銀河系の水素原子･分子ガス 3次元分布

中西　裕之 (野辺山宇宙電波観測所)
祖父江　義明 (東大天文センター)

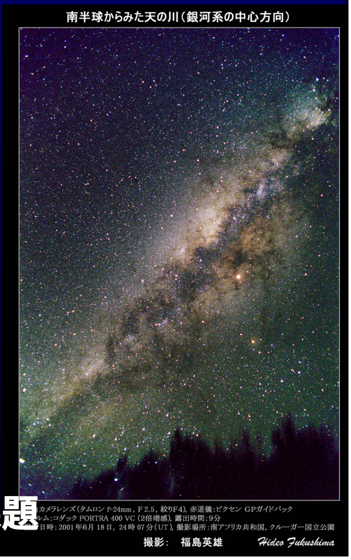
CONTENTS

1. はじめに
2. 銀河系HI･H_2分布の決定方法
3. 結果･議論
4. まとめ

はじめに

天の川銀河の構造について

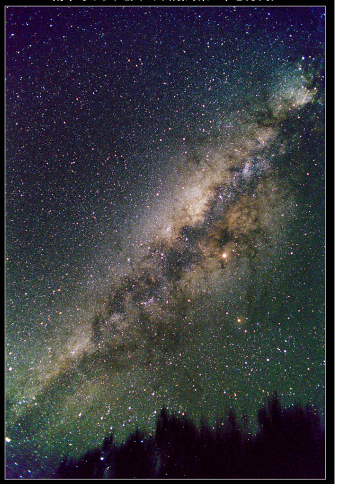
- 銀河系は最も近い銀河
  →最も小さい空間スケールでの
  　研究が可能
- 系内天体を研究する上で銀河系内
  での位置は重要
  ex. 銀河中心部 or 外縁部？
  　arm or inter-arm ？等
- しかしながら我々観測者が銀河系
  内部に位置するため、
  銀河系の構造を探るのは難しい課題



天の川銀河の構造について

- 電波輝線データは銀河系構造を探るのに適している
  (i) 可視光では減光が大きい。
  (ii) 速度情報が使える。
  (iii)銀河全体に分布している。
- 我々は最新のHI・COサーベイデータを用いて銀河系の3次元構造を調べた。

南半球からみた天の川（銀河系の中心方向）

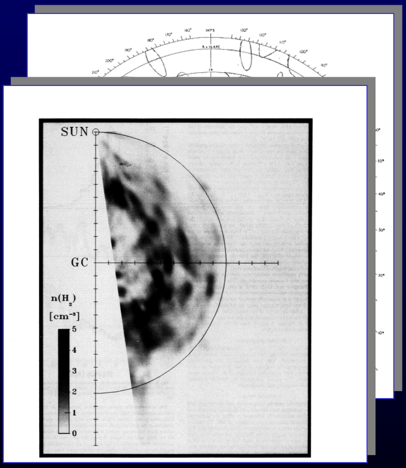


広角カメラレンズ（タムロン f=24mm，F 2.5，絞りF4），赤道儀：ビクセン GPガイドパック
フィルム：コダック PORTRA 400 VC（2倍増感），露出時間：9分
撮影日時：2001年6月18日，24時07分（UT），撮影場所：南アフリカ共和国，クルーガー国立公園
撮影：　福島英雄　Hideo Fukushima

