ブラックホールX線連星の短時間変動

植村誠(広島大学 宇宙科学センター) OISTER WS 2020 2020.11.12

アウトライン

・ブラックホールX線連星の短時間変動

- 2つの時系列データから共通成分を抽出する
 - 大間々、植村、池田、森井、日本天文学会2020年春季年会 W23b
 - 大間々、植村、池田、森井、日本天文学会2020年秋季年会 W31a
 - Omama, Uemura, Ikeda, & Morii, PASJ, in prep.

アウトライン

・ブラックホールX線連星の短時間変動

- 2つの時系列データから共通成分を抽出する
 - 大間々、植村、池田、森井、日本天文学会2020年春季年会 W23b
 - 大間々、植村、池田、森井、日本天文学会2020年秋季年会 W31a
 - Omama, Uemura, Ikeda, & Morii, PASJ, in prep.

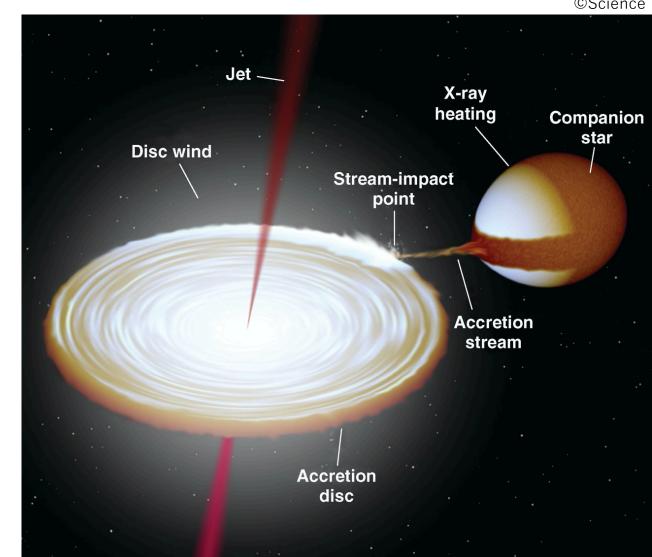
ブラックホールX線連星

• 降着円盤の物理

- Very high sate, high/soft state, low/hard state
- 標準円盤、ADAF/RIAF、Slim disk
- ジェットと円盤の相互作用
 - ジェットが出る=very high state, low/hard state
 - ジェットが出ない=high/soft state
 - 磁気流体シミュレーション

