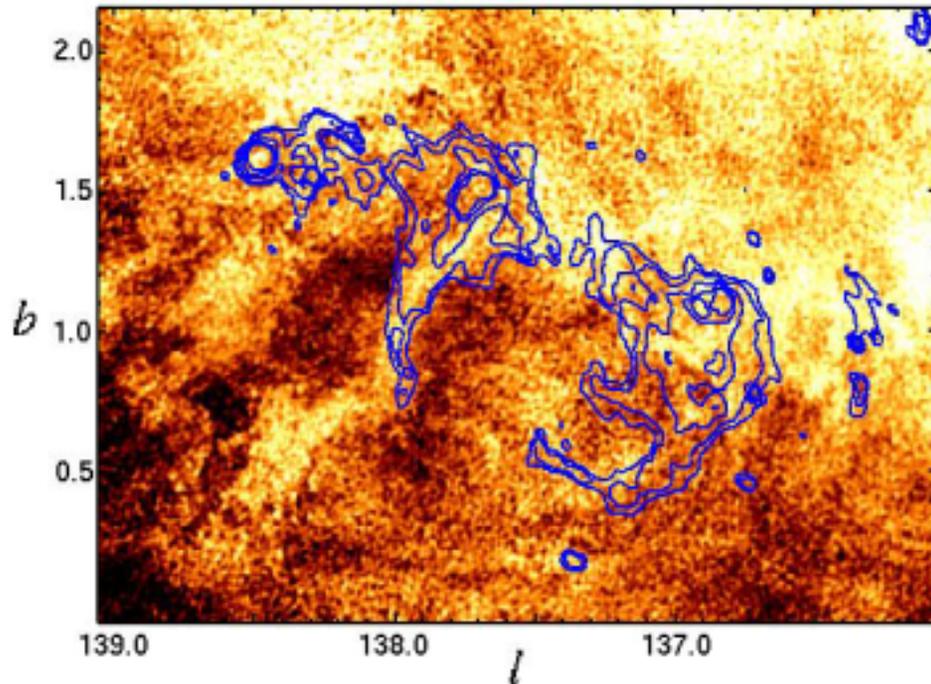
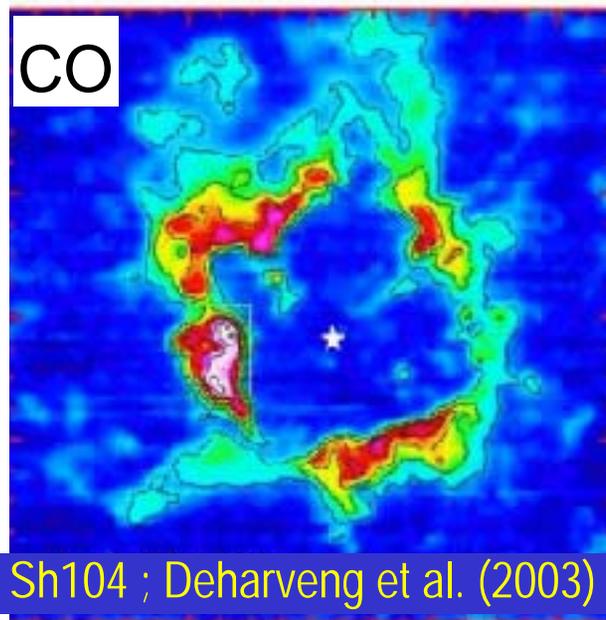
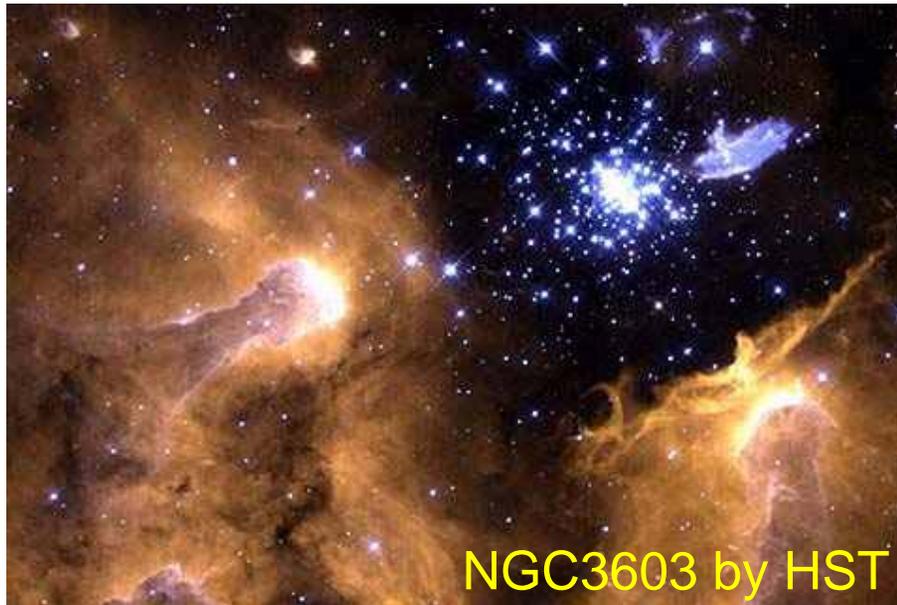


電離領域膨張による 誘発的星・分子雲形成



細川 隆史 (NAOJ)
犬塚 修一郎 (京大理)

Radiative Feedback -分子雲中-



- 電離 (HI HII) 光子
($h\nu > 13.6\text{eV}$)
- 解離 (H_2 HI) 光子
($11.0\text{eV} < h\nu < 13.6\text{eV}$)

星形成に対するFeedback

Negative Feedback

分子雲を破壊して抑制

(H2 HI HII)

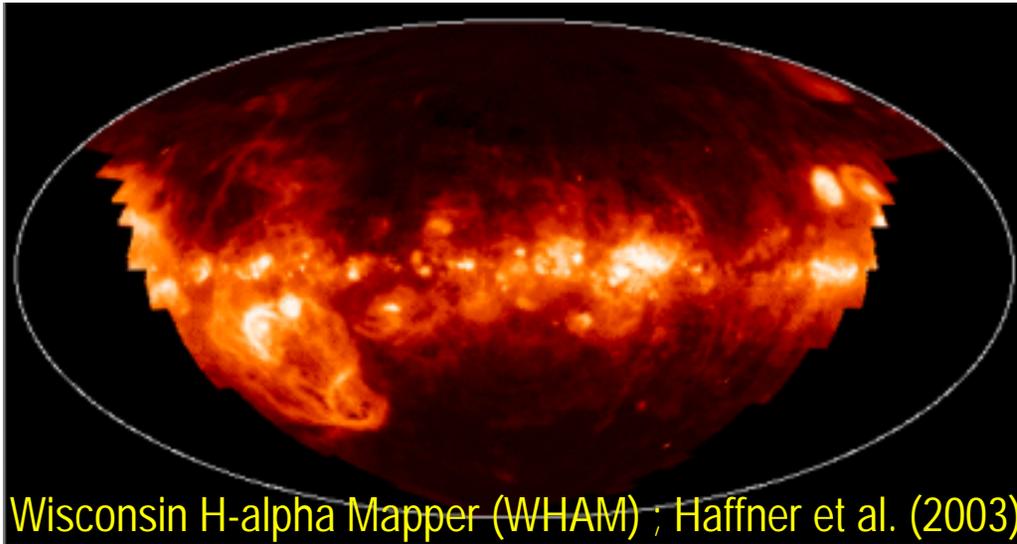
V.S

Positive Feedback

衝撃波による分子ガス圧縮
誘発

(compression of H2)

Radiative Feedback -希薄中性ガス中-



星間物質循環に対する
Feedback

Negative Feedback

中性ガスの光電離
: 希薄電離ガスの維持

(HI HII)

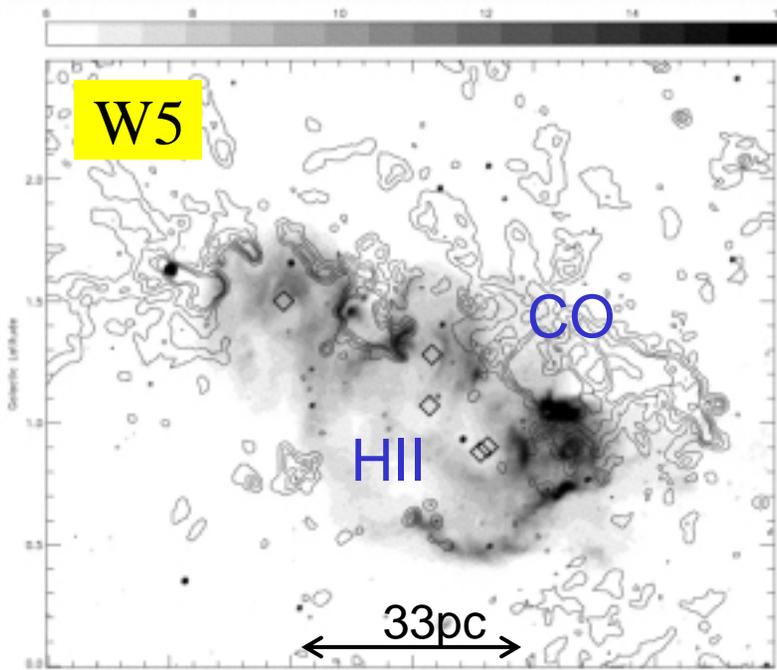
V.S

Positive Feedback

衝撃波による中性ガス圧縮

↓
分子雲形成

(HI H2)

