

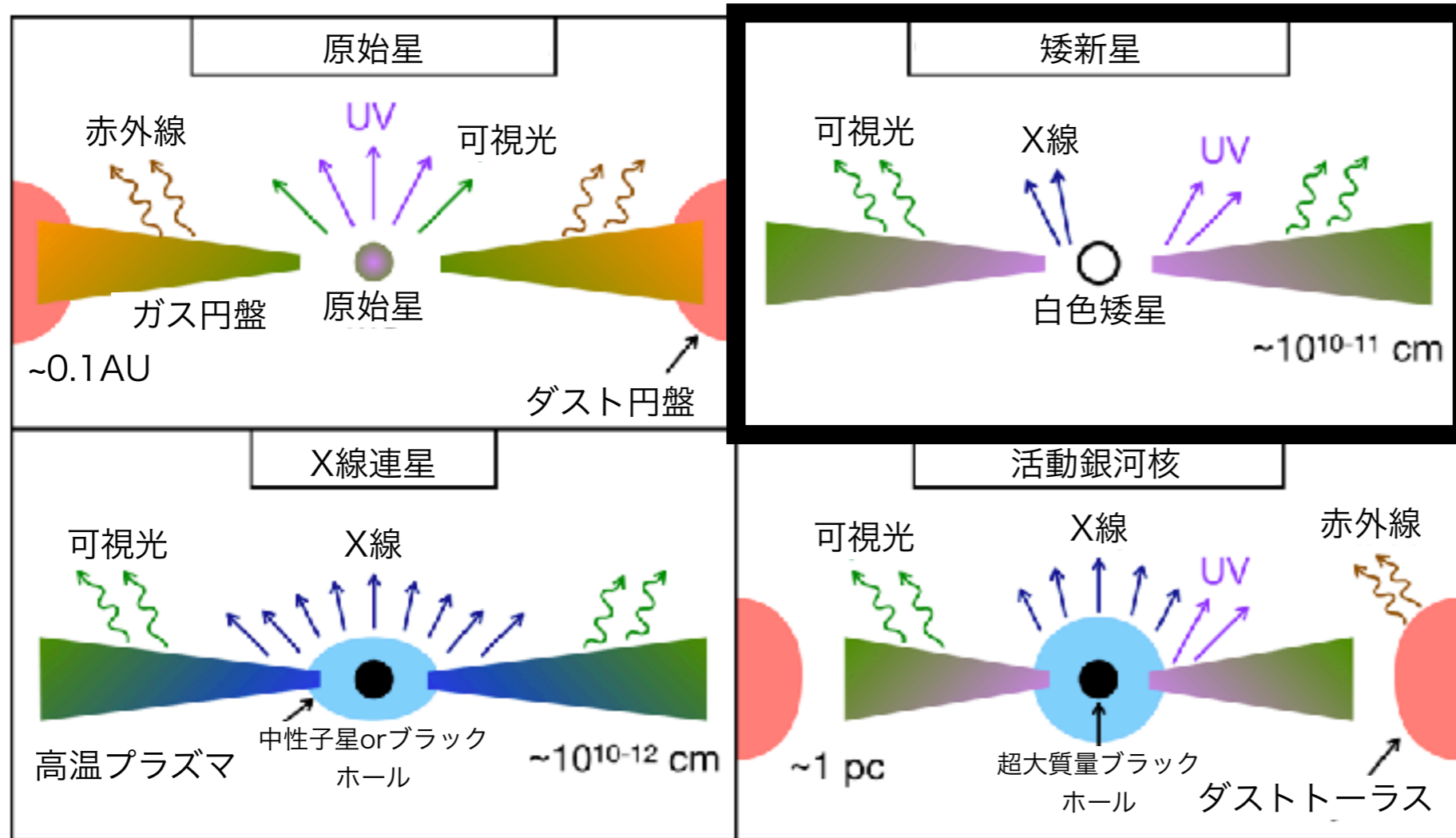
木曾Tomo-e GozenとNICER 望遠鏡による矮新星SS Cygの 可視光・X線同時高速観測

木曾シュミットシンポジウム2021

西野耀平, 酒向重行, 紅山仁, 大澤亮, 峰崎岳夫, 瀧田怜 (東京大学),
木邑真理子, 榎戸輝揚 (理化学研究所), 中庭望 (東京都立大学),
山田真也 (立教大学), Keith C. Gendreau(NASA/GSFC)

様々な降着円盤天体

降着円盤天体の内側



1. 数が多い
2. 可視光で明るい
3. 増光のタイムスケールが短い
4. 強重力、強磁場の影響を受けにくい



最もシンプル、
降着円盤の研究
に最適

理化学研究所 木邑氏より提供

宇宙には様々な降着円盤天体がある。系によってタイムスケールは異なるが、**降着円盤の物理は普遍的である。**

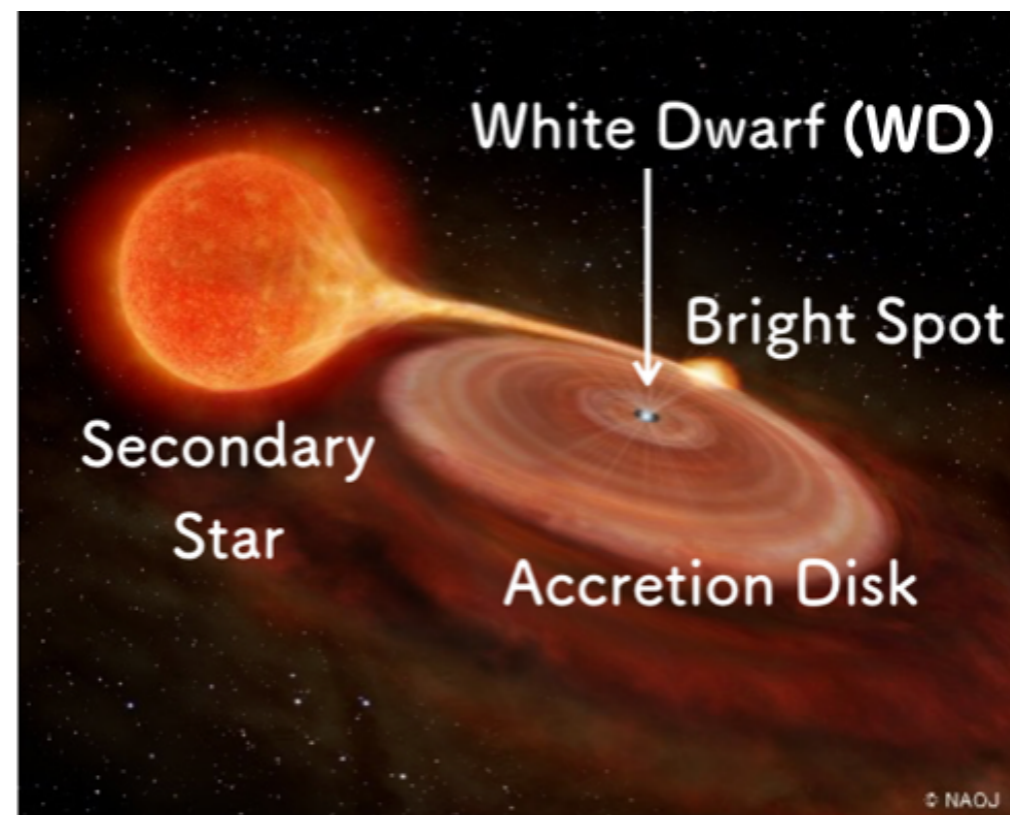
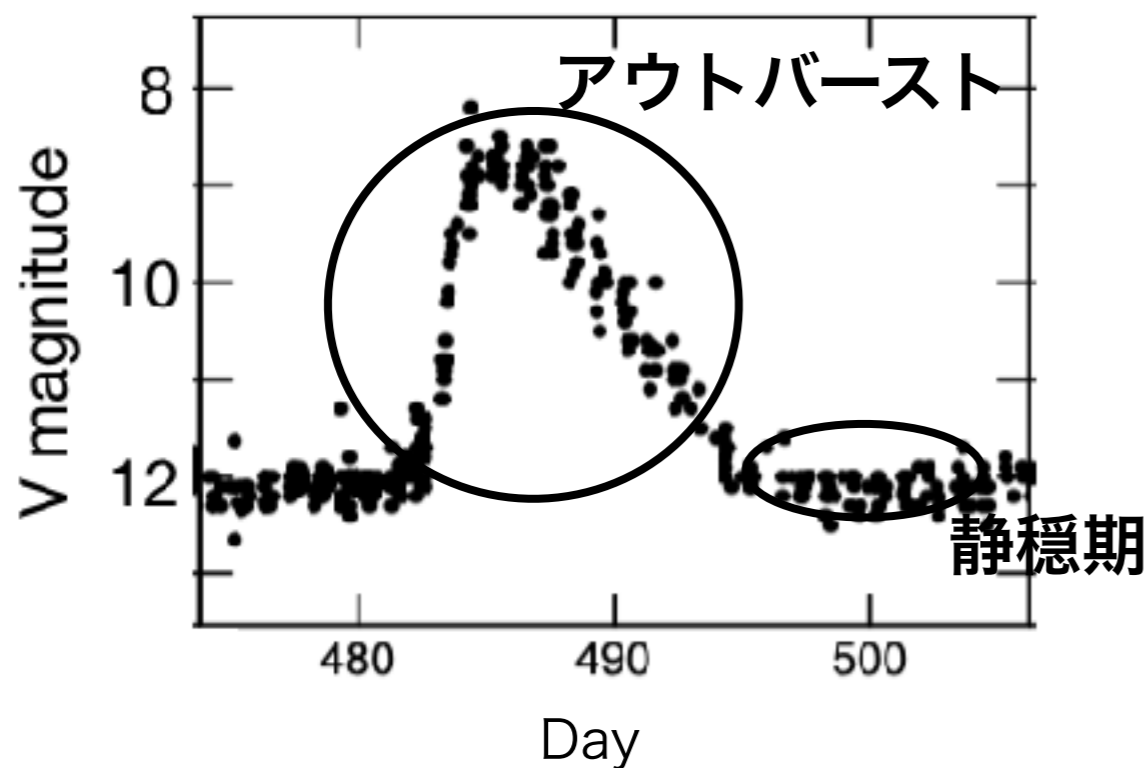
— 若い大質量星の質量獲得

