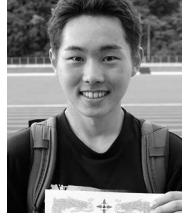


手作り電波望遠鏡と高校数学による 天の川の回転曲線の導出

谷 敷 怜 空¹・浅 山 信一郎²・
西 村 淳³・小 川 英 夫⁴



谷 敷

〈¹ 豊田工業高等専門学校電気・電子システム工学科 〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1〉

〈² SKA Observatory, Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK〉

〈³ 国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山 462-2〉

〈⁴ 大阪公立大学理学研究科 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1〉

e-mail: ¹ 72138@toyota.kosen-ac.jp

近年の情報通信革命がアマチュア無線技術を応用した簡易的な電波望遠鏡を作ることが可能にしている。今回は高等専門学校の3年生が、研究者からリモートで指導を受けながら、自作電波望遠鏡を用いて天の川銀河の中性水素21 cm輝線の観測を実施し、取得したデータを三角関数等の高校数学や表計算ソフトを用いて解析することで、先行研究と矛盾しない銀河の回転曲線の導出に成功したのでそれを報告する。今回の結果は、簡易な自作電波望遠鏡を用いることで、だれでも比較的気軽に本格的な電波天文学に触れることができることを示している。使用した周波数帯での電波天文観測は可視光と異なり昼夜や天候を問わずにできることも魅力であり、天文普及活動において大変有用である。

1. はじめに

渦巻銀河の回転曲線は、銀河の運動を探るうえで最も基本的な情報であり、可視光や電波での測定が繰り返し行われてきた。回転曲線とは銀河の回転速度を銀河中心からの距離の関数として表したものである。種々の測定から多くの円盤銀河では円盤部で回転速度が変化しない平坦な回転曲線を描くことがわかっており、ダークマターハローの存在を示唆する結果の一つになっている [1]。

前回の報告 [2] においてソフトウェア無線受信機 (SDR) を用いた簡易電波望遠鏡を製作し、天の川銀河由来の中性水素21 cm輝線の検出に成功することができた。今回はさらに銀河面上の複数点で中性水素21 cm輝線観測を実施し、得られたスペクトルプロファイルから三角関数などの高校

数学と表計算ソフトを用いて天の川銀河の回転曲線を導出したので報告する。この結果から銀河の回転曲線という天文学上の重要な課題に、自作の望遠鏡や高校数学、Excelなどを用いて触れることが可能であると確認できた。つまり、いつでもだれでも本格的な電波天文学に触れることができるのだ。また、この周波数帯での電波天文観測は時間や天候を問わずにできることも魅力であり、この点が天文普及活動における本アプローチの強みの一つである。

2. Tangent Point Method

今回の天の川銀河の回転曲線の導出は、銀河面に存在する中性水素原子ガスの視線方向の速度成分と銀河中心からの距離を測定することで行った。本実験で我々が使用した方法はTangent

Point Method[3, 4]である．ここでは，第1象限の銀河面（つまり銀経(l)= 0° – 90° ）を観測し，後退するガスはすべて太陽の銀河中心に対する周年半径より内側にあるとする．また，銀河中心からの距離が等しければ，回転速度は一定であるとした．図1からわかるようにある特定の方向で測定された水素ガスの後退速度のうちもっとも速いものは，観測方向を接線とする回転円上を周回するガスに対応する速度になる．また，その時のガスの銀河中心からの距離は三角関数を用いて容易に計算が可能である．これらのことから，回転曲線の導出に必要な量は以下の式で求められる．

$$v = v_{\text{rad,max}} + v_0 \sin l \quad (1)$$

$$R = R_0 \sin l \quad (2)$$

ここで v は銀河中心からの距離 R における中性水素原子ガス雲の回転速度， l は銀経， R_0 は太陽から銀河中心までの距離．また， v_0 は銀河中心に対する太陽の回転速度であり， $v_0=238 \text{ km/s}$ とした [5]．観測された $v_{\text{rad,max}}$ を用いて式(1)より，ガスの回転速度 v が計算される． $v_{\text{rad,max}}$ は観測で得られた水素原子スペクトルのプロファイルから求めることができるが，その際に観測ビームの中に含まれる水素原子ガスのランダム運動を考慮する必要がある．また，得られるスペクトルプロファイルはビーム内に含まれるガスの銀河円盤での位置に対応した速

