

ブラックホールはなぜ光る？ 突発天体と降着円盤

木邑 真理子 (理化学研究所、基礎科学特別研究員)

自己紹介

2015. 3 京都大学 理学部 理学科 卒業

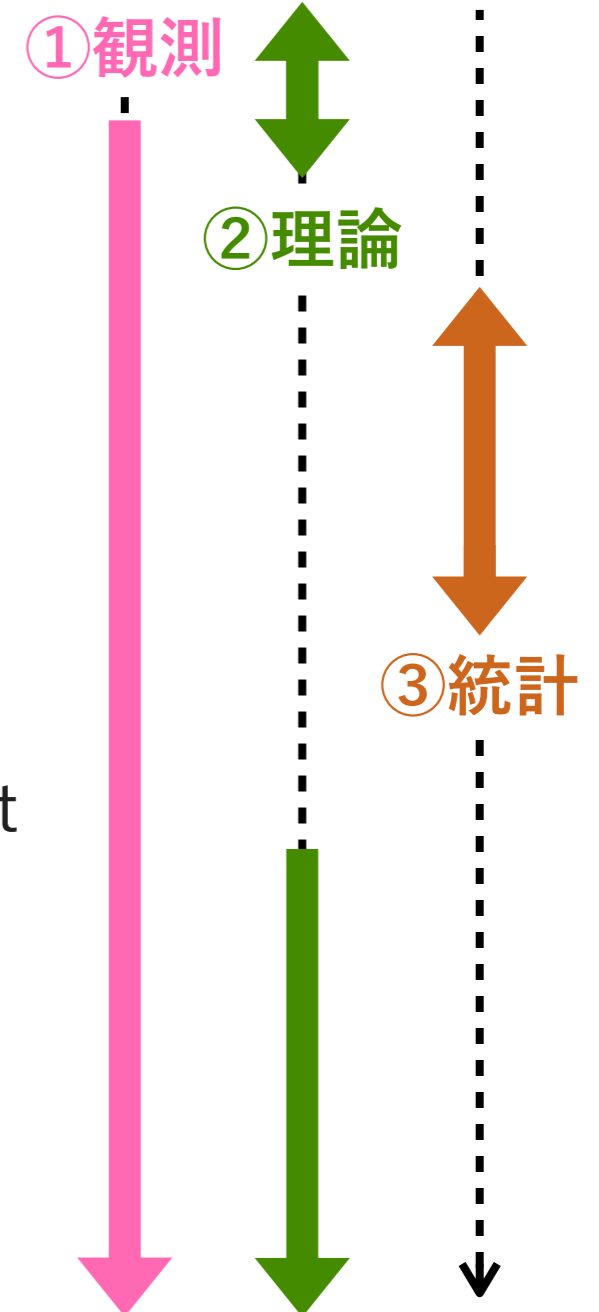
2015. 4 — 2017. 3 京都大学 大学院 理学研究科
宇宙物理学専攻 (修士課程)

2017. 4 — 2020. 3 京都大学 大学院 理学研究科
宇宙物理学専攻 (博士後期課程)
日本学術振興会 特別研究員 DC1

2018. 1 — 2018. 7 Durham University (UK) Visiting Student

2019. 9 — 2019. 11 Caltech (US) Visiting Student

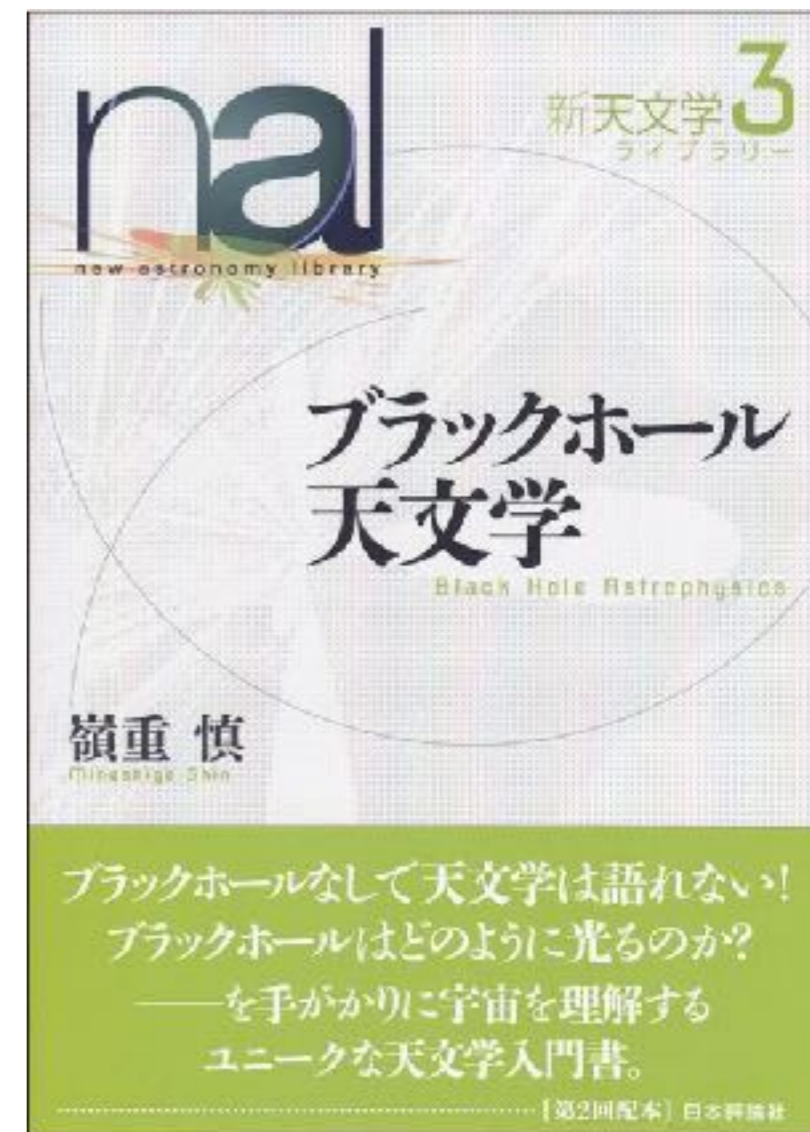
2020. 4 — 現在 理化学研究所 開拓研究本部
基礎科学特別研究員 (2021. 6 第一子出産)



多波長観測と数値シミュレーションによる、高エネルギー突発天体の研究

本日本話すること

- **イントロダクション1**
 - ▶ 突発天体と降着円盤
 - ▶ 連星系とは？
 - ▶ なぜ円盤ができるのか、多波長域の光を出すのか？
- **イントロダクション2**
 - ▶ 円盤不安定モデル
 - ▶ 連星系の研究の問題点
 - ▶ 多波長観測・数値シミュレーションの重要性
- **私の研究紹介（はくちょう座SS星について）**
- **将来の観測計画について**
- **まとめ**



(日本評論社)

イントロダクション 1

(突発天体と降着円盤、連星系の円盤はなぜできるか、どのようにして多波長域の光を出すか?)

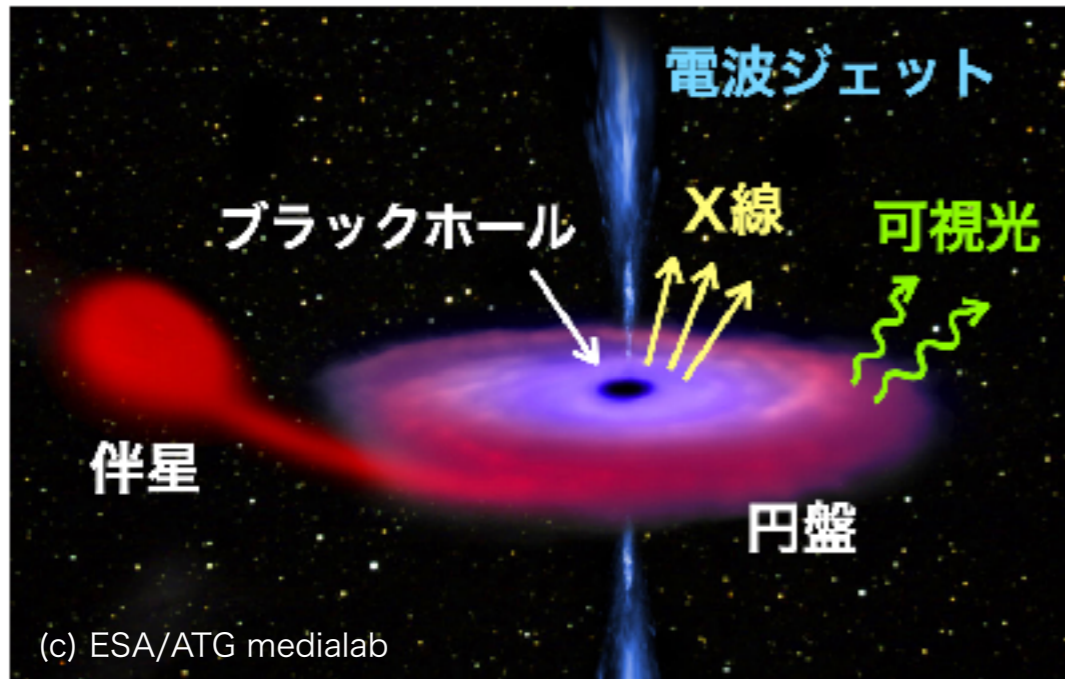
様々な突発天体と降着円盤

現在、天文学分野では、突発天体の研究が盛ん
ある日突然、明るくなる天体

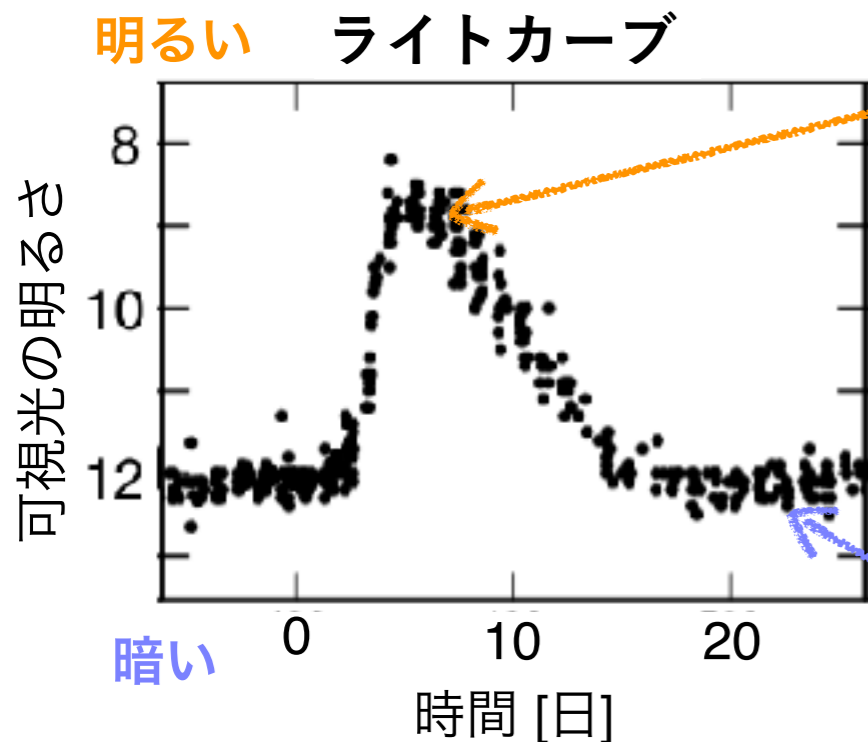


共通点：コンパクト天体（ブラックホール・中性子星・白色矮星）の周りの**降着円盤**
→ 大量の重力エネルギーを光や噴出流として解放する、あらゆる突発天体の
中心エンジン

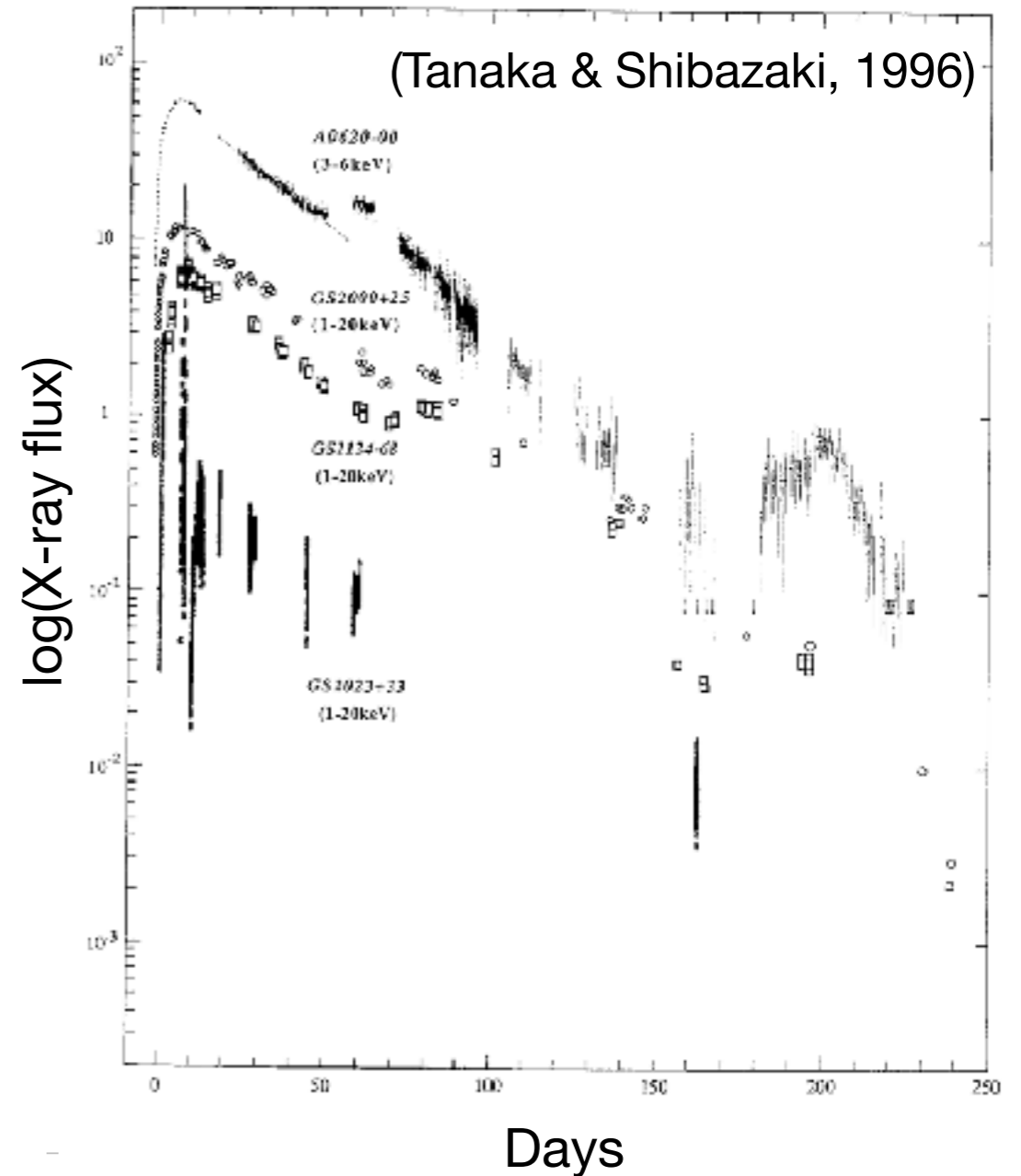
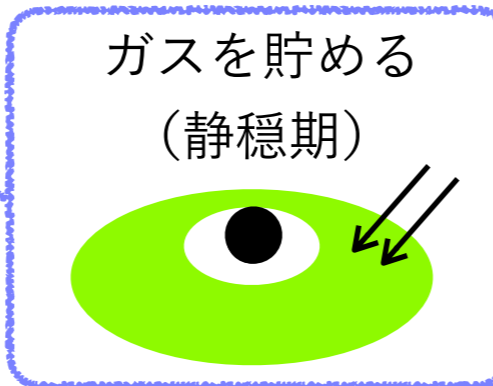
コンパクト天体と普通の星の連星系とアウトバースト



- 連星系は、一番シンプル = 観測しやすい
- 円盤の突発的増光 = アウトバーストを起こす
- アウトバーストは円盤の熱不安定により起こる

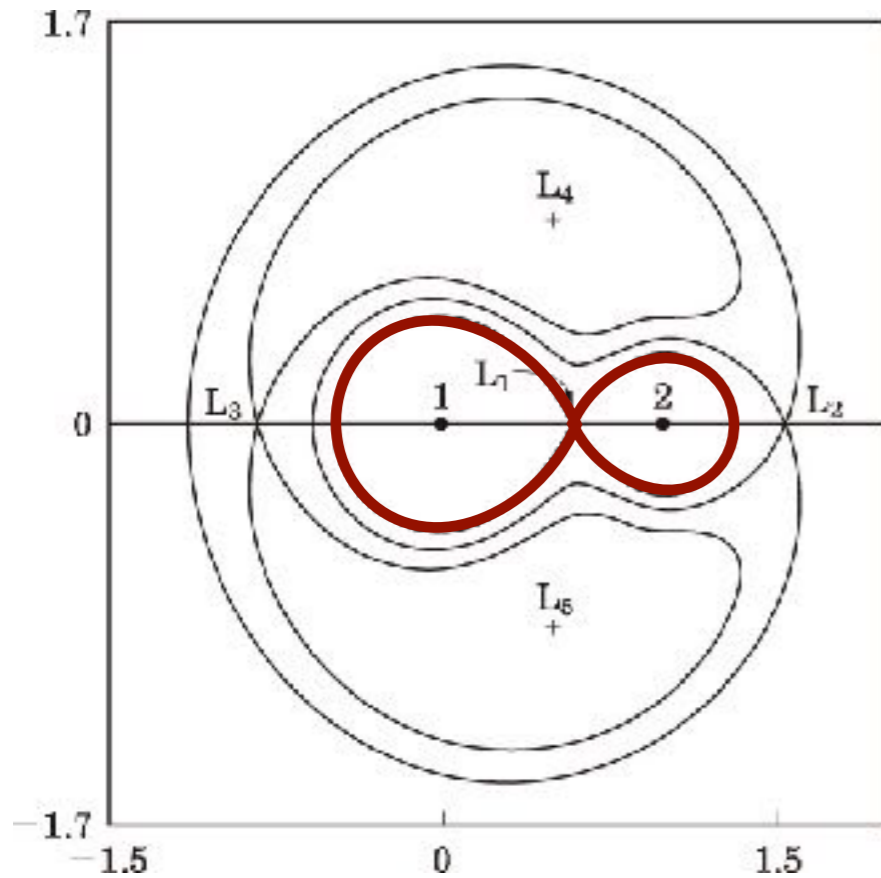


円盤不安定



なぜ円盤ができるのか？

等ポテンシャル面の図

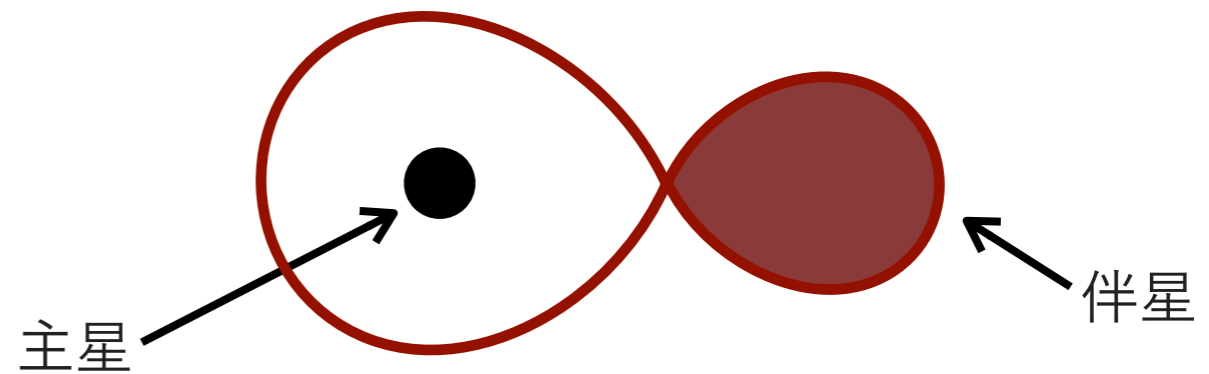


↑ 「恒星」 (日本評論社) より

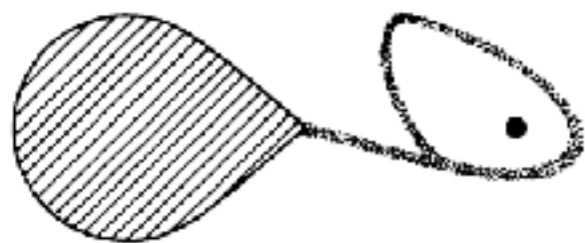
有効ポテンシャル：重力ポテンシャル
+ 遠心力ポテンシャル

$$\begin{aligned}\psi_{\text{eff}} &= \psi_{\text{grav}} + \psi_{\text{cent}} \\ &= -\frac{G(M_1 + M_2)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} + |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}|^2\end{aligned}$$

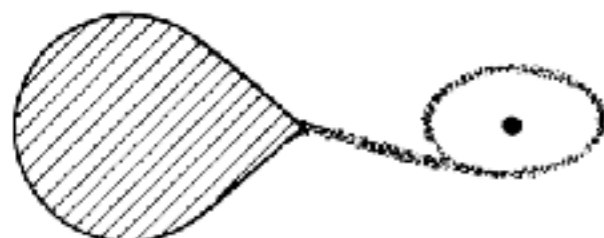
- ロッシュローブ：等ポテンシャル面の中でL1を通るもの (赤)
- ロッシュローブオーバーフローにより、伴星から主星の方へ質量が流れる



