

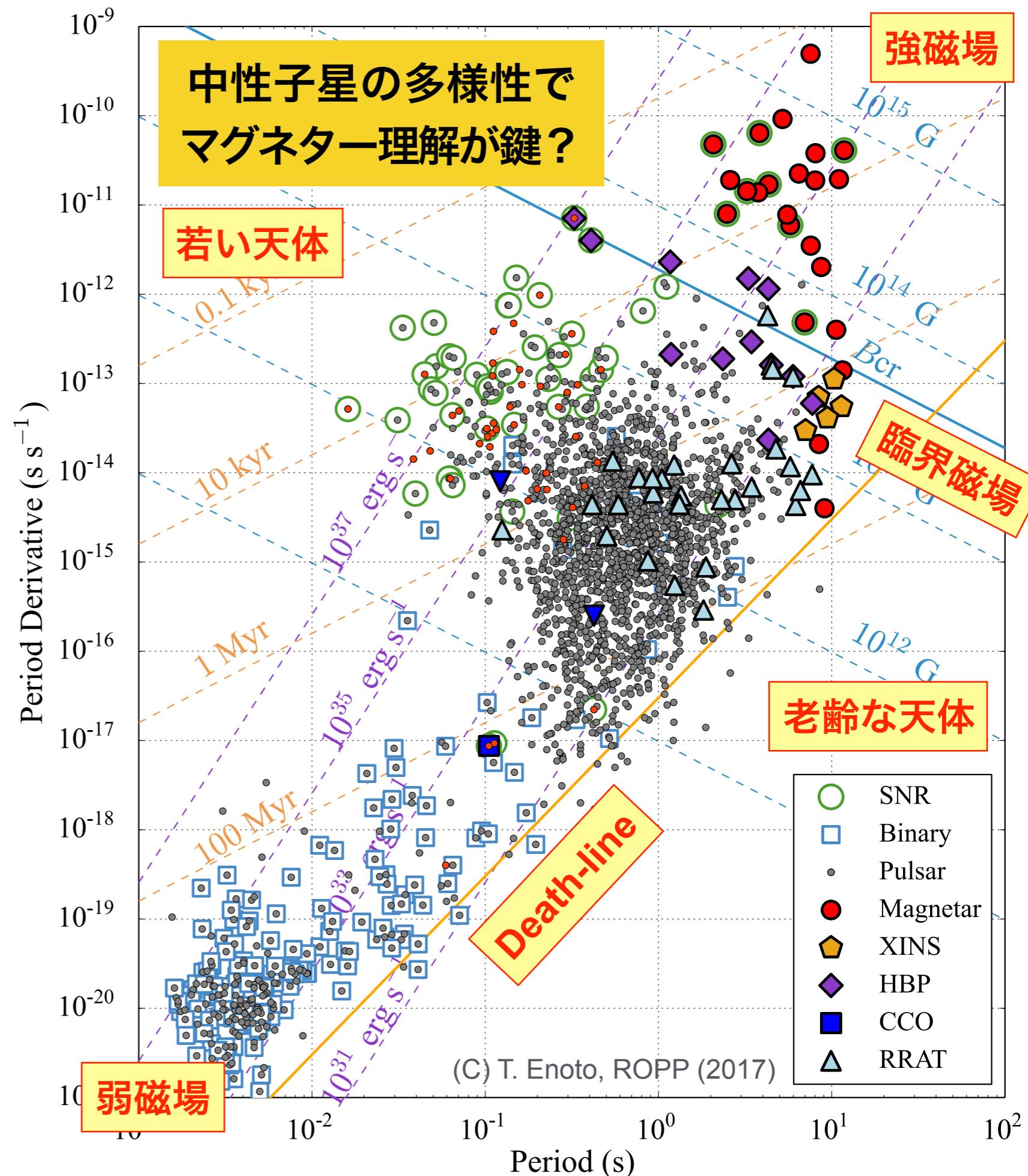
# マグネターからの Sub-MeV ガンマ線放射

Teruaki Enoto  
榎戸 輝揚

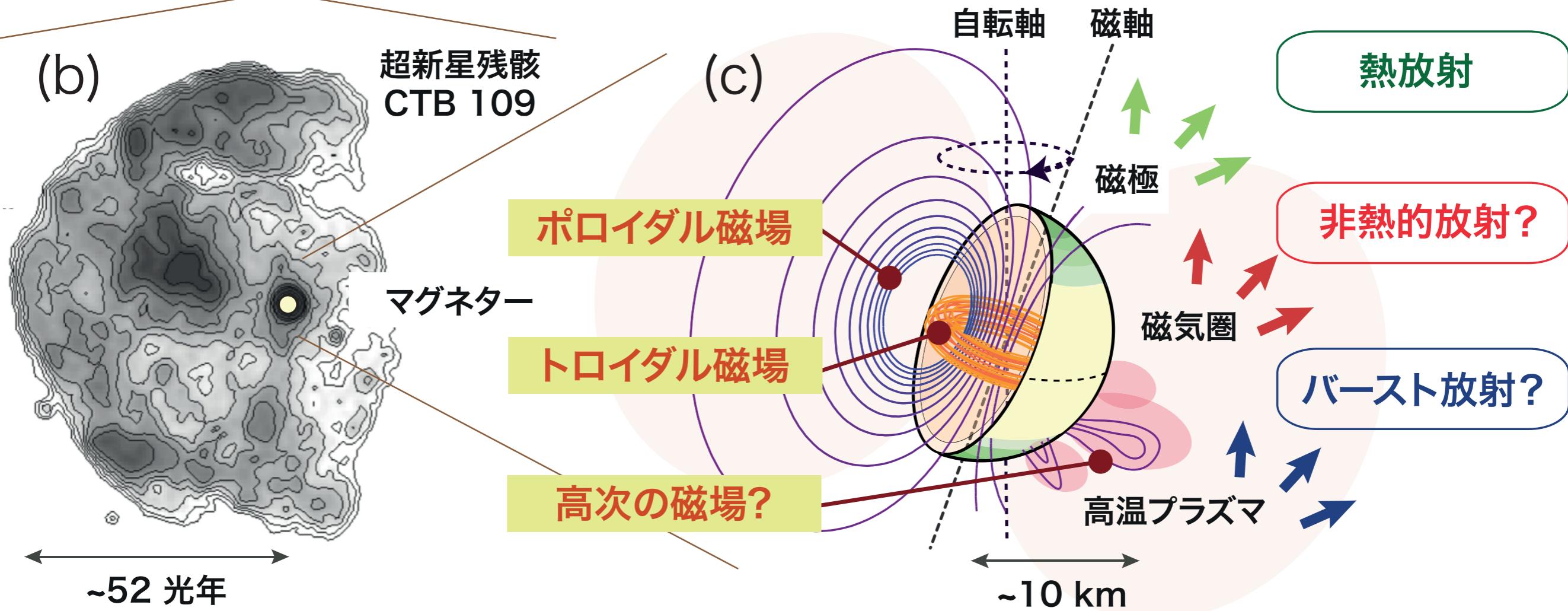
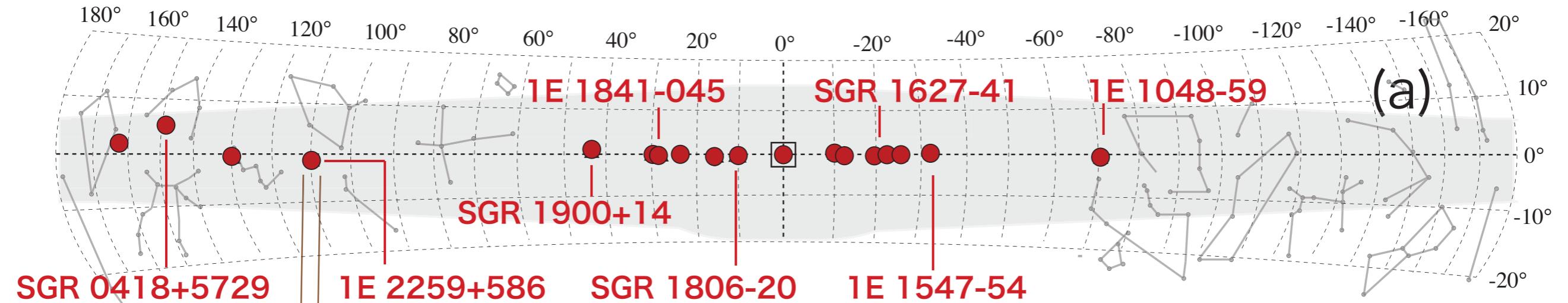
京都大学 宇宙物理学教室・白眉センター

# マグネターとは？

1. 軟ガンマ線リピーター(SGR)や特異X線パルサー(AXP)として知られる約23個のX線パルサー。
2. 双極子磁場が $10^{14\text{-}15}$  Gと量子電磁力学の臨界磁場 $4.4 \times 10^{13}$  Gを超え、磁気エネルギー駆動の天体。
3. 巨大フレアやバースト、突発増光など、古典的な回転駆動型の電波パルサーとは異なる観測的特徴。
4. バーストや定常放射ではSub-MeV帯域が検出され、放射の起源は未解明。

