

# 中性子星の観測的研究の進展

榎戸輝揚 (Teruaki Enoto)

 [@teru\\_enoto](https://twitter.com/teru_enoto)

(理化学研究所 / RIKEN)



2022年9月22日 9:00-10:00

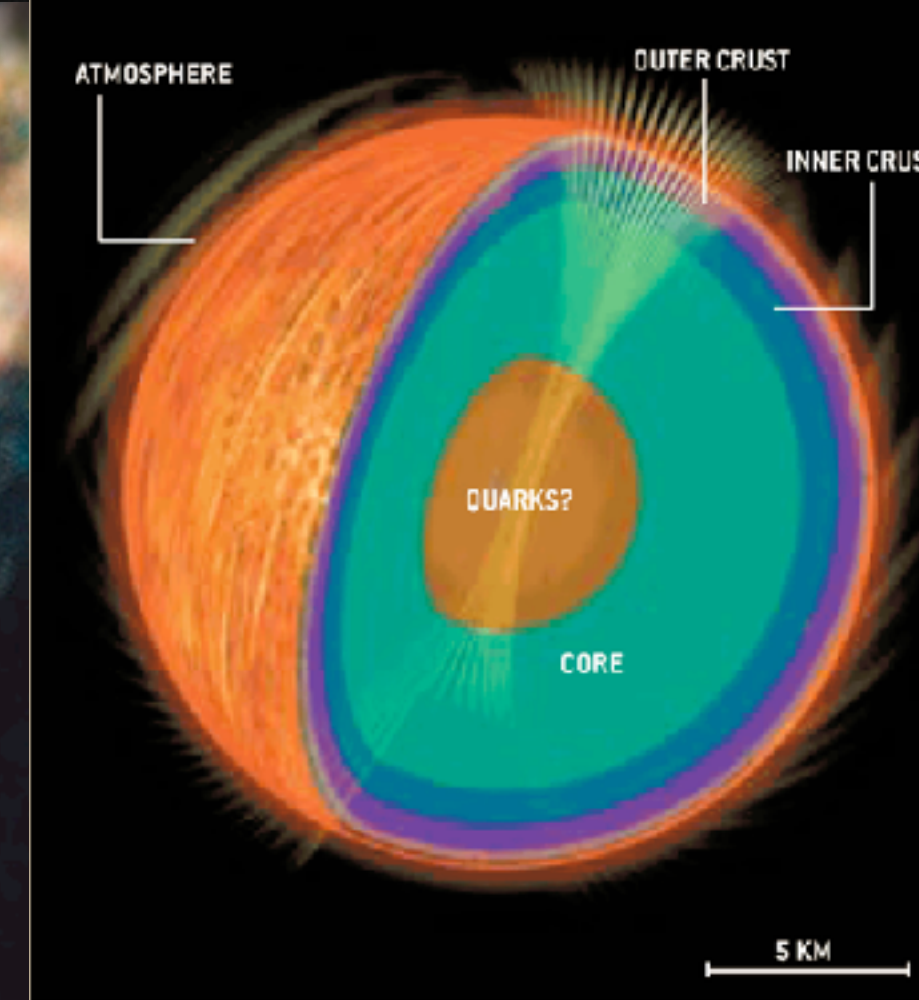
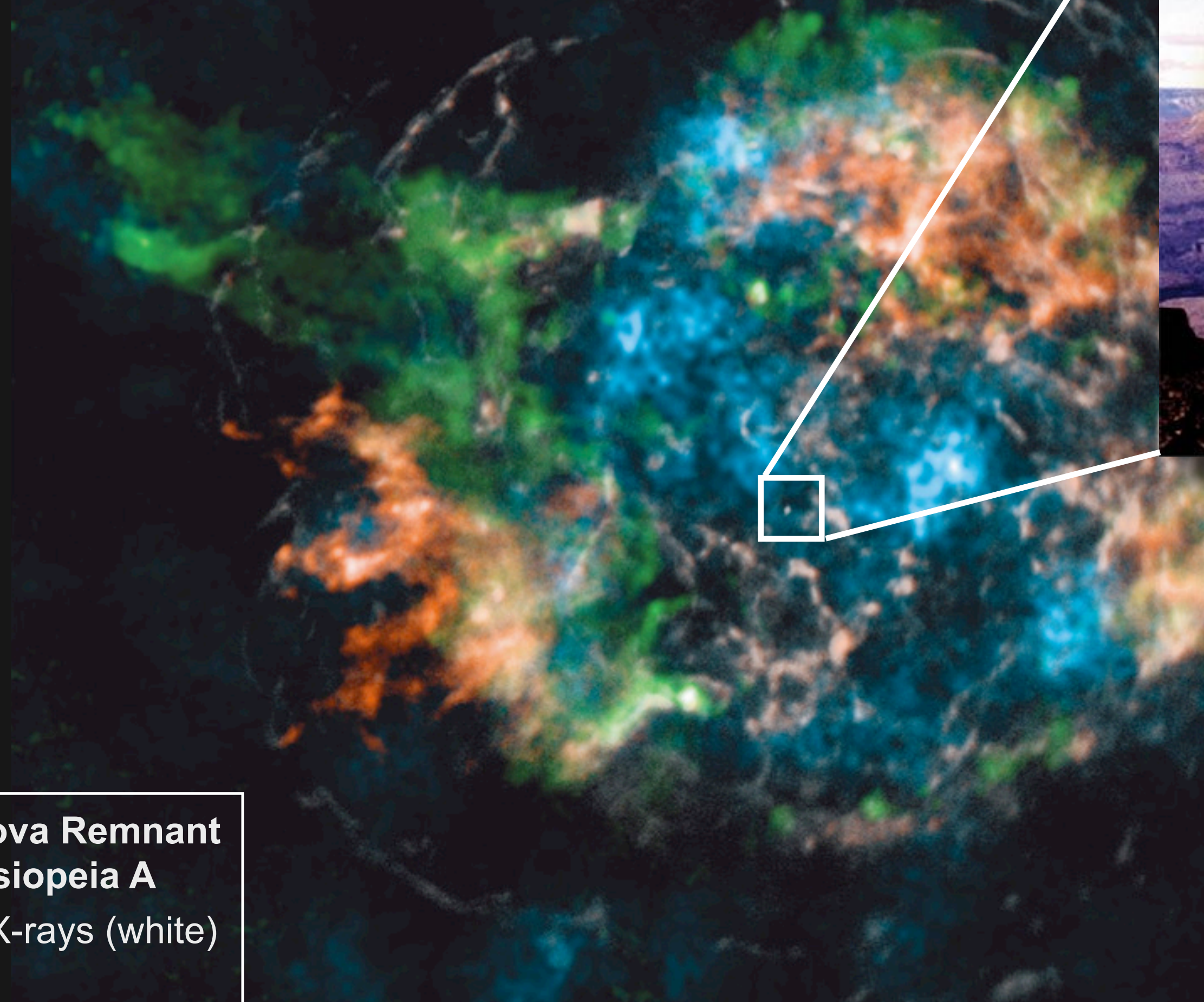
基研研究会「熱場の量子論とその応用」(1時間)

