

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)



全学教育機構
SCHOOL OF GENERAL EDUCATION



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次元構造の解明
- 6: 銀河/クエーサー周辺物質の探査

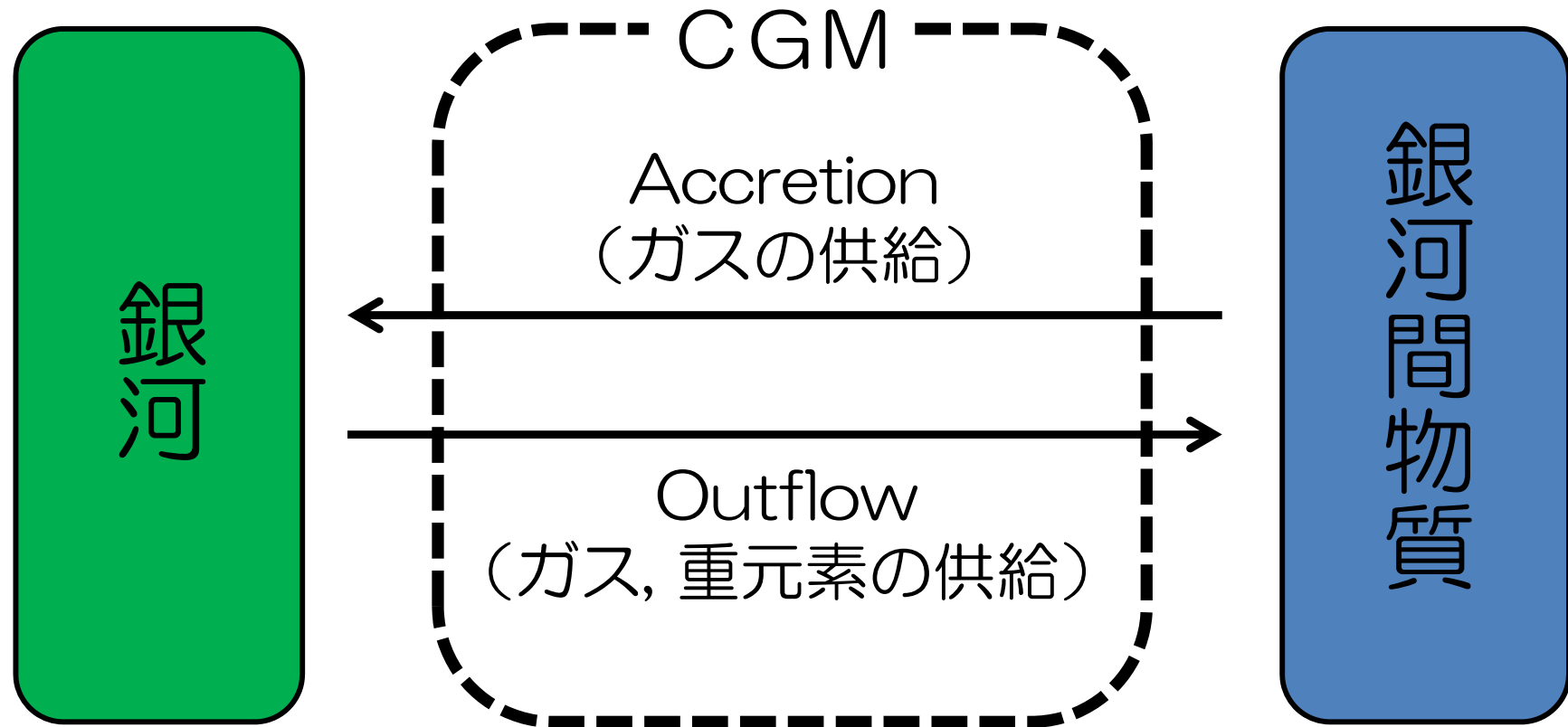
Circum-Galactic Medium (CGM; 銀河周辺物質)



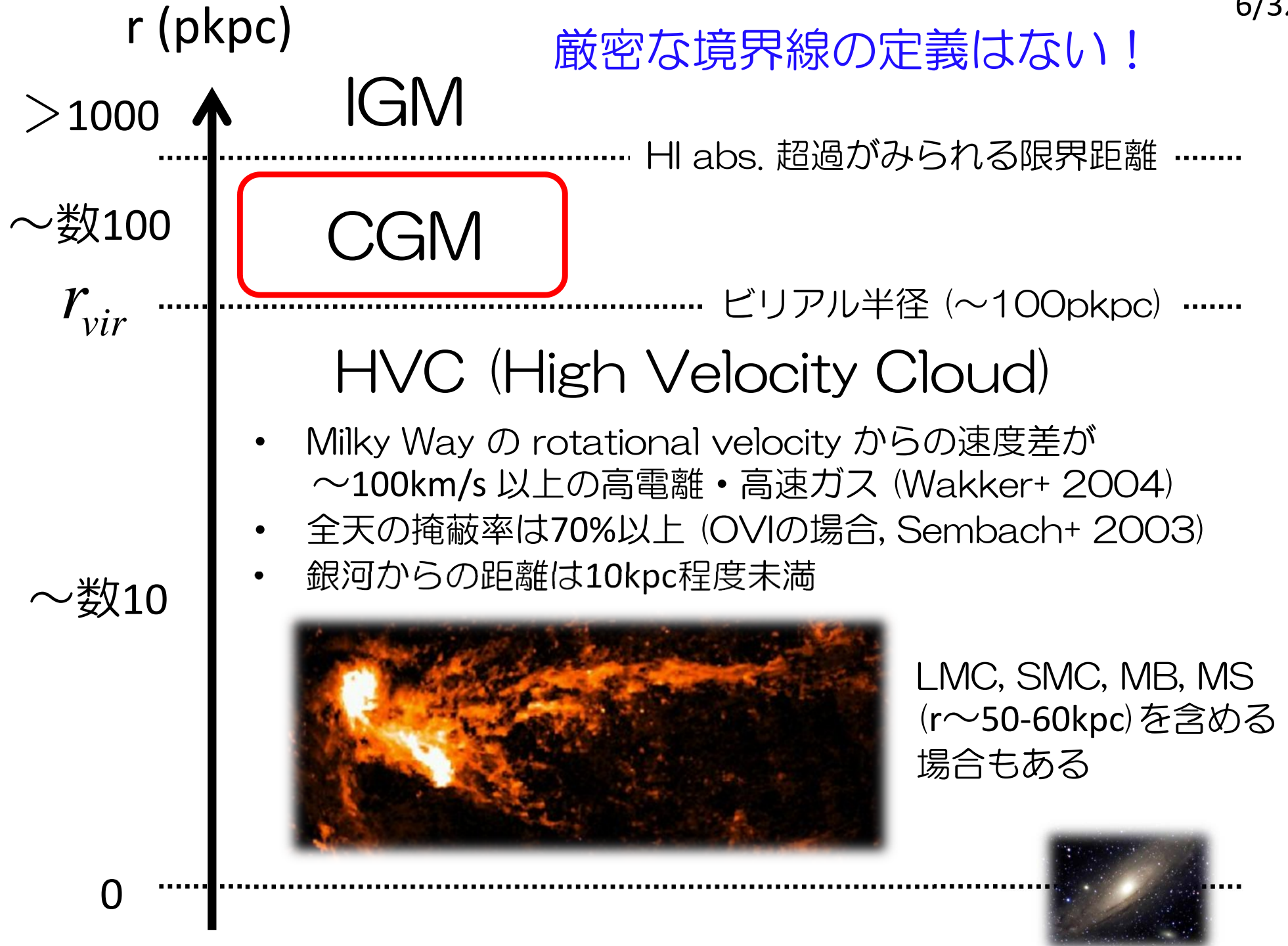
© MPIA (G. STINSON / A. V. MACCIÒ)

銀河進化と銀河周辺物質(CGM)

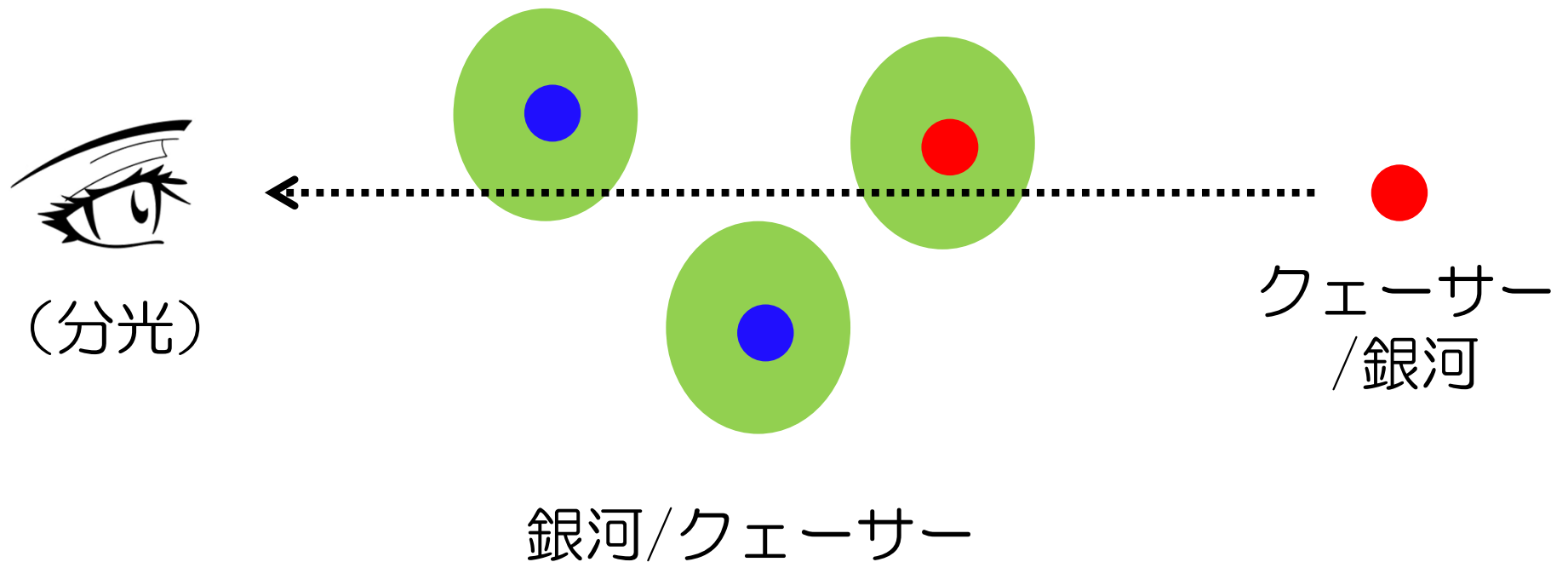
銀河と銀河間空間(IGM)の間の物質循環の役割を担う銀河周辺物質(CGM)は、星形成活動の促進や抑制、銀河間物質の化学進化に大きな影響を与えるため、その理解は極めて重要である。



