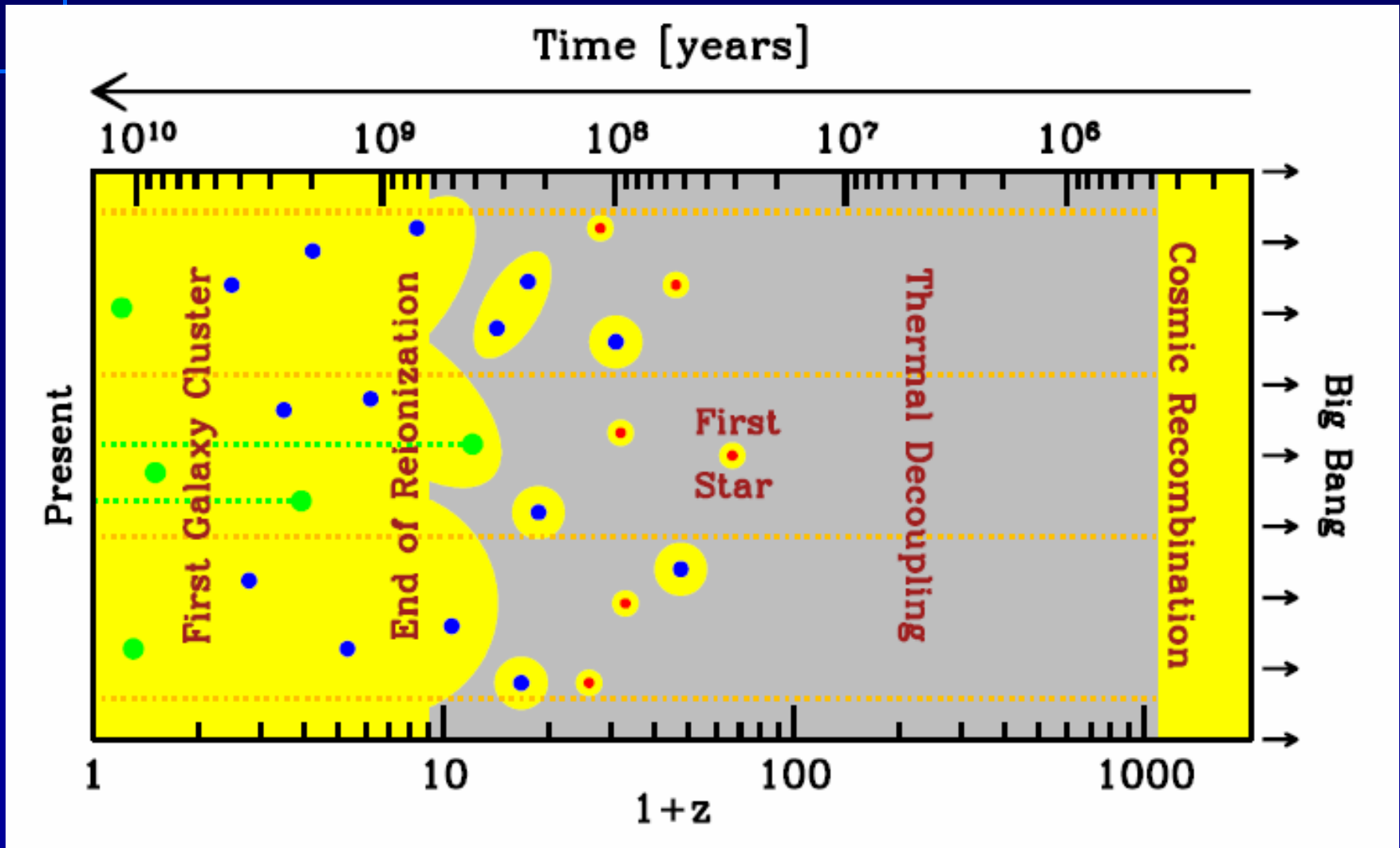


銀河の平均的電離光子脱出率の宇宙論的進化

井上昭雄

大阪産業大学教養部物理学教室

宇宙再電離史



宇宙再電離史の2つのカギ

1. バリオンー電離光子変換効率

- 星形成効率
- 初期質量関数
- 星スペクトル

2. 電離光子脱出率

ポスト再電離期からさかのぼって調べる！

現在、観測可能

銀河からの電離光子脱出率 — 理論的考察

- Clumpy mediumの方が大きい脱出率
 - Ciardi et al. (2002)
 - Monte Carlo radiative transfer in clumpy ISM
- Small objectsの方が大きい脱出率
 - Fujita et al. (2003)
 - SN supershell blowoutによる電離光子脱出
 - Kitayama et al. (2004)
 - Ionization front blowoutによる電離光子脱出

