

# NANTEN望遠鏡の 見た宇宙

名古屋大学大学院

立原研悟

# What is the NANTEN2 project ?

**Purpose** : Investigate **large scale** distributions, structure, dynamics, and chemistry of the ISM in the Milky Way and nearby galaxies

**How** : Multi line observations in CO and CI

- 100GHz : CO(J=1-0)

- 200GHz : CO(J=2-1)

low freq. (Nagoya) RX





- 500GHz : CO(J=4-3), CI( $^3P_1$ - $^3P_0$ )

- 800GHz :  $^{12}\text{CO}$ (J=7-6),  $^{13}\text{CO}$ (J=8-7), CI( $^3P_2$ - $^3P_1$ )

SMART RX

can trace density and temperature of gas and star forming PDR regions

## International collaboration

-  Nagoya U., Osaka Prefecture U.
-  Universität zu Köln, Universität Bonn
-  The University of New South Wales, Sydney, Macquarie and so on
-  Universidad de Chile       Seoul National U.
-  Swiss Federal Institute of Technology Zurich



# Project Timeline

Chile Las Campanas, alt.2400m

Chile Atacama, alt.4800m



- 2004.8: Move to Pampa la Bola from Las Campanas observatory
- 2005.9: First light in mm
- 2006.4: First light in Sub mm
- 2007.10: Start remote observations
- 2009.4: Installation of SMART



# NANTEN2 Site (Chile; Pampa la bola)

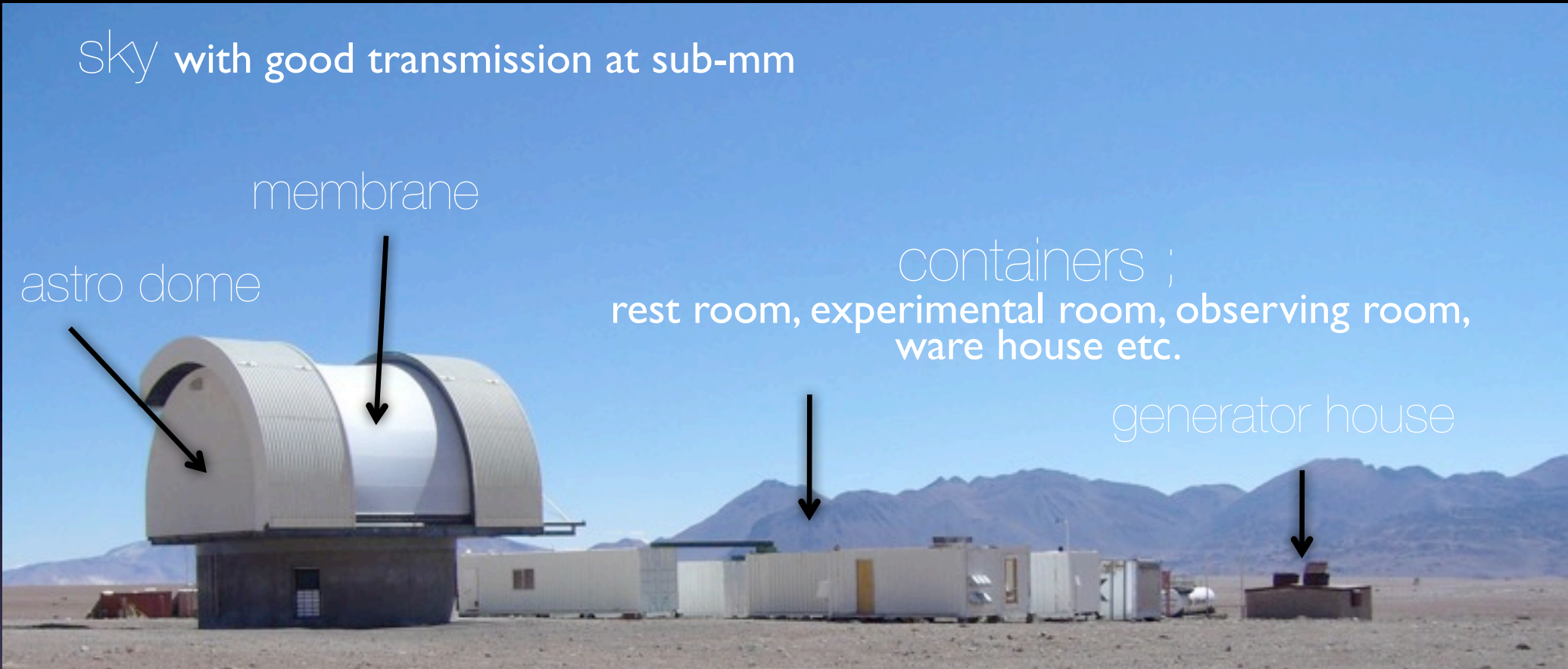
sky with good transmission at sub-mm

membrane

astro dome

containers ;  
rest room, experimental room, observing room,  
ware house etc.

generator house



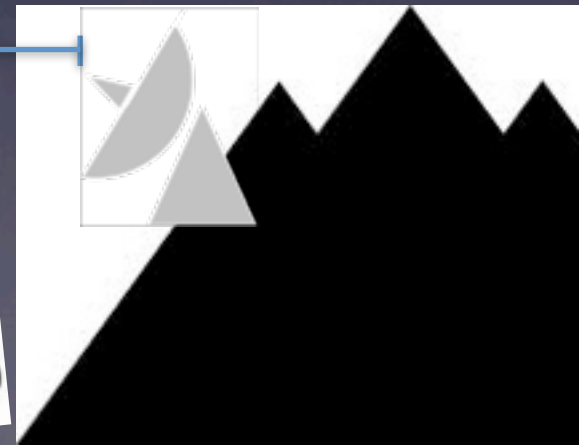
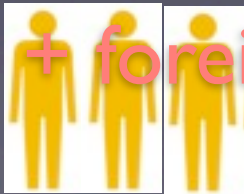
Sequitor (Alt. 2700m)

~ 1.5 hours by car

NANTEN2 (Alt. 4865m)



Always a few people  
staff and PhD students  
+ foreign astronomers



# Instruments

## Receiver

- 100 (110-115) GHz: 1 pixel, DSB
- VDI LO chain (installed in 2012 April)
- 4-12 GHz IF
- $^{12}\text{CO}(1-0)$  and  $^{13}\text{CO}(1-0)$  simultaneously
- Replaced with 200 GHz RX in 2013 Apr.



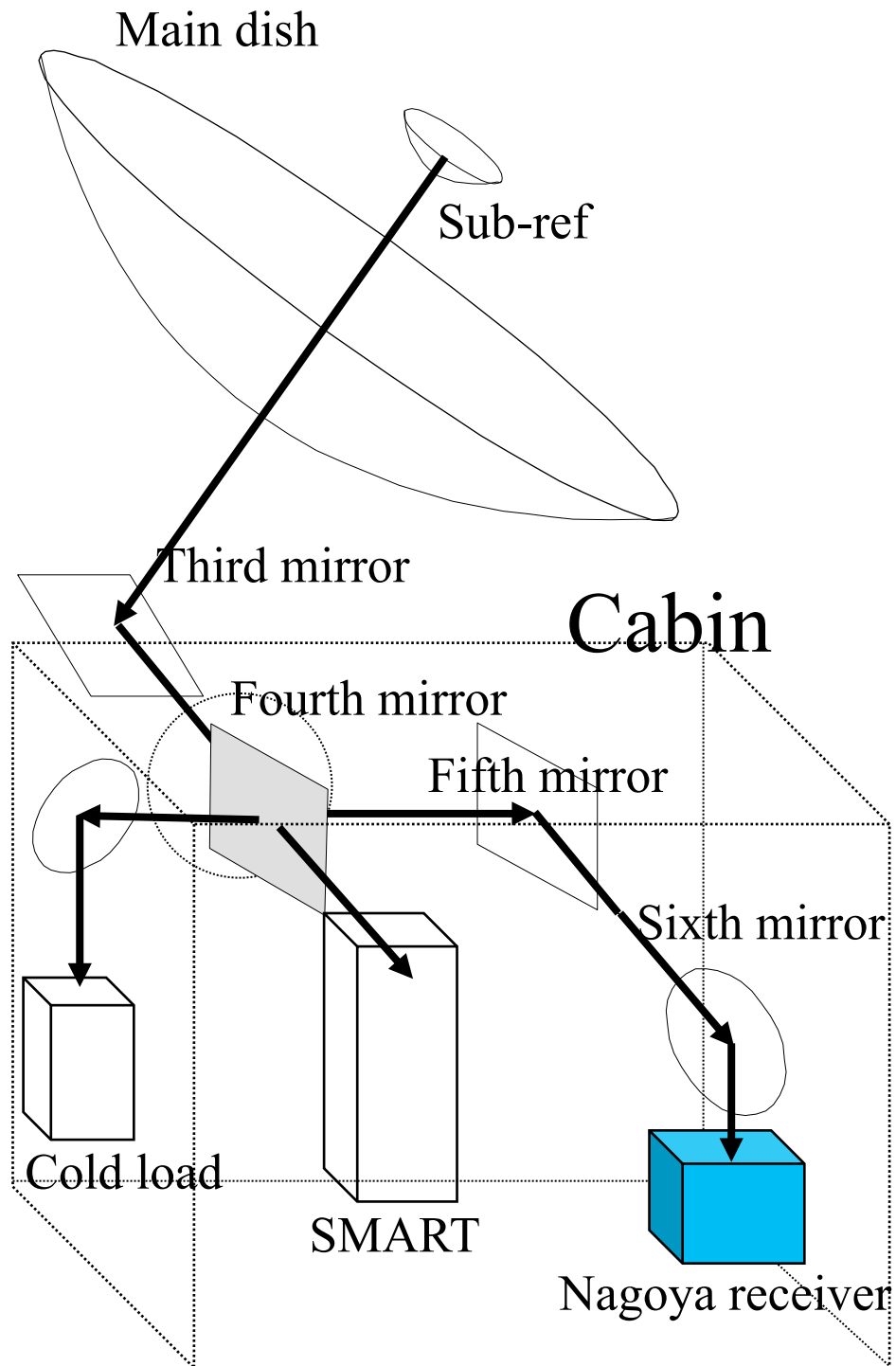
Nagoya receiver

## Spectrometers

- DFT $\times$ 2: 1GHz band, 61kHz resolution for 100 or 200GHz

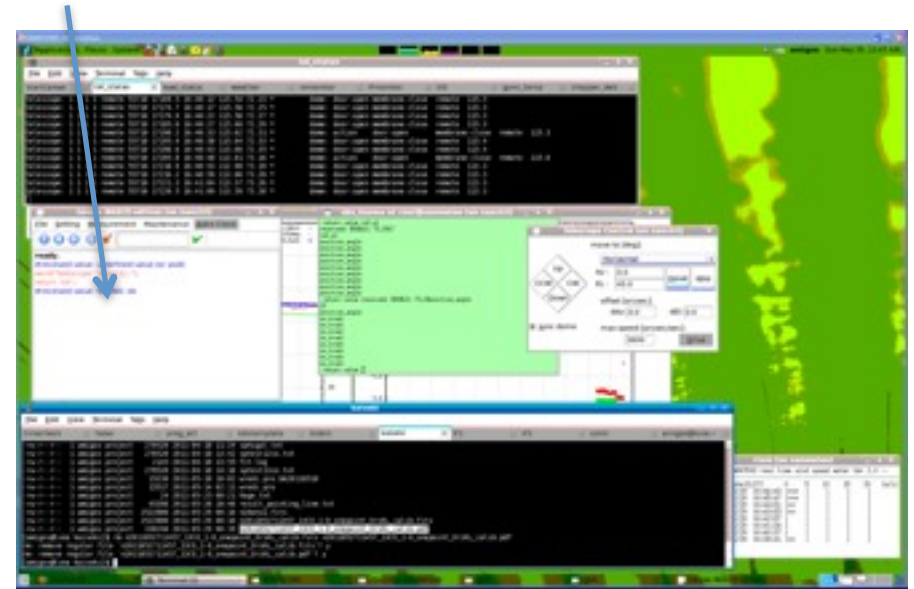
## Parameters (100 GHz)

- HPBW : 180''
- V resolution:  $\sim 0.16$  km/s, V coverage:  $\sim 2600$  km/s
- $T_{\text{sys}}$  : 150 K (DSB)

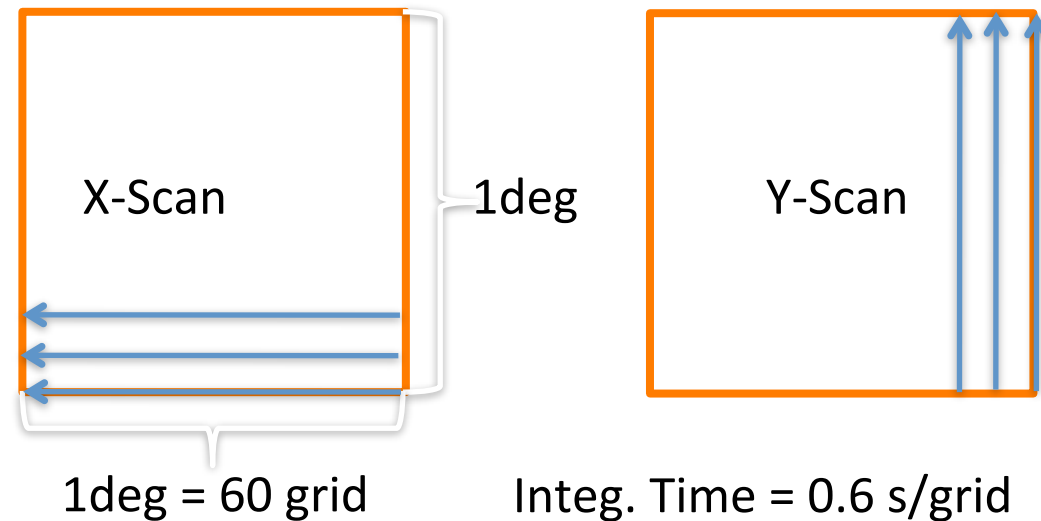


# How to observe (100GHz)

Tareas: NANTEN2 operating console (GUI)



