

# 磁場の強い中性子星のX線観測

榎戸 輝揚

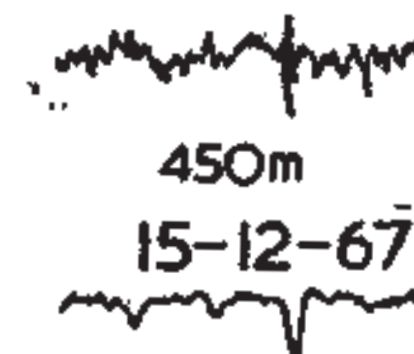
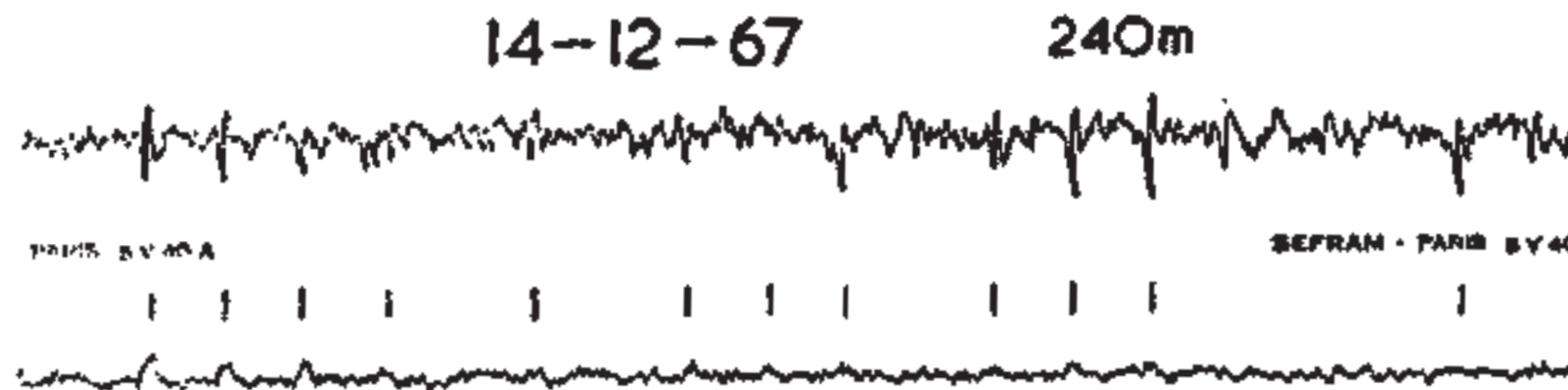
(京都大学 白眉センター・宇宙物理学教室)

中性子星の専用  
X線望遠鏡 NICER  
の打ち上げ！  
2017年6月3日



# パルサー発見から50周年

1967

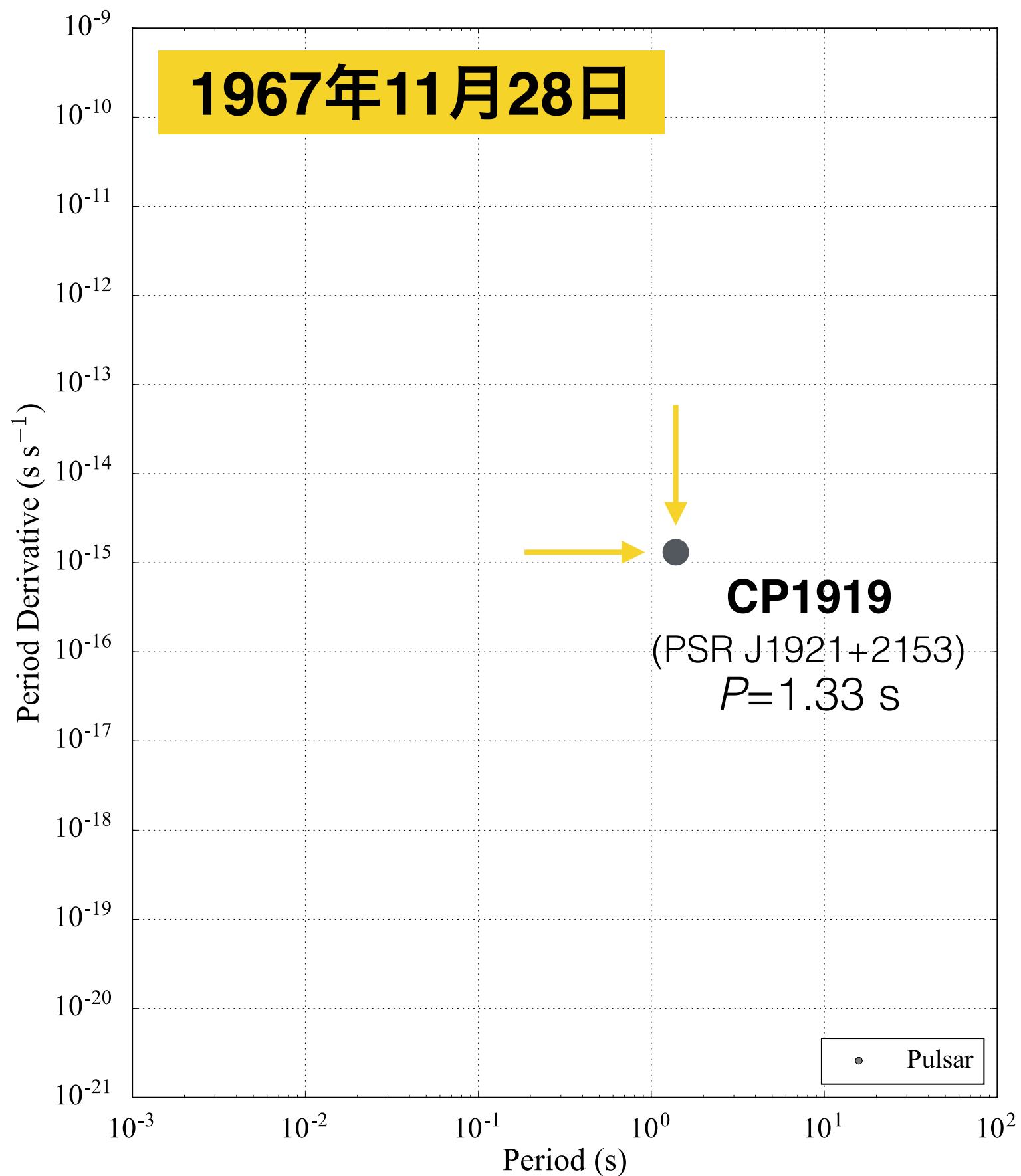


Hewish & Bell et al., 1968, Nature

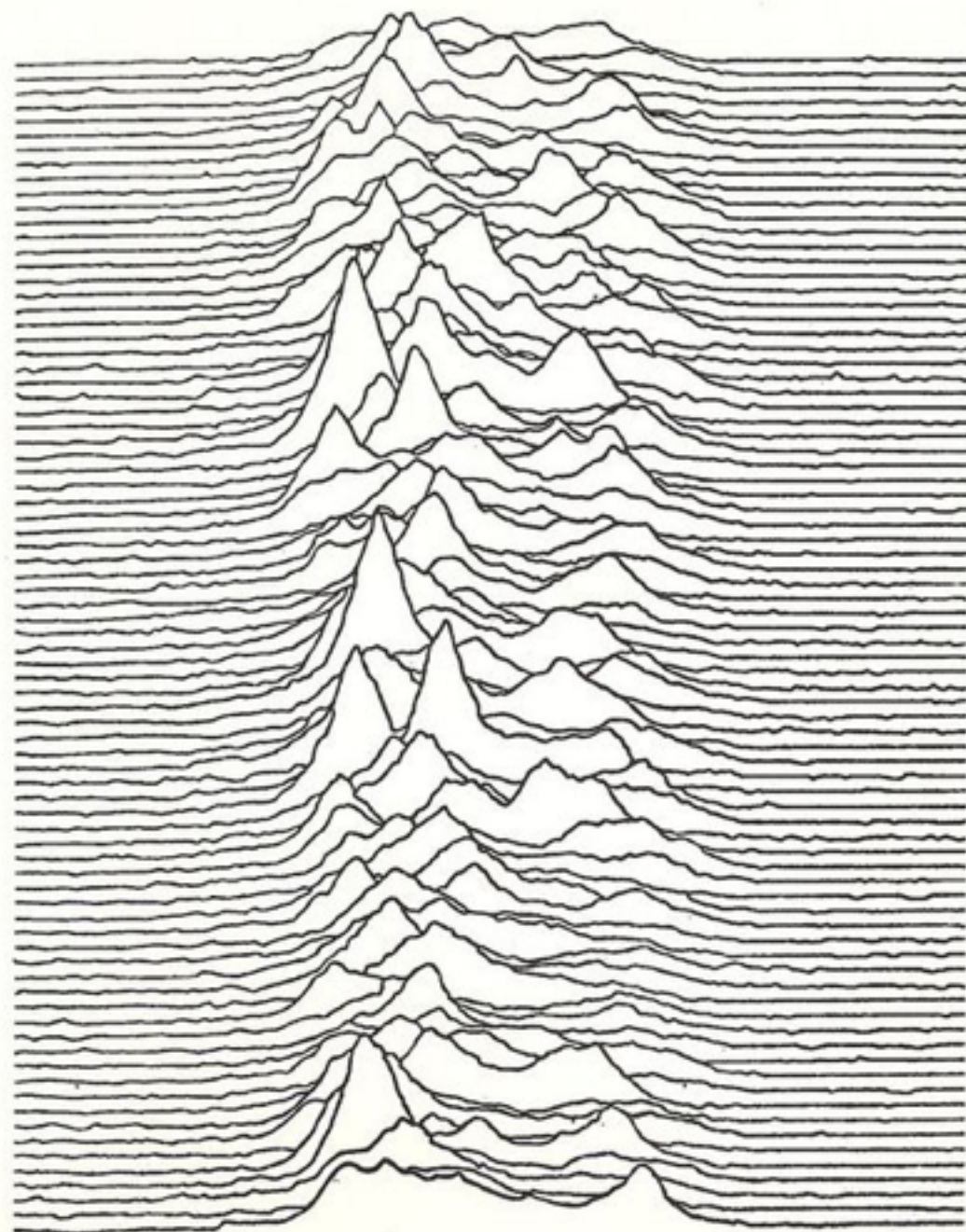


# パルサー発見から50周年

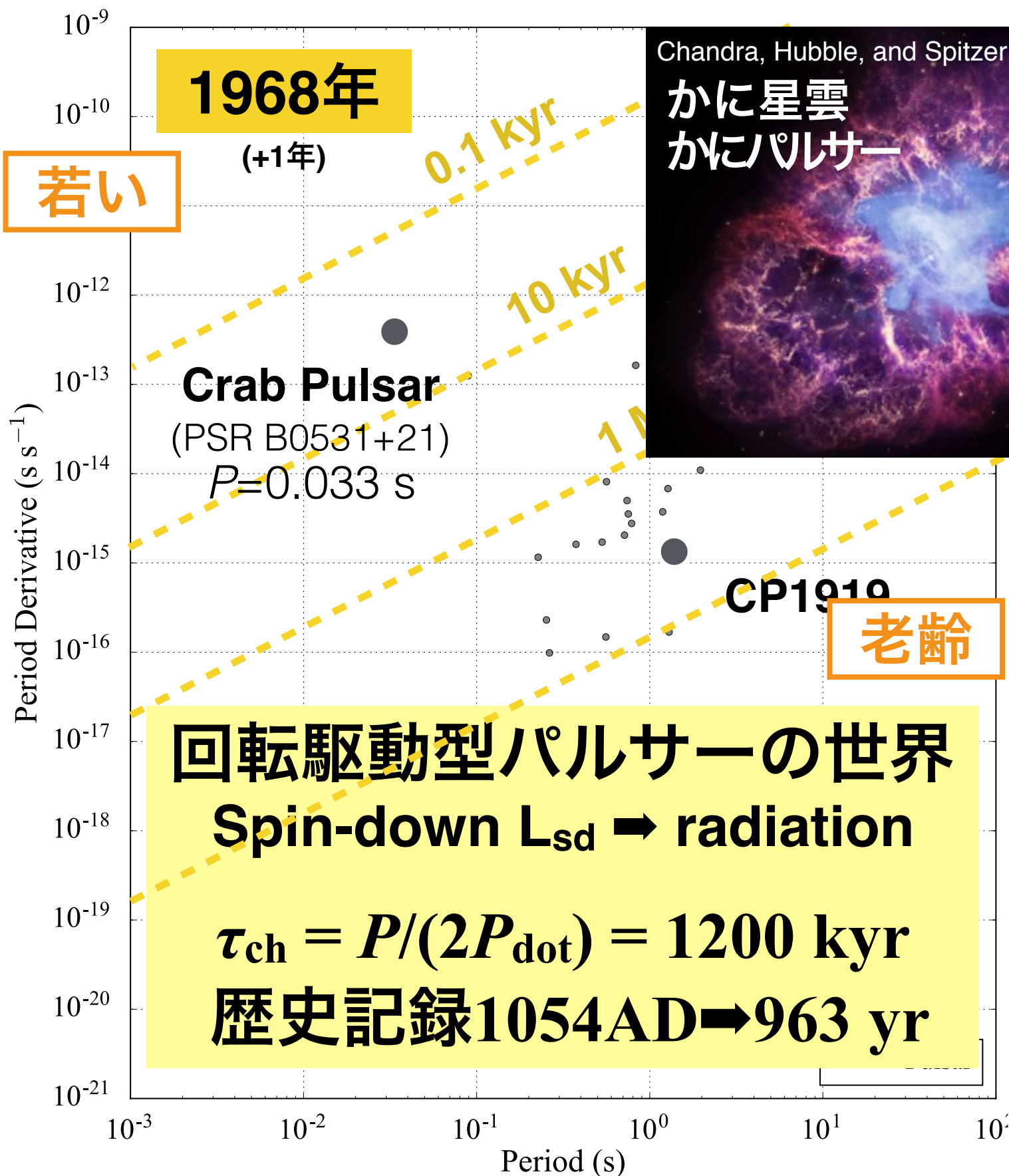
1967年11月28日



6.7: Successive pulses from the first pulsar discovered, CP 1919, are here superimposed vertically. The pulses occur every 1.337 seconds. They are caused by a rapidly-spinning neutron star.



# パルサー発見から50周年

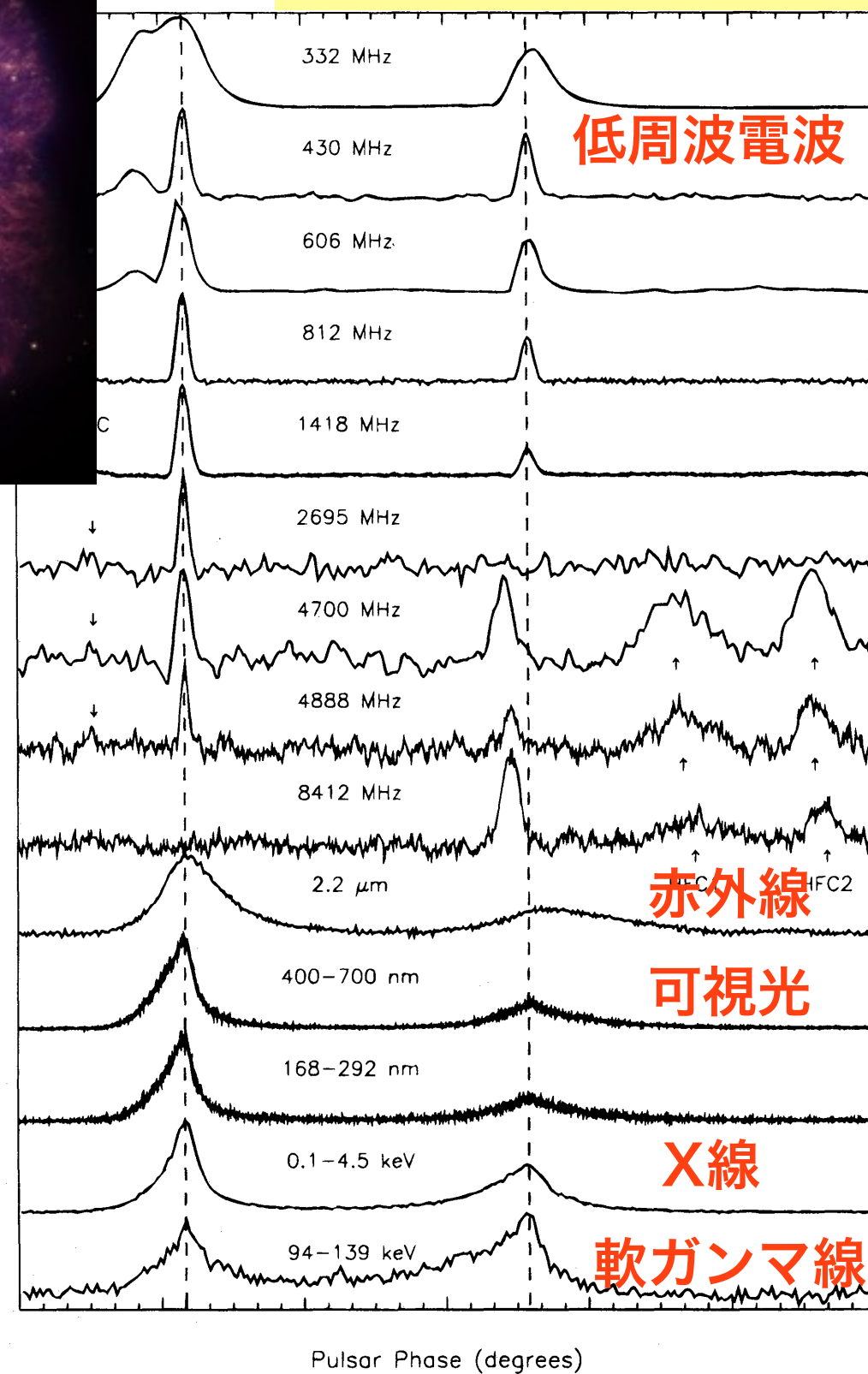


Chandra, Hubble, and Spitzer image

かに星雲  
かにパルサー

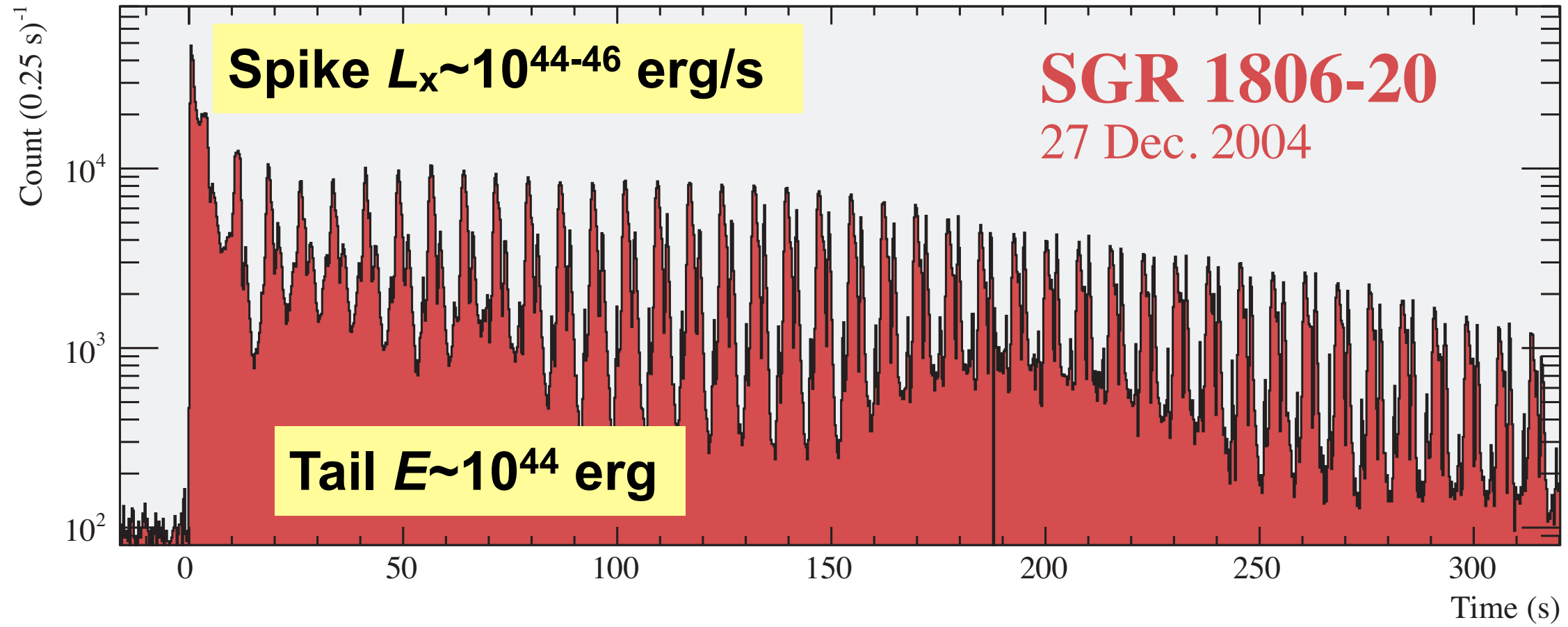
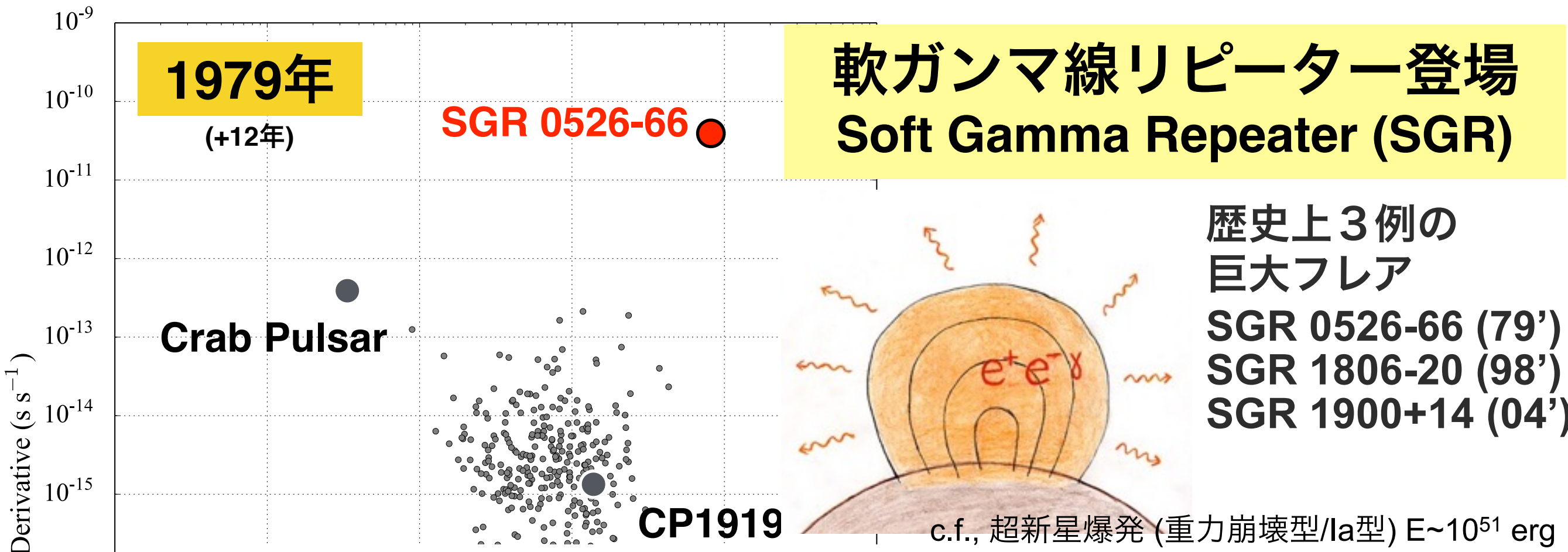
$$P = 33 \text{ ms}$$

$$P_{dot} = 4.2 \times 10^{-13} \text{ s/s}$$





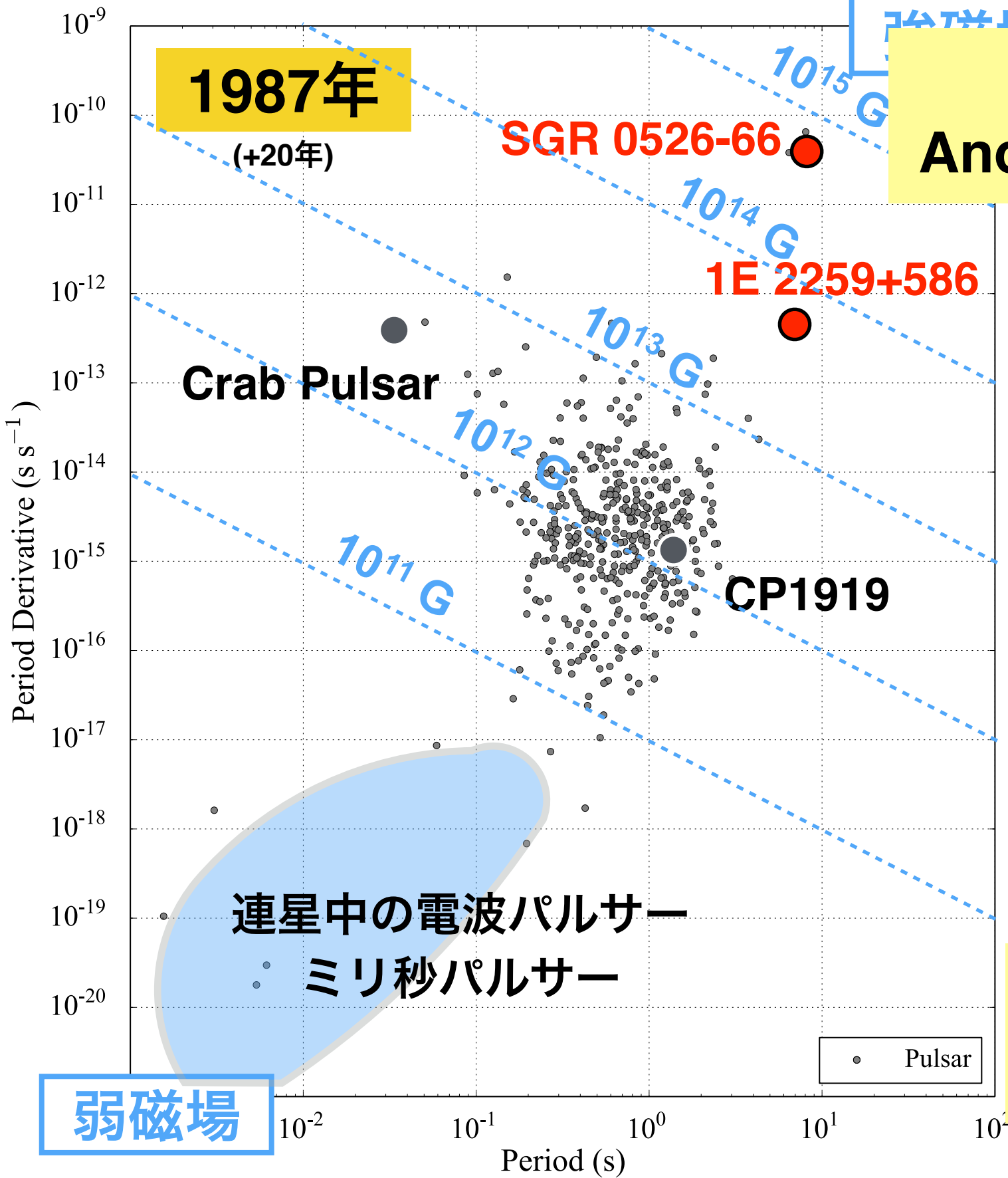
# パルサー発見から50周年



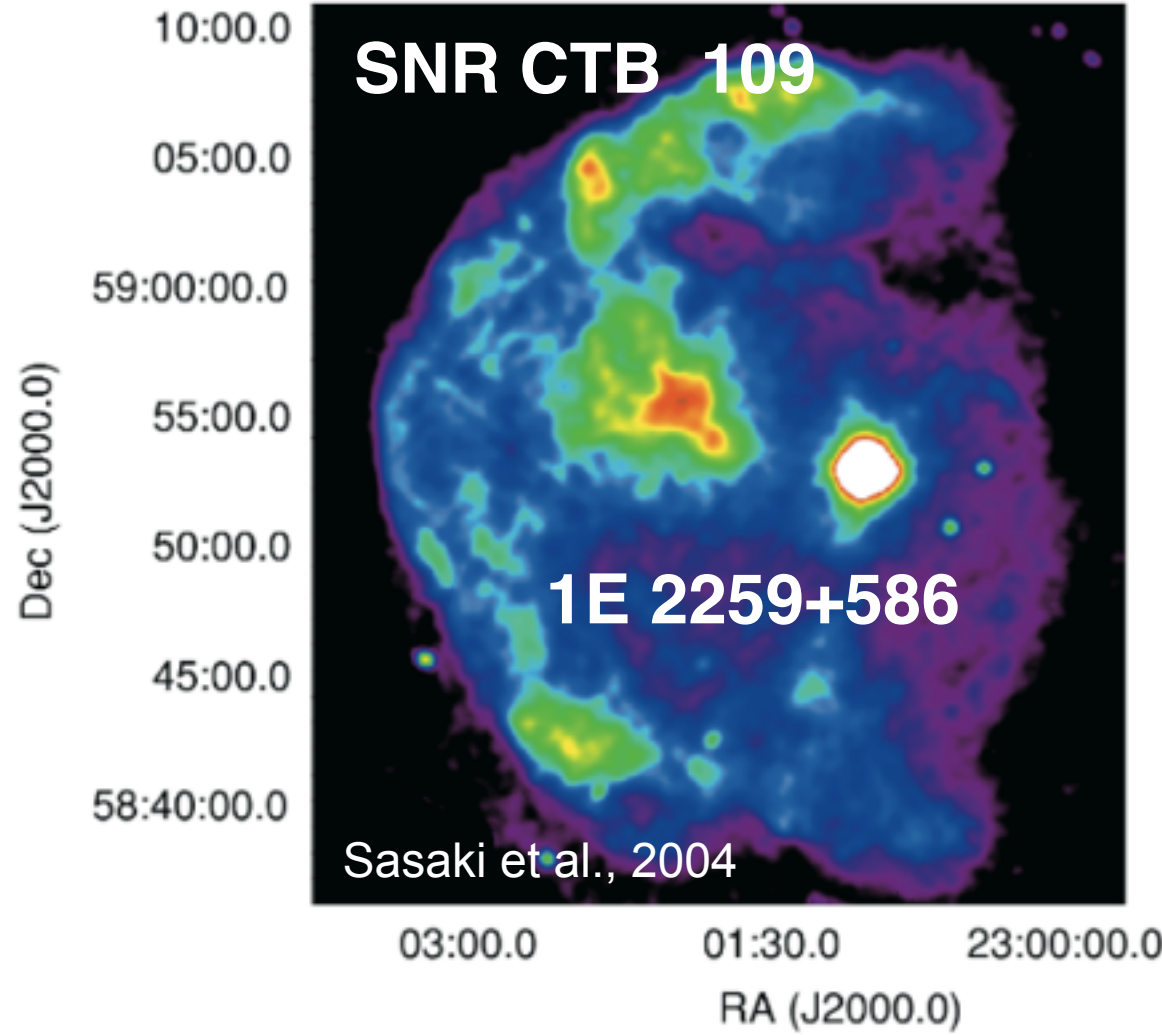


# パルサー発見から50周年

$$B \propto \sqrt{P\dot{P}}$$



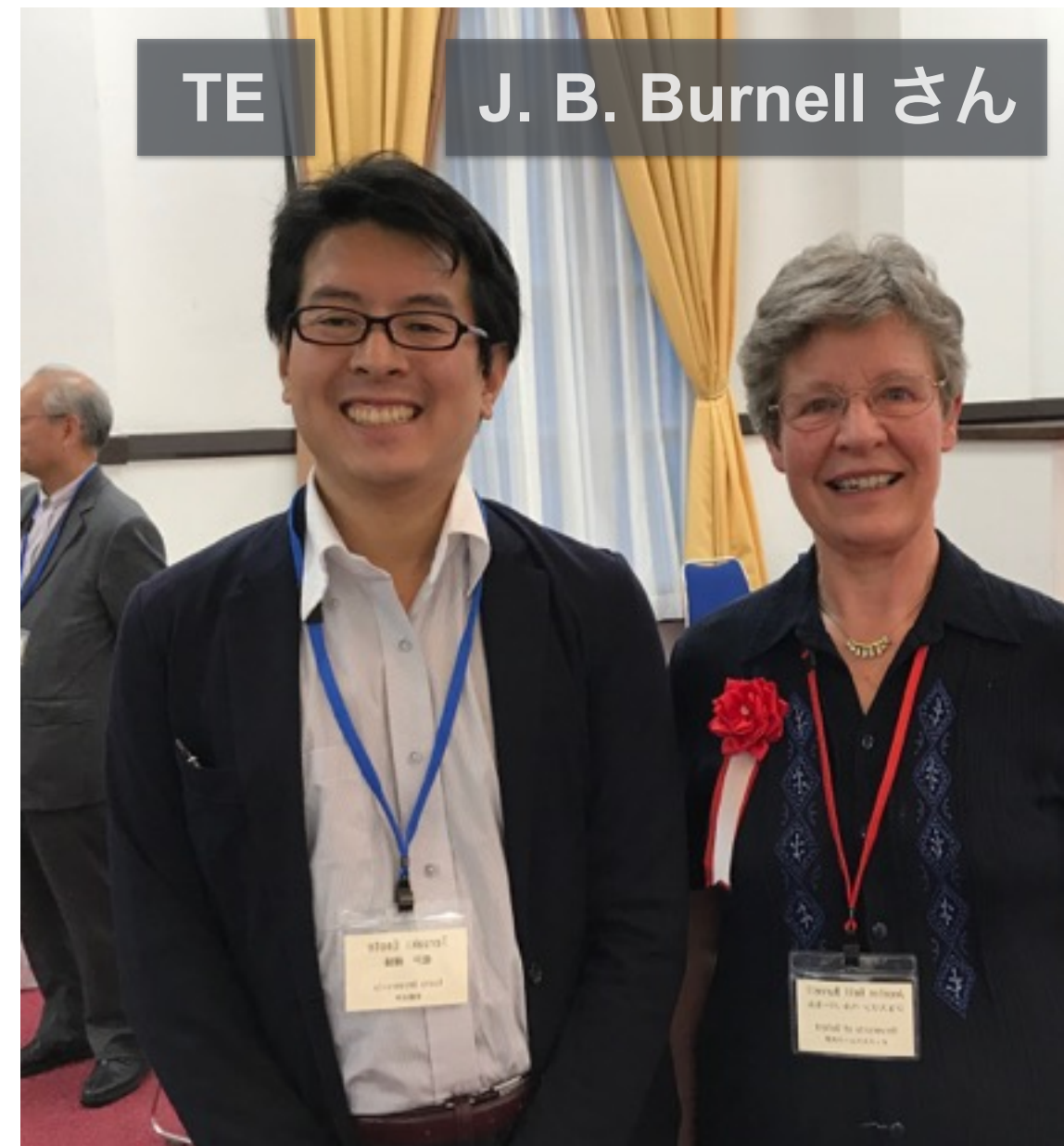
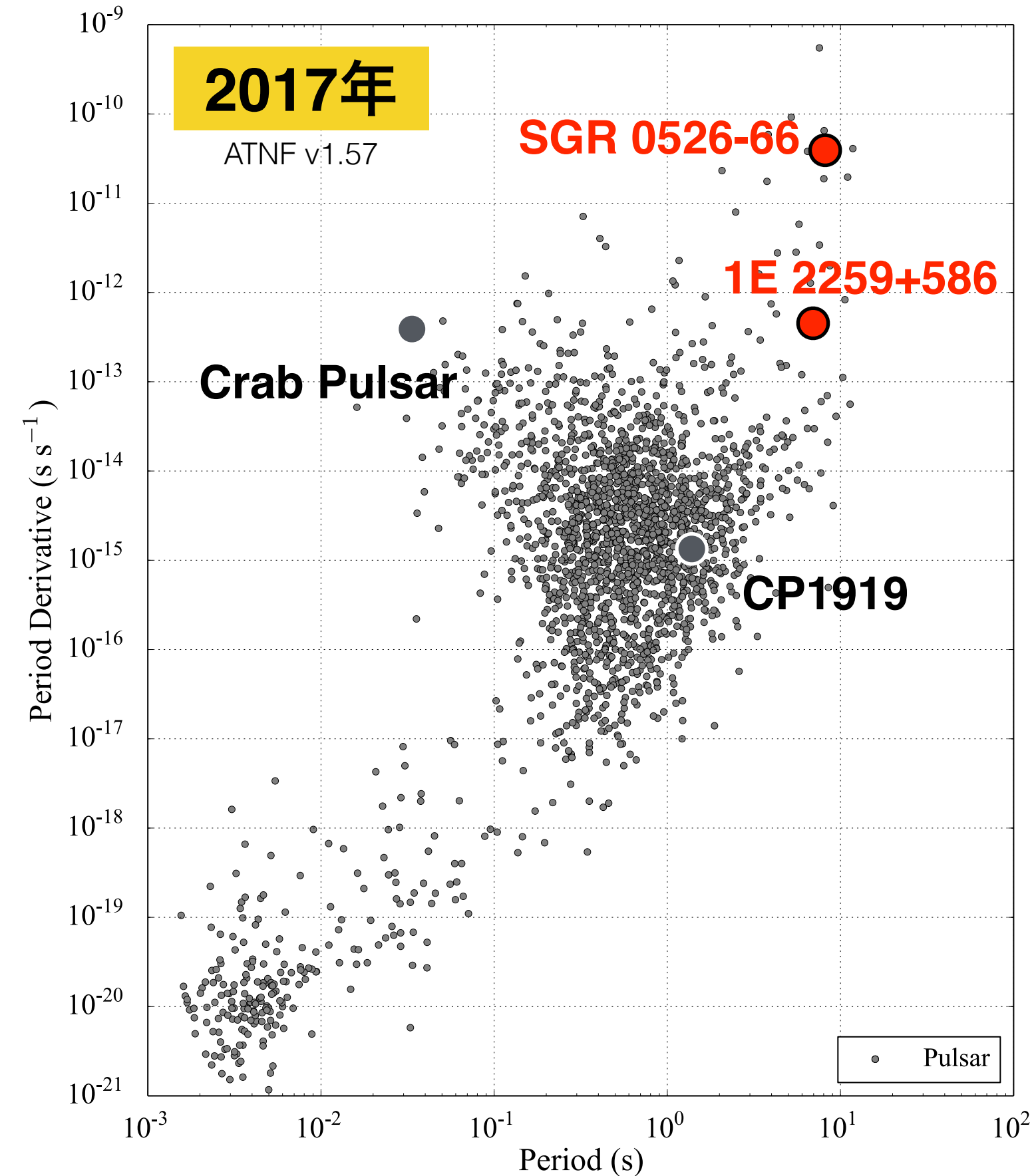
特異X線パルサー  
Anomalous X-ray Pulsar (AXP)



$L_x > L_{sd}$  エネルギー源は?  
SGR+AXP=強磁場天体?