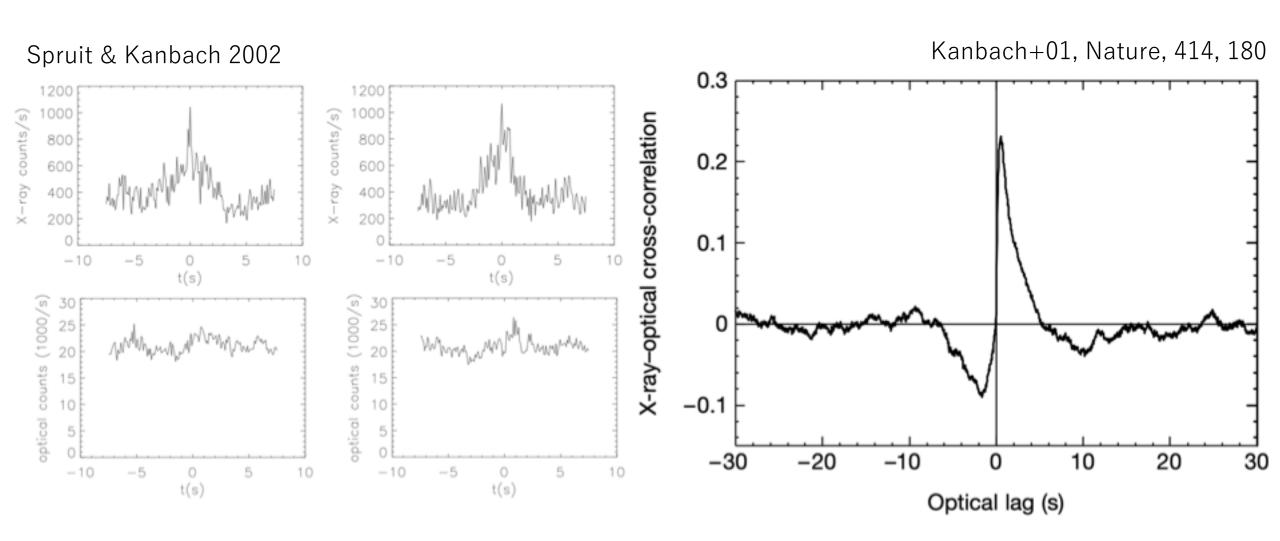
多波長で観測

- 電波:ジェット
- 近赤外線・可視光・紫外線:伴星、降着円盤、 ジェット?
- X線:BH近傍の降着流、ジェット?
- 時間変動



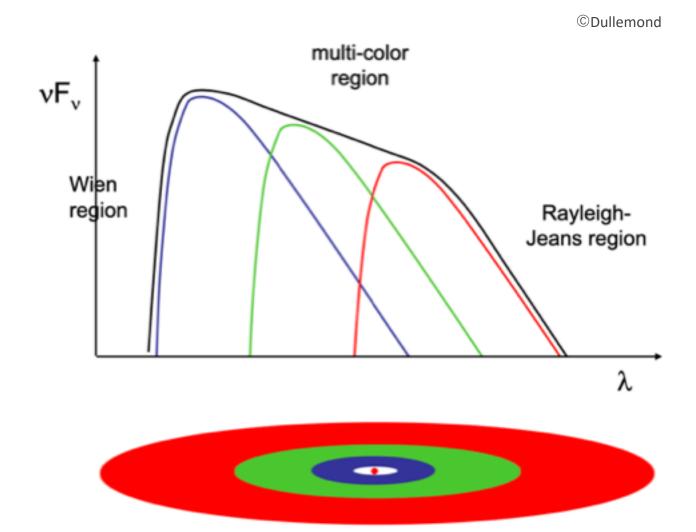
©Science

XTE J1118+480 (KV Uma): X線と複雑に相関する可視光短時間変動

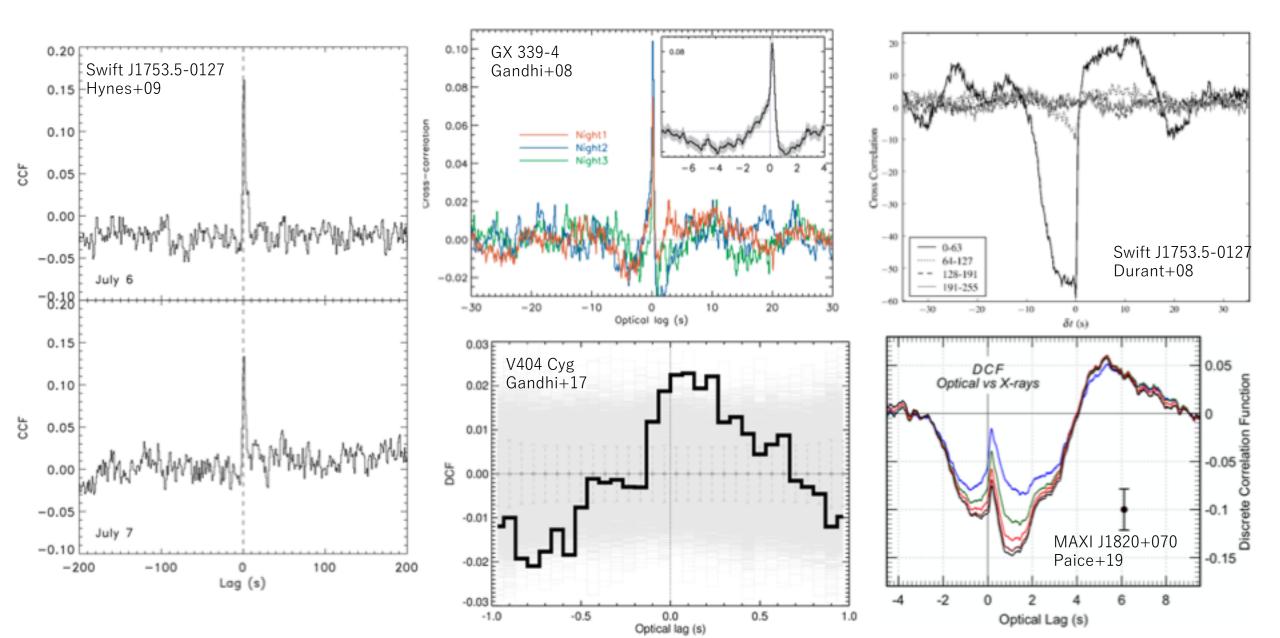


可視光短時間変動はどこから?

