

全天X線監視装置 MAXI/GSC を用いた恒星フレアの観測

中央大学 修士2年 山崎恭平

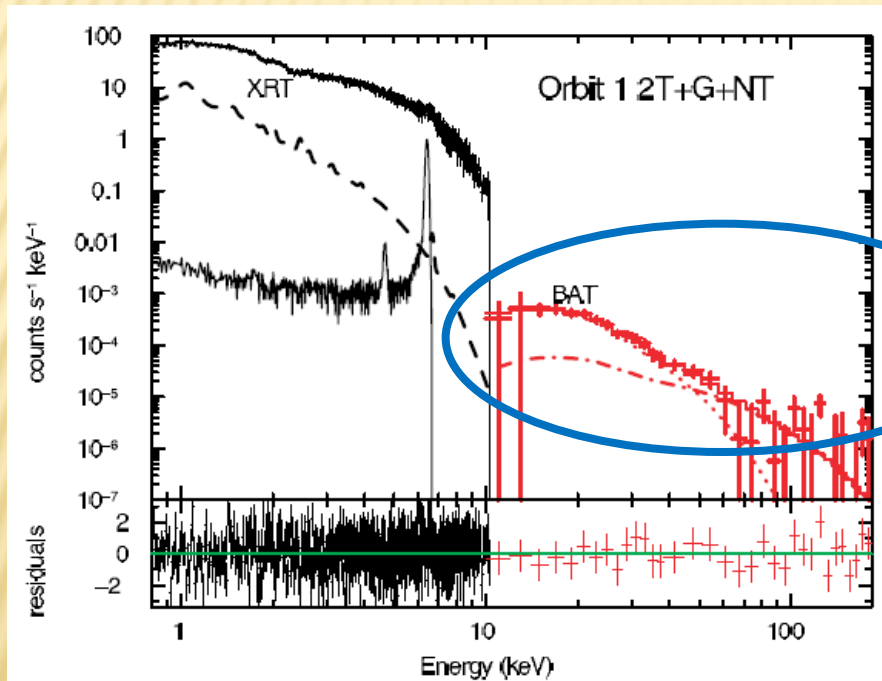
坪井陽子、松村和典（中央大学）、中平聡志、
松岡勝（理研）、ほかMAXIチーム

◇X線フレア観測について

様々なポインティング衛星、モニタリング衛星で、
 $L_x = 10^{28} \sim 10^{34} \text{ ergs s}^{-1}$ に渡るX線フレアが観測
されている。

例) II Peg (@Swift)

L_x (0.8-200 keV)
 $= 2 \times 10^{33} \text{ ergs s}^{-1}$



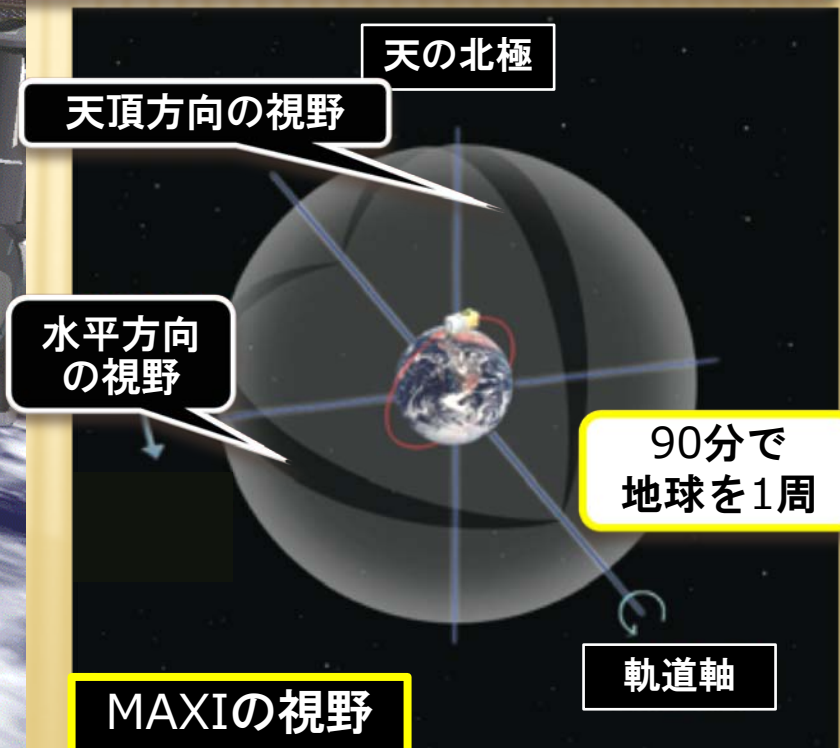
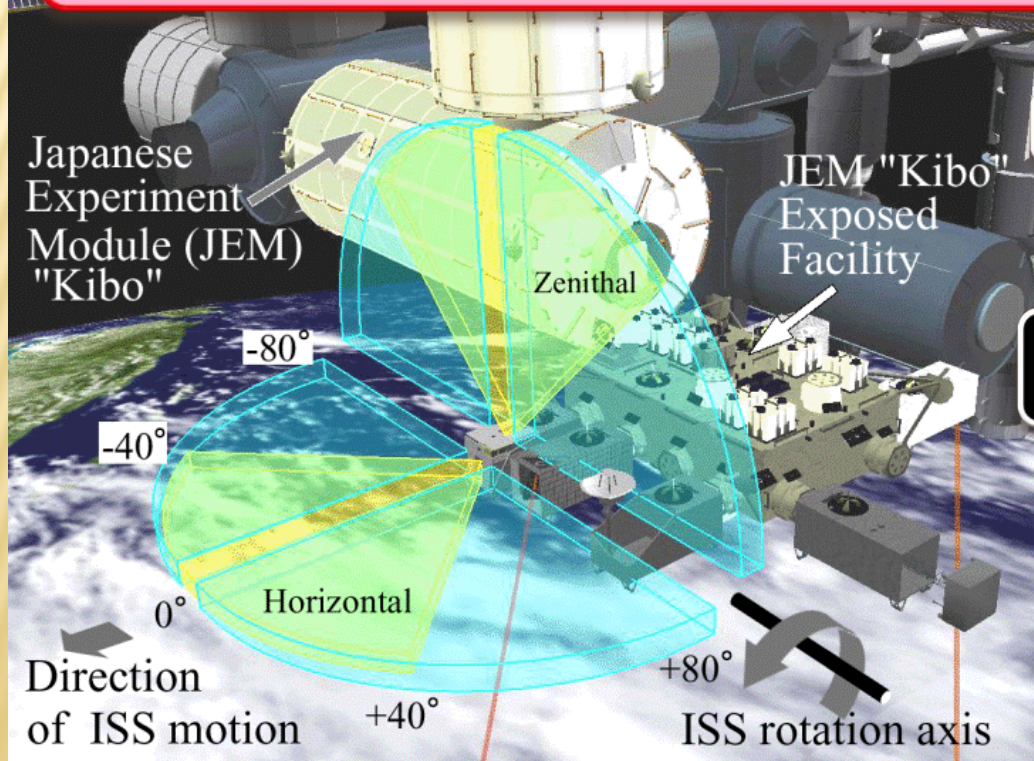
非熱的放射の
可能性あり？

このようなフレアは頻度が低く、観測例が少ないため
フレアの統一的な議論が未だになされていない。

◇ MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)

