

南極からの
[N II] 1.46 THz 輝線による
銀河面サーベイ

梅本智文 (国立天文台)

南極からの遠赤外線・テラヘルツ波で探る宇宙

2022年3月14日

FUGIN Project

(Umemoto et al. 2017 PASJ, 69,78)

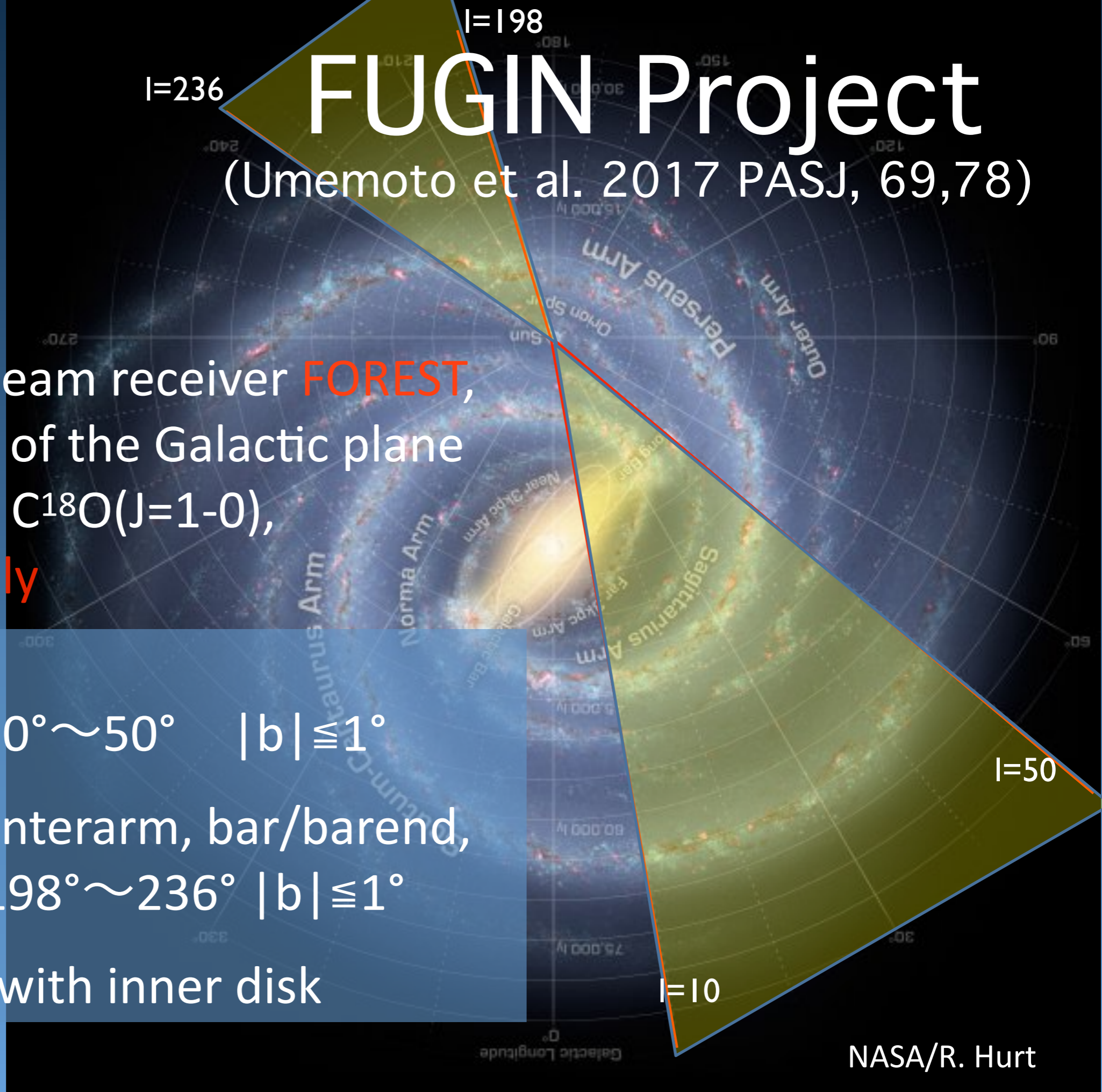
- Using multi-beam receiver **FOREST**, OTF mapping of the Galactic plane in ^{12}CO , ^{13}CO , $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$, **simultaneously**

Mapping area:

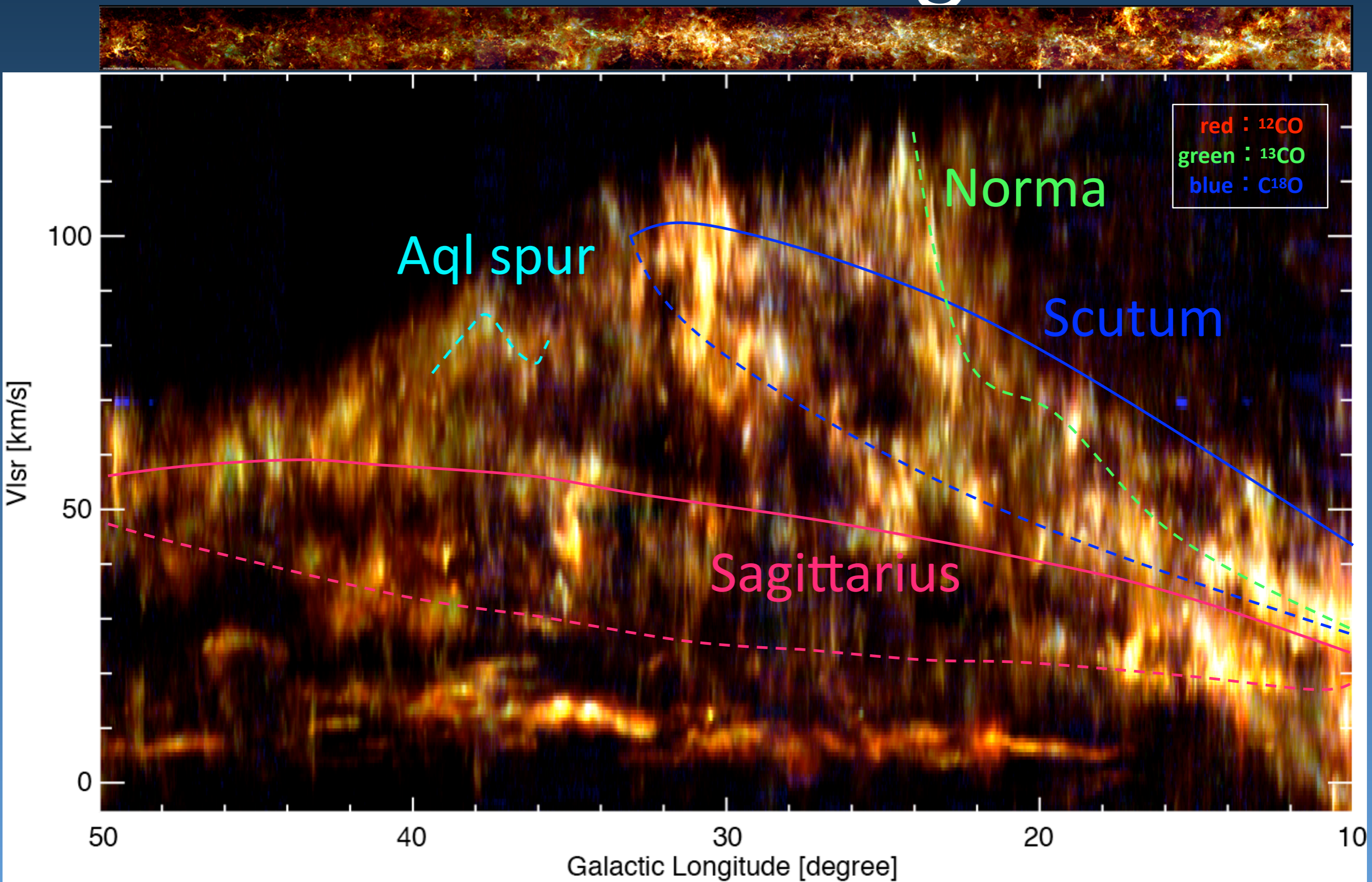
inner disk: $l = 10^\circ \sim 50^\circ \quad |b| \leq 1^\circ$

Spiral arms, interarm, bar/barend,
outer disk: $l = 198^\circ \sim 236^\circ \quad |b| \leq 1^\circ$

Comparison with inner disk

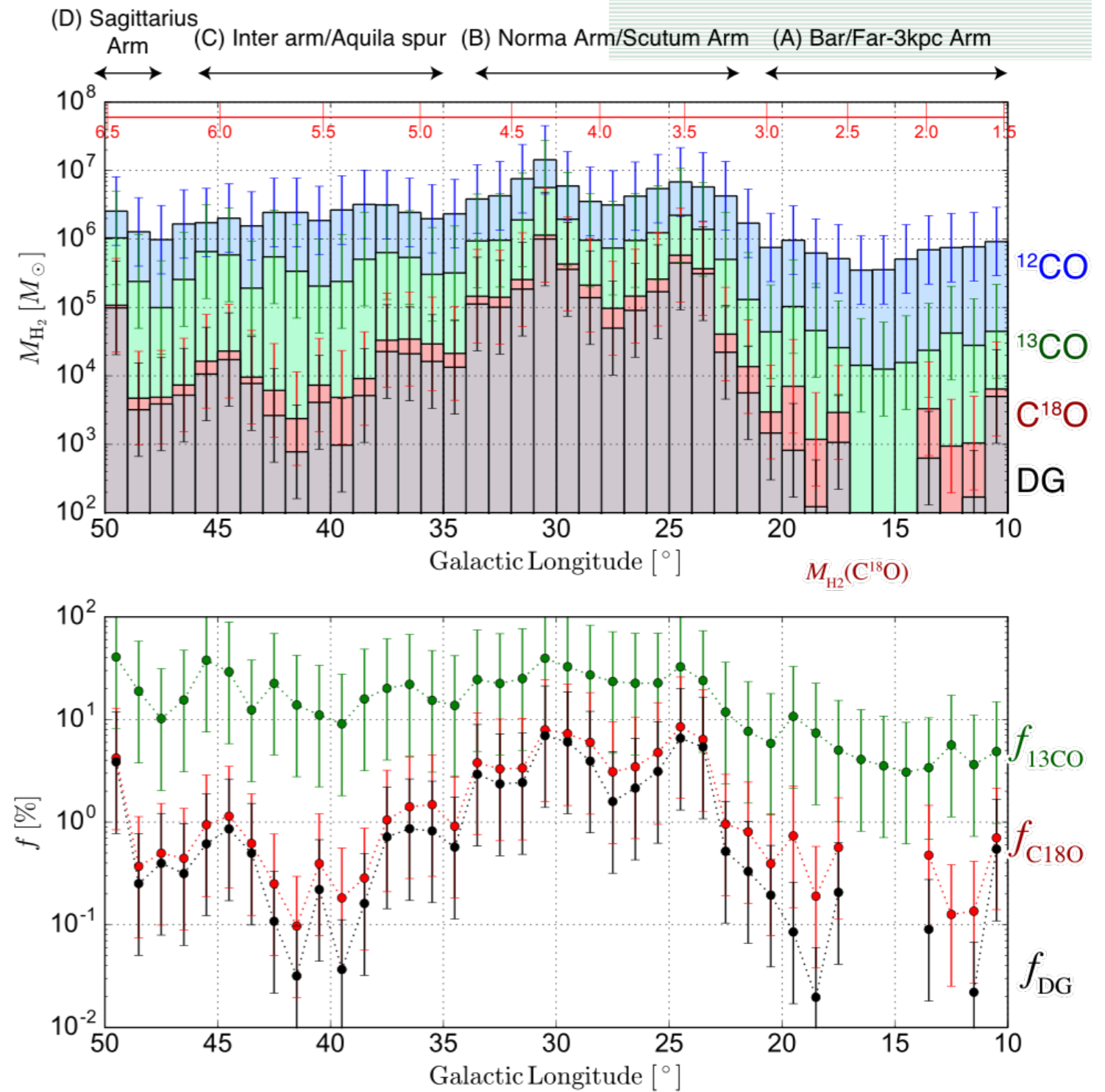
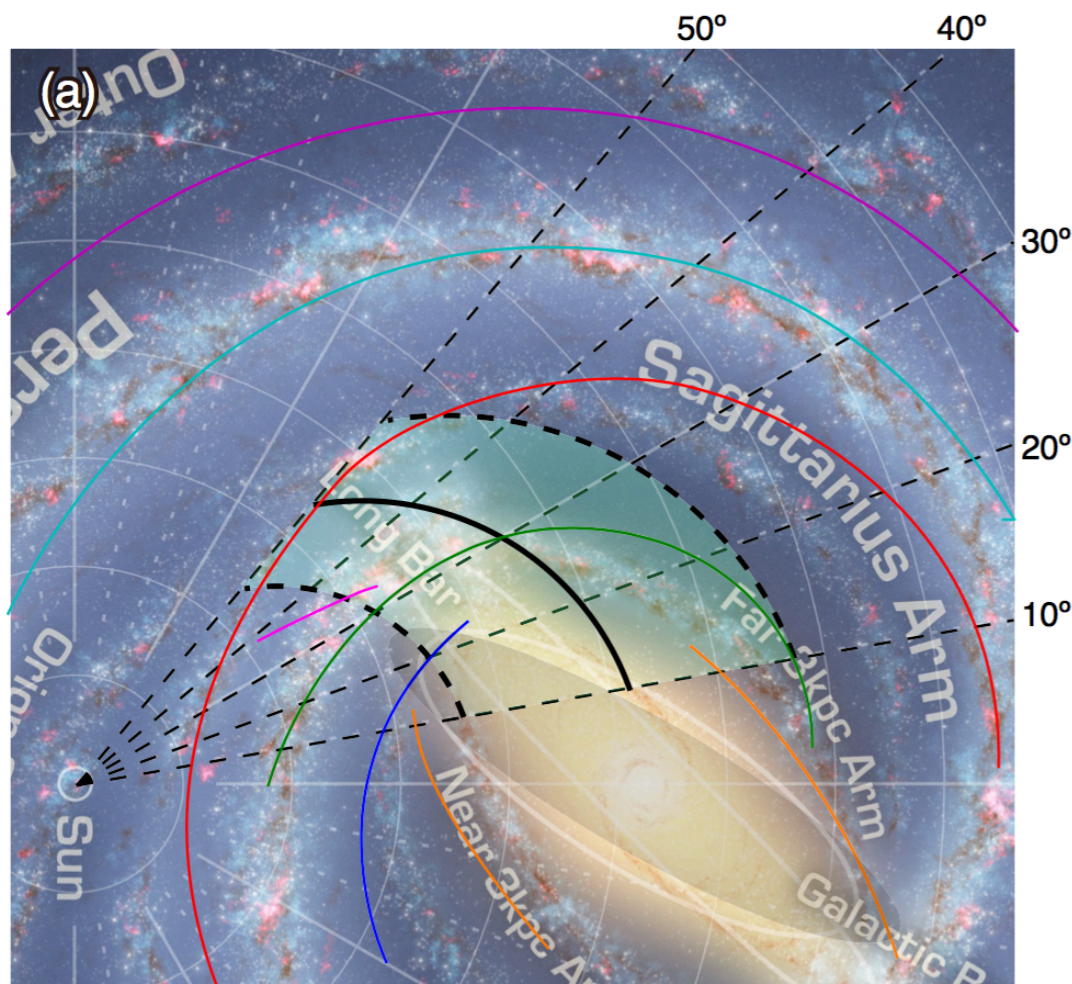


