

# SKAが拓く銀河進化研究の新展開

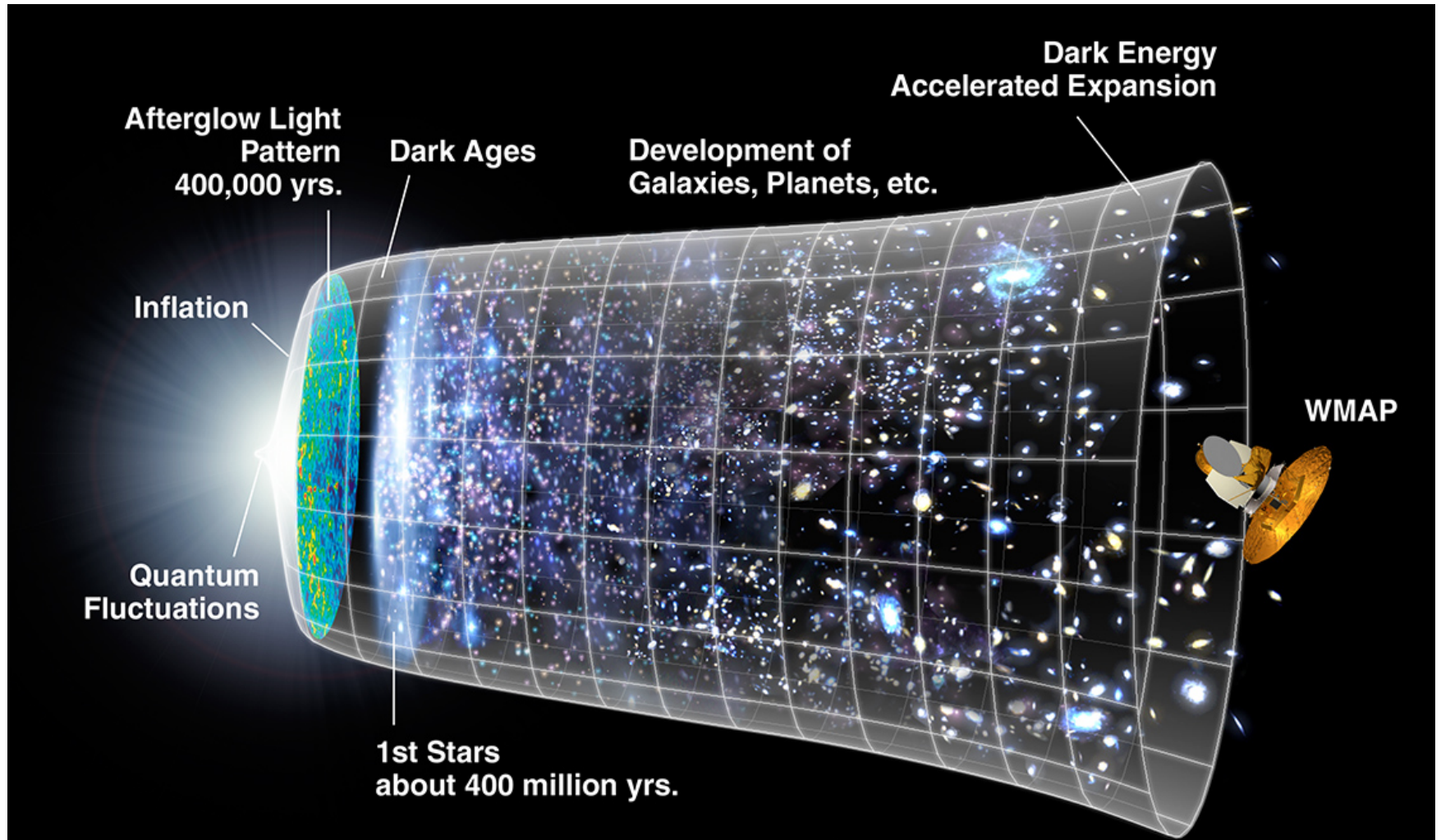
竹内 努

名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻

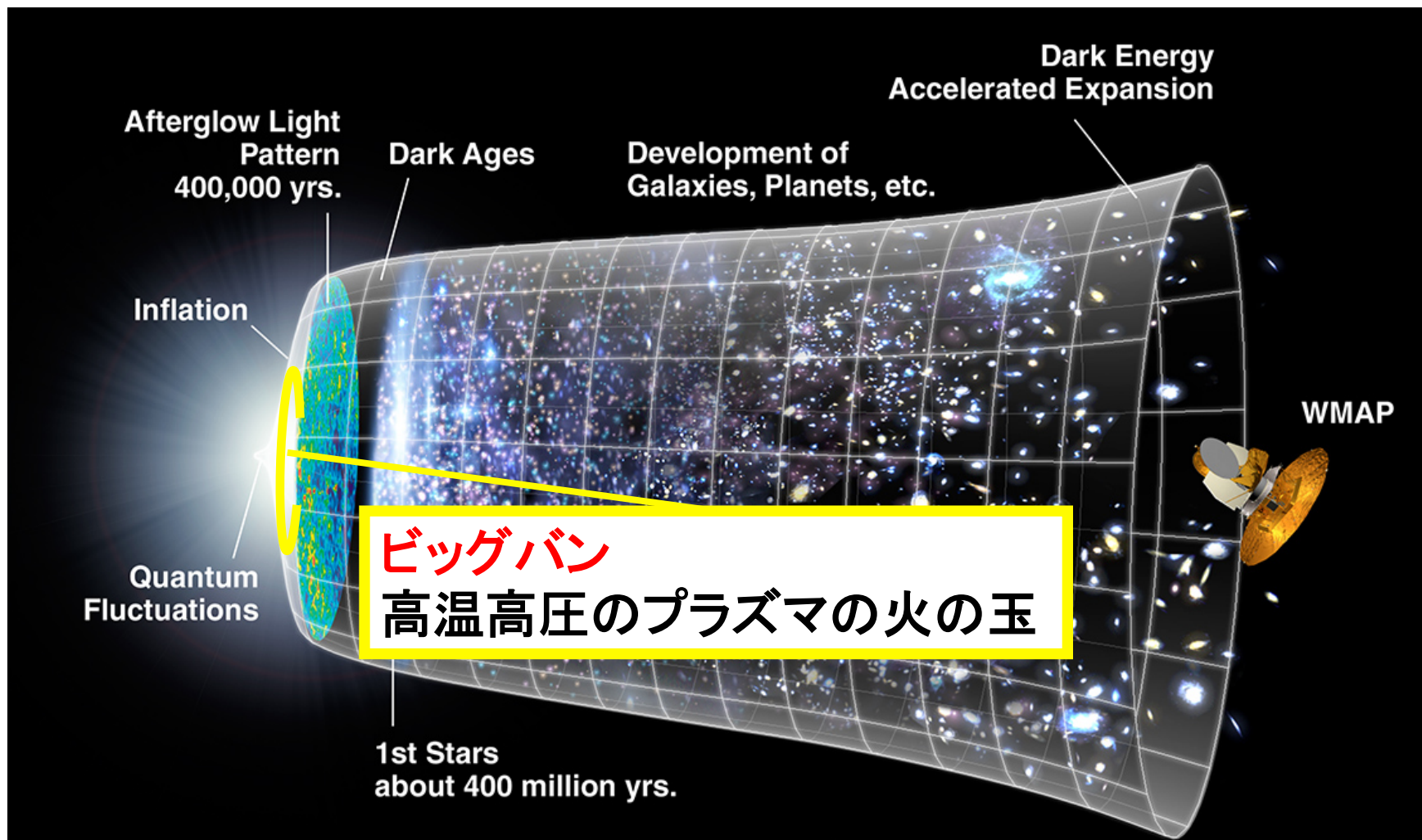
宇電懇シンポジウム, 名古屋, 2013年12月18日

# 1 宇宙進化と銀河

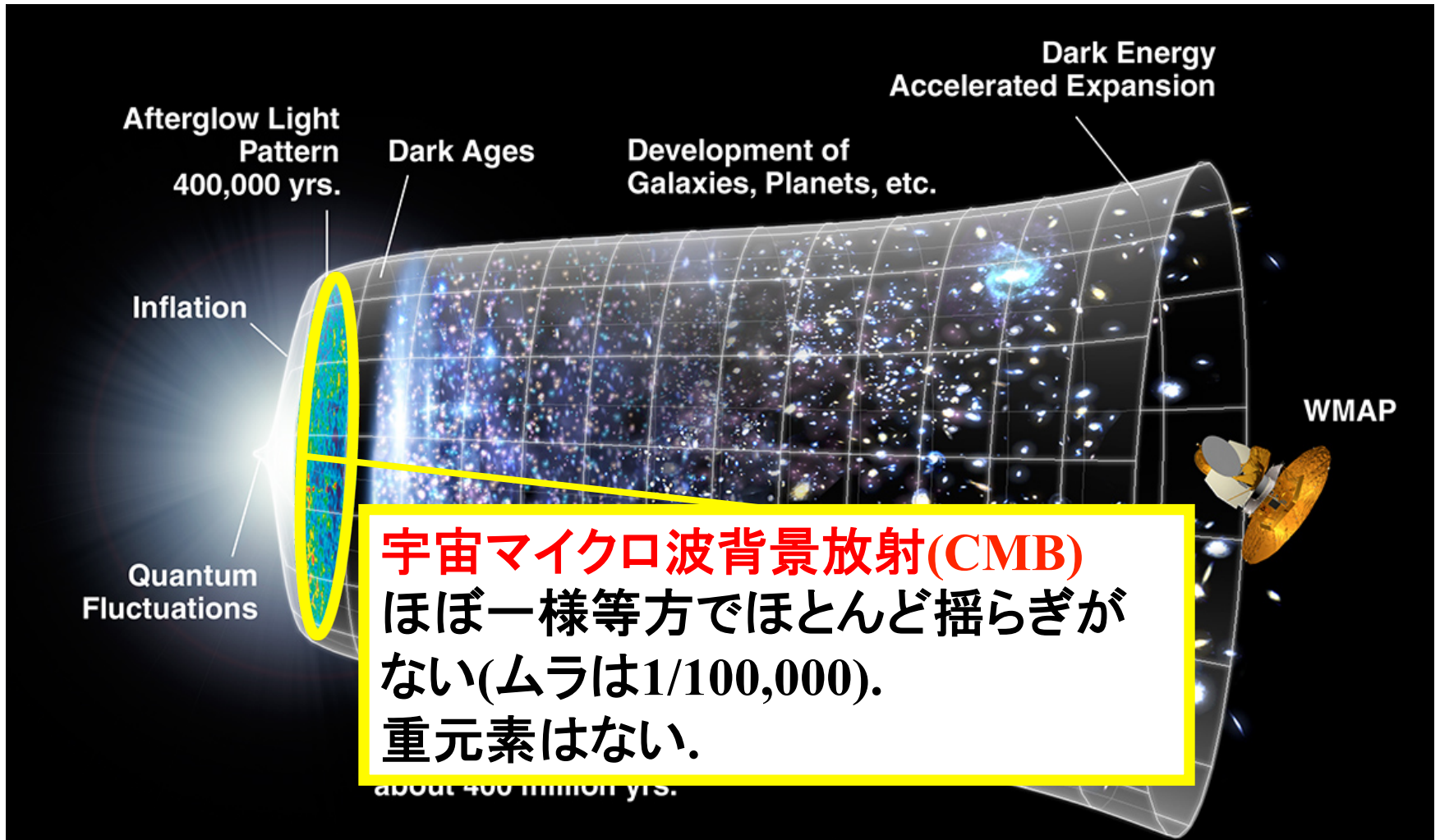
## 1.1 宇宙の大局的進化



# 1.1宇宙の大局的進化



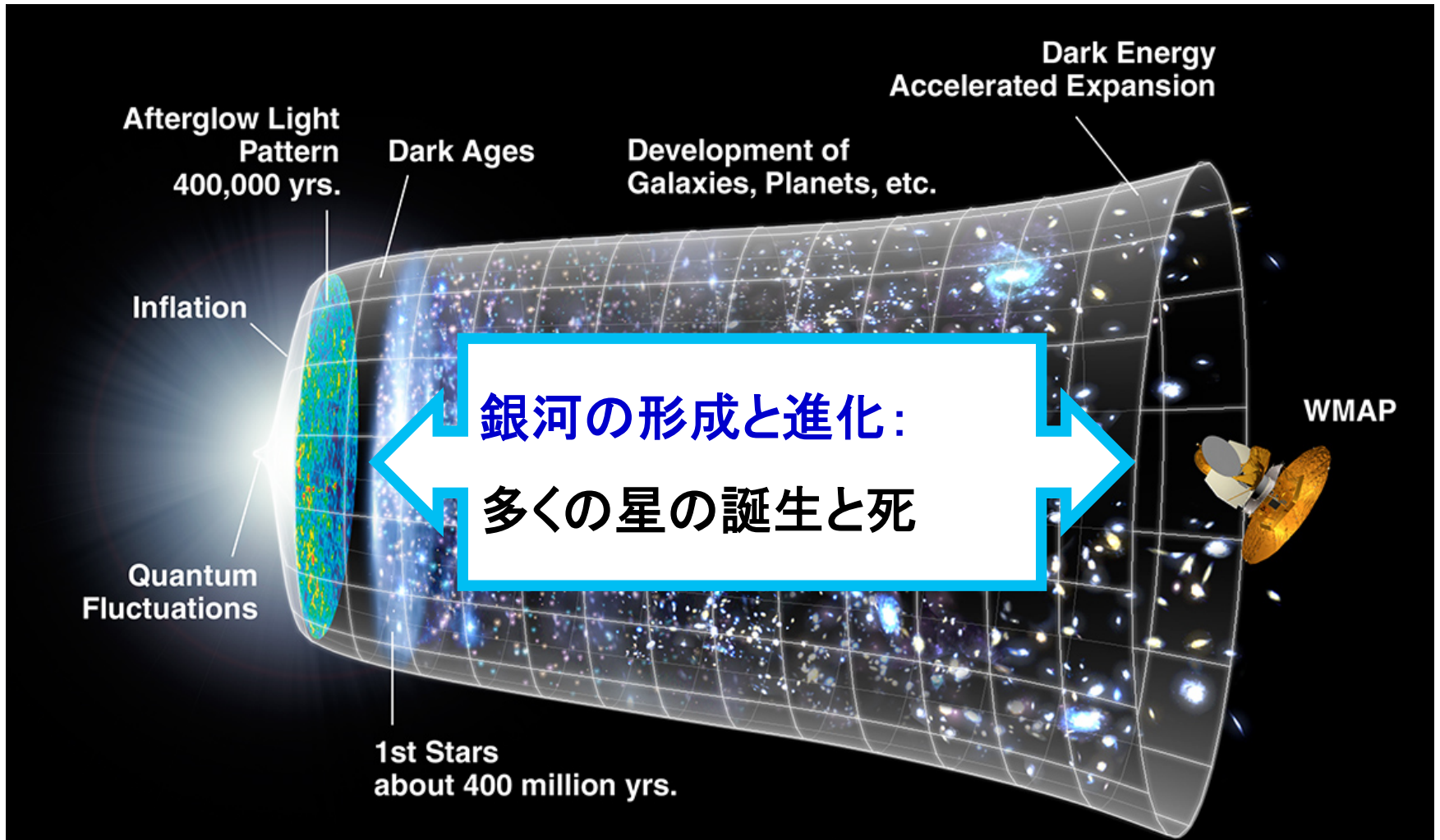
# 1.1宇宙の大局的進化



# 1.1宇宙の大局的進化



# 1.1宇宙の大局的進化



## 1.2 銀河の形成と進化

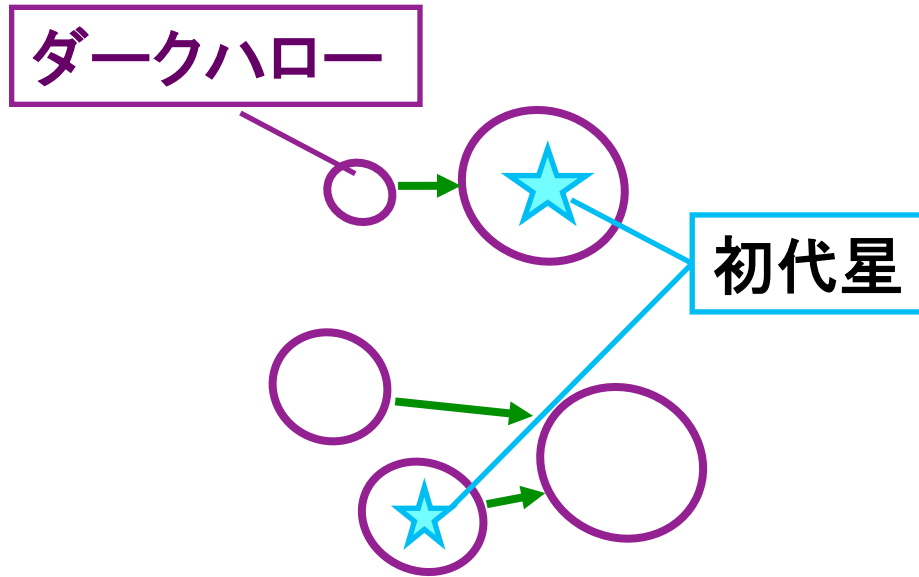
宇宙の物質の密度はダークマターが占めている。まずダークマターが重力で集まり、塊を作る(ダークハロー)。

ダークハロー



## 1.2 銀河の形成と進化

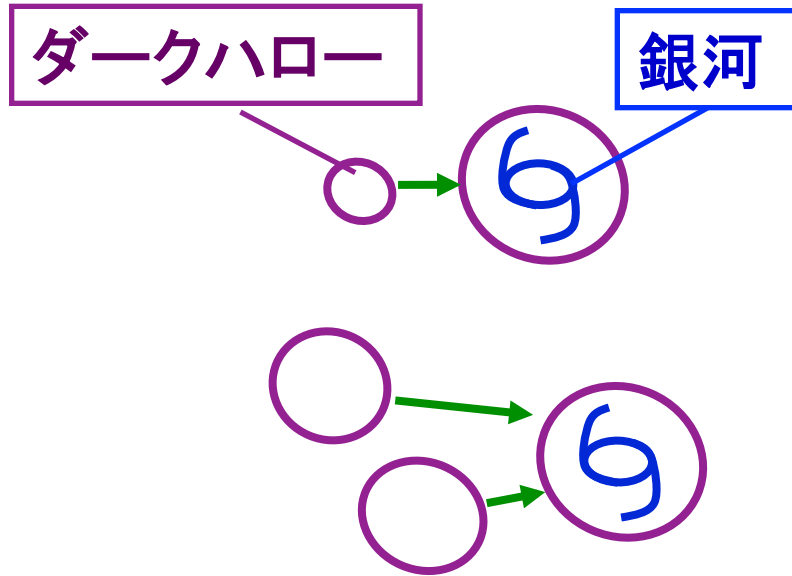
ダークハローの中で最初の星(初代星)ができ始める. 初代星が**超新星爆発**を起こすと, 最初の重元素が宇宙に供給される.





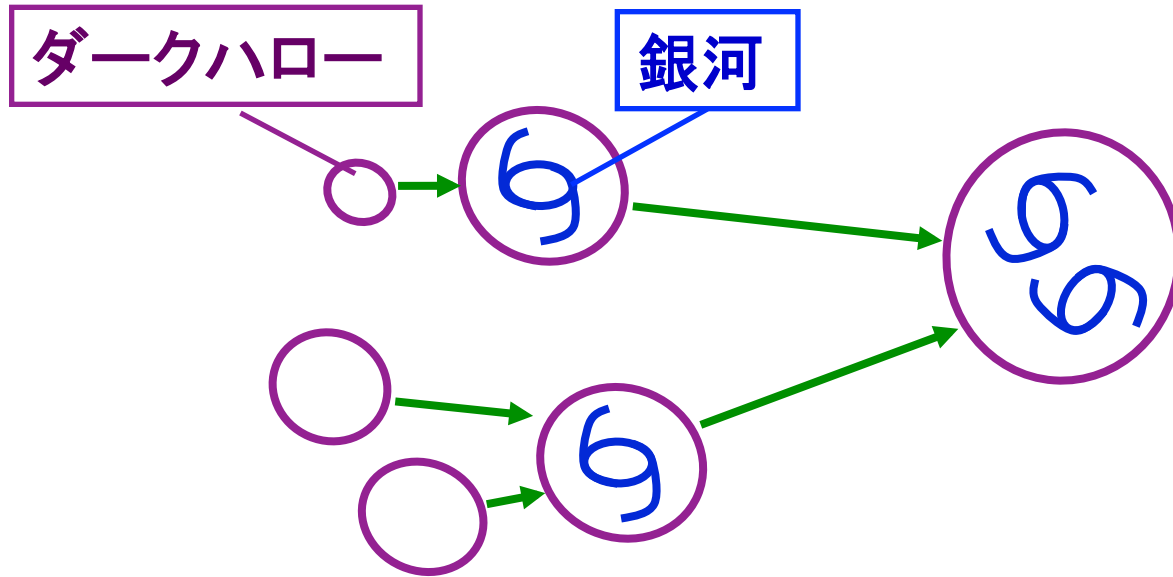
## 1.2 銀河の形成と進化

初代星から重元素が供給されると, ガスは**星形成に適した条件に変わる**ため爆発的星形成が起き, 銀河が形成される.