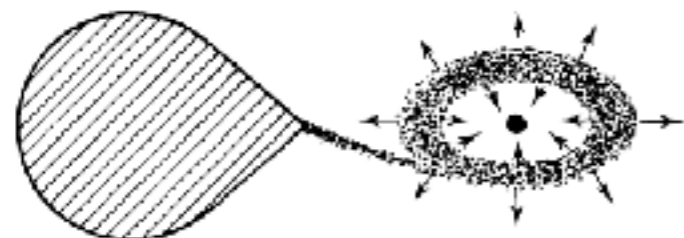
なぜ円盤ができるのか？



(A) ロッシュローブオーバーフローにより、ガスが流れ込む

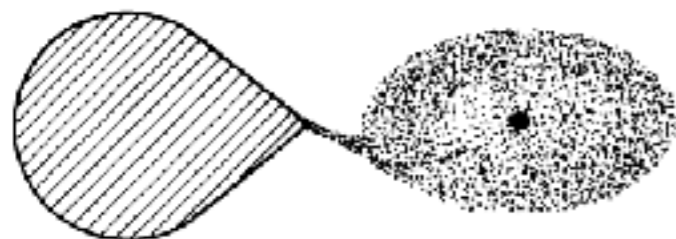


(B) 主星の周りにガスのリングが出来る (伴星のガスが持っている角運動量によって半径が決まる)



(C) 粘性によりリングが広がる

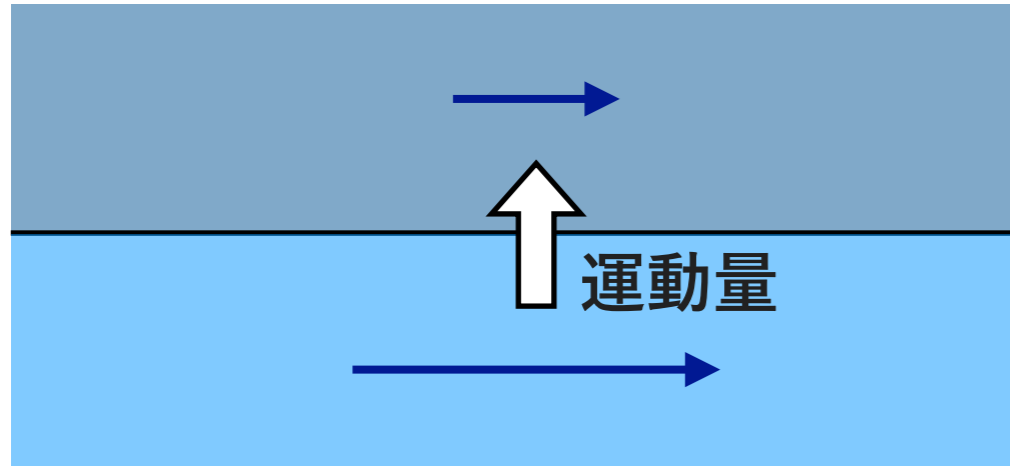
角運動量を輸送する



(D) 円盤ができる

(Verbunt 1982)

粘性の働き（平行流）



v_1 小 \longrightarrow 速くなる

v_2 大 \longrightarrow 遅くなる

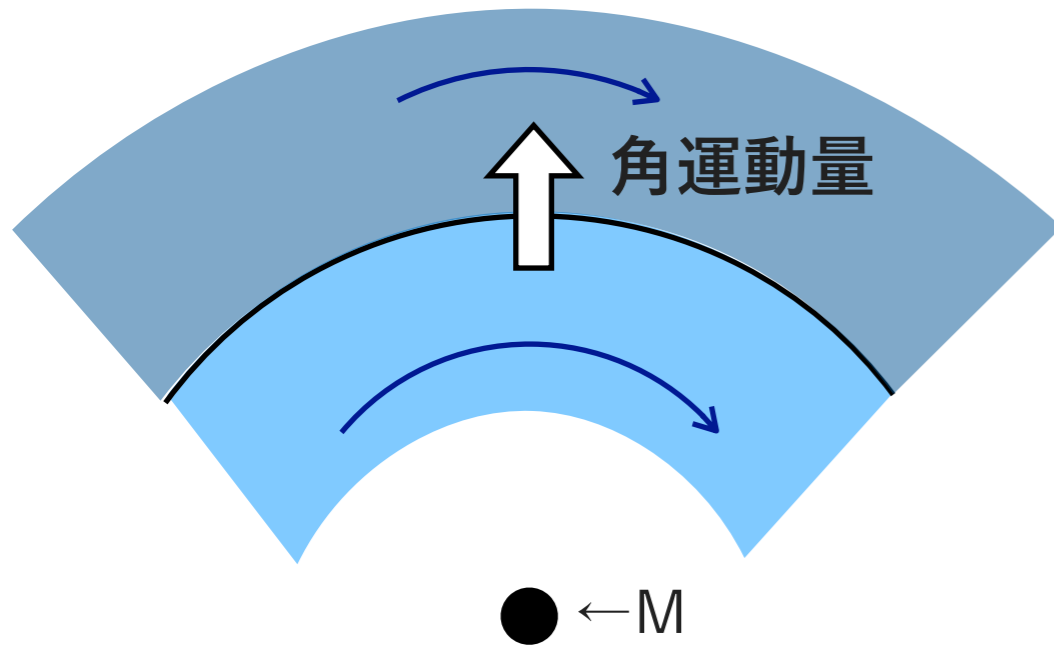
- 境界に粘性（摩擦力）が働くと、

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{a} \equiv \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} \quad (\text{速度が変化する})$$

$$\frac{\Delta\mathbf{p}}{\Delta t} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{F} \equiv m\frac{d\mathbf{x}}{dt} \quad (\text{運動量が変わる})$$

\longrightarrow 二つの平行流の間の速度の差が小さくなる

粘性の働き（回転流）



v_1 小 \longrightarrow 半径大 \longrightarrow 遅くなる

v_2 大 \longrightarrow 半径小 \longrightarrow 速くなる

- 境界に粘性（摩擦力）が働くと、

$$\frac{\Delta(\mathbf{r} \times \mathbf{p})}{\Delta t} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (\text{角運動量が外向きに輸送される})$$

$$\text{速度 } v = \sqrt{GM/r} \quad \text{角運動量 } l = \sqrt{GMr}$$

\longrightarrow 二つの回転流の間の速度の差が大きくなる
ガス流は広がっていく（リング \rightarrow 円盤）

円盤粘性の起源

- 分子粘性 **弱く、効かない**

$$\nu_{\text{mol}} \sim v_{\text{mol}} l_{\text{mfp}} \sim 10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

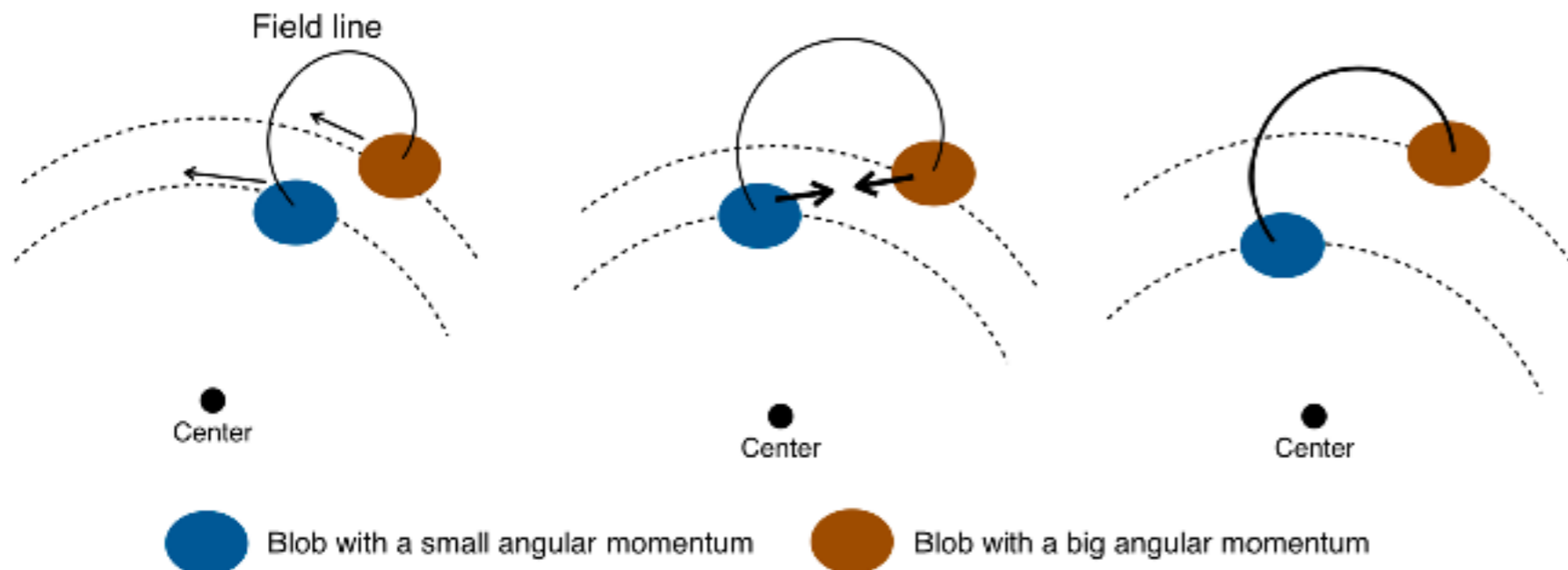
$$t_{\text{vis}} = r^2 / \nu \sim 10^{10} \text{ yr} \sim \text{宇宙年齢}$$

- 乱流粘性 (磁気乱流による動力的粘性)

$$\nu_{\text{turb}} \sim v_{\text{turb}} l_{\text{turb}} \sim c_s H \sim 10^{13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$c_s = 10^6 \text{ cm s}^{-1}$$

降着のタイムスケールは1年程度



MagnetoRotational Instability (MRI)

電離ガスが磁場とくっつく



離れるガスの塊を引き戻そう
として、角運動量を輸送する



乱流が発生する

(Balbus & Hawley 1991)

円盤の基本方程式

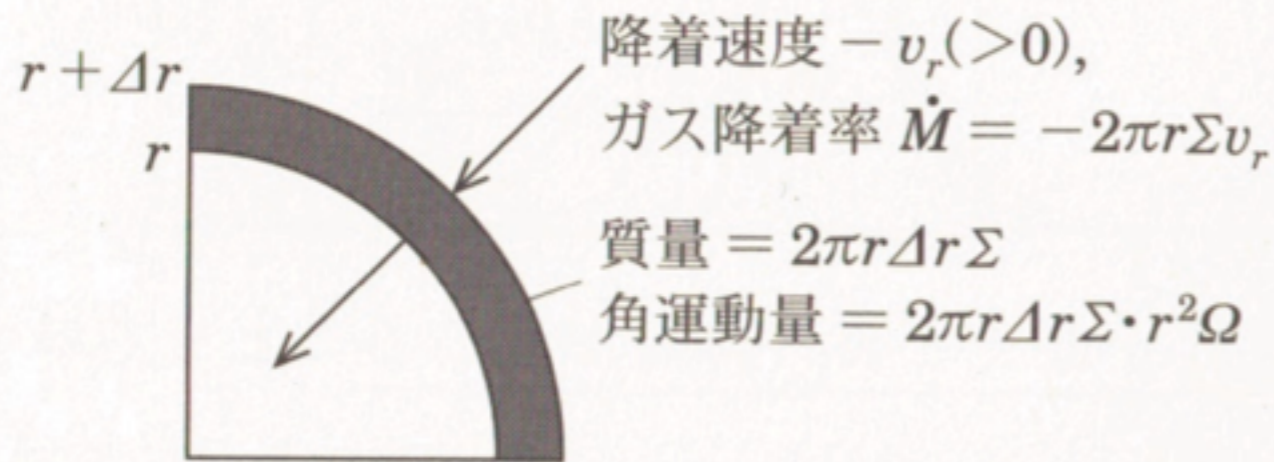


図 2.7 リングに入るガスと出ていくガス

← 「ブラックホール天文学」より

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sqrt{r} \nu \Sigma) \right]$$

拡散方程式が出てくる！



(a) 質量保存の式

$$\frac{\partial}{\partial t} (2\pi r \Delta r \Sigma) = (-v_r 2\pi r \Sigma)_{r+\Delta r} - (-v_r 2\pi r \Sigma)_r \simeq \Delta r \frac{\partial \dot{M}}{\partial r} \quad \boxed{\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r}} \quad (1)$$

(b) 角運動量保存の式

トルク $\overset{\text{運動論的粘性}}{G(r, t)} = 2\pi r \nu \Sigma r^2 \frac{d\Omega}{dr}$

$$\frac{\partial}{\partial t} (2\pi r \Delta r \Sigma \cdot r^2 \Omega) = (-v_r 2\pi r \Sigma \cdot r^2 \Omega)_{r+\Delta r} - (-v_r 2\pi r \Sigma \cdot r^2 \Omega)_r + \frac{\partial G}{\partial r} \Delta r$$

$$\simeq -\Delta r \frac{\partial}{\partial r} (\dot{M} \cdot r^2 \Omega) + \frac{\partial G}{\partial r} \Delta r \quad \boxed{\dot{M} \frac{d(r^2 \Omega)}{dr} = -\frac{\partial G}{\partial r}} \quad (2)$$

標準円盤モデルの導入とエネルギー方程式

- 定常な円盤を仮定 (式(1)で時間微分がゼロ)

$$\dot{M} \equiv -2\pi r \Sigma v_r = \text{const.}$$

- 式(2)は積分できる

$$G(r) = -\dot{M}(r^2\Omega + C) \quad G(r_*) = 0 \text{ となるように } C \text{ を決める}$$

- ケプラー回転を仮定すると $G(r) = -3\pi\nu\Sigma \cdot r^2\Omega$ なので、上と合わせて

$$\boxed{\nu\Sigma = \frac{\dot{M}}{3\pi} \left(1 - \sqrt{\frac{r_*}{r}}\right)} \quad (3)$$

- ここで、エネルギーバランスを考えると、

$$\begin{array}{ccc} Q_{\text{vis}}^+ \text{ (トルクによる仕事率)} & = & Q_{\text{rad}}^- \text{ (円盤表面からの放射)} \\ \uparrow & & \uparrow \\ (9/4)\nu\Sigma\Omega^2 & & 2F(r) = 2\sigma T_{\text{eff}}^4 \end{array}$$

$$\boxed{F(r) = \sigma T_{\text{eff}}^4(r) = \frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}}{r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_*}{r}}\right)} \quad (4)$$

黒体放射とは？

- 真っ黒な物体から発せられる放射（全ての波長のエネルギーを吸収し、放射する）
- 熱平衡にある場合の放射、黒体の温度だけで放射が決まる

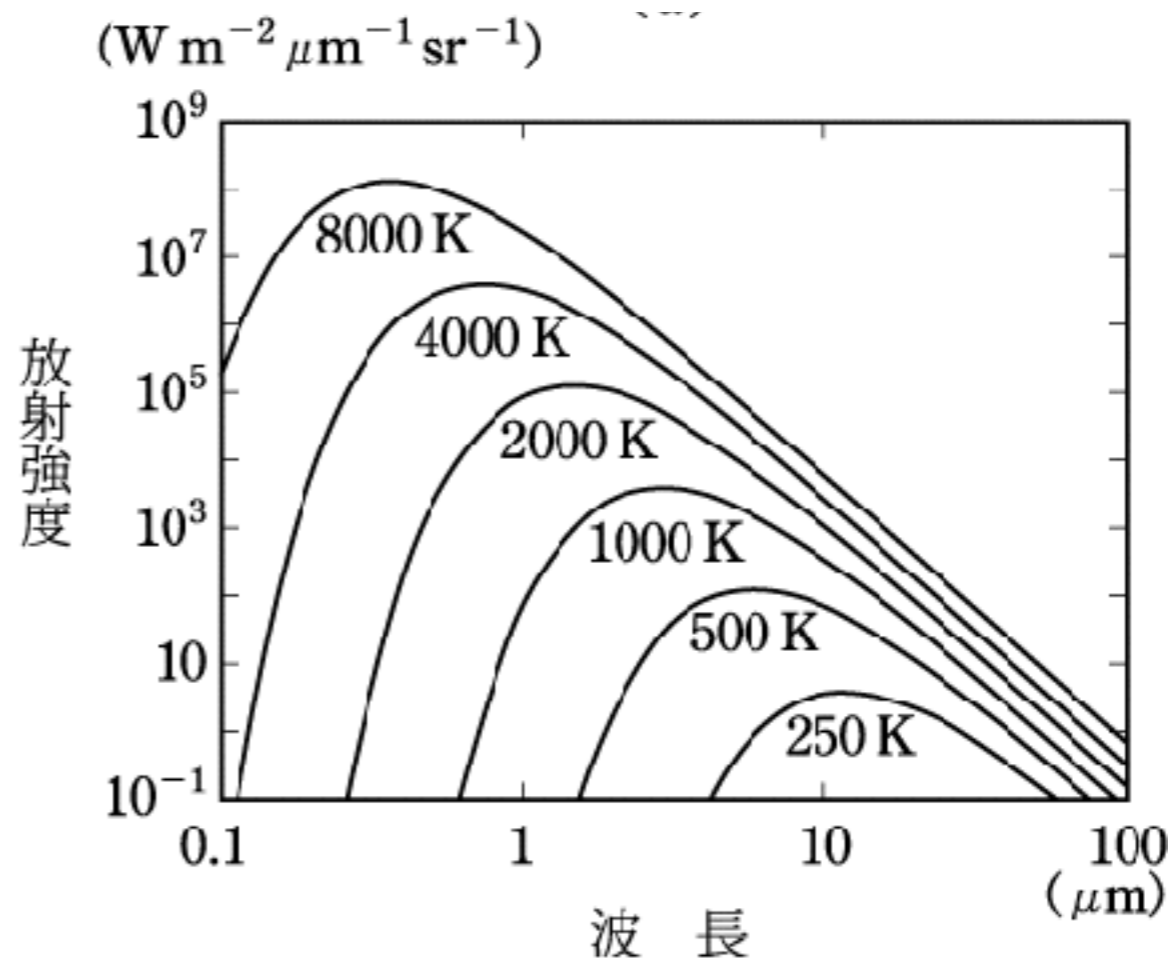
$$\pi B_\nu(T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$



全波長域で積分

$$B(T) = \frac{1}{\pi} \sigma T^4$$

この時のTが有効温度 (T_{eff})



↑ 「宇宙の観測 I」 (日本評論社) より

円盤のエネルギーの流れ

- 式(3)と(4)より、

$$\frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}}{r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_*}{r}}\right) = \frac{9}{8} \nu \Sigma \frac{GM\dot{M}}{r^3} = F(r) \quad \leftarrow \text{放射}$$

重力エネルギーの解放

粘性加熱による熱エネルギーの上昇

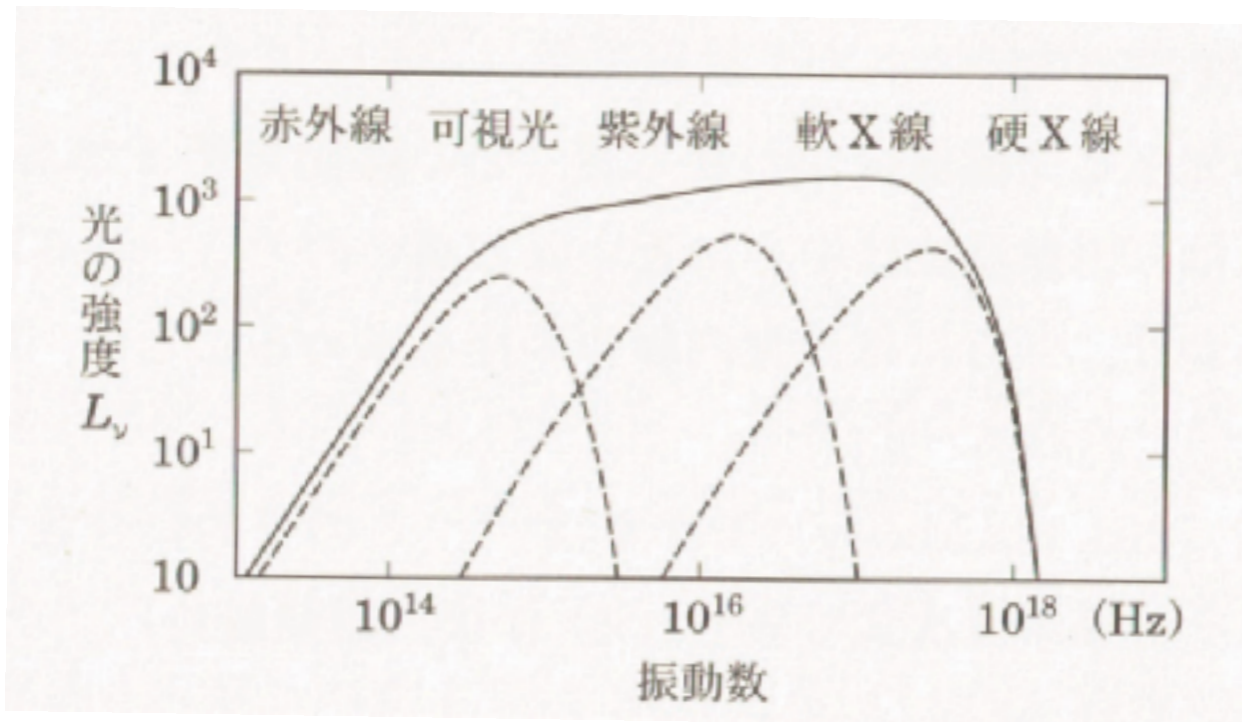
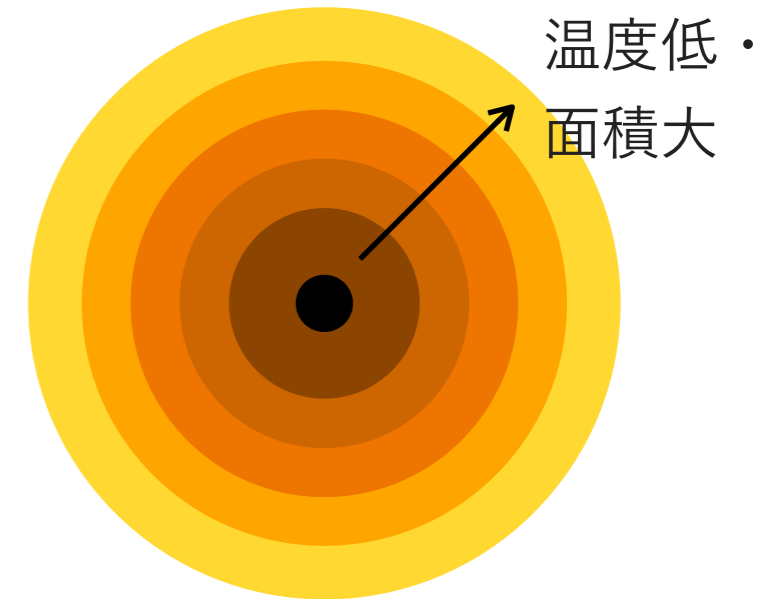
「降着円盤は、重力エネルギーを効率良く放射エネルギーに変換する装置である」

