

# サーベイデータで探る大質量星形成： 分子雲衝突による誘発的星形成の観点から

鳥居和史 (国立天文台/野辺山)

- 福井康雄, 服部有祐, 西村淳, 大浜晶生 (名古屋大), 大西利和 (大阪府立大), 羽部朝男, 島和宏 (北海道大)
- 花岡美咲, 服部和生, 石原大助, 金田英宏(名古屋大)
- 南谷哲宏, 梅本智文 (国立天文台/野辺山), 藤田真司, 栗木美香, 久野成夫 (筑波大), 松尾光洋 (鹿児島大), 服部有祐, 西村淳, 河野樹人, 立原研悟 (名古屋大), 濤崎智佳 (上越教育大), 津田裕也 (明星大), 大橋聡史 (東京大) + FUGIN チーム

# 大質量星形成

## 大質量星：

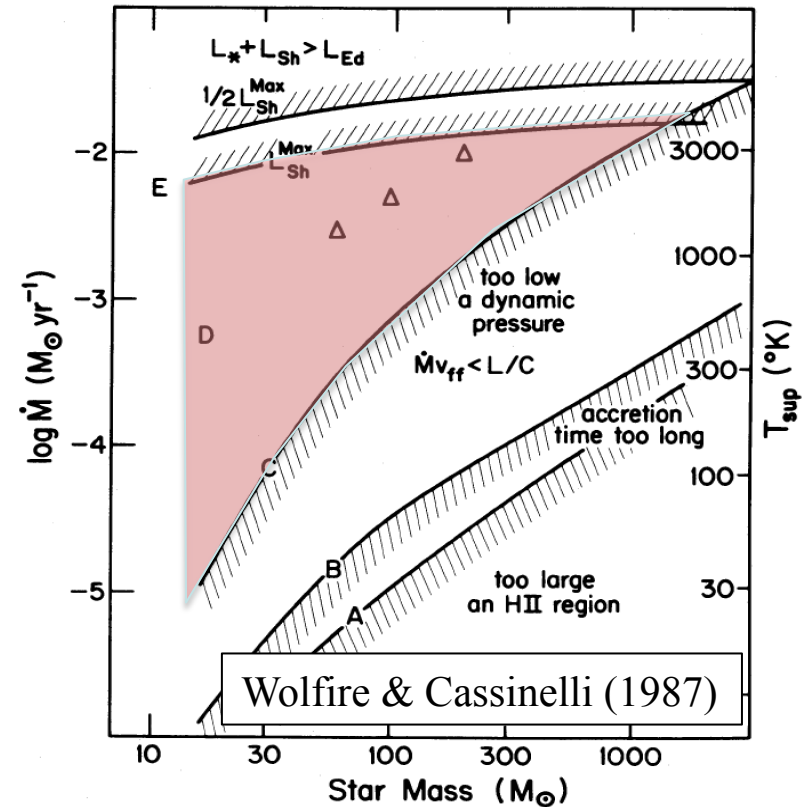
- 質量  $> 8 M_{\text{Sun}}$  (B3型星)
- 紫外線・星風・超新星爆発
- 超新星爆発で重元素を合成
- 銀河の進化に決定的な影響

形成メカニズムの解明は重要課題

## 大質量星の形成：

- 観測的困難：サンプルが少ない, 母体分子雲を破壊
- 強い放射圧 ( $L_* \propto M_*^{3-4}$ ) → 高い質量降着率 ( $> 10^{-4} M_{\text{Sun}}/\text{yr}$ ) が鍵

$$\dot{M} \sim \frac{M_{\text{J,eff}}}{t_{\text{ff}}} = \frac{c_s^3}{G} \simeq 5 \times 10^{-6} \left( \frac{T}{10 \text{ K}} \right) M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$



# 自己重力的形成シナリオ

2つの有力視されているシナリオ (最近のレビュー: Tan+14)

- コア降着モデル (e.g., McKee & Tan 03; Krumholz+07, 09; Hosokawa+10; Myers+13)
  - 小質量星形成モデルのスケールアップ版 (Shu et al. 1987)
  - 大質量分子雲コア ( $>100M_{\odot}$  within 0.1pc,  $M_{\text{core}} > 100M_{\text{J}}$ )
- 競争的降着モデル (e.g., Bonnell+01, 04, 07; Smith+11, 13)
  - 大質量分子雲コアを経由しない
  - proto-clusterから星団と共に大質量星を作る ( $M_{\text{core}} \sim M_{\text{J}}$ )
- いずれも自己重力的な大質量ガス塊を起点にする
  - 赤外線暗黒星雲 (Infrared Dark Clouds = IRDCs)が有力な候補
  - $T < 20\text{K}$  &  $n(\text{H}_2) > 10^5 \text{ cm}^{-3}$  (Carey+98; Pillai+06)
  - 銀河面で1万個以上のIRDCsが同定 (i.e., Simon+06; Peretto & Fuller 09)
  - 大多数のIRDCsはMassive YSOsやHigh-mass protostarsを伴わない (Peretto+10)

# 誘発的形成シナリオ

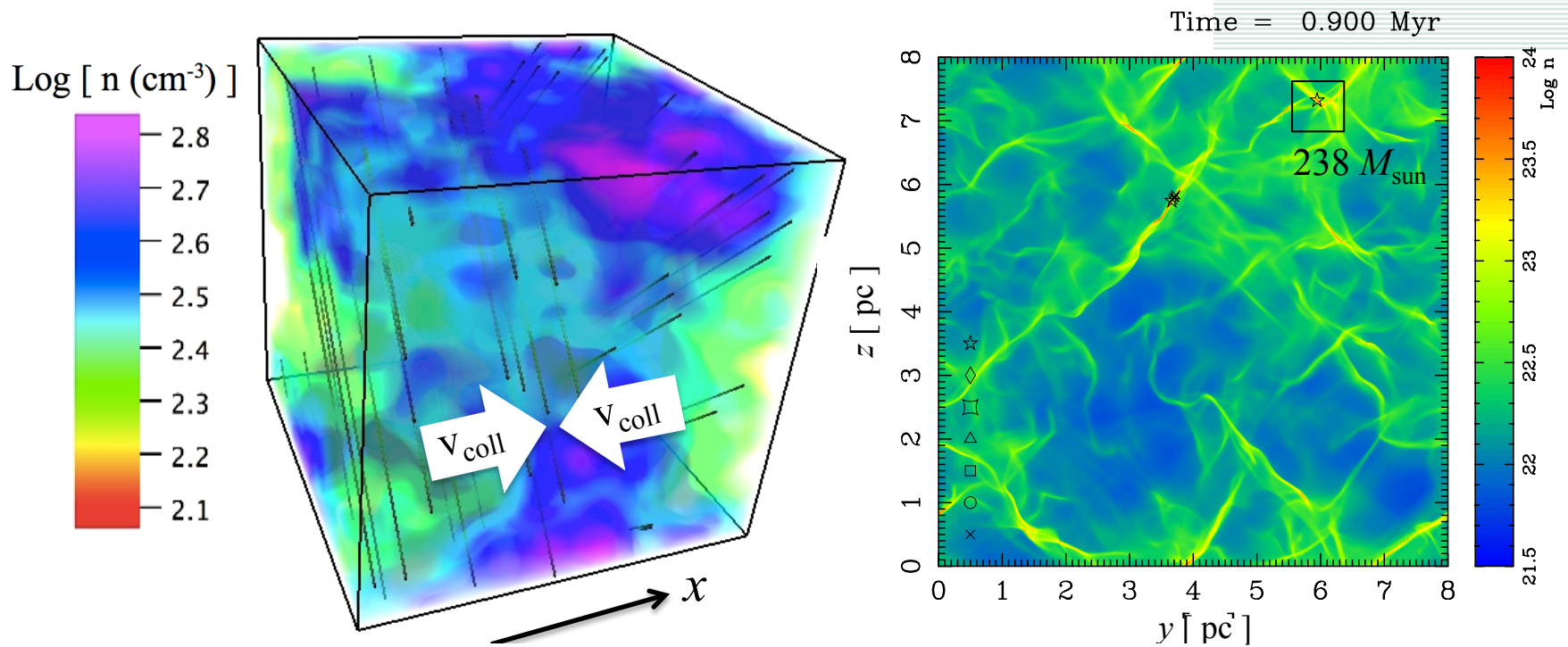
外的作用をトリガーとする大質量クランプ・大質量星形成

- 大質量星からのフィードバック (c.f., Elmegreen+07)
  - 候補：UV放射、膨張シェル (HII領域), SNR
- 分子雲衝突
  - 2009年の巨大星団Westerlund 2での発見を契機に(Furukawa+09)、観測・理論の両面で大きく進展
  - MW-like銀河での衝突頻度（平均自由時間）：~7 Myr (Tasker & Tan 11; Dobbs+15)

