

# 科学報告 銀河進化

竹内 努

(SKA-JP銀河進化サブWG)

1. 名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻
2. 統計数理研究所統計的機械学習研究センター

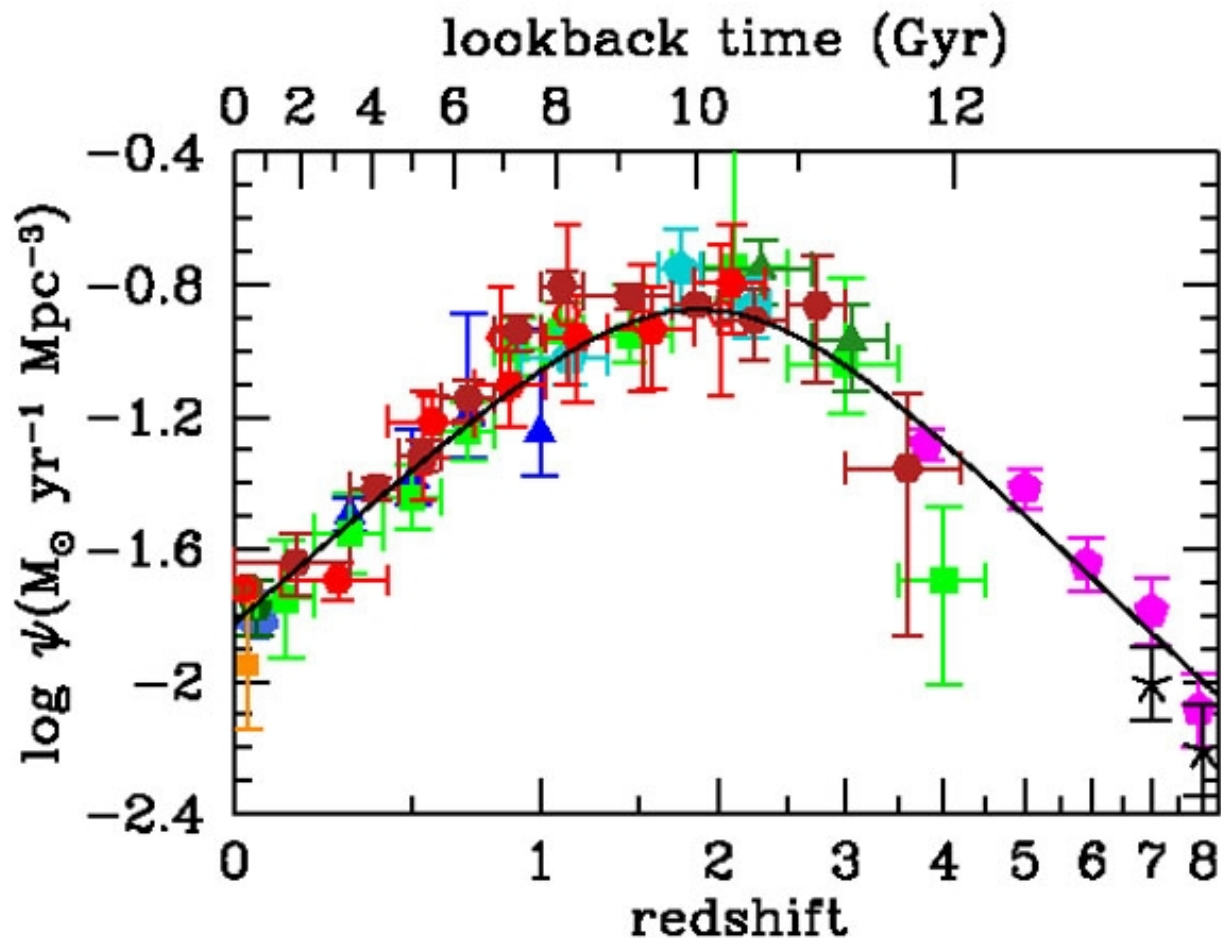
SKA-JP Science Strategy Workshop, オンライン, 2021年7月12日

# 長波長電波観測による宇宙138億年の星形成史の解明

宇宙138億年の歴史において、初代星形成から進化の進んだ複雑な現在の銀河の星形成までを単一の基準で評価できる観測量は、SKAによって革命的進展が期待される長波長電波(21cm線, 電波連続波)のみである。21cm線によって近傍宇宙では空間分解した星形成則, 中間赤方偏移では銀河活動ピークの検証, 遠方では21cm吸収線系による初期銀河の個別検証を進め, 全宇宙年齢にわたる電波連続光による独立な星形成史の決定と組み合わせ, 銀河形成進化史を統一的に解明する。

# 銀河進化研究の究極目標

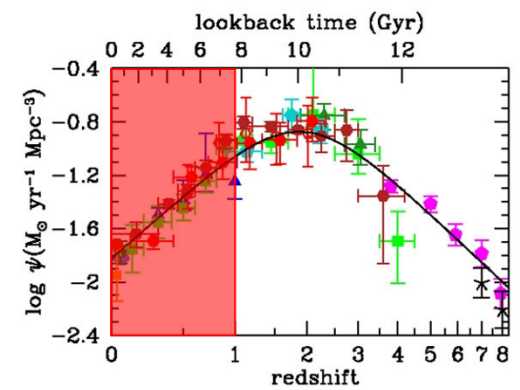
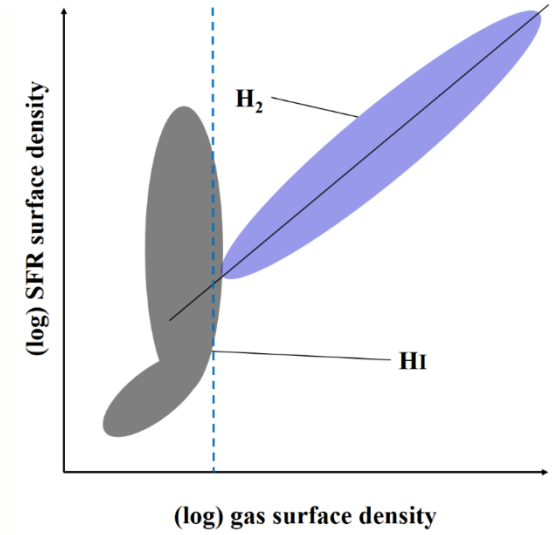
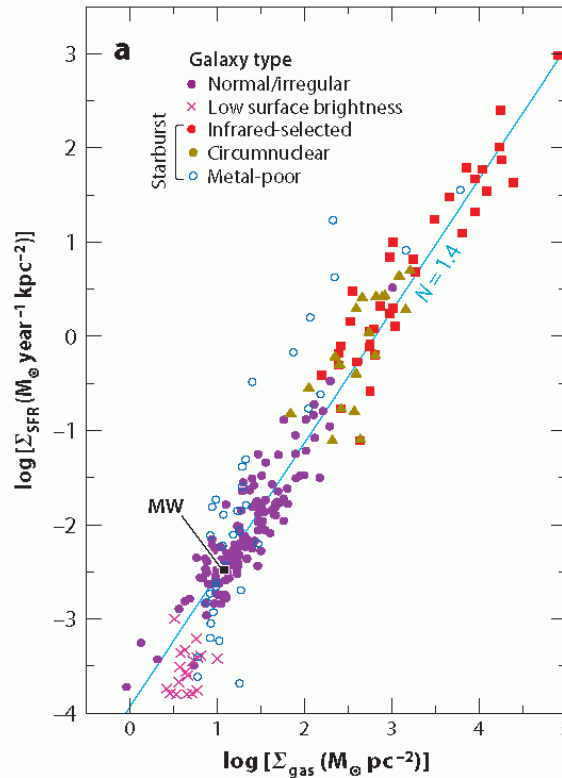
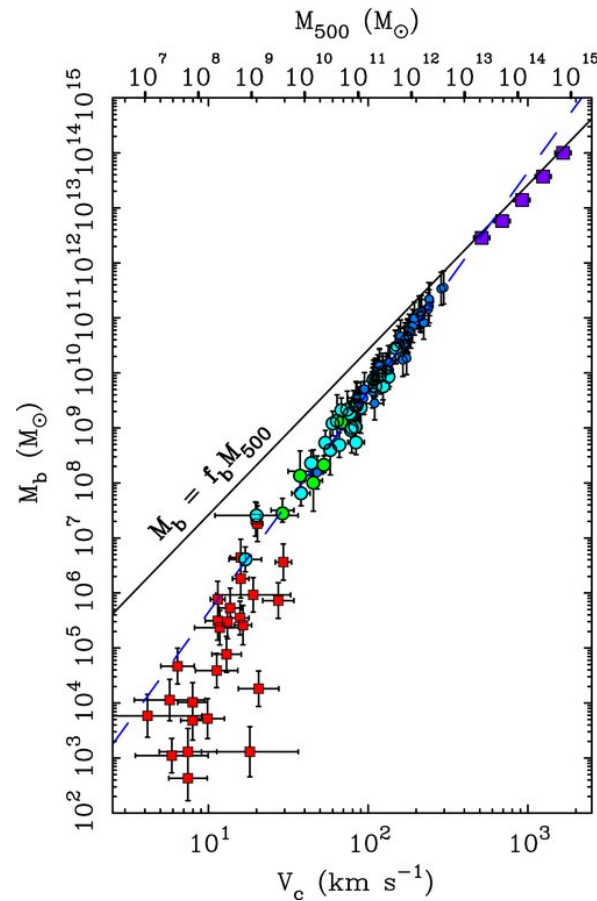
惑星系、有機物、生命の起源に繋がる、宇宙の全重元素合成の場である銀河の形成進化の全容を解明する!



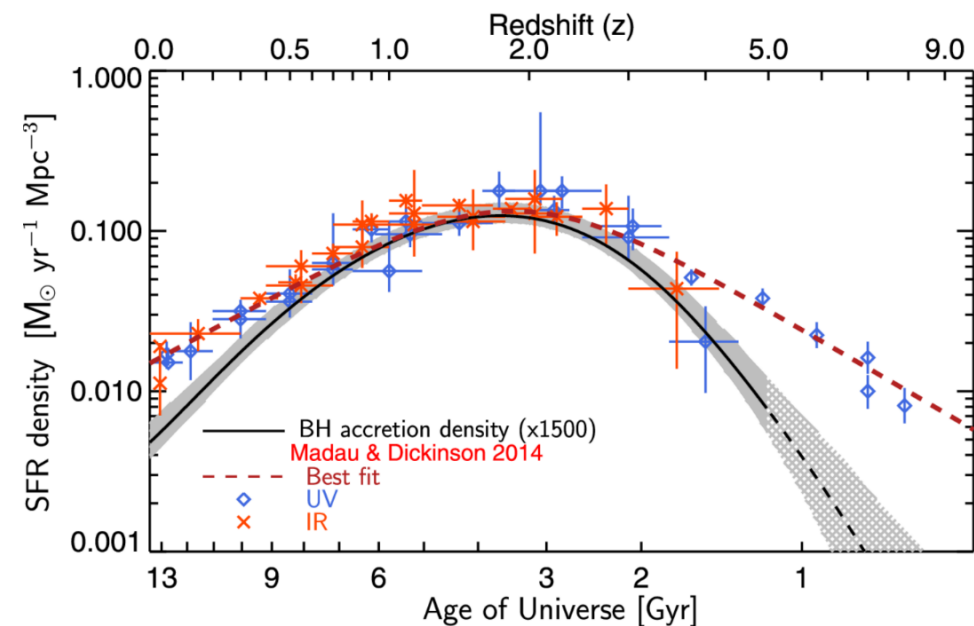
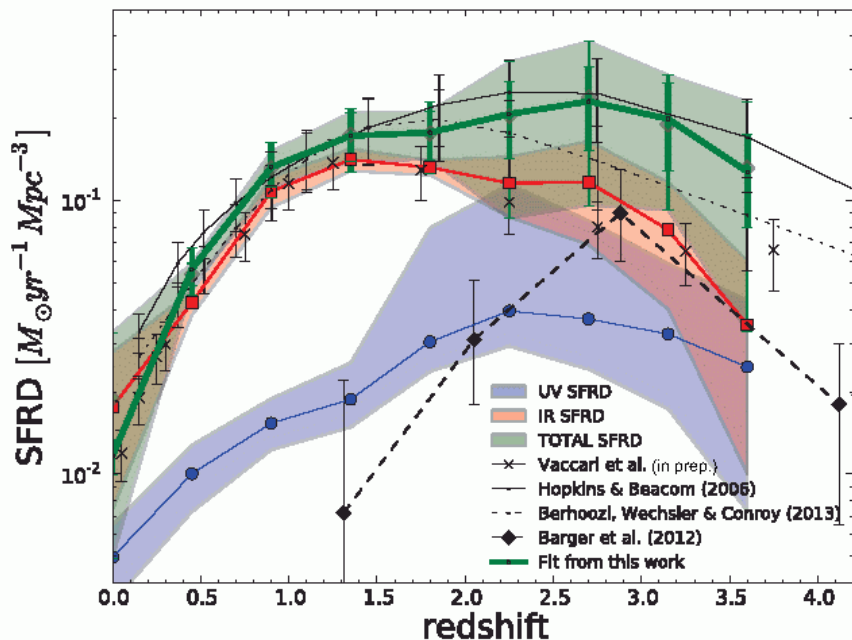
Madau & Dickinson (2014)