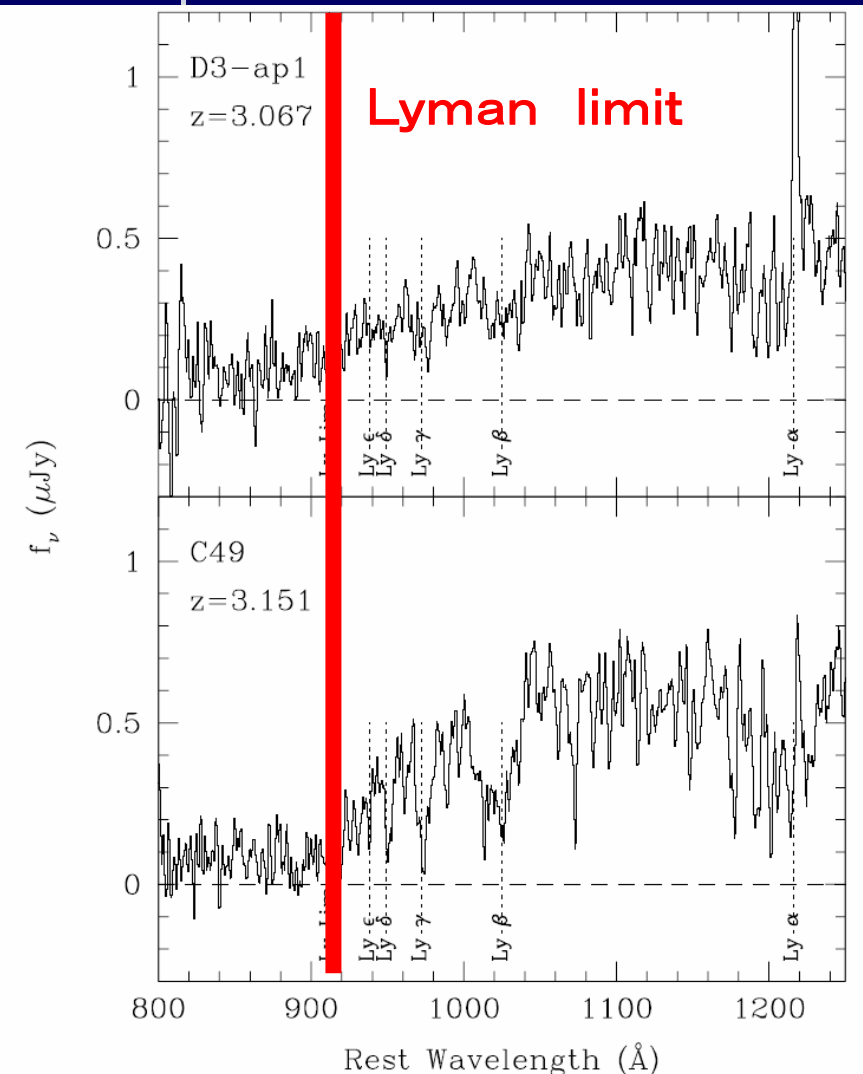
銀河からの電離光子脱出率 — これまでの観測的制限(1)

- 近傍スターバースト銀河
 - 電離光子未検出(5天体): 脱出率1—10%以下
 - Leitherer et al. (1995), Hurwitz et al. (1997), Deharveng et al. (2001)
 - スペクトル観測(HUT, FUSE)
 - 電離光子検出(1天体): 脱出率10%
 - Bergvall et al. (2006): Haro 11 (Blue Compact Galaxy)
 - スペクトル観測(FUSE)
- $z \sim 1$ 星形成銀河
 - 電離光子未検出(11天体): 脱出率0.2—5%以下
 - Malkan et al. (2003)
 - 広帯域測光観測(HST/STIS)

銀河からの電離光子脱出率 — これまでの観測的制限(2)

