

強い輻射場の下での原始銀河雲の進化について

～超巨大BHの形成過程の解明に向けて～

京都大学 天体核研究室

稲吉恒平、大向一行

宇宙論的な初期条件から宇宙で最初に形成される星(初代星)は、現在の宇宙で形成される星よりも比較的大質量であることが分かっている。星の質量を決める上で最も重要なのは始原ガス雲の分裂過程である。宇宙初期の星形成において、低温の始原ガス中では水素分子が冷却を担っている。そのため、まず始原ガス雲は $10^4/\text{cc}$ 以下の密度で水素分子により急激に冷却され、ジーンズ不安定により分裂し、その結果 $10^2\text{-}10^3 M_\odot$ の分裂片が形成され、その後周囲のガスが中心星に降着して星に進化すると考えられている。

しかし、一方で大質量星の影響下で進行する第二世代星の天体形成の際には、初代星からの紫外線の照射の効果を考える必要がある。強い紫外線は水素分子を解離してしまうため、冷却が効かず高温のままガスの収縮が進行する。このような高温のガスでは原子冷却(主にLy α 輝線)が有効だが、ガスはほぼ等温のまま収縮するため、激しい分裂時期を経験しないことが予想される。ガスがこのような進化をたどると、最終的に超大質量の星($10^6 M_\odot$)が形成される可能性が指摘されている。このような星は銀河中心に存在する超巨大ブラックホール(SMBH)の種として考えられている。

第二世代の星形成が起きているような宇宙では、初代星からの輻射による効果の他、ガスを電離する宇宙線などの効果も重要になってくると考えられる。本研究では、以上の効果も考慮したうえで、ガスが原子冷却による進化をたどるために必要な輻射の量を正確に見積もり、SMBH形成の可能性を探った。

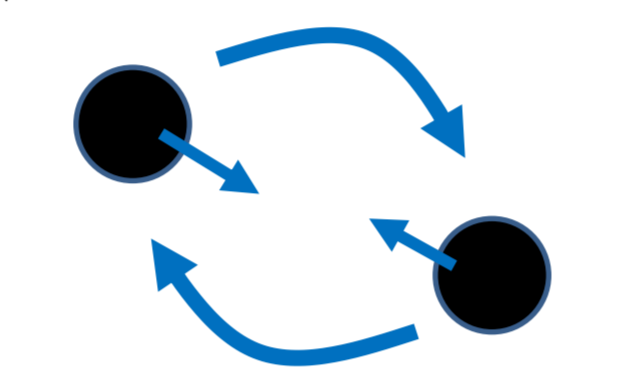
1、SMBHの形成過程の問題

- ・宇宙に普遍的に存在する超巨大BHはどのように形成されたのか？
- ・宇宙物理学の中で最も重要な未解決問題の一つ
- ・特に、初期宇宙($z \sim 6$)に存在するSMBH($10^9 M_\odot$)の起源は何か！？

従来、考えられてきた2つのシナリオ

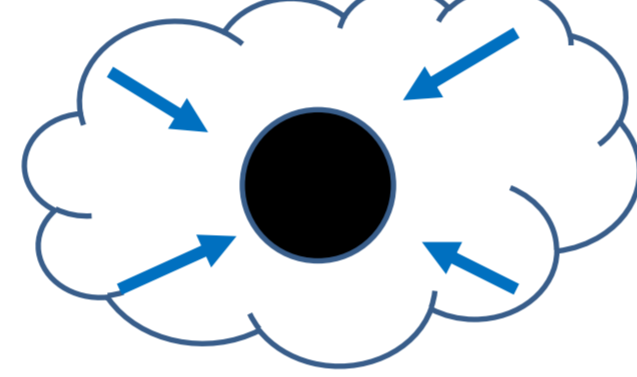
① 星質量BHや中間質量BHの衝突合体

系から十分に角運動量を抜き取ることができない(摩擦or重力波)