<https://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/TQFT/html2022/tqft2022.html>

# 本日の話題

- 中性子星の観測的な多様性（特にマグネター）
- 国際宇宙ステーションに搭載された NICER
- 中性子星の質量と半径を宇宙観測で計測する
- かにパルサーの巨大電波パルス（高速電波バースト）

# 中性子星 (Neutron star)



**Supernova Remnant  
Cassiopeia A**  
4-6 keV X-rays (white)  
Fe (red)  
Si, Mg (green)  
Ti (blue)

中性子星：半径  $R \sim 12$  km, 質量  $M \sim 1.4 M_{\text{sun}}$   
大質量星の重力崩壊で誕生する

# パルサーの発見 (1967年) は 55年前

論文の出版は翌年、Hewish, Bell, et al., Nature (1968)



## パルサー発見の電波望遠鏡

Four-acre array at the Mullard Radio Astronomy Observatory, Cambridge, UK, Credit: Graham Woan (J. B. Burnell, 2017, Nature astronomy)



## Jocelyn Bell Burnell さん

Credit: Daily Herald Archive  
SSPL / Getty Images

# 天文月報 1969年7月 の鶴田幸子先生の記事

## 中性子星について

鶴田幸子\*

準星，X線源等の問題がまだ解決されず，理論家の頭を悩ませている今，またまたパルサーという奇妙な新しい天体が発見されたことは，すでに天文月報で報告されたとおりである（1968年6月号，1969年1月号）。最近になって，このパルサーが中性子星と関係があるとの説が非常に有力になって来たので，パルサーの中性子星説と関連して，中性子星の解説をしたいと思う。

### 1. 中性子星とは何か

私達の周囲にある物が分子により，原子により作られていることはよく知られているが，物質に圧力をかけていくとどうなるかということは面白い問題である。物質が圧縮され，密度がある程度以上になると，原子もくずれて，原子を構成している原子核と電子とがばらばらに

性子星の研究を発表している。

やがて 1964 年頃，宇宙からくるX線が発見されるに及んで，このX線が中性子星によるのではないかというので一時騒がれたことがあった。しかし研究が進むにつれて，簡単な中性子星のみの仮説では，観測された線の特徴を説明出来ないという結果になった。ところがはじめにふれたように，最近のパルサーの発見により，中性子星の問題が再び注目を浴びるようになった次第である。

### 3. 中性子星の内部構造について

一般に物質の塊が星という天体の状態で存続するためにはさまざまな安定の条件を満たさなければならず，そのため安定した星の取り得る質量，半径などの値はおの

# 中性子星の研究史は、ほぼ1世紀

- ・1932年 チャドウィックが中性子を発見 (1935年にノーベル物理学賞)
- ・1934年 バーデとツビッキーが、超新星爆発の後に、中性子からなる天体が残る可能性を指摘
- ・1939年 オッペンハイマーとヴォルコフが、中性子星の質量と半径を理論的に計算
- ・1967年 ベルとヒューイッシュが、パルサー PSR B1919+21 を発見 (1974年にノーベル物理学賞)
- ・1968年 かに星雲の中心に、かにパルサーが発見される
- ・1974年 ハルスとテイラーが連星パルサーで重力波の間接的な証明 (1993年にノーベル物理学賞)
- ・1979年 大マゼラン雲にあるマグネター SGR 0526-66 から軟ガンマ線での巨大フレアが検出
- ・1982年 バッカーらが、最初のミリ秒パルサー PSR B1937+21 を発見
- ・1992年 ミリ秒パルサー PSR B1257+12 に、複数の惑星が発見
- ・2007年 ロリマーらが、パークス電波望遠鏡のアーカイブデータに最初の高速度電波バーストを発見
- ・2017年 LIGO と Virgo が連星中性子星の合体にともなう重力波イベント GW170817 を検出
- ・2020年 銀河系内のマグネター SGR 1935+2154 から FRB と X線バーストが同時に観測

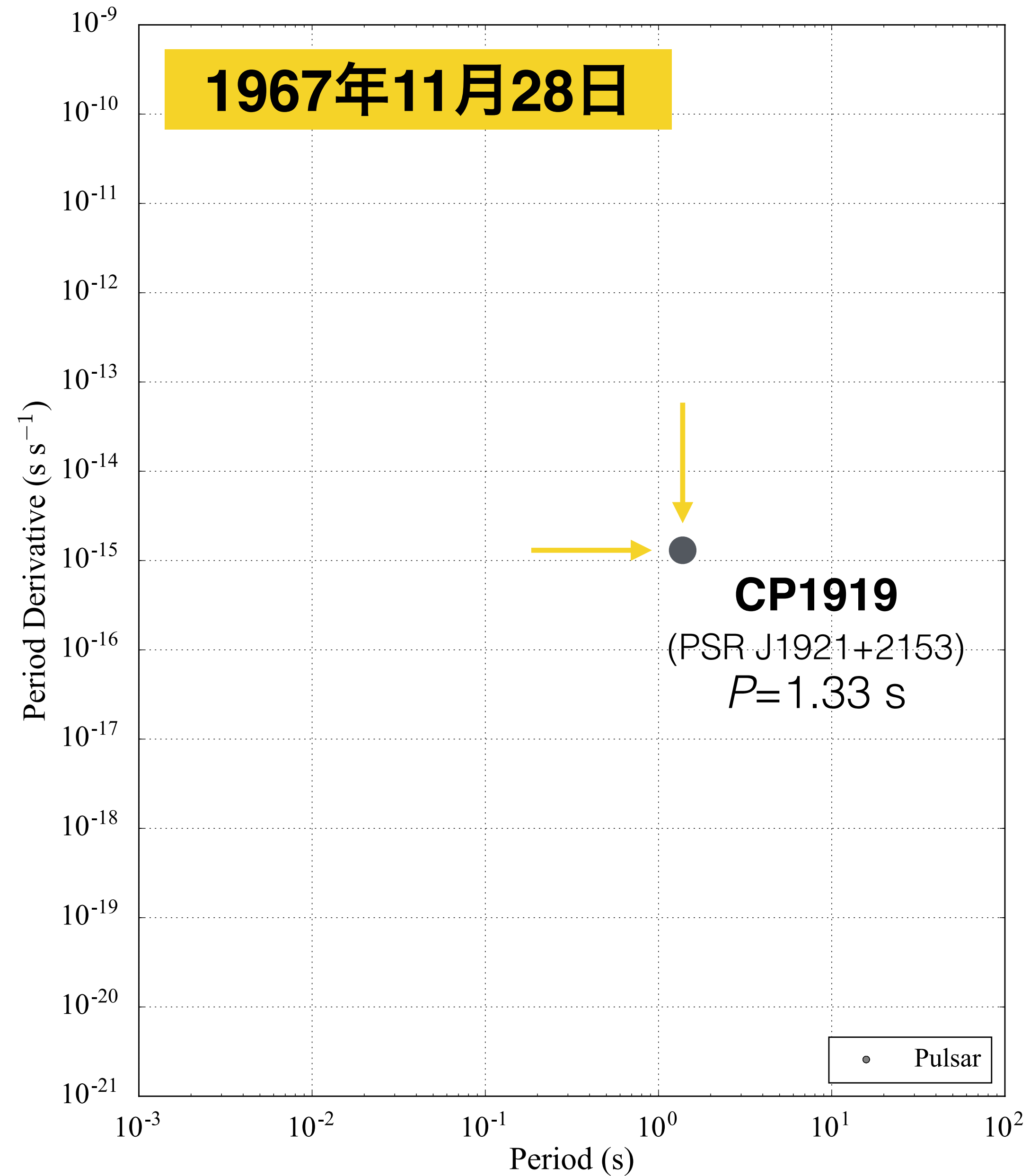
発見より30年以上も前から、中性子星の内部構造や質量と半径の理論計算  
→ 宇宙観測と原子核研究のクロスオーバーの意義を何よりも表す歴史