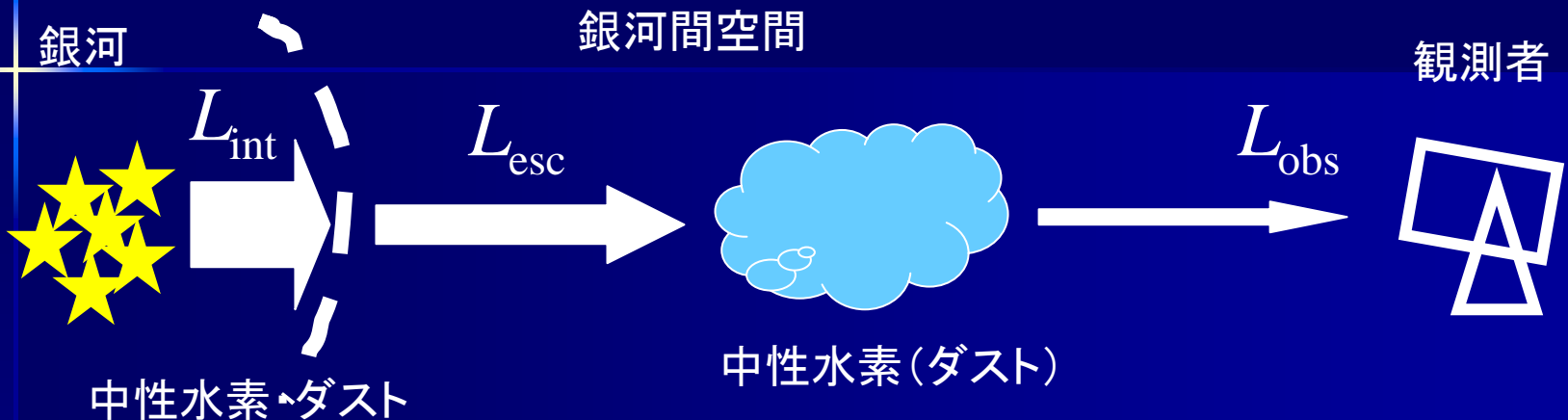
- $z \sim 3$ ライマンブレイク銀河
 - 電離光子検出(29天体composite): 脱出率50%
 - Steidel et al. (2001)
 - もっとも青いLBGs29個の重ね合わせ
 - スペクトル観測(Keck/LRIS)
 - 電離光子未検出(2天体): 脱出率5%以下
 - Giallongo et al. (2002)
 - もっとも明るいLBGs2個
 - スペクトル観測(VLT/FORS)
 - 電離光子未検出(2天体): 脱出率20%以下
 - Inoue et al. (2005)
 - 典型的LBGs2個
 - 狭帯域フィルター一測光観測(VLT/FORS)

2つのLBGから電離光子検出 — Shapley et al. (2006)



- Keck LRIS分光
- 14個の明るいLBGs
 - SSA22領域
 - $R_{AB} < 24.3$ 等
- 2個から電離光子検出！
 - 一方は赤く、他方は青い
 - 脱出と性質の関係は？？？
 - 相対脱出率50%以上
 - 絶対脱出率は10%以上？
- 14個の平均
 - 相対脱出率15%
 - 絶対脱出率5%？

電離光子脱出率の推定法



$$f_{esc,ion} = \frac{L_{ion}^{esc}}{L_{ion}^{int}} = \frac{L_{ion}^{obs} e^{\tau_{ion}^{IGM}}}{L_{ion}^{int}}$$

$$L_{UV}^{obs} = L_{UV}^{int} e^{-\tau_{UV}^{ISM}}$$

$$L_{ion}^{int} = R_{int} L_{UV}^{int} = R_{int} L_{UV}^{obs} / f_{esc,UV}$$

SEDモデル

$$f_{esc,ion} = \frac{L_{ion}^{obs} e^{\tau_{ion}^{IGM}}}{R_{int} L_{UV}^{obs}}$$

