

CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING). II. Transitions between atomic and molecular gas, diffuse and dense gas, gas and stars in the dwarf galaxy NGC 2976

2018/07/04 B4 近藤 滉

1.abstract

- COMINGプロジェクトの一環で野辺山45m望遠鏡を用いて、
NGC2576の分子ガスと星形成の性質を調べた。
- 1、分子ガス比は、ガス全体の面密度と星形成率に依存する。ことを示した
- 2、 $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ と $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の割合から、
分子ガスの面密度が減少するにしたがって分子ガスの温度が上昇する。
ことを示した。
- 3、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)/^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の積分強度比は 27 ± 11 となった。
⇒低い面密度が支配的であることを示す

1.abstract

- 4、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)/^{18}\text{CO}(J=1-0)$ の積分強度比は下限値の21を得た。
- 5、 全ガスの面密度と星形成率の関係はべき乗指数で 2.08 ± 0.11 となった。
分子ガスの面密度と星形成率の関係 (1.62 ± 0.17) より大きかった。
- 6、 全ガスの面密度と星形成率の関係
→ $10 M_{\odot}$ 以下の面密度をもつ分子ガスの割合の急増によるもの。
- 7、 分子ガスの運動は
棒のような構造は剛体の回転曲線で回転する。ということをしめす。

2. Introduction NGC2976について

- ガスの面密度が低いところでの星形成に関する重要な情報で、より多くの銀河のサンプルが必要。

→NGC2976は低ガス密度領域の星形成の関係の研究のベストターゲットの一つ。

- 先行研究との違い。

角分解能が銀河の主構造を分解できるほど高い単一鏡で $12\text{CO}(J=1-0)$ のマッパを作る初めての観測。

単一鏡での $12\text{CO}(J=1-0)$ のデータは極めて重要と言える。

- 単一鏡は全流速を観測可能
- $12\text{CO}(J=1-0)$ はXcoのデータが使える基本的な輝線

2. introduction

- NGC2976について

パラメーター	
形態	SAc
中心座標	
α J2000	9h47m15.46s
δ J2000	+67° 54'59".0
Vlsr[km/s]	9
距離[Mpc]	3.56
傾斜角[°]	54
主軸からの角度[°]	143
D25/2[']	2.9 × 1.5

3. Observations and data reduction

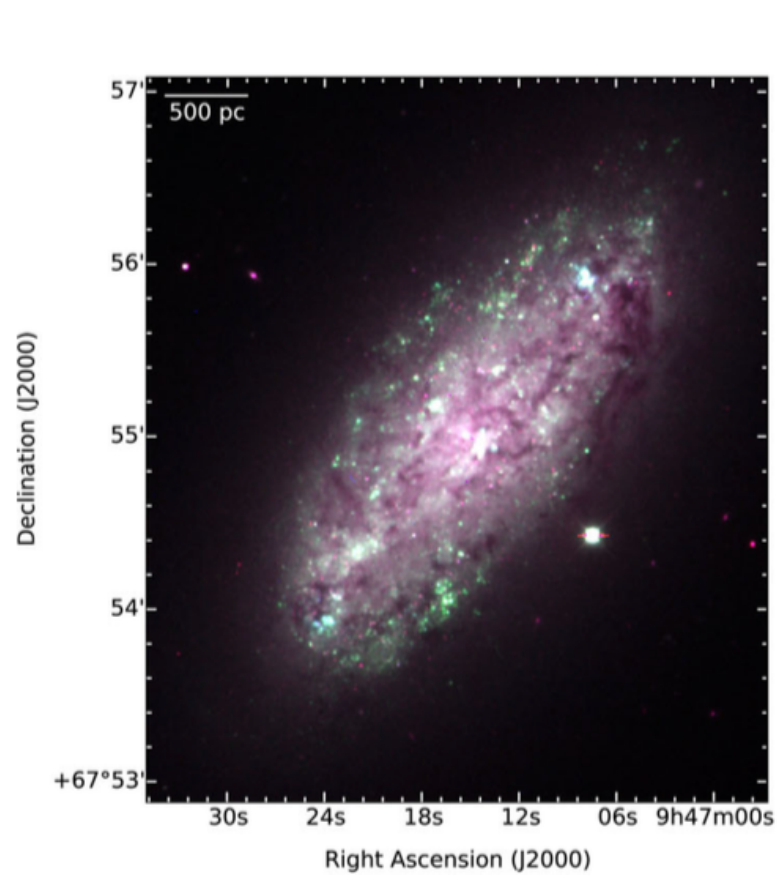
〈観測システム〉

- マルチビーム受信機FOREST
- ビームサイズは15''(110GHz), 14''(115GHz)
- ビーム間隔は50''
- 観測領域は3.56Mpcで3' × 5'(5.2 × 3.1kpc)
- OTFマッピングモード
- 110GHzと115GHzの効率の差は5%以下。
- 強度のcalibrationの絶対誤差は±20%
- データリダクションはNOSTARを使用。

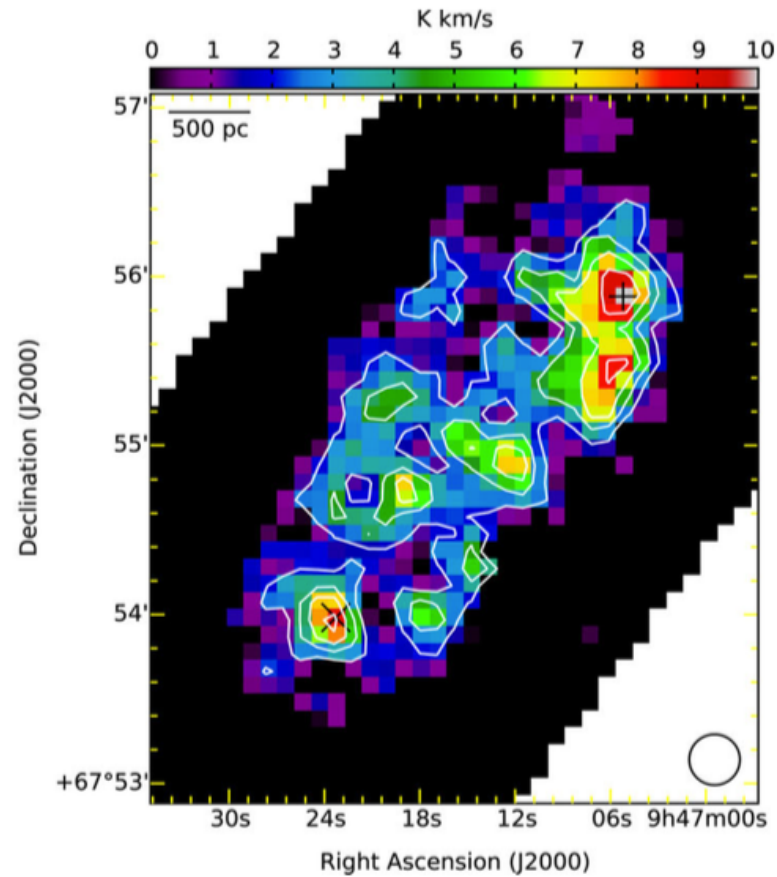
4. Result

- $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ について
 - ①分子ガスの分布と運動
 - ②他のデータとの比較
- $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ とC18Oについて

4. Result $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ について ①分子ガスの分布と運動

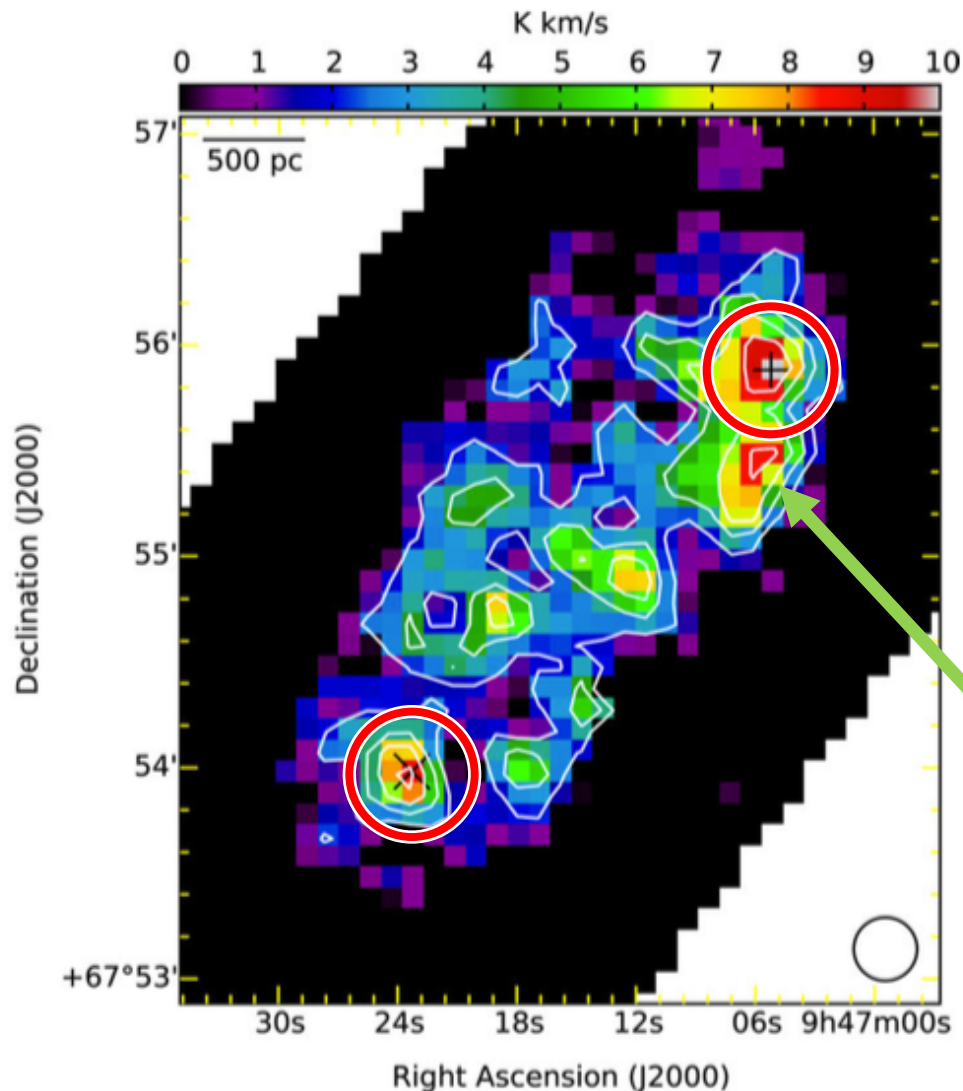


NGC29761(NASA)