- ・ 国際宇宙ステーションに搭載されている最高感度のモニタリングX線観測機
- ・ 2009年8月稼働開始

90分で1枚の全天画像を作成し、X線天体を監視！



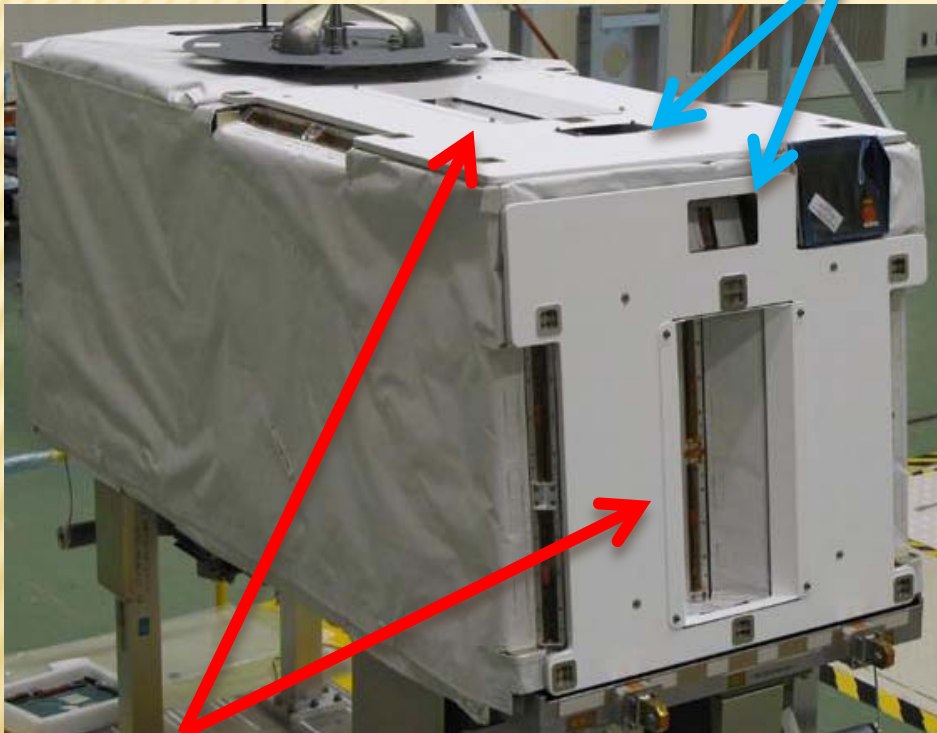
◇MAXIの検出器

Solid state Slit Camera(SSC)

- 検出器 : X線CCD(32枚)
- 検出エネルギー : 0.5-12keV
- エネルギー分解能 :
2.5%(@5.9keV)

従来の全天監視装置
より10倍高い感度で
観測が可能！

GSCのデータを用いた



Gas Slit Camera (GSC)