— 活動銀河核における超大質量ブラックホールの形成

矮新星とは

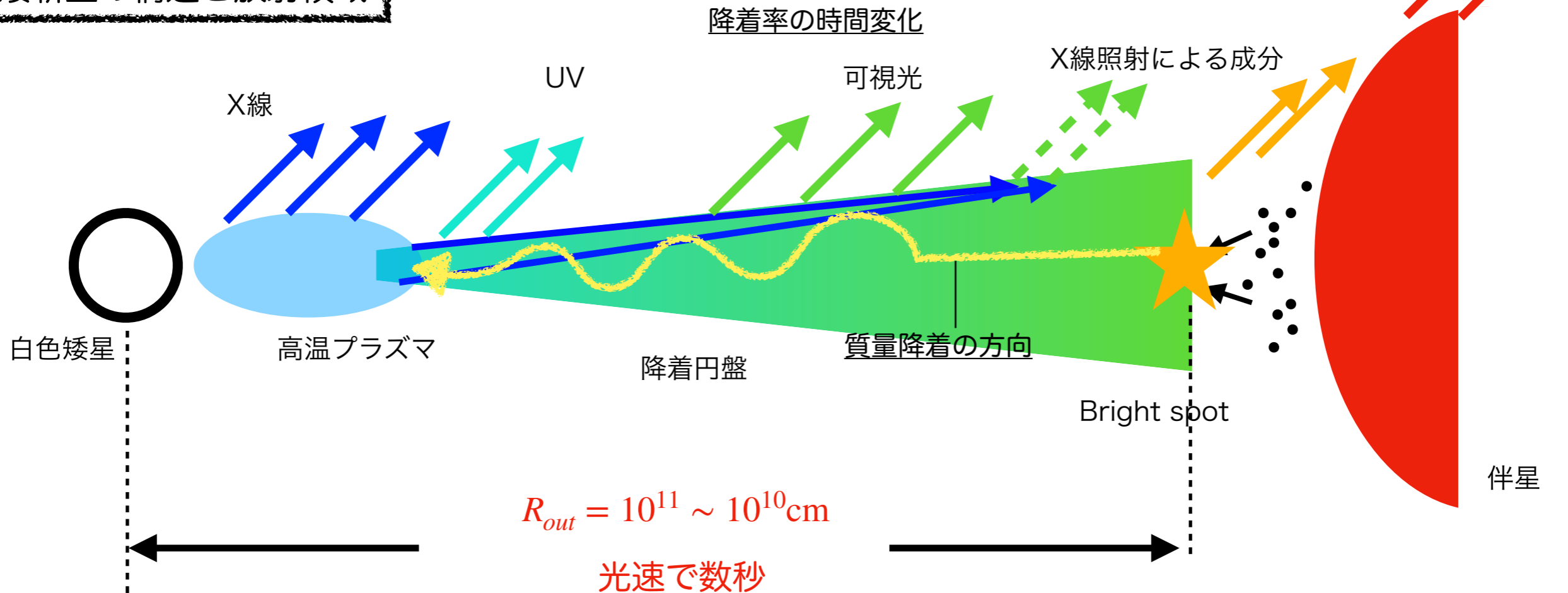
矮新星の特徴

- 白色矮星+低質量伴星
- 伴星からの質量輸送により降着円盤を形成
- Bright Spot … 伴星からの質量が流入する高温領域
- 円盤の熱不安定による、数十~数百日周期のアウトバースト。2~6等の可視光光度上昇



短時間変動を伴う動的システム

矮新星の構造と放射領域



問題点 シンプルな理論モデルだけでは説明できない、多様な増光や秒スケールの短時間変動

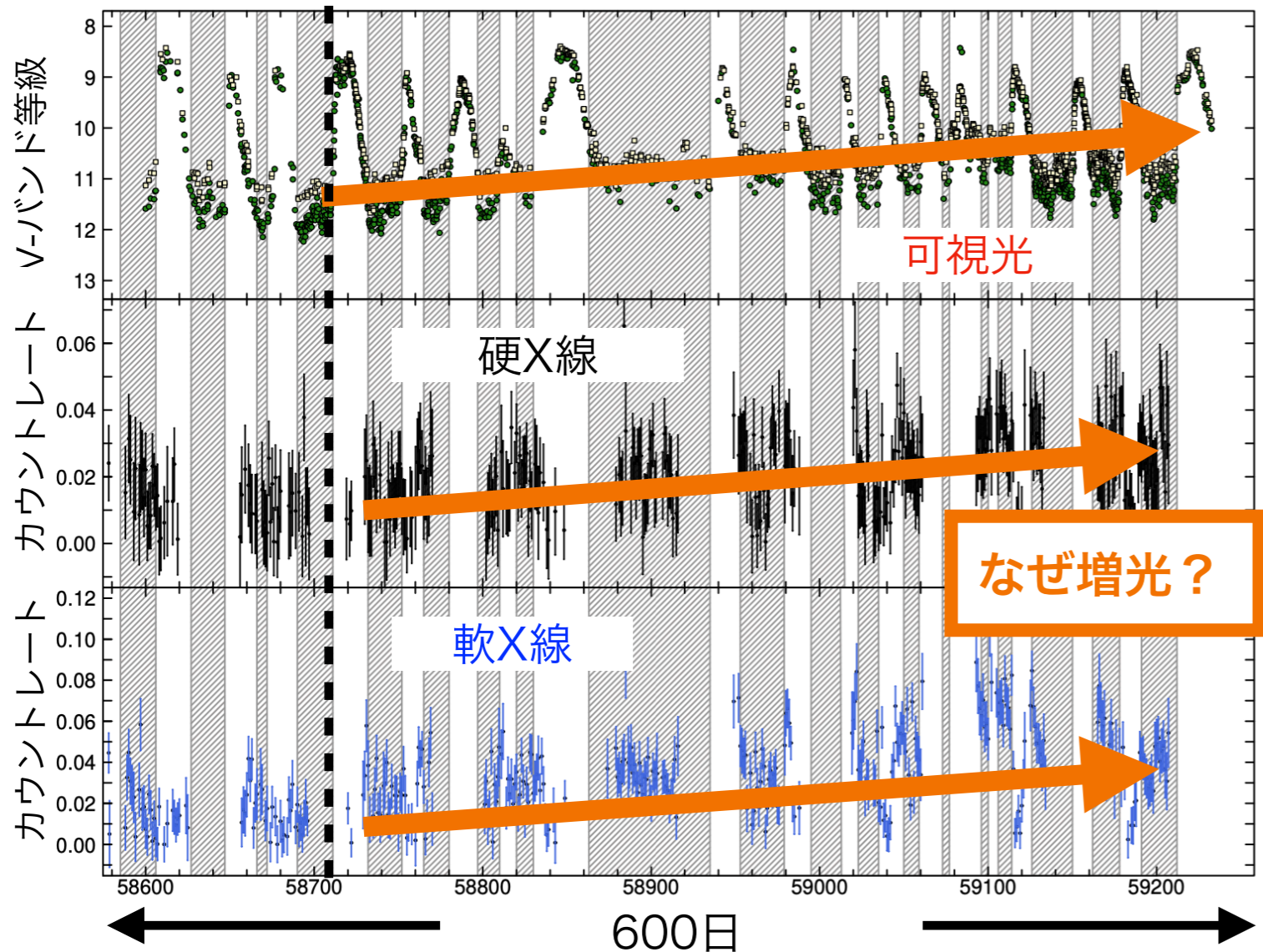
円盤の内側(X線)と円盤の外側(可視光)が

— 今までは別々に研究されてきた
— 実際は相互作用し、大きな物理状態の変化を生む

多波長同時観測を行い、円盤の物理現象の全体像を描く

矮新星 SS Cyg

2019年8月



理化学研究所 木邑氏より提供

- 典型的な矮新星

- 白色矮星+低質量星
- ~4等のアウトバースト
- 一定した静穏等級

- 多数の可視光観測

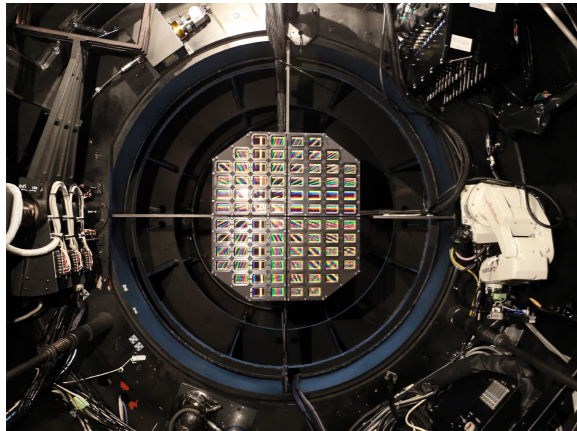
2019年8月あたりから現在まで、
静穏期の明るさがX線で10倍、
可視光で2.5倍程度高い状態(11等)
になった。

これまでにない新しい情報が得られると期待される。

高いS/Nの多波長同時観測の好機

Tomo-eとNICERによる同時観測

木曾Tomo-e Gozen (2019-)

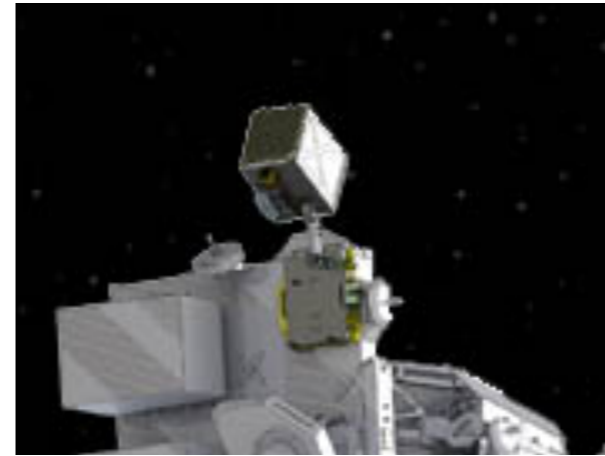


© 東京大学 木曾観測所

- ・ 可視400nm~700nm
- ・ 広視野と高感度
- ・ CMOSカメラによる動画撮像
- ・ 時刻精度<1ミリ秒

Sako et al. 2018

NICER (2018-)



© NASA

- ・ 軟X線帯域(0.2~12keV)
- ・ 大有効面積(Silicon Strip Detector)
- ・ サブ秒スケールの高時間分解能
- ・ 時刻精度<0.1ミリ秒

Gendreau, Keith C et al. 2016

同時観測ログ

日付	装置	開始時間(UTC)	観測時間(s)
2020/9/14	NICER	10:04:00	1000
	Tomo-e	10:12:10	618
2020/9/15	NICER	12:24:20	1000
	Tomo-e	12:29:06	1064
2020/11/14	Tomo-e	11:59:54	3998
	NICER	12:04:48	2554
2020/11/18	NICER	10:32:18	2694
	Tomo-e	10:59:53	1286

