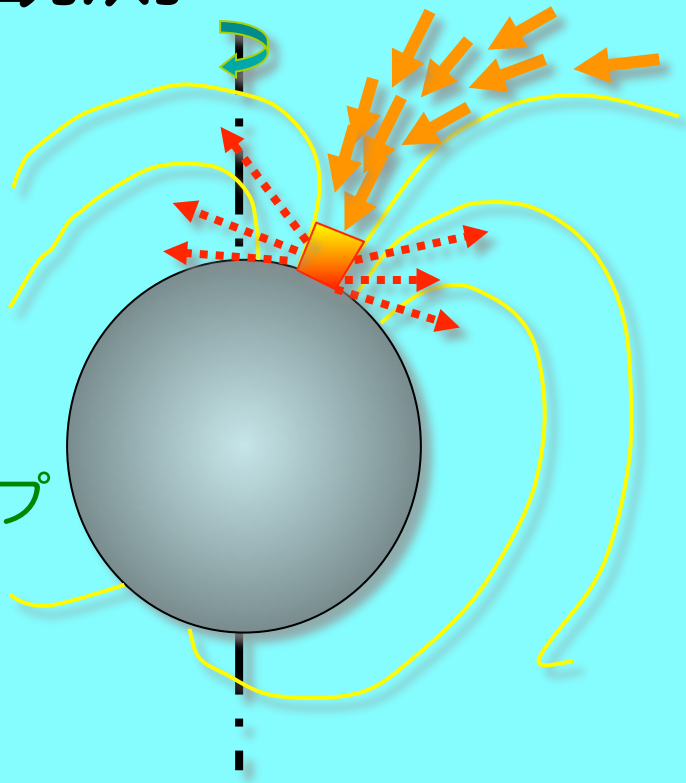
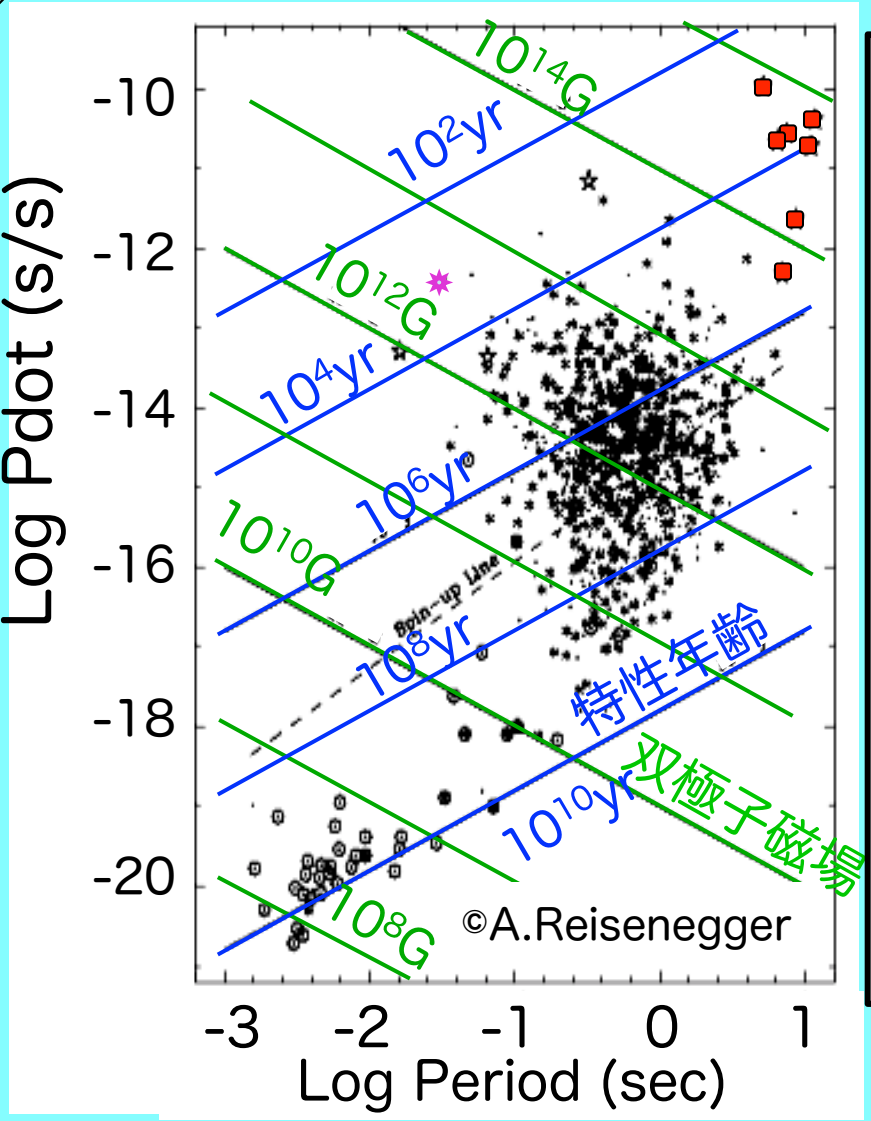
「すざく」による超強磁場天体マグネターの観測

牧島一夫[A,B,C]

A：東京大学 理学系研究科 物理学専攻
B：ビッグバン宇宙国際研究センター
C：理化学研究所 宇宙観測実験連携研究グループ



1. 中性子星 (NSs) とパルサー



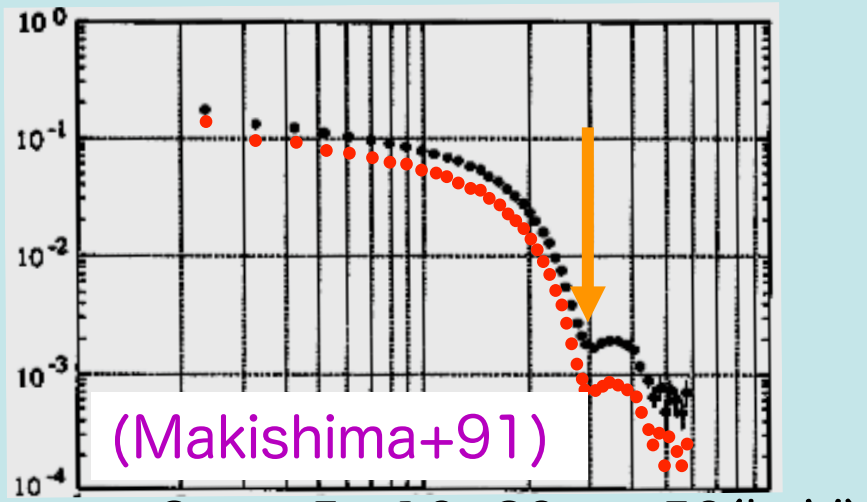
NSの磁場はどうやって保持されるか？

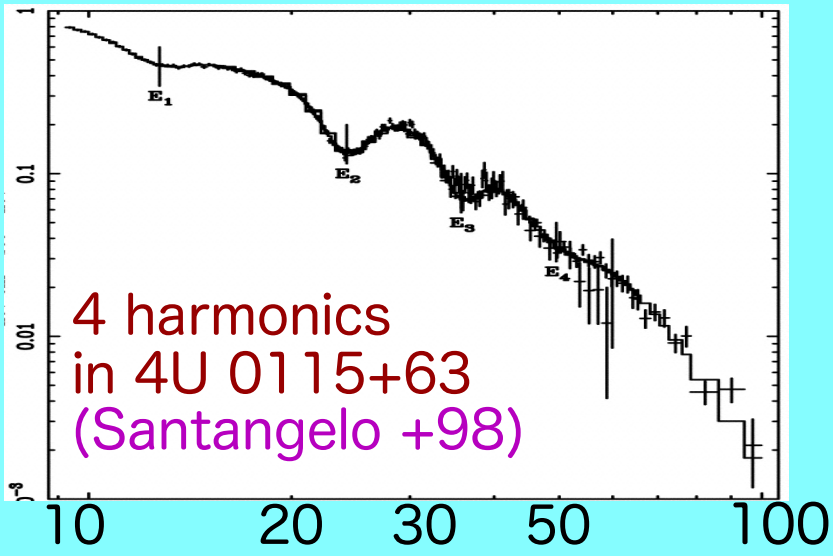
1990年代の通説：

- 陽子の超流体からなる「渦糸」が磁束を担う。
- 時間とともに渦糸は消失、磁場は次第に減衰し、弱磁場のNSができる。
- *P*-*P*dot図の統計的解析は磁場の減衰を支持。

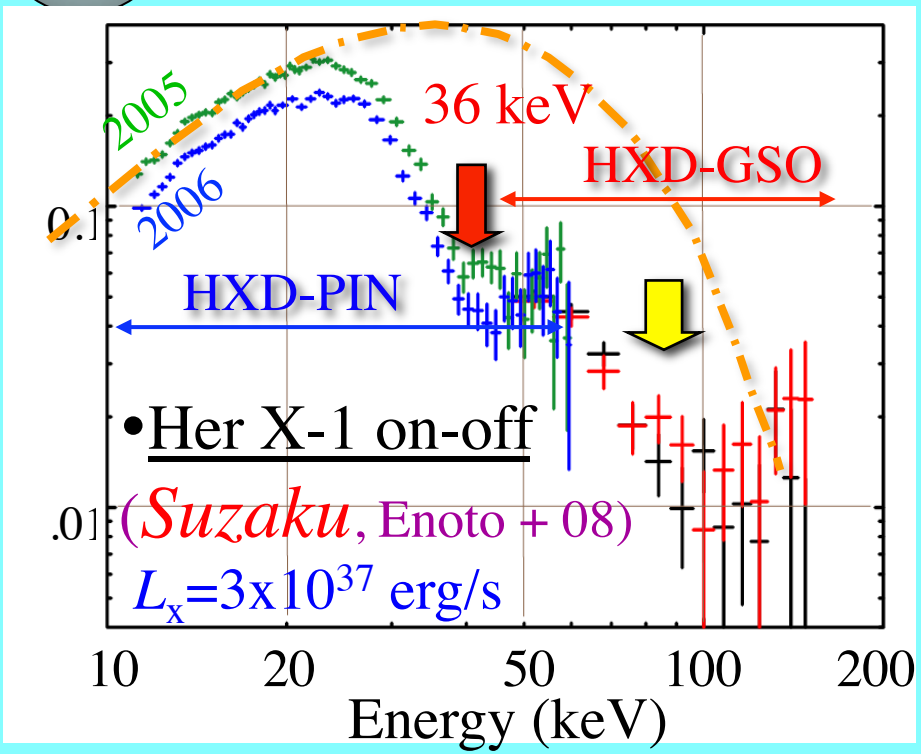
2. 電子サイクロトロン共鳴

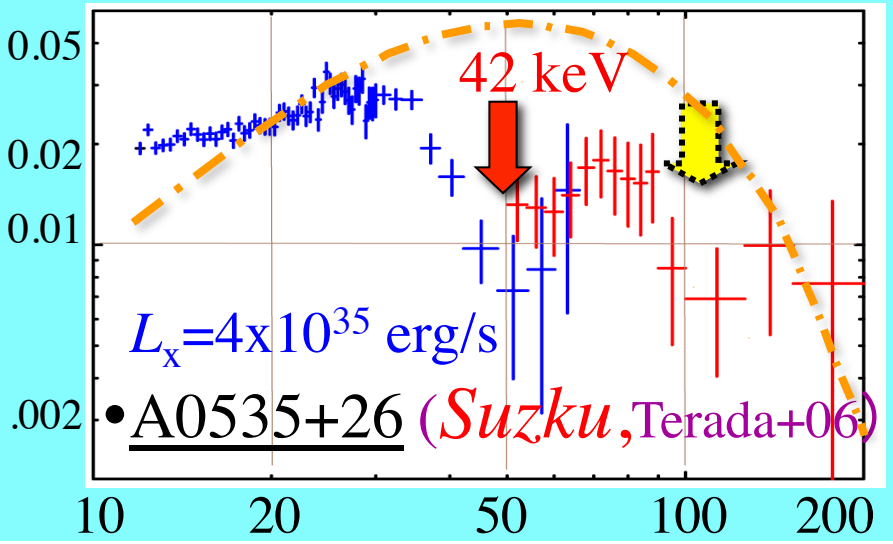
- ランダウ準位の間隔
  $E_c = heB/2\pi m_e$
  $= 12\ (B/10^8\ \mathrm{T})\ \mathrm{keV}$
- このエネルギーに、電子サイクロトロン共鳴構造が出現するはず。
- 1978、気球による最初の検出例、1884 に第２の例。
- 「ぎんが」衛星(1987~)の登場で、一挙に検出例が増え、～15個に。
- すべてスペクトル中の吸収構造として現れる。
- しばしば高調波を伴う。