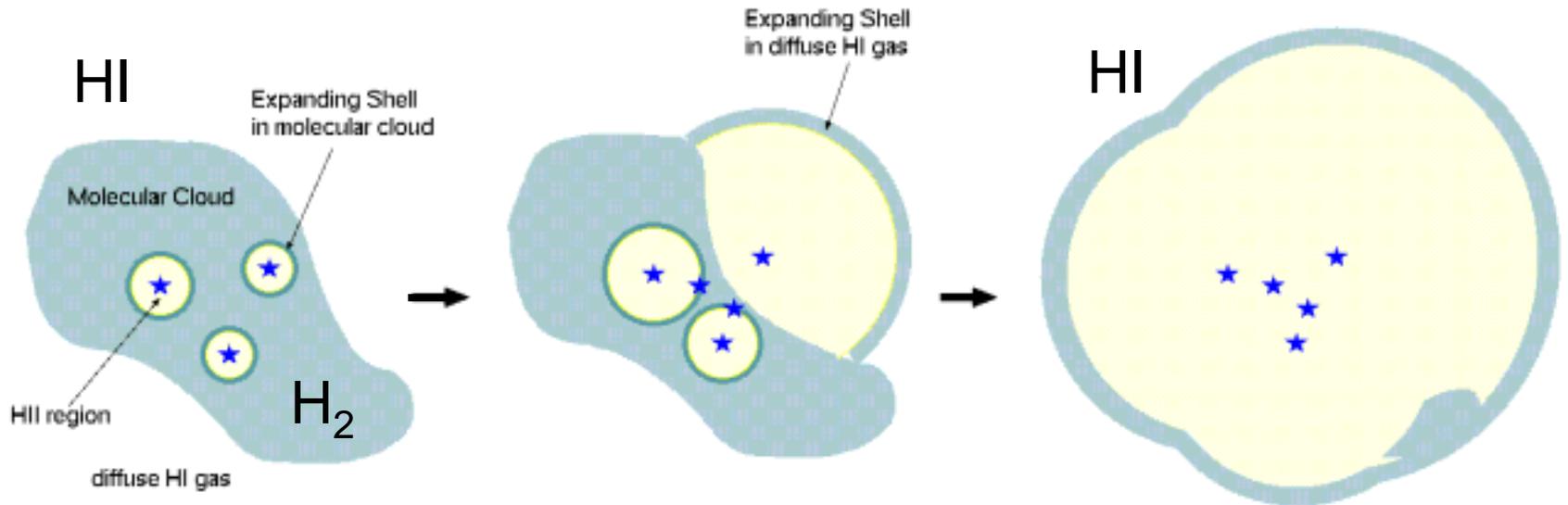


Karr & Martin (2003)

Motivation

話題1

話題2



(a) 分子雲内での電離領域の膨張

(b) 電離領域膨張による星形成誘発と分子雲破壊

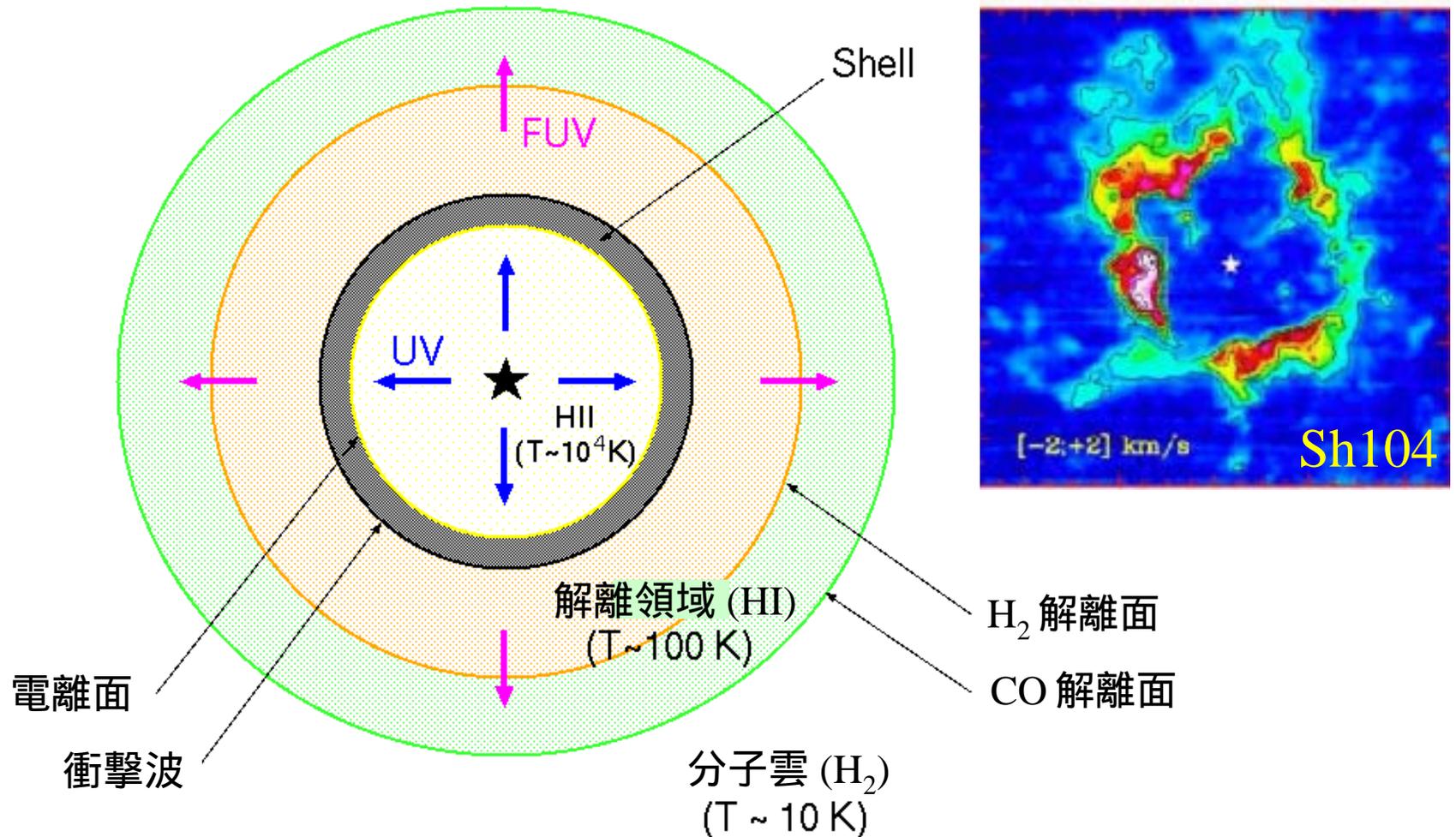
(c) 分子雲破壊後、diffuse HI gasへの電離領域膨張

分子雲中 : 分子ガスの電離・解離 v.s. 衝撃波での誘発的星形成
中性ガス中 : 中性ガスの電離 v.s. 衝撃波での誘発的分子生成

どのような場合にどちらの効果が効くか？ Positive feedbackの効率は何？

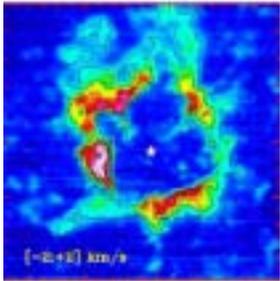
Approach : 1D 球対称 輻射流体計算

分子雲中の膨張



- study the physical/chemical structure of the shell
- **Does molecular gas accumulates in the shell shielding FUV photons?**

