

卒業論文

自作電波望遠鏡を用いた HI 21cm 輝線観測による
天の川の回転曲線の導出

2025 年度
(令和 7 年度)

茨城大学 理学部 理学科 学際理学コース

22S6012X
木暮 里奈

概要

天の川銀河の回転曲線は、銀河の質量分布と力学構造を理解するための基本的な観測量である。電波天文学の観測には通常、大型で高価な電波望遠鏡や専門的な観測設備が必要とされる。しかし、谷敷怜空 (2025) の研究により、自作電波望遠鏡を用いることで、大型の観測装置を使用せずとも、身近な材料から製作した簡易な装置で銀河規模の物理現象を捉えることが可能であることが示されている。

本研究では、中性水素原子 (HI) 21 cm 輝線観測により得られる視線方向速度を用い、回転曲線の導出を行った。その結果、銀河中心から離れても回転速度が大きく変化しない特徴的な回転構造が確認された。

目次

第 1 章	はじめに	2
1.1	水素 21 cm 輝線とは	2
1.2	銀河系の回転曲線	2
1.2.1	視線速度	2
1.2.2	最大視線速度と銀河系回転速度の決定	3
1.3	研究目的	3
第 2 章	観測	4
2.1	観測装置	4
2.2	手作り望遠鏡の作成方法	5
2.3	観測	5
第 3 章	解析	6
3.1	ベースライン補正	6
3.2	狭帯域ノイズ成分の除去	7
3.3	3 点移動平均による平滑化	8
3.4	処理過程の比較	8
3.5	差分スペクトルによる検証	8
3.6	信号雑音比 (S/N) による定量評価	9
3.7	最大視線速度の決定	9
第 4 章	結果	11
4.1	各銀経方向の観測スペクトル	11
4.2	回転曲線	12
第 5 章	考察	14
5.1	回転曲線の特徴と物理的意味	14
5.2	先行研究との比較	14
5.3	文献値との差異とその要因	14
5.4	ダークマターとの関連	14
第 6 章	今後の展望	15
第 7 章	謝辞	16
付 録 A	付録	17
参考文献		27

第1章 はじめに

1.1 水素 21 cm 輝線とは

21 cm 輝線とは、中性水素原子が放射・吸収する波長 21 cm (周波数 1420.405 MHz) の電磁波によるスペクトル線のことである。中性水素原子は陽子と電子から構成されるが、両者はそれぞれスピンと呼ばれる物理量を持ち、その向きは上向き・下向きの二つの状態をとる。陽子と電子のスピンの向きが一致している時と、逆向きの時とで水素原子全体が持つエネルギーが僅かに異なり、この超微細構造と呼ばれる準位差が変化する際に 21 cm 輝線が放射または吸収される (図 1.1)。可視光領域では星間物質による減光の影響を受けやすいが、21 cm の電波はその影響を受けにくいと、銀河内部の構造を見通して観測できる。

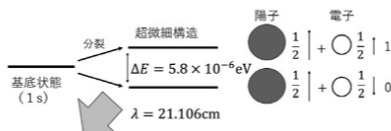


図 1.1: 21cm 輝線の放射機構 [1]

1.2 銀河系の回転曲線

銀河回転の速度を銀河中心距離の関数として表示したものを回転曲線という。これは渦巻銀河の運動を理解する上で最も基本的な情報の一つである。

銀河系の回転曲線は、銀河内に存在する多数の星やガス雲の距離と運動を観測することで求めることができる。ここでは、銀河回転によって円運動する天体の視線速度を幾何学的関係から導出する。

銀河中心から観測天体までの距離を R 、LSR; Local Standard of Rest (局所静止基準) の原点から銀河中心までの距離を R_0 、LSR から観測天体までの距離を D とする。また、天体位置における銀河回転速度を v 、LSR の銀河回転速度を v_0 、銀経を l と定義する。

1.2.1 視線速度

天体が銀河系の回転に従って完全な円運動していると仮定する。LSR から天体を観測したときの視線方向の速度 v_{rad} は、観測天体と LSR の速度成分の差として与えられる。

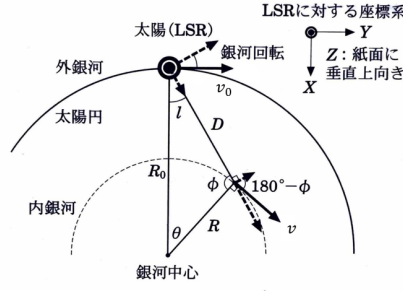


図 1.2: 銀河系を真上から見た模式図

図 1.2 の幾何学的関係より、

$$v_{\text{rad}} = v \sin(180^\circ - \phi) - v_0 \sin l \quad (1.1)$$

と書ける。三角関数の性質より $\sin(180^\circ - \phi) = \sin \phi$ であり、また、正弦定理より $\sin \phi / R_0 = \sin l / R$ が成り立つ。これを代入すると、視線速度は以下のように書き換えられる。

$$v_{\text{rad}} = \left(\frac{v}{R} - \frac{v_0}{R_0} \right) R_0 \sin l \quad (1.2)$$

これが、銀河系内の天体を LSR から観測したときの得られる視線速度の基本式である。なお、余弦定理より、

$$R^2 = D^2 + R_0^2 - 2DR_0 \cos l \quad (1.3)$$

の関係があり、 D は R_0, R, l を用いて以下のように表すことができる。

$$D = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l} \quad (1.4)$$

右辺第 2 項が 0 となるのは、 $R = \pm R_0 \sin l$ が成り立つときである。この点は、銀河中心を中心とする円と LSR から観測した視線とが接する点であり、接線点と呼ばれる。

1.2.2 最大視線速度と銀河系回転速度の決定

銀河系第一象限では、太陽から銀経 l の方向を見たとき、視線方向が銀河回転軌道に接する接線点が存在する。この点では回転速度ベクトルの視線方向成分が最大となるため、観測スペクトル中の最大視線速度 $v_{\text{rad,max}}$ は接線点からの放射に対応する。図 1.2 より、接線点の銀河中心距離 R は、

$$R = R_0 \sin l \quad (1.5)$$

と表される。また、最大視線速度は、

$$v_{\text{rad,max}} = v - v_0 \sin l \quad (1.6)$$

となるため、

$$v = v_{\text{rad,max}} + v_0 \sin l \quad (1.7)$$

より、最大視線速度の観測値から太陽円内側における銀河回転速度 $v(R)$ を直接求めることができる。本研究では、 $R_0 = 8.05$ kpc、 $v_0 = 238$ km/s を用いた。^[2]

1.3 研究目的

本研究の目的は、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を用いて、天の川銀河に含まれる中性水素 (HI) 21 cm 輝線の観測を行い、取得したデータから視線速度を導出し、銀河の回転曲線を求めることである。天の川銀河の回転曲線は、銀河の質量分布やダークマターの存在を示す重要な指標であるにも関わらず、一般的な可視光観測では得られない情報である。本研究では、独自に制作した観測装置でも実際に回転曲線の特徴が再現可能であることを検証することを目的としている。

第2章 観測

2.1 観測装置

観測システム全体は、図 2.1 に示すように電波の受信からデータ解析に至る一連の処理を行うため、アンテナ、受信系、データ取得・処理系によって構成されている。本装置は、中性水素 (HI)21cm 輝線の検出を目的として設計されており、各寸法や構成要素は 21 cm 波帯を基準として決定したものであり任意ではない。装置の設計及び製作にあたっては、谷敷氏の装置を参考にした。^[1]