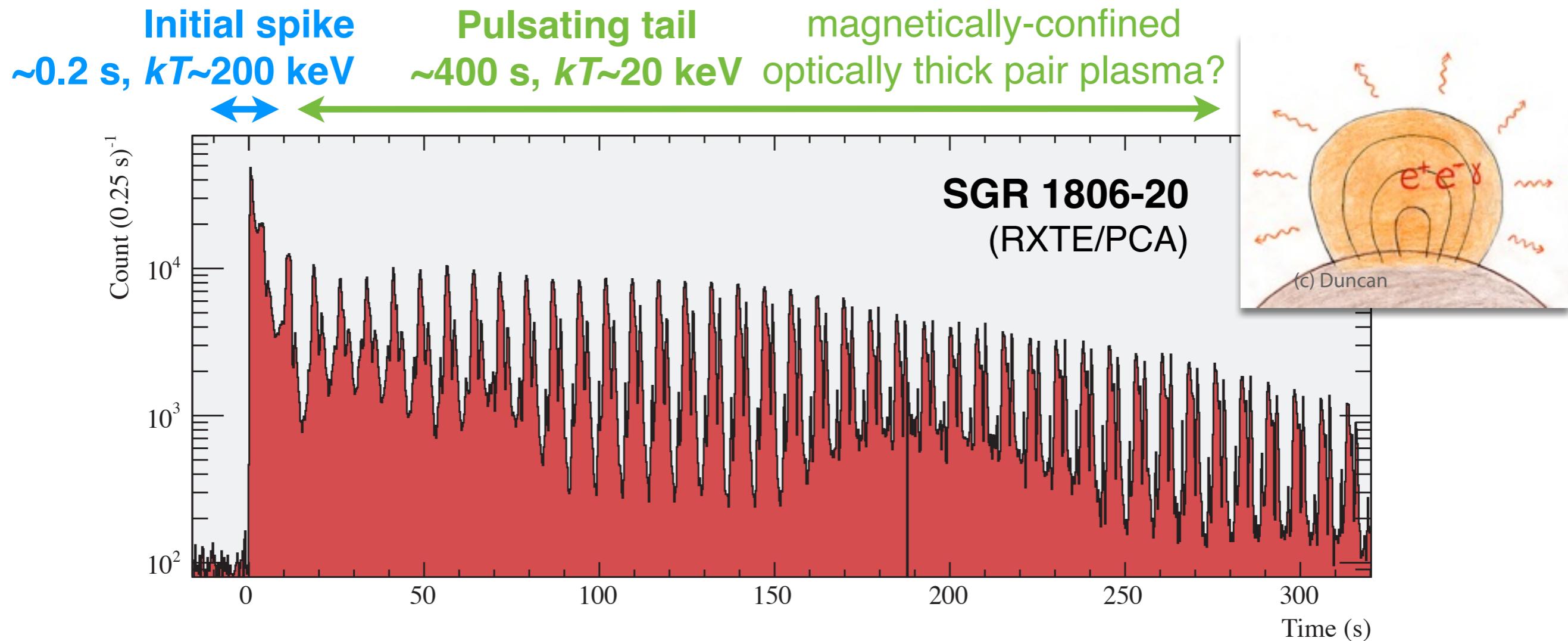


# マグネターからのエネルギー放射



磁気エネルギーが、表面の熱放射、磁気圏の放射、バースト放射になる

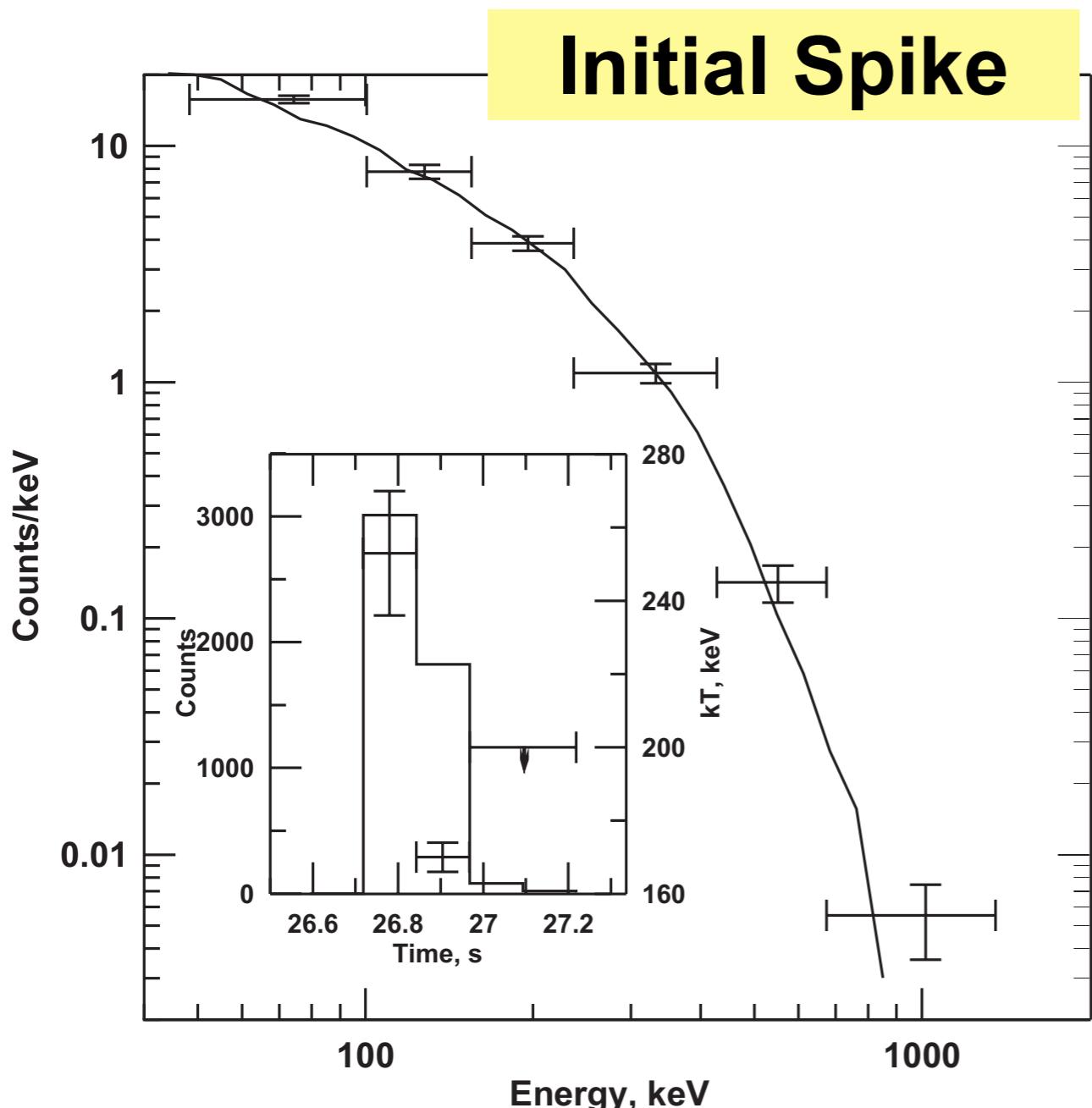
# マグネターの巨大フレア



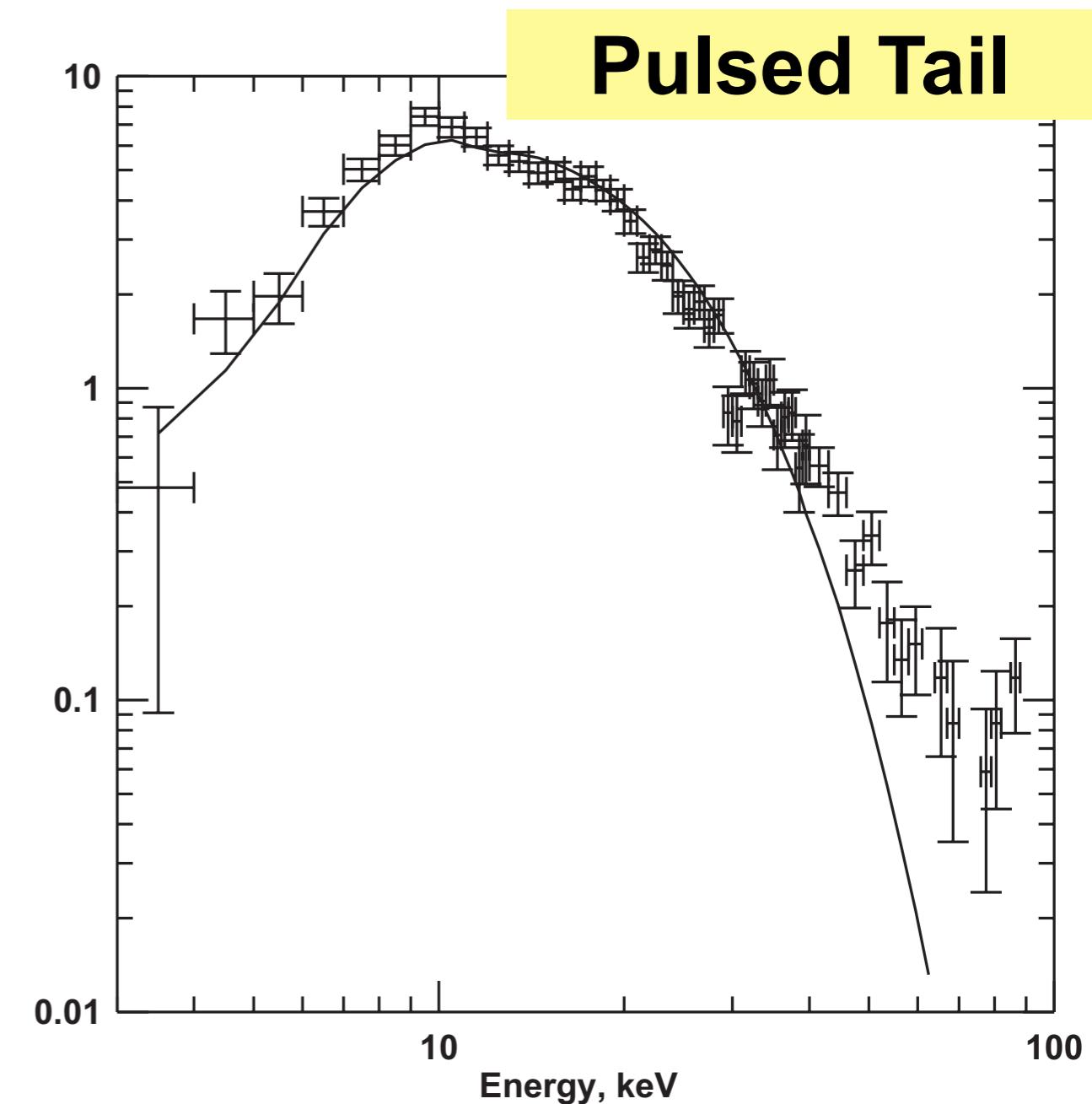
Historical GFs	SGR 0526-66	SGR 1900+14	SGR 1806-20
	Mar. 5, 1979	Aug. 27, 1998	Dec. 27, 2004
spike $L_x$ (erg/s)	$3.6 \times 10^{44}$	$>8.3 \times 10^{44}$	$4.0 \times 10^{46}$
tail $E$ (erg)	$3.6 \times 10^{44}$	$1.2 \times 10^{44}$	$1.3 \times 10^{44}$
Duration (tail)	~200 s	~400 s	~380 s

c.f., 超新星爆発(重力崩壊型/Ia型)  $E \sim 10^{51}$  erg

# 巨大フレア SGR 1806-20



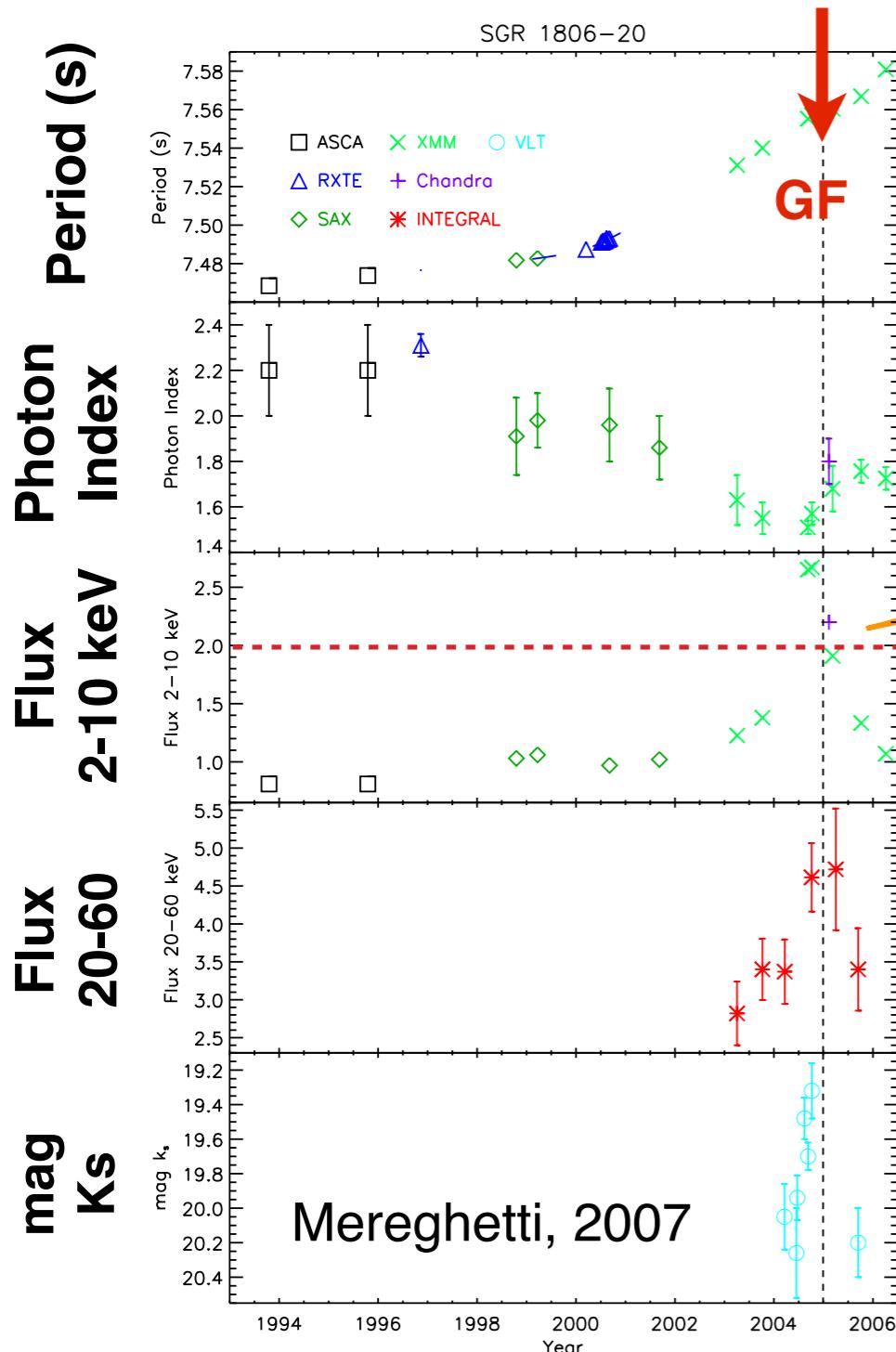
- RHESSI
- BB fit :  $kT=175\pm25$  keV



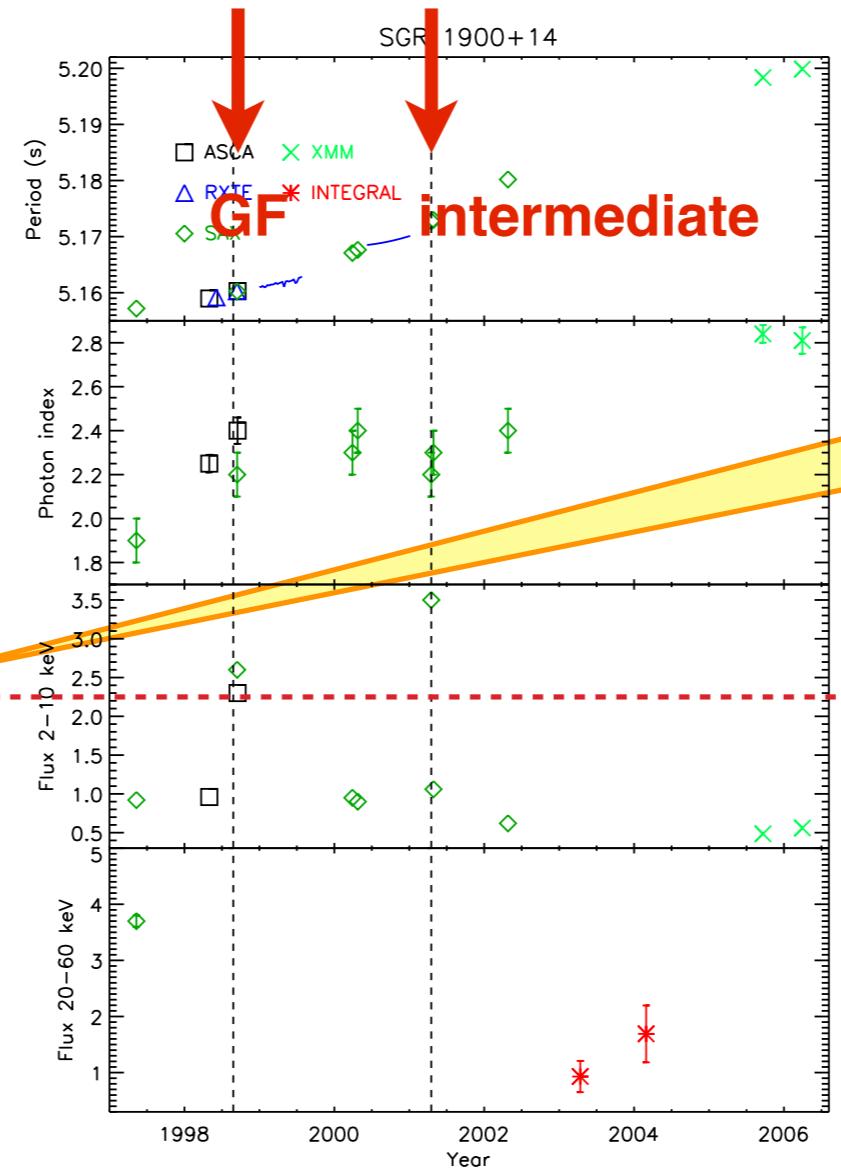
- RHESSI / 272-400 s
- BB fit :  $kT=5.1\pm1.0$  keV
- bremss :  $kT\sim22$  keV

ASTRO-H/SGD を例にとって試算すると  
MDP~10% (initial spike), ~1% (tail)

# How Can We Monitor Giant Flares?



**Fig. 6** From top to bottom: long term evolution of the pulse period, photon index, X-ray flux (2–10 keV), hard X-ray flux (20–60 keV), and infrared magnitude of SGR 1806–20. Fluxes are in units of  $10^{-11}$   $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The vertical dashed line indicates the December 2004 giant flare.