Dynamical Evolution

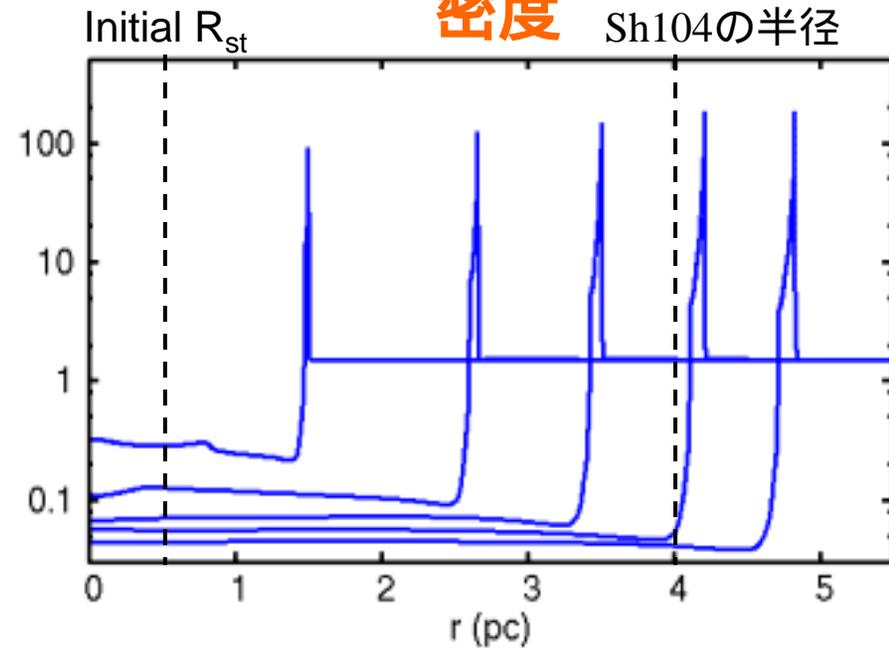
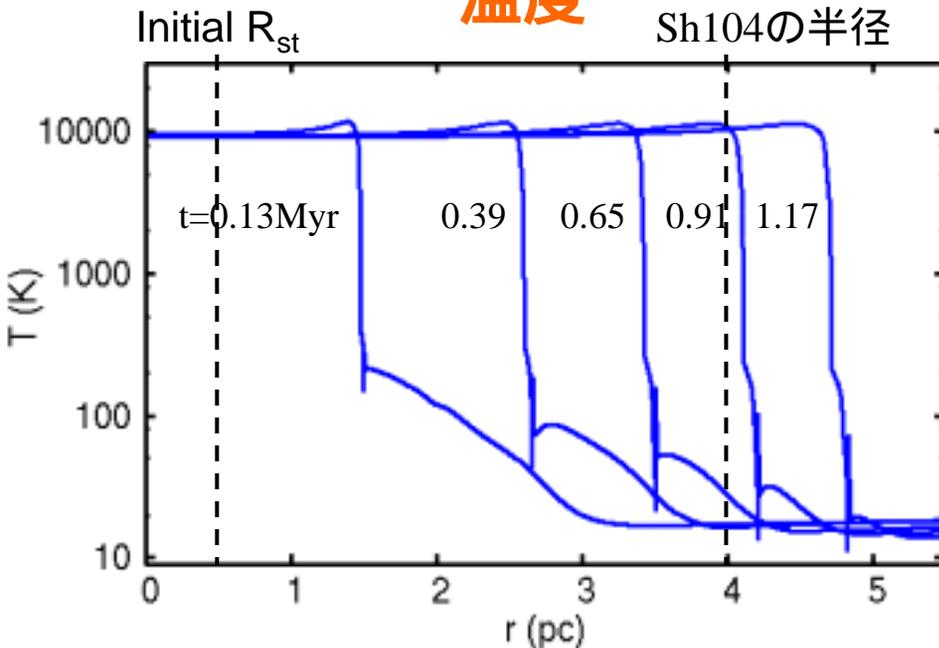


中心星: $40M_{\text{sun}}$ の単独星 観測、
媒質密度: $n_{\text{H}} = 1.5 \times 10^3/\text{cc}$ を仮定。

Snapshots

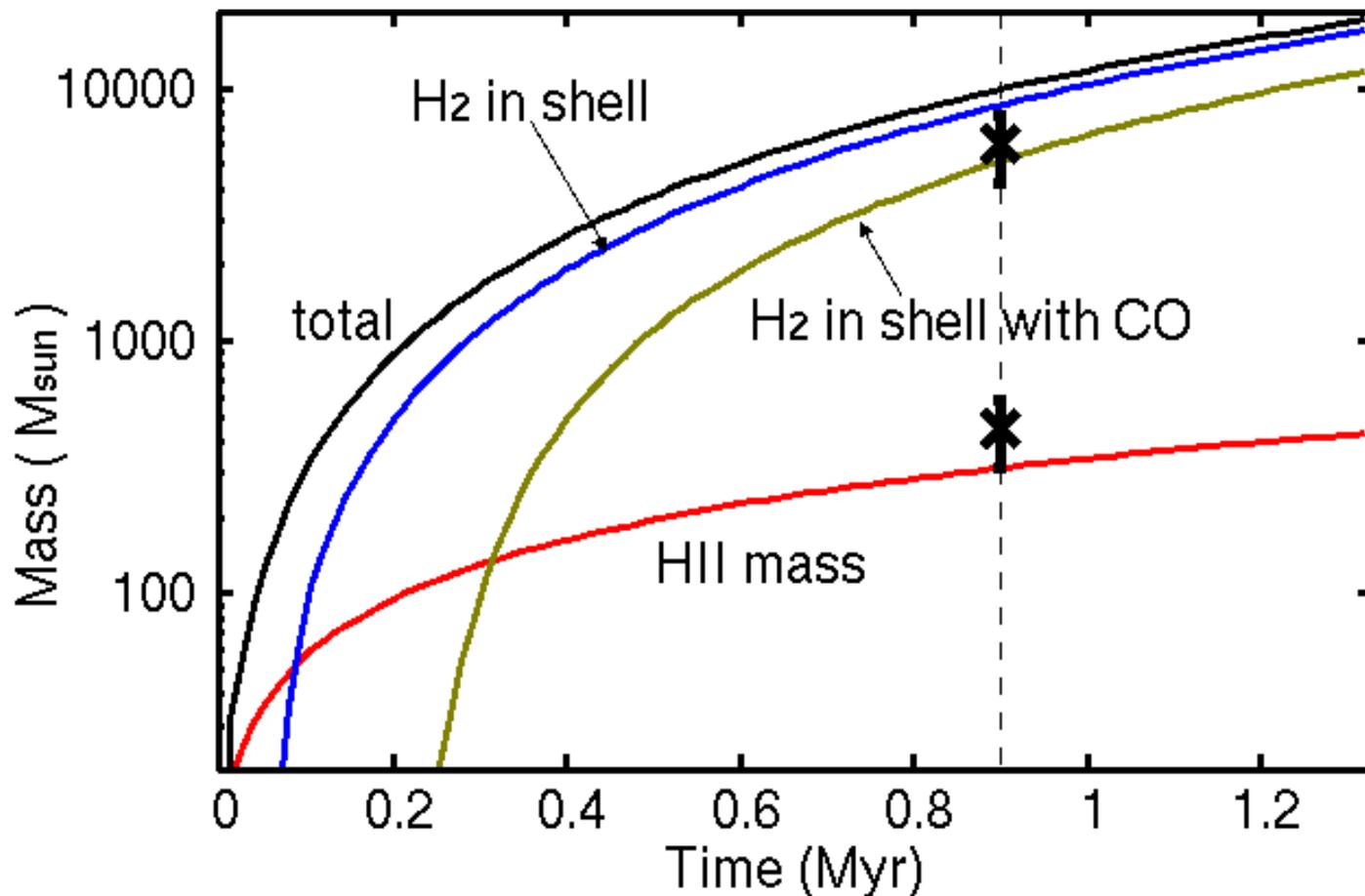
温度

密度



$T \sim 10^4 \text{ K}$ 電離領域, $T \sim 100 \text{ K}$ 解離領域, $T \sim 10 \text{ K}$ 分子雲
電離波面の前に衝撃波が立つ。

