

X線観測による矮新星静穏時における 硬X線放射領域の物理状態の解明

武尾舞(都立大)

林多佳由(NASA's GSFC/UMBC)

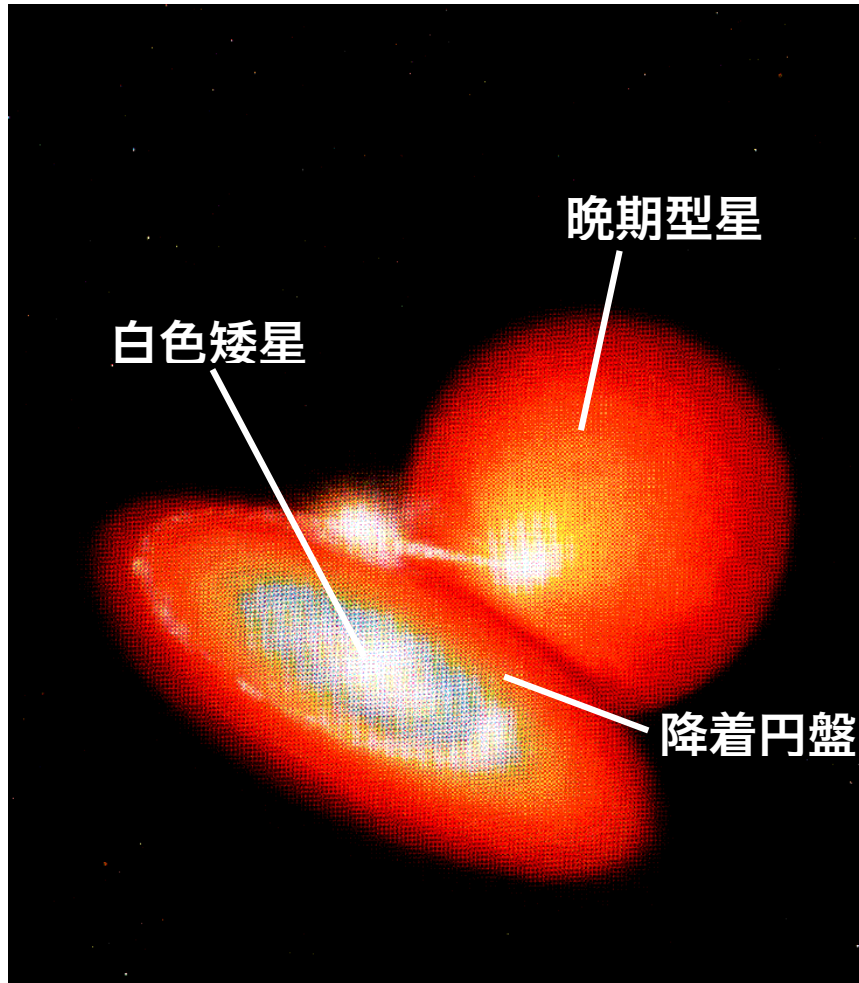
石田學、前田良知(宇宙研)

PASJにて掲載

Takeo et al. 2021a PASJ, 73, 143 "Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of U Geminorum in quiescence and outburst"

Takeo et al. 2021b PASJ, 73, 1418 "Spatial distribution of the X-ray-emitting plasma of SS Cygni in quiescence and outburst"

導入

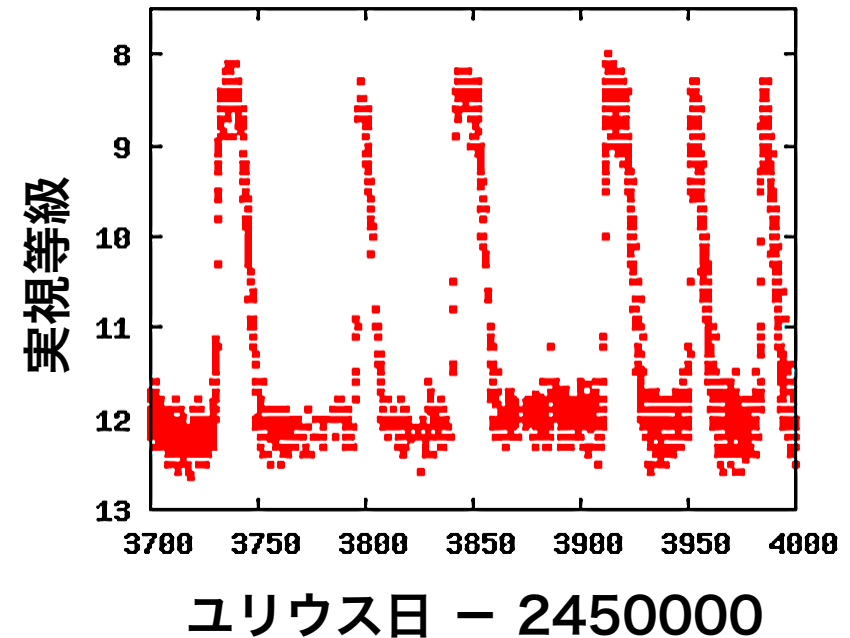


激変星の模式図

<https://www.star.le.ac.uk/%7eopj/nmcv.gif>

矮新星

10日から数100日程度の間隔で2-5等級の小規模な爆発現象を繰り返す



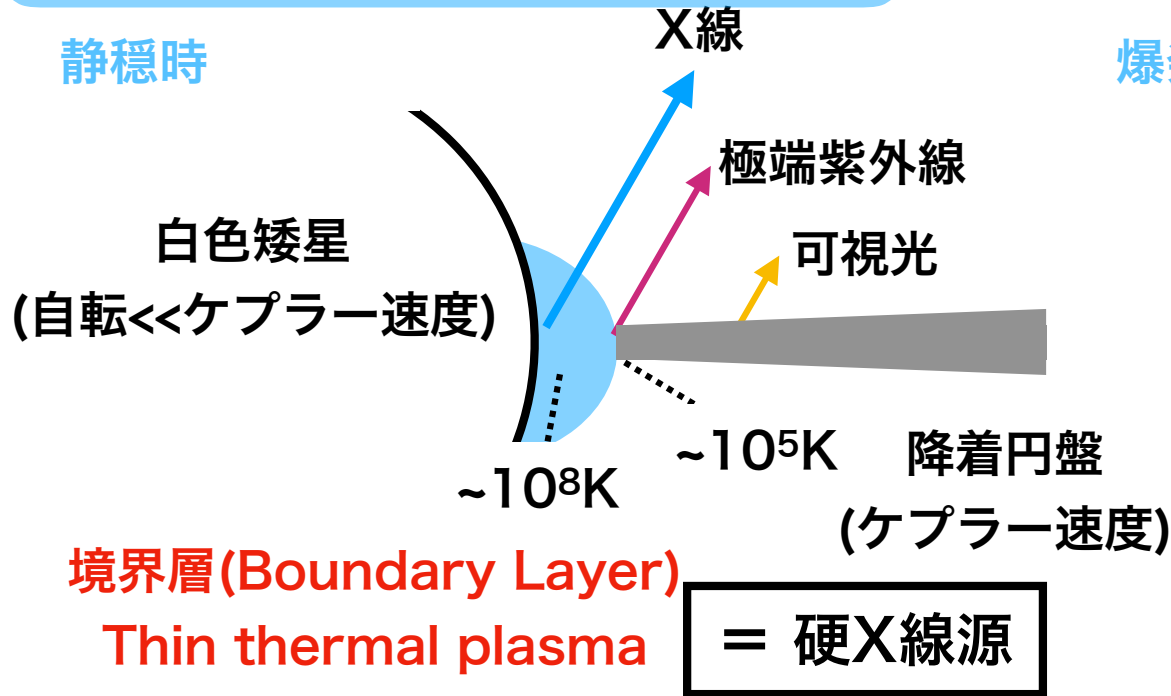
はくちょう座 SS星の光度曲線

https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_029.html

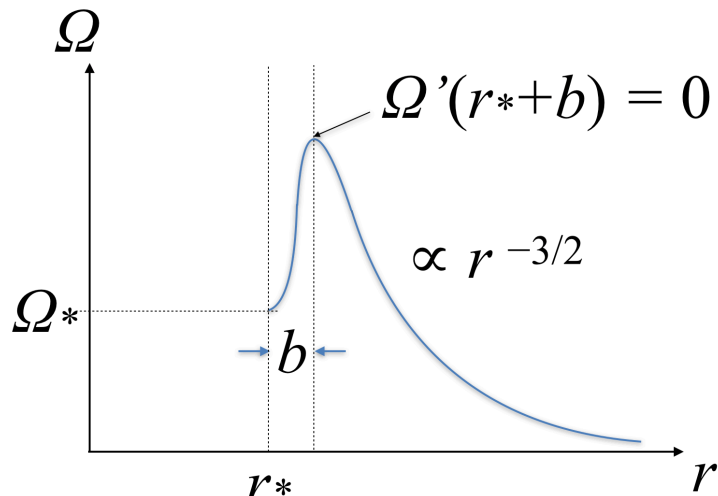
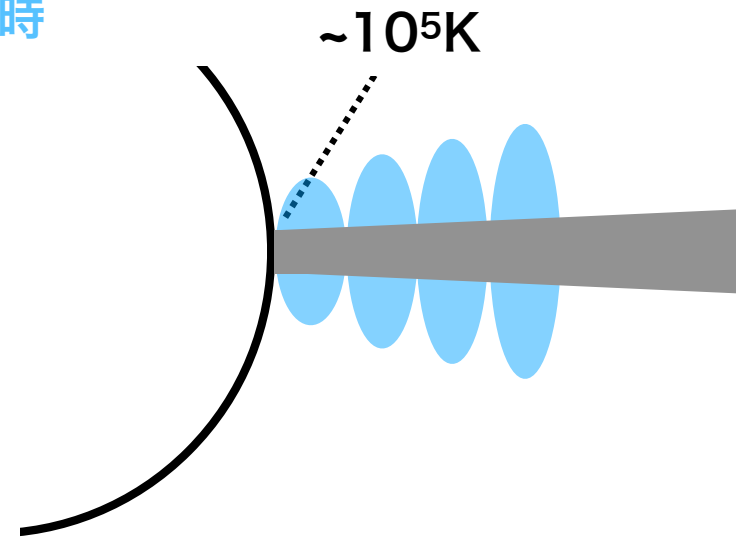
導入

Ishida et al.(2009)

Patterson & Raymond (1985)