天の川銀河の構造について

- 先行研究
  HI分布図：
  Oort et al. 1958等
  H_2分布図：
  Clemens et al. 1988等

ただし、天の川銀河全体の3次元ガス分布は未知
→天の川銀河の3次元ガス分布を探ることは重要
HI・H_2の比較も興味深いテーマ



HⅠ・H_2ガス分布の決定方法

データ：HI・COサーベイ

HIサーベイデータ

Hartmann & Burton (1997): 0.5 ° < l < 240 °

Kerr et al. (1986): 240.5 ° < l < 350 °

Burton & Listz (1983): 350 ° < l < 359.5 °

グリッド間隔：0.5 °, 速度分解能：1.0 - 5.5 km/s

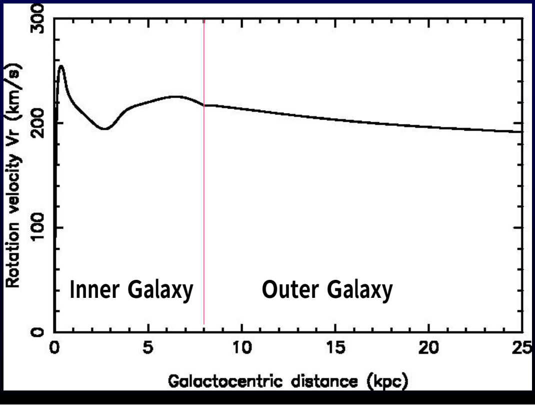
^{12}CO(J=1-0)サーベイデータ

Dame et al.（2001）: 0 ° < l <360 °, -1.5 ° < b < +1.5 °

グリッド間隔：0.125 ° -0.250 °, 速度分解能：1.3 km/s

データ：回転曲線

inner Galaxy　(R< R_0) : Clemens(1985)
outer Galaxy　(R> R_0) : Dehnen & Binney (1998)



R_0=8.0kpc,
V_0=217km/s

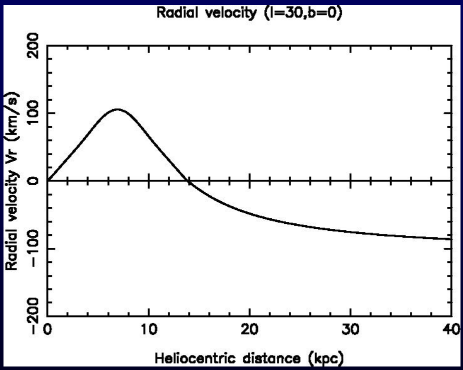
T_b(l,b,Vr)→ n(R, θ , z) の変換

・視線速度V_r → 距離r

$V_r = (R_0V(R)/R - V_0) \sin l \cos b$

$R^2 = R_0^2 + r^2 - 2rR_0 \cos l$

l,b:銀経、銀緯、r:太陽からの距離、
R:銀河中心からの距離、V:回転速度



・輝度温度T_b → 密度n

$n = C\, T_b\, \Delta V_r / \Delta r$

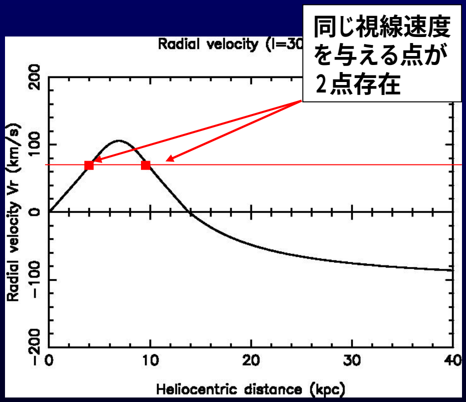
C=1.82 x 10^{18} (HI),
C=1.80 x 10^{20} (CO; Dame et al. 2001)

Near-far problem

Inner Galaxyでは同一視線上に同じ視線速度を与える点が2点存在する。

→ 観測されるガス分布は近い点と遠い点　両方からの足し合わせ（Near-far problem）

→ Near-far の分離が必要



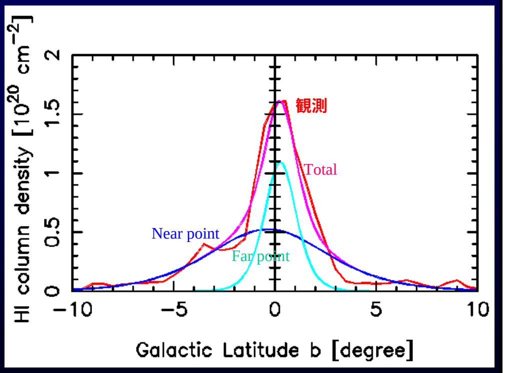
Near-far problemの解決策

z方向の分布のモデル（Spitzer　1942）を導入

$n_{HI}[cm^{-3}]=n_{HIo}\ sech^2((z-zo)/h)$

観測されるHI、H_2密度の銀緯b分布は未知パラメータ（n_{HIo1}, zo_1, n_{HIo2}, zo_2）を用いて

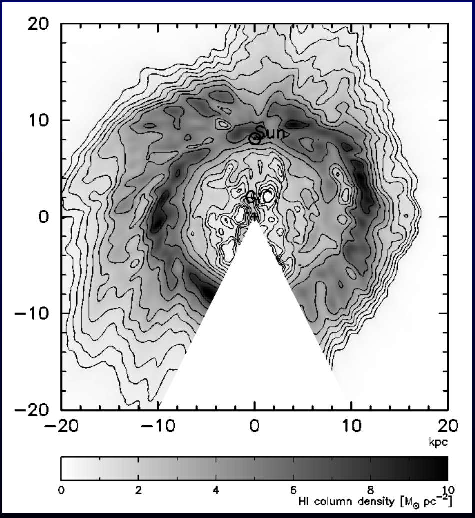
$n_{HI}[cm^{-3}] = (n_{HIo1}\ sech^2((r_1 \tan b - zo_1)/h)$
$+ n_{HIo2}\ sech^2((r_2 \tan b - zo_2)/h))/\cos b$