Mass Evolution

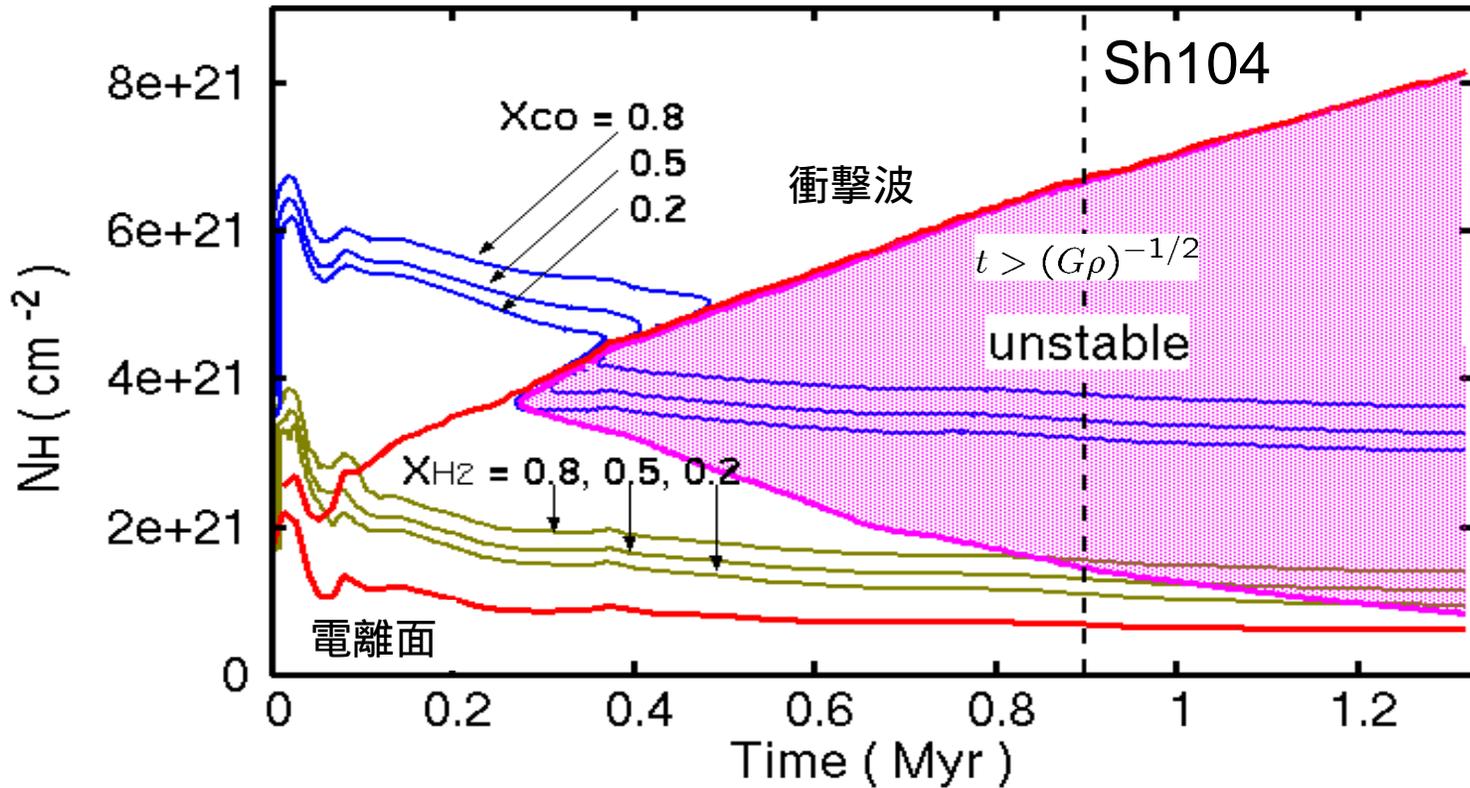


Sh104 観測. Mass of HII region: $\sim 450M_{\odot}$
H₂ Mass of the shell : $\sim 6000M_{\odot}$

よく一致

大半のガスは、分子ガスとしてシェル上に留まる。

Chemical Evolution of Shell

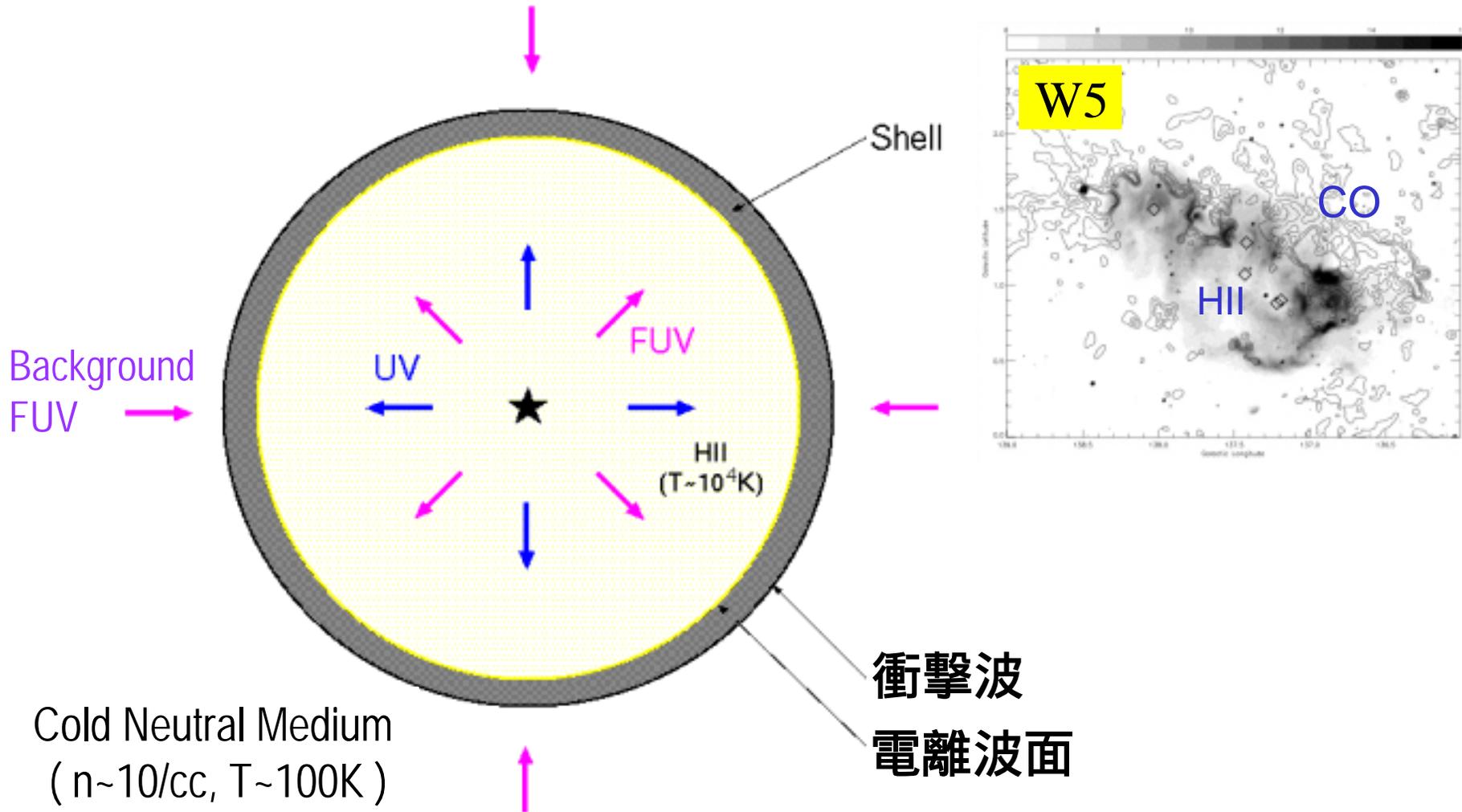


シェルの柱密度 ダスト減光によるFUV光の遮蔽
大半のガスがシェル上に分子ガスとして溜まる。

重力不安定による分裂

Positive Feedback

希薄中性ガス中の膨張



- Study the physical/chemical structure of the shell
- **Does molecular gas form from ambient neutral medium?**

