

# 再電離期から暗黒時代に迫る銀河形成 —TMT時代へ向けた日本の戦略は？—

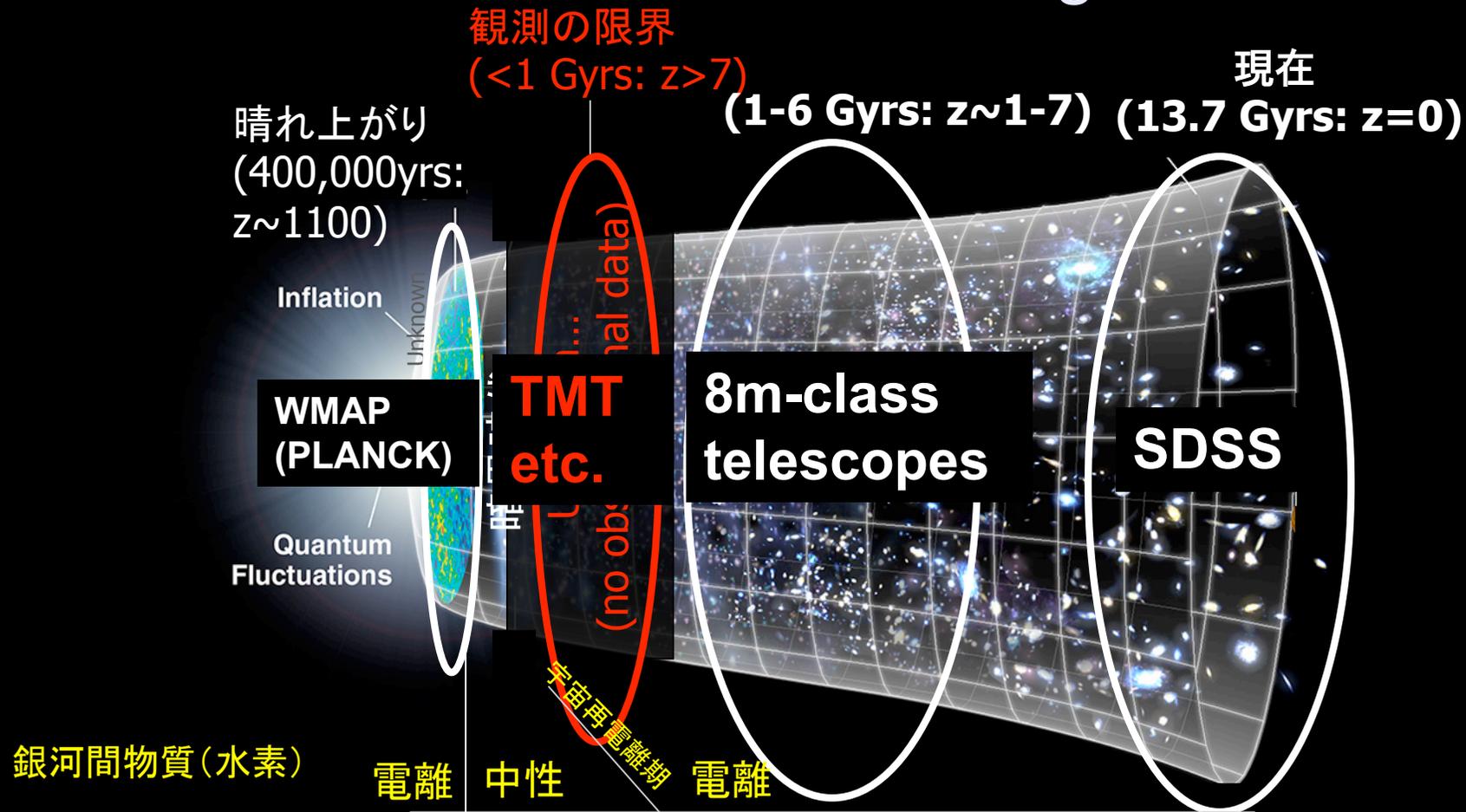
大内 正己

(Carnegie Institution of Washington)

