

X線で見える恒星

菅原 泰晴
(中央大学)

~恒星の一生~



目次

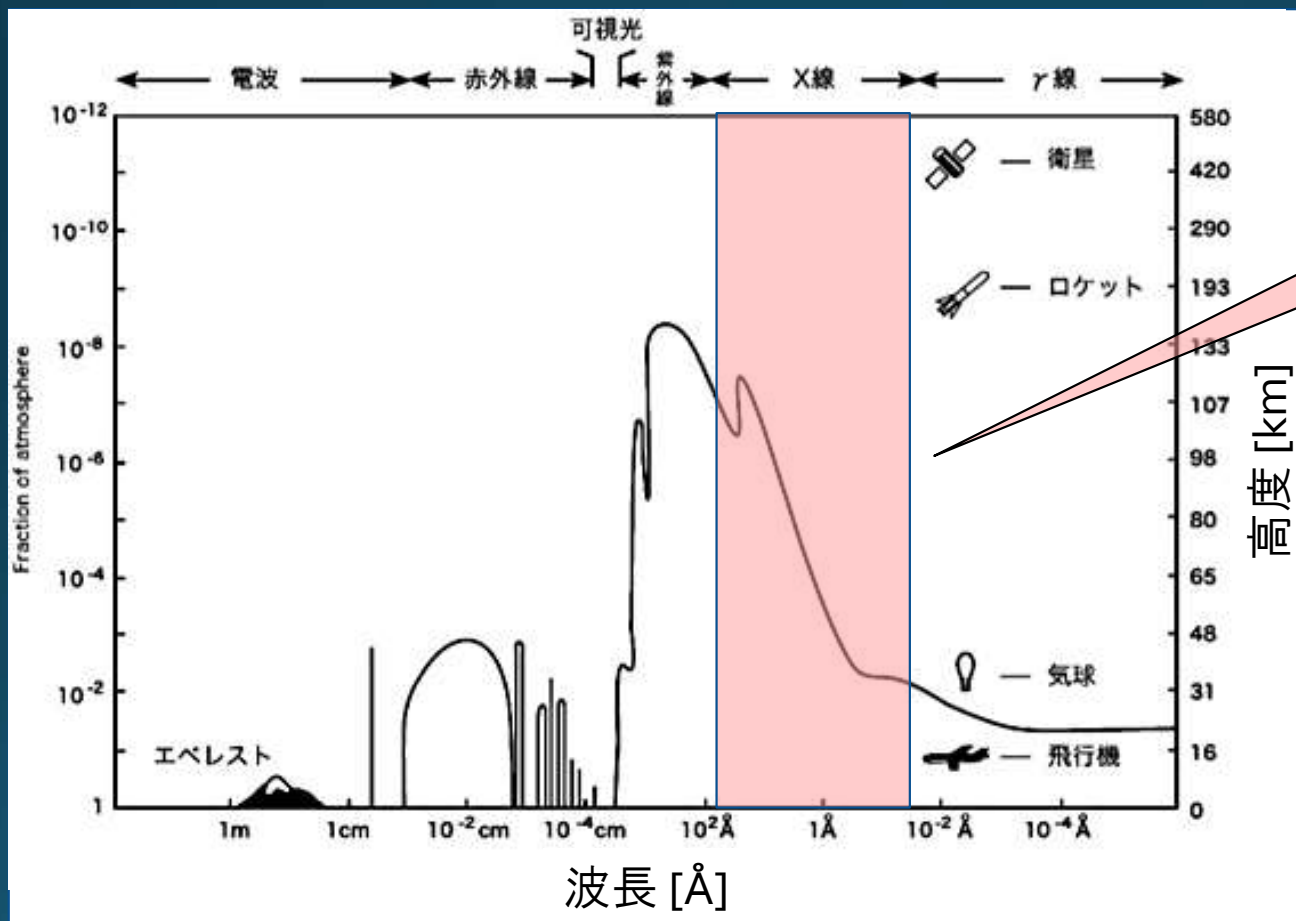
0. はじめに
1. 小質量星からのX線
2. 大質量星からのX線
3. 次世代のX線観測

興味ある話題をピックアップしてお話します。

0. はじめに

X線天文学の始まり

1962年 リカルド・ジャッコーニ、ブルーノ・ロッシらが「観測ロケット」で太陽系外 (Sco X-1) からのX線を捉えた



地上観測不可

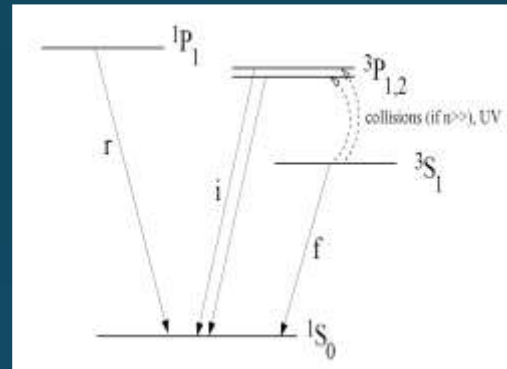
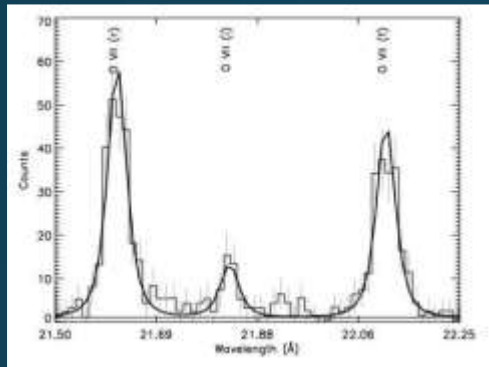
多くの星がX線を出していることが判明

X線観測のメリット

X線を出す温度→多くのイオンは高電離する

- X線輝線は物理素過程が簡単

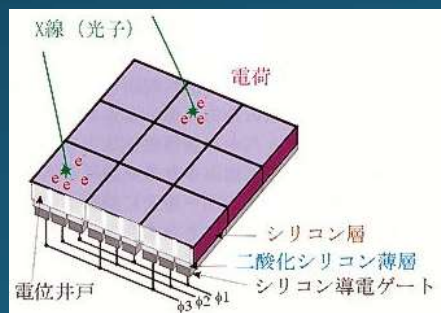
例：He-like triplet (電子温度、電子密度に制限)



Argiroffi+03

- 「撮像」「分光」「測光」を**同時に**行える検出器もある
(太陽以外の恒星からのX線 $\ll 1$ 光子/sec/cm²,

ただし十分な集光が必要)



現在稼働中のX線天文衛星等



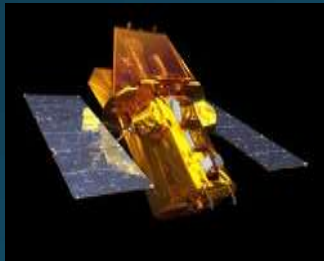
Chandra
空間分解能
波長分解能



XMM-Newton
集光力
波長分解能



Suzaku
集光力
広帯域



Swift
即応観測
広帯域



MAXI
全天監視



NuSTAR
硬X線撮像

それぞれの長所がある

1. 小質量星からのX線

- 巨大フレアの観測
- (定常X線の変動)

