法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

渦巻銀河NGC4945の中心領域の回転曲線の導 出と質量推定

早川, 慎太朗 / HAYAKAWA, Shintaro

(出版者 / Publisher) 法政大学大学院理工学研究科 (雑誌名 / Journal or Publication Title) 法政大学大学院紀要.理工学研究科編 (巻 / Volume) 64 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 6 (発行年 / Year) 2023-03-24 (URL) https://doi.org/10.15002/00026436

渦巻銀河 NGC4945 の中心領域の 回転曲線の導出と質量推定

DERIVATION OF THE ROTATION CURVE AND MASS ESTIMATION OF THE CENTRAL REGION OF SPIRAL GALAXY NGC4945

早川慎太朗

Shintaro HAYAKAWA 指導教員 佐藤 修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生科学系修士課程

The spiral galaxy NGC4945 is a characteristic galaxy with an active galactic nucleus and active starbursts. In this paper, the CO emission lines from the central region of NGC 4945 observed by ALMA are used for image analysis and mass determination from rotation curves. Two arms extending north-south and two bars extending east-west were observed in the image analysis in the 581-619 km/s integrated intensity diagram. The mass estimate of the central region shows a mass of 1.2×10^9 M_☉ within 9" (~166 pc) of the CO(J=1-0) emission line rotation curve.

Key Words : Rotation curve, NGC4945, ALMA, CO

1. はじめに

渦巻銀河の質量は銀河の回転速度を銀河半径の関数と して表した回転曲線から推定することができる.渦巻銀 河の回転曲線は光学観測や電波観測による位置-速度図 から導かれ,質量推定の他にもダイナミクスの解明にも 役立つ.1980年代に銀河の回転曲線を求めたところ,銀 河の表面輝度から推定される回転曲線よりも,銀河円盤 の外縁部でも速度が低下せずに,水平を保っていたこと から,銀河には大量のダークマターが存在することが示 唆された[1][2].

NGC4945 は銀河系から 3.8Mpc 程離れたところに位置 するエッジオン銀河(i≒78°)で Cen A/M83 銀河群に属 する[3].また,NGC4945 は 2 型活動銀河核を持つセイ ファート銀河と中心領域で星形成が盛んに行われるスタ ーバースト銀河で特徴的な性質を持ち,様々な波長で観 測のターゲットとなっている.

本研究は ALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉 計)で観測した CO 輝線のデータを用いて,活動銀河核や 星形成が盛んに行われる銀河中心領域の画像解析と回転 曲線を用いた質量推定を行う.

2. 観測データ

ALMA はチリ北部アタカマ砂漠の標高 5000m に設置 された口径 12m のパラボラアンテナ 54 台と口径 7m の パラボラアンテナ 12 台の合計 66 台から構成される電波 干渉計で, 35-950GHz までのミリ波サブミリ波を 0".01 の高分解能かつ高感度での観測が実現できる[4].

ALMA の観測データは ALMA Science Archive と JVO ALMA FITS Archive に保存されている. ALNA Science Archive には観測結果の天体画像に加えて,画像を生成す るために必要な観測生データとデータ処理に必要なファ イルが取得できる. JVO ALMA FITS Archive は ALMA Science Archive 内の FITS ファイル化されているデータ が保存されている. この FITS ファイル化されたデータは ALMA 観測所が観測者に渡す際に観測者が取得したい周 波数帯を切り出した参照データで,生データと比較して データサイズが小さく解析が容易にできる[5].

本研究では JVO ALMA FITS Archive から銀河内に 存在する分子ガスの中で水素分子(H₂)の次に多く分布す る CO 分子ガスをトレースする 115.271 GHz の CO(J= 1-0)輝線(2017.1.00002.S), 230.538 GHz の CO(J=2-1) 輝線(2016.1.01279.S), 345.796 GHz の CO(J=3-2)輝線 (2016.1.01135.S)の観測データを使用する.