# 話の内容

- TMT時代に取り組むべき銀河形成研究
- TMTへ向けた戦略
  - すばるからJWSTをこえてTMTへ

# Big Bang後の約1Gyr: 宇宙史におけるMissing Piece



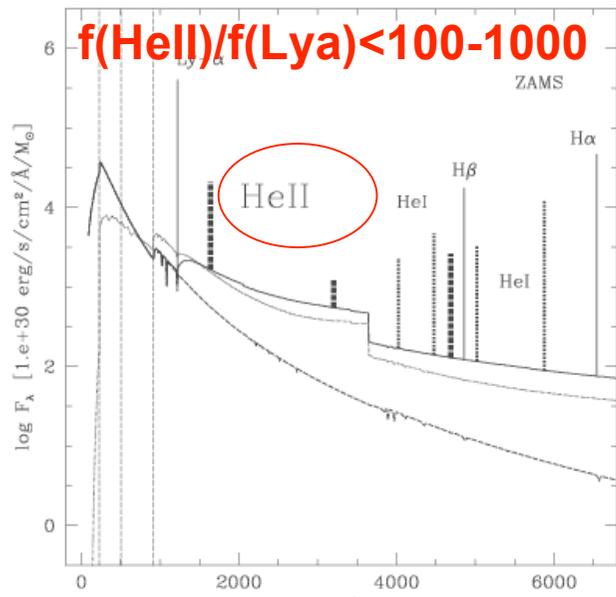
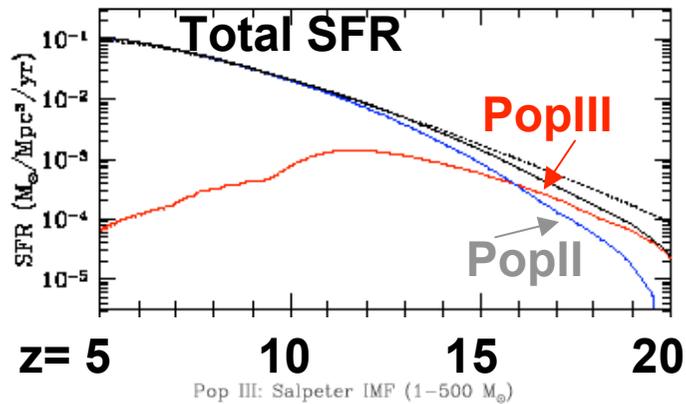
宇宙の晴れ上がり以降、天体が無い宇宙の暗黒時代を経て、**第一世代銀河(first galaxy)**が形成された一方、IGM(水素)は晴れ上がりで中性になった後、天体が放つUV光で再び電離(**宇宙再電離**)

TMT時代の銀河形成研究が取り組むべき課題

1. Primordial gasからなる First galaxyはいつ、どのように形成されたのか？これらがどのように $z \sim 2-7$ の LBG, LAE, DRG, submm銀河 etcを経て現在の銀河になったのか？
2. 宇宙再電離はいつ、どのように起こったのか？再電離の電離源は本当に星形成銀河なのか？

# 1. TMTによるFirst galaxyの検出

Cosmic SFR Contributed from PopIII and PopII (Trac & Cen 2007)



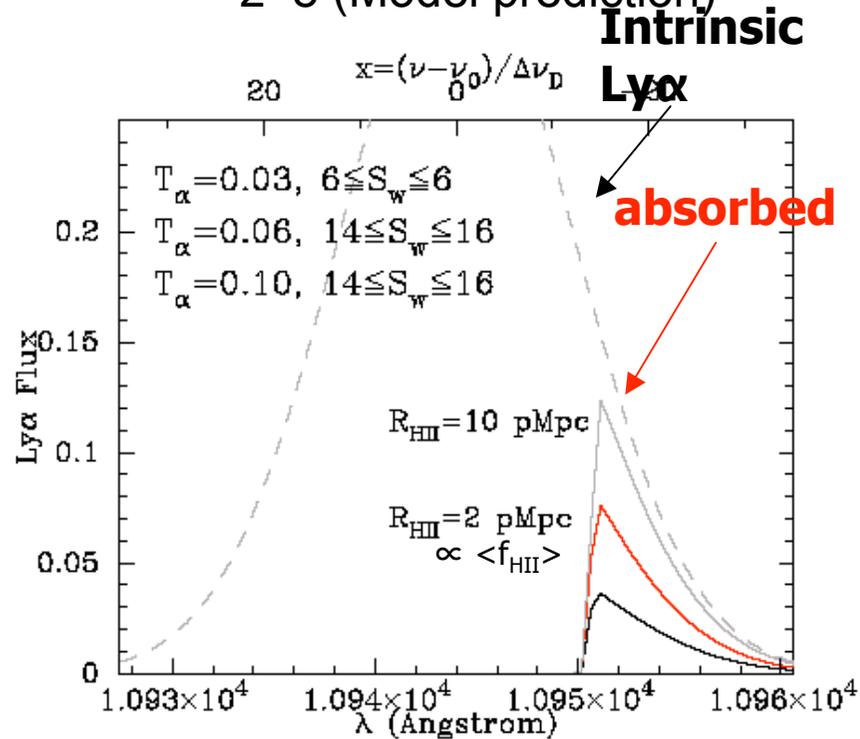
Schaerer 2003

- **どの赤方偏移?**:  $z \sim 15-20$ でpopIII SFがpopIIを上回ると予想(Trac & Cen 2006)。Ly $\alpha$ より長波長のUV光がKに入る→TMTでアクセス可。
- **感度は?**:  $z=15-20$ のSFR=1Mo/yrの天体の明るさ=30mag。TMT+AOの検出限界(点源で~31-32mag)で届く。Dropout法で検出可。
- **課題**: どのようにfirst galaxyとmetalで汚染されたsecond gen. galaxyを見分けるか? **HeII $\lambda$ 1640** (Schaerer03;感度に難:  $z \sim 15$ は厳しい)、**Ly $\alpha$ の広がり**(Fardal+01;検出に難)、**UVの金属線**、etc...

