

TMT時代の高分散分光データを用いた 銀河/AGN研究



三澤 透 (信州大学)

内容

- TMT時代の銀河/AGNの分光学的研究
- 銀河周辺物質(CGM)
 - 吸収線によるCGM調査
 - 輝線によるCGM調査
- 近接効果(PE)
 - 過去のクエーサー活動の追跡調査
- まとめ

TMT × 高分散分光で挑むサイエンス

- 1: 基礎物理定数(微細構造定数)の変動可能性
- 2: 極低温ガスの物理的・化学的状態の解明
- 3: 銀河間ガスにおける原始金属量の評価
- 4: 宇宙膨張の観測的検証
- 5: 吸収体の3次元的構造の解明
- 6: 銀河/ウェーバー周辺物質の探査

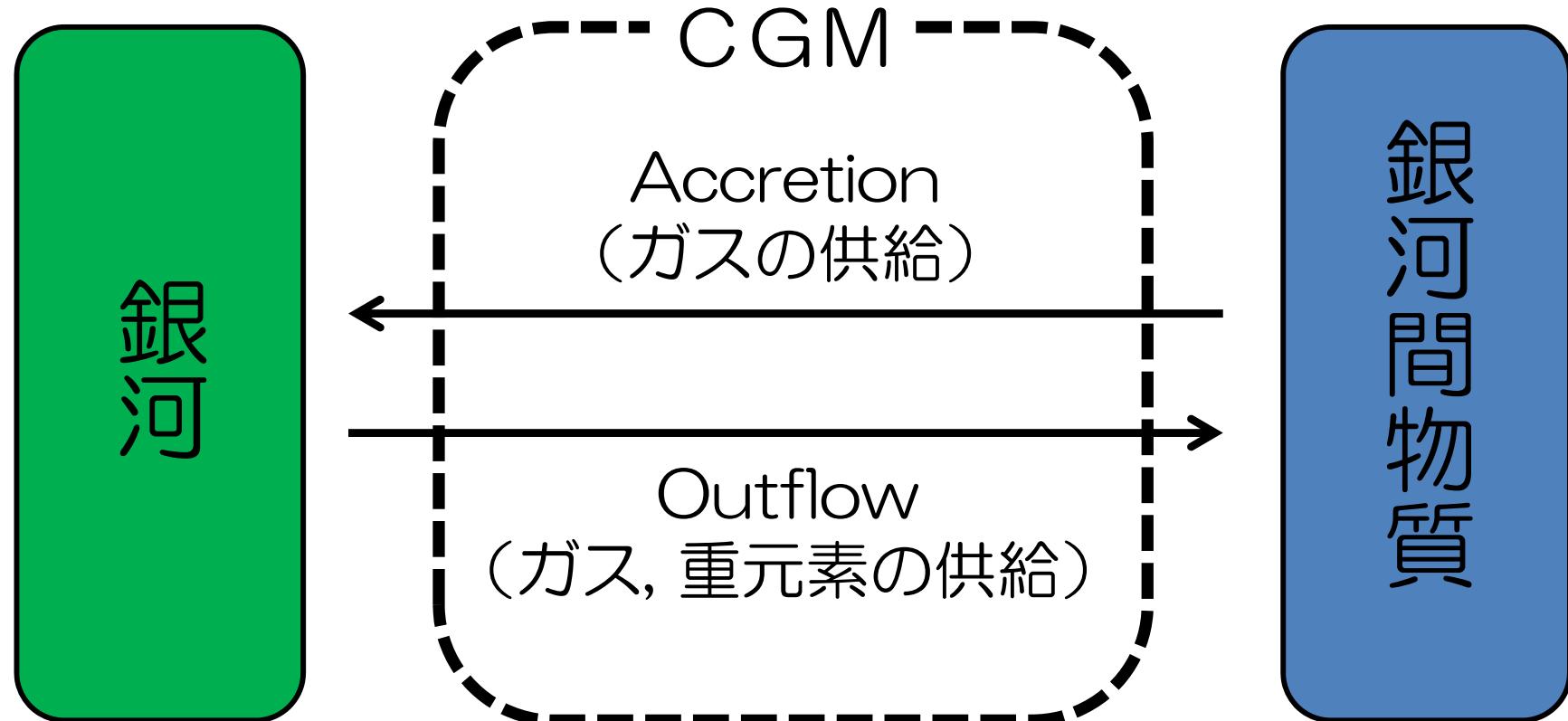
Circum-Galactic Medium (CGM; 銀河周辺物質)



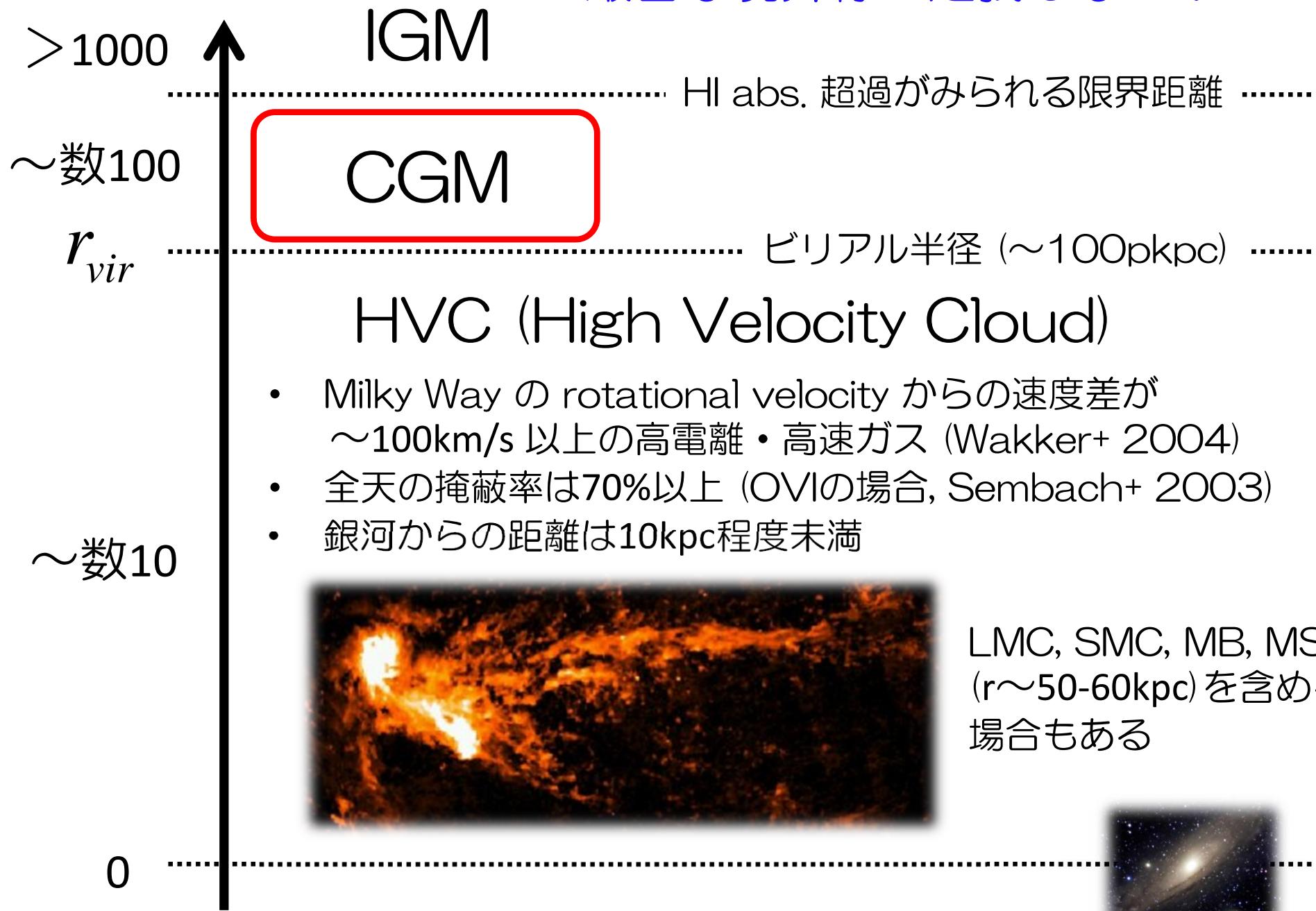
© MPIA (G. STINSON / A. V. MACCIÒ)

銀河進化と銀河周辺物質(CGM)

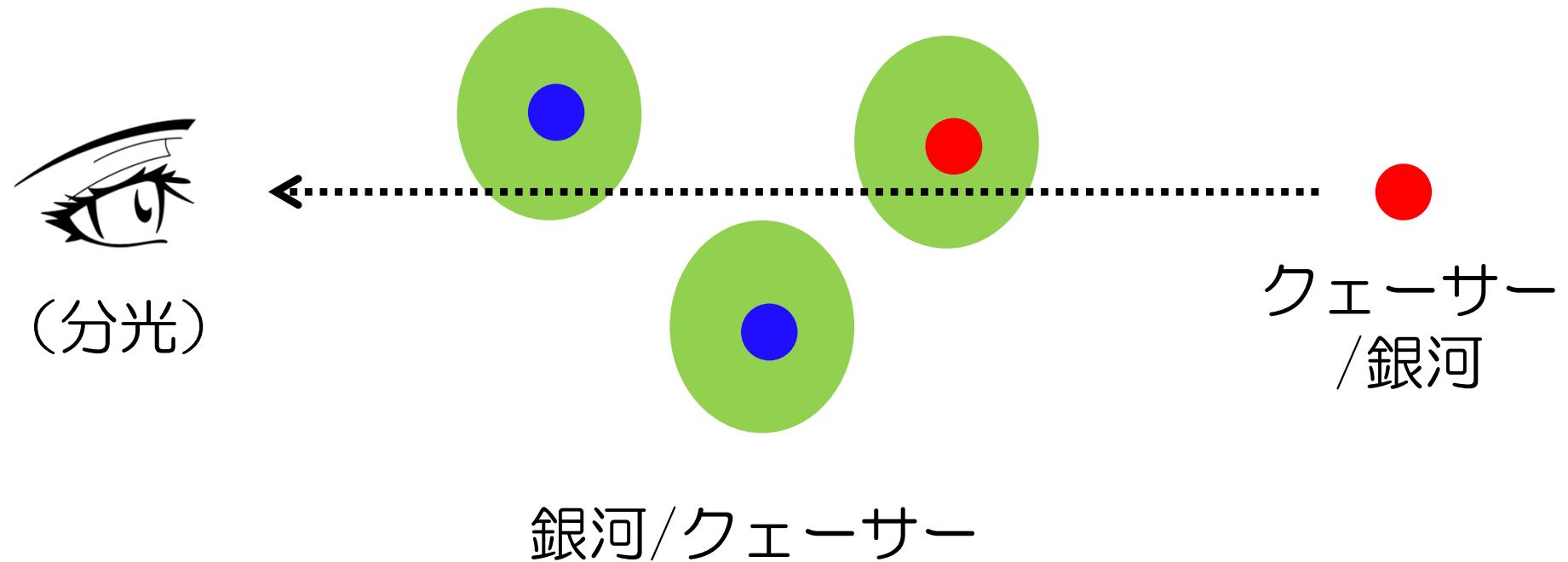
銀河と銀河間空間(IGM)の間の物質循環の役割を担う銀河周辺物質(CGM)は、星形成活動の促進や抑制、銀河間物質の化学進化に大きな影響を与えるため、その理解は極めて重要である。