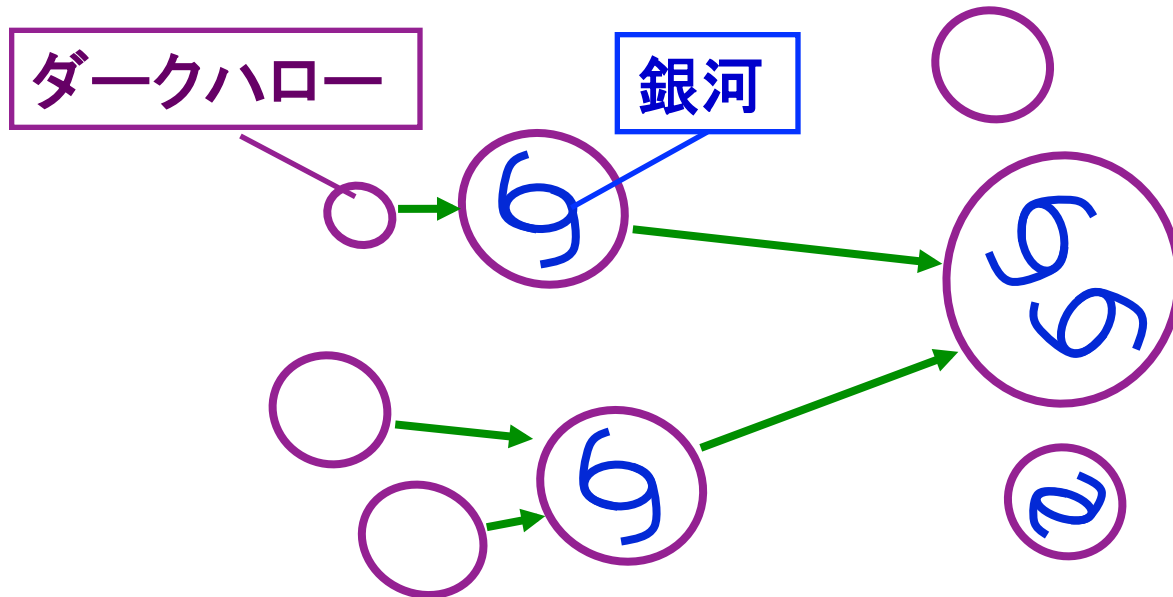
## 1.2 銀河の形成と進化

ダークハローは他のハローと合体を続け、成長してゆく。ハロー中の銀河は合体によって共通のダークハローに複数個存在するようになる。銀河同士は合体することもあるが、しばらくお互いを回りあうこともある。



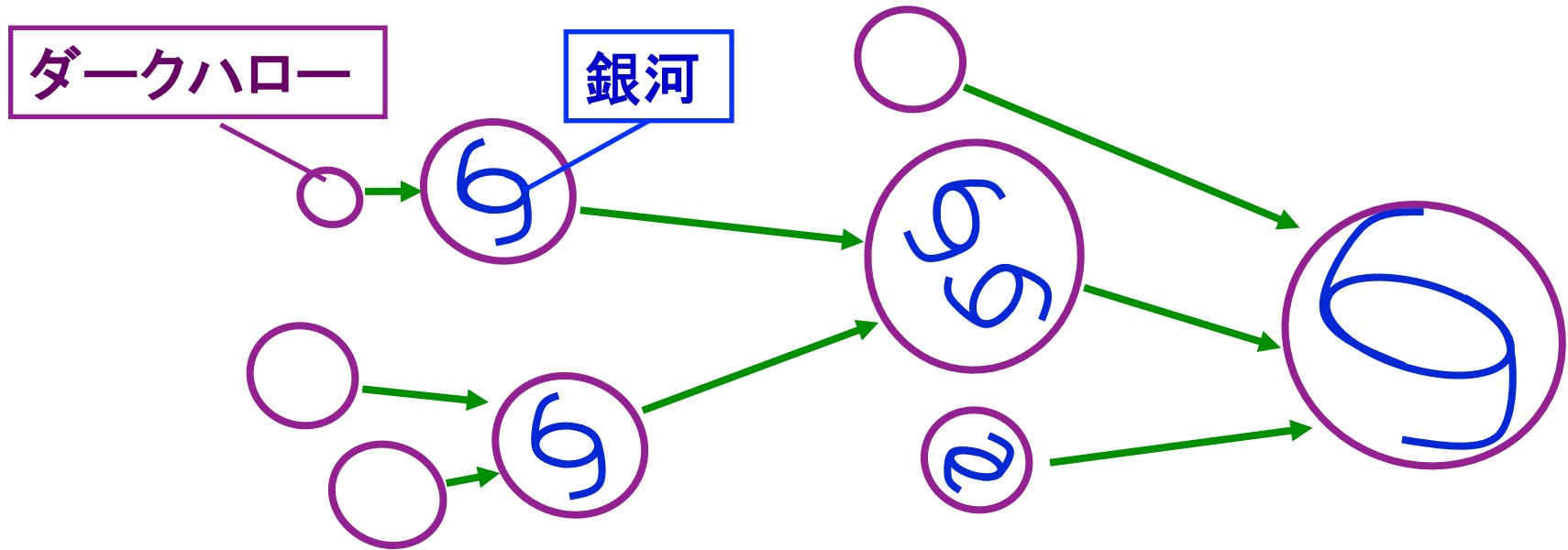
## 1.2 銀河の形成と進化

ハローと銀河の合体が進む。また、個々の銀河の中では**ガスから星が作られ**、それぞれの銀河も成長してゆく。



## 1.2 銀河の形成と進化

ハローは単調に成長し, 銀河も合体して巨大銀河が形成される.  
**銀河の形態は合体の様子によって大きく異なってくる.** また星の  
形成と進化により, 銀河の重元素量は単調に増大してゆく.



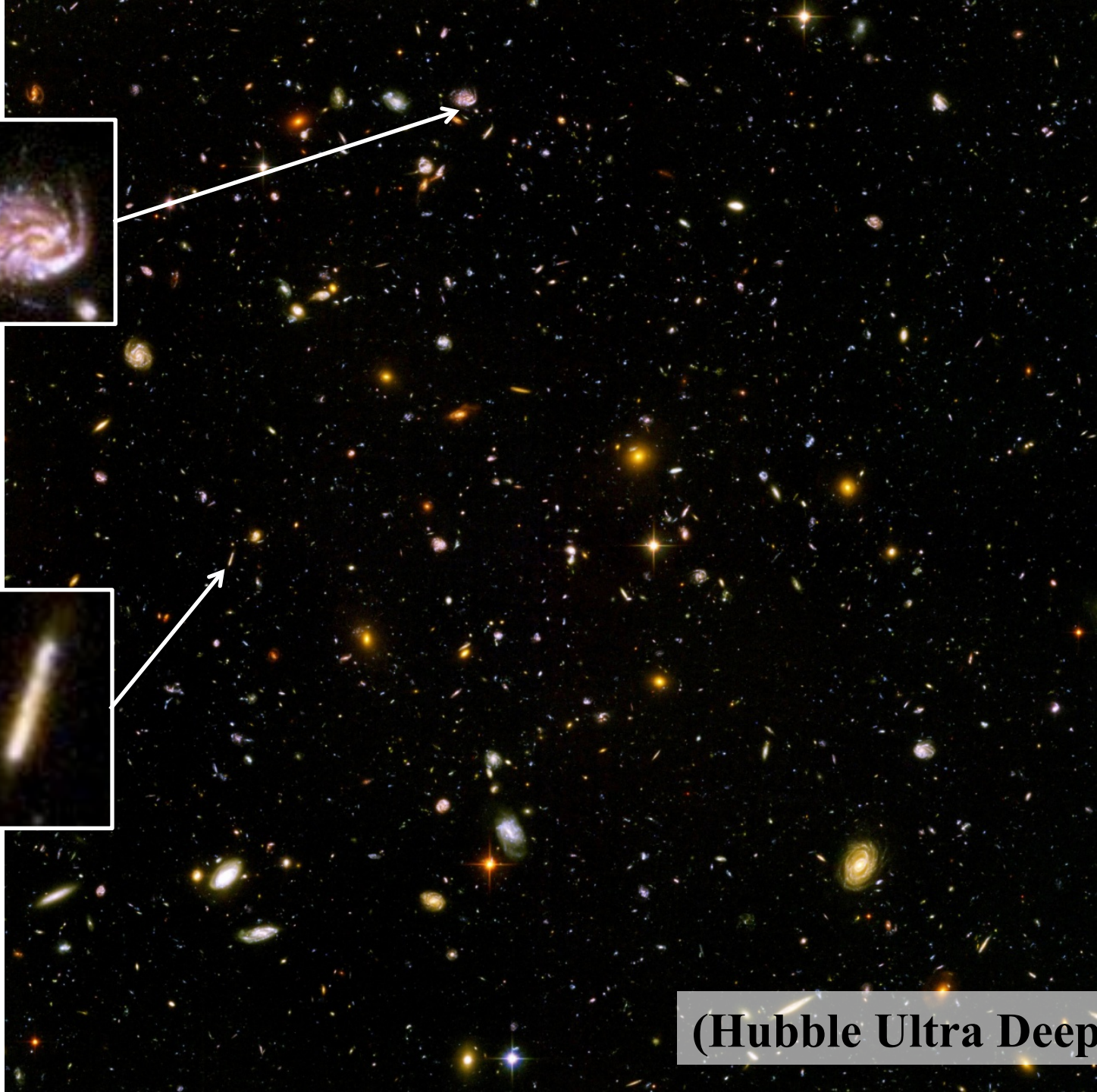
宇宙誕生から3-10億年後の銀河



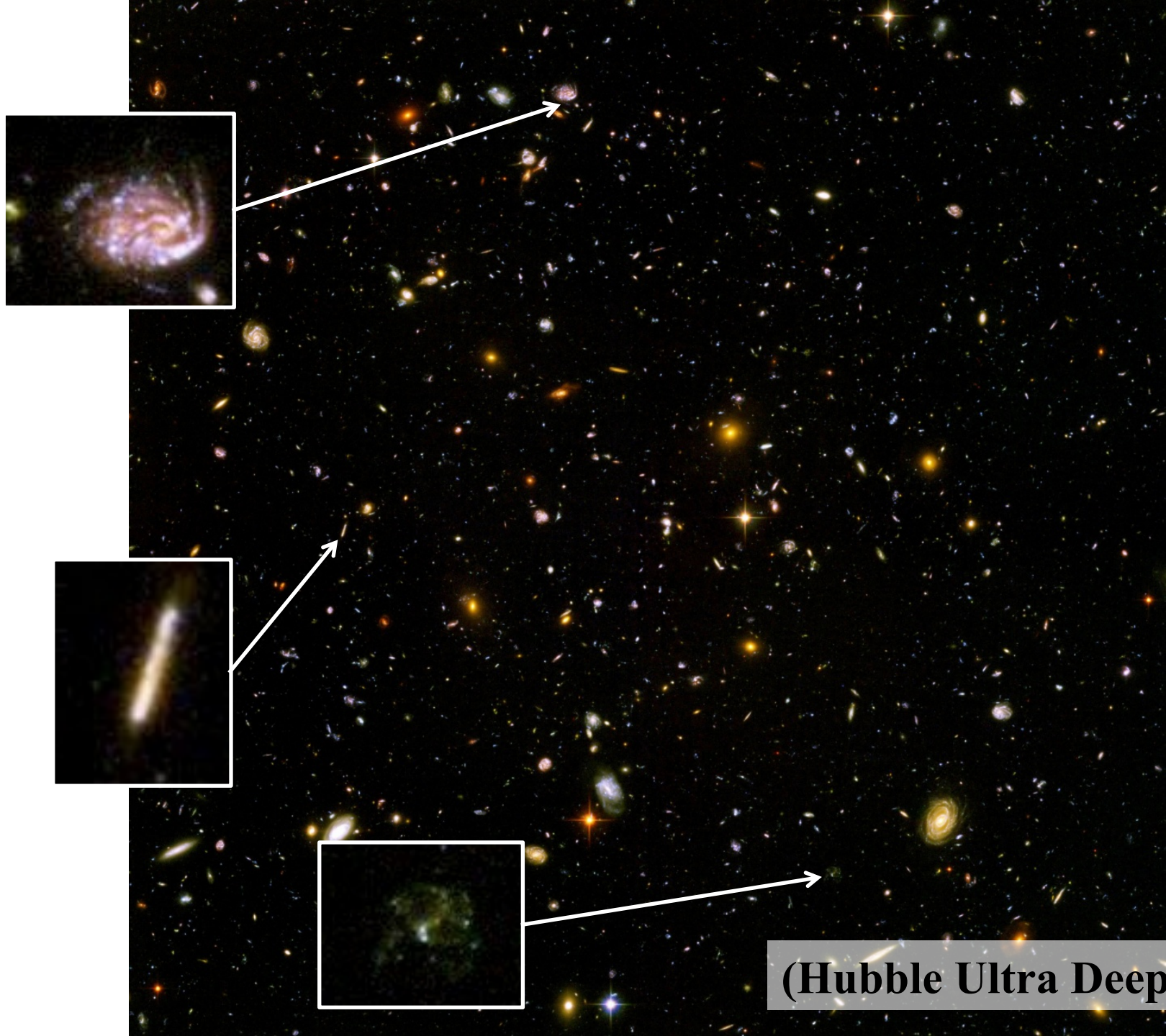
(Hubble Ultra Deep Field)



