

近年の宇宙再電離に関する理論・観測的研究の進展と今後の課題(期待)

長谷川賢二 (筑波大)

初代星・初代銀河研究会@鹿児島大学 2014年1月22-24日

宇宙再電離

$z \sim 1100$ で一度中性化した宇宙が、後に形成される天体からの輻射によって再び電離される過程

何を知りたいか？ 5W1H

When: いつはじまり、いつ終わったのか？

How, Where: どのように進んだのか(電離史、Topology)

What (Who) Why: どんな天体が寄与し、なぜ再電離電離が起こるのか？

近年(ここ10年程度)の進展

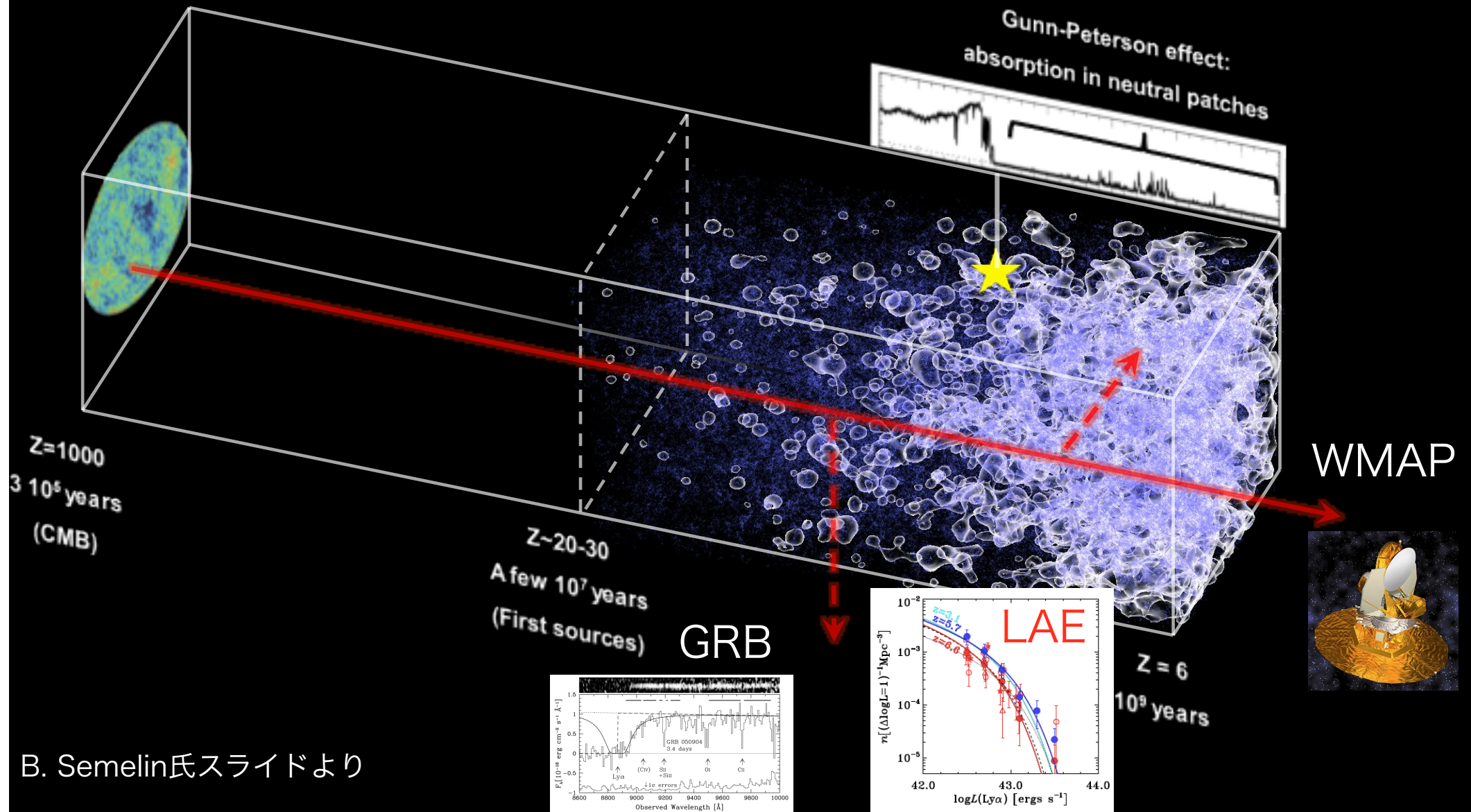
観測：再電離期($z > 6$)での様々な天体が多数観測されてきており、観測量からIGMの状態がある程度推測できるようになってきた。

理論: 計算機の向上により3次元実空間での輻射輸送計算や大規模な構造形成計算が可能となってきた。(直接的なIGM電離計算、統計的議論)

今は再電離の研究をするのに非常に適した時代

When

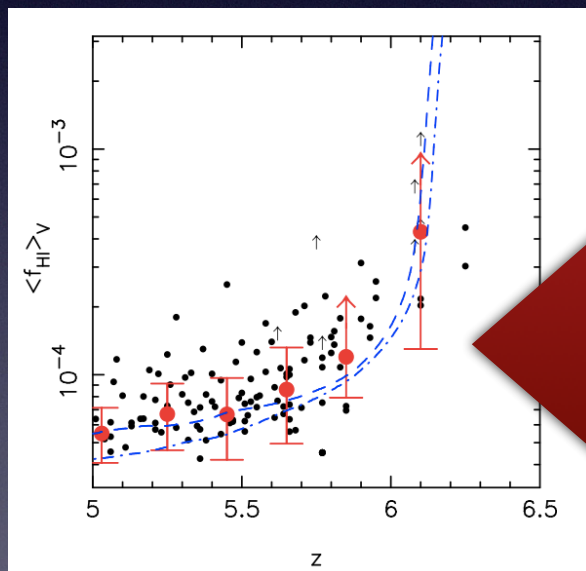
観測から示唆される f_{HI} の進化(Sudden or gradual)



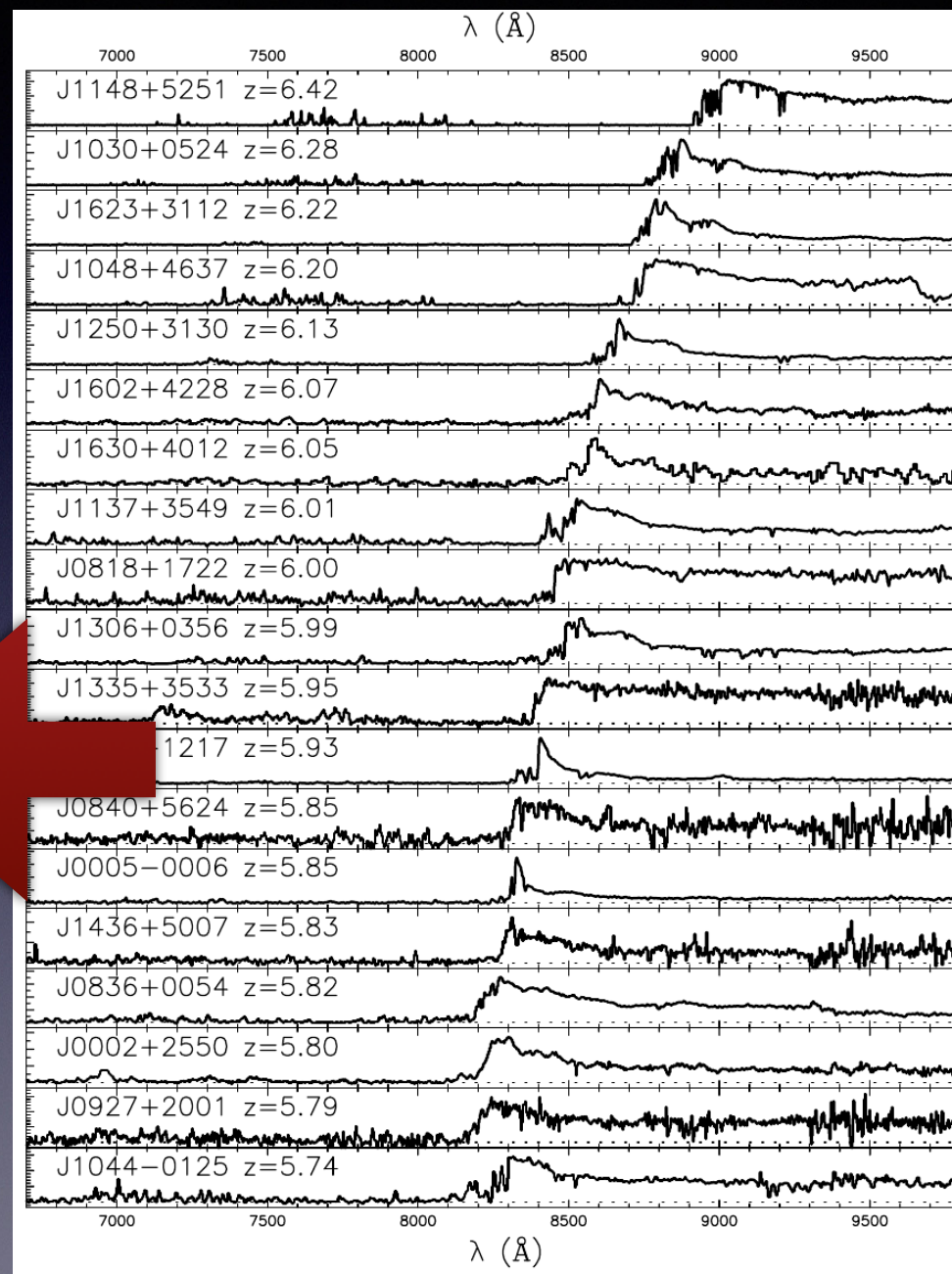
観測からの中性水素割合の制限：QSO観測

■ QSOのスペクトルのLy α 吸収線の深さから中性水素割合を決める.(Gunn, Peterson (1965), first detection Becker+01’)

Fan+(2006)
で19個の
SDSS QSO
の解析



■ 他、 $z=7.1$ のQSOの近傍効果 (Damping Wing fitting) の解析 (Mortlock+11’)からも制限 $f_{\text{HI}} < 0.1$,



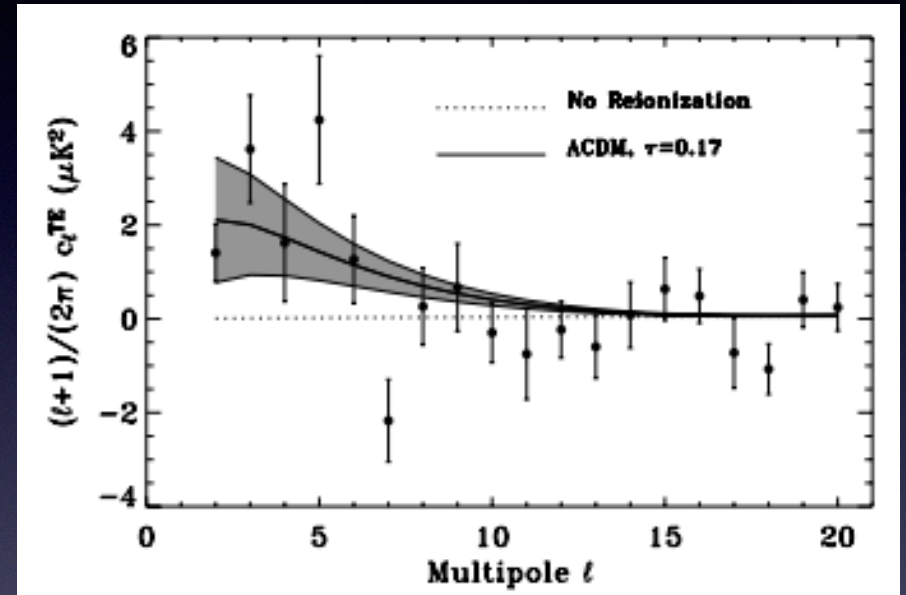
高赤方偏移

観測からの中性水素割合の制限：CMB観測

CMB偏光観測からトムソン散乱に対する光学的厚み(晴れ上がりから現在までの積分値)を持つもの $\Rightarrow$ 電子の柱密度

$$\tau_e = c\sigma_t \int_{z_r}^0 n_e(z) \frac{dt}{dz} dz$$

WAMP観測からわかるのは積分値なので、再電離の時期(z_r)に変換する場合は、瞬間的な再電離史を仮定



WMAP 1-yr: $\tau = 0.17 \pm 0.04$, $z_r = 17 \pm 4$ (Kogut+03')

WMAP 9-yr: $\tau = 0.089 \pm 0.014$, $z_r = 10.6 \pm 1.1$ (Hinshaw+13')

PLANCK: $\tau = ?? \pm 0.005$, (2014??)

WMAPでは τ の値も小さくなったが、 σ_8 の値も小さくなった ($0.9 \Rightarrow 0.82$) 事もあり、以前として厳しい条件ではある。

観測からの中性水素割合の制限：高赤方偏移銀河観測

■ $z=5.7, 6.6$ での $\text{Ly}\alpha$ 光度関数の違い

=> IGMの中性水素によって $\text{Ly}\alpha$ が減光を受けている？

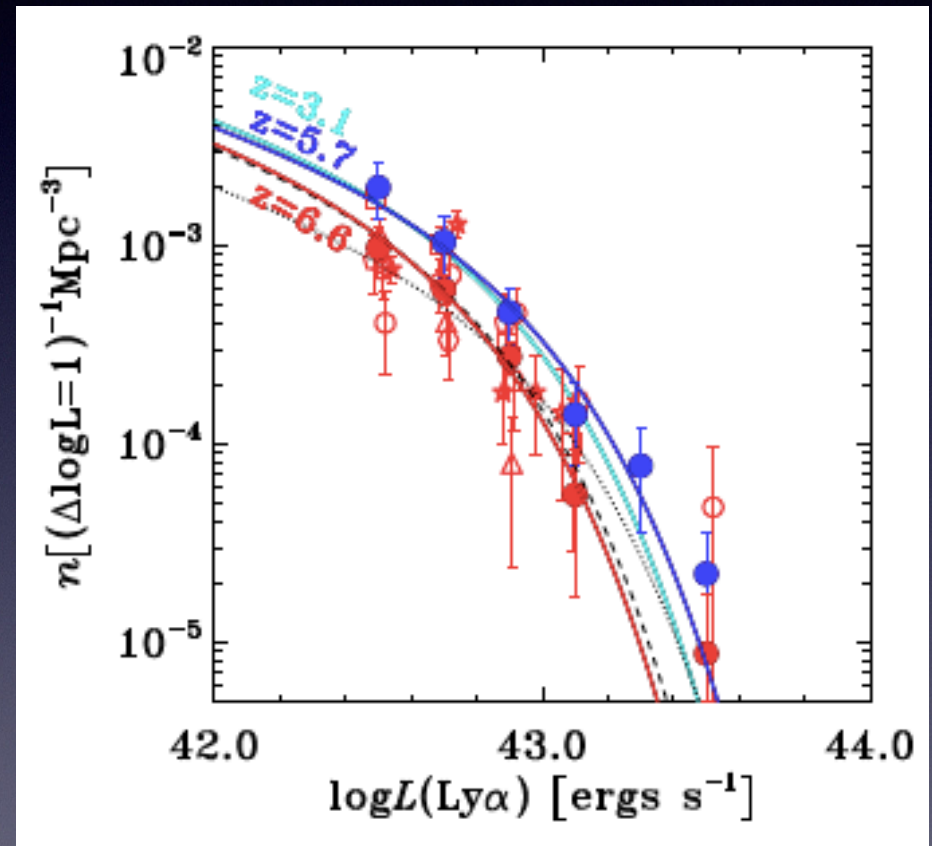
銀河自体の進化を考慮すると、再電離起源の進化はそれほど大きくない=> $f_{\text{HI}} < 0.2 @ z=6.6$

■ LAEのclustering:

電離領域でのLAEが選択的に観測される事により、観測されるLAEのclusteringがboostされる (McQuinn+07')

有意なboostは観測されず、 $f_{\text{HI}} < 0.5$

$z=3.1, 5.7, 6.6$ での $\text{Ly}\alpha$ 光度関数

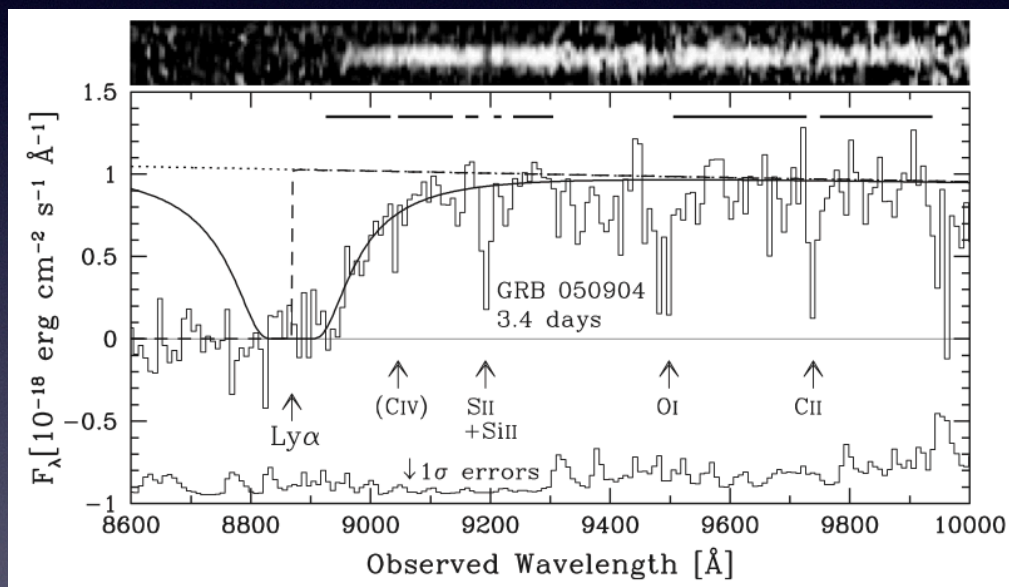


Ouchi+10'

観測からの中性水素割合の制限：GRBs

GRBのafterglowスペクトルに見えるLy α damping wingの解析

GRB050904@ $z=6.3$, Totani+06' GRB130606A@ $z=5.9$, Totani+13'