積分強度図 ($^{12}\text{CO}(J=1-0)$)

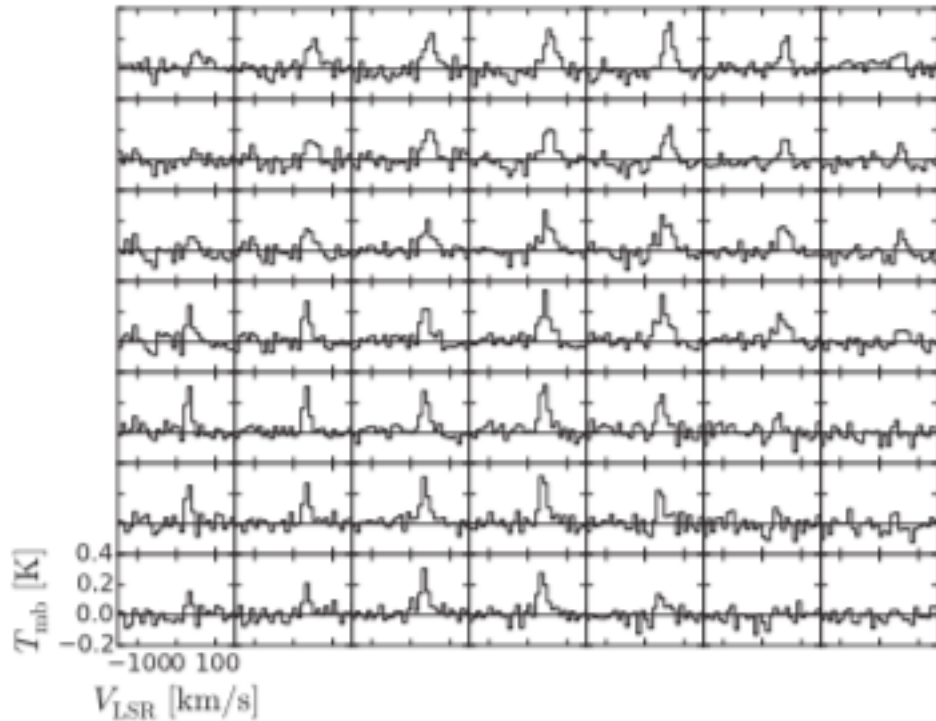
4. Result 12CO(J=1-0)について ①分子ガスの分布と運動



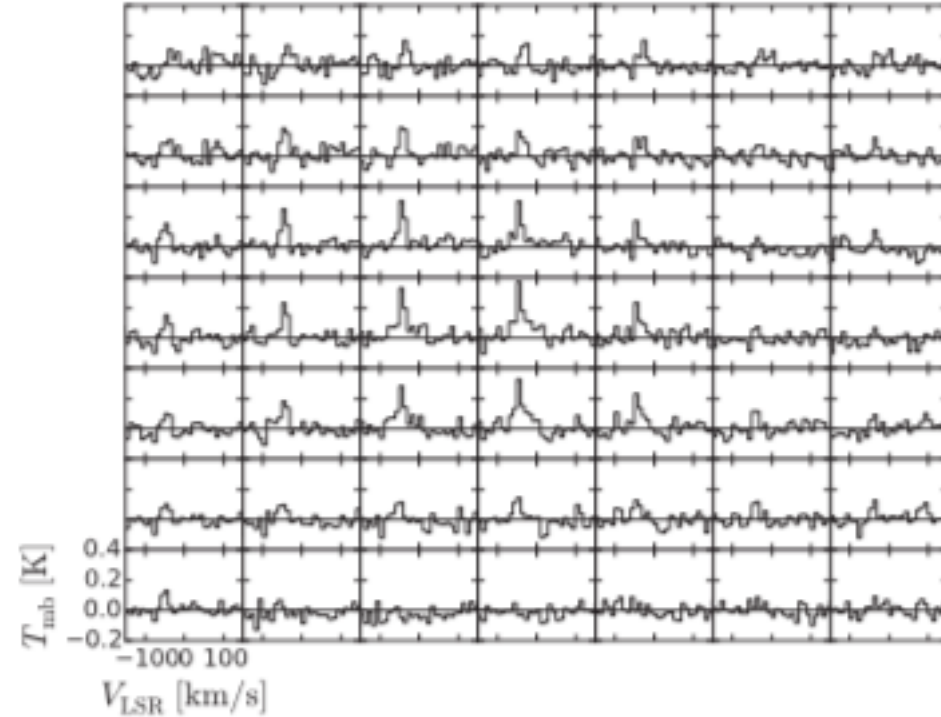
積分強度図 (12CO(J=1-0))

- 100pc規模で $10^5 M_{\odot}$ 程度のclumpを示している
- clumpの位置は12CO(J=3-2) (Tan(2013)) と一致している。
(例) 図のXと+の位置。○
→非軸対称構造の両端に一致 (Valenzuela(2014))
- +近くのピークは興味深いことに12CO(J=3-2)と一致していない。

4. Result $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ について ①分子ガスの分布と運動



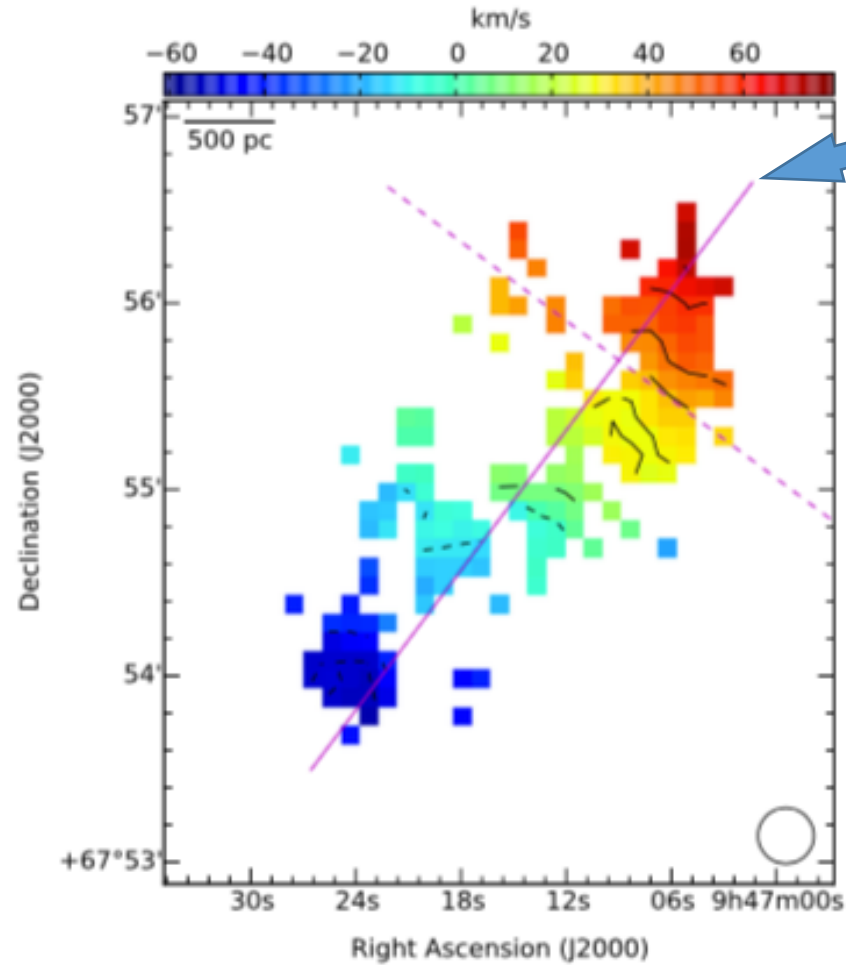
+における $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ のピーク