# 分子雲と銀河をつなぐ物理

分子雲( $\sim \text{pc}$ )スケールではみられず, 銀河スケール( $\sim \text{kpc}$ )で出現する星形成則(e.g., Takeuchi et al. 2021)



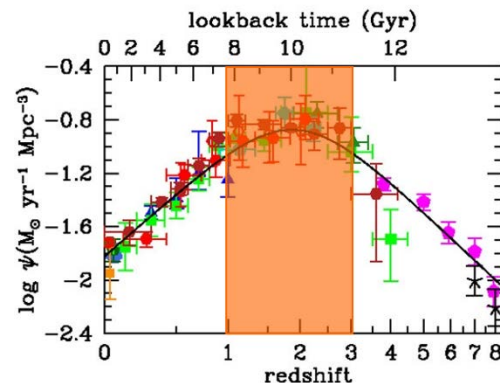
# 星形成率・銀河活動性のピーク



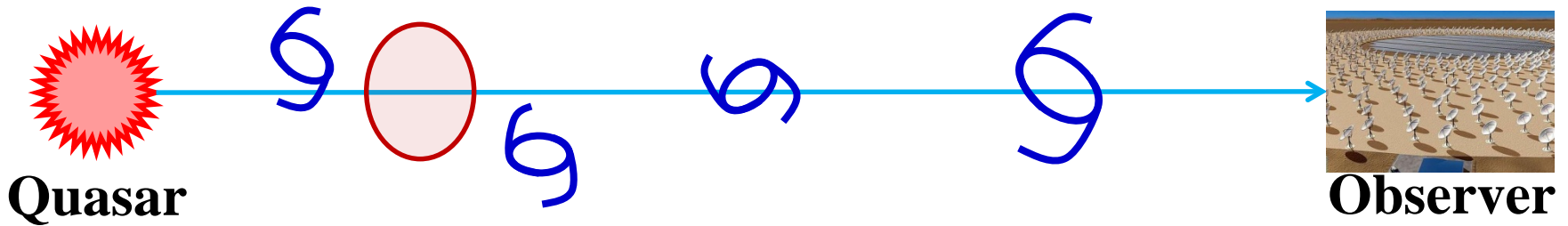
銀河が十分に成長して以降、星形成、銀河合体、形態進化、そして活動銀河核への質量降着など様々な側面でピークを迎え、激動する時期が $z = 1-2$ .

現在、この時代のHIの物理はほとんど検証できていない。

⇒ SKA1からSKA2で進展!

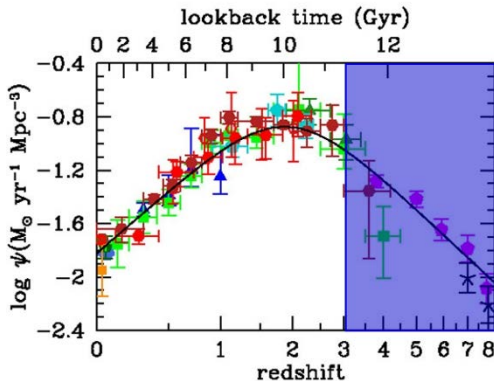


# 初代銀河の21cm吸収線系による検証



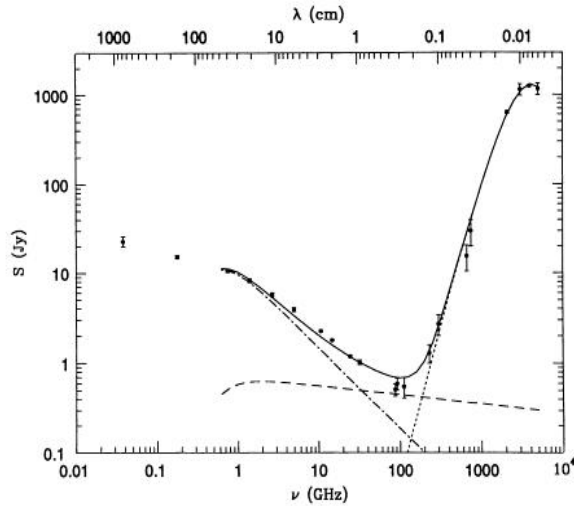
初代星形成後，銀河が形成される時期．宇宙再電離期の電離光子源の有力候補が形成直後の銀河や初期の活動銀河核であり，再電離の物理と密接に関係．宇宙論的検証にも使える．

銀河になる前のHIの検証法は活発に議論されているが，個別天体のHIの観測は極端に難しく，議論も限定的！

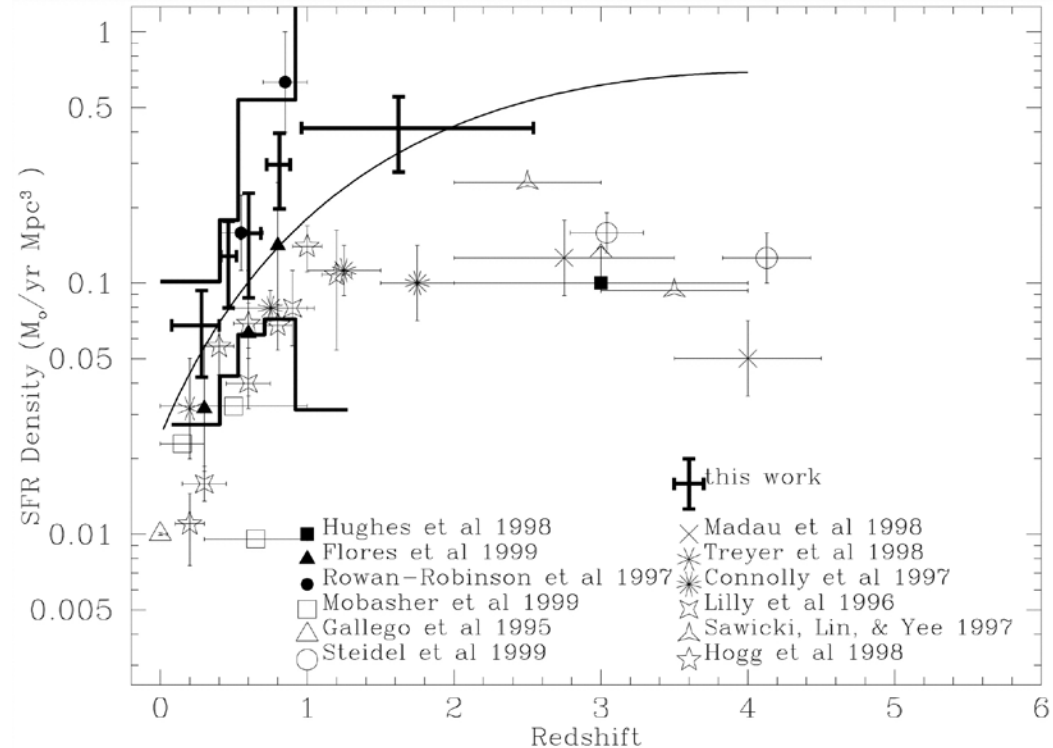
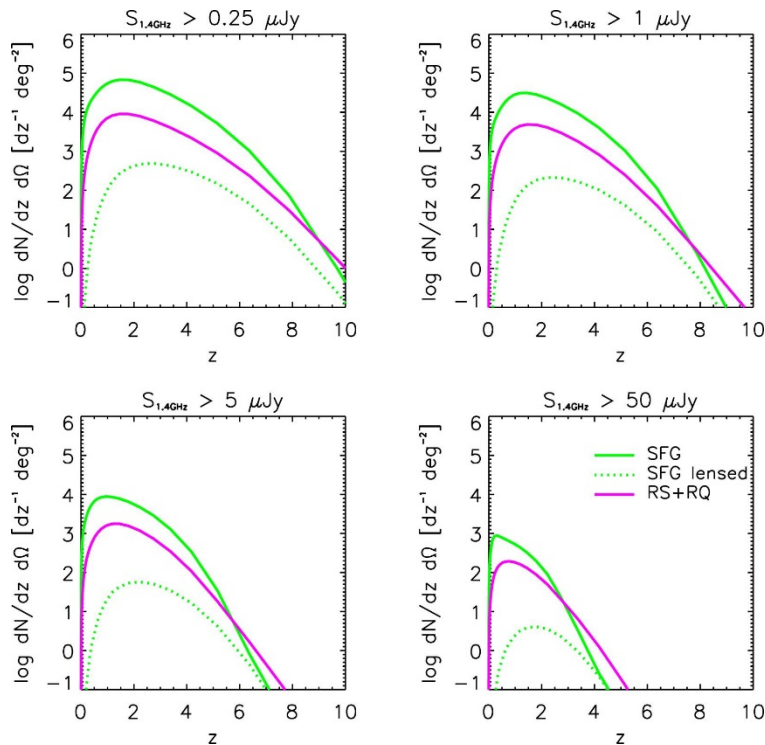


⇒ SKA2による21cm吸収線系を用いた観測！

# 長波長電波連続波による全宇宙年齢星形成史の決定



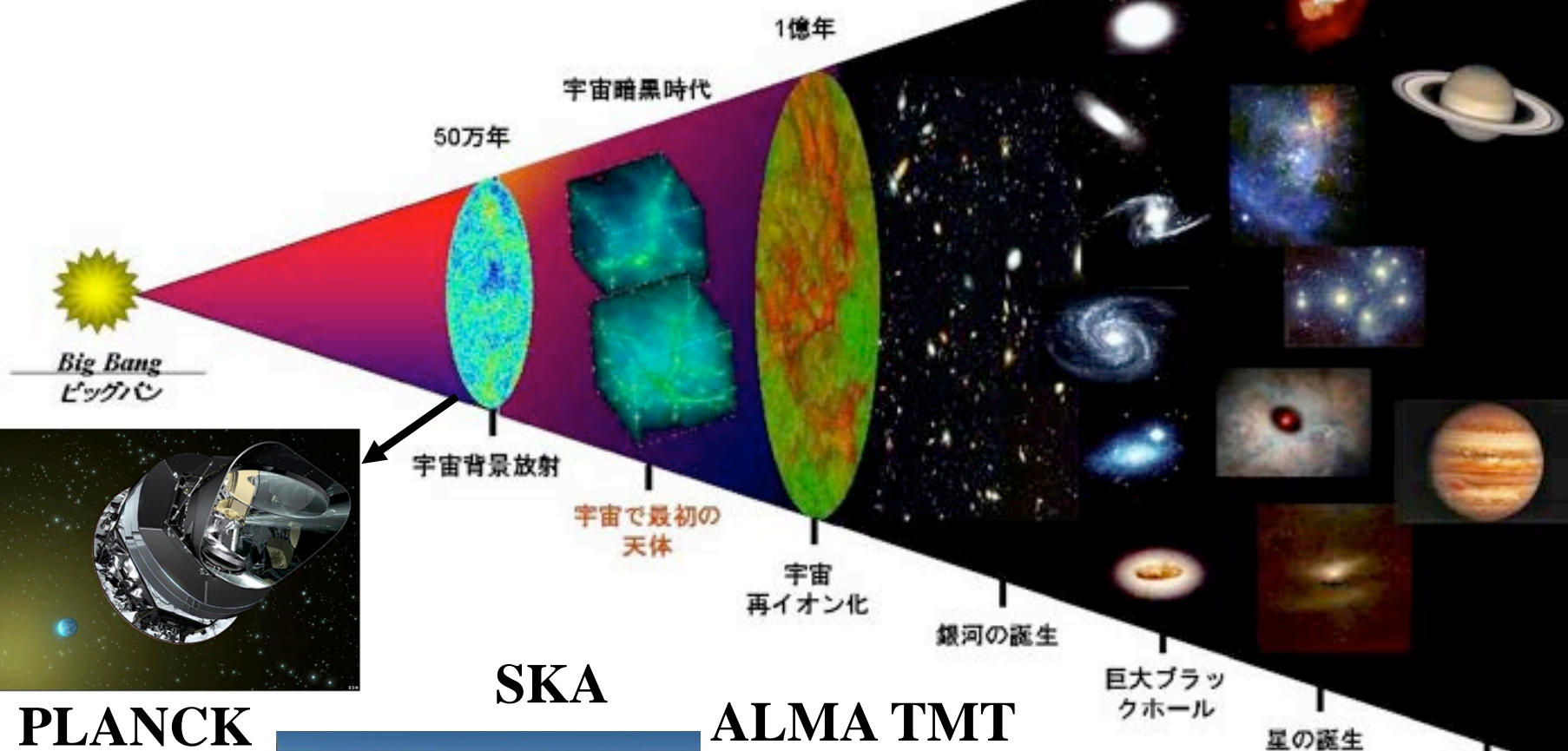
電波連続波によって、 $z = 0-10$ までの銀河の星形成が同一の均一な観測から求められる。



