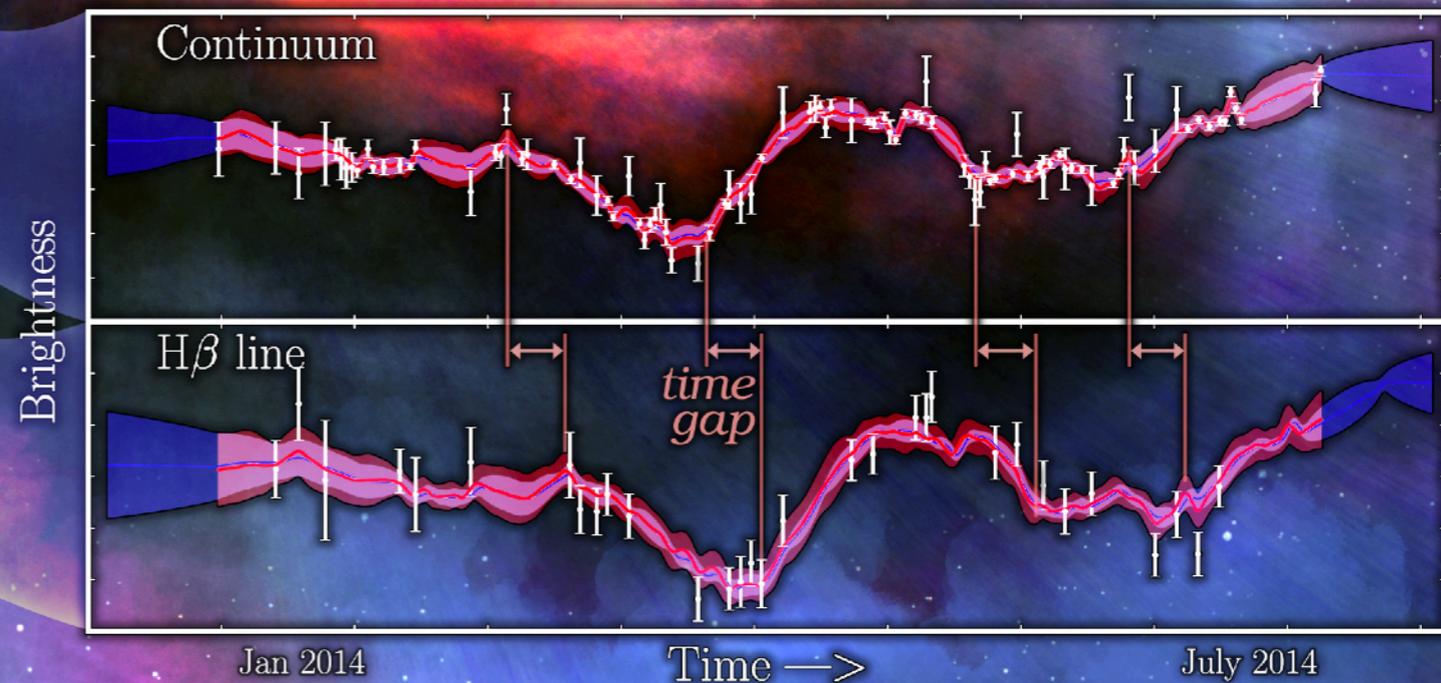
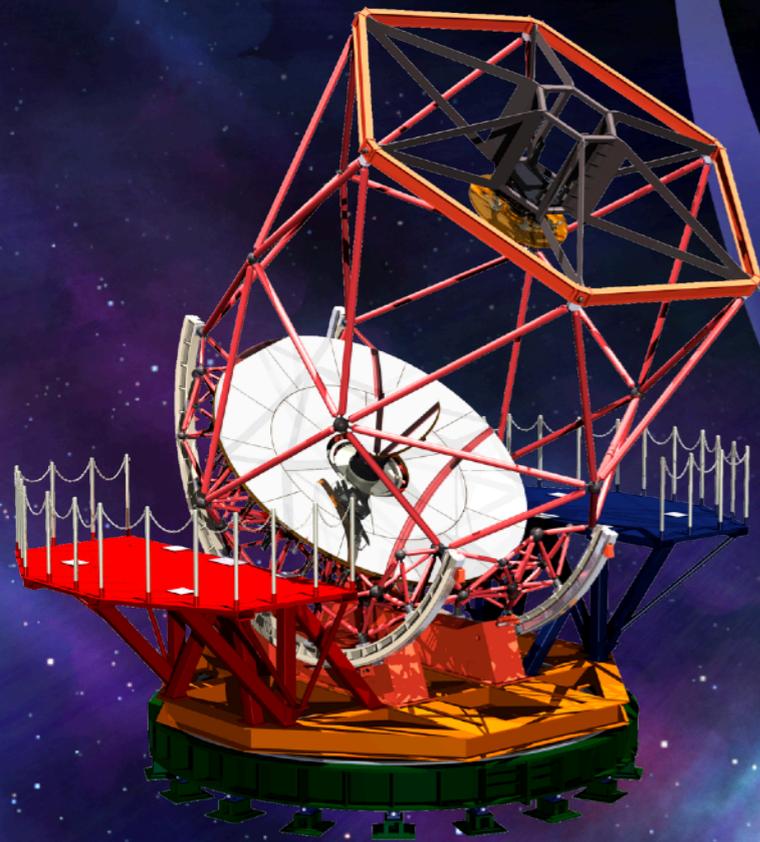


# せいめい望遠鏡を用いた

## AGN time-domain サイエンスの展望

小久保 充 (プリンストン大)

峰崎岳夫(東大)、岩室史英(京大)、野田博文(阪大)、鮫島寛明(東大)



# 内容

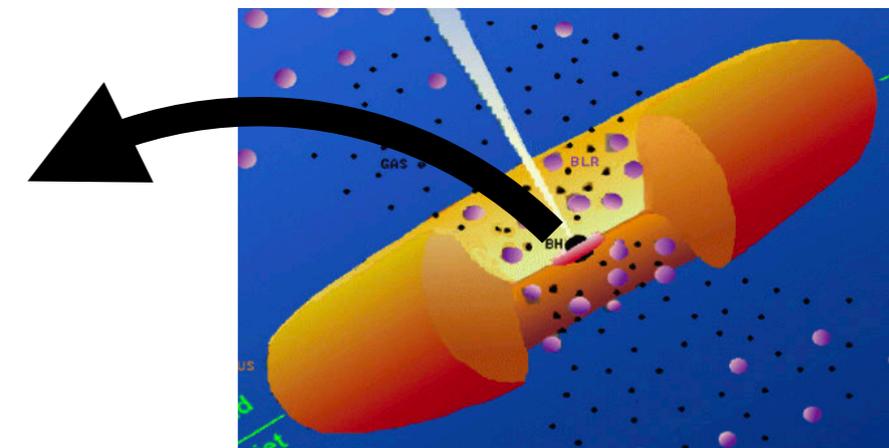
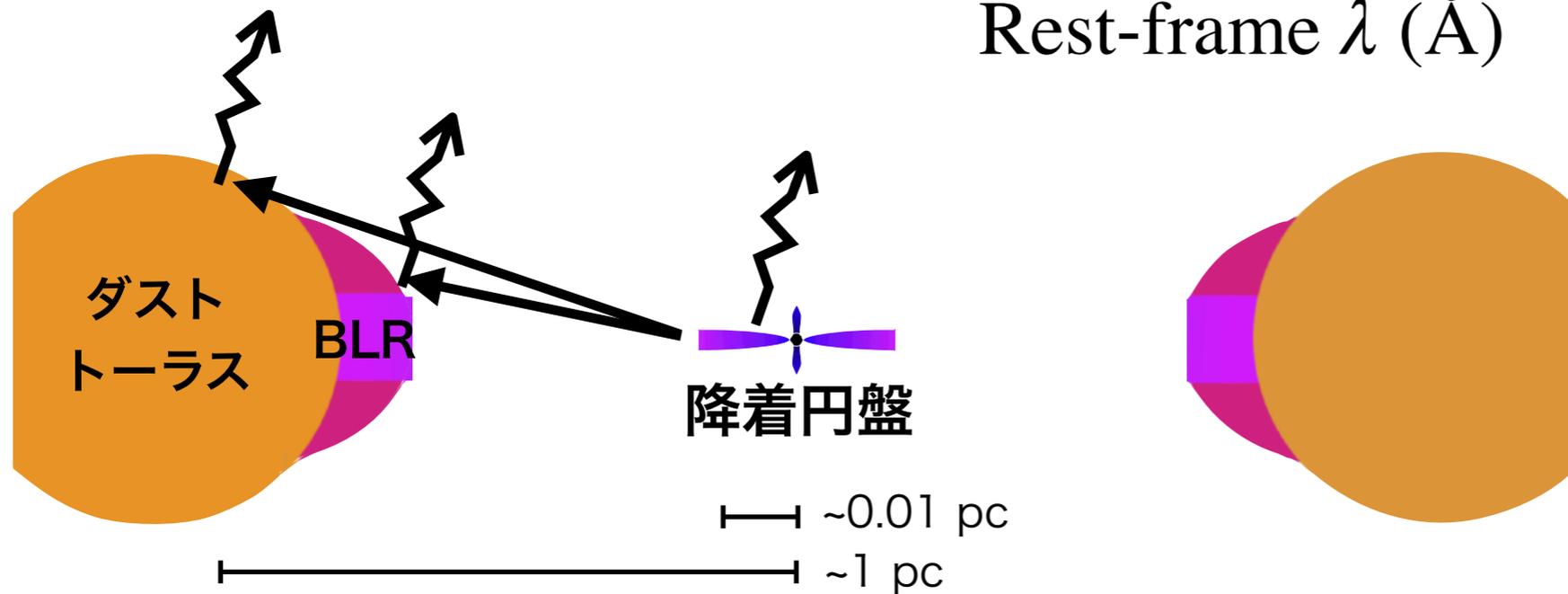
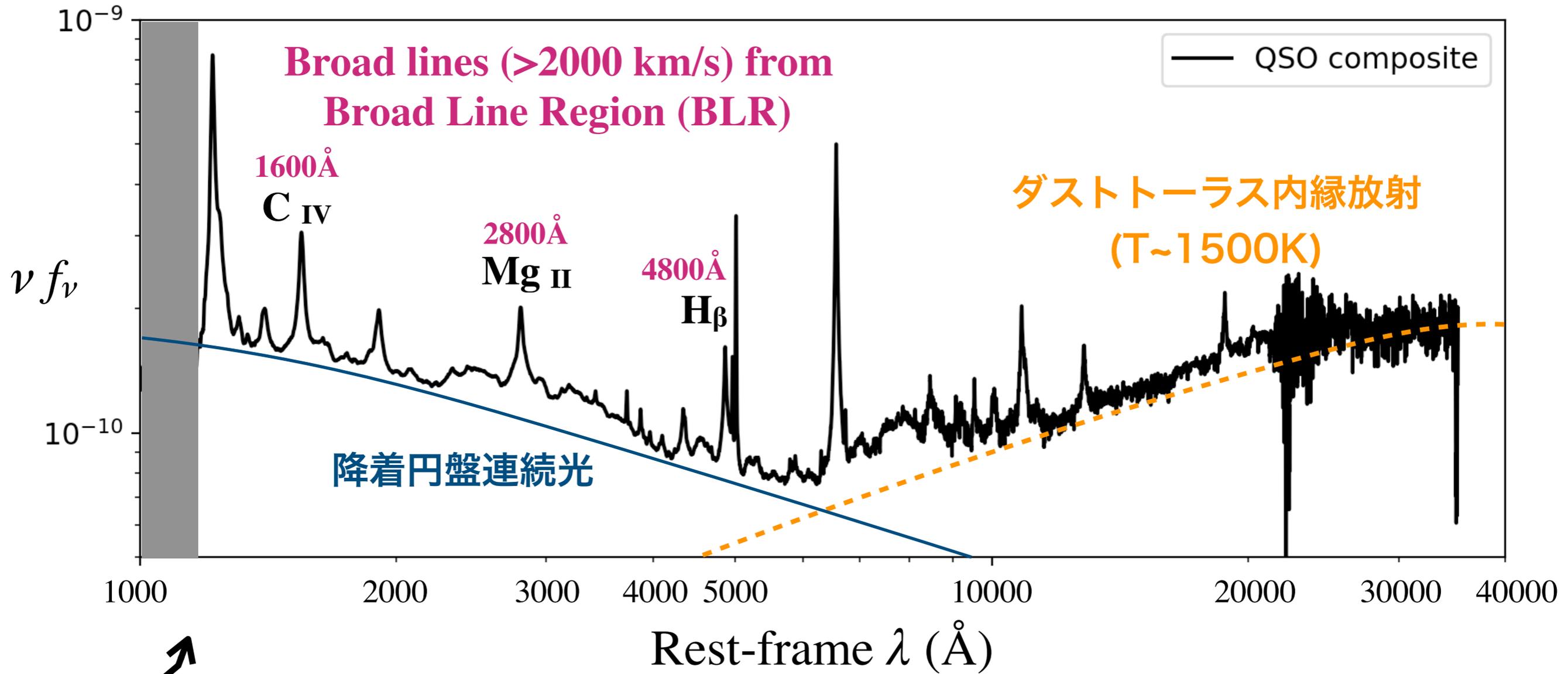
- AGN反響マッピング (Reverberation Mapping; RM):  
原理、最近の進展、残された論点・課題

(\*1型AGN; ブレーザーの話は含みません)

- せいめい望遠鏡(KOOLS-IFU, IRS + TriCCS)の強みを生かした  
**(超)長期AGNモニタ**によるRM観測提案

(\*非せいめいユーザーからの提案なので実証データはありません. 概念的な話のみ)

# AGN円盤放射と再放射成分(広輝線、ホットダスト)

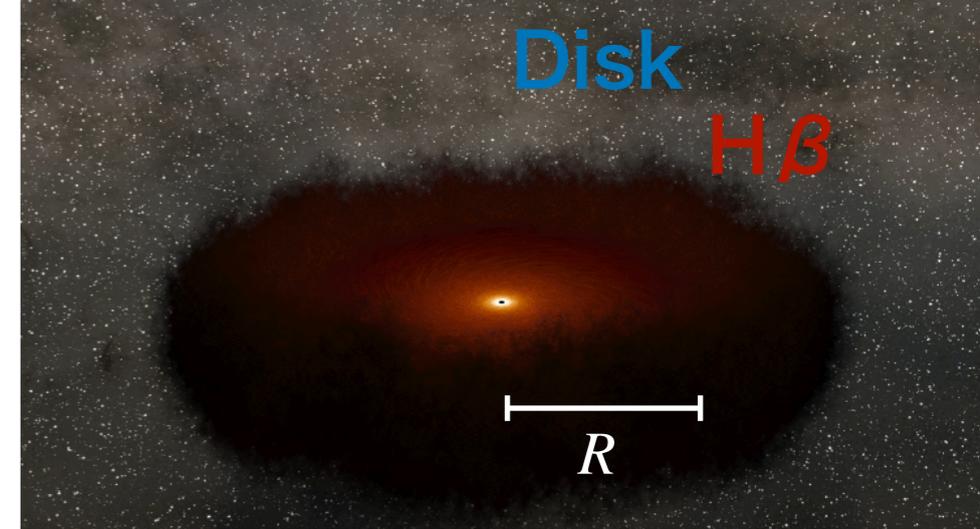


Urry+Padovani 1995

Cackett+2021

# AGN 反響マッピング

## Reverberation Mapping (RM)

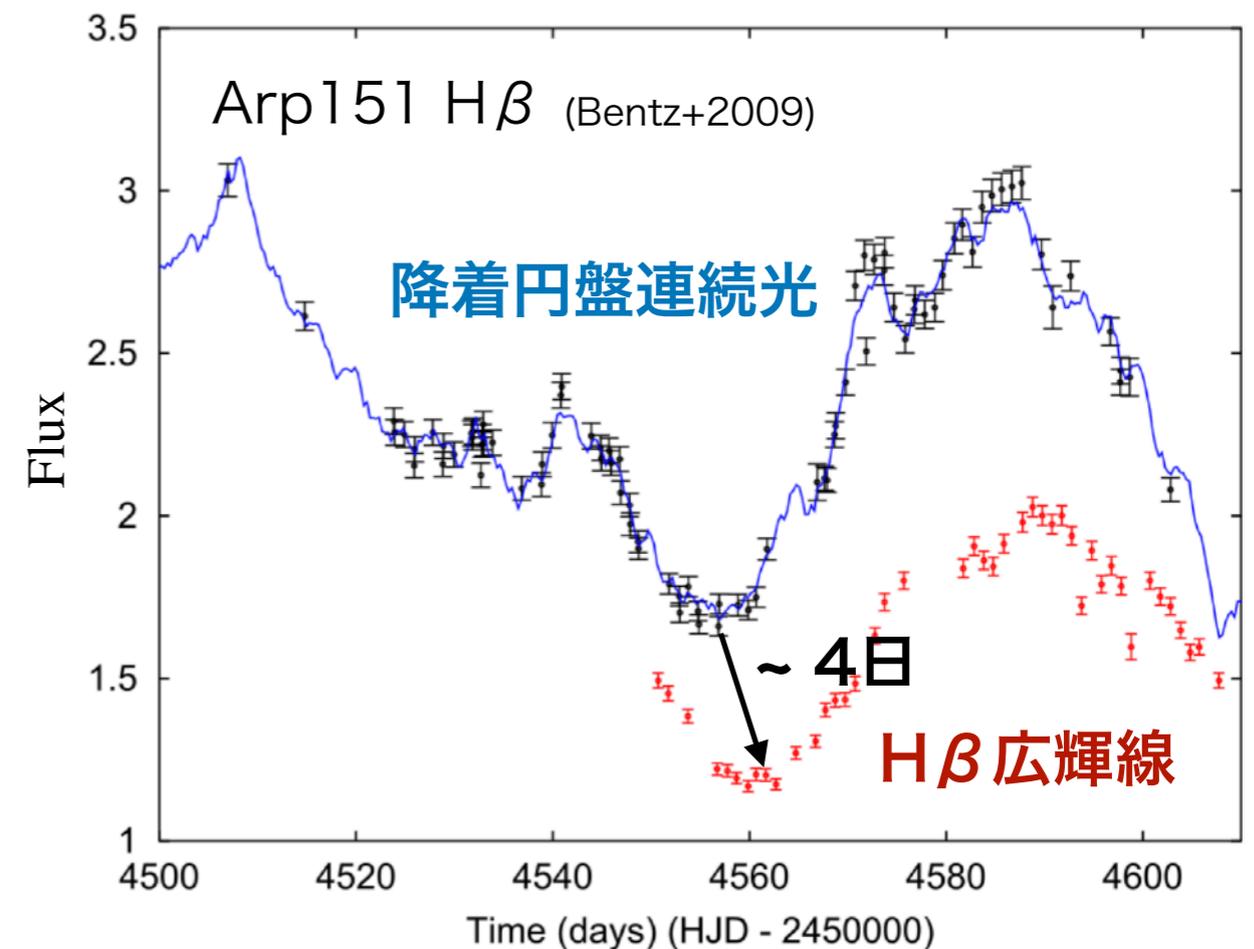
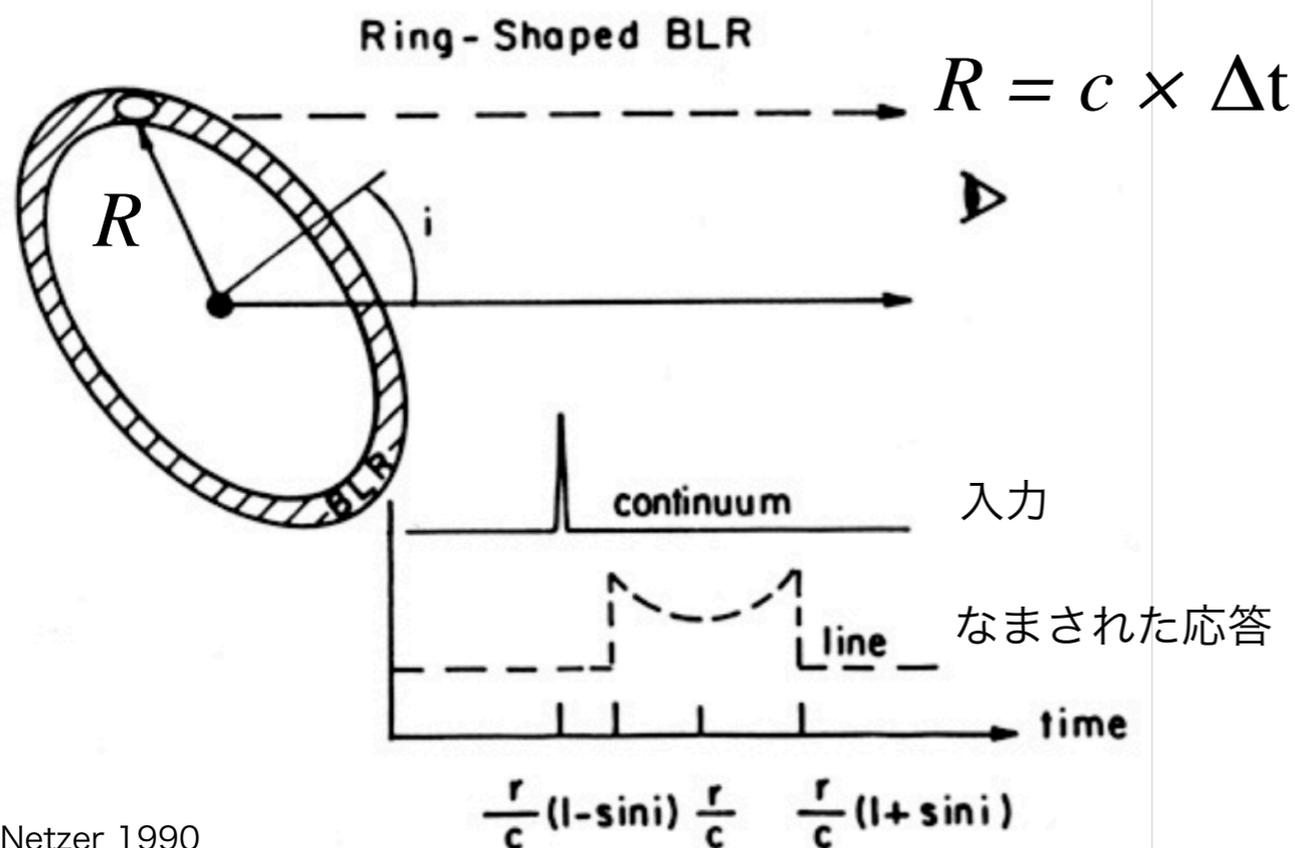