まず、観測対象からの 21 cm 線電波はアンテナ系によって受信される。アンテナには、キャンプマットを材料として自作した円錐ホーンアンテナを用いた。このホーンアンテナは開口部直径約 30 cm、ビームサイズ約 40°の指向性を持つ。中性水素 (HI)21 cm 輝線のスペクトルプロファイルを測定するために十分な指向性および有効な分解能を得ることを目的として、キャンプマットの表面にはアルミテープを用いてアルミホイルを貼り付け、導電性を持たせた。さらに、ホーンアンテナの導波管部には内径 153.3 mm の空き缶を用いたカンテナを組み合わせ、簡易的な構造ながら効率的な受信が可能な構成とした。

アンテナで受信された微弱な高周波 (RF) 信号は、受信系において段階的に増幅及び周波数選択が行われる。まず、中性水素 21 cm 輝線観測用モジュールである SAWbird+H1m を使用した。このモジュールには低雑音増幅器 (LNA) とバンドパスフィルタ (Band Pass Filter:BPF) が内蔵されており、増幅器の帯域は約 1410 ~ 1421 MHz、ゲインは約 40 dB である。また、バンドパスフィルタの帯域は約 1419 ~ 1421 MHz に設定されており、21 cm 線近傍の周波数成分のみを効率よく通過させることで不要な信号の混入を抑制している。さらに、外付けの低雑音増幅器として SPF5189Z を追加した。この増幅器は約 50 MHz ~ 4 GHz の広い周波数範囲に対応し、約 20 dB のゲインを持つ。これにより受信信号を十分な強度まで増幅し、後段の記録装置で安定して処理できるレベルに引き上げた。

増幅・周波数選択後の信号は、SDR (Software Defined Radio) によってデジタル信号へ変換される。中心周波数を 1420.405 MHz に設定し、観測帯域は約 2.048 MHz (速度幅に換算して約 430 km/s) とした。サンプリングは、8 ビットで行い、256 ch の分光点数を持つスペクトルデータとして取得した。これにより周波数分解能は約 8 kHz、速度分解能は約 1.7 km/s を実現している。取得された複素電圧データは USB 経由で Windows ノートパソコンのハードディスクに保存され、その後高速フーリエ変換 (FFT) を適用することで周波数ごとのパワースペクトルを算出した。本研究では、このパワースペクトルを基に中性水素 (HI)21 cm 輝線のスペクトル解析を行った。[?]

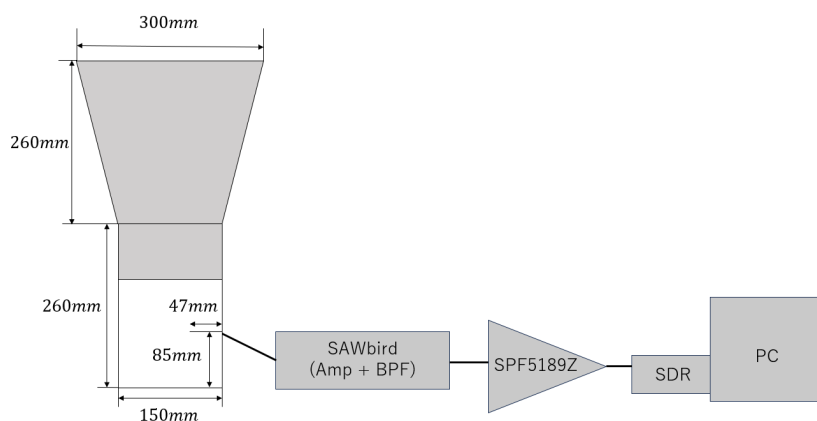


図 2.1: 観測システム全体の概略図

2.2 手作り望遠鏡の作成方法

本研究では、小型の電波望遠鏡を手作りした。本節では、特にアンテナおよびホーンアンテナの製作方法について述べる。

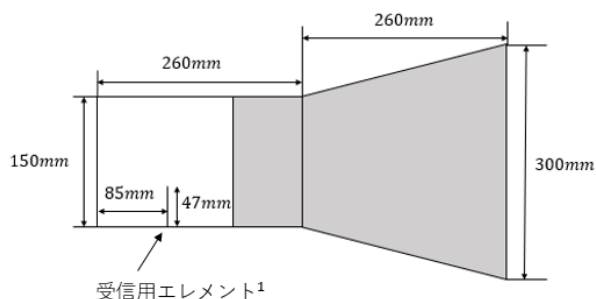


図 2.2: ホーンアンテナ

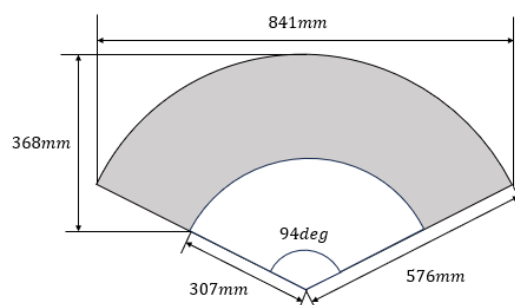


図 2.3: ホーンの寸法

アンテナには、内径 153.3 mm の金属丸缶を使用した。缶の加工には缶切りを用い、円筒形状を保ったまま缶の縁を切断した。受信用エレメント¹には外径 3 mm、壁厚さ 0.5 mm の真鍮丸管を用い、長さを 47 mm とした。受信用エレメントは缶の底面から 85 mm の位置に設置した。これらの寸法は、21 cm 波帯において効率よく信号を受信することを目的として決定した。アンテナの製作は、以下の手順で行った。

まず、缶の底面から 85 mm の位置に、SMA コネクタが通る大きさの穴を開けた。次に、SMA コネクタを仮挿入し、その位置を基準として固定用のねじ穴を加工した。その後、直径 3 mm の真鍮丸管を 47 mm の長さに切断し、SMA コネクタの中心導体にはんだ付けした。最後に、完成した SMA コネクタを缶に取り付け、M2 のねじとナットで用いて固定した。

続いて、ホーンアンテナの製作について述べる。細かい寸法を図 2.2、図 2.3 に示す。ホーンアンテナにはキャンプマットを材料として用いた。製作にあたっては、あらかじめ作成されていた段ボール製の型紙を基にし、その形状に合わせてキャンプマットを切り出した。これにより、製作したアンテナと適合する寸法および形状を再現性よく得ることができた。また、キャンプマットの表面には食品用アルミホイルを貼り付け、さらにアルミテープで固定することで導電性を持たせ、電波反射面として機能するようにした。

2.3 観測

作成した電波望遠鏡をマジックテープと経緯台に固定し、天の川銀河の中性水素 (HI) 21 cm 輝線の観測を行った。観測は茨城県高萩市において 2026 年 1 月 20 日の 14 時頃に実施した。観測には、SKA 天文台の浅山信一郎氏が考案した既存の観測スクリプトを用い、銀河座標 (銀経 l , 銀緯 b) = $(0^\circ, 0^\circ)$, $(0^\circ, 30^\circ)$, $(0^\circ, 45^\circ)$, $(0^\circ, 60^\circ)$, $(0^\circ, 75^\circ)$, $(0^\circ, 90^\circ)$ の 6 方向を対象とした。各方向における観測では、まずアンテナの代わりに電波終端を低雑音増幅器の入力に接続し、天体信号を含まない状態で観測を行った。このときに得られたデータは、受信系に由来する装置雑音や周波数特性のみを反映したものであり、以降の解析における基準データ (OFF 点) として用いた。次に、アンテナを天の川方向に向けて観測を行い、天体信号と装置雑音の両方を含むデータ (ON 点) を取得した。得られた ON 点のスペクトルを OFF 点のスペクトルを補正することで、装置由来の影響を低減し、中性水素 (HI) 21 cm 輝線に起因する信号を抽出した。

¹導波管内部に挿入された金属プローブであり、ホーンで受信した電磁波を電気信号として取り出す部分。

第3章 解析

観測によって取得した中性水素 (HI) 21 cm 輝線スペクトルには、銀河ガスからの放射だけでなく、観測装置の特性や周囲環境の影響による背景成分、さらにランダムノイズが含まれている。これらの不要成分が残ったままでは、最大視線速度の決定や線幅の評価に誤差を与える可能性がある。そこで本研究では、物理的に意味のある信号をなるべく正確に抽出することを目的として