厳密な境界線の定義はない！



吸収線によるCGM調査



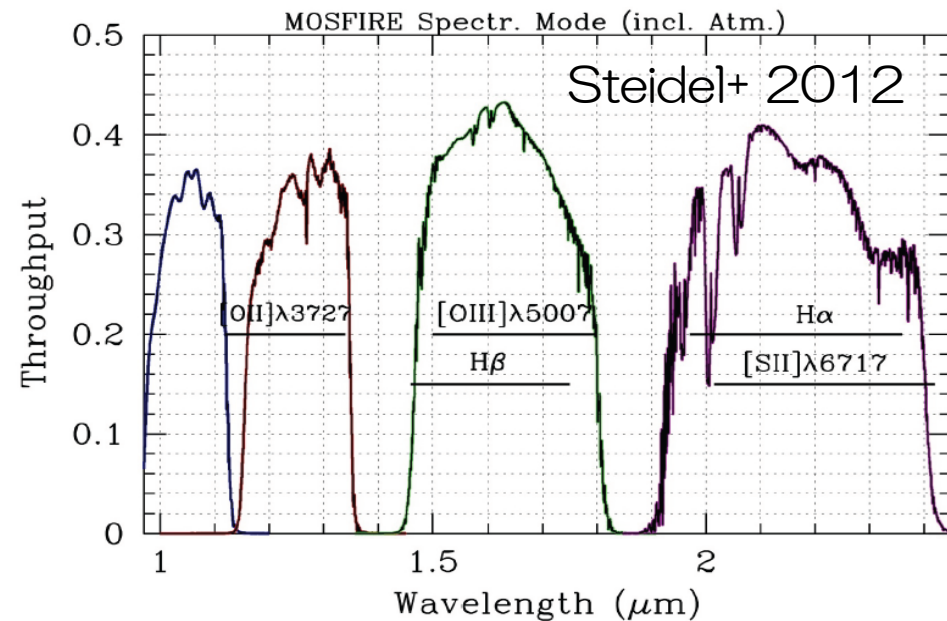
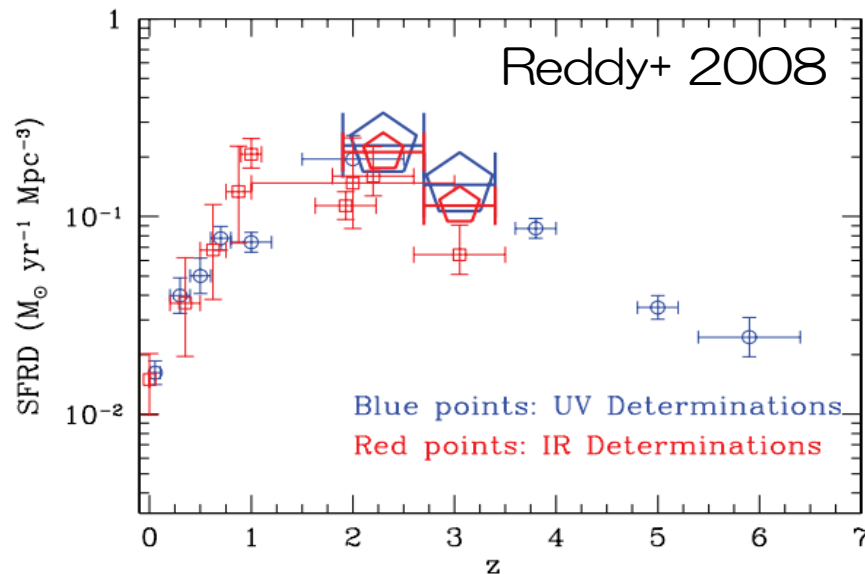
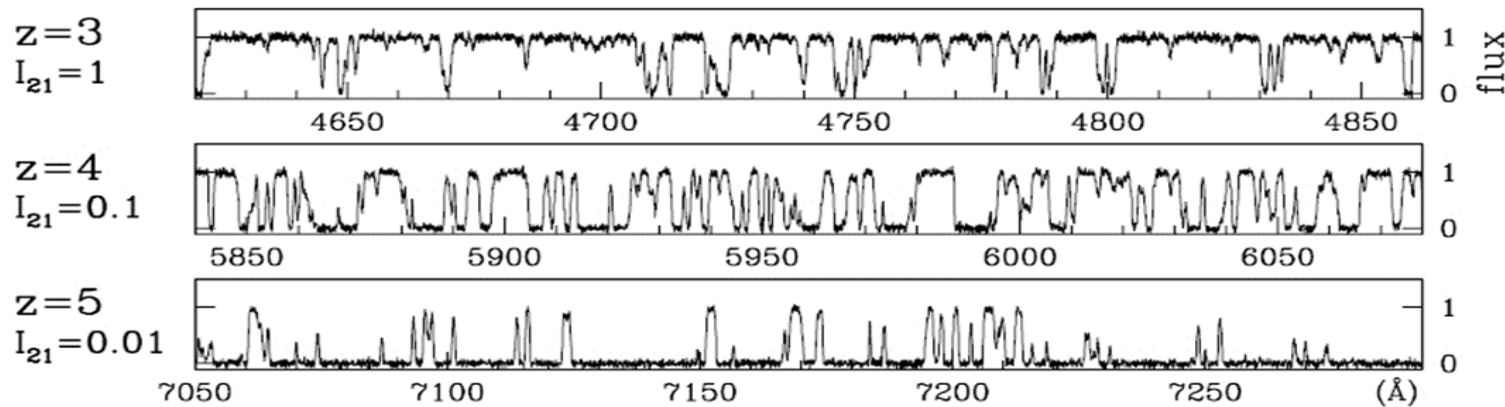
		背景光源		
		QSO	銀河	
吸収体	QSO	1D 1990年頃～ 2D 2012年～ Quasars Probing Quasars (QPO) project series Her 2006～	2004年～ Adelberger+ 2004	近接効果 CGM
	銀河	1D 1990年頃～ Lanzetta+1990, Bergeron+1991, 2D 2012～ Adelberger+ 2003 Rakic+ 2012,2013, Turner+2014	2005年頃～ Adelberger+ 2005a, Rubin+2010, Keck Baryonic Structure Survey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

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

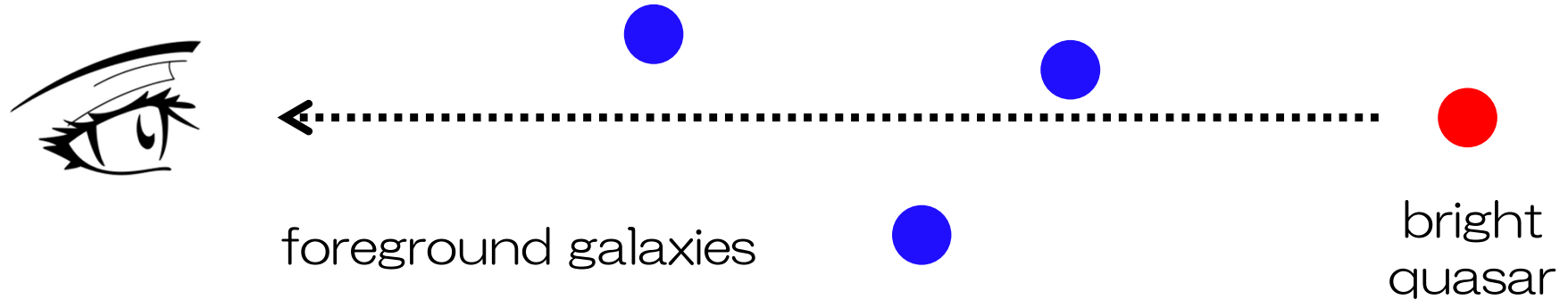
○: サンプル多い
 小離角もOK (<100kpc)
 ×: 暗い(低S/N)
 → stacking法

ねらいめは $z \sim 2-3$

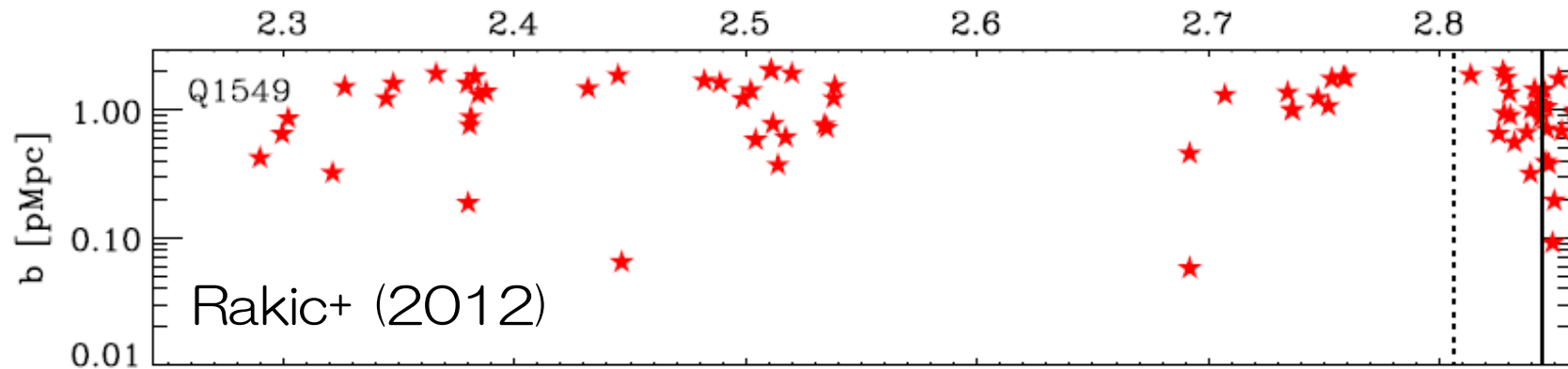
- $z > 4$ だと Ly α forest が混みすぎ, $z < 2$ だと 少なすぎる
- 星形成率がピークを迎える時期 (CGMからのガス供給が活発)
- 銀河の z を正確に評価する際に必要な nebular 輝線の検出が容易