円盤のスペクトルと多波長放射

- 式(4)から、円盤の各半径の温度が分かる

$$T_{\text{eff}}(r) = \left(\frac{3}{8\sigma\pi} \frac{GM\dot{M}}{r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_*}{r}} \right) \right)^{1/4}$$

- 円盤からの放射は、多温度の黒体放射を足し合わせたものになる



$$L_\nu = \int \pi B_\nu(T_{\text{eff}}) \cdot 2\pi r dr$$

← 「ブラックホール天文学」より

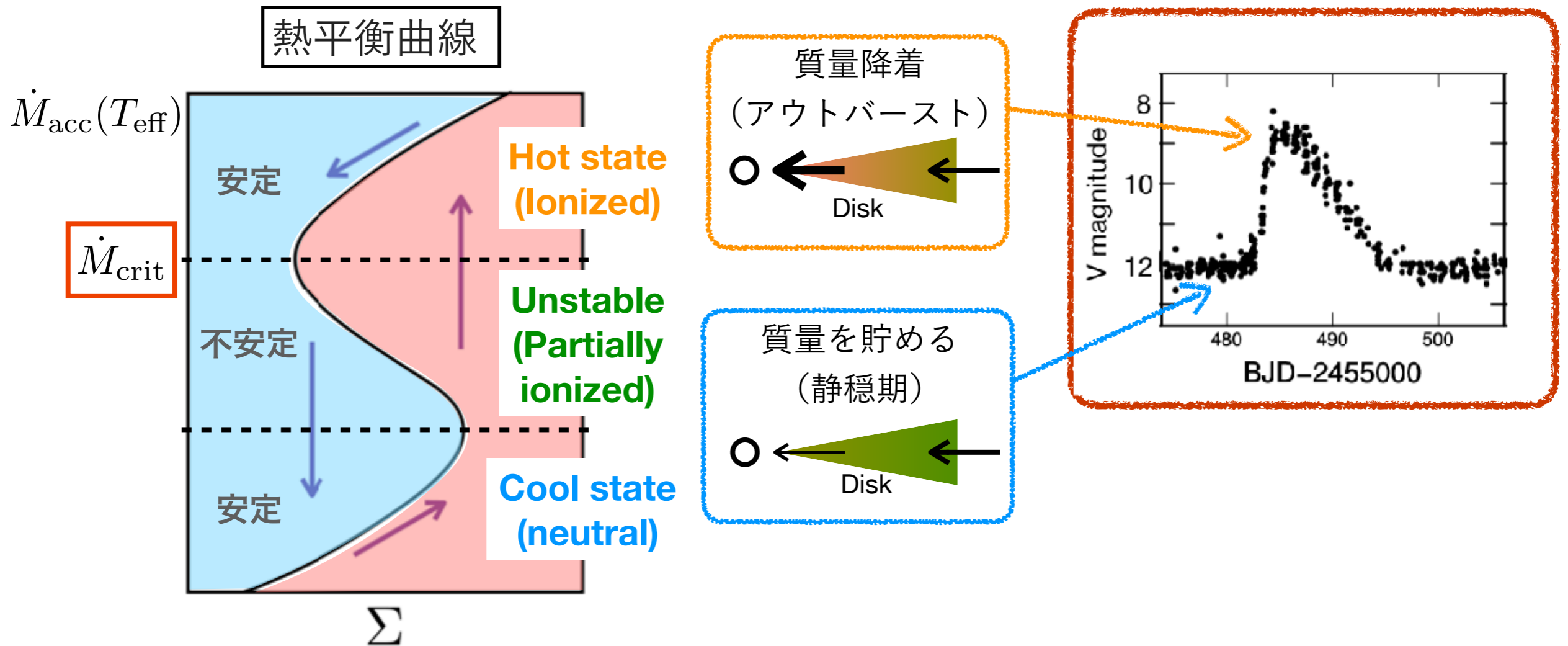
「降着円盤は、X線から可視光まで、多波長域の放射を出す」

イントロダクション 2

(アウトバーストを引き起こす熱不安定・最近問題になっていること)

連星系のアウトバーストのメカニズム

水素の部分電離に伴う熱不安定により起こる



円盤不安定モデル

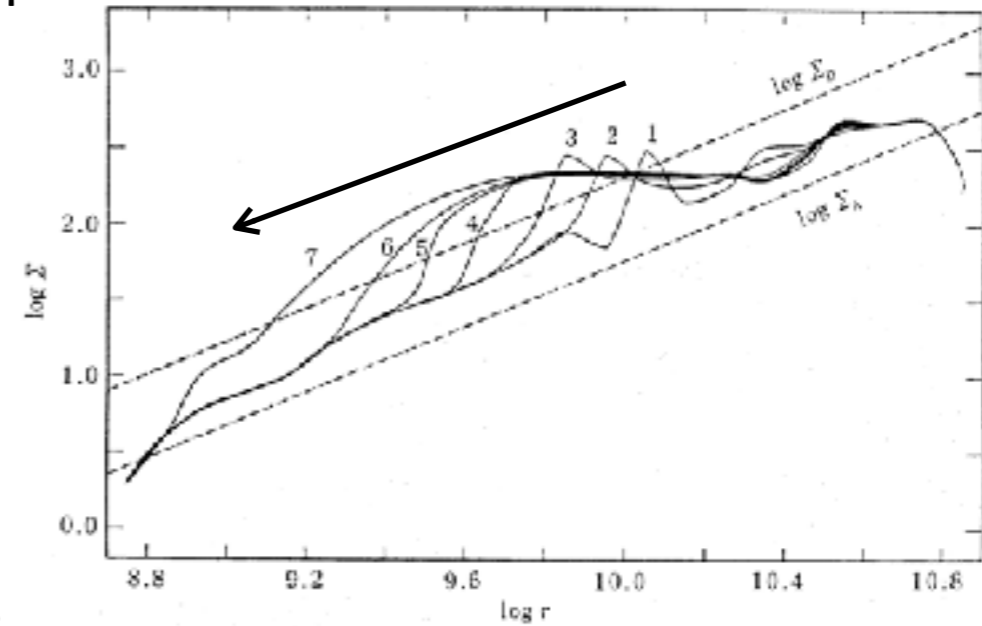
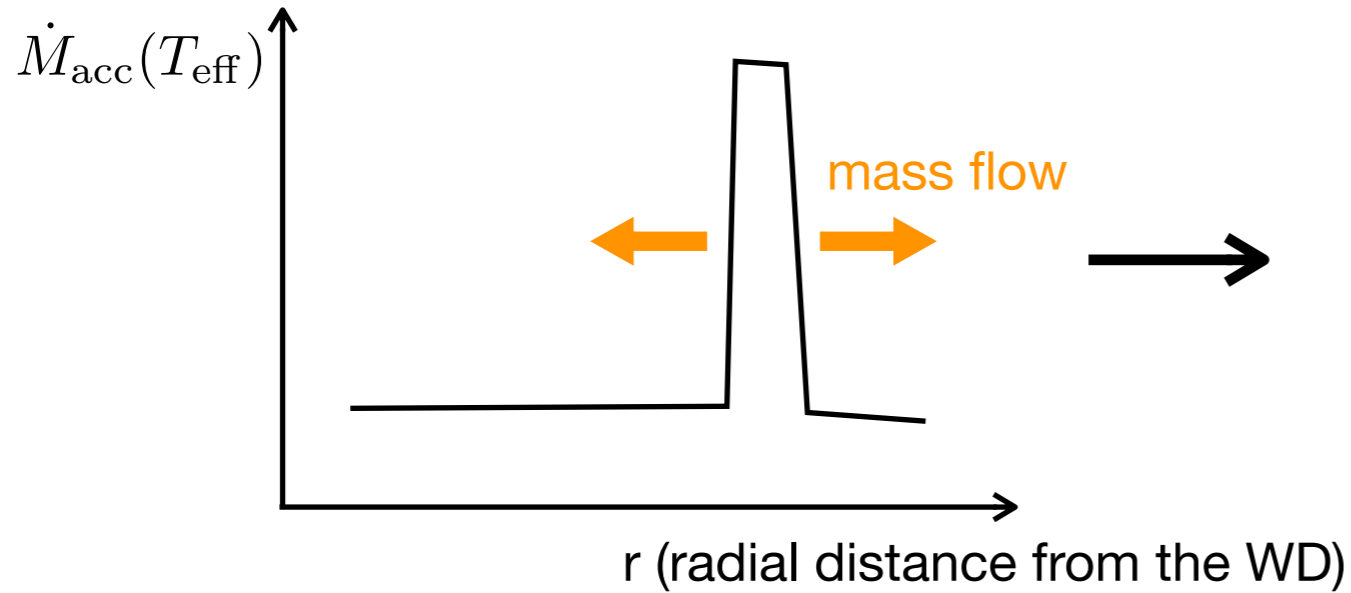
- リミットサイクル不安定が円盤全体に伝わる
- 伴星からの質量輸送率は一定だが、質量降着率は可変

(Hoshi 1979; Meyer & Meyer-Hofmeister 1981; Mineshige & Osaki 1985; Osaki 1996; Meyer & Meyer-Hofmeister 1983)

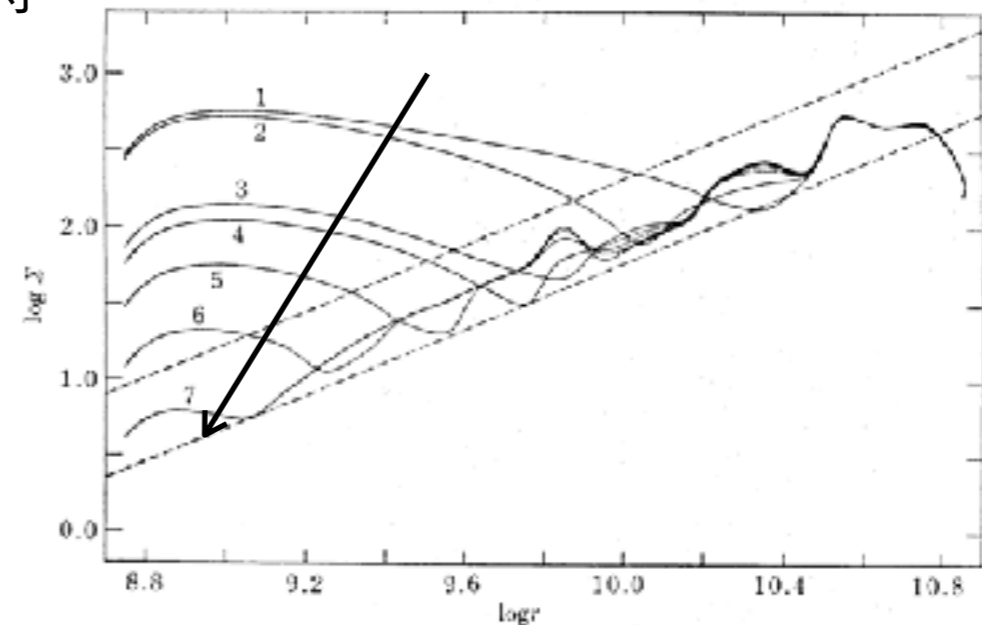
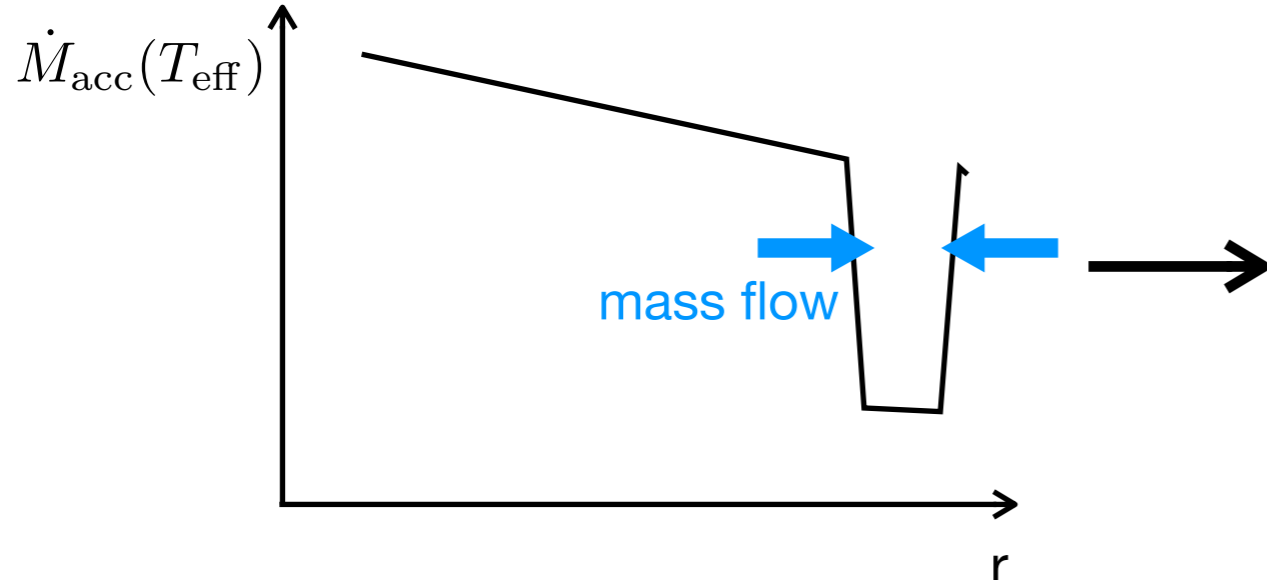
連星系のアウトバーストのメカニズム

Transition waveが円盤全体に伝わることで、振幅の大きい増光になる

Heating waves 静穏時 → アウトバースト

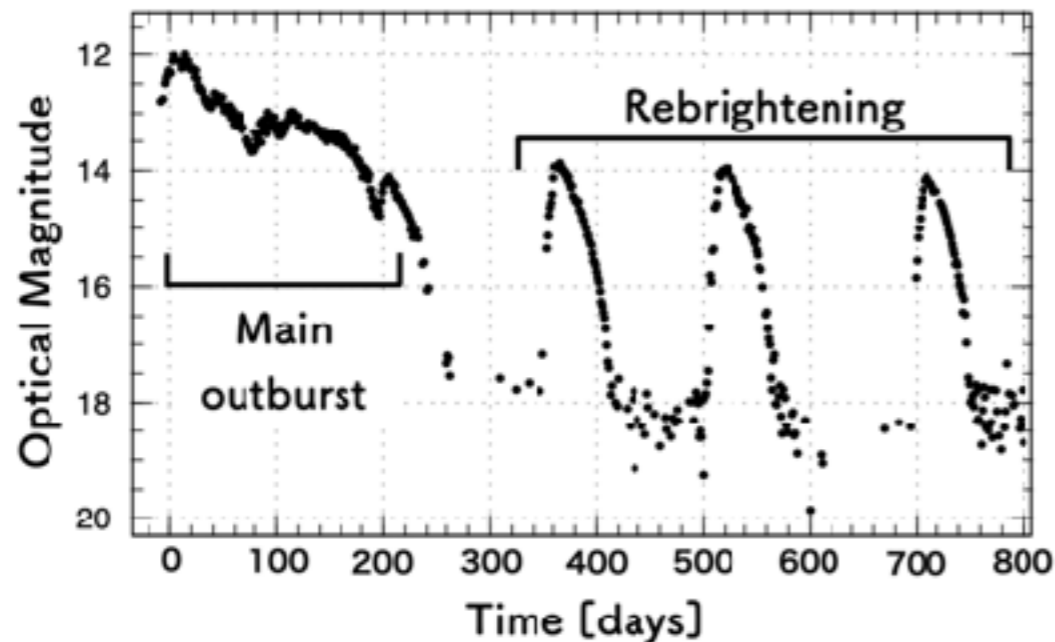
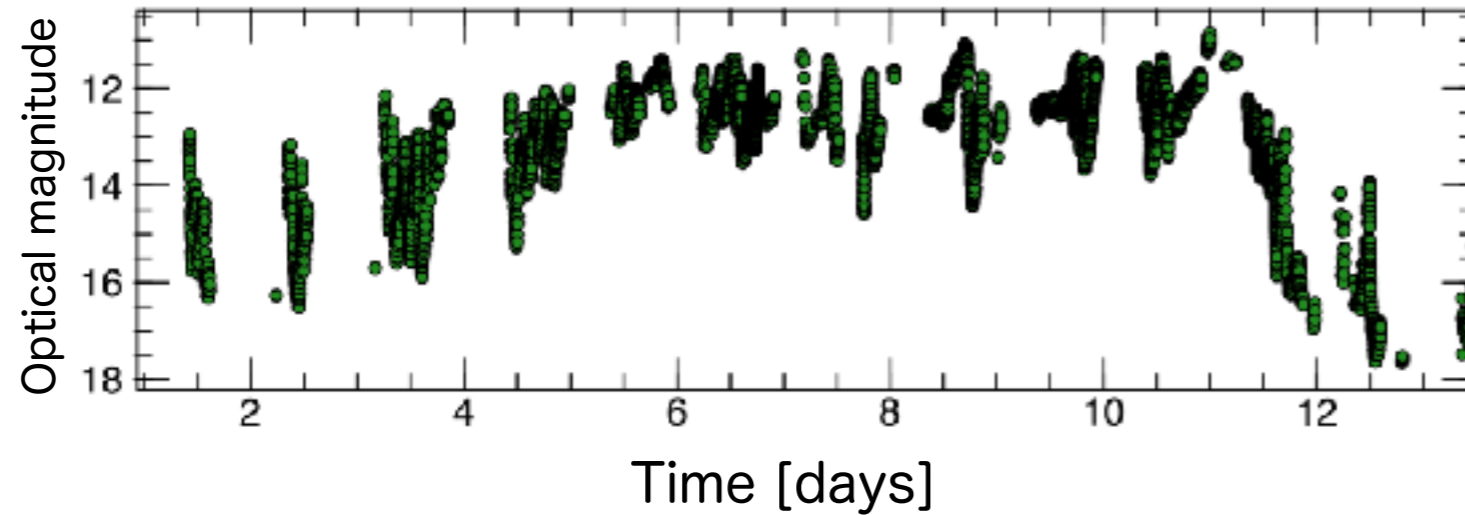
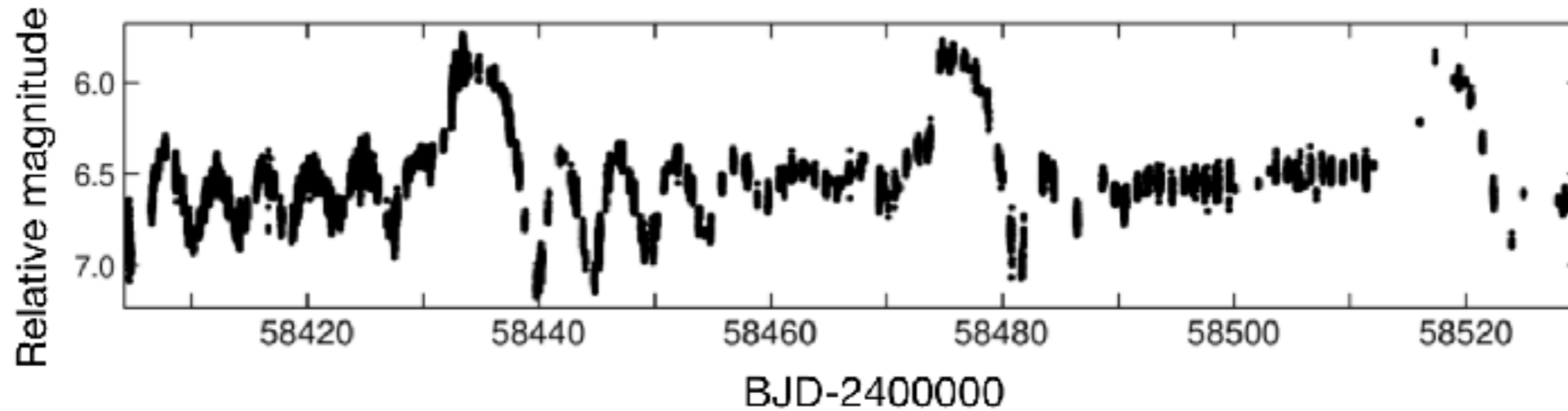


Cooling waves アウトバースト → 静穏時



(Mineshige & Osaki 1985)