- ベースライン補正
- 狭帯域ノイズ成分の除去
- 3 点移動平均による平滑化

の順に前処理を行った。これらの処理は段階的に適用し、各段階でスペクトルの変化を確認することで、信号の形状を保持しながらノイズのみを低減できているかを検証した。例として、得られた以下のスペクトルを解析する。

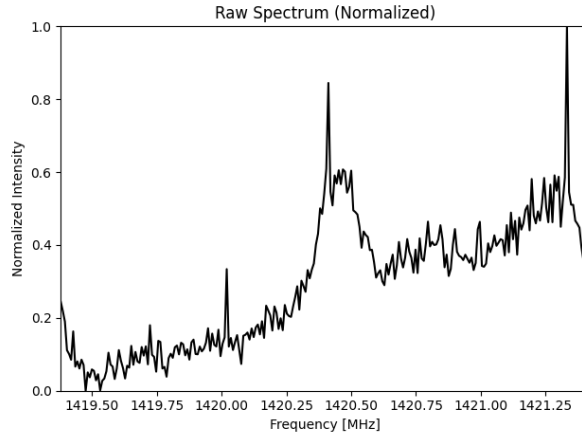


図 3.1: 処理前のスペクトル

3.1 ベースライン補正

観測スペクトルには、本来一定であるべき背景レベルに緩やかな傾きやオフセットが見られる場合がある。これは受信機のゲイン変動や連続波成分などに起因するものであり、輝線の強度評価に系統的な誤差を与える要因となる。

本研究では、輝線が存在しない周波数帯を基準領域としてベースラインを推定した。具体的には、中性水素 (HI) 21 cm 輝線の静止周波数である 1420.405 MHz を中心としたスペクトルのうち、1419.5 MHz 付近および 1421.0 MHz 付近からそれぞれ 25 点ずつデータを抽出した。これらの領域は輝線の影響を受けにくく、背景成分を代表していると考えられる。

抽出した計 50 点に対して一次関数による線形フィッティングを行い、

$$I_{\text{baseline}}(f) = a + bf \quad (3.1)$$

としてベースラインを求めた。その後、この背景成分を元のスペクトルから差し引くことで強度の基準を補正した。

この処理により、スペクトル全体の傾きが解消され、輝線のピーク強度や線幅をより正確に評価できるようになった。図 3.2 にベースライン補正後のスペクトルを示す。

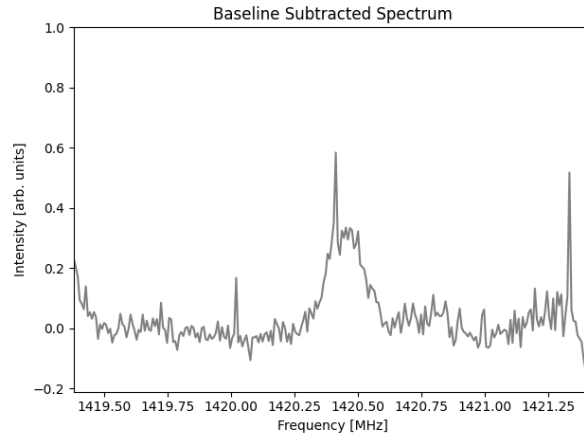


図 3.2: ベースライン補正後のスペクトル

3.2 狭帯域ノイズ成分の除去

電波観測におけるノイズ成分には、帯域全体に一樣に現れる熱雑音のほかに、特定の周波数チャンネルに集中して現れるノイズが存在する。後者は、携帯電話などの人工電波による外来電波干渉や、受信機内部の発振・クロック信号に起因するスプリアス成分などであり、狭い周波数幅に強いピークとして現れることから「狭帯域ノイズ」と呼ばれる。これらは天体からの HI 輝線とは無関係であり、真のスペクトル線と誤認される可能性がある。

電波観測では、このような外部電波干渉や電子回路の瞬間的な揺らぎによって、隣接するデータ点間で不自然に大きな強度差が生じることがある。狭帯域ノイズは特定チャンネル、あるいは飛び飛びの複数チャンネルに強く現れ、スペクトル上で突発的なピークとして観測される。そのため、誤ったピーク検出や速度決定の誤差の原因となる。

そこで隣接する強度差の絶対値を計算し、その標準偏差 (1σ) を基準として 5σ を超える急激な変化を外れ値と判定した。異常と判断されたデータ点は解析に用いないよう除外し、連続性を持つスペクトルのみを残した。 5σ という閾値を採用したのは、ランダムノイズではほぼ発生しないレベルの変動のみを除去し、真の信号を誤って削除するリスクを抑えるためである。

この処理により、スペクトル中の突発的なピークが取り除かれ、全体として滑らかな構造が得られた。

図 3.3 に 5σ を超えるノイズ成分を除去した後のスペクトルを示す。

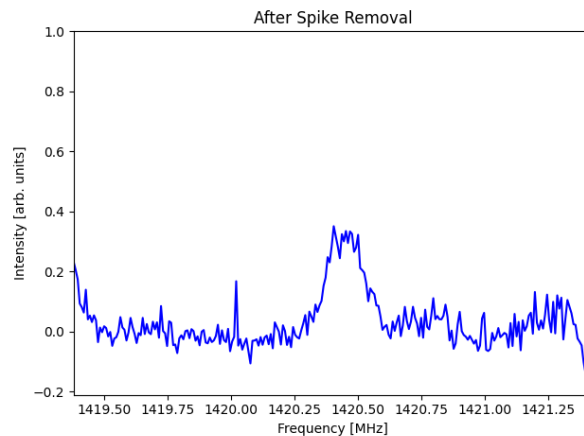


図 3.3: ノイズ成分除去後のスペクトル

3.3 3 点移動平均による平滑化

ノイズ成分除去後も、熱雑音などに起因する高周波的な強度揺らぎが残る。そのため、周波数チャンネル方向で 3 点移動平均を適用し、統計的なばらつきを抑えた。移動平均は連続する複数点の平均値を新たなデータとして用いる手法であり、ピーク位置などの大局的な特徴を保持したままノイズを低減できる利点がある。平均点数を過度に増やすと線幅が人工的に広がる可能性があるため、本研究では信号形状への影響が小さい最小限の平滑化として 3 点にした。図 3.4 に 3 点移動平均後のスペクトルを示す。

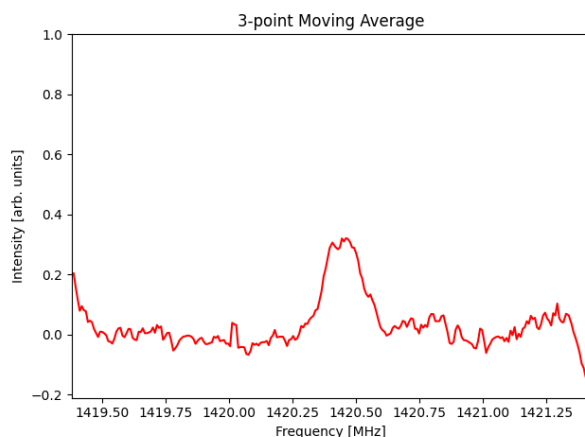


図 3.4: 移動平均後のスペクトル

3.4 処理過程の比較

図 3.5 にベースライン補正後、ノイズ成分の除去後、移動平均による平滑化後のスペクトルを重ねて示す。

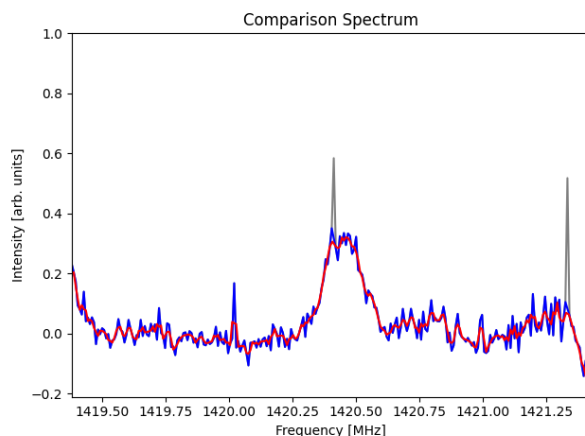


図 3.5: 処理の比較

処理を段階的に適用することでノイズが低減し、信号の輪郭が明確になっていく様子が確認できる。特に平滑化のスペクトルではピーク構造が判別しやすくなっており、最大視線速度の決定精度向上に寄与している。