- AGN降着円盤のランダムな光度変動 (~0.1等/年)

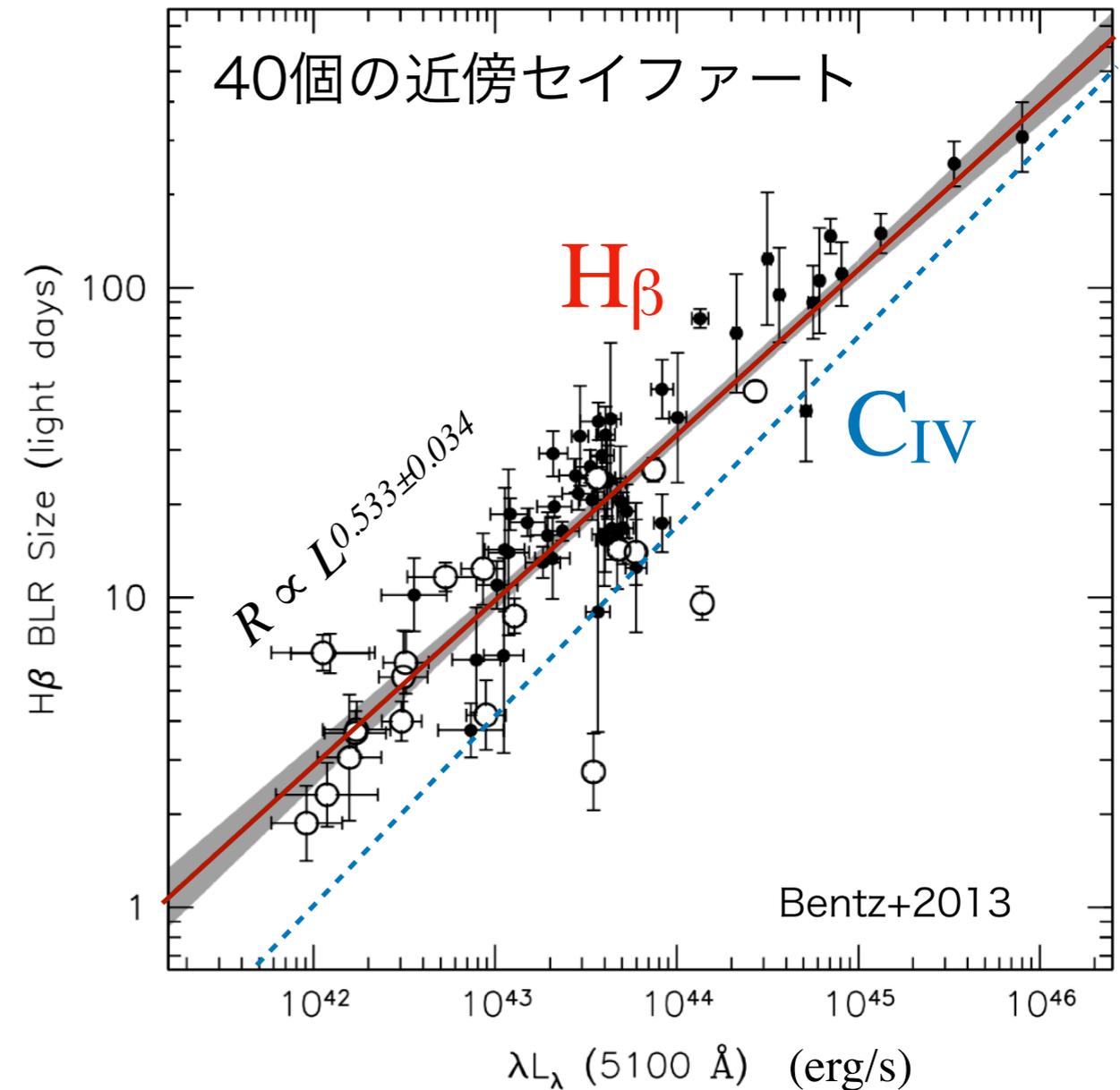
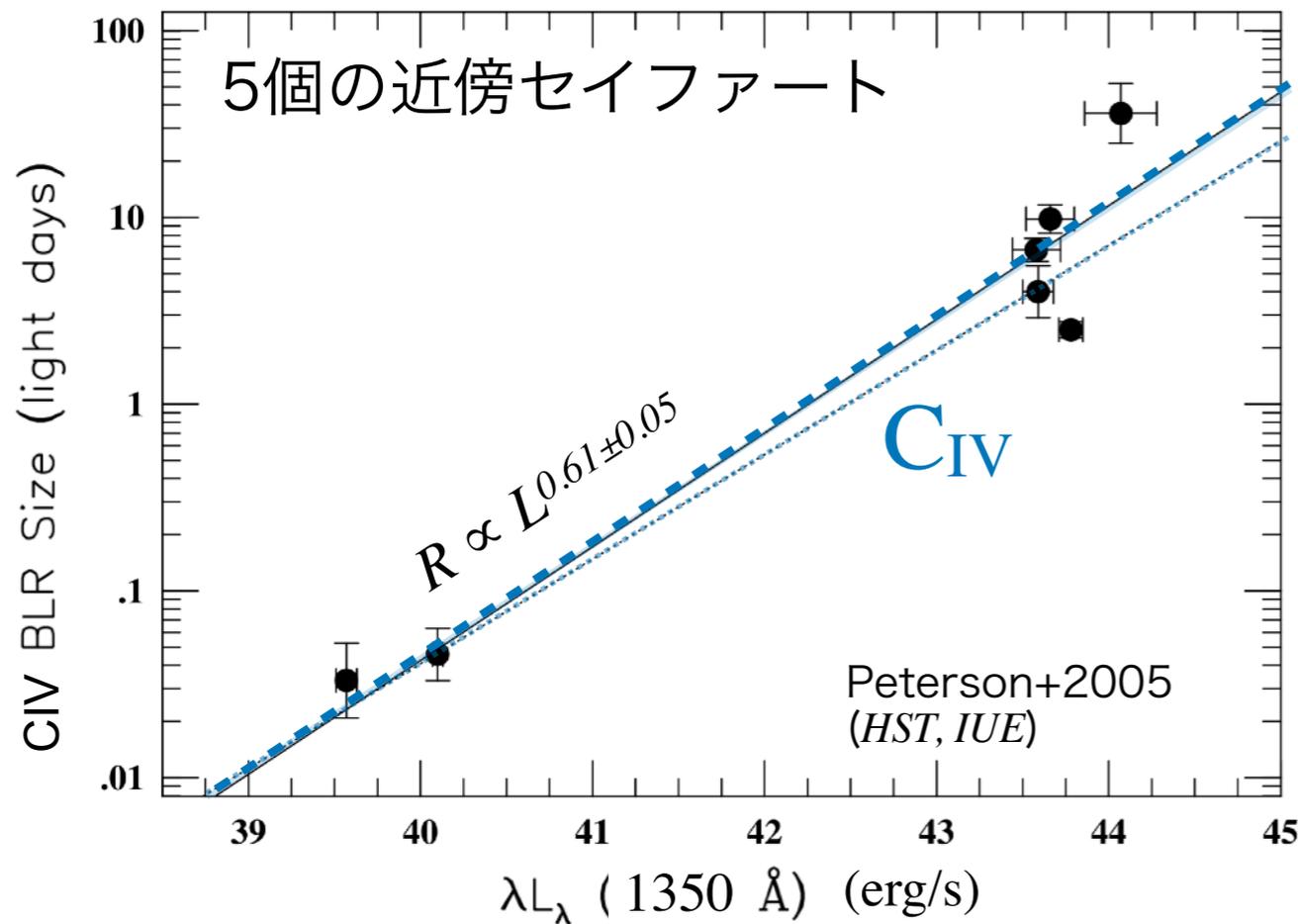
(降着円盤不安定性? e.g., Kokubo 2015; 2018)

→ 広輝線、ダストトーラス放射は“反響”(reverberate)する:  $R = c \times \Delta t$

- 降着円盤+反響光度曲線から タイムラグ  $\Delta t$ , つまり  $R = c \times \Delta t$  の測定 = RM  
空間分解できないAGN領域の大きさを”測定”できる. **ただし高コスト (長期間分光)**



# $R - L$ 関係: 放射領域半径 $R$ vs. AGN円盤光度 $L$

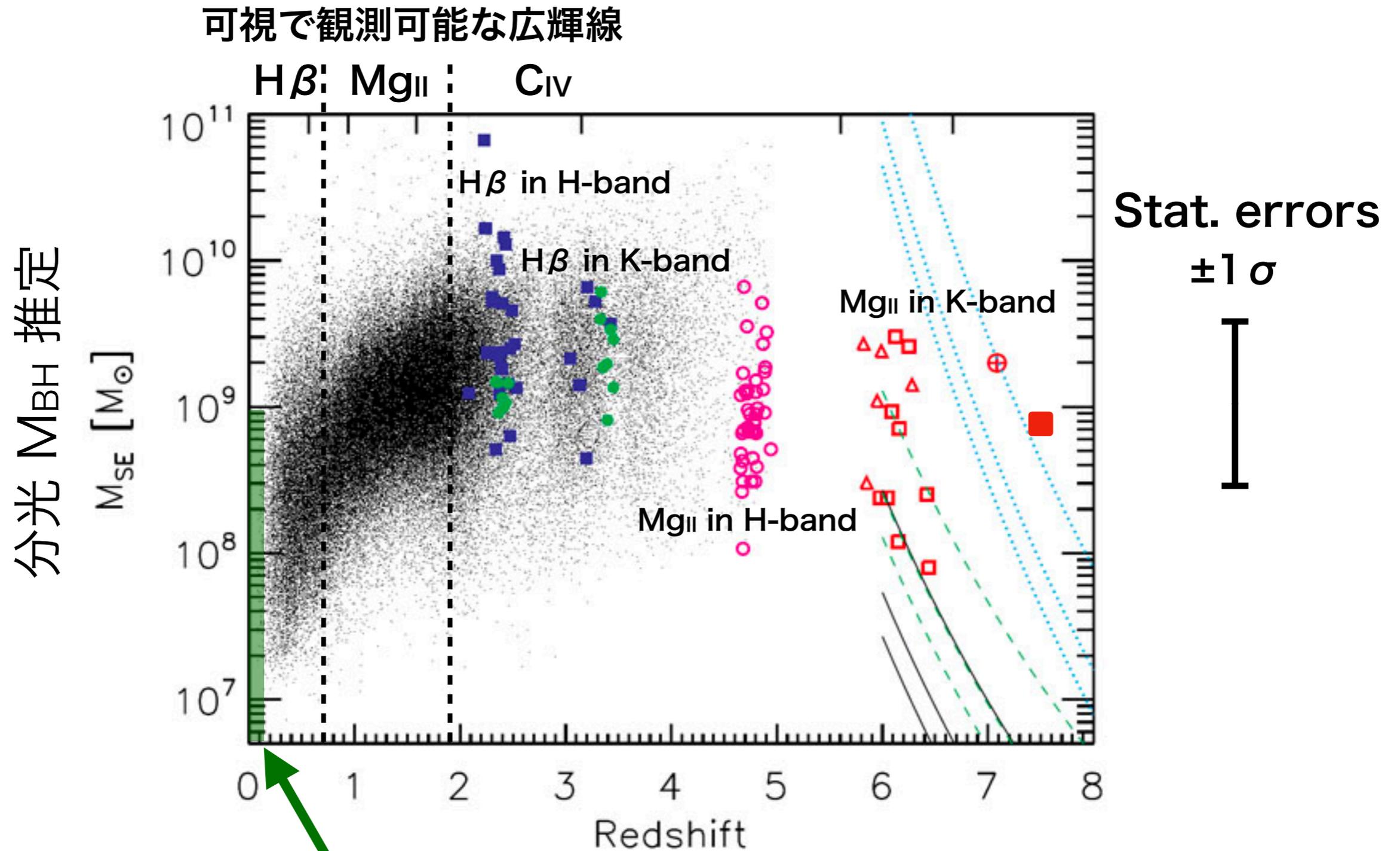


(MgII :  $R - L$  関係は不定)

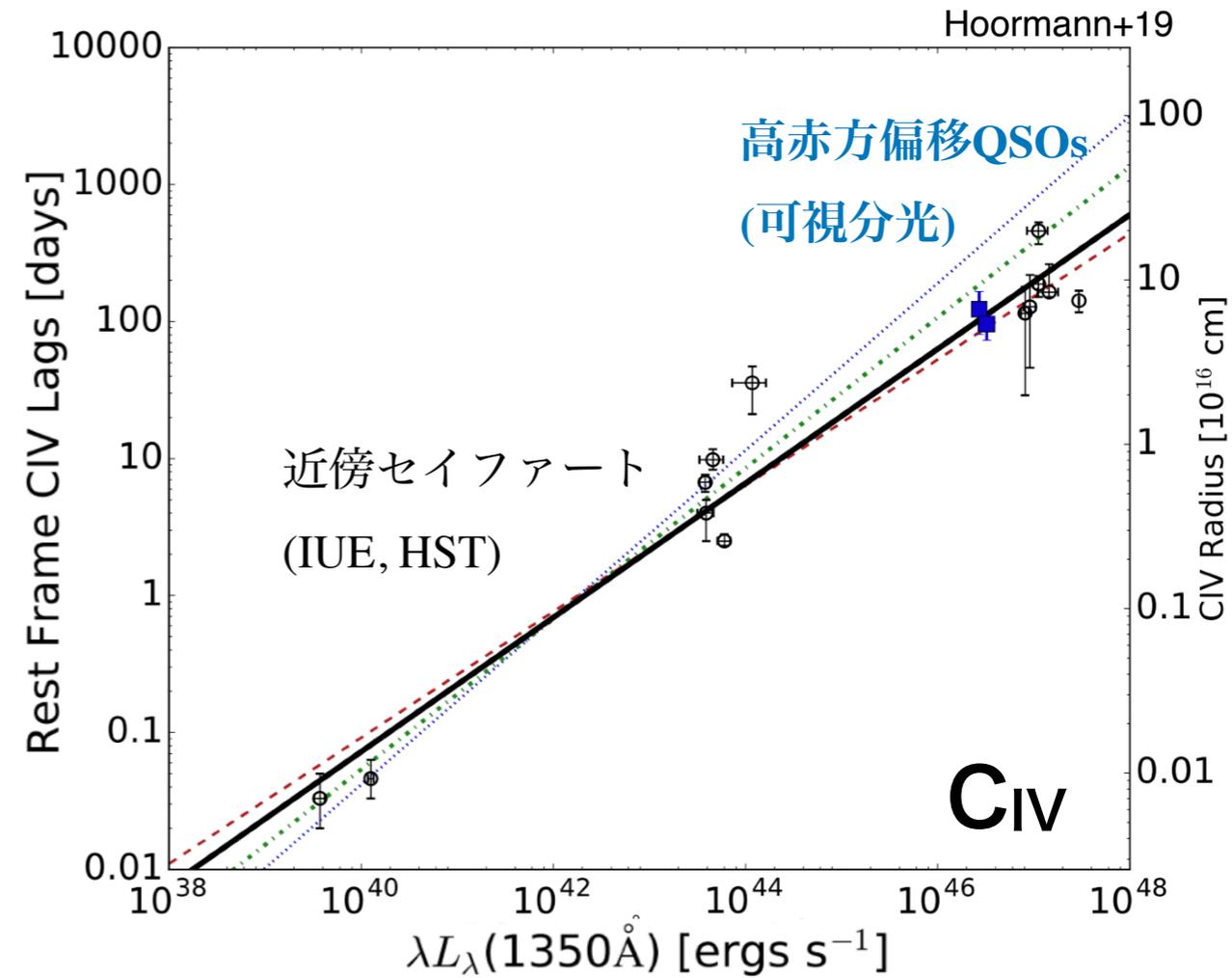
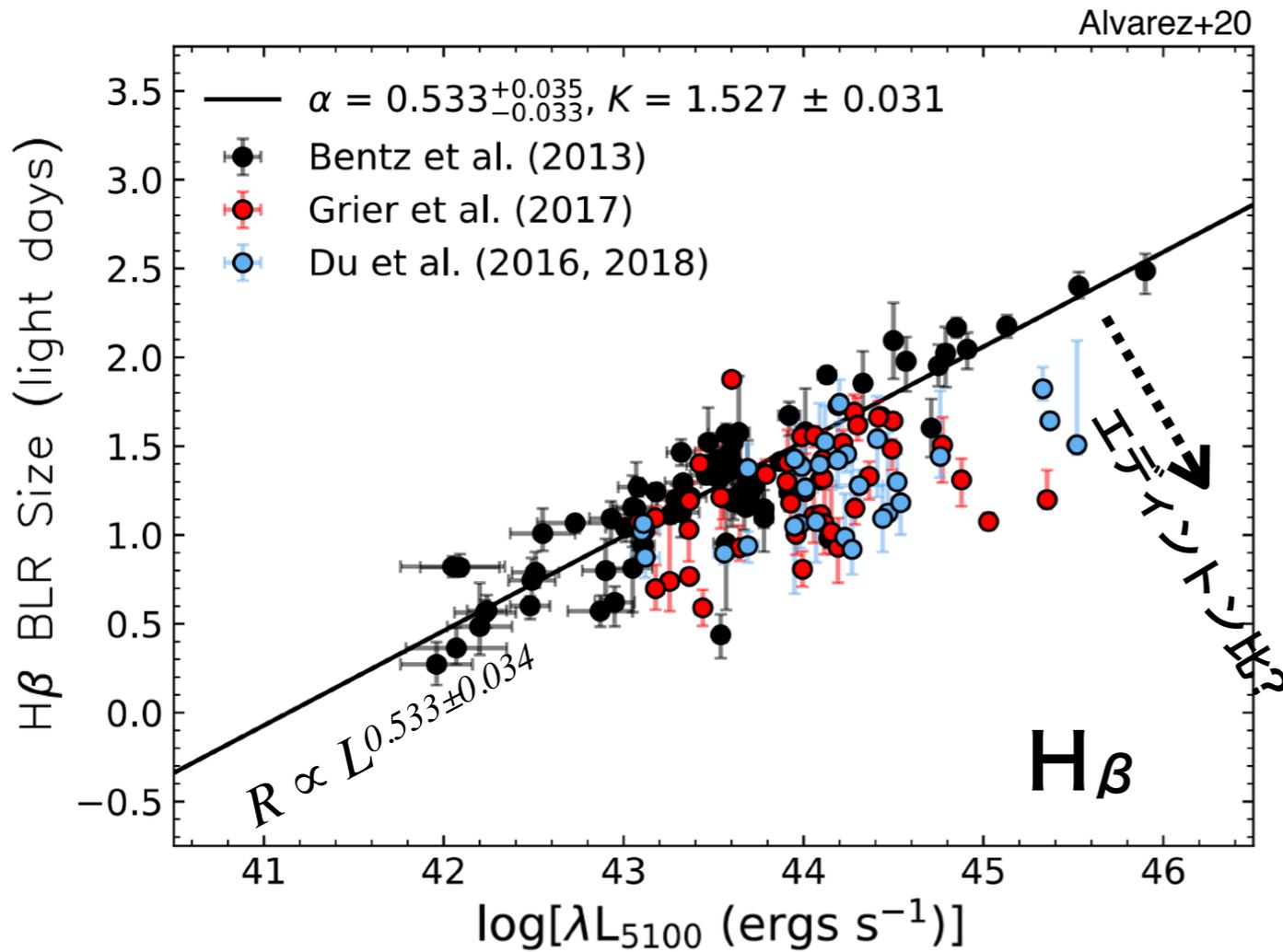
- 大まかに  $R \propto L^{0.5} \dots$  電離パラメータ ( $L / 4\pi R^2$ )一定のスケーリングに(大体)乗る

- この経験的關係がSMBH質量推定の基礎:  $M_{BH} = \frac{R_{BLR} \Delta V^2}{G} \rightarrow C \frac{L^\alpha \Delta V^2}{G}$