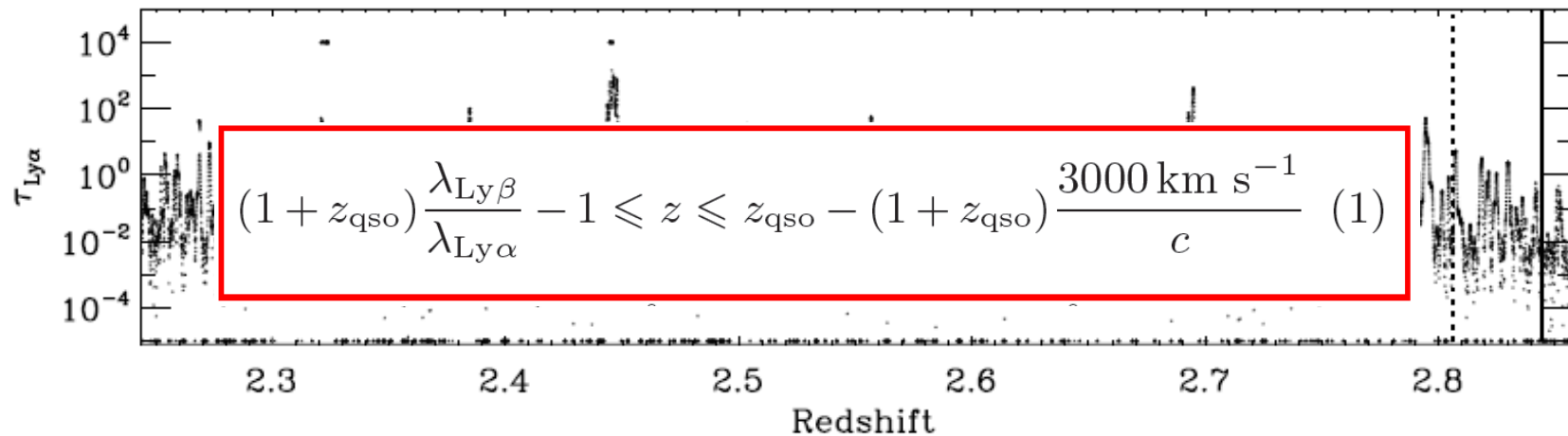
Stacking法による2次元分布



Impact
parameter

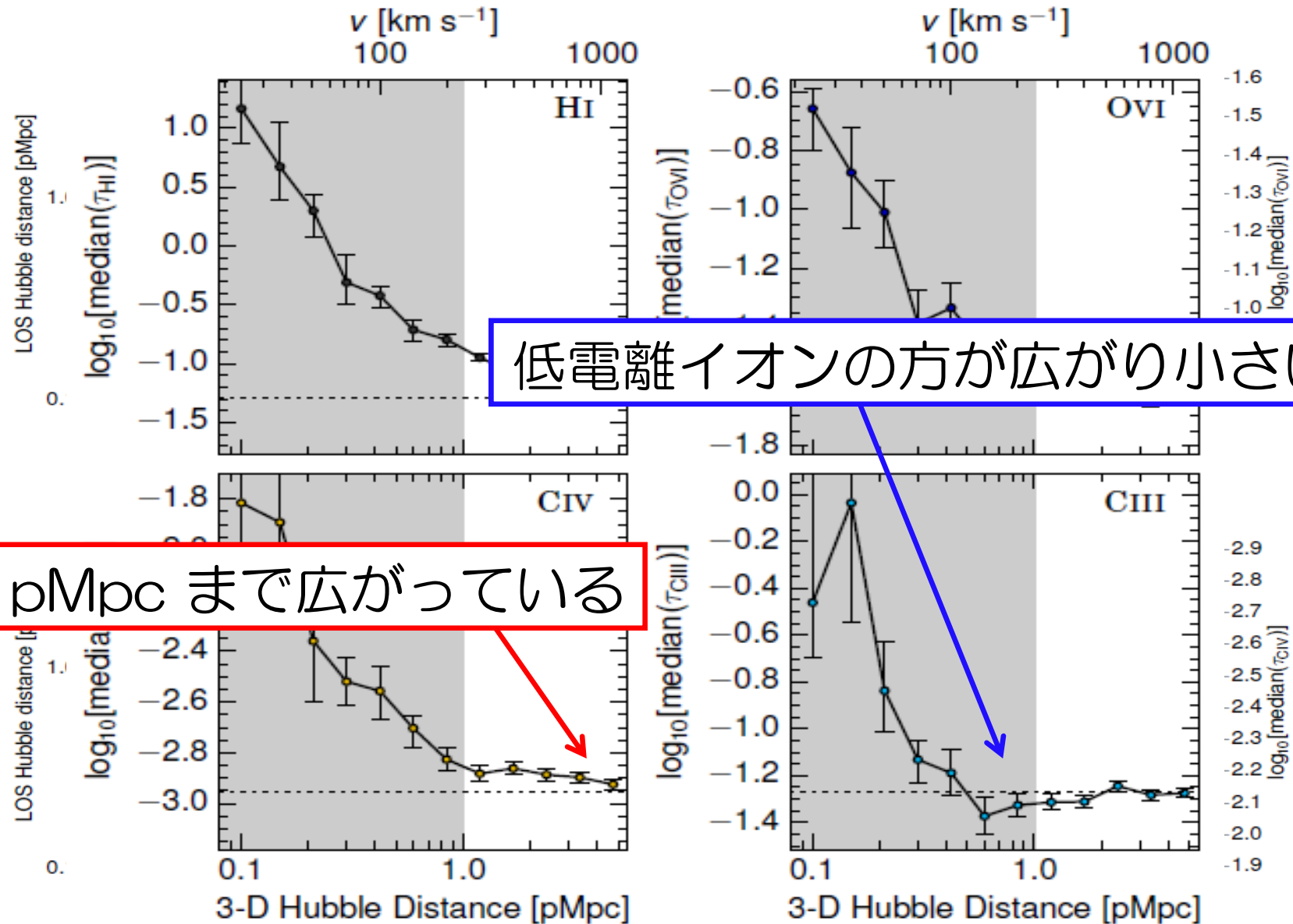


optical depth

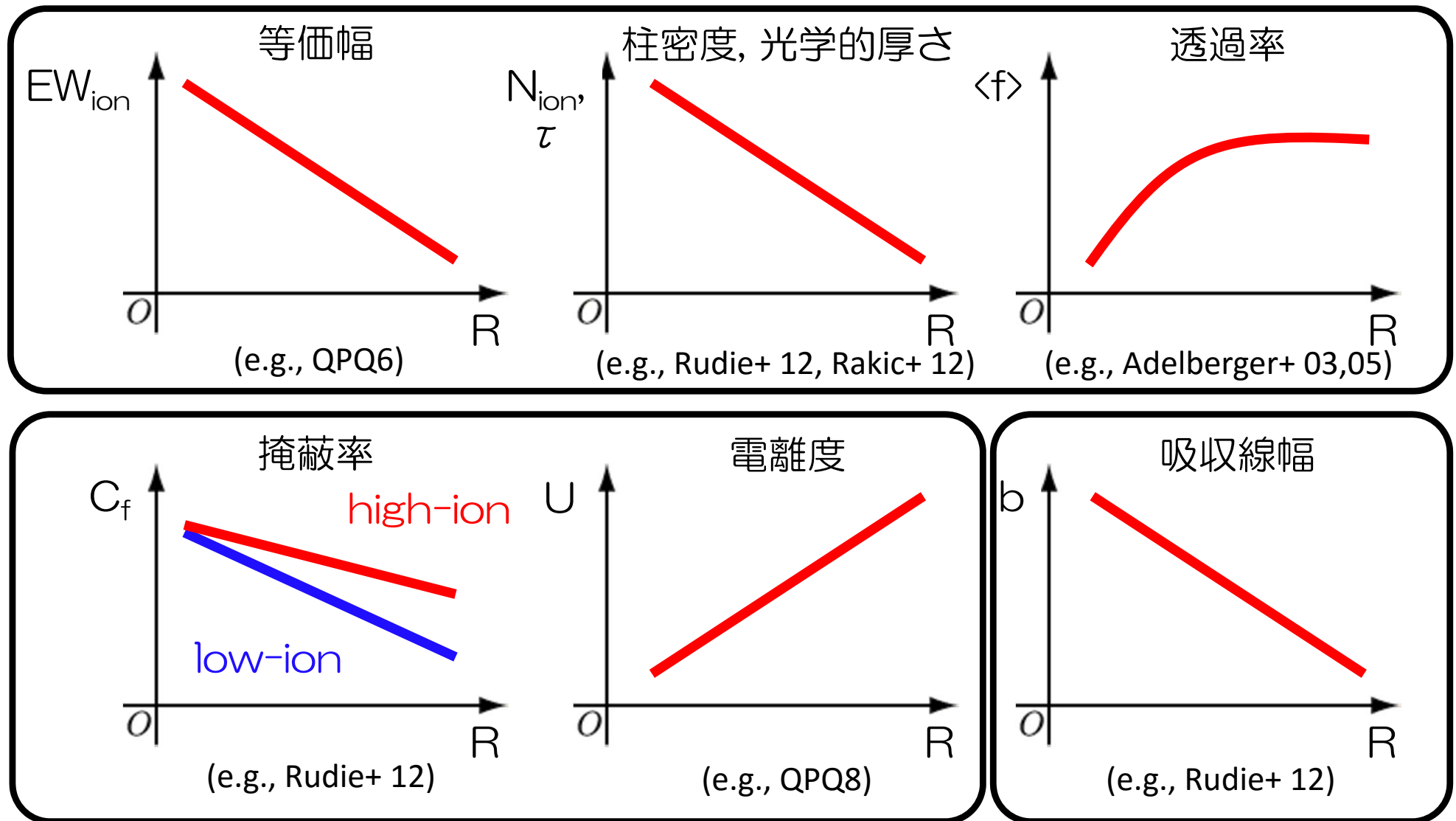


Metal abs.
(Turner+ 2015)