- 可視光
 - 降着円盤外縁(r~10⁵ Rsch)
 - 黒体放射 (標準円盤)
 - タイムスケール >数時間
 - T~10^4 K
- (soft) X線
 - 降着円盤内縁(r~10^0—3 Rsh)
 - 黒体放射(標準円盤, high/soft state) + 逆コンプトンなど (ADAF/RIAF, low/hard state)
 - タイムスケール 1 100 Hz
- X線で秒以下の変動が受かるのは普通 だが、可視光では従来の描像では難し い

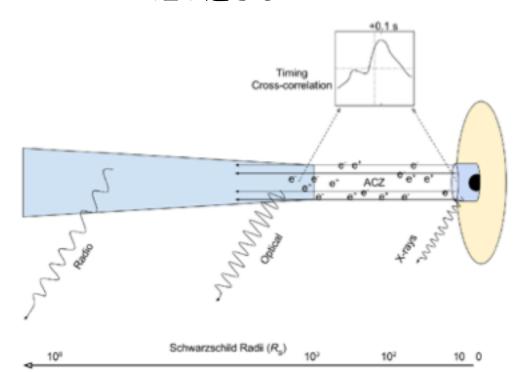


様々な相互相関関数

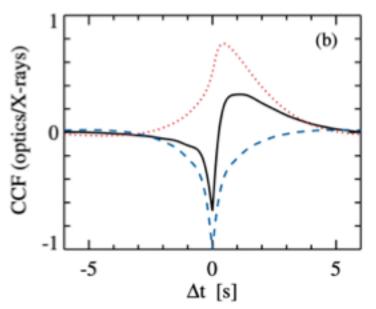


何が起きているのか?

- ~0.1秒X線が先行する信号
 - X線が円盤外縁で吸収・再放射?
 - Gandhi+17
 - ジェットの中を電子が移動する時間
 - 吸収・再放射にしてはタイムラグが 短か過ぎる



- タイムラグほぼ無し?で反相関する信号
 - Malzac+04
 - 磁場に蓄えられたエネルギーが、1)X線 として解放されるか、2)ジェットの中で 可視光として解放されるか。
 - Veledina+11
 - ・ 粒子加速→X線フレア&シンクロトロン 自己吸収で可視光は減光



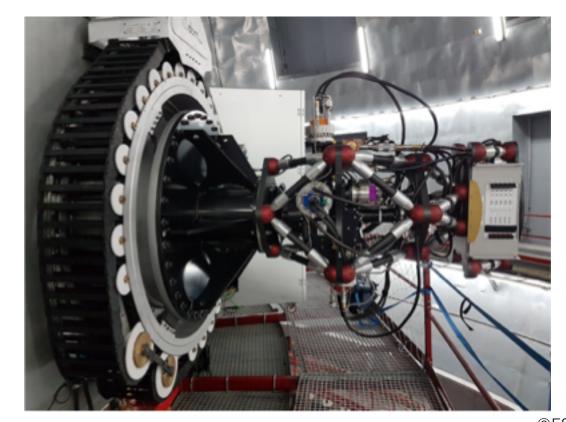
Veledina+11

ULTRACAM & HIPERCAM



• イギリスのグループが開発

- Dhillon+07
- Frame-transfer CCD x 3
- 2002~ WHT → NTT → VLT → タイ



• イギリスのグループが開発

- Dhillon+16
- Frame-transfer CCD x 5
- 2017~ WHT → GTC

©ES0

現状の問題点

- 可視光短時間変動の起源がわからない
 - どこで? 降着円盤?ジェット?
 - 順相関は何を意味する? 吸収・再放射? ジェット内の移動?
 - 反相関は本当にある? 何を意味する?
- 相互相関関数やクロススペクトル解析でできること
 - (周波数帯ごとに)タイムラグを伴った相関がありそうかどうか
 - 定常過程だと思って平均的な挙動を見ている
- データからさらに情報を抽出できないか?
 - 共通の信号成分が含まれてることが示唆されるなら、それらを分離して抜き出したい。
 - 波形や成分ごとの相互相関関数
 - 共通信号の強度やタイムラグの時間変動