未知パラメータ（n_{HIo1}, zo_1, n_{HIo2}, zo_2）をfittingで決定してNear-far problemを解決し、Inner GalaxyでのHI、H_2分布を求めた

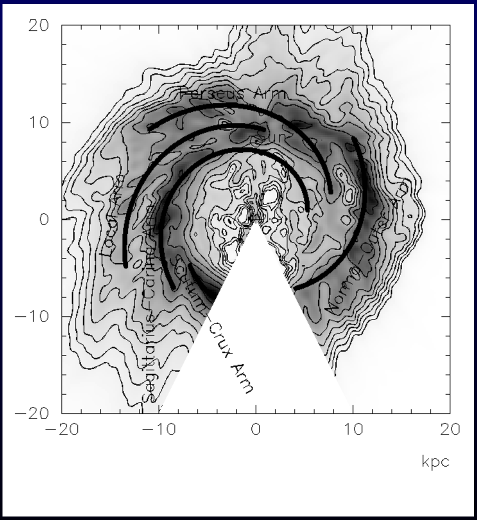
結果・議論

HI　map



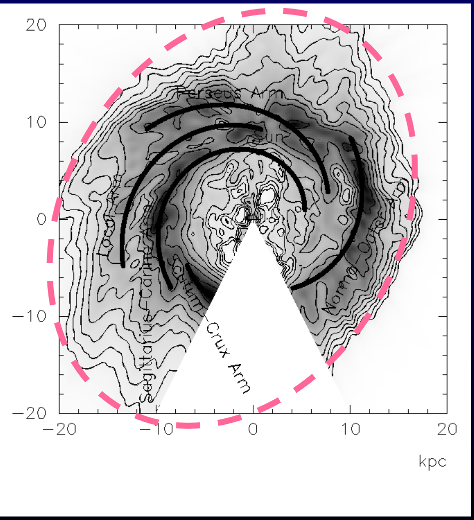
- HIガスは外縁部で豊富、中心部で少ない

HI map



- HIガスは外縁部で豊富、中心部で少ない
- Outer arm,
  Perseus arm,
  Local (Orion) arm,
  Sagittarius-Carina arm,
  Crux armの一部
  が見られる

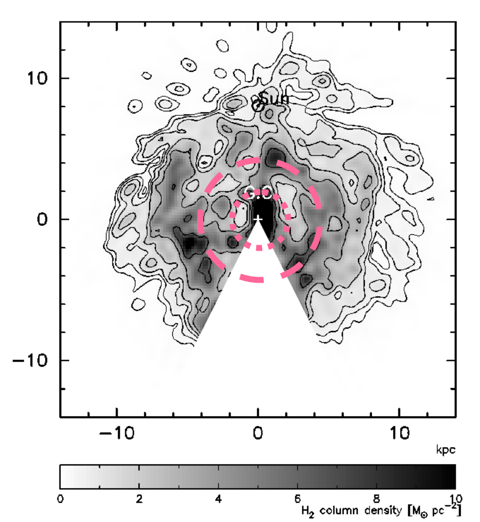
HI map



- HIガスは外縁部で豊富、中心部で少ない
- Outer arm,
  Perseus arm,
  Local (Orion) arm,
  Sagittarius-Carina arm,
  Crux armの一部
  が見られる

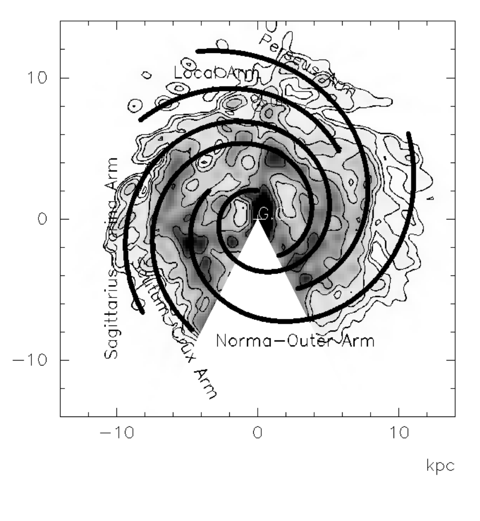
- HIガス分布は軸対象ではなく、偏長
  (Lopsided disk)