厳密な境界線の定義はない！



吸収線によるCGM調査



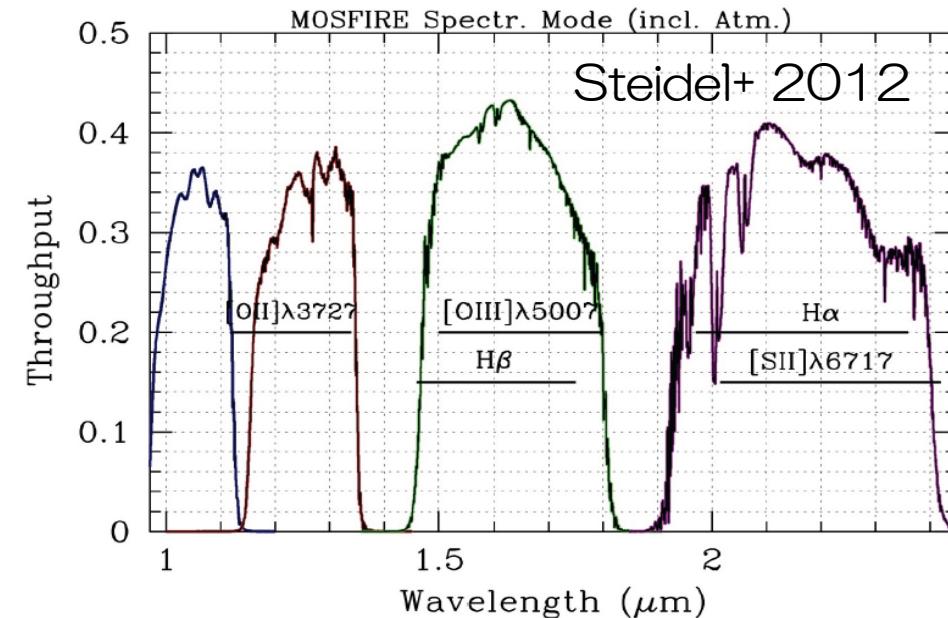
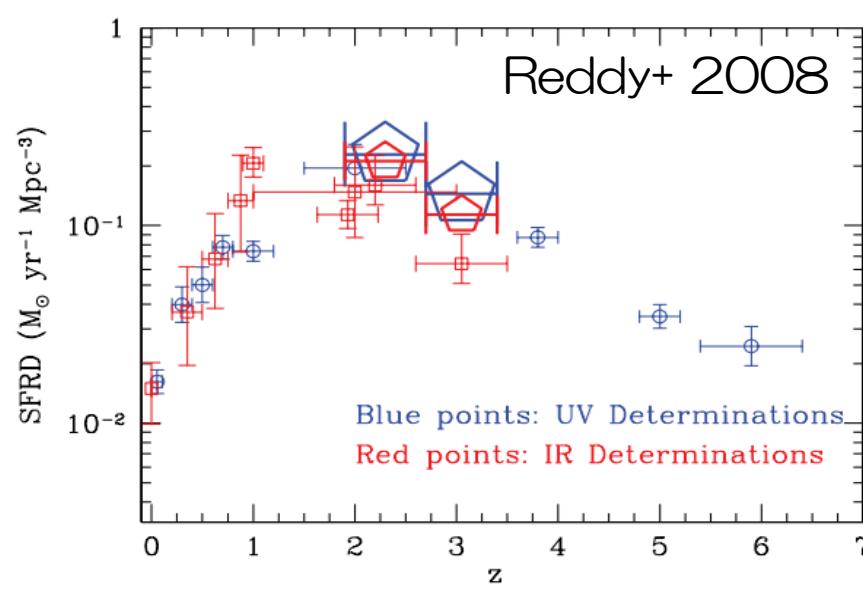
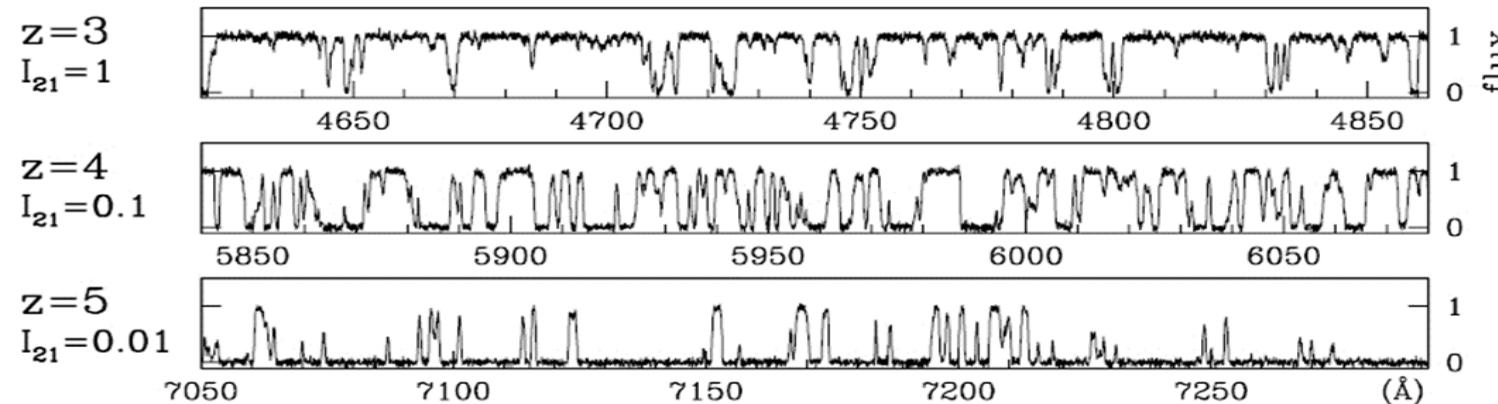
		背景光源		近接効果 CGM
		QSO	銀河	
吸収体	QSO	1D 1990年頃～ 2D 2013年～ Quasar series Hennawi+ 2006～ 2006～	2004年～ Adelberger+ 2004	近接効果 CGM
	銀河	1D 1990年頃～ Lanzetta+ 1990, Bergeron+ 1991, 2D 2012～ Adelberger+ 2003 Rakic+ 2012,2013, Turner+2014	2005年頃～ Adelberger+ 2005a, Rubin+2010, Keck Baryonic Structure Survey (KBSS) 2012～ (Steidel, Rakic, Rudie, Turner et al.)	

○: 明るい(高S/N)
 ×: サンプル少ない
 大離角のみ (>100kpc)

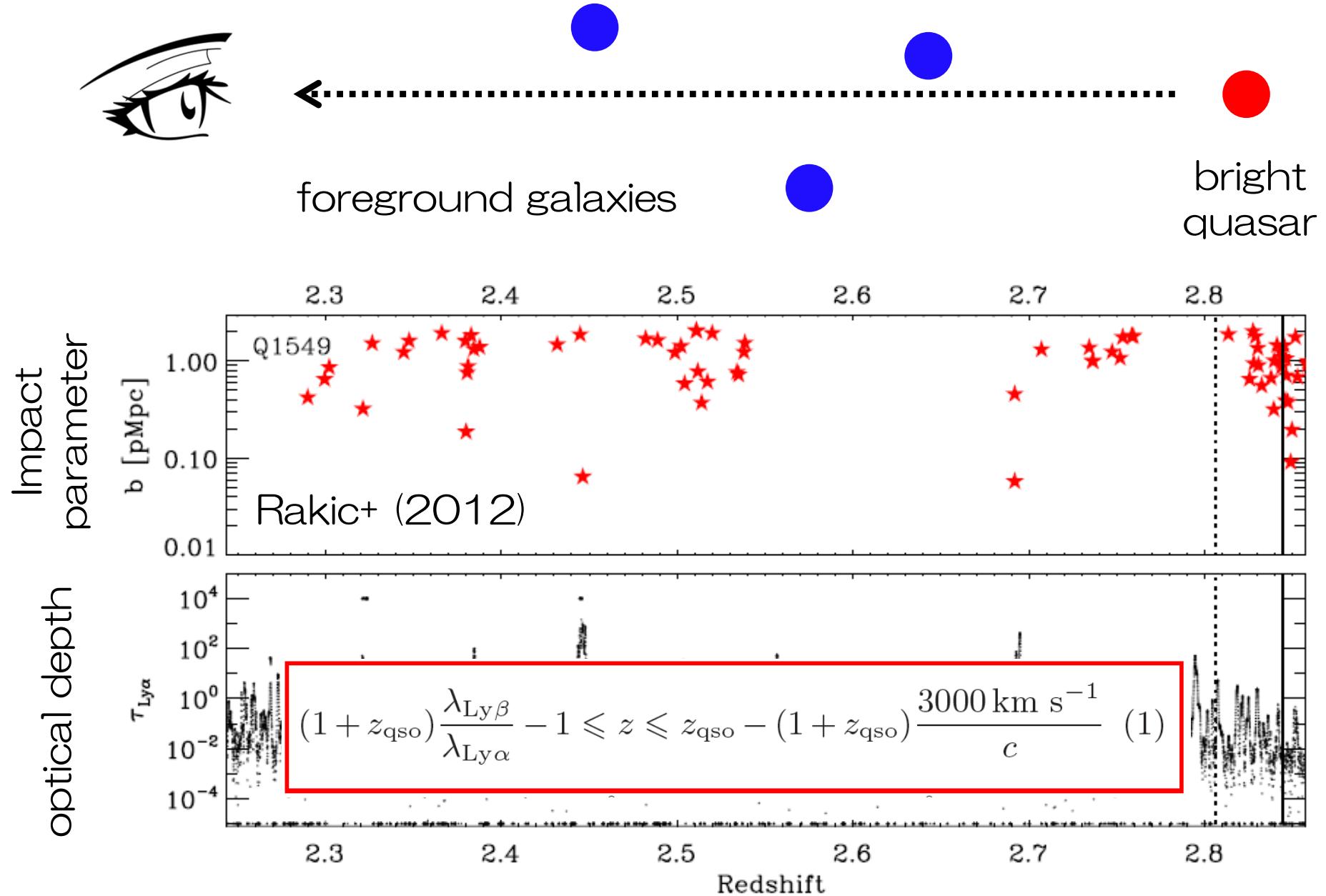
○: サンプル多い
 小離角もOK (<100kpc)
 ×: 暗い(低S/N)
 → stacking法

ねらいめは $z \sim 2-3$

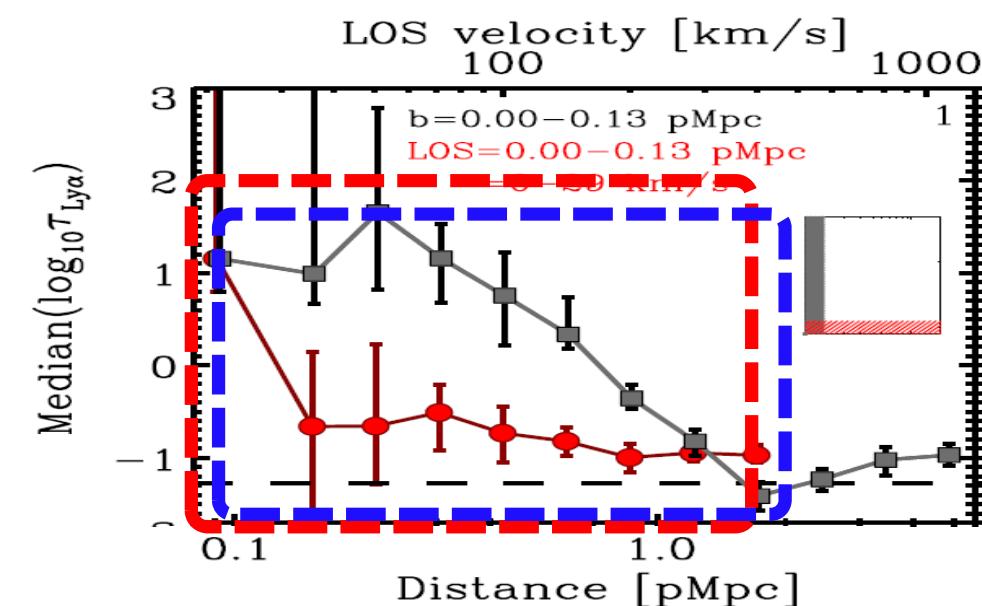
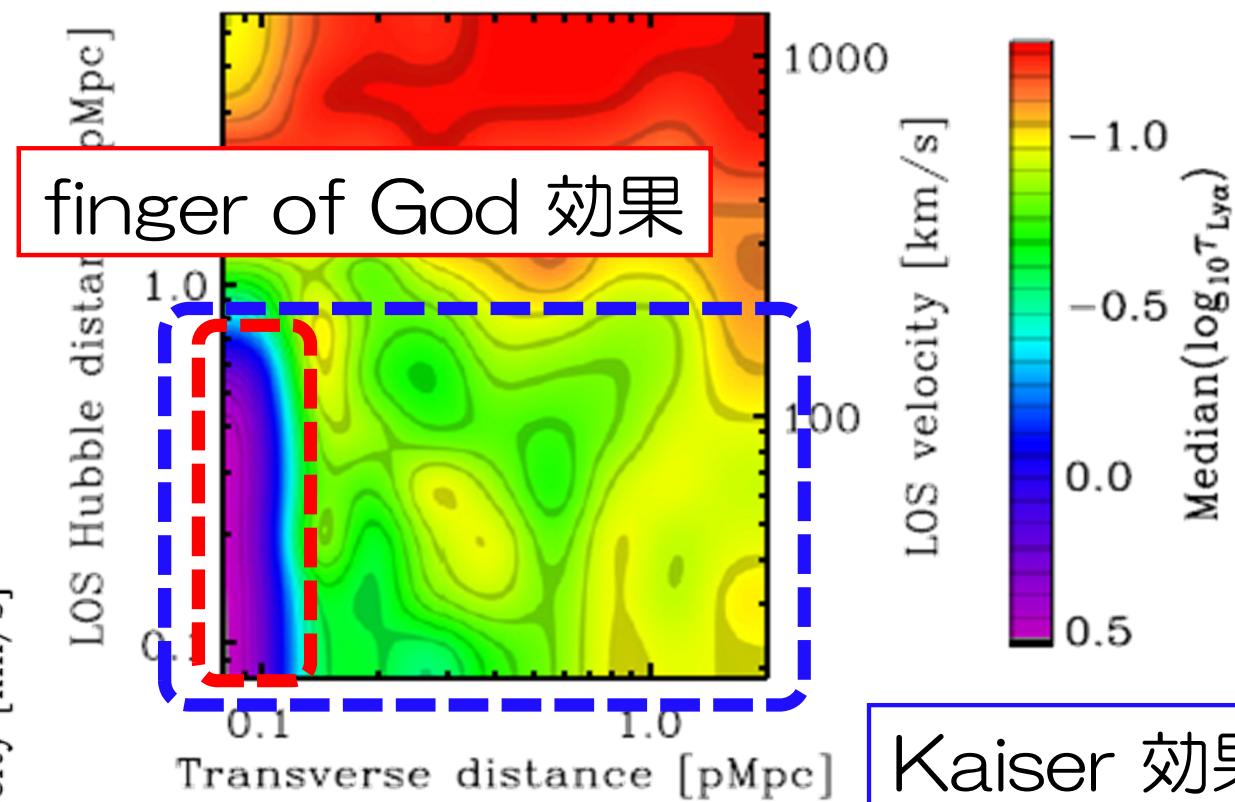
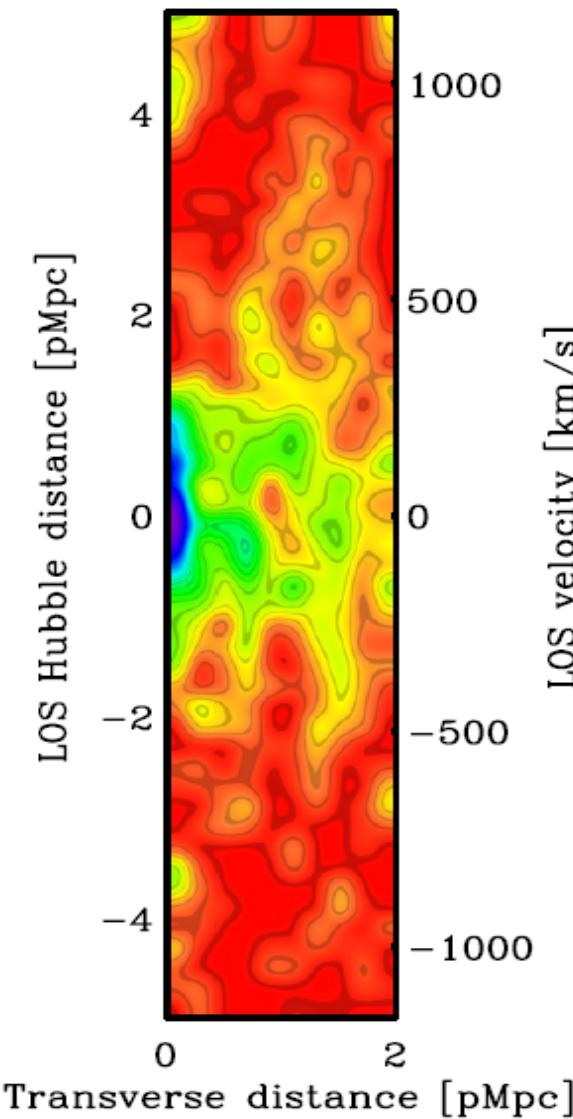
- $z > 4$ だと Ly α forestが混みすぎ, $z < 2$ だと少なすぎる
- 星形成率がピークを迎える時期 (CGMからのガス供給が活発)
- 銀河の z を正確に評価する際に必要なnebular輝線の検出が容易