# パルサー発見から50周年→多様な中性子星



2500

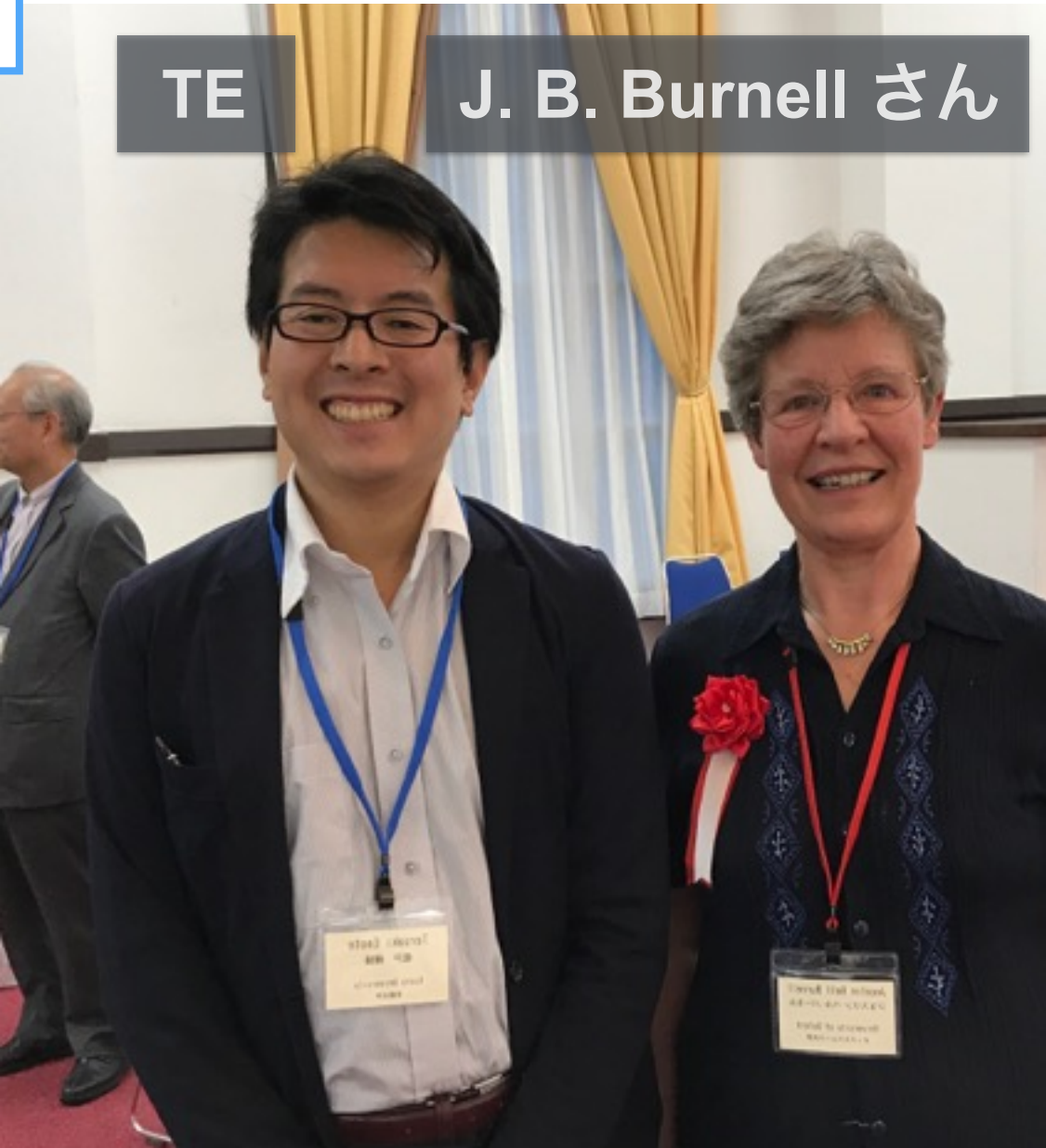
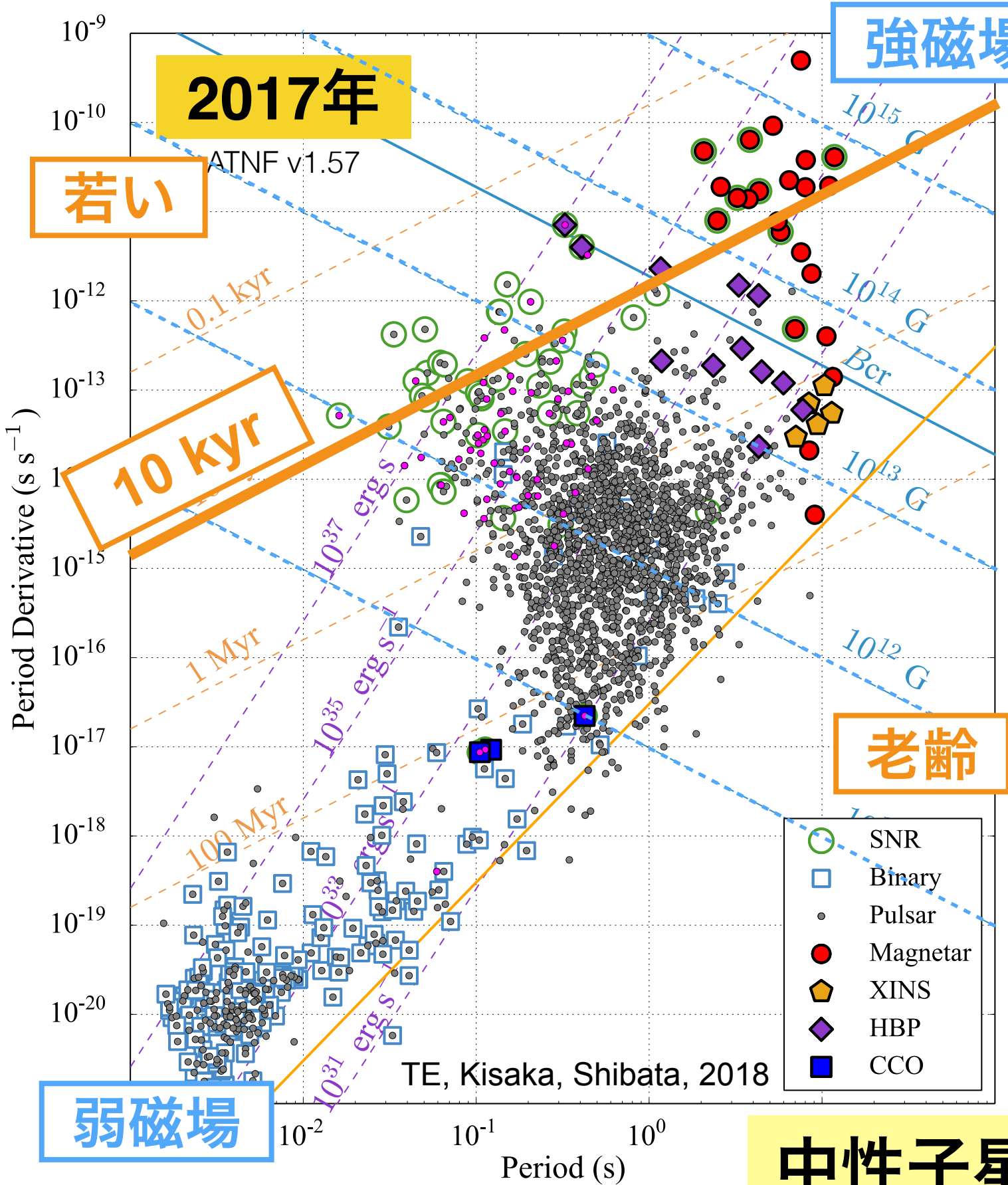
(銀河系には 10

可視光 ~20 天体, X線 ~100

ガンマ線 ~200



# パルサー発見から50周年→多様な中性子星

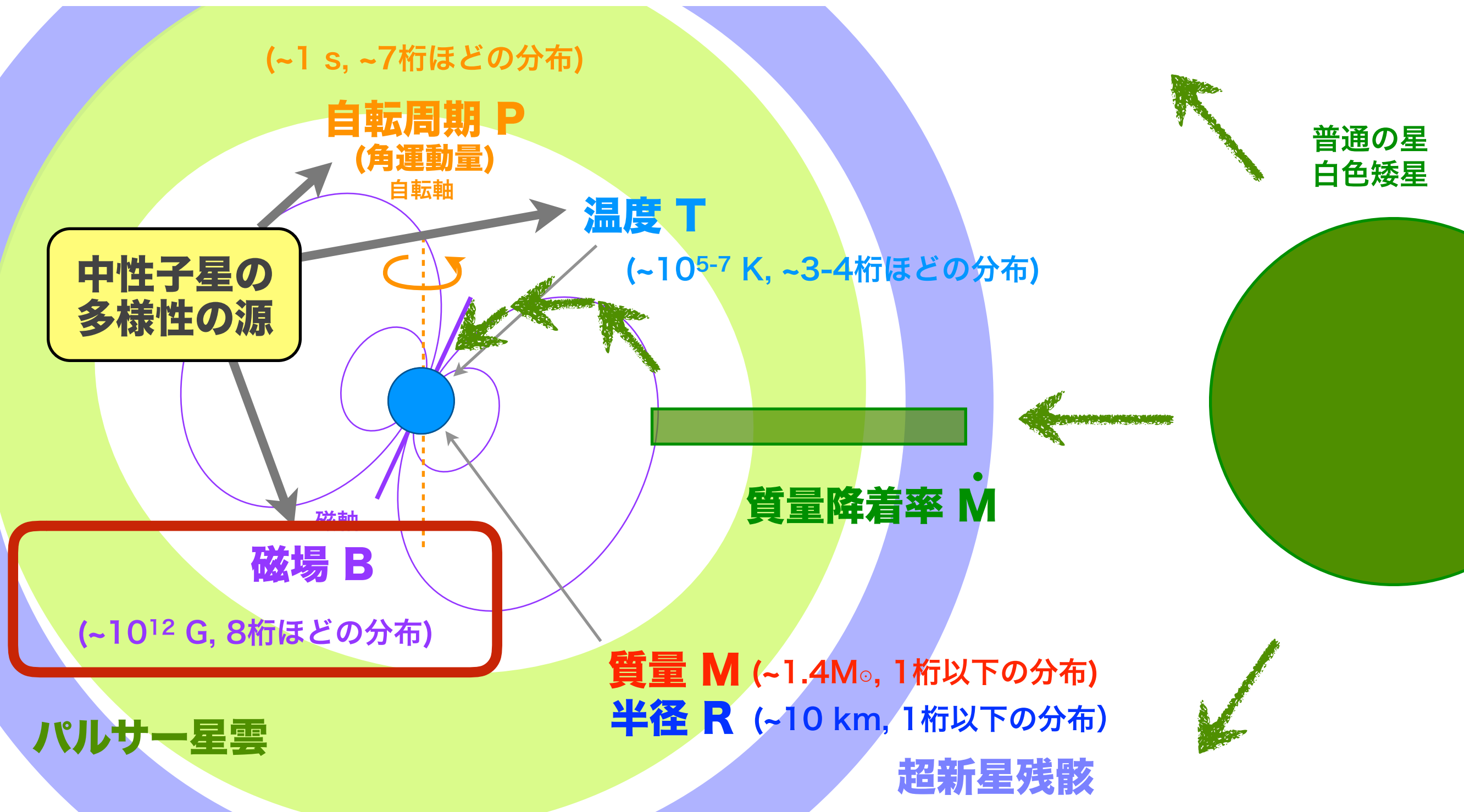


2500  
(銀河系には 10  
可視光 ~20 天体, X線 ~100  
ガンマ線 ~200

中性子星の進化と多様性の解明へ



# 中性子星の観測的な物理量



中性子星の基本的な物理量の違いに加え、周辺環境との相互作用で多様な系が現れる = 動物園 (Neutron Star Zoo)



# 中性子星の放射エネルギー源

## 回転エネルギー: 非熱的な放射

大多数の電波パルサーや一部のミリ秒パルサー

### スピンドOWN光度

$$L_{\text{sd}} \propto d(I\Omega^2/2)/dt$$

$$L_x = 6.4 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1} P_{1\text{s}}^{-3} \dot{P}_{10^{-11} \text{ s/s}}$$

## 熱エネルギー: 超新星爆発後の残熱

超新星残骸の中心の熱放射をする中性子星

### 表面からの熱放射

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

$$L_x = 1.5 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1} T_{0.3 \text{ keV}}^4$$

## 重力エネルギー: 連星での質量降着

X線連星での明るい放射(複数のサブ種族)

### 降着での重力エネルギー解放

$$L_x = GM\dot{M}/(R\Delta t)$$

$$L_x = 0.98 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1} \dot{M}_{10^{-11} M_\odot/\text{yr}}$$

## 磁場エネルギー: 磁場が強い種族

マグネター(SGR, AXP)と呼ばれる新種族

### 磁場散逸 (内部 / 磁気圏)

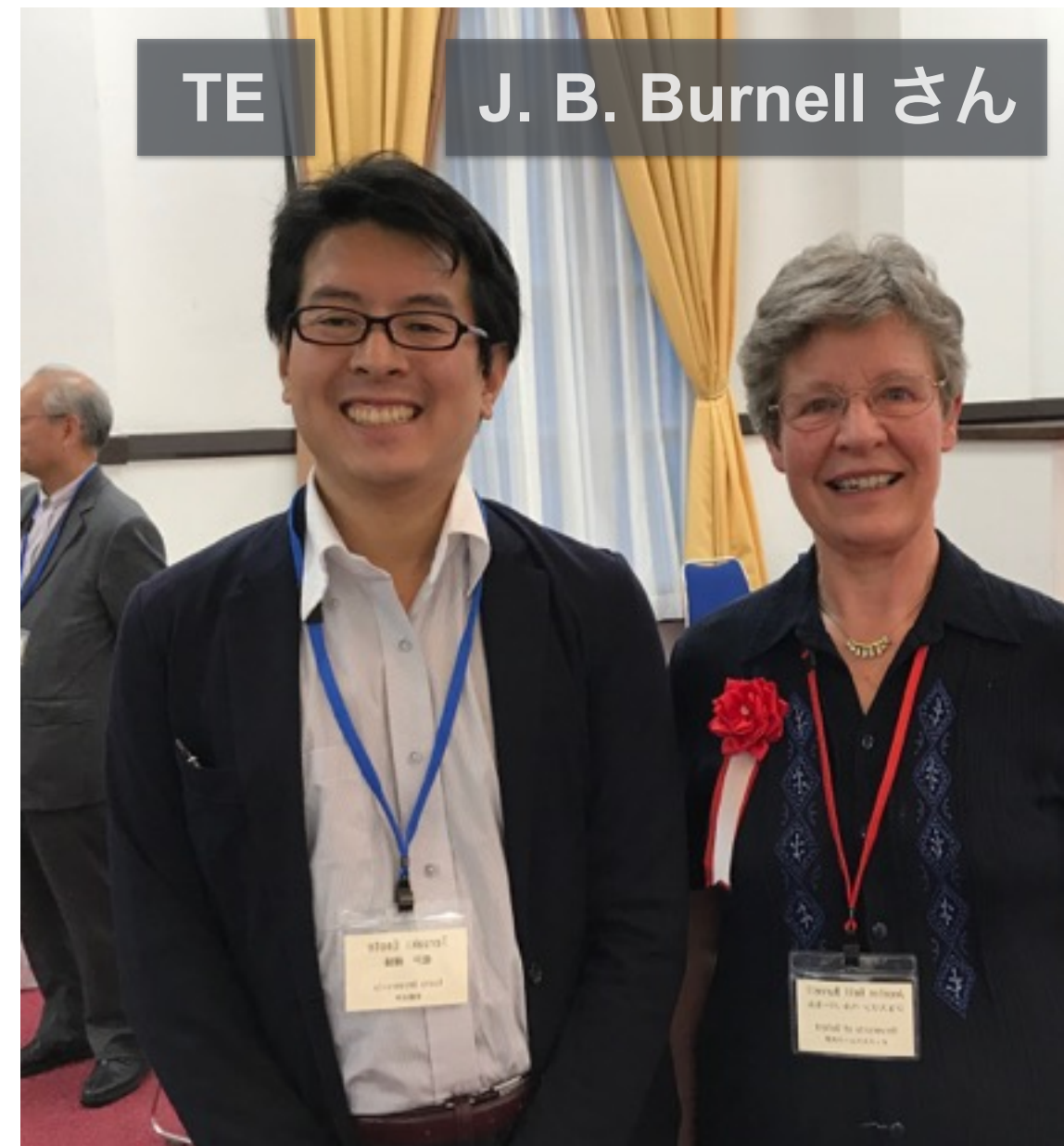
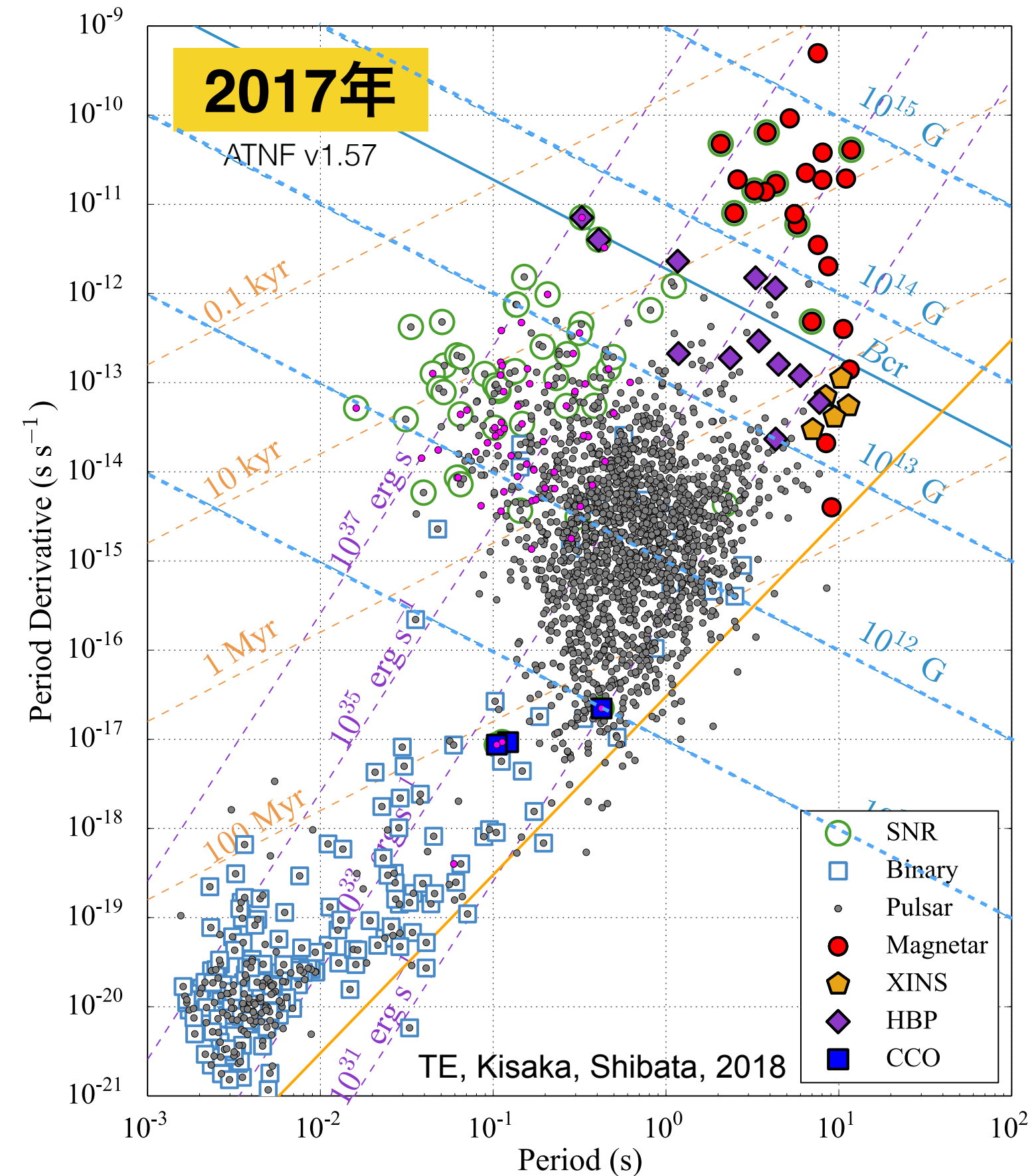
$$L_x = (B^2/8\pi)(4\pi/3R^3)/t$$

$$L_x = 0.92 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1} B_{10^{15} \text{ G}}^2 t_{100 \text{ kyr}}^{-1}$$

$L_x = 10^{35} \text{ erg/s}$ , 10 kpc  $\Rightarrow F_x = 10^{-11} \text{ erg/s/cm}^2$  で精密観測へ



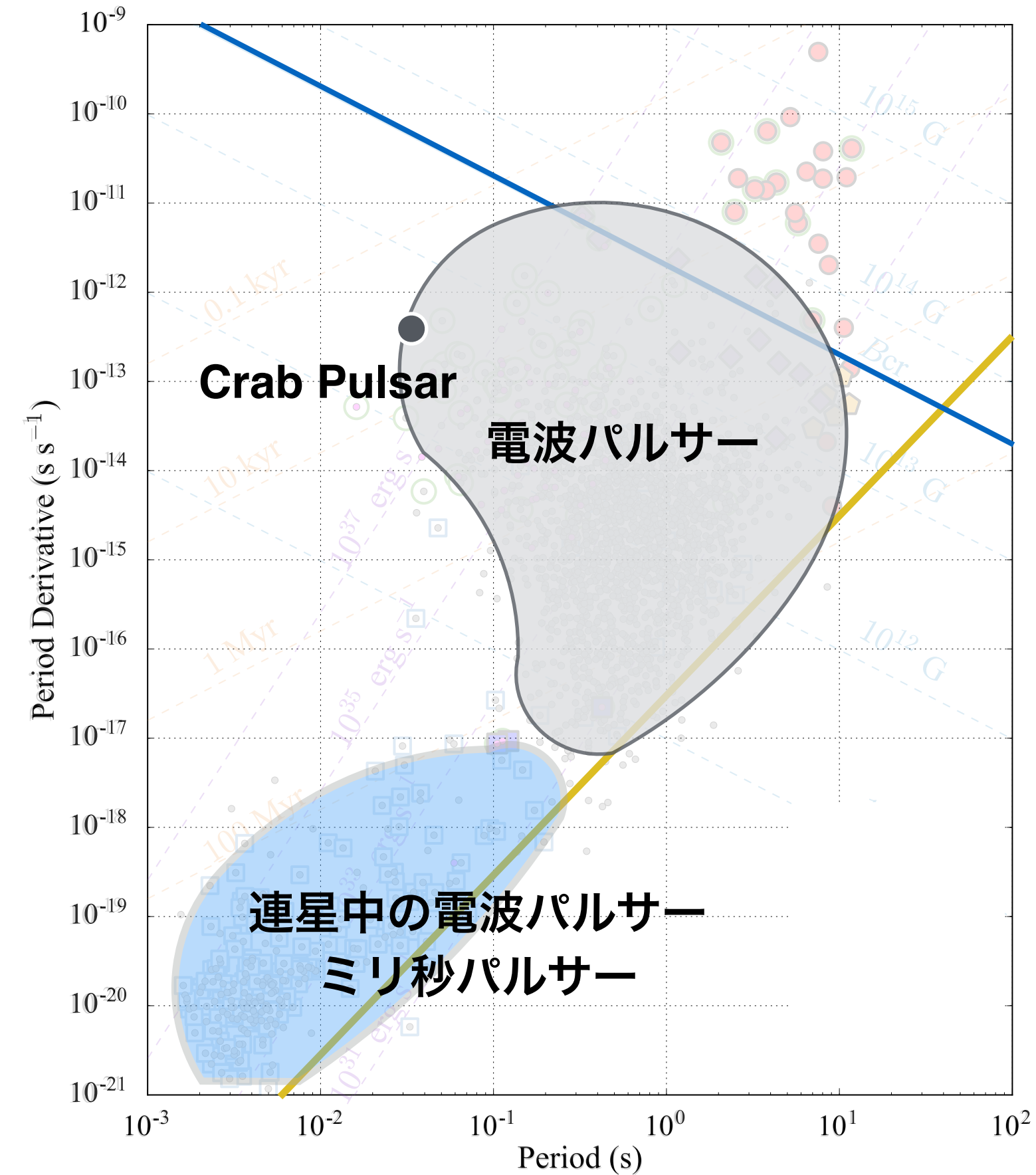
# 中性子星の種族たち



2500  
(銀河系には 10  
可視光 ~20  
X線 ~100  
ガンマ線 ~200

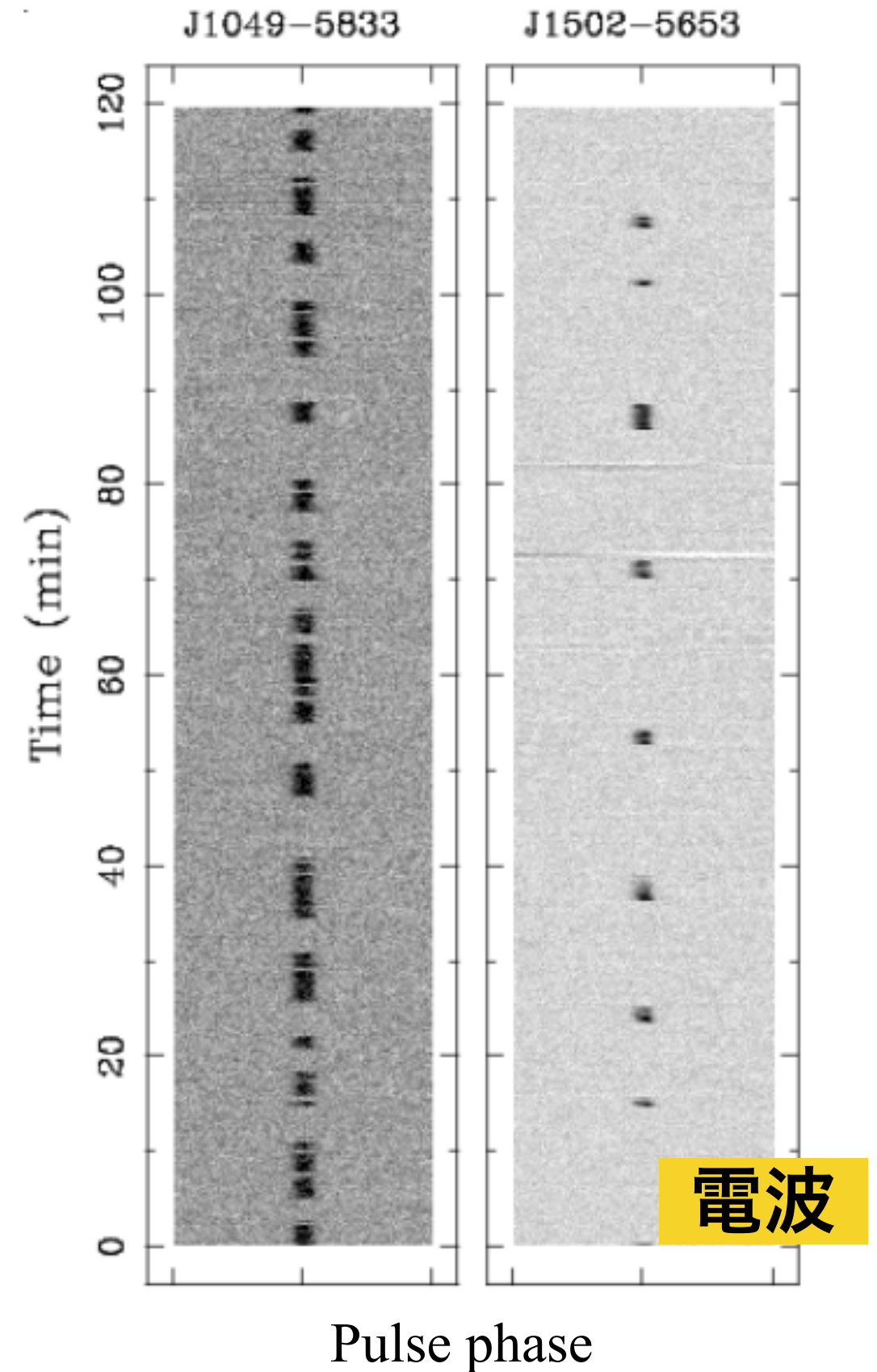
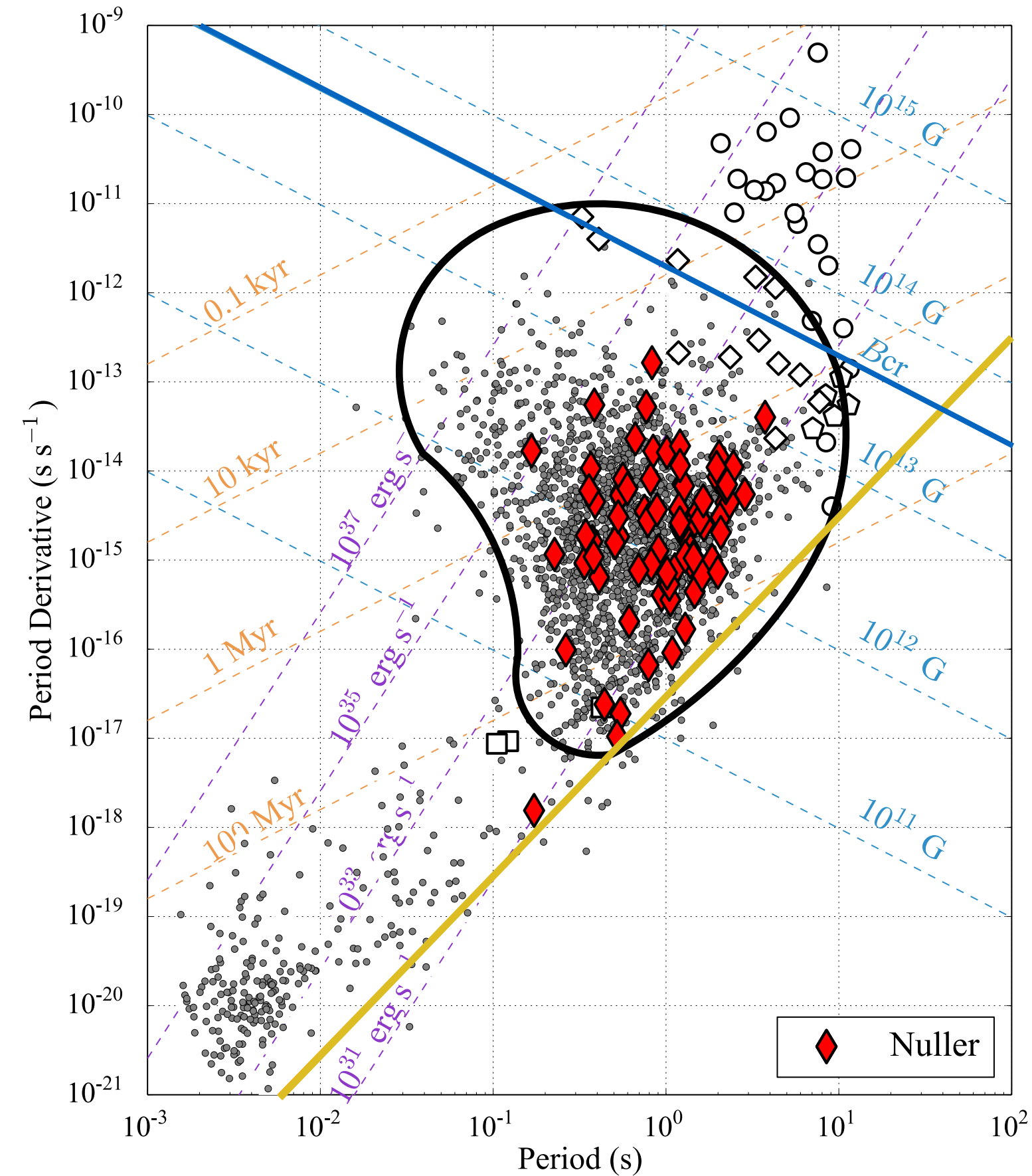