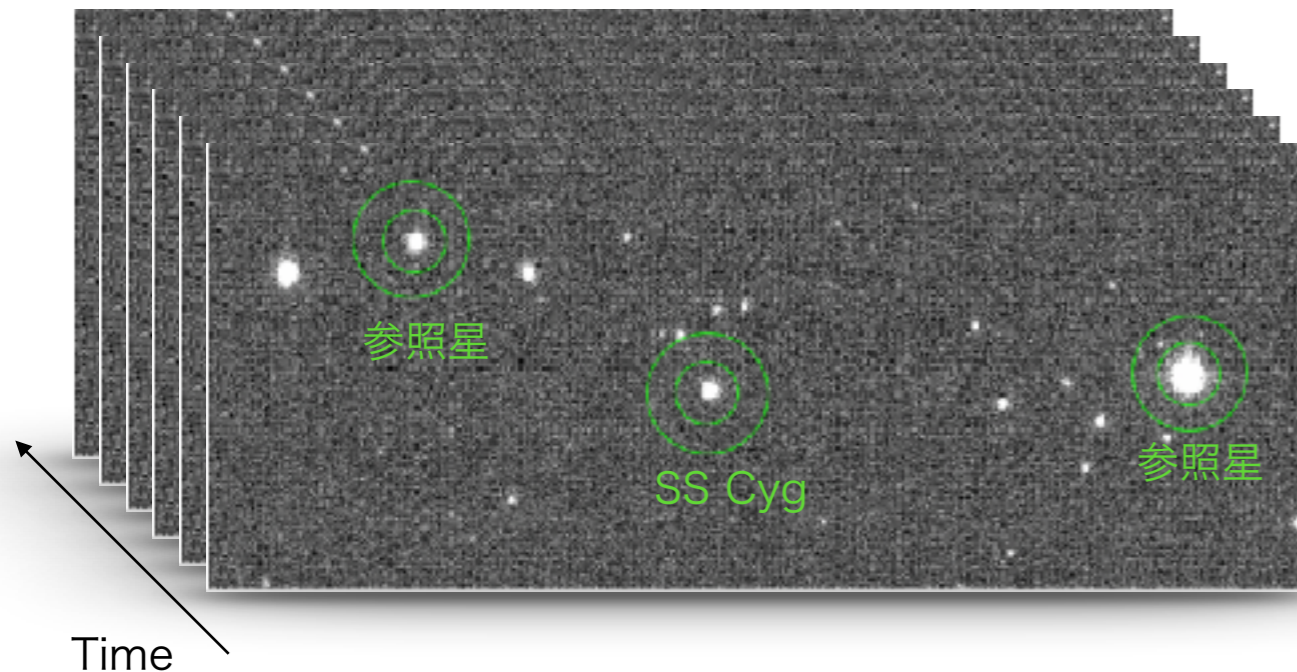
共に高速観測+高い機動力で突発天体の観測に適する

- ・ 2020年9月-11月に渡ってTomo-e GozenとNICERによる同時観測キャンペーンを実施。(理化学研究所木邑氏の協力)
- ・ NICERの露光時間は一回あたり1000~2000秒
- ・ NICERがSS Cygを観測しているタイミングで、Tomo-eをSS Cygに向けて26fpsで観測(三鷹から遠隔操作)。

ライトカーブの作成

Tomo-e Gozen

Tomo-e Gozenの26fpsの動画データを
をライトカーブに変換

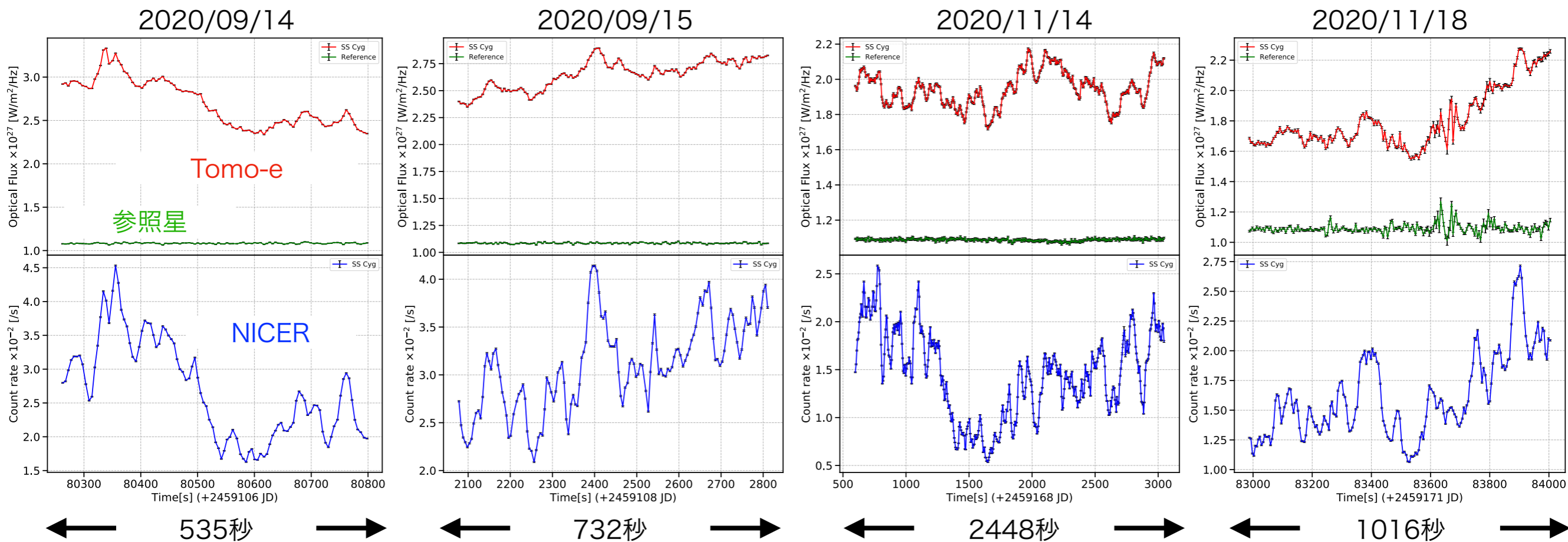


1. 一次処理、位置較正
2. 開口測光。測光エラーは円環領域から算出。
開口半径18''
3. 重心追跡によってシーイングダンスを補正
4. 参照星を用いて大気減光のゆらぎを補正、
Gaia DR2のG-band等級を使用し相対測光

NICER

- NASAのアーカイブ
- 0.3-7 keV帯域の光子数を0.5 秒ごとに数える。
- NICERのサンプル時刻に合わせてTomo-eのデータを内挿、リサンプル

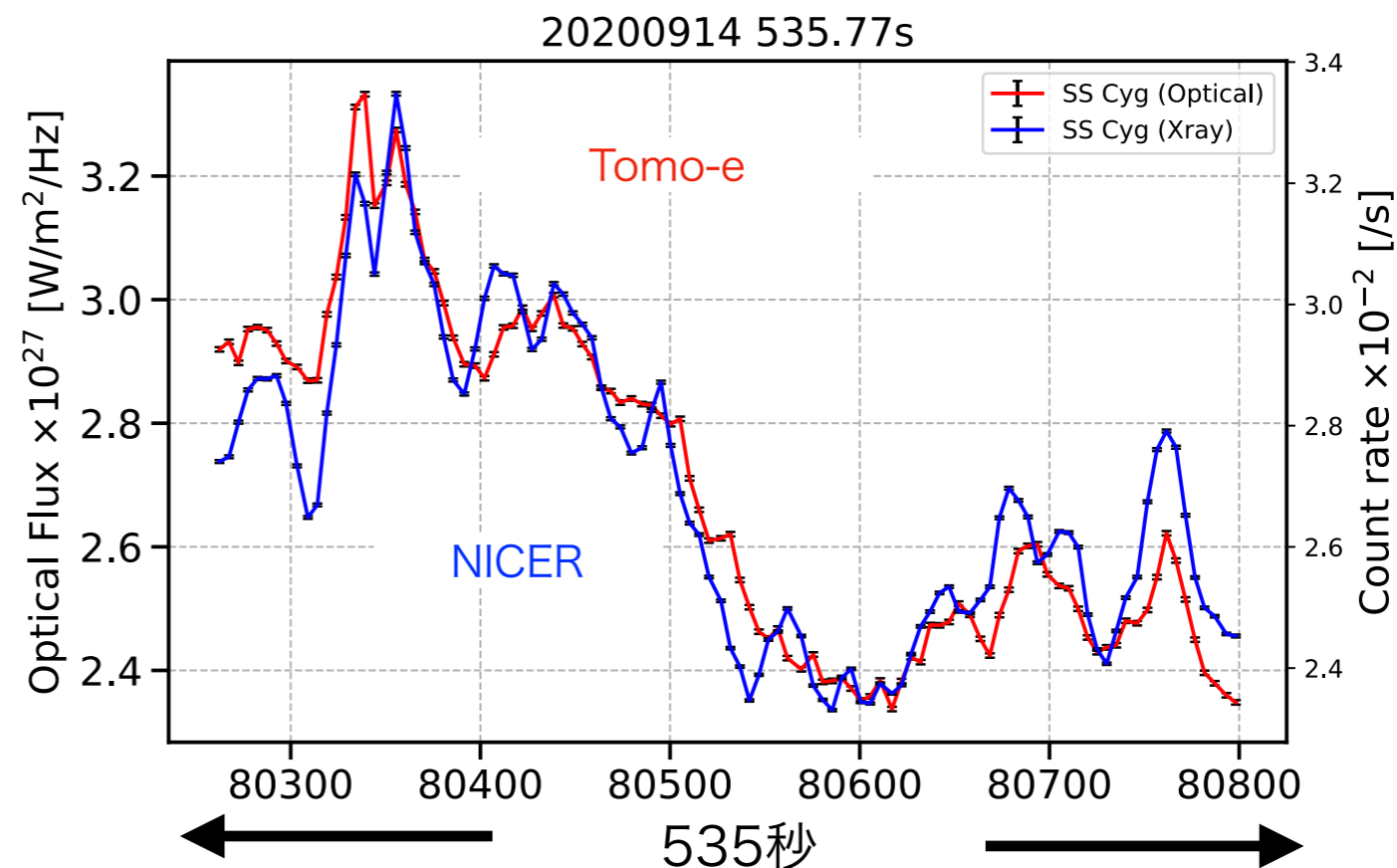
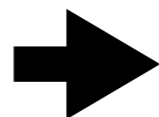
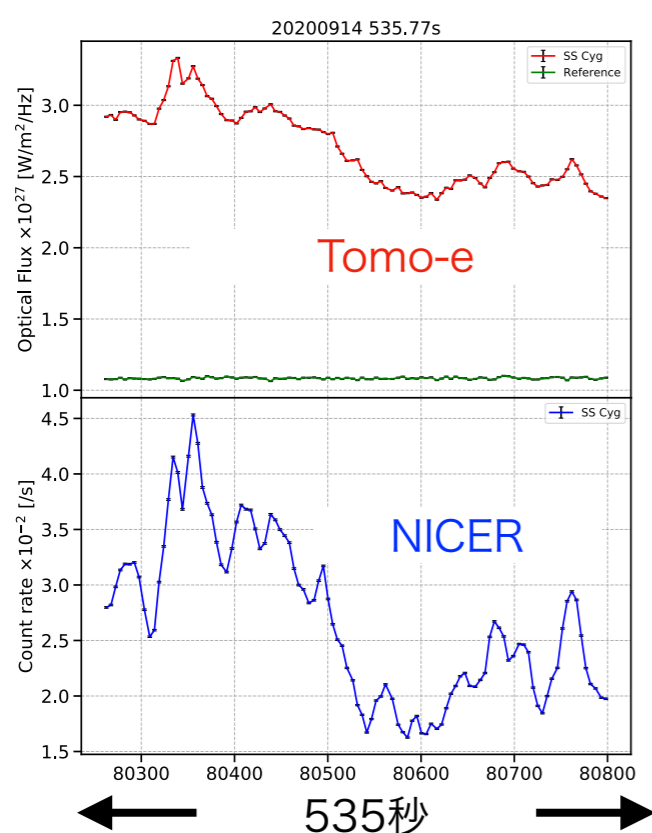
ライトカーブ