## Standard OTF parameters

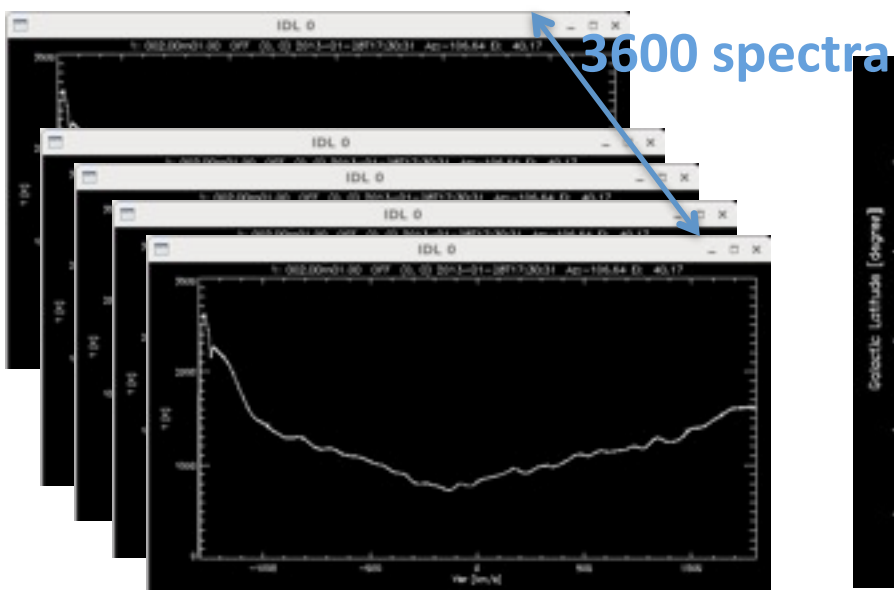




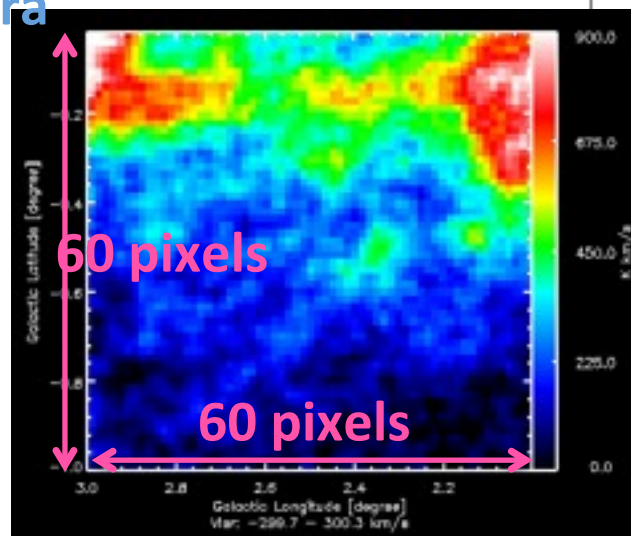
# Data reduction (100GHz)

1. Temperature calibration (Chopper wheel method)
2. Intensity calibration
3. Doppler correction
4. Baseline fitting
5. Basket weaving\*
6. Baseline fitting
7. Transforming data into 3D cube (fits)

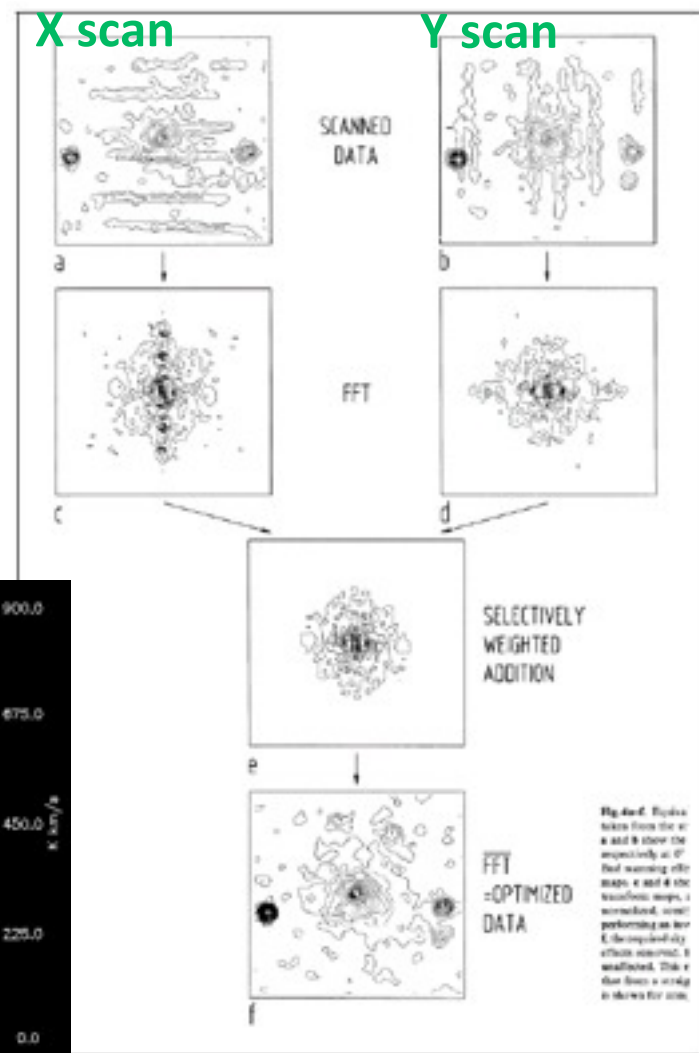
Raw data



Final data



Basket weaving method



Emerson & Graeve (1988)

# NAnten Super CO survey as Legacy (NASCO)

All-sky survey era: **Why don't we make a CO map ?**

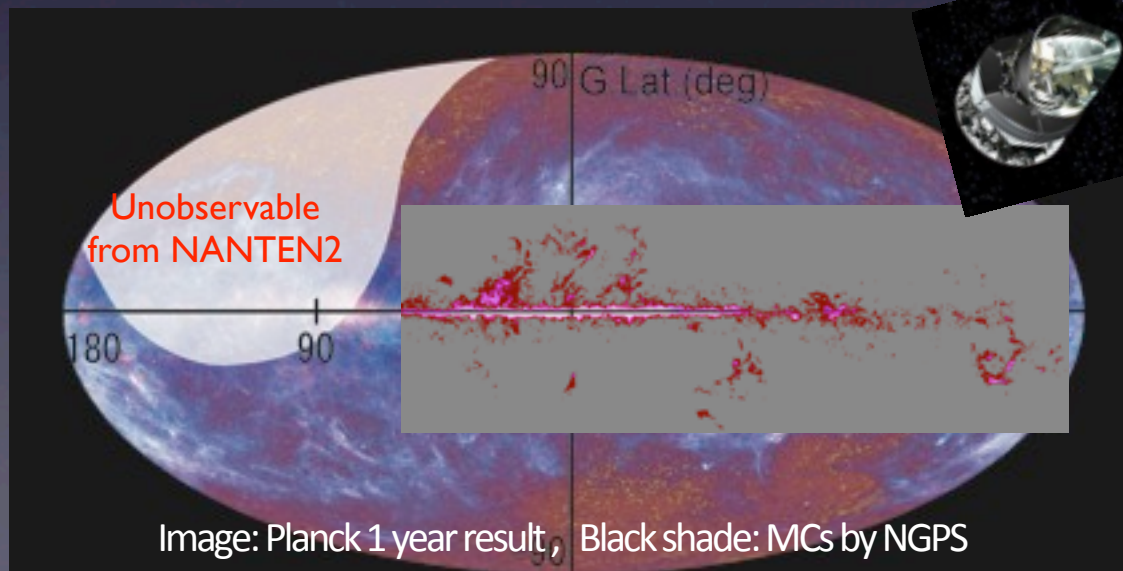
## What is NASCO ? :

- Brand new CO legacy survey with high angular resolution with huge coverage
- in  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$  and  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) lines
- Collaboration with the Planck team

## Expected outcomes :

- understanding of foreground emission of CMB
- Comparative study with gamma-ray telescopes
- High sensitivity atlas of Galactic high mass star forming region

Image: Planck 1 year result , Black shade: MCs by NGPS





# Scientific Targets

## NASCO

- Galactic Plane Survey (NASCO\_GPS)
- SNR survey
- Galactic center
- nearby low-mass SFR
- Planck based CO
- High-latitude clouds

## Massive star-forming regions

- Cloud-cloud collision
- “Spitzer bubbles”

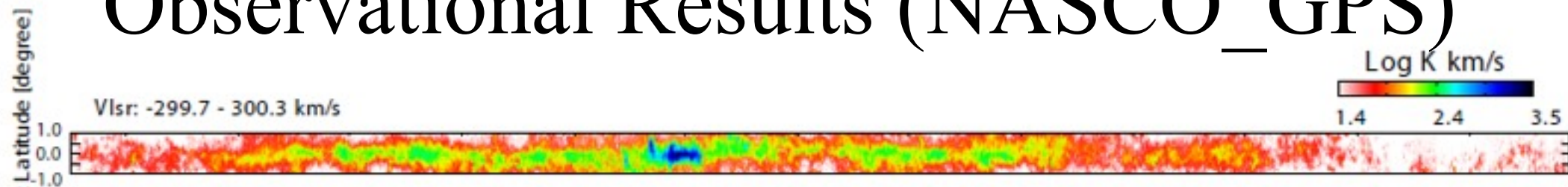
## Collaboration with Osaka Pref. U.

- Orion A
- Serpens

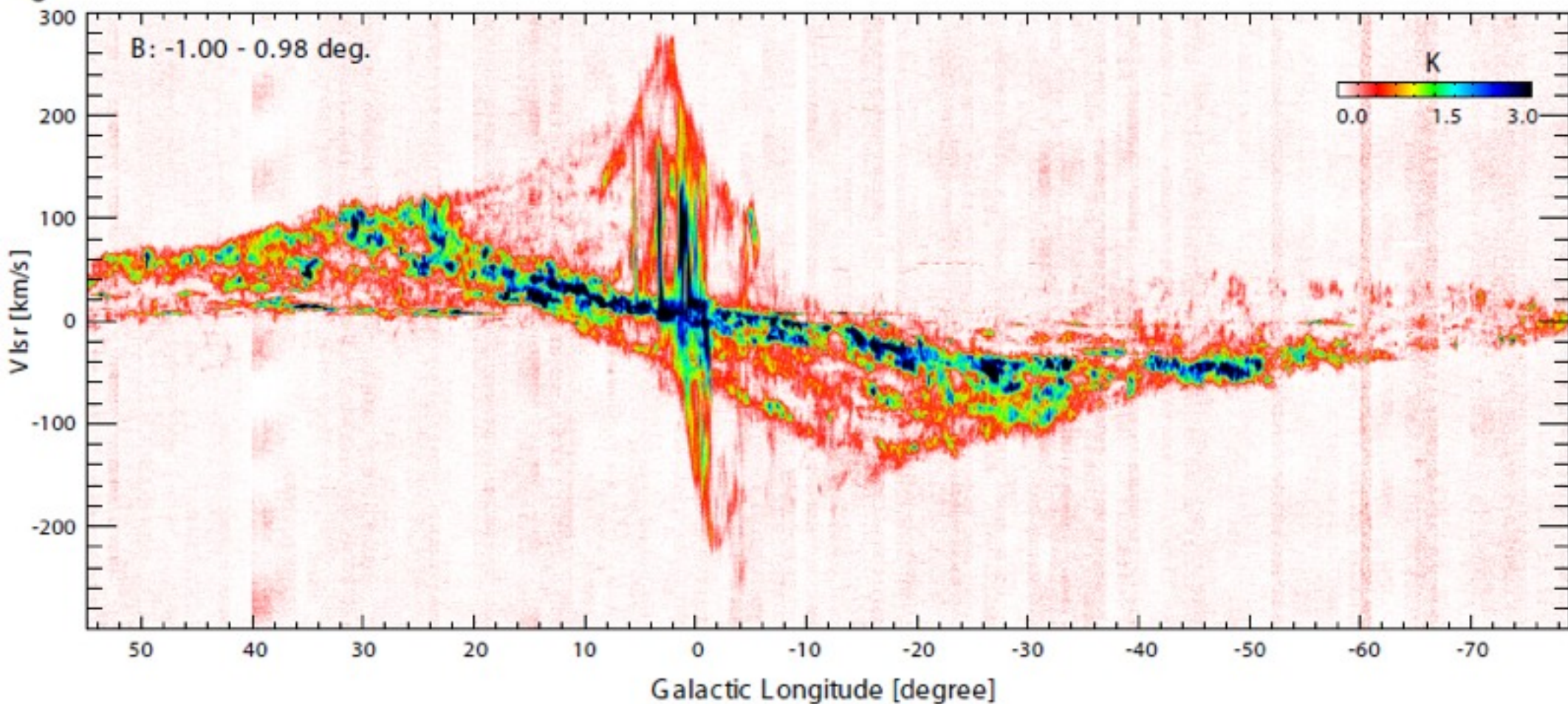
## Nearby galaxies

- Nearby galaxy survey
- LMC
- SMC

# Observational Results (NASCO\_GPS)



See also my poster !!



Total observation time: ~1000 h , Data point: ~100,000\*16,000 !!

# 今日のトピック

1. 分子雲衝突による大質量形成
2. 星間乱流と星形成
3. 超新星残骸における粒子加速とTeV  $\gamma$ 線

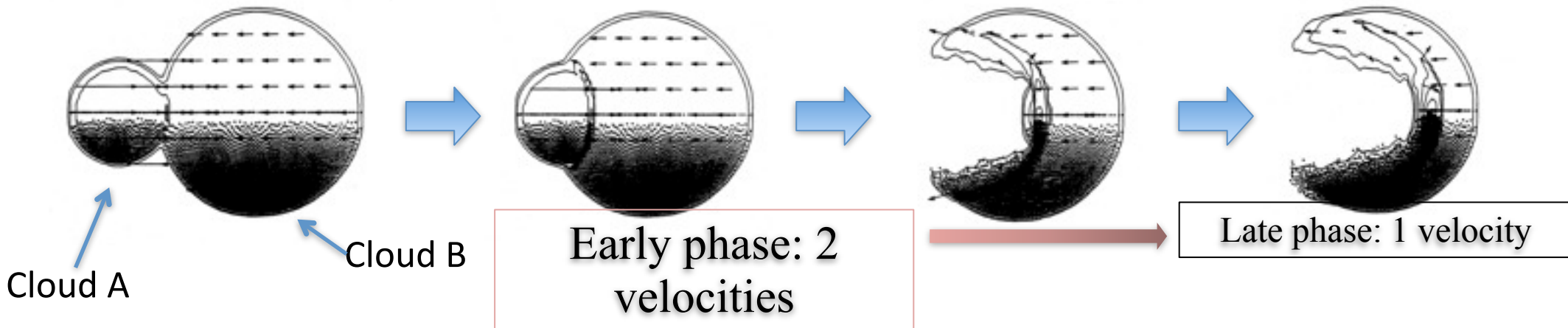


# I. 分子雲衝突による大質量星形成

- 大質量星を作るためには？
- 大質量の分子雲コアをつくる
  - 短いタイムスケールで小質量コアに分裂してしまう
- 小質量のコアを合体させる
  - 衝突頻度は低そう

# Cloud-Cloud Collision as mechanism of <sup>13</sup> massive star formation

## ■ Collision between uneven clouds (Habe & Ohta 1992)



– The shock triggered star formation

- Inside of the shell is ionized (HII region).
- Two velocity components should be observed.