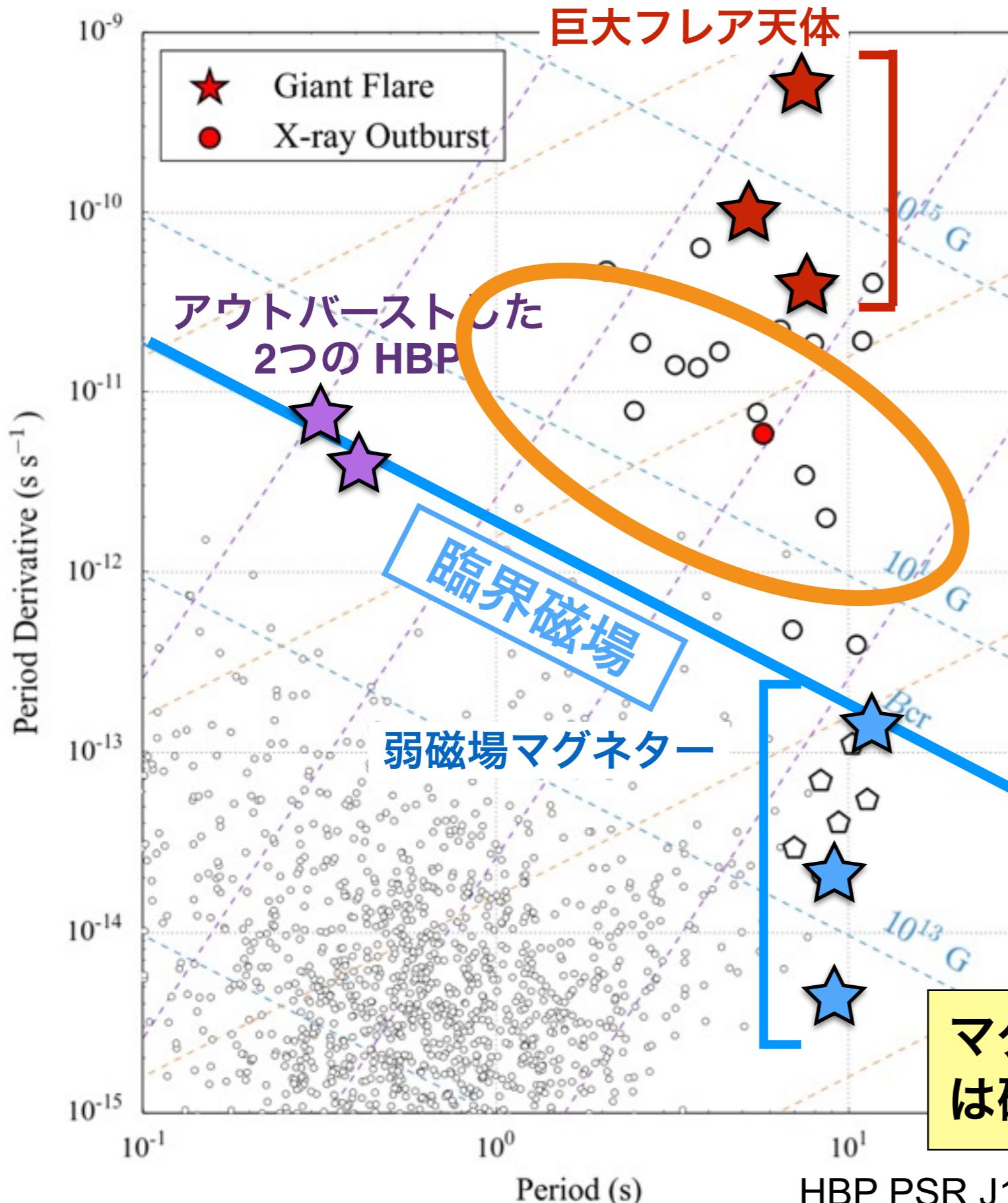
**Fig. 7** From top to bottom: long term evolution of the pulse period, photon index, X-ray flux (2–10 keV), and hard X-ray flux (20–60 keV) of SGR 1900+14. Fluxes are in units of  $10^{-11}$   $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The vertical dashed lines indicate the 27 August 1998 giant flare and the 18 April 2001 intermediate flare.

Persistent X-rays becomes brighter before the GFs.  
(Spectral becomes a bit harder)

1 mCrab level

*Swift* (or other monitoring mission sensitive to  $\sim$ 1 mCrab level on the Galactic plane) is used for the magnetar monitor before GFs

# マグネターの突発的な磁気エネルギー解放

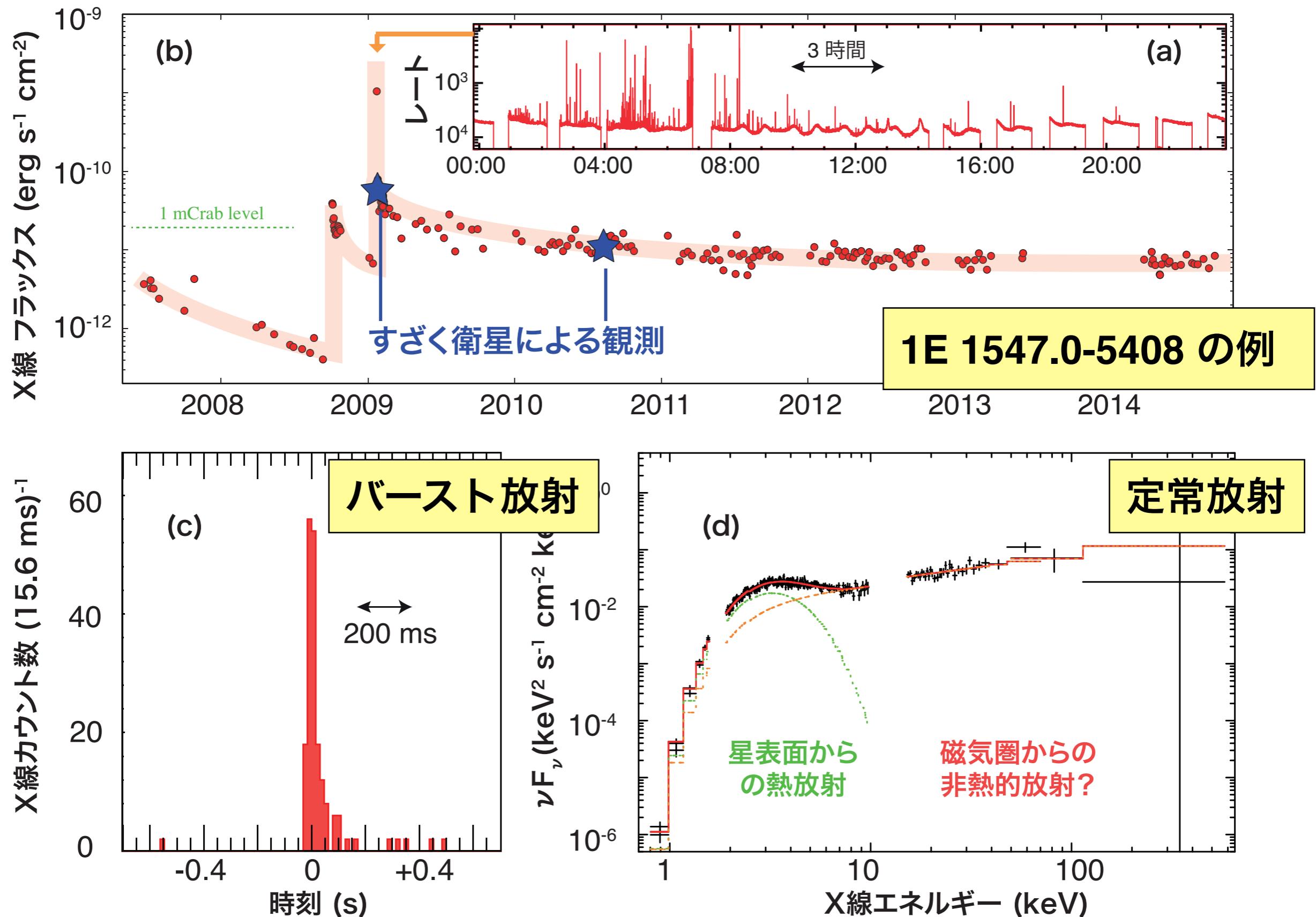


多様な天体からマグネター様  
アウトバーストが検出される!