Stacking法による2次元分布

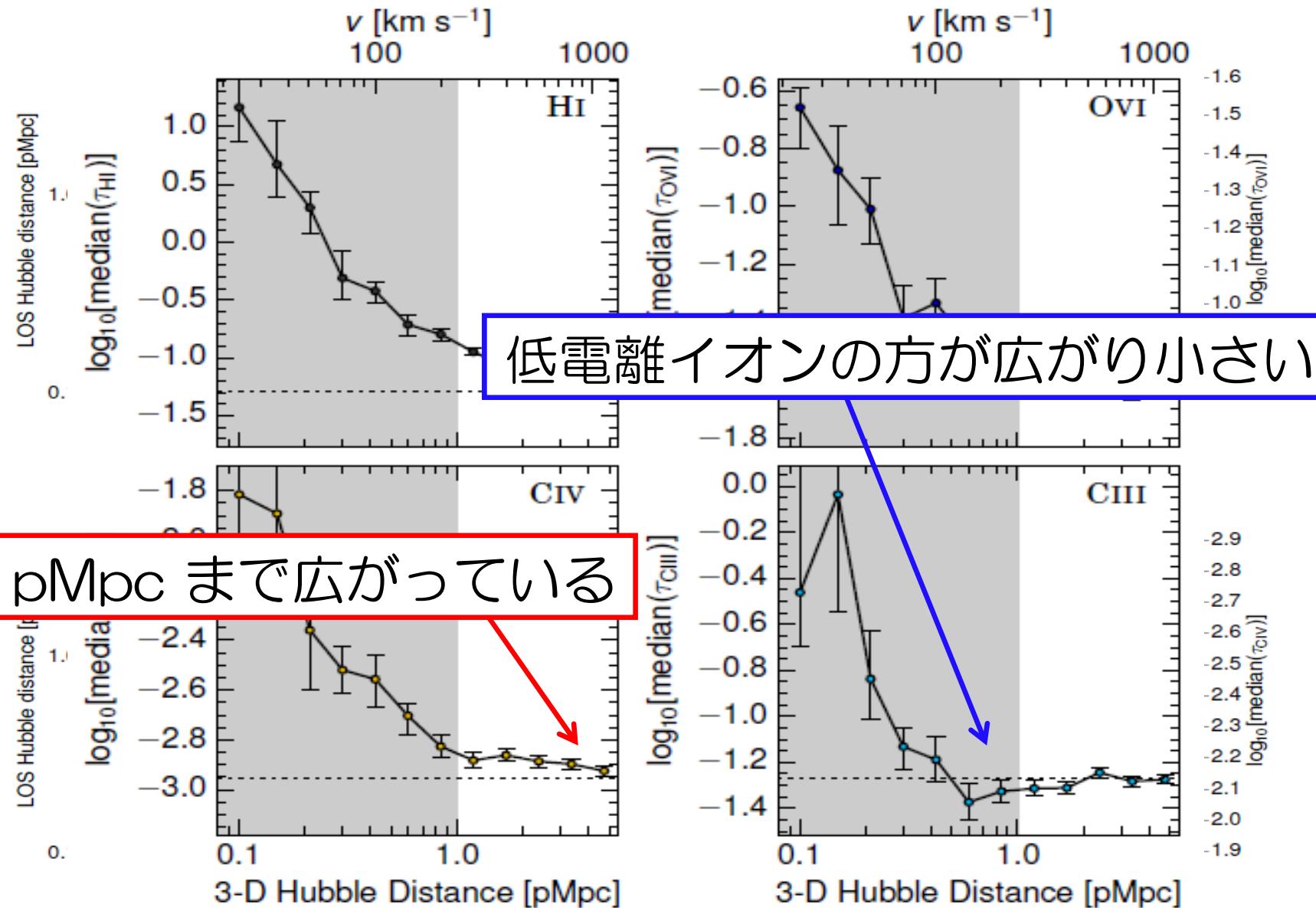


HI gas
(Rakic+ 2012,13)

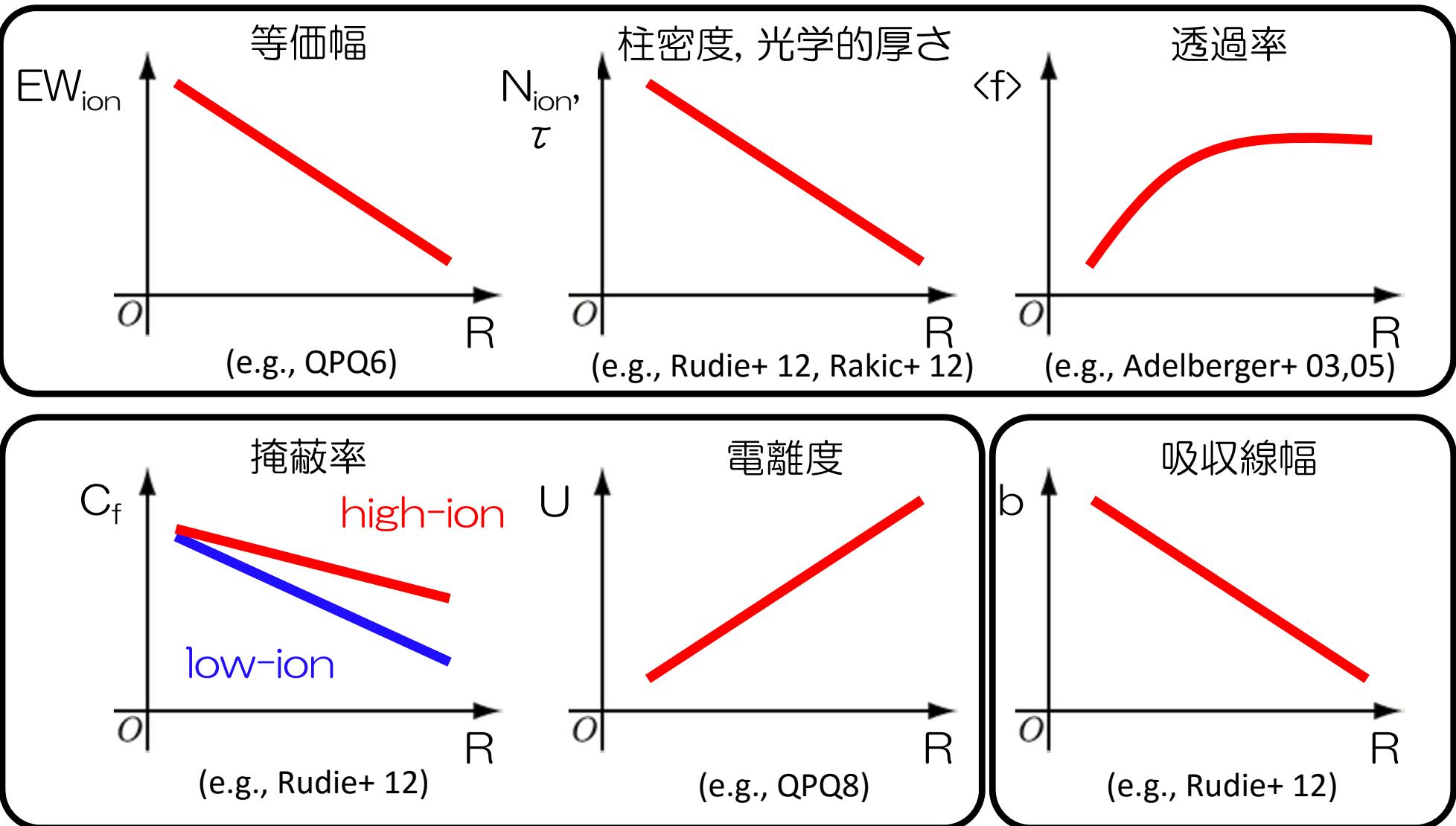


Metal abs.
(Turner+ 2015)