H_2 map



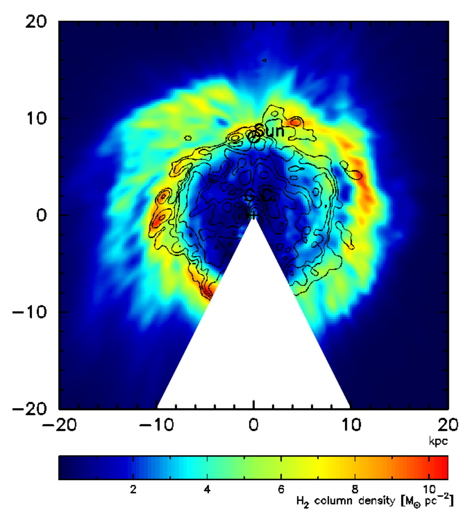
- 第4象限は初めての マップ化
- 第1象限には4kpcリングが見られる
- 分子ガスが銀河中心に集中

H_2 map



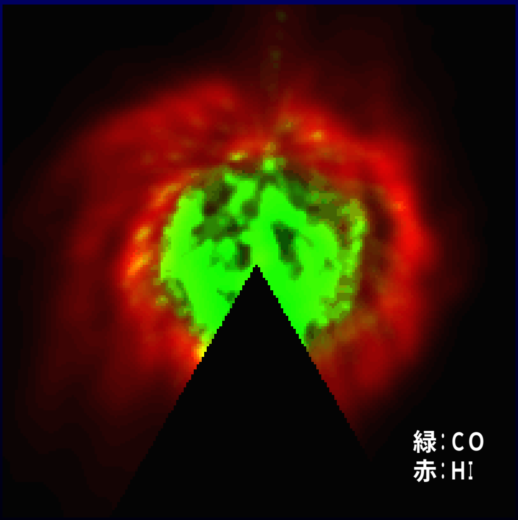
- 第4象限は初めての マップ化
- 第1象限には4kpcリングが見られる
- 分子ガスが銀河中心に集中
- Norma-Outer arm, Perseus arm, Local (Orion) arm, Sagittarius-Carina arm, Scutum-Crux arm がトレースできる

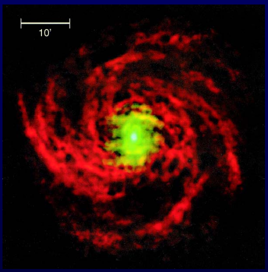
HI-H_2 map



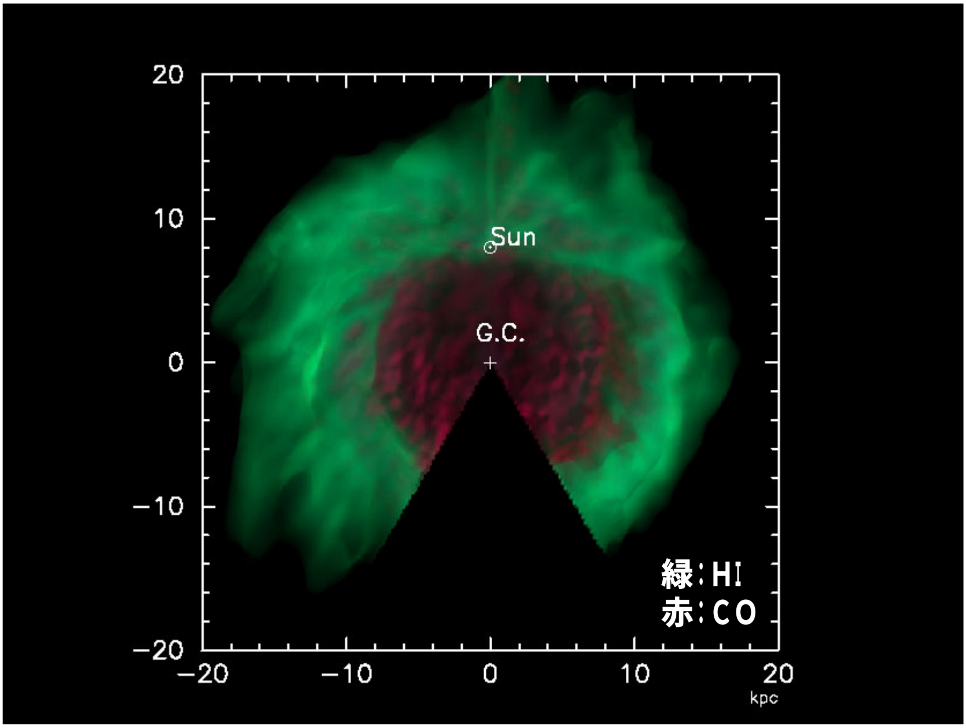
・分子ガスは銀河の中心付近で豊富
・HIガスは銀河の外側部分で豊富
・Outer arm, Perseus arm, Carina armで　分子ガスとHIガスの腕が一致している