**(Hubble Ultra Deep Field)**

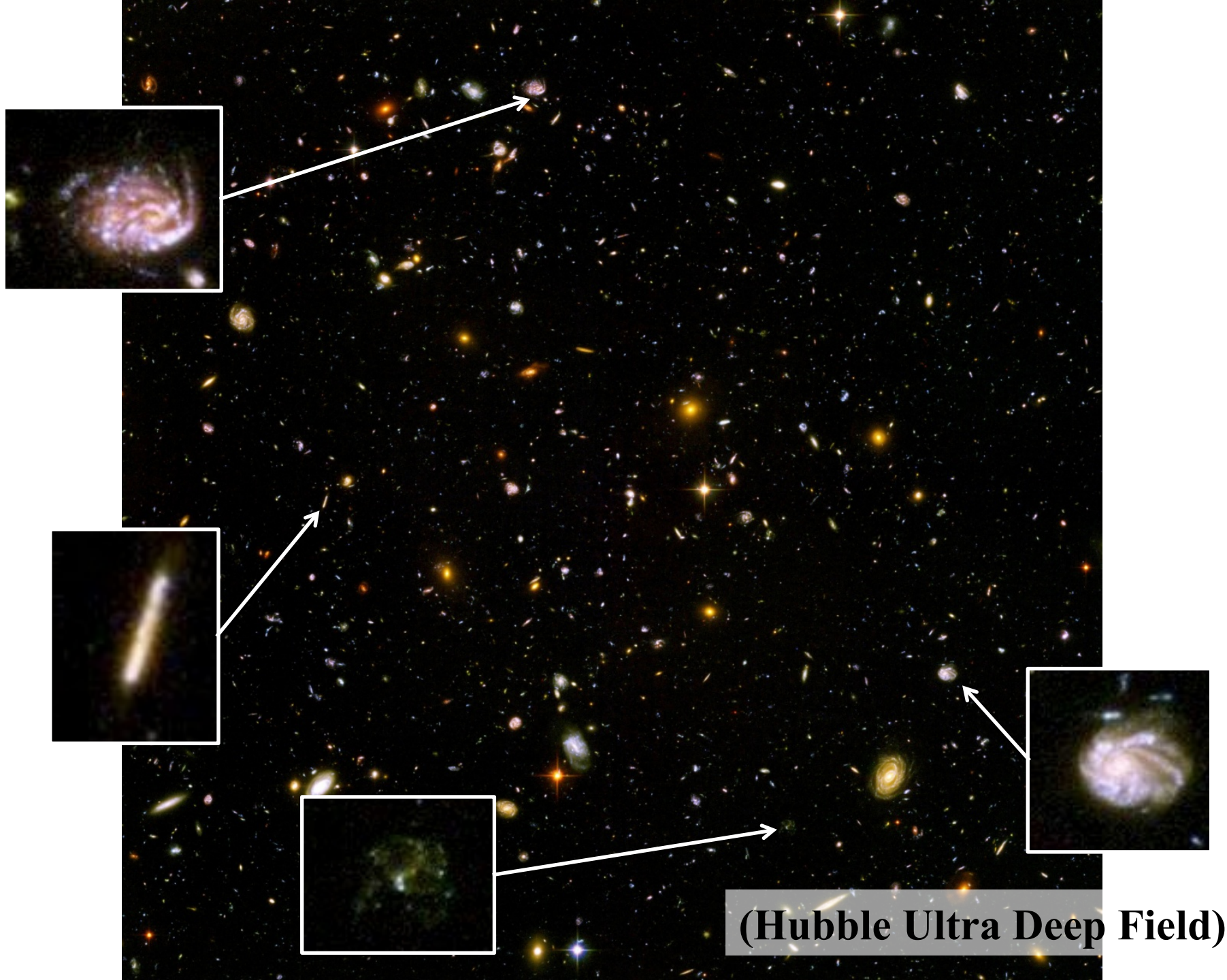


**(Hubble Ultra Deep Field)**

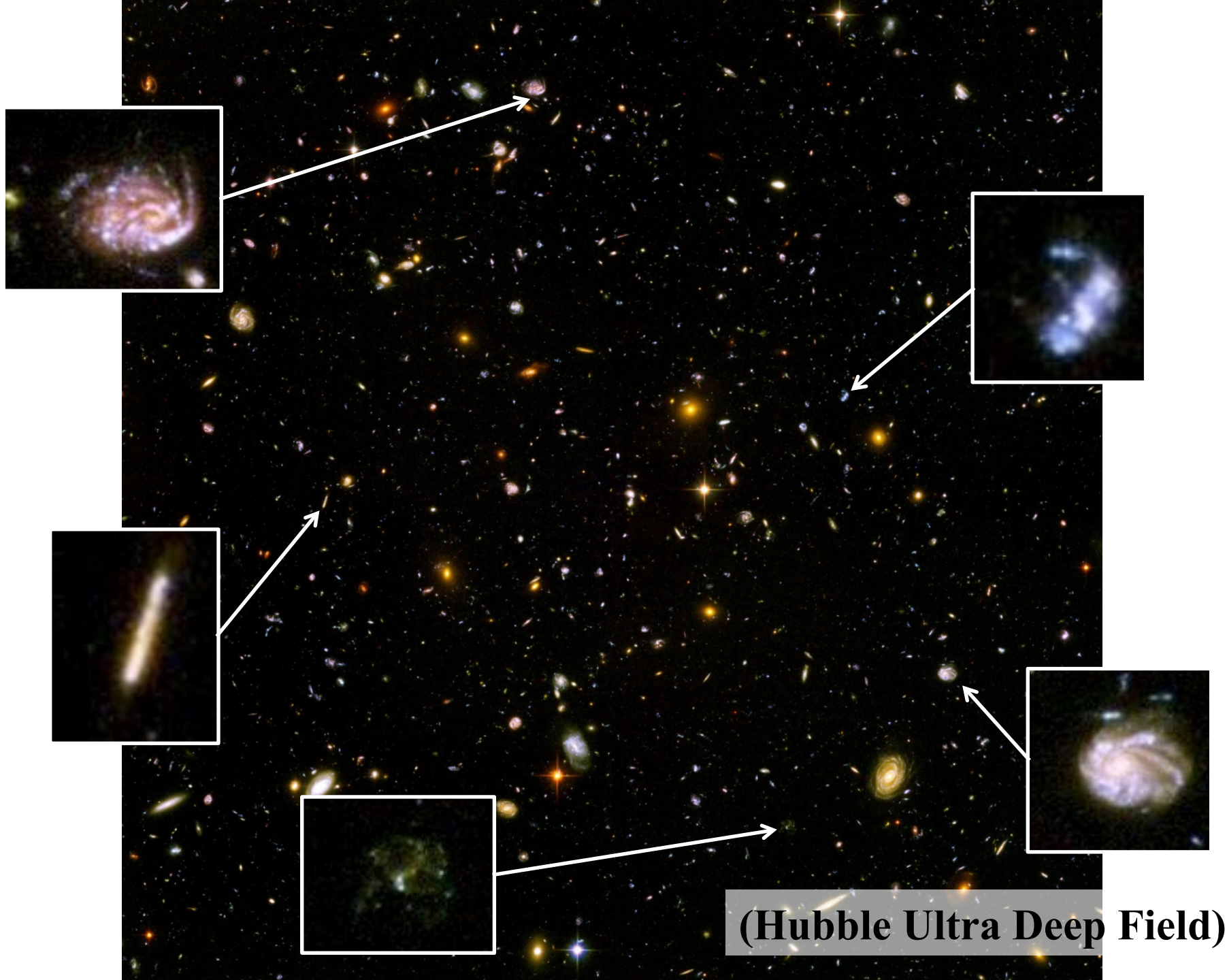


**(Hubble Ultra Deep Field)**





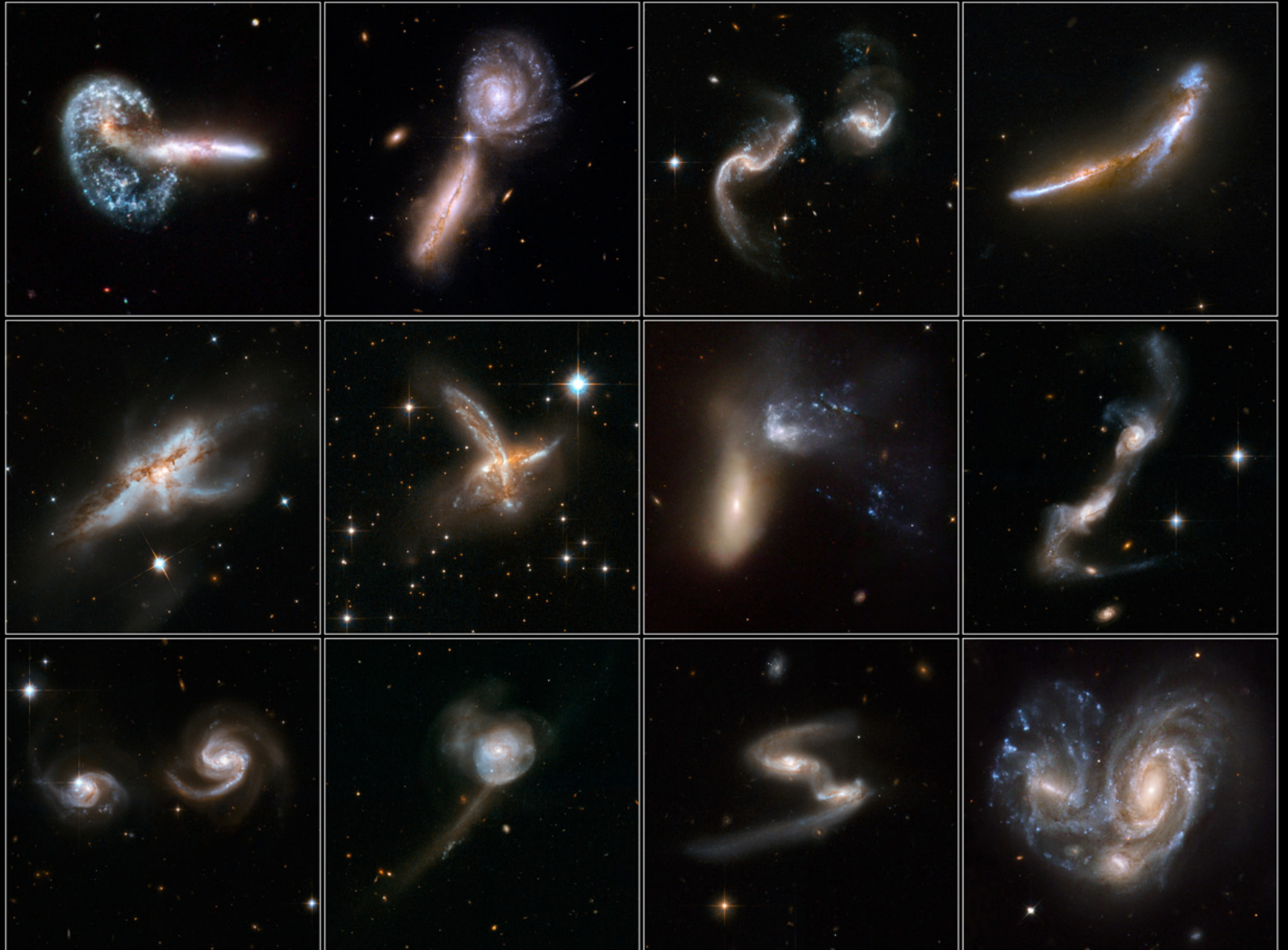
**(Hubble Ultra Deep Field)**



**(Hubble Ultra Deep Field)**

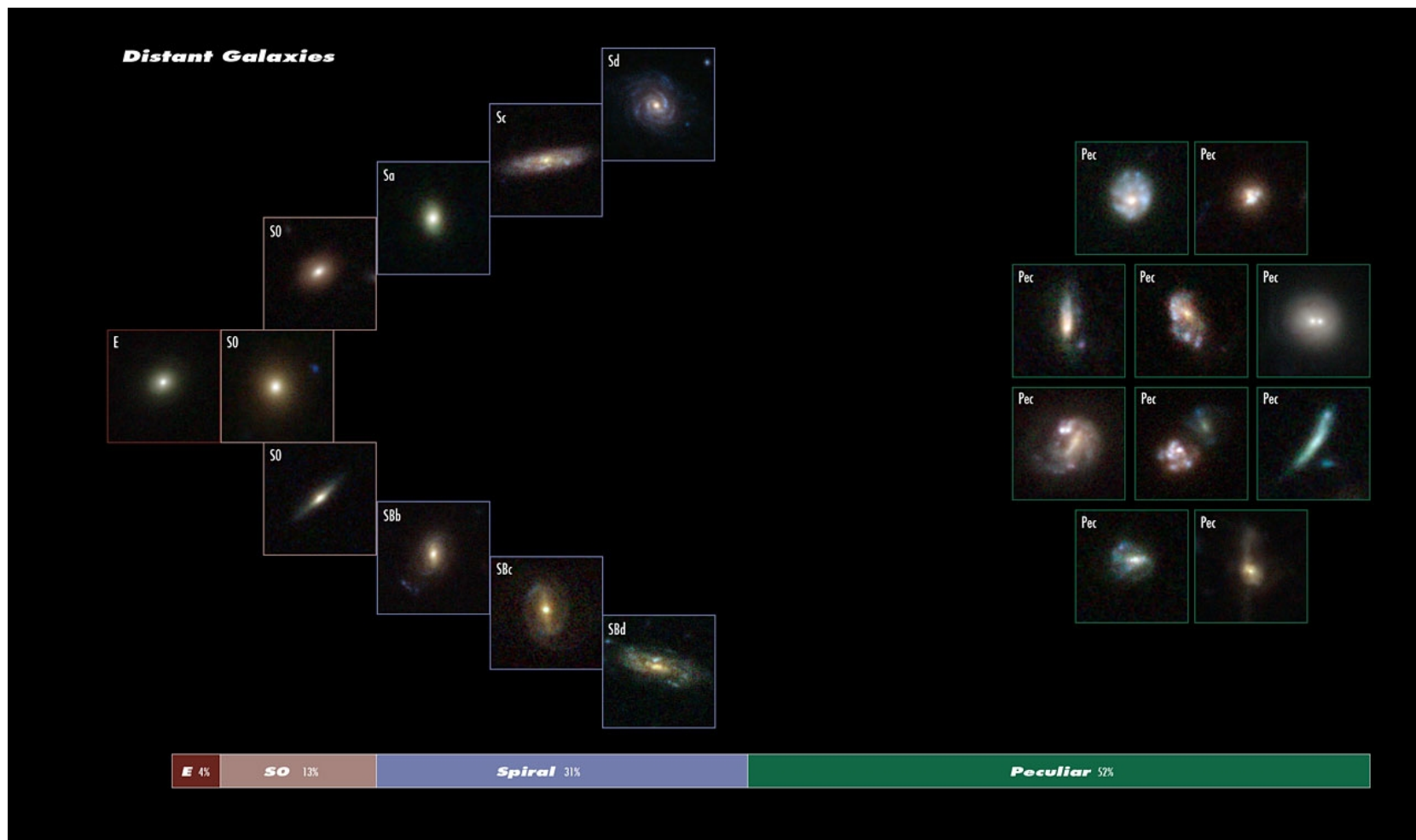
# Interacting Galaxies

Hubble Space Telescope • ACS/WFC • WFPC2



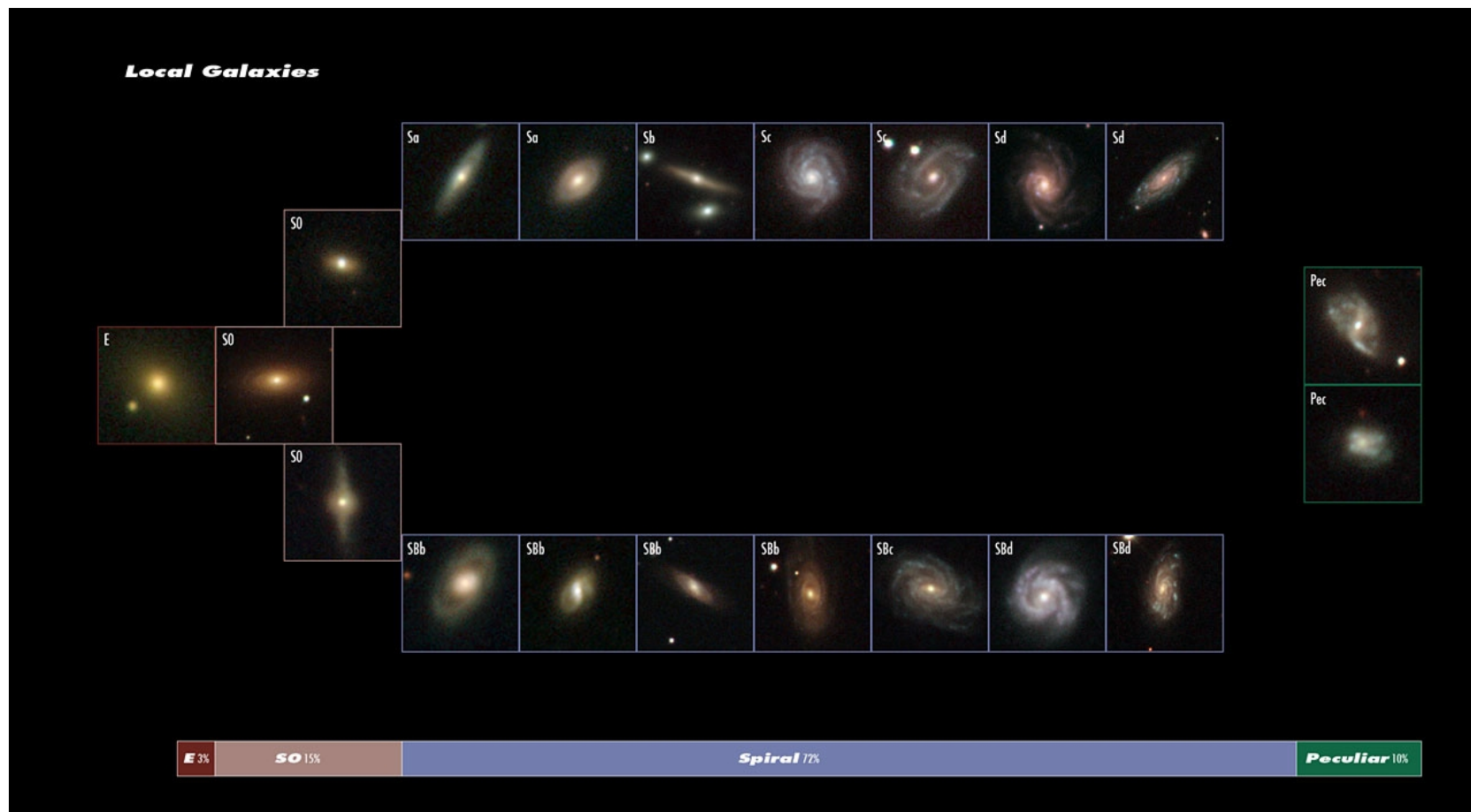
# 銀河の形態の出現

衝突合体と星形成により銀河は形を整えていく。



# 銀河の形態の出現

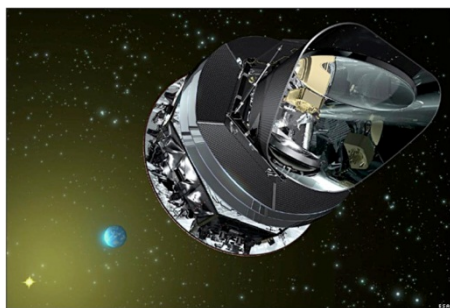
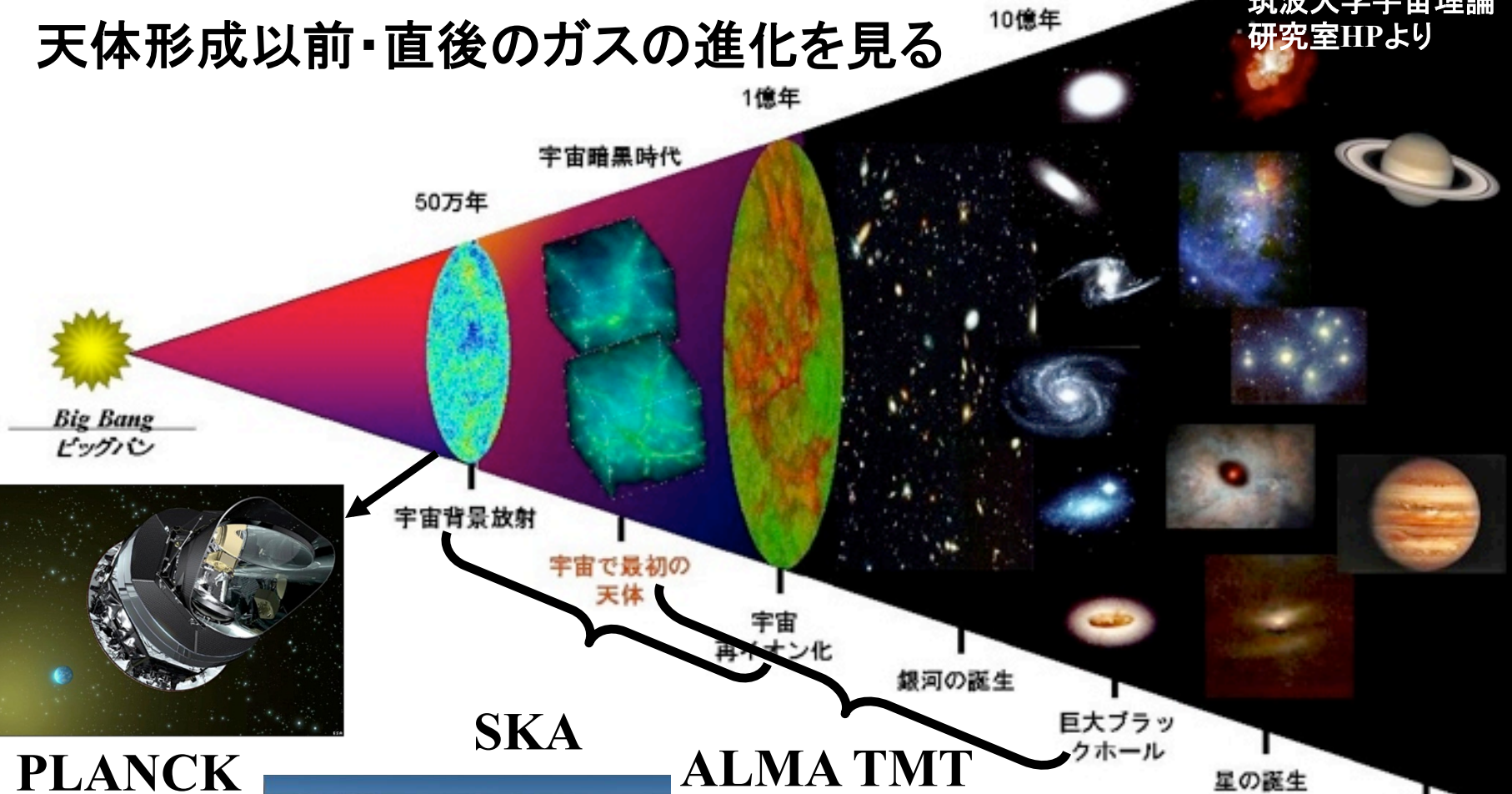
現在は銀河合体の頻度も下がり, 巨大銀河の多くが規則的な形態を持つに至っている.



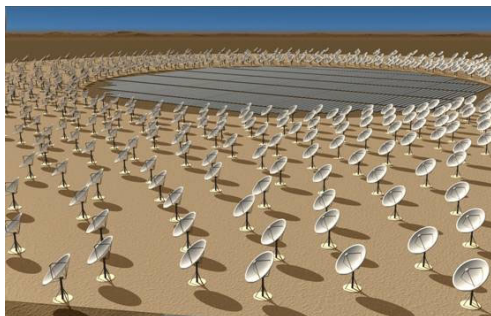
# 中性水素で解き明かす宇宙史

## 天体形成以前・直後のガスの進化を見る

筑波大学宇宙理論  
研究室HPより



PLANCK



SKA

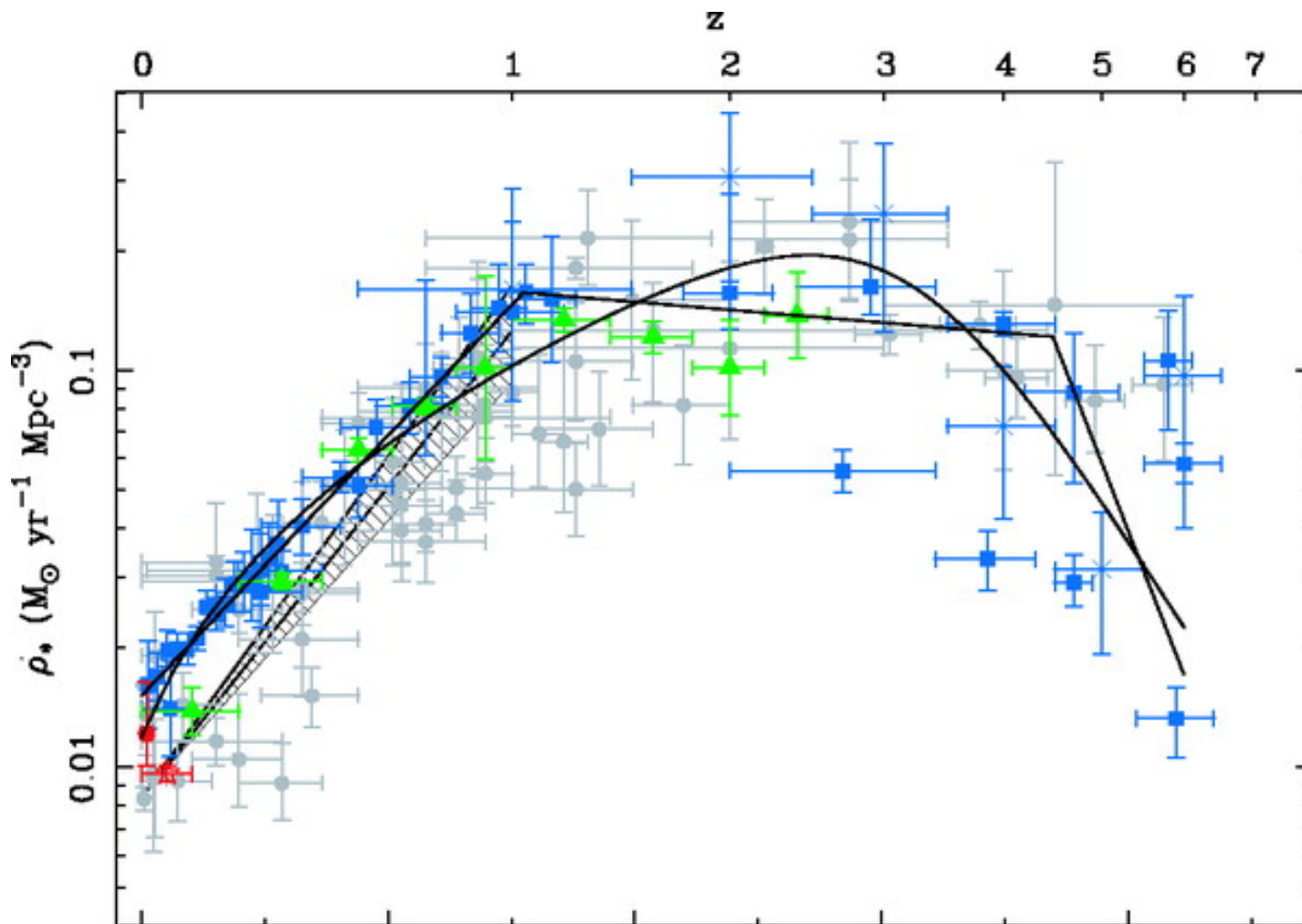


ALMA TMT



# 1.3 宇宙の星形成史

宇宙の星形成密度



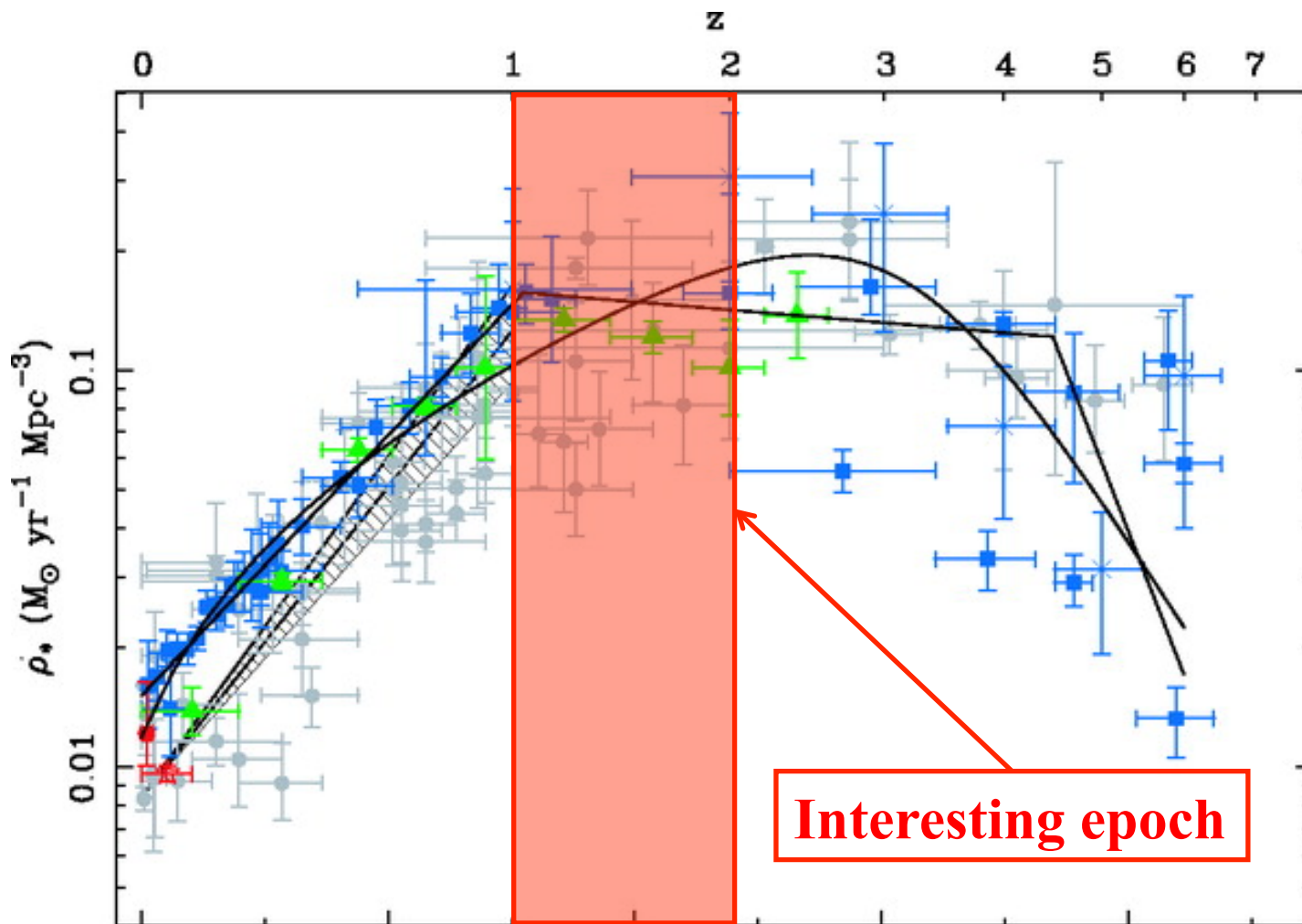
(Today)