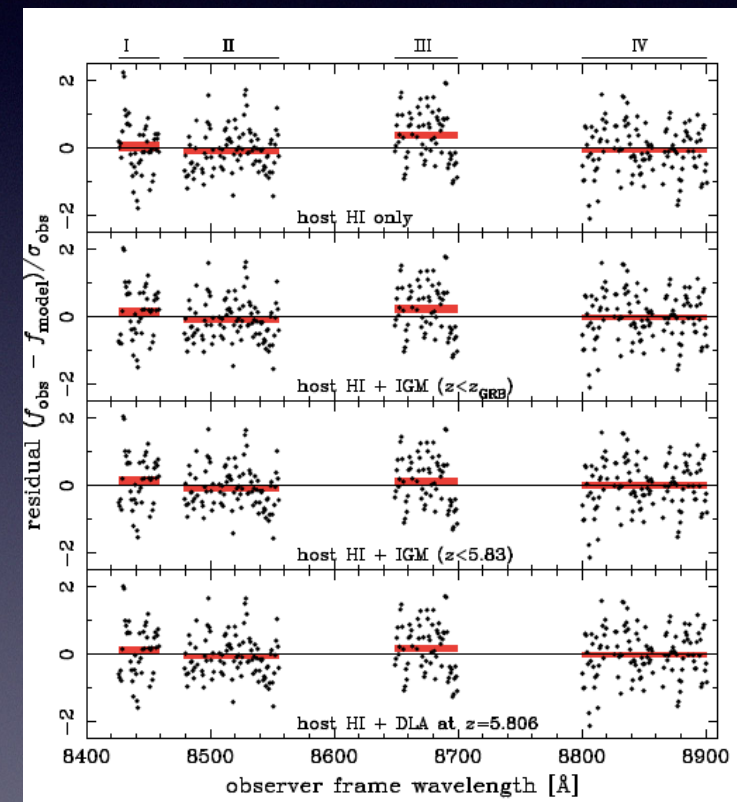


$$f_{\text{HI}} < 0.6$$

詳細は、戸谷さんの講演で

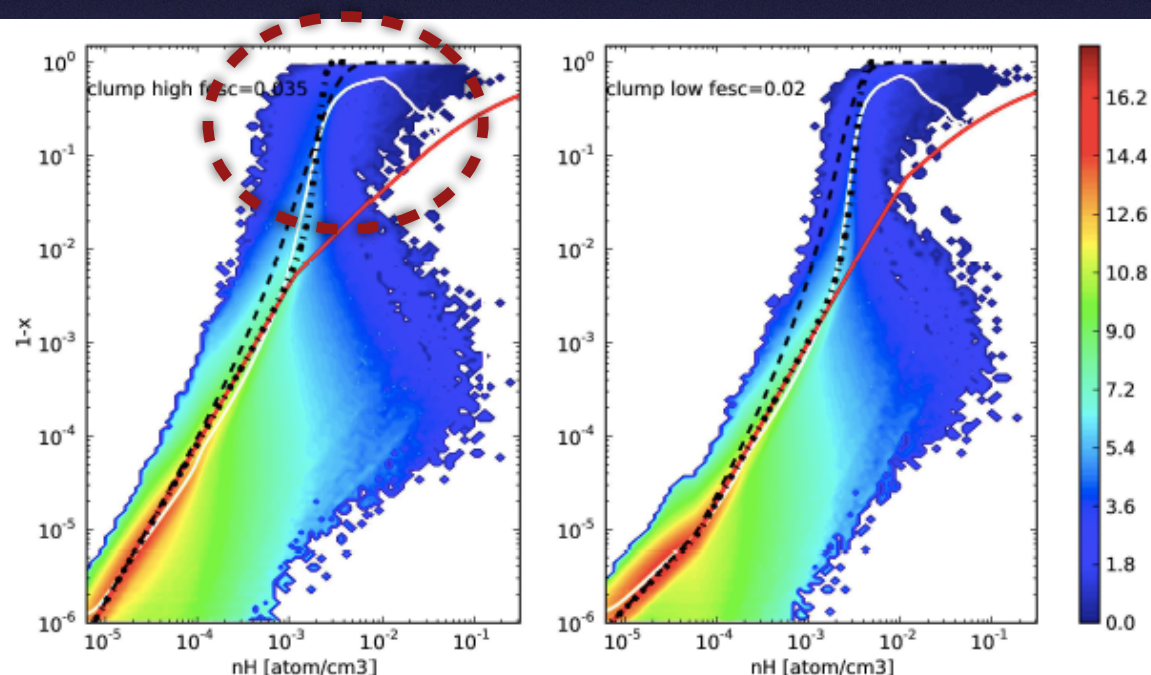
QSOは高密度

$0.086 < f_{\text{HI}} < 0.46$ 中性水素が残っている!
(しかし Chornock+13')は、 $f_{\text{HI}} < 0.11$)



$z \sim 6$ でも中性水素は残っているか？

ほとんどの理論計算(simulation, semi-anaモデル)では、 $z \sim 6$ でほぼ完全電離を示唆(というよりそういう計算をする場合が多い). $z \sim 6$ でもわずかながら $f_{\text{HI}} > 0.1$ の領域はあるが0.1以上残っている場所はレア. より統計的に中性水素領域の出現頻度を比較できるとうれしい.

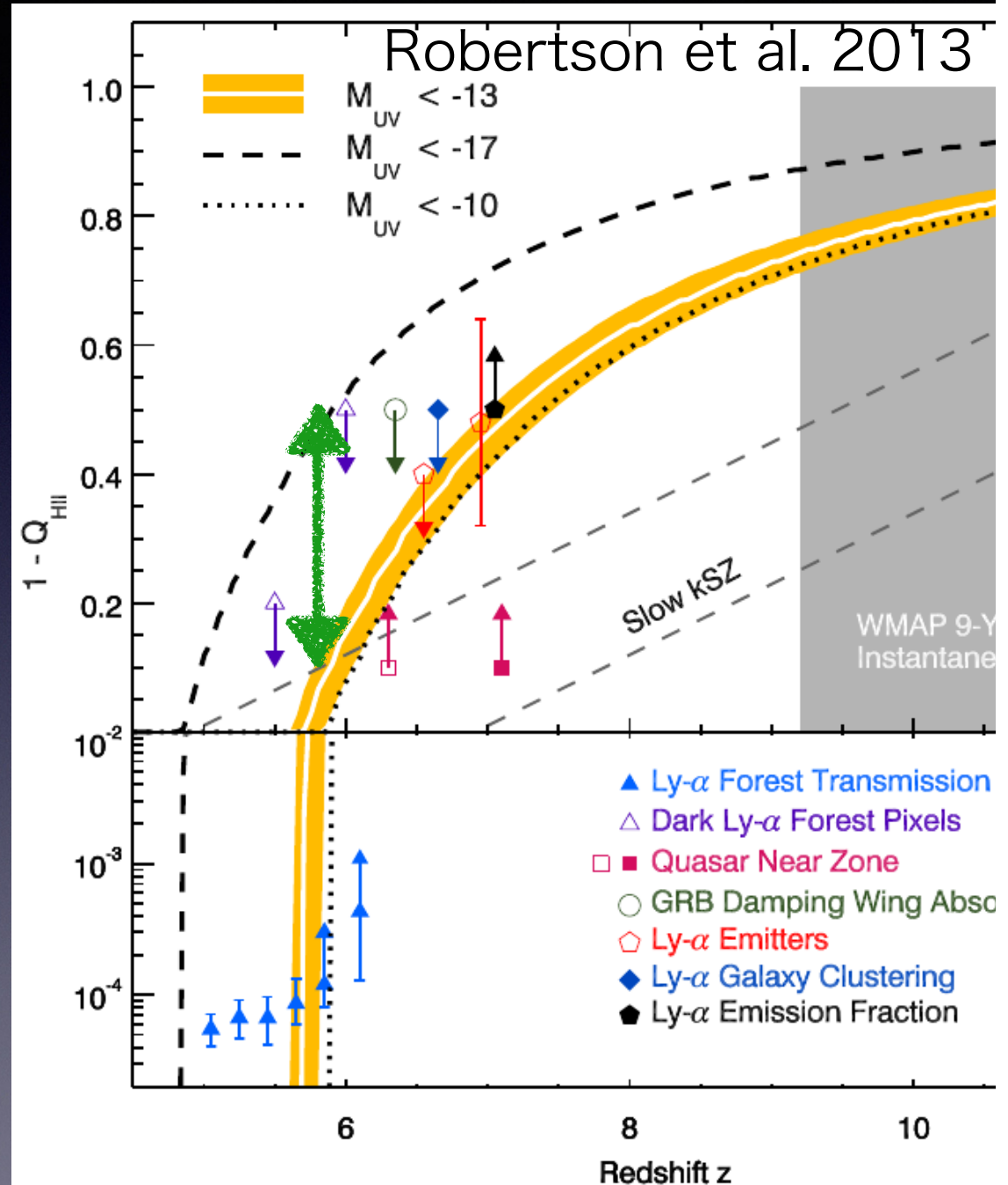


Aubert & Teyssier 10'
Cosmological Hydro (Ramses)
+ Post-processing RT (M1
closure)

$z=6.2$ での中性水素割合の頻度

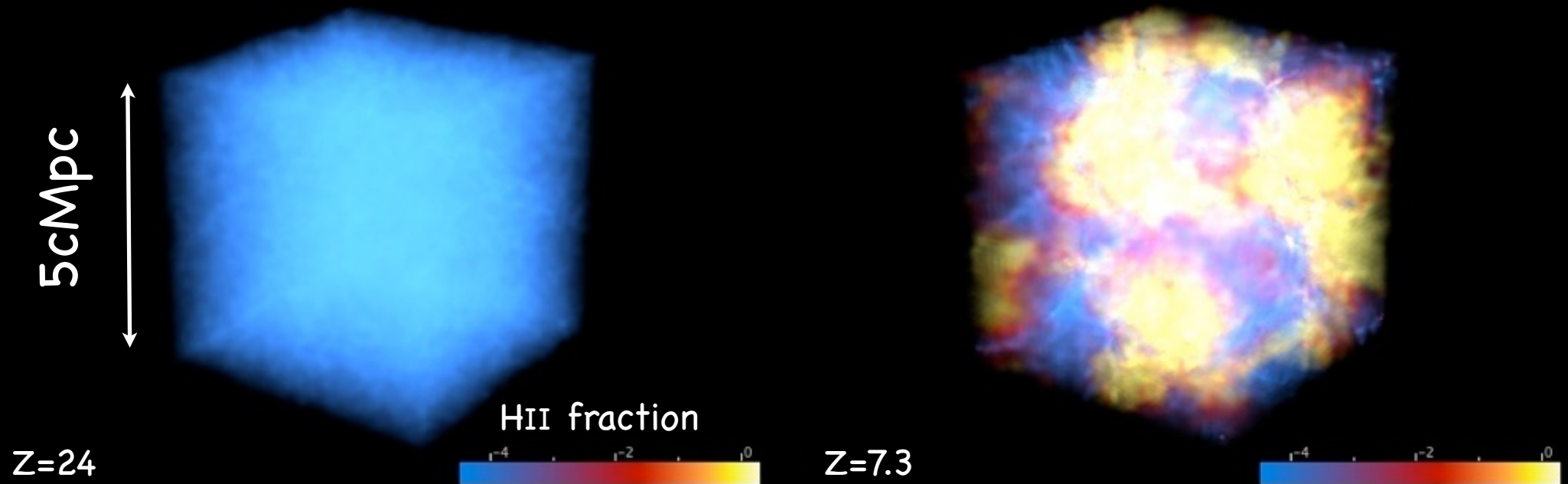
以上をまとめると

- お互いに完全に矛盾するような観測結果は今のところない.
- $z \sim 5$ ではほぼ完全電離っぽいですがそれ以前では、高赤方偏移ほど中性水素割合が高くなっていそう.
- $z \sim 6-7$ では、中性水素が残っている可能性が示唆され、トムソン散乱のoptical depthも同時に満たそうと思うとextendedな電離史を示唆. $z \sim 6$ の銀河カウントも”photon-starved”を予想(Bolton & Haenelt 07').



How & Where

どのような領域から再電離が始まるのか？



KH, Semelin (2013)

Topology

提唱されている3つのモデル

- Outside-in: 低密度領域=>高密度領域の順で電離
 - Miralda-Escude+00', Nakamoto+01'
- Inside-out: 高密度領域=>低密度領域の順で電離
 - (Iliev+シリーズ, Furlanetto+06', Trac & Cen 06')
- Inside-outside-middle: 高=>低=>中密度(filament)で電離
 - Finlator+09' のみが提唱

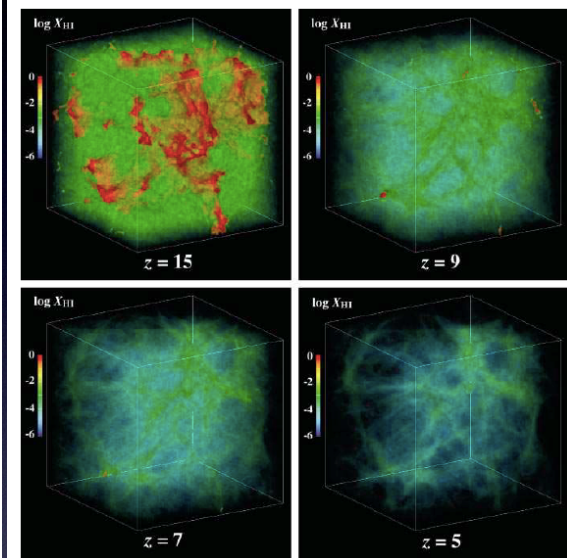
観測的にはまだよくわからない

Topology

Outside-in

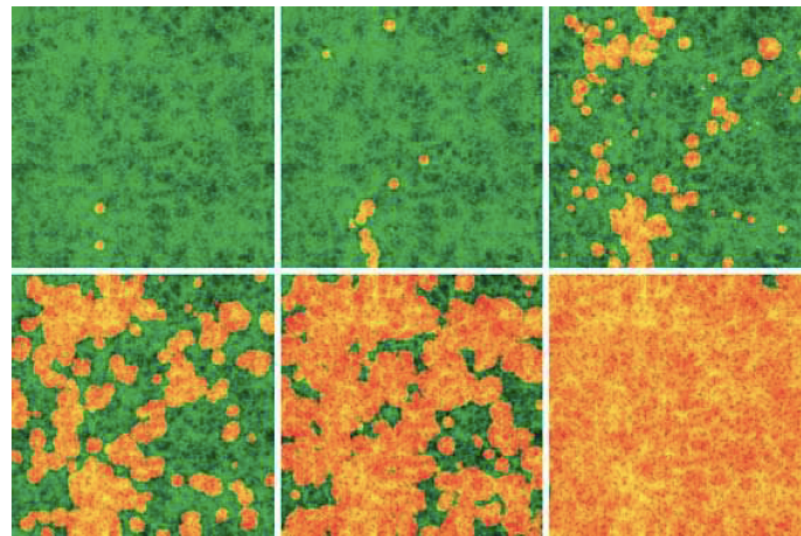
Inside-out

IOM



8/h Mpc
Nakamoto+01'

「背景放射」の輻射輸送
シミュレーション

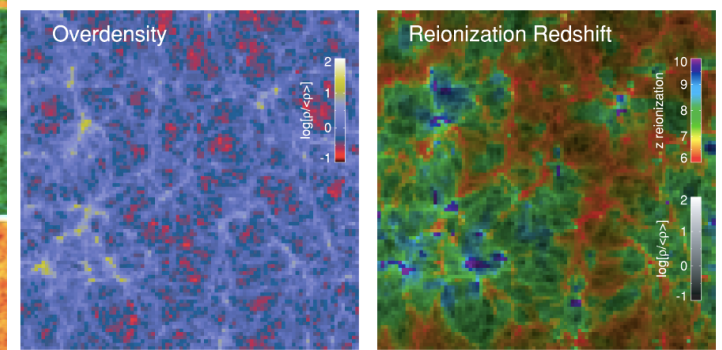


100/h Mpc
Iliev+06'

「銀河からの放射」の輻射輸
送シミュレーション

overdensity

電離時期



16/h Mpc
Finlator+09'

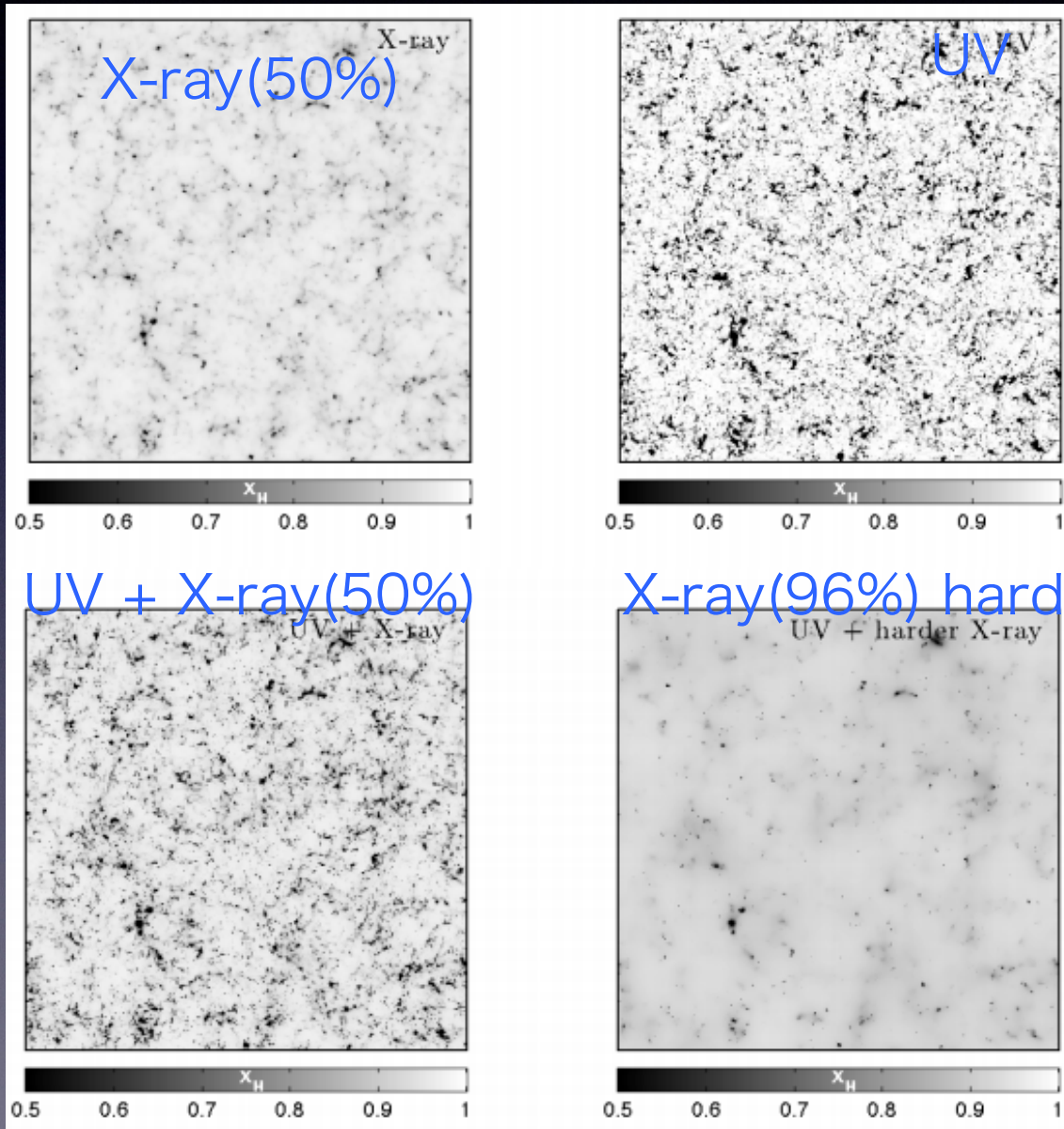
「銀河からの放射」の輻射
流体シミュレーション+z=9
でOptically thinなUVB

電離光子源として星が支配的なら、おそらくIO topology. (局所的にはOI, IOMもあるかもしれない). より高赤方偏移でhard-X線源がたくさんあると変わるかもしれない.