3 color l-v diagram



銀河面における高密度ガスの割合

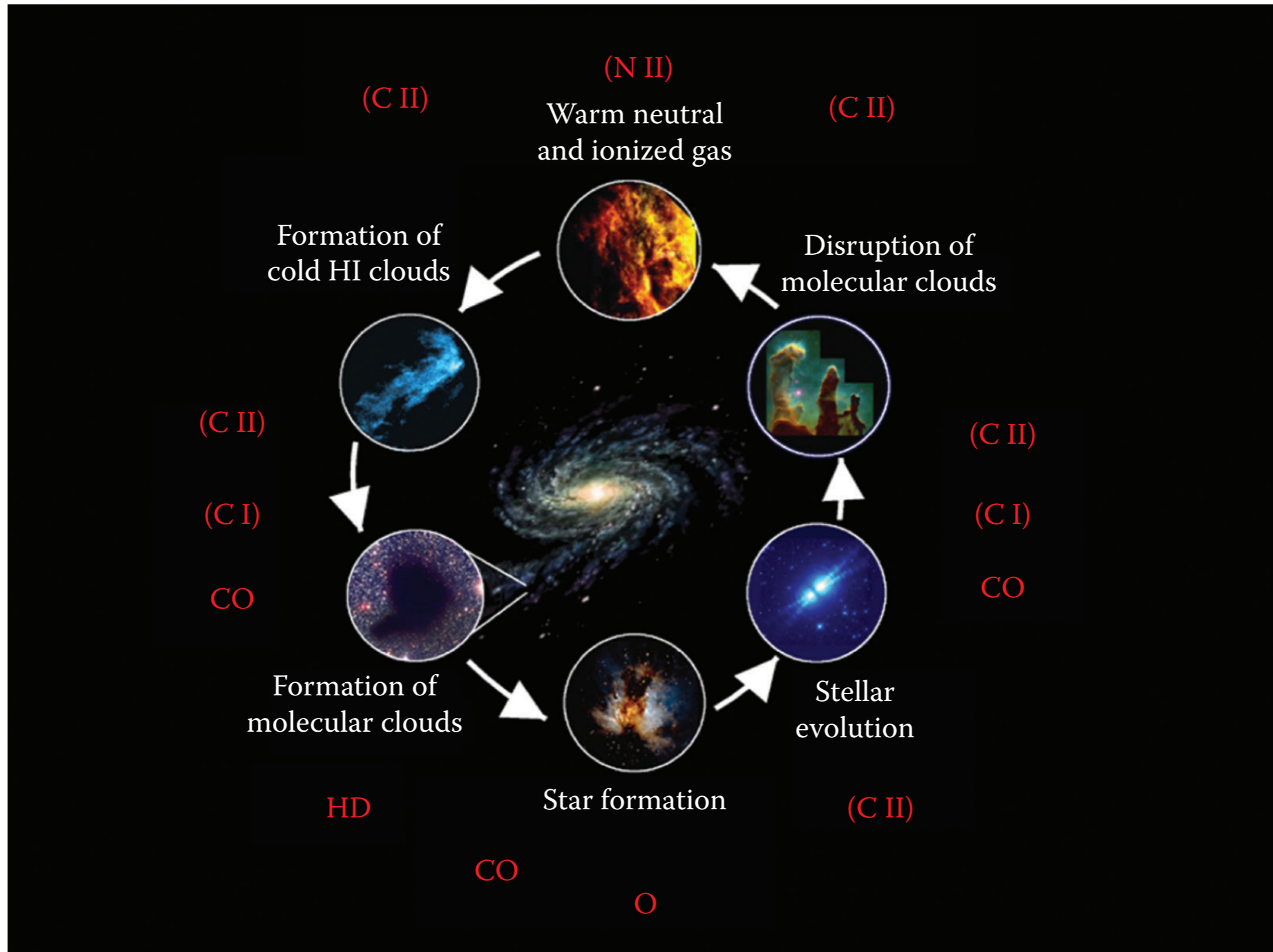
K.Torii et al. 2019, PASJ, 71,



- 5kpcにわたる領域での高密度ガスの割合 ~ 3%
- 渦状腕では ~ 5% に対し bar 領域や渦状腕の間では ~ 0.1-0.4%
 - これらの領域での星形成率の違いか?

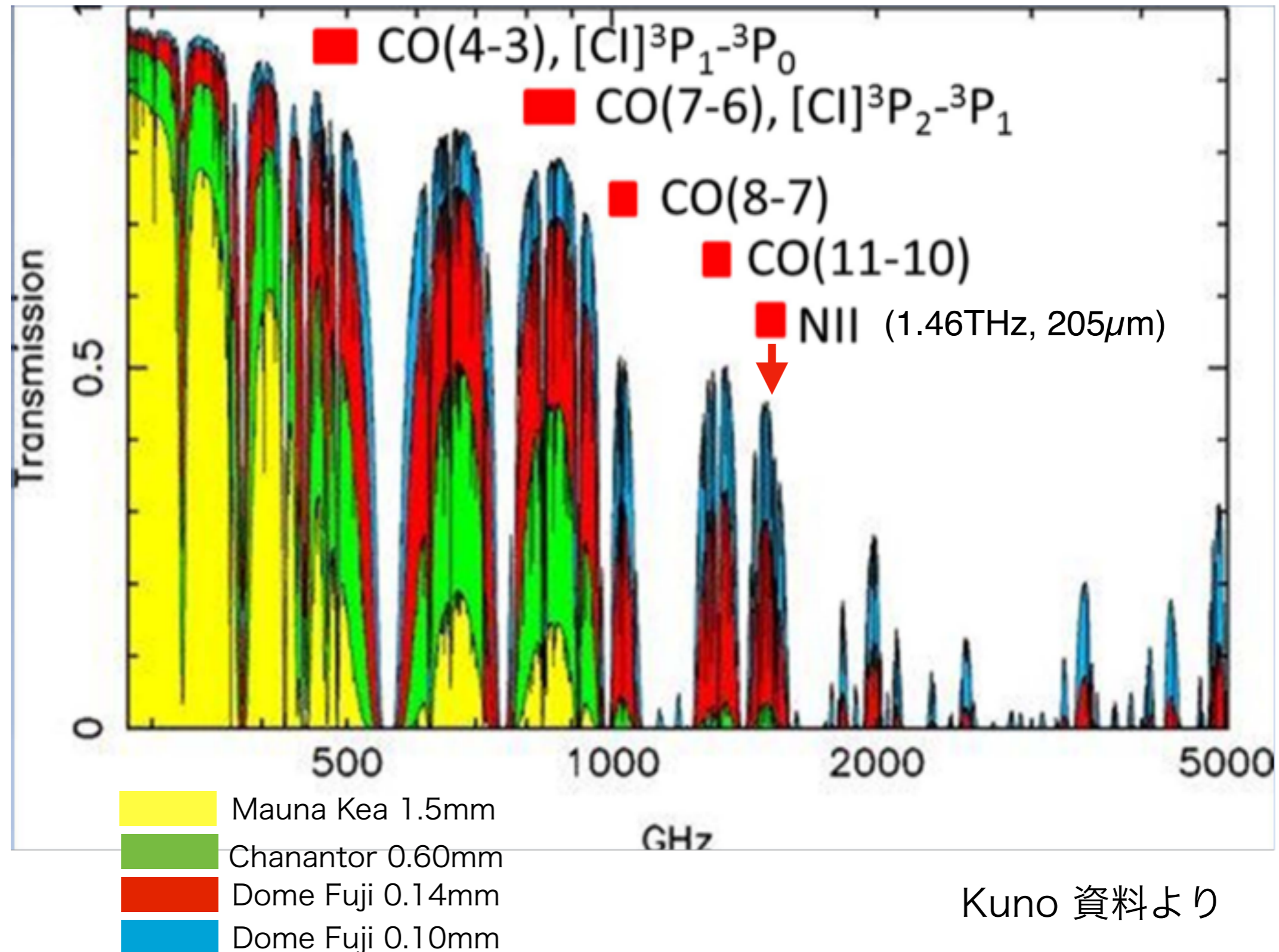
- 距離 ~ 5.5–8kpc \Leftrightarrow ~1pc の分解能
- FUGIN データは分子雲の総質量を求め高密度ガスが集中する星形成領域を検出できる

星間物質のガスの循環



Walker (2016)

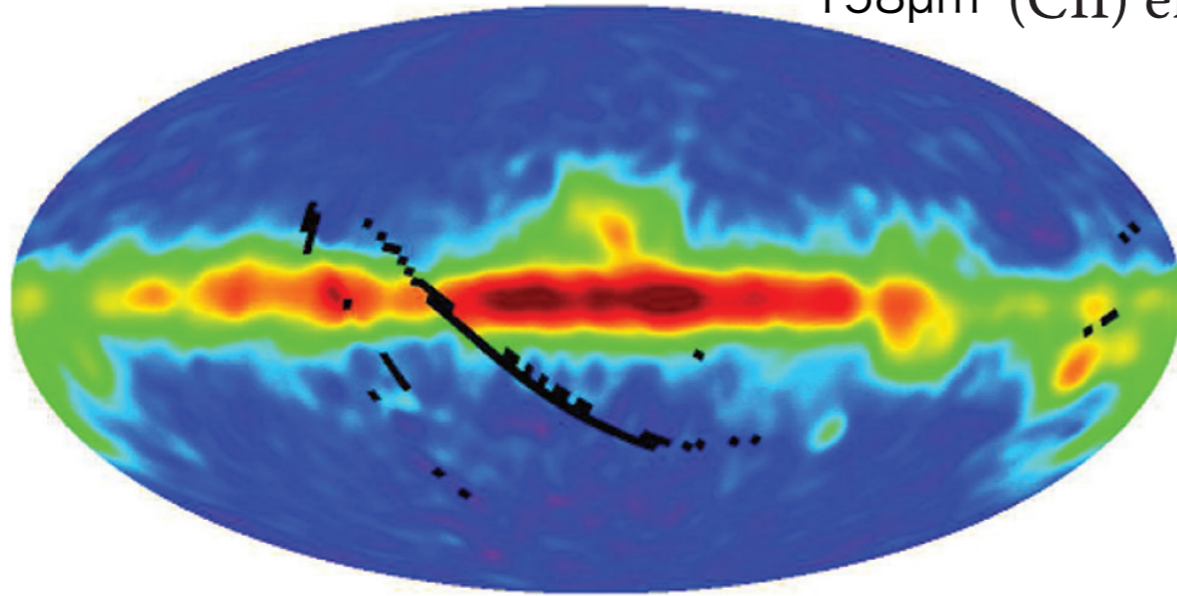
THzにおける原子・分子輝線



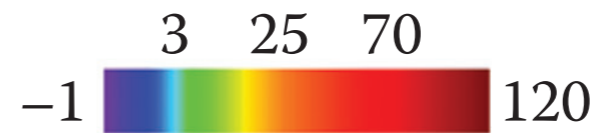
Kuno 資料より

COBE/FIRASによる[C II] & [N II]