# SDSS QSOs + $\alpha$ の $M_{BH}$ vs. 赤方偏移



# 最近のRM観測の進展, 残された論点・課題



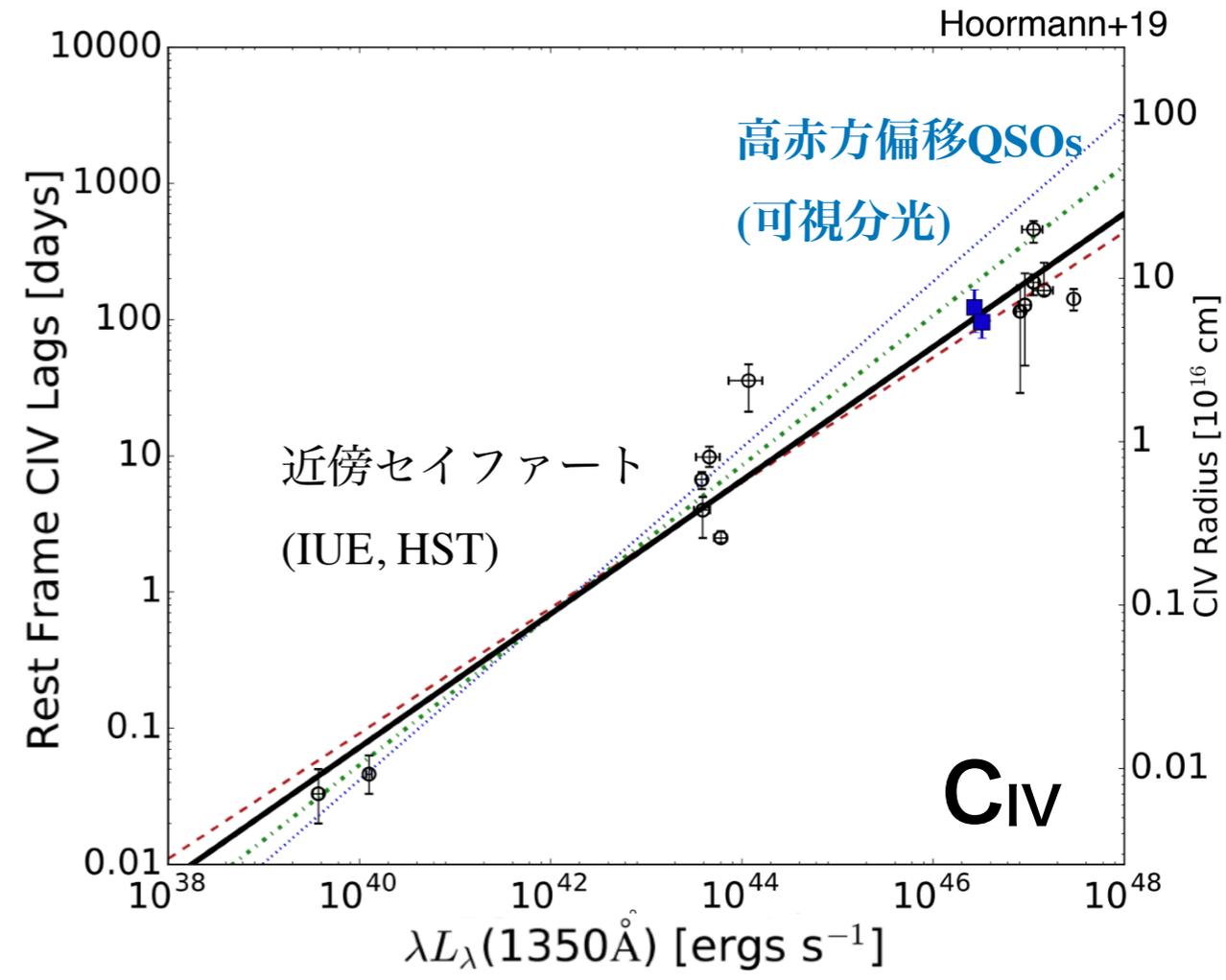
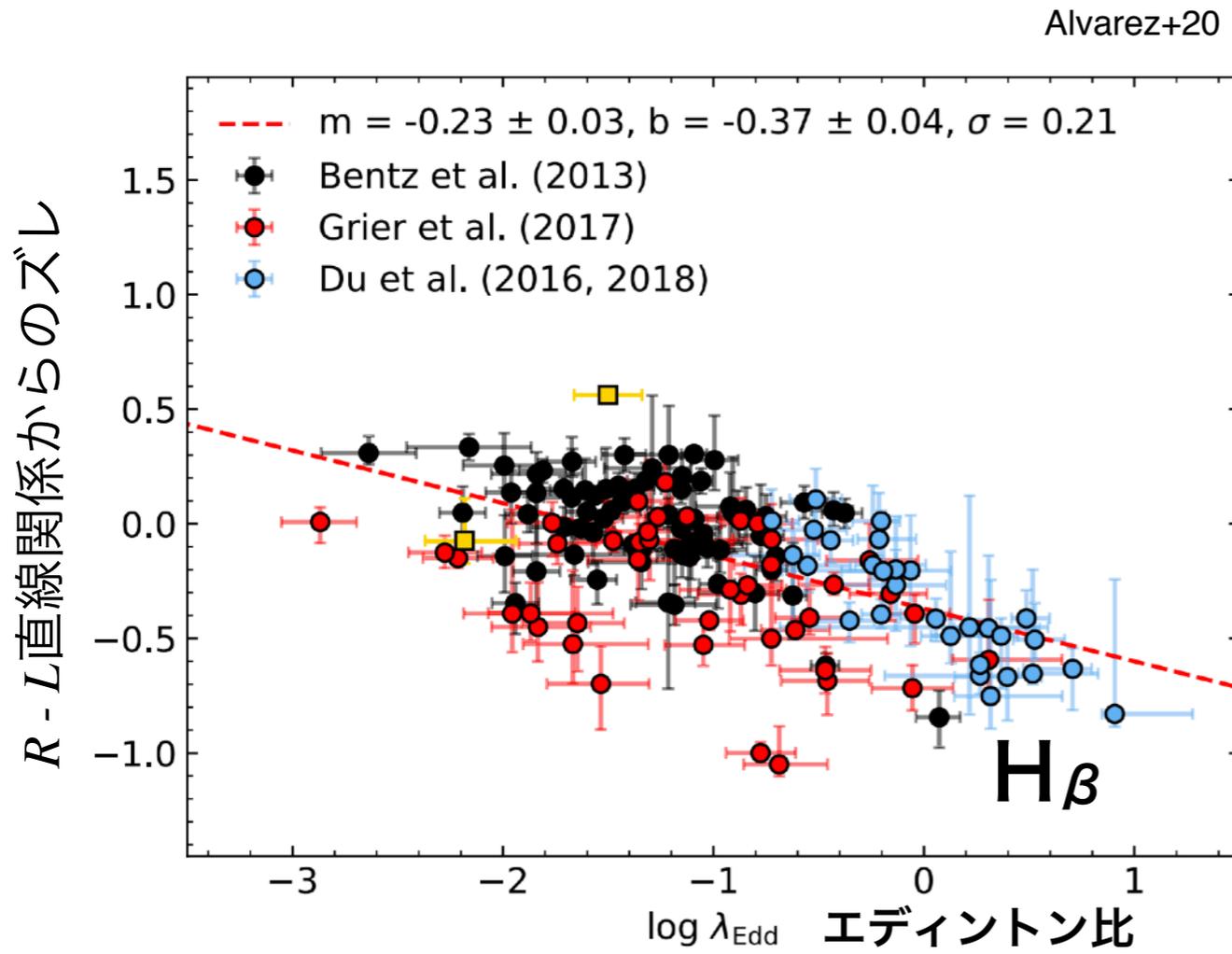
- エディントン比の大きいAGNsではH $\beta$  R-L関係がずれている? (Grier+2017, Du+2018, Alvarez+20)

- 静止系UV広輝線(CIV, MgII)のRM観測は少ないまま… M<sub>BH</sub>推定の基礎は実はあやふや

→ 高光度(エディントン比)、高赤方偏移AGNsのRM観測サンプルを増やしたい

$\tau \propto L^{0.5} \times (1+z)$  … 超長期(>年単位)の高測光精度分光モニタ必須

# 最近のRM観測の進展, 残された論点・課題



• エディントン比の大きいAGNsでは $H\beta$   $R-L$ 関係がずれている? (Grier+2017, Du+2018, Alvarez+20)

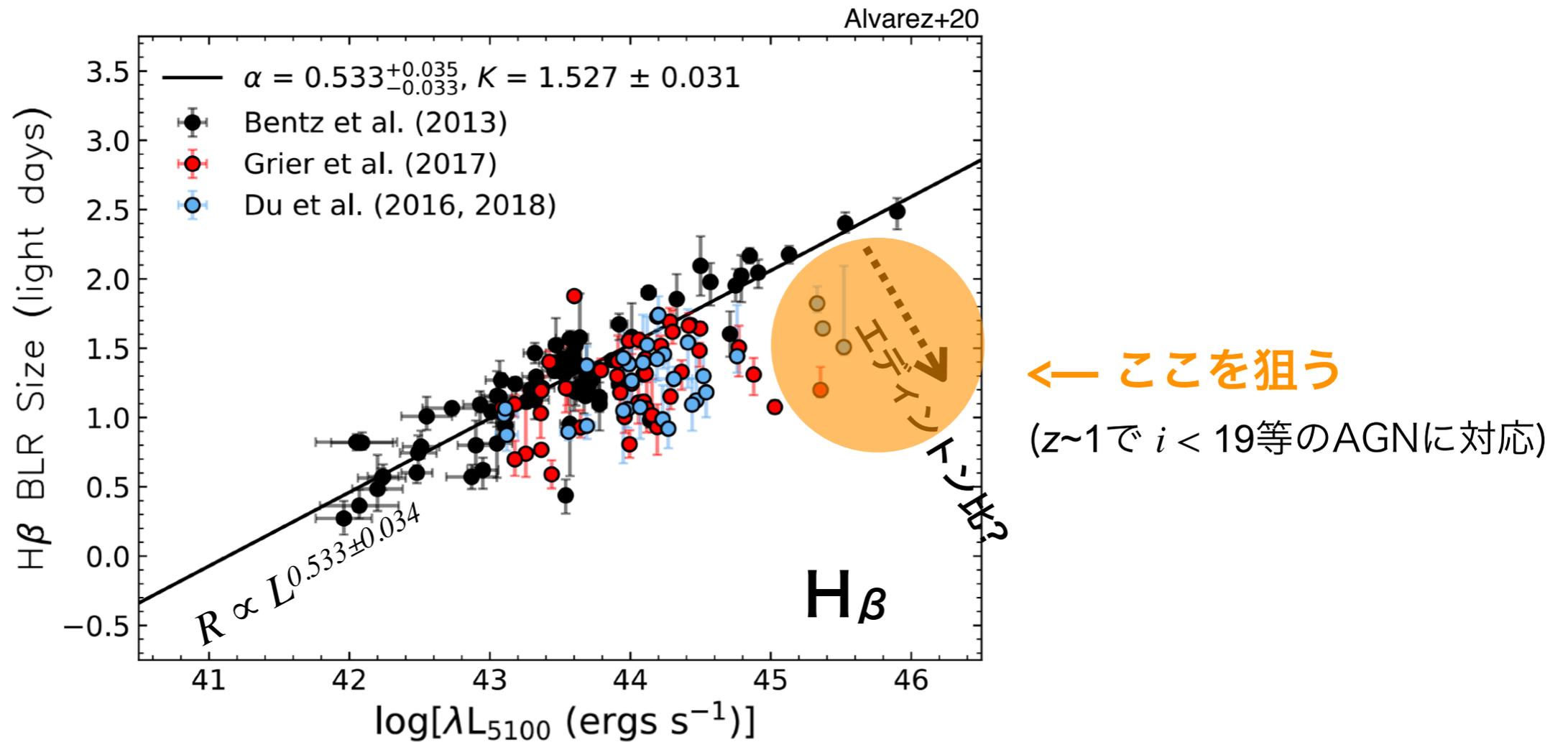
• 静止系UV広輝線( $CIV$ ,  $MgII$ )のRM観測は少ないまま…  $M_{\text{BH}}$ 推定の基礎は実はあやふや

→ 高光度(エディントン比)、高赤方偏移AGNsのRM観測サンプルを増やしたい

$\tau \propto L^{0.5} \times (1+z)$  … 超長期(>年単位)の高測光精度分光モニタ必須

# 観測提案①:

## KOOLS-IFU可視面分光モニタによる 高エディントン比AGNsの高精度H $\beta$ RM



# KOOLS-IFU (after 2020 Oct.)

## # Spatial Performance

(after 2020/Oct.)

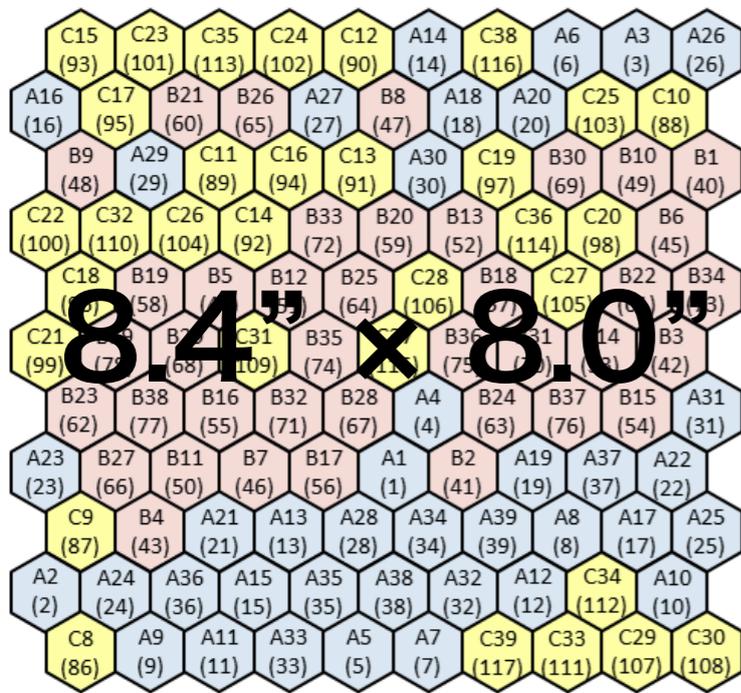
Number of fibers	117 (= 110 for objects and 7 for sky)
FoV of a fiber	regular hexagon of 0.42 arcsec inradius
Fiber pitch	$0.84 \pm 0.07$ arcsec
Total FoV	8.4 x 8.0 arcsec for object and 2.5 x 2.4 arcsec for sky
Fiber core filling factor	~100%

## # Spectral Performance

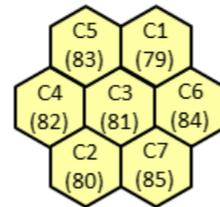
(after 2020/Oct.)

Grism	VPH-blue	VPH-red <sup>‡</sup>	VPH 495	VPH 683 <sup>‡</sup>
Wavelength coverage	4100-8900 Å	5800-10200 Å	4300-5900 Å	5800-8000 Å
Spectral resolution	~500	~800	~1500	~2000
Total peak throughput*	~7%	~6%	~5.5%	~4%

### object fibers

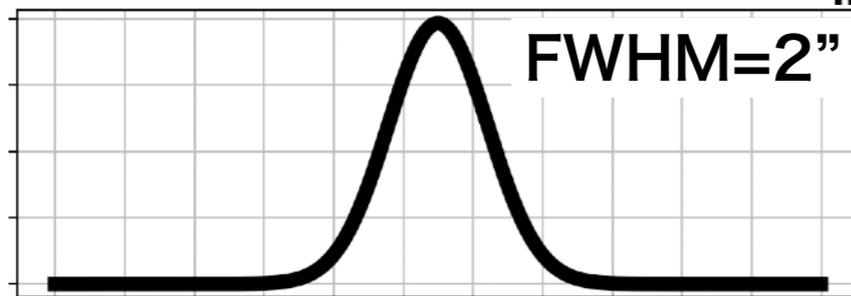


### sky fibers



3.8 arcmin away

- IFU
- ~100% fiber filling + offset sky fibers  
→ flux測定精度向上.
- 広い波長域をカバー  
→ スペクトル成分分解が容易.  
赤方偏移選択の自由度.

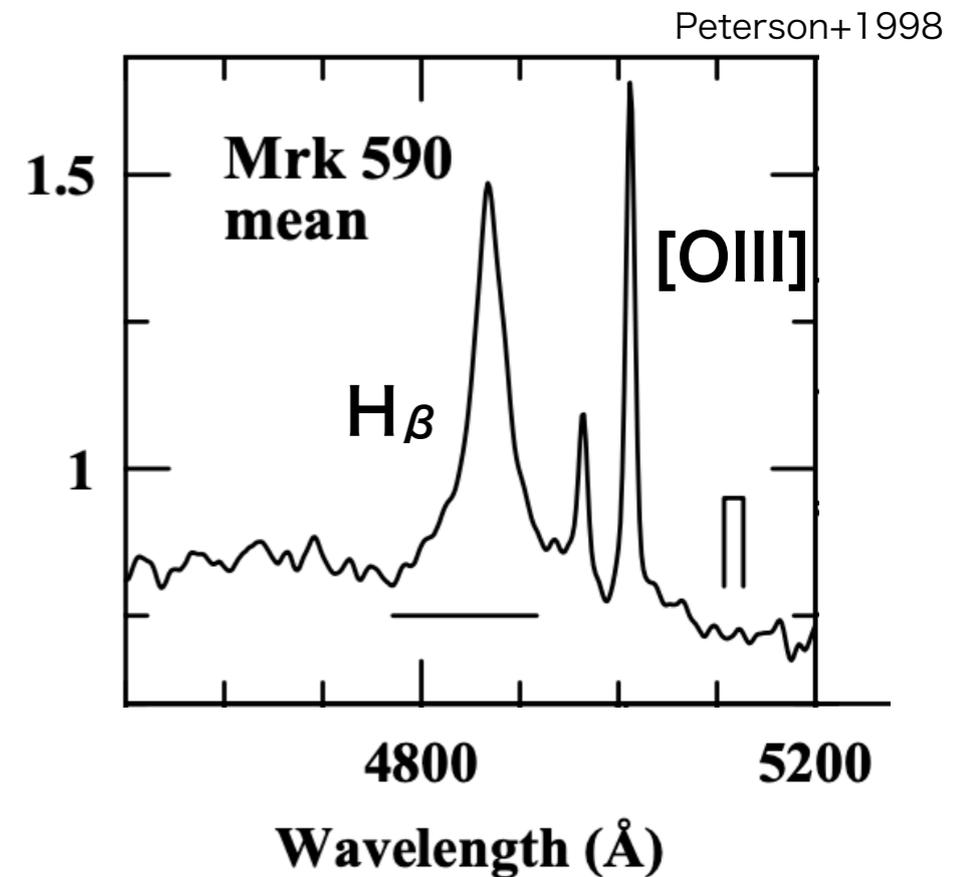
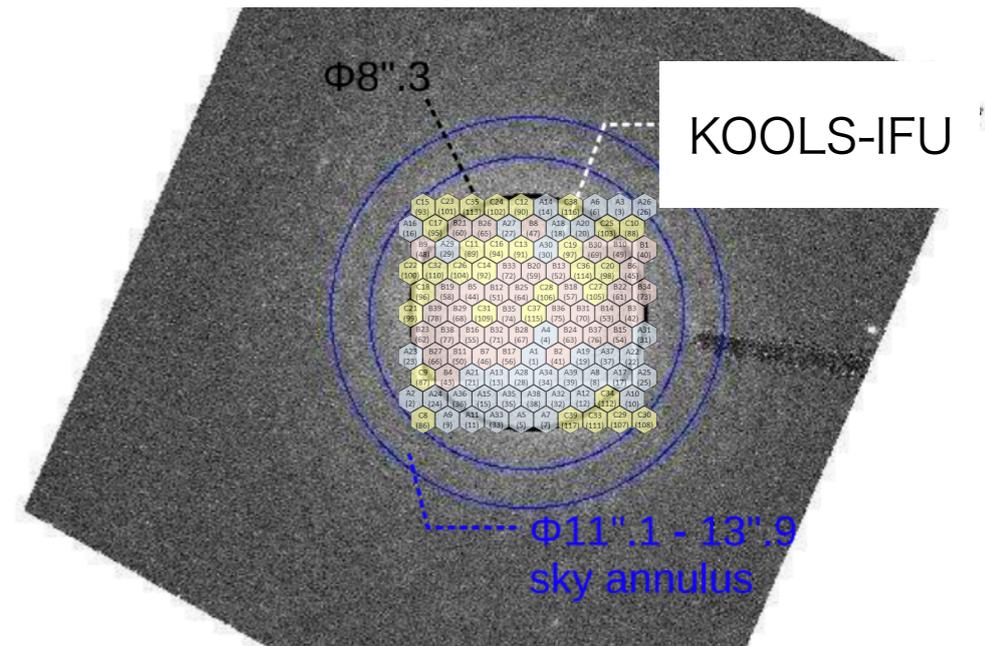


