

周期光度変動を示した極光度 クェーサーのフォローアップ観測

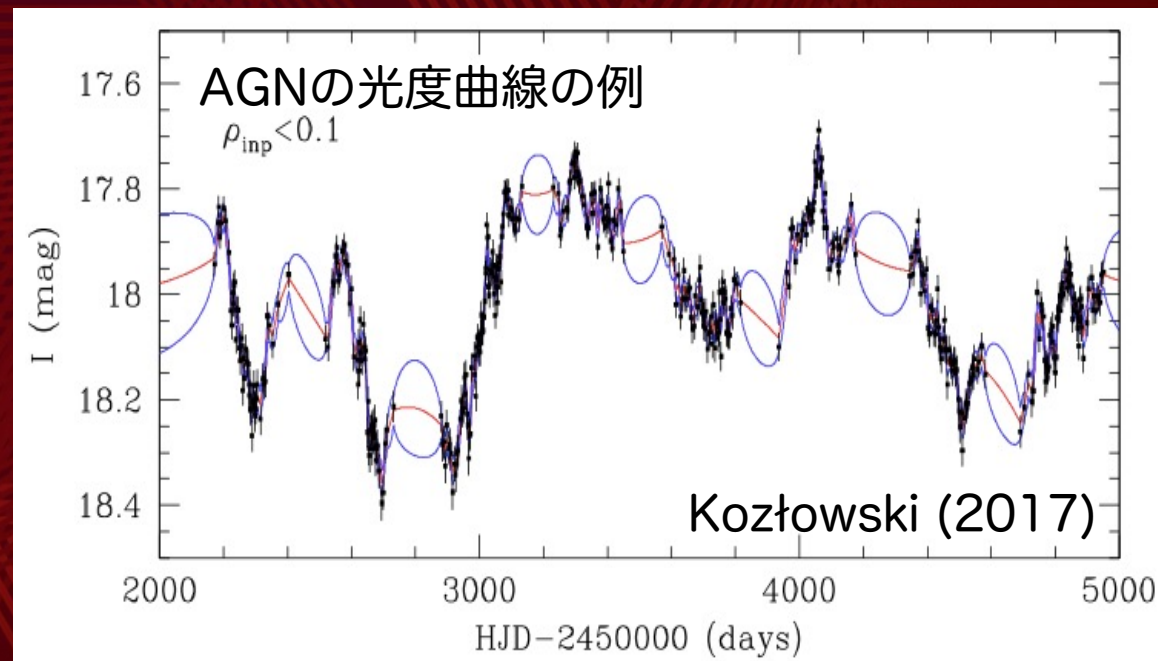
東京大学 天文学教育研究センター
堀内 貴史

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.
- 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, クェーサーの周期的に見える変動(QPO)が2015年に同定された.

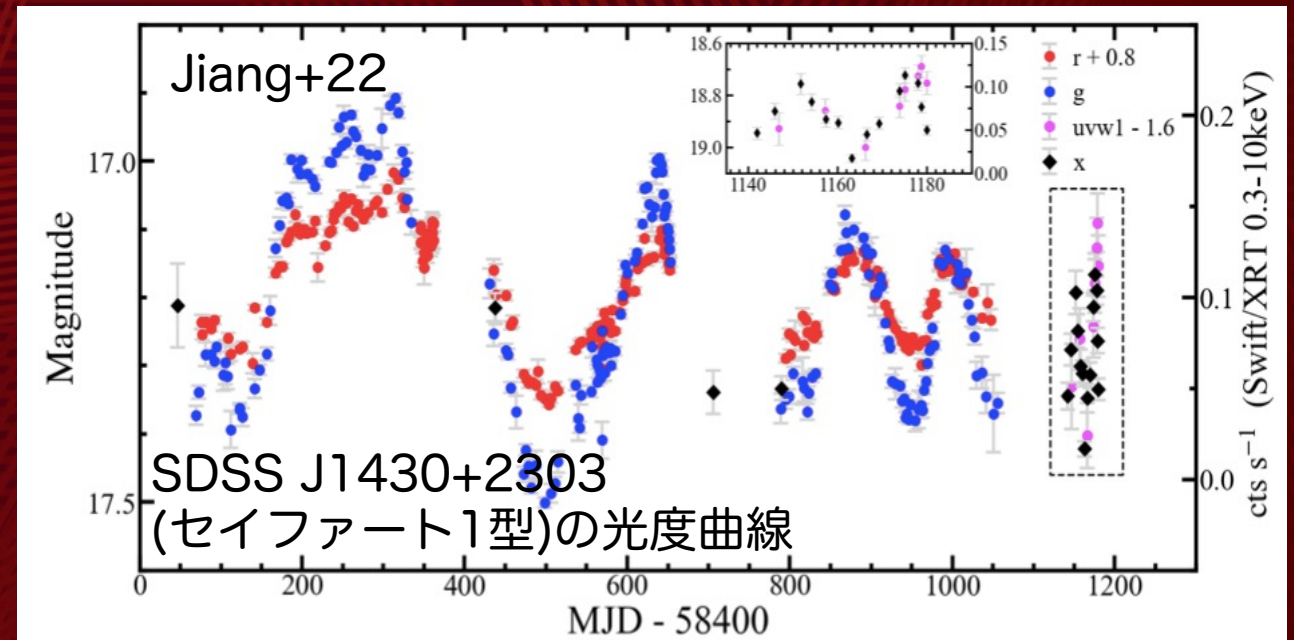
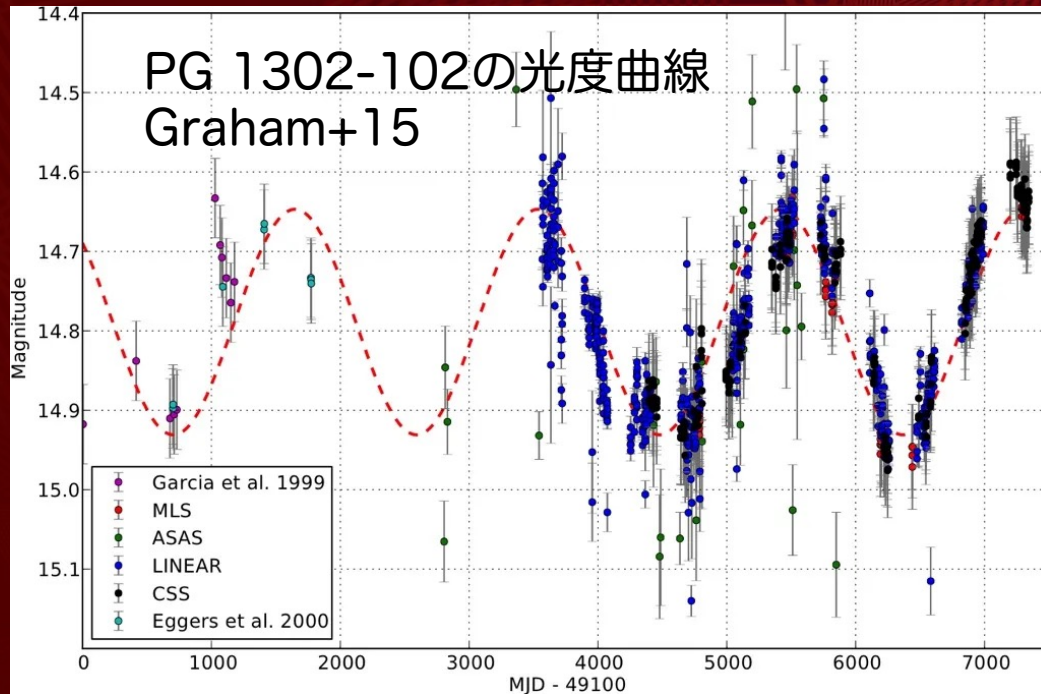


Credit: NASA, ESA and J. Olmsted (STScI)



AGNに見られる周期的な光度変動

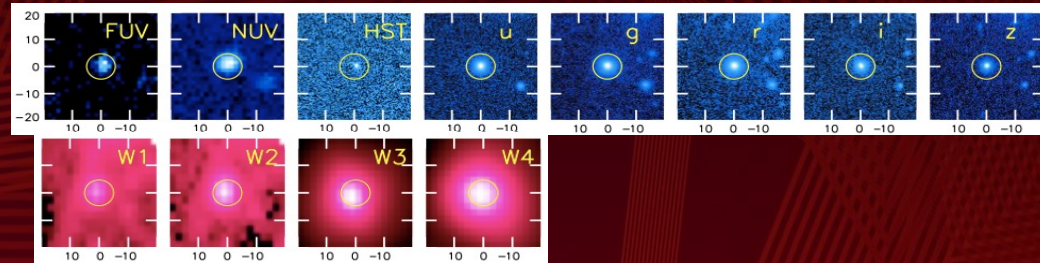
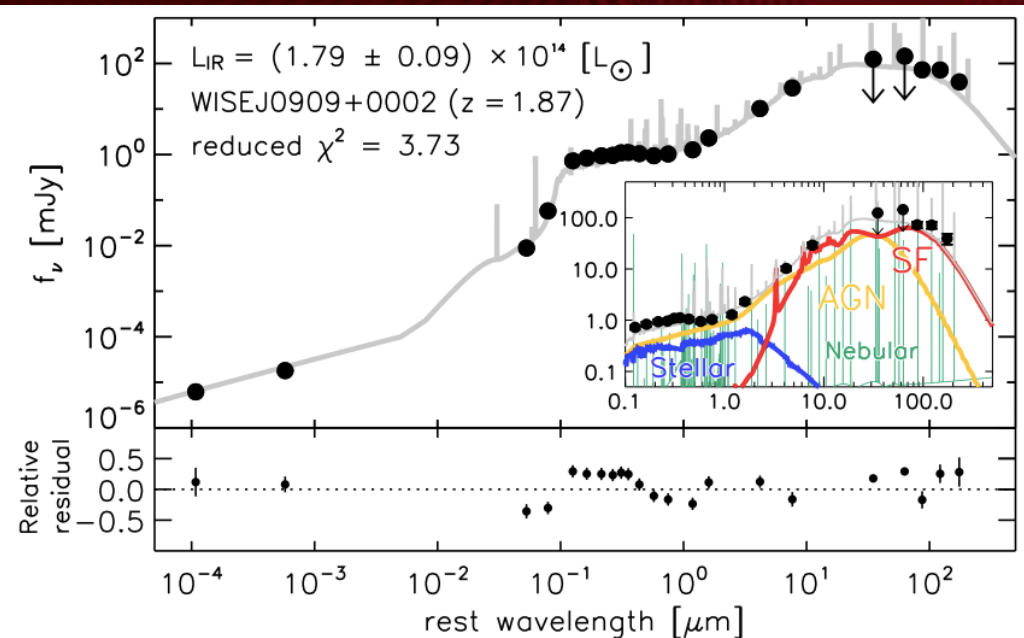
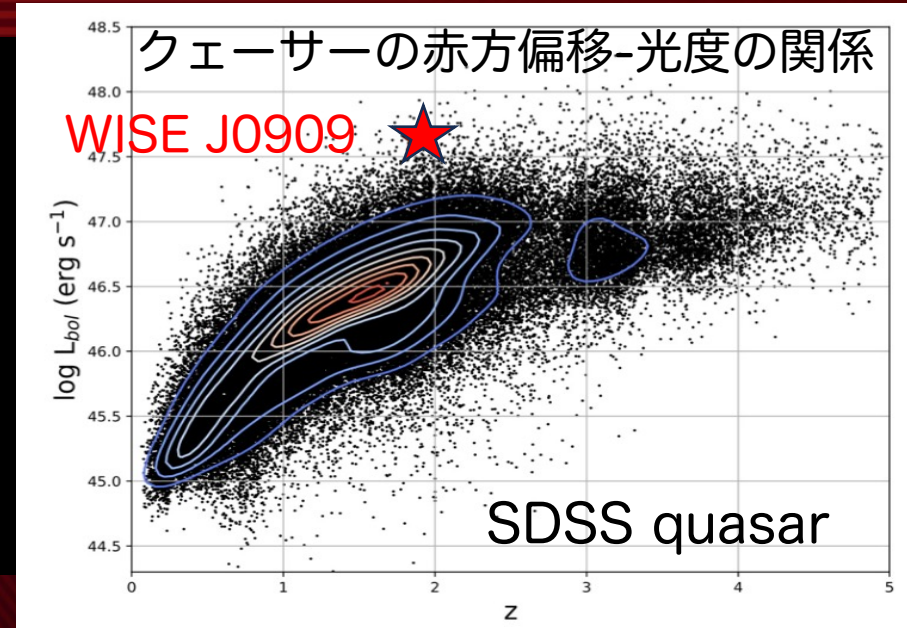
- PG 1302-102: Graham+15によって正弦関数で表せるような周期的な光度変動(5.2年周期)が同定されたクェーサー
 - 以降は複数のAGNで周期光度変動が同定されている (偽検出も多々あり)
 - 近年はブラックホールバイナリの合体直前の候補天体が注目されている (Jiang+22).