5秒ビンング

ライトカーブの外観の比較

X線を可視光に合わせて目視スケール、
オフセット調整



- 大局的によく似ている
- X線と可視光の同時観測でこれほど良質なデータが得られたのは初めて

放射領域

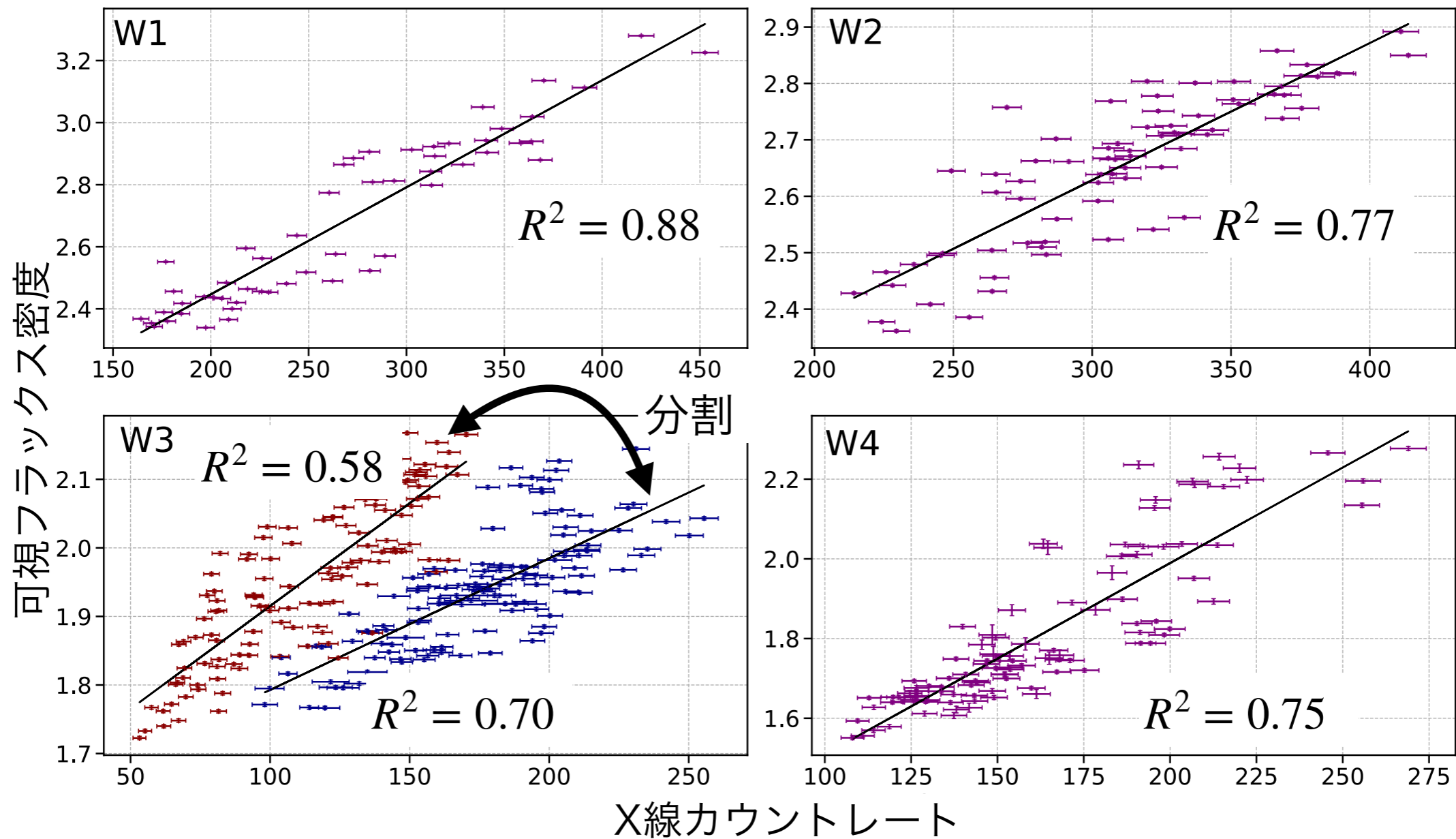
可視光 - 円盤内縁, ~6000K

X線 - 中心付近, ~1000万K

なぜ相関するのか？

光度の時間変動の相関

$$F_{X\text{-ray}} = AF_{\text{Optical}} + B \text{ でフィッティング}$$



高い相関の原因は何なのか？

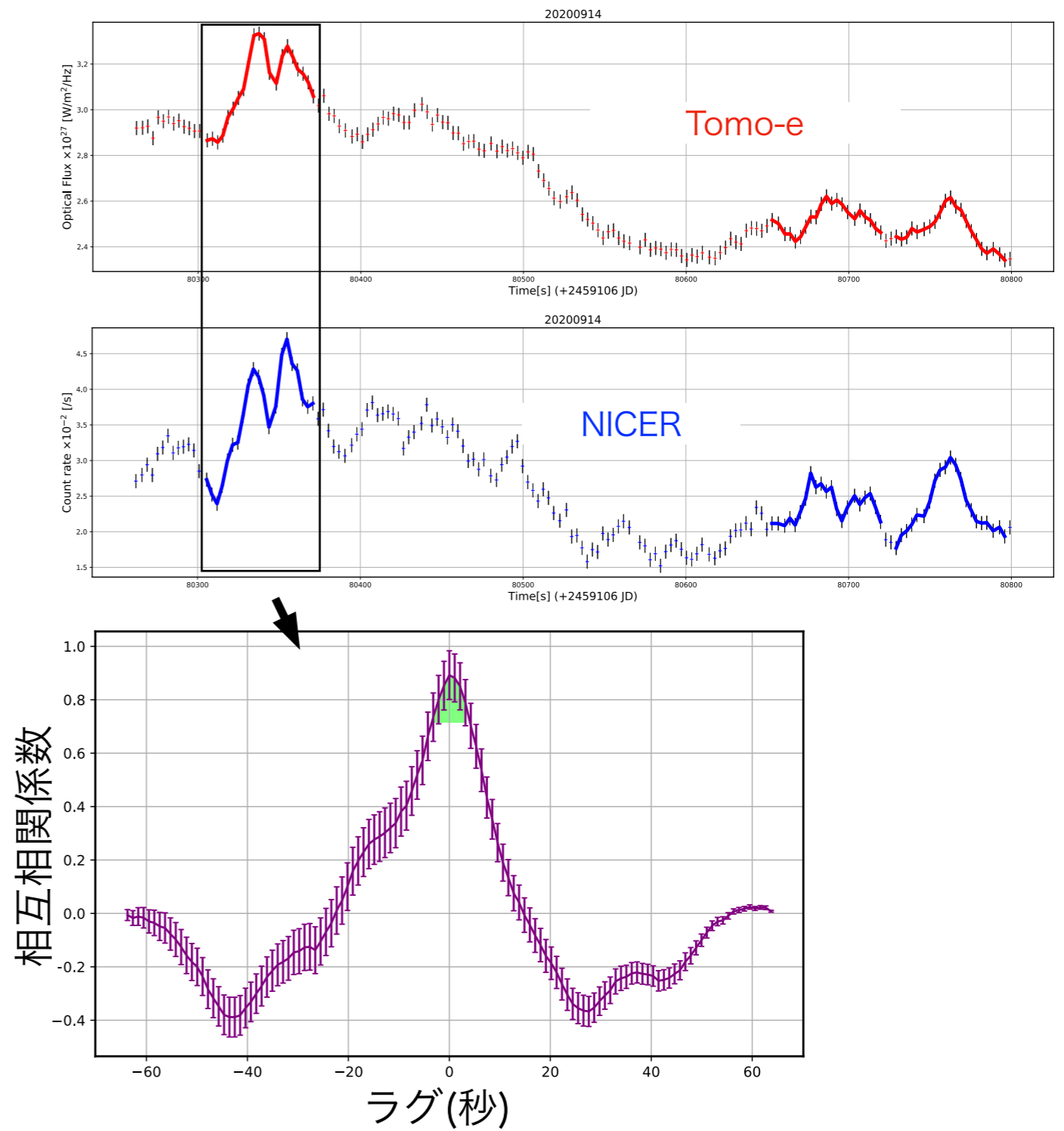
ショットラグ解析

急激な時間変動が見られた時間帯のラグを解析

手法

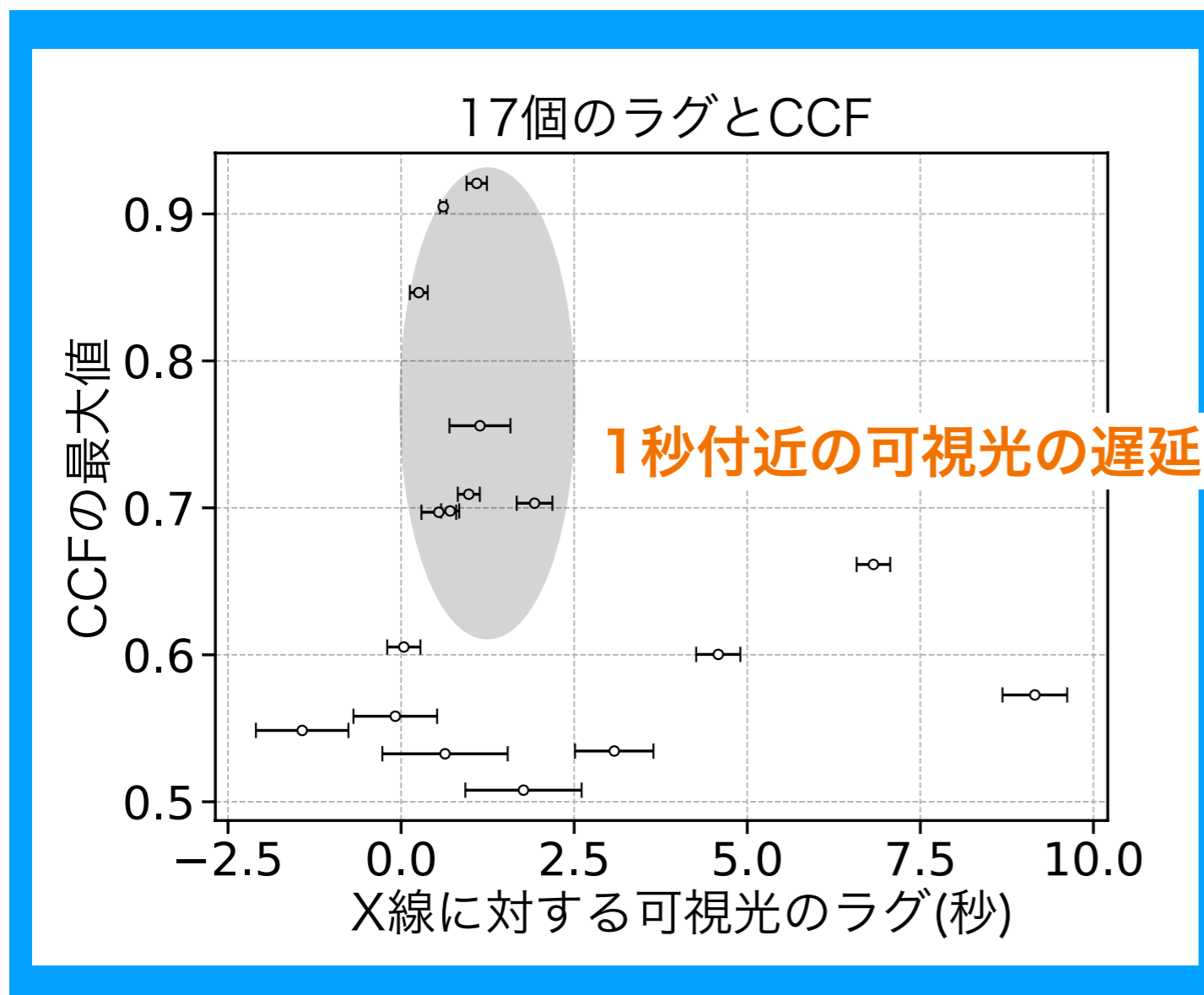
1. 1秒ビニング
2. 可視光で前後60点のローカルな極大点を抽出
3. 抽出した点の前後30点を1つのショットと定義する
(Dobrotka 2019)
4. 可視光/X線の2つのショットの相互相関関数を取り、Peakの0.8倍の領域の重心をとる。
(Koratkar & Gaskell 1991 and Penston 1991)

抽出したショットの例



ショットラグ解析

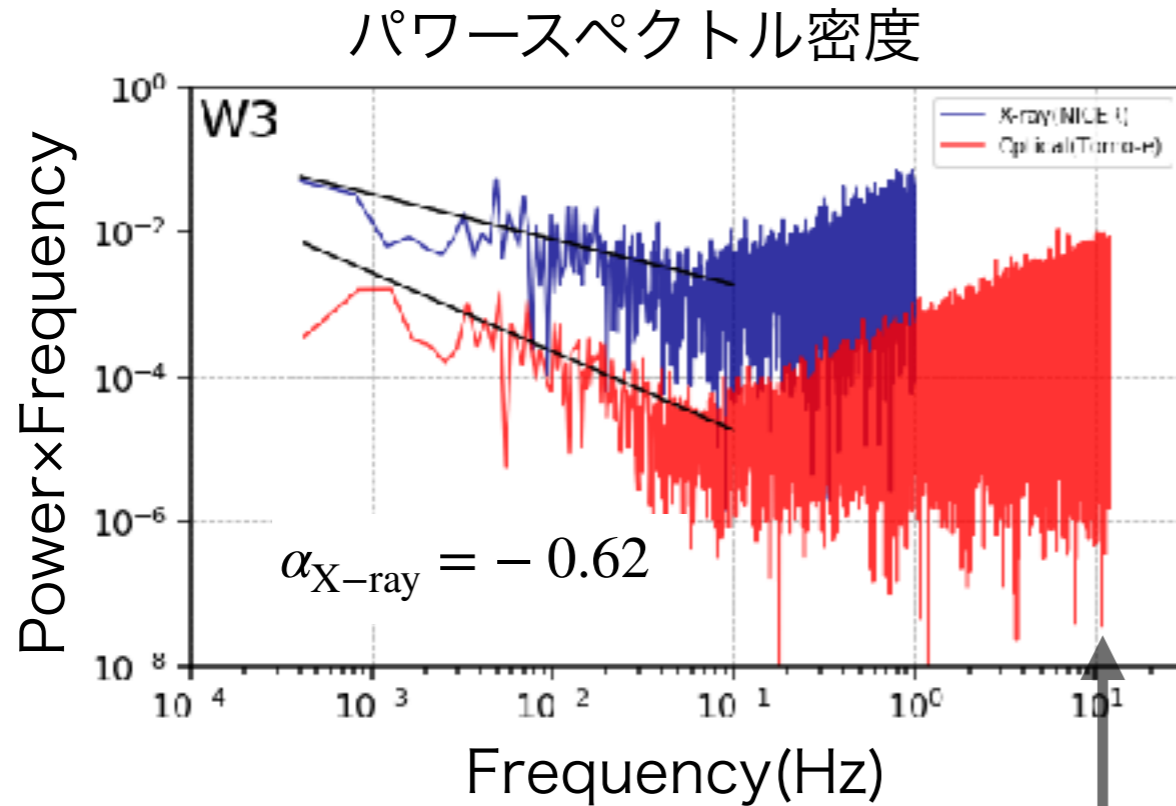