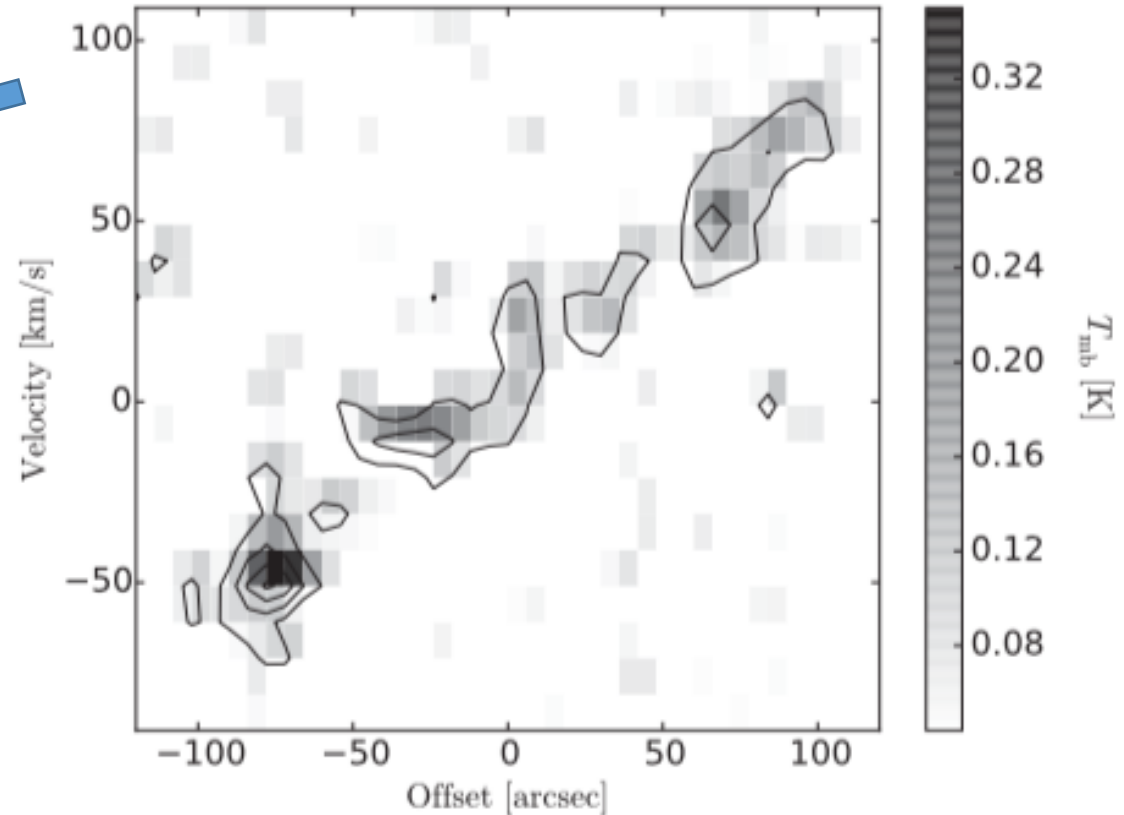
×における $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ のピーク

- ・ ピーク温度は0.30~0.37K
- ・ $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の積分強度に由来する全 H_2 の質量は $4.3 \times 10^7 M_{\odot}$

4. Result 12CO(J=1-0)について ①分子ガスの分布と運動



12CO (J=1-0) の速度場

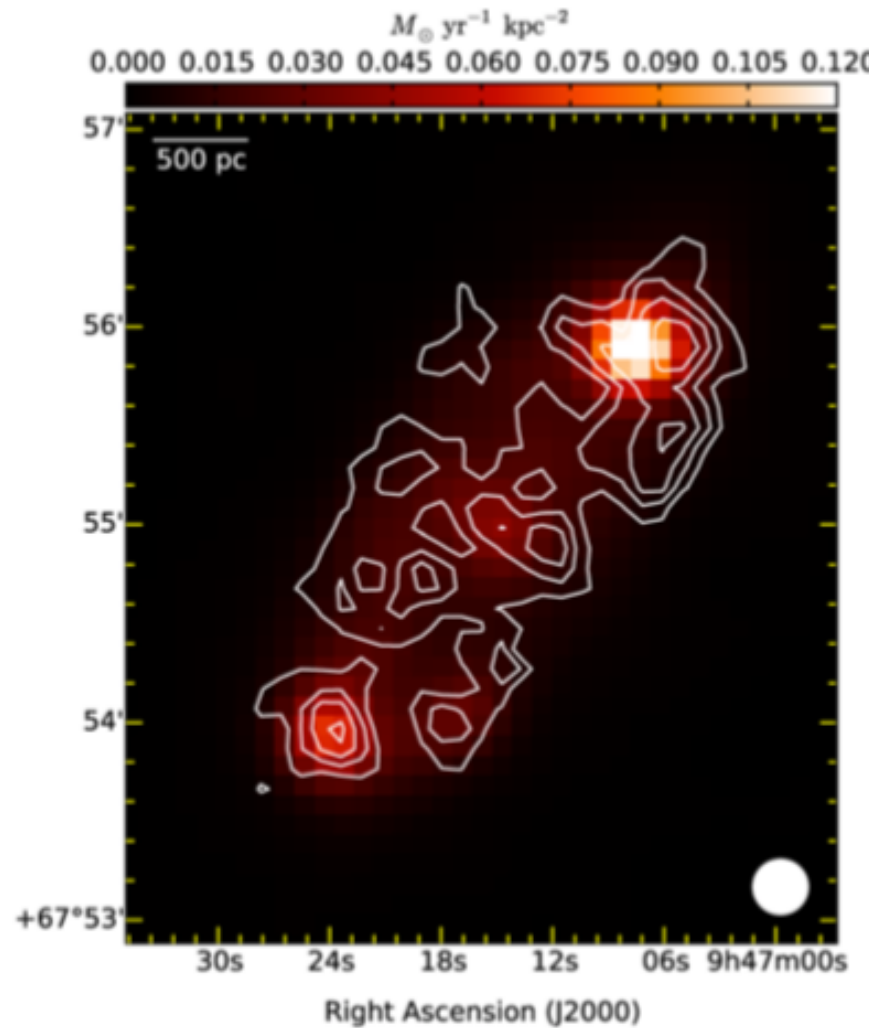


主軸の位置と速度の関係

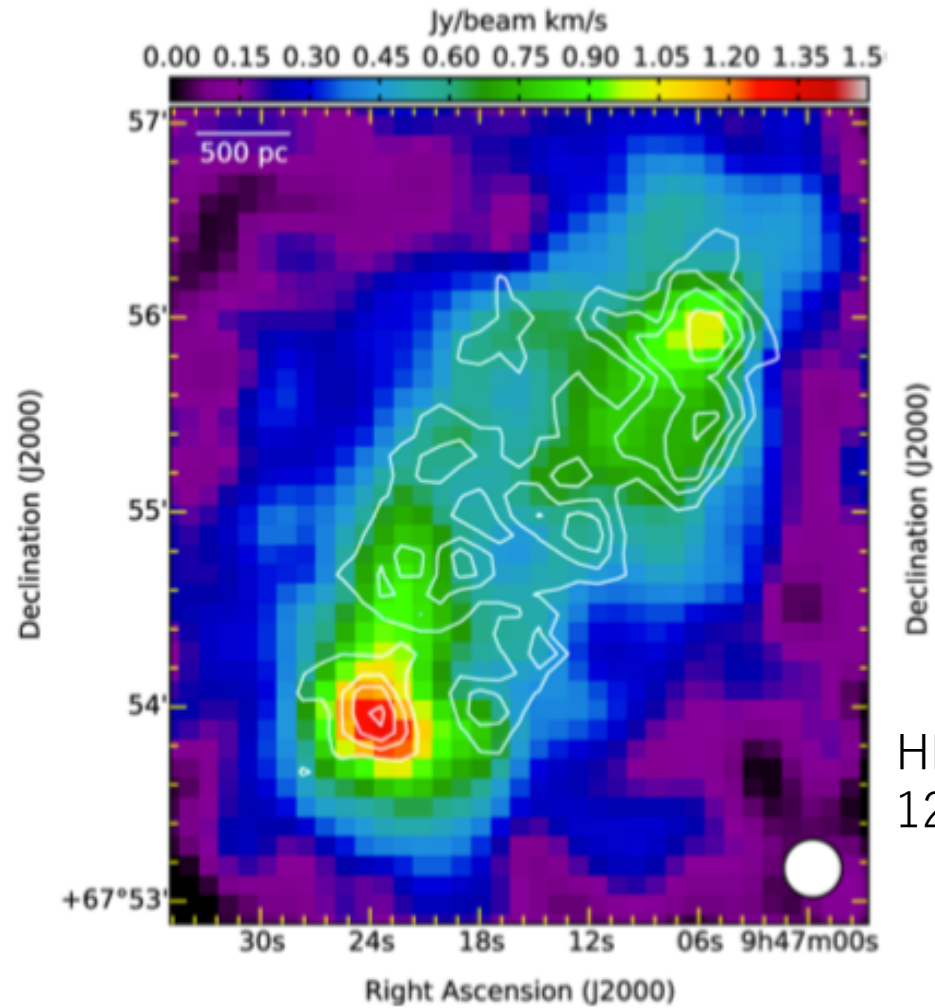
半径100"の回転曲線を示す

これはH α の回転曲線 (Simon(2003)) と一致する。

4. Result 12CO(J=1-0)について ②他のデータと比較



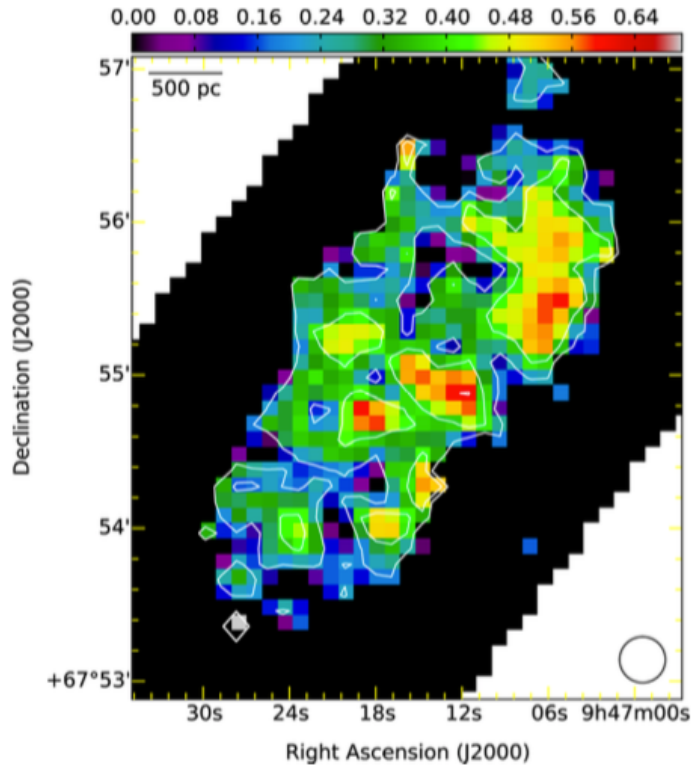
星形成率（遠赤外線と24 μm のデータ）
コントアは12CO(J=1-0)



