

中性子星の観測的多様性をめぐる最新描像

榎戸 輝揚

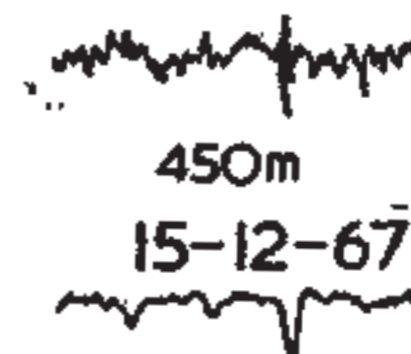
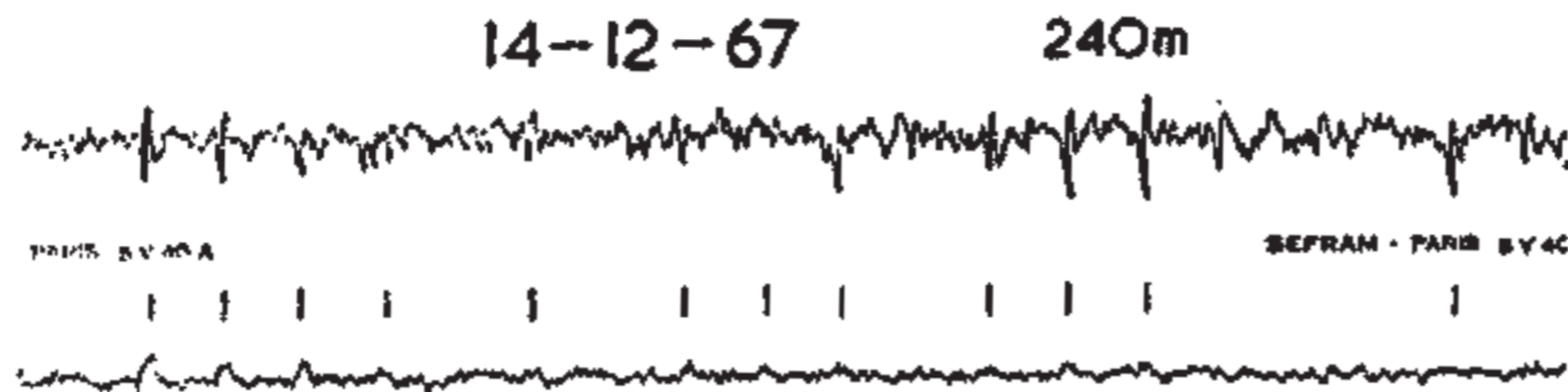
(京都大学 白眉センター・宇宙物理学教室)

中性子星の専用
X線望遠鏡 NICER
の打ち上げ！
2017年6月3日

SpaceX CRS-11 Cargo Mission Launch
June 3, 2017
Photo Credit: (NASA/Bill Ingalls)

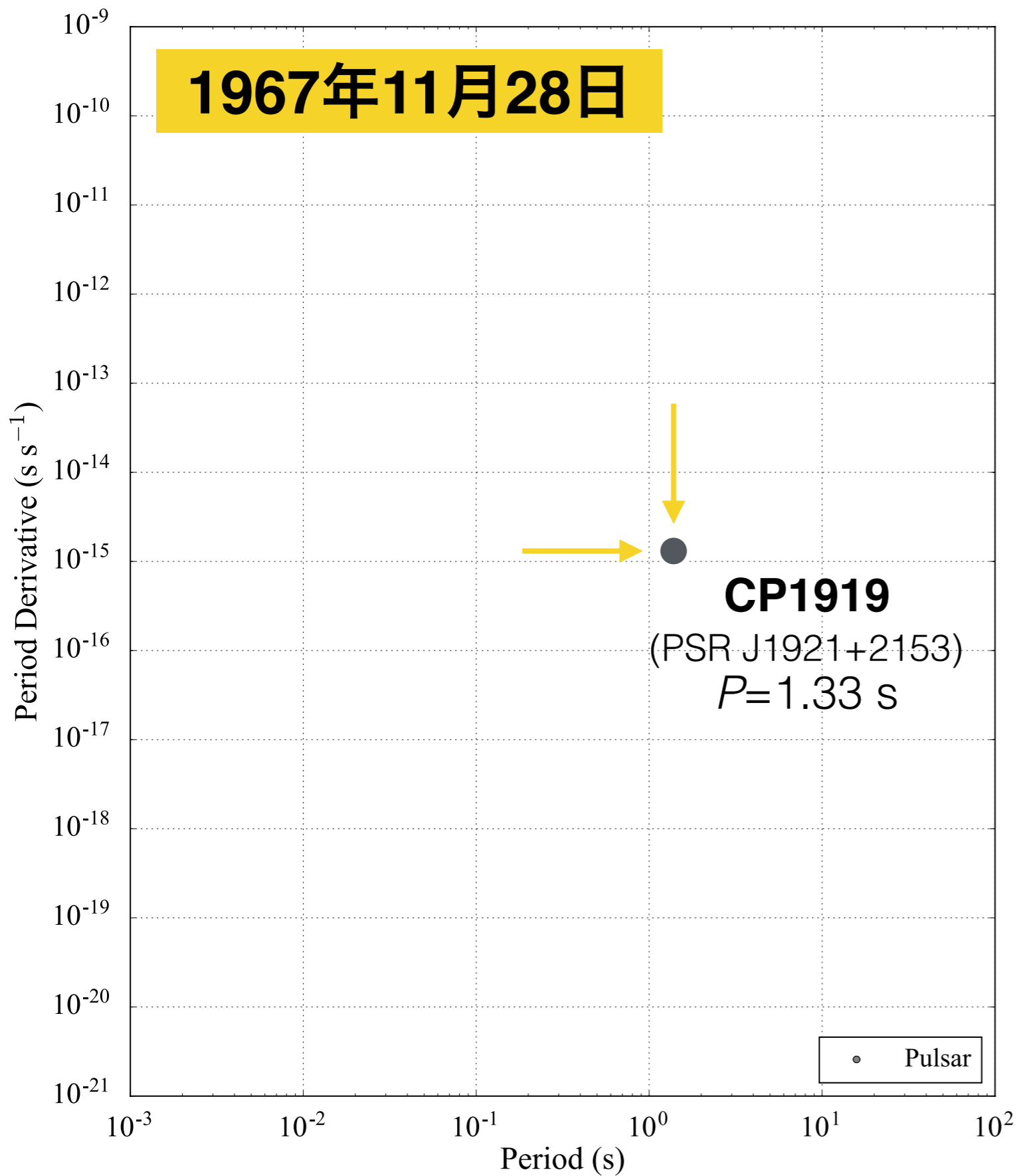
パルサー発見から50周年

1967

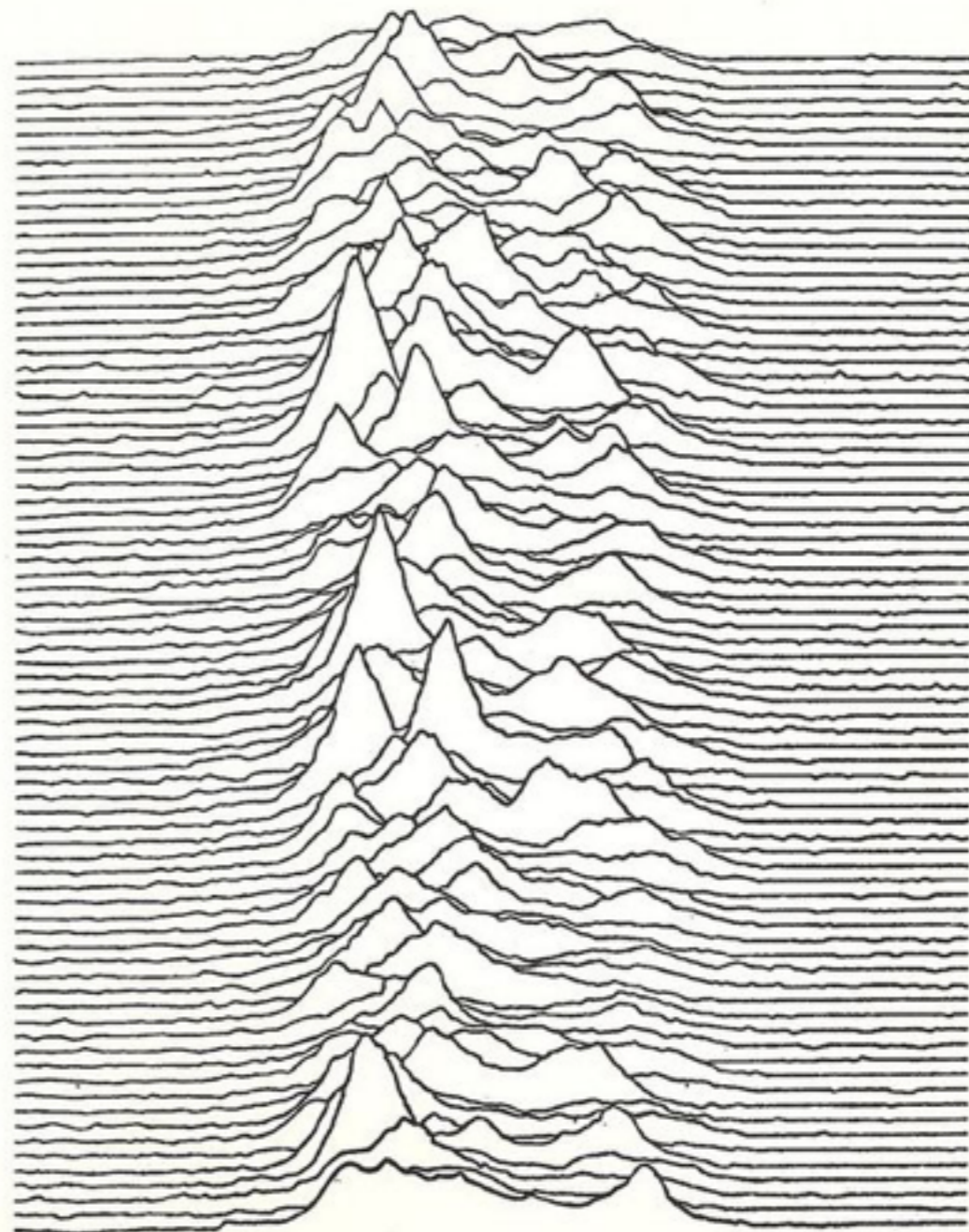


Hewish & Bell et al., 1968, Nature

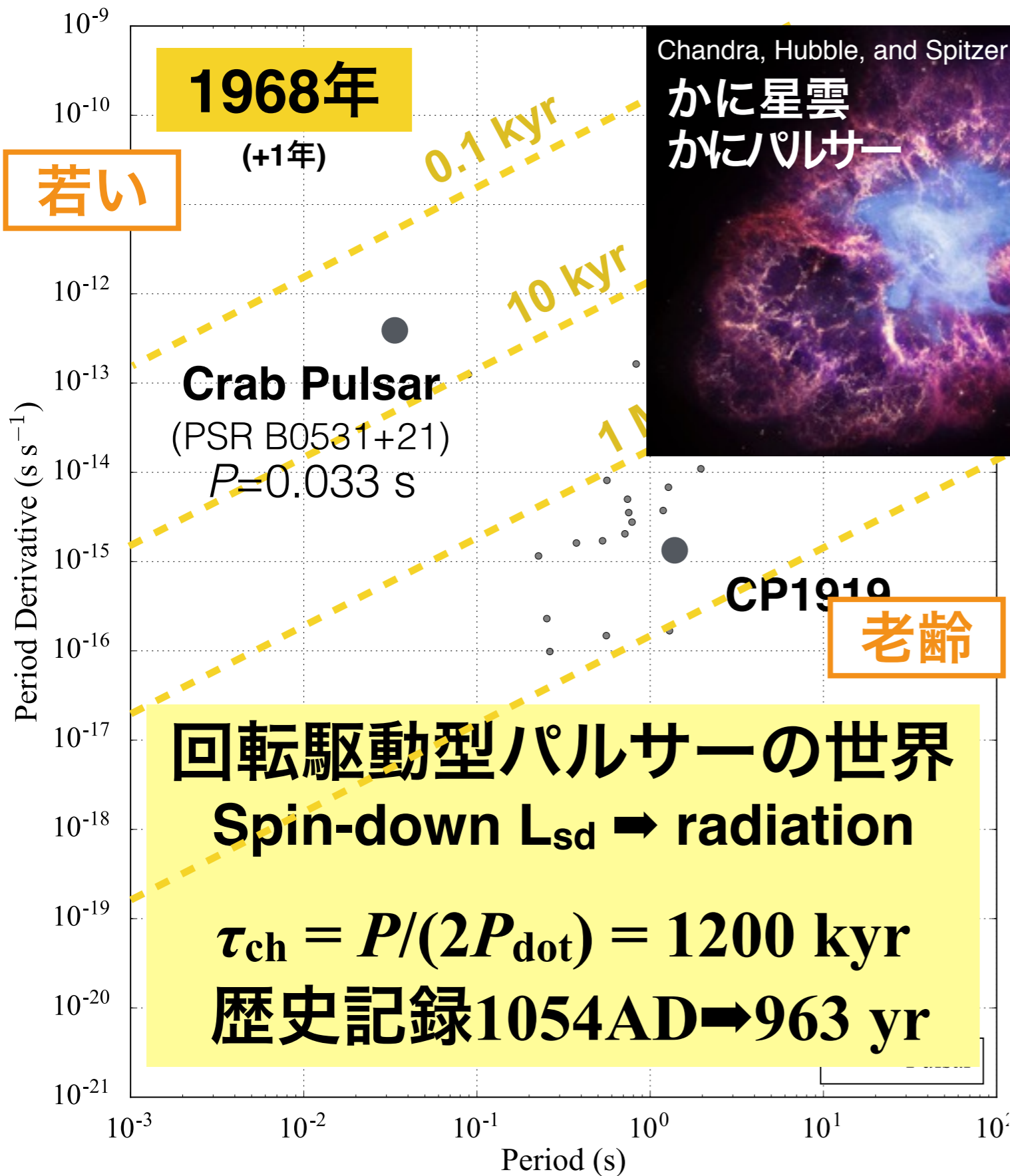
パルサー発見から50周年



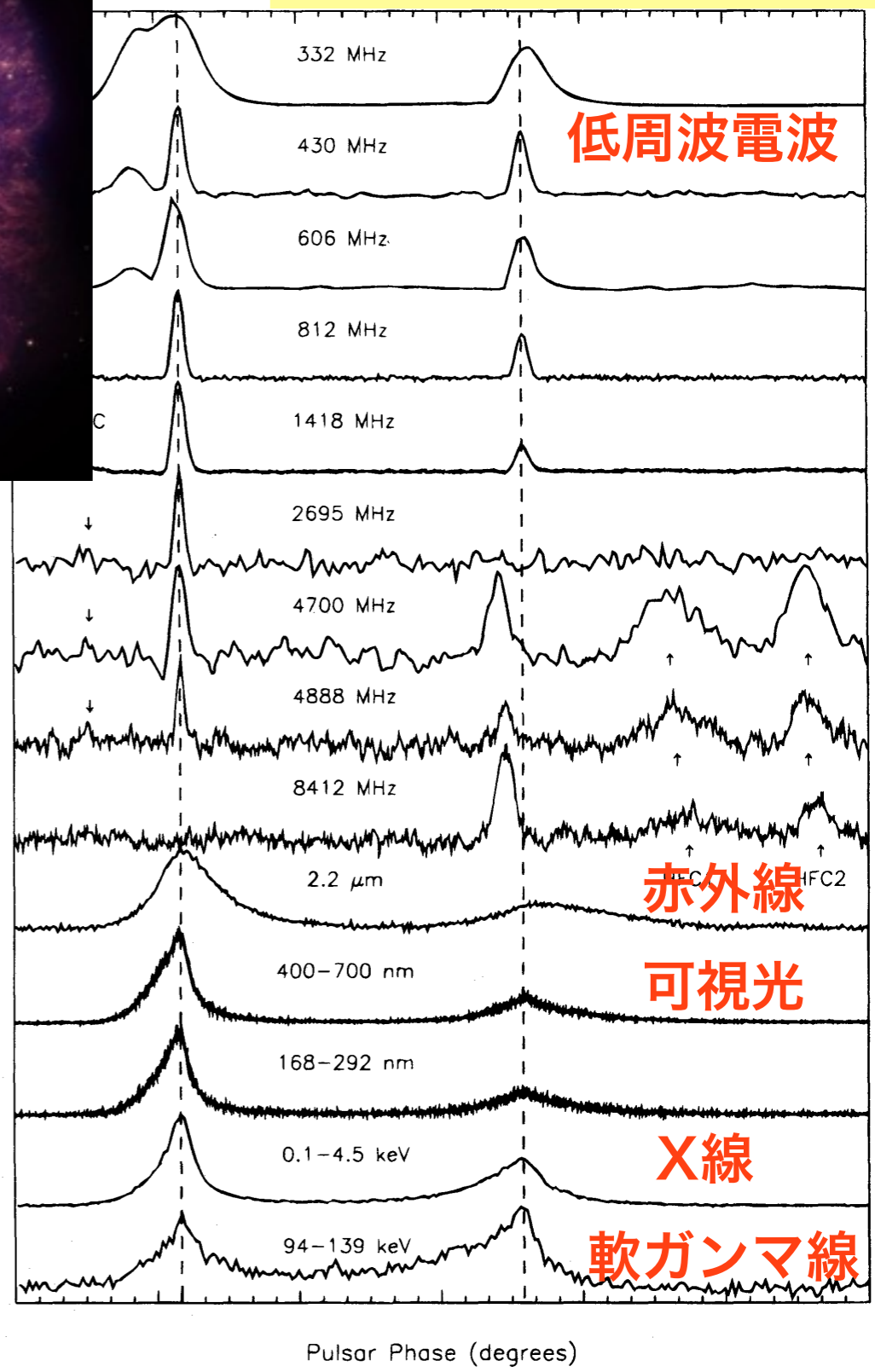
6.7: Successive pulses from the first pulsar discovered, CP 1919, are here superimposed vertically. The pulses occur every 1.337 seconds. They are caused by a rapidly-spinning neutron star.



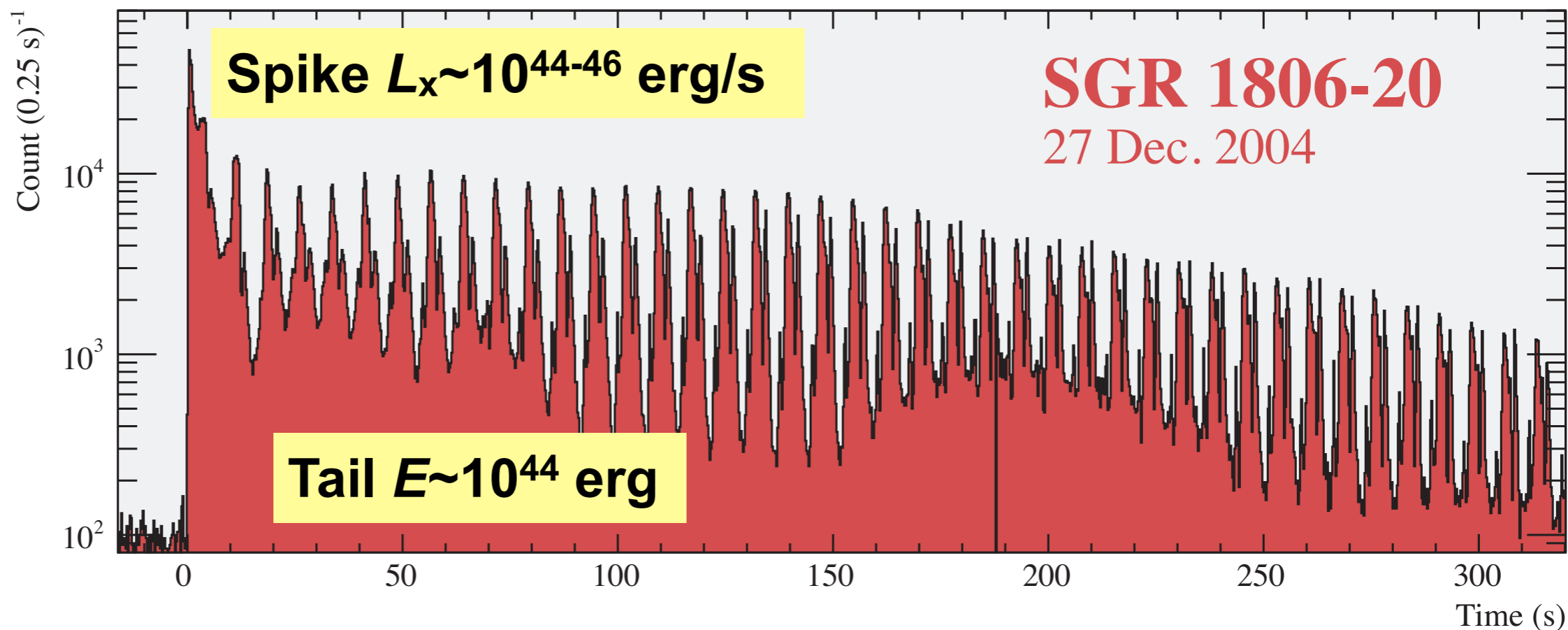
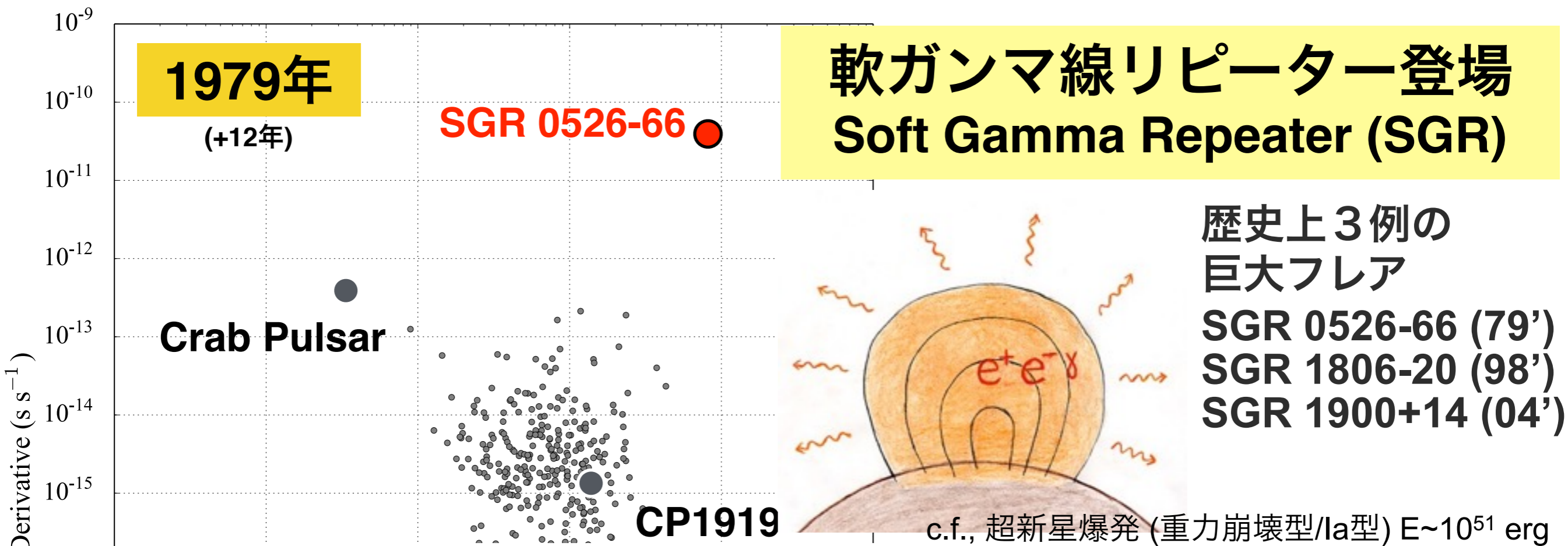
パルサー発見から50周年



$P = 33$ ms
 $P_{dot} = 4.2 \times 10^{-13}$ s/s

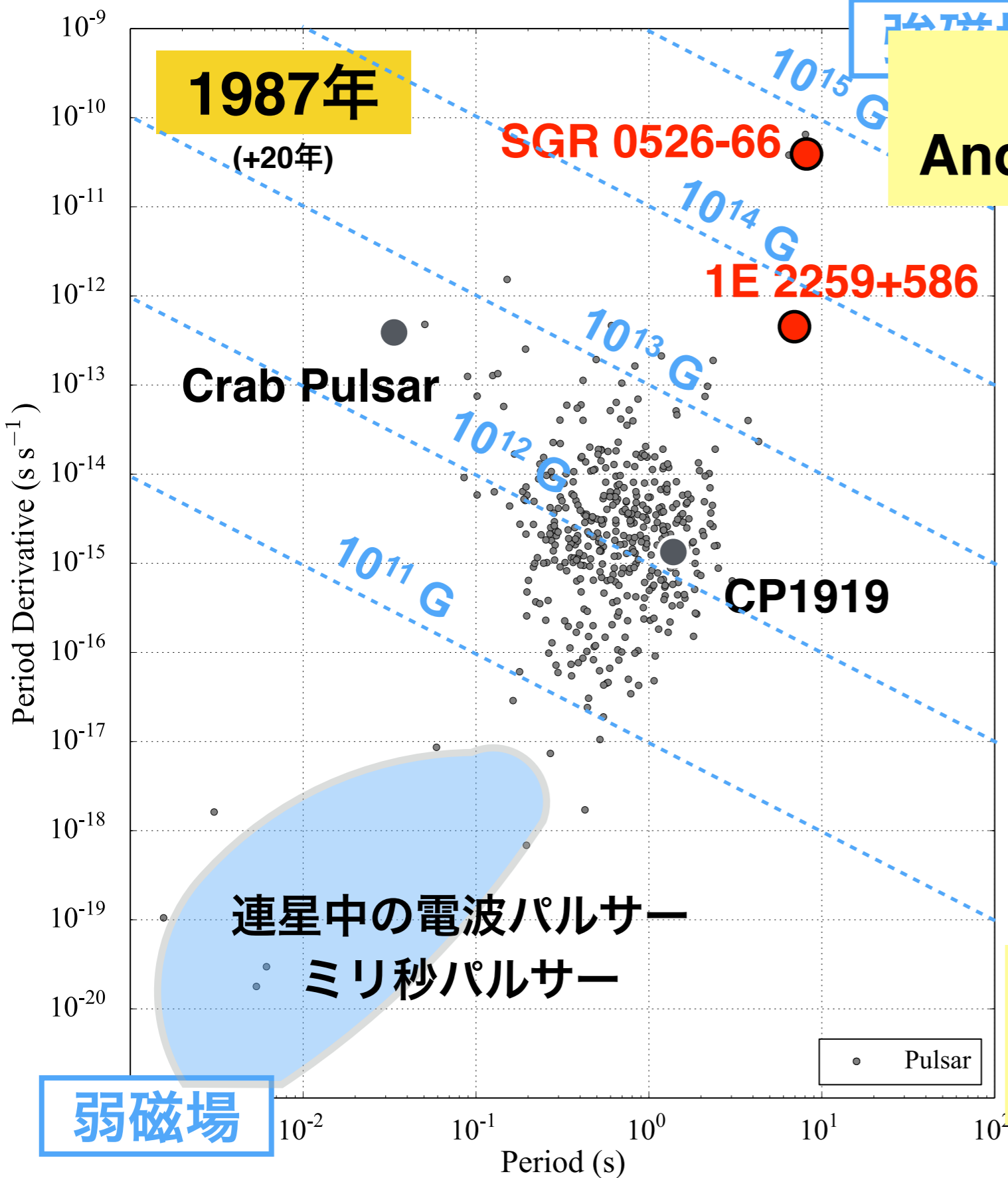


パルサー発見から50周年

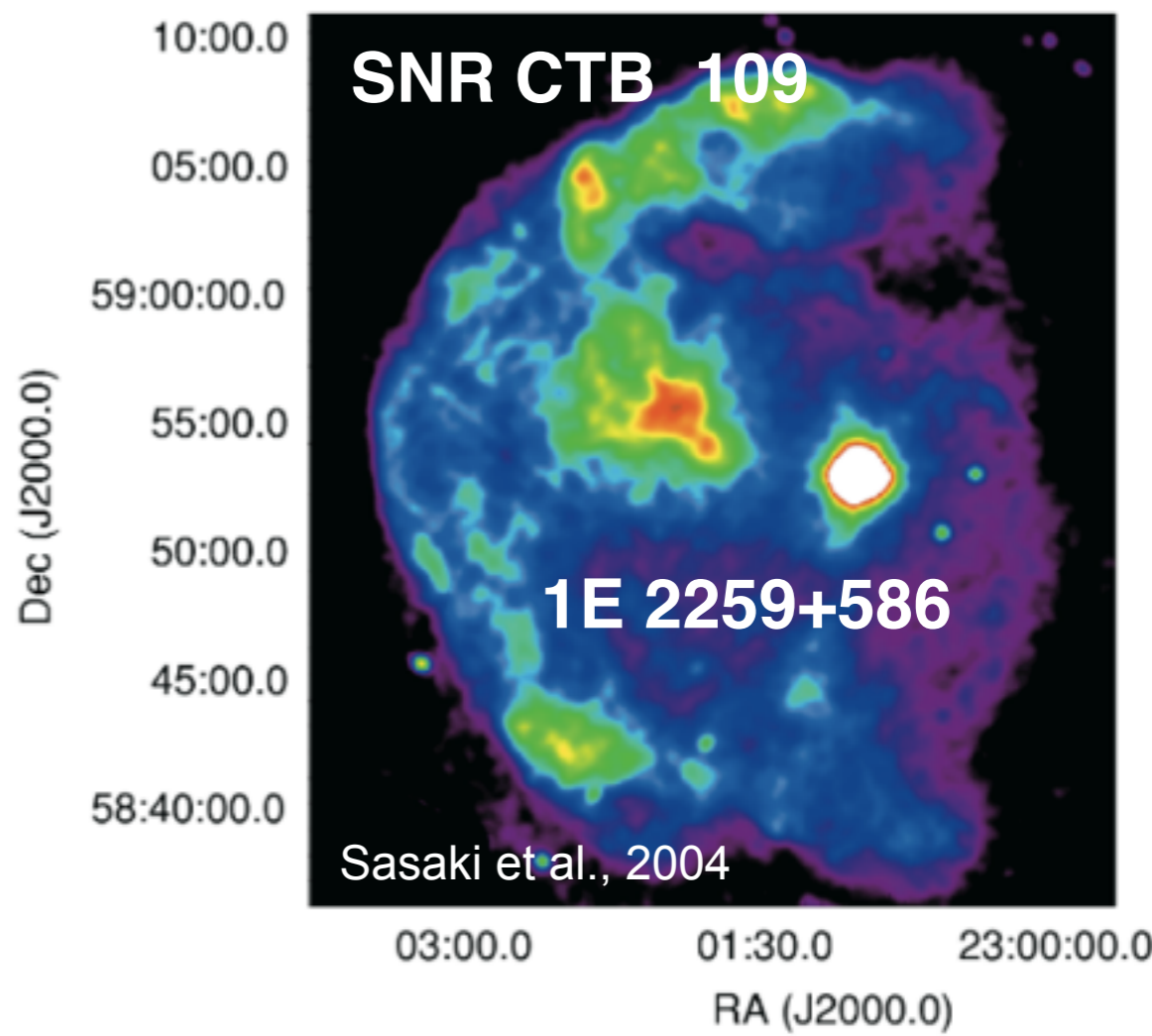


パルサー発見から50周年

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

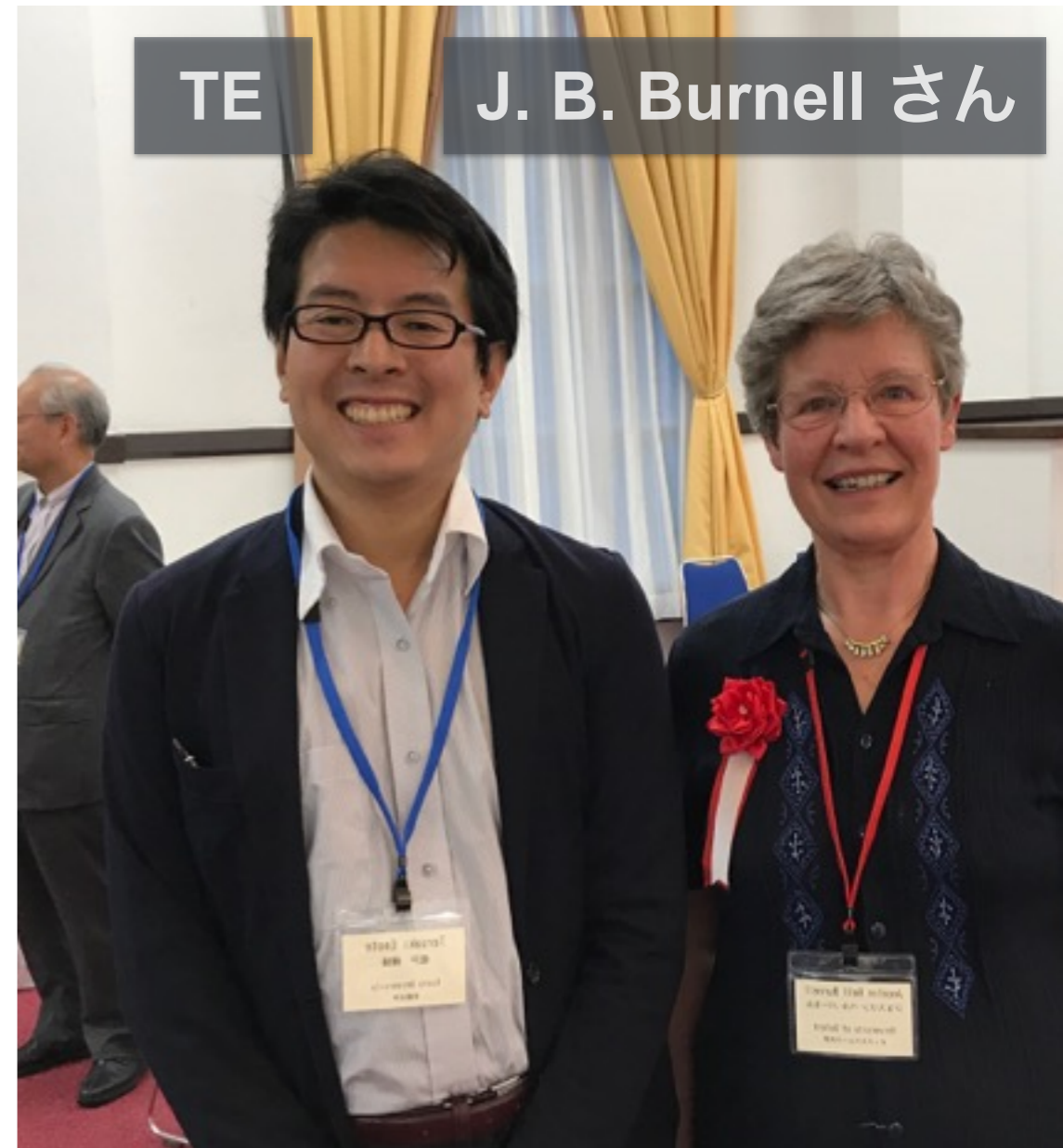
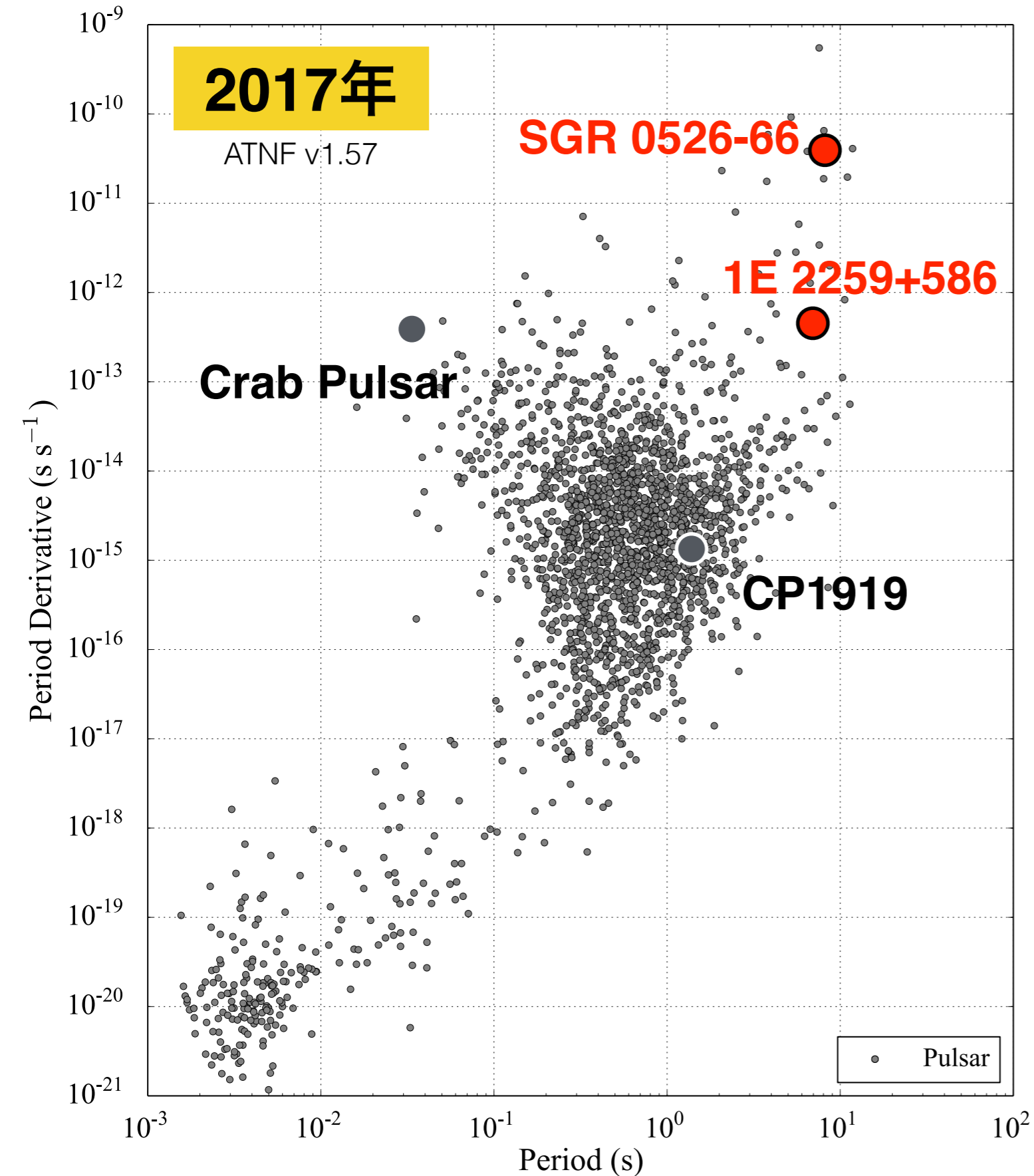


**特異X線パルサー
Anomalous X-ray Pulsar (AXP)**



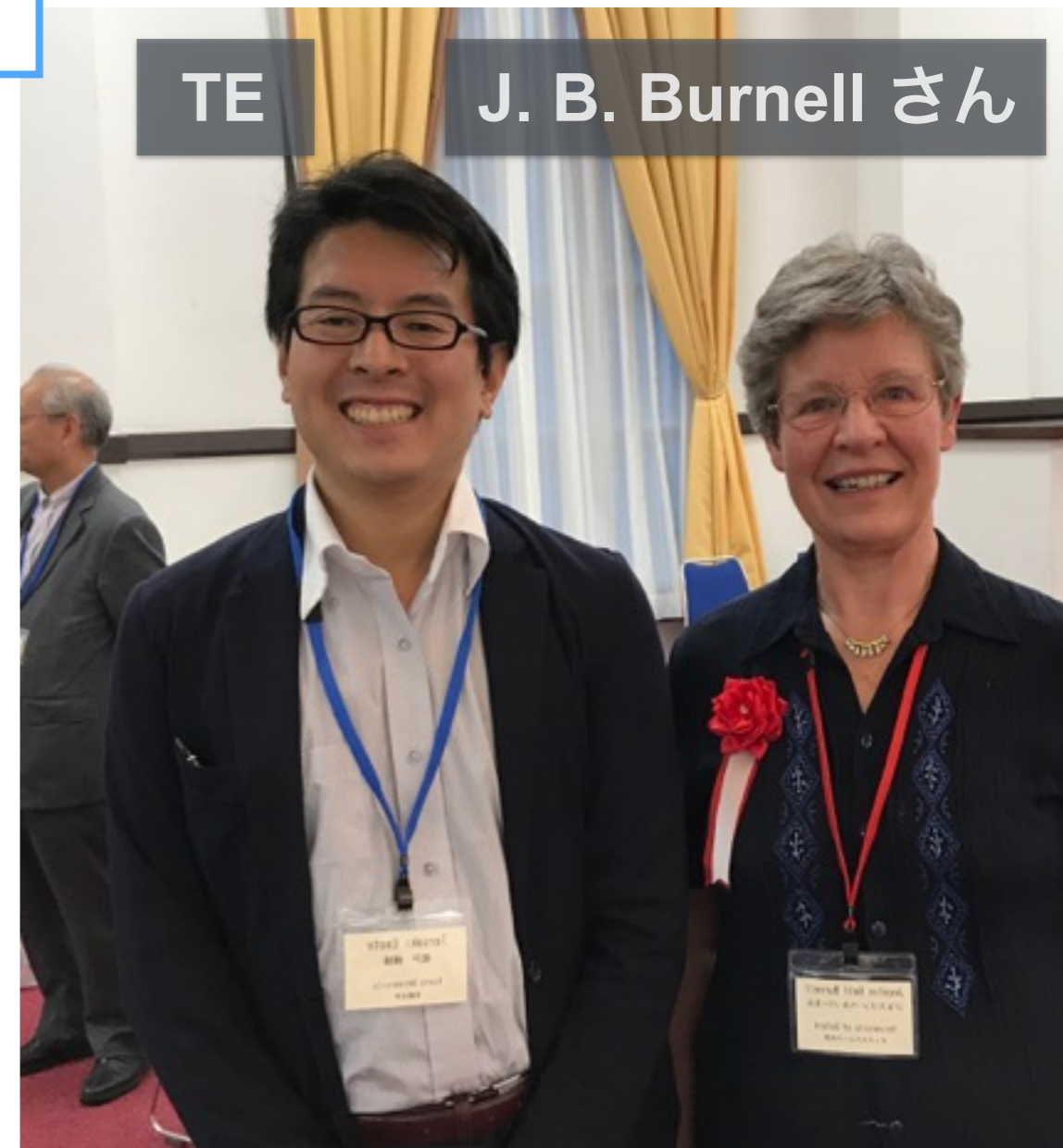
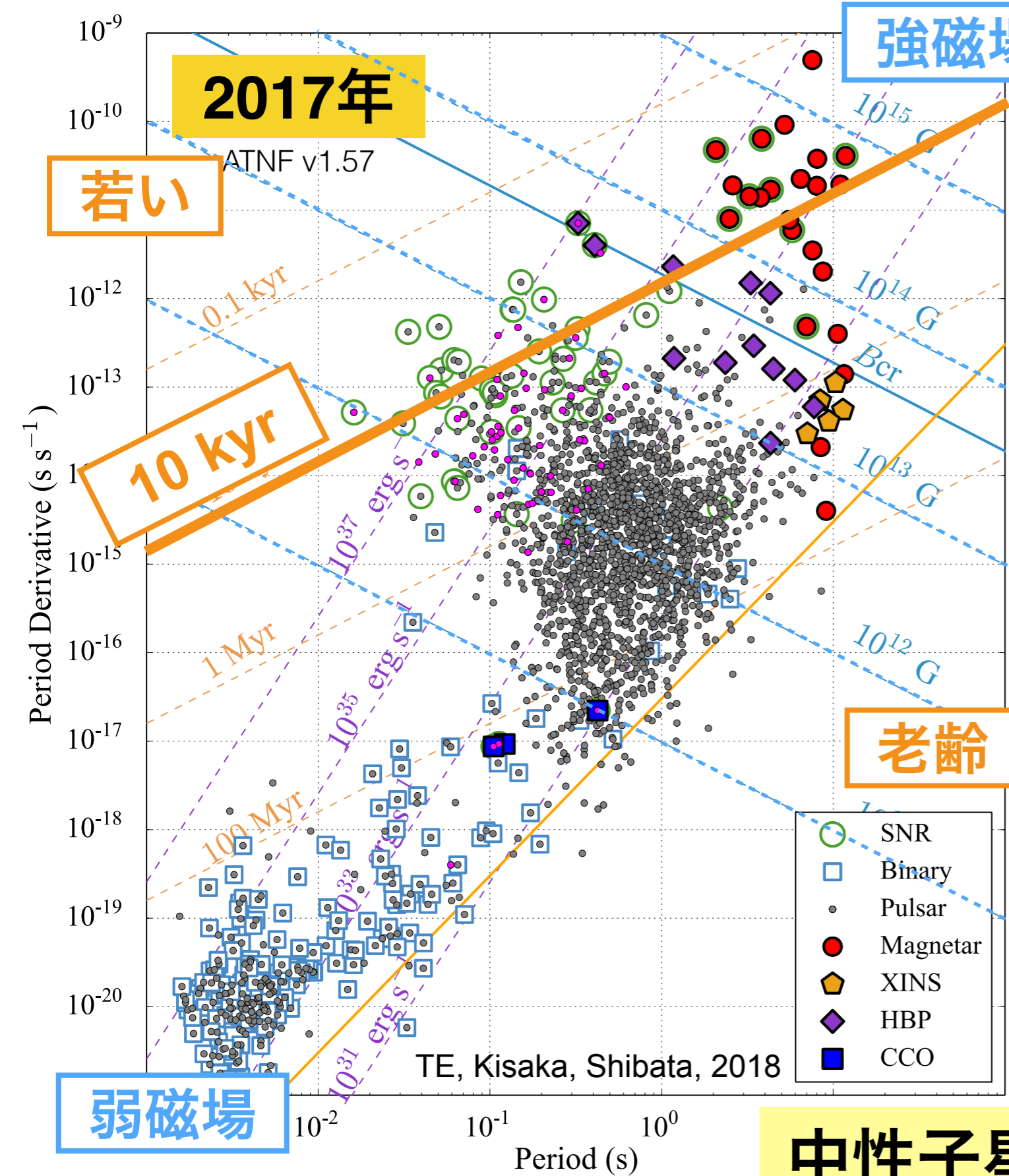
**$L_x > L_{sd}$ エネルギー源は?
SGR+AXP=強磁場天体?**