# Westerlund 2 (Wd2)

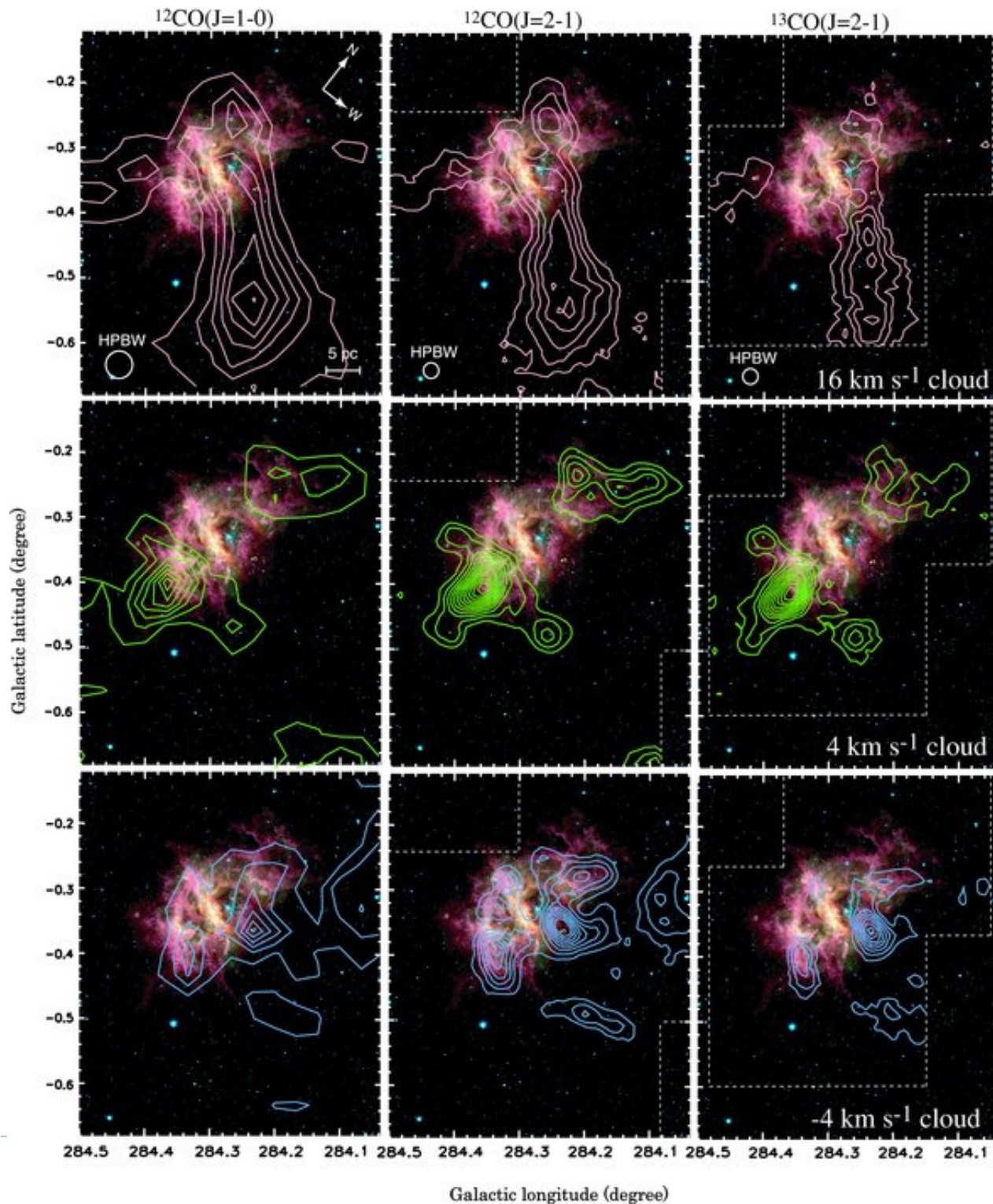
- 銀経 $284^{\circ}.27$ , 銀緯  $-0^{\circ}.34$
- O型星  $\geq 18$ 個
- WR星 2個 (うち1つは連星)  
(Rauw et al. 2005, 2007, 2011)
- 星の総質量  $\sim 10^4 M_{\odot}$   
(Ascenso et al. 2007)
- 年齢: 2 – 3 Myr  
(Ascenso et al. 2007, Piatti et al. 1997)
- HII領域RCW49とダスト・PAHs構造  
(Churchwell et al. 2004)
- YSOs  $\sim 300$ 個 (Whitney et al. 2004)
- 距離 2.8 – 8.0 kpc  
(Rauw et al. 2011, reference therein)



Spitzerによる赤外線イメージ

- 青:  $3.6 \mu\text{m}$  (星)
- 緑:  $4.5 \mu\text{m}$  (水素再結合線 $\text{Br}\alpha$ )
- 赤:  $8.0 \mu\text{m}$  (多環芳香族炭化水素(PAH))





(左)  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$   
 (中)  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$   
 (右)  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$

イメージ:  
 Spitzer IRAC  
 青  $3.6 \mu\text{m}$   
 緑  $4.5 \mu\text{m}$   
 赤  $8.0 \mu\text{m}$

-4 kms<sup>-1</sup> クランプ

4 kms<sup>-1</sup> 成分

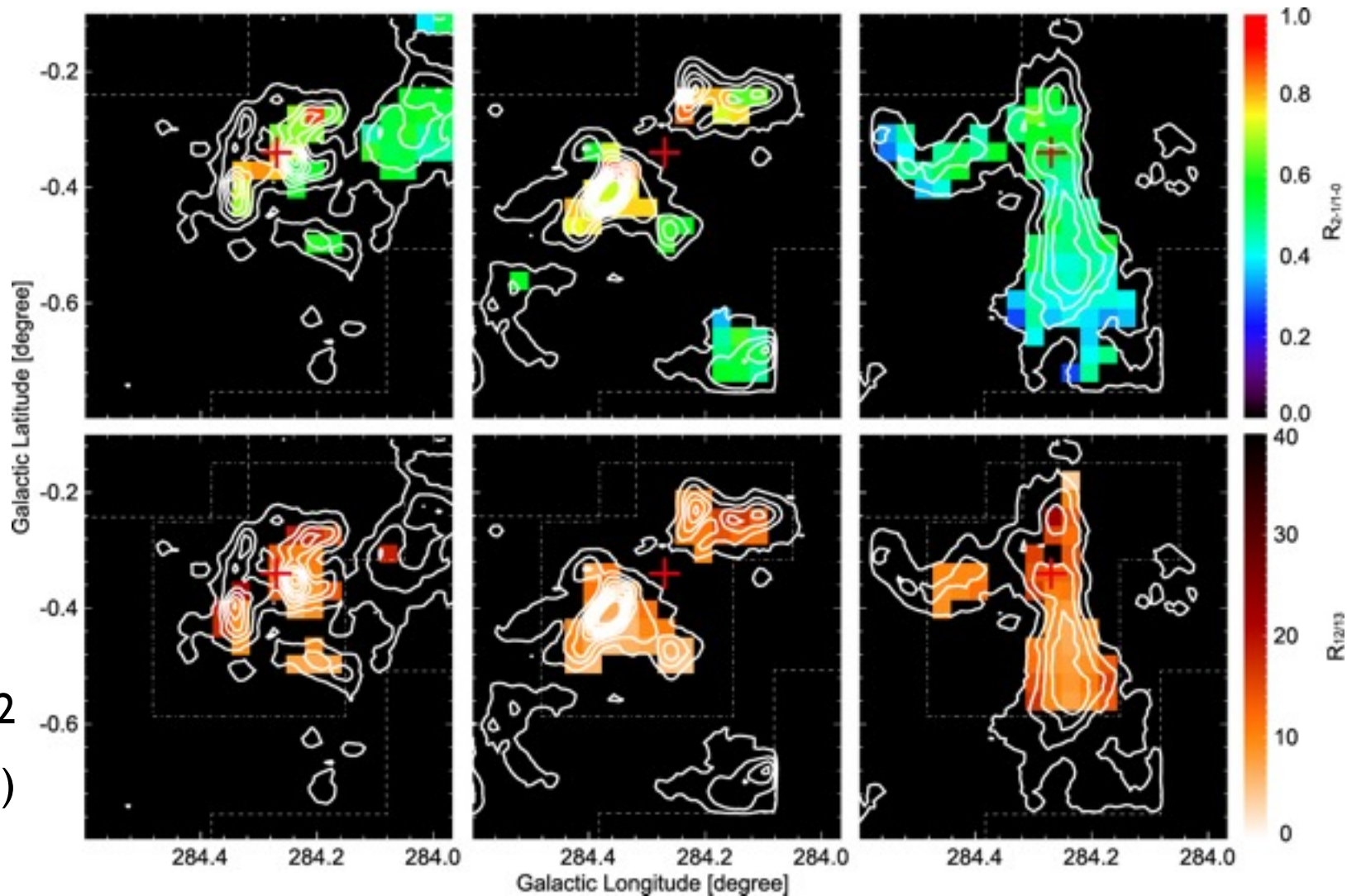
16 kms<sup>-1</sup> 成分

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

$R_{12/13}$   
 $^{12}\text{CO}(J=2-1)/$   
 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$

十字: Wd2

コントア:  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$



$R_{2-1/1-0}$  . . . 高い  $\Leftrightarrow$  温度 and/or 密度が高い領域

$R_{12/13}$  . . . 高い(=  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ が弱い)  $\Leftrightarrow$  密度が低い領域



-4 kms<sup>-1</sup> クランプ

4 kms<sup>-1</sup> 成分

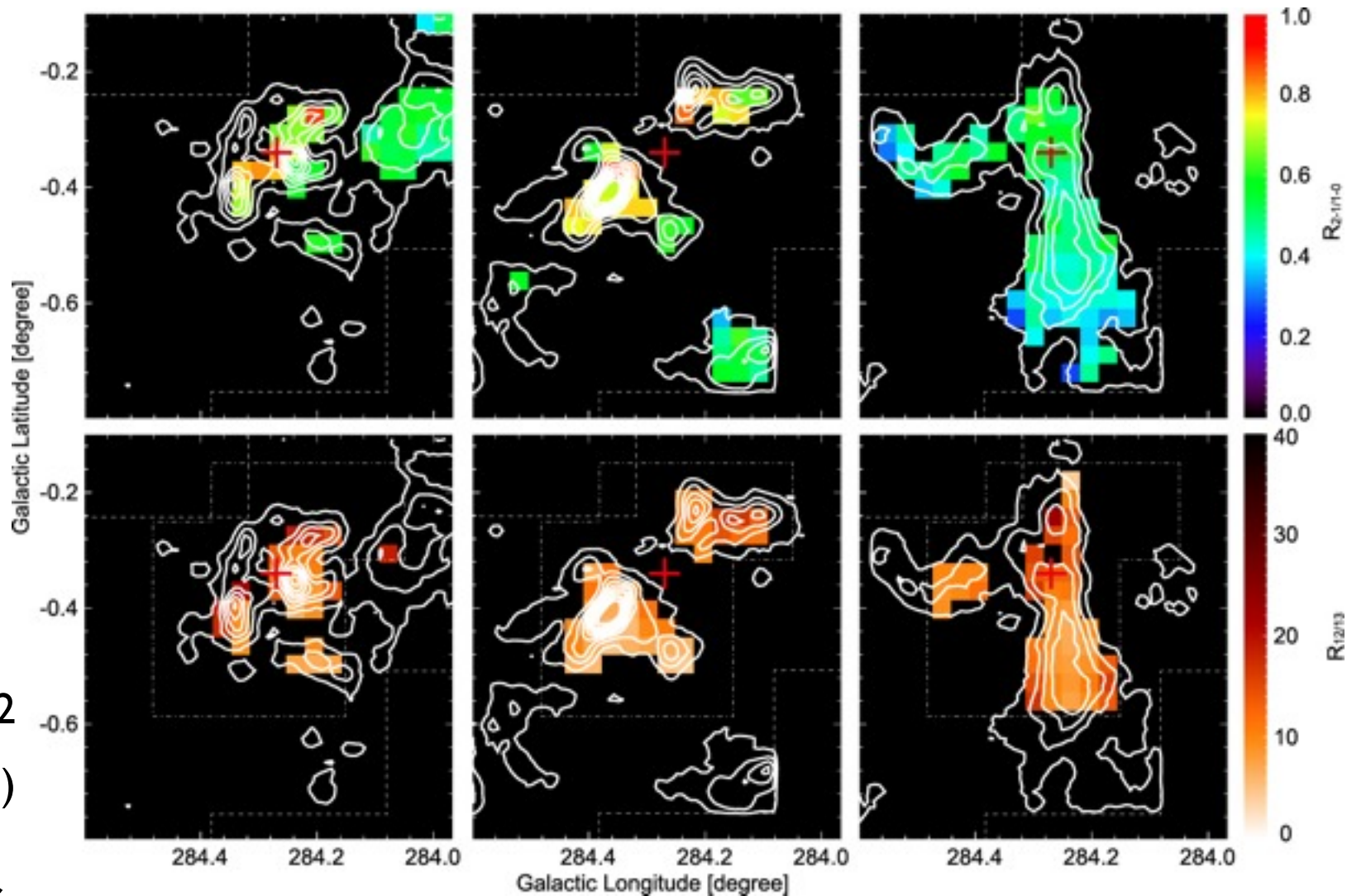
16 kms<sup>-1</sup> 成分

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

$R_{12/13}$   
 $^{12}\text{CO}(J=2-1)/$   
 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$

十字: Wd2

コントア:  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$



▶ 4 kms<sup>-1</sup> 成分

▶ 16 kms<sup>-1</sup> 成分に比べて  $R_{2-1/1-0}$  が高い

▶ 16 kms<sup>-1</sup> 成分

▶ Wd2に近いほど  $R_{2-1/1-0}$  が高い

➡ 16 kms<sup>-1</sup> 成分より Wd2に近い

➡ Wd2に付随

➡ Wd2に近い分子雲は散逸



# GMCsの運動

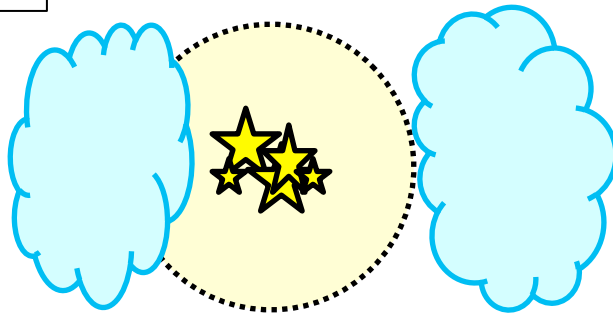
▶ 仮説 1 :

星風による膨張 (Dame 2007)

▶ 仮説 2 :