# 宇宙科学に関するノーベル物理学賞

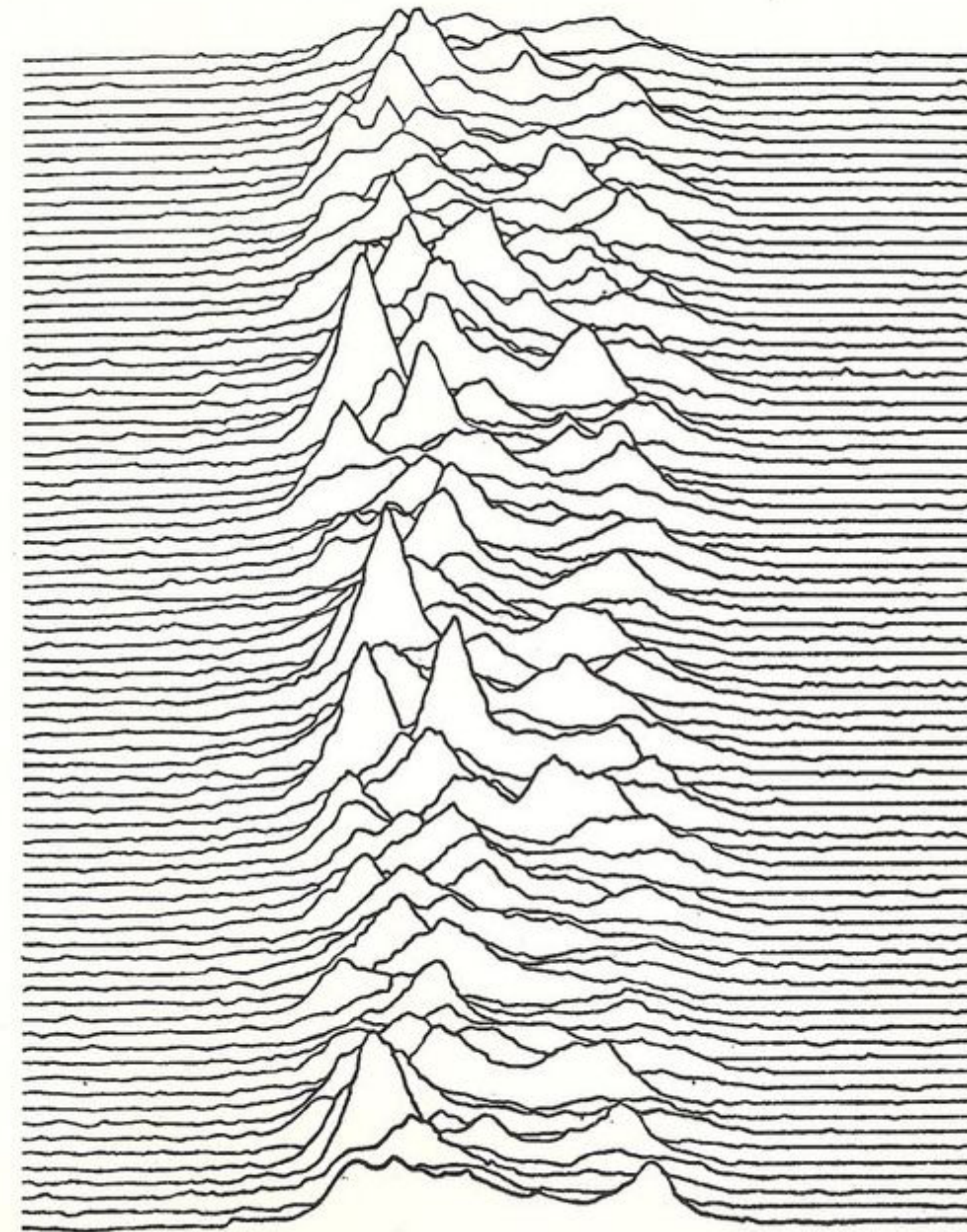
- ・1936年 ヘス, 宇宙線の発見
- ・1967年 ベーテ, 原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見
- ・1974年 ライル, 電波天文学における先駆的研究 (観測および発明、特に開口合成技術に関して)
- ・1974年 ヒューイッシュ, 電波天文学における先駆的研究 (パルサーの発見に果たした決定的な役割)
- ・1978年 ペンジアスとウィルソン, 宇宙マイクロ波背景放射の発見
- ・1983年 チャンドラセカール, 星の構造および進化にとって重要な物理的過程に関する理論的研究
- ・1983年 ファウラー, 宇宙の化学元素の生成で重要な原子核反応に関する理論的および実験的研究
- ・1993年 ハルスとテイラー, 重力研究の新しい可能性を開いた新型連星パルサーの発見
- ・2002年 ジャコーニ, 宇宙X線源の発見を導いた天体物理学への先駆的貢献
- ・2002年 デイビスと小柴, 天体物理学への先駆的貢献、特に宇宙ニュートリノの検出
- ・2006年 マザーとスムート, 宇宙マイクロ波背景放射が黒体放射およびその非等方性の発見
- ・2011年 パールマッター, シュミット, リース, 遠方の超新星の観測を通じた宇宙の加速膨張の発見
- ・2015年 梶田とマクドナルド, ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見
- ・2017年 ワイス, バリッシュ, ソーン, LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献
- ・2019年 マイヨールとケロー, 太陽型恒星を周回する太陽系外惑星の発見
- ・2019年 ピーブルス, 物理宇宙論における理論的発見
- ・2020年 ゲンツェルとゲズ, 銀河系の中心にある超大質量コンパクト天体の発見