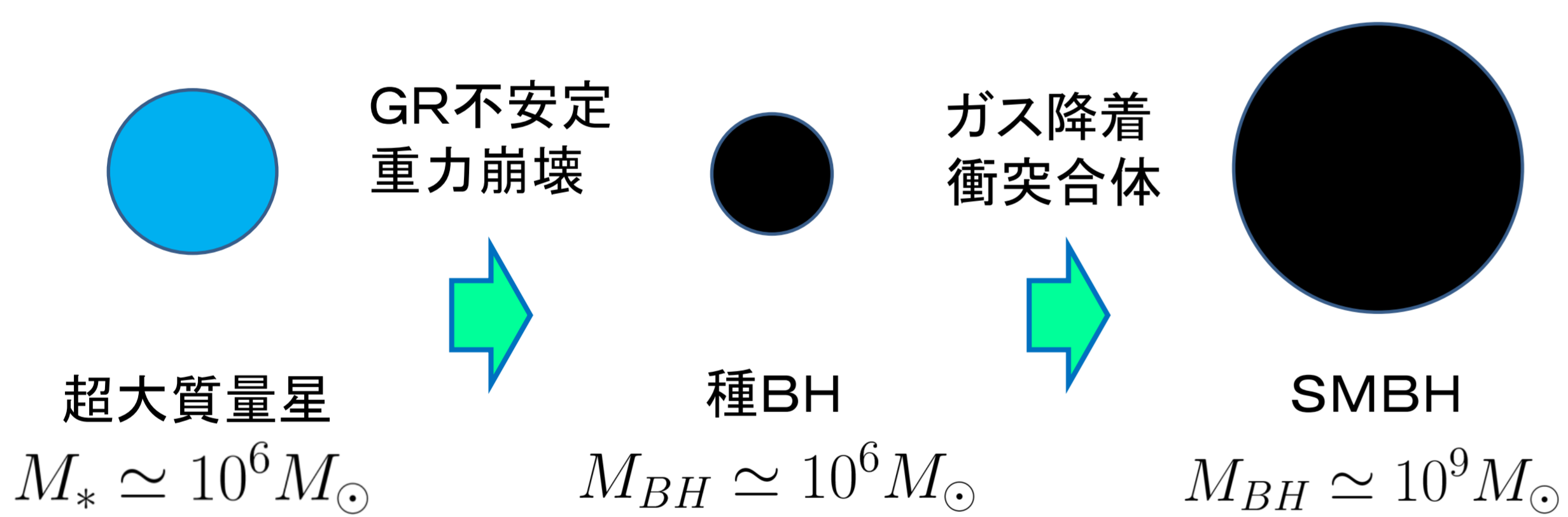
② BHへのガスの降着

Eddington降着率を超える非常に大きい降着率を必要とする



$z \sim 6$ までに $10^9 M_\odot$ のBHを形成するのは非常に困難
他に重要な形成過程はないのか？

超大質量星($10^6 M_\odot$)の重力崩壊により形成されたBHがSMBHの種BHとして考えられないか？



2、第二世代星の形成⇒超大質量星

すでに初代星が誕生したDMハロー内では、次世代の星形成領域の環境が劇的に変わる可能性がある！

初代星からの強い輻射 (Lyman-Werner band)