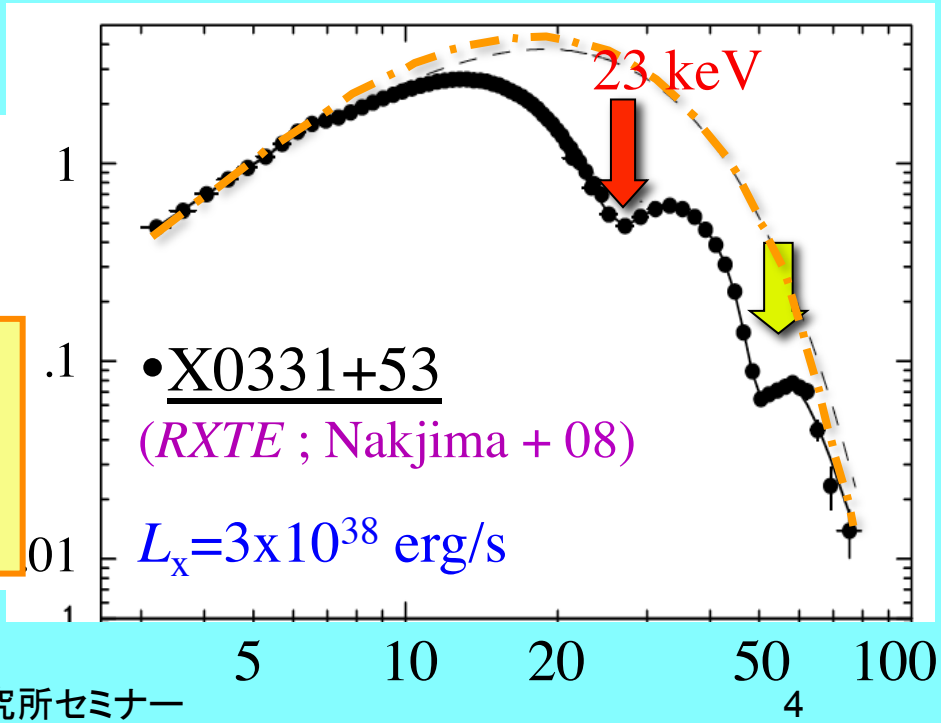




3. 電子サイクロトロン共鳴の例







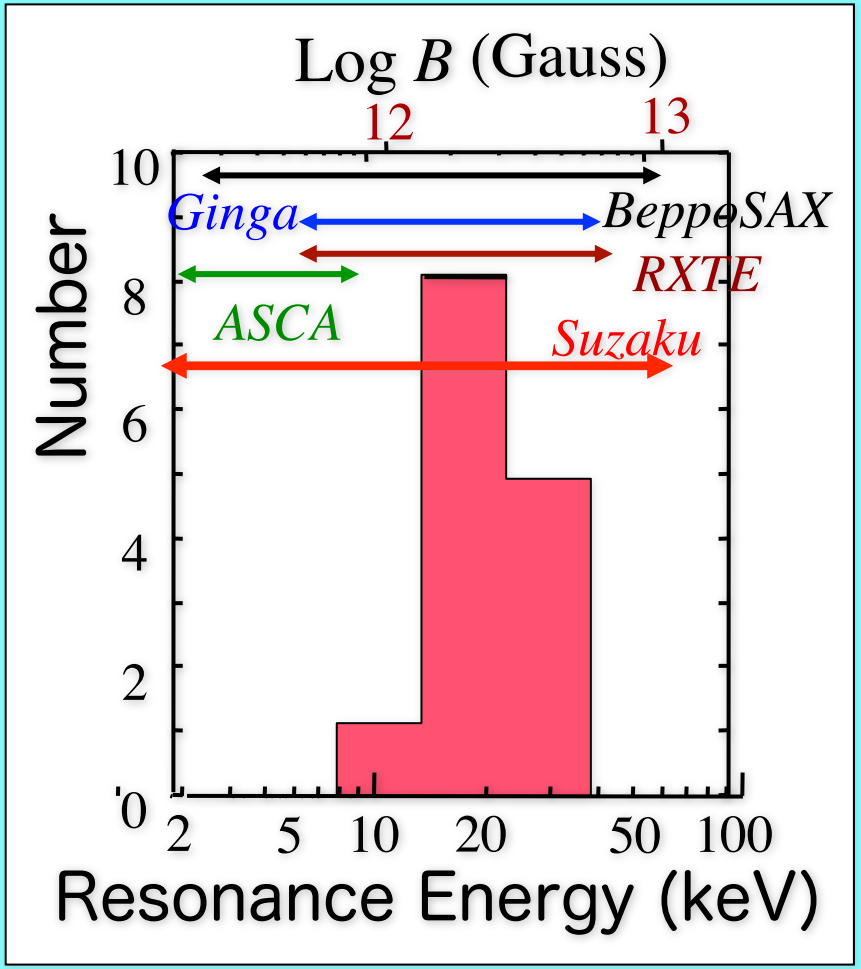
- Using regions near $E_{a1}/2$ and $>3E_{a1}$, define the continuum as

$$f(E)=AE^{\alpha}\exp(-E/E_{cut})$$

4. 磁場強度の頻度分布

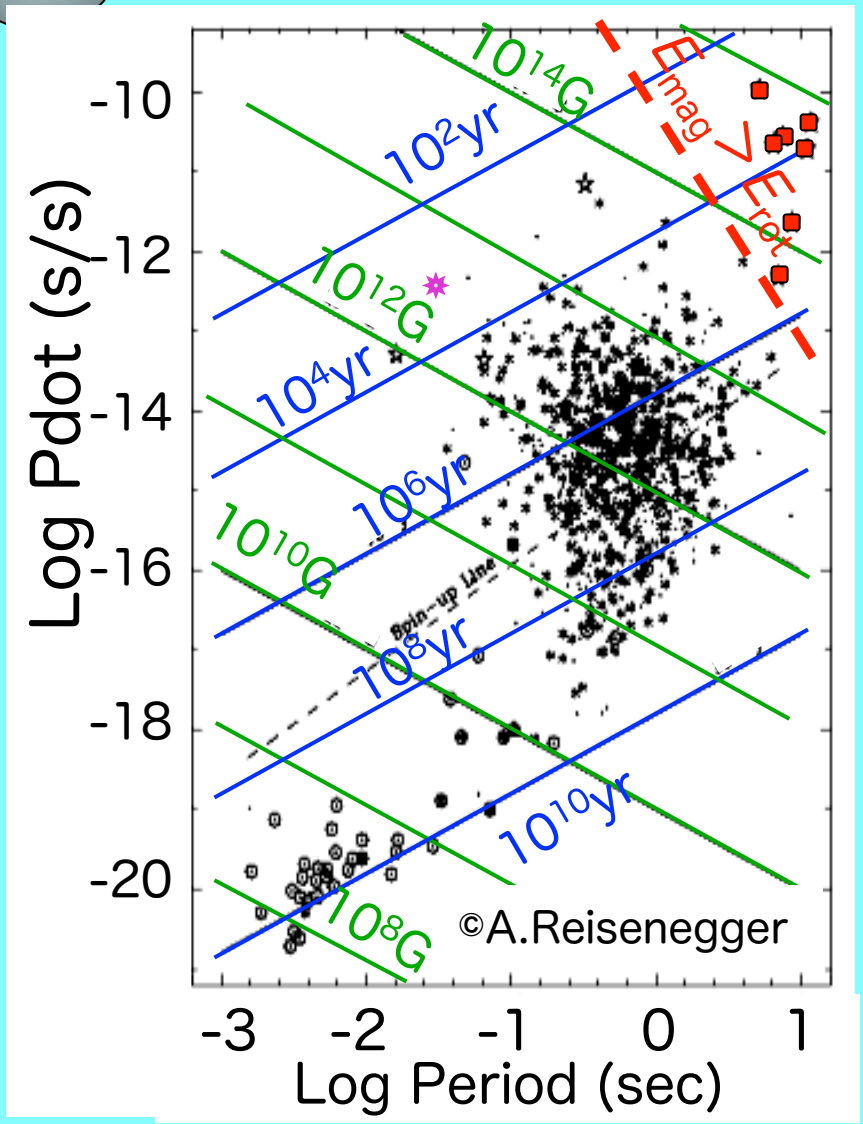
- サイクロトロンで測定された磁場は(1-4)×10^{12} Gに集中。
- 高エネルギー側はまだ測定が不十分だが、低エネルギー側の取りこぼしは少ない。
- 磁場は～1×10^{12} 以下には減衰しないのでは？
- 弱磁場NSと強磁場NSは、内部物理状態が違うのでは？
- 核物質の強磁性と常磁性の発現では (Makishima+99)？
- NS全体が強磁性になると、~10^{16}Gが可能。

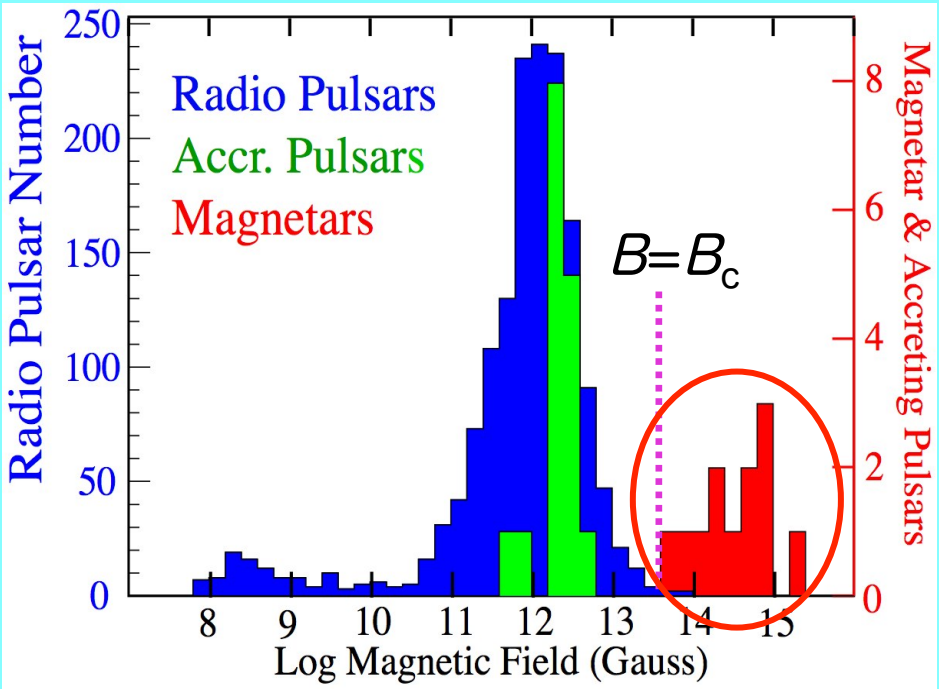
(Makishima+99)



5. マグネター

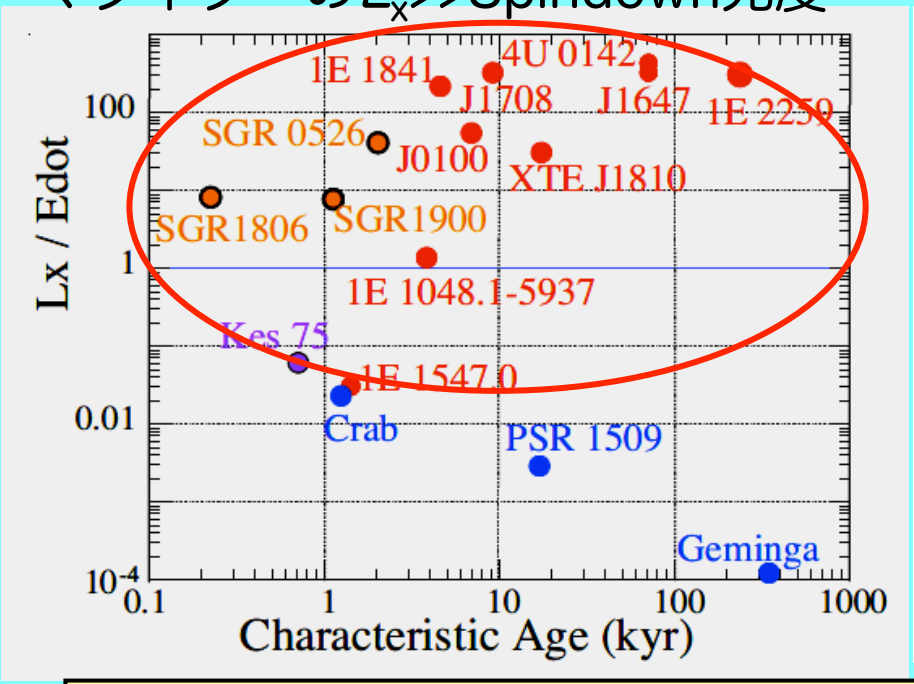
マグネター = 中性子星の一種
- ～10 AXPs と 6 SGRs
- P = 2～12 秒, 大きな P-dot
  ⇒ $B > B_c \equiv 4\times10^{13}$G
- 放射はX線領域、$L_x \gg L_{spindown}$
- 質量降着の証拠なし
- さまざまな時間スケールでの活動性。あるものは Giant Burstを起こす。