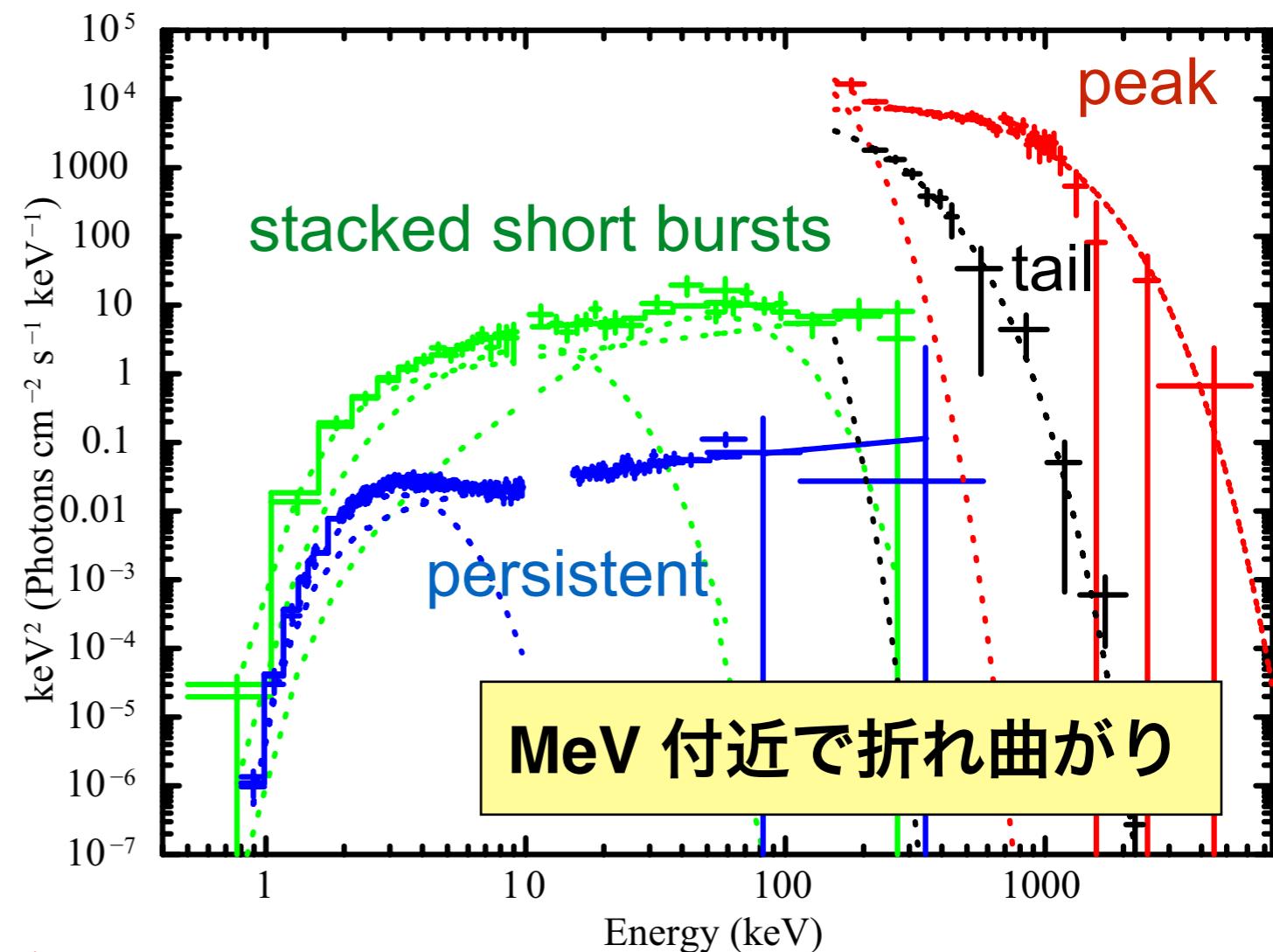
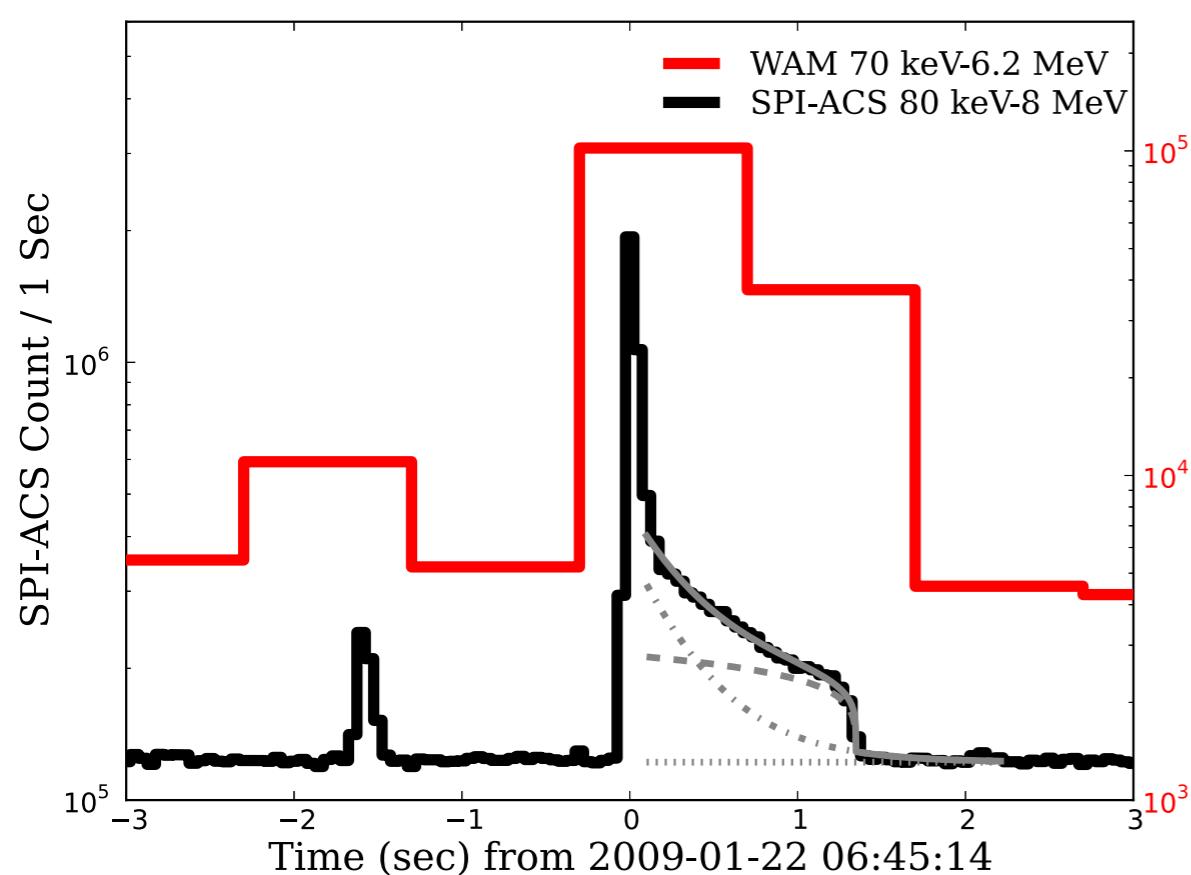
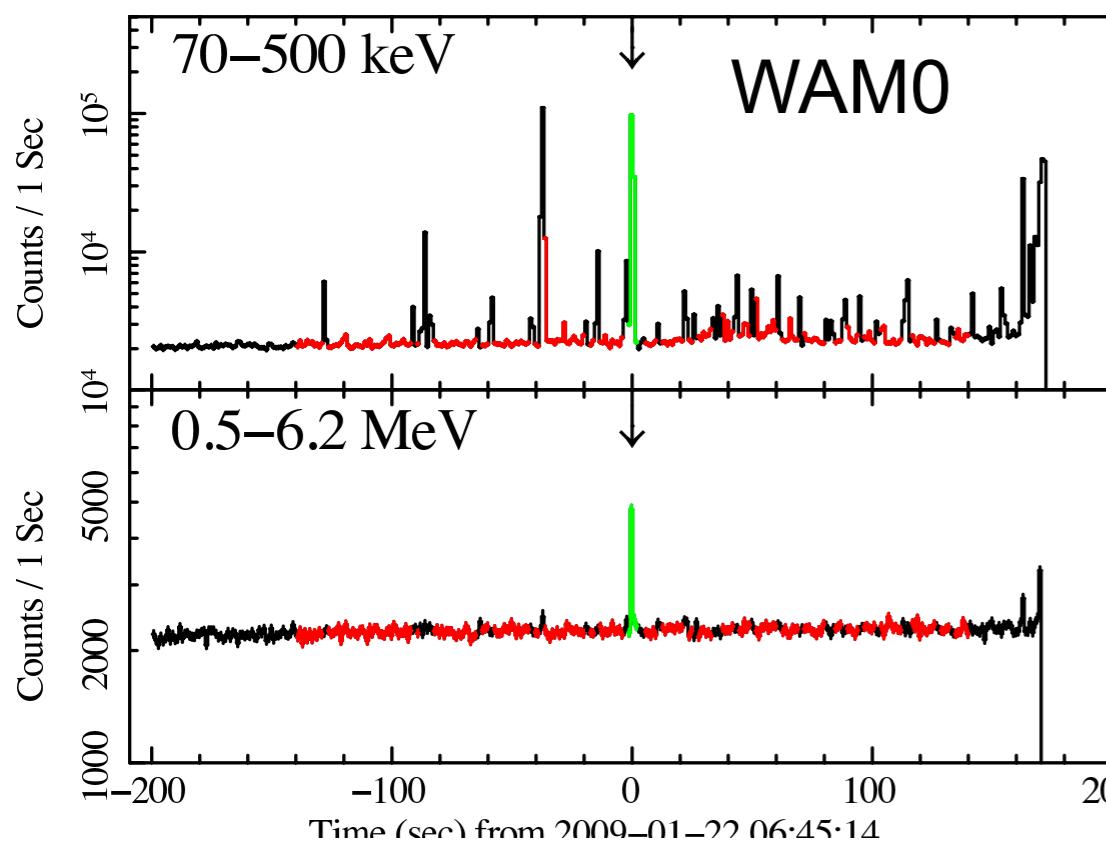
- ・ **巨大フレア(3天体)**
- ・ **通常の突発マグネター(~10)**
- ・ **弱磁場マグネター(3天体)**
  - $P\text{-}Pdot$  から求めた表面磁場は臨界磁場を下回るが、マグネター特有のアウトバーストなどの磁気活動を示す
  - $B_d < 4 \times 10^{13} \text{ G}, L_x > L_{\text{sd}} @ \text{outburst}$
- ・ **強磁場パルサー(2天体)**
  - 通常は回転駆動型パルサーのように振舞うが、稀にマグネター活動
  - $B_d \sim 10^{13} \text{ G}, L_x < L_{\text{sd}}$

マグネターの磁気エネルギー解放では硬X線から MeV ガンマ線の放射！

# マグネターからのエネルギー放射: 突発増光



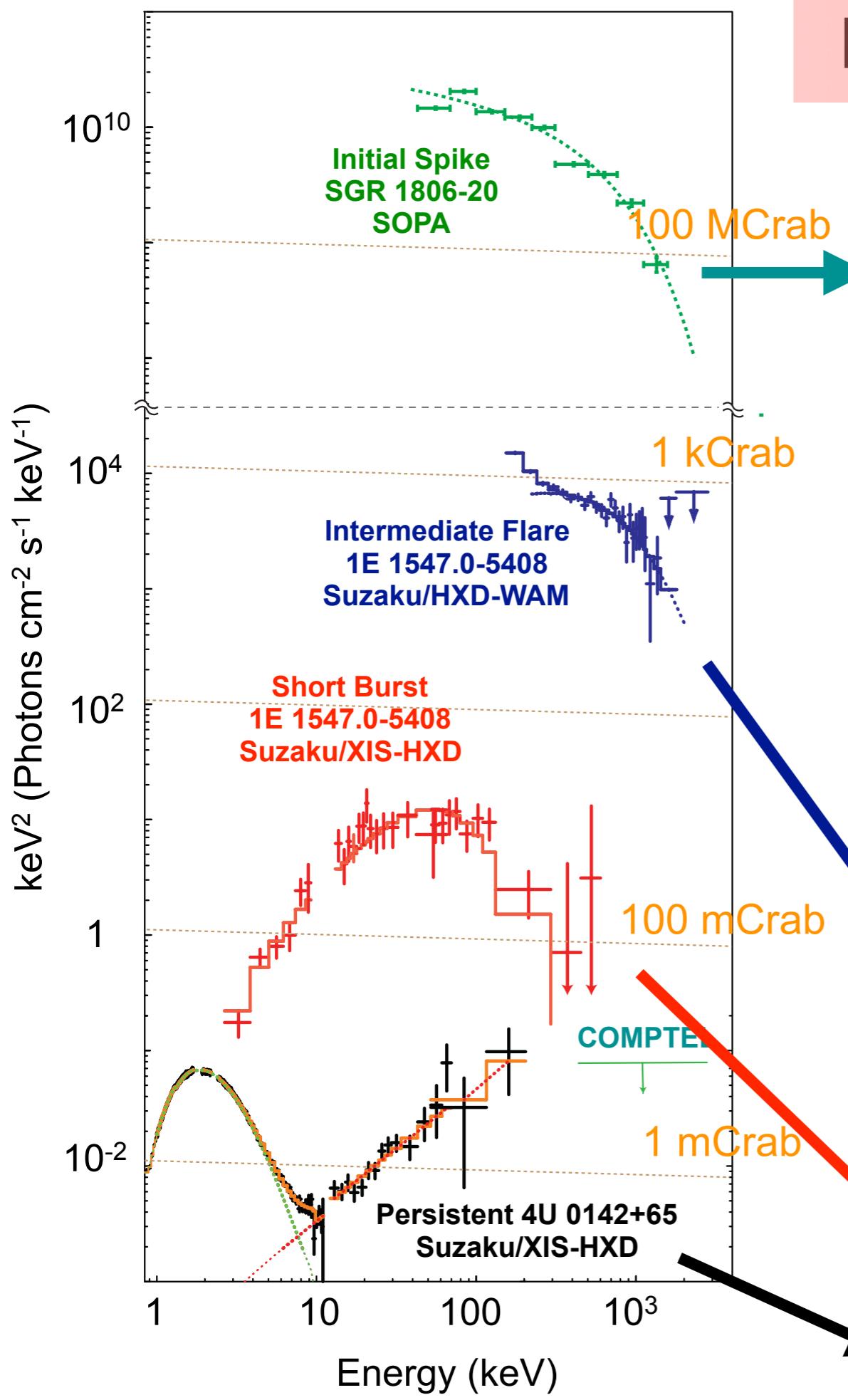
# Intermediate Flare: 1E 1547.0-5408@2009