- 検出器 : 比例計数管(12台)
- 検出エネルギー : 2-30keV
- 有効面積 : 5350 cm²

◇MAXI/GSCの利点

ポインティング観測
観測時間：少

モニタリング観測
観測時間：多



巨大なフレアを含めて、恒星フレアの
統計的な議論ができる！

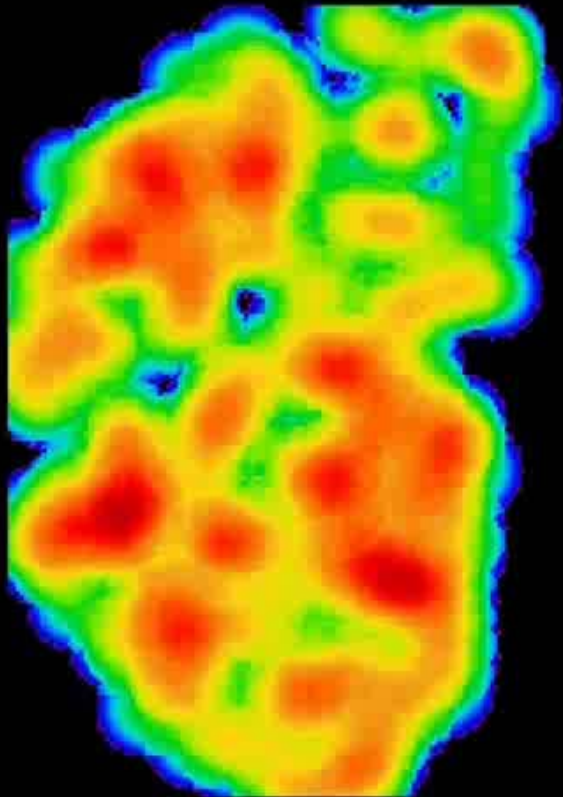
解析結果

～統計的議論～

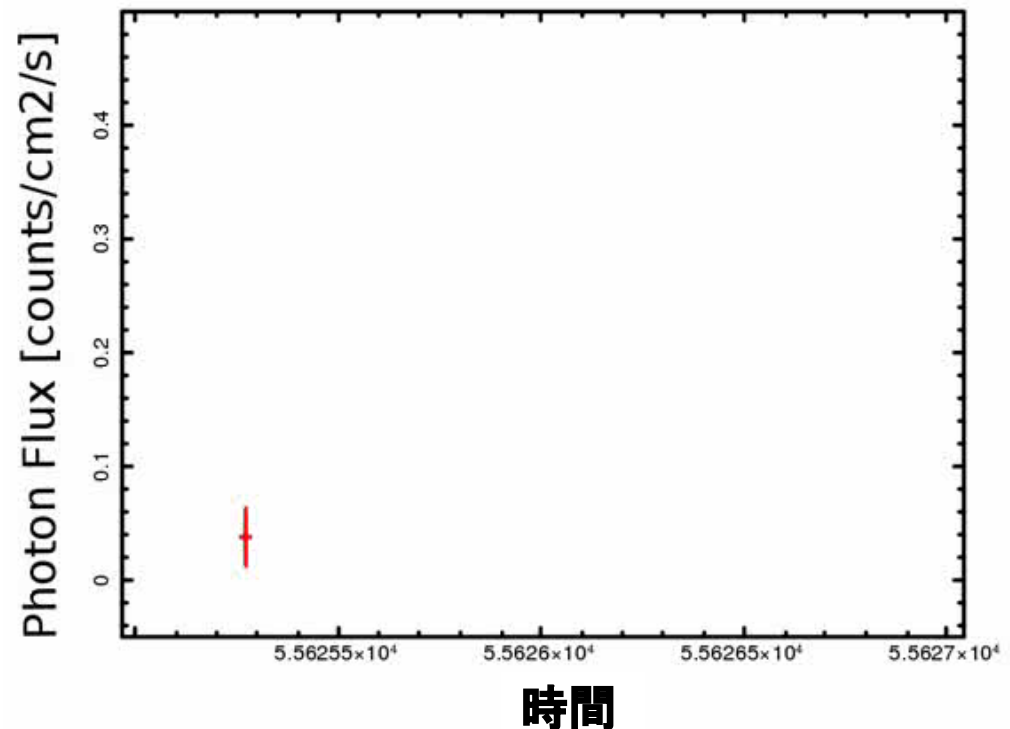
◇フレアの検出

MAXIにより、2年間で13の恒星から計23個もの大きいフレア ($L_x > 10^{31}$ erg/s) の検出に成功！

◎例：HR1099 (連星) 1周回 (90分) ごとのムービー

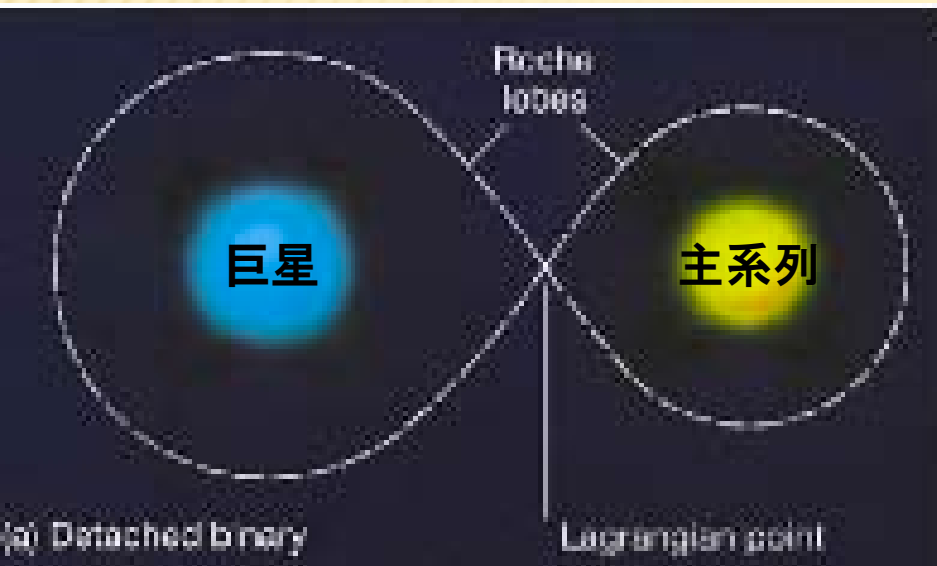


(帯域：2-10 keV)



◇検出した天体の種類

・ RSCVn型連星



・ Algol型連星



・ dMe型星

CaIIなどの輝線成分を持つM型の矮星。彩層活動がとても活発で、表面磁場も強い（数kG）。

・ YSOs(若い恒星状天体)

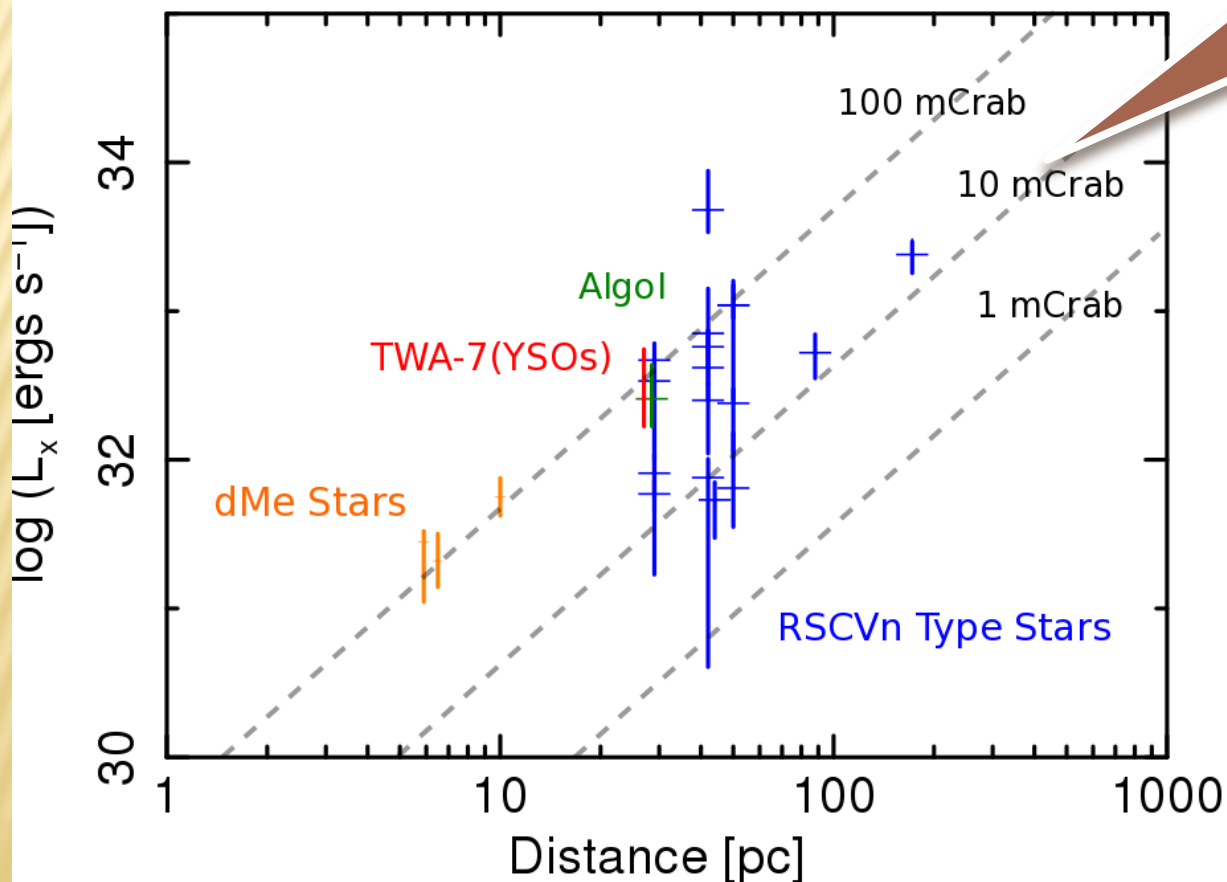
太陽のような主系列星になる前の段階の星。(CTTS, WTTS)

◇検出した天体の分布

多くが100 pc以内に分布している

フレアの検出
限界はおおよそ
10mCrabである

(帯域：2-20 keV)



X線光度
(ergs s^{-1})