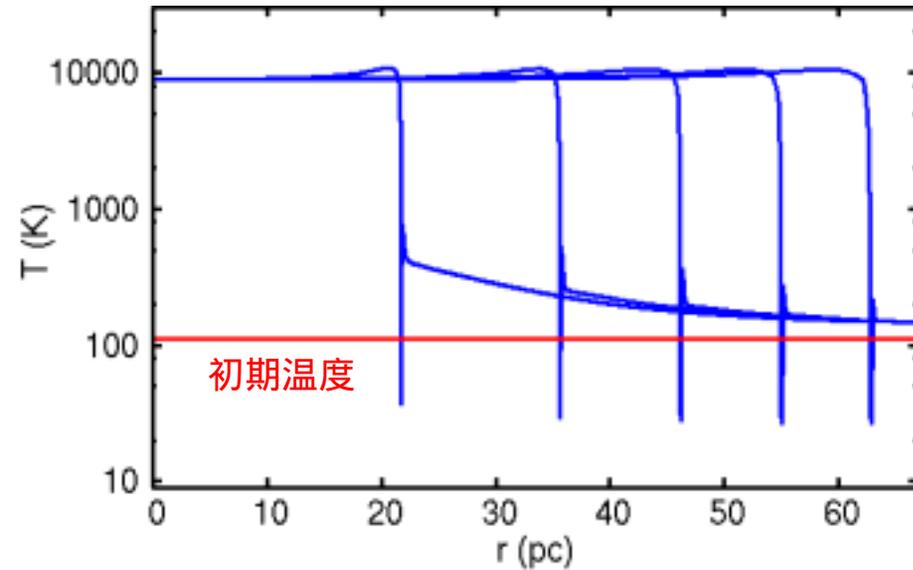
Dynamical Evolution

球対称 HII領域膨張の数値計算

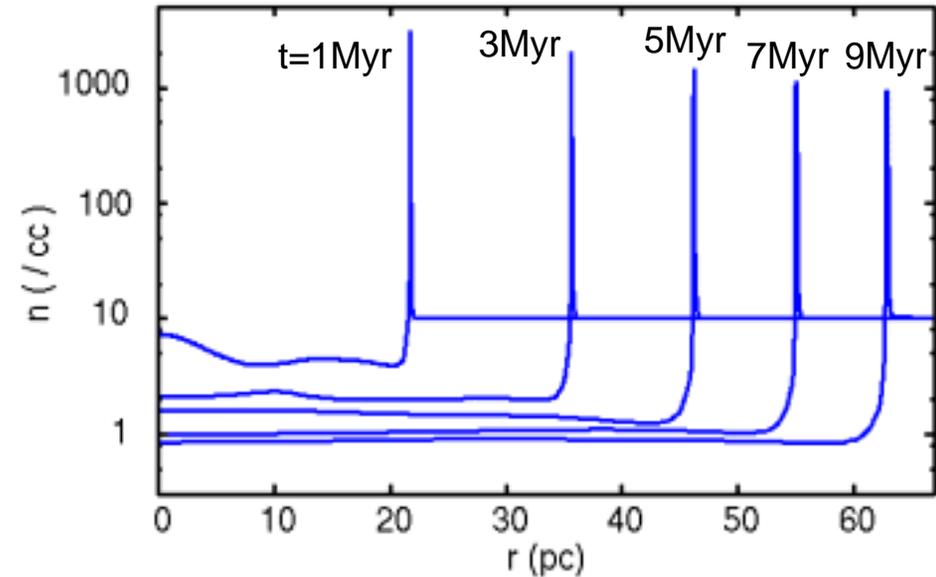
中心星: $41M_{\text{sun}}$ 、媒質: cold HI ($n=10/\text{cc}$, $T\sim 100\text{K}$)の場合

Snapshots

温度

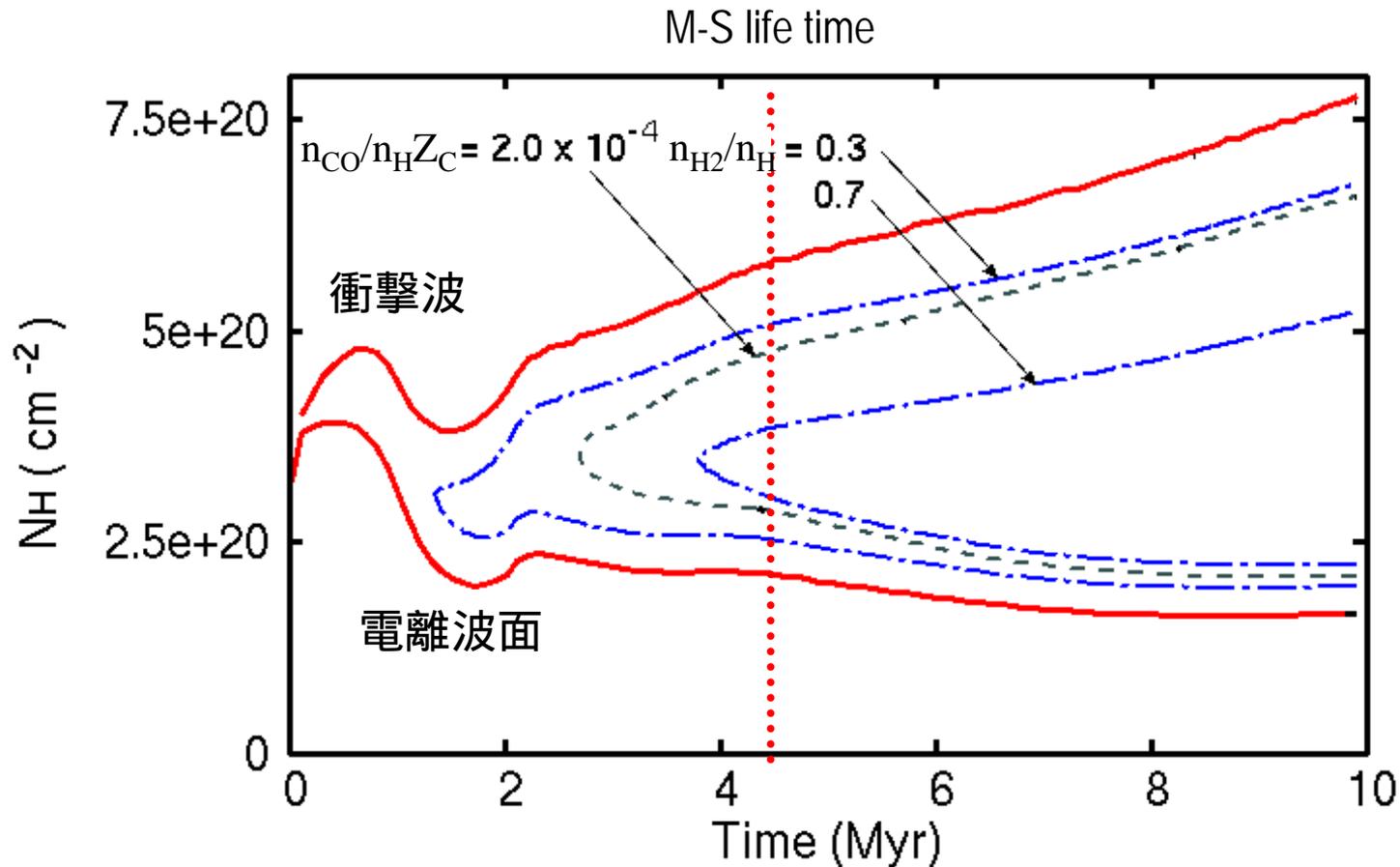


密度



電離領域周囲に高密度shellができる。密度: $n\sim 1000/\text{cc}$
Shell内部はその周囲より低温。温度: $T\sim 30\text{K}$

Accumulation of Molecules



Shell内に H_2 分子が生成される。COはできない。 **Dark HI / H_2**

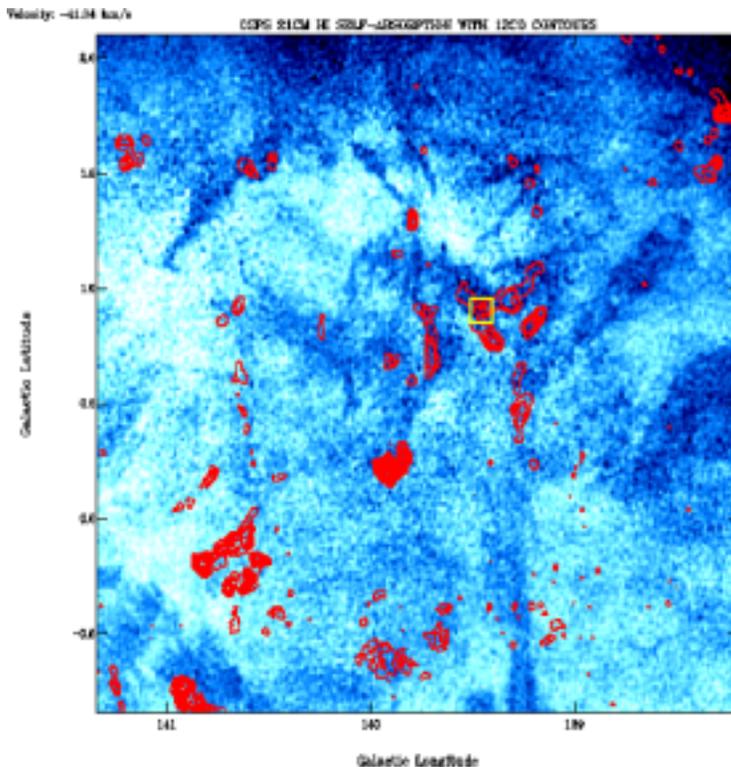
↓
中性ガスと、COで観測される分子雲との中間のガス相

Hunt of Predicted Gas Phase

Hunt the cold ($T \sim \text{a few} \times 10 \text{ K}$) HI

中性水素 21cm 輝線

HI Self-Absorption (HISA) : 高温中性ガス (warm) からの21cm線輝線に対する、低温中性ガスの吸収。



Canadian Galactic Plane Survey CGPS ; Taylor et al. (2003)