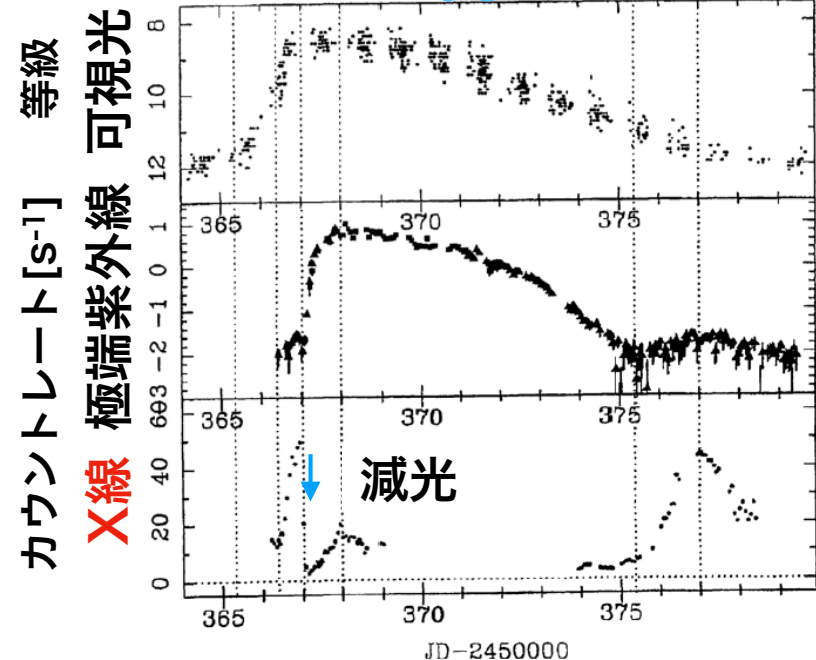


爆発時



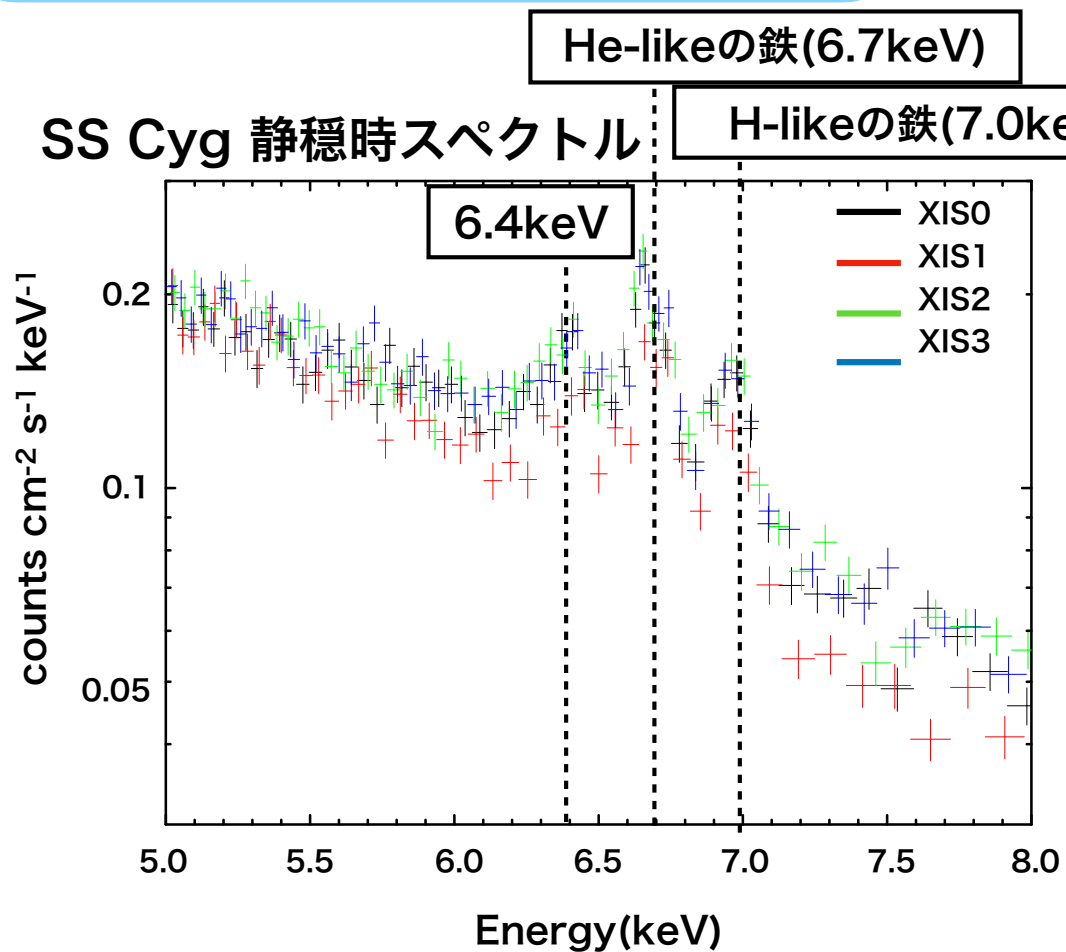
$b < 0.15 R_{\text{WD}}$ for HT Cas (Mukai et al. 1997)

$b < 0.12 R_{\text{WD}}$ for SS Cyg (Ishida et al. 2009)



(Wheatley 2003)

導入



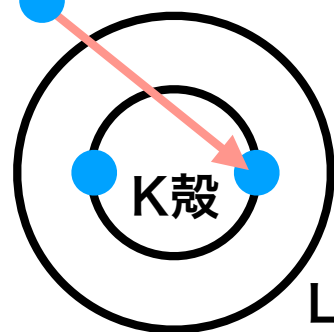
冷たい
白色矮星

高速回転する
ディスク

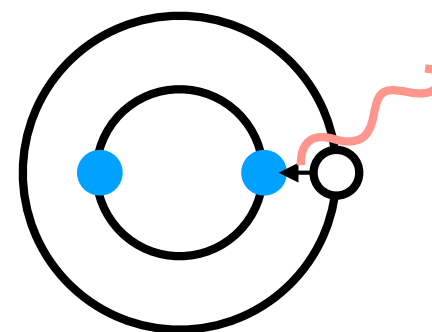
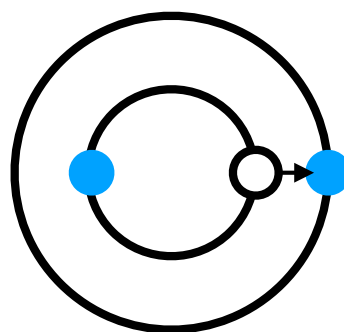
プラズマからの輝線
(6.7keV, 7.0keV)



$E \gtrsim 10 \text{ keV}$



L殻



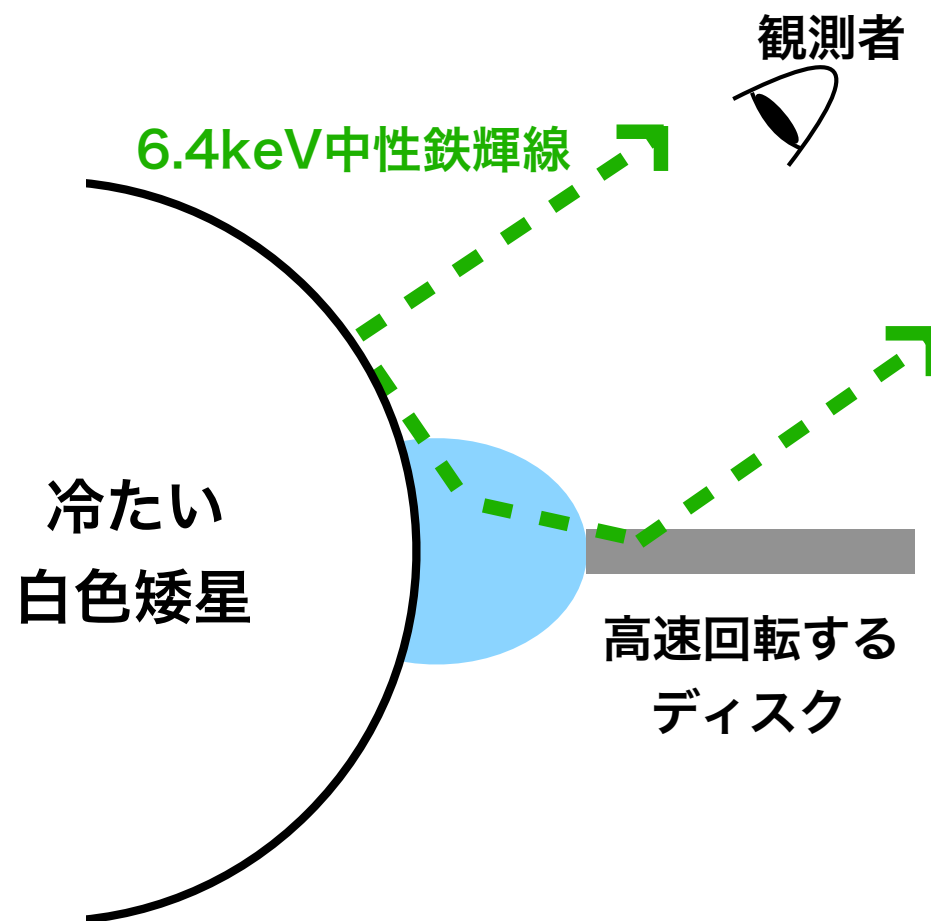
導入

6.4keV中性鉄輝線

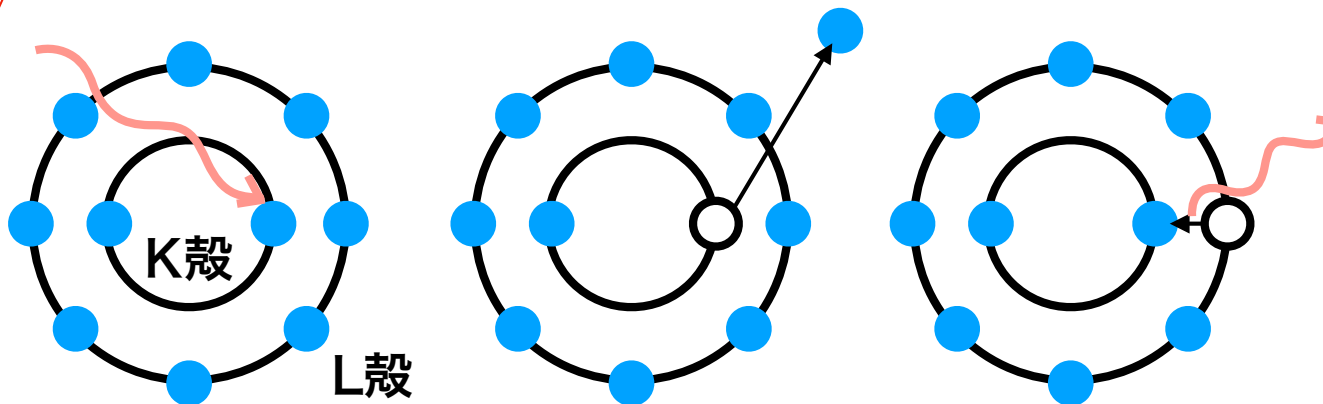
冷たい反射物質(低温の領域)

に由来する成分

白色矮星、ディスク

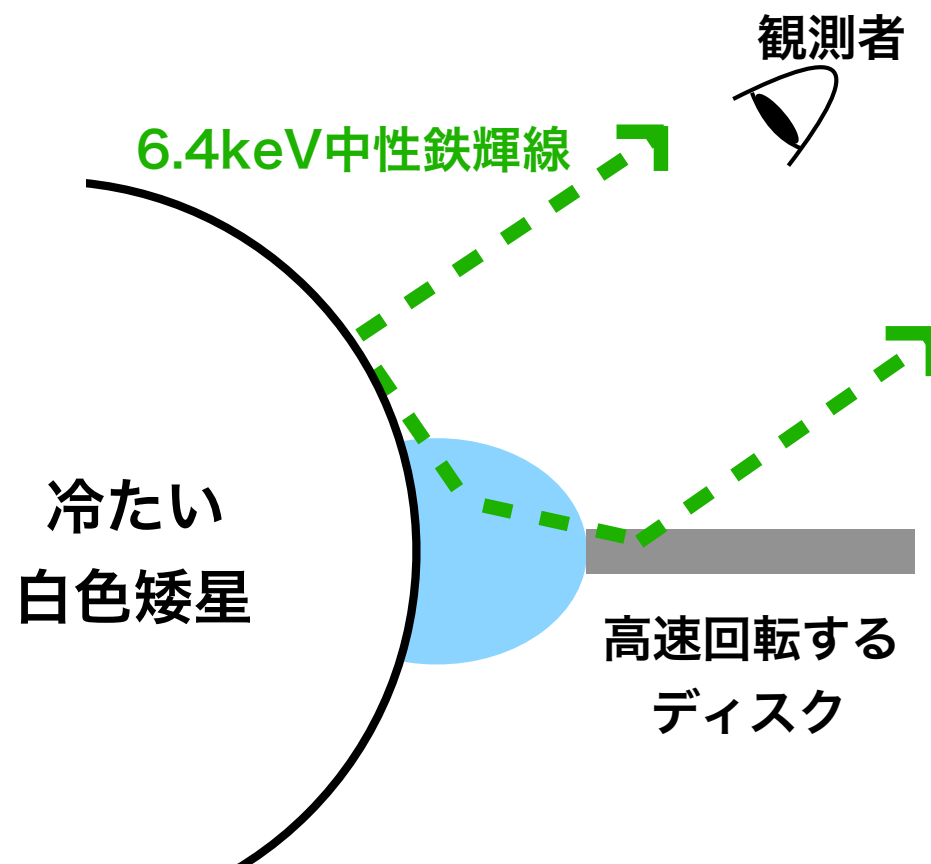


> 7.1keV

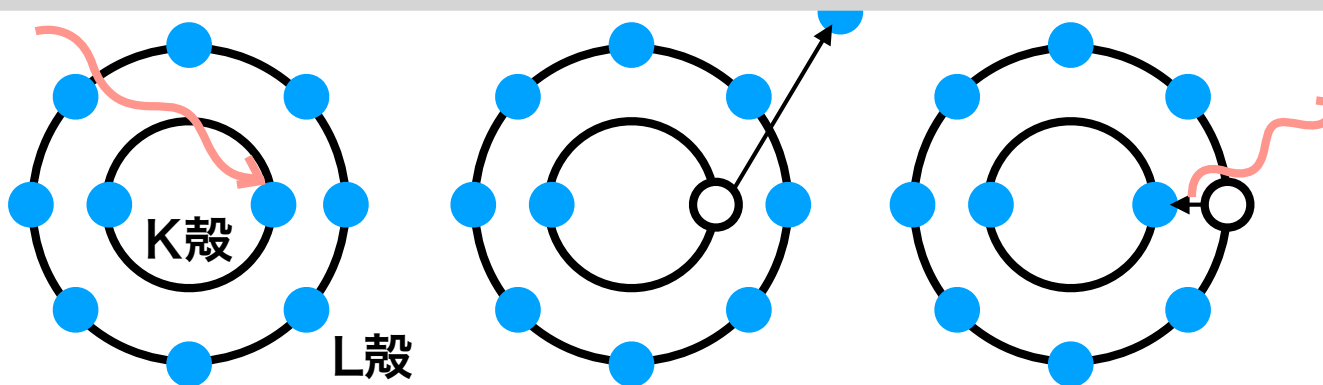


導入

6.4keV中性鉄輝線
冷たい反射物質(低温の領域)
に由来する成分
↓
白色矮星、ディスク



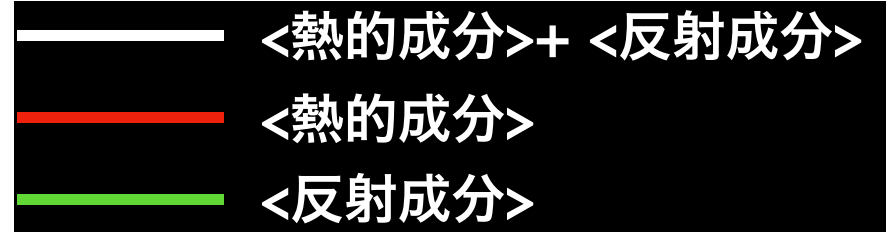
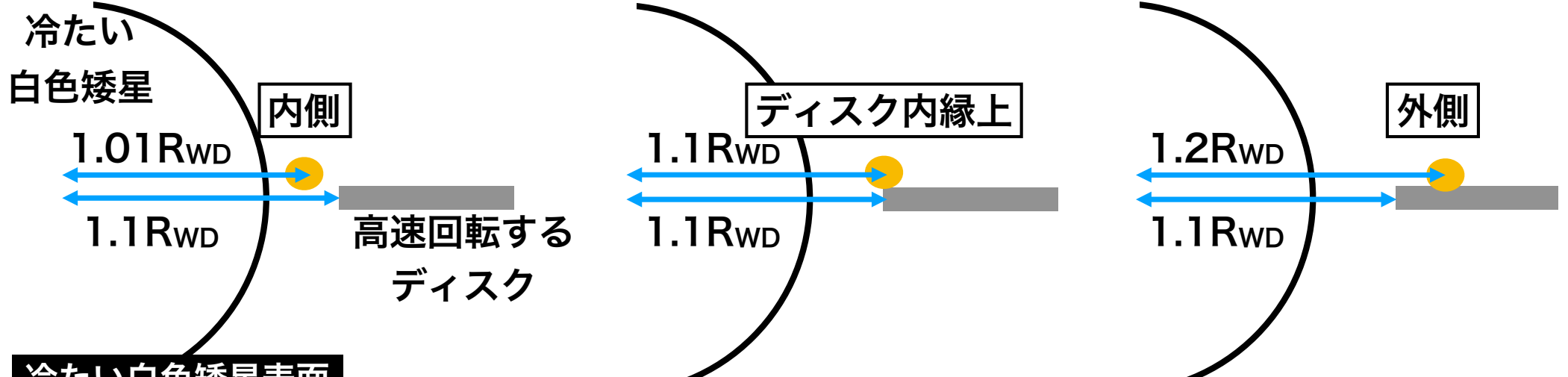
X線放射領域の構造を観測的に検証する上で重要となる成分