$$r = \sqrt{b^2 + (\Delta v / H(z))^2}$$



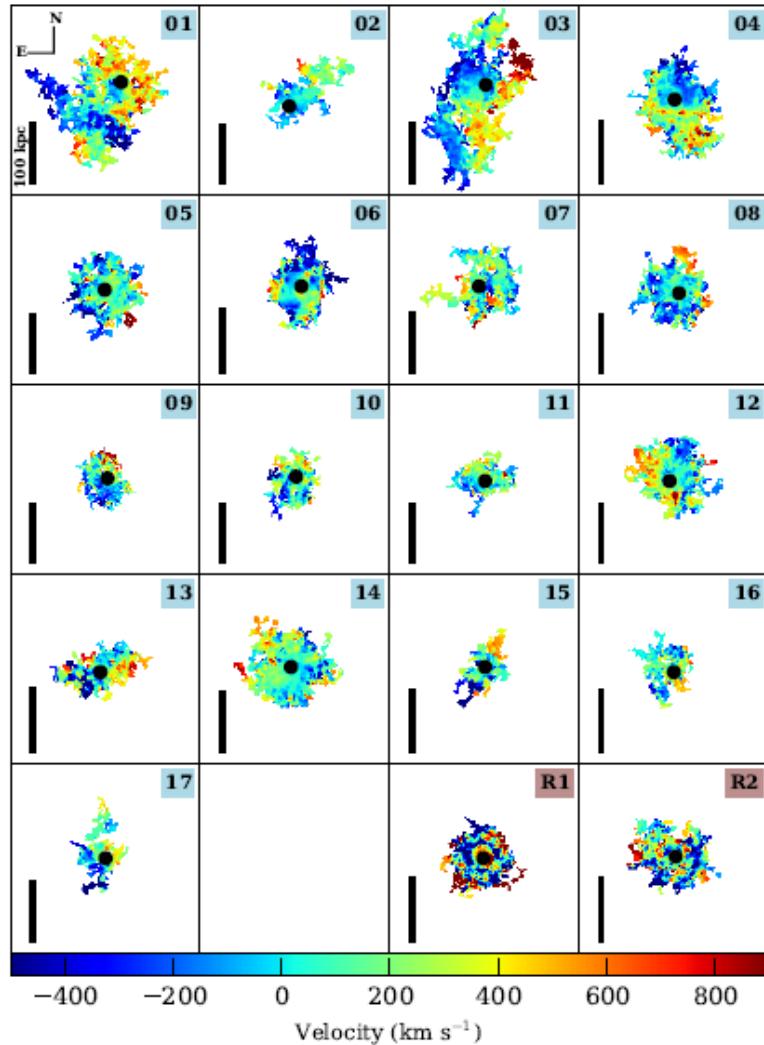
CGMの内部構造（半径依存性）



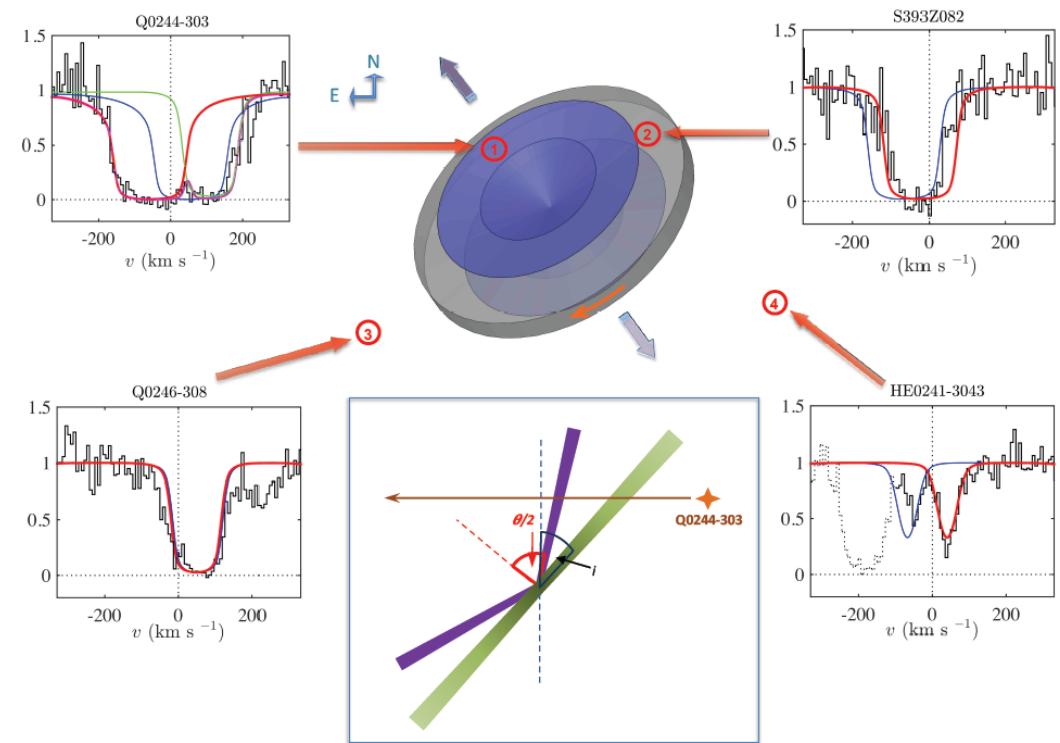
内側ほど 柱密度高い 電離状態低い ガス温度/乱流大きい

CGM の kinematics

$Z \sim 2$



$Z \sim 0$

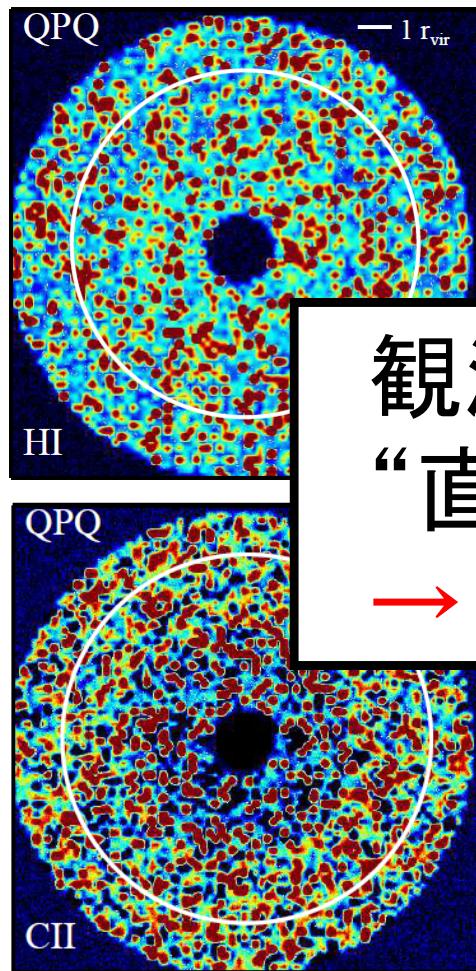


近傍銀河NGC1097の4視線分光の結果

$$V_{\text{rot}} + V_{\text{turb}} + V_{\text{wind}} = 70 + 20 + 70 \text{ km/s}$$

で吸収構造を再現可能 (Bowen+ 16)

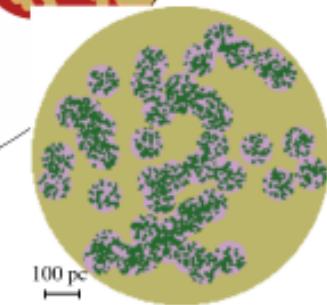
CGM の projected 2D map



観測からCloud scale を
“直接” 見積もれないか?
→ TMT時代のサイエンス

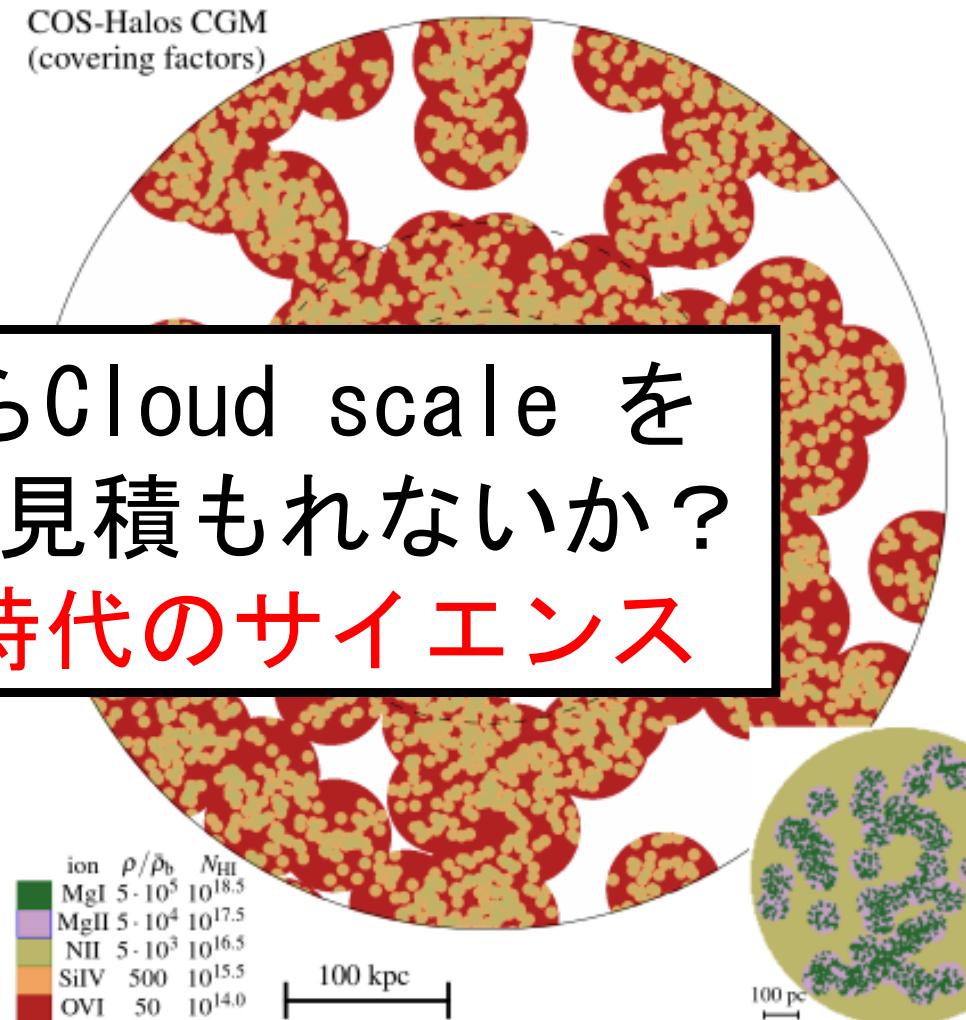
ion	$\rho/\bar{\rho}_b$	N_{HI}
MgI	$5 \cdot 10^5$	$10^{18.5}$
MgII	$5 \cdot 10^4$	$10^{17.5}$
NII	$5 \cdot 10^3$	$10^{16.5}$
SiIV	500	$10^{15.5}$
OVI	50	$10^{14.0}$

100 kpc



Cloud size を **5kpc** に固定
EW, C_f 分布の半径依存性
を再現するように配置
400x400kpc (QPQ7)

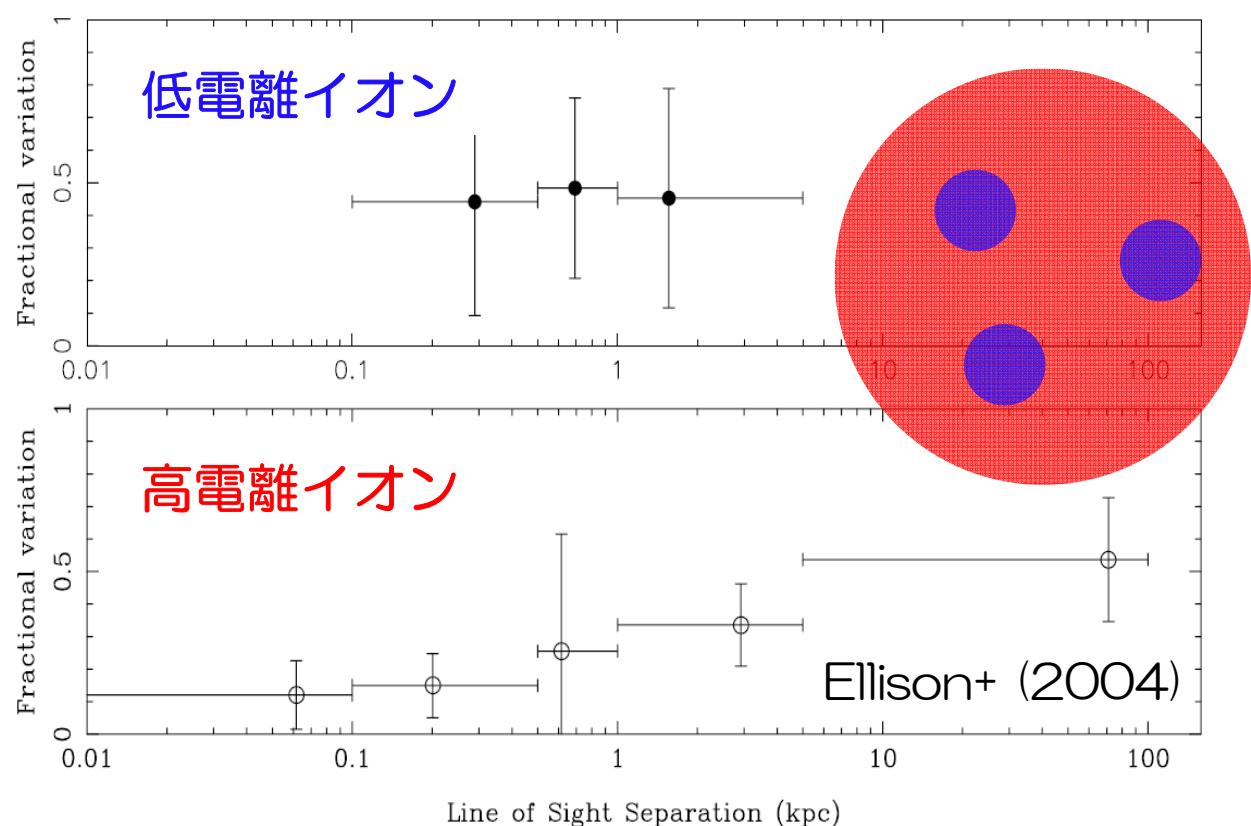
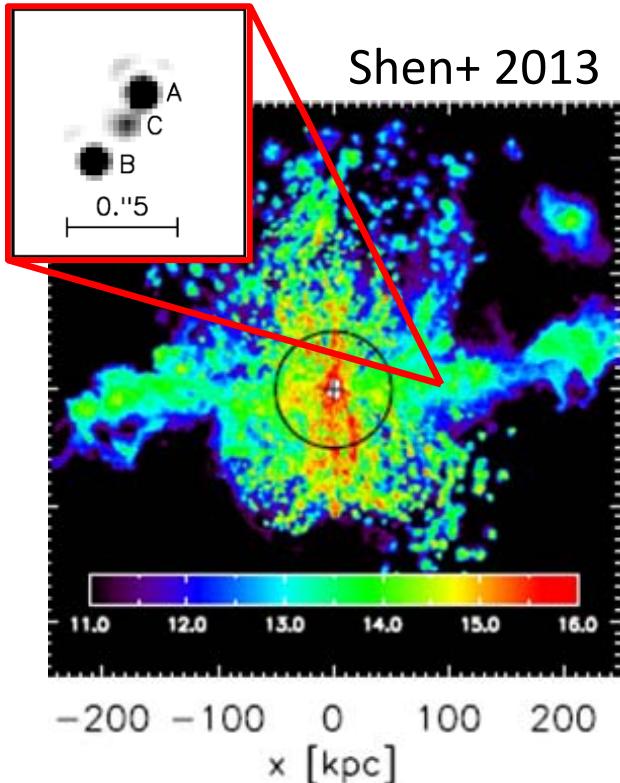
光電離モデルの結果に基づき C_f , Z/Z_\odot , ρ_{max} 分布
などを再現するように配置
 $r_{\text{cloud}} \sim 6 \text{ pc}-35 \text{ kpc}$, $n_{\text{H}} \sim 10^{-5}-1 \text{ cm}^{-3}$ (Stern+ 16)



TMT① : CGMを構成するcloudのサイズ評価

重力レンズクエーサーを背景光源とした小離角高S/N多視線観測

- ・ 小スケール(<1pkpc)における内部構造の調査が可能
- ・ Stacking法に頼らず個々のCGMの情報が得られる



$$\Delta EW = \frac{|EW_1 - EW_2|}{\max(EW_1, EW_2)}$$

Koyamada et al.
(in prep., HSC-project 144)

吸収線によるCGM探査 の現状

2大プロジェクト (QPQ, KBSS) が進行中。ターゲットは $z \sim 2-3$

CGMのスケール

視線方向 : $\pm 240 \text{ km/s}$ 程度に広がる

⇒ ハローガスの固有運動によるもの (finger of God 効果)