- 電波・赤外 での銀河面サーベイ
- 角分解能: 約1分
- HI, HII, CO, dust分布 が揃う。

Channel Map

青image:21cm emission, 赤contour:CO

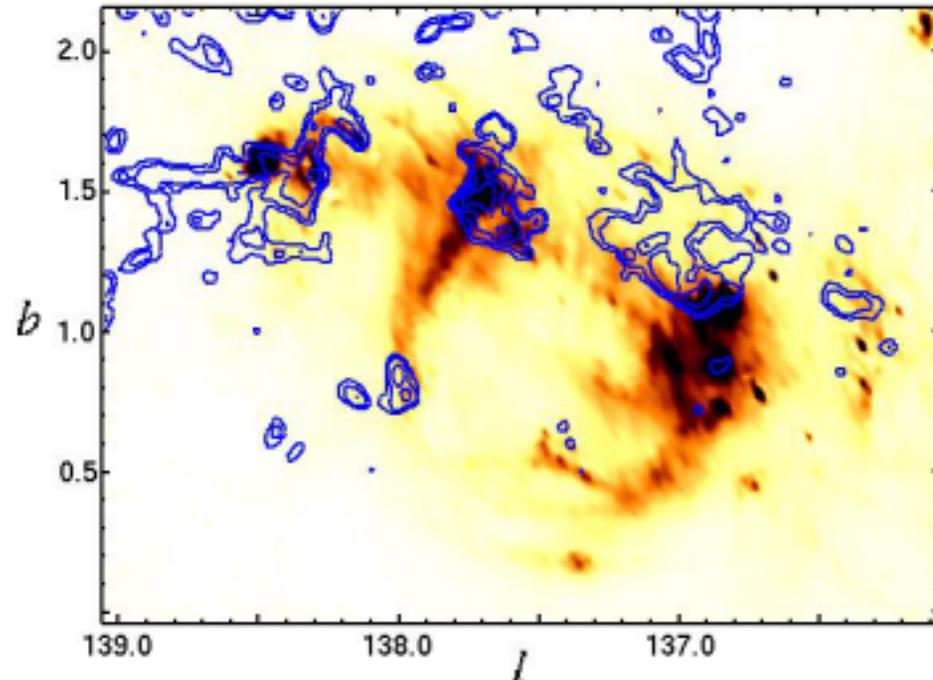
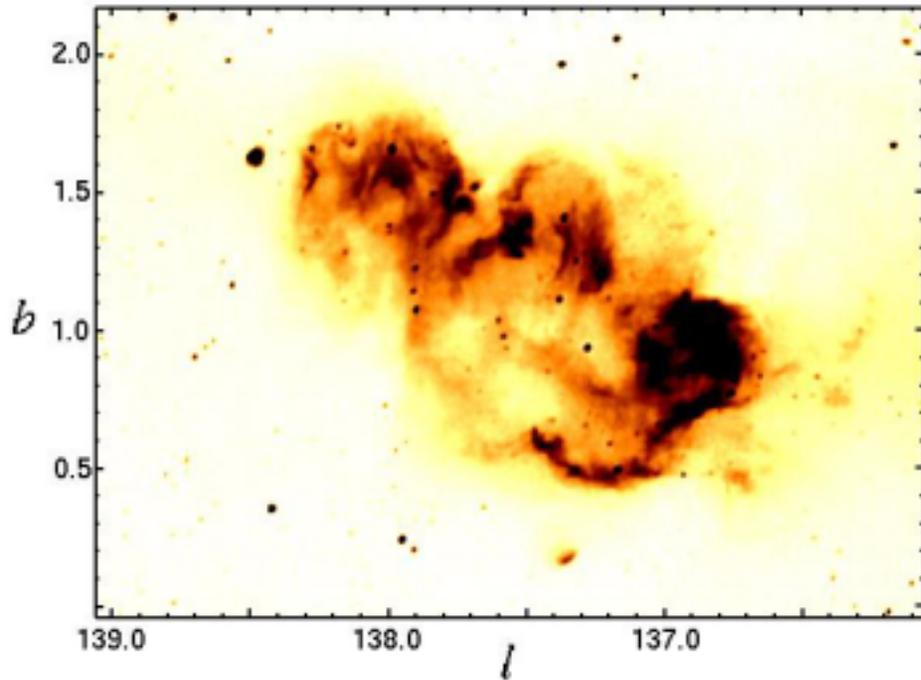
CGPS data in W5 HII region

21cm continuum (HII gas)

$T_b=5\text{K}$ (bright) 12.5K (dark)

Image : $60\ \mu\text{m}$ dust emission

Contour : $^{12}\text{CO}(1-0)$ @ $v_{\text{LSR}}=-39.8\ \text{km/s}$

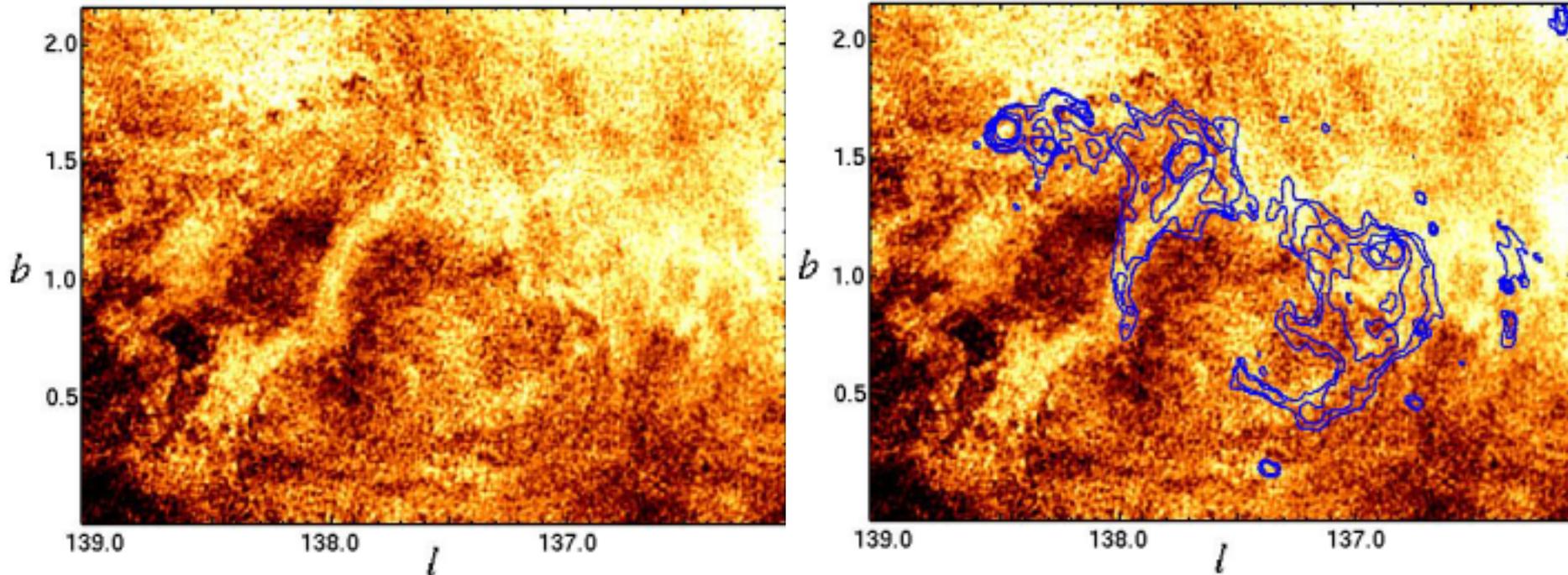


電離ガスを取り囲むようにdust shellが存在。
周囲にCO分子。Dust shellとの相関は必ずしも良くない。

CGPS data in W5 HII region

HI 21cm emission @ $v_{\text{LSR}} = -39.8$ km/s
: $T_b = 45\text{K}$ (bright) 110K (dark)

contour : $60 \mu\text{m}$ dust emission



電離ガスを取り囲むようにshell状にHI自己吸収がある。
Dust shellとの相関あり。CO分子とは必ずしも相関しない。

Summary

大質量星起源のUV/FUV光による誘発的星・分子雲形成過程を調べた。

(I) 分子雲中

- 電離領域の圧力超過により高密度・低温シェルが出来る。
- シェル中の化学構造: **atomic shell** → **molecular shell** **観測と合致**
シェルの柱密度 ダスト減光によるFUV光の遮蔽
- 分子ガスdominant後、分裂 ; *positive feedback*

(II) 希薄中性ガス中

- 同様に高密度・低温シェルが出来る。
- シェル中の化学構造: **HI H2 OK**, **但し、CO分子なし。**
分子雲と中性ガスの中間的なガス相 **Dark HI / H₂ cloud**
- 観測データ中にも実際にそのようなガス相の兆候が見られる。