# 中性子星の種族たち：電波パルサー

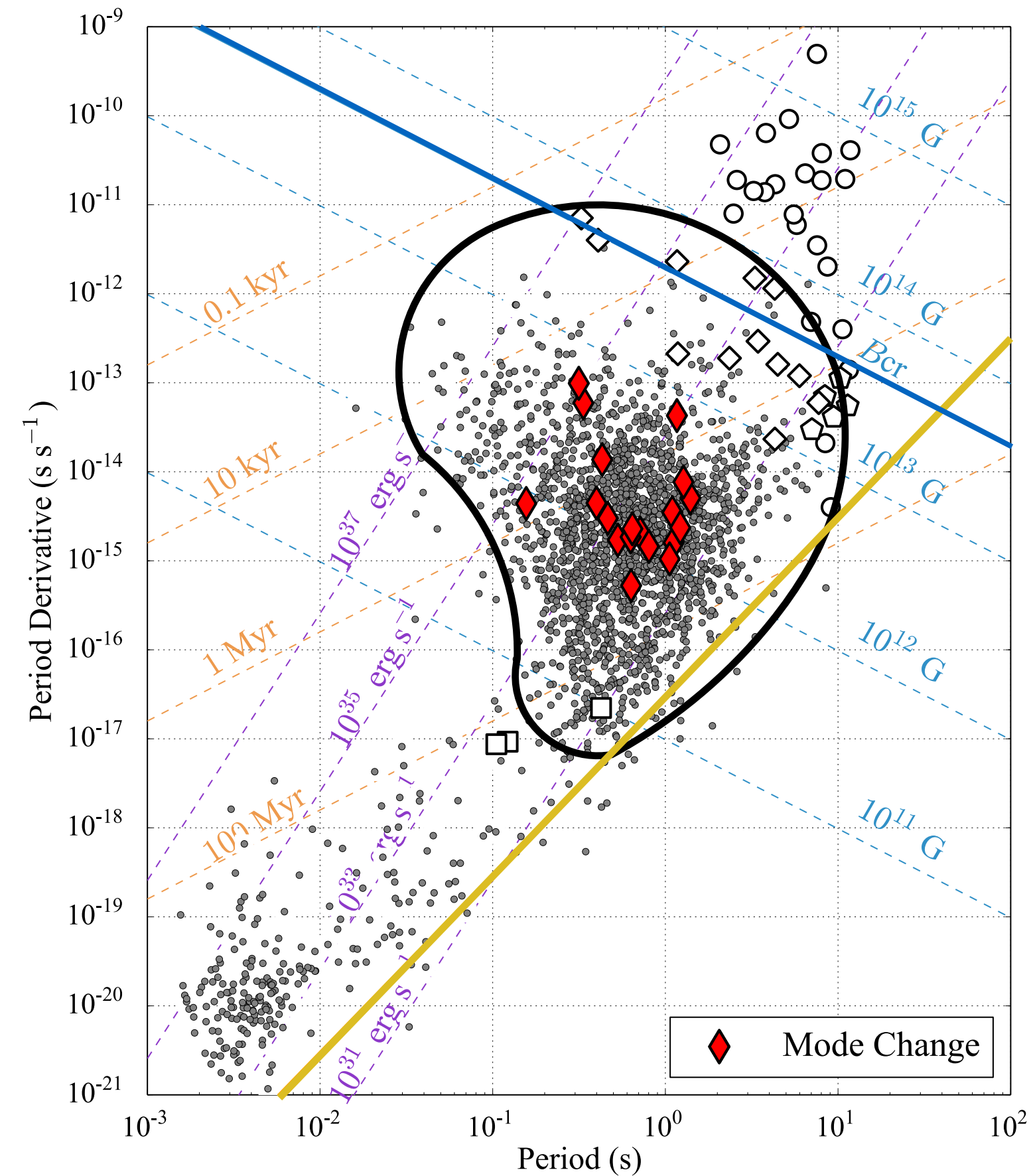




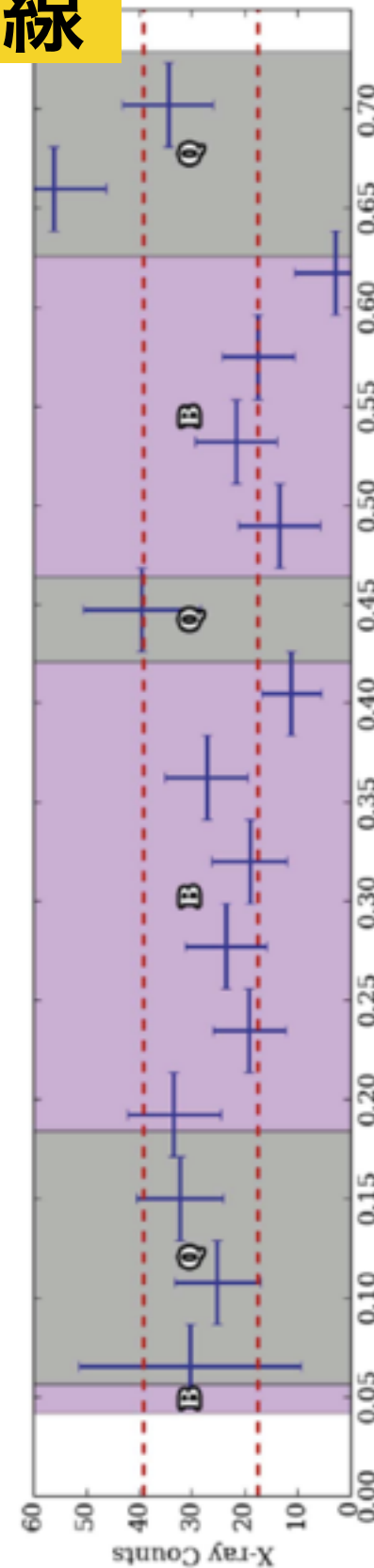
# 中性子星の種族たち：電波パルサー



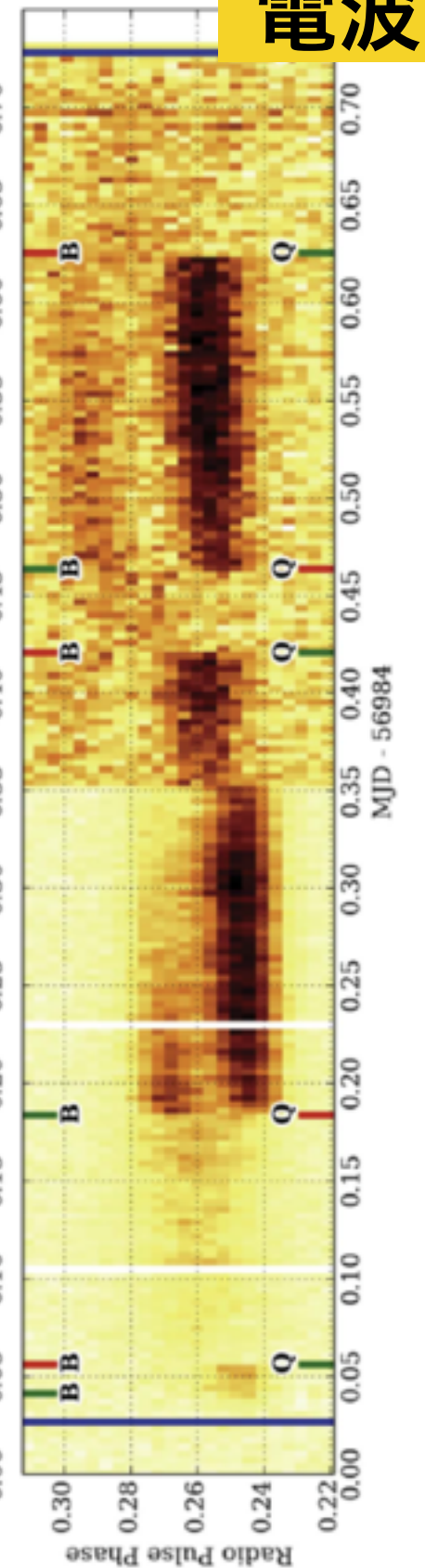
# 中性子星の種族たち：電波パルサー



X線

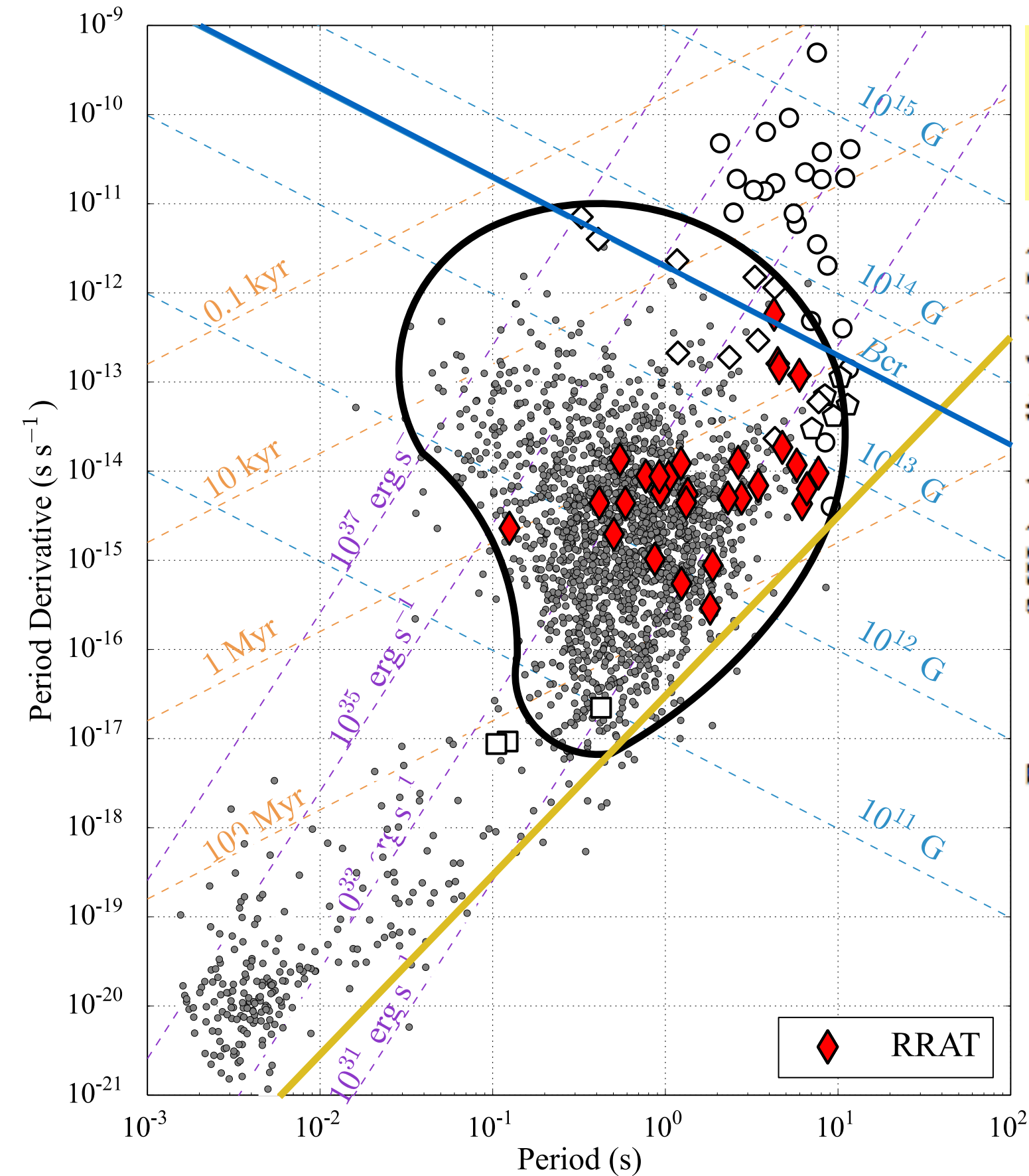


電波

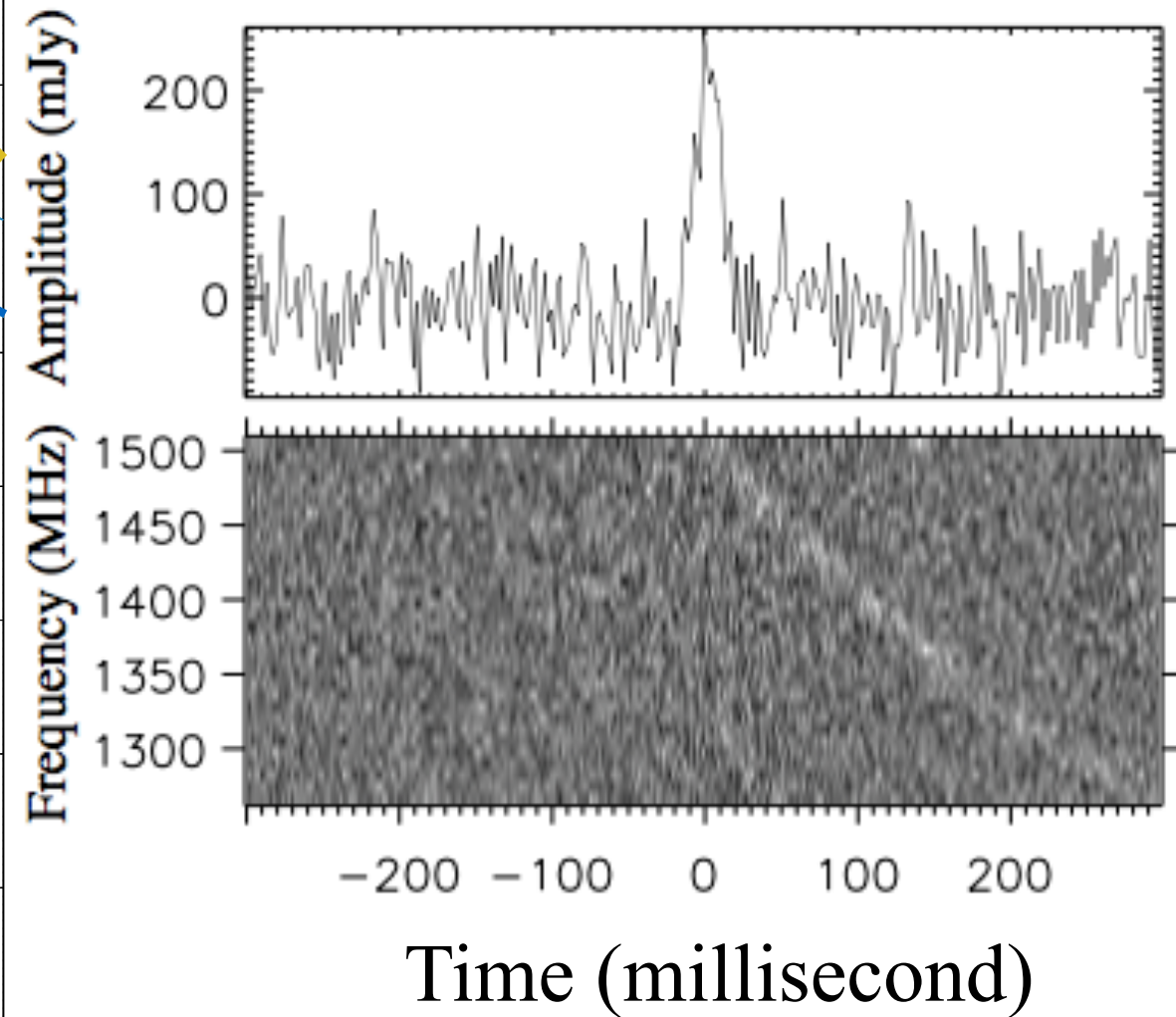




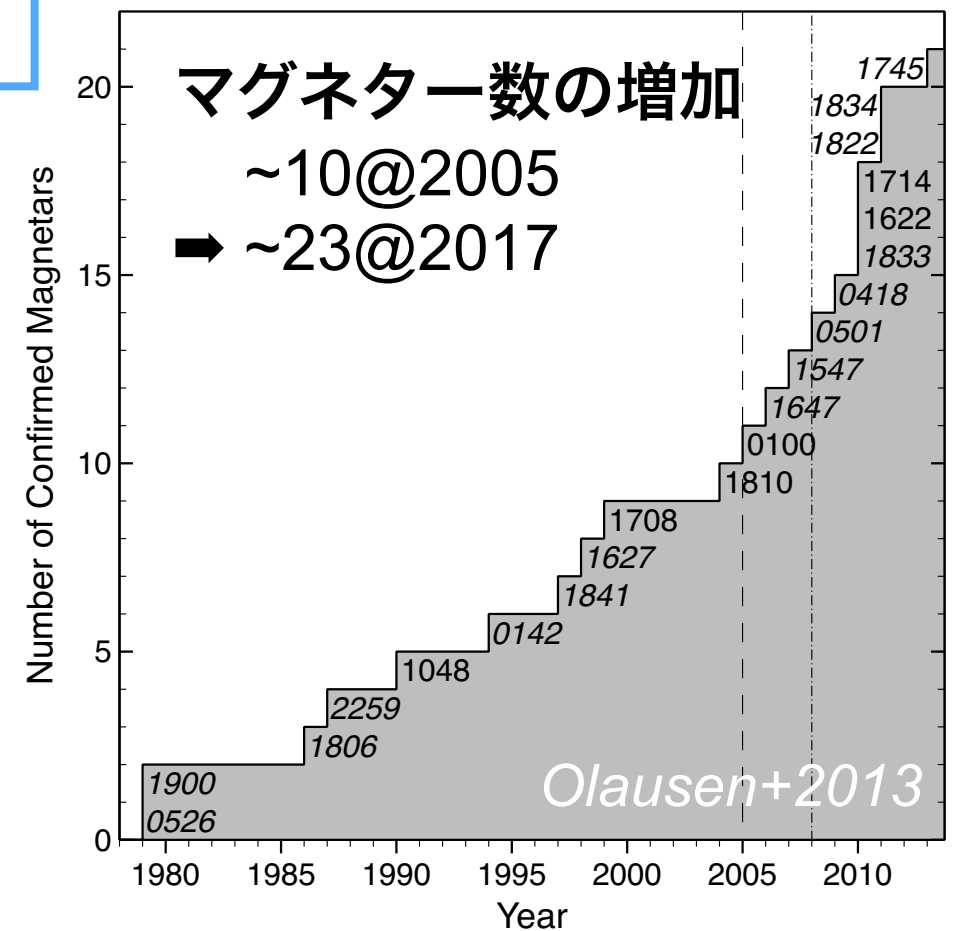
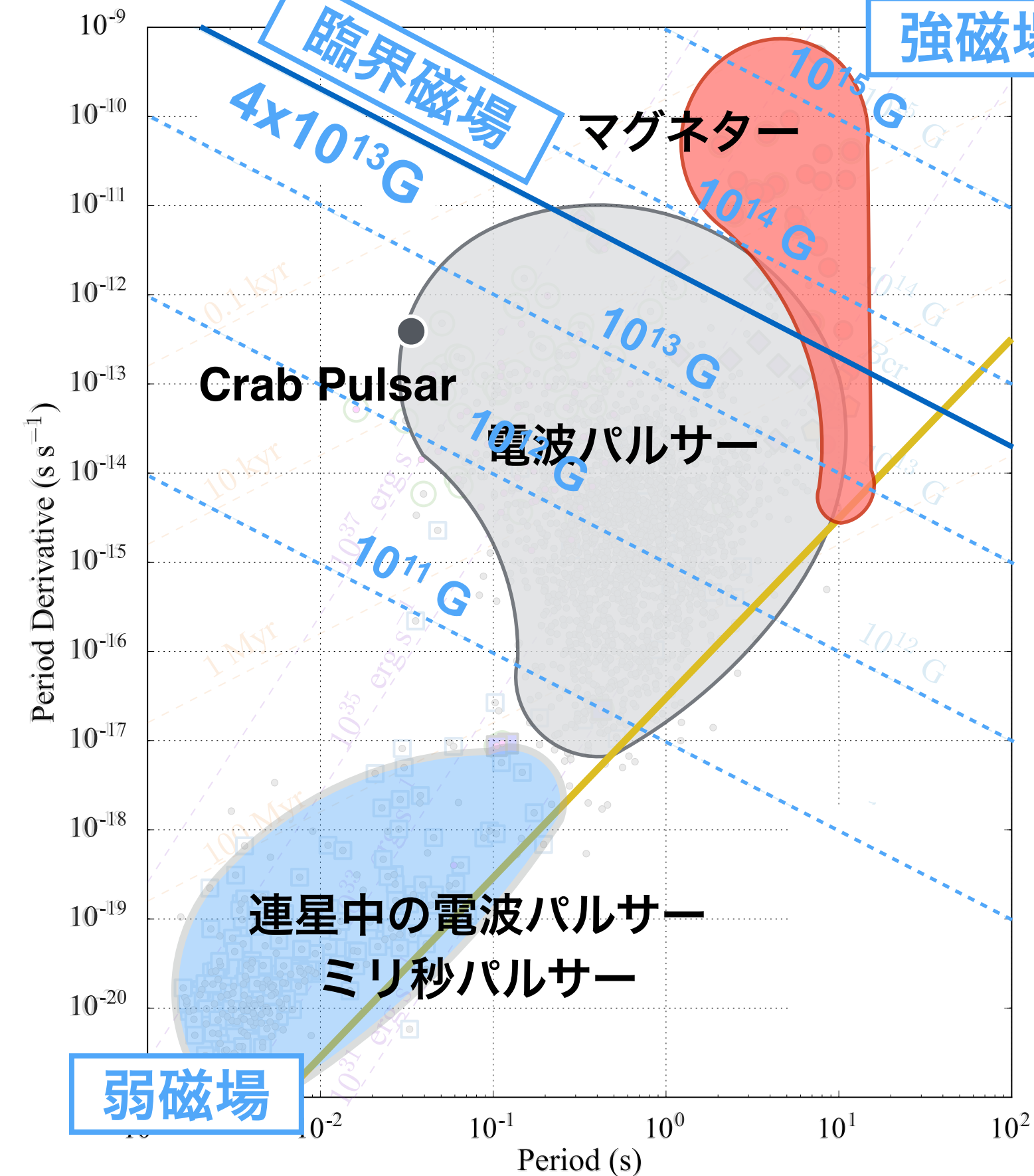
# 中性子星の種族たち：電波パルサー



## 突発的な電波パルス天体 Rotating RAdio Transient



# 中性子星の種族たち: マグネター





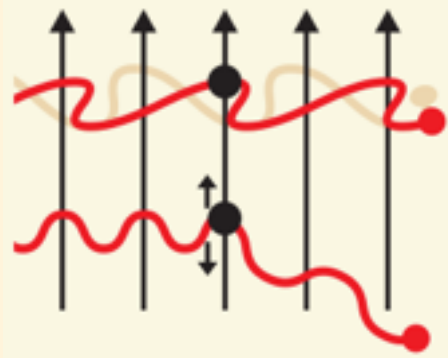
# マグネター仮説

1. SNR に付随, 遅い自転  $P$  &  $\dot{P}$  大  $\Rightarrow$  若く ( $\tau < 100$  kyr) & 強磁場  $B \sim 10^{14-15}$  G
2. X線光度  $L_x \gg$  スピンダウン光度  $L_{sd} \Rightarrow$  回転駆動型パルサーではない
3. 連星の兆候なし  $\Rightarrow$  降着駆動型パルサーでない
4. エディントン光度を超えるフレア現象  $\Rightarrow B > 10^{14}$  G で散乱断面積の抑制?
5. 陽子サイクロトロン共鳴の兆候  $\Rightarrow B > 10^{14}$  G を示唆
6. バースト活動  $\Rightarrow$  磁気エネルギーの散逸 (e.g., 磁気リコネクション)??

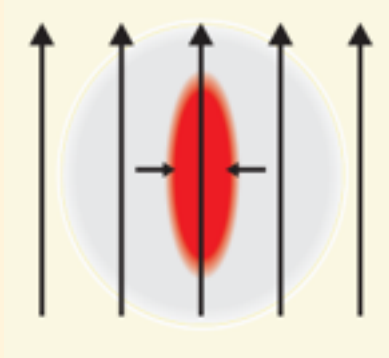
## QED 臨界磁場

$$\hbar \frac{eB}{m_e c} = m_e c^2 \Rightarrow B_{\text{QED}} = 4.4 \times 10^{13} \text{ G}$$

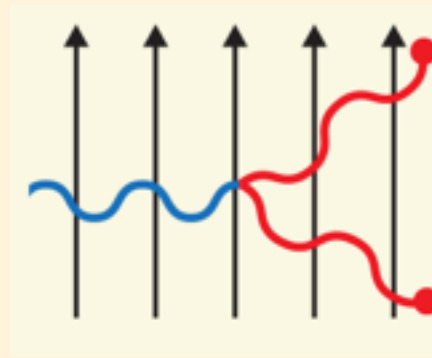
### 散乱断面積の抑制



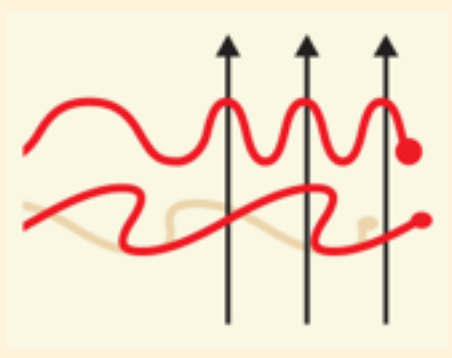
### 原子の変形



### 光子の自然分裂

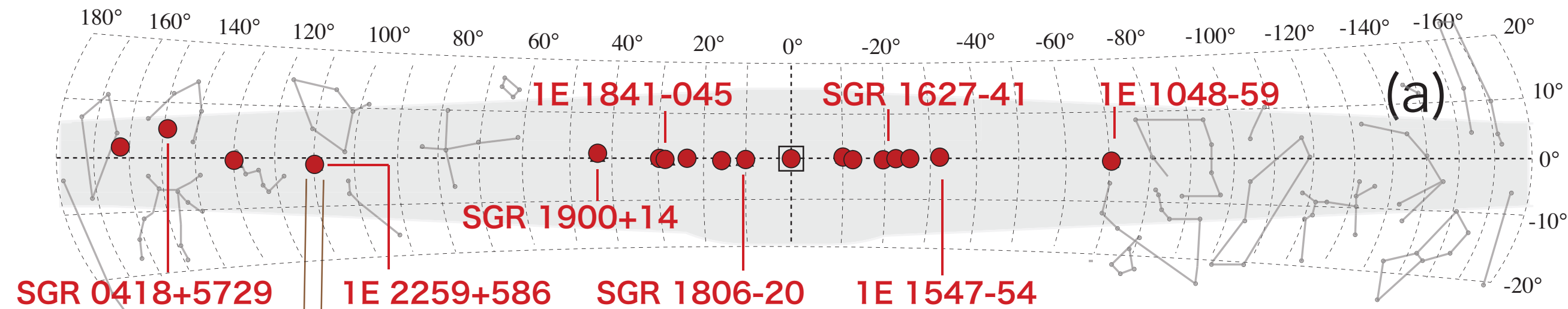


### 真空の複屈折



**銀河系内で発見されてきたマグネターの観測的性質の共通理解は確立**  
(ただし、通常のダイポール磁場の中性子星や白色矮星の対立仮説はまだある)

# 既知マグネター：銀河系・マゼラン雲に23天体

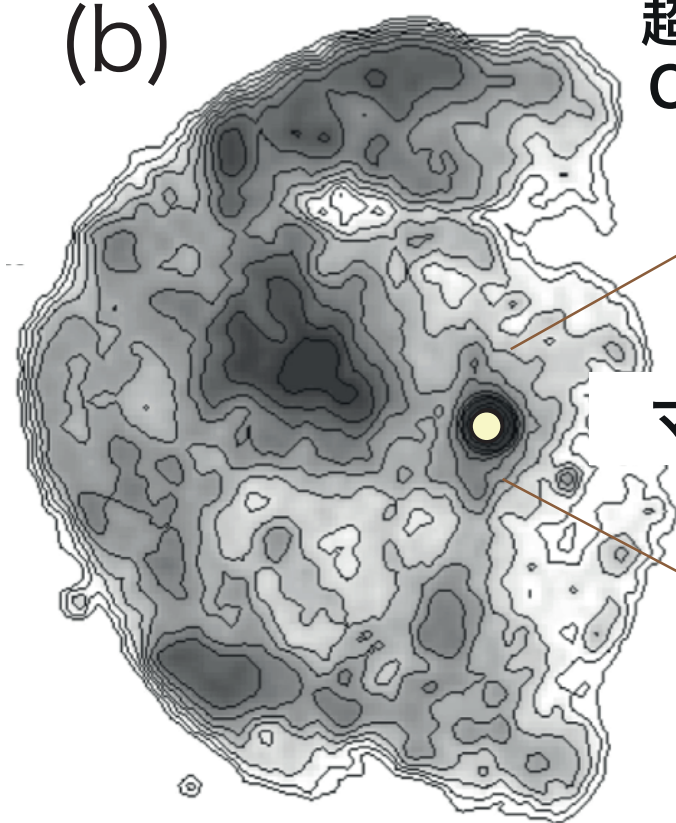


(b)

超新星残骸  
CTB 109

マグネター

~52 光年



(c)

ポロイダル磁場

トロイダル磁場

高次の磁場?

自転軸

磁軸

磁極

磁気圏

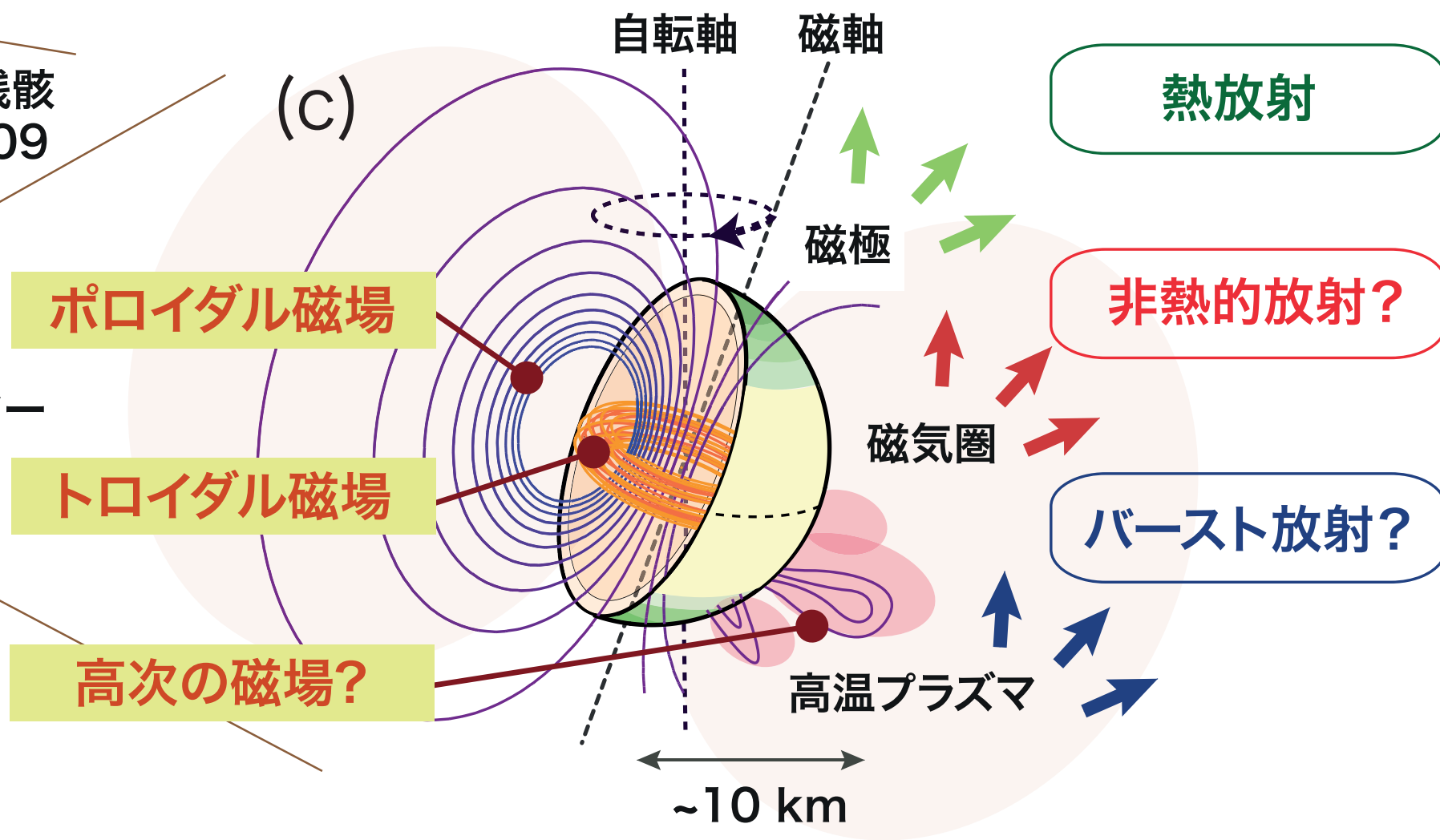
高温プラズマ

~10 km

熱放射

非熱的放射?

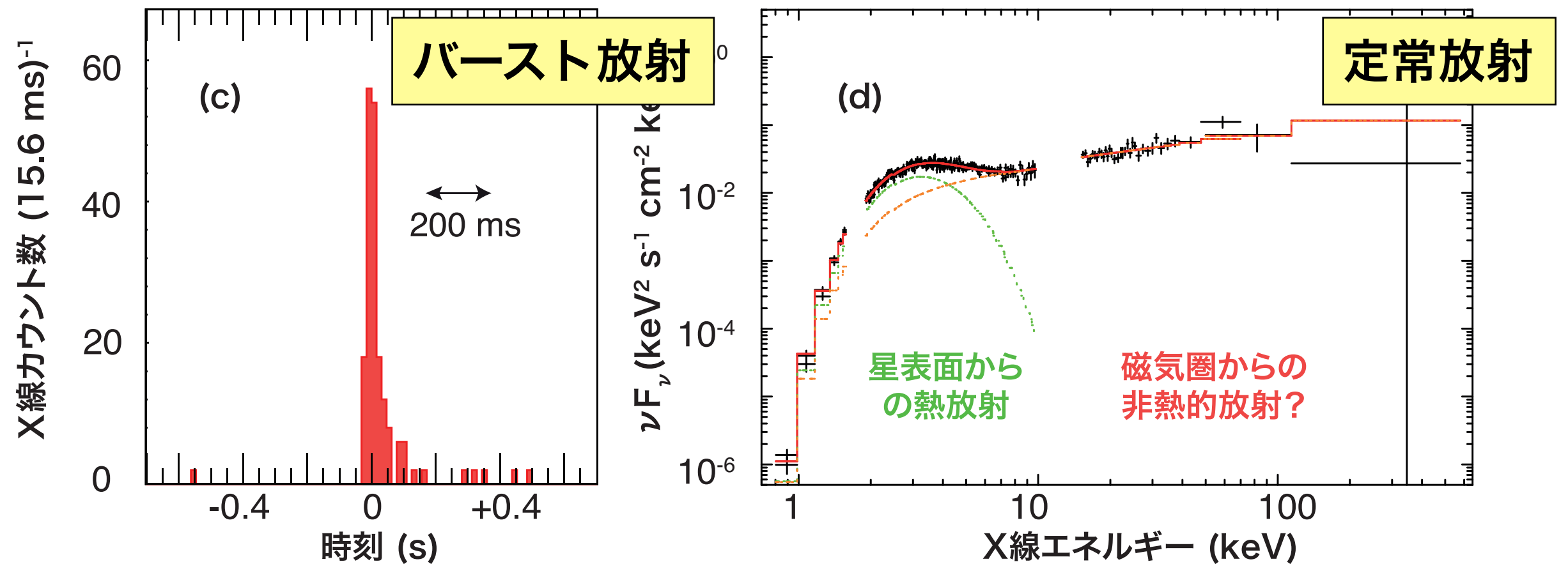
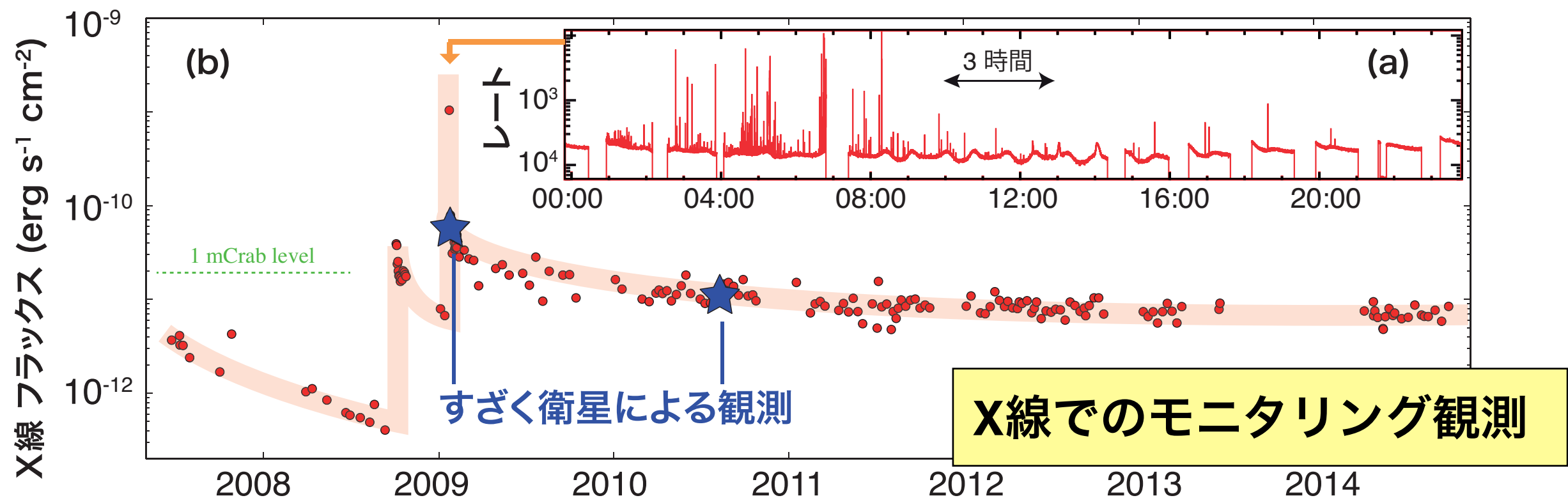
バースト放射?