# IFUの利点: [OIII]狭輝線を用いたH $\beta$ 広輝線フラックスの相対較正

- [OIII]狭輝線は**広がった母銀河ガス**に付随  
= **無変動**  
→ H $\beta$ 広輝線フラックスの**相対較正**に使える (Peterson et al. 1995)

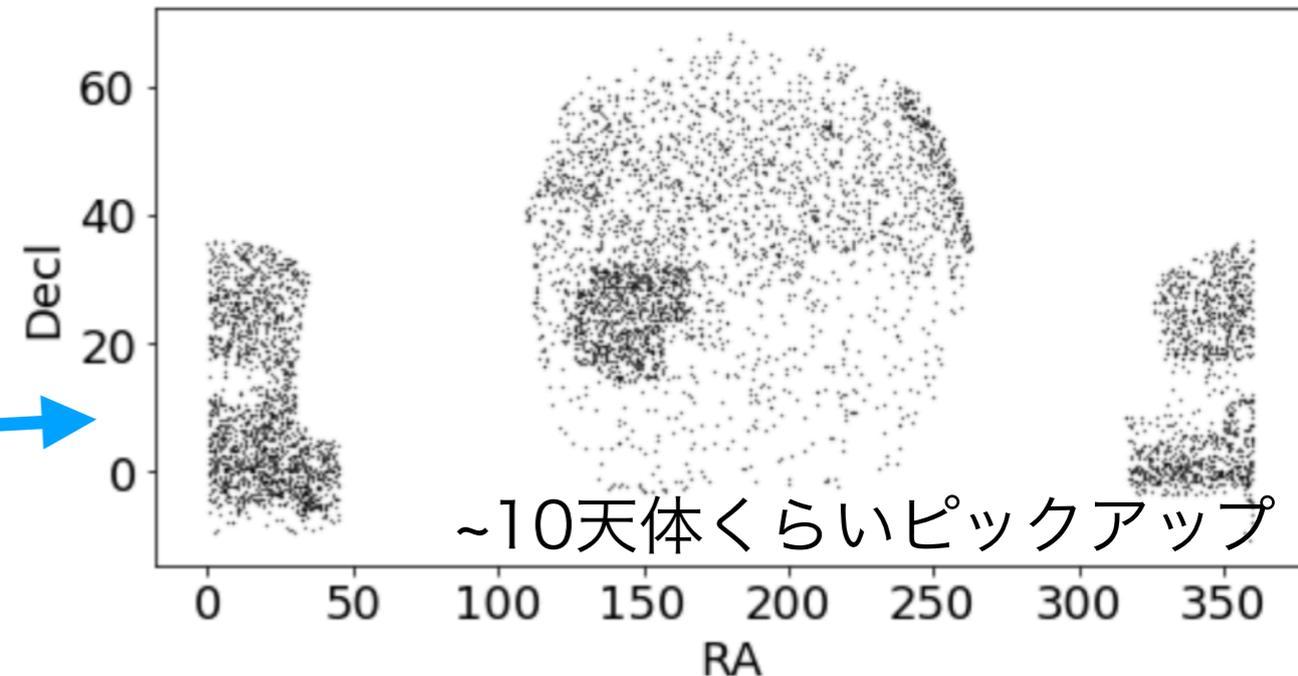
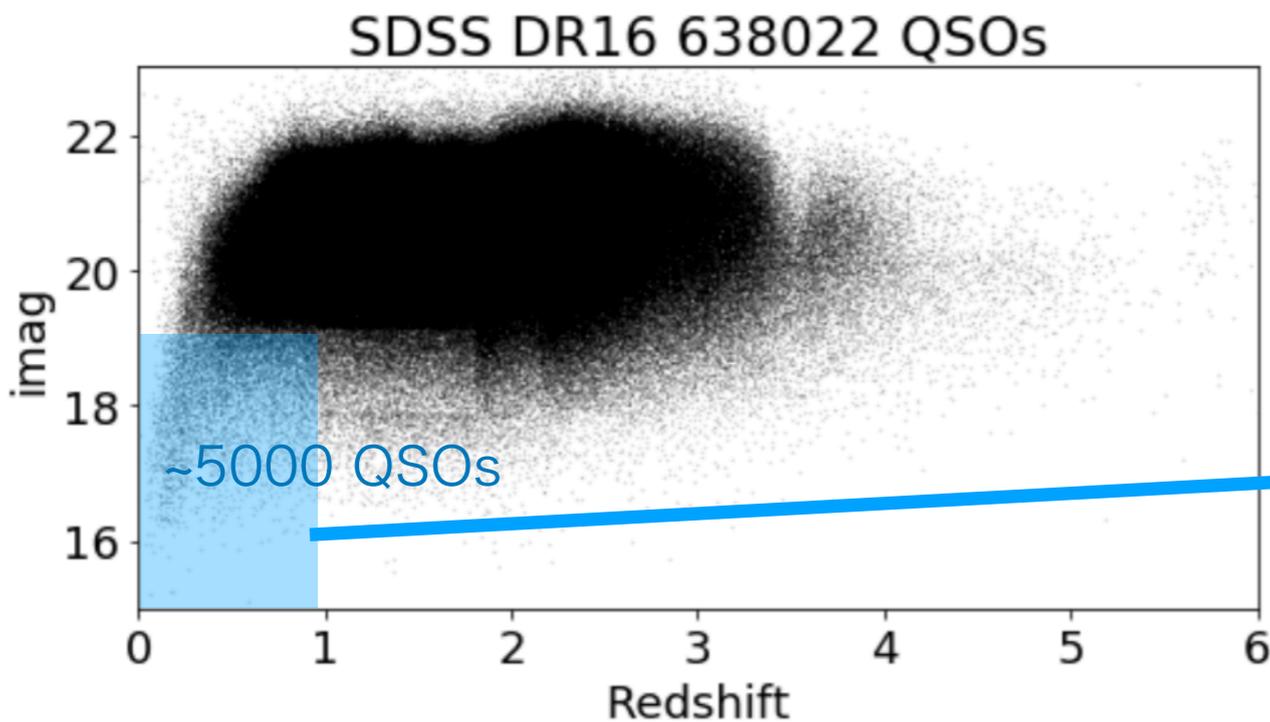
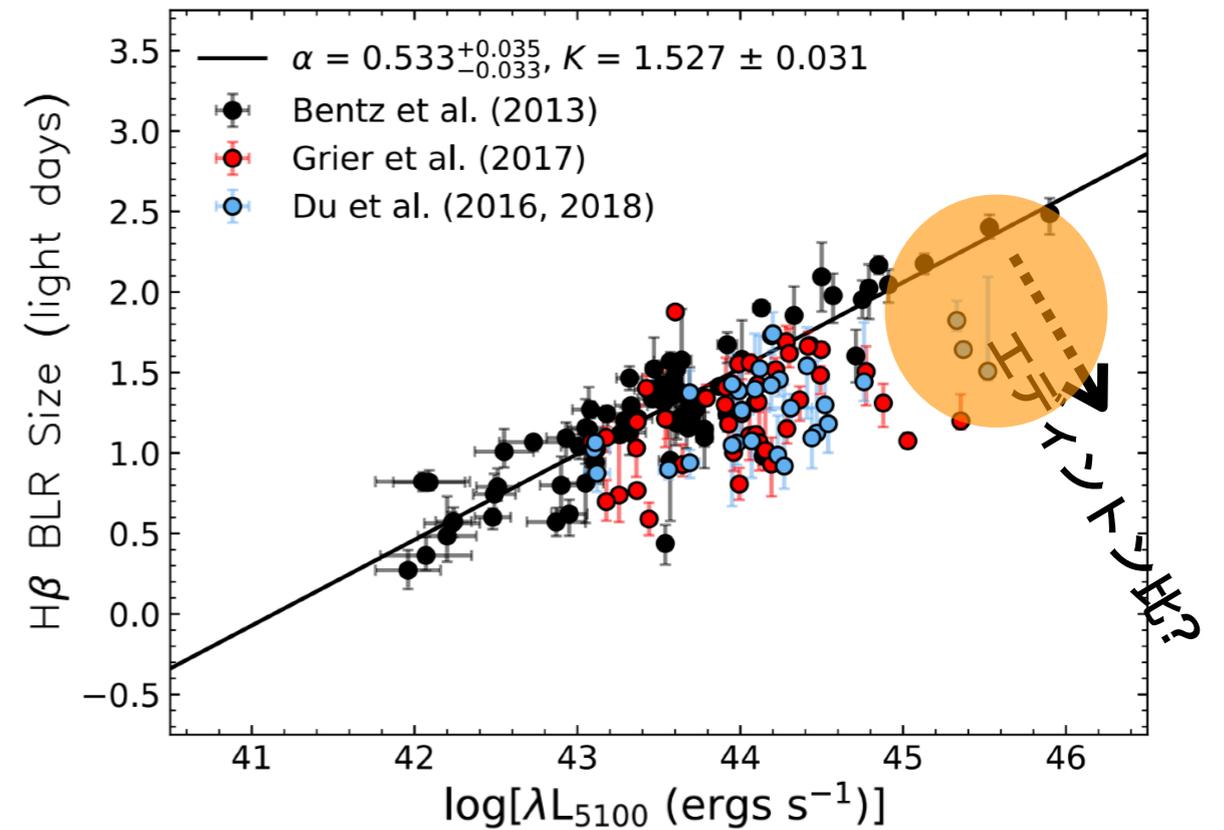
- KOOLS-IFU面分光ならスリットロス無し  
で”[OIII]相対較正法”を使える

H $\beta$ のみ有効. MgII, CIVには適用できない。



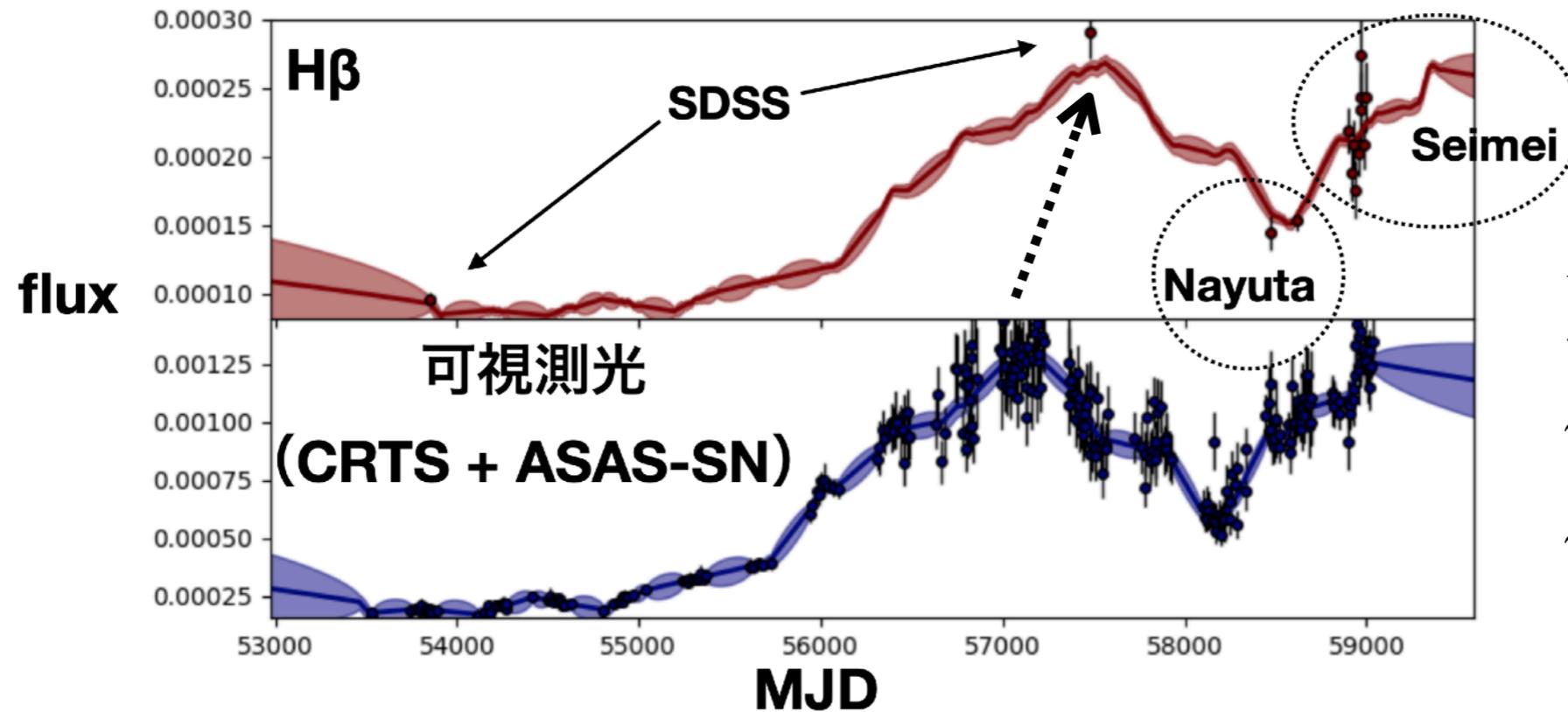
# ターゲット, 必要な観測期間

- SDSS分光QSOsで特に高光度のもの  
~10天体くらいが現実的?
- $H\beta + [OIII]$  は  $z < 1$  で観測可能
- $i \sim 19$ 等  $\sim L_{5100} \sim 10^{45}$  erg/s  
観測系での $H\beta$ 遅延  $\sim 200 - 600$ 日  
→ **少なくとも2年間のモニタ観測**  
**観測頻度は月に1回程度 (後述)**



# 観測頻度？

具体例: 名越さんのKOOLS-IFU RM観測( $i\sim 18$ 等 SDSS QSO at  $z\sim 0.289$ )より



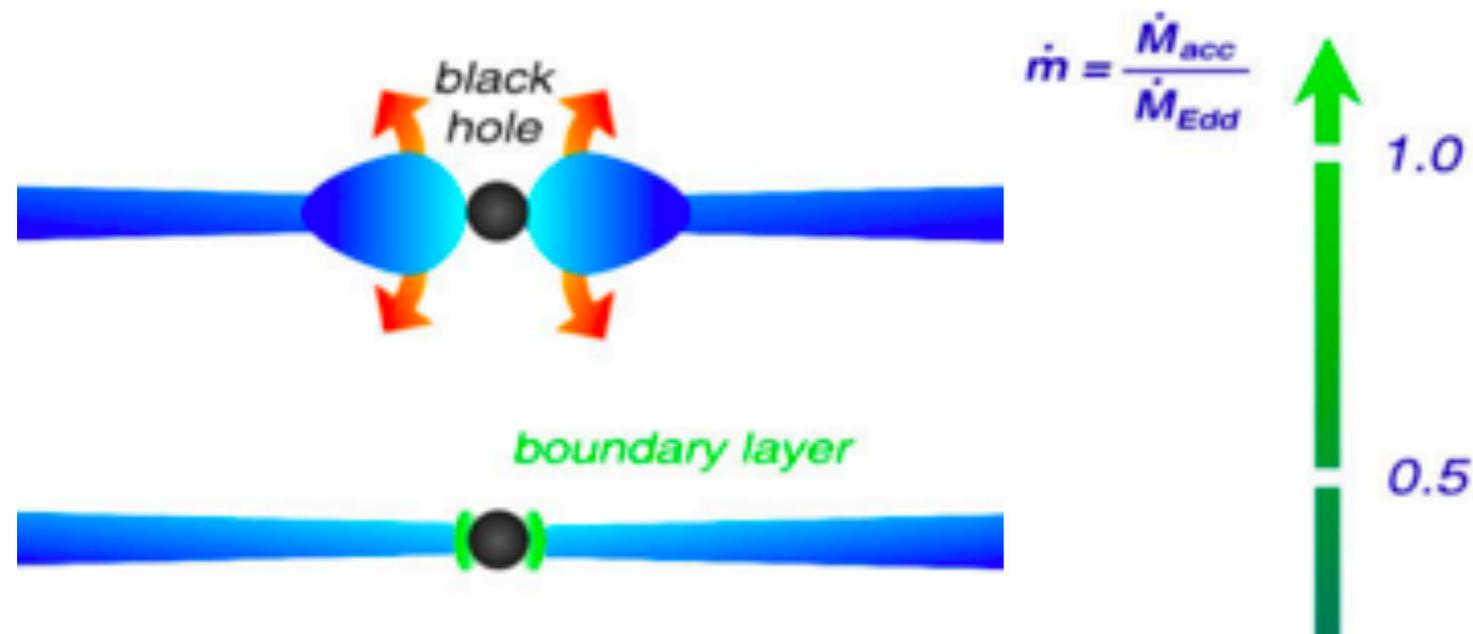
ガウシアンプロセスによる  
モデル化を用いて、  
 $\tau_{\text{obs}} = 387 \pm 40$  日  
 $\tau_{\text{rest}} = 296 \pm 30$  日

一般論として

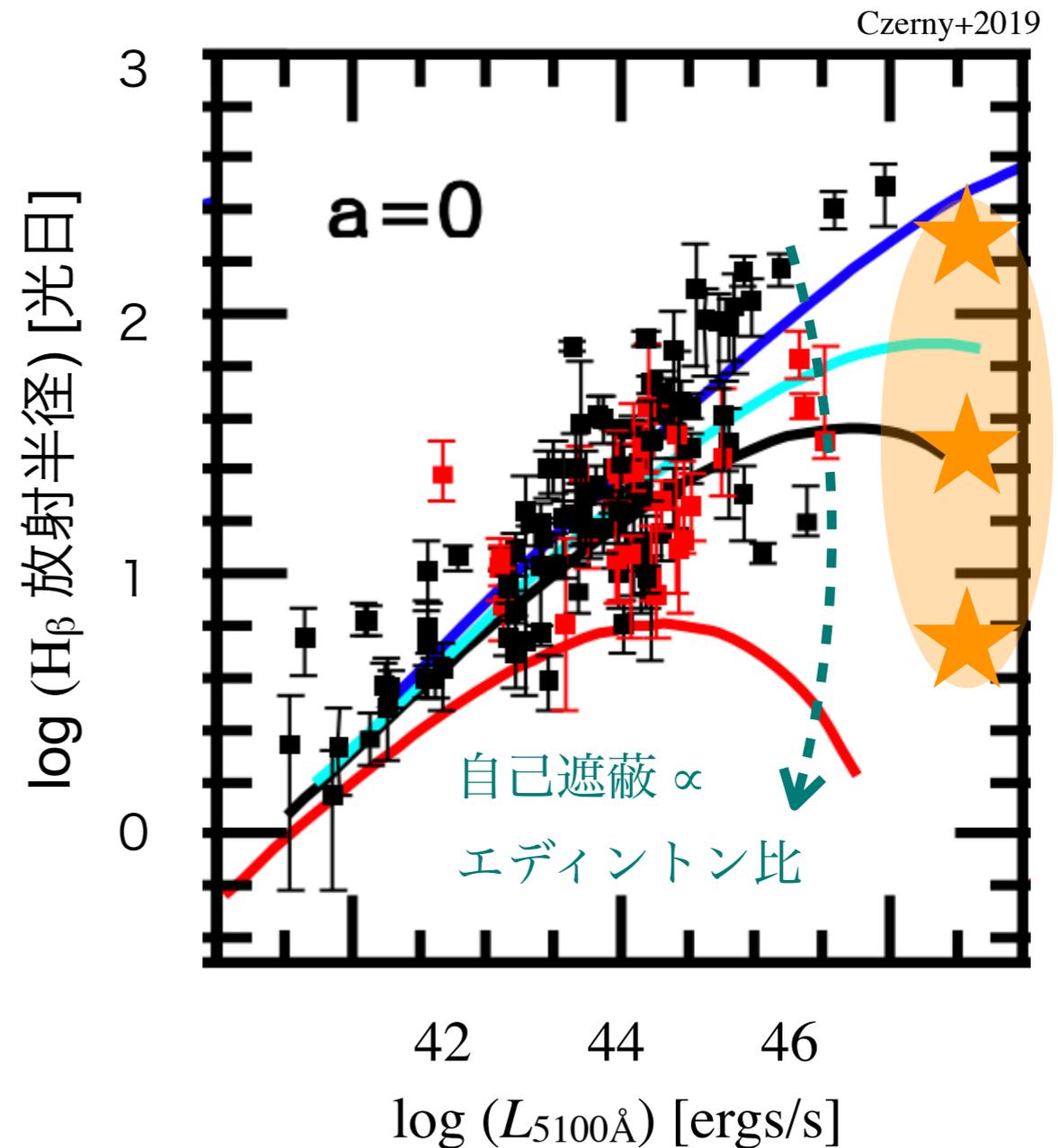
- 円盤連続光測光データが密ならば、分光データが粗でも時間遅延を測定できる  
… 目安は月に1回分光
- 測光データは自分で撮る (TriCCS) or 全天サーベイに頼る. 北天なら ZTF など.  
ターゲットの pre-selection も有効 (“良い”測光変動パターン → 分光開始)

# 期待できる結果: $H\beta$ $R-L$ 関係の高エディントンAGNでの 振る舞いの観測、円盤自己遮蔽モデルの検証

- 高エディントン比天体では降着円盤が  
薄い円盤 から 厚い円盤に変化  
→ 自己遮蔽で電離光子が減少する?  
ref. Wang+2014; Czerny+2019
- $R - L$  観測値とモデル予言値の比較で  
直接検証可能!