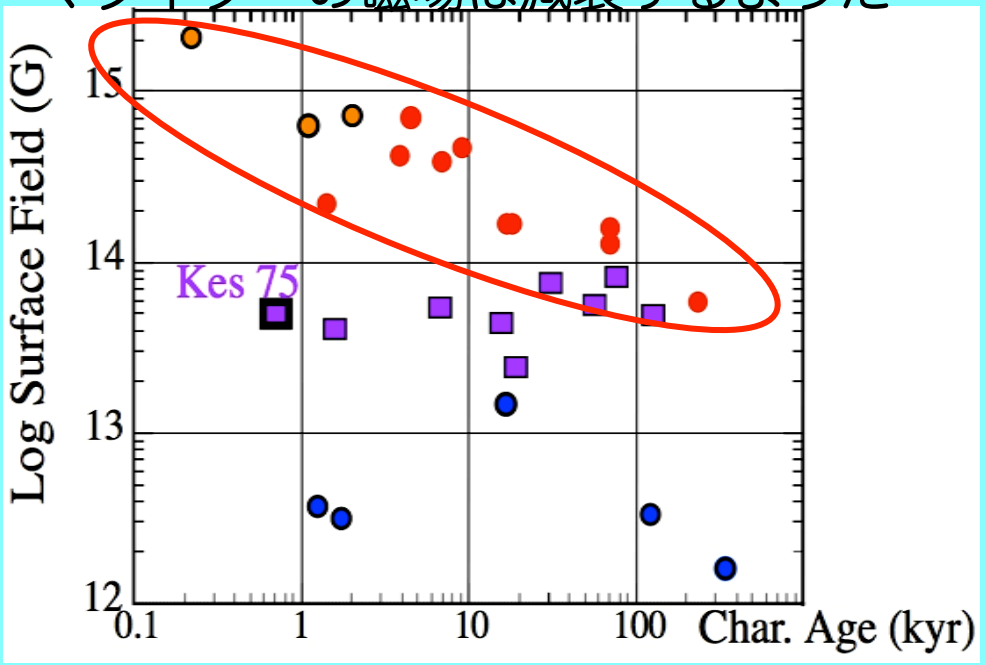


6. 既知のマグネター

マグネターのL_x>>Spindown光度

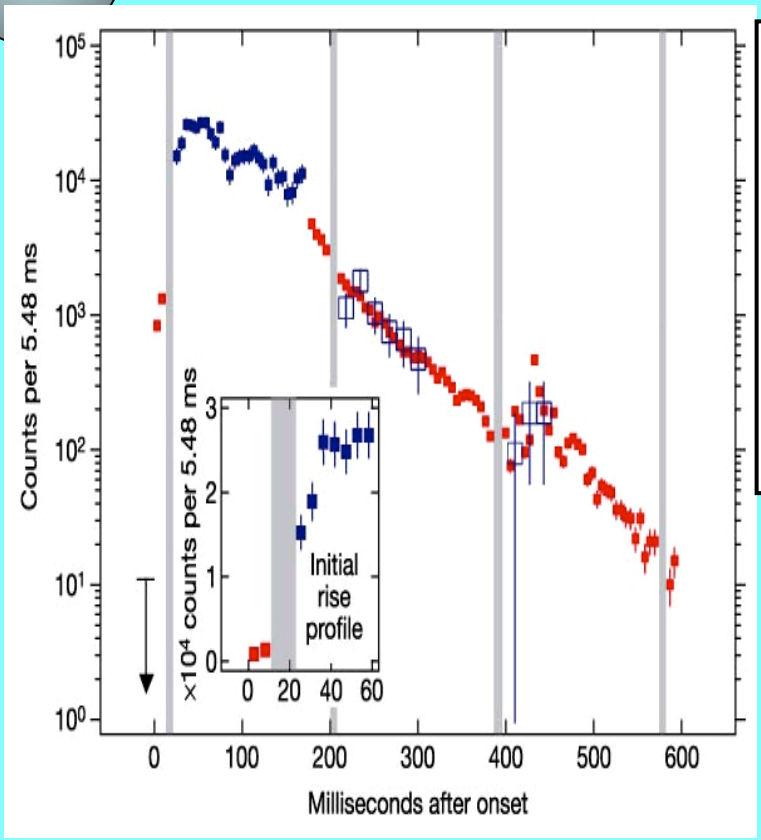


マグネターの磁場は減衰するようだ

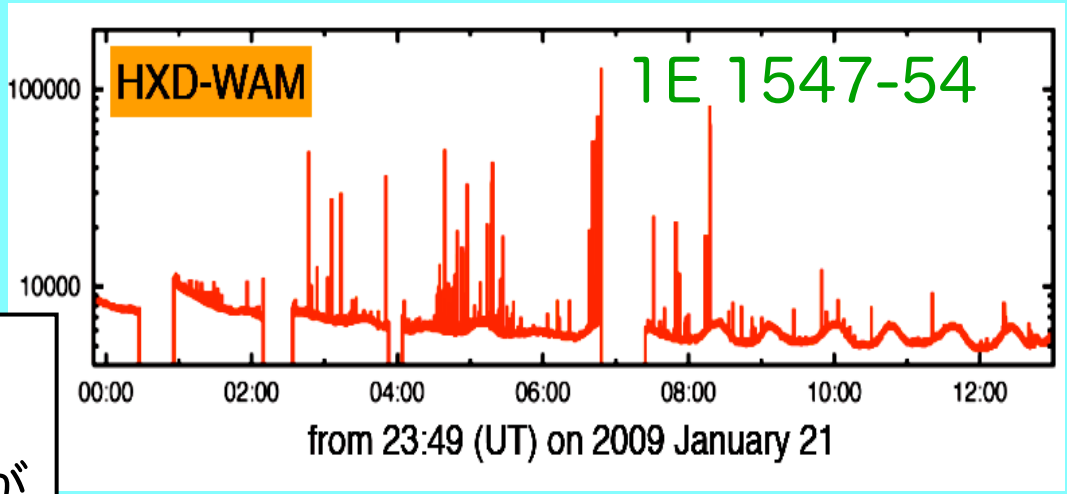


超強磁場仮説：“マグネターはじっさい$B > B_c$の超強磁場をもち、
磁気エネルギーを消費して輝いている”（*Thompson& Duncan 95*）。

7. マグネターの活動の例



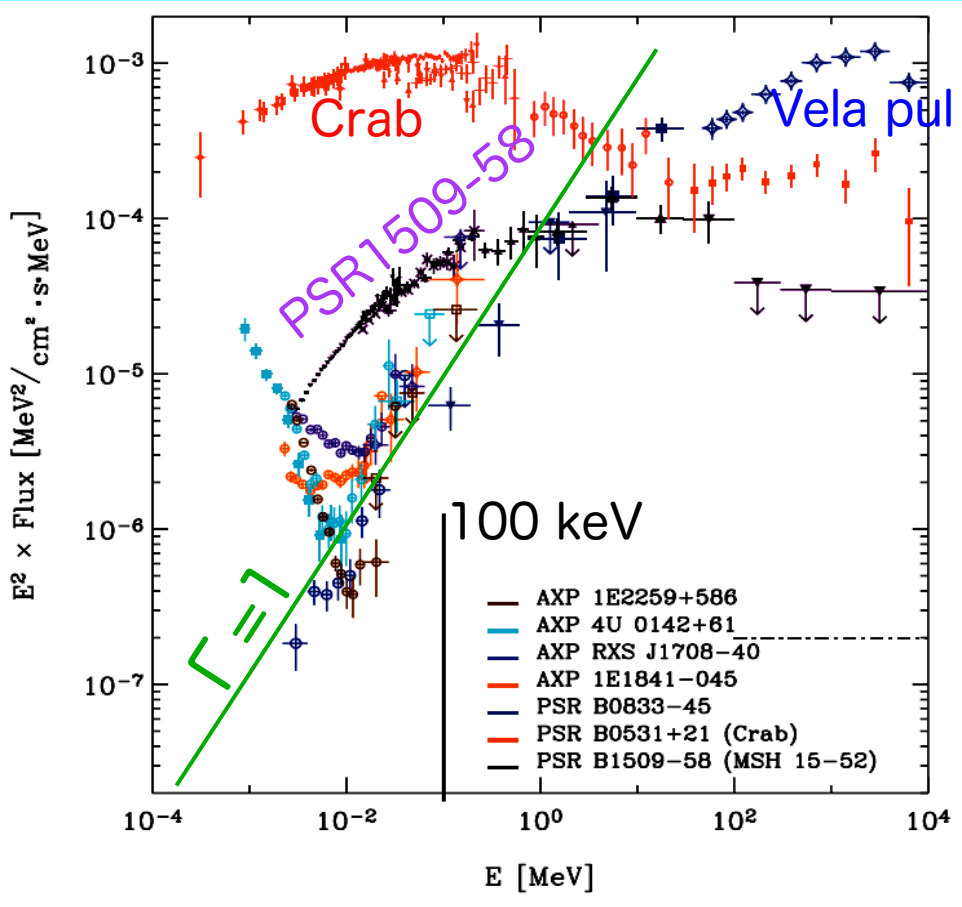
SGR 1806-20 からの Giant Flare on 2004 Dec. 27 (Terasawa+05). ほとんどすべてのガンマ線検出器は飽和してしまい、GEOTAIL衛星の粒子検出器が正確なライトカーブを提供。放出エネルギー~10^{47} erg は 10^{15} G の双極子磁場が消滅したことに相当。



2009年１月、急に活動を開始した 1E 1547-54から、「すざく」HXDシールド部が１日に受けた大量のバースト。

8. ハードテールの発見

INTEGRAL and *RXTE* (e.g., Kuiper+06, den Hartog + 09)

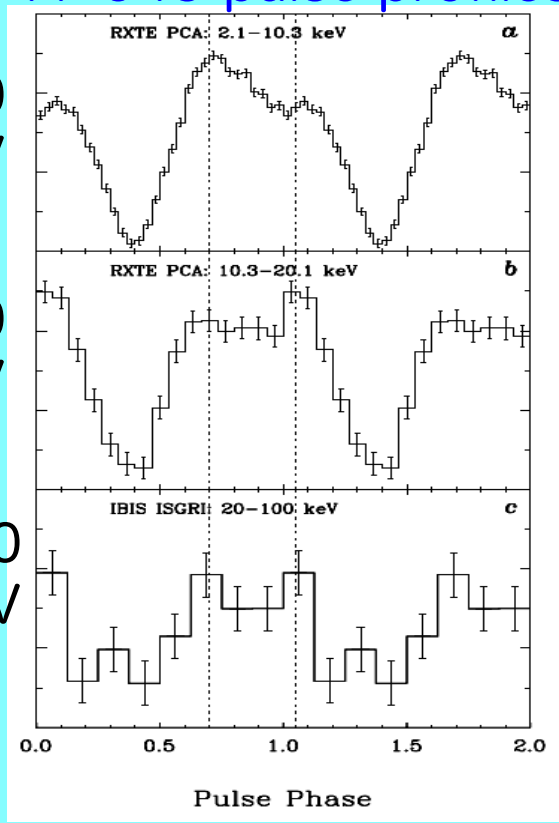


1E 1841-045 pulse profiles

2-10 keV

10-20 keV

20-100 keV



・異常に硬い光子指数Γ~1で、~100 keV まで延びる。
・強くパルスするが、その波形はソフト成分のものと大差ない。

9.「すざく」硬X線検出器(HXD)

大マゼラン雲にSN1987Aが出現したとき、高エネルギー実験の釜江教授らが、ブラジルでガンマ線をとらえる気球実験を実施。それを衛星搭載装置としてバージョンアップしたもの。