アウトライン

・ブラックホールX線連星の短時間変動

- 2つの時系列データから共通成分を抽出する
 - 大間々、植村、池田、森井、日本天文学会2020年春季年会 W23b
 - 大間々、植村、池田、森井、日本天文学会2020年秋季年会 W31a
 - Omama, Uemura, Ikeda, & Morii, PASJ, in prep.

共通成分解析

(森井、池田、木邑、植村、日本天文学会2017秋季年会 W105a)

• (離散)逆フーリエ変換

$$h(t_i) \approx 2\Delta f \sum_{j=1}^{M} [H_{\mathcal{R}}(f_j) \cos(2\pi f_j t_i) + H_{\mathcal{I}}(f_j) \sin(2\pi f_j t_i)]$$

$$y = Ax$$

$$(A)_{i,j} = 2\Delta f \cos(2\pi f_j t_i)$$

$$(A)_{i,M+j} = 2\Delta f \sin(2\pi f_j t_i)$$

• 2つの時系列データ(X線と可視光を想定)

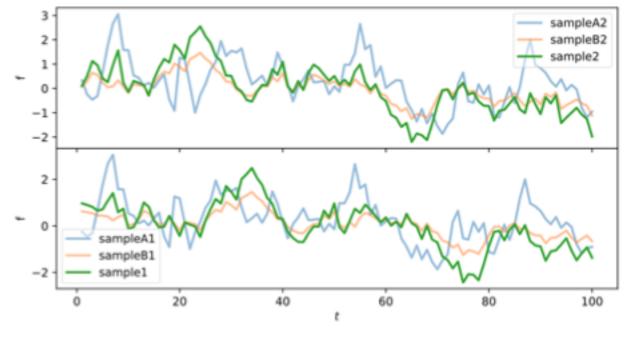
$$y_{x} = A_{x}x_{x}$$

$$y_o = A_o x_o$$

$$A_{xo} = \begin{pmatrix} A_x & O \\ O & A_o \end{pmatrix}$$

• グループLASSOで共通するフーリエ成分を抽出

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{xo} = \underset{\boldsymbol{x}_{xo}}{\operatorname{arg min}} ||\boldsymbol{y}_{xo} - \boldsymbol{A}_{xo} \boldsymbol{x}_{xo}||_{2}^{2} + \lambda \sum_{j} \sqrt{a_{j}^{2} + b_{j}^{2} + c_{j}^{2} + d_{j}^{2}}$$



- 各フーリエ成分の (a, b, c, d) から以下の量が得られる
 - 振幅と位相

$$\begin{aligned} Q_{\mathrm{x},j} &= \sqrt{a_j^2 + b_j^2}, \\ Q_{\mathrm{o},j} &= \sqrt{c_j^2 + d_j^2}, \\ \phi_{\mathrm{x},j} &= 2\pi f_j \Delta t_{\mathrm{x},j} = \arctan(b_j/a_j) \\ \phi_{\mathrm{o},j} &= 2\pi f_j \Delta t_{\mathrm{o},j} = \arctan(d_j/c_j) \end{aligned}$$