158 μ m (CII) emission

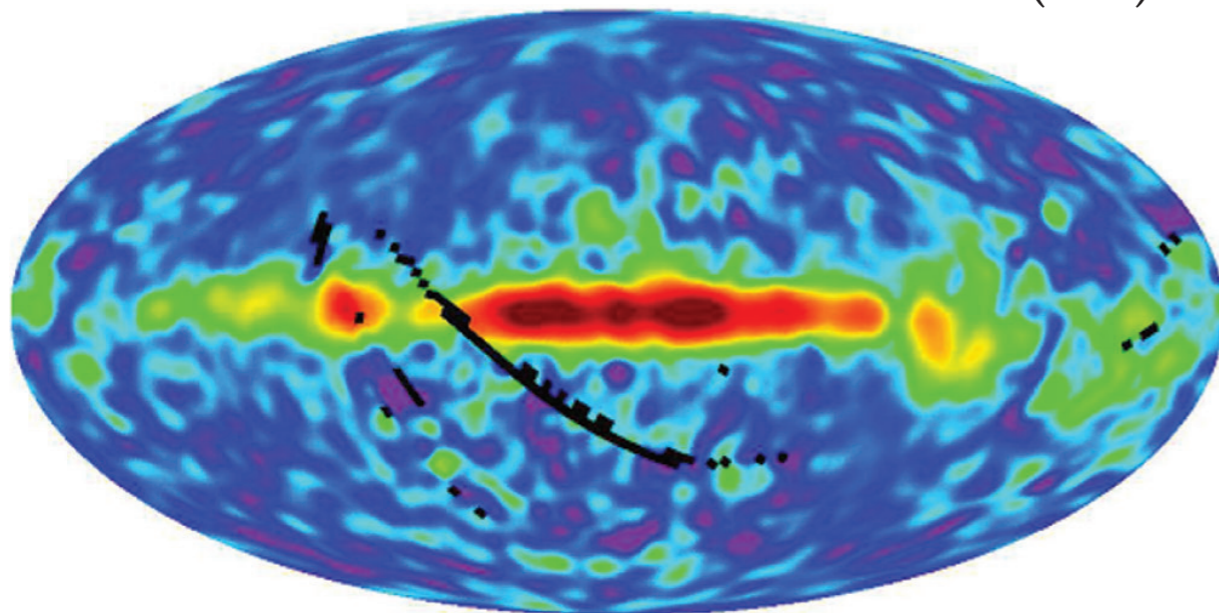


- 角度分解能7°、速度分解能1000km/sで [C II],[N II] 全天マップ



- [C II] 輝線は赤外線連続波の~0.3% と星間物質の冷却で最も支配的な輝線

205 μ m (NII) emission



- [N II]輝線 の強度は [C II]輝線の10分の1程度

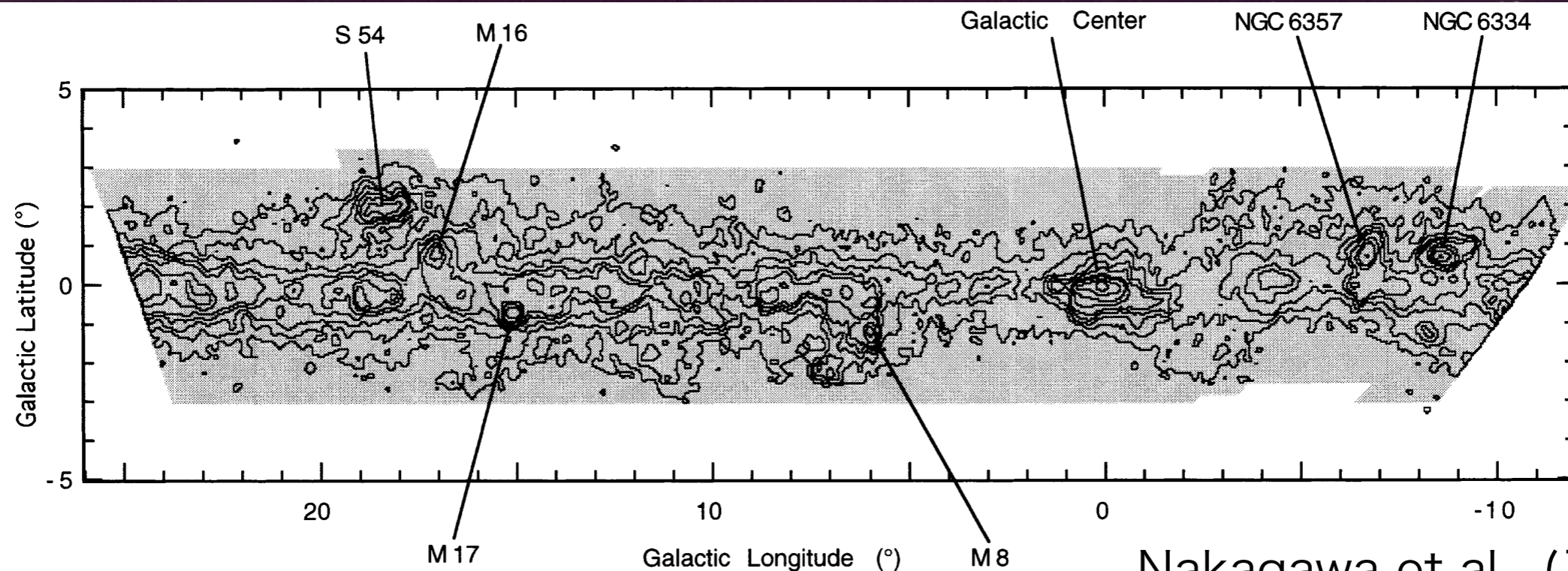
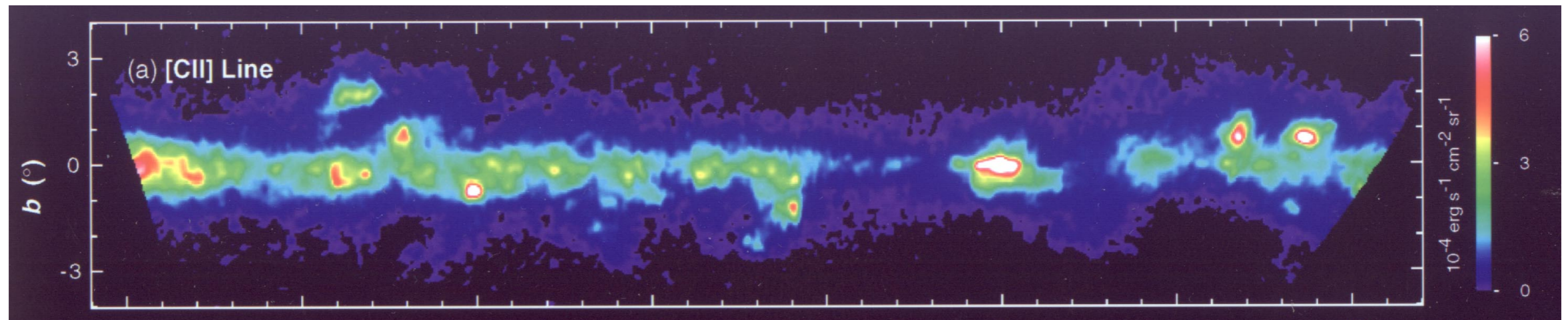


- [N II] 輝線は強く電離した領域 --> [C II] と[N II]と比較すれば [C II] が電離ガスまたは中性ガス起源なのか決められる

Fixsen, Bennett, & Mather (1999)

[C II] Galactic Plane Survey by BICE

- Balloon-borne Infrared Carbon Explorer
 - 15' angular resolution & 175 km/s velocity resolution

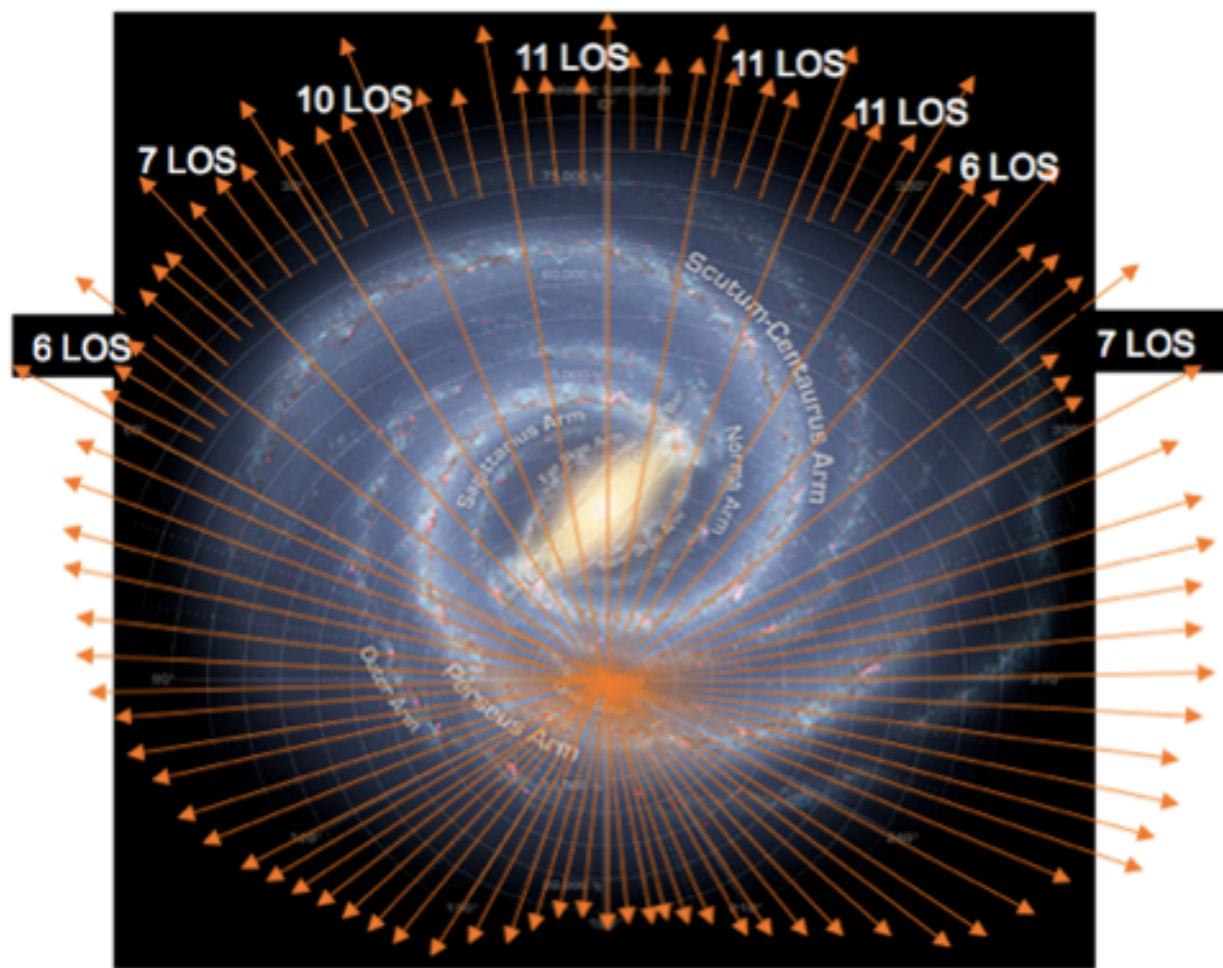


Nakagawa et al. (1998)

FIG. 8.—Far-infrared [C II] line intensity contour map obtained by BICE with a spatial resolution of 15'. Contour levels are 0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, and $9 \times 10^{-4} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. The shading shows the observed area. Representative bright sources are labeled.