1.結晶シンチレータ

2.鉛と銅による
パッシブシールド

3.パッシブコリメータ

4.プラシンチによる
荷電粒子の反同時計数

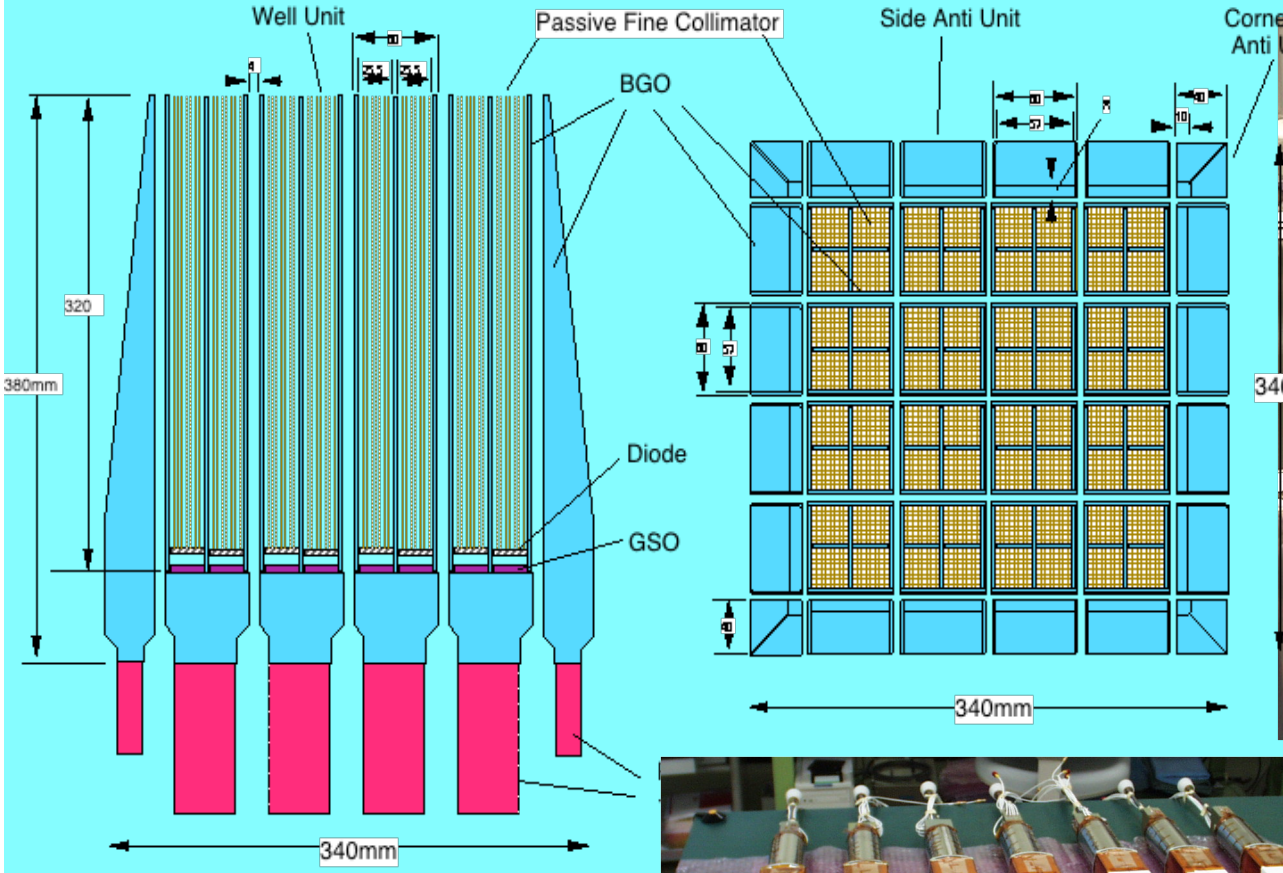
5. 無機結晶による
アクティブシールド

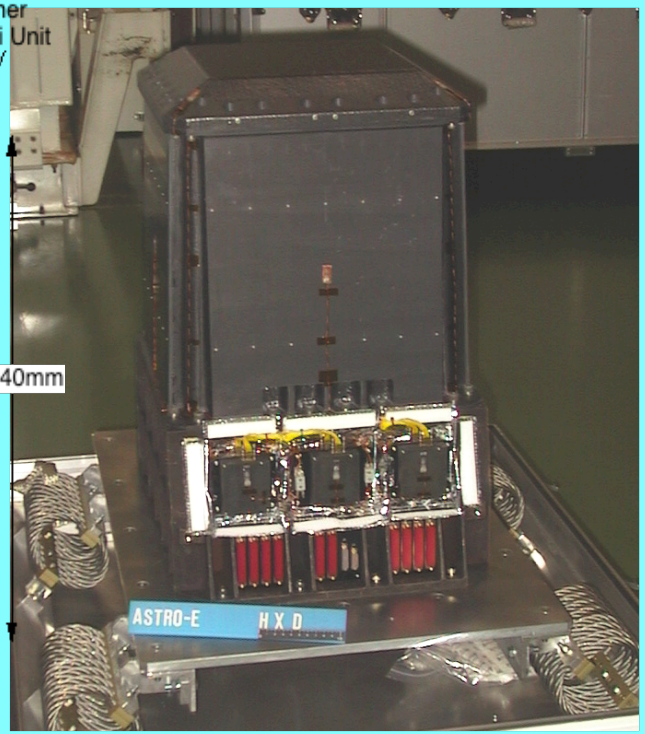
6.フォスイッチ方式

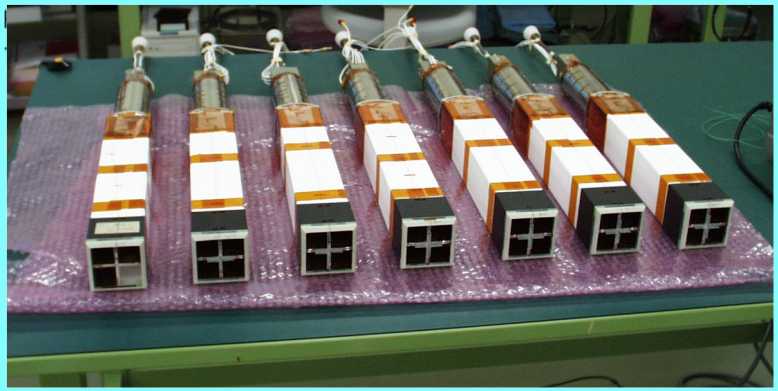
7.井戸型フォスイッチ方式

磁石星

複眼構造により、有効面積を増やし、反同時計数を効かせ、エレキのデッドタイム軽減

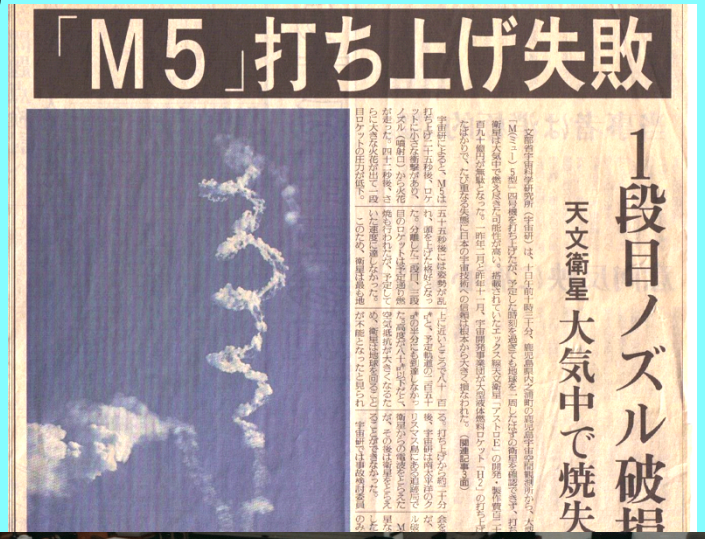






(Takahashi+07, Kokubun +07)

10. *ASTRO-E* と *Astro-E2*


「M5」打ち上げ失敗

1段目ノズル破損

天文衛星 大気中で焼失

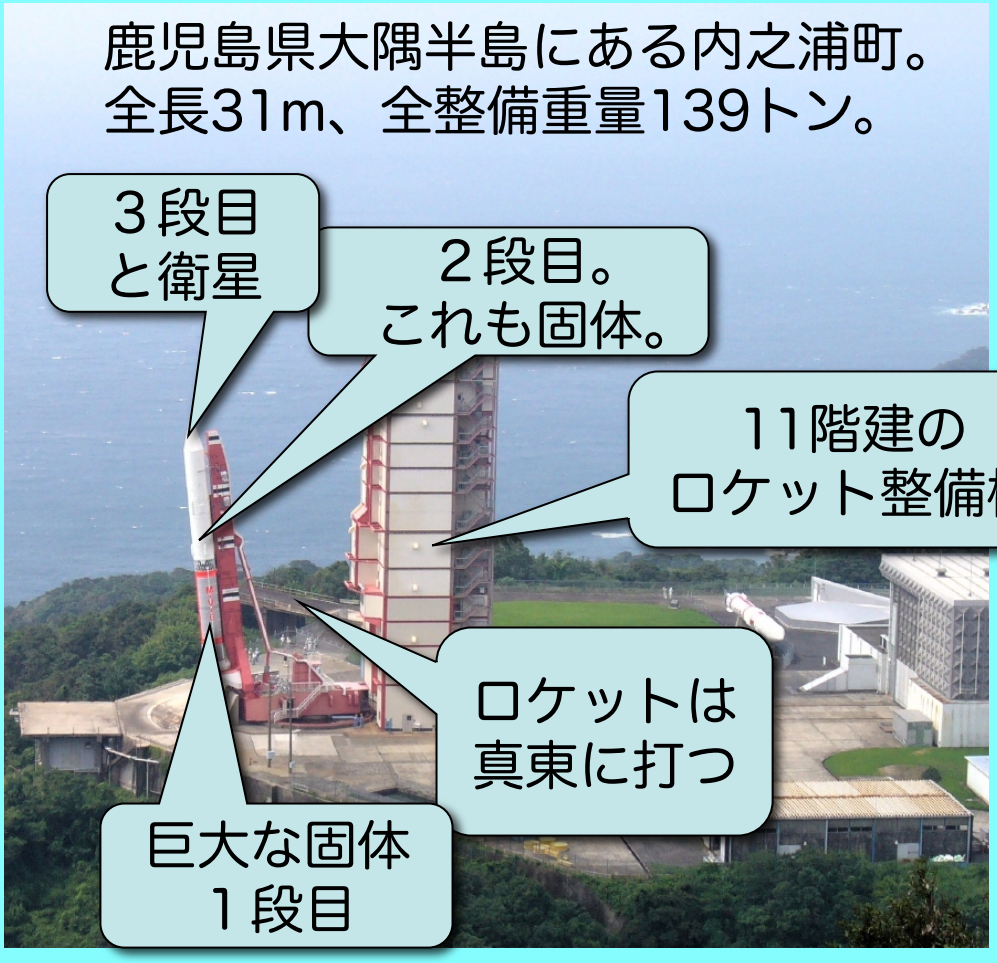
釜江名誉教授（現Stanford大）

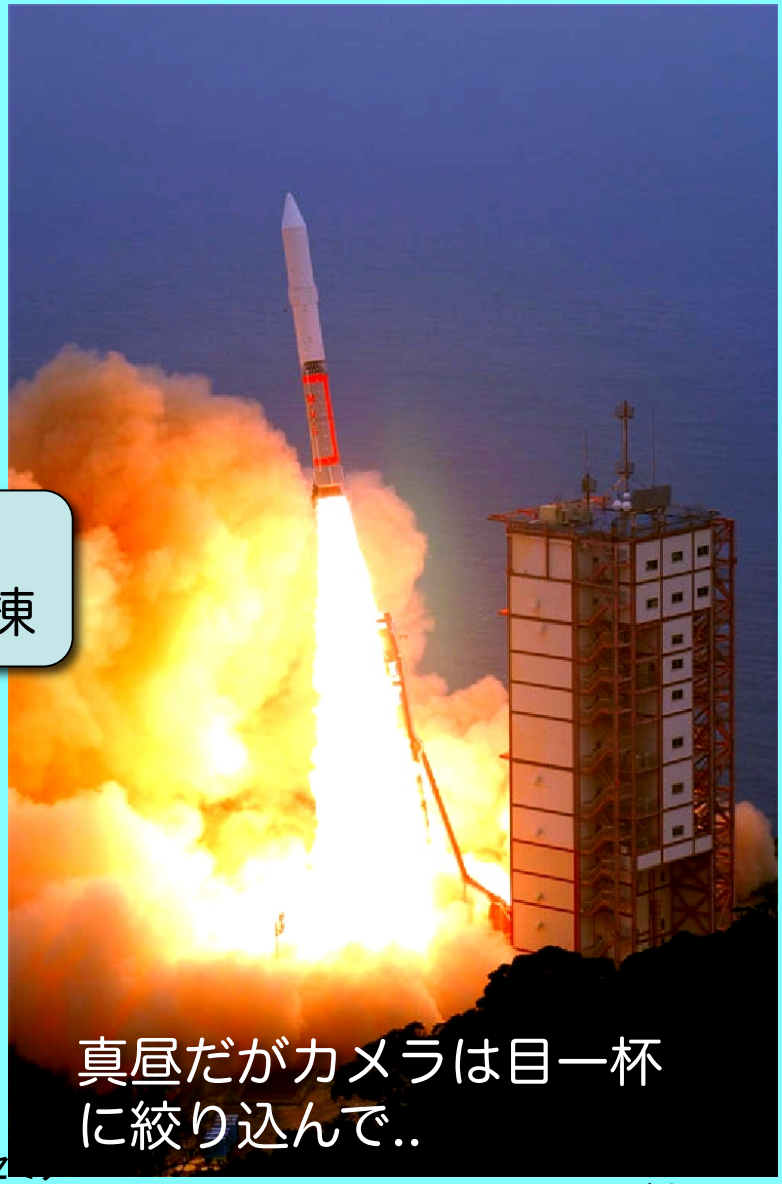
2004年夏。HXDの２号機。
理研、広島大、埼玉大、青学大、
金沢大などが参加。再挑戦機
Astro-E2（すざく）に搭載。

1999年夏。HXDの１号機。
おもに東大と宇宙研。装置を
*ASTRO-E*衛星に搭載したが…

11. *Astro-E2* の組み立て（JAXA)

13. *Astro-E2* (すざく) の打ち上げ





打ち上げ32秒後

音速の壁を越える頃。
搭載装置は最も厳しい
振動に曝される..