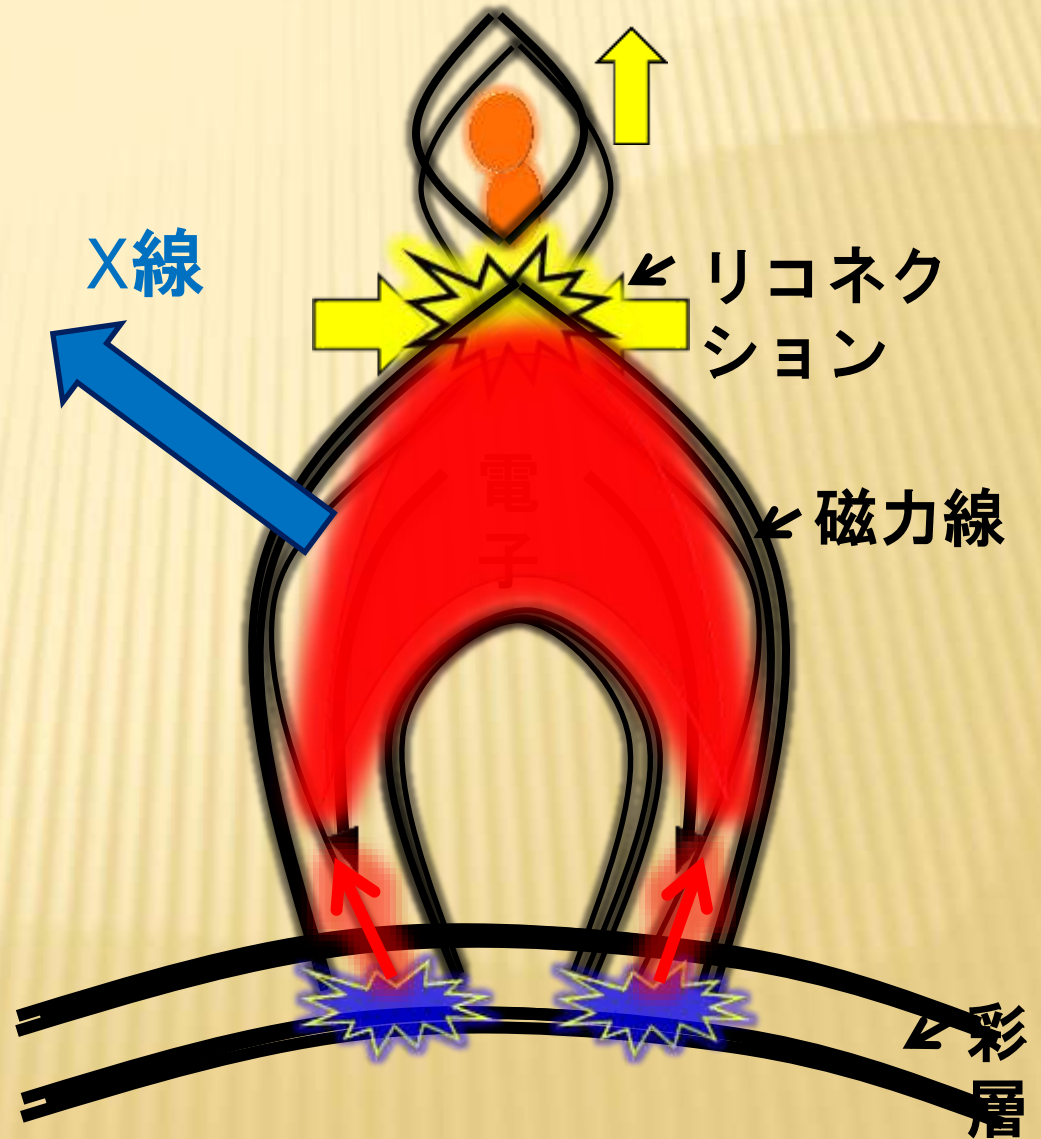
1-1. 巨大フレアの観測

イントロダクション

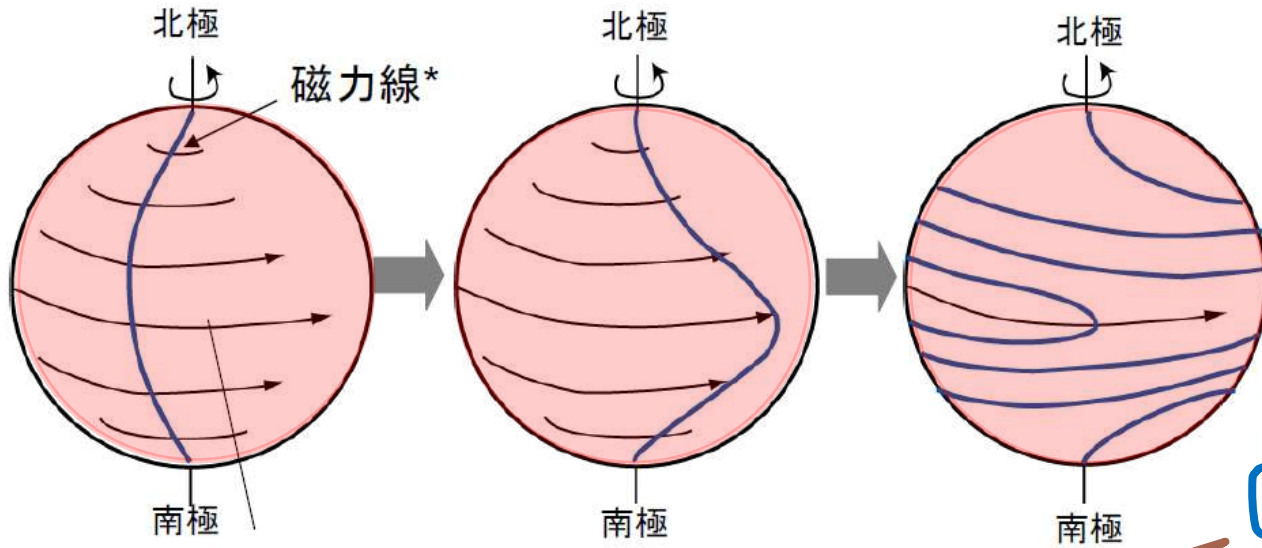
◇太陽フレアのメカニズム

磁力線の再結合

急激に、
温度上昇 ↑
X線光度上昇 ↑

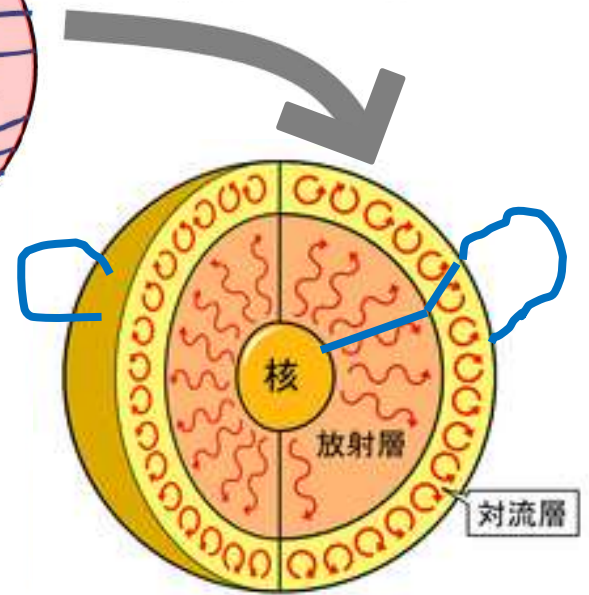
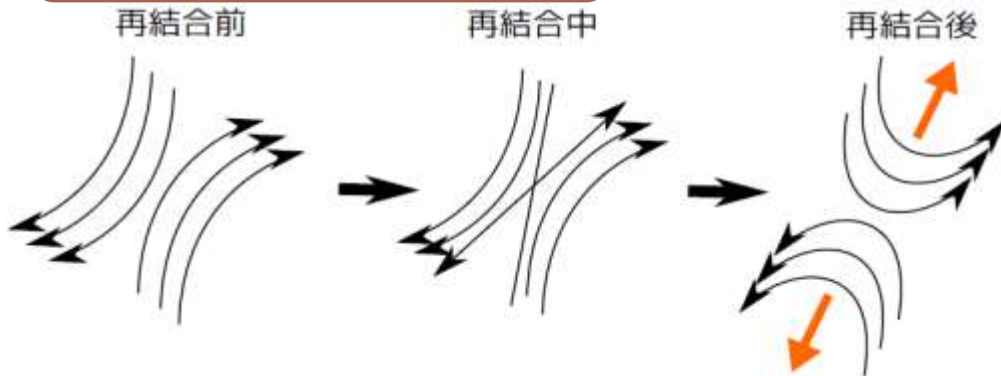


◇太陽フレアのメカニズム



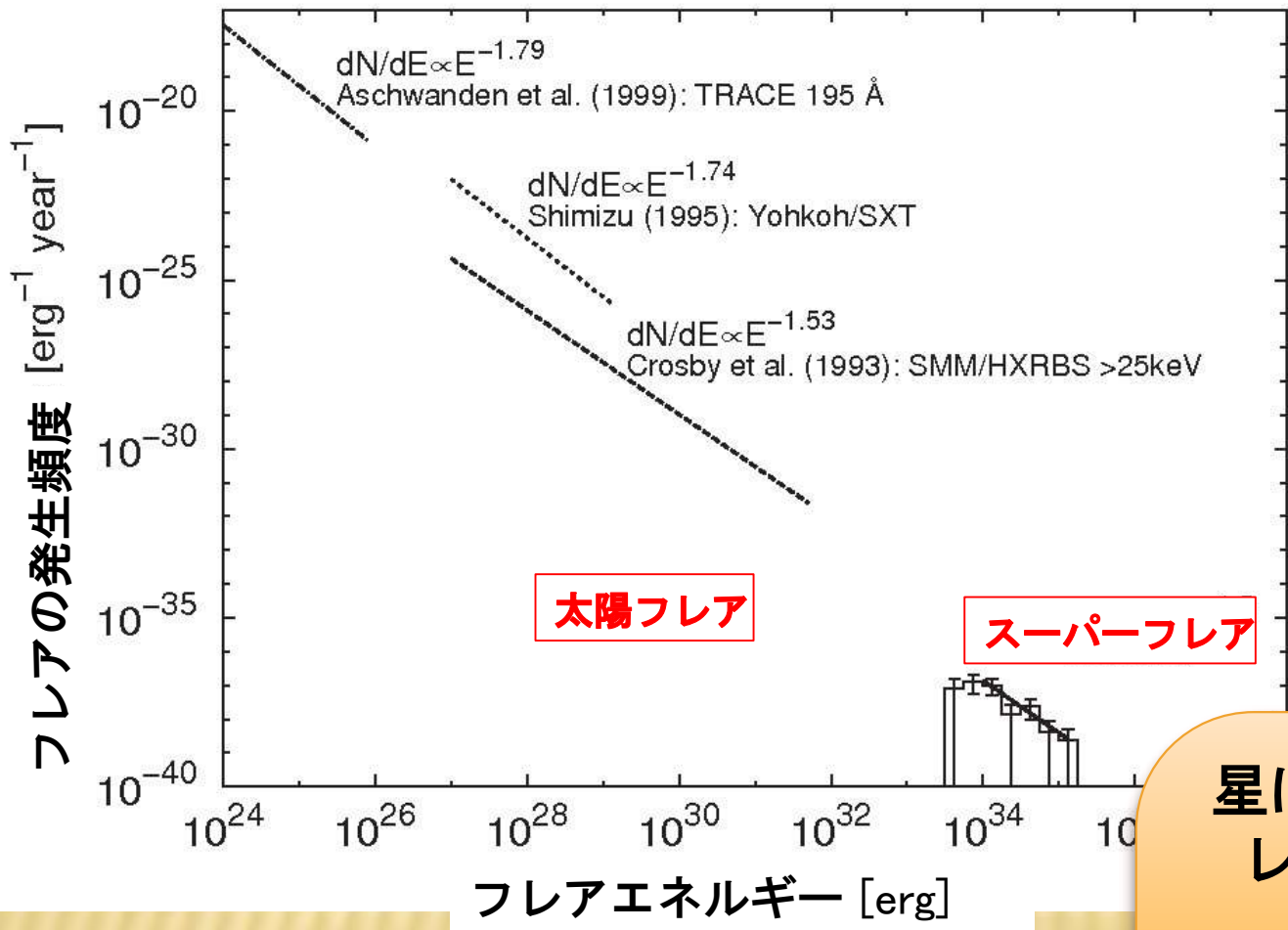
差動回転

磁気リコネクション



フレアの発生頻度

Shibayama+13



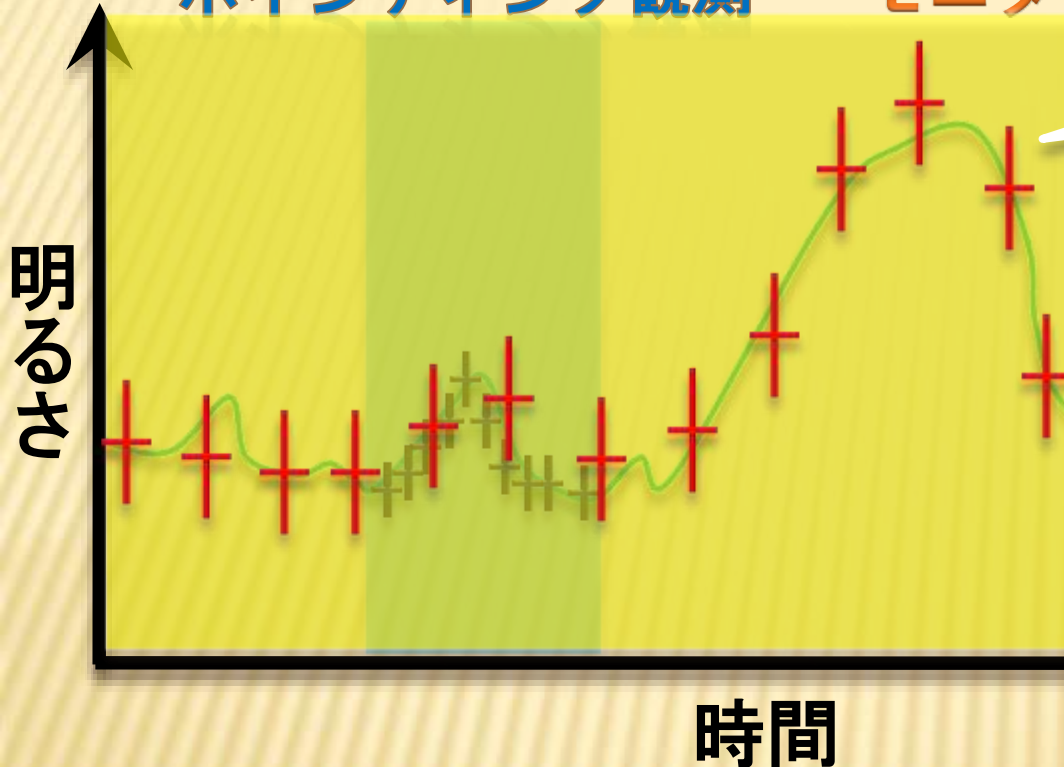
星はどこまで巨大なフレアを起こすのか？

巨大なフレアを起こす要因は何か？

◇手法：X線モニタリング

ポインティング観測

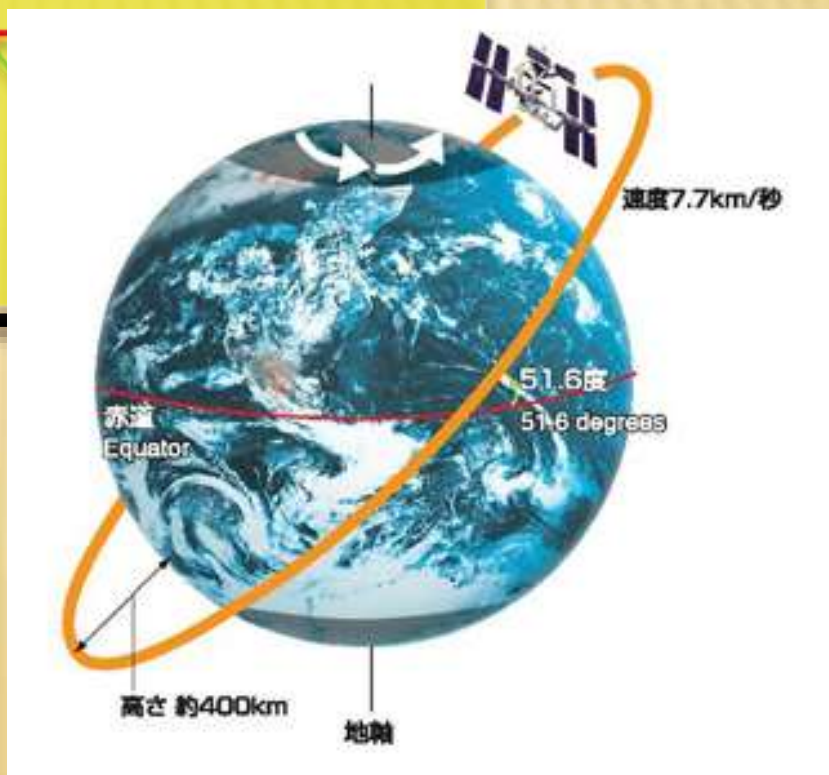
モニタリング観測



巨大フレアも
検出できる

全天X線監視装置MAXI

⇒90分に1回全天を監視！

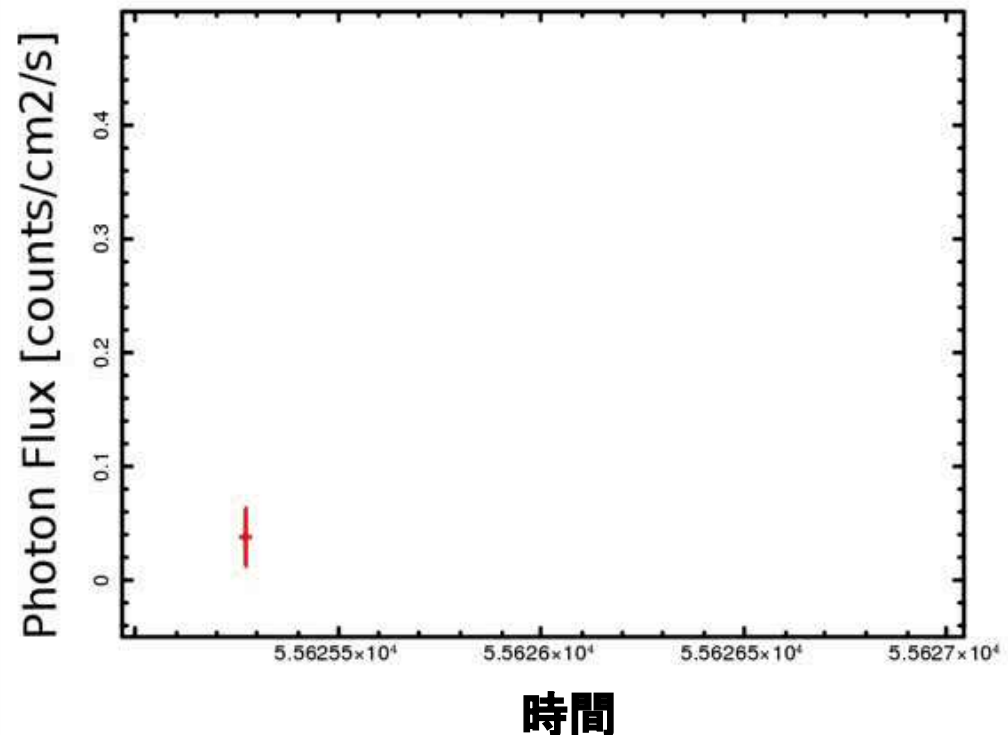
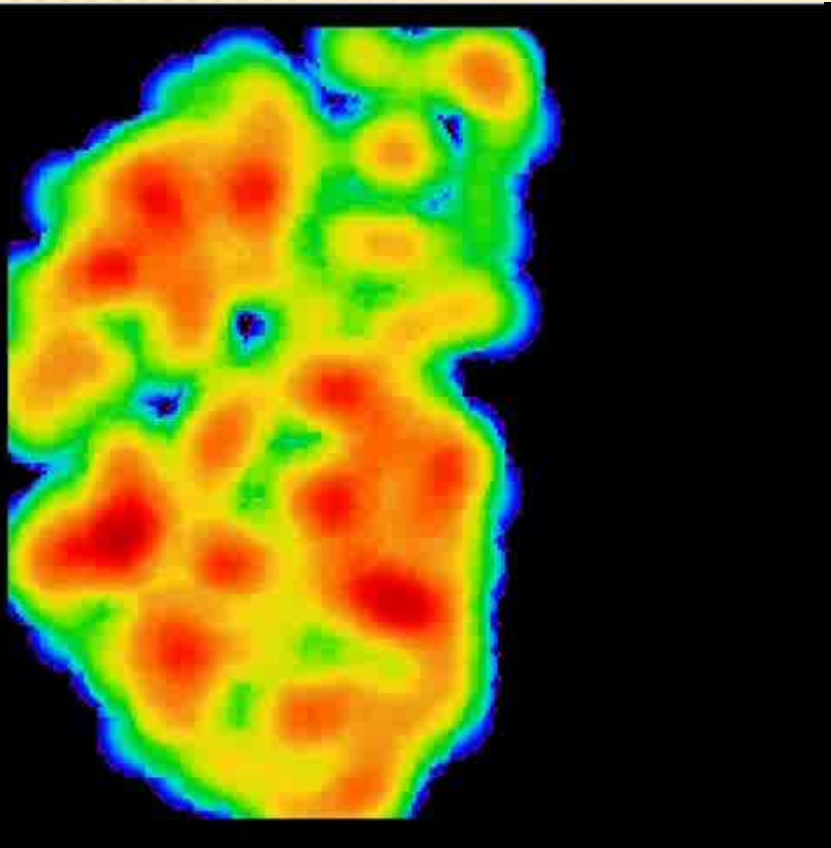