3.5 差分スペクトルによる検証

前処理が信号の物理的特徴を損なっていないことを確認するため、元データと最終スペクトルの差分を求めた。

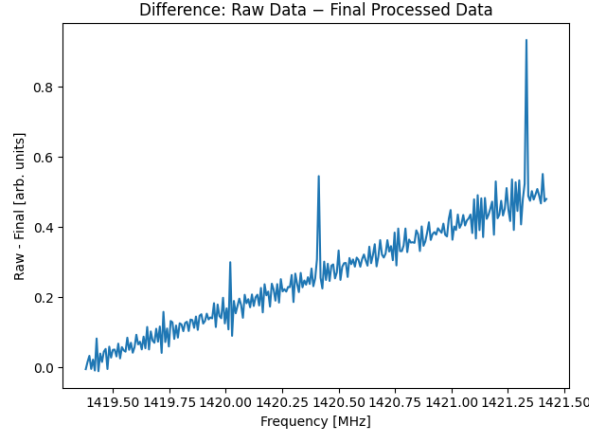


図 3.6: 一連のノイズ除去処理前後での差分スペクトル

差分は主にノイズ成分に対応しており、大きな系統的ずれが見られないことから、本処理が天体起源の輝線成分を保持したまま不要成分のみを除去できていることが確認された。

3.6 信号雑音比 (S/N) による定量評価

スペクトル品質の改善を定量的に評価するため、処理前後の信号雑音比 (S/N) を算出した。ノイズはベースライン推定に使用した周波数帯域の標準偏差から求め、信号はスペクトルの最大強度と定義した。その結果、ノイズ成分の除去および移動平均の適用により信号雑音比 (S/N) は約 1.7 倍向上した。これは主にランダムノイズの低減によるものであり、本前処理が有効であることを示している。

3.7 最大視線速度の決定

観測周波数 f をドップラー効果に基づき

$$v = c \frac{f_0 - f}{f_0} \quad (3.2)$$

の関係式を用いて視線速度に変換した。ここで、 c は光速、 f_0 は HI 21 cm 輝線の静止周波数である。

得られた速度スペクトルには熱雑音が含まれるため、信号成分とノイズ成分を統計的に区別する必要がある。本研究では、解析対象である最終的な速度スペクトル自身に対して、各速度点ごとに隣接する左右 2 点を含む計 5 点のデータを用いて局所的な標準偏差を算出した。

熱雑音はチャンネルごとに独立に揺らぐランダムな成分であるのに対し、天体起源の HI 21 cm 輝線は速度方向にわたって複数チャンネルに広がる連続的な構造として現れる。本研究で用いた 5 点の評価幅は、この輝線の典型的な広がりよりも十分に狭いスケールである。そのため、この局所的な分散は主としてランダムノイズの振幅を反映していると考えられる。

この性質を利用し、各速度点の強度がその局所標準偏差の 3 倍を超える場合のみを統計的に有意な信号として抽出した。

さらに、抽出された信号のうち速度に対して連続的に分布する主要成分を解析対象とし、単発的に現れる点状成分はノイズとして除去した。この連続成分に含まれる最大速度を $v_{\max}$ と定義した。さらに、HI 21 cm 輝線スペクトルの主ピークをガウス関数で近似し、その線幅から速度分散 σ_v を求めた。観測される線幅にはガス雲内部の乱流や熱運動などのランダム運動による広がりが含まれるため、この影響を補正する必要がある。そこで本研究では、

$$v_{\text{rad,max}} = v_{\max} - \sigma_v \quad (3.3)$$

として最大視線速度を導出した。

以下の図に最大視線速度の決定過程を示す。

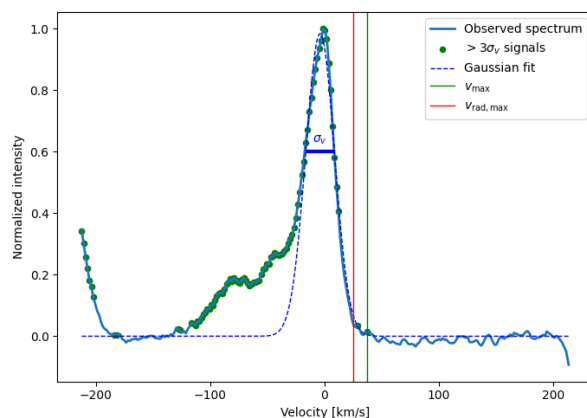


図 3.7: HI 21 cm 輝線スペクトルの解析例

青線は平滑化後の速度スペクトル、緑点は 3σ を超える有意な信号、青い波線はガウスフィットの結果を示している。緑線は $v_{\max}$ 、赤線は速度分散を補正して得た最大視線速度 $v_{\text{rad,max}}$ を示しており、線幅補正の効果が視覚的に確認できる。

第4章 結果

4.1 各銀経方向の観測スペクトル

銀経 $l = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の各方向において観測した HI 21 cm 輝線スペクトルを図 4.1 から図 4.6 に示す。横軸はドップラー効果から算出した視線速度、縦軸は最大強度で規格化した強度である。最大視線速度 $v_{\text{rad,max}}$ を赤線で示す。