3. データ解析と結果

(1) 積分強度図と速度場図

スペクトル線観測では空間2次元(*l,m*)とドップラー効 果によるスペクトル線の静止周波数と観測周波数のずれ から求められる視線速度の速度1次元(v)の合計3次元 のデータキューブが得られる.積分強度図はデータキュ ーブを速度方向に積分したマップのことで,以下の式で 表せる[4].

$$M_0 = \int_{v} I(l, m, v) dv \tag{1}$$

観測から得られた各 CO 輝線の積分強度図を図1に示 す.



図1 CO 輝線の積分強度図

すべての積分強度図で CO 分子ガスは PA=45° に沿っ て 10"×2"のサイズのエッジオンの円盤状に分布してお り、CO(J=1-0)輝線の積分強度図では中心から南方向 5" 付近に他の CO 輝線では確認できない 35 Jy/beam.km/s ほどの放射が観測できる.また、CO(J=2-1),CO(J=3-2) 輝線の積分強度図では北東方向に銀河中心 0"~2"(0~38 pc)と 2.7"~5.0" (50~95 pc)に 2 つのピークが見られ る.

積分強度図で求めた分子ガスの運動を把握するために は、データキューブの視線速度の分布を図示した速度場 図が用いられる.速度場図はデータキューブのうち空間 2次元の各ピクセルの平均速度を求めたもので、以下の 式で表せる[3].

$$M_{1} = \frac{\int_{v} vI(l,m,v)dv}{\int_{v} I(l,m,v)dv}$$
(3.2)

速度場図を作成する際は銀河の後退速度に対して速度差 が大きいチャンネルのノイズが平均速度に影響してしま うため、S/N比の小さい領域を除外して計算する必要 がある. CO(J=1-0)輝線とCO(J=2-1)輝線はRMSノ イズレベルの3倍以下、CO(J=3-2)輝線はRMSノイズ レベル以下の領域を除外して作成した各CO輝線の速度 場図に440,520,600,680 km/sの contour を重ねたマッ プを図2に示す.



すべての CO 輝線の速度場図で銀河の後退速度 v=563 km/s [6]に対して北東方向が赤方偏移,南西方向が青方 偏移していることから,円盤が回転している様子がわか る. CO(J=1-0)輝線と CO(J=2-1)輝線の速度場図では 600 km/s の contour が西から北側に捻じれていること が確認できる. この contour の捻じれの要因を調べるた め,600 km/s 付近の速度範囲(581~619 km/s)で積分し た各 CO 輝線の積分強度図と各 CO 輝線のピーク速度の 10,20,40,60,80%の強度に対応する contour を図 3 に示 す.



図3 581-619 km/sの速度範囲で積分した積分強度図

図3のCO(J=1-0)輝線とCO(J=2-1)輝線の積分強度図 では、赤緯軸方向に15"程伸びる2つのアーム状の放射 が観測でき、東側のアームが南西方向に、西側のアーム が北東側に湾曲していることがわかる.北西方向のアー ムの位置が図2のcontourの捻じれが見られる位置に対 応していることから、アームが図2の速度場図の捻じれ の要因になると考えられる.

(2) 輝線強度比

CO の多輝線観測は星が形成される分子雲のメカニズ ムを理解するのに役立つ. CO(J=1-0)輝線は CO 分子ガ スの中で低温低密度の CO 分子ガスをトレースし,

CO(J=3-2)輝線は星生成に直結する高温高密度の CO 分 子ガスをトレースすることから, CO 輝線の強度比を求 めることで分子雲の中で星形成が活動的な場所を見積も ることができる.

本研究では CO 分子が集中している PA=45°の長軸 上の銀河中心を含めた 9 点の積分強度と輝線強度比を求 める.各観測点の座標, CO 輝線の強度,輝線強度比を 表 1, CO(J=2-1)輝線と CO(J=3-2)輝線のビームサイズ を CO(J=1-0)輝線のビームサイズに合わせて作成した輝 線強度比の分布図を図 4 に示す.