Astro-E2 は2005年７月10日12:30に打ち上げ成功し、「すざく」と命名された。

13. 「すざく」によるマグネターの観測

✧2005～2008年は、単発的な観測。

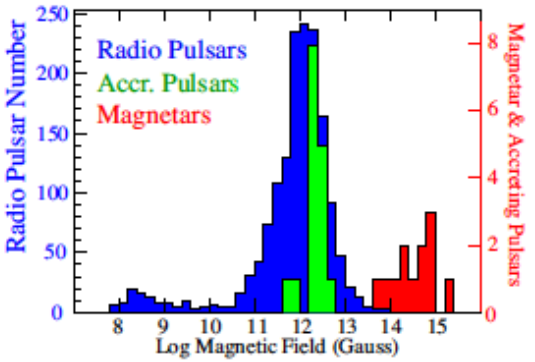
✧第４観測期(2009年度)に「Key Project」が採択(670 ksec)。

✧2008年8月と2009年1月に、活動開始した天体を緊急観測。

A *Suzaku* Study of Magnetars and the Neutron-Star Magnetism

K. Makisihima[1,2], T. Enoto[1], A. Hayato[2,3], M. Morii[4], Y. E. Nakagawa[2], M. Nakajima[5], T. Tamagawa[2], A. Bamba[6], J. S. Hiraga[2], N. Kawai[7], S. Kitamoto[4], T. Kohmura[8], H. Murakami[4], T. Sakamoto[9], S. Shibata[10], N. Shibazaki[4], T. Takahashi[6], J. Takata[12], T. Tanaka[11], Y. T. Tanaka[7,1], Y. Terada[13], T. Terasawa[7], & A. Yoshida[14]

1: University of Tokyo
2: RIKEN
3: Tokyo Univ. of Science
4: Rikkyo University
5: Nihon University
6: ISAS/JAXA
7: Tokyo Institute of Technology
8: Kogakuin University
9: NASA UMBC/GSFC
10: Yamagata University
11: Stanford University
12: Tsing Hua Univ., Taiwan
13: Saitama University
14: Aoyama Gakuin Univ.



1 Introduction

The strong magnetism of neutron stars (NSs) is

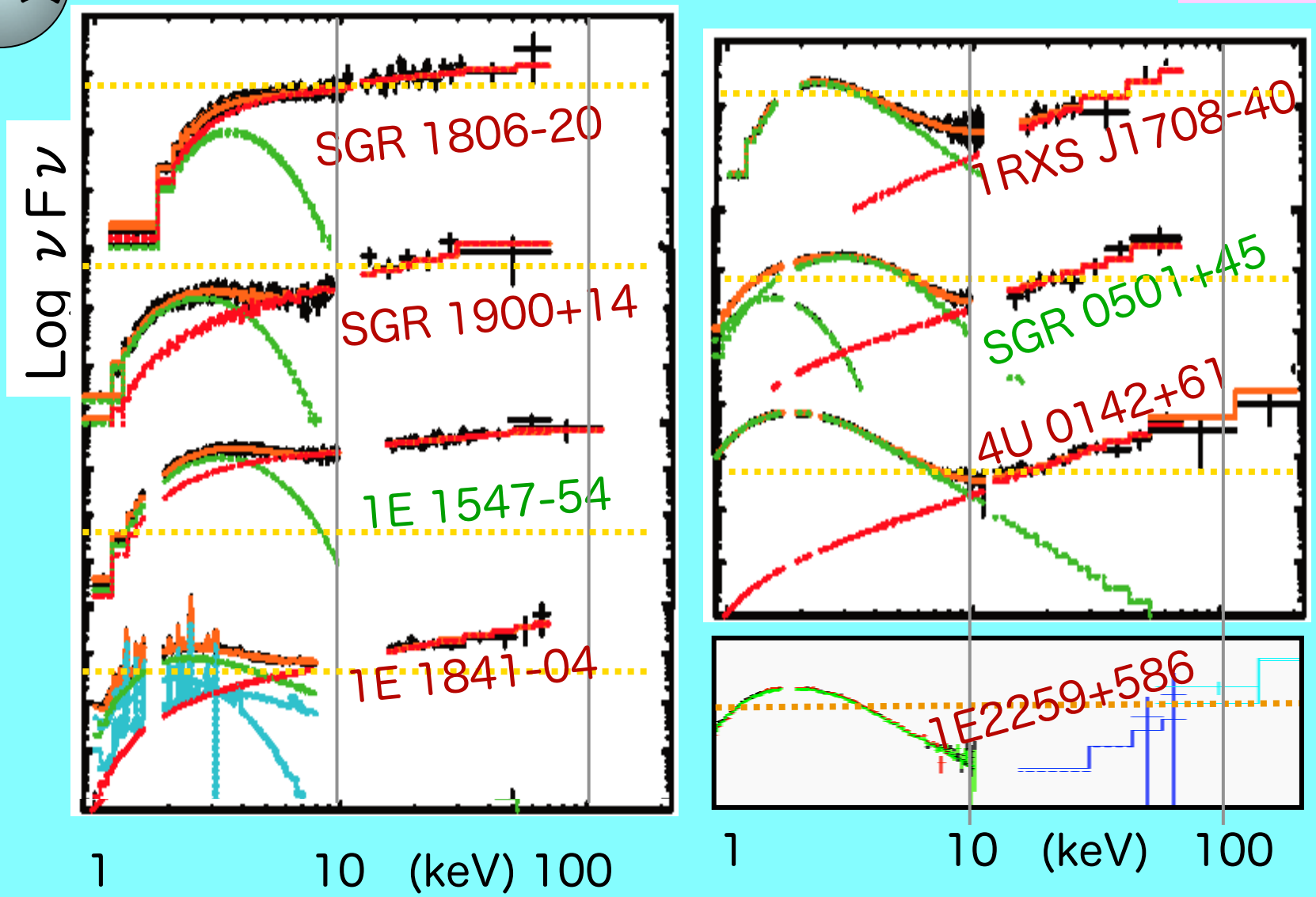
Figure 1: Distributions of magnetic fields of magnetars

14. 論文発表

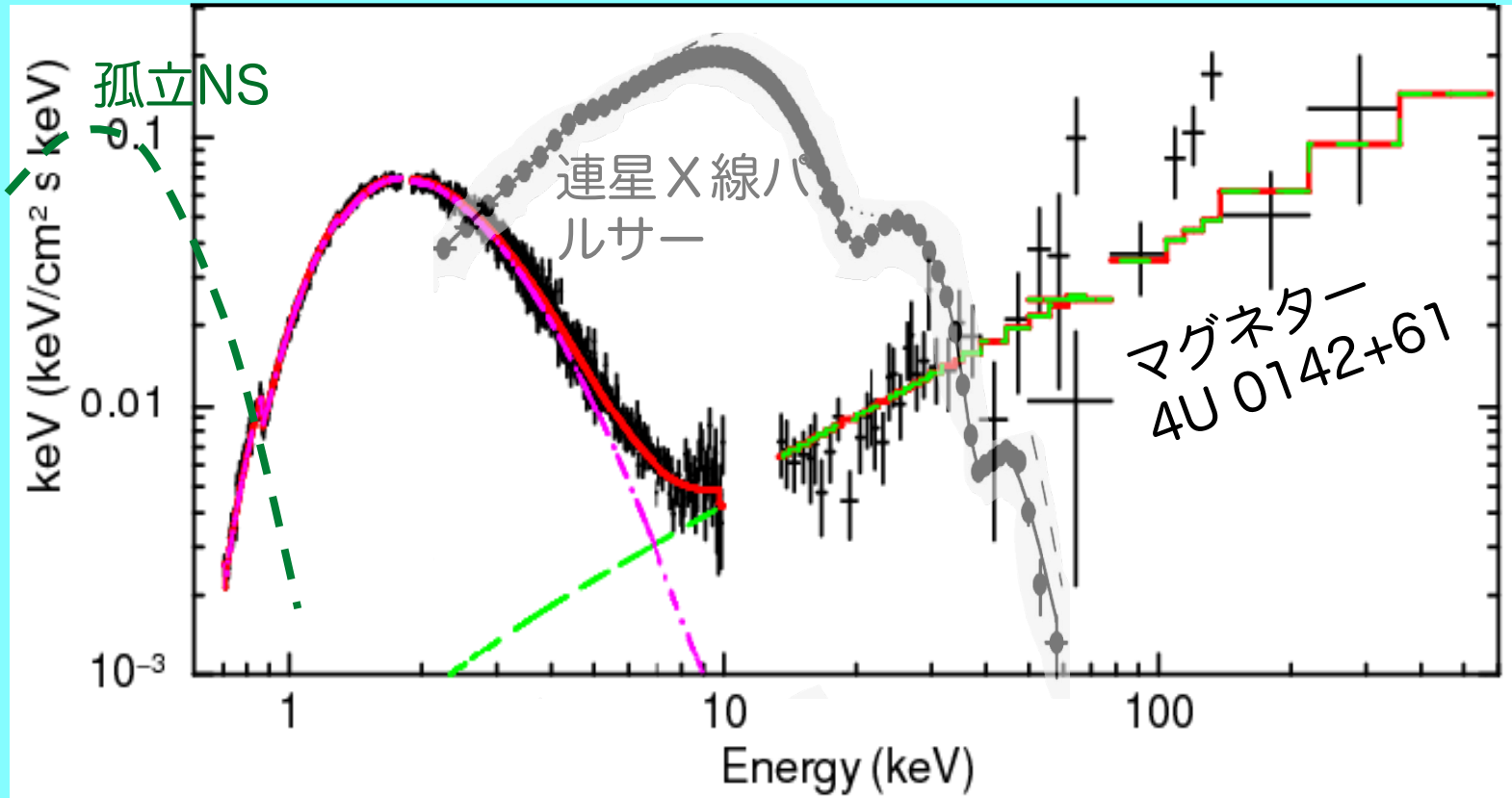
- Esposito, P. *et al. A&A* **476**, 321 (2007) [SGR 1806]
- Naik, S. *et al.* 2008, *PASJ* **60**, 237 (2008) [CXOU 1647]
- Nakagawa, Y. *et al. PASJ* **61**, S387 (2009) [SGR1806, SGR 1900]
- Enoto, T. *et al. ApJL* **639**, L122 (2009) [SGR 0501+45 No.1]
- Enoto, T. *et al. ApJ* **715**, 665 (2009) [SGR 0501+45 No.2]
- Enoto, T. *et al. PASJ* **42**, 475 (2010) [1E 1547-51]
- Enoto, T., PhD, Univ. Tokyo (2010)

15.「すざく」による定常放射スペクトル

(榎戸D論, 2010)