近年の、多様なアウトバーストの発見



観測技術の発達・ビッグデータ

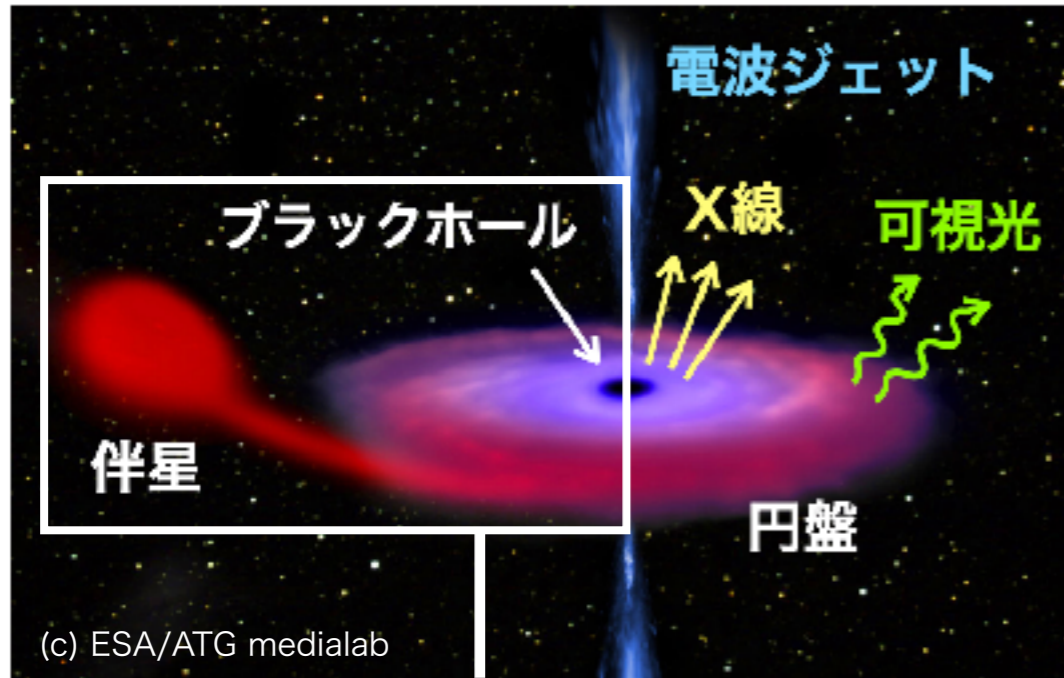


シンプルなモデルでは説明できないアウトバーストの発見



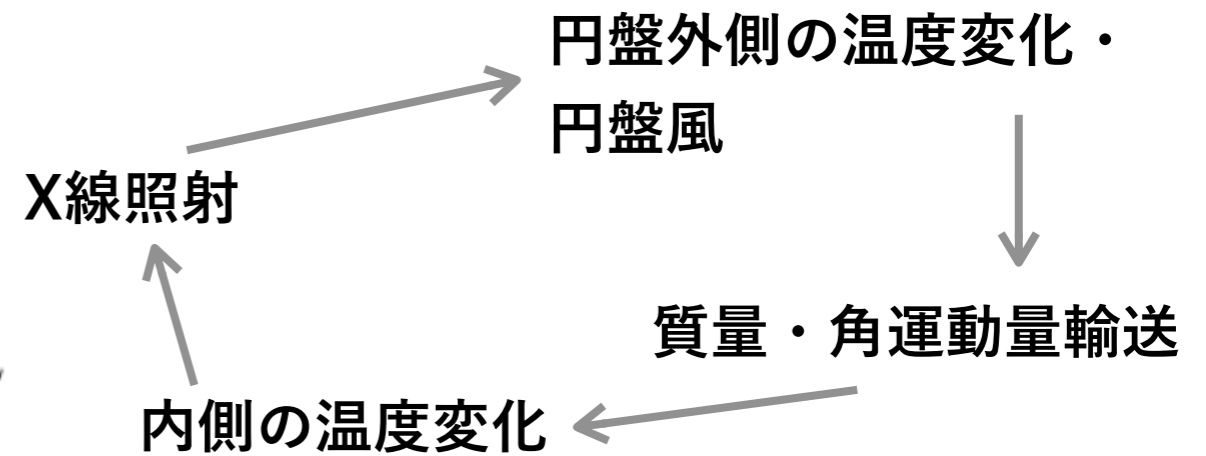
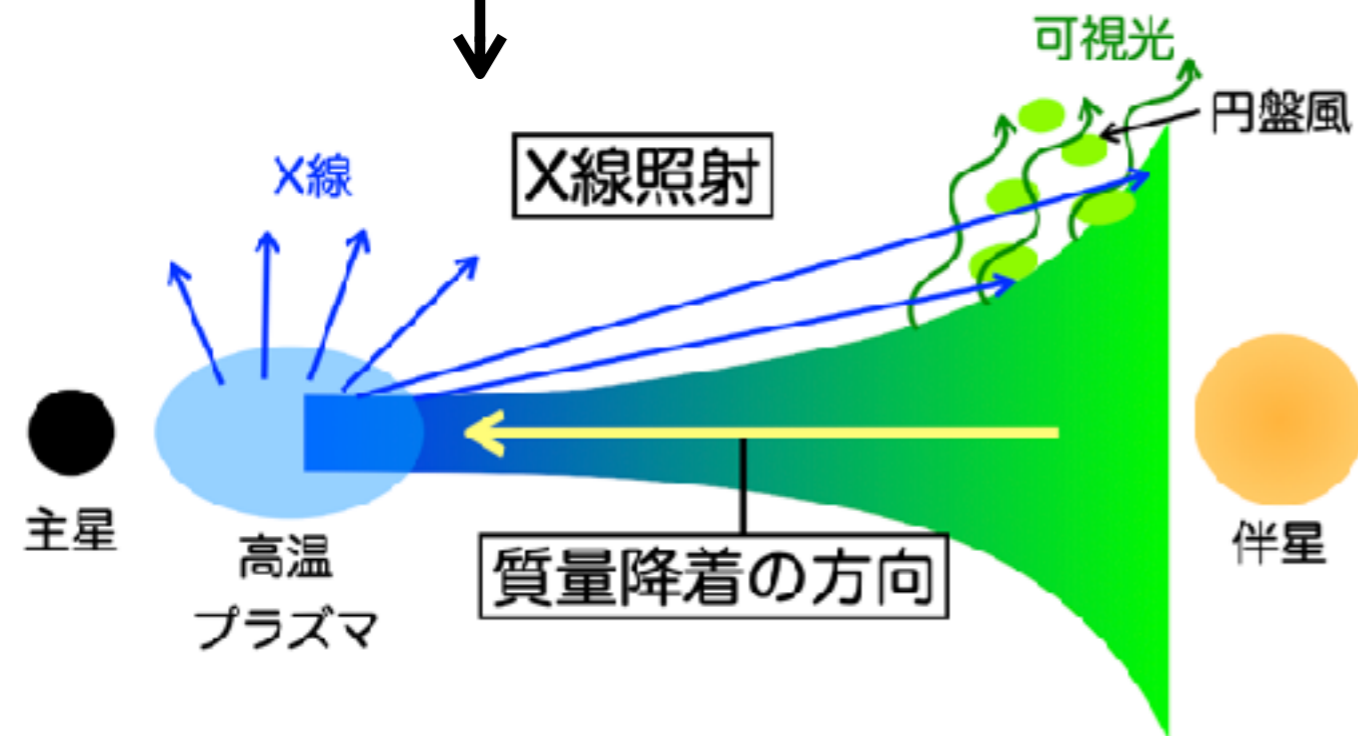
多様なアウトバーストを説明する大統一モデルへ

多波長観測の重要性



これまでは、X線と可視光の研究が別々だった
しかし、

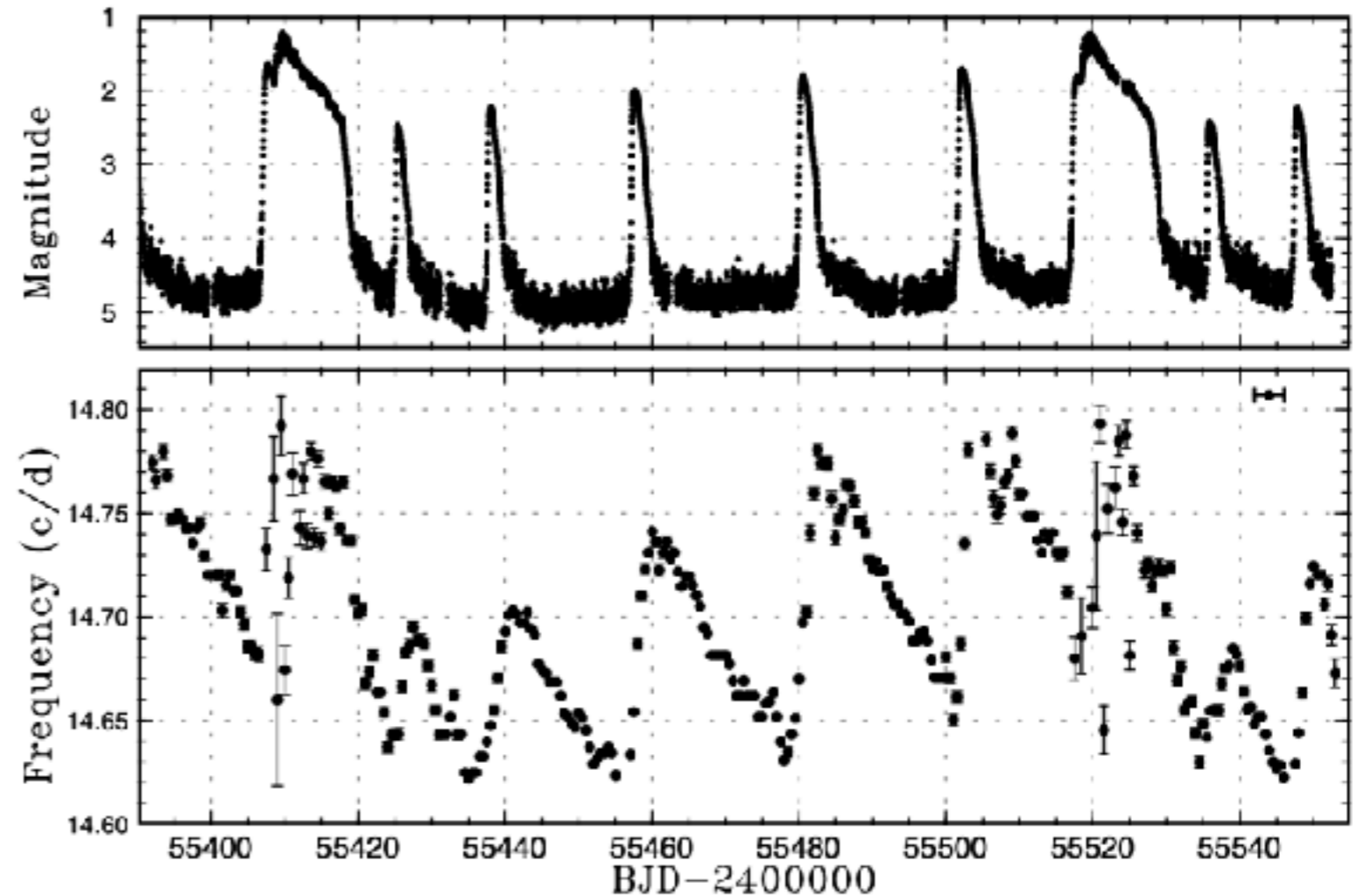
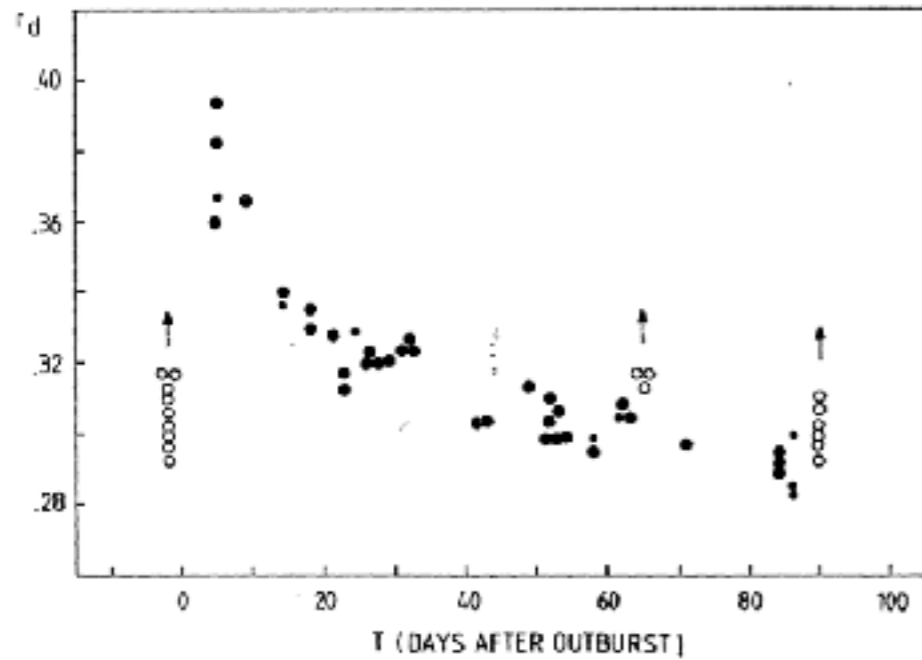
円盤の一部で起こる物理現象が、
円盤全体に影響する



多波長観測をして初めて、円盤全体
の物理現象を調べられる

数値シミュレーションの重要性

ガス降着 → 円盤内での角運動量輸送 → 円盤半径が変化する

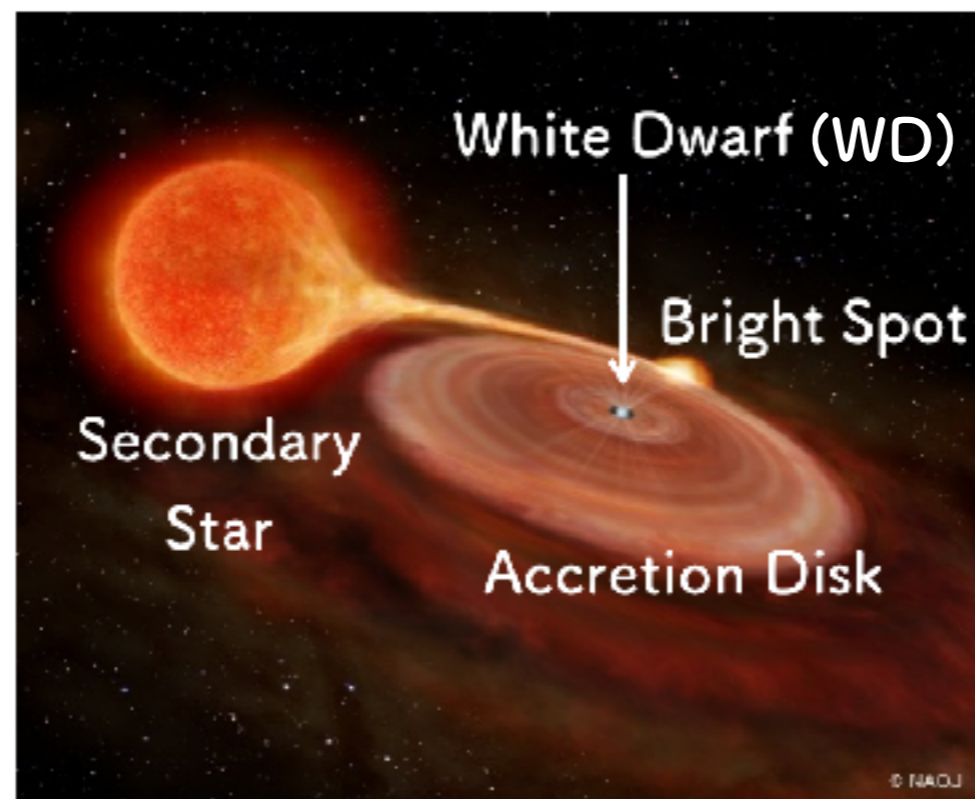


円盤の全角運動量が保存する数値シミュレーションが必要

(Smak 1984; Osaki & Kato 2013)

私の研究紹介

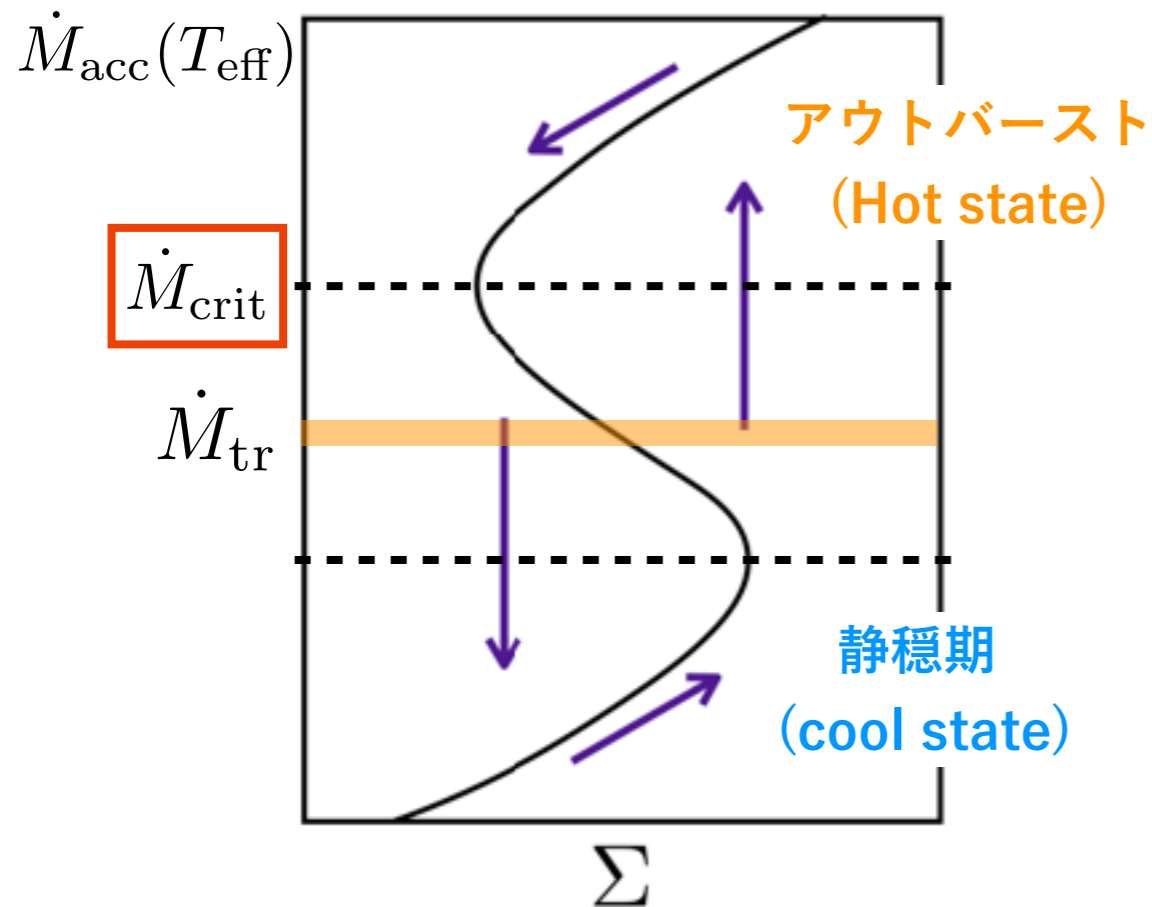
(はくちょう座SS星について、多波長観測と数値シミュレーション)