# 2. 宇宙の再電離 と電離源

Cosmic reionization predicted by  
neumerical simulation (Iliev et al. 2006)

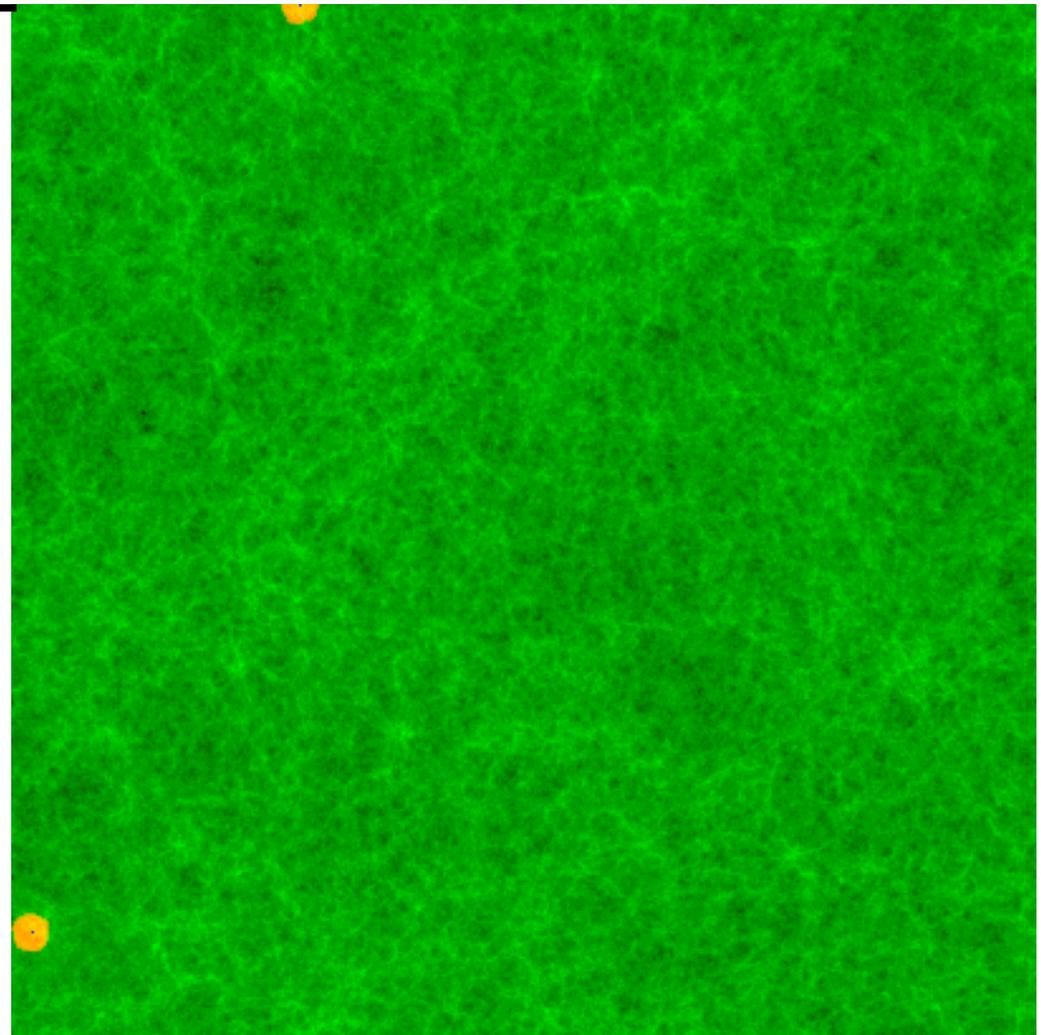
Ly $\alpha$  line profiles of galaxies at  
z=8 (Model prediction)



Dijkstra et al. (2007)

• **宇宙再電離の時期:** z~11?? (WMAP5+inst. model; Dunkley+08) [z>6; GP trough; Becker+07]

• **手法:** TMTでUV dropout銀河は見えるが、Ly $\alpha$  emitterがほとんど見えなくなる時代→中性水素からなる宇宙→**宇宙再電離の始まりを同定**(cf. Kashikawa+06, Iye+06, Ota+06)。



電離源 (blue dots) と ionized bubbles (orange)

# 再電離研究でTMTが果たす役割

- Ly $\alpha$ 天体によるIGM中性度の測定は、銀河からのLy $\alpha$ 輝線の吸収により間接的に測るため、不定性が高い(銀河のoutflow, peculiar velocity, ISMの分布等)。再電離史を探るのには最適とは言えない。

Simulation results of  $z > 6$  QSO with MWA

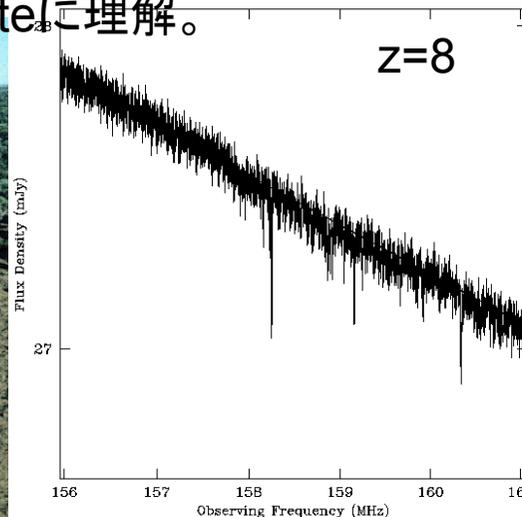


## 電離される水素ガス (by 21cm SKA観測)

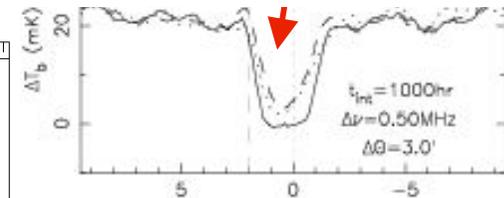
と

## 電離源である銀河 (by 光赤外TMT観測)

八木/と捉え、宇宙の分布と銀河の分布を比較することで、電離源、再電離の過程をcompleteに理解。  
SKA (~2020)



21cm forest (simu.)