観測結果：

- 速度10–30km/sの超音速衝突
- Westerlund 2, NGC3603, RCW38等の巨大星団(Furukawa+09; Fukui+14, 16)
- M20, RCW120などの単一のO型星からなるHII領域(Torii+11,15)
- ALMAによるLMCのN159(Fukui+15, Saigo+16)

# MHD数值計算 (Inoue & Fukui 2013)



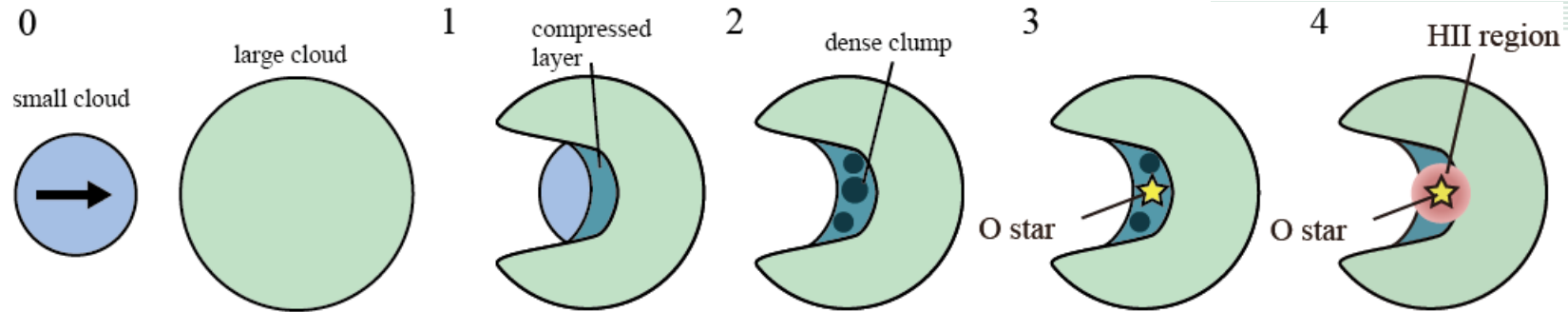
$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{ff}} = \frac{c_s^3}{G} \sim 2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr} \left( \frac{T}{10K} \right)^{3/2}$$

$$M_{J,\text{eff}} \approx (c_s^3 + c_A^3 + \Delta v^3) / (G^{3/2} \rho^{1/2}) \quad c_s^3 : c_A^3 : \Delta v^3 = 1 : 125 : 90$$

- 磁場と乱流の増幅により質量降着率が増加

$$dM/dt = 5 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3} M_{\text{sun}}/\text{yr}$$

# 分子雲衝突モデル

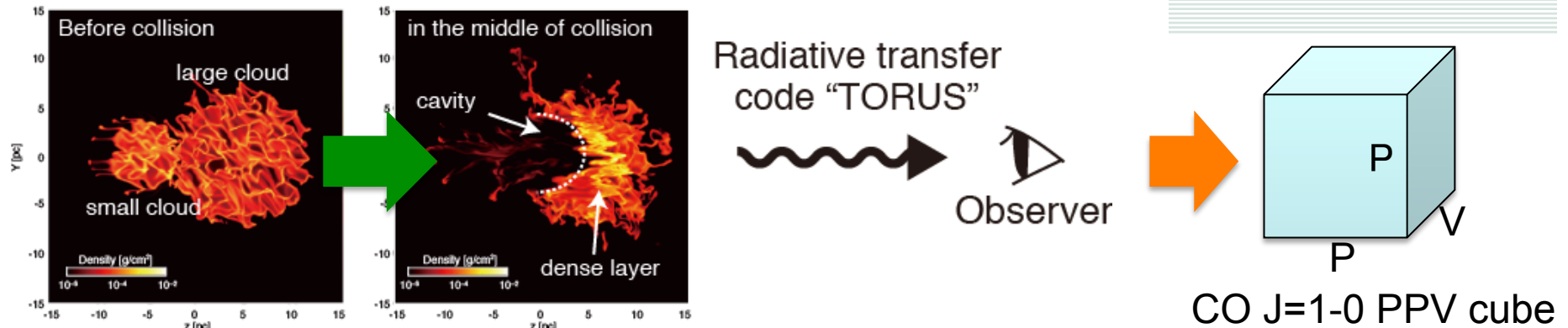


Habe & Ohta (1992)モデル: 2つの異なるサイズの分子雲の衝突

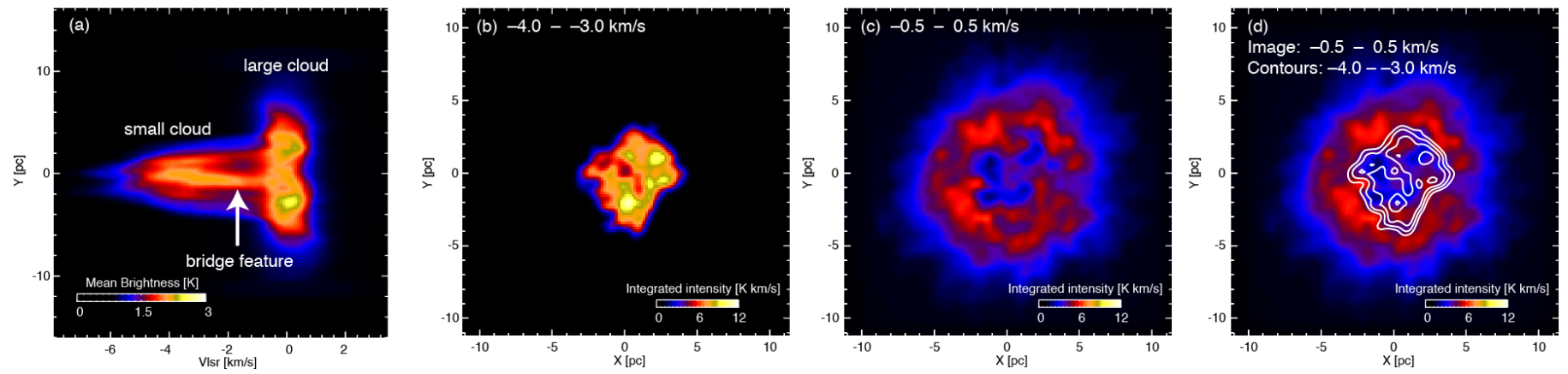
1. 衝突により分子雲(大)に空洞が形成され、その内部で衝突圧縮層が作られる。
2. 圧縮層の内部で大質量分子雲クランプが形成される
3. 大質量星が形成される
4. すぐに周囲を電離し、HII領域を形成する

最終的な分子雲、大質量星、HII領域の観測的に捉えられる構造は、衝突のバリエーションやタイムスケールに大きく依存する

# 分子雲衝突数値計算の発展



- 分子雲衝突の数値計算データに対する疑似的CO J=1-0輝線の観測.  
(Takahira et al. 2014; Haworth et al. 2015a, b)



## 分子雲衝突に特有な2つの観測的特徴を発見

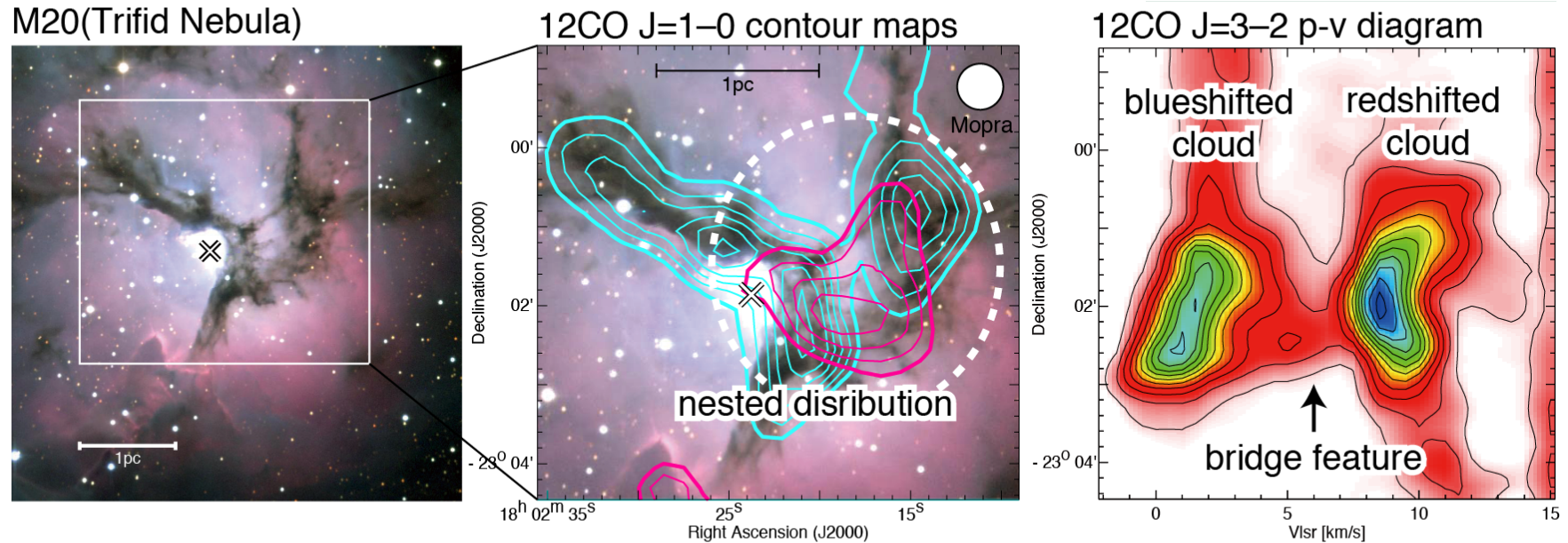
- 位置-速度図で2つの分子雲を結ぶブリッジ構造
- 2つの分子雲の空間的な相補性 (反相関分布)

