

Galaxy-IGM 2021

Group Work

Galaxy Theory Team

菊地原・大滝・喜友名・中野・松本
Supervisor: 平野さん、菅原さん

課題①

「**初代星の質量（初期質量関数）**は宇宙初期の銀河形成を左右する重要なパラメータである。①初代星の形成過程においてその影響が未解明である物理過程について調べ、初代星質量に与える不定性を整理せよ。②また、将来どのような観測を行えばこの不定性を制限することができるか検討せよ」

"The mass of the first star (or its initial mass function IMF) is an important parameter that influences galaxy formation in the early universe. (1) Investigate the physical process whose influence is unclear in the formation process of the first star, and summarize the indeterminacy on the mass of the first star. (2) Also, consider what kind of observations can be made in the future to limit this indeterminacy."

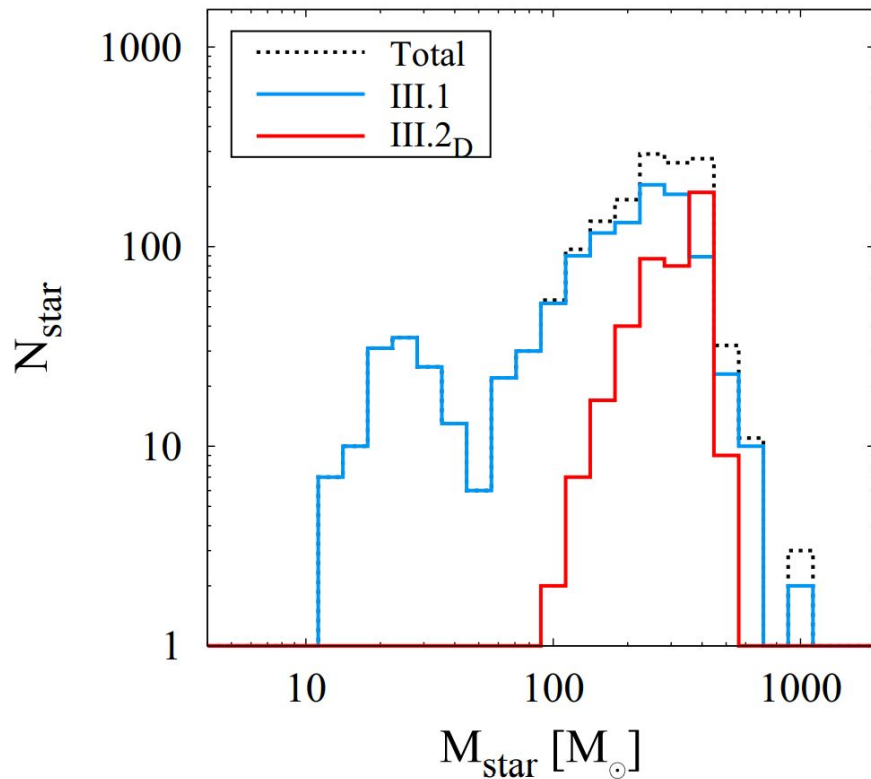
Pop III initial mass function (IMF)

初期質量関数 (IMF) : どのような質量の星がどのような頻度で生まれるかを表す関数

Hirano et al. (2015)では宇宙論的シミュレーションの星形成領域からIMF決定。

PopIIIのIMFに加味されてない物理的効果により、どのような不定性が現れるか考える

Fiducial model of Pop III IMF

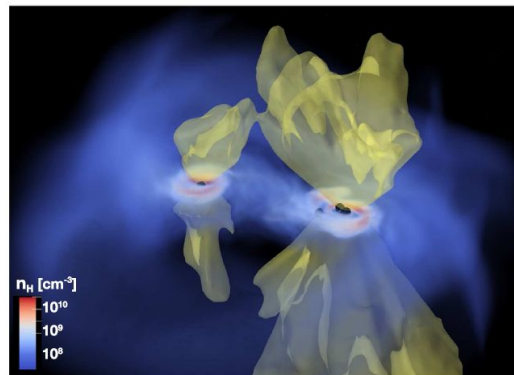
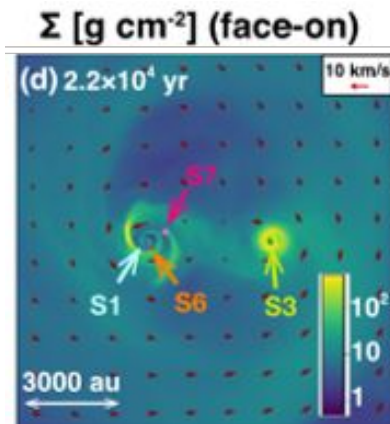