Wyithe et al. 2006  
(from Carilli 2006)

# 2020年へ向けて

- TMTで行える重要な銀河形成研究は数えきれない
    1. いつ、どのように銀河が誕生したのか？(宇宙暗黒時代の終わり)
      - First galaxy (popIII銀河)  $z \sim 20$  の検出
    2. 宇宙の再電離はいつから始まったか？電離源は何か？
      - Ly $\alpha$ 輝線天体の出現時期 ( $z \sim 10?$ ) の同定
    3. 宇宙の星形成、質量集積、化学進化史は？
    4. 銀河形態はどのように獲得されてきたのか？
    - 5... これまで見られなかった時代の銀河を観測することで、想像していなかった事実が見つかる(←これが一番面白い)。
  - すばるで満足せず、TMT時代でもexcitingな研究を行いたい。
  - すばる望遠鏡のサイエンスからTMT時代のサイエンスへどう繋げていくか？
- 以下、日本がTMTに参画すると仮定して考えてみたい。

# すばるとTMTの違い

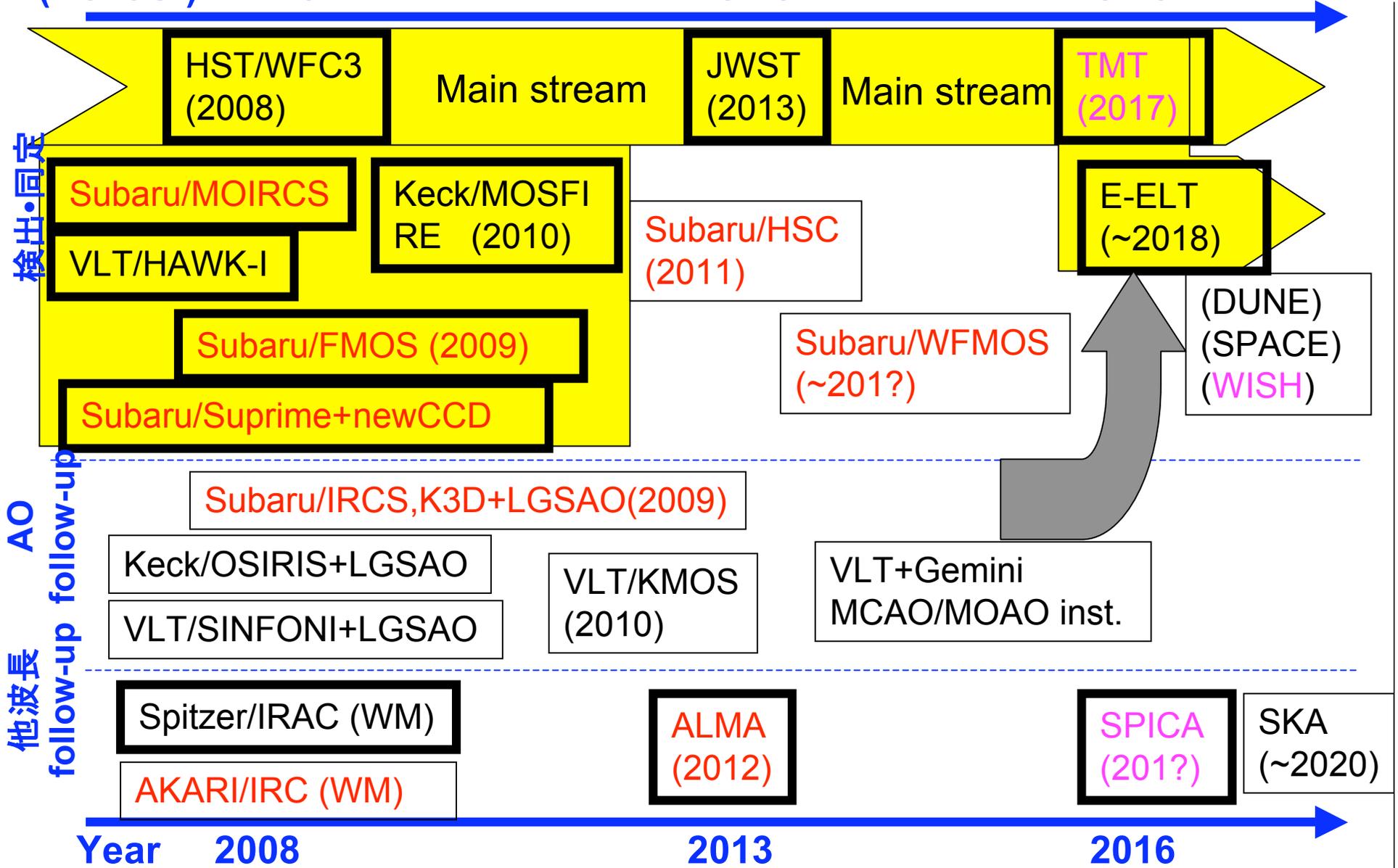
- すばる
  - 日本占有。日本人以外のアクセスはUH等を除きほとんど認められていない
    - すばるにしかできない研究(例えば、Suprime-Camによる研究)は日本人研究者がほぼ独占
    - 特別な保護の下、新参者の日本人研究者が確実に成果を出せた(例:すばるのz~6 LAEの研究 vs. HST のz~6 dropoutの研究)
- TMT
  - 日本以外からも同じ装置にアクセスできる(Caltech, UC, Canada等から)
    - TMTにしかできない研究でも日本人研究者が1番乗りで成果を出せるできるとは限らない
    - 熾烈な競争にさらされる。日本人研究者が成果を出すことは保証されていない
- TMTに参加する場合は、資金・装置といったハードウェア面での戦略(午前の話)はもとより、将来行われるであろう厳しい競争に耐えうるサイエンス、つまりソフトウェア面での戦略もなくては生き残れない。