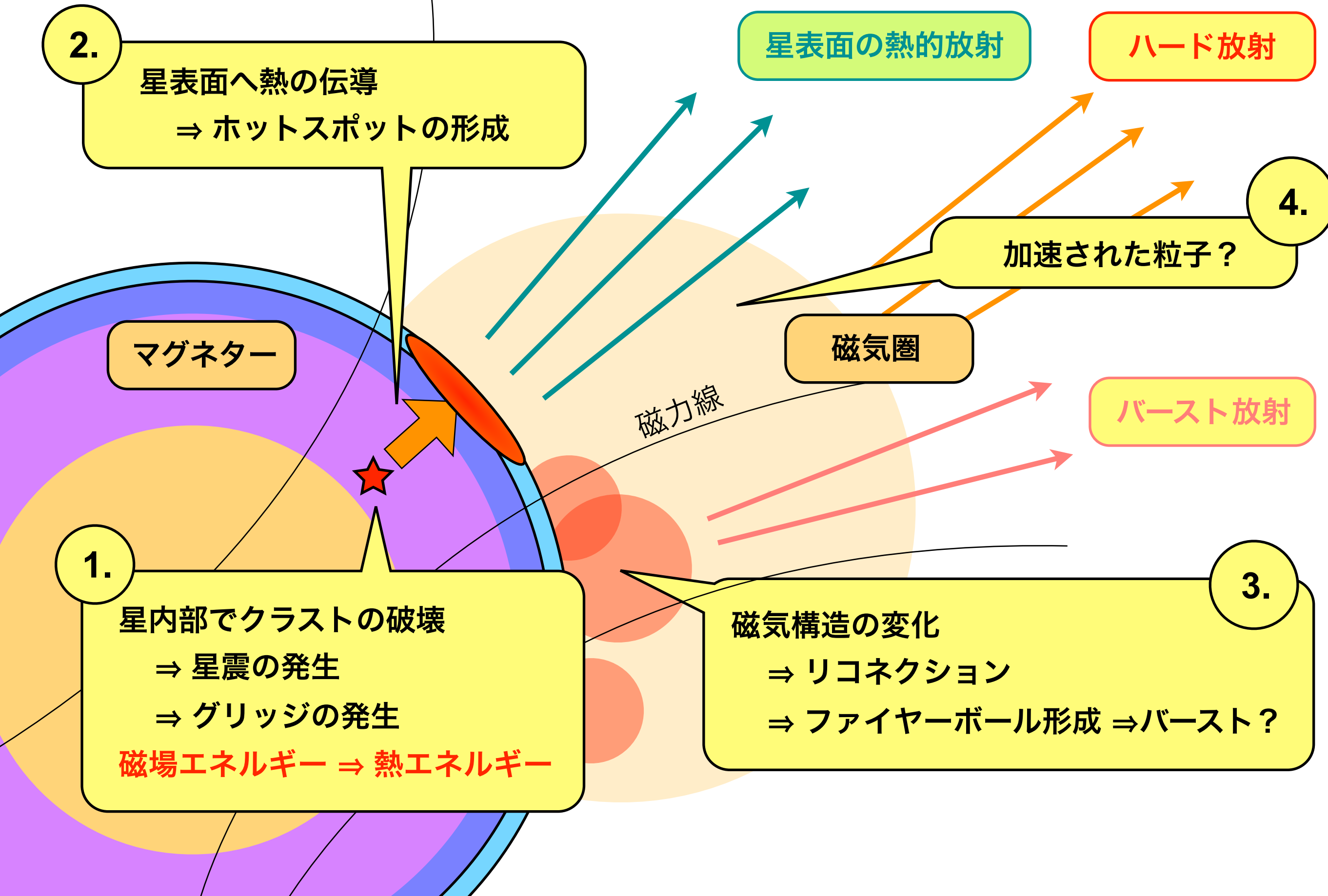
磁気エネルギーが、表面の熱放射、磁気圏の放射、バースト放射になる



# マグネター 1E 1547.0-5408 での突発増光



# マグネター突発増光での磁気エネルギー解放





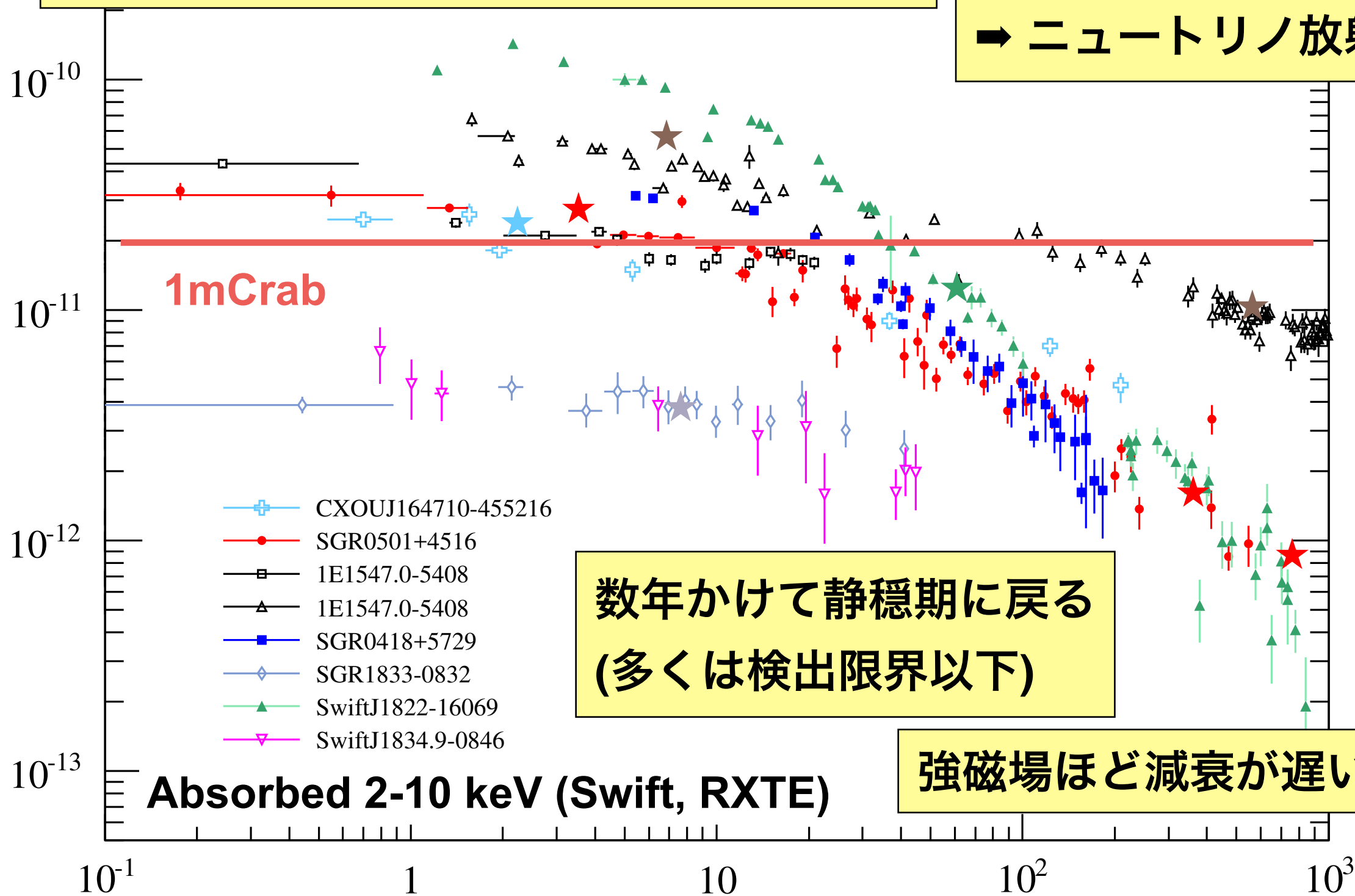
# マグネターのX線アウトバースト

主に星表面の放射が観測

X線フラックス ( $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )

アウトバースト初期に short burst が頻発

~10日のプラトー状態  
⇒ ニュートリノ放射？



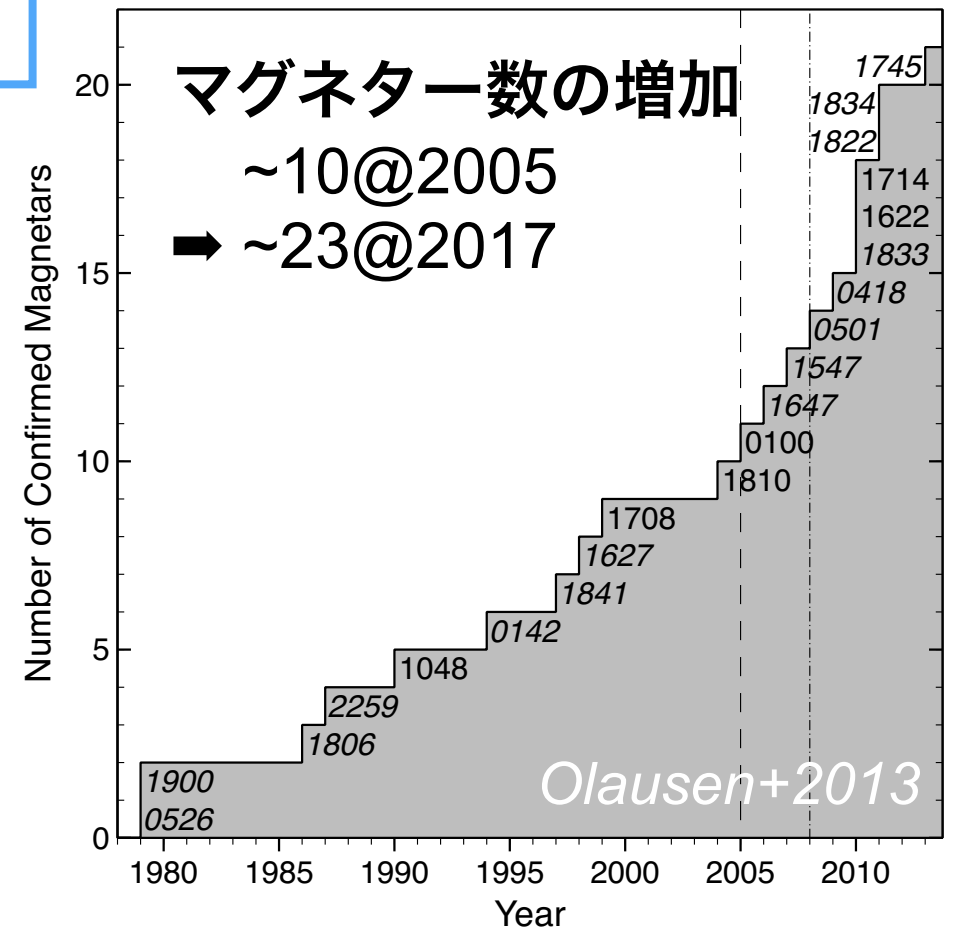
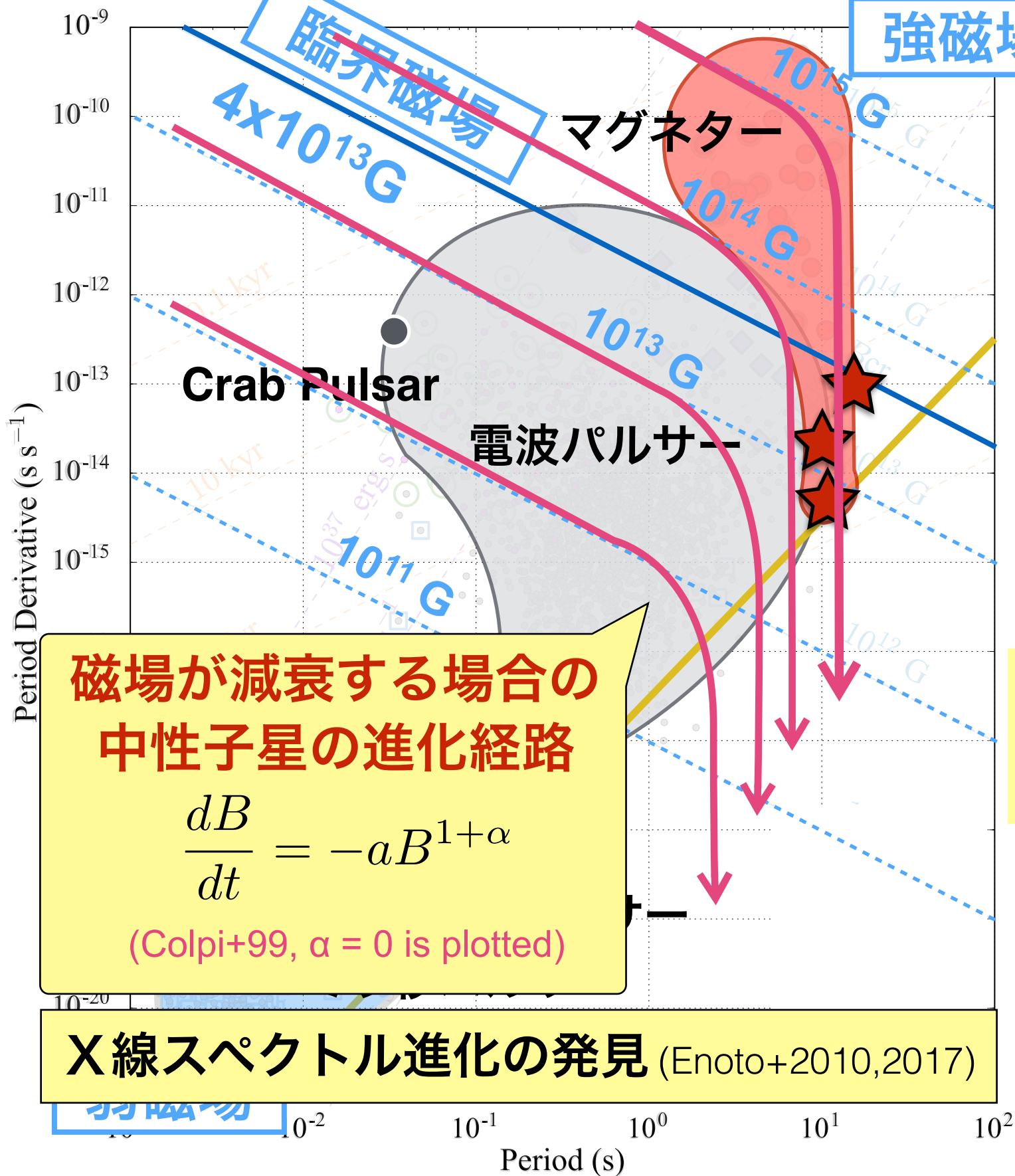
数年かけて静穏期に戻る  
(多くは検出限界以下)

強磁場ほど減衰が遅い??

星内部 or 磁気圏の磁場エネルギー解放後の冷却過程

バーストの経過日数  
(Enoto et al., ApJS 2017)

# 中性子星の種族たち：マグネター



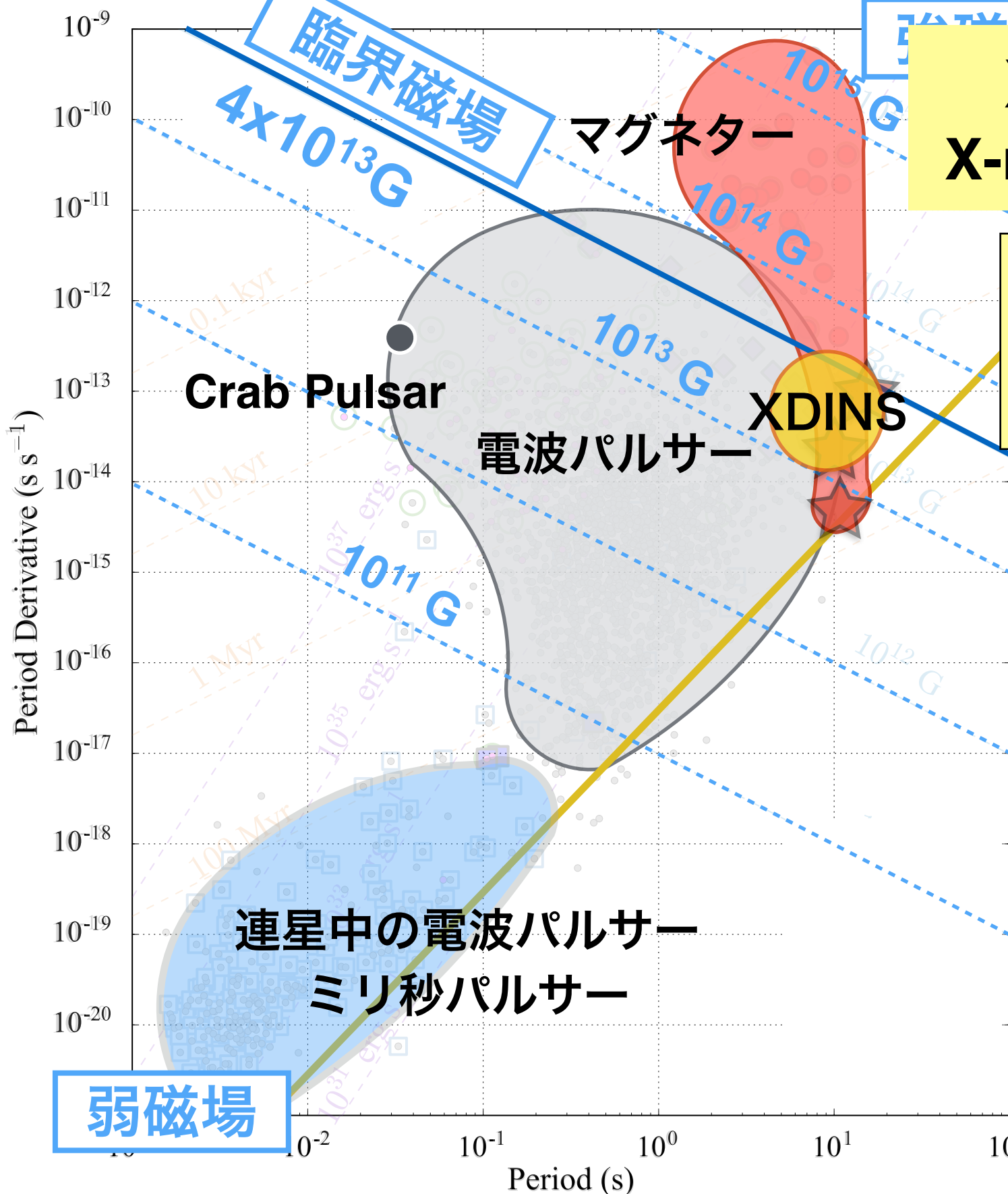
## 弱磁場マグネター Low field magnetar

P-Pdot か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。

SGR 0418+5729、Swift J1822.3-1606 など3天体が知られる。



# 中性子星の種族たち: XDINS



**X線で輝く孤立中性子星**  
**X-ray Dim Isolated NS (XDINS)**

**可視偏光の検出 ( $\text{PD} = 16.4 \pm 5.3\%$ )**  
**真空偏極の証拠?** Mignani+2016, MNRAS  
**マグネターの末裔なのか?**

**地球に最も近い孤立中性子星**  
**RX J1856.5-3754**

Image credit: Chandra X-ray Observatory

地球近傍にある電波放射のない孤立中性子星。数秒の自転周期と熱的なX線放射。  
中性子星の残熱（+磁場）で輝く？  
アウトバーストは観測されていない。



# 小説「竜の卵 (Dragon's Egg)」

R. L. Forward

年に

査船が中性子星の上の生物を発見する話。著者  
フォワードの指導教官は、初期の重力波実験に  
多大な影響を与えた

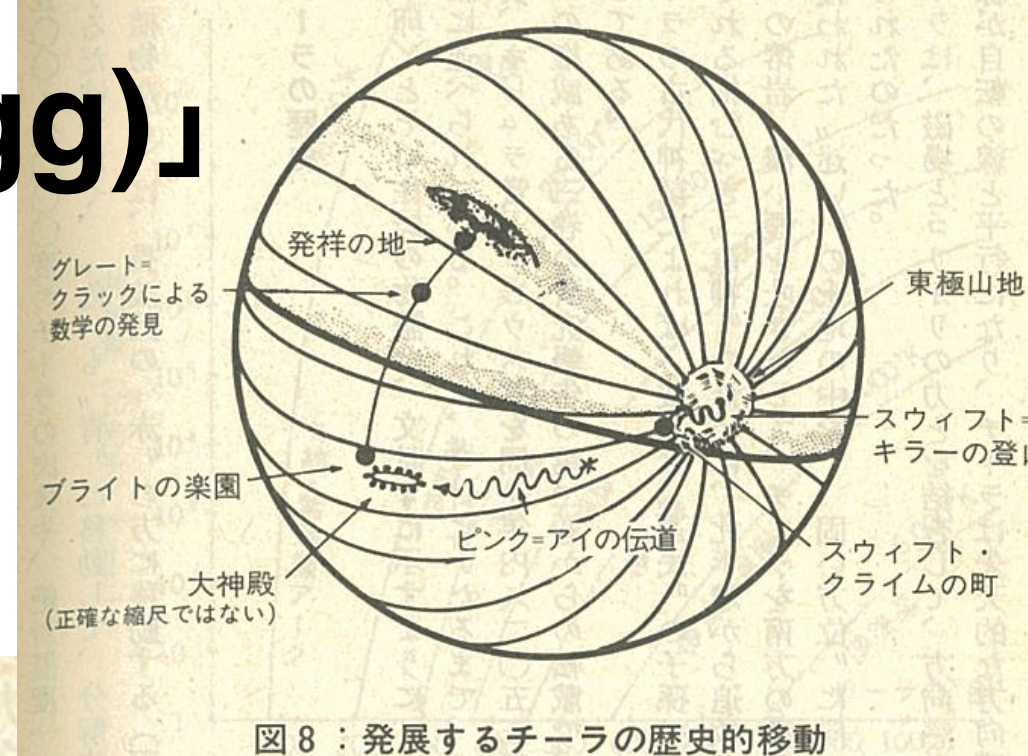
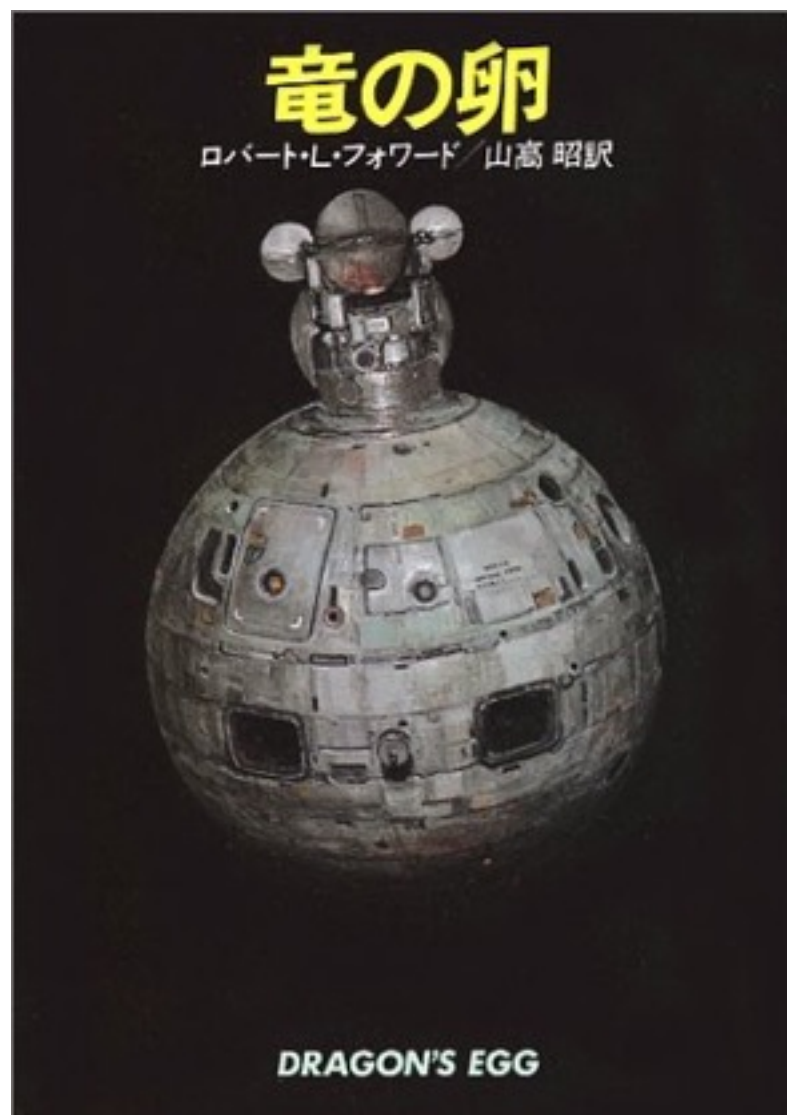


図8：発展するチーラの歴史的移動

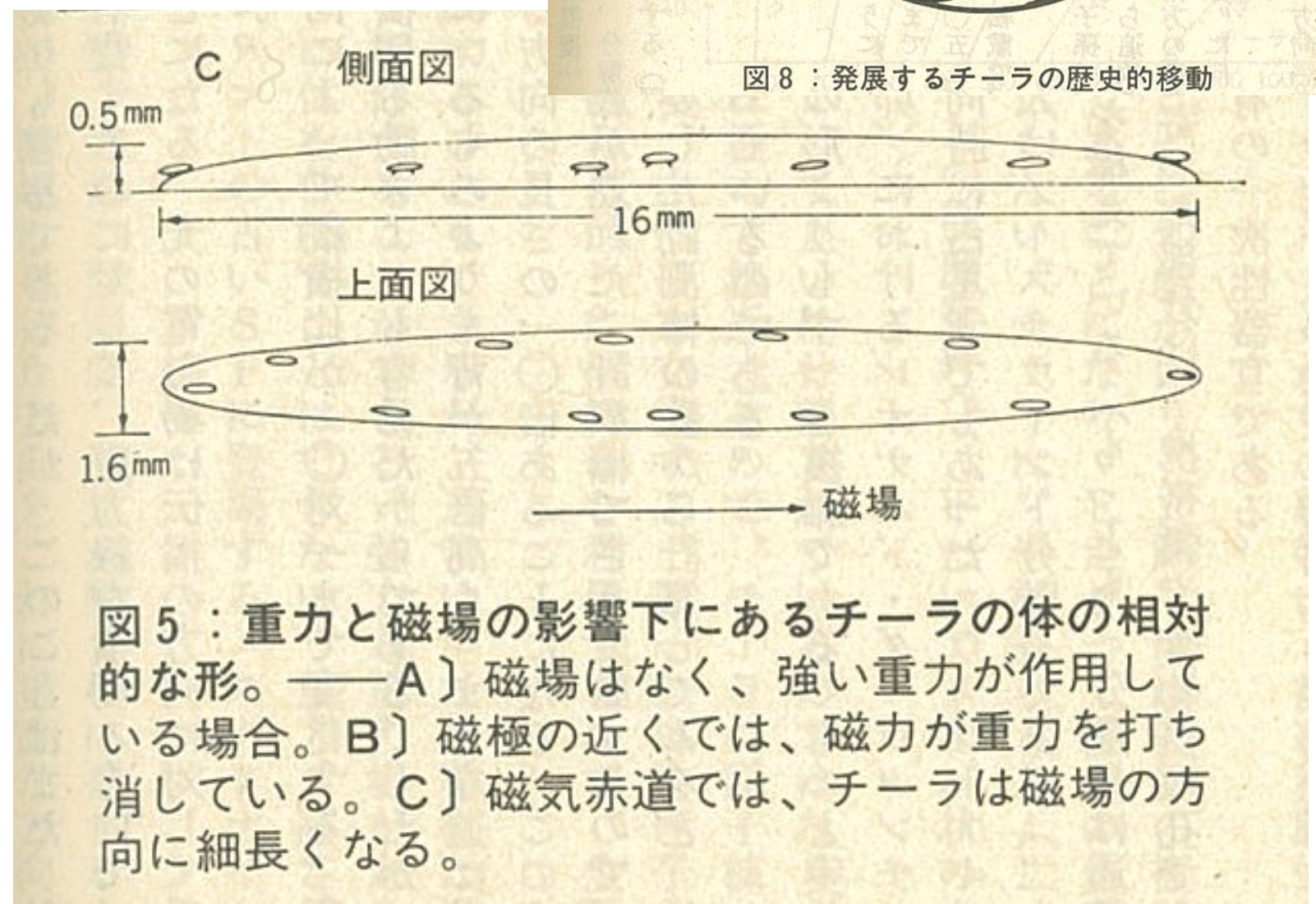
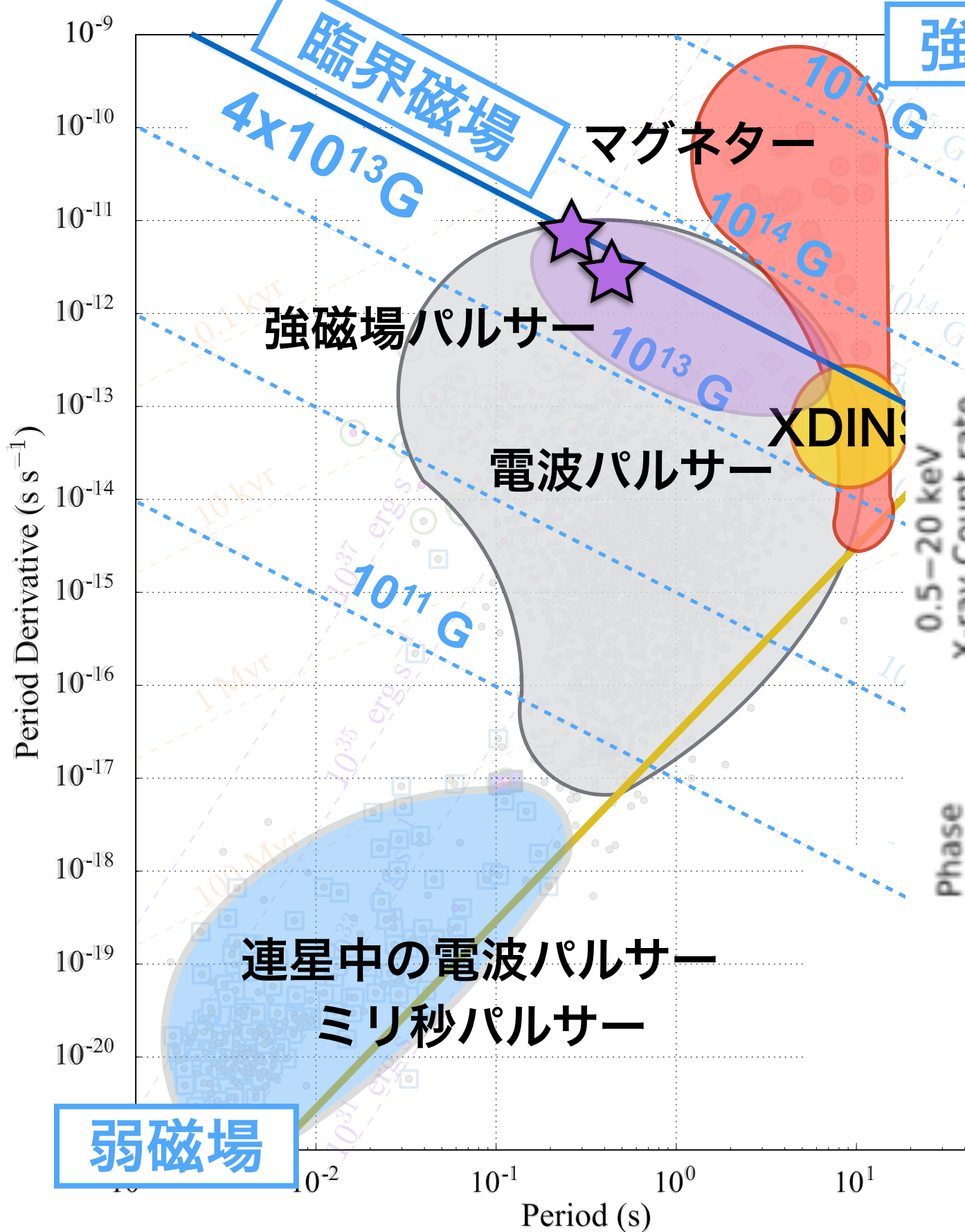


図5：重力と磁場の影響下にあるチーラの体の相対的な形。——A〕磁場はなく、強い重力が作用している場合。B〕磁極の近くでは、磁力が重力を打ち消している。C〕磁気赤道では、チーラは磁場の方向に細長くなる。

XDINSs は 100-300 pc と近いが、Dragon's Egg を彷彿とさせる。  
X線放射の弱いマグネターの末裔がまだ近傍に隠れている可能性は？



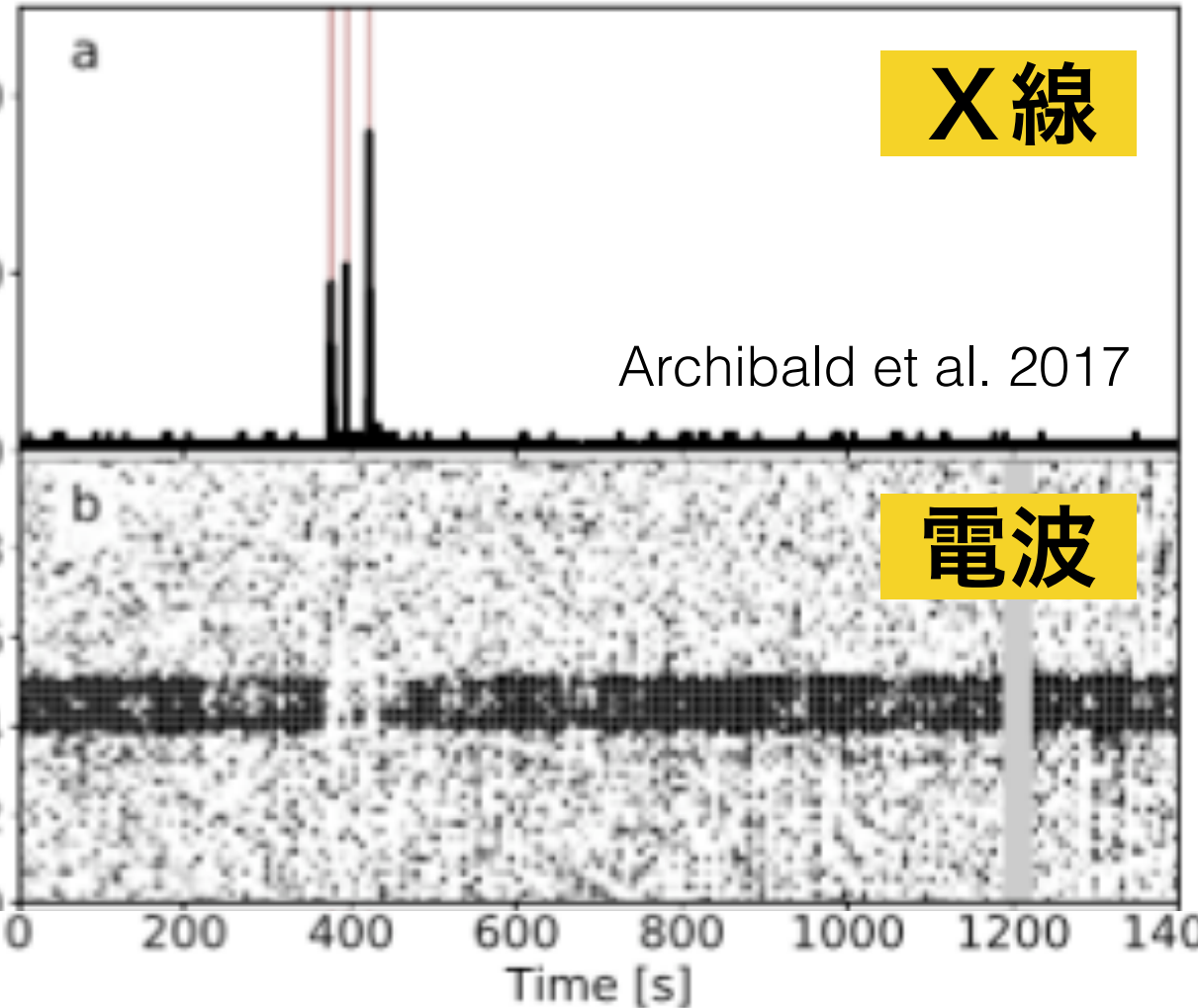
# 中性子星の種族たち：強磁場パルサー



強磁場

マグネターと電波パルサーの中間的な磁場の天体。PSR J1119-6127 (2016年アウトバースト)など2天体は、通常は回転駆動型パルサーのように振舞うが、稀にマグネターの活動性を示す。