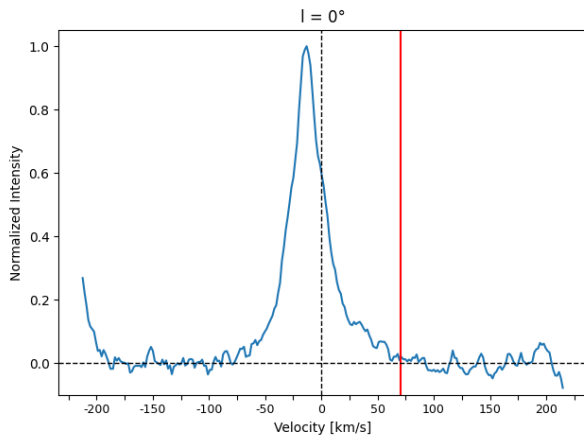


図 4.1: 銀経 $l = 0^\circ$ のスペクトル

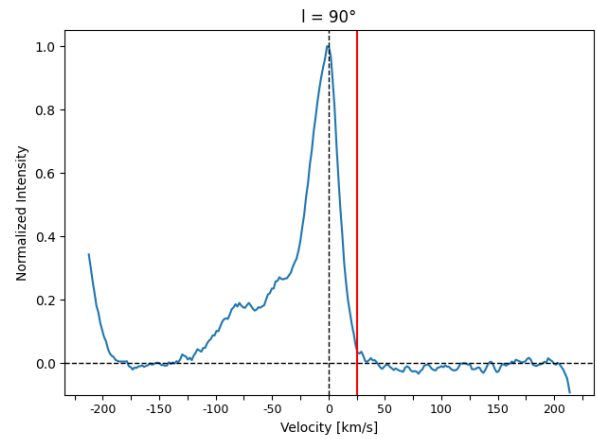


図 4.2: 銀経 $l = 90^\circ$ のスペクトル

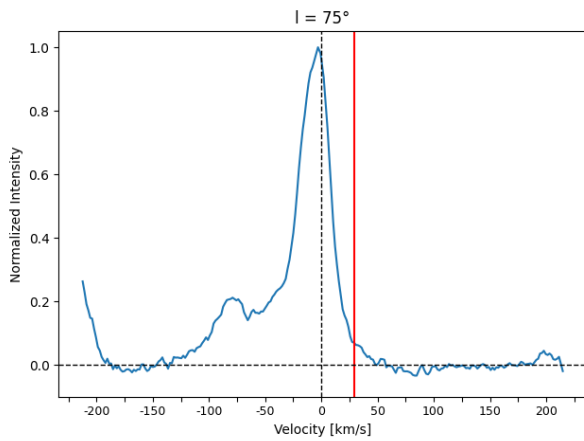


図 4.3: 銀経 $l = 75^\circ$ のスペクトル

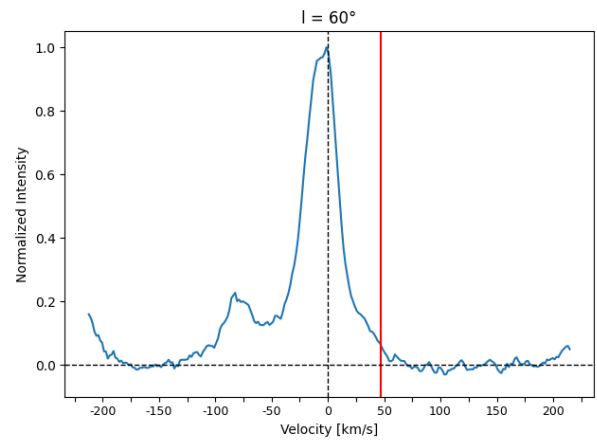


図 4.4: 銀経 $l = 60^\circ$ のスペクトル

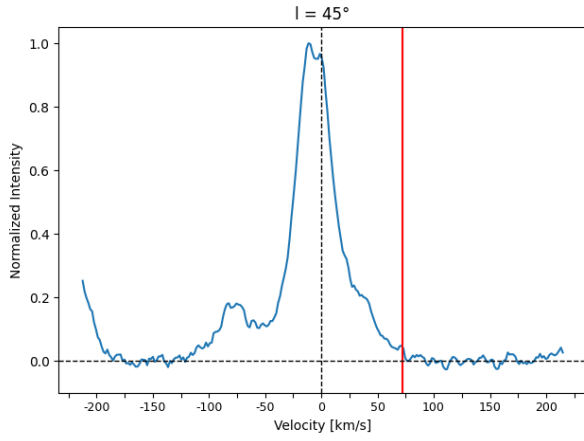


図 4.5: 銀経 $l = 45^\circ$ のスペクトル

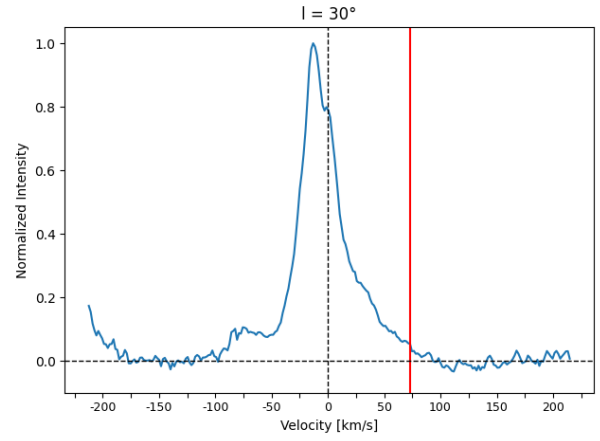


図 4.6: 銀経 $l = 30^\circ$ のスペクトル

4.2 回転曲線

回転曲線の導出に用いた各値と計算結果を表 4.1 に表す。各銀経方向における速度分散は銀経 $l = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の各方向において、それぞれ 14.98, 16.07, 14.43, 13.63, 12.58 km/s であり、いずれもおおよそ 15 km/s 前後に分布していた。これらの平均値は 14.34 km/s と求められ、中央値 14.43 km/s と大きな差は見られなかったことから、速度分散は概ね一定であると考えられる。本研究では、観測データに含まれるノイズやフィッティング誤差による外れ値の影響を受けにくい代表値として中央値を採用し、速度分散を 14.43 km/s とした。

表 4.1: 回転曲線導出に用いた各銀経方向の観測値と計算結果

l	$\sin l$	R	$v_{\max}$	$v_{\text{dispersion}}$	$v_{\text{rad,max}}$	$v_0 \sin l$	v
30	0.50	4.03	88.17	14.43	73.74	119	192.74
45	0.71	5.96	88.17	14.43	73.74	168	241.7
60	0.87	6.97	61.16	14.43	46.73	206	252.73
75	0.97	7.78	42.58	14.43	28.15	230	258.15
90	1.00	8.50	37.52	14.43	22.77	238	260.77

結果、最大視線速度から算出した銀河の回転曲線は以下ようになった。

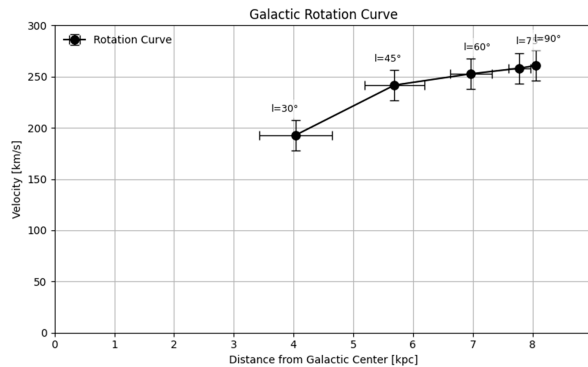


図 4.7: 導出された回転曲線

横方向のエラーバーは観測方向の不確かさを表しており、本観測で使用したホーンアンテナのビームサイズ (約 40°) を考慮して $\pm 5^\circ$ とした。縦方向のエラーバーは 15 km/s とした。この値はスペクトルの線幅から見積もられる速度分散に基づいている。中性水素ガスは乱流運動や熱運動の影響を受けるため単一速度では存在せず、最大視線速度の決定には本質的な不確かさが伴う。本研究では各銀経方向のスペクトルに対してガウスフィットを行っ

た。結果、速度分散はいずれも約 15 km/s と同程度の値を示した。そこで本研究では、この最大視線速度の代表的な不確かさとみなし、縦方向のエラーバーを 15 km/s とした。

第5章 考察

5.1 回転曲線の特徴と物理的意味

本研究では、自作電波望遠鏡を用いた中性水素 (HI) 21 cm 輝線観測により銀河の回転曲線を導出した。その結果、銀河の中心からの距離が増加しても回転速度は大きく減少せず、ほぼ一定の値を示すことが確認された。これは、可視光で観測される恒星やガスの質量分布のみから予想されるケプラー回転とは異なる挙動である。通常、質量が中心に集中している場合、距離の増加とともに回転速度は減少すると考えられる。しかし本研究の結果は、銀河円盤外側にも重力源となる物質が広く分布している可能性を示唆している。

5.2 先行研究との比較

得られた回転曲線を、中性水素 (HI) 21 cm 輝線観測に基づく既知の回転曲線^[4]と比較すると、銀河外縁部において回転速度がおおよそ 220 - 240 km/s 程度ではほぼ一定となる傾向と定性的に一致していた。この結果は、本研究で用いた自作電波望遠鏡でも、銀河全体の回転の特徴を捉えることを示している。したがって、今回の観測手法は銀河の運動を調べる上で十分に有効であると考えられる。