HI-H_2 map

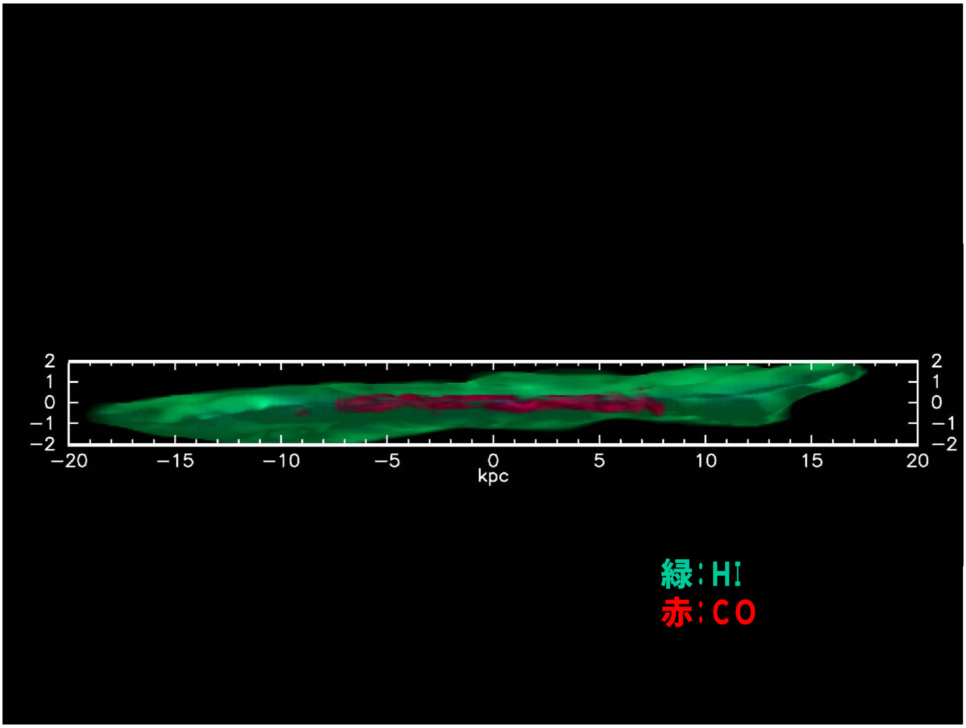




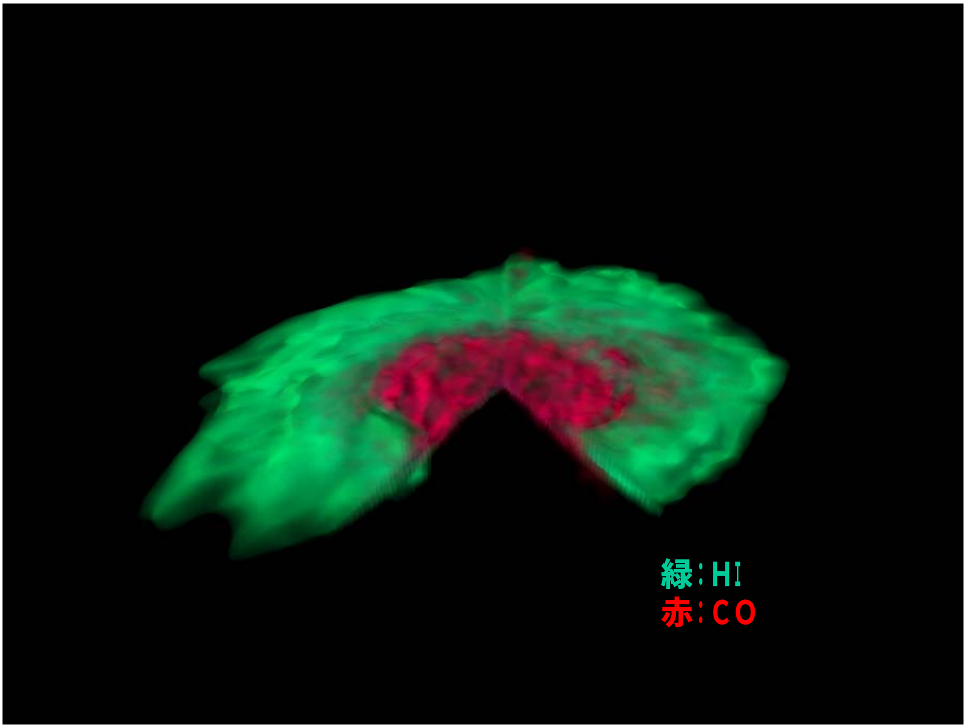
IC342のHI・CO
(Crosthwait et al. 2001)