◇MAXIによるフレアの検出

Yamazaki+
submitted to PASJ

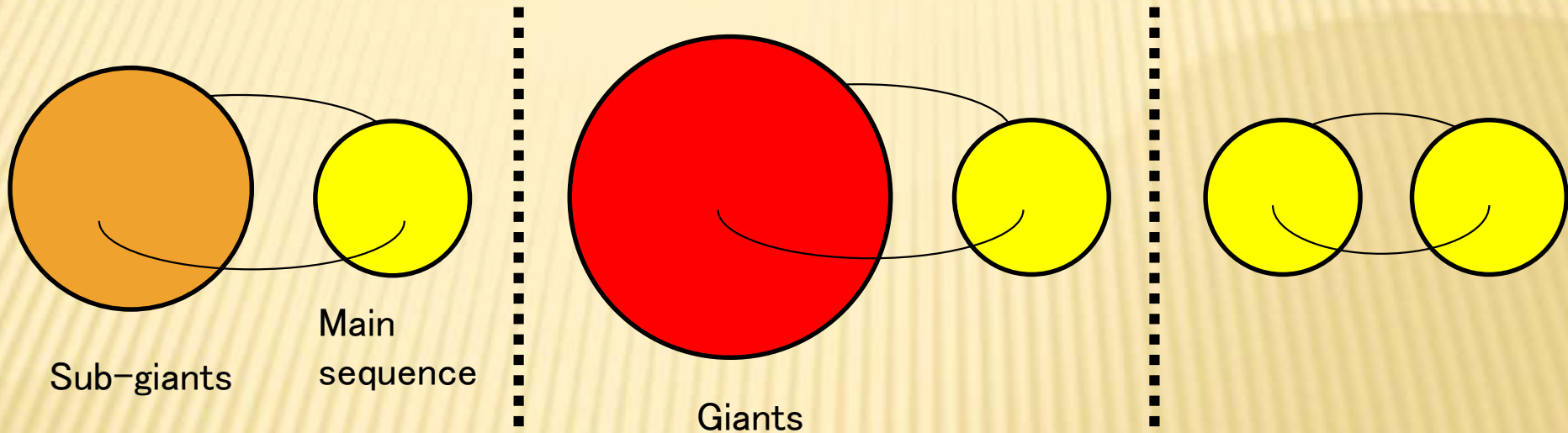
4年間で、21天体から**64**発の巨大フレアを発見

◎例：HR1099（連星） 1周回（90分）ごとのムービー



◇ Detected Stellar Categories

◆ Active Binary

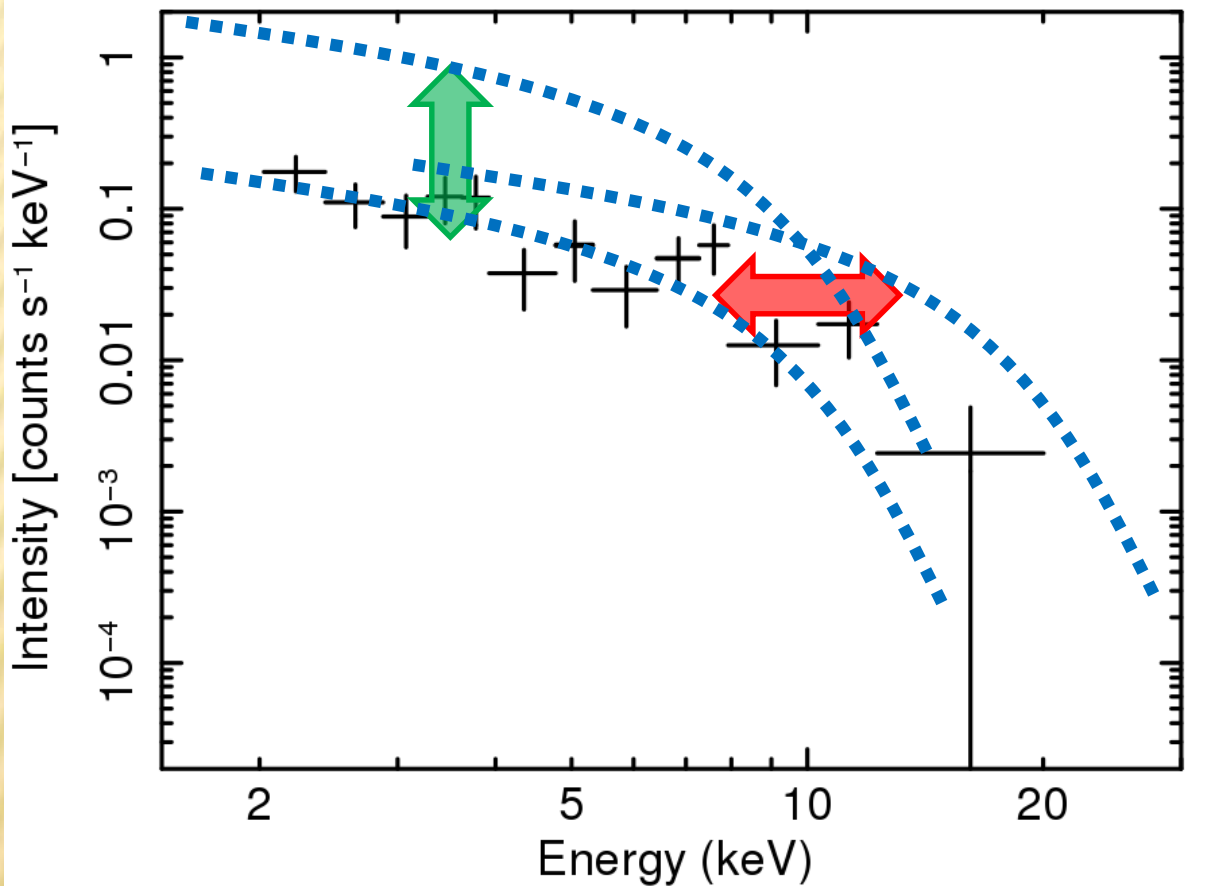


◆ Single active stars

- dMe stars
- YSOs

◇ X線から分かること：温度とプラズマ規模

X線スペクトル

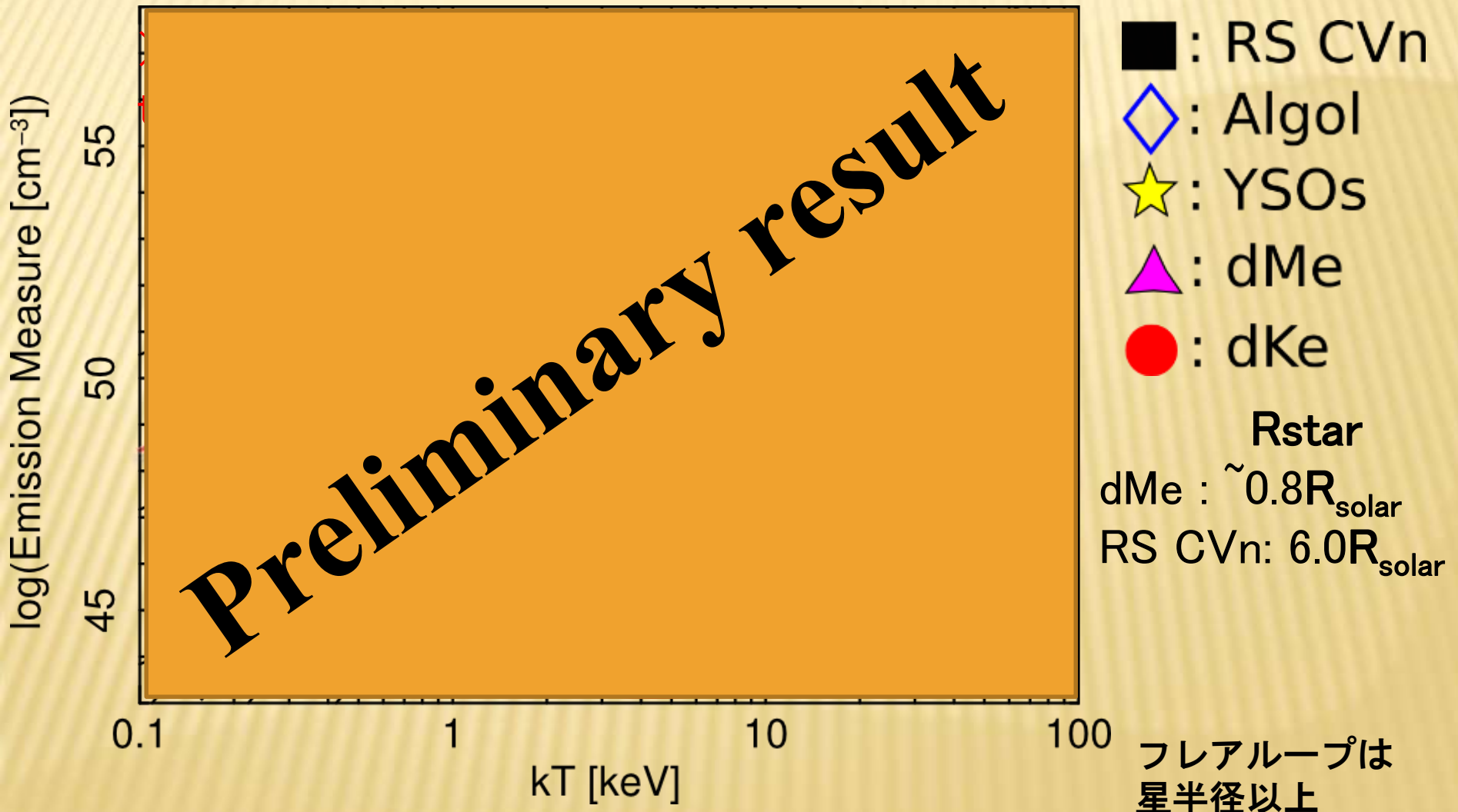


熱的プラズマ
モデル

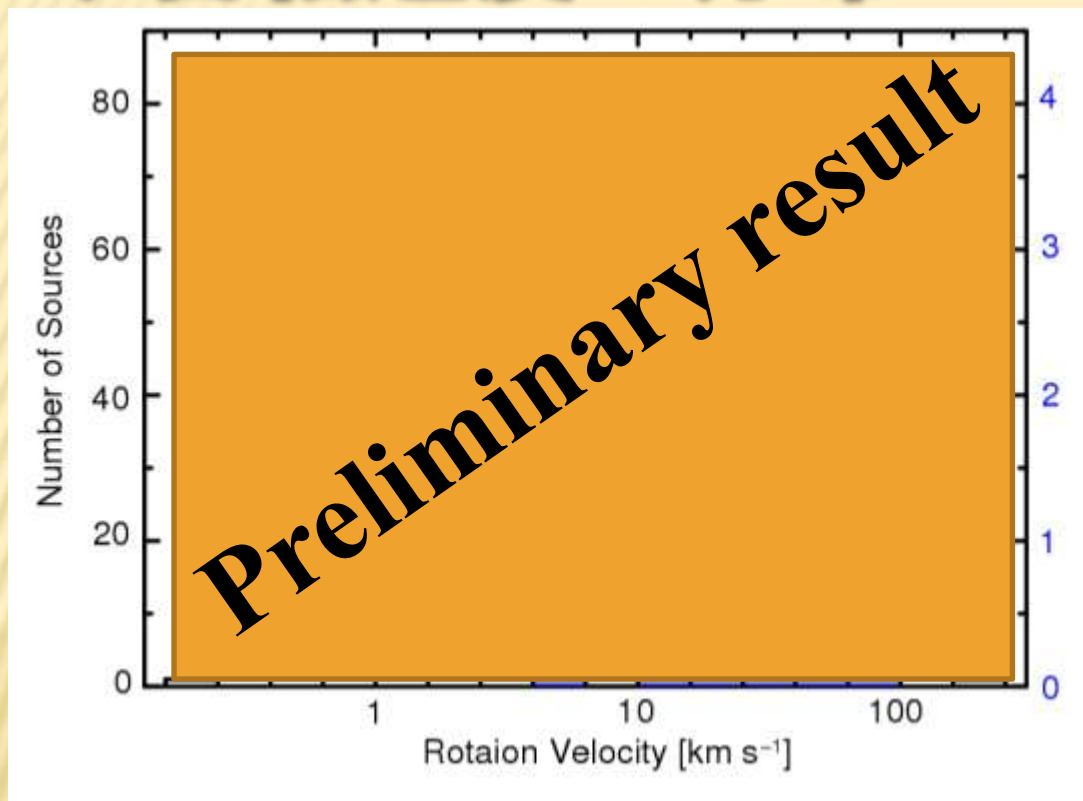
横軸⇒ 温度(kT)
縦軸⇒ プラズマの規模(EM)