観測結果の例 : M20 (Torii et al. 2011, 2016 submitted)





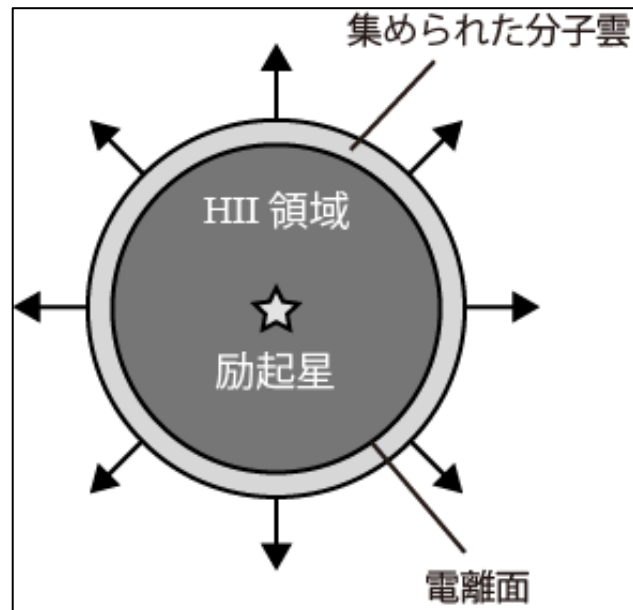
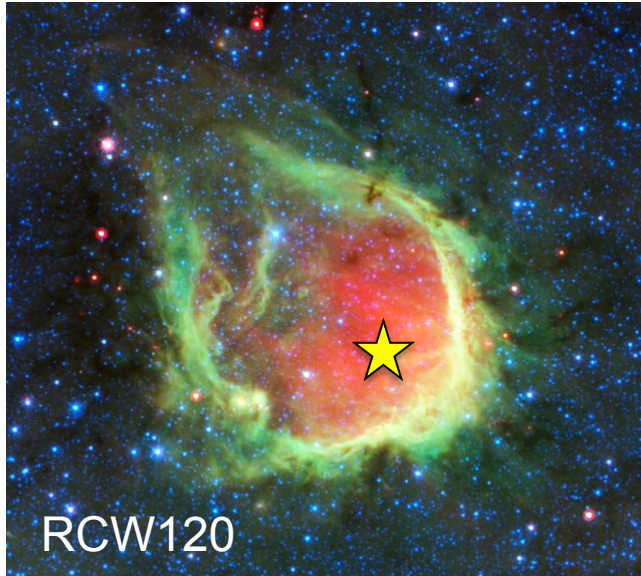
# 観測結果の例 : M20 (Torii et al. 2011, 2016 submitted)



- A young galactic ( $\sim 0.3$  Myr) HII region ionized by single O7.5V star.
  - Mopra CO J=1-0 & ASTE CO J=3-2 observations indicate that:
    1. The two colliding clouds with velocity separation  $\sim 7$  km/s shows complementary distributions.
    2. The two clouds are connected by bridge features in the p-v diagram.
- These signatures are consistent with the model calculations.

(Torii et al. 2016, submitted to ApJ)

# 研究成果 RCW120 (Torii et al. 2015, ApJ, 806, 7)



## RCW120

- 単一のO7型星( $\sim 20M_{\text{Sun}}$ )を中心とする星雲
- リング状の赤外線分布(PAH)
- リング内部にHII領域

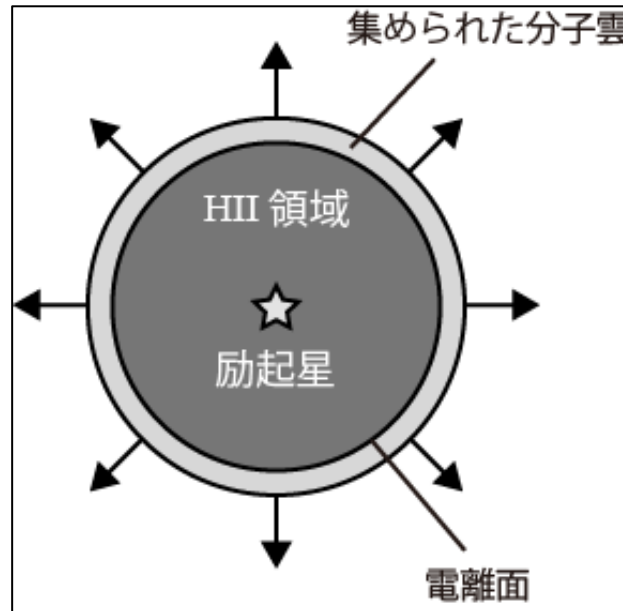
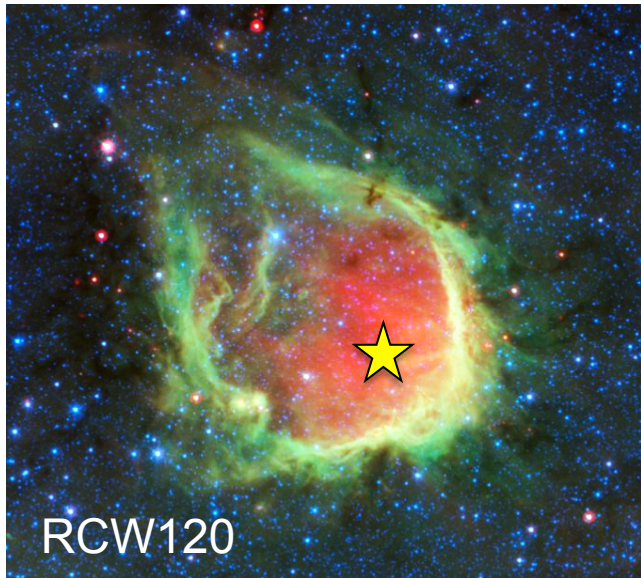
## 従来 of 解釈

- HII領域が形成する膨張シェル

## 本研究

- CO観測(NANTEN2, Mopra, ASTE)
  - 膨張構造が見られない
- 従来のモデルでは解釈できない

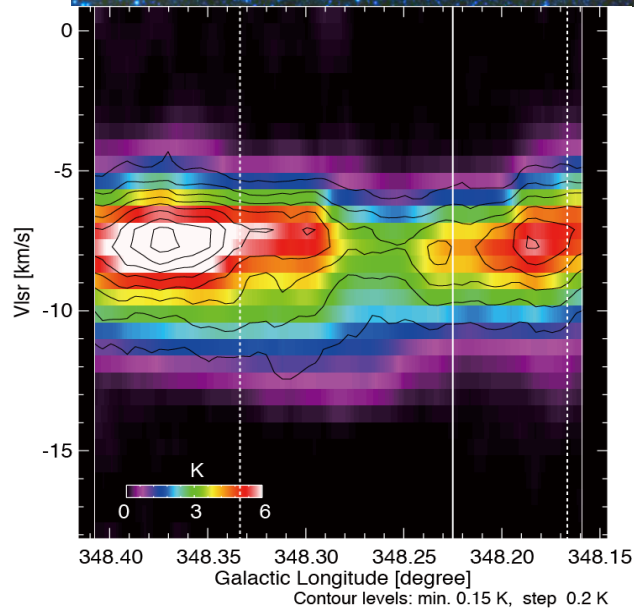
# 研究成果 RCW120 (Torii et al. 2015, ApJ, 806, 7)



( $0M_{\text{Sun}}$ )を中心と

炭素分布(PAH)