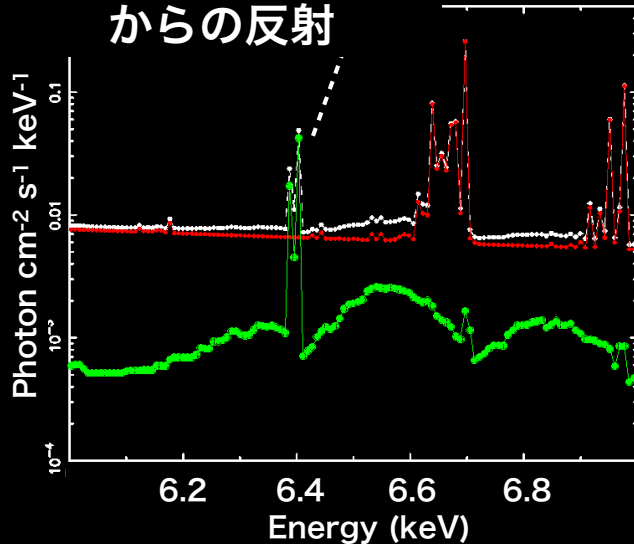
研究目的

6.4keV中性鉄輝線

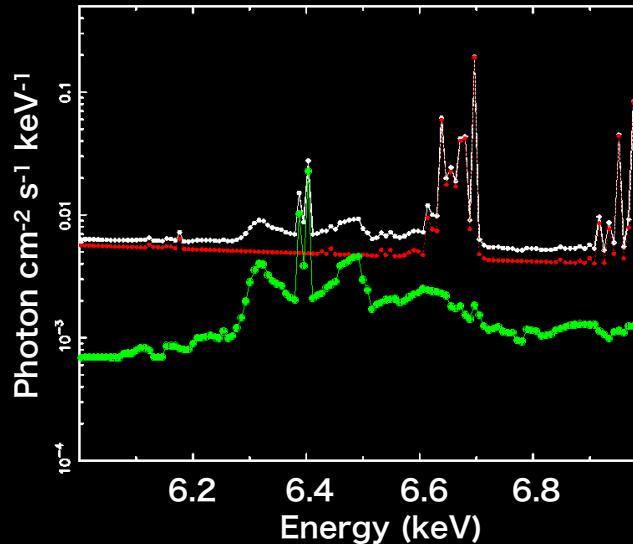
(冷たい反射物質に由来する成分)



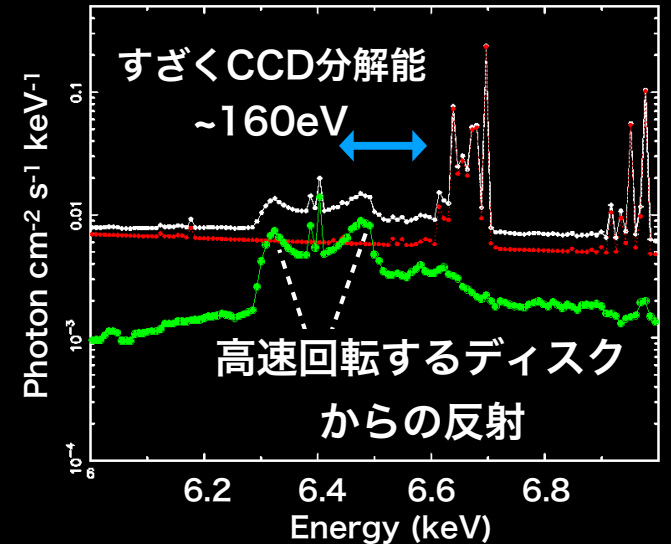
冷たい白色矮星表面からの反射



Current Theoretical Model



Current Theoretical Model



プラズマの配置で鉄輝線のプロファイルが大きく変わる

研究目的

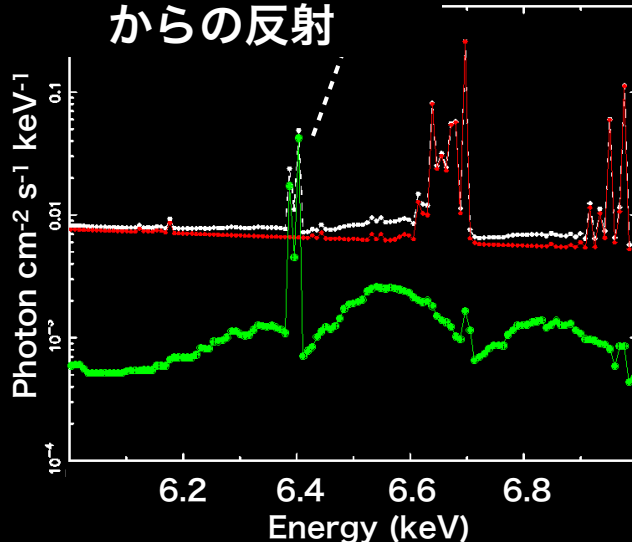
— <熱的成分>+ <反射成分>

— <熱的成分>

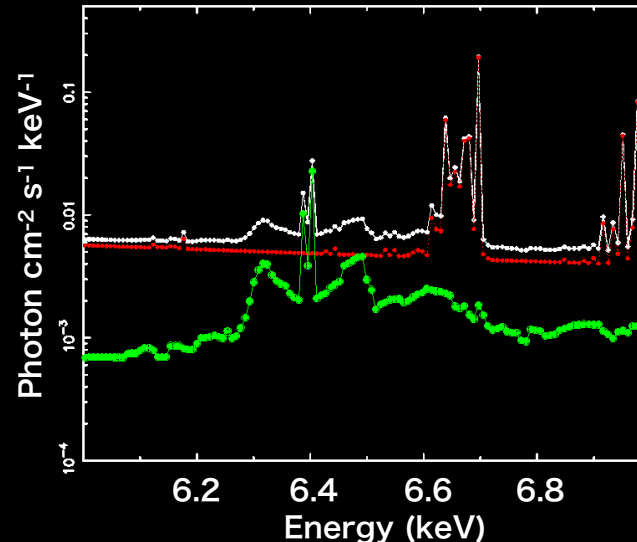
X線天文衛星「すざく」のデータを用いて
プラズマと反射体である白色矮星や降着円盤の位置関係を様々に変えた反射シ
ミュレーション(Hayashi+18)を取り入れ、代表的な矮新星の
静穏時および爆発時のプラズマの空間分布を精密に推定する。

ディスク

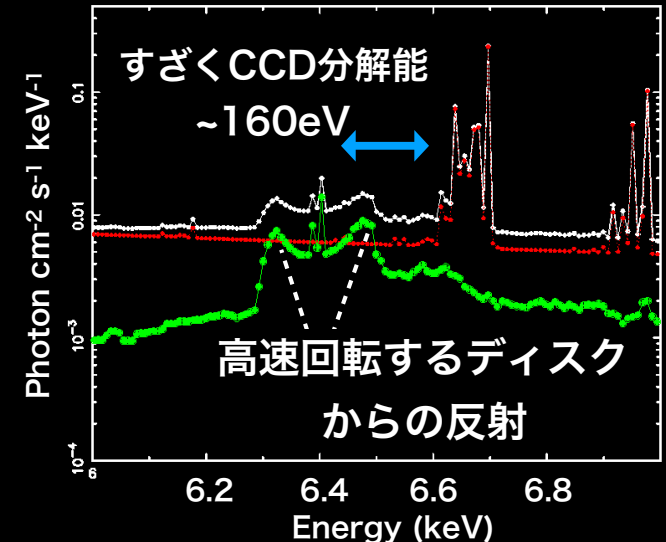
冷たい白色矮星表面
からの反射



Current Theoretical Model



Current Theoretical Model



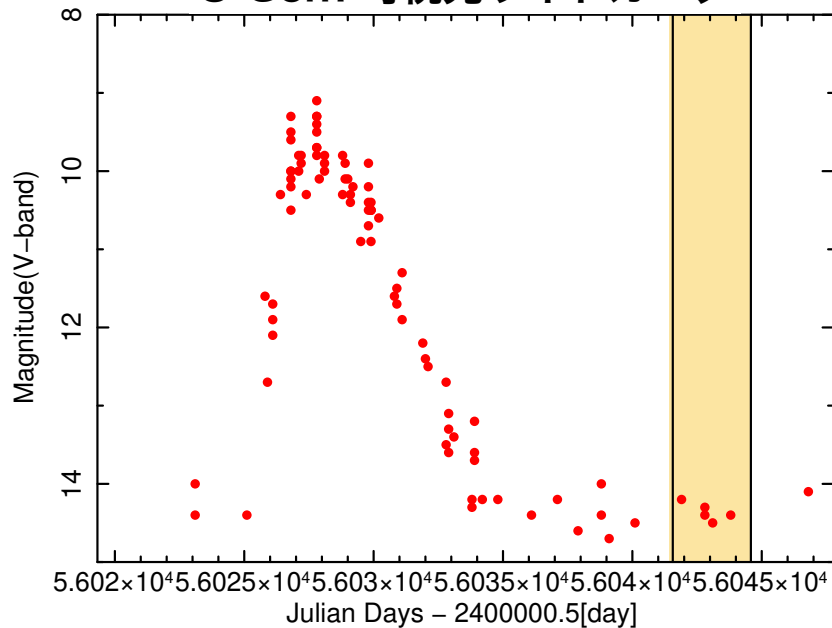
プラズマの配置で鉄輝線のプロファイルが大きく変わる

観測データ

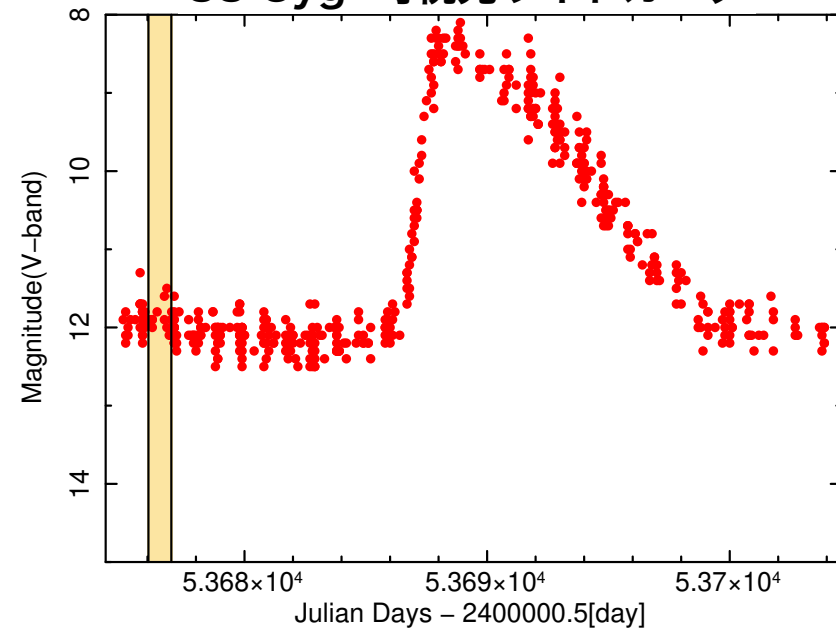
すざく衛星による観測データ

Target	State	Observation date	XIS Exposure (ks)	HXD Exposure (ks)	XIS count rate (s ⁻¹)	HXD count rate (s ⁻¹)
U Gem	静穏時	2012/04/24	119.1	93.1	0.491 ± 0.001	0.010 ± 0.002
SS Cyg	静穏時	2005/11/02	39.5	30.0	2.928 ± 0.004	0.144 ± 0.004
V893 Sco	静穏時	2006/08/26	18.5	15.0	3.318 ± 0.014	0.015 ± 0.005
Z Cam	静穏時から 爆発時への 増光期間	2009/04/10	37.7	33.9	3.861 ± 0.010	0.053 ± 0.003

