

星間輻射場によって制御される星団形成過程 の3次元輻射流体力学による研究

安部牧人、梅村雅之、長谷川賢二
(筑波大学宇宙物理理論研究室)

2014年1月24日初代星・初代銀河研究会@鹿児島大学

銀河初期の進化と球状星団

星団と銀河の関係

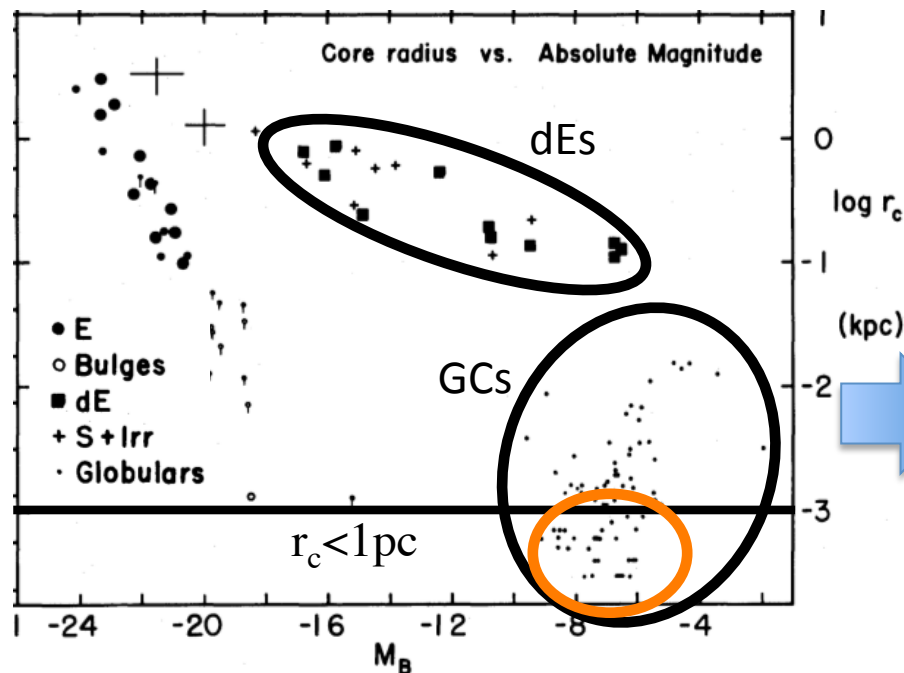
- 星団→銀河中に存在する恒星系
- 銀河中の星は、多くの場合星団として形成 (Lada&Lada 2003)

→銀河の進化過程を議論する上で、星団の形成過程の理解は必要不可欠

古い星団: 球状星団(年齢 $\sim 10\text{Gyr}$ 、 $10^5\text{--}10^6 M_{\text{sun}}$)

- 球状星団の形成過程の理解は、初期の銀河形成を議論する上で重要な情報

球状星団の特徴: コンパクトな星団



Kormendy 1985

銀河は、形成の初期段階に
コンパクトな星団を形成する必要がある

球状星団のような星団は、単純にガスが
重力収縮しただけではできない?

しかし形成過程は謎

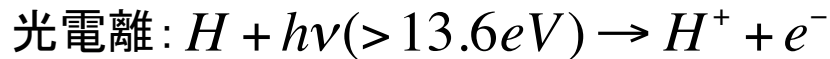
既に形成された周辺为天体からの輻射の
影響下で星団形成が進行する可能性を考慮

→星間輻射場中の星団形成

星間輻射(紫外線)がガスに及ぼす影響

→基本的に、星団形成にとってマイナスの効果

(i)光電離過程による加熱



紫外線のエネルギーと電離に使われたエネルギーの差がガスに渡る

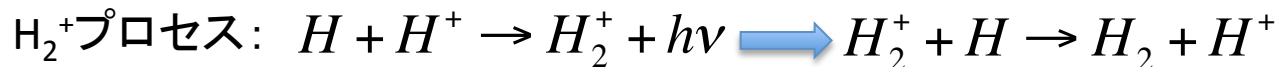
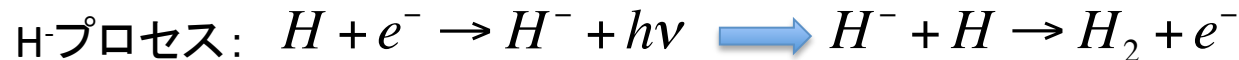
→加熱過程、ガス温度は $\sim 10^4 K$ まで上昇

$M_J(T \sim 10^4 K)$ 以下の質量のガスは収縮できなくなる→低質量天体形成が困難

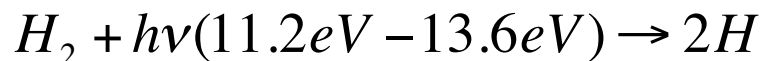
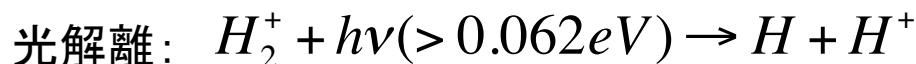
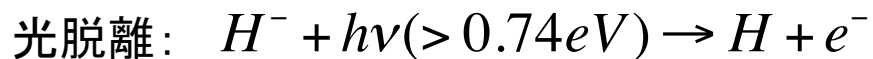
(ii)冷却材の破壊

水素分子: 金属量の少ない宇宙初期での主要な冷却材($T < 10^4 K$)

・水素分子形成プロセス



・水素分子形成にマイナスのプロセス(輻射過程)

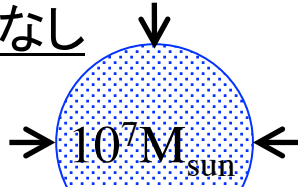


H₂やH₂形成に必要な触媒は
輻射過程で破壊される

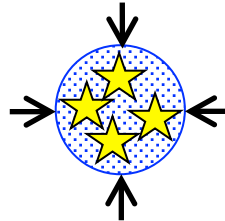
紫外線輻射場中でのガスの収縮

紫外線輻射場中で収縮したガスでは、コンパクトな星団が形成されるか？

紫外線なし



重力不安定で収縮↑

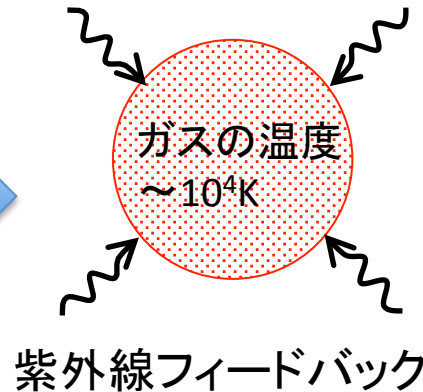
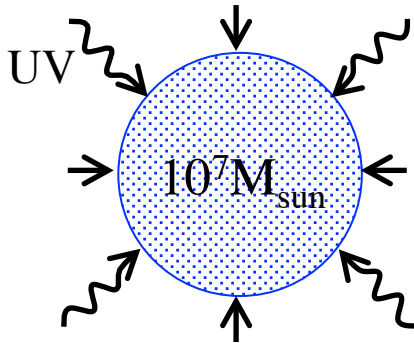