# 1 長波長電波で見る銀河進化

## 1.1 多波長で探る宇宙史

筑波大学宇宙理論  
研究室HPより



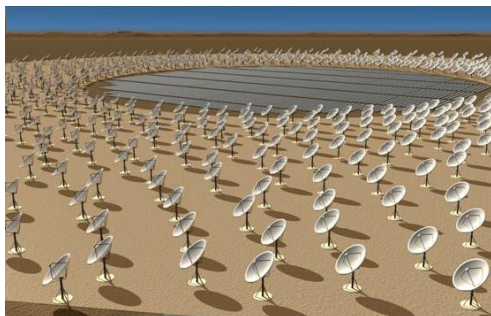
PLANCK

SKA

ALMA TMT

巨大ブラックホール

星の誕生

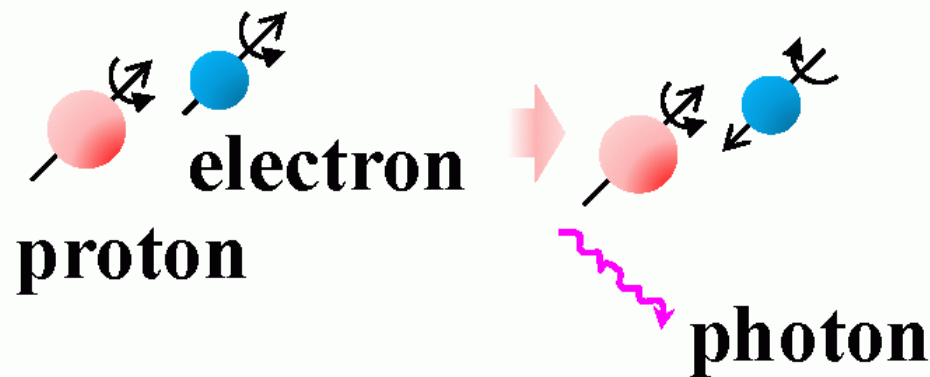




## 1.2 長波長ならではの銀河の観測量

### 中性水素(HI) 21 cm 線

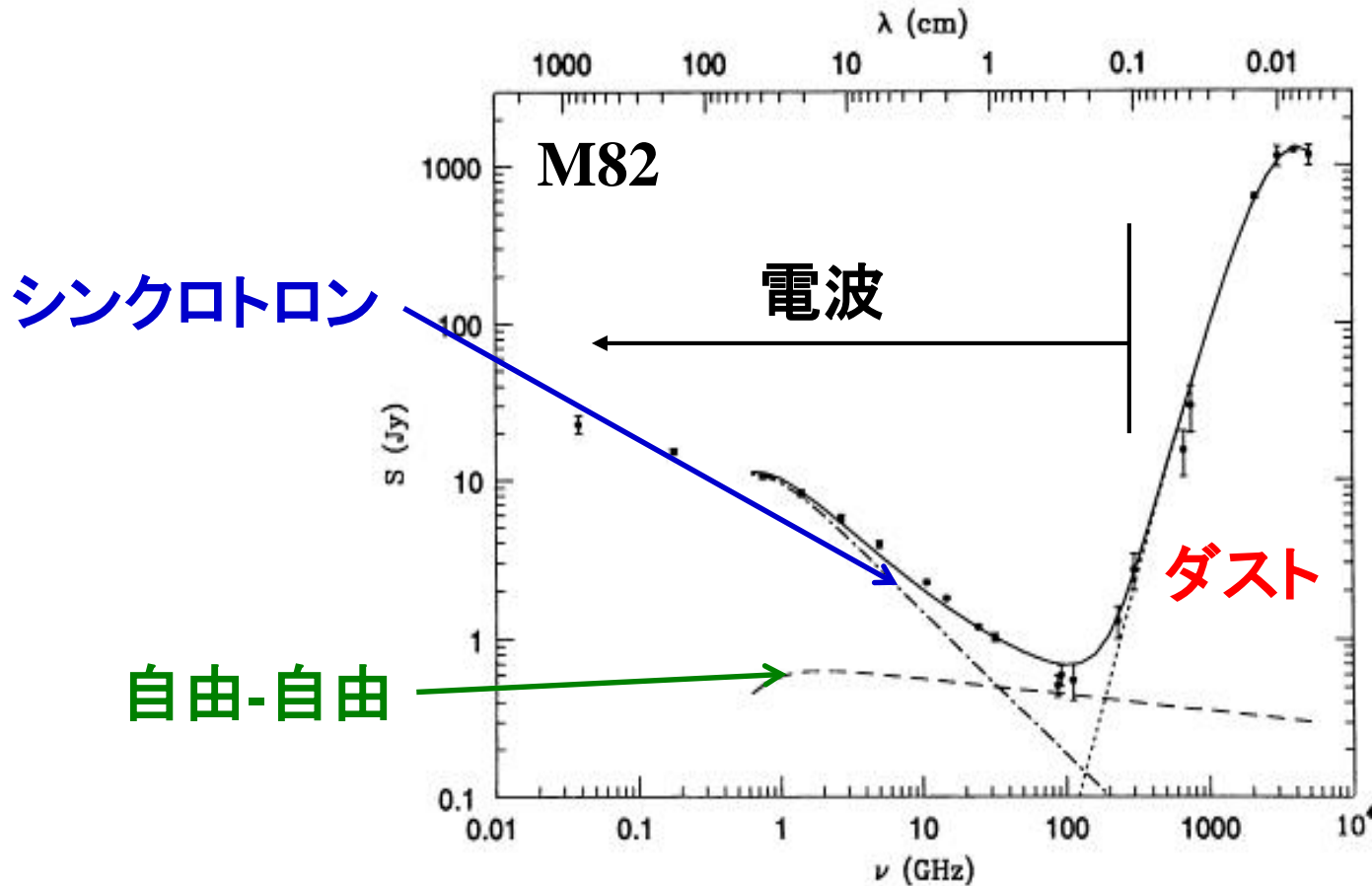
水素の原子核(陽子)と電子のスピンの平行と反平行の状態エネルギーが異なり, その状態間の遷移が起きるとエネルギー差(超微細構造)に対応する波長21cmの電波が放射される。



1個の水素原子でこの遷移が生じる頻度は**10<sup>7</sup>年に1回**と非常に低い, 宇宙に存在する水素の量が莫大なため観測できる。

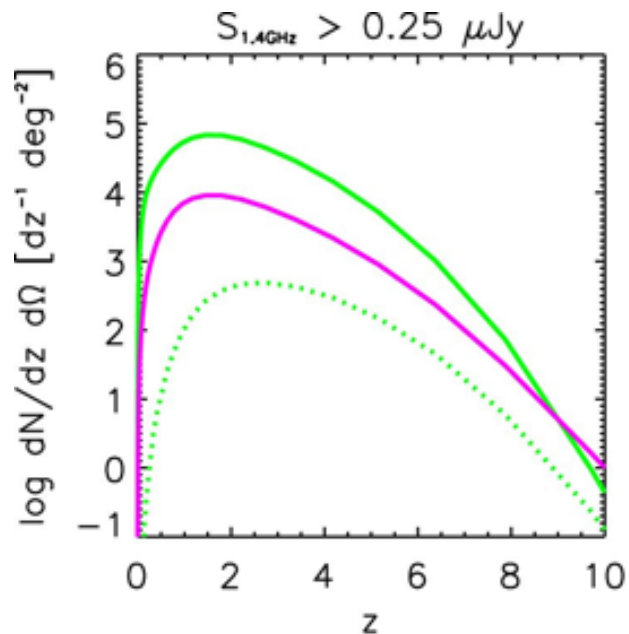
# 電波連続波

自由電子が他の荷電粒子や磁場によって加速度を受けて放射する電磁波. 広い波長域の電磁波が放射されるが, 銀河では特に長波長電波領域で支配的. **星形成や活動銀河核活動の指標.**

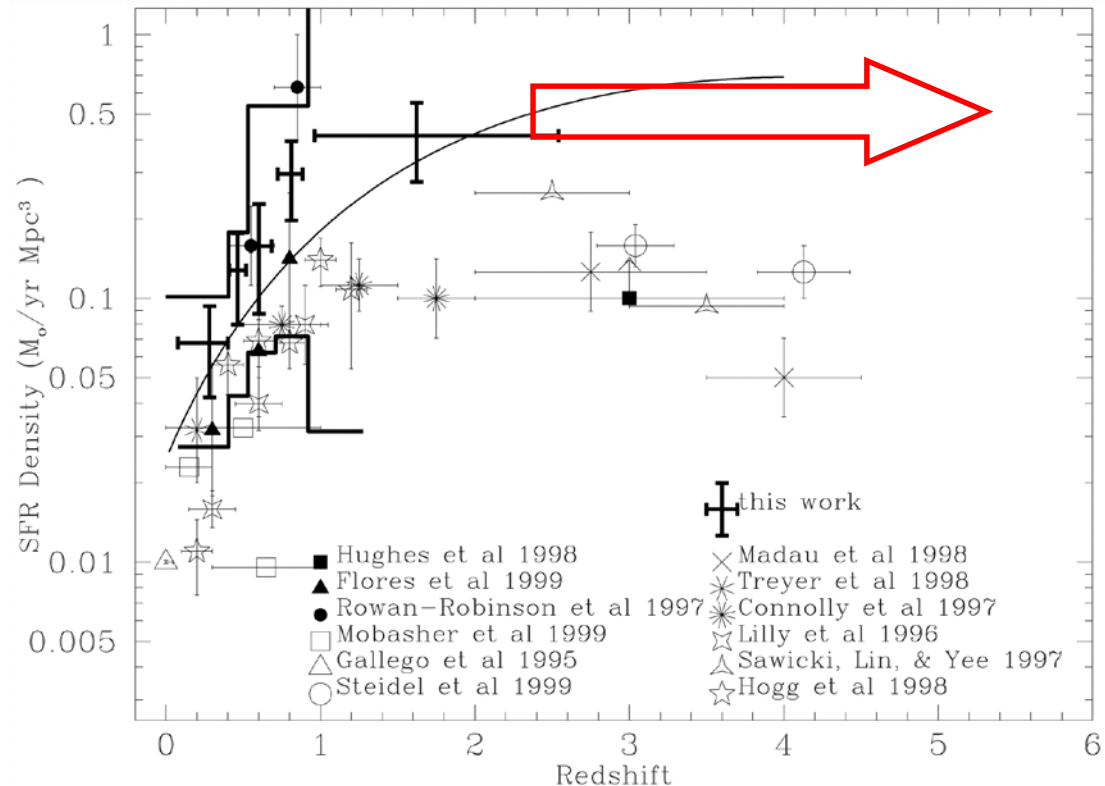


Condon (1992)

# 電波連続波



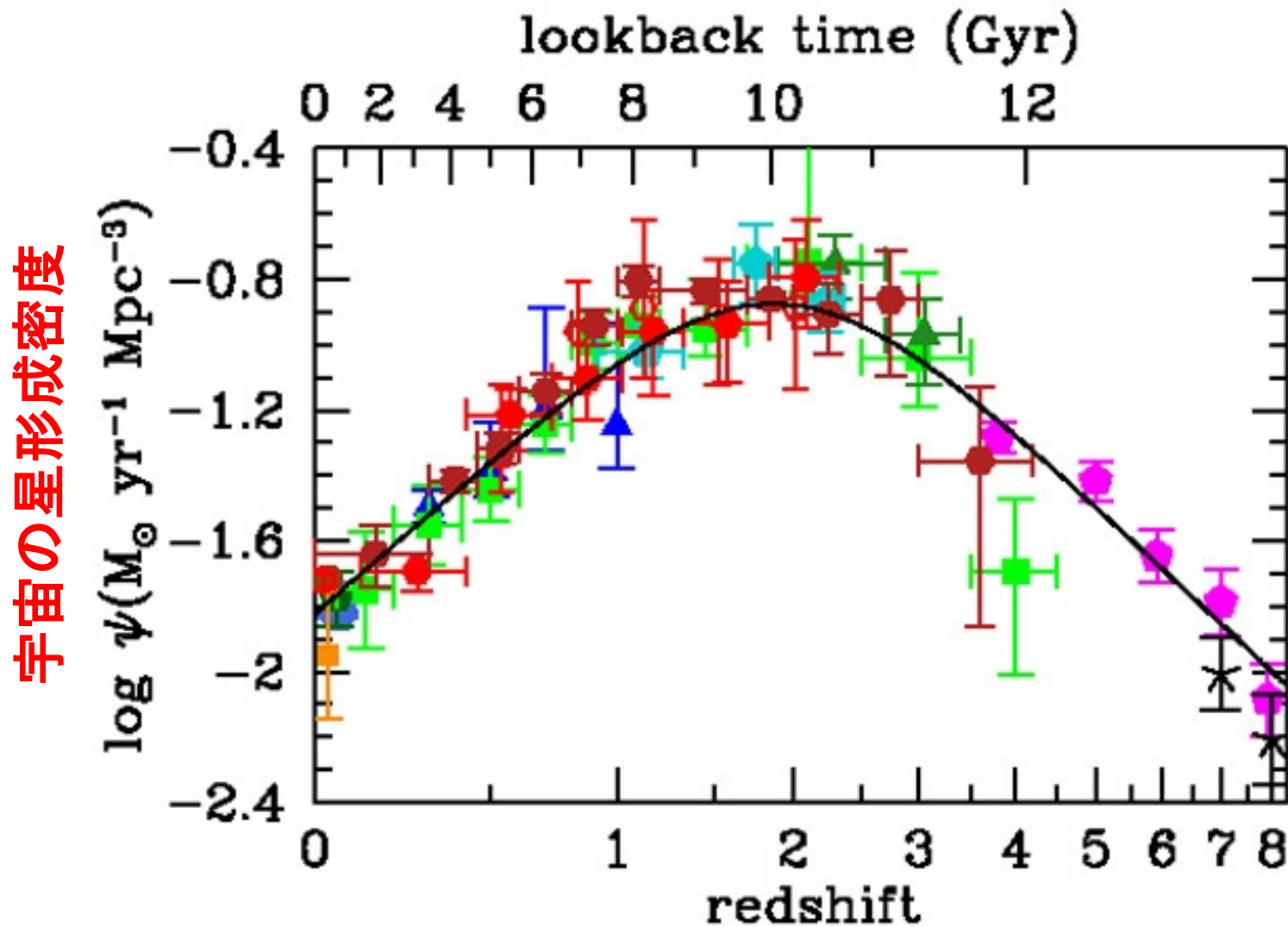
Mancuso et al. (2017)



