

Pulsar の電波観測について – Review of Recent Pulsar Study –

関戸 衛

情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター

概要

パルサーは天体物理の研究対象として大変興味深い天体であり、マイクロ波におけるパルスのタイミング観測から多くの情報が得られる。SKA のサイエンスターゲットのひとつとして挙げられているパルサーであるが、日本においてパルサーを電波で観測している研究機関は少ない。この報告では、最近のパルサーのマイクロ波観測に関する興味深い論文を紹介し、SKA に関心のある日本の研究者の一助としたい。

1 はじめに

パルサーは宇宙の高エネルギー物理の実験室といわれ、電波、光、X 線、ガンマ線に至る広い周波数領域で観測的研究が行われている。しかし、電波望遠鏡を使ったパルサー観測を行っている研究機関は、日本国内ではほんのわずかである。本研究会の主題である SKA において、パルサーの重要なサイエンスターゲットのひとつとしてあげられており、パルサーをマイクロ波で観測することによって、パルサーや宇宙空間の媒質についてどのような研究ができるのか理解することは、SKA に対して日本の研究者がどのように取り組んでいくべきか考える材料として大変重要である。

パルサーは、強力な磁場を持つ自転する中性子星と考えられており、磁極から指向性の高い電波を放射しているため地上からは周期の安定したパルス列として観測される。そのパルス列のタイミング観測及び干渉系観測などからパルサーの物理量や、パルサーと地球の間の星間媒質に関する情報が得られる (表 1)。次節以降では、パルサータイミング観測による星の質量の推定、天体位置及び高精度な距離の測定、パルス周期の高い安定度を使った重力波検出に関する研究、VLBI

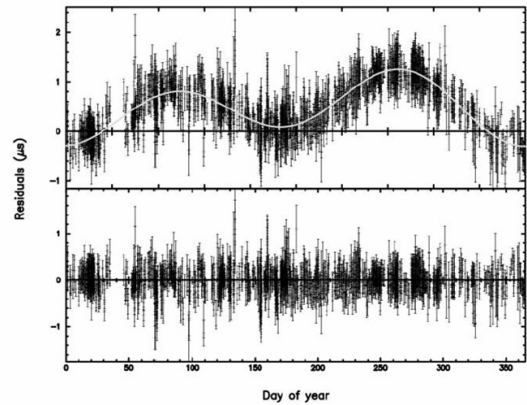


図 1: J0437-4715 のパルサータイミング残差に見られる年周視差の Signature(上) と推定後のタイミング残差 (下) (Verbiest et al.2008)

を使った位置天文観測、パルサーのパルスを使って星間媒質を調べるシンチレーション観測、デイスパージョンメジャーと位置天文学的な距離の観測から銀河系の電子密度モデルを作るなど、最近のパルサーの電波観測による研究成果を紹介する。

2 Pulsar 観測

2.1 Pulsar Timing

パルサータイミング観測は、パルスの到達タイミングを精密に計測することによって表 1 に示すような、パルサーに関する多くの情報が得られる重要な観測手法である。重い中性子星のスピンの安定性に基づく安定なパルスのおかげで、タイミングノイズの少ないパルサーについては、固有運動や年周視差の測定 (図 1) も可能である。

年齢の若いパルサーは、中性子星の回転安定性が低く、グリッチと呼ばれるタイミングノイズのため、従来は位置や固有運動などの位置天文パラメータの推定

表 1: Pulsar の観測から測定される量 (PT:Pulsar Timing)

物理量	関係式	観測方法
特性年齢	$\tau_c = P/2\dot{P}$	PT
表面磁場	$B_s = 3.2 \times 10^{19} \sqrt{P\dot{P}}$	PT
星間電子柱密度	$DM = \int n_e dl$	PT
星間磁場と電子密度	$LM = \int B_{\parallel} n_e dl$	PT
偏波率		干渉計
位置、固有運動		干渉計
年周視差		干渉計