接線方向 : 2 Mpc 程度に広がる

⇒ large scale のガスの infall (Kaiser 効果)

内部構造

高電離イオンの方が広がりが大きい

⇒ 銀河/QSOからの紫外光によって電離されているわけではない

高電離ガスの方が外部まで広がり掩蔽率も高い

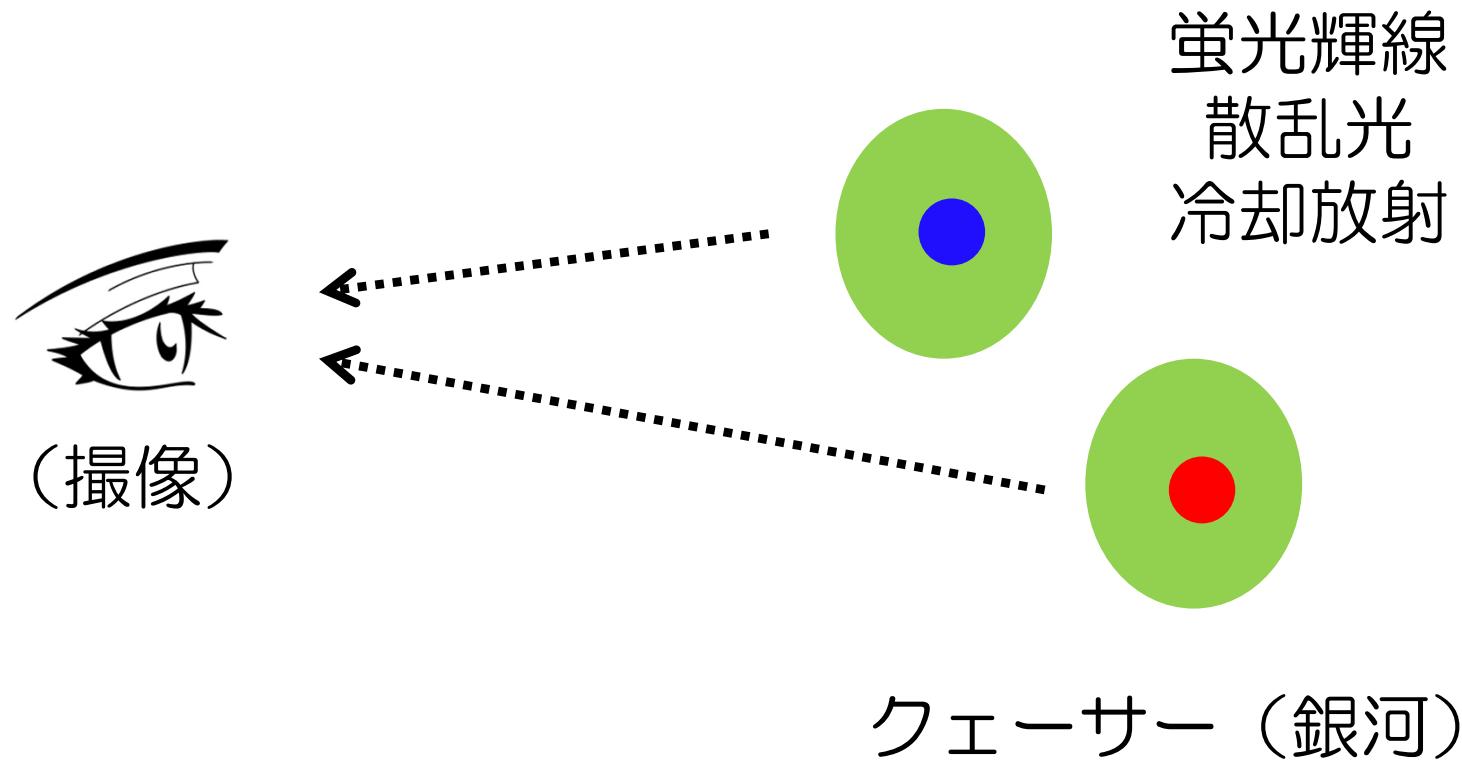
電離状態 (ガス密度) に依存した階層構造も持つ可能性がある

CGMの kinematics に redshift evolution があるかもしれない

小スケール (<1 pkpc) の内部構造 ⇒ TMT[分光]

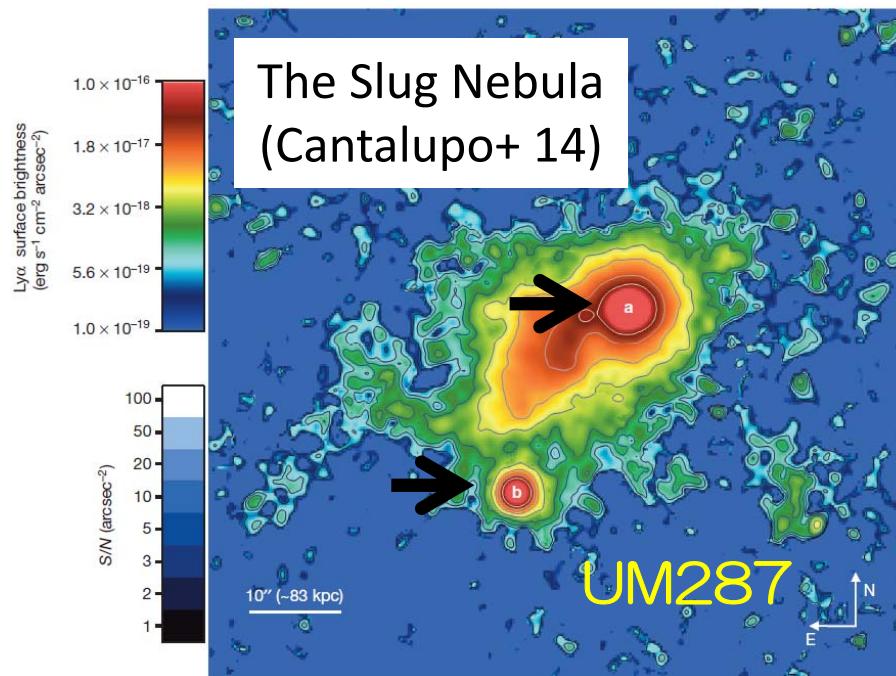
CGMの全体像 ⇒ 輝線検出が不可欠

輝線によるCGM調査

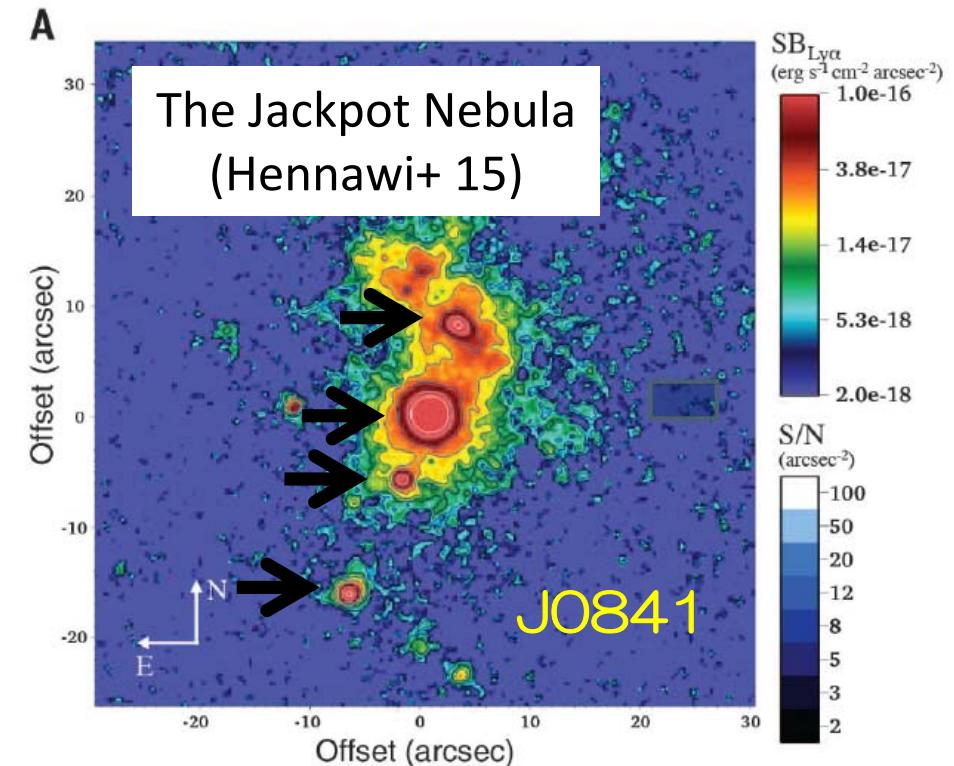


Deep NB imaging による検出例

$r \leq 100$ pkpc での検出例は多い(検出率はおよそ5割; e.g., QPQ6)
 $r > r_{\text{vir}}$ (銀河ハローとは無関係な領域)での明確な検出例は2つだけ



CGM with
 $d \sim 460$ pkpc,
 $L_{\text{Ly}\alpha} \sim 1.4 \times 10^{45}$ erg/s
around pair quasar

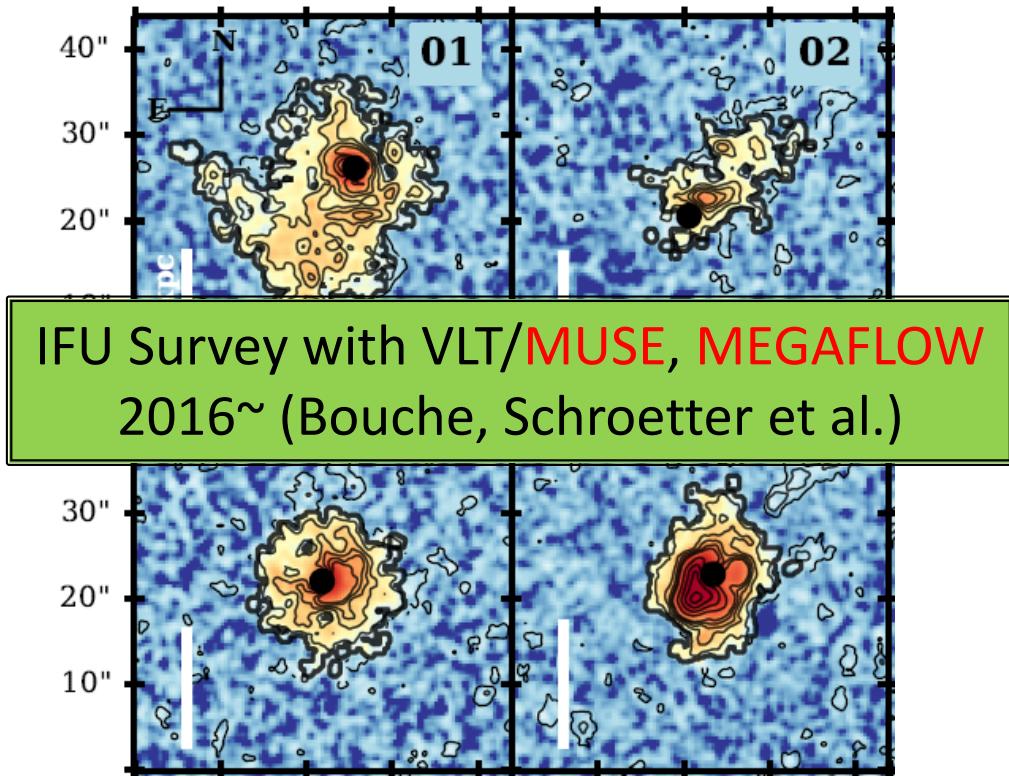


CGM with
 $d \sim 310$ pkpc,
 $L_{\text{Ly}\alpha} \sim 2.1 \times 10^{44}$ erg/s
around quadruple quasar

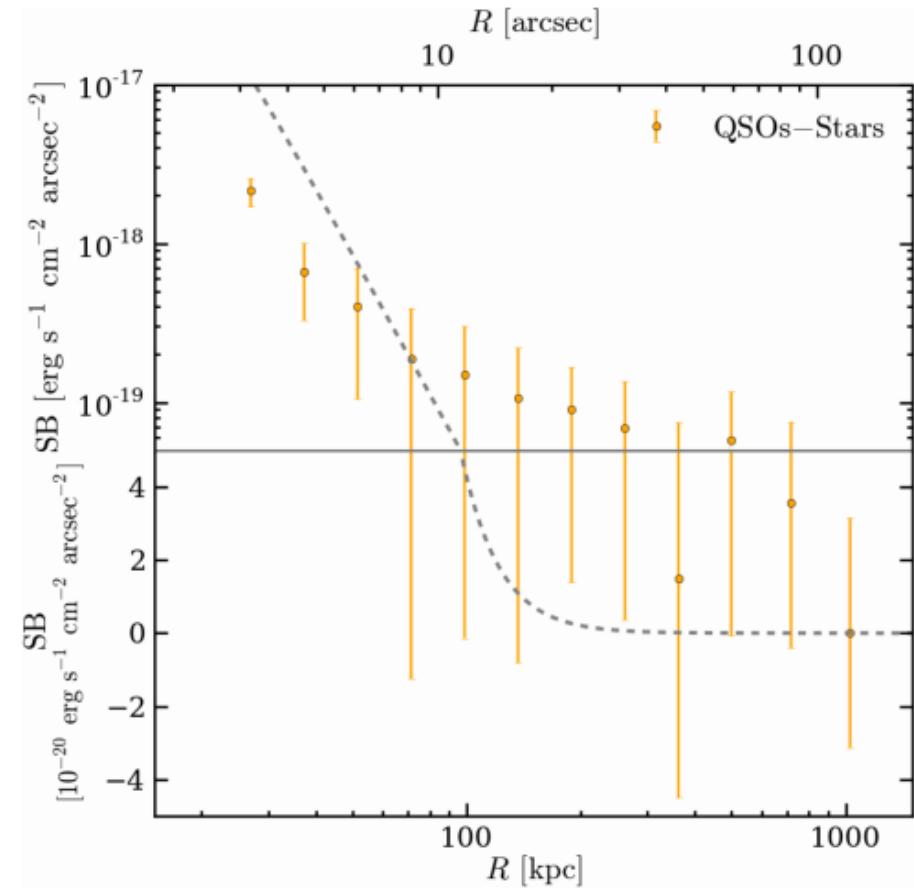
スタッキング法と面分光 による検出例

$\leq 100\text{pkpc}$ では面分光
 $100\text{--}500\text{pkpc}$ ではスタッキング法

が(現時点では)有効



$L_{\text{Ly}\alpha} \sim 10^{44} \text{ ergs/s}$ (検出率100% in 100pkpc)
 (Borisova+ 16; MUSE group)