	RA	Dec	輝線強度 [Jy/beam km/s]			輝線強度比(輝度温度換算)		
			CO(1-0)	CO(2-1)	CO(3-2)	R _{2-1/1-0}	R _{3-2/1-0}	R _{3-2/2-1}
1	13h05m27s.915	-49°28'01'.114	28.31	14.42	6.44	0.56	0.77	1.37
2	13h05m27s.83	-49°28'01'.914	33.81	28.36	13.22	0.92	1.32	1.43
3	13h05m27s.719	-49°28'03'.000	38.65	28.92	15.25	0.82	1.33	1.62
4	13h05m27s.567	-49°28'04'.579	48.41	53.28	24.19	1.21	1.68	1.39
中心	13h05m27s.478	-49°28'05'.436	59.24	49.49	16.31	0.92	0.93	1.01
5	13h05m27s.405	-49°28'06'.257	71.27	96.97	37.74	1.49	1.78	1.20
6	13h05m27s.318	-49°28'07'.212	56.20	55.36	21.19	1.08	1.27	1.18
7	13h05m27s.202	-49°28'08'.330	44.97	38.97	13.34	0.95	1.00	1.05
8	13h05m27s.060	-49°28'09'.712	30.37	18.69	3.51	0.67	0.39	0.58

表1 観測点の輝度温度と輝線強度比



 $R_{2-1/1-0}$ と $R_{3-2/1-0}$ は銀河の中心部に行くほど値が大きくな るが銀河中心のH2Oメーザーのある位置では急激に値 が小さくなった.また, $R_{3-2/2-1}$ では分子円盤の南西側よ り北東側,さらに長軸を境にして北側に高温高密度の CO(J=3-2)が多く見られ,星形成が活動的に行われてい ると考えられる.

銀河中心領域の星形成については近赤外線の Pa α 線 を観測した Marconi et al. (2000)[7]で研究されており、 100pc(1"=18.5pc)スケールのスターバーストリングが発 見された. このスターバーストリングの Pa α 線の赤外 線放射に R_{3-2/2-1}のピークを 1 とした際の 20,40,60,80% の contour を重ねたものを図 5 に示す.



図5 中心領域で観測された Paα線の分布図に R_{3-2/2-1} のピークを1とした際の 20,40,60,80%の値の contour を 重ねた図.

図5では星形成活動の指標となる $Pa \alpha$ 線は長軸より北 側に多く分布し、 $R_{3-2/2-1}$ と同様の位置で星形成が行われ ていると推測できる.

(3) 回転曲線の導出

NGC4945 の回転曲線を導出するためには銀河の長軸 とドップラー効果による視線速度を 2 次元の強度分布図 として表した位置-速度図を作成する必要がある.本研究 では電波観測データ解析ソフトの CASA を用いて CO(J=1-0),CO(J=2-1),CO(J=3-2)輝線の観測データか ら銀河の長軸(PA=44°)[8]に沿った位置-速度図を作成 する.最大輝線強度の 20,40,60,80%の強度の contour を重ねた各 CO 輝線の位置-速度図を図6に示す.



回転曲線の導出には位置-速度図の終端速度をトレー スする Envelope-Tracing 法を用いる[9][10]. Envelope-Tracing 法より終端速度の最大輝線強度の20%の contour に対応する視線速度を 0.5"ごとに読み取り,銀河の傾き などを補正して銀河の回転速度を求める.オフセット+方 向と-方向の平均速度を求めた各 CO 輝線の回転曲線と 0.25"の銀河中心位置の不確かさによる誤差棒を図7に 示す.



図7では銀河中心部で剛体回転のように速度が急上昇 し、すべてのCO輝線の回転曲線で銀河半径が1.0"(≒ 18.5 pc)で回転速度が最大となり、2.5"(≒46pc)で170 km/s まで低下した.その後は、CO(J=2-1)輝線と CO(J=3-2)輝線で4.5"(≒83 pc)にかけて10~15 km/s速 度が再上昇している様子が見られる.