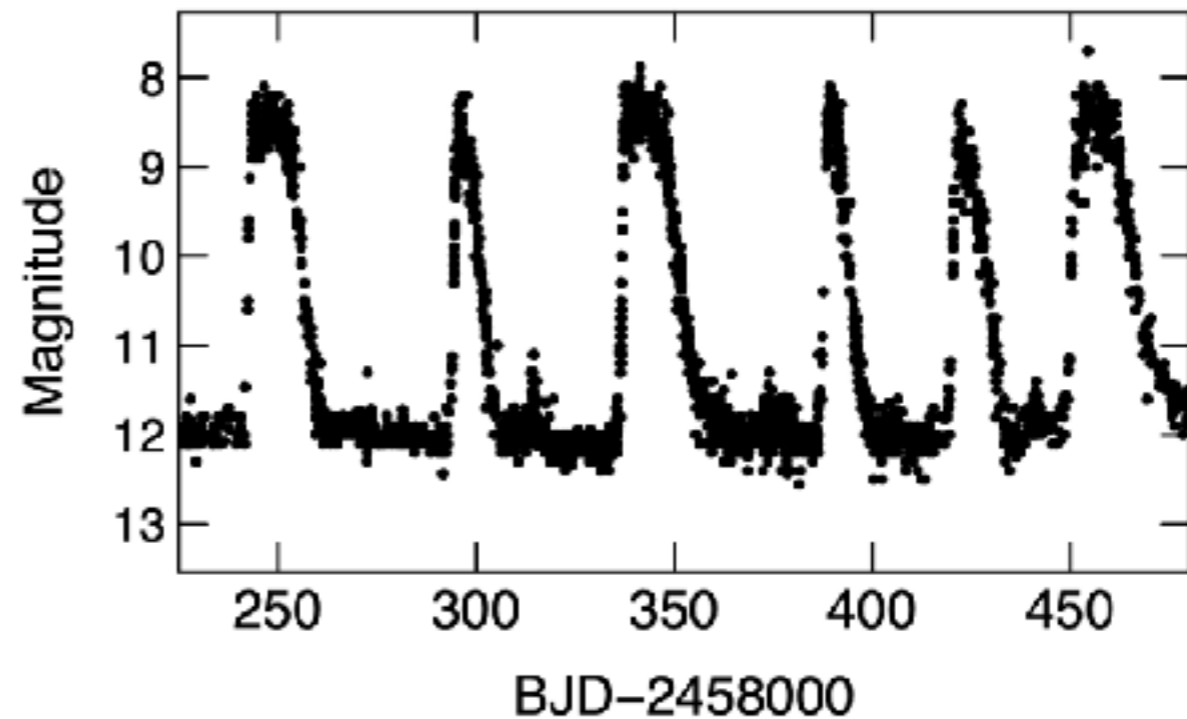
矮新星

伴星からの質量輸送率による矮新星の分類

熱平衡曲線



SS Cyg-type stars

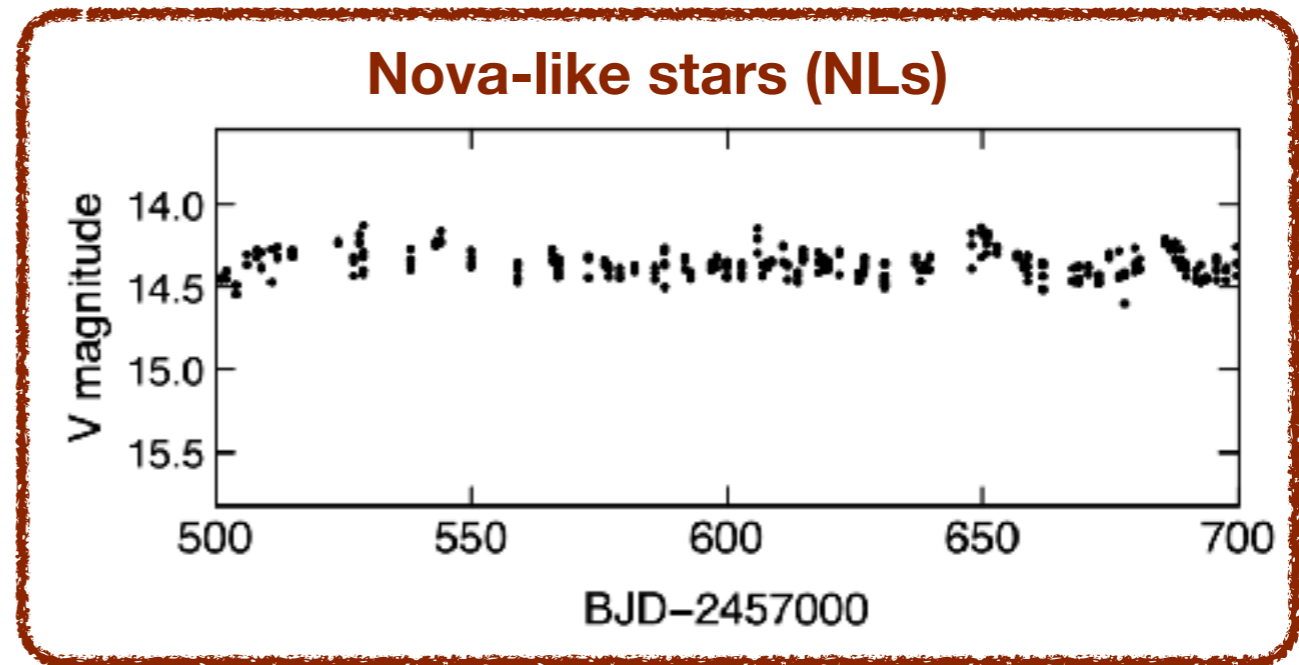
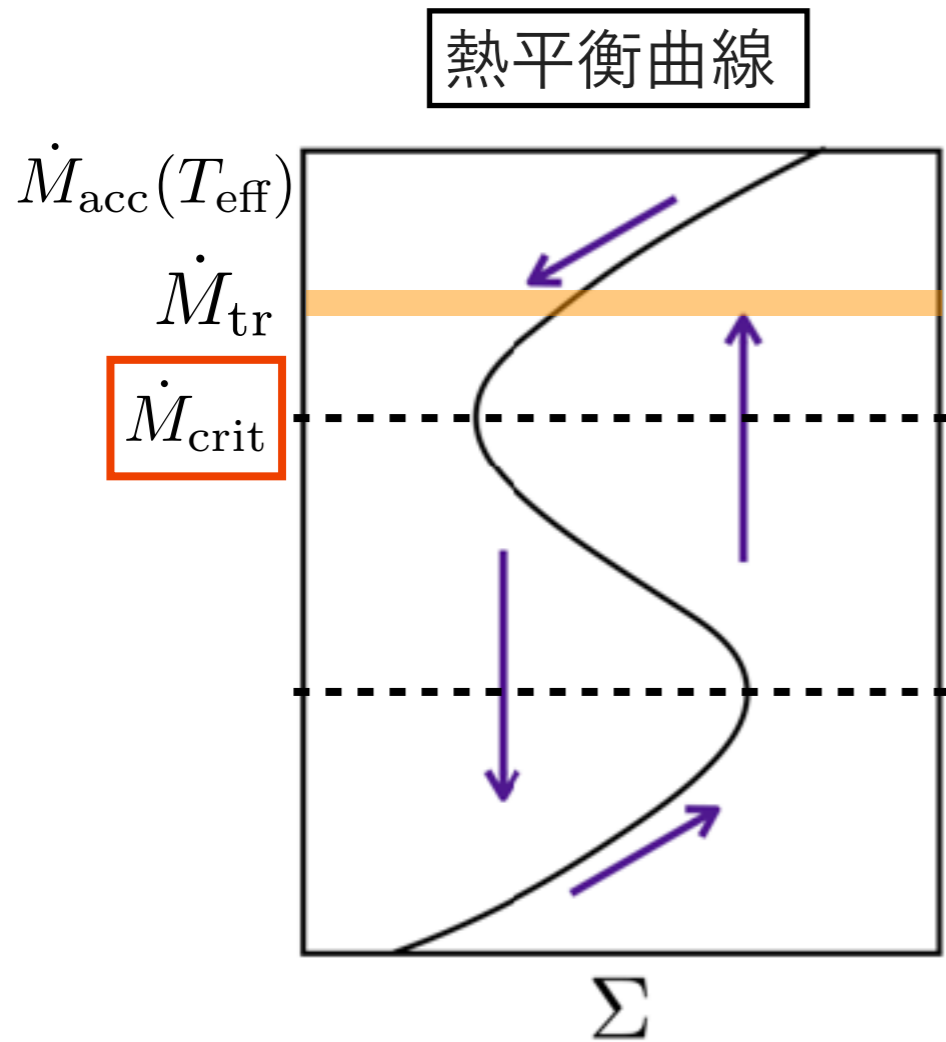


$$\dot{M}_{tr} < \dot{M}_{crit}$$

- 円盤は熱不安定になる
- アウトバーストを繰り返す

(Hoshi 1979; Meyer & Meyer-Hofmeister 1981; Mineshige & Osaki 1985; Osaki 1996; Meyer & Meyer-Hofmeister 1983)

伴星からの質量輸送率による矮新星の分類



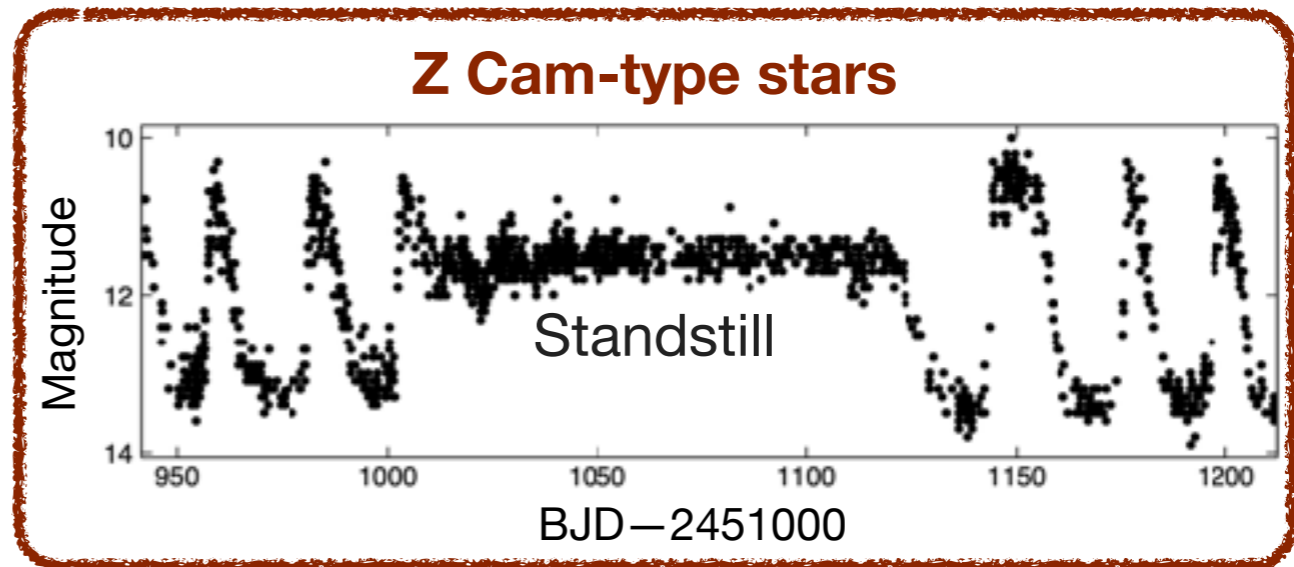
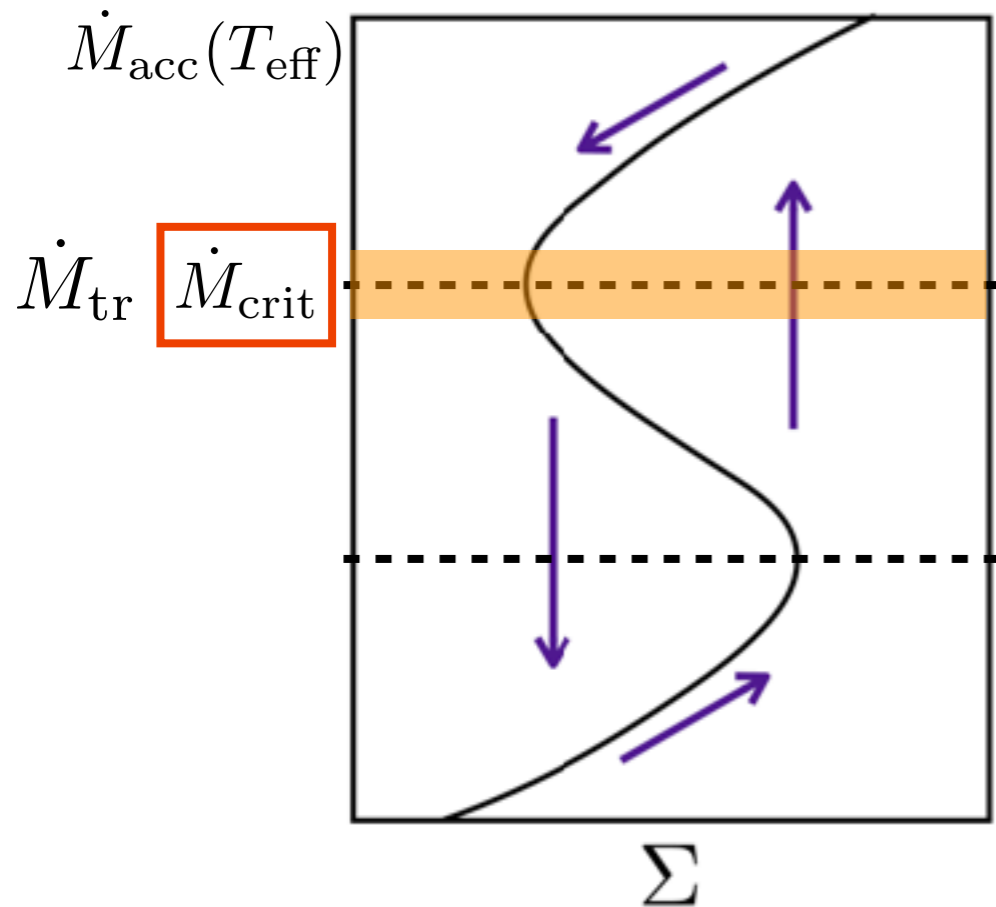
$$\dot{M}_{tr} > \dot{M}_{crit}$$

- 円盤は熱的に安定
- 光度が一定

(Hoshi 1979; Meyer & Meyer-Hofmeister 1981; Mineshige & Osaki 1985; Osaki 1996; Meyer & Meyer-Hofmeister 1983)

伴星からの質量輸送率による矮新星の分類

熱平衡曲線



$$\dot{M}_{tr} \sim \dot{M}_{crit}$$

- NLsとSS Cyg starsの中間の存在
- 質量輸送率が変化する？

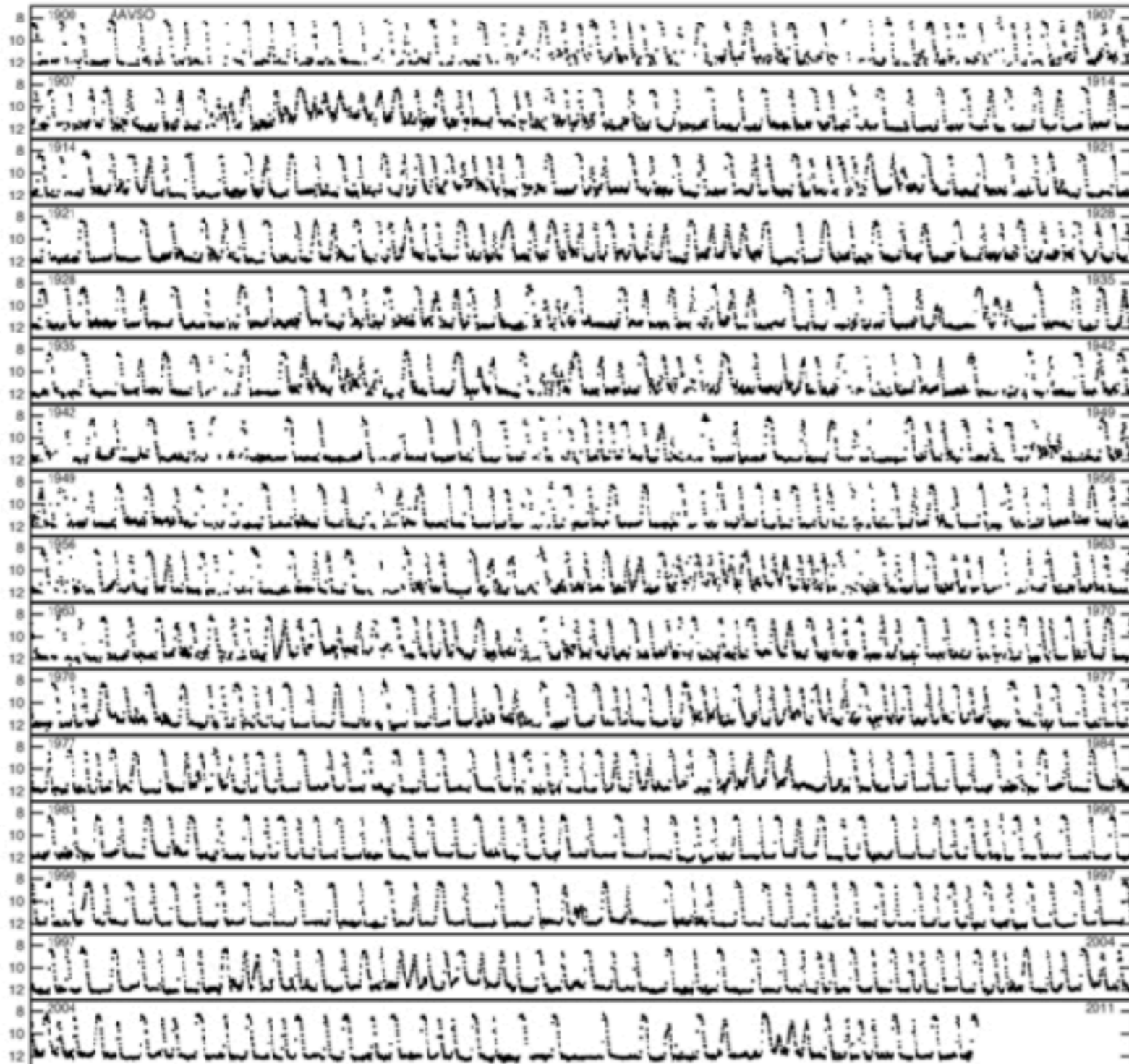
Standstillとアウトバーストの切り替えは、シンプルな円盤不安定モデルでは説明できない

→ 多様なアウトバーストの大統一モデルは未完成

(Hoshi 1979; Meyer & Meyer-Hofmeister 1981; Mineshige & Osaki 1985; Osaki 1996; Meyer & Meyer-Hofmeister 1983)

はくちょう座SS星 (SS Cygni) とは？

SS Cygni
1900-2010 (1-day means)

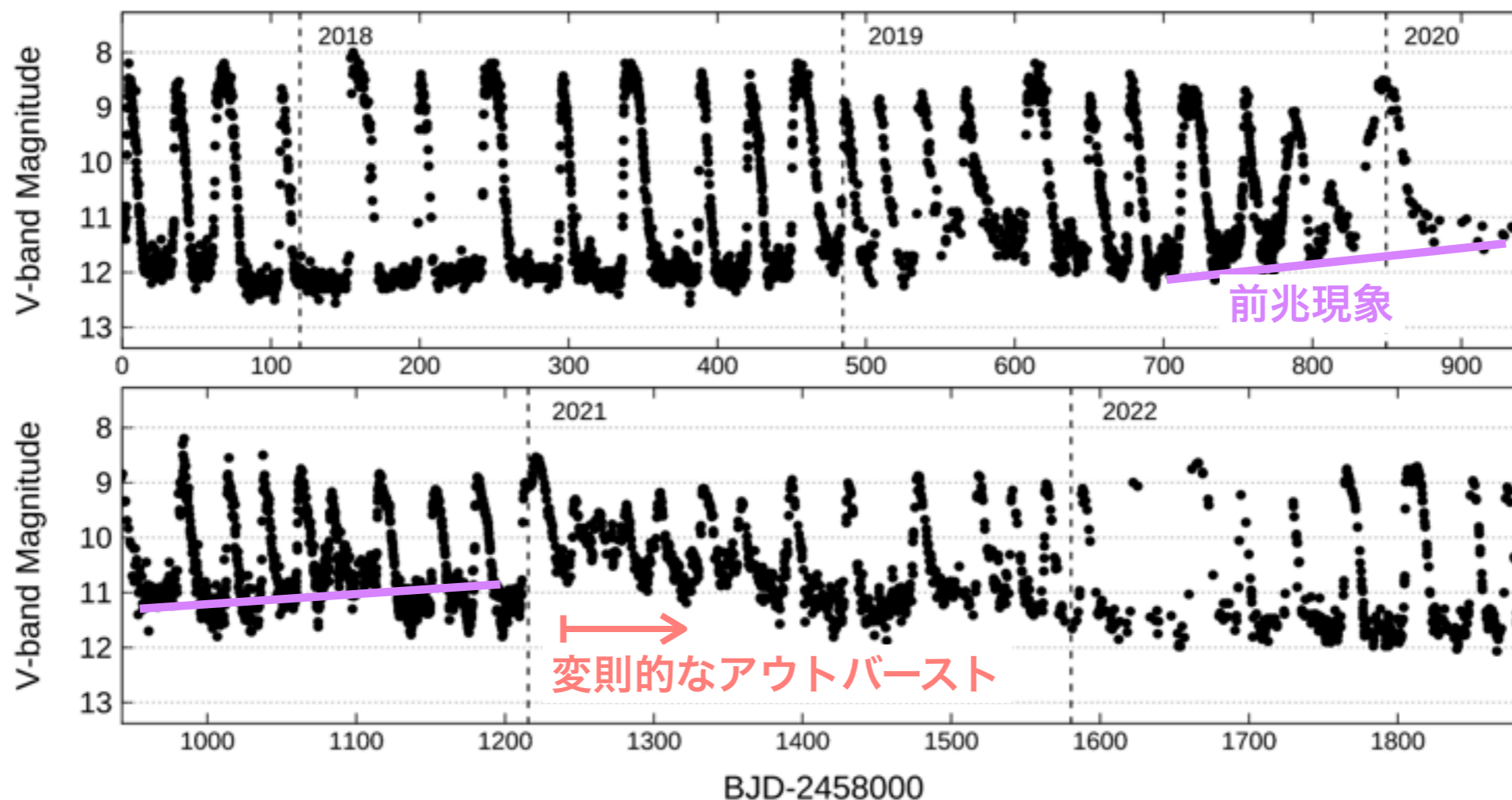


(Historical light curve of AAVSO)

- 可視光とX線で、それぞれ100年以上、20年以上もモニタリングされている
- ~1ヶ月の間隔でアウトバーストを起こす
- SS Cyg型の矮新星のプロトタイプ

