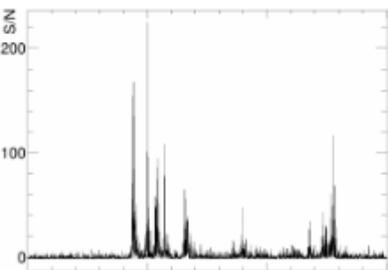


パルサーの 巨大電波パルスとSKA

三上 諒

(東京大学・宇宙線研究所)

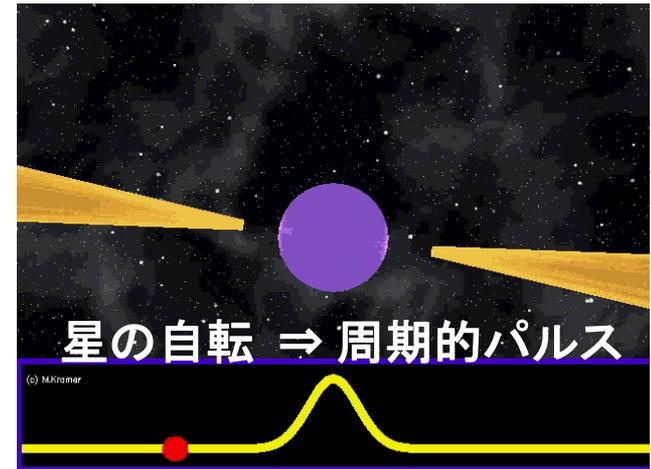


パルサーと巨大電波パルス

◎パルサー(回転中性子星)

- ・超強磁場 (地表の約1兆倍)
- ・高速自転 (ミリ秒～数秒)

⇒宇宙の
「**極限環境**」



[http://www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/double_pulsarcd/media/lighthouse.avi]

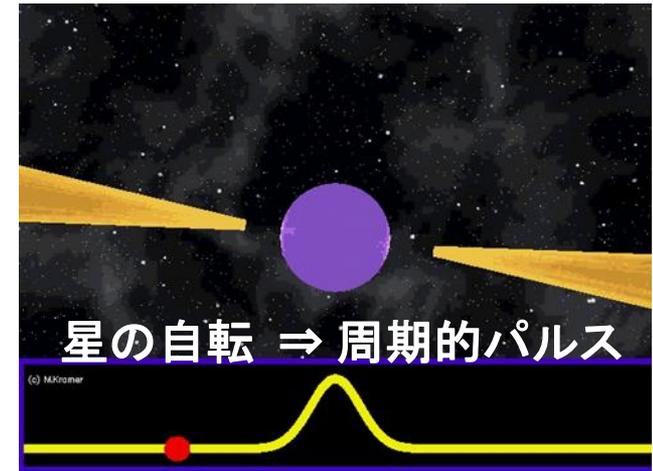
電波～ γ 線まで、幅広い周波数帯域で
パルス放射が観測される

パルサーと巨大電波パルス

◎パルサー(回転中性子星)

- ・超強磁場 (地表の約1兆倍)
- ・高速自転 (ミリ秒～数秒)

⇒宇宙の
「**極限環境**」

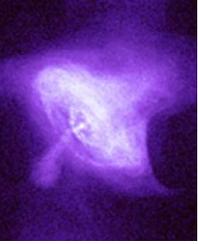


[http://www.jb.man.ac.uk/research/pulsar/double_pulsarcd/media/lighthouse.avi]