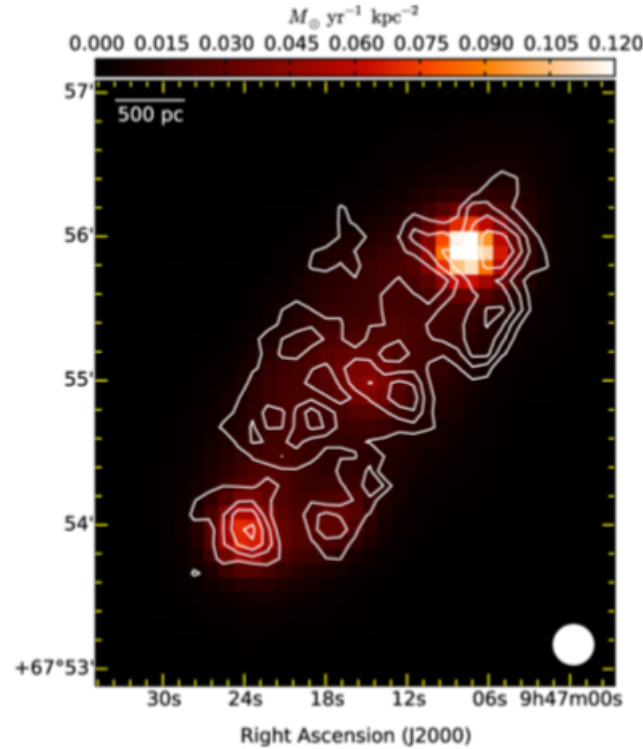
HIの積分強度図
コントアは12CO(J=1-0)

HIマップには2つのピークがあり
12CO(J=1-0)のピークと一致

4. Result 12CO(J=1-0)について ②他のデータと比較



f_{mol} の分布



星形成率（遠赤外線と24 μ mのデータ）
コントアは12CO(J=1-0)

f_{mol} とは

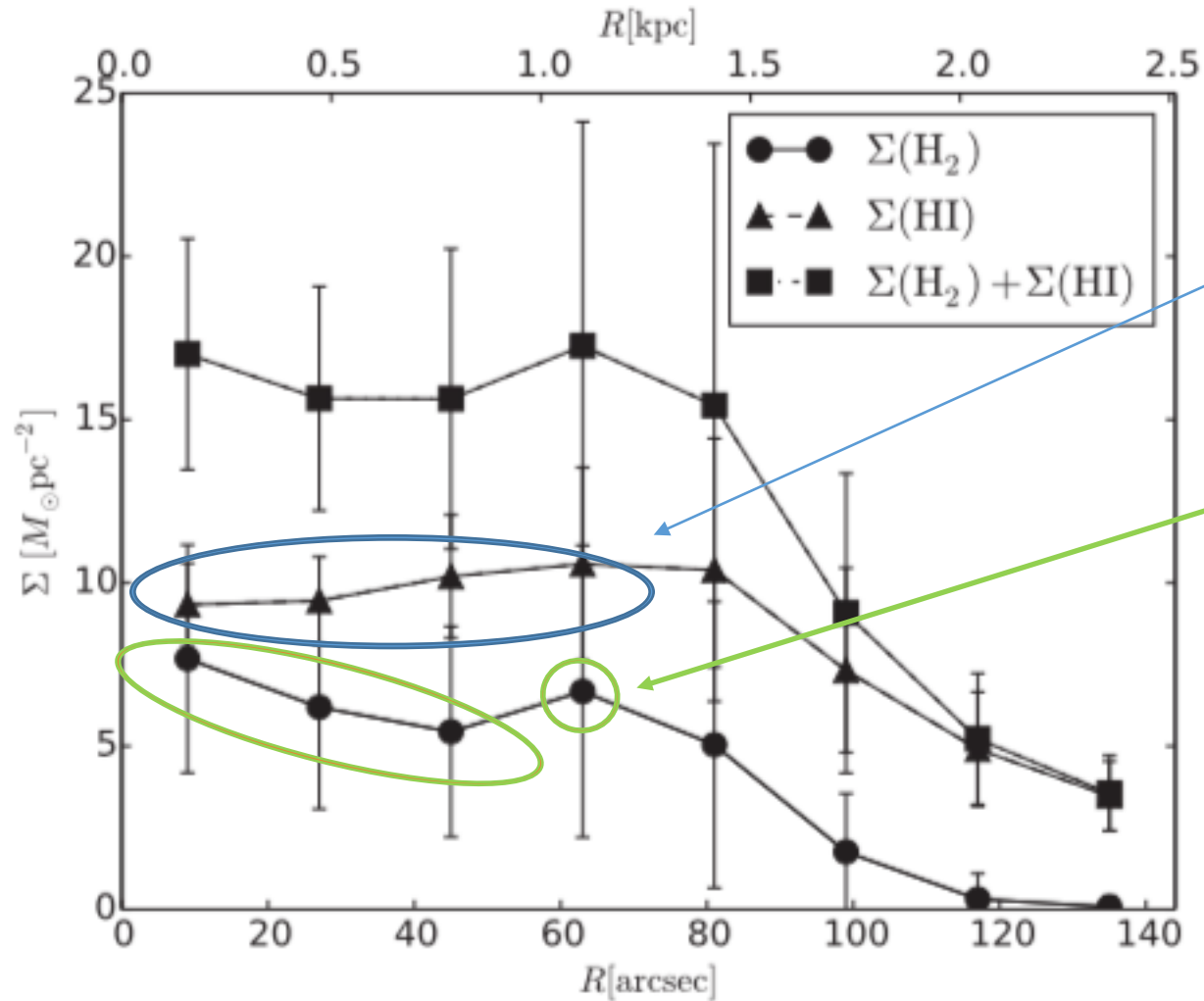
$$f_{mol} \equiv \frac{\Sigma(H_2)}{\Sigma(H_2) + \Sigma(H_1)} = \frac{\text{分子ガス}}{\text{全ガス}}$$