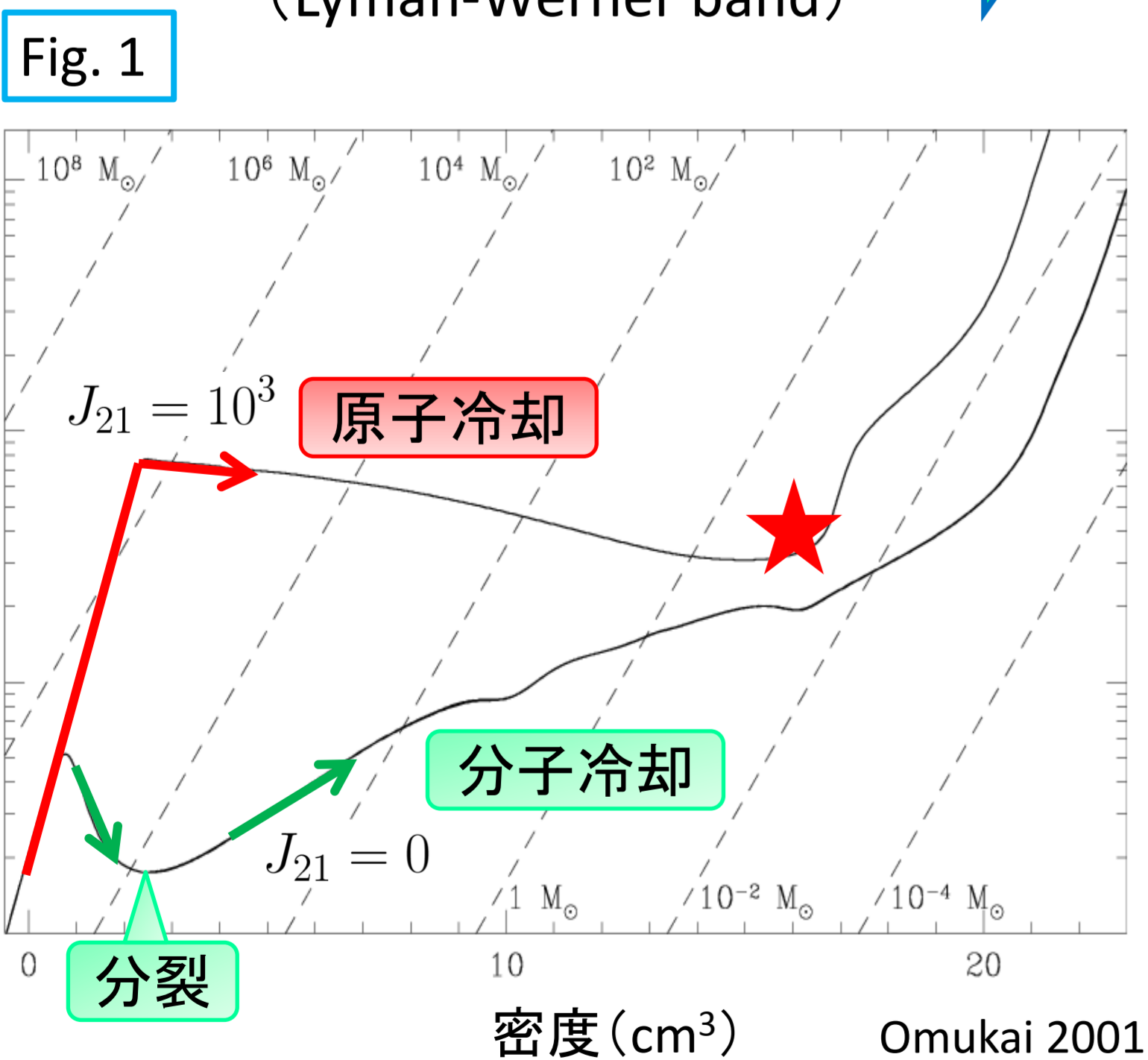
H_2 分子は解離されてしまう
 $H_2 + \gamma_{LW} \rightarrow 2H$

輻射が非常に強いと $J_{21} \geq J_{crit}$

H_2 分子冷却 \times
冷却が効かずに温度上昇

高温($\sim 8000\text{K}$)では原子冷却が効く(e.g. Ly α)

初代星(分子冷却)の場合とは全く異なる進化をたどる



初代星の典型的な質量はここで決まる

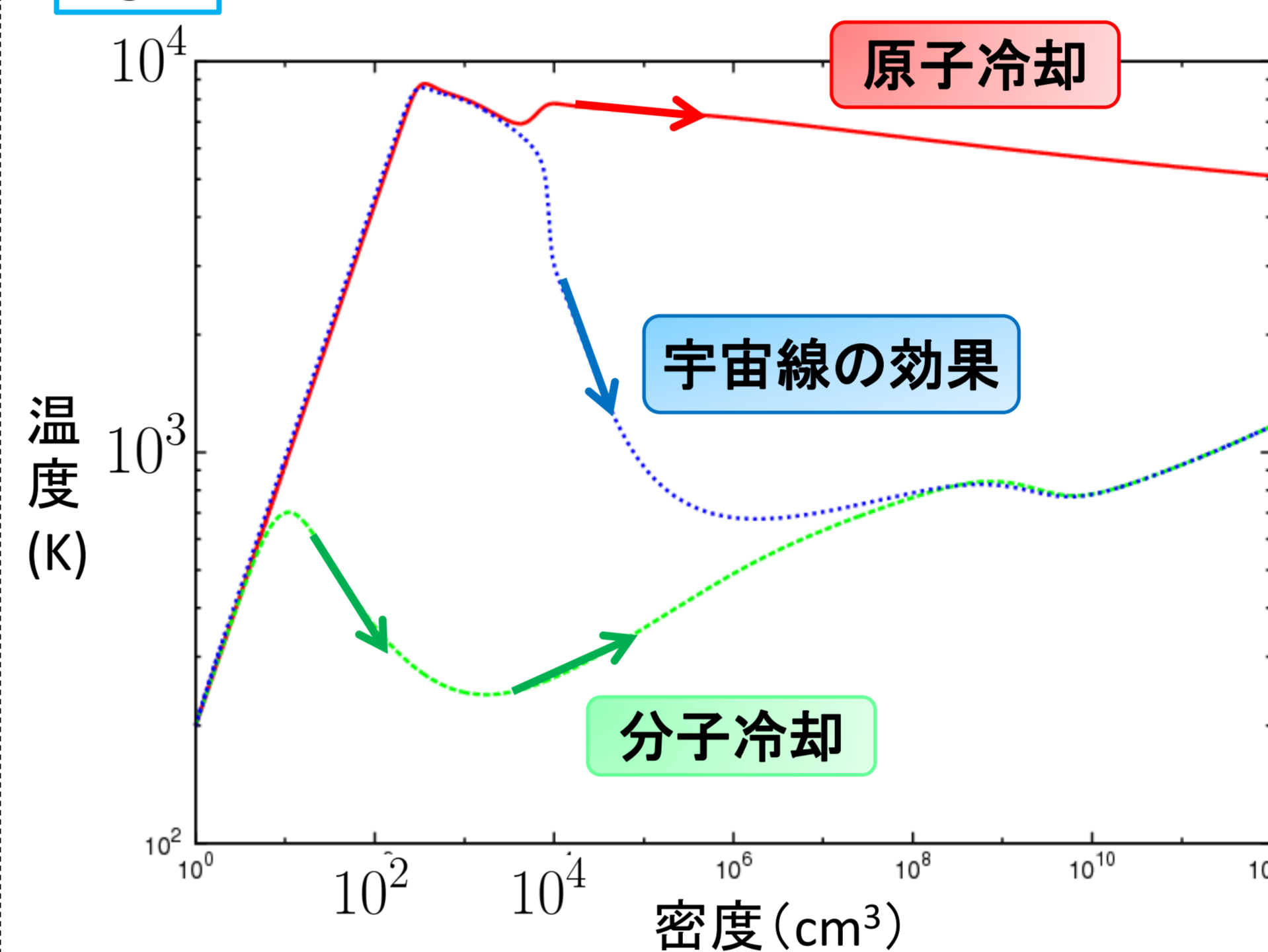
3Dシミュレーションで輻射場の下でのガスの進化を計算(Bromm & Loeb 2003)