X線の明るさ(L_x)

◇ 温度 vs. プラズマ規模



◇ 自転速度の分布



-  : MAXI
-  : 一般的な星(<300光年)

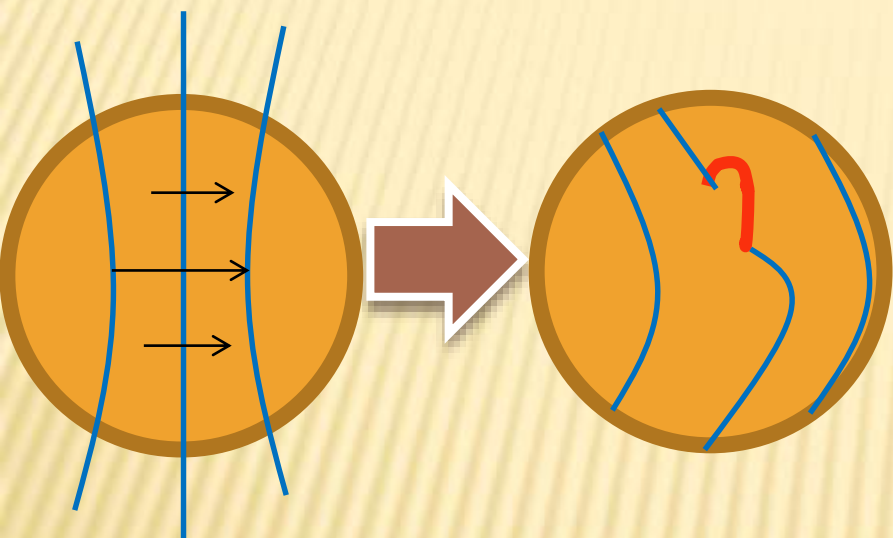
平均 35 km s⁻¹

平均 6 km s⁻¹

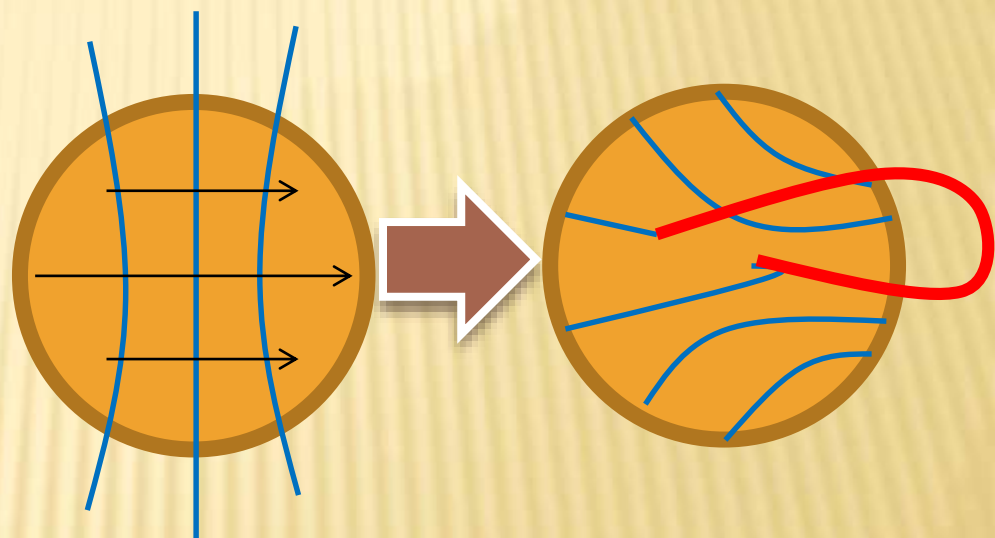
自転速度が速い星が巨大フレアを起こす

◇ 解釈

太陽



巨大フレア天体



自転の速さ⇒ループの長さ⇒フレア規模

◇まとめ - 巨大フレア観測 -

MAXIによるX線フレア観測

→温度、プラズマ規模、X線光度

巨大フレア→ループが長い

→自転が速い星ばかり？

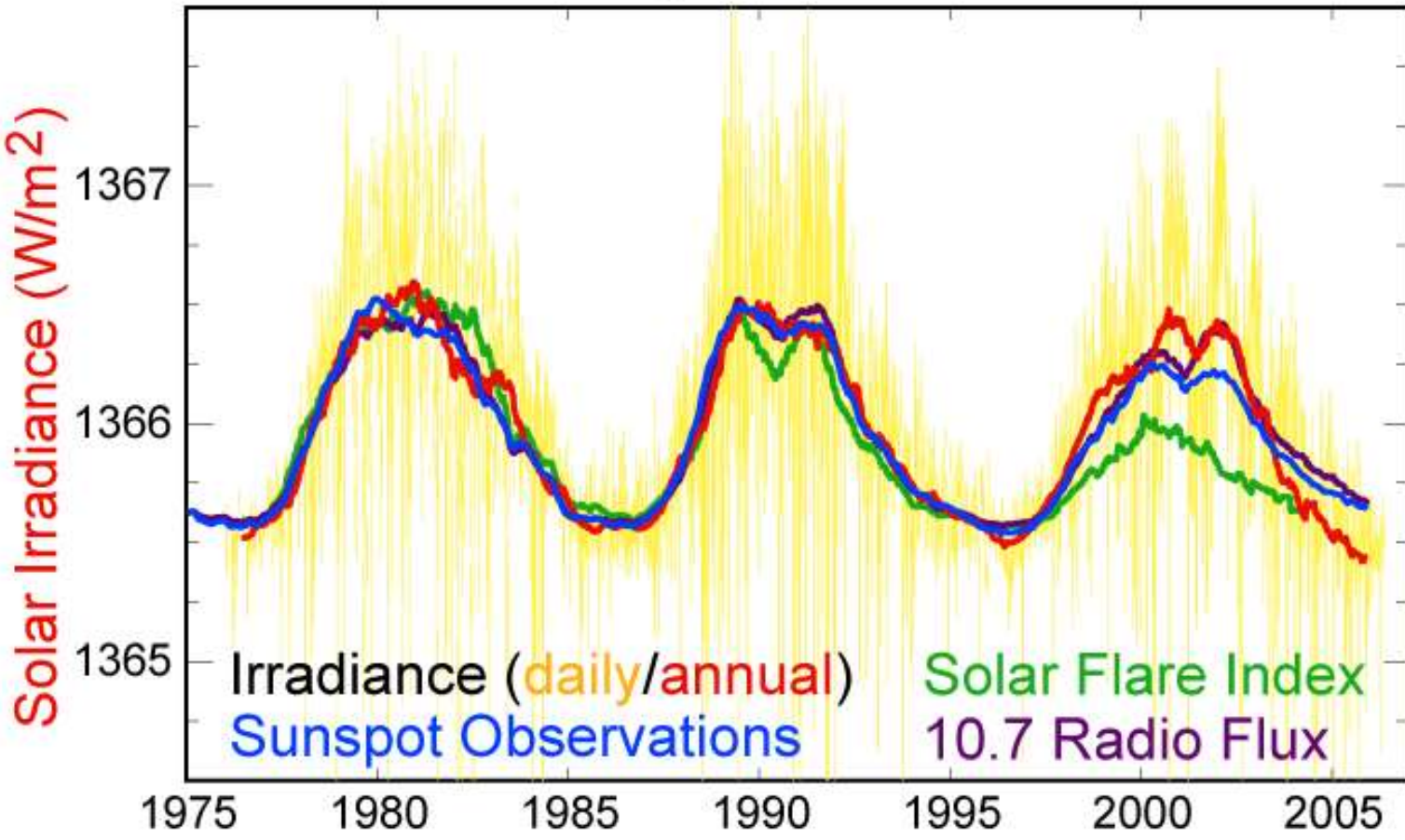
サンプルがもっとほしい

1-2. 定常X線の変動

◇太陽の長周期変動

磁場活動の変化

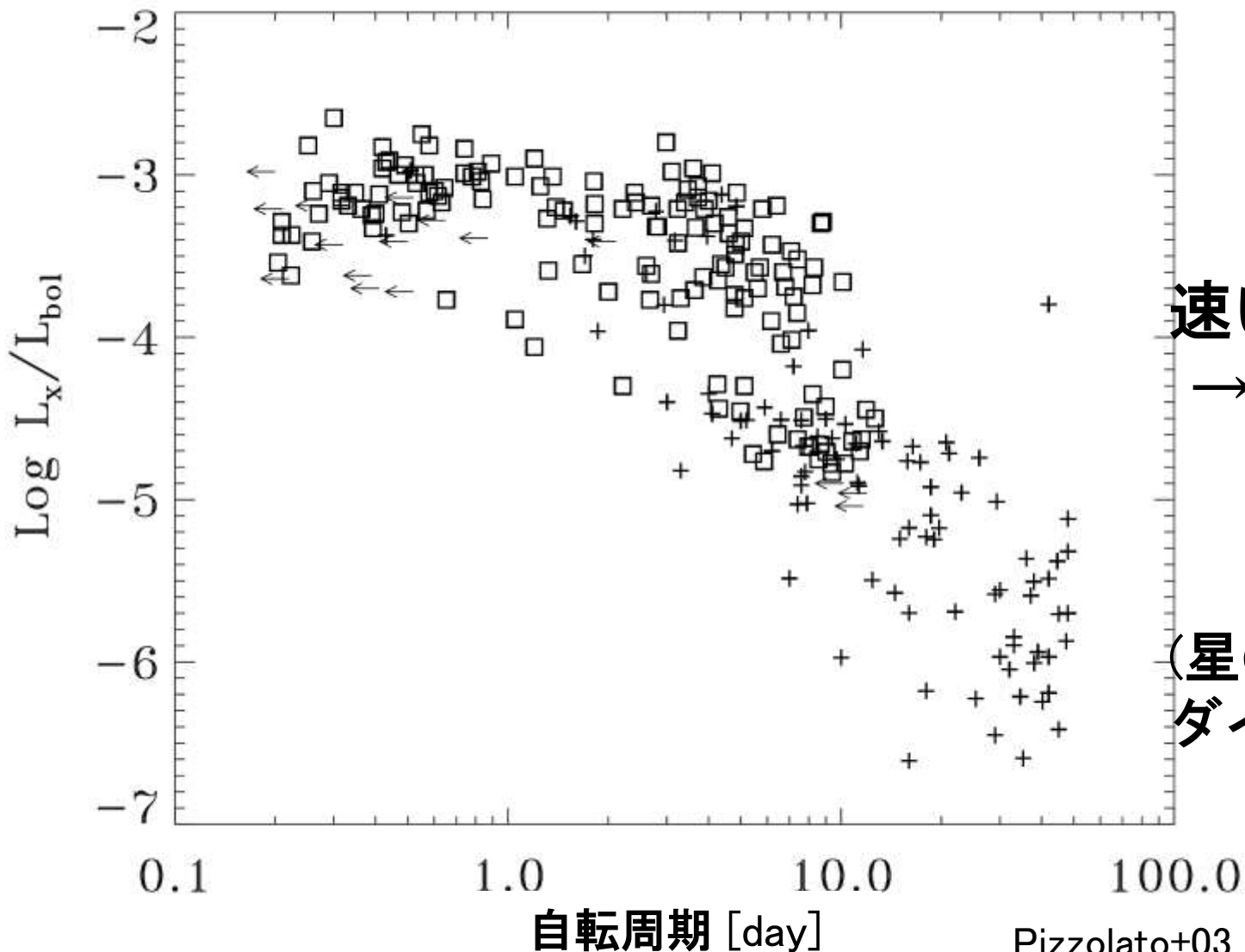
Solar Cycle Variations



太陽以外も
磁場活動が
長期的周期的
に変わる
のか？

◇定常X線

恒星コロナからのX線放射

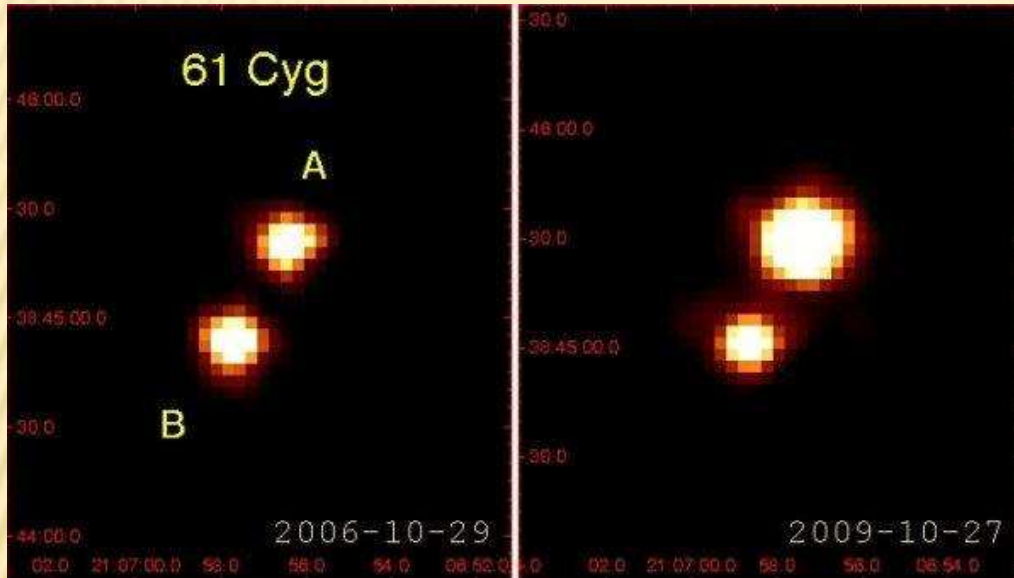


速い自転
→強いX線放射

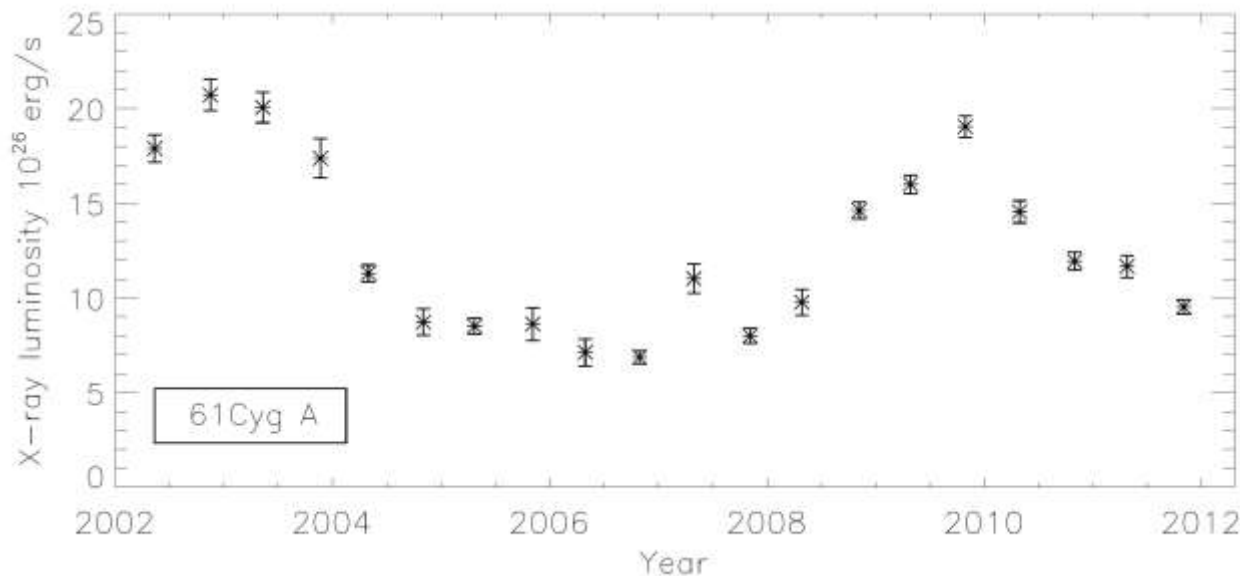
(星の自転による
ダイナモ→磁場)

◇長周期X線変動の発見

XMMによるモニタリング



61 Cyg A (K5V)
自転周期 35日
X線変動周期 7.3年
(Robrade+12)



磁場の周期変動は
遅い自転の星で共
通？

◇まとめ - 定常X線の変動 -

定常X線 → 恒星の磁場活動

長期X線モニタリングが有効