Herschel [C II] 銀河面サーベイ

- Galactic Observations of Terahertz C+ (GOT C+)

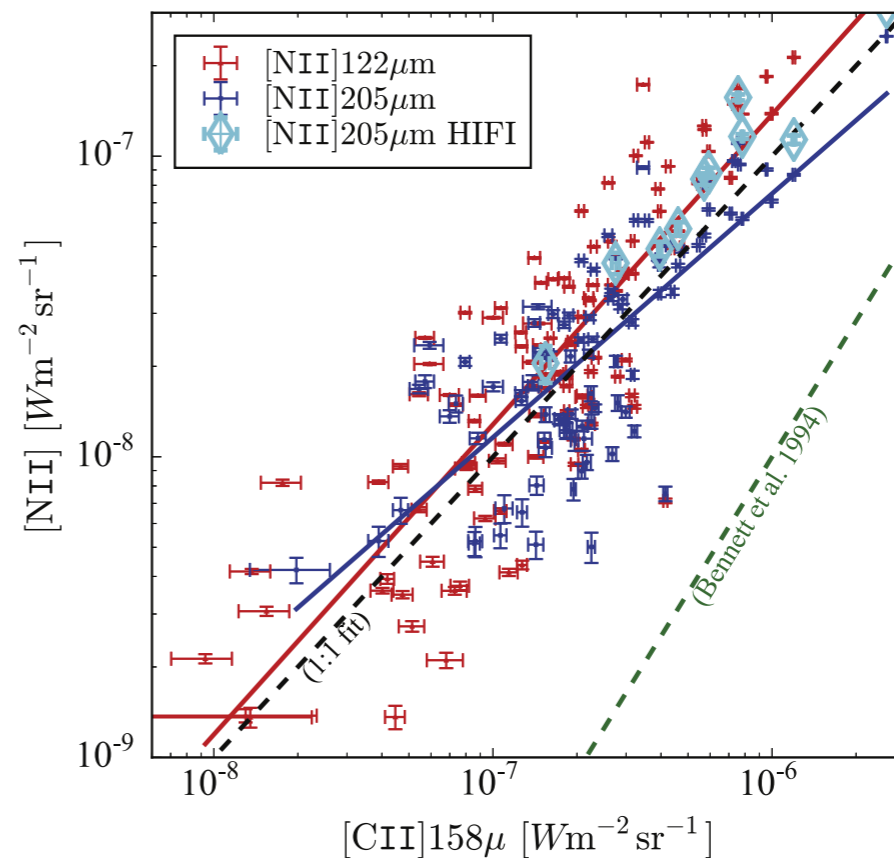
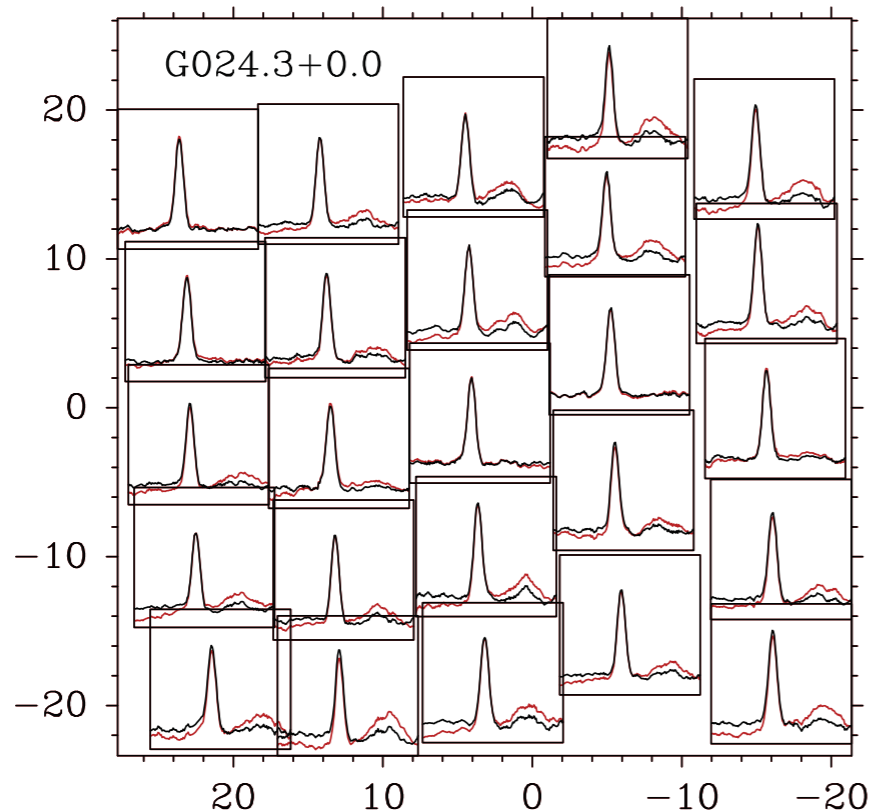


- Herschel(3.5m)/HIFIによる[C II] 銀河面サーベイ、12" の空間分解能、0.1 km/s速度分解能
- 銀河面の452視線方向を観測
- Every 0.87° ($|l| < 60^\circ$), 1.3° ($30^\circ < |l| < 60^\circ$), 4.5° ($60^\circ < |l| < 90^\circ$), and 4.5° to 13.5° ($|l| > 90^\circ$)
- $b=0^\circ$, $\pm 0.5^\circ$, and $\pm 1.0^\circ$, $\pm 2.0^\circ$ ($|l| > 90^\circ$)

Langer et al. (2010), Pineda et al. (2013), Langer et al. (2014)

Herschel [N II] Galactic plane survey

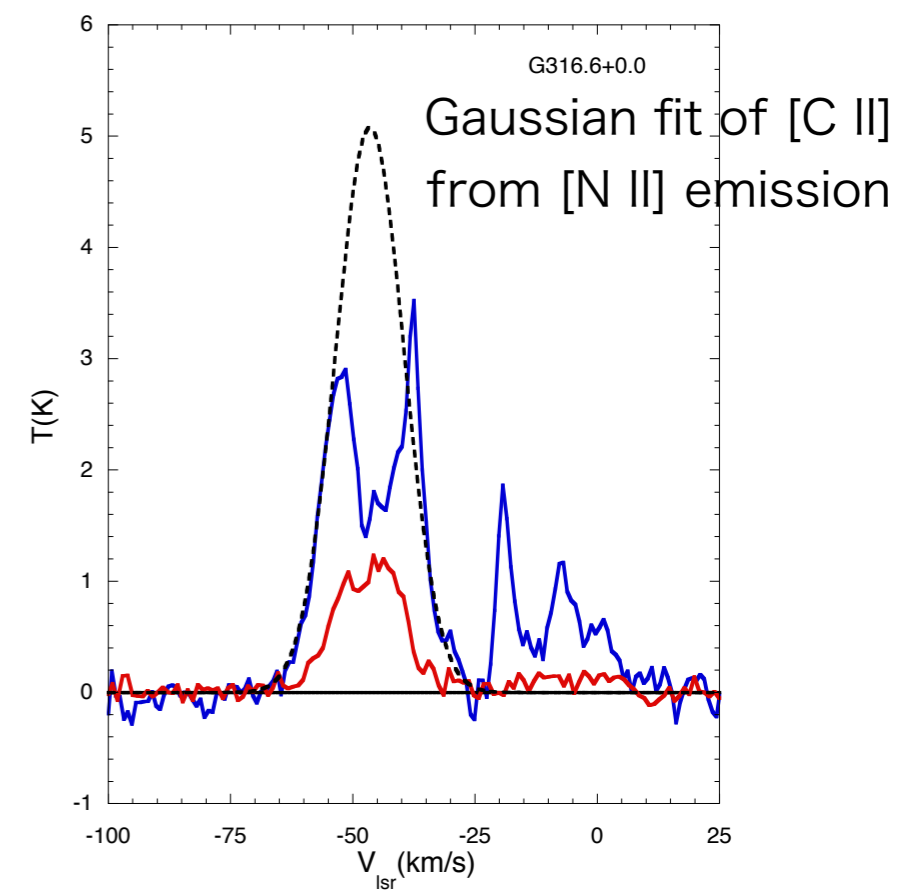
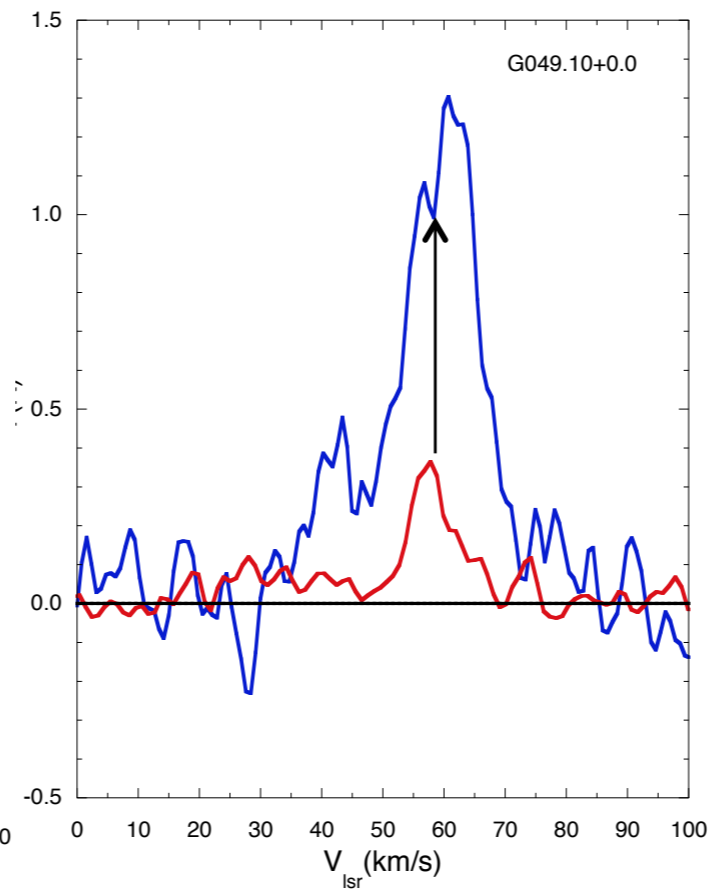
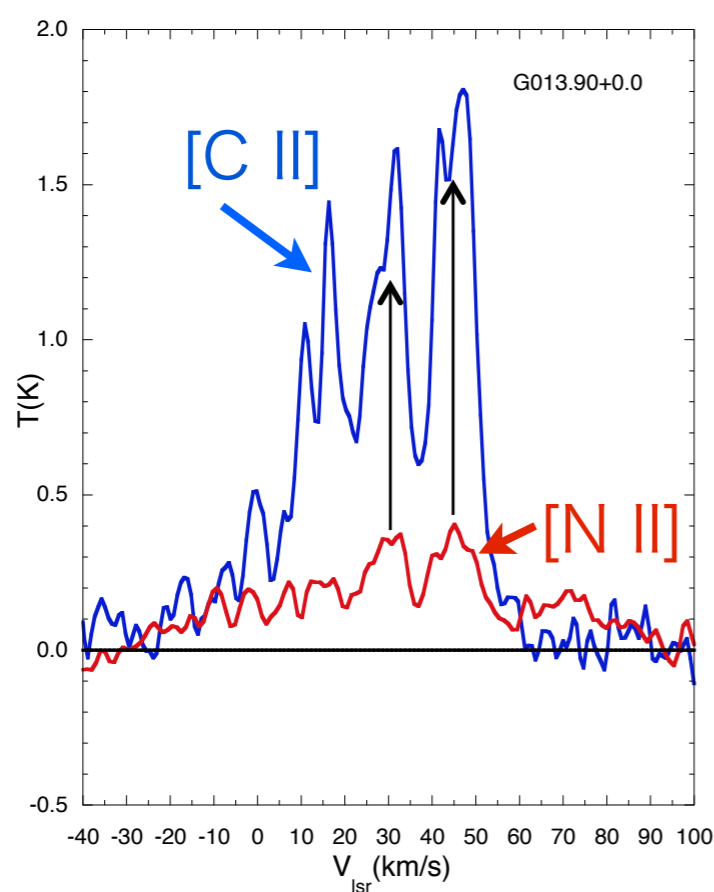
- [N II] at 122 & 205 μm with PACS(5x5)
 - 149 LOSs selected from GOT C+, 10" (122 μm), 15" (205 μm)
 - Both lines are detected in the range $-60^\circ \leq l \leq 60^\circ$
 - [N II] emission highly correlated with that of [C II]
 - High electron density ($10\text{-}30\text{cm}^{-3}$) \rightarrow [N II] emission is **not** from **WIM** but from **dense WIM** associated with SFRs, H II regions