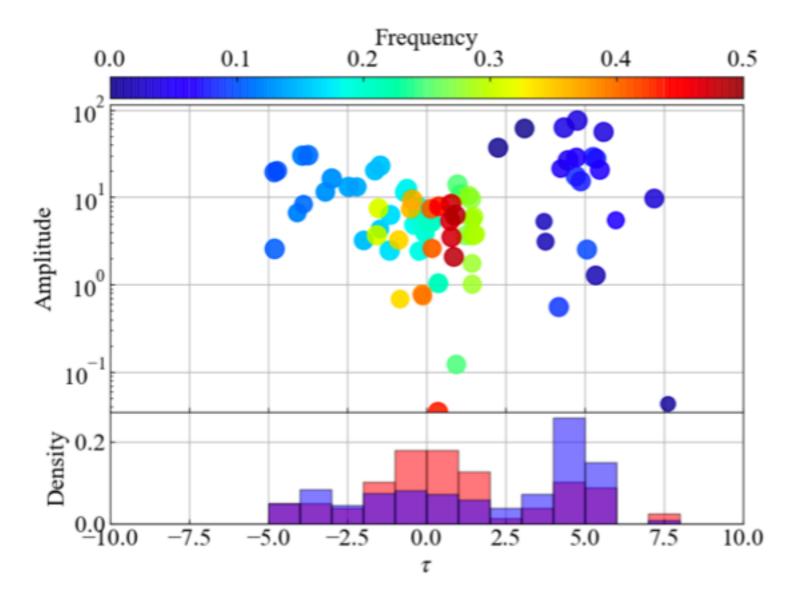
タイムラグ

$$\tau_{j} = \begin{cases} \Delta t_{\mathbf{x},j} - \Delta t_{\mathbf{o},j} \ (-T_{j}/2 \le \Delta t_{\mathbf{x},j} - \Delta t_{\mathbf{o},j} < T_{j}/2), \\ T_{j}/2 - (\Delta t_{\mathbf{x},j} - \Delta t_{\mathbf{o},j}) \ (\text{otherwise}), \end{cases}$$

共通性

$$r = \begin{cases} Q_x/Q_o & (Q_x \leq Q_o) \\ Q_o/Q_x & (Q_x > Q_o) \end{cases}$$

(周波数,振幅,タイムラグ,共通性)を可視化



- 1つの丸が1つのフーリエ成分
 - 周波数=色
 - 振幅 = 縦軸
 - タイムラグ=横軸
 - 共通性=丸の大きさ
- フーリエ成分が集中しているところ (タイムラグ=5) に共通成分 あり、とみなす
 - ヒストグラムが有用

成分分離と光度曲線の再構成

- 長い期間では非定常だけど、短い区間なら定常とみなす。
- 光度曲線全体を短いフレームに分割

$$y_m(t - mS) = w_s(t - mS)y(t),$$

- 今回の場合
 - 全データ = Δ t=0.05秒で1200秒(24,000点)
 - 1フレーム 50秒
 - ステップ 1秒 (20点)
 - ハン窓

- フレームごとに
 - 共通成分解析から特定のタイムラグを持つフーリエ成分を抽出
 - 逆フーリエ変換で光度曲線を再構成

$$\tilde{y}_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{k \in K} \hat{x}_{m,k} \exp(2\pi i f_k t)$$

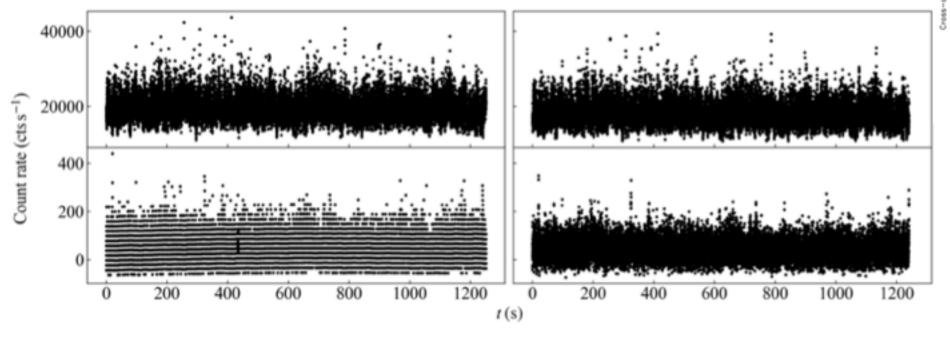
$$= \frac{1}{N} \sum_{k \in K} [a_k \cos(2\pi f_k t) + b_k \sin(2\pi f_k t)].$$