何らかの形で特に  
中性子星に関する研究

# パルサー発見から半世紀

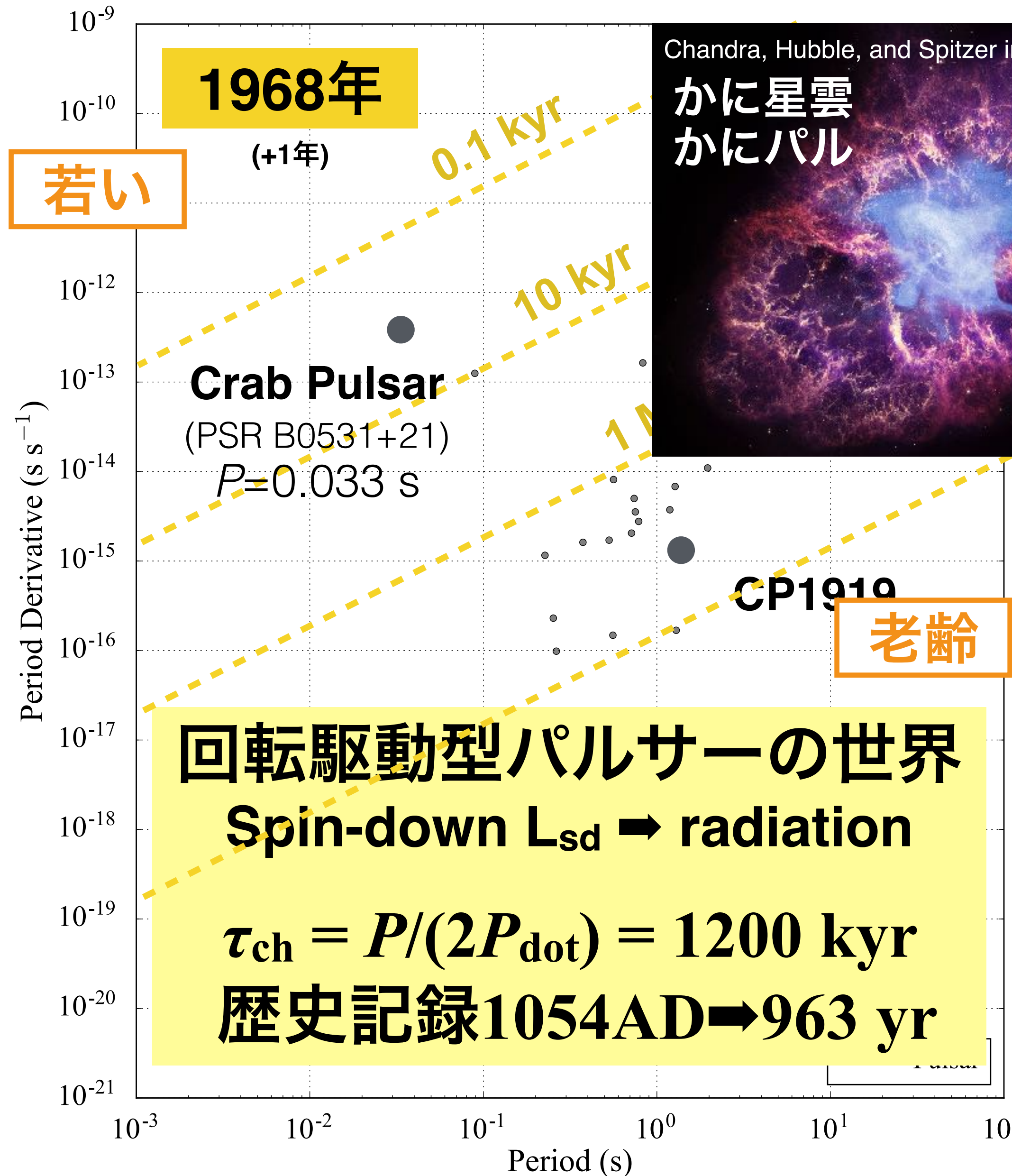


6.7: Successive pulses from the first pulsar discovered, CP 1919, are here superimposed vertically. The pulses occur every 1.337 seconds. They are caused by a rapidly-spinning neutron star.