十分収縮、冷却→星形成

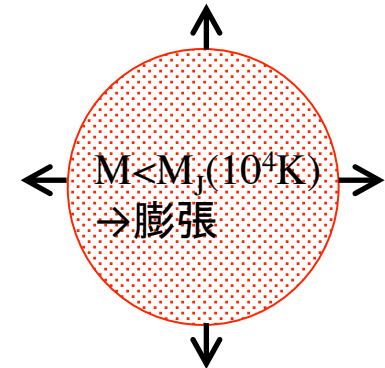


形成される星団はコンパクトにならない

(i) 紫外線あり(早い時期に照射)

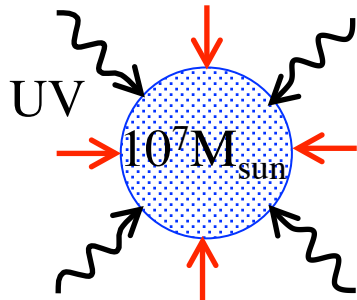


紫外線フィードバック

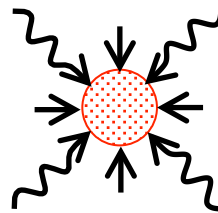


天体形成されない

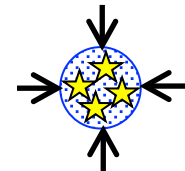
(ii) 紫外線あり(遅い時期に照射)



落下速度~電離ガスの音速(~10km/s)

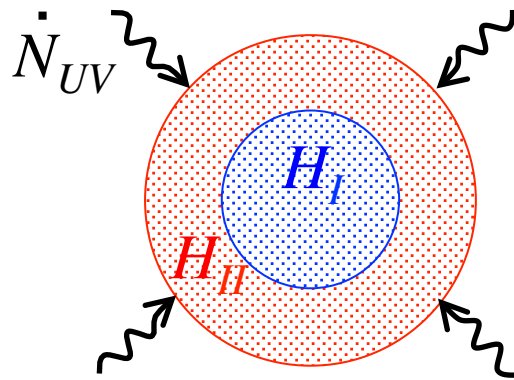


圧力による減速を受けながら、星を形成せずにコンパクトな状態まで収縮



紫外線を遮断して冷却すれば、コンパクトな星団を形成できる
(Hasegawa+2009、1次元球対称)

背景輻射場中の星形成: 自己遮蔽効果による星形成



中性のガス→紫外線により電離($T \sim 10^4 \text{K}$)



電離されたガス→一定の割合で再結合

電離率と(励起状態への)再結合率が釣り合えば、紫外線の進入は止まる



自己遮蔽効果($T < 10^4 \text{K}$)、低質量天体形成が可能

遮蔽条件: 単位時間当りの入射UV光子数(表面積) = ガス雲の再結合率(体積)

電離される体積 V_{HII} は以下のように決まる

$$\dot{N}_{UV} = \int_{V_{HII}} \bar{n}^2 \alpha_B C dV$$

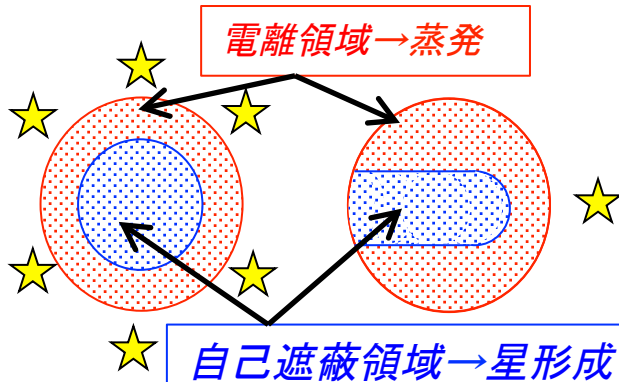
$\dot{N}_{UV}$: 単位時間当りのUV光子数

n : 数密度

α_B : 再結合係数 $2.59 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ($T = 10^4 \text{K}$)

$C = \langle n^2 \rangle / \langle n \rangle^2$: clumping factor

非等方輻射場中の自己遮蔽



- 輻射場の非等方性によって、遮蔽領域は非等方
→ガスは、1次元球対称の場合と同様に収縮しない?



形成される星団のダイナミクス(サイズ)は、輻射場の非等方性にどのように影響されるか?
3次元輻射流体力学による研究を行う

等方輻射

非等方輻射(片側照射)

手法

■ ガスダイナミクス

3次元輻射流体計算→RSPH(Susa 2006)、26万体のSPH粒子($M_{SPH} \sim 10M_{sun}$)

エネルギー方程式

断熱加熱+電離加熱

分子、原子による冷却

輻射輸送+非平衡化学反応

・ 輻射輸送

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu I_\nu + j_\nu \rightarrow \text{電離加熱率 } \Gamma_i = \int_{\nu_L}^{\infty} d\nu \int d\Omega \frac{I_\nu}{h\nu} \kappa_\nu (h\nu - h\nu_L)$$

化学反応の反応率の計算

I_ν : intensity [$\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$]
 ν_L : Lyman limit振動数