Fig. 1の★でガス雲は分裂せず → SMBHの種となる超大質量星の形成の可能性を示唆

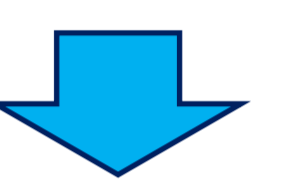
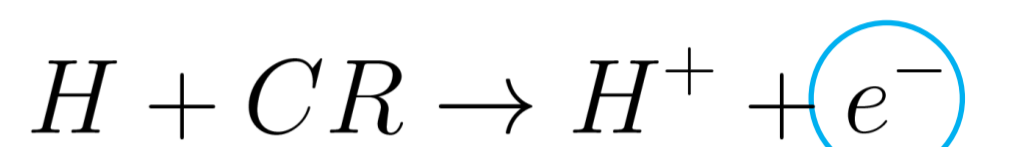
3、宇宙線の効果

Q. 第二世代星が形成される宇宙では、初代星の超新星爆発により加速された粒子が宇宙線として飛来し、ガス雲を電離してしまうことが考えられないか？

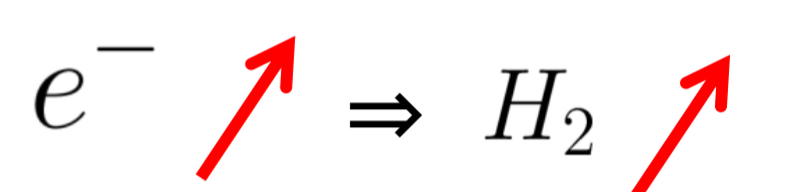
Fig. 2



宇宙線によるガスの電離



電子は H_2 形成の触媒なので



H_2 分子による冷却が効くため、 J_{crit} の値が大きくなる

J_{crit} の値が非常に大きくなってしまえば、『紫外線をガスに照射することで、超大質量星を形成する』というシナリオは困難になる！？

➡ 宇宙線の強度に対する J_{crit} の振る舞いを調べることは重要

4、結果

宇宙線の強度 U_{CR} をパラメータにして J_{crit} の値を計算した

宇宙線の単位エネルギーあたりの数密度

$$\frac{dn_{CR}}{d\epsilon} = \frac{U_{CR}}{\epsilon_{min}^2 \ln(\epsilon_{max}/\epsilon_{min})} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{min}}\right)^{-2} U_{CR}$$

宇宙線の強度 (erg cm⁻³)