電波～ γ 線まで、幅広い周波数帯域で
パルス放射が観測される



巨大電波パルス(Giant Radio Pulse, GRP)
に注目

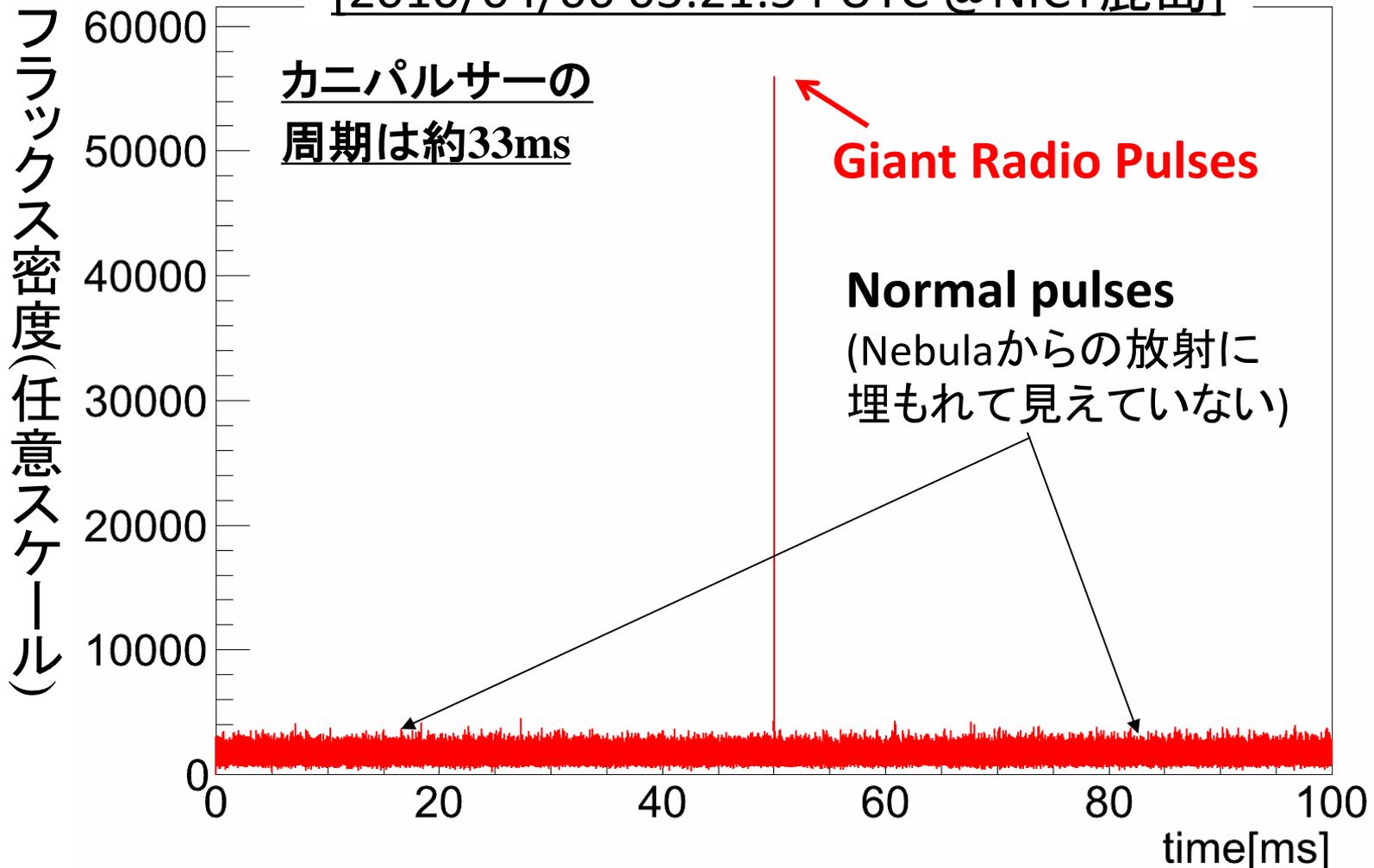


パルサーの巨大電波パルス (Giant Radio Pulse, GRP)



カニパルサーでのGRPの例

[2010/04/06 03:21:54 UTC @NICT鹿島]