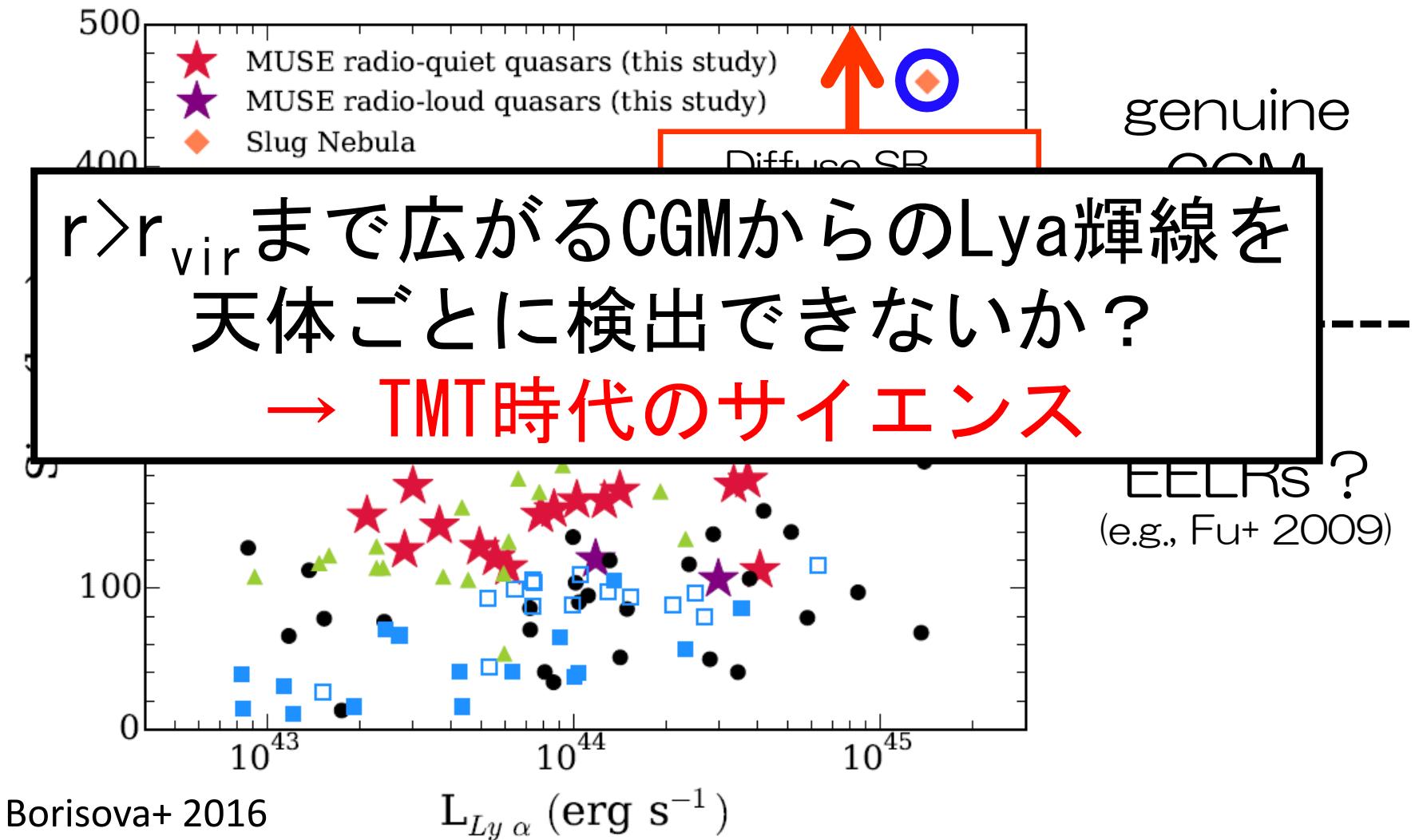


$SB_{\text{Ly}\alpha} \sim 5.5 \times 10^{-20} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$
 (Arrigoni Battaia+ 16)

CGM の Ly α 光度-サイズ関係

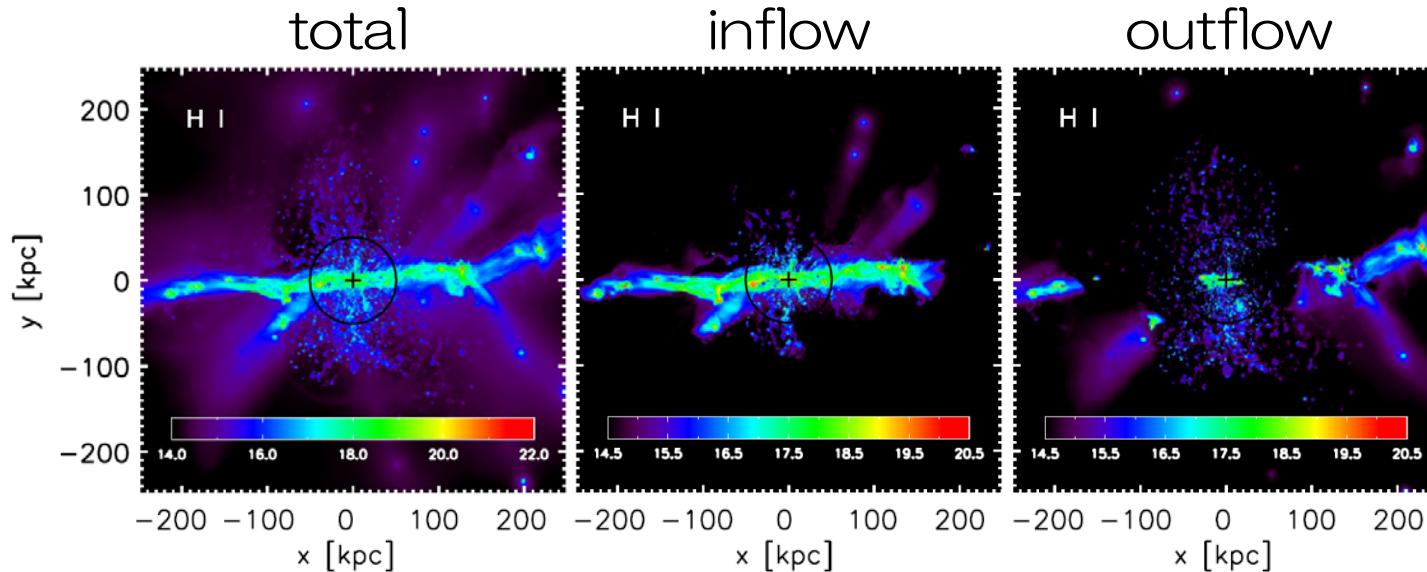
$SB_{Ly\alpha} \sim 10^{-18} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2 \rightarrow r < r_{vir}$ のものが大半

$SB_{Ly\alpha} \sim 10^{-20} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2 \rightarrow r \sim 500 \text{ pkpc}$ まで広がっている可能性

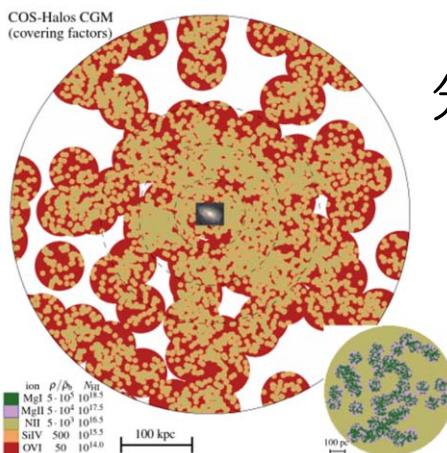


TMT②: $r > r_{\text{vir}}$ に広がるCGM/IGMの撮像

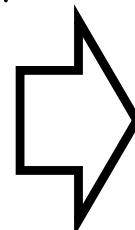
当面はVLT/MUSE, [Keck/KCWI] による面分光の独壇場
TMTでは, NB撮像による diffuse CGM の直接検出をめざす



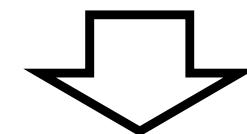
シミュレーション
“zoom-in” simulation
with $M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\odot}$
at $z \sim 2.8$
(Shen+ 2013)



分光+光電離モデル+統計
Spectroscopic data &
photo-ionization model
at $z \sim 0.2$
(Stern+ 2016)



TMTによる
Ly α , (C IV, He II)
輝線の
直接撮像へ



輝線によるCGM探査 の現状

long-slit 分光 : ~100H積分 with VLT/FORS2 (明確な検出なし)

NB撮像 : Keck/LRIS, Gemini/GMOS (明るいものは検出成功)

面分光 : VLT/MUSE (ビリアル半径程度以下の検出多数)

CGMのスケール

- ビリアル半径を超えるサイズの検出は数例のみ
(Slug nebula at $z=2.3$, Jackpot nebula at $z=2.04$)
- ビリアル半径程度以下 (< 100 pkpc) の検出例は多い
 - radio-quiet quasar 周辺で50% (NB) ~ 100% (IFU)
 - Extended emission line regions (EELRs) かもしれない
- faint ($SB_{\text{Ly}\alpha} \sim 6 \times 10^{-20} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$) なCGMは, 最大で500 pkpc 程度まで広がっている可能性がある (stacking法)
- 多視線分光観測 (QPQ6), zoom-in simulation (Shen+ 2013), 光電離モデル (Stern+ 2016)の結果は, 500 pkpcスケールに広がるCGMの存在を示唆

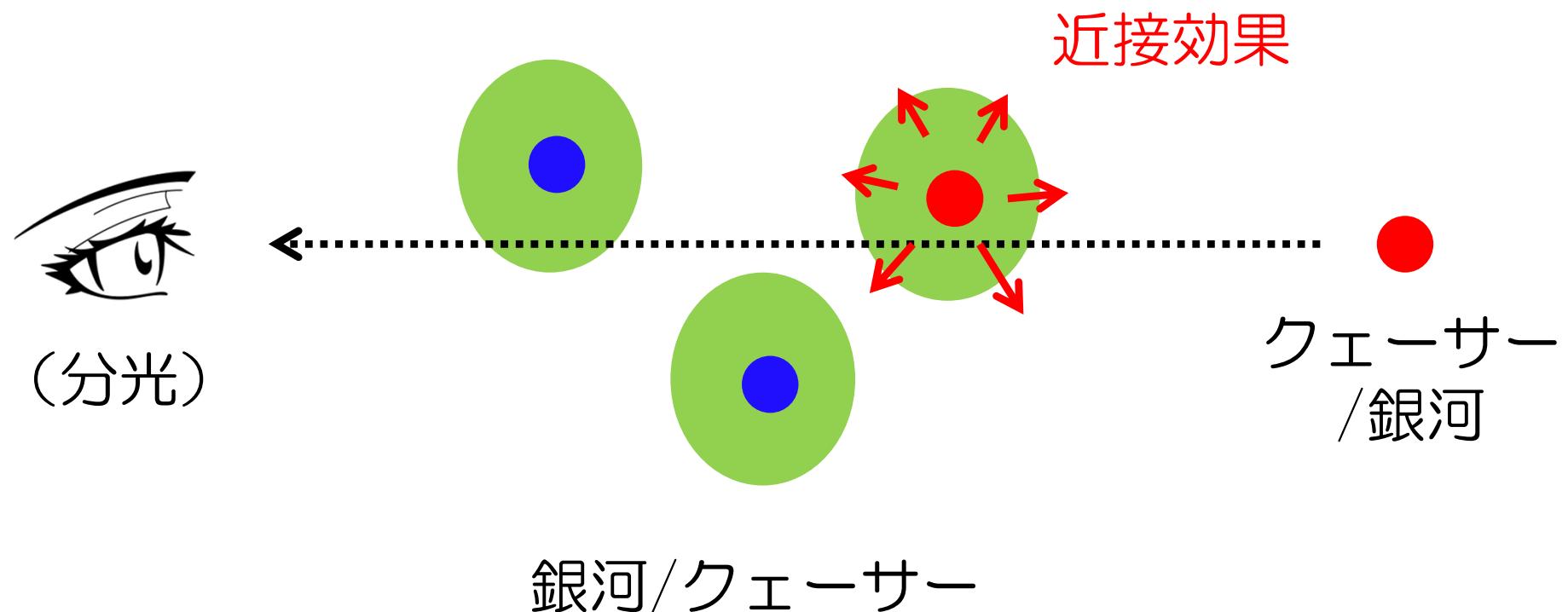
辺縁部まで含めたCGMの全体像 \Rightarrow TMT[撮像]