・ 冷却

e^- 、 H 、 H^+ 、 H^- 、 H_2 、 H_2^+ の6種の非平衡化学反応を解き、
各分子種のabundanceから冷却率を評価する

■ 星形成

星形成条件: $\nabla \cdot \vec{v} < 0$, $X_{H_2} > 5 \times 10^{-4}$, $T < 5000 K$

ローカルな
ガスの収縮

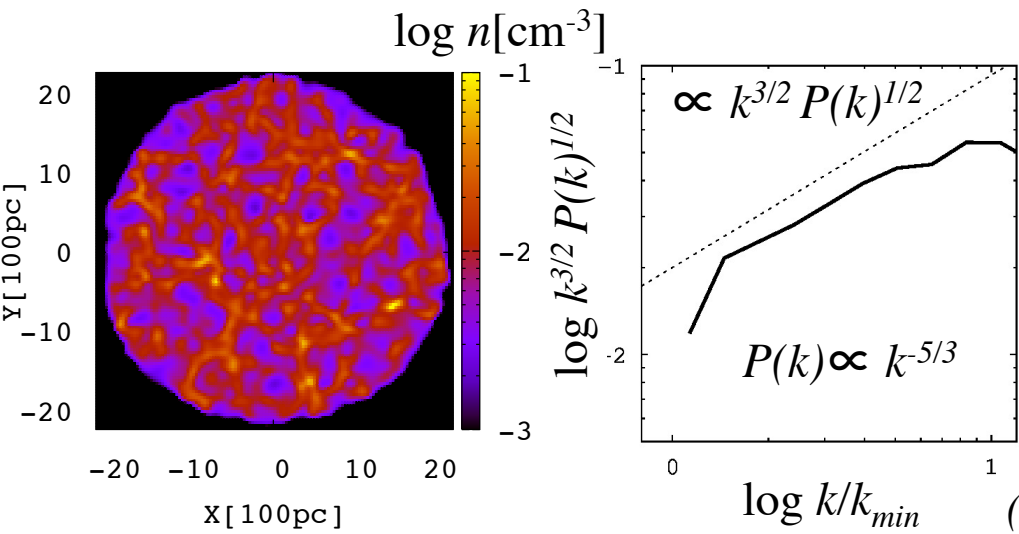
水素分子形成 水素分子による冷却

X_{H_2} : H_2 fraction

遮蔽が実現しないと満たされない

星形成条件を満たしたSPH粒子を星粒子(圧力0)として、星の重力多体計算

■ 初期ガス雲



$M_{cloud}=10^7 M_{sun}$ 、 $\bar{n} = 0.01 cm^{-3}$
 $C=1.5$ (線形の密度ゆらぎを仮定)
 密度ゆらぎパワースペクトル $P(k) \propto k^{-5/3}$
 →Kolmogorv index(乱流)を想定

スケール k^{-1} でのゆらぎの大きさ

■ 輻射場

- 輻射場：片側照射(1 source、x軸上に光源配置)
 等方輻射(18 source、等方的に光源配置)

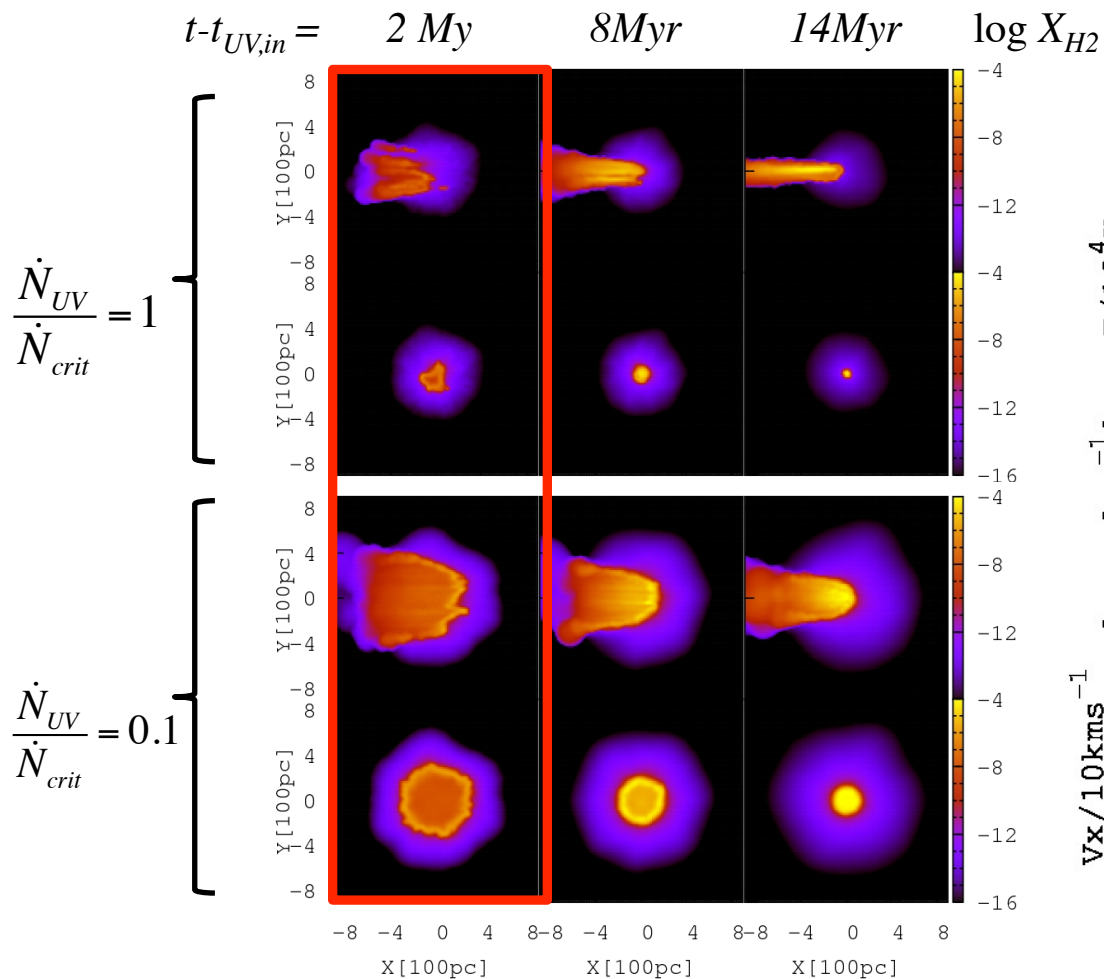
▪ 輻射強度：

体積 V_{Cloud} のガス全体を電離する臨界電離光子数 $\dot{N}_{crit} = \int_{V_{Cloud}} \bar{n}^2 \alpha_B C dV$
 $= 1.63 \times 10^{52} s^{-1}$

入射紫外線光子数 $\dot{N}_{UV}$ について $\dot{N}_{UV} / \dot{N}_{crit} = 1, 0.1$ を設定

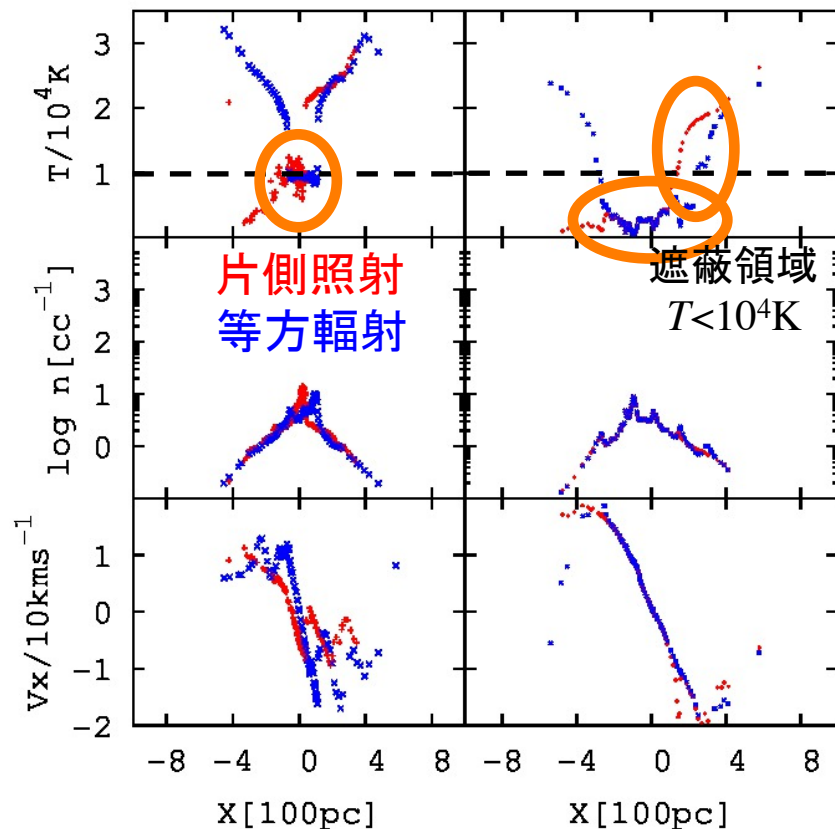
- 落下速度 $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ のタイミングで紫外線を照射($\bar{n} = 0.15 \text{ cm}^{-3}$ 、 $C=5.9$)