度の積算であることを考慮して，複数のガウス関数を足し合わせたものでフィッティングすることが必要になる場合もある．しかし今回は高校数学の範囲で導出を行うため，銀経 $l=180^\circ$ の水素ガスが視線と垂直方向に運動をしていると仮定し，この方向のガスの最大速度を，ランダム運動による速度幅の目安として用いることとした．この予想される速度幅を，我々の視線に沿った最大視線速度から引いて，最大後退速度 $v_{\text{rad,max}}$ を求めた．

3. 観測装置

観測システムは，天文月報2024年5月号 [2] で報告されたSDRと自作卓上ホーンアンテナで構成される自作簡易電波望遠鏡と同じ構成である．水素輝線のスペクトルプロファイルを測定するために有効な分解能を得るため，キャンプマットにアルミホイルを張ることで製作された口径30 cmのホーンアンテナに段ボールでホーン部分を継ぎ足して口径50 cmに拡張した．ホーンアンテナは導波管の開口端を広げることでアンテナとして動作するため，拡張部分をもとのホーンと電氣的に接続する必要がある．アルミホイルとアルミテープで拡張部を固定することで電氣的に接続した．また増幅用アンプは前回紹介したSPF5189Zから，雑音指数が低く，高利得のZKL-33ULN-S+に変

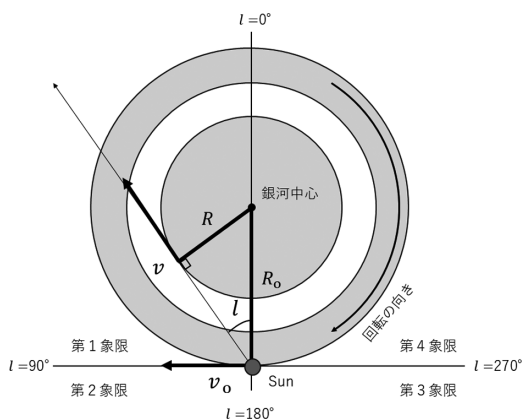


図1 Tangent Point Method.

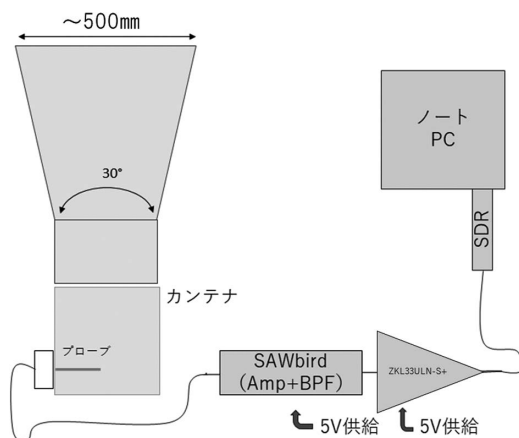


図2 観測システムブロック図.

更されている（図2）．ホーンアンテナのビームサイズは、オンラインの計算ツールを用いて約25°となることを確認した [6]．

4. 中性水素21 cm輝線観測

改良を施した自作簡易電波望遠鏡で天の川銀河の中性水素21 cm輝線観測を行った．観測日時は2024年6月4日午前6時30分-7時30分，6月6日午前1時-2時，6時-6時30分，23時-23時30分

（JST）である．観測地点は愛知県豊田市の豊田工業高等専門学校（北緯35度6分12.15秒東経137度8分55.0秒）．観測方向は銀河座標系で（銀経： l ，銀緯： b ）=（30°, 0°），（45°, 0°），（60°, 0°），（75°, 0°），（90°, 0°），および（180°, 0°）の6点である．観測スクリプトは，pythonを用いて作成した．観測地点（豊田市）における観測方向の方位角（Az）と高度角（El）を計算し，スマートフォンの水準器とコンパスでポインティングを