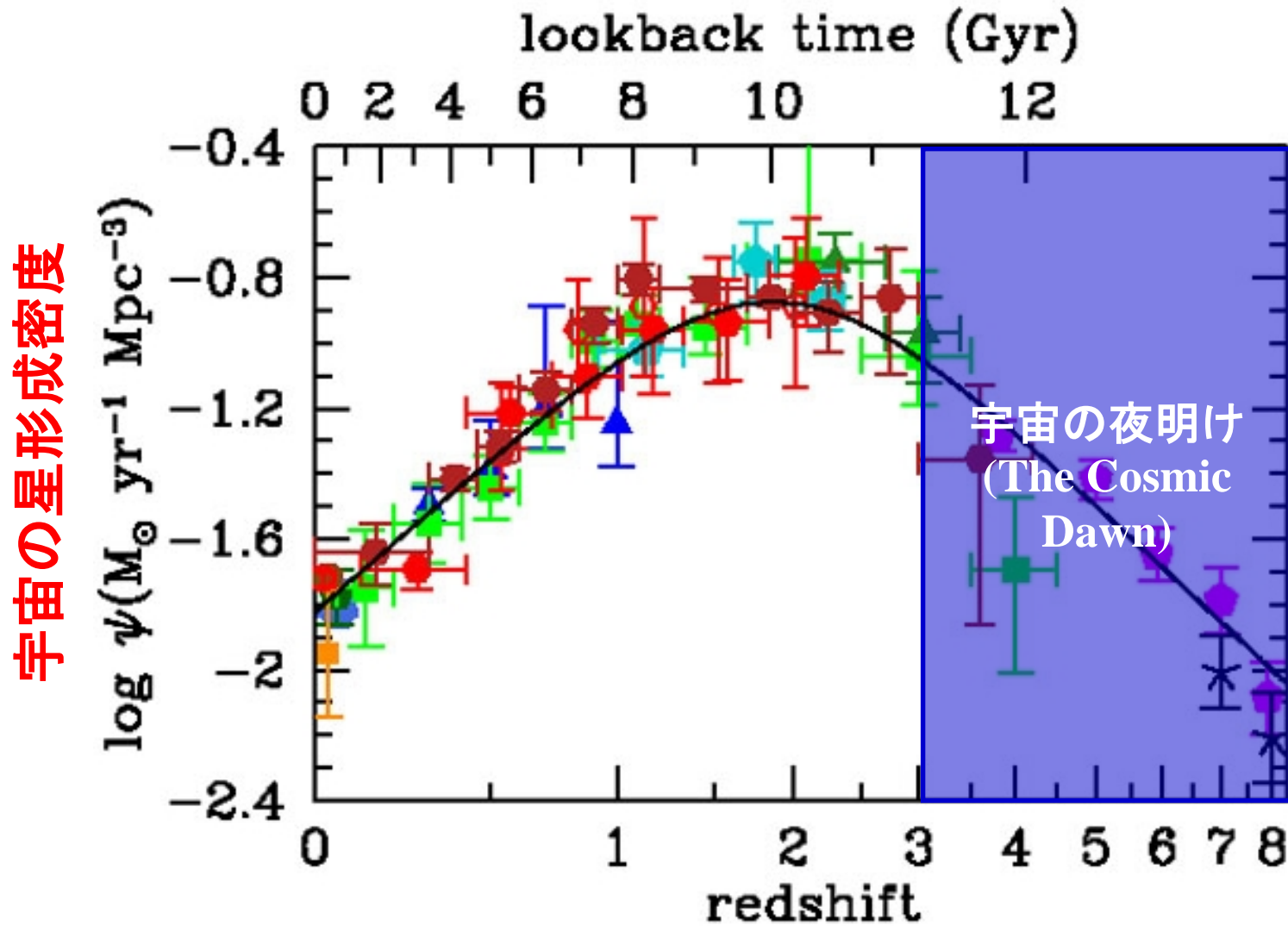
Haarsma et al. (2000)

近傍宇宙からCosmic Dawnまで、銀河の星形成を統一された基準で測定できる唯一の観測量! MWAによる予備研究を進めている(Takeuchi et al. 2021b).