結果：背景輻射場中のガスの収縮



X軸上の物理量プロファイル
(速度、密度、温度)

$\dot{N}_{UV} / \dot{N}_{crit} = 1$ $\dot{N}_{UV} / \dot{N}_{crit} = 0.1$



$\dot{N}_{UV} / \dot{N}_{crit} = 1$: 紫外線により、ガス雲の温度は $T \sim 10^4 K$ 程度まで加熱される

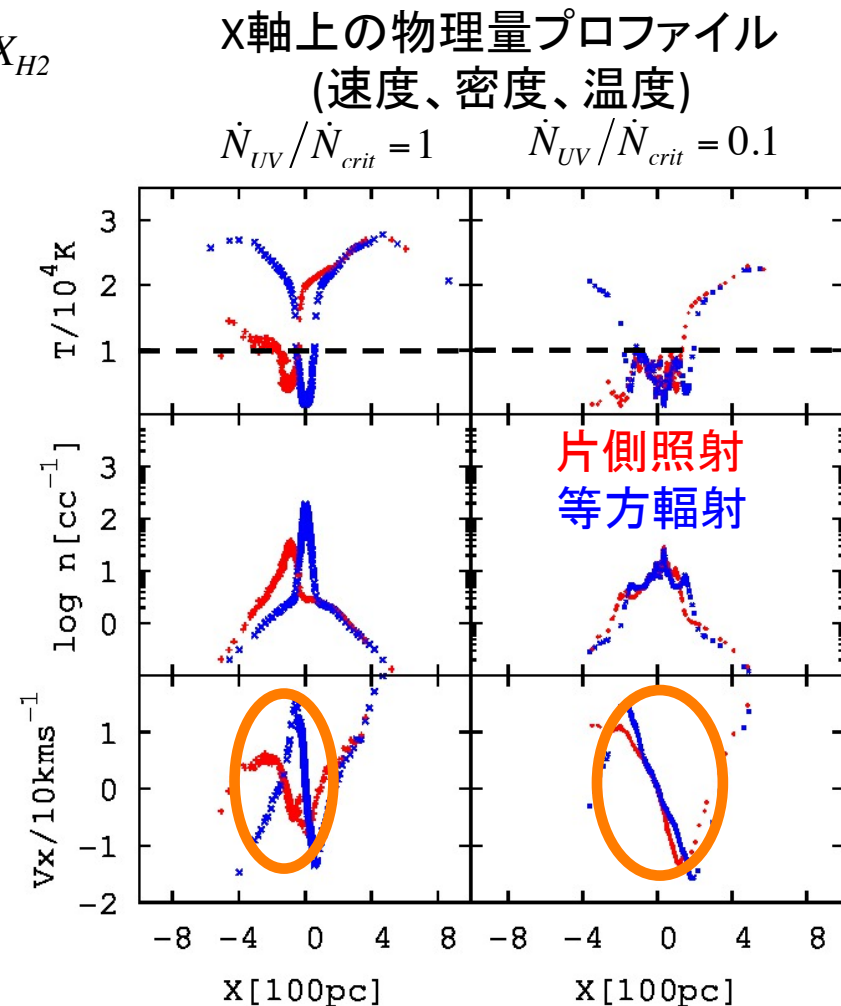
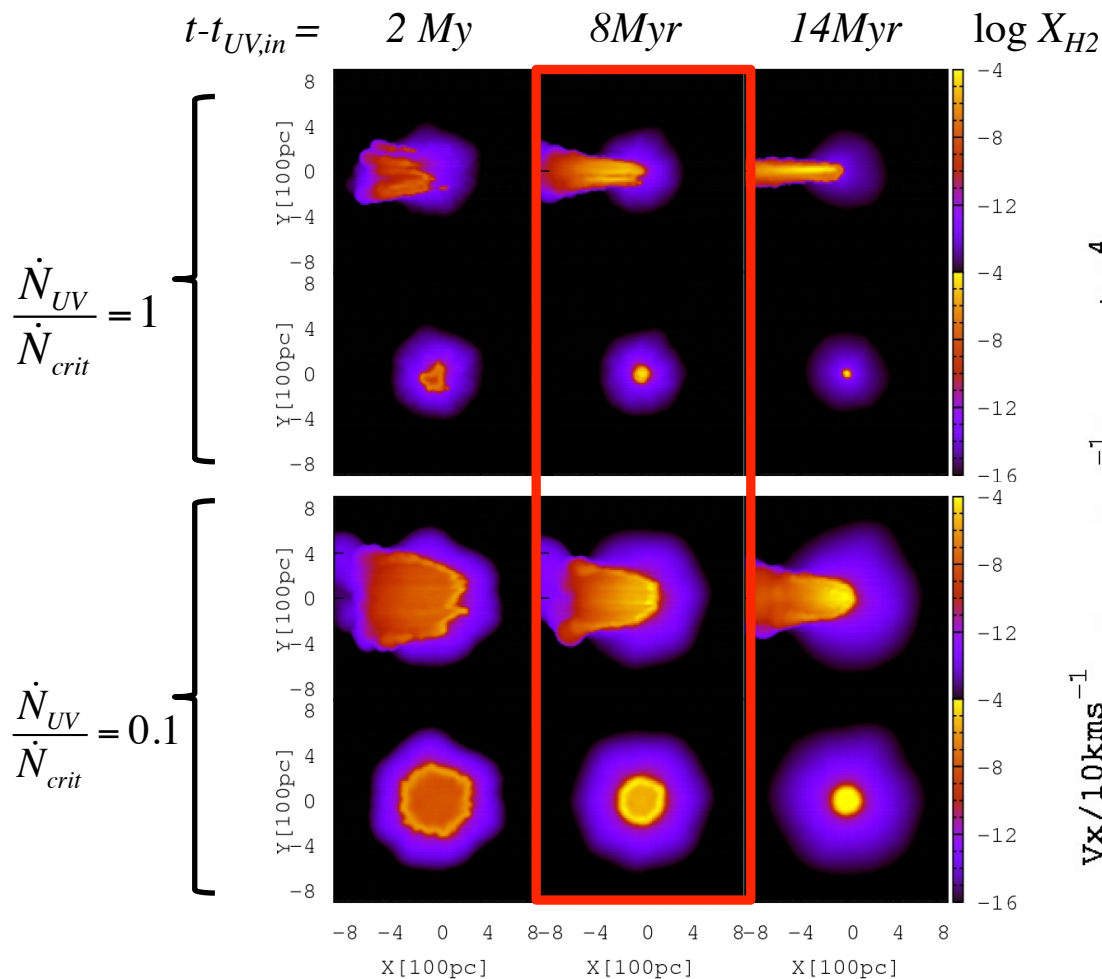
→ 高圧となるため、ガスの収縮に伴う運動エネルギー散逸効果が期待できる

