

氏 名 関 戸 衛

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大乙第92号

学位授与の日付 平成13年9月28日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Pulsar Astrometry by VLBI

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 藤本 真克
教授 川口 則幸
教授 郷田 直輝
教授 笹尾 哲夫
教授 大師堂 経明（早稲田大学）

論文内容の要旨

パルサーは、高エネルギー現象、相対性理論の検証、時系への応用、基準座標系の結合、星間物質のプローブ光源としての利用など、さまざまな観点から大変興味深い天体である。特にパルサーのパルスの周期安定度は、地上の原子時計を凌ぐ精度を持つと期待されており、地球の重力場に影響されない普遍的な時系として研究が進められている。また正確なパルス到達時間の計測により、太陽系惑星暦の座標系(力学座標系)の上でのパルサーの位置を数十 μ 秒角程度の高い精度で求めることができる。一方、現在最も高い空間分解能で天体の位置計測ができる超長基線電波干渉計(VLBI)により決定される座標系は、国際天球座標系(ICRF)という天文学の基準座標系として承認されており、パルサーをVLBI観測することにより、パルサーのICRF上の位置を測定できる。しかし、VLBI観測は黄道面の位置に関して感度がないため、黄道面と赤道面の交点で定義される春分点の計測に不感であり、黄道面を基準とする力学座標系と、系外電波源を基準とするICRFは観測的に結合される必要がある。パルサーは両座標系上の位置をそれぞれ高精度に求めることができる数少ない電波源の一つであり、VLBIによるパルサーの位置計測は座標系結合にとって重要である。また、基準座標系上での精密な位置の決定は、異なる波長で観測された現象(光学観測、X線、ガンマ線)が同一天体に起源を持つものであるかどうか同定する上でも重要である。また、パルサーの精密な固有運動の計測は、異なるエポックで計測されたパルサーの座標系上の位置を同一エポックの位置に変換する際に重要となるほか、パルサーの起源とされる超新星残骸との関係の同定、力学年齢の推定、パルサータイミングの周期変化率計測データから固有運動によるバイアス誤差の除去など、多くの観点から必要とされている。

筆者らは、ロシアのレベデフ物理学研究所(LPI)と通信総合研究所(CRL)の共同研究に基づいて、ロシアのKalyazin局(64m直径パラボラアンテナ)とCRL鹿島の34m直径パラボラアンテナを使って、基線長7000kmのVLBI観測(群遅延を用いた絶対位置天文観測)を1995-1998年の4年間にわたって行い、複数のパルサーの精密な位置および固有運動を計測した。得られたパルサーの位置及び固有運動は以下の通りである。

PSR B0329+54 Epoch:1995.00	α : 03 ^h 32 ^m 59 ^s .37577 (0.0004) μ_{α} : 17.3 (0.35) mas/year	δ : 54°34'43''.5179 (0.003) μ_{δ} : -10.6 (0.37) mas/year
PSR B0355+54 Epoch: 1995.00	α : 03 ^h 58 ^m 53 ^s .713 (0.003)	δ : 54°13'13''.75 (0.1)
PSR B0950+08 Epoch: 1996.36 Epoch: 1998.40	α : 09 ^h 53 ^m 9 ^s .30 (0.01) α : 09 ^h 53 ^m 9 ^s .309 (0.001)	δ : 7°55'35''.8 (0.8) δ : 7°55'36''.154 (0.07)
PSR B1933+16 Epoch: 1995.20	α : 19 ^h 35 ^m 47 ^s .824 (0.006)	δ : 16°16'40''.07 (0.27)
PSR B2021+51 Epoch: 1995.20	α : 20 ^h 22 ^m 49 ^s .866 (0.005)	δ : 51°54'50''.302 (0.01)

また、パルサー B0329+54, B0355+54, B1257+12, B1937+21, B2021+51 のタイミング観測から得られた座標値、及びVLBI観測から得られた座標値(我々の結果及び、文献値)を使い、太陽系惑星暦DE200の座標系とICRF座標系の回転行列を推定した。その結果、回転ベクトルとして(-7.4 \pm 3, -11.9 \pm 5, -9.1 \pm 3) (mas)を得た。これはFolknerらの結果と誤差

の範囲で一致している。これまで Folkner ら(1994)が LLR の観測から求めた DE200 と ICRF の結合を、パルサー PSR B1937+21 の VLBI 観測結果とパルサータイミング観測の座標を比較して検証した例(1996)はあったが、パルサーを使った座標系の結合はまだ報告されていない。現状では、パルサーの位置精度が十分でないこと、使用できるパルサーの数が少ないことにより、Folkner らの結果を上回る座標結合には至っていないが、今後パルサーのタイミング観測及び VLBI 観測の継続により、パルサーを使ったより高精度の座標系結合が可能になると期待される。

上記の結果を導くに当たり、二つの点で新しく開発した技術を用いた。一つは、ミリ秒周期のパルサーに対応したパルサーゲート機能をもつ K4 型相関器の開発であり、もう一つは GPS 観測により得られた電離層モデルを使った、電離層遅延補正である。

パルサーの信号は一般に-2 から-3 程度の負の大きなスペクトル指数を持ち、高周波で急速に電波強度が弱くなる特徴を持つ。そのため、マイクロ波帯でパルサーの VLBI 観測を行うには、信号対雑音比 (SNR) を改善するために大型のパラボラアンテナを使い広帯域の観測を行うといった観測手法の工夫の他に、VLBI データの相関処理時に、受信したパルスに同期してパルスの部分だけで相関積分をとることにより、実効的に平均 Flux 密度を増加させ SNR を改善する“パルサーゲート”処理が有効である。筆者らは上に述べたパルサーの VLBI 観測データを処理するに当たり、ミリ秒周期に対応したパルサーゲート処理機能を持つ K4 型相関器を開発し、信号対雑音比を 5-6 倍改善することに成功した。