5.3 文献値との差異とその要因

本研究で求めた回転速度は文献値に比べやや高い値を示す場合があった。この要因として、まず観測装置に起因する不確かさが挙げられる。使用したホーンアンテナはビームサイズが大ため、単一のガス雲だけでなく、視線方向に存在する複数のガス成分を同時に受信している可能性がある。その結果、異なる速度をもつ成分が重なり合い、スペクトル線幅が広がり、最大視線速度が実際よりも大きく読み取られたと考えられる。また、最大視線速度の決定方法も結果に影響を与えた可能性がある。

本研究では、スペクトル成分を抽出した後、ガウスフィットによって得られた速度分散を用いて最大視線速度を求めた。しかし、最大視線速度は高速度側のどの位置を採用するかに依存するため、ノイズの残存やフィッティング範囲の設定によって数 km/s 程度の差が生じ得る。特に高速度側の弱い成分を信号として含めた場合には、最大視線速度が外側へ引き延ばされ、回転速度が高く見積もられる可能性がある。

さらに、ベースライン補正やスパイク除去、移動平均による平滑化といったデータ処理の過程でも系統誤差が生じる。特に平滑化はランダムノイズを低減する一方でスペクトル形状をわずかに変化させるため、最大視線速度の位置に微小なずれを与える可能性がある。

5.4 ダークマターとの関連

今回得られた回転曲線が銀河の外側までほぼ一定であったという結果は、先行研究で報告されている傾向と一致している。一般に、銀河外縁部では回転速度が低下すると予想されるが、実際には大きく減少しないことが知られている。この現象は、星やガスなど観測できる物質だけでは説明できず、目に見えない質量の存在を示唆している。その代表的な解釈がダークマターである。今回得られた回転曲線もこの考え方と矛盾しない結果となった。

以上より、自作電波望遠鏡という比較的簡易な装置を用いた観測であっても、適切なデータ解析を行うことで、銀河スケールの物理現象を検証できることが示された。この点は、本研究の重要な意義であると言える。

第6章 今後の展望

本研究では、自作電波望遠鏡を用いて銀河系の回転曲線を導出し、回転速度が銀河中心から離れてもほぼ一定となる傾向を確認することができた。一方で、観測方向の数が限られていることや、観測誤差・解析手法による不確かさが結果に影響している可能性もある。今後は観測する銀経の数を増やし、より細かい間隔でデータを取得することで、回転曲線の形状をより高精度に求めることが期待される。また、積分時間を延ばすことで S/N の向上が見込まれ、速度分散や最大視線速度の推定精度も改善されると考えられる。

さらに、本観測手法は比較的シンプルな装置構成で実施できることから、今後は学部 3 年生の課題別物理実験へ取り入れることも視野に入れている。自作した観測装置を用いて実際の天体からの電波を受信し、そのデータから銀河の運動を解析する一連の過程を体験することは、講義で学ぶドップラー効果や銀河の回転といった物理現象への理解がより深まると期待される。

第7章 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々より多大なるご指導とご支援をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。指導教員である百瀬宗武教授には、観測からデータ解析、論文作成に至るまで丁寧にご指導いただきました。数多くの貴重なご助言をいただき、本研究を完成させることができましたことを心より感謝申し上げます。観測の実施に関してご協力いただいた米倉覚則教授にも、厚く御礼申し上げます。

また、博士課程の森泉さんには、観測やデータ解析について丁寧に教えていただきました。解析で行き詰まったときにも親身に相談に乗ってくださり、多くのことを学ばせていただきました。森泉さんのご指導がなければ、本研究をここまで進めることはできなかったと感じています。心より感謝申し上げます。

間部さんにも、観測や解析の場面で多くのご指導とご協力をいただきました。分からないことにも丁寧に向き合ってください、研究を進めるうえで大きな支えとなりました。間部さんの支えがなければ、本研究を最後まで進めることはできなかったと思います。本当にありがとうございました。

さらに、同じ研究テーマに取り組まれていた川俣さんには、観測や解析について気軽に相談に乗っていただき、分からないことを丁寧に教えていただきました。自分一人では理解が難しかった部分も、川俣さんのおかげで理解を深めることができました。研究を進めるうえで、とても心強い存在でした。

そして、研究室の先輩方および同期の皆様にも、多くのことを学ばせていただきました。研究室で過ごしたこの1年間は本当に楽しく、この研究室を選んで本当によかったと心から感じています。

これまで支えてくださったすべての皆様に、心より感謝申し上げます。

付録A 付録

観測に用いたコードを以下に示す。

Listing A.1: SKA 天文台の浅山信一郎氏が考案した観測コード

```
1 import tkinter as tk
2 from matplotlib.figure import Figure
3 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2Tk
4 import numpy as np
5 import datetime
6 from scipy import fftpack
7 from rtlsdr import RtlSdr
8 from matplotlib import pyplot
9 import glob
10 import os
11 import argparse
12
13 class Application(tk.Frame):
14     def __init__(self, master=None):
15         super().__init__(master)
16         self.master = master
17         self.master.title('matplotlib graph')
18
19         #-----
20
21         # 配置用フレーム matplotlib
22         frame = tk.Frame(self.master)
23
24         # の描画領域の作成 matplotlib
25         fig = Figure(figsize=(10.0, 7.5))
26         # 座標軸の作成
27         self.ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
28         # の描画領域とウィジェット matplotlib(Frame)の関連付け
29         self.fig_canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, frame)
30         # のツールバーを作成 matplotlib
31         self.toolbar = NavigationToolbar2Tk(self.fig_canvas, frame)
32         # のグラフをフレームに配置 matplotlib
33         self.fig_canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
34
35         self.ax.text(0.0, 0.5, 電波終端を"Sawbird の入力に取り付けて、HI「準備」のボタンを押
            してください。n", fontname="MS Gothic", fontsize=28)
36
37         self.ax.axis('off')
38         self.fig_canvas.draw()
39
40         # フレームをウィンドウに配置
41         frame.pack()
42
43         # ボタンの作成
44         fonts = ("", 13)
45
```

```

46     button0 = tk.Button(self.master, text = 準備"\n観測前に一度だけ実行
         ("), command = self.prep, font=fonts)
47     button1 = tk.Button(self.master, text = 天の川の観測"\n観測前に「クリア」を押す
         ("), command = self.sky_obs, font=fonts)
48     button2 = tk.Button(self.master, text = クリア
         "", command = self.fig_clear, font=fonts)
49     button3 = tk.Button(self.master, text = プログラムの"\終了
         n", command = root.quit, font=fonts)
50
51     button0.place(x=0, y=0)
52     button1.place(x=375, y=0)
53     button2.place(x=670, y=0)
54     button3.place(x=850, y=0)
55
56     #-----
57
58
59
60     def fig_clear(self):
61         self.ax.clear()
62         self.fig_canvas.draw()
63
64
65     def close_window():
66         self.root.quit()
67
68
69     def prep(self):
70         self.ax.clear()
71         self.fig_canvas.draw()
72
73
74         # configure device
75         sdr = RtlSdr()
76         sdr.sample_rate = 2.048e6 # Hz
77         sdr.center_freq = 1420.4e6 # Hz
78
79         Glist =
            [2,3,6,9,11,14,16,17,19,21,22,25,27,29,32,34,36,37,38,40,42,43,44,45,47,50]
80
81     for k in range(len(Glist)):
82         sdr.gain = Glist[k]
83         dat = sdr.read_samples(2.048e6)
84         r_hist, r_bins = np.histogram(dat.real, range=(-1, 1),bins=256)
85         i_hist, i_bins = np.histogram(dat.imag, range=(-1, 1),bins=256)
86         NO = (r_hist/np.sum(r_hist)+i_hist/np.sum(i_hist))*256
87         print("gain=%d, %.1f, %.3f" % (Glist[k],sdr.get_gain(), np.max(NO)))
88         if np.max(NO) < 7:
89             gain = Glist[k]
90             break
91         elif k == len(Glist)-1:
92             print("\n")
93             print電波の入力レベルが低すぎます ("")
94             printケーブルの接続や装置の不具合を確認してください ("")
95
96             print("\n")
97             exit()
98