領域



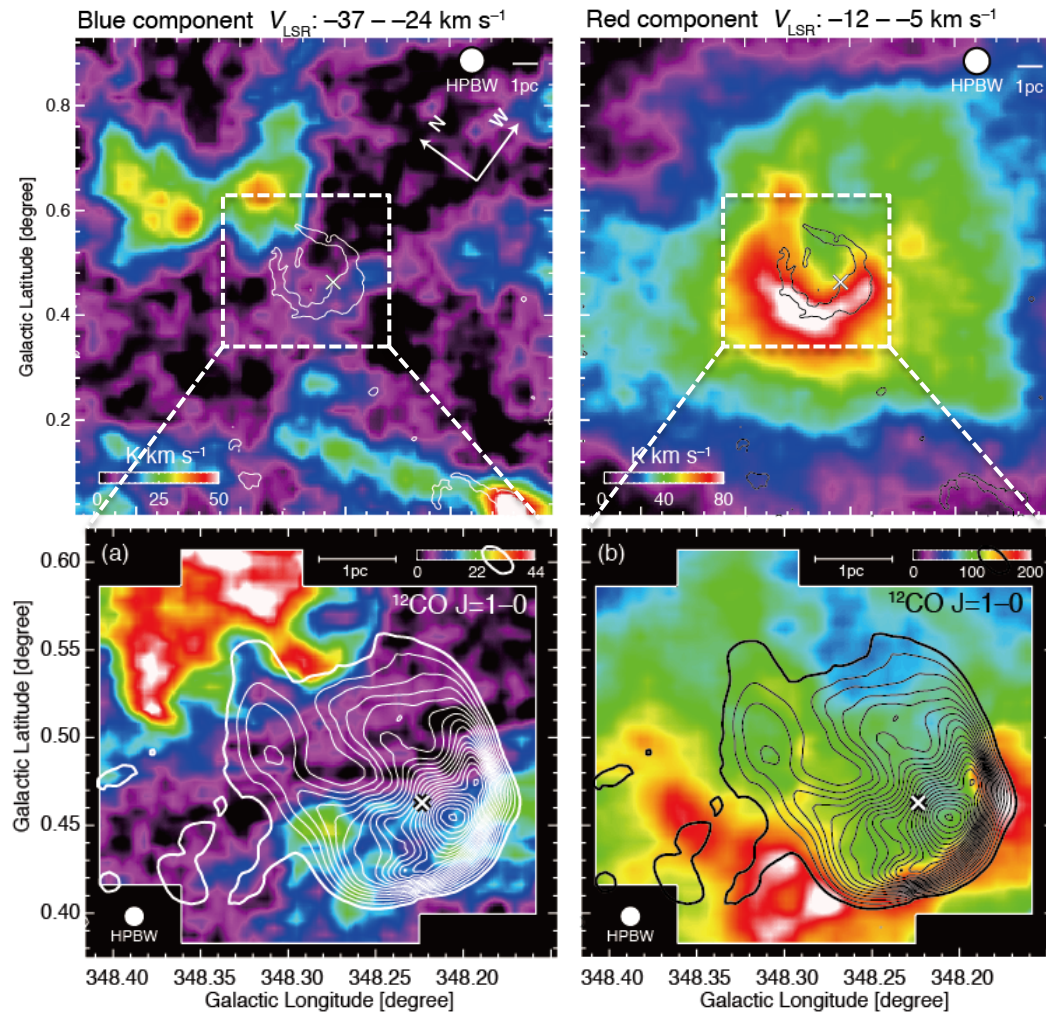
- HII領域が形成する膨張シェル

## 本研究

- CO観測(NANTEN2, Mopra, ASTE)
- 膨張構造が見られない

→ 従来のモデルでは解釈できない

# 研究成果 RCW120 (Torii et al. 2015, ApJ, 806, 7)

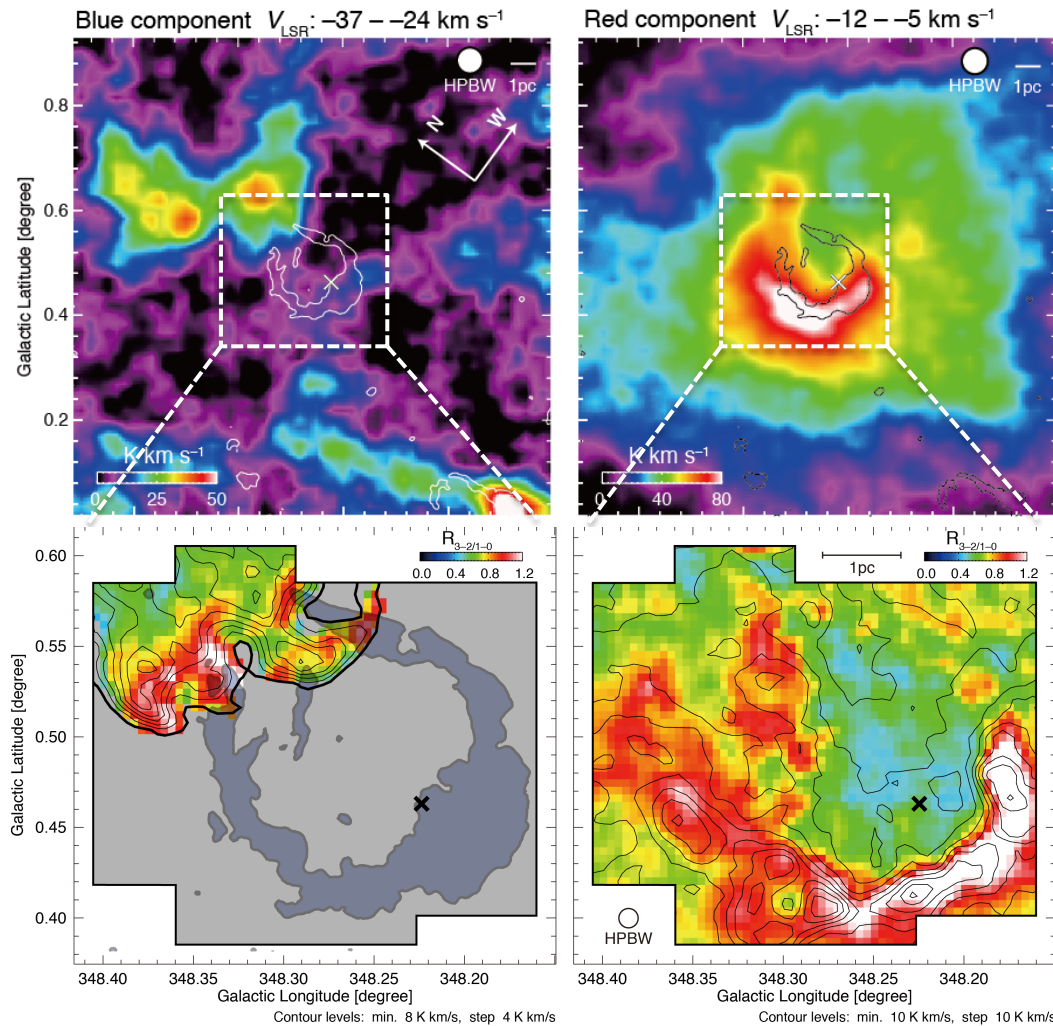


- 20 km/sの速度差を持つ2つの分子雲を同定
  - 2つの分子雲が共に：
    - HII領域に沿った分布
    - HII領域付近で高いCOJ=3-2/J=1-0比
- 励起星により加熱



2つの分子雲が共に  
RCW120に付随

# 研究成果 RCW120 (Torii et al. 2015, ApJ, 806, 7)

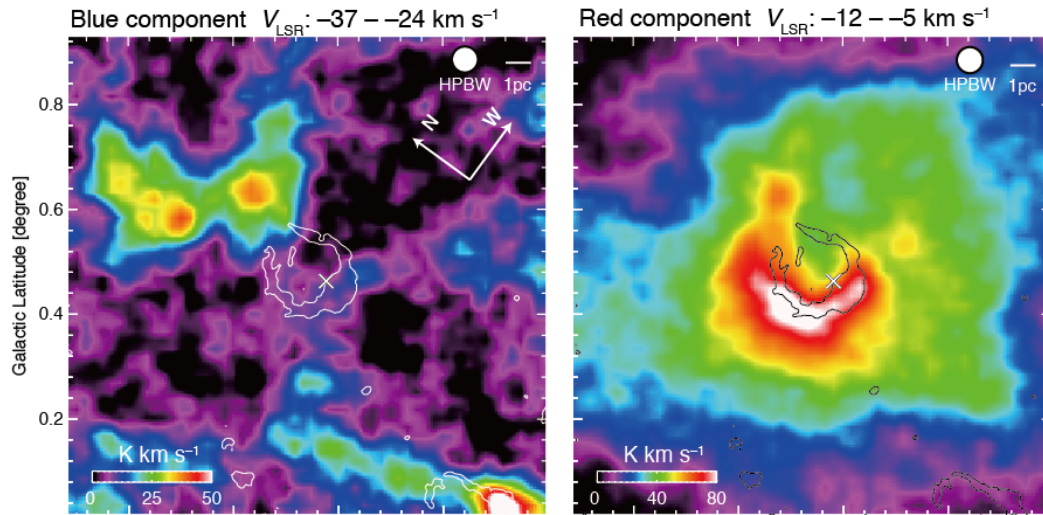


- 20 km/sの速度差を持つ2つの分子雲を同定
- 2つの分子雲が共に：
  - HII領域に沿った分布
  - HII領域付近で高いCOJ=3-2/J=1-0比
 → 励起星により加熱