$10^{31} \sim 10^{33}$

最大級のフレア
を検出している

◇天体の活動性

100 pc以内の active binary = 256天体

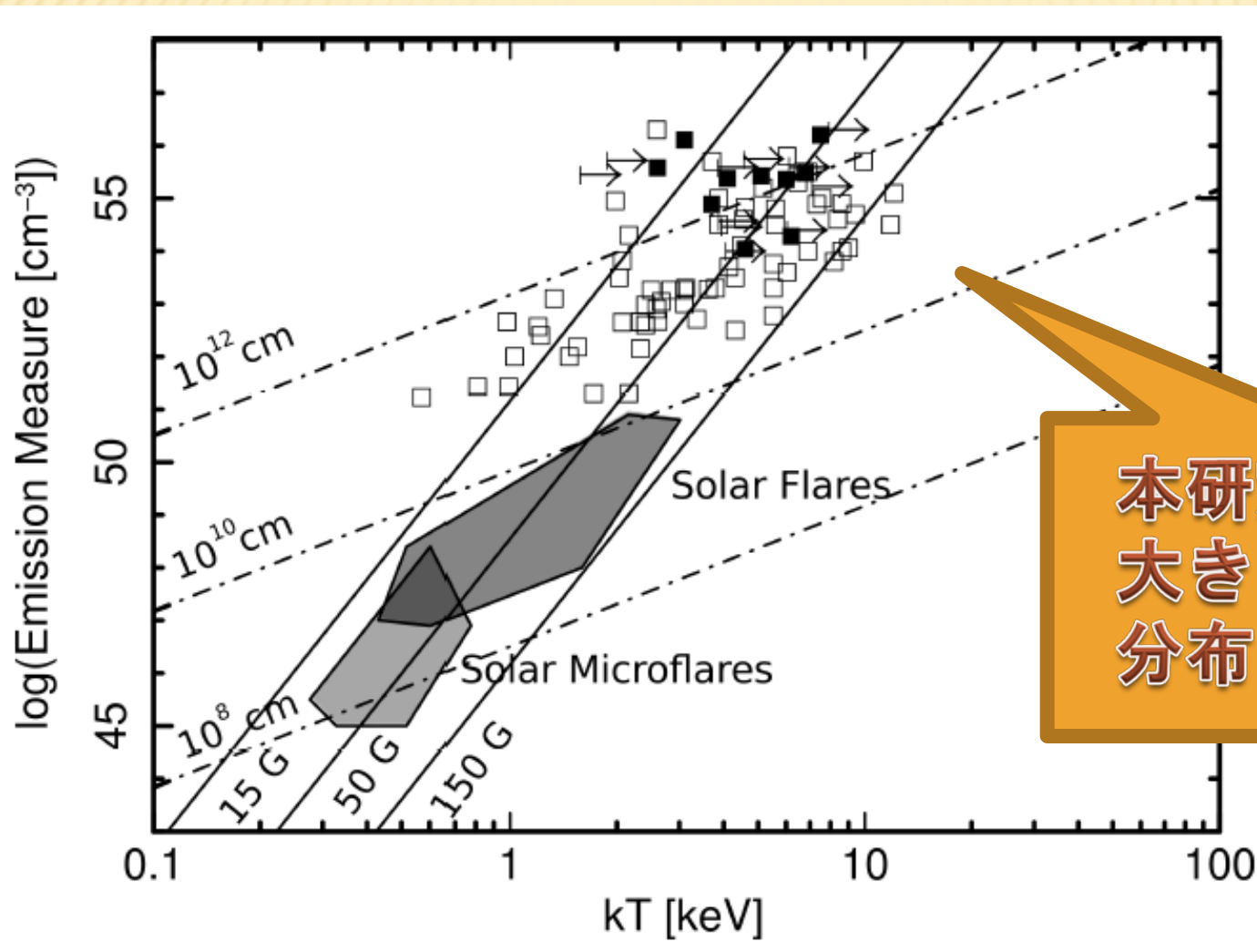
MAXIのモニタリングで検出したactive binary = 10天体



MAXIで検出されるようなフレアを起こす
天体はごく一部であることがわかった

太陽のようなG型の主系列星は10pc以内に
15天体あるが、いずれも検出されていない