Topology

Mesinger13': semi-numerical model

← 750Mpc →



X線が多い場合、これらは mean free pathが長い為、UVだけの場合に比べて一様再電離に近くなる。

←このような場合、IGM中性水素の21cm CMBに対するシグナル(δT_b)を負=>正にするセンス

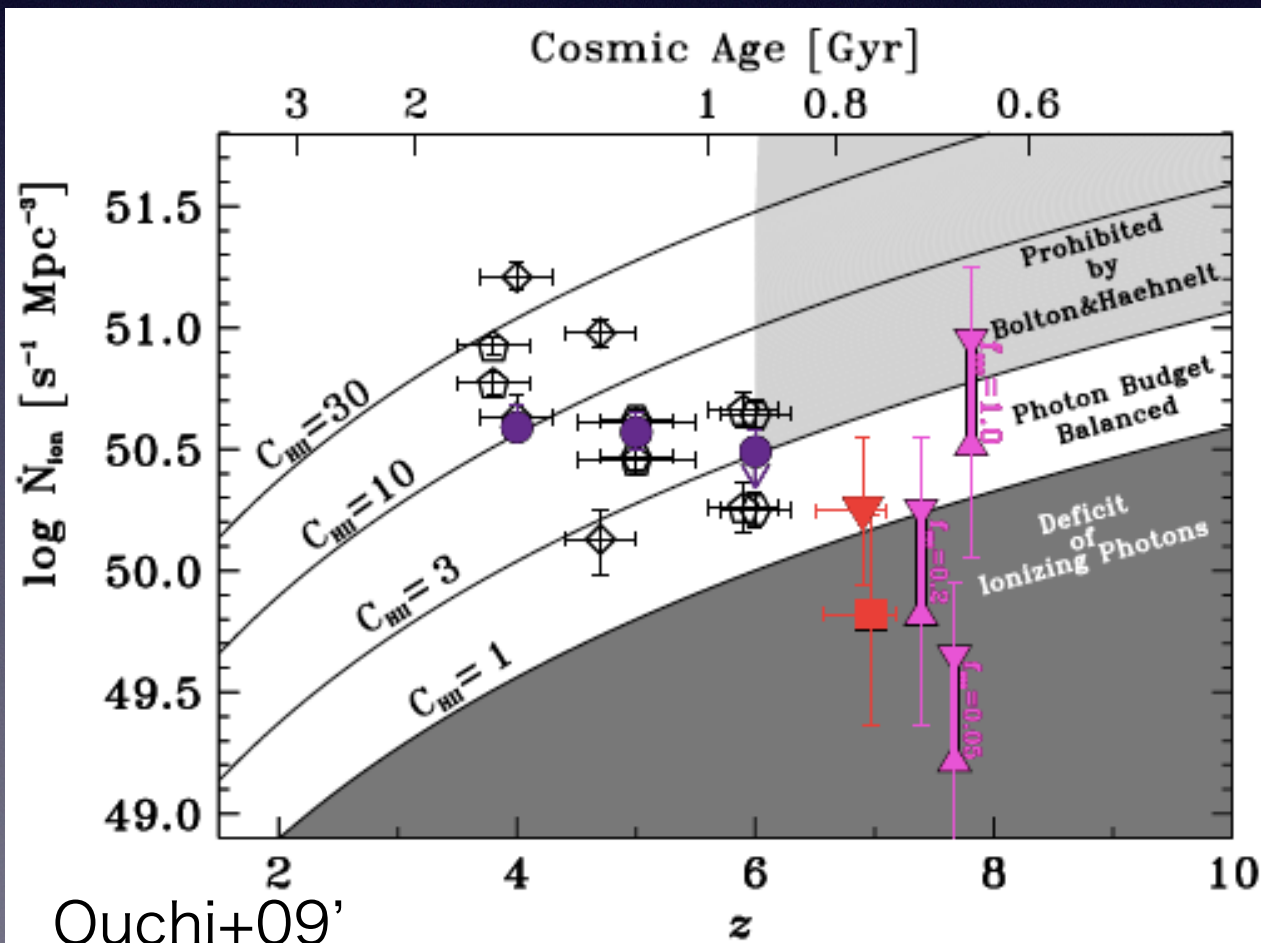
What (Who) & Why

- 電離光子源は何なのか？
- なぜ宇宙を電離できるのか?(もしくはできないのか?)

電離光子放射率と再結合率(ともに単位体積あたり)の釣り合い(Madau+99')

$$\dot{N}_{\text{ion}} = \frac{\langle n_{\text{H}} \rangle}{\langle t_{\text{rec}} \rangle} = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}}^2 \rangle = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}} \rangle^2 C$$

$$C \equiv \frac{\langle n^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} \quad \text{Clumping factor}$$



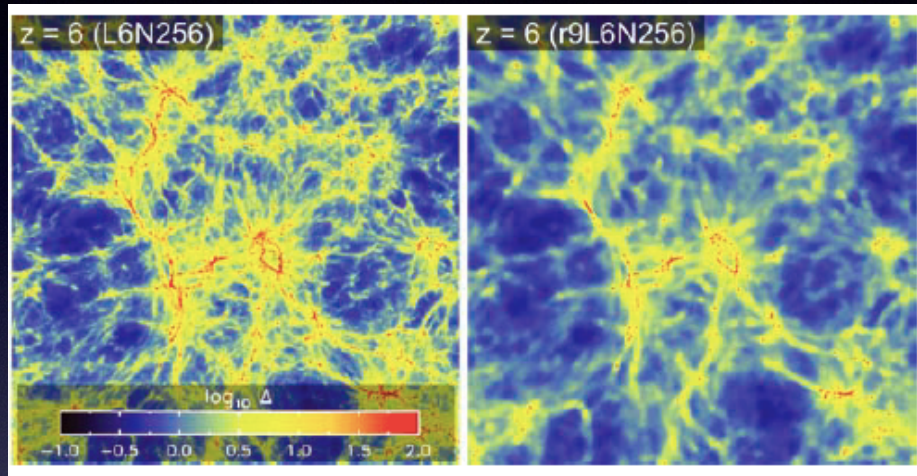
必要な情報

- 1) 各時代におけるIGM clumping factorの値
- 2) 各時代光子源の個数密度
- 3) 放射源あたりに放射される電離光子数

IGMのClumping factor

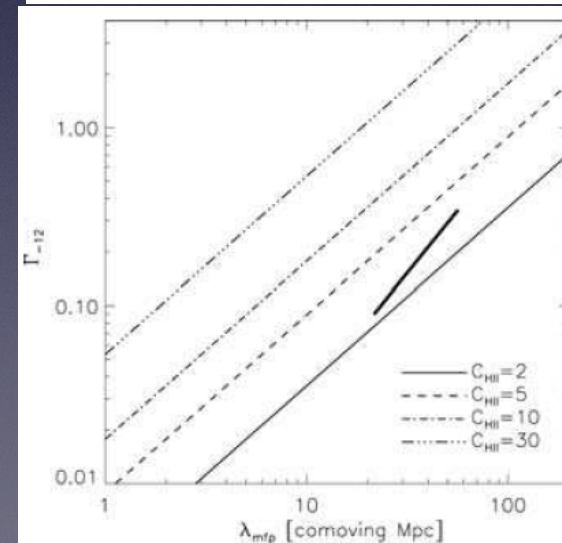
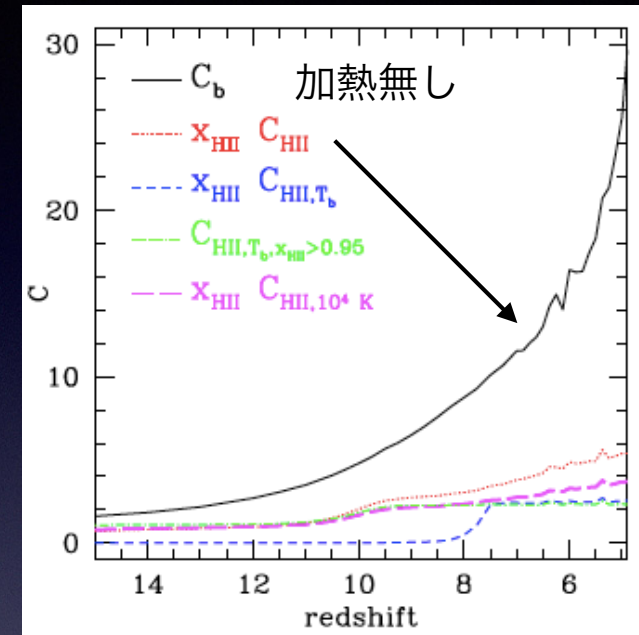
UVによる加熱効果
無し 有り

Finlator+12, Cosmological RHD



Pawlik+09', Cosmological HD
Optically thin

Bolton & Haenelt 07': 直接的に観測する事はできないが、QSO GP optical depthから求まる $z \sim 6$ での電離率などから、 $z=6$ で電離する為の条件として間接的に $C < 3$. 完全電離していないと..



理論的にも観測的にも $C < 3$ くらいとみんな思っている

電離光子源の候補

- 星(銀河)

- 多くの銀河がすでに観測されている(山田さん、清水さん講演)

- 星(低質量銀河、POPIIIハロー)

- 観測はされていないが、階層的構造形成理論的には数多くいるはず. POPIII星は明るいはず(須佐さん、平野さん、細川さん講演).

- AGN

- QSOのような明るいものだけでは電離は不可能で、number countからも $z \sim 6$ ではQSOより銀河の方が支配的(Bolton & Heanelt 07').よりhigh- z ではBHの種、成長過程による.

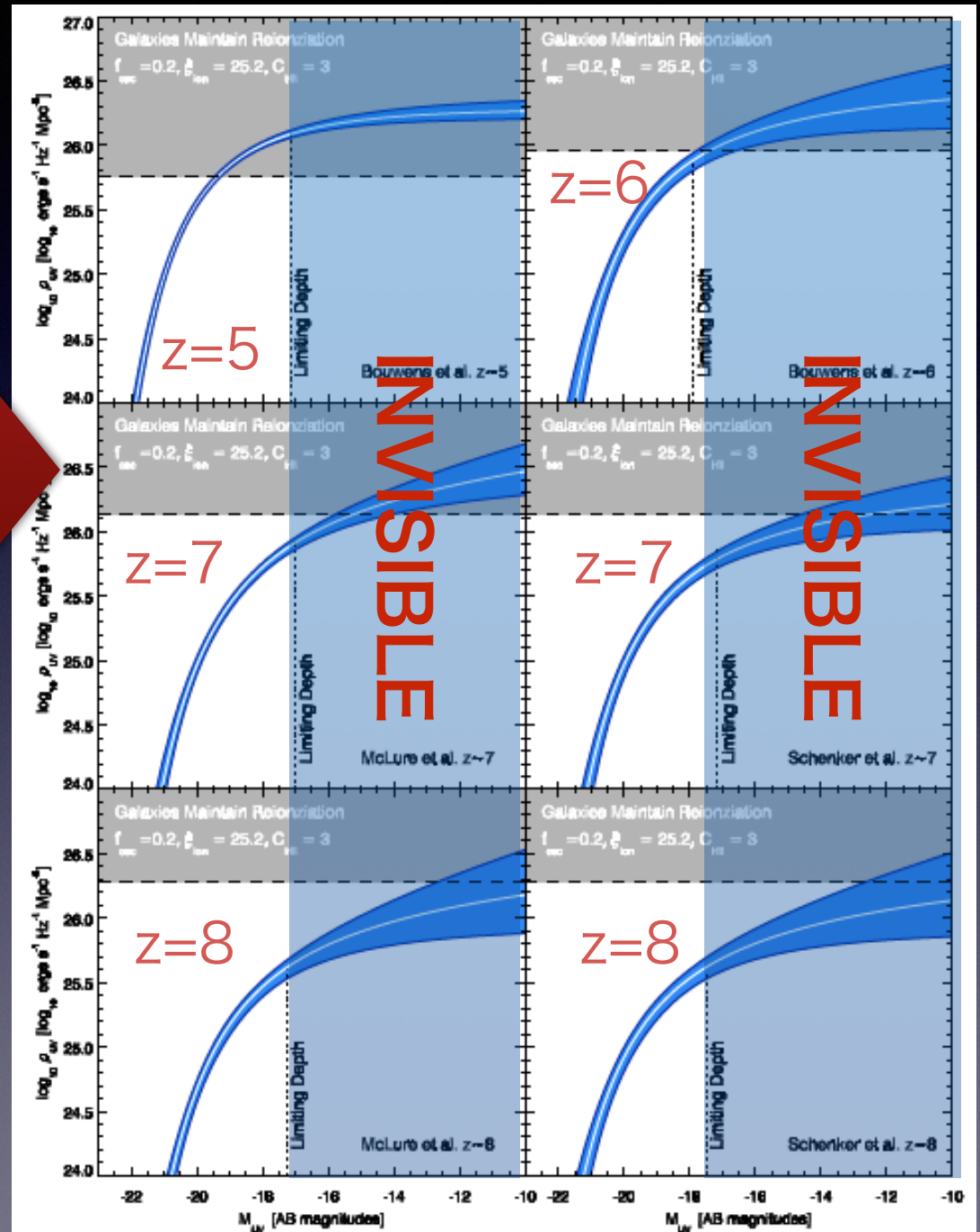
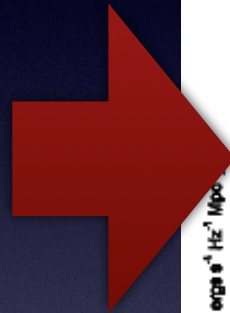
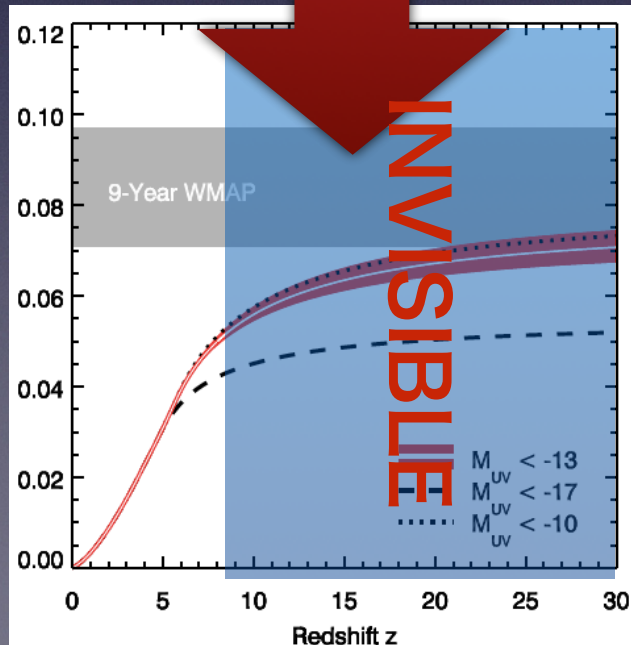
- その他.

- ガスのemission(SN残骸のfree-free, free-bound 等)(Johnson+11', 星からの電離光子の10%くらいは効く)

高赤方偏移銀河

$z=5\sim 8$ のIntegrated UV LF
(Robertson+13')

$f_{\text{esc}}=0.2$, $C_{\text{HII}}=3$ の場合、見えている銀河($M_{\text{UV}} < -17.0$ くらい)だけでは、 $z > 7$ で宇宙を電離を維持できない optical depth も届かない。



高赤方偏移銀河だけで再電離は可能か？

重要なのは

■まだ見えない暗い(低質量)銀河がどれだけいるか？

電離、解離等輻射性フィードバック(安部くん、鈴木くん講演)や超新星爆発フィードバック等に敏感.