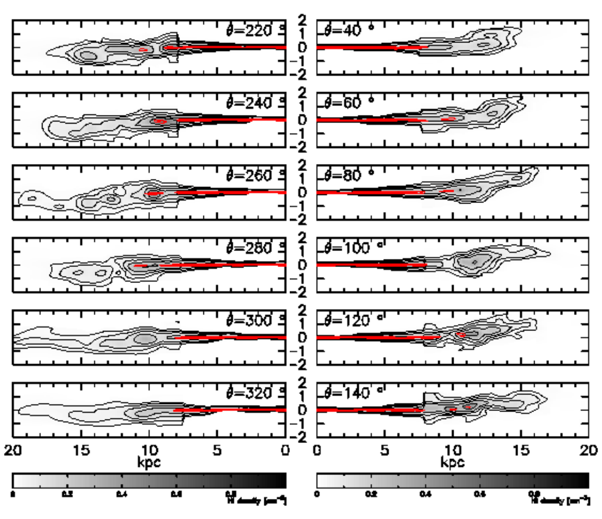
20
10
0
−10
−20
−20
−10
0
10
20
kpc
Sun
G.C.
緑：HI
赤：CO



2
1
0
−1
−2
−20
−15
−10
−5
0
5
10
15
20
kpc
緑：HI
赤：CO

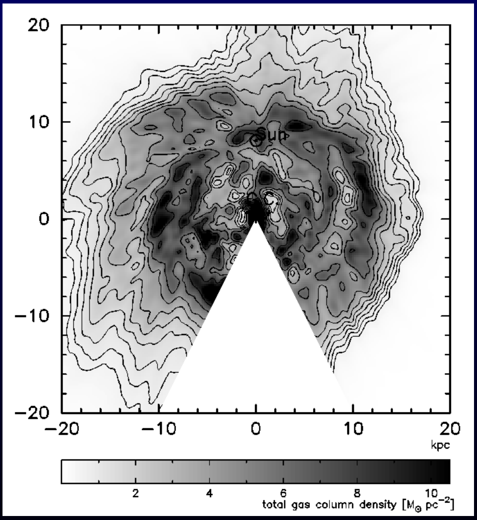


HI-H_2 map/断面図



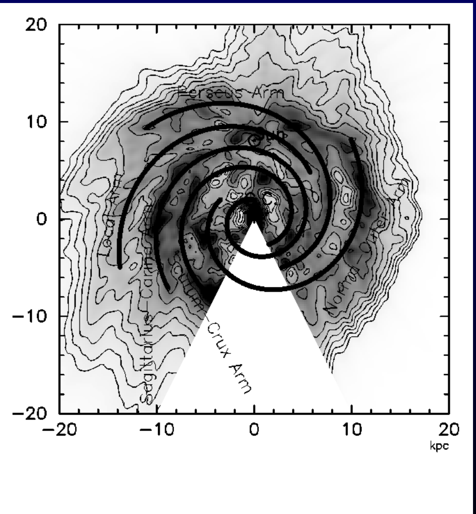
- HIガスが分子ガスを囲むように分布（あんぱん構造）
- HIガスは外側付近で大きく歪む（Warping）
- 分子ガスでもWarpingの兆候が見られる
- 銀河の内側部分でもz方向の揺らぎ（tilted disk）