(Early epoch)

(Hopkins & Beacom 2006)

# 1.3 宇宙の星形成史

宇宙の星形成密度



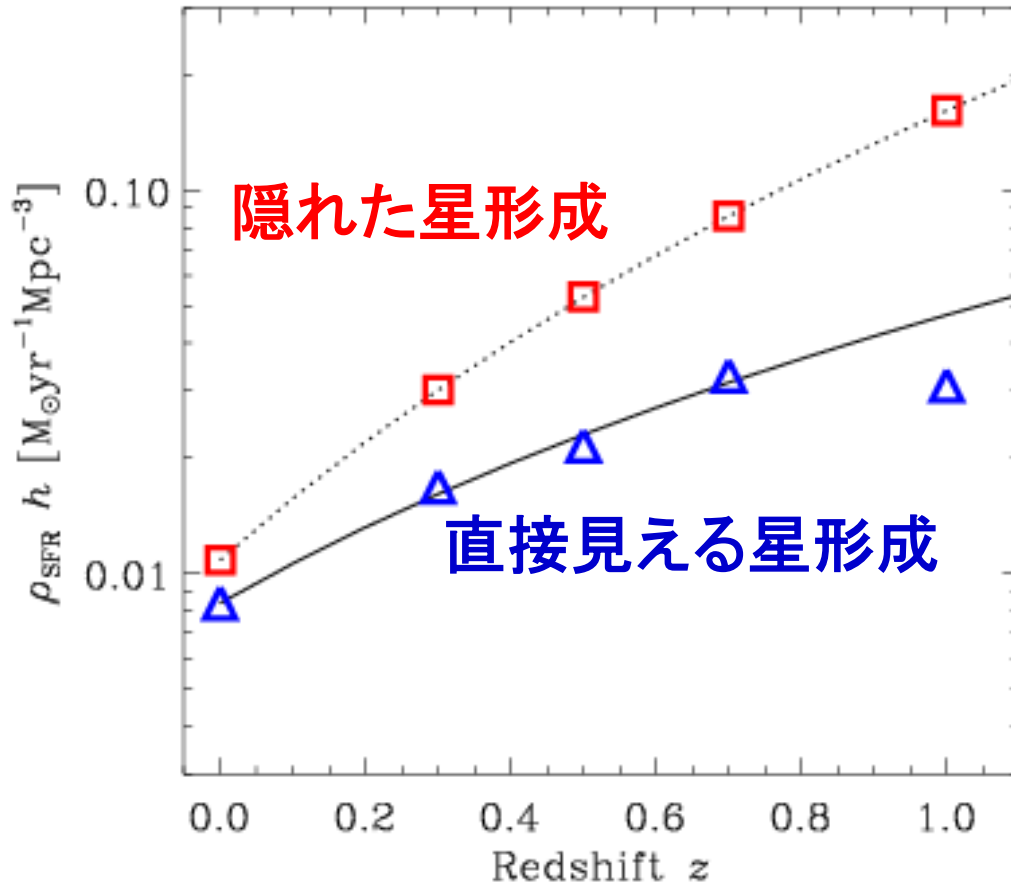
(Today)

(Early epoch)

(Hopkins & Beacom 2006)



# 星形成史における赤外銀河の重要性



紫外線で見える銀河の進化と赤外線のものとは、どちらが重要なのか？

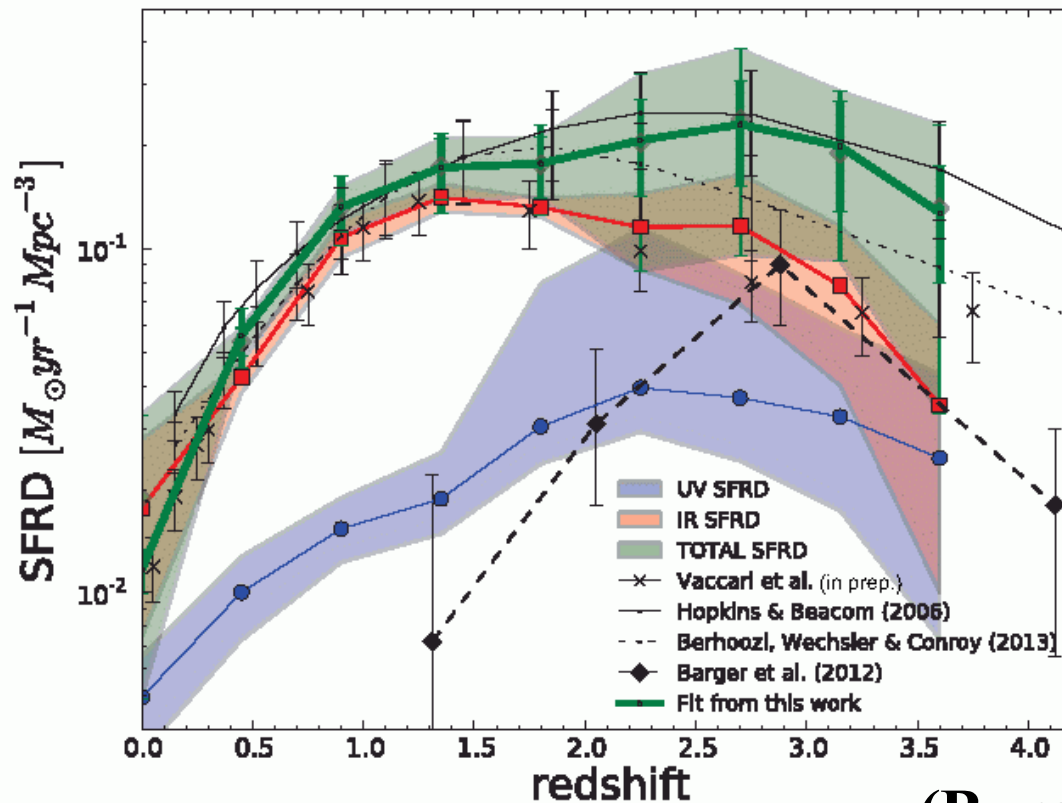
⇒ 赤方偏移1(宇宙年齢61億歳)の宇宙では、銀河で作られる星の9割以上がダストで隠されていて、紫外線では見えない。

(Takeuchi et al. 2005)

## 星形成史における赤外銀河の重要性

その後 *Herschel* 宇宙望遠鏡などによる研究で、ダストで隠れた星形成は  $z \sim 3$  まで卓越していることが確かめられた (e.g., Cucciati et al. 2011; Burgarella et al. 2013).

宇宙の星形成率密度



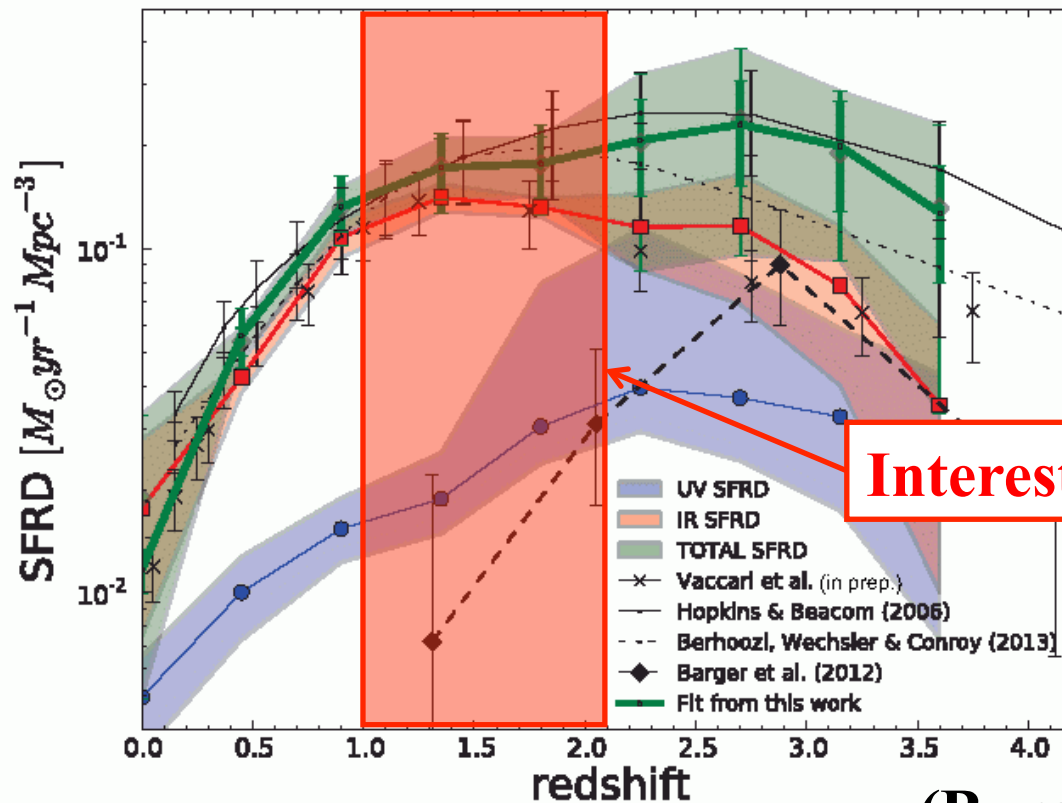
(Burgarella et al. 2013)

宇宙年齢の大半で、ダストで隠された銀河の方が主役である。

# 星形成史における赤外銀河の重要性

その後 *Herschel* 宇宙望遠鏡などによる研究で、ダストで隠れた星形成は  $z \sim 3$  まで卓越していることが確かめられた (e.g., Cucciati et al. 2011; Burgarella et al. 2013).

宇宙の星形成率密度

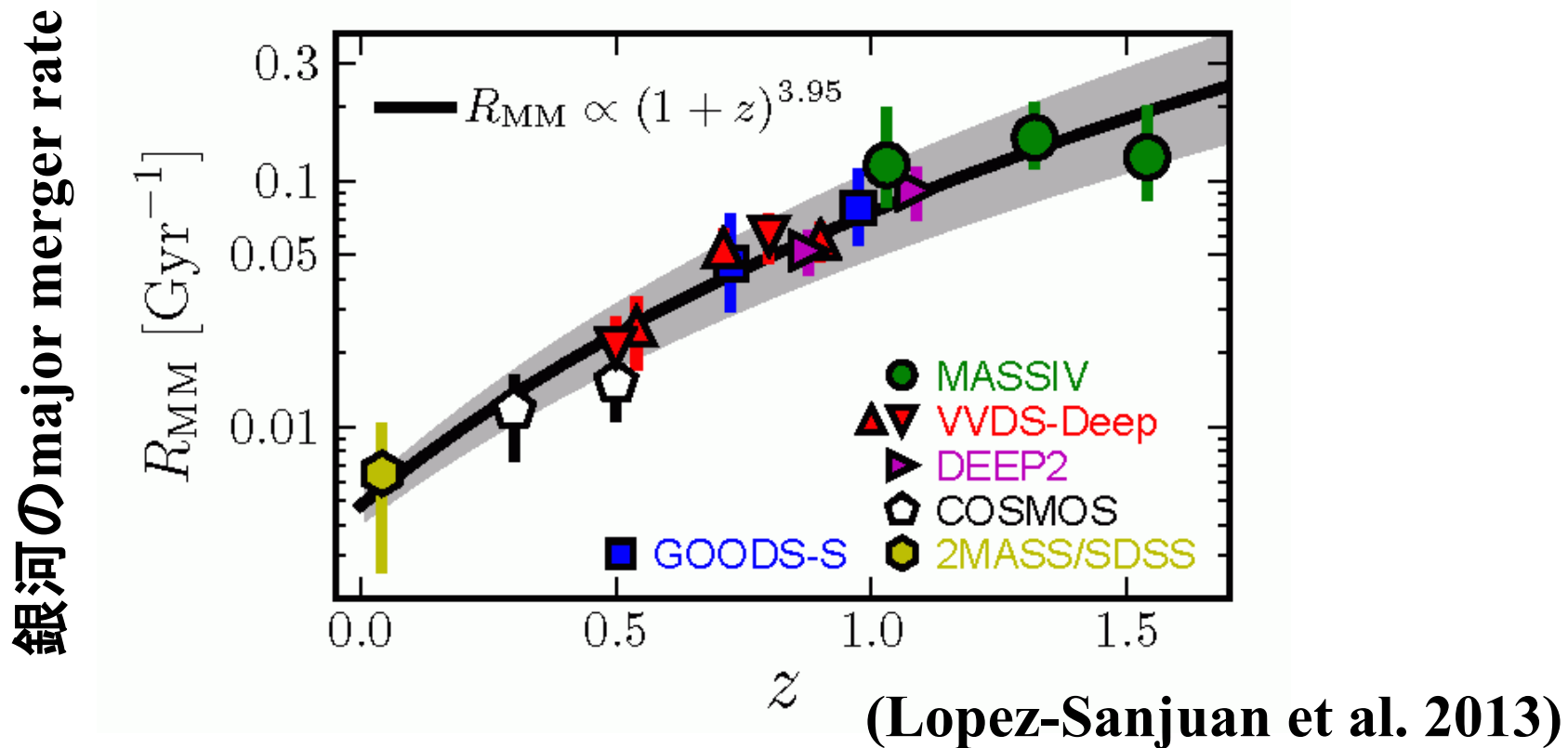


Interesting epoch again

(Burgarella et al. 2013)

## 星形成史における銀河合体の重要性

理論的な階層的構造形成シナリオ, および観測の両面から, **銀河合体**が銀河進化に重要な役割を果たすことは強く支持されている(e.g., Behroozi et al. 2013, Stott et al. 2013).

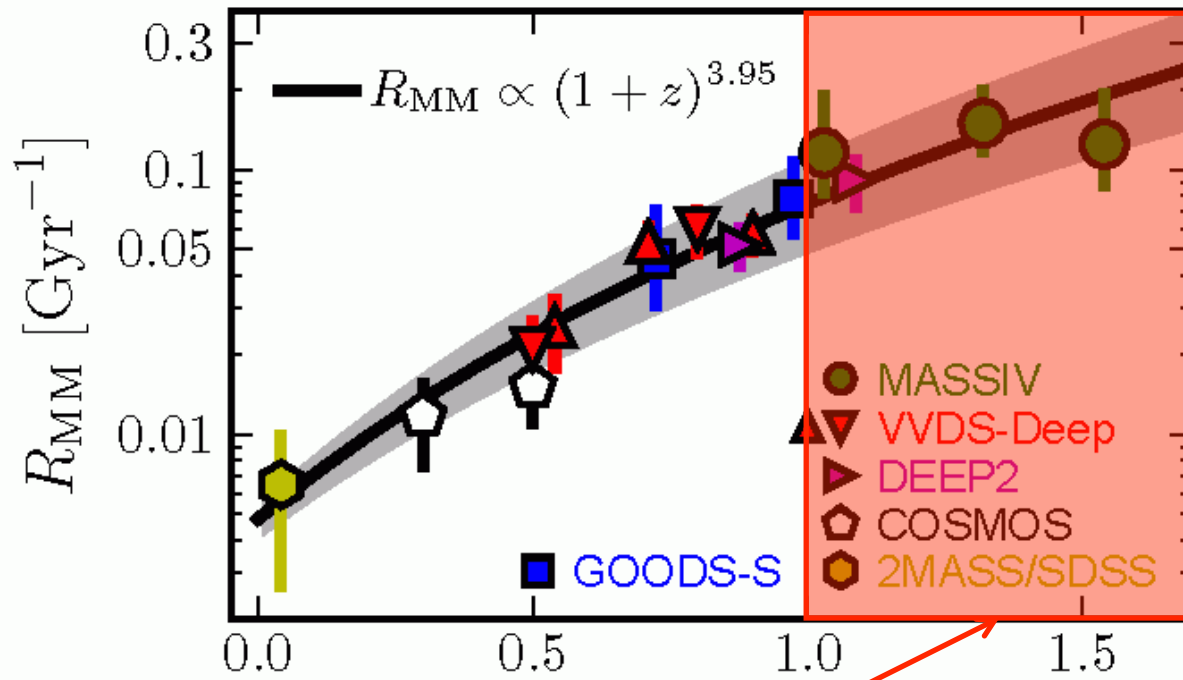


しかし最新の観測を以てしても定量的な議論は収束していない。

## 星形成史における銀河合体の重要性

理論的な階層的構造形成シナリオ, および観測の両面から,  
**銀河合体**が銀河進化に重要な役割を果たすことは強く支持  
されている(e.g., Behroozi et al. 2013, Stott et al. 2013).

銀河のmajor merger rate



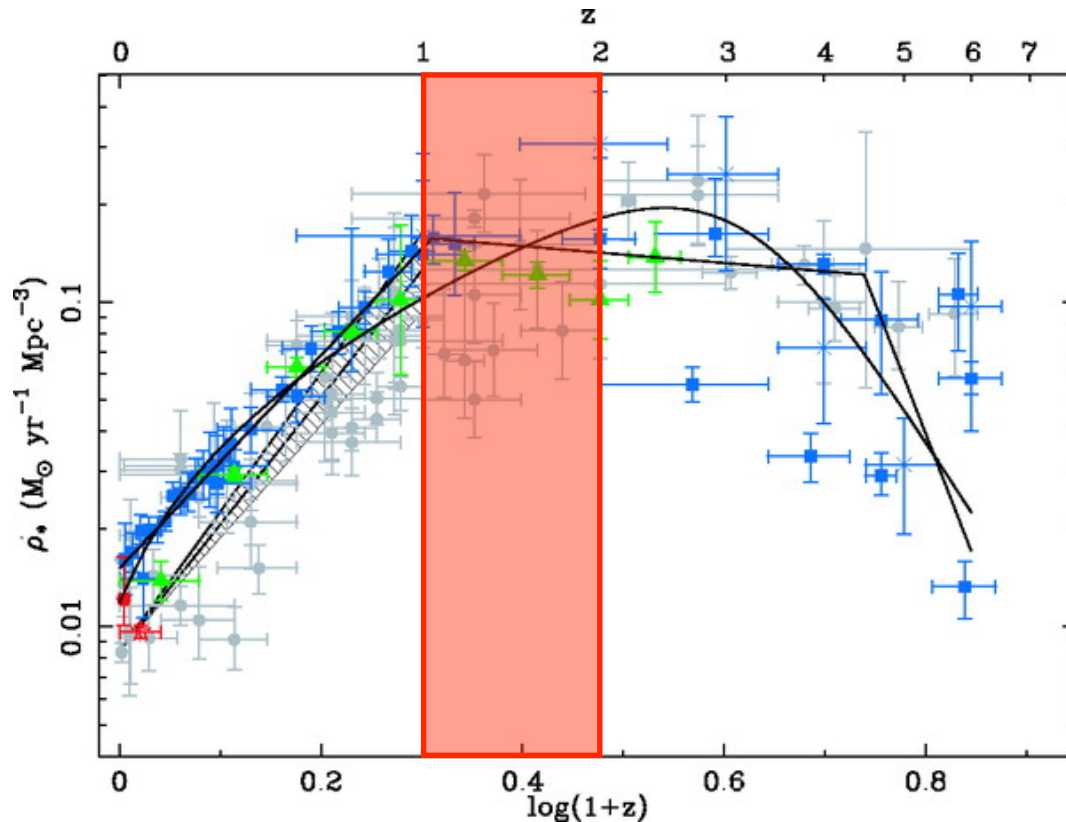
(Lopez-Sanjuan et al. 2013)

銀河およびハロー合体のピークは $z \sim 1-2$ .

# 銀河進化の注目ポイントその1

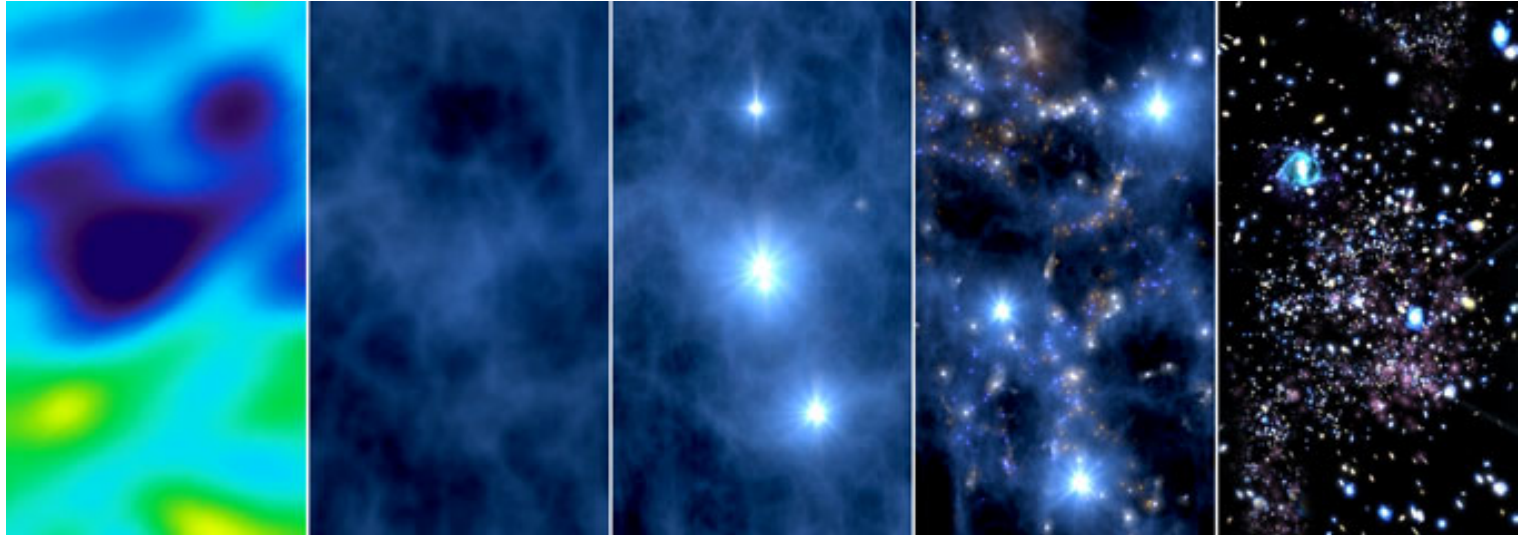
銀河が十分に成長して以降, 星形成, 銀河合体, 形態など  
様々な側面で最も激動する時期が $z = 1-2$ .