Goldsmith et al. (2015)

Herschel/HIFIによる[C II] [N II] 観測

- GOT C+方向の[N II] 輝線観測
 - [C II] 輝線を、強く電離したガスと弱く電離したガスからの寄与を分離することが可能
 - [N II]輝線が強いところでは[C II] しばしば前景のガスによる**吸収**がみられる --> [C II] 輝線の観測だけでは高度に電離したガスの量を**過小評価**



Langer, Goldsmith & Pineda (2016)

[N II] 1.46 THz 銀河面サーベイ

- [N II] 輝線の特徴

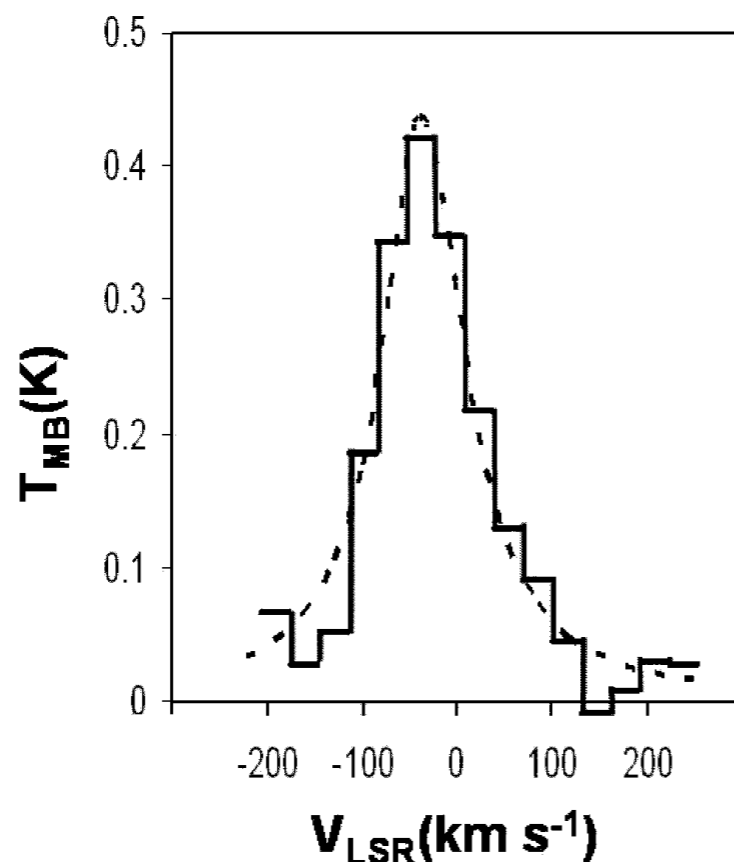
- [C II] 輝線の電離ポテンシャルは11.3eVと水素の電離ポテンシャル13.6eVよりも低いため、[C II]輝線は**電離ガス**領域と**中性ガス**領域のどちらからでも生じる。いっぽう、[N II]輝線は電離ポテンシャルが**14.5eV**と高い。
- このため[N II]輝線は**強く電離**した領域で生じる--> [C II]輝線と[N II]輝線のマップを比較すれば、[C II]輝線が**電離した領域**からなのか**中性ガス**領域から来ているのを決定できる
- [C II]輝線はしばしば**吸収線**がみられ、[C II]輝線の観測からだけでは非常に電離したガスを**過小評価**することになる

- 南極からの[N II]1.46 THz輝線銀河面サーベイ

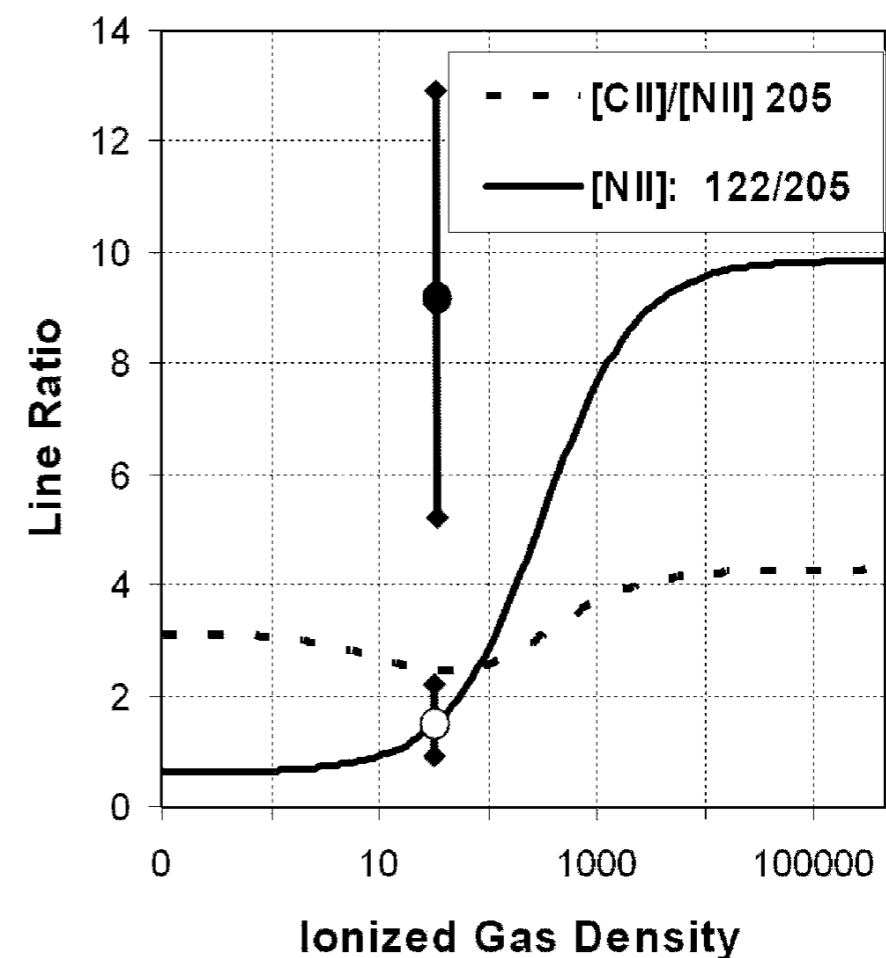
- 天の川銀河の広い領域をマッピング観測することで、中性ガスだけでなく電離ガスも含めた星間物質の進化の過程を明らかにするのが目的

Detection of 205 μm [N II] from Ground

- AST/RO at South Pole (1.7m)
 - The first detection of 205 μm [N II] line from ground-base
 - [N II] emission reveals the fraction of [C II] emission arises from the ionized gas and the neutral ISM
 - **27% of [C II] arises from the low-density ionized gas but 73% from the neutral ISM!**



[N II] emission from Carina nebular with velocity resolution of 60 km/s



Oberst et al. (2006)

観測可能領域

マッピング領域:

Inner disk: $l = 221^\circ \sim 25^\circ$ $|b| \leq 1^\circ$

Spiral arms, interarm, bar, G.C.

FUGIN 領域と一部オーバーラップ

$232^\circ < l < 14^\circ$ (EL $> 30^\circ$), $221^\circ < l < 25^\circ$ (EL $> 20^\circ$)

○観測可能天域 (@新ドームふじ)

仰角(EL)	赤緯(Decl.)
$> 5^\circ$	$< +8^\circ$
$> 10^\circ$	$< +3^\circ$
$> 20^\circ$	$< -7^\circ$

南極

FUGIN

NASA/R. Hurt

南極テラヘルツ10m鏡によるサーベイ

- [N II] 1.46THz 銀河面サーベイ
 - サーベイ領域 $l = 221^\circ - 25^\circ$ ($EL > 20^\circ$), $|b| \leq 1^\circ$ ($|b| \leq 2^\circ$)
 - 20" grid, $\Delta T(5\sigma) = 0.75\text{K}$, 10x10 beams \rightarrow 75,000h (OTF) **x**
 - 銀経にそってOTFによるストリップスキャン \rightarrow 1度角ストリップ
当たり1.2時間 (OTF) \rightarrow **~200時間** \gg いくつかの銀緯でスト
リップスキャン、又は特定領域のマッピングを実施

Freq. band (GHz)	Freq. range (GHz)	Lines	Beam	Sensitivity (5σ) ($\tau=10\text{min}$, $\Delta v=1\text{km/s}$)	Angular Resolution (D=10m)
460	385-540	CO (J=4-3), [C I] $^3P_1-^3P_0$	250	0.054 K	17"
650	575-735	HCl, D ₂ H ⁺	250	0.092 K	11.4"
850	775-965	CO (J=7-6), [C I] $^3P_2-^3P_1$	250	0.14 K	8.7"
1000	1000-1060	CO (J=8-7), NH ⁺	100	0.35 K	7.4"
1300	1250-1380	CO (J=11-10), H ₂ D ⁺	100	0.47 K	5.7"
1500	1450-1550	[N II]	100	0.75 K*	5.0"

(*:T_{sys}=6000K) From Kuno's document

SFRと L_{IR} のプロローブとしての[N II]

- [N II] 輝線観測の意義
 - LIRGsとstar-forming galaxies のHerschelの [N II] 観測から、星形成率 (SFR) と赤外光度 (L_{IR})の素晴らしいプロローブ (Zhao et al. 2013).
 - したがって[N II]輝線光度 $L_{\text{[N II]}}$ は、従来の L_{IR} から求めた推定よりも、より正確なSFRの指標となる

$$\log \text{SFR} = (-5.31 \pm 0.32) + (0.95 \pm 0.05) \log L_{\text{[NII]}}$$

$$\log L_{\text{IR}} = (4.51 \pm 0.32) + (0.95 \pm 0.05) \log L_{\text{[NII]}}$$

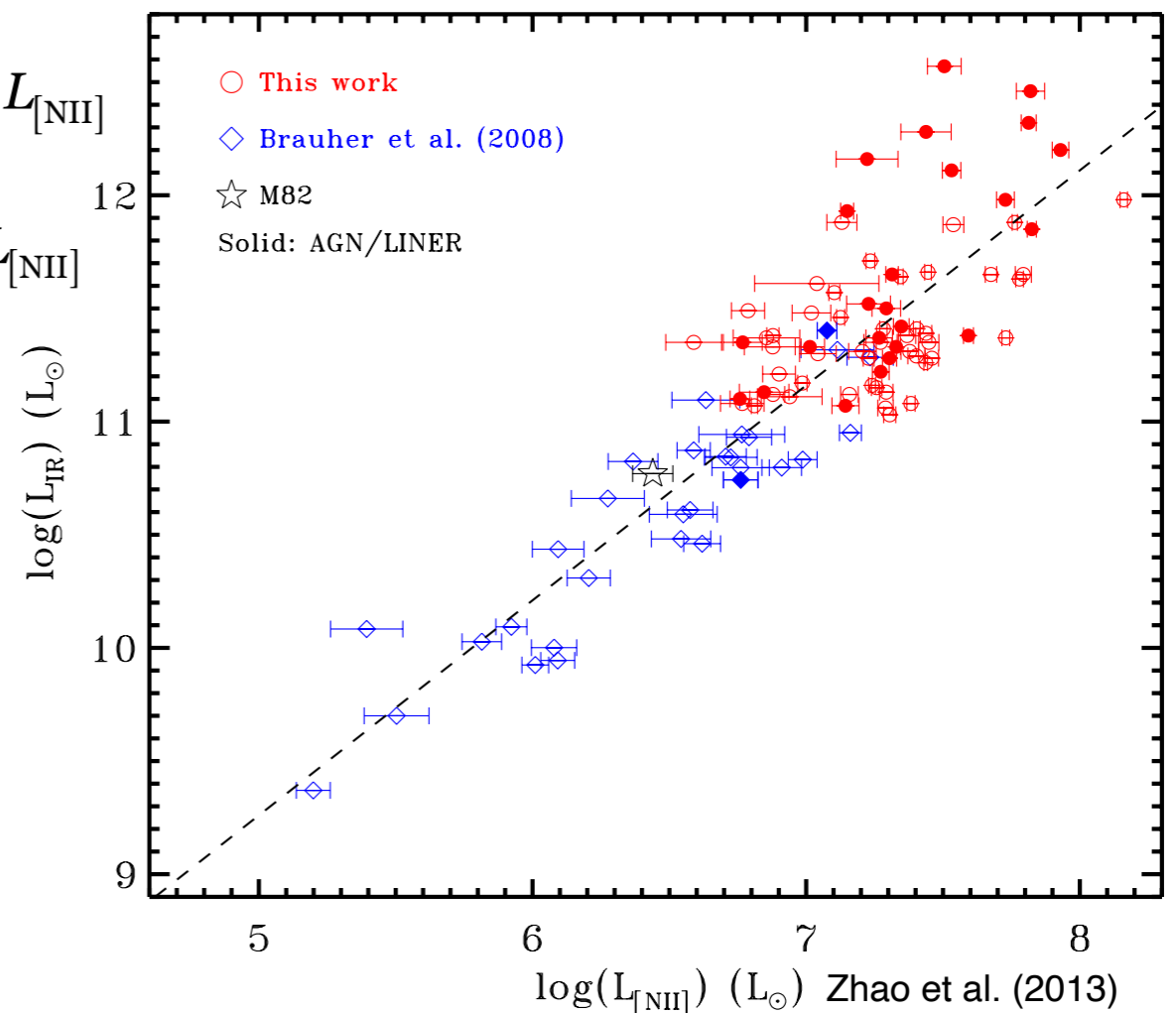
where

SFR = star formation rate ($M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)