(Hirano et al. 2015)

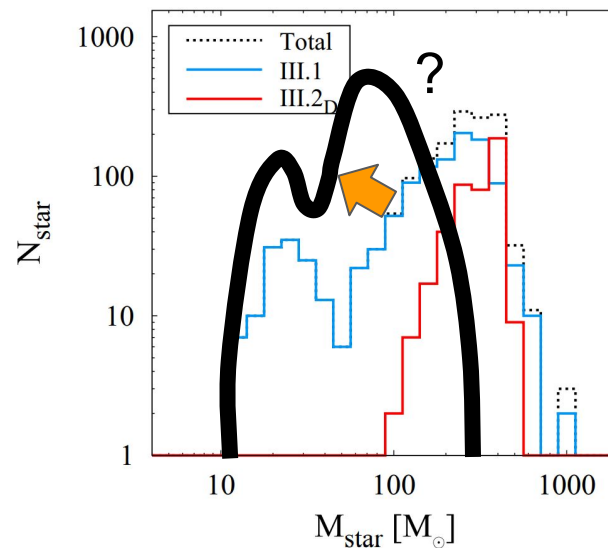
Fragmentation & Magnetic field

・**Fragmentation**: 初代星形成時に連星系が形成される効果

⇒ シミュレーションの結果, 1つのクラウドから**4個**の初代星が形成 (Sugimura et al. 2020)



Sugimura et al. (2020)

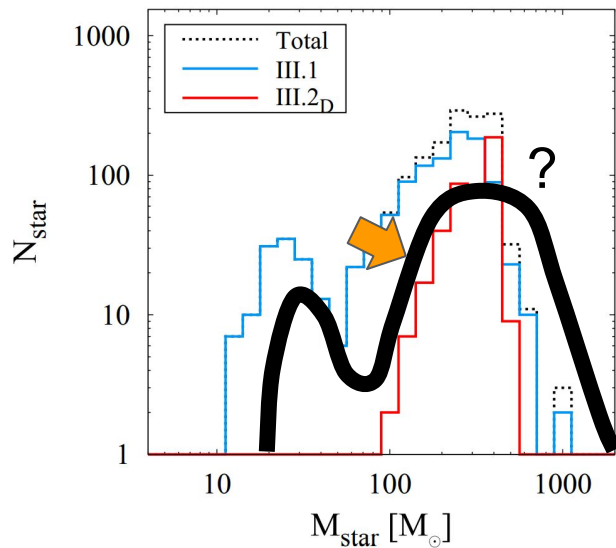


Fragmentation & Magnetic field

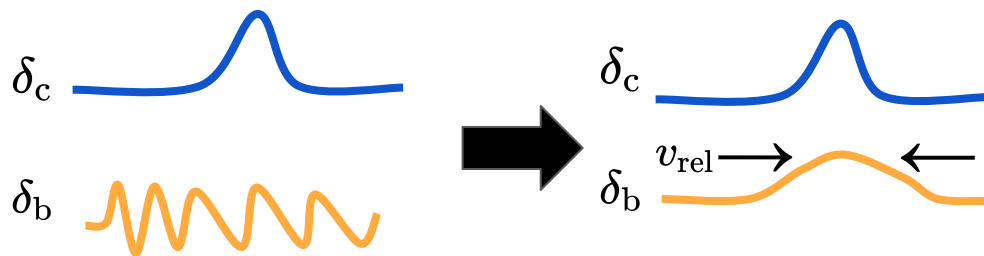
・**Fragmentation**: 初代星形成時に連星系が形成される効果

⇒ シミュレーションの結果, 1つのクラウドから**4個**の初代星が形成 (Sugimura et al. 2020)

- ・ $B \gtrsim 10^{-13} (n/1 \text{ cm}^{-3})^{-2/3} \text{ G}$ の磁場が存在する場合:
 - コアの角運動量が外層に効率的に運ばれる
 - **ガスの降着が促進され, 円盤消失**
 - 形成される初代星の質量は大きくなり, Fragmentationによる形成個数は減る



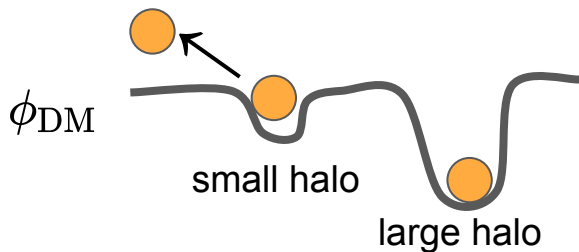
Baryon Streaming Vel.