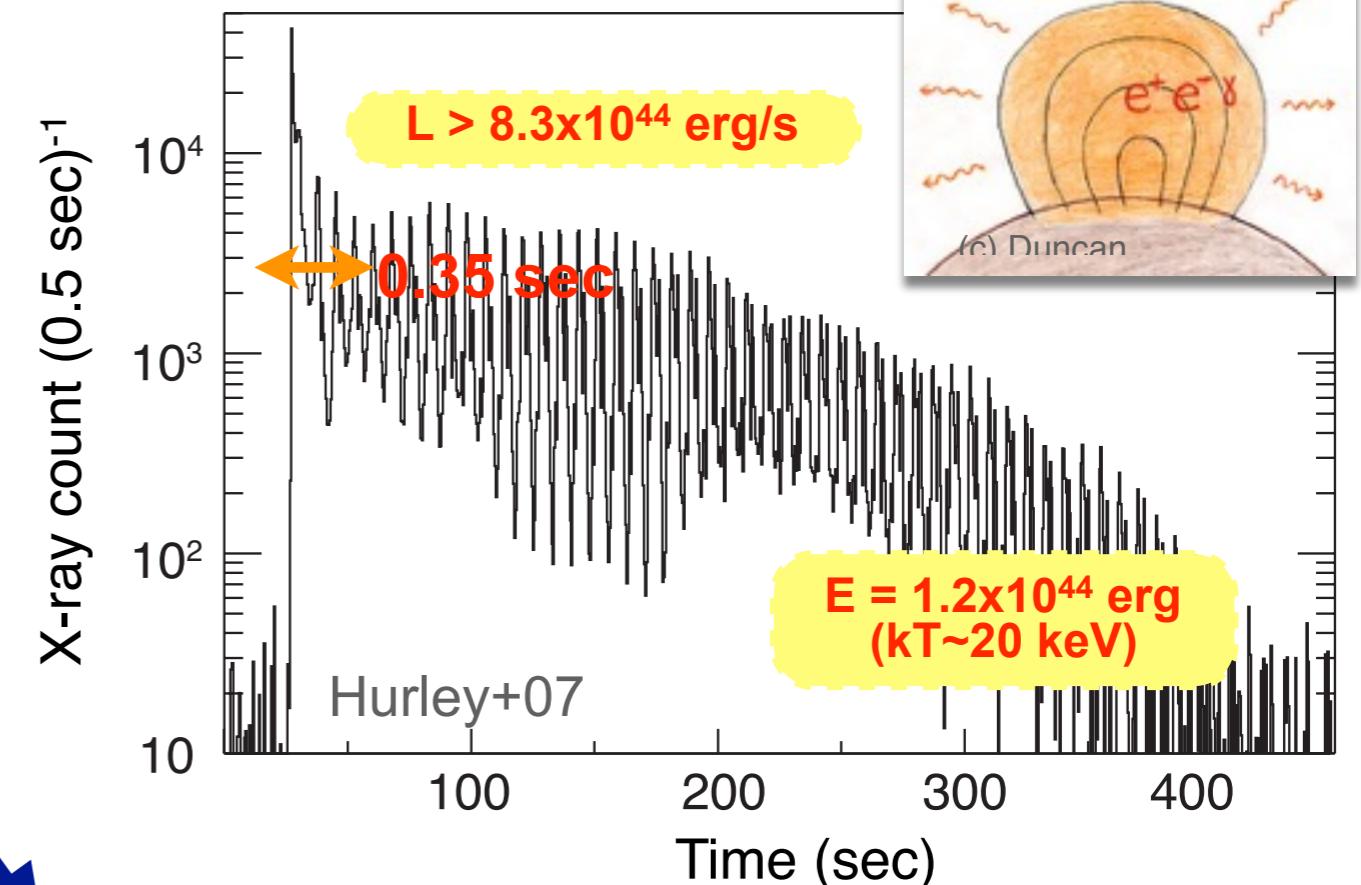
- ・ すばく WAM で準巨大フレアの検出 (巨大フレアより ~3桁暗いが、普通の short burst より ~4桁明るい)
- ・ スペクトルは数 MeV 帯域まで
- 突発マグネターは良い sub-MeV 突発現象の観測候補

# Persistent vs. Bursts

## Time-domain viewpoint



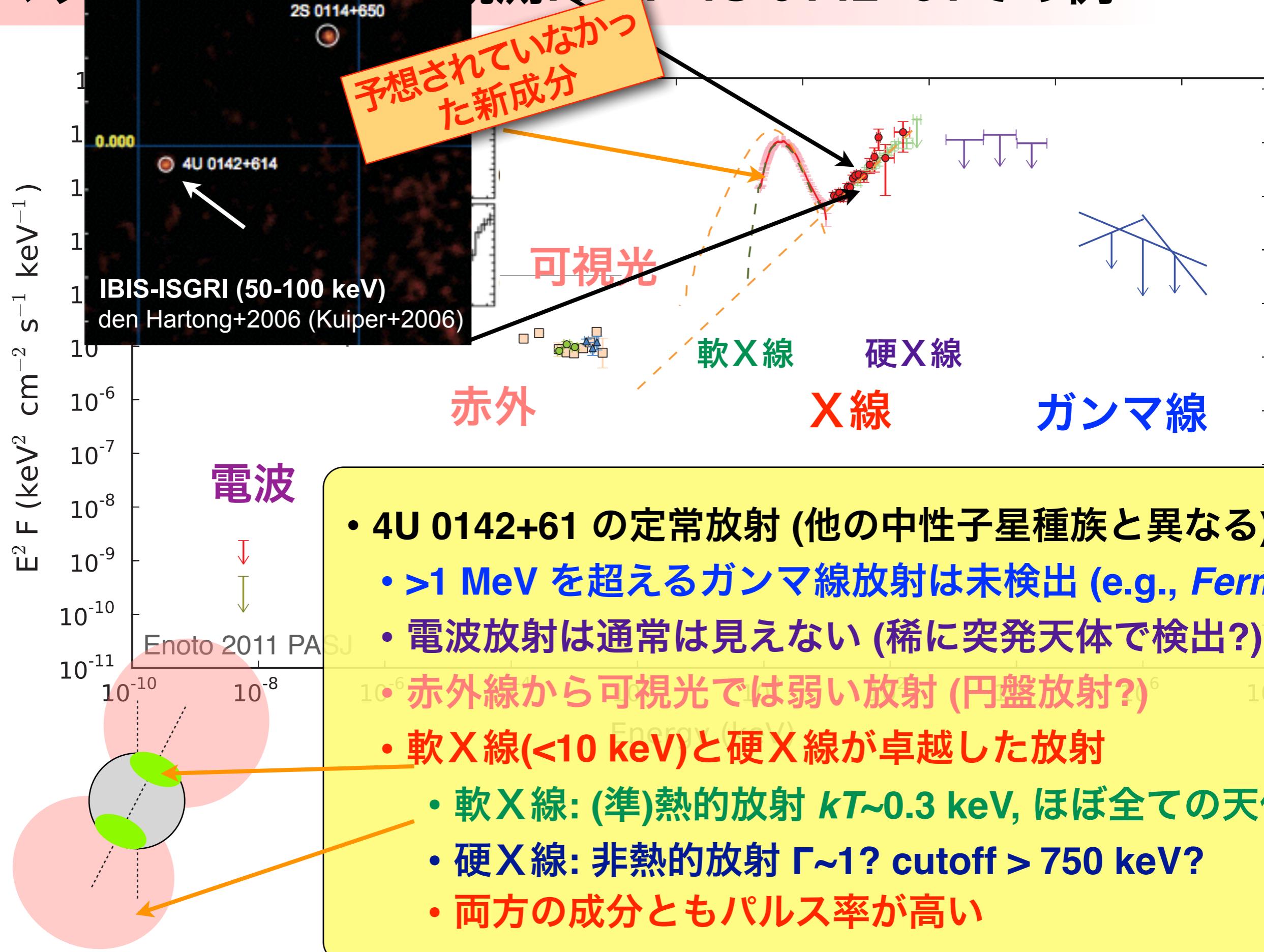
- Giant Flare (~400 sec)



- Intermediate flare, short burst

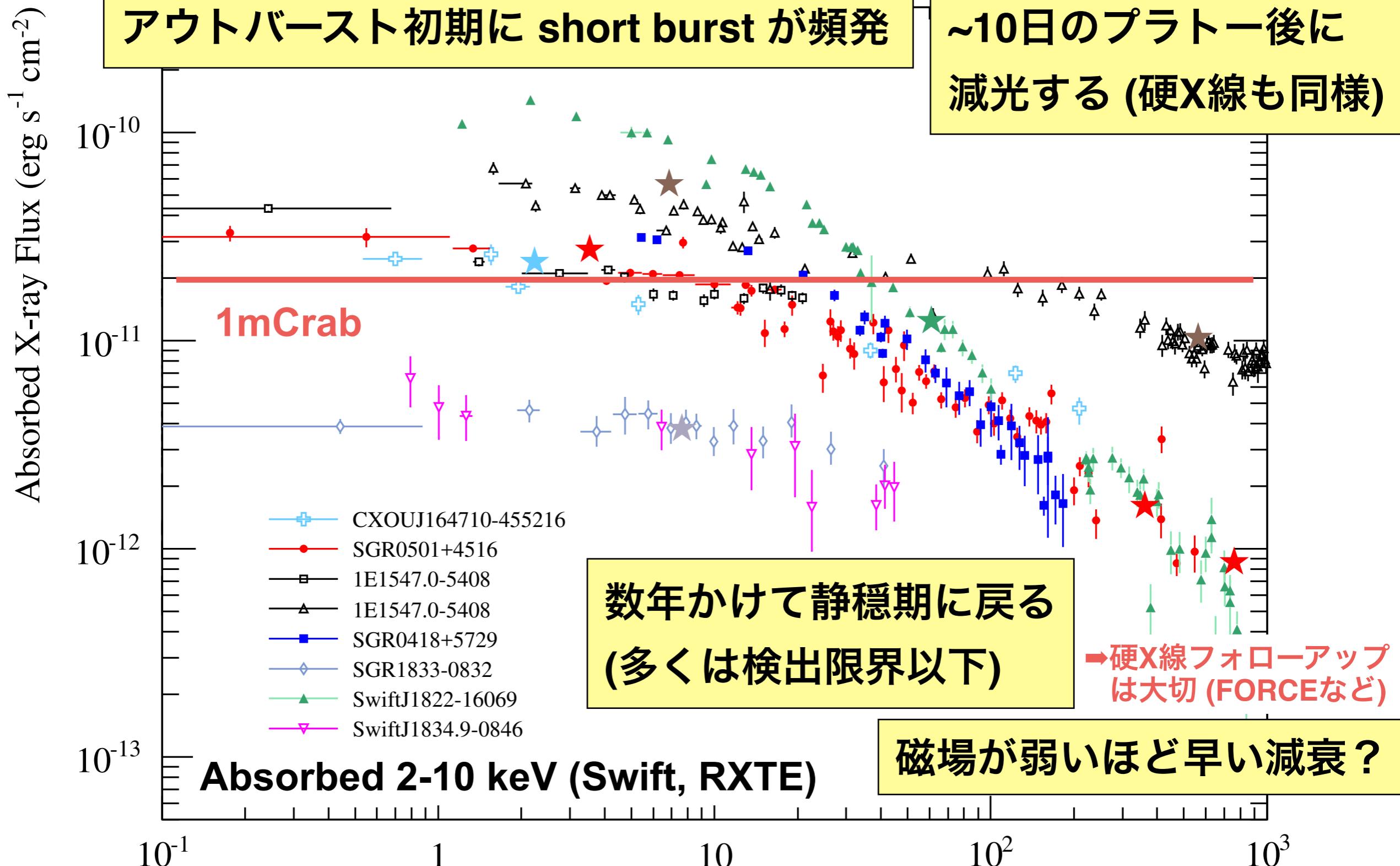
- a few hundred millisecond
- reconnection or starquake?

- Weak short bursts (Enoto et al. 2011, MNRAS)
- Persistent Emission



# マグネターのX線アウトバースト

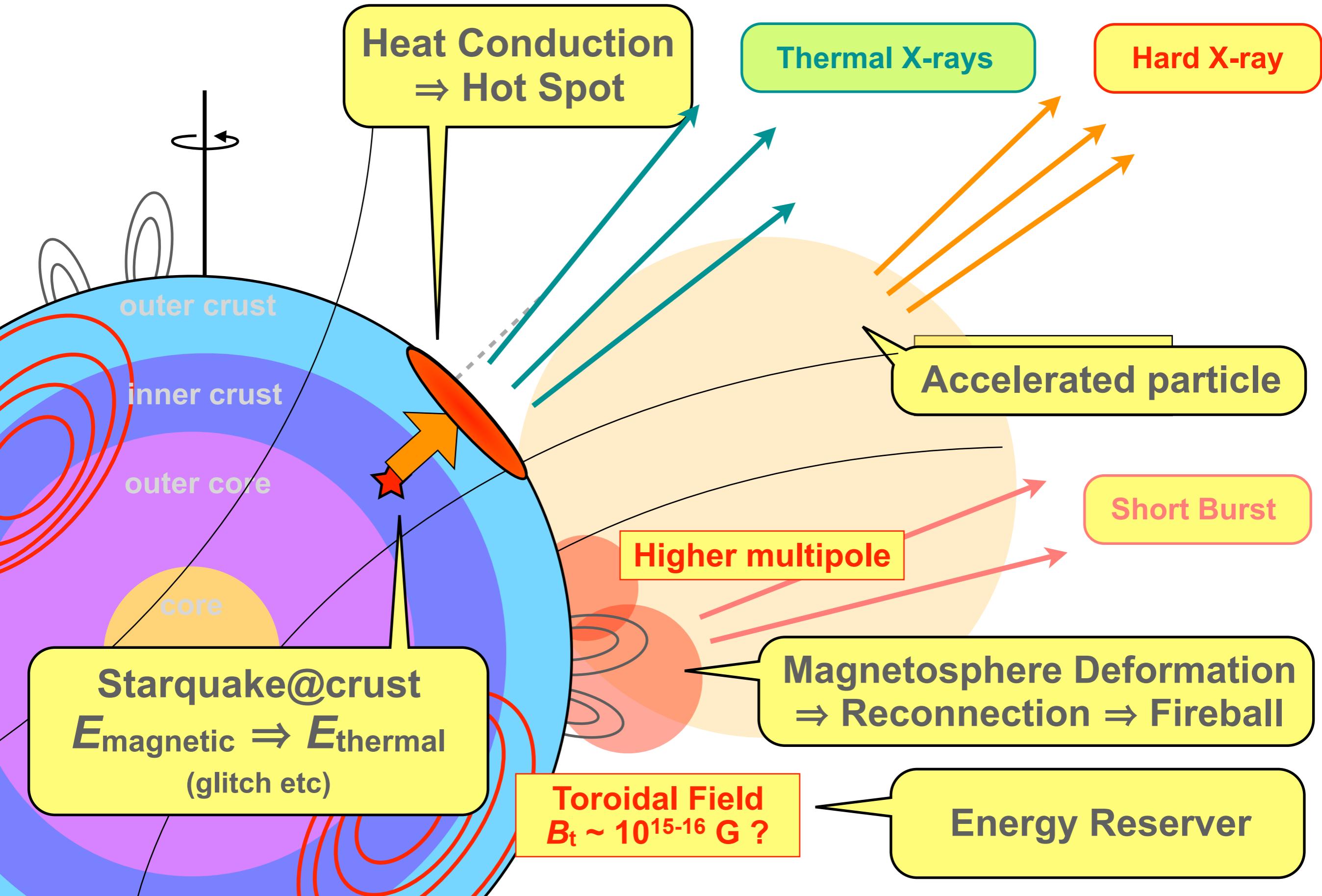
主に星表面の放射が観測



星内部 or 磁気圏の磁場エネルギー解放後の冷却過程

Elapsed day  
(Enoto et al., ApJ submitted)