U Gem 可視光ライトカーブ



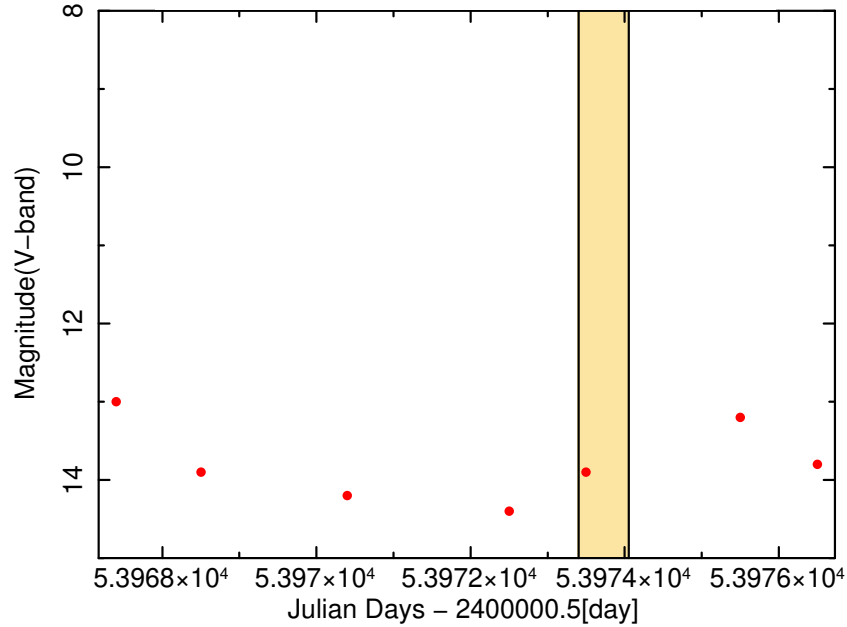
SS Cyg 可視光ライトカーブ



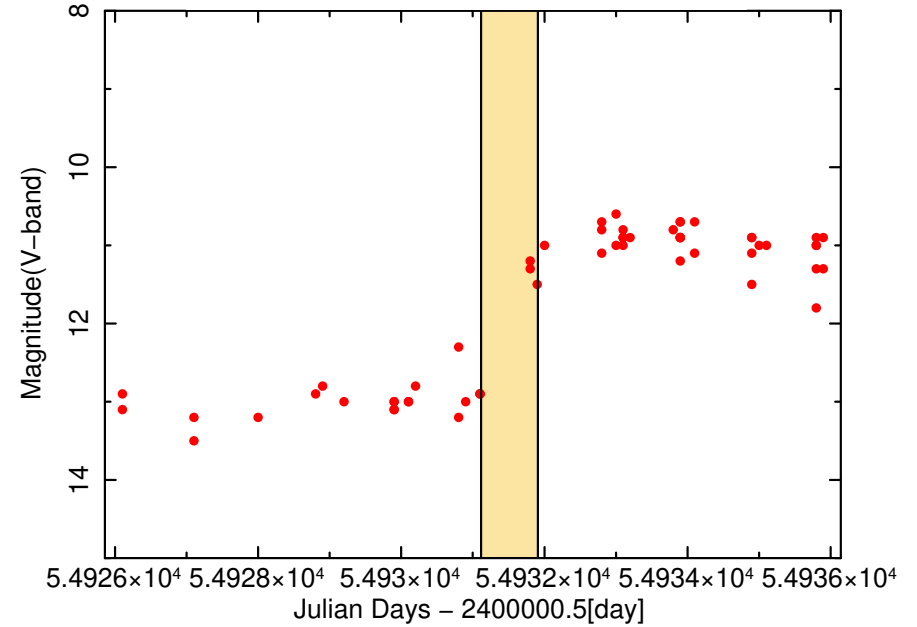
観測データ

すざく衛星による観測データ

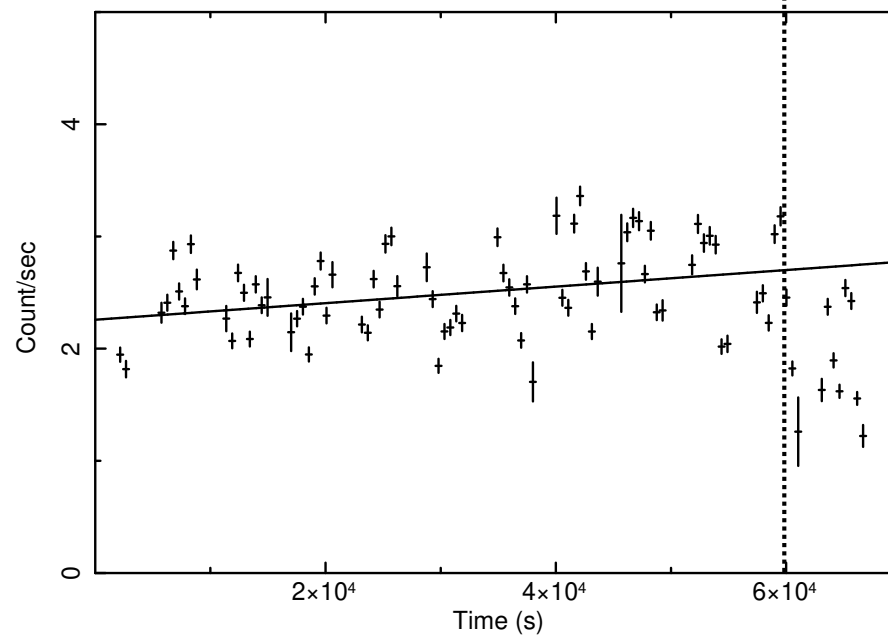
V893 Sco 可視光ライトカーブ



Z Cam 可視光ライトカーブ



Z Cam X線ライトカーブ



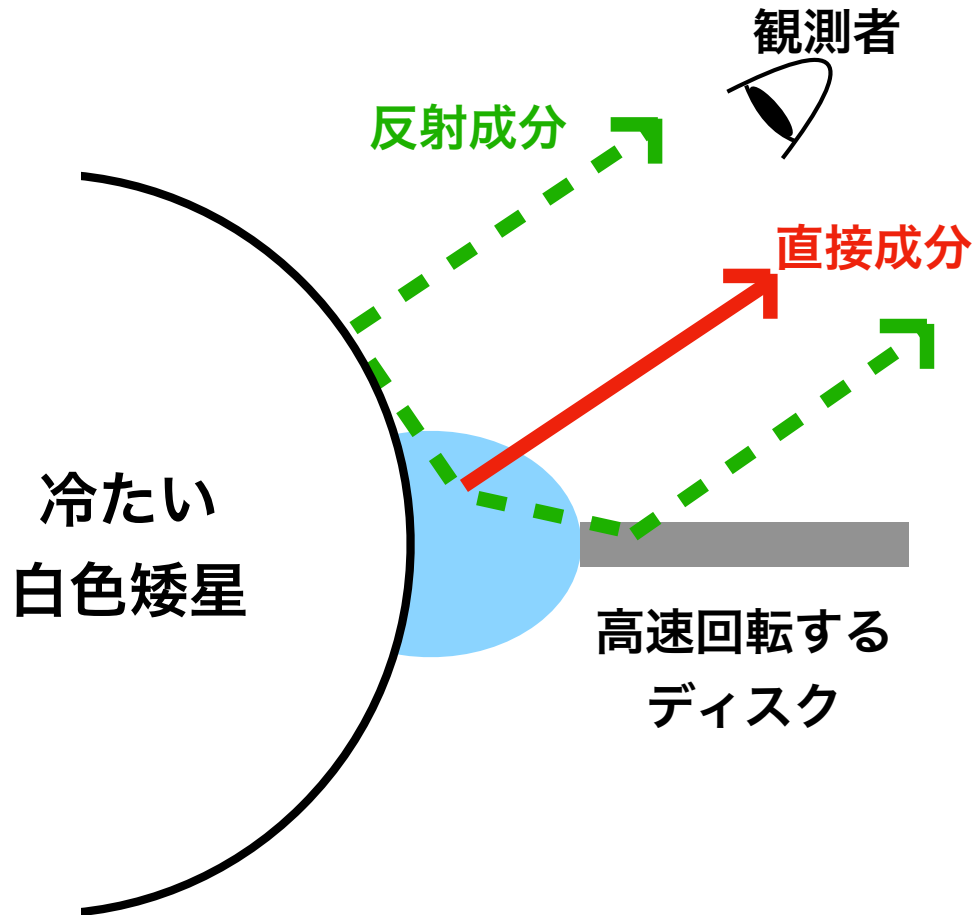
解析から除く

データ解析

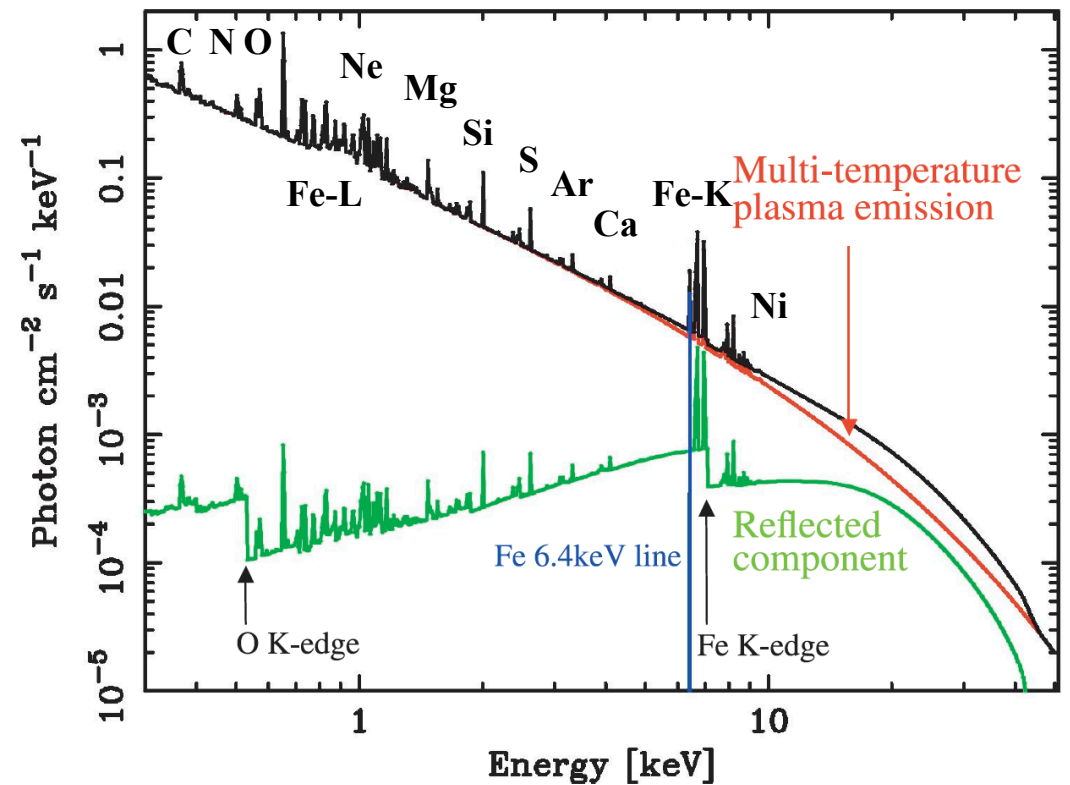
スペクトルフィット



反射シミュレーション



Ishida et al.(2009)



データ解析

使用したモデル

星間吸収 + 直接成分 + 反射成分

スペクトルフィット

多温度プラズマモデル(cevmkl)

T_{max}, α, Z_{Fe}

$$d(EM) \propto \left(\frac{T}{T_{max}}\right)^\alpha d(\log T) \propto \left(\frac{T}{T_{max}}\right)^{\alpha-1} dT$$