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

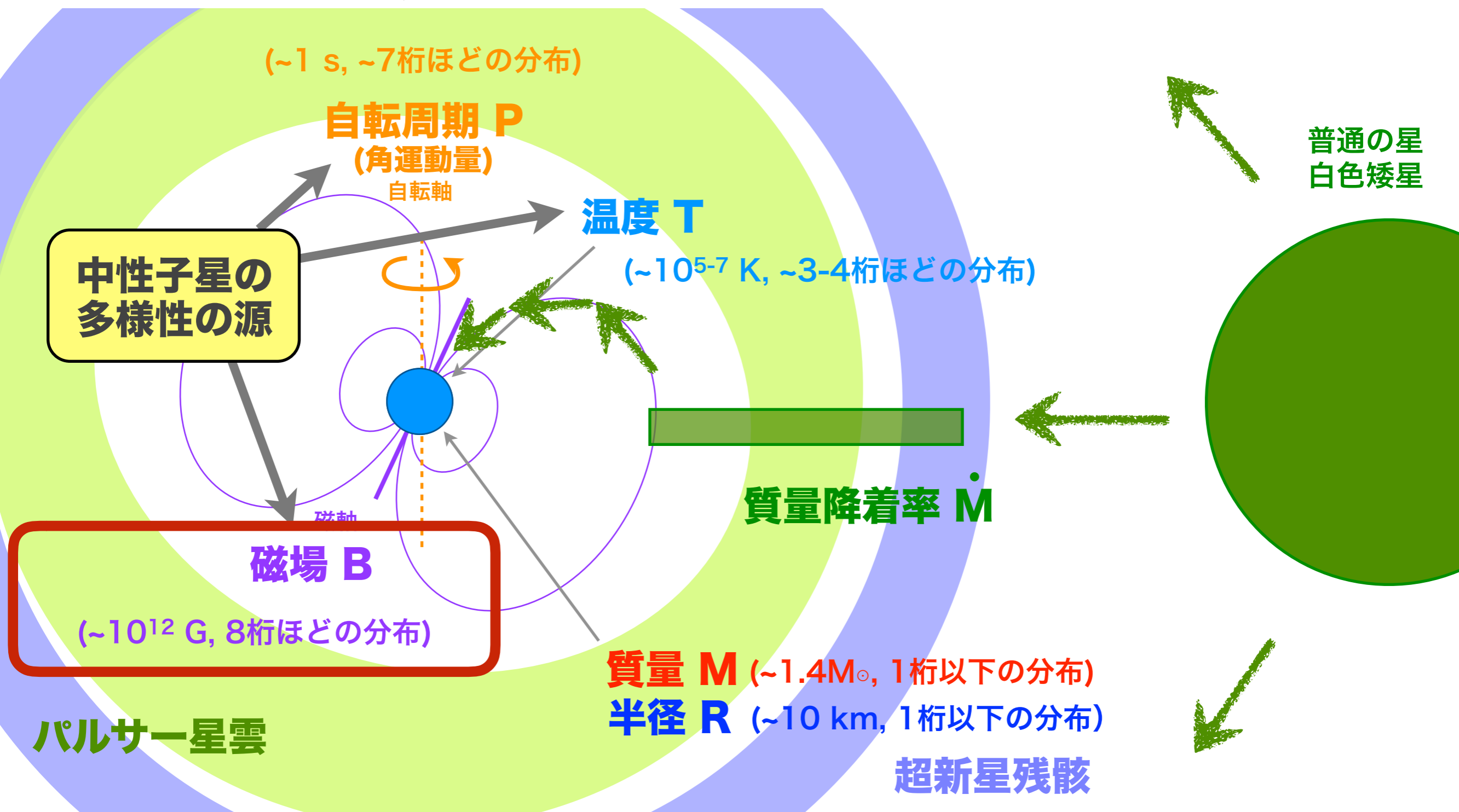
パルサー発見から50周年→多様な中性子星



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

スピンドアウン光度

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

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

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

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

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

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

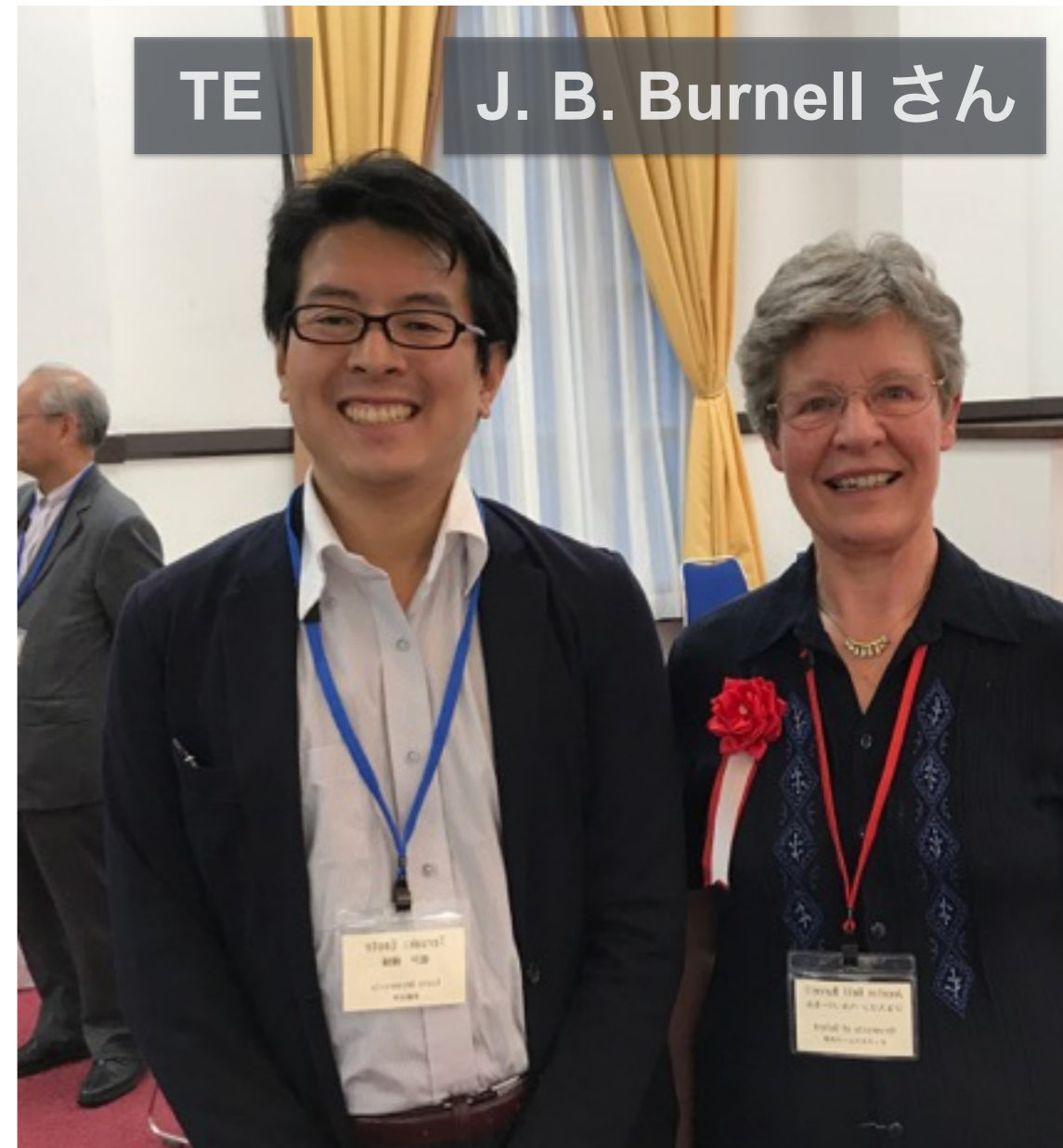
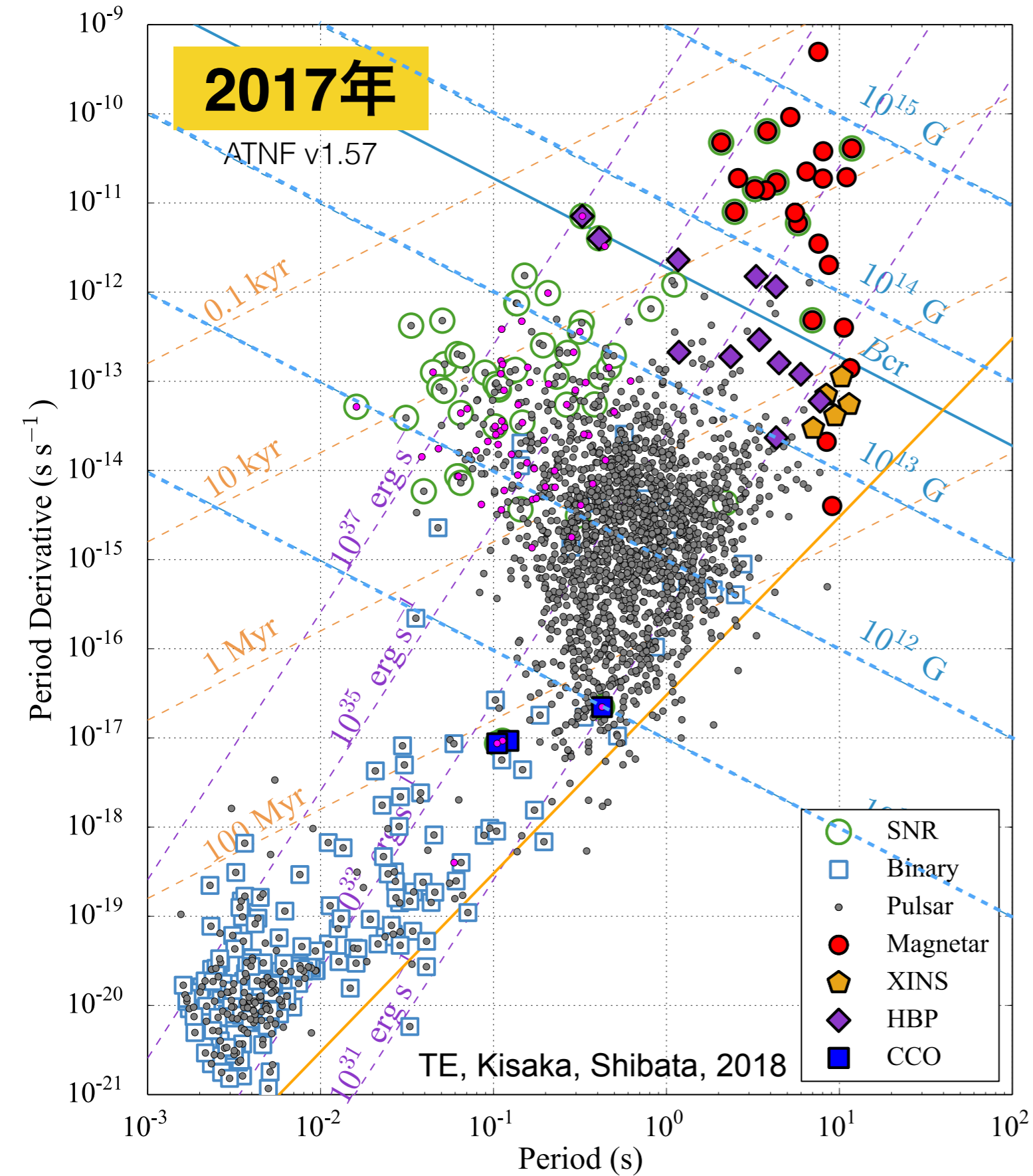
磁場散逸 (内部 / 磁気圏)

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

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

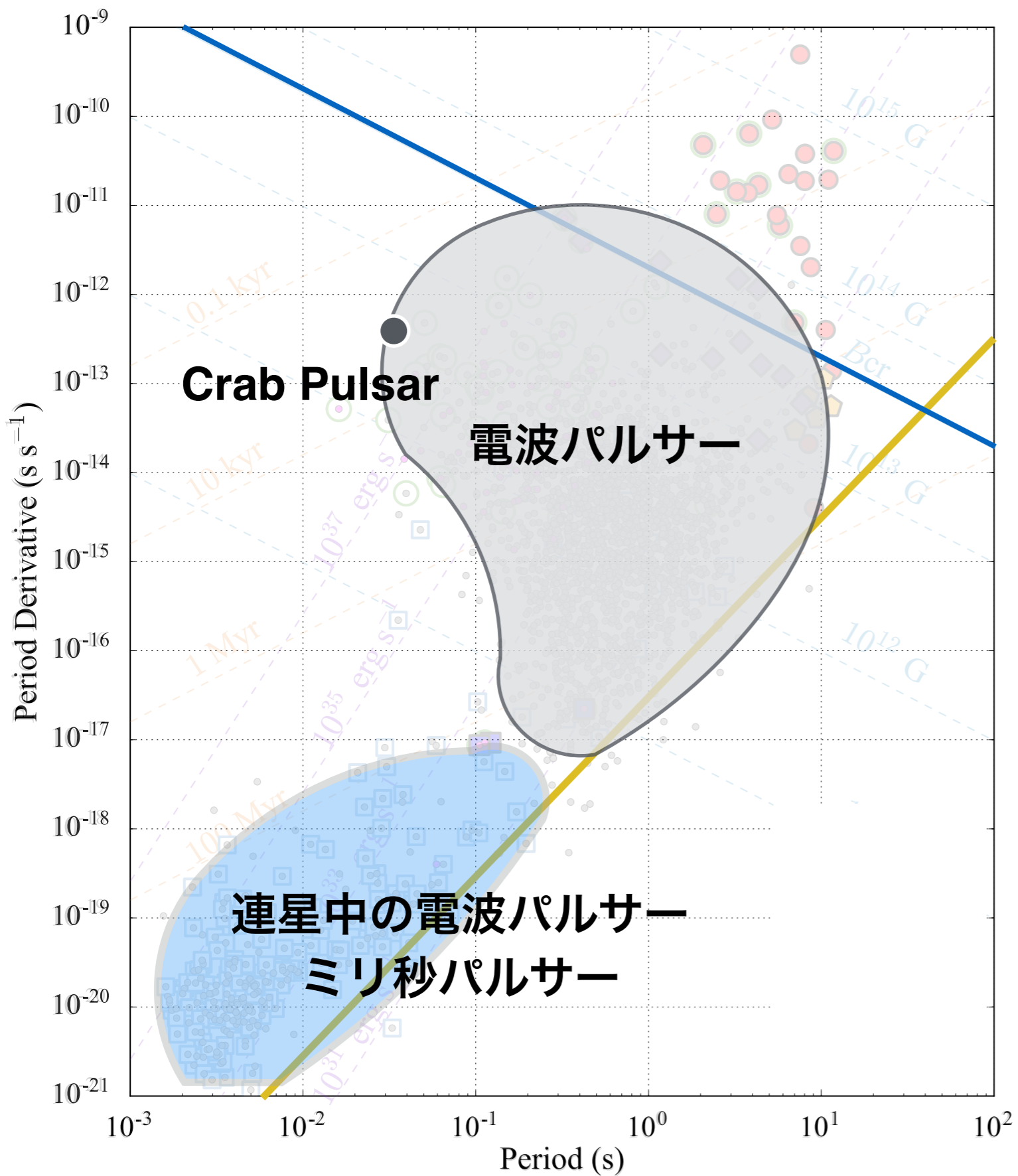
$L_x=10^{35} \text{ erg/s}$, 10 kpc $\Rightarrow F_x=10^{-11} \text{ erg/s/cm}^2$ で精密観測へ

中性子星の種族たち

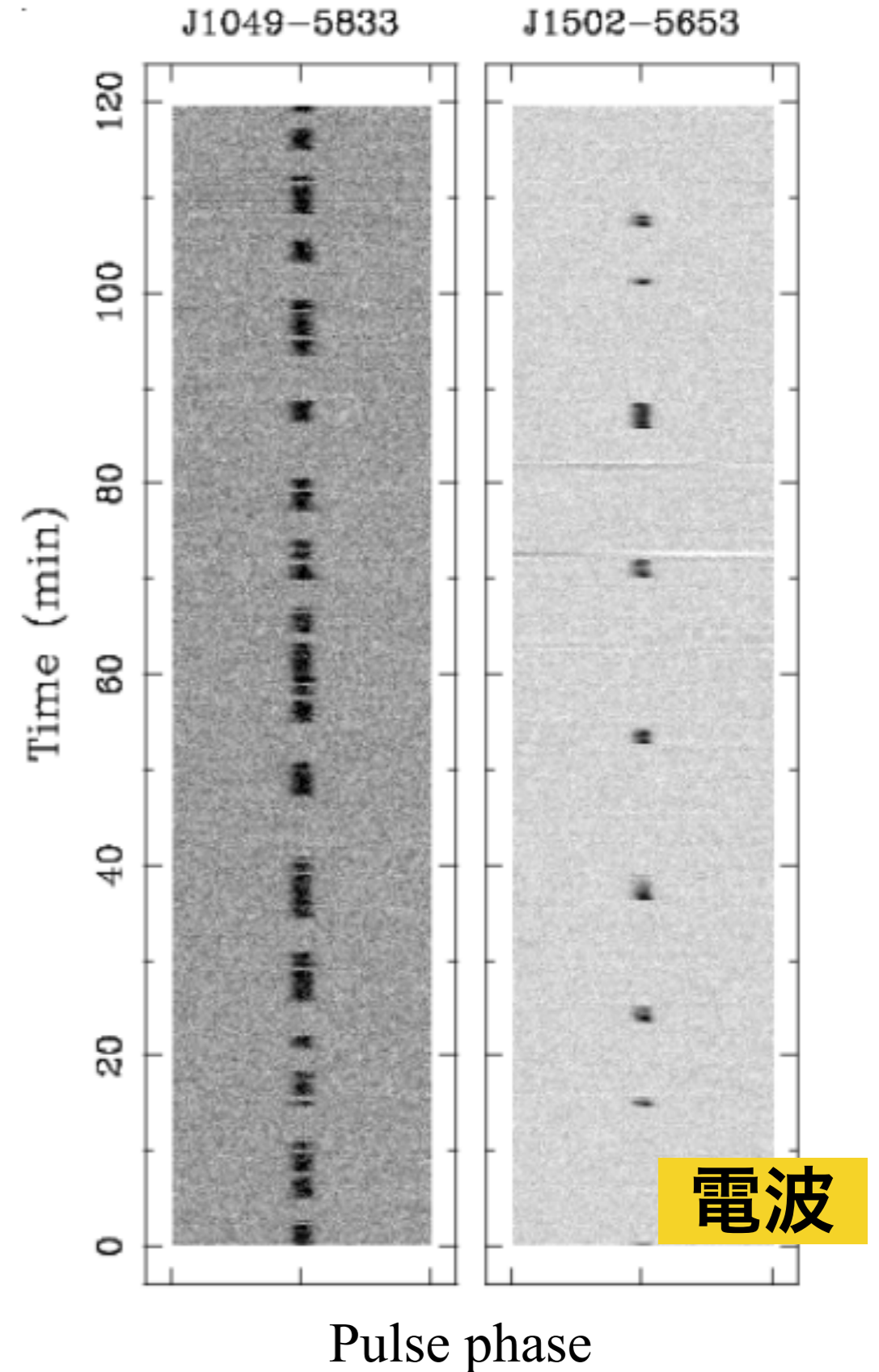
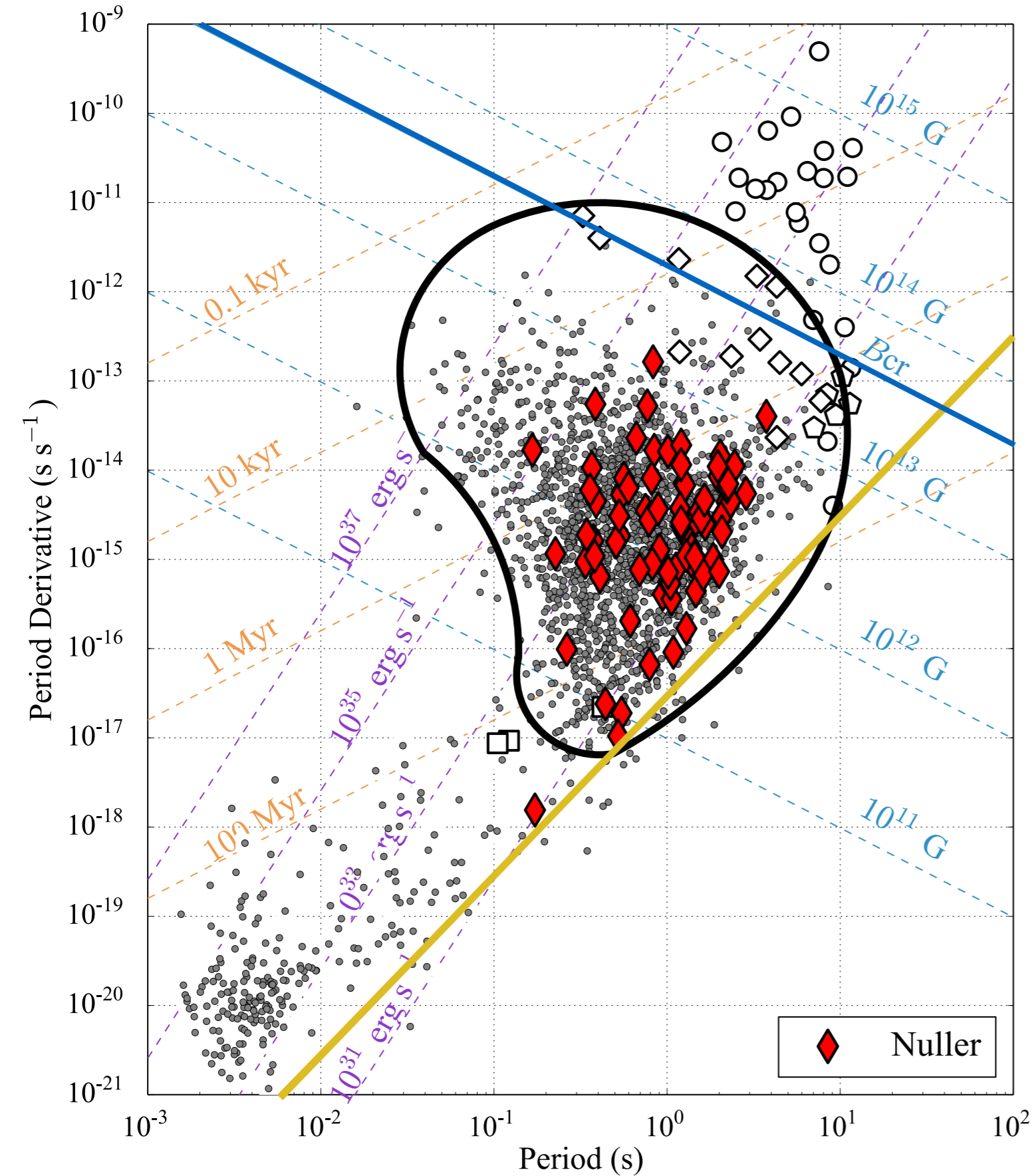


2500
 (銀河系には 10
 可視光 ~20
 X線 ~100
 ガンマ線 ~200

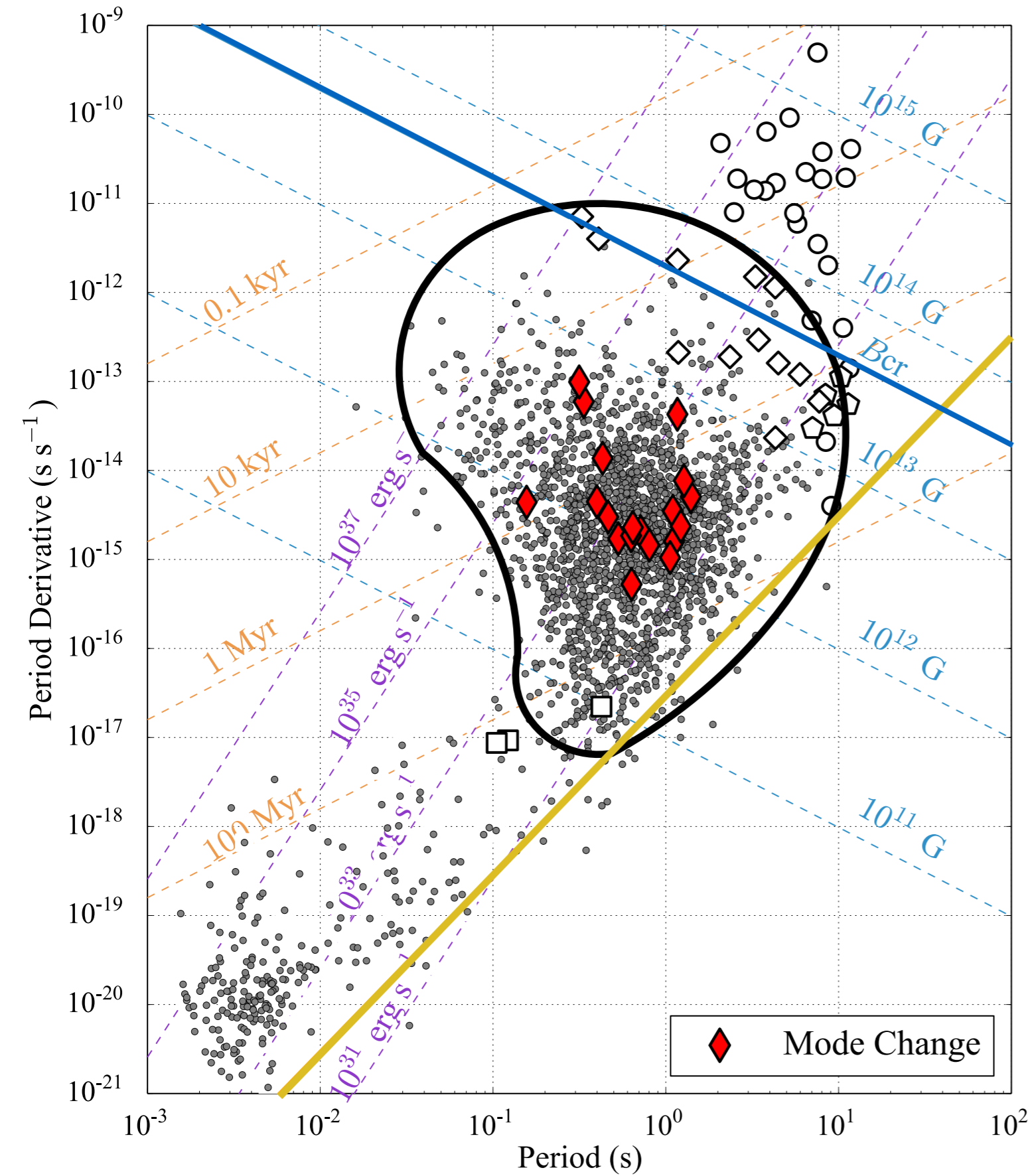
中性子星の種族たち：電波パルサー



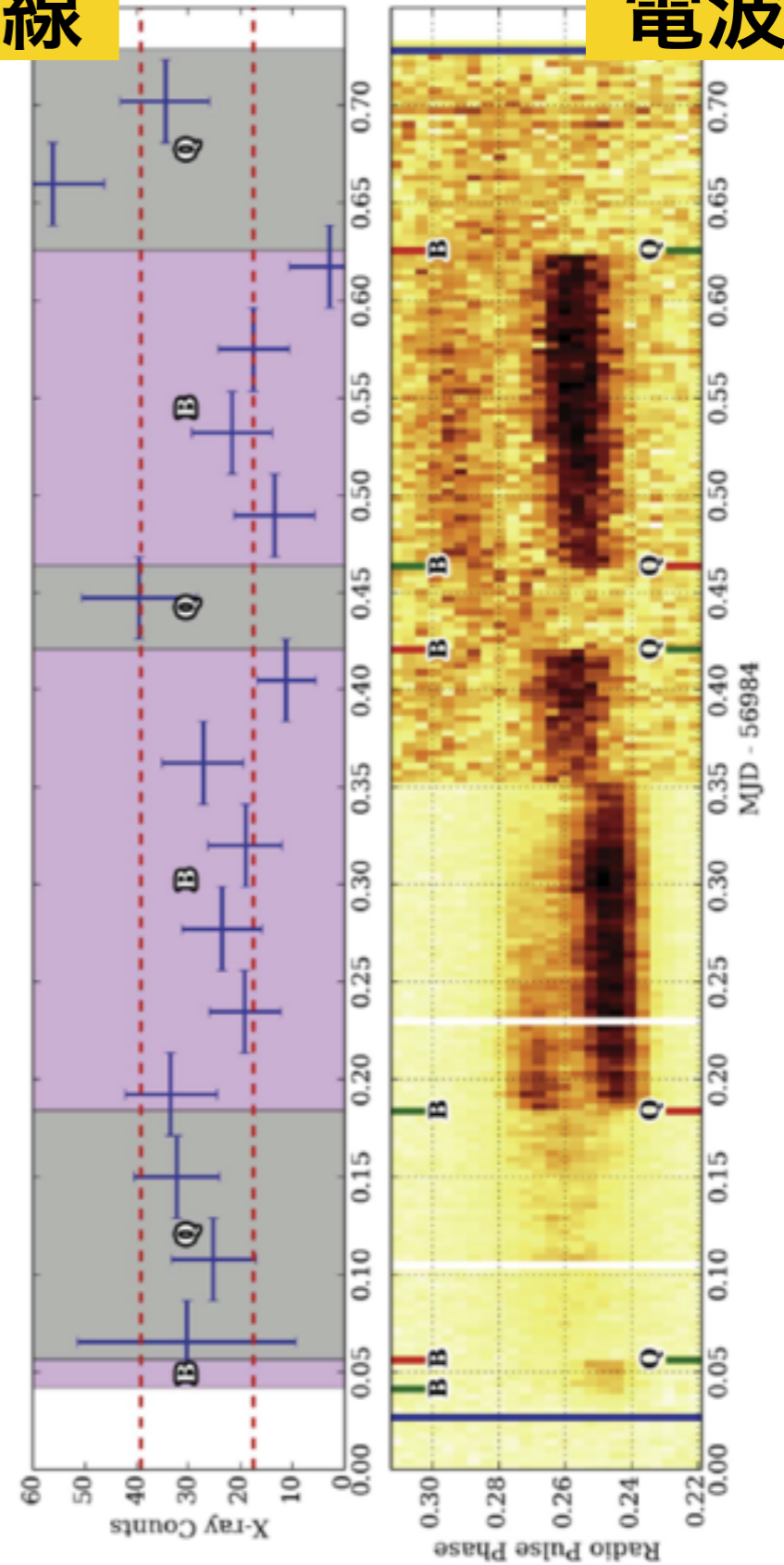
中性子星の種族たち：電波パルサー



中性子星の種族たち：電波パルサー

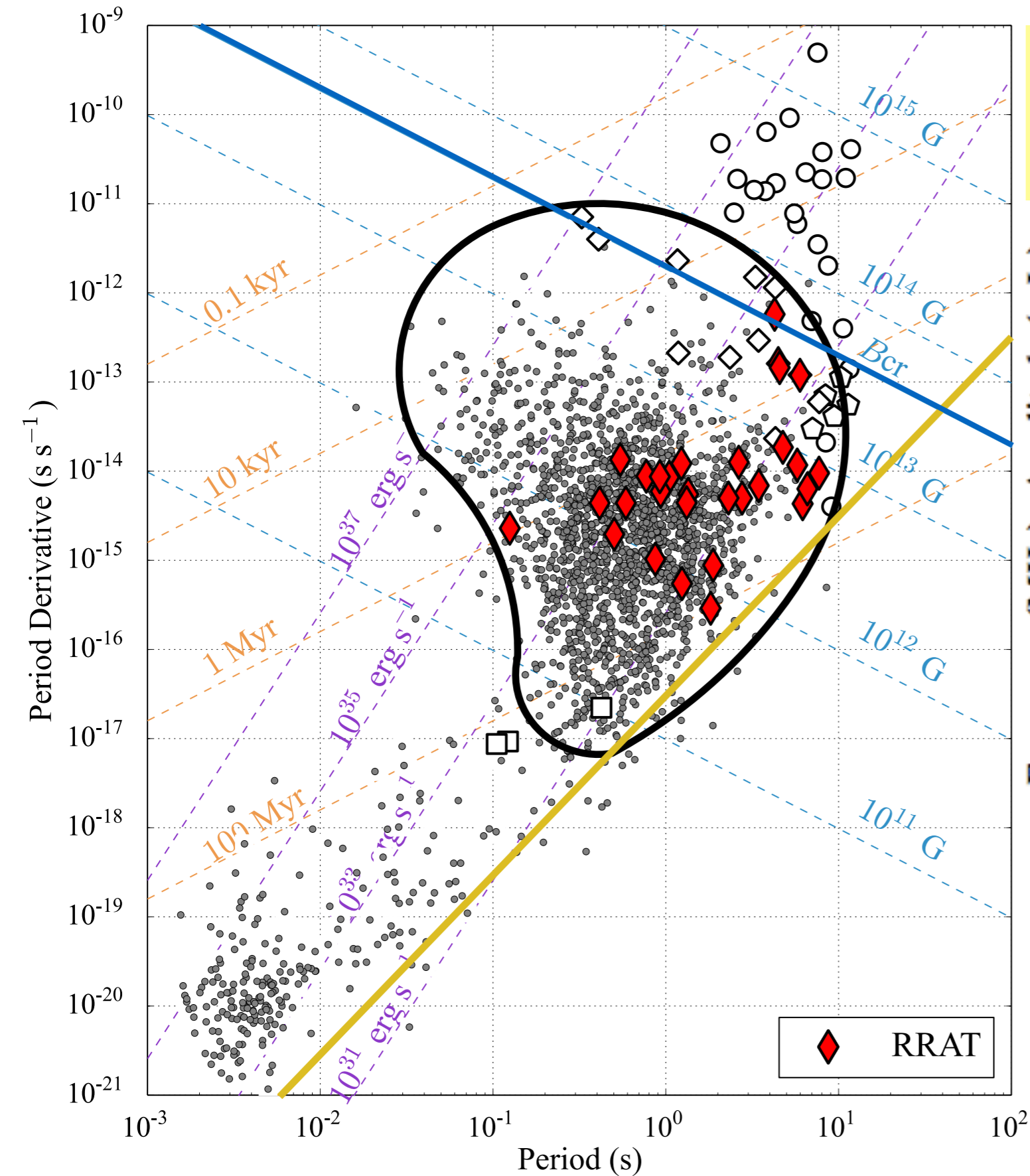


X線

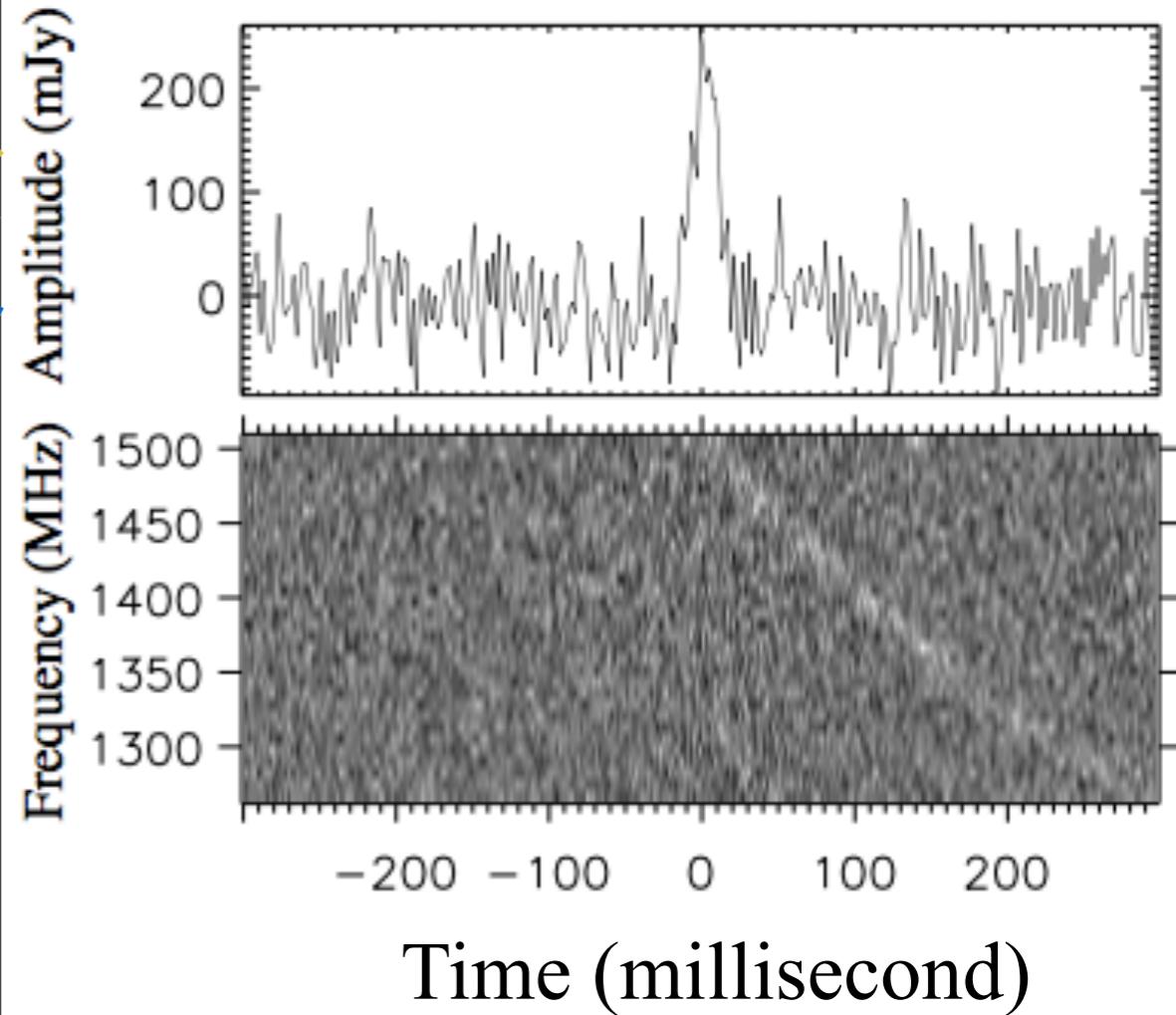


電波

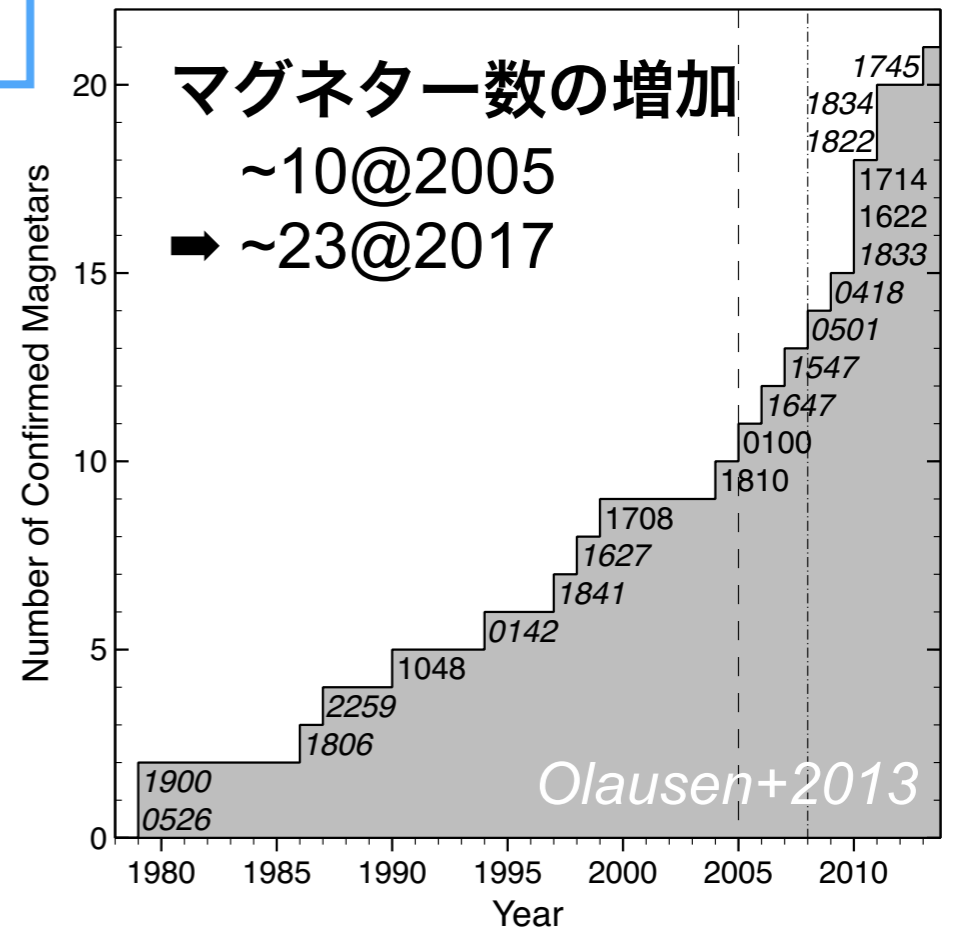
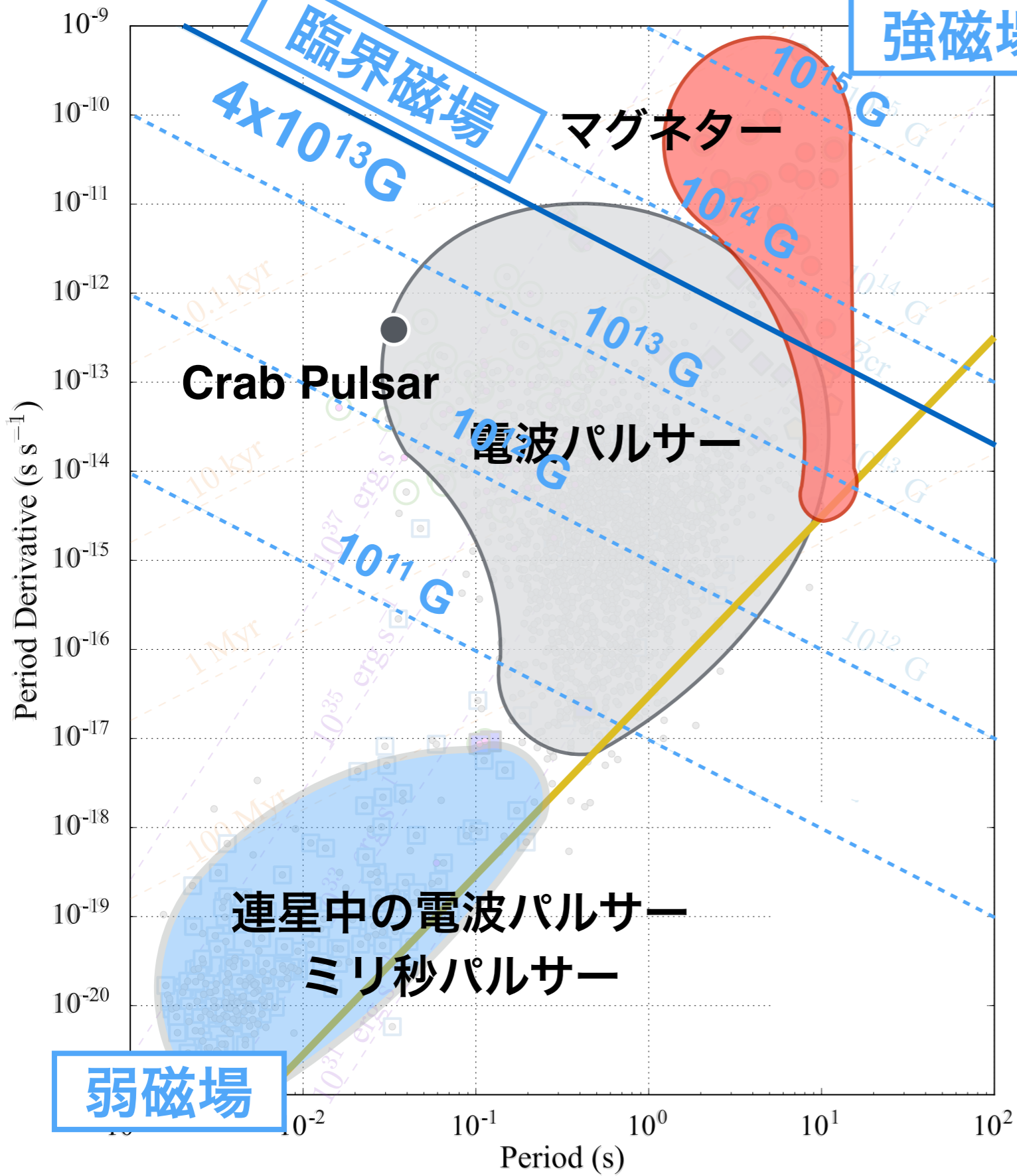
中性子星の種族たち：電波パルサー



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



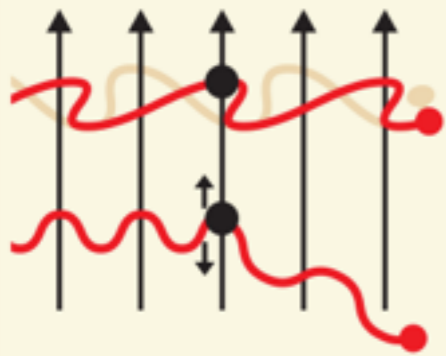
マグネター仮説

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)??