しかし, 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.



## 1.4 暗黒時代から銀河形成初期

暗黒時代から初代天体形成,そして集団的星形成モード(銀河形成)へと遷移していく時代は,銀河自体が成長していく時期.

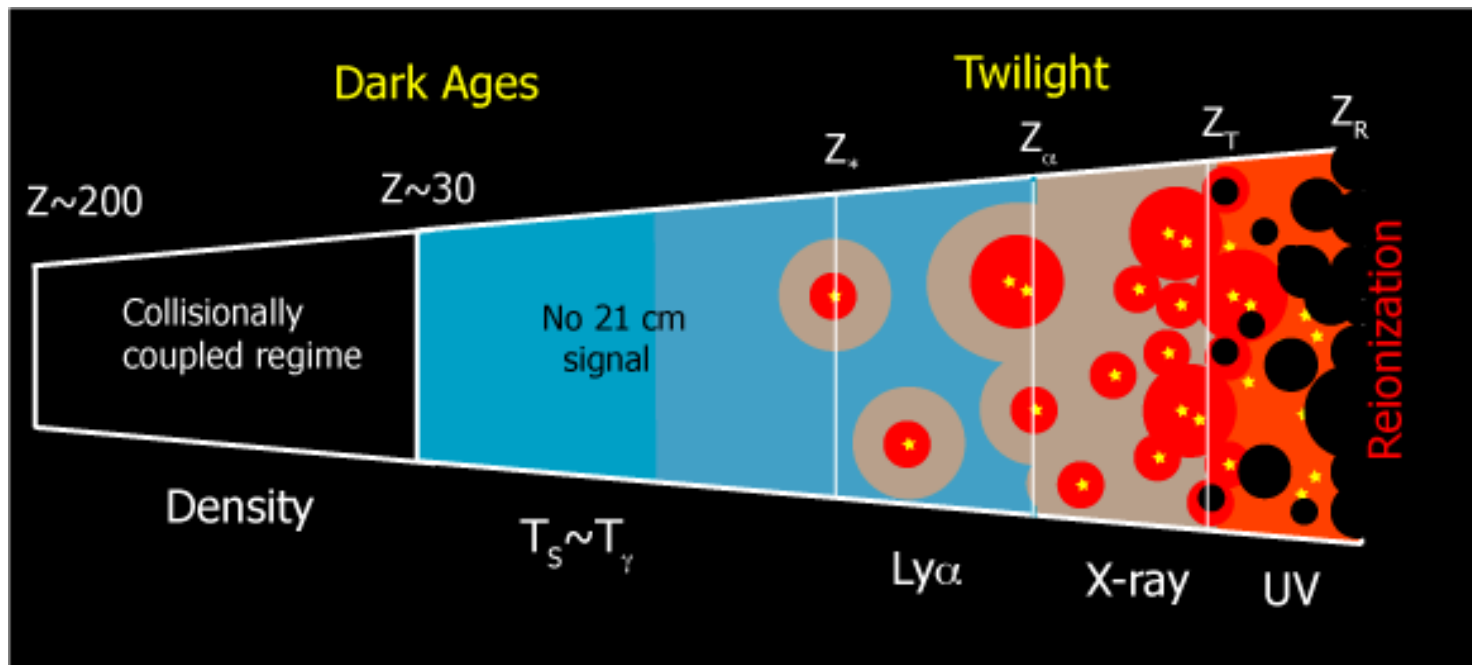


1. 非常に一様な物質分布から,ゆらぎが重力的に成長
2. ダークマターが重力ポテンシャルを形成
3. 通常物質が**ダークマターの塊(ハロー)に落下**
4. ガスが冷却・圧縮し,**星**が形成(初代星)
5. 初代星の**超新星爆発**により,宇宙最初の**重元素**が供給
6. 爆発的星形成が開始し,銀河形成が始まる

## 宇宙再電離の時期

宇宙再電離は暗黒時代の終わり頃, 初期天体が形成された場所から始まり, その周囲の電離領域が広がることで徐々に重なりあいながら拡大し, 最終的に宇宙全体が電離した.

⇒ 再電離の歴史が課題(cf. 杉山先生の講演)

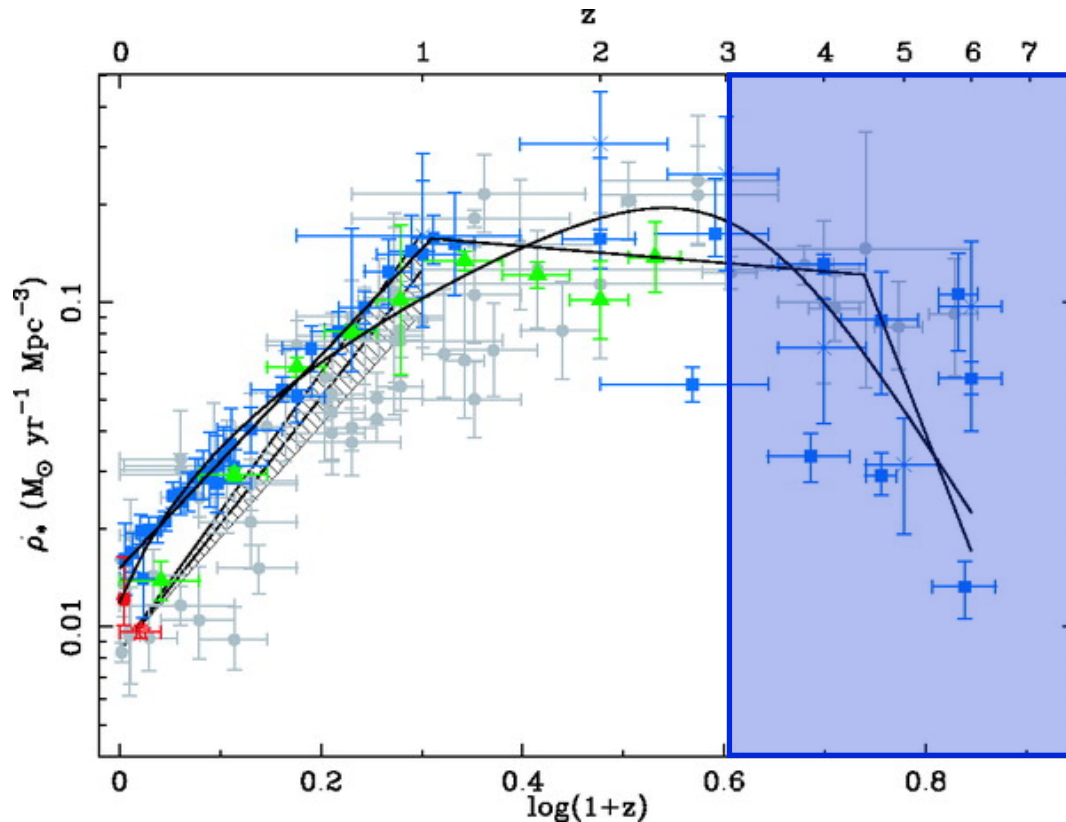




## 銀河進化の注目ポイントその2

銀河が微小な中性水素のゆらぎから誕生し、成長してゆく時期は  $3 < z < 20$  (銀河形成からEoRは  $6 < z < 20$ ).

暗黒時代のバリオンのプローブはHIしかない. また, 初期銀河は大量の中性ガスを含んだ(ミニ)ハローから始まる.



# 2 SKAが拓く可能性

## 2.1 SKA仕様

### SKAの仕様: SKA<sub>1</sub> (Phase 1)

- 最終的なSKA仕様の**10%程度の規模の段階**.
- 基本デザインは右表
- SKA<sub>1</sub>のサイエンスとしての2つが最重要課題として取り上げられることとなった
  1. 暗黒時代から現在までの中性水素の歴史解明
  2. パルサーによる重力波検出

| Parameter   | Value   |
|---|---|
| Frequency Range: Antennas                         |   |
| SKA <sub>1</sub> Low: (sparse aperture arrays)    | 70 – 450 MHz  |
| SKA <sub>1</sub> Mid: (dishes)                    |   |
| Capability range                                  | 0.3 – 10 GHz  |
| Initial baseline implementation                   | 0.45 – 3.0 GHz  |
| Baseline instrumentation                          |   |
| SKA <sub>1</sub> Low:                             | 70 – 450 MHz<br>2000 m <sup>2</sup> /K  |
| SKA <sub>1</sub> Mid:                             | 0.45 – 3.0 GHz<br>1000 m <sup>2</sup> /K  |
| SKA <sub>1</sub> Advanced Instrumentation Program | <i>e.g.</i><br><i>High-frequency feeds,</i><br><i>Field-of-view expansion technology,</i><br><i>AA digital upgrades,</i><br><i>Ultra-wide-band feeds etc.</i> |
| Frequency resolution (low-band):                  | 1 kHz   |
| Time resolution:                                  |   |
| Tied Array Beam (pulsars, VLBI)                   | 1 nsec  |
| Pulsar search equipment                           | 0.1 msec  |
| Max. baseline length from core                    | 100 km  |

## SKAの仕様:SKA<sub>2</sub> (Phase 2)

最終的なSKA. 最終的な詳細な仕様は今後の技術開発, サイエンス要求によって左右される.

### パラメーター 詳細

周波数範囲 70MHz~10GHz

感度 5,000 m<sup>2</sup>K<sup>-1</sup> (毎分400 μJy)

視野 200平方度(70~300MHz),  
1-200平方度(0.3~1GHz),  
最大1平方度(1~10GHz)

角度分解能 < 0.1秒角

帯域幅(同時観測) バンド中心±50%

スペクトル(周波数)チャンネル 16,384 毎バンド 毎基線長

偏光精度 10,000:1

合成ダイナミックレンジ画像 >1,000,000

## 2.2 現状との比較

|  |   | JVLA                 | MeerKAT             | SKA1-mid            | ASKAP               | SKA1-survey         | LOFAR-NL            | SKA1-low            |
|--|---|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>A<sub>eff</sub>/T<sub>sys</sub></b> | m <sup>2</sup> /K                               | 265                  | 321                 | 1630                | 65                  | 391                 | 61                  | 1000                |
| <b>Survey FoV</b>                      | deg <sup>2</sup>                                | 0.14                 | 0.48                | 0.39                | 30                  | 18                  | 6                   | 6                   |
| <b>Survey Speed FoM</b>                | deg <sup>2</sup> m <sup>4</sup> K <sup>-2</sup> | 0.98×10 <sup>4</sup> | 5.0×10 <sup>4</sup> | 1.0×10 <sup>6</sup> | 1.3×10 <sup>5</sup> | 2.8×10 <sup>6</sup> | 2.2×10 <sup>4</sup> | 6.0×10 <sup>6</sup> |
| <b>Resolution</b>                      | arcsec  | 1.4                  | 11                  | 0.22                | 7                   | 0.9                 | 5                   | 11                  |

A<sub>eff</sub>/T<sub>sys</sub>:

6xJVLA

6xASKAP

16xLOFAR

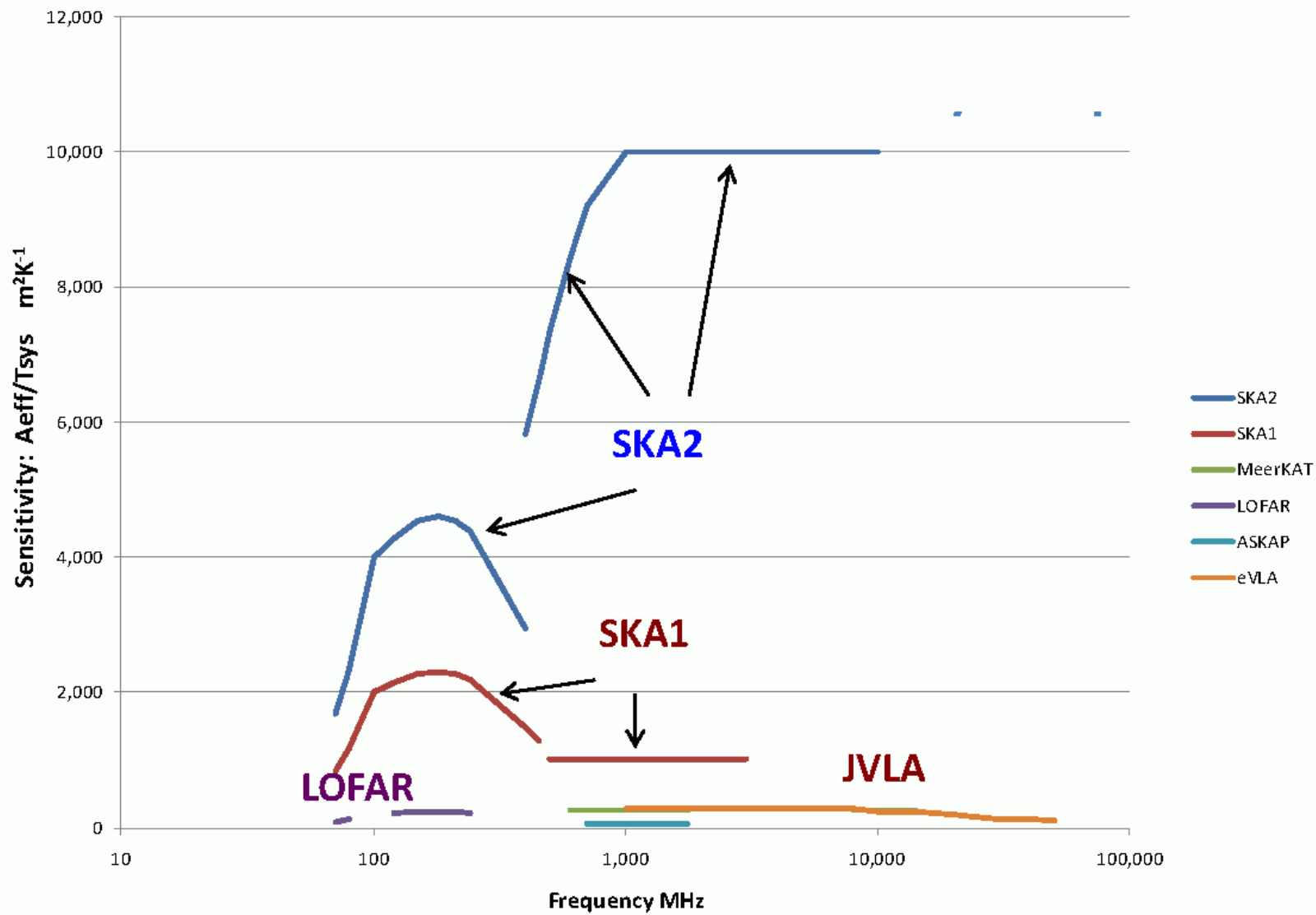
Survey Speed:

100x

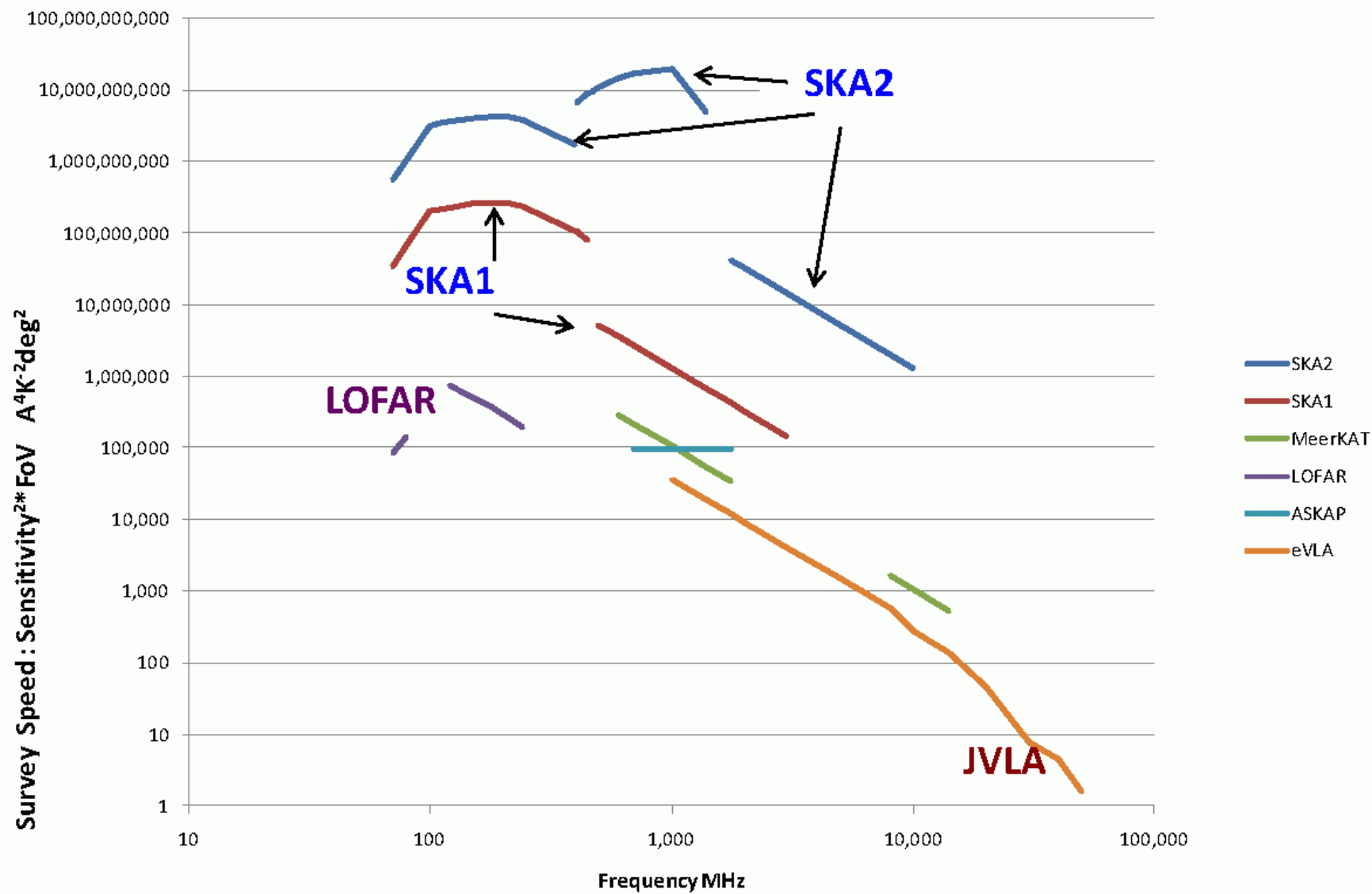
22x

270x

# SKAと他の装置の感度比較

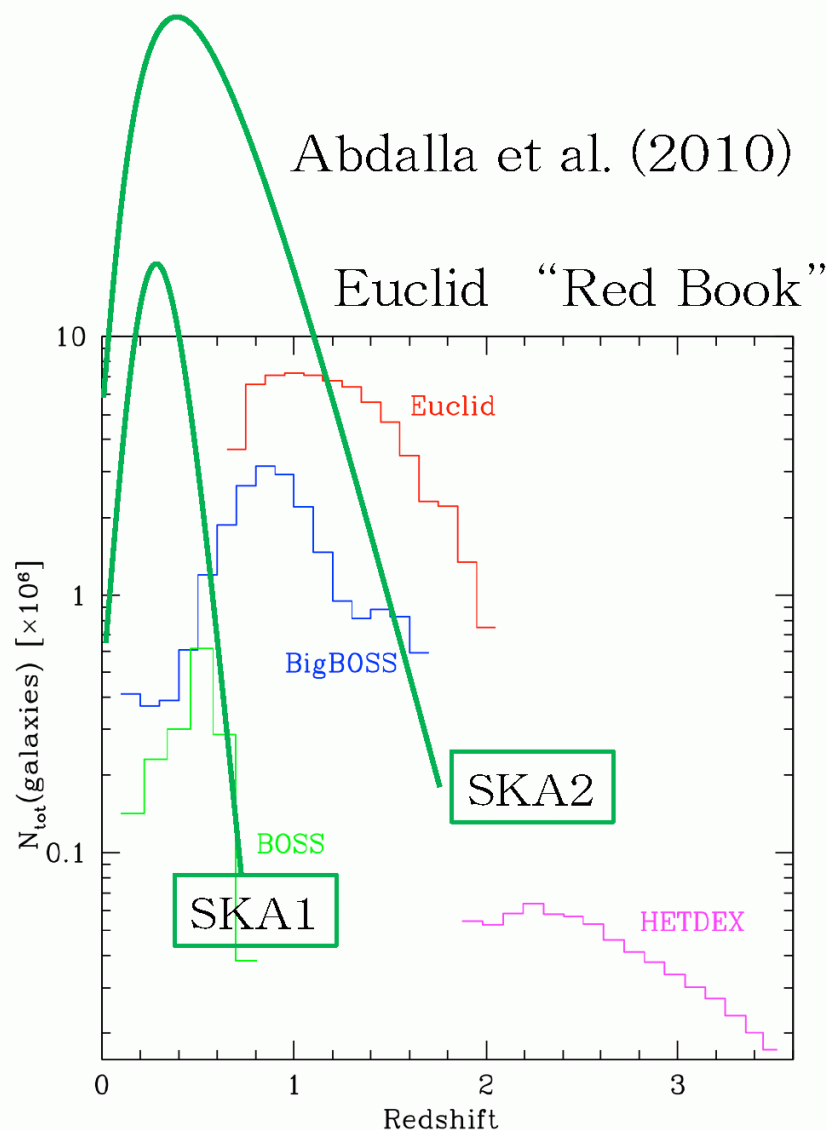


# SKAと他の装置のサーベイスピード比較



## 2.3 予想赤方偏移分布

### Expected HI redshift distribution



HIの赤方偏移分布はSKA1で $z \sim 0.4$ に、SKA2で $z \sim 0.6$ くらいにピークを持つ。

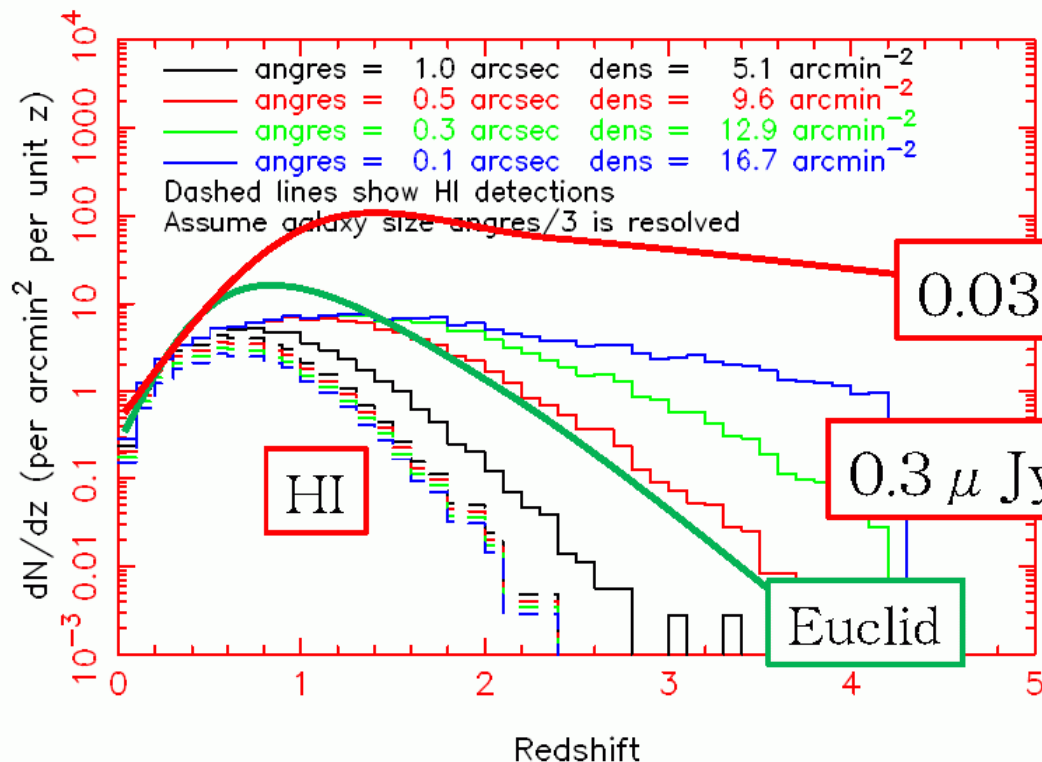
SKA2では検出されるソースは大部分が $z < 2$ 。

(高橋さんスライドより)

