

低質量X線連星Swift J1727.8-1613の アウトバースト中の可視光変動の起源



金沢大学

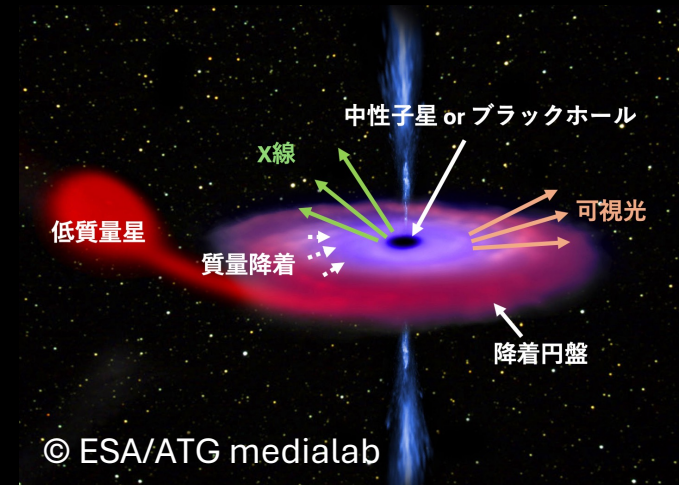
© JAXA

修士1年 大塚天心

共同研究者: 木邑真理子(金沢大学)、酒向重行(東京大学)、
Kaushik Chatterjee (South-Western Institute for Astronomy Research)

低質量X線連星 (Low-Mass X-ray Binaries; LMXBs)

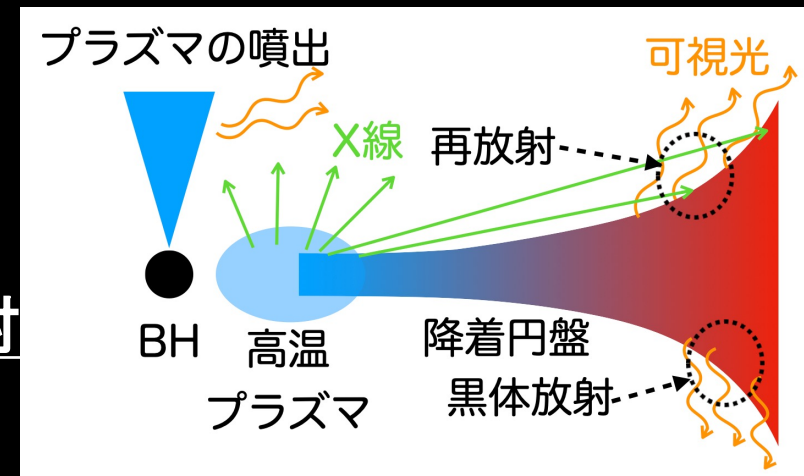
- 主星がブラックホールまたは中性子星、伴星が低質量星の近接連星系
- 伴星から主星へガスの流入
→ 降着円盤を形成
- 多波長域でさまざまな放射



LMXBsのイメージ図

可視光では

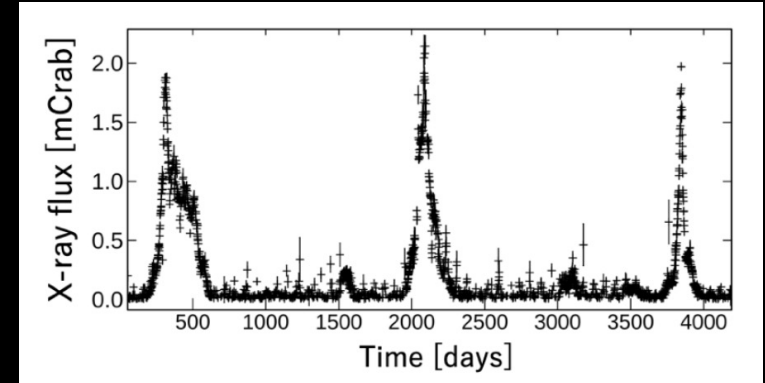
- 円盤の黒体放射
- X線照射による可視光の再放射
- ジェットからのシンクロトン放射



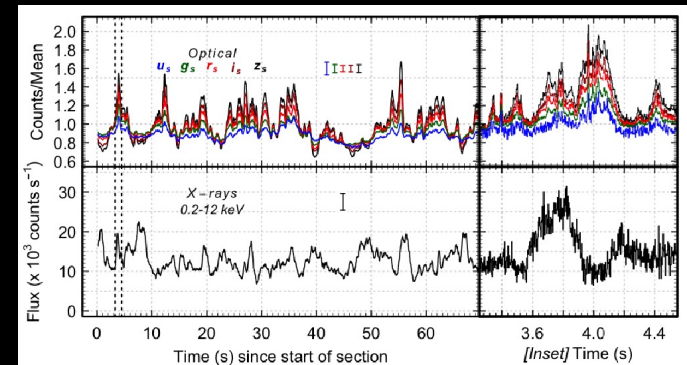
LMXBsのイメージの断面図

アウトバースト・短時間変動

- 円盤内の水素の熱不安定
→ “アウトバースト”
- アウトバースト中に
ミリから数十秒スケールの
短時間変動が多波長域で発生
- この短時間変動の物理機構は
完全には解明されていない



アウトバーストの長期間光度変化



Paice et al. (2019)