4日間で計17個のショットを抽出



CCF max	lag (sec)
0.90	0.60 ± 0.04
0.66	6.8 ± 0.2
0.85	0.25 ± 0.12
0.70	0.54 ± 0.25
0.70	0.71 ± 0.13
0.71	0.98 ± 0.16
0.57	9.2 ± 0.5
0.56	-0.084 ± 0.604
0.92	1.1 ± 0.1
0.51	1.8 ± 0.8
0.70	1.9 ± 0.2
0.60	4.6 ± 0.3
0.76	1.1 ± 0.4
0.55	-1.4 ± 0.6
0.53	0.63 ± 0.9
0.61	0.039 ± 0.239
0.53	3.1 ± 0.5

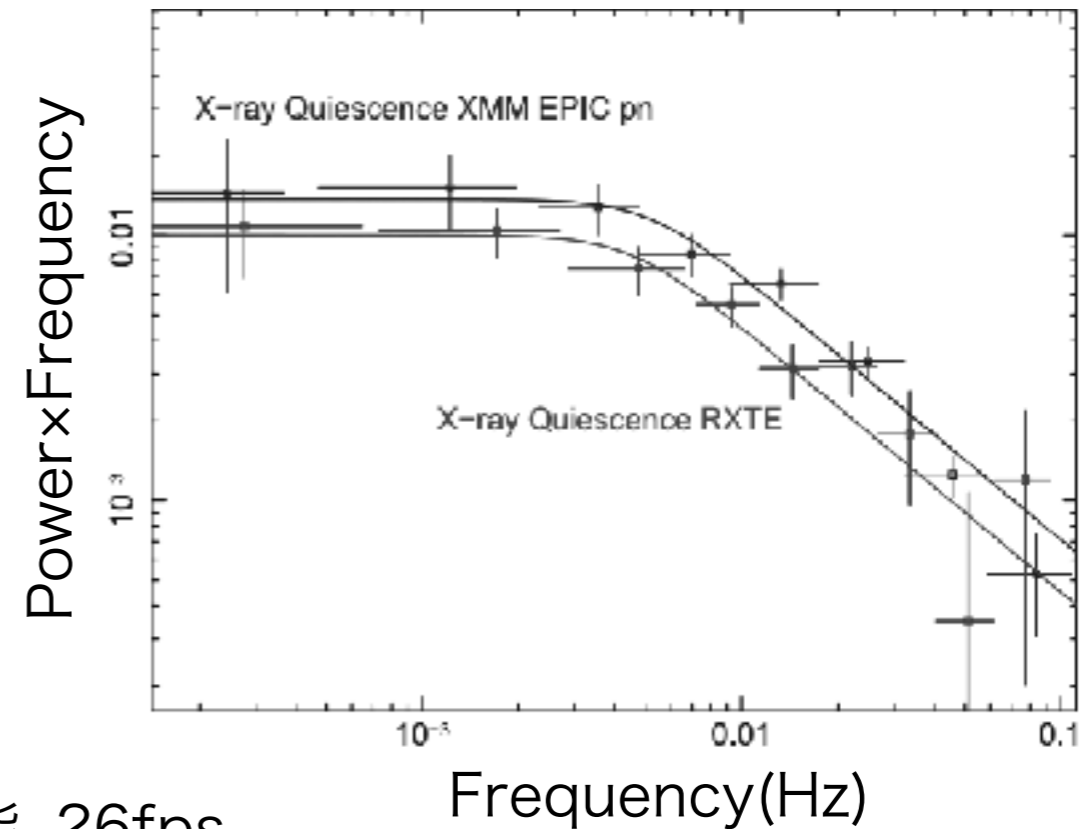
- 時刻精度はTomo-eが0.5 msec 以下(Sako et al. 2018)、NICERは300nsec 以下(Enoto et al. 2021)

パワースペクトル密度



Tomo-eの時間分解能, 26fps

SS Cyg 静穏期のX線時間変動の先行研究



Balman & Revnivtsev 2012

- 静穏期にQPOsなど特徴的な周波数は見られなかった
- 可視光、X線の形状はおおよそ一致していた
- 0.1 Hz以上のスロープはおおよそ $\propto f^{-1}$ で下がる