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

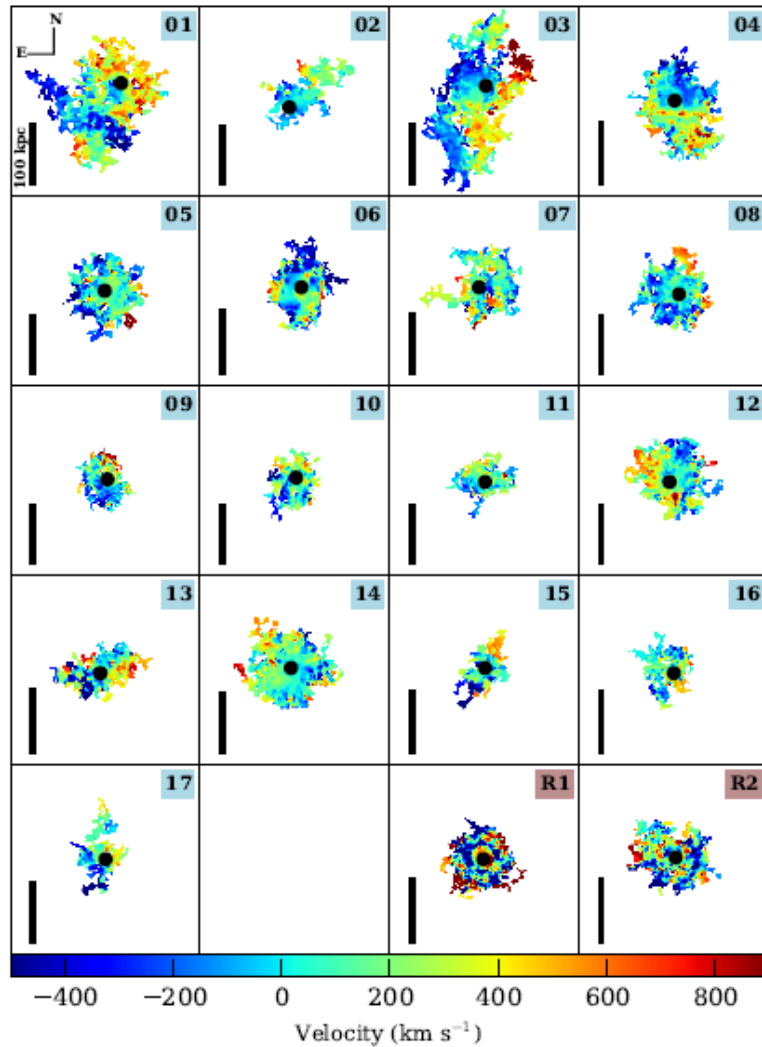


CGMの内部構造（半径依存性）

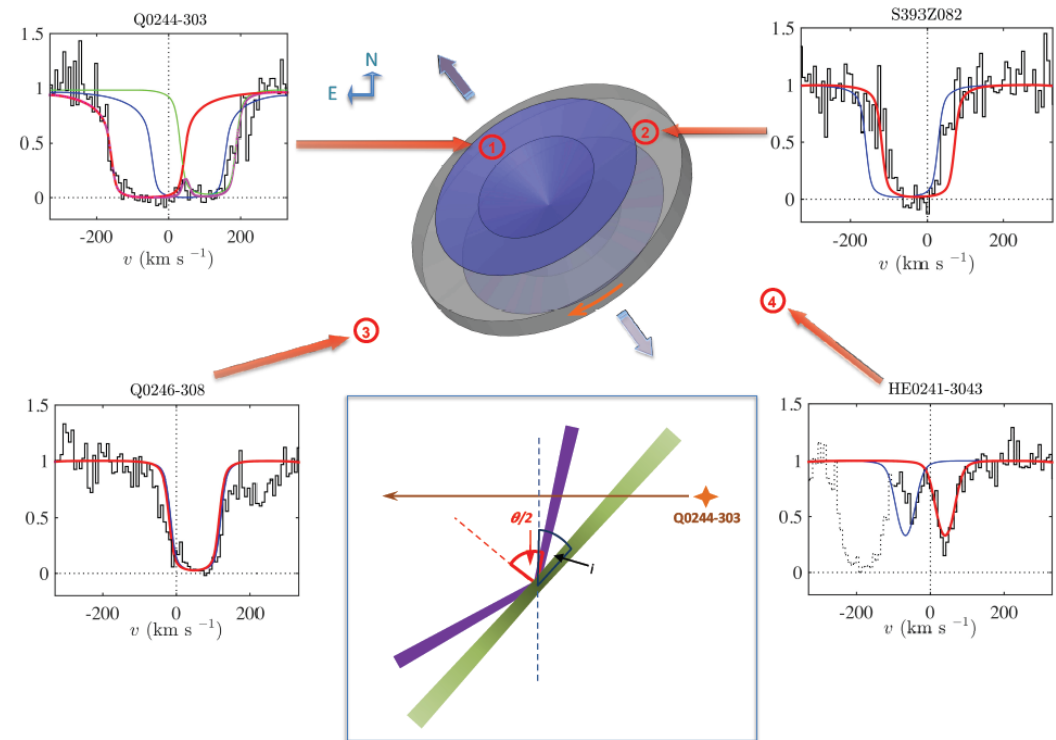


内側ほど 柱密度高い 電離状態低い ガス温度/乱流大きい

CGM の kinematics

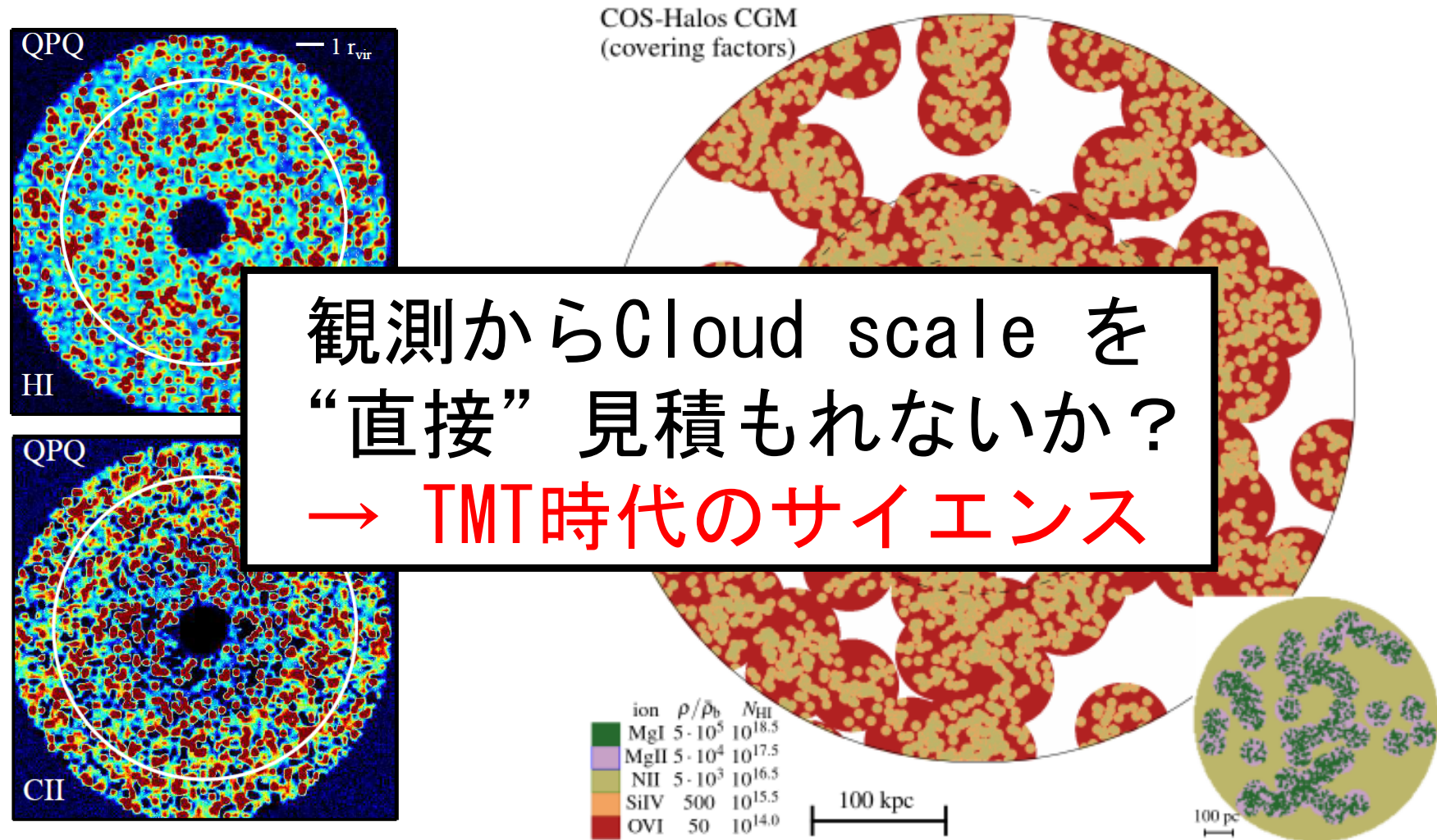
 $z \sim 2$


MUSEによる面分光の結果
Rotation は見られない (Borisova+ 16)

 $z \sim 0$


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

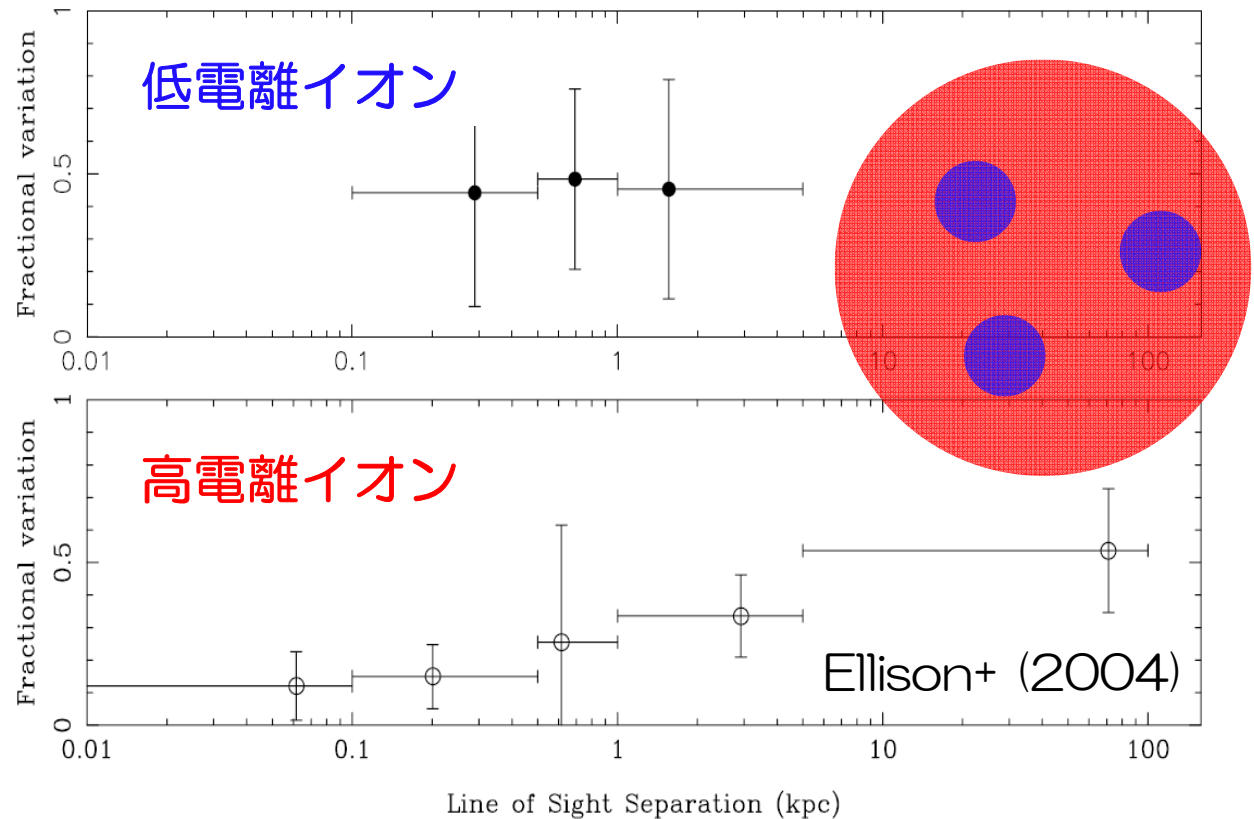
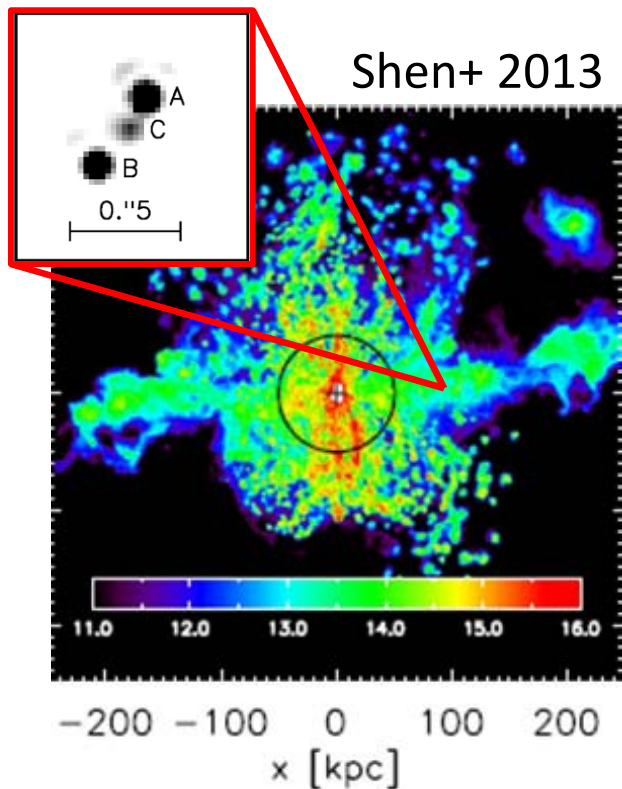
Cloud size を **5kpc** に固定
EW, C_f 分布の半径依存性
を再現するように配置
400x400kpc (QPQ7)