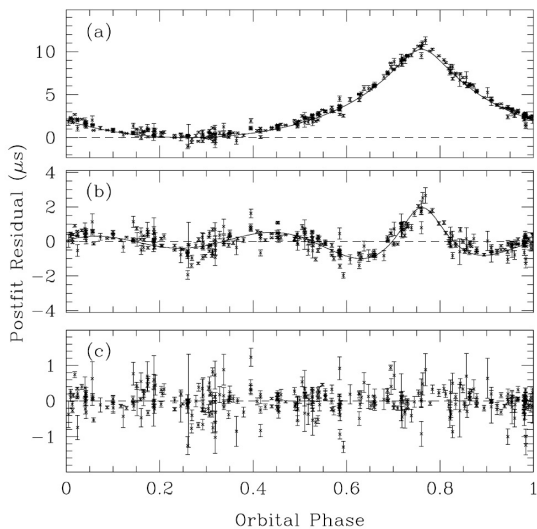


図 2: 連星パルサー J1713+0747 のタイミング観測の解析残差に現れるシャピロ遅延効果 (上) と推定後の残差 (下) (Splaver et al., 2005)。

が困難であった。しかし近年、Hobbs ら (2003) はタイミング解析残差を白色雑音化するようにタイミングノイズを除いて固有運動の推定を行うアルゴリズムを開発し、J0538+2817 などタイミングノイズのあるパルサーの固有運動推定に成功している。

Splaver et al.(2005) は連星パルサーの精密なタイミング観測によって、伴星の相対論的重力遅延である Shapiro 遅延の計測に成功し (図 2)、パルサーと伴星の質量をそれぞれ ($1.3 \pm 0.2 M_{\odot}$, $0.28 \pm 0.03 M_{\odot}$) と推定した。Verbiest et al.(2007) は Shklovskii 効果という見かけ上のパルサーの加速度運動を利用して、パルサータイミング観測により連星パルサー J0437-4715 までの距離を 1.5% の精度 ($d=157.0 \pm 2.4$ pc) で推定することに成功した。Shklovskii 効果とは、パルサーが固有運動で天球面上を移動するとき、実際には 3 次元的な直線運動をしているために球面に対して奥行き方向の見かけの加速度が生じる効果で、この見かけの加速度大きさは $\mu^2 D P_b / c$ で評価される。 μ , D , P_b はそれぞれ固有運動、距離、連星周期である。この計測方法の誤差は周期の計測精度に支配され、パルサータイミングによって連星周期を 1.5% の高い精度で計測できるため、視差を使った測距より高い精度計測が可能となった。

2.2 Discovery of Giant Pulse

パルス 1 発で数 KJy を超える強力なパルスをジャイアントパルス (GP) と呼ぶ。GP は Crab パルサーから時々放射されていることは、1970 年代から知られてい