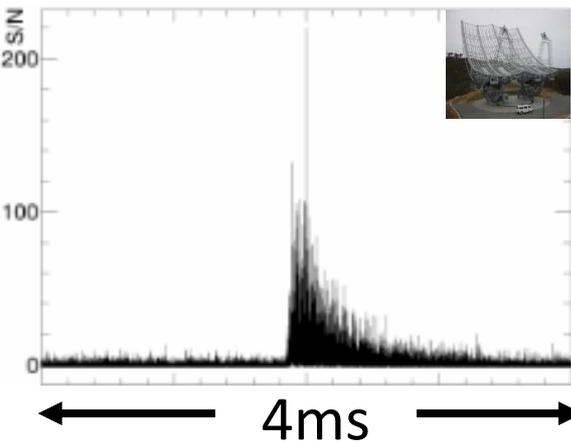


パルサーの巨大電波パルス (Giant Radio Pulse, GRP)

2014/6/1 03:54:31UTC頃に3地点で同時観測されたカニパルサーGRP

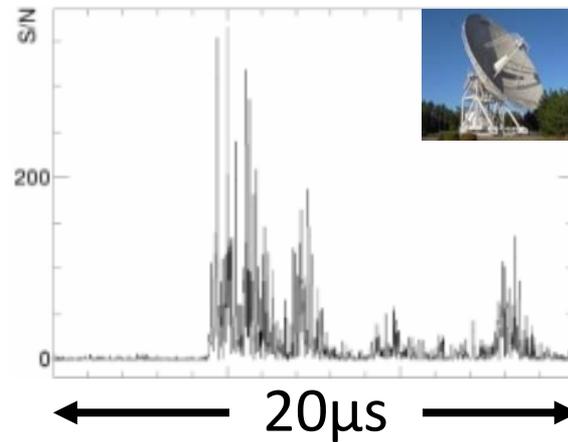
323.1-327.1MHz

[東北大飯舘観測所]



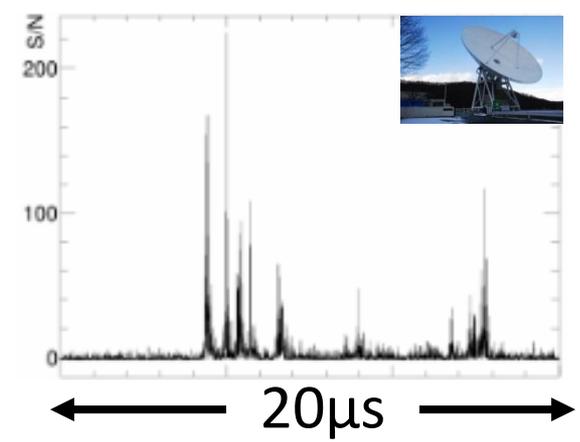
1400-1443MHz

[NICT鹿島]



2182-2344MHz

[JAXA臼田]



- ・現在10個程度のパルサーでGRPが発見されている
- ・通常パルス強度の数千倍を超える
- ・ ≥ 100 周期に一回発生
- ・ナノ秒スケールで激しい変動を見せる
- ・放射機構は未解明

本研究の目的

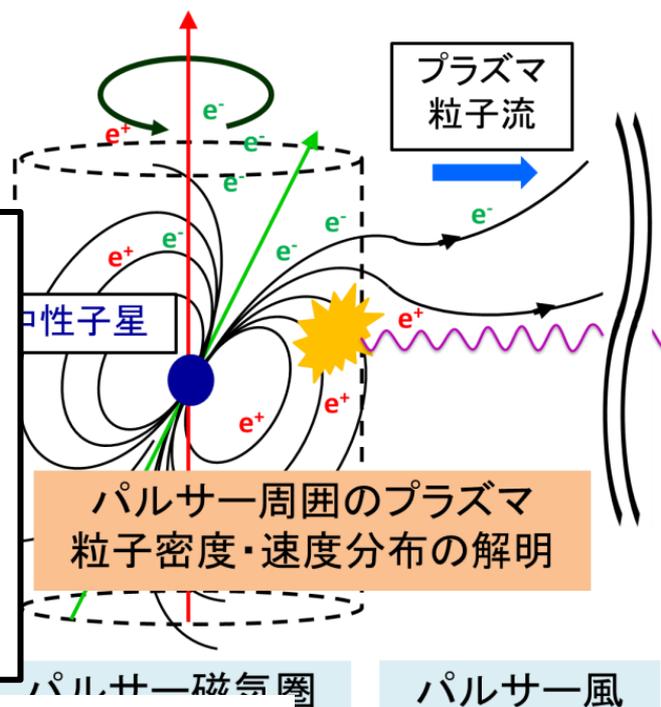
GRPの**多周波同時観測**により到来時刻差を精密測定し、パルス伝播路、特に**パルサー近傍のプラズマ密度構造**に迫る