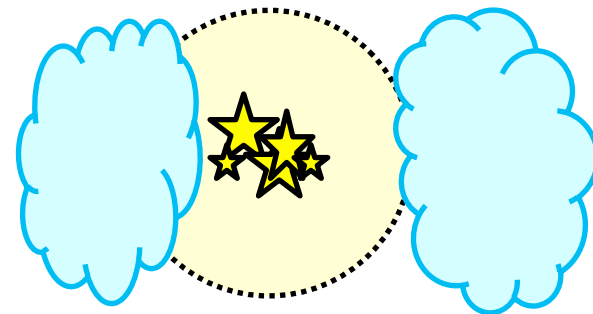
GMCsの衝突 → 星団形成のトリガー

仮説1



←→  
相対速度  $\sim 12 \text{ kms}^{-1}$

仮説2



←→  
相対速度  $\sim 12 \text{ kms}^{-1}$

# GMCの運動

## ▶ 仮説1：星風による膨張

イメージ： $^{12}\text{CO}(J=2-1)$

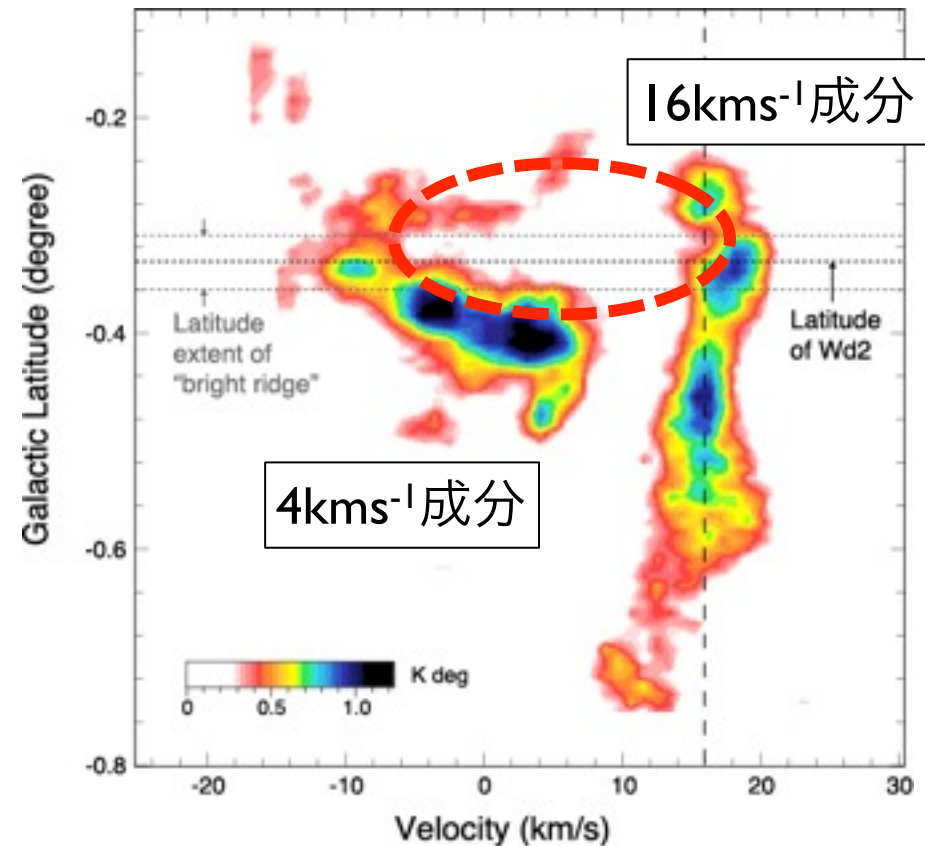
### ▶ 位置速度分布

- ▶  $b = -0^\circ.4 - -0^\circ.2$  : 膨張構造
- ▶  $16 \text{ kms}^{-1}$  成分の  $b < -0^\circ.4$  は  $16 \text{ kms}^{-1}$  の一定速度を持つ

16  $\text{kms}^{-1}$  成分全体が星団の星風によって膨張したと解釈しにくい

### ▶ エネルギー計算

- ▶ 分子雲の距離を推定し質量を求め
- ▶ 系全体の分子雲の運動エネルギー  
 $\sim 1.2 \pm 0.5 \times 10^{50} \text{ erg}$
- ▶ 星風の力学的エネルギー



膨張エネルギーは星風のエネルギーの10%

▶ 18  $3.6 \times 10^{51} \text{ erg}$  (Rauw et al. 2007)

# GMCsの運動

## ▶ 仮説 2 : GMCsの衝突

### ▶ 衝突後の経過時間

- ▶  $4 \text{ km s}^{-1}$ 成分と  $16 \text{ km s}^{-1}$ 成分の相対速度  $\sim 12 \text{ km s}^{-1}$
- ▶ RCW49のサイズ  $\sim 40 \text{ pc}$

経過時間  $\sim 4 \text{ Myr} \Leftrightarrow \text{Wd2の年齢 } 2 - 3 \text{ Myr}$

### ▶ 星形成効率

$$\eta_{SFE} = \frac{M_{star}}{M_{cloud} + M_{star}} \sim 0.05$$

$M_{star}$ : 星の総質量 ( $\sim 10^4 M_{\odot}$ )

$M_{cloud}$ : 分子雲の総質量

( $\sim 2 \times 10^5 M_{\odot}$ )



## Westerlund2のまとめ

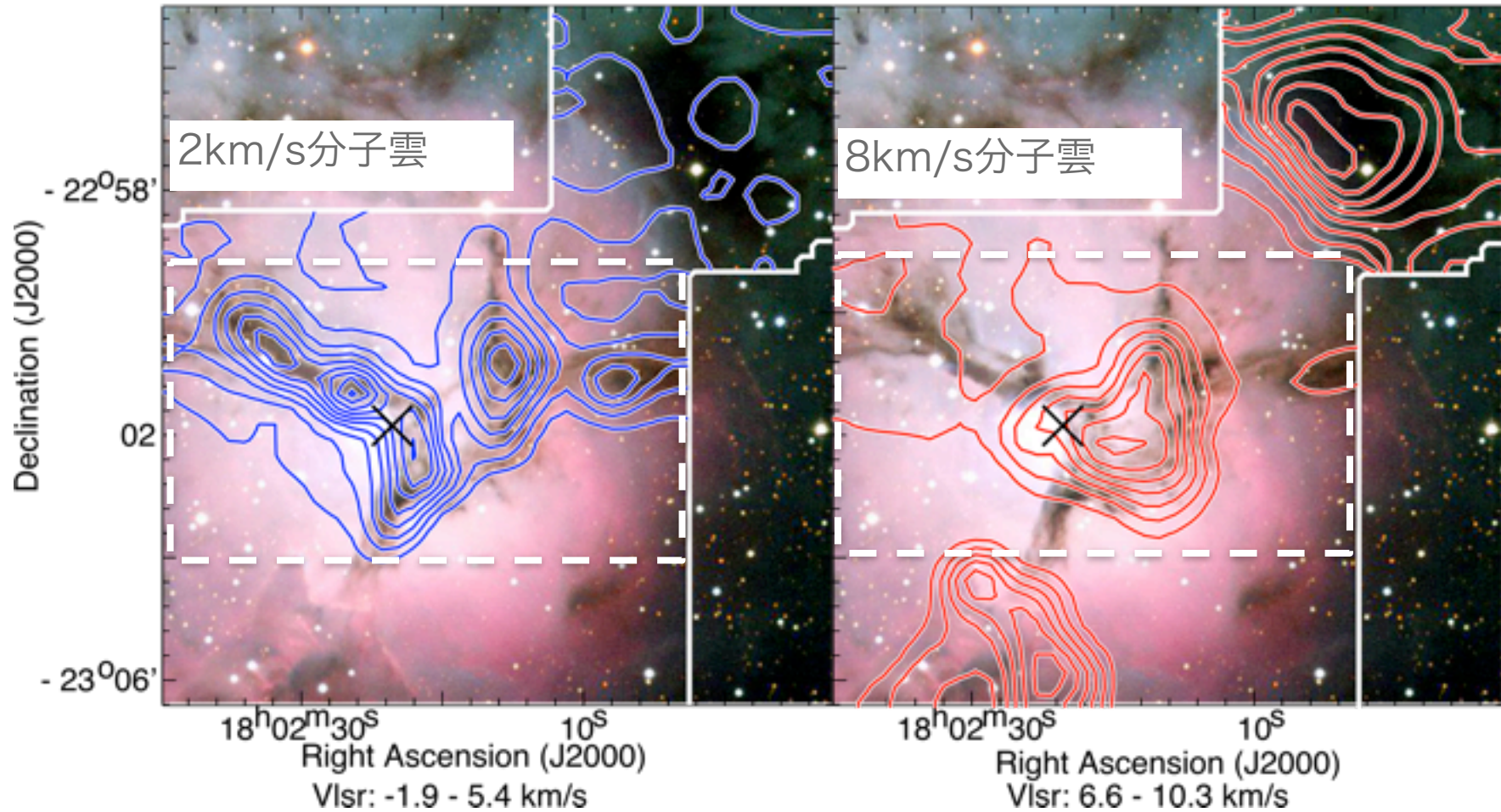
---

- ▶ 中間赤外線との形態比較や、CO輝線の励起分布・同位体比分布から、二つのGMCs(4kms<sup>-1</sup>と16kms<sup>-1</sup>成分)がWd2に付随
- ▶ 2つのGMCsの重心速度からWd2までの距離を $5.4^{+1.1}_{-1.4}$  kpcと推定
- ▶ GMCsの速度構造やエネルギー計算より、2つのGMCsがWd2によって膨張しているとは解釈しにくい
- ▶ 相対速度~12kms<sup>-1</sup>のGMCsが衝突してWd2を形成した？

# M20 (三裂星雲)

コントラ  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ Mopra

x:中心星(HD164492A O7.5型星)



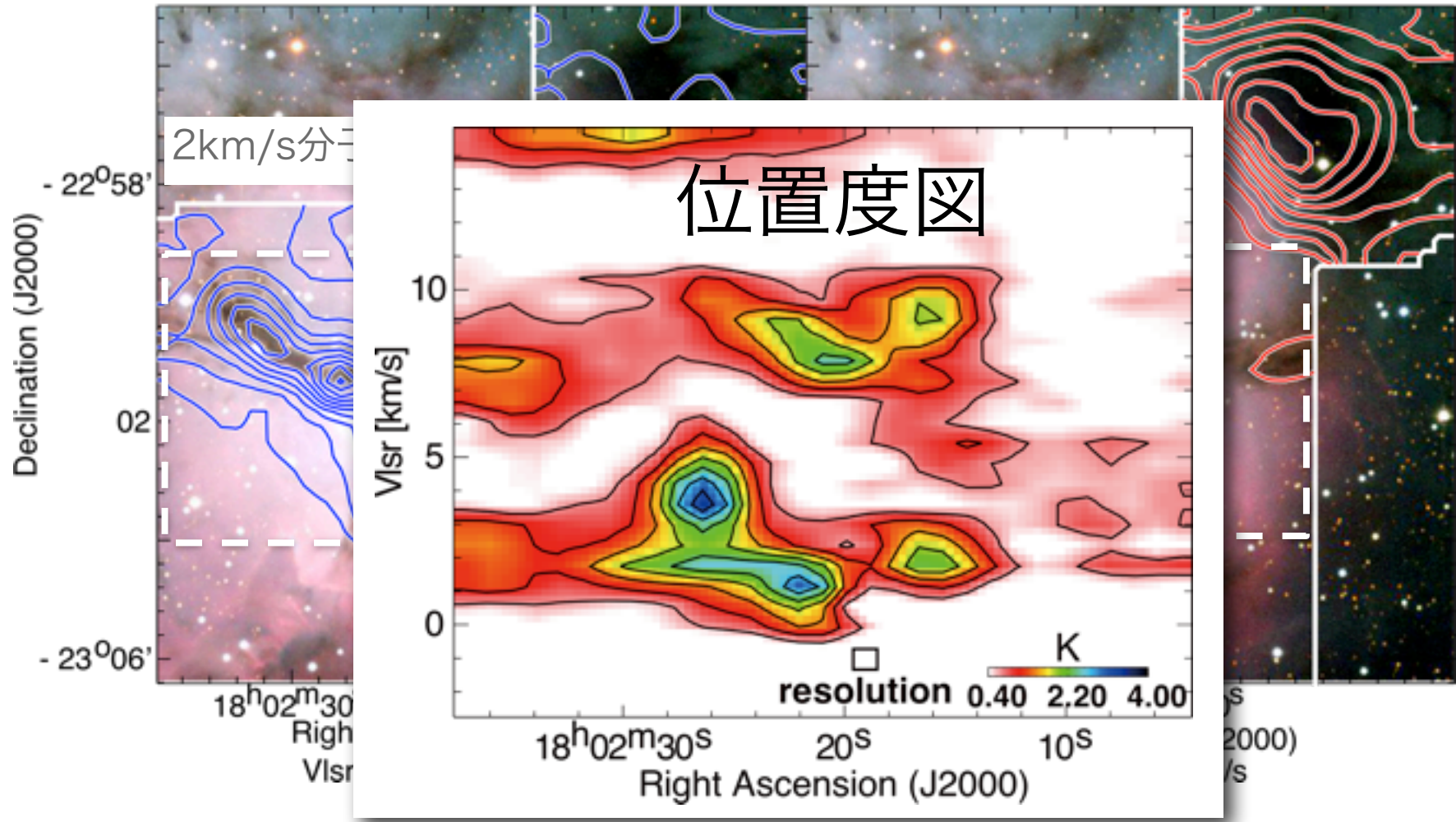
ブルーシフト成分

レッドシフト成分

# M20 (三裂星雲)

コントラ  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ Mopra

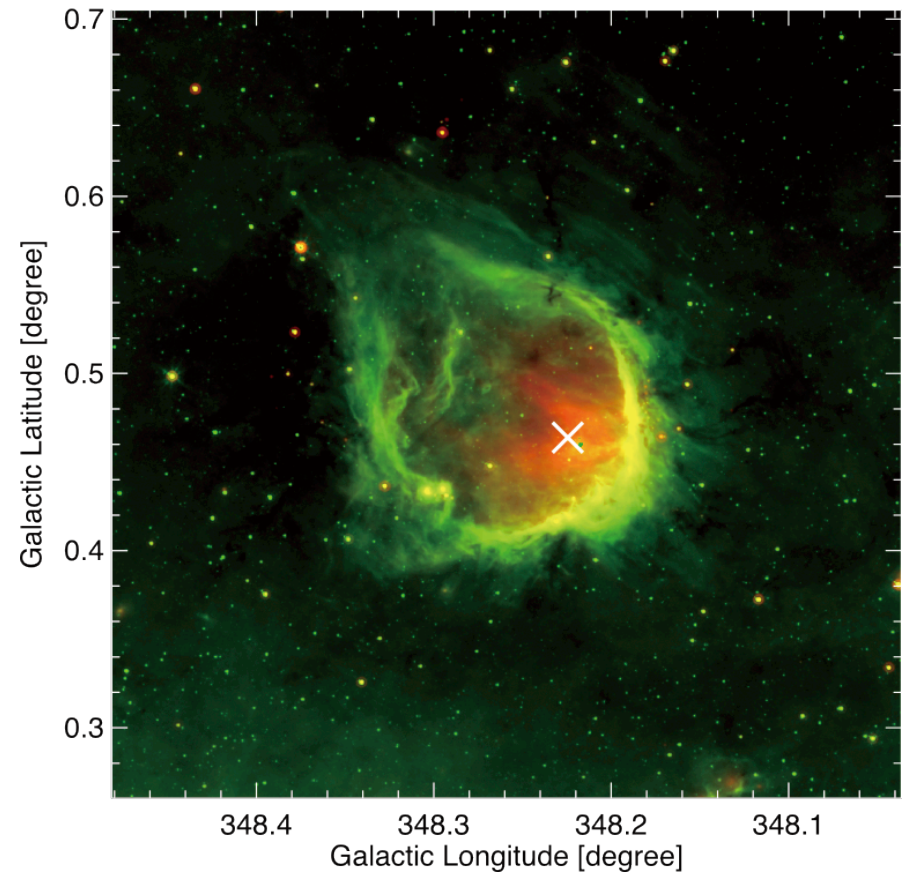
x:中心星(HD164492A O7.5型星)