$\Sigma(H_2) \cdots H_2$ の面密度

f_{mol} は一般的に
近傍渦巻銀河の銀河中心に固まっている

左図では f_{mol} のピークは銀河中心になく、
低星形成領域にCOのピークが見られる

4. Result 12CO(J=1-0)について ②他のデータと比較



$\Sigma(\text{H}_1)$ はおおよそ一定

$\Sigma(\text{H}_2)$ は減少した後、1.1kpcで上昇

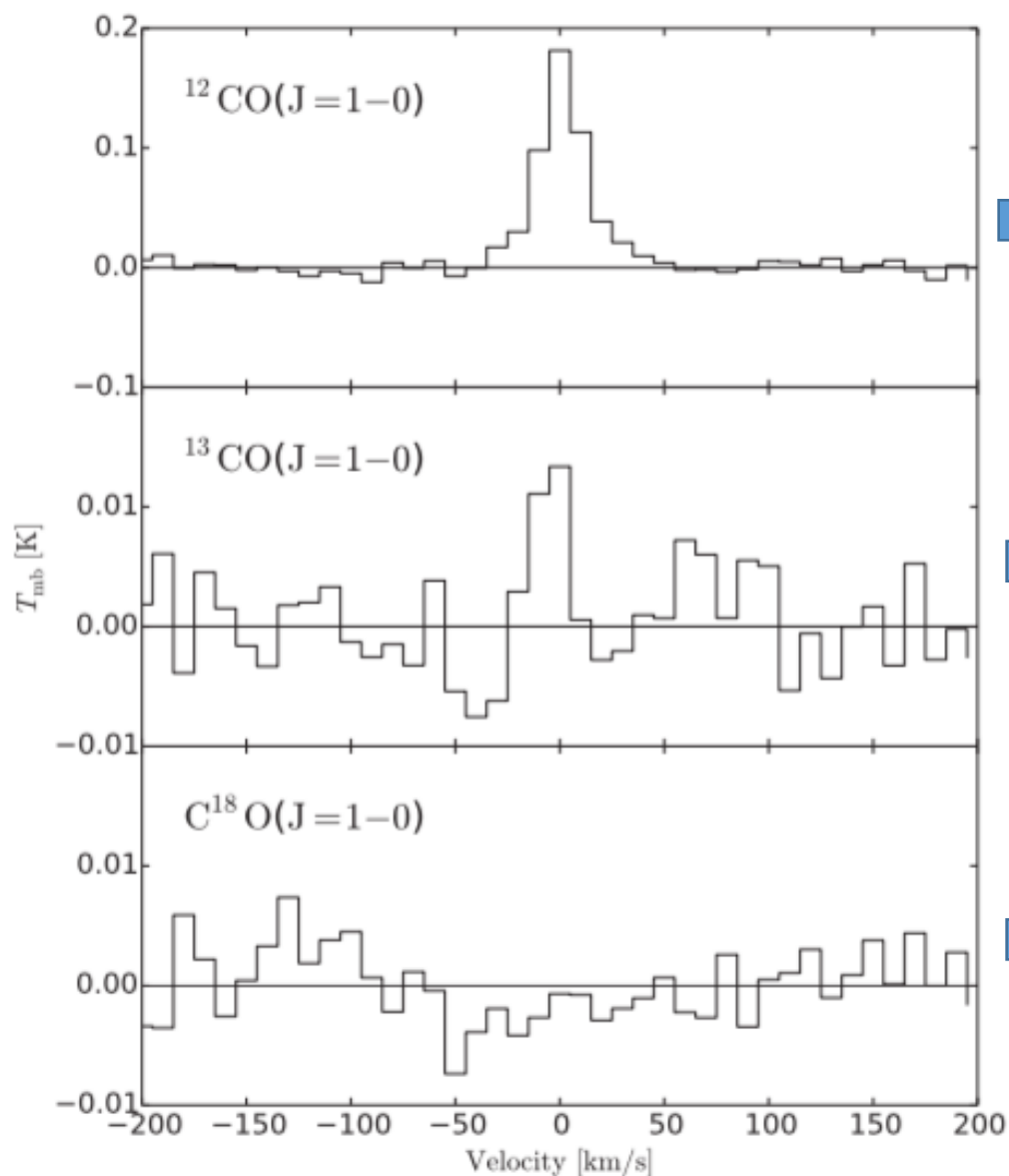
非軸対称構造の端と一致



$\Sigma(\text{H}_1)$ が内部まで支配的である

$\Sigma(\text{H}_2)$, $\Sigma(\text{H}_1)$, $\Sigma(\text{H}_2) + \Sigma(\text{H}_1)$ の分布

4. Result $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ とC18Oについて



- ピーク温度は13.4mK、rmsは3.7mK
- Stackingされた ^{12}CO ($J=1-0$) の積分強度は $0.19 \pm 0.08 \text{ km/s}$

- Stackingされた ^{13}CO ($J=1-0$) の積分強度は $5.1 \pm 0.18 \text{ km/s}$

$$\frac{^{12}\text{CO}}{^{13}\text{CO}} = \frac{5.1}{0.19} = 27 \pm 11$$

近傍銀河の平均値より高い

- C18Oの上限温度は8.6mK

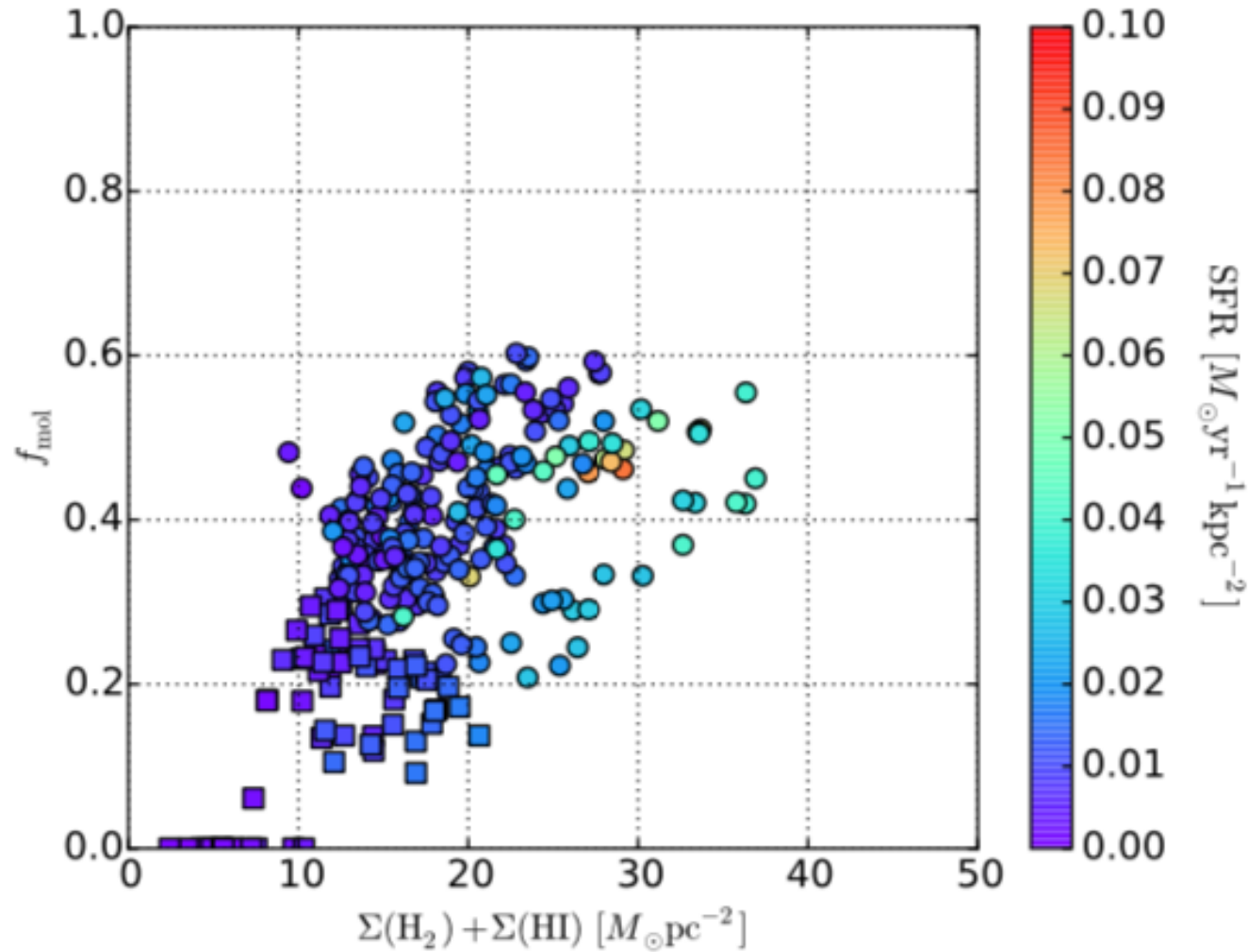
$$\frac{^{12}\text{CO}(J=1-0)}{\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)} \text{ の下限値は21となった}$$

これはM51の下限値(Schinner(2010))や starburst銀河の下限値(Aalto(1995))と一致し、巨大分子雲の20より大きい。

5. Discussion

- 5.1 H_I から H_2 への変化
- 5.2 分子ガス物理的特性
- 5.3 星形成
- 5.4 非軸対称構造

5. Discussion H_I から H_2 への変化



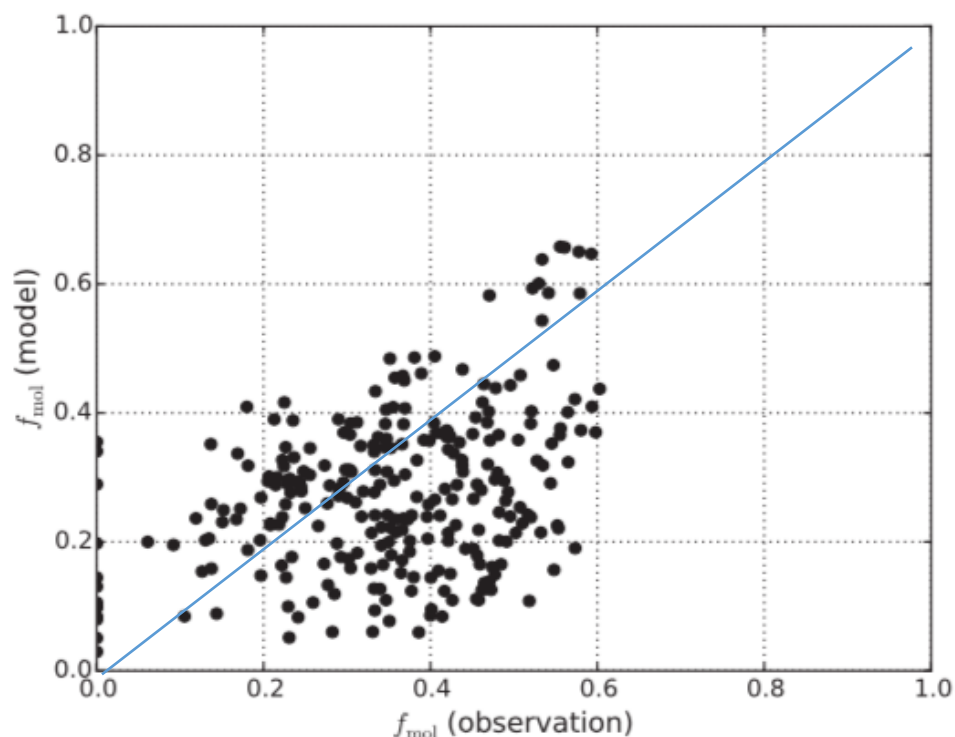
- f_{mol} は $\Sigma(H_2) + \Sigma(HI)$ と共に増加
- メイン部と別に比較的低い部分がある
→ 星形成率の2つのピークに対応する