パルサーの強磁場・高速自転
→多量の[カニパルサーで $\sim 10^{40}$ 個/秒]
高エネルギープラズマ放出を示唆
[Tanaka & Takahara, 2010など]

高エネルギープラズマ粒子が
どのように生まれるか?

||

パルサーの電磁場エネルギーがどの
ように粒子エネルギーに変換されるか?



に対する理解への手掛かりとなることを期待

星間プラズマ中の伝播による パルスの群遅延(dispersion delay)効果

角振動数 ω のパルスがプラズマ中の距離 L を伝播するのに要する時間 T は、

$$T = \int_0^L \frac{ds}{\underbrace{V_g}_{\text{群速度}}} = \int_0^L \frac{ds}{c \underbrace{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}}_{\text{プラズマ中での屈折率}}}$$

$\omega \gg \omega_{pe}$ として展開すると、

Dispersion Measure (DM)

$$T \simeq \int_0^L \frac{1}{c} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right] ds = \frac{L}{c} + \frac{e^2}{2\pi m_e c} \frac{1}{f^2} \int_0^L n_0 ds$$

これまでの研究では、DM項($\propto f^{-2}$)のみが考慮され、より高次の項は小さいとしてしばしば無視されてきた

f⁻²のdelayの効果のみで十分か?

—Kuz'min et al. (2008)の報告—

- 111, 63, 44MHz帯での
カニパルサー GRP観測
- DMのみでは説明できないGRP
の到来時刻差が見られた
111MHz-63MHz間 → ~ 67 ms
111MHz-44MHz間 → ~ 150 ms

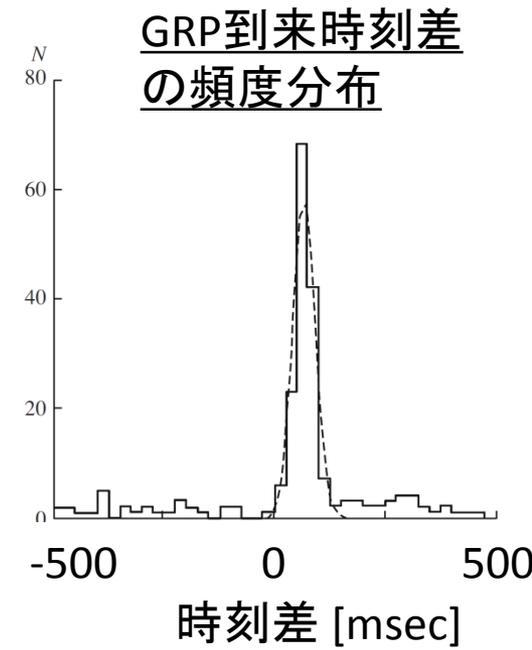
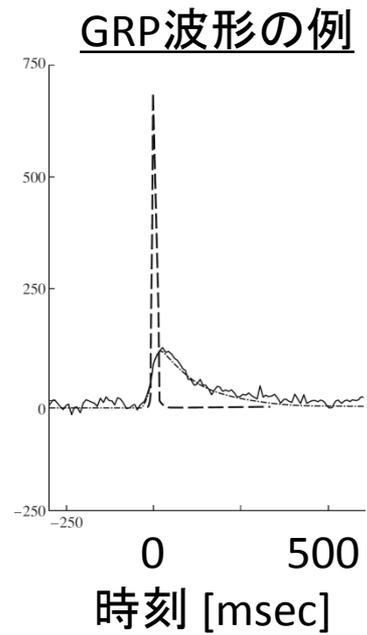