◇ 温度 vs. プラズマ規模

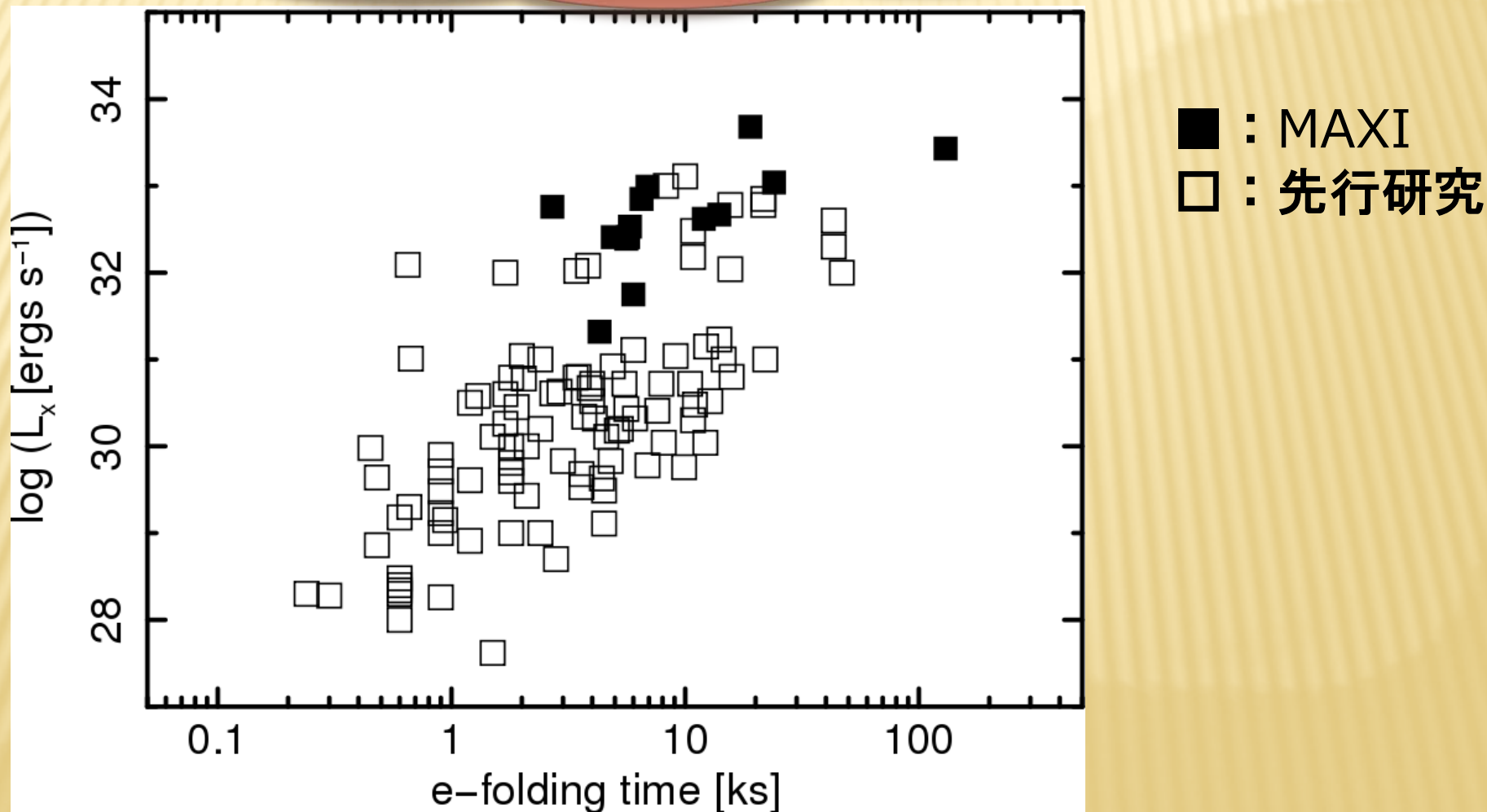


■ : MAXI
□ : 先行研究

本研究により、
大きいフレアの
分布を示せた

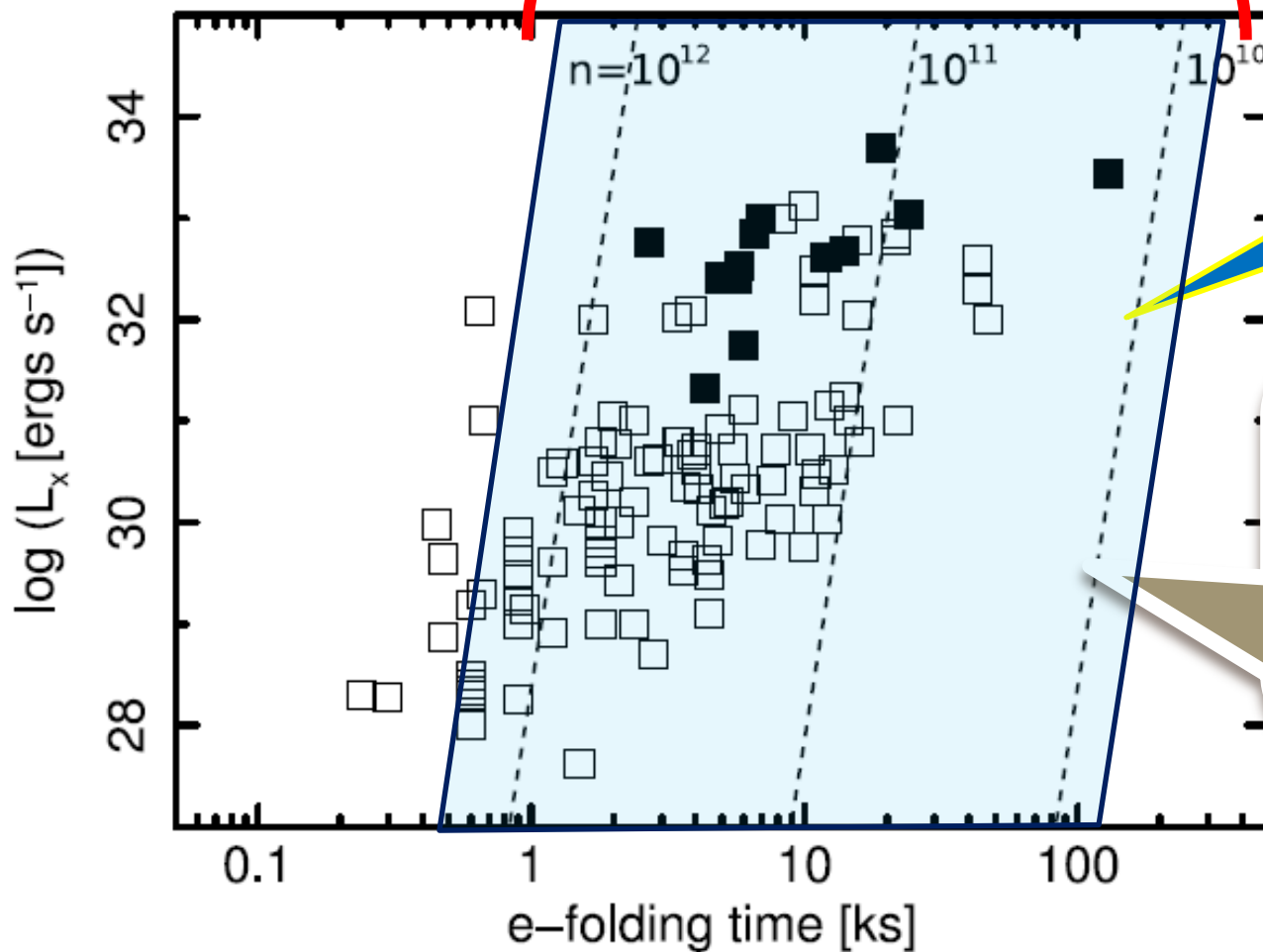
◇減衰時間 vs. フレアの明るさ

L_x が大きい減衰時間も長い？



◇フレアの減衰は何から？

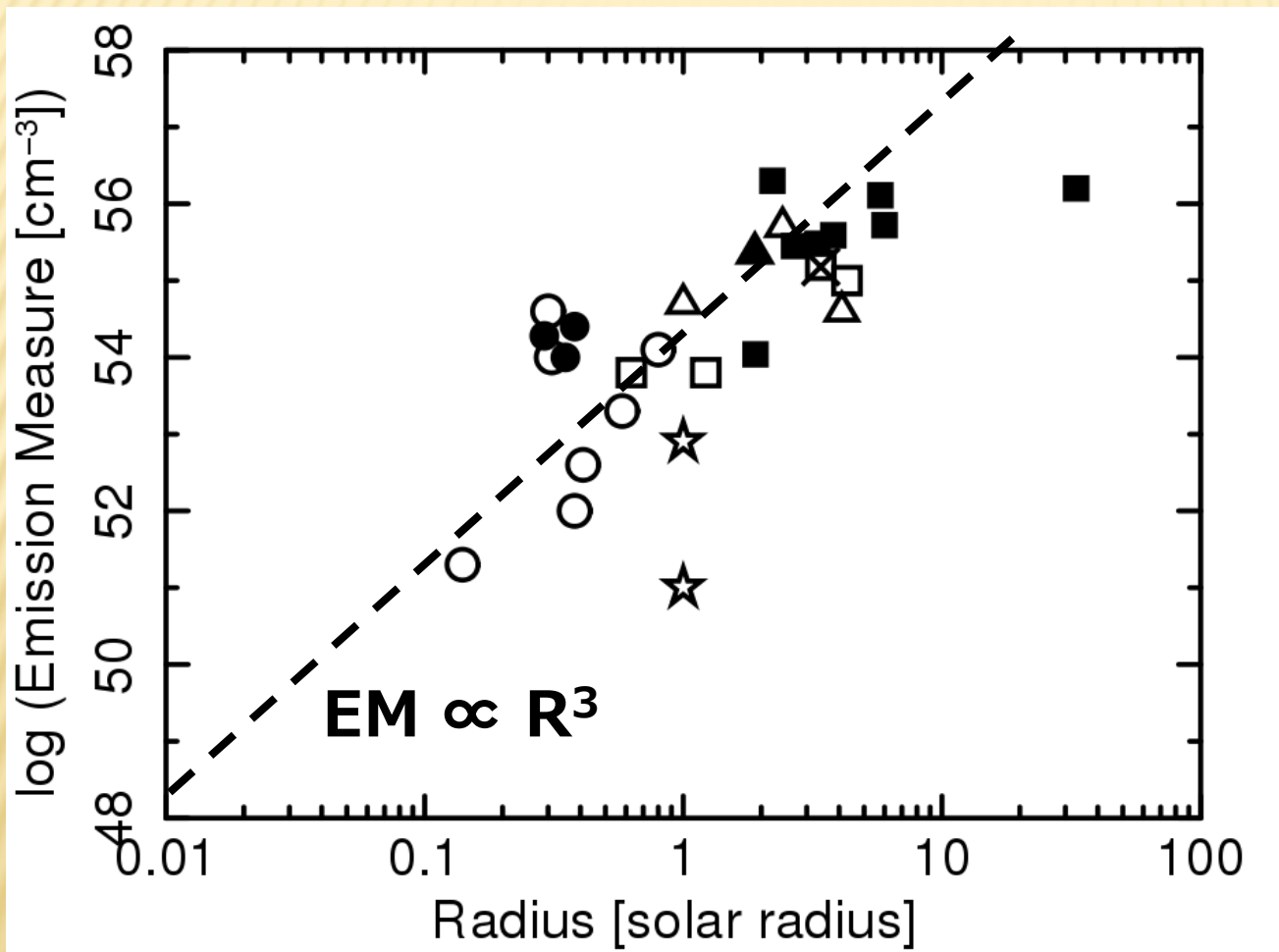
太陽&恒星フレアの電子密度 [cm^{-3}]