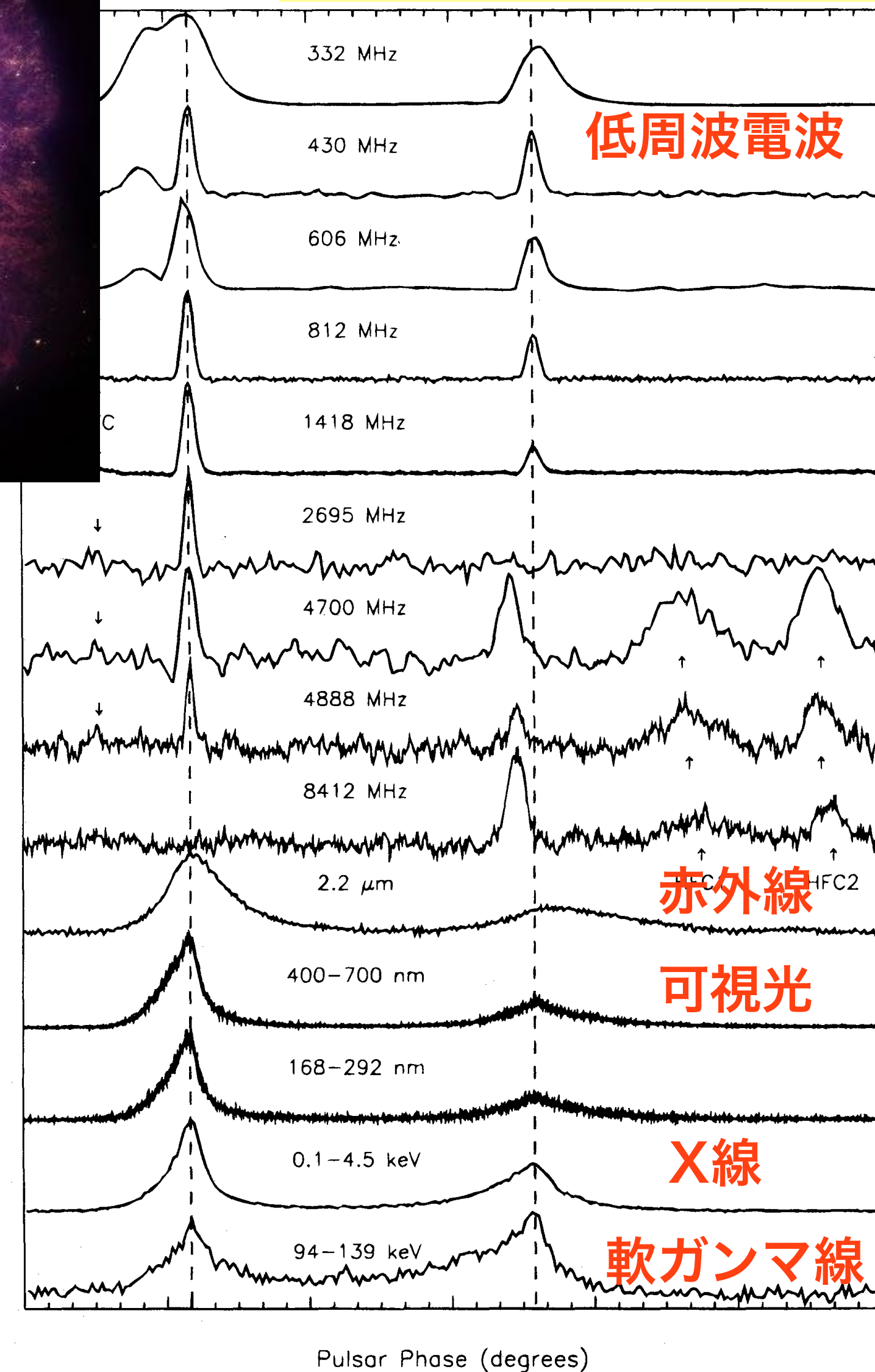




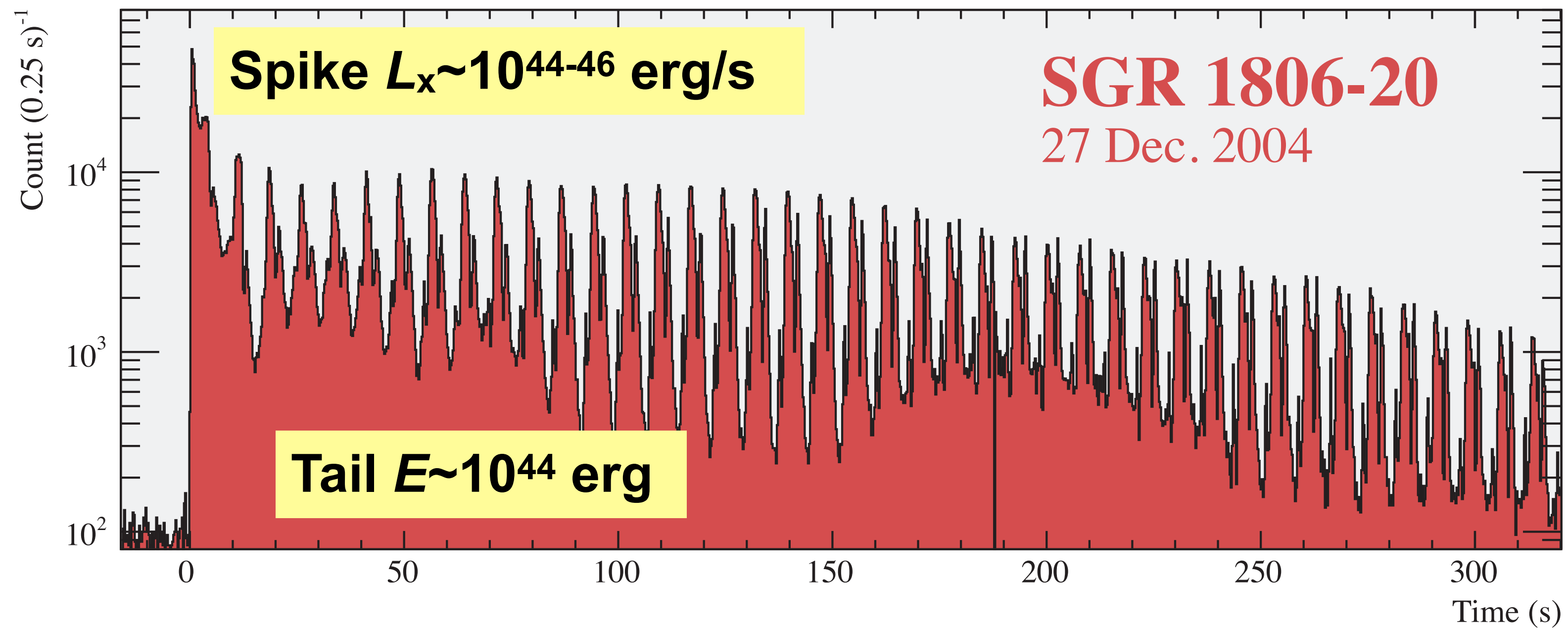
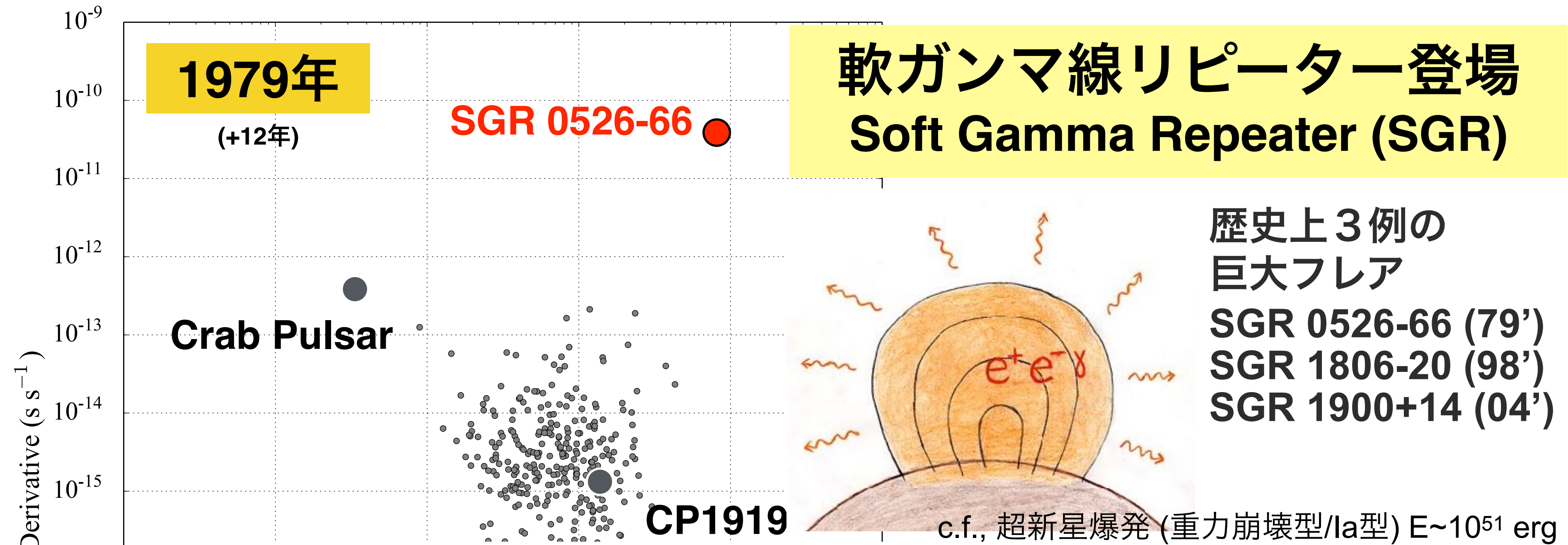
# パルサー発見から半世紀