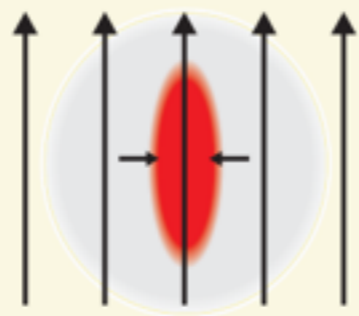
QED 臨界磁場

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

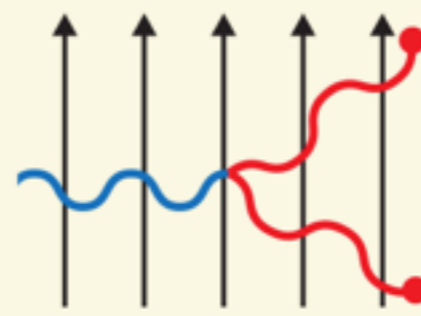
散乱断面積の抑制



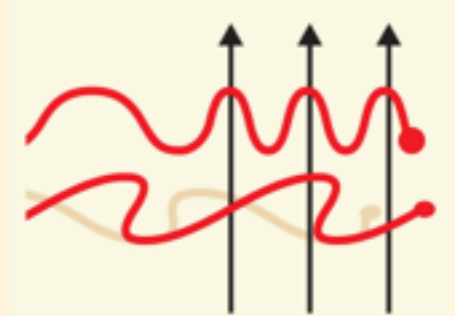
原子の変形



光子の自然分裂

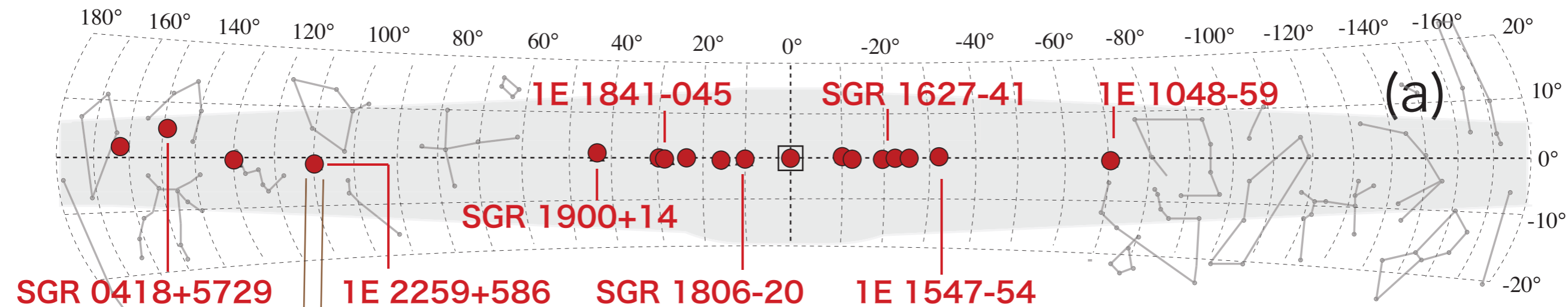


真空の複屈折

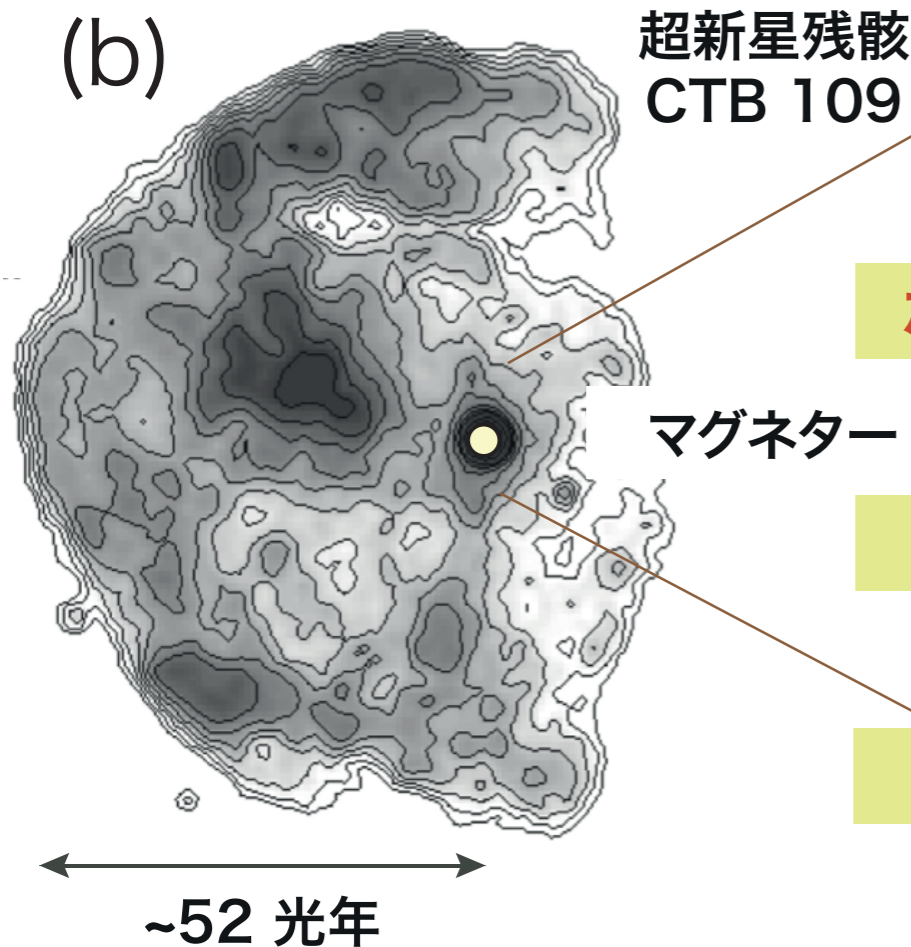


銀河系内で発見されてきたマグネターの観測的性質の共通理解は確立
(ただし、通常のダイポール磁場の中性子星や白色矮星の対立仮説はまだある)

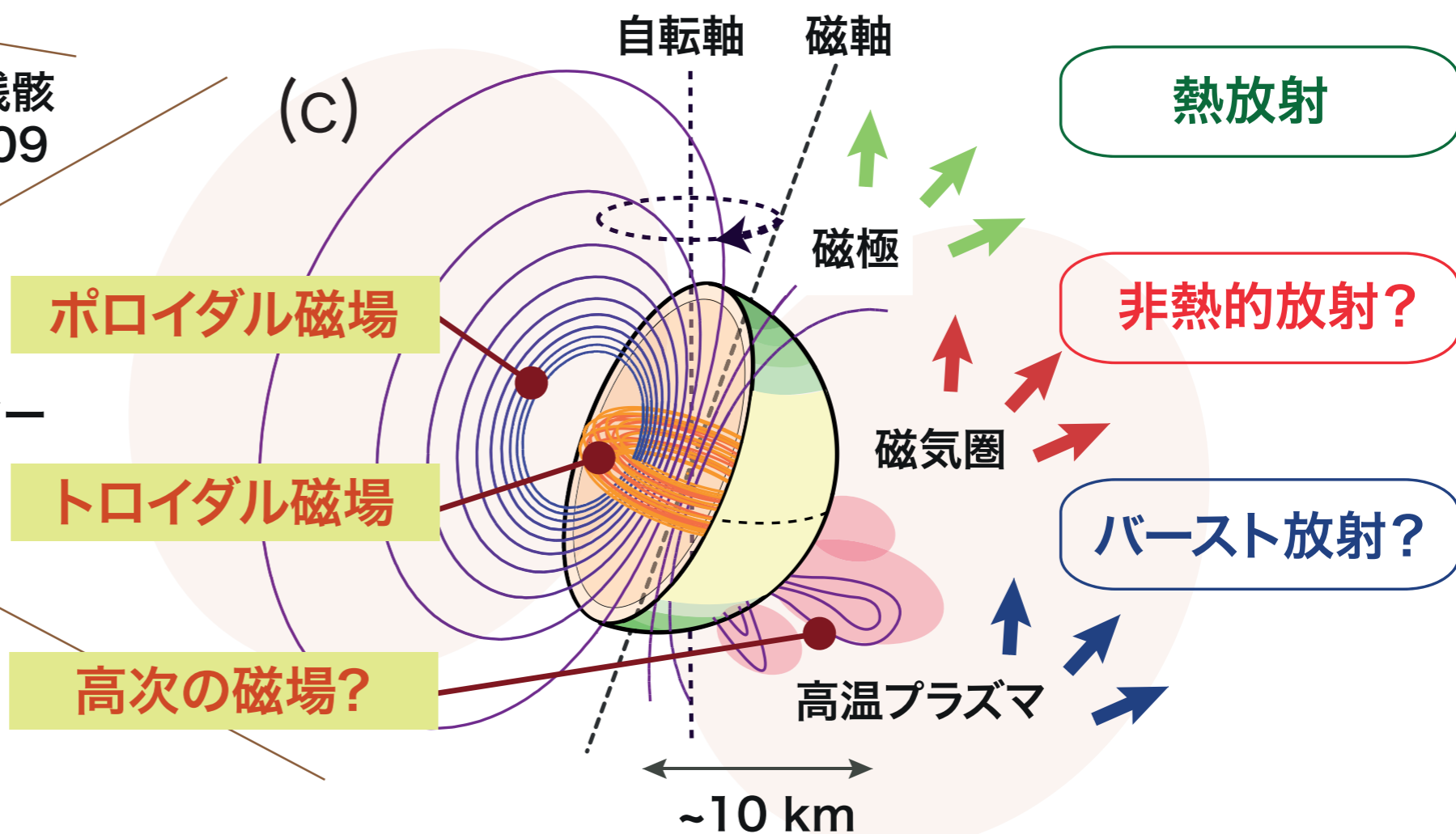
既知マグネター：銀河系・マゼラン雲に23天体



(b)

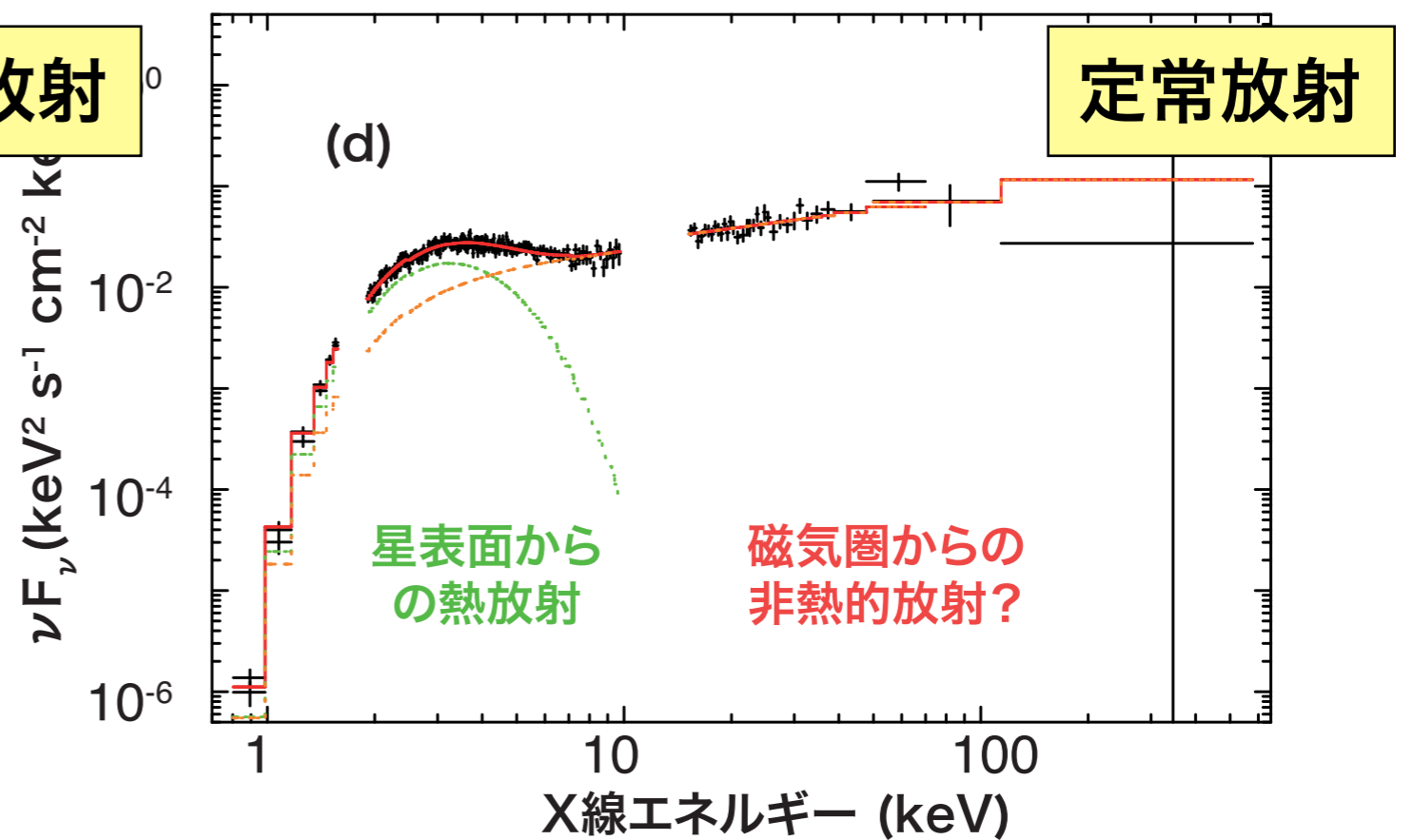
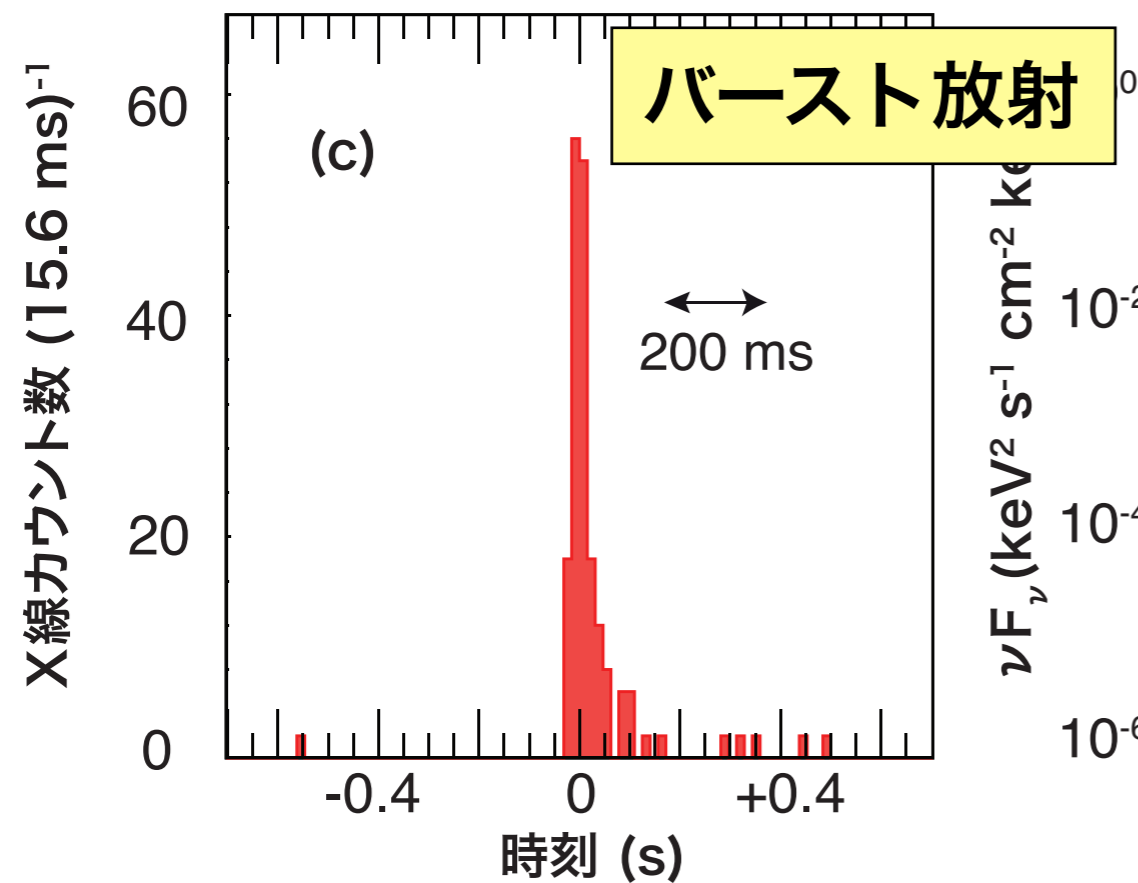
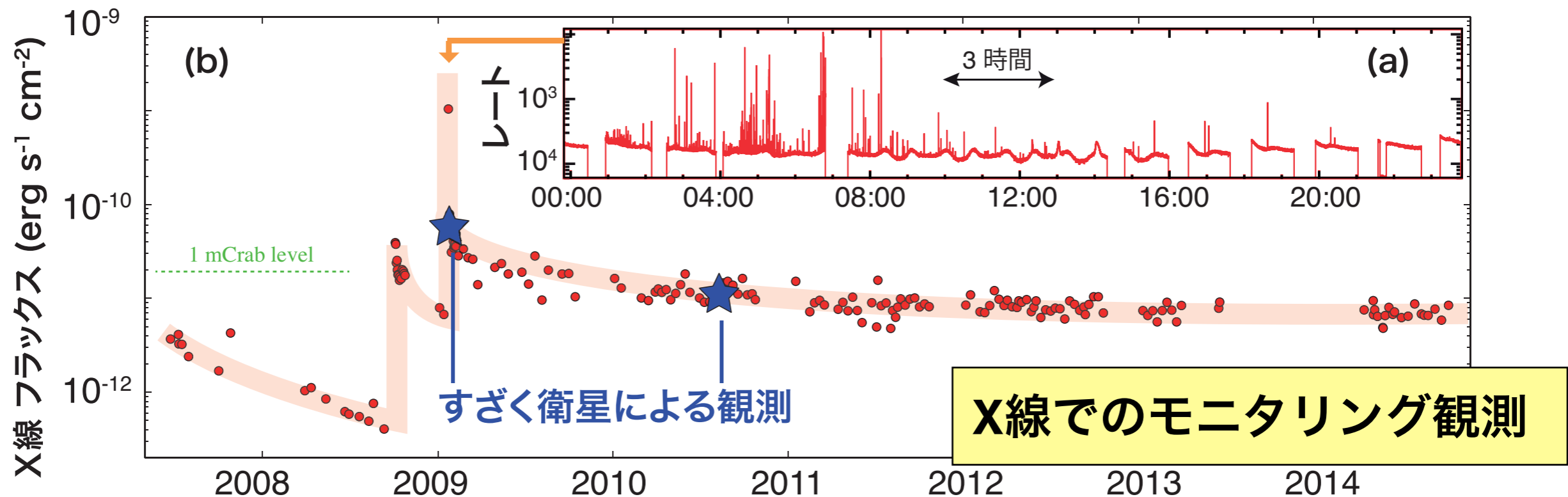


(c)

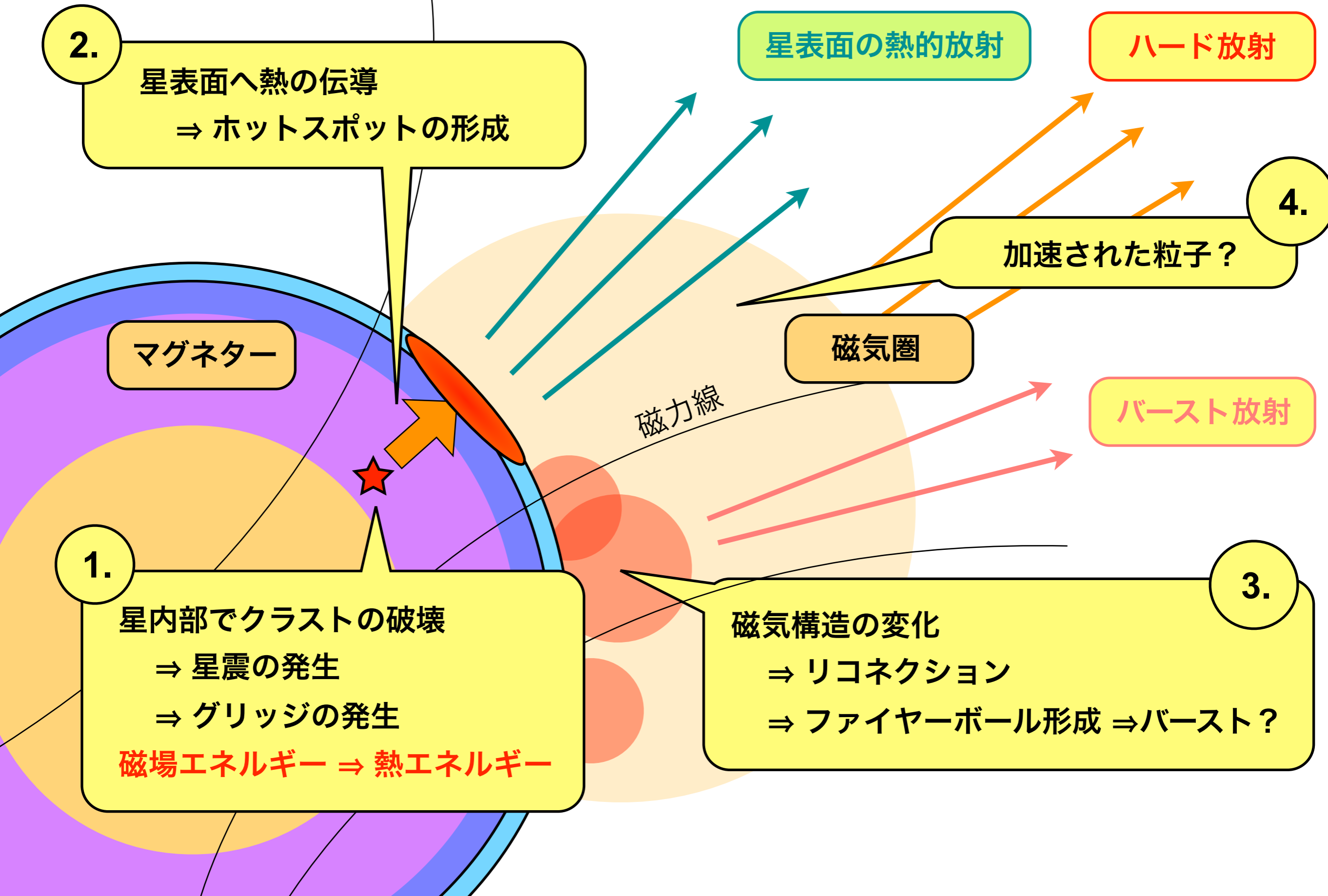


磁気エネルギーが、表面の熱放射、磁気圏の放射、バースト放射になる

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

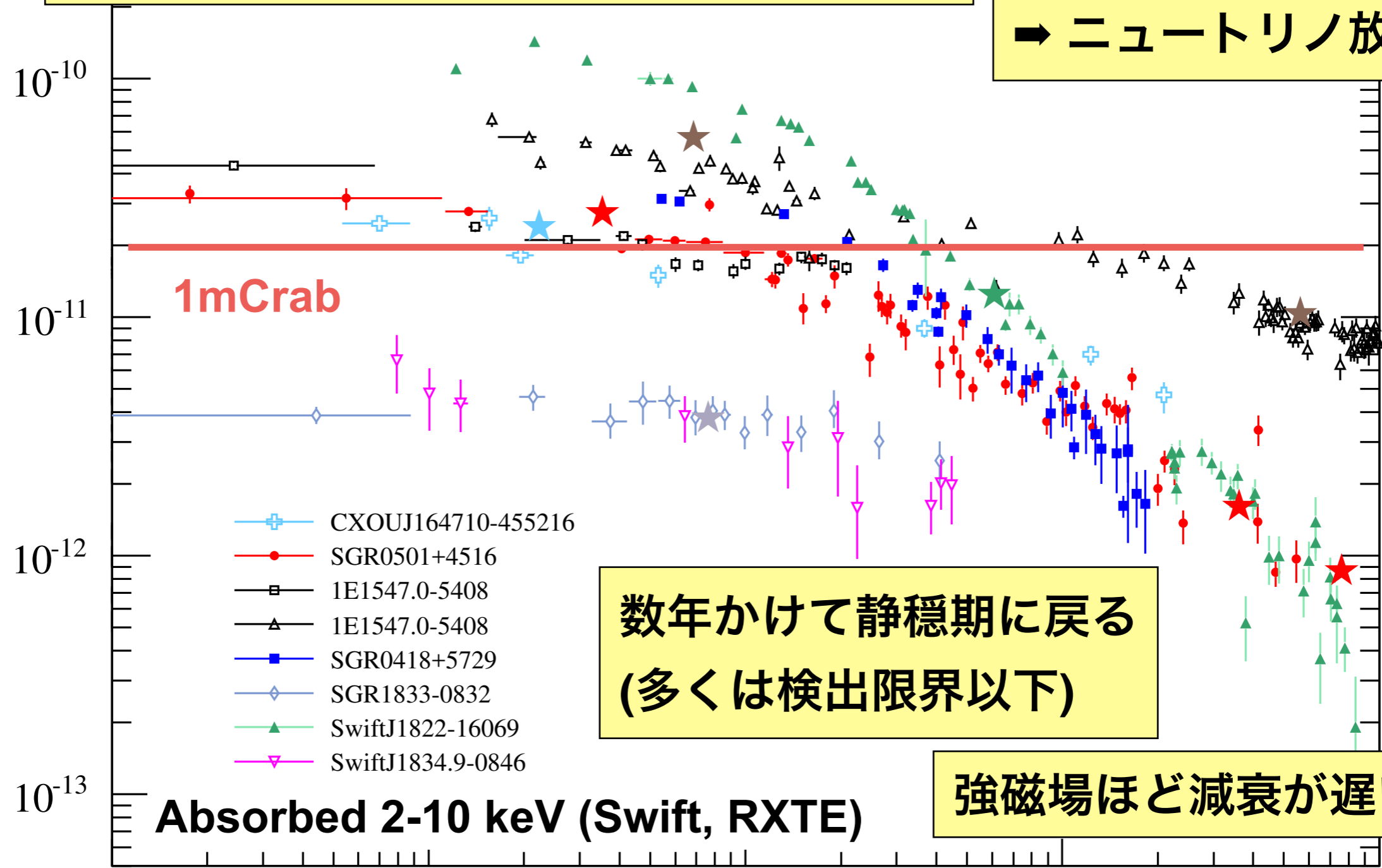


マグネターのX線アウトバースト 主に星表面の放射が観測

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？



Absorbed 2-10 keV (Swift, RXTE)

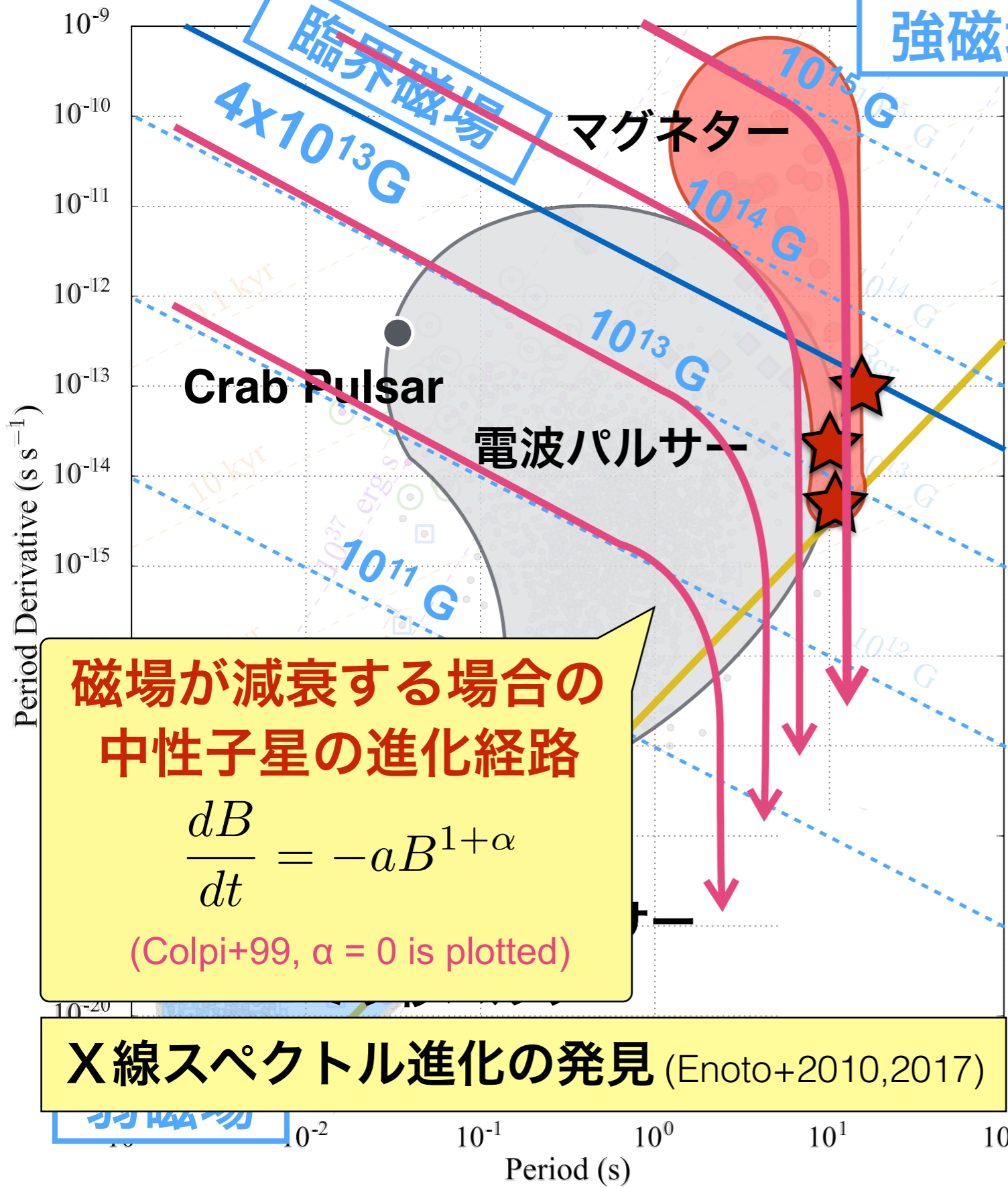
数年かけて静穏期に戻る
(多くは検出限界以下)

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



強磁場

臨界磁場
4x10¹³ G

マグネター

Crab Pulsar

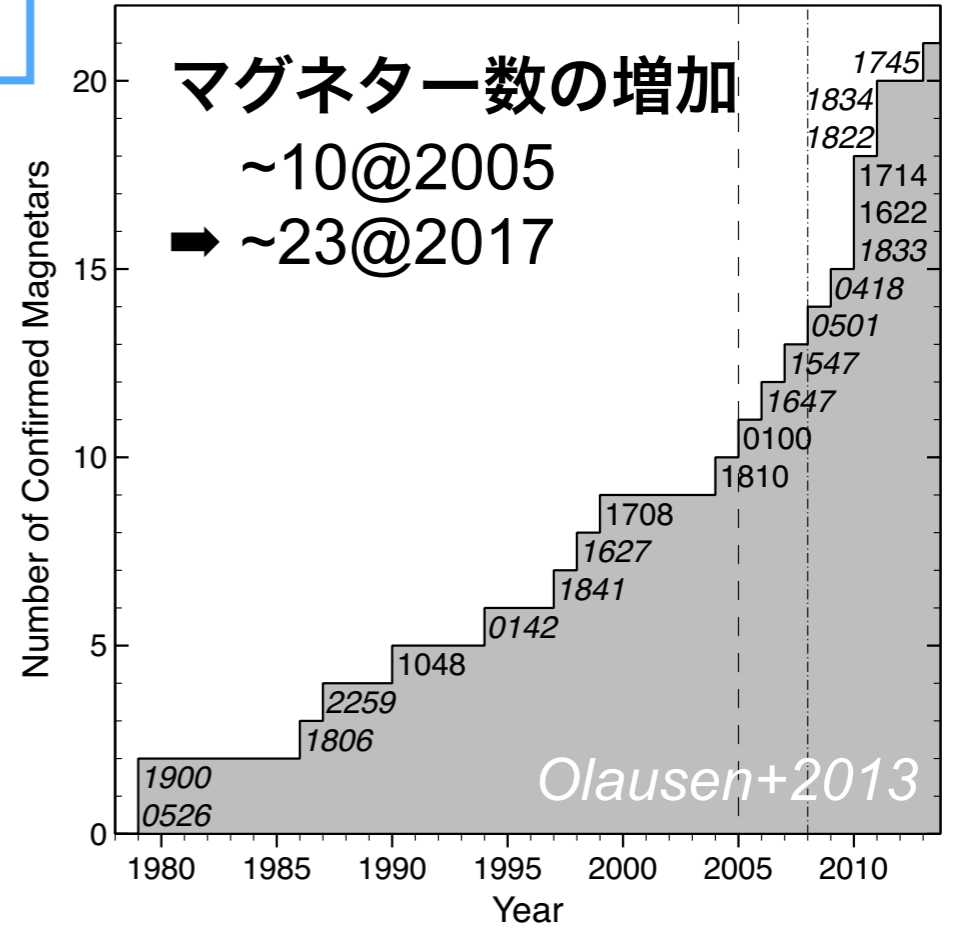
電波パルサー

磁場が減衰する場合の
中性子星の進化経路

$$\frac{dB}{dt} = -aB^{1+\alpha}$$

(Colpi+99, $\alpha = 0$ is plotted)

X線スペクトル進化の発見 (Enoto+2010,2017)



マグネター数の増加

~10@2005

➡ ~23@2017

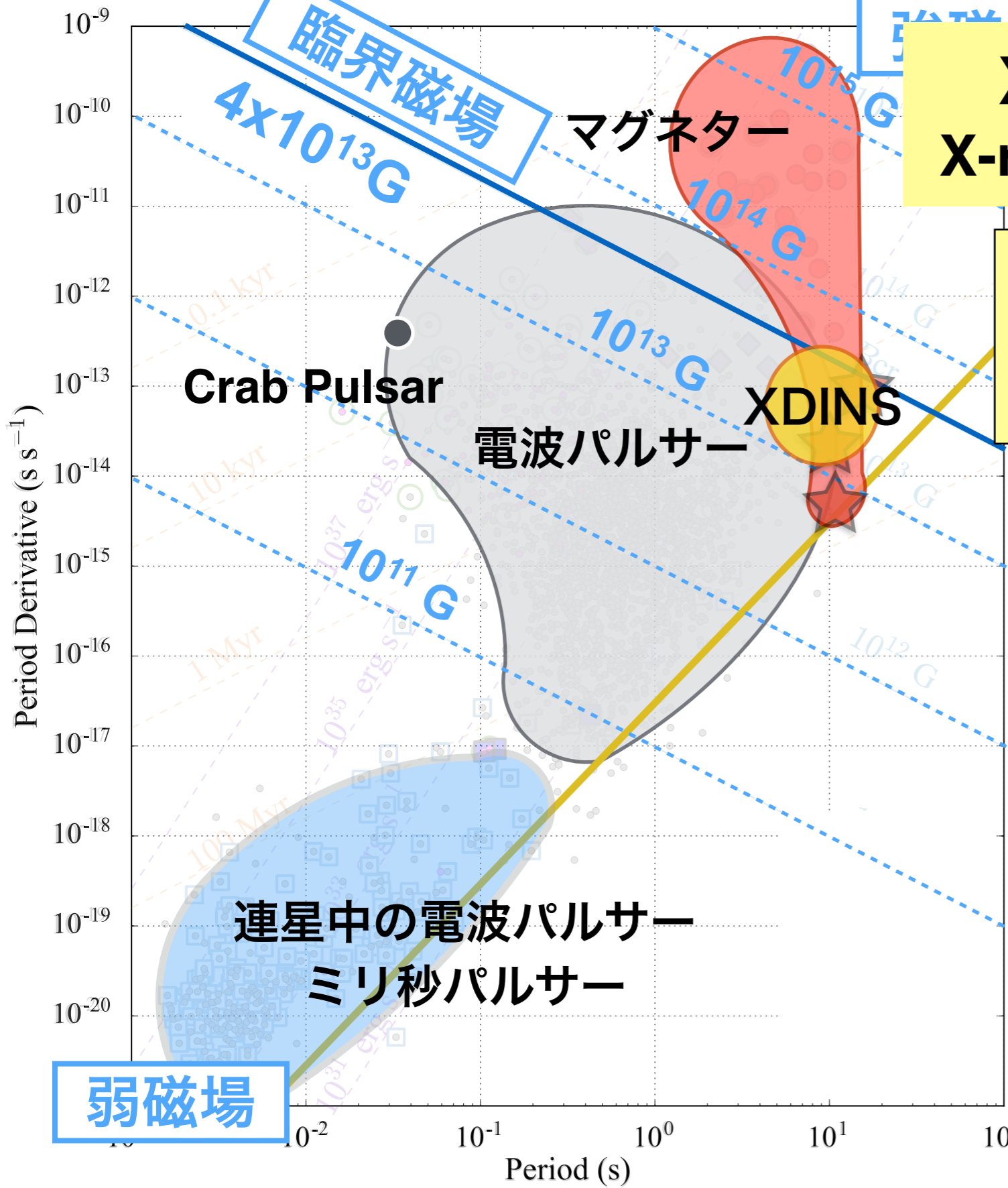
Olausen+2013

弱磁場マグネター
Low field magnetar

P-Pdot が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 (PD=16.4±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。