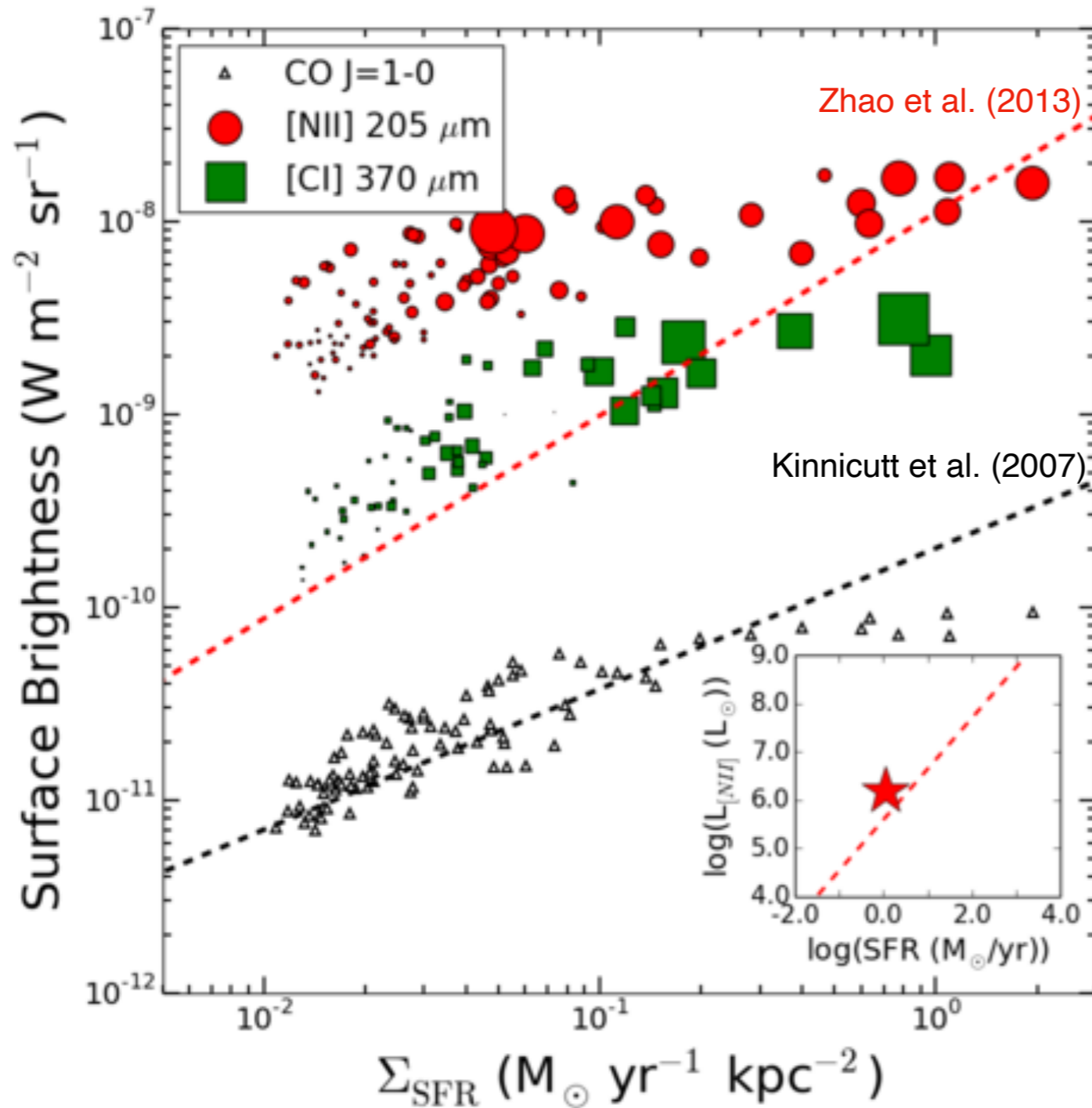
$L_{\text{[NII]}}$ = luminosity of [NII] line (L_{\odot})

L_{IR} = luminosity of dust in IR (L_{\odot})

これははたして数百パーセックのスケールでも当てはまるのか?



Relationship between Σ_{SFR} & [N II]

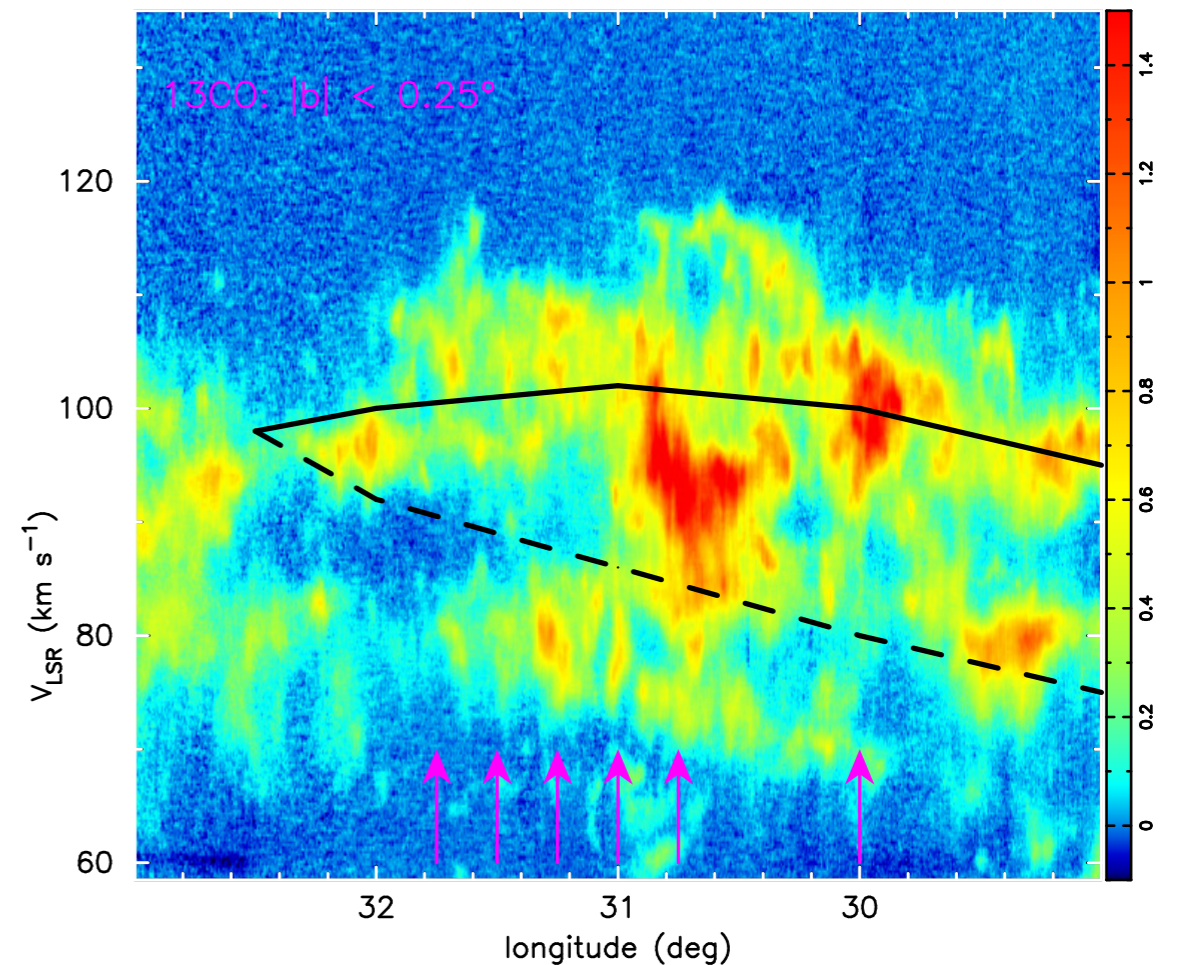
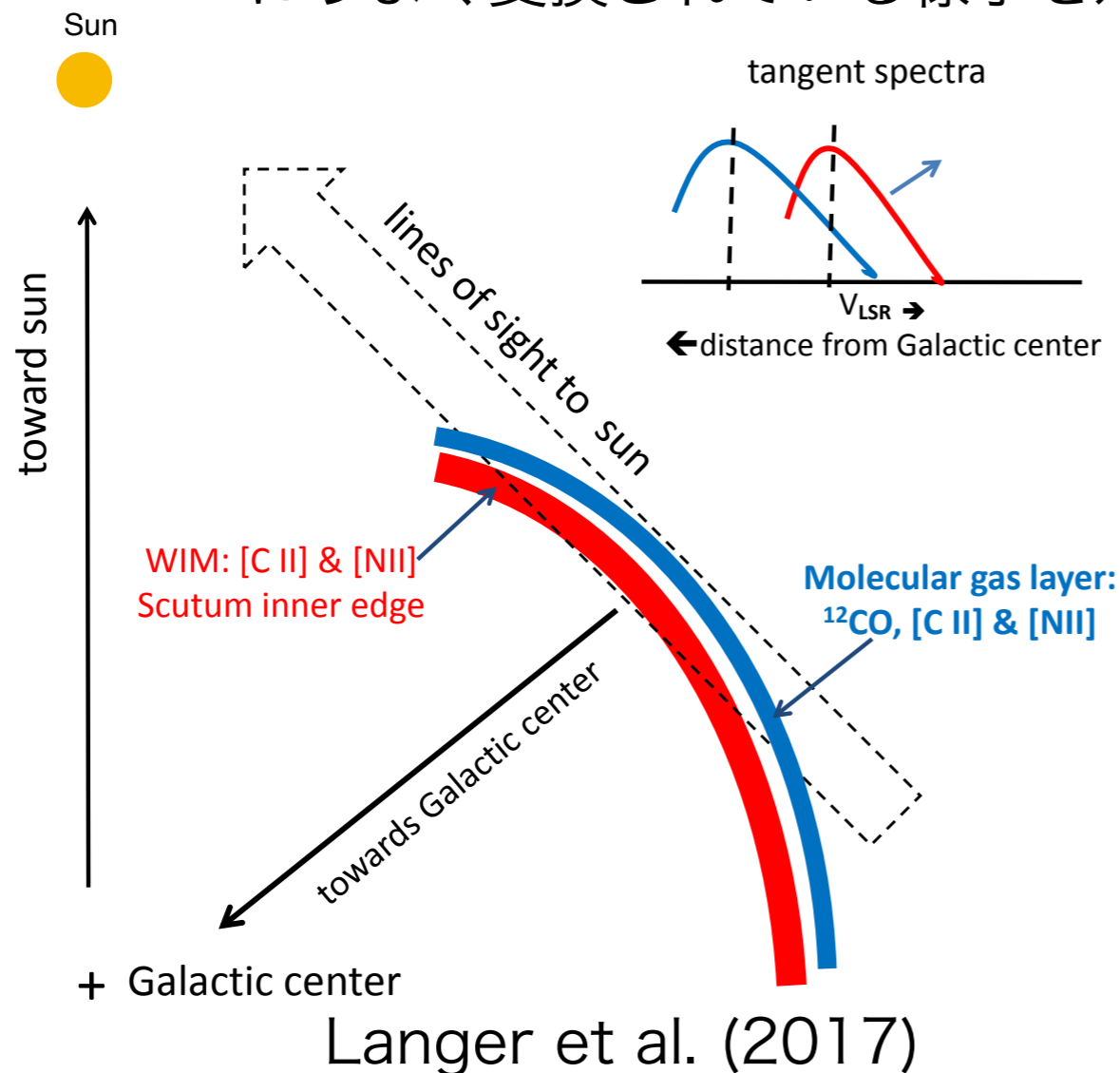