また、我々の観測は、低周波で大きくなる電離層の影響と、高周波で小さくなるパルサーの Flux の兼ね合いから 1.4GHz 及び 2.2GHz の周波数を使ってパルサーを観測した。しかし、これらの周波数においても電離層遅延量が最も大きな誤差要因であることに変わりなく、数 m の Excess path length が誤差として観測量に付随する。このような大きな誤差要因を取り除くため、GPS 衛星の観測によって電離層の電子密度分布を推定する方法について検討した。その結果、ベルン大学によって求められた全地球的な電離層電子密度分布のマップを使うことにより、電離層補正を行わない場合に付加される 60 ミリ秒角もの系統誤差を取り除くことができることを実証し、我々のパルサー観測データに適用した。

また、パルサーは信号の空間周波数がコヒーレントであるため、クエーサの VLBI データでは見られない星間シンチレーション現象が観測された。我々は観測データからシンチレーションバンド幅、及びシンチレーションタイムスケールを見積もり、星間電子密度分布として Thin screen モデルを仮定して scattering disk size を求めた。その結果 1.4 及び 2.2GHz の周波数帯では、ほとんどのパルサーで scattering disk size は 1mas 以下であることがわかった。

論文の審査結果の要旨

回転する中性子星と考えられるパルサーは、その特徴的なふるまいによって、強い重力場のもとにある物質の極限的な性質を知る鍵になるとともに、わが銀河系の構造と物理を探る重要なプローブとなっている。特に重要なことは、パルサーがきわめてコンパクトで、しかも強い電波を放っているために、天文学で最高の分解能を達成したVLBI（超長基線電波干渉計）というきわめて強力な観測手段の格好な観測対象になることである。

本申請論文は、1995年から1998年にかけて行われた通信総合研究所鹿嶋の34mアンテナとロシアのカリヤージンの64mアンテナを結ぶ基線長7000kmの国際VLBI観測でパルサーの位置と固有運動を測定した研究をまとめたものである。申請者である関戸衛氏は、通信総合研究所の研究者であり、ロシア科学アカデミー・レベディエフ物理学研究所のイリヤソフ教授等と協力し、同教授の科学面での指導を受けながら、データ処理法及び解析法の開発を含めて、この観測と解析を中心になってやり遂げた。

本申請論文の特色は、VLBIと並ぶパルサーの重要な観測手法であるタイミング観測から得られる太陽系力学座標系におけるパルサーの位置と、VLBI観測で得られるクエーサーなどの銀河系外VLBI電波源を基準とするICRF（国際天球基準座標系）におけるパルサーの位置を比較することで、両座標系を結合することを目指していることである。これは、今後の精密天体位置計測及び長期にわたる安定な精密時系の構築にとって重要な仕事である。このため、パルサー位置の測定には、ICRF構築に用いられる通常の測地・位置天文VLBI観測の手法、すなわちバンド幅合成法による群遅延時間を測定量とする方法を採用している。

解析の結果、5個のパルサーの位置が、測地・位置天文VLBI観測の通常の精度に迫る数mas (milliarcsecond) から10mas台の精度で測定され、そのうちの1個については、固有運動が2--3mas/年の精度で、また過去の他の観測結果を援用した場合には0.4mas/年という高精度で決定された。これは、masレベルでの座標系結合が現実に可能であることを示したはじめての重要な成果である。申請者は、詳細な誤差解析と、過去に他の手段で行われたさまざまな観測結果との比較検討を通じて、この観測精度を確認している。

上記の結果を導く過程で、申請者は、観測およびデータ処理の精度向上をもたらす新しい方法を開発した。ひとつは、パルサーのような低周波で強度を持つ天体の観測に最も重大な影響を及ぼす電離層の効果を除去するために、国際的なGPS衛星の2周波受信データから得られる全地球規模の電離層モデルを補正に利用する方法である。これにより、電離層による誤差の90パーセント以上が除去できることを、実際の観測結果をもとに明瞭に示した。もうひとつは、VLBI相関処理においてパルサーが光っている時間だけを切り出して処理するパルサーゲート機能を実現し、ミリ秒パルサーにも使えるまでに改良・強化したことである。これにより、検出感度が大幅に向上し、従来の処理方法では検出できなかった弱いパルサーも検出できるようになった。国際的にもパルサーゲート機能を持つ相関処理がまだ端緒的段階にある中で、これを完全に実用化し、ミリ秒パルサーにまで適用可能にしたことは、今後のパルサーのVLBI研究に大きな展望を拓くものである。

さらに、本申請論文では、星間電離媒質によるパルサー電波の散乱によって生じるパルサーの見掛けの像の拡がりの効果をとらえ、議論している。これは、星間電離媒質の柱密度の測定、パルサー距離の推定、星間電離媒質による干渉を利用したパルサーの微細構造

の解明の研究に連なるものである。

以上のように、本申請論文は、VLBIによるパルサーの位置観測において、困難な国際観測を成功させ、独創的な方法を開発して処理、解析し、力学的座標系と国際天球基準座標系の結合に必要な観測精度を達成した重要な成果である。このような判断に基づき、本審査委員会は、申請者関戸衛氏の学位申請論文を全員一致で合格と判定した。