Proximity Effect (PE; 近接効果)



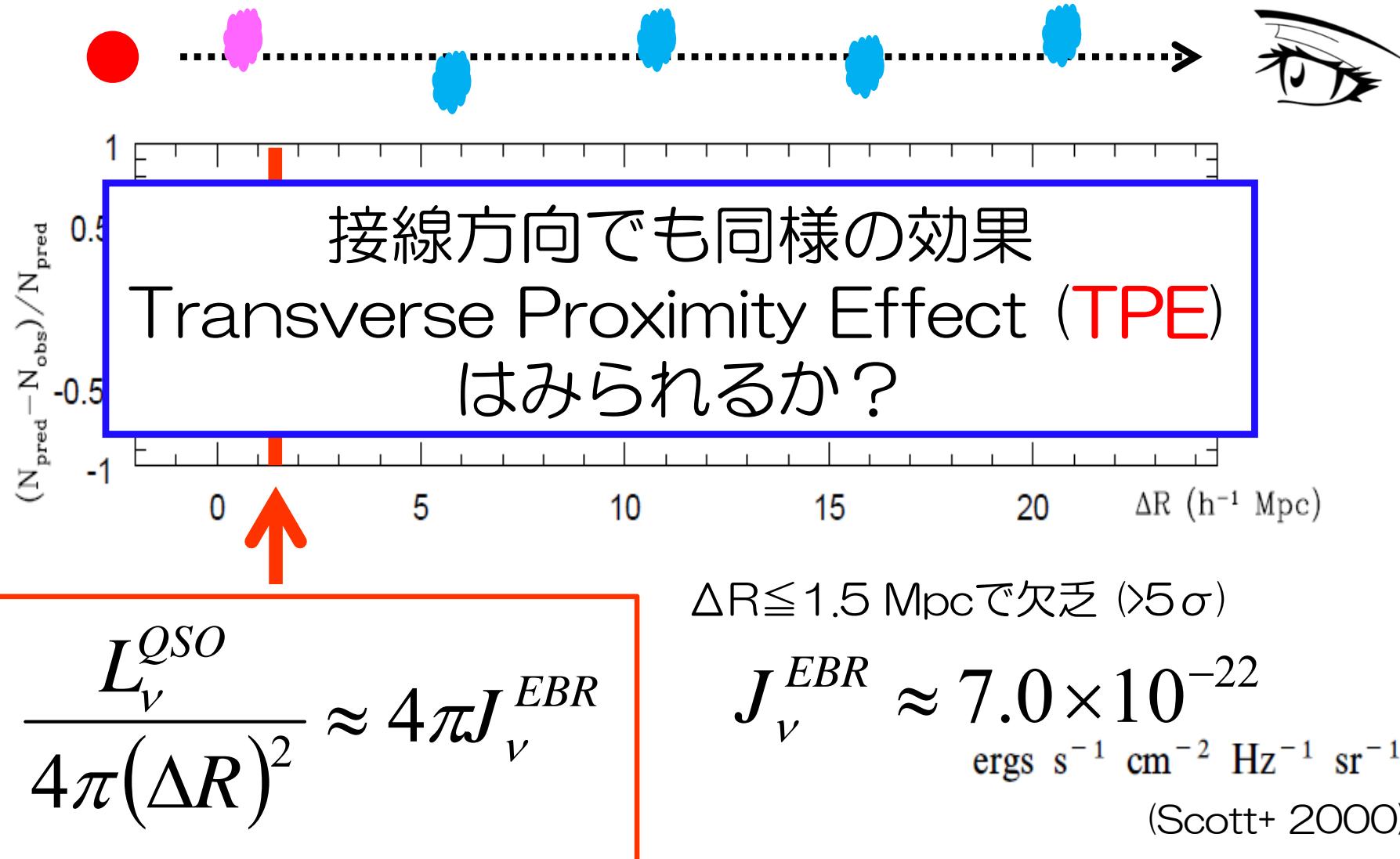
© ESO/M. Kornmesser

クエーサーによる近接効果



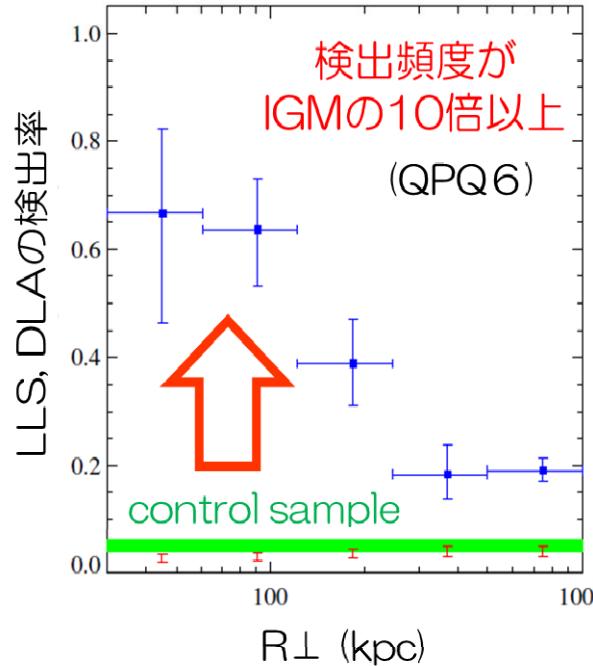
クエーサー近接効果 (Proximity Effect)

視線方向(LoS)に対してクエーサーの近傍では HIの平均吸収強度が低下する(**LPE**)。UV背景放射強度の評価にも利用できる。

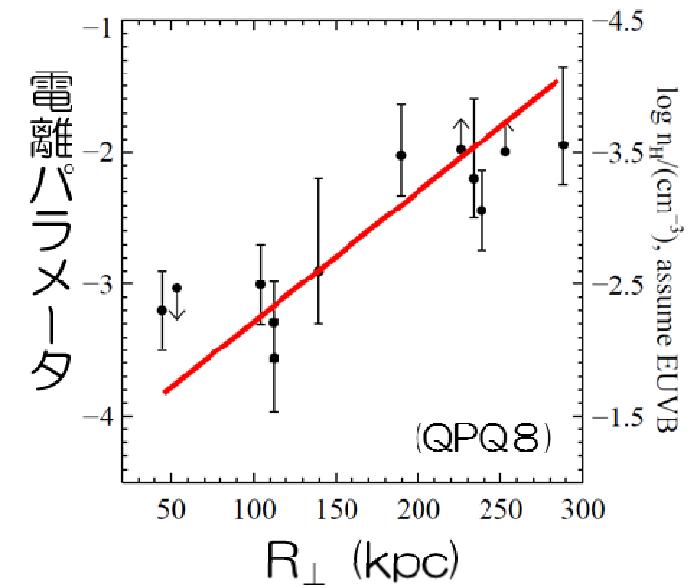
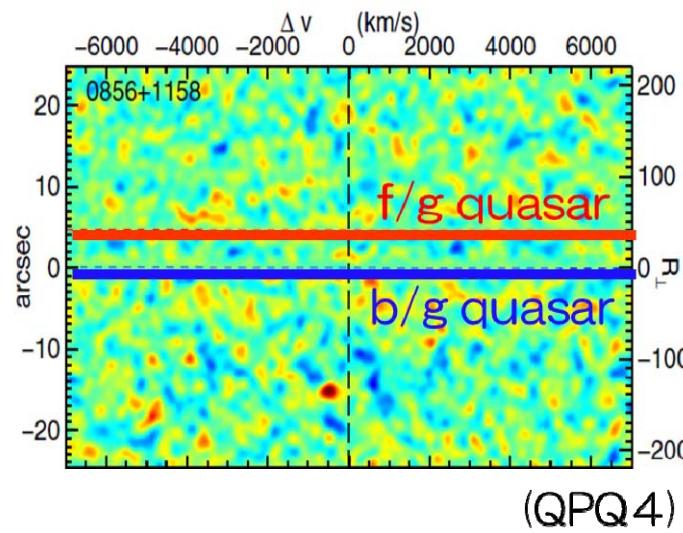


近接効果の異方性をほのめかす結果

- 光学的に厚いHIガス (LLS/DLA) の検出率がQSO近傍で高い
- クエーサー光度から期待される Ly α 蛍光輝線が検出されない
- クエーサーからの距離と電離状態に正の相関 (逆センス)

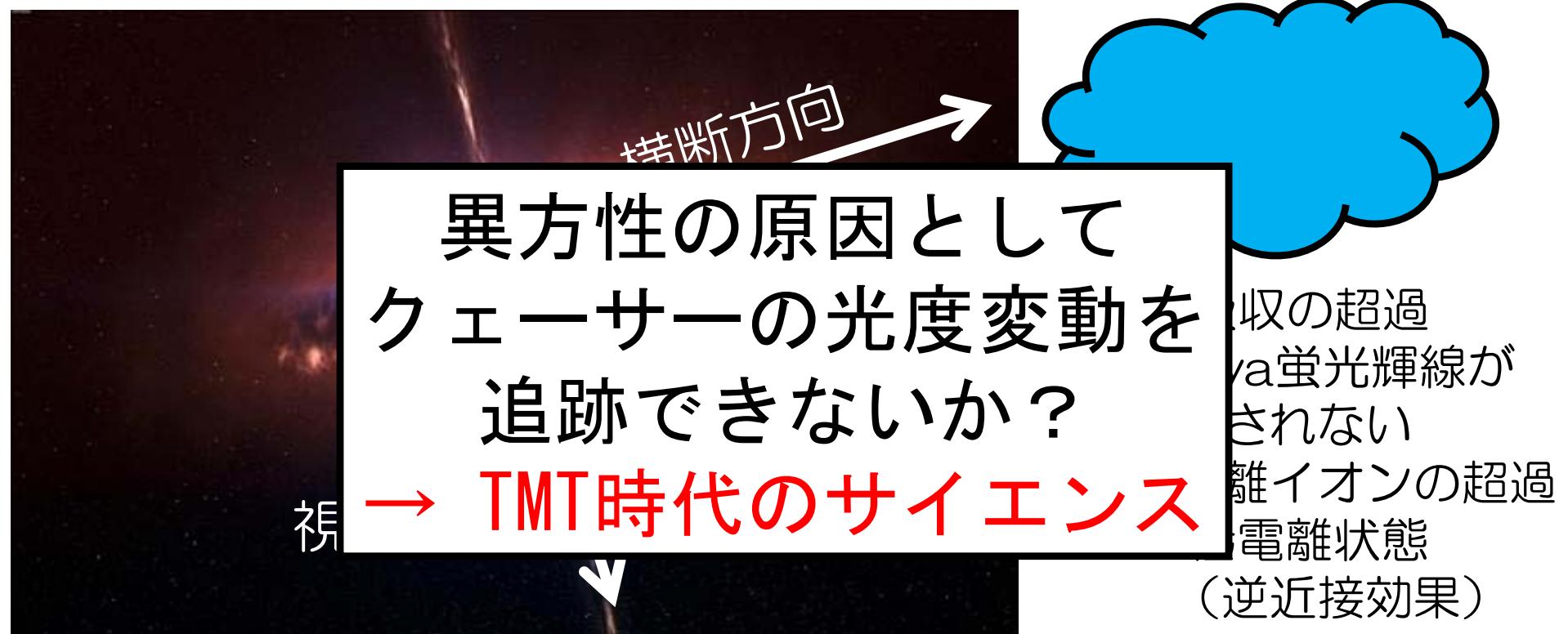


$$\begin{aligned} \text{SB}_{\text{Ly}\alpha} &= \frac{f_{\text{gm}} \eta_{\text{thick}} h \nu_{\text{Ly}\alpha} \Phi}{(1+z)^4} \frac{\Phi}{\pi} \\ &= 4.0 \times 10^{-17} \left(\frac{1+z}{3.0} \right)^{-4} \left(\frac{f_{\text{gm}}}{0.5} \right) \left(\frac{R}{100 \text{ kpc}} \right)^{-2} \\ &\times \left(\frac{L_{\nu_{\text{LL}}}}{10^{30} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}} \right) \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2} \end{aligned}$$

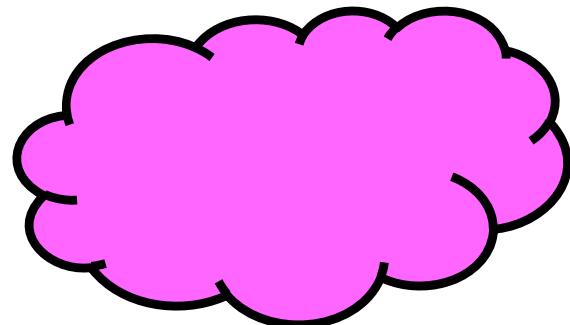


AGNトーラスによる非等方輻射 (LPE vs TPE)

AGN統一モデルに基づく非等方フィードバック効果の可能性 (QPQ 6)



- HI 吸収の欠乏
→ 高電離状態
(近接効果)