2021年の変則的なアウトバースト

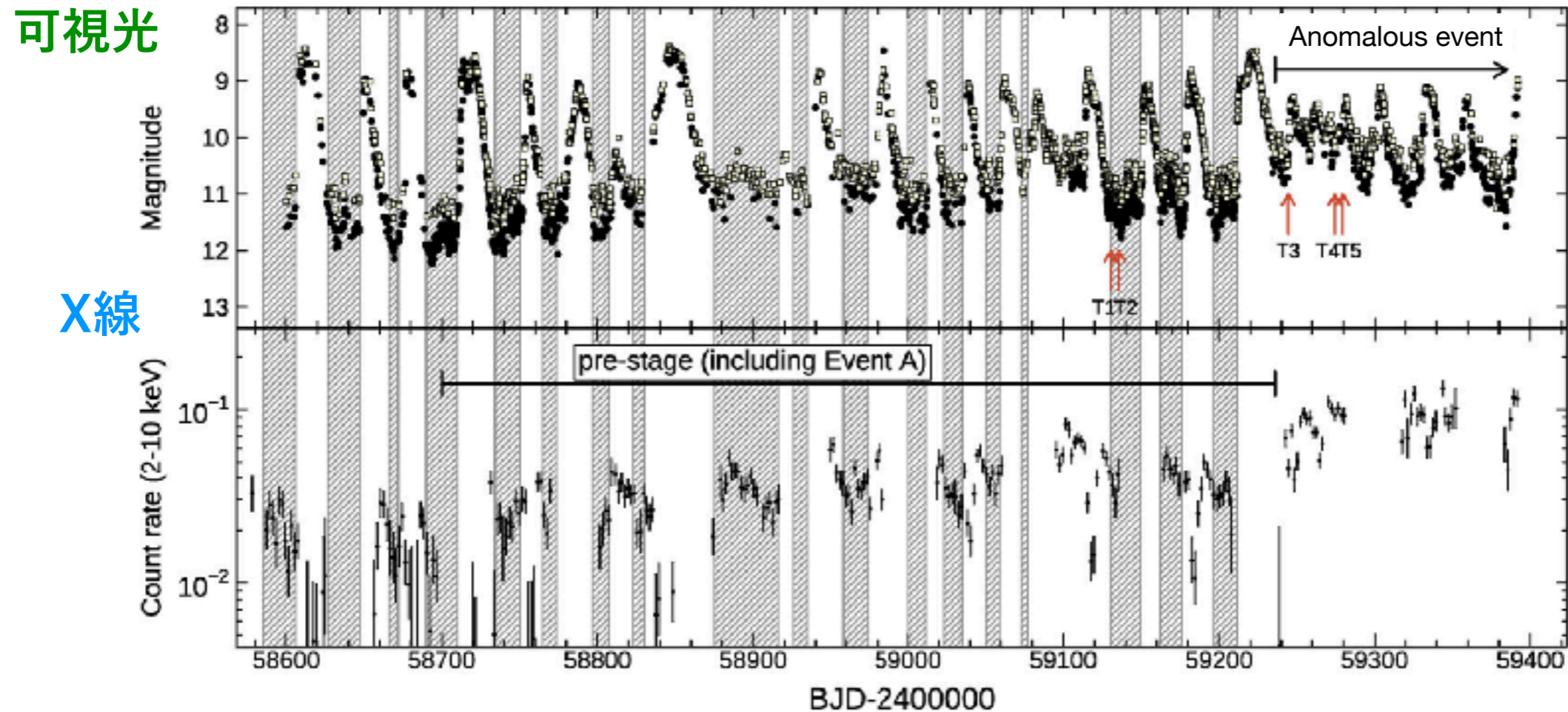
- SS Cygはプロトタイプではなくなりました。。



- 長い観測の歴史の中で初めての出来事
→ 矮新星のstandstillがなぜ起こるか？を考える良いきっかけ

多波長域で観測された、変則的なアウトバースト

前兆現象：静穏期における、可視光・X線の長期的な増光



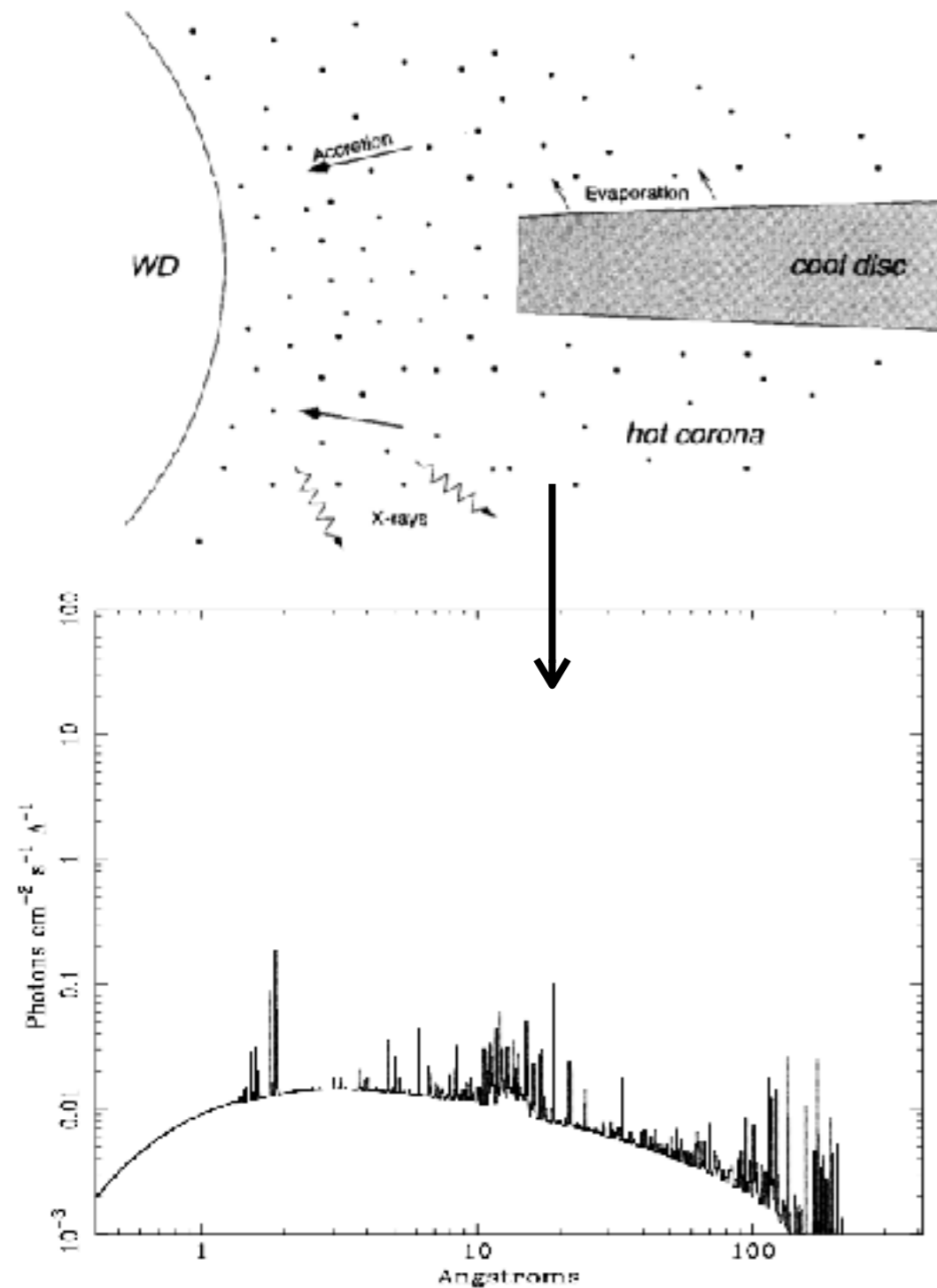
私たちの観測

可視光: Amateur groups (VSNET, AAVSO), Tomo-e Gozen at Kiso Observatory

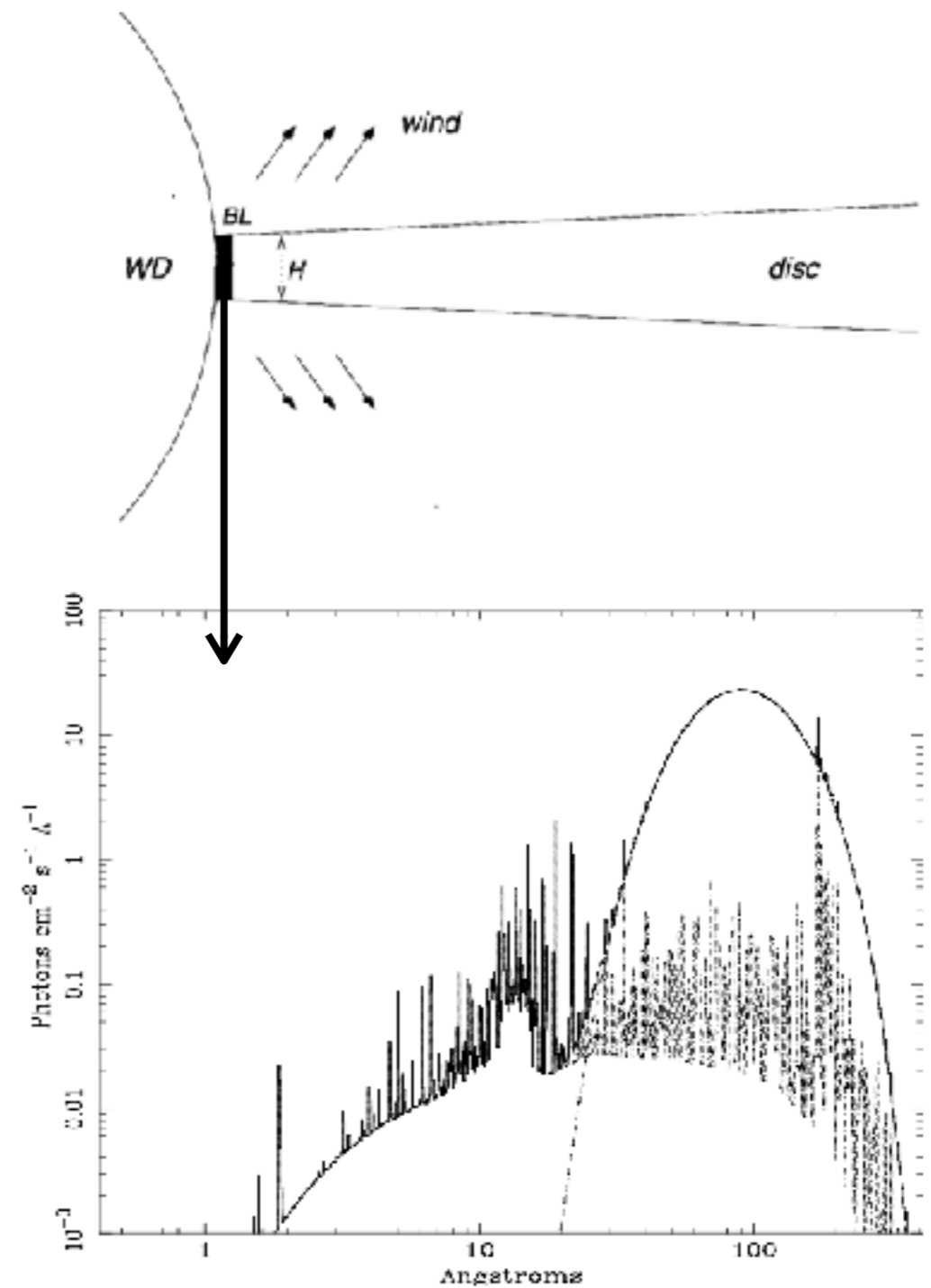
X線: NICER, NuSTAR, MAXI, Swift

矮新星のX線放射

質量降着率が低い静穏期



質量降着率が高いアウトバースト期



(Wheatley & Mauche 2005; Hellier 2001)

なぜ可視光とX線で同時に増光したのか？

考えられるシナリオ

1. 伴星からの質量輸送率が増えた

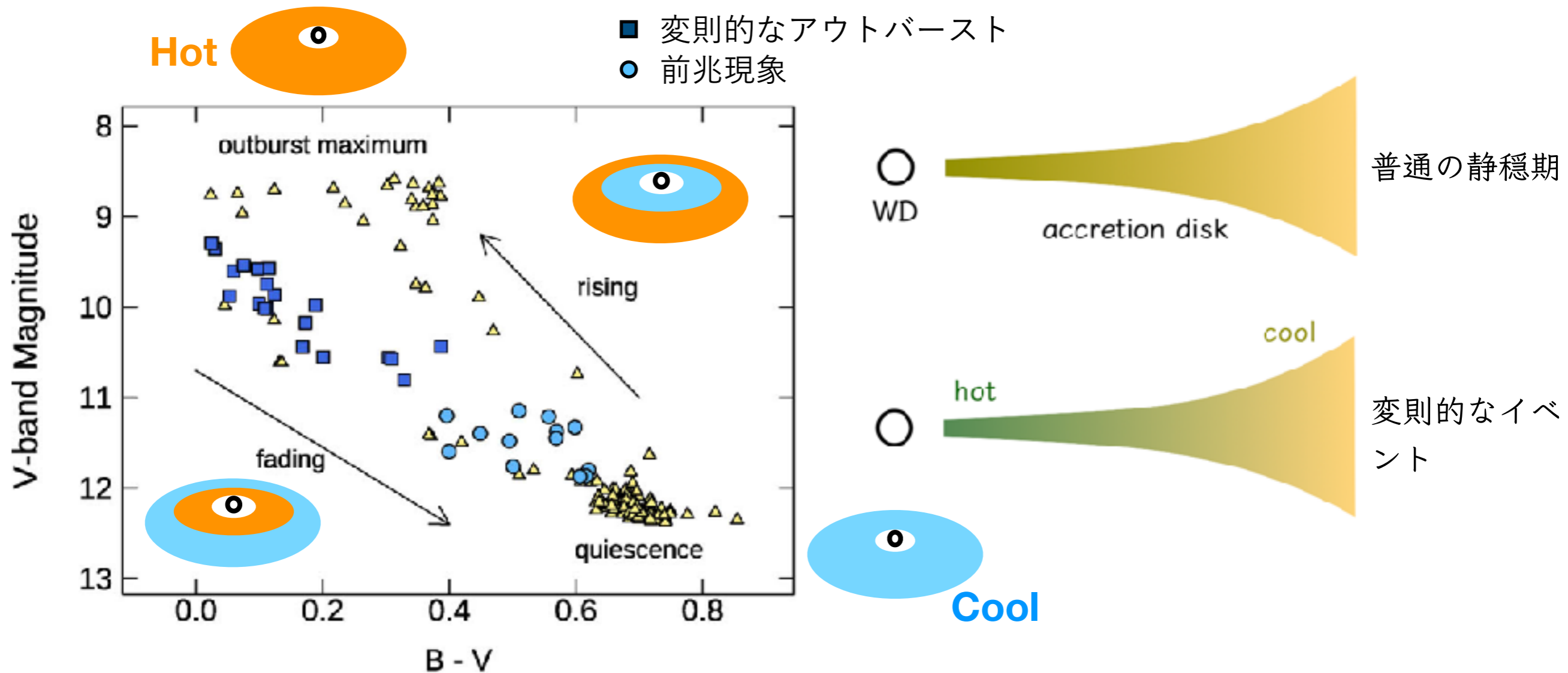
↑ No positive evidence

2. X線照射が強くなった

↑ 照射では、可視光の光度を最大~30%しか上げられない

3. (何らかの理由で) 円盤の質量降着率が増加した

円盤内側の温度が高い？



$$\dot{M}_{\text{in}} \propto \alpha_{\text{cool}} \Sigma T \longrightarrow L_{\text{X}} \sim \frac{GM\dot{M}_{\text{in}}}{2r_{\text{in}}}$$

質量降着率が上がれば、X線の増光を同時に説明できる

Cool stateでの粘性が増加した？

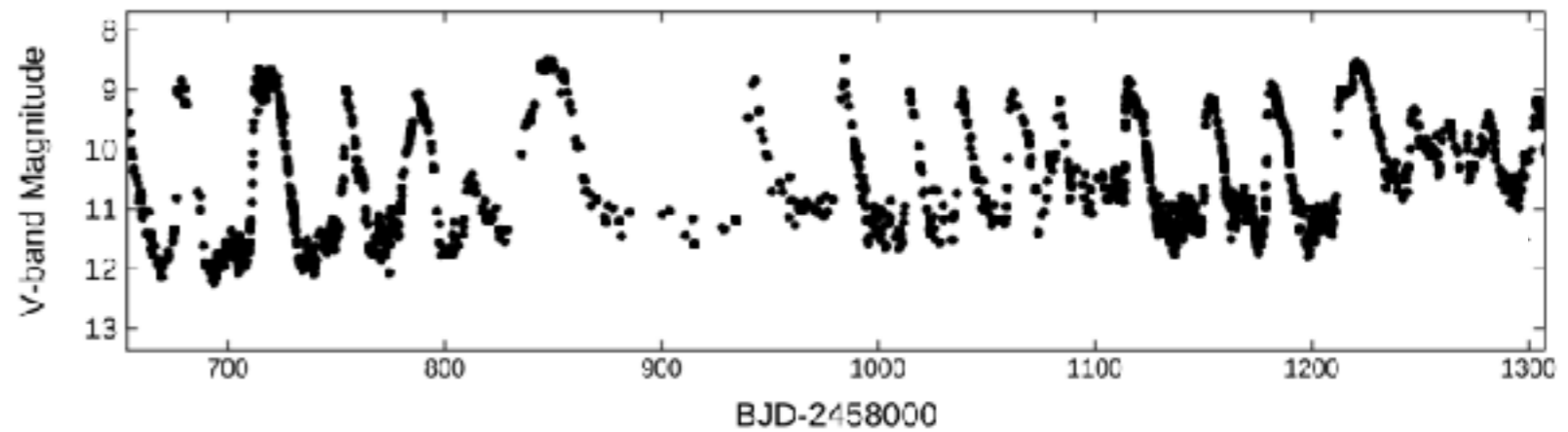
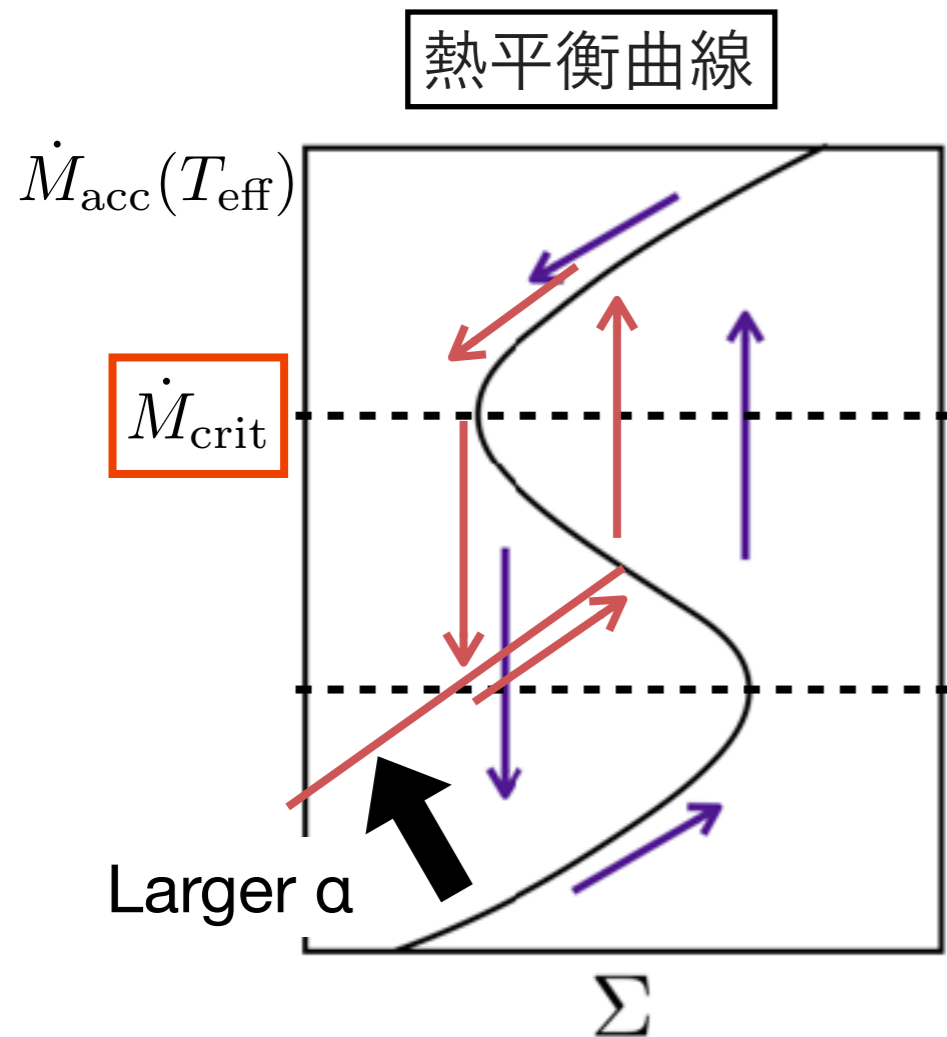
粘性の増加の効果