先行研究: X線のPSDと円盤内縁半径の関係

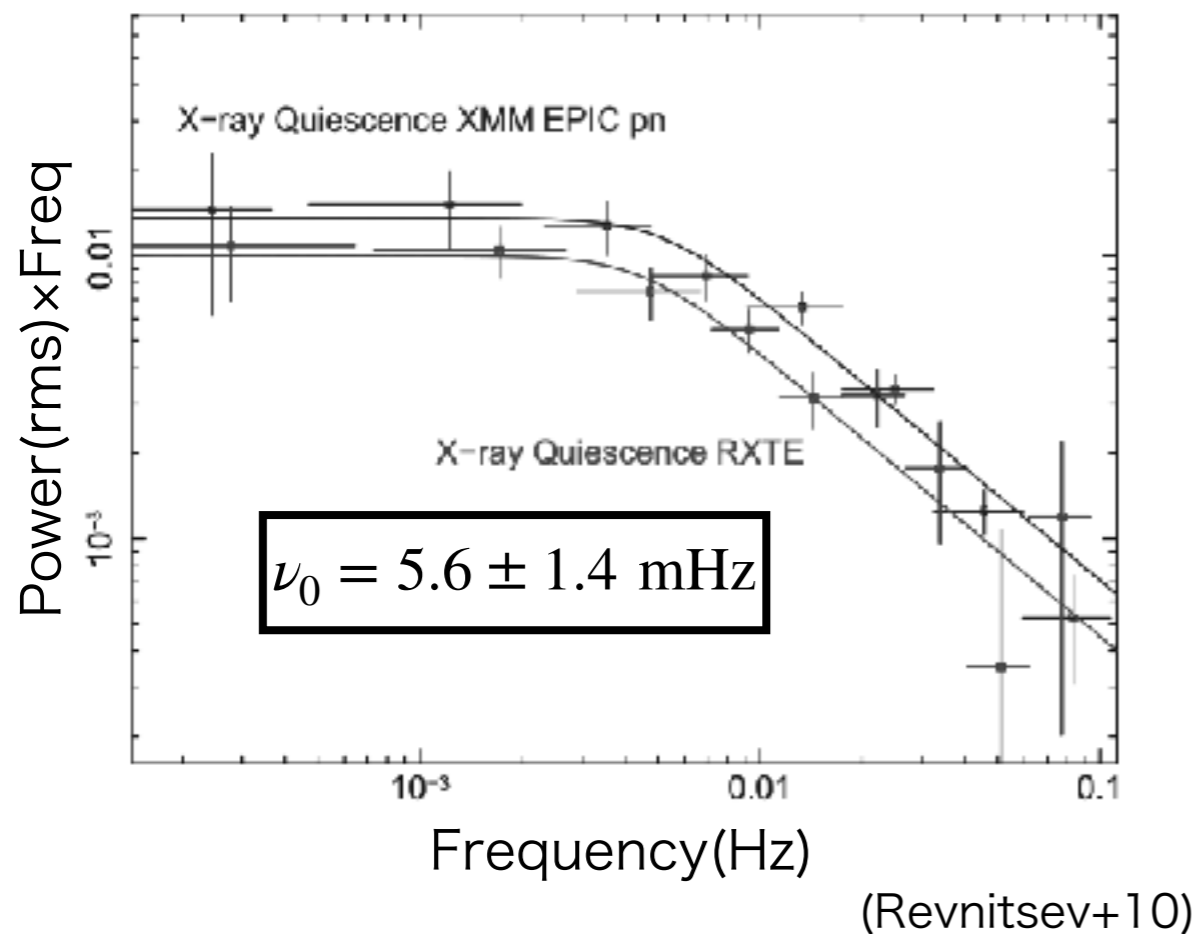
円盤内縁半径がX線のPSDの折れ曲がり周波数に対応 (Lyubarskii 1997)

$$\nu P(\nu) = a \left(1 + (\nu/\nu_0)^4 \right)^{-1/4}$$

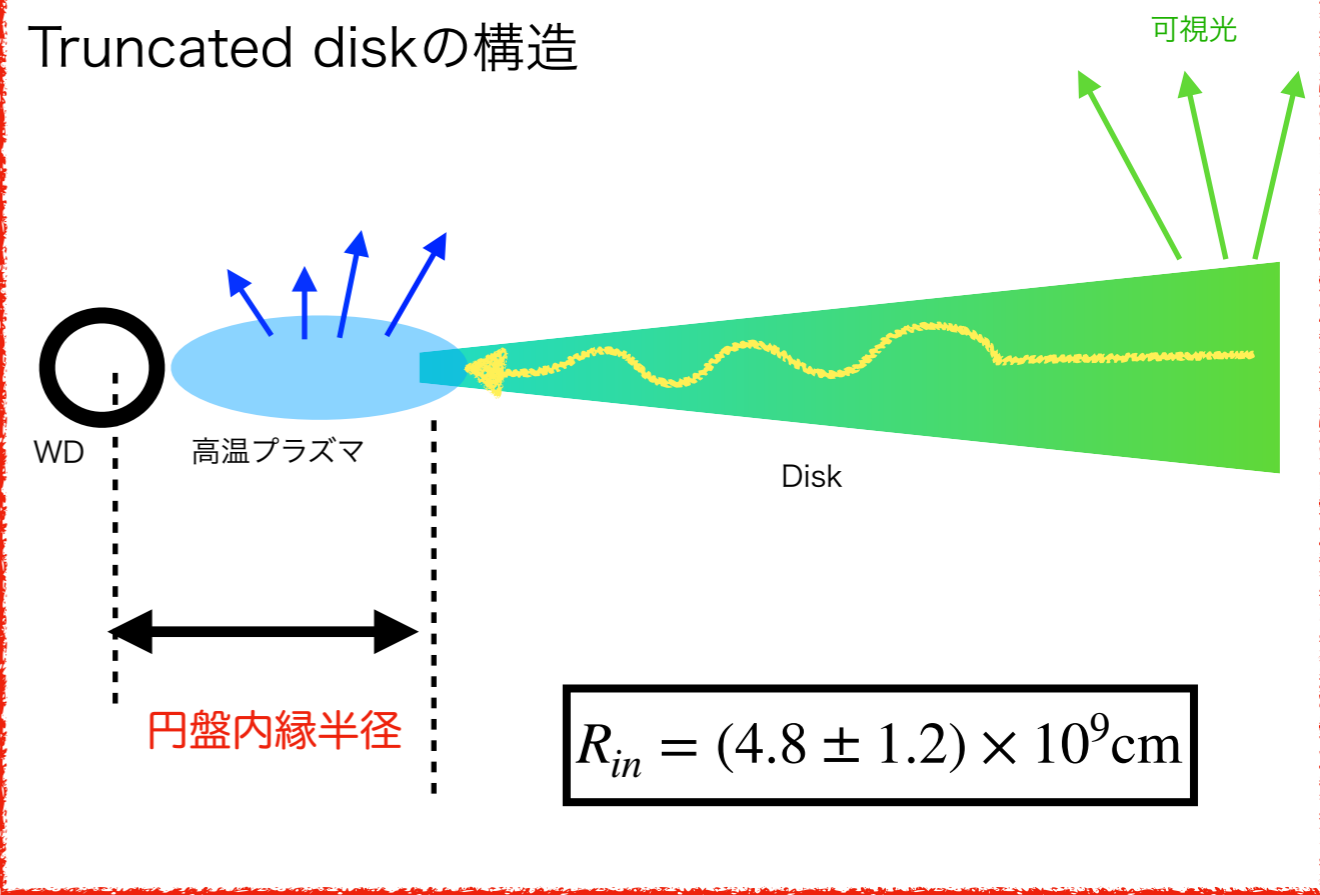
- 円盤各半径の降着率の変動が内側に伝播する
- ν_0 …PSDの折れ曲がり周波数。円盤内縁半径のケプラー回転のタイムスケールと対応