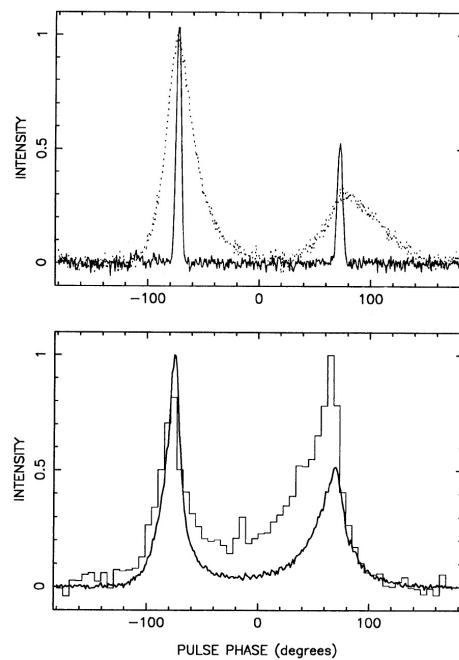


図 3: Crab Pulsar の電波と赤外 (上図: 実線と点線) 及び、ガンマ線と X 線 (下図: ヒストグラムと実線) のパルスプロファイル

たが、近年複数のパルサーで GP が見つかり、多波長の観測や高時間分解能の観測が盛んに行われるようになってきている。Lundgren et al.(1995) はコンプトンガンマ線観測衛星と地上の電波望遠鏡で GP の同時観測を行い (図 3)、50-220 keV のエネルギー領域と電波では GP に相関がないことを示し、また通常のパルスは頻度分布がガウス分布または指数分布であるのに対し、GP の分布はエネルギーのべき乗となることを示した。1996 年には PSR1937+21 で GP が観測された (Cognard et al, 1996)。図 4 にオーストラリア ATCT で観測された Crab Pulsar の GP の頻度分布を示す。Hankins et al.(2003) はデジタルオシロスコープを使った高速なデータ取得装置によって、2 ns のパルス幅の GP を検出した。これは 60 cm という極めて小さな放射領域から輝度温度にして 10^{37} K という途方もないエネルギーが放射されていることを意味する。現在 GP が観測されているパルサーは、B1937+21, B0531+21, B1821-24, B0540-69 の 4 つだけであり、光円柱 (パルサーと剛体回転する半径が光速となる半径) での磁場強度が強いパルサーに GP が見つかった傾向がある (表 2)。GP の観測は、近年の高速サンプリングやソフトウェアによるデータ処理など VLBI のために開発された観測装置を使って時間分解能の高いパルサー観測ができるようになり、大きく進展している。GP を使って銀河系外のパルサーを観測しようという試みも始まって

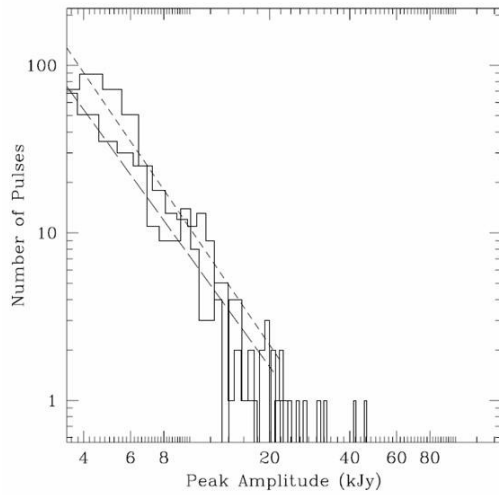


図 4: ATCA 22m 鏡で観測した 1.4GHz の Crab Pulsar からの GP の頻度分布、横軸は 1 パルス (幅 $1\mu\text{sec}$ 程度) あたりのエネルギー

表 2: GP が観測されているパルサー (*) と光円柱における磁場強度 B_{lc} (McLaughlin&Cordes 2003)

PSR name	P (msec)	$\dot{P}$ (10^{-15}s/s)	B_{lc} (10^5G)
B1937+21*	1.56	1.1×10^{-4}	9.8
B0531+21*	33.4	4.2×10^2	9.3
B1821-24*	3.05	1.6×10^{-3}	7.2
B1957+20	1.61	1.7×10^{-5}	3.6
B0540-69*	50.4	4.8×10^2	3.5
J0218+4232	2.32	7.5×10^{-5}	3.1
J1823-3021A	5.44	3.4×10^{-3}	2.5
J0034+0534	1.88	6.7×10^{-6}	1.6
J2229+6114	51.6	7.8×10^1	1.3
J0205+6449	65.7	1.9×10^2	1.2

いる (McLaughlin&Cordes 2003)。

2.3 Gravitational Wave Detection and Pulsar Survey

パルサータイミングによる重力波検出は SKA の研究テーマの一つとしても注目されている。これは、太陽系外の精密な時計＝「複数のミリ秒パルサーから構成される時系」と地上の時系 (TT) を比較することにより重力場変動を検出するというものである。オーストラリアのパークスでは 20 個のミリ秒パルサーを 2-3 週間の周期でモニタ観測する PPTA (Parks Pulsar Timing Array) プロジェクトを開始している (図 5)。周期 10^8 秒＝3 年オーダの周期の重力波を検出することを目指しており、これは数光年の波長サイズに相当する。SKA では複数の視野で高い感度のパルサータイミング観測