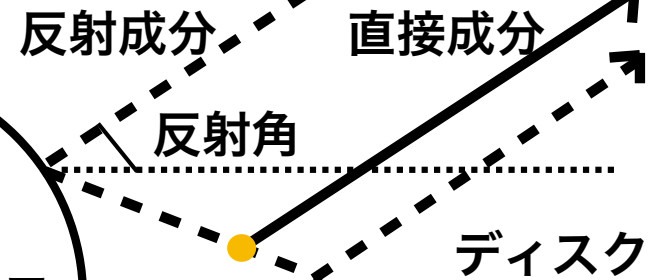
パラメータが
収束するまで繰り返す

算出された T_{max}, α, Z_{Fe} を用いて
反射シミュレーションを行う

得られた反射モデルを用いて
スペクトルフィットを行う

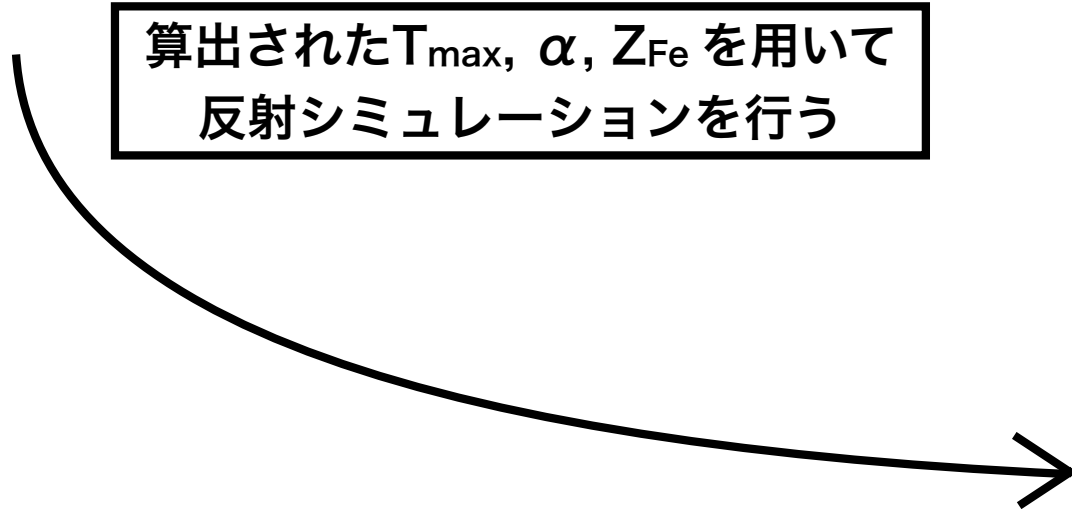
モンテカルロ法で白色矮星表面の物質とX線の相互作用を
シミュレート

反射シミュレーション



—相互作用—

非弾性散乱・弾性散乱・光電吸収



データ解析

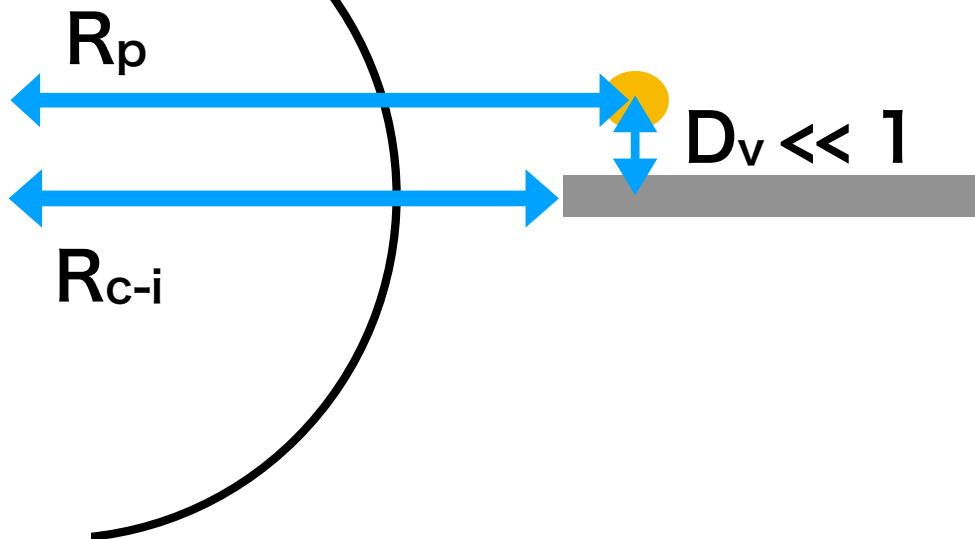
R_{ci} : 白色矮星中心からディスク内縁までの距離

R_p : 白色矮星中心からプラズマまでの距離

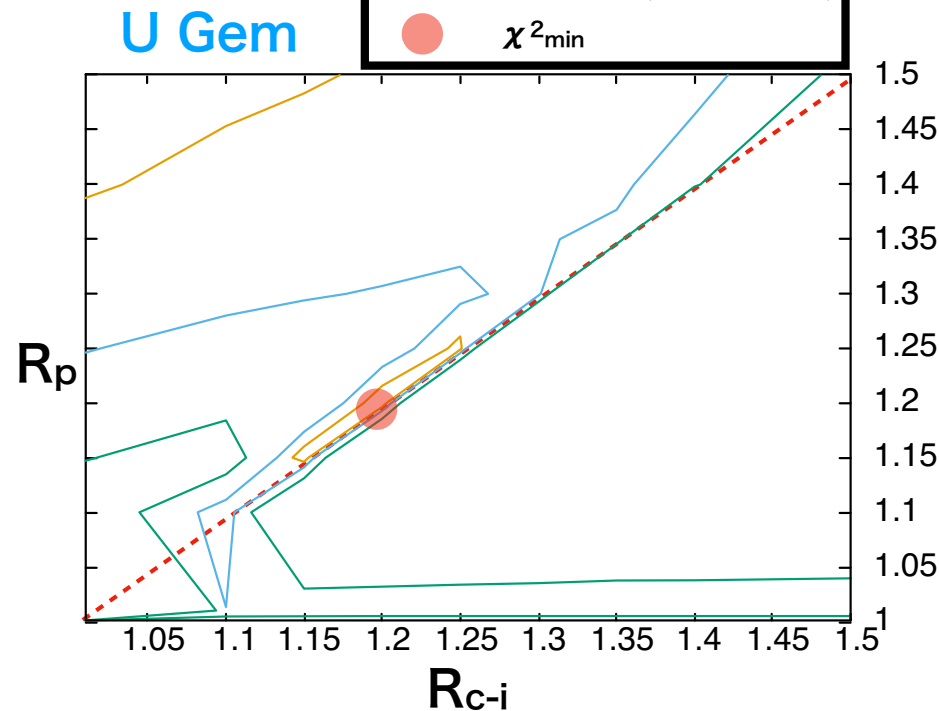
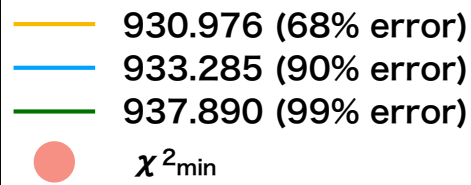
D_v : ディスクとプラズマの垂直方向距離

$D_v \ll 1$ R_{WD} と仮定

R_p および R_{c-i} の関係を変えて、
観測されたスペクトルを評価



..... ディスク内縁上



データ解析

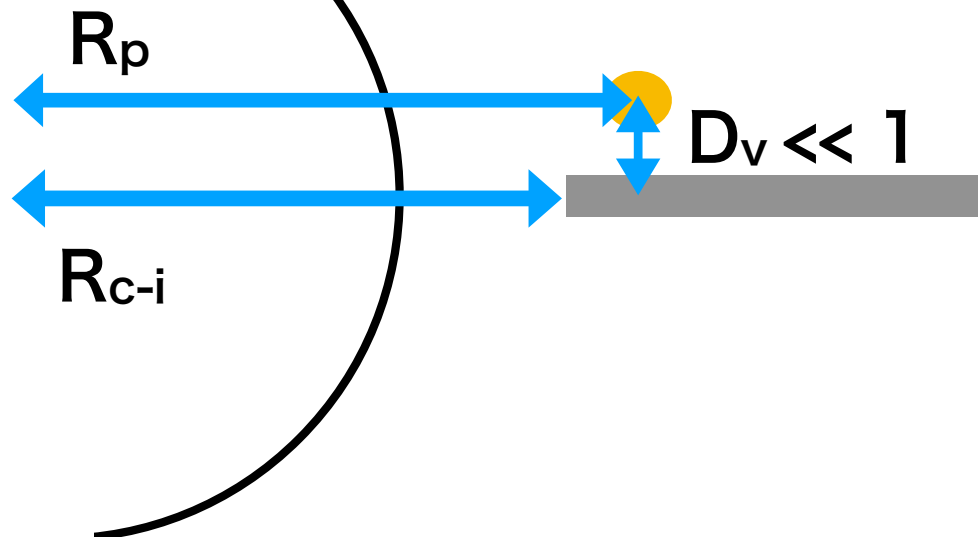
R_{ci} : 白色矮星中心からディスク内縁までの距離

R_p : 白色矮星中心からプラズマまでの距離

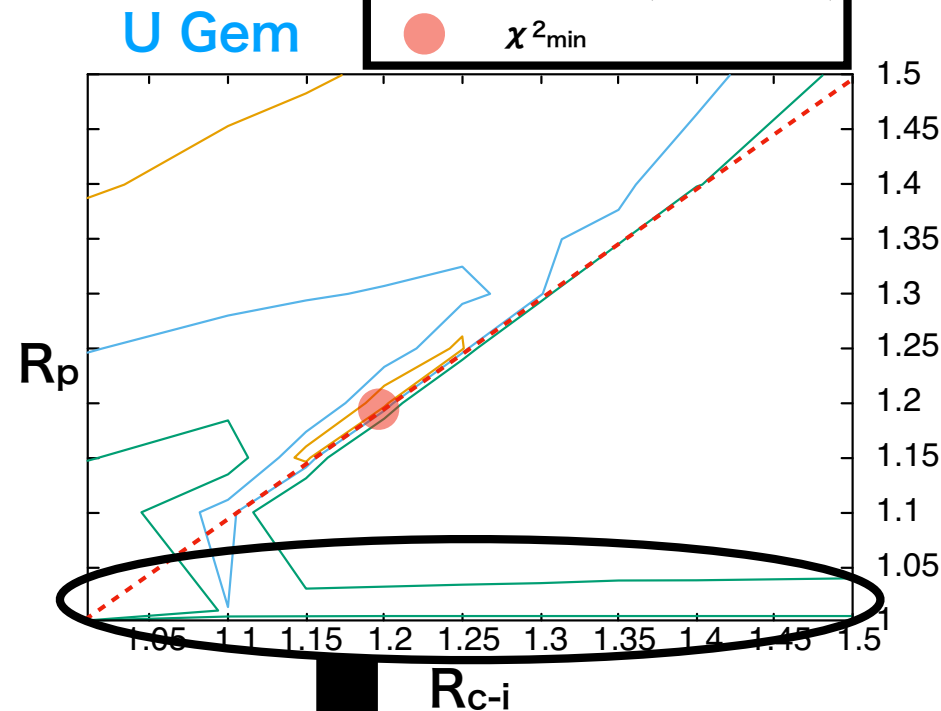
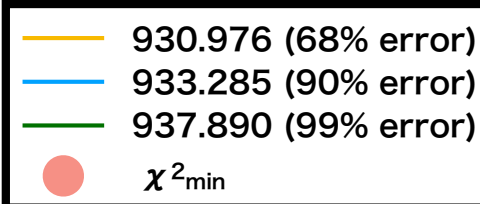
D_v : ディスクとプラズマの垂直方向距離

$D_v \ll 1 R_{WD}$ と仮定

R_p および R_{c-i} の関係を変えて、
観測されたスペクトルを評価



..... ディスク内縁上



$R_p < R_{c-i}$

(プラズマがディスク内縁より内側にある時)

プラズマの重心は白色矮星表面付近に存在する

※ R_{c-i} の下限値および上限値は決まらない

データ解析

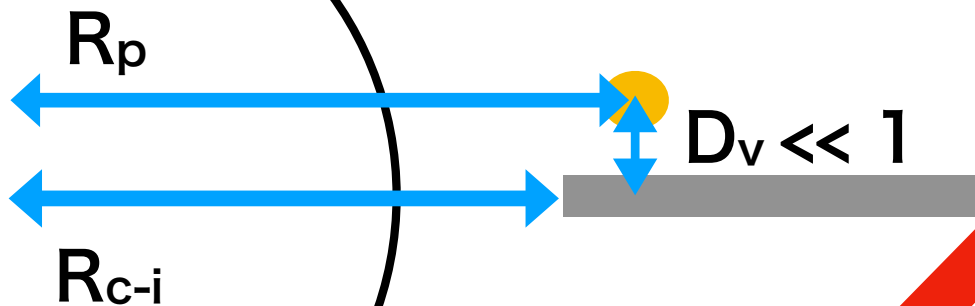
R_{ci} : 白色矮星中心からディスク内縁までの距離

R_p : 白色矮星中心からプラズマまでの距離

D_v : ディスクとプラズマの垂直方向距離

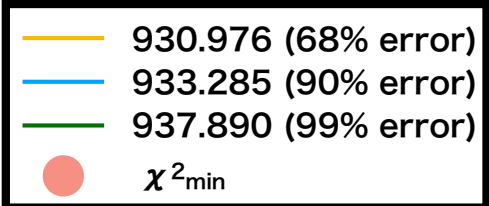
$D_v \ll 1 R_{WD}$ と仮定

R_p および R_{c-i} の関係を変えて、
観測されたスペクトルを評価

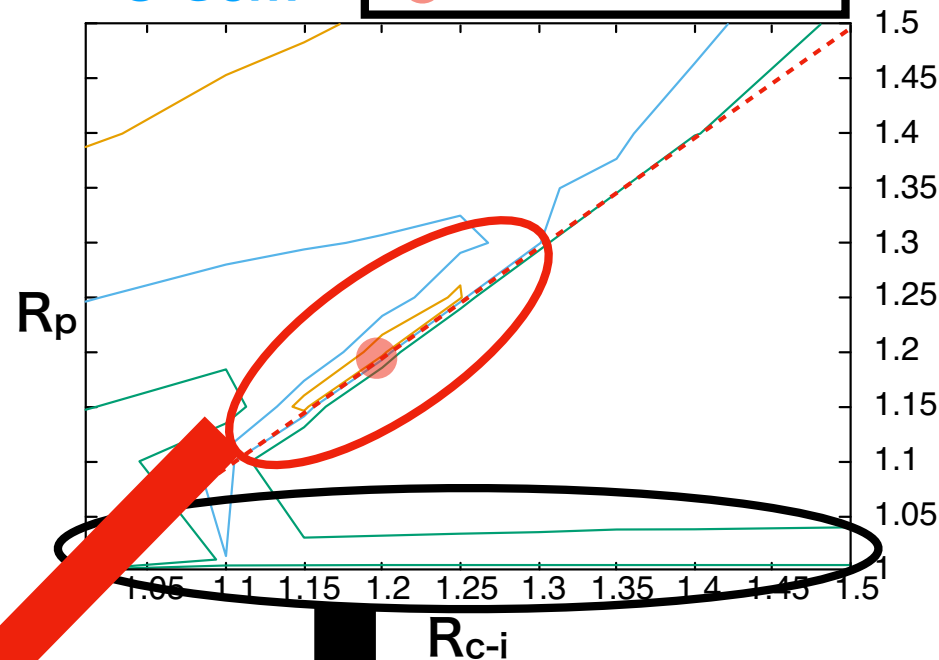


$R_p = R_{c-i}$
(プラズマがディスク内縁上にある時)