アウトバースト中の短時間変
動

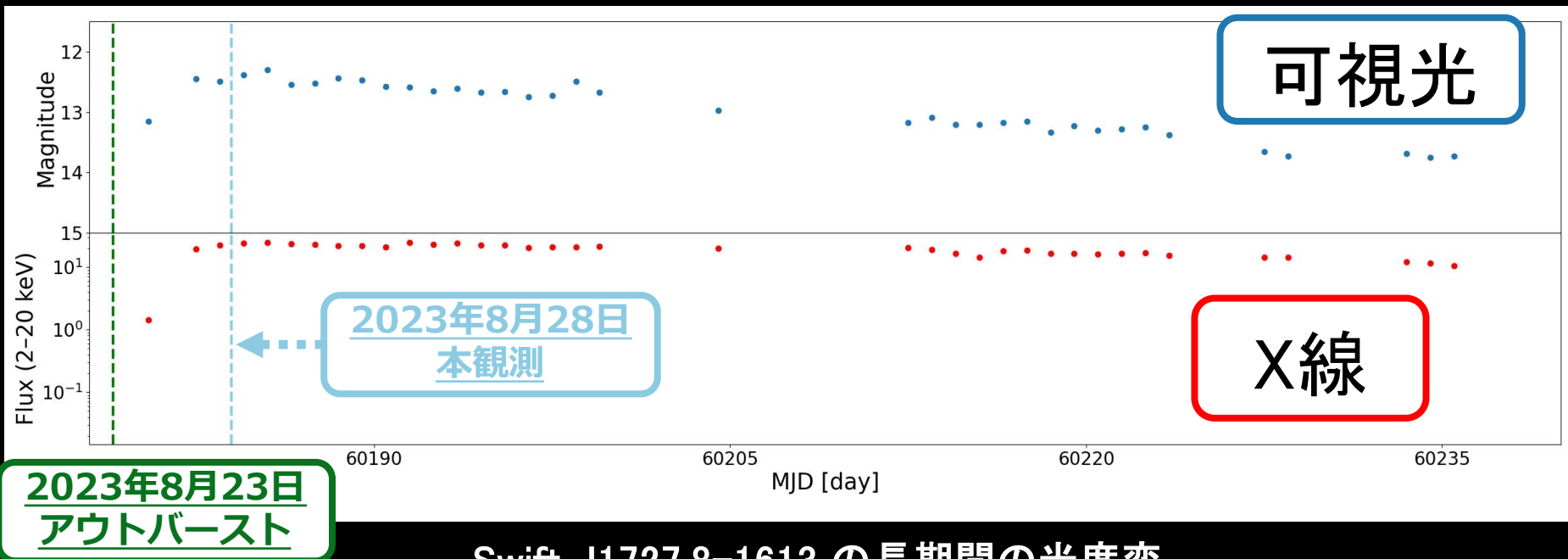
X線と可視光の変動を比較
⇒ 短時間変動の放射機構に制限をかけたい

Mineshige, S., & Wheeler, J.C. (1989)

Tanaka, Y. & Shibazaki, N. (1996)

Paice, J.A., et al (2019)

ターゲット天体:Swift J1727.8-1613



Swift J1727.8-1613 の長期間の光度変

- 2023年8月23日にアウトバーストの立ち上がり
- X線で非常に明るいアウトバースト(1.68×10^{-7} [erg/cm²/s] @2-20 [keV])
- 主星がブラックホール(主星:13.5 M_☉, 伴星:K4V, $P_{orb} = 0.45$ [day])
- サブ秒スケールの時間変動
- せいめい望遠鏡のTriCCSとInsight-HXMTによる可視光とX線の同時観測データ(2023年8月28日)

Debnath, D., et al (2025)

Mata, A., et al (2025)

Kennea, J.A. & SWIFT Team (2023)

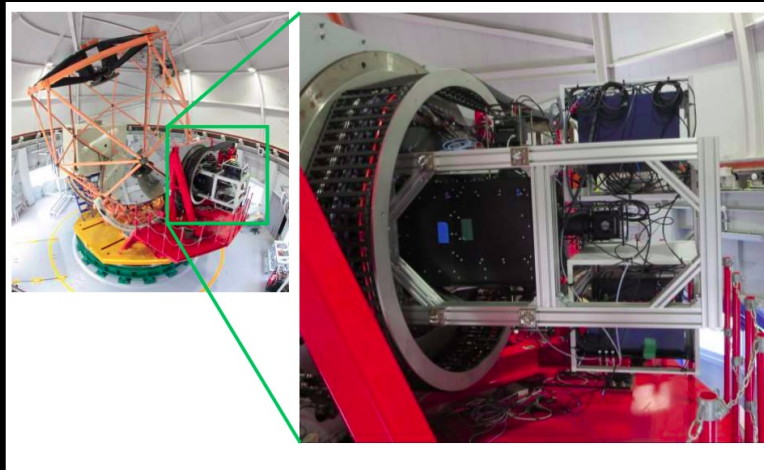
せいめい望遠鏡搭載

Tricolor CMOS Camera and Spectrograph (TriCCS)

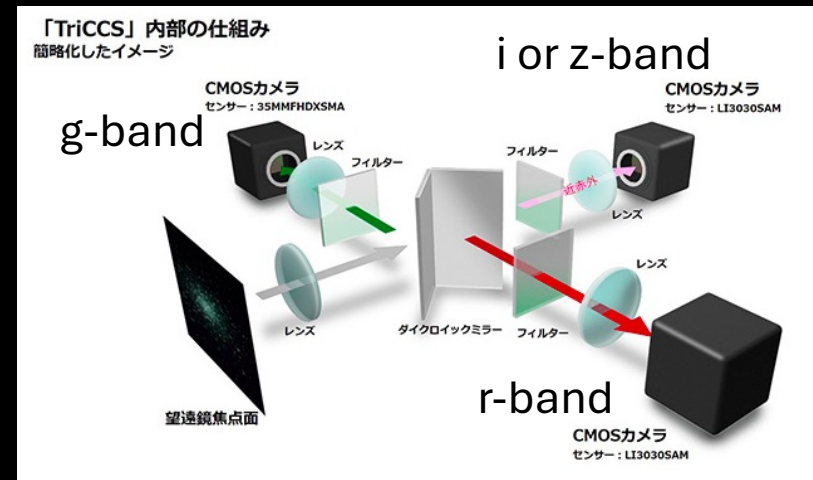
- 観測光を3つの光路に分け、それぞれ別のフィルター(g, r, i or z-band)を通し、CMOSカメラで撮像。

最大フレームレート	98 FPS
絶対時刻精度	0.5 ms
視野角	12.6 × 7.5 分角

- 観測対象：超新星、フレア星、X線連星



©京都大学岡山天文台
せいめい望遠鏡



©京都大学岡山天文台
TriCCSの内部構造

Insight Hard X-ray Modulation Telescope (Insight-HXMT)

- High Energy(HE) 20–250 keV
- Middle Energy(ME) 5–30 keV
- Low Energy(LE) 2–15 keV

時間分解能	HE	25 μ s
	ME	25 μ s
	LE	1 ms
絶対時刻精度	8.6–15.8 μ s	

⇒ TriCCSと相性が良い

LE

- Swept Charge Device(SCD)で検出
- コリメーター方式

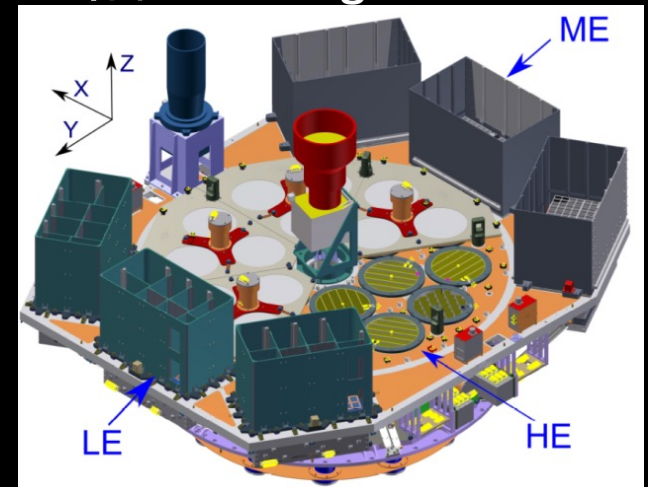
観測モード

- 銀河サーベイ : ポインティングオブザベーション = 40 % : 60 %

©Insight-HXMT (HEASARC/NASA)