$\dot{N}_{UV} / \dot{N}_{crit} = 0.1$: 紫外線強度が弱いため、早々にガス雲中央部に遮蔽領域が形成される

入射する紫外線光子数は変わらないが、fluxは異なる

→ 片側照射の方が、よりガス雲の中心部まで紫外線が進入

結果：背景輻射場中のガスの収縮



入射する光子数は光源分布によらないが、フラックスは異なる

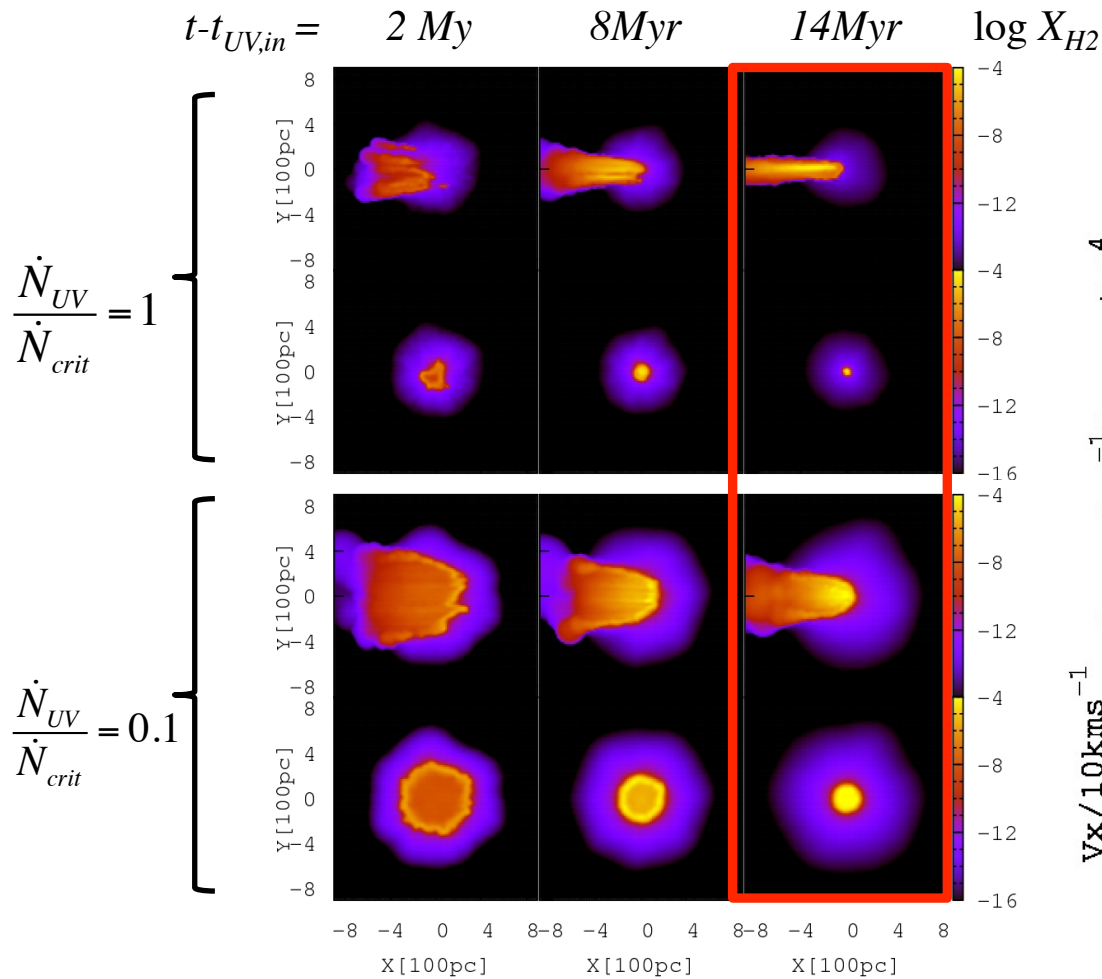
$\frac{\dot{N}_{UV}}{\dot{N}_{crit}} = 1$: 片側照射の方が、紫外線がガス雲中心部の収縮運動に強く影響を与える

→ より収縮運動が減速された状態で、コンパクトな領域で遮蔽すると期待される

$\frac{\dot{N}_{UV}}{\dot{N}_{crit}} = 0.1$: 早々に形成された遮蔽領域が収縮する

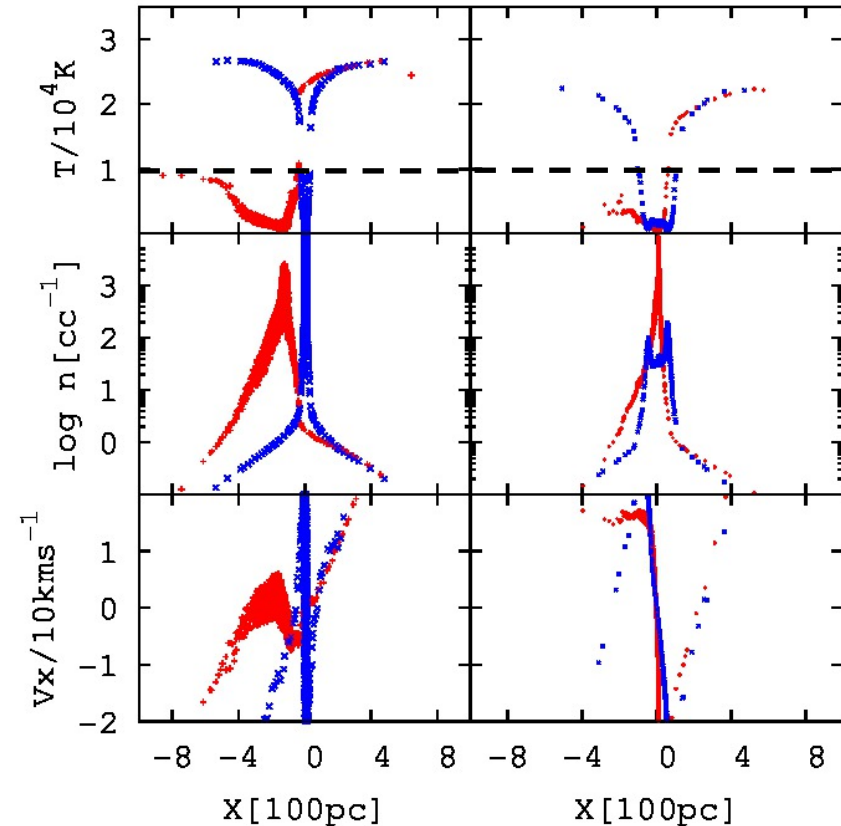
→ 収縮運動は輻射場の非等方性に大きく影響されない

結果：背景輻射場中のガスの収縮



X軸上の物理量プロファイル
(速度、密度、温度)

$$\frac{\dot{N}_{UV}}{\dot{N}_{crit}} = 1 \quad \frac{\dot{N}_{UV}}{\dot{N}_{crit}} = 0.1$$