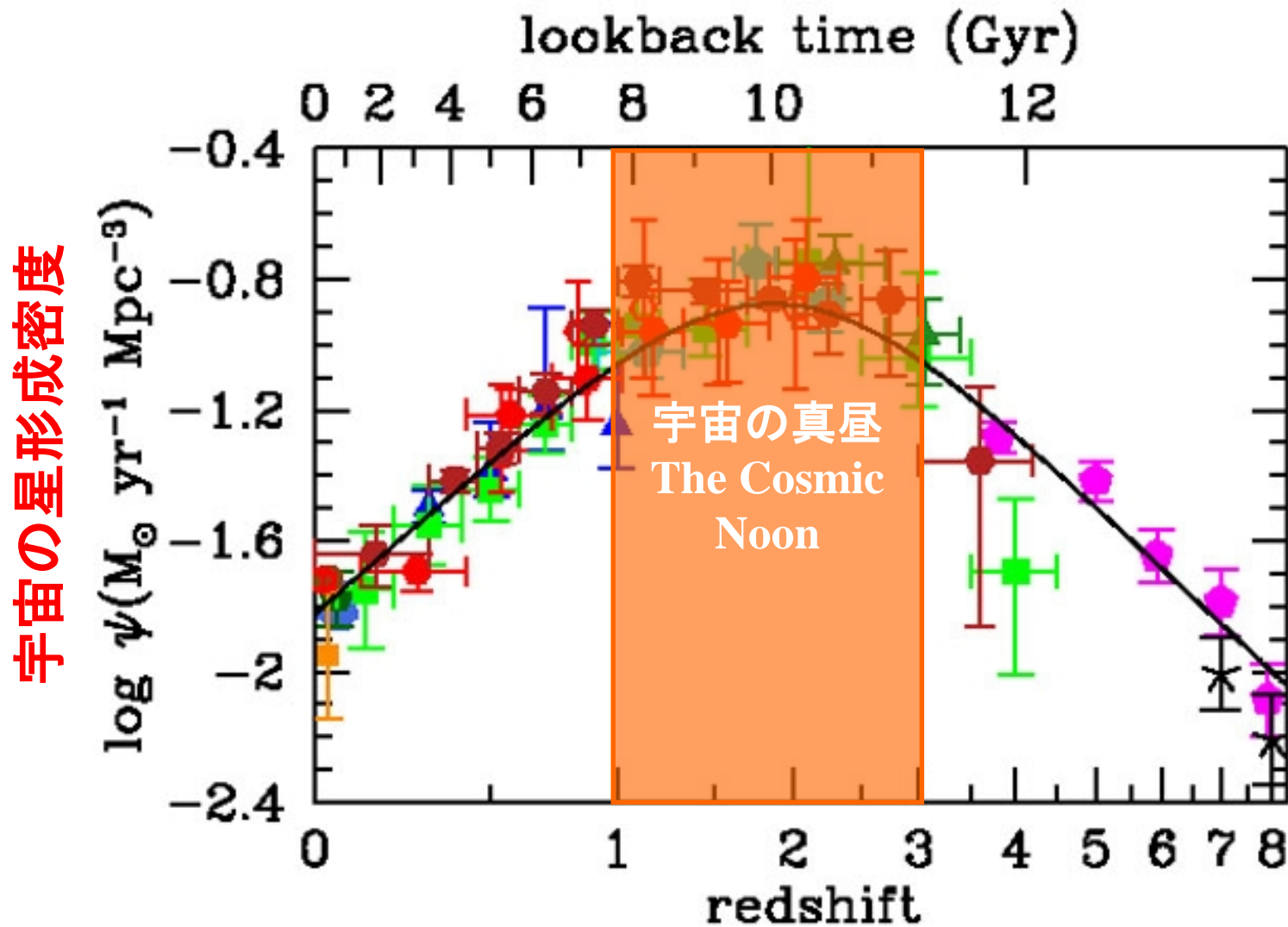
# 1.3 宇宙の星形成史



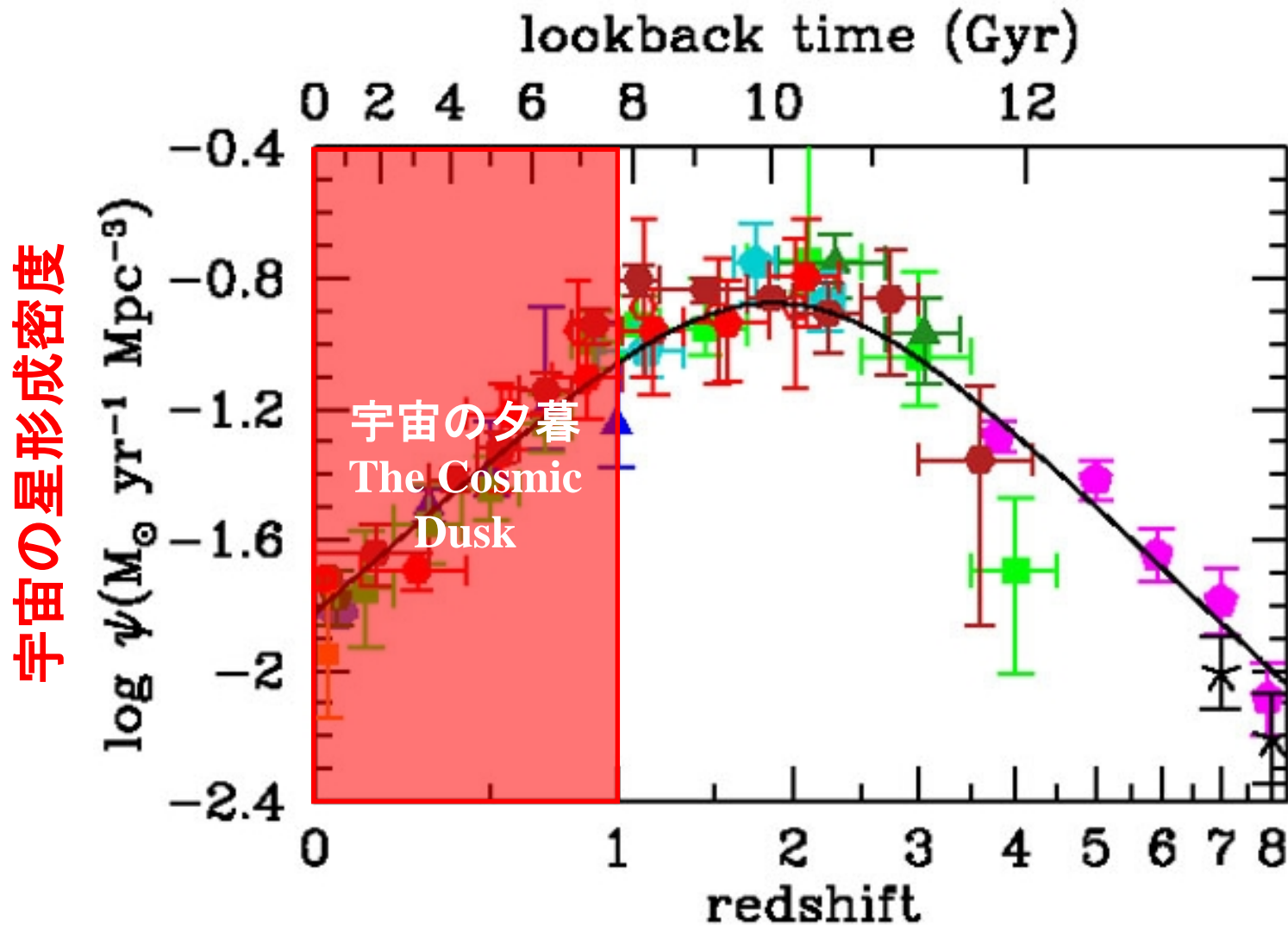
# 1.3 宇宙の星形成史



# 1.3 宇宙の星形成史

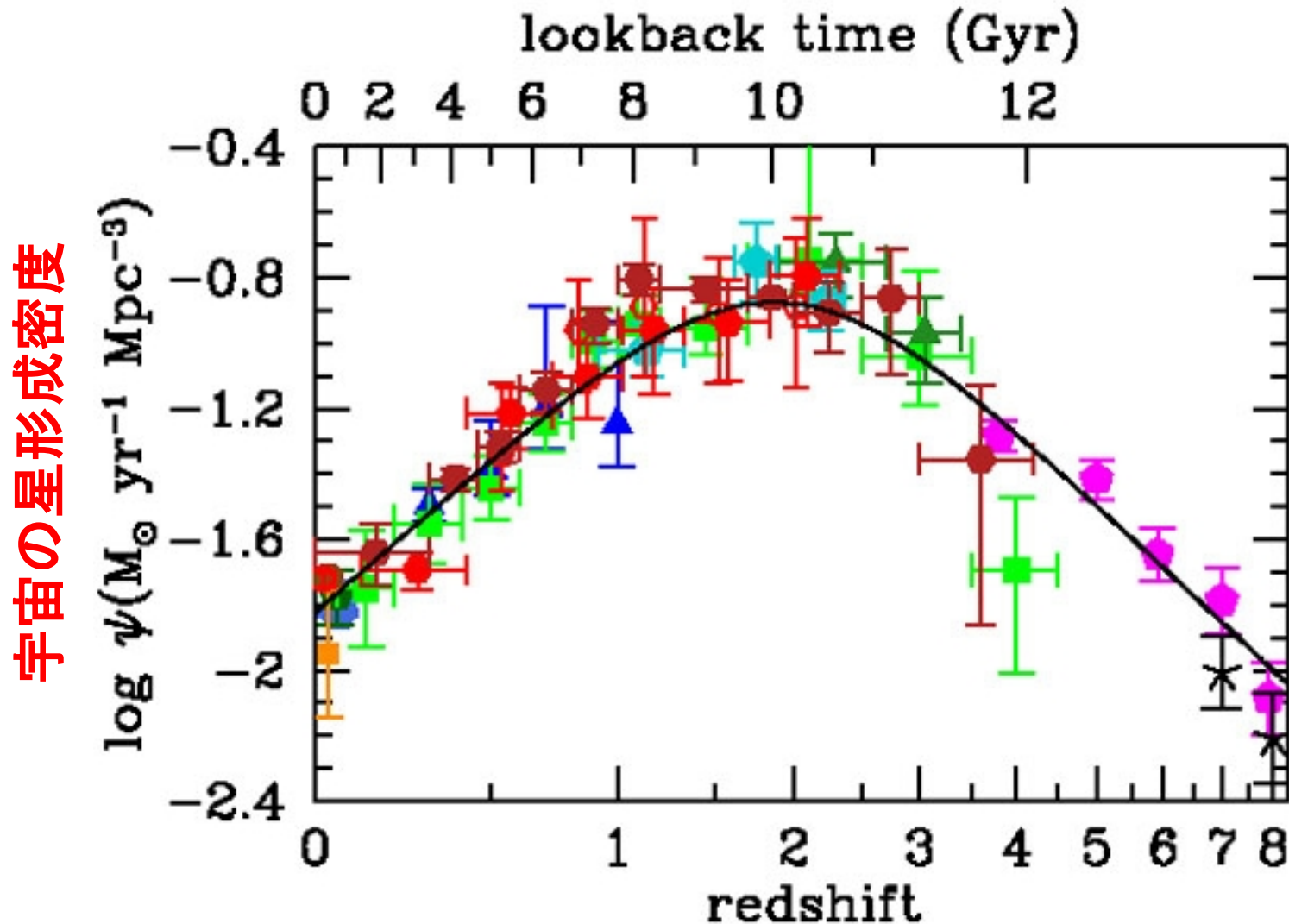


# 1.3 宇宙の星形成史



# 1.3 宇宙の星形成史

このような星形成史が出現する原因は分かっていない!

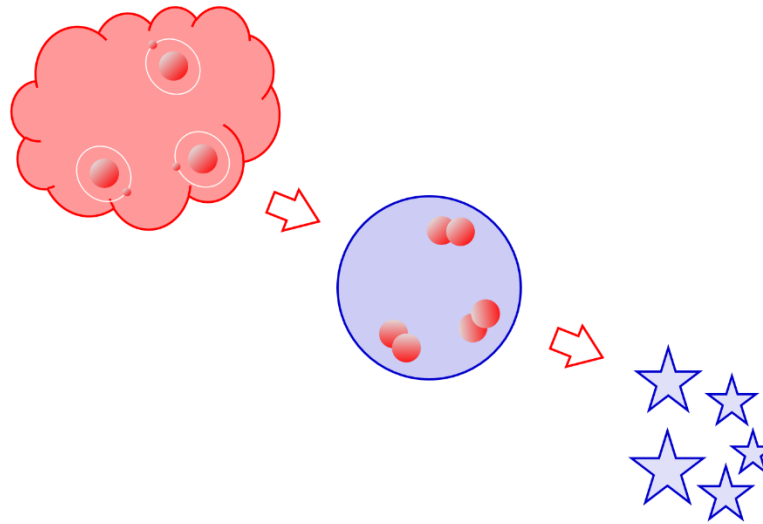




## 2 銀河進化の課題とSKA

### 2.1 ガスから星へ

星形成とはガスから星への遷移

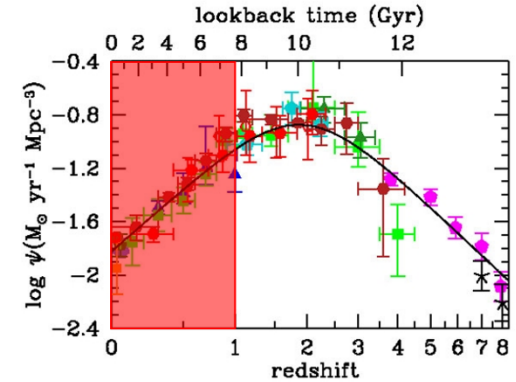


原子ガスから分子ガスを経て星が形成!

原子ガス(HI)の観測は近傍( $z < 0.3$ )のみ!

⇒ SKA1によって一気に進展が期待される。

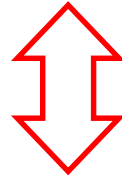
(⇔ 分子ガス観測は $z \sim 10$ まで届いている)



## 2.2 分子雲と銀河をつなぐ物理

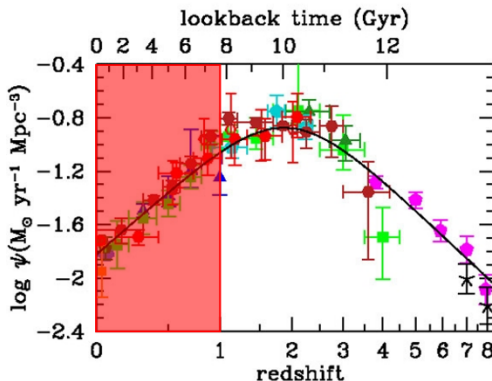
分子雲( $\sim \text{pc}$ )スケールではみられず, 銀河スケール( $\sim \text{kpc}$ )で出現する星形成則(e.g., Takeuchi et al. 2021)

分子雲内の質量密度 $\rho$ は星形成率と無関係



銀河内の分子雲の数密度は星形成率と比例

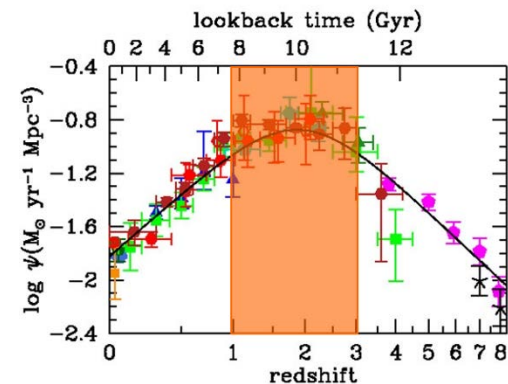
メソスケール(中間スケール: 100 pc-1 kpc)の物理が必要.



⇒ SKA1で大きく進展!

## 2.3 星形成率のピーク

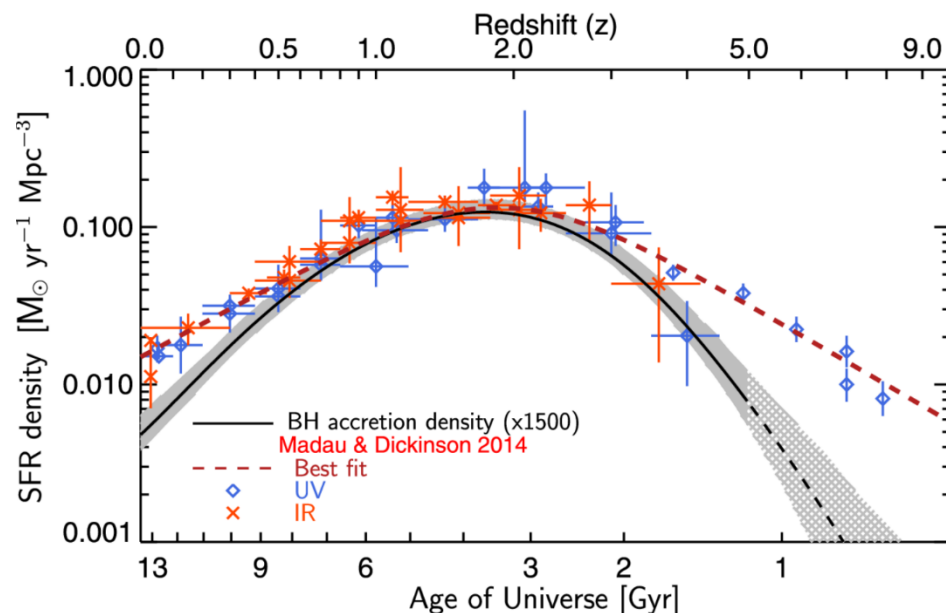
銀河が十分に成長して以降、星形成、赤外線銀河数、銀河合体、形態進化、そして活動銀河核への質量降着など様々な側面でピークを迎え、激動する時期が $z = 1-2$ .



現状ではこの時代のHIの物理はほとんど検証できていない。

⇒ SKA1からSKA2で進展!

活動銀河核の質量降着率と星形成史の比較(Aird et al. 2015).



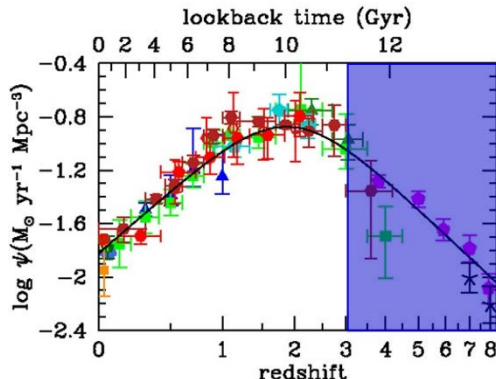
## 2.3 銀河形成前夜から初代銀河へ

初代星形成後, 銀河が形成される時期が $z \sim 20-6$ .

宇宙再電離期における電離光子源の有力候補が形成直後の銀河や初期の活動銀河核であり, 再電離の物理と密接に関係.

しかし, 銀河になる前のHIの検証法は活発に議論されているが, 個別天体のHIの観測は極端に難しく, 議論も限定的!

⇒ SKA2による観測の可能性あり!



個別天体の電波連続波観測は有望!

⇒ SKA1から2へ!

# 3 SKAによる銀河進化補完計画

## 3.1 HI質量関数とその進化

今日のHI銀河サーベイは浅く(> mJy), 角分解能も悪い.