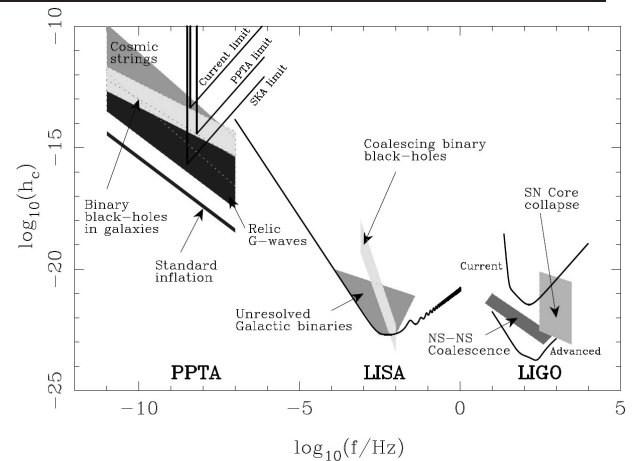


図 5: レーザ干渉計などの重力波検出器とパルサータイミングによる重力波検出の周波数レンジと重力波振幅の大きさ (Manchester 2007)

を行うことにより、パルサー時系の安定度を向上させ、世界初の重力波直接検出を目指そうとしている。

パークス 64m 電波望遠鏡に 13 のマルチビーム受信機を搭載し、同時に 13 方向の天球面上を観測することにより効率化された**パルサーサーベイ**が Manchester et al.(2005), Kramer et al.,(2003), Hobbs et al.(2004), Faulkner et al.(2004), Lorimer et al.(2006) によって進められている。このサーベイによりこれまでに 742 個のパルサーが新たに発見されている (図 6)。2009 年 1 月現在までに発見されたパルサーの総数は 1794 個となり、ATNF Pulsar Catalog (Manchester et al., 2005)¹として公開されている。SKA によって更に高感度でマルチビームを使ったサーベイが開始されれば、更に多くのパルサーが発見され、周期 1 ミリ秒を切るような超高速回転＝新しい物質状態の星が発見されるかもしれない。

2.4 Scintillation 観測

パルサーは太陽程度の質量が直径 10km 程に圧縮された中性子星と考えられており、100pc の距離でも見込み角は 7×10^{-8} arc sec 以下であり理想的な点源とみなされる。このため、信号の空間周波数のコヒーレンスが高く、星間空間の電離媒質によって位相が乱され、異なる経路を伝搬した信号どうしが干渉して、観測者を含む面に干渉縞を生じる。パルサーや星間媒質の移動に伴って干渉縞が移動し、観測者はシンチレーションと呼ばれる強度変動を観測する。シンチレーショ

¹<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

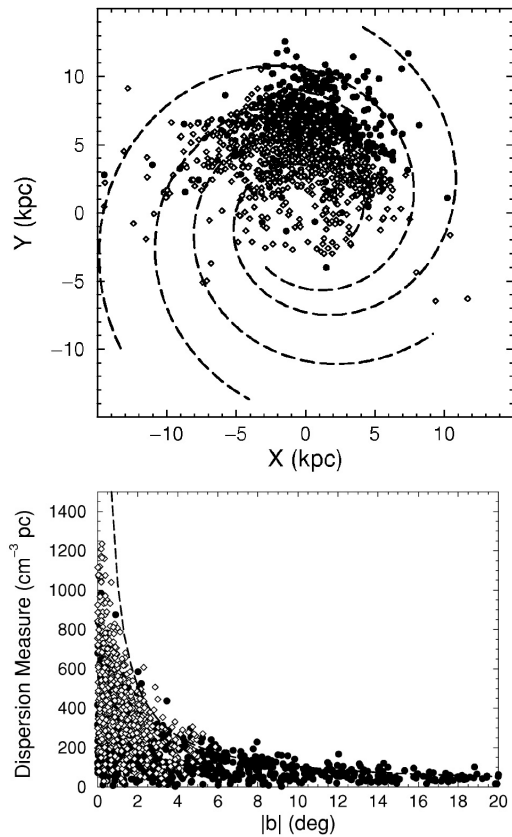


図 6: Parks Multibeam Pulsar Survey によって発見されたパルサーの分布 (Kramer et al., 2003)。銀河中心方向に DM の大きなパルサーが多く見つかった。

ンには回折性の短期変動と屈折性の長期変動があることが知られており、強度変動は時間方向だけでなく、周波数方向にもみられる。干渉パターンの典型的な大きさはパルサーと地球の間にある星間電子密度や距離によって異なる。シンチレーションには特徴的なサイズ (Scintillation time scale: t_d と decorrelation band width: $\Delta\nu_d$) があってダイナミックスペクトルの自己相関関数からそれらのパラメータが測定されている (図 7)。