Table 2. Results of observations at 111 and 63 MHz

Dates	<i>N</i>	DM _{<i>JB</i>} , pc/cm ³	Δ <i>t</i> , ms	σ, ms
May 23–May 25, 2006	14	56.747	67	25
July 3–July 12, 2006	36	56.751	68	22
Oct. 3–Oct. 23, 2006	110	56.754	66	26
Nov. 5–Nov. 8, 2006	48	56.773	68	36
All runs	208	—	67	25

f^{-2} のdelayの効果のみで十分か? —Kuz'min et al. (2008)の解釈—

低周波数のGRPが、DMにより与えられる遅延を補正してもさらに遅れている

→ dispersion delayの高次項が見えているかも?

$$T = \int_0^L \frac{ds}{V_g} = \int_0^L \frac{ds}{c\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}} \approx \frac{L}{c} + \frac{q^2}{2\pi m_e c^2} \frac{1}{f^2} DM + \frac{3}{8c} \left(\frac{q^2}{\pi m_e} \right)^2 \frac{1}{f^4} EM$$

$$EM \equiv \int_0^L n_e^2 ds \quad \text{“Emission Measure”}$$

→視線方向に、平均と比較して高密度のプラズマ領域が一部だけ存在し、そこを伝播したと解釈

(Kuz'minらの得たGRP到来時刻差 $\rightarrow EM \sim 4 \times 10^6 \text{pc/cm}^6$)

Kuz'min et al. (2008)で得られた EM $\sim 4 \times 10^6 \text{pc/cm}^6$ について

$$T = \int_0^L \frac{ds}{V_g} = \int_0^L \frac{ds}{c \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}} \simeq \frac{L}{c} + \frac{q^2}{2\pi m_e c^2} \frac{1}{f^2} DM + \frac{3}{8c} \left(\frac{q^2}{\pi m_e} \right)^2 \frac{1}{f^4} EM$$

星間乱流による典型的なEM値 EM_{ISM} は、
[1pcスケールの密度揺らぎを仮定]