recombination 以前
baryon-photon 流体

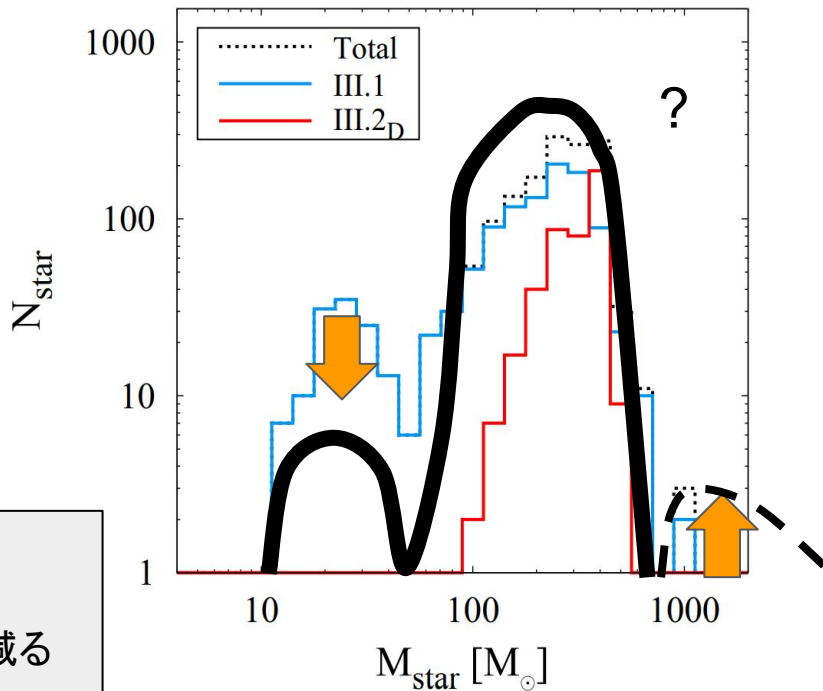
recombination 以後
baryon catch-up

もし v_{rel} が大きいと...



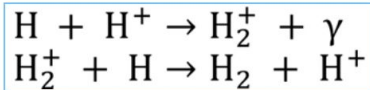
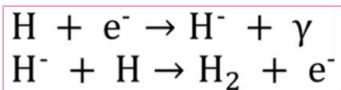
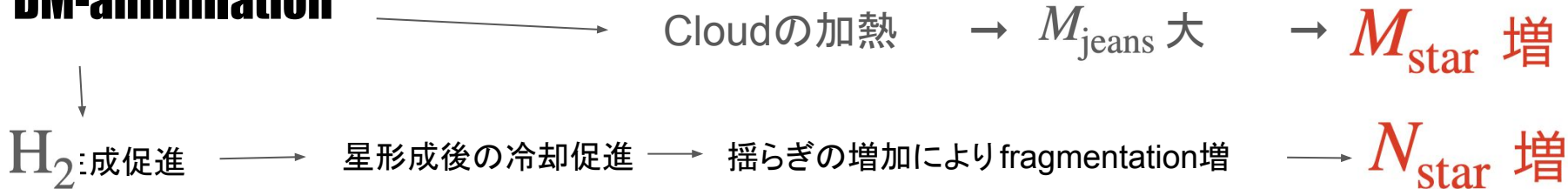
low mass halo には
gas が集まらなくなる
→ low mass pop III が減る

稀に大質量星?
(Hirano et al. 2017)



WDM & DM-annihilation

DM-annihilation



WDM

速度分散大 \rightarrow 小質量halo減 $\rightarrow M_{\text{star}}$ 増

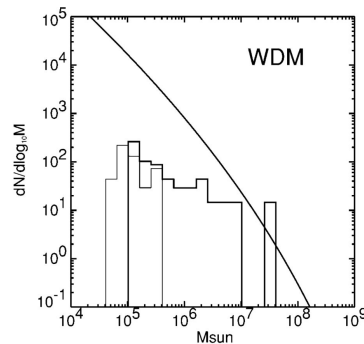
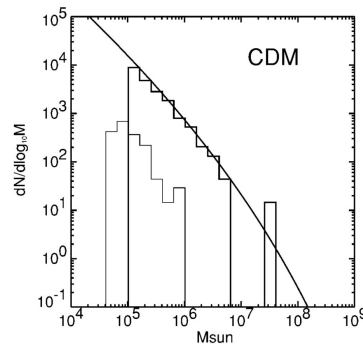