# 分子雲衝突による大質量形成のまとめ

- いくつかの大質量星は巨大分子雲の衝突で誘発されているそう
- どの程度支配的なモードなのか？
- Spitzer bubbleなどの系統的サーベイを実施中



赤:24um 緑:8um ×:励起星



# 2. Interstellar turbulence

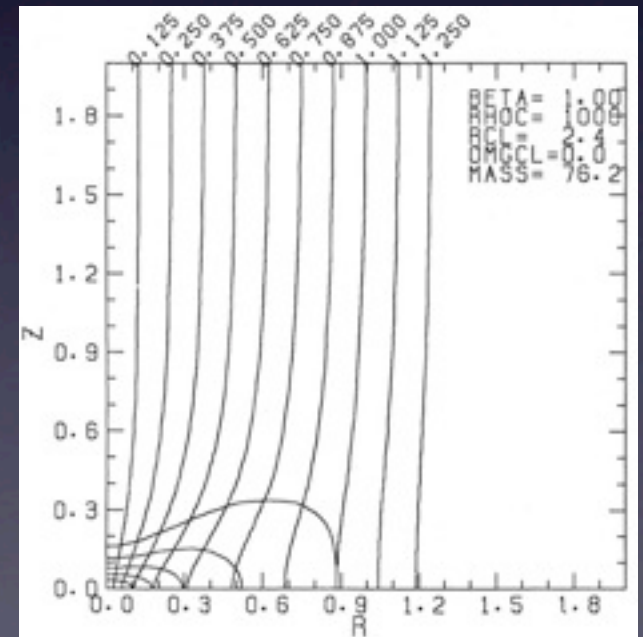
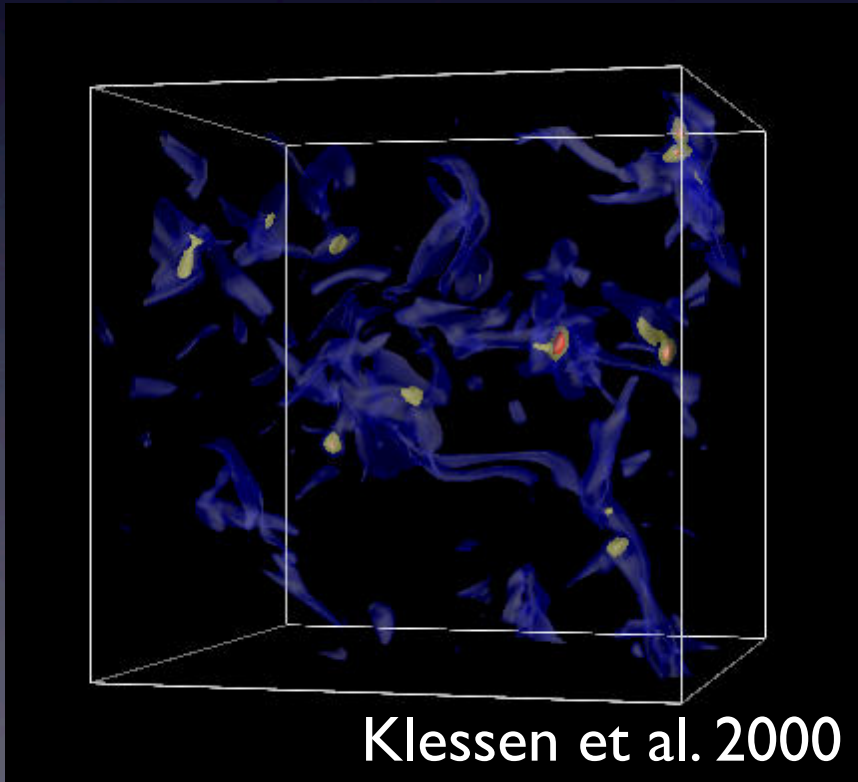
- Observed by broad (super-sonic) molecular lines
- Ubiquitous from diffuse cloud to dense cores
- $\Delta V(^{12}\text{CO}) \sim 1.5\text{-}2.5 \text{ km/s} \gg C_s \sim 0.2 \text{ km/s}$  for 20 K gas,  $\Delta V(\text{H}^{13}\text{CO}^+) \sim 0.5 \text{ km/s}$
- Important for cloud evolution and dense core dynamics

# Paradigms of dense core evolution

Self-gravity



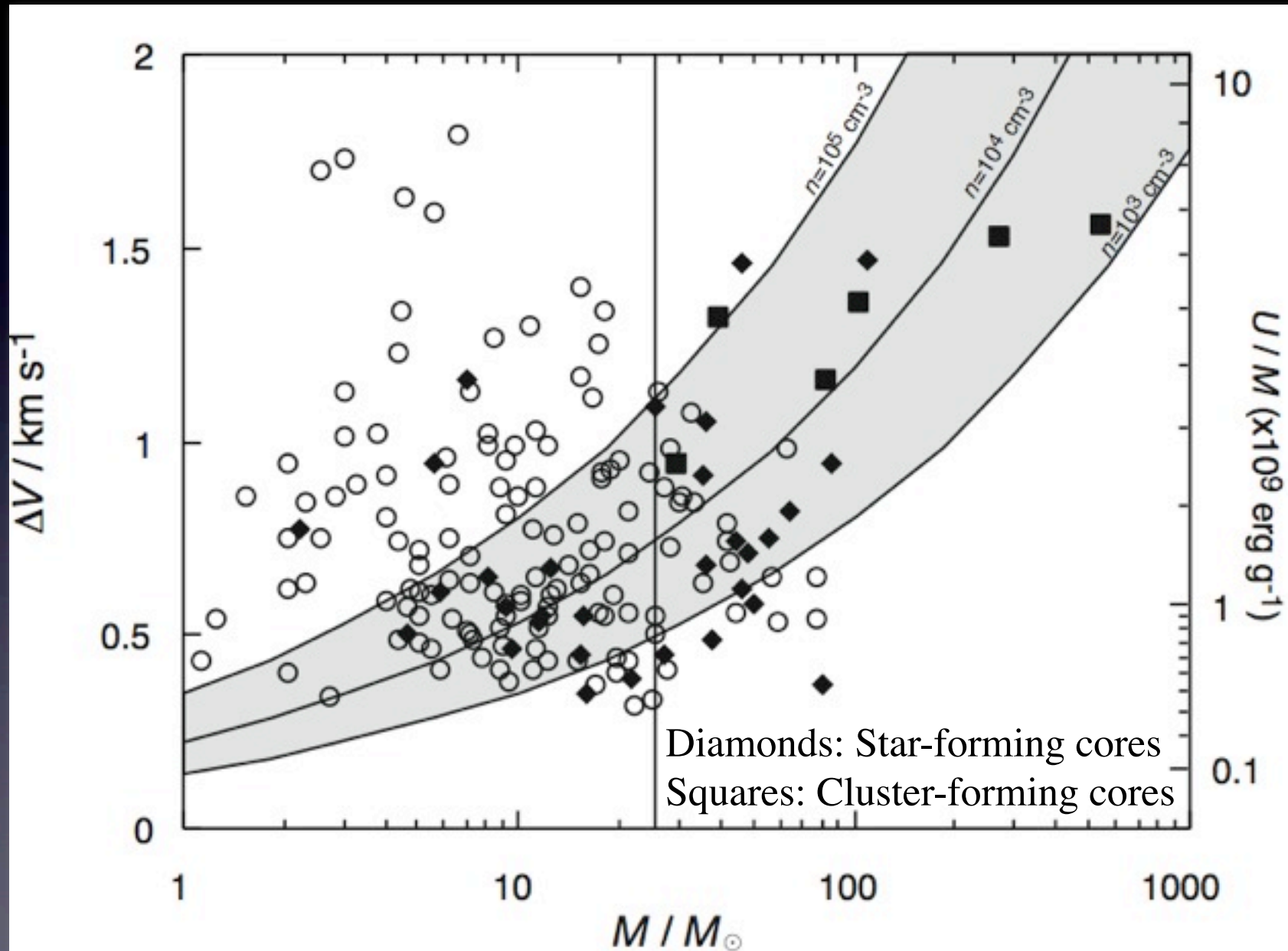
Magnetic fields  
or  
Interstellar turbulence





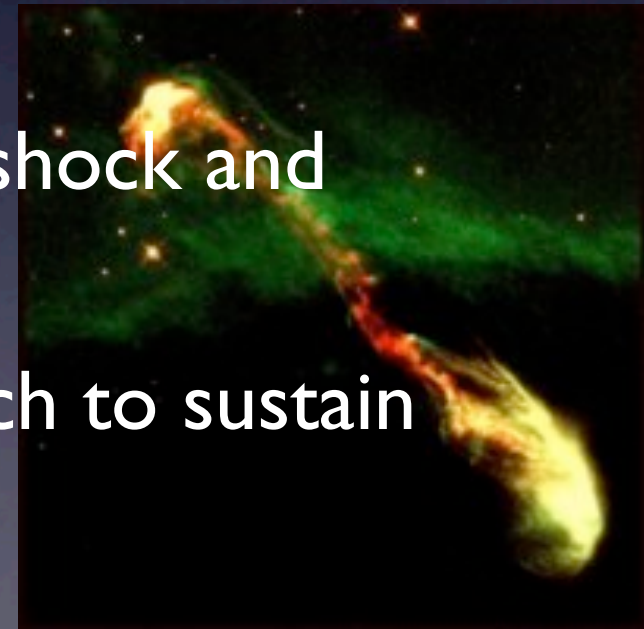
# Line width - mass relations

## NANTEN C<sup>18</sup>O core survey in nearby clouds

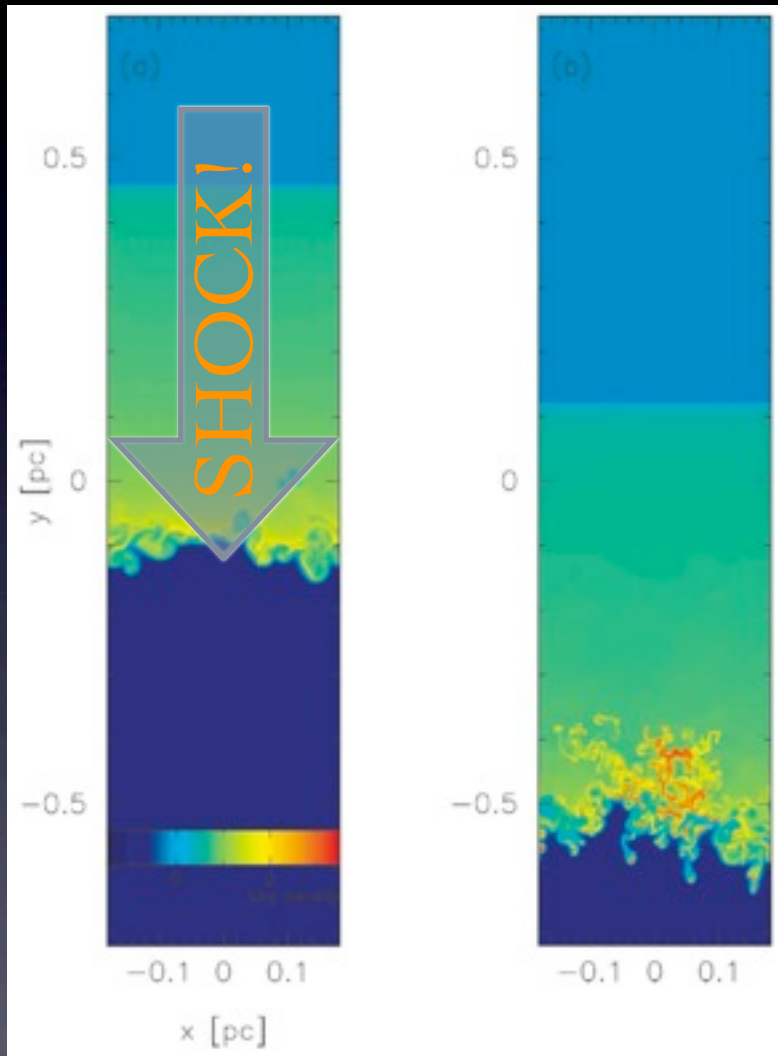


# Where the inter-stellar turbulence comes from?

- excited by large-scale wave (e.g., galactic density wave, SN, outflow, SW, etc...)
- cascade into smaller-scale waves (Kolmogorov turbulence)
- but the super-sonic wave forms shock and decays very rapidly
- Magnetic field does not help much to sustain turbulence



# The two-phase gas model



- ISM consist of warm ( $\sim 10^4$  K) and cold ( $< 100$  K) neutral medium (WNM and CNM)
- shock compression of diffuse WNM  $\Rightarrow$  turbulent CNM by TI
- sustained long due to subsonic random motion wrt the warm gas