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: $10^{9.9} M_{\odot}$

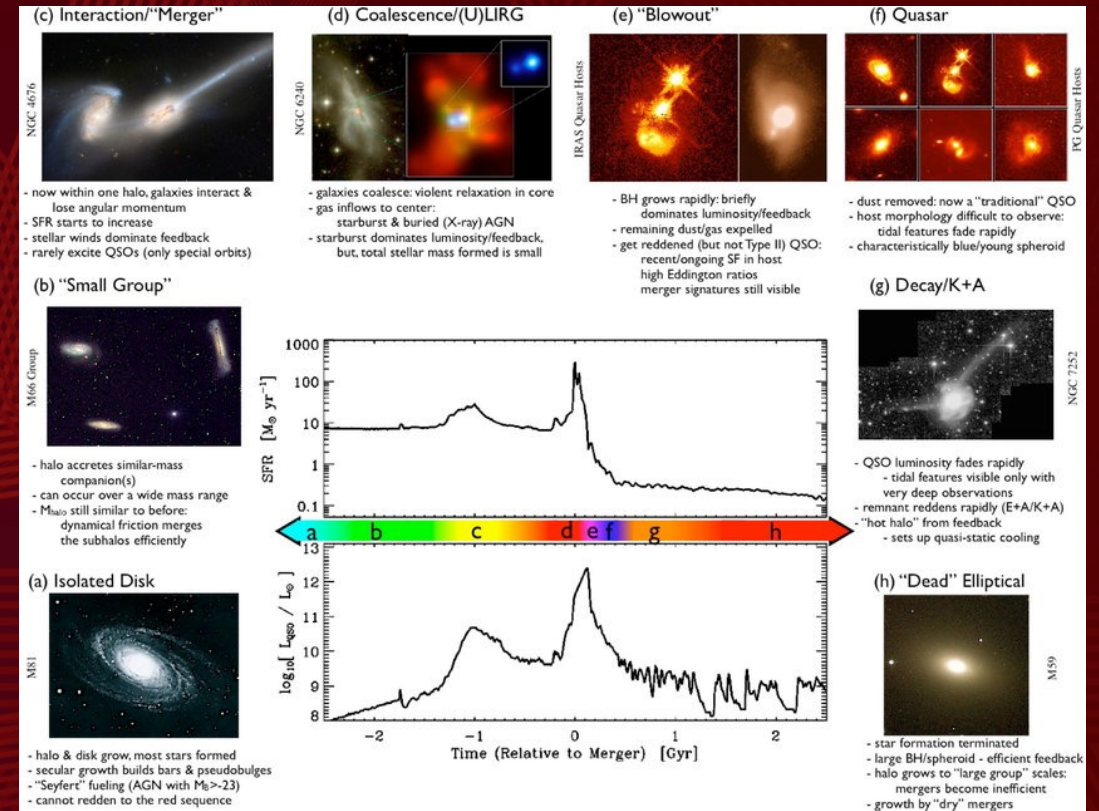


BH properties (Sect. 3.2)

$L_{\text{bol}} (\text{erg s}^{-1})$	$(4.3 \pm 0.6) \times 10^{47}$
$M_{\text{BH}} (M_{\odot})$	$(7.4 \pm 0.3) \times 10^9$
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。
- 周期光度曲線のいくつかのシナリオ
 - BSBHの相対論的ドップラーブースト (e.g. D'Orazio 2015)
 - 降着円盤の歳差運動
 - 視線上での連星の軌道運動
 - Circumbinary accretion variability (e.g. Duffell+2019)

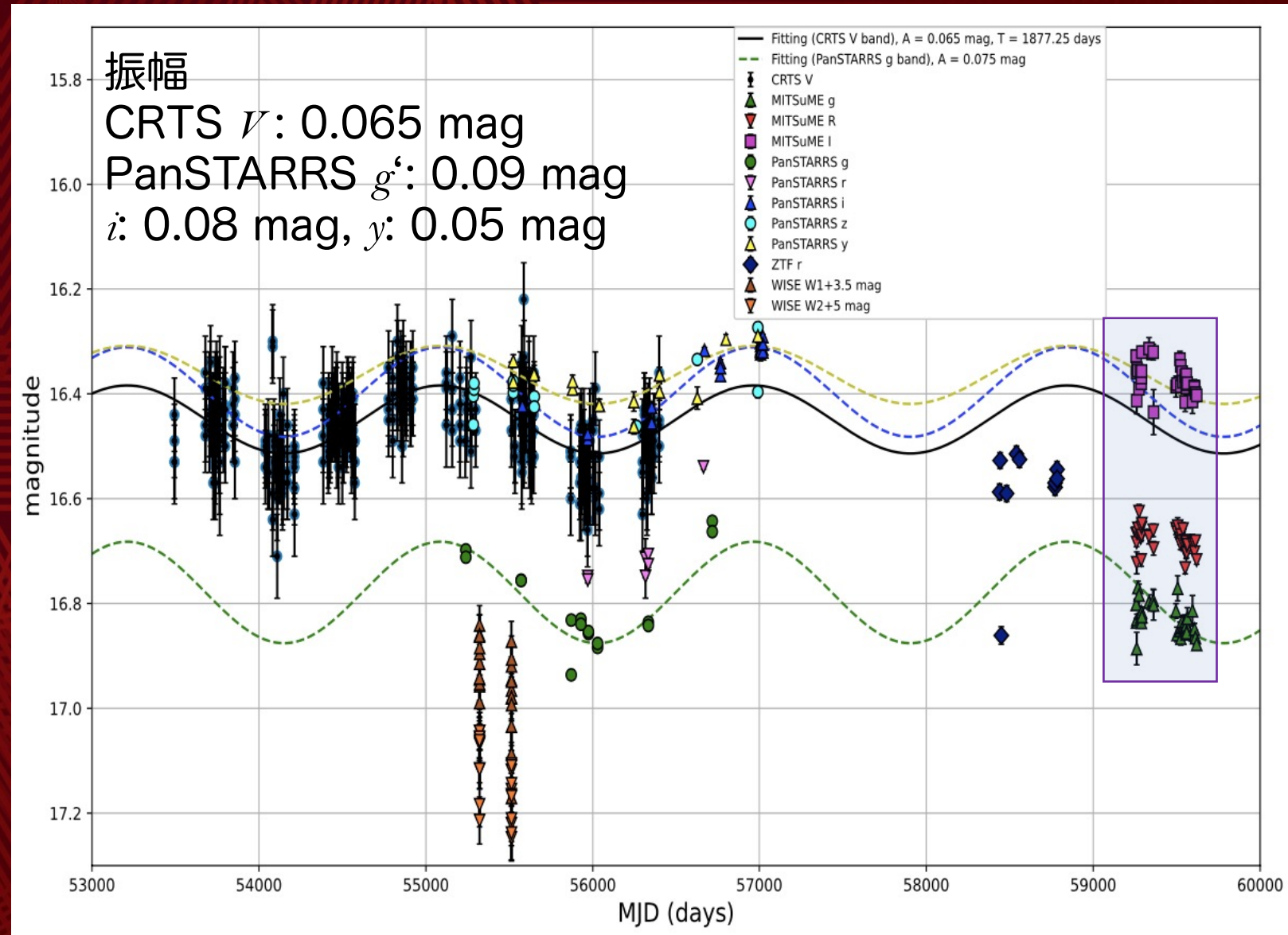
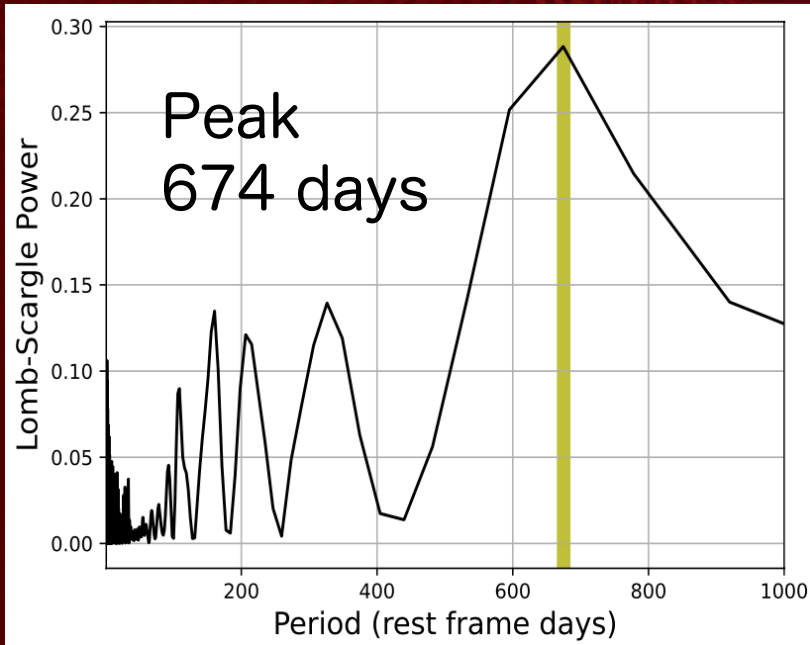