# Magnetar Outbursts



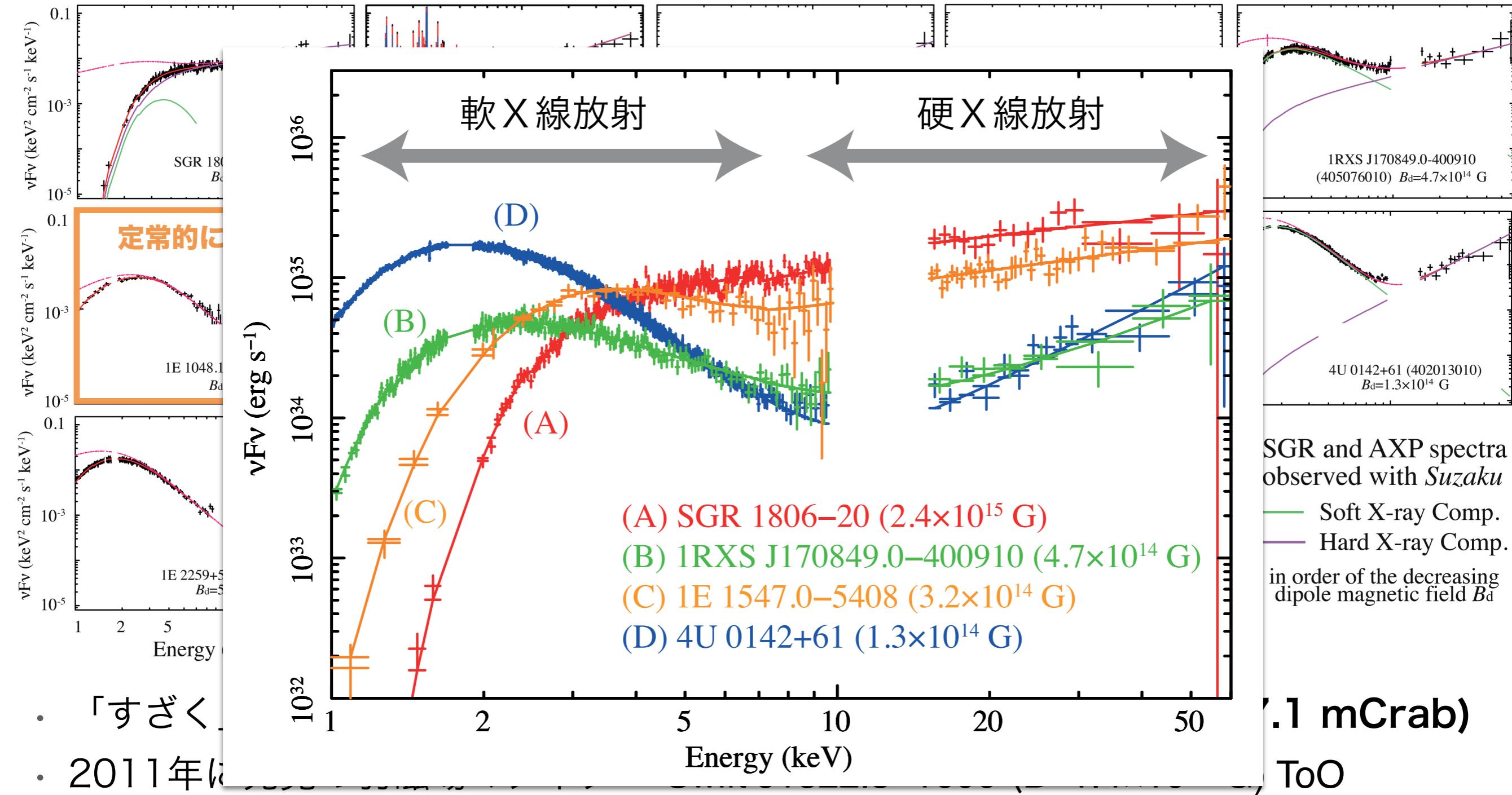
# すざく広帯域スペクトル: 再解析

14

- 定常に明るい9天体(16観測) + 6個の突発天体(10個のToO観測)の全データ

強磁場

弱磁場



「すざく」

2011年に

- 軟X線は検出( $kT \sim 0.4$  keV), 硬X線は上限値  $F_{15-60} < 1.2 \times 10^{-11}$  erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>
- 1E 1048.1-5937, 1E 2259+586, AX J1818.8-1559などでも硬X線は上限値

.1 mCrab)

ToO

# 2成分比の磁場相関

1E 1547.0-5408 (AXPとして既知天体)

2009年に増光。硬X線を発見 (Enoto et al., 2010, 12)

1年後に硬X線を検出。ハードネス低下 (Iwahashi et al., 2013)

自由歳差の兆候の検出 (Makishima et al., 2015)

SGR 0501+4516

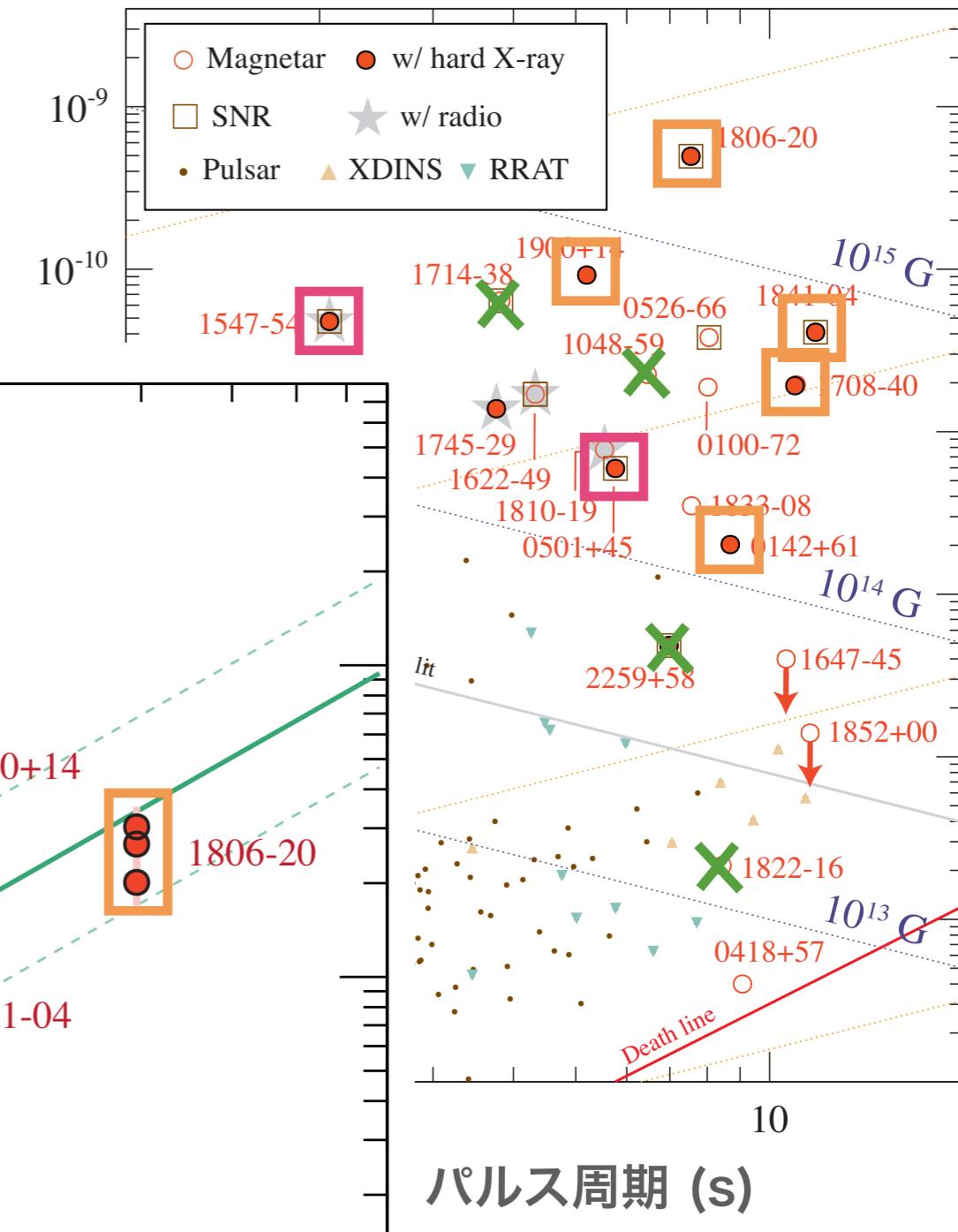
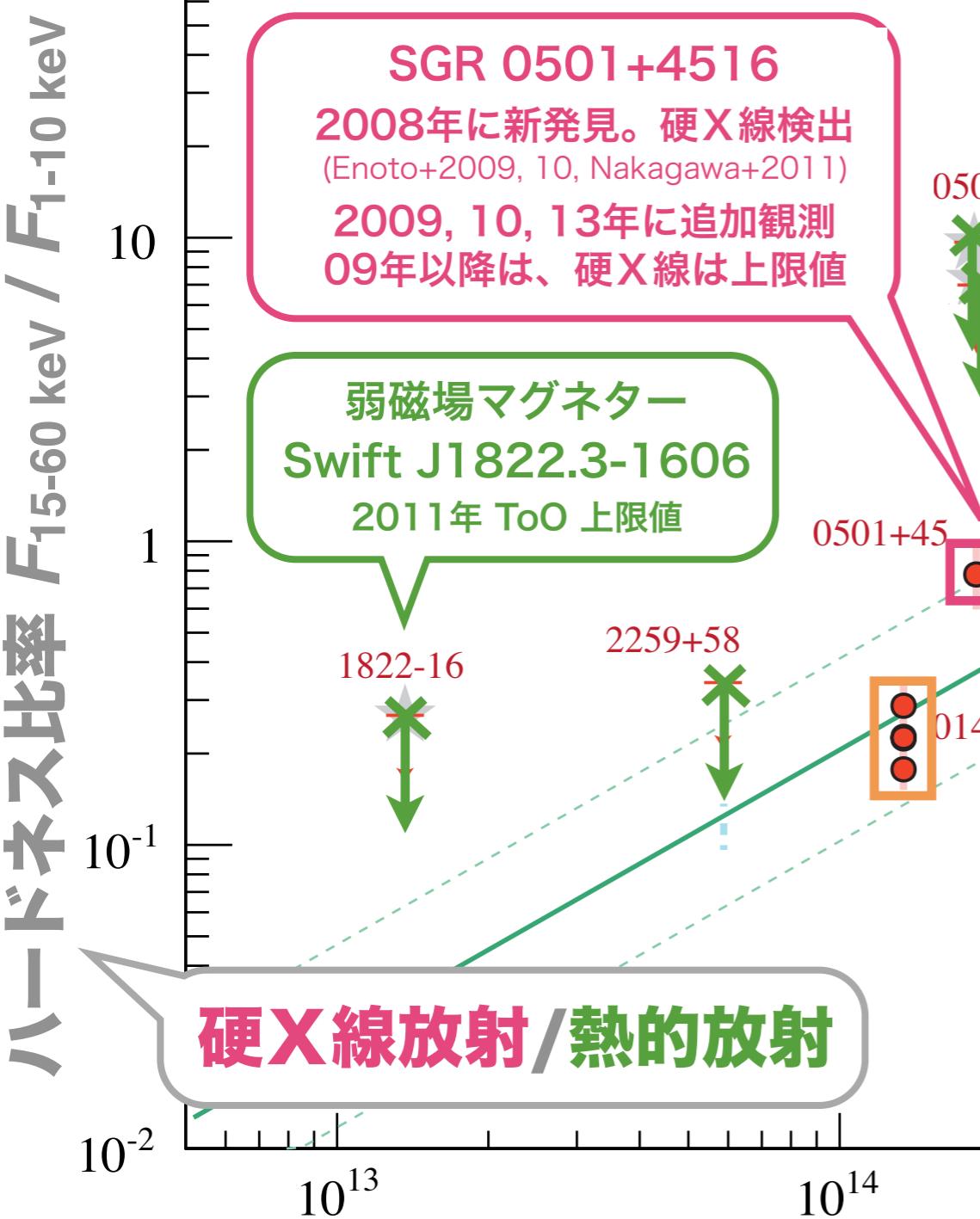
2008年に新発見。硬X線検出  
(Enoto+2009, 10, Nakagawa+2011)