--- ディスク内縁上



U Gem

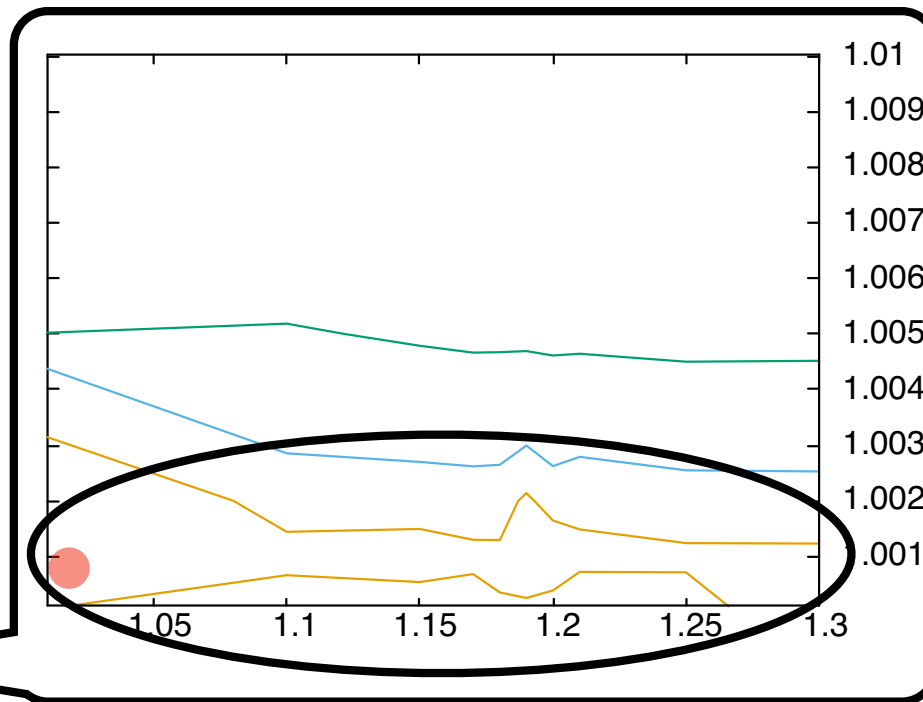
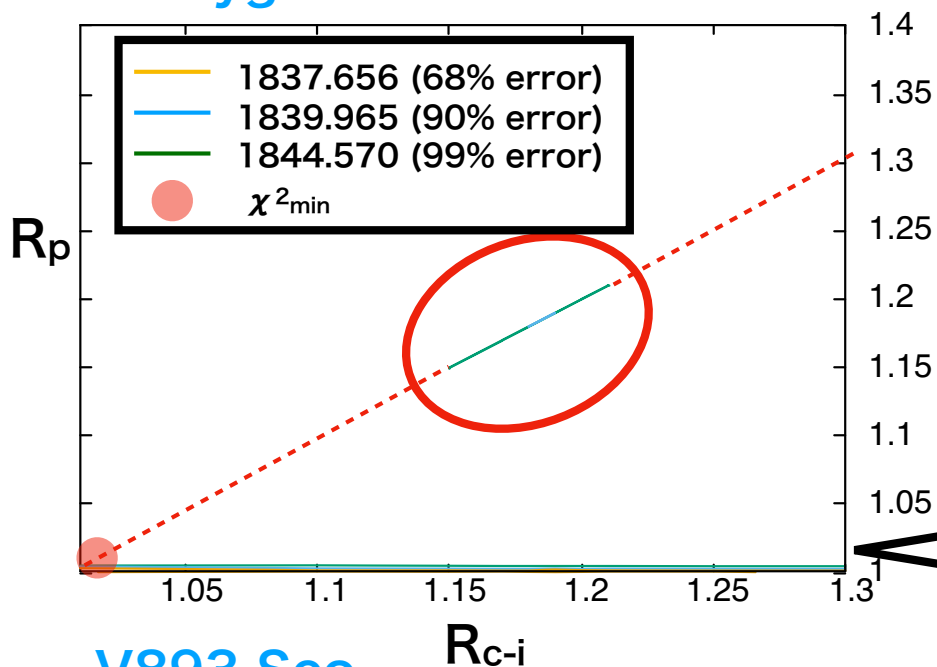


$R_p < R_{c-i}$
(プラズマがディスク内縁より内側にある時)
プラズマの重心は白色矮星表面付近に存在する
※ R_{c-i} の下限値および上限値は決まらない