★降着円盤の歳差運動: opticalとNUVの放射領域のサイズが同等で歳差運動が困難 (Zhang 2022)

★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)

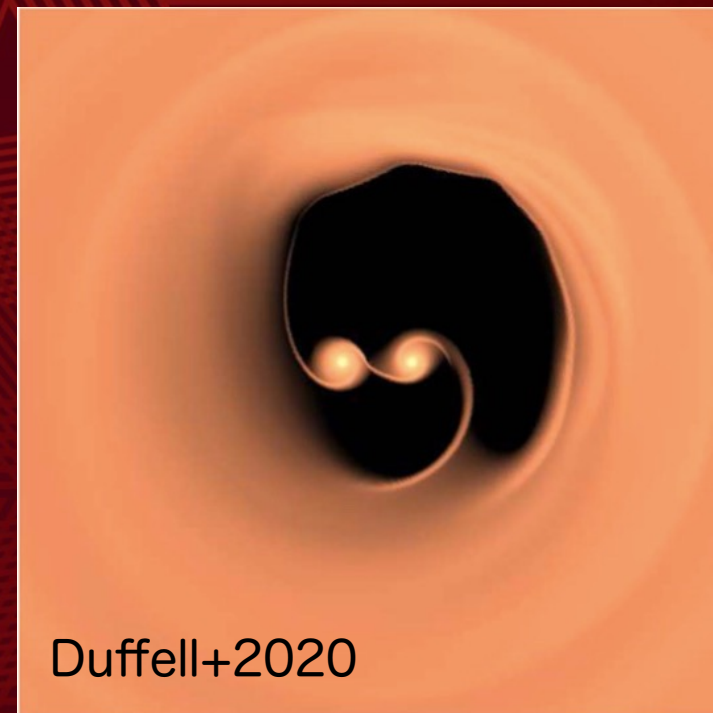
WISE J0909+0002の光度曲線

- アーカイブ: CRTS, PanSTARRS, ZTF, WISE
- CRTSとPanSTARRS g' , i , y の光度曲線に正弦関数でフィッティング
- CRTSの光度曲線は5.1年周期(静止系で1.8年)で振動



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
BSBHs (mini-disks)同士が相対論的
速度で運動. Doppler factor, D
の効果の分, 観測されるフラックス等に影響.
- mini-diskが観測者に近づく(遠ざかる)
ほど明るく(暗く)なる.



Doppler factor

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

観測フラックス

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

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1

9/13

- BSBHの運動に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.

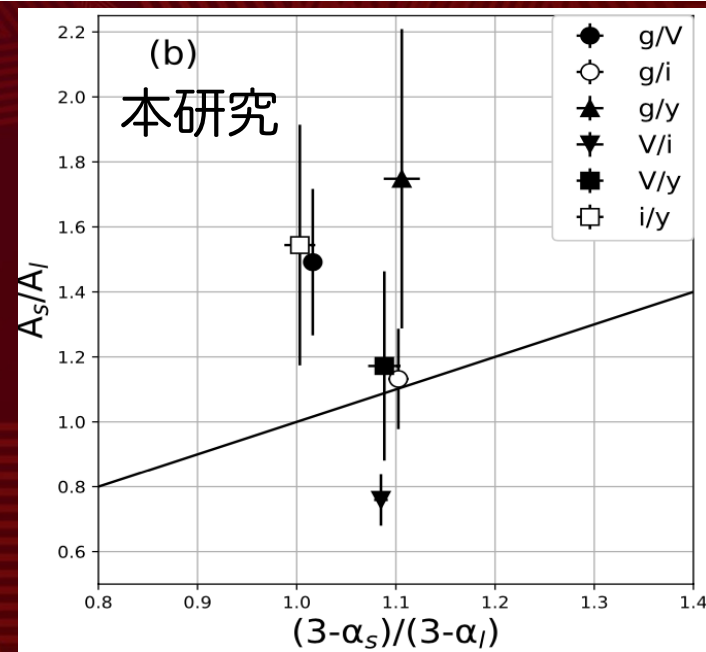
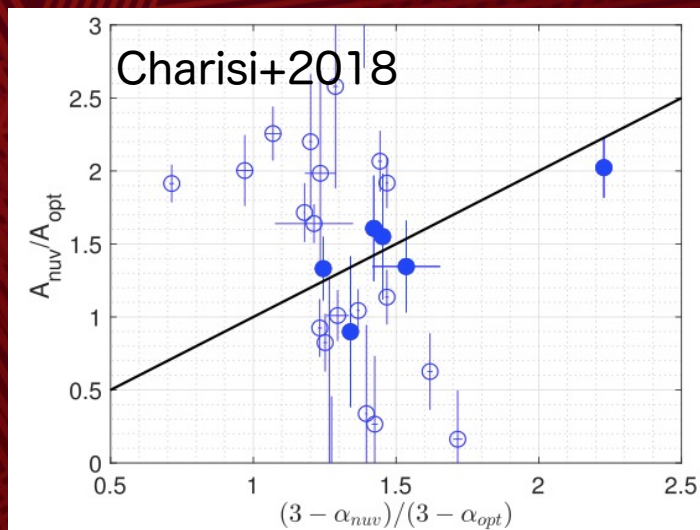
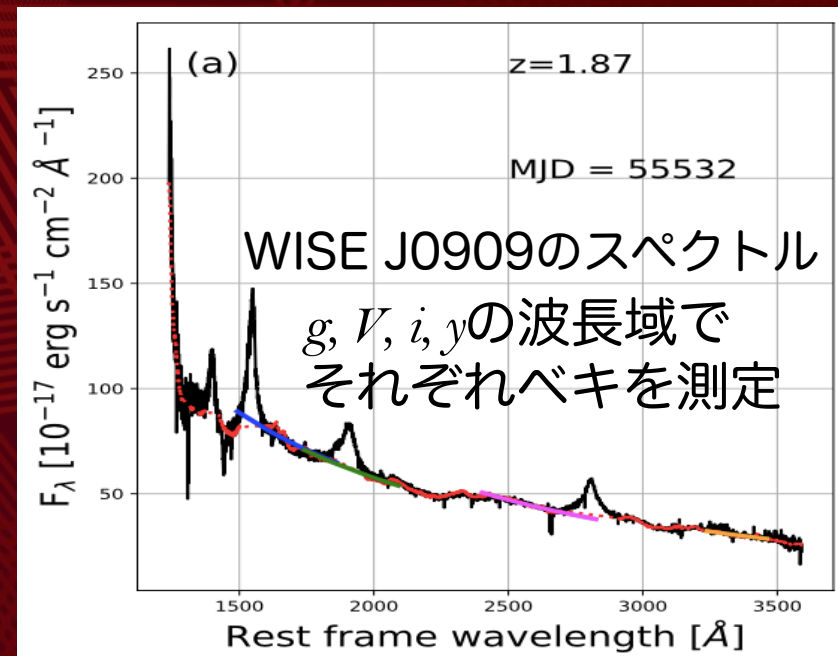
- 異なる波長間の振幅比はフラックスのべき α_ν を用いると