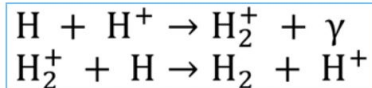
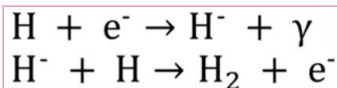
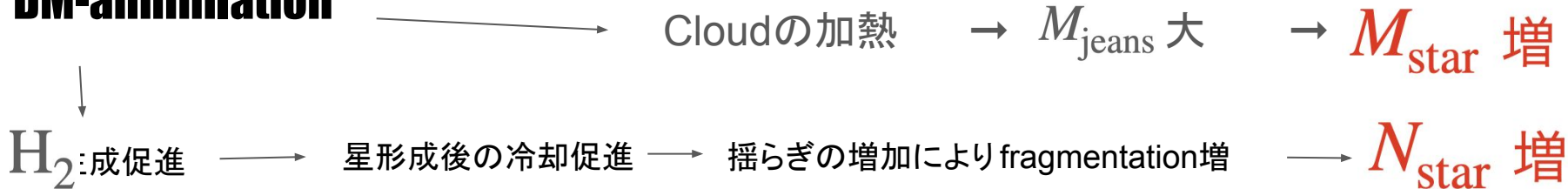
FIG. 2.—Mass function of dark matter halos at $z = 20$. The solid line is the Press-Schechter mass function computed for the CDM model. We also plot the abundance of all the subhalos within these parent halos as thin histograms.

(高温やWDMの崩壊によるエネルギーで H_2 の生成で数も増えるかも？)

(Yoshida et al. 2003)

WDM & DM-annihilation

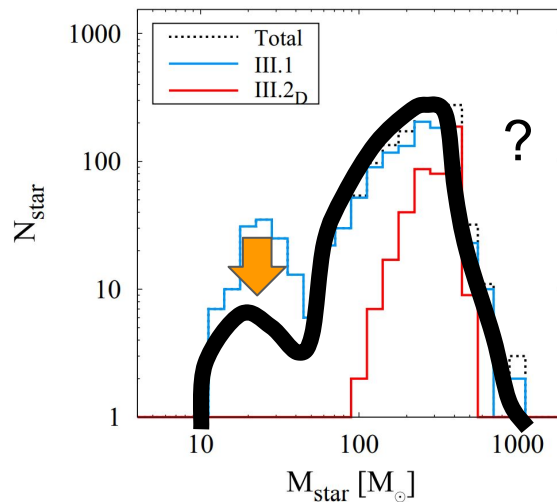
DM-annihilation



WDM

速度分散大 → 小質量halo減 → M_{star} 増

(高温やWDMの崩壊によるエネルギーで H_2 の生成で数も増えるかも？)



課題②

「**初代星の質量（初期質量関数）**は宇宙初期の銀河形成を左右する重要なパラメータである。①初代星の形成過程においてその影響が未解明である物理過程について調べ、初代星質量に与える不定性を整理せよ。②また、将来どのような観測を行えばこの不定性を制限することができるか検討せよ」