$$EM_{ISM} = L \langle (\Delta n_e^2)_L \rangle = L \int d^3k P_{n_e}(\vec{k})$$

$$\sim L \frac{4\pi}{3} k^3 C_n^2 k^{-11/3}$$

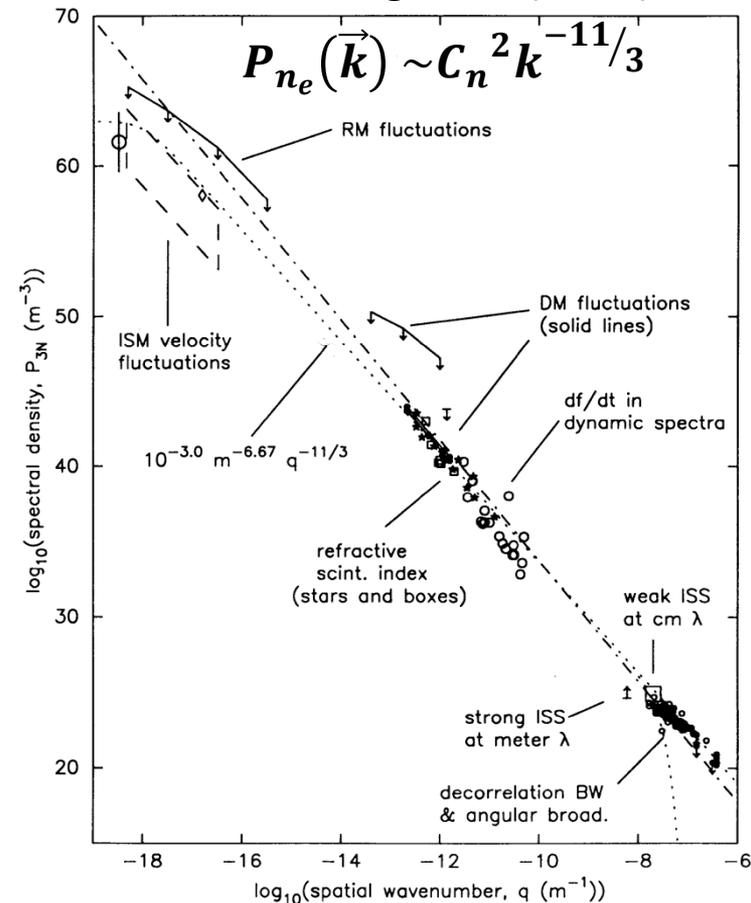
$$\sim 10^{-4} [\text{pc/cm}^6]$$

$$\ll 4 \times 10^6 \text{pc/cm}^6$$

⇒ 典型的な星間プラズマでは
観測値を説明困難

⇒ パルサー近傍のプラズマ構造?

[Armstrong et al. (1995)]



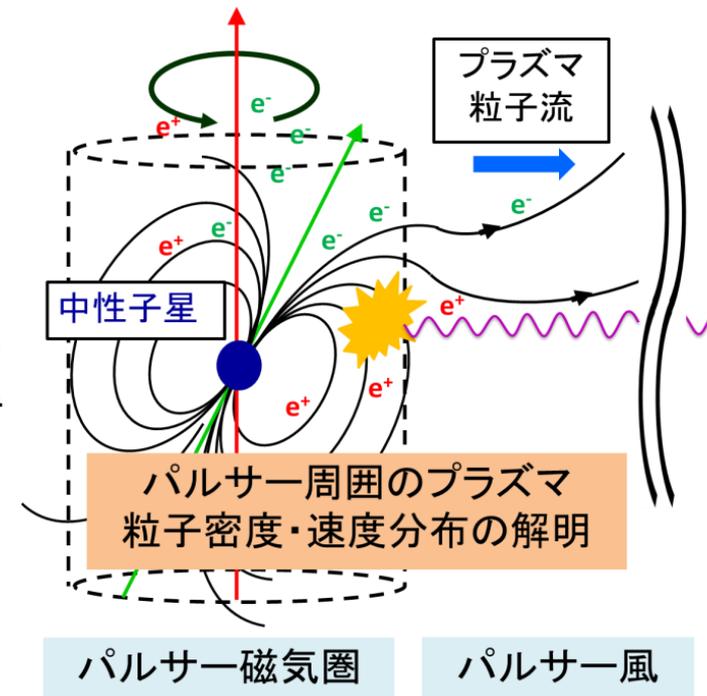
Dispersion効果の詳細な検証

$$\Delta t \sim 4.15 \times 10^{-3} \text{s} \left(f_{1,\text{GHz}}^{-2} - f_{2,\text{GHz}}^{-2} \right) DM_{\text{pc/cm}^3} + 0.25 \times 10^{-12} \text{s} \left(f_{1,\text{GHz}}^{-4} - f_{2,\text{GHz}}^{-4} \right) EM_{\text{pc/cm}^6}$$