短波長側

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

長波長側

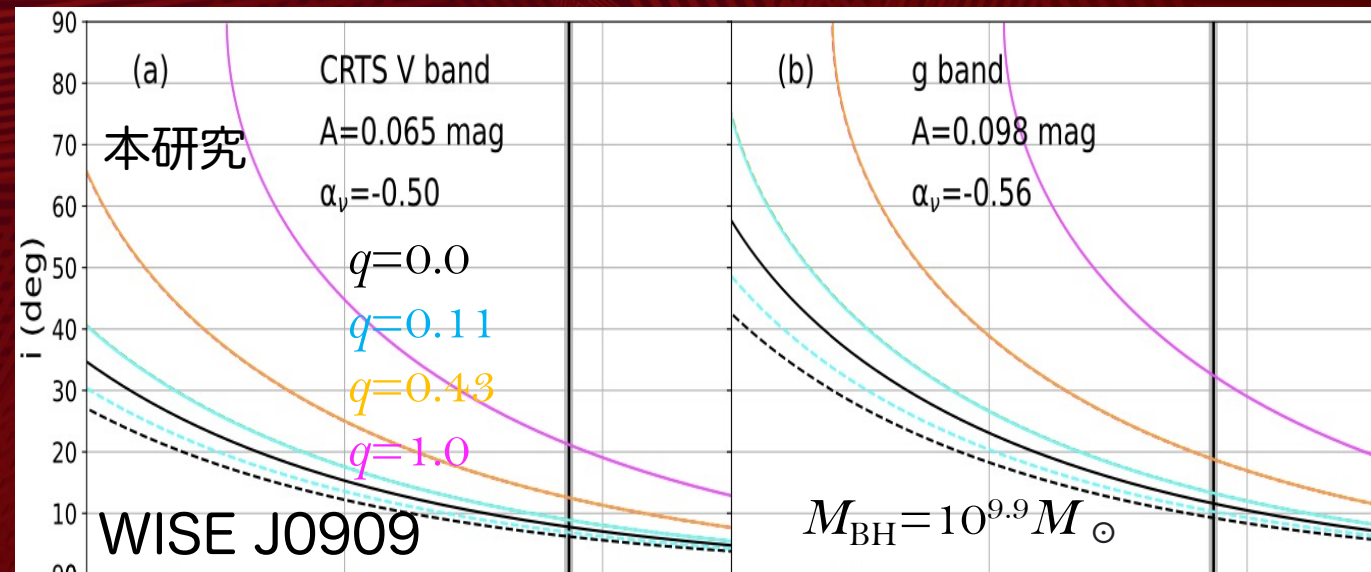
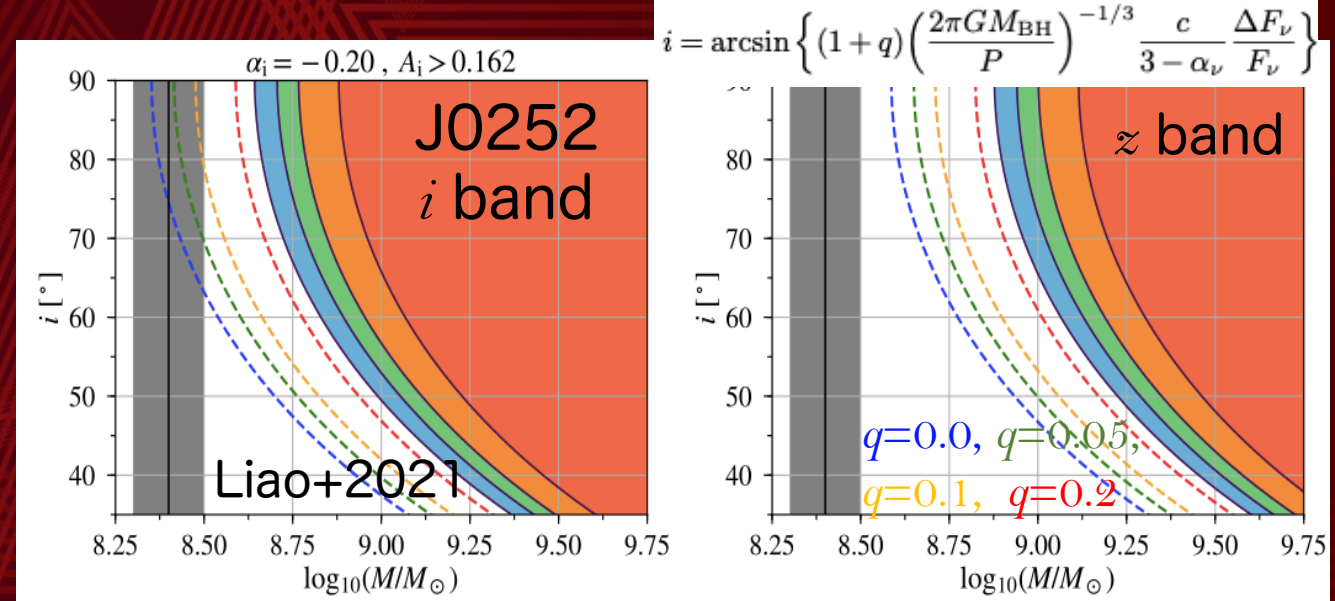
となる. 本研究では理論線(黒)に乗るデータは全体の~30%.



相対論的ドップラーブーストの検証2

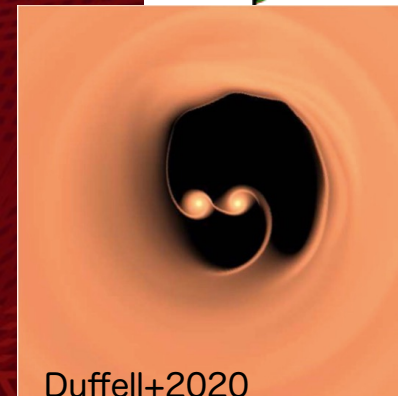
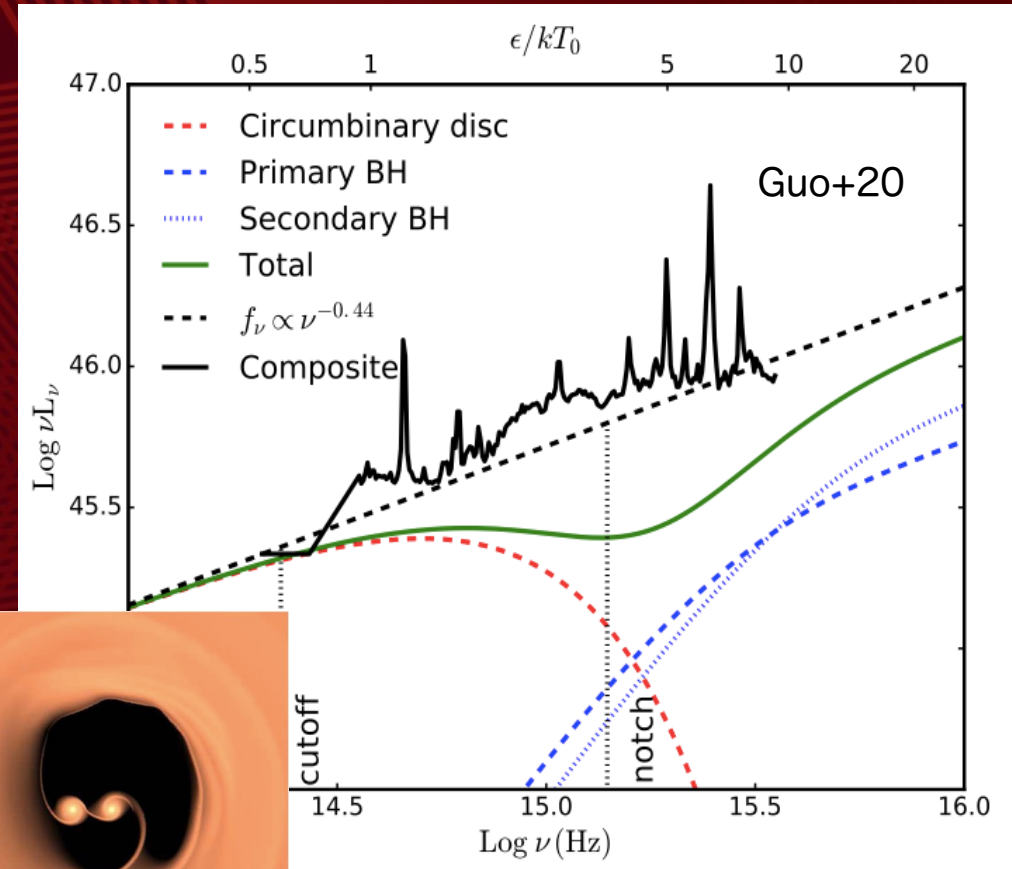
- 軌道傾斜角 i とブラックホール質量 M_{BH} の関係をbinary BHの質量比 $q=(M_2/M_1)$ 毎にプロット ($i=90^\circ$: edge on)
- Liao+2021 (天体: SDSS J0252)ではparameter spaceが殆どなくドップラーブースト説は可能性が低い.
- 一方, $q = 0.11, 0.43$ 等でWISE J0909では $i > 10^\circ$ にパラメータスペースをもつ.
- CRTS V , PanSTARRS g' , i , y bandは同様の傾向.

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).



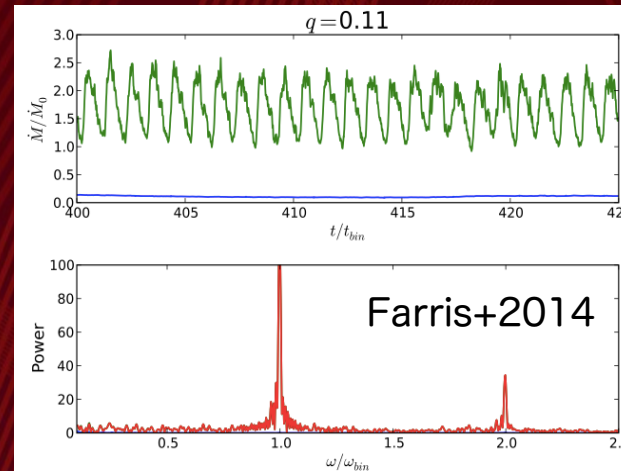
Duffell+2020

cut-off温度

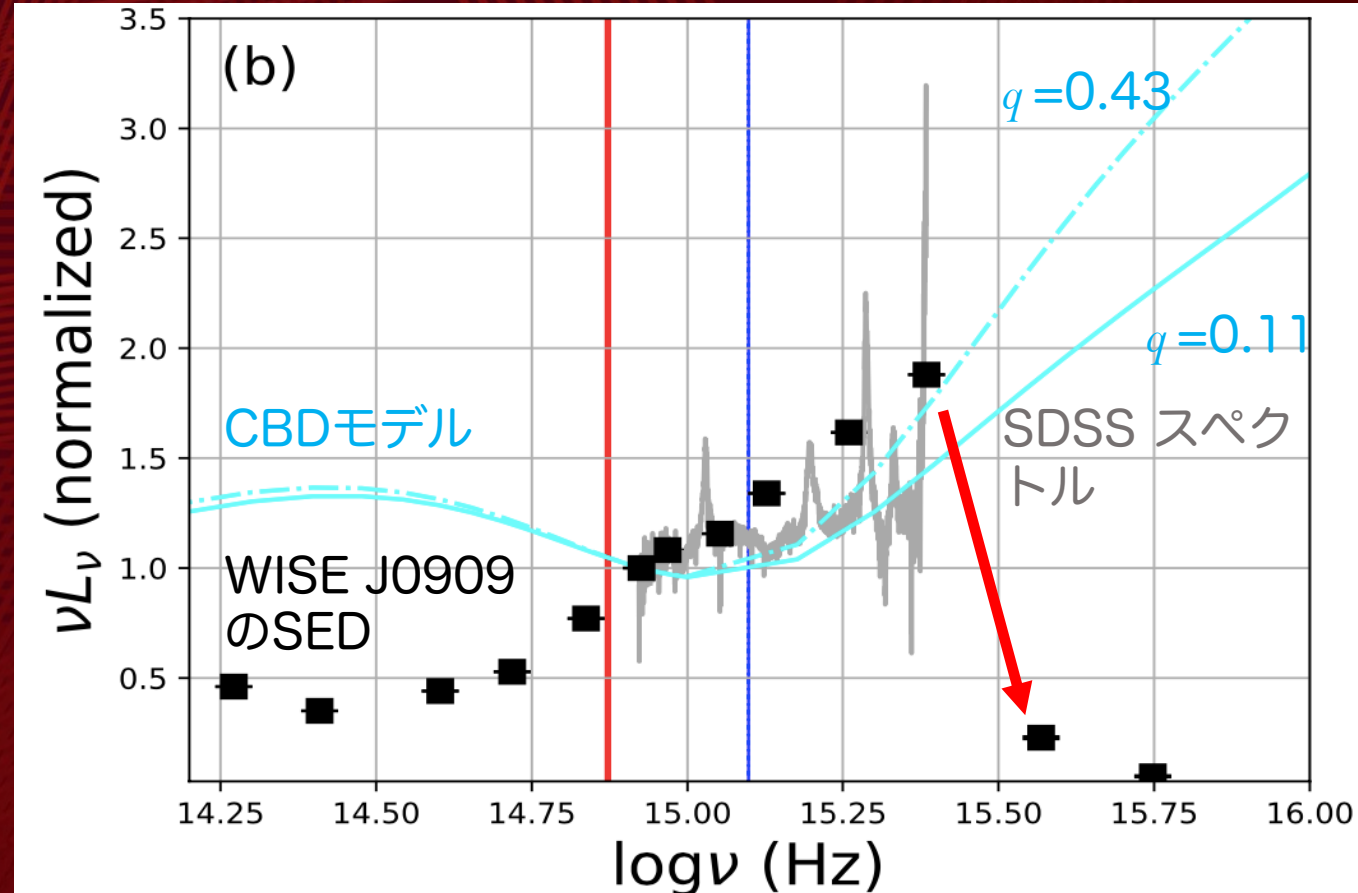
$$T_{\text{cut-off}} \simeq 2.0 \times 10^4 \left[\dot{m} \left(\frac{\eta}{0.1} \right)^{-1} M_8^{-1} \left(\frac{a}{100 R_g} \right)^{-3} \right]^{1/4} \text{ K}$$