ion: 900 A
UV: 1500 A

“脱出”光度比

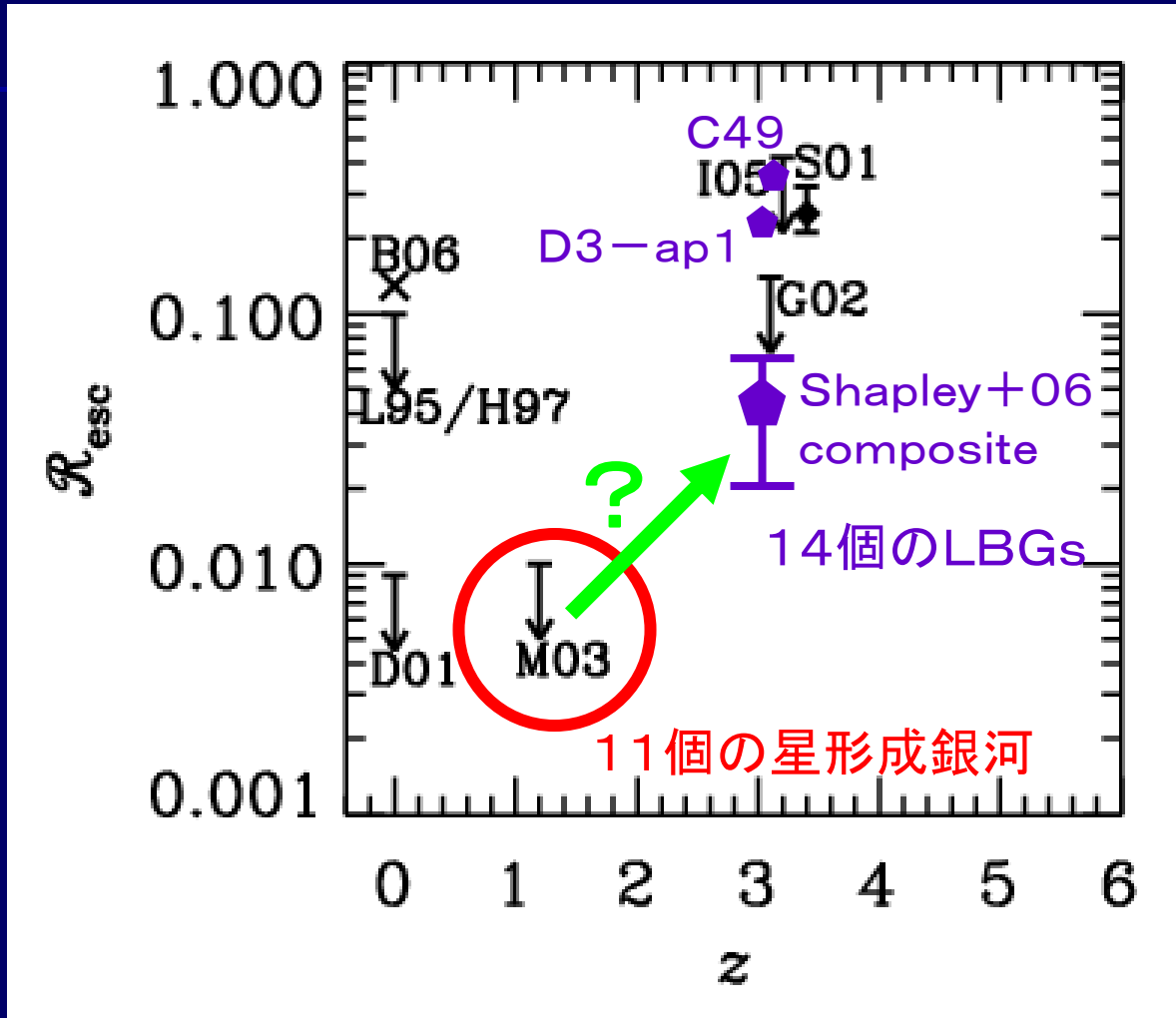
- 絶対脱出率
 - UVダスト減光補正
 - 電離—UV光度比 (SED)
 - IGM吸収補正
- 相対脱出率
 - 電離—UV光度比 (SED)
 - IGM吸収補正
- 脱出光度比
 - IGM吸収補正

Ly α clouds,
 LLSの観測
 から
 平均値
 は良く決まる

ほとんど
 直接観測量

$$R_{\text{esc}} = \frac{L_{\text{ion}}^{\text{esc}}}{L_{\text{UV}}^{\text{esc}}} = \frac{L_{\text{ion}}^{\text{obs}} e^{\tau_{\text{ion}}^{\text{IGM}}}}{L_{\text{UV}}^{\text{obs}}}$$