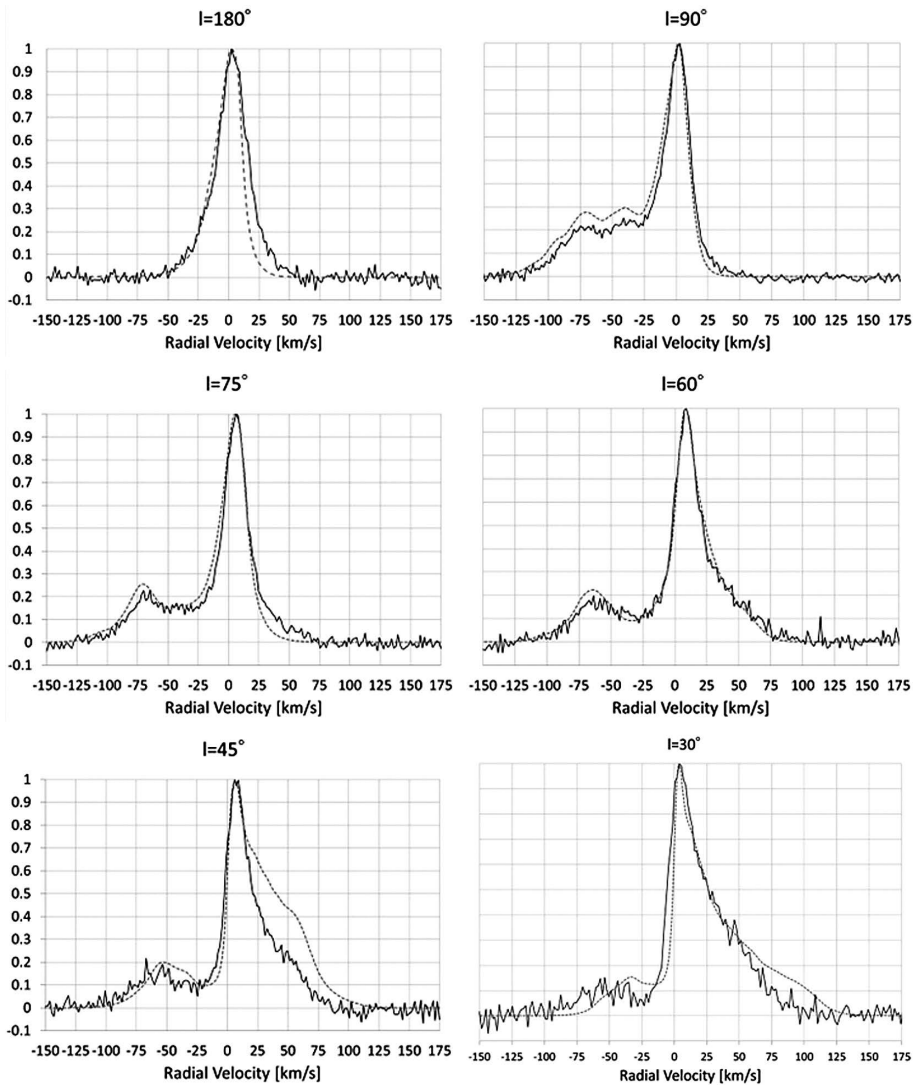


図3 輝線観測結果．左上から $l=180^\circ$ ， $l=30^\circ$ ， $l=45^\circ$ ， $l=60^\circ$ ， $l=75^\circ$ ， $l=90^\circ$ のスペクトルである．スペクトルの横軸は視線速度，縦軸は最大強度を1で規格化している．参考のためLABサーベイ（ビームサイズ20°）で得られた同方向のHIスペクトルを破線で示す．