X線衛星 Insight-HXMT



©National Space Science Data Center

Insight-HXMTの検出システム

データリダクション

可視光

手順

- 1.ダーク引き・フラット割
2. $4.0 \times \text{FWHM}$ でアパーチャー測光
- 3.比較測光

データ情報

- ・3つのバンド(g,r,i)で観測
- ・データフレームレート: 11 [FPS]
- ・連続観測時間: 22 [minute]

X線

手順

- 1.HEASOFTのHXMTDASを用いてhpipelineを実行
- 2.helcgen,melcgen,lelcgenを用いてライトカーブを作成

データ情報

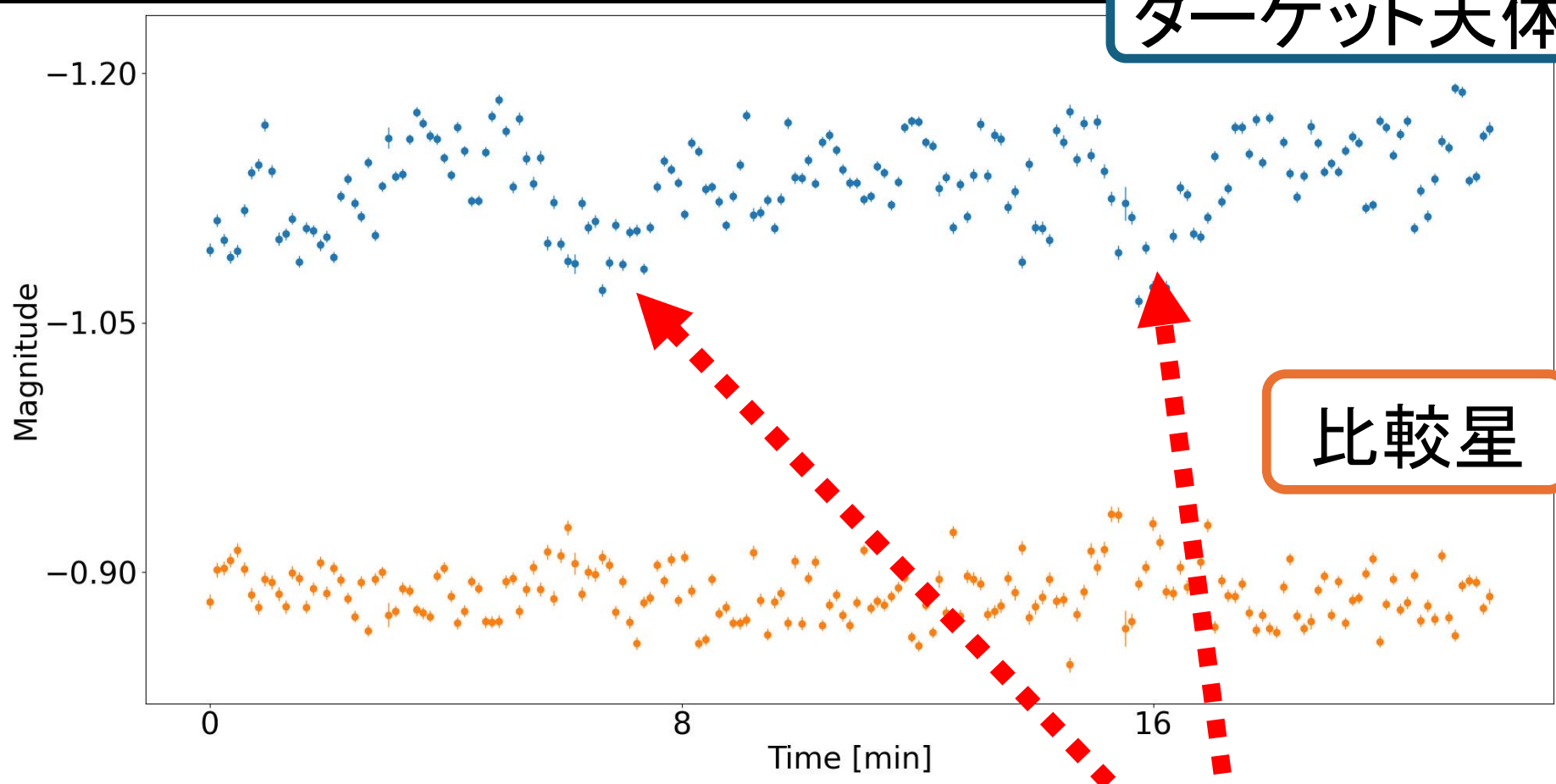
- ・サンプリングレート: 10 [FPS]
- ・有効観測時間: 27 [minute]