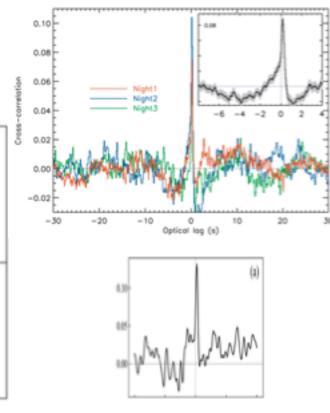
• 再構成した光度曲線は精度の高い真ん中付近に重みを置いて平均して全てのフレームを足し合わせる

$$\hat{y}(t) = \sum_{m} w_a (t - (mS + \ell/2)) \tilde{y}_m(t)$$

$$w_a(t') = \begin{cases} \frac{4S}{d^2} t' + \frac{2S}{d} & (-d/2 \le t' \le 0) \\ -\frac{4S}{d^2} t' + \frac{2S}{d} & (0 < t' \le d/2) \\ 0 & (\text{otherwise}), \end{cases}$$

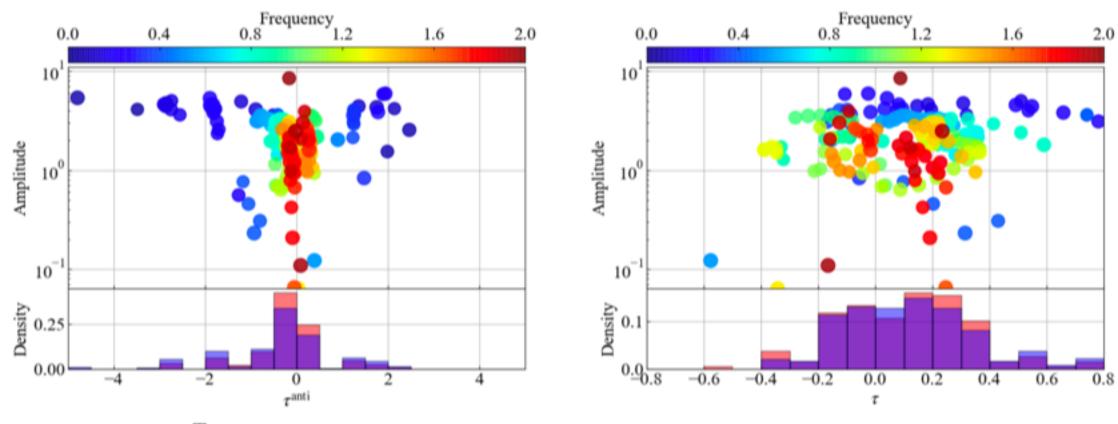
データ





- GX 339-4 (Gandhi+08)
- Low/hard state:アウトバーストから減光した直後の時期
- X線データは 1ビン(0.05秒)で~10カウント → ポアソンノイズが支配的
- 前処理:Low-pass filter (FIR フィルタ) をかけて、2Hz以上のパワーを急速に落とす。

共通成分解析の結果 (とある1フレーム)



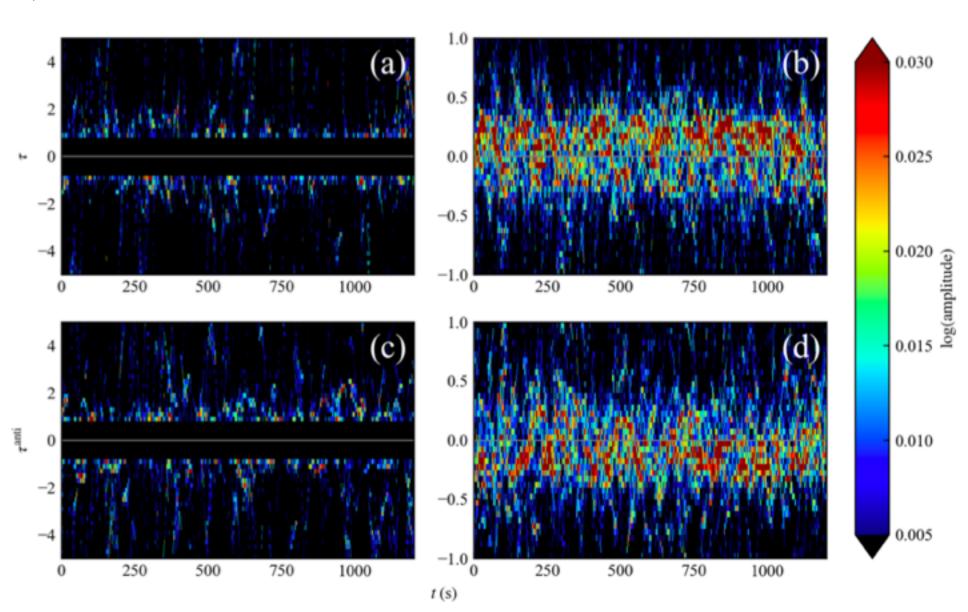
$$au_j^{ ext{anti}} = \left\{ egin{array}{ll} au_j - rac{T_j}{2} & (au_j \geq 0) \ au_j + rac{T_j}{2} & (au_j < 0) \end{array}
ight.$$

• 反相関: +1~2秒のあたり?