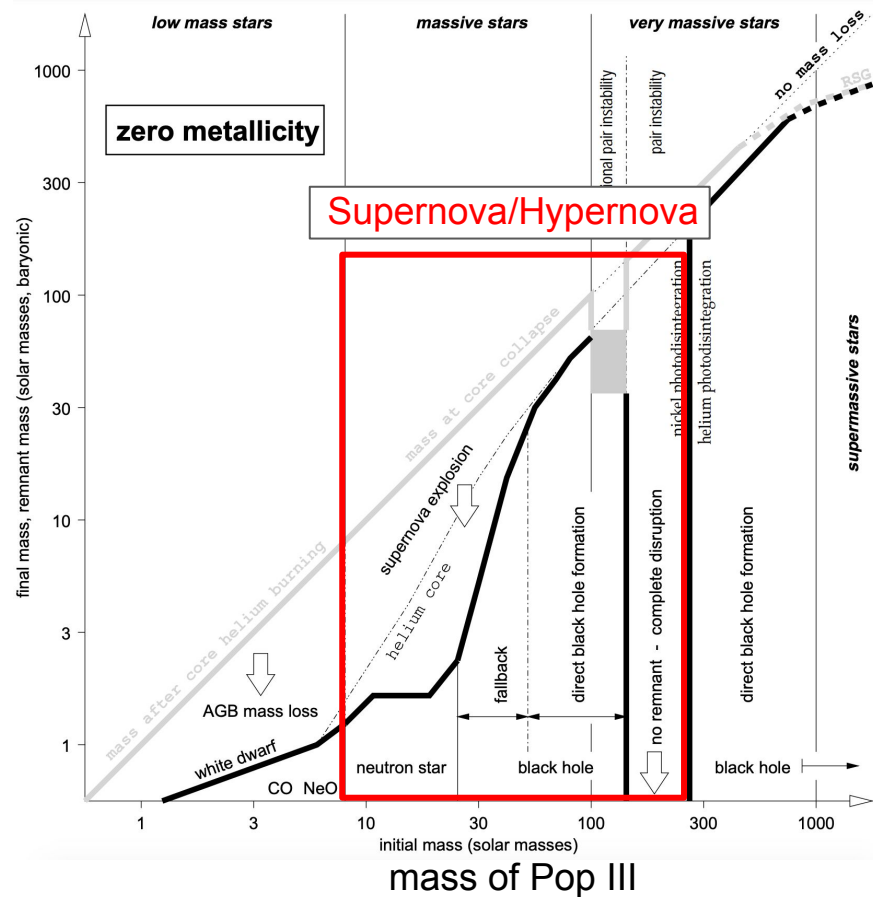
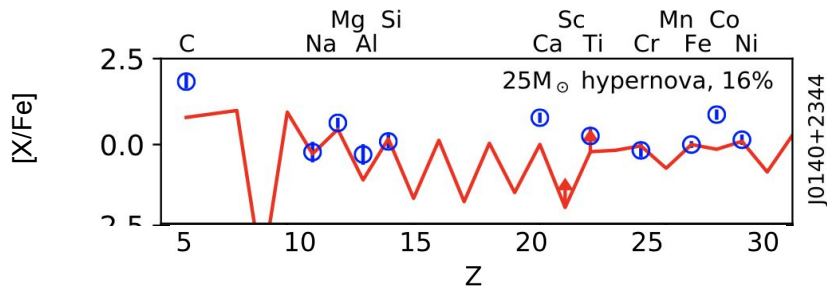
"The mass of the first star (or its initial mass function IMF) is an important parameter that influences galaxy formation in the early universe. (1) Investigate the physical process whose influence is unclear in the formation process of the first star, and summarize the indeterminacy on the mass of the first star. (2) Also, consider what kind of observations can be made in the future to limit this indeterminacy."

観測によるIMFの制限 (1)

2nd generation star は1st star supernovaから
放出されるガス環境で形成

➡ 2nd gen. star 観測によりIMFを制限
することができないか？

Hartwig et al. (2019) はsemi-analytical model
を用いて、extremely metal-poor (EMP) の
chemical abundance から初代星の質量を推定



(Heger and Woosley 2002)

観測によるIMFの制限 (2)

観測ターゲット

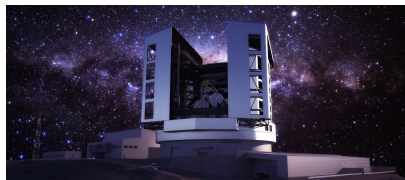
- ・現在も生き残っているlow-mass 2nd generation starの大規模サンプル → IMFに制限
 - ・2nd gen. starとして許される最大metallicity※までの星を選ぶ(※シミュレーションで求めておく)
 - ・銀河系バルジ内の星を対象 ← 2nd gen. starはバルジに多いという予想 (Greif+15)

観測量

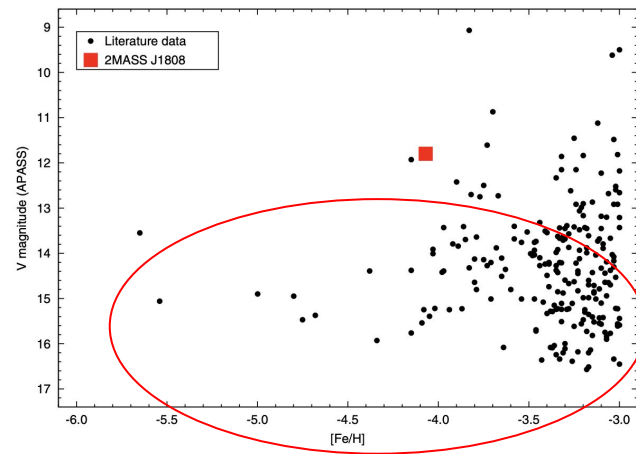
- ・金属吸収線 @Near UV (特にNa, C, Alがモデル制限に使える)
- ・Chemical abundanceを正確に求めるにはhigh-resolution & high-S/N が必要
例: ・VLT/UVES ($R=8,000-11,000$)
→ $[\text{Fe}/\text{H}]=-4.1$, $V=11.9\text{mag} \Rightarrow t=90\text{min.}$ (Melendez+16)
- ・GMT/G-CLEF ($R>19,000$, multi-object modeあり)