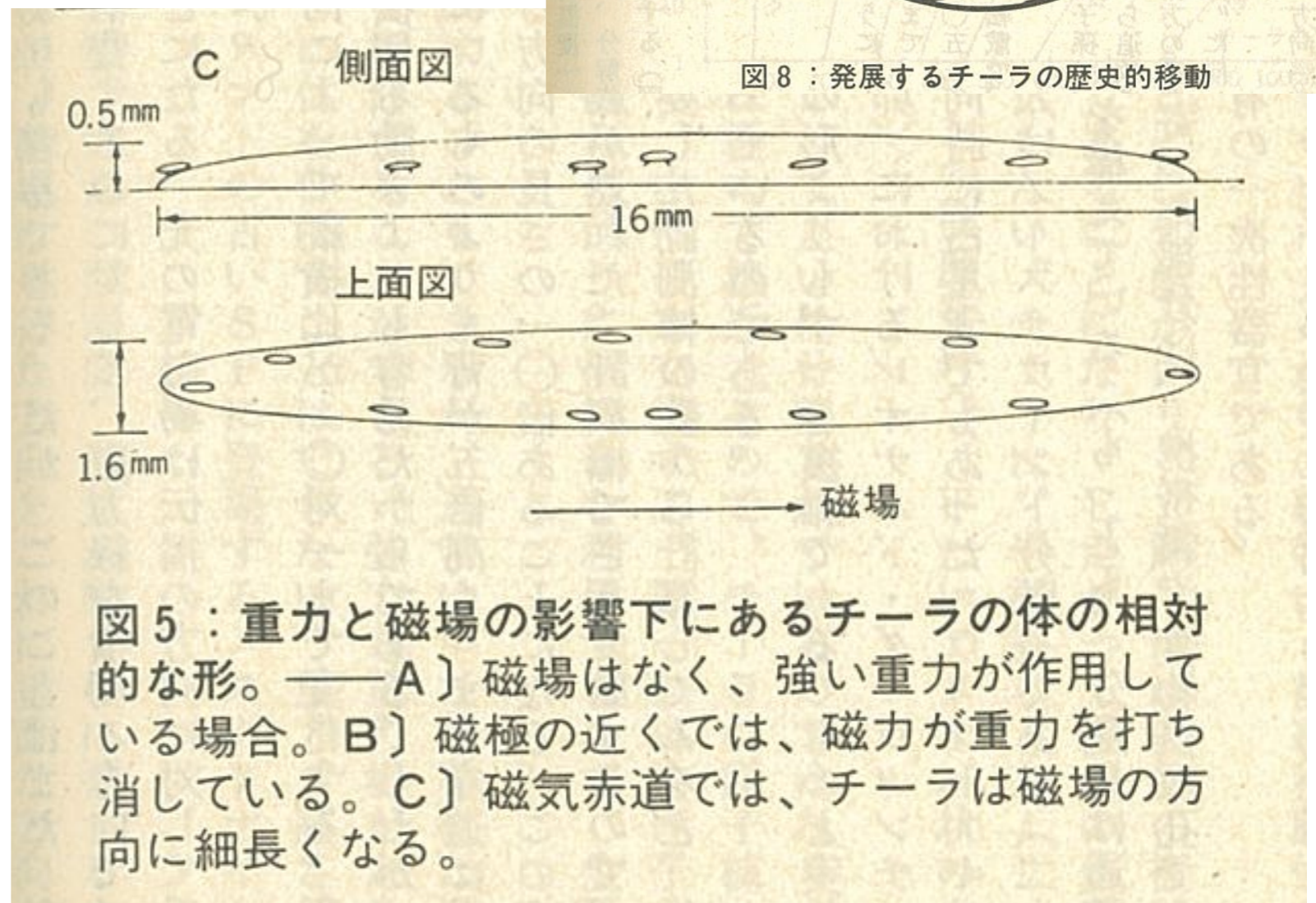
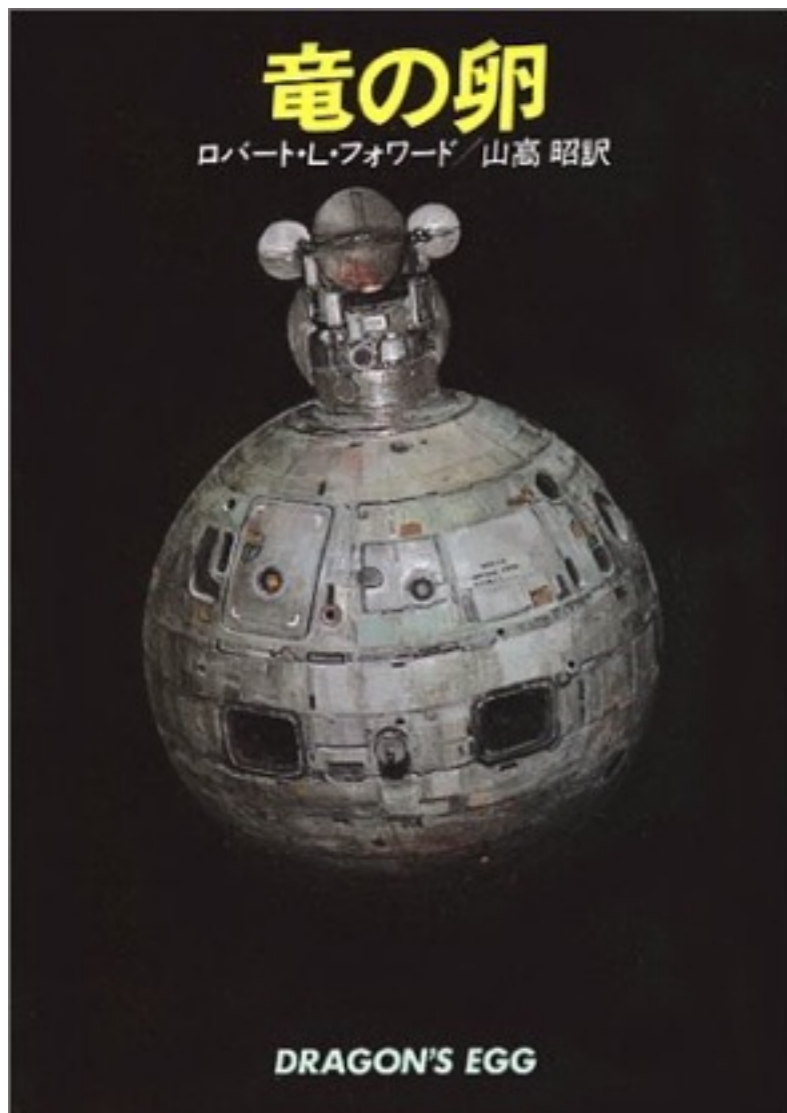
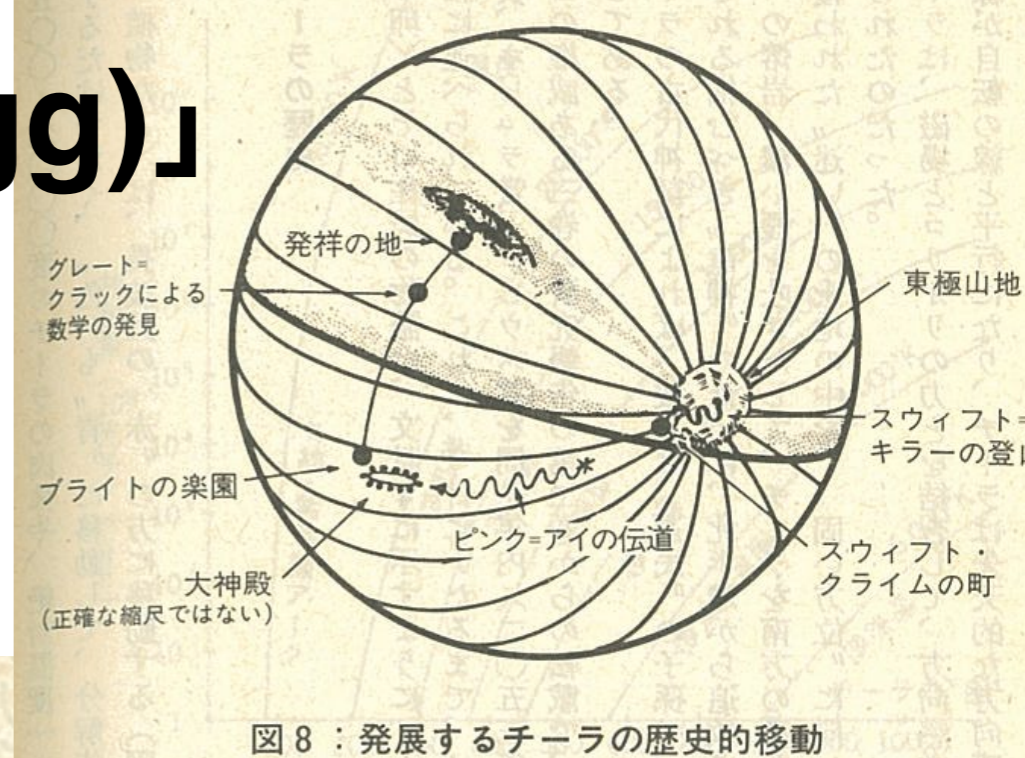
弱磁場

小説「竜の卵 (Dragon's Egg)」

R. L. Forward

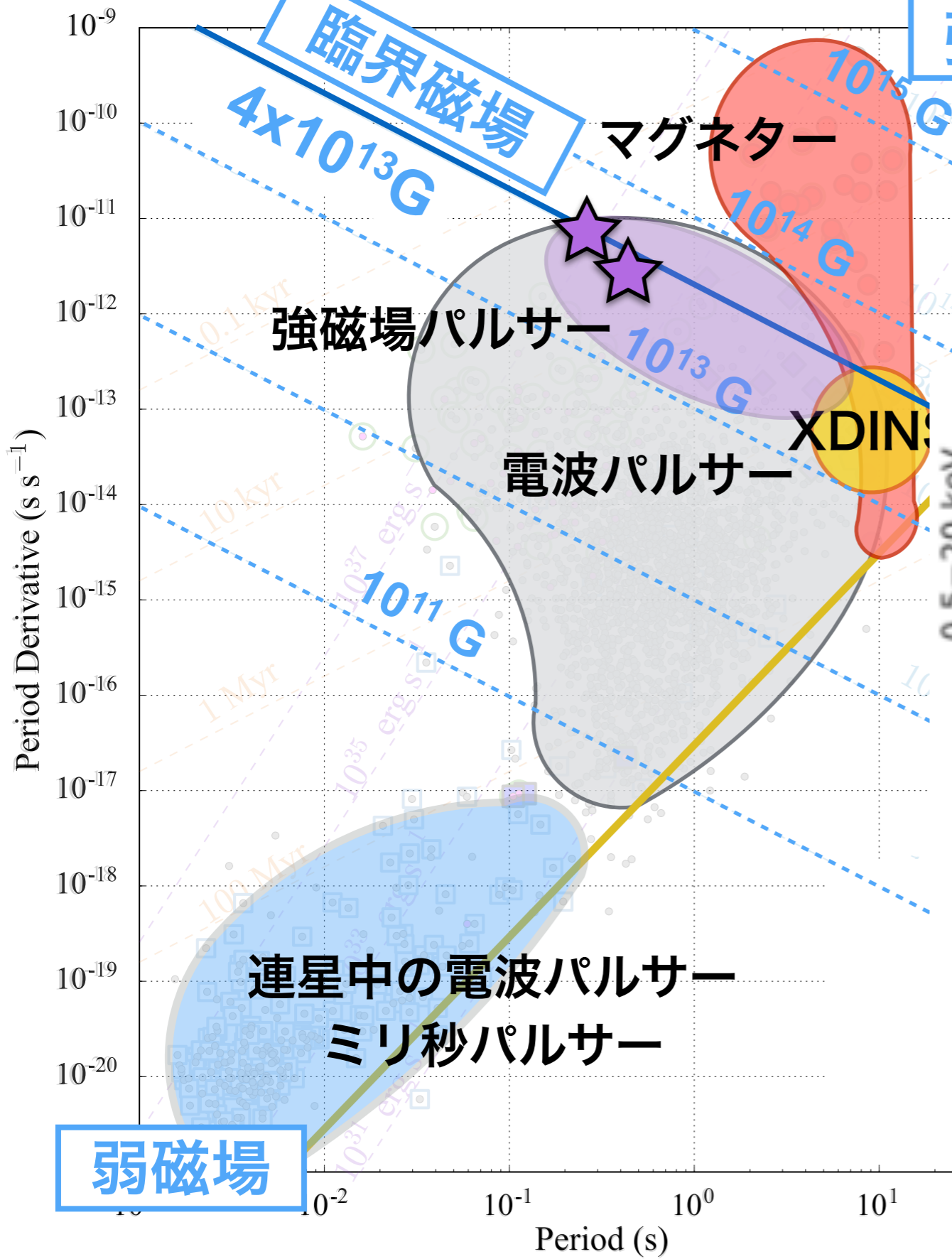
年に

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

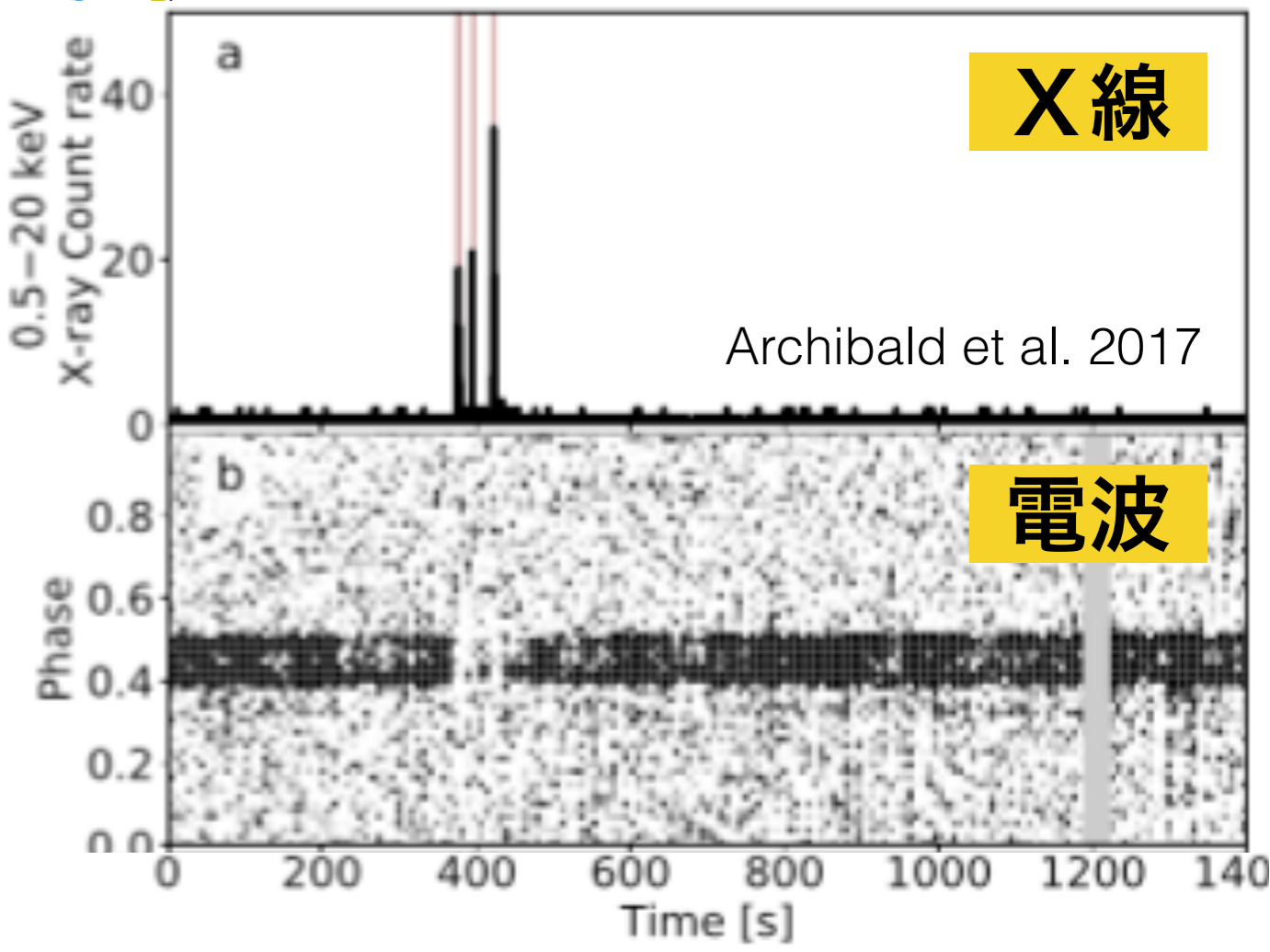


XDINSs は 100-300 pc と近いが、Dragon's Egg を彷彿とさせる。X線放射の弱いマグネターの末裔がまだ近傍に隠れている可能性は？

中性子星の種族たち：強磁場パルサー

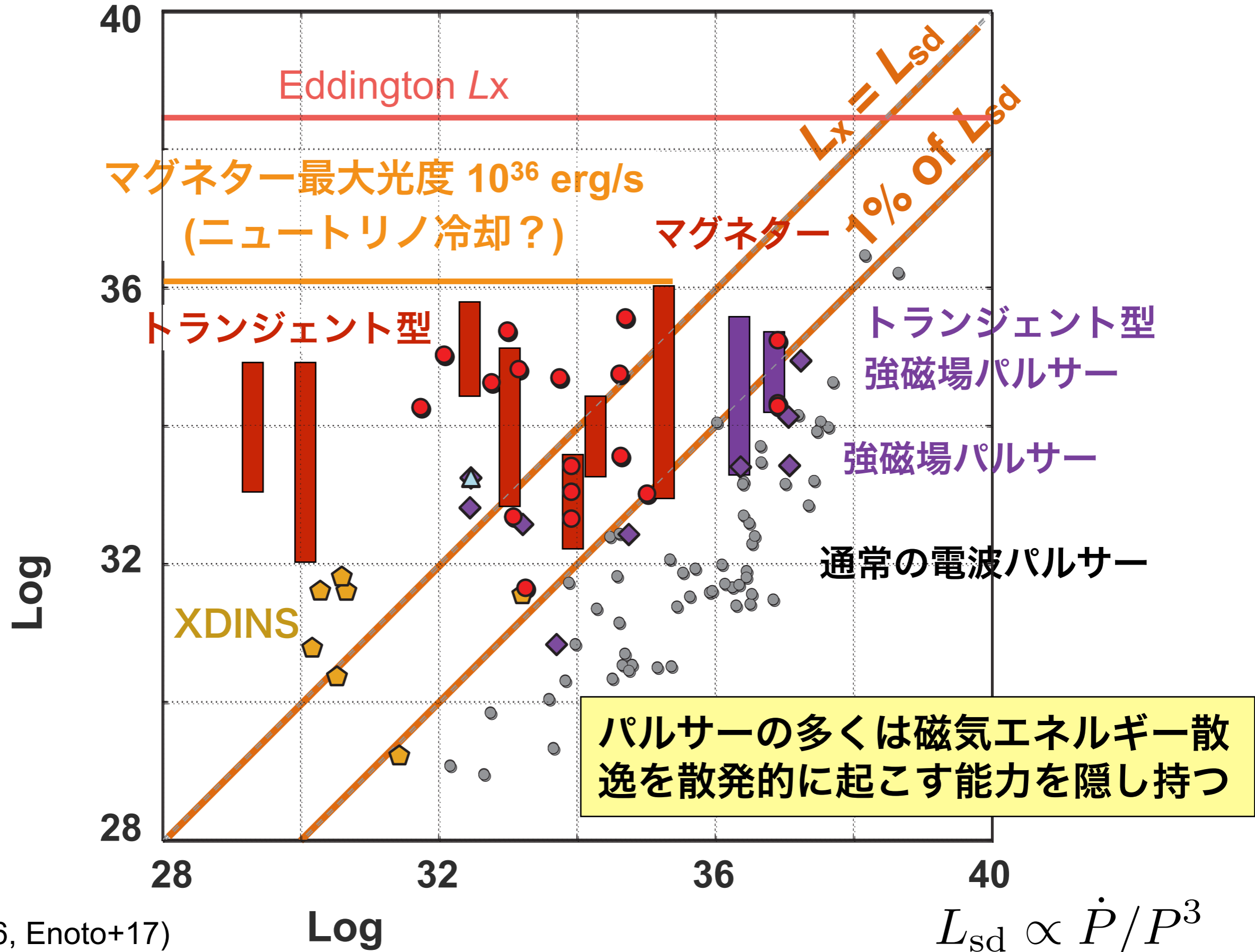


強磁場 マグネターと電波パルサーの中間的な磁場の天体。PSR J1119-6127 (2016年アウトバースト)など2天体は、通常は回転駆動型パルサーのように振舞うが、稀にマグネターの活動性を示す。



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？

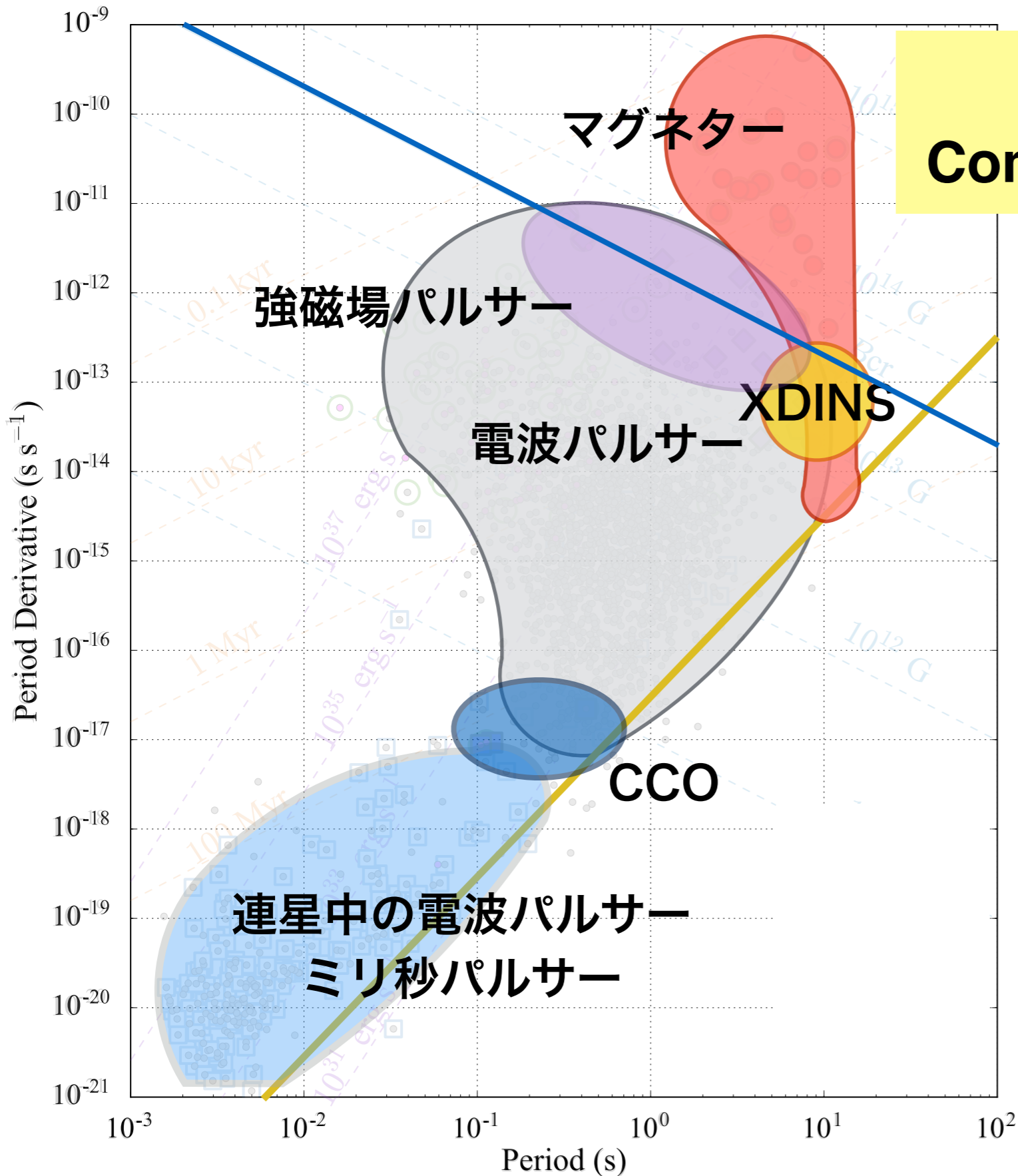
X線放射に現れる磁気エネルギー散逸



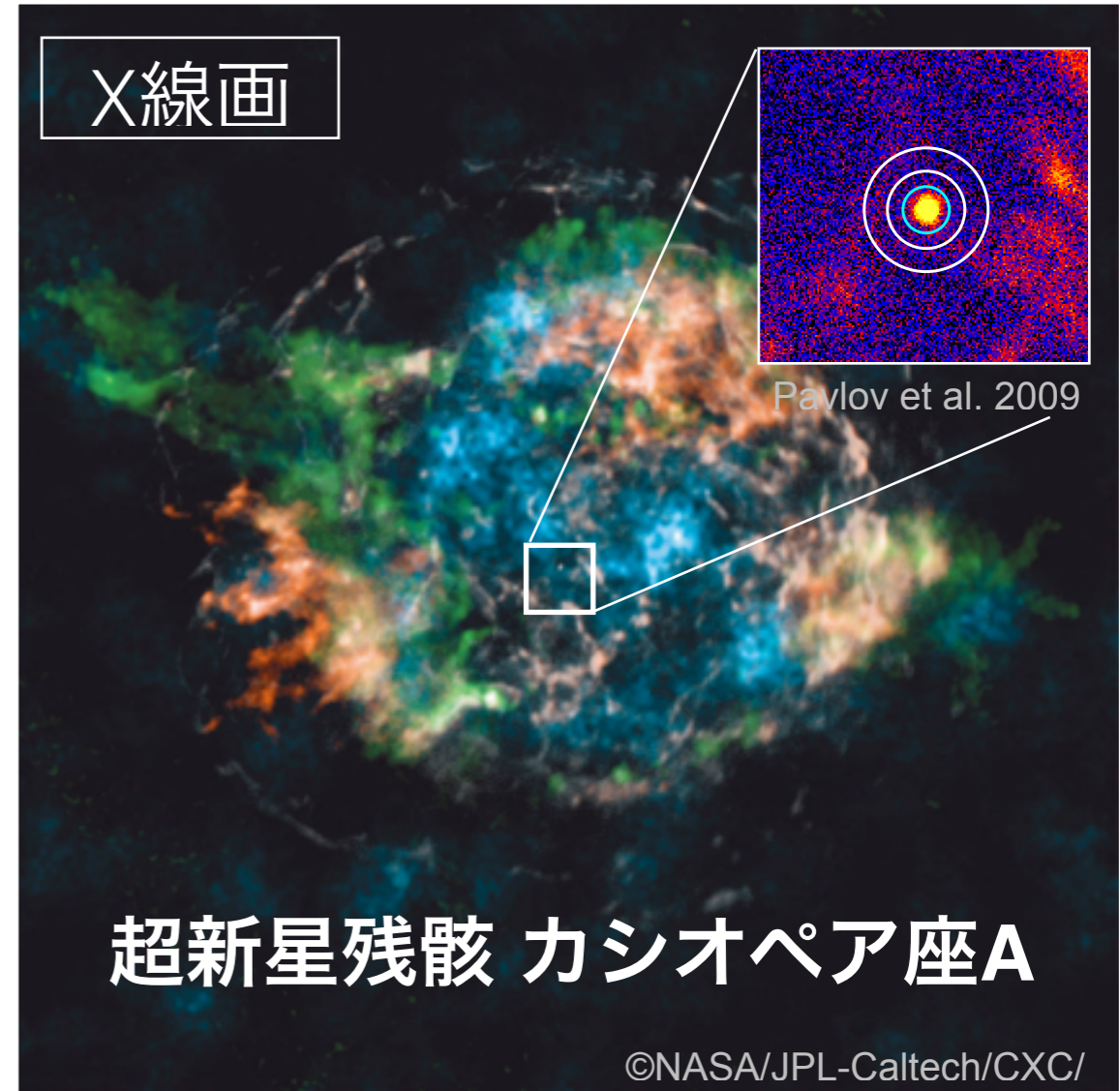
(Shibata+16, Enoto+17)

$$L_{sd} \propto \dot{P} / P^3$$

中性子星の種族たち: CCO

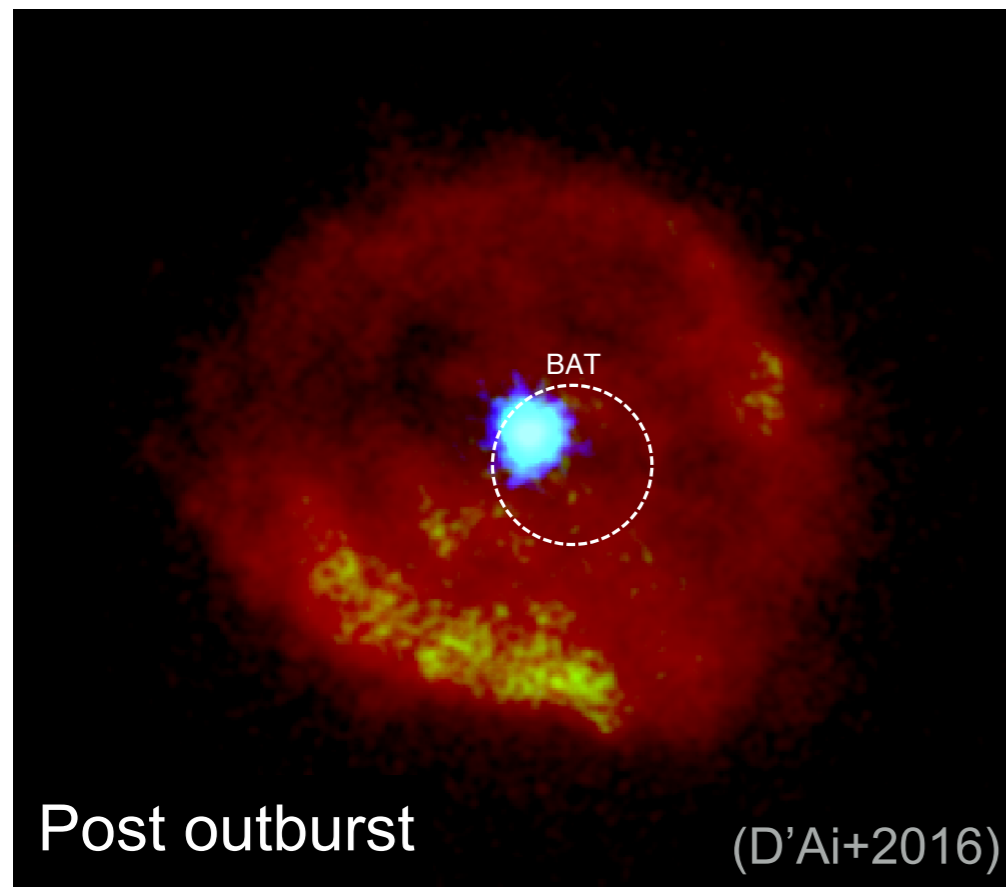
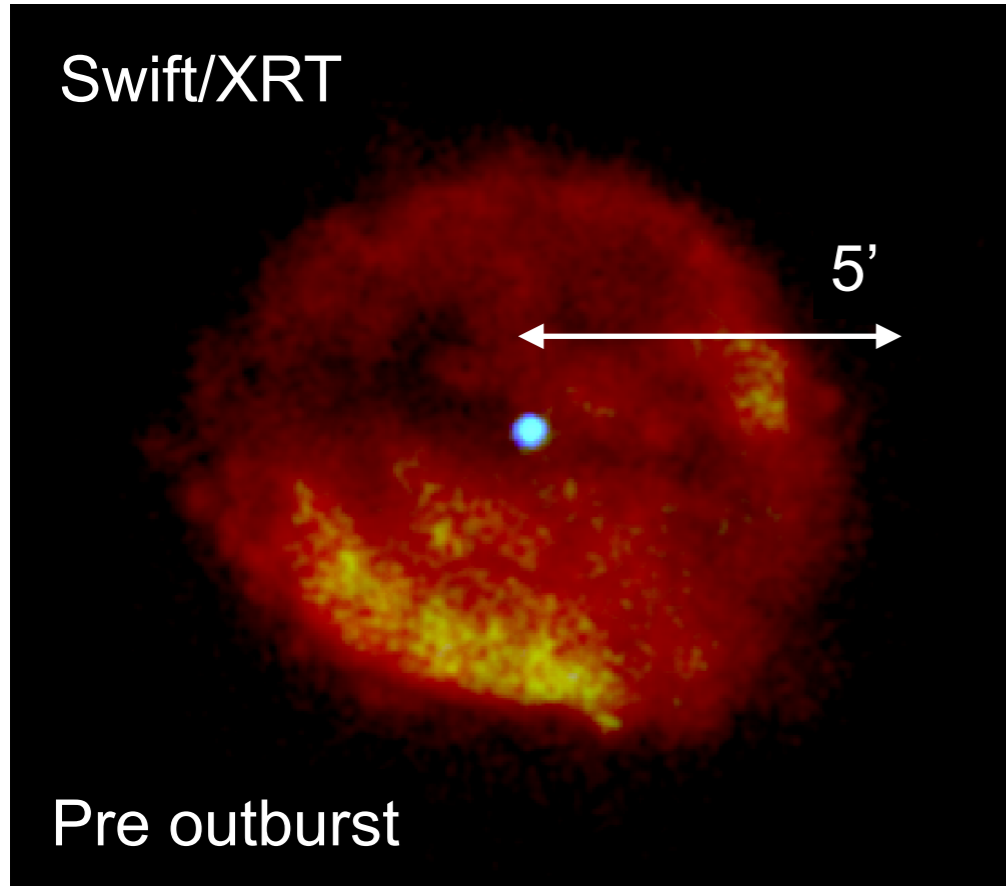


SNR中心の軟X線源
Compact Central Object (CCO)



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



- **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？**

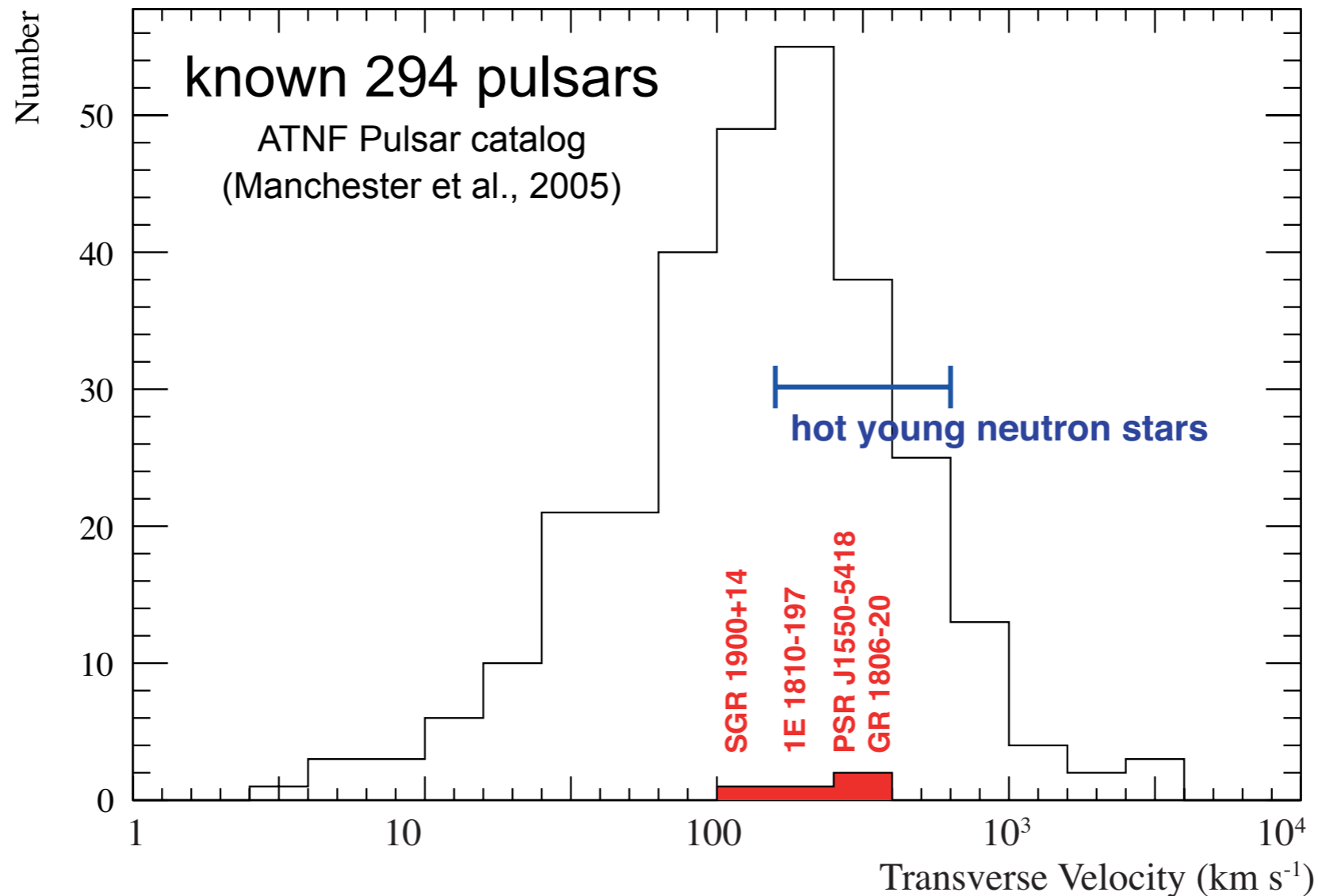
fall-back disk により急速に減速がかかり、押し込められた磁場がマグネター活動を起こした？不明..

**弱磁場のはずの中性子星でも
マグネター的な磁気活動？**

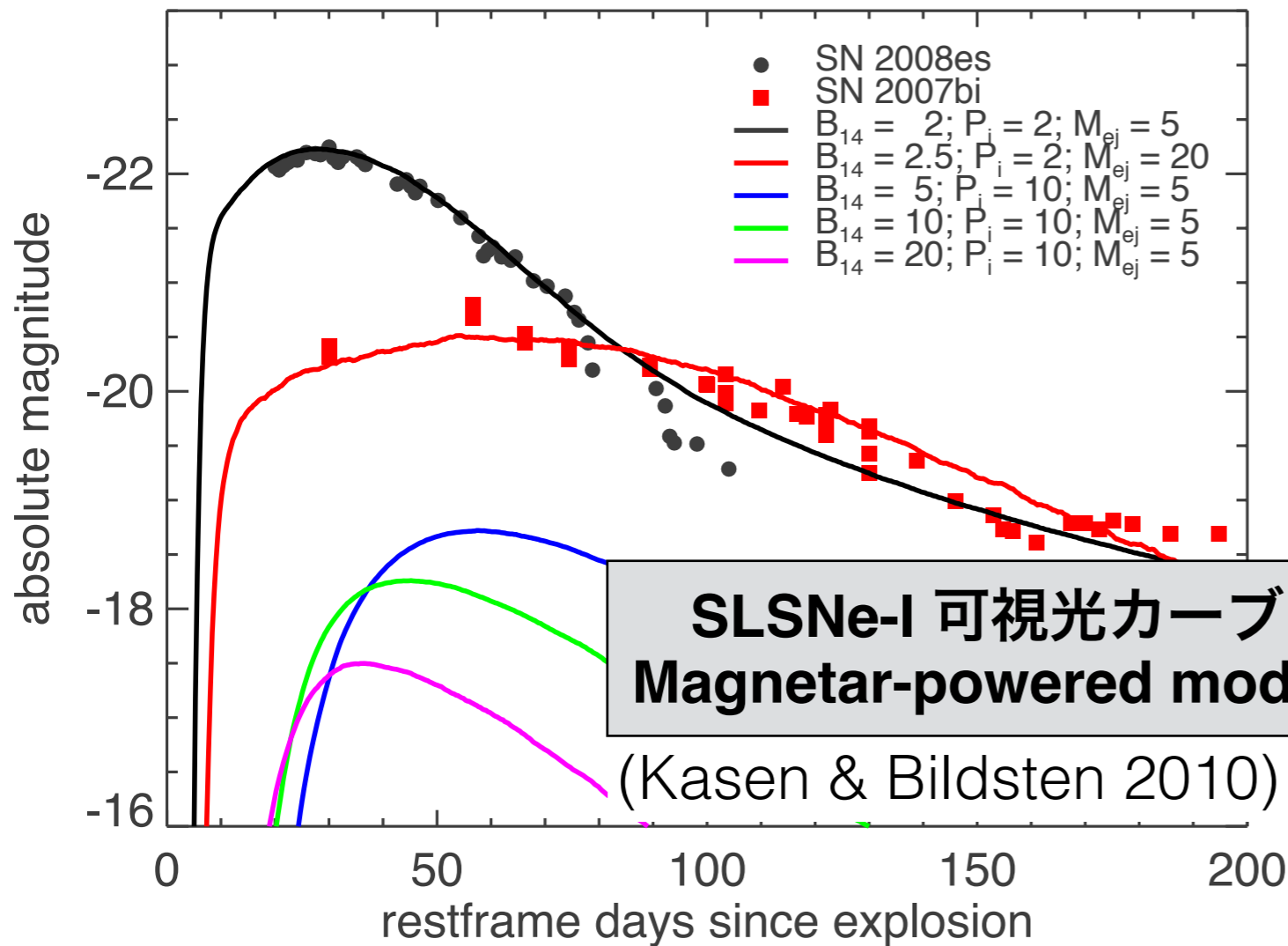
多様なNSを生む超新星爆発に違いがあるのか？

- 高速回転する原始中性子星 ($P_i \sim 1-3$ ms) がダイナモで磁場増幅？ (Duncan & Thompson 1992)
 - 回転エネルギー $E_{\text{rot}} \sim 1/2 I \Omega^2 \sim 3 \times 10^{52} (P/1\text{ms})^{-2}$ の大部分が超新星爆発へ？？
- マグネターに付随する超新星残骸のX線プラズマ診断から、
 - 爆発エネルギーは古典的な重力崩壊型超新星 ($\sim 10^{51}$ erg) と大差ない。
 - 母天体 (progenitor) の質量はやや重いと指摘されている。
- マグネターのキック速度も他の中性子星と観測的に大差ない。

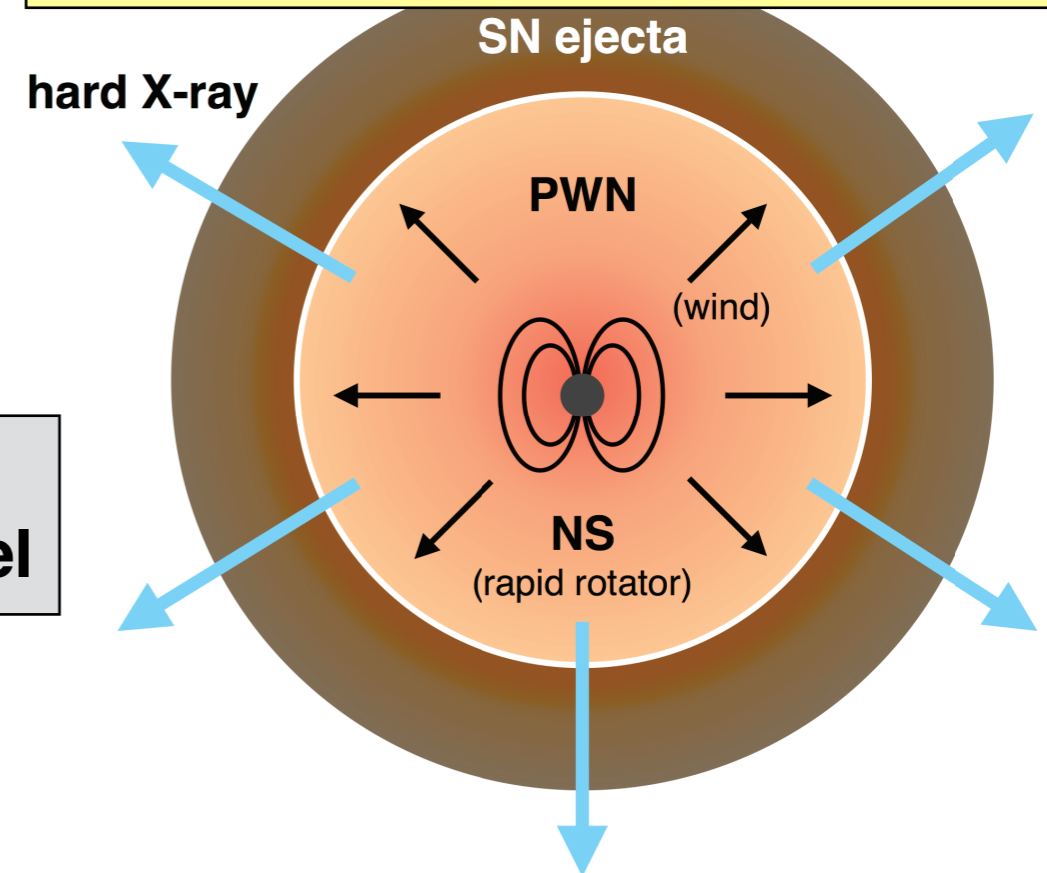
Arons+03, Allen+04,
Sasaki+04, Figer+05,
Gaensler+05, Vink
and Kuiper+06, Muno
+06, Bibby+08, Leahy
& Tian 08, Davies+09,
Ritchie+10, Kumar
+14, Uchida+15,
Nakano+16



明るい超新星にマグネターが隠れているか？



新生マグネターのスピンドウン
エネルギーがエジェクタに注入

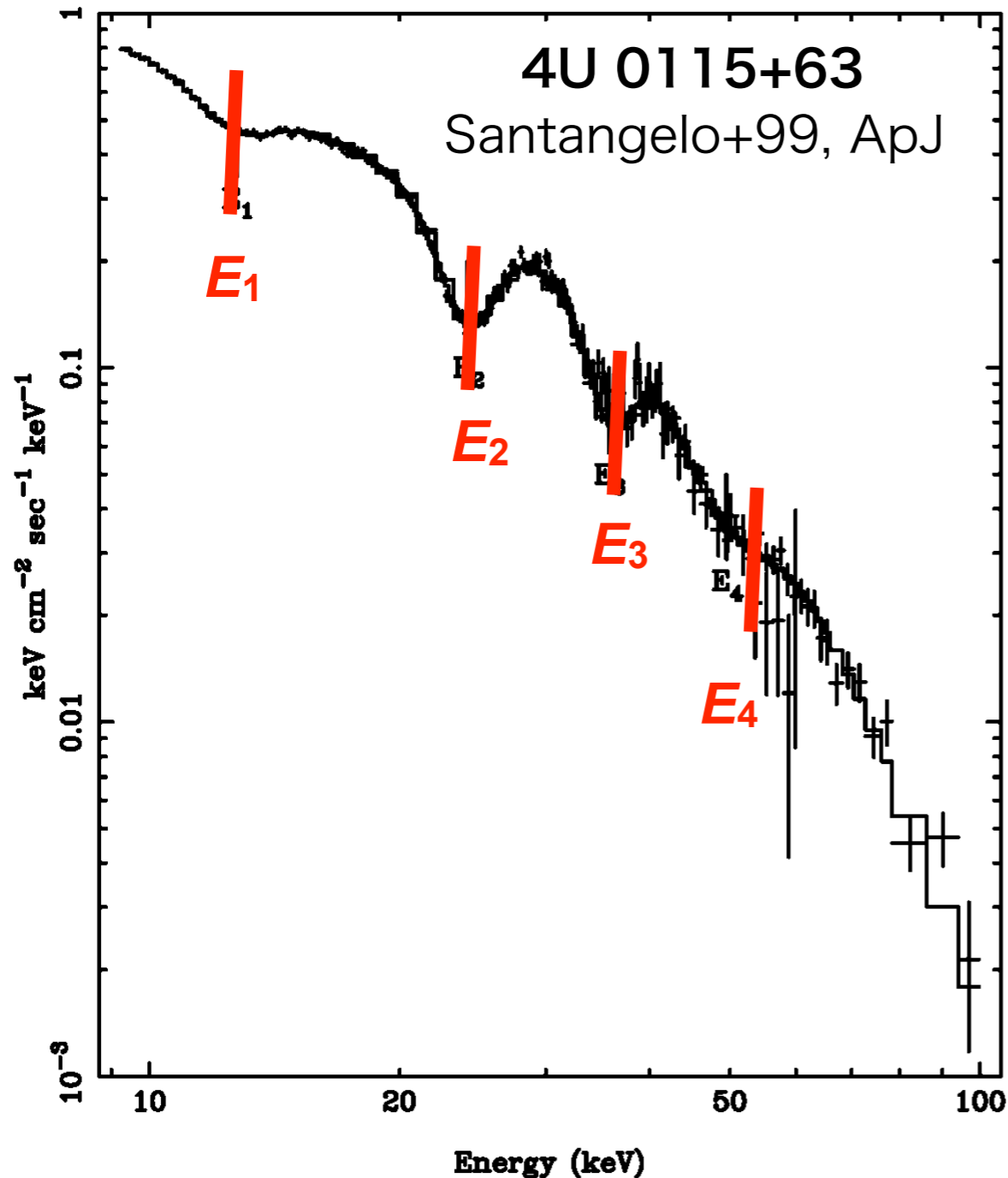


- 典型的な重力崩壊型超新星より $\sim 10-100$ 倍も明るい Superluminous Supernovae (SLSNe) の一部では、超新星の可視光ライトカーブは高速回転する新生マグネターのエネルギー注入で説明？ (Metzger+2014)
- マグネターの生成率($\sim 10\%$?) を説明するには、SLSNe-I などでは足りず通常の SN Ibc にもマグネターが隠れているか？ 実際、 $P_i > 10$ ms で $B > 5 \times 10^{14}$ G のマグネターが SN Ibc にいるという指摘も (Kashiyama+2016)