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(<1 pkpc)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

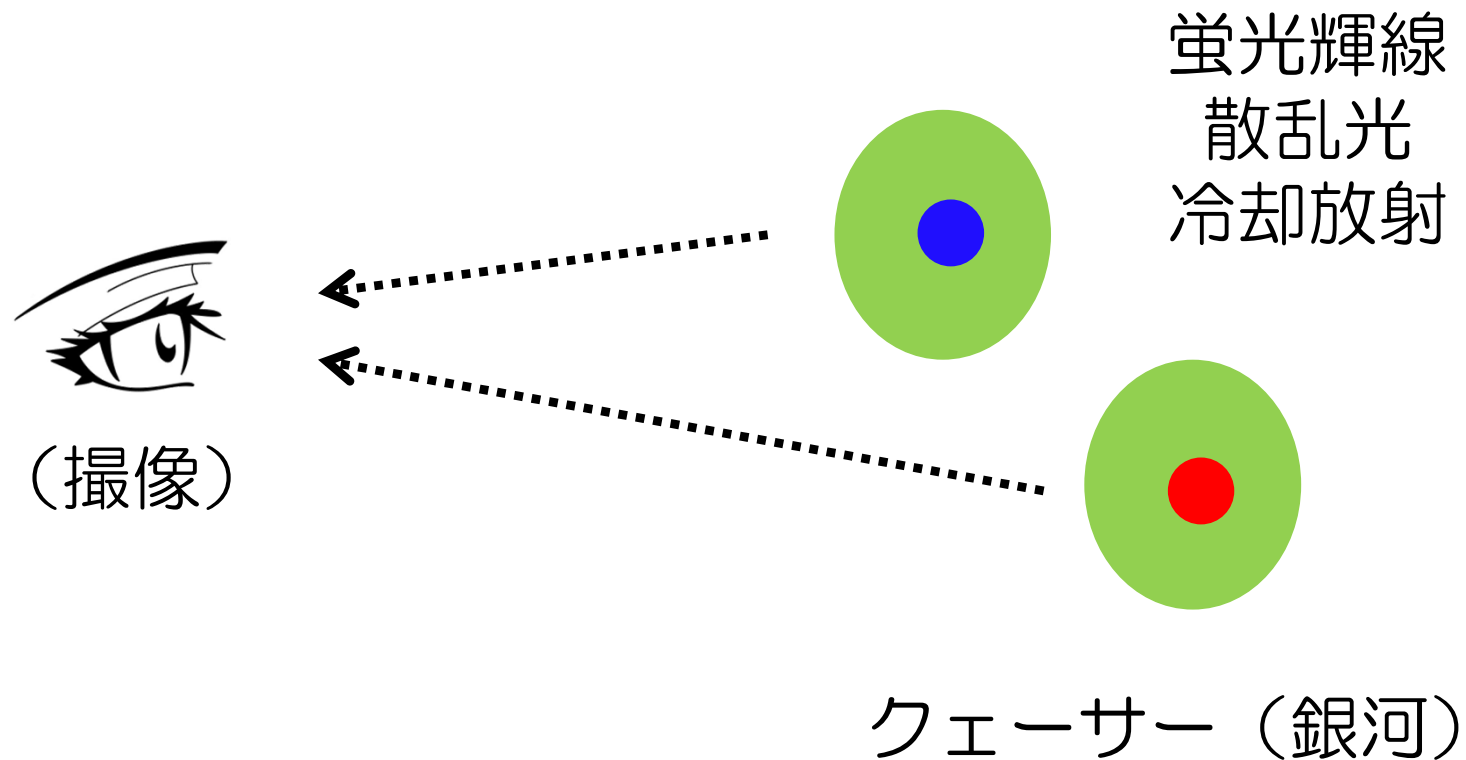
電離状態（ガス密度）に依存した階層構造も持つ可能性がある

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

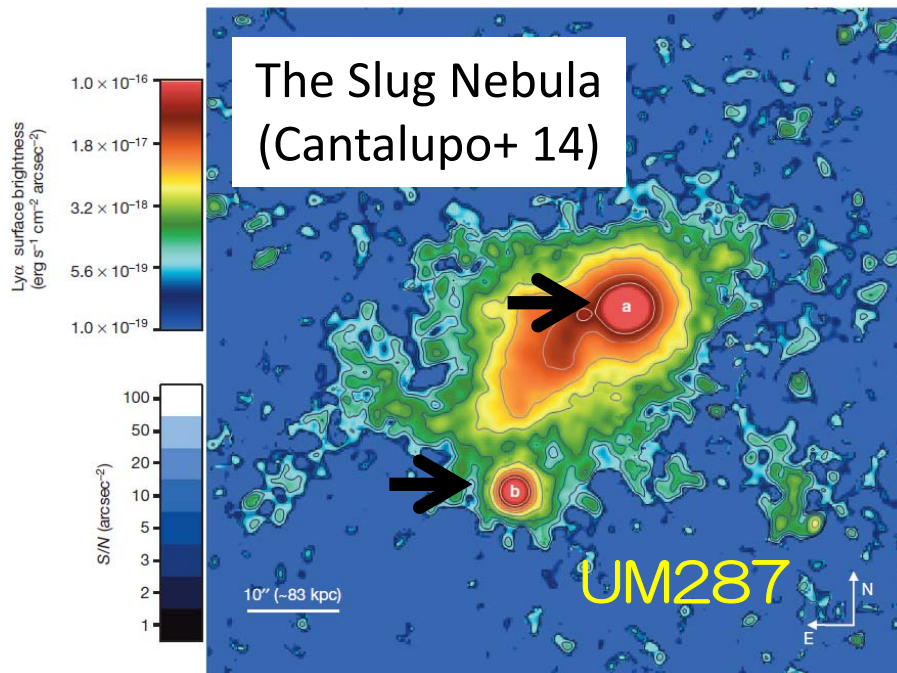
輝線によるCGM調査



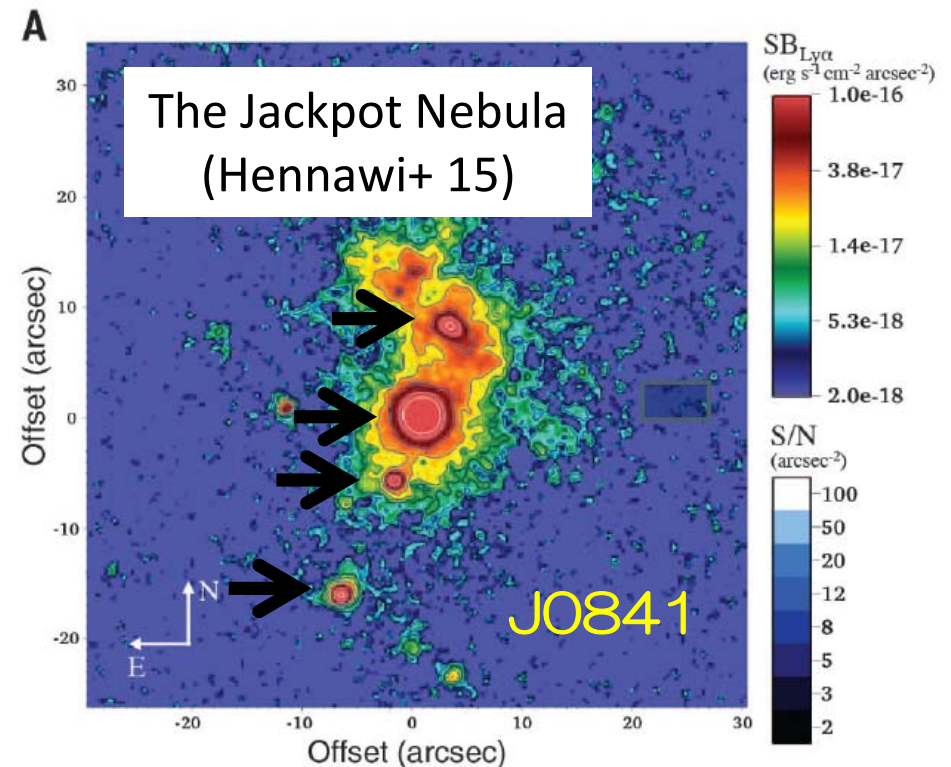
Deep NB imaging による検出例

$r \leq 100$ 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 ~ 460pkpc,
L_{Ly α} ~ 1.4x10⁴⁵ erg/s
around pair quasar