同時観測時間:7分

可視光の測光結果

7秒 binning

ターゲット天体

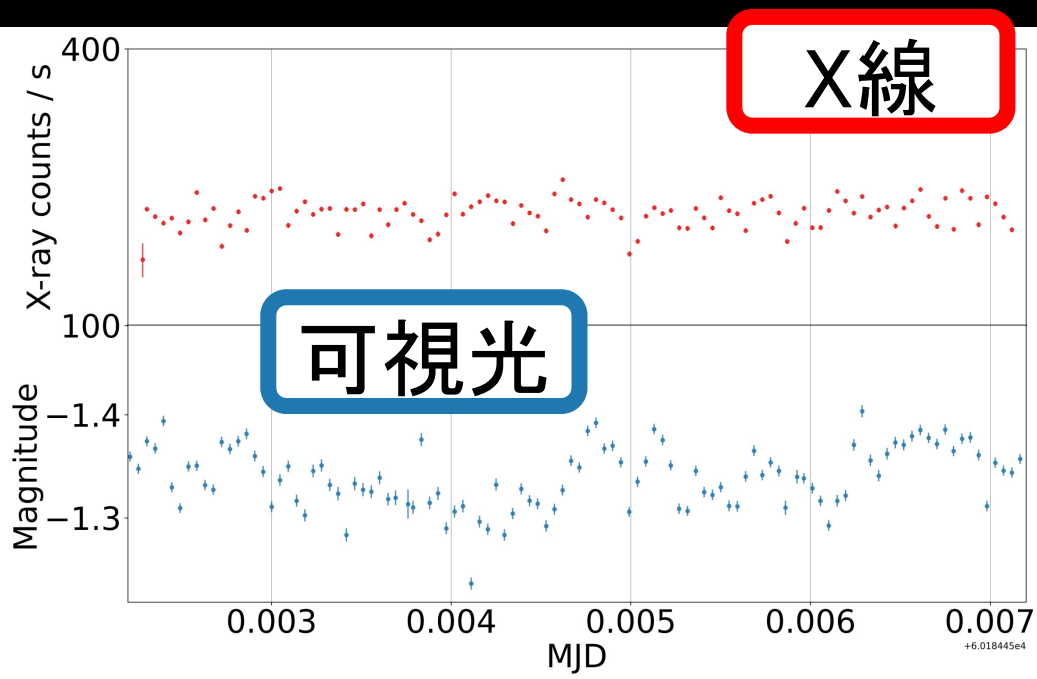


比較星

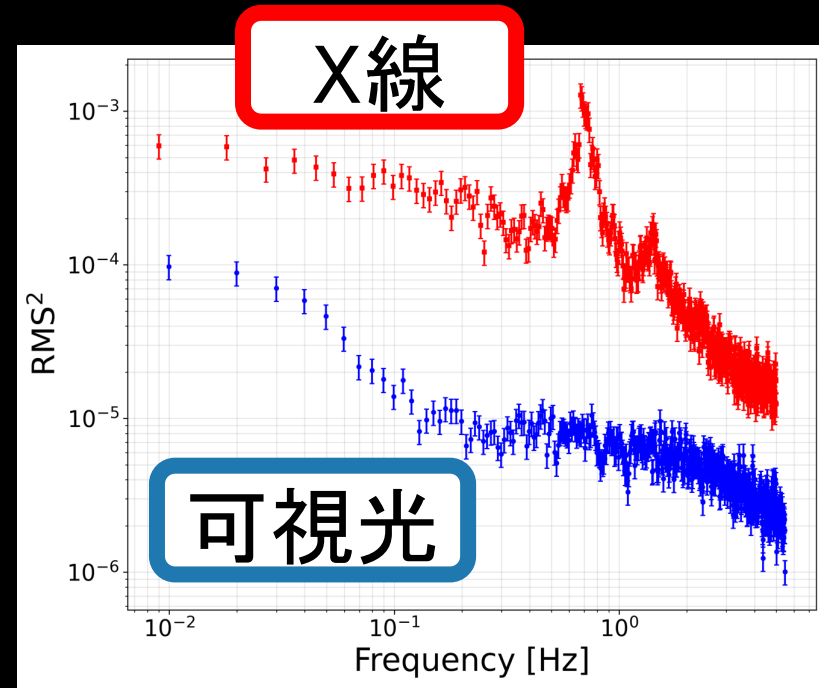
Swift J1727.8-1613の明るさの短時間変動

比較星に比べて顕著な分スケールの変動

可視光とX線の比較



X線と可視光の短時間変動の同時比較

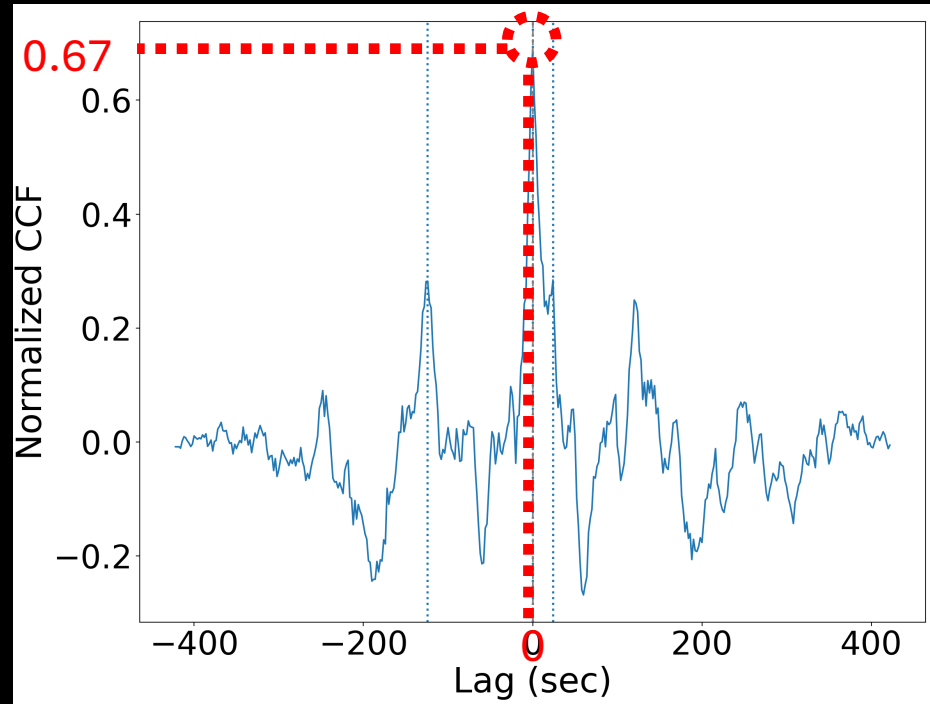


X線・可視光のパワースペクトル

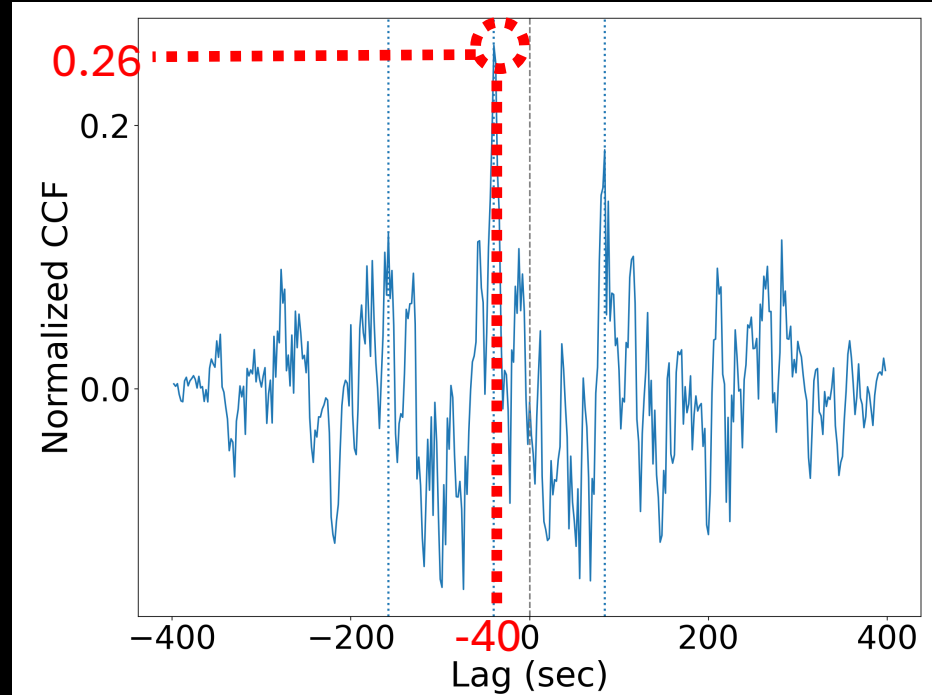
- ・可視光とX線の変動の様子が異なる
- ・周波数特性も異なる

X線と可視光の相関

g - r band



X線 vs 可視光



可視光同士とX線 - 可視光の組み合わせの相互相関関数

g - r band	: タイムラグ	0 [sec]
X線 vs 可視光	: タイムラグ	40 [sec]

タイムラグのベイズ推定

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{\sum P(B|A)P(A)}$$

A : 仮定(パラメーター: タイムラグ、OU process parameter etc.)

B : 比較する2つの観測データ

$P(A)$: 事前分布

$P(A|B)$: B が与えられた時の A の条件付き確率

$P(B|A)$: A が与えられた時の B の条件付き確率

- 事前分布を設定することで、解にある種の制約を課している。
- 未知パラメータは確率変数としてモデル化され、その分布が推定される。

MCMC(Markov Chain Monte Carlo)