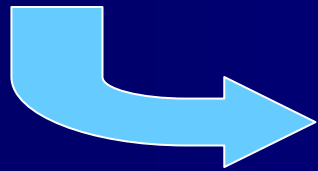
“脱出”光度比の直接観測結果



平均“脱出”光度比

- 宇宙全体での平均的“脱出”光度比

$$R_{\text{esc}} = \frac{L_{\text{ion}}^{\text{esc}}}{L_{\text{UV}}^{\text{esc}}}$$



$$R_{\text{esc}} = \frac{\rho_{\text{ion}}^{\text{esc}}}{\rho_{\text{UV}}^{\text{esc}}}$$

IGMに供給される
電離光子放射率

観測される
UV放射率

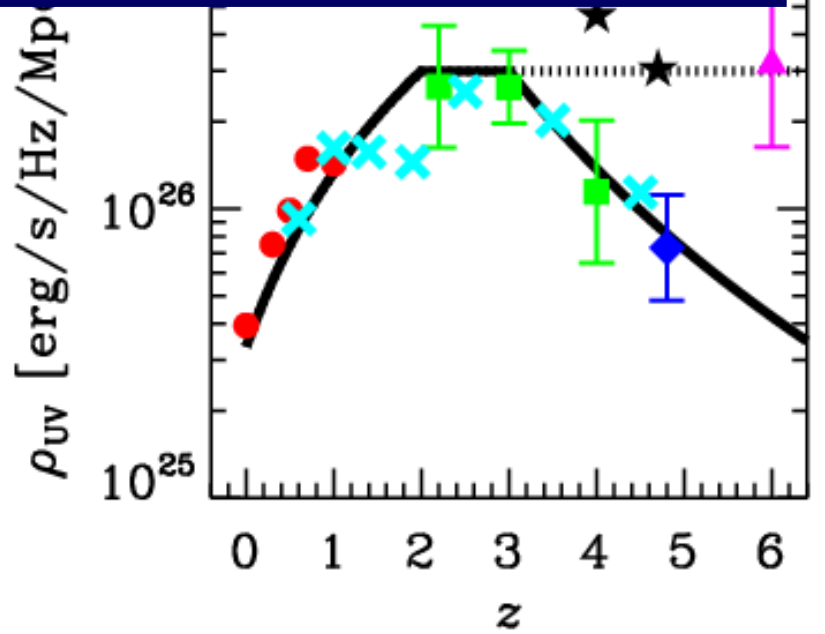
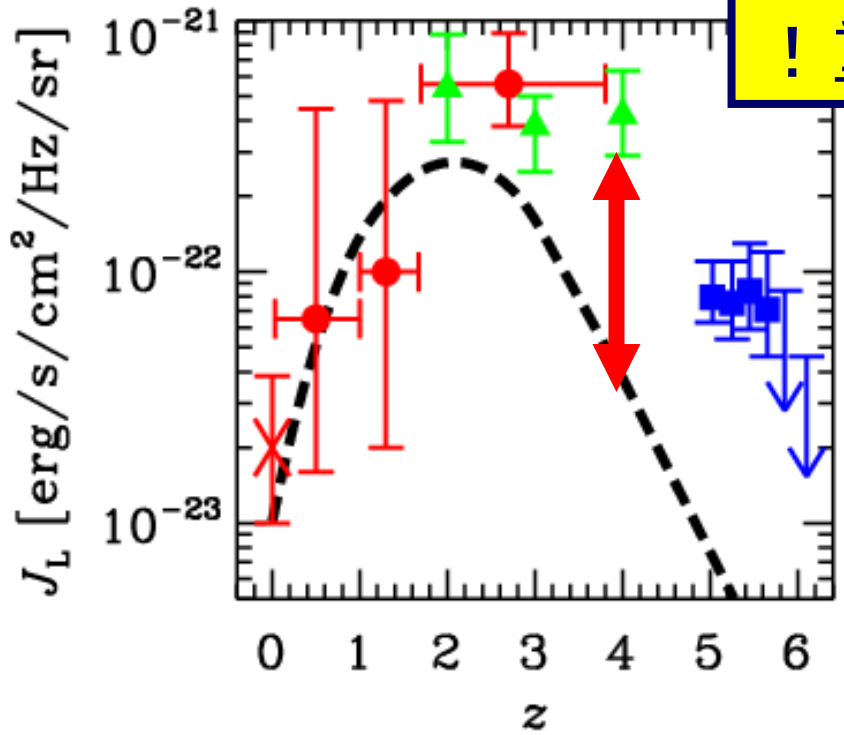
波長(UV) > 1216Å
ならIGM吸収は無い