The HI Parkes All Sky Survey (HIPASS)

The HI Jodrell All Sky Survey (HIJASS)

The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey (ALFALFA)

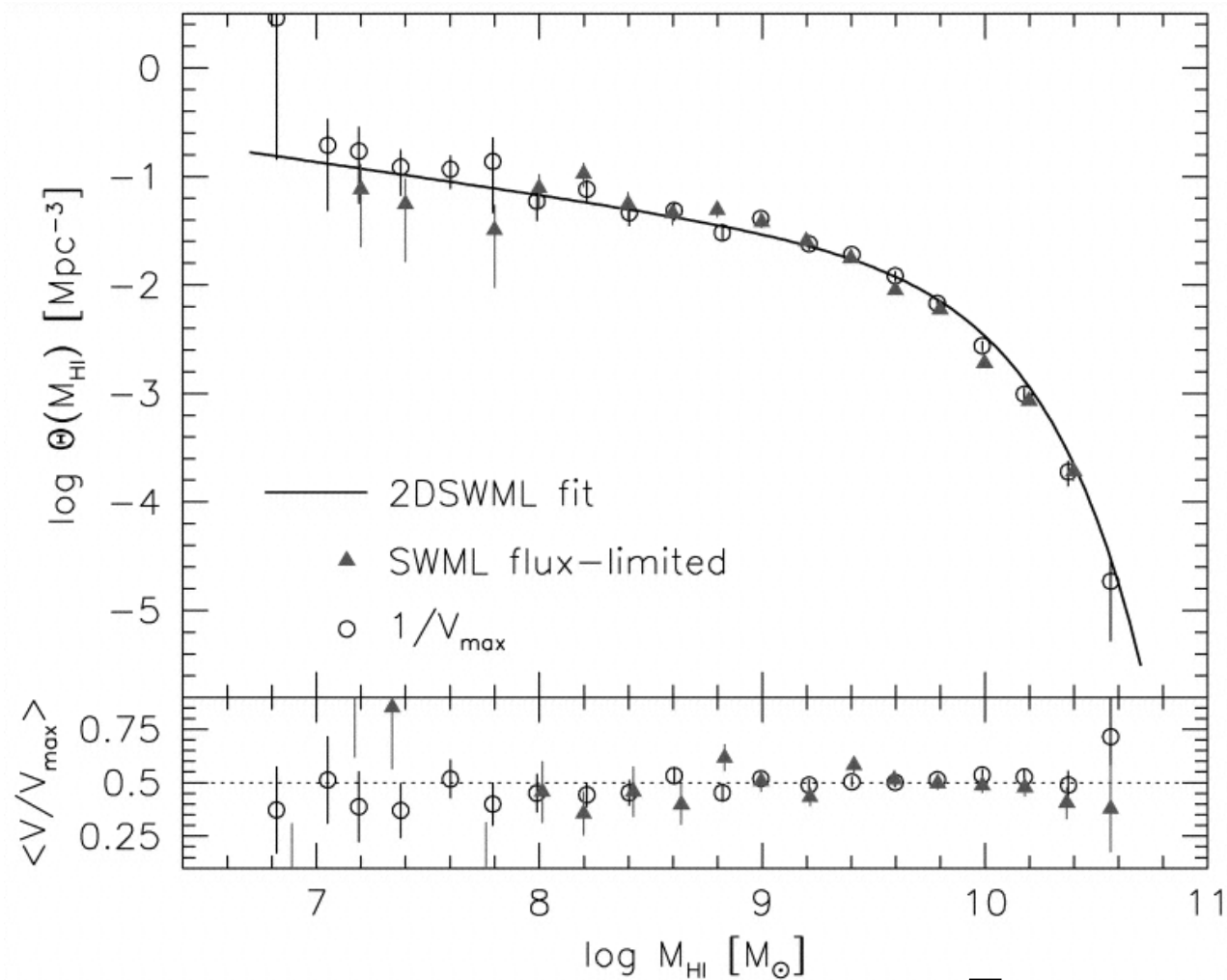
etc.

$\langle z \rangle \sim 0.01-0.06$

$z < 0.5$ での研究は極めて限定的(Kanekar et al. 2016;  
Fernández et al. 2016)

進化の研究は現状ではほぼ不可能!

# 近傍銀河のHI質量関数(HIPASS)

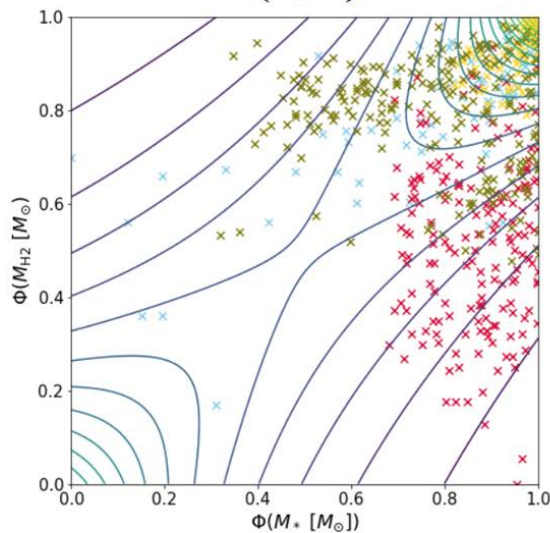


Zwaan et al. (2003)

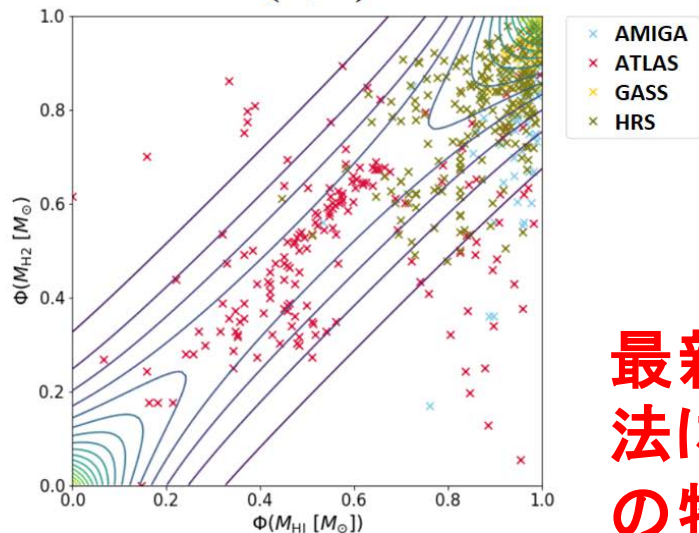
SKA1によってHI質量関数の進化研究は確実に可能!

# 近傍銀河の原子ガス-分子ガス-星質量関数の構築と推定

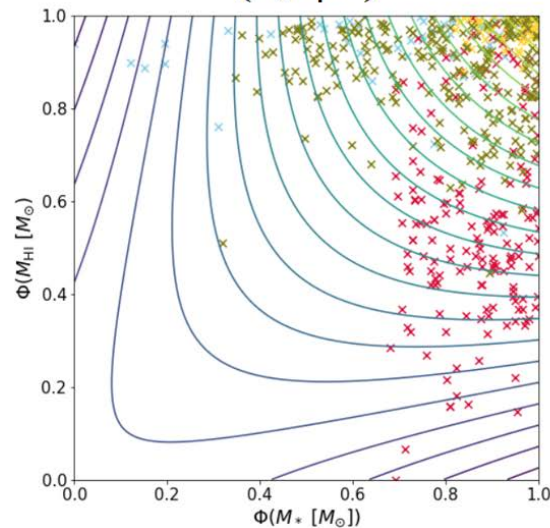
(3, 1)



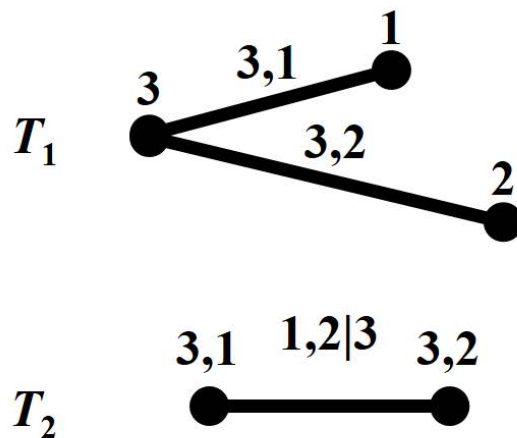
(3, 2)



(2,1|3)



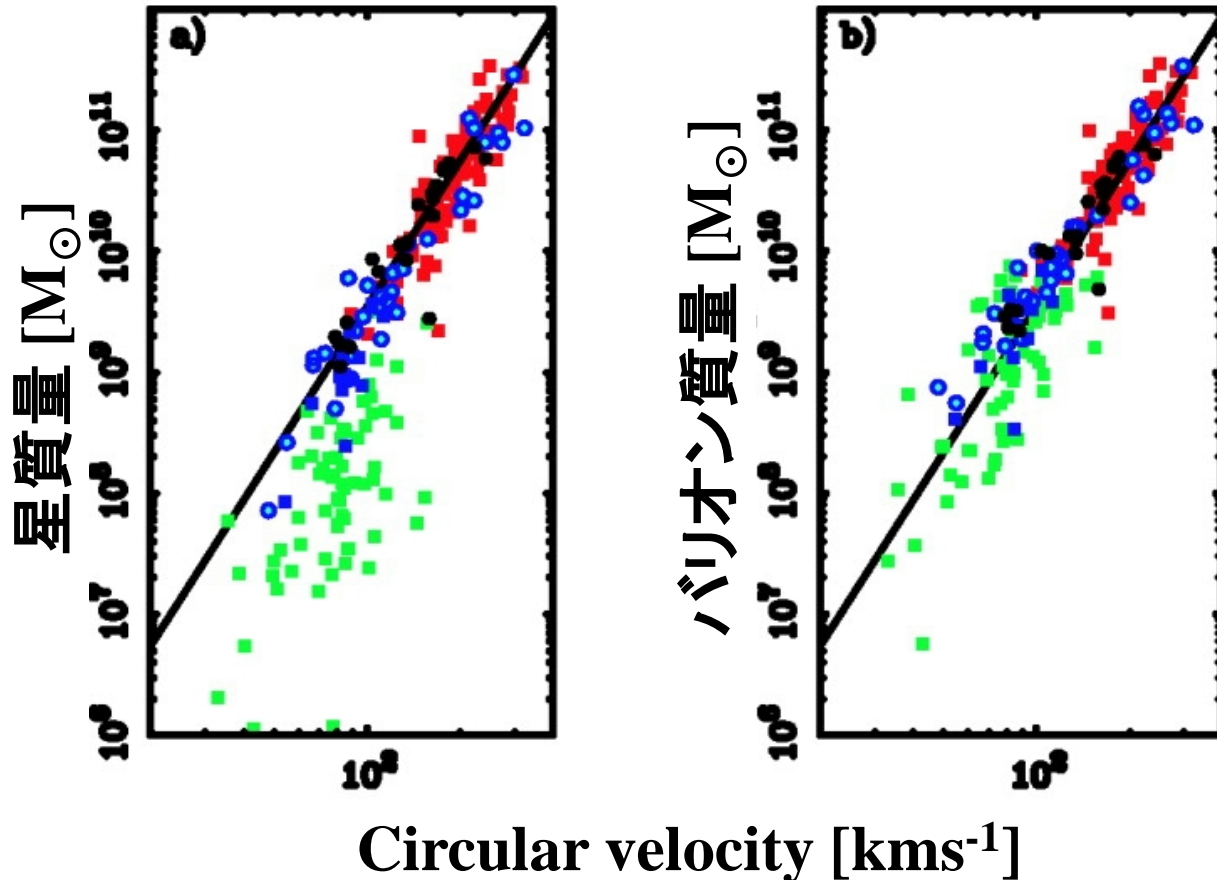
最新のデータ科学的方法により、SKAおよび他の物理量との相関構造の定量化が厳密に可能.



Takeuchi & Kono (2020)

## 3.2 銀河のガスを含むスケーリング則とその進化

### Baryonic Tully-Fisher (BTF) relation

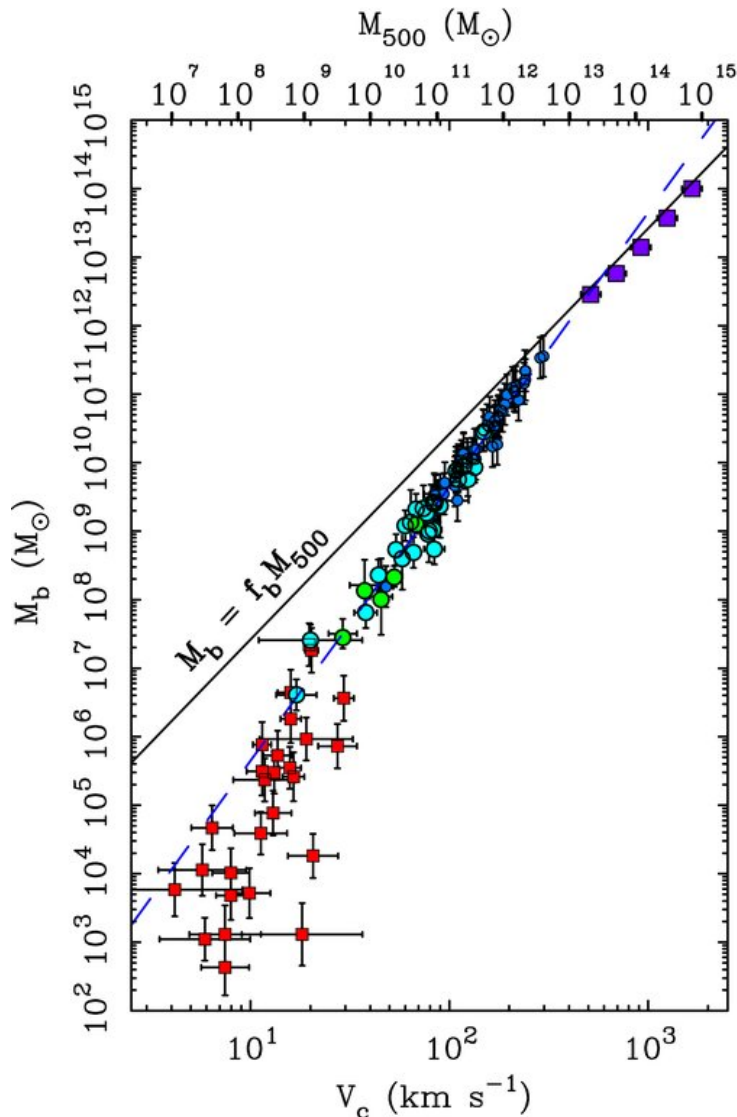


$$M_B \propto V_C^\alpha$$
$$\alpha = 3.98 \pm 0.12$$

HIを考慮してバリオン質量でTully-Fisher関係を評価すると、線型性が回復する(McGaugh et al. 2000).