- 現在の情報を基準として、後続の情報を扱う。
- 解析的に解けない事後分布を計算する

- メトロポリス法

条件 a

Parameter	Value
Time lag	40 [sec]
variability strength	10

⋮

$P(B|A)|_a$

• $a \rightarrow b$

aからbに行く

条件 b

Parameter	Value
Time lag	36 [sec]
variability strength	5

⋮

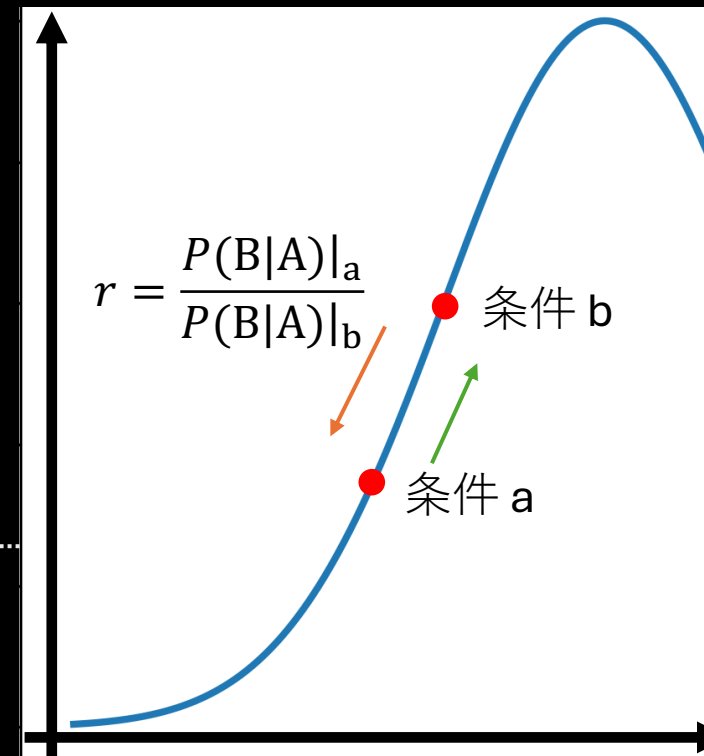
$P(B|A)|_b$

• $b \rightarrow a$

$$r = \frac{P(B|A)|_a}{P(B|A)|_b}$$

確率rでbからaに行く

$P(B|A)$