```

```

99
100     sdr.gain = gain
101     pws_bl = np.zeros(256)
102     for i in range(Nint):
103         dat = sdr.read_samples(2.048e6)
104         nData = len(dat)
105         signal_spectrum = np.fft.fftshift(np.fft.fft(dat))
106         pwrN = np.abs(signal_spectrum/nData*2)**2
107         pws = np.sum(pwrN.reshape(256,int(nData/256)),axis=1)
108         pws_bl += pws
109
110     sdr.close()
111
112     try:
113         for f in glob.glob("load_*.csv"):
114             os.remove(f)
115
116     except OSError as e:
117         pass
118
119     np.savetxt("load_%d.csv" % (gain,), pws_bl, delimiter=",", fmt="%s")
120     #####
121
122     self.ax.text(0.2, 0.8, "の最適ゲイン値は SDR%でした。
123                  d" % (gain,), fontname="MS Gothic", fontsize=24)
124     self.ax.text(0.0, 0.7, 電波終端を"Sawbird の入力コネクタから外し、
125                  HI" , fontname="MS Gothic", fontsize=24)
126     self.ax.text(0.0, 0.6, アンテナと"Sawbird を同軸ケーブルで繋いでください。
127                  HI", fontname="MS Gothic", fontsize=24)
128     self.ax.text(0.0, 0.4, アンテナを天の川に向けたら「クリア」ボタンを押し、
129                  "", fontname="MS Gothic", fontsize=24)
130     self.ax.text(0.0, 0.3, 「天の川の観測」のボタンを押して観測してください。
131                  "", fontname="MS Gothic", fontsize=24)
132     self.ax.axis('off')
133     self.fig_canvas.draw()
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151

```

```

def sky_obs(self):
    self.ax.clear()
    load = glob.glob("load_*.csv")

    pws_bl = np.genfromtxt (load[0], delimiter=",")
    gain = int(load[0].split('_')[1] [-4])

    sdr = RtlSdr()
    # configure device
    sdr.sample_rate = 2.048e6 # Hz
    sdr.center_freq = 1420.4e6 # Hz
    sdr.gain = gain

    pws_sky = np.zeros(256)
    for i in range(Nint):
        dat = sdr.read_samples(2.048e6)
        nData = len(dat)
        signal_spectrum = np.fft.fftshift(np.fft.fft(dat))
        pwrN = np.abs(signal_spectrum/nData*2)**2
        pws = np.sum(pwrN.reshape(256,int(nData/256)),axis=1)

```

```

152         pws_sky += pws
153
154     sdr.close()
155
156     now = datetime.datetime.now()
157     skyname = now.strftime("%Y%m%dT%H%M%S")
158
159     HIspectrum = pws_sky/pws_bl
160     HIspectrum = HIspectrum - np.min(HIspectrum)
161     HIspectrum=HIspectrum/np.max(HIspectrum)
162
163     self.ax.plot(freq, HIspectrum)
164     self.ax.set_xlabel('Frequency [MHz]')
165     self.ax.set_ylabel('Normalized intensity [a.u.]')
166     self.ax.set_title("Hydrogen line signal of our milkyway", fontsize = 16)
167     self.ax.set_ylim(np.min(HIspectrum),1.01)
168     Outdata = np.zeros((2,256))
169     Outdata[0] = freq
170     Outdata[1] = HIspectrum
171     self.fig_canvas.draw()
172
173     np.savetxt(skyname+".csv", Outdata.T, delimiter=",", fmt="%s")
174     self.fig_canvas.print_png(skyname+".png")
175
176
177
178 parser = argparse.ArgumentParser(description='Filterbank format(.fil) file')
179 parser.add_argument('-d', '--duration', type=int, help='Observing duration (seconds)',
180                     default=25)
181
182 args = parser.parse_args()
183
184 Nint = args.duration
185
186 print("Observing Duration: " + str(Nint) + "sec")
187 freq = [1420.4 -2.048/2 + 0.004 + 0.008*i for i in range(256)]
188
189
190 root = tk.Tk()
191 sdr = RtlSdr()
192 sdr.close()
193
194 app = Application(master=root)
195 app.mainloop()

```

また、解析に用いたコードを以下に示す。

Listing A.2: HI 21cm スペクトルデータの前処理および S/N 評価プログラム

```

1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import bisect
4 import numpy as np
5 import argparse as arg
6 import os
7 from scipy.interpolate import interp1d
8
9 # 関数定義
10 def moving_average(arr, n=3):
11     return np.array([np.mean(arr[i:i+n]) for i in range(len(arr)-n+1)])
12

```

```

13 def remove_spikes(f, I, n_sigma=5):
14     diff = np.abs(np.diff(I))
15     sigma = np.std(diff)
16     mask = np.ones(len(I), dtype=bool)
17
18     for i in range(1, len(I)):
19         if np.abs(I[i] - I[i-1]) > n_sigma * sigma:
20             if I[i] > I[i-1]:
21                 mask[i] = False
22             else:
23                 mask[i-1] = False
24
25     return f[mask], I[mask]
26
27 def safe_savefig(path, dpi=100):
28     if os.path.exists(path):
29         os.remove(path)
30     plt.savefig(path, dpi=dpi)
31
32 def plot_single(f, I, filename, title, xlim, ylim, color='black'):
33     plt.figure(figsize=(6.4, 4.8))
34     plt.plot(f, I, color=color)
35
36     plt.xlabel("Frequency [MHz]")
37     plt.ylabel("Normalized Intensity")
38     plt.title(title)
39     plt.xlim(xlim)
40     plt.ylim(ylim)
41     plt.tight_layout()
42     safe_savefig(filename)
43     plt.close()
44
45 # メイン処理
46 if __name__ == '__main__':
47
48     parser = arg.ArgumentParser(description="手作り電波望遠鏡データ解析=")
49     parser.add_argument("filename", type=str, help="解析対象=CSV")
50     args = parser.parse_args()
51
52     file_name = os.path.abspath(args.filename)
53     base_dir, data_file = os.path.split(file_name)
54     data_name = os.path.splitext(data_file)[0]
55
56     save_dir = os.path.join(base_dir, "out", data_name)
57     os.makedirs(save_dir, exist_ok=True)
58
59     print("保存先:", save_dir)
60
61     # データ読み込み
62     df = pd.read_csv(file_name, header=None, names=['f', 'I'])
63
64     # 軸範囲 (用) RAW
65     raw_norm = df['I'] / np.max(df['I'])
66     xlim = (df['f'].min(), df['f'].max())
67     ylim_raw = (np.min(raw_norm), 1.0)
68
69     # ★保存 (処理前) RAW