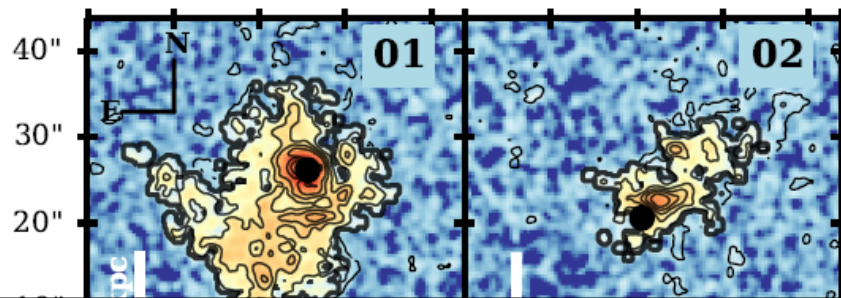


CGM with
d ~ 310pkpc,
L_{Ly α} ~ 2.1x10⁴⁴ erg/s
around quadruple quasar

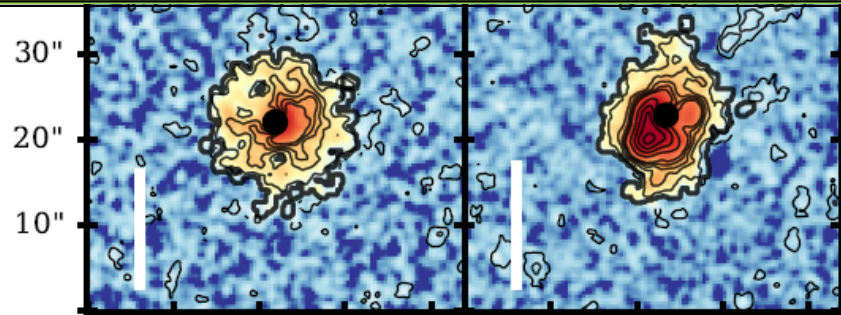
スタッキング法と面分光 による検出例

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

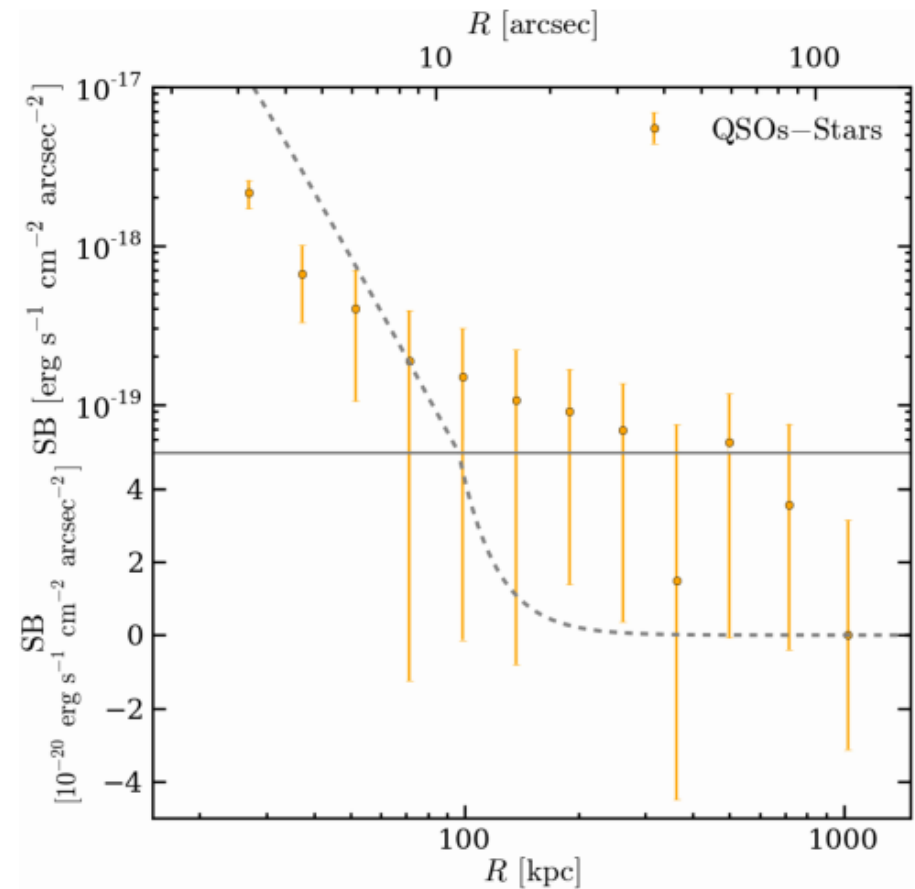
が(現時点では)有効



IFU Survey with VLT/**MUSE**, **MEGAFLOW**
2016~ (Bouche, Schroetter et al.)



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

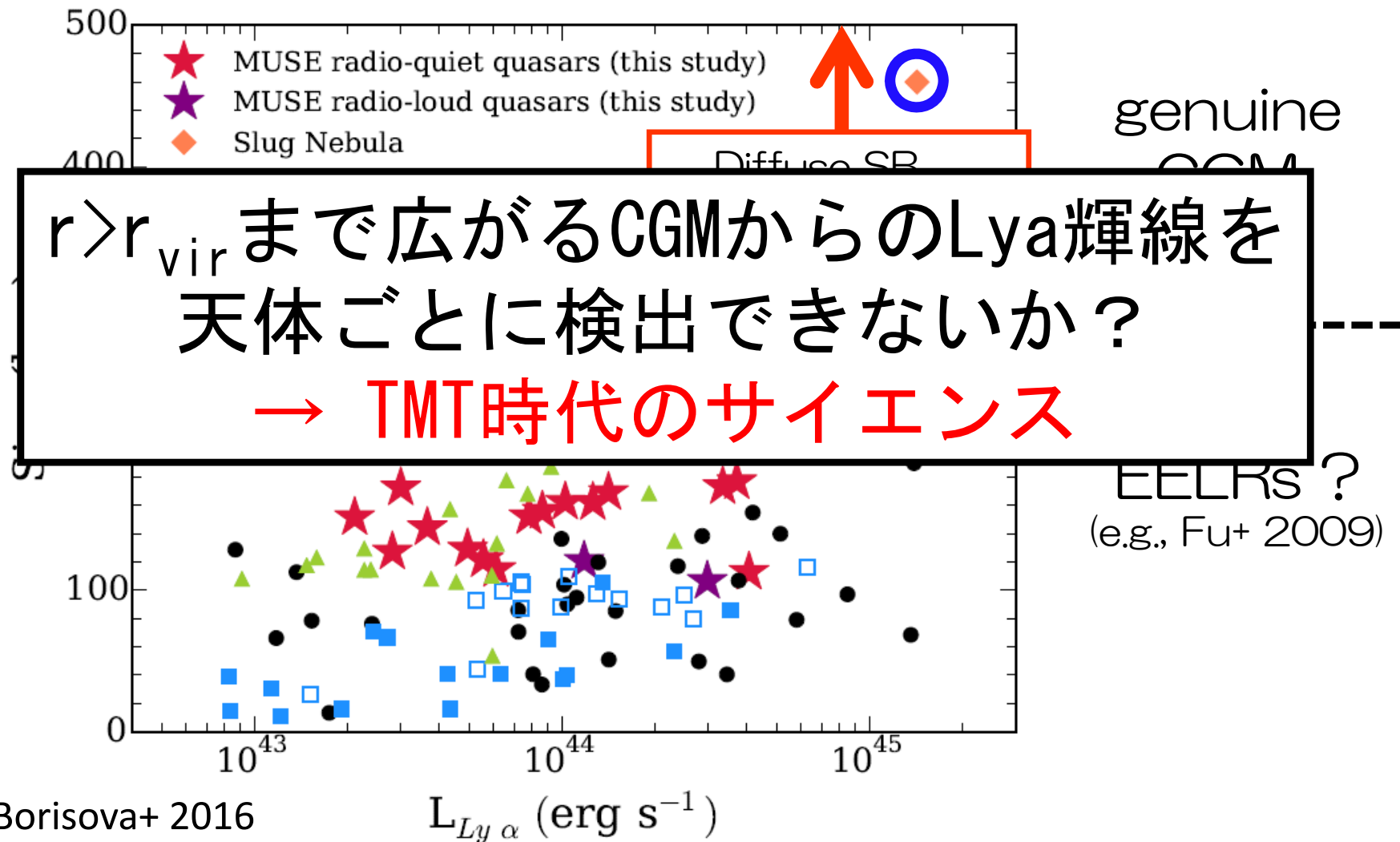


$SB_{\text{Ly}\alpha} \sim 5.5 \times 10^{-20} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2$
 (Arrigoni Battaia+ 16)

CGM の Ly α 光度-サイズ関係

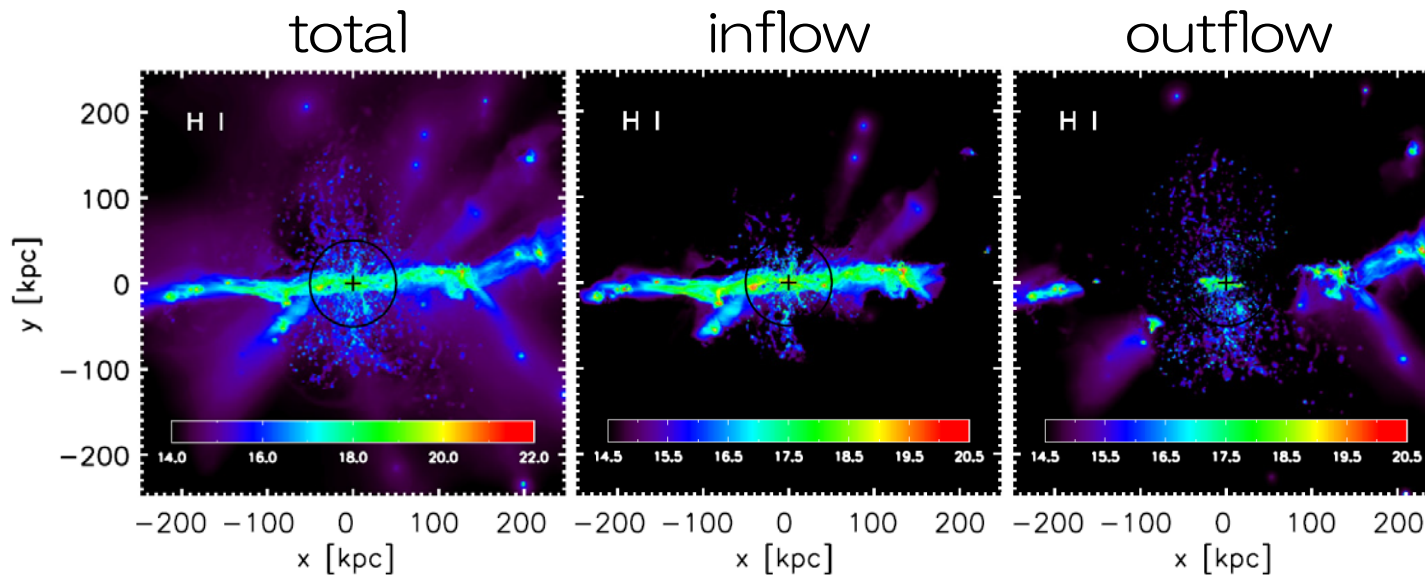
$SB_{Ly\alpha} \sim 10^{-18} \text{ ergs/s/cm}^2/\text{arcsec}^2 \rightarrow r < r_{vir}$ のものが大半

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

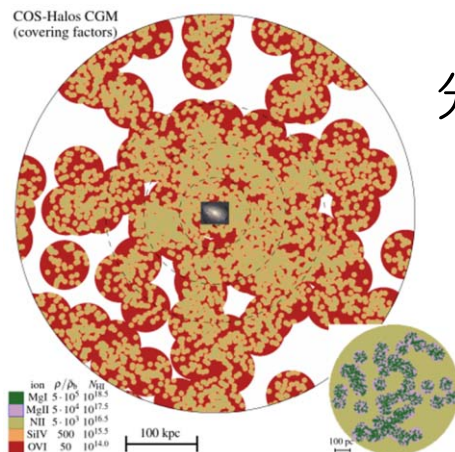
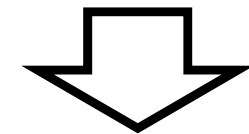


TMT② : $r > r_{\text{vir}}$ に広がるCGM/IGMの撮像

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 ($SB_{\text{Ly}\alpha} \sim 6 \times 10^{-20}$ ergs/s/cm²/arcsec²) 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