サンプルがもっとほしい

2. 大質量星からのX線

- X線から得られる情報

星風：輻射圧による質量放出

イントロダクション

• 大質量星

- ・ 銀河における化学的・力学的進化に

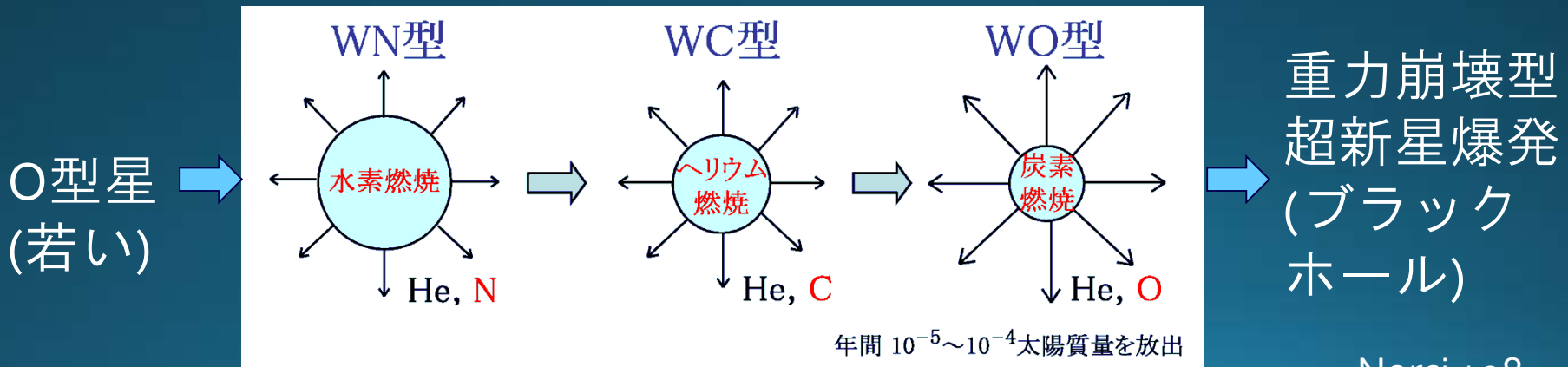
超新星爆発と同程度の寄与

大質量星末期: 数 10^{-5} M_{\odot}/yr × 6000天体 ~ 0.1 M_{\odot}/yr ?
超新星爆発: 数 M_{\odot} /数10 yr ~ 0.1 M_{\odot}/yr ?

- ・ 末期段階の滞在時間~30万年で爆発

(非常に早い→数少ない)

ウォルフ・ライエ (WR) 段階



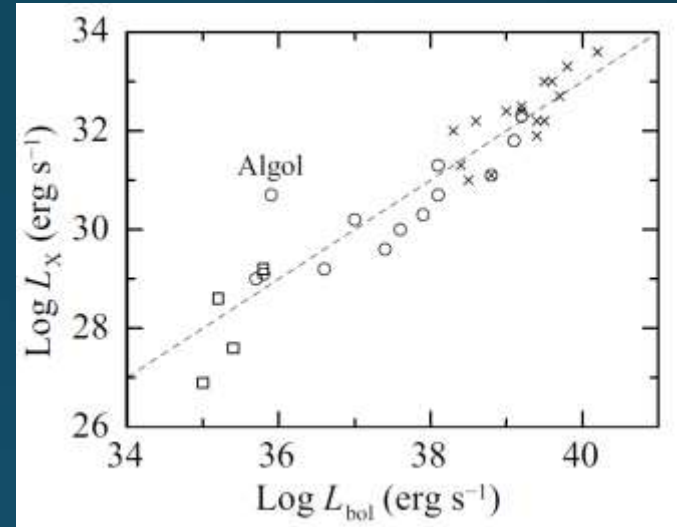
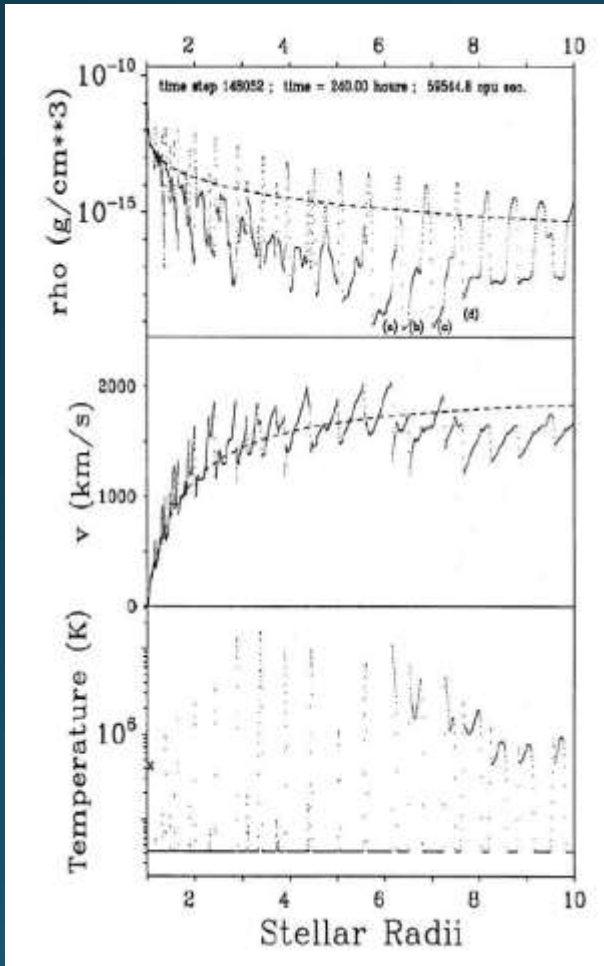
イントロダクション

単独星からのX線

O型(若い)星はよく観測・理解されている
(典型値 $\log L_x \sim 30-32 \text{ erg/s}$, $T \sim 700 \text{ 万K}$)

$\log L_x/L_{\text{bol}} \sim -7$ (Paravicini+ 81)

シミュレーション (Feldmeier 95)



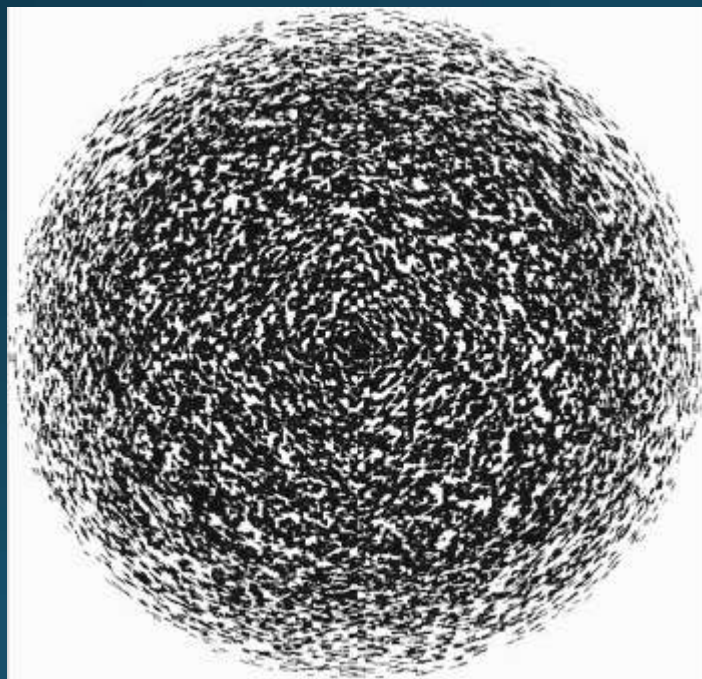
現在受け入れられている説

- 星風の不安定性によって、粗密 (速度差)が生じる
- > 衝突発生
- > プラズマを加熱

単独星からのX線

一方、もっと進化が進むと、、、
WC型WR星やLBVからは未だにX線未検出
(e.g., Naze+11)

イラスト



X線は自身の星風で吸収されているのだろう

単独星のX線特性は
分かってきた?