Müller 2004



## 観測提案②:

近赤外相対測光分光器IRSによる  
超長期(~10年)近赤外反響マッピング

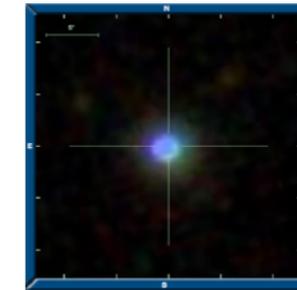
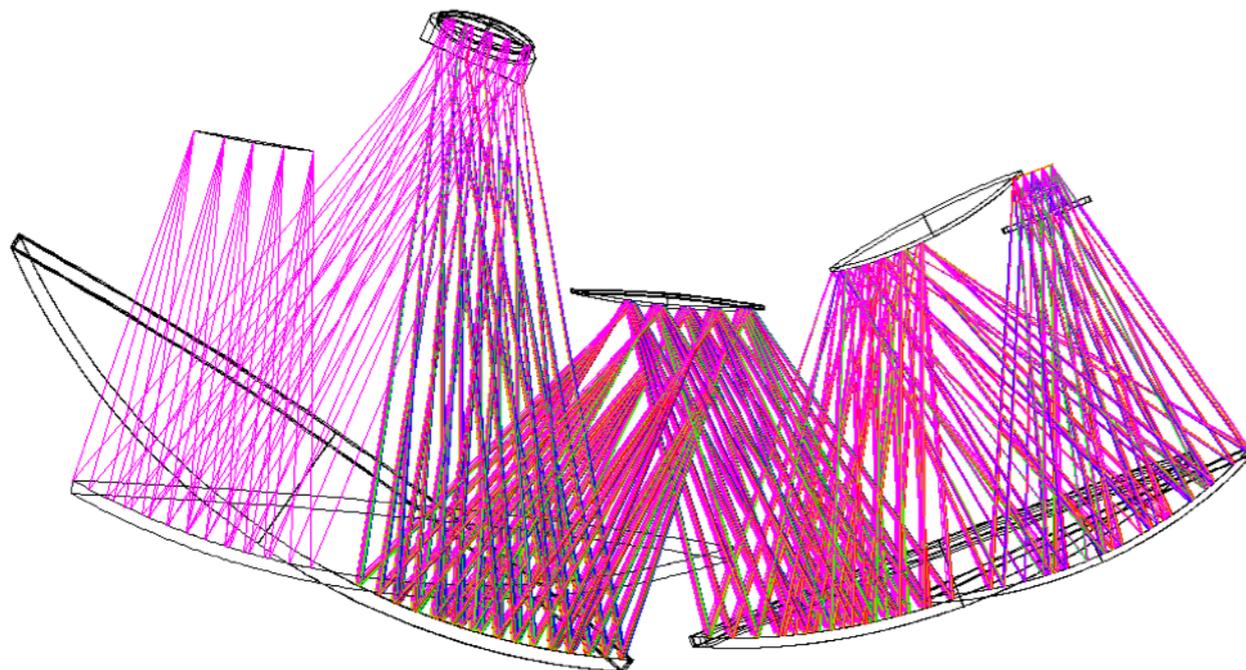
# 近赤外相対測光分光器IRS

(see 岩室さんのトーク)

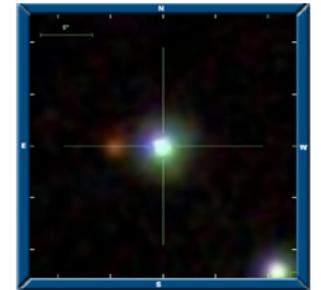
(2020年代後半~?)

- $\phi 12'$  内の任意の2天体を同時に面分光  
→ 相対測光/分光による高精度分光モニター
- 広波長域： $zYJHK$ 同時 ( $0.86 - 2.2 \mu\text{m}$ )  
高分散： $R \sim 4000$

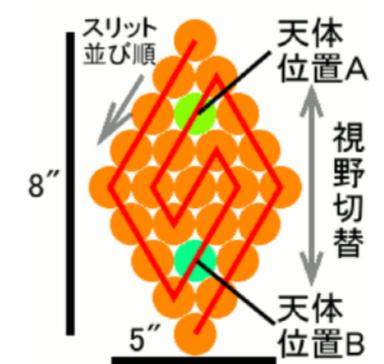
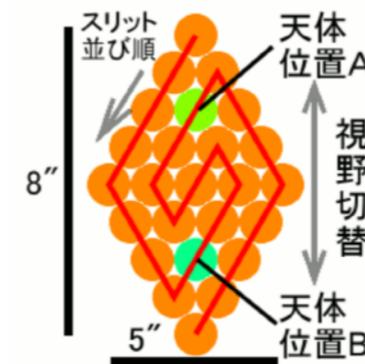
赤外分光モニターは非常にユニーク!



Object



Reference



クロスディスペーザで折りたたみ

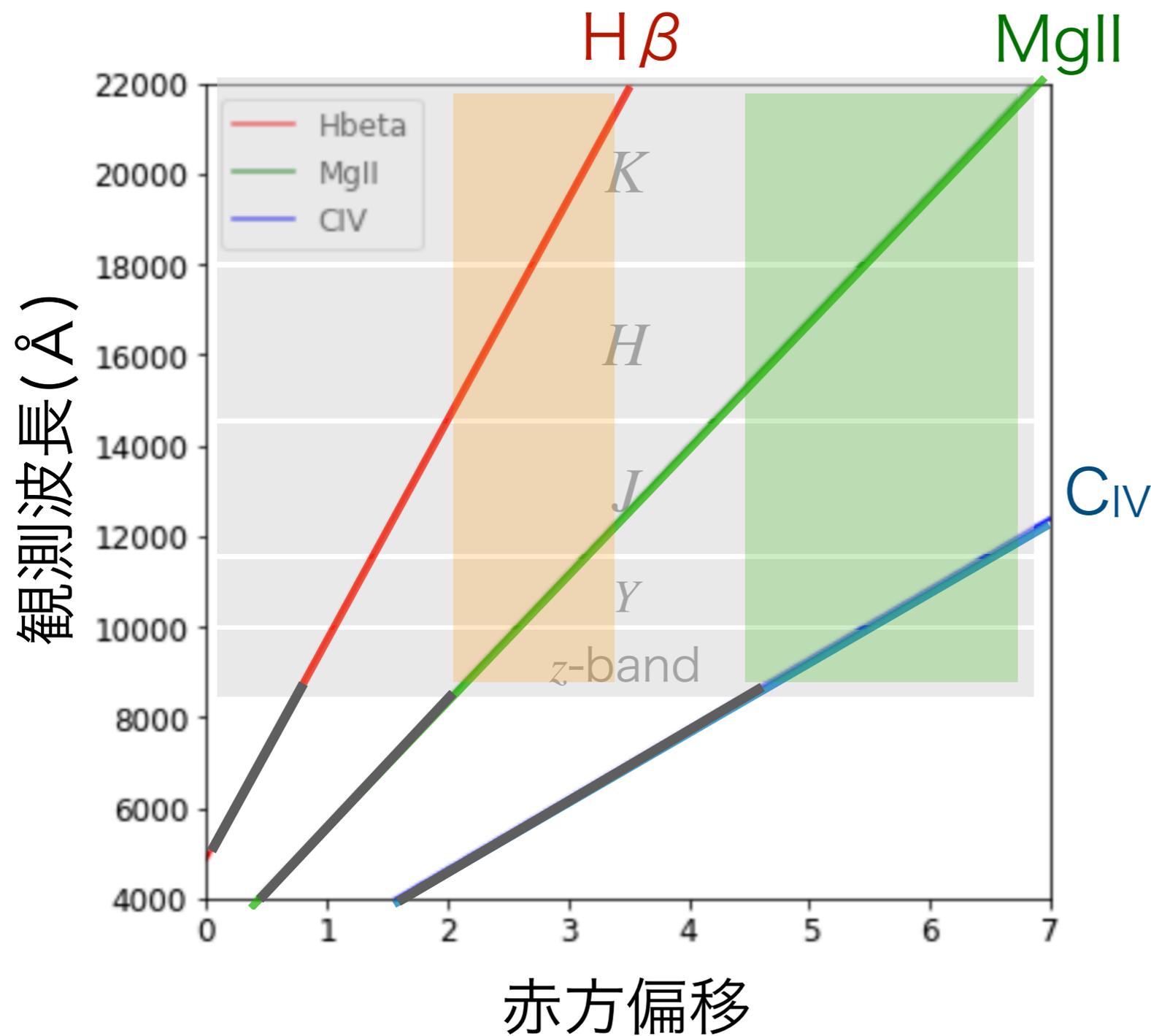
分散配置

分光器

直交分散

検出器上

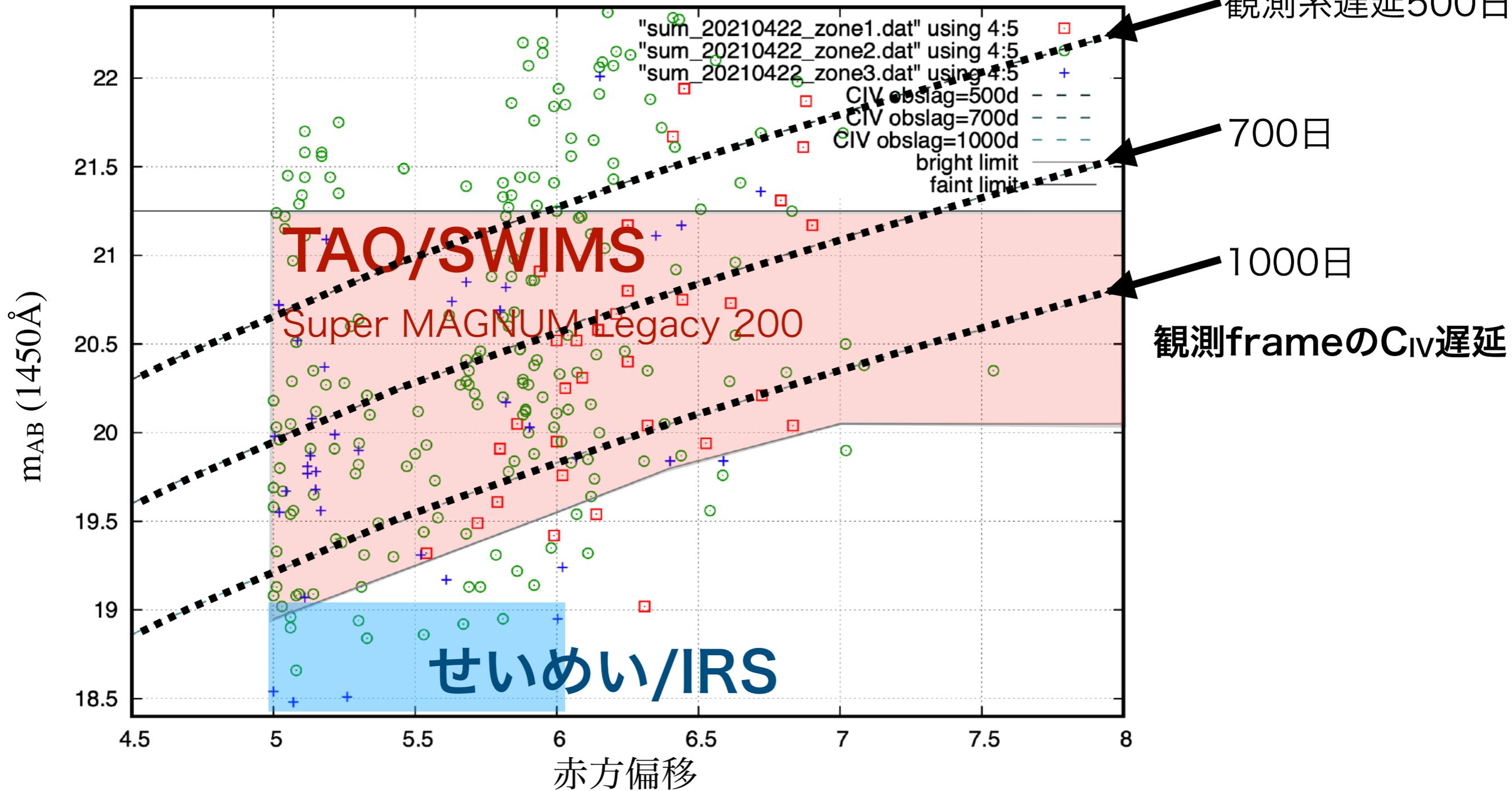
# 観測可能broad lines vs. 赤方偏移



- $H\beta$  :  $z = 0.8 - 3.5$
- $MgII$  :  $z > 2.0$
- $CIV$  :  $z > 4.5$
- $H\beta$  と  $MgII$  ( $z = 2 - 3.5$ )
- $MgII$  と  $CIV$  ( $z > 4.5$ )
- を同時に狙える
- → UV輝線,  $H\beta$ 輝線間の放射半径を直接比較できる
- サンプル, 観測頻度などは KOOLS-IFUの議論と同じ
- → 全輝線の  $R-L$ 関係の確立

# 最高赤方偏移QSO RM: C<sub>IV</sub> in *Y/J* band, Mg<sub>II</sub> in *H/K*

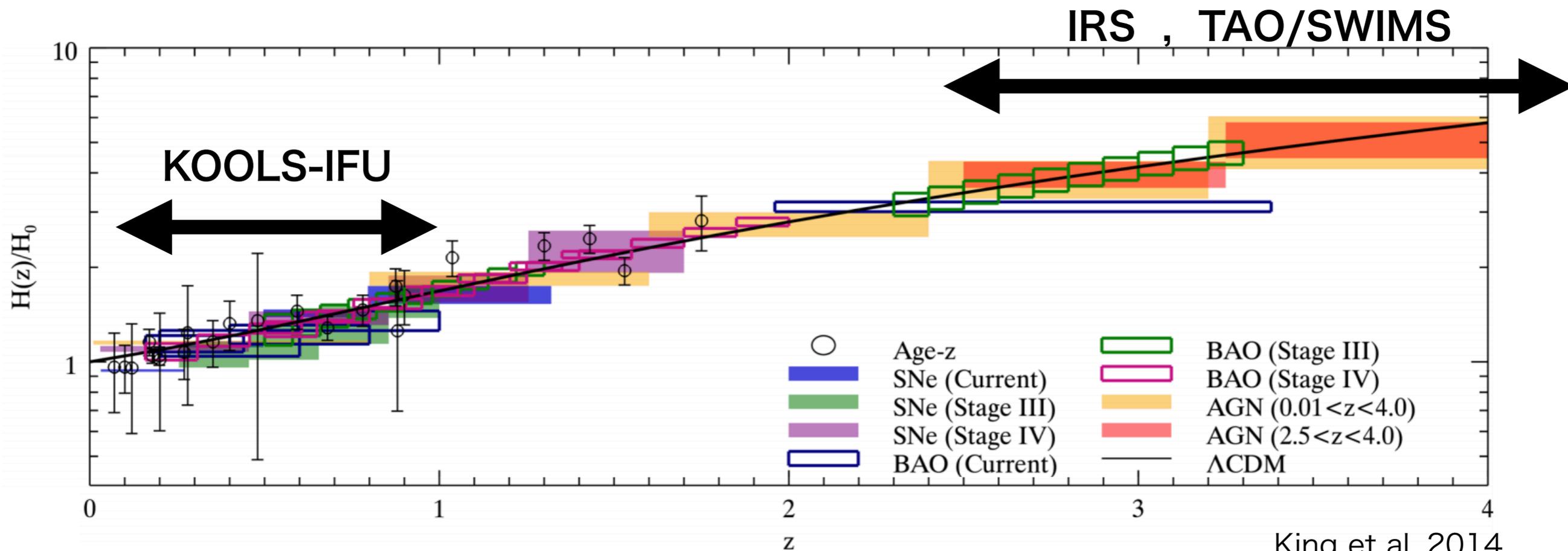
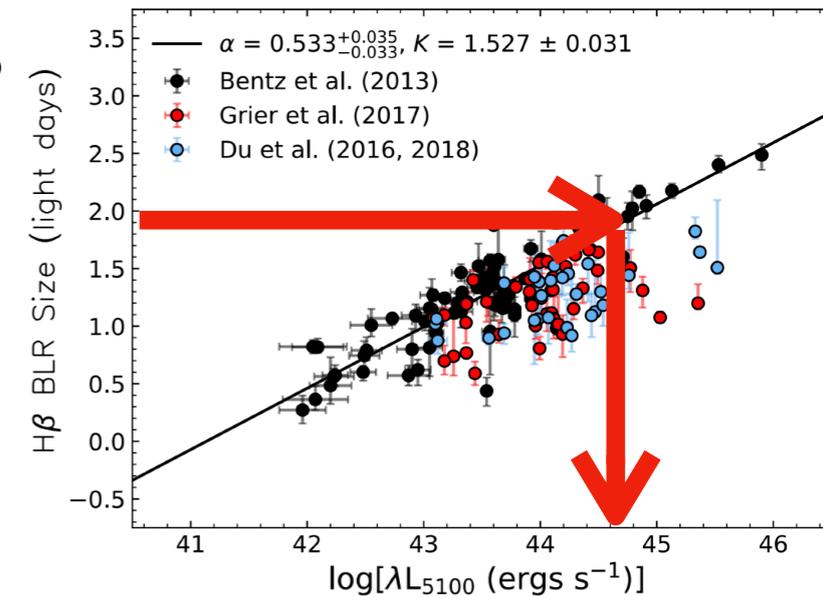
From 峰崎さん, 北天+南天 (ref. Inayoshi+2020)



- せいめい/IRSでは北天の最も明るい  $z > 4.5$  QSOs (せいぜい数個?)を観測
- >3年以上モニタ、観測頻度は最低でも半年に1回

# 最後に: RM-based AGN *Hubble diagram* ?

- $R - L$  関係がgiven  $\rightarrow$  RMによる $R$ の測定から光度 $L$ がわかる
- RMはBAO, Ia超新星などと独立に宇宙のダークエネルギーのprobe(標準光源)になりうる [原理的には $z \sim 7$ まで]  
(e.g., Yoshii et al. 2014, King et al. 2014)
- ダークエネルギーの時間進化の検出!?



# まとめ

装置	装置の強み	提案	期間
KOOLS-IFU	面分光による[OIII]フラックスロスの軽減→高精度相対測光	$z < 1$ 高エディントン比(光度)AGNの H $\beta$ + [OIII] RM	月1分光/2年—5年
近赤外相対測光分光器IRS	2天体同時分光による相対フラックス精度の向上、 <b>近赤外線</b>	UV輝線R-L関係の確立、高赤方偏移AGNによる宇宙論	月1分光/3年—10年