Extra Viewgraphs

Heating / Cooling Processes

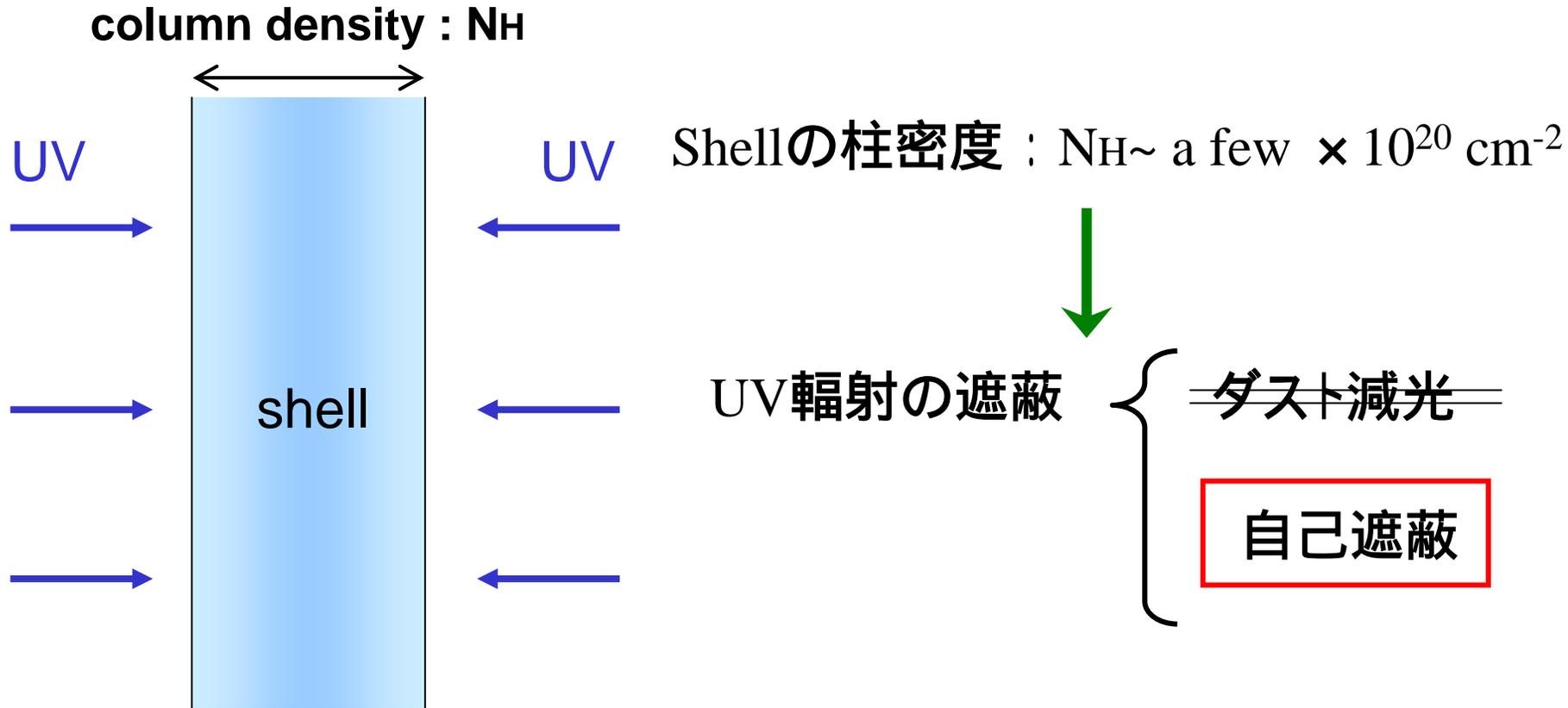
	region	process	reference	note
Heating	HII	H photoionization	Spitzer (78) etc.	
	PDR	Photoelectron H ₂ photodissociation H ₂ reformation Cosmic-ray	Bakes & Tielens (94) HM79 (Hollenbach & McKee '79) HM79 Shull & Van Steenberg (85)	
Cooling	HII	H recombination Lyman- α OI (63.0 μ m) OII (37.29 μ m) CII (23.26 μ m) Collisional ionization	Spitzer (78) etc. Spitzer (78) HM89 (Hollenbach & McKee '89) HM89 HM89 Tenorio-Tagle et al. (86)	
	PDR	OI (63.1 μ m) CII (157.7 μ m) H ₂ rot/vib excitation CO rot/vib excitation Dust recombination Collisional dust-gas heat transfer	HM89 HM89 HM79, Galli & Palla (98) HM79 Bakes & Tielens (94) HM89	†1 †2

†1: backgroundがsource func.を上回った場合、heatingとして効く。

†2: dust温度がgas温度を上回った場合、heatingとして効く。

Why only H₂ Molecules?

水素分子のみが選択的に生成される原因



CO分子はH₂分子に比べて僅かしかないので、自己遮蔽はH₂分子にしか効かない。

Why small column density ?

媒質密度を変えたときの定性的な変化。

Hosokawa & Inutsuka (2006), ApJ, 646, 240

$$\left. \begin{array}{l} \text{大きさ: } R_{\text{St}} \propto n^{-2/3} \\ \text{時間: } t_{\text{dyn}} = R_{\text{St}}/c_{\text{HII}} \propto n^{-2/3} \\ \text{シェル質量: } M_{\text{Sh}} \propto nR_{\text{St}}^3 \propto n^{-1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{大} \leftarrow \\ \\ \rightarrow \text{小} \end{array}$$
$$\left. \begin{array}{l} \text{シェル柱密度: } \sigma_{\text{sh}} \propto nR_{\text{St}} \propto n^{1/3} \\ \text{シェルに入射するFUV flux:} \\ F_{\text{FUV},i} \propto S_{\text{FUV}}/R_{\text{St}}^2 \propto n^{4/3} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{小} \leftarrow \\ \\ \rightarrow \text{大} \end{array}$$