## 2.3 予想赤方偏移分布

### Expected radio continuum source redshift distribution

Radio continuumの赤方偏移分布はHIよりも high- $z$  tailがずっと長く伸びている。



(Blake et al. 2007)

*N.B.* しかし、この予想は銀河進化自体を仮定して計算されており、それ自体が検証の対象である。

(高橋さんスライドより)



# 3 銀河進化の新しい課題

## 3.1 SKAの波長帯での銀河進化研究

現在, 銀河のHIによるサーベイは浅く(> mJy), 角分解能も悪い.

**NRAO VLA Sky Survey (NVSS)**

**Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS)**

**Faint Images of the Radio Sky at Twenty-cm (FIRST)**

**Westerbork Northern Sky Survey (WENSS)**

**The HI Parkes All Sky Survey (HIPASS)**

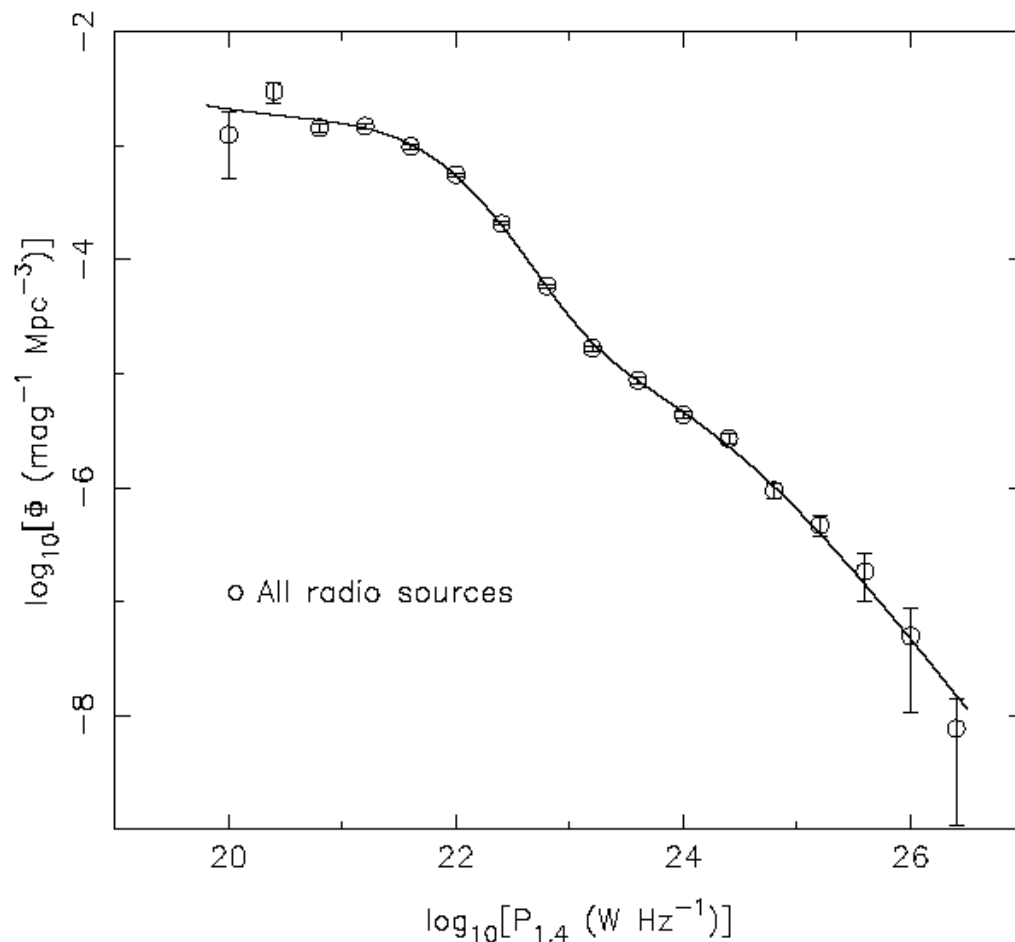
**The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey (ALFALFA)**

etc.

$\langle z \rangle \sim 0.01-6$

⇒ 統計的に議論できるのは近傍銀河のみで, 進化の議論は難しい.

## 3.2 銀河の電波光度関数



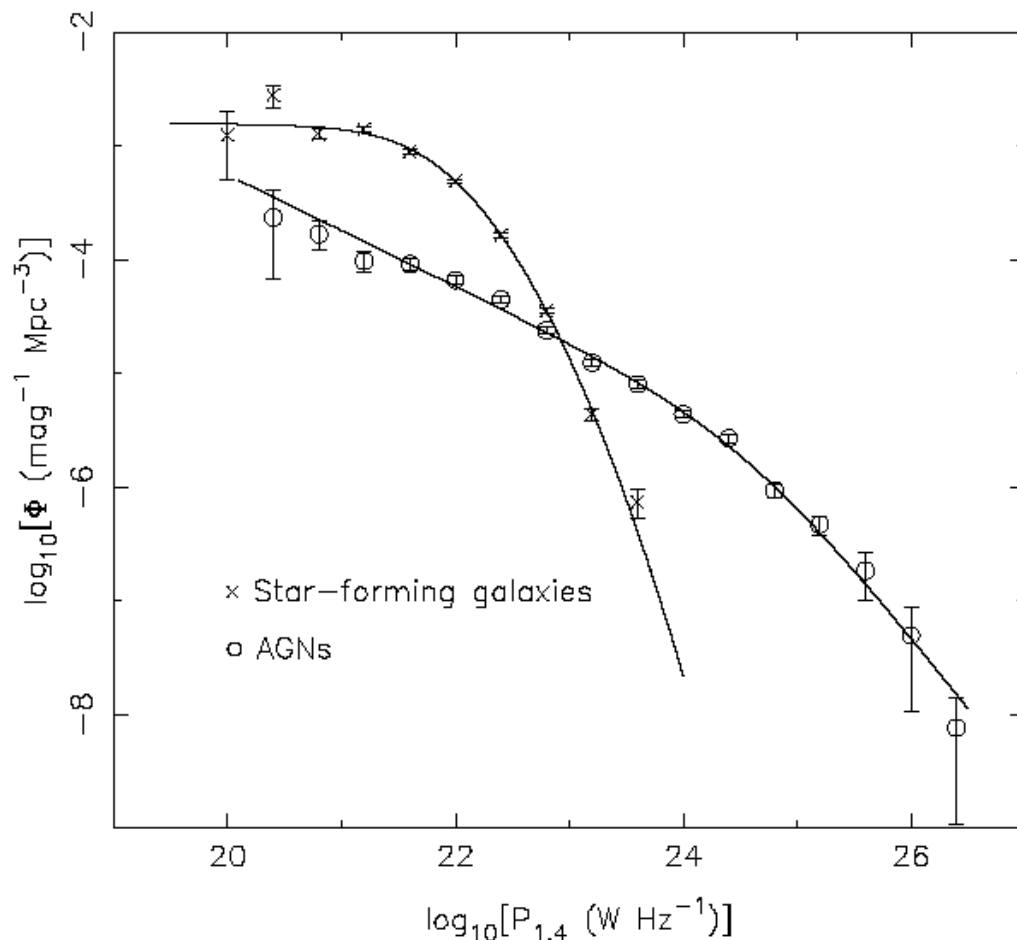
(Mauch & Sadler 2007)

NVSSと6dFGRSによる  
1.4GHzでの銀河の光度  
関数.

電波光度関数は、可視、  
NIR,あるいはUVで見ら  
れるようなSchechter関数  
では近似できない。

またFIRのように冪型関  
数でもフィットしない。

## 3.2 銀河の電波光度関数

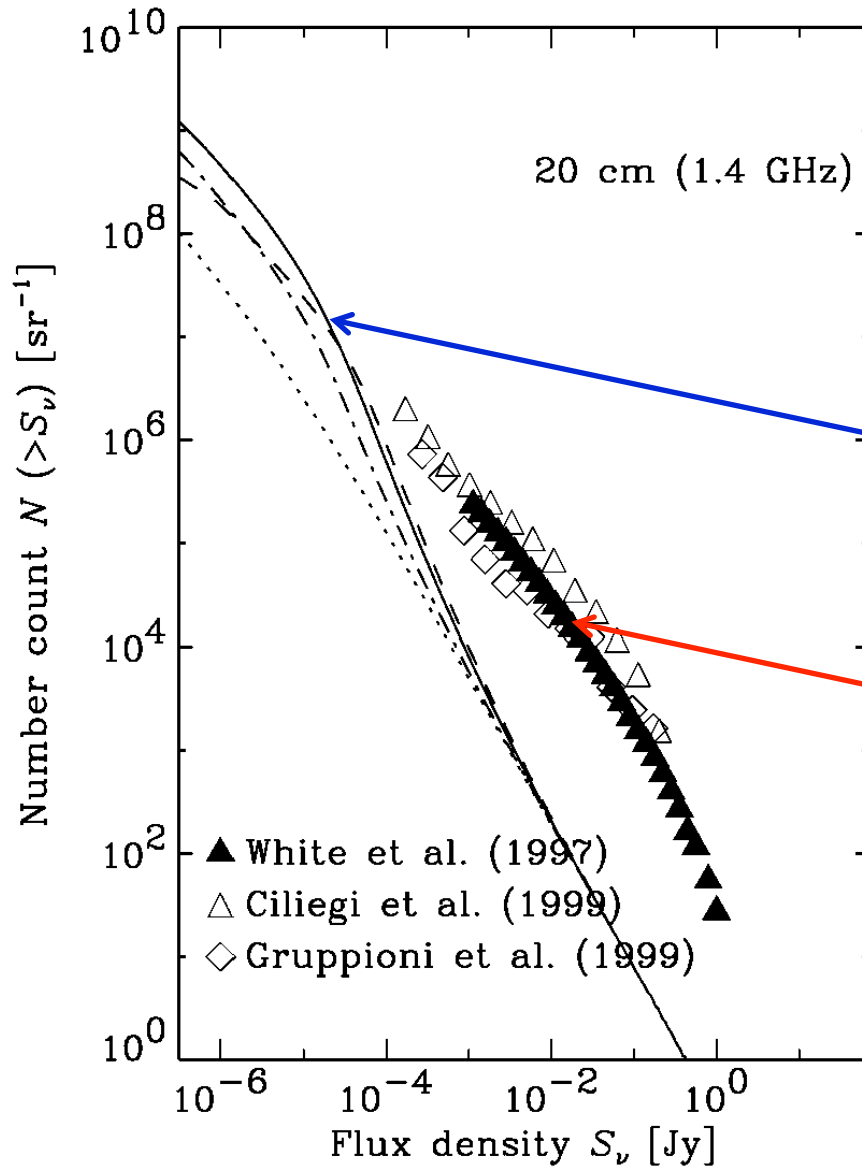


星形成銀河とAGN(電波銀河)それぞれの光度関数を描くと, 冪関数型(赤外銀河に近い)の2成分があることが分かる(Machalski & Godlowski; Mauch & Sadler 2007)

⇒この割合, あるいはそれぞれの成分は進化したか?

(Mauch & Sadler 2007)

## 3.2 銀河の電波光度関数



Number countsからは、星形成銀河とAGNの電波での進化は異なっていることが示唆される (Takeuchi et al. 2001).

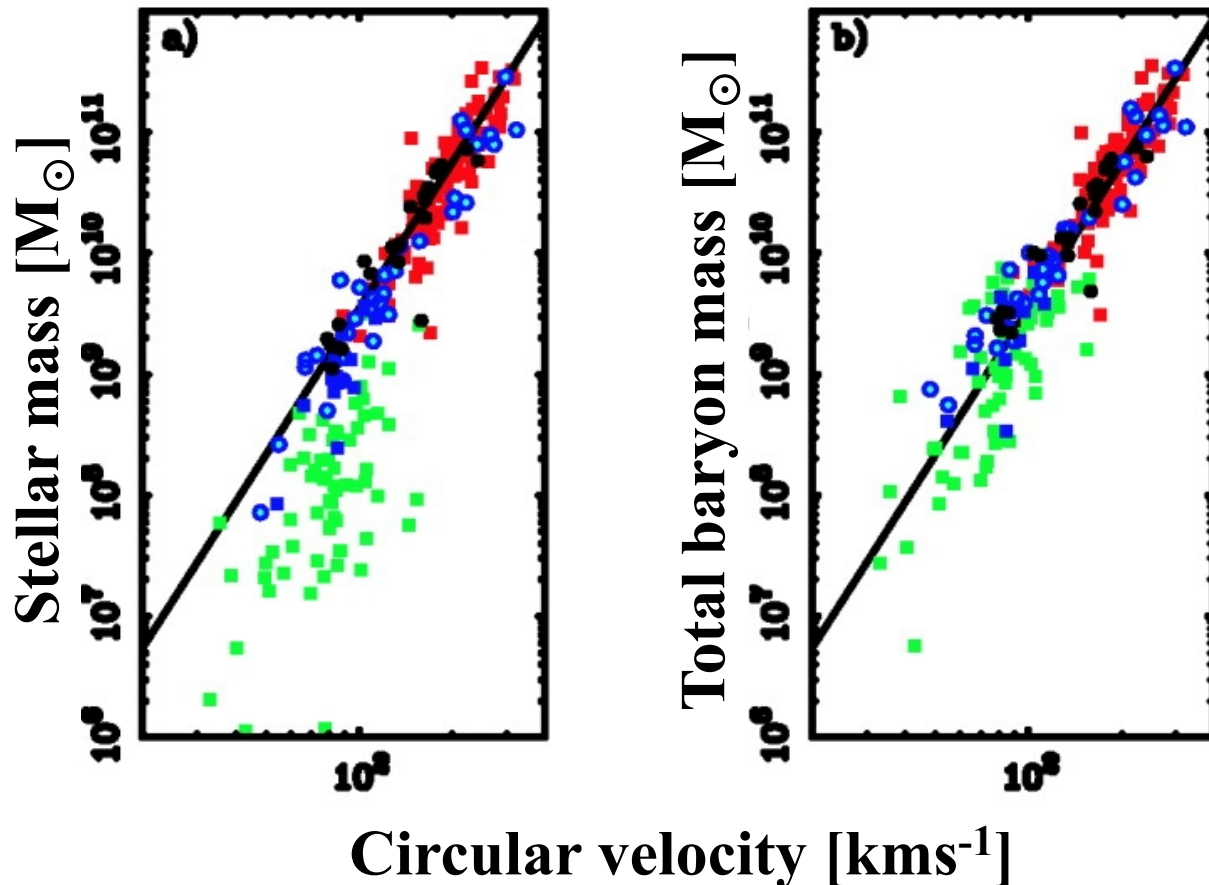
星形成銀河の銀河計数モデル

観測される銀河計数：明るい flux のカウントはAGN (電波銀河) の発達したローブが支配的

(Takeuchi et al. 2001)

### 3.3 銀河のガスを含むスケーリング則

#### Baryonic Tully-Fisher (BTF) relation



$$M_d = AV_c^b$$
$$b = 3.98 \pm 0.12$$

(McGaugh et al. 2000)

HI mass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).

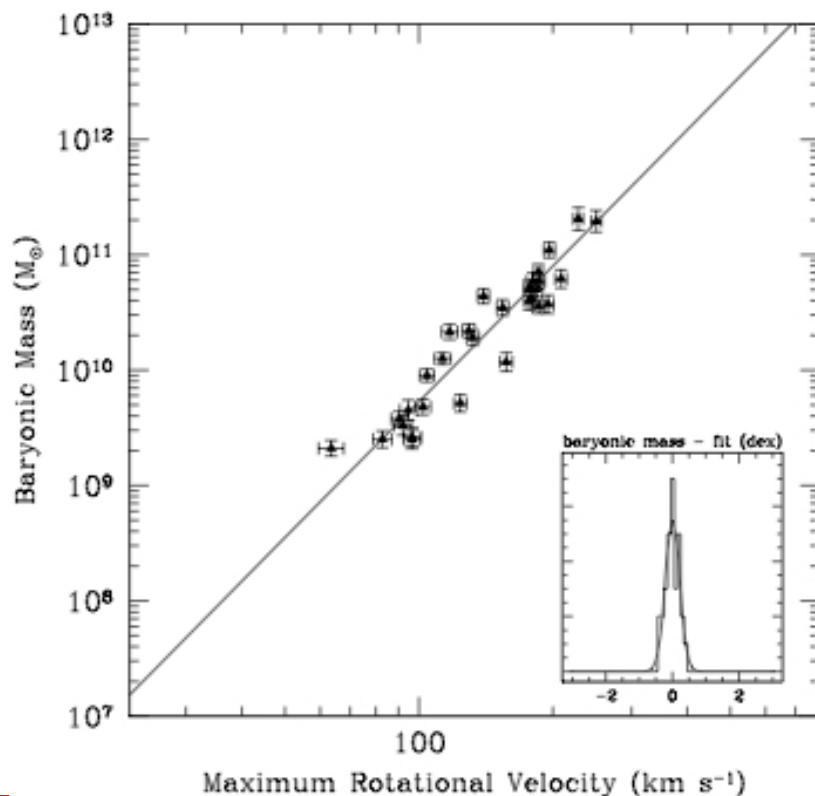
## Baryonic Tully-Fisher (BTF) relation: HIPASS result

The HI Parkes All Sky Survey (HIPASS)チームは

$$M_B \propto V^4$$

を示した。これは光度に基づく古典的TFのスロープよりも急である。しかし、HIPASSは浅すぎてHI massのレンジが小さく、結論は決定的ではない。

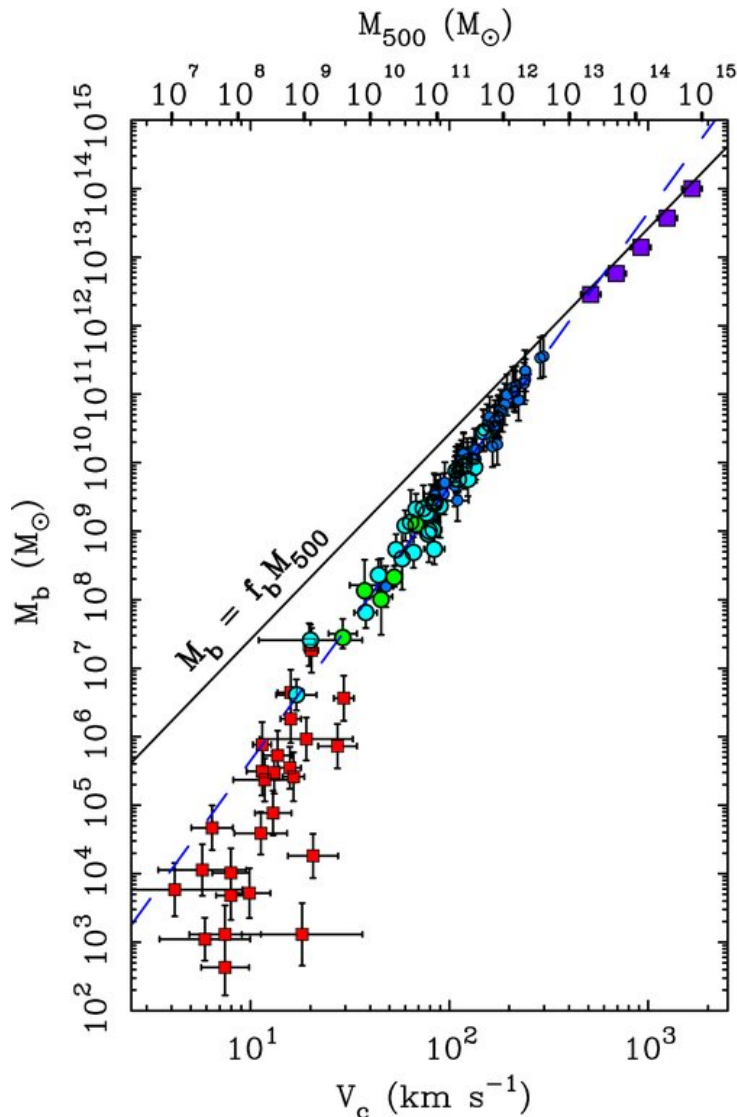
最近の研究では、小質量側で単一  
冪から下向きに外れるという研究結  
果もある。



Meyer et al. (2008)

URL: <http://www.atnf.csiro.au/research/multibeam/release/>

# The “extended” BTF



(McGaugh et al. 2010)

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スロープが浅くなる (clusters: violet symbols, giant galaxies: blue symbols, and dwarf spheroidals: red symbols).