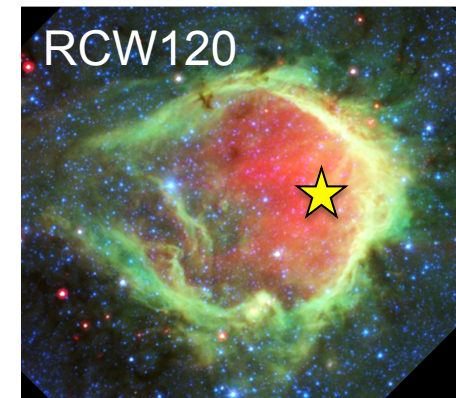
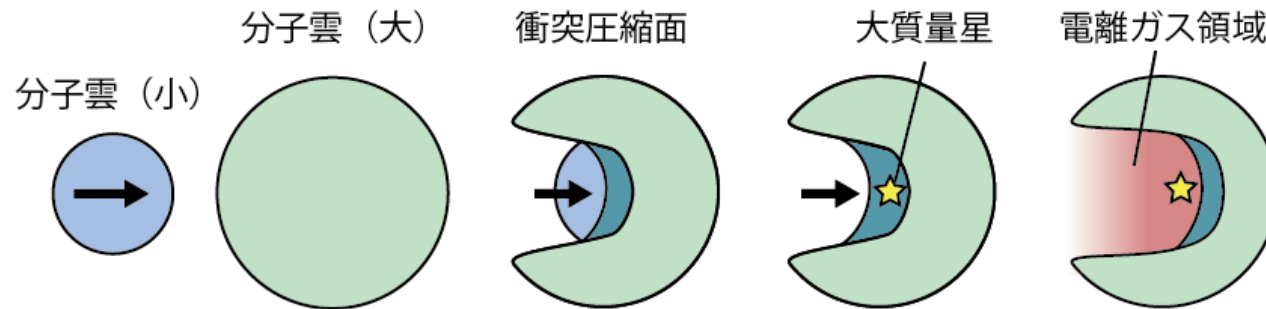
2つの分子雲が共にRCW120に付随

# 研究成果 RCW120 (Torii et al. 2015, ApJ, 806, 7)



## 分子雲衝突モデル

- 大小2個の分子雲の衝突
- 分子雲内部に空洞を形成
- 衝突面で大質量星が形成
- 電離ガスが空洞内部を満たす



衝突のタイムスケール  $\sim 0.2 \text{ Myr}$   
 → 質量降着率  $10^{-4} M_{\text{Sun}}/\text{yr}$