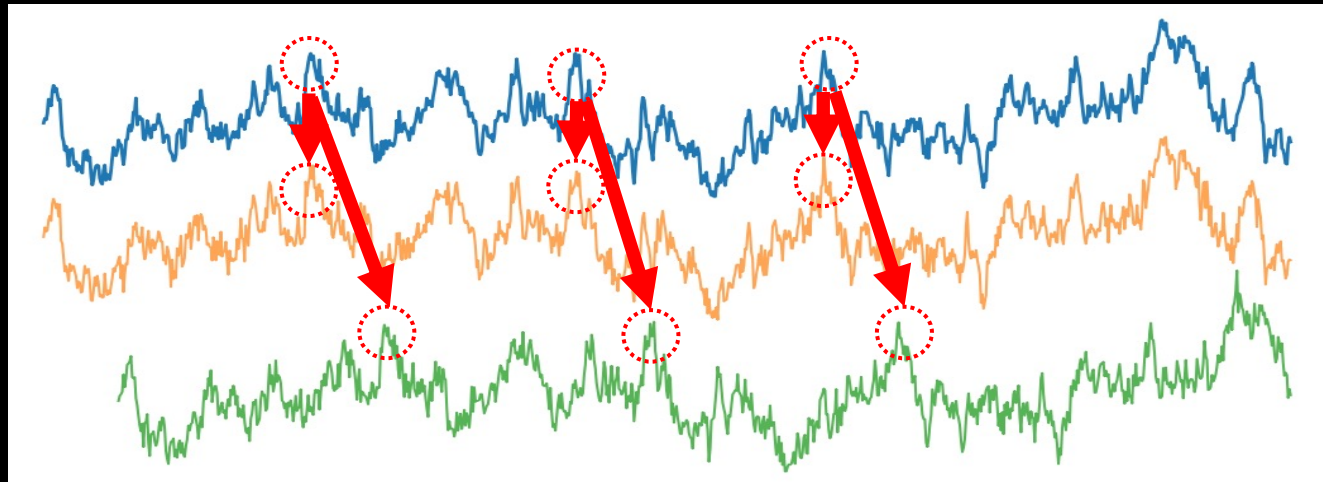
X

Model

$X(t)$
潜在的ライトカーブ

観測1

観測2



$$dX(t) = -\frac{1}{\tau}(X(t) - \mu) + \sigma dB(t)$$

$X(t)$: 潜在的ライトカーブ

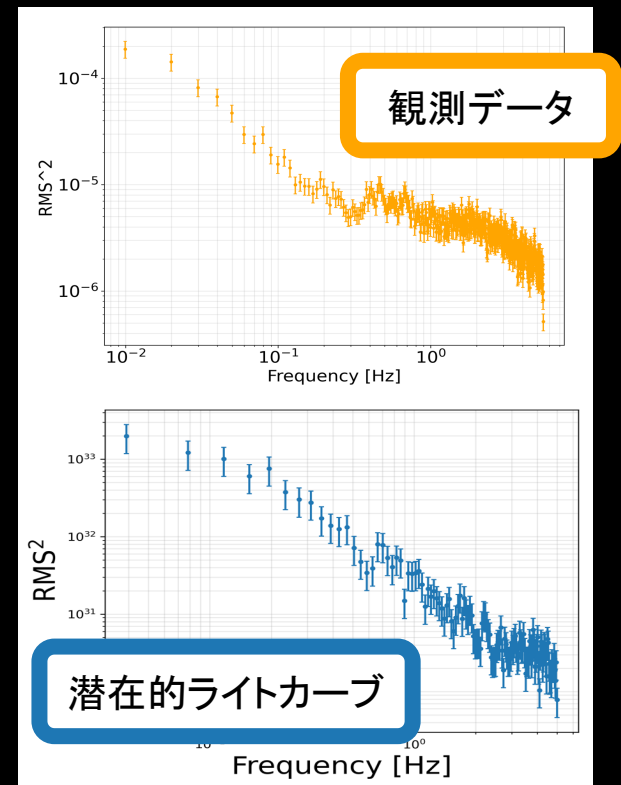
τ : 緩和時間

μ : 平均

σ : 揺らぎの強さ

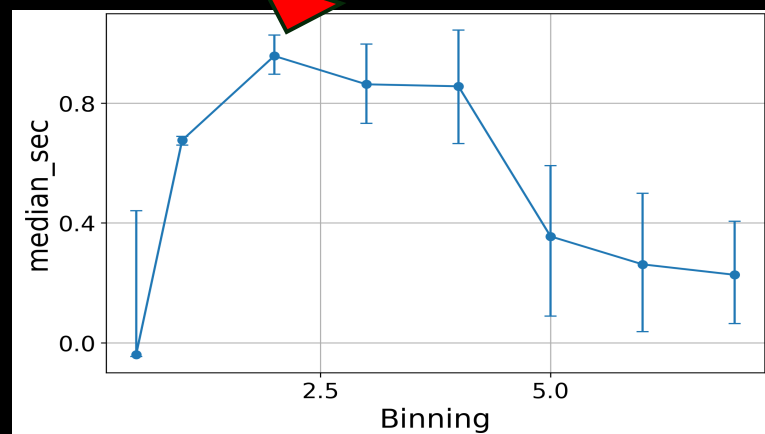
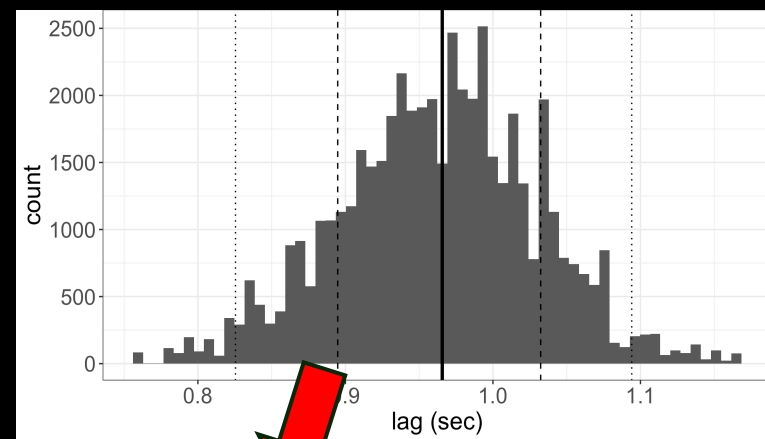
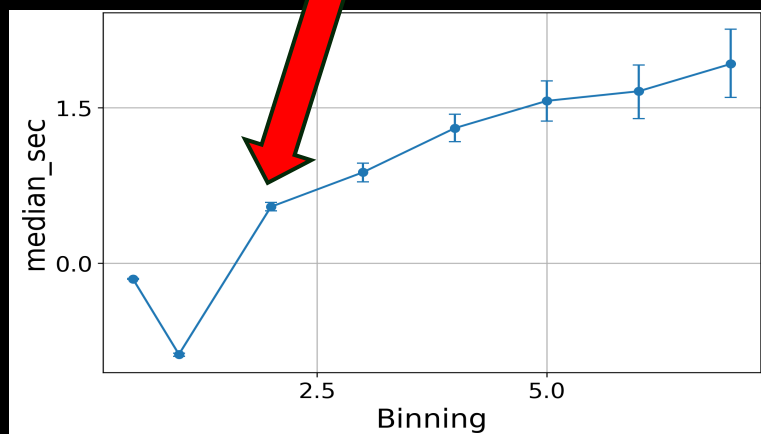
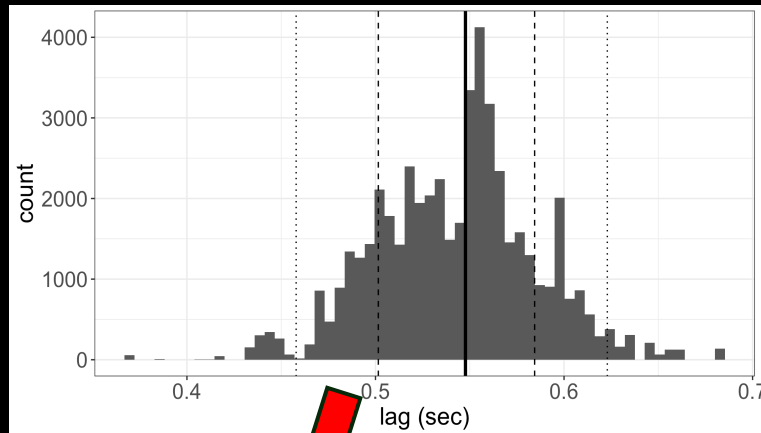
dB : ブラウン運動