2009, 10, 13年に追加観測  
09年以降は、硬X線は上限値

弱磁場マグネター

Swift J1822.3-1606  
2011年 ToO 上限値

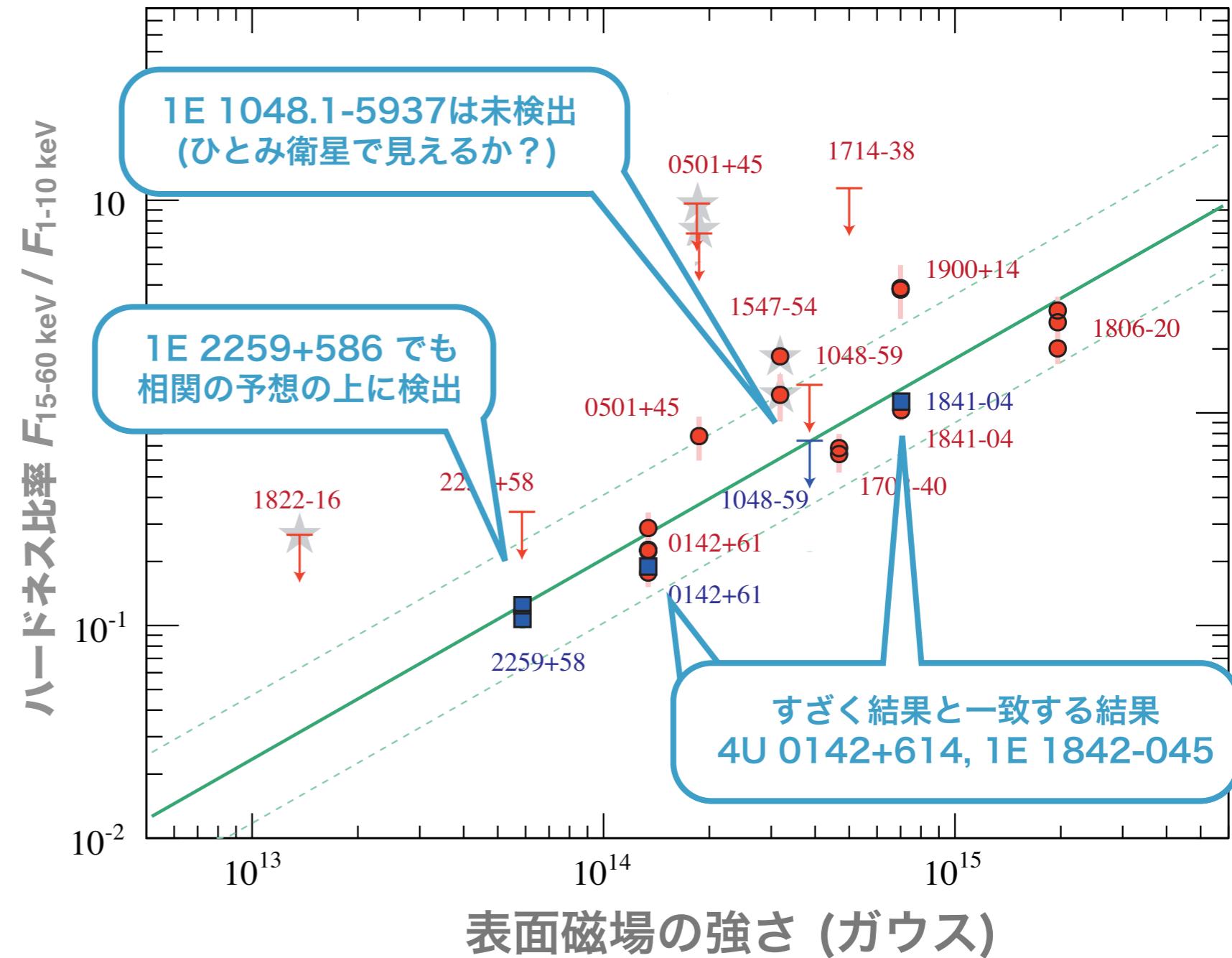
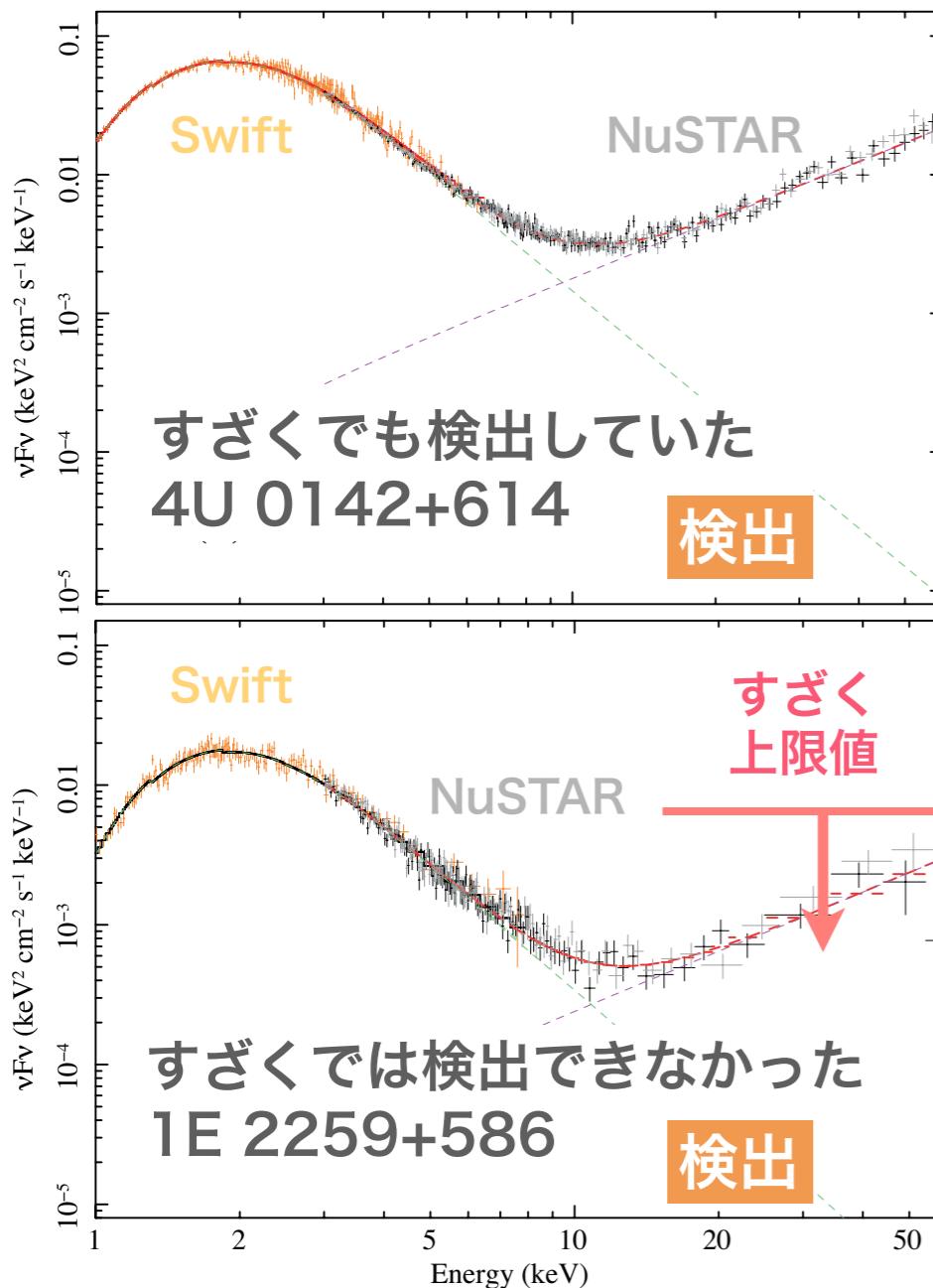
硬X線放射/熱的放射



- 2010年以降に新天体からの硬X線の検出なし
- 新たに得られた上限値も、ハードネス比と磁場の相関 ( $\eta$ -B correlation) に無矛盾
- NuSTAR での硬X線観測はどうか？

# NuSTAR 初期観測(2012年6月~)の追加

16

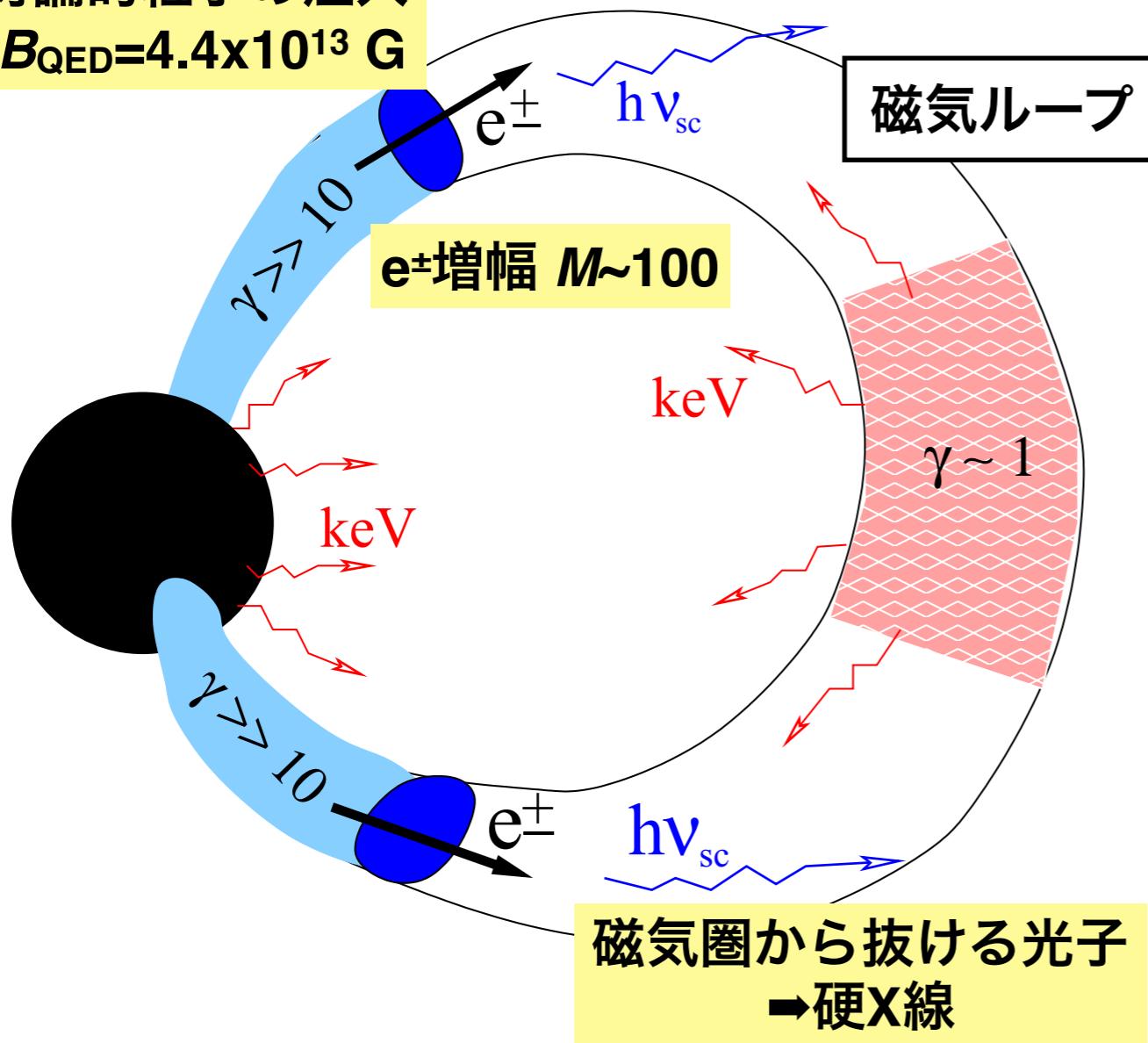


- すぐで検出できなかった天体について NuSTAR は、
  - 1E 2259+586 から検出 (Vogel et al. 2014) :  $F_{15-60} \sim 3.1 \times 10^{-12} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
  - 1E 1048.1-5947 からは未検出 (Yang et al., 2015) :  $F_{15-60} < 6.7 \times 10^{-12} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ( $3\sigma$ )