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

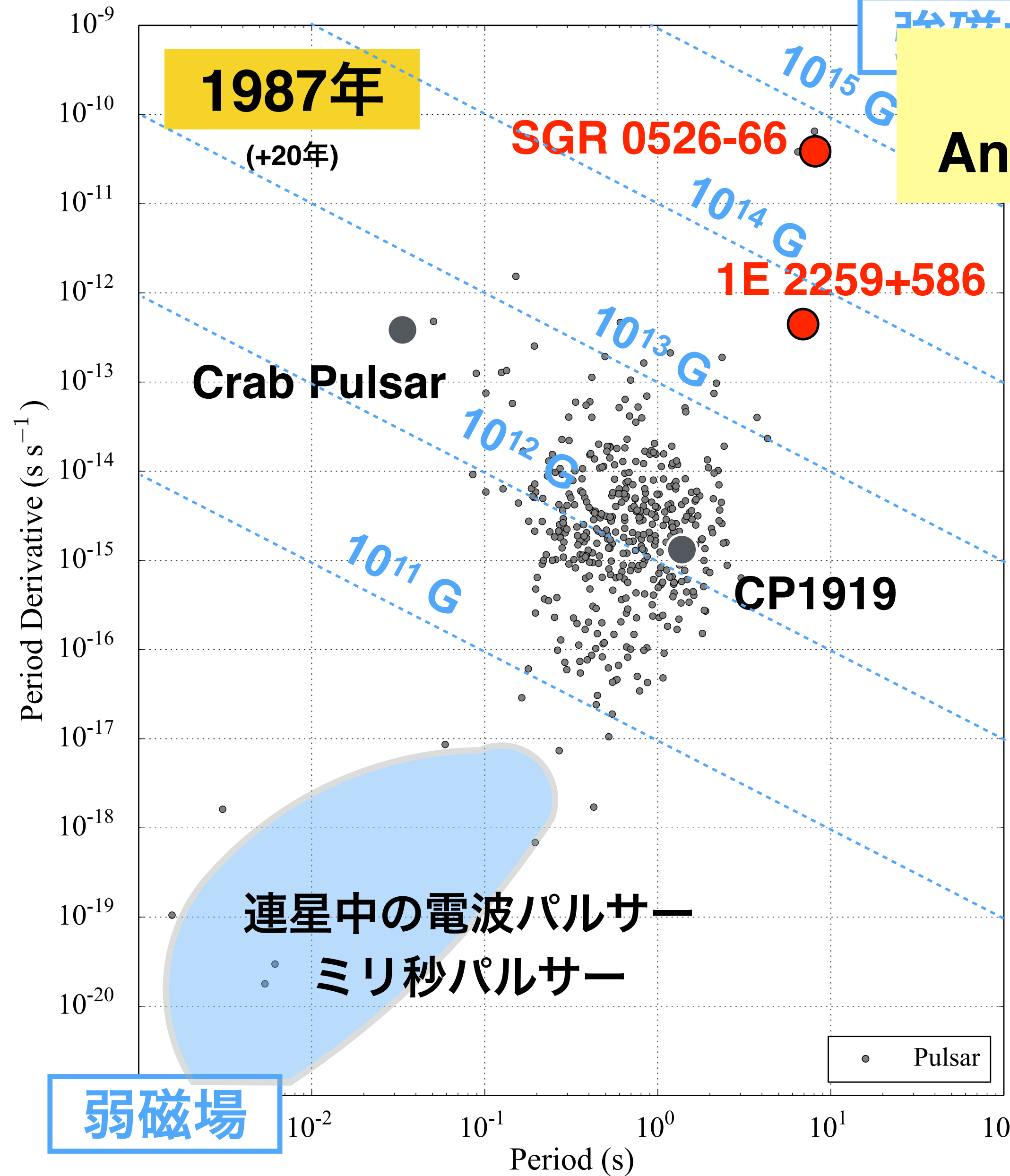


# パルサー発見から半世紀

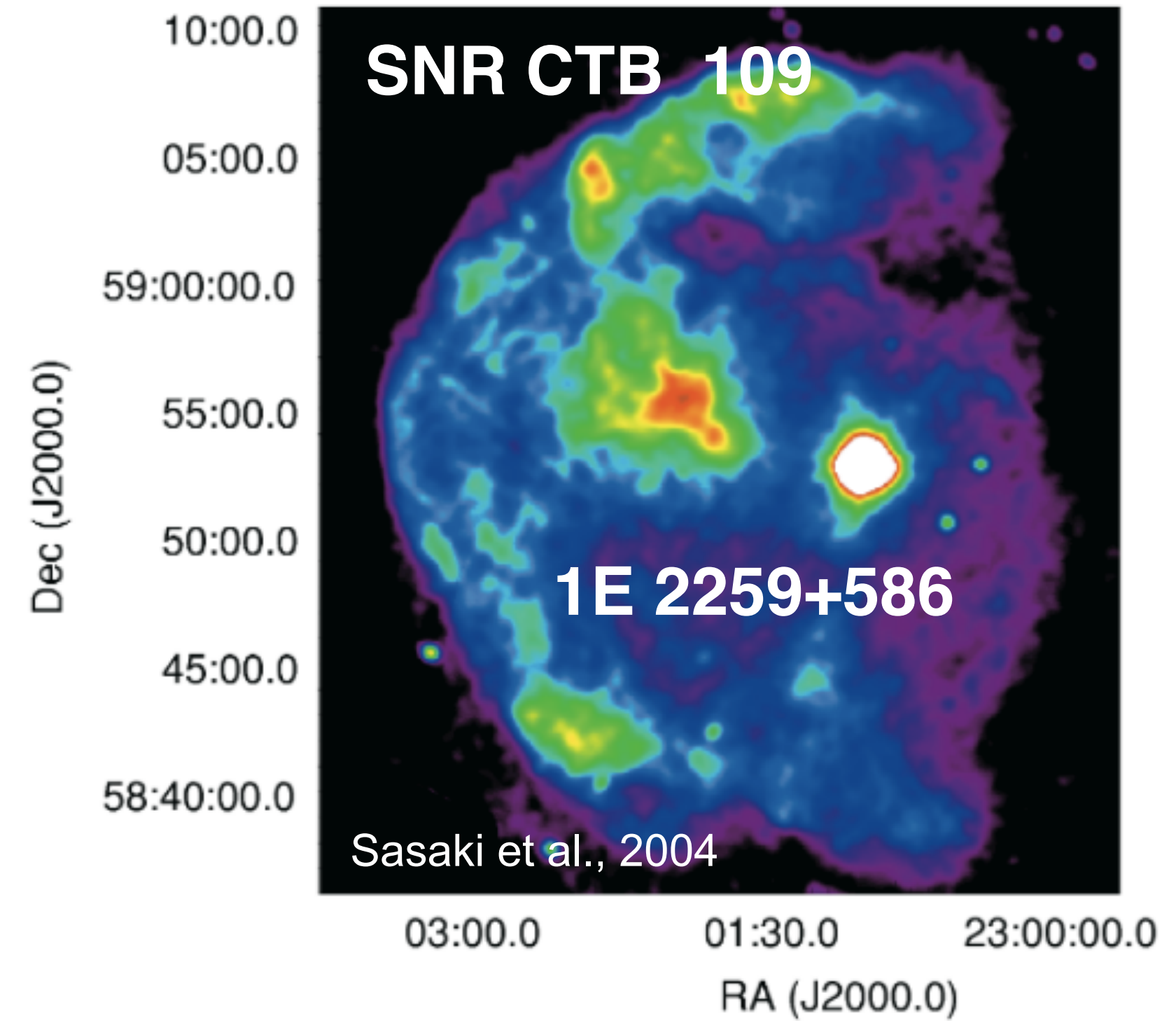