EM項の調査により、**パルサー近傍の
プラズマ密度構造**に迫れる可能性

◎マイクロ秒～ナノ秒の構造を持つ
GRPは、到来時刻差の精密な調査に最適

◎広帯域であるほど精密決定可能
⇒SKAを用いた広帯域同時観測に期待



本グループの観測における カニパルサーGRPの到来時刻差比較

GRP at 01:32:51 UT on 7 Sept 2014



Crab pulsar

UTC: 5571.537821375000
01:32:51.538

DM = 56.764 pc/cm³

EM = 0 pc/cm⁶

_UsdX 8429-8461

臼田 8.3GHz

_UsdX 2312-2344

_UsdX 2234-2266

臼田* 2.3GHz

_UsdX 2182-2214

_ksmL 1702-1734

_ksmL 1614-1646

鹿島* 1.4-1.7GHz

_ksmL 1404-1436

_Idt 323- 327

飯館 325MHz

5549.292625144451

5549.295125144450

5549.297625144450

← 5ミリ秒 →

*複数の副周波数帯から代表的な3つを選択して表示

本グループの観測における カニパルサーGRPの到来時刻差比較

GRP at 01:32:51 UT on 7 Sept 2014



Crab pulsar

UTC: 5571.537821375000
01:32:51.538

DM = 56.764 pc/cm³

EM = 0 pc/cm⁶

_UsdX 8429-8461

臼田 8.3GHz

_UsdX 2312-2344

_UsdX 2234-2266

臼田* 2.3GHz

_UsdX 2182-2214

_ksmL 1702-1734

_ksmL 1614-1646

鹿島* 1.4-1.7GHz

_ksmL 1404-1436

_Idt 323- 327

飯館 325MHz

5549.294625144450

5549.295125144450

5549.295625144450

← 1ミリ秒 →

*複数の副周波数帯から代表的な3つを選択して表示

本グループの観測における カニパルサーGRPの到来時刻差比較

GRP at 01:32:51 UT on 7 Sept 2014



Crab pulsar

UTC: 5571.537779750000
01:32:51.538

DM = 56.764 pc/cm³

EM = 0 pc/cm⁶

_UsdX 8429-8461

臼田 8.3GHz

_UsdX 2312-2344

_UsdX 2234-2266

臼田* 2.3GHz

_UsdX 2182-2214

_ksmL 1702-1734

_ksmL 1614-1646

鹿島* 1.4-1.7GHz

_ksmL 1404-1436

_Idt 323-327

飯館 325MHz

5549.295033408912

5549.295083408912

5549.295133408912

観測所間の
受信機内部遅延、
記録系の時計のずれ
等の較正に難しさ
⇒SKAによる広帯域
同時観測で改善可能?

← 100μ秒 →

*複数の副周波数帯から代表的な3つを選択して表示



SKAでどの程度のEMまで 検証可能か？



高周波数帯 (SKA-mid)のGRPを用いてまずDMを決定、
そのDMを用いて低周波数帯(SKALow)のGRPとの到来時刻差を比較し、EMを決定する。

DMが誤差 δDM で決定したとすると、

$$EM_{\text{pc/cm}^6} = \frac{\Delta t'}{0.25 \times 10^{-12} \left(f_{\text{min, GHz}}^{-4} - f_{\text{max, GHz}}^{-4} \right)} \pm \frac{4.15 \times 10^{-3} \left(f_{\text{min, GHz}}^{-2} - f_{\text{max, GHz}}^{-2} \right) \delta DM_{\text{pc/cm}^3}}{0.25 \times 10^{-12} \left(f_{\text{min, GHz}}^{-4} - f_{\text{max, GHz}}^{-4} \right)}$$

$\delta DM = 0.001 \text{ pc/cm}^3$ とし、 $f_{\text{min}} = 0.05 \text{ GHz}$ 、 $f_{\text{max}} = 0.30 \text{ GHz}$ より、

$$EM_{\text{min, SKA}} \simeq 4.04 \times 10^4 [\text{pc/cm}^6]$$



SKAでのEM項検出に 要求される時刻精度



$$\Delta t_{EM} = 0.25 \times 10^{-12} s \left(f_{1,GHz}^{-4} - f_{2,GHz}^{-4} \right) EM_{pc/cm^3}$$