```



```

70     plot_single(df['f'], raw_norm,
71                 os.path.join(save_dir, "raw_spectrum.png"),
72                 "Raw Spectrum (Normalized)",
73                 xlim, ylim_raw, color='black')
74
75     # パラメータ
76     cen_freq = 1420.405
77     l1 = 1419.5
78     r1 = 1421.0
79     M = 25
80
81     # ベースライン推定
82     ind_l = bisect.bisect_left(df['f'], l1)
83     ind_r = bisect.bisect_left(df['f'], r1)
84
85     x1 = df['f'][ind_l:ind_l+M].values
86     y1 = df['I'][ind_l:ind_l+M].values
87     xr = df['f'][ind_r:ind_r+M].values
88     yr = df['I'][ind_r:ind_r+M].values
89
90     x_all = np.concatenate([x1, xr])
91     y_all = np.concatenate([y1, yr])
92
93     b, a = np.polyfit(x_all, y_all, 1)
94     baseline = a + b * df['f']
95     corr = df['I'] - baseline
96
97     # スパイク除去& 平滑化
98     f_spike, I_spike = remove_spikes(df['f'].values, corr.values, n_sigma=5)
99
100    f_avg = moving_average(f_spike, 3)
101    I_avg = moving_average(I_spike, 3)
102
103    # 正規化
104    norm = np.max(I_avg)
105
106    corr_n = corr / norm
107    I_spike_n = I_spike / norm
108    I_avg_n = I_avg / norm
109
110    ylim = (np.min(corr_n), 1.0)
111
112    # 各プロット
113    plot_single(df['f'], corr_n,
114                os.path.join(save_dir, "baseline_subtracted.png"),
115                "Baseline Subtracted Spectrum",
116                xlim, ylim, color='gray')
117
118    plot_single(f_spike, I_spike_n,
119                os.path.join(save_dir, "spike_removed.png"),
120                "After Spike Removal",
121                xlim, ylim, color='blue')
122
123    plot_single(f_avg, I_avg_n,
124                os.path.join(save_dir, "moving_average.png"),
125                "3-point Moving Average",
126                xlim, ylim, color='red')

```

```

127
128 # 比較プロット
129 plt.figure(figsize=(6.4, 4.8))
130
131 plt.plot(df['f'], corr_n, color='gray', label='Baseline Subtracted')
132 plt.plot(f_spike, I_spike_n, color='blue', label='Spike Removed')
133 plt.plot(f_avg, I_avg_n, color='red', label='Moving Average')
134
135 plt.xlabel("Frequency [MHz]")
136 plt.ylabel("Normalized Intensity")
137 plt.title("Comparison Spectrum")
138
139 plt.xlim(xlim)
140 plt.ylim(ylim)
141
142 plt.legend()
143 plt.tight_layout()
144
145 comp_path = os.path.join(save_dir, "comparison.png")
146 safe_savefig(comp_path)
147 plt.close()
148
149 # 差分プロット
150 interp_final = interp1d(f_avg, I_avg_n, kind='linear', fill_value="extrapolate")
151 I_final = interp_final(df['f'].values)
152
153 diff = df['I'].values / norm - I_final
154
155 plt.figure(figsize=(6.4, 4.8))
156 plt.plot(df['f'], diff)
157
158 plt.xlabel("Frequency [MHz]")
159 plt.ylabel("Raw - Final (Normalized)")
160 plt.title("Difference Spectrum")
161
162 plt.tight_layout()
163
164 diff_path = os.path.join(save_dir, "difference_raw_vs_final.png")
165 safe_savefig(diff_path)
166 plt.close()
167
168 # 計算 SNR
169 noise_before = np.concatenate([
170     corr_n.values[ind_l:ind_l+M],
171     corr_n.values[ind_r:ind_r+M]
172 ])
173
174 noise_sigma_before = np.std(noise_before, ddof=1)
175 signal_peak_before = np.max(corr_n)
176 SNR_before = signal_peak_before / noise_sigma_before
177
178 noise_after = np.concatenate([
179     I_final[ind_l:ind_l+M],
180     I_final[ind_r:ind_r+M]
181 ])
182
183 noise_sigma_after = np.std(noise_after, ddof=1)

```

```

184     signal_peak_after = np.max(I_final)
185     SNR_after = signal_peak_after / noise_sigma_after
186
187     print【処理前（ベースライン除去のみ）】("S/N =", SNR_before)
188     print【処理後（スパイク除去＋平滑化）】("S/N =", SNR_after)
189     print("S/N 改善率=", SNR_after / SNR_before)

```

Listing A.3: 最大視線速度および速度分散の導出プログラム

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.optimize import curve_fit
5 from scipy.cluster.hierarchy import linkage, fcluster
6
7 # ガウス関数
8 def gaussian(v, I0, v0, sigma):
9     return I0 * np.exp(-(v - v0)**2 / (2 * sigma**2))
10
11 # データ読み込み
12 data = pd.read_csv(
13     r"C:\Users\kogure\homemade_telescope\takahagi\out\velocity_data\113732v_190.csv"
14 )
15
16 v = data["velocity_kms"].values
17 I = data["normalized_intensity"].values
18
19 # 局所σ3 有意信号
20 window = 5
21 rolling_std = data["normalized_intensity"].rolling(
22     window, center=True, min_periods=1
23 ).std()
24
25 signal_mask = I > 3 * rolling_std
26 signal_v = v[signal_mask]
27 signal_I = I[signal_mask]
28
29 # クラスタリング
30 if len(signal_v) > 1:
31     Z = linkage(signal_v.reshape(-1, 1), method="single")
32     clusters = fcluster(Z, t=50, criterion="distance")
33
34     unique, counts = np.unique(clusters, return_counts=True)
35     main_cluster = unique[np.argmax(counts)]
36
37     main_signal_v = signal_v[clusters == main_cluster]
38 else:
39     main_signal_v = signal_v
40
41 # v_max
42 v_max = main_signal_v.max()
43
44 # ガウスフィット（速度分散）
45 idx_peak = np.argmax(I)
46 v_peak = v[idx_peak]
47 I_peak = I[idx_peak]
48

```

```

49 fit_range = 20
50 mask_fit = np.abs(v - v_peak) <= fit_range
51
52 p0 = [I_peak, v_peak, 5.0]
53 popt, _ = curve_fit(gaussian, v[mask_fit], I[mask_fit], p0=p0)
54 I0_fit, v0_fit, sigma_fit = popt
55
56 v_fit = np.linspace(v.min(), v.max(), 1000)
57 I_fit = gaussian(v_fit, *popt)
58
59 # v_rad,max
60 v_rad_max = v_max - sigma_fit
61
62 # プロット
63 plt.figure(figsize=(7, 5))
64
65 # 観測スペクトル
66 plt.plot(
67     v, I,
68     color="#1f77b4",
69     lw=2,
70     label="Observed spectrum"
71 )
72
73 #  $\sigma$ 以上の点3
74 plt.scatter(
75     signal_v,
76     signal_I,
77     color="green",
78     s=20,
79     label=r"$>3\sigma$ signals"
80 )
81
82 # ガウスフィット
83 plt.plot(
84     v_fit,
85     I_fit,
86     "b--",
87     lw=1.0,
88     label="Gaussian fit"
89 )
90
91 # v_max
92 plt.axvline(
93     v_max,
94     color="green",
95     lw=1,
96     label=r"$v_{\mathrm{max}}$"
97 )
98
99 # v_rad,max
100 plt.axvline(
101     v_rad_max,
102     color="red",
103     lw=1,
104     label=r"$v_{\mathrm{rad,max}}$"
105 )

```

```

106
107 #  $\sigma$  表示
108 plt.hlines(
109     y=0.6 * np.max(I),
110     xmin=v0_fit - sigma_fit,
111     xmax=v0_fit + sigma_fit,
112     color="blue",
113     lw=3
114 )
115 plt.text(
116     v0_fit,
117     0.63 * np.max(I),
118     r"$\sigma$",
119     ha="center",
120     color="blue"
121 )
122
123 plt.xlabel("Velocity [km/s]")
124 plt.ylabel("Normalized intensity")
125 plt.legend()
126 plt.tight_layout()
127 plt.show()
128
129 # 数值出力
130 print(f"v_max = {v_max:.2f} km/s")
131 print(f"sigma = {sigma_fit:.2f} km/s")
132 print(f"v_rad,max = {v_rad_max:.2f} km/s")

```

参考文献

- [1] 谷敷怜空, 2024 , 天文月報, 117 , 315
- [2] 谷敷怜空, 2025 , 天文月報, 118 , 53
- [3] 祖父江義明 他編, シリーズ現代の天文学 5 銀河－銀河系 (日本評論社)
- [4] 祖父江義明, 1997 , 天文月報, 90 , 122