5. Discussion H_I から H_2 への変化

観測結果が、基本的な考えが全ガスの低い面密度領域で Elmegreen(1993)のモデルにあっていいるかどうかを確認した。

Elmegreen(1993)のモデル

f_{mol} は金属量と圧力と紫外線放射に依存するというモデル



・大きく分散している

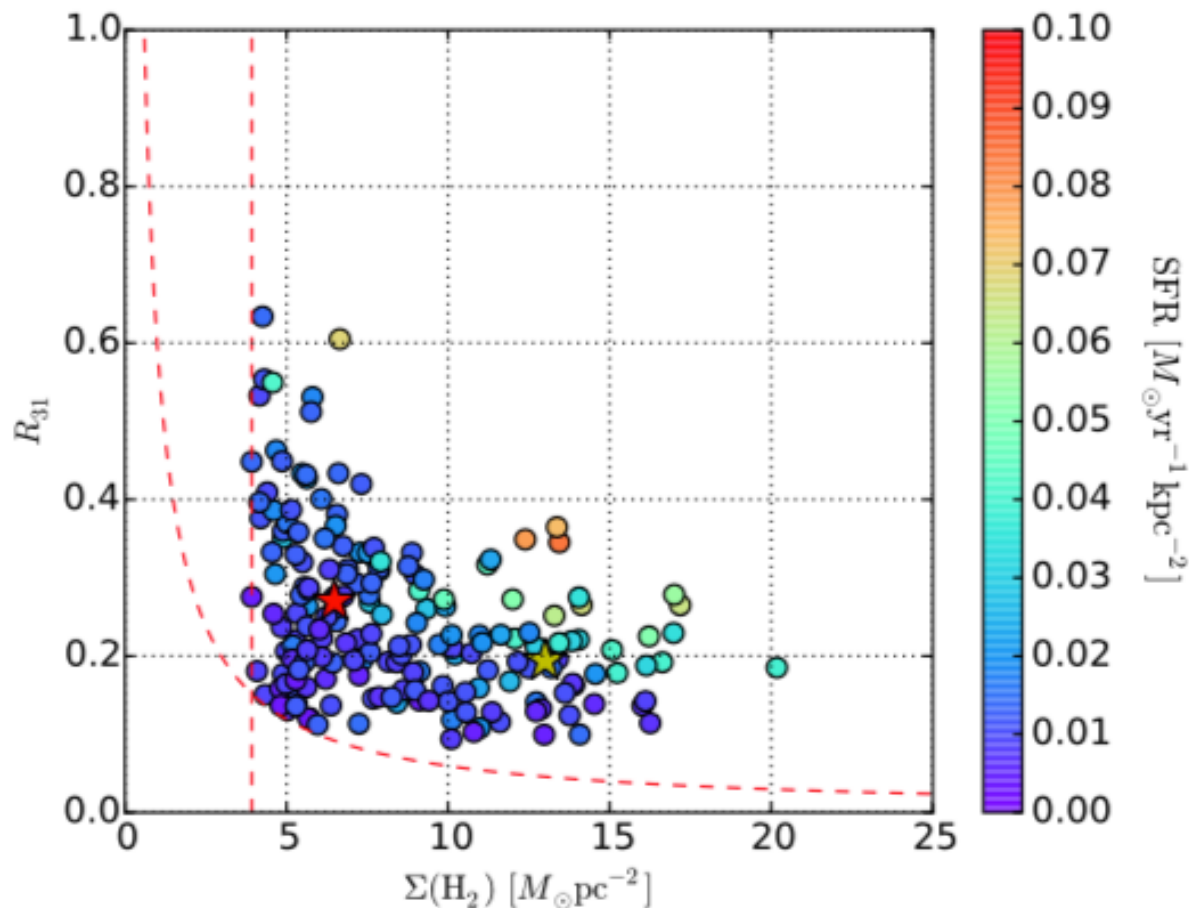
・全体的に低め

- ・大規模な分散の主な原因
星形成法から導かれた放射場の強さを単一の力で推定し、 $\Sigma(H_2) + \Sigma(H_I)$ を推定が不確かであった可能性が高い。
- ・不一致の原因
圧力推定の不確実性が考えられる (Tanaka et al. 2014)

5. Discussion 分子ガスの物理的特性

12 CO (J = 3-2) データとの比較により、
NGC 2976における分子ガスの物理的性質を調べた。

$$R_{31} = 12\text{CO}(J = 3-2) / 12\text{CO}(J = 1-0)$$



$\Sigma(\text{H}_2)$ の減少しているところで R_{31} は増加している



$\Sigma(\text{H}_2)$ と R_{31} の依存性から $\Sigma(\text{H}_2)$ の
分子ガスの物理的特性を知ることができる

R_{31} が増加には、
分子ガスは濃いか暖かいまたは両方が必要



$\Sigma(\text{H}_2)$ が低いところでは暖かいはずである

$\Sigma(\text{H}_2)$ が $10 M_\odot / \text{pc}^2$ 以上の R_{31} の平均値 = 0.27 ± 0.09 ★
 $\Sigma(\text{H}_2)$ が $10 M_\odot / \text{pc}^2$ 以下の R_{31} の平均値 = 0.19 ± 0.05 ★

5. Discussion 分子ガスの物理的特性

熱力学的平衡(LTE)の仮定では
観測されたR31を再現するのは難しい



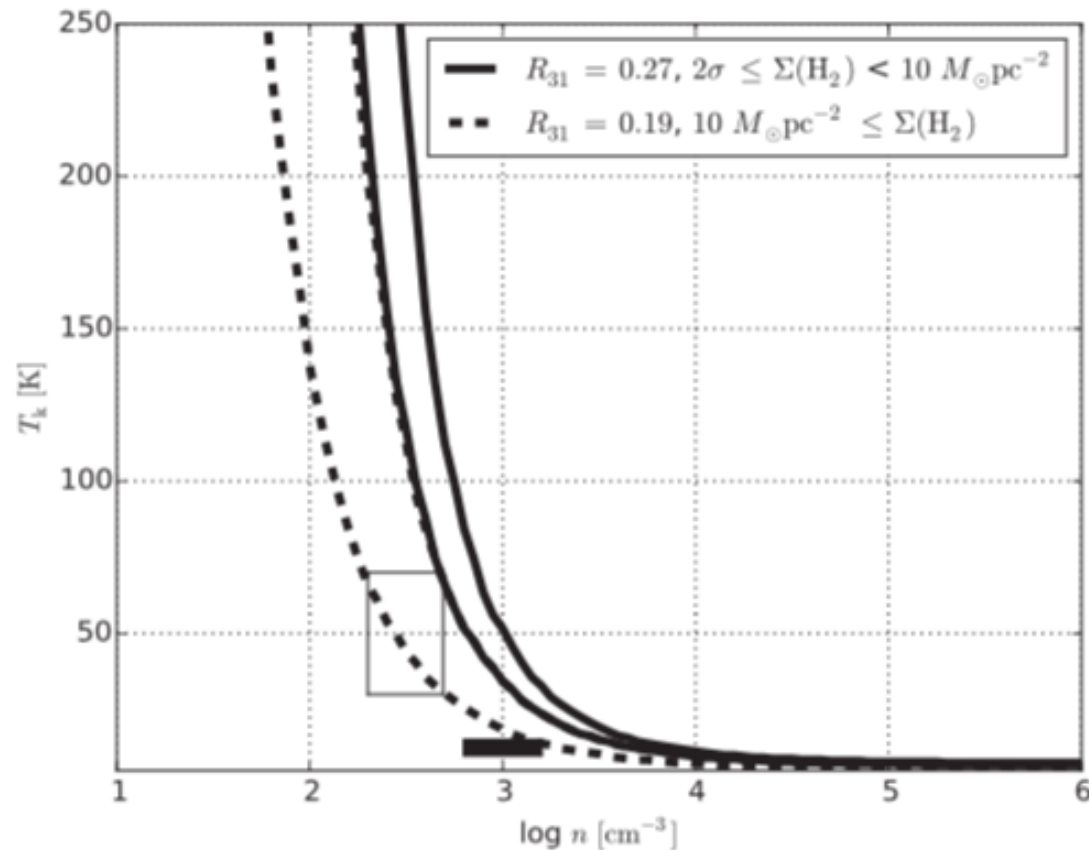
RADEXを用いて、温度と密度を推定。

《 結果 》

もし低い面密度領域より
高い面密度領域で体積密度が高かったら、
高面密度領域の分子ガスの温度が
低面密度領域よりも低くなければならない



R_{31} が $\Sigma(H_2)$ と共に減少するということが
低密度および高温のdiffuseな分子ガス段階から
高密度および低温の分子雲への分子ガスの変化を示唆する