• 順相関: +0.2秒?

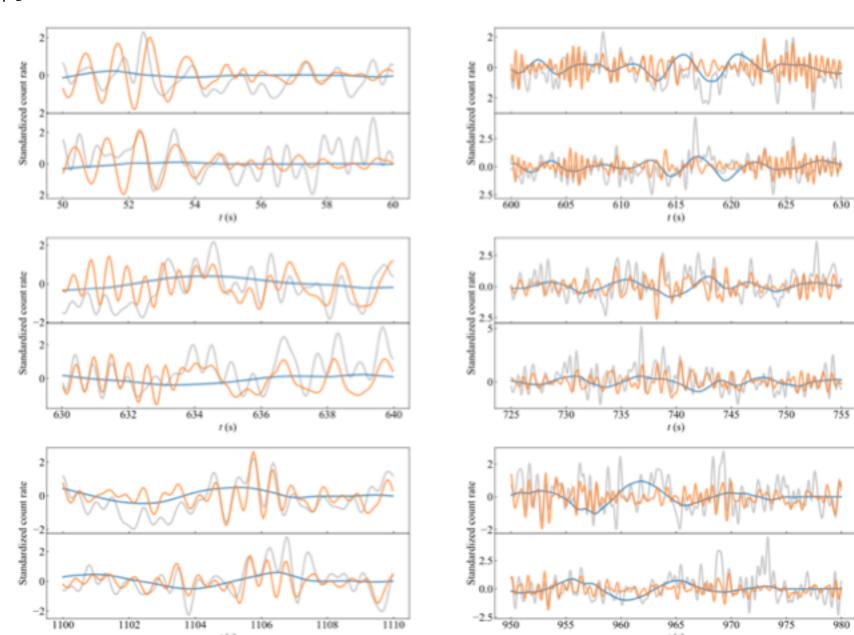
タイムラグマップ

- タイムラグの時間変化
- 色は振幅
- 反相関で+1~2秒あたり に散発的な構造
- 順相関で+0.15秒あたり に定常的な構造
- これら2つの共通信号 の光度曲線を再構成する



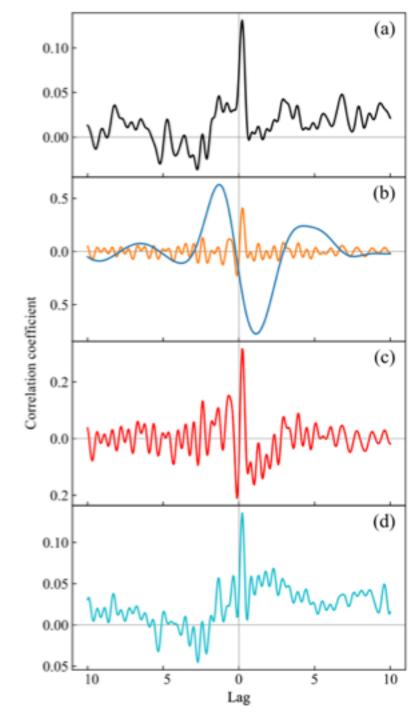
再構成された光度曲線

- +0.15秒で順相関(オレンジ)
 - 期待通りの光度曲線
- +1秒で反相関(青)
 - むしろ-1秒で順相関にも見 える
 - 反相関ではなく、順相関なのかもしれない
- X線が0.15秒先行して順相関する信号=X-ray preceding signal (XPS)
- 可視光が1秒先行して順相関する信号=Optical preceding signal (OPS)