行った。方位角、高度角方向にそれぞれ $\pm 5^\circ$ 程度の誤差を想定している。アンテナの固定は段ボールで行った。実際に $v_{\text{rad,max}}$ を取得するために中性水素原子ガスの視線速度を求める際には、地球の自転と公転に対する動きを考慮し補正を行う必要があり、局所静止基準に対する我々観測者の速度を求めることが必要である。観測者速度を計算するスクリプトにはastropyを用いた[7]。データ解析には表計算ソフト（Microsoft Excel）を用いた。システムのゆらぎや地球大気の影響で、観測で得られるスペクトルデータの強度がゼロになるレベル（ベースライン）がうねってしまうことがある。そのため、輝線がない部分をExcelの近似曲線機能を用いて2次関数で近似して差し引く

ことで、うねりを除去するベースラインフィッティングを行った。上記のデータ処理をおこない、最終的に得られたスペクトルを図3に示す。左上から $l=180^\circ$, $l=30^\circ$, $l=45^\circ$, $l=60^\circ$, $l=75^\circ$, $l=90^\circ$ のスペクトルである。破線はLeiden/Argentine/Bonn (LAB) Galactic HIサーベイにより得られた同方向の中性水素21 cm輝線スペクトルを参考に示している（データは、EU-HOU projectのWebページから取得）。このスペクトルは、ビームサイズ $\sim 20^\circ$ で取得されたものである[8, 9]。我々の観測はビームサイズ $\sim 25^\circ$ で行われたため、LABで取得されたデータと完全には一致しないが、整合性のあるデータが取得できた。

表1 回転曲線の導出に用いた各値と計算結果。 $v_{\text{dispersion}}$ は速度分散であり、一定であると仮定している。

l	$\sin l$	$R=R_0 \sin l$	v_{max} (km/s)	$v_{\text{dispersion}}$ (km/s)	$v_{\text{rad,max}}$ (km/s)	$v_0 \sin l$ (km/s)	v (km/s)
30	0.50	4.03	150	50	100	119	219
45	0.71	5.69	125	50	75	168	243
60	0.87	6.97	100	50	50	206	256
75	0.97	7.78	75	50	25	230	255
90	1.00	8.05	50	50	0	238	238

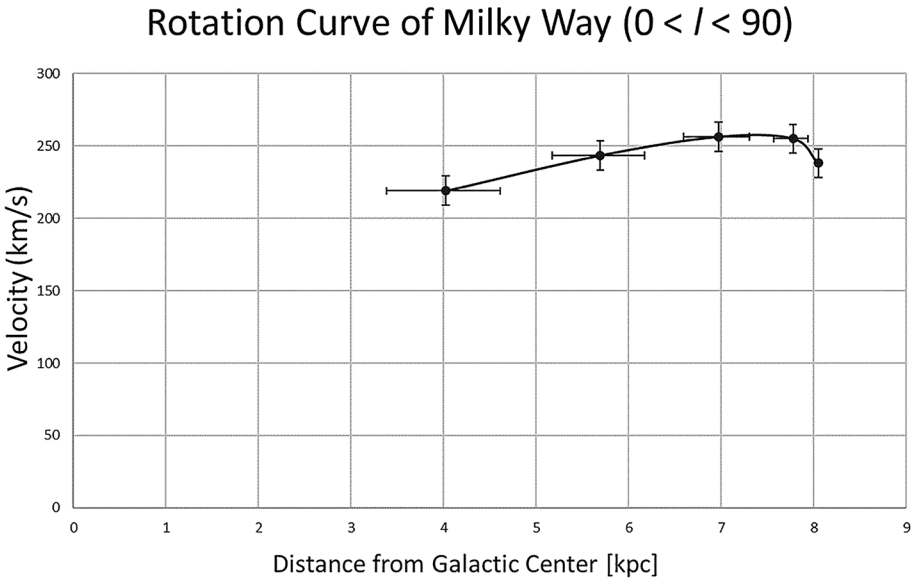


図4 今回の観測で得られた銀河系の回転曲線。横方向のエラーバーは $l=5^\circ$ 程度の観測誤差を表す。縦方向のエラーバーは、最大速度の読み取り幅である25 km/sとした。