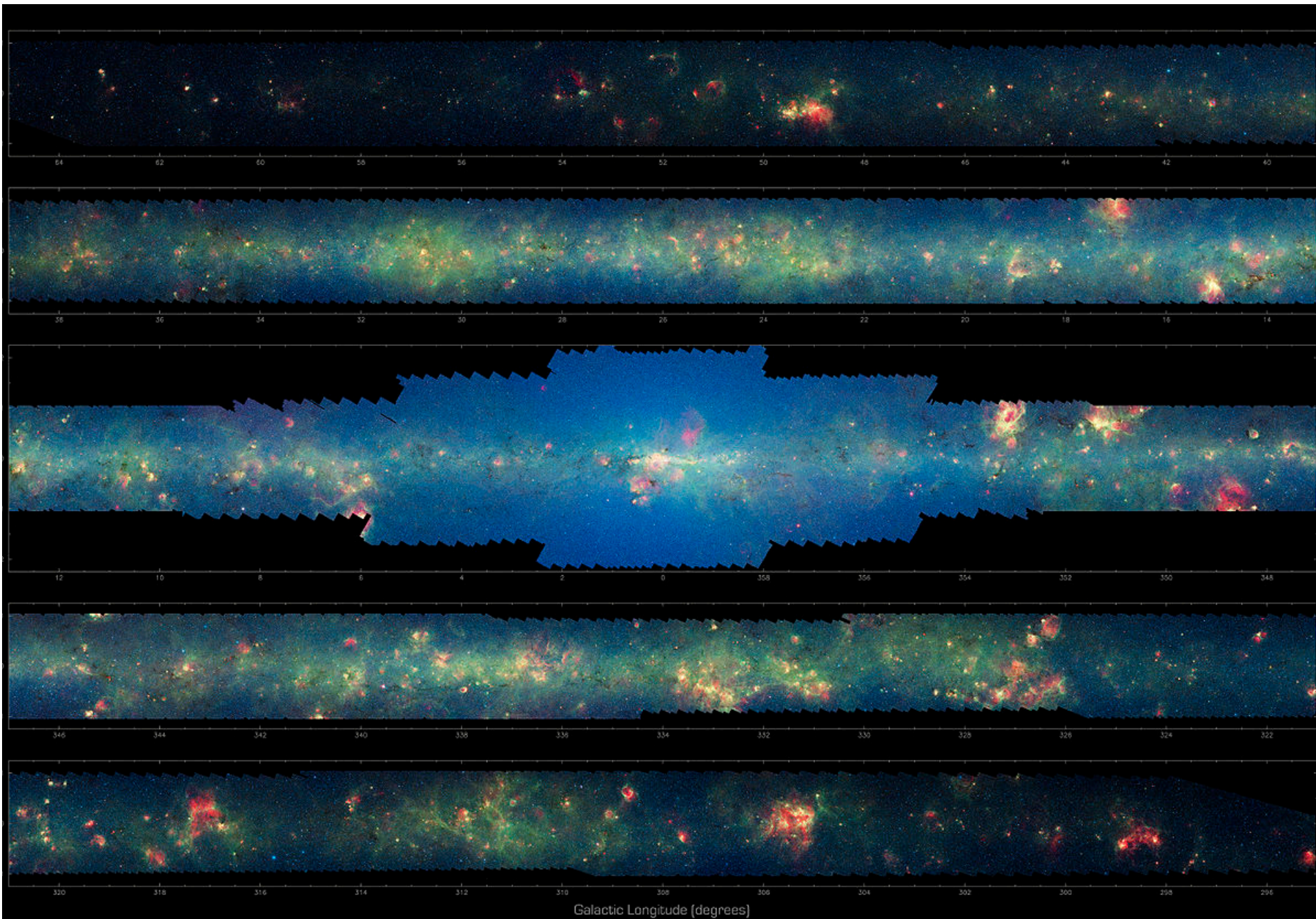
膨張シェルモデルに変わる  
 新たなモデル

# 現状のまとめと課題

- 0.1pc ~ 10pcスケールでの分子雲衝突による大質量星形成の基本的なプロセスは理解できた

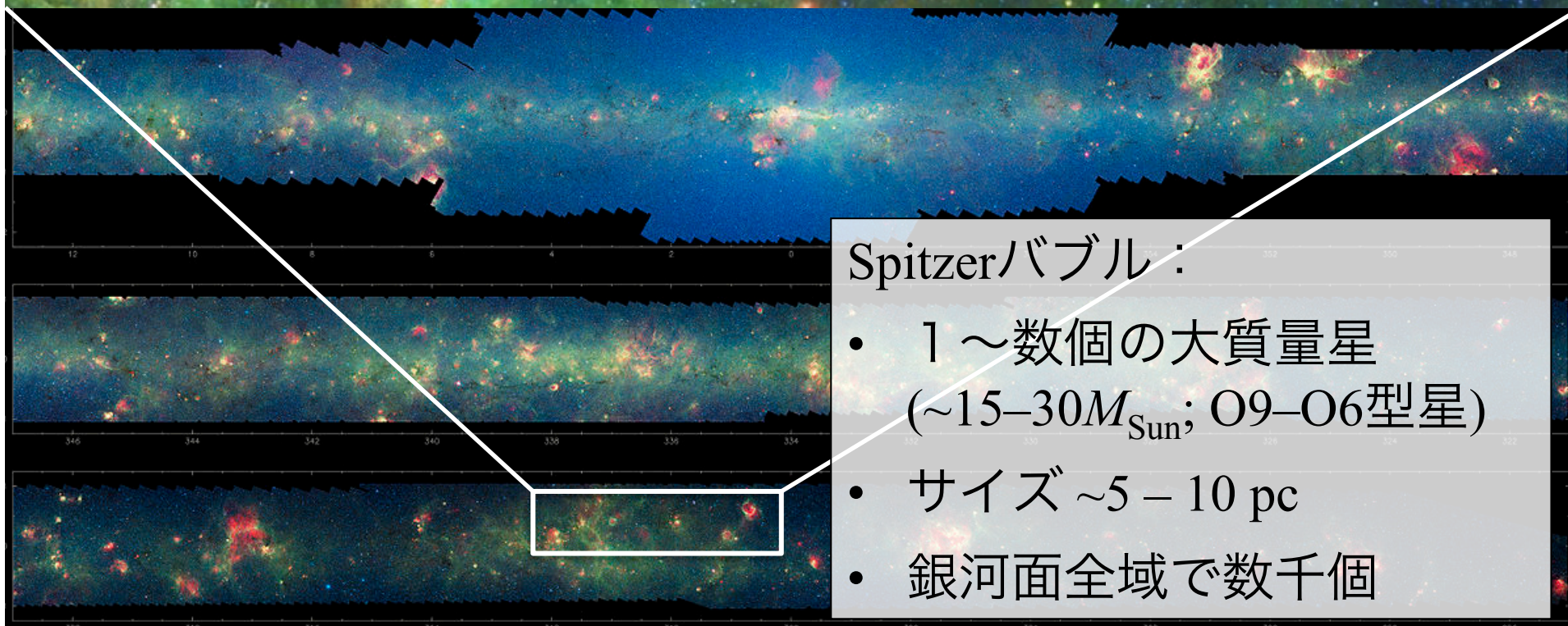
## 今後の課題

- 衝突と形成される大質量星のバリエーションを追求
  - 個別天体研究と統計研究
- ミクロプロセスの理解：大質量星形成過程の理解
  - 観測が予想する形成タイムスケール( $\sim 0.1$ Myr)は数値計算(Inoue & Fukui 2013)より一桁短い
  - 分子雲衝突は自己重力的な大質量分子雲コアを經由する？
- マクロプロセスの理解：衝突を駆動するものは？
- 包括的理解：大質量星のどれくらいの割合が分子雲衝突で作られるのか？



NASA/JPL-Caltech / E. Churchwell, GLIMPSE Team & S. Carey, MIPS GAL Team

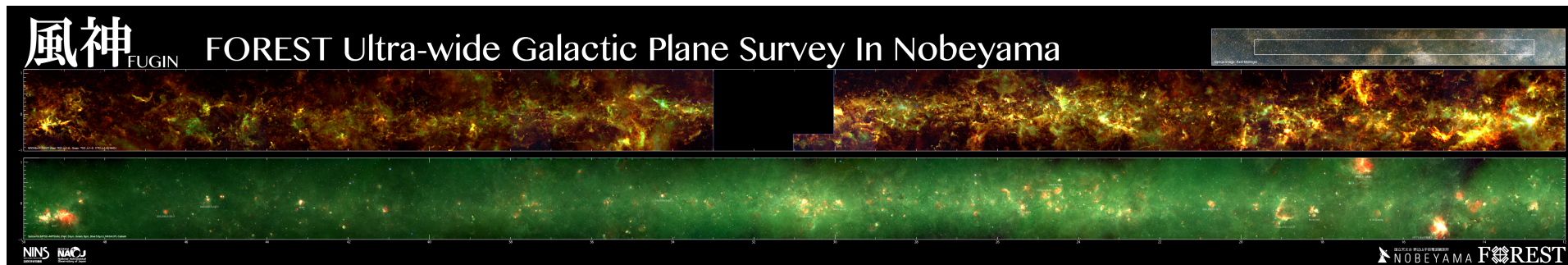




Spitzerバブル：

- 1～数個の大質量星  
( $\sim 15\text{--}30M_{\text{Sun}}$ ; O9–O6型星)
- サイズ  $\sim 5\text{--}10\text{ pc}$
- 銀河面全域で数千個

# 分子雲衝突と野辺山45m FUGIN計画



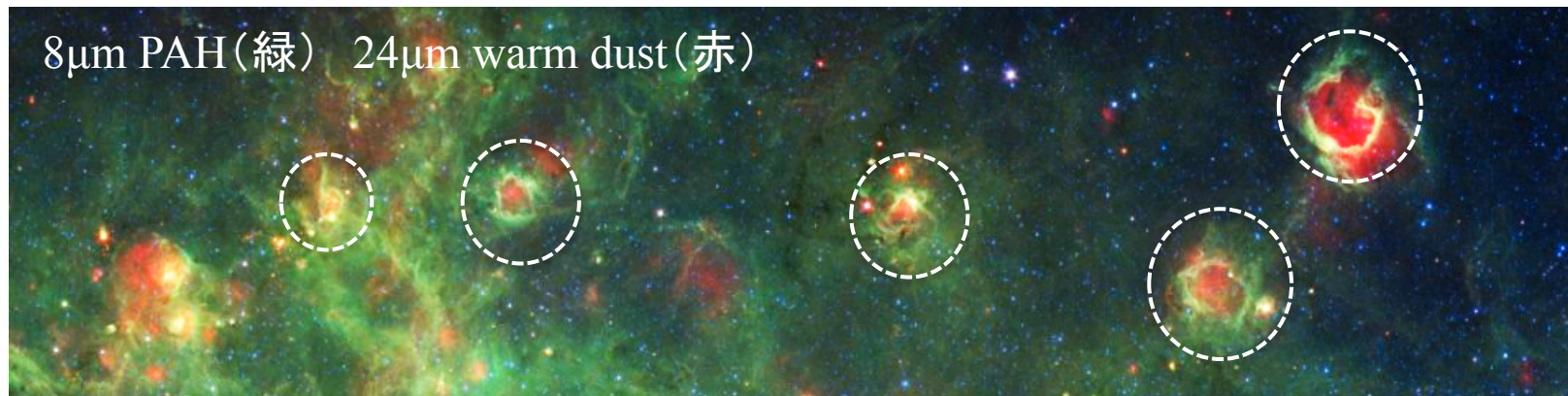
- 野辺山45m望遠鏡を用いたCO J=1-0輝線の銀河面サーベイ計画
- 昨年度までの達成度：~70%
- 高い分解能(~20")で銀河面の広範囲を観測
  - 第1象限サーベイ： $10^\circ < l < 60^\circ, b < |1^\circ|$
- 星形成はローカルだが衝突はグローバル => 広域サーベイデータの重要性
- GLIMPSEデータと直接比較できる分解能