■銀河内で生成される電離光子がどれくらいの割合でIGM抜け出せるか(電離光子脱出割合 f_{esc})

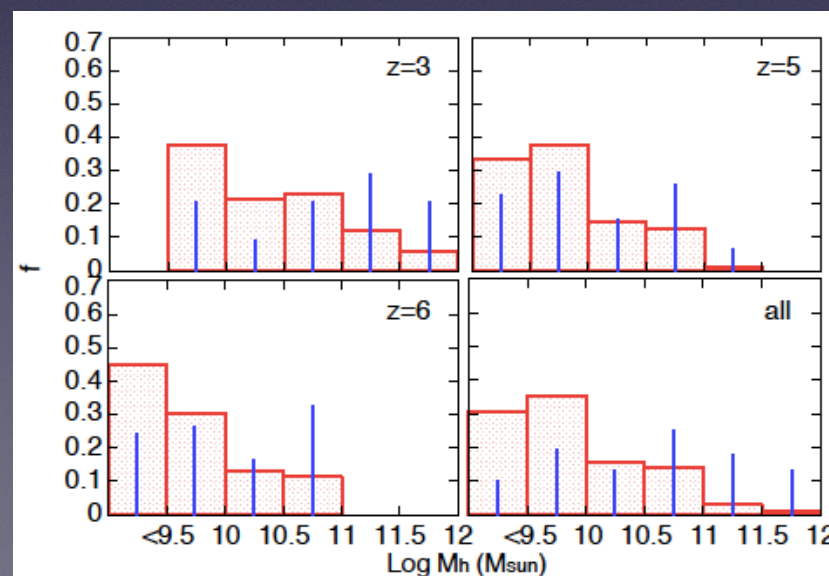
これもフィードバックに敏感、どの質量の銀河が再電離の光子源として支配的かを決めるのにも重要.

=>絶対値だけでなく、質量依存性も重要

青:intrinsic=ほぼflat

赤: f_{esc} 込み=低質量ほ

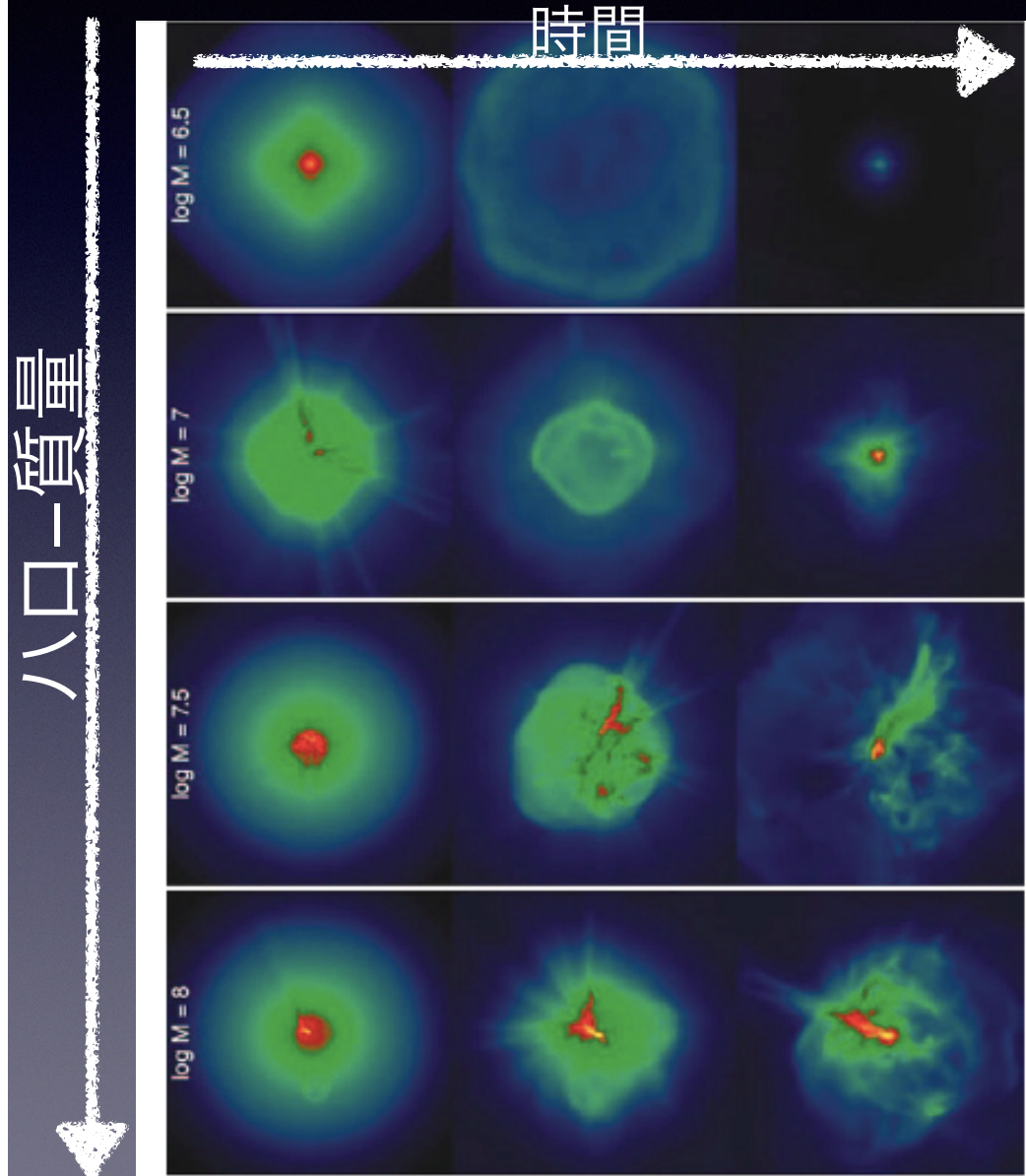
ど寄与が大きい. Yajima+12'



Internal & External Feedback (RHD simulations)

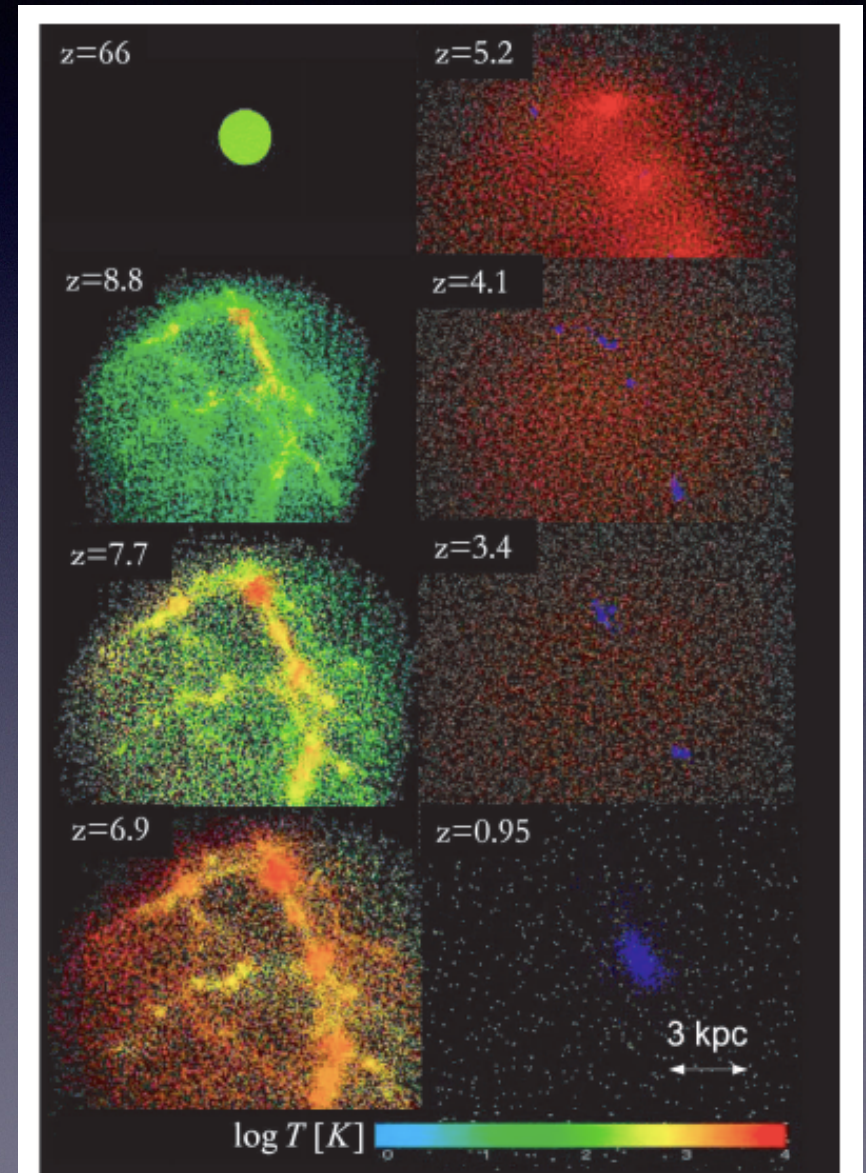
Wise & Cen 09'

Internal UV, SN feedback



Susa & Umemura 04'

External UV (UVB)

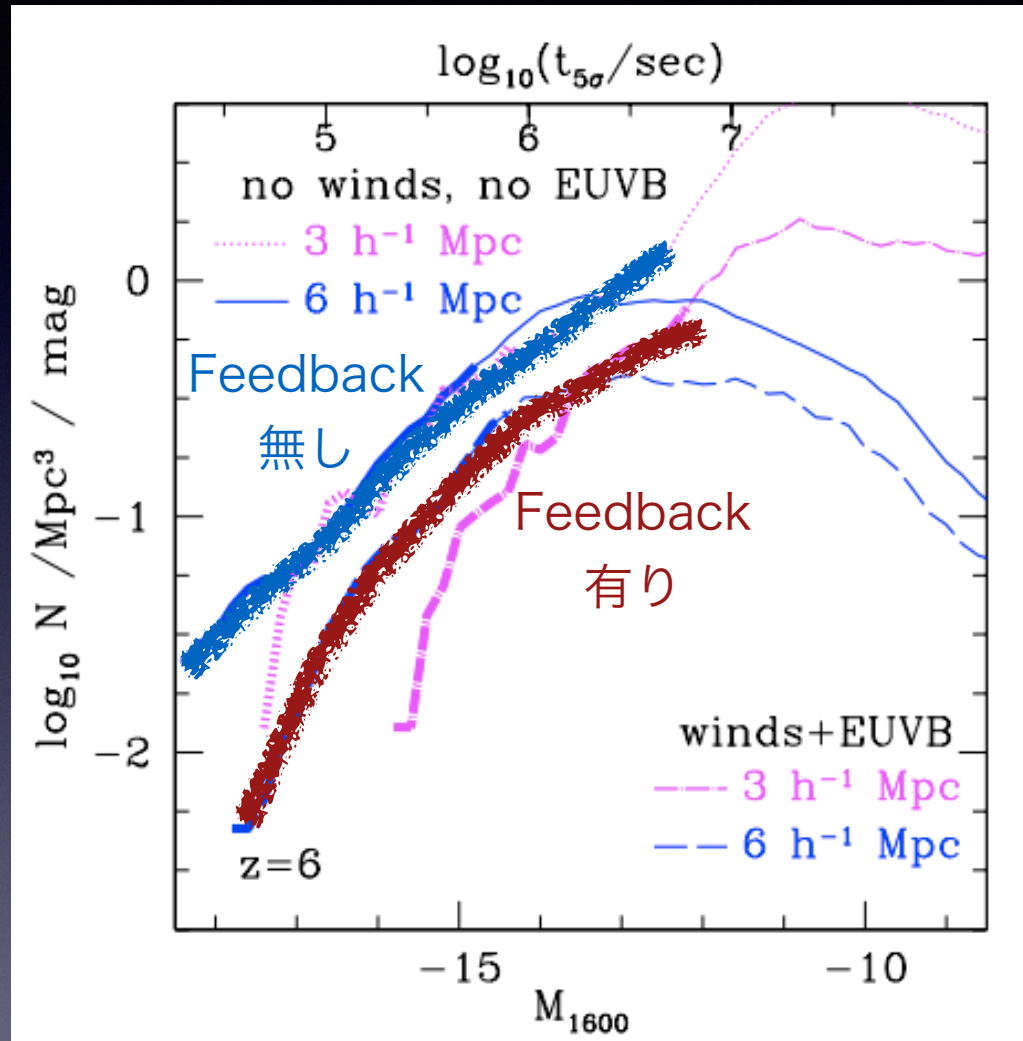


FeedbackがUV LFのfaint-endに与える影響

JWSTでdetectする為に必要な観測時間

Finlator+12'の
cosmological RHD
simulation

Feedbackは現在の
観測限界以下のUV LF
のかたちに影響を与
える.JWSTですごく
頑張れば見える.



UV magnitude

同様のUV LFはJaacks+13'のH₂-based SFモデルでもみられる.

電離光子脱出確率(観測)

@ $z \sim 3$, LBGsのescape fraction
が観測される(e.g., Inoue+05',
Shapley+06')

Iwata+09'

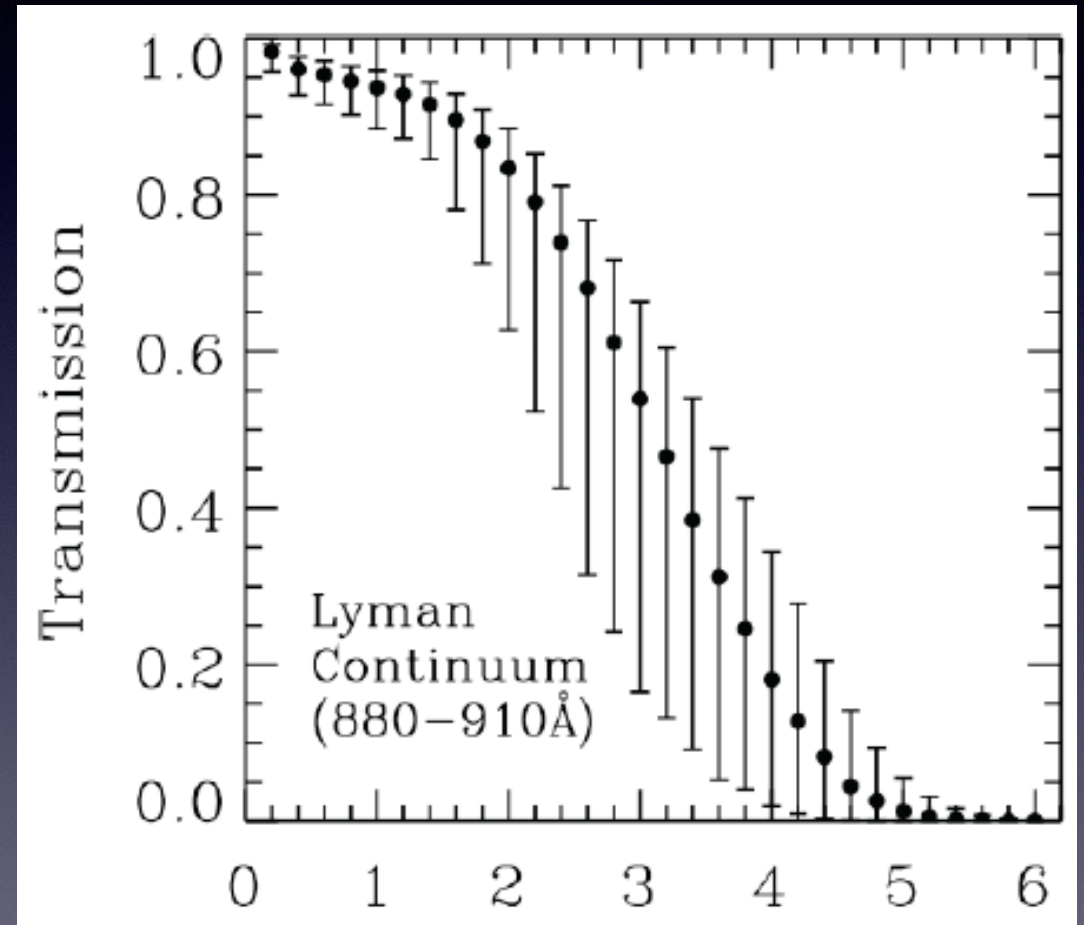
$z \sim 3$ (SSA22)の73 LBGs,
125 LAEsを観測(SC) $\Rightarrow$ 7 LBGs
と10 LAEsのLyCを直接検出



7 LBGsの f_{esc} (median)=
0.04-0.2

(detectできなかったものを含め
ると平均的にはもっと低い?)