# 2020年までに登場する装置(銀河研究に重要なもの)

$z(\text{frontier}) = 7-10$

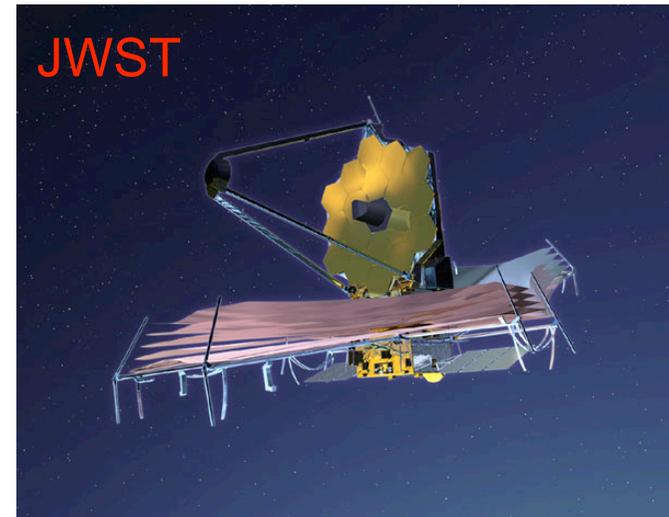
10-20

10-20



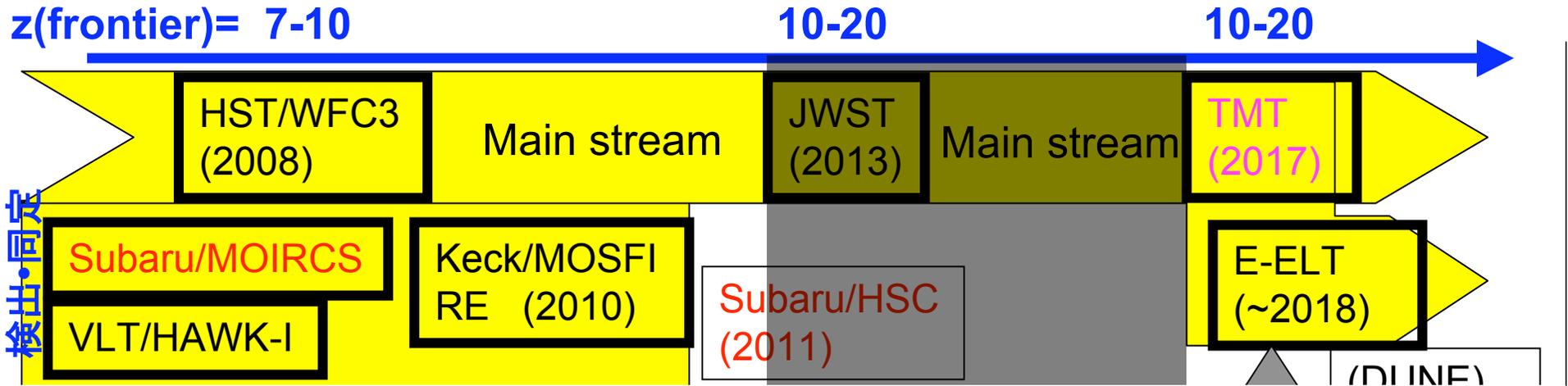
赤(日本からアクセス可能)、マゼンタ(日本からのアクセス可能性有)、黒(海外の装置)

# JWST(2013-予定)がもたらす パラダイム・シフト



- 感度が1-2桁違う。(すばるのK-band限界 $\sim 25$ mag $\rightarrow$ JWST  $\sim 30$  mag) 銀河形成に対する考え方すら変わる可能性(パラダイムシフト)
- Galaxies at  $z\sim 10-20$ : TMTの前にThe first galaxiesも検出可能かもしれない。ただし、小さい( $10^6-8$ Mo;  $\rightarrow < \sim 20$ pc) first galaxyの検出効率は JWSTより diff limitが1/5の30mTMT+AOの方が有利?。

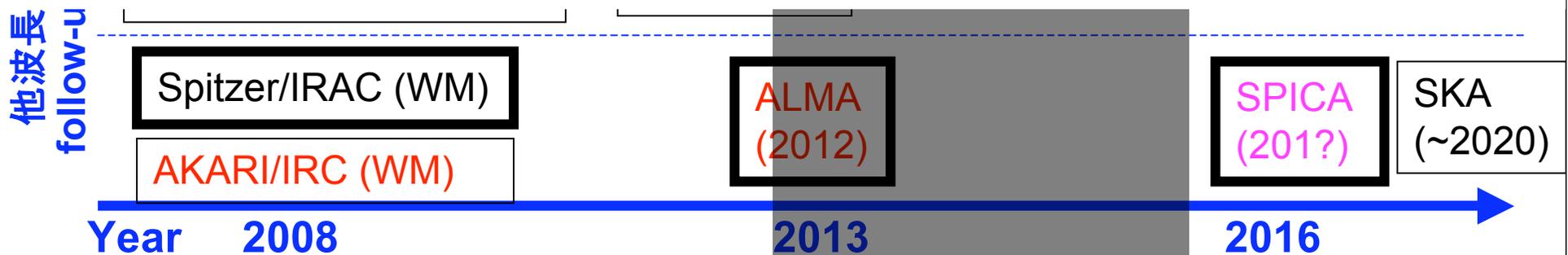
# 2020年までに登場する装置(銀河研究に重要なもの)