2.5 その他の電波観測によるパルサー研究

これまで述べた以外に、**パルサーの干渉計による固有運動、年周視差の観測**が Briskin ら (2001; 2002; 2003) や、Chatterjee ら (2005) らによって VLA, VLBA を使って精力的に行われている。また、パルサータイミングや干渉計観測によって得られた距離とディスパージョンメジャー (DM) のデータを使って、**銀河系の電子密度分布のモデル**が Cordes & Lazio (2002, 2003) によって作られている。これは、Taylor & Cordes (1993) が作

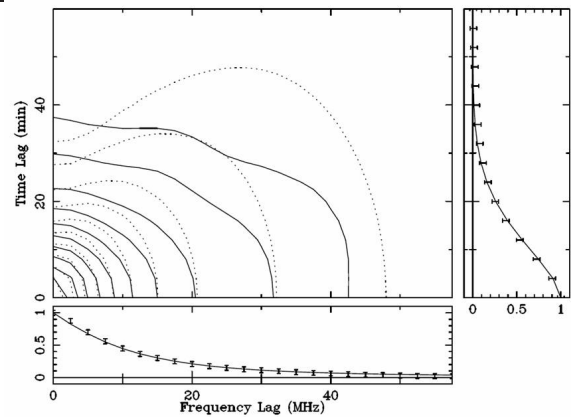


図 7: PSR0329+54 の観測 (1540MHz、ウルムチ 25m) から得られたダイナミックスペクトルの自己相関。 $t_d=17$ 分, $\Delta\nu_d=14$ MHz (Wang et al. 2005)

成した銀河系の電子密度分布モデルを改良したもので NE2001²と呼ばれている。年周視差を求めることができないパルサーについては、DM が距離の尺度であり、DM を距離に変換するために必要な銀河系の電子密度分布モデルは、パルサーの距離の推定値を求める上で大変重要である。距離の値はパルサーの運動速度や放射エネルギー量などの見積もり、パルサーの誕生時初期速度の統計的な推定値などに直接影響する。

参考文献

- Bhat N. D. R., et al., ApJ, **676**, 1200-1209, 2008
 Briskin W. F., et al., ApJ, **121**, 1192-1198, 2001
 Briskin W. F., et al., ApJ, **571**, 906-917, 2002.
 Briskin W. F., et al., ApJ, **126**, 3090-3098, 2003
 Chatterjee S., et al., ApJ, **630**, L61-L64, 2005.
 Cordes J. M., T. J. W. Lazio, Astr-ph/ 0207156v3, 2002.
 Cordes J. M., T. J. W. Lazio, Astr-ph/ 0301598v1, 2003.
 Cognard I., et al., ApJ, **457**, L81-L84, 1996.
 Faulkner A. J., et al., MNRAS, **355**, 147-158, 2004.
 Hankins T. H., et al., Nature, **422**, 141-143, 2003.
 Hobbs G., A. G. Lyne, M. Kramer, Radio Pulsars, Proc. of ASP Conference, **302**, 215, 2003.
 Hobbs G., et al., MNRAS, **352**, 1439-1472, 2004.
 Kramer M., et al., MNRAS, **342**, 1299-1324, 2003.
 Lorimer D. R., et al., MNRAS, **372**, 777-800, 2006.
 Lundgren S. C., et al., ApJ, **453**, 433-445, 1995.
 McLaughlin M. A., J. M. Cordes, ApJ, **596**, 982-996, 2003
 Manchester R. N., et al., AJ, **129**, 1993-2006, 2005
 Manchester R. N., 40 YEARS OF PULSARS: Millisecond Pulsars, Magnetars and More. Proc. of American Institute of Physics Conference, **983**, 584-592 2008.
 Splaver E. M., et al., ApJ, **620**, 405-415, 2005.
 Taylor J. H., Cordes J. M., ApJ, **411**, 674-684, 1993.
 Verbiest J. P. W., et al., ApJ, **679**, 675-680, 2007.
 Verbiest J. P. W., et al., ApJ, **679**, 675-680, 2008.
 Wang N., et al., MNRAS, **358**, 270-282, 2005.

²<http://www.astro.cornell.edu/cordes/NE2001/>