0.5–20 keV  
X-ray Count rate



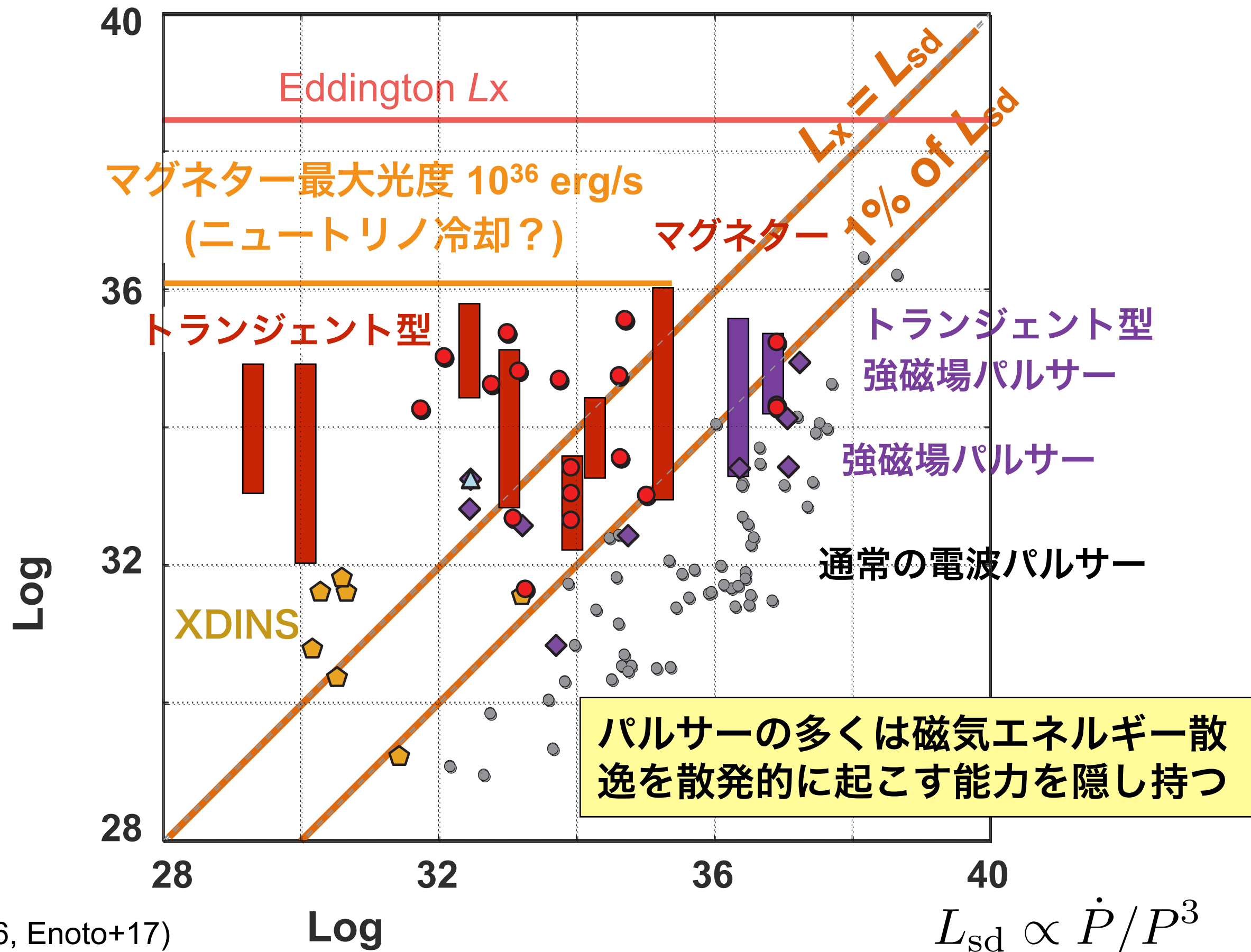
X線

電波

Archibald et al. 2017

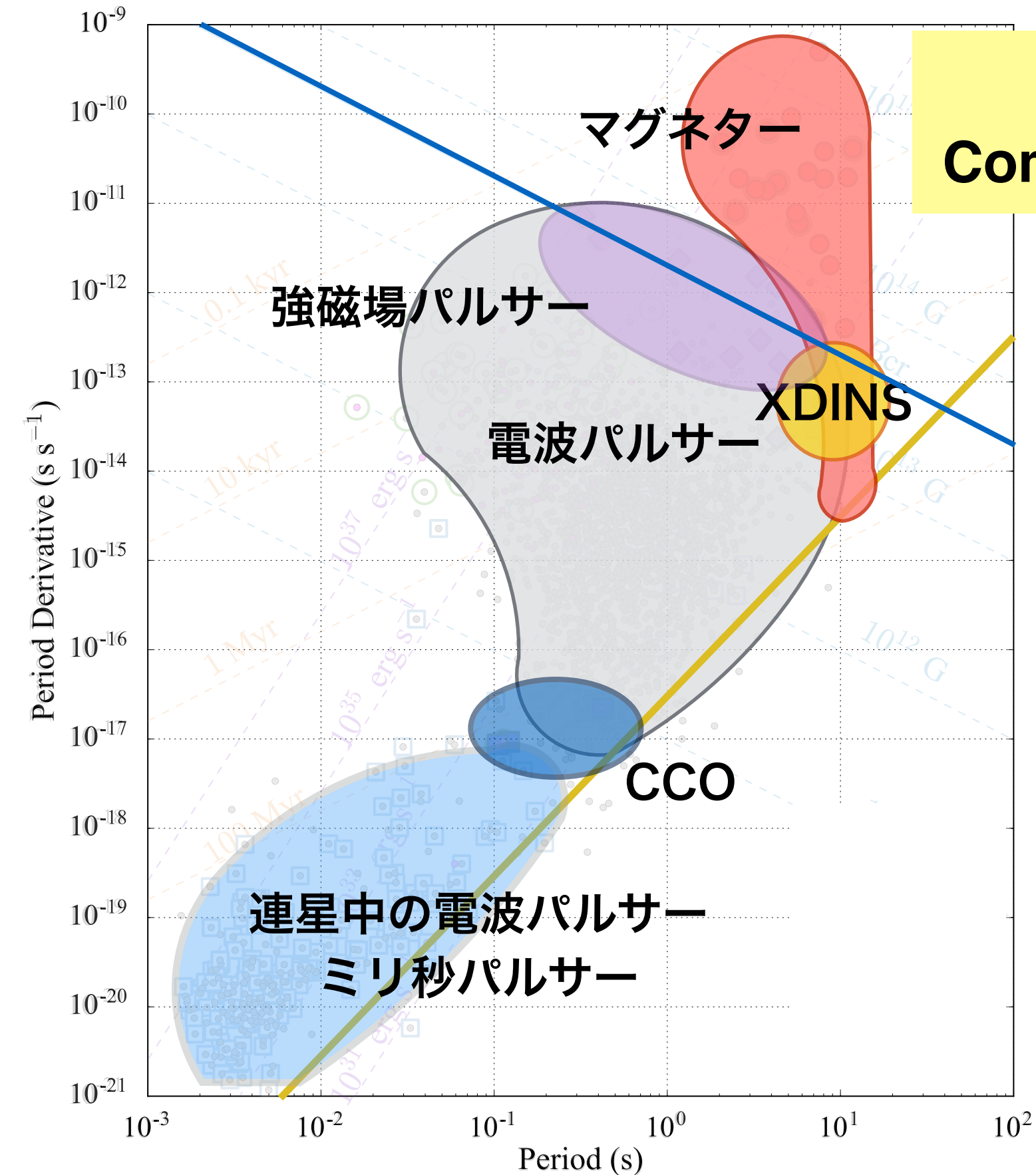
トロイダル磁場などの内部による磁気活動は強磁場中性子星に普遍的？

# X線放射に現れる磁気エネルギー散逸

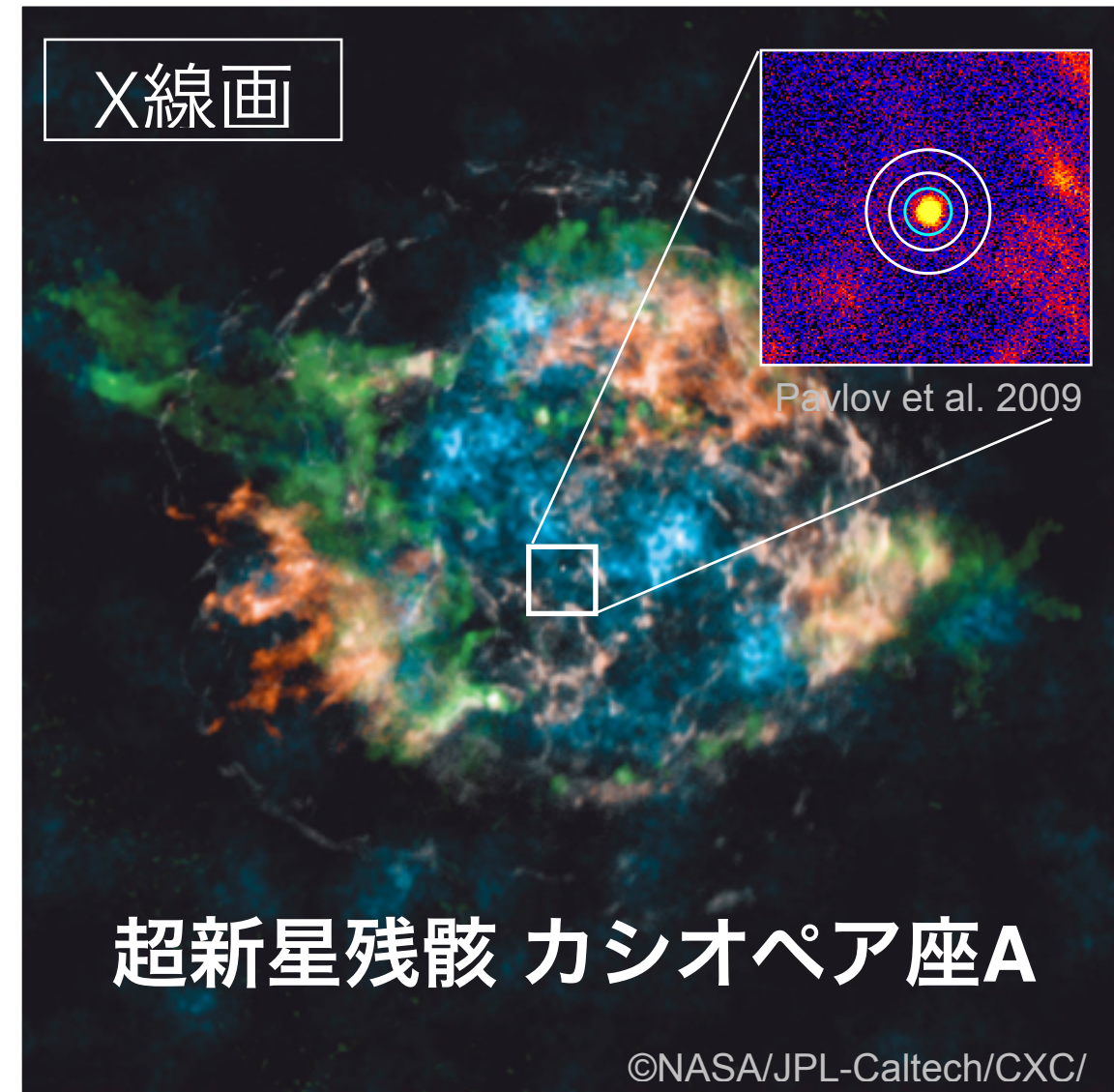




# 中性子星の種族たち: CCO



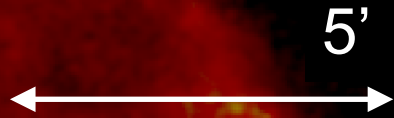
**SNR中心の軟X線源**  
**Compact Central Object (CCO)**



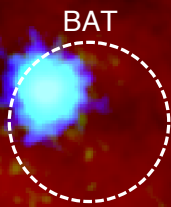
若い超新星残骸の中心の軟X線源で、  
電波は出さずX線パルスも弱い。  
表面からの熱放射と考えられるが...

# CCO からもマグネター放射が検出された

Swift/XRT



Pre outburst



Post outburst

(D'Ai+2016)

- **Compact Central Object (CCO)**

超新星残骸の中心にあるX線源で、一般的にはマグネターと異なり回転が速く ( $P \sim 0.1-0.4$  s)、減速が小さい ( $P_{\dot{}} < \sim 10^{-14}$  s/s) ので表面磁場は小さくなる ( $B \sim 10^{11}$  G?). 複数の種族が混在しているかも?

- **奇妙な天体 CCO 1E 161348-5055**

超新星残骸 RCW 103 の中心天体で、6.67 hour という孤立中性子星の標準モデルの自転では説明できない周期性を示す CCO の中でも特異天体。超新星残骸のX線観測から典型的な重力崩壊型。

- **マグネター様アウトバーストの検出**

2016年6月22日にマグネターのショートバーストに加え定常X線の増光が観測された。パルス波形は変化したが大周期は大きくは変化しなかった。

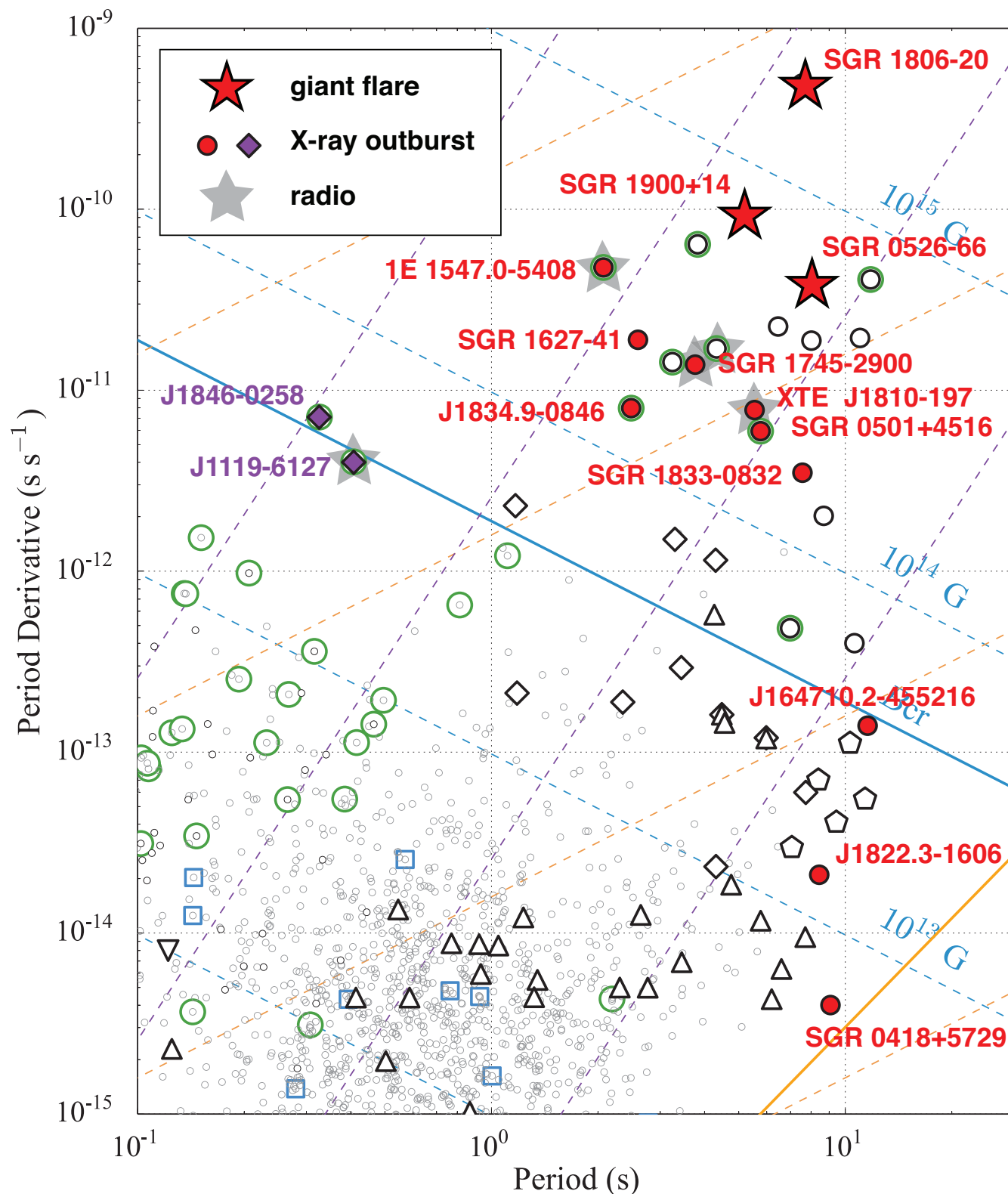
- **長周期とマグネター活動性の起源は?**

fall-back disk により急速に減速がかかり、押し込められた磁場がマグネター活動を起こした? 不明..

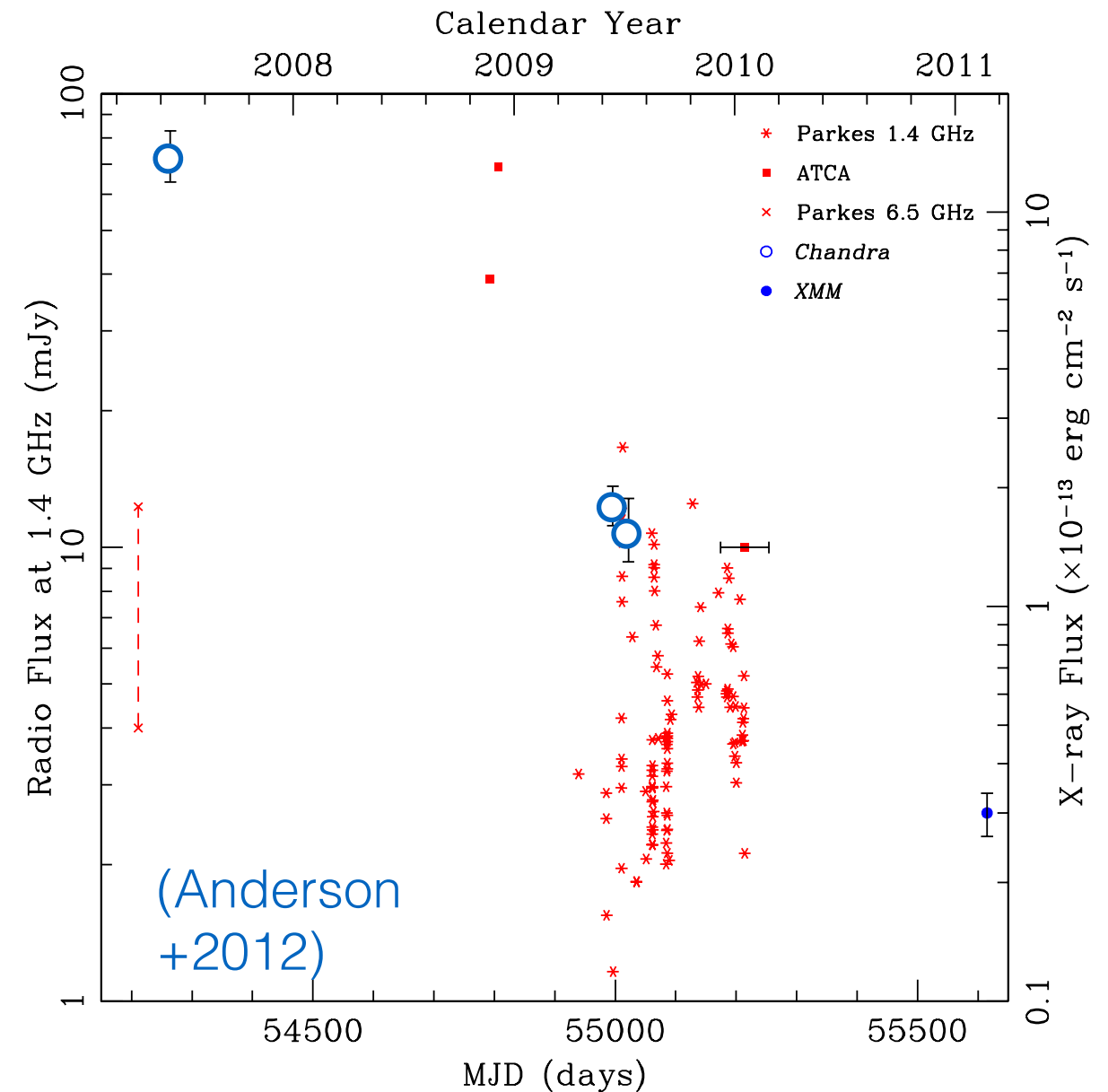
**弱磁場のはずの中性子星でも  
マグネター的な磁気活動?**



# マグネターのX線と電波による同時観測



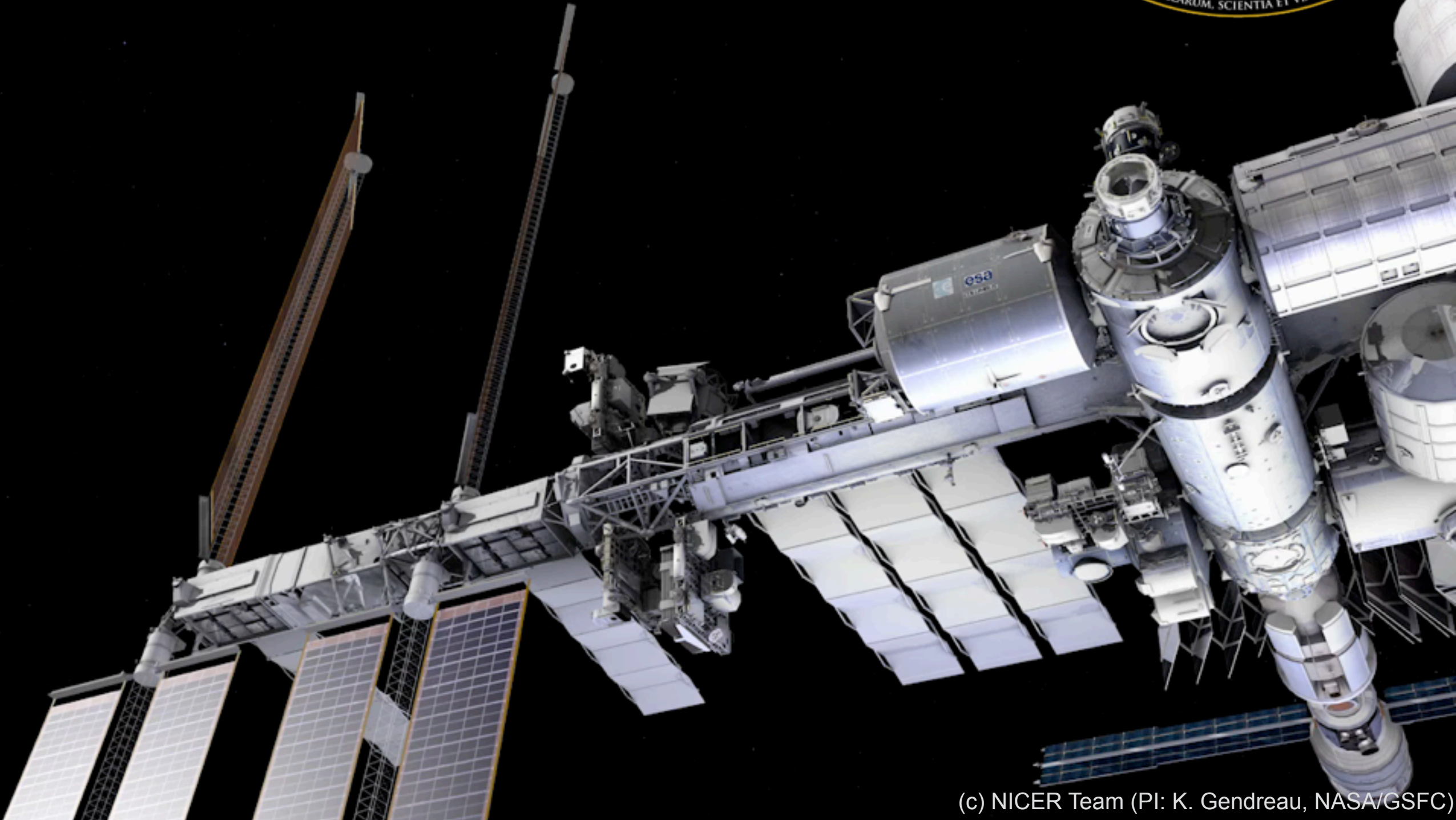
電波で発見された PSR J1622-4950  
X線と電波でのアウトバースト観測



電波で明るいマグネターは5個ほどしか知られていないが、  
今後、X線と電波の同時観測が盛んになると考えられる。

# Neutron star Interior Composition ExploreR

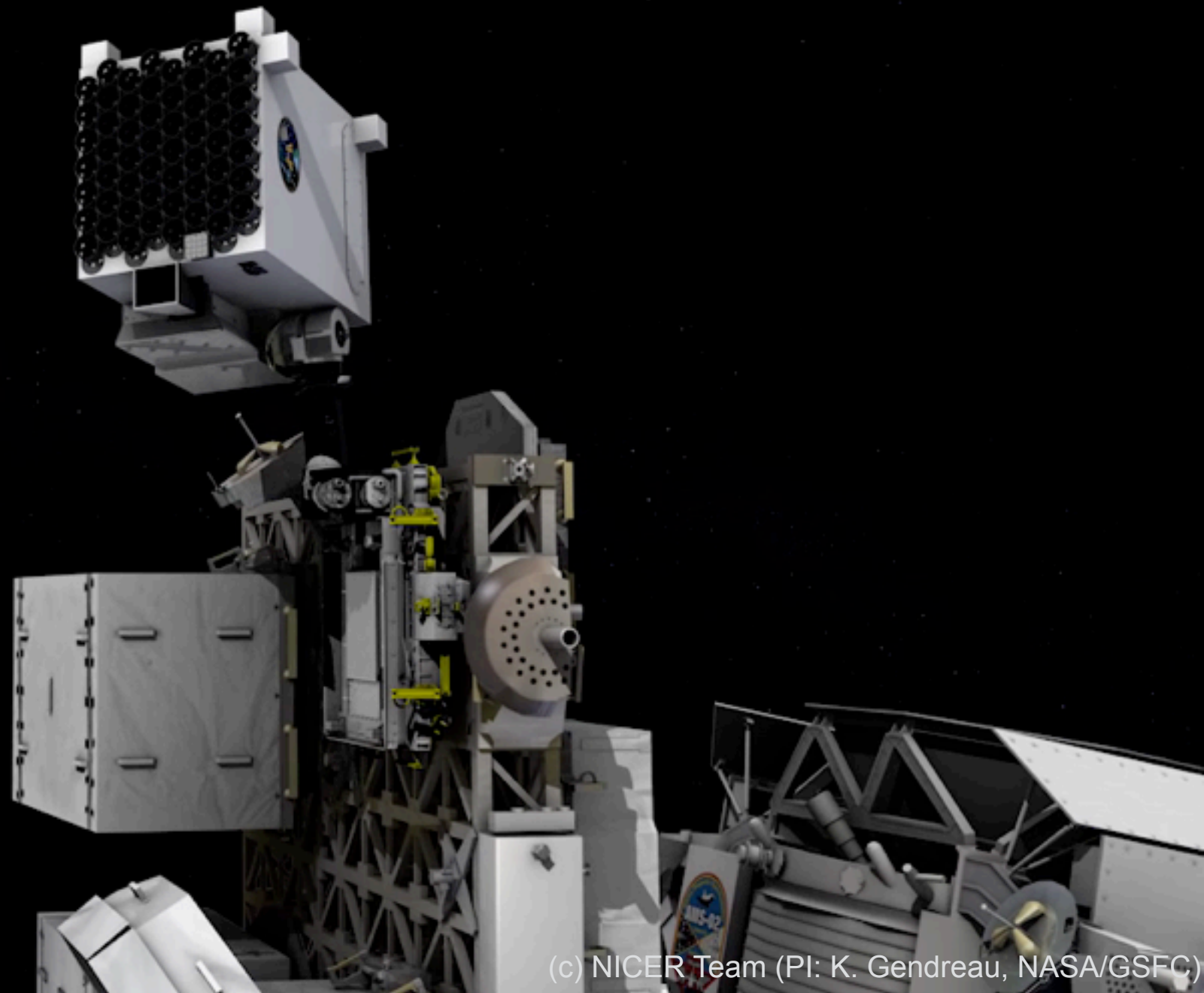
- **NICER mission:** Soft X-ray (0.2-12 keV) timing spectroscopy for neutron star structure, dynamics, and energetics.
- **Platform:** ISS external attached payload with active pointing
  - Launched June 3, 2017; Installed on ISS, June 13
- **Duration:** 18 months science mission + GO extension





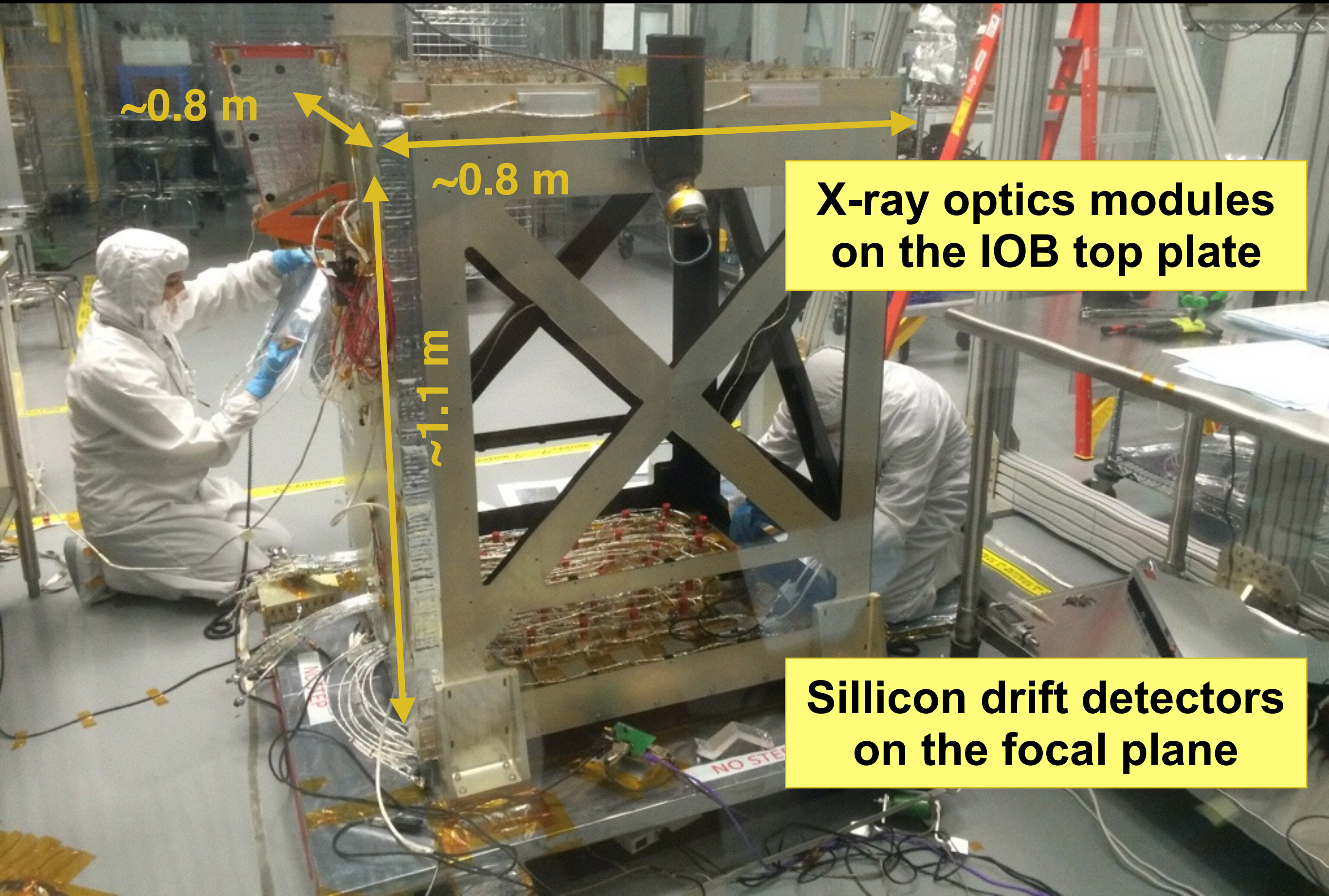
# Neutron star Interior Composition ExploreR

- **NICER mission:** Soft X-ray (0.2-12 keV) timing spectroscopy for neutron star structure, dynamics, and energetics.
- **Platform:** ISS external attached payload with active pointing
  - Launched June 3, 2017; Installed on ISS, June 13
- **Duration:** 18 months science mission + GO extension





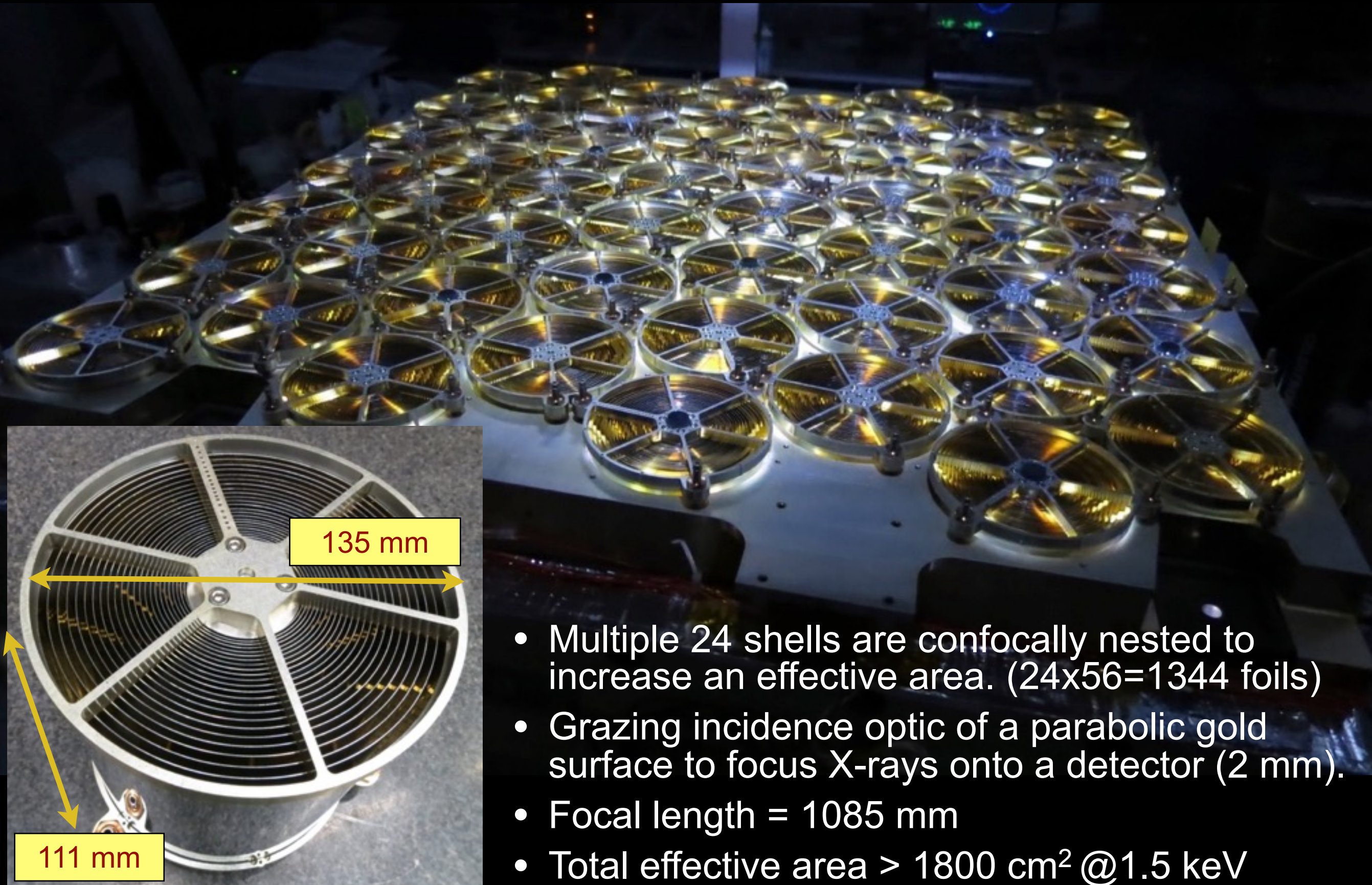
# 56 X-ray Timing Instruments (XTIs) of NICER





# X-Ray Concentrator optics (XRC)

Single reflection, grazing-incidence nested gold-coated Al foils

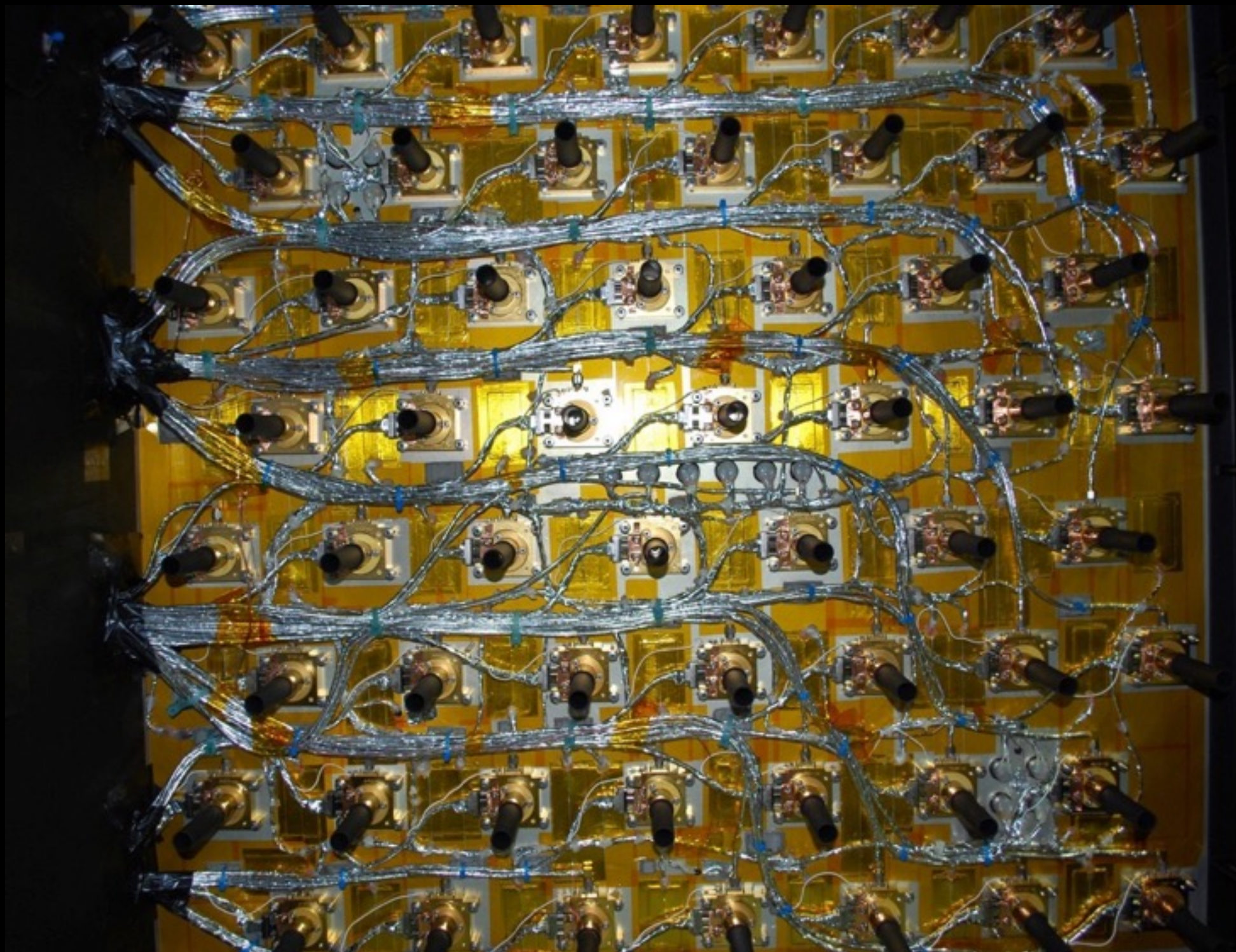


- Multiple 24 shells are confocally nested to increase an effective area. ( $24 \times 56 = 1344$  foils)
- Grazing incidence optic of a parabolic gold surface to focus X-rays onto a detector (2 mm).
- Focal length = 1085 mm
- Total effective area  $> 1800 \text{ cm}^2$  @1.5 keV