$$R_{in} \propto \nu_0^{-2/3}$$

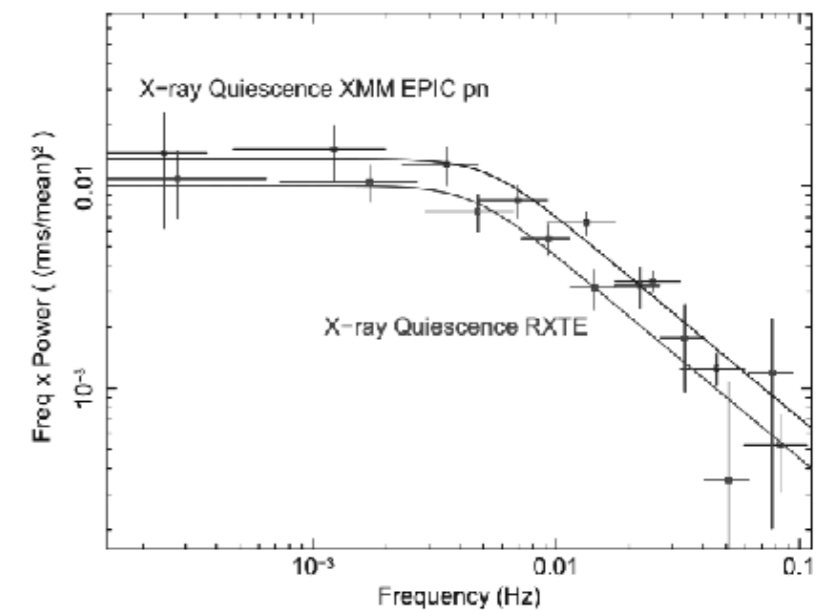
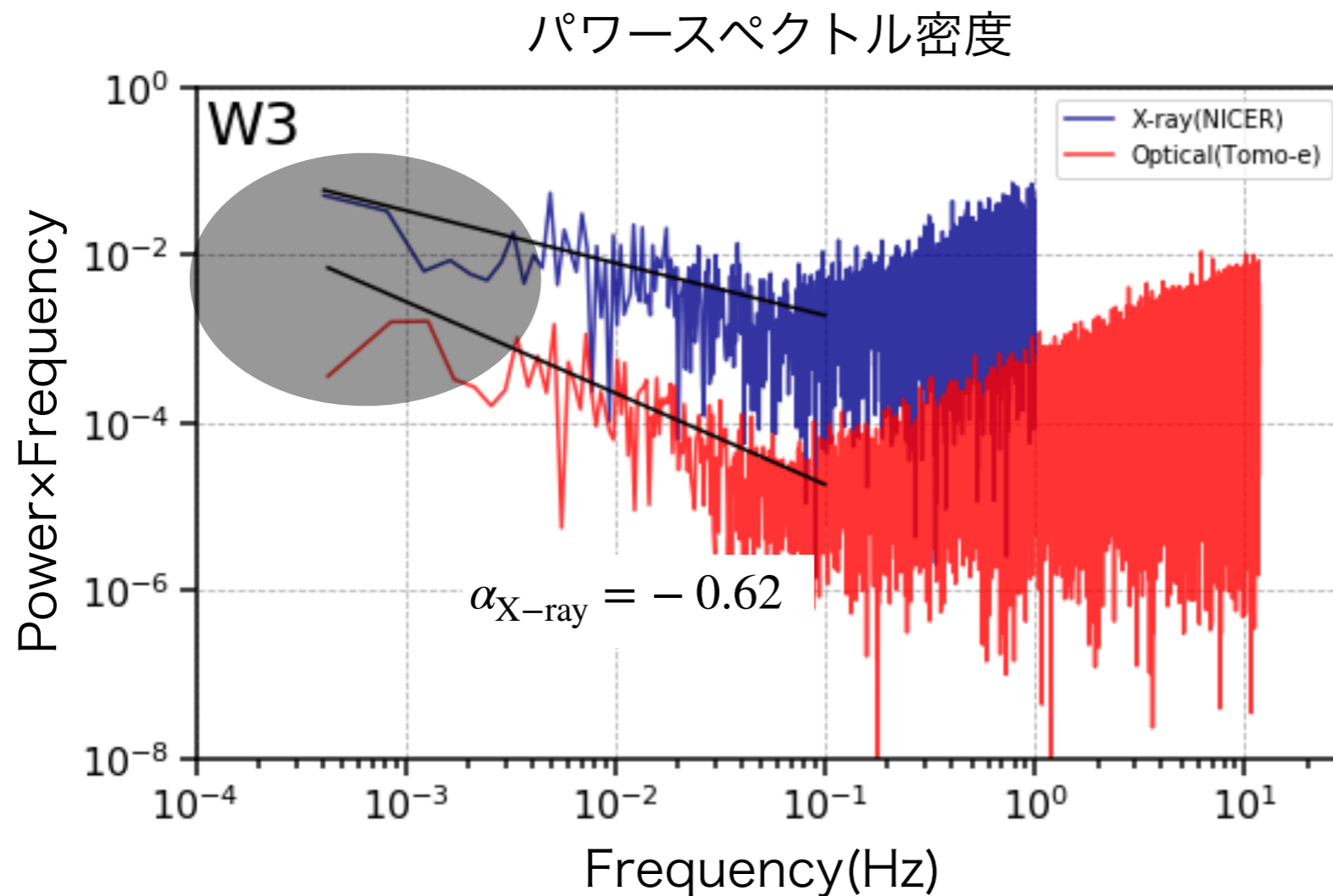
SS Cyg 2003年



Truncated diskの構造



先行研究: X線のPSDと円盤内縁半径の関係



Balman & Revnivtsev 2012

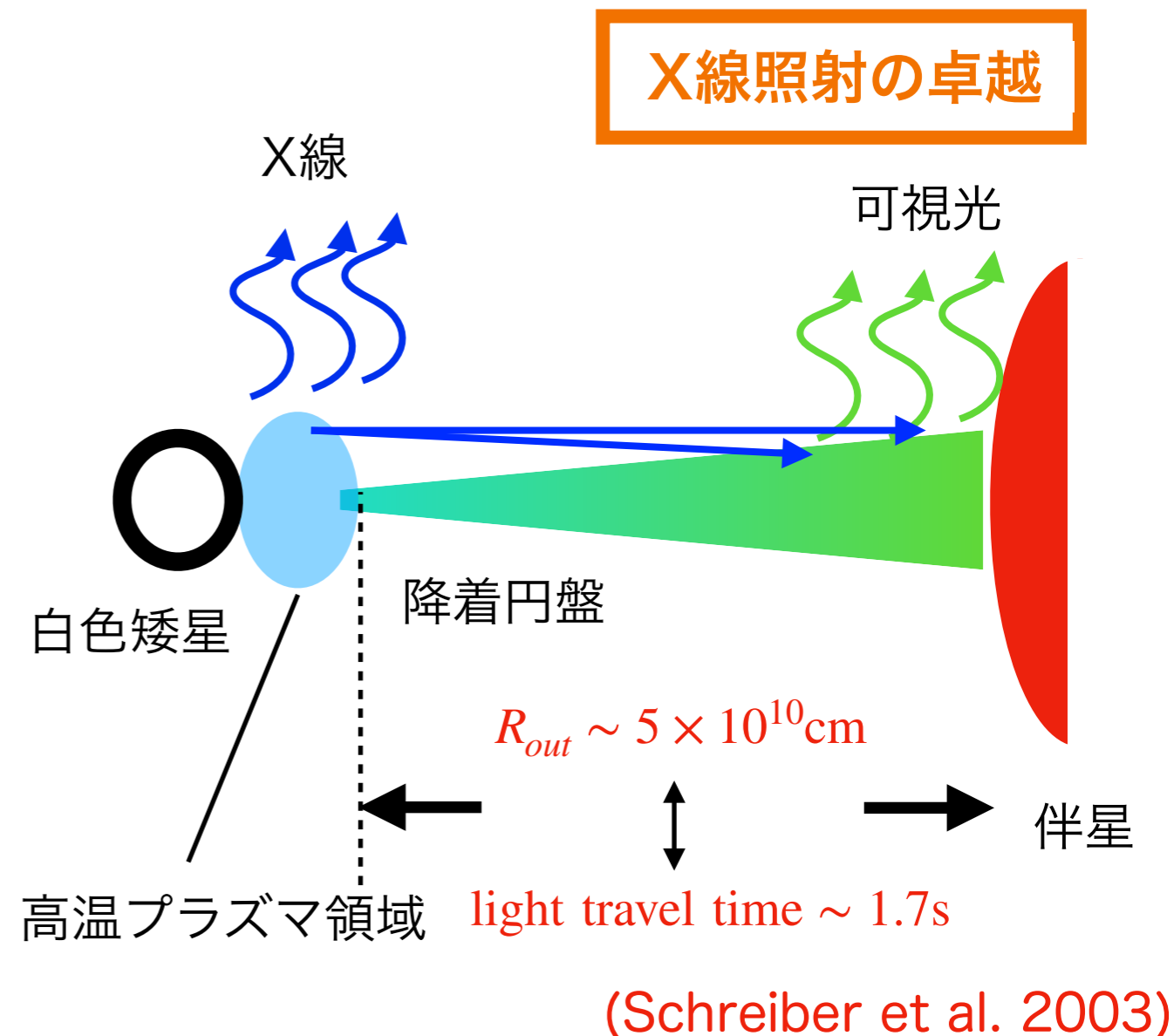
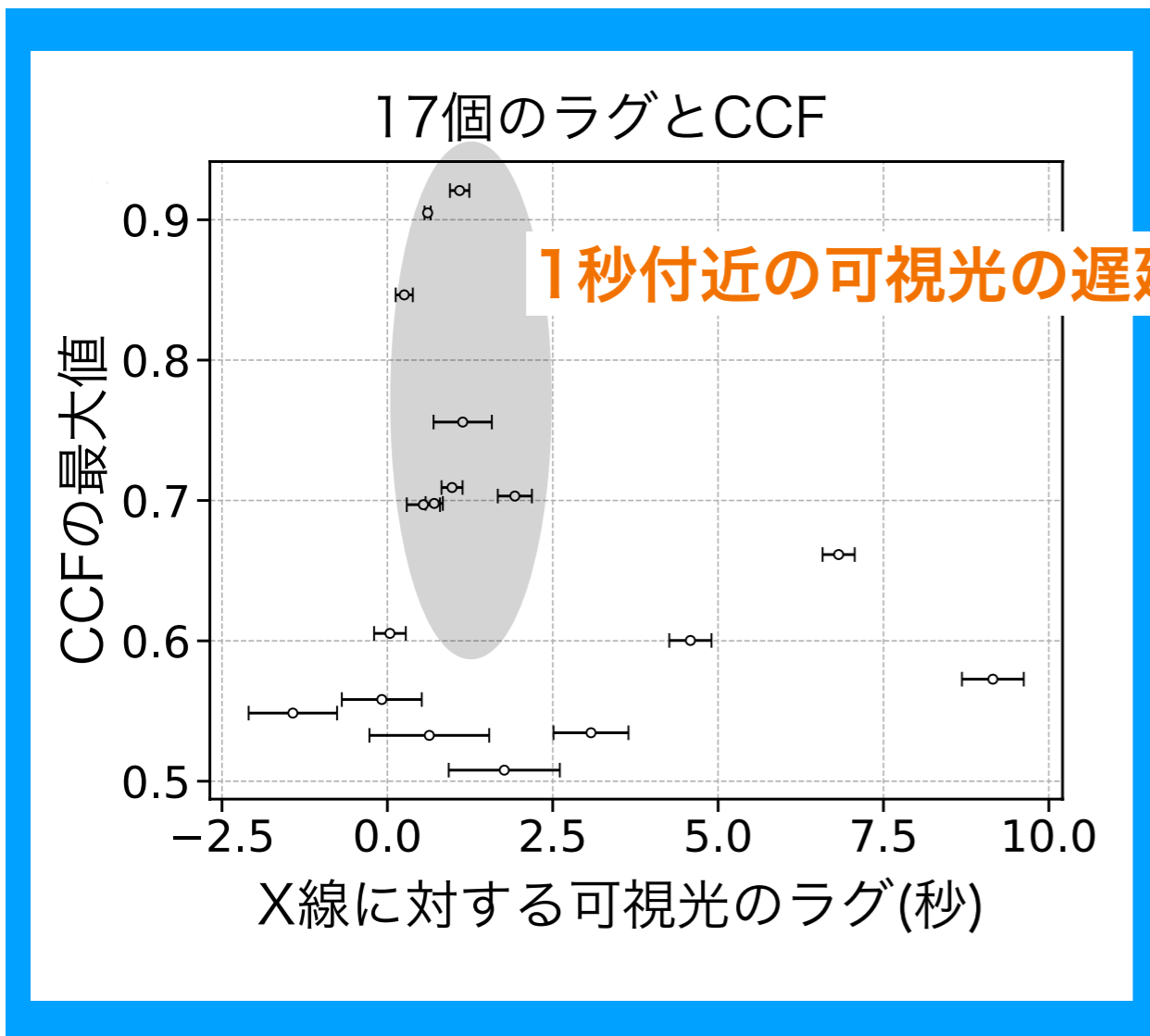
- ・折れ曲がり周波数を求めるためには $10^4 - 10^5$ 秒の観測が必要
- ・高周波($> 10^{-2}$)における可視光PSDの形状はX線と一致するか？