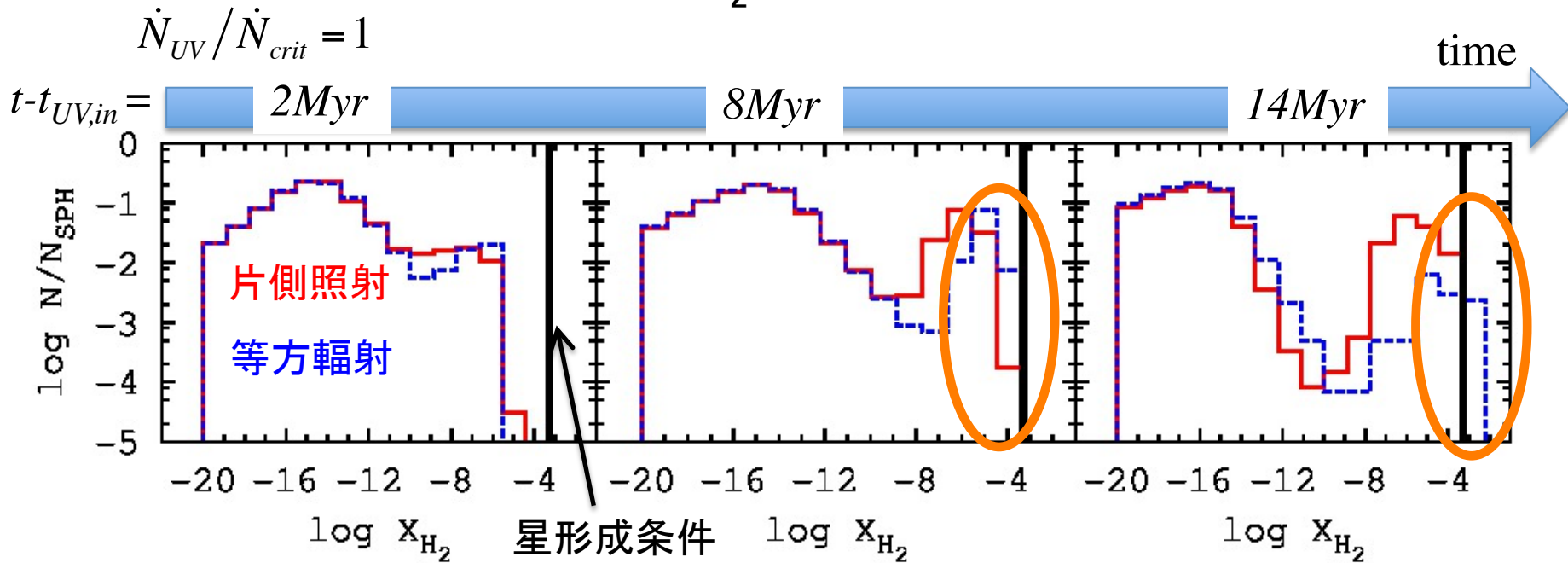
$\frac{\dot{N}_{UV}}{\dot{N}_{crit}} = 1$: 片側照射の方が、より収縮運動が減速された状態で、コンパクトな領域で遮蔽すると期待される



背景輻射場の3次元的な効果①

$\frac{\dot{N}_{UV}}{\dot{N}_{crit}} = 0.1$: 既に形成された遮蔽領域が収縮するため、収縮運動は輻射場の非等方性に大きく影響されない

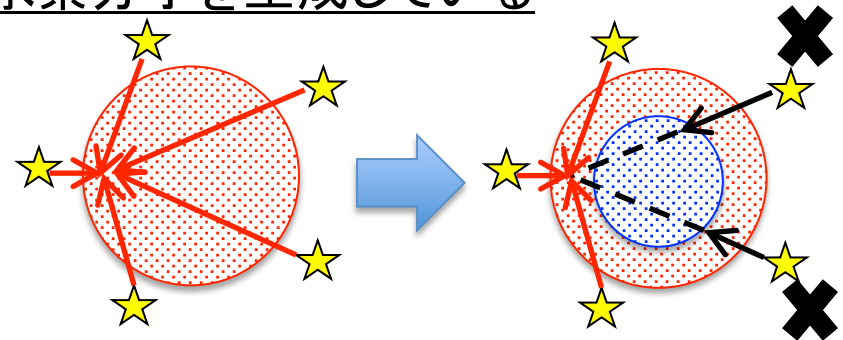
ガス雲のH₂ fractionの分布



等方輻射の方が、高い効率で水素分子を生成している

→等方輻射においては、一度遮蔽領域が形成されると有効的な光源の数が減り、遮蔽が促進されやすくなるため

→ 輻射場の3次元効果②

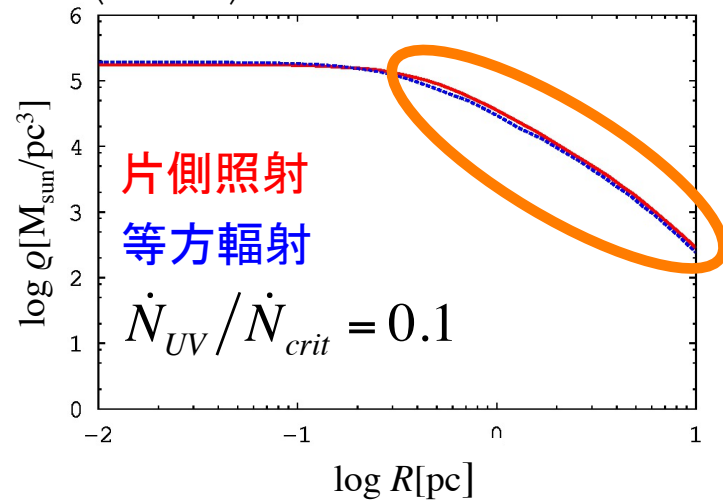
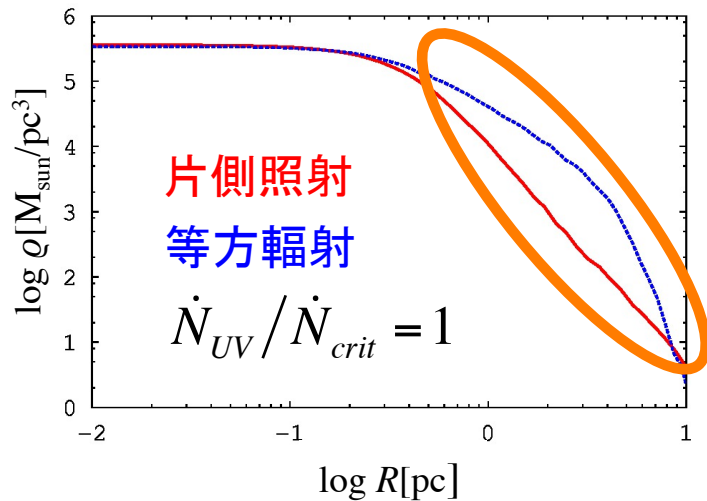


片側照射である方が、収縮の過程で紫外線の影響をより受けやすい

輻射場の3次元効果①+② → $\dot{N}_{UV}/\dot{N}_{crit} = 1$ 程度の強い輻射強度で、片側照射である方がコンパクトな星団が形成されやすい?