(4) 中心領域の質量の推定

次に各 CO 輝線の回転曲線から銀河中心部の質量分布 が球対称だと仮定した場合の質量分布を求める. NGC4945の中心領域の質量分布と0.25"の銀河中心位置 の不確かさによる誤差棒を図8に示す.



図4の質量分布では9.0"(=165pc)内の質量は1.2× 10°M_☉,また,最初の測定点の0.25"(=5.2 pc)地点では CO(J=1-0)輝線で1.7×10⁷M_☉, CO(J=2-1)輝線で 3.2×10⁷M_☉, CO(J=3-2)輝線では3.3×10⁷M_☉となり, Henkel et al.(2018)[11]の高密度分子のHCN(J=4-3)輝 線の回転曲線から求められた2.5×10⁷M_☉と比較する と,CO(J=1-0)輝線は低質量になったがCO(J=2-1),CO(J=3-2)輝線は1.3倍程大きい値となった.

4. 考察

(1) CO 輝線以外でのアームの観測

図3のCO(J=1-0),CO(J=2-1)輝線の581-619 km/sの 速度範囲の積分強度図で観測されたアームは他の輝線観 測でも確認されており, Henkel et al. (2018)は HCN(J=1-0)輝線で南北に伸びる2本のアームと CS(J=2-1)輝線で東西方向に広がる100pc程のバー構造 を発見した[11]. (図9)



図9 581-619 km/s の速度範囲の HCN(J=1-0)輝線(左) と CS(J=2-1)輝線(右)の積分強度図

Henkel et al. (2018)では図9の CS(J=2-1)輝線で観測さ れたバーを介して大量のガスが外縁部から中心部へ供給 していると推測した[11]. このバー構造は図3の CO(J=1-0)輝線の積分強度図でも見られ,バーがアーム と分子円盤を繋いでいることが確認でき,CO 輝線観測 からもバーを介して中心部にガスを供給していると考え ることができる.

(2) モデルを用いた回転曲線の再現

図7のCO(J=2-1)輝線とCO(J=3-2)輝線の回転曲線 では1"(≒18.5pc)と4.5"(≒83pc)に速度のピークが確認 できる. この2つのピークは図6の位置-速度図のオフ セットの+方向で顕著に見られ、2つのピークは分離し ていないが異なる成分からの放射であると考えられる.

ここでは銀河の密度分布のモデルを作成し、4.5"付近 の回転速度の再上昇などの特徴が見られる CO(J=3-2)輝 線の回転曲線を再現できるか検証する.本研究では簡単 なモデルにするため、図8の質量分布が2次元平面上に 仮定した際の面密度分布のモデルを作成する.モデルは 中心成分とリング成分の2成分に分け、中心成分は半径 1.5"(≒28 pc)で面密度を指数関数、リング成分は半径 1.5~6.5"(≒27~120 pc)で面密度を二次関数の分布だと 仮定すると図 10 に示す回転曲線が得られる.



図 10 各 CO 輝線の回転曲線とモデルの回転曲線

このモデルを用いると CO(J=3-2)輝線の回転曲線を再現 でき,図1の CO(J=2-1)輝線と CO(J=3-2)輝線の積分 強度図で観測された北東方向の2つのピークのうち,銀 河中心 0"~2"(0~38 pc)にピークを持つ成分が中心成分 で 2.7"~5.0" (50~95 pc)にピークを持つ成分がリング成 分に対応すると考えられる.