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 ($q = 0.11, 0.43$)



まとめ

- AGNの光度変動は一般的にはランダムだが、キューサーPG 1302-102の光度曲線に周期性が同定されて以降に複数天体でも同定されてきた。
- ターゲット天体のWISE J0909+0002はキューサーを内包する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
 - 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。
 - むりかぶし望遠鏡の観測を2021年2月から開始。光・赤外大学間連携観測による明野・岡山50 cm望遠鏡で得られたデータを追加しても周期性の保持を示唆。
 - 現段階ではBinary Blackhole説を強く否定する結果は得られていない。
Doppler boost $\triangle$ (inclinationは $\bigcirc$), CBD $\triangle$ 今後さらに検証。

スペクトルで探るBHバイナリー候補天体

CBD

$$L_{\epsilon} = \frac{32\pi^2}{3} \frac{a^2}{c^2 h^3} (kT_0)^{8/3} g^{-4} \epsilon^{1/3} \int_{u_l}^{u_h} du \frac{u^{5/3}}{e^{u/g} - 1},$$

Primary

$$L_{\epsilon}^{(1)} = (32\pi^2/3)(a^2/c^2 h^3)(kT_0)^{8/3} f_1^{2/3} (1+q)^{-2/3} g^{-4} \epsilon^{1/3} \times \int_0^{u_1} du \frac{u^{5/3}}{e^{u/g} - 1} \quad (7)$$

Secondary

$$L_{\epsilon}^{(2)} = (32\pi^2/3)(a^2/c^2 h^3)(kT_0)^{8/3} f_2^{2/3} (1+q)^{-2/3} q^{2/3} g^{-4} \epsilon^{1/3} \times \int_0^{u_2} du \frac{u^{5/3}}{e^{u/g} - 1}. \quad (8)$$

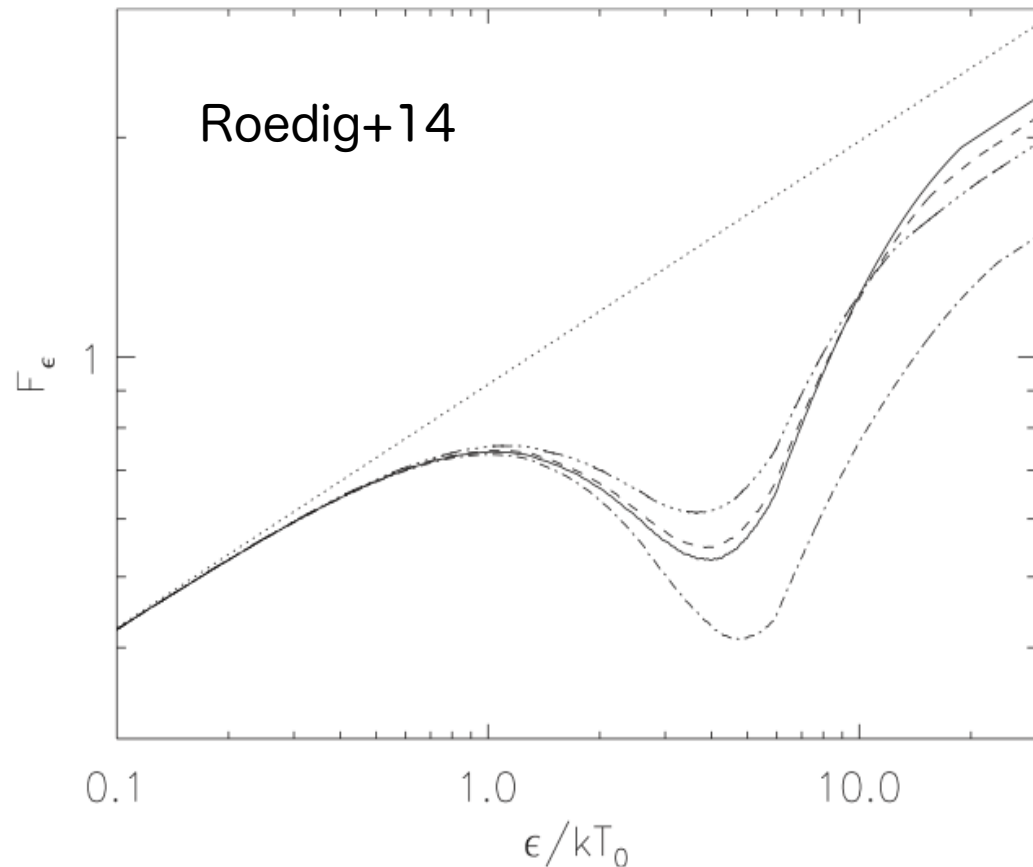
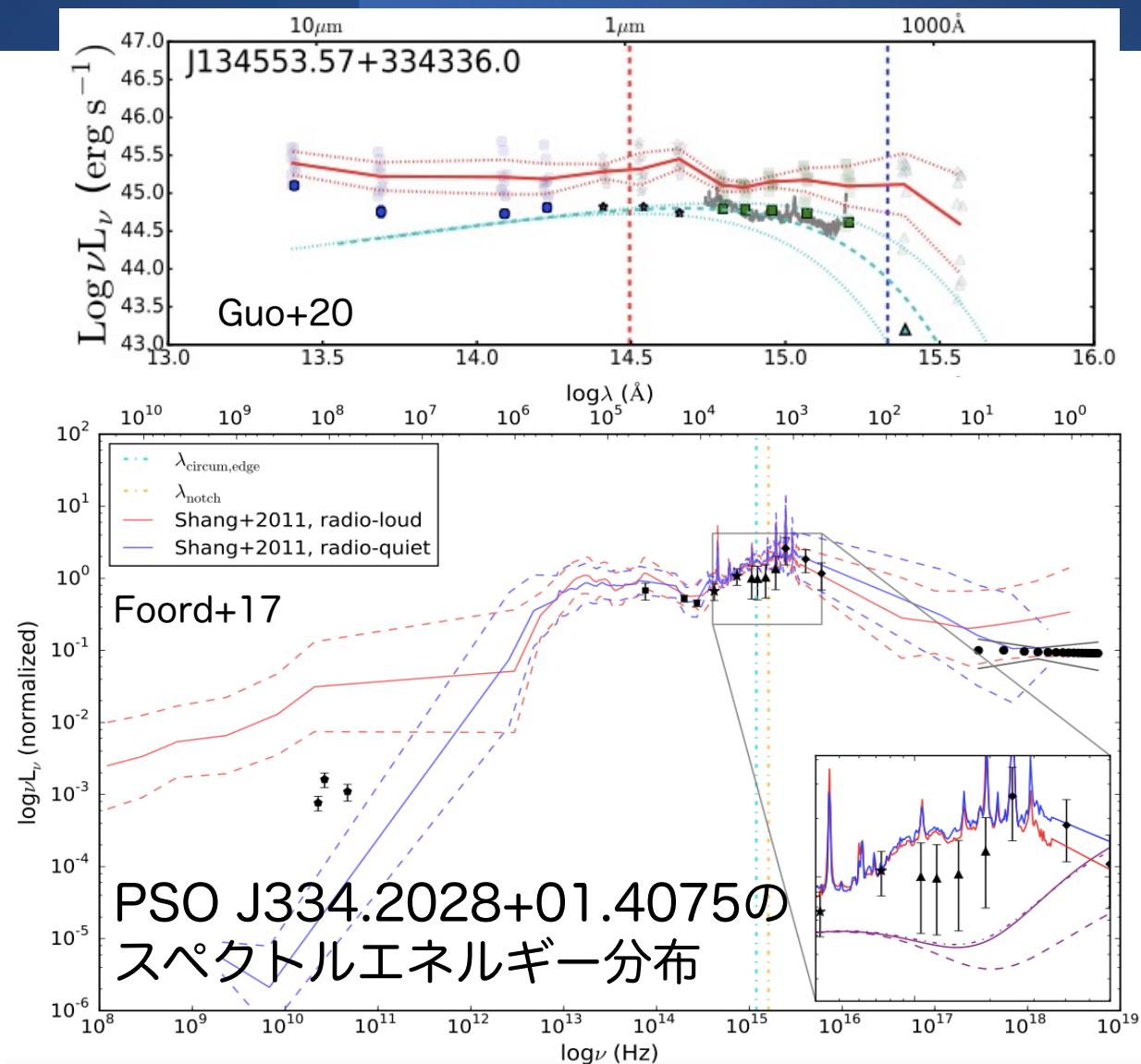


Figure 1. Thermal spectra for four examples. For all cases, the photon energy is in units of kT_0 ; the hardening parameter $g = 1.7$; and all curves share the same arbitrary flux units. The solid curve shows the equal-mass case, $f_1 = f_2 = 0.5$ and $q = 1$; the dashed curve shows the case of $q = 0.3$ and $f_1 = 0.45$, $f_2 = 0.55$; the two dash-dot curves show the spectrum when $q = 0.1$, and $f_1 = 0.08$, $f_2 = 0.92$ (lower curve) or $f_1 = 0.45$, $f_2 = 0.55$ (upper curve).