- Cool stateにおける粘性の増加

→ リミットサイクルが
小さくなる

→ 静穏期の光度が上昇

Inside-out outburstsが増える



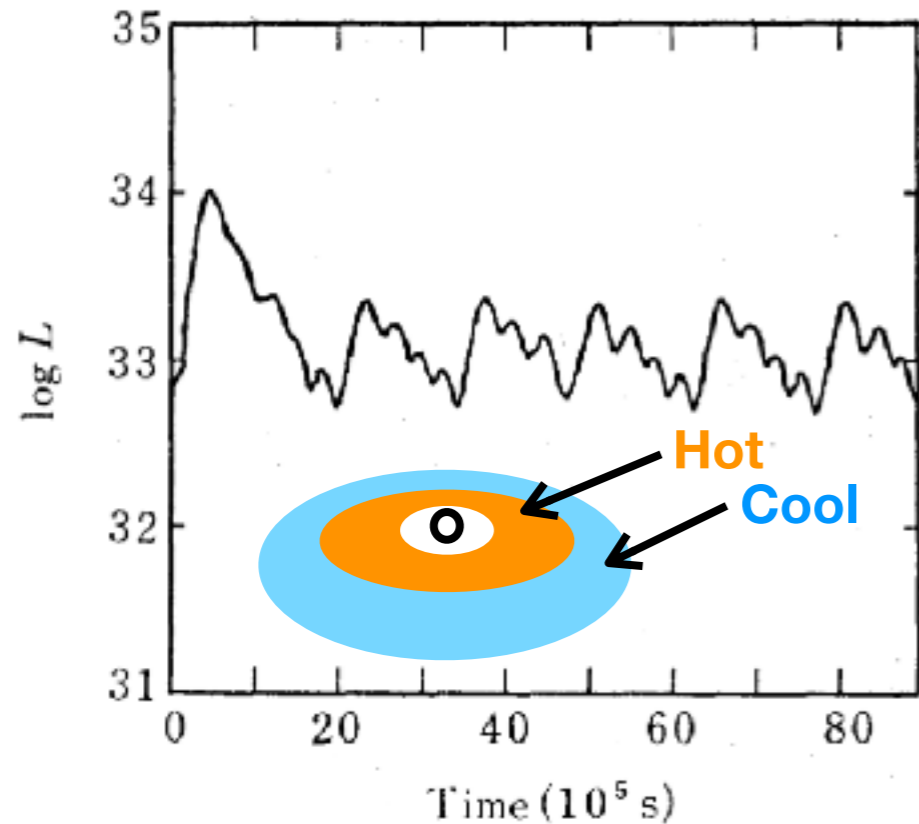
↑ 前兆現象の可視光のライトカーブ

Transition waveが円盤全体に伝わりにくくなる

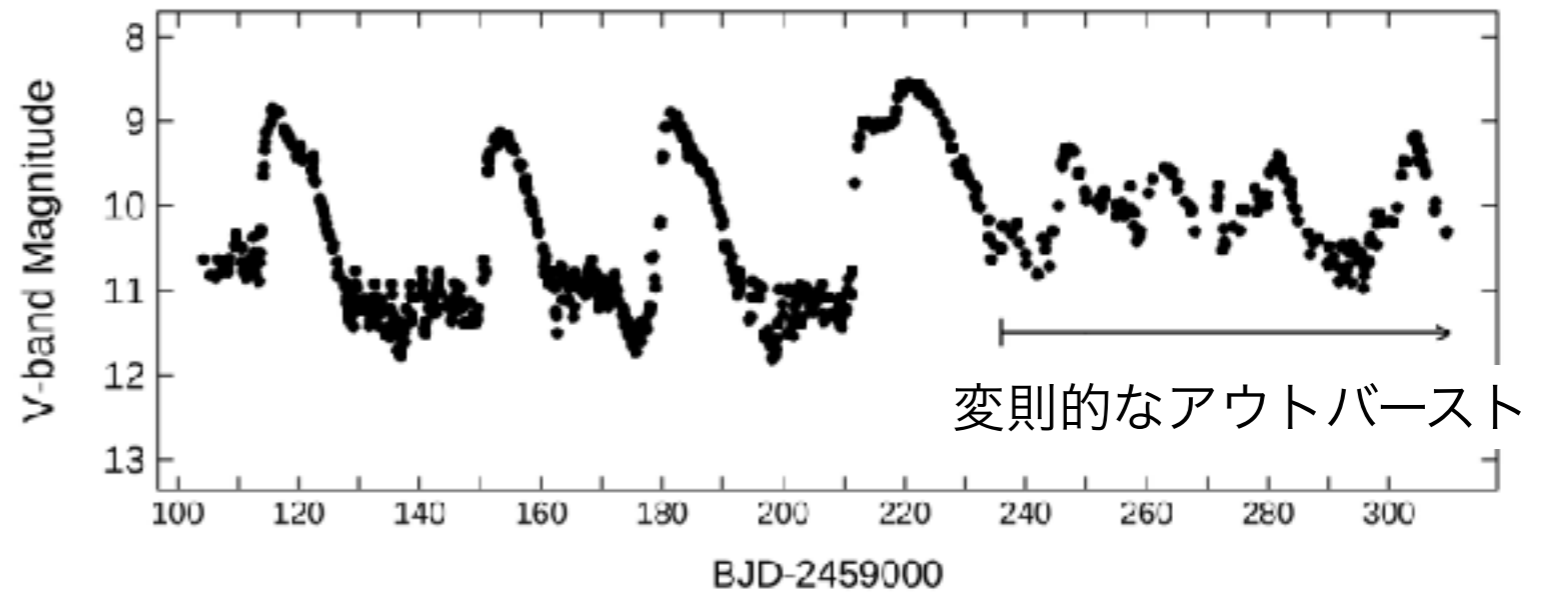
2021年の変則的なアウトバーストの正体

- 粘性が著しく増加すると、

→ Oscillationsのみの光度変動になり、大振幅のアウトバーストができない



(Mineshige & Osaki 1985)



小振幅のアウトバーストが繰り返し
起きている

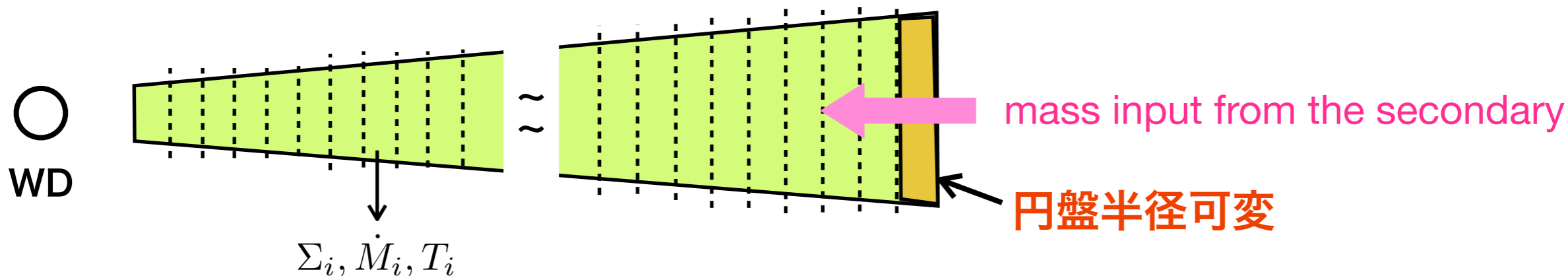
数値シミュレーションで確かめよう！

Kimura et al. (2021, PASJ, 73, 1262): "On the nature of the anomalous event in 2021 in the dwarf nova SS Cygni and its multi-wavelength transition"

円盤の数値シミュレーション

1次元の円盤の時間発展を解く数値シミュレーションコード (Ichikawa & Osaki 1992)

円盤の全角運動量が保存



(質量保存の式)
$$\frac{\partial(2\pi r\Sigma)}{\partial t} = \frac{\partial\dot{M}}{\partial r} + s$$
 伴星からの質量輸送

(角運動量保存の式)
$$\frac{\partial(2\pi r\Sigma h)}{\partial t} = \frac{\partial(\dot{M}h)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r}(2\pi r^2 W) - D + h_{LS} s$$

伴星からの角運動量

潮汐トルク

(エネルギー保存の式)

$$F_r = \frac{\partial T}{\partial r} C_P \left[\frac{\partial}{\partial t}(2\pi r\Sigma T) - \frac{\partial}{\partial r}(\dot{M}T) - 2\pi\Sigma\nu_{th} \frac{\partial(rF_r)}{\partial r} - sT \right] = 2\pi r(Q^+ - Q^-)$$

熱の拡散

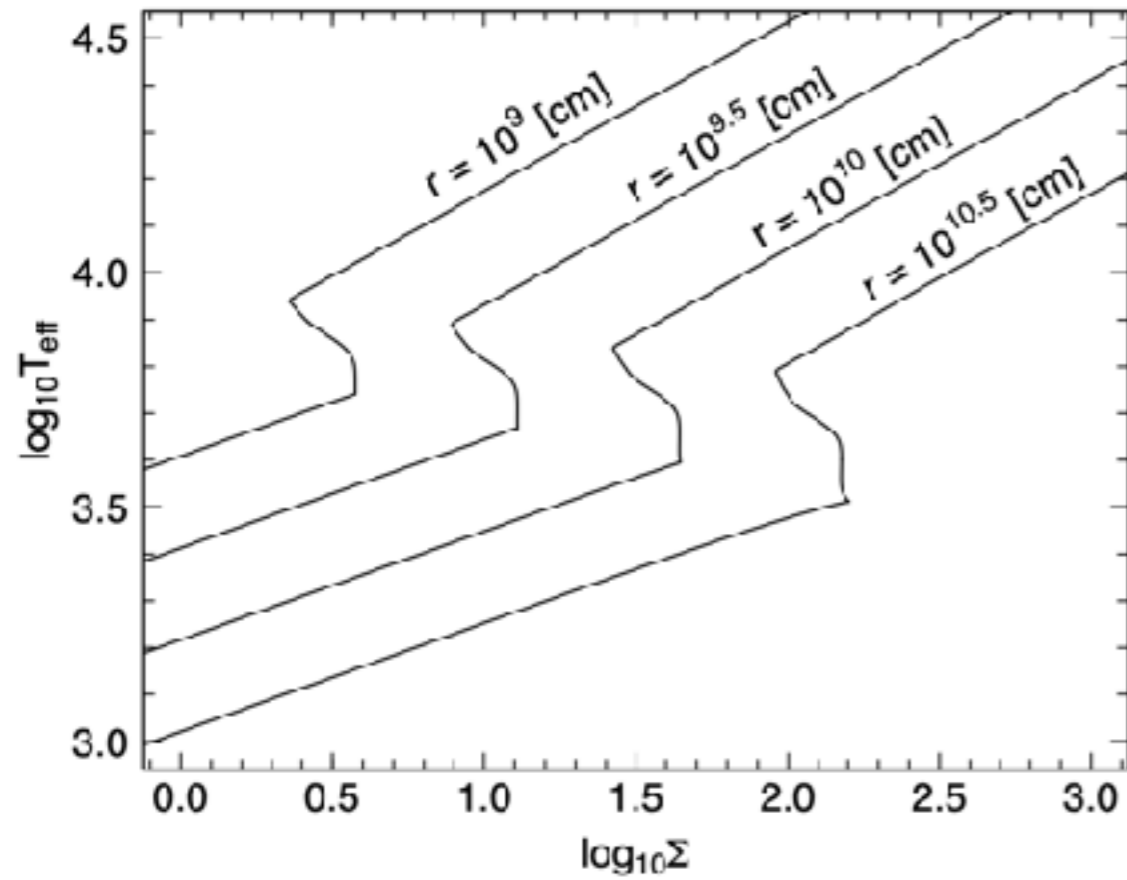
移流による加熱

伴星からの質量が運ぶエネルギー

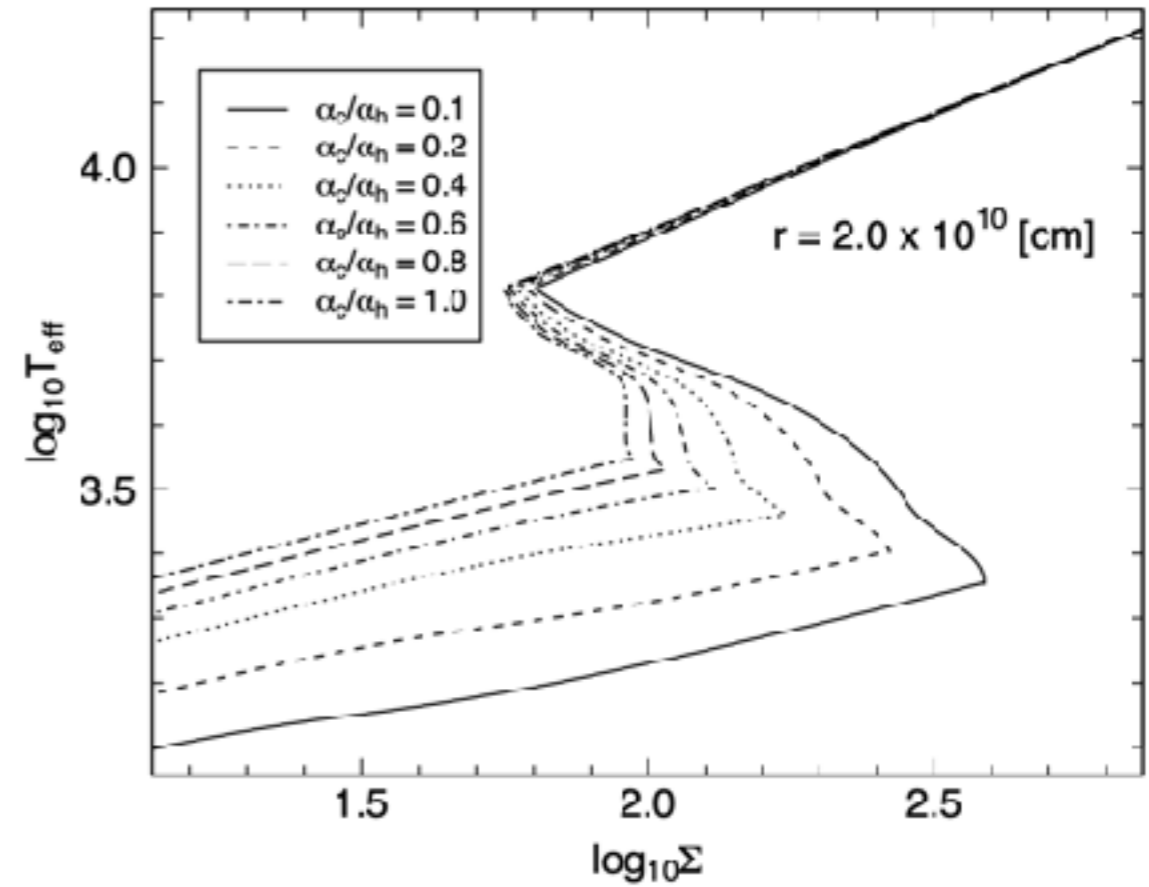
(Kimura et al. 2020, PASJ)

円盤の数値シミュレーション

熱平衡曲線（半径依存性）

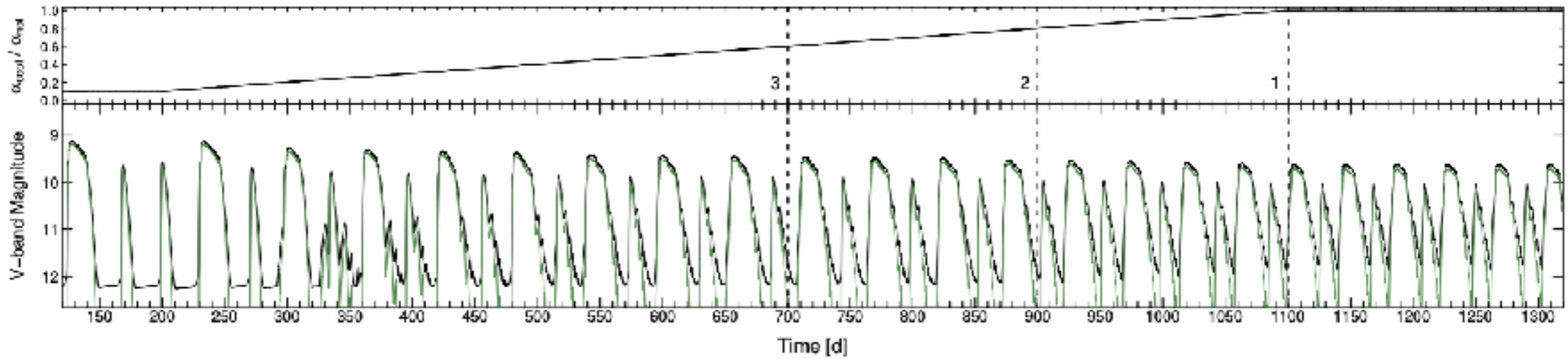


熱平衡曲線（粘性パラメータ依存性）

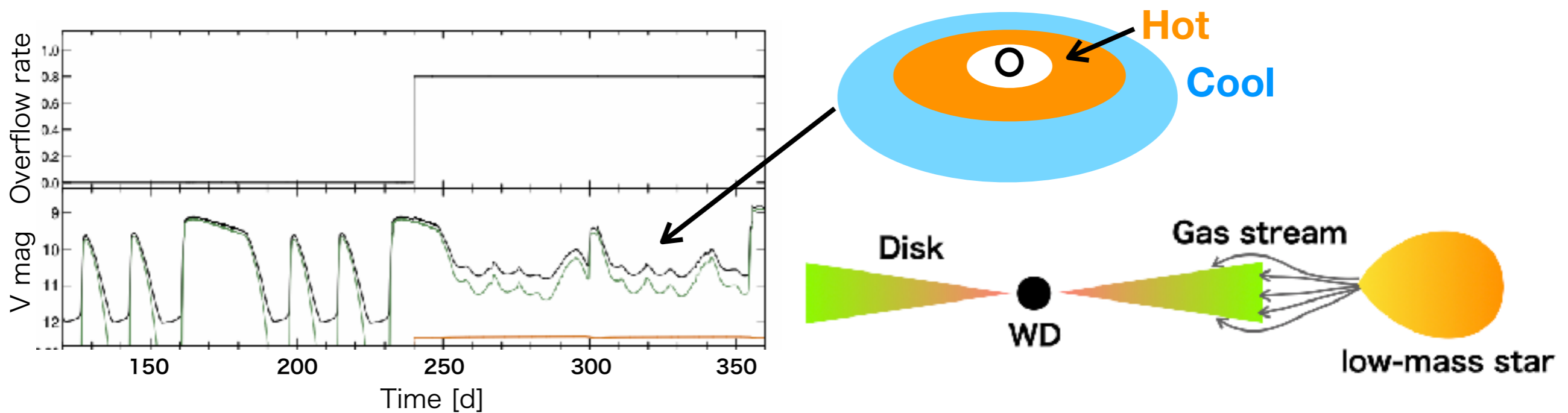


(Kimura & Osaki 2023, PASJ)

はくちょう座SS星の数値シミュレーション



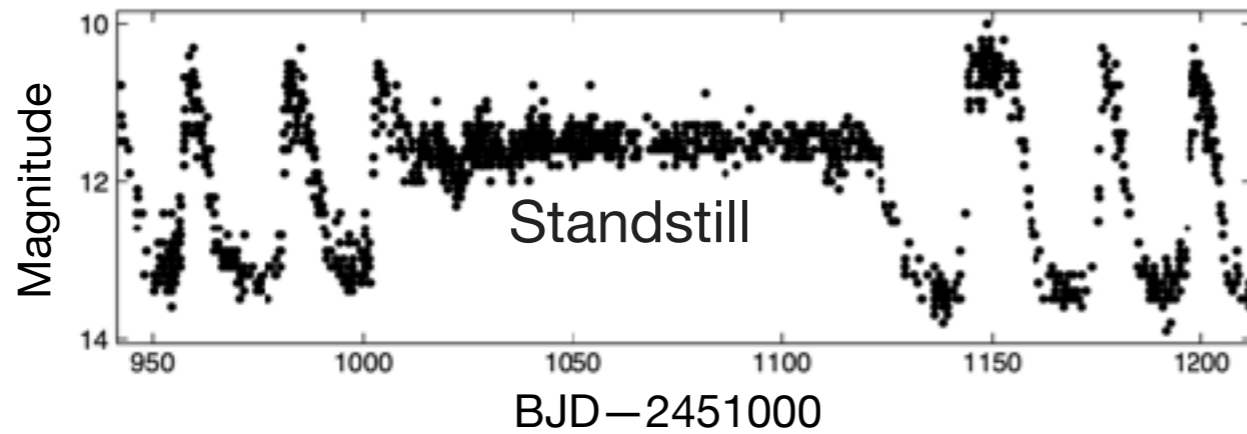
- 粘性の増加により、前兆現象の再現に成功。しかし、2021年の現象を再現するのは難しかった
- 伴星からのガス流が円盤をオーバーフローした？



(Kimura & Osaki 2023, PASJ)