放射冷却

減衰時間は、
放射冷却だけ
で説明が可能

◇星半径 vs. EM

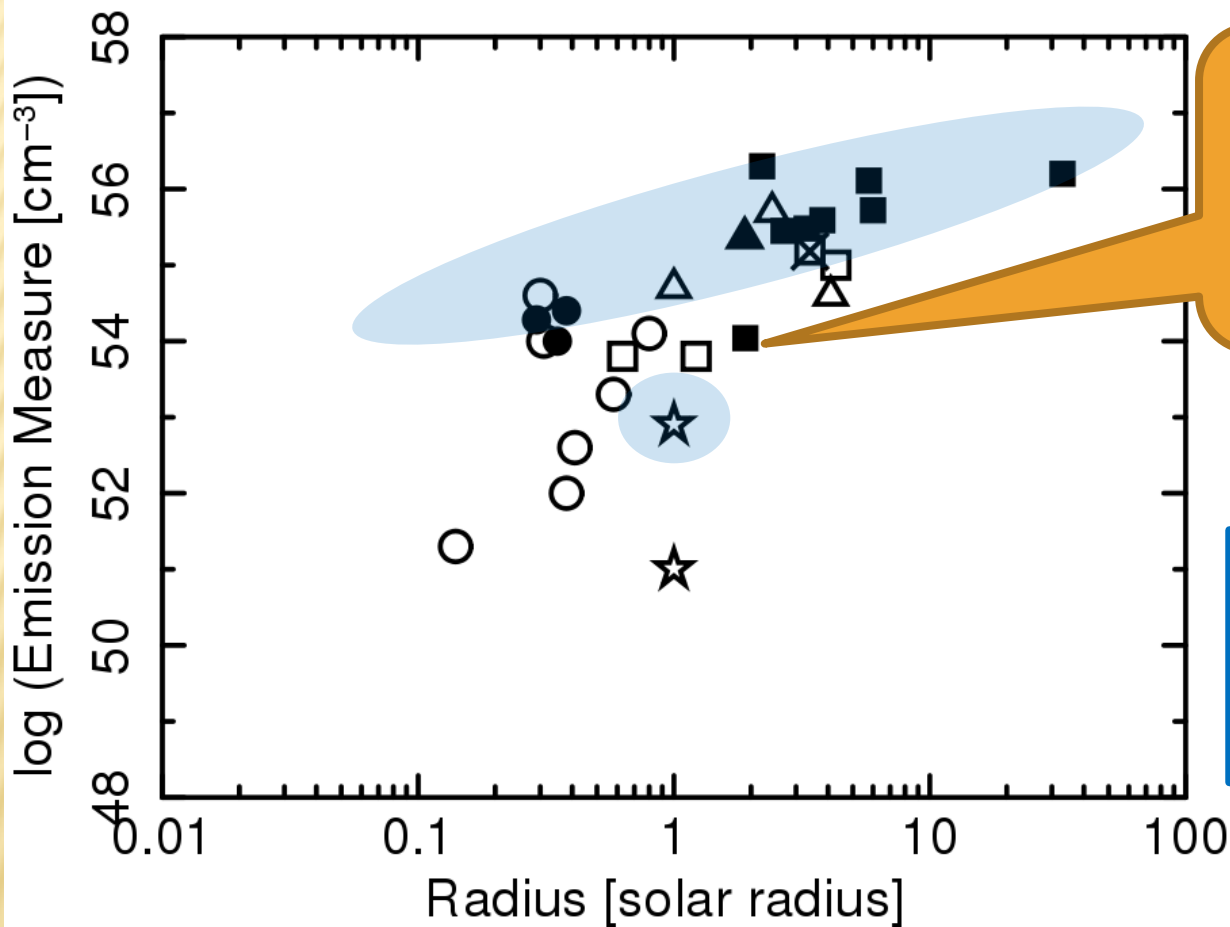


- : RSCVn-MAXI
- : RSCVn-ref
- × : Algol-MAXI
- : dMe-MAXI
- : dMe-ref
- ▲ : YSOs-MAXI
- △ : YSOs-ref
- ☆ : Solar type