5. 回転曲線の導出

以上の観測結果を受けて、天の川銀河の回転曲線を導出した。表1に観測によって得られた物理量とTangent Point Methodによる計算結果を示す。 R_0 と v_0 はそれぞれ8.05 kpc, 238 km/sとした [5]。ビームが非常に大きく、意図した観測範囲外の速度成分を取得している可能性があるため、最大速度値の同定は25 km/s刻みで行った。銀河中心からの距離 R とガスの回転速度 v を用いて描かれた回転曲線が図4である。200–250 km/sの間で銀河の中心から離れても回転速度が低下せず、速度の変化がほとんどないことが読み取れる。回転速度200–250 km/sという値はよく知られている事実 [1, 10] とある程度一致しており、今回の観測からも銀河系の回転曲線が平坦であることを確認できた。

6. おわりに

今回、自作の簡易電波望遠鏡を用いて銀河系の回転曲線を導出することに成功し、既知の結果と矛盾しないことを確認した。自作簡易電波望遠鏡は安価かつネットショッピングで購入可能な部品から製作されており、手軽に電波天文学に触れることのできる教材として非常に有用である。今後もこういった簡易電波望遠鏡の普及に取り組んでいきたい。しかし、回転曲線の導出に関して、著者は現在高等専門学校の3年生であり、知識の点からまだ定量的な議論が十分にできていない。今後はアンテナの大型化等によるビームサイズの改善と、より精度の高いポインティングを目指し、ガウシアン等によるスペクトルフィッティングを行うことで回転速度をより詳細に調べたい。また誤差の伝搬法則などを考慮した定量的な議論を目指していく。

謝 辞

本記事を出稿するにあたり、記事の添削を頂いた雲南大学副教授の島袋隼士先生に感謝申し上げます。また、ホーン拡張にあたっての実験観測に

協力してくれた豊田高専の松尾駿寿くんにも感謝の意を表します。Leiden/Argentine/Bonn (LAB) サーベイのデータはEU-HOU project および Comenius grant の助成のもと得られたものです。

参考文献

- [1] 本間希樹, 1999, 天文月報, 92, 617
- [2] 谷敷怜空, 2024, 天文月報, 117, 315
- [3] van de Hulst, H., et al., 1951, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 12, 117
- [4] 中西裕之, 2021, 天文月報, 114, 120
- [5] Honma, M., et al., 2012, PASJ, 64, 1
- [6] <https://hornantennacalculator.blogspot.com/p/calculator.html> (2024.6.23)
- [7] <https://qiita.com/nishimuraatsushi/items/9c8885daaf710b036f43> (2024.6.4)
- [8] Kalberla, P., et al., 2005, A & A, 440, 775
- [9] <https://euhou.obspm.fr/public/archive.php>
- [10] 祖父江義明, 1997, 天文月報, 90, 122

Milky Way's Rotation Curve Measurements Using a Handmade Radio Telescope and High School-level Mathematics

Riku YASHIKI, Shin'ichiro ASAYAMA, Atsushi NISHIMURA and Hideo OGAWA

¹ National Institute of Technology, Toyota College, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2-1 Eiseicho, Toyota, Aichi 471-8525, Japan

² SKA Observatory, Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK

³ Nobeyama Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, National Institutes of Natural Sciences, 462-2 Nobeyama, Minamimaki, Minamisaku, Nagano 384-1305, Japan

⁴ Department of Physics, Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

Abstract: Recent advances in information and communication technology have made Homemade radio telescopes available to us. A high school student who is 18 years old succeeded in drawing the rotation curve of the Milky Way with Microsoft Excel and high school-level mathematics under the guidance of researchers. We can make sure to identify well-known outcomes. The simple Homemade telescope offers an easy way to experience radio astronomy.