イントロダクション

連星系からのX線

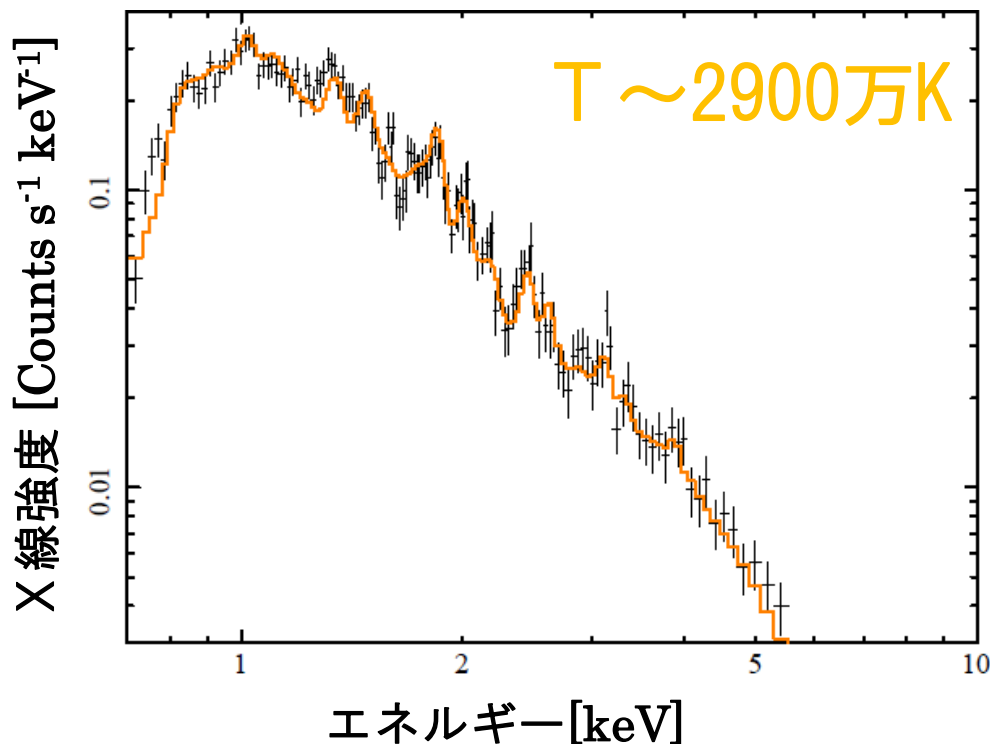
(O+O, WR+O, LBV+WR)

- 銀河系内は約75%が binary (Sana+12)

- 星風衝突連星系**
→ 衝撃波物理の
よい実験場



XMMによる観測例：WR 25 (WN+O)



星風衝突連星系のX線観測

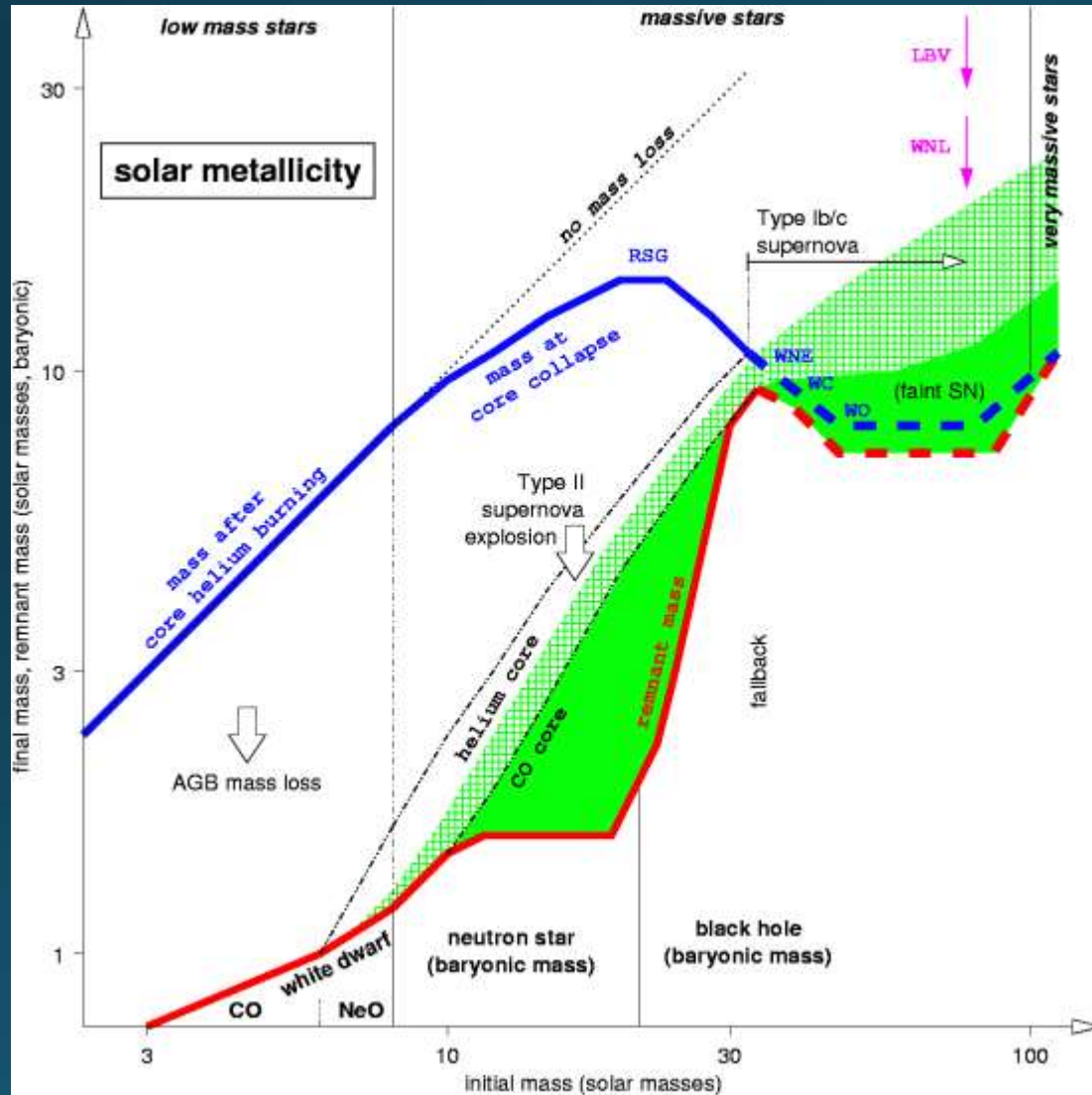
$T = 1000 \sim 3500$ 万Kの
星風衝突プラズマが支配的

$L_x = 1e32 \sim 1e34$
erg/s @0.5-10keV

(Oskinova 05)

イントロダクション

恒星進化モデルの例



• 分からないこと
どのように進化する
のか？

どういう元素を（星
風として）いつ、ど
のくらい放出する
か？（さらに「どこまで
重い星が存在するの
か？」）

手法：X線分光+モニタリング

メリット：

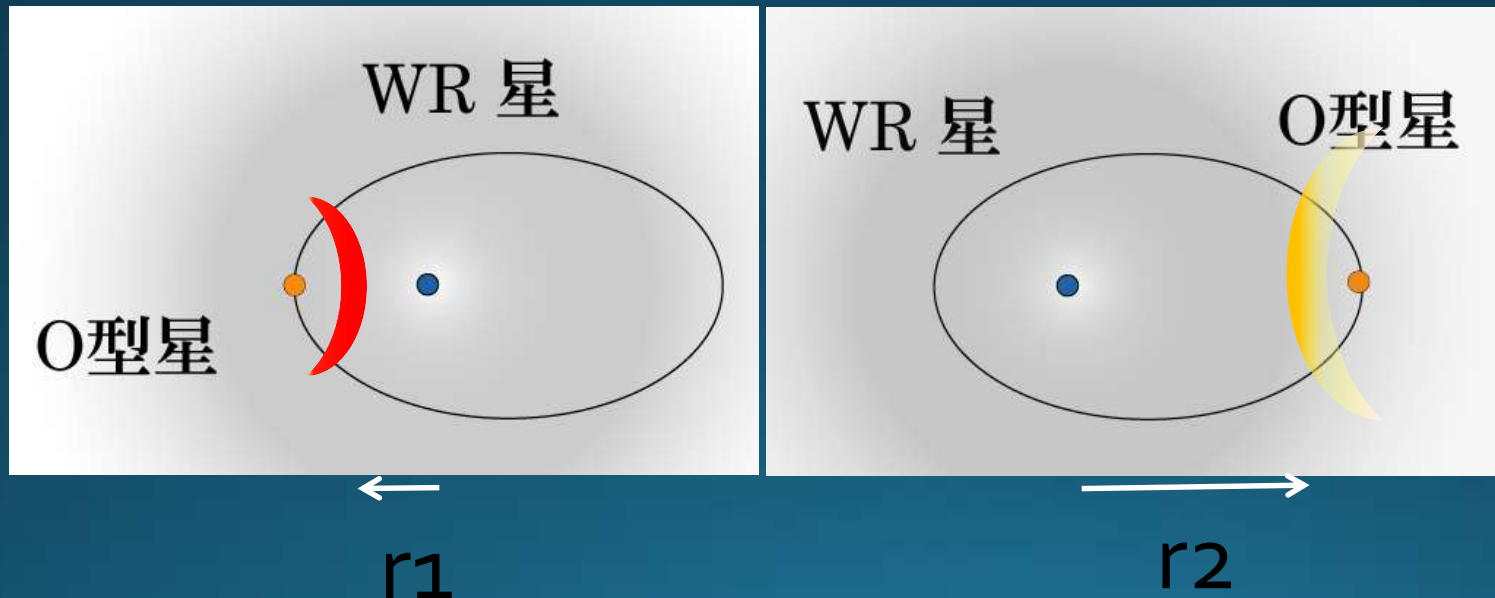
星風衝突領域から明るいX線を出す

X線輝線は物理素過程が簡単

Ne, Fe輝線も良く見える

連星間距離で異なるプラズマサンプル

連星なので質量が決めやすい

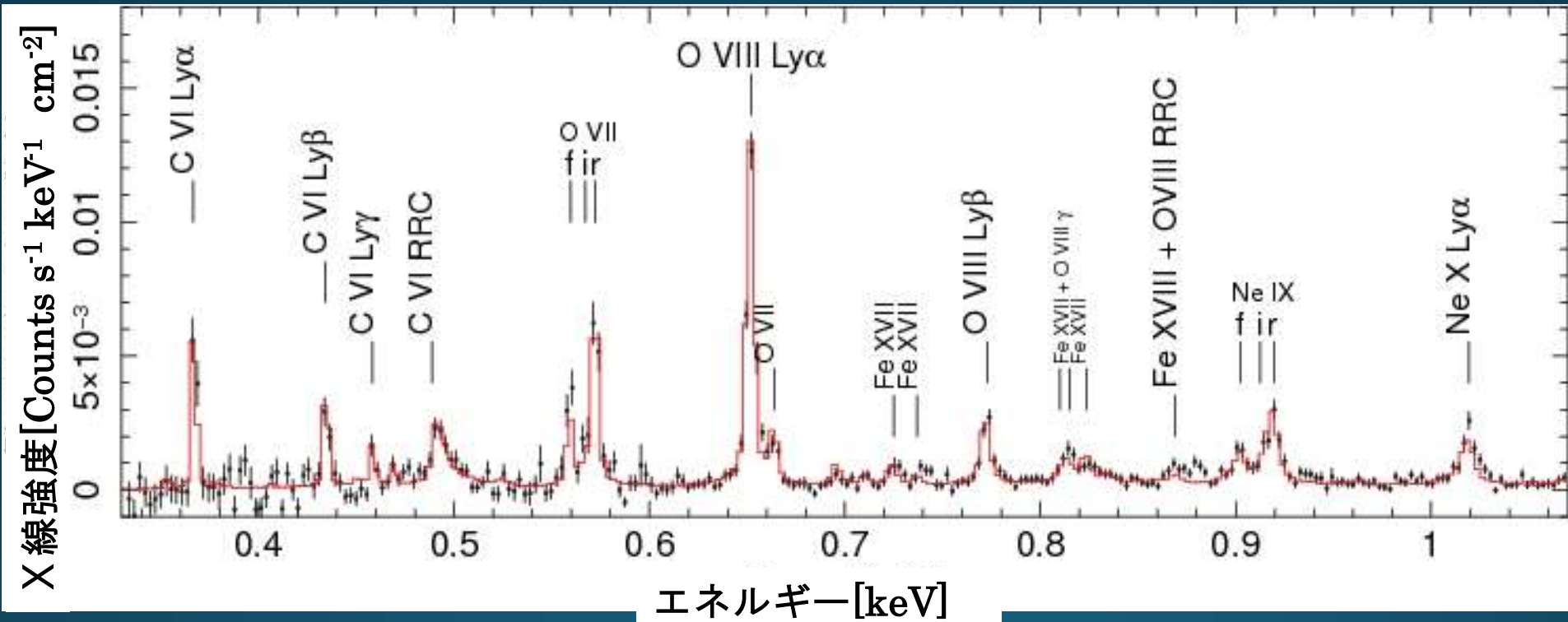


明るさと温度から星風の加速のされ方が分かる

→質量放出率、元素組成比の情報

元素組成比の測定 (Sugawara+o8)