# パルサー発見から半世紀

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

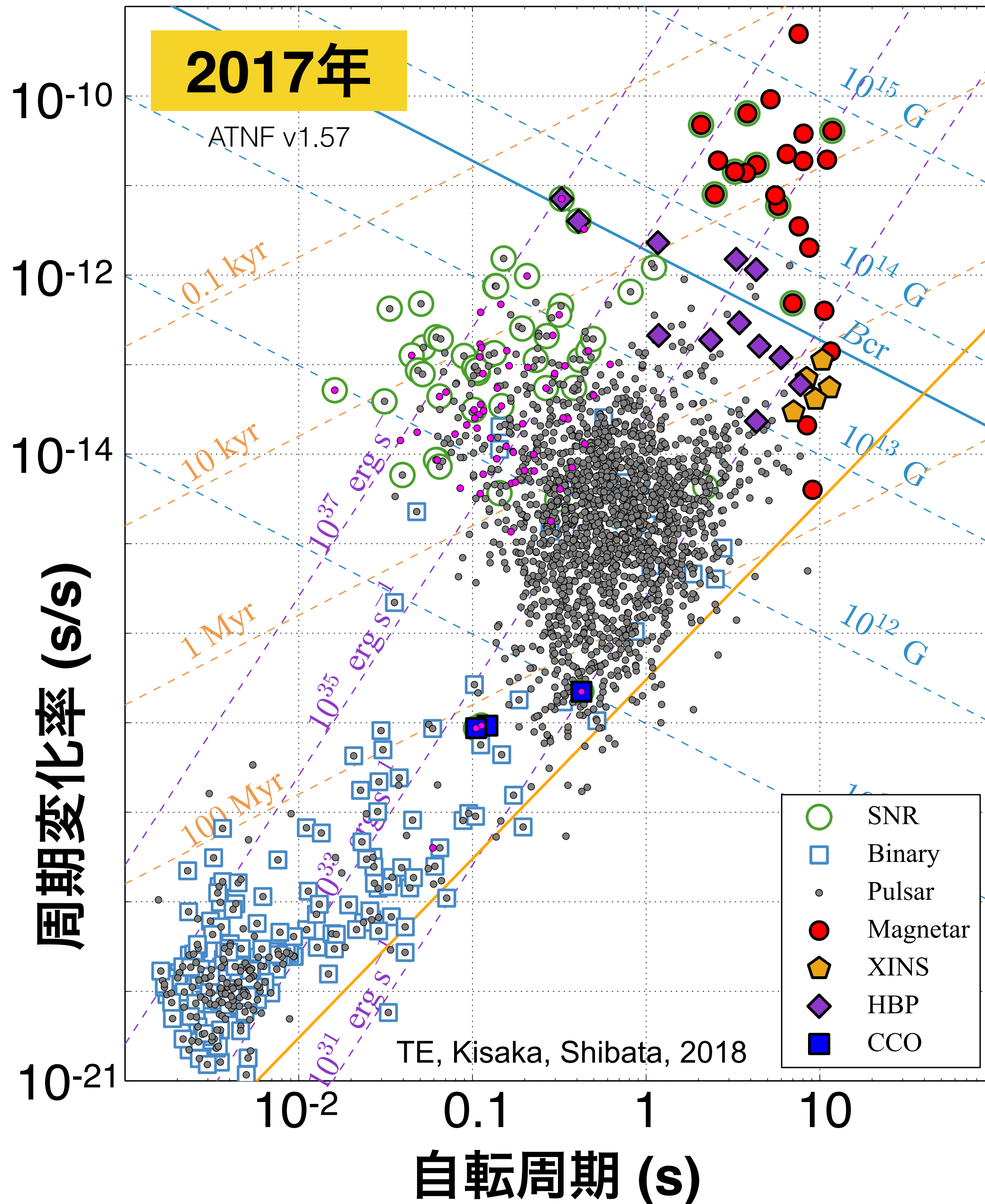


特異X線パルサー  
Anomalous X-ray Pulsar (AXP)