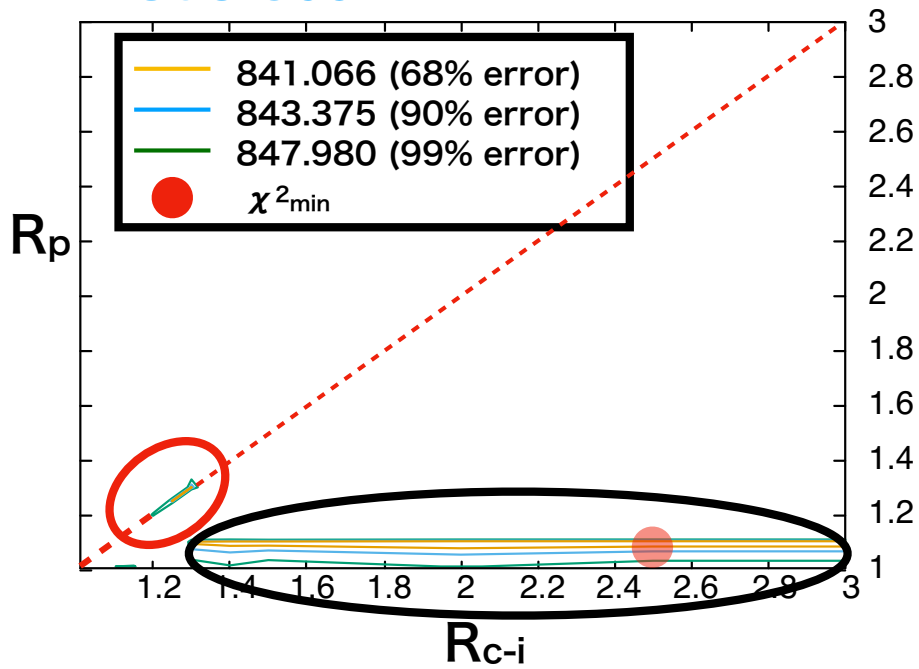
データ解析

--- ディスク内縁上

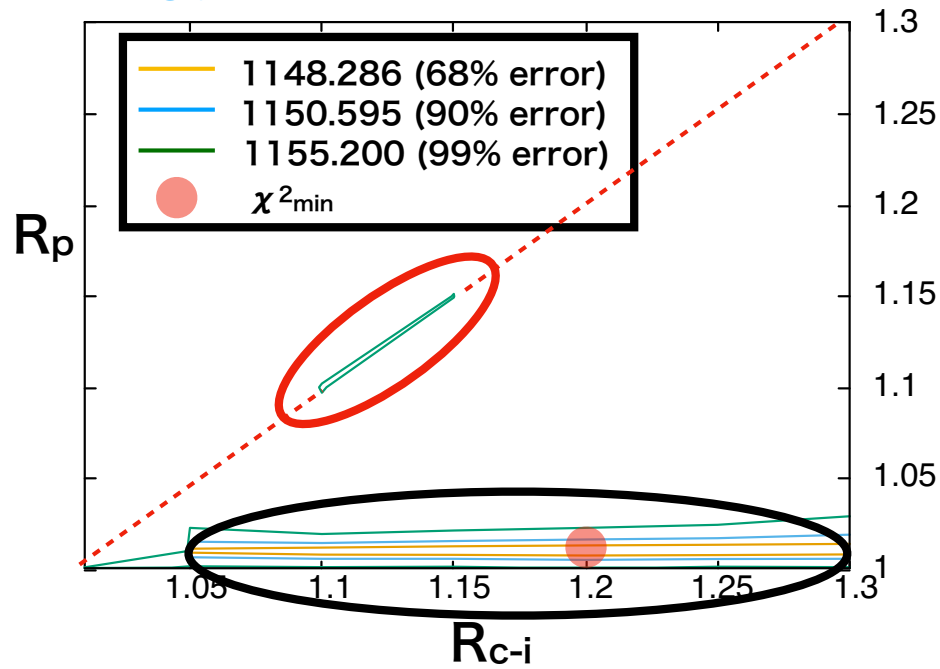
SS Cyg



V893 Sco



Z Cam

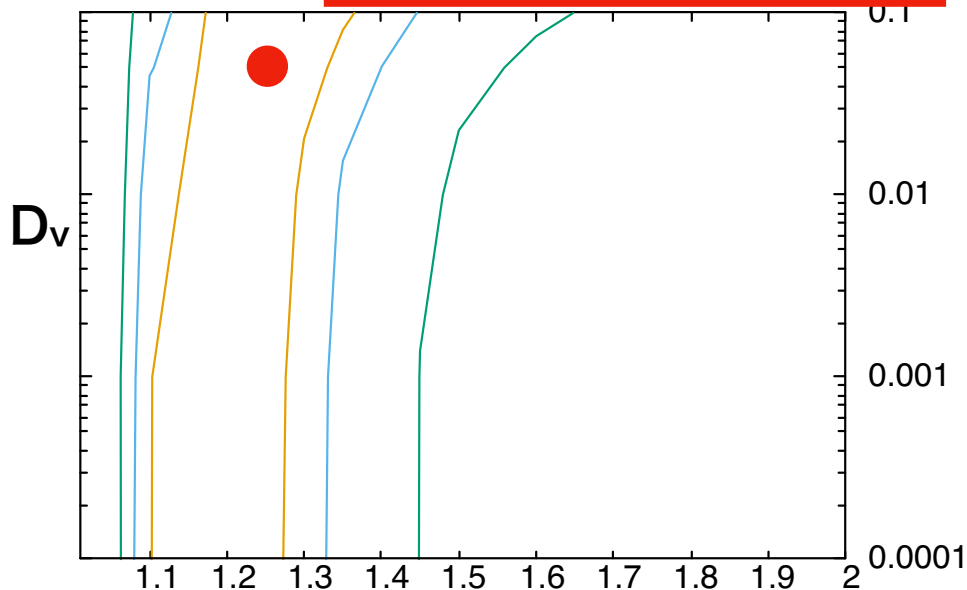


データ解析

D_v(垂直方向距離)の不定性を考慮すると
信頼度90%の下限值および上限値は…

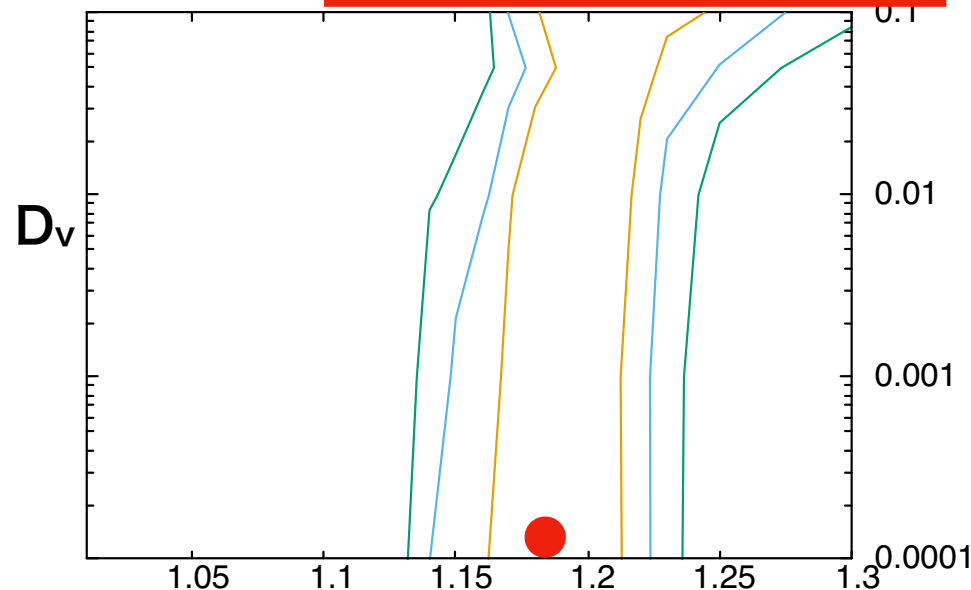
U Gem

$R_p=R_{c-i}=1.20 - 1.35R_{WD}$



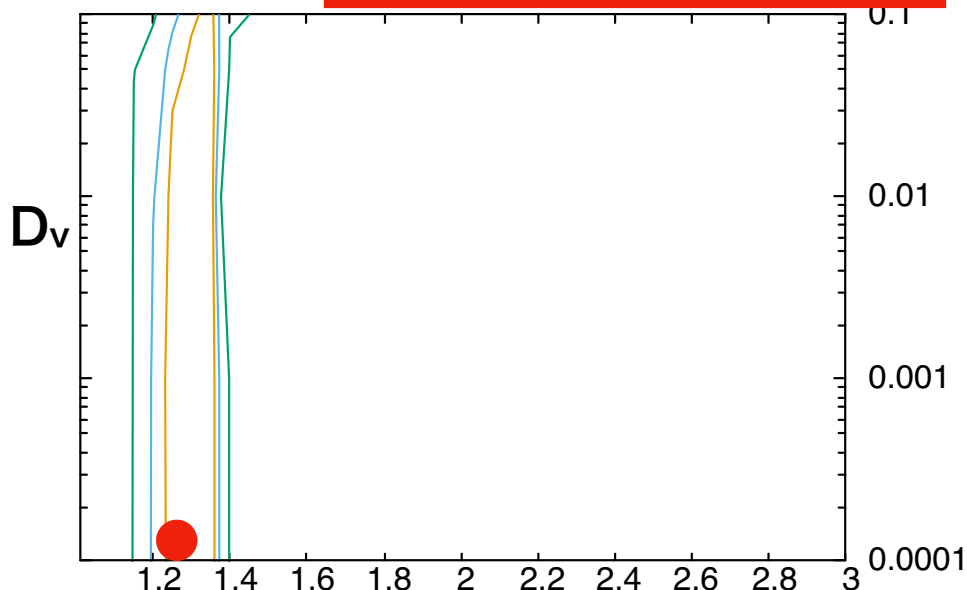
SS Cyg

$R_p=R_{c-i}=1.17 - 1.23R_{WD}$



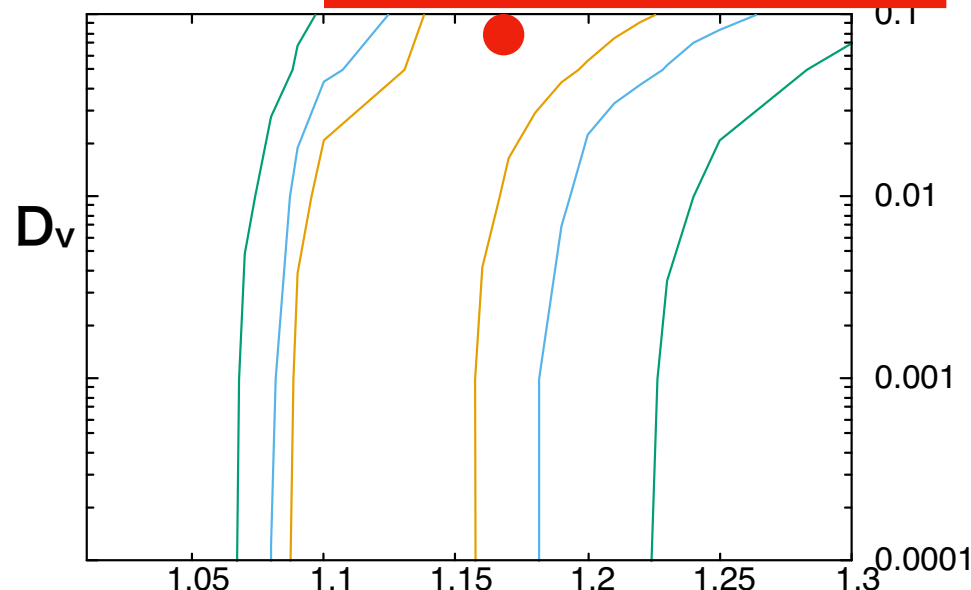
V893 Sco

$R_p=R_{c-i}=1.24 - 1.35R_{WD}$



Z Cam

$R_p=R_{c-i}=1.10 - 1.20R_{WD}$

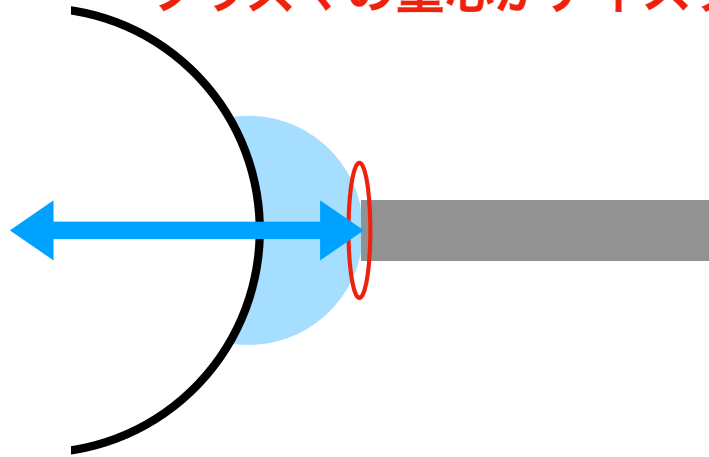


$R_p=R_{c-i}$

$R_p=R_{c-i}$

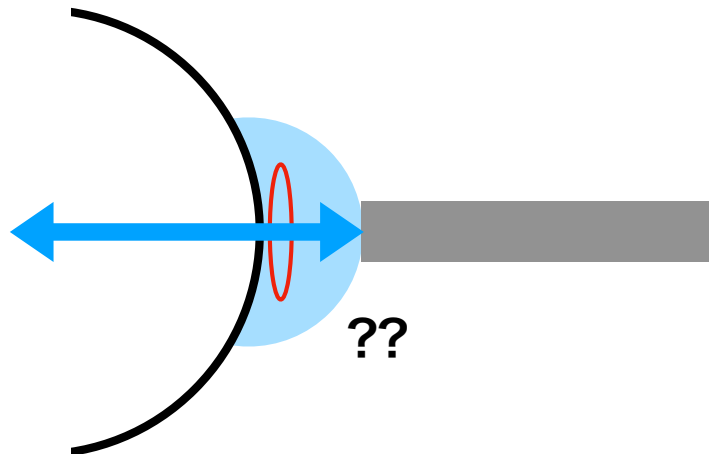
データ解析

プラズマの重心がディスク内縁上にあるとき ($R_p = R_{c-i}$)



U Gem : 1.20 - 1.40 R_{WD}
SS Cyg : 1.17 - 1.23 R_{WD}
V893 Sco : 1.24 - 2.50 R_{WD}
Z Cam : 1.10 - 1.25 R_{WD}

プラズマの重心がディスク内縁より内側にあるとき ($R_p < R_{c-i}$)



議論 1

$R_p=R_{ci}$ という結果について

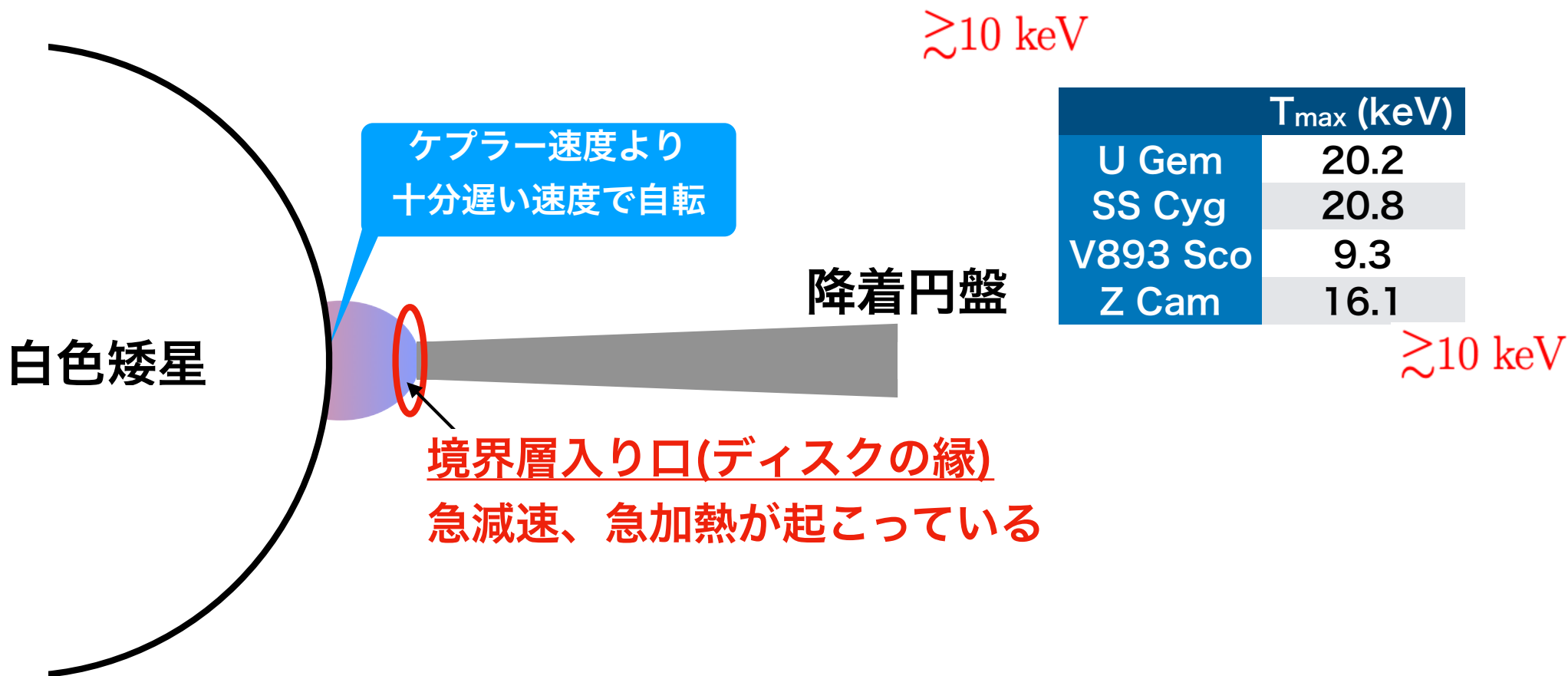
U Gem、SS Cyg、V893 Sco、Z Camの静穏時



$R_p=R_{ci}$

ディスク内縁上にプラズマの重心がある

→縁のあたりで鉄のK殻が電離されるほどの高温まで上がっていることを示す



議論 2

連星系の基本パラメータとの関係(質量降着率、密度)

1. 爆発時の質量降着率(\dot{M}_{OB})を導出

$$\dot{M}_{OB} = 1.1 \times 10^{-8} M_{\text{sun}} \text{yr}^{-1} (\alpha_H/0.1)^{1.14} (\alpha_c/0.02)^{-1.23} (f/0.4)^{1.43} (r_d/4 \times 10^{10})^{2.57}$$

α_H : 爆発時の粘性

α_c : 静穏時の粘性

f: ディスク質量のスケールファクター

r_d : 爆発時に切り替わる際の静穏時のディスクの最大半径

(Cannizzo 1993)

また、SS Cygの観測から $\alpha_H=0.1$, $\alpha_c=0.02$, $f=0.4$

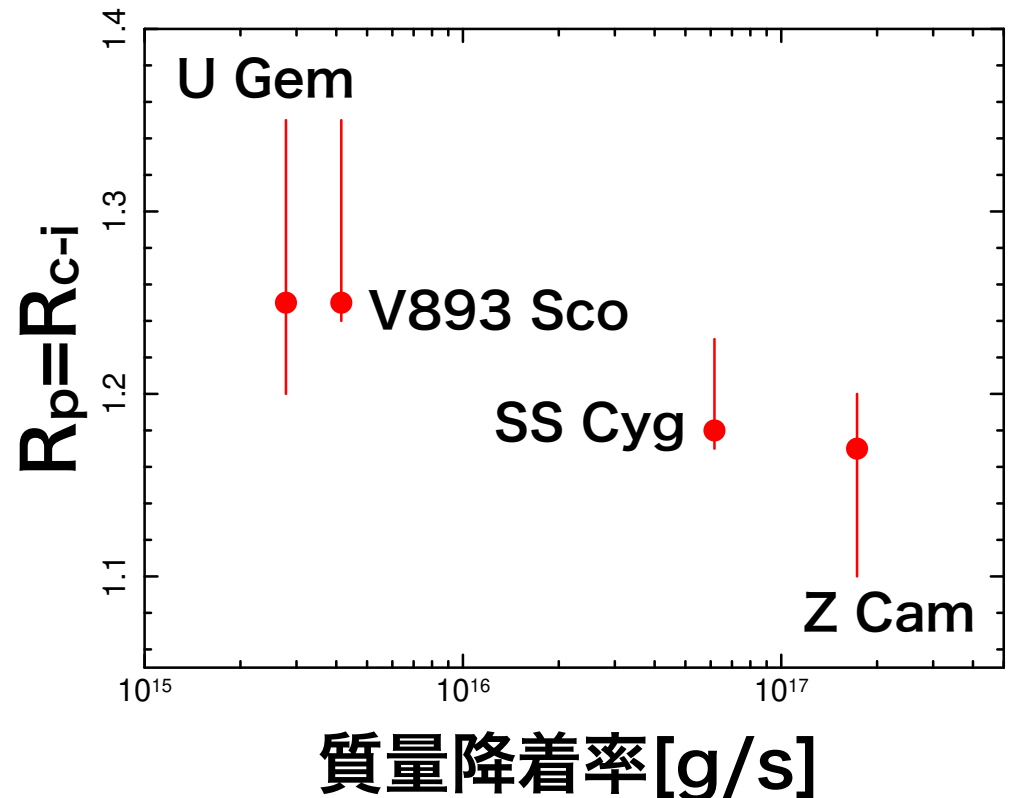
$r_d/a=0.29$ (U Gem), 0.31 (WZ Sge), 0.313 (OY Car)に基づき、 0.3 と仮定