# 「拡張」BTF関係



拡張されたBTFでは、矮小楕円体銀河、通常銀河、銀河団の順に速度-バリオン質量関係の Slope が浅くなる

⇒ Feedback の効果?

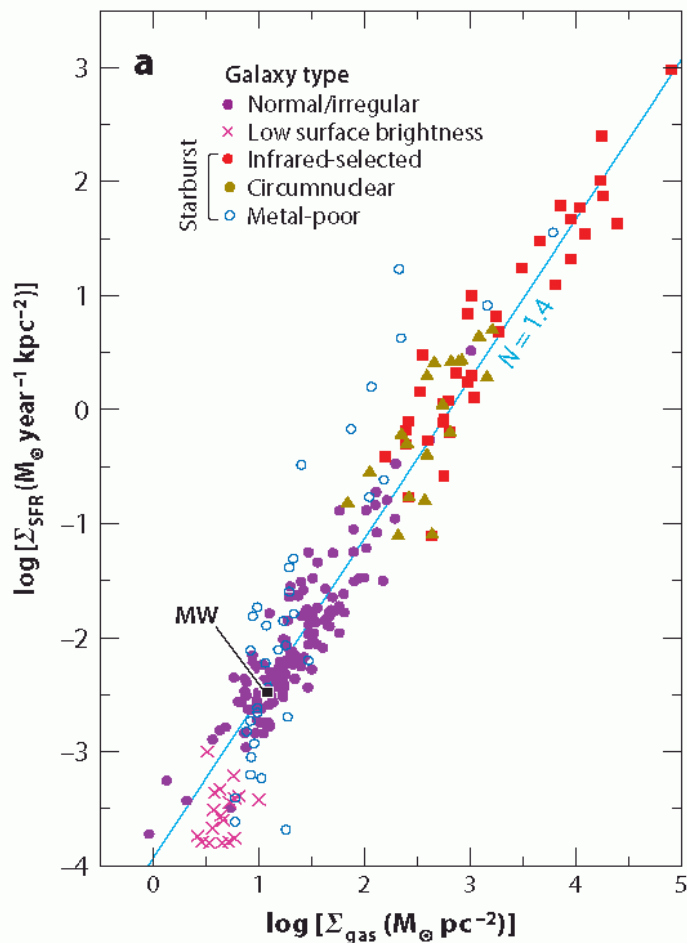
しかし、現状ではガスリッチな矮小銀河がサンプルから漏れている。

SKAによる大サンプルによって解決!

McGaugh et al. (2010)

## Kennicutt-Schmidt (K-S)則

単位面積当たりのガス密度と星形成率密度の関係は  
**Kennicutt-Schmidt則**として知られている。



古典的なK-S則は星形成率とガス  
(HI+H<sub>2</sub>)の**面密度の平均値**の間の  
関係。

**Kennicutt & Evans (2012)**

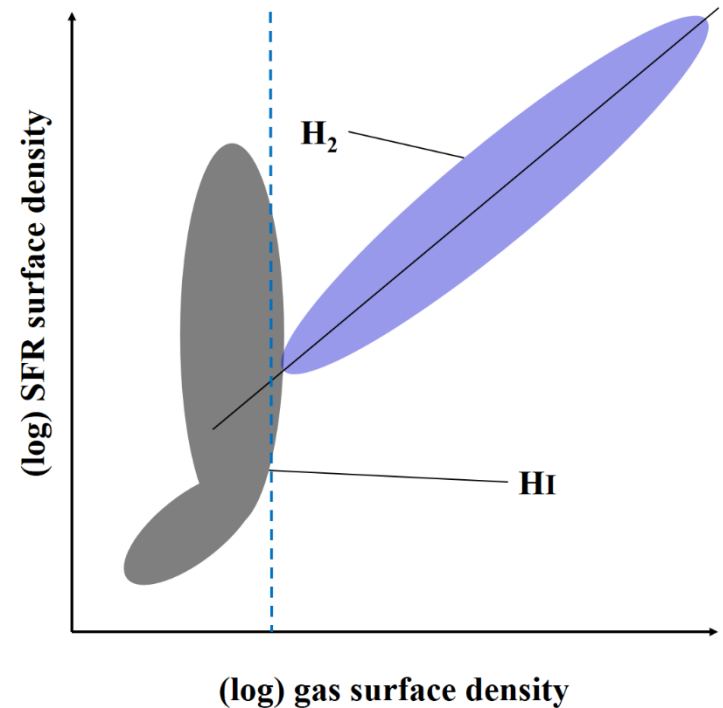
## 空間分解したK-S則

平均値ではなく空間分解した各点のK-S則から、HIとH<sub>2</sub>の2つの系列が足されて傾きが決まっていることが明らかになった(Bigiel et al. 2008).

この関係の進化を議論するためには、HIの観測もCO観測と同様、 $1 < z < 2$ まで届く必要がある。

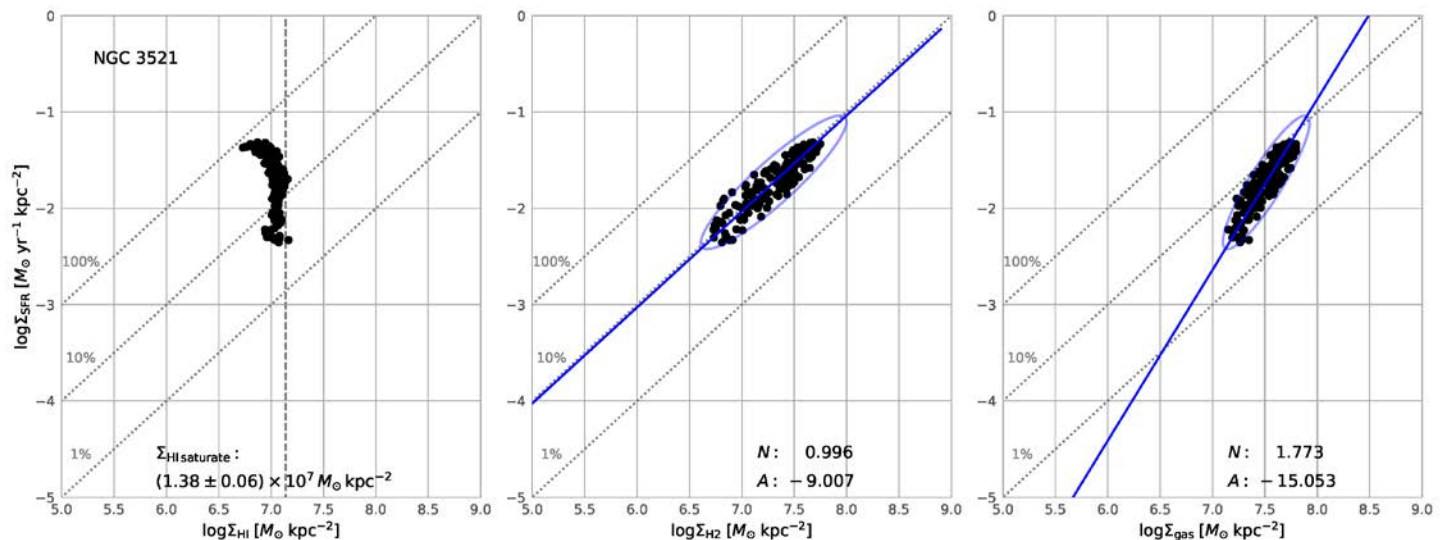
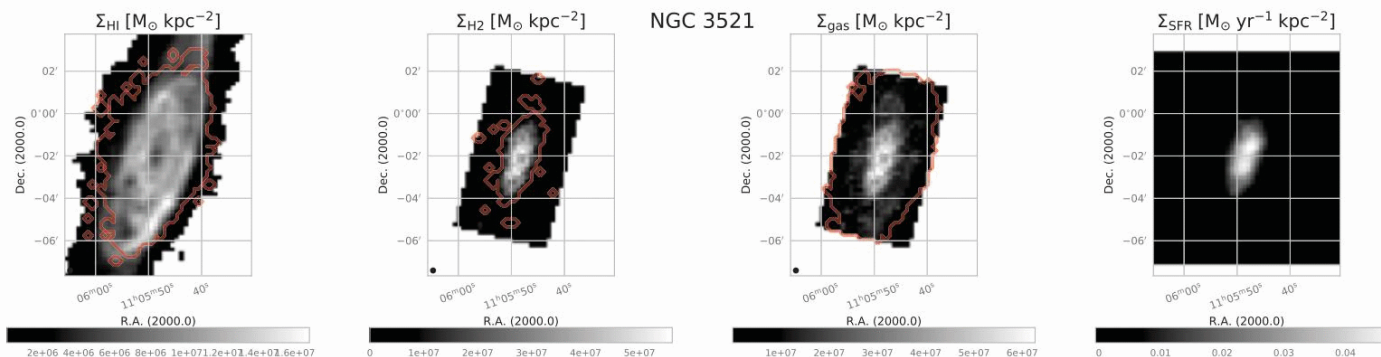
⇒ SKA1からSKA2

分子観測とのシナジーも重要!



Takeuchi et al. (2021)

# 空間分解したK-S則



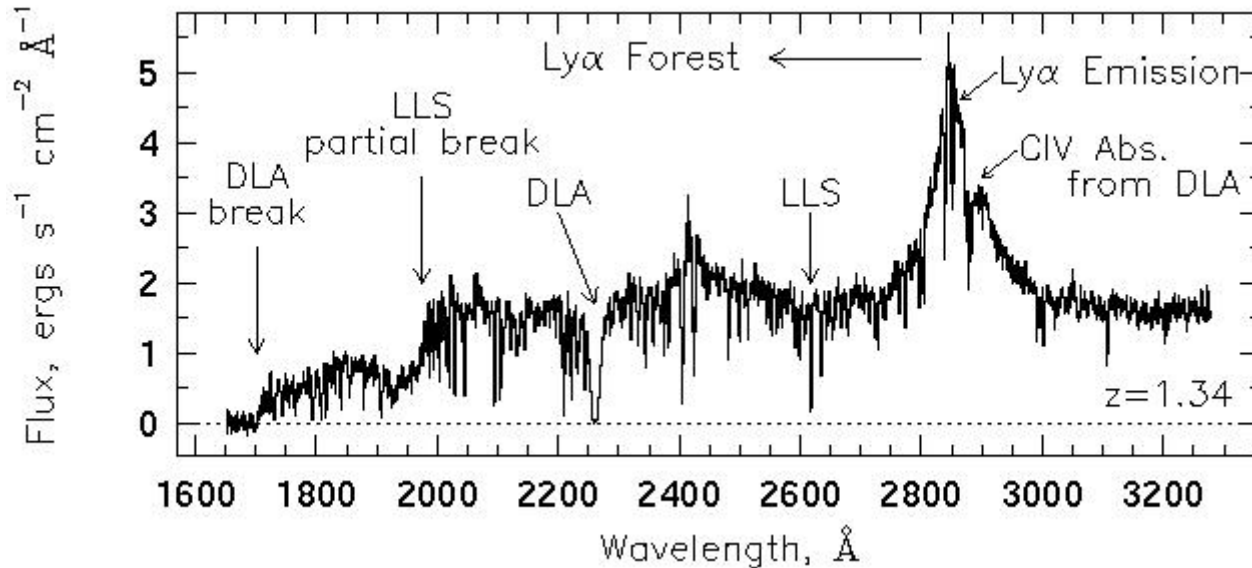
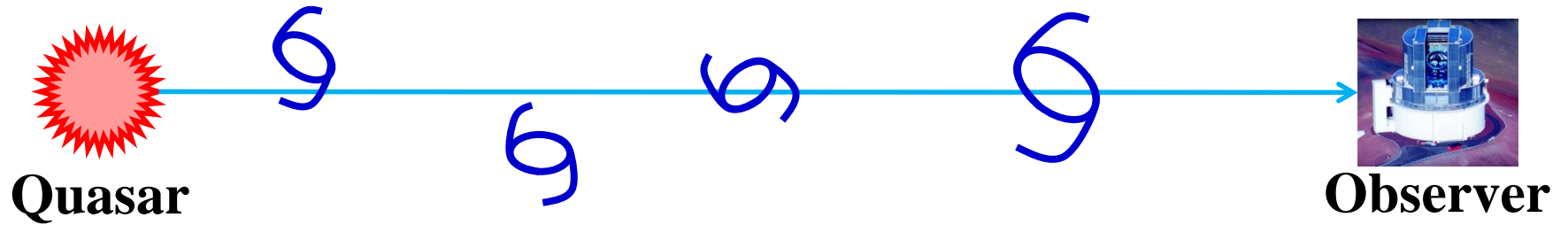
NGC 3521

Takeuchi et al. (2021)