静穏期におけるX線照射の卓越

円盤のスケールは光速で1.7秒 \Leftrightarrow 可視光の1秒付近の遅延時間

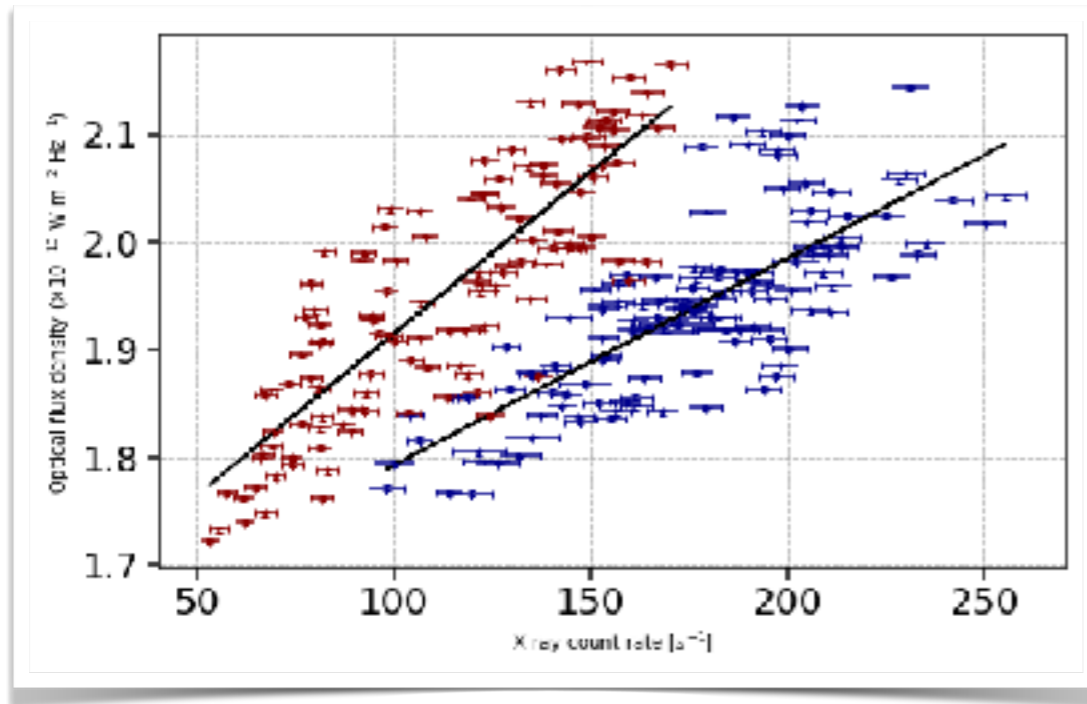


SS Cygの静穏期における降着円盤へのX線照射で説明

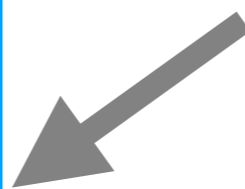
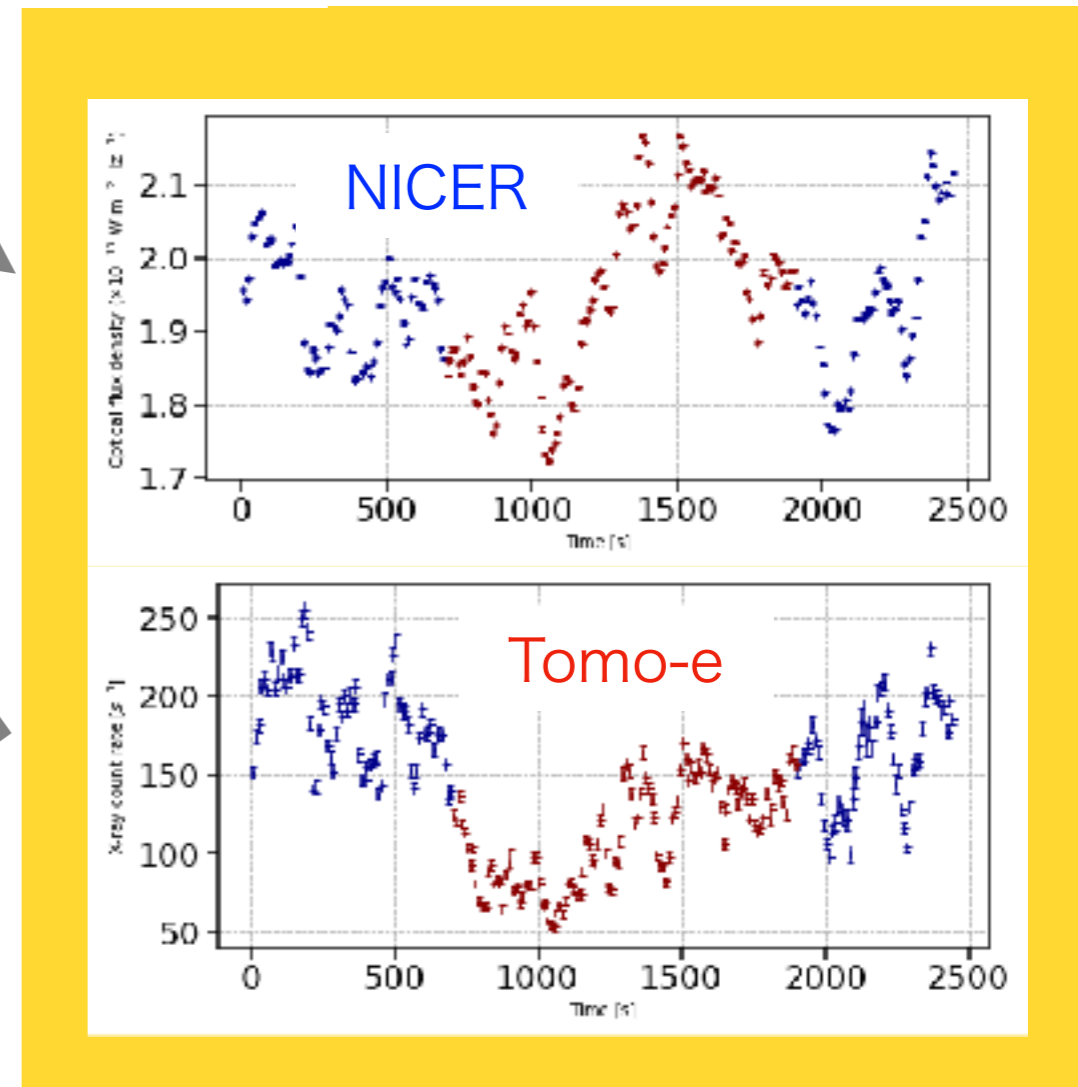
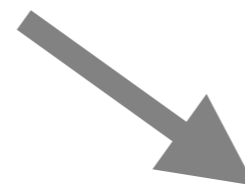


鉛直方向に拡大 可視光の遅延時間と一致

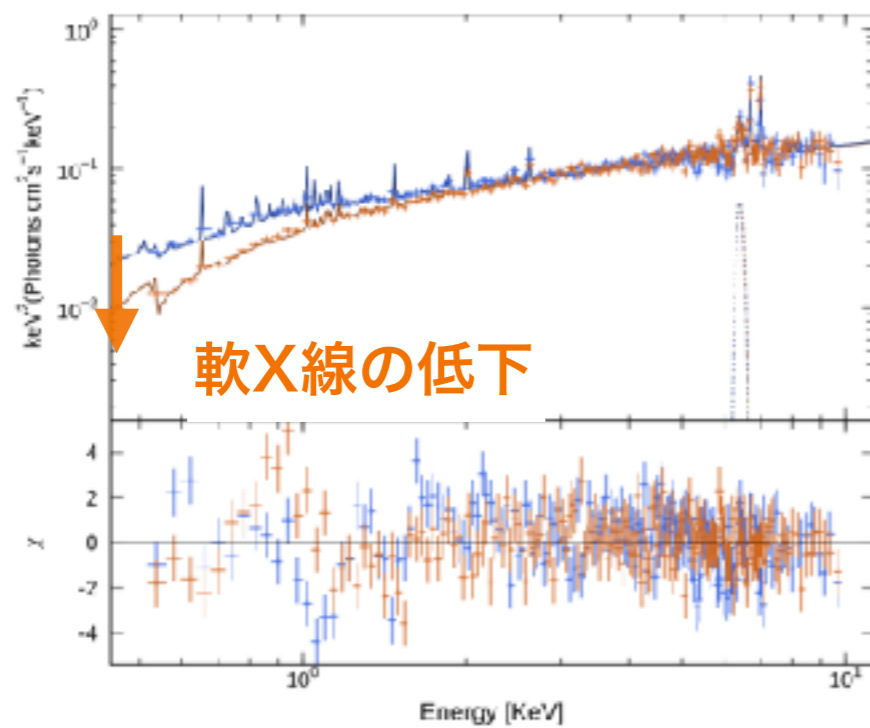
X線照射の短時間変動



ライトカーブに戻す



X線スペクトル



- X線スペクトルの変化が照射の効果に影響
- 遮蔽物の存在

将来計画

Tomo-e Gozenを用いた今後の観測計画

長時間観測

- ・ 円盤内縁半径の算出が可能になる
- ・ X線スペクトルの変動を長期モニターする

多波長観測

- ・ 硬X線や電波など、他の波長帯と更に組み合わせることで円盤をより詳細に分解できる

他のコンパクト天体観測

- ・ X線連星、矮新星、パルサー等の短時間変動する様々なコンパクト天体を多波長同時観測することにより新しいサイエンスが切り拓かれる可能性

まとめ

- 多様な降着円盤天体に共通した、降着円盤物理の研究において最も最適な天体は矮新星である
- 降着円盤の確率的な短時間変動の物理機構を明らかにするため、矮新星SS Cygの静穏期に対して、木曾シュミットTomo-e GozenとX線望遠鏡NICERで高速同時観測キャンペーンを行った
- 線形相関解析により可視光とX線に高い相関があることがわかった。
- ショットラグ解析により1秒程度の可視光の遅延を確認できた。
- PSDの形状は高周波では過去の観測と一致していた
- 高い相関と1秒程度の遅延はX線照射により引き起こされている可能性がある
- X線スペクトルの短時間変動により、X線照射の性質が変化している可能性がある。
- 円盤の内縁半径やX線スペクトルのより詳細な理解のためにはより長時間の観測が必要