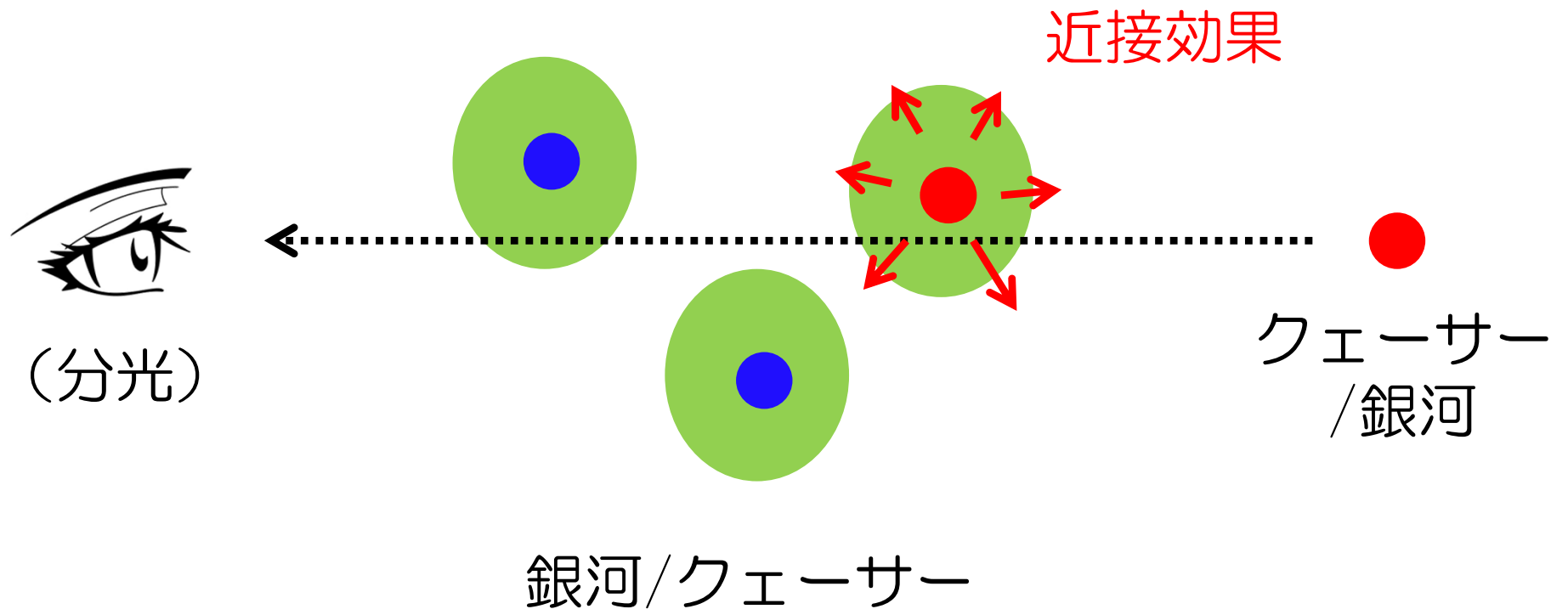
辺縁部まで含めたCGMの全体像 ⇒ TMT[撮像]

Proximity Effect (PE; 近接効果)



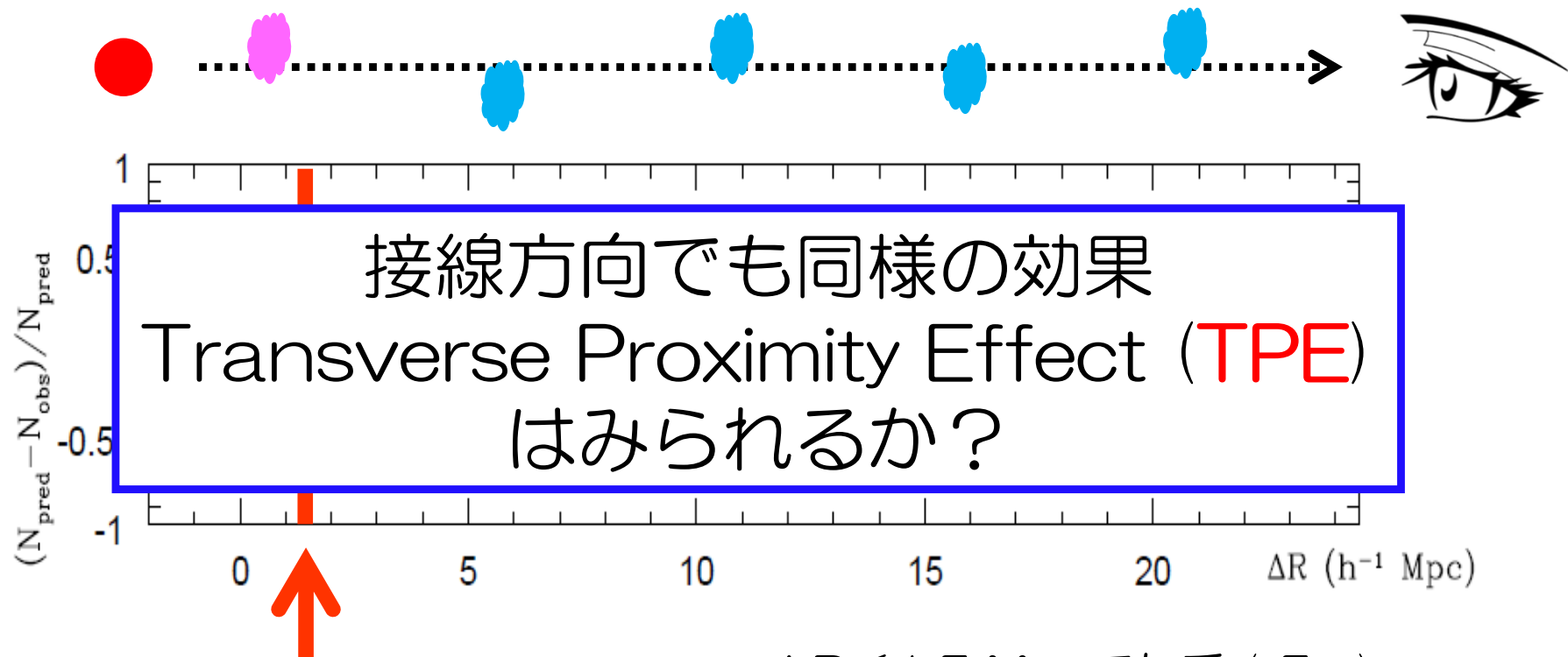
© ESO/M. Kornmesser

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。



$$\frac{L_{\nu}^{QSO}}{4\pi(\Delta R)^2} \approx 4\pi J_{\nu}^{EBR}$$

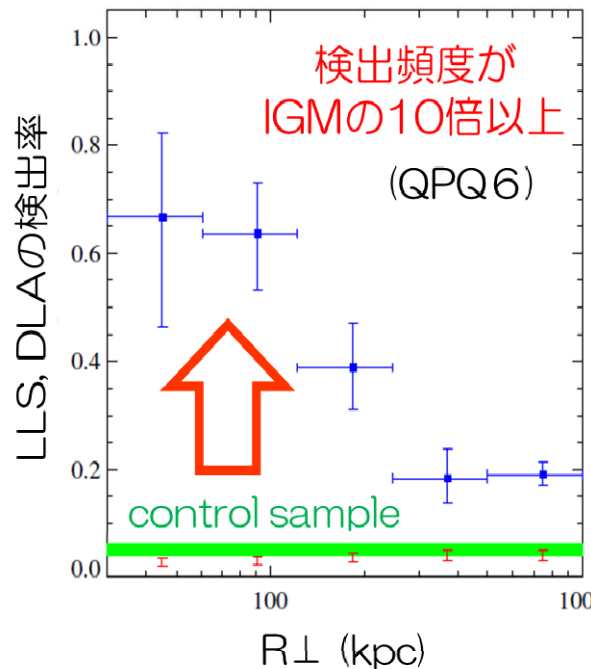
$\Delta R \leq 1.5 \text{ Mpc}$ で欠乏 ($>5\sigma$)

$$J_{\nu}^{EBR} \approx 7.0 \times 10^{-22} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

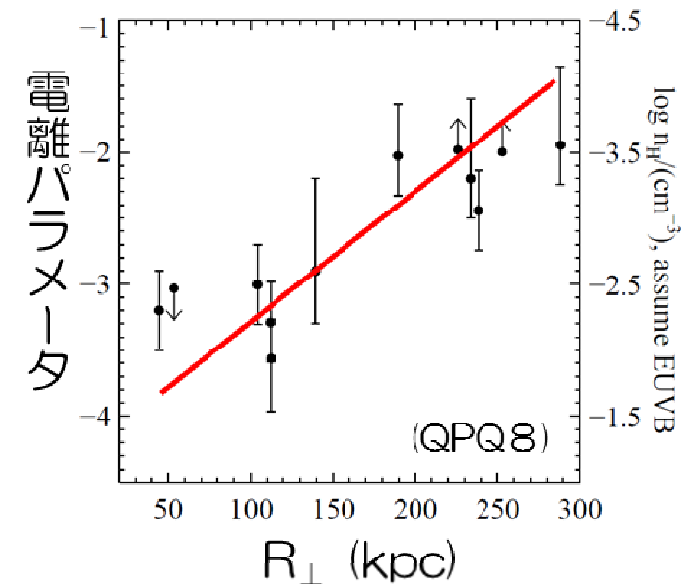
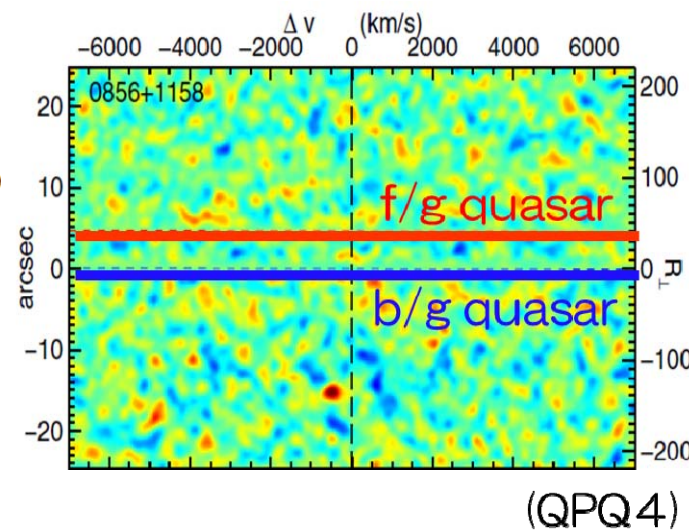
(Scott+ 2000)

近接効果の異方性をほのめかす結果

1. 光学的に厚いHIガス（LLS/DLA）の検出率がQSO近傍で高い
2. クェ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
3. クェーサーからの距離と電離状態に正の相関（逆センス）



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



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(QPQ6)

増断方向

異方性の原因として
クエーサーの光度変動を
追跡できないか？
→ **TMT時代のサイエンス**

視

吸収の超過
Ly α 蛍光輝線が
されない
高電離イオンの超過
電離状態
(逆近接効果)

- HII 吸収の欠乏
⇒ 高電離状態
(近接効果)