XMMの回折格子を用いたWR48 (WC+O+O)のX線スペクトル

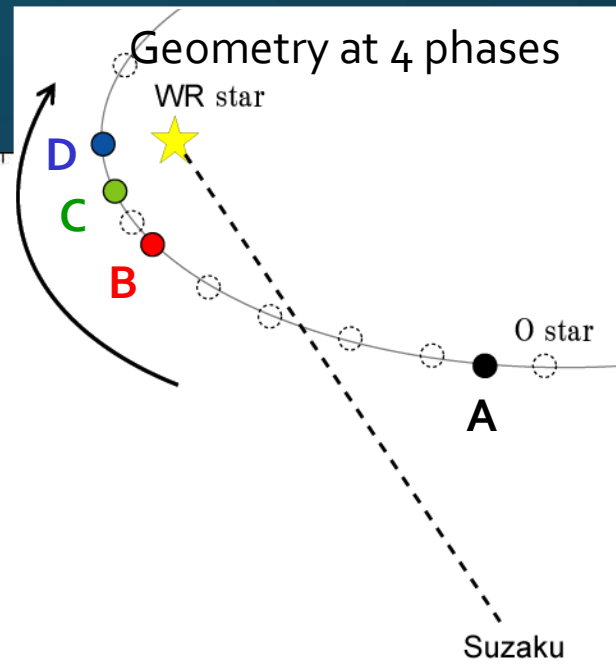
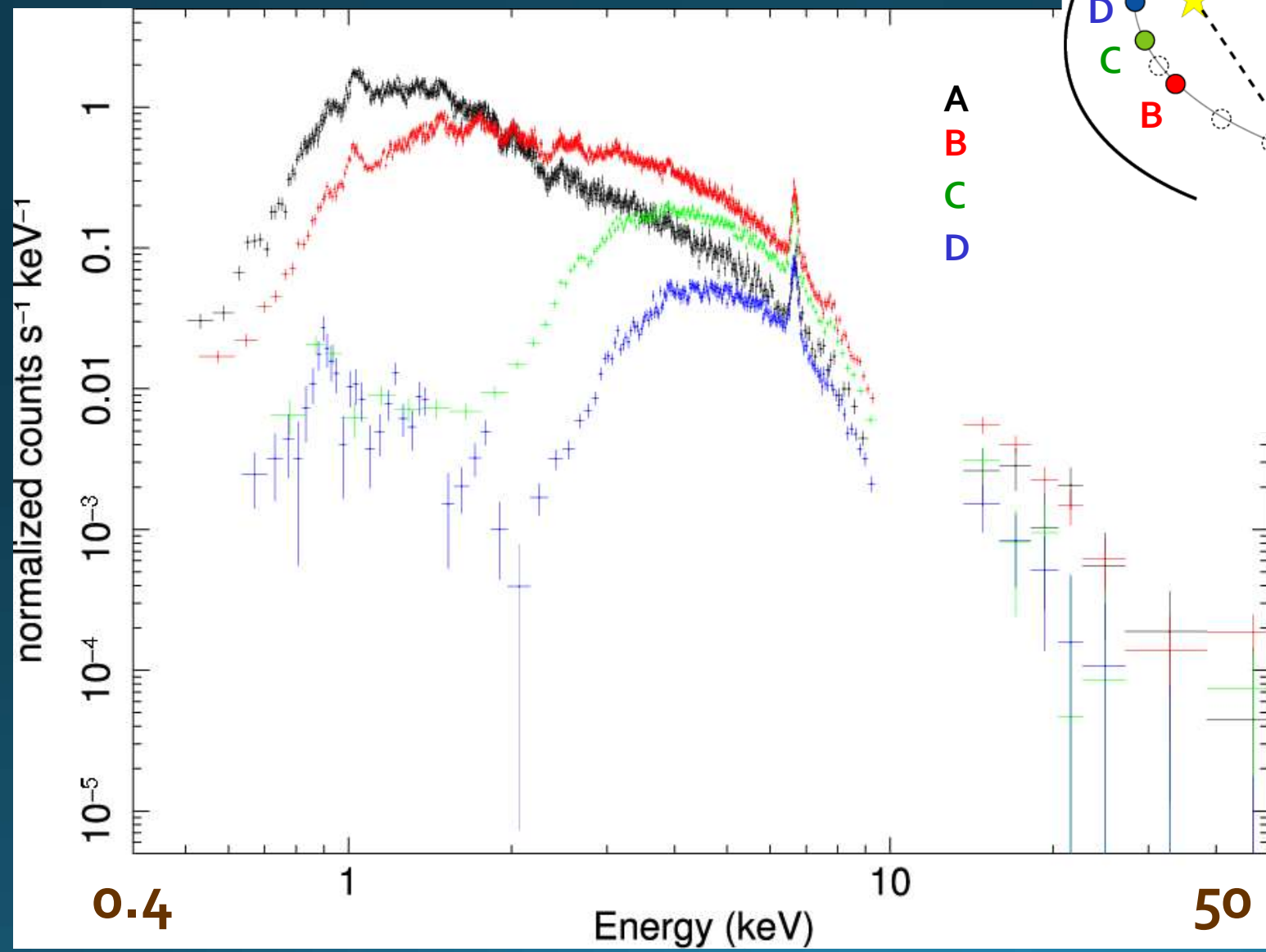


[C/Fe]が太陽のおよそ23倍など元素組成比が得られた
(3α 反応により生成されたモデル計算とconsistent)

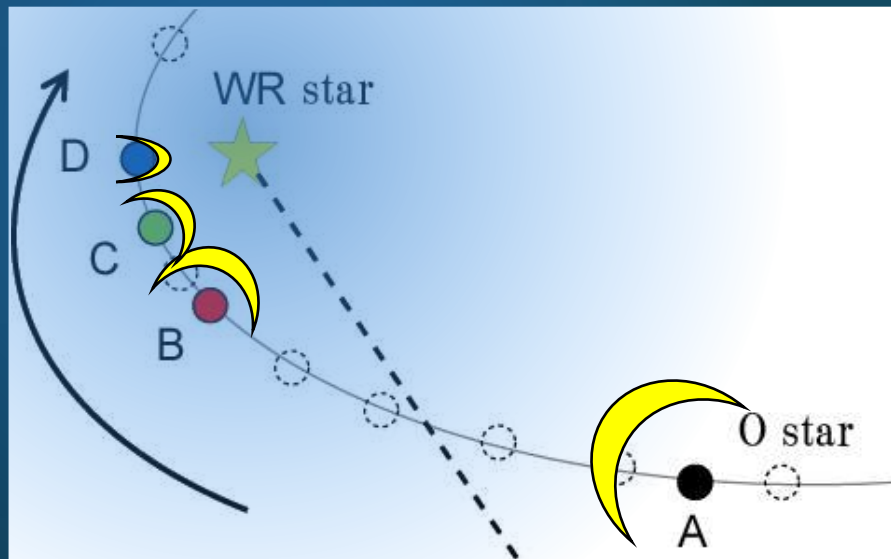
質量放出率の測定

Sugawara+ submitted to PASJ

■ SuzakuによるWR140(WC+O)モニタリング



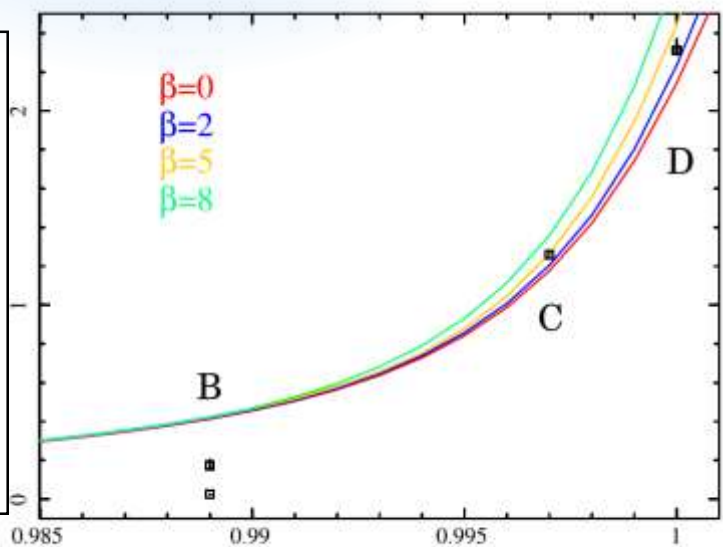
X線吸収量と質量放出率 (WR)



Observed value

$$N_{\text{He}} = \int_{\text{d}}^{\infty} \frac{\dot{M}}{4\pi \mu m_{\text{p}} v(r) r^2} ds$$

$N_{\text{He}} [10^{21} \text{cm}^{-2}]$



Orbital phase

WR星の質量放出率

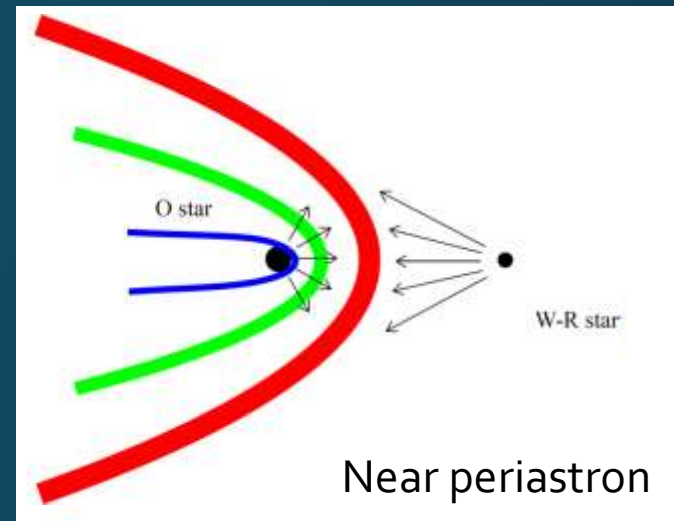
$$\rightarrow \dot{M}_{\text{WR}} \sim 1.4 \times 10^{-5} \text{ Ms/yr}$$

光度変動

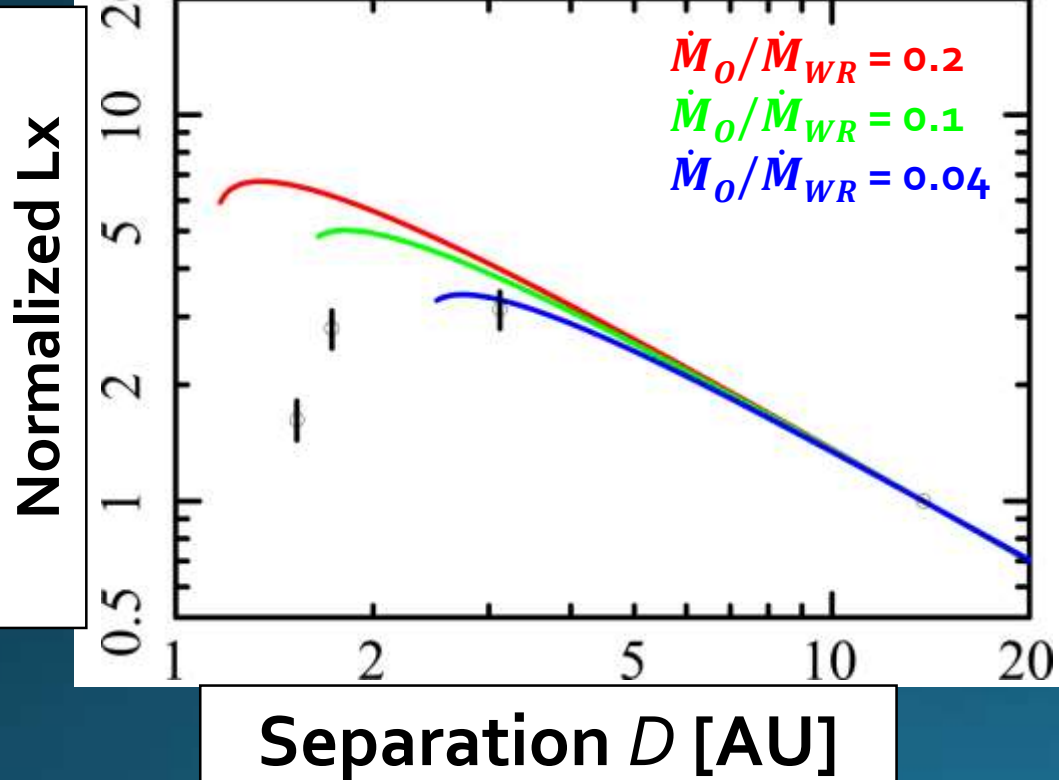
The simple theory of colliding wind

$$L_X \propto n_e \times n_i \times V$$

$$\propto D^{-1}$$



Near periastron



Beta velocity law

$$v(r) = v_\infty (1 - R_*/r)^\beta$$

Wind momentum flux ratio

$$A = \left((\dot{M}_{WR} v_{WR}(r)) / (\dot{M}_O v_O(r)) \right)^{1/2}$$

$$L_X \propto D^{-1} (1 + A) / A^4$$

(Stevens+92)