5. Discussion 分子ガスの物理的特性

・銀河系のパラメーターと比較

- ・diffuseなガスの範囲は
低面密度領域の低い方（破線）と重なる。
- ・自己重力分子ガスの範囲は
高面密度領域の低い方（実践）と重なる。

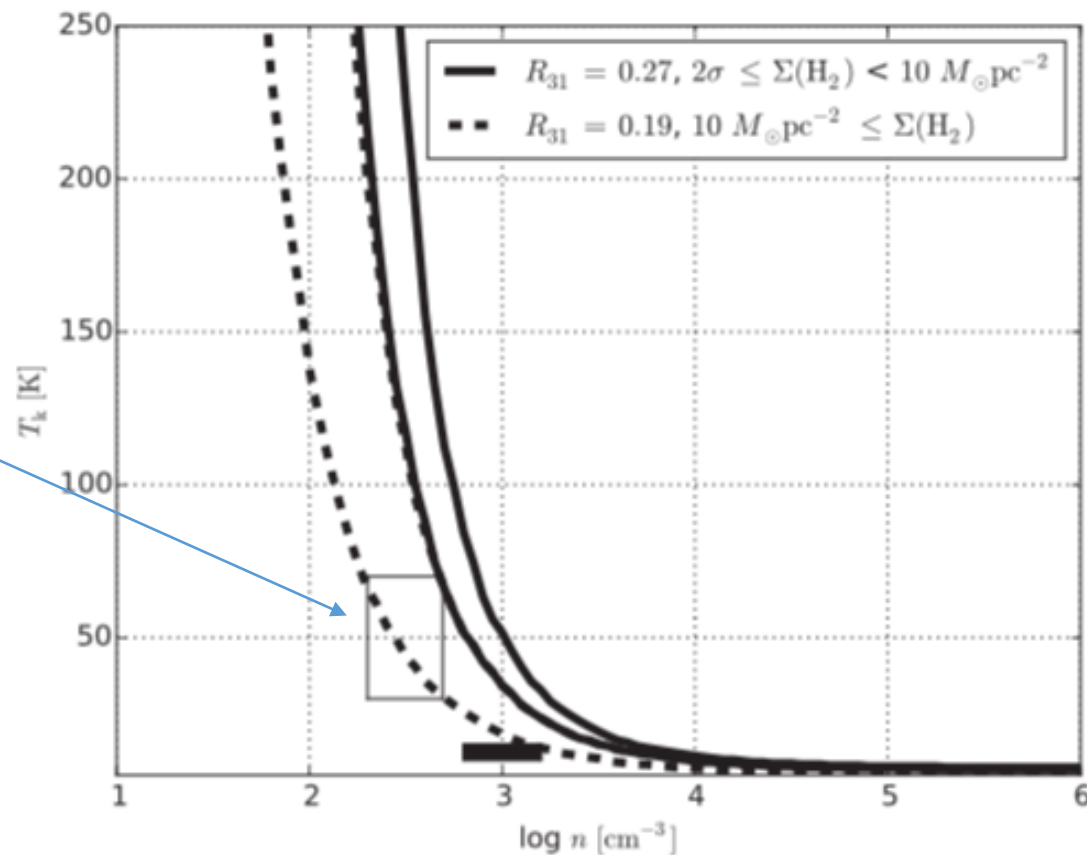
低い $\Sigma(H_2)$ での R_{31} の増加は
分子ガスの温度の増加により引き起こされる

→RADEX計算の結果は、解釈と矛盾しない

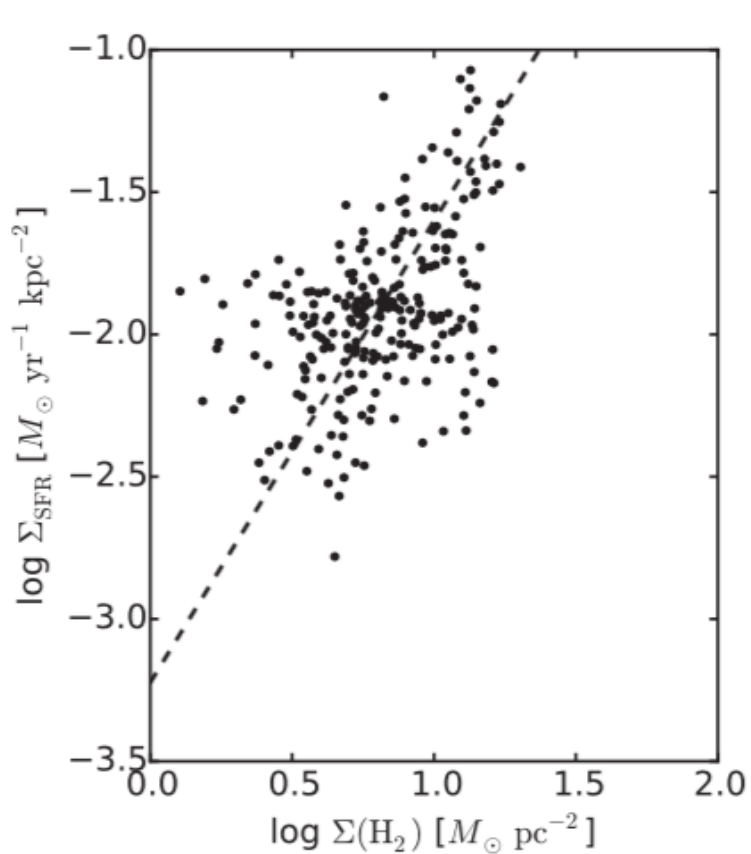
・観測結果から

NGC2976ではdiffuseなガス段階の領域が支配的で、
 R_{1213} はdiffuseなガスに近い (Aalto(1995), Morokuma(2015))

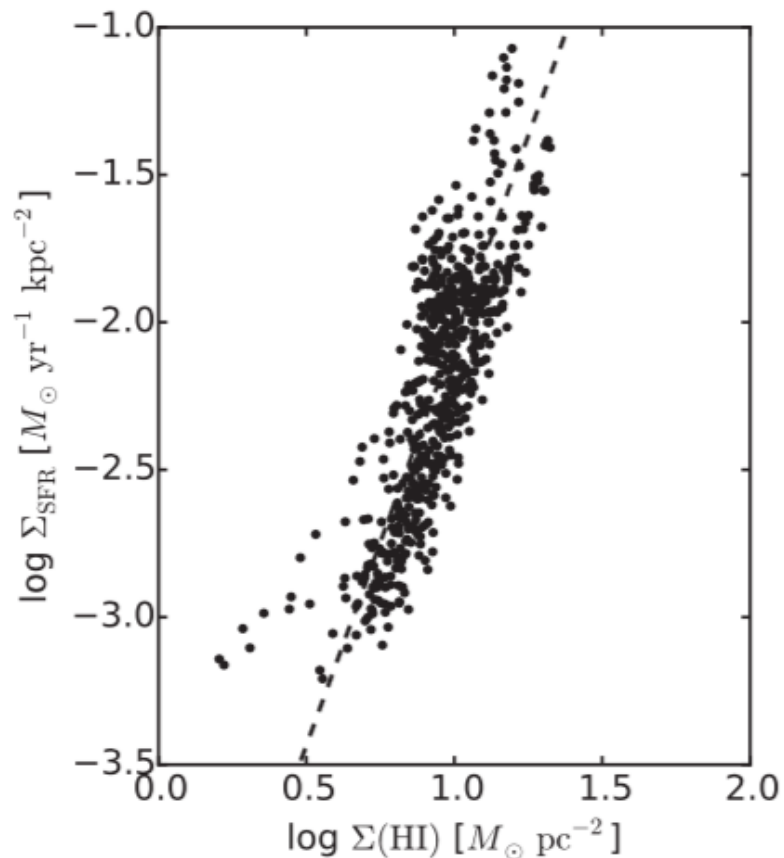
NGC2976で観測された高い R_{1213} もdiffuseなガスが低ガス面密度
領域で支配的であるという我々の解釈に合う