- ・連続的な潜在光度曲線 (latent light curve) を仮定
- ・潜在光度曲線は Ornstein-Uhlenbeck Process で生成
- ・観測1には時間遅れはなく、観測2には時間遅れがある



タイムラグの事後分布の推定結果

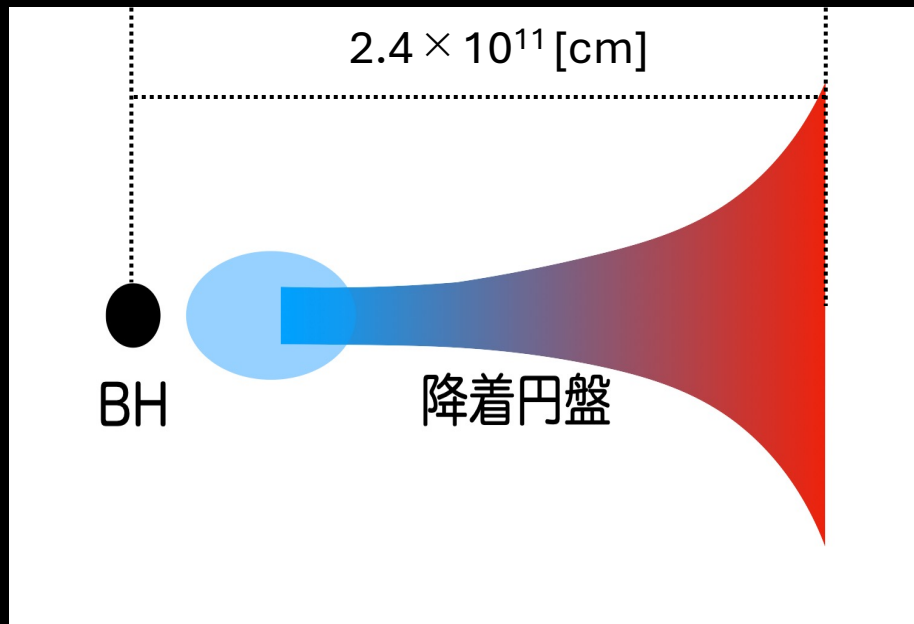
14



ビンングサイズによるタイムラグの推定結果の変化

- タイムラグが0秒付近に収束
- 長波長側が遅れている
- ビンングサイズによって結果が異なる

降着円盤の中心から外縁までライトラベルタイム



降着円盤の内縁から端までの距離
: 2.4×10^{11} [cm]
ライトラベルタイム(光伝搬時間)
: 8.0 [sec]

$$a = \left[\frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2} P_{orb}^2 \right]^{1/3}$$

$$r_{tidal} = 0.6a \left(1 + \frac{M_2}{M_1} \right)^{-1}$$

$$M_1 = 13.5 \pm 1.9 M_{\odot}$$

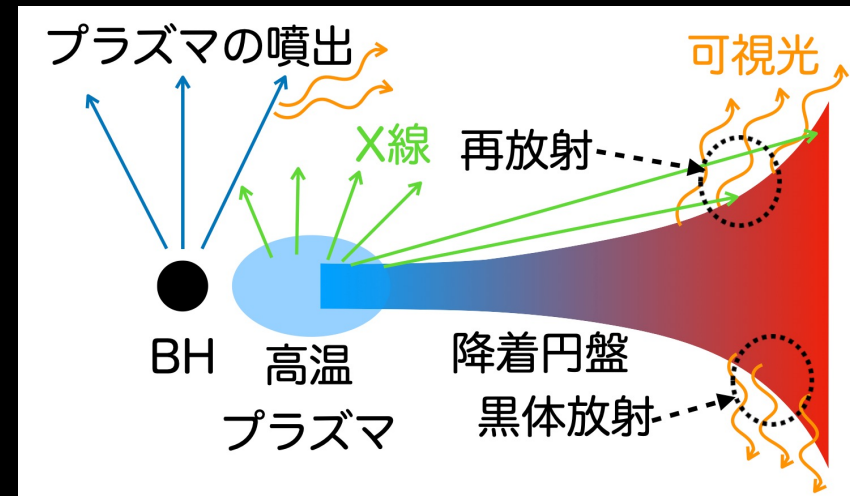
$$M_2 = 0.5 M_{\odot}$$

$$P_{orb} = 0.45016 \pm 0.00003 [day]$$

Discussion

- 可視光の変動がX線の変動に対して40 [sec] ($\gg 8.0$ [sec]) 遅れている
- 可視光において長波長側が1秒ほど遅れている。
 - ⇒ X線照射の可能性
- しかし、タイムラグがライトラベルタイムに対して長すぎる
- また、周波数特性も異なる