Inoue & Iwata 08'



再電離期の電離光子は次世代観測機器
でも直接検出不可能orz

電離光子脱出確率(理論)

Fernandez & Shull (2011): Simple
モデルで、銀河の内部構造の電離光
子脱出割合への影響を調査

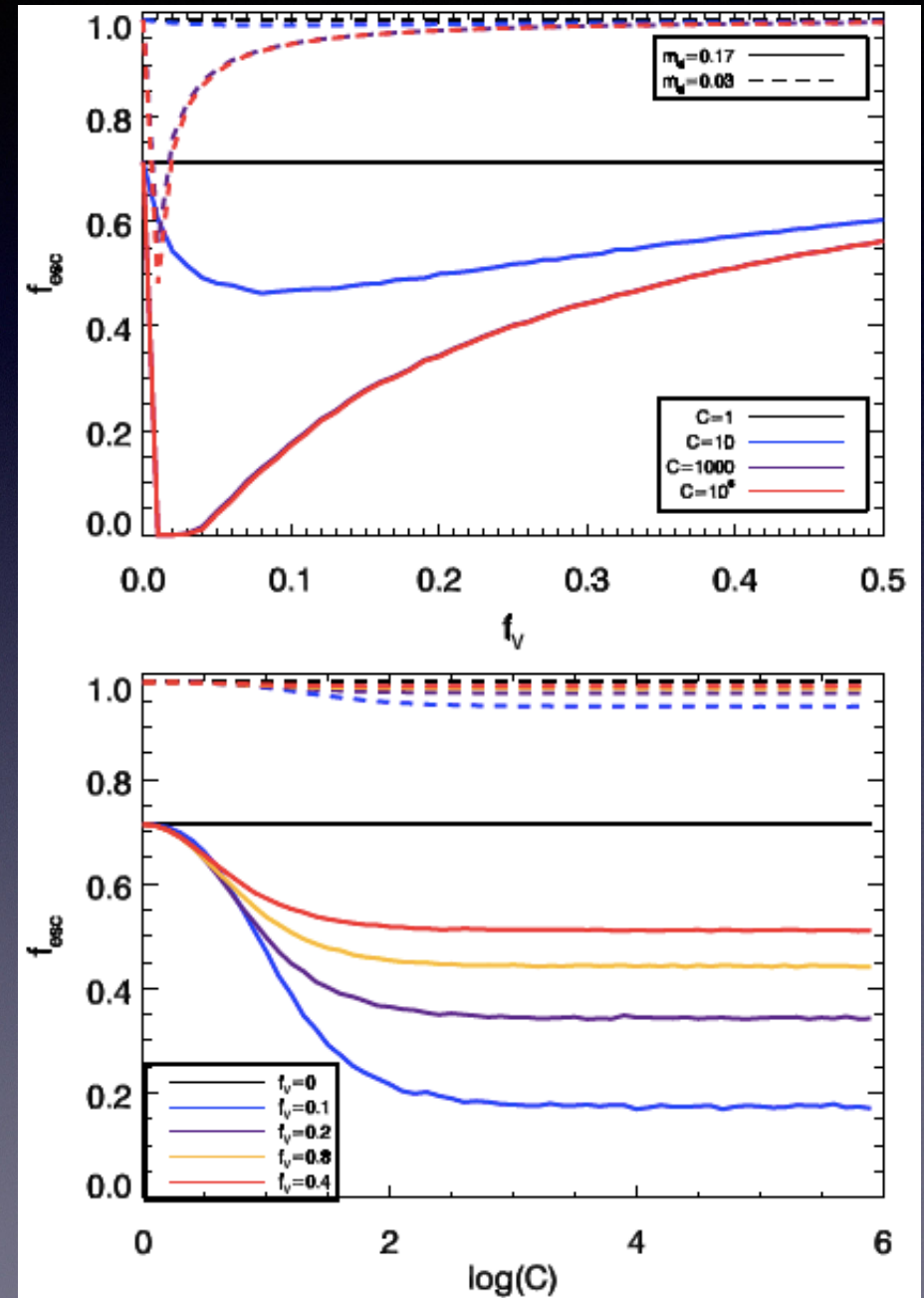
1. Diskyな銀河内密度分布を仮定
2. 星を銀河中心に、Clumpをランダムに配
置. clumpのvolume filling factor (f_v),
clump密度(clumpとinterclumpの密度
の比C)をパラメータ

ある方向に沿ったescape fraction

$$\eta(\theta) = 1 - \frac{4\pi\alpha_B}{Q_{\text{pop}}} \int_0^\infty n_H^2(Z) r^2 dr .$$

を全方向で立体角積分

$$f_{\text{esc}}(Q_{\text{pop}}) = \iint \frac{\eta(\theta)}{4\pi} d\theta d\Omega$$

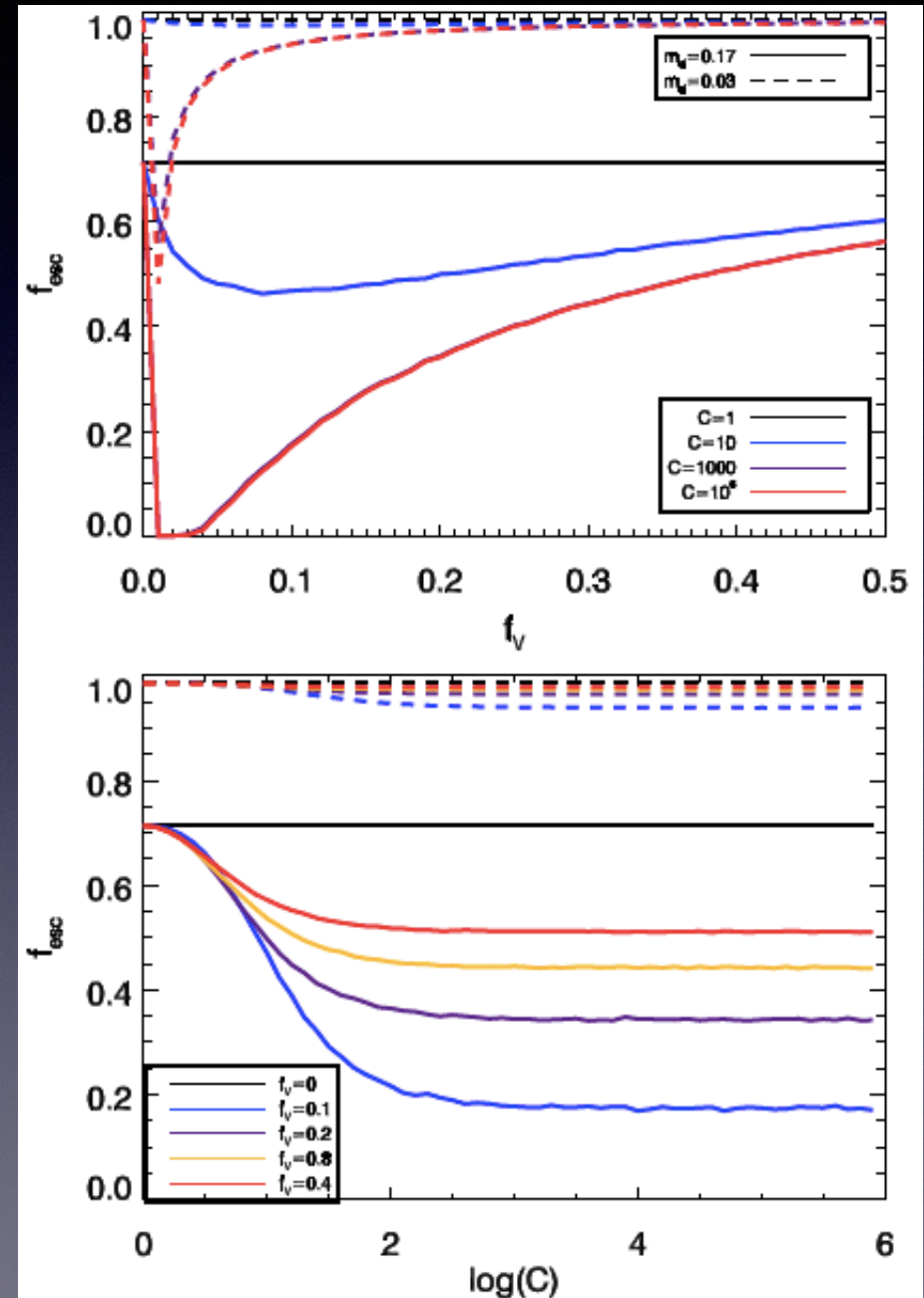


電離光子脱出確率(理論)

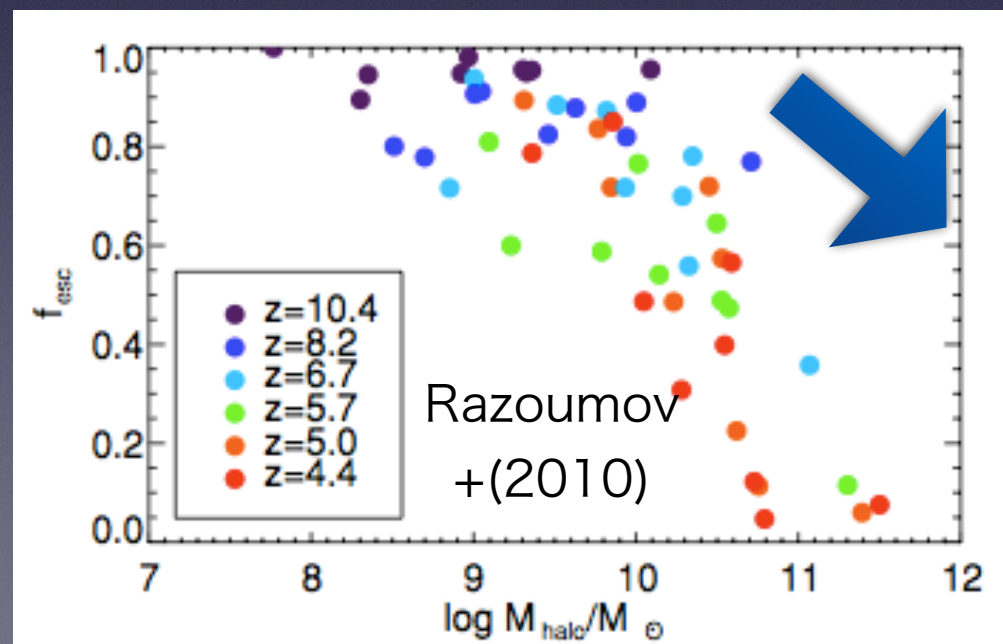
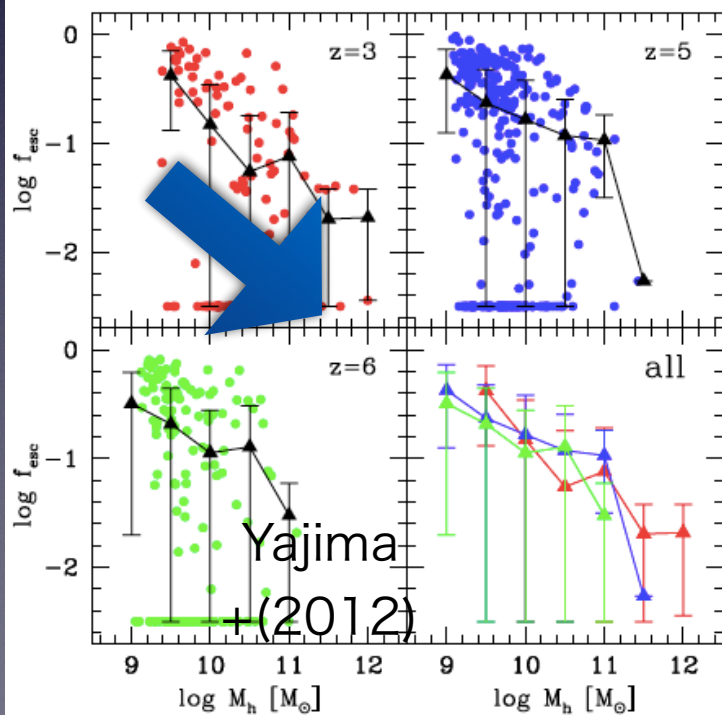
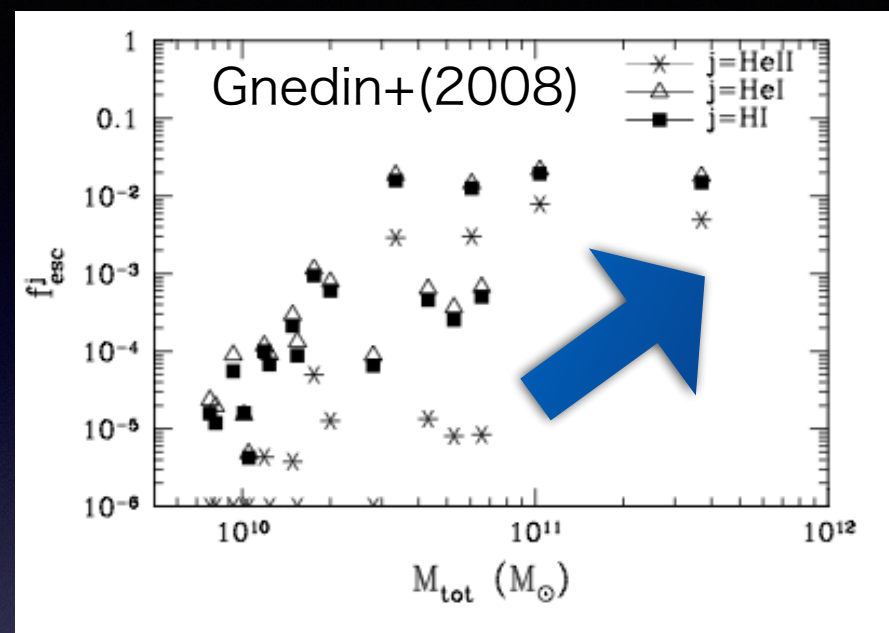
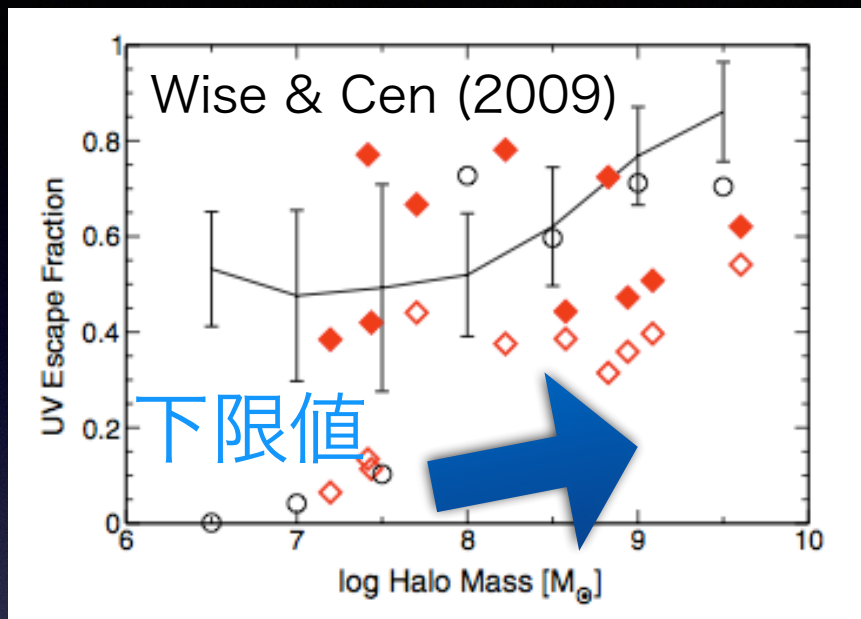
Fernandez & Shull (2011):
Simpleモデルによる、銀河の内部構造と電離光子脱出割合への影響

1. Diskyな銀河内密度分布を仮定
2. 星を銀河中心に、Clumpをランダムに配置. clumpのvolume filling factor (f_v), clump密度(clumpとinterclumpの密度の比 C)をパラメータ

Escape fractionは、銀河の内部構造に非常に敏感. 実際には、星の分布やダストの分布等も絡み非常に複雑.



電離光子脱出割合(シミュレーション)



電離光子脱出割合(シミュレーション)

結果はバラバラ.なぜ?

A: 分解能を初め手法等が異なる.

- Wise : 分解能は十分. f_{esc} が星形成活動に敏感である事も示す.ただし下限値か
- Gendin : 大質量銀河のみだが他の計算と質量依存性が逆.謎
- Razoumov : よく引用されるが、銀河の質量がごとに分解能が異なっている事に注意.
- Yajima: 銀河のサンプルが多く、 f_{esc} の分散が大きい事を示唆.

	Wise & Cen (2009)	Gnedin et al. (2008)	Razoumov et al. (2010)	Yajima et al. (2011)
空間分解能 (Physical @z=6)	0.1pc	70pc	90pc for $10^9 M_{\text{halo}}$ 530pc for $10^{12} M_{\text{halo}}$	260pc
RHD or Post- processing?	RHD	RHD	Post- processing (no Rad. feedback)	Post- processing (no Rad. Feedback)
Metal enrichment	×	○ (dustは重要で ない)	○ (dustは重要で ない)	○ (dustは重要)
Method	AMR+ adaptive ray tracing	AMR + OTVET	SPH + adaptive ray tracing	SPH + つくばART

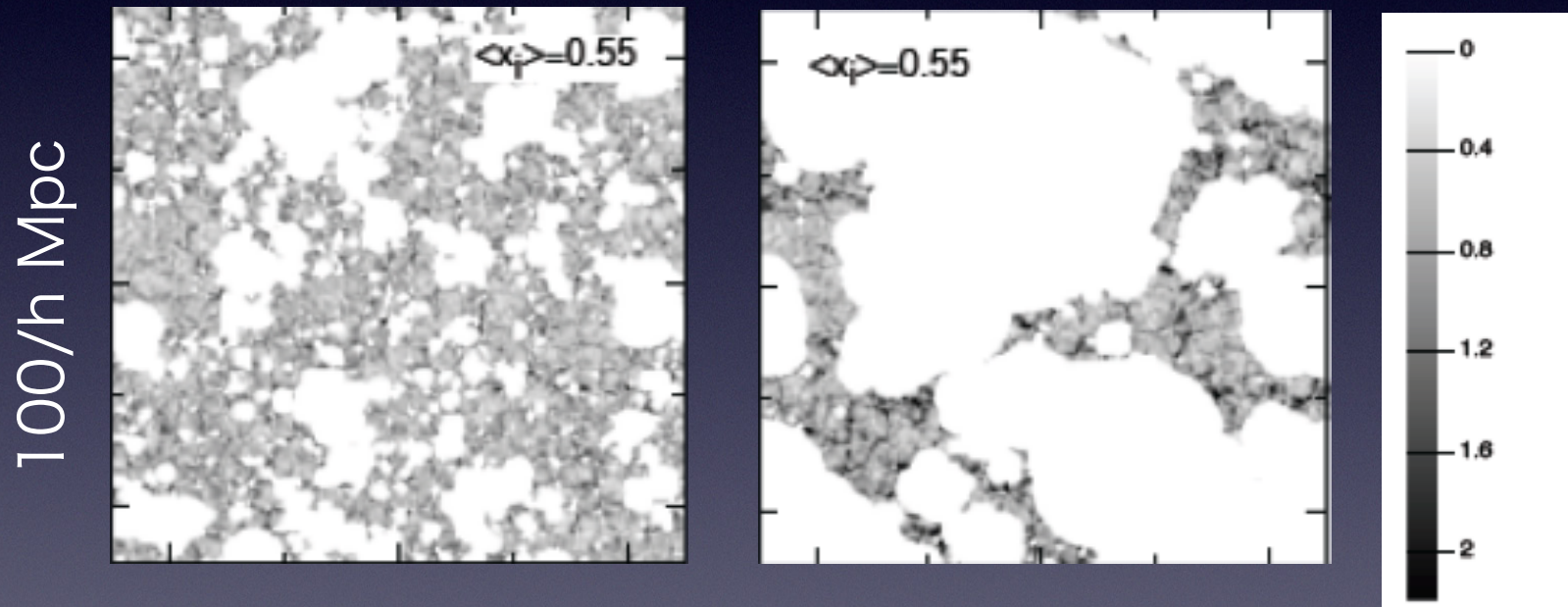
理論的にも f_{esc} がちゃんと決まっているとはいえないのが、Low Massで f_{esc} が大きく、大質量ほど f_{esc} が小さいという結果が多い。

支配的な銀河が異なると

Kim+13'

semi-numerical (輻射輸送は解かずに、あるセル内で生成された光子を近傍セルの電離に使う)

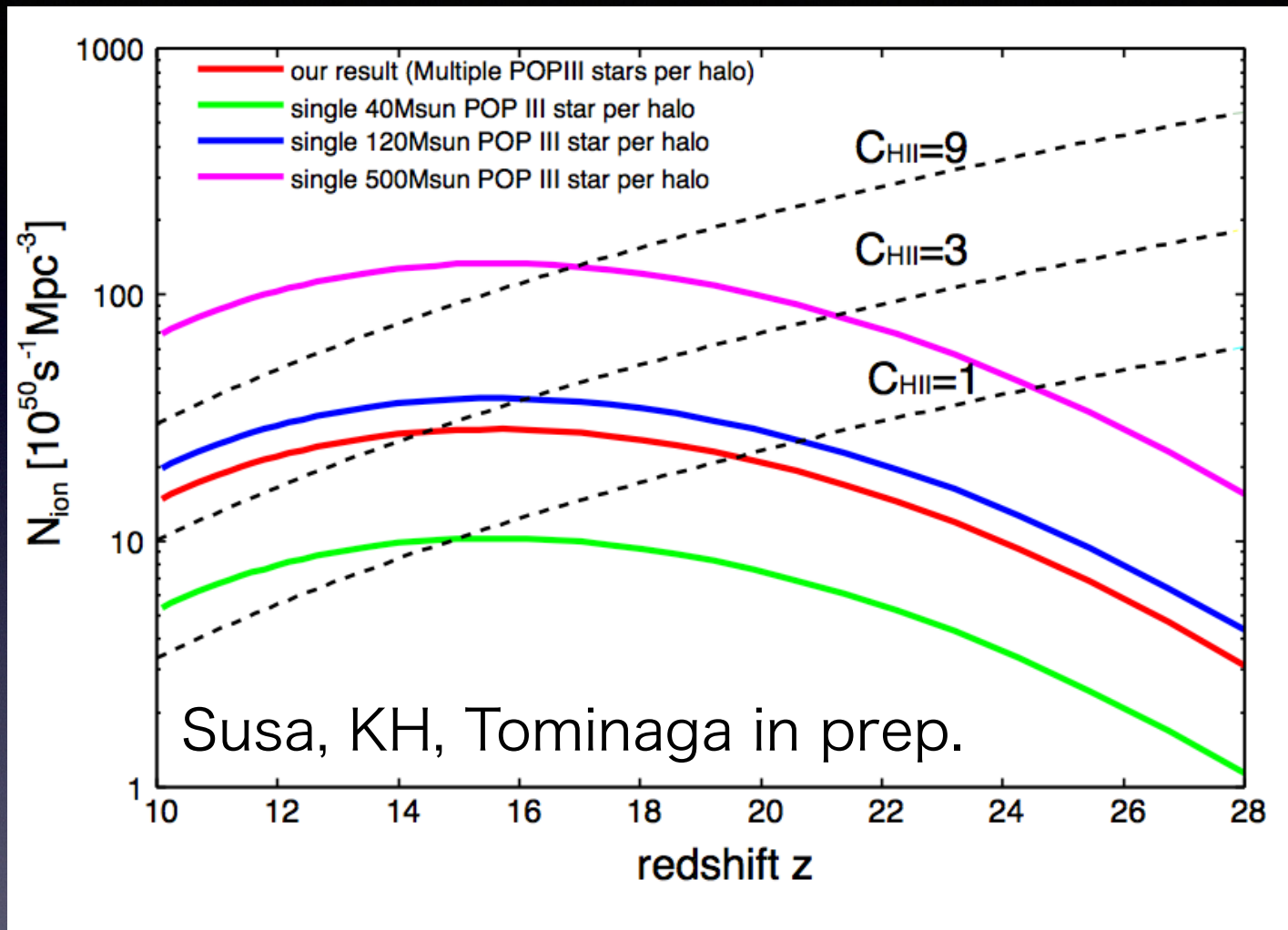
低質量銀河が支配的な場合 大質量銀河が支配的な場合



平均電離度が同じでも、どんな銀河が支配的かは f_{HI} の頻度分布や中性水素の21cmのパワースペクトルに残る.

=>SKA観測から、feedbackや f_{esc} の質量依存性の情報が得られる

Mini-haloの再電離への寄与



$10^5\text{--}10^7 M_{\text{sun}}$ のmini-halo内にある質量のPOP III starが生まれた場合の再電離への寄与. Feedback効果は無視.
Feedback影響下でのPOP III形成率、IMFが重要.

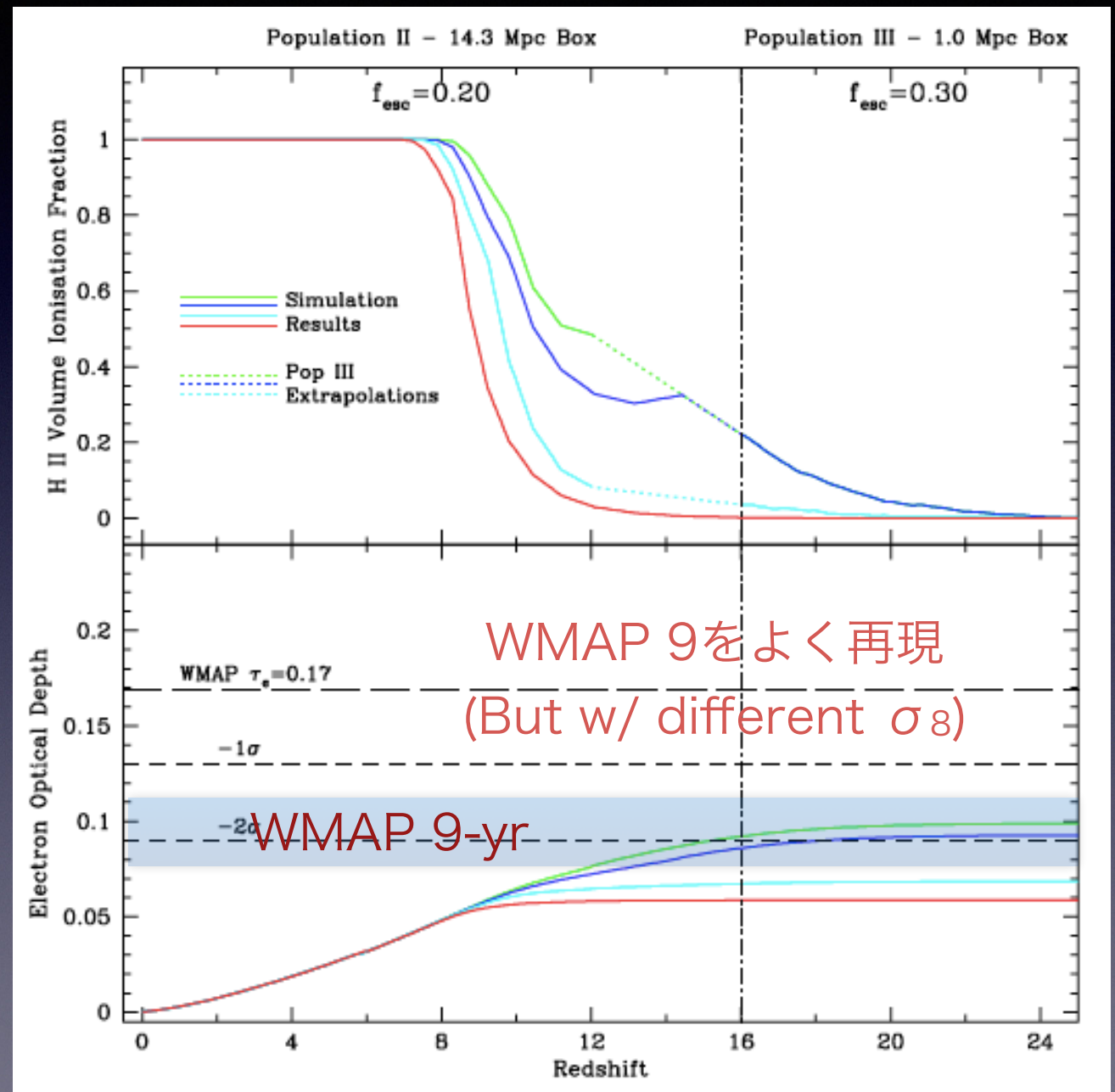
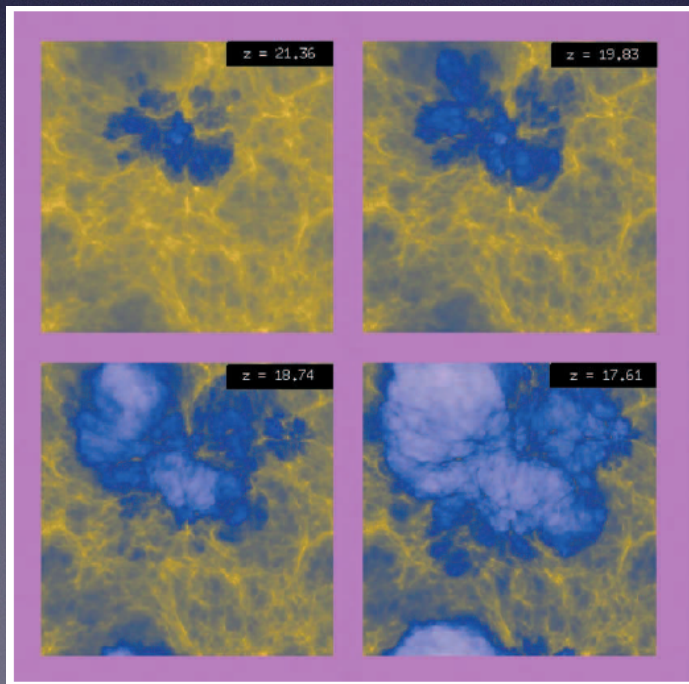
Mini-haloの再電離への寄与

Sokasian+04'

Cosmological Hydro +
RT simulation.

- Mini-haloをresolve
- 光加熱 LW背景放射,
SN(mimic) feedback

1 Mpc



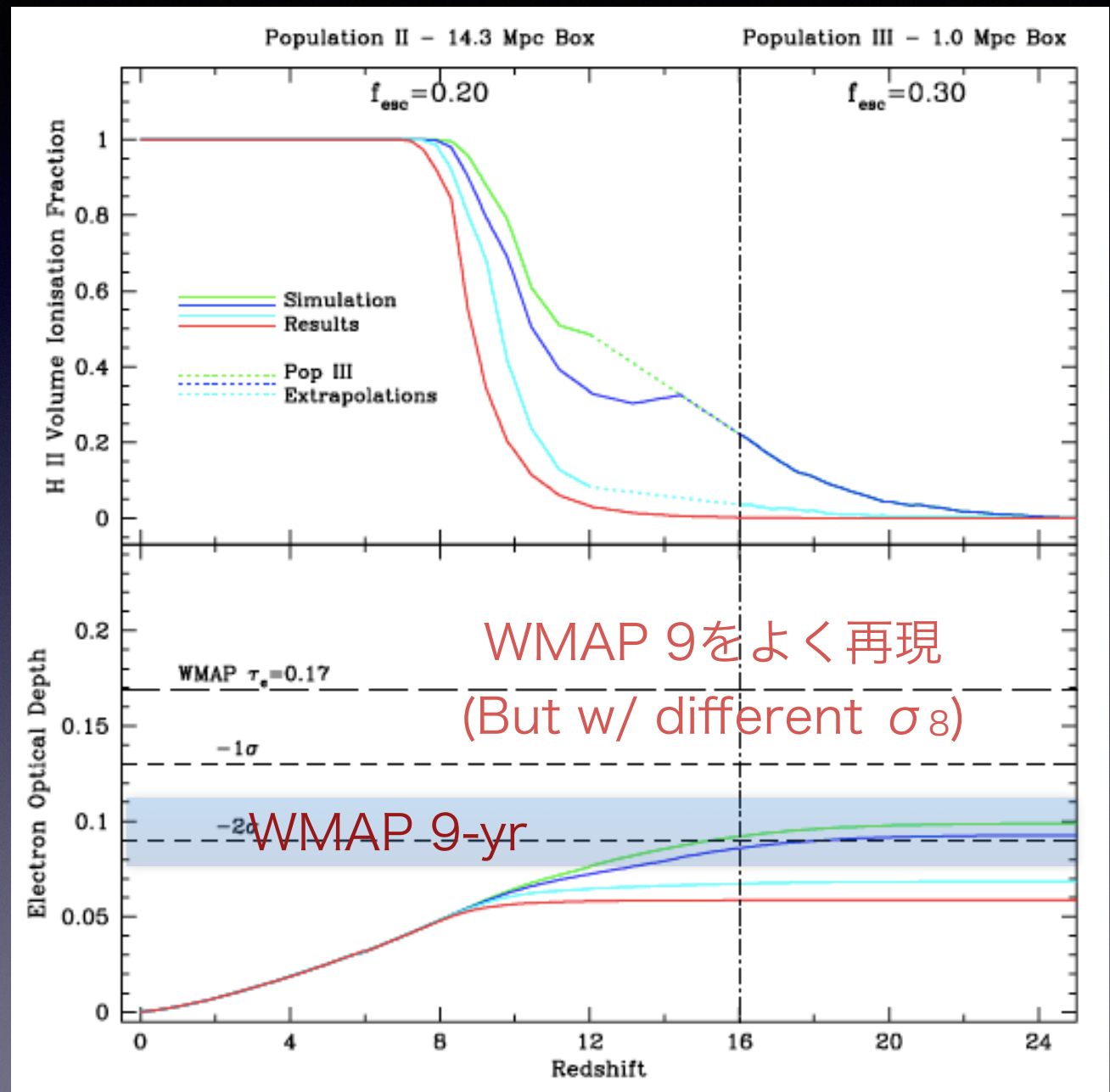
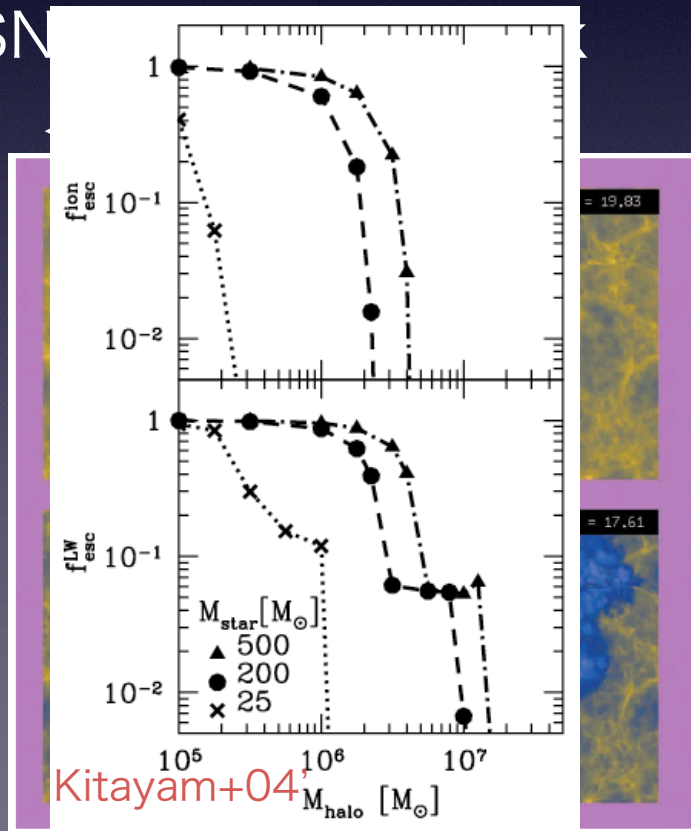
Mini-haloの再電離への寄与

Sokasian+04'

Cosmological Hydro +
RT simulation.

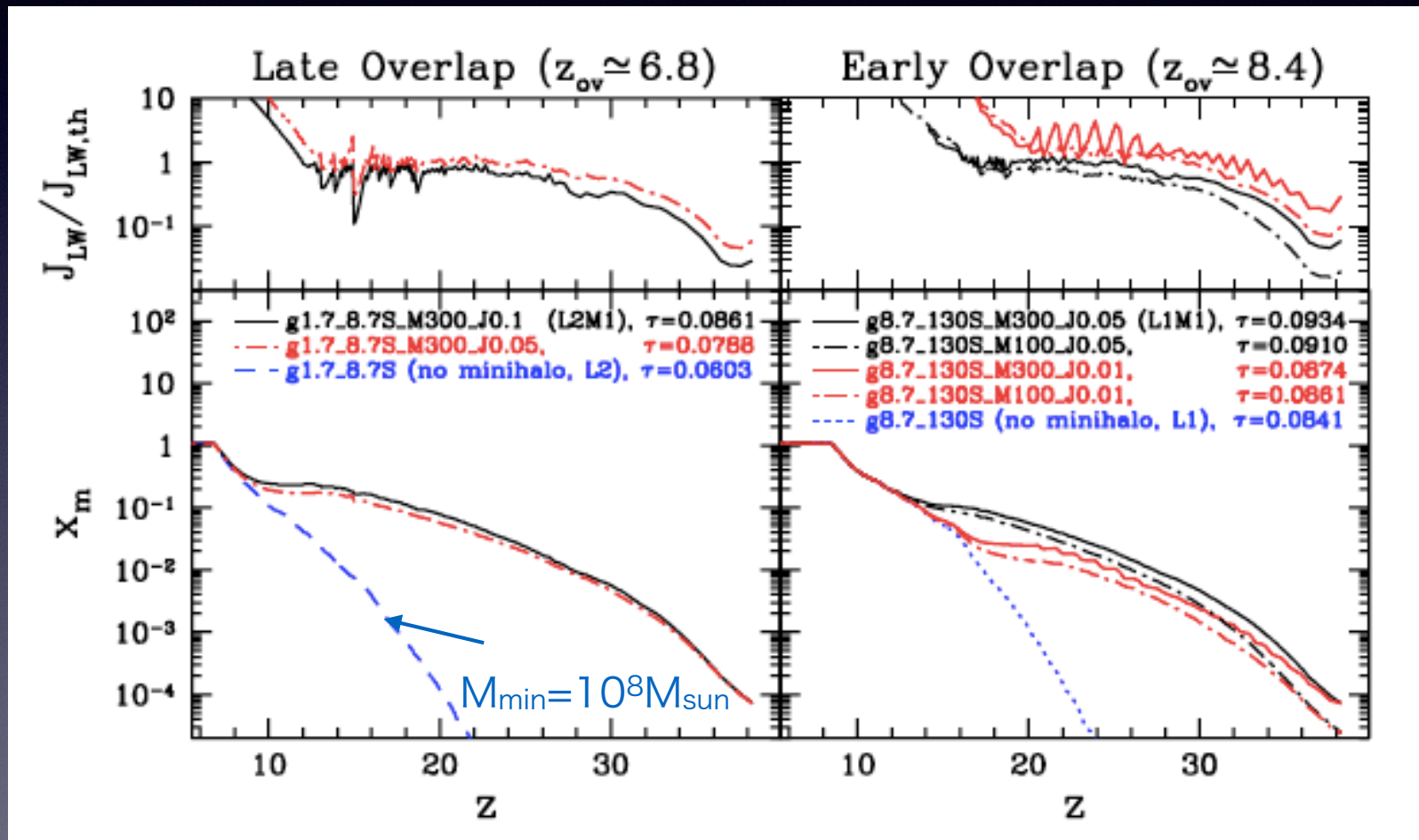
●Mini-haloをresolve

●光加熱 LW背景放射,
SN



Mini-haloの再電離への寄与

Ahn+(2012): mini-halo($M_{\text{halo}} < 10^8 M_{\text{sun}}$, $100 M_{\text{sun}}$ POPIII star/halo)をsubgrid化したN-body + RT(LW & ionizing). J_{LW} がある閾値以上がは($0.01 < J_{\text{cr}} < 0.1$)ではPop III starが形成されないと仮定.



電離史は J_{cr} に依存するが、高赤方偏移で部分的に電離する事でCMBのoptocal depth観測値 & $z \sim 6$ での f_{HI} を同時に再現.

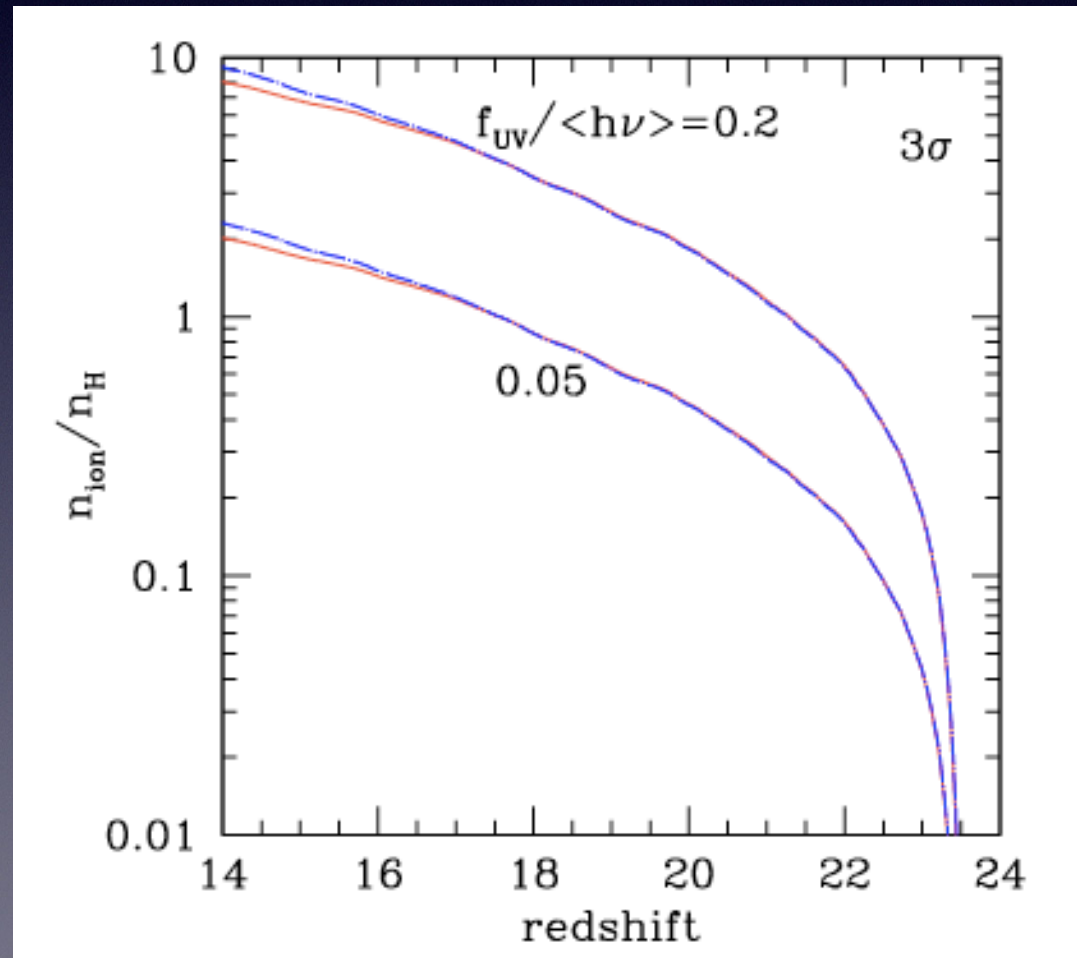
AGN “miniquasar” model

Madau+04' : POPIII星のremnantのIMBH($\sim 100 M_{\text{sun}}$)の再電離への寄与をanalyticに解析.

仮定：エディントンガス降着+major mergerでactivityがトリガーされる.

上記の仮定で最大限BHが光るようにすれば、 n_{H} より多くの電離光子はだせて、再電離にも重要な寄与.(high- z で再結合率も高いのでおそらく完全電離は難しい)

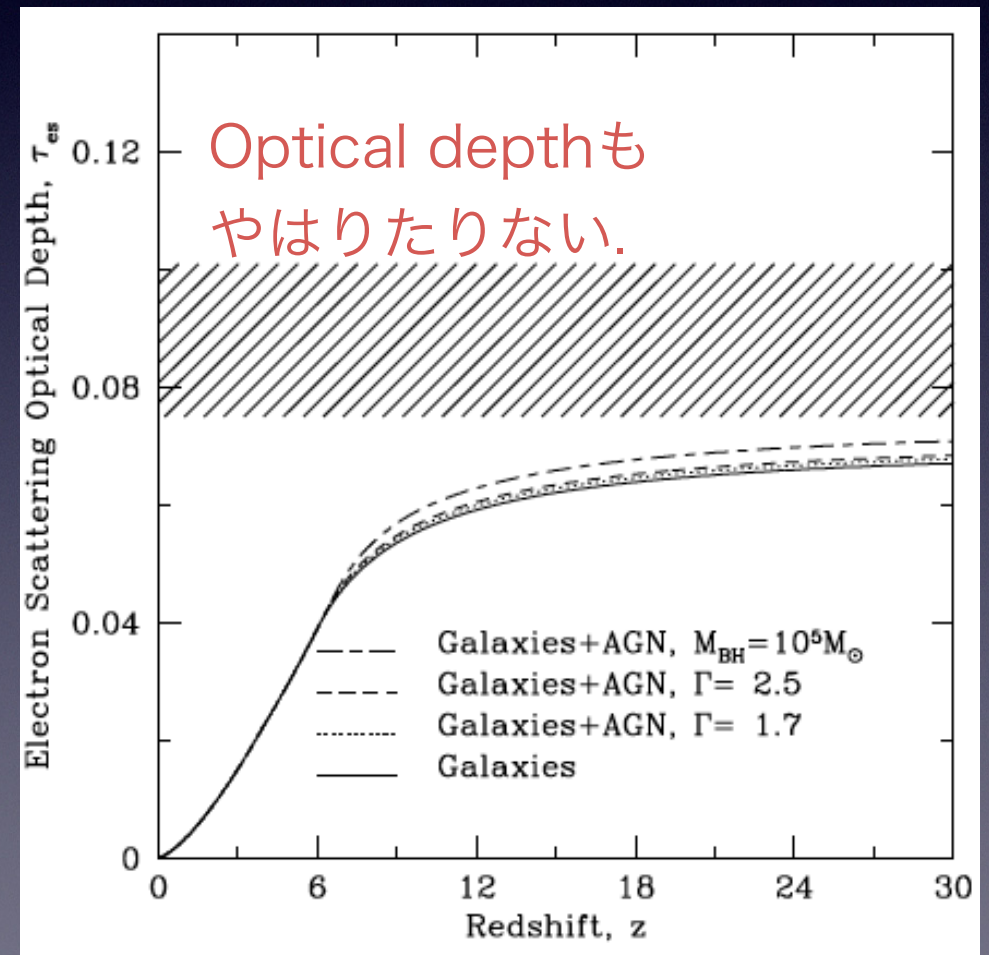
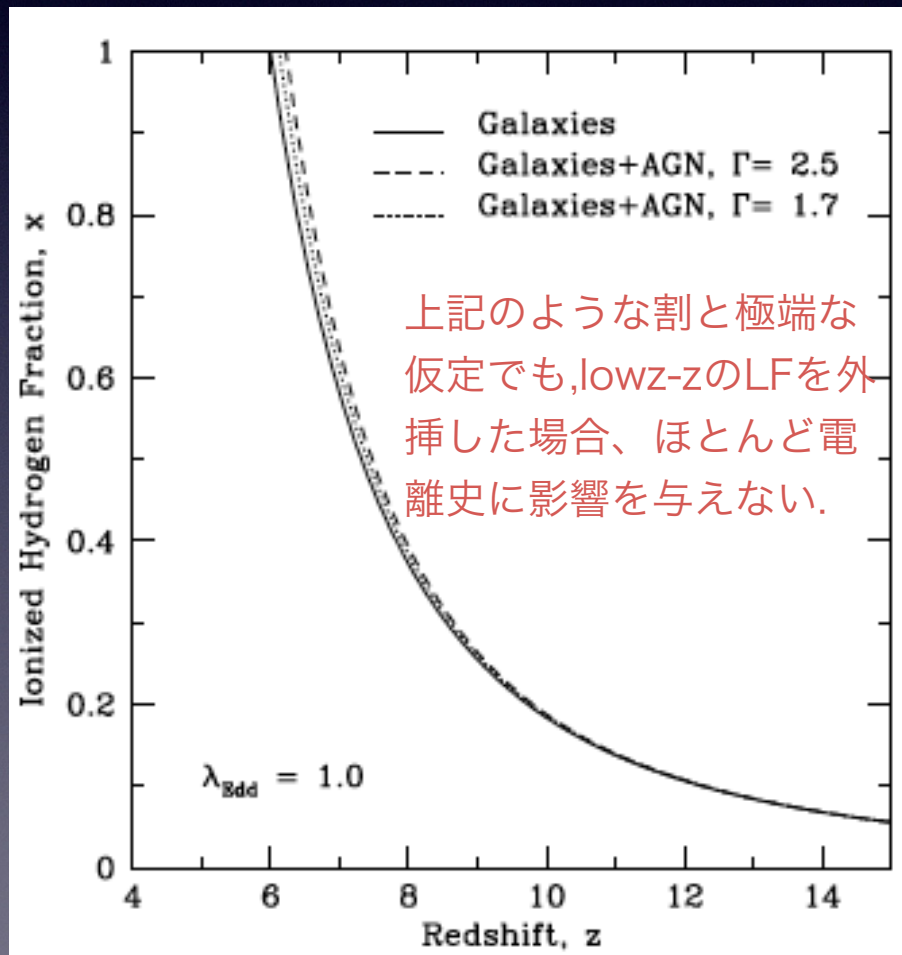
Alvarez



AGN

$z > 6$ ではよくわからない. 個数密度?, BHがあったとしても光っている(成長過程の問題)?

Grissom+13': $z < 4$ でのAGN LFをそのまま $z = 30$ まで外挿し、Eddington光度で光 + 遮蔽もなしという割と極端なモデルで準解析的に計算



まとめ：再電離5W1H

- When: $z < 7$ で中性水素は減少傾向.ただし、 $z \sim 6$ でもある程度中性水素が残っている可能性あり.CMB観測と合わせるとextendedな電離史が示唆される.
- How, Where: 星がdominantならInside-out、BHが非常にdominantなら一様もしくはoutside-inに進むと思われる.今後の21cmやkSZの観測で切り分けられるかも.
- What(Who), Why: 再電離終焉期($z=6-7$)では、銀河が主な電離光子源であると思われるが、よりhigh- z では観測されている銀河だけでは電離光子数が足りない($f_{\text{esc}}=1.0$ でも困難). トムソン散乱のoptical depthを再現しようと思うと、暗い側の銀河からの f_{esc} を含めた電離光子放射率や、Mini-halo(PopIII)の形成が重要.BHが効くかどうかは成長過程を明らかにする必要がある、まだ定量的には不明.

今後の観測への期待

- PLANCK(2014~): 偏光観測によって τ へのより正確な制限. 再電離過程のdurationにもある程度制限可能.kSZ?
- HSC(2014-15?): 膨大なhigh-z銀河サンプルを期待. Local(といっても広い領域)LAE LFがわかれば、ある程度 $z \sim 7$ での電離構造もわかるかもしれない.clusteringからの f_{HI} へのより強い制限(inside-out).
- WISH(2018~): HSCより多くのLAE, LBGサンプル. $z > 10$ での銀河
- JWST(2018~): Faint-end slope of LF. $z > 10$ での銀河
- TMT(2021~): high-z銀河の内部構造(速度、金属量、星、ガス), outflowと f_{esc} の関係などへの示唆. IGM tomography.
- SKA(1:2020~2:2026?): 21 cm観測から直接的なHI分布を観測 (Tomography). 背景光源(GRB等)を利用した吸収線形解析からの電離史.AGN成分の検出(吸収 $\Rightarrow$ 輝線 feature)

今後の理論の課題

POP III : 形成率、IMF、それらに対するfeedbackの影響

初代銀河、high-z銀河: POP III生存率, IMF(Pop III→II)、光度関数, SED(特に $\text{Ly}\alpha$ RT)、ダスト、 f_{esc} 、

SMBH: 種+成長過程(accretion vs. merging), 光度関数(z).



すべての道は再電離に通ず

それぞれ自分の研究を続けてもらえばよい.

がちょっとだけ再電離を意識した議論を含めてもらえればうれしい.

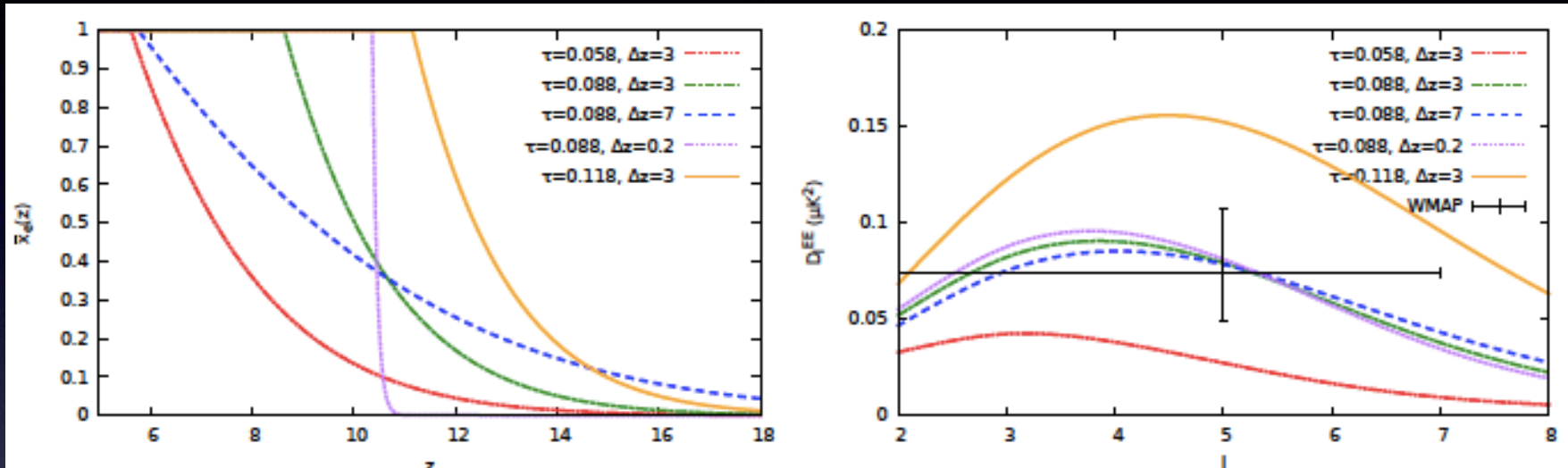
再電離研究への招待

high- z の観測結果で面白そうなネタがたくさん出てくる一方で、理論側のマンパワー不足は最近よくでる問題。(実際、今回の研究会で再電離関係の講演は少ない.)

#重要: 観測との詳細な比較には、 $\text{Ly}\alpha$ RTが必須(LAEとの比較、21 cm signalの計算)だが人材がいない. 重要な割に、国内競争相手はいない(?)ので若い人にお勧め.

PLANCK

今後CMB偏光のデータがでる予定

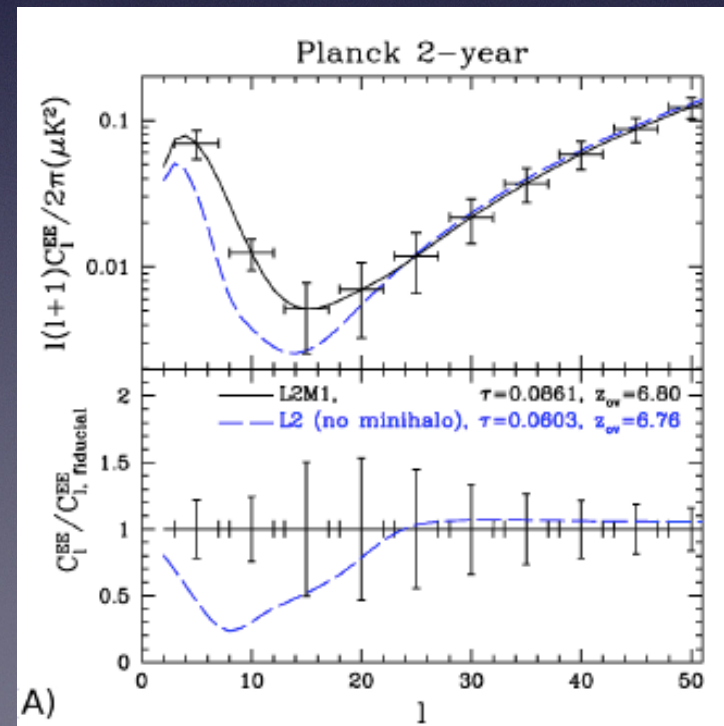


Zahn+12'

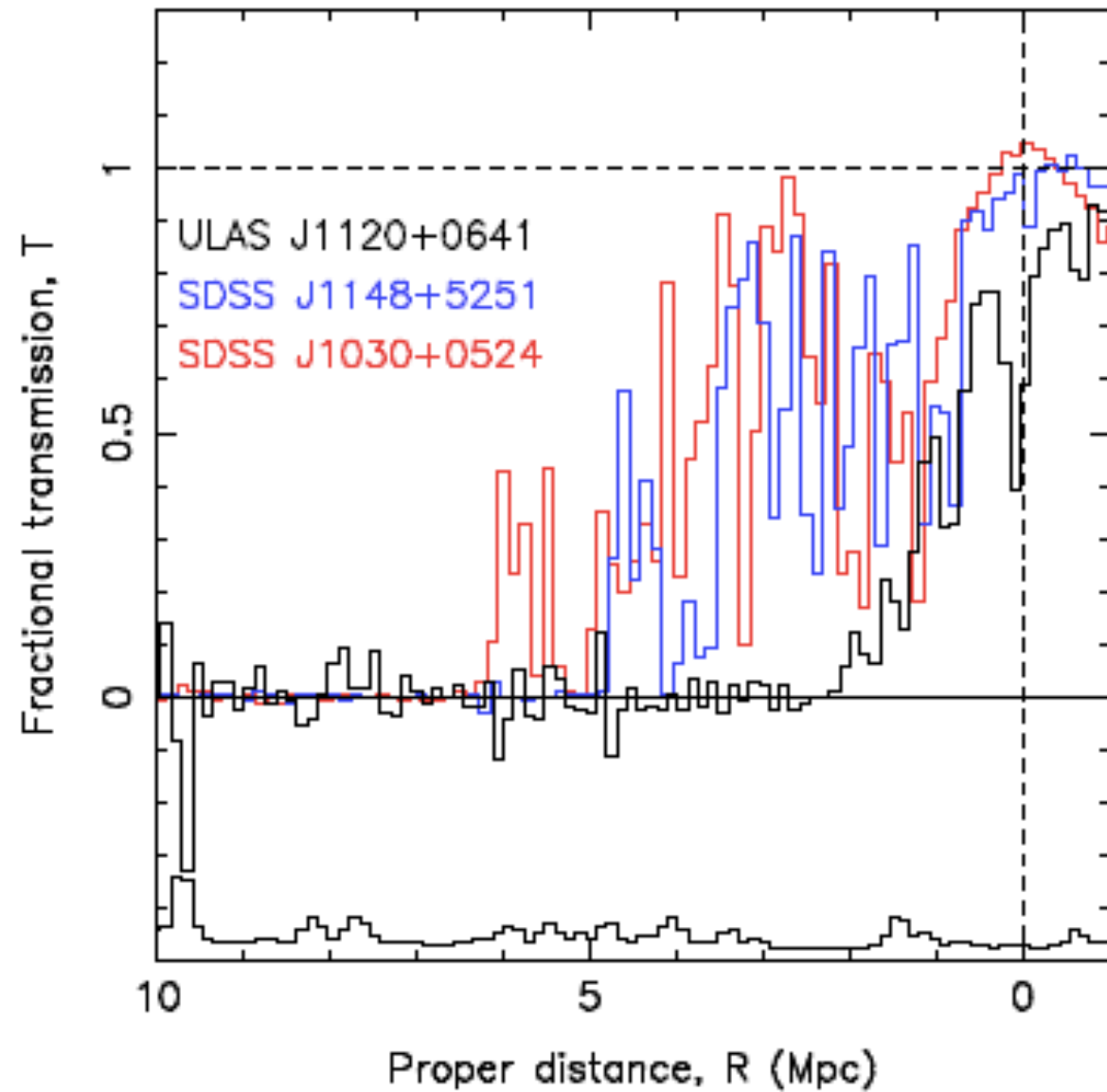
Δz にもある程度は制限がつけられる。 $\uparrow$

mini-halo有りモデルと無しモデルのどちらが良さそうか切り分けができる。 $\rightarrow$

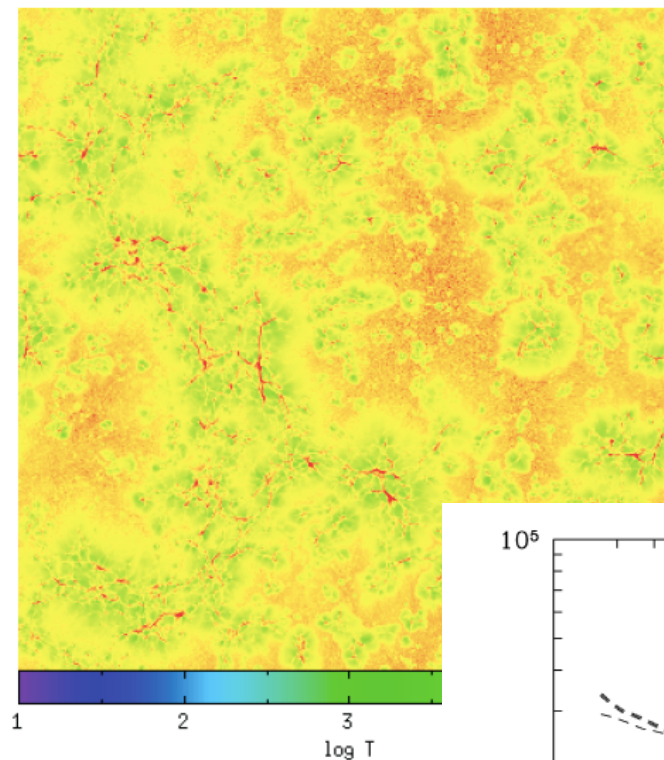
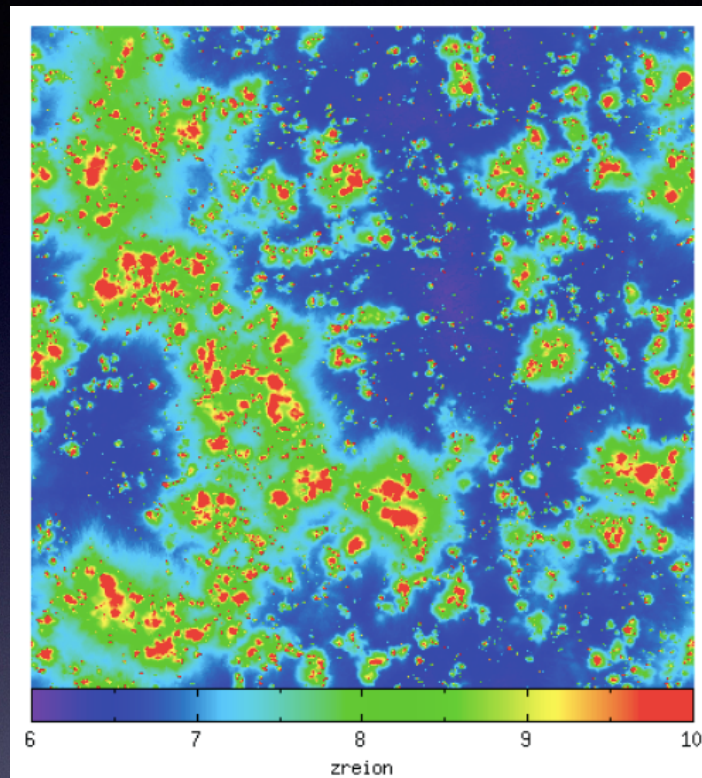
Ahn+12'



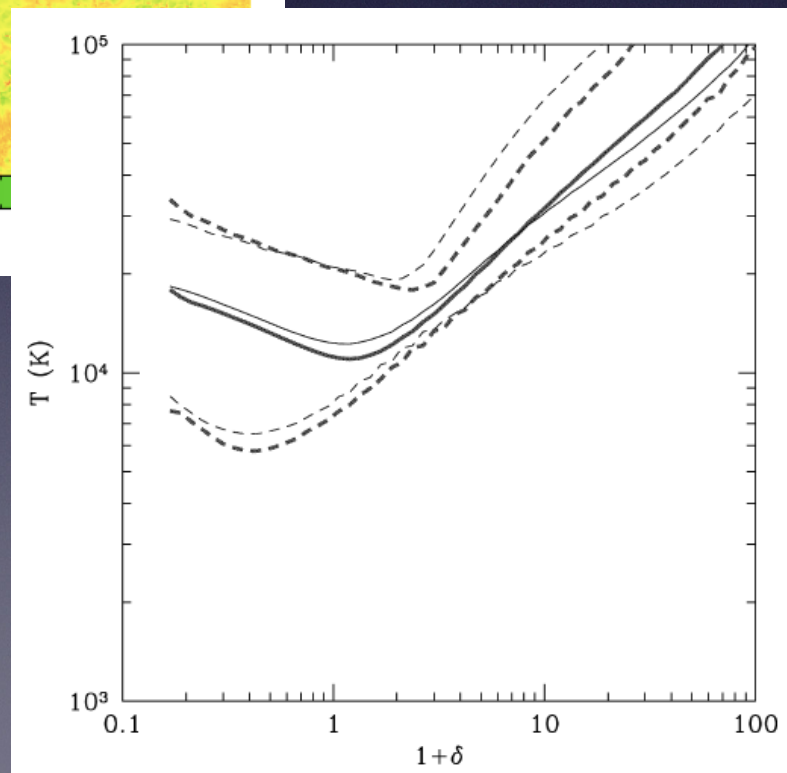
QSO近傍效果



再電離期と温度



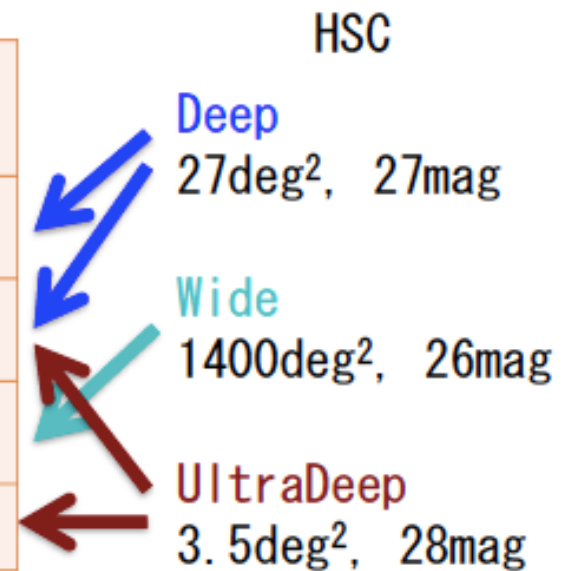
Trac, Cen, Loeb (2008)



HSC & Wish

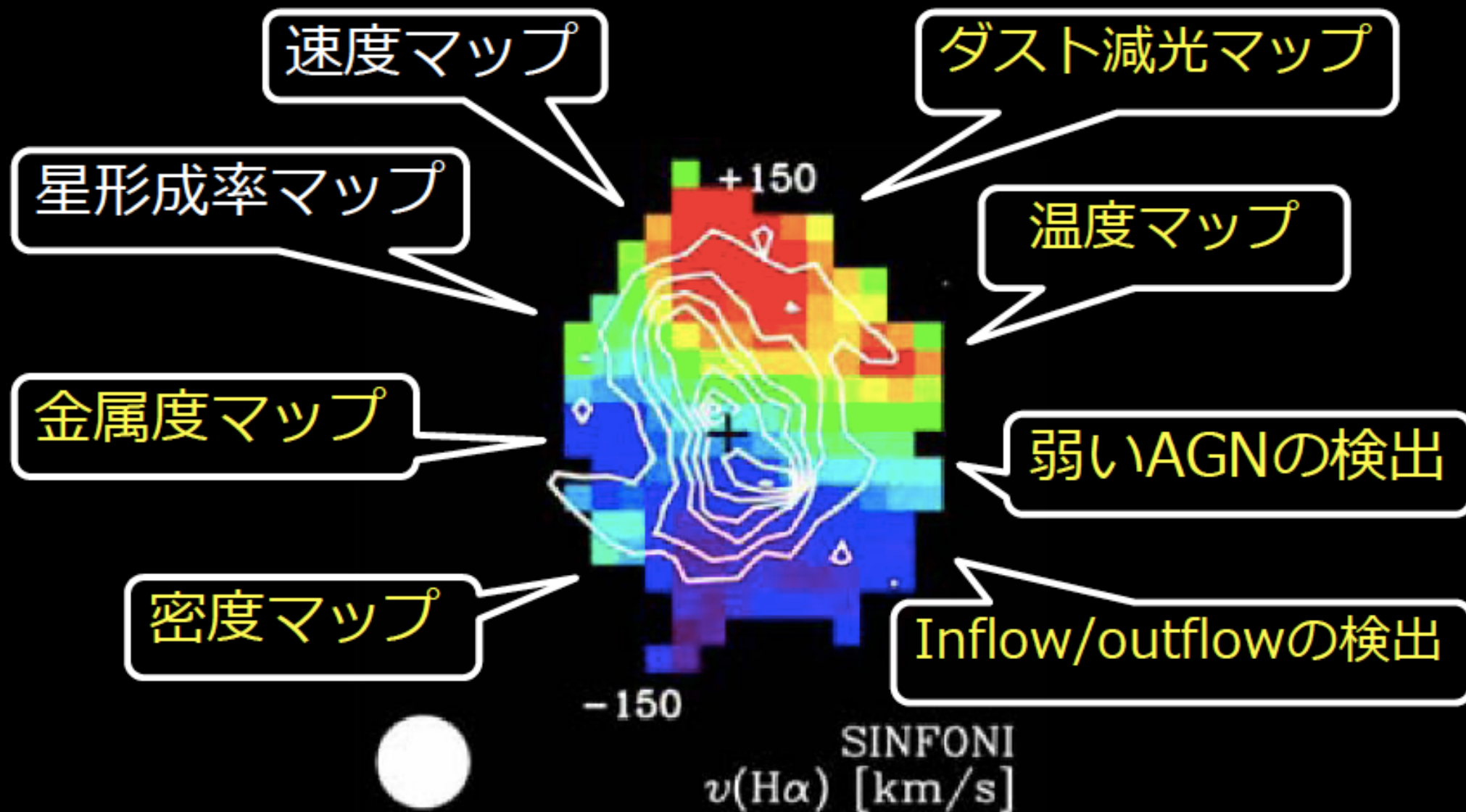
WISH Survey Plan

	Depth (3σ) (AB mag)	Area	Example of the Filters (a plan, to be determined)
Ultra Deep Survey (UDS)	28	100 deg ²	1.0, 1.4, 1.8, 2.3, 3.0 μm
Multi-Band Survey (MDS)	28	10 deg ²	4.0
Ultra Wide Survey (UWS)	24-25	1000 deg ²	1.4, 1.8, 2.3, (3.0, 4.0)
Extreme Survey	29-30	0.25 deg ²	1.0, 1.4, 1.8, (3.0, 4.0)



柏川さんスライド@WISHワークショップ

TMTが切り拓く銀河進化

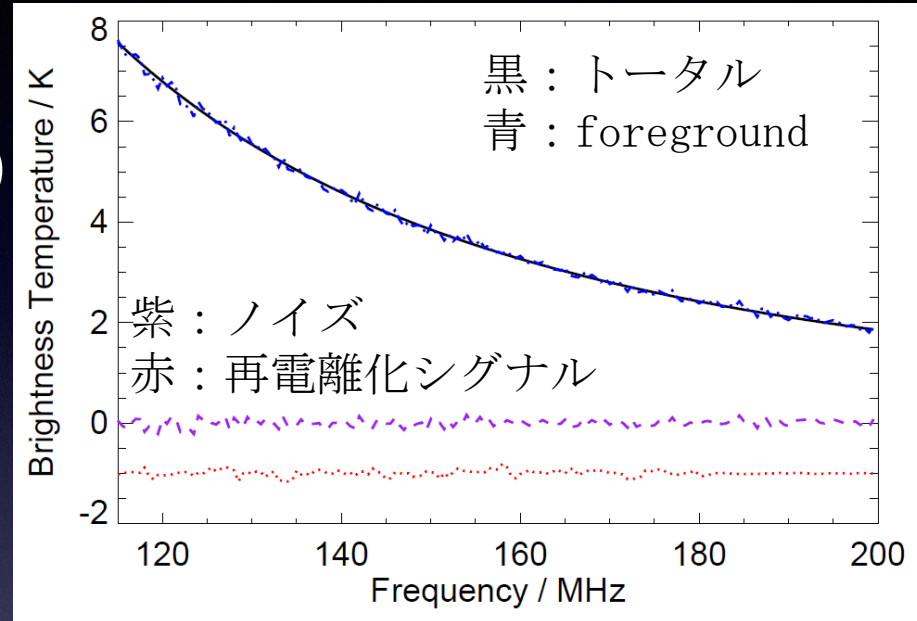


銀河内部におけるsub-kpcスケールのバリオンの複雑な物理素過程とその進化($z \sim 6$ まで)を明らかにする。

SKA foregroundのさっ引き

Chapman+13'

- ・ 600時間の観測を想定(LOFAR)
- ・ pixelごとにwavelet変換で滑らかな成分を引く
- ・ さらにノイズを引く



左 : input

右 : output

@165MHz

$10^\circ \times 10^\circ$

相関係数

= 0.689