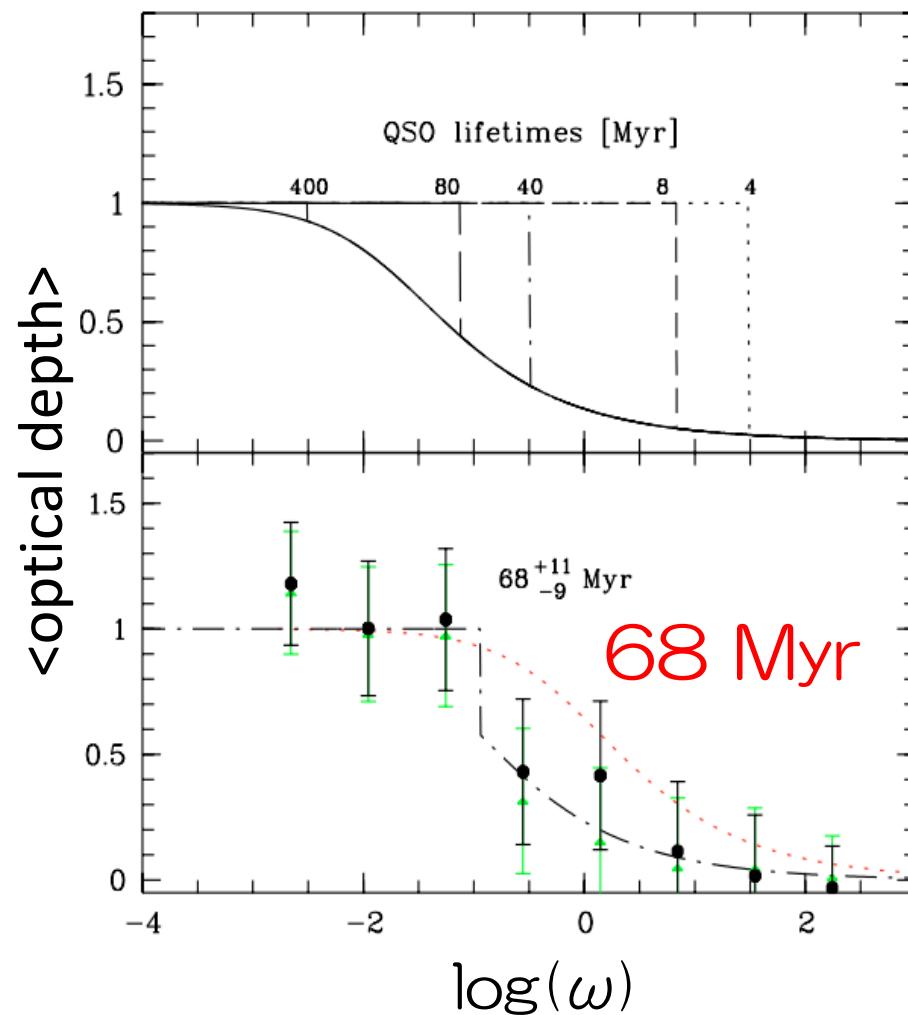
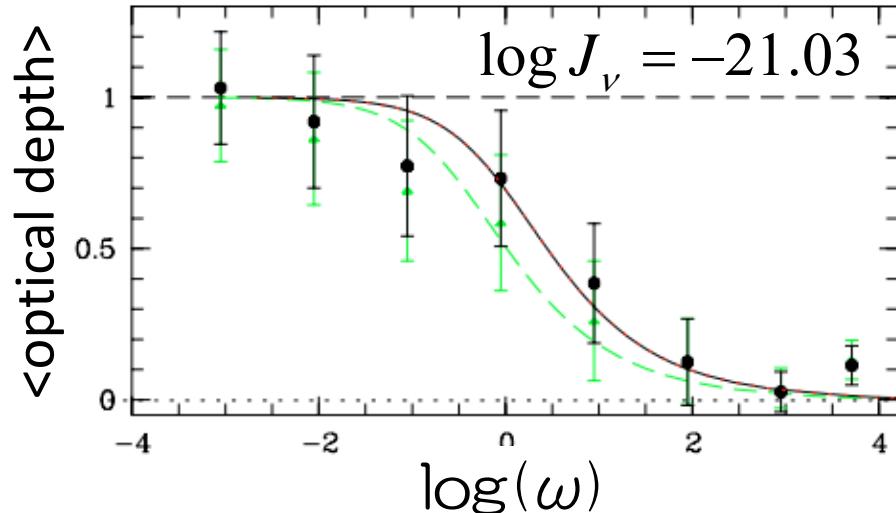
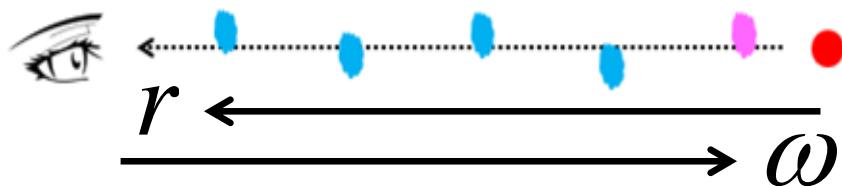
あるいは
光度変動の影響

TMT③: LPE によるQSO光度変動の追跡

クエーサー年齢が 10^6 – 10^8 yrs 程度であれば, LPEの半径依存性から
クエーサー年齢の見積もりが可能 (Dall'Aglio+ 2008)

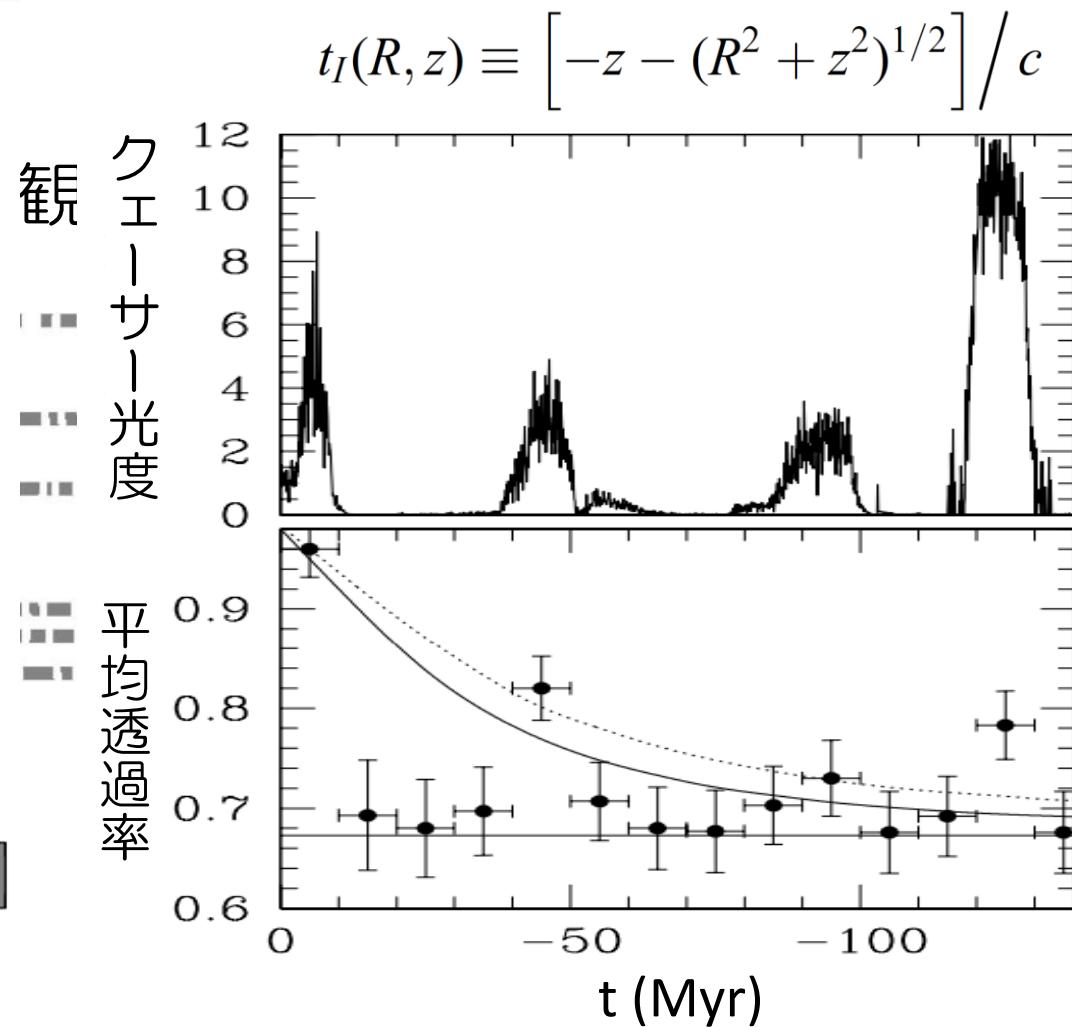
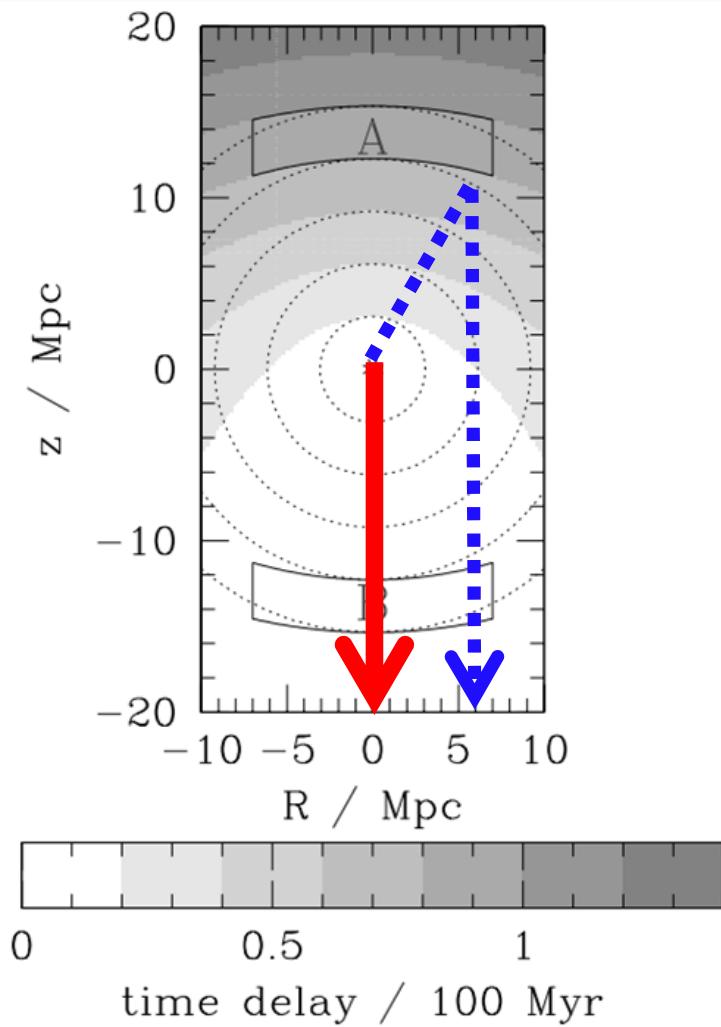
Flux-scaled distance

$$\omega = \frac{F^Q(\nu_0)}{4\pi J(\nu_0)}$$



TMT③: TPE によるQSO光度変動の追跡

LPEとTPEの両方の効果を考慮に入れた3次元的な近接効果の調査。
クエーサー光度(電離光子)の変動の追跡が可能 (Adelberger+ 2004)



近接効果とクエーサー異方性調査 の現状

クエーサー近傍におけるIGMの電離状態

視線方向：クエーサー近傍 ($< 1.5 h^{-1} \text{ Mpc}$) で

- HIガスによる透明度が上がる (LPE; e.g., Bajtlik+ 1988)

接線方向：クエーサー近傍 ($\leq 1 \text{ Mpc}$) で

- HIガスによる透明度が下がる (e.g., QPQ6)
- 期待されるHIガスによる蛍光輝線が未検出 (e.g., QPQ4)
- 電離状態が下がる (e.g., QPQ8)

⇒ いずれも期待される傾向とは逆 (TPE はみられない)

近接効果にみられる異方性の原因

- AGNトーラスによる非等方輻射 による影響
⇒ CGM(CQM) の分光, 撮像観測を継続
- クエーサーの光度変動 (クエーサー年齢) による影響
⇒ LPE によるクエーサー光度変動の追跡 (Dall'Aglio+ 2008)
TPE によるクエーサー光度変動の追跡 (Aldenberger+ 2004)

クエーサー背景銀河の高密度多視線分光 ⇒ TMT[分光]

まとめ

- TMT時代の高分散分光観測によるサイエンス（抜粋）
- CGM探査（吸収線）
 - QPQ (for CQM), KBSS (for CGM) が進行中
 - finger of God 効果 ($\sim 240 \text{ km/s}$), Kaiser 効果 ($\sim 2 \text{ Mpc}$) がみられる
 - 多視線観測 + 光電離モデルにより、内部構造の解明が進展
- CGM探査（輝線）
 - 蛍光輝線の検出成功率は long-slit < NB撮像 < 面分光 (VLT/MUSE)
 - $r < r_{\text{vir}}$ での検出率 50-100% ($\text{SB}_{\text{Ly}\alpha} \sim 10^{-18} - 10^{-19} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$)
 - スタッキング法 $\Rightarrow 500 \text{ pkpc}$ まで広がる成分 ($\text{SB}_{\text{Ly}\alpha} \sim 10^{-20} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$)
- 近接効果の異方性とクエーサーの光度変動
 - クエーサー近傍 ($< 1 \text{ pkpc}$) でのCGM/IGMの電離状態は視線方向で上がり (LPE), 接線方向で下がる (期待される効果 (TPE) とは逆の傾向)
 - AGNトーラスによる非等方輻射 or クエーサーの光度変動の影響
- TMT時代のサイエンス
 - 小スケール ($< 1 \text{ pkpc}$) の内部構造解明 [分光], 辺縁部まで含めたCGMの全体像 [撮像], 近接効果の4次元分布 (3D + 時間) [多視線分光]