SKAの帯域で、 $EM = 4 \times 10^6 pc/cm^3$ の場合に生じる遅延量

SKA1-mid band1 (0.35-1.05GHz) : 65 μ s

SKA1-mid band2 (0.95-1.76GHz) : 1.1 μ s

SKA1-mid band3 (1.65-3.05GHz) : 0.12 μ s

(SKA1-low : 159ms)

高周波数帯での到来時刻差比較においては、 ≤ 100 nsの
分解能での観測が必要

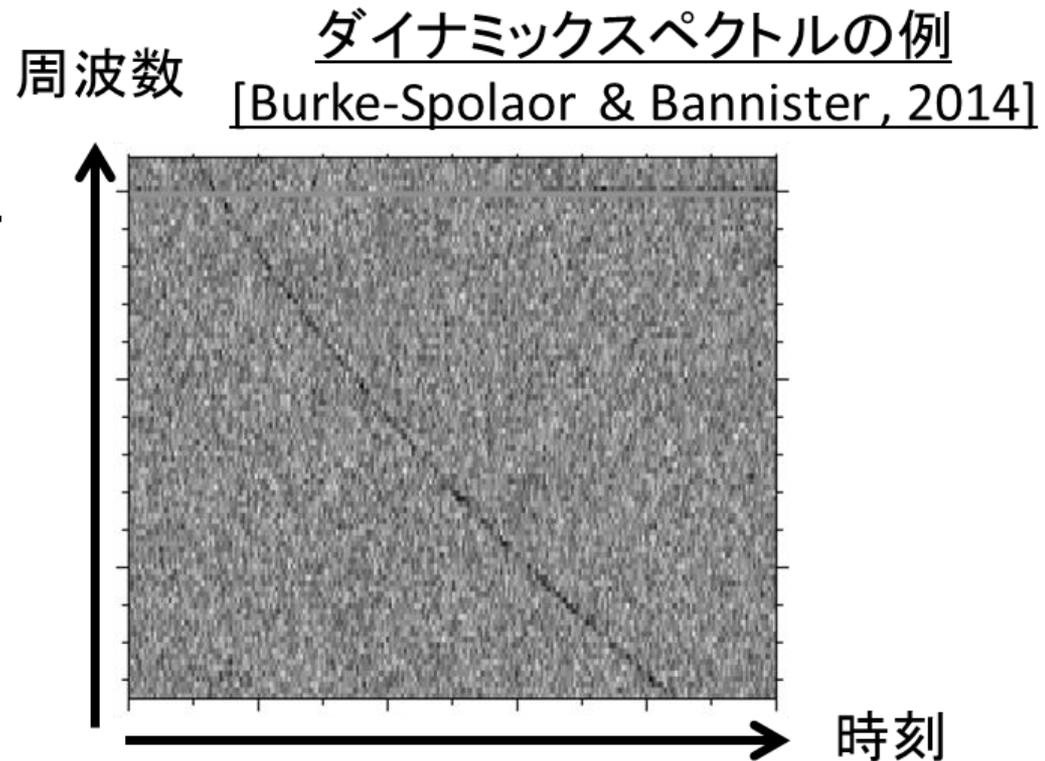
[cf. SKA1-midにおけるpulsar timing modeの時間分解能 : 100ns]

(SKA1 System Baseline Designより)

SKAを用いた高密度プラズマ領域の検証

広帯域受信可能なSKAを使えば、ダイナミックスペクトル上で理論線をfitし、EM項を直接検証できる可能性がある

(⇔ただし、パルス強度が十分強いものに限られる)



Summary

- ・マイクロ秒～ナノ秒の構造を持つGRPの多周波同時観測による到来時刻差の精密な調査
 - ⇒パルサー近傍のプラズマ密度構造に迫れる可能性
 - ⇒パルサーでの粒子生成・加速機構への手掛かり
- ・広帯域受信可能なSKAでは、先行研究より更に小スケール(密度、サイズ)の構造に迫れる可能性がある
- ・到来時刻差決定には $\leq 100\text{ns}$ の時間分解能での観測が必要である