形成された星団のサイズ

星団の密度分布をPlummer model: $\rho(R) = \frac{3M}{4\pi b^3} \left(1 + \frac{R^2}{b^2}\right)^{-5/2}$ でフィット、星団のコア半径 b を評価

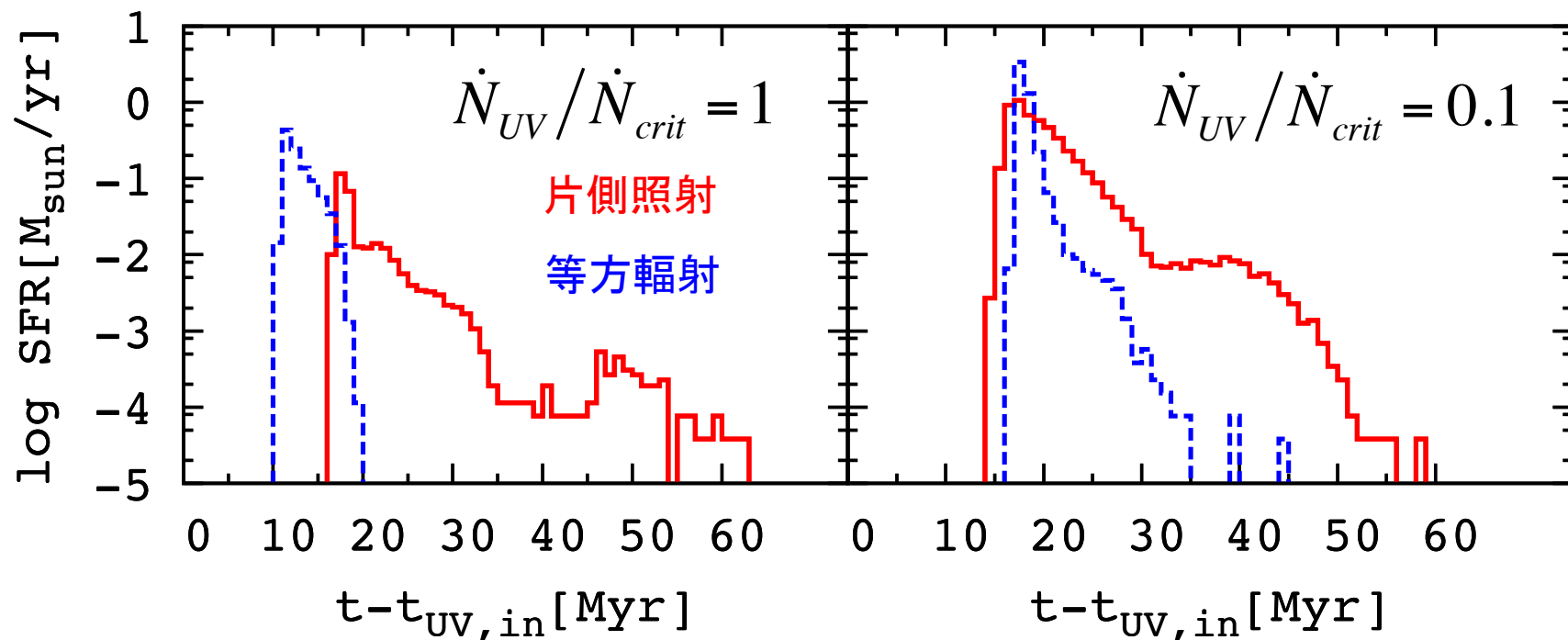


輻射強度	$\dot{N}_{UV}/\dot{N}_{crit} = 1$		$\dot{N}_{UV}/\dot{N}_{crit} = 0.1$	
	core半径 b [pc]	$M_{core} [M_{sun}]$	core半径 b [pc]	$M_{core} [M_{sun}]$
片側	0.575	9.81×10^4	2.02	6.66×10^5
等方	0.912	2.53×10^5	1.98	5.53×10^5

* M_{core} : b 内に含まれる星質量

- 輻射強度 $\dot{N}_{UV}/\dot{N}_{crit} = 1 \rightarrow$ 片側照射の方が、星間輻射の効果によって星団のコア半径が小さくなる
- 輻射場の非等方性が星団のサイズに影響を与える輻射強度は、 $\approx \dot{N}_{crit}$ 程度
- 球状星団のコア半径 $\lesssim 1$ [pc] $\rightarrow$ 強い星間輻射場中で、球状星団程度のサイズの星団が形成される可能性が示された