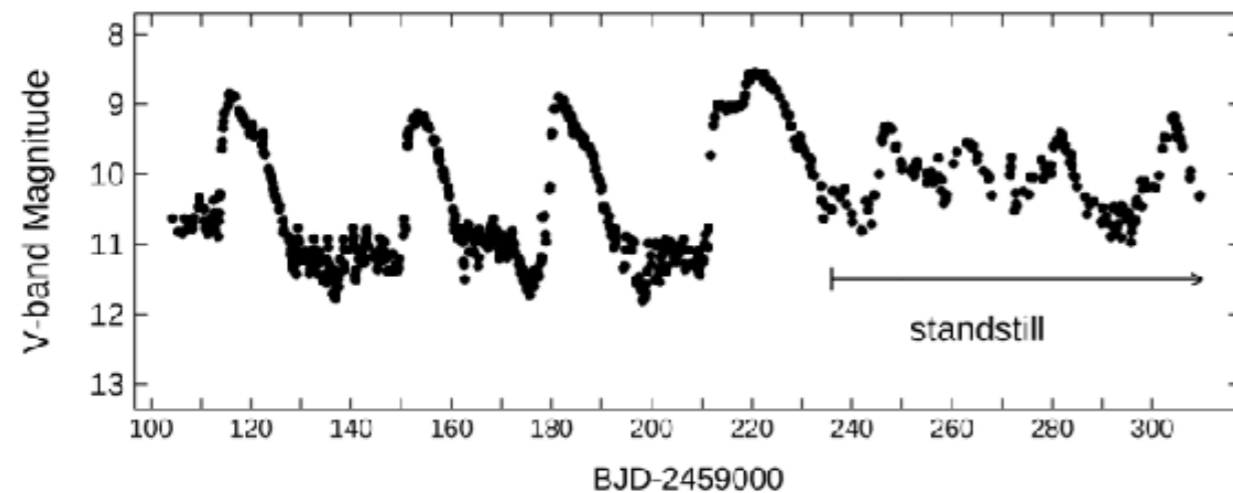
多様なStandstillをどう説明するか？

Z Cam型のstandstill

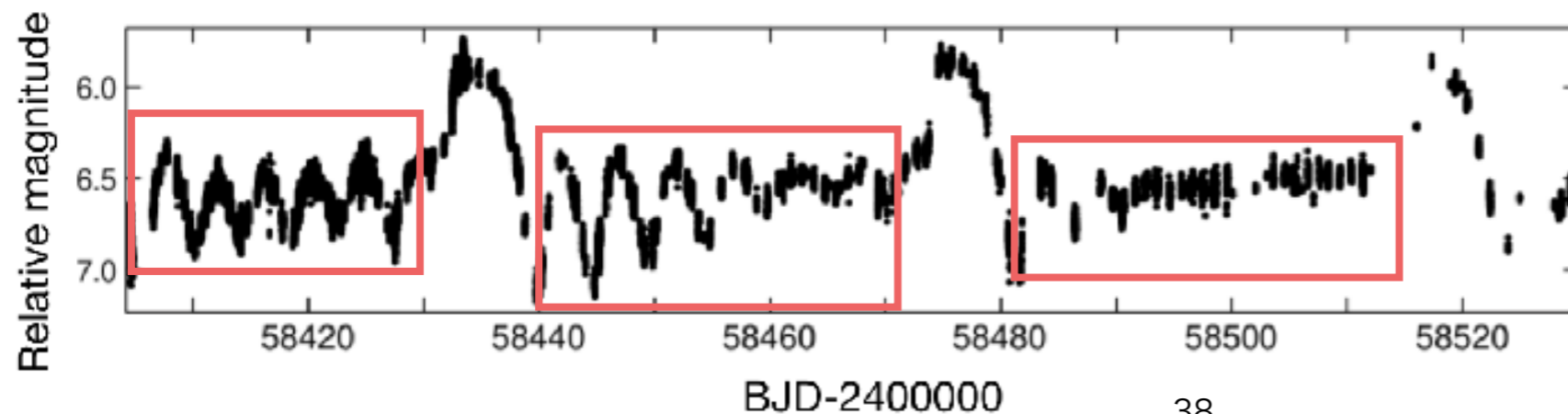


- 伴星からの質量輸送率の変化
- 円盤粘性の変化
- 伴星からのガス流のオーバーフロー

SS Cyg型のstandstill-like state



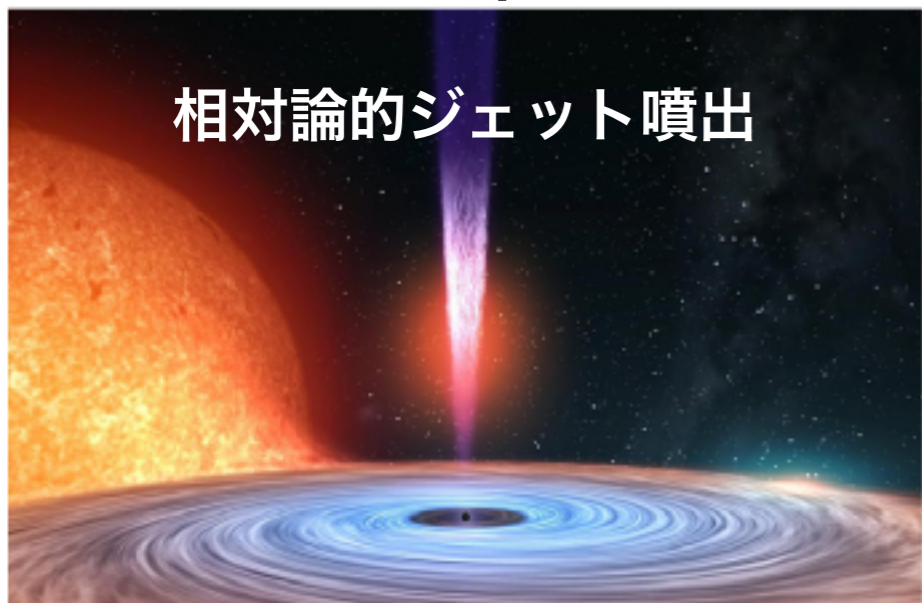
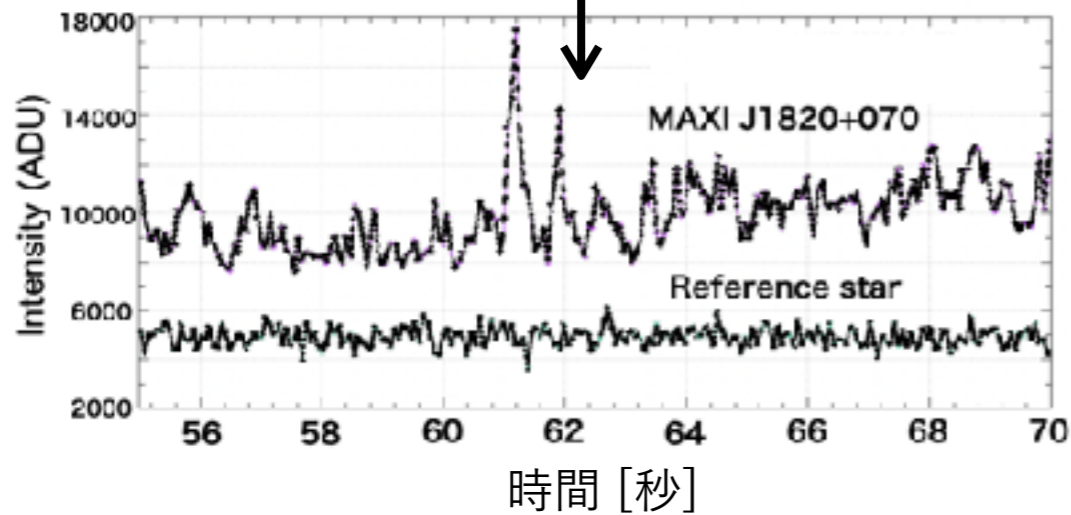
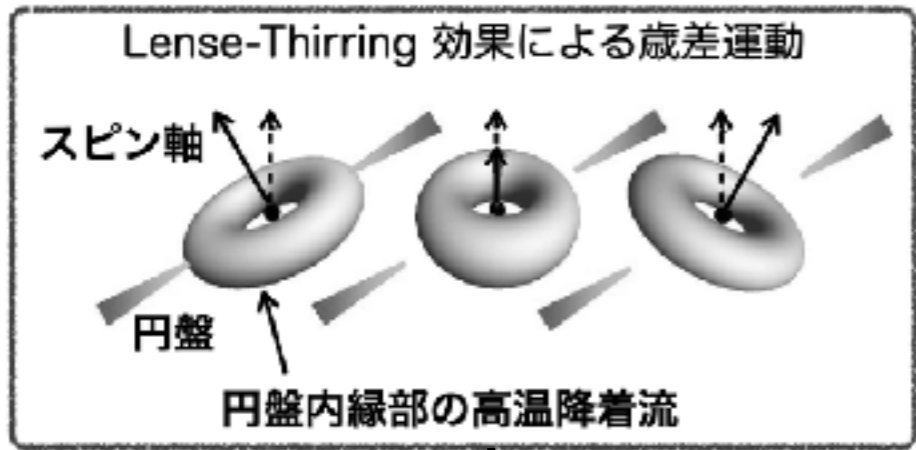
IW And型のquasi-standstill



将来の観測について

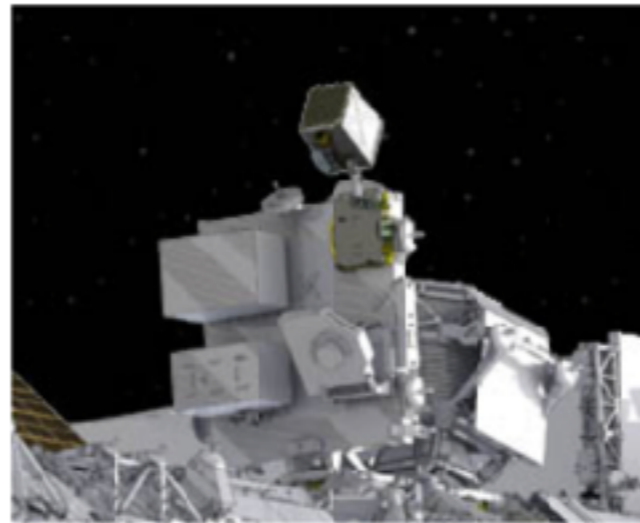
(XRISM衛星、KOYOH衛星、せいめい
望遠鏡、Tomo-e Gozenなど)

コンパクト天体の高速観測が拓くサイエンス



アウトバースト中の秒スケールの光度変動
→ 強重力場下における物理現象・円盤の幾何学構造の探針

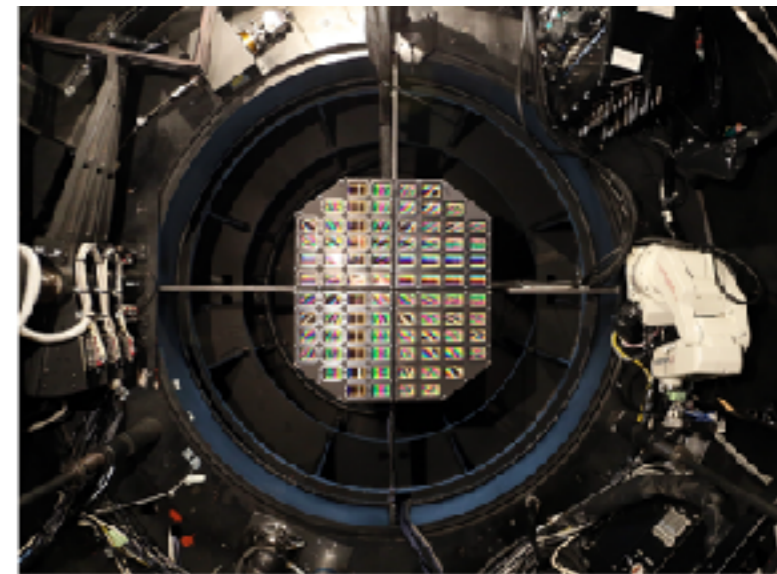
X線望遠鏡NICER (2018~)



CMOSカメラ@せいめい望遠鏡 (2021~)



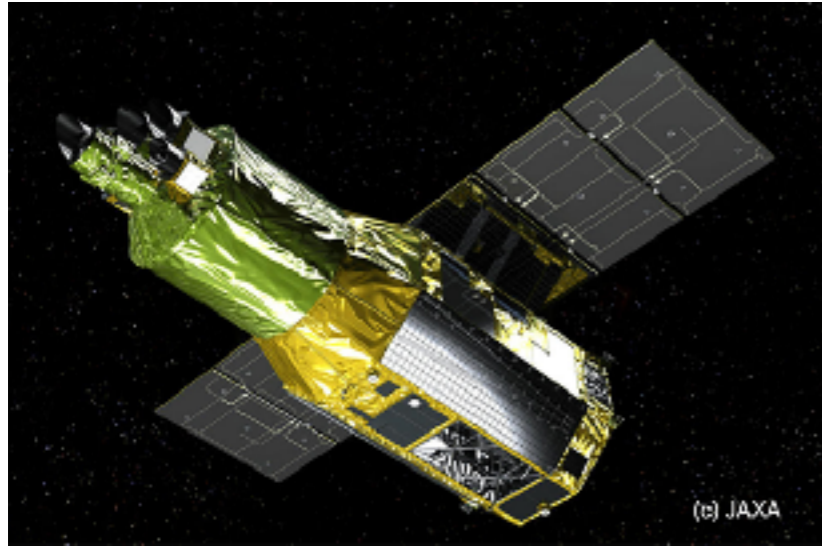
広視野CMOSカメラTomo-e Gozen (2019~)



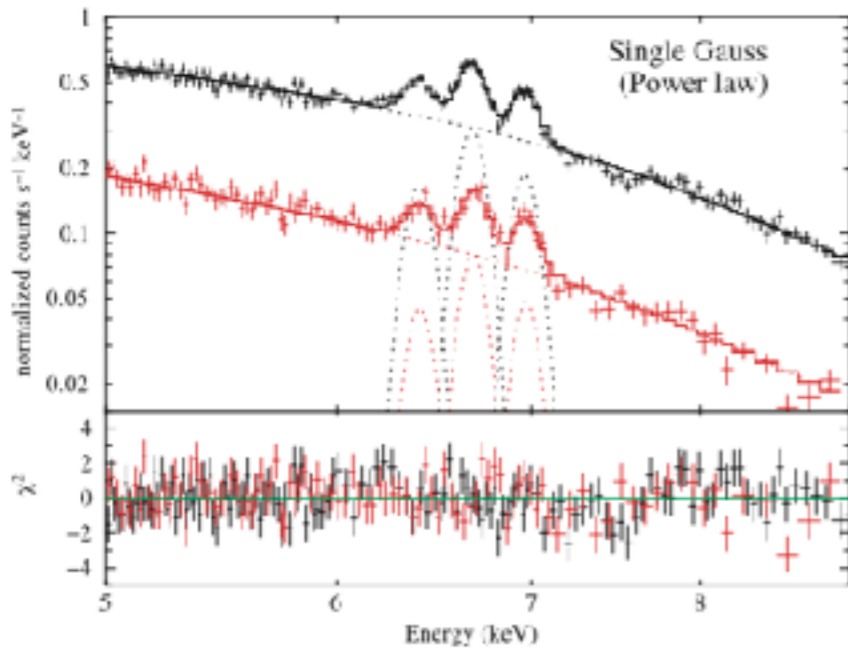
観測装置の発達により、
研究できる準備が整った！

XRISM衛星による精密X線分光

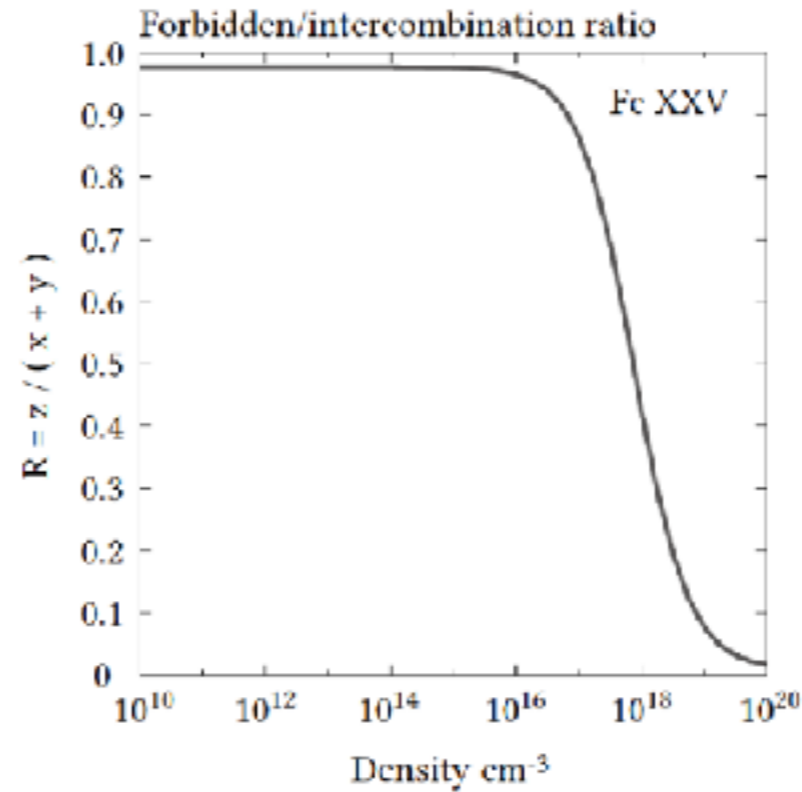
XRISM (2023~)



- 鉄の輝線を高分解する (1 eVの精度)
 - 1. 重力赤方偏移により、白色矮星の質量を測る
 - 2. 空間分解できないX線放射領域の幾何学構造を推定する



(Ishida et al. 2009)



(JAXA石田さんのスライドより)

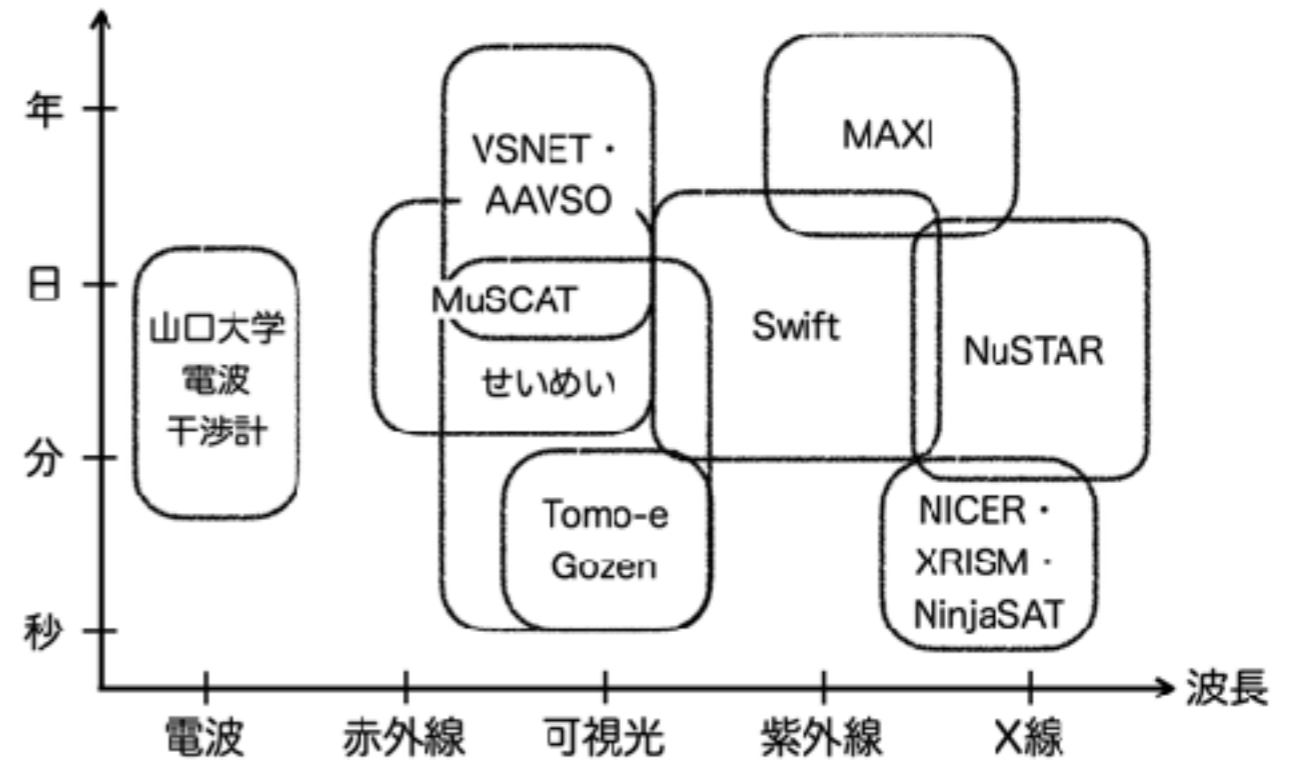
明るい突発天体の多波長モニター

超小型衛星 + 高い機動力を持つ中小望遠鏡



重力波と同期したガンマ線バースト・
連星系のアウトバーストなど、
あらゆる突発天体を検出

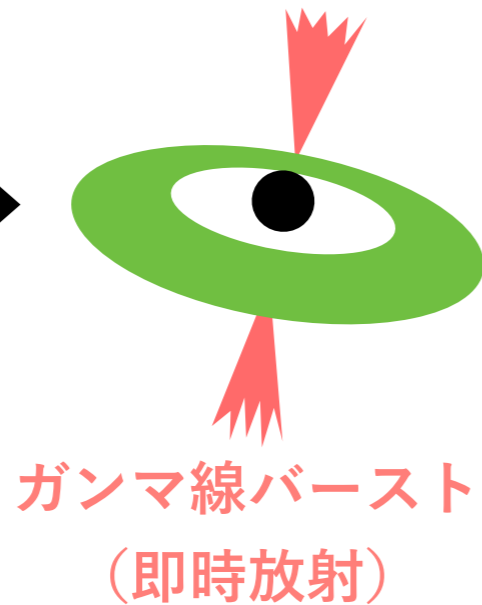
タイムスケール



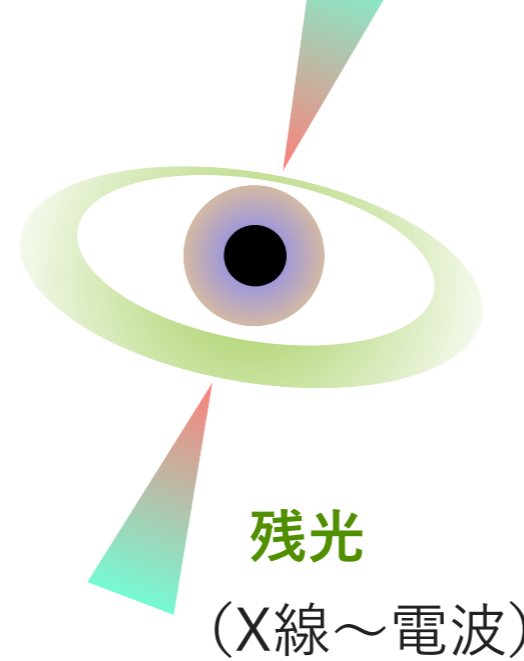
連星中性子星
(合体前)



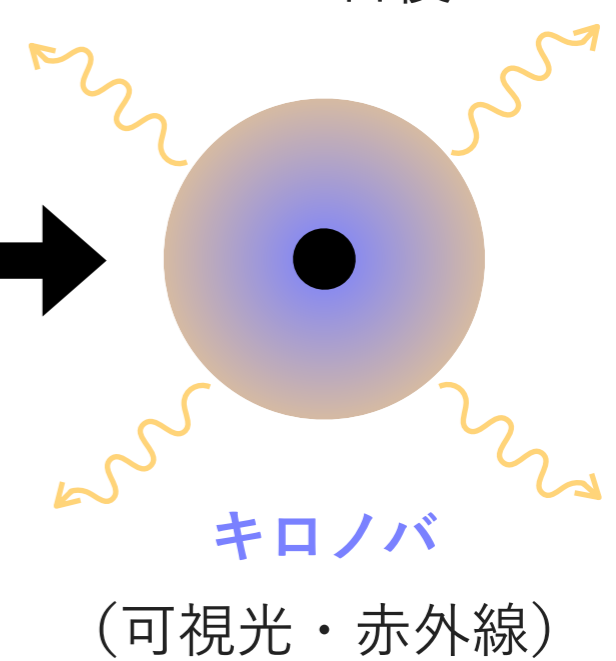
~2秒後



~100秒後



1~10日後



まとめ

研究の背景

- 降着円盤は、あらゆる突発天体の中心エンジン。連星系は観測しやすく、降着円盤の研究に最適
- 円盤形成の鍵は、乱流起源の粘性（摩擦力）
- 円盤は、内側ほど温度が高く、外側ほど温度が低いため、X線から可視光まで、あらゆる波長域の光を出す
- アウトバーストは、円盤の熱不安定によって起こる
- 近年の観測技術の発達により、多様なアウトバーストを統一的に説明できるモデルの構築が求められている

Kimura et al. (2021)とKimura & Osaki (2023)で分かったこと

- 静穏時の粘性の増加により、standstillに似た現象が起こる？
- 伴星からのガス流が円盤をオーバーフローすることも関わっているかもしれない

今後は、連星系 + ガンマ線バーストの研究も行う予定