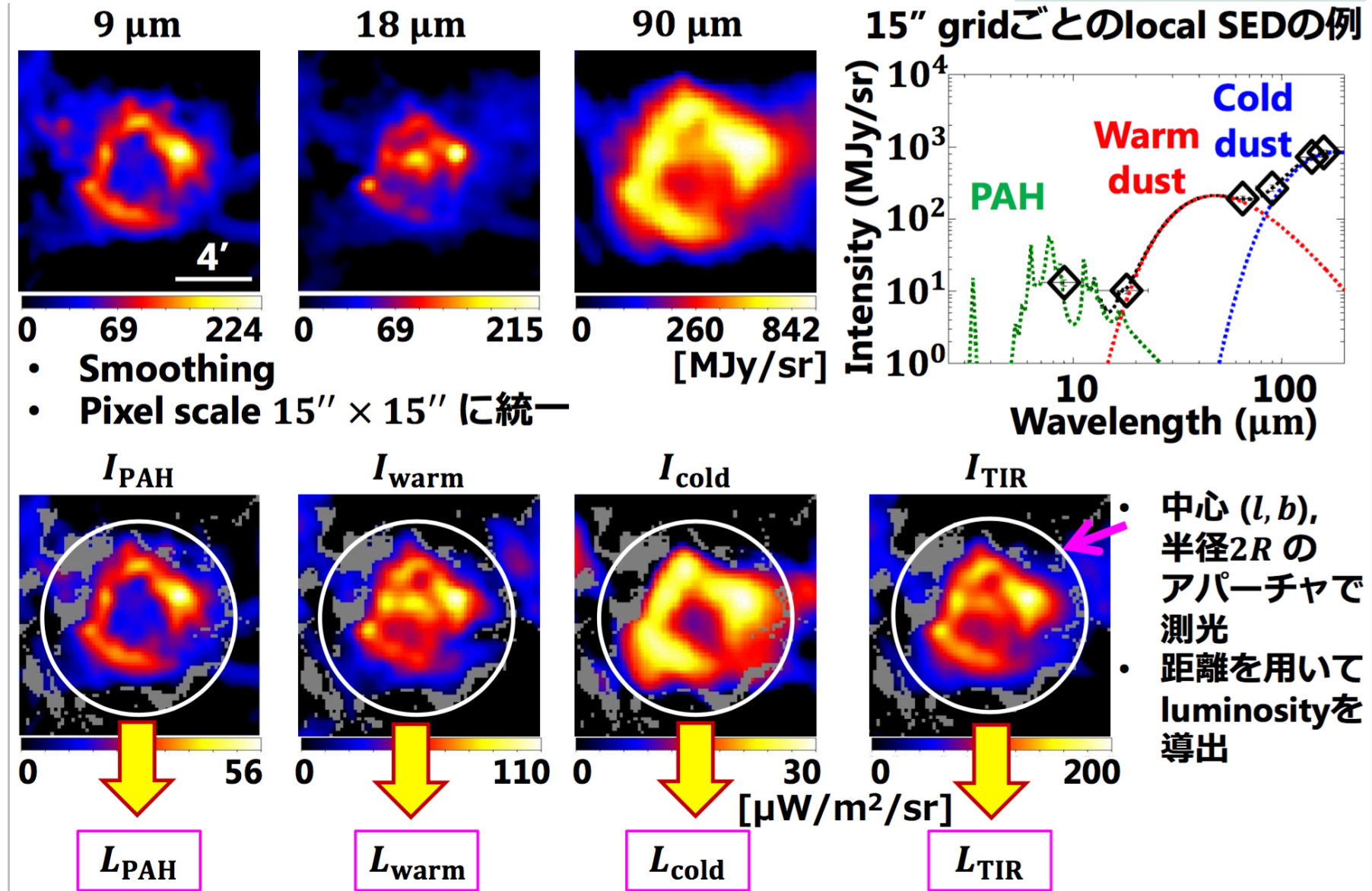
FUGINデータで分子雲衝突の統計的研究が可能

# 赤外線データと星形成

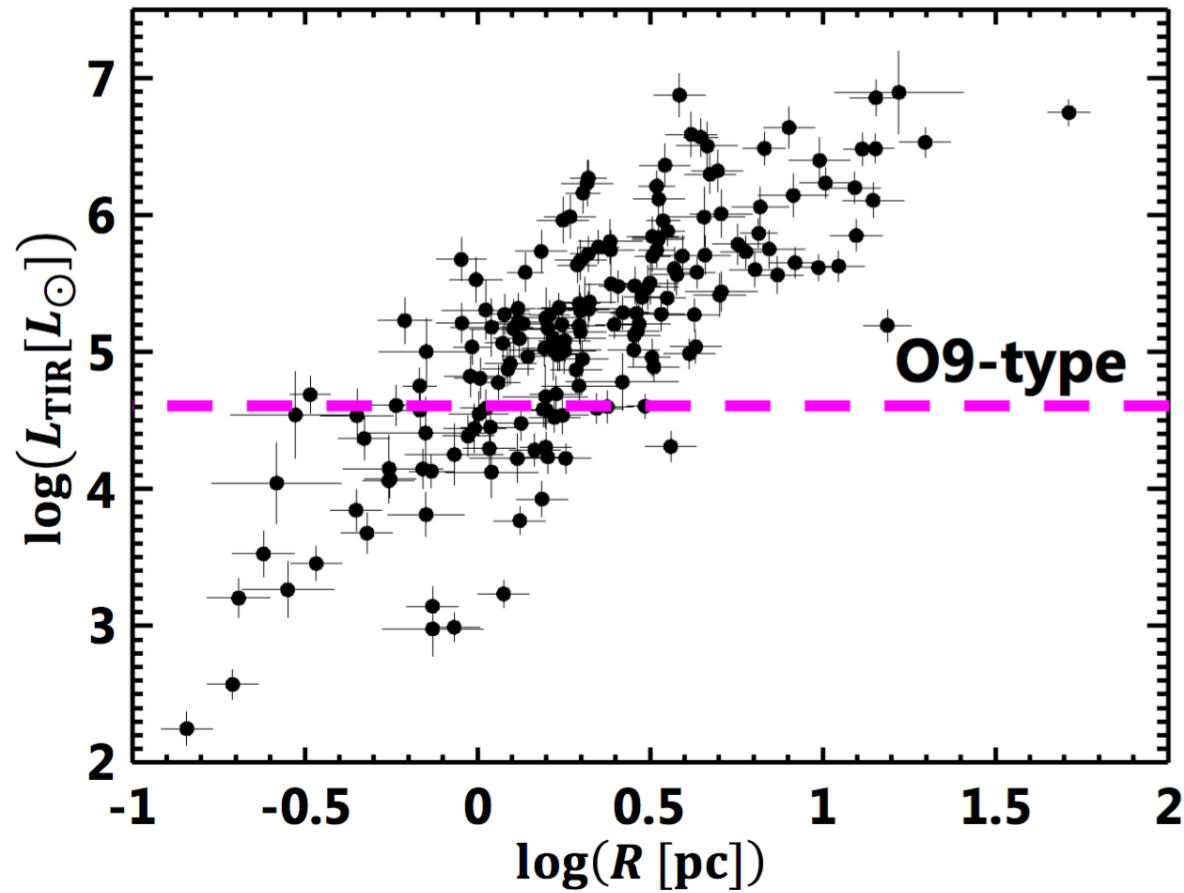
- 数千個の埋もれた若い大質量星形成領域
  - 大半の領域で、励起星が同定されておらず、質量（光度）・分布・位置などの基本情報がない
- 中間赤外～遠赤外サーベイマップが大きな役割
  - Total infrared Luminosity ( $L_{\text{TIR}}$ )  $\Rightarrow$  励起星の光度
  - $L_{\text{TIR}} \Rightarrow \text{SFR}$  (e.g., Kennicutt 98),  $L_{70\mu\text{m}} \Rightarrow \text{SFR}$  (e.g., Li+10; Calzetti+10),
  - $\Sigma_{\text{SFR}}$  vs.  $\Sigma_{\text{gas}}$  (c.f., Kennicutt-Schmidt law)
  - 点源カタログ (e.g., Class別YSOカタログ)



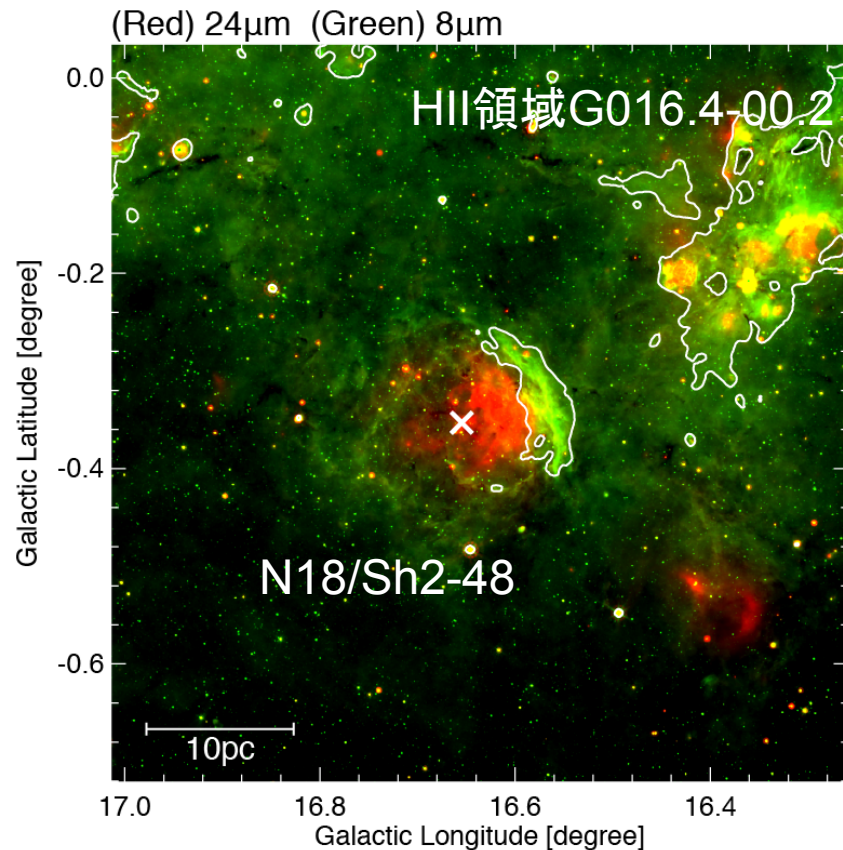
# あかり撮像マップを用いたSpitzerバブル統計研究(Hattori+16)