Total gas　map



・HIガスと分子ガスの両方のマップが得られて　初めて描くことが可能になった

Total gas　map

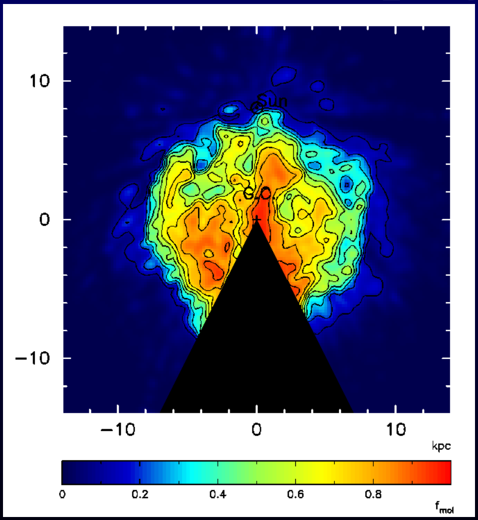


・HIガスと分子ガスの両方のマップが得られて　初めて描くことが可能になった

・銀河系全体の渦巻き腕構造がトレースしやすくなった

・Norma armとOuter armはピッチアングルが約11度付近であると考えると同一の腕らしい

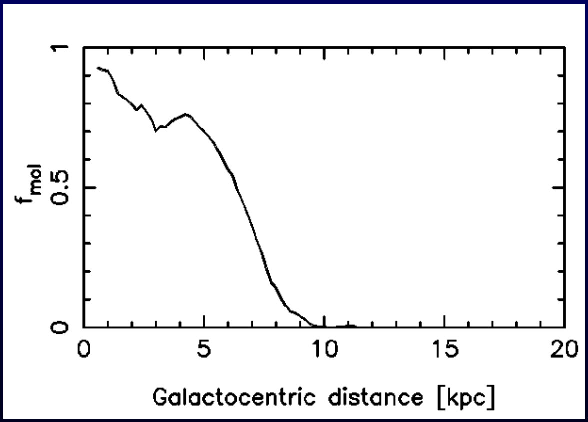
HI vs. H_2/ f_{mol}



- 分子ガス比 $f_{mol}=M_{H2}/(M_{H2}+M_{HI})$ と定義
- f_{mol}は密度P，金属量Z，紫外線強度（U）によって決定される（Elemegreen, 1993)

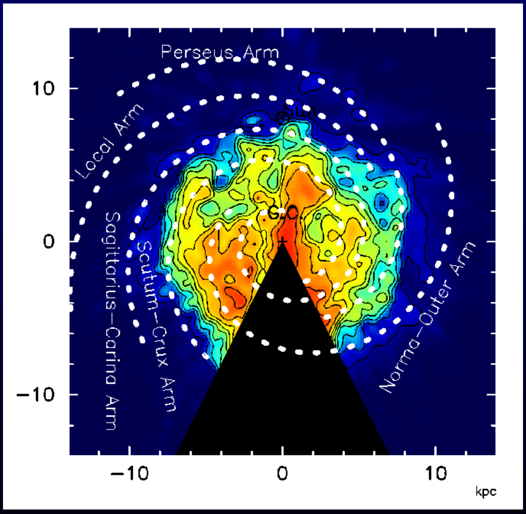
  P↑　⇒　f_{mol} ↑
  Z↑　⇒　f_{mol} ↑
  U↑　⇒　f_{mol} ↓

f_{mol}の動径分布



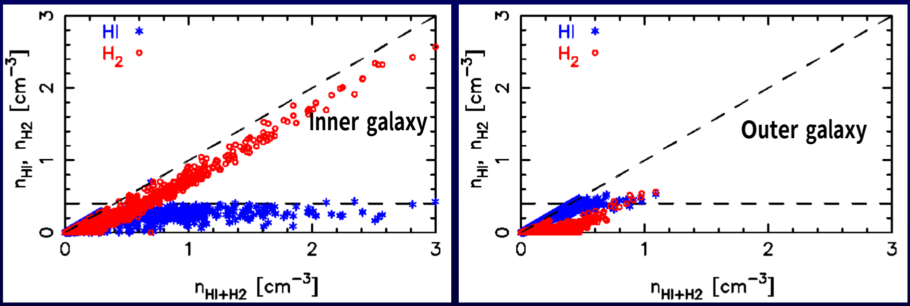
- 銀河中心付近で f_{mol}～1
- 銀河の外側で f_{mol}～0
- 半径5－8ｋｐｃ付近で急激に減少 (Molecular Front)

小さなスケールでのf_{mol}変化



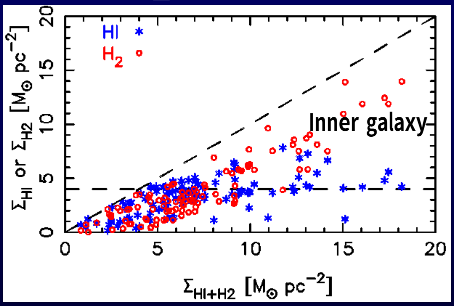
・f_{mol}は小さいスケールでも変化
・渦巻き腕上で変化が顕著
・渦巻き腕でHI－H_2の遷移が短時間で起こっている。
・変化の幅はパターン速度とガスの速度の差で決まり、10^6－10^7yr程度で変化していると考えられる。