連星のX線パルサーにマグネターはいるか？

Cyclotron Resonance Scattering Feature (CRSFF)

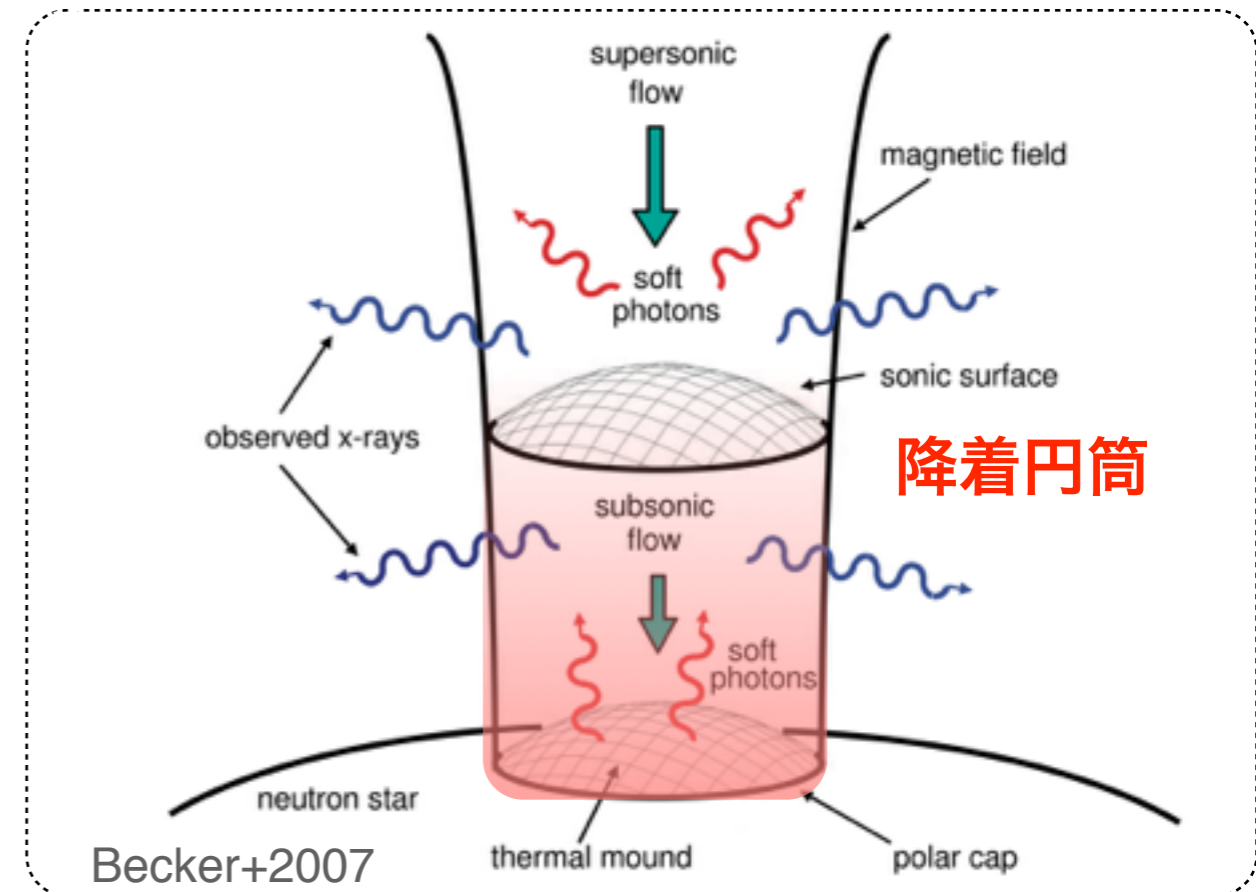
約20天体から検出



重力エネルギー

$B \sim 10^{11-12} \text{ G}$

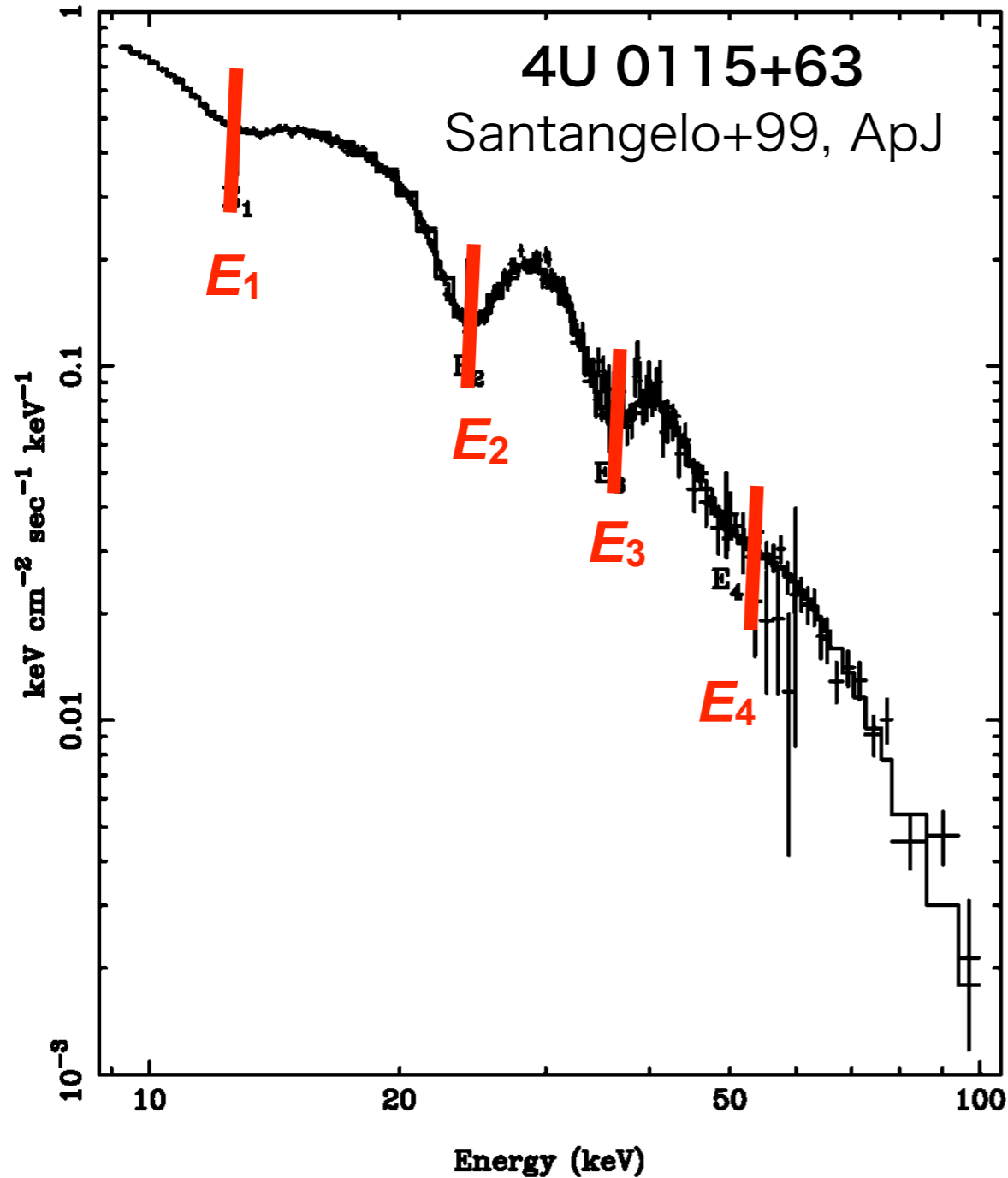
大質量X線連星
(HMXB)



連星のX線パルサーにマグネターはいるか？

Cyclotron Resonance Scattering Feature (CRSFF)

約20天体から検出

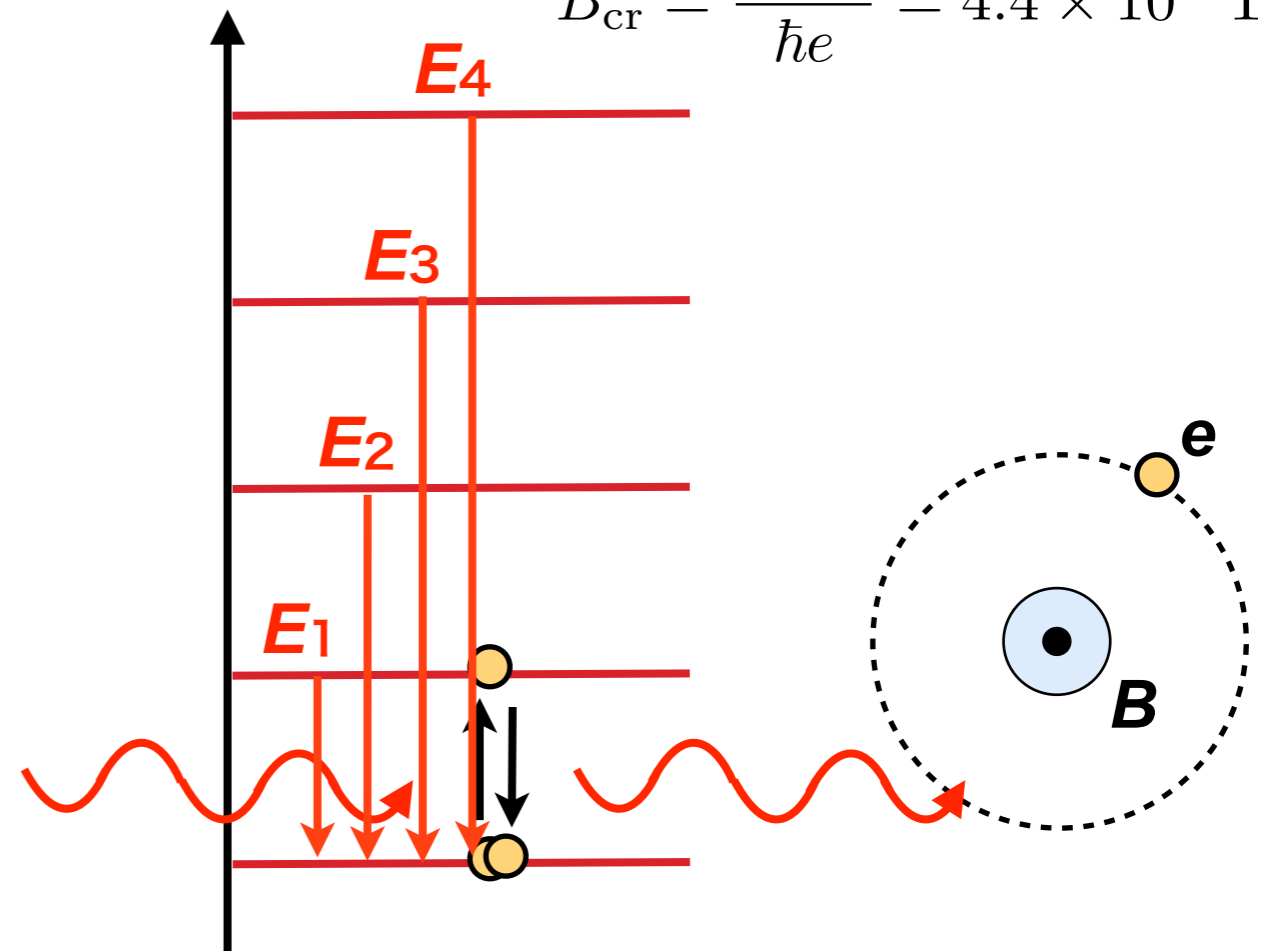


磁場中の電子

$$E_n = n\hbar\omega_c = m_e c^2 \frac{B}{B_c} \cdot n$$

$$E_n \sim 11 \text{ keV for } B=10^8 \text{ T}$$

$$B_{\text{cr}} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.4 \times 10^9 \text{ T}$$

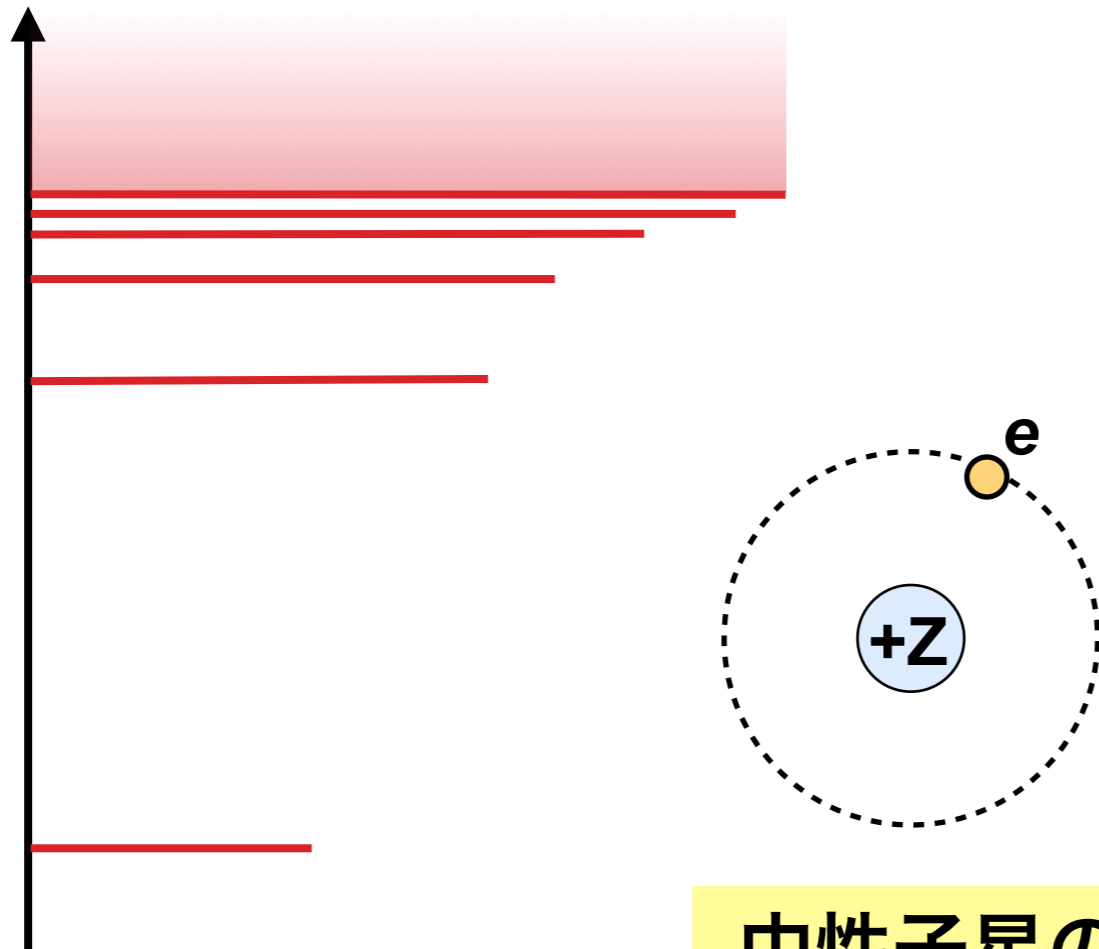


連星のX線パルサーにマグネターはいるか？

原子に束縛された電子

$$E_n = -\frac{\alpha^2}{2} m_e c^2 \cdot \frac{Z^2}{n^2}$$

$$E_n \sim 13.6 \text{ eV for H (Z=1)}$$
$$7 \sim 9 \text{ keV for Fe (Z=26)}$$

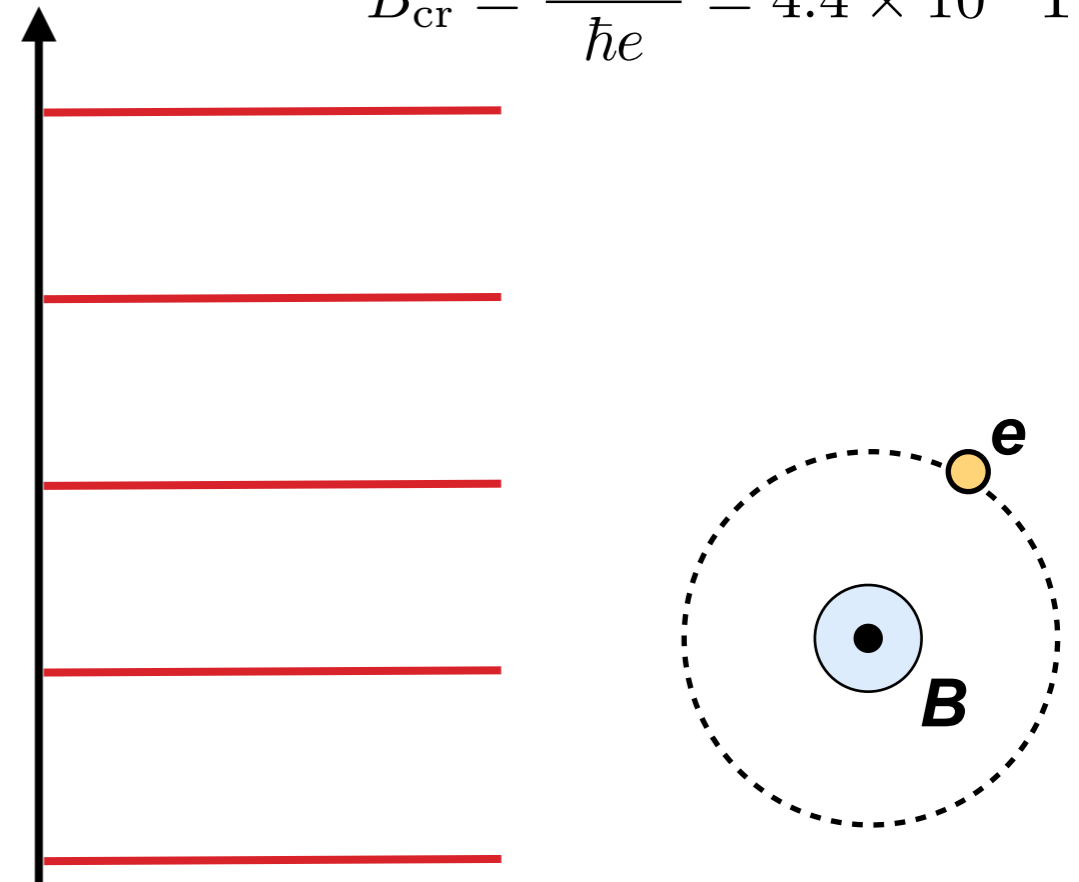


磁場中の電子

$$E_n = n \hbar \omega_c = m_e c^2 \frac{B}{B_c} \cdot n$$

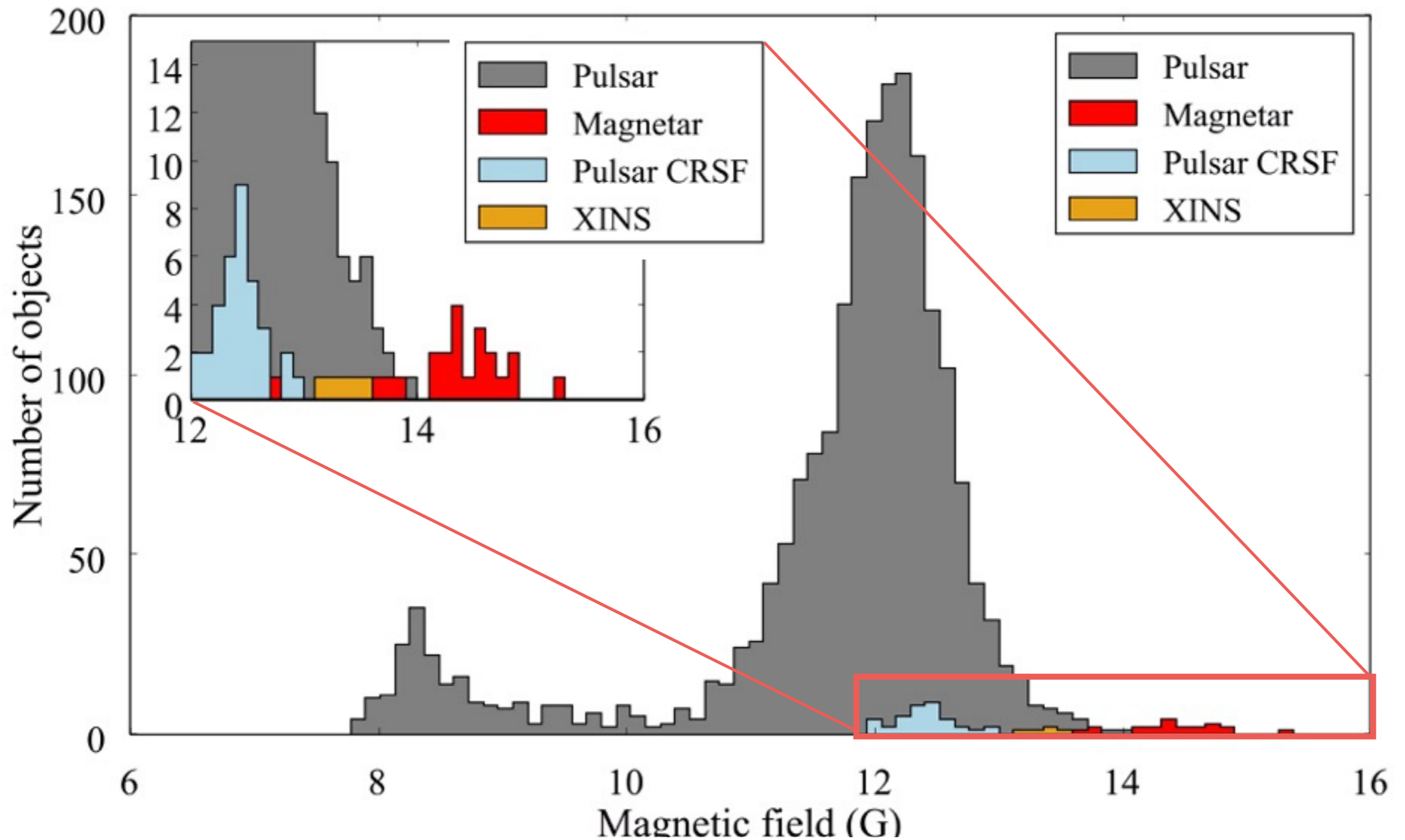
$$E_n \sim 11 \text{ keV for } B=10^8 \text{ T}$$

$$B_{\text{cr}} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.4 \times 10^9 \text{ T}$$



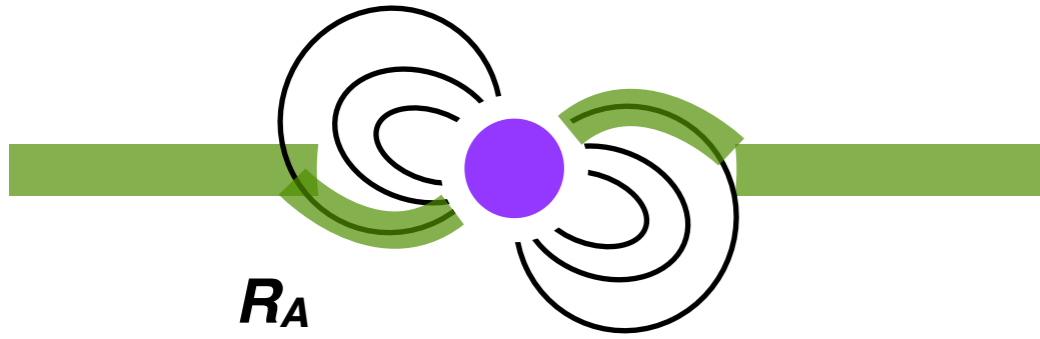
中性子星の磁場($B \sim 10^8 \sim 10^9$ T)の診断の有効な方法論

連星のX線パルサーにマグネターはいるか？

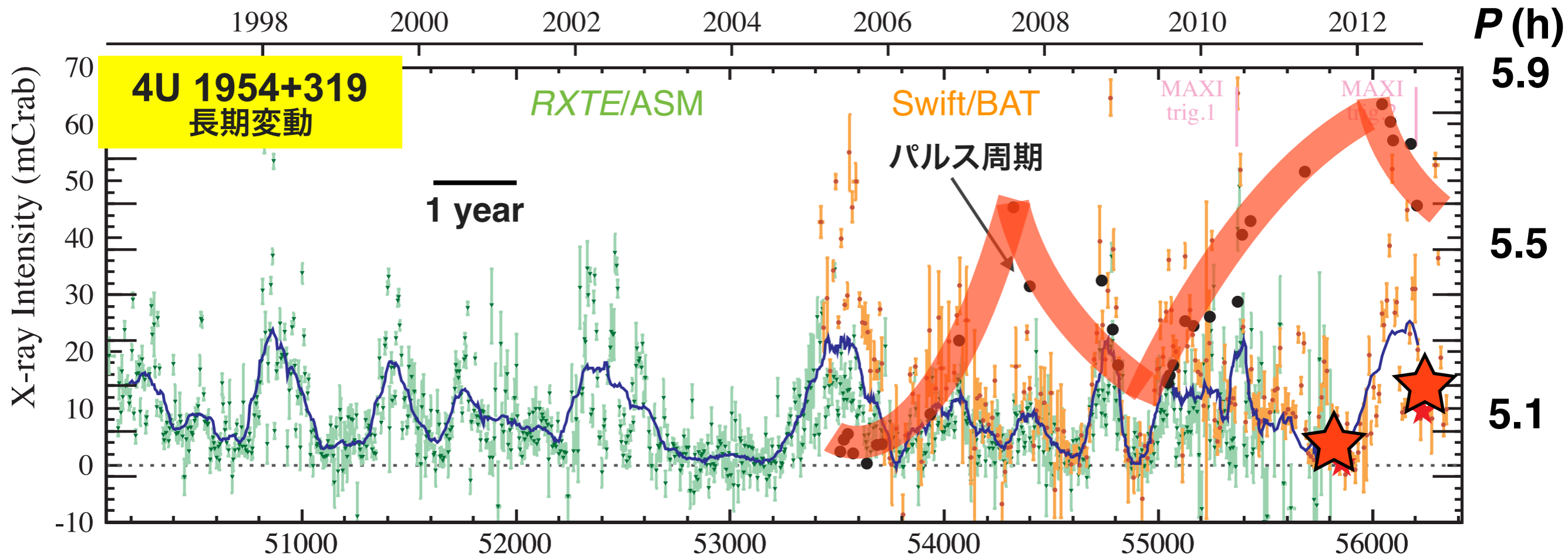


降着駆動型パルサーの電子サイクロトロン共鳴で、連星にあるマグネターはまだ見つかっていない (孤立天体での陽子サイクロトロン共鳴は報告あり)

長周期パルサーにはマグネターが隠れているか？



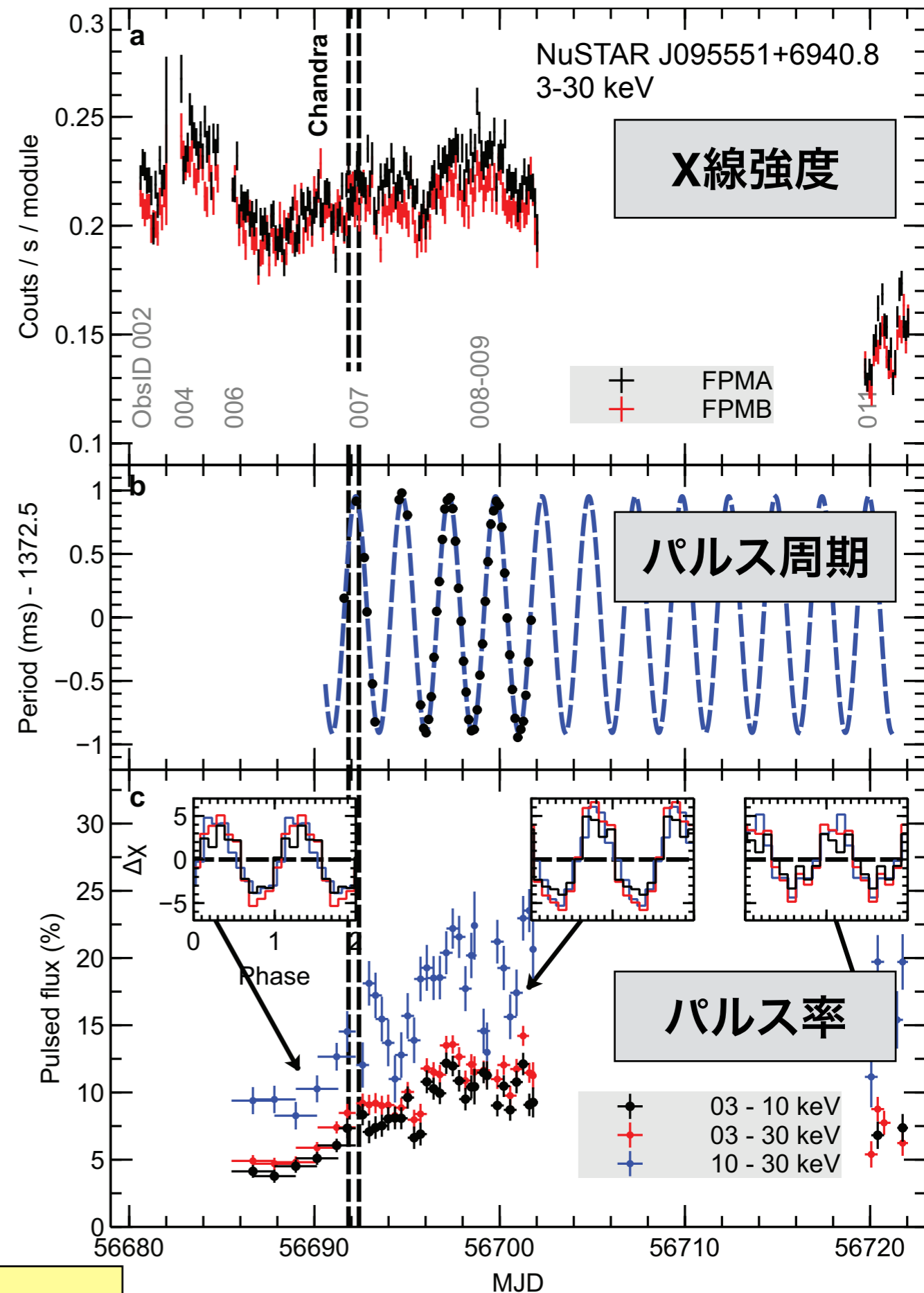
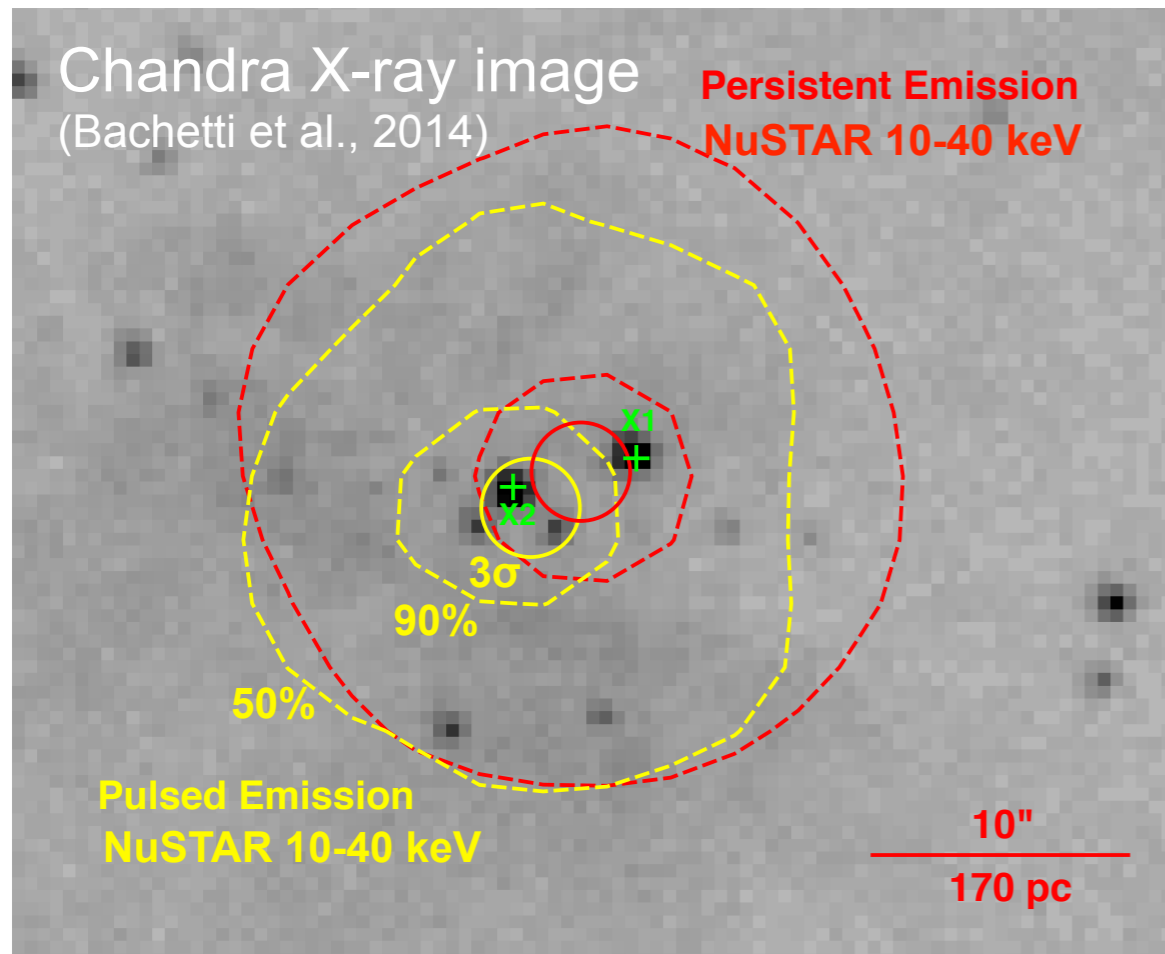
- 磁場が強いパルサーはアルフベン半径が大きくなり、ケプラー回転の速度が遅いためパルサーの自転周期は遅いと考えられる。
- 連星中のX線パルサー 4U 1954+319 はもっとも自転周期が遅く5時間！



詳細なX線観測の結果、球対象な星風降着で説明できると結論
ただし、M型巨星と(やや)強磁場の中性子星の共生X線連星は AIC で誕生？

ULX パルサー M82 X-2

- ULX (Ultra-luminous X-ray source)
近傍銀河の中心核からずれたエディントン光度を超えるX線源 ($L_x > 10^{39}$ erg s $^{-1}$)
- M82 X-2 (3.6 Mpc) から 2.5 日でドップラー変調した $P=1.37$ s のパルスX線を検出した! → ULXに磁場は強い NS が!

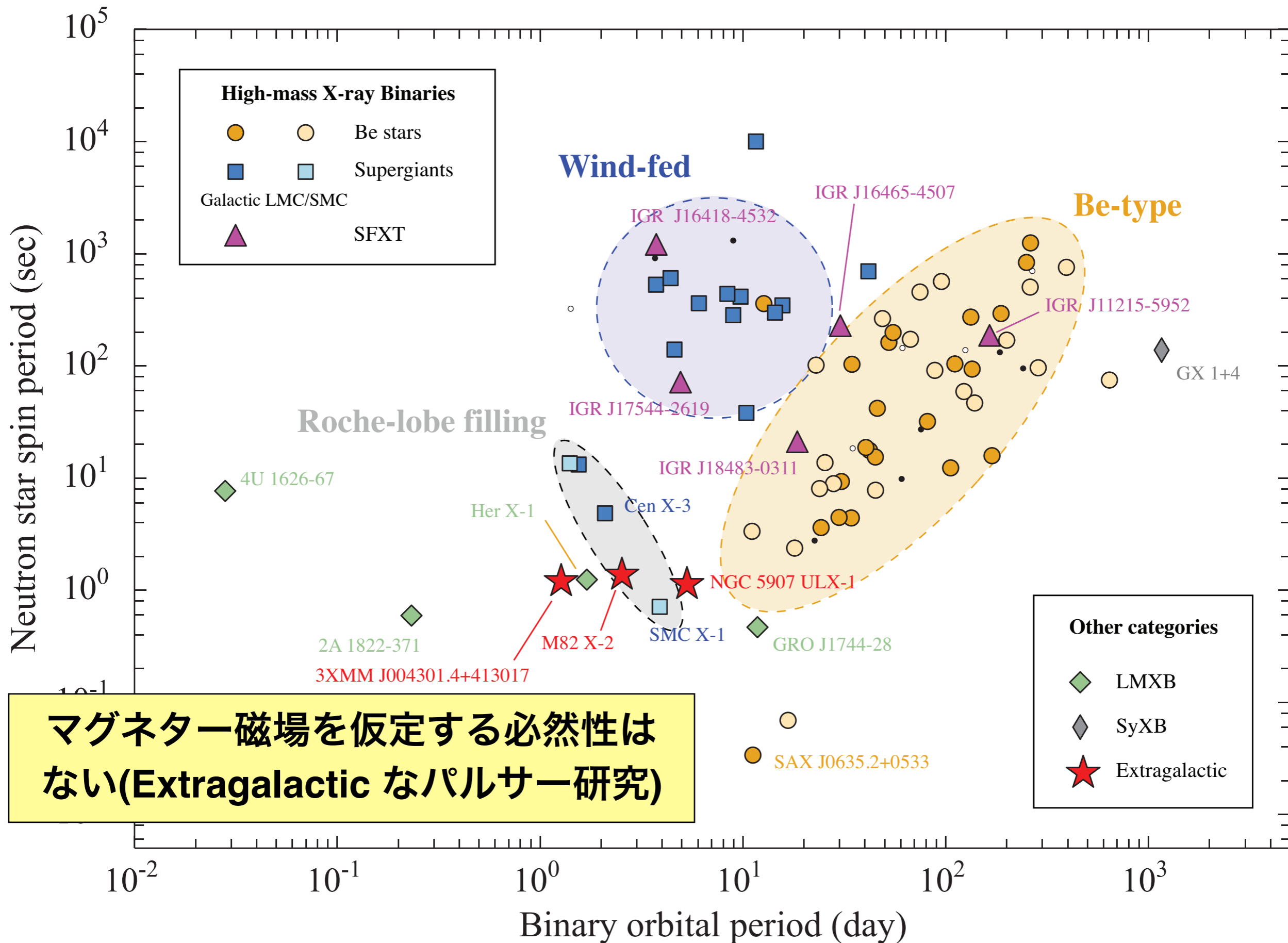


$L_x = 1.8 \times 10^{39}$ erg s $^{-1}$ (total, 0.3-10 keV)

$L_x = 4.9 \times 10^{39}$ erg s $^{-1}$ (pulsed, 3-30 keV)

Bachetti et al., Nature, 2014

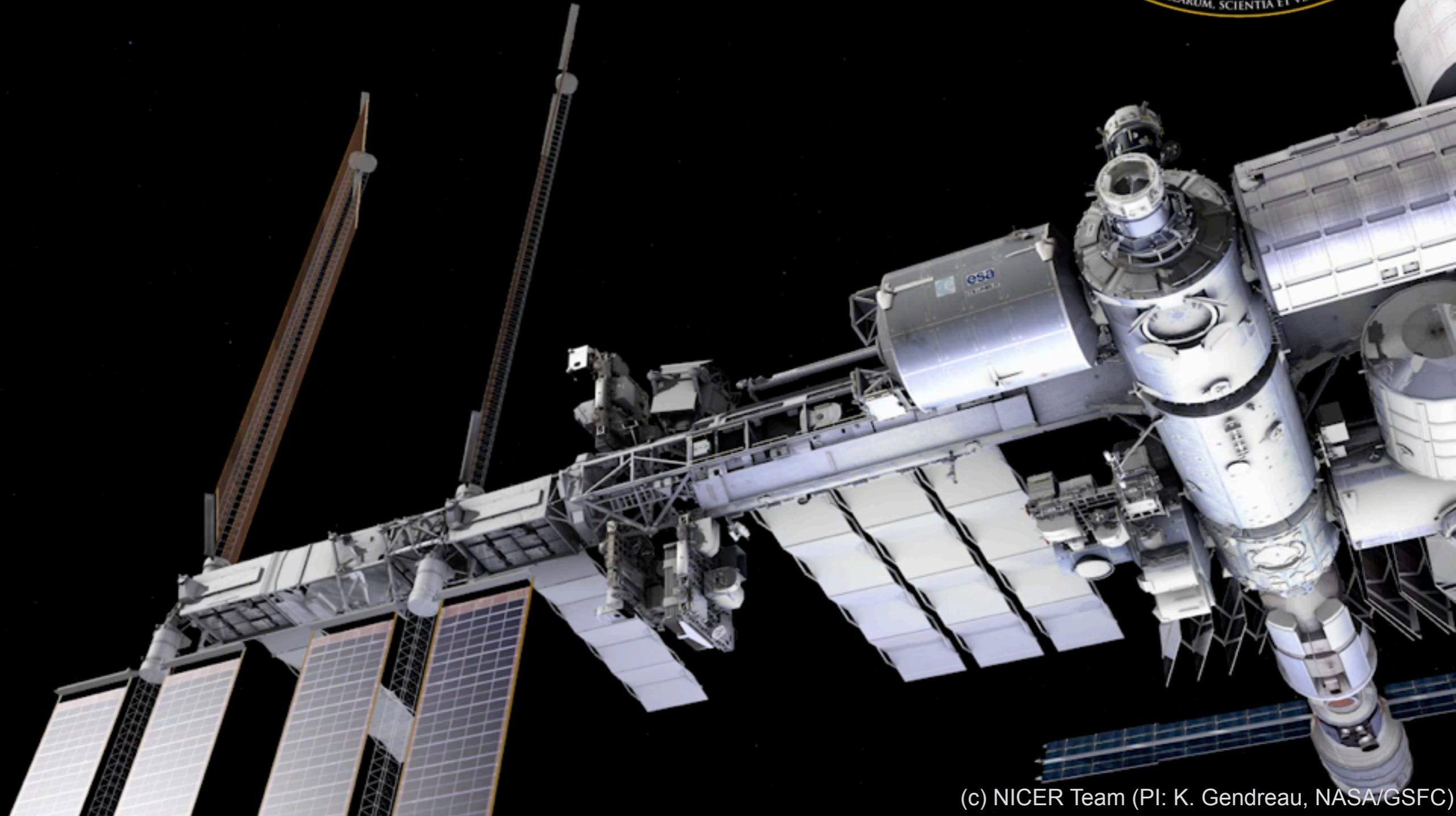
ULX の磁場は？ 古典的なX線連星と比べると？



マグネター磁場を仮定する必然性はない(Extragalactic なパルサー研究)