EMが星の体積に比例している？



◇星半径 vs. EM —つづき—



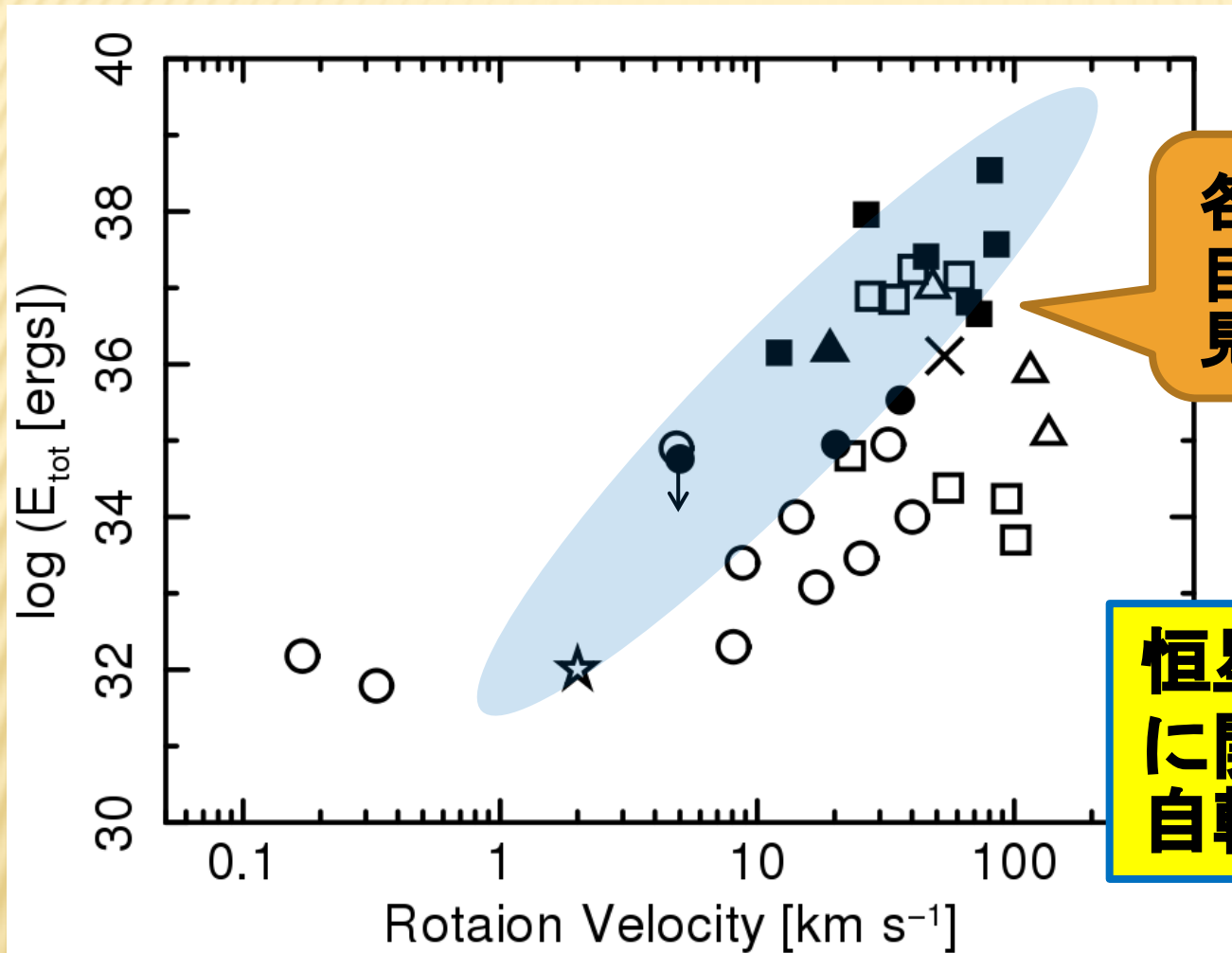
active star と
G型主系列星には
エクセスがある。



G型主系列星は
X線フレアに関して
active ではない

各天体カテゴリの最大フレアに注目すると、
全ての恒星に統一的に相関があるとはいえない

◇ 自転速度 vs. E_{tot} ーつづきー



各天体カテゴリ毎に
目立ったエクセスは
見られない



恒星フレアに統一的
に関わっているのは
自転速度ではないか

◇まとめ

- ・ **大きい規模のフレアのサンプルを増やす事ができた。**

- ・ フレアの明るさ減衰時間の関係をバイアスの少ない観測により示した。

⇒ **今回のフレアの減衰は放射冷却で説明ができる。**

- ・ 統一的に、プラズマの規模が体積に相関があるとはいえない。

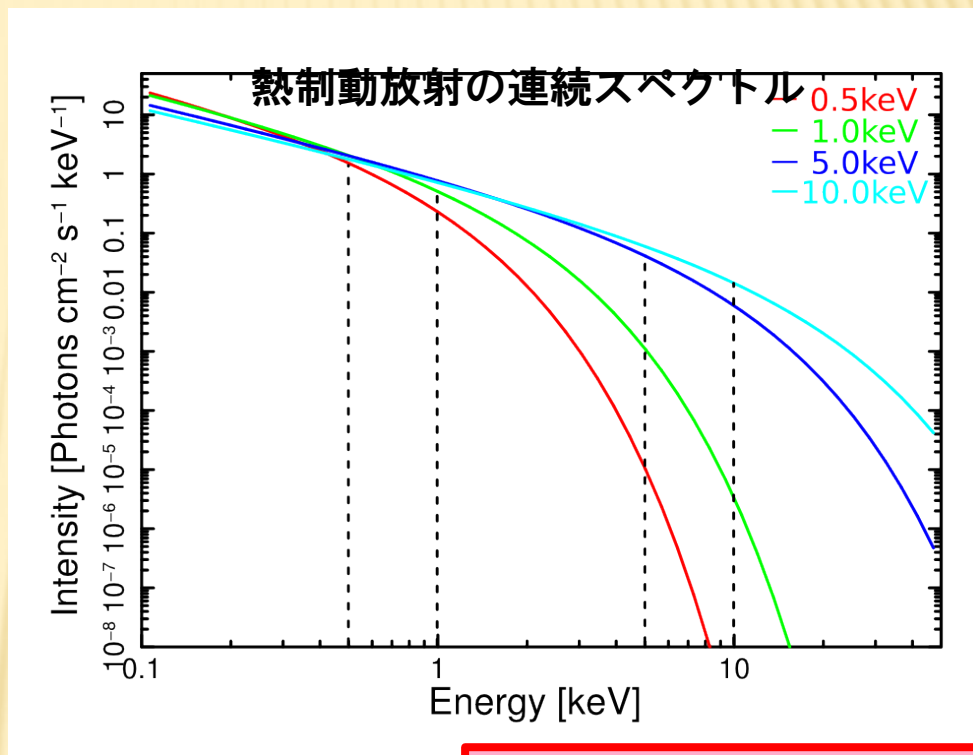
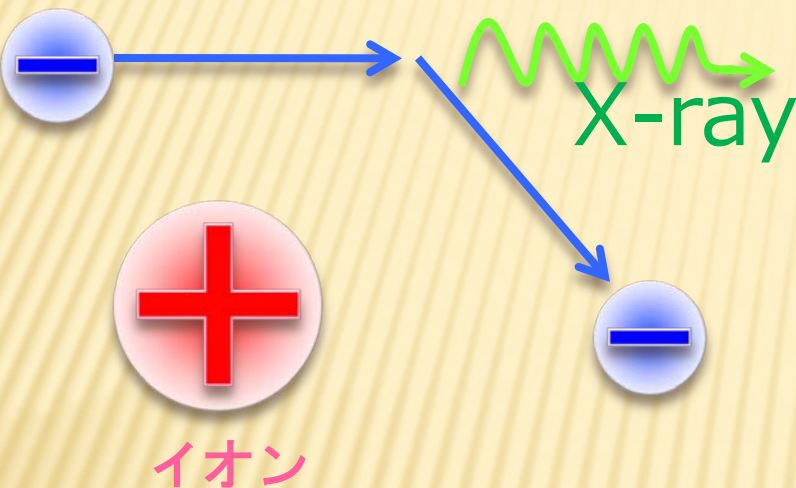
⇒ **G型主系列星の活動性が低い**

- ・ フレアの全放射エネルギーに寄与しているのは自転速度であると思われる。

⇒ **大規模なフレアを起こす星は総じて自転速度が速い**

熱的プラズマからのX線 (熱制動放射)

自由電子



$$h\nu = kT \text{で折れ曲がる}$$

- ◆ プラズマ状態では電子とイオンに分かれており、電子の運動の向きが変えられると、運動量の差分に対応したX線が放射される
- ◆ プラズマの温度に対応した連続スペクトルが放射される

◇星半径の求め方

星の光度は、表面温度と表面積で決まり、

$$L = 4\pi R^2\sigma T^4$$

という計算式で与えられる。Lは光度（ワット）で、Rは半径（メートル）、 σ はステファン・ボルツマン定数（ $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ）、Tは星の表面温度（ケルビン）。

光度と温度を観測的に求めて、半径を導く。
また太陽と比較を計算すると、

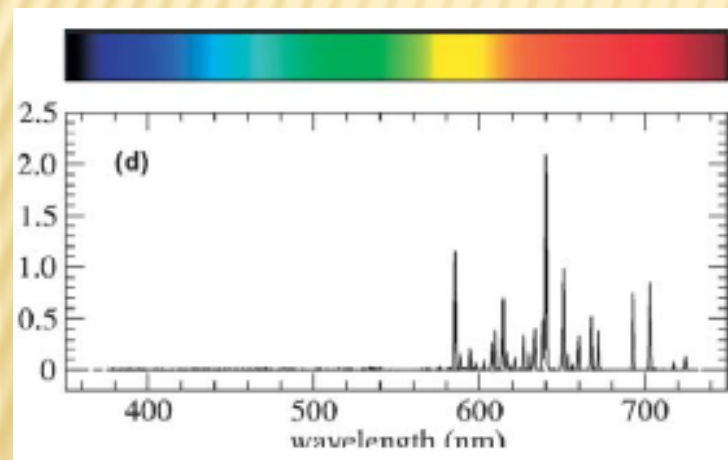
$$L/L_s = (4\pi R^2\sigma T^4)/(4\pi R_s^2\sigma T_s^4) = (R/R_s)^2(T/T_s)^4$$

となり、 R/R_s について解くと、以下の式を得る。

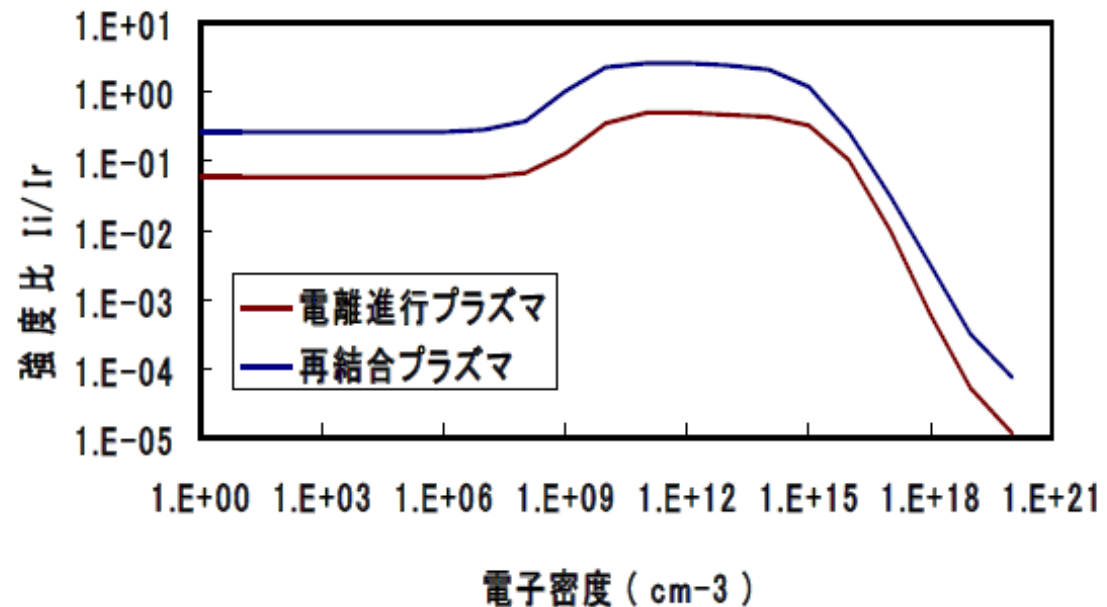
$$R/R_s = (T_s/T)^2(L/L_s)^{1/2}$$

◇電子密度

◎励起状態密度を入力として、衝突輻射モデルを解くことによって、（電離度が同一の）輝線の強度比から、電子温度・電子密度を推定することができる。



スペクトル線の強度比の電子密度依存性 ($T_e=200\text{eV}$)



