFlux)に依存して異なるが、同一周波数でも変動が見られる(2011Sep01)可能性があり、確認が必要である。
- GRPの強度分布を調べた結果、Main PulseとInter Pulseで異なるべき乗の分布に従うことが確認された。これまでの報告(Popov&Stappers 2007)と比較するとMain Pulseはほぼ同様の結果であるがInter Pulseでは我々の方がべき指数が小さい。

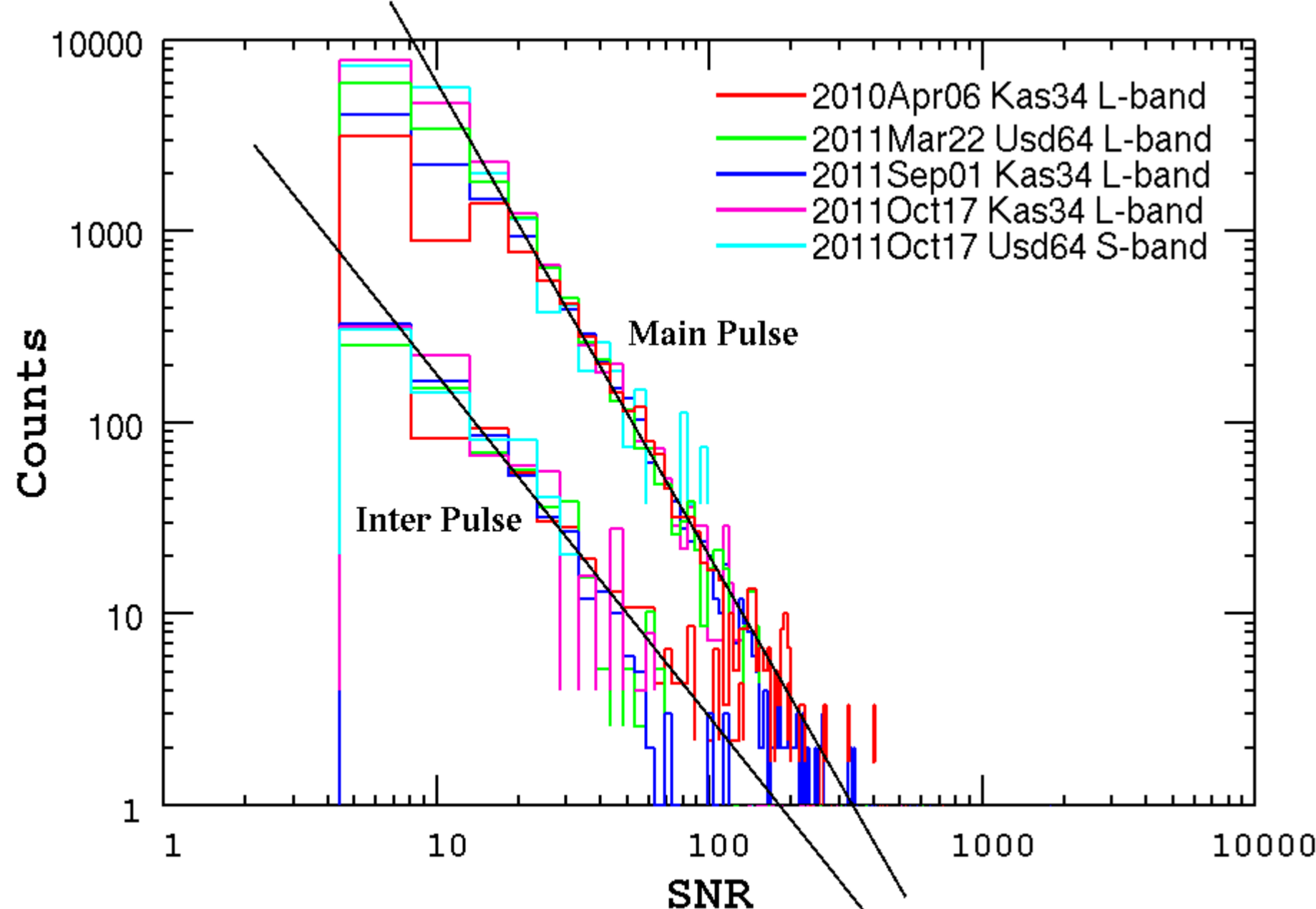


図4. 各観測エポックのGRPのSNRのヒストグラムを上方に平行移動して分布を揃えると、Main PulseとInter Pulseでそれぞれ異なるべき乗(-2.6, -1.7)の分布に従うことがわかる。