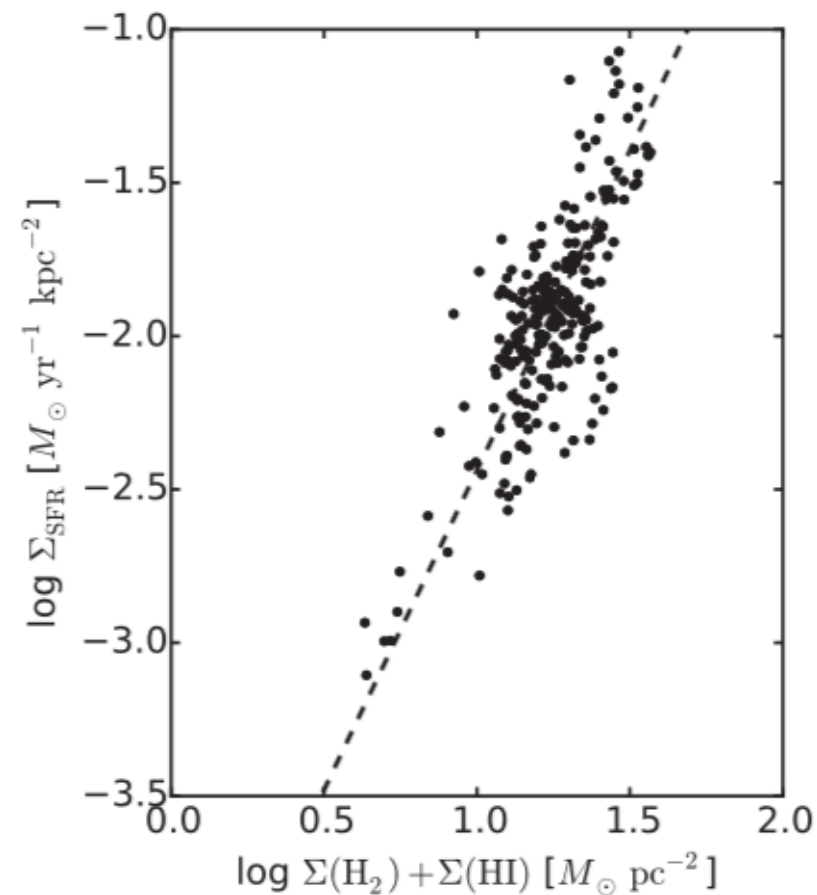
5. Discussion 星形成



傾きの指数 1.62 ± 0.17

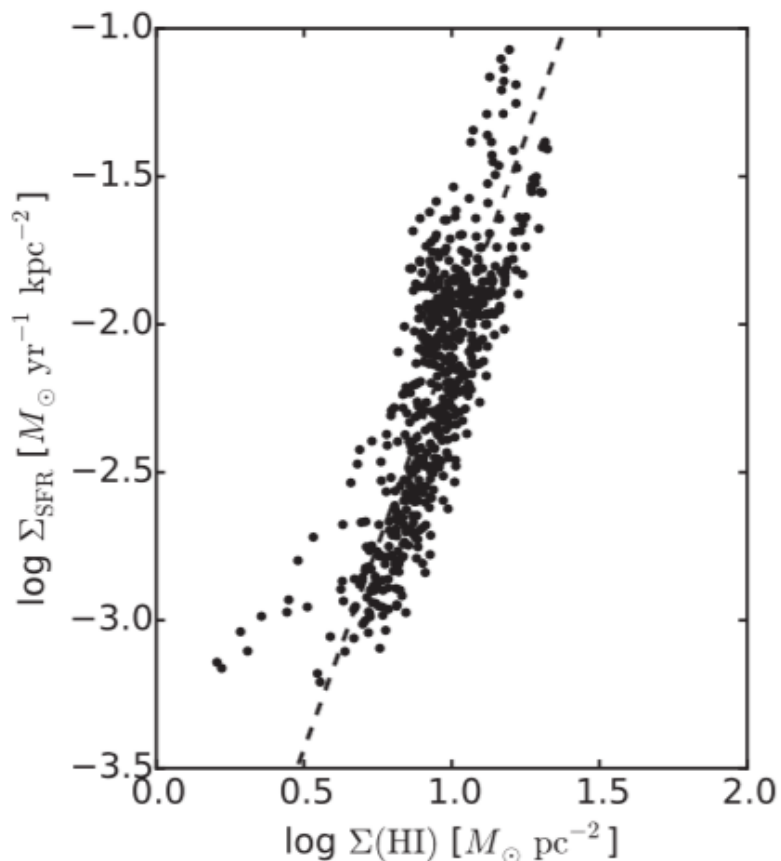


2.76 ± 0.11



2.08 ± 0.11

5. Discussion 星形成



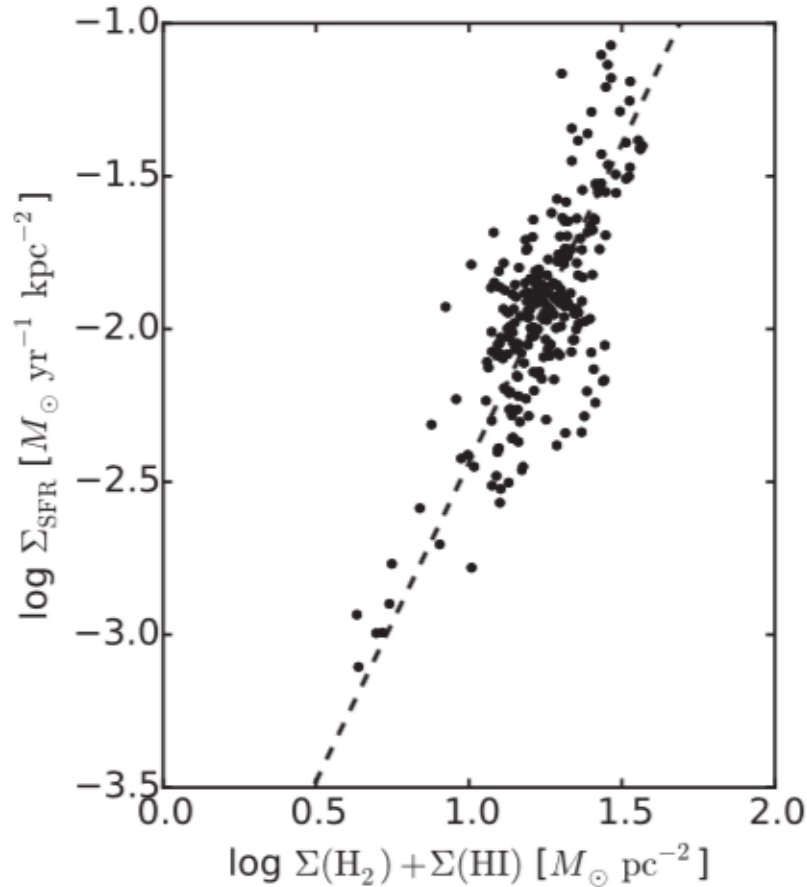
$$2.76 \pm 0.11$$

- NGC2976の星形成領域は H_1 の雲よりもコンパクトで、 H_1 のピークに集中している
- 高い分解能がより高いべき乗指数につながっている
- 活発な星形成領域の大きさはビームサイズと同等な一方で、 H_1 はより不均一に分布する。
- 星形成がない場所でも比較的強い領域があり、左図の大きい傾きにつながっている



傾きはより浅くなる

5. Discussion 星形成

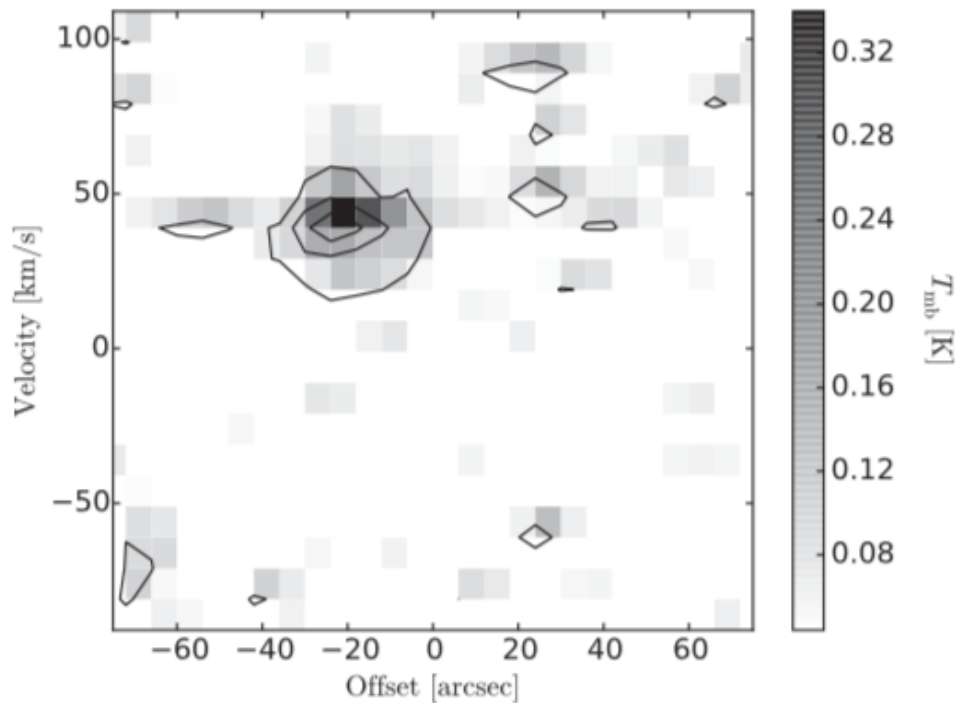


- ΣSFR と $\Sigma(\text{H}_2) + \Sigma(\text{H}_1)$ の相関はぴったり。
 $\Sigma(\text{H}_2)$ よりも急角度。
- 高密度領域での相関は線形に近い。
低密度領域でさえ線形であるのは
 f_{mol} の急激な変化によるもの
- $\Sigma(\text{H}_1)$ ($\sim 10 M_{\odot} / \text{pc}^2$) で分子ガスが急速に増え、
 $\Sigma(\text{H}_1)$ はほぼ一定のまま であるので、
 $\Sigma(\text{H}_2) + \Sigma(\text{H}_1) = \Sigma(\text{H}_2) + \text{オフセット}$ である

結果として

ΣSFR と $\Sigma(\text{H}_2) + \Sigma(\text{H}_1)$ の相関の傾きは
 ΣSFR と $\Sigma(\text{H}_2)$ の相関よりも急になる

5. Discussion 非軸対称構造



NGC2976のbar構造に垂直な輝線に沿った
Position Velocity図

- 中央領域でも速度幅が大きくなり、速度幅もほぼ一定である
- barのない位置でもvelocity jumpのような構造をしている。
→ 構造がbarのせいで速度jumpしているとは言い切れない。
→ より高品質のデータが必要
- 結果として
分子ガスの運動は少なくとも非軸対称構造が
剛体回転曲線を回転する

6. Summary

(1) $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ マップはクランプ構造であった。

非対称構造のそれぞれの端に位置している 2 つの強い $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ のピークは

$^{12}\text{CO}(J=3-2)$ と ΣSFR のピークと一致する。

ほかのピークは星形成ほど活発ではなかった。

(2) $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ との積分強度比である R_{1213} は 27 ± 11 であった。

これは近傍銀河の平均値(12-13)の約二倍であった。

$\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ は Stacking 法でさえ探せなかった。

^{12}CO と C^{18}O の積分強度比の下限值は 21 であった。

(3) f_{mol} は $\Sigma(H_2) + \Sigma(H_1)$ と ΣSFR の依存性を示す。

f_{mol} は $\Sigma(H_2) + \Sigma(H_1)$ の増加に伴って増加し、 ΣSFR の 2 つの高いピークでは低い。

この傾向はおおよそ Elmegreen のモデルによって再現されうる。

6. Summary

(4) $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ と $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の積分強度比 R_{31} は $\Sigma(H_2)$ の減少に伴って増加する.

つまり、分子ガスは高温のdiffuseな段階から低温の自己重力を持つ雲まで変化する

(5) $\Sigma(H_1)$ と ΣSFR のべき乗の指数は、 $\Sigma(H_2)$ と ΣSFR の関係よりも大きい。

その関係は急速な H_1 から H_2 への変化が、 $\Sigma(H_2) + \Sigma(H_1)$ と ΣSFR の急激な勾配を作るという考えに一致

(6) ^{12}CO のマップは、過去の観測で示した非対称軸の分布を示している。

分子ガスの運動は、かき乱されていないことを示した。

つまり、棒渦巻銀河で見られるある一定の速度では剛体運動の曲線で回転する。