スペクトルで探るBHバイナリー候補天体

- CBDモデル(シアン)に沿った傾向を確認 (Guo+20).
- 周期光度変動を示したPSO J334.2028+01.4075のエネルギー分布に CBDのnotchの可能性を確認 (Foord+2017).
※データ点のエラーが大きいことに注意.
- BHバイナリーかどうかは光度曲線だけでなくスペクトル, SEDも調べることも重要.



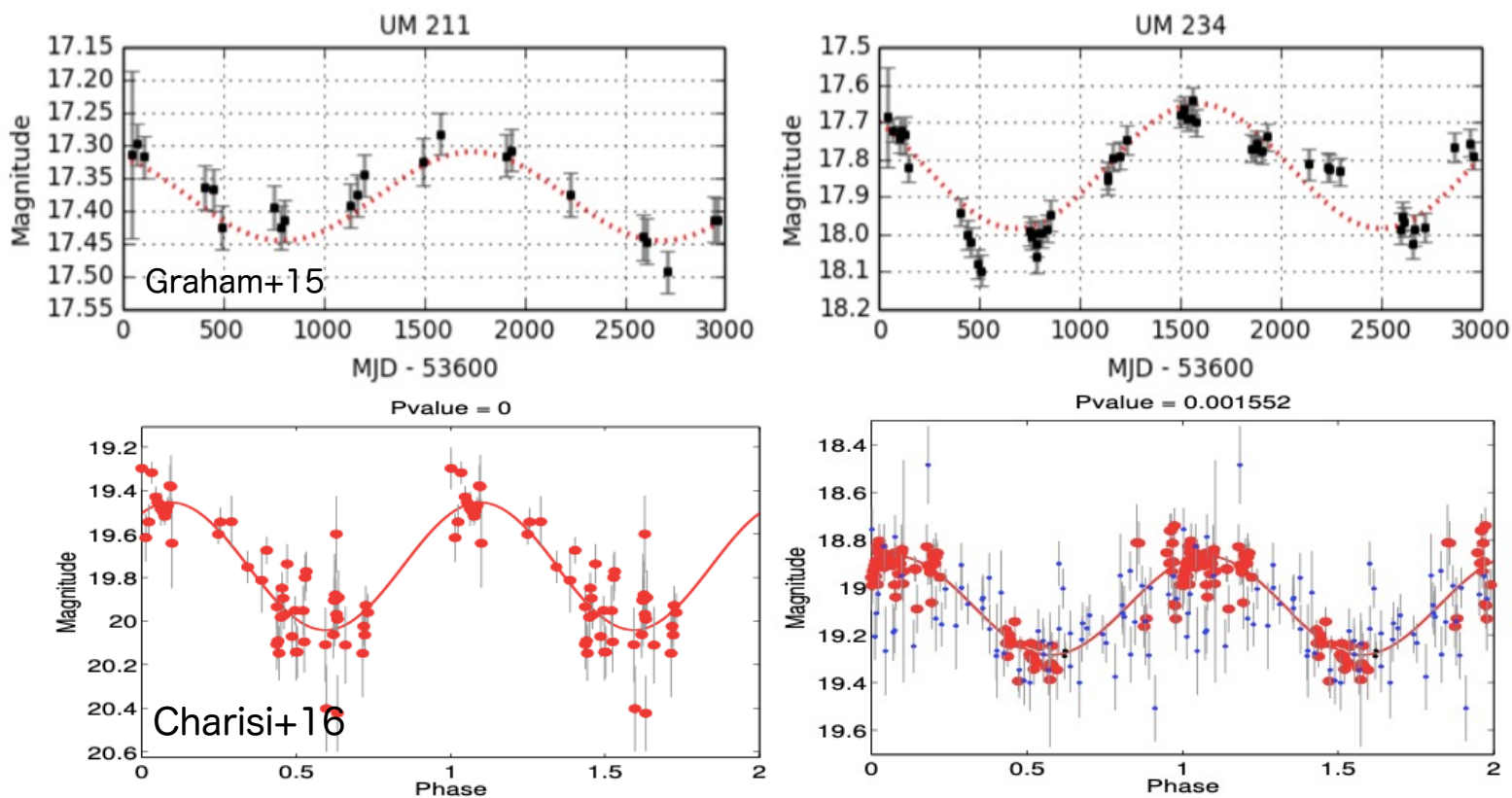
周期変動クェーサーサーベイ

CRTS

Catalina Real-Time
Transient Survey

INTERMEDIATE PALOMAR TRANSIENT FACTORY

- アーカイブデータを駆使して周期光度変動を示す,
 - 111個のクェーサーを同定 (Graham+15)
 - 50個のクェーサーを同定 (Charisi+16)



ブラックホール質量が大きいほど若干周期が短い傾向

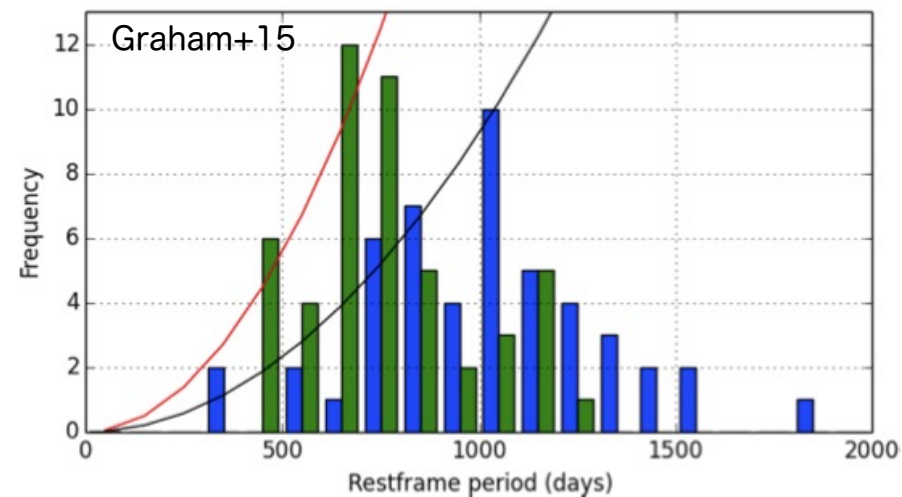


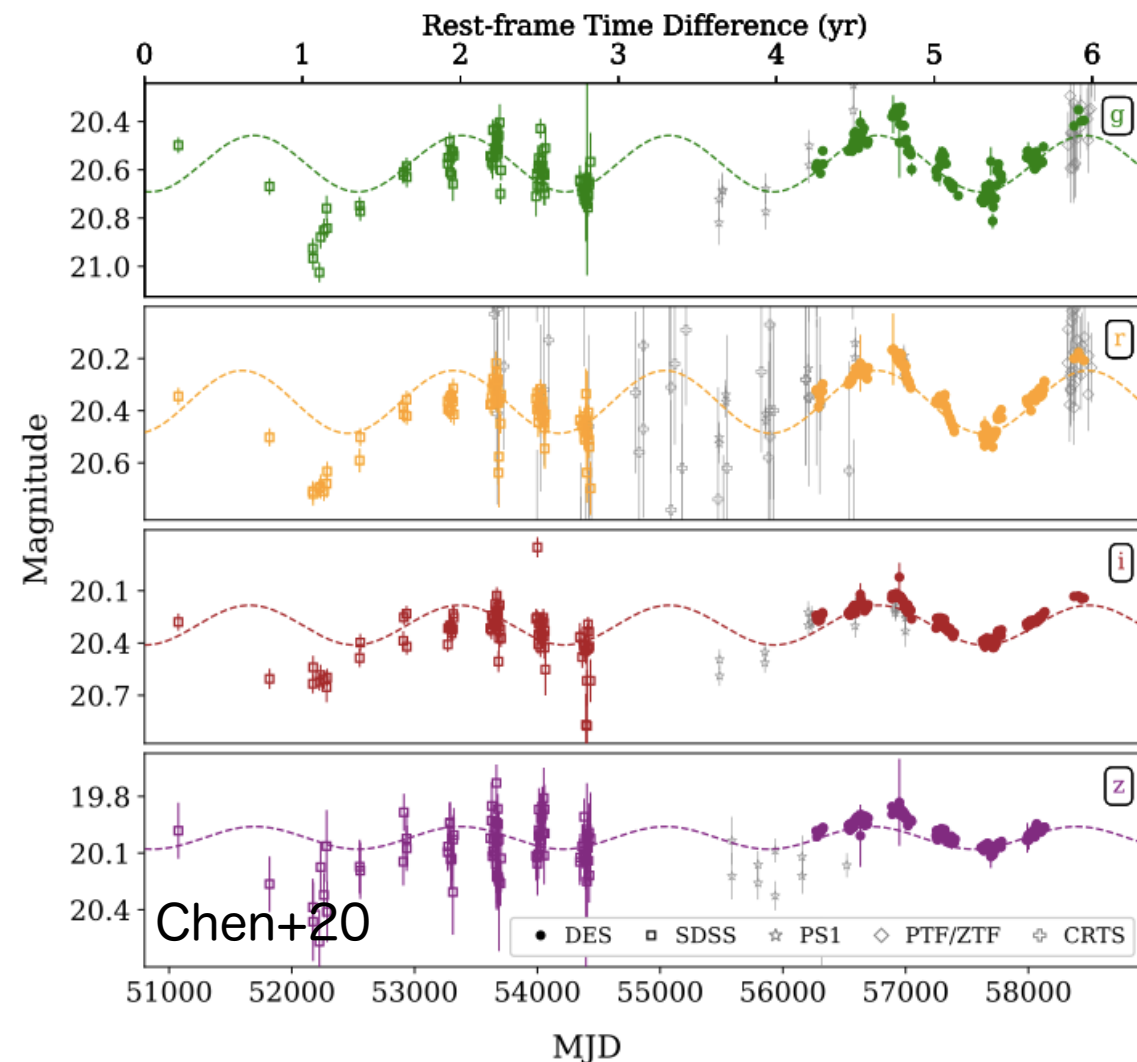
Figure 9. The frequency of SMBH binaries as a function of rest-frame period. This shows the distribution for objects with $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) < 9$ (blue) and $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) > 9$ (green). Theoretical curves are also shown for a $n_{\text{var}} \propto t_{\text{orb}}^{8/3}$ relationship for the two mass distributions: $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) < 9$ (black) and $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) > 9$ (red).

