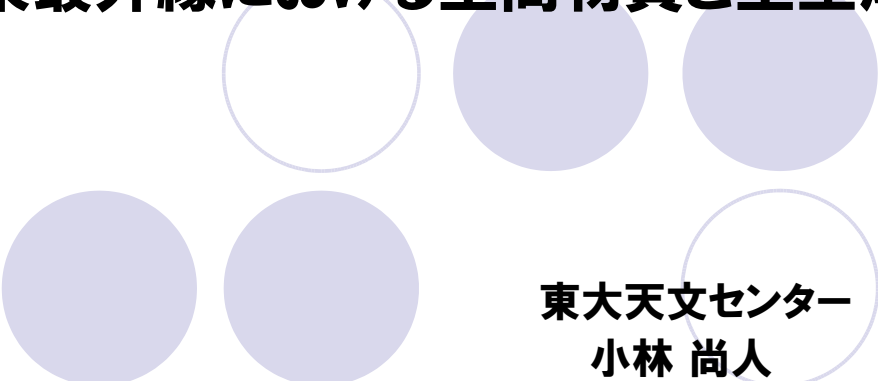


銀河系最外縁における星間物質と星生成



東大天文センター
小林 尚人
安井 千香子

共同研究者

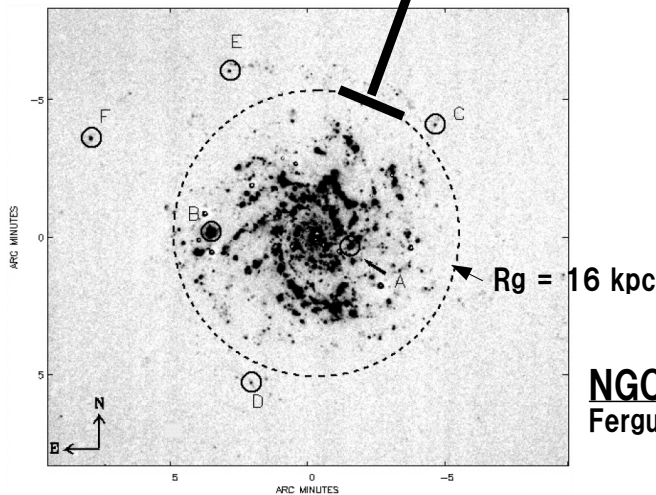
斎藤正雄 (ALMA : 国立天文台)、Alan Tokunaga (ハワイ大学)

内容



1. 銀河系最外縁部 **現在の理解**
2. Extreme Outer Galaxy $R_g > 18\text{kpc}$
研究の意義 **3つ**
3. Digel Cloud2 **best example**として
4. SNR起源の星生成について **how important?**
5. 今後の展望

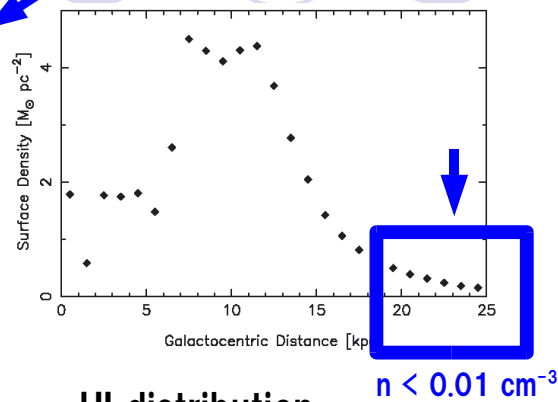
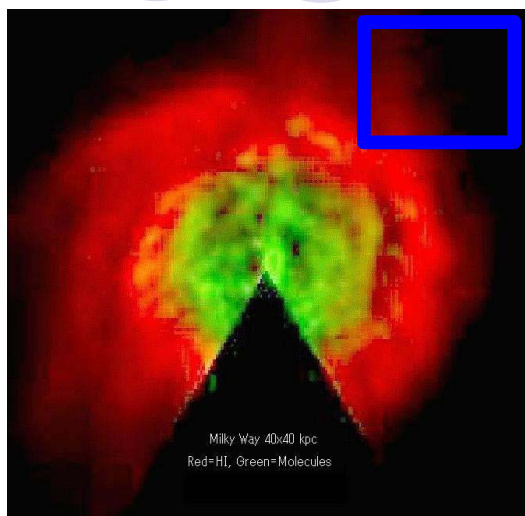
1. 銀河系最外縁部 系外銀河で見ると



NGC628 in H α
Ferguson et al. 1998

- 星の分布の限界 $R_g \sim 18-20$ kpc
Digel et al. 1984 and references therein

1. 銀河系最外縁部 銀河系外縁部の環境

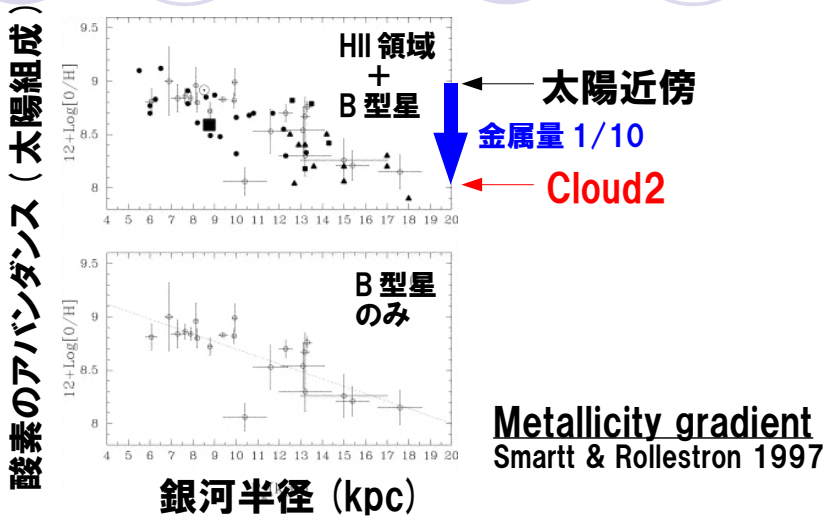


HI distribution
Nakanishi & Sofue
2003

$n < 0.01 \text{ cm}^{-3}$

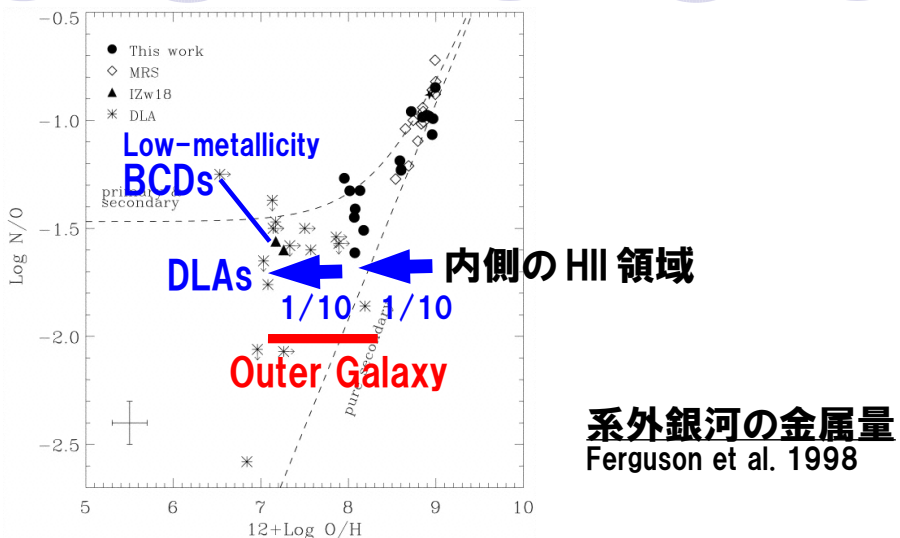
- 低密度、渦状腕による擾乱小 (or なし)
この点では”始源的”環境

1. 銀河系最外縁部 銀河系外縁部の金属量



- $R_g > 18$ kpc は、金属量が 1/10 solar
LMC/SMC など近傍 dlrr と同程度かそれ以下

1. 銀河系最外縁部 系外銀河との金属量の比較



- より銀河形成期の環境に近い??
「thick disk 形成期 (+halo 形成期)」の環境をシミュレートか

1. 銀河系最外縁部 最近の10年の進歩

■ B型星による分光距離の測定

- Smartt & Rolleston 1997 に集約

■ 電波・赤外線による星生成領域の探査

- IRAS ベース Wouterloot et al. 1990 etc.
- **Extreme Outer Galaxy $R_g > 18\text{kpc}$ の分子雲 (Digel Clouds) の探査**
- **Outer arm 付近 $15 < R_g < 18\text{kpc}$ の探査**

Kobayashi and Tokunaga 2000 (continued)

- 単発的な発見 e.g., Santos et al. 2000

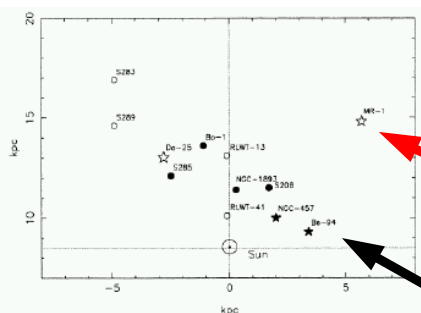
- **Outer arm 付近 $15 < R_g < 18\text{kpc}$ の探査**

現在もっとも comprehensive

北天 Snell et al. 2002 DRAO (HI) + FCRAO (CO), IRAS+2MASS ($K < 15$)

南天 Nakagawa et al. 2005 Nanten (CO)

1. 銀河系最外縁部 B型星の分布



B型星の分布
Smartt et al. 1996

Outer arm?
($D > 10\text{ kpc}$)

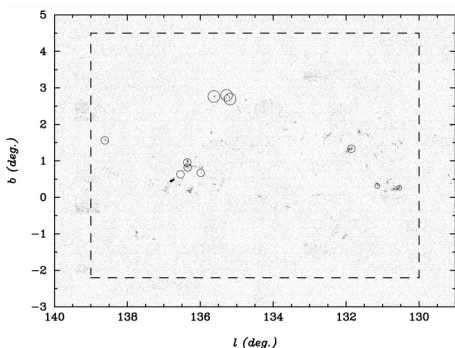
Perseus arm
($D \sim \text{few kpc}$)

- 現時点でもっとも確かな距離測定

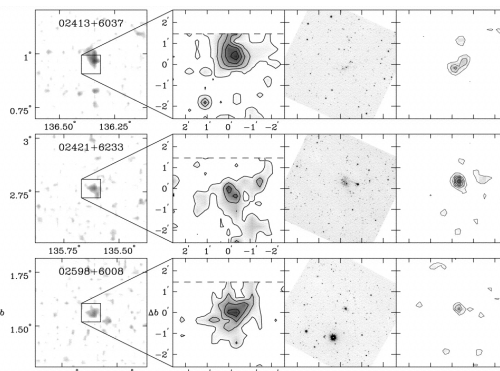
ただし、20% 程度の統計誤差

(星のモデルによるシステムティックな誤差はもっと大きい)

1. 銀河系最外縁部 系統的な星生成領域探査 電波ベース(北天)



FCRAO CO (1-0)



12CO

13CO

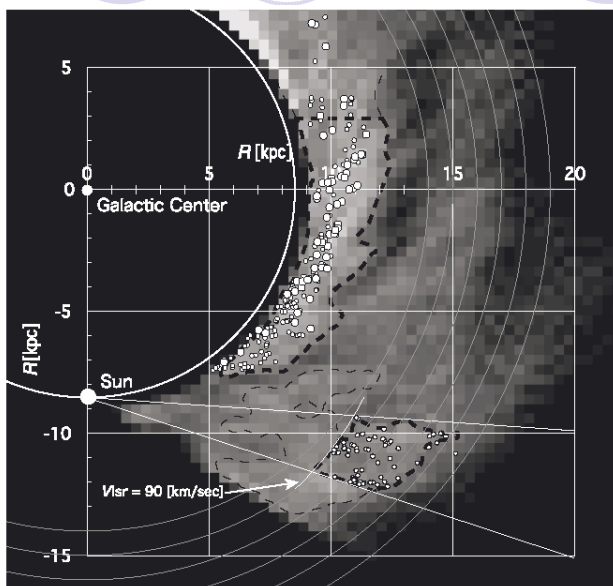
K-band

星生成領域探査

Snell et al. 2002

- Outer arm 付近 ($15 < R_g < 18 \text{ kpc}$) では
分子雲からの星生成効率は通常 ($\sim 10\%$)
- 分子雲自体の生成効率が悪いだけ

1. 銀河系最外縁部 系統的な分子雲探査 電波ベース(南天)



南天の外縁部分子雲探査
Nakagawa et al. 2005

- 低金属量下の分子雲のパラメータ

2. Extreme Outer Galaxy ($R_g > 18 \text{ kpc}$) 研究の意義

■ Thin disk の外側の構造への知見

- Outer arm 以遠

■ 星生成研究の理想的実験場

- Weak (or No?) perturbation from spiral arms
- SNR triggered star formation
- No complexity in space and time

■ 銀河形成期の星生成への示唆

- 低金属量、低密度環境
- 矮小銀河や高赤方偏移 DLA での星生成
- ダークマター dominant な環境での星生成？

3. Cloud 2 best example として 歴史的経緯

■ Digel による distant HI 雲候補の

CO follow-up で発見 Digel et al. 1994

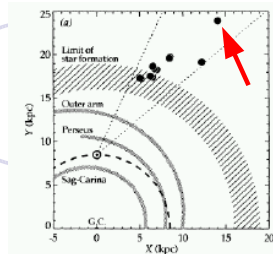
- 8つの Clouds のうちのひとつ GMC $M(\text{CO}) \sim 4 \times 10^4 M_{\text{solar}}$
- $R_g \sim 20 \text{ kpc}$ (Smartt et al. 1996, Kobayashi and Tokunaga 2000)
- 金属量 $\sim 1/5 \text{ solar}$ (SMC 相当)

■ 星生成の発見 Kobayashi & Tokunaga 2000

- 赤外線天体 IRS1-7

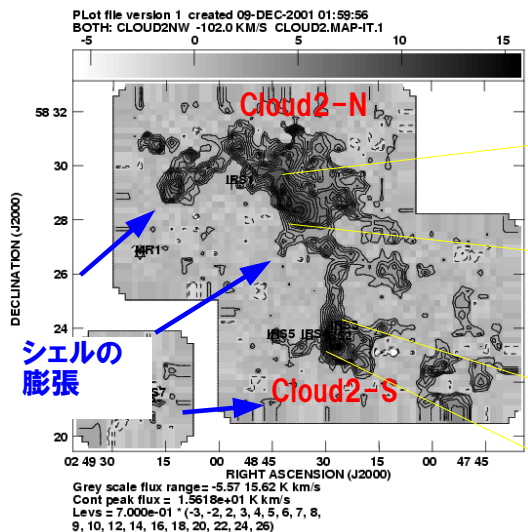
■ 付随していた巨大な SNR の発見 Stil & Irwin 2001

- $r = 180 \text{ pc}$ (通常 $r < 100 \text{ pc}$), ほぼ完全なかたち
- 年齢 4.3 Myr (通常 1 Myr)
- Cloud 2 が HI Shell に付随
→ SNR による分子雲形成、および、星生成

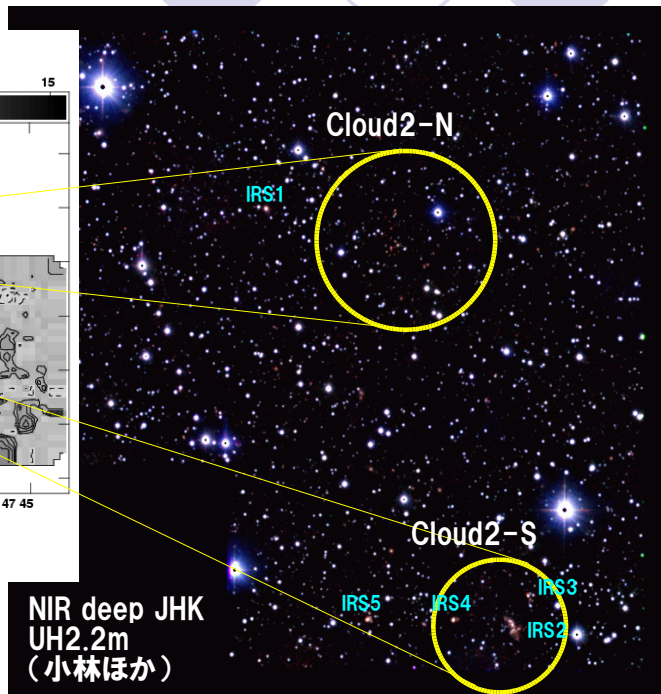


3. Cloud2

SNR Shell による分子雲形成 → 星生成

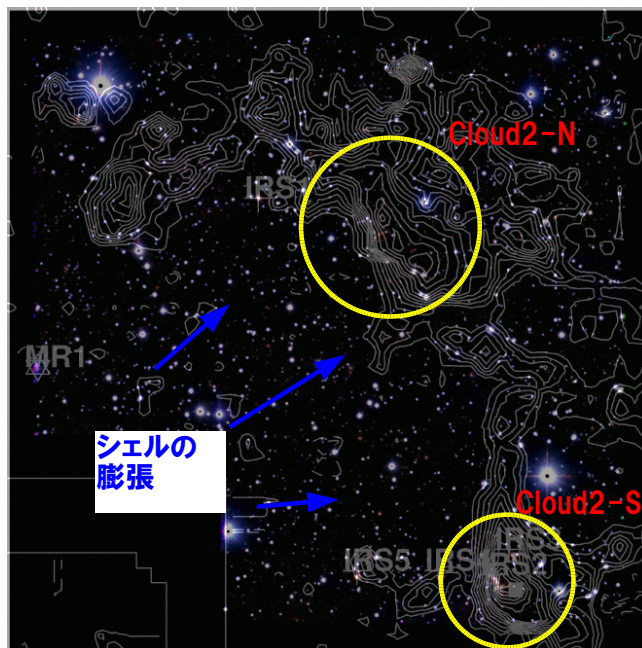


^{12}CO
野辺山 45m (斎藤ほか)



3. Cloud2

SNR Shell による分子雲形成 → 星生成



NIR deep JHK
UH2.2m
(小林ほか)

^{12}CO
野辺山 45m
(斎藤ほか)

4. SNR 起源の星生成について

■ Cloud2 はもともと clear-cut な例

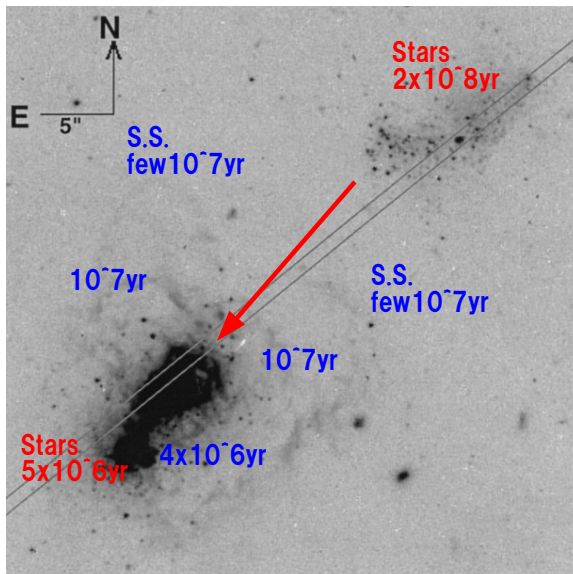
- SN-triggered star formation の最初の直接的な証拠？

■ SNR 起源の星生成の重要性

- 銀河形成期の主要な星生成トリガー
- 現在の銀河スケールの星生成は2元的 Elmegreen 2002
Turbulence compression \leftrightarrow expanding shell collapse
- dwarf 銀河(とくに BCD: Blue Compact Dwarfs)では dominant な星生成の原因？ IZw18 の例
- spiral 銀河でも実はそうか？ M33 の例

4. SNR 起源の星生成について

BCD (Blue Compact Dwarf) の場合



IZw18 における SNR シェル

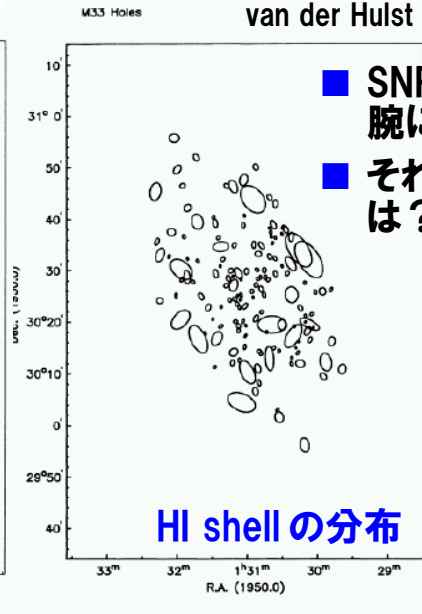
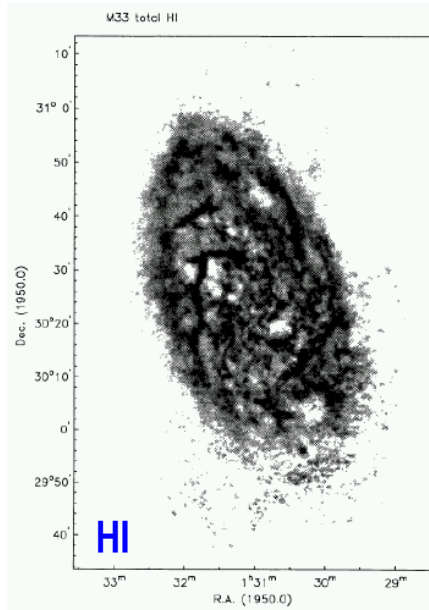
Dufour et al. 1996

HST F450W+F555W+F675W

- Super shells ($>$ few kpc)
- 連続した SNR による爆発的星生成
- シェル dominant な構造
- なお、この天体は低金属量 (1/100 solar) で、銀河系最外縁の環境に類似？

4. SNR 起源の星生成について Disk galaxy の場合

M33 渦状腕における
SNR シェル
van der Hulst 1996



- SNR シェルが渦状腕に多数
- それによる星生成は？

5. 今後の展望(1)

■ 外縁部星生成領域のサーベイ

- Outer arm 付近 ($15 < R_g < 18$ kpc) の分子雲サーベイ
Snell et al., Nakagawa et al. の赤外線 follow-up
- 新たな Extreme Outer Galaxy ($R_g > 18$ kpc) の
高感度分子雲サーベイができないか？
今は古い Digel 分子雲サーベイの赤外線 follow-up を
われわれのグループがすすめているのみ
→ Cloud2 以外のいくつかの雲でも
SNR 起源の分子雲 / 星生成の兆候あり

5. 今後の展望(2)

■ 外縁部星生成領域の金属量の測定

- 可視分光による手法 (HII 領域、星) が広く使われてきた
- 中間／遠赤外の原子禁制輝線を使う手法 (HII 領域)
[OIII] 52.88um, [NIII] 57um, [SIII] 19um 他多数
→ Spitzer, SPICA 等に期待 //

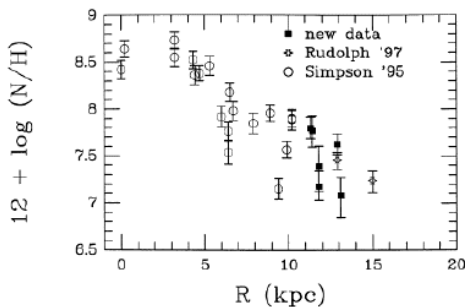


Figure 1. Nitrogen abundances versus galactocentric distances.

KAO による
abundance curve
Fich et al. 1999

5. 今後の展望(3)

■ 低金属量下のIMF

- 近赤外による深撮像、分光など多岐にわたる観測
- 理論の重要性

太陽 metallicity 下の星生成理論

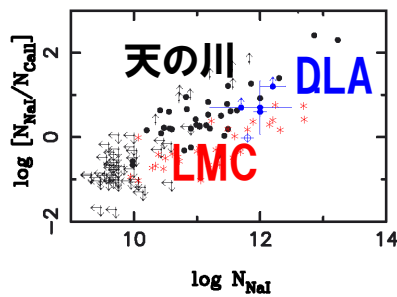


ゼロ metallicity 下の星生成理論

5. 今後の展望(4)

■ 低金属量下の物理

- H_2/CO ratio (e.g., Nakagawa et al. 2005)
- ダストの性質、ダスト形成、ダストディスク形成
形成中の銀河でのダスト生成への示唆



High-z DLA における
ダスト吸着
Kondo et al. 2006