# 3.3 吸収線観測による銀河形成期の検証

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測

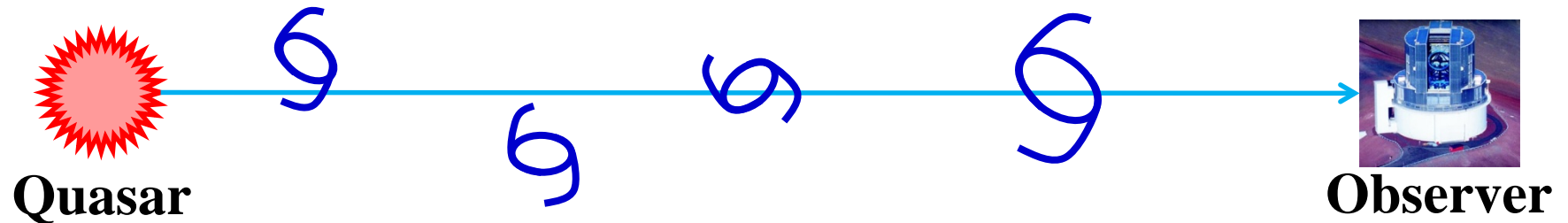
可視光では、銀河になっていないガス、あるいはガスの多い若い銀河の有効な検出方法として、**QSO吸収線系**の観測が知られている。



### 3.3 吸収線観測による銀河形成期の検証

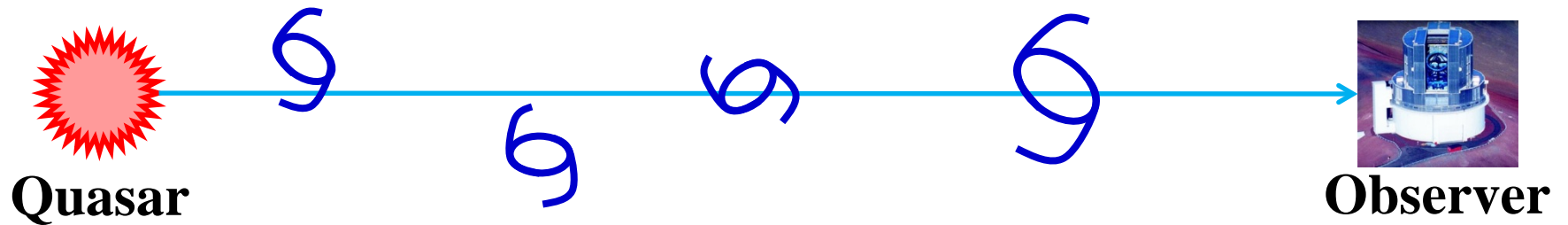
#### ガスが支配的なフェーズの銀河の観測

可視光では、銀河になっていないガス、あるいはガスの多い若い銀河の有効な検出方法として、**QSO吸収線系**の観測が知られている。



特に水素の柱密度が高いものは**damped Lyman  $\alpha$  systems (DLAs)**として観測され、**現在の巨大銀河の祖先**と考えられている。

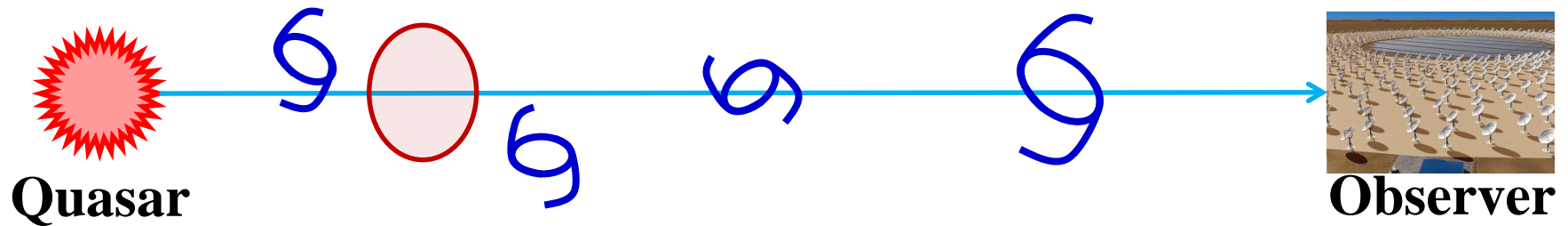
## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



観測から、これらの系はガスリッチで、低金属量であることが知られている(e.g., Ledoux et al. 2003).

特に高密度の系は銀河形成前夜にある天体であると考えられ、銀河形成研究のキーとなる!

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



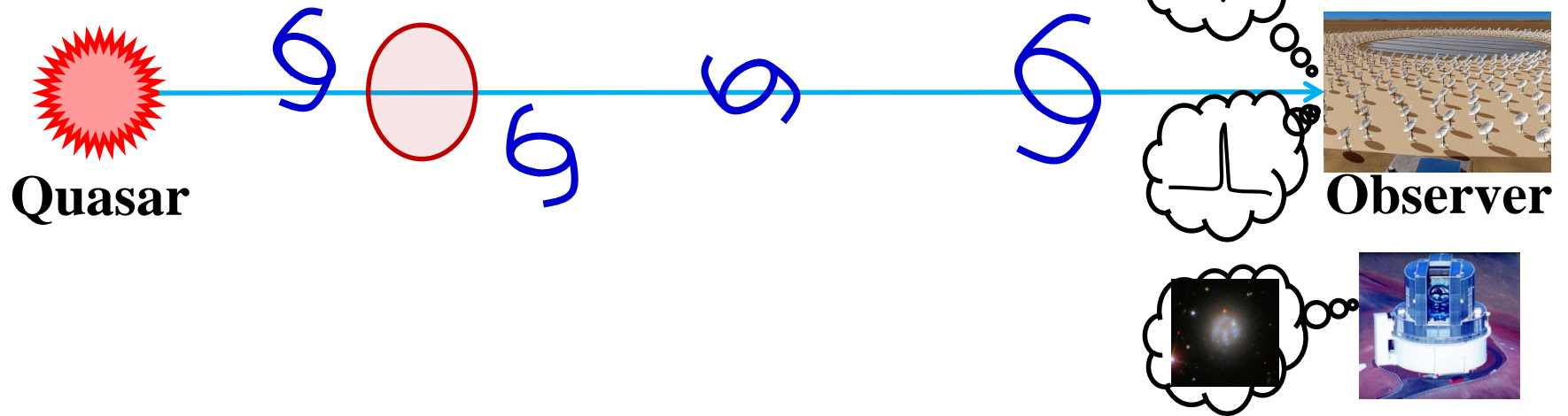
クエーサーの連続光を電波でセレクトし、吸収線系を21cm線で探査すればよい: SKA2のサイエンスとして最適!

可視/UV吸収線系の観測に比べて有利な点:

1. 電波では**ダストによる減光が無視できる**.
2. 断面積が小さいので、**非常に柱密度の高い系まで観測が可能**.

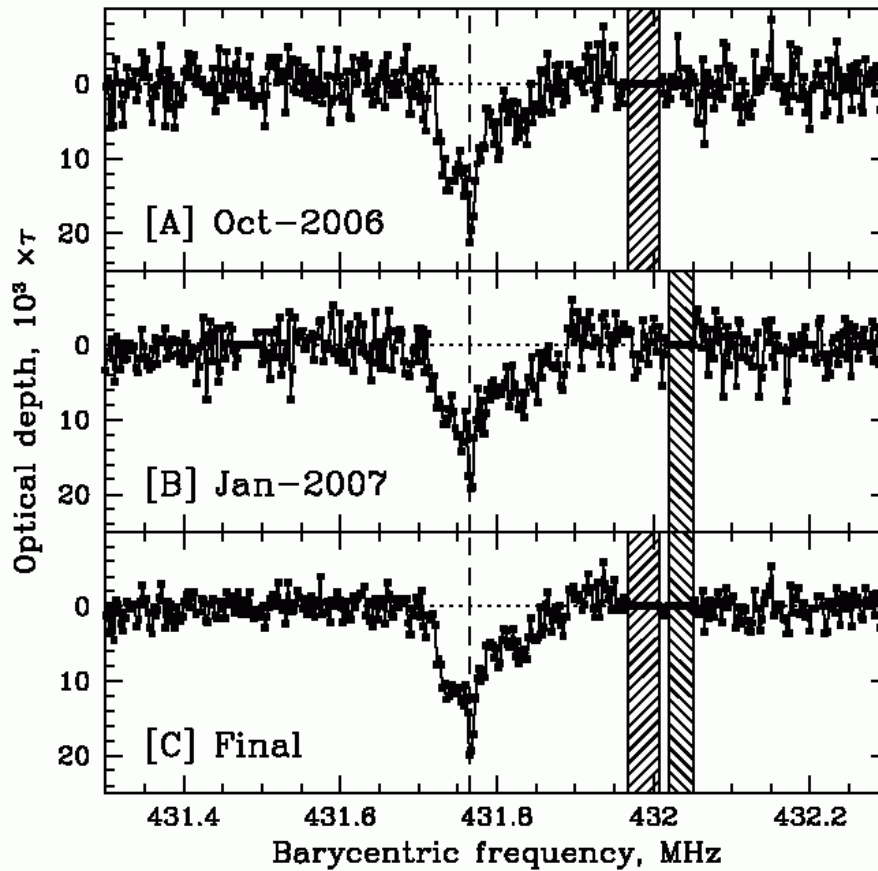
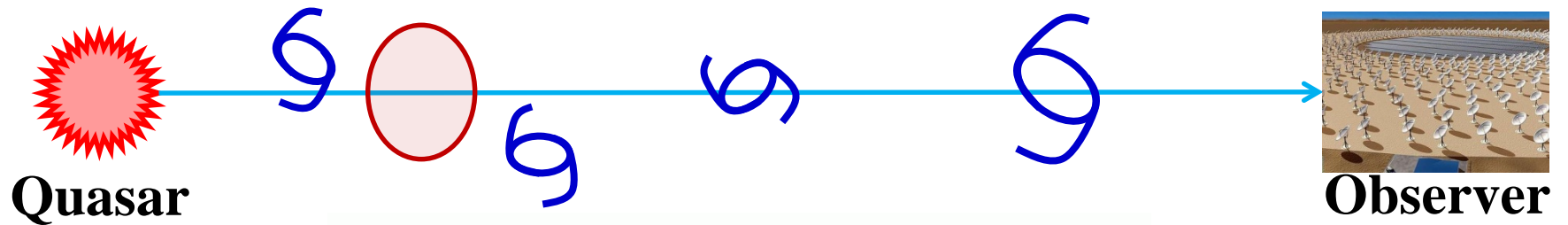


# ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



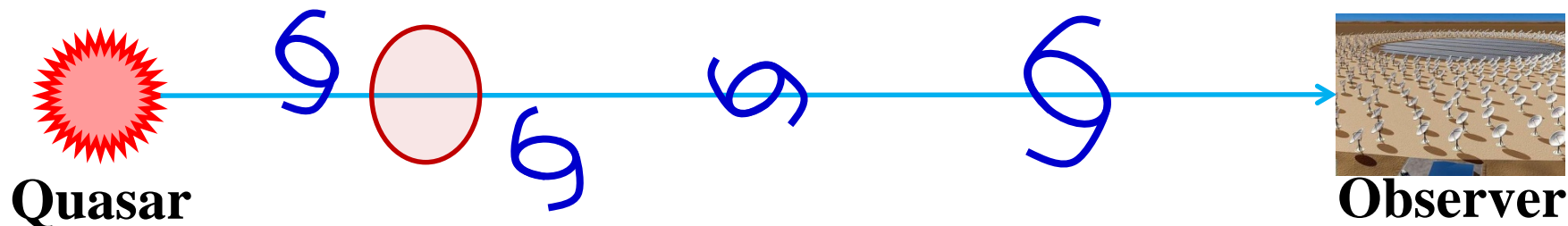
電波連続波による観測のみでなく、電波輝線や可視光で**補助的観測**を行えば、さらに多くの物理的情報を引き出すことができる。

# ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



York et al. (2007)

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



宇宙論グループの吉川さん、および筑波大統計学研究室と共同で、シミュレーションデータから銀河の情報を抽出する革新的統計解析の研究を進めている。

## 3.4 その他の話題

- 近傍銀河の原子ガス⇒分子ガス遷移
- 星形成銀河主系列の進化とガススケーリング則の融合(施他)
- 相互作用銀河における星形成の検証(大森 他)
- 電波連続波を星形成率指標として用いた星形成史⇒MWAデータを用いた論文(Takeuchi et al. 2021b, to be submitted)
- 長波長電波連続波による活動銀河核と星形成銀河の進化、宇宙最電離期の銀河の役割の検証(河野 他)
- 宇宙大規模構造の位相的データ解析
- 銀河進化の多様体学習による定量化と予言
- スパースモデリングの応用による電波画像の超解像とそれを用いた活動銀河の研究
- 銀河団内物質の進化と素過程の研究⇒Nature  
etc.

# 4 SKAによる銀河進化研究

## 戦略的利点

1. HI, 電波連続波観測は現状 $z < 0.5$ に限られており, SKAによるデータで**ほぼ自動的に**新発見が得られる。
2. データ科学面でSKA-JP独自の方法論を発展させており,**国際的競争においても優位.**
3. 感度・観測時間への**強い要求がほぼ不要.**
4. 再電離、宇宙論、星間物質、宇宙磁場など他グループの研究との親和性が非常に高く、データ・知見の共有が容易。

⇒ コストパフォーマンスの高い研究課題!

# 銀河進化研究の究極目標

惑星系、有機物、生命の起源に繋がる、宇宙の全重元素合成の場である銀河の形成進化の全容を解明する!



「我々はどこから来たのか 我々は何者か 我々はどこへ行くのか」  
“D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?”

Paul Gauguin