(3) ピーク速度の比較

図7ではすべてのCO輝線で1"にかけて急激な速度 上昇が見られたが、ピーク速度は輝線ごとに異なり、ビ ームサイズが最も小さいCO(J=3-2)輝線のピーク速度が 最大、ビームサイズが最も大きいCO(J=1-0)輝線で最小 の値になった.そのため、すべてのCO輝線のビームサ イズを最も大きいCO(J=1-0)輝線に合わせて、位置-速 度図を作成し直し、回転曲線を導出する.(図11)



図 11 CO(J=1-0)輝線のビームサイズに合わせた CO(J=2-1)輝線と CO(J=3-2)輝線の回転曲線

図 11 ではビームサイズを CO(J=1-0)輝線に合わせた CO(J=2-1)輝線と CO(J=3-2)輝線の回転曲線はどちらも 1"で回転速度が 200km/s となり,もとの回転曲線より CO(J=2-1)輝線は 5 km/s, CO(J=3-2)輝線は 15 km/s 低下した.もとデータのビームサイズが小さい CO(J=3-2)輝線のほうがより速度差が大きくなったため,観測時 のビームサイズが小さいほうがピーク速度が大きくなる と考えられる.また,ビームサイズを大きくした CO(J=2-1), CO(J=3-2)輝線のピーク速度が CO(J=1-0) 輝線のピーク速度まで低下しないのは,CO(J=1-0) 輝線のピーク速度まで低下しないのは,CO(J=1-0))輝線 で観測できる CO 分子が光学的に厚く,他の CO 輝線で 観測した回転速度の速い位置とは異なる位置からの放射 を観測したのではないかと考えられる.

5. まとめ

本研究では、活動銀河核やスターバーストなど特徴的 な性質を持つ渦巻銀河 NGC4945 の中心領域を ALMA の CO 輝線の観測データを用いて画像解析と回転曲線か ら中心領域の質量推定を行った.

画像解析では CO 輝線の観測データから積分強度図と 速度場図を作成した.581-619 km/s の積分強度図では 先行研究でも観測された2本のアームとバーが確認で き,このアームによって速度場図の contour に捻じれが 生じると推測することができた.

中心領域の質量推定では、3 つの CO 輝線の回転曲線 から質量を求めた.最初の測定点の0.25''(=5.2 pc)地点 では CO(J=1-0)輝線で $1.7 \times 10^7 M_{\odot}$, CO(J=2-1)輝線で $3.2 \times 10^7 M_{\odot}$, CO(J=3-2)輝線で $3.3 \times 10^7 M_{\odot}$, CO(J=1-0) 輝線の回転曲線の最後の測定点の9''(=166 pc)地点での 質量は $1.2 \times 10^9 M_{\odot}$ となった.また、モデルを作成して回 転曲線の再現をし、中心領域の CO 分子ガスの分布を推 測することができた.

参考文献

- [1] 谷口義明・岡村定矩・祖父江義明 編,『銀河 I 一銀河 と宇宙の階層構造[第 2 版](シリーズの天文学 第 4
 巻)』,日本評論社, 2018
- [2] 祖父江義明・有本信雄・家正則 編,『銀河II-銀河 系[第2版](シリーズ現代の天文学 第5巻)』,日本 評論社,2018

[3] Ott, M., Whiteoak, J. B., Henkel, C., & Wielebinski, R. 2001, A&A, 372, 463

[4] 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄. 宇宙の観測 II 電 波天文学[第 2 版] シリーズ現代の天文学 第 16 巻. 日 本評論社, 2009.

- [5] 国立天文台アルマプロジェクト・データ解析センタ -. ALMA データ解析講習会. 2021 年 11 月.
- [6] Koribalski B. S. et al., 2004, AJ, 128, 16
- [7] Marconi, A., Oliva, E., van der Werf, P. P., et al. 2000, A&A, 357, 24
- [8] Chou, R. C. Y., Peck, A. B., Lim, J., et al. 2007, ApJ, 670, 116
- [9] Sofue, Y., 1996, ApJ, 458, 120
- [10] Sofue, Y., 1997, PASJ, 49, 17
- [11] Henkel, C., Mühle, S., Bendo, G., et al. 2018, A&A, 615, A155

謝辞

本研究を進めるにあたり春日隆先生には,退職された にもかかわらず,多くのご指導を頂きました.深く感謝申 し上げます.