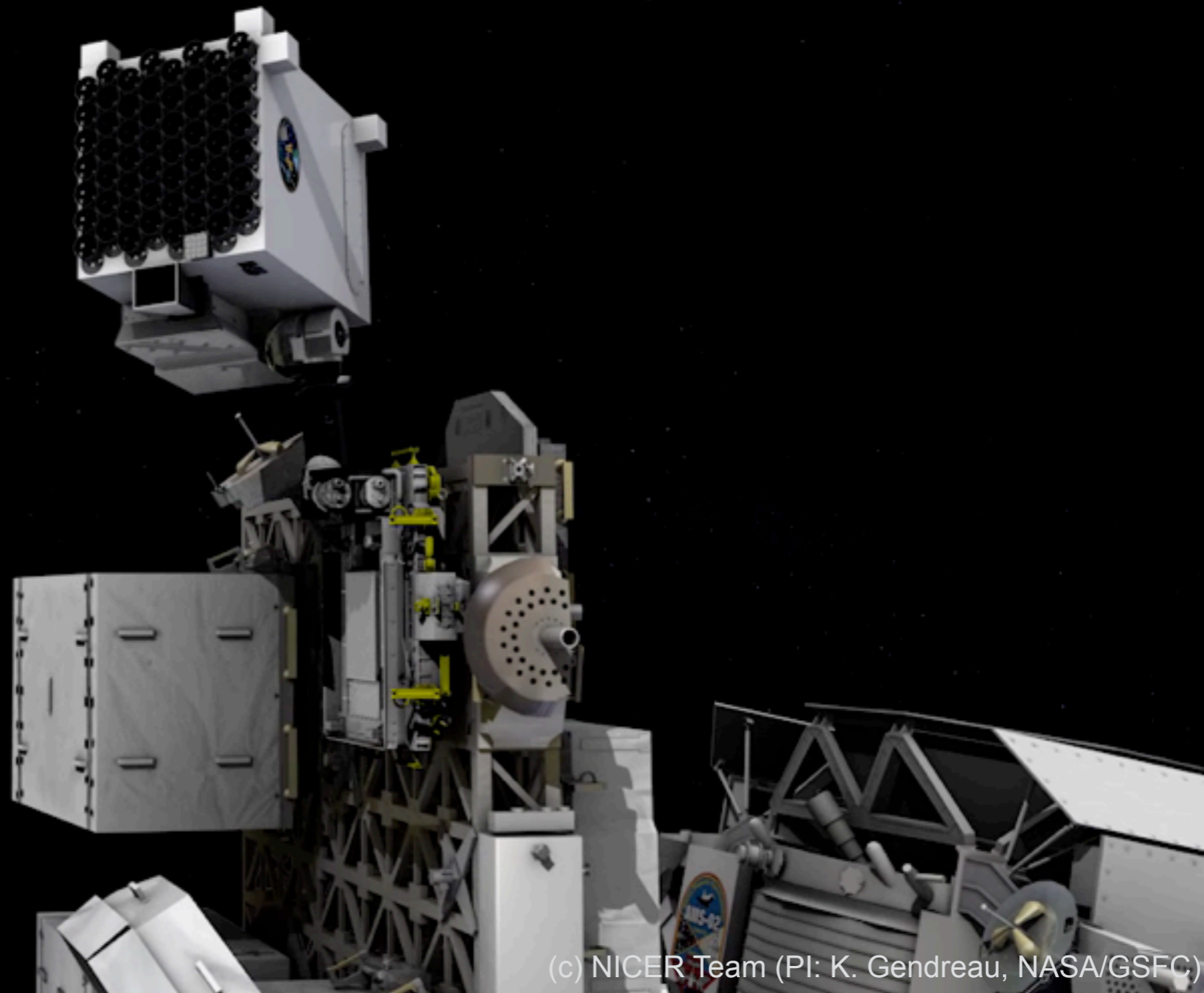
Neutron star Interior Composition ExploreR

- **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

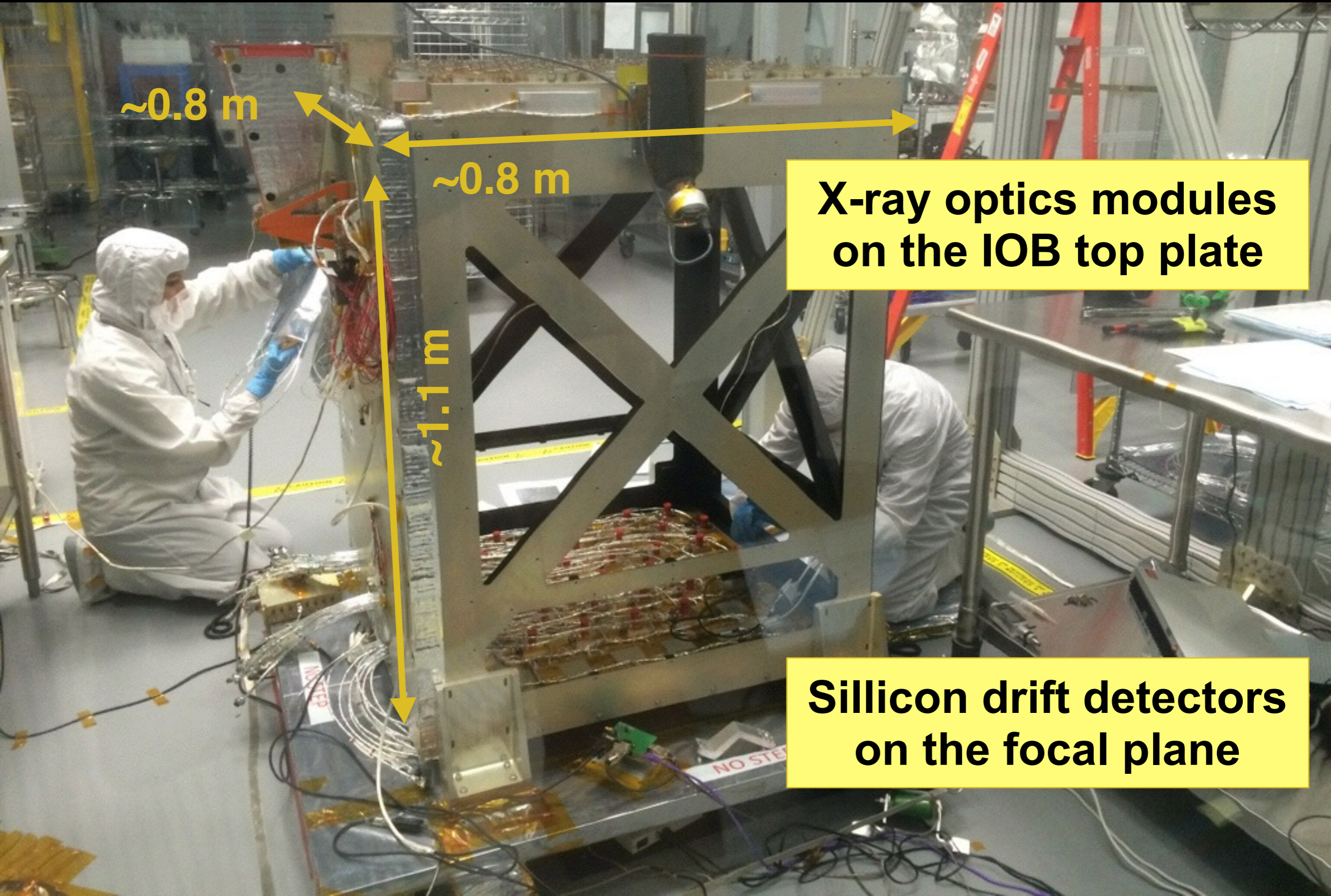


Neutron star Interior Composition ExploreR

- **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



~0.8 m

~0.8 m

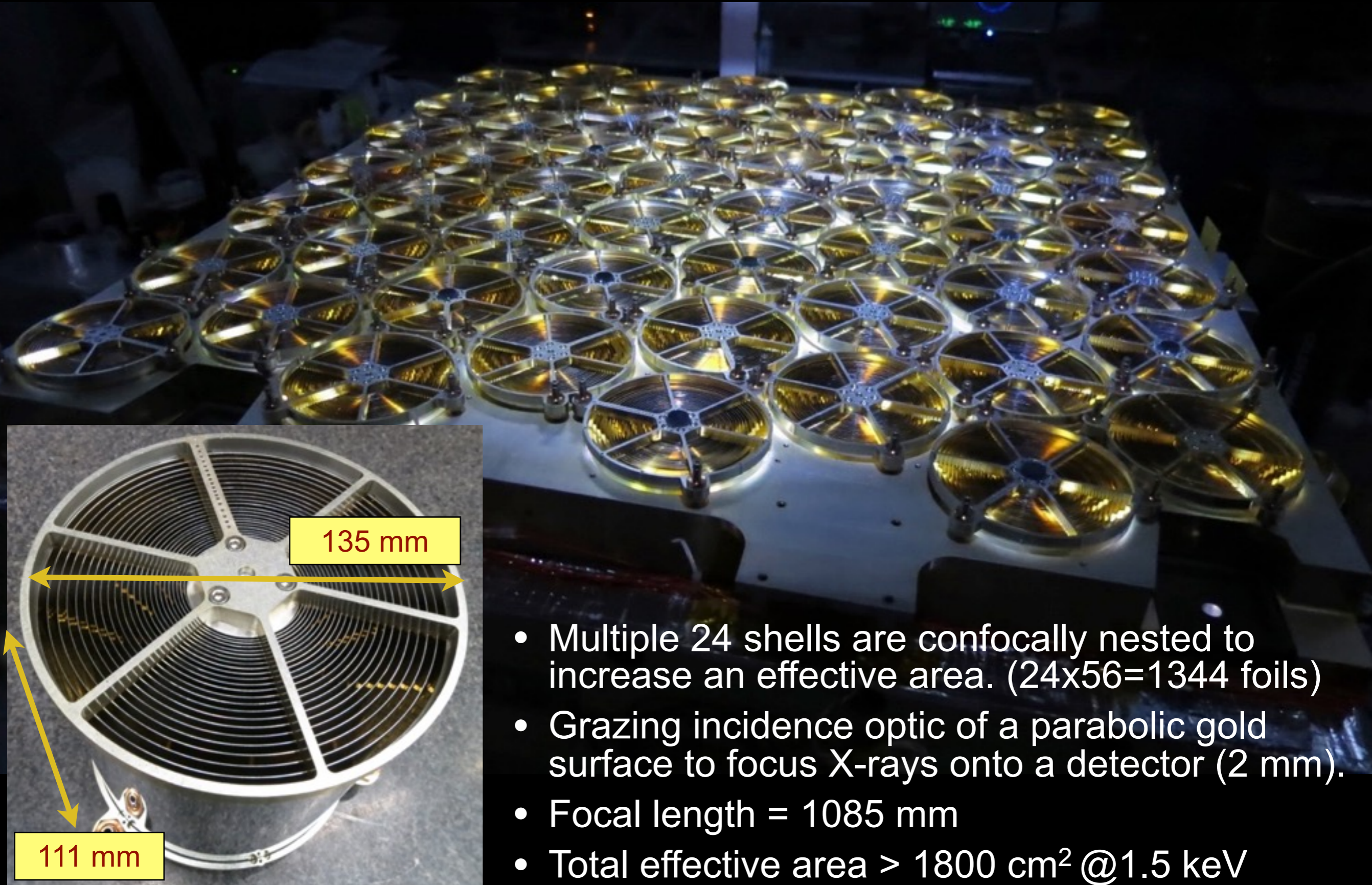
~1.1 m

**X-ray optics modules
on the IOB top plate**

**Sillicon drift detectors
on the focal plane**

X-Ray Concentrator optics (XRC)

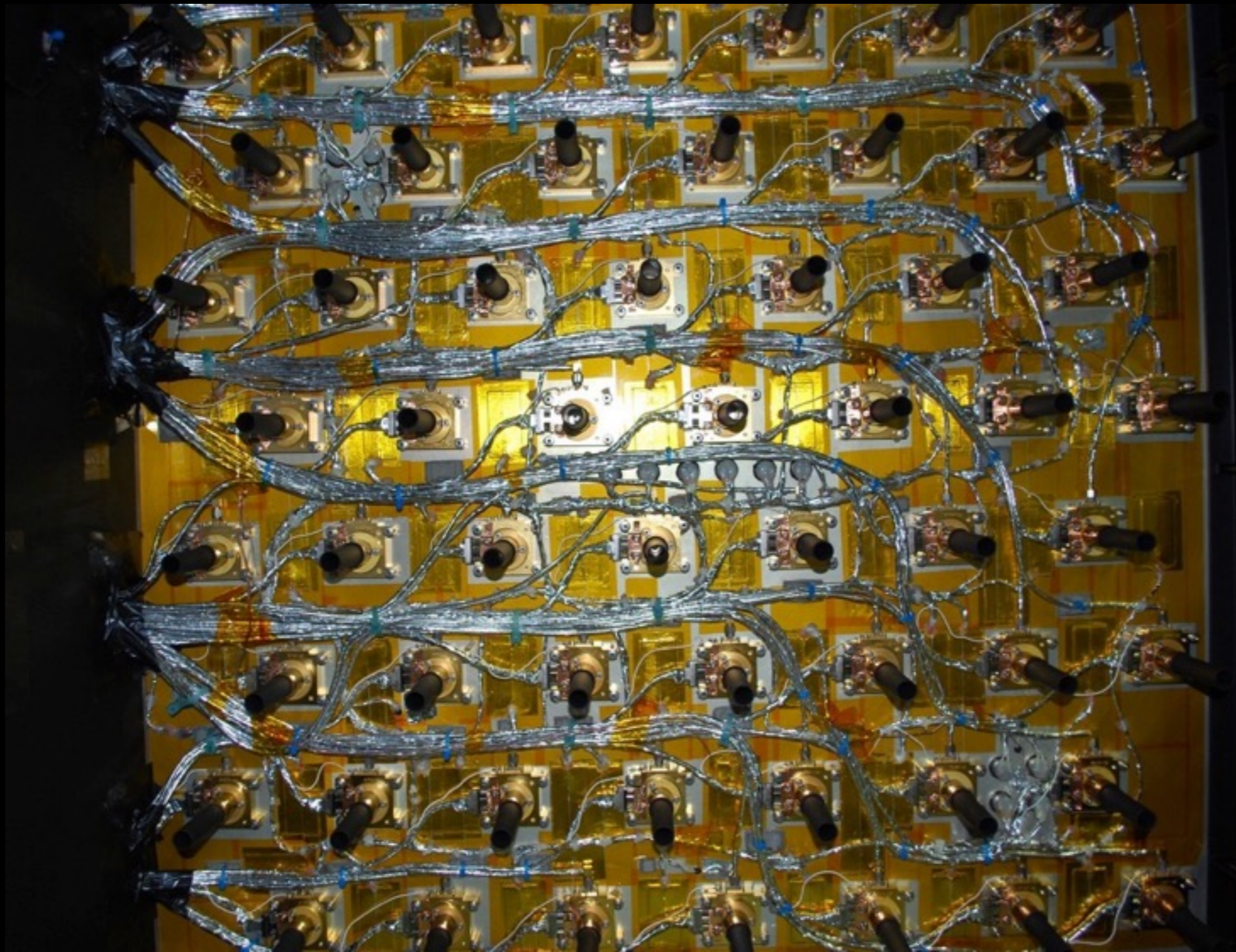
Single reflection, grazing-incidence nested gold-coated Al foils



- 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 $> 1800 \text{ cm}^2 @ 1.5 \text{ keV}$

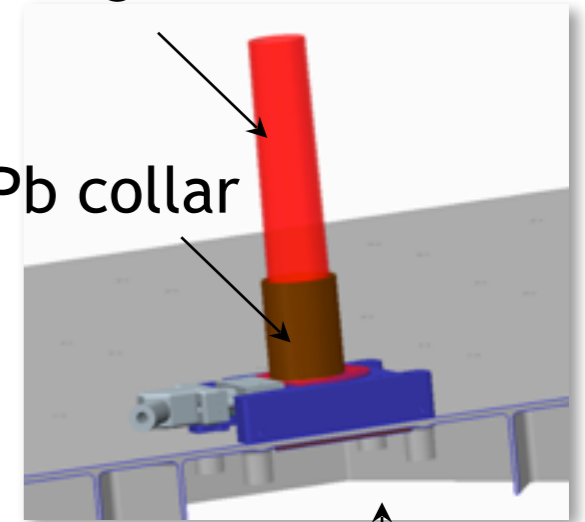
Silicon Drift Detectors (SDDs)

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

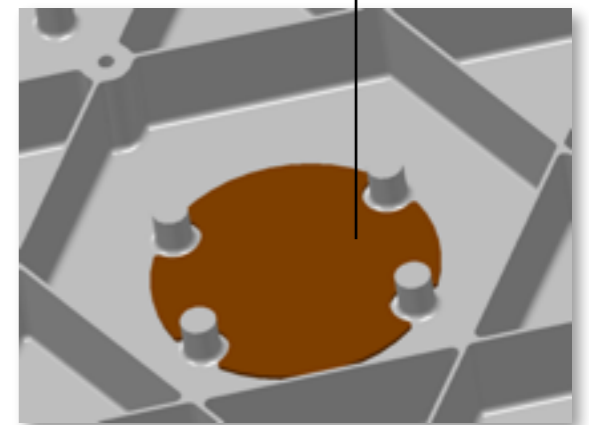


*Radiation
shielding*

Au/Ag “traffic cone”



Pb disk



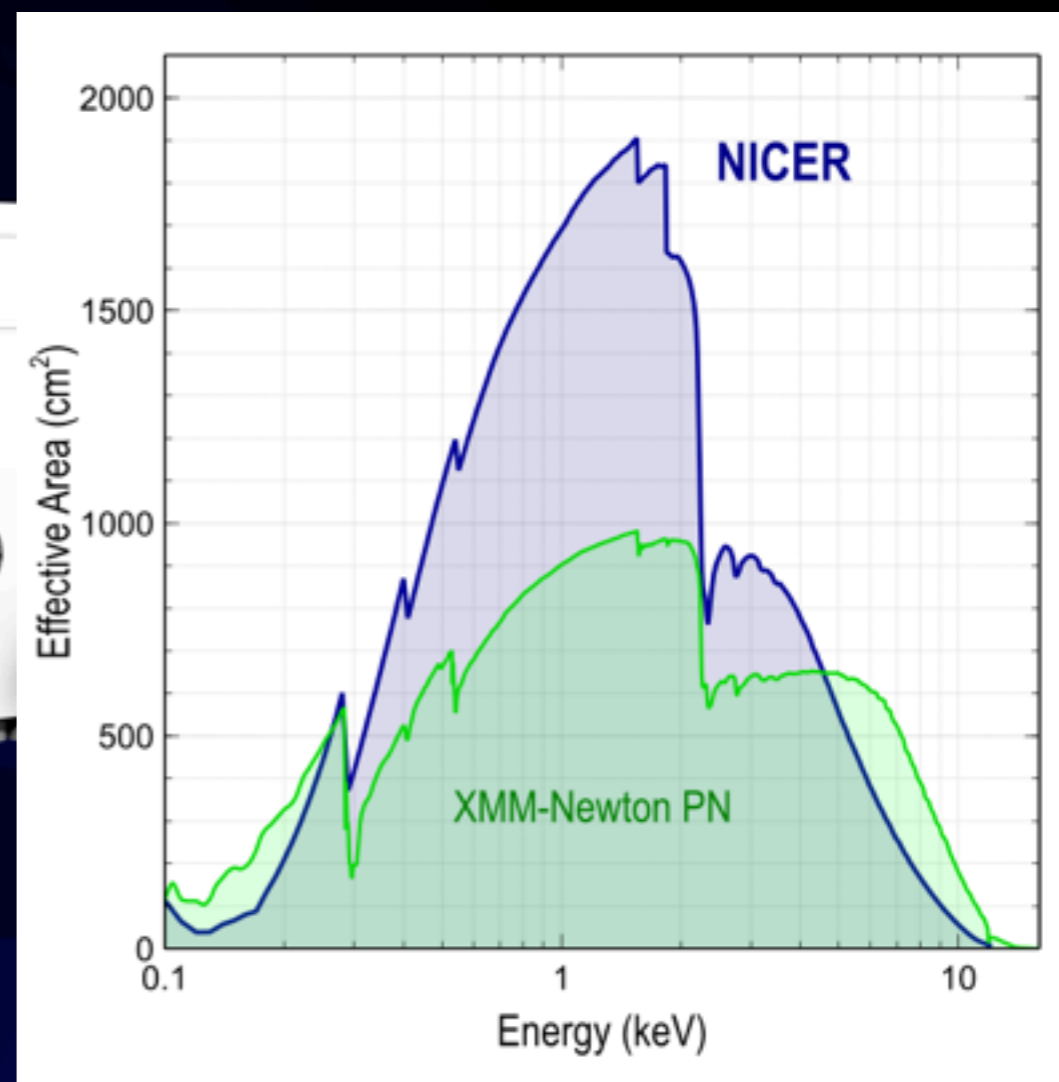
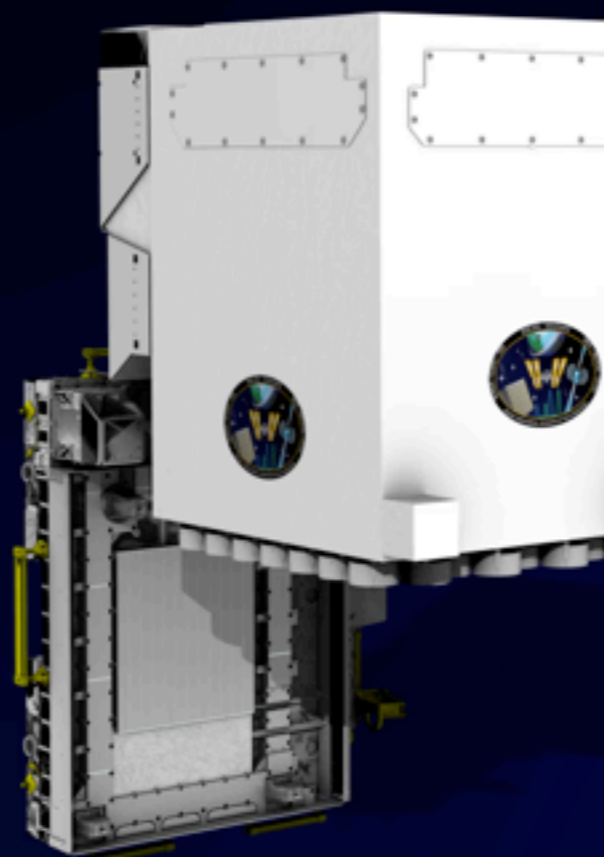
NICER

Neutron Star Interior Composition Explorer

(c) NICER Team

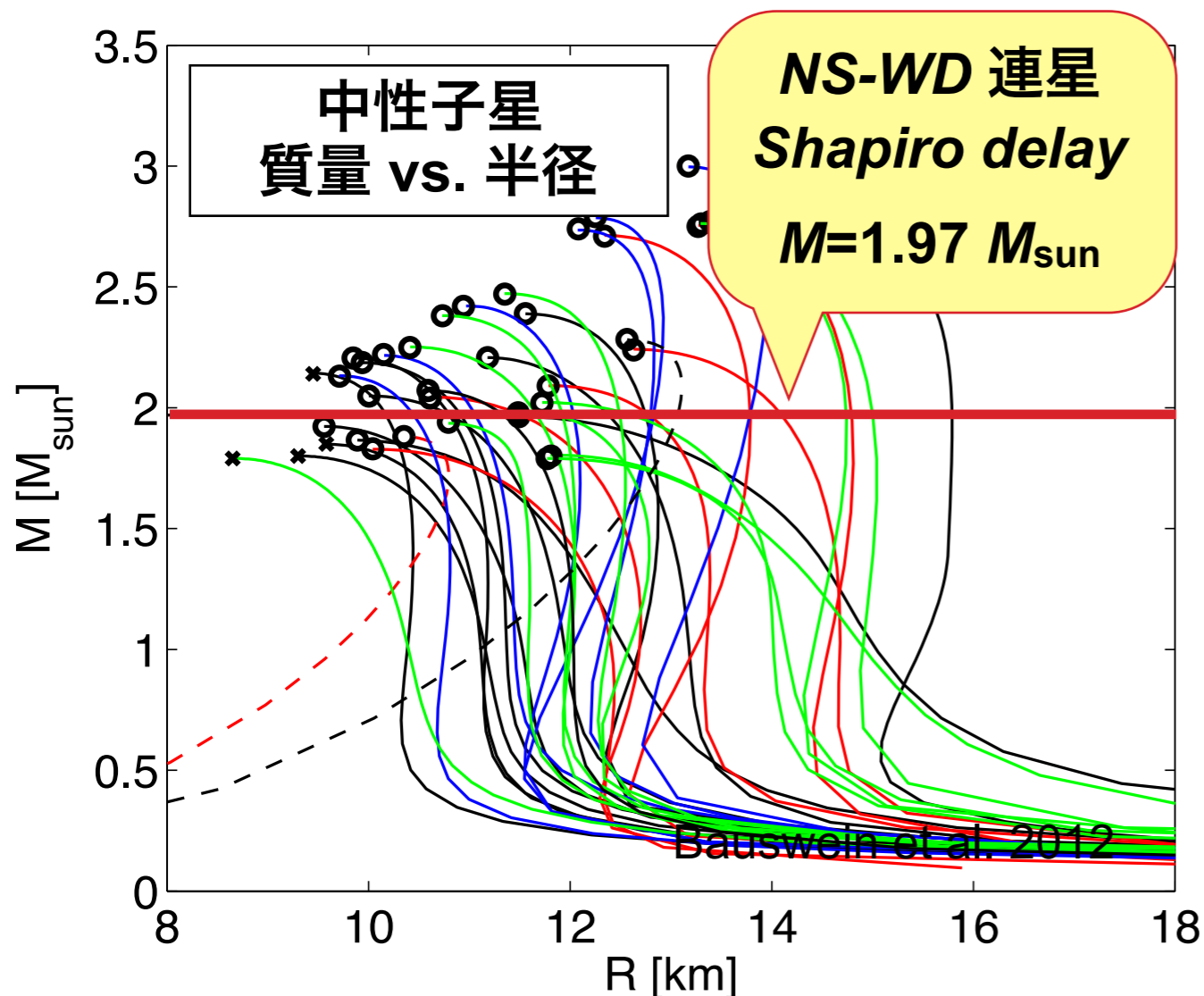
(PI: K. Gendreau, NASA/GSFC)

Large effective area High time resolution

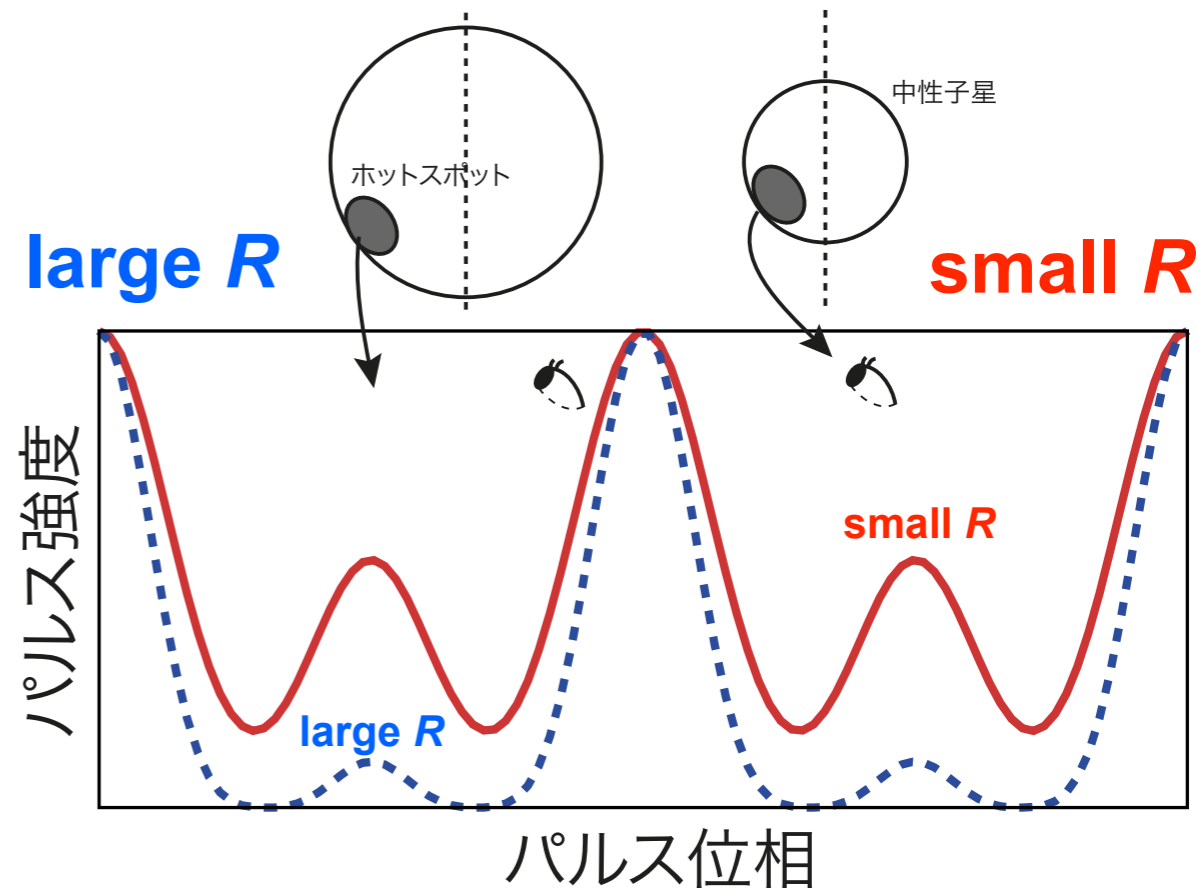


- Energy band : 0.2-12 keV (Resolution : 140 eV @ 6 keV)
- Time resolution : <100 ns RMS (absolute)
- Non-imaging FOV 6 arcmin diameter
- Background : < 0.5 cps
- Sensitivity: 1×10^{-13} erg/s/cm² (5σ , 0.5-10 keV, 10 ksec exposure for Crab-like)
- Max rate: ~38,000 cps (3.5 Crab)

中性子星の高密度状態方程式と質量-半径の測定

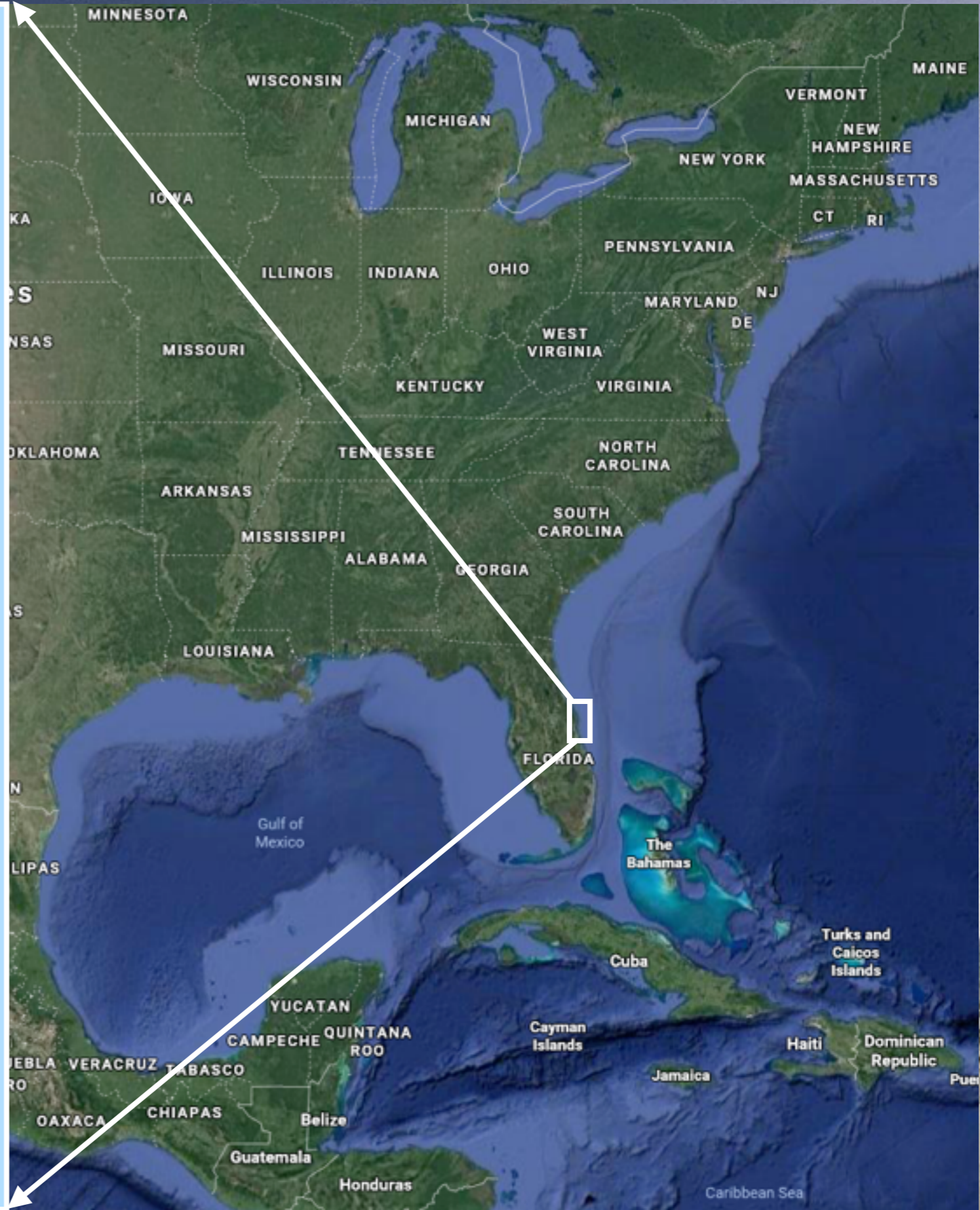
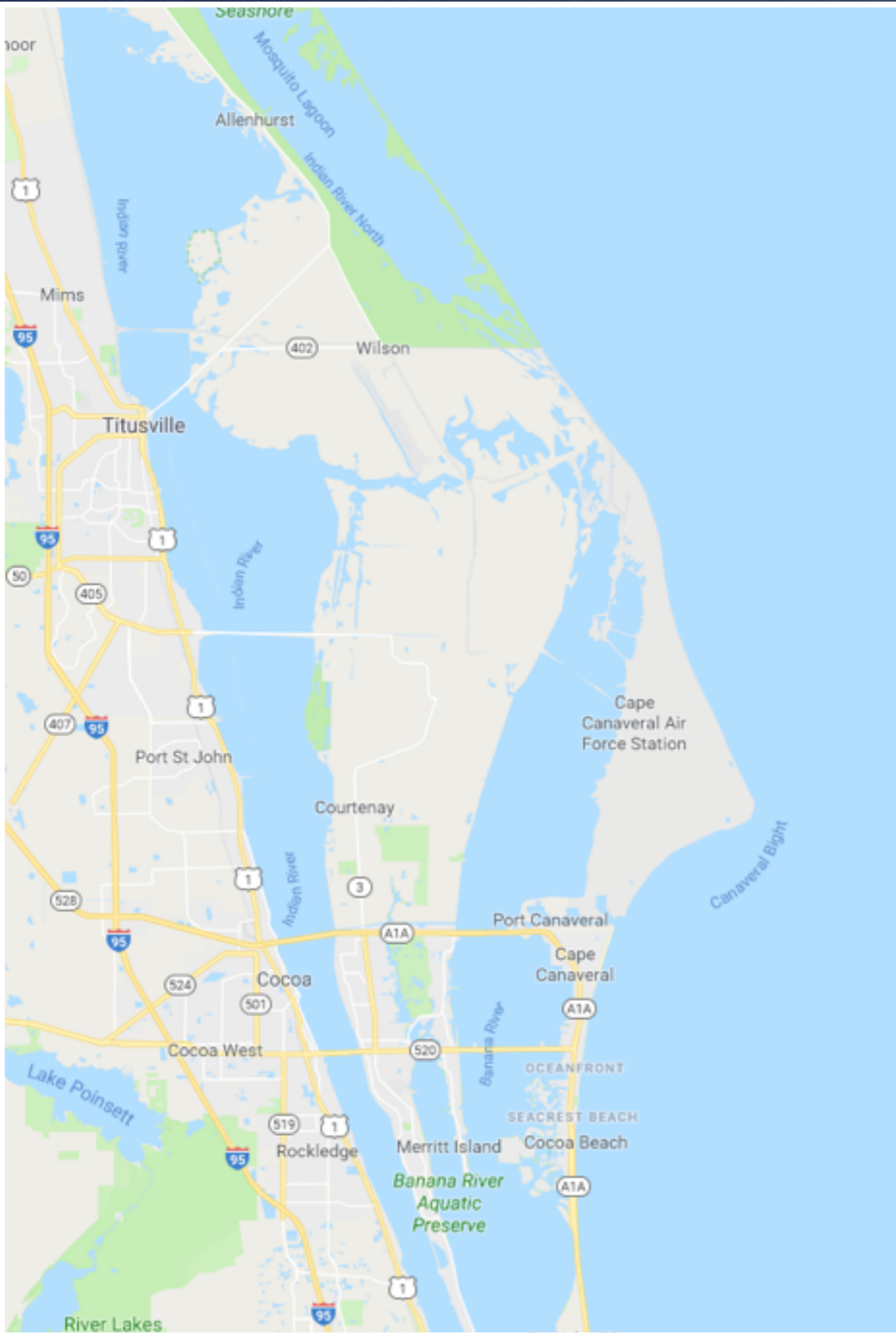


表面パルスの重力場による影響

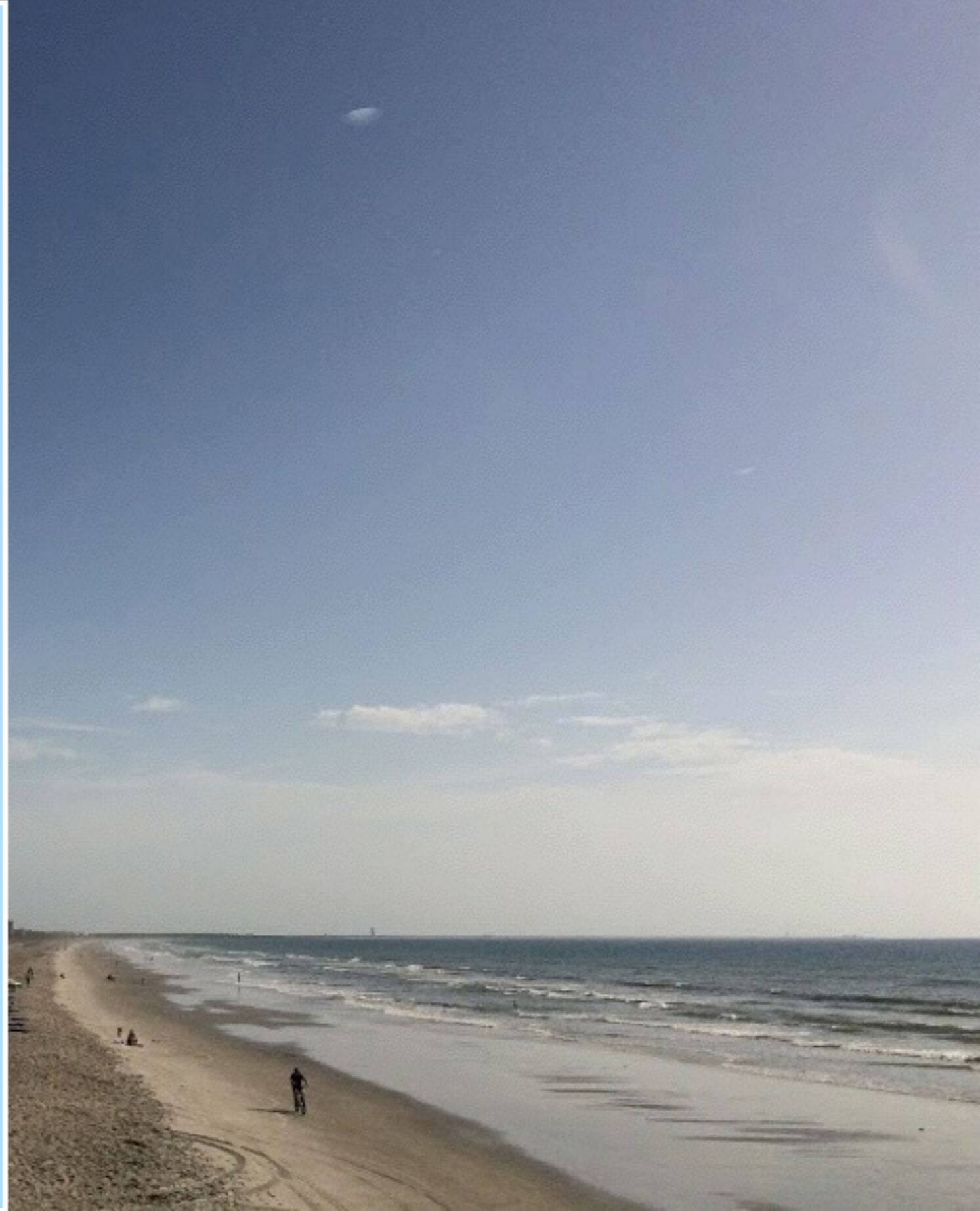
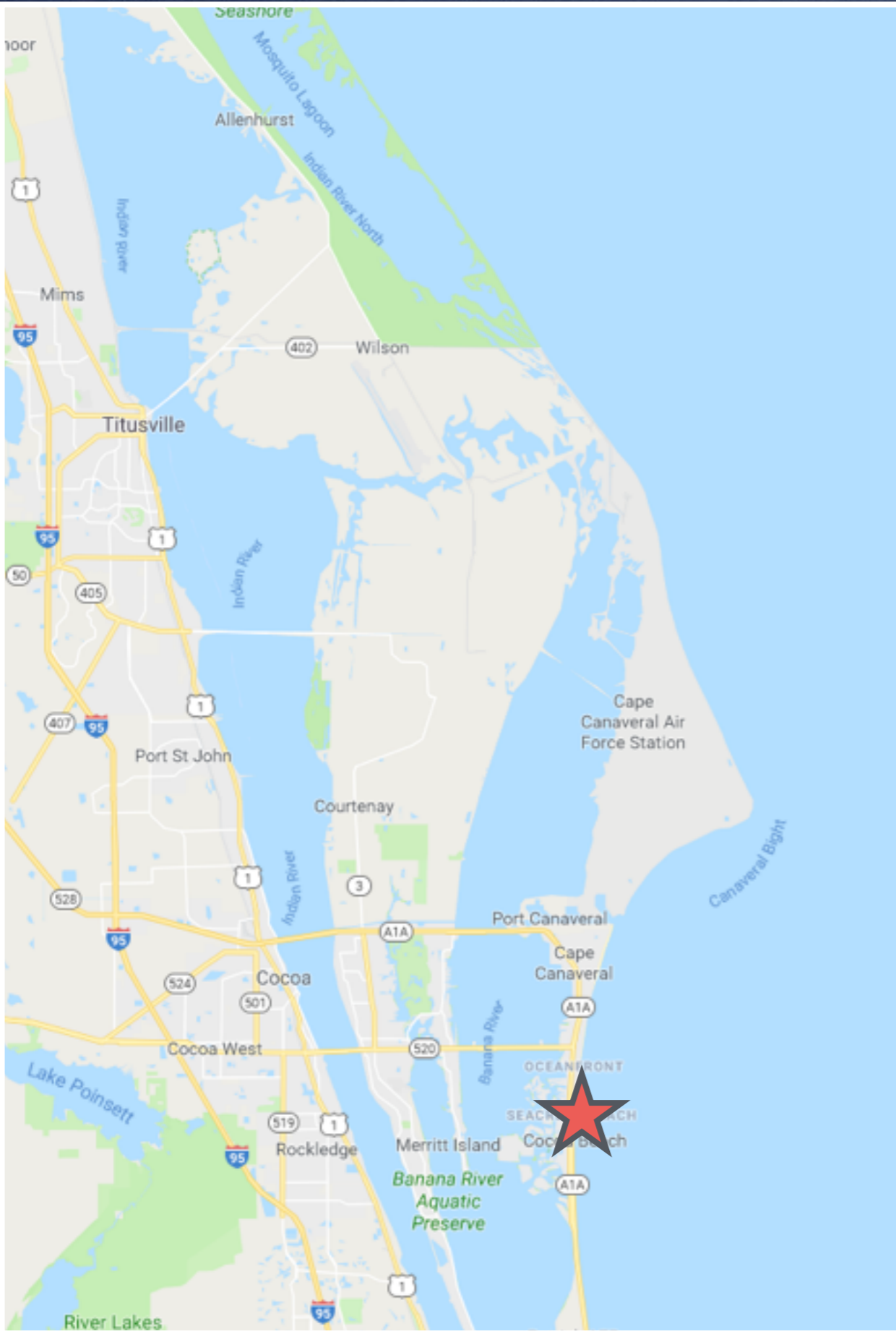


- 原子核密度 $\rho = 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ を超える中性子星(NS)内部の状態方程式は未解明。
- 状態方程式と質量-半径は一対一対応 \Rightarrow 理論モデルの切り分けには宇宙観測が必要。
- 質量はパルサーの連星運動から精度のよい測定が可能 (例: 電波の Shapiro delay)。
- 半径は表面の X 線放射はきわめて難しい(天体距離、大気組成、磁場の影響)。
- M/R比 (コンパクトネス) 測定に期待。重力場の影響でパルス波形が歪む効果で測定。

Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017

COCOA BEACH THROUGHOUT THE YEARS

Known for its white, sandy beaches, rolling waves and as the home of the American space program, Cocoa Beach is the world's most famous small town. The city of Cocoa Beach tells a story of overcoming economic struggles, perseverance during hardships and the charming life of a close-knit community. Famous for its prominent landmarks and pristine beaches, Cocoa Beach is not just a beautiful beach town - it's one of the most famous vacation spots in America.