サイエンスの国際競争が激しいTMT

海外ではJWST撮像→TMT分光(高見さんの発表)という流れでいち早く結果が出せる

日本は出遅れるのではないかと心配。どうするか？



赤(日本からアクセス可能)、マゼンタ(日本からのアクセス可能性有)、黒(海外の装置)

# JWSTにアクセスできない状況をどう乗り切るか？

- 1. JWST(2013)とTMT(2017)のFLの差は4年程度なので無視する？
- 2. JWSTが公開するであろうLegacyデータにいち早くアクセスして結果を出す
  - 過去のHST GOODS+UDSのz~6 dropout銀河研究の例
    - Bouwens et al.
    - Bunker et al.
    - Yan et al.
  - 問題点: 誰でもやる、やれる研究。オリジナリティーが無い。装置・研究提案・観測・解析など一切貢献せずに成果だけ獲得するのは世界的に見て評価されない(=人の禪で相撲をとる)
- 3. JWSTデータ+自分たちの観測データ→付加価値を付けた研究
  - 過去の「HST 探査+自分たちの観測」の例
    - Hawaii HDF(HDFNをUH88,KPNO4m,Subaruで撮像follow-up; Capak)
    - MUSYC(HDFS,CDFS等をCTIO4m,Magellan6.5m,VLT,Geminiでfollow-up; van Dokkum, Gawiser他)
    - 京大グループの研究(HDF-NのSuprime-Cam撮像,太田、岩田他)

# すばるとALMAの活用

## 3a) Redshift frontier( $z \sim 10-20$ )

### に切り込むケース

#### – Subaru/SCamとHSCam

- JWSTでは出来ない( $< 0.6 \mu\text{m}$ )観測

- Ultra-deep (U) BV imaging

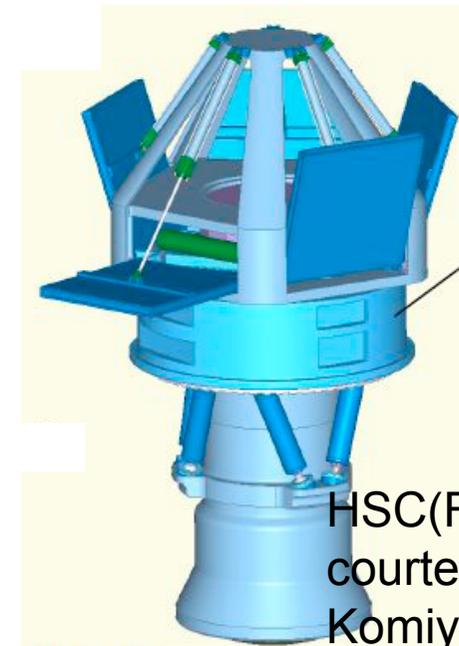
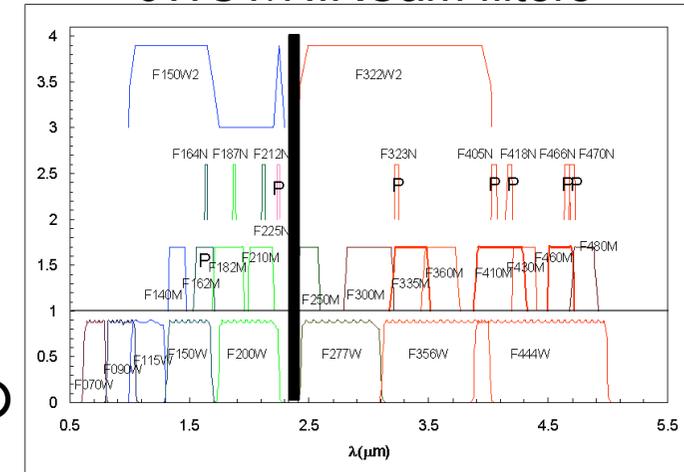
- 主に $z=0-4$ 銀河に有効だが $z > 7$ 銀河の研究にも必要とされる

- 色選択で得られる $z \sim 10-20$ 天体のうち最も明るい候補天体をFMOS/MOIRCSで分光

- $z \sim 10$ 銀河の研究に食い込む

– まとまったすばる時間(戦略枠)などでコミュニティーで対応?