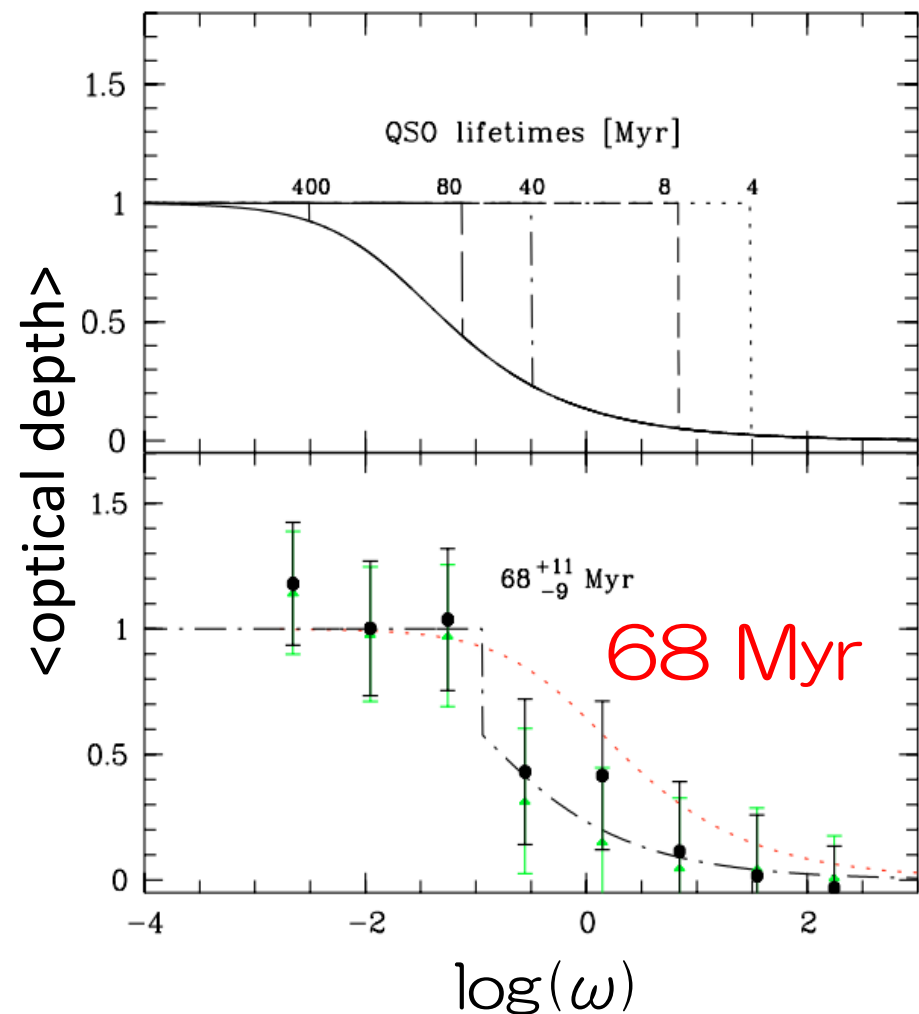
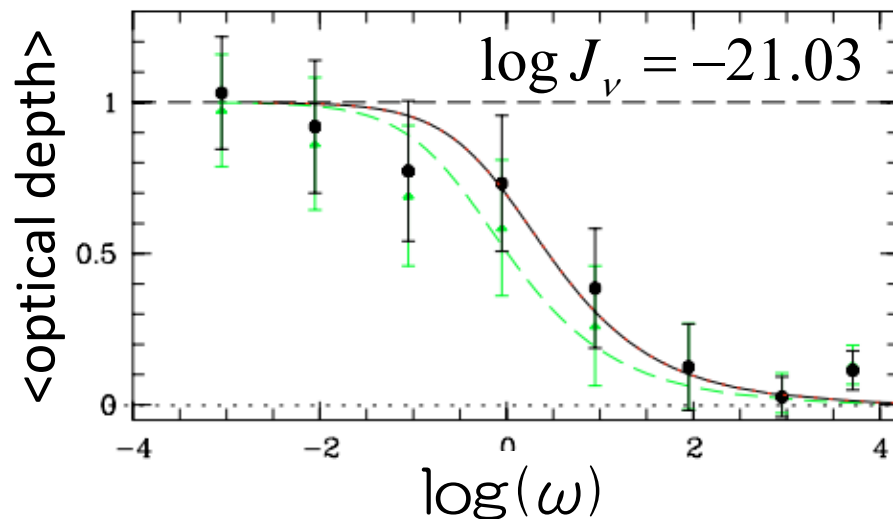
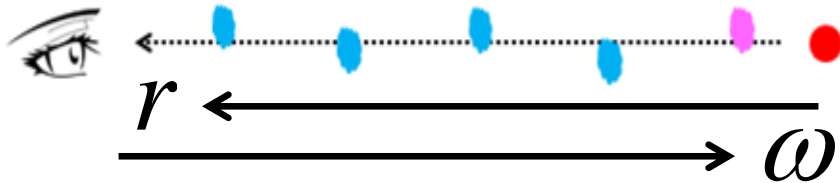
あるいは
光度変動の影響

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)

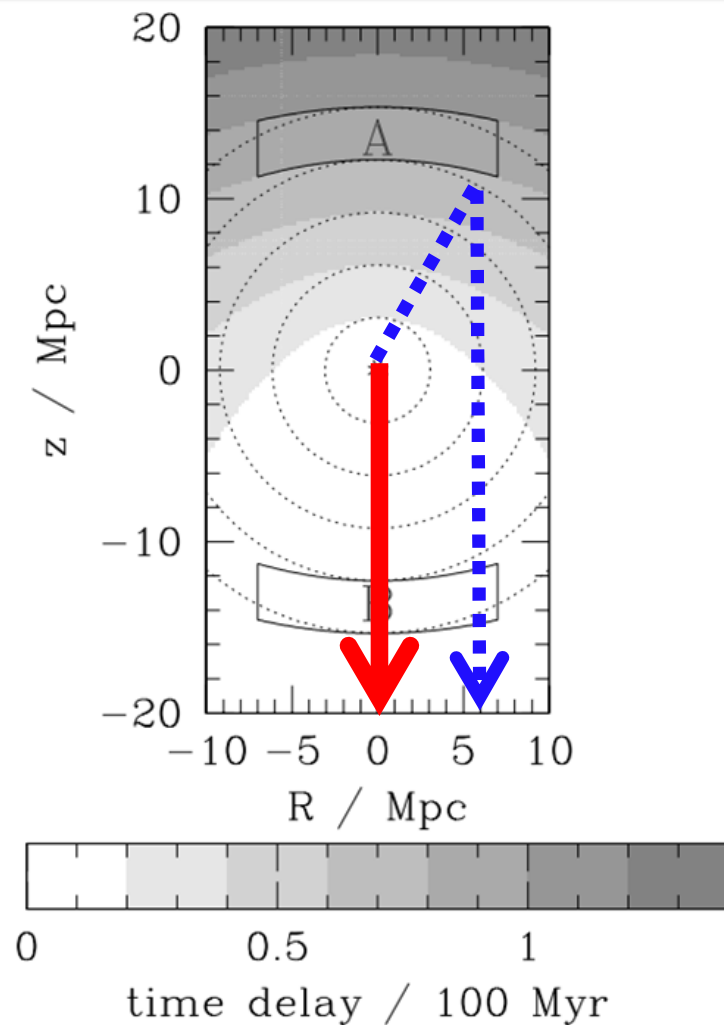
Flux-scaled distance

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

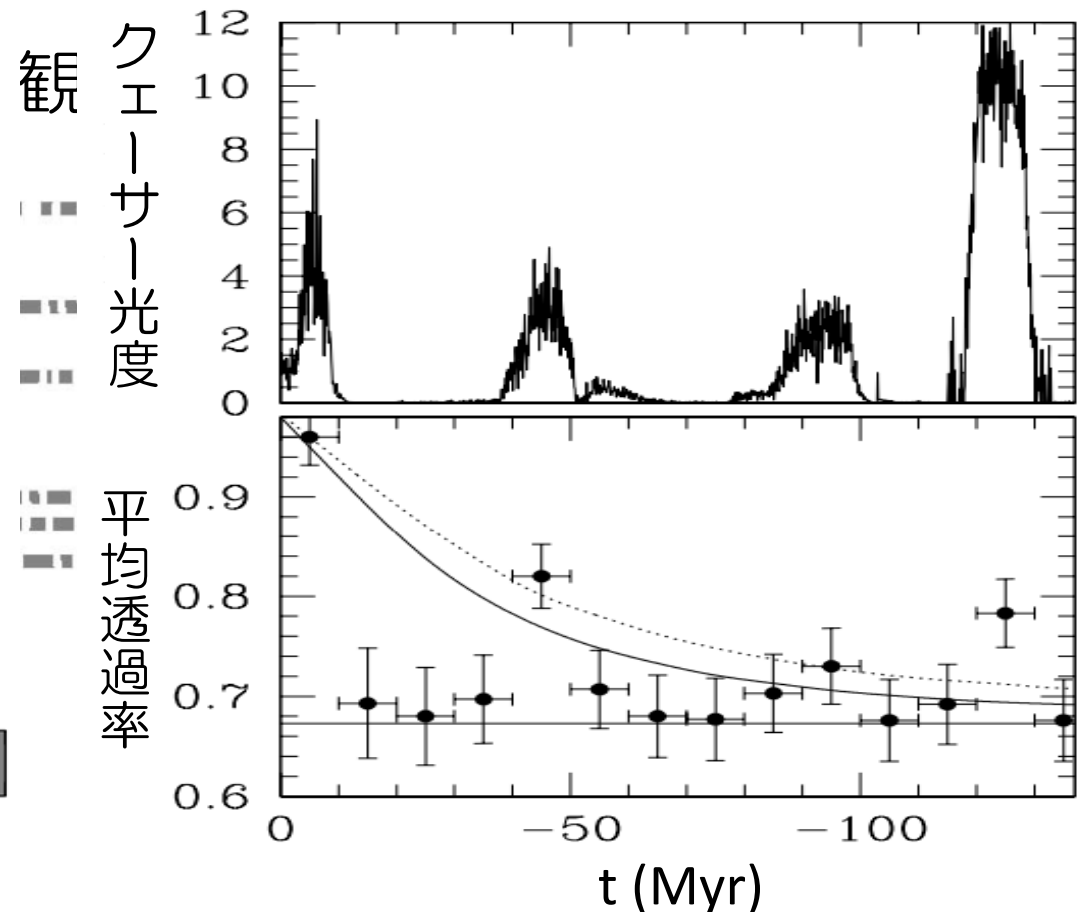


TMT③：TPE によるQSO光度変動の追跡

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)



$$t_l(R, z) \equiv \left[-z - (R^2 + z^2)^{1/2} \right] / c$$



近接効果とクェーサー異方性調査 の現状

クェーサー近傍におけるIGMの電離状態

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

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

接線方向：クェーサー近傍 ($\leq 1\text{Mpc}$) 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

- クェーサーの光度変動 (クェーサー年齢) による影響

⇒ LPE によるクェーサー光度変動の追跡 (Dall'Aglio+ 2008)

TPE によるクェーサー光度変動の追跡 (Aldenberger+ 2004)

クェ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 (~ 240 km/s), Kaiser 効果 (~ 2 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% ($\text{SB}_{\text{Ly}\alpha} \sim 10^{-18} - 10^{-19}$ ergs/s/cm²/arcsec²)
 - スタッキング法 \Rightarrow 500 pkpc まで広がる成分 ($\text{SB}_{\text{Ly}\alpha} \sim 10^{-20}$ ergs/s/cm²/arcsec²)
- 近接効果の異方性とクェーサーの光度変動
 - クェーサー近傍 (< 1 pMpc) 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 クェ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 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]