⇒ **X線照射の寄与は小さい**



LMXBsのイメージの断面図

可視光の他の変動起源候補

- ジェットによるシンクロトロン放射

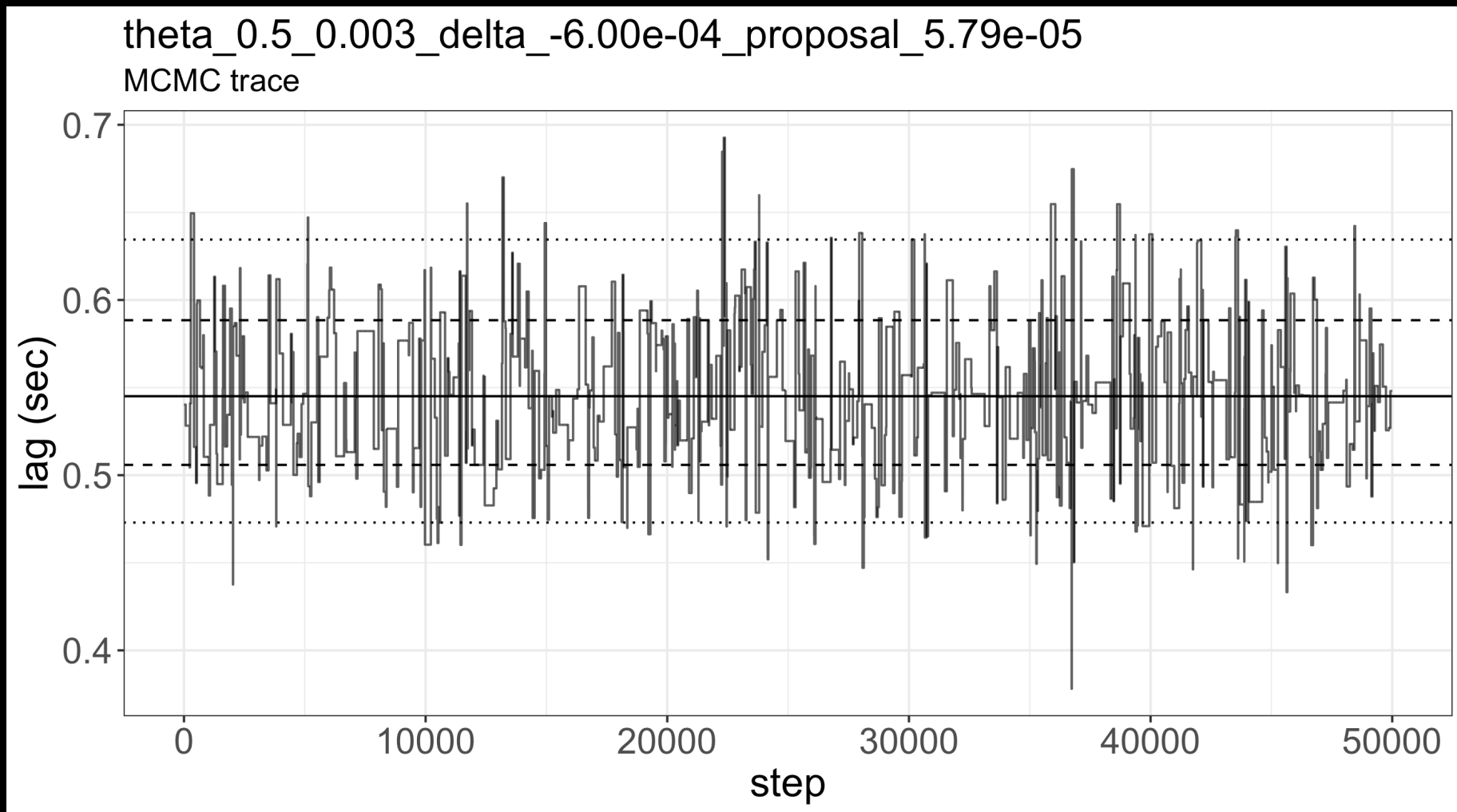
Summary

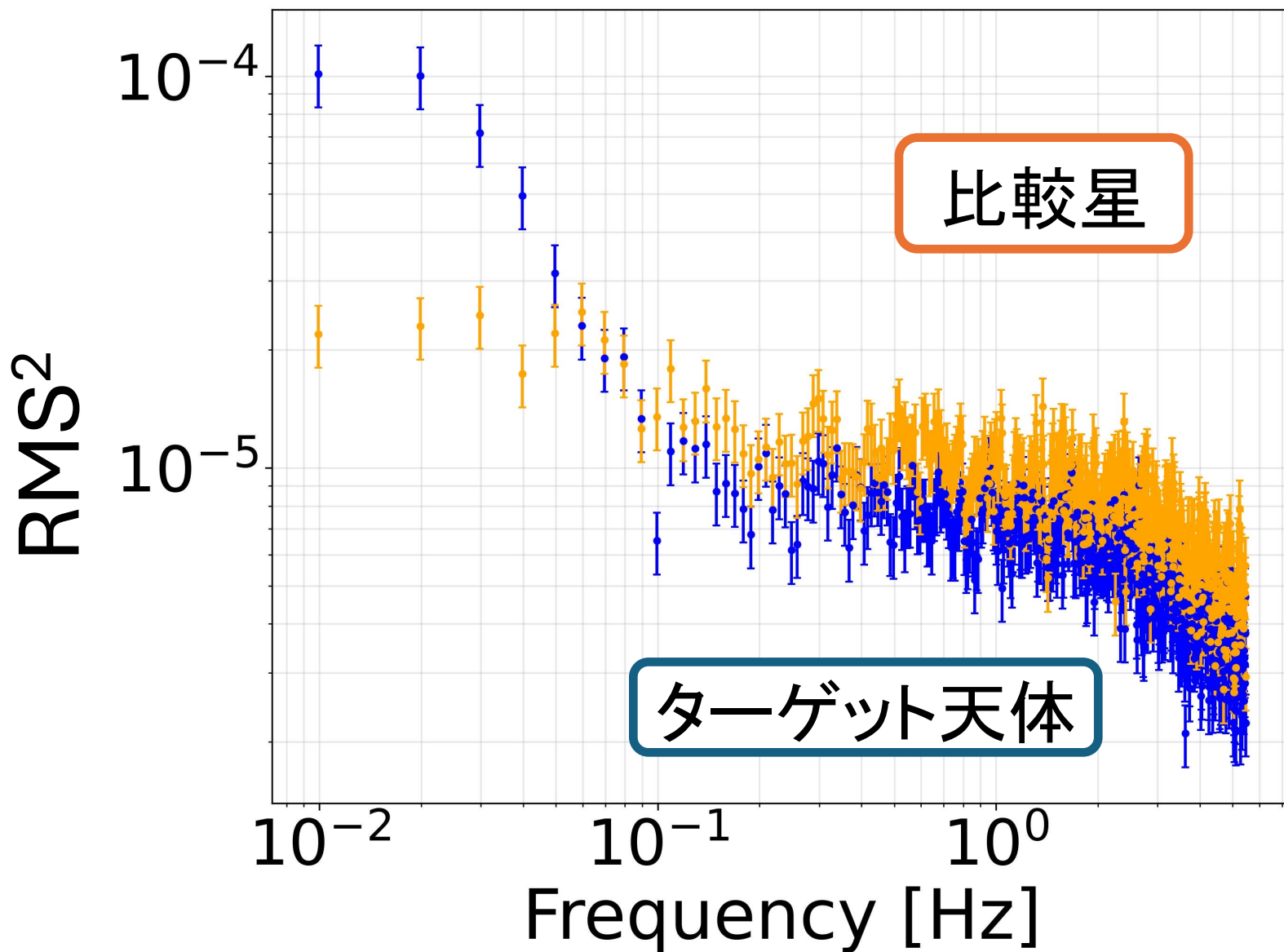
- 分スケールの可視光変動
- 可視光変動は、X線変動とは周波数特性が異なる
- 可視光変動がX線変動に対して40秒遅れている(ライトトラベルタイムでは説明できない)
- 可視光変動において長波長側が1秒ほど遅れている

Future Work

- X線と可視光のFlux比較
→電波との相関を見る
- X線の10秒ごとのスペクトルを変えて可視光との変動の比較
→X線を成分ごとに分解し、そのどの成分が可視光変動と結び付いているかを調べる

Appendix





theta_0.5_0.003_delta_-6.00e-04_proposal_5.79e-05

MCMC trace