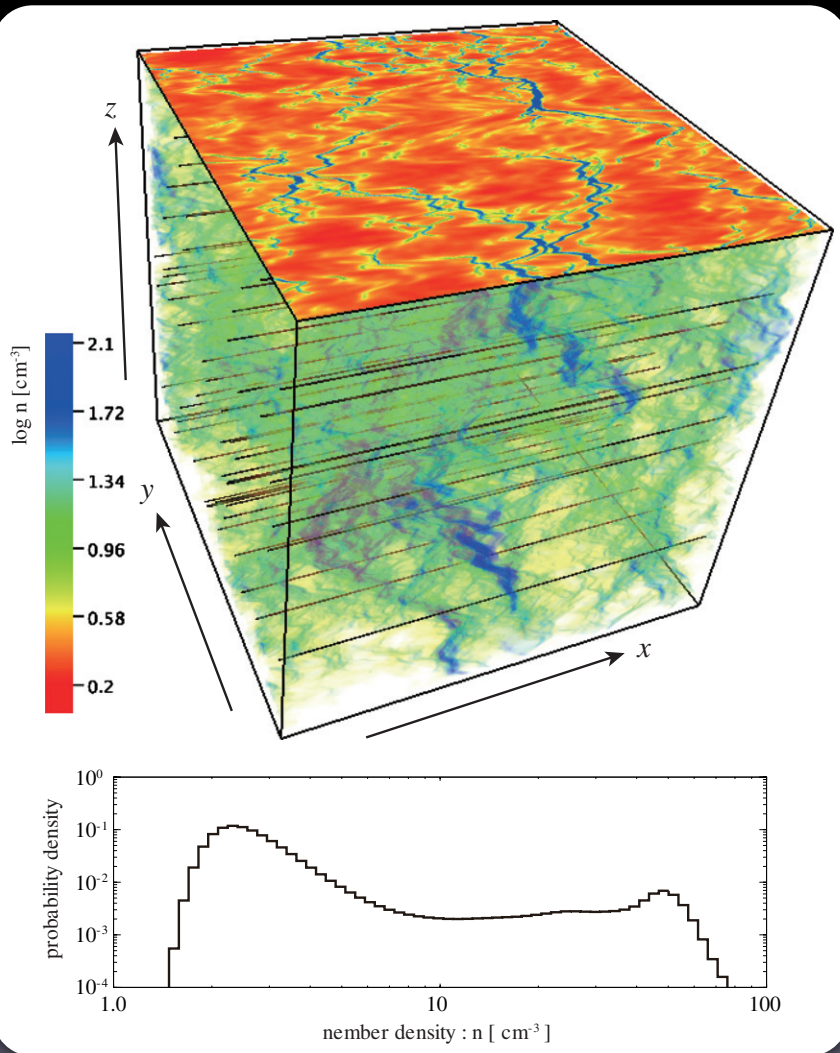
Thermal instability of shocked layer  
(Koyama & Inutsuka 2000, 2002)

(See also Hennebelle et al. 2007)

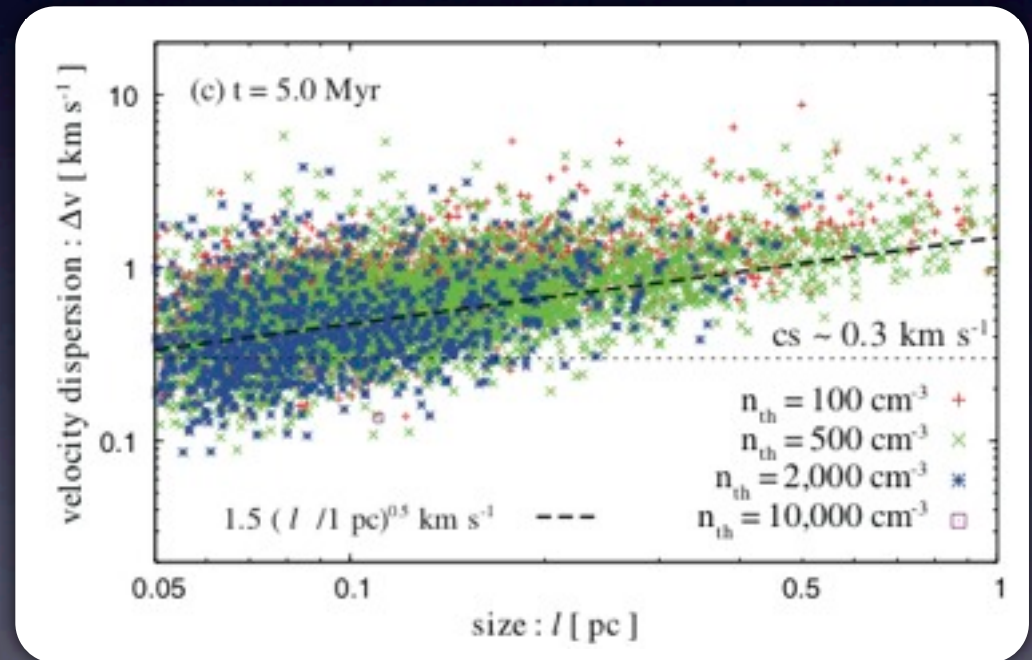


# Numerical simulations

- 3D MHD simulation of colliding flow
- Chemical reaction
- Radiative heating & cooling,
- Thermal conduction, etc...



Thermal instability



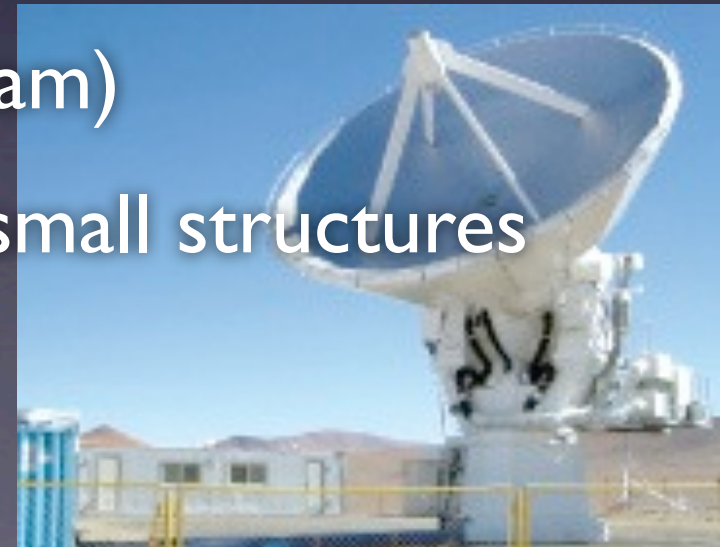
Larson's law

Inoue & Inutsuka 2012

# Ophiuchus North $^{12}\text{CO}$ observation

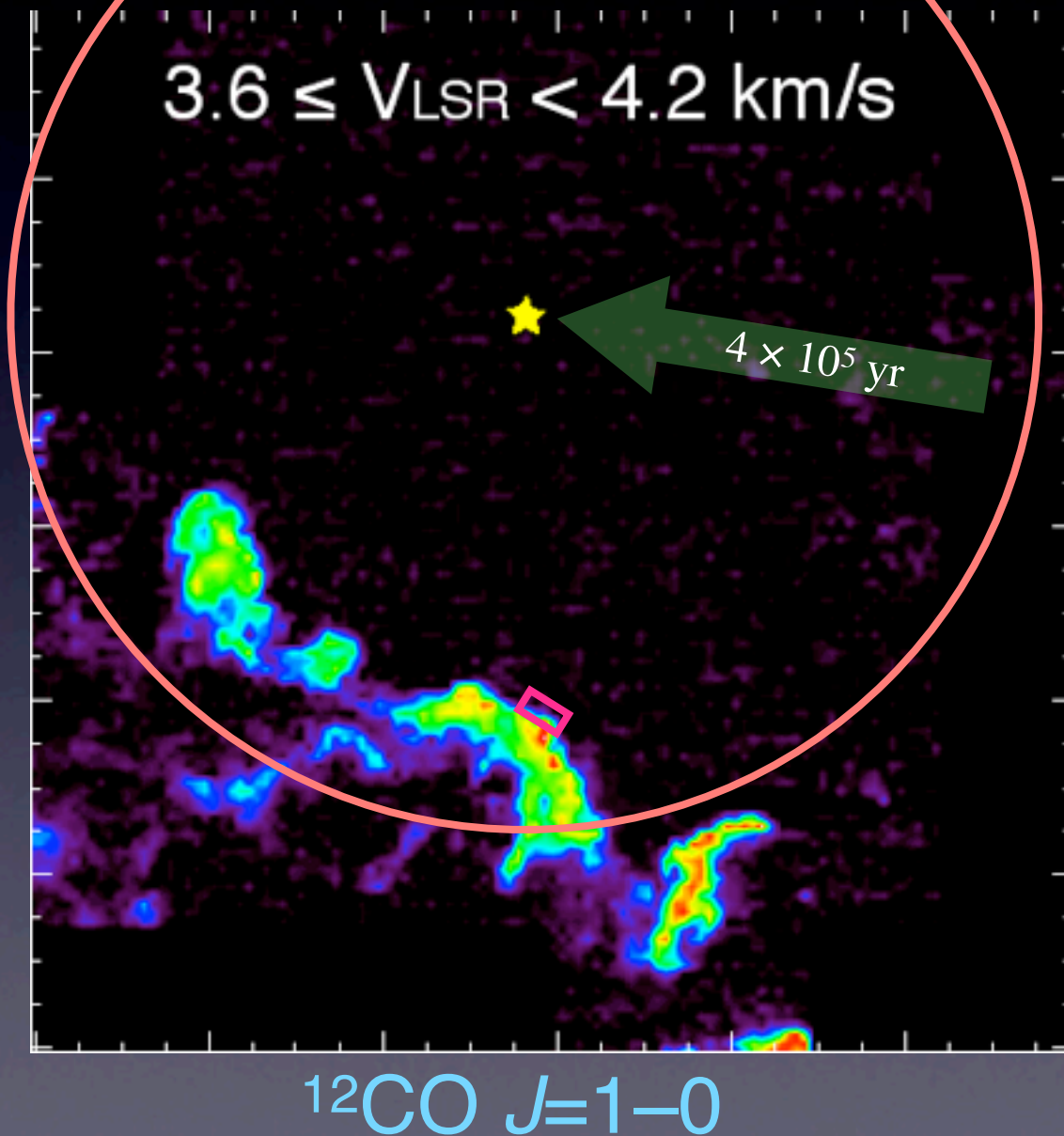
- NRO 45m + BEARS;  $^{12}\text{CO}$   $J=1-0$ 
  - HPBW =  $15''$ ; 2300 AU at 150 pc
  - L204 cloud surface on S27 excited by  $\zeta$  Oph
  - Repeat scans of a  $11' \times 22'$  region
  - $T_{\text{rms}} \sim 0.35$  K

- ASTE 10m;  $^{12}\text{CO}$   $J=3-2$ , ( $22''$  beam)
  - $4 \times 4$  and  $3 \times 3$  arcmin $^2$  around small structures
  - $T_{\text{rms}} \sim 0.13$  and  $0.1$  k





# L204 cloud complex & $\zeta$ Oph



The nearest O-type (9.5V) star at 150 pc

Runaway star ejected from Sco OB2

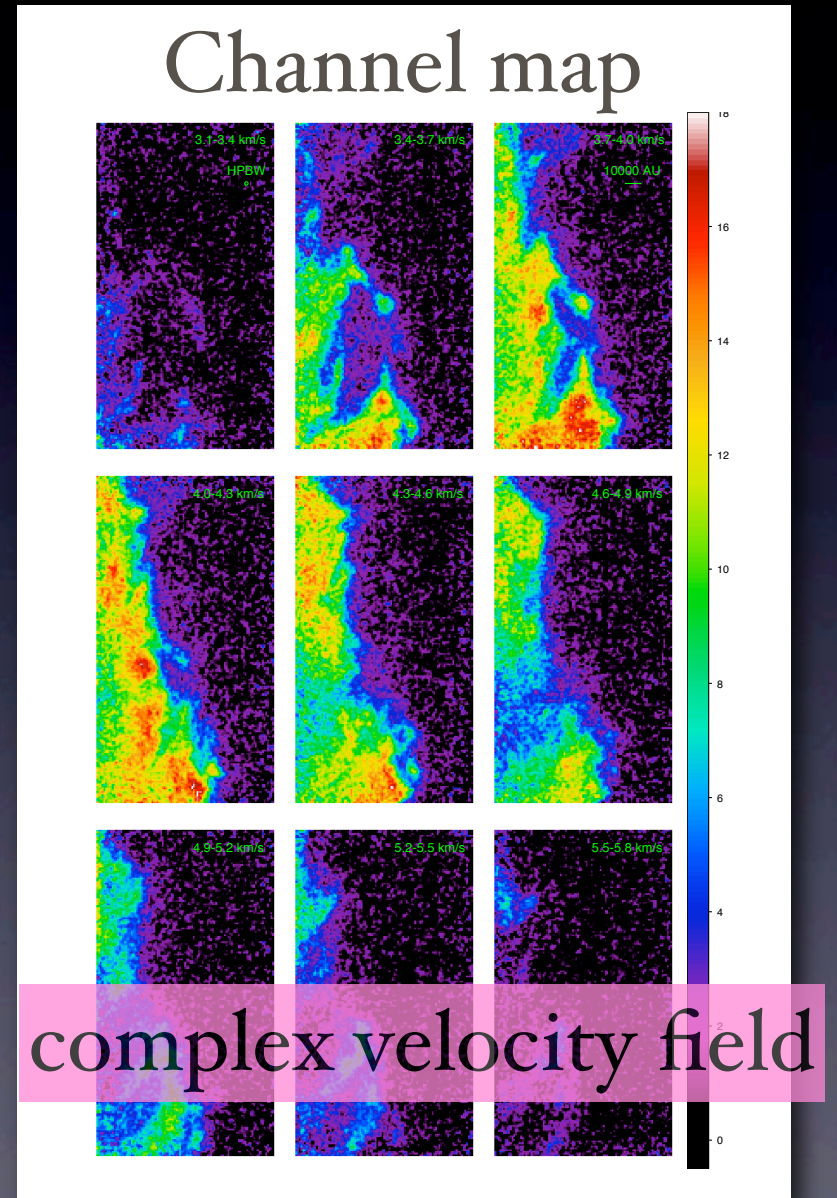
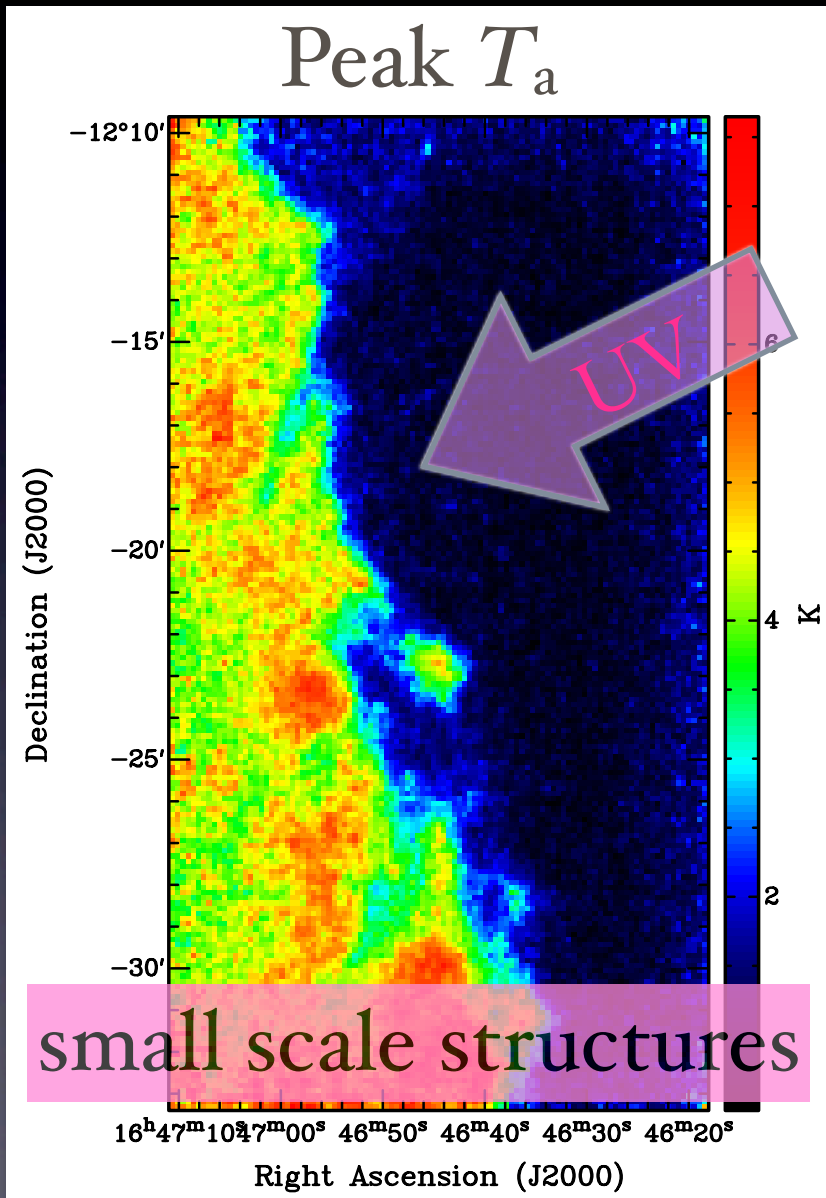
NANTEN  $8^\circ \times 8^\circ$  survey => cloud acceleration