平均“脱出”光度比の推定

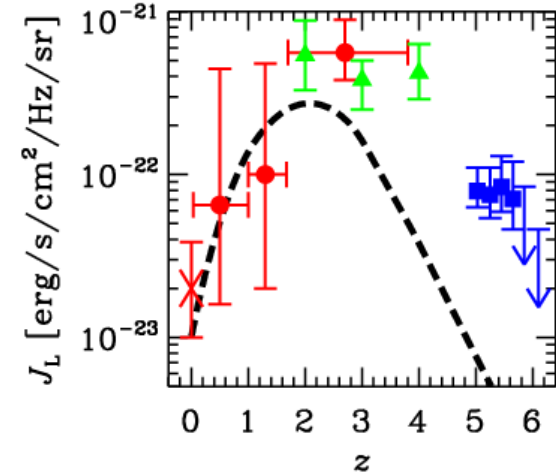
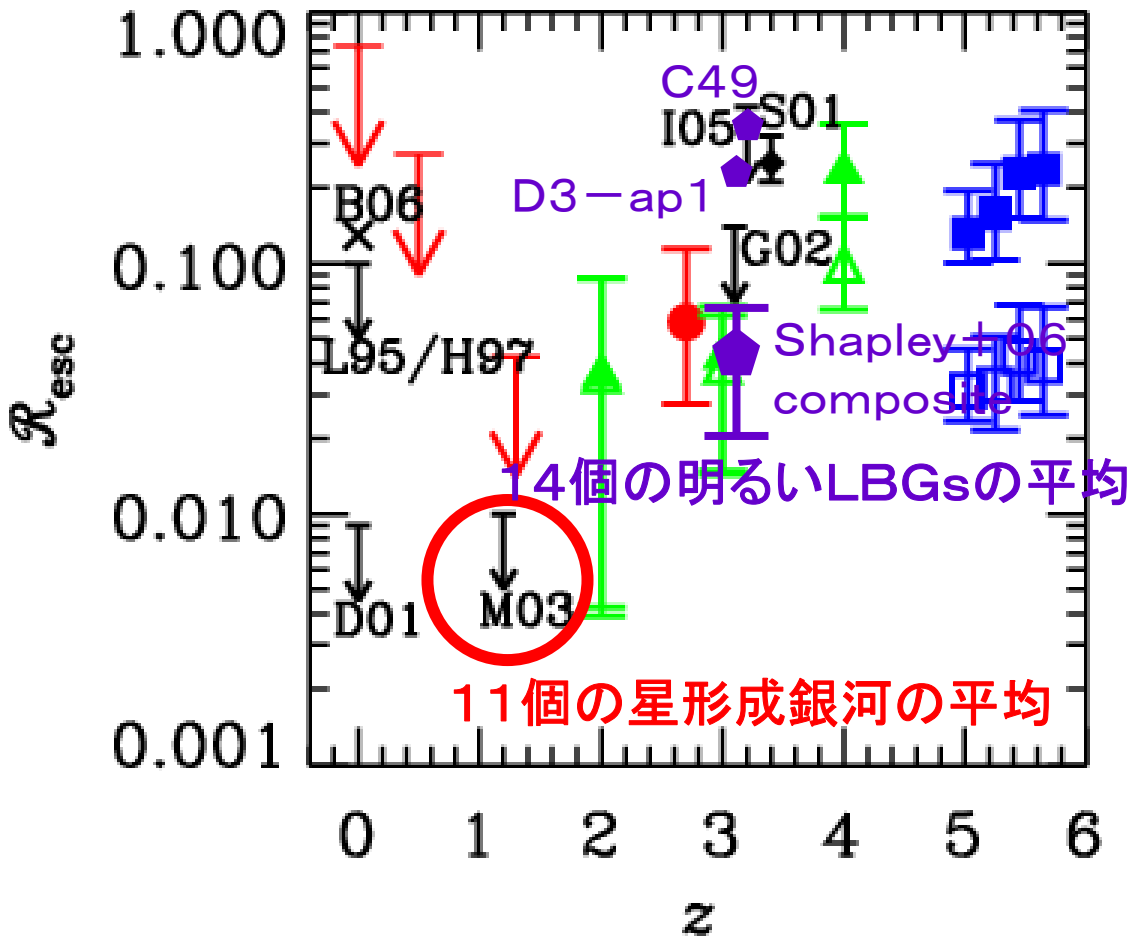
$$= R_{\text{esc}} \rho_{\text{UV}}^{\text{obs}}$$