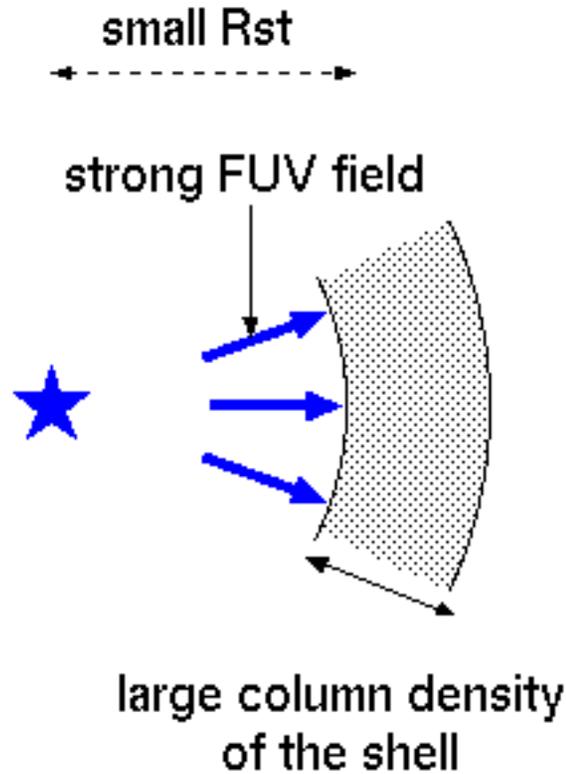
密度小

$M_{\text{sh}}, \sigma_{\text{sh}}, F_{\text{FUV},i}$ は同じ t/t_{dyn} での比較

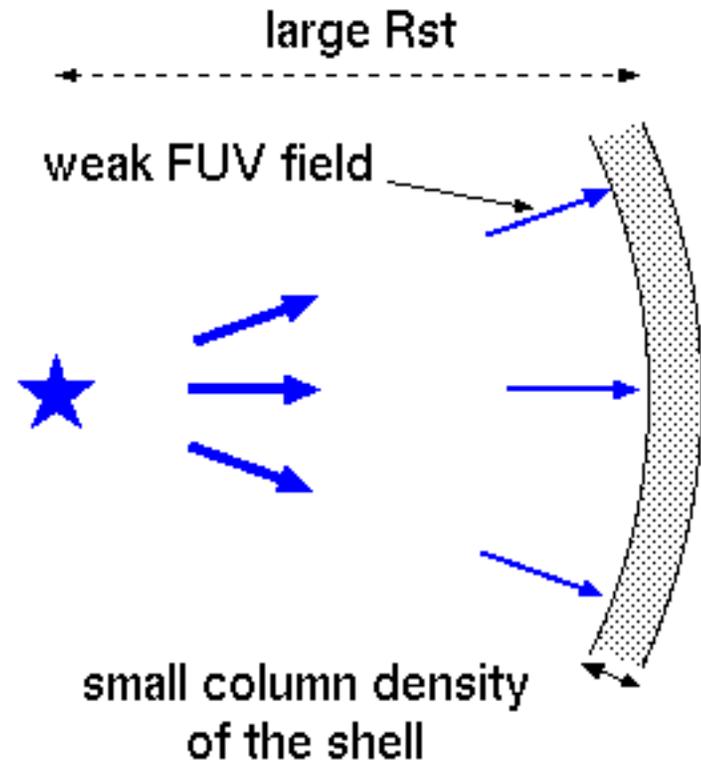
密度大

Density dependence

(1) High density case



(2) Low density case

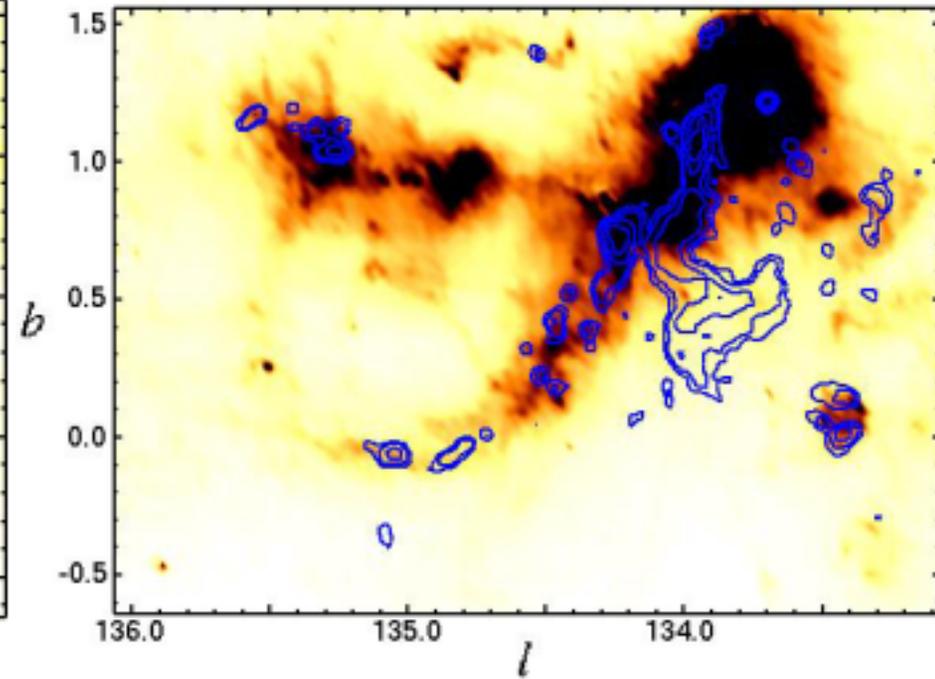
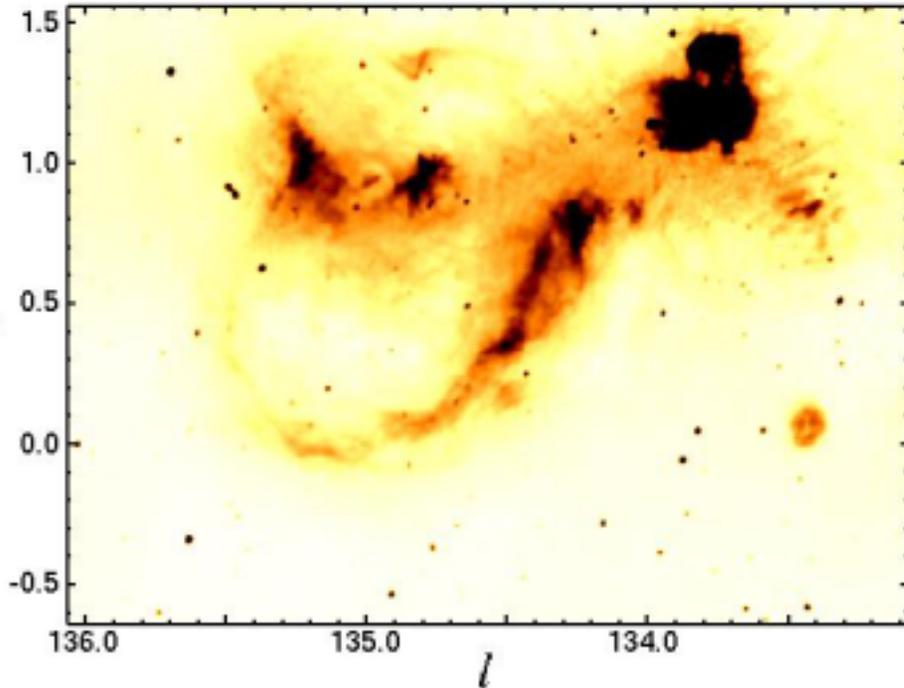


密度 \longrightarrow 半径 でシェルに入射するFUV
同時に、シェルの柱密度

CGPS data in W4 HII region

21cm continuum (HII gas)
 $T_b=5\text{K}$ (bright) 12.5K (dark)

Image : $60\ \mu\text{m}$ dust emission
Contour : $^{12}\text{CO}(1-0)$ @ $v_{\text{LSR}}=-39.8\ \text{km/s}$



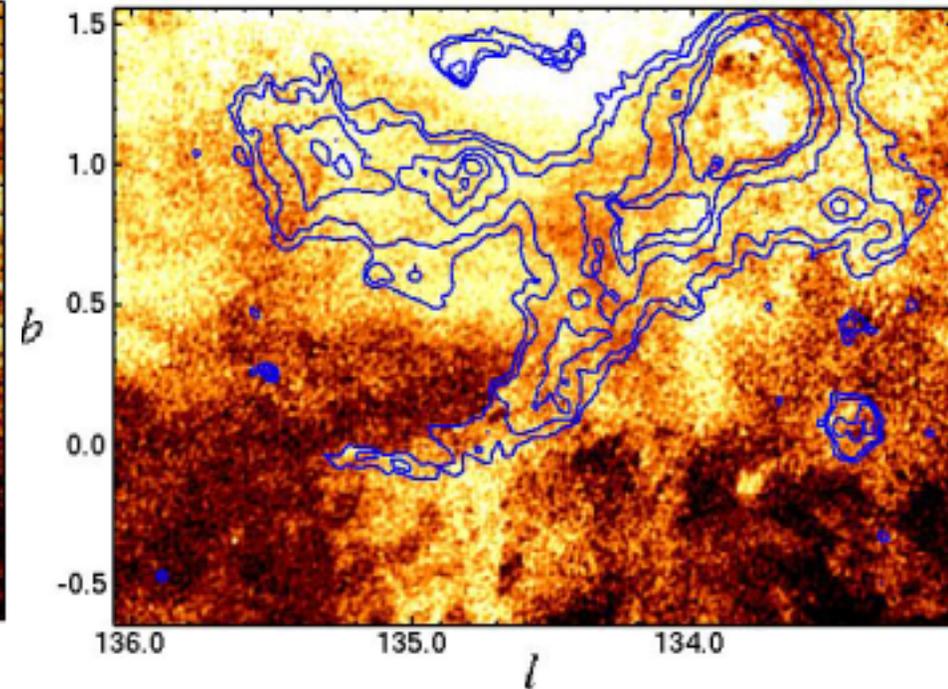
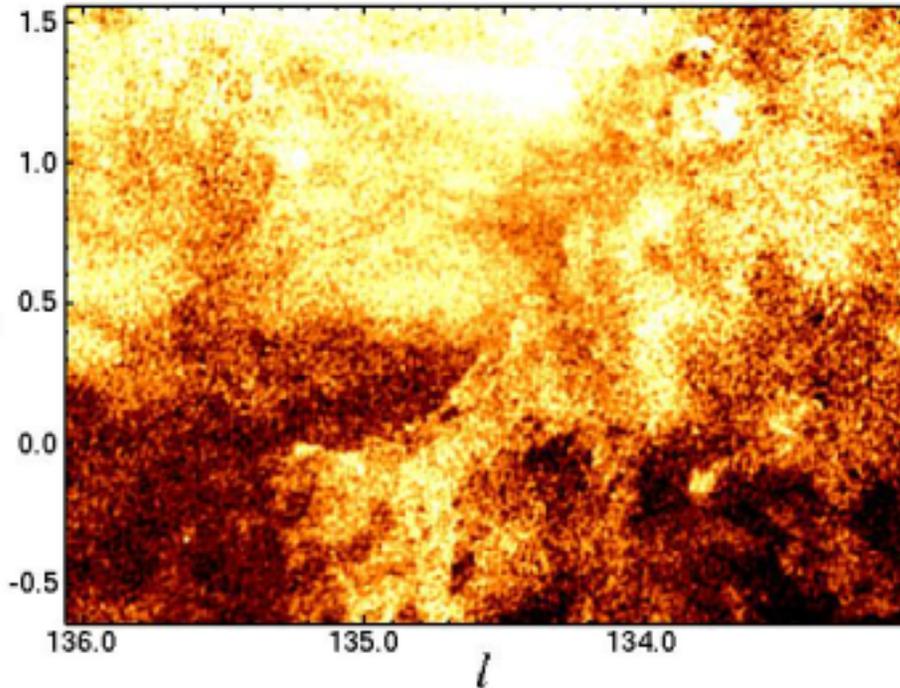
電離ガスを取り囲むようにdust shellが存在。
連続的では無いが、CO分子もdust shellに沿って分布している。

CGPS data in W4 HII region

HI 21cm emission @ $v_{\text{LSR}} = -47.3$ km/s

: $T_b = 45\text{K}$ (bright) 110K (dark)

contour : $60 \mu\text{m}$ dust emission



電離ガスを取り囲むようにshell状にHI自己吸収がある。
Dust shellとよく重なる。