●放射冷却の導出●

$$T_{\text{rad}} = 3nkT/\epsilon$$

($k=1.38 \times 10^{-16}$, ϵ : Emissivity= $3 \times 10^{-27} \times T^{1/2} \times n^2$)

$$T_{\text{rad}} = 1.38 \times 10^{11} \times n^{-1} \times T^{1/2} \quad \dots \textcircled{1}$$

kT vs. EM の plot より、

$$T = 10^{((\log EM) + 10)/8} \quad \dots \textcircled{2}$$

Emissivity = $L_x/V = L_x \times n^2/EM$ であるので、

$$L_x = 3 \times 10^{-27} \times T^{1/2} \times EM$$
$$EM = 3.3 \times 10^{26} \times L_x \times T^{-1/2} \quad \dots \textcircled{3}$$

②と③より、

$$8 \log T = \log(3.3 \times 10^{26}) + \log L_x + \log T^{-1/2} + 10$$
$$17/2 \log T = 36.52 + \log L_x$$
$$\log T = (73 + 2 \log L_x)/17$$
$$T = 10^{(73 + 2 \log L_x)/17} \quad \dots \textcircled{4}$$

①に④を代入する

$$T_{\text{rad}} = 1.38 \times 10^{11} \times n^{-1} \times 10^{(73 + 2 \log L_x)/34}$$
$$\log T_{\text{rad}} = 11.14 + 2.15 - \log n + 1/17 \log L_x$$
$$\therefore \log L_x = 17 \log T_{\text{rad}} + 17(\log n - 13.3)$$

●伝導冷却の導出●

$$T_{\text{cond}} = 3nkT/(\kappa T^{7/2}/L^2)$$
$$(k=1.38 \times 10^{-16}, L=(400V/n)^{1/3}, \epsilon=3 \times 10^{-27} \times T^{1/2} \times n^2)$$
$$T_{\text{cond}} = 3nkT/(\kappa T^{7/2}/(400V/n)^2)$$

V = Lx/εであるので、

$$T_{\text{cond}} = 3nkT/(\kappa T^{7/2} \times (127Lx/\epsilon)^{-2/3})$$
$$= 3nk\kappa^{-1}T^{-5/2}(127Lx/\epsilon)^{2/3}$$
$$= 4.14 \times 10^{-16} \times \kappa^{-1} \times n \times T^{-5/2} \times (127Lx/\epsilon)^{2/3}$$
$$= 4.14 \times 10^{-16} \times \kappa^{-1} \times n \times T^{-5/2} \times Lx^{2/3} \times T^{-1/3} \times 1.2 \times 10^{19} \times n^{-4/3}$$
$$= 5 \times 10^3 \times \kappa^{-1} \times n^{-1/3} \times T^{-17/6} \times Lx^{2/3} \quad \dots \textcircled{1}$$

放射冷却と同様に②、③式より、

$$T = 10^{(73+2\log Lx)/17} \quad \dots \textcircled{4}$$

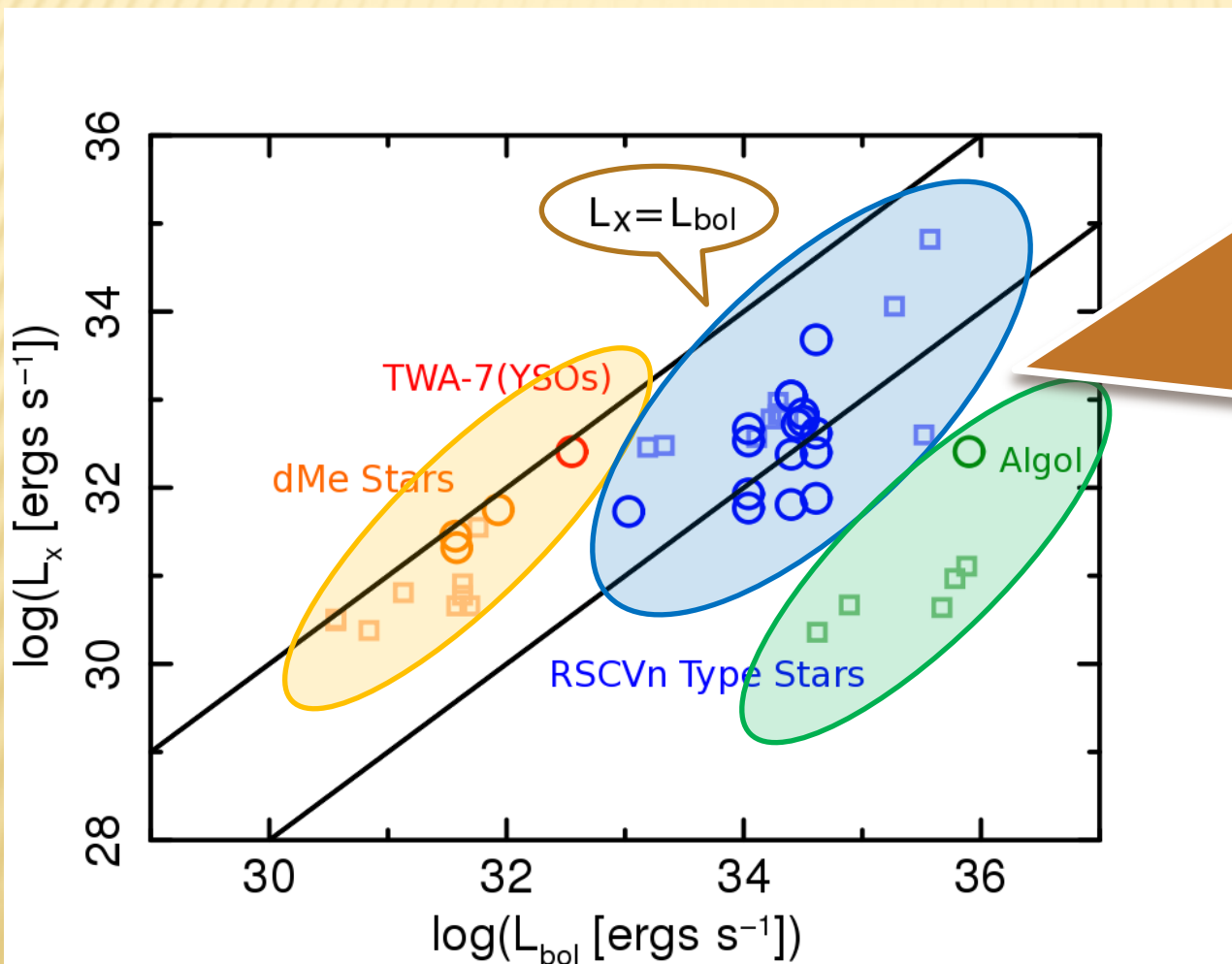
①に④を代入する

$$T_{\text{cond}} = 5 \times 10^3 \times \kappa^{-1} \times n^{-1/3} \times 10^{-(73+2\log Lx)/6} \times Lx^{2/3}$$
$$\log T_{\text{cond}} = 3.7 - \log \kappa + \log n^{-1/3} - (73+2\log Lx)/6 + \log Lx^{2/3}$$
$$= -8.47 - \log \kappa - 1/3 \log n - 1/3 \log Lx + 2/3 \log Lx$$
$$\log T_{\text{cond}} + 2.42 + 1/3 \log n + \log \kappa = 1/3 \log Lx$$

$$\therefore \log Lx = 3 \log T_{\text{cond}} + (3 \log \kappa + \log n + 25.4)$$

◎ L_{bol} VS. L_x

○ : MAXI detect □ : 先行研究



フレアの明るさは種類によらないが、 L_{bol} は種類によって違いがある事がわかった。