多色測光データを用いた研究



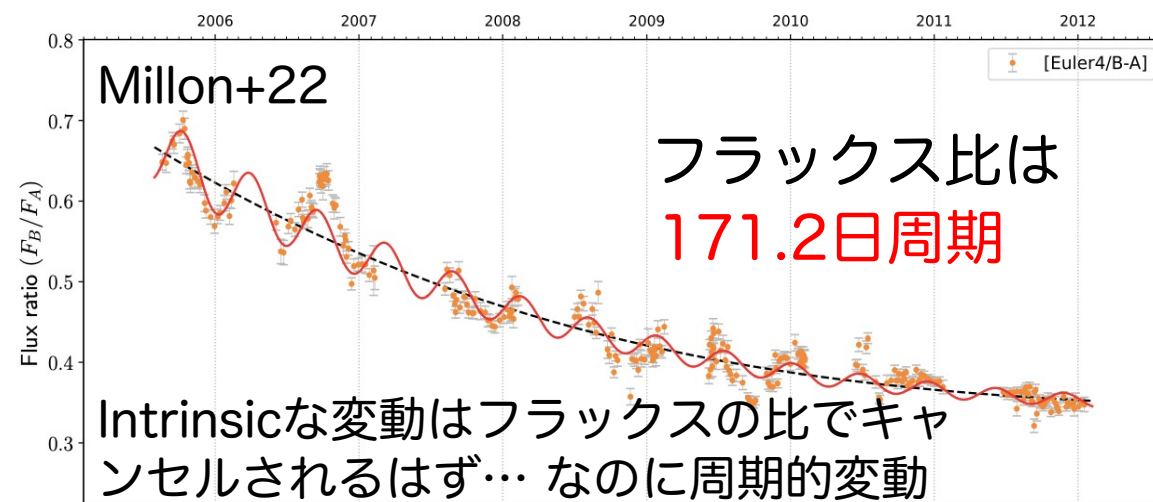
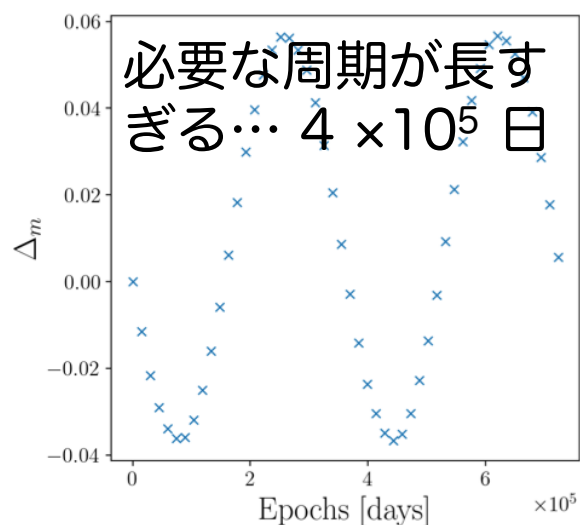
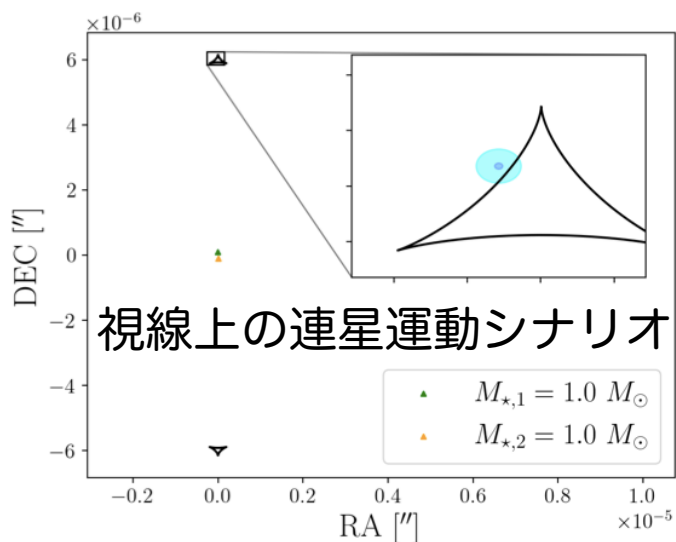
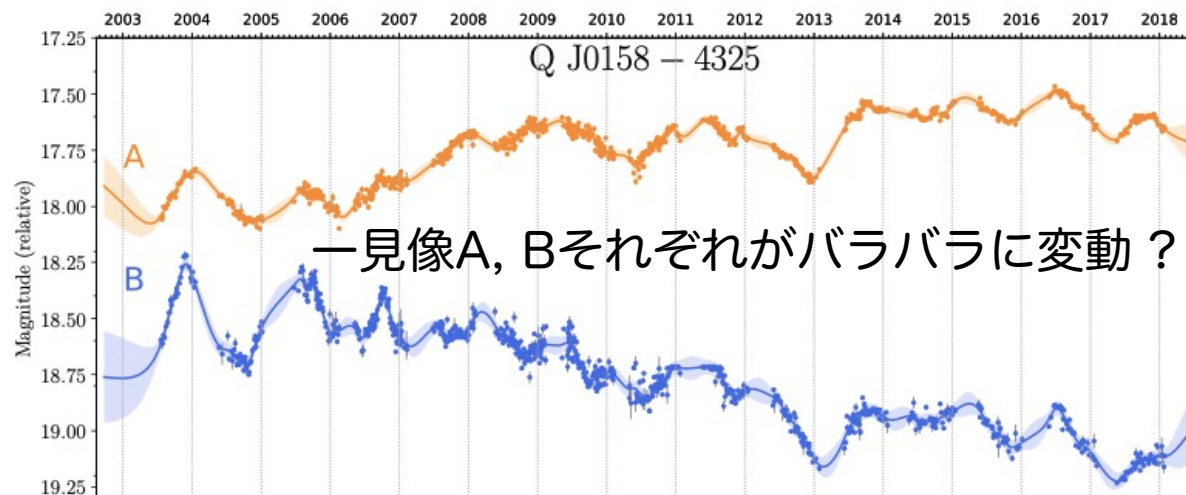
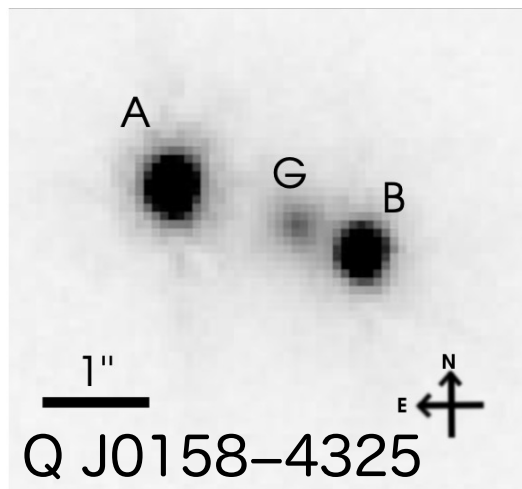
©The Dark Energy Survey

- Dark energy surveyのアーカイブデータ (*girz*)を用いて, サンプル625天体中4天体で周期光度変動を同定 (Chen+20)
- サンプルは特段明るい, BH massが重いわけではない.
- 変動の物理機構を考察
 - 相対論的ドップラーブースト? (後ほど)



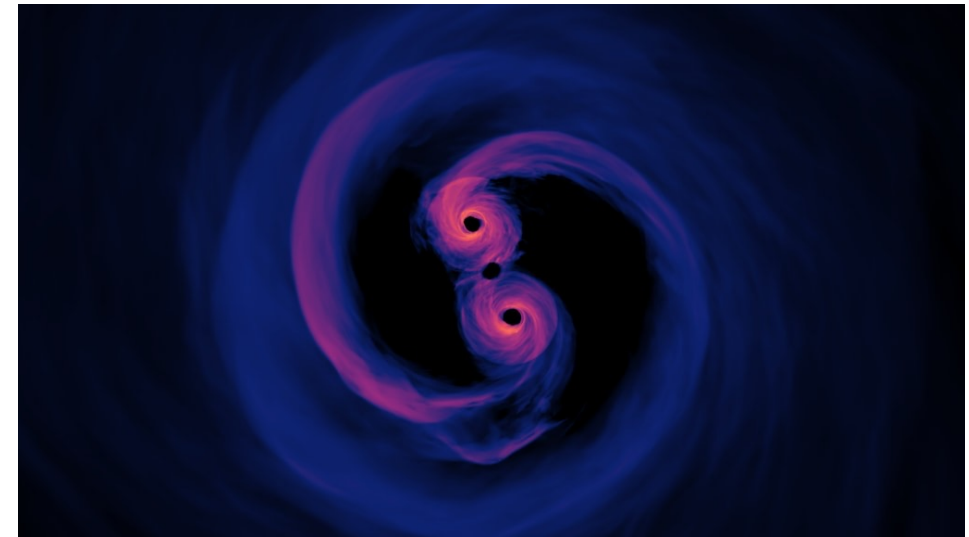
レンズクェーサーで発生した周期光度変動

- レンズクェーサーに周期光度変動が確認された
- A, Bのフラックスの比をとることで周期性が明らかに



なぜ(正弦波的)周期光度変動が重要か？

- 周期光度変動の要因の有力説: 大質量ブラックホールバイナリーの軌道運動
 - 重力波源になりうる
- 非常に珍しい
 - 0.01 ~ 0.1%のクエーサーのみ周期性を確認
 - 文献によっては0.8-1.1% (Chen+20)
- 銀河合体の物理に新たな知見を与えられる可能性