Only a few YSOs

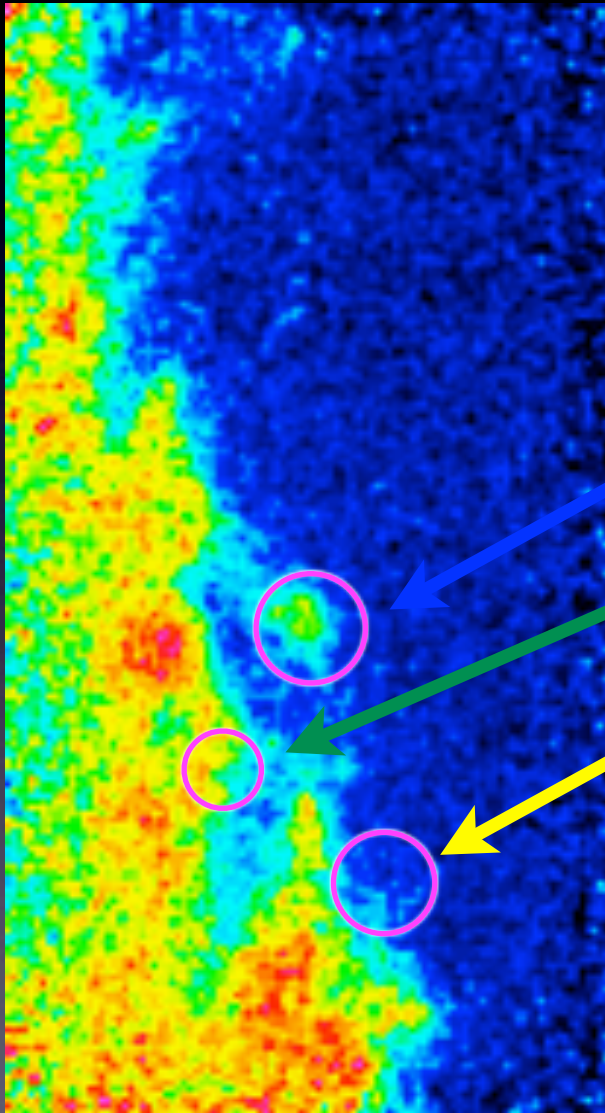




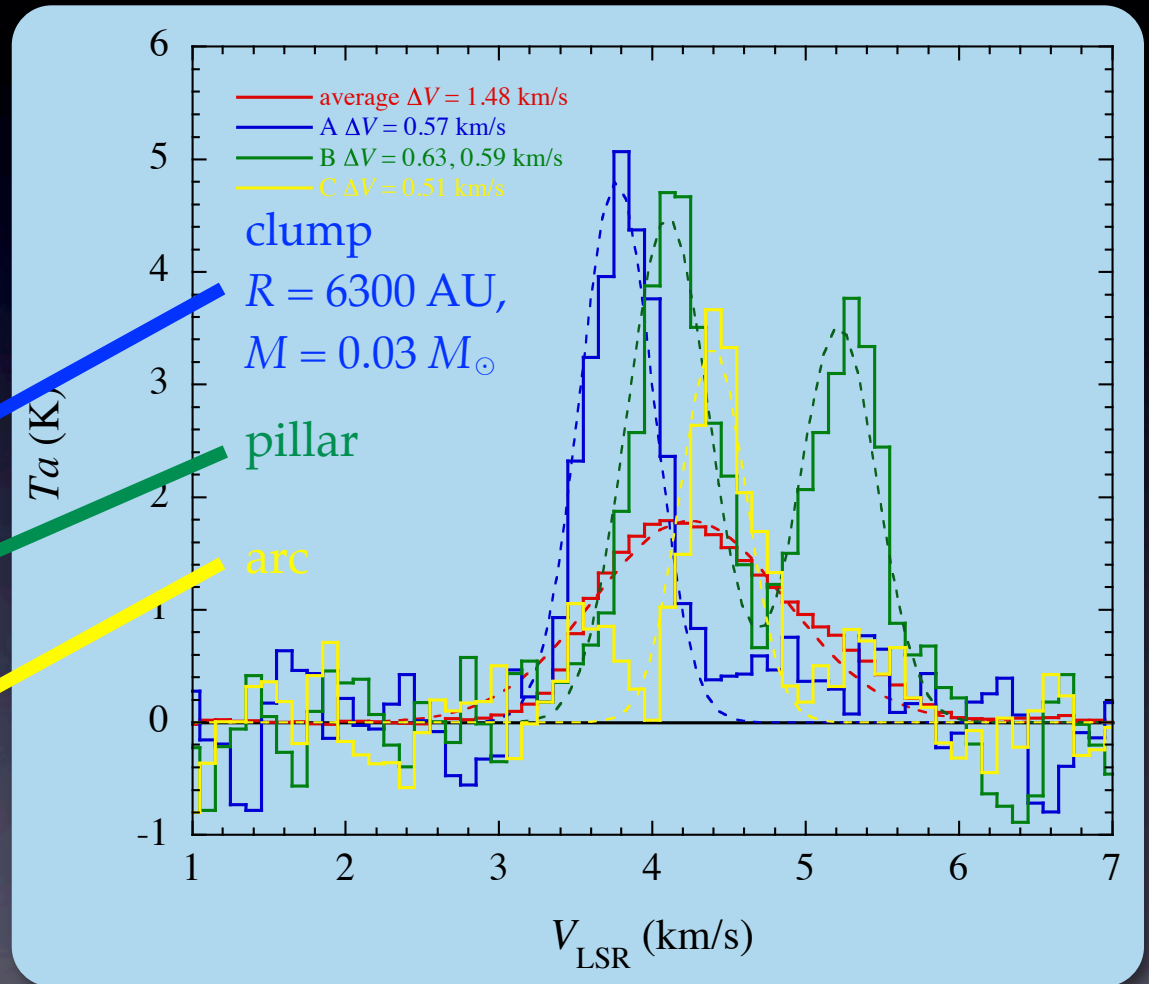
# Small scale structures of the cloud surface



# Complex velocity field



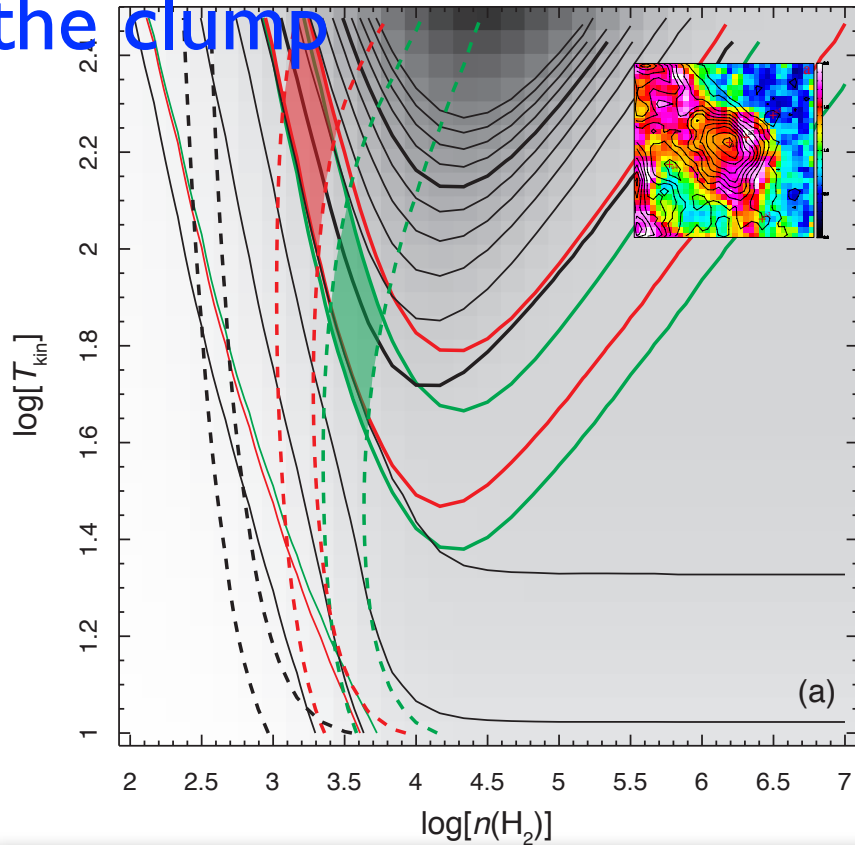
Channel map



$^{12}\text{CO}$  spectra  $\Delta V_{\text{small}} \sim 0.6$  km/s,  $\Delta V_{\text{ave}} \sim 1.5$  km/s

# $T_{\text{kin}}$ and $n(\text{H}_2)$

the clump

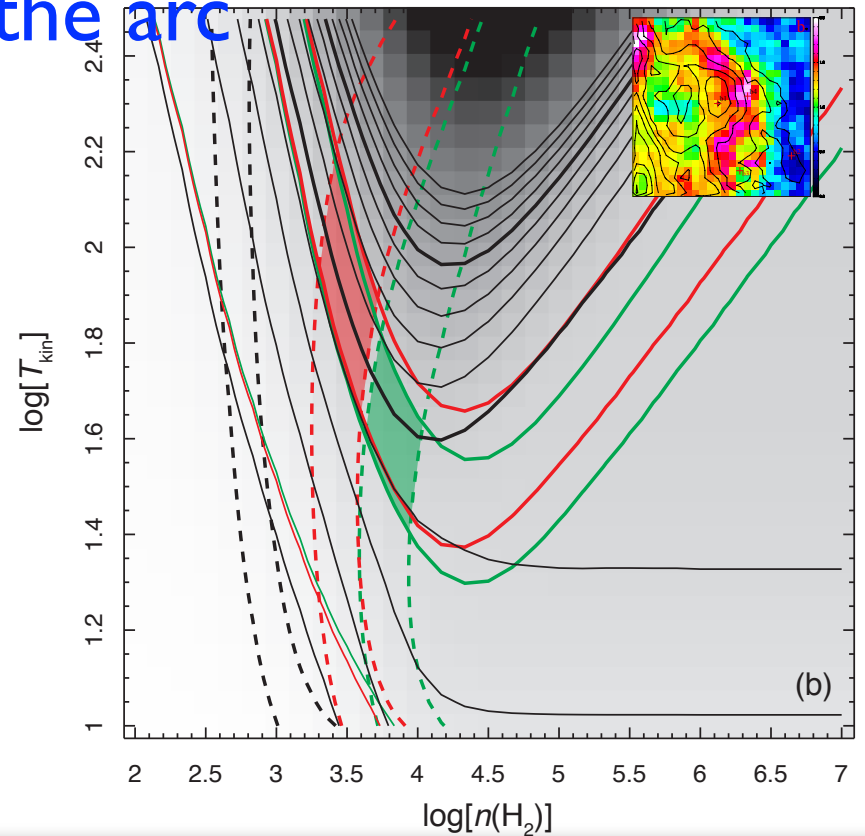


$1000 < n(\text{H}_2) [\text{cm}^{-3}] < 6000$   
 $\Rightarrow 0.008 < M [M_{\odot}] < 0.05$   
 $40 < T_{\text{kin}} [\text{K}] < 300$

$R = 6300 \text{ AU}, \Delta V = 0.6 \text{ km/s}$

$Z = 5 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-6}$

the arc



$2000 < n(\text{H}_2) [\text{cm}^{-3}] < 11000$   
 $\Rightarrow 0.005 < M [M_{\odot}] < 0.03$   
 $25 < T_{\text{kin}} [\text{K}] < 150$

$R = 3000 \text{ AU}, \Delta V = 0.6 \text{ km/s}$



# 星間乱流のまとめ

- 分子雲は多数の微細構造 ( $\leq 10000$  AU) からできている
- 視線方向の重なりが超音速乱流的なスペクトルをつくる
- 二相ガスモデルで星間乱流は説明できそう
- 磁場・WNMの観測がまだない