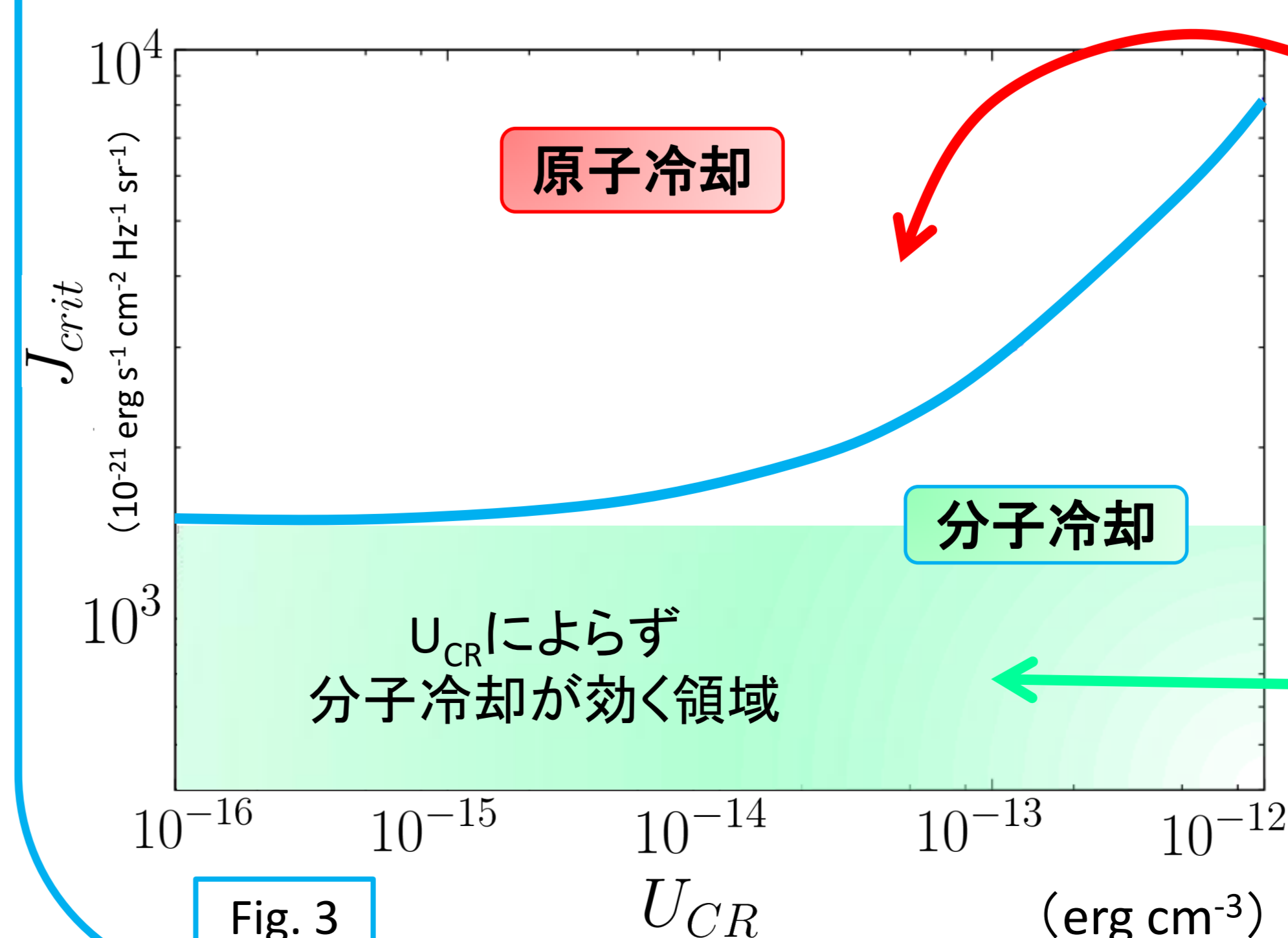
べきはFermi加速で得られる値を仮定

宇宙線による電離率

$$\zeta_{CR} \approx 10^{-19} \text{ s}^{-1} \left(\frac{U_{CR}}{2 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3}}\right) \left(\frac{\epsilon_{min}}{10^7 \text{ eV}}\right)^{-1.3}$$

上式を用いて、紫外線+宇宙線の効果を入れた始原ガス雲の進化を計算

➡ 冷却過程の分岐を決める物理の解明を目指す



上の領域(原子冷却)
 H_2 分子を十分に壊す輻射が存在する

下の領域(分子冷却)
宇宙線による電離の効果で H_2 分子を十分に生成する

Fig. 3