変動の一部はO型星の星風速度の低下で説明可。

結果、 \dot{M}_O / \dot{M}_{WR} が分かる

まとめ - 大質量星からのX線 -

X線分光+モニタリング（ターゲットは連星）

→ 元素組成比、質量放出率を制限

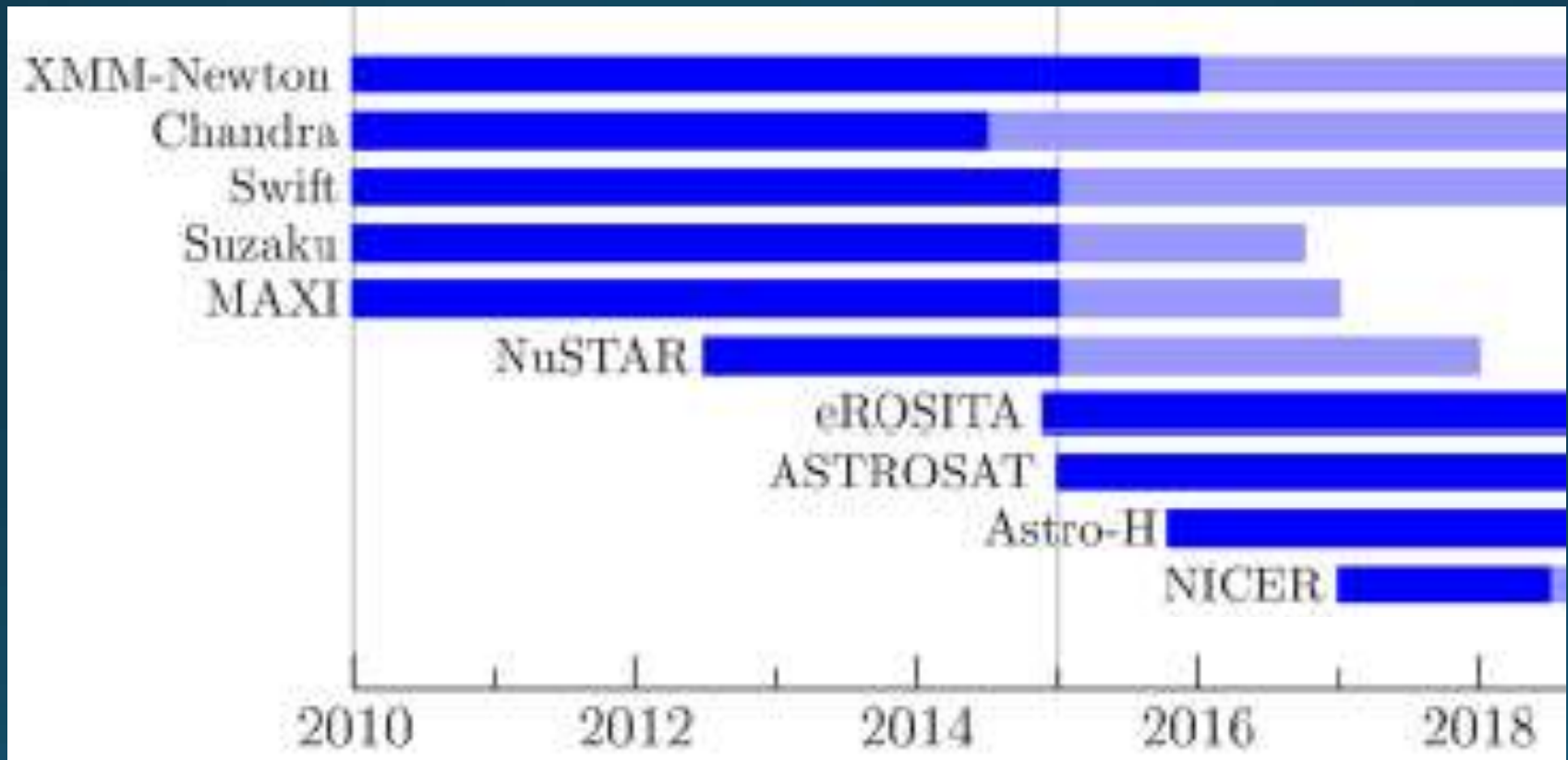
様々な質量、進化段階のサンプルがほしい

3. 次世代のX線観測

- Astro-H

今後について

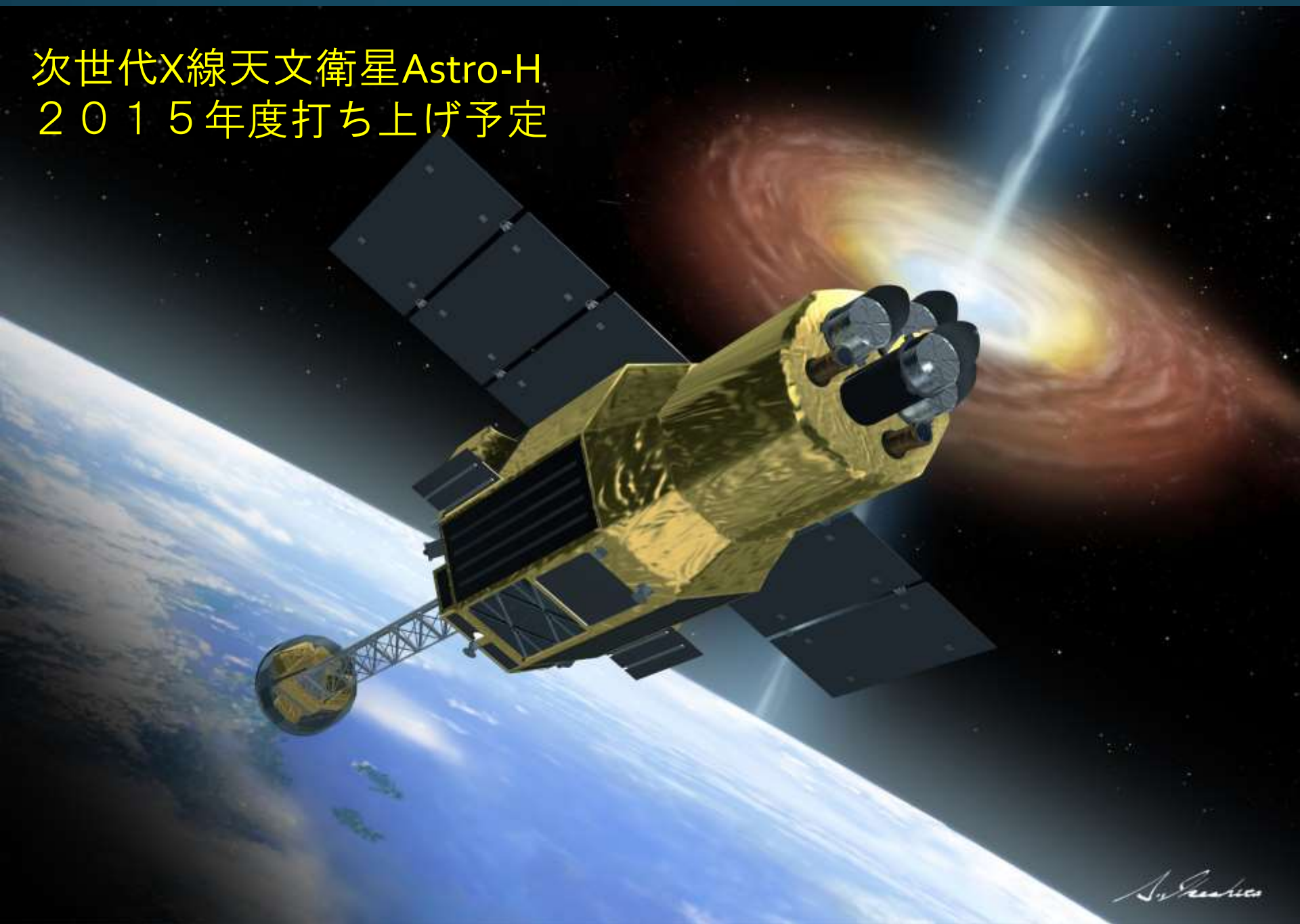
世界の動向



あと3年で、4機増える可能性あり

→今回はAstro-Hに注目

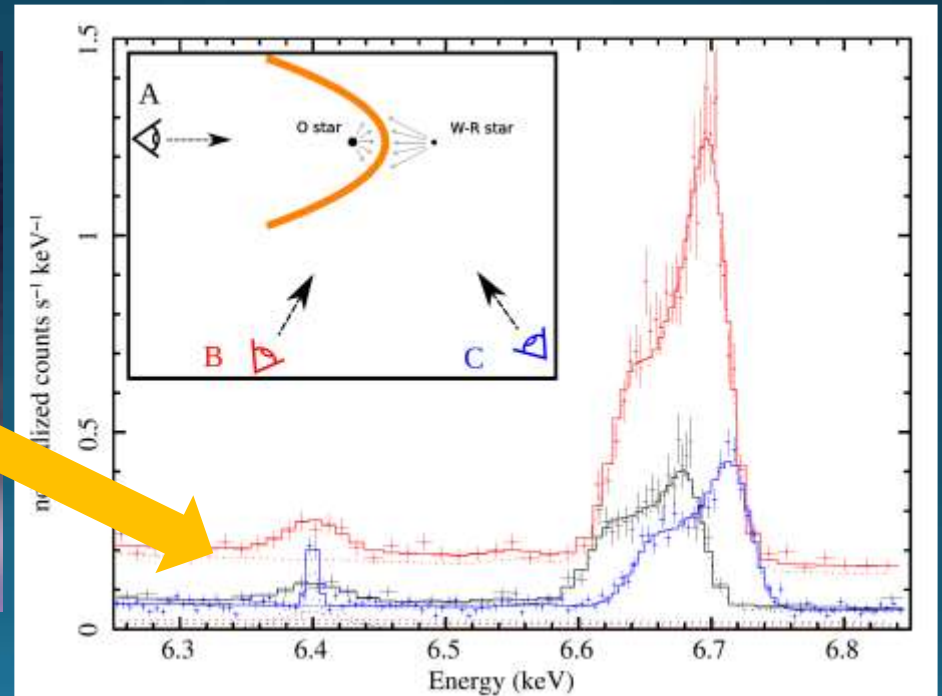
次世代X線天文衛星Astro-H
2015年度打ち上げ予定



By Yasuhiro

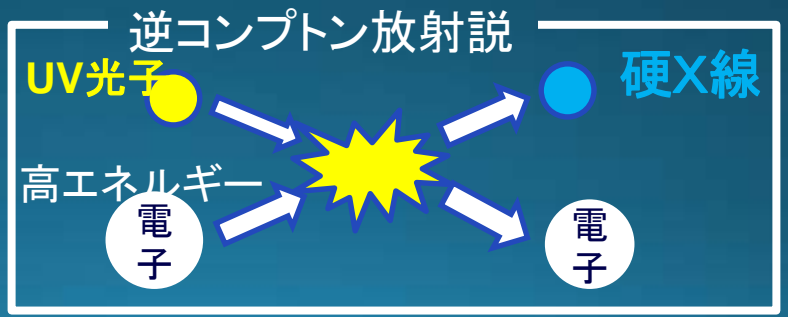
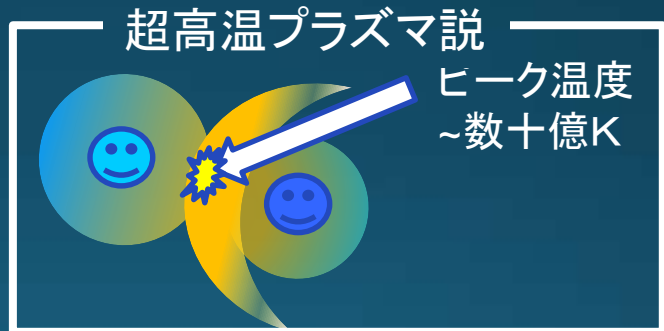
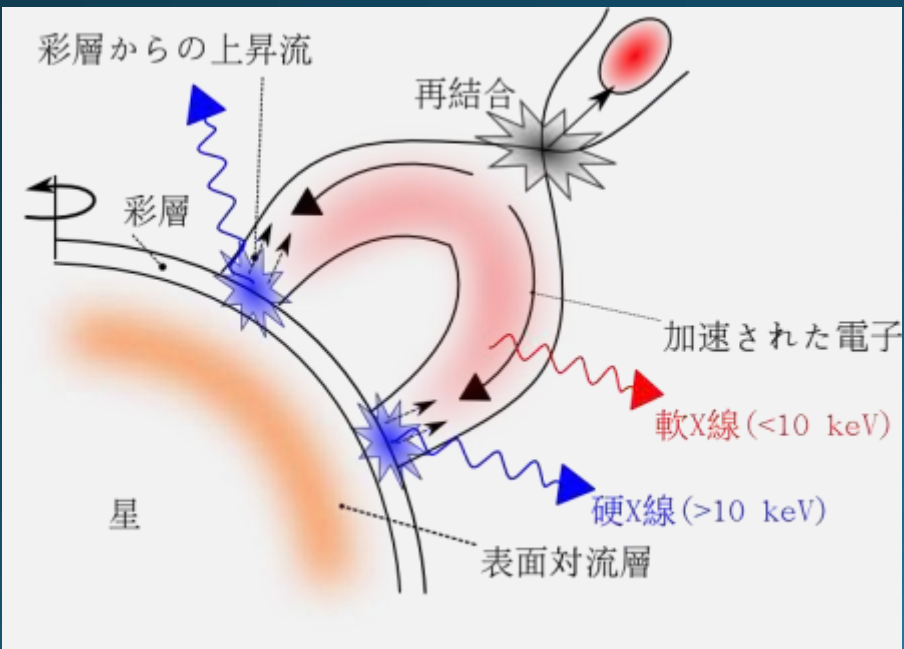
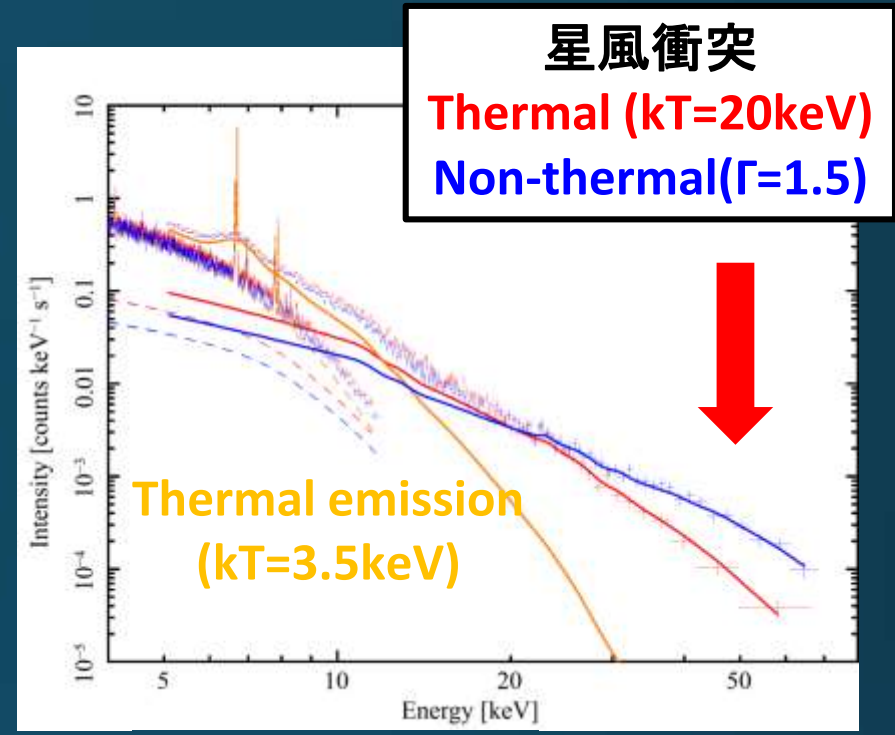
期待その1

- 超精密分光！
→ プラズマダイナミクスや微細な輝線変動
(簡単に星風測定が可能)



期待その2

- 高い質の硬X線スペクトル！
 - 星風衝突領域の粒子加速
 - フレアにおける粒子加速



最後に

- 近年、恒星のX線観測では、「モニタリング」手法が注目されている
- Astro-Hを用いた、新たな観測の切り口が期待される