⇒ 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。

**Toward lower HI masses!**

## 近傍銀河のスケーリング則検証に要求される感度

HI emissionをHI mass =  $10^3 M_{\odot}$  ( $\sim$  dSphのバリオン質量)まで検出するには、距離3Mpcのところで

$$S_{\nu} = 50 \left( \frac{M}{10^3 M_{\text{sun}}} \right) \left( \frac{v}{10 \text{ kms}^{-1}} \right)^{-1} [\mu\text{Jy}]$$

が必要.

**$\Rightarrow$  SKA1で十分可能.**



## 星形成主系列銀河 (Star forming galaxy sequence)

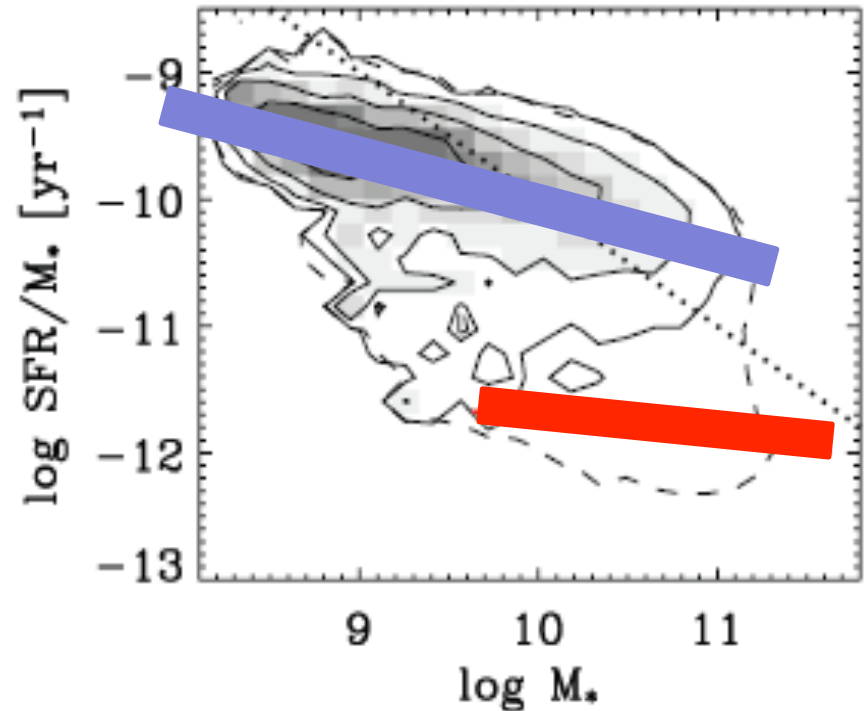
銀河進化の観点からは**星形成率**が最も興味ある物理量であり、星形成率の関係するスケーリング則を検証したい。

Specific star formation rate (SSFR)

$$\text{SSFR} = \frac{\text{SFR}}{M_*}$$

星質量-SSFR平面上で、非常に顕著な星形成銀河の系列がみられる: **星形成主系列銀河 (star-formation main sequence)**.

cf. 古典的な色-等級図ではブルークラウドに対応する。



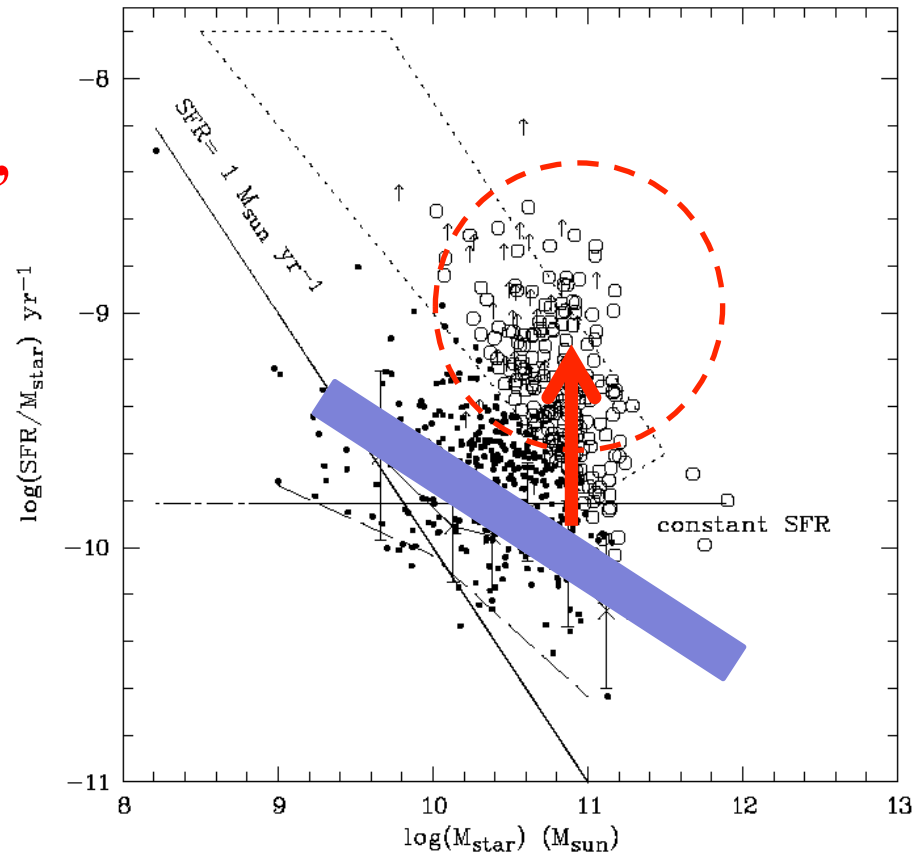
Schiminovich et al. (2007)

# 星形成主系列銀河(Star forming galaxy main sequence)

Secularな進化をしている(合体銀河等ではない)星形成銀河の系列.

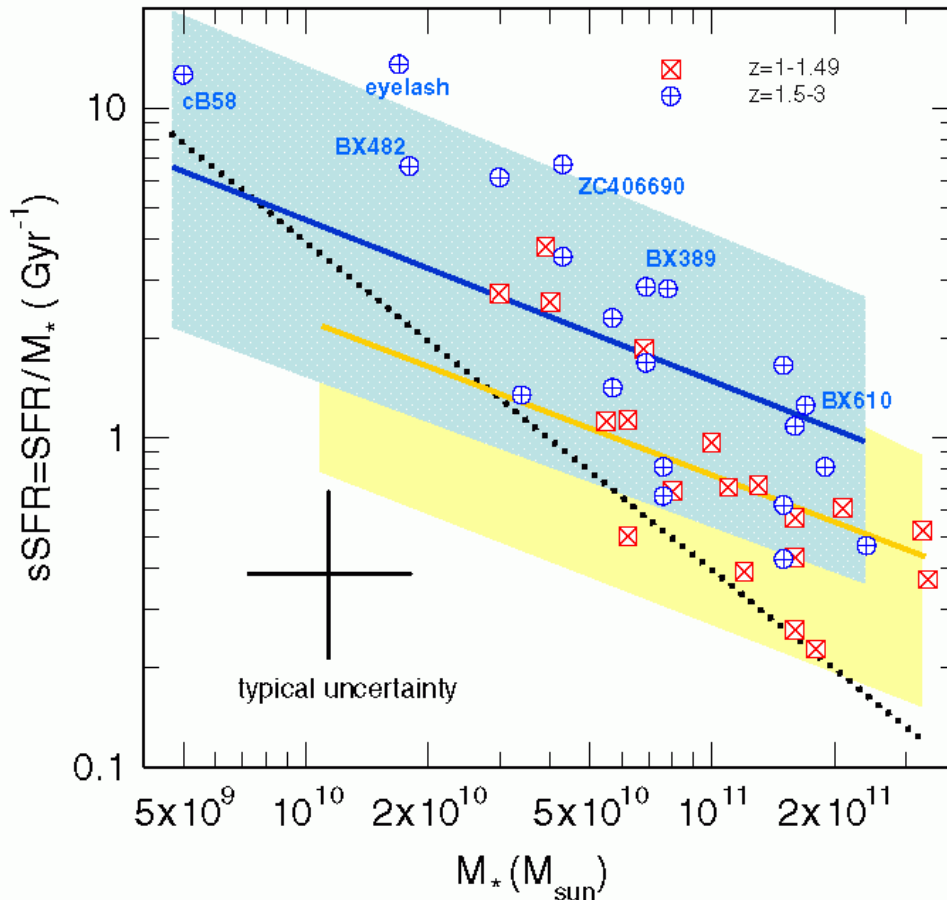
爆発的星形成銀河(ULIRGなど)はこれから大きく外れる(e.g., Buat et al. 2007).

Buat et al. (2007)



# 星形成主系列銀河(Star forming galaxy main sequence)

Secularな進化をしている(合体銀河等ではない)星形成銀河の系列。



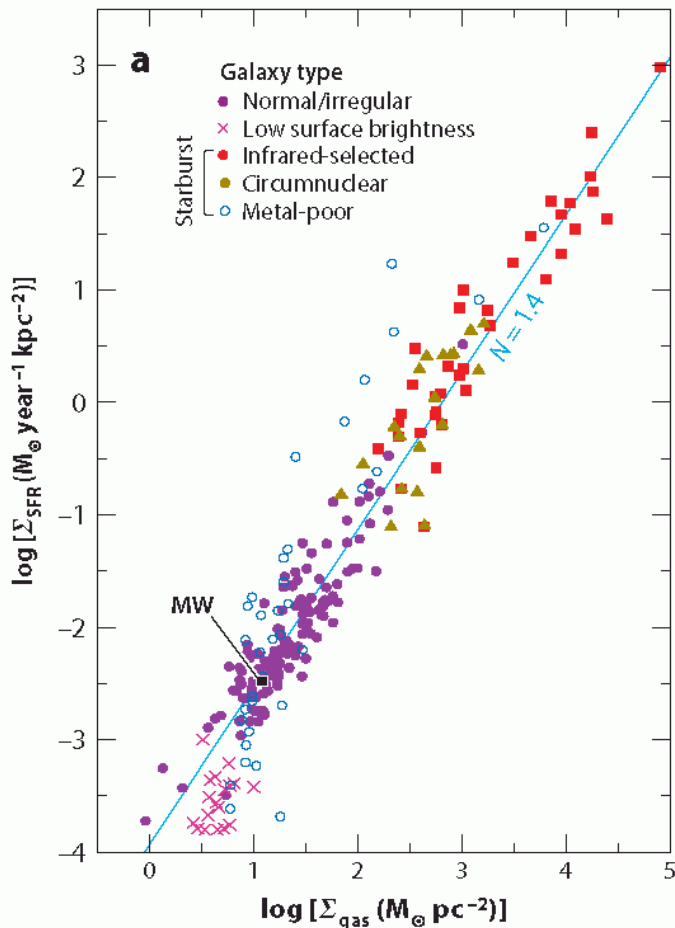
Genzel et al. (2012)

様々な物理量への依存性が活発に検証されている(ダスト温度, クランピネスなど). 特に, 分子ガスとの関連が注目されている(Genzel et al. 2012; Magnelli et al. 2012).

COの観測は $1 < z < 2$ に届きつつあるが, サーベイと呼べる段階ではない.  
HIはまだ全く届かない.

## Schmidt-Kennicutt law

銀河の**サイズ**を考慮することにより、単位面積当たりのガス密度と星形成率密度の関係を議論することができる。この関係が**Schmidt-Kennicutt law**として知られる。



古典的なSchmidt-Kennicutt lawは星形成率とガスの**面密度**の間の関係。

幅広いガス面密度範囲にわたり、単一幂の関係が見られるが、その傾きについては現在も議論が収束していない。

Kennicutt & Evans (2012)

# Schmidt-Kennicutt law

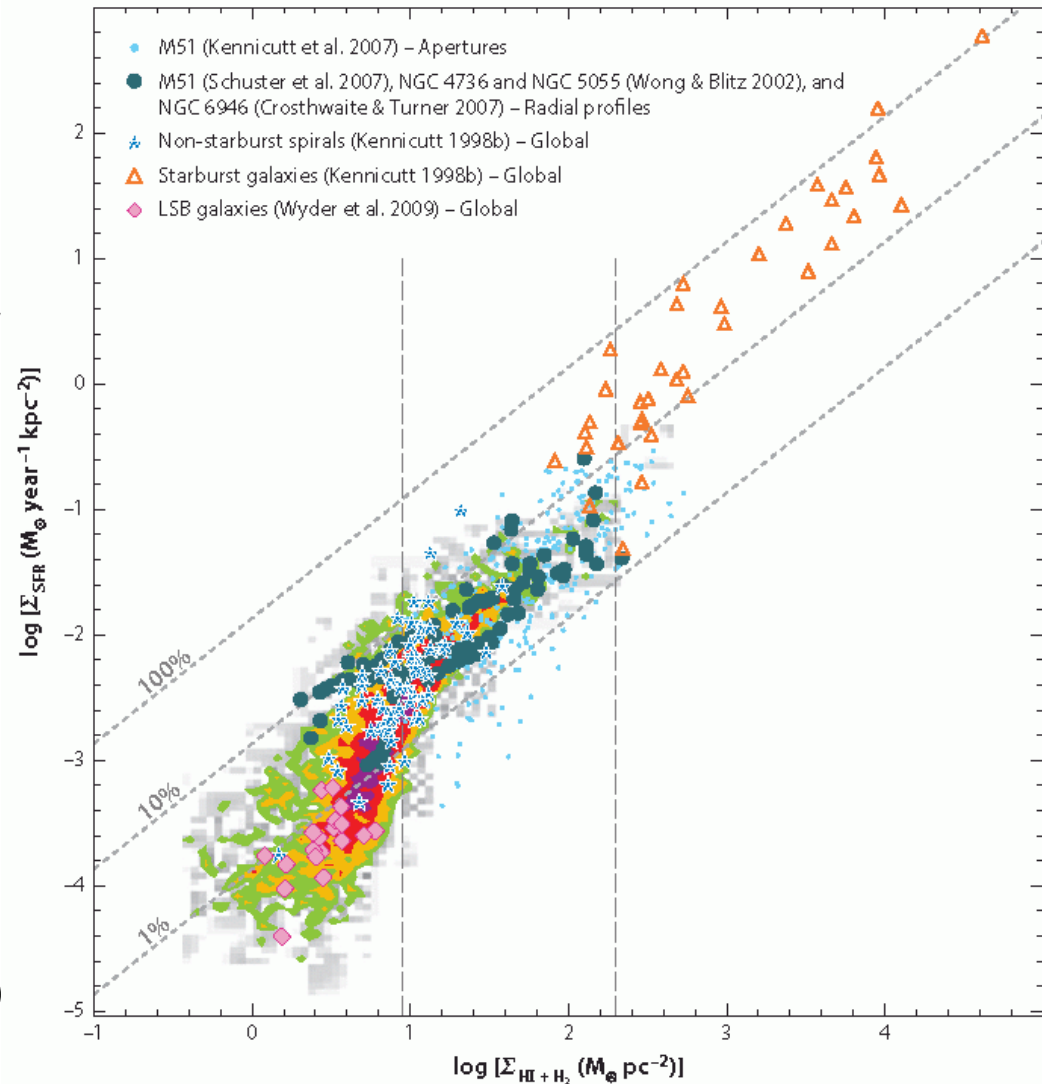
S-K lawが示すのは, 全ガス質量( $\text{HI} + \text{H}_2$ )とSFRの密度の相関.

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.

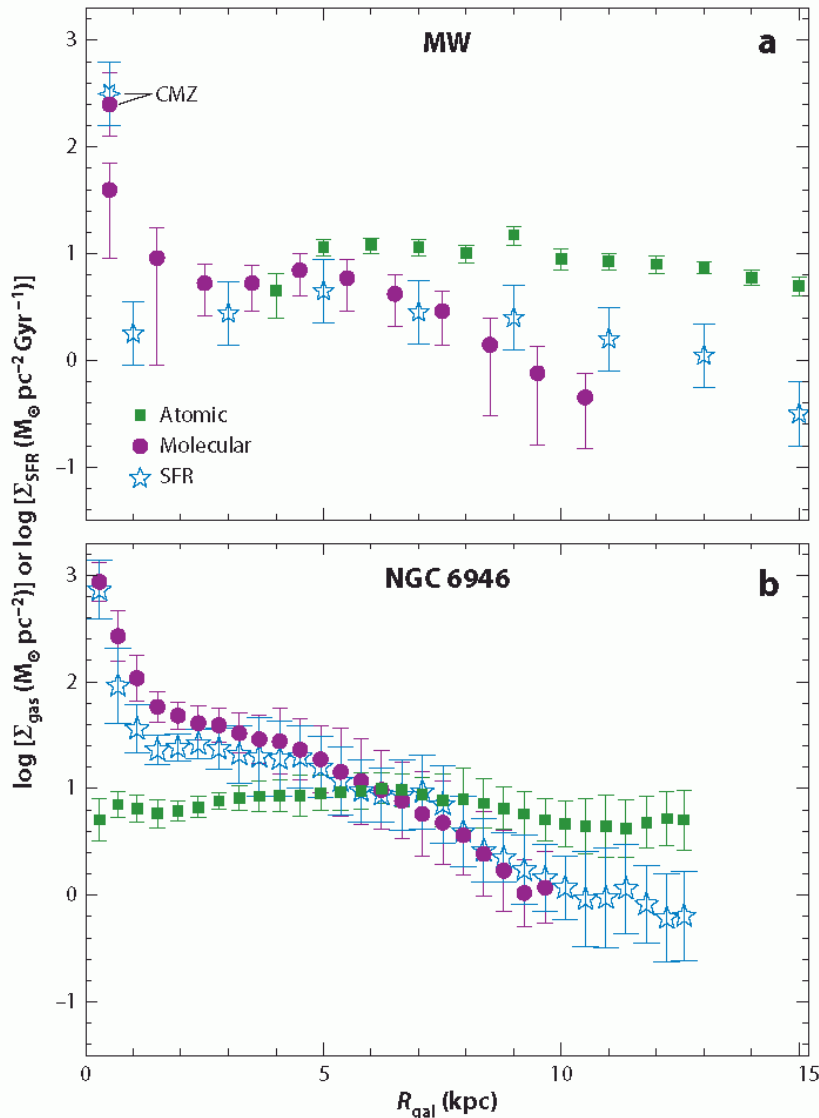
⇒ SKA1からSKA2

分子観測とのsynergyも重要!

Kennicutt & Evans (2012)



# 水素原子から水素分子への遷移と星形成



一般に、星形成は濃い分子雲の密度と相関していると考えられている。

しかし、星形成に $\text{H}_2$ 分子の存在が必要なのではなく、星形成の生じる条件では分子ができやすいという因果関係であるという指摘がある (Krumholz et al. 2011).



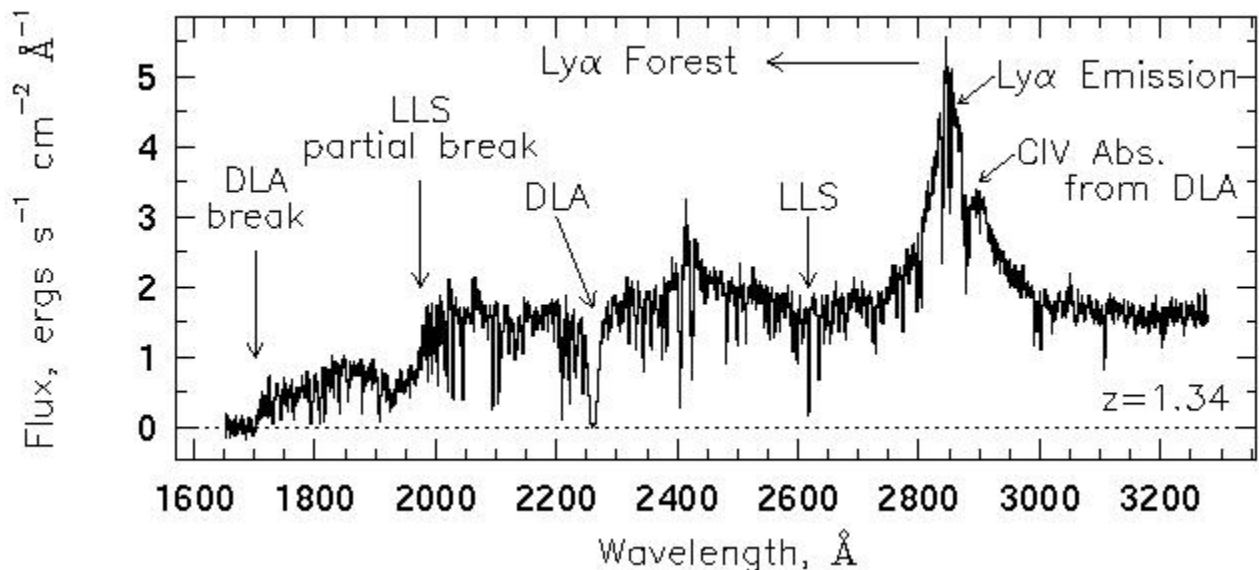
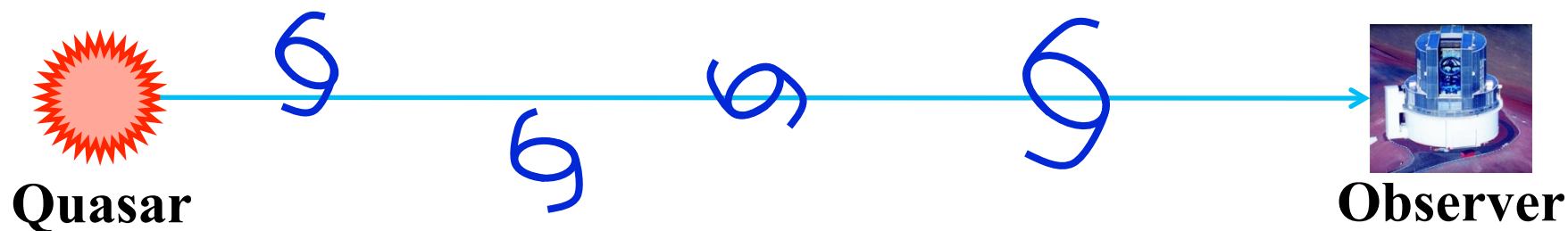
原子-分子遷移の直接検証が必要! SKA1ならば、銀河系および近傍銀河を分解して詳細な検証が可能 (cf. 福井先生の講演).