$$J_{\text{obs}}(z) = J_{\text{QSO}}(z) + J_{\text{gal}}(z, \rho_{\text{ion}}^{\text{esc}})$$

！重要！ UVダスト補正不要

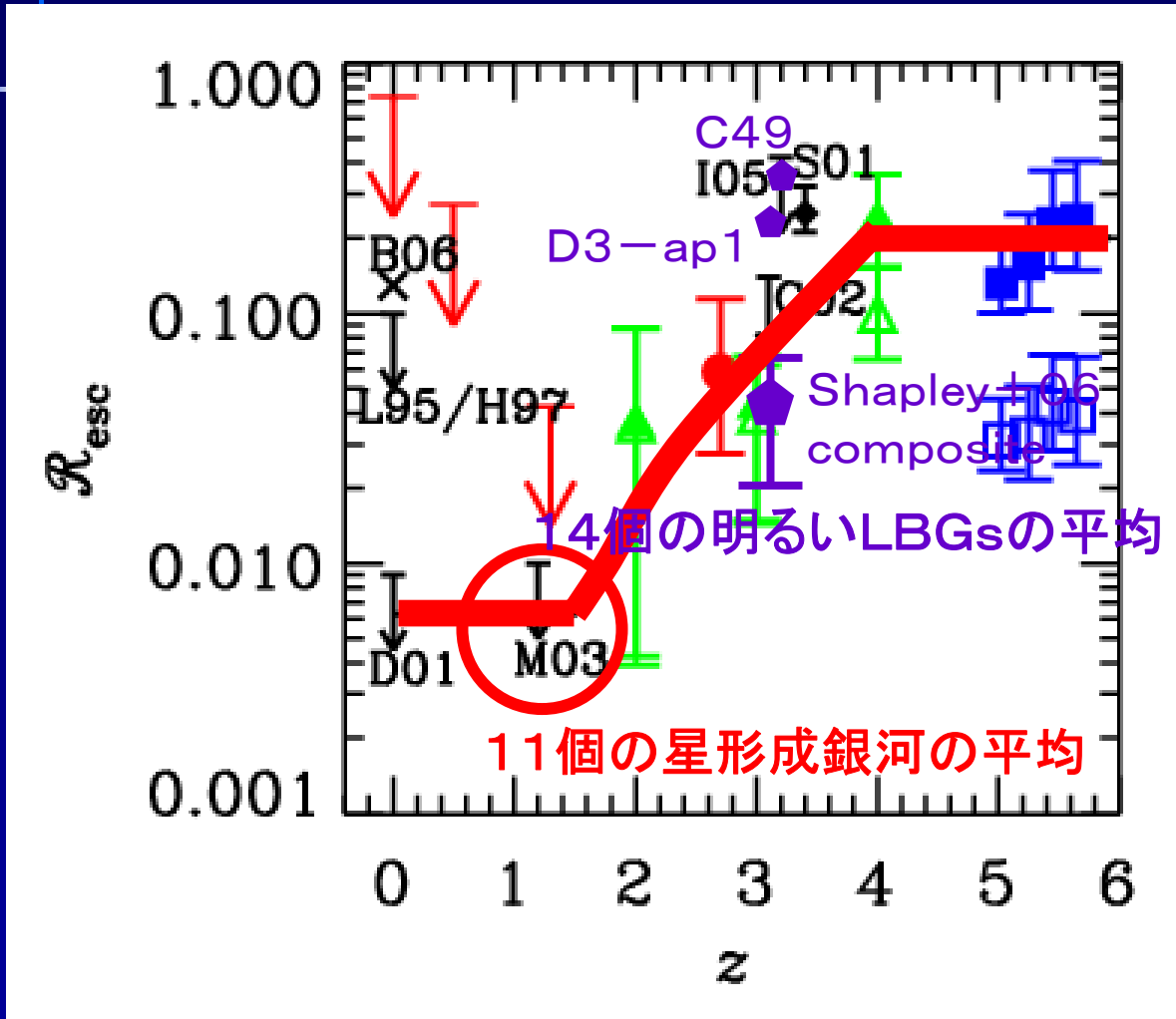


赤: Scott et al. (2002)の背景放射強度から推定
 緑: Bolton et al. (2005)の背景放射強度から推定
 青: Fan et al. (2006)の背景放射強度から推定



白抜きは
high emissivity
の場合

赤: Scott et al. (2002)の背景放射強度から推定
 緑: Bolton et al. (2005)の背景放射強度から推定
 青: Fan et al. (2006)の背景放射強度から推定



赤線 ($2 < z < 4$):
 $\propto (1+z)^5$

白抜きは
 high emissivity
 の場合

電離光子脱出率進化

■ 脱出率の進化があるように見える

- R_{esc} が $z < 1$ から $z > 4$ にかけて約10倍になる
- $f_{\text{esc}} \sim 0.01 @ z < 1$ から $f_{\text{esc}} \sim 0.1 @ z > 4$

$$f_{\text{esc}} = \frac{R_{\text{esc}}}{R_{\text{int}}} 10^{-0.4 A_{\text{UV}}}$$

$A_{\text{UV}} = 1 \text{ mag}$, $R_{\text{int}} = 0.3$ のとき

(星形成銀河で典型的な値)

$$f_{\text{esc}} \approx R_{\text{esc}}$$

脱出率進化以外の可能性

$$f_{\text{esc}} = \frac{R_{\text{esc}}}{R_{\text{int}}} 10^{-0.4 A_{\text{UV}}}$$

1. R_{int} が $z > 4$ で 10 倍大きい
ほとんど全部 Pop III なら可能
2. A_{UV} が $z > 4$ で 3 倍大きい