### 3. 超新星残骸における粒子加速

#### ■ 超新星残骸：大質量星が超新星爆発した後に残される残骸

–  $10^{51}$  erg のエネルギー放出

– 超音速衝撃波層の形成・膨張



星間空間へ多大な影響を与える

– 衝撃波と星間物質との相互作用

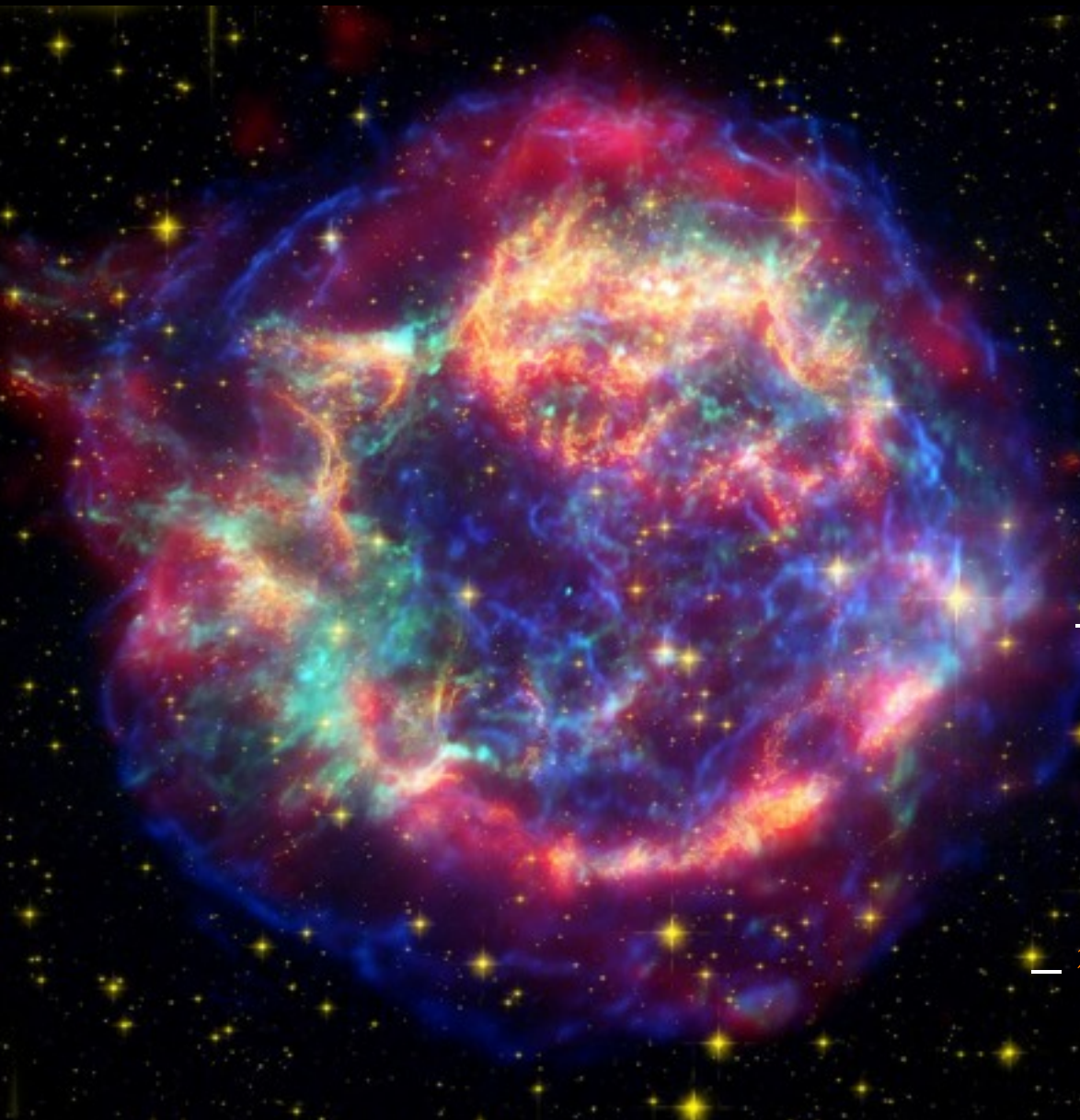
– 星間空間への重元素の供給

– 新たな星の誕生(e.g., Sano+10)

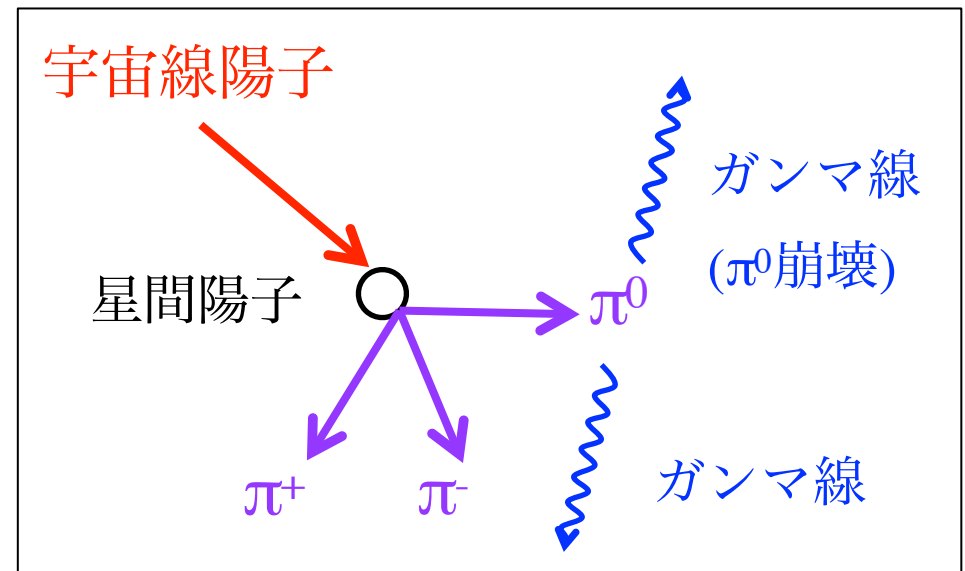
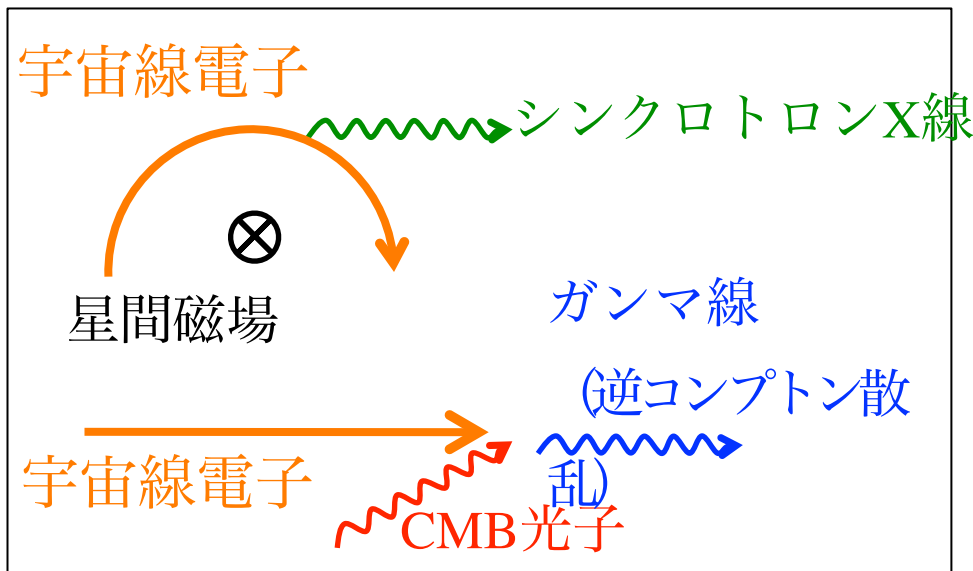
– 衝撃波面 ( $\sim 1000$  km/s) における

宇宙線粒子加速

etc.



# SNR as a Cosmic Ray Accelerator ( $\sim 10^{15.5}$ eV)



- 宇宙線電子：シンクロトロンX線の検出により、加速は証明 (e.g., Koyama+95)
- 宇宙線陽子：スペクトルの違いから逆コンプトン散乱と  $\pi_0-2\gamma$  を切り分けを試み、

Middle Aged SNR については、加速が示唆されつつある

⇒ 非一様ISM中にあるSNRは、スペクトルによる切り分けは困難 (Inoue+12)

SNRで宇宙線陽子が加速されているか否かを明らかにすることが

この研究分野の最大の焦点の1つ



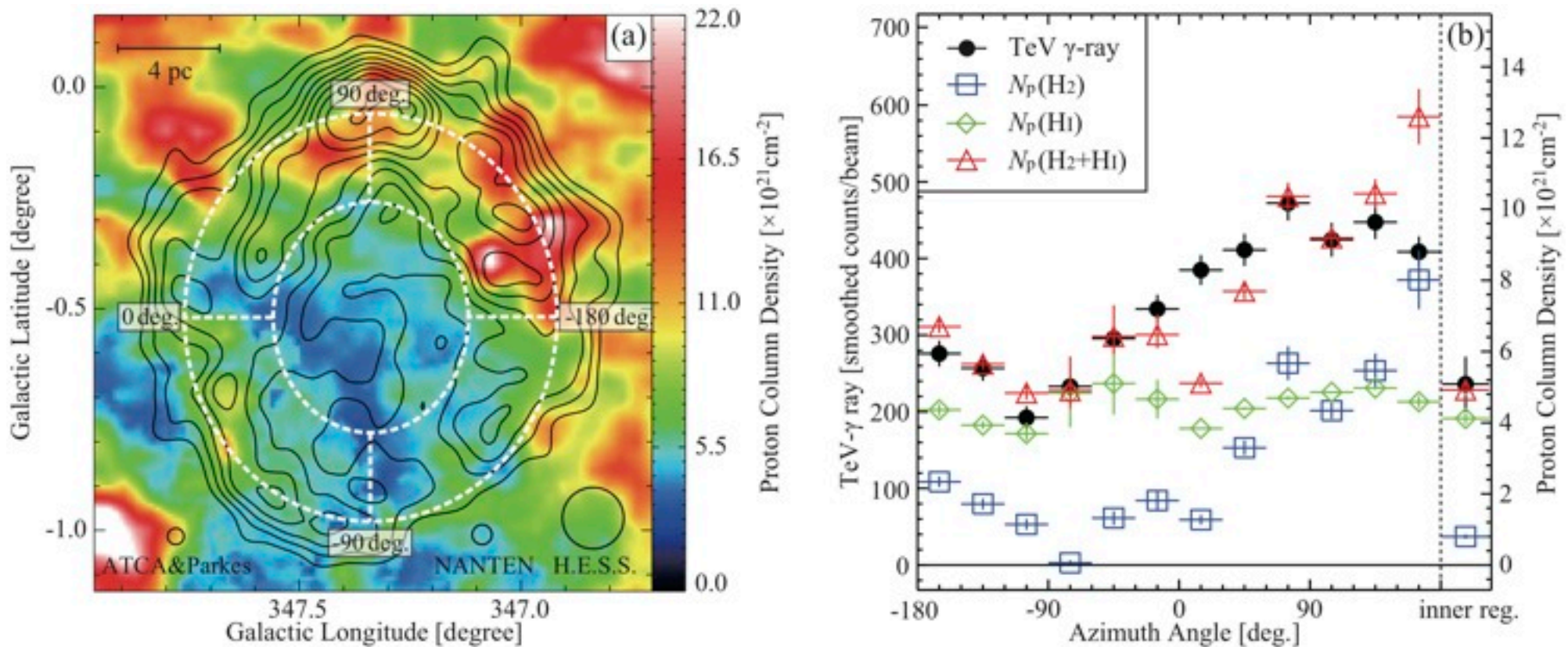
# TeV $\gamma$ -ray vs. Target ISM Proton

## ■ RX J1713.7–3946

- 水素分子と原子の質量比は同程度 ( $\text{H}_2$ :  $0.9 \times 10^4 M_\odot$ ,  $\text{HI}$ :  $1.1 \times 10^4 M_\odot$ )

- 宇宙線陽子の加速効率は  $0.1\%$  ( $\sim 10^{48}$  erg) 程度

⇒ 宇宙線陽子が加速されていると考えても矛盾はしない



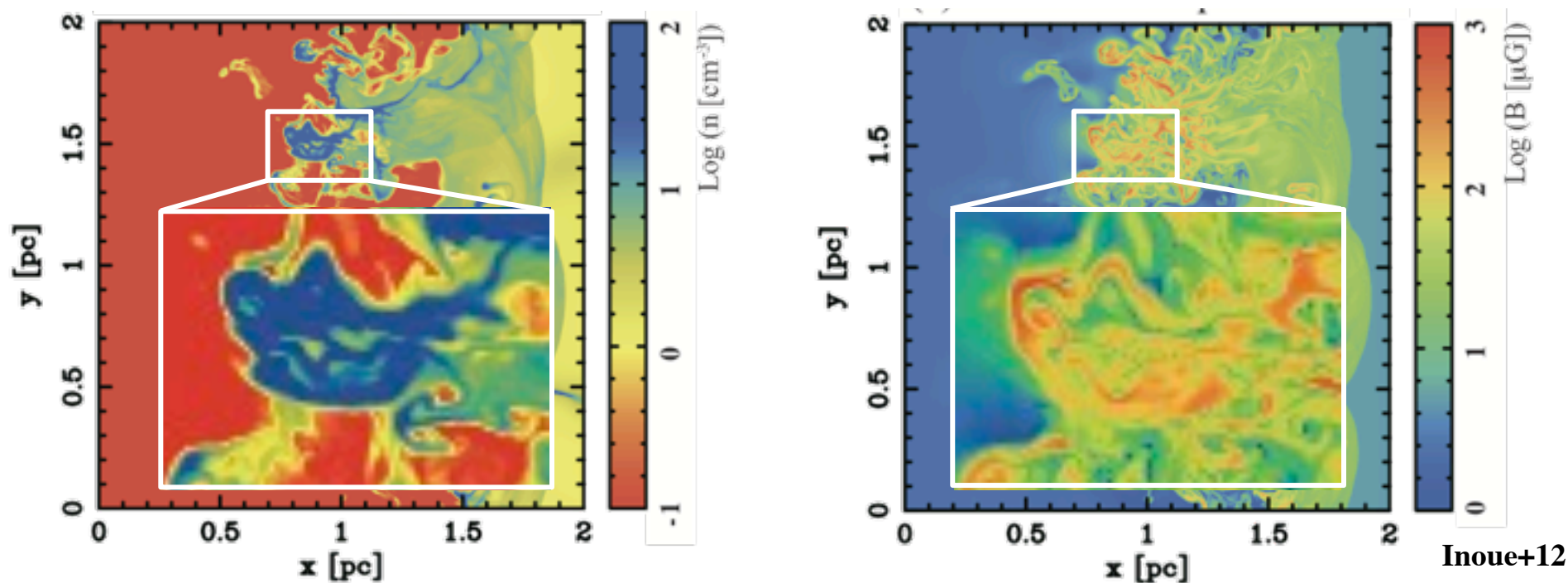
[左図] イメージ: 全星間陽子柱密度  $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$ , コントア: TeV ガンマ線強度 (Fukui, Sano et al. 2012)

[右図] TeVガンマ線, 水素分子 ( $\times 2$ )  $N_p(\text{H}_2)$ , 水素原子  $N_p(\text{HI})$ , 全星間陽子  $N_p(\text{H}_2+\text{HI})$  の方位角分布

# Numerical Simulation

## ■ MHD Simulation of Shock-cloud interaction (Inoue+12)

熱的不安定性により形成された clumpy な ISM (Inoue&Inutsuka+08,+09) へ衝撃波伝搬



○ 衝撃波速度  $V_{sh}$  は  $1/(\text{星間ガス密度})^{0.5}$  で減速

⇒ 密度差の大きな分子雲周辺 ( $\Delta n \sim 10^{3-5}$ ) で速度差発生 → 乱流の生成

○ 分子雲近傍に強いシア流 (回転電場) + 乱流が磁場を巻き上げ増幅 (乱流ダイナモ)

⇒ 磁場  $B \sim 0.1-1 \text{ mG}$  まで増幅される → 分子雲周辺でX線放射がエンハンスされる

星間ガス周辺のX線増光が期待 ⇒ 観測でも見えはじめています

# 粒子加速のまとめ

- TeV  $\gamma$ 線の起源として、陽子加速はありそう
- 電子起源との切り分けはまだむずかしい
- 磁場・および十分な分解能での密度構造の情報から、理論モデルの検証を試みる



# 全体のまとめ

- 星間物質はとてもダイナミック
- 衝突・加速・加熱・冷却・相転移 . . .
- 観測データは増えてきた（あとは高分解能の原子ガスと磁場の情報が）
- More to come with the NASCO survey!