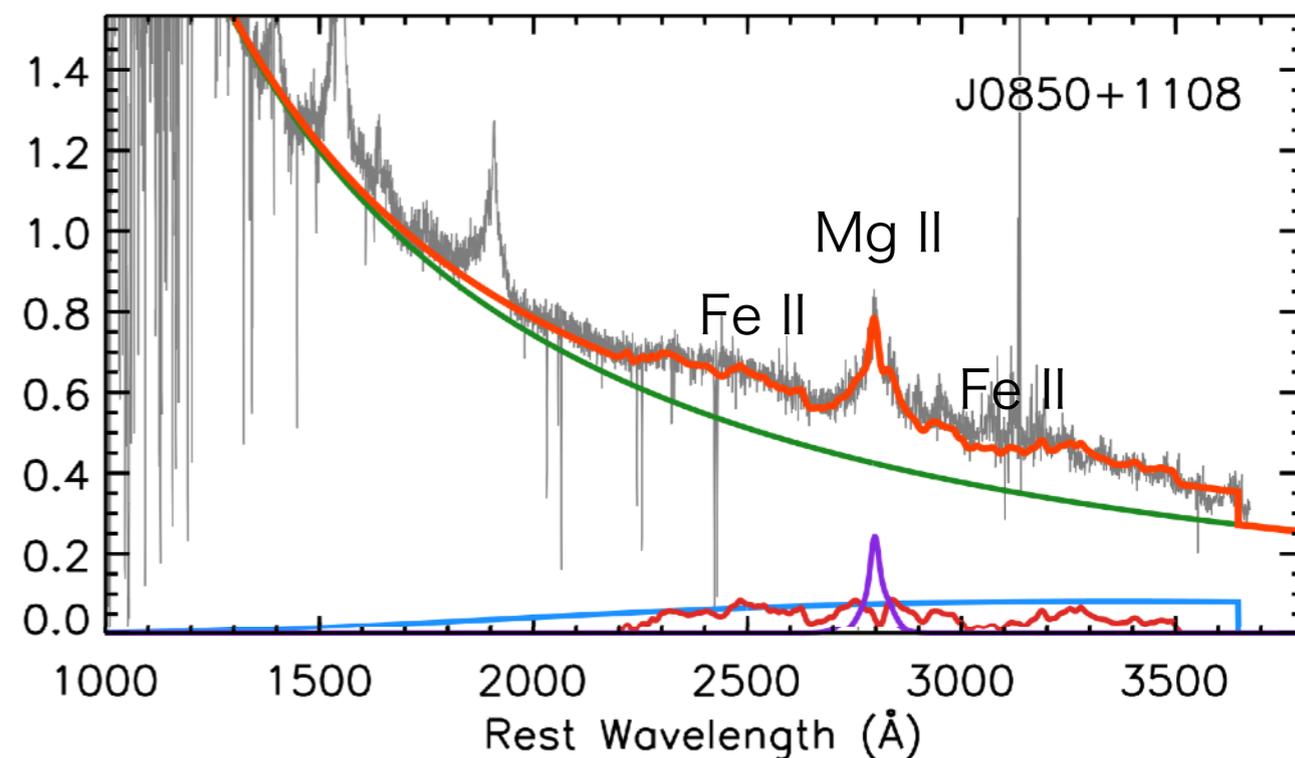
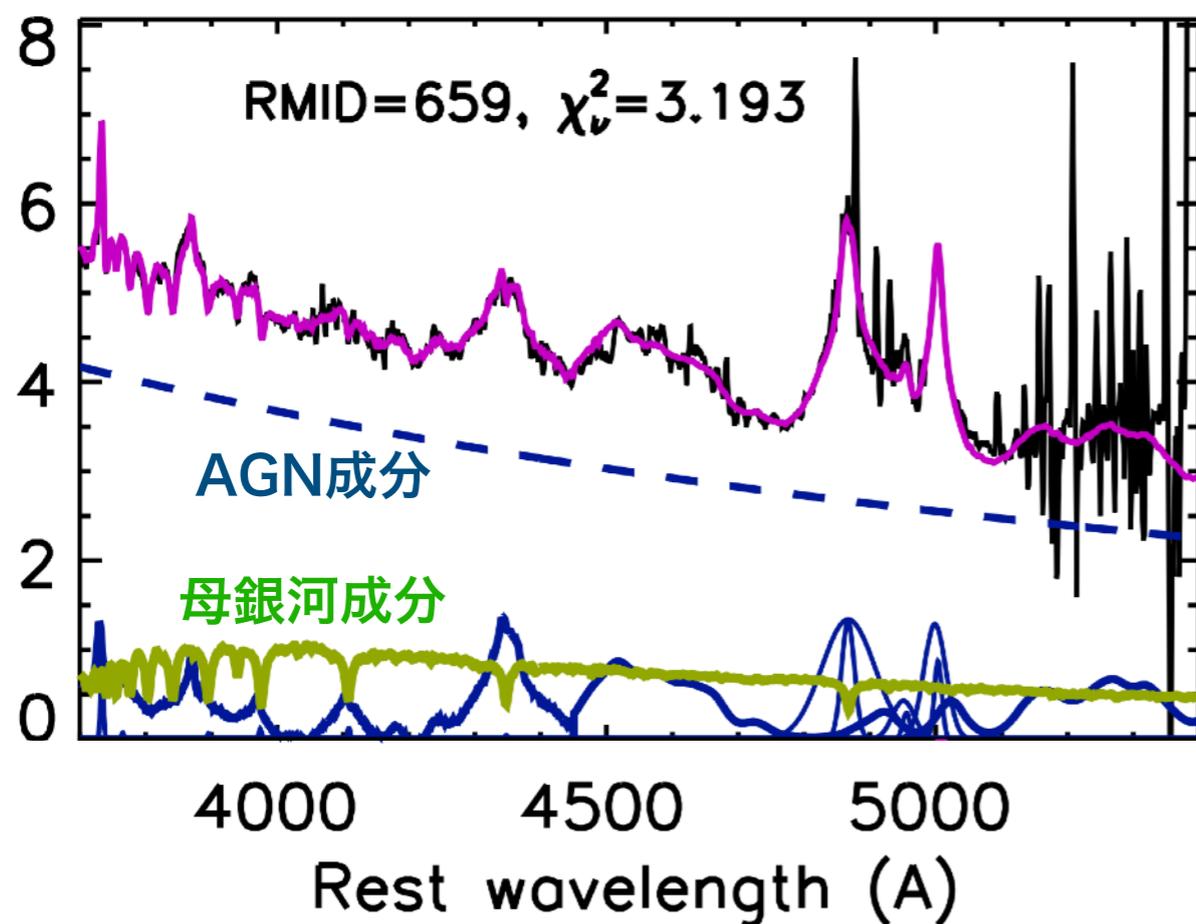
- **RMによるR-L関係**は遠方AGNs/QSOsのSMBH質量推定の基礎なので、高精度のRM観測は銀河・AGN進化の文脈でも高インパクト
- RM-based AGN Hubble diagram → 宇宙パラメータ?

- Flux(**相対**)精度はとても重要. テクニック次第で~0.01magいけるか?
- 超長期のlow cadence monitoringは共同利用の文脈にはのらない?  
(キュー観測に移行すれば、“割り込み”でcadence観測取得可能?)



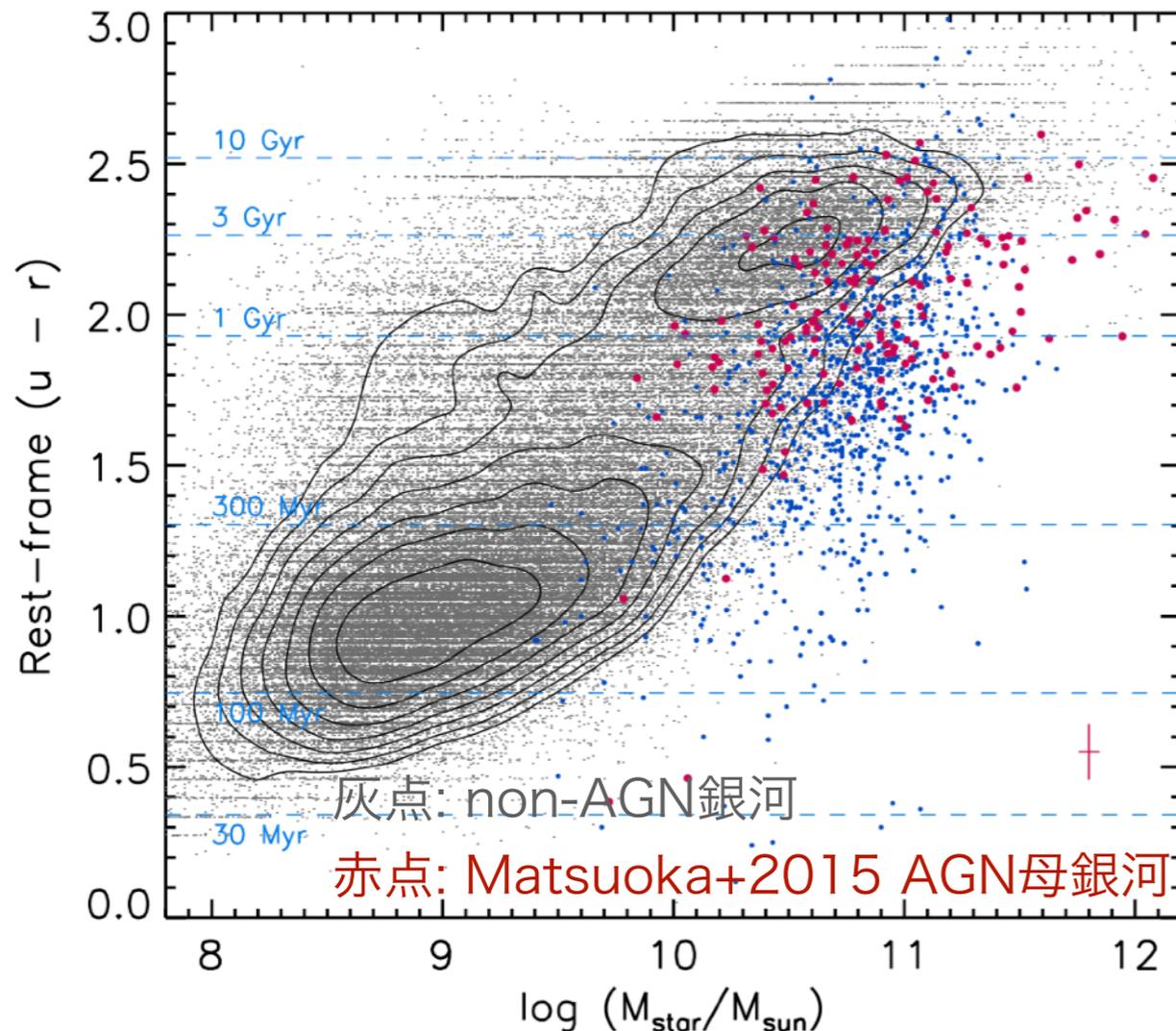
# Coaddによる高S/Nスペクトル

- RMの複数エポックの分光データをcoadd → 超高S/N分光
  - 母銀河成分とAGN成分のスペクトル分解 ...高赤方偏移でのAGN-銀河共進化
  - AGNスペクトル中のFe II/Mg II輝線比を用いた金属量測定

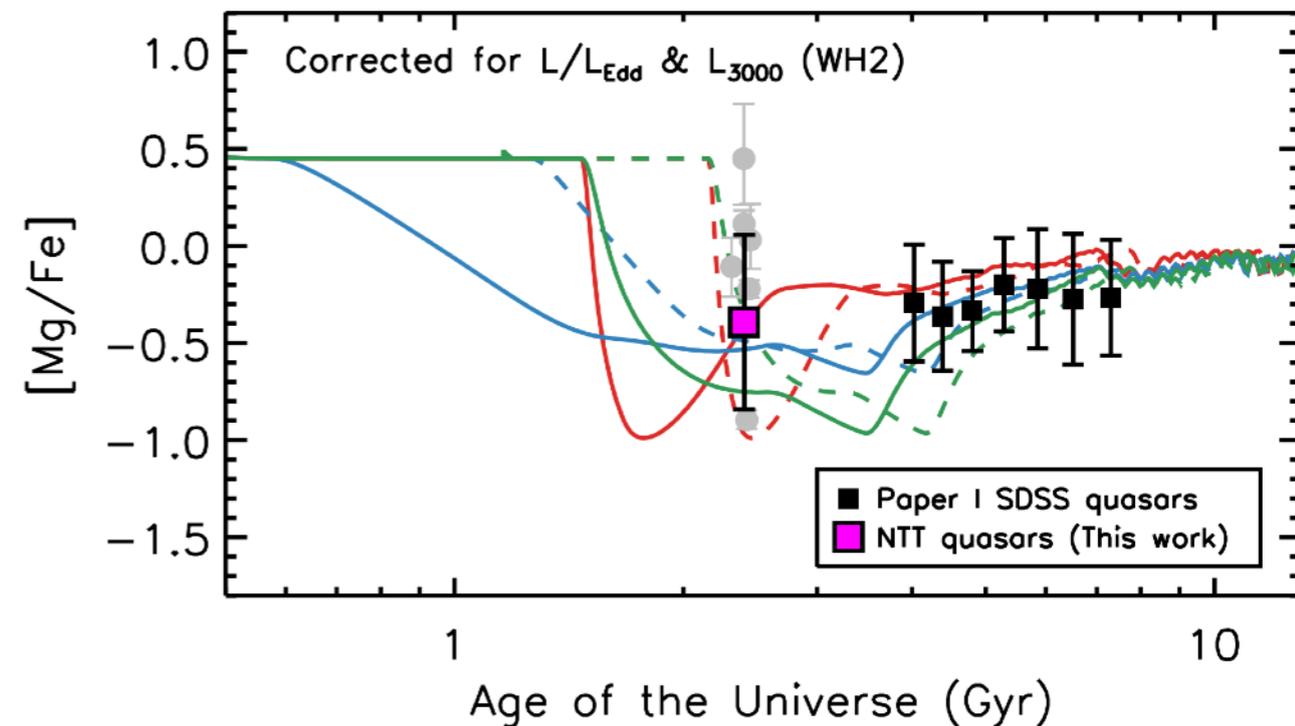


# Coaddによる高S/Nスペクトル

- RMの複数エポックの分光データをcoadd → 超高S/N分光
  - 母銀河成分とAGN成分のスペクトル分解 ...高赤方偏移でのAGN-銀河共進化
  - AGNスペクトル中のFe II/Mg II輝線比を用いた金属量測定

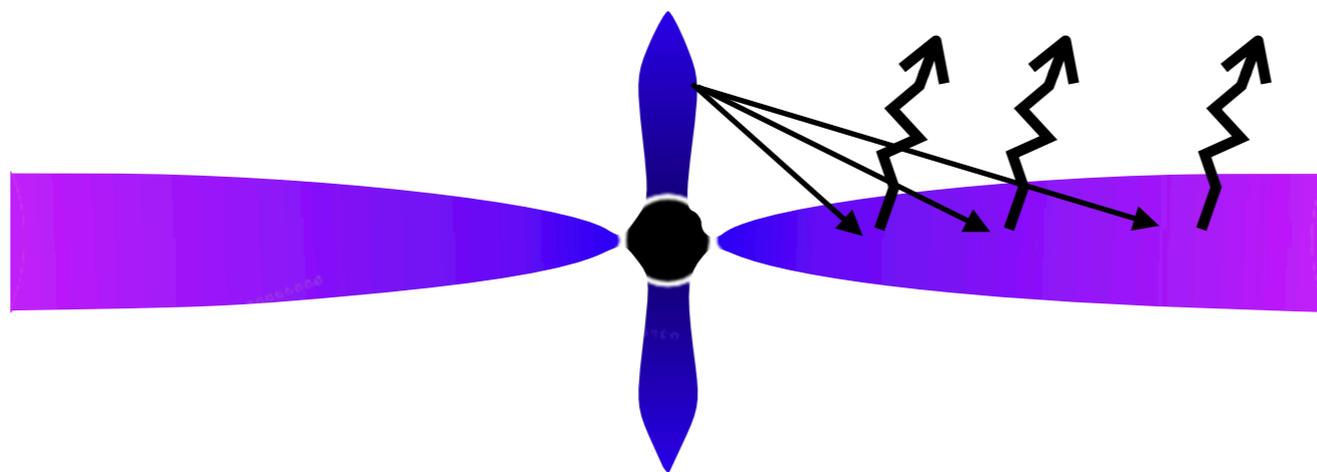
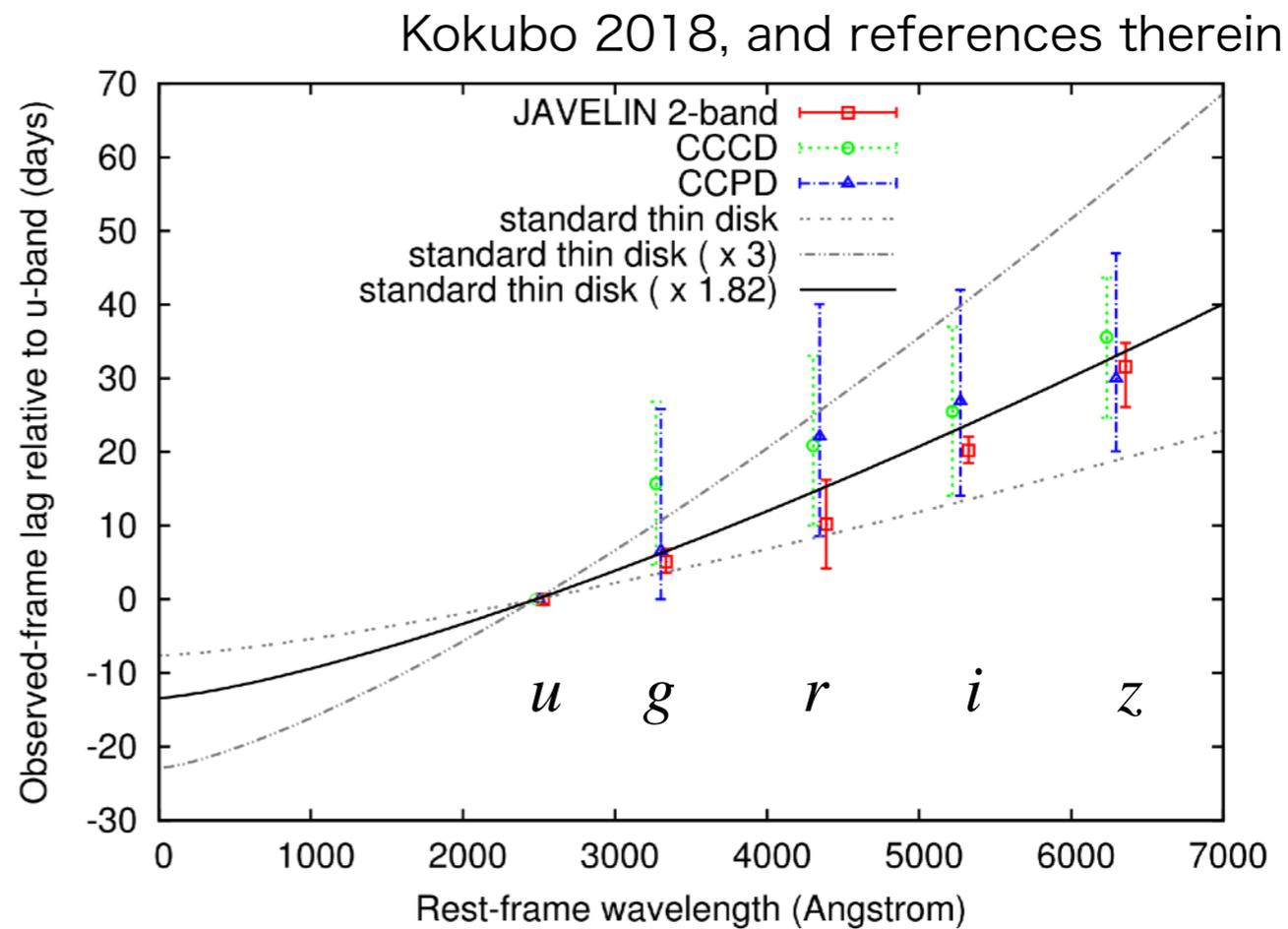
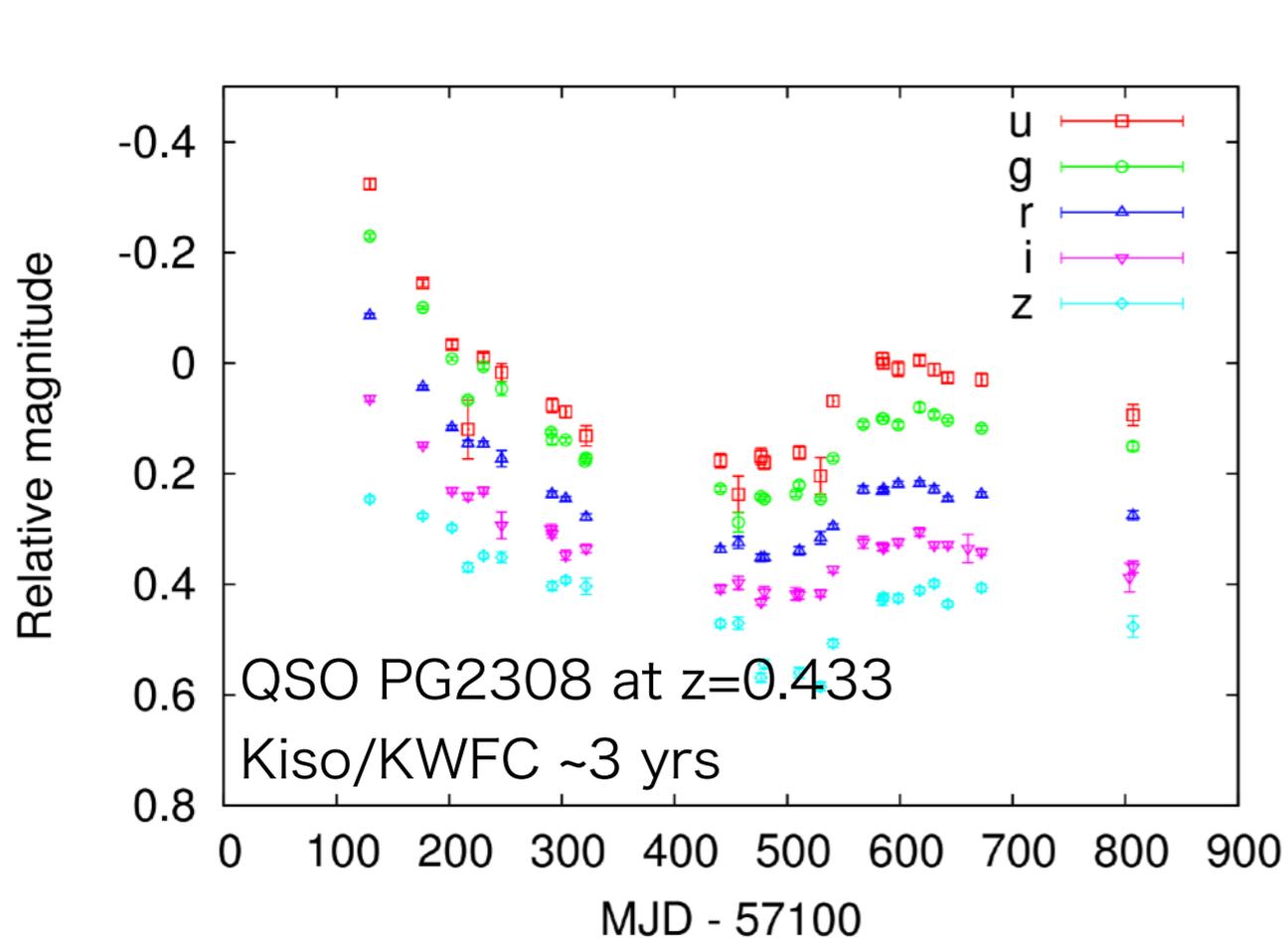