注意点

- ・Proper motionによる不定性
- ・ダストの影響



EMPのV-mag vs $[\text{Fe}/\text{H}]$



観測から予想されるimplication

観測したlow-mass 2nd generation starの統計的解析によって、IMFを求める。

宇宙論的シミュレーションから得たPop III IMFのfiducial modelよりも

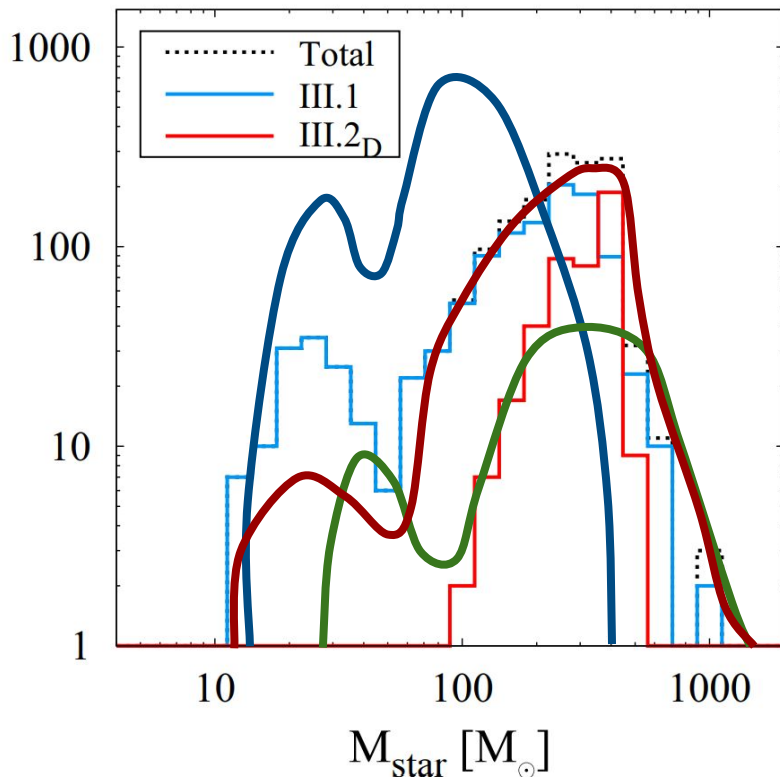
- ・ピークが右側 : 磁場
- ・ピークが左側 : fragmentation
- ・左のピークが減少 : baryonic streaming ?

WDM ?

DM-annihilation ?

N_{star}

Fiducial model of Pop III IMF

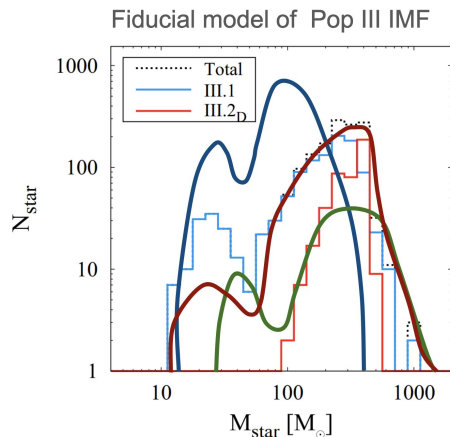


(Hirano et al. 2015)

Summary ー初代星の星質量関数ー

課題①: IMFへの影響

- ・磁場: IMFをhigh-mass側にずらす
- ・Fragmentation: low-mass側にずらす
- ・Baryon streaming
WDM : low-mass側を抑制
DM-annihilation



課題②: 観測による制限

【方針】

2nd generation starのchemical abundanceを調べる

【観測】

MW bulge内に残る2nd gen. starをUVで大規模に分光

【解析】

求められたchemical abundanceをシミュレーション
(初代星から2nd gen. starを形成するモデル)と比較
→ 初代星のIMFを精度良く求める
→ 課題①のうちどれが効いているか？