Wu et al. (2018)

- [N II]輝線の表面輝度と星形成率 Σ_{SFR} の関係は Zhao et al.(2013)の結果よりも傾きがなだらかで、[N II]輝線の表面輝度は $\Sigma_{\text{SFR}} > 10^{-1} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$ で一定の値を取るようになっている
- ところが、[N II]輝線の表面輝度と星形成率 Σ_{SFR} をM83銀河全体に渡って積分すると、Zhaoの関係とよく一致する。
- このことは、[N II]輝線の表面輝度と星形成率 Σ_{SFR} の比例関係は、**銀河全体のスケール**では当てはまるが、**~300 pc scale.**では当てはまらないかもしれないことを示している

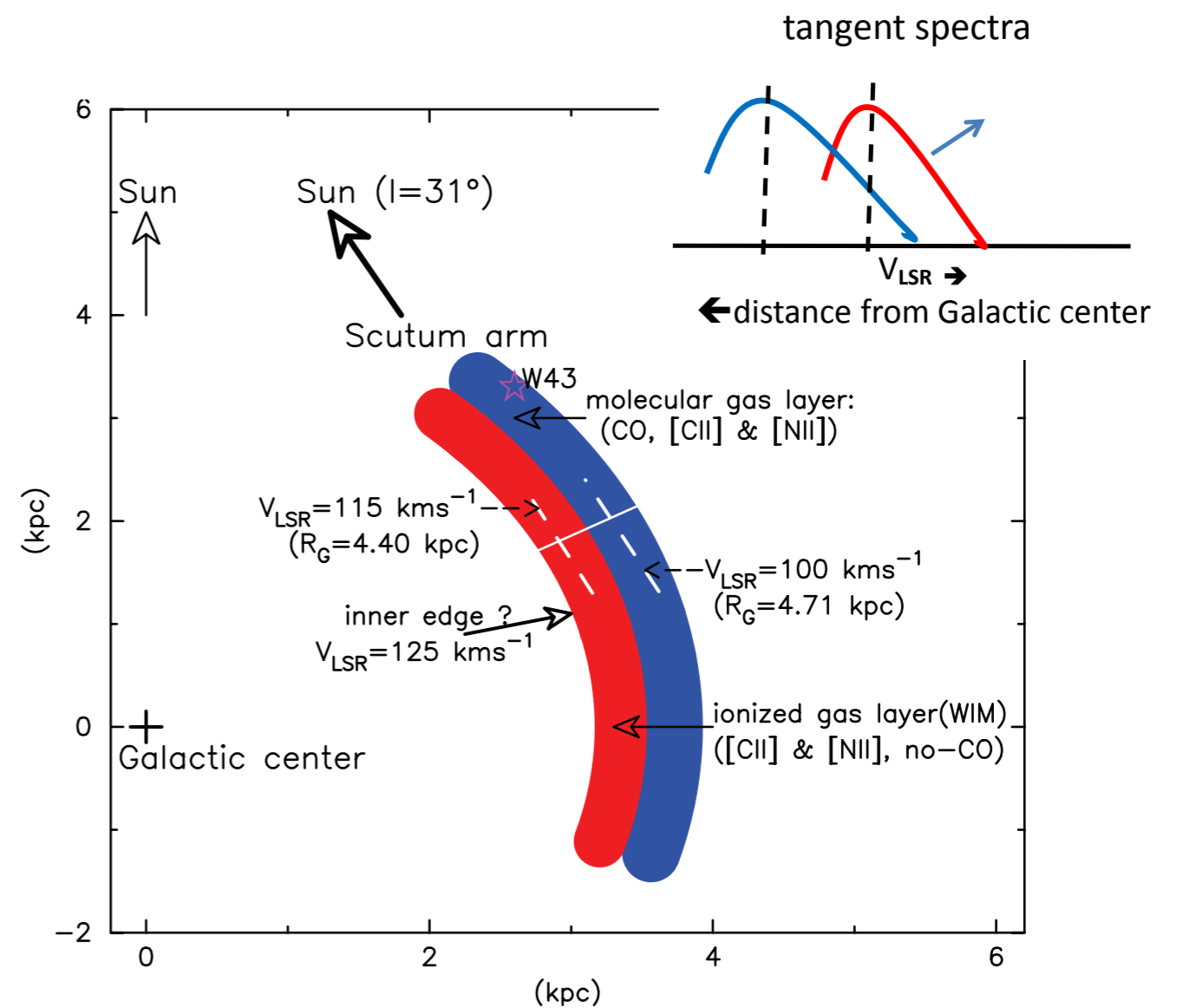
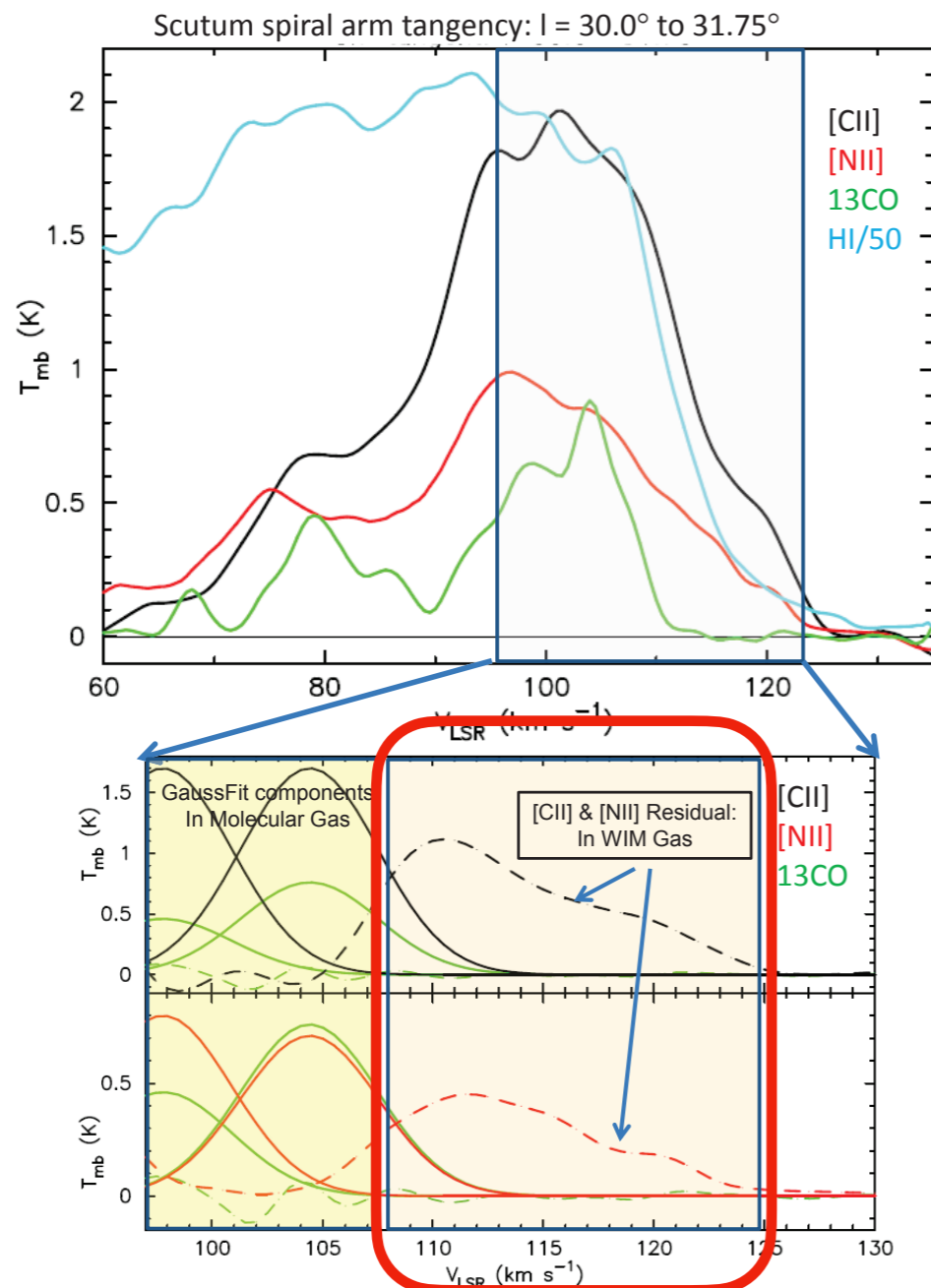
天の川銀河の渦状腕の接線付近方向

- 通常は低密度のwarm ionized medium WIMを検出できない。しかし接線付近方向では視線方向のパスが長くなるため、検出できる可能性
- 電離ガス、HI中性原子ガス、COによる分子ガスといった異なる層が、終端 V_{LSR} 速度の関数として輝線プロファイルにあらわれると期待
- WIMが渦状腕の重力ポテンシャルに落ち込んで圧縮され、高密度ガスにうまく変換されている様子を知ることができるかも



Ionized Gas in the Scutum Arm

- There is highly ionized gas within the arm with 1-20 times electron density ($0.2 - 0.9 \text{ cm}^{-3}$) of the interarm WIM
- [N II] emission arises from shock compression layers of the WIM, accelerated by the gravitational potential of the arm

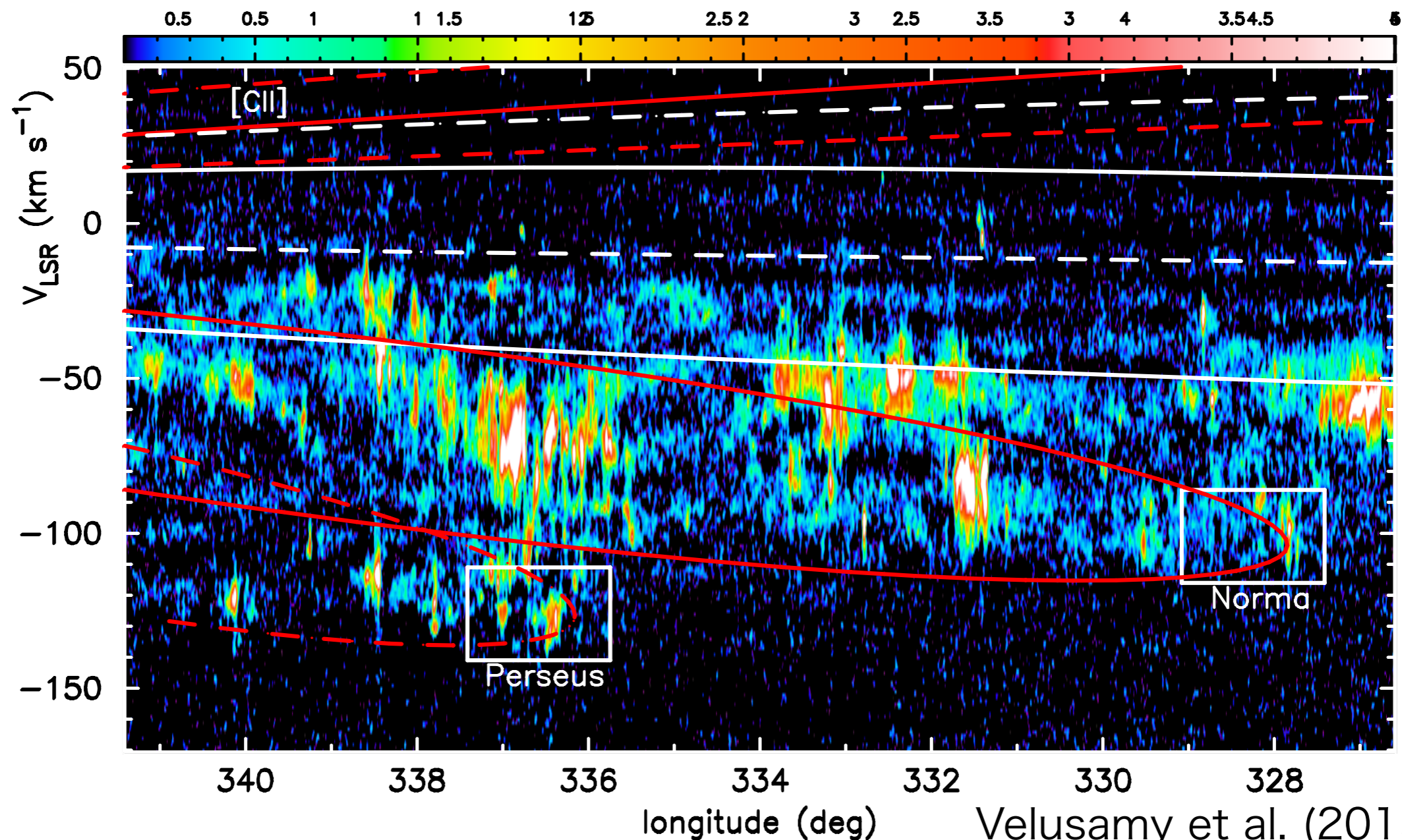


Langer et al. (2017)

Spiral Arm Tangency in Southern Sky

- Scutum-Centaurus, Carina-Sagittarius, Norma, and Perseus spiral arm tangencies in the southern visible sky from S.P.
- **WIM traced by [N II] emission arises from shock compression layers induced by the spiral density waves?**

Universal?