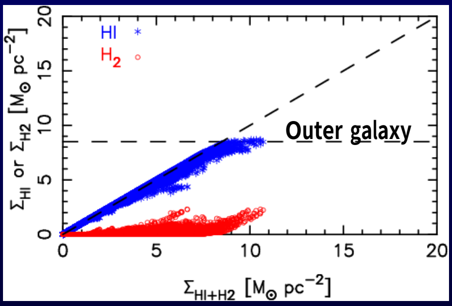
HI・H_2 vs. 全ガス(体積密度の場合)



・全ガス密度が低い部分ではHIガスは破線に沿って増加（HIガスが優勢）
・全ガス密度がある密度 ($0.4cm^{-3}$) を超えると、HIガス密度は一定となり、分子ガスが線形に増加する。
→ HI飽和密度が存在
→ UVの減光が顕著になる密度か （400pcでN_{HI+H2}=5e+20cm^{-2})

HI・H_2 vs. 全ガス(面積密度の場合)



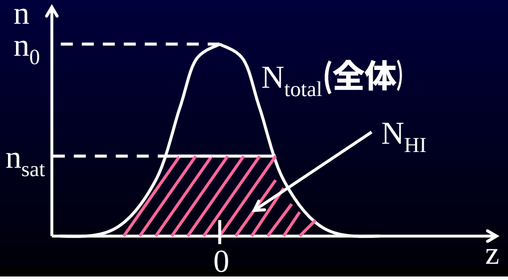


- 全ガスの面積密度とHI・H_2の面積密度の関係
- 体積密度の場合と同様、面積密度の場合もHI飽和密度が存在

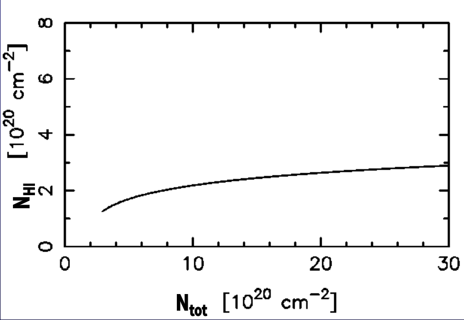
  → なぜ　同様の傾向が見られるのか？

柱密度でのHI飽和密度の解釈

- z方向のガス分布がSpitzer (1942)のモデルに従うと考える。
  $n_{tot}(z) = n_0 \, sech^2(z/h)$
- この時、HIの密度は
  $n_{HI}(z) = \max(n_0 \, sech^2(z/h) \, , n_{sat})$
- HIガス分布を－∞から+∞まで積分すると
  $N_{HI} = 2h\,(n_{sat} \log((n_0^{0.5} + (n_0 - n_{sat})^{0.5})/n_{sat}^{0.5}) + n_0(1-(1-n_{sat}/n_0)^{0.5}))$



柱密度でのHI飽和密度の解釈

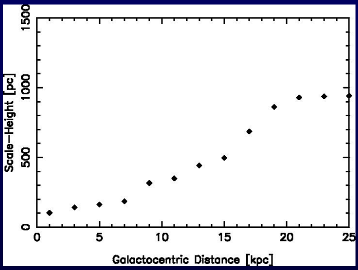


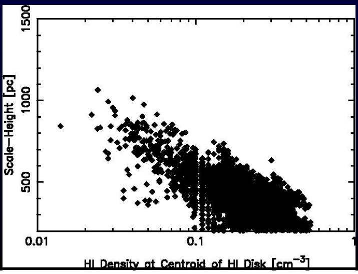
N_{total}の変化に対してN_{HI}の変化は小さい

→ 全ガスの面積密度が変化しても、HIガスの面積密度はほとんど変化しない

→ 体積密度で飽和密度が存在すると、面積密度でもHI飽和密度が見られる

Scale-height





- 内側から外側に向かい厚みが増加する
- Armで薄くinter-armで暑いという傾向がある

重力では説明できなさそう

磁場やSNが原因か

まとめ

- 最新のHI・COサーベイデータと回転曲線を用いて天の川銀河の3次元HI・H_2分布マップを構築した
- 天の川銀河全体の渦巻き腕構造を明らかにした
  Norma armとOuter armは同一
- HI飽和密度が体積密度・面積密度、両方で見られることが明らかになった