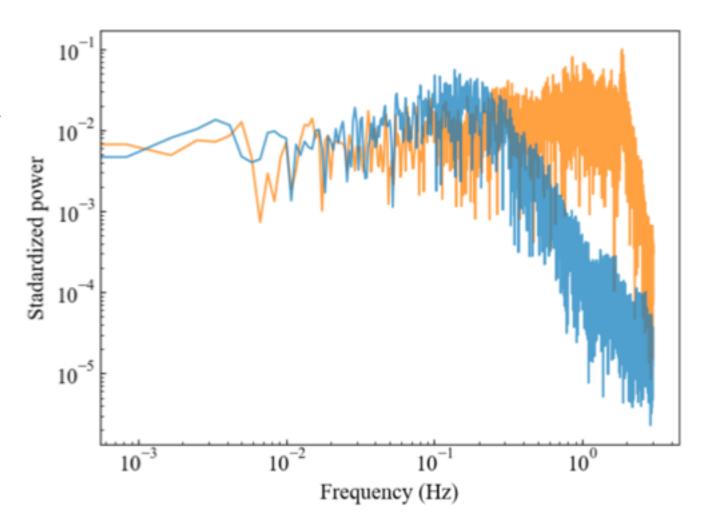
成分ごとの相互相関関数

- XPS:+0.15秒に順相関のピーク
- OPS: +1秒に反相関&-1秒に順相関 (possibly -3秒に反相関)
 - 抽出したのは反相関してたフーリエ成分なのに
- XPS+OPSの相互相関関数で、データの相互相 関関数の特徴を説明できる。



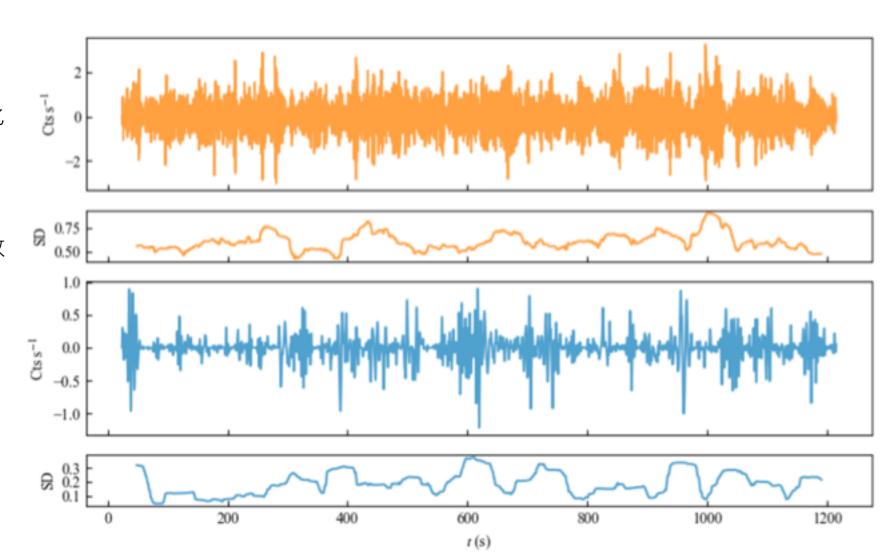
XPSとOPSのパワースペクトル

- XPS のタイムスケール
 - <0.5秒(>2 Hz:高周波のパワーは 前処理でフィルターかけて落として いるので)
 - 実際は >2 Hzの高周波信号も XPS に含まれているだろう。このデータ ではノイズに埋もれているけど。
- OPS のタイムスケール
 - ~5秒
 - パワーでは数十秒くらいまで卓越



XPSとOPSの活動時期

- 再構成された光度曲線の1フレーム内の標準偏差の時間変化
- XPS, OPS共に活動的な時期と そうでない時期がある(非定常)
- それぞれが活動的な時期は一致しない。
- ひょっとしたら OPSの活動時期がXPSの活動時期に先行?



まとめ

- ブラックホールX線連星で観測される、X線と相関した可視光短時間変動
 - X線が+0.15秒先行する順相関 & 反相関?
 - どこで何が起こっているのか?
- 共通信号成分の抽出と成分ごとの光度曲線解析(Omama, et al. in prep.)
 - GX 339-4: X線が+0.15秒先行する順相関、可視光が4秒先行する反相関、X線が1秒 先行する反相関 (Gandhi+08)
 - 2つの反相関成分は、可視光が1秒先行する1つの順相関成分で説明できる。
- 新しい武器で、これまで得られなかった情報を抽出