硬X線は普遍的な放射で(将来的なターゲット)、強度は磁場によって進化する？

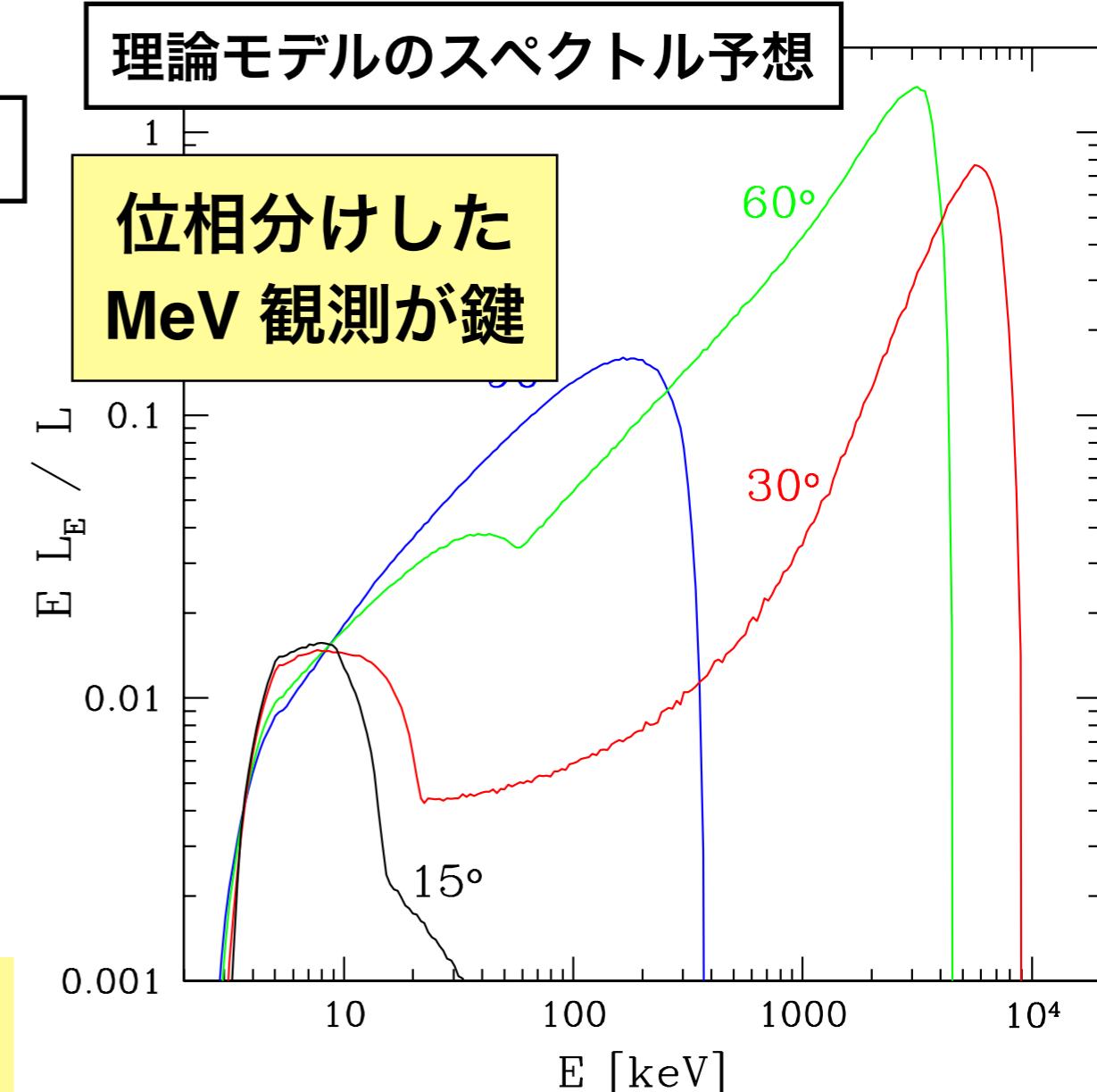
# マグネター磁気圏の理論モデル

相対論的粒子の注入  
 $B > B_{QED} = 4.4 \times 10^{13}$  G



理論モデルのスペクトル予想

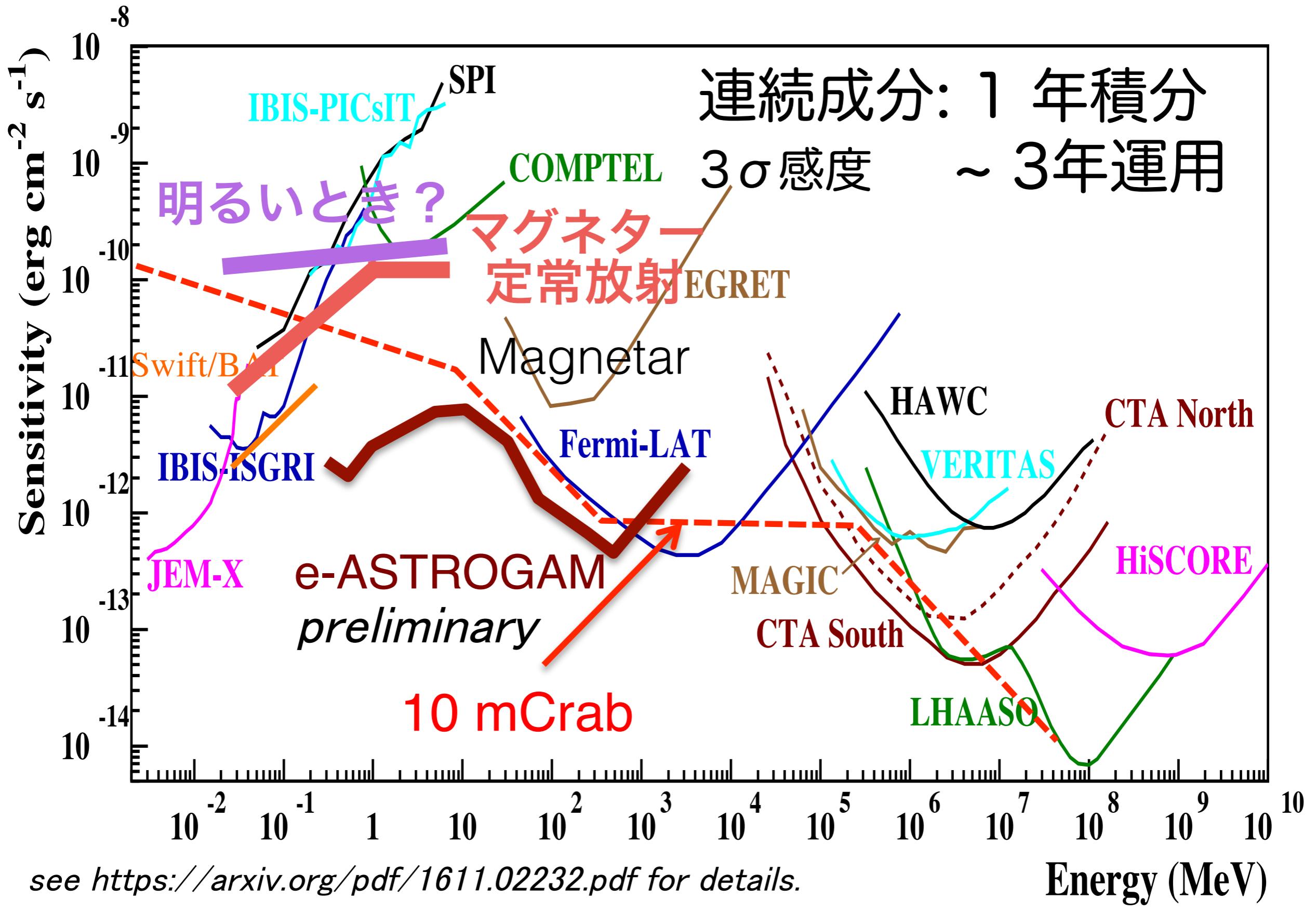
位相分けした  
MeV 観測が鍵



- 硬X線の光度は、表面の熱的放射の光度を上回る（観測と一致）
- 硬X線スペクトルは 10 keV から MeV 帯域まで伸び、強くパルス（観測と一致）
- スペクトルは 1 MeV 付近以下で extraordinary mode の偏光になると予言。
- 磁気ループの先で 511 keV の対消滅線が出ると予言。 $L_{ann} \sim 0.1 L$

強い偏光と対消滅線

# マグネターの Sub-MeV 放射の観測可能性

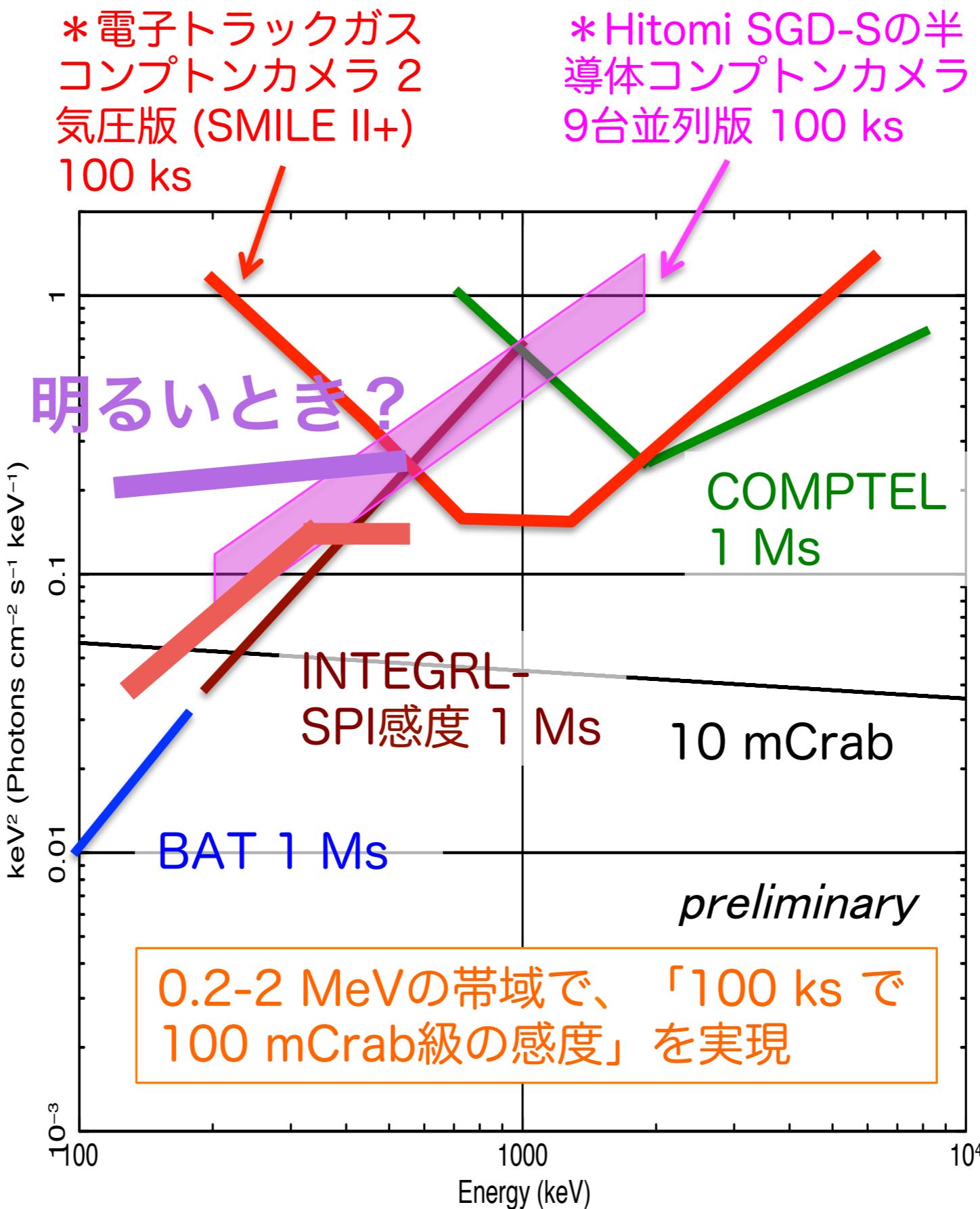


see <https://arxiv.org/pdf/1611.02232.pdf> for details.

Energy (MeV)

中澤さんのスライドより

# マグネターの Sub-MeV 放射の観測可能性



# マグネターの Sub-MeV ガンマ線放射

## 1. マグネターからの Sub-MeV 放射の特徴

巨大フレア(initial spike)や明るいショートバーストでは 1 MeV 前後にカットオフがあり、定常放射でも 1 MeVを超えたあたりで折れ曲がるようだ。放射機構は未解明だが、光子分裂のような強磁場の物理や、マグネター特有のねじれ磁場の寄与が期待されている。

## 2. マグネターの Sub-MeV 観測の科学的意義

ガンマ線パルサーの GeV 帯域の折れ曲がりを Fermi が測定したことで、磁気圏での粒子加速や放射の理解が進んだように、折れ曲がり形状が放射機構の同定に有効であろう。より重要な点は、マグネター強磁場に由来する「強い偏光」や「対消滅線」といった信号が予想されることである。

## 3. マグネターの Sub-MeV 帯域の観測可能性

マグネター定常放射の ~1 MeV 強度は典型的に~10-100 mCrab で e-ASTROGAM 感度では十分なターゲットだが、現状技術 100 ks 観測ではやや感度が足りない。ただし、巨大フレア直後や突発増光した際の明るくなった定常放射やバースト観測は有効かもしれない。