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

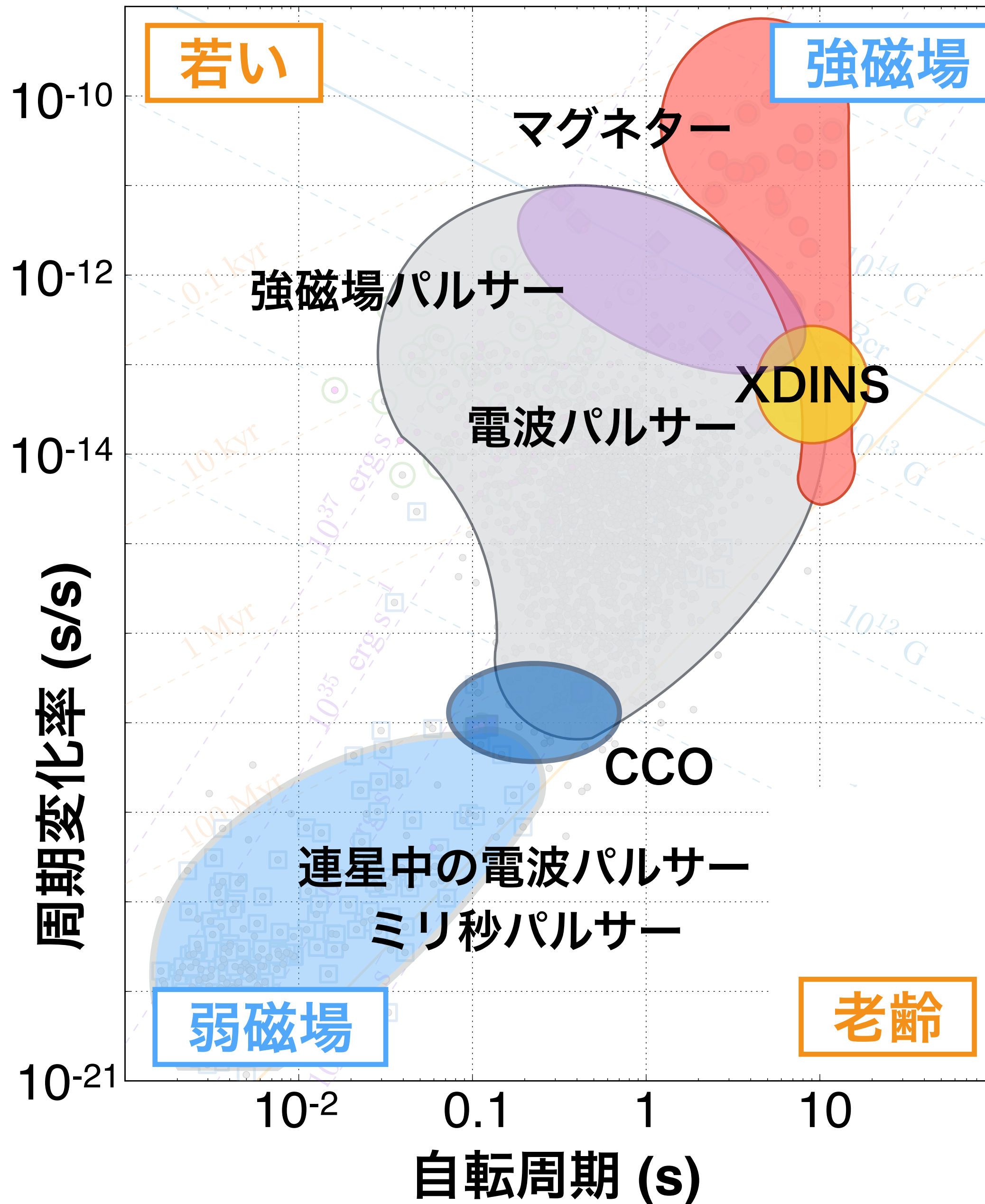
# 中性子星の多様性: 進化の統一的な理解へ



2500個以上のパルサー  
(銀河系に  $10^5$  個存在?)

- 可視光 ~20 天体
- X線 ~100 天体
- ガンマ線 ~200 天体

# 中性子星の多様性: 進化の統一的理解へ



2500個以上のパルサー  
(銀河系に  $10^5$  個存在?)

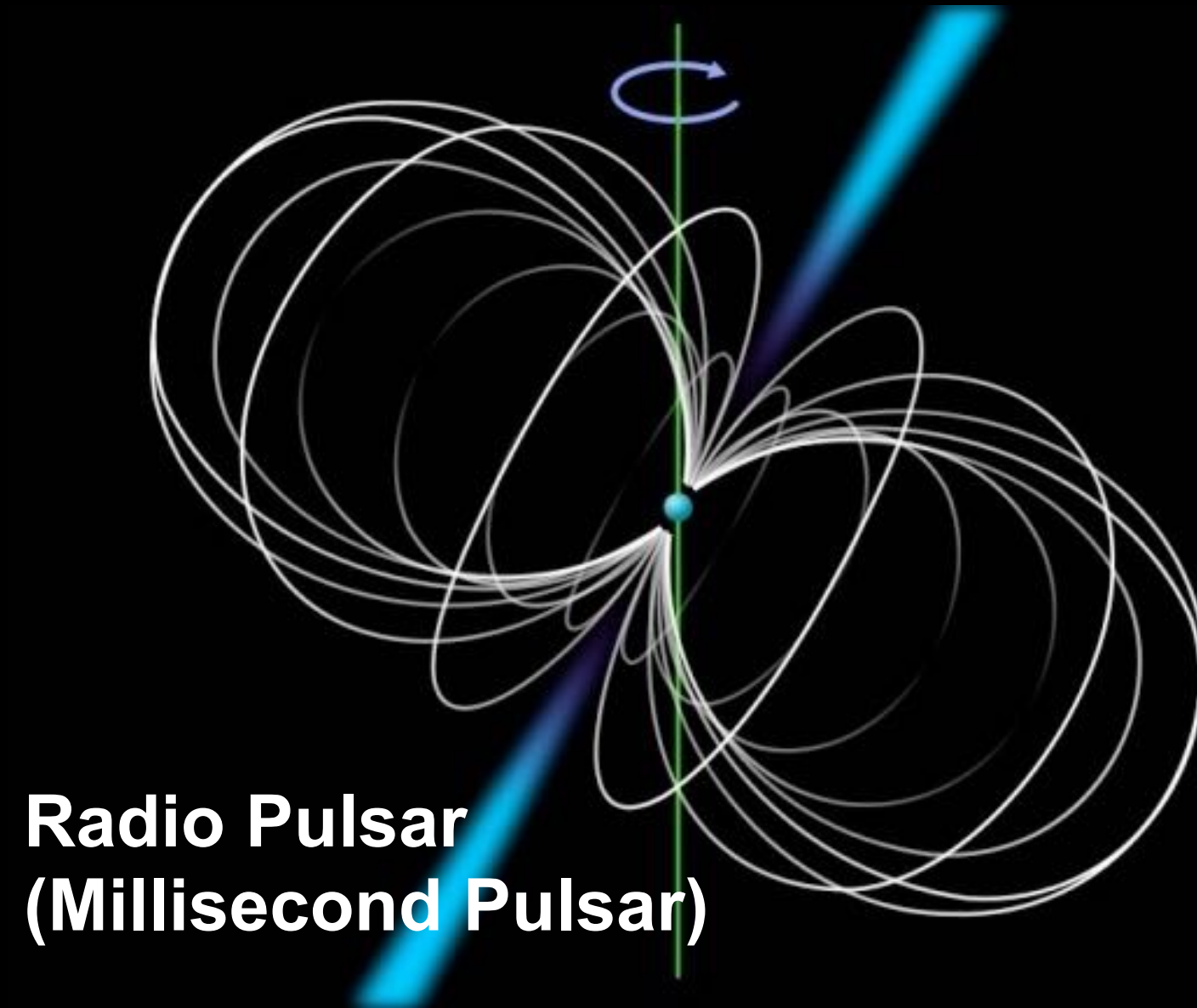
- 可視光 ~20 天体
- X線 ~100 天体
- ガンマ線 ~200 天体

「中性子星」研究の醍醐味は基礎物理と多様性が両立！

統一的理解への挑戦  
(どう進化するか?)

# Energy sources of neutron stars

**Rotation**