Summary

- 中性ガスだけでなく電離ガスの星間物質の進化過程を理解するためには、テラヘルツ帯の原子輝線の観測が重要.
- [N II] 輝線の電離ポテンシャル (**14.5 eV**) は水素より高いため, [C II]輝線と[N II]輝線の比較から、[C II]輝線がどれ位の割合で**電離した**ガスと**中性**のガスから来ているかわかる.
- そこで、南極からのヘテロダイン受信機カメラで[N II] 1.46 THz 輝線による銀河面サーベイを提案したい.
- [N II] 輝線による星形成領域の観測から、はたして数百パーセックのスケールでも[N II]輝線光度と星形成率 (**SFR**) に良い相関があるか、さらに、渦状腕の接線領域での視線速度の違いから、[N II]輝線によってトレースされる低密度のWIMが、渦状腕の密度波によって圧縮され、高密度ガスに変換されている様子を明らかにできるかもしれない.

GBT Diffuse Ionized Gas Survey

- GDIGS in the Galactic plane (Anderson et al. 2021)
 - 4 - 8 GHz radio recombination line (RRL) emission, $Hn\alpha$, $Hn\beta$, $Hn\gamma$ RRLs and molecular lines (ex. H_2CO , CH_3OH)
 - Survey range: $-5^\circ \leq l \leq 32.3^\circ$, $|b| \leq 0.5^\circ$
 - $dv=0.5$ km/s, spacial resolution $\sim 2.65'$ ($Hn\alpha$), $dT \sim 10$ mK

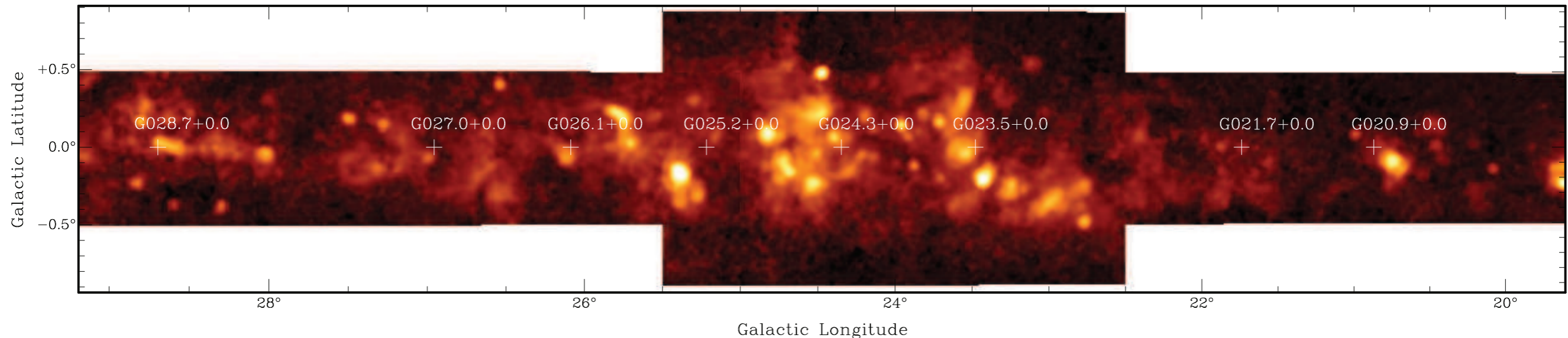
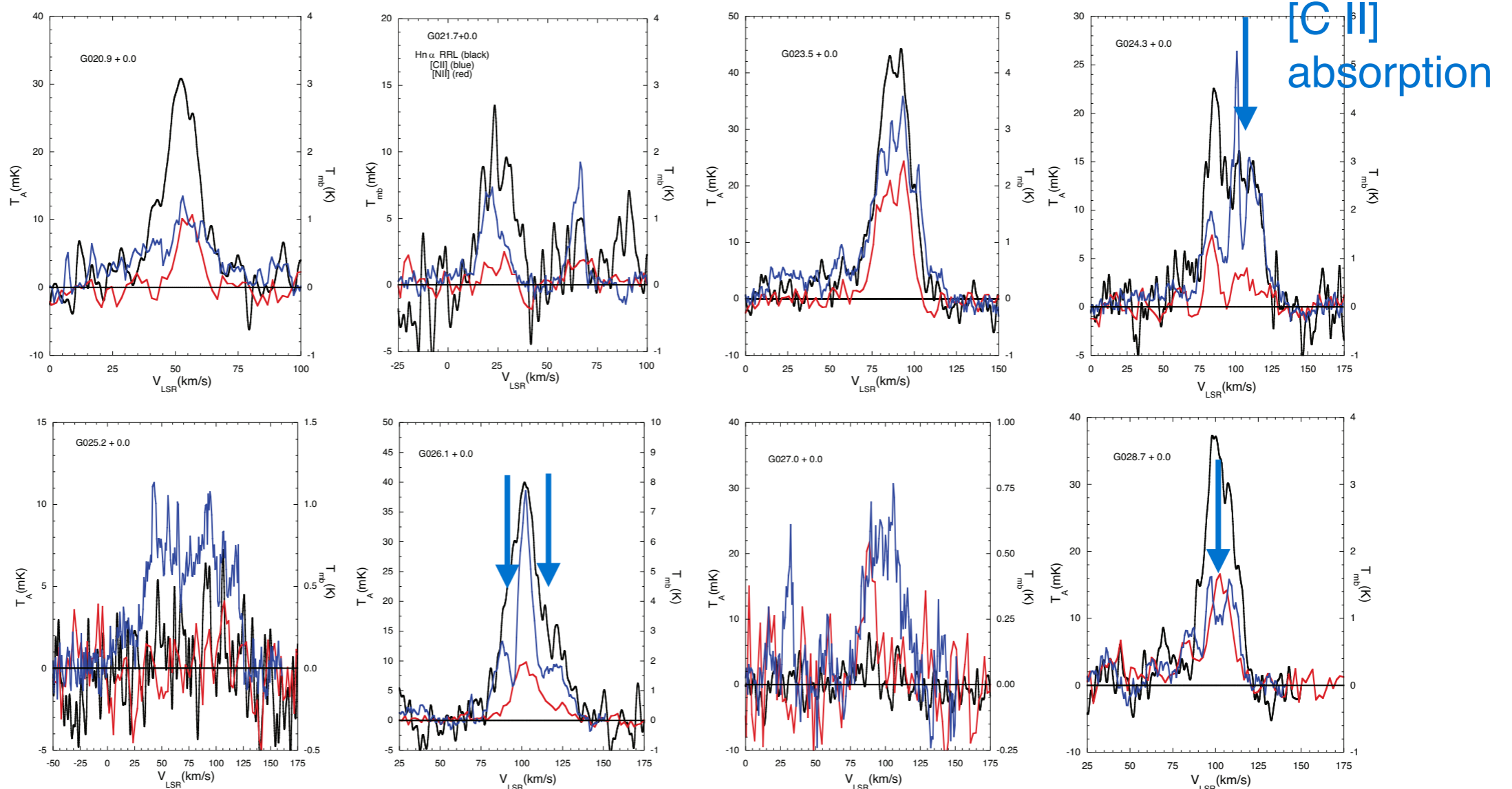


Fig. 1. The location of the eight lines of sight observed in $[N II]$, RRL, and $[C II]$, indicated + signs, superimposed on a moment 0 integrated intensity map of the $Hn\alpha$ RRL Green Bank Telescope Diffuse Ionized Gas Survey (GDIG; (Anderson et al. 2021)). None of the LOS intersect the locations of the brightest compact emission, although many intersect with larger ionized zones.

[N II], [C II] & RRL from D-WIM

- [N II] at 205 μm toward 8 LOS by SOFIA
 - $T = 3400 - 8500$ K, high electron density $n(e) = 10 - 35 \text{ cm}^{-3}$ comparing from Herschel PACS 122 μm (Langer et al. 2021)
 - Dense warm gas is from SFRs associated with molecular gas, contribute $> 50\%$ of the observed [C II]

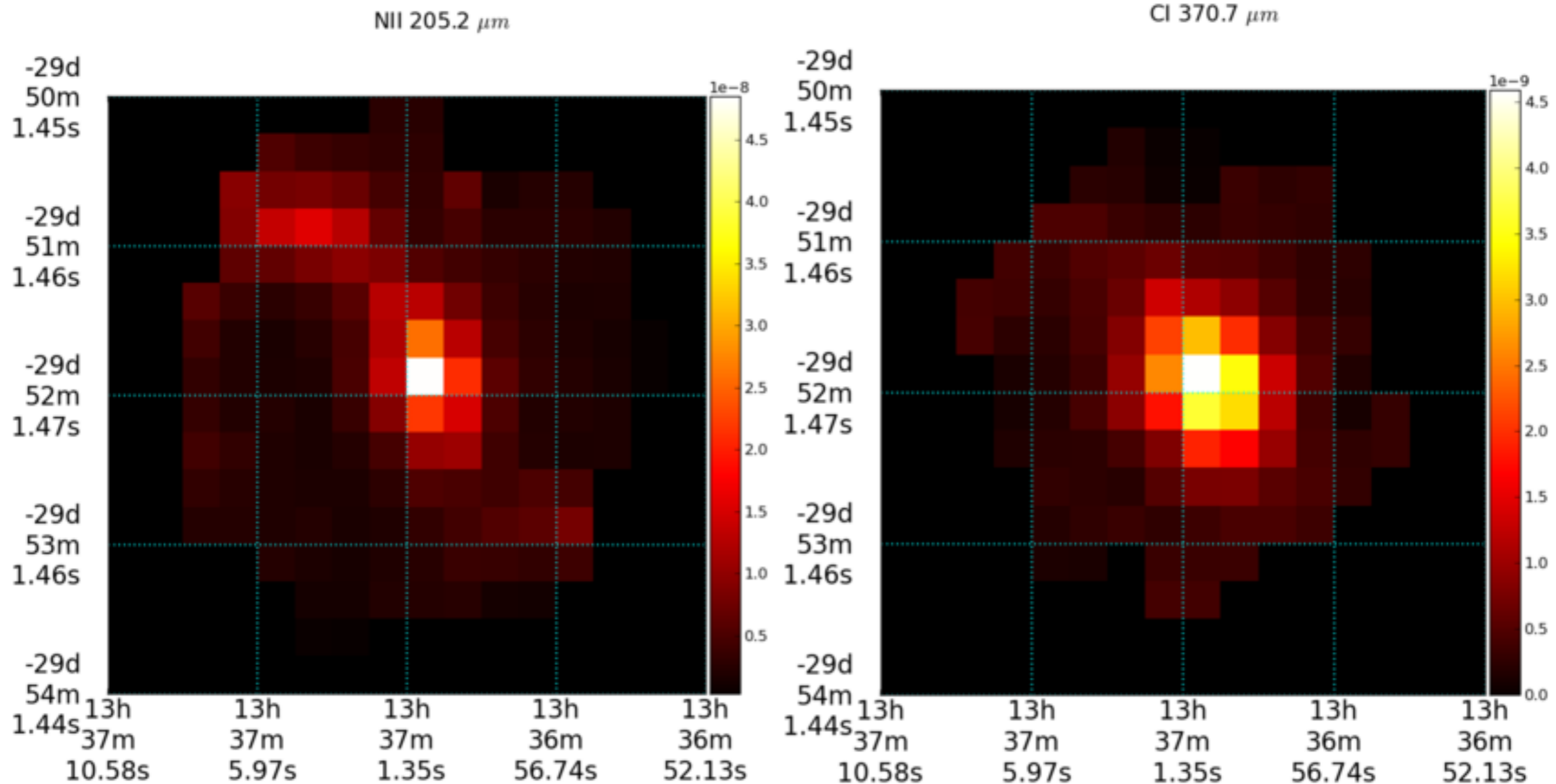
[N II]
[C II]
RRL



Spatially Resolved [N II] & [CI] 370 μ m

M83 @4.5Mpc

Wu et al. (2018)



The [NII]205 μ m is the most widely detected emission line from the observed region of M83. On the contrary, the spatial distribution of the [CI] 370 μ m emission appears more concentrated around the nuclear region.