

# 論文内容の要旨

## 論文題目

### Distance Measurements of UX Cyg and Evaluation of VERA Digital Filter Bank (はくちょう座 UX 星の距離測定と VERA デジタルフィルタバンクの評価)

倉山 智春

VERA を用いた、太陽近傍ミラ型変光星の周期光度関係の確立のために、VLBA を用いた位相補償 VLBI 観測で UX Cyg の年周視差を  $0.54 \pm 0.06$  mas と求めた。また、VERA の観測装置で電波望遠鏡のバックエンドシステムとして初めて導入されたデジタルフィルタバンクの周波数応答特性の測定を行った。

セファイド、こと座 RR 型変光星など一部の变光星には、周期光度関係と呼ばれる変光周期と絶対等級 (光度) の間の関係があることが知られている。これらの関係は天文学における「距離はしご」の 1 つとして、比較的近傍にある銀河の距離の測定などに用いられているが、周期光度関係の原点、すなわち周期と絶対等級の間の関係がどの変光星の場合にもよくわかっていないため、現在のところ相対的な距離指標に過ぎず、周期光度関係だけから距離を求めることはできない。

ミラ型変光星の場合、周期光度関係は大マゼラン雲のミラ型変光星を用いてよく研究されているが、太陽近傍 (銀河系内) のミラ型変光星については周期光度関係がどうなっているのかよくわかっていない。これは、大マゼラン雲の場合にはすべてのミラ型変光

星までの距離が等しいと仮定して見かけの等級の差をそのまま絶対等級の差と考えられるのに対して、太陽近傍の場合にはミラ型変光星までの距離を求める必要があるためである。ミラ型変光星は距離 1 kpc 以上のものがほとんどで、精度 1 mas の Hipparcos の年周視差を用いてもまだ精度が不足するのである。よって太陽近傍のミラ型変光星までの距離を精度よく測定し、ミラ型変光星の周期光度関係の原点を得ることができれば、ミラ型変光星を絶対的な距離指標にすることができる。また、恒星までの距離を求めることは、恒星の半径、光度の実測に不可欠であり、恒星物理学に対する寄与も大きい。

そこで、ミラ型変光星 UX Cyg に付随する水メーザーと、天球上でその近くにある系外連続波電波源をほぼ同時に観測する位相補償 VLBI 観測を 4 回行い、連続波源を天球上の位置基準とした各メーザーの位置変化から、年周視差と各メーザー源の固有運動を求めようとする観測を VLBA で行った。7 つのメーザースポットの運動を共通の年周視差と直線運動でフィッティングし、年周視差が  $0.54 \pm 0.06$  mas、距離にして  $1.85^{+0.25}_{-0.19}$  kpc という値を得ることができた。これを大マゼラン雲での周期 420 日以上での周期光度関係と比較すると、大マゼラン雲の距離を  $55.0^{+9.0}_{-7.2}$  kpc と見積もることができる。これはほかの方法での値と矛盾しない。また、年周視差と固有運動の値から、UX Cyg の銀河系内での 3 次元的位置や 3 次元速度、さらにわれわれの銀河系内での運動範囲を得ることができた。これらの結果は位相補償 VLBI 観測による位置天文学観測の可能性と、VERA の大きな目標の 1 つである銀河系の運動学の解明の可能性を示すものである。

しかし、今回得られた 1 回の観測での位置精度 0.2 mas は、UX Cyg の距離測定は可能な範囲であるが遠くの天体にとっては十分な精度であるとはいえない。銀河系内全体のミラ型変光星の年周視差を測定するためには、やはり VERA を用いて約 0.1 mas の位置精度を目指す必要がある。このために私は VERA の中でデジタルフィルタバンクの性能評価を分担し、周波数抑圧特性の測定を行った。

デジタルフィルタバンクは、電波望遠鏡のデジタルバックエンドとしては VERA で初めて導入され、野辺山の BEARS で使用されているほか、今後は ALMA、EVLA、KVN などでも採用されることが決まっており、これからの電波望遠鏡のバックエンドシステムの標準になろうとしている。このデジタルフィルタバンクの基礎的な特性として、周波数応答特性の測定を行っている。測定としては、雑音に CW 信号を混入した信号をデジタルフィルタに通し、フィルタリング前後のスペクトルを比較する形で行っている。VERA のデジタルフィルタバンクには較正位相検出装置へのスループットがあるため、

較正位相検出装置でデジタルフィルタバンクへの入力スペクトルを測定し、分光器として取り付けられている NRFD を用いてデジタルフィルタバンクからの出力スペクトルを測定することができる。ただし、較正位相検出装置は 2 つのビーム間の相互相関スペクトルしか測定することができないため、A/D 変換機の前のアナログの状態で同一の信号を 2 分配し、2 つのビームに入力することで測定を行っている。デジタルフィルタの入出力のスペクトルを両方ともデジタルで測定するため、非常に高い精度 (測定誤差 0.06 dB) が得られる。帯域幅 16 MHz と 64 MHz の場合について測定を行い、16 MHz 幅の場合は約 -35 dB、64 MHz 幅の場合は約 -25 dB の抑圧率が得られている。

また、実際の VERA の観測データのデモンストレーションも行った。J1424+0434 と 3C273B、W3OH と J0244+6228 の位相・振幅のスペクトルを作成し、(1) 帯域内での特性がフラットである、(2) 異なる IF 間での較正を行わなくても、複数の IF にわたりフラットな位相・振幅特性が得られるといったデジタルフィルタバンクの特長を確認した。また、理論的な抑圧特性と観測スペクトルとの比較を行い、自己相関では折り返し雑音の効果がみられるのに対して、相互相関では VLBI の高いフリンジ周波数により折り返し雑音の影響が消えることを確認した。

さらに、今後のデジタルフィルタバンクの開発のために、フィルタ係数のタップ数とワード長 (数を表すビット長) を変化させての抑圧特性の測定を行った。フィルタリング過程は周波数領域での入力波形と矩形関数の掛け算で表現することができるので、フーリエ変換すれば時間領域では入力波形と矩形関数のフーリエ変換との畳み込みで表される。入力波形に畳み込む矩形関数のフーリエ変換はフィルタ係数と呼ばれ、デジタルフィルタバンクではこのフィルタ係数を変化させることによってさまざまな帯域のフィルタリングを簡単に切り替えることができる。しかし実際の装置内の計算では、フィルタ係数の時間方向の長さであるタップ数は無限ではなく有限であり (VERA の場合 1024)、フィルタ係数自体も無限桁数が表現できるわけではなく、ある有限のビット長 (VERA の場合 13 ビット) での計算となる。さらに入出力のデータは量子化されており (VERA の場合はほとんどの場合入出力とも 4 レベル)、これらの影響は無視することができない。しかし一方でタップ数とビット長により装置の物量が決まるので、フィルタリング過程に影響を与えない最小のタップ数とビット長を求めることは、デジタルフィルタバンクを設計する上で大変重要である。しかも、タップ数やビット長を減らすことはフィルタ係数に 0 を入れることで容易に実現でき、抑圧特性の測定を実機で行うことができる。

タップ数を減少させると時間領域で打ち切りの矩形関数がかかるのと等価になるため、周波数領域ではシンク関数の畳み込みを行うことになる。このシンク関数の幅はタップ数が少ないほど大きくなるため、タップ数を減らしていくと帯域内外でのリップルが大きくなる。また、ビット長を減らすと量子化雑音が増えることになるので、リップルが大きくなる。