観測的には ???
3. そもそも銀河以外の電離光子源
Type 2 QSOs?

脱出率進化の起源

- 電離光子脱出はデジタルな現象
 - Kitayama et al. (2004)
 - Shapley et al. (2006)
 - high- z では大きな脱出率の銀河の割合が高い？
- 1. high- z では小さい銀河が多い？
 - $M_{\text{halo, crit}}$?
- 2. high- z では形態が乱れた銀河が多い？
 - galactic chimneyの方向だけ脱出？

脱出率の進化が本当なら...

- 銀河進化の枠組みでの理解が必要
 - 銀河の性質と電離光子脱出の関係解明
 - 再電離期の銀河の性質
- 初代天体への重要な示唆
 - バリオン—電離光子変換効率
 - 星形成効率
 - 初期質量関数
 - 星スペクトル

今後の課題

- 電離光子脱出サンプルの拡大
 - 現在: $z \sim 3$ 2個、 $z \sim 0$ 1個
 - 統一的描像不明
- すばる望遠鏡主焦点カメラ狭帯域測光計画
 - 広視野、高感度で効率よく探査
 - $z \sim 3$ 専用狭帯域フィルター

すばるS-Camによる $z \sim 3$ 電離光子観測計画

- 観測天域: SSA22
 - $z=3.1$ に大規模なクラスタリング
 - ターゲット数: **約1000個** (LBG, LAE, LAB)
- S-Cam専用狭帯域フィルターを製作
- Shapleyの天体なら**4時間で 3σ 以上**
- 予定検出限界: 27.4AB (5σ)
 - 90,000秒 (5晩)、天体サイズ1秒、暗夜

まとめ

- 銀河からの電離光子脱出率観測が進展
 - しかし、脱出の物理は未解明
 - 電離光子背景放射から平均的脱出率を議論
 - 電離—紫外“脱出”光度比を用いて不定性を抑制
 - 電離光子の直接観測結果と背景放射強度からの推定を直接比較
 - 平均的な銀河の電離光子脱出率は赤方偏移とともに大きくなっている可能性を指摘
 - 宇宙再電離や銀河進化への重要な示唆
 - すばるS-camによる直接観測で100個程度の脱出サンプルを作成する計画
- ← ご支援お願い致します