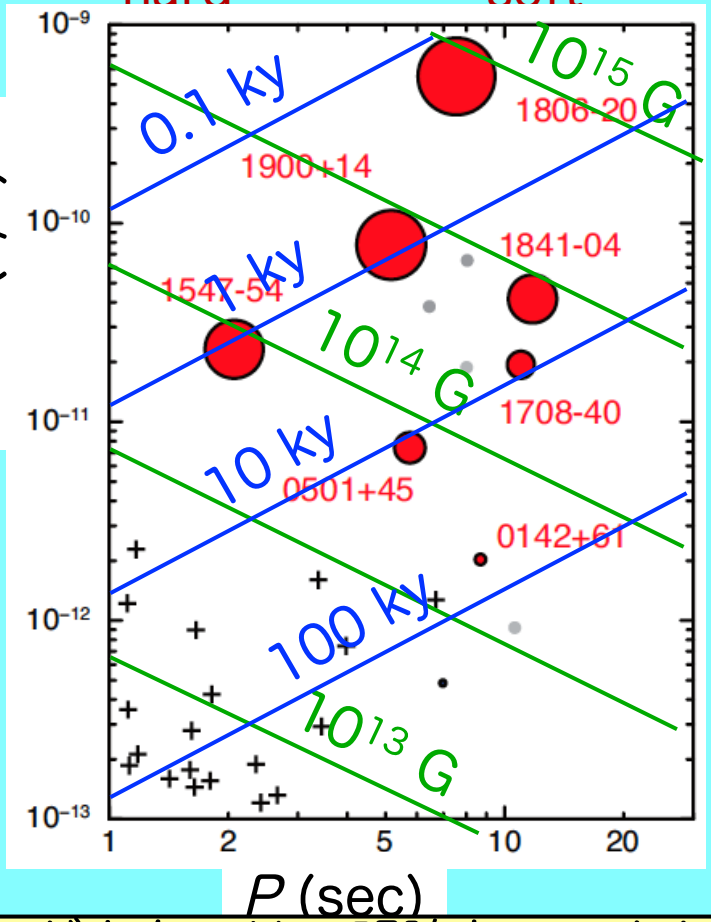
比べてみよう…

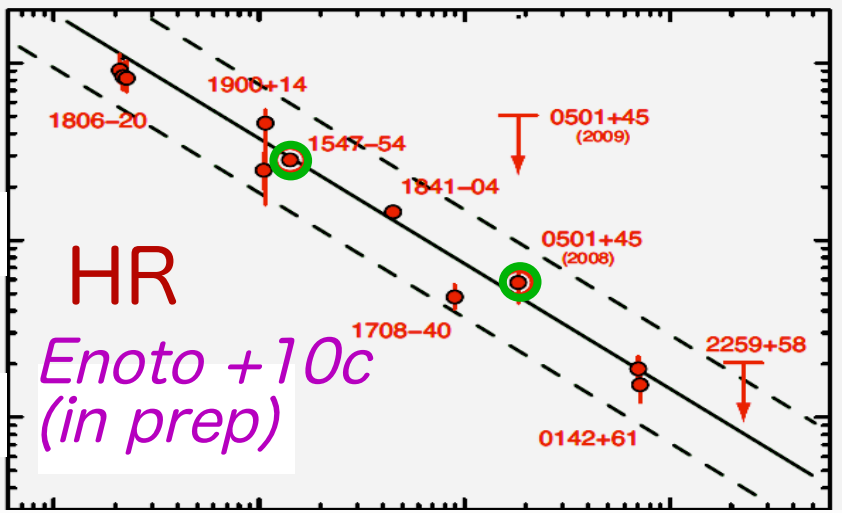


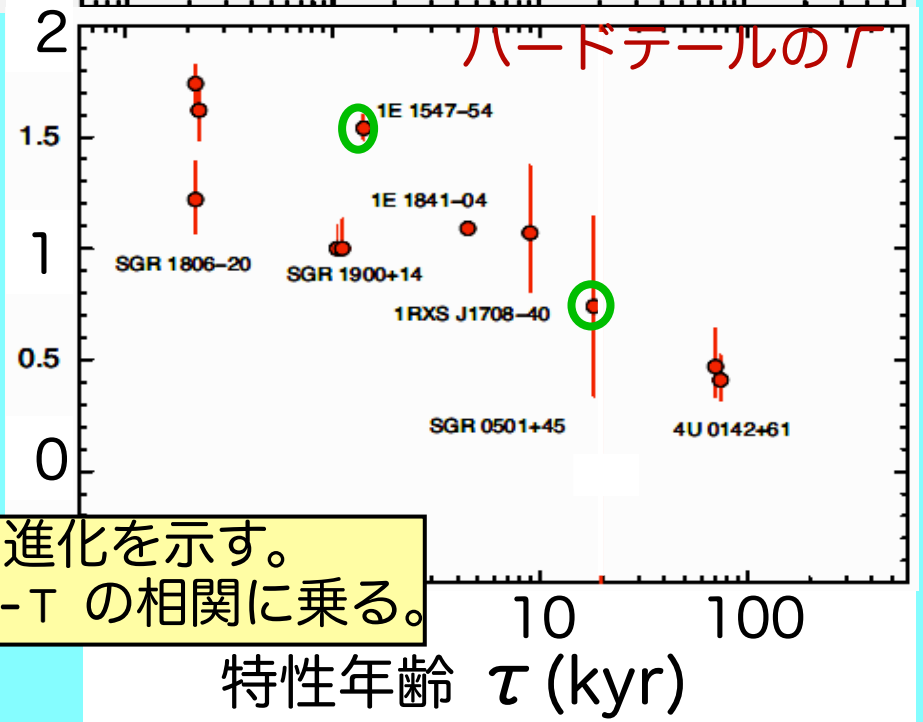
・初めて真に同時で均質な広帯域スペクトルの取得に成功。
・マグネターはどれも、特徴的な２成分スペクトルを示す。
・ハード成分は光子指数Γ～1と、異常に硬い。
⇒類のない特異な種族。特殊な物理状態。超強磁場仮説を強化。

16.「すざく」の大発見：定常スペクトルの進化

Hardness Ratio (HR)
≡ F_{hard} (1-60)/F_{soft} (1-20)



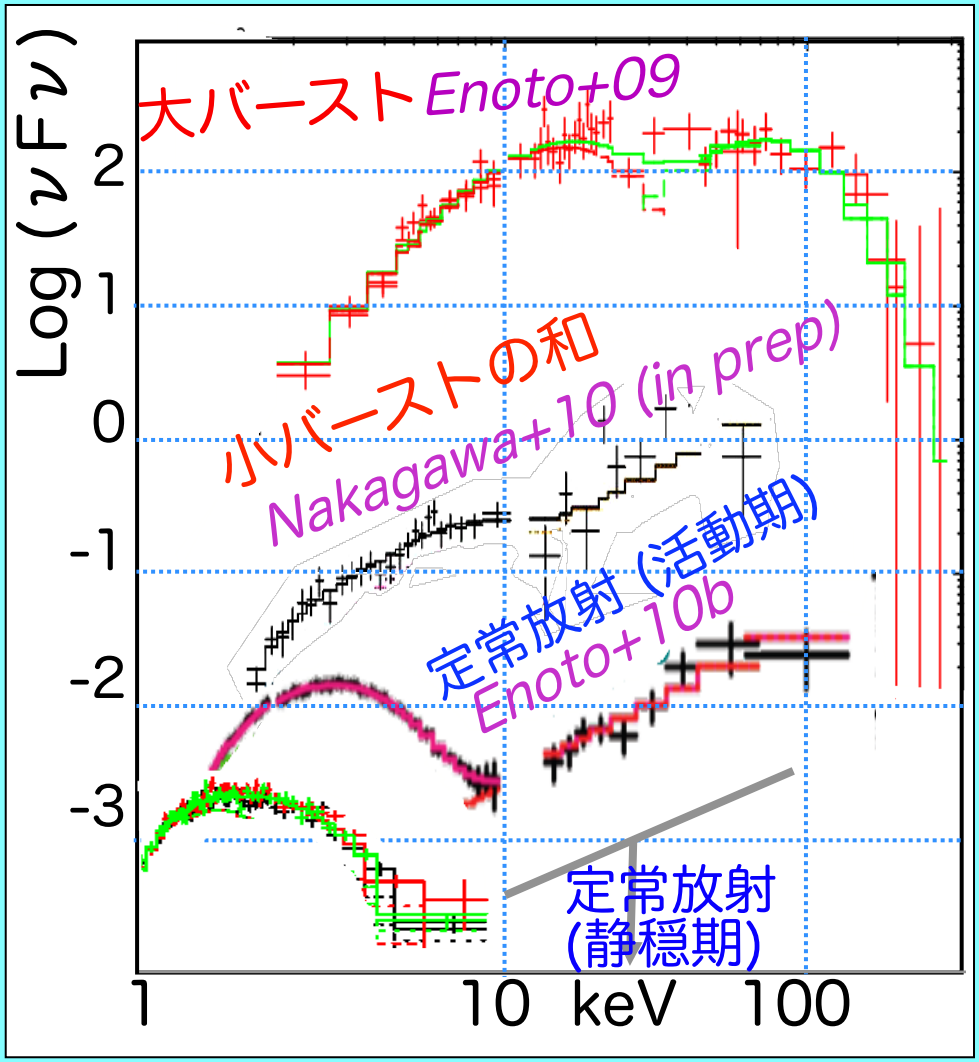


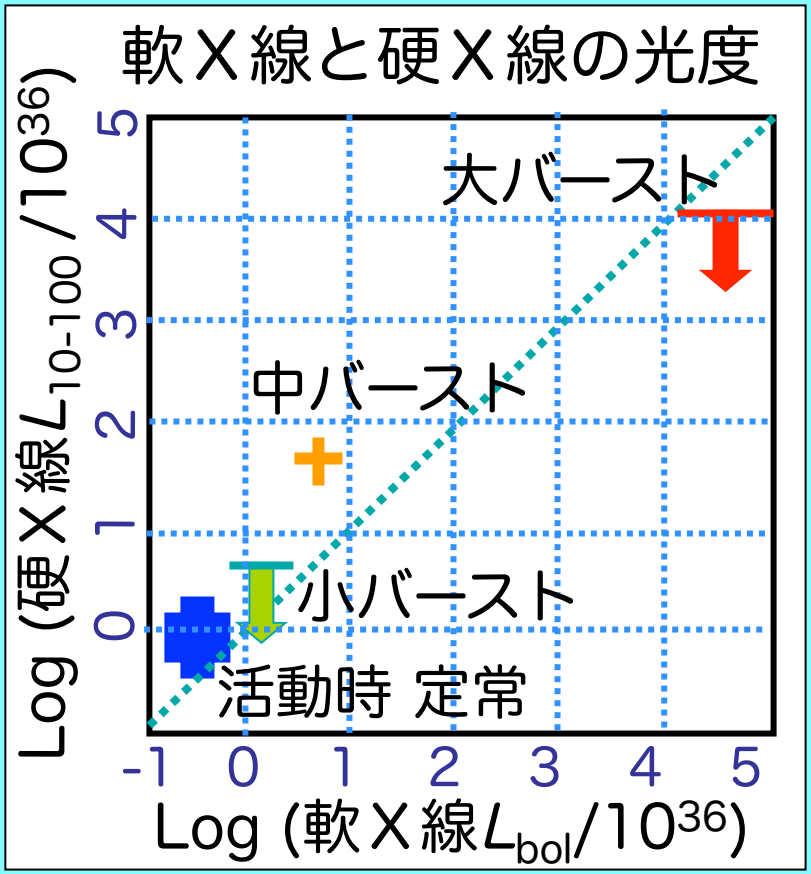


・マグネターは、明瞭なスペクトルの進化を示す。
・活動期の天体も、静穏期と同じ HR-Γ の相関に乗る。

17.「すざく」の見たバーストと定常放射

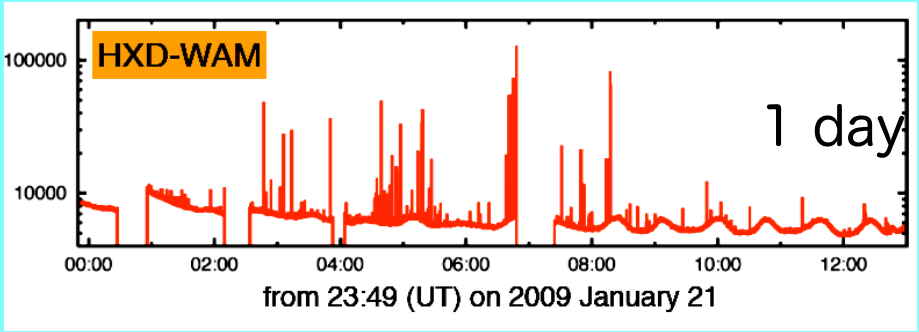
SGR 0501+45（２回の観測）

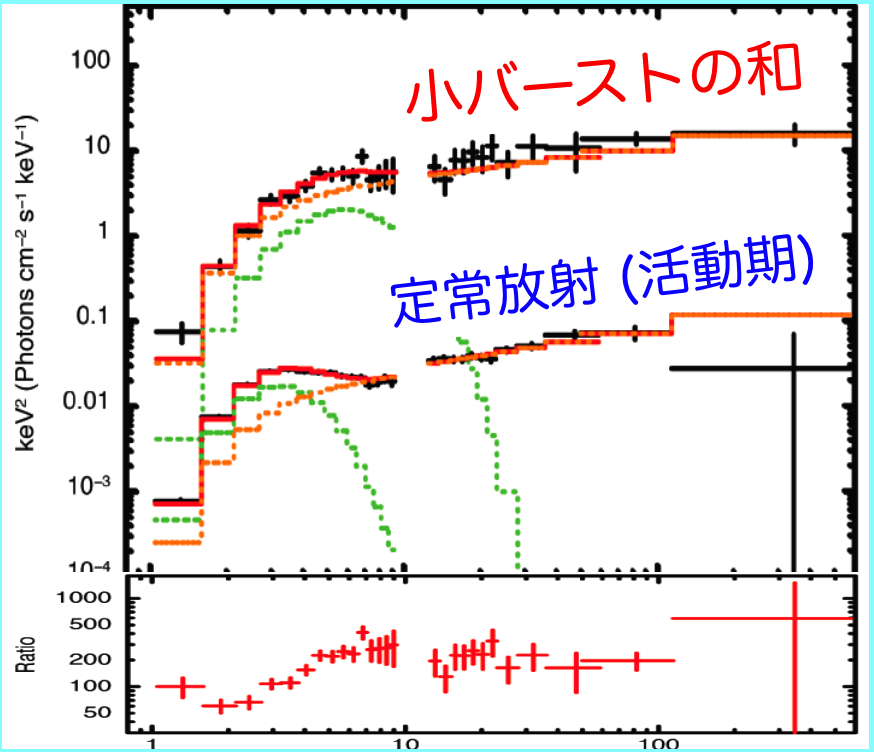




1E 1547-54の活動期の観測

(*Enoto+10a*)



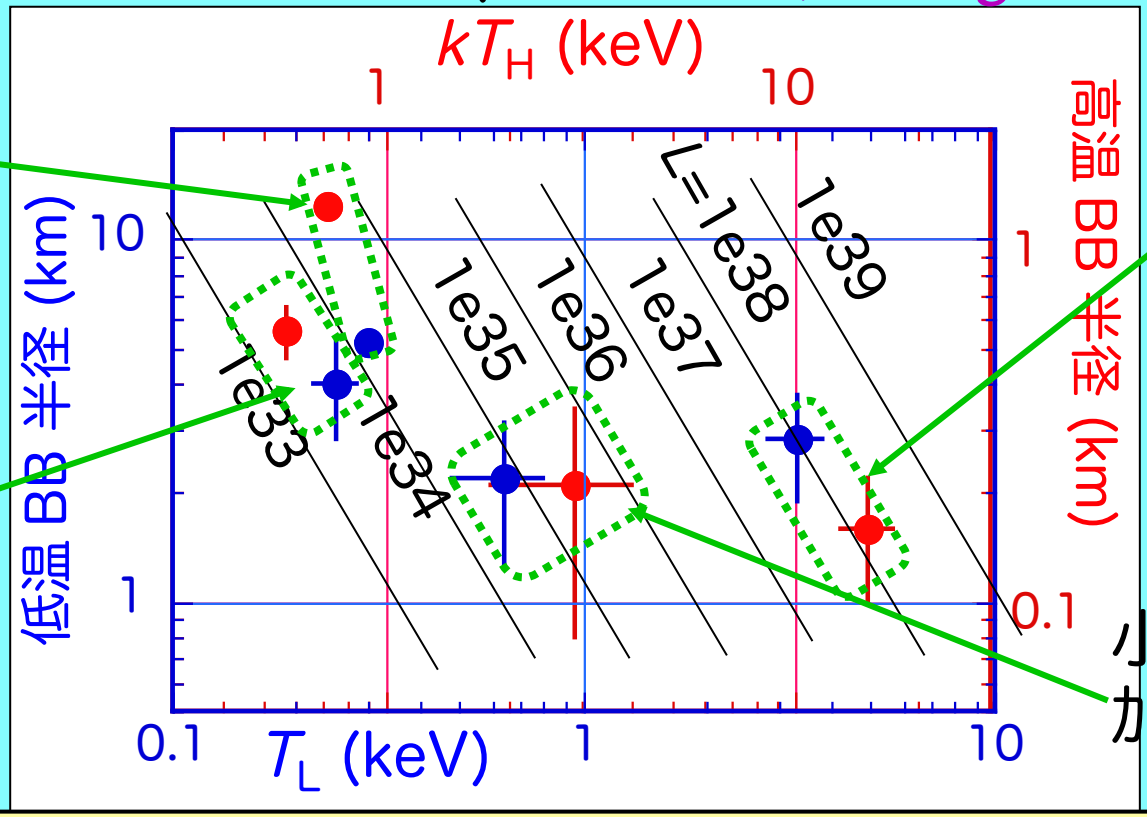


- 小バーストと定常放射は、類似したスペクトルを示す。
- バースト/定常放射も共通なエネルギー源⇒超強磁場仮説を強化。
- 定常放射 ≒ “マイクロバースト”の和か (*Nakagawa+09b*).

18.ソフト成分の性質

(@4 kpc)

SGR 0501+4516 ソフト成分の2温度黒体放射フィット (*Enoto+09,Nakagawa+10*)



定常放射
(活動期)

定常放射
(静穏期)

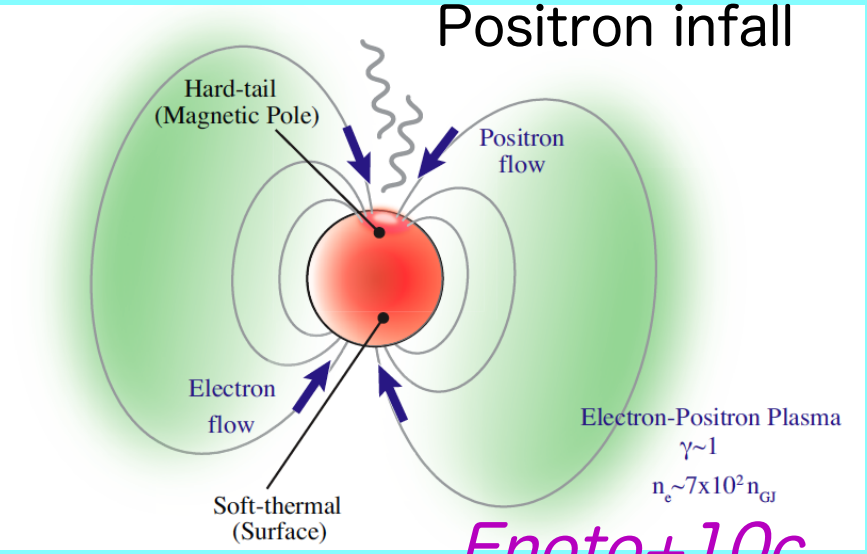
大バースト

小バースト
加算

・ソフト成分は、NS表面からの光学的に厚い熱的放射
・T ＞2 keV (局所Eddington温度)は、超強磁場の効果？
・２温度は、強磁場中の偏光の “Oモード” と“Xモード”？

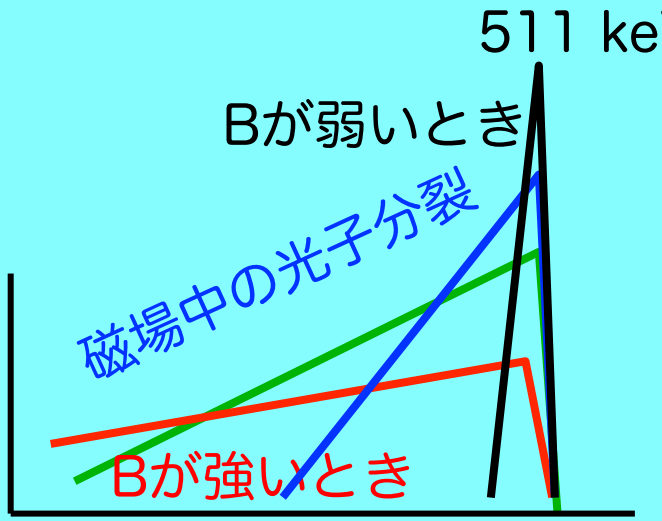
19. ハード成分の起源

1. おそらく非熱的 ⇒ おそらく磁気圏で、粒子加速。
2. 「～1を説明する必要⇒逆コンプトン過程などでは無理。
2. 放射は等方的 ∵) HR は見る角度によらず、τで決まる⇒シンクロトロン過程、曲率放射などは、除外される。
3. 中性子星の表面で発生 ∵) ソフト/ハード成分で似たパルス波。
4. 高い放射効率 ∵) 天体により $L_{hard} \gg L_{soft}$⇒非熱的制動放射では無理。



Enoto+10c

$\gamma_0 + \gamma^* \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$



20. まとめと今後の課題

1. 「すざく」により～８個のマグネターから、均質で同時な広帯域(0.5～100keV) スペクトルを取得できた。
2. どのスペクトルも、ソフト/ハード２成分から成り、その形は、ほぼ特性年齢で決まることを発見した。
3. ソフト/ハード成分、活動期/静穏期、バースト/定常放射を通じ、エネルギー源が共通である証拠を得た。
4. ソフト成分はNS表面からの熱放射のO-modeとX-modeかもしれない。
5. ハード成分は簡単には説明できない。511 keV ガンマ線が強磁場中で光子分裂を繰り返したものか。
6. 可能性が報告されていた陽子サイクロトロン共鳴構造は、未確認。
7. いくつかの観点から、超強磁場仮説を強化できた。

✧ 3.を強化⇒バーストのスペクトルを定量化。理研にて進行中(中川)。

✧ より高いエネルギー領域を探査⇒Stanfordにて進行中(榎戸、*Fermi*)。

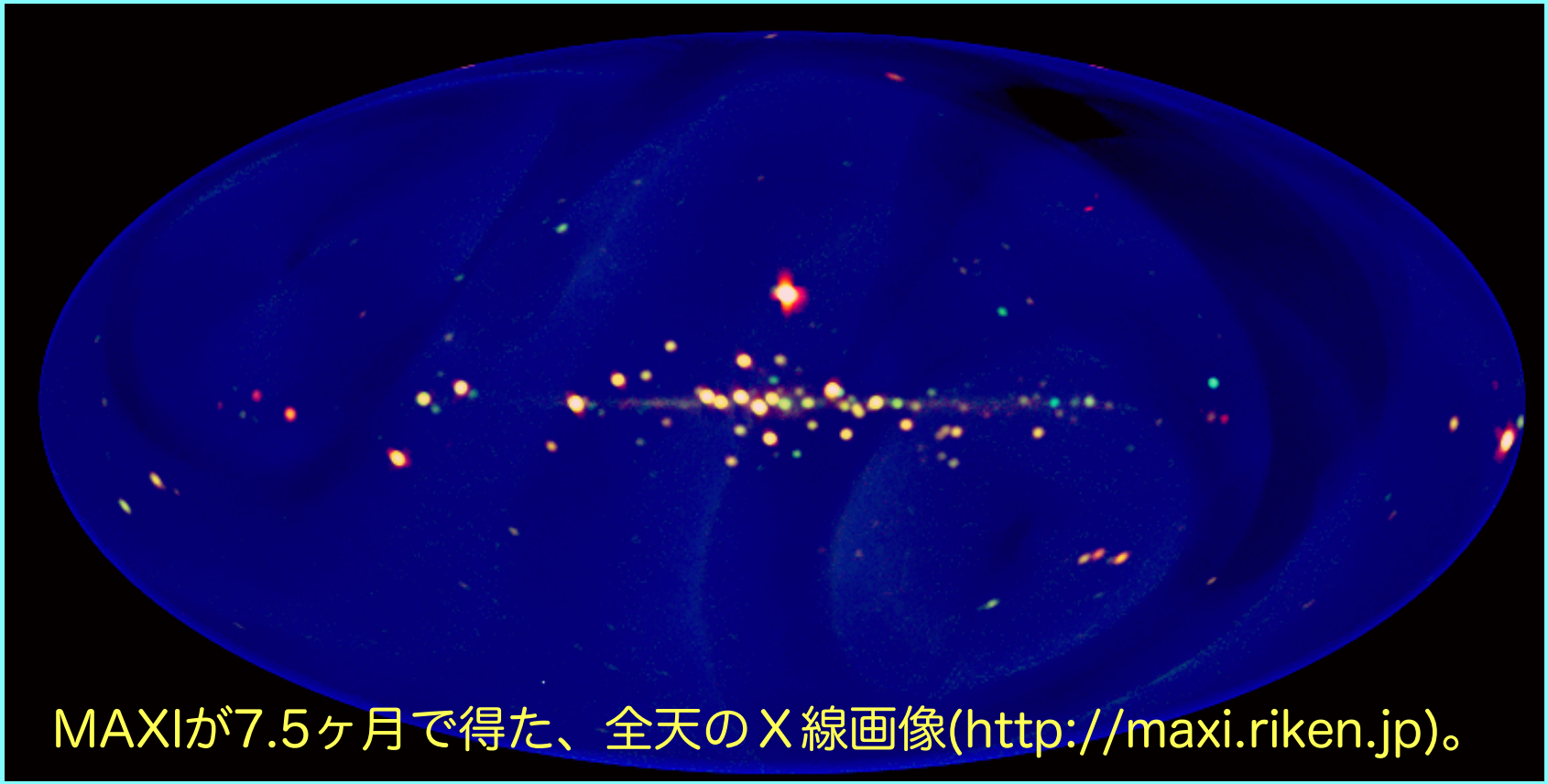
✧ 活動期に入ったマグネター⇒ MAXIで検出、「すざく」で追観測。

✧ 4.を検証⇒軟Ｘ線成分の偏光を測定する→*GEMS* 衛星(NASA, 理研)

✧ 5.を検証⇒511 keV 付近の連続成分を測定。「すざく」、*ASTRO-H* 。

21. 全天X線監視装置MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)

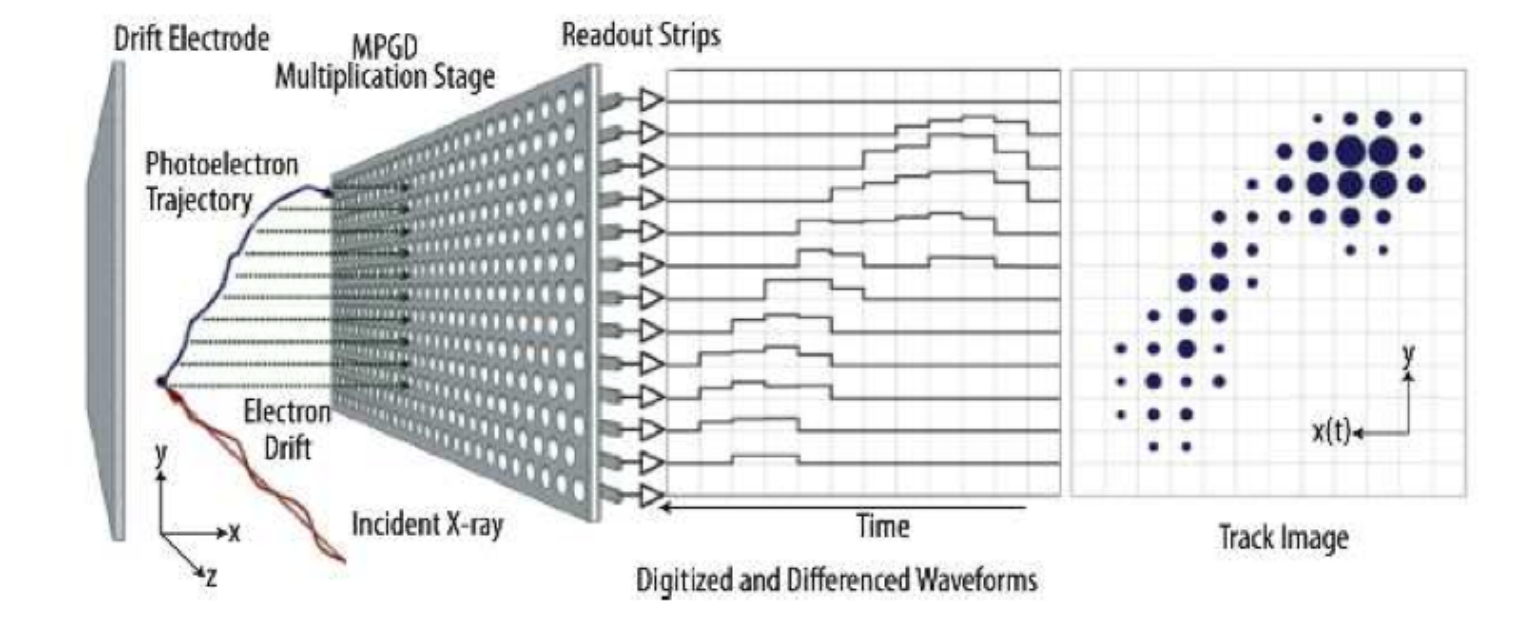
理研、JAXA、東工大、青学大、日大、京大、宮崎大など。
2009年7月、国際宇宙ステーション「きぼう」に搭載。



MAXIが7.5ヶ月で得た、全天のX線画像(http://maxi.riken.jp)。

22. *GEMS* (Gravity and Extreme Magnetism SMEX)

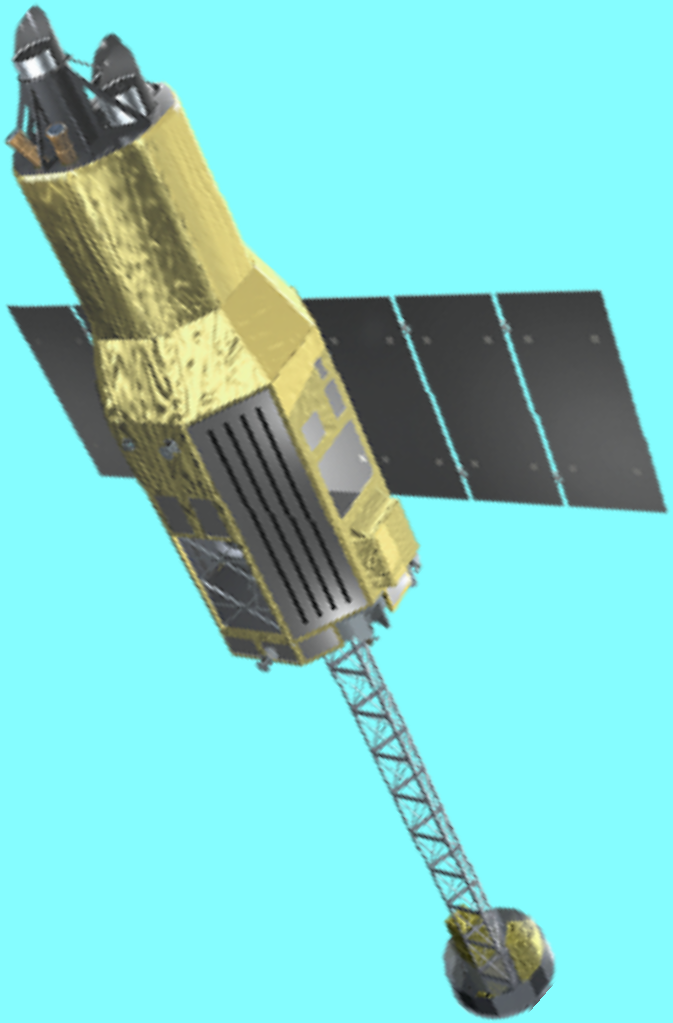
- ✧ 世界初の、Ｘ線偏光観測衛星。2013年頃に打ち上げ予定。
- ✧ 米国 SMEX (Small Explorerミッション）として採択。
- ✧ 理研(玉川ら)+東大CNSで開発された、ガス電子増幅フォイル(GEM)を、Time Projection Chamberとして用い、光電子の飛跡を3D測定、入射Ｘ線の偏光方向を決定。



23.「すざく」の後継機*ASTRO-H*

2014年度に、H2Aロケットで打ち上げ予定

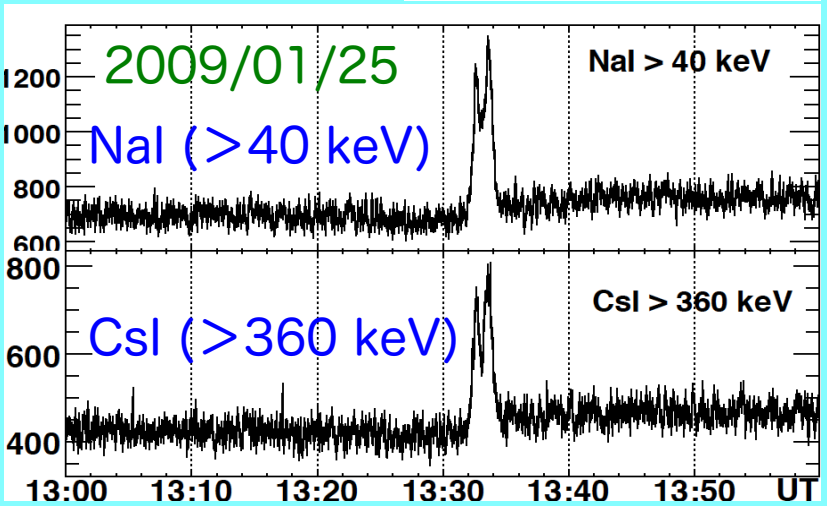
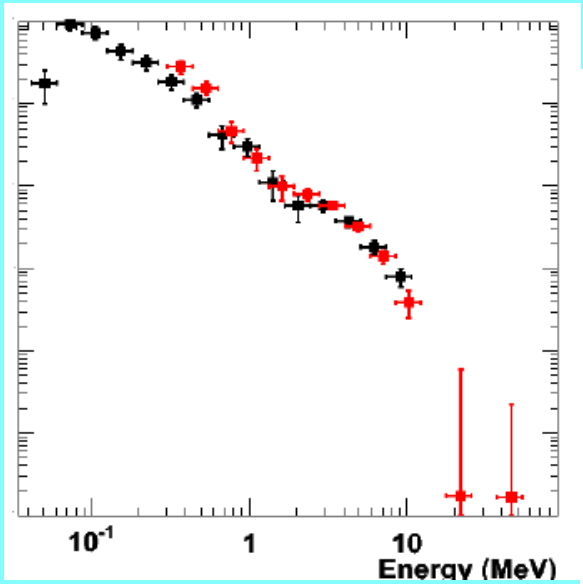
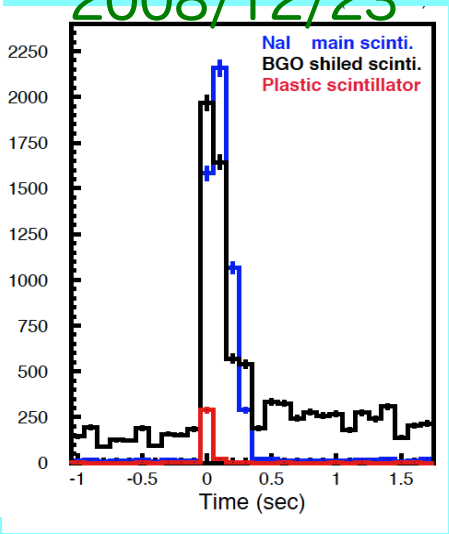
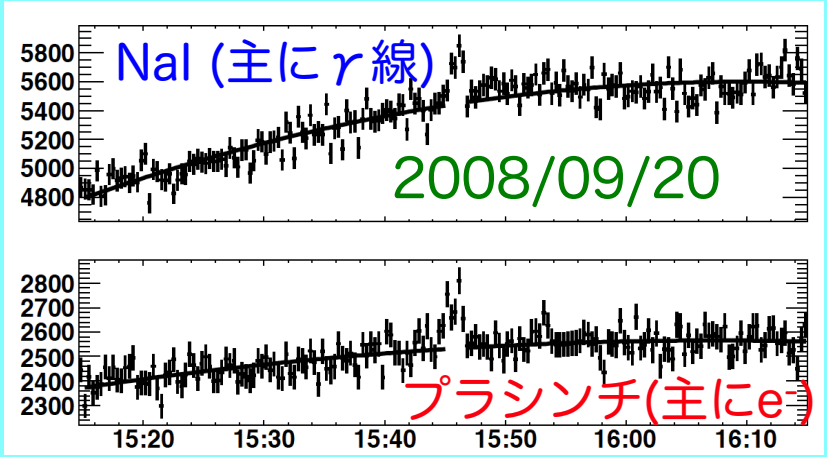
- マイクロカロリメータ: 0.5-10 keV, $\Delta E/E \sim 0.1\%$ (JAXA,首都大,金沢大,理研..)
- 硬X線スーパーミラー (名大, JAXA, 愛媛大,..) と半導体撮像検出器 (JAXA,東大,広大, 埼玉,青学大, Stanford,..)を用いた硬X線撮像システム：5～80 keV ⇒ マグネター連続成分、銀河団やSNRの非熱的放射、BH…
- コンプトン運動学を用いた、軟ガンマ線検出器(Stanford, JAXA, 広大, 東大,..)：60~600 keV ⇒e^+e^-対消滅構造
- 軟X線ミラーと国産X線CCD(阪大,京大..)を用いた軟X線撮像システム ⇒汎用の標準装備



乗鞍と日本海での雷実験

磁石星

Gamma-Ray Observation of Winter THunderclouds
GROWTH

- ✧ 日本海冬季雷からも乗鞍夏期雷からも、10 MeVにガンマ線を検出。
- ✧ 約5例は0.1sec以下で、落雷に同期。
- ✧ 他の約５例は～１分の長い継続時間、落雷に同期せず。
- ✧ 電子が到来する場合もある。

(土屋晴文、榎戸輝揚+；PRL 07, 09)