

2024/12/10-12

第15回光赤外線天文学大学間連携（OISTER）ワークショップ

周期光度変動を示す極高光度クエーサーの長期多色モニター観測

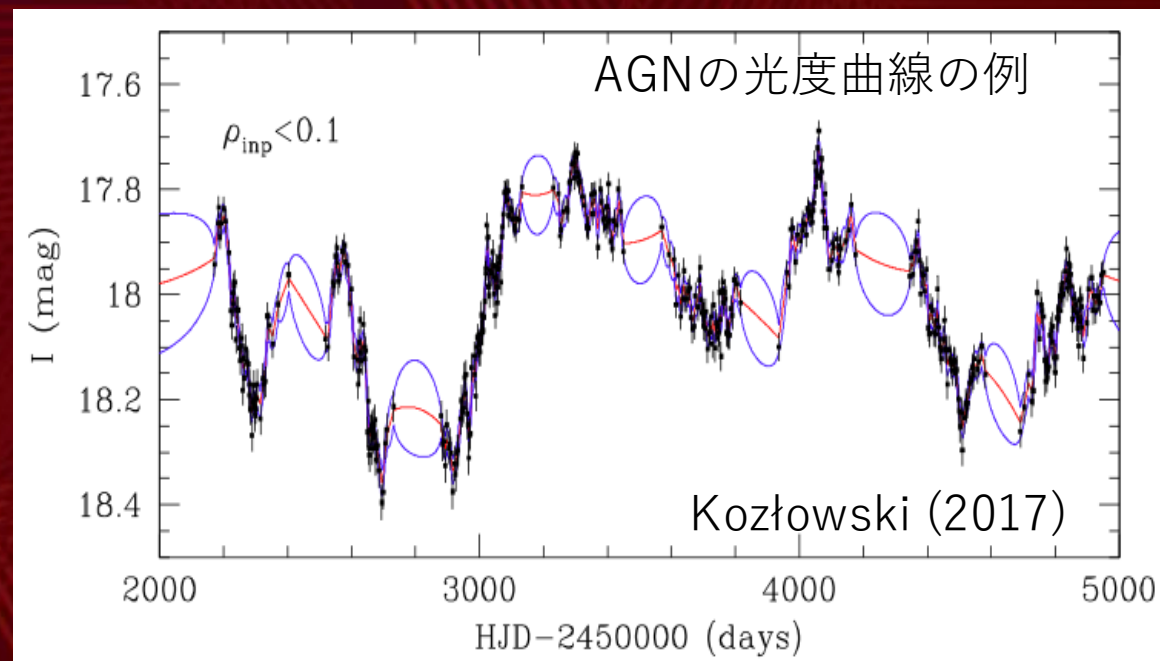
東京大学 天文学教育研究センター

堀内 貴史

Horiuchi et al., PASJ, accepted (11/2024)

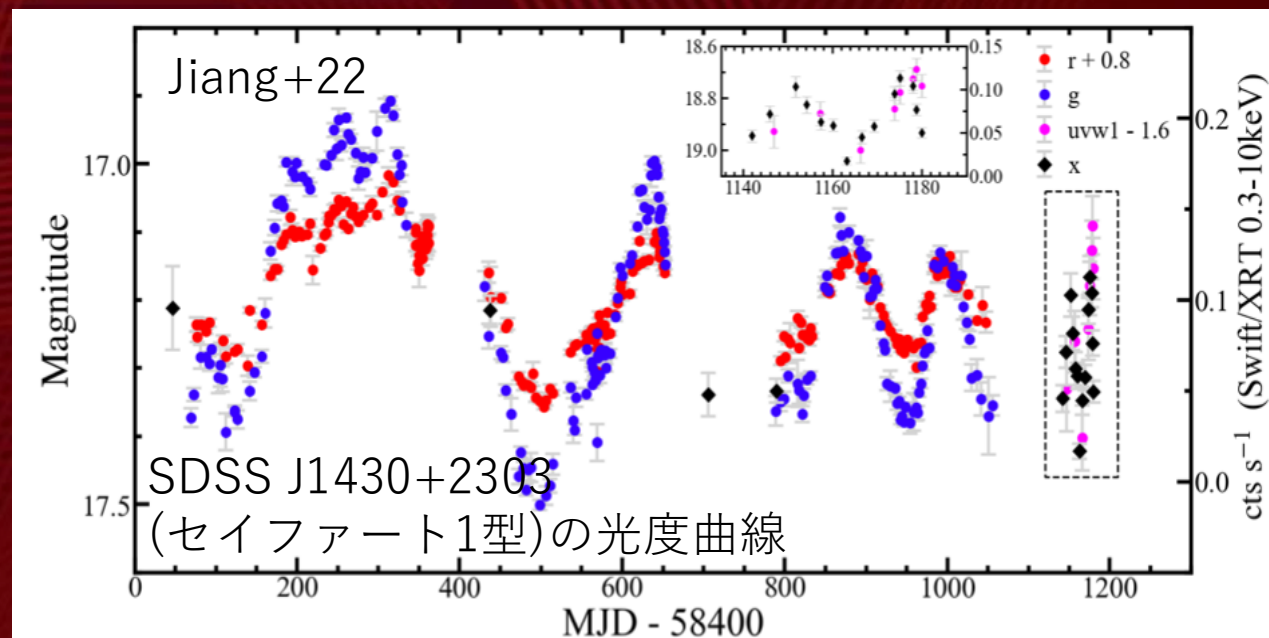
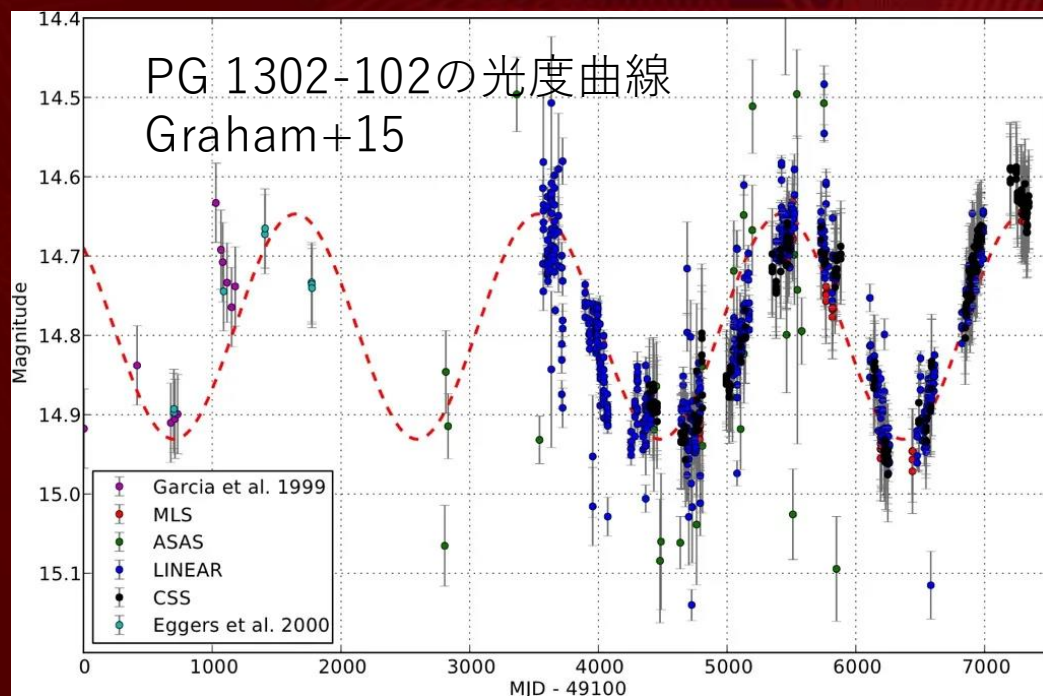
クェーサーの光度変動

- クェーサー: 宇宙最大規模の明るさをもつ, 活動銀河中心核 (AGN) の一種. 通常のセイファート銀河より1-2桁明るい.
- クェーサーの重要な性質: 光度変動
 - 変動は一般にはランダム. 光度変動を damped random walk でモデル化する試みもある (Kelly+09).
 - しかし, 周期的に見える変動 (QPO) が先行研究で同定された (e.g., Graham+2015).



AGNに見られる周期的な光度変動

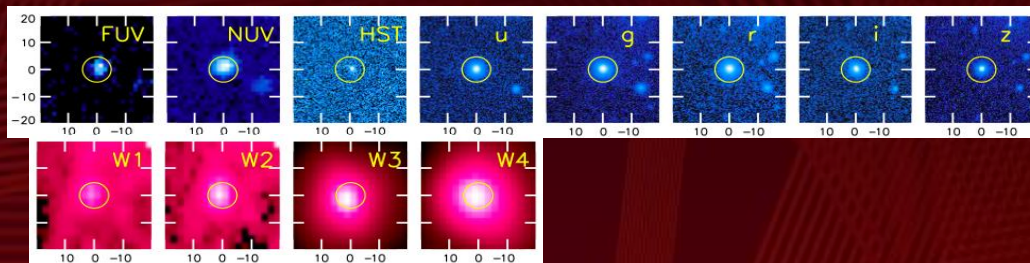
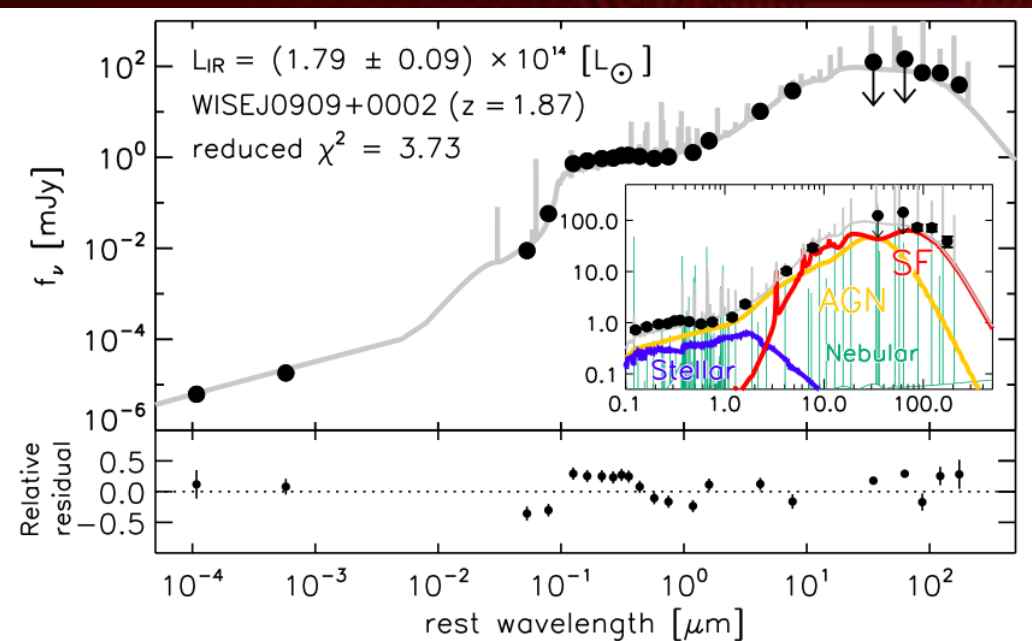
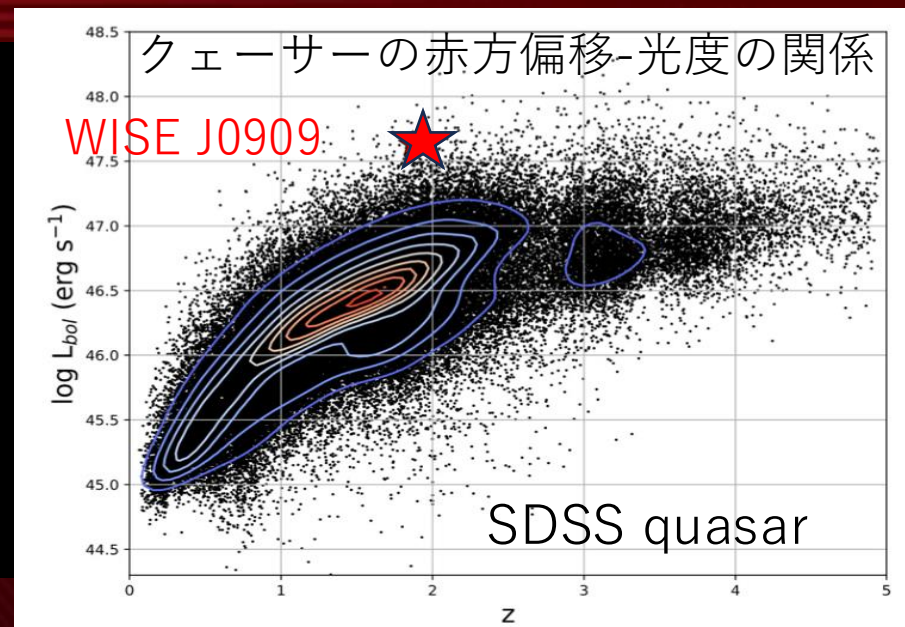
- PG 1302-102: Graham+15によって正弦関数で表せるような周期的な光度変動 (quasi-periodic oscillation, QPO: 5.2年周期)が同定されたクェーサー
 - 以降は複数のAGNで周期光度変動が同定されている (偽検出も多々あり)
 - 近年はブラックホールバイナリの合体直前の候補天体が注目されている (Jiang+22).



極高光度クェーサー-WISE J0909+0002のモニター観測

• WISE J0909+0002

- 非常に明るいクェーサー ($z=1.87$, $V=16.5$ mag)
- 赤外線で非常に明るい天体 (ELIRG; $L_{\text{IR}} > 10^{14} L_{\odot}$)
としても同定されている (Toba+2021).
 - $L_{\text{IR}} = 1.79 \times 10^{14} L_{\odot}$
- ブラックホール質量: $10^{9.9} M_{\odot}$ (非常に稀な天体)

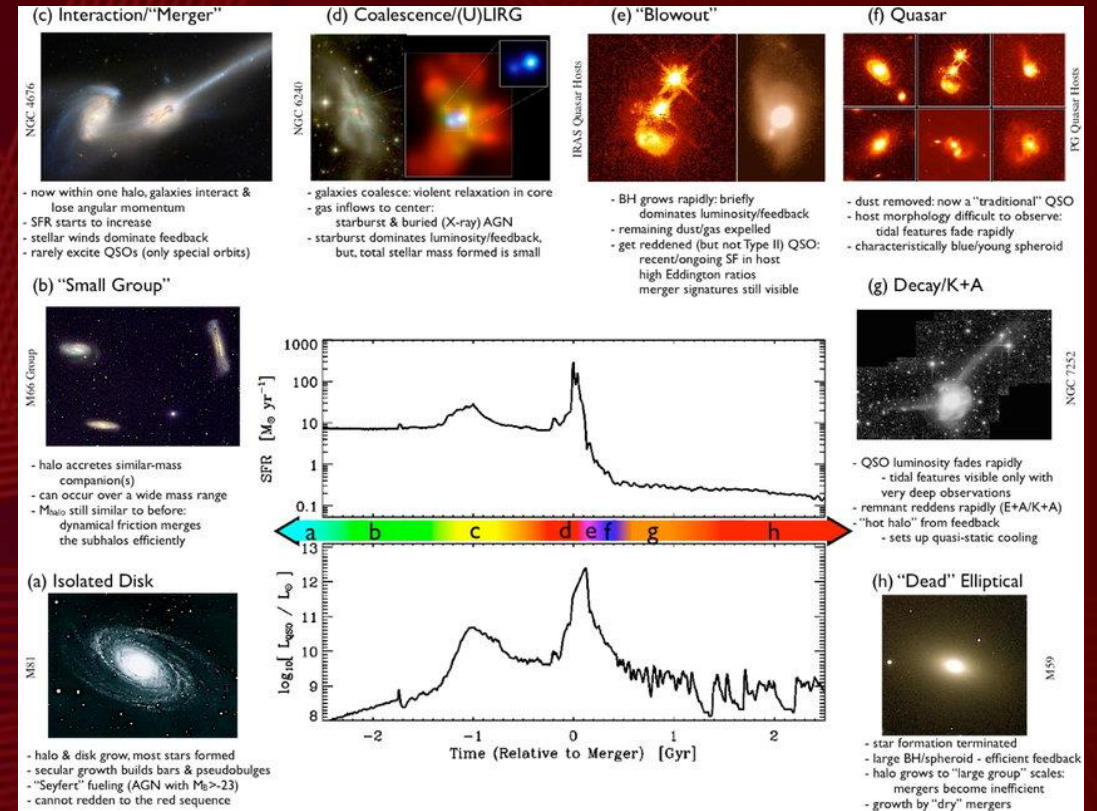


BH properties (Sect. 3.2)

$L_{\text{bol}} (\text{erg s}^{-1})$	$(4.3 \pm 0.6) \times 10^{47}$
$M_{\text{BH}} (M_{\odot})$	$(7.4 \pm 0.3) \times 10^9$
λ_{Edd}	0.4 ± 0.1
$\kappa_{\text{X}} (= L_{\text{bol}}/L_{2-10\text{keV}})$	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^2$

研究の目的

- WISE J0909+0002は共進化のピーク段階
 - 測光モニター観測によって銀河進化の過程における衝突と大質量ブラックホールバイナリーの関連性やその他物理過程に示唆を与えたい。
- 周期光度変動のいくつかのシナリオ
 - バイナリー大質量ブラックホール (BSBH)の相対論的ドップラーブースト (e.g. D'Orazio 2015)
 - 電波ジェットの時差運動。



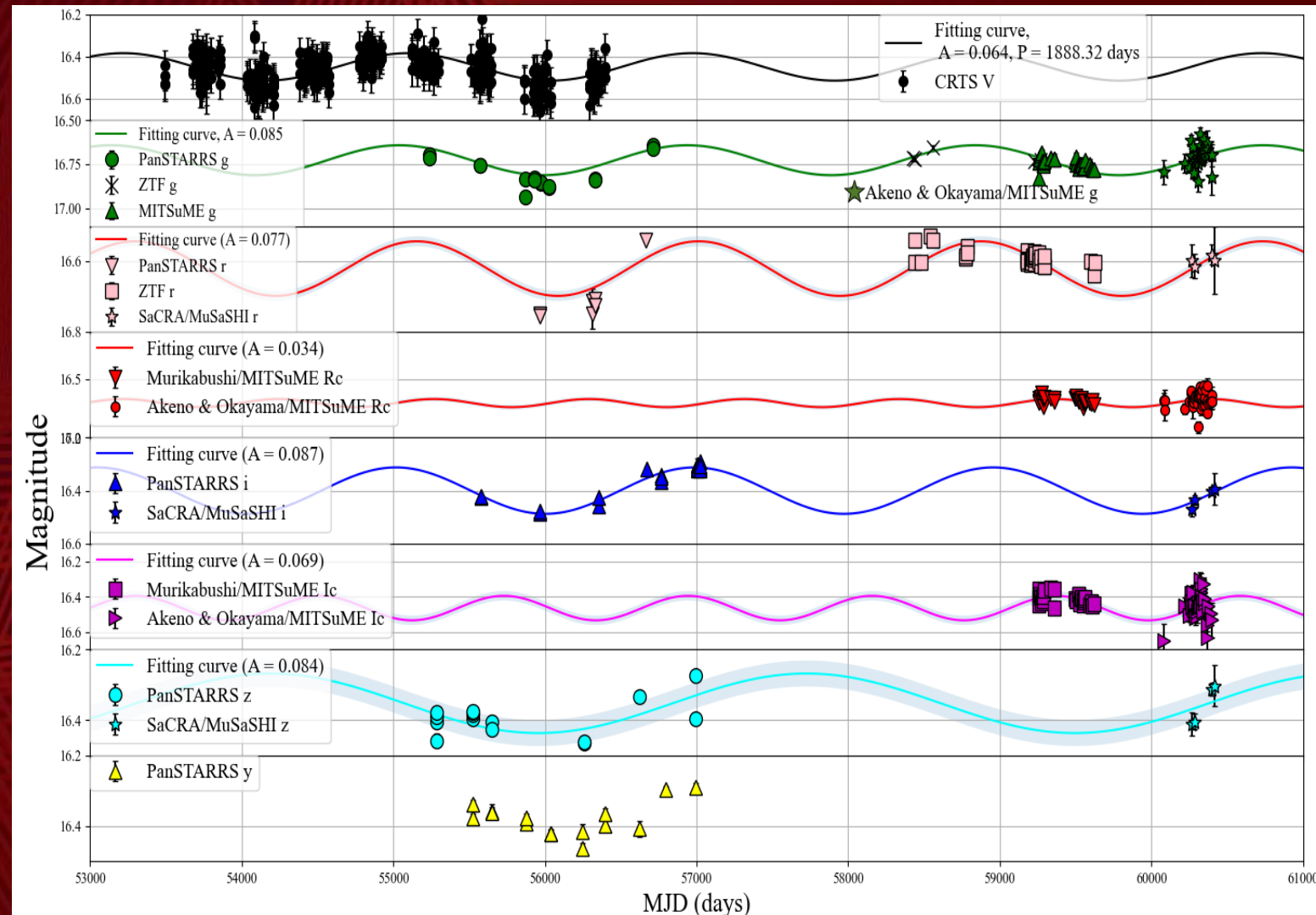
Hopkins+08

★降着円盤の時差運動: opticalとNUVの放射領域のサイズが同等で時差運動が困難 (Zhang 2022)

★連星の軌道運動: 光度曲線を再現できないほど周期が長い (Millon+2022)

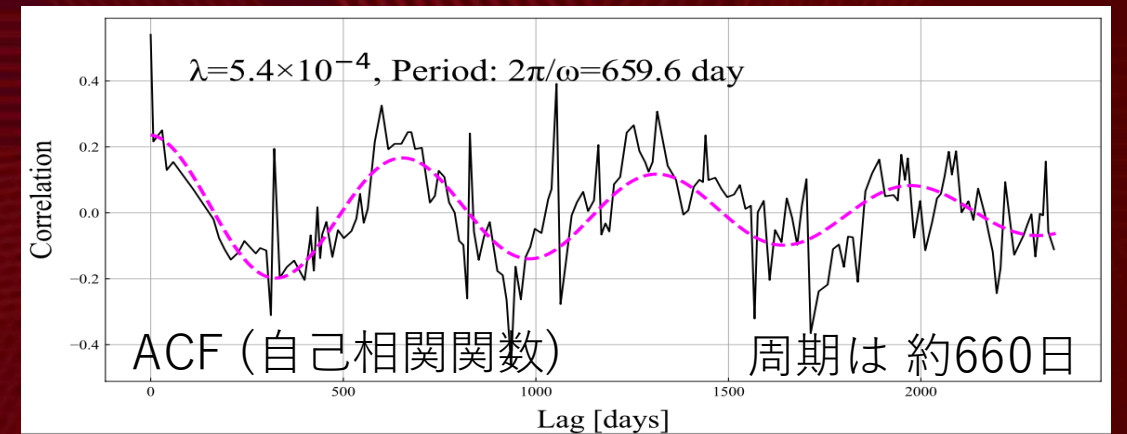
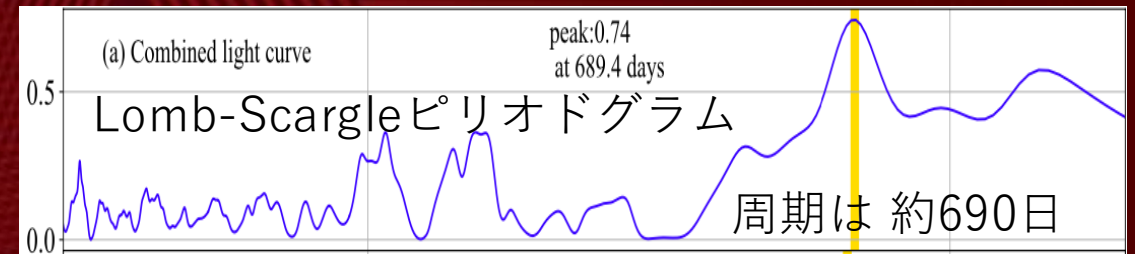
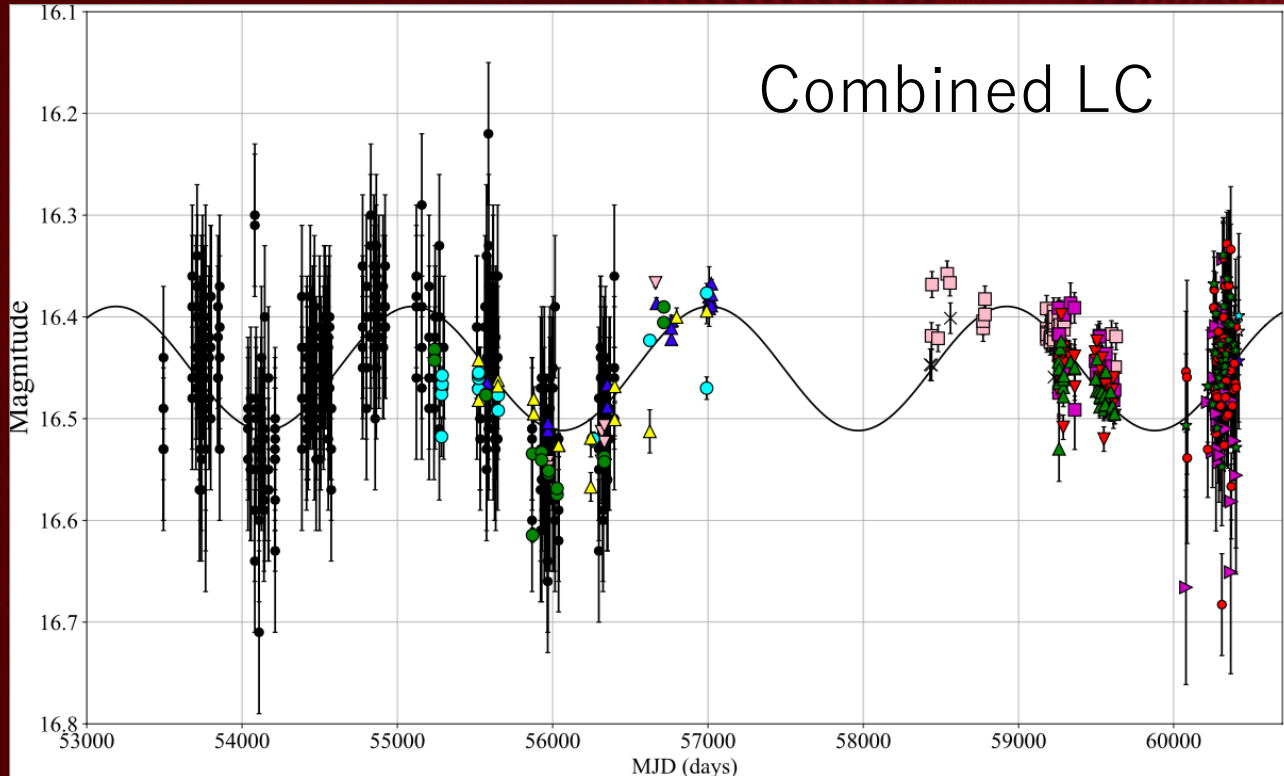
WISE J0909+0002の光度曲線

- アーカイブ: CRTS (V), PanSTARRS ($grizy$), ZTF (gr)
- OISTER+ α : 明野・岡山, むりかぶし/MITSuME (g, Rc, Ic), SaCRA/MuSaSHI (r, i, z)
- 改訂点: ZTFのデータでbadflagがあるものは除いている.



WISE J0909+0002の周期

- 周期は静止系で660-690日程度.

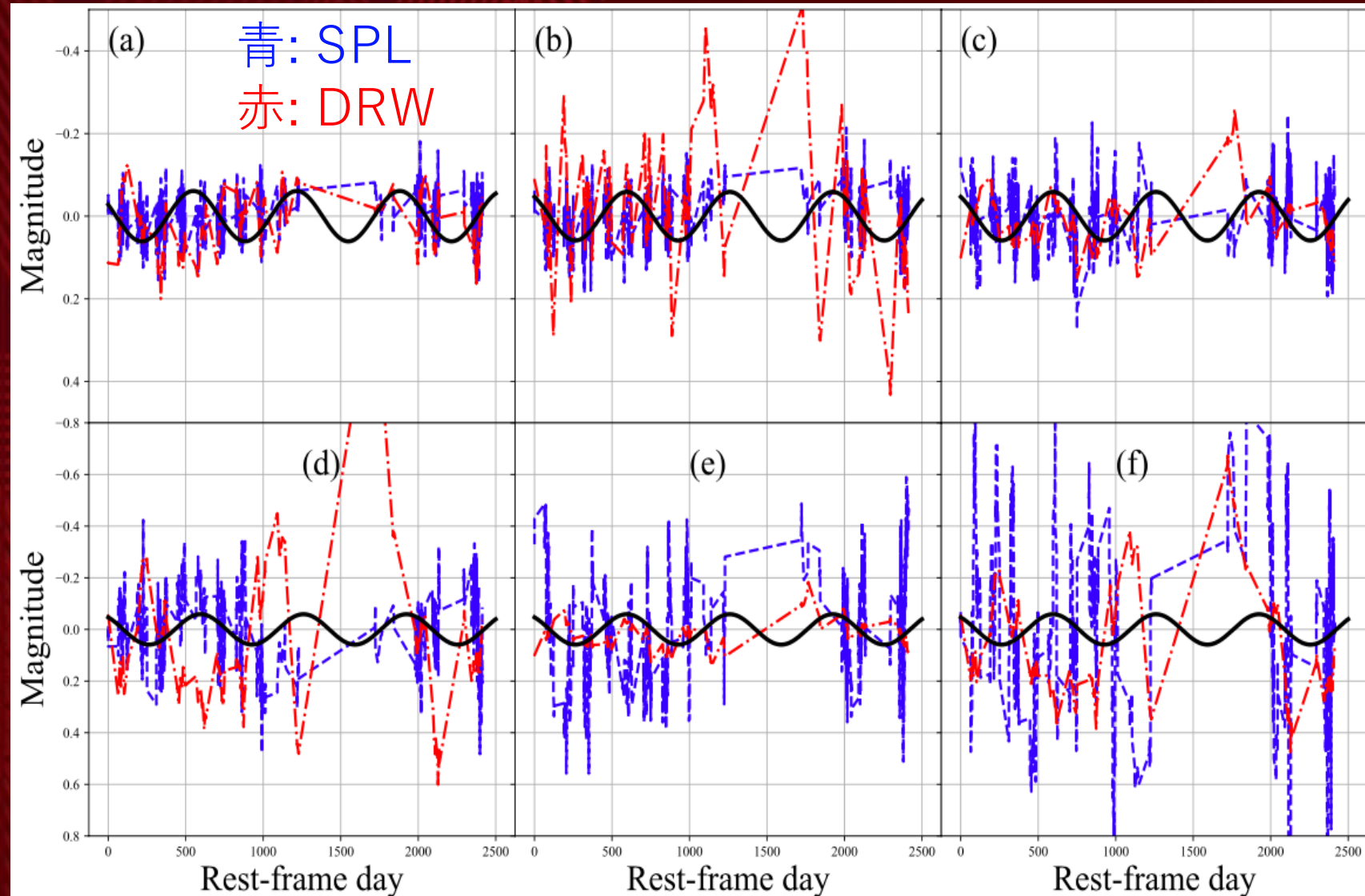


- Lomb-Scargle法はまばらに取得されたデータの周期の評価に有用
→ Lomb-Scargleピリオドグラムを作成 (周期は 約690日)
- ACFに関しては周期は660日程度.

光度曲線のシミュレーション

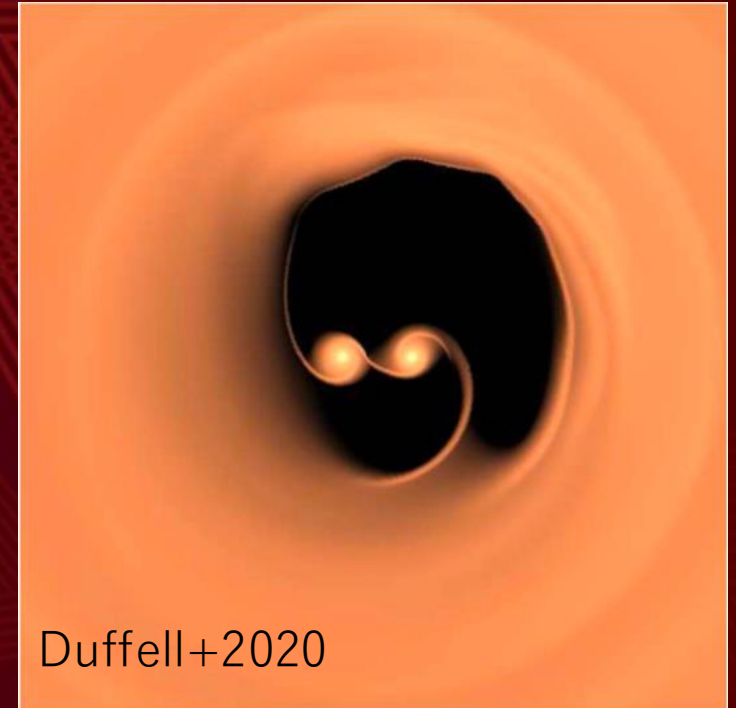
8/13

- 偶然に周期性が再現される可能性があることを考慮.
- 2つのモデル(single power-lawとdamped random walk)で10000回シミュレーション.
- Periodic-likeかつ Combined LCよりベストフィットモデルに近い曲線が生成できてしまった(e).



相対論的ドップラーブーストについて

- 相対論的ドップラーブースト (D’Orazio+ 2015b)
BSBHs (mini-disks)同士が相対論的速度で周期運動.
Doppler factor, \mathcal{D} の効果の分, 観測される
フラックスが影響を受ける.
- mini-diskと観測者との相対速度の変位が, 光度曲線
の振幅に反映される.



Doppler factor

$$\mathcal{D} = \frac{1}{\gamma (1 - v_{\parallel}/c)}$$

観測フラックス

$$\mathcal{F}_{\nu}^{\text{obs}} = \mathcal{D}^{3-\alpha_{\nu}} \mathcal{F}_{\nu}^{\text{em}}$$

観測から37%のクエーサー(FUV)がドップラー
ブーストとconsistent (Charisi+2018)

相対論的ドップラーブーストの検証

- ドップラーブーストを仮定すると, 光度曲線の振幅 A ($=\Delta F_\nu/F_\nu$) は, $v \ll c$ では以下の形に従う

$$\frac{\Delta F_\nu}{F_\nu} = (3 - \alpha_\nu) \frac{v}{c} \cos \phi \sin i$$

α_ν, ϕ, i はそれぞれフラックス(power law)のべき, 軌道運動のフェーズ, 軌道傾斜角.

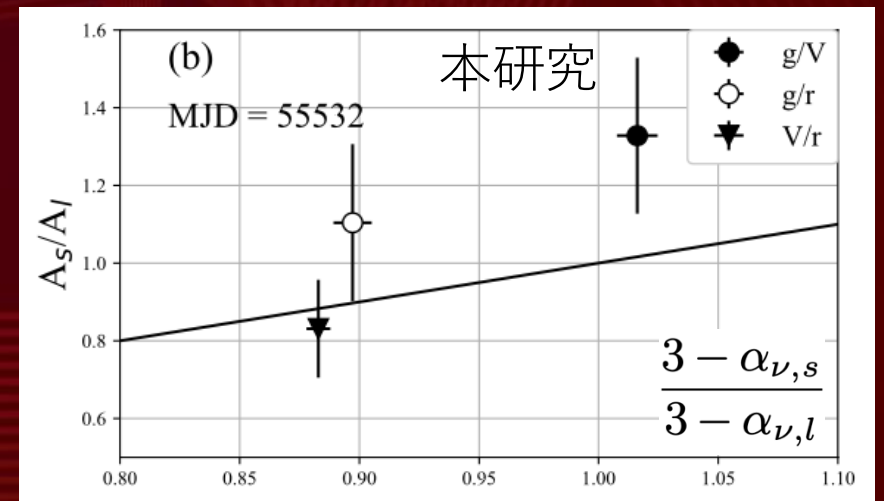
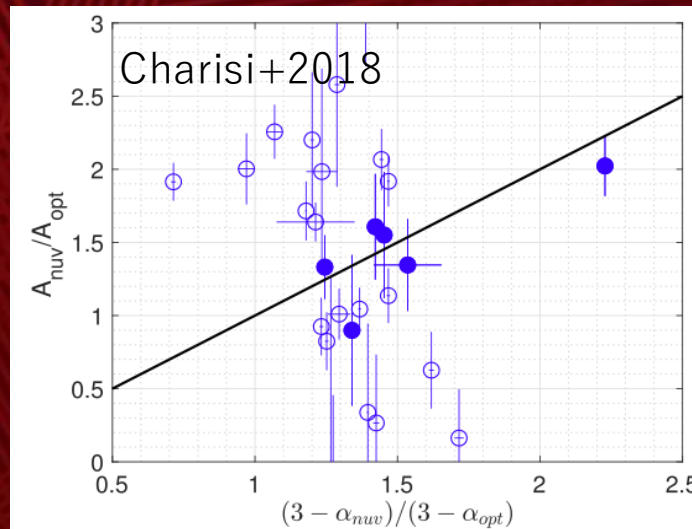
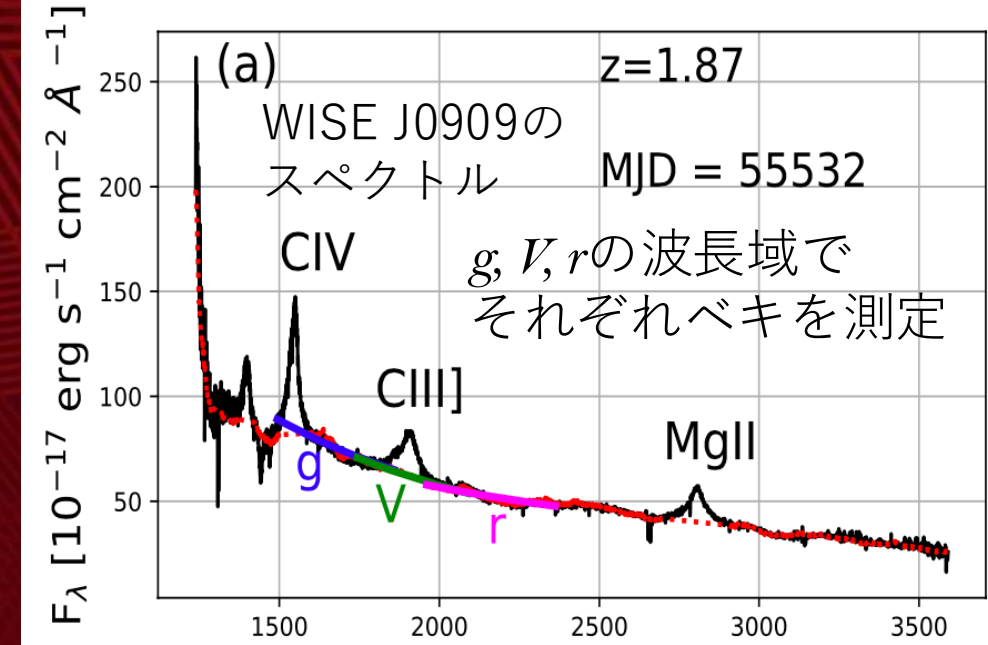
- 異なる波長間の振幅比, フラックスのべき α_ν の比を用いた理論との比較.

短波長側の振幅

$$\frac{A_s}{A_l} = \frac{3 - \alpha_{\nu,s}}{3 - \alpha_{\nu,l}}$$

長波長側の振幅

- 本研究では概ねドップラーブーストを支持.



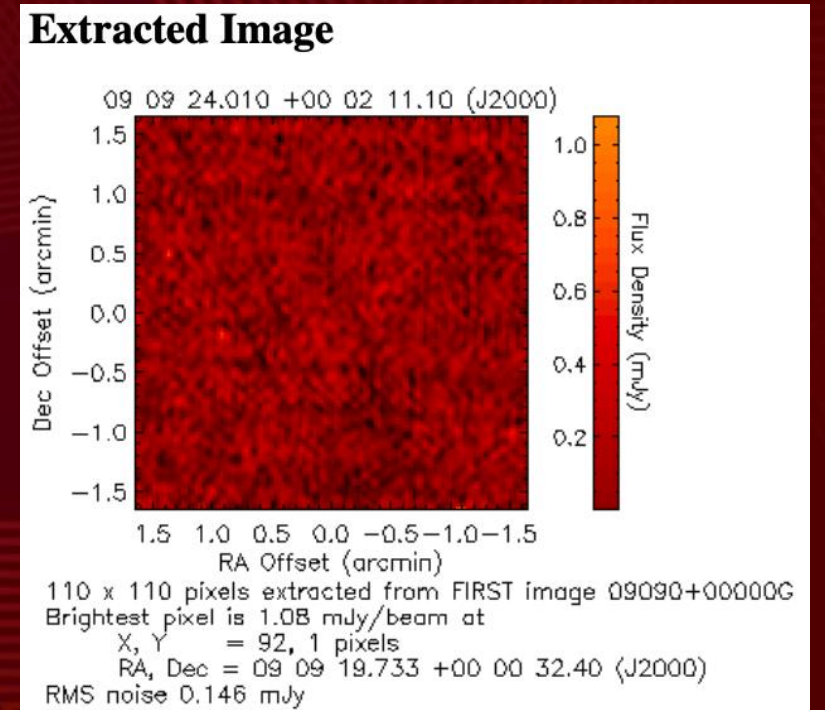
電波ジェット of 歳差運動の検証

- 電波ジェットの歳差運動によって, QPOが発生するというシナリオ
- しかしながら, VLT FIRSTでWISE J0909+0002のフィールドを探索したところ, 電波では検出されなかった(1 mJyのthreshold)



--> UV/optical fluxへのcontributionは期待できない
--> 電波ジェットの歳差運動シナリオは排除

- 先行研究の結果とconsistent (e.g., Chen+21).



大型望遠鏡でQPOの研究?

- 将来的にLSSTといった大型望遠鏡のサーベイによって、暗いAGN等に対しても精度良くQPOが調査できるかもしれない。

→ 多色測光で、BSBH周りの円盤のサイズに制限を加えられる可能性。

- 暗いAGN等のQPOに対して、ドップラーブーストを検証すべく、別の大型望遠鏡を用いた分光観測でフォローアップ!

→ スペクトルの変位を調査。

© VERA C. RUBIN OBSERVATORY

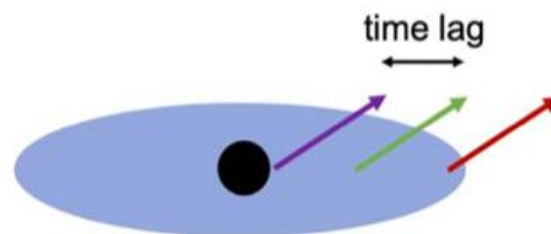


<https://gallery.lsst.org/bp/#/>



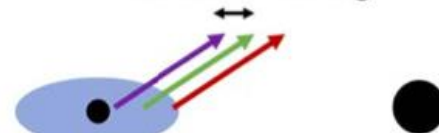
Liu+2024

single AGN disk



shorter time lag

secondary minidisk



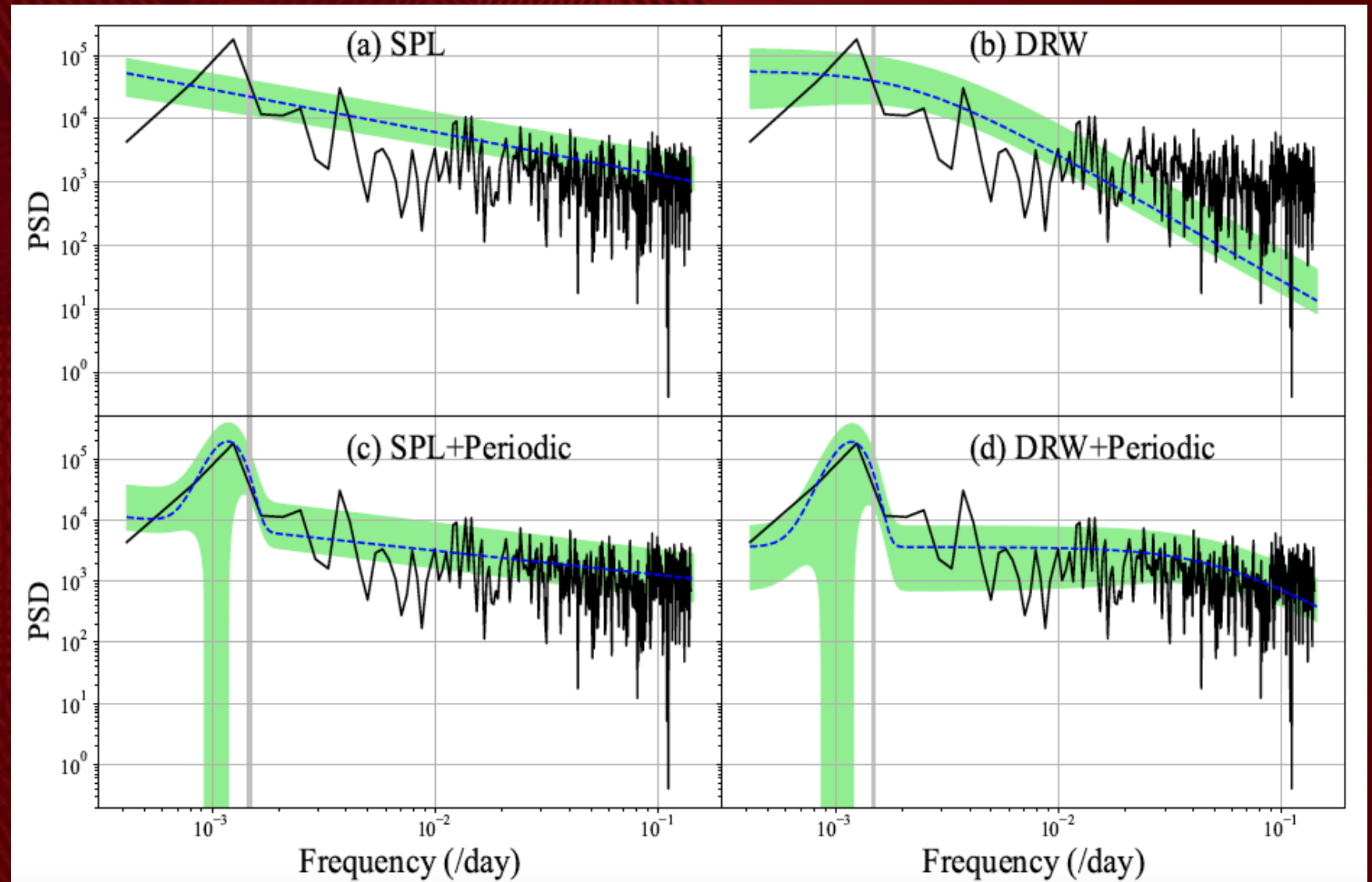
まとめ

- ターゲット天体のWISE J0909+0002はクェーサーを内包するELIRGかつ、光度曲線周期性が継続している可能性のある非常に稀有な天体 (660-690日周期, 3.6周期分).
 - WISE J0909+0002の観測は銀河進化の過程における衝突と大質量ブラックホールバイナリーの関連性に示唆を与えられる可能性を秘めている.
 - 偶然光度曲線が周期的になっているだけの可能性も完全には否定できない, ということがDRWのシミュレーションによりわかった.
 - BSBHによるドップラーブーストと概ね矛盾のない結果.
 - 電波ジェットの歳差運動シナリオは可能性が低い.

光度曲線のパワースペクトル密度

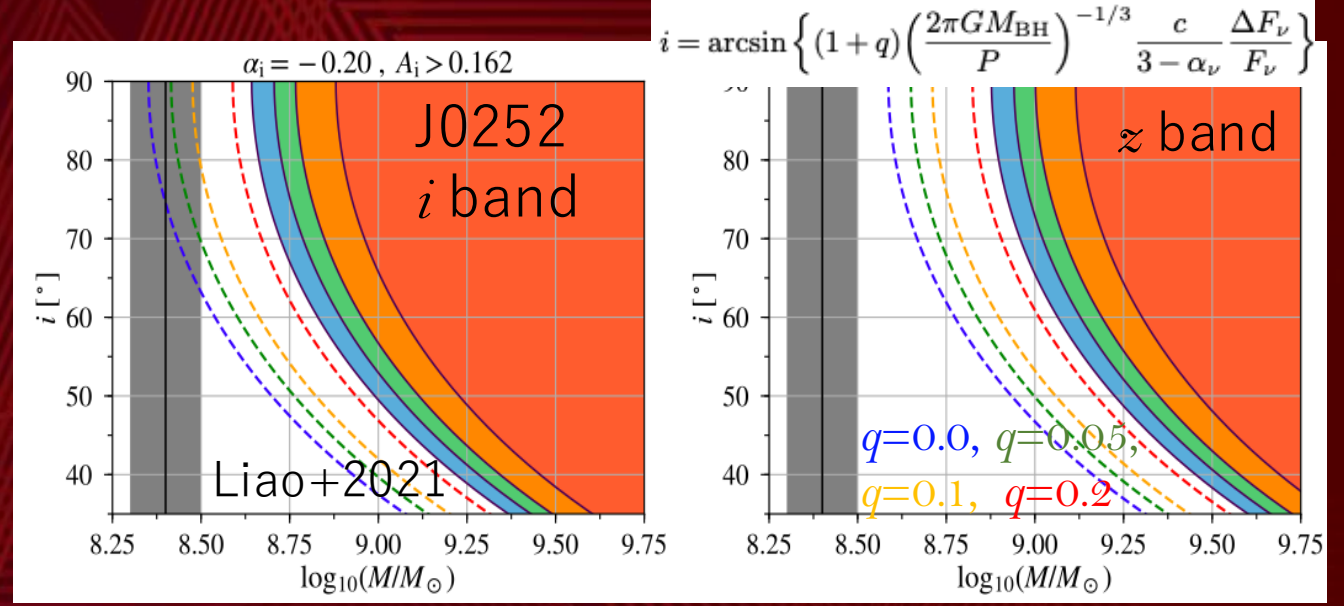
- 周期があればパワースペクトル密度にピークがみられるはず.
- そうでなければnoisyな傾向を見せる.
- 本研究ではノイズと周期性+ノイズの計4つのモデルの適合性を検証

--> 周期性+SPLが最も適合する結果に.

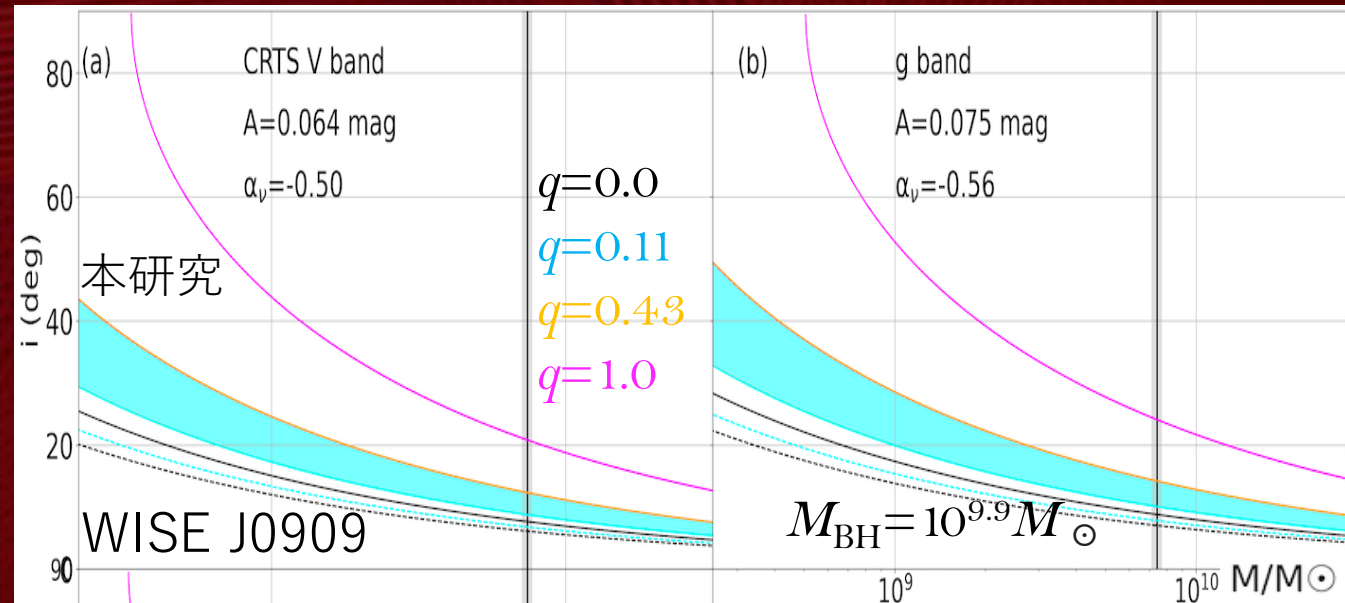


相対論的ドップラーブーストの検証2

- 軌道傾斜角 i とブラックホール質量 M_{BH} の関係を binary BH の質量比 $q = (M_2/M_1)$ 毎にプロット ($i = 90^\circ$: edge on)
- Liao+2021 (天体: SDSS J0252) では parameter space が殆どなくドップラーブースト説は可能性が低い.
- 一方, $q = 0.11, 0.43$ 等で WISE J0909 では $i > 10^\circ$ にパラメータスペースをもつ.
- CRTS V, g', r band は同様の傾向.

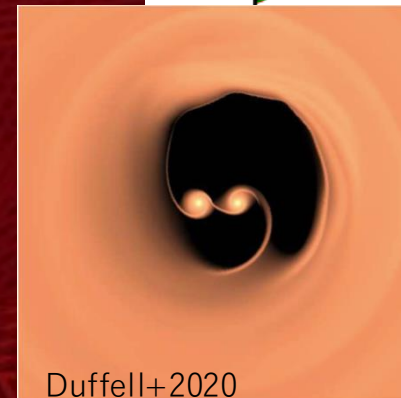
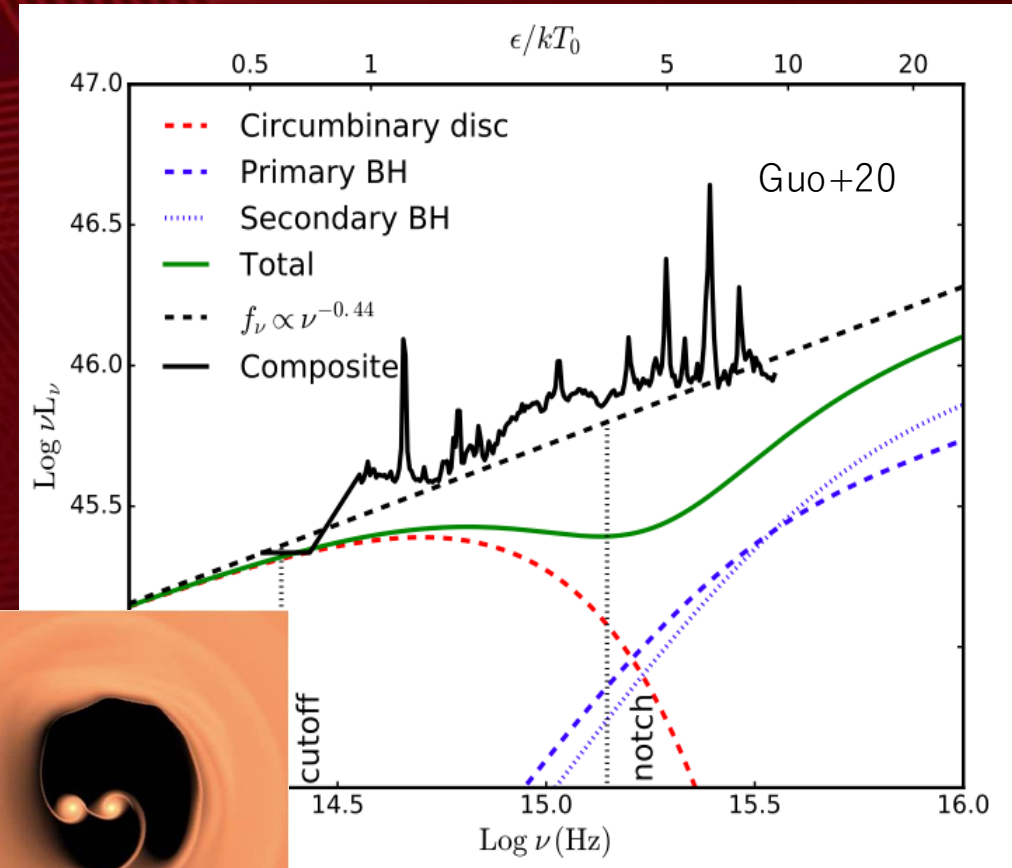


実線: secondary disk の luminosity contribution = 80%



その他BHバイナリ説へのアプローチ

- 多くのクェーサーサンプルは典型的には1.5周期分の光度曲線しか得られていない。
=> 偽検出は常に起こりうる (Vaughan+16)
- BHバイナリによる光度変動はもっとレアなのは?
- Circumbinary disk model (CBD; Roedig+14)によればAGNフラックスの紫外域においてdiskの構造に由来するcut-offが見られる
=> 周期変動クェーサー138天体中**7天体**で確認 (Guo+20).



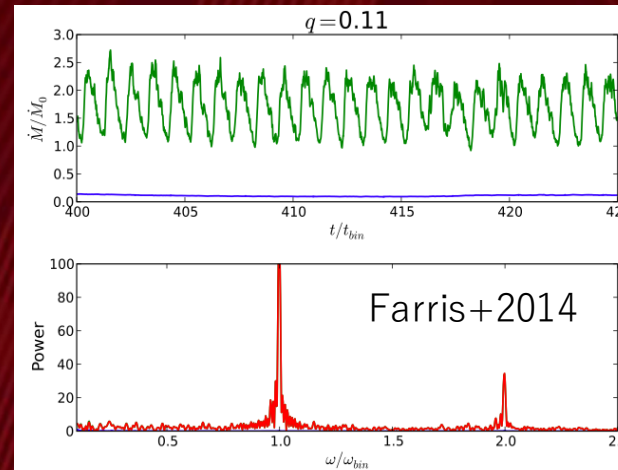
cut-off温度

$$T_{\text{cut-off}} \simeq 2.0 \times 10^4 \left[\dot{m} \left(\frac{\eta}{0.1} \right)^{-1} M_8^{-1} \left(\frac{a}{100 R_g} \right)^{-3} \right]^{1/4} \text{ K}$$

CBDモデルの検証

- WISE J0909+0002の紫外-近赤外 SED(黒)に対して, CBDモデル(シアン)を検証

- 質量比 $q = 0.11, 0.43$ で検証
- SEDがCBDモデルと合っていない
 - SEDからはCBDモデル特有の凹み(青縦線付近)がみられない
 - 長波長側は全く合っていない
- ただしCBDではNUV, FUVのdrop-offもまた予想される (ex. Mrk 231の SED, Yan+2015)



Binary disk質量比 q の値によってはpowerがdouble peakに ($q = 0.11, 0.43$)