The first settlers in the area were a family of freed slaves after the American Civil War in 1888. However, the land was largely undeveloped until Gus Edwards purchased 600 acres of land in 1925. He began development in the area immediately and by 1939, the town had a hotel, a gas station and a post office. It wasn't until the town got a church that it really started to grow. In 1940 the Cocoa Beach Community Church was built and it still stands today on South Orlando Avenue. As the small community grew, a single police officer was employed for just one dollar per hour in 1947. Reports indicate that in the 1940s the population was just 49 people. However, that would soon change as the race to space began in the 1960s. The entire world would soon hear of Cocoa Beach.



In a matter of years, the town grew from 49 to 3,500 residents. With Cape Canaveral, the location for America's Space Program, just a few miles away, money, resources and people flowed to Brevard County. Astronauts and scientists could often be seen at the beach enjoying the surf and sun with their families. In 1942, the Casavert Pier was built extending 800 feet over the Atlantic Ocean. Today, the pier is known as the Westgate Cocoa Beach Pier. Kelly Slater, an 8-time world champion surfer was born and raised in Cocoa Beach. Some consider Slater to be the best surfer the world has ever known. In 1962, 75,000 people flooded the beach to watch John Glenn, the first American to orbit the earth, soar into space in his capsule "Friendship 7". The beach became a prime location for visitors and a famous landmark for surfers. In 1964, the pier hosted the inaugural Easter Sealing Festival, a festival that is still held at the pier every year. During the 60s, the city was buzzing with new ideas, advancement in space technology and tourists from all over the world. In 1967 "A Dream of Jeannie" premiered on NBC about an astronaut that lived in Cocoa Beach. The entire country's eyes were on Cocoa Beach.

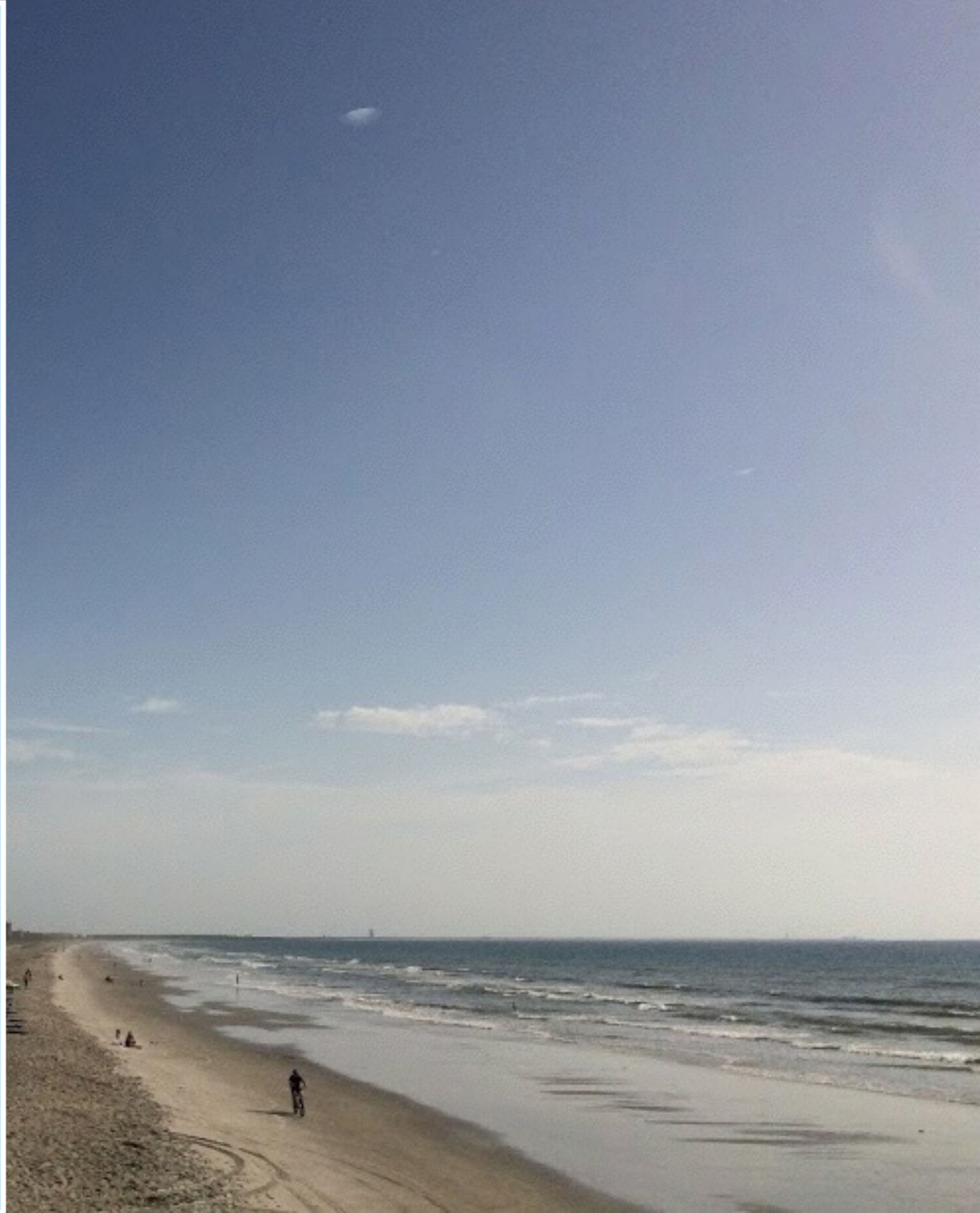
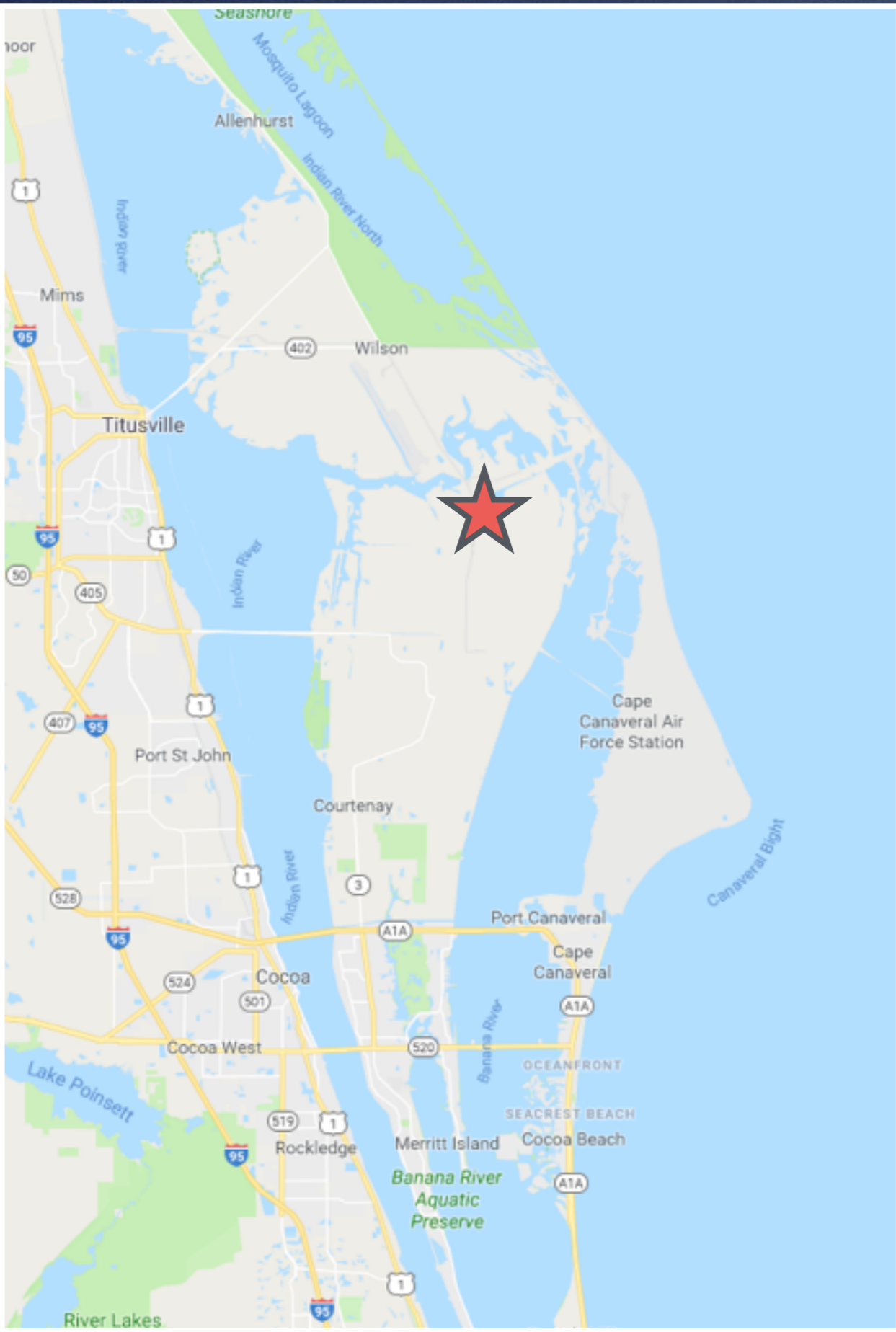
When the Apollo program was canceled in 1970, the city struggled through an economic downfall as thousands of families left the area. All the space-themed hotels that were built to accommodate the tourists were suddenly vacant and the restaurants that were once busy with hungry travelers sat with open tables and empty chairs. It wasn't until the Space Shuttle program began in the 80s that the economy picked up and Cocoa Beach thrived once again.

The John F. Kennedy Space Center is located just 15 miles north of Cocoa Beach and displays original rockets from the space program. The Westgate Cocoa Beach pier is also an iconic landmark that welcomes tourists and local residents to enjoy the ocean and delicious seafood year round.

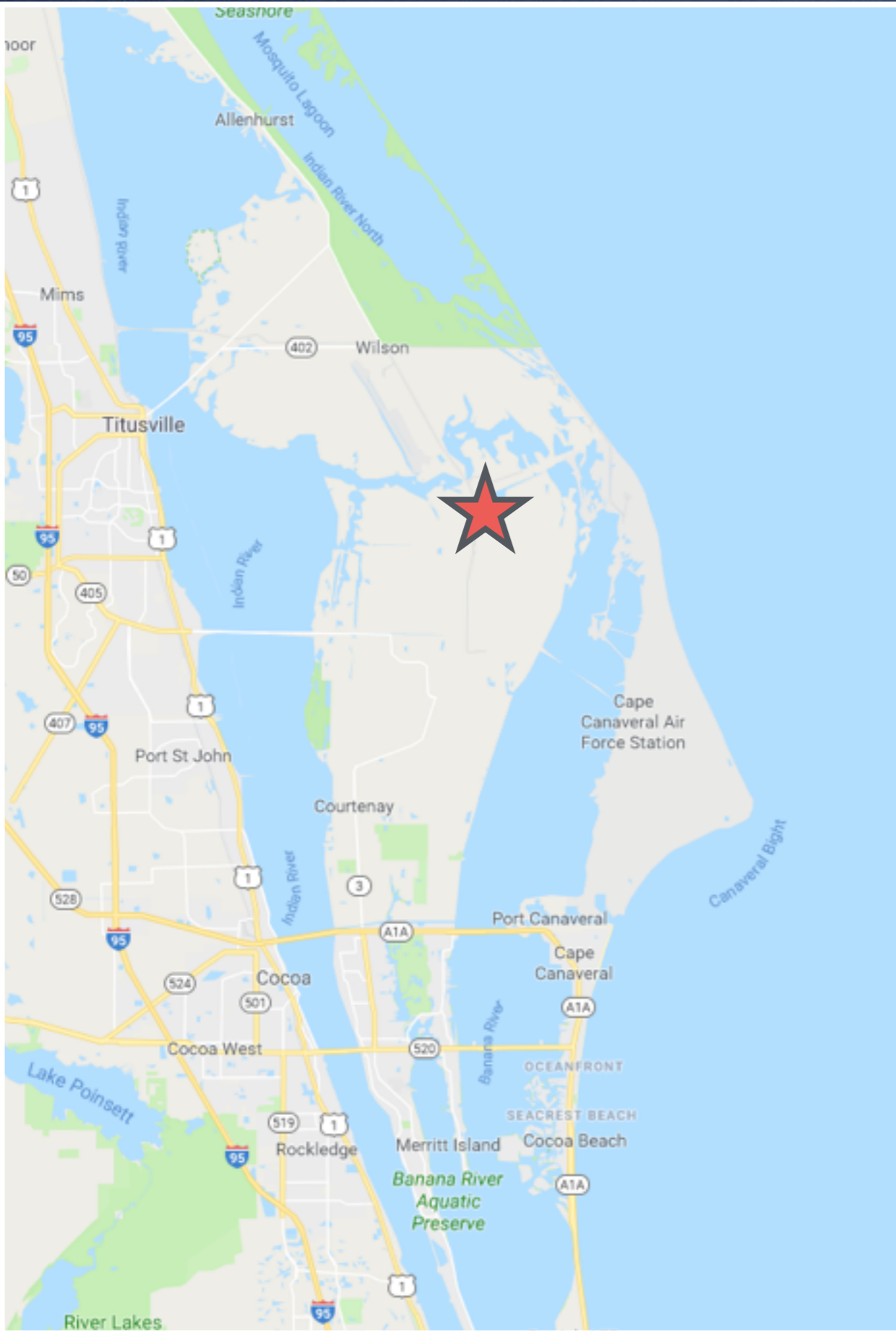
While new post offices, restaurants and hotels replace the original versions, traces of history can be seen as you drive down streets like Meade or North Atlantic Avenue. Cocoa Beach flourishes with millions of visitors a year, yet it still has charismatic, small town charm. People come from all over the world to enjoy the Florida sunshine, warm sand, historic landmarks and ocean waves. Welcome to Cocoa Beach!



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



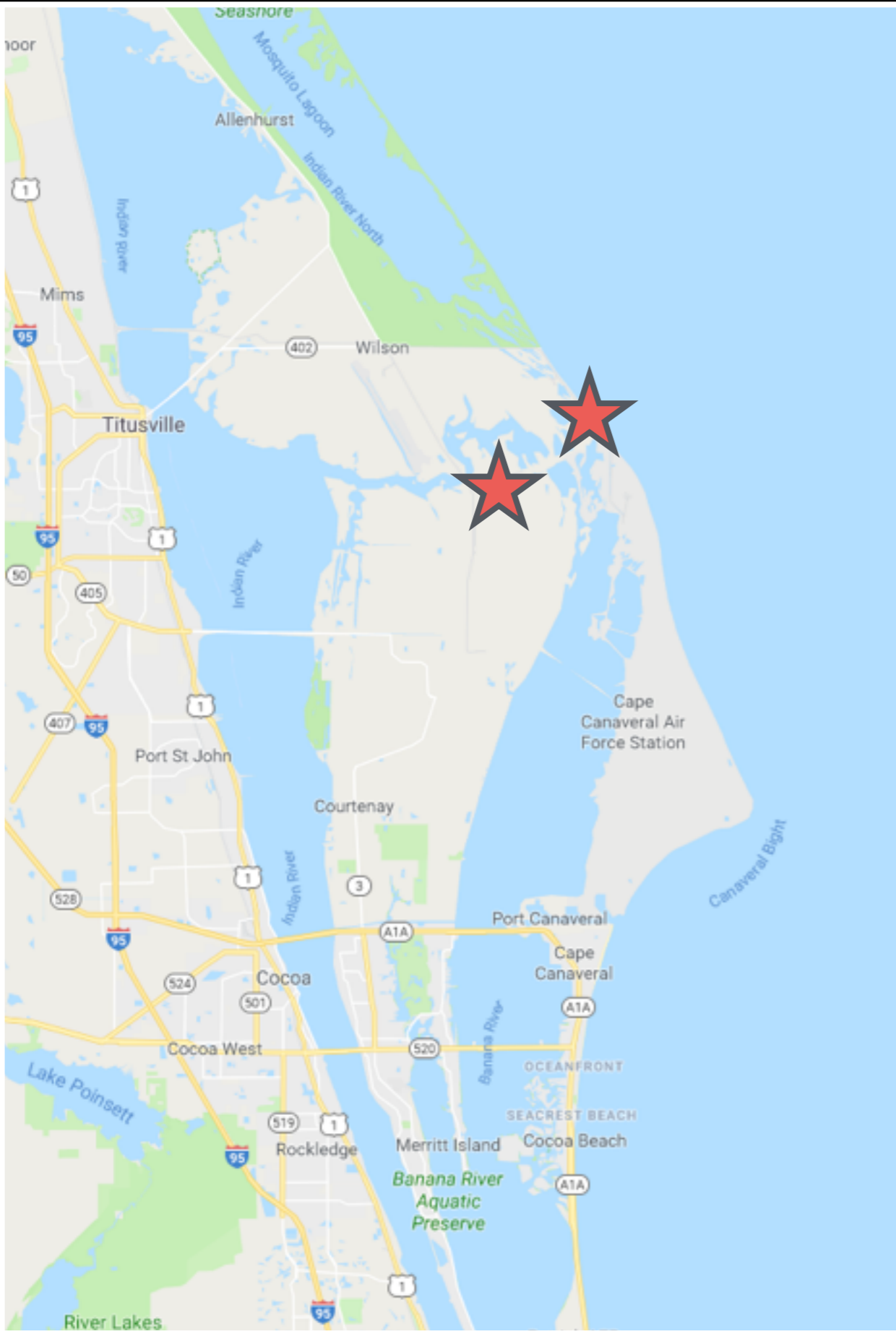
Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



Buzz Aldrin



Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017

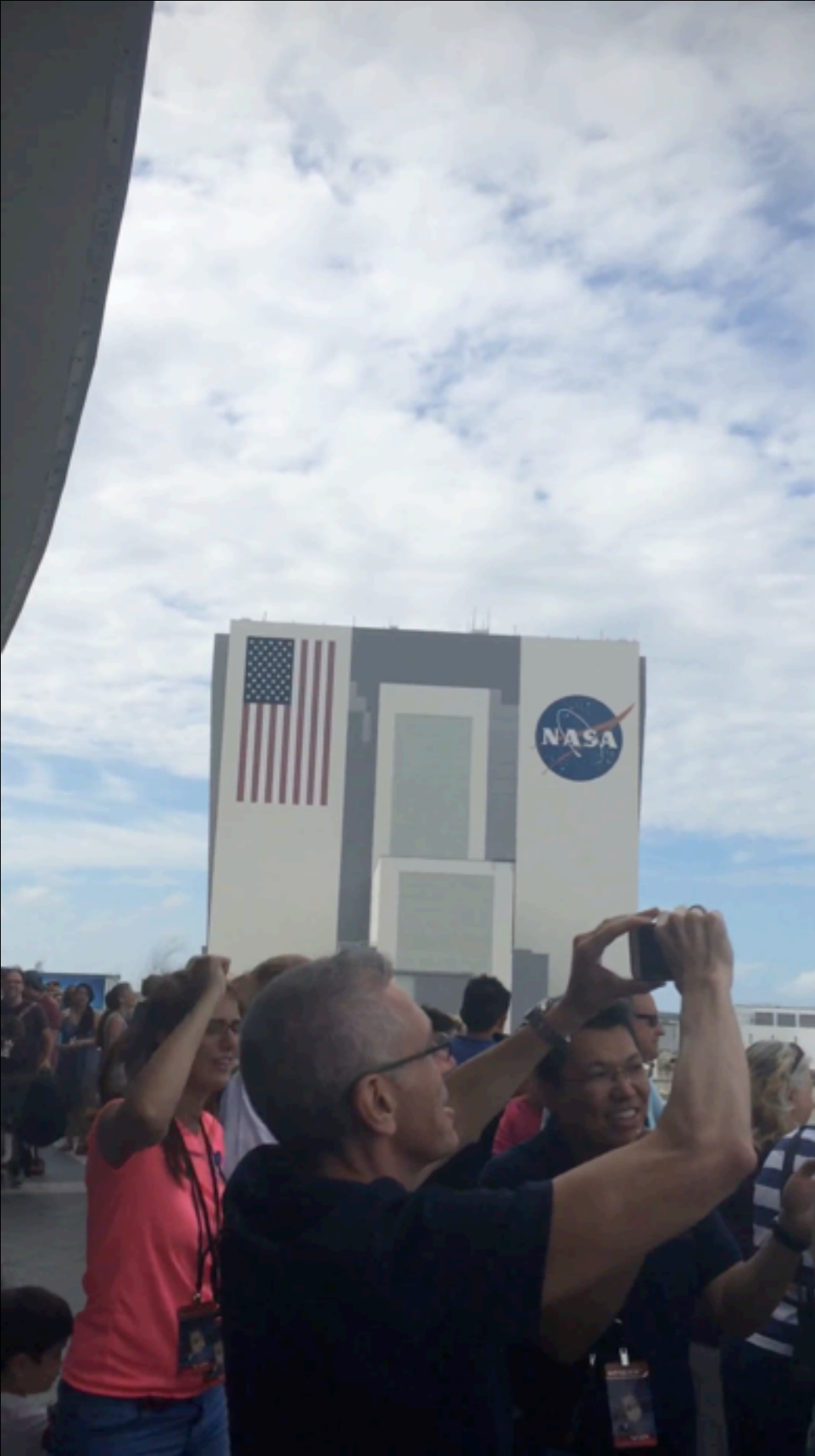


Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017

Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



T+ 00:07:32	
STAGE 1	TELEMETRY
SPEED	ALTITUDE
00306 km/h	00.4 km

LAUNCH: CRS-11



SPACEX

Launch by SpaceX-11 resupply, June 3, 2017



Dragon proceed to ISS transfer orbit



Extraction from Dragon was delicate

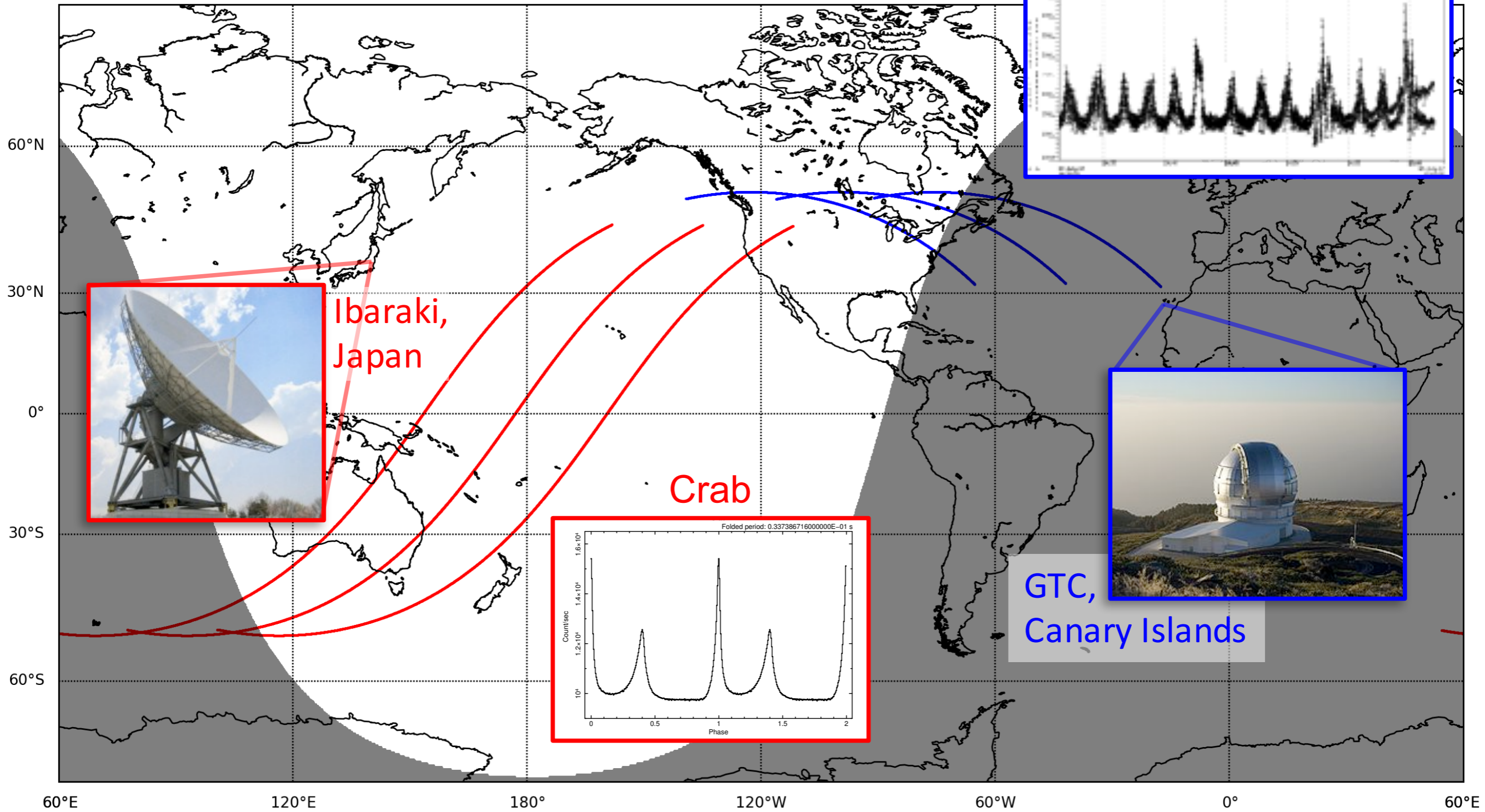


Installation and Development on ISS

NICER Initial Observation: Crab Pulsar

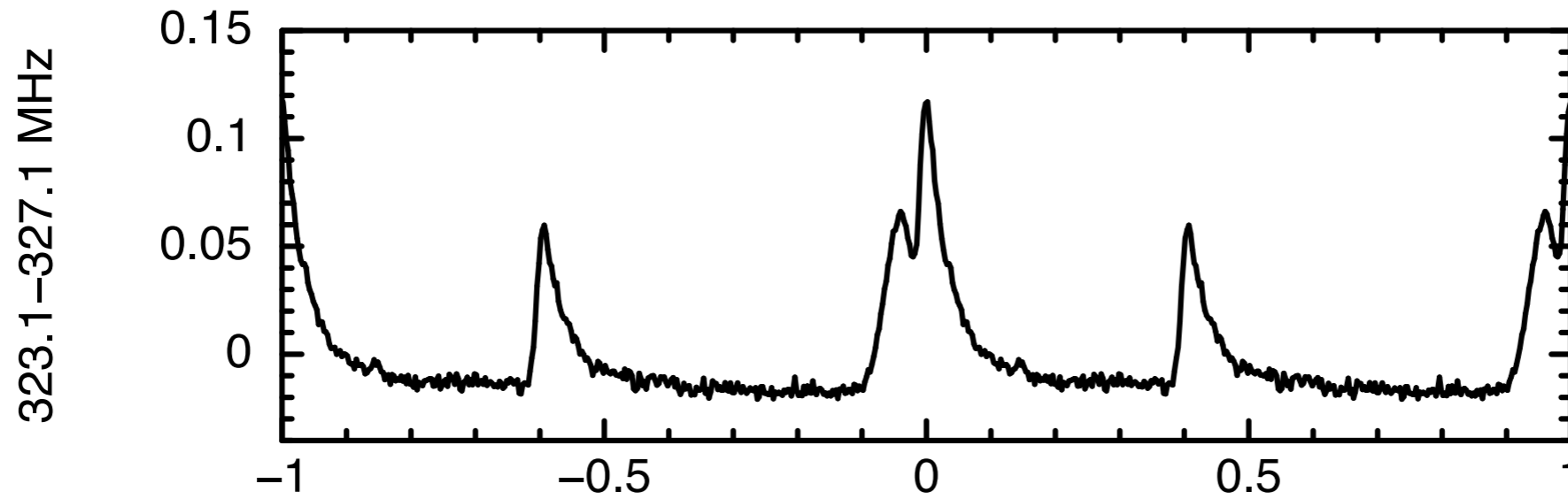
GRS 1915+105

Coordinated Crab & GRS 1915+105, 2017 Aug 9-10

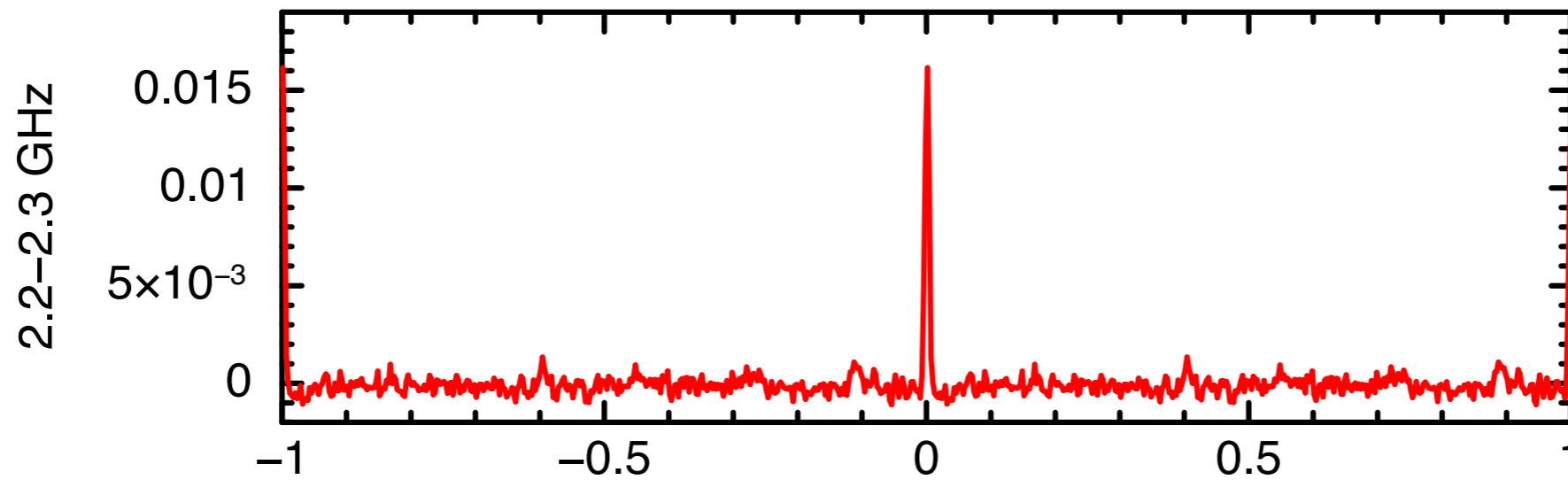


2つの観測ターゲット(Crab pulsar & GRS 1915+105)を、2つの地上望遠鏡(臼田の64 m電波望遠鏡とカナリー諸島のGran望遠鏡)で、3軌道周期で観測

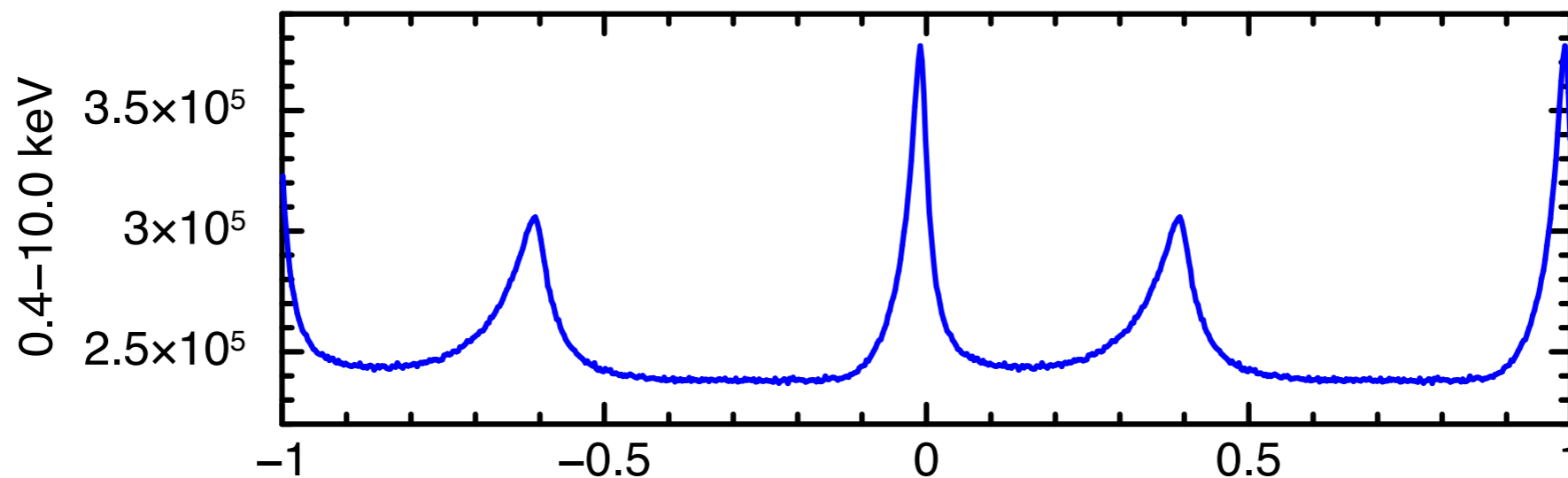
Crab Pulse Profile Observed with NICER



電波



電波



X線
(NICER)

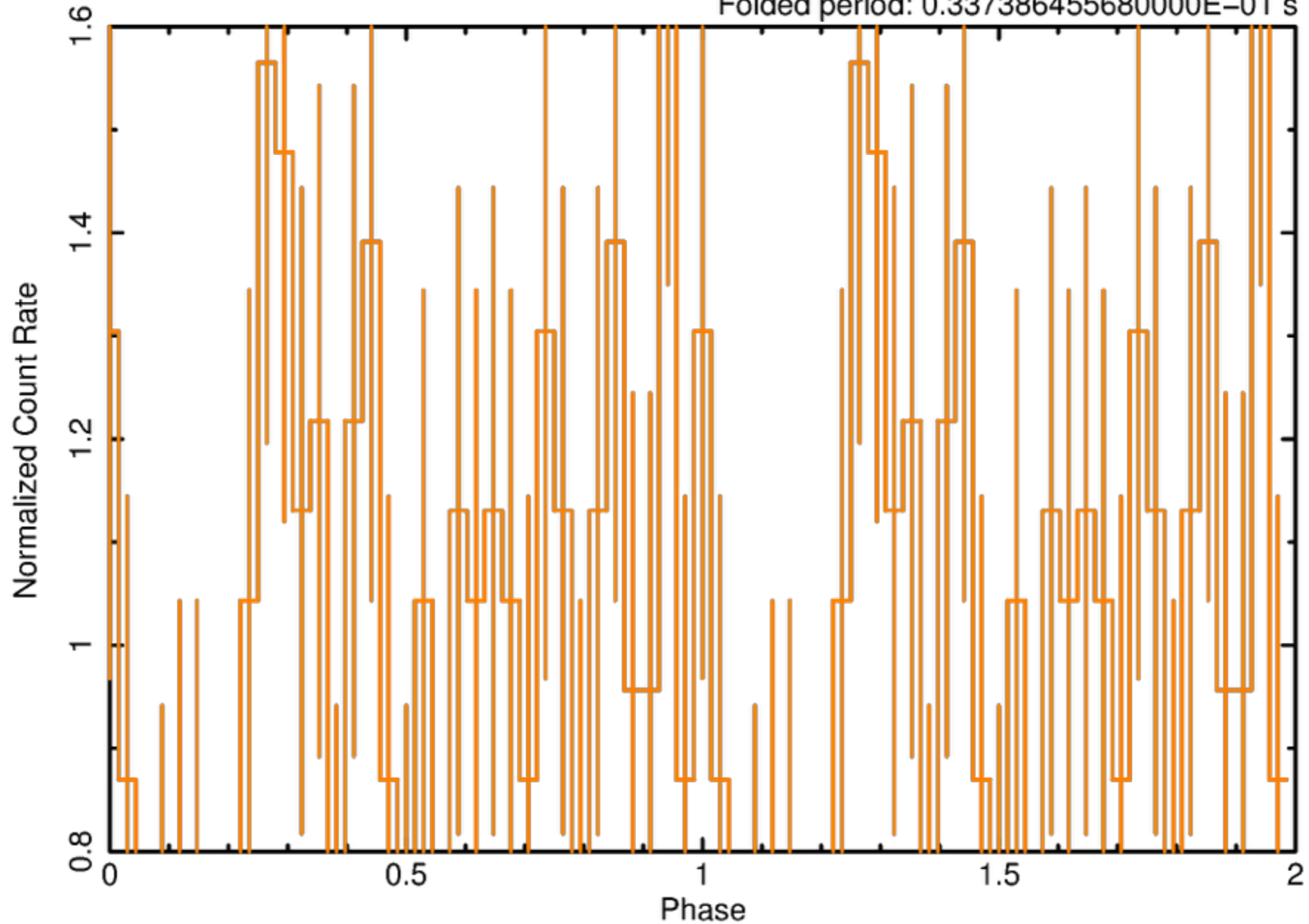
Phase

Radio from Terasawa et al.

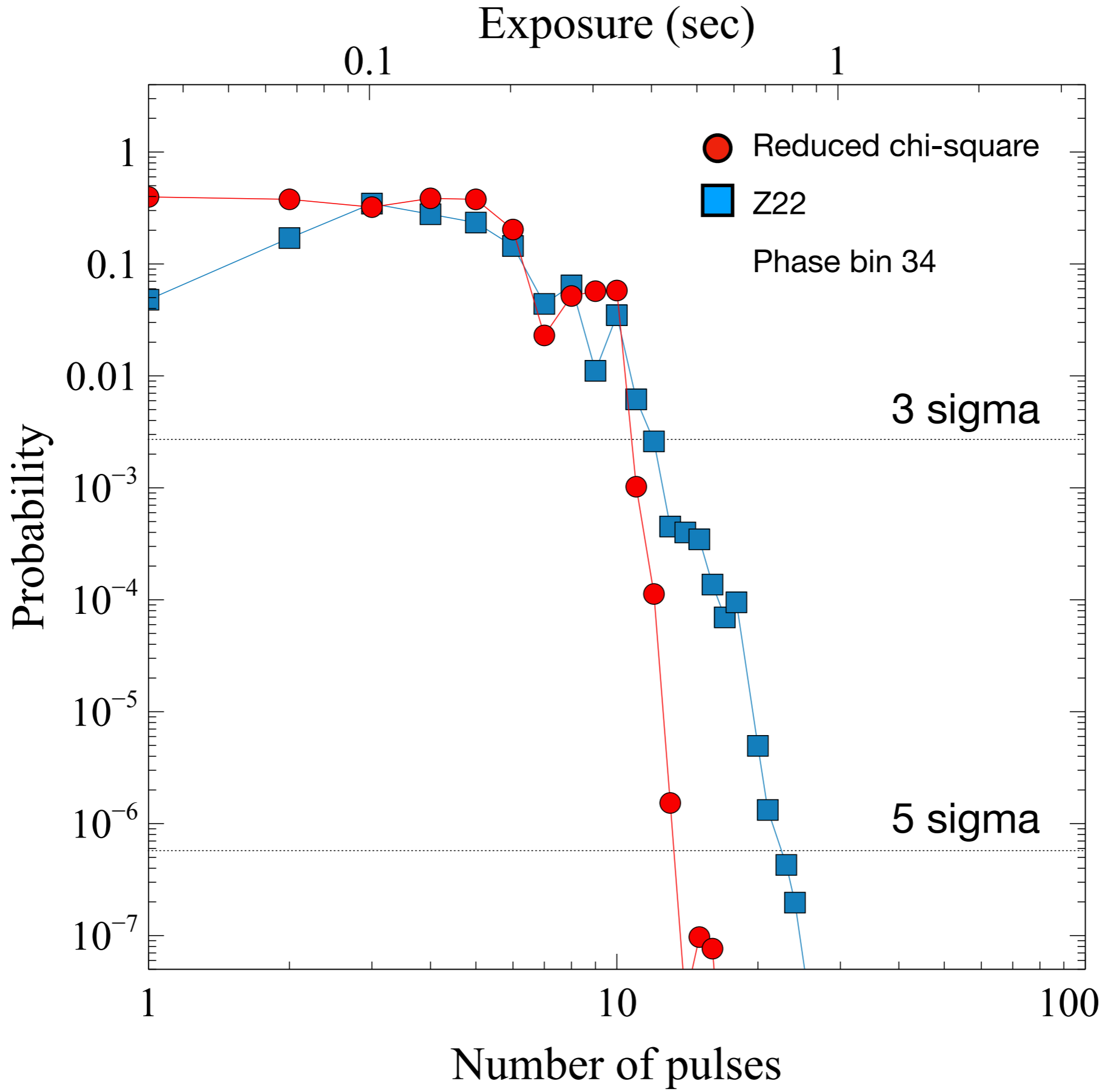
Crab Pulse Profile Observed with NICER

0.034 s accumulation (Number of Pulses = 1, Number of Events=391)