2. 可視光の等級差を用いて

静穏時の質量降着率(\dot{M}_Q)を推定

1等級で2.512倍明るさが違うため

$$\dot{M}_Q = \dot{M}_{OB} / (2.512)^{V_Q - V_{OB}}$$



議論 2

連星系の基本パラメータとの関係(質量降着率、密度)

$\nu_k = \alpha c_s H$ (Shakura and Sunyaev 1973) より

$$\rho = 3.1 \times 10^{-8} \alpha^{-7/10} \dot{M}_{\text{dot}}^{11/20} M^{5/8} R_{\text{c-i}}^{15/8} f^{11/5} [\text{g/cm}^3]$$

を用いて密度 ρ を計算

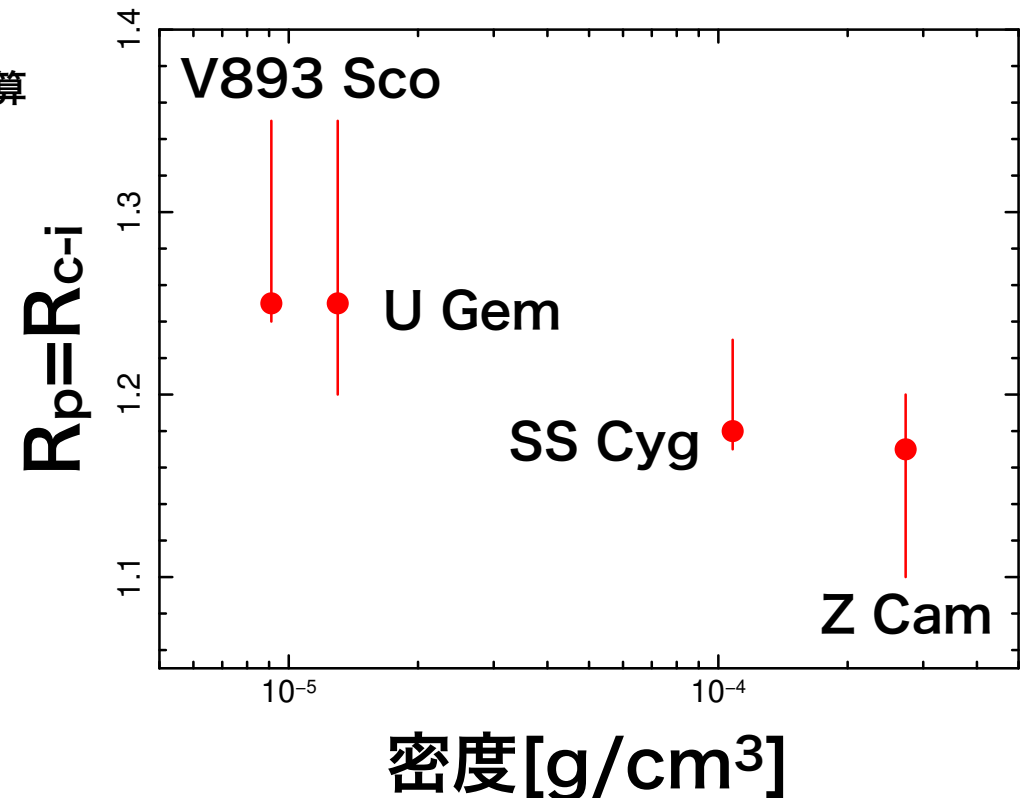
α : 0.02 (Tylenda 1981, Smak 1984a, 1992)

\dot{M}_{dot} : 可視光の絶対等級より計算

M : $M_{\text{star}}/M_{\text{sun}}$

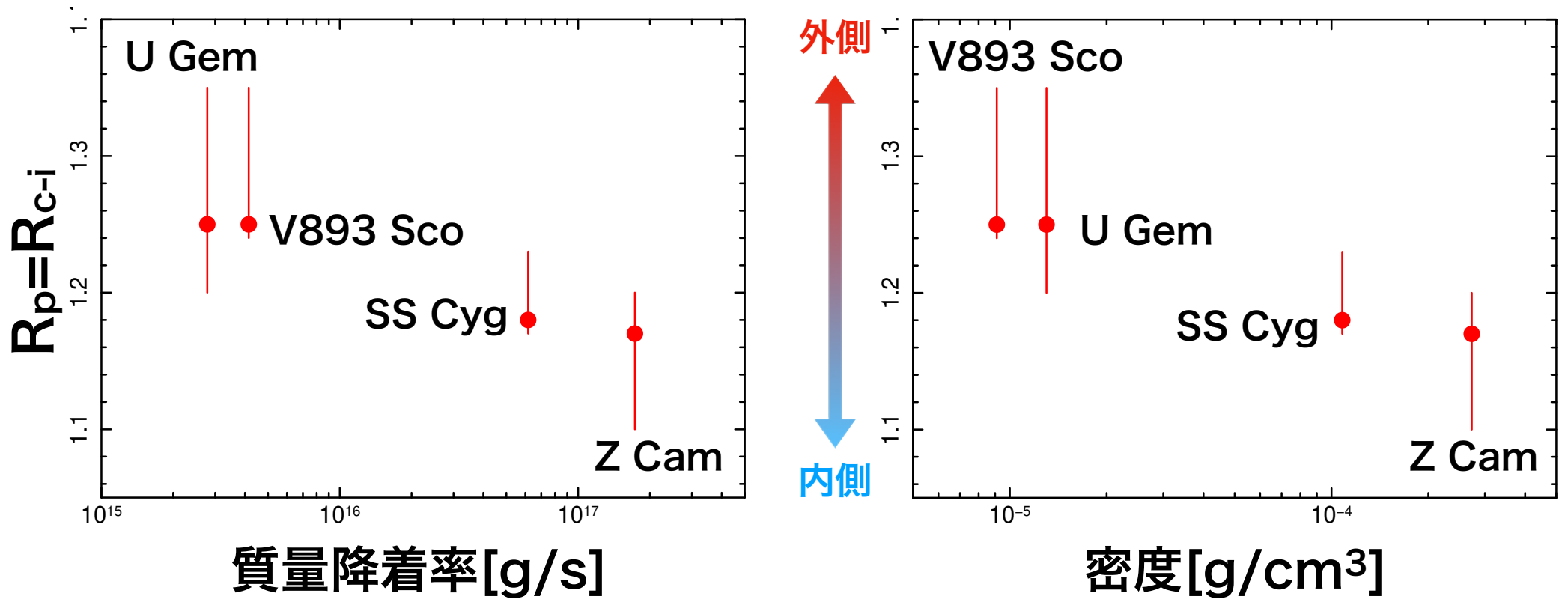
R_{star} : M-R関係式 (Nauenberg 1972) より計算

$f = [1 - (R_{\text{star}}/R_{\text{c-i}})^{1/2}]^{1/4}$



議論 2

連星系の基本パラメータとの関係(質量降着率、密度)

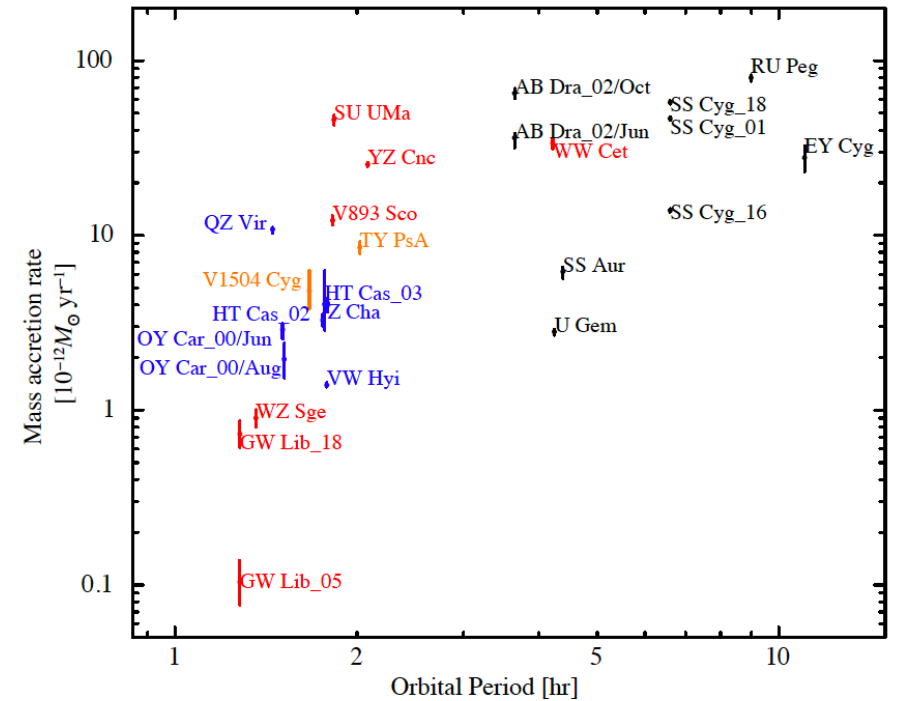
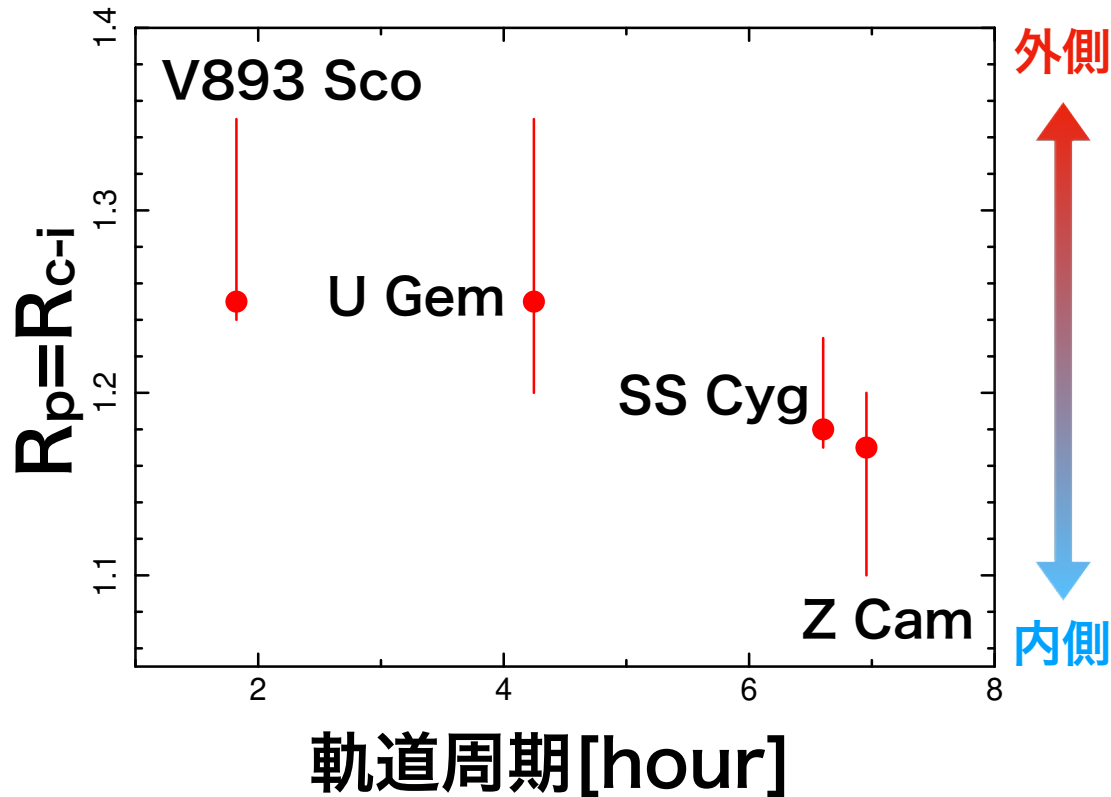


質量降着率が高い→密度も高く冷却効率が良い

ディスクはより内側まで迫ってくる

議論 2

連星系の基本パラメータとの関係(軌道周期)



中庭博士論文より引用

軌道周期と質量降着率には相関がある

…軌道周期が長いほど質量降着率が高い

→冷却効率が良い

ディスクはより内側まで迫ってくる

まとめ

—目的—

X線天文衛星「すざく」のデータを用いて、プラズマと反射体である白色矮星や降着円盤の位置関係を様々に変えた反射シミュレーション(Hayashi+18)を取り入れ、代表的な矮新星の静穏時のプラズマの空間分布を精密に推定する。

4天体 (U Gem, SS Cyg, V893 Sco, Z Cam) で共通した二つの可能性

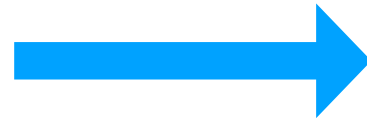
- ・ プラズマがディスク内縁より内側にあるとき
- ・ プラズマがディスク内縁上にあるとき ($R_p=R_{ci}$)

→ ディスクは白色矮星表面に到達する前に途切れており、ディスク内縁上で鉄のK殻が電離されるほどの高温のプラズマが形成されている。

$\gtrsim 10$ keV

連星系の基本パラメータとの関係

- ・ 質量降着率、密度
- ・ 軌道周期



冷却効率が良いため
ディスクがより内側まで迫ってくる

これらのパラメータが大きいほど