# あかり撮像マップを用いたSpitzerバブル統計研究(Hattori+16)



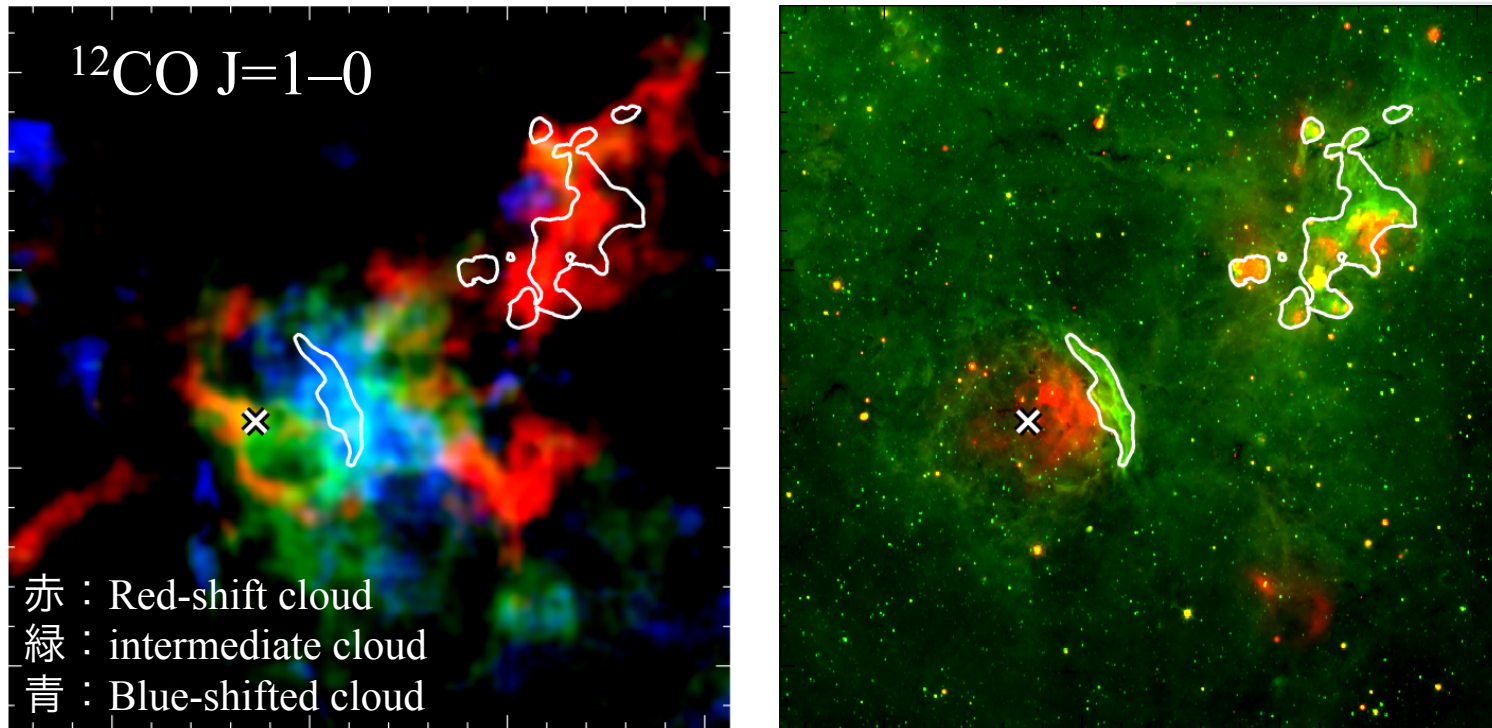
# SpitzerバブルN18: FUGIN + あかり



- 西側の細長く明るい8 $\mu$ m放射
- 東側の淡いリング構造
- 8 $\mu$ m放射の内部に24 $\mu$ m放射  
→ Spitzerバブルの典型的な特徴
- HII領域Sh2-48 (Sharpless 59)
- 中央にO9.5型星 BD-14 5014 (Vijapurkar & Drilling 93).
- 距離 $\sim$ 3.8kpc (Anderson+09)
  - FUGIN分解能 $\sim$ 0.36pc相当

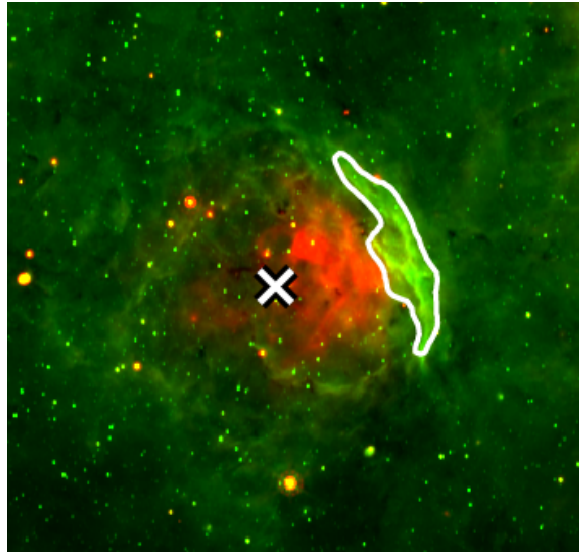
- 比較的孤立しており形状がシンプルなSpitzerバブル  
→ FUGINデータを用いたパイロット研究に最適

# SpitzerバブルN18: FUGIN + あかり



- 速度ごとに分解すると相補的な分布
- バブル東側の $8\mu\text{m}$ 構造とはあまり対応が良くない
- O9.5V starとの対応も不明瞭

# SpitzerバブルN18: FUGIN + あかり



- O9.5V星の位置と衝突箇所が一致せず、  
8 $\mu$ mピークとも距離がある

↓

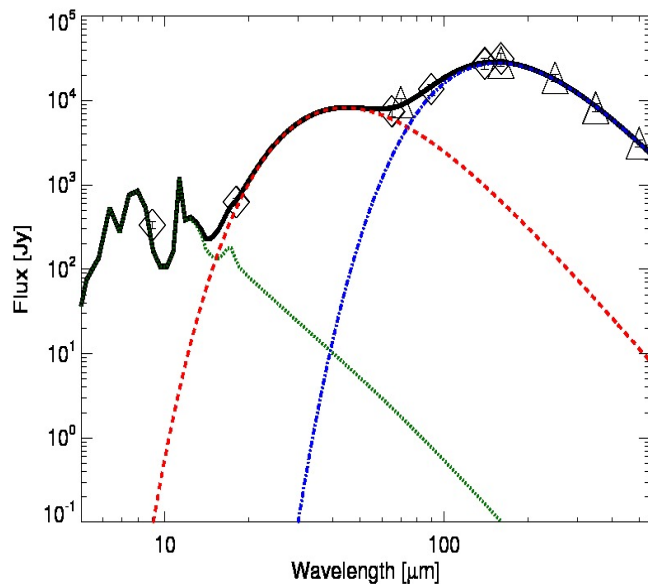
- AKARI+Herschelデータを用いてN18全体をglobal SED fit (Hattori+16)

$$L_{\text{tot}} \sim 10^{5.8} (L_{\text{SUN}}).$$

- 単一のO型星ではO5~O6型星に相当、  
O9.5V型星では10~20個分相当 (Panagia 73).

↓

- 埋もれた大質量星の存在を示唆
- 8 $\mu$ mピーク付近 = 衝突領域が有力候補





# まとめ



- ・ 分子雲衝突は単一のO型星から巨大星団まで形成可能
- ・ これまでの観測・理論研究で、分子雲衝突による大質量星形成の基本的なプロセスは理解できた
- ・ より大規模に観測研究を展開、衝突と星形成のバリエーションの統計的理解が課題
  - 「大質量星の何割が分子雲衝突で形成されたのか？」
- ・ 銀河面が埋もれた若い大質量星形成領域の宝庫
- ・ 野辺山をはじめ分子雲サーベイが各所で精力的に推進
- ・ 赤外線サーベイデータが星形成の基本的情報を与える

# あかり vs Herschel/Hi-GAL or Spitzer/GLIMPSE

- 分解能ではHi-GAL
- Photometryの信頼性は？
  - Hi-GALは広がったfluxをリカバーした…？ (Molinari+16)
- あかりは感度のダイナミックレンジが広い
  - GLIMPSE 24  $\mu$ mは大質量星形成領域ですぐサチる
- Hi-GALチームはmorphologicalな研究に多大なリソースを注いでいる (i.e., filaments)
  - Vialactea 2016@ローマに出席しての印象
  - 基本的・古典的な星形成研究の重要性
- 銀河面サーベイによくある銀緯 $b < |1^\circ|$ は物足りない
  - M16, M17, NGC6334, NGC6357他さまざまな天体が欠ける