Folded period: 0.337386455680000E-01 s

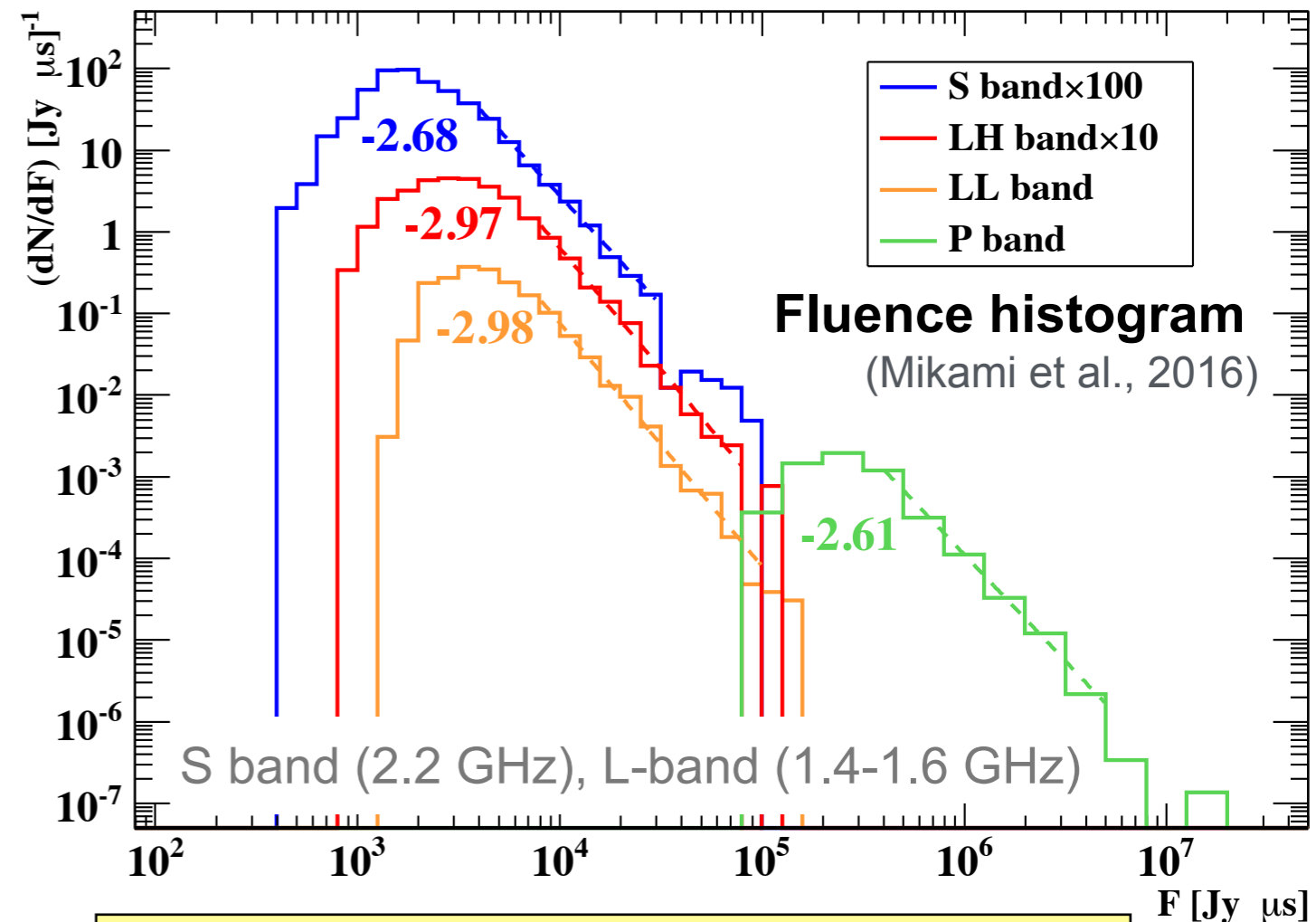
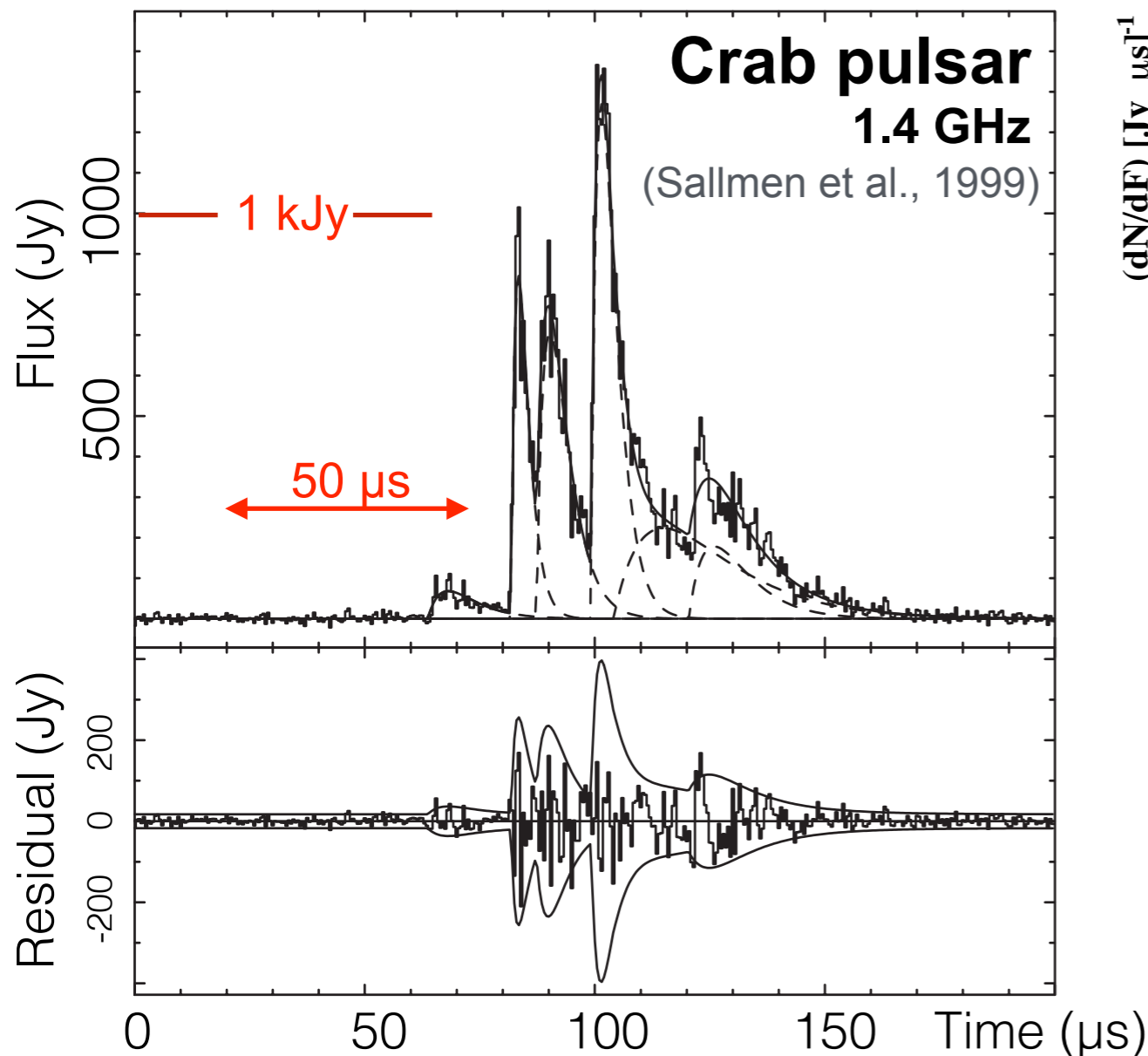


Short exposure to detect Crab pulsation



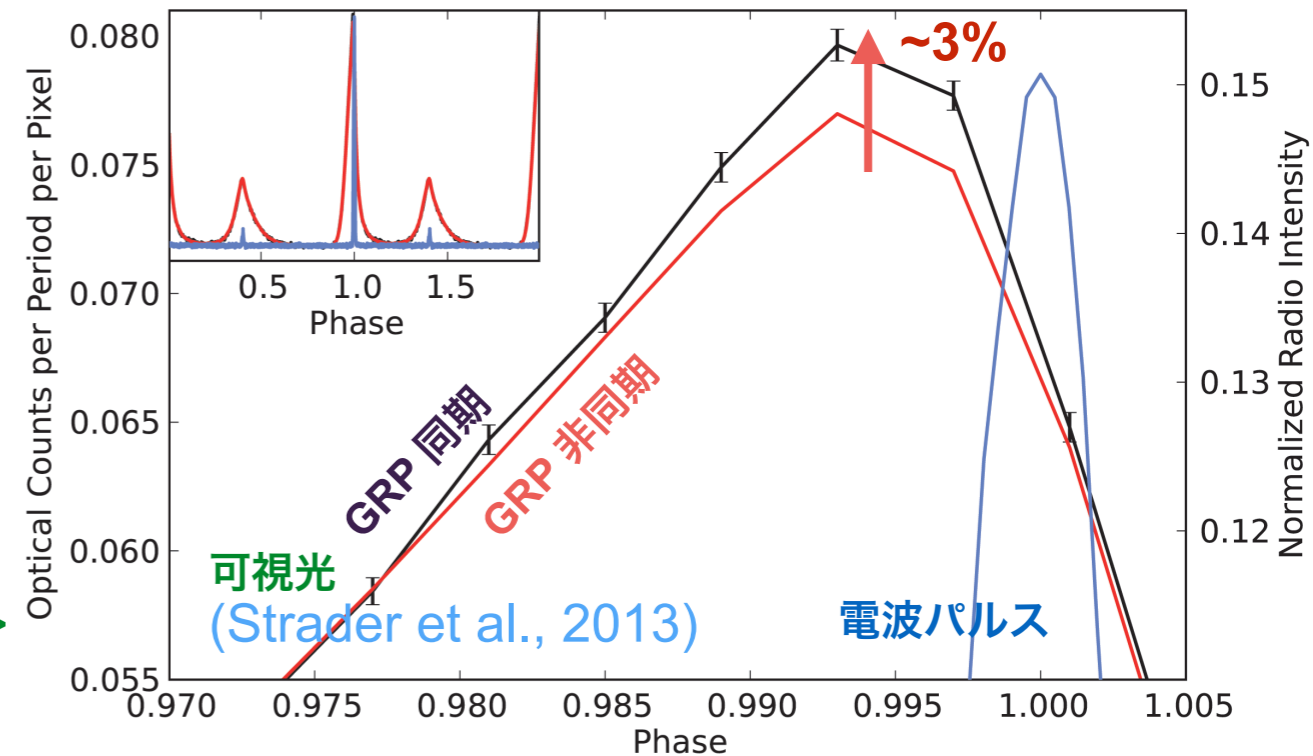
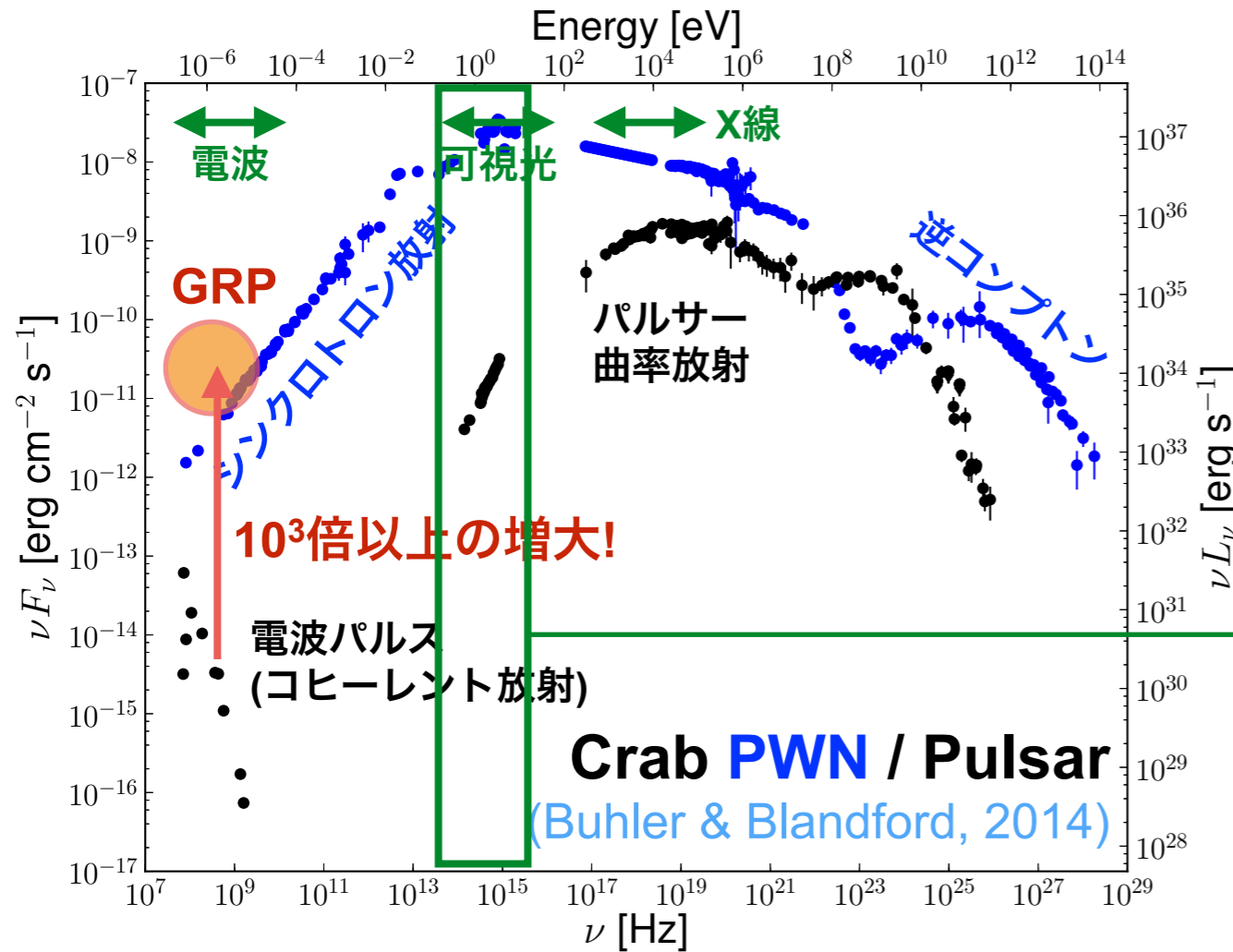
巨大電波パルス Giant Radio Pulses (GRPs)

- 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

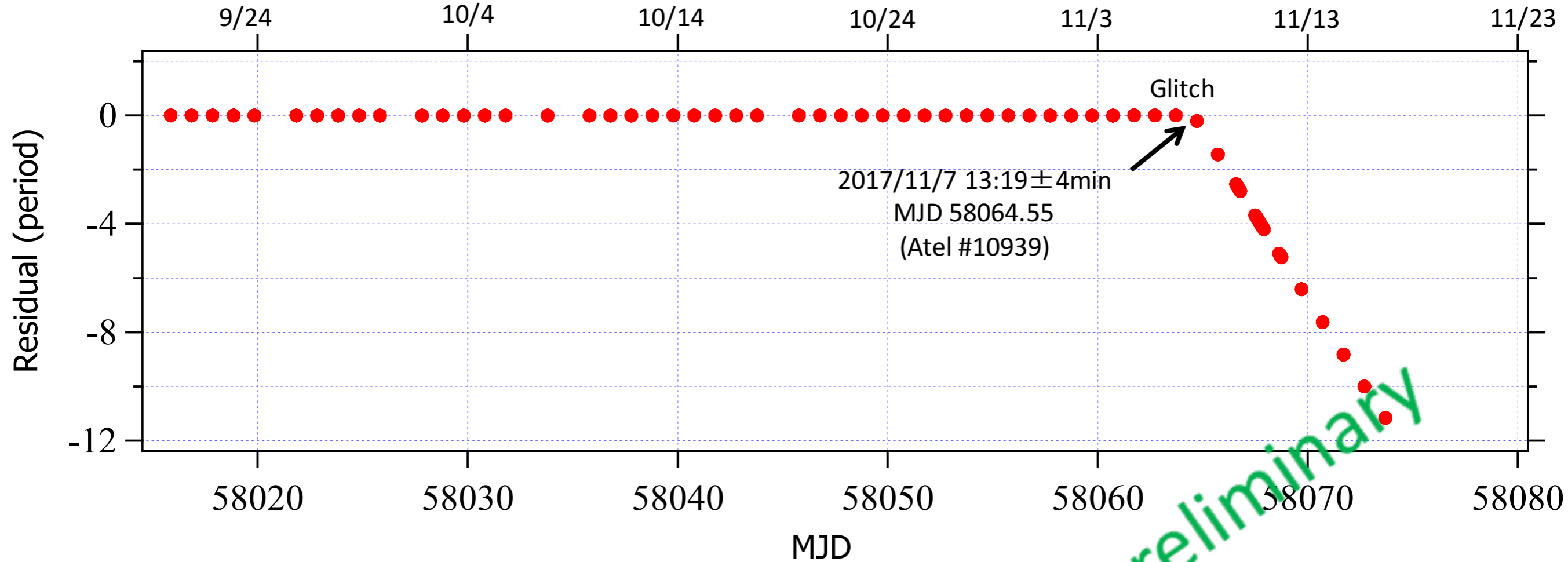


NICERの結果に乞うご期待！

- かにパルサーの GRP に同期して統計的に有意(7.2σ)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, $<10\%$ (2σ) (Bilous et al., 2012)
 - γ -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

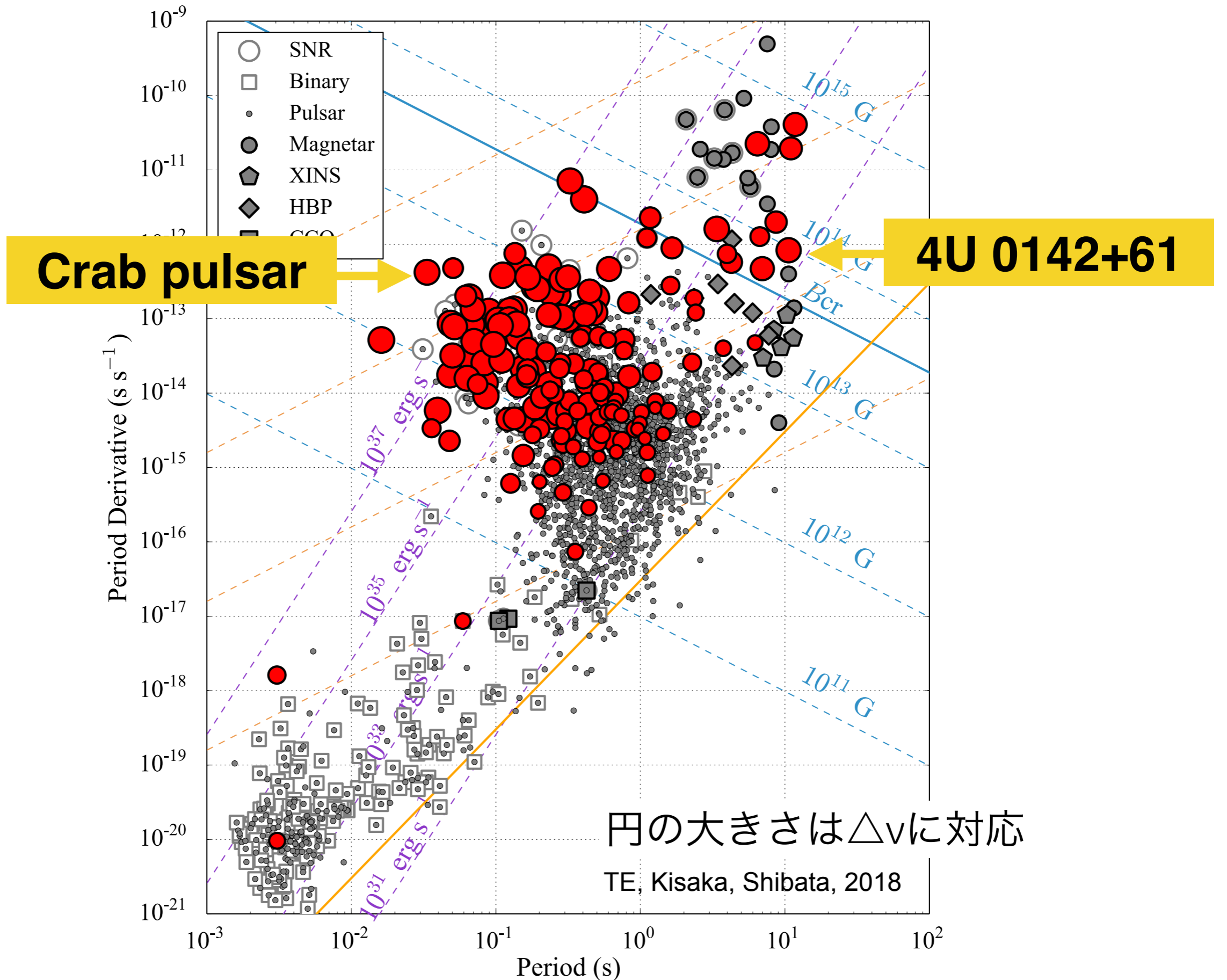


$$\delta\nu \sim 14.5\mu\text{Hz}$$

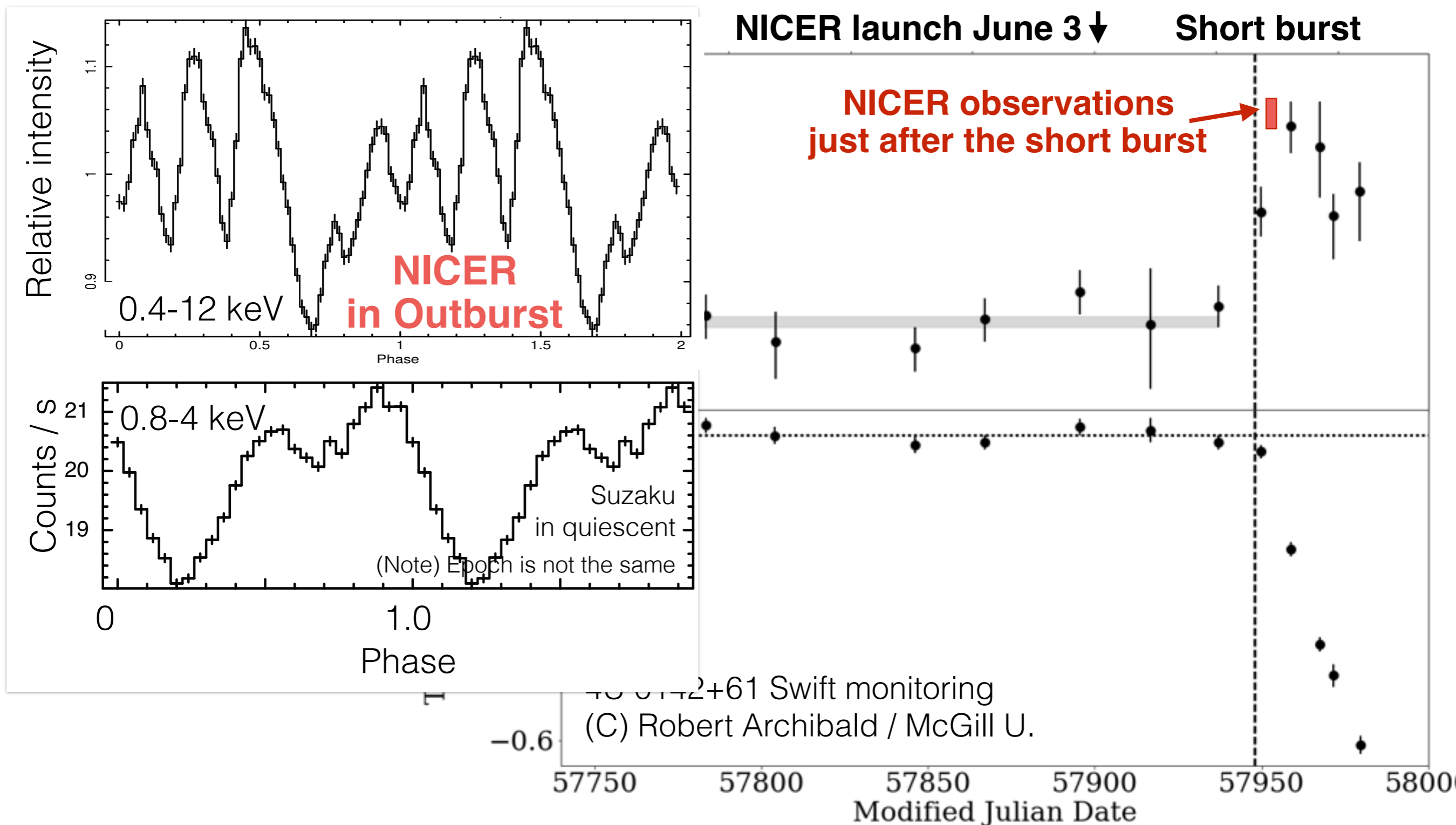
$$\delta\nu/\nu \sim (0.5)\times 10^{-6}$$

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

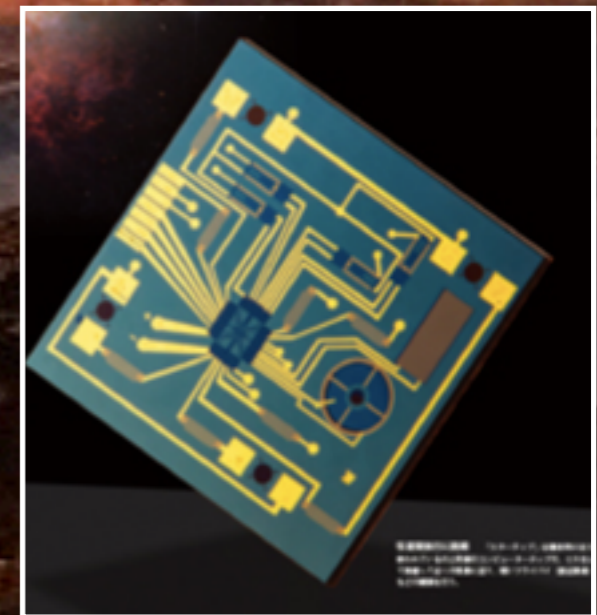
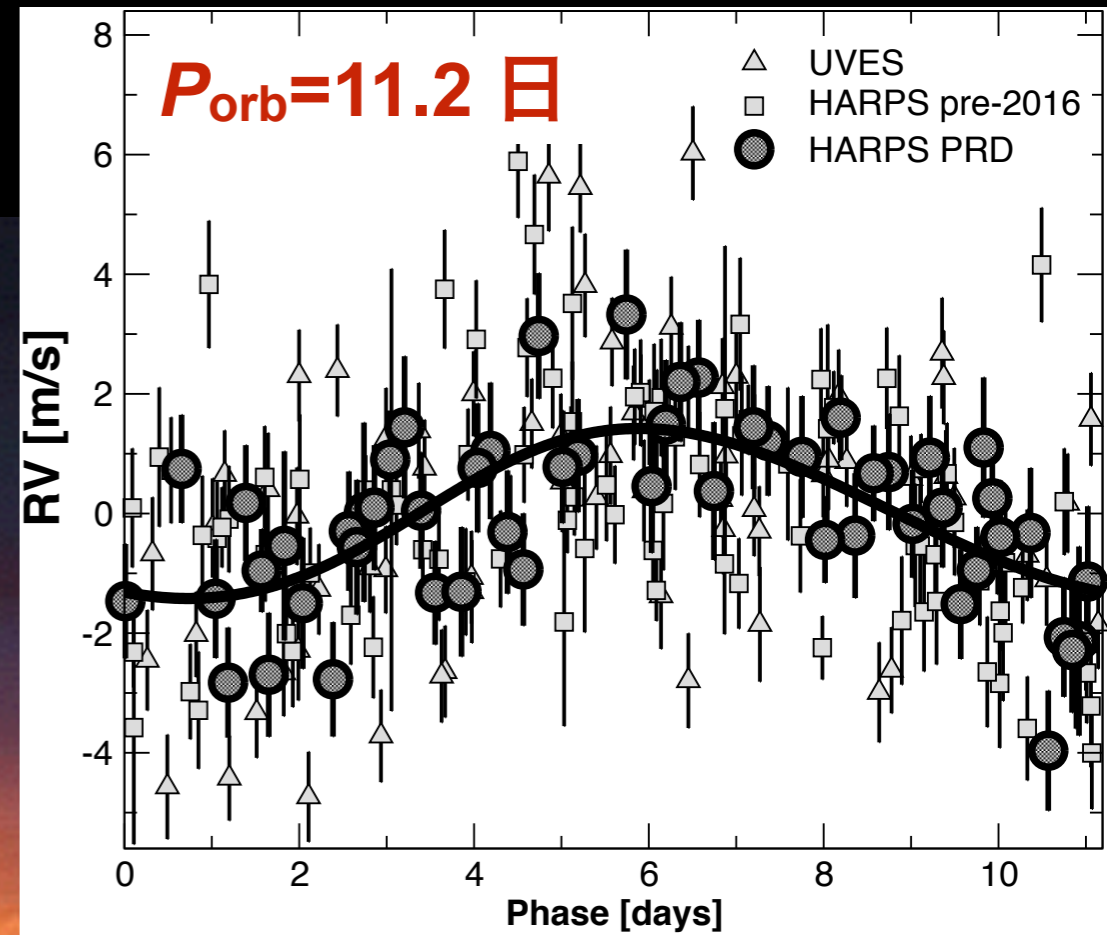


- Fermi GBM detected a SGR-like short burst at 23:54 UT on 13 July during the NICER's commissioning phase ([GCN 21342](#)).
- Signature of a glitch around the outburst from Swift monitoring ([Atel 10576](#))
- NICER follow-up ToO observations, ~0.88, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 days after the burst, from July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

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)



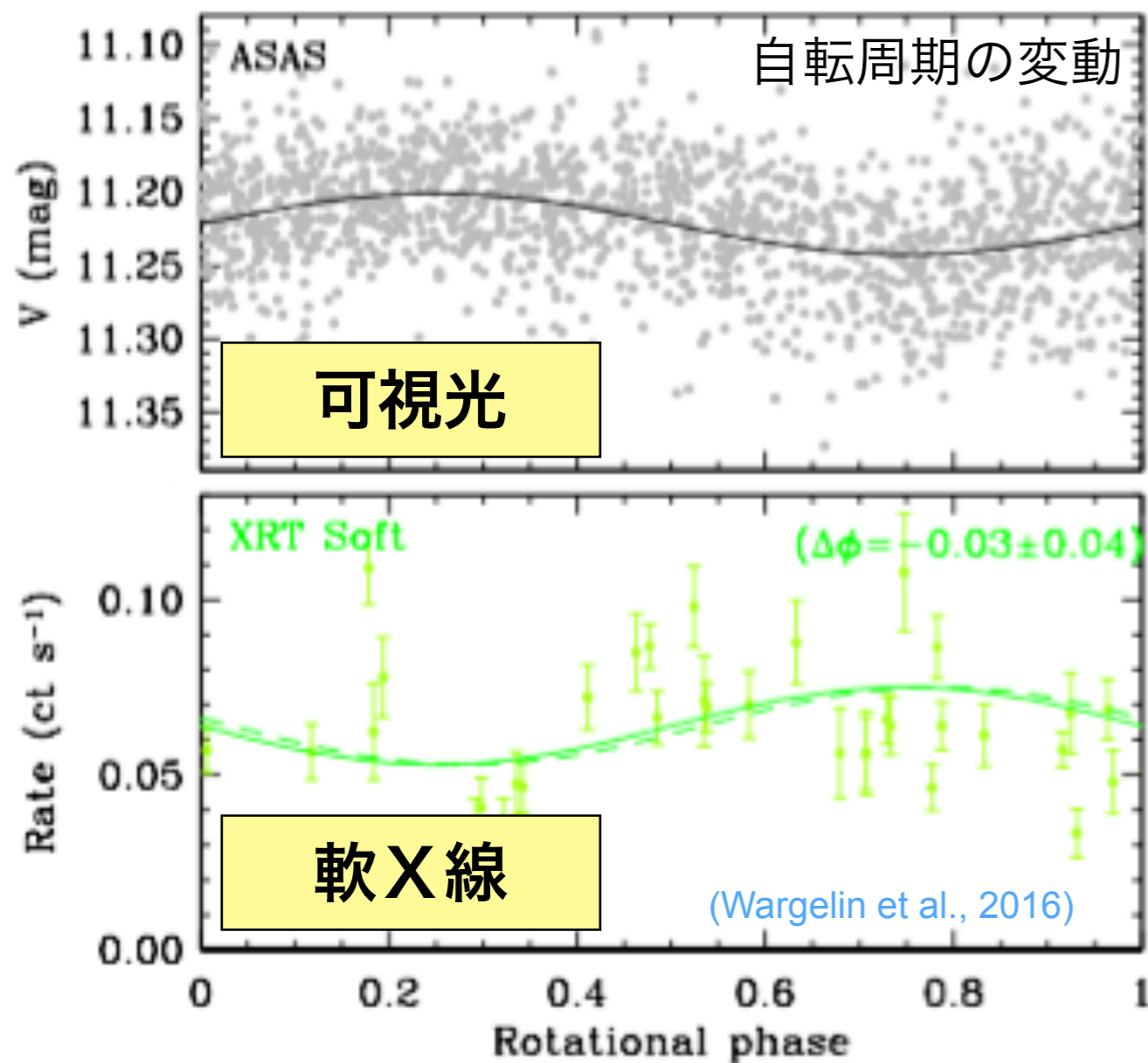
野心的なスターショット計画 →

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

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

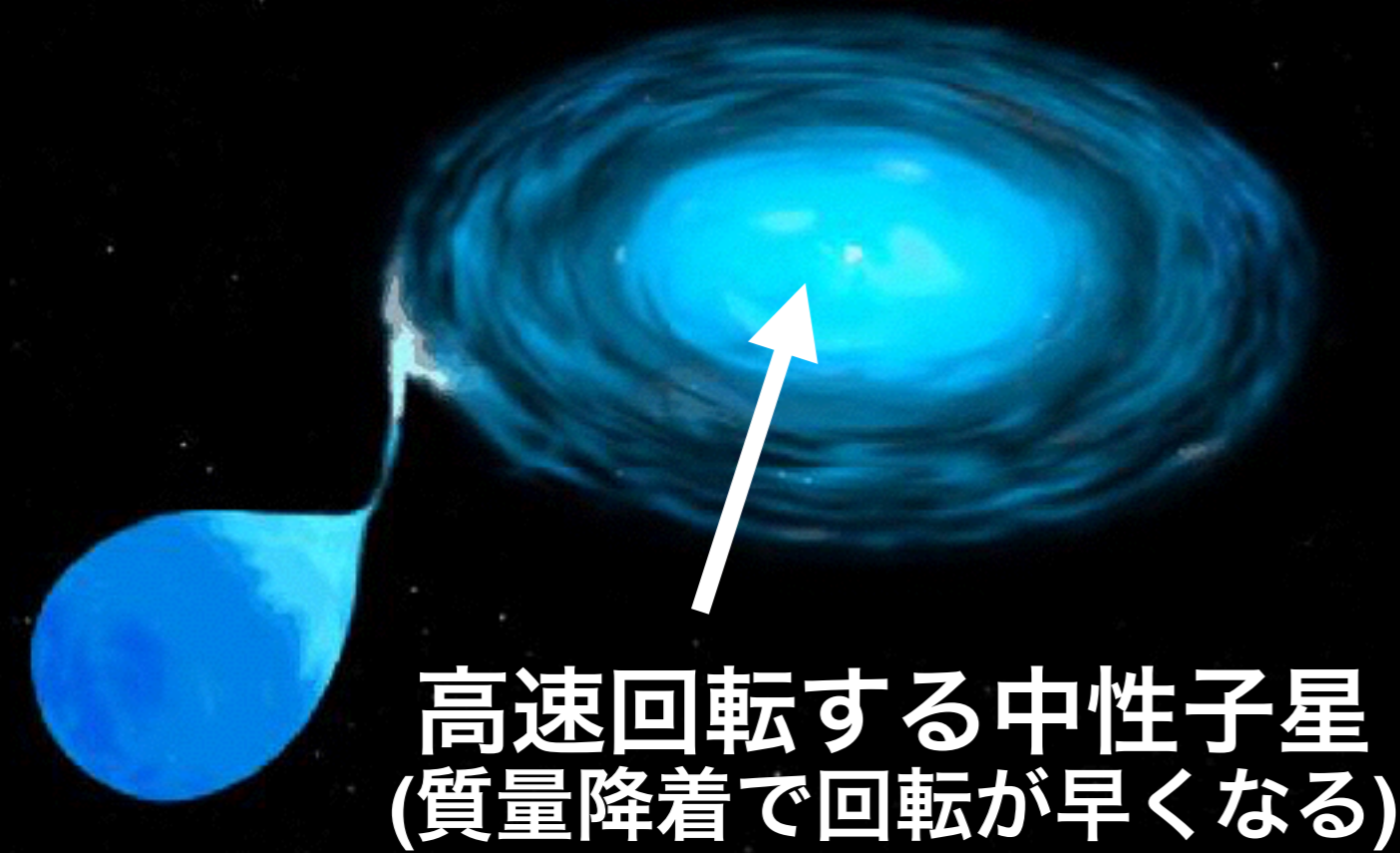
近傍の星の磁気活動を長期X線モニタリング

- 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線観測は散発的: 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



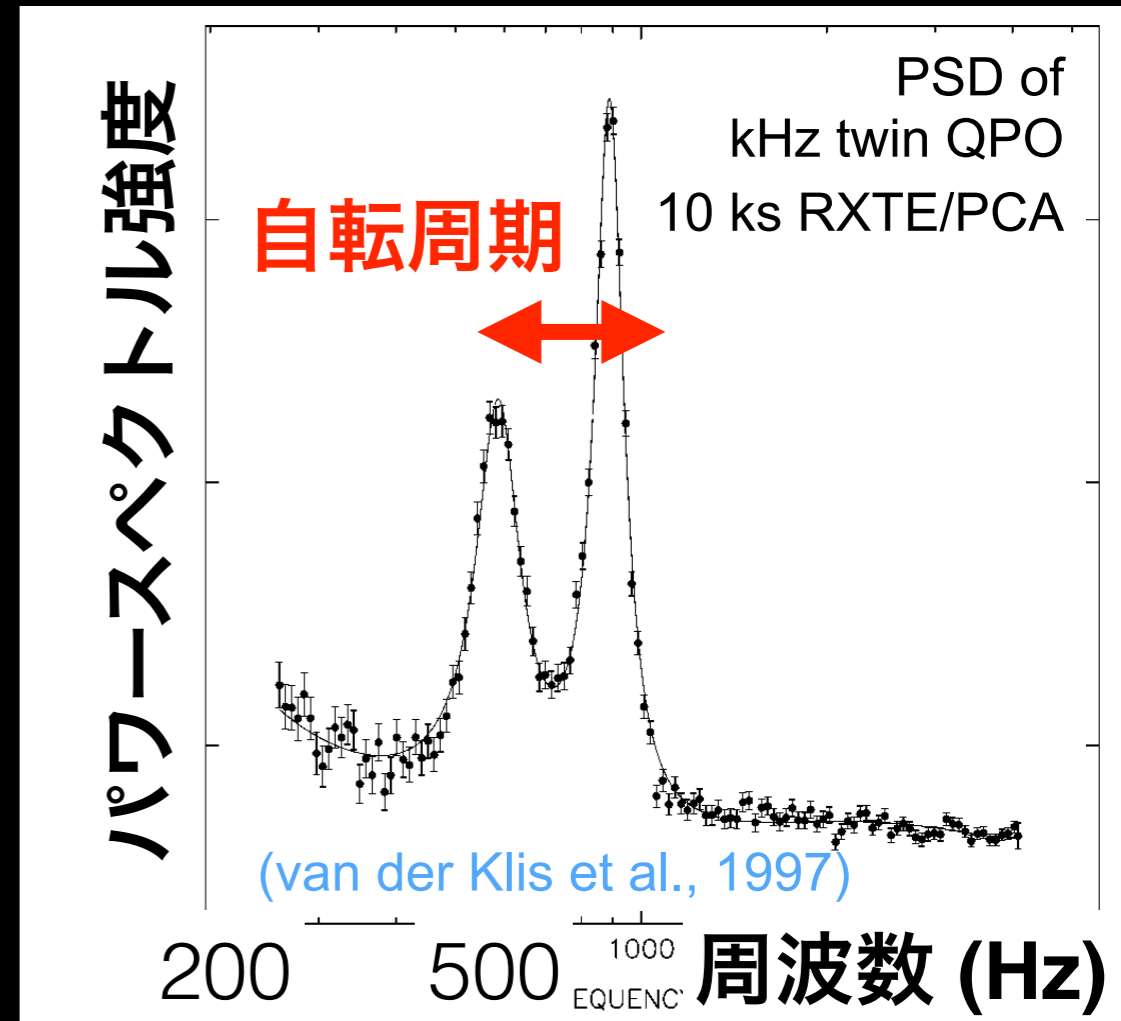
さそり座 X-1 (中性子星)の定常重力波を狙う

BH-BH, NS-NS 連星合体の重力波の直接検出→X線観測での貢献は？

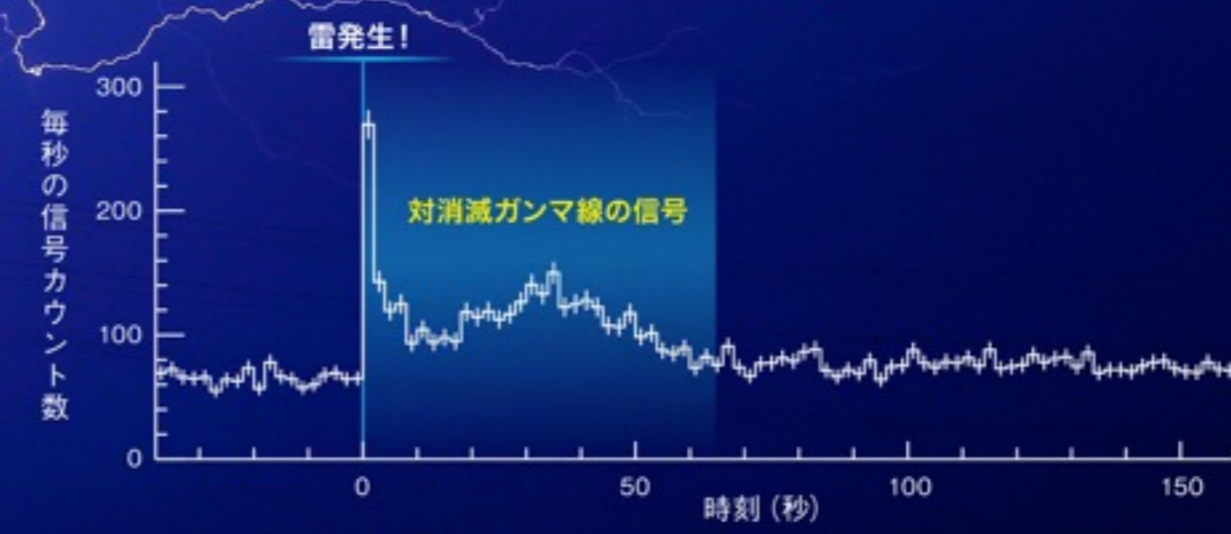
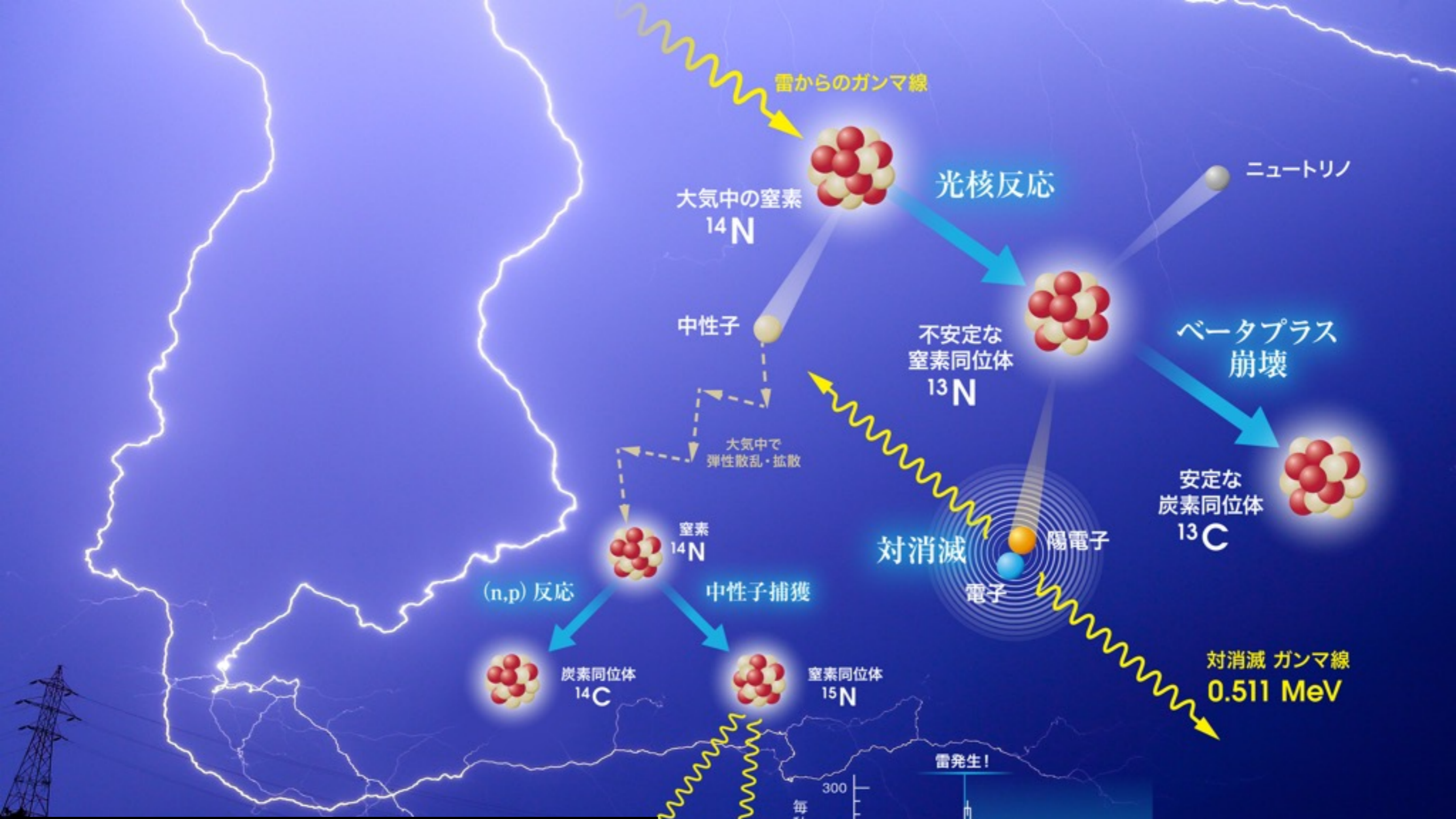


高速回転する中性子星
(質量降着で回転が早くなる)

角運動量を抜くのは円盤？重力波？



- X線の強度変動に QPO が知られ、その差分が自転周期と考えられる。
- 自転周期は質量降着に応じて時間変動し、重力波の探査を難しくする
- さそり座X-1は全天で最も明るく、大型衛星では観測が難しい。
- 小型衛星での QPO モニタ観測で周期を計測し、重力波探査に貢献？



科研費不採択→
 学術系クラウドファンディング→
 機動的な少人数グループでの開発→
 雷での光核反応の発見
 (Enoto, Wada, Furuta et al. Nature, 2017)

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。
- 高速自転する中性子星さそり座X-1からの定常重力波の探査や、近傍星の磁気活動の観測にも、X線で有効な貢献が期待できる。