## QSO [Mg/Fe]と化学進化モデルの比較



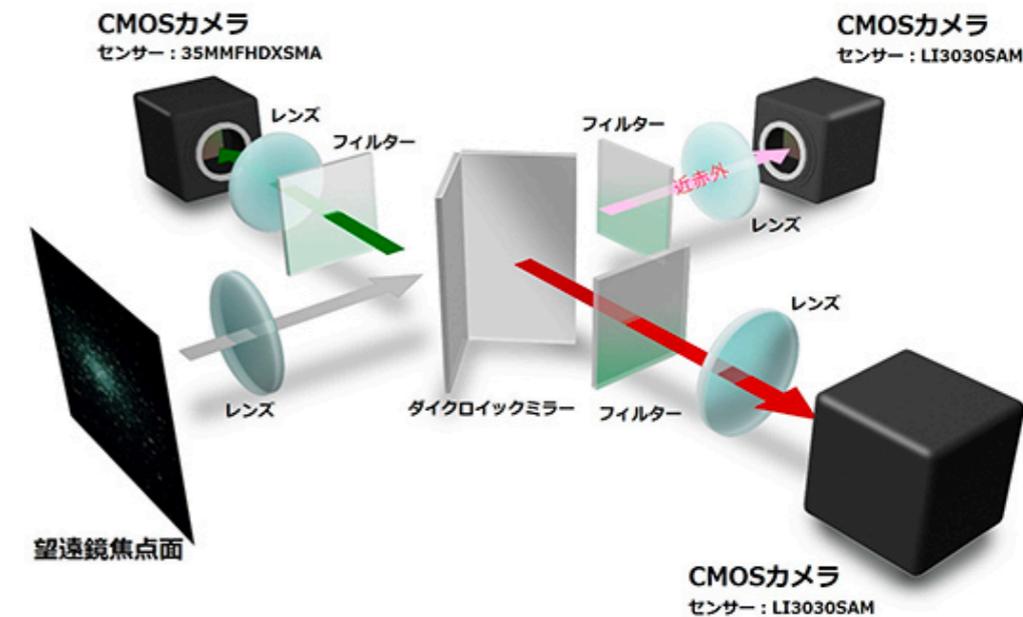
# 観測提案③:

## TriCCS多バンド測光による AGN降着円盤連続光反響マッピング

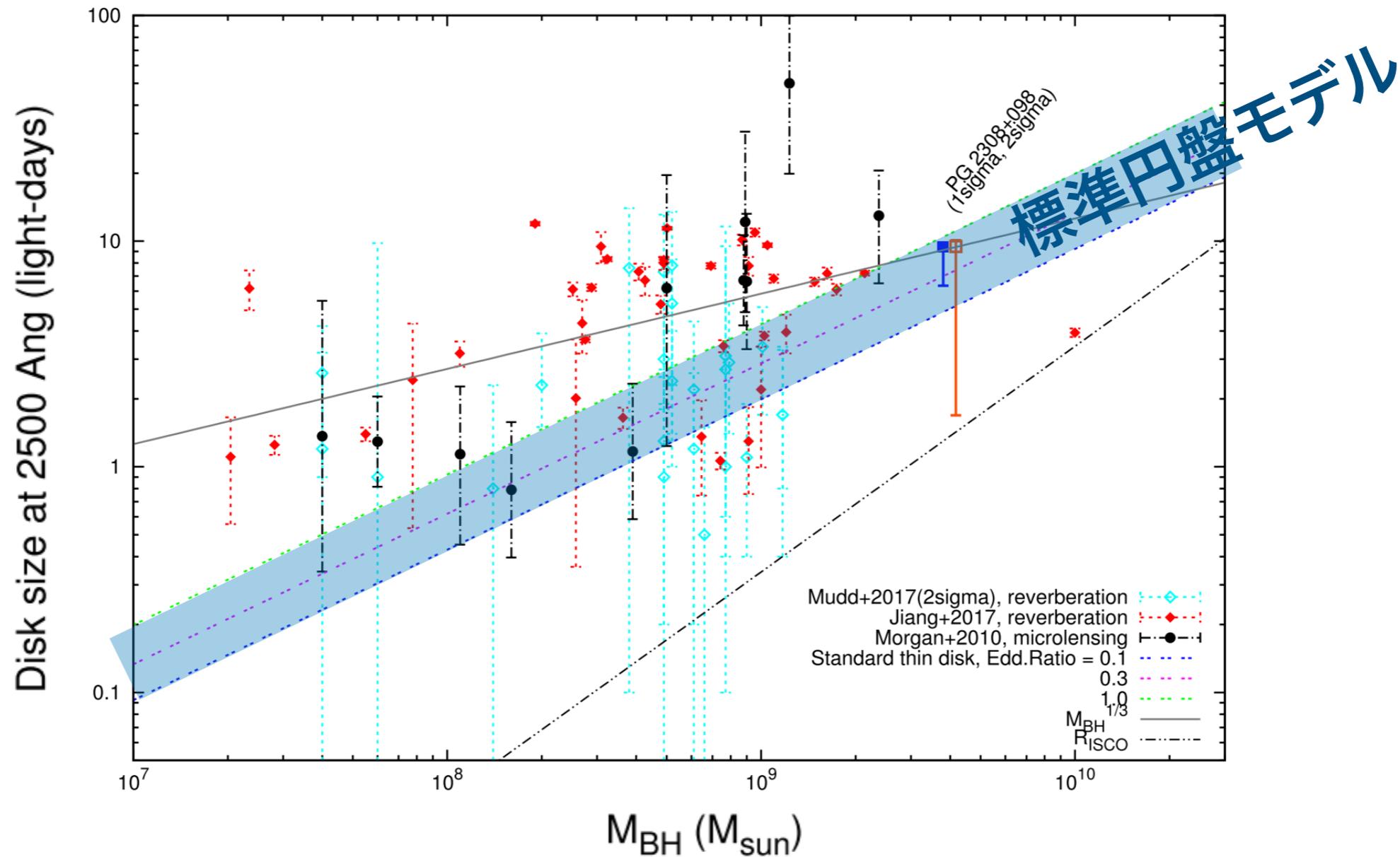


降着円盤光自身も  
他バンドで時間遅延を示す  
(X線コロナ放射の再放射)

- ダイクロイックミラーによる3色同時撮像

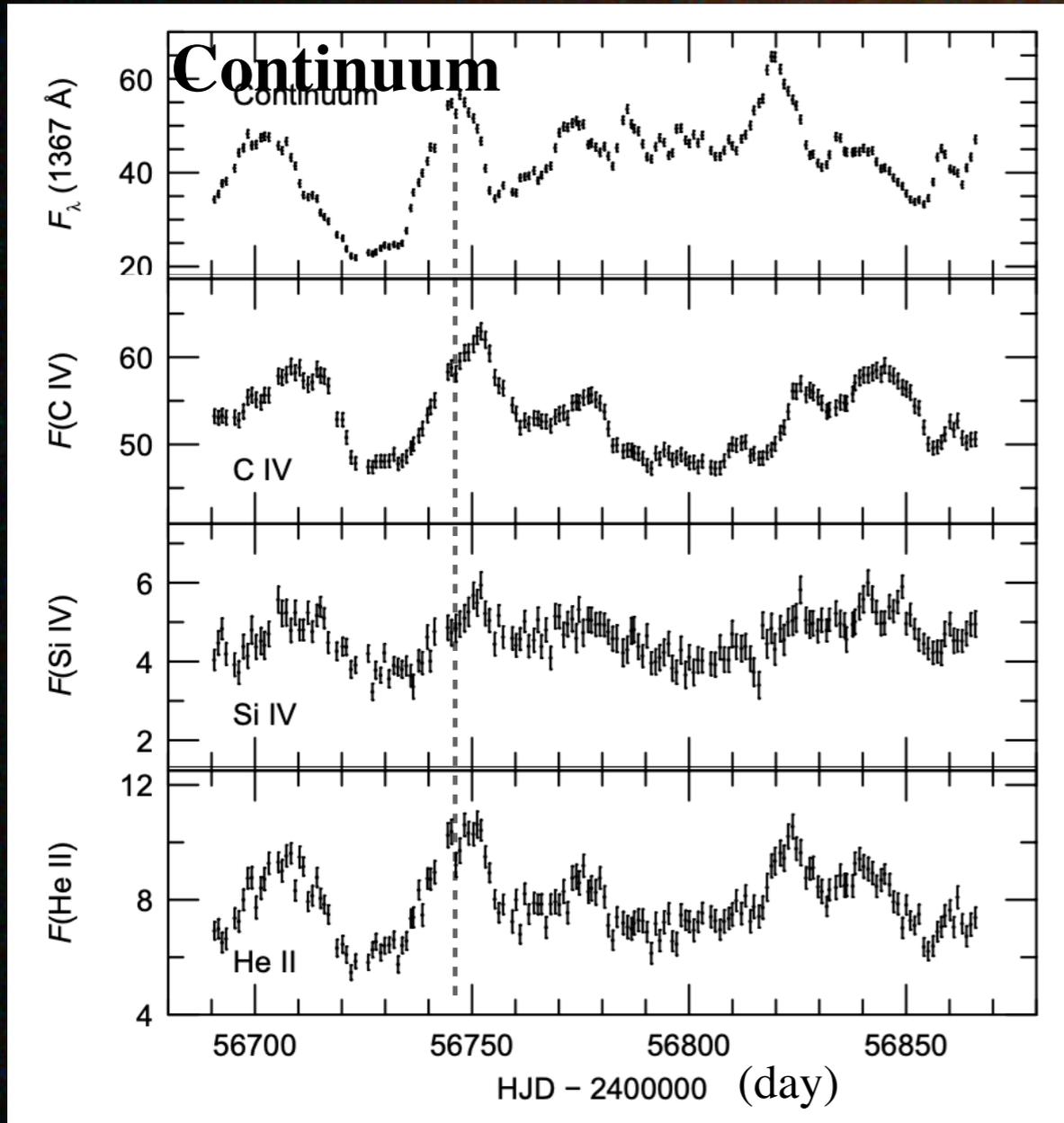


\*AGNには秒スケールの早い変動は無い ...  
CMOS高速読み出しは活かせない  
(ref. 星質量BH GX 339-4 ~ 1秒)

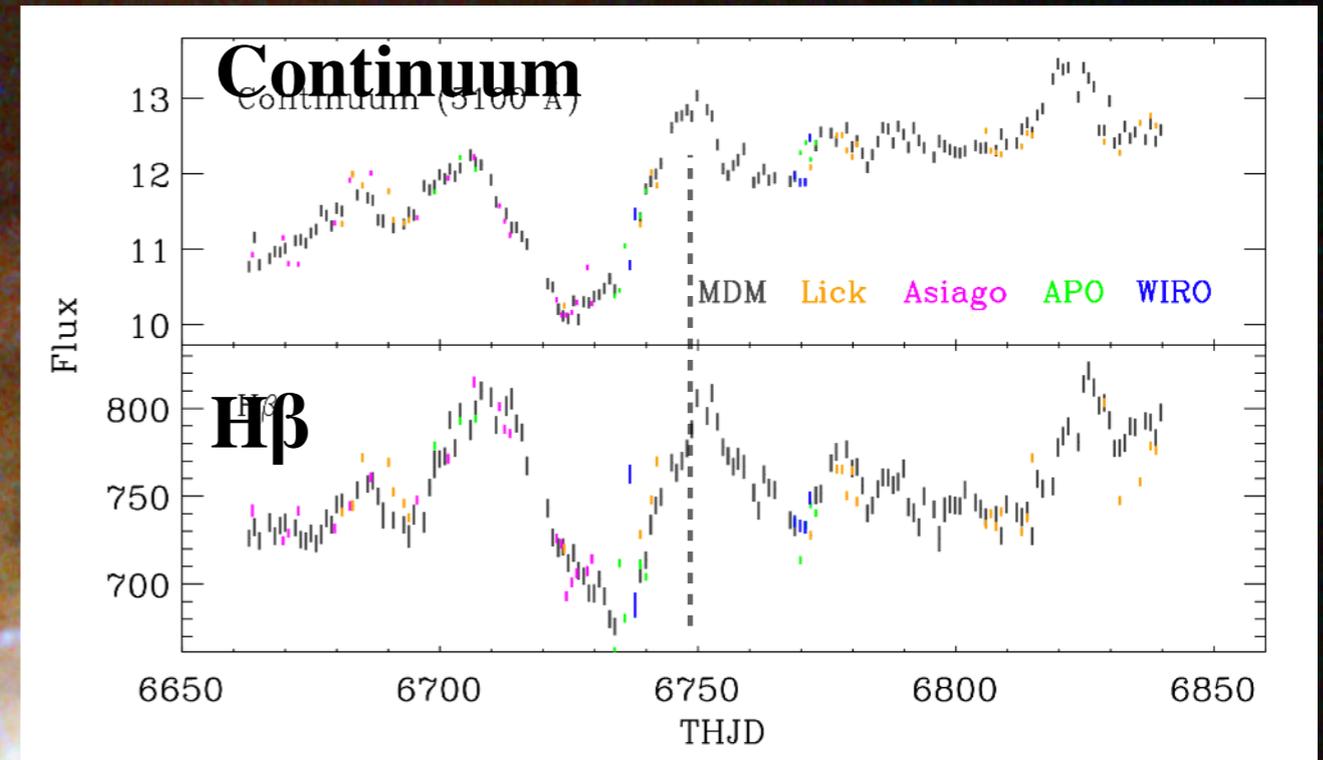


- 標準円盤モデルの予言値と 円盤RMの測定値が合わないという指摘
- 高光度QSOサンプルの”密な”モニタ で high-mass end を押えたい

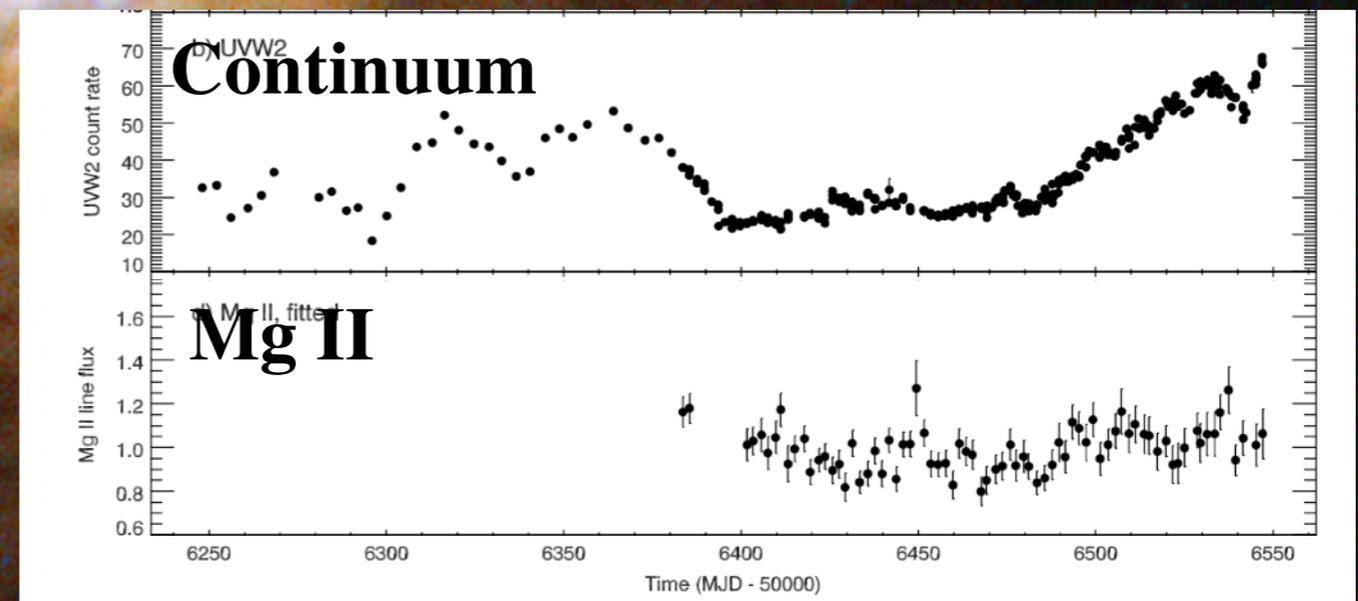
# Seyfert galaxy NGC5548 ( $z = 0.016$ )



NGC5548, HST/COS; De Rosa+2015



NGC5548; De Rosa+2017

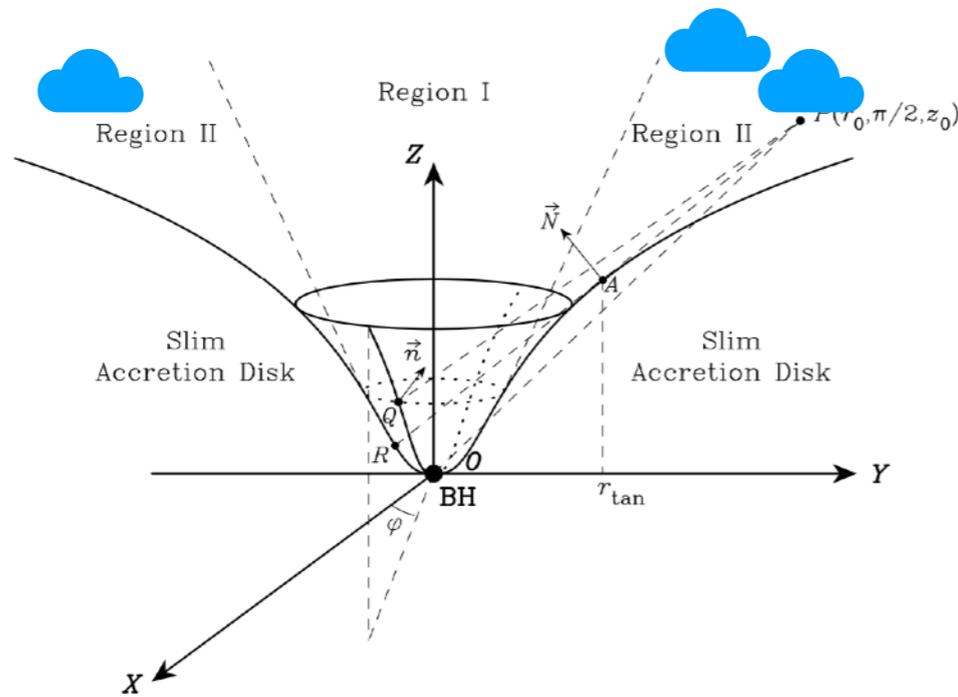


NGC5548, Swift/; Cackett+2015

MgII variability is typically weak (e.g., Kokubo+2014; \*\*MgII is collisionally excited)

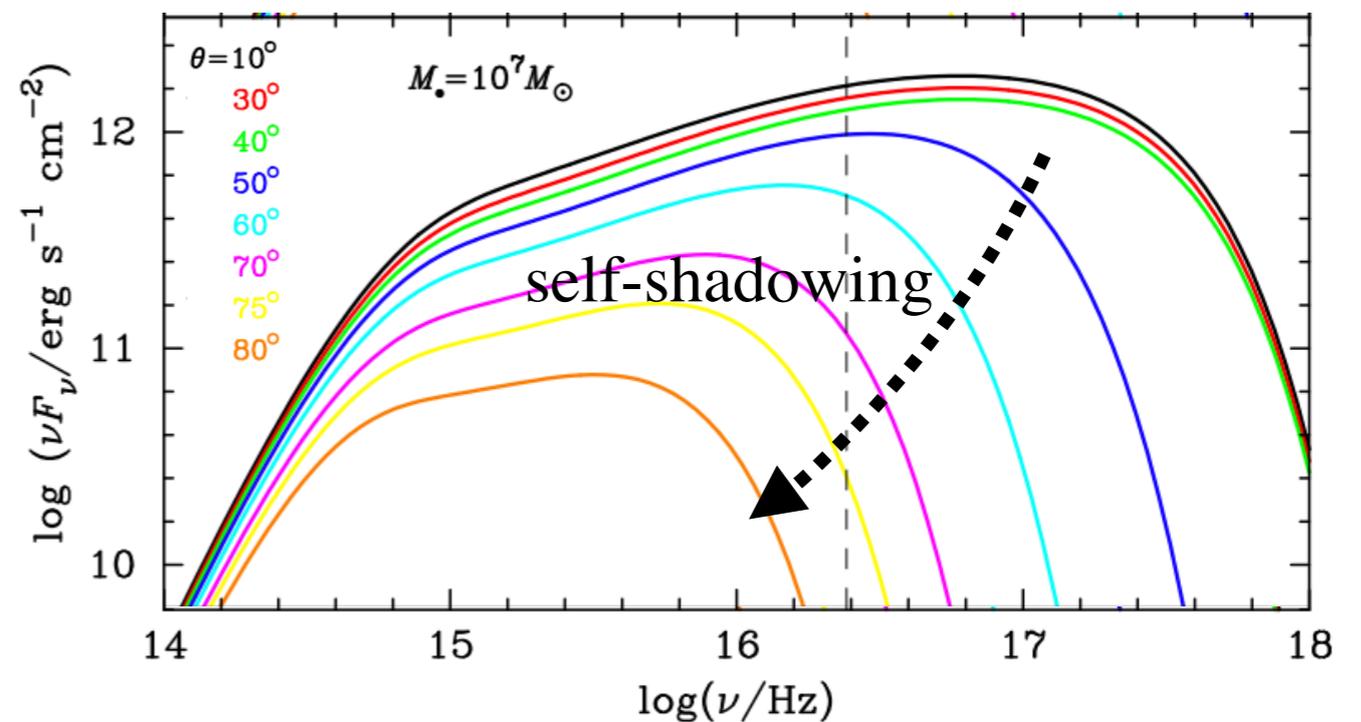
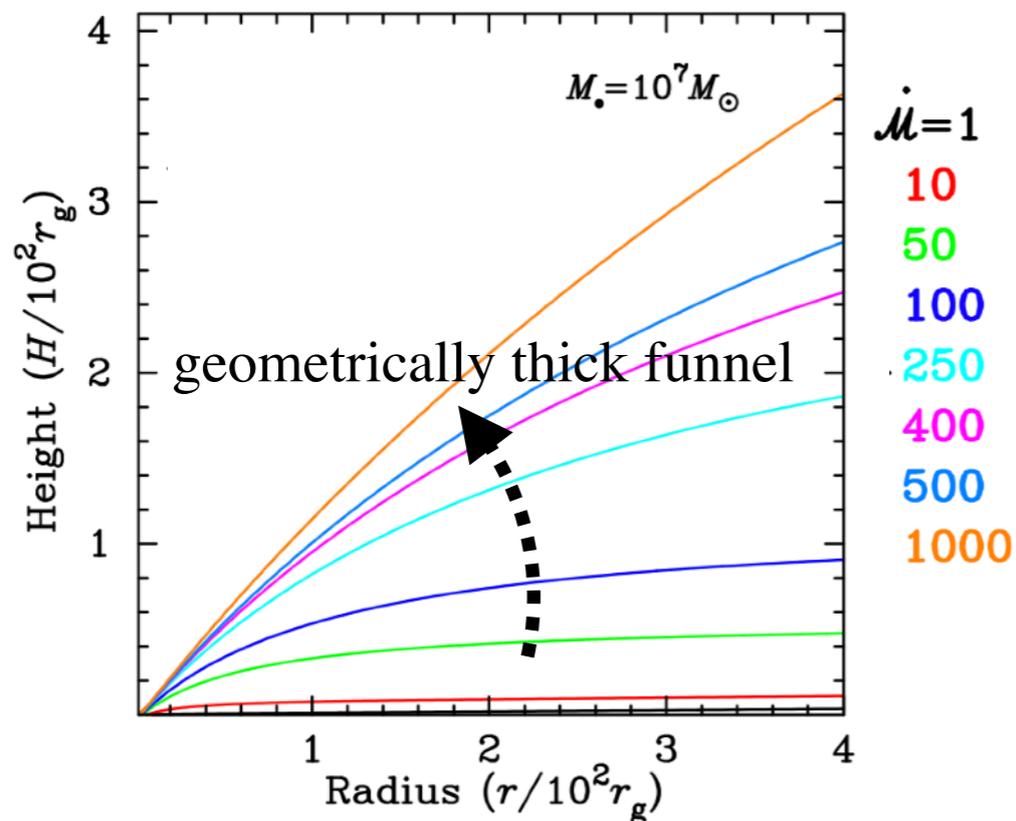
# H $\beta$ R-L のディスク影モデルの検証

Wang+2014



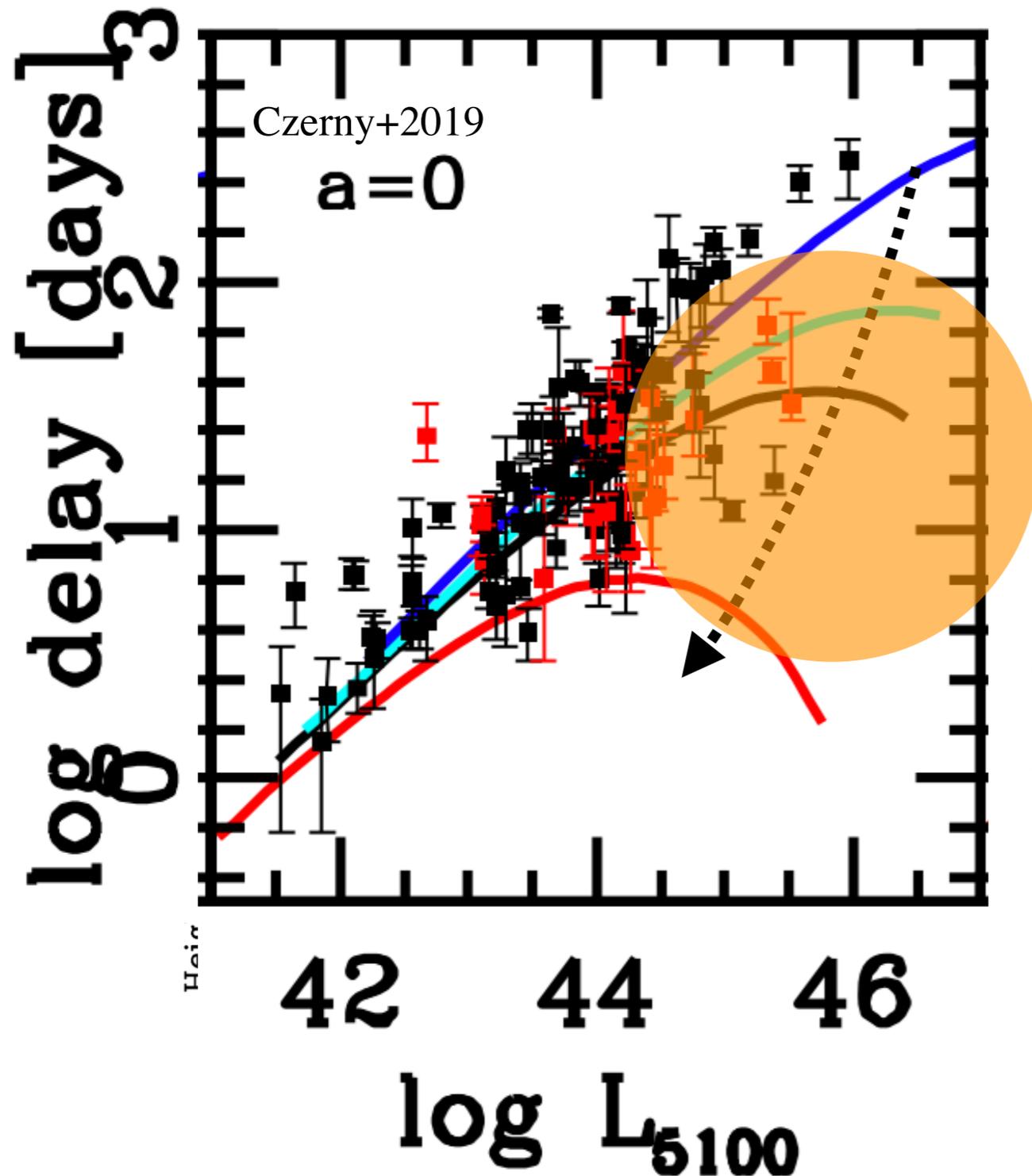
At **very** high accretion rate, disk's thick funnel (slim disk) **self-shadows** the ionizing photons

→ small  $R_{\text{BLR}}$  at high accretion rate



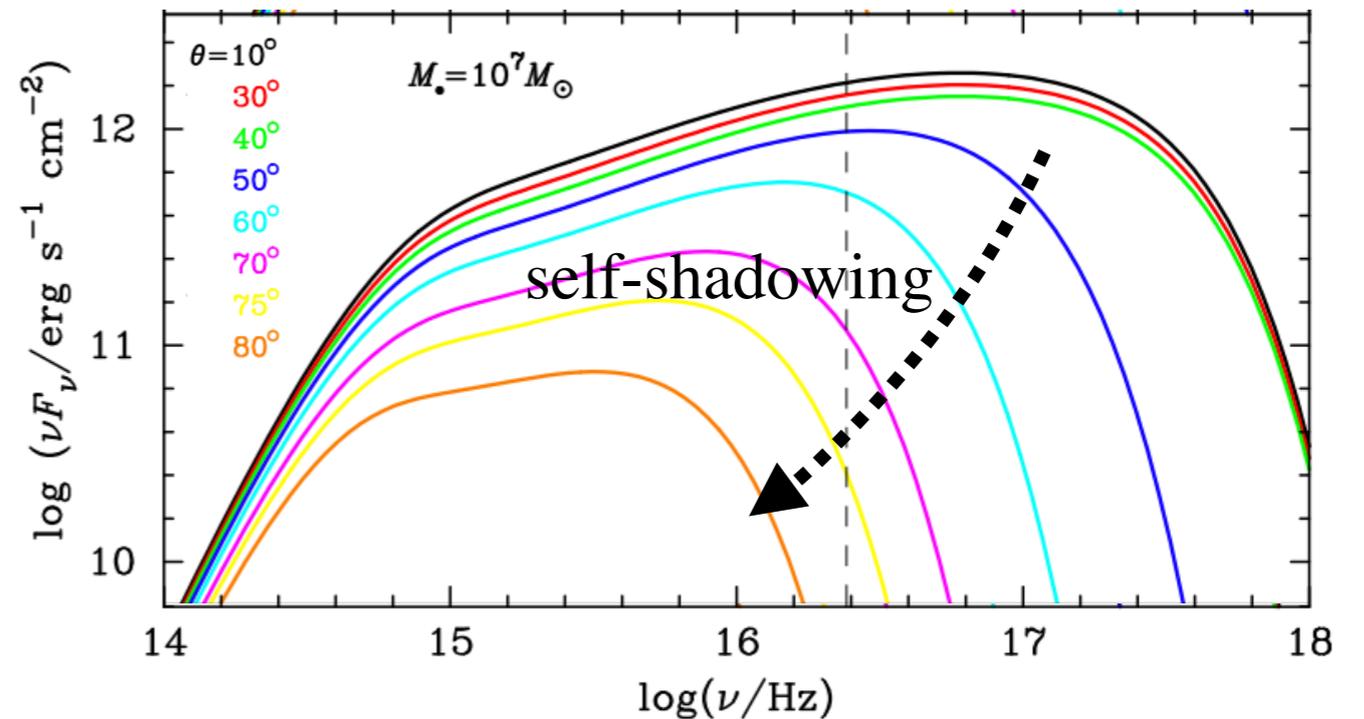
# H $\beta$ R-L のディスク影モデルの検証

Wang+2014



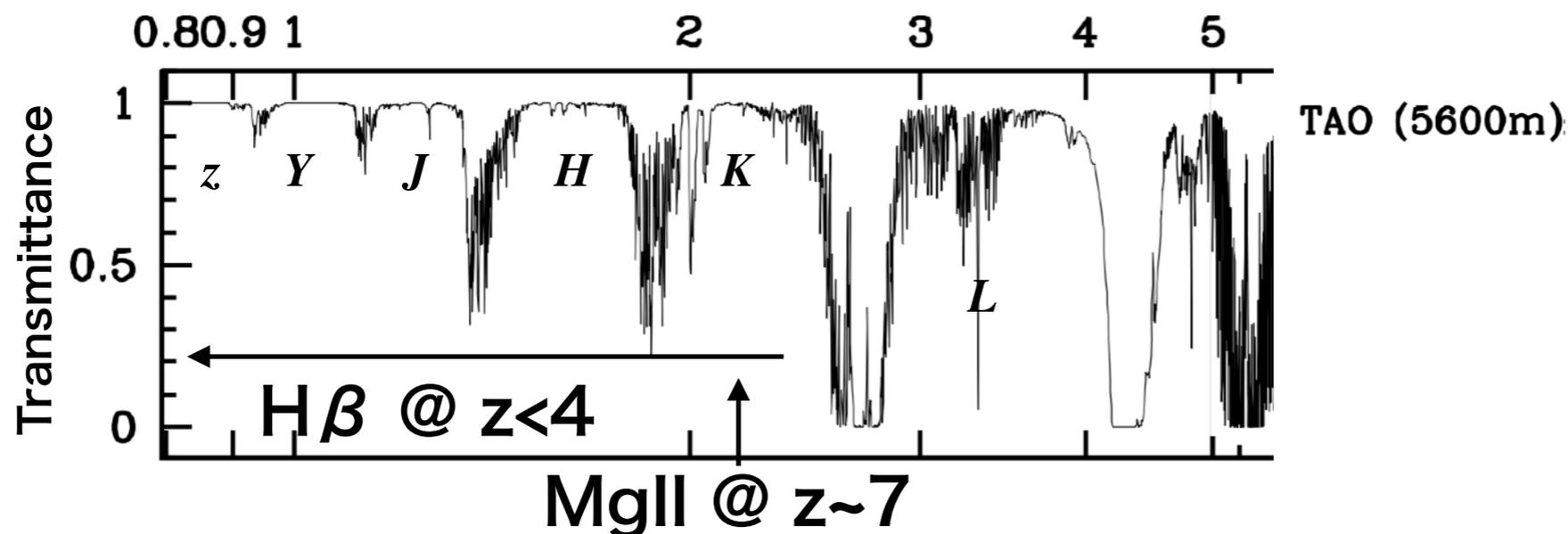
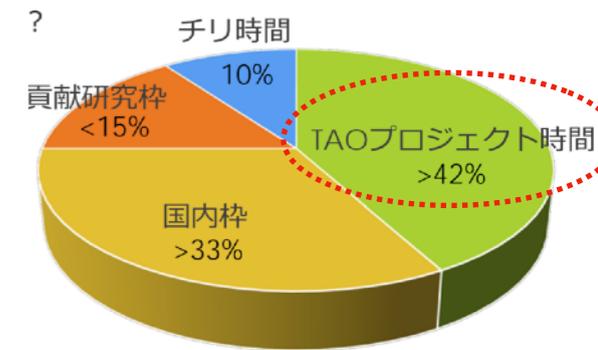
At **very** high accretion rate, disk's thick funnel (slim disk) **self-shadows** the ionizing photons

→ small  $R_{\text{BLR}}$  at high accretion rate



# TAO “*super MAGNUM*”

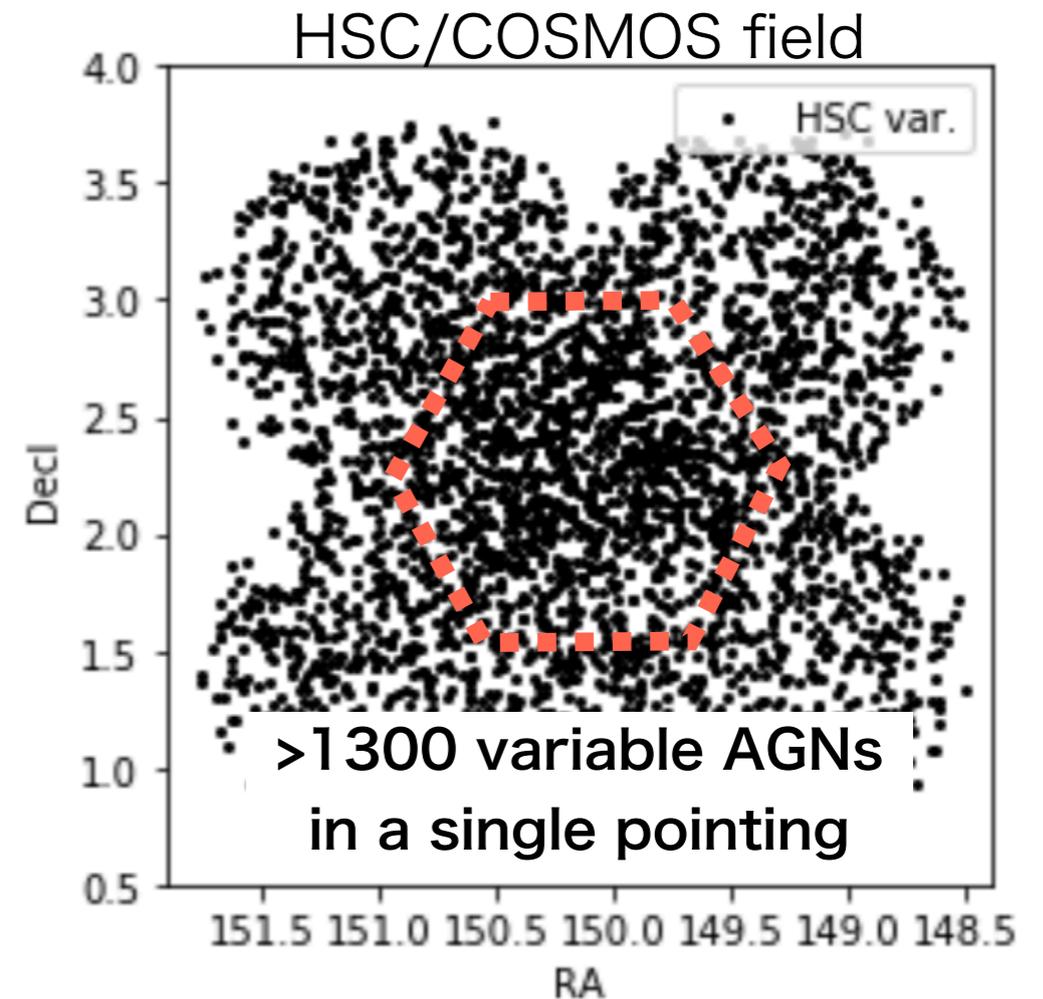
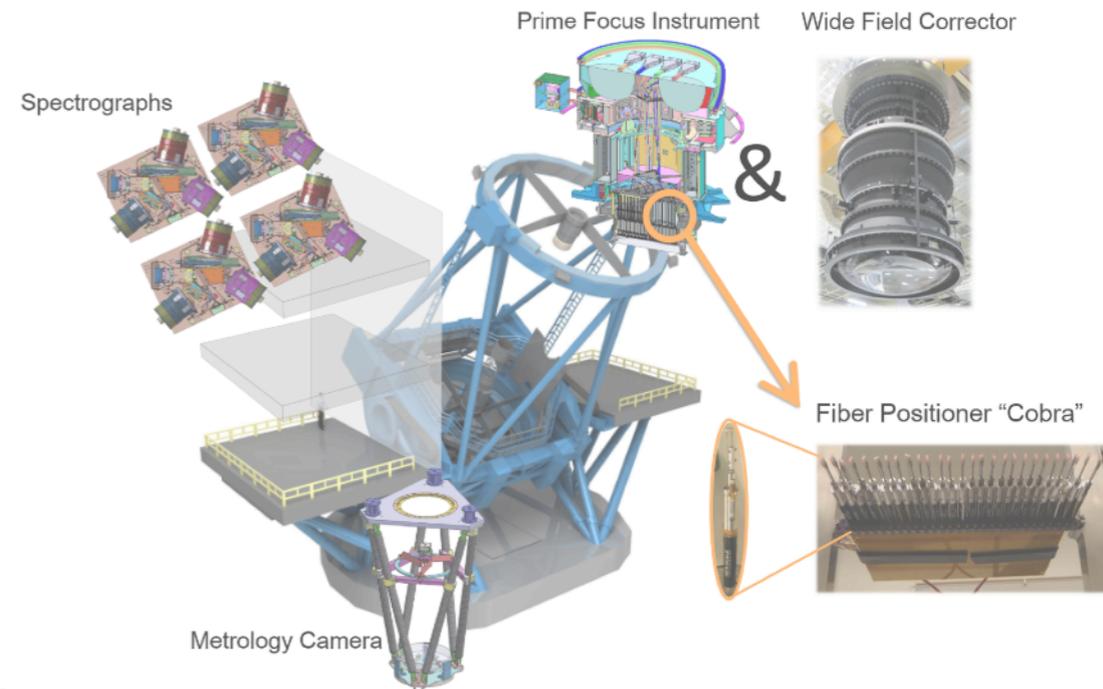
- Tokyo Atacama Observatory **6.5-m IR telescope** @5640 m Chajnantor, Chile. Science operation in 2023—
- **IR RM** for AGNs is one of the TAO’s key projects (“*Super-MAGNUM*”)
  - $H\beta$  RM at  $z < 4$  and  $MgII$  RM at  $z > 1$
  - $MgII$  **RM-based  $M_{BH}$**  for  $z \sim 7$  AGNs !? (monitor for  $\sim 10$  yrs)
  - Survey simulations and sample selection are ongoing ... (MK+)



# Subaru/PFS-RM

Higher- $z$ , higher-S/N,  
wider- $\lambda$  version of SDSS-RM

- Subaru Prime-Focus multi-object Spectrograph with **2400** fibers, covering **0.4 — 1.26  $\mu\text{m}$**  ( $J$ -band)
- ~~PFS/SSP~~  $\rightarrow$  Subaru Intensive program
  - Plan: 1 obs. (1 hr) per month, 3 years
  - $\sim 2$  mag deeper than SDSS-RM
- Photometry light curve from *LSST* ? (J. Trump)



# Subaru/PFS-RM

Higher-z, higher-S/N,  
wider- $\lambda$  version of SDSS-RM

- RM for two lines in each of AGNs  
→ inter-calibration between the two
- Survey light curve simulations
  - Success rate ~ 20%

→ lag detections in  
**100 – 200 AGNs** are expected