星形成史



等方輻射

- 早い段階で星形成率が減衰
→ 遮蔽領域の周りは蒸発してしまうため、継続的に星形成がされない

片側照射

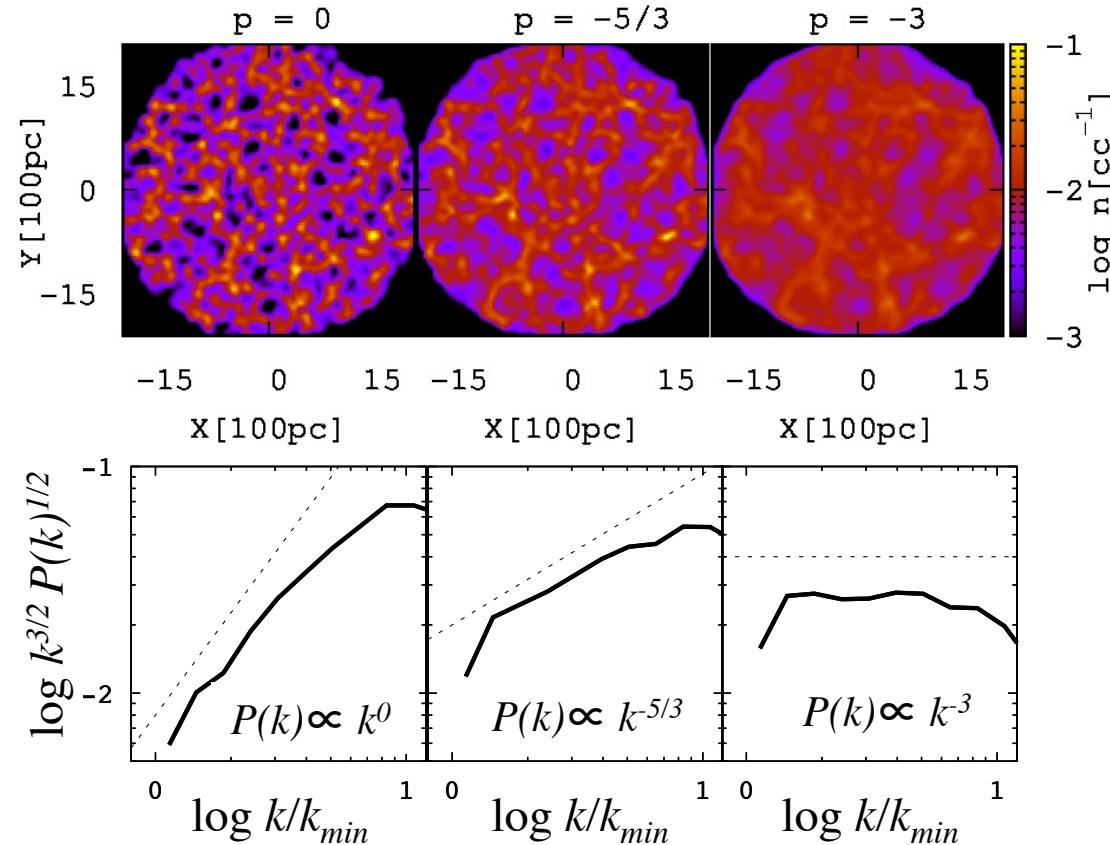
- 日陰領域が形成されるために継続的に星形成できる

ガスの密度構造の影響

- 密度構造は、星団形成過程(遮蔽条件)にどのように影響するか?

→異なる密度構造を持つガス雲を生成

- 片側照射、 $\dot{N}_{UV}/\dot{N}_{crit} = 1$



仮定したindex p

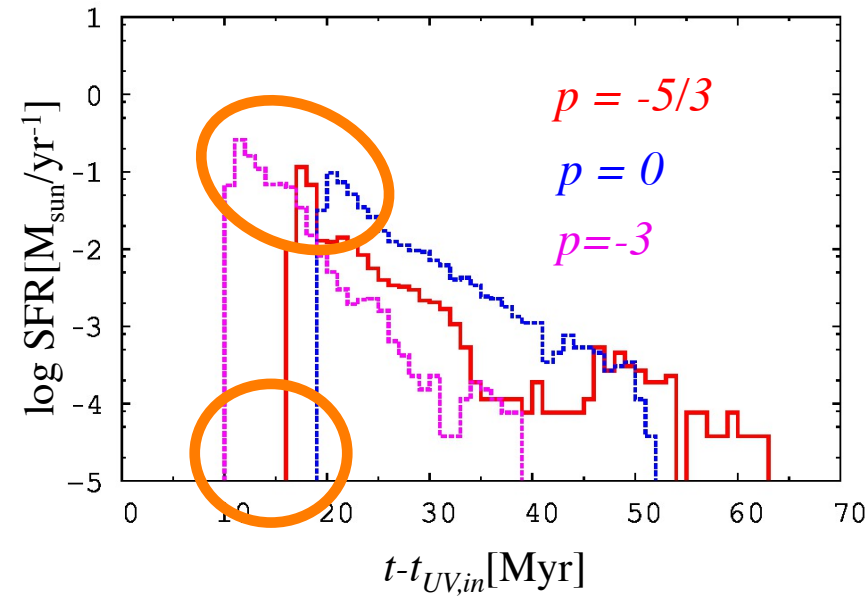
- $p=0$: white noise
- $p=-5/3$: Kolmogorov law(乱流場)
- $p=-3$: 宇宙論的な密度ゆらぎ

紫外線照射時において、
臨界電離光子数は同じ

p	$\dot{N}_{UV} (= \dot{N}_{crit})$	$C(UV \text{ in})$
0	1.65×10^{52}	7.59
-5/3	1.63×10^{52}	5.88
-3	1.62×10^{52}	4.44

- ベギが緩やかなほど、小スケールでの密度ゆらぎの寄与が大きい

ガス雲の密度構造と形成される星団



星形成史

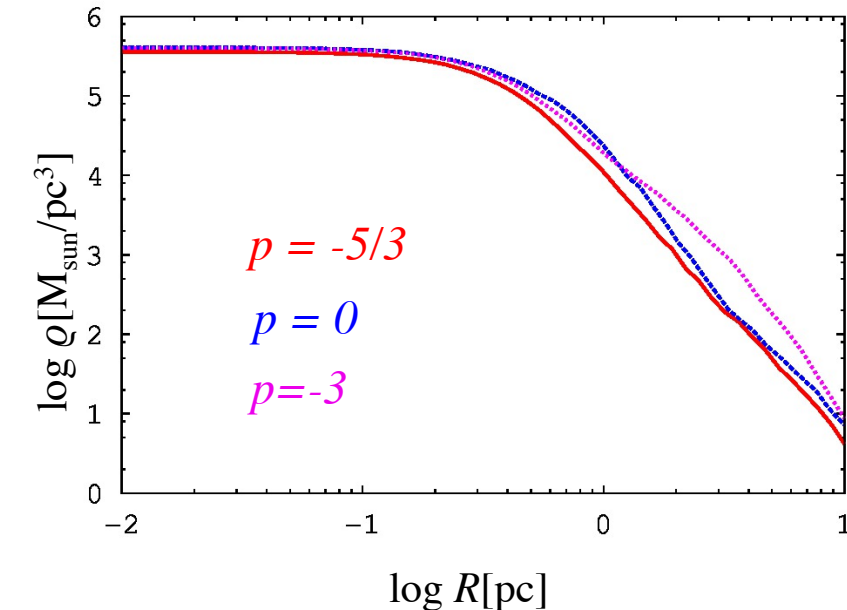
ベキがsteepであるほうが遮蔽が有効



- 星形成の開始時期が早まる傾向
- 星形成率が高くなる

星団のサイズ

強い輻射強度 $\rightarrow b < 1 \text{ pc}$ の星団を形成
明確なベキの依存性は見られない



	$\dot{N}_{\text{UV}}/\dot{N}_{\text{crit}} = 1$	
Index p	コア半径 $b [\text{pc}]$	$M_{\text{core}} [M_{\text{sun}}]$
0	0.624	1.41×10^5
-5/3	0.575	9.81×10^4
-3	0.819	1.81×10^5

まとめ

- 星団形成過程における星間輻射場の存在に注目し、3次元輻射流体計算によって特に輻射場の非等方性が星団のサイズに与える影響について調べた
- 入射する紫外線がガス雲全体を電離するほど強い場合、非等方輻射場(片側照射)である方がよりコンパクトな星団を形成できることが分かった
- ガス雲が持つ密度構造の違いは、自己遮蔽の効率に影響するが、線形の密度ゆらぎであれば形成される星団のサイズには大きく影響しない
- 今回得られた結果と球状星団の観測との比較(fundamental plane上での議論など)には、精密なN体計算によって~10Gyr程度星団の運動を追う必要がある→future work?