Kennicutt & Evans (2012)

# 3.4 銀河形成期

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測

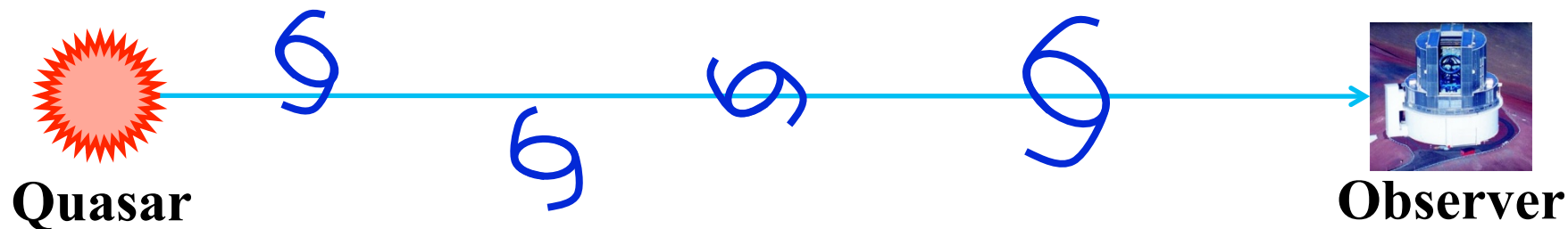
可視光では、銀河になっていないガス、あるいはガスの多い若い銀河の有効な検出方法として、**QSO吸収線系**の観測が知られている。



## 3.4 銀河形成期

### ガスが支配的なフェーズの銀河の観測

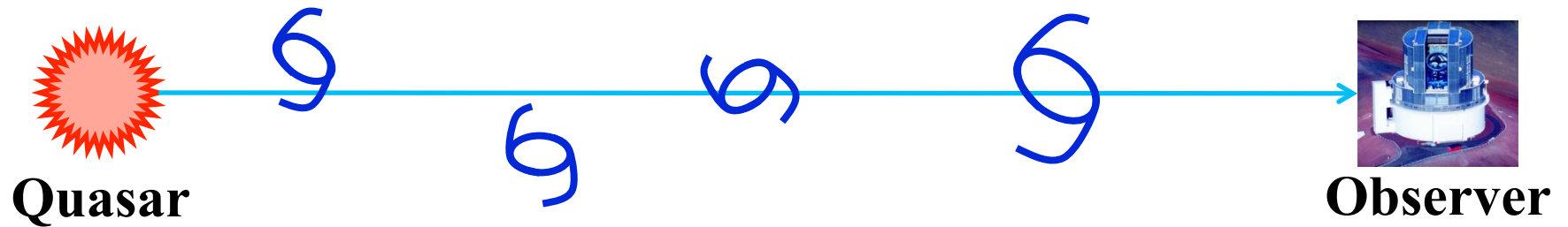
可視光では、銀河になっていないガス、あるいはガスの多い若い銀河の有効な検出方法として、**QSO吸収線系**の観測が知られている。



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。



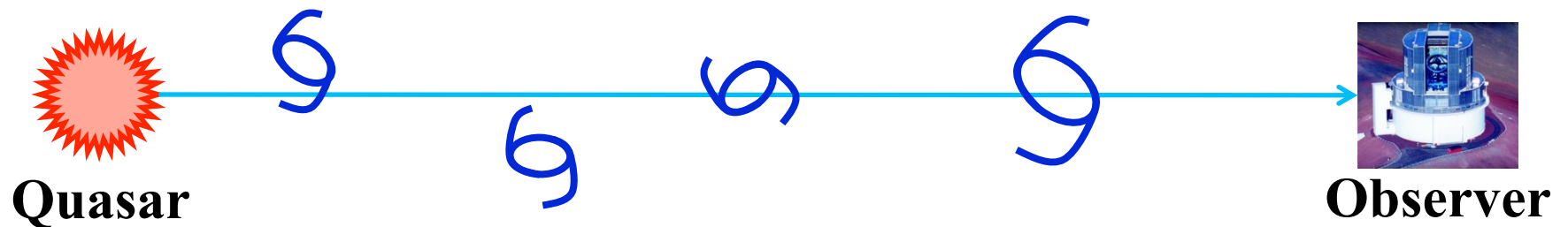
## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



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).

また, DLAは小さいスケールでの宇宙の大規模構造のパワー Spektralを検証するプローブでもある.

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測

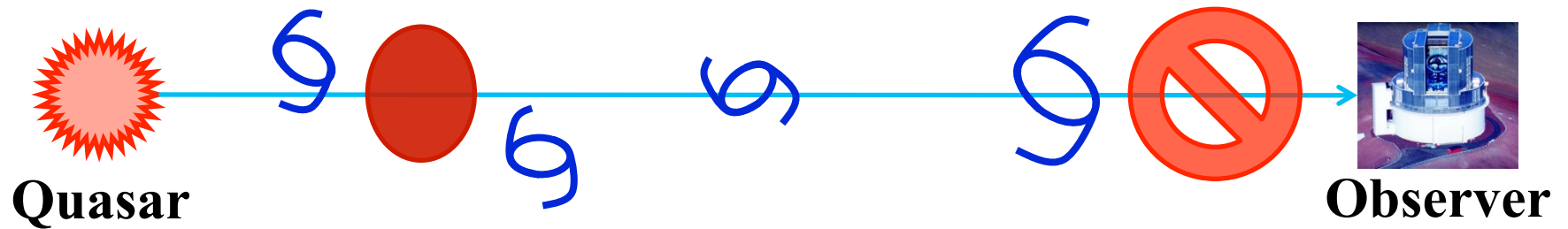


観測から, これらの系はガスリッチで, 低金属量であることが知られている(e.g., Ledoux et al. 2003).

また, DLAは小さいスケールでの宇宙の大規模構造のパワースペクトルを検証するプローブでもある.

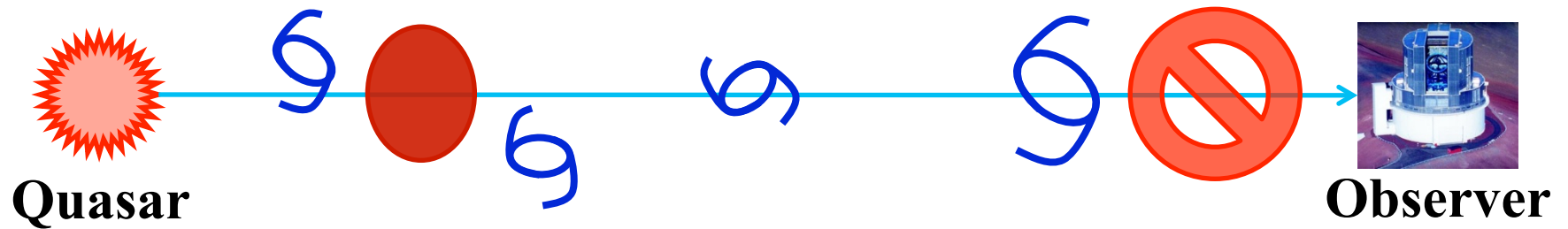
しかし, optical/UVベースでの観測には本質的な問題がある!

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



我々は吸収線系を検出したいのだが、非常に高い注密度のシステムは、背景クェーサーからの放射を非常に強く減光してしまい、そもそも最初のセレクションから漏れてしまう(Vladilo & Péroux 2005).

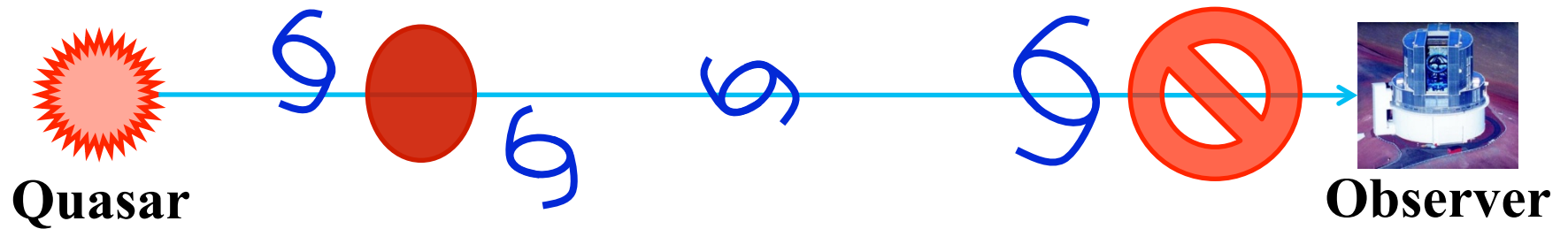
## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



我々は吸収線系を検出したいのだが、非常に高い注密度のシステムは、背景クェーサーからの放射を非常に強く減光してしまい、そもそも最初のセレクションから漏れてしまう(Vladilo & Péroux 2005).

このような高い柱密度の系は**最初の爆発的星形成**が生じる直前である可能性が高い、つまりまさに我々が観測したい系であり、**宇宙の星形成史**を理解するために本質的に重要。

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測

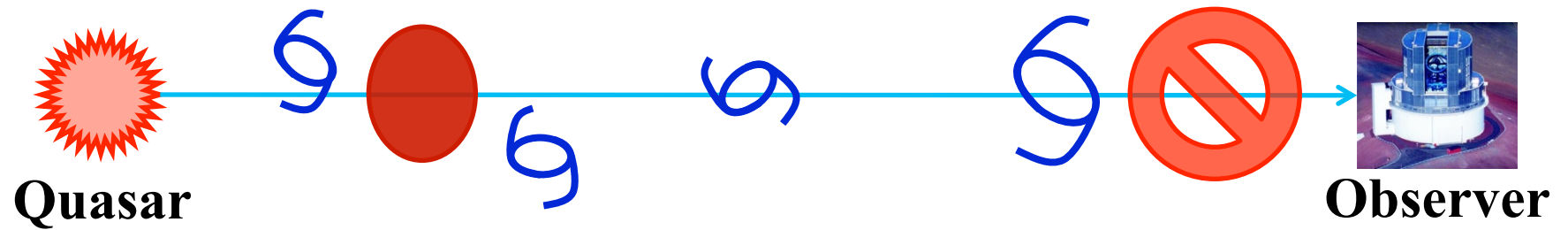


我々は吸収線系を検出したいのだが、非常に高い注密度のシステムは、背景クェーサーからの放射を非常に強く減光してしまい、そもそも最初のセレクションから漏れてしまう(Vladilo & Péroux 2005).

このような高い柱密度の系は**最初の爆発的星形成**が生じる直前である可能性が高い、つまりまさに我々が観測したい系であり、**宇宙の星形成史**を理解するために本質的に重要。

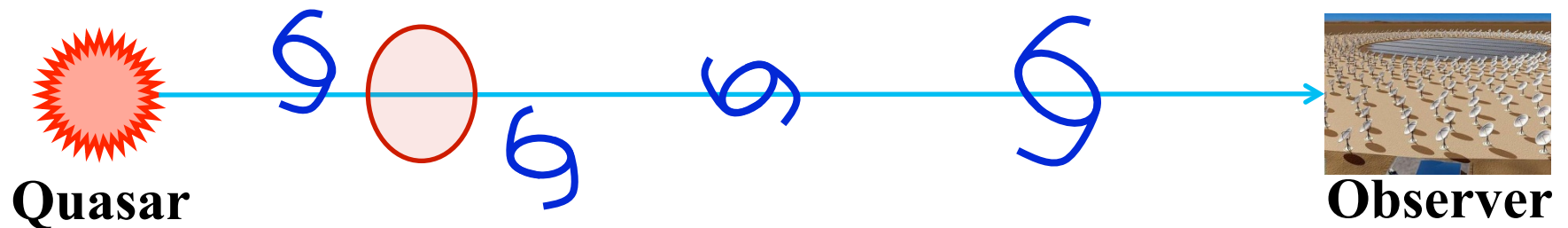
➡ このような選択バイアスは致命的である!

# ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



この致命的問題をどう解決するか？

## ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



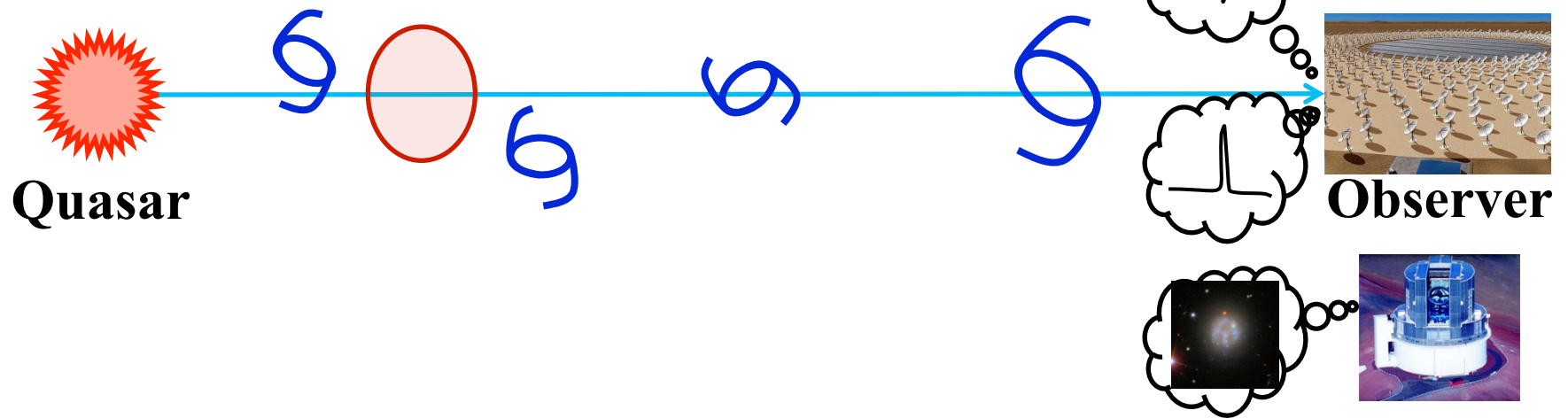
この致命的問題をどう解決するか？

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

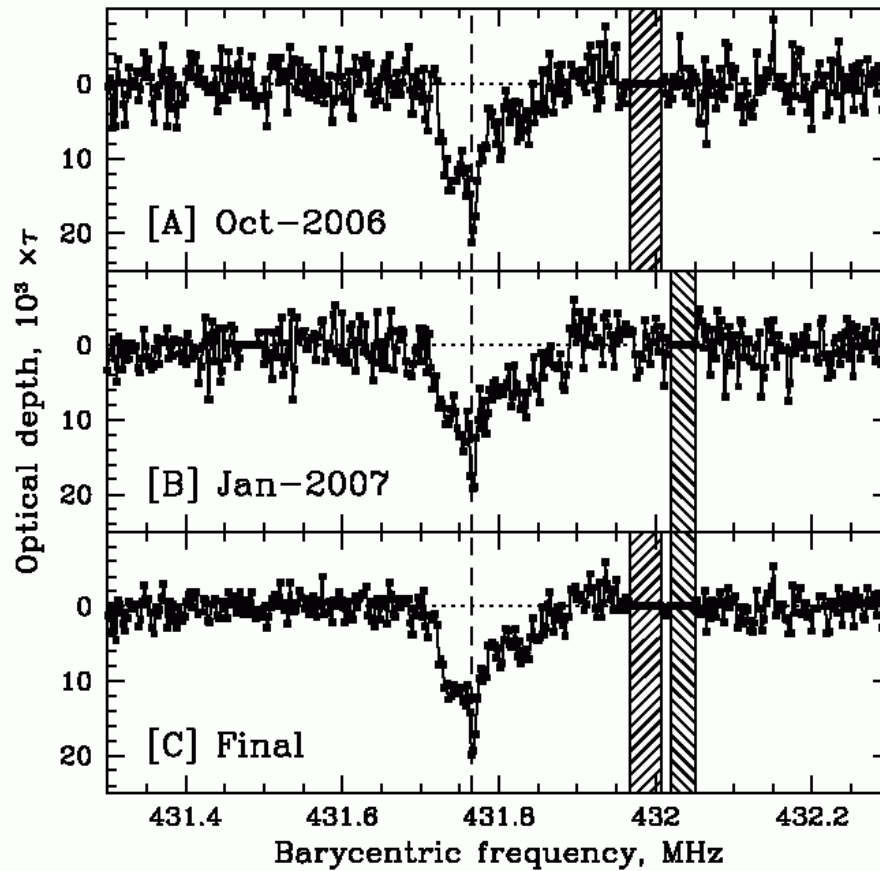
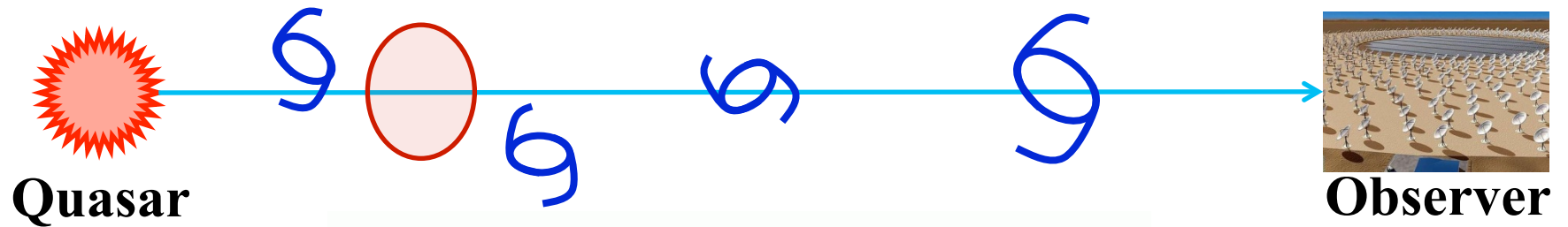


電波連続光による観測のみでなく、電波輝線や可視光で**補助的観測**を行えば、さらに多くの物理的情報を引き出すことができる。

宇宙暗黒時代も含む**銀河進化の理論モデル**構築も急務。  
例: ミニハローのモデル (cf. 島袋さんのポスター)



# ガスが支配的なフェーズの銀河の観測



(York et al. 2007)

## 4 まとめ

1. 銀河進化は宇宙進化の議論における重要な課題の一つ。しかし、HIを考慮した銀河進化の議論はまだ端緒についたばかり。SKAの重点的テーマの中でも、SKA1, 2ともに銀河進化は重要なトピックとして挙げられている。しかし、実は銀河進化そのもののテーマはほとんど議論されていない。
2. 銀河進化で興味深い時代は $z \sim 1-2$ および $z > 3$ 。前者はでき上がった銀河の進化の激動期であり、後者は銀河がまさに形成されるビルドアップフェーズ。
3. 現存する装置によるHIないしcontinuumの広域サーベイは検出限界がmJyのオーダーであり、角分解能も不足している。このため近傍銀河に限られており、また星形成領域の分解にも十分とはいえない。

# 5 まとめ

4. HIないしradio continuumの統計的議論は $z \sim 0$ に限られており, 光度関数の進化も知られていない. 星形成銀河とAGNの進化は異なっているという示唆がある. これはSKA2へ向けての予想にも直接影響するため, SKA1でクリアすべき課題.
5. 銀河のガスを含むスケーリング則の研究も, 現状ではHI観測が浅いために近傍の, 大質量銀河に限られている.
6. Baryon Tully-Fisher relation (BTF)の研究では, 非常に小質量の銀河が単一冪から外れることが示唆されている. SKA1の感度で $M_{\text{gas}} \sim 10^3 M_{\odot}$ まで検出できるので, SKA1のテーマとして適している.
7. 星形成主系列銀河におけるガスから星への転換の検証については, SKA1からSKA2にかけて進化を追うことができる.

# 5 まとめ

8. Schmidt-Kennicutt lawは銀河のHIとH<sub>2</sub>両方を合わせたガス質量と星形成率の面密度の関係. これも近傍銀河に限られており, SKA1から2でその進化について検証できる. 分子輝線観測とのsynergyが重要.
9. 近傍銀河の水素原子-分子遷移については, SKAの角分解能によって個別のガス領域に分解して議論できる.
10. 銀河形成期のSKAならではの観測として, 21cm吸収線系による初期爆発的星形成前夜のガスリッチな銀河検出がある. DLAに比べ, ダスト減光による選択効果がなく, 無バイアスな検出が期待できる. ミニハローモデルなどの理論研究も準備しておくのがよい.