JWST/NIRCam filters



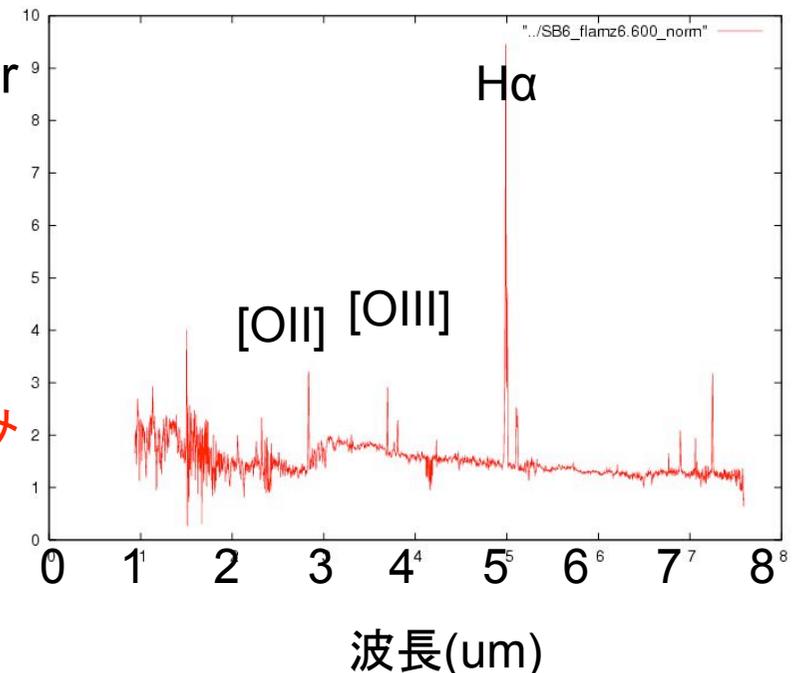
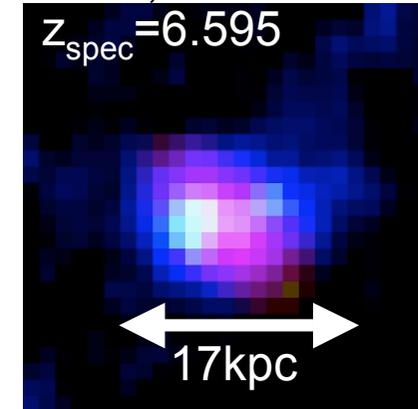
HSC(Figure courtesy; Komiyama)

# すばるとALMAの活用

3b) より現実的なIntermediate redshift ( $z=3-7$ )の研究で、すばる  
→ JWST → TMTの流れを確立するケース

- すばるSC, HSCの $z=3-7$ のLAE searchで見つけた面白い天体でJWST proposalを通し、JWST分光(H $\alpha$ )・撮像(morphology)フォローアップを展開( $z=6.6$  giant LAE,  $z=5.7$  proto-cluster など)。
- JWST撮像・分光データ→TMT 高感度 + 高空間分解能(AO)分光
- すばる独自のサンプルを元にJWST時間を獲得。JWSTサイエンスに食い込みTMT時代に備える

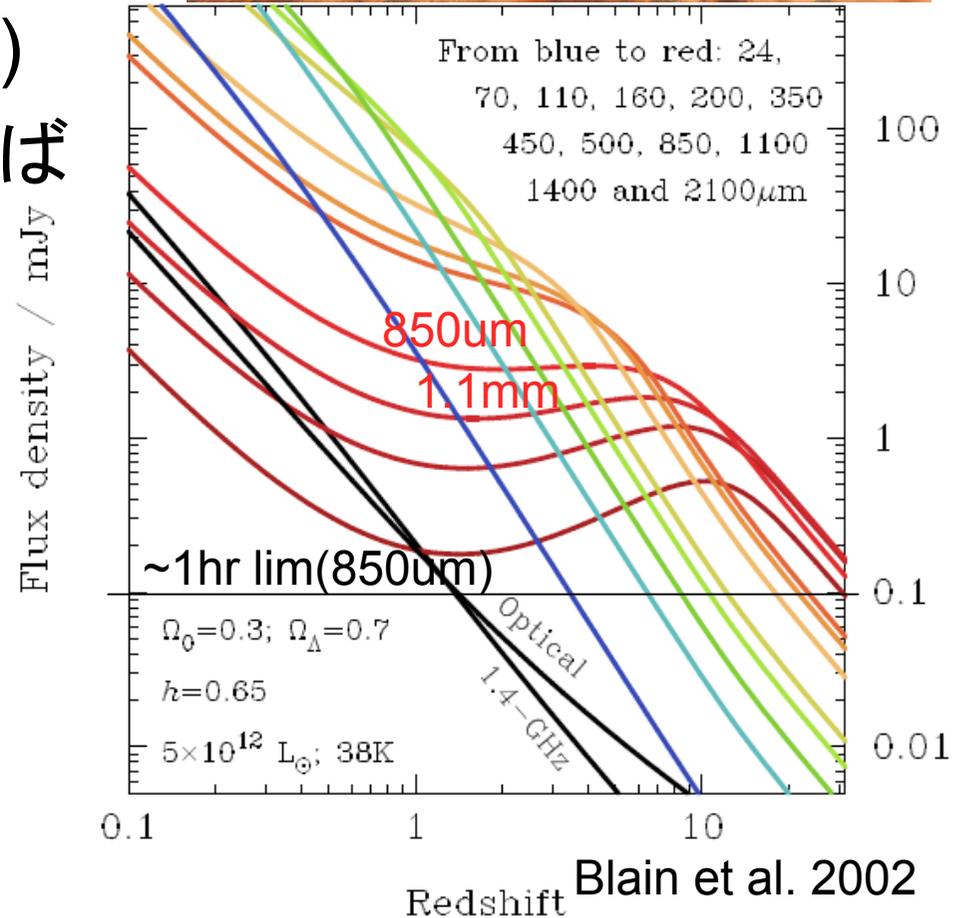
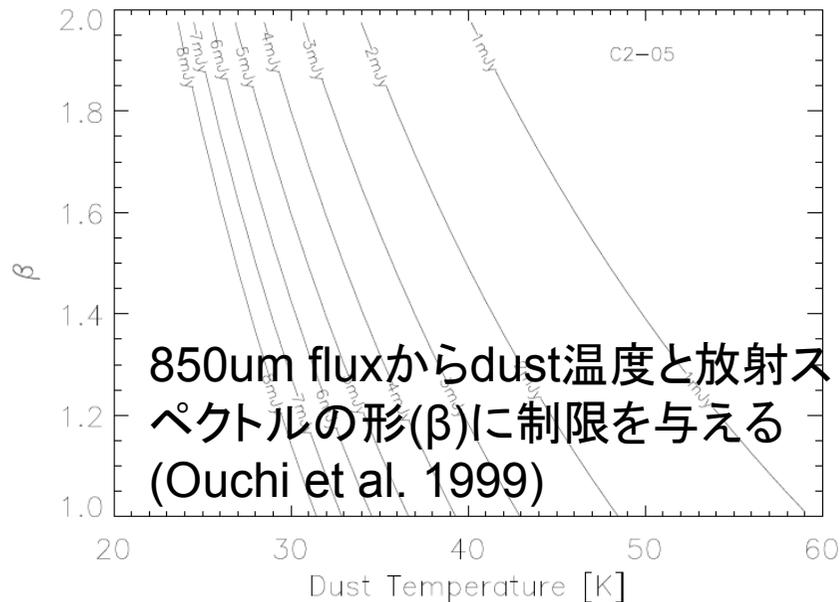
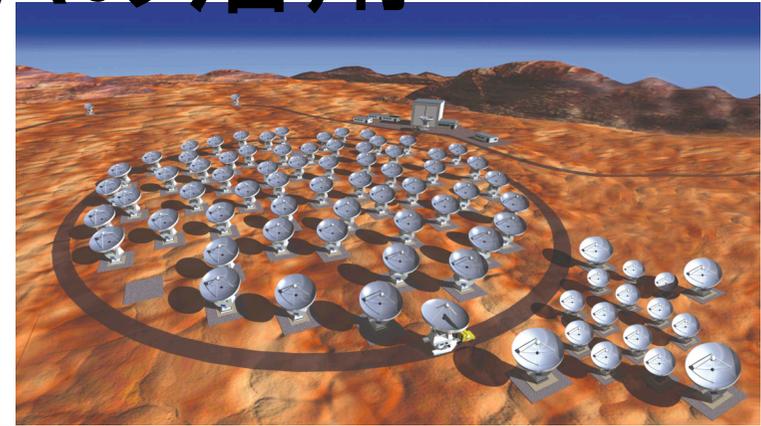
Giant LAE (Ouchi et al. ApJ submitted, arXiv:0807.4174)



# すばるとALMAの活用

## 3c) ALMAを使う

- Negative K-correction
- 850um, 1.1mmのダスト放射
- ALMAなら850um 1時間で  
~0.1mJy程度 (50arrays)
- LIRG程度の天体があれば  
z~10くらいまで検出可能



# まとめ

- 再電離期から暗黒時代に迫る銀河形成
  1. いつ、どのように銀河が誕生したのか？(宇宙暗黒時代の終わり)
    - First galaxy (popIII銀河)  $z \sim 20$  の検出 (Hell etc.)
  2. 宇宙の再電離はいつから始まったか？電離源は銀河か？
    - Ly $\alpha$ 輝線天体の出現時期 ( $z \sim 10?$ ) の同定とHI 21cm線観測とのコラボ
- TMTへ向けた戦略
  - JWST(2013)の登場は銀河形成研究におけるパラダイム・シフト
  - JWST無しで2010年代中盤をどう生き残り、TMT時代へ繋げるか？
    - JWSTデータを用いたサイエンスに絡みTMTサイエンスの準備を怠らない
    - すばるHSC FMOS, MOIRCSやALMAなど生かせる資源をフル活用

(質疑応答 — Q:質問, A:回答, C:コメント — 氏名無しは発表者の発言, 敬称略)

(Q) TMT の建設サイトによっては ALMA などとの協力が難しくなってしまうのか? (柏川)

(A) 深宇宙探査などは equator の field を選んでやれば問題は出ない。equator の field として日本になじみのあるターゲットとしては SXDS や COSMOS などが挙げられる。

(C) 必ずしも ALMA で北天ができないわけではなく、例えば SDF は  $35^\circ$  くらいまでは上がる。ASTE でも、とりあえず観測はできている。(本原)

(Q) TMT 装置開発の装置開発グループの保証時間 (GT:Guaranteed Time) は、どのようになる見透しなのか? プロジェクトとセットの装置開発があっても良いと思うが? (太田)

(A) 同じ観測を違うグループが行うことはなくなるだろう。

(A) TMT 側では、GT についても話し合いをしなくてははいけませんね、というレベルでしか話題に上がっていない。(家)

(Q) SKA で背景天体をどのようにして探すのか? また redshift ( $\sim 13$ ) をどう決めるのか? (青木け)

(A) 21cm 線観測は、吸収ではなく輝線を見るもの。Redshift は強い Ly 輝線で決める。