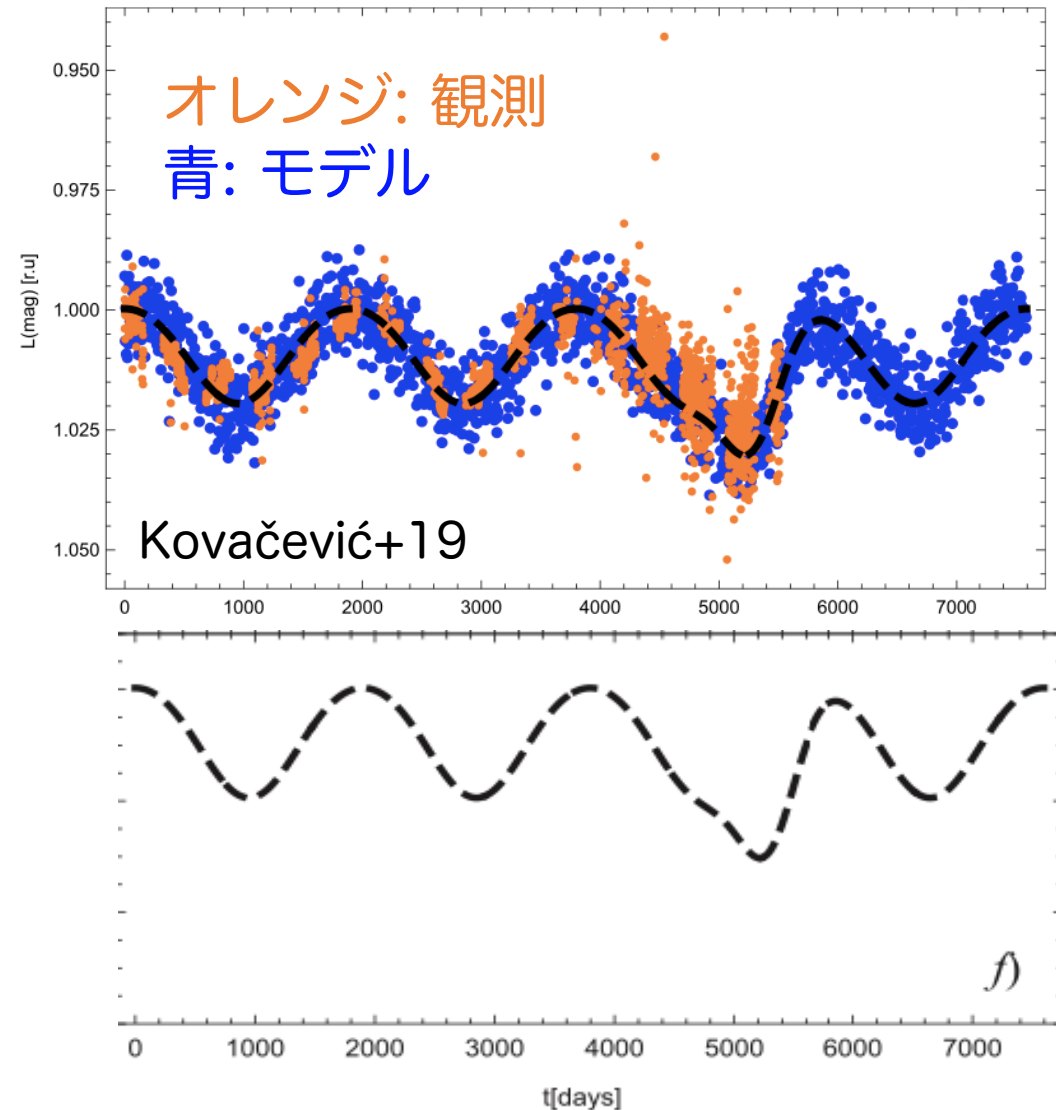
NASA's Goddard Space Flight Center/Scott Noble;
simulation data, d'Ascoli et al. 2018

$$t_{\text{gw}} = \frac{5}{256} \left(\frac{GM_c}{c^3} \right)^{-5/3} (2\pi f_{\text{orb}})^{-8/3}$$

重力波源の合体時間タイムスケール
(Peters 1964)

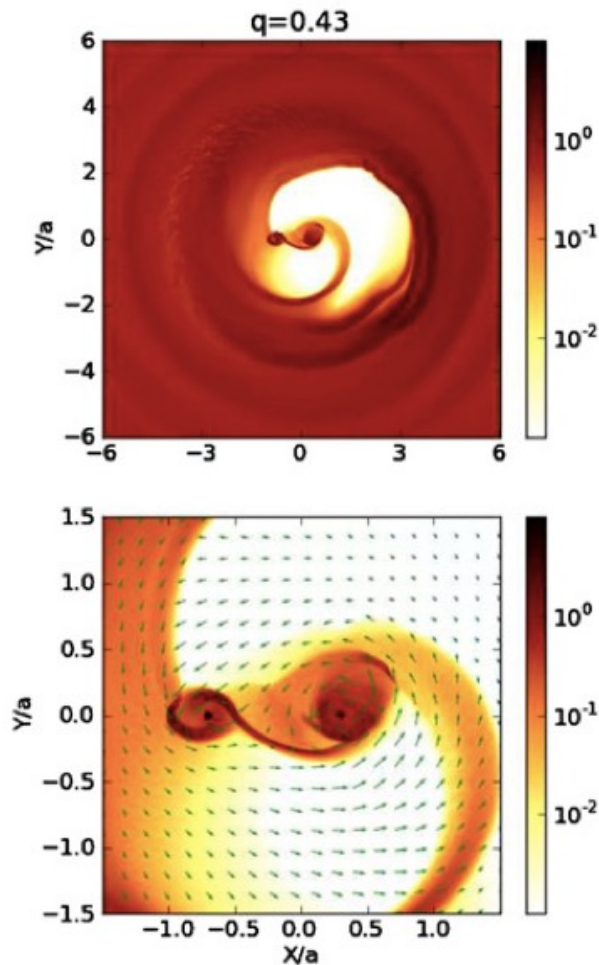
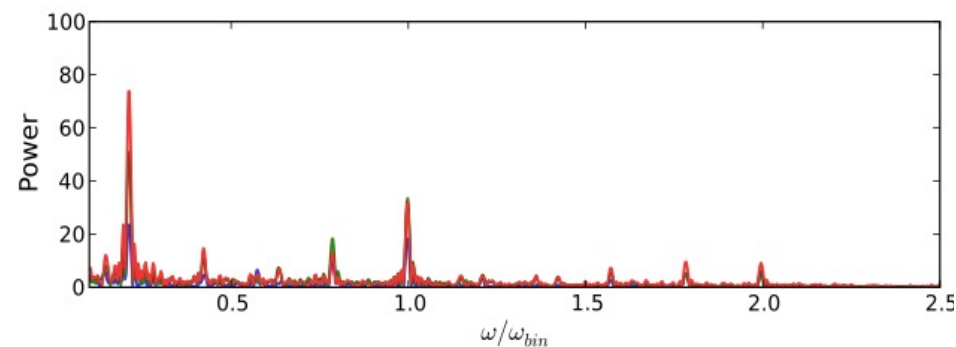
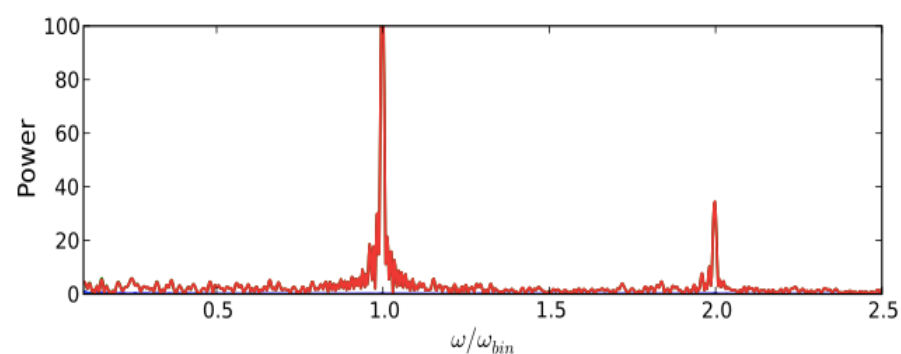
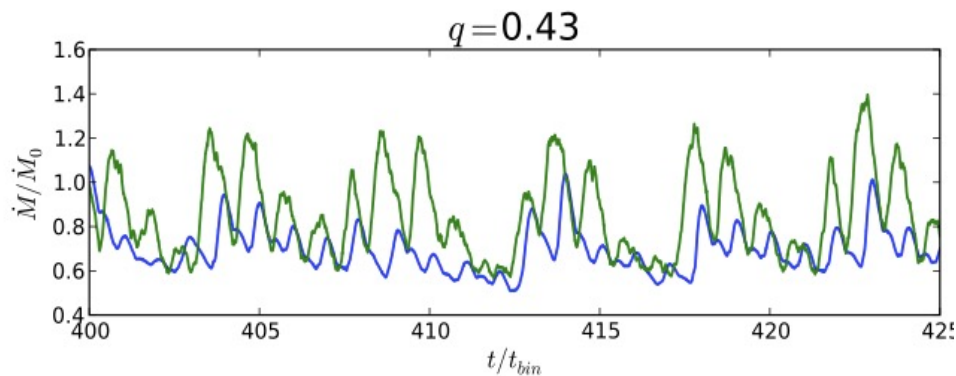
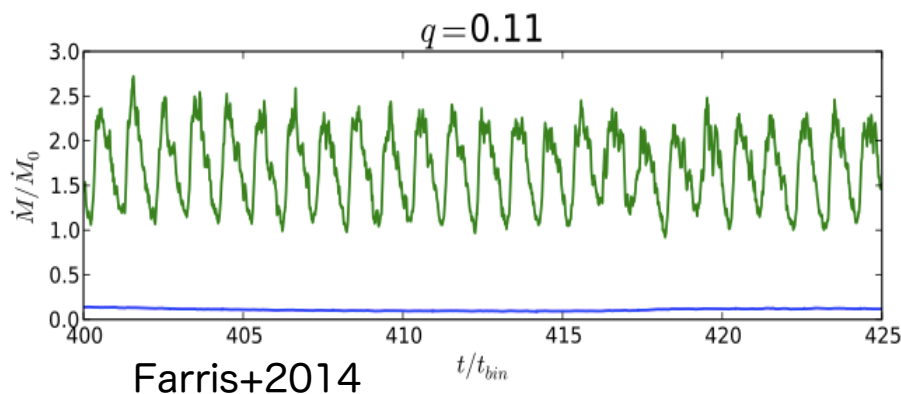
PG1302-102で確認された周期曲線の乱れ

- CRTS+ASSA-SN (The All-Sky Automated Survey for Supernovae)のデータ
- 追観測で周期性が崩れることも
==> 偶然周期関数でフィットできただけ？
- 降着円盤にcold spot (Kasliwal 2017)が発生？



質量比, 周期, パワーの関係

- Farris+2014のシミュレーション結果では $q=0.11, 0.43$ に2つの特徴的なピーク



ただし, $q < 0.3$ が宇宙論的銀河合体モデル(Volonteri+03)とconsistent.