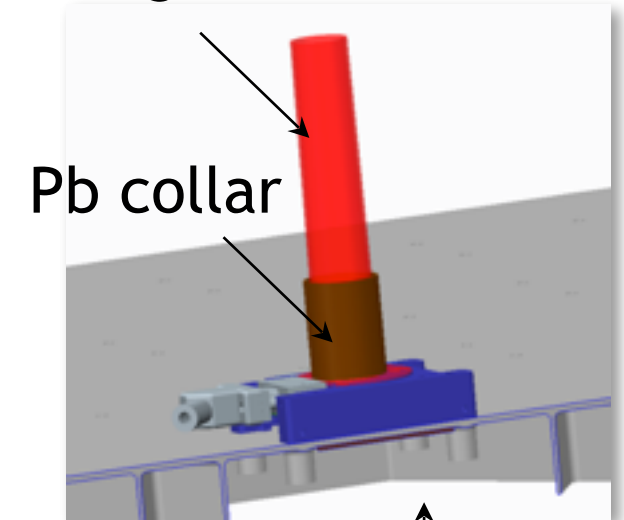
# Silicon Drift Detectors (SDDs)

Resolution : 140 eV @ 6 keV, Time resolution : <100 ns RMS (absolute)

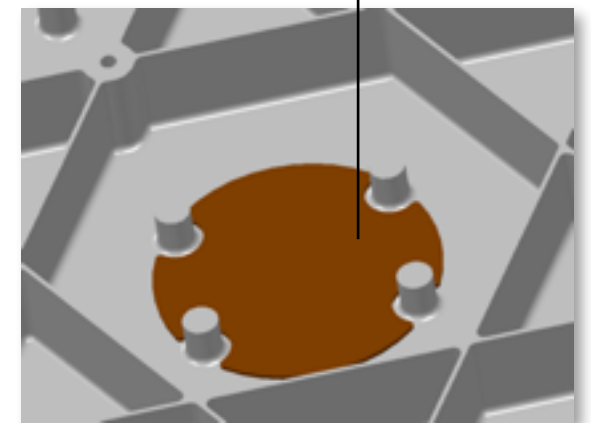


*Radiation  
shielding*

Au/Ag “traffic cone”



Pb disk

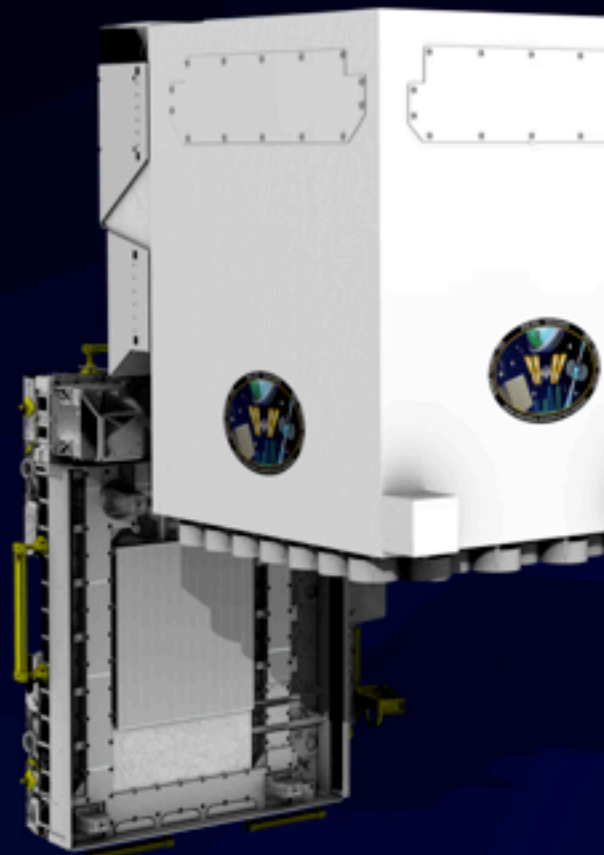




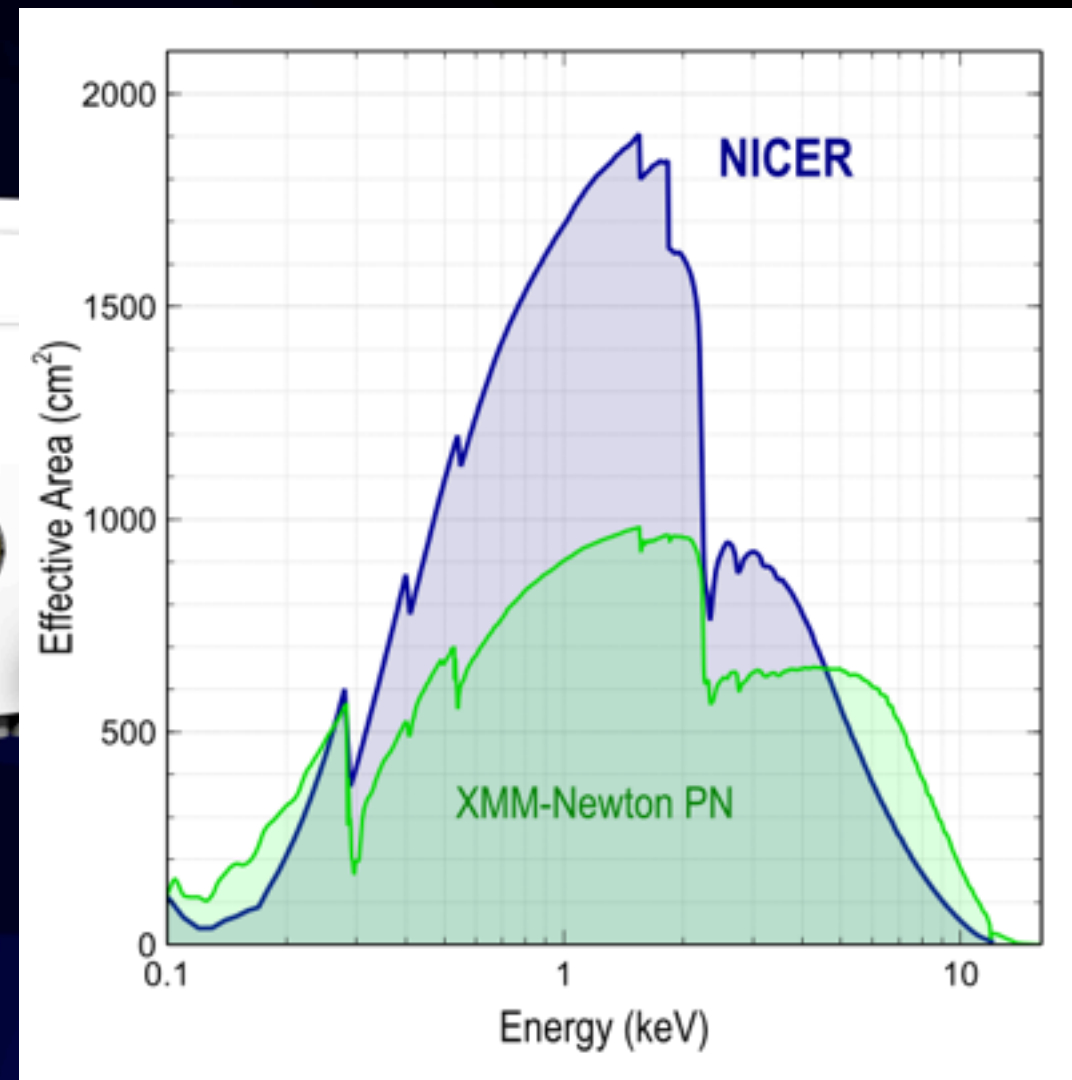
# NICER

Neutron Star Interior Composition Explorer

(c) NICER Team  
(PI: K. Gendreau, NASA/GSFC)

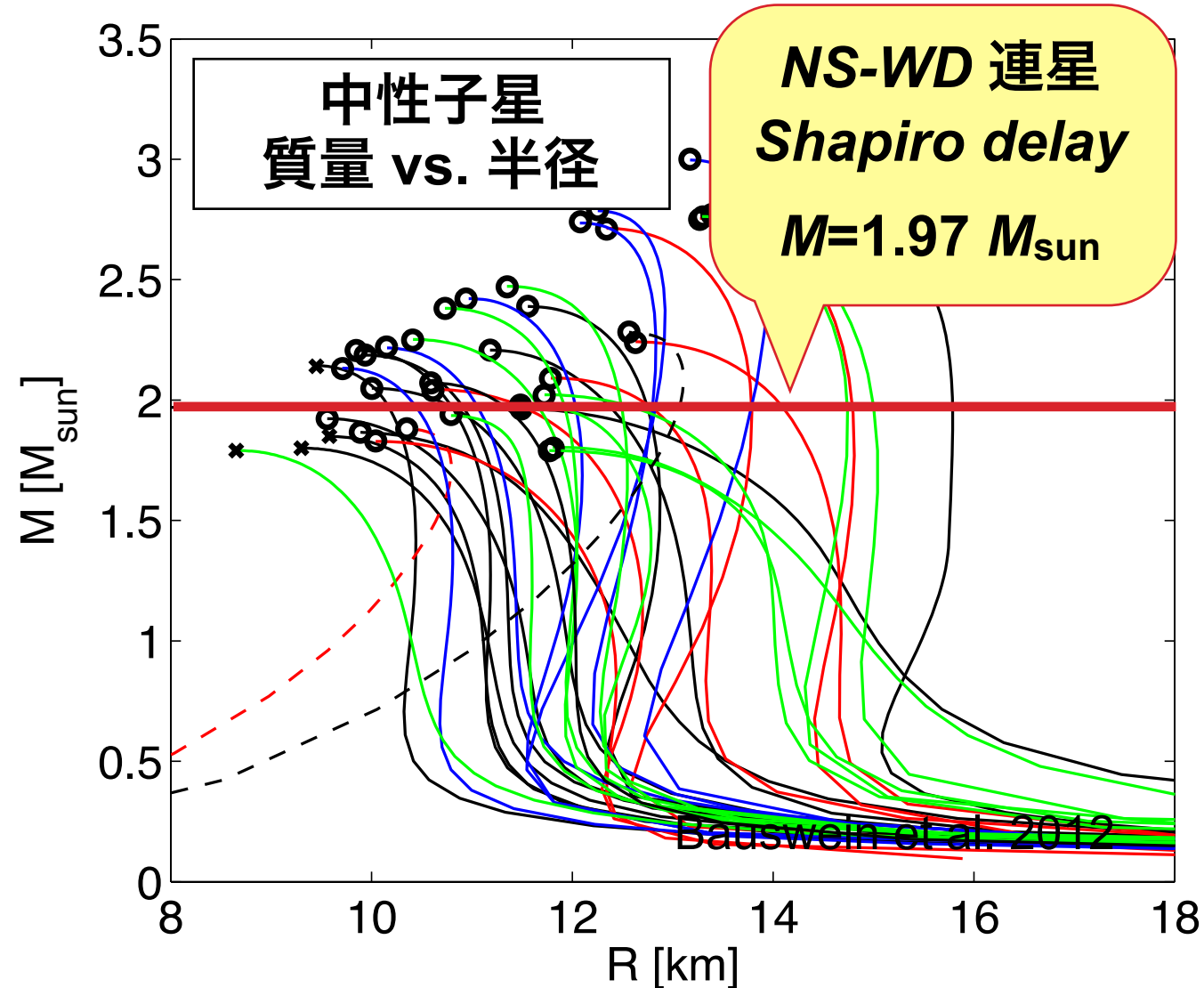


## Large effective area High time resolution

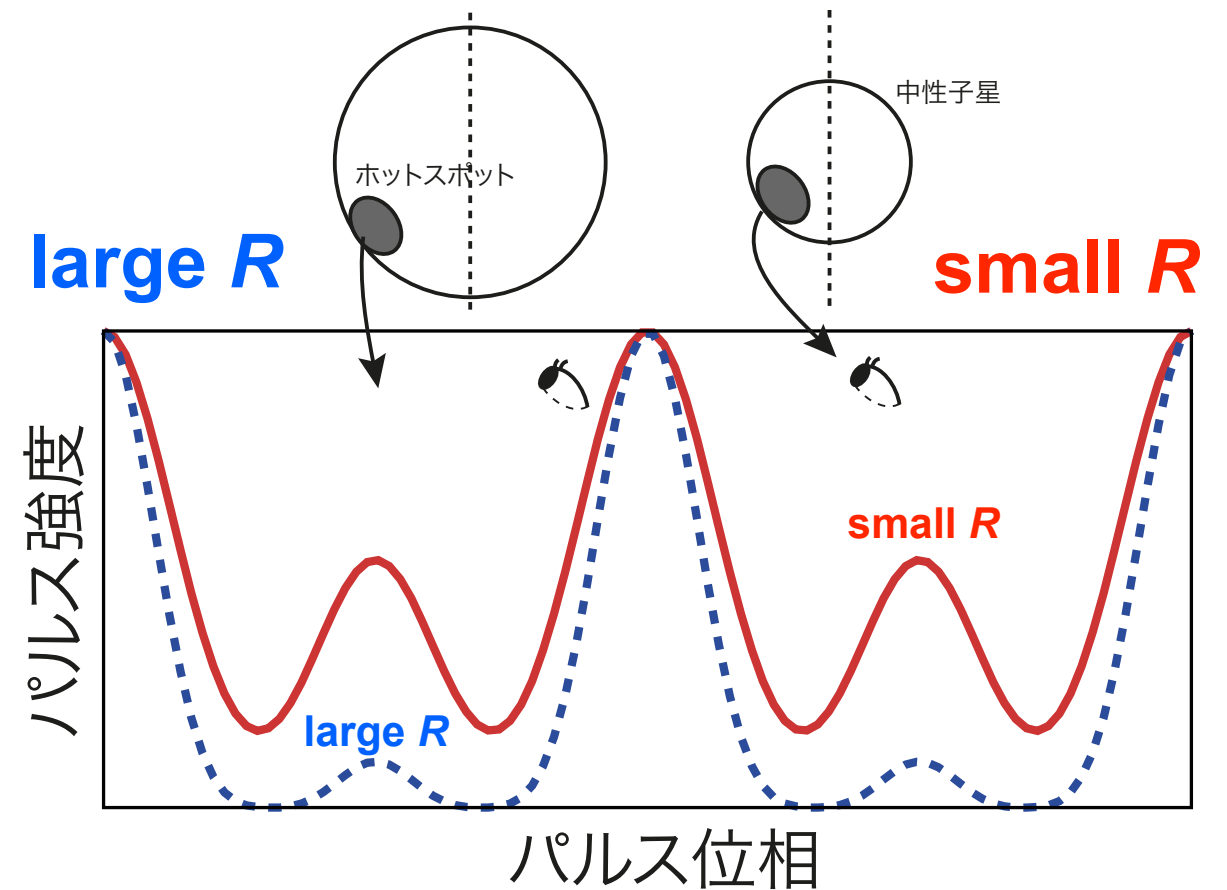


- Energy band : 0.2-12 keV (Resolution : 140 eV @ 6 keV)
- Time resolution : <100 ns RMS (absolute)
- Non-imaging FOV 6 arcmin diameter
- Background : < 0.5 cps
- Sensitivity:  $1 \times 10^{-13}$  erg/s/cm<sup>2</sup> ( $5\sigma$ , 0.5-10 keV, 10 ksec exposure for Crab-like)
- Max rate: ~38,000 cps (3.5 Crab)

# 中性子星の高密度状態方程式と質量-半径の測定



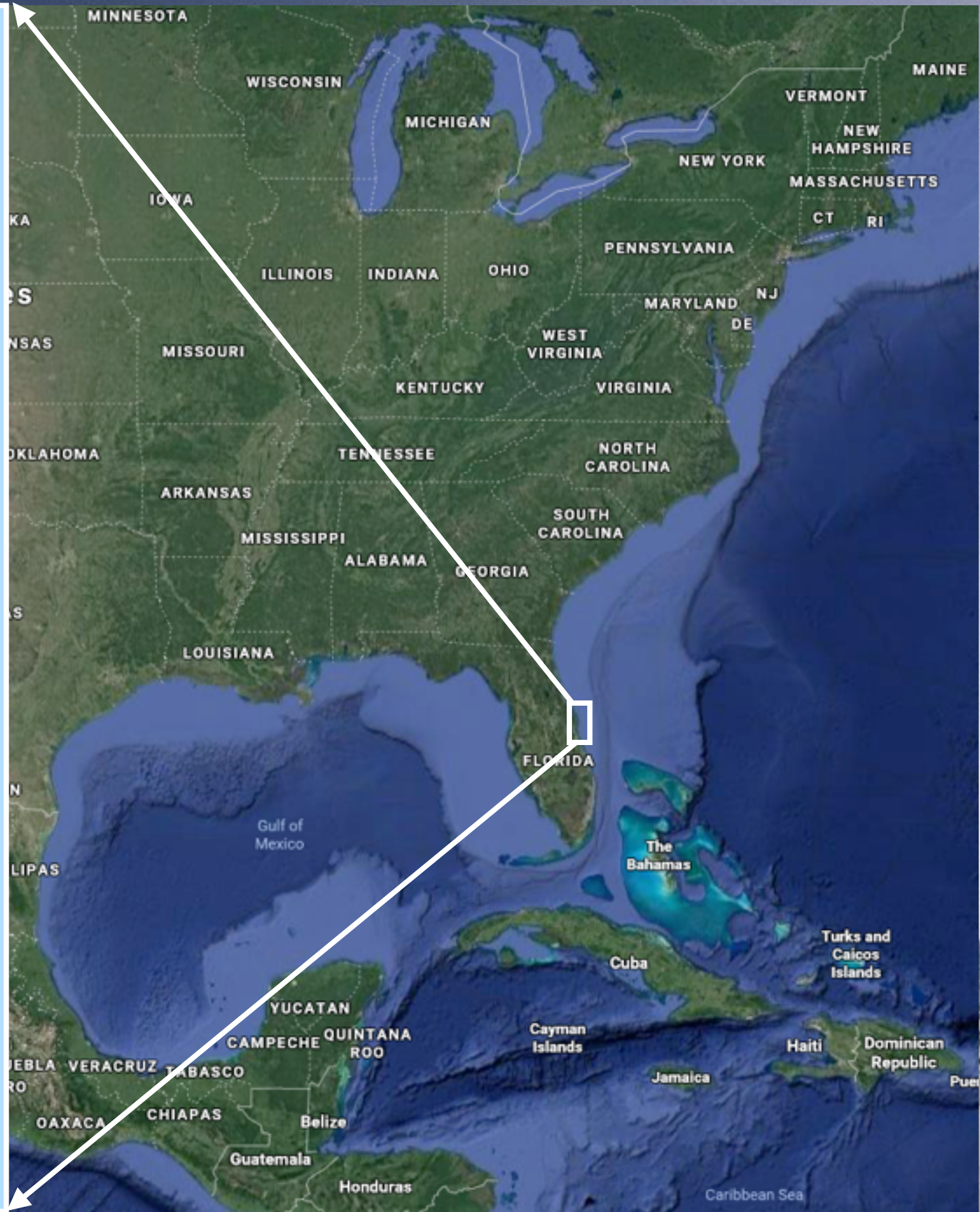
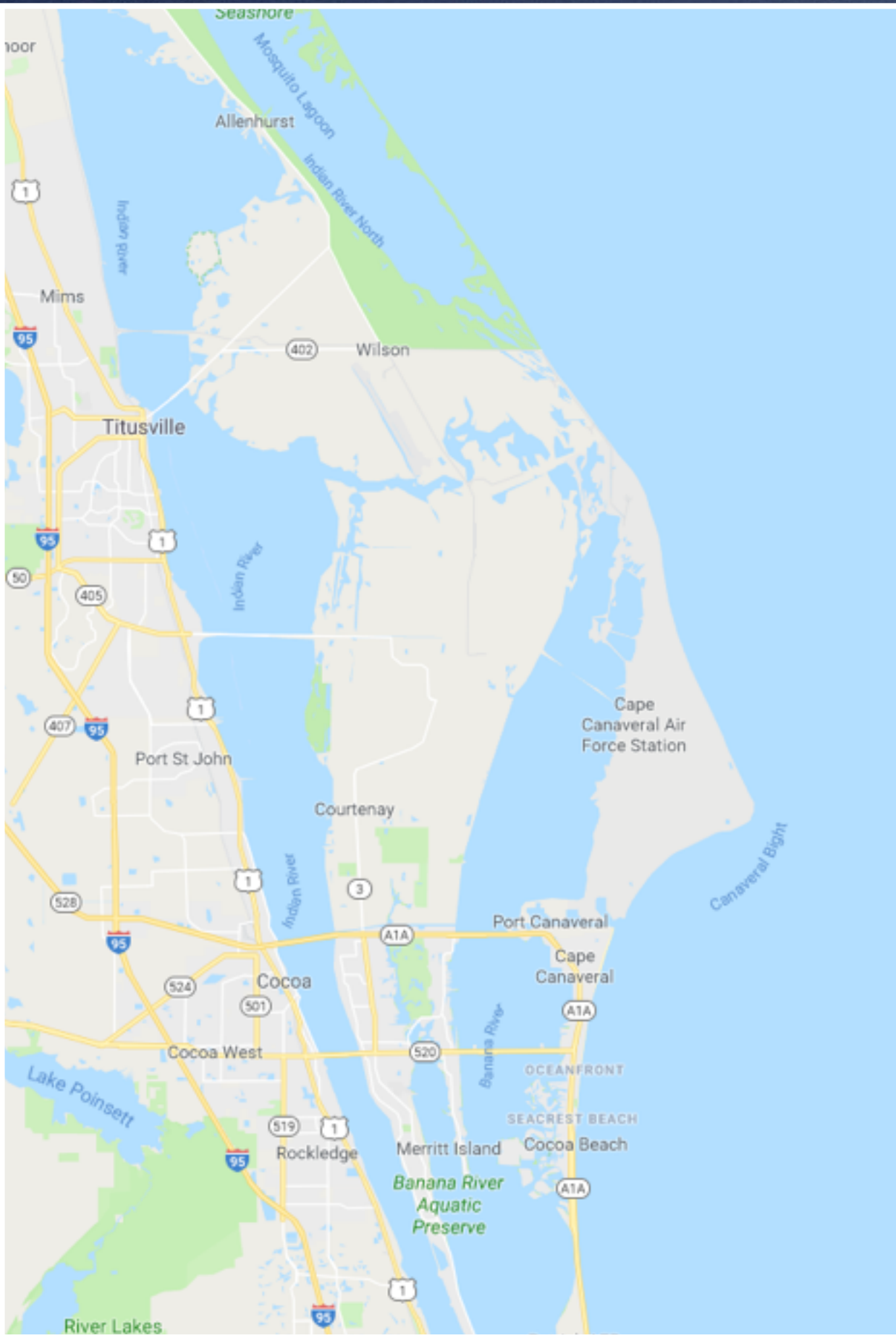
## 表面パルスの重力場による影響



- 原子核密度  $\rho = 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  を超える中性子星(NS)内部の状態方程式は未解明。
- 状態方程式と質量-半径は一対一対応 $\Rightarrow$ 理論モデルの切り分けには宇宙観測が必要。
- 質量はパルサーの連星運動から精度のよい測定が可能 (例: 電波の Shapiro delay)。
- 半径は表面のX線放射はきわめて難しい(天体距離、大気組成、磁場の影響)。
- M/R比 (コンパクトネス) 測定に期待。重力場の影響でパルス波形が歪む効果で測定。

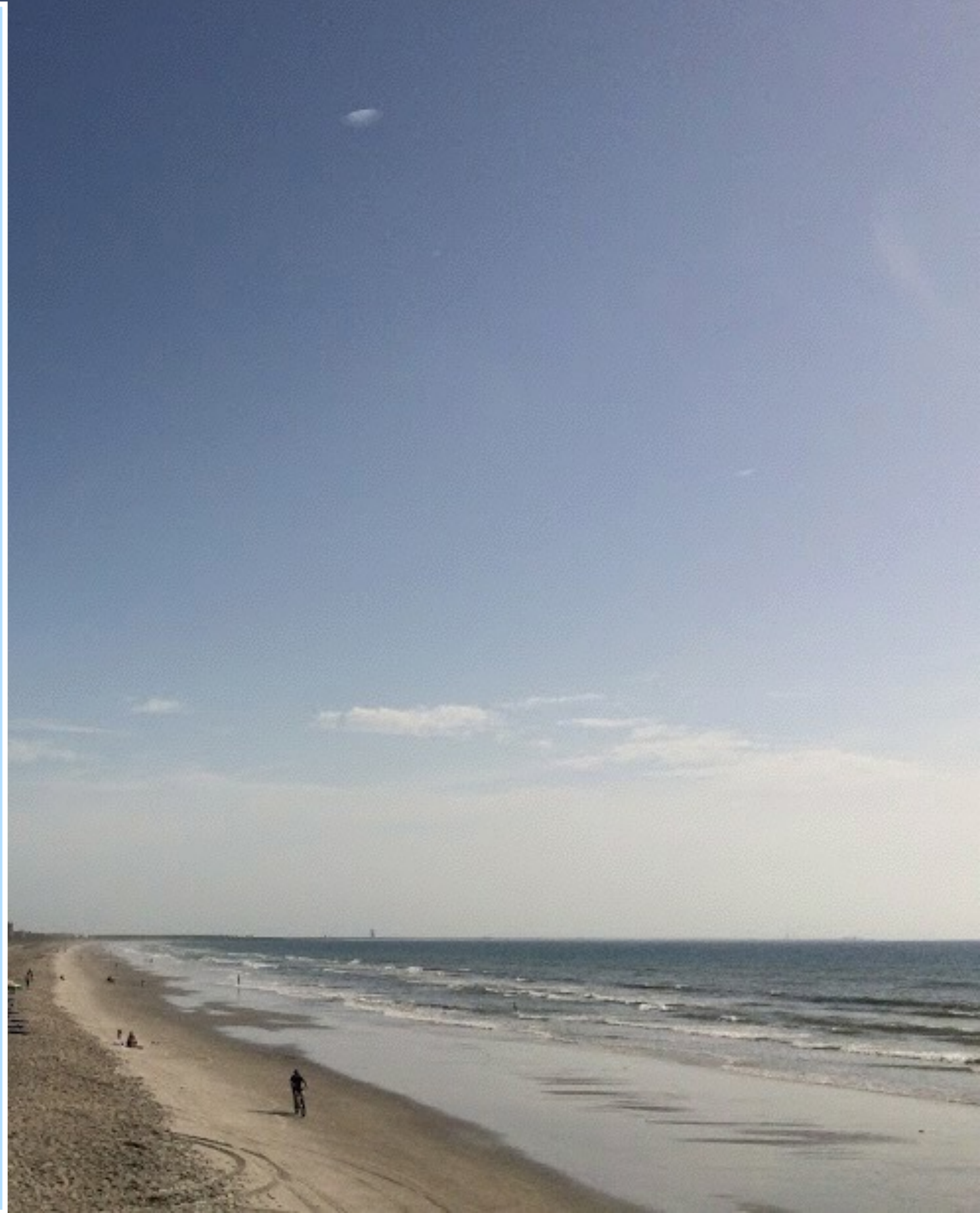
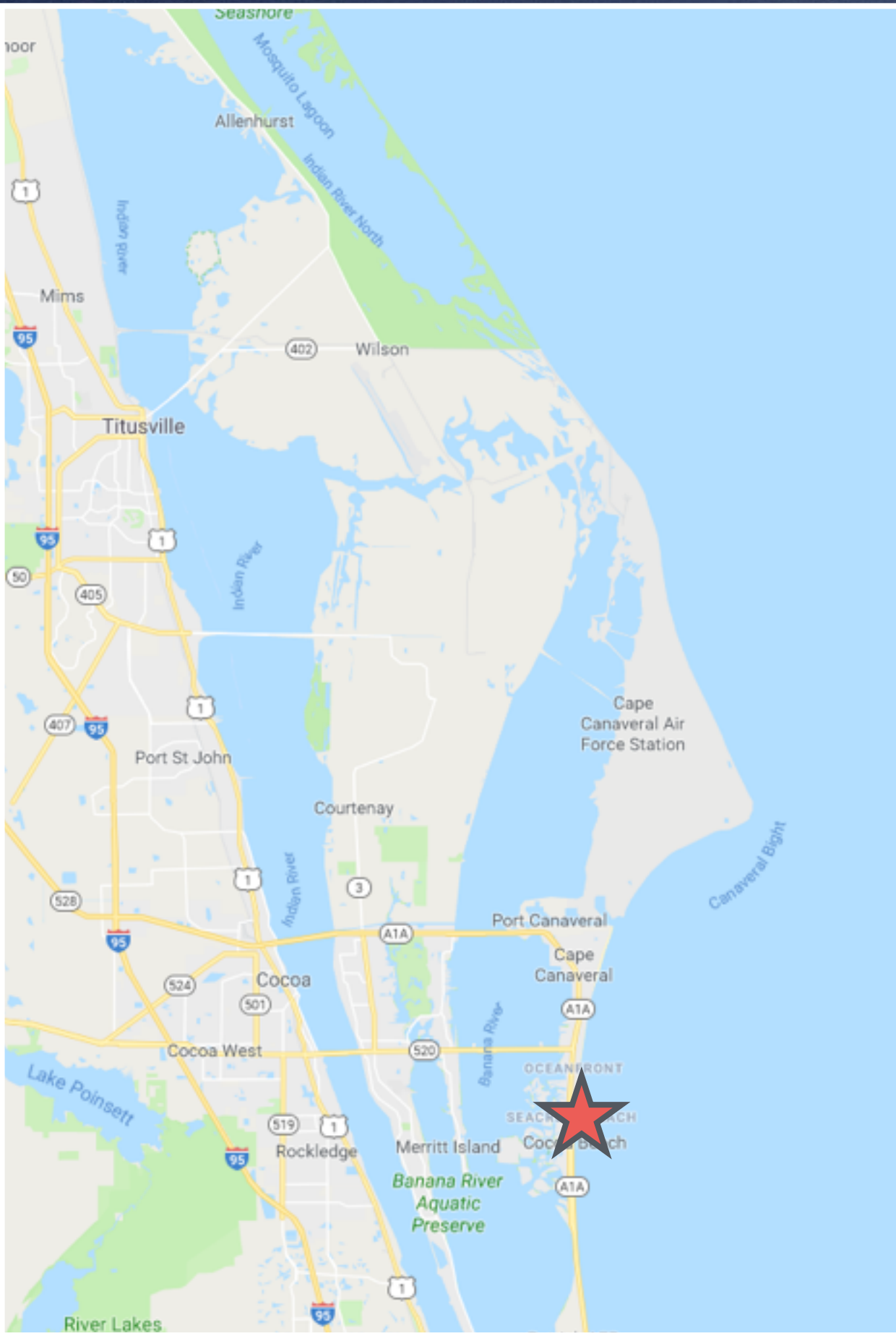


# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



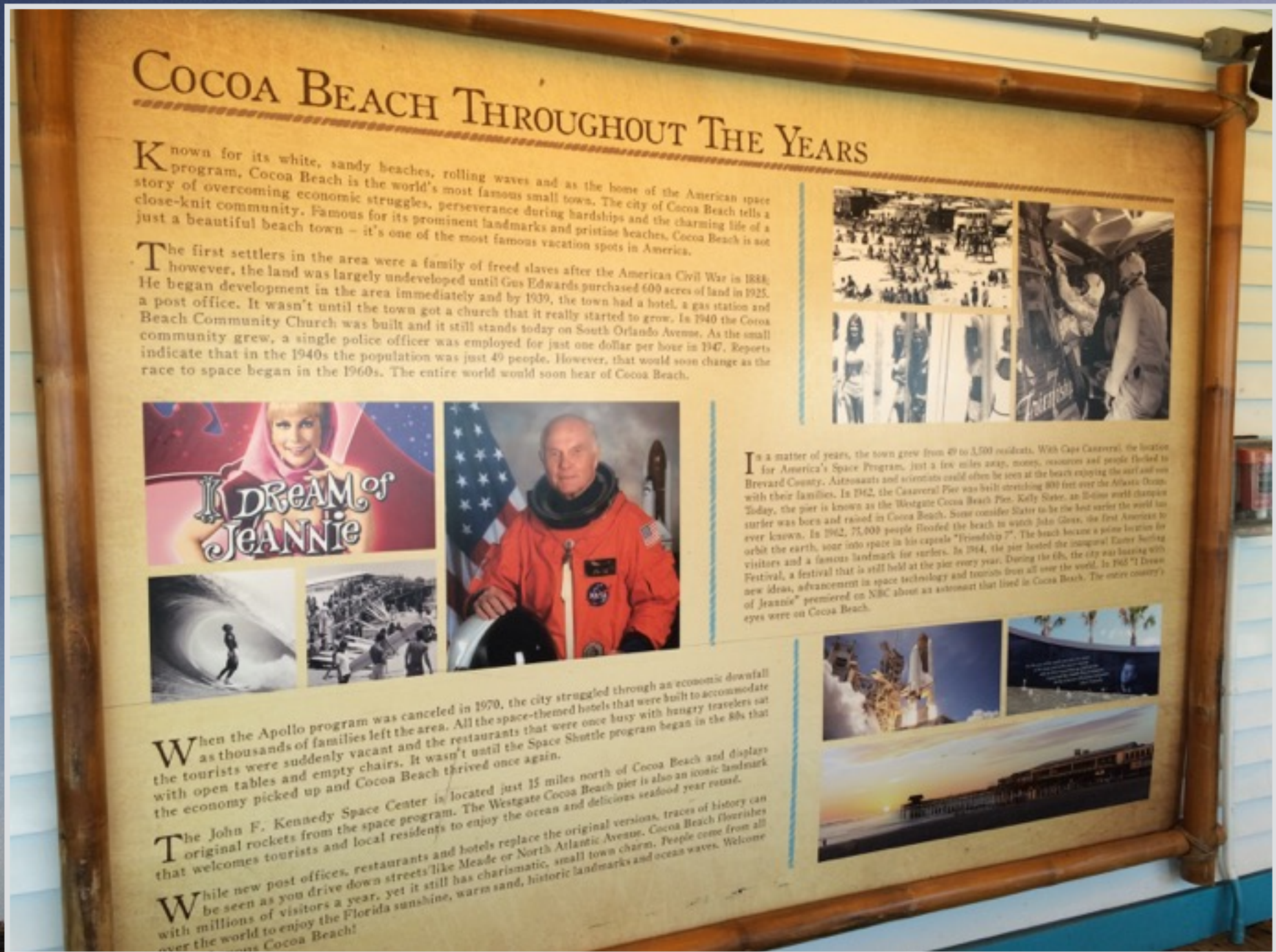


# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



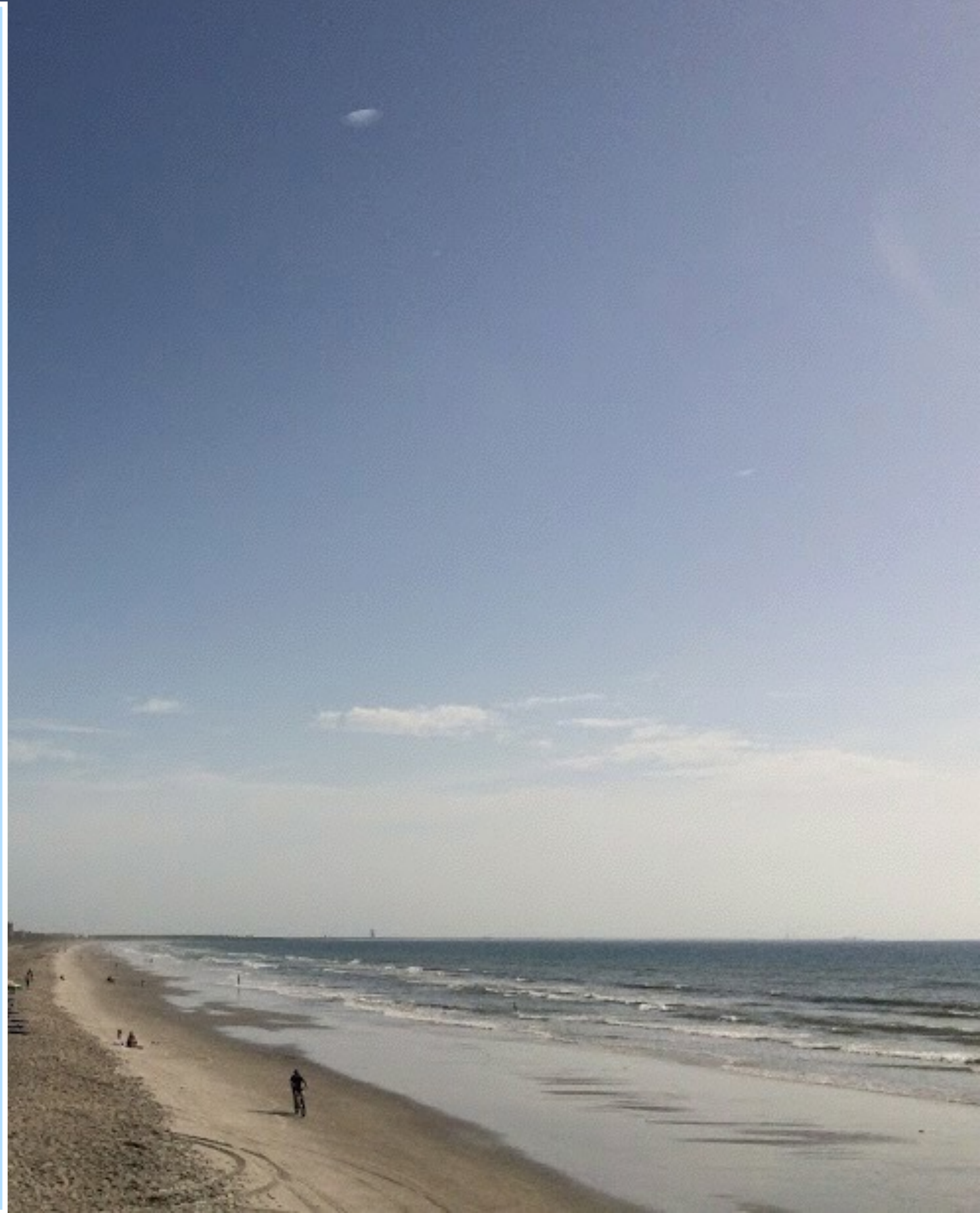
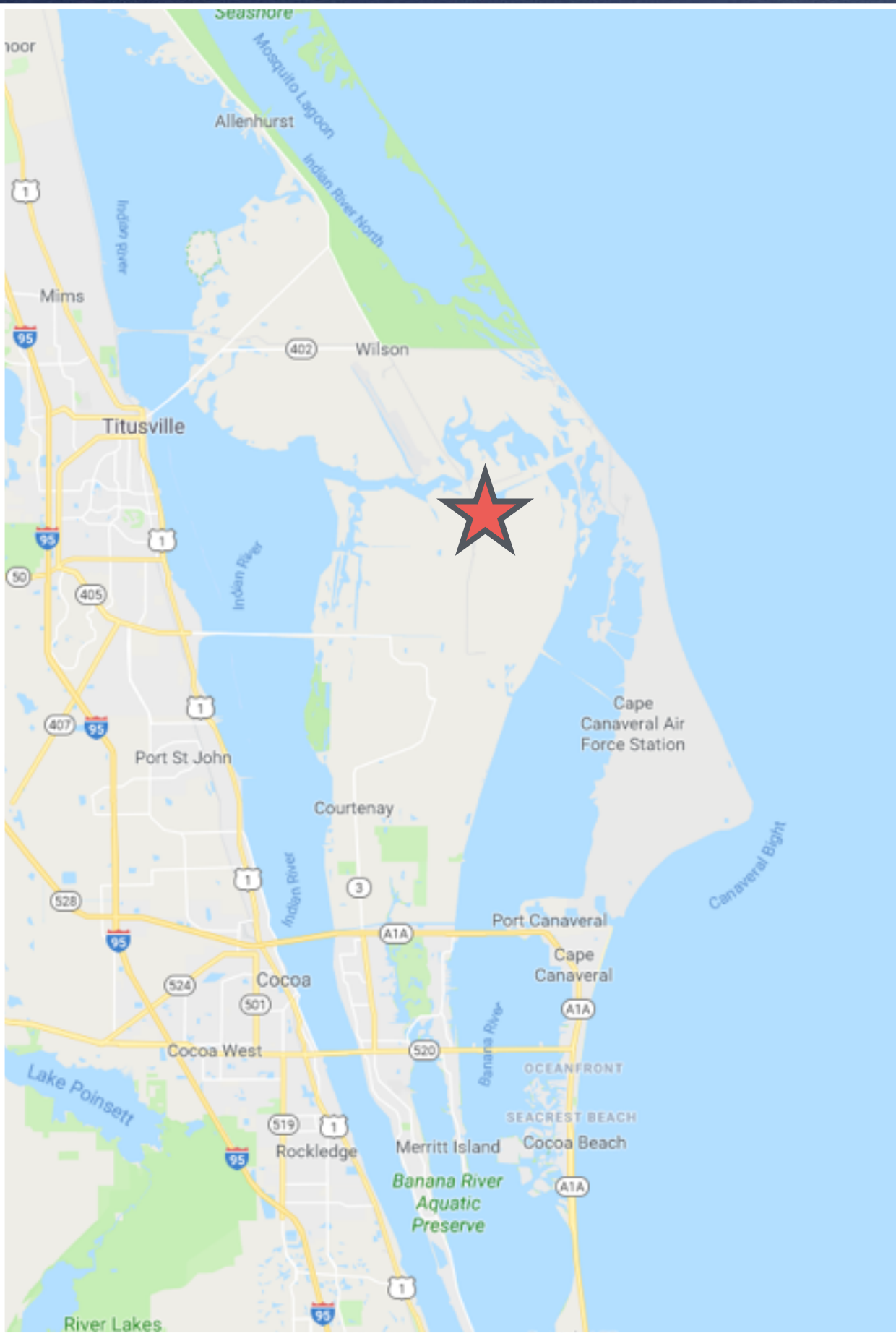


# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



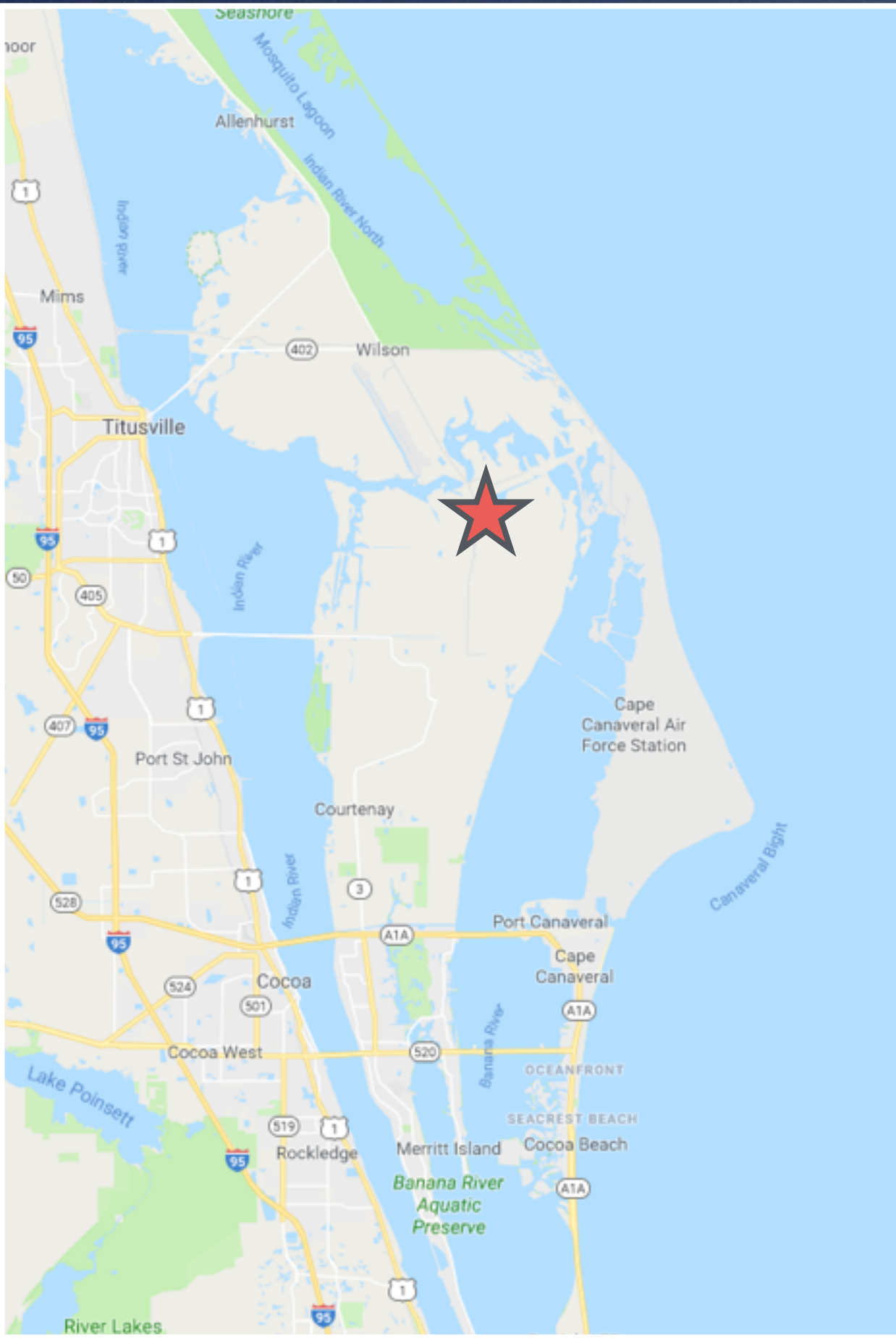


# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



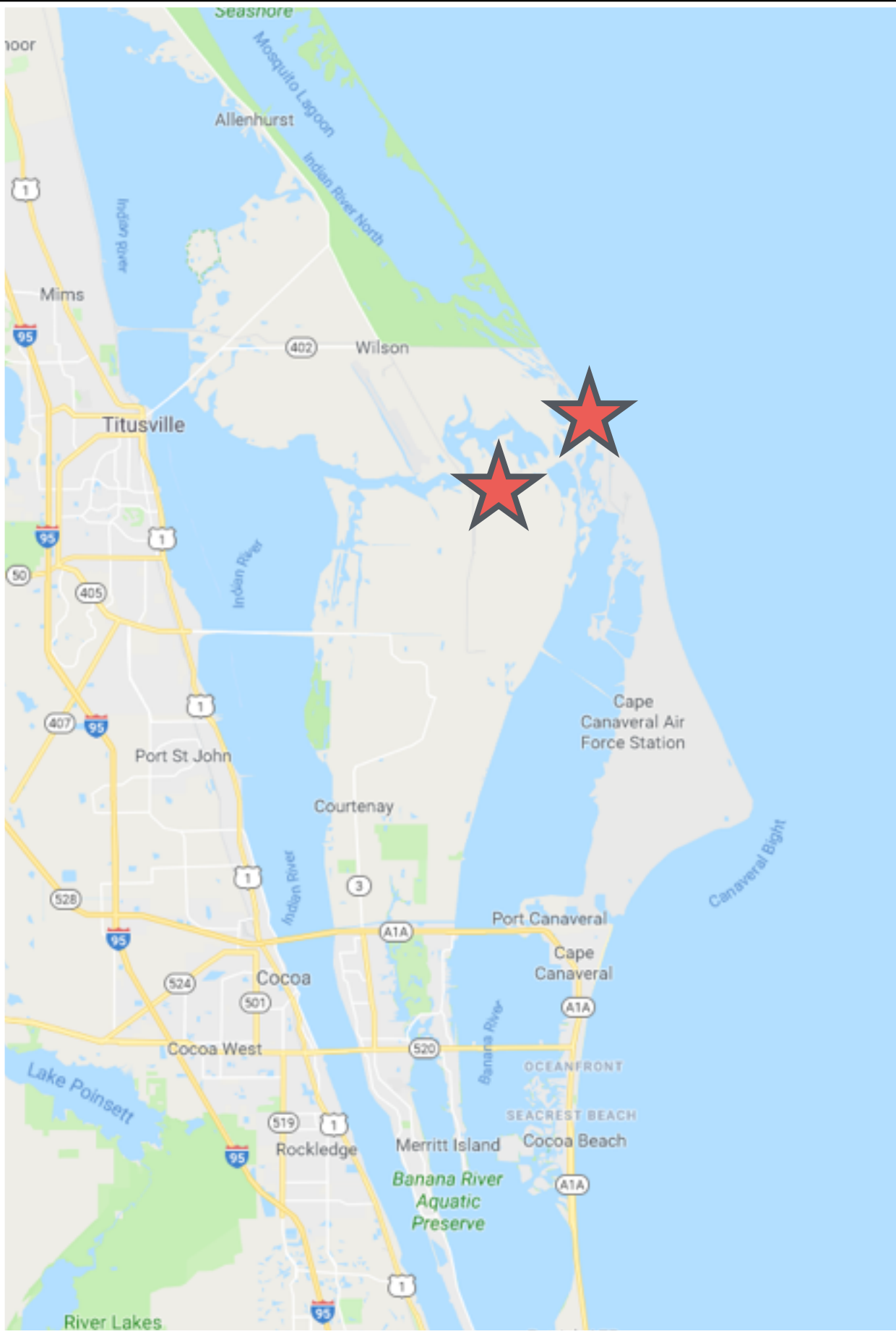


# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





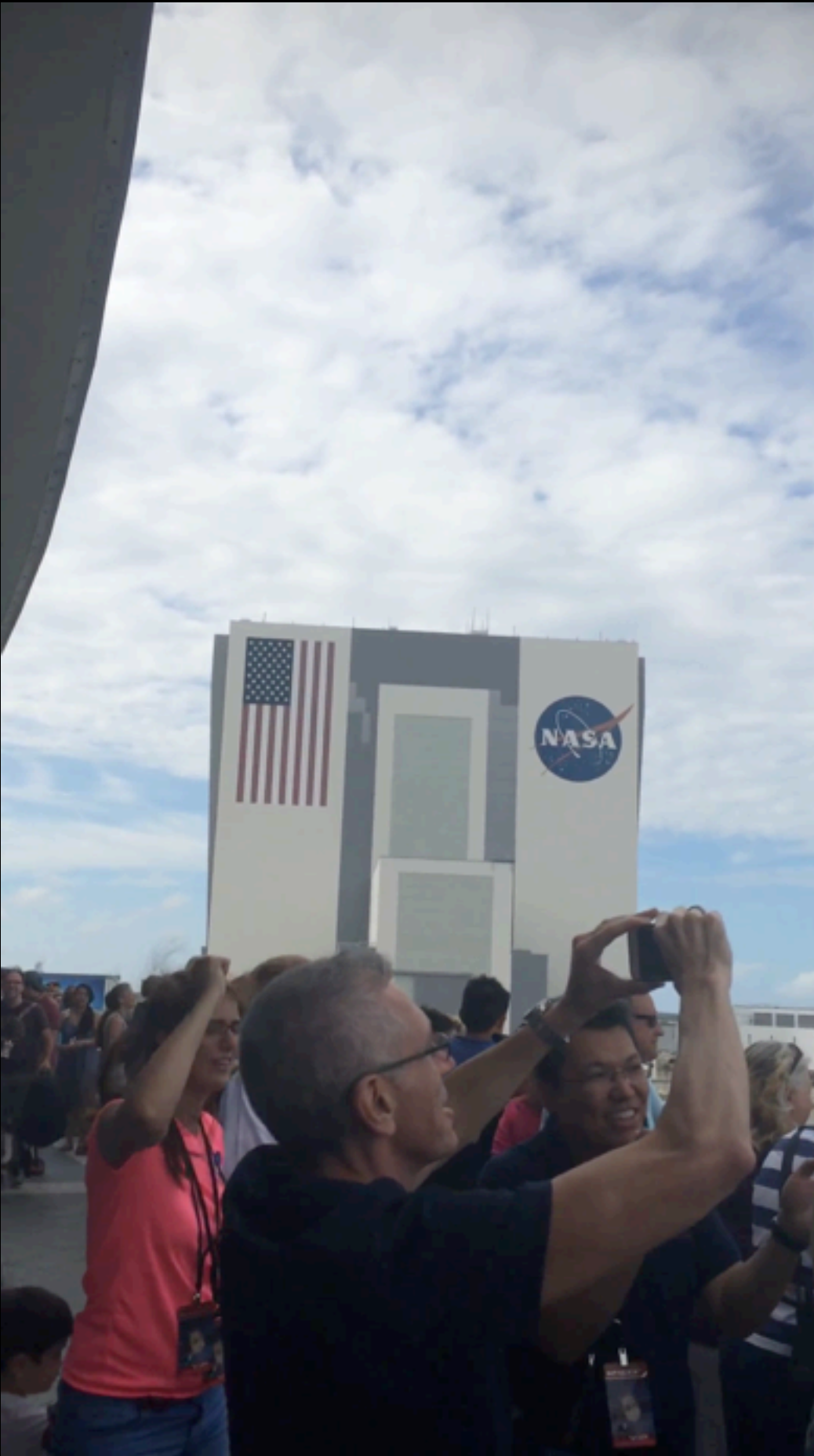
# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





**Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017**

# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017





# Dragon proceed to ISS transfer orbit





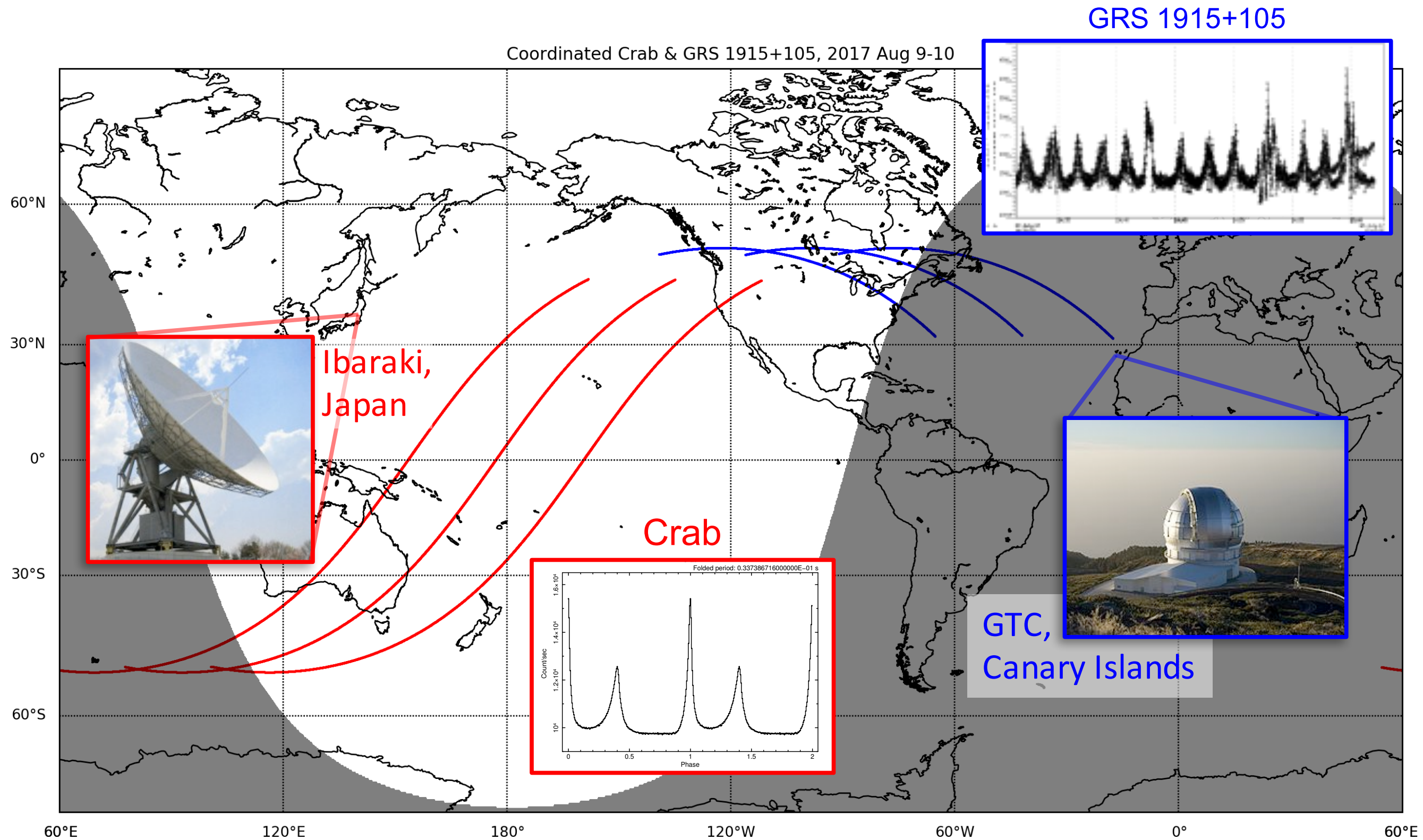
# Extraction from Dragon was delicate





# Installation and Development on ISS

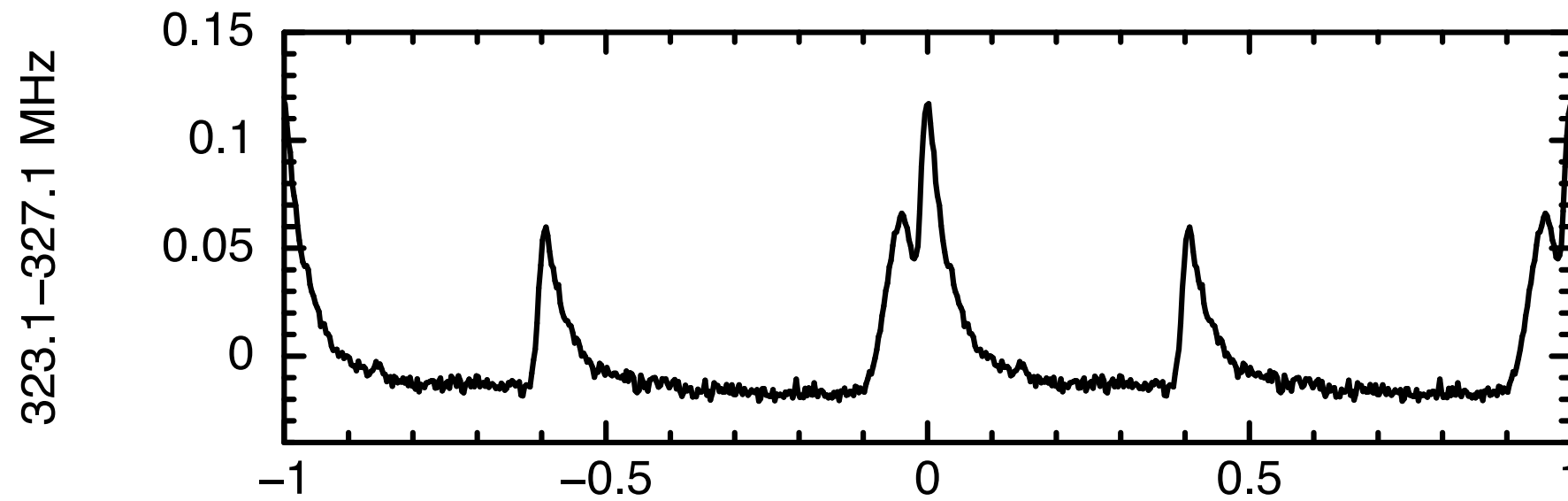
# NICER Initial Observation: Crab Pulsar



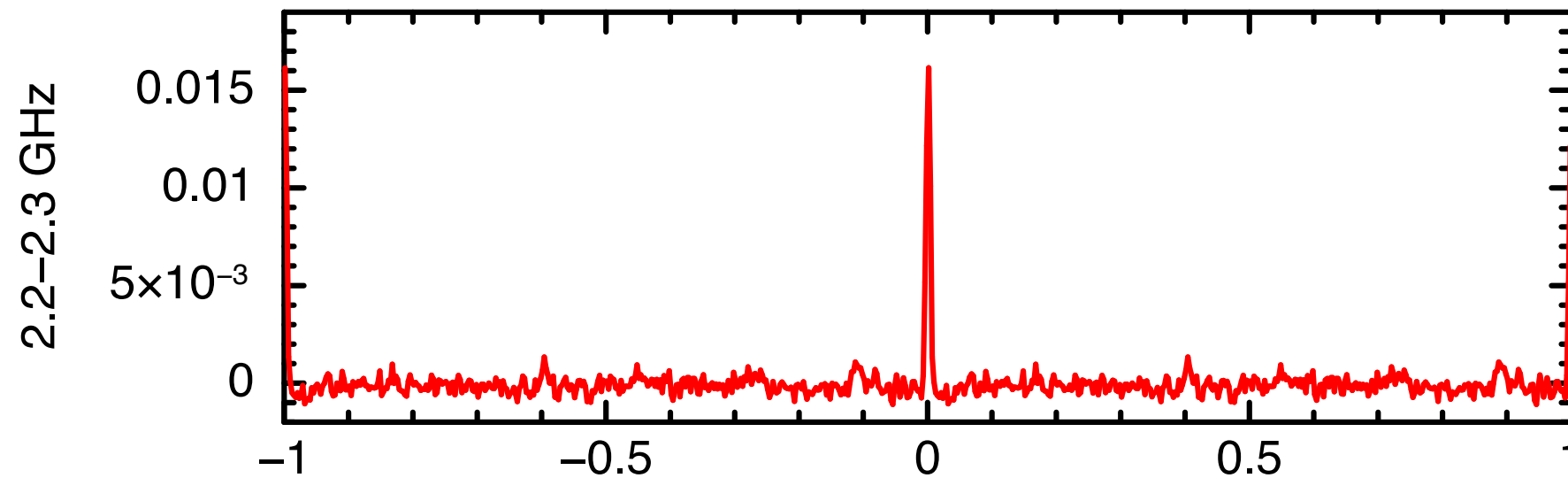
2つの観測ターゲット(Crab pulsar & GRS 1915+105)を、2つの地上望遠鏡(臼田の64 m電波望遠鏡とカナリー諸島のGran望遠鏡)で、3軌道周期で観測



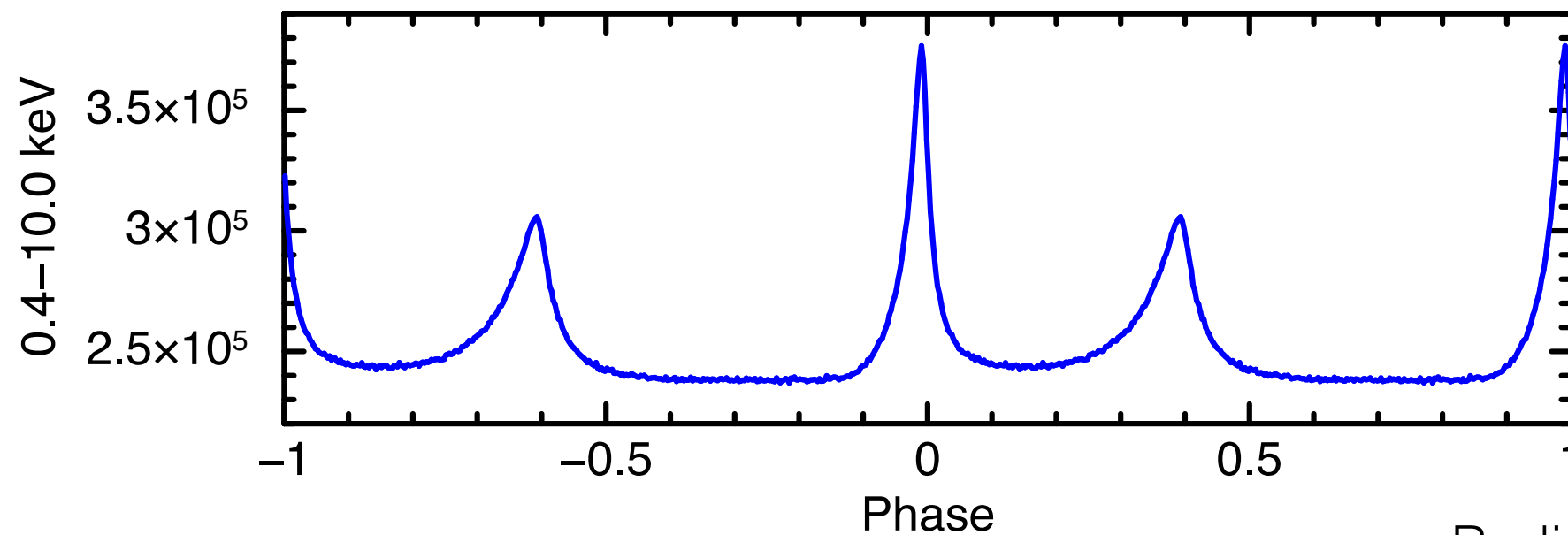
# Crab Pulse Profile Observed with NICER



電波



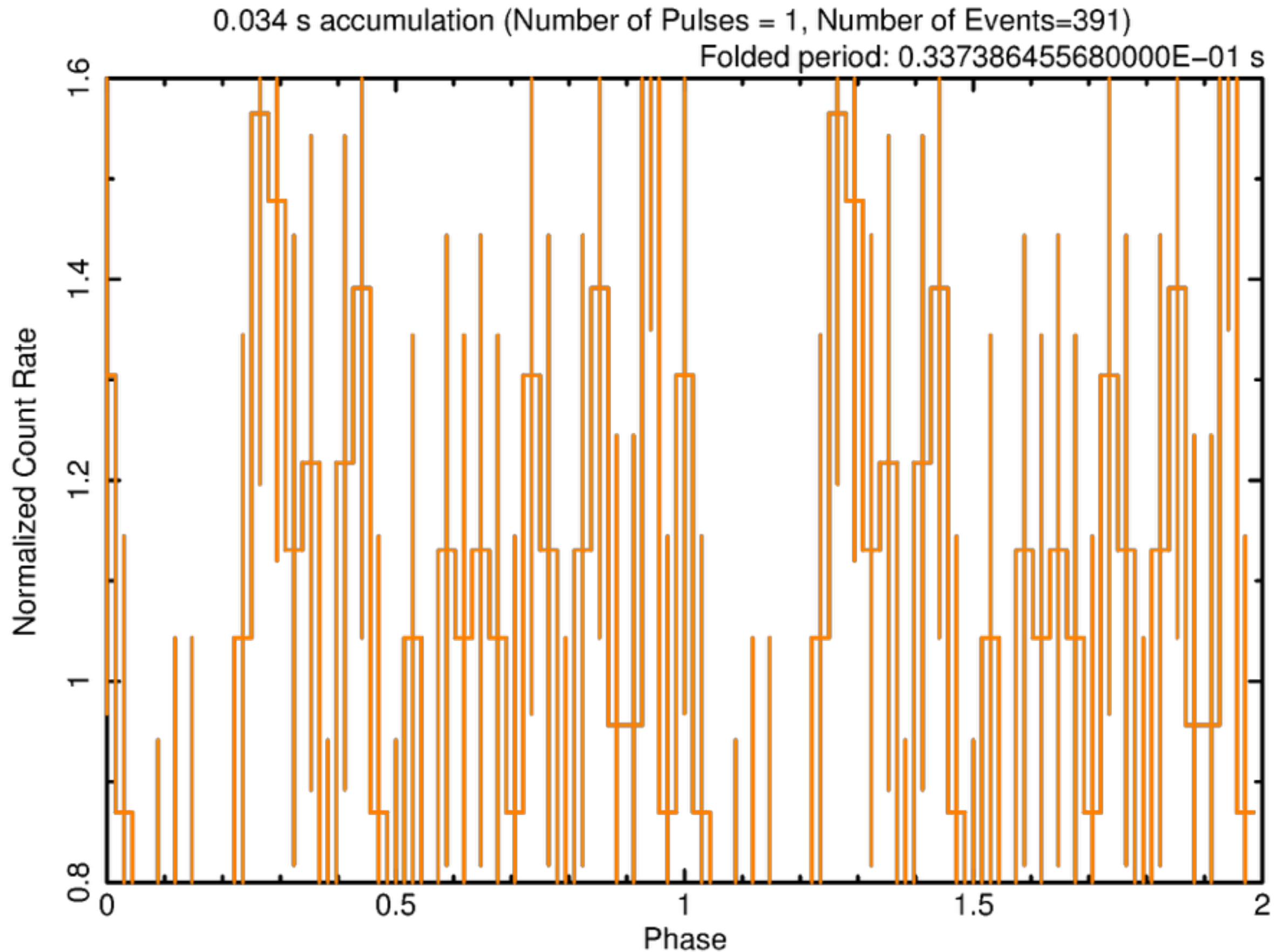
電波



X線  
(NICER)

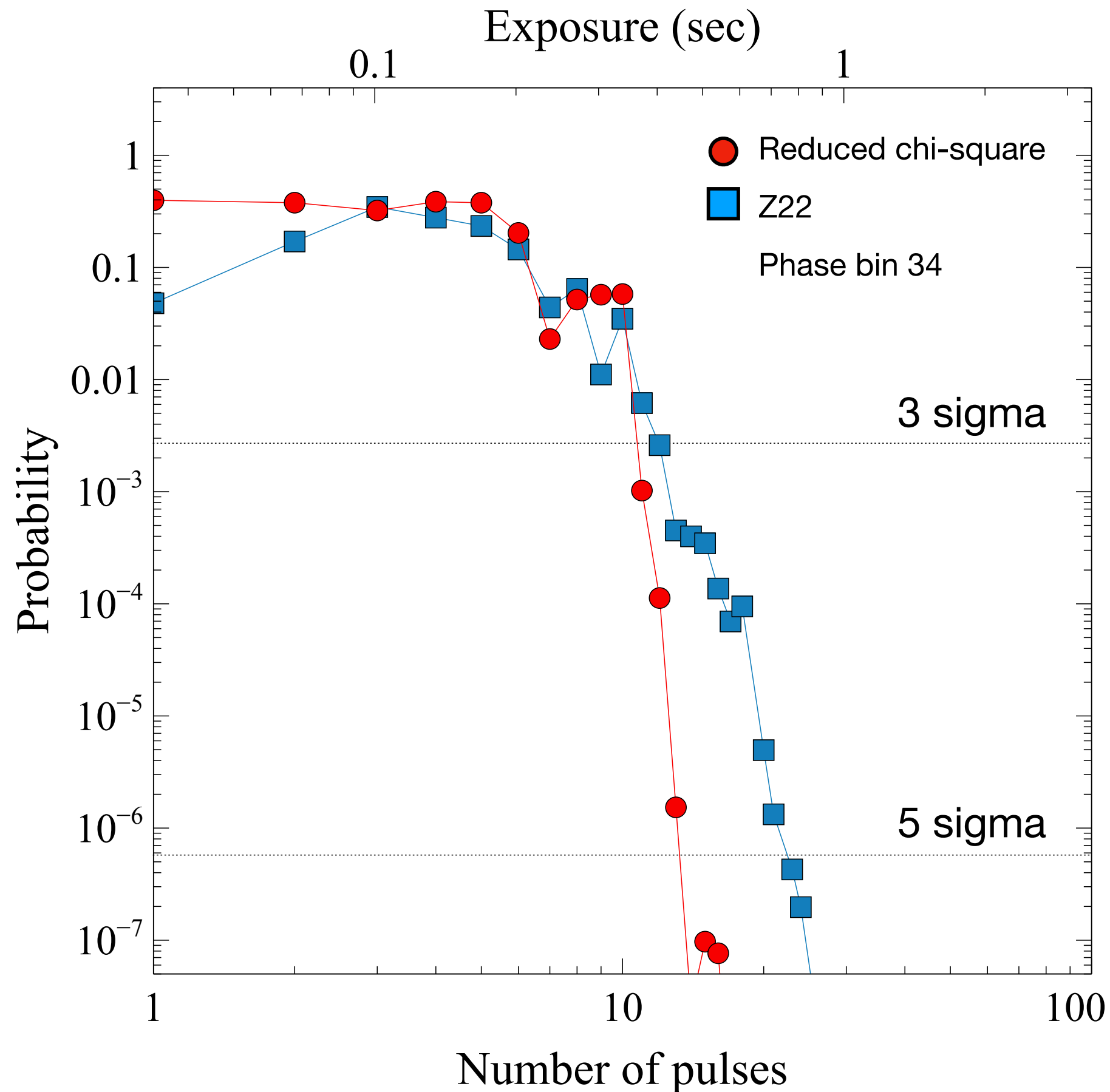
Radio from Terasawa et al.

# Crab Pulse Profile Observed with NICER



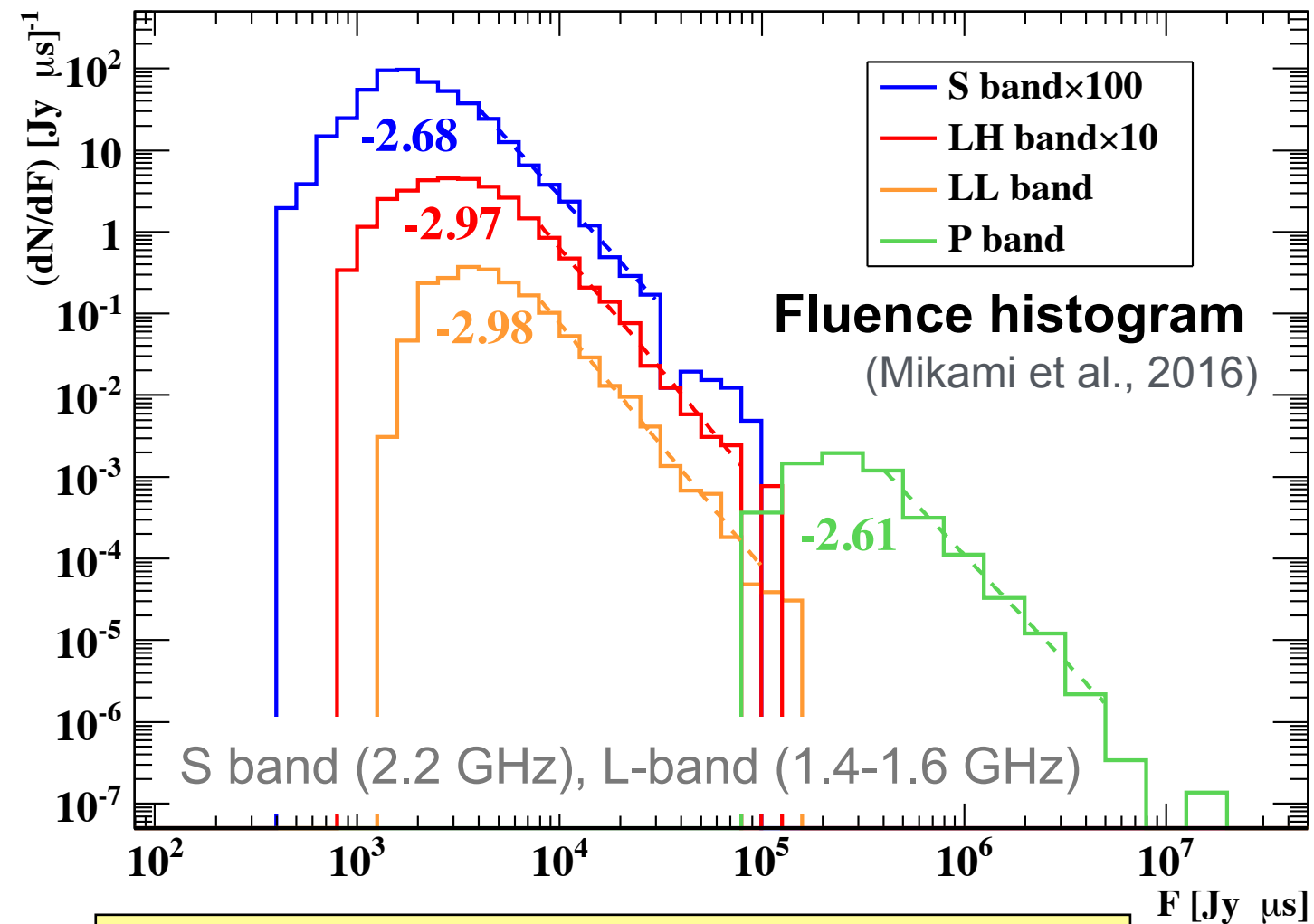
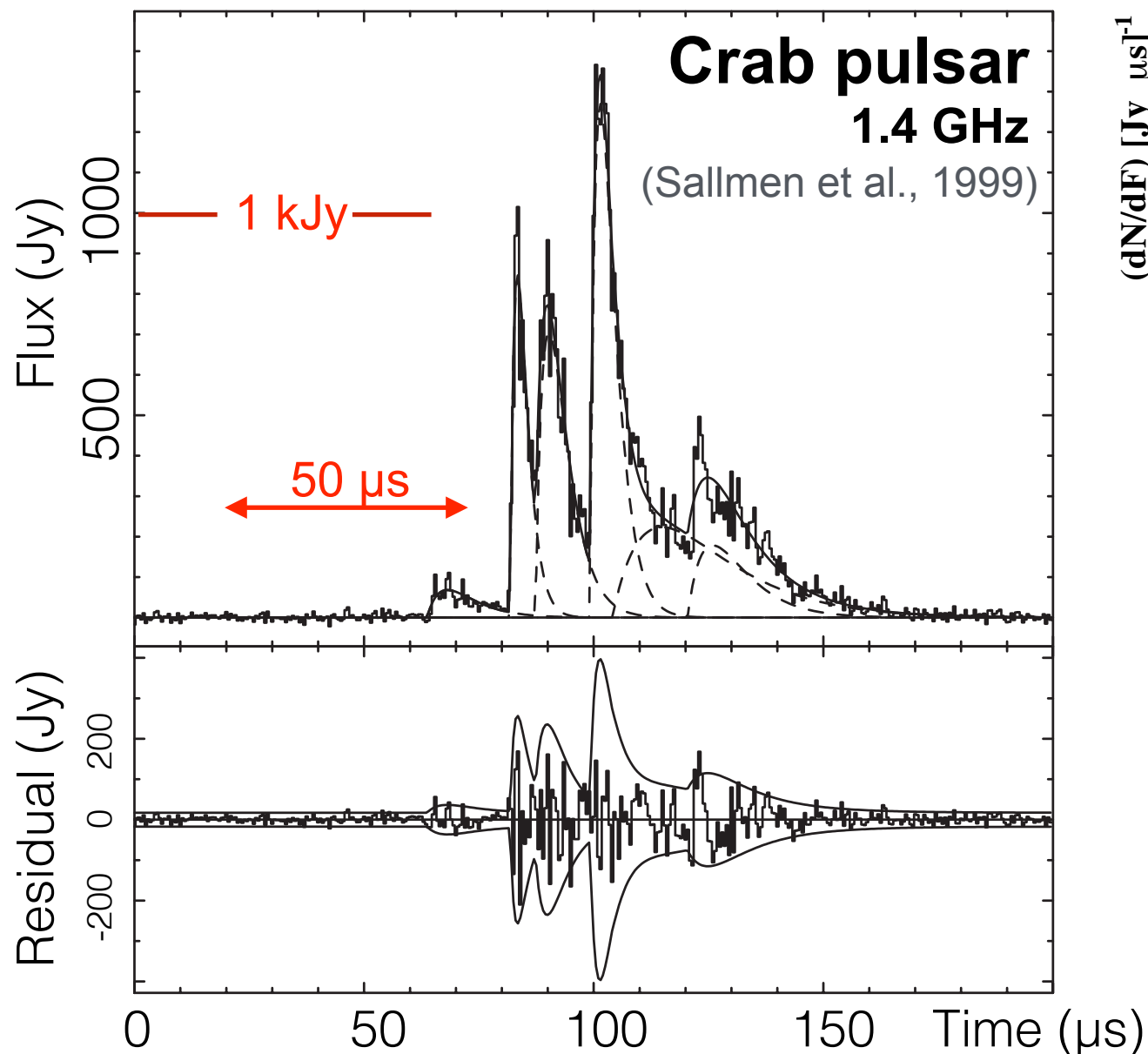


# Short exposure to detect Crab pulsation



# 巨大電波パルス Giant Radio Pulses (GRPs)

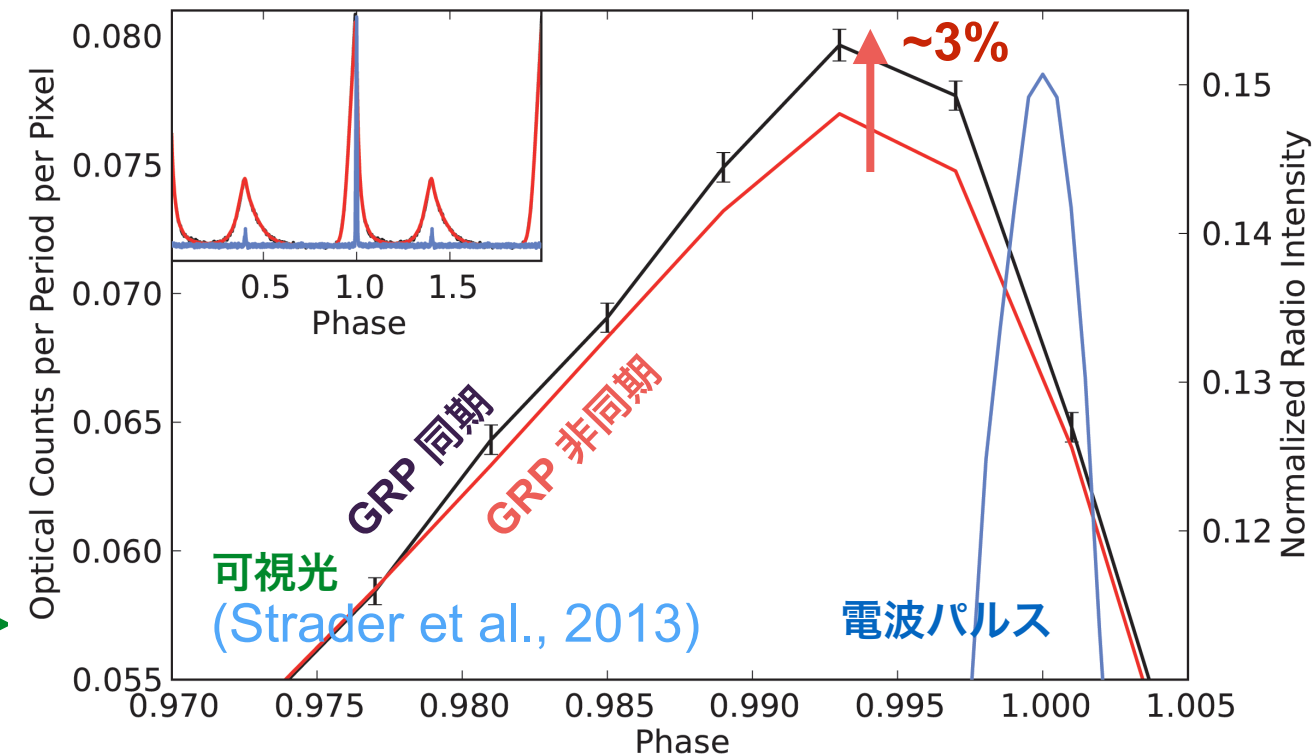
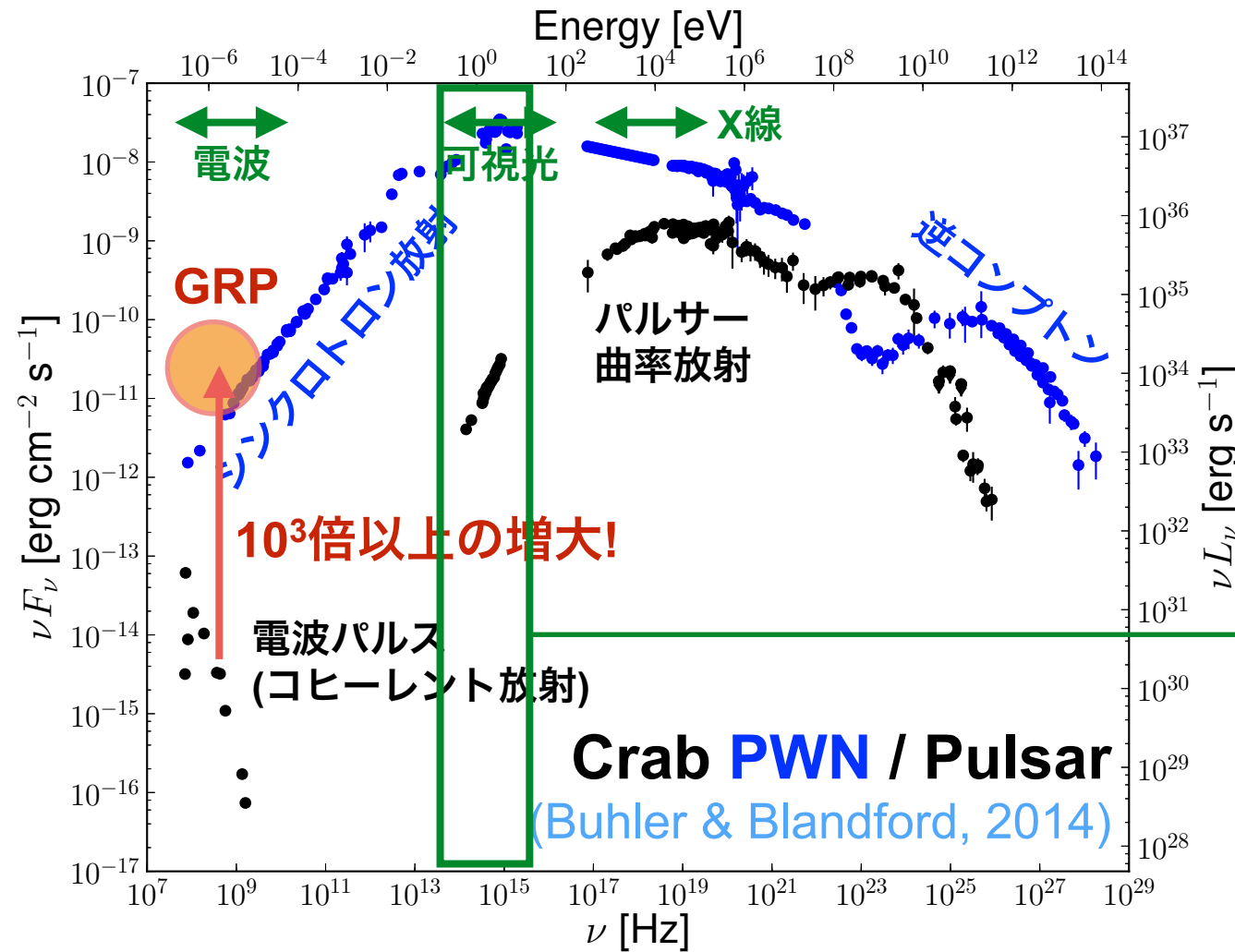
- 巨大電波パルス GRP は通常パルスより  $10^{2-3}$  も強い。場合によっては MJy レベル。
- 知られている 2,000 個ほどのパルサーのうち、約 12 天体から検出されている。
- Main pulse か interpulse の位相でランダムに発生する。
- GRP のフルーエンスは、べき分布する（通常パルスは正規分布か指数分布）。
- GRP の発生機構は未解明。FRB が系外の若い中性子星の GRP の可能性もある。



**GRP の理解は FRB 解明に必要**



# Crab Pulsar GRP の多波長同時観測

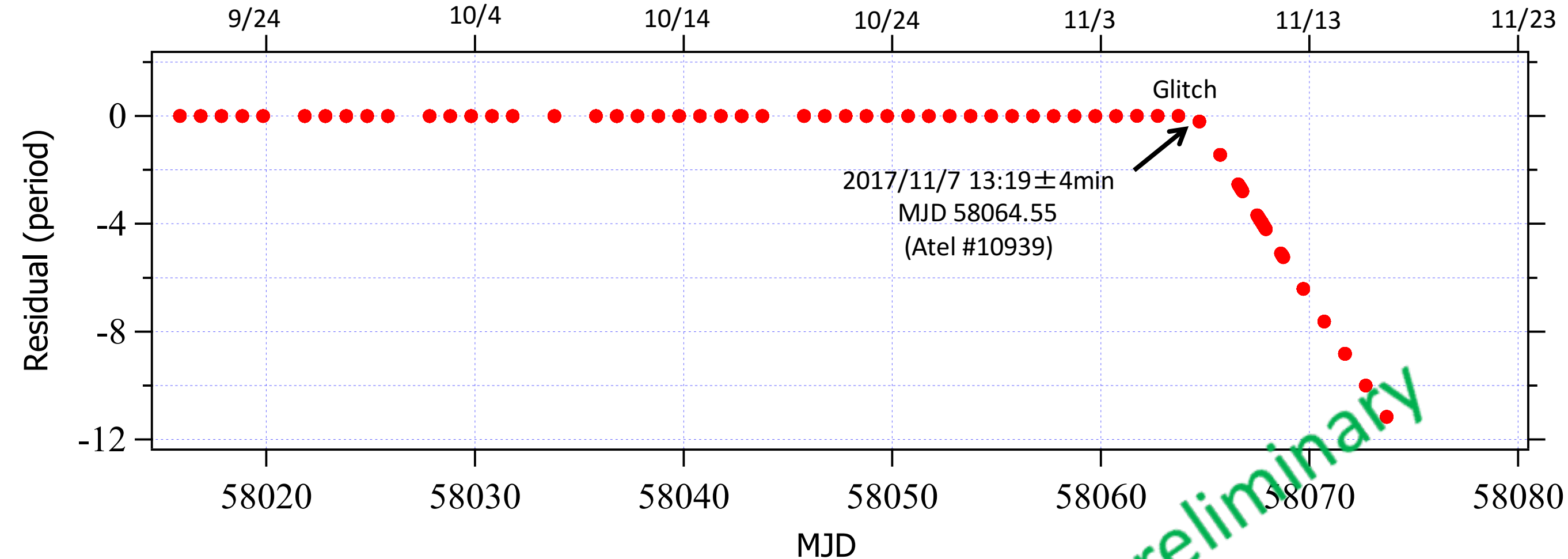


**NICERの結果に乞うご期待！**

- かにパルサーの GRP に同期して統計的に有意(7.2 $\sigma$ )な可視光の増光(3.2%)を検出。
  - コヒーレントな電波放射とインコヒーレントな可視-X線放射が関連？
- X線以上の高エネルギーでは増光の上限値のみ。
  - Soft X-ray (1.5-4.5 keV): Chandra HRC-S, <10% (2 $\sigma$ ) (Bilous et al., 2012)
  - $\gamma$ -ray (50-220 keV): Fermi LAT, <400% (95% CL) (Bilous et al., 2011)
- NICER (0.2-12 keV)と電波望遠鏡(325MHz@飯館, 1.4GHz@鹿島)の同時観測を企画。

# Largest Glitch from the Crab Pulsar

A Crab pulsar glitch detected in the data from Toyokawa observatory, Nagoya University and Iitate observatory, Tohoku University



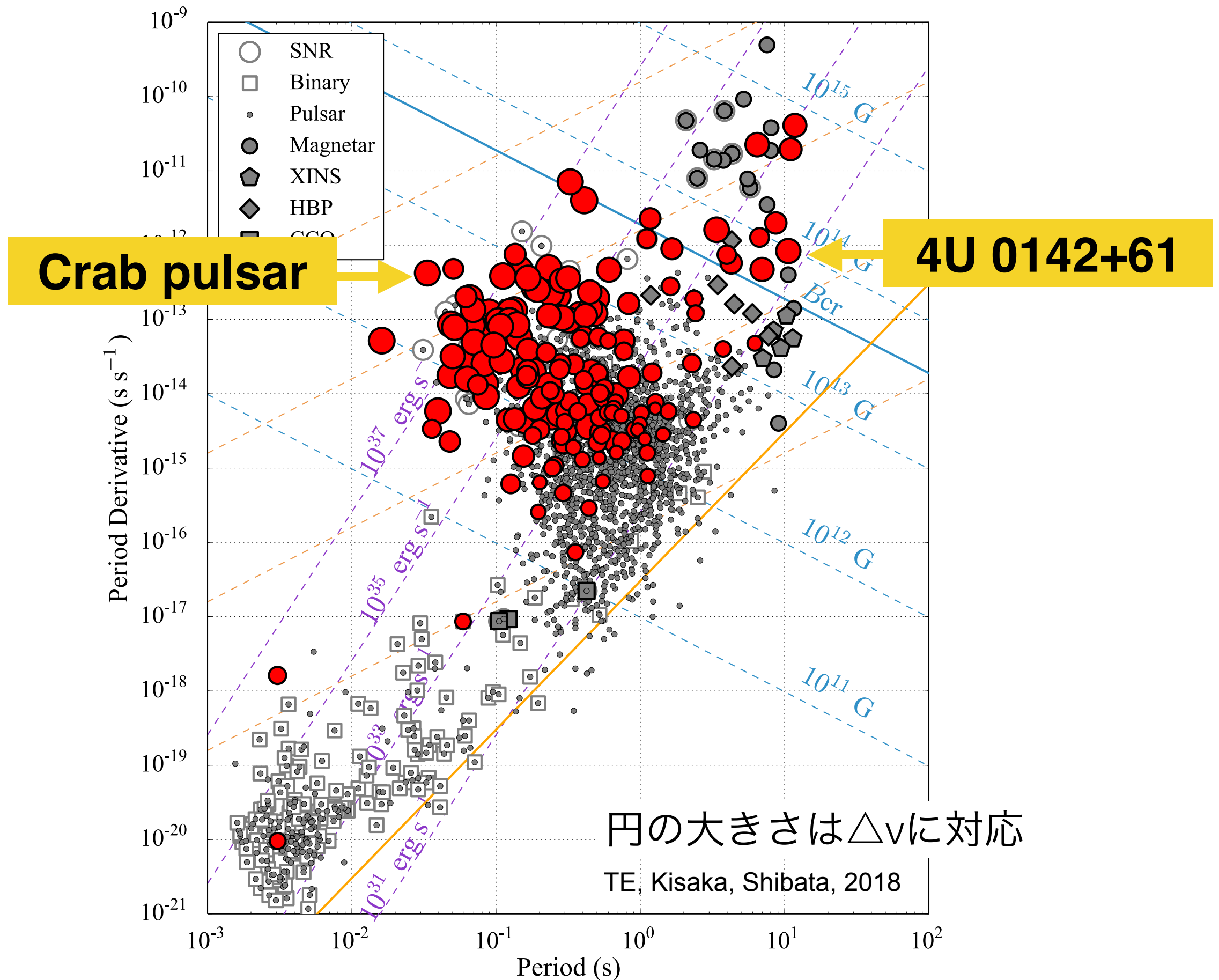
$$\delta\nu \sim 14.5\mu\text{Hz}$$

$$\delta\nu/\nu \sim (0.5)\times 10^{-6}$$

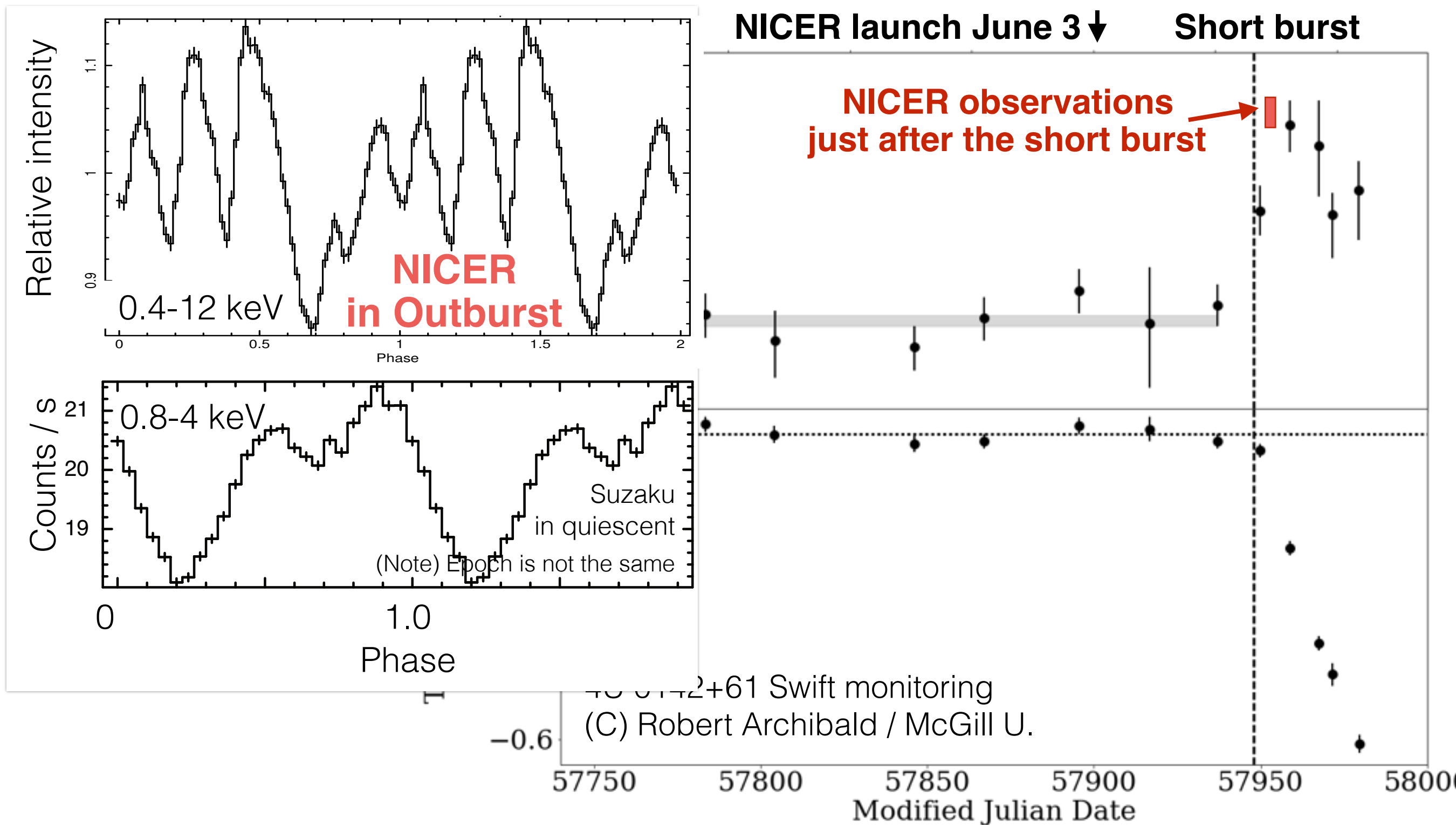
consistent with the Atel reports (10939, 10947, 11025)  
(We should refine the error estimation.)



# NICER で見る中性子星のグリッチ



# マグネター 4U 0142+61 のグリッチ後観測

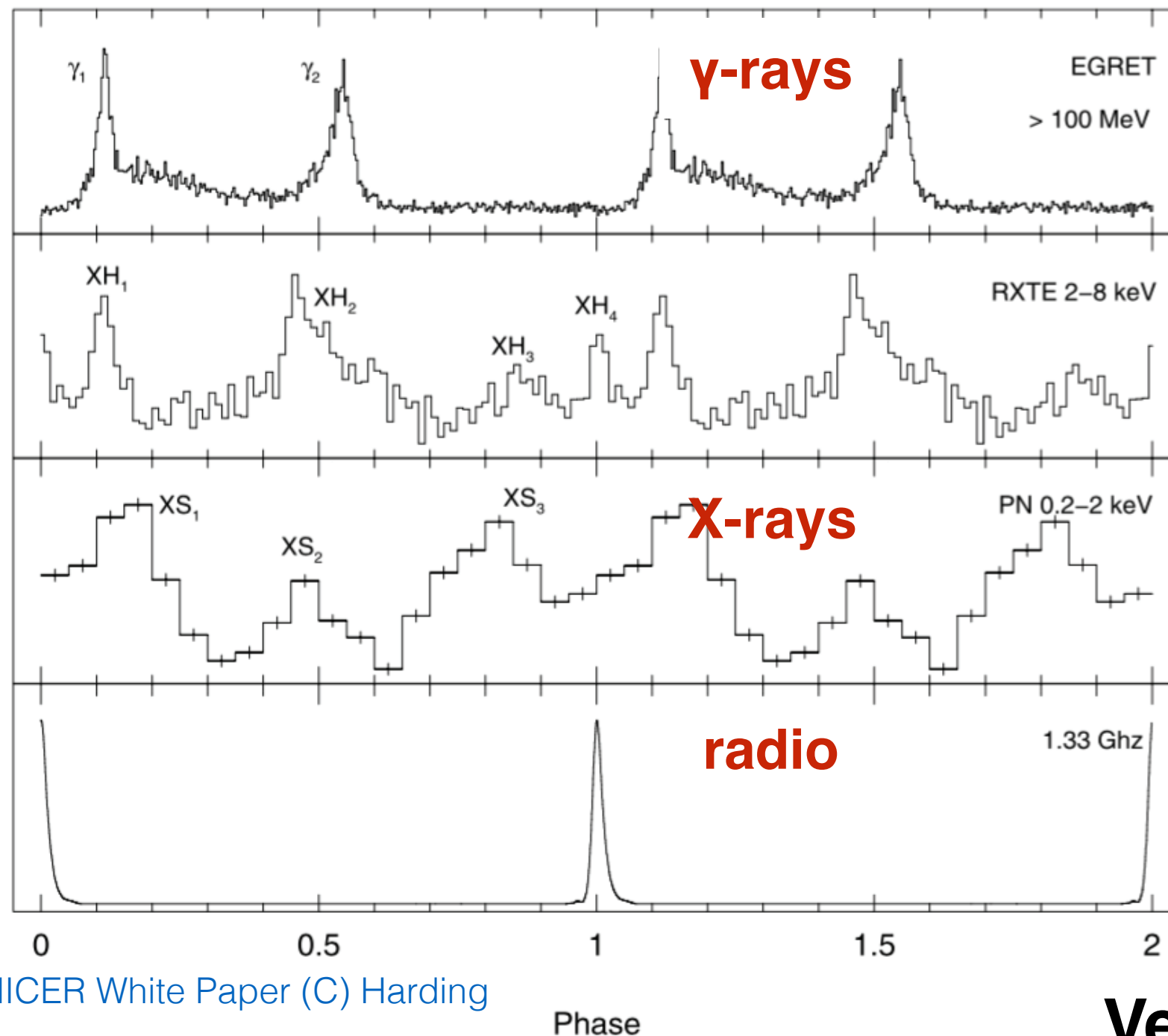


- Fermi GBM detected a SGR-like short burst at 23:54 UT on 13 July during the NICER's commissioning phase ([GCN 21342](#)).
- Signature of a glitch around the outburst from Swift monitoring ([Atel 10576](#))
- NICER follow-up ToO observations, ~0.88, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 days after the burst, from July 14 to 18 (total ~75 ks)



# NICER によるマグネター観測戦略

NICER の機動性(突発天体や他波長同時観測に柔軟に対応)を活かし、電波との同時観測を進めたいと考えている。



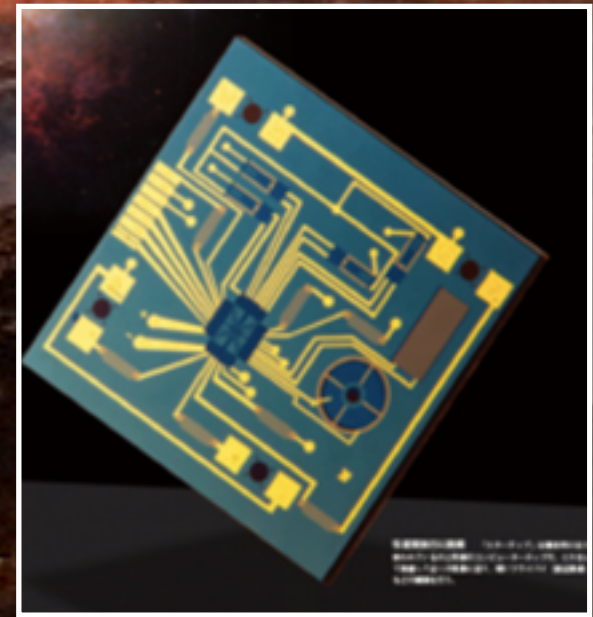
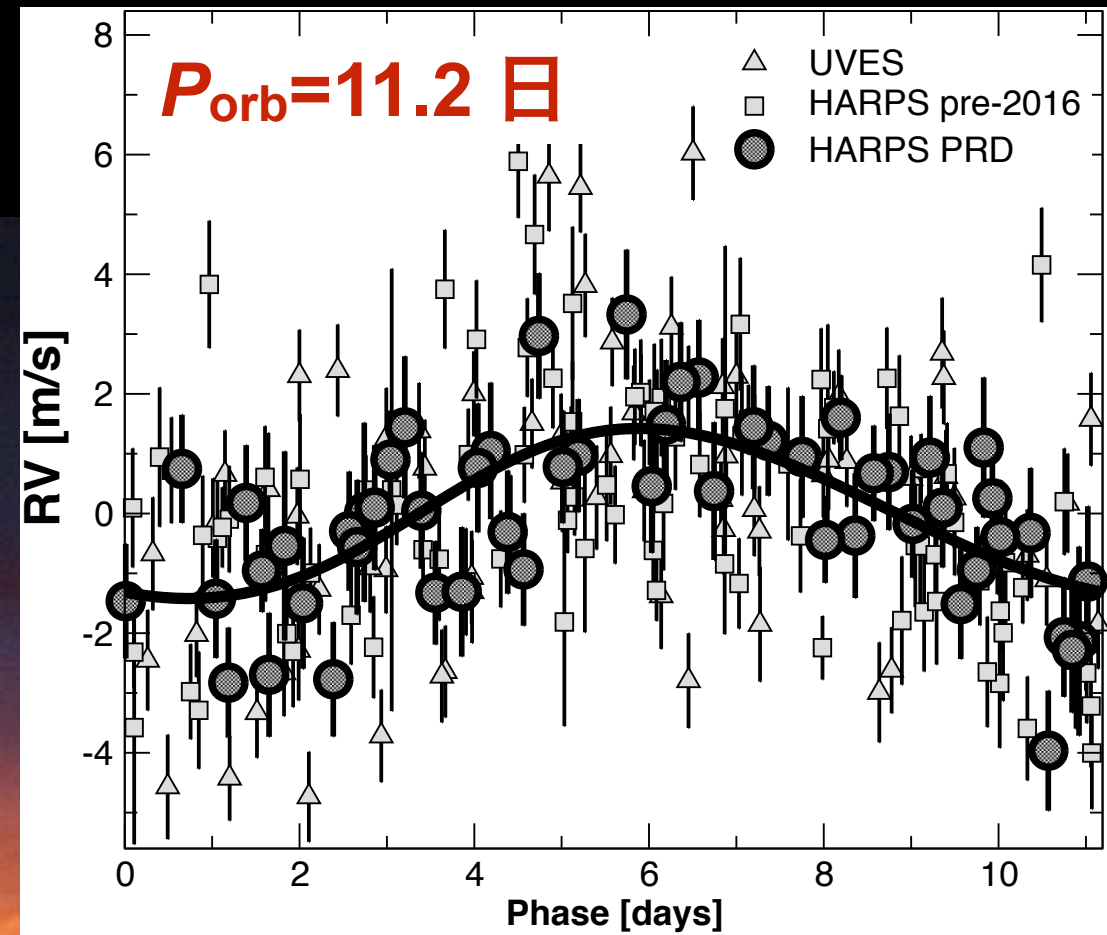
NICER White Paper (C) Harding

Vela パルサー

# プロキシマ・ケンタウリにハビタブルな惑星!?

## 4.2 光年のお隣さんの星 (dM5.5e)

(Anglada-Escude et al., 2016, Nature)



野心的なスターショット計画 →

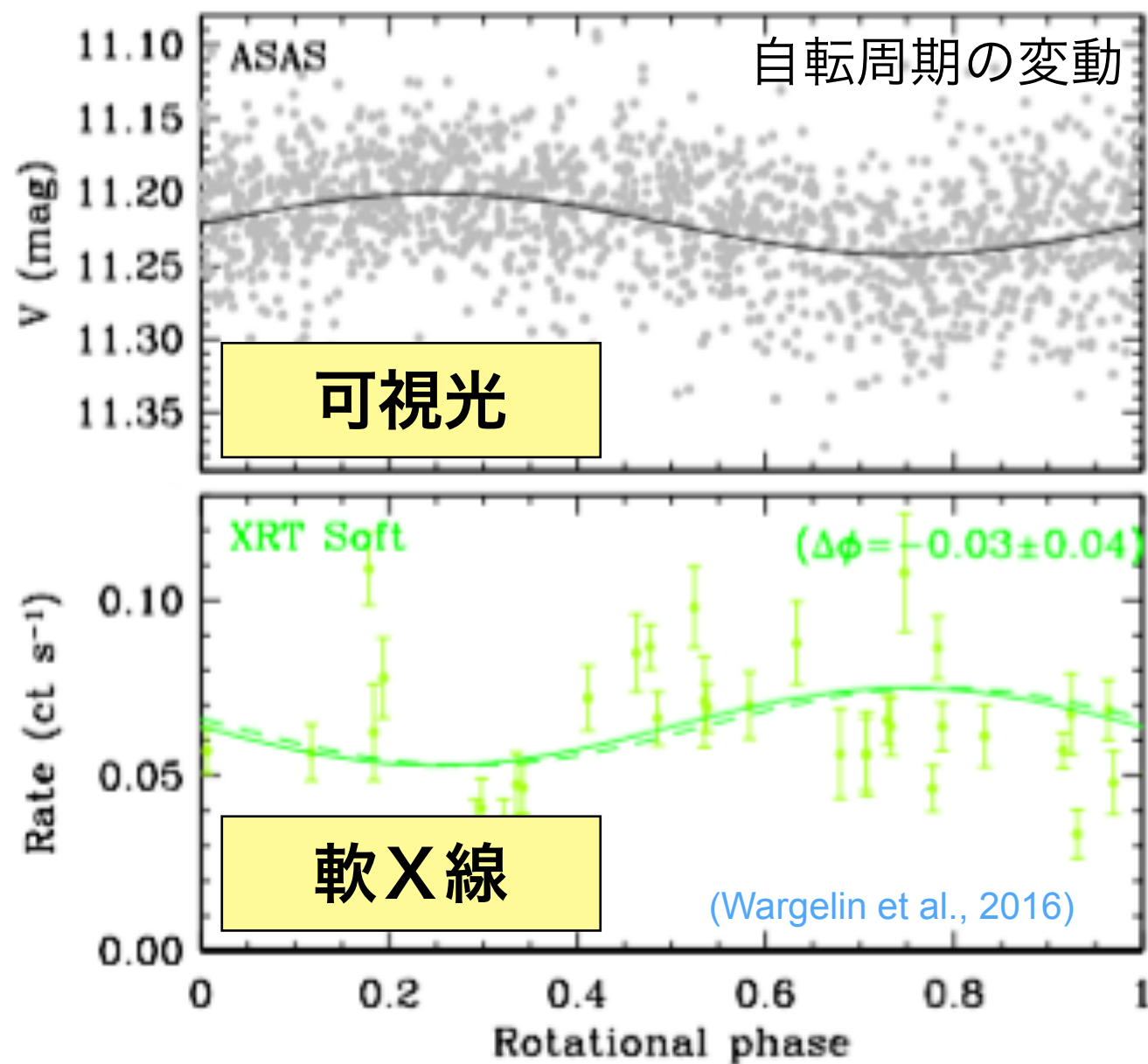
Pale light from a red dwarf star  
Proxima Centauri b : artist's illustration  
by ESO, M. Kornmesser

$L_x \sim L_{\text{sun}}$ , 0.05 AU → X線やフレアの影響?



# 近傍の星の磁気活動を長期X線モニタリング

- 中心星の可視光観測で周期性? 83 日(星の自転), 7年(太陽周期)
- 過去のX線観測は断片的: 可視光の周期変動と反相関との指摘?
- NICER 観測: 自転 83 日の 2サイクル分を 2 ks x 40 回でカバー
- フレアと静穏状態の弁別に、南天の可視光観測があると良い



# まとめ

- 中性子星（パルサー）の発見から半世紀になり、多様な中性子星の種族が見つかり、それらの進化経路の観測的研究が盛んになった。
- 中性子星の活動性の鍵は磁気活動であり、 $10^{14-15}$  G という宇宙最強の磁場をもつマグネターを中心に多波長での観測が進んでいる。
- 国際宇宙ステーションに中性子星の観測を狙うX線望遠鏡NICERが設置され、大有効面積で高い時間分解能の観測を開始した。
- NICER によるマグネターなどの強磁場パルサー観測では、電波とX線との同時観測（+モニタリング）が新しい結果を生む。