

初代星・初代銀河研究会 @ 吳  
2018年 2月 10日(土)

# 銀河間潮汐相互作用が誘発する 大質量星形成 1: 大小マゼラン雲

---

柘植紀節, 佐野栄俊, 山本宏昭, 田村陽一, 立原研悟, 井上剛志,  
福井康雄 (名古屋大学), 戸次賢治 (ICRAR/西オーストラリア大学)

# 大質量星の重要性

## 大質量星 (質量 $20 M_{\odot}$ 以上の星)

大質量星は星風・紫外線放射・超新星爆発などを通して星間物質に大きな影響を与える

**銀河の物質進化・宇宙の形成史の理解  
において非常に重要である。**

## 大質量星形成メカニズムが未解明

短時間に非常に多くのガスを集めめる必要がある

$\sim 10^{-4}\text{--}10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$  > (Wolfire & Cassinelli 1987)

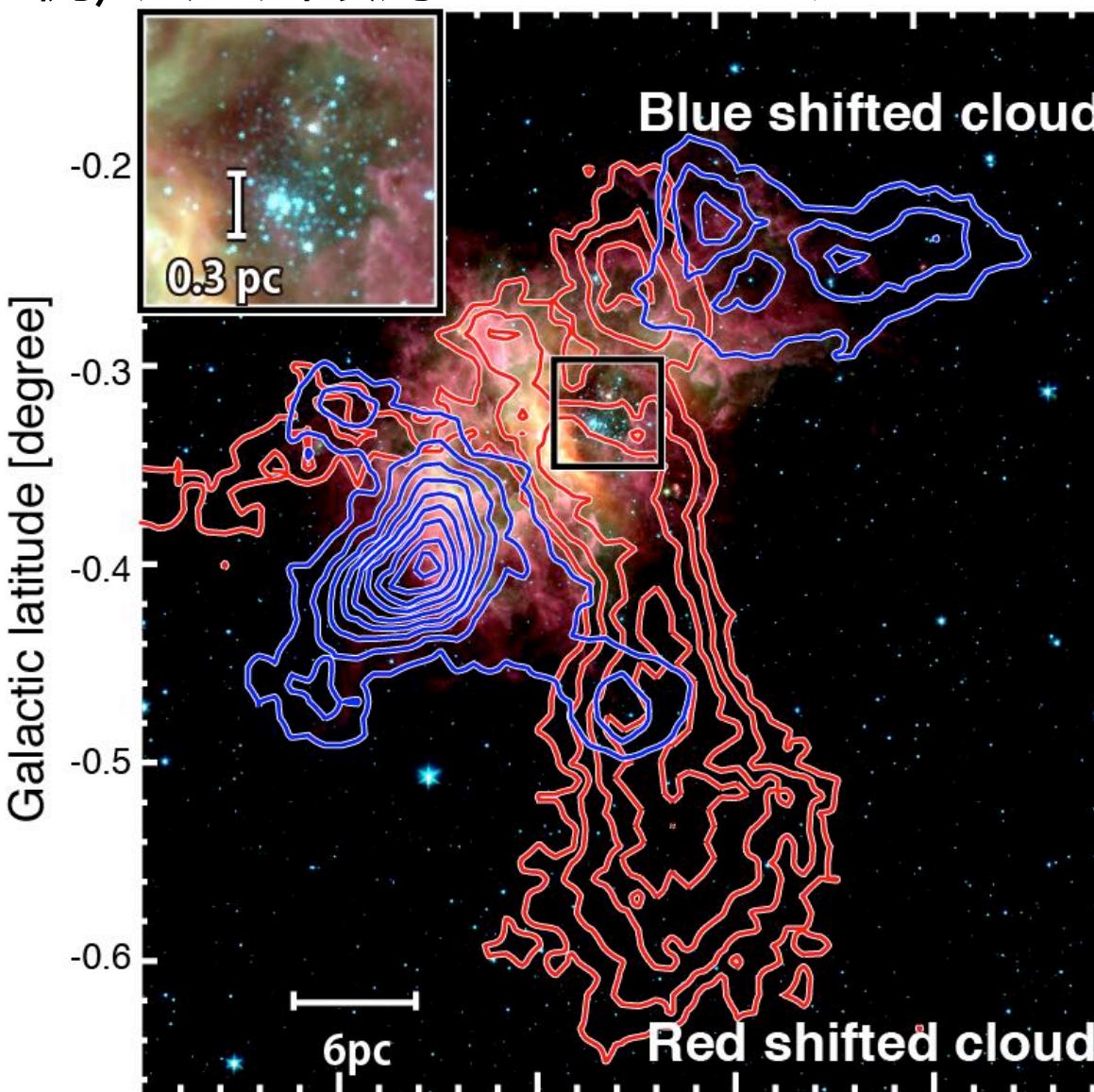
太陽質量程度の星の場合は  $\sim 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$  (自己重力による)

**効率の良い機構が必要**

可能性の1つとして、ガスの超音速衝突によるガスの強い圧縮とそれに伴う磁場の增幅や乱流の励起が考えられている。  
(井上 福井 2013)

# ガス雲同士の衝突による大質量星形成の可能性

例) 天の川銀河のスーパースタークラスター: Westerlund 2



巨大星団は分子ガス雲同士の衝突によって形成されることが観測的に理解されつつある。

## # 観測例

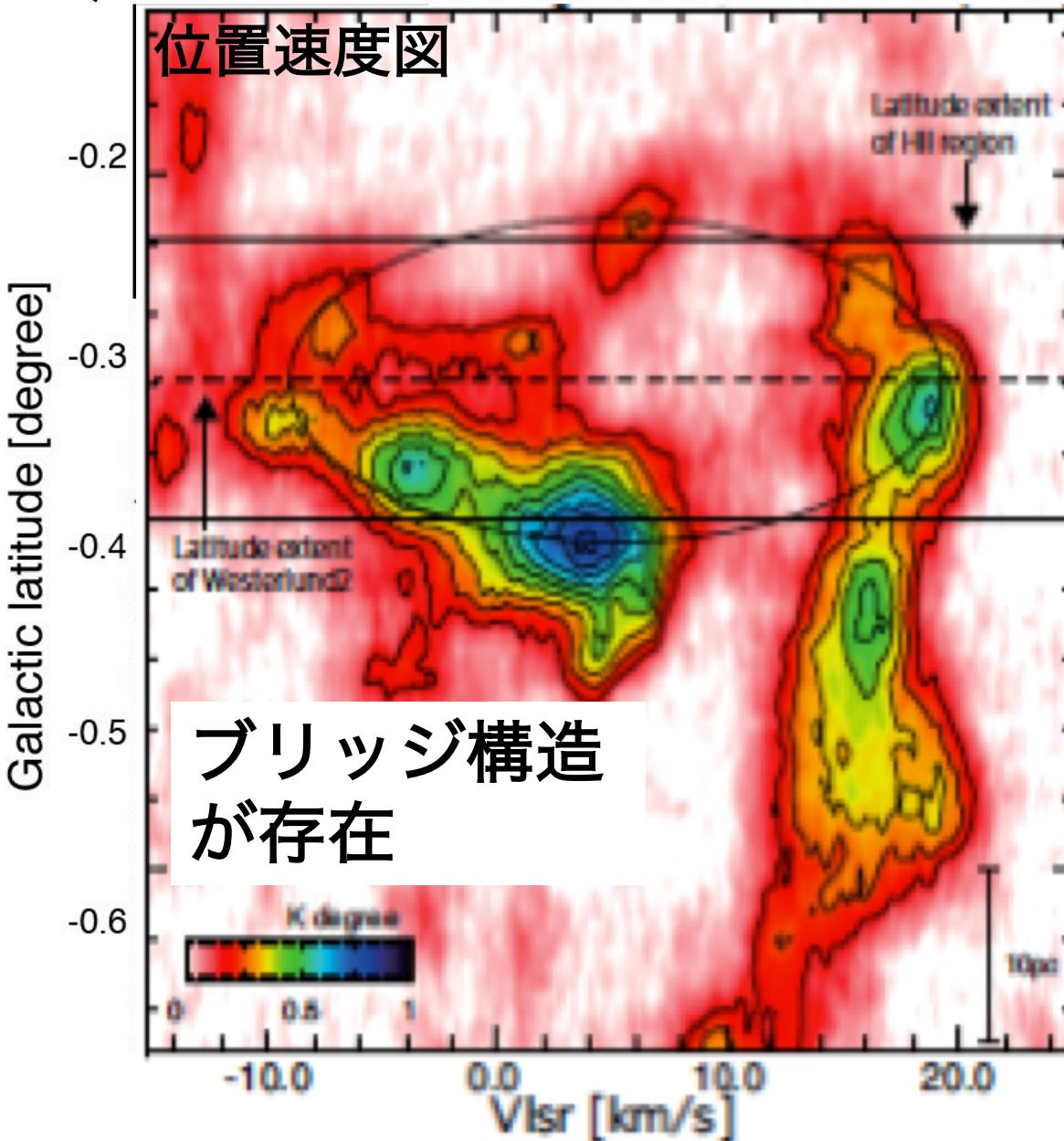
- Westerlund2
- RCW38
- NGC 3603

星団質量  
 $\sim 10^4 M_{\odot}$  程度.

Furukawa et al. 2009

# ガス雲同士の衝突による大質量星形成の可能性

例) 天の川銀河のスーパースタークラスター: Westerlund 2



巨大星団は分子ガス雲同士の衝突によって形成されることが観測的に理解されつつある。

# 観測例

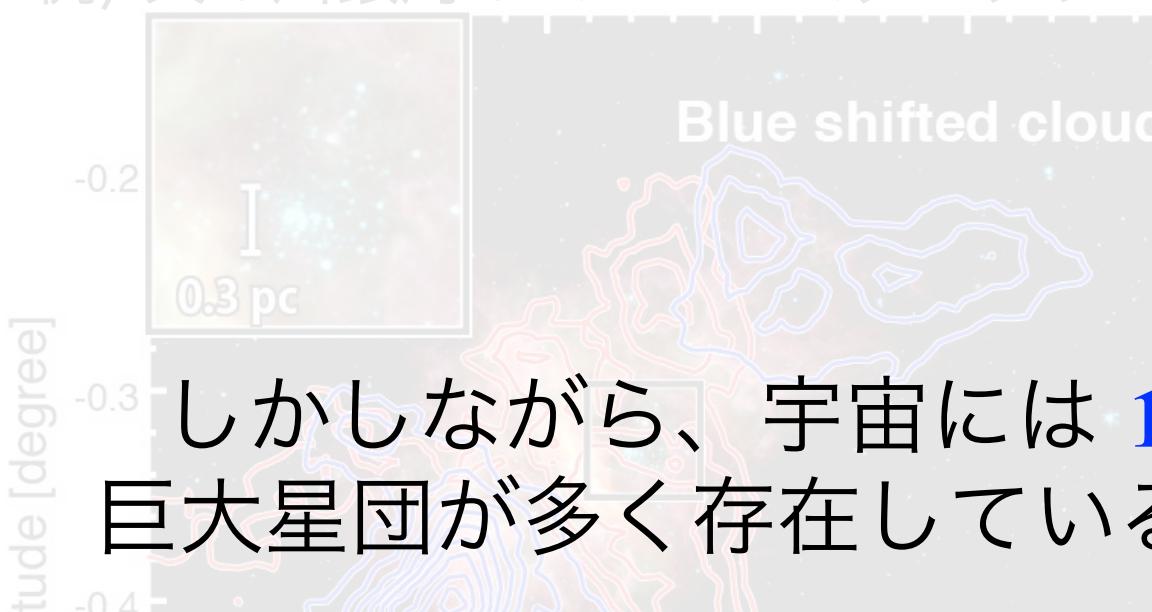
- Westerlund2
- RCW38
- NGC 3603

星団質量  
 $\sim 10^4 M_{\odot}$  程度。

Furukawa et al. 2009

# ガス雲同士の衝突による大質量星形成の可能性

例) 天の川銀河のスーパースタークラスター: Westerlund 2



しかしながら、宇宙には  $10^5 M_{\odot}$  を超える巨大星団が多く存在している (e.g., 球状星団).

巨大星団は分子ガス雲同士の衝突によって形成されることが観測的に理解されつつある。

• Westerlund 2

本研究の目的

$10^5 M_{\odot}$  を超える巨大星団の形成機構の解明



星団質量  
 $10^4 M_{\odot}$  程度.

2 速度成分のガス雲が相補的な空間分布を示す

# 大マゼラン雲 (LMC)

距離: ~ 50 kpc

高空間分解能での観測が可能



# 大マゼラン雲 (LMC)

距離: ~ 50 kpc

高空間分解能での観測が可能

R136



# RMC 136 (R136) スーパースタークラスター



- 年齢が若い :  $\sim 1.5 \text{ Myr}$
- 局部銀河群で最大の星団 :  $\sim 10^5 M_{\odot}$
- 超大質量の星が存在  
 $265 M_{\odot}, 195 M_{\odot}, 175 M_{\odot}, 135 M_{\odot}$  の星が存在 (Crowther et al. 2010)

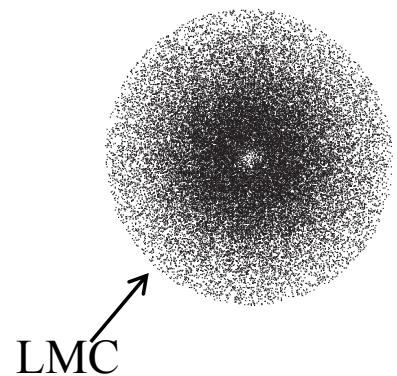
# RMC 136 (R136) スーパースタークラスター



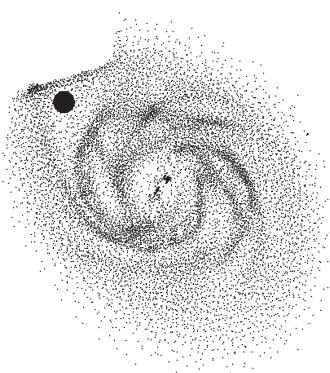
- 年齢が若い :  $\sim 1.5 \text{ Myr}$
- 局部銀河群で最大の星団 :  $\sim 10^5 M_{\odot}$
- 超大質量の星が存在  
 $265 M_{\odot}, 195 M_{\odot}, 175 M_{\odot}, 135 M_{\odot}$  の星が存在 (Crowther et al. 2010)

# 銀河間潮汐相互作用による巨大星団形成の可能性

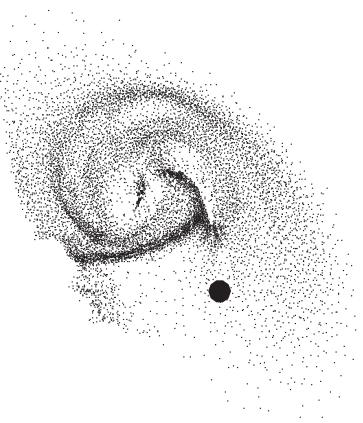
-0.82 Gyr SMC



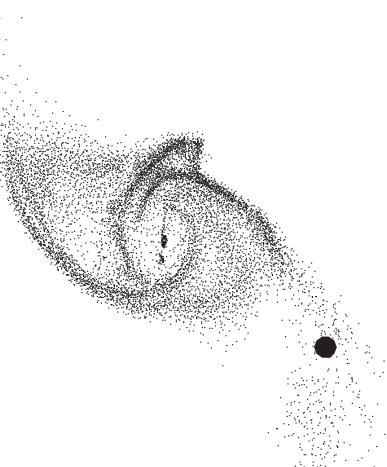
-0.27 Gyr



-0.14 Gyr



0



Bekki & Chiba 2007

Fujimoto & Noguchi 1990  
潮汐相互作用による  
巨大星団形成を示唆.

- ~ 0.2 Gyr 前 LMC と SMC が近接遭遇
- LMC のガスの攪乱 + SMC からのガス流入

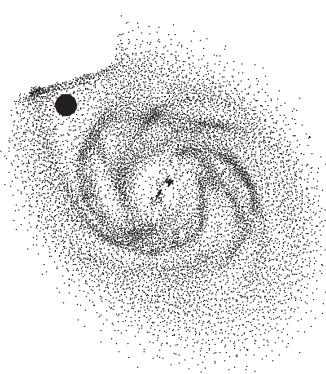
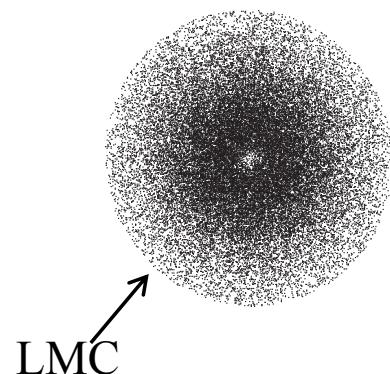
↓  
ガス衝突による  
星団形成の可能性

Bekki & Chiba 2007 に  
よってサポートされる.

# 銀河間潮汐相互作用による巨大星団形成の可能性

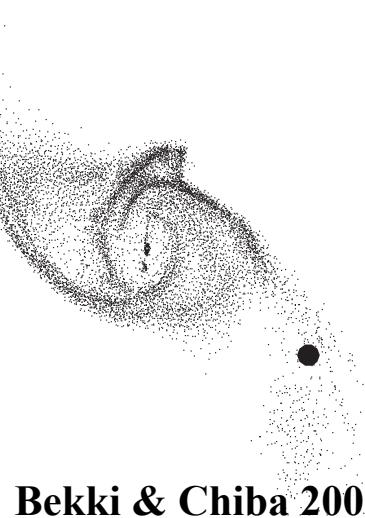
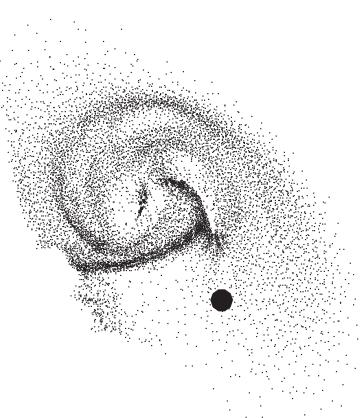
-0.82 Gyr SMC

-0.27 Gyr



-0.14 Gyr

0



Bekki & Chiba 2007

Fujimoto & Noguchi 1990  
潮汐相互作用による  
巨大星団形成を示唆.

- ~0.2 Gyr 前 LMC と SMC が近接遭遇
- LMC のガスの攪乱 + SMC からのガス流入

↓  
ガス衝突による  
星団形成の可能性

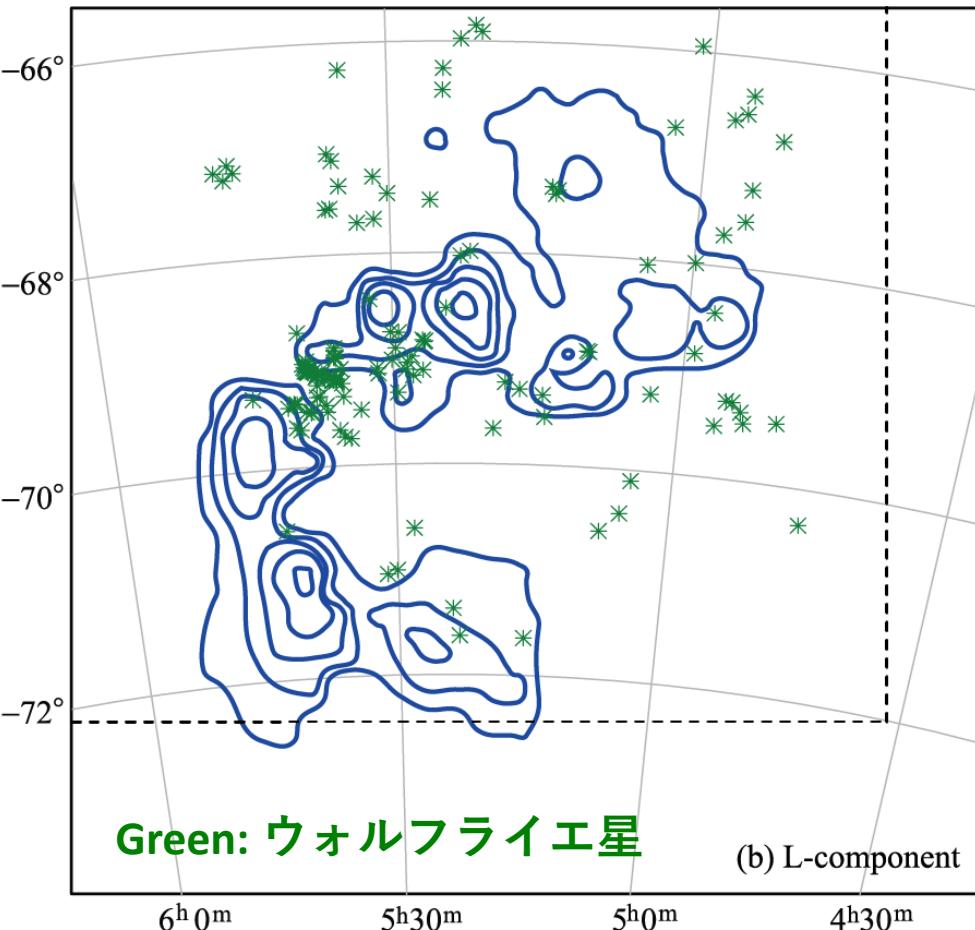
Bekki & Chiba 2007 に  
よってサポートされる.

数値計算の観測的検証は行われていなかった.

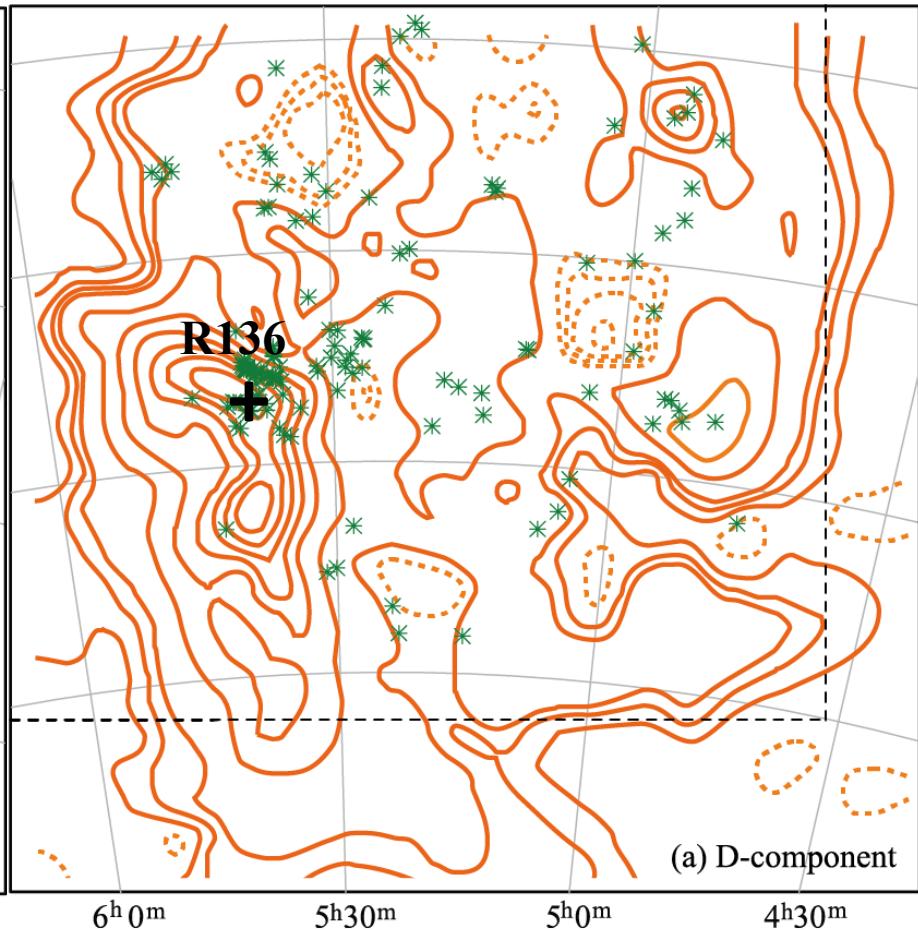
# 先行研究: 2つの速度成分の存在 (Luks & Rohlfs 1992)

- Parkes 望遠鏡による空間分解能  $\sim 230$  pc の HI 21cm の解析
- Disk 成分の他に、低速度の HI ガスが存在

**L-component**



**D-component**



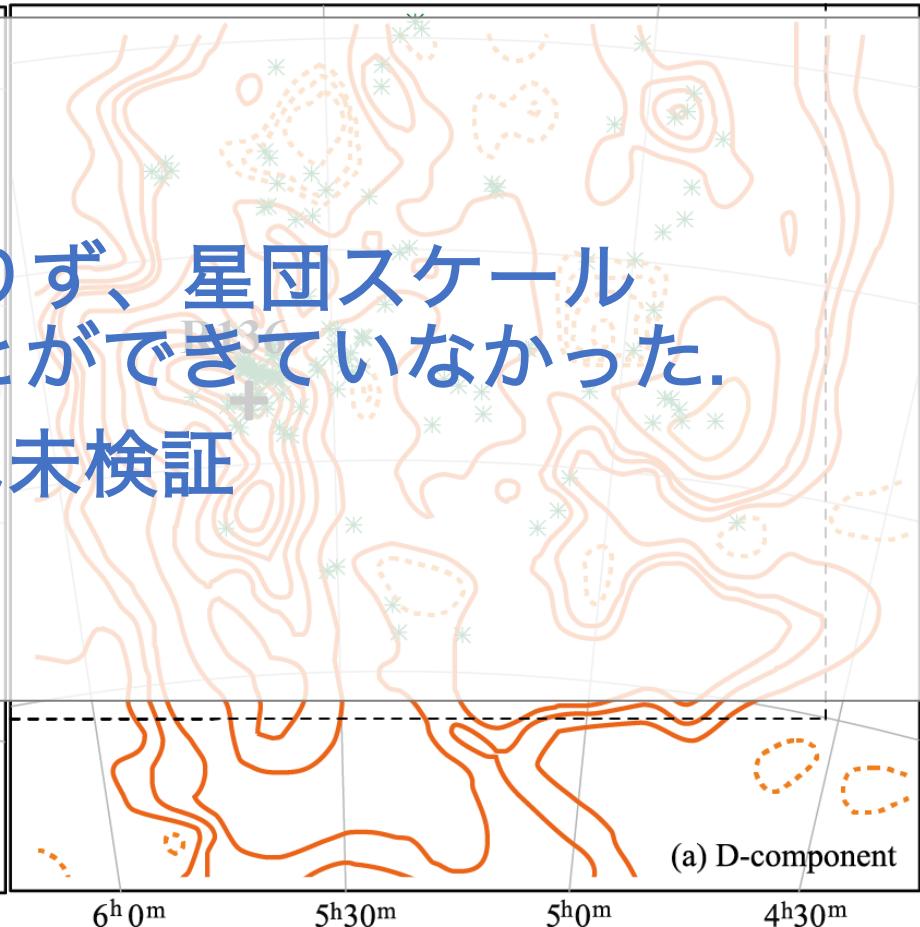
# 先行研究: 2つの速度成分の存在 (Luks & Rohlfs 1992)

- Parkes 望遠鏡による空間分解能  $\sim 230$  pc の HI 21cm の解析
- Disk 成分の他に、低速度の HI ガスが存在

**L-component**



**D-component**



- 空間分解能が 230 pc と足りらず、星団スケール (数10 pc) まで分解することができていなかった。
- 大質量星形成との関係性は未検証

Green: ウォルフライエ星

(b) L-component

(a) D-component

# 本研究の狙いと方法

LMC と SMC の潮汐相互作用によるガスの攪乱・流入・衝突が R136 の形成と関係していることを観測的に検証する。

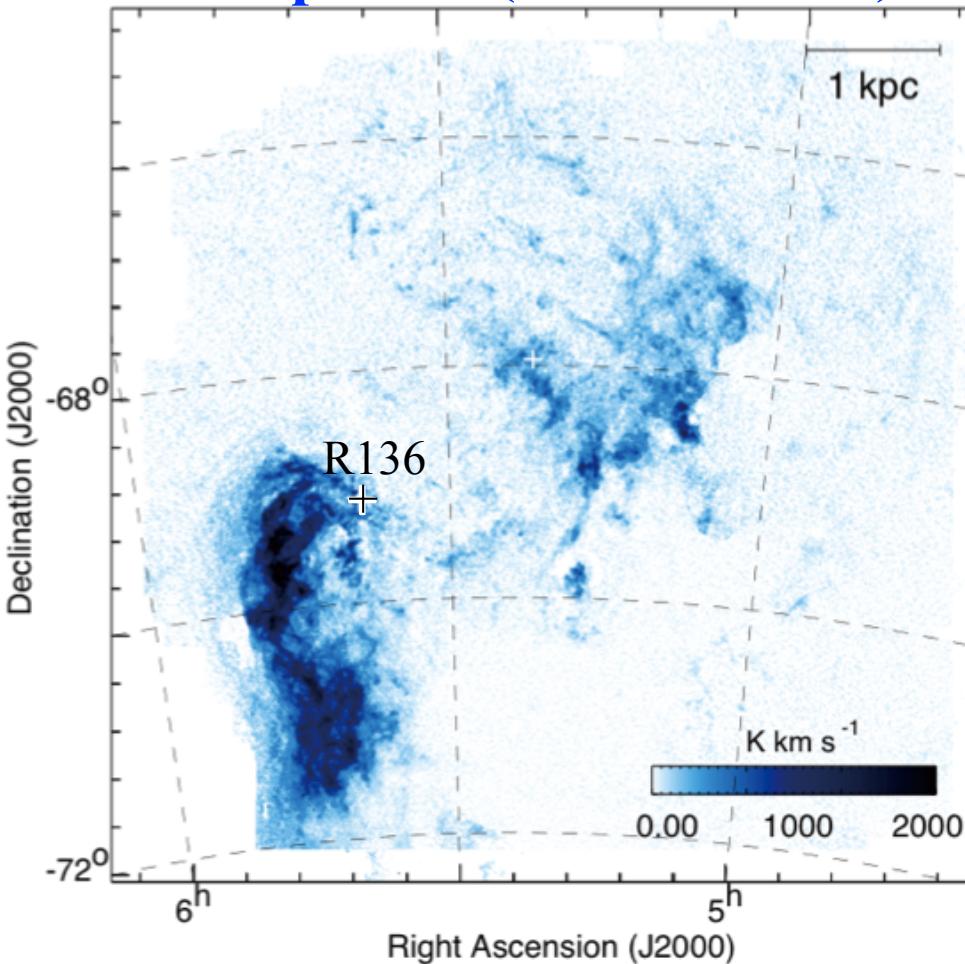
- LMC の水素ガスの空間分布, 速度構造を解明  
ガス衝突の有無を調べる
  - 2 つの速度成分の分離
  - それらの空間分布の比較
- 潮汐相互作用によるSMC からのガス流入の有無を検証
  - SMC の重元素量は LMC の 1/5 程度
  - ガス流入があった場合、観測的にも重元素量の違いが見えることが期待される

# 使用したアーカイブデータ

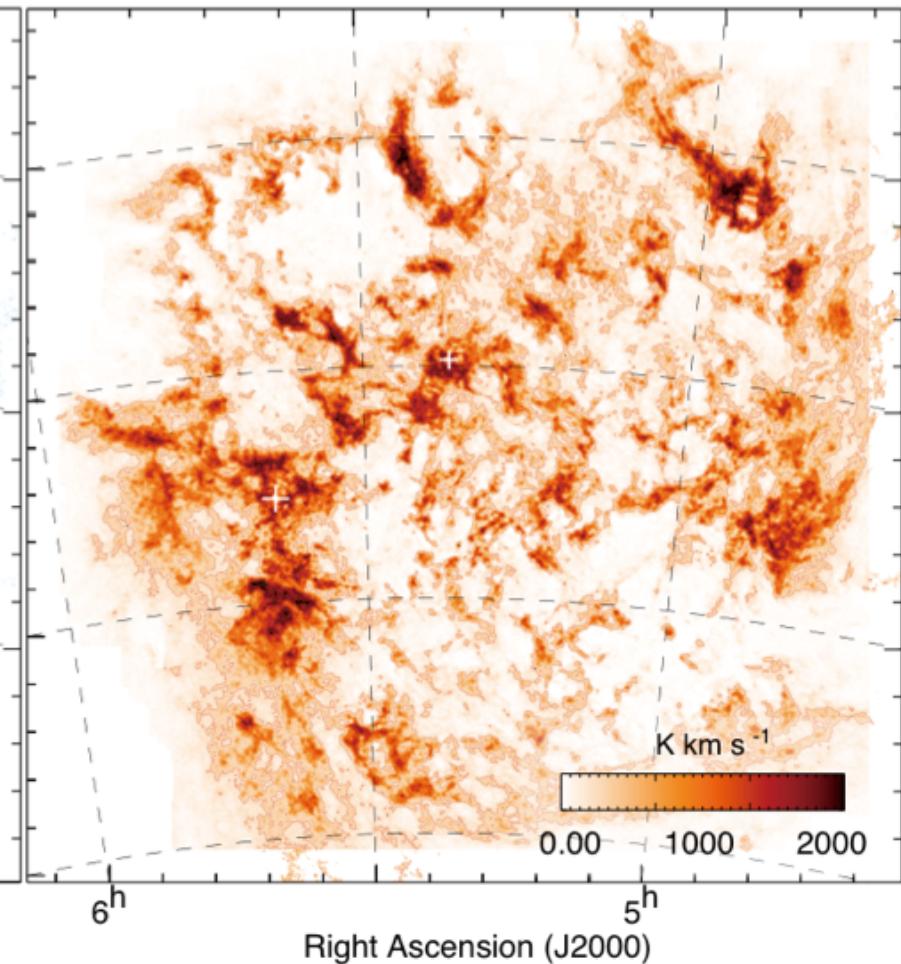
観測対象	$^{12}\text{CO}(J=1-0)$		HI 21cm	H $\alpha$	$\tau_{353}, T_d$
望遠鏡	NANTEN 2	Mopra	ATCA& Parkes	61 cm Curtis Schmidt	<i>Planck/IRAS</i>
角度分解能	2. $'$ 6	45 $''$	1. $'$ 0	$\sim 3''$ - 4 $''$	5 $'$
空間分解能	40 pc	10 pc	15 pc	0.7-1.0 pc	70 pc
速度分解能	0.65 km s $^{-1}$	0.53 km s $^{-1}$	1.649 km s $^{-1}$	-----	-----
論文	Fukui et al. 1999	Wong et al. 2011	Kim et al. 2003	MCEL; Smith & MCELS Team 1999	Planck Collaboration et al. 2014

# 結果: L-, D-components の空間分布

**L-component (-100 to -30 km/s)**



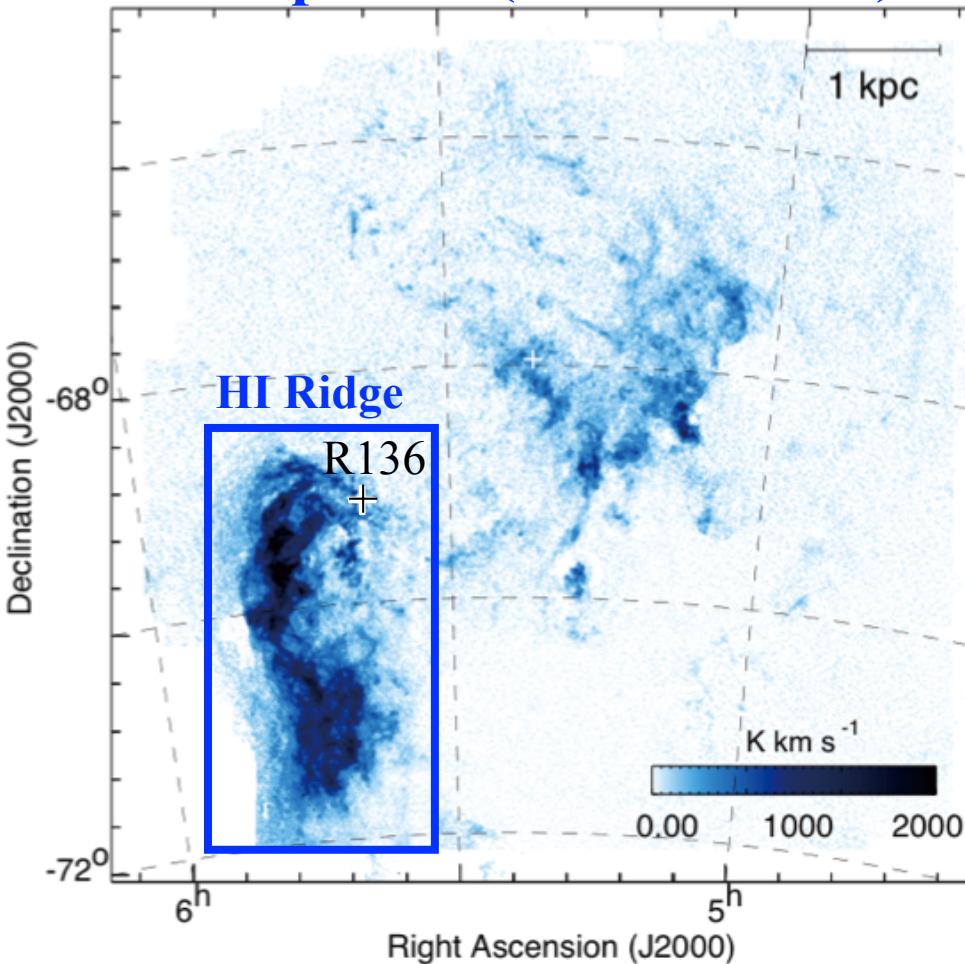
**D-component (-10 to +10 km/s)**



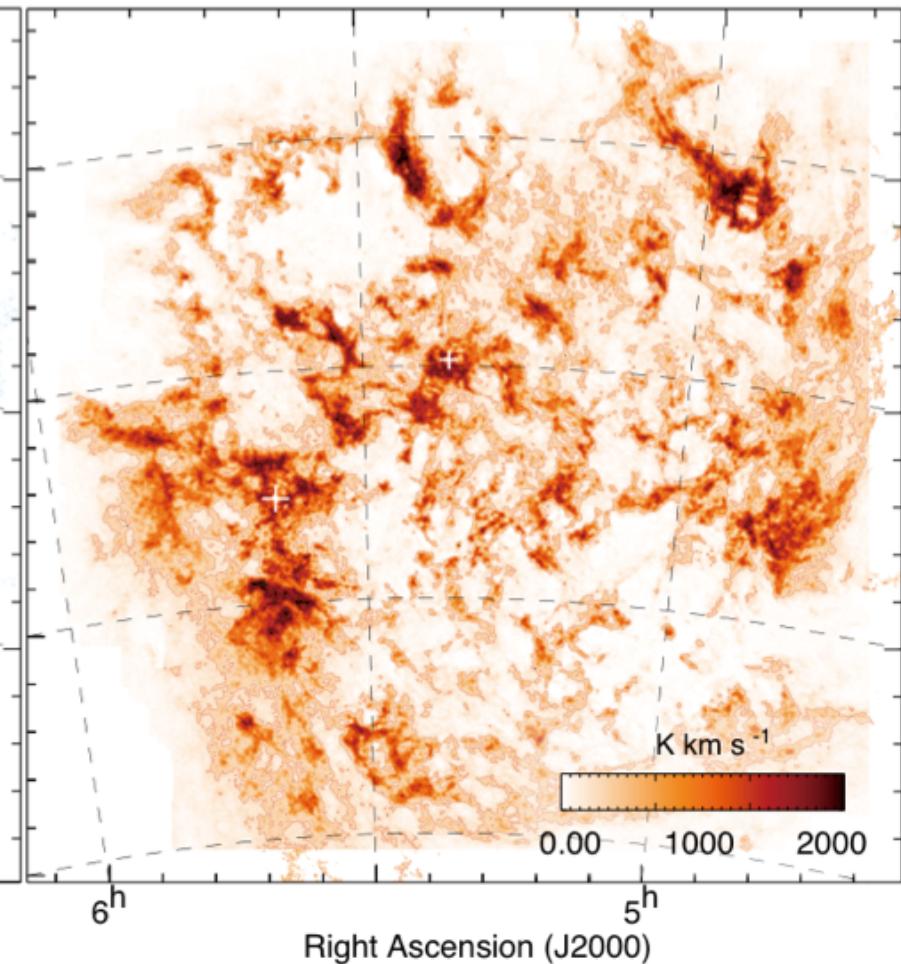
- L-component は南東に集中. 西部にも淡い成分が広がっている

# 結果: L-, D-components の空間分布

L-component (-100 to -30 km/s)

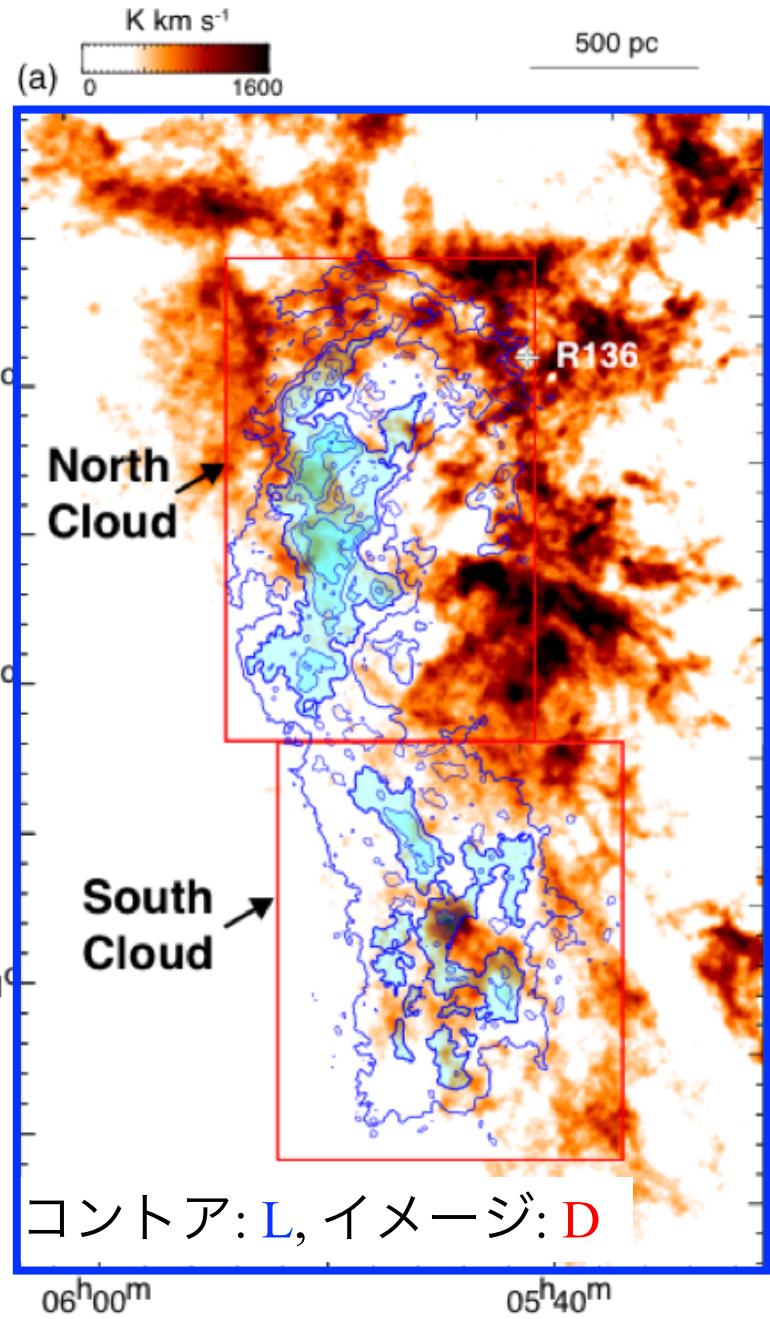


D-component (-10 to +10 km/s)



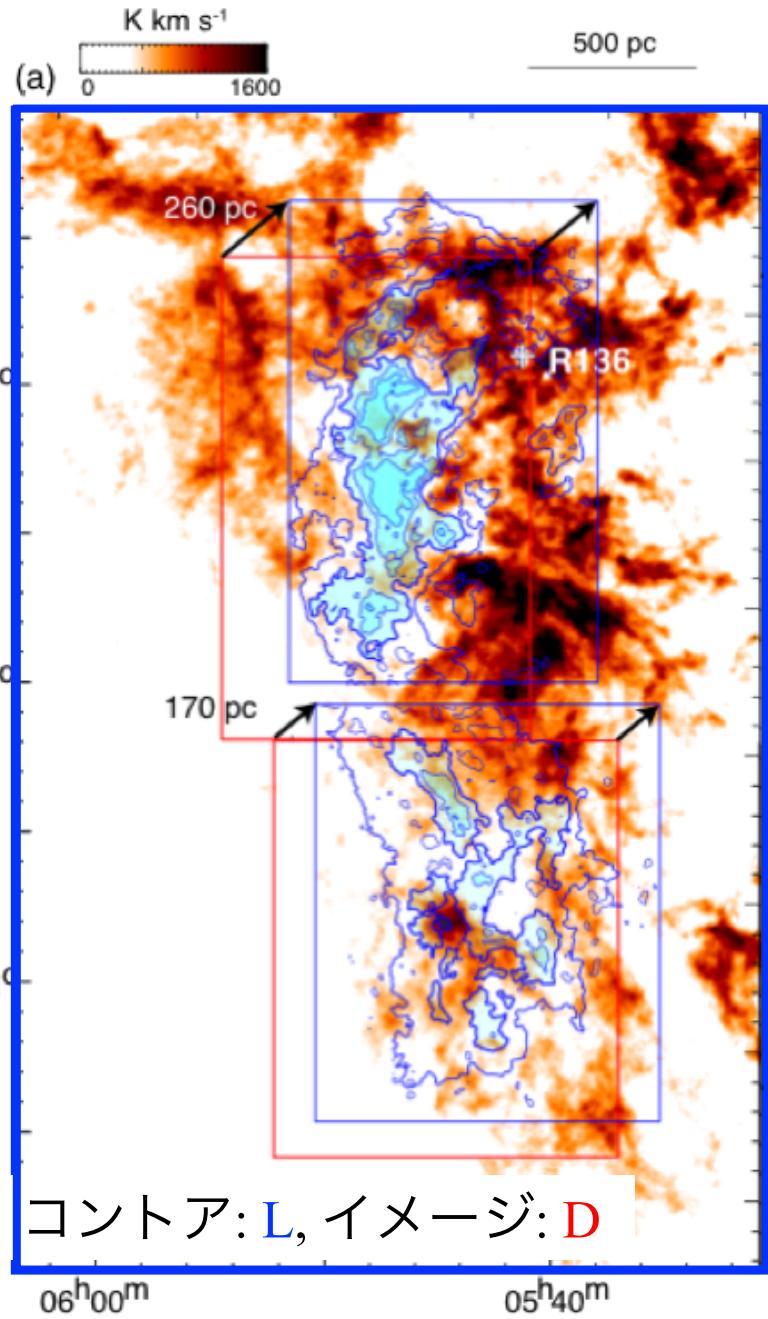
R136 が位置する南東部の HI Ridge 領域に着目した.

# 結果: L-, D-components の空間分布 (500pc scale)



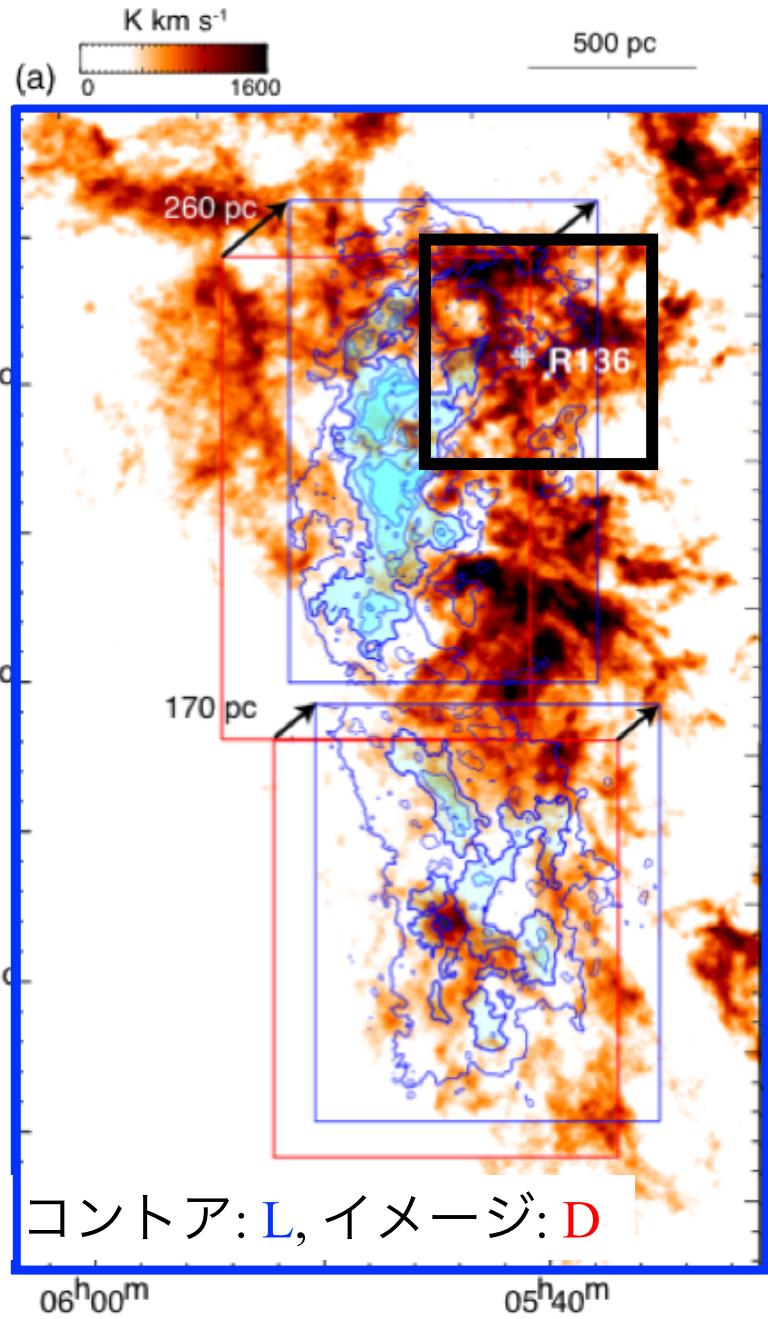
L と D が相補的な空間分布を示している。

# 結果: L-, D-components の空間分布 (500pc scale)



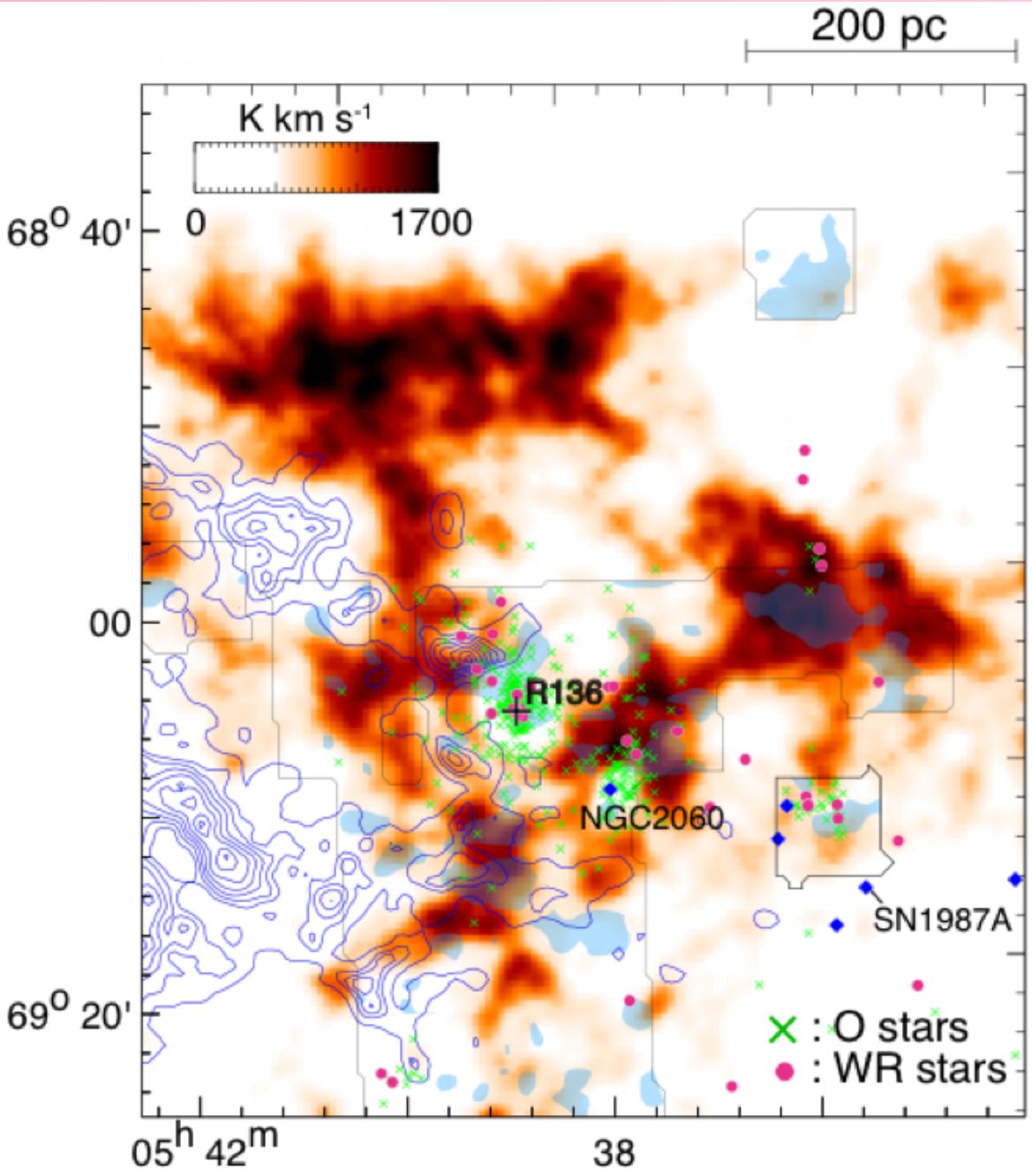
L と D が相補的な空間分布を示している。

# 結果: L-, D-components の空間分布 (500pc scale)



L と D が相補的な空間分布を示している。

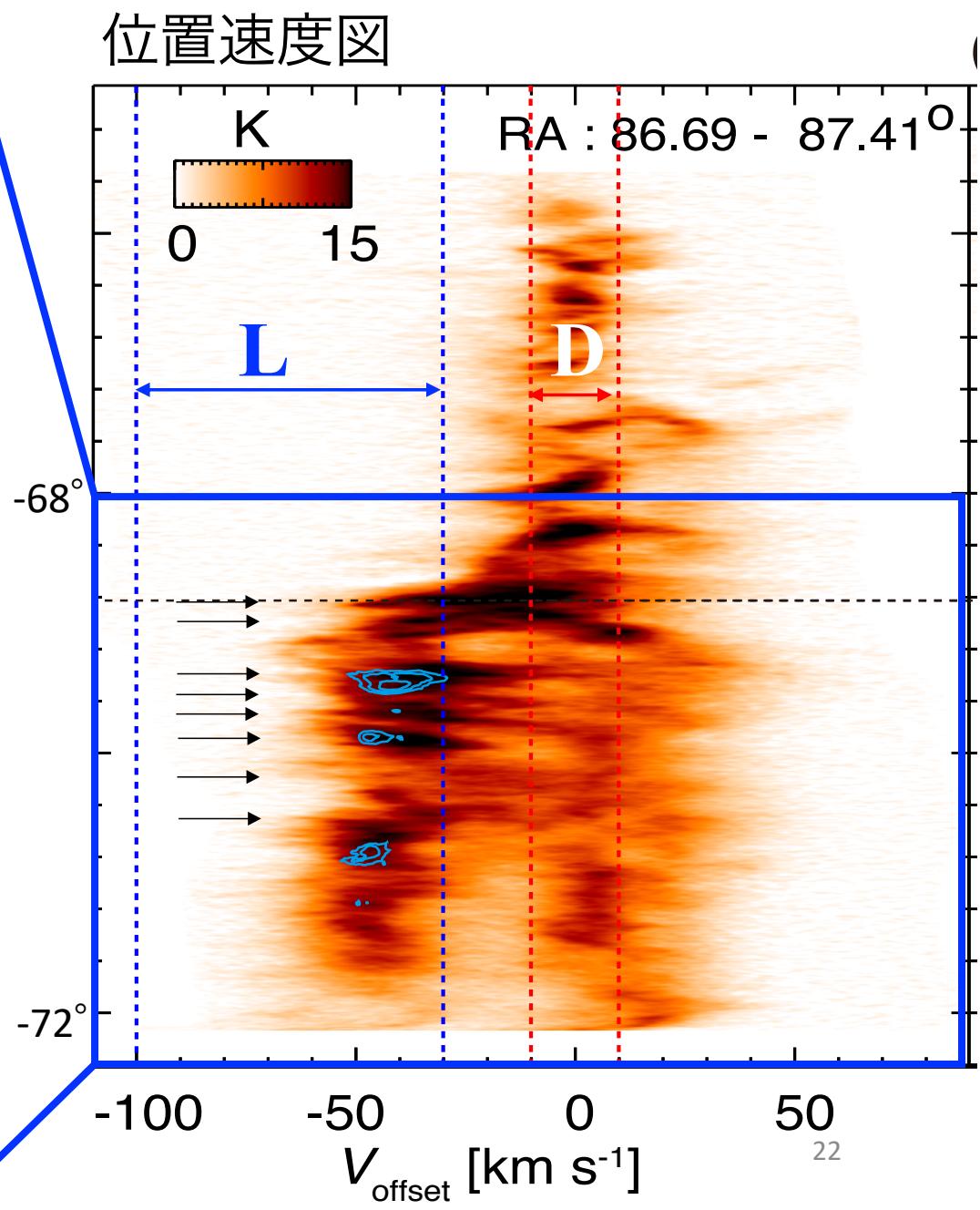
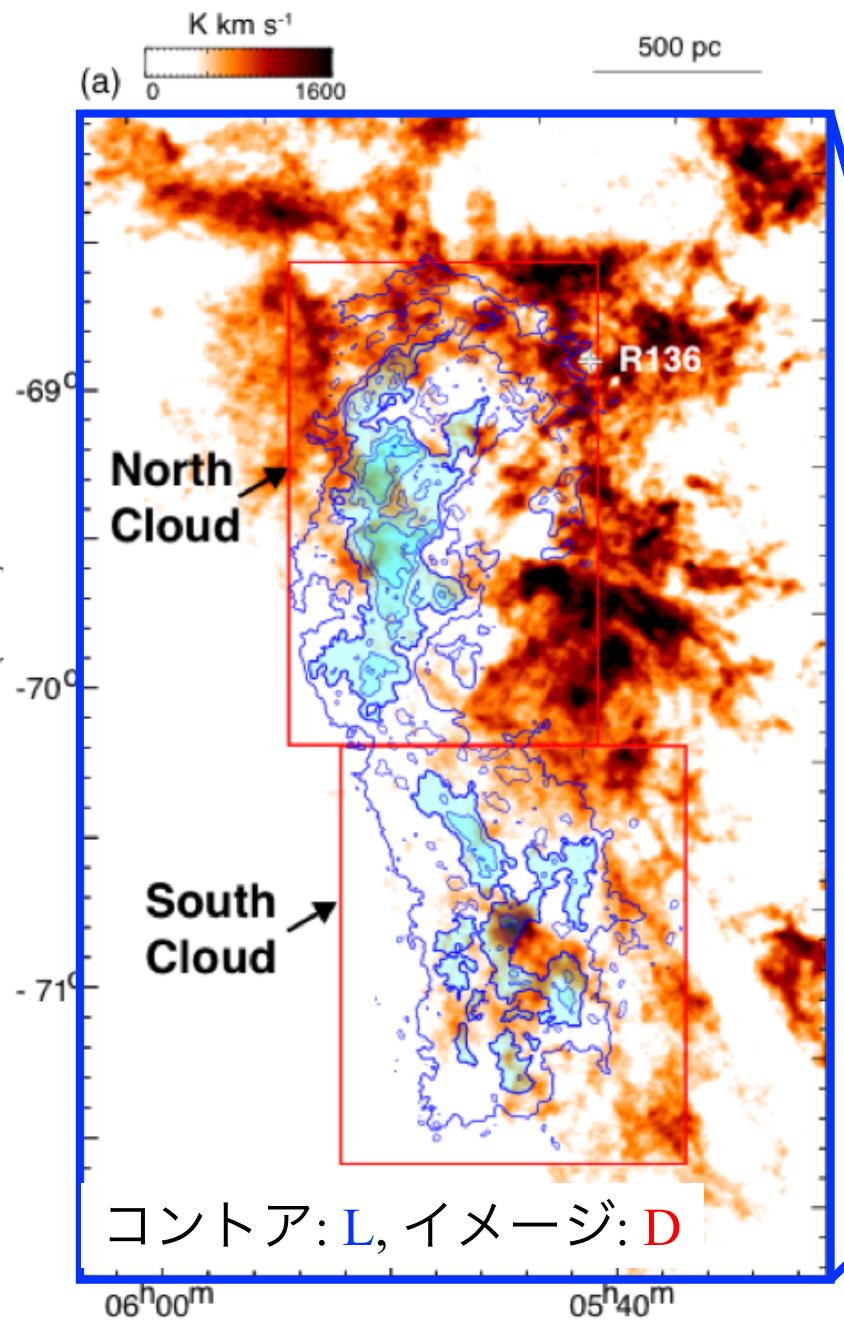
# 結果: L-, D-components の空間分布 (100pc scale)



R136 方向で  
L と D が相補的  
な空間分布を示  
している。

イメージ: D-component  
コントア: L-component  
■ : CO

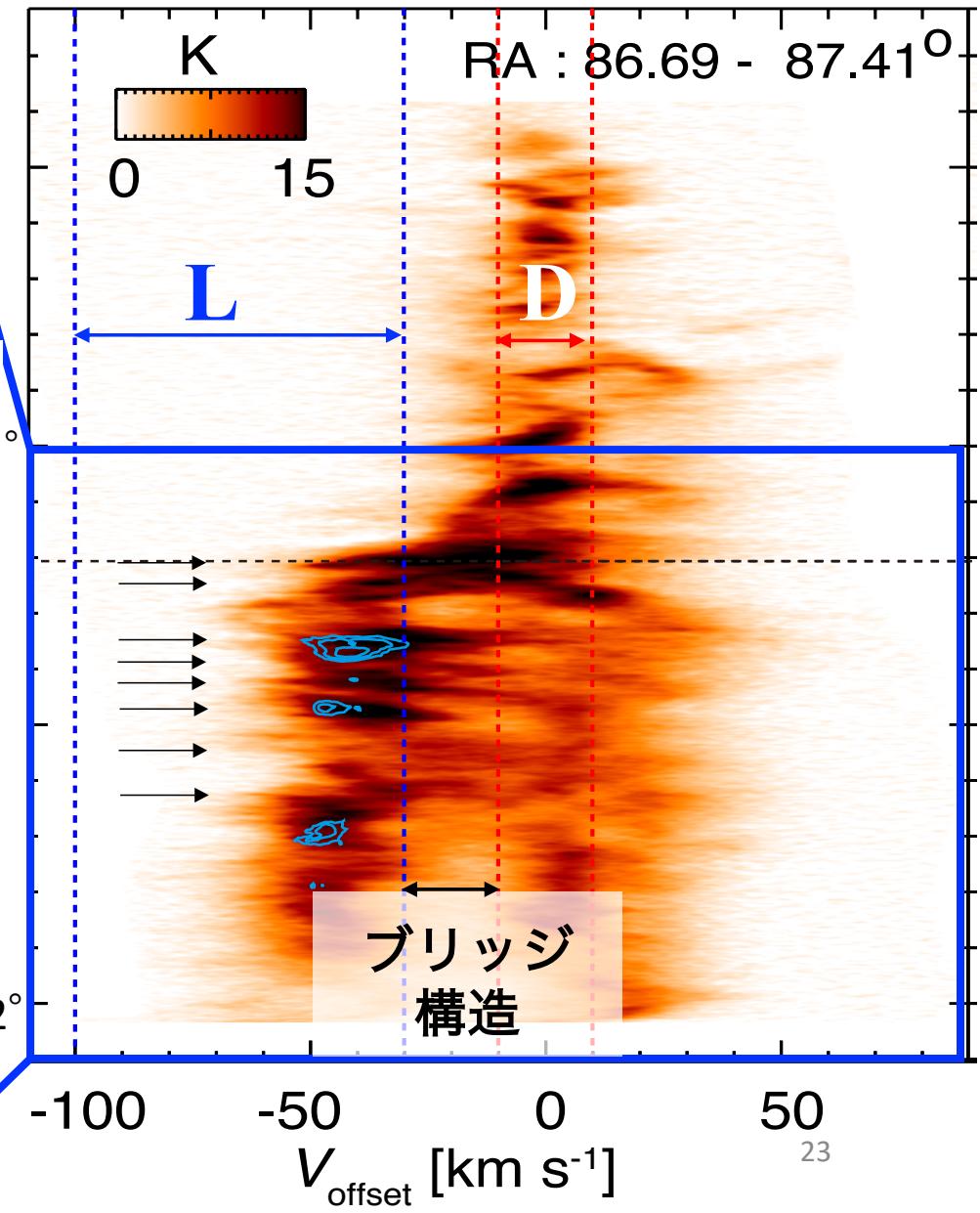
# 結果: 速度構造



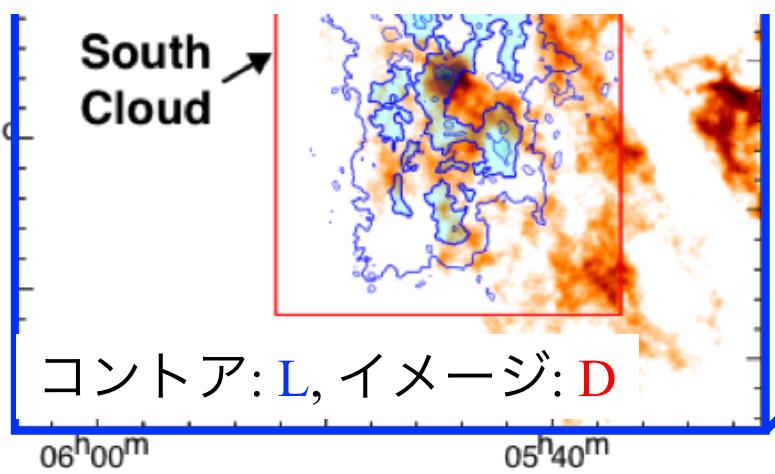
# 結果: 速度構造



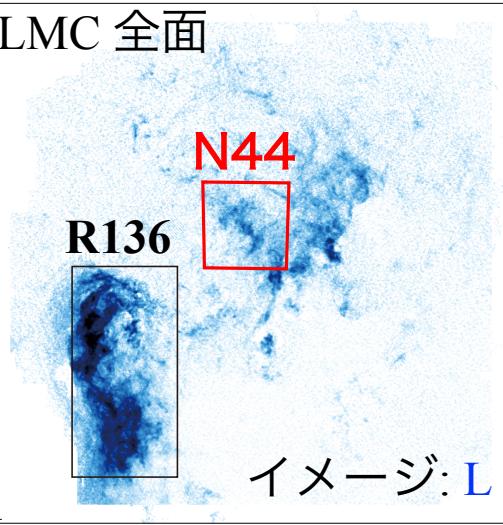
位置速度図



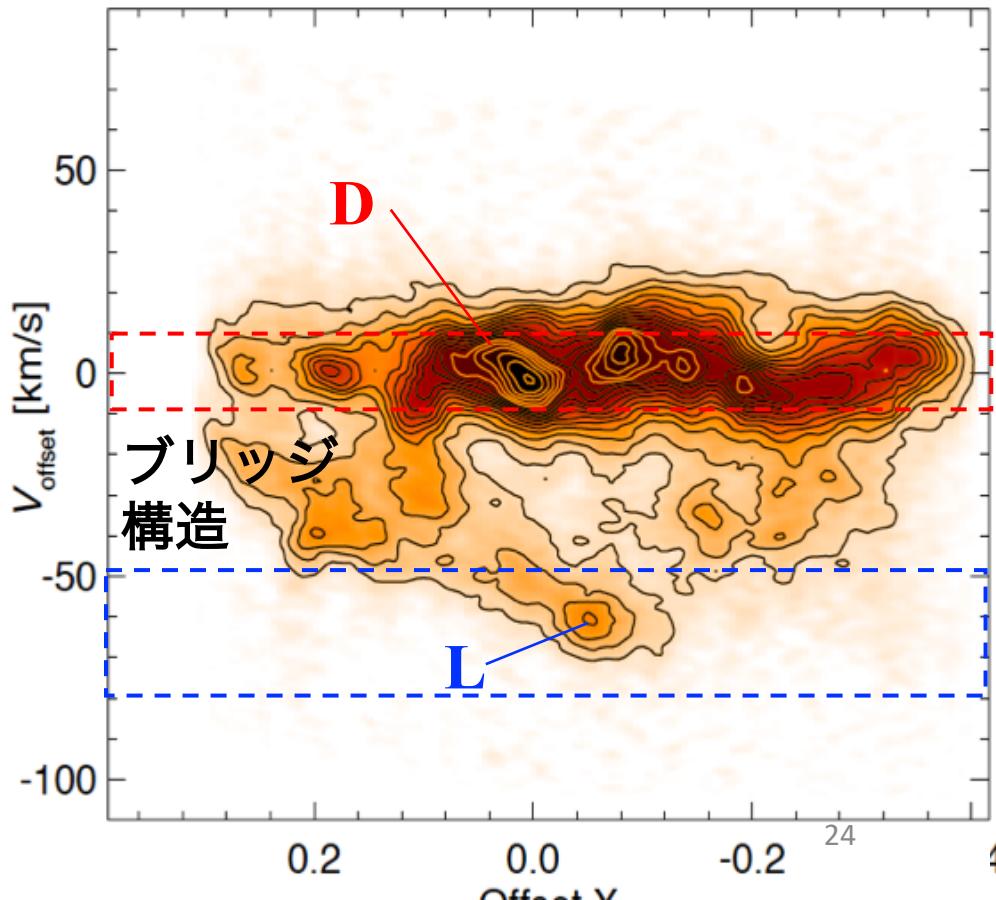
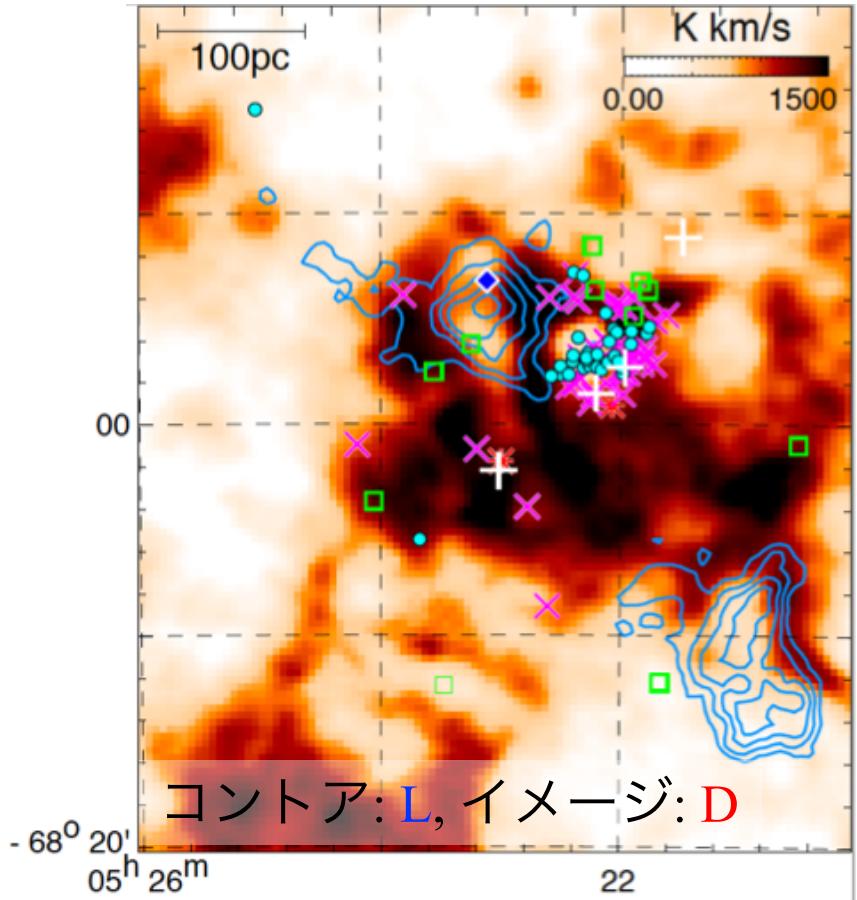
2 速度成分をつなぐ  
中間速度構造が存在



LMC 全面



最も明るい HII 領域の 1 つである N44 領域についても R136 周辺と同様に HI ガス同士の衝突が起きていると考えられる。



# ダストを用いた重元素量の比較

重元素の半分はダスト(固体微粒子)として存在

ガス/ダスト比 = 重元素量の指標

[仮定] 水素ガスとダストが一様に混ざっている

## 本研究

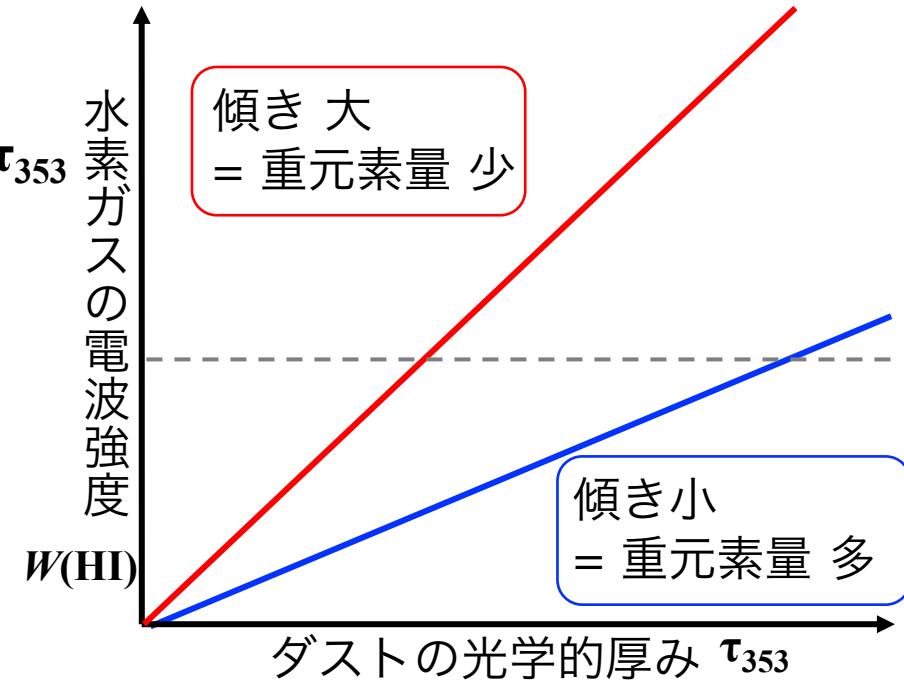
- ダストの量 : 353 GHz の光学的厚み:  $\tau_{353}$   
(Planck Collaboration 2014)

ダストの性質が一定であると仮定

- 水素ガスの量 : HI の電波強度:  $W(\text{HI})$

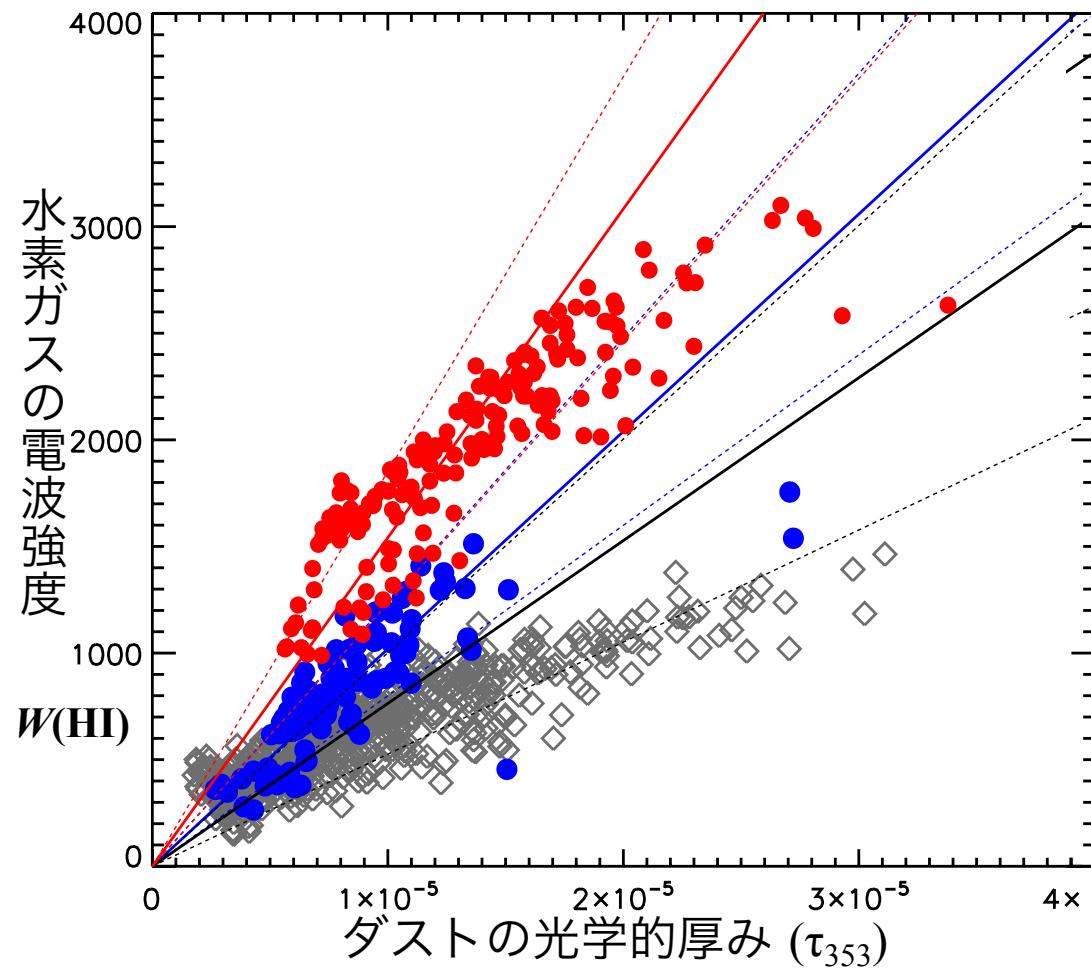
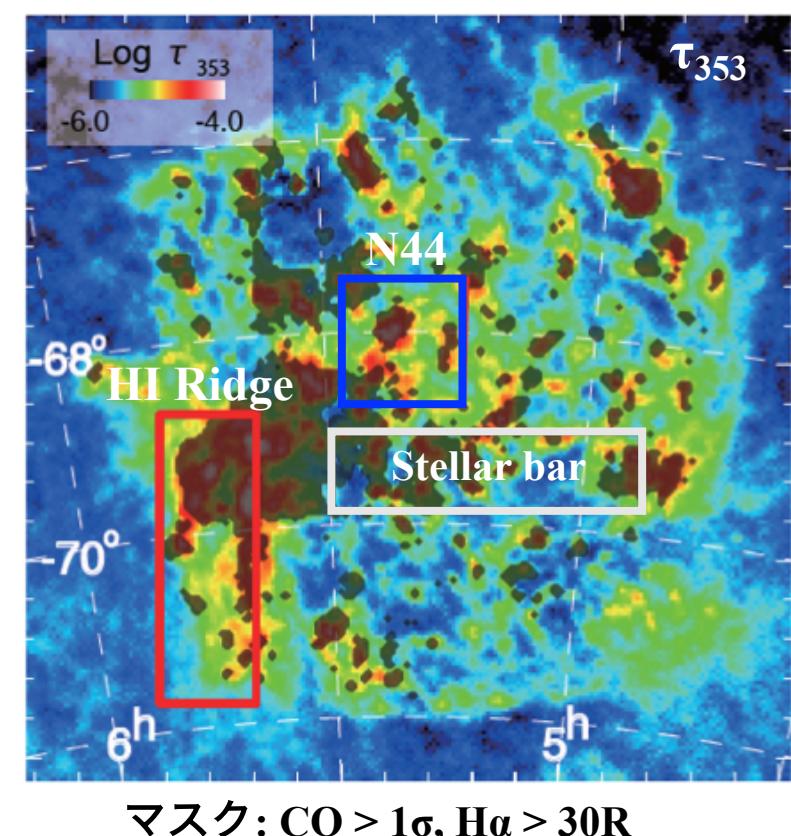
(Kim et al. 2003)

ダスト温度が高い成分のみを使用  
=> 光学的に薄い



中性水素ガスの電波強度とダストの光学的厚みの相関をとる

# ダストを用いた重元素量の比較



	<b>Stellar bar</b>	<b>N44</b>	<b>HI Ridge</b>
傾き [10 <sup>8</sup> K km/s]	<b>0.75 ± 0.24</b>	<b>1.0 ± 0.2</b>	<b>1.5 ± 0.3</b>

**Stellar bar < N44 < HI Ridge**

# 議論：SMC からのガス流入 (HI ガス衝突の起源)

Stellar bar のダスト/ガス比の値を 1 として領域間の比較を行った。

領域	ダスト/ガス比 (重元素量)	SMC と LMC のガス質量比	L と D の 質量比
Stellar bar (LMC)	1	----	----
N44	0.8	3 : 7	~ 3 : 7
HI Ridge	0.5	1 : 1	~ 1 : 1
SMC = 1/5 LMC	0.2	----	----

$R_{\text{SMC}}$ : SMC のガスの割合

$R_{\text{LMC}}$  : LMC のガスの割合

$$R_{\text{SMC}} + R_{\text{LMC}} = 1$$

$$R_{\text{SMC}} \times 0.2 + R_{\text{LMC}} \times 1 = 0.8 \text{ or } 0.5$$

積分範囲

L: -100 to -10 km/s

D: -10 to +10 km/s

=> L-component は SMC から流入してきたガスを多く含む

HI ガスの衝突は銀河間潮汐相互作用  
によって引き起こされたことを示唆

# まとめ

## ■ LMC の水素ガスの空間分布, 速度構造

- 銀河全面に渡って L と D の 2 速度成分の分離を行なった
- HI Ridge, N44 領域で HI ガスの衝突の観測的証拠を見つけた
- HI ガスの衝突による巨大星団形成を示唆

## ■ ガス/ダスト比を指標とした領域間での重元素量の違い

- 領域間の重元素量の違いを明らかにした
  - Stellar bar > N44 > HI Ridge (R136)
- 衝突領域への SMC からのガス流入
- 潮汐相互作用による HI ガスの衝突を示唆

R136 をはじめとするLMC の巨大星団形成が SMC との銀河間潮汐相互作用によって誘発されたことを観測的に示した.

# 今後の展望

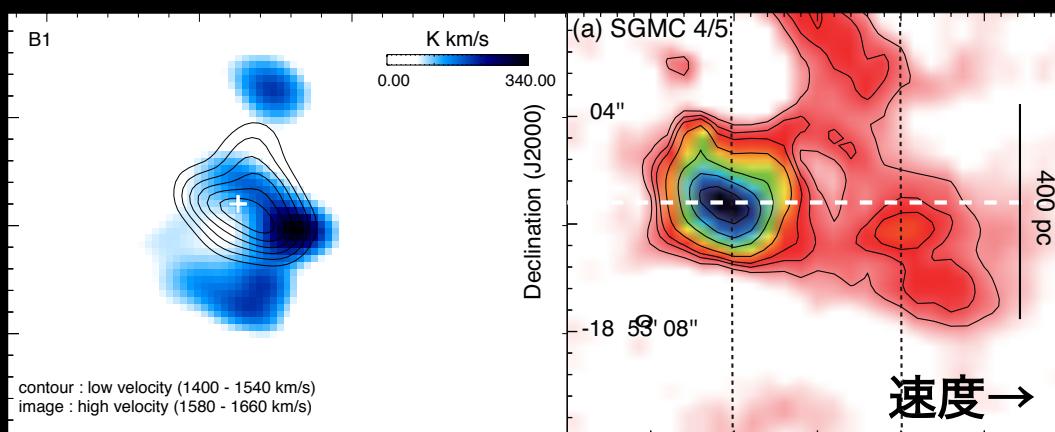
## ■ LMC・SMC

- ・ 全面に渡り HI ガス衝突による大質量星形成を検証
- ・ ダスト/ガス比の詳細な空間分布を解明
- ・ 数値計算との詳細な比較

## ■ 他の相互作用・衝突銀河に拡張

- ・ アンテナ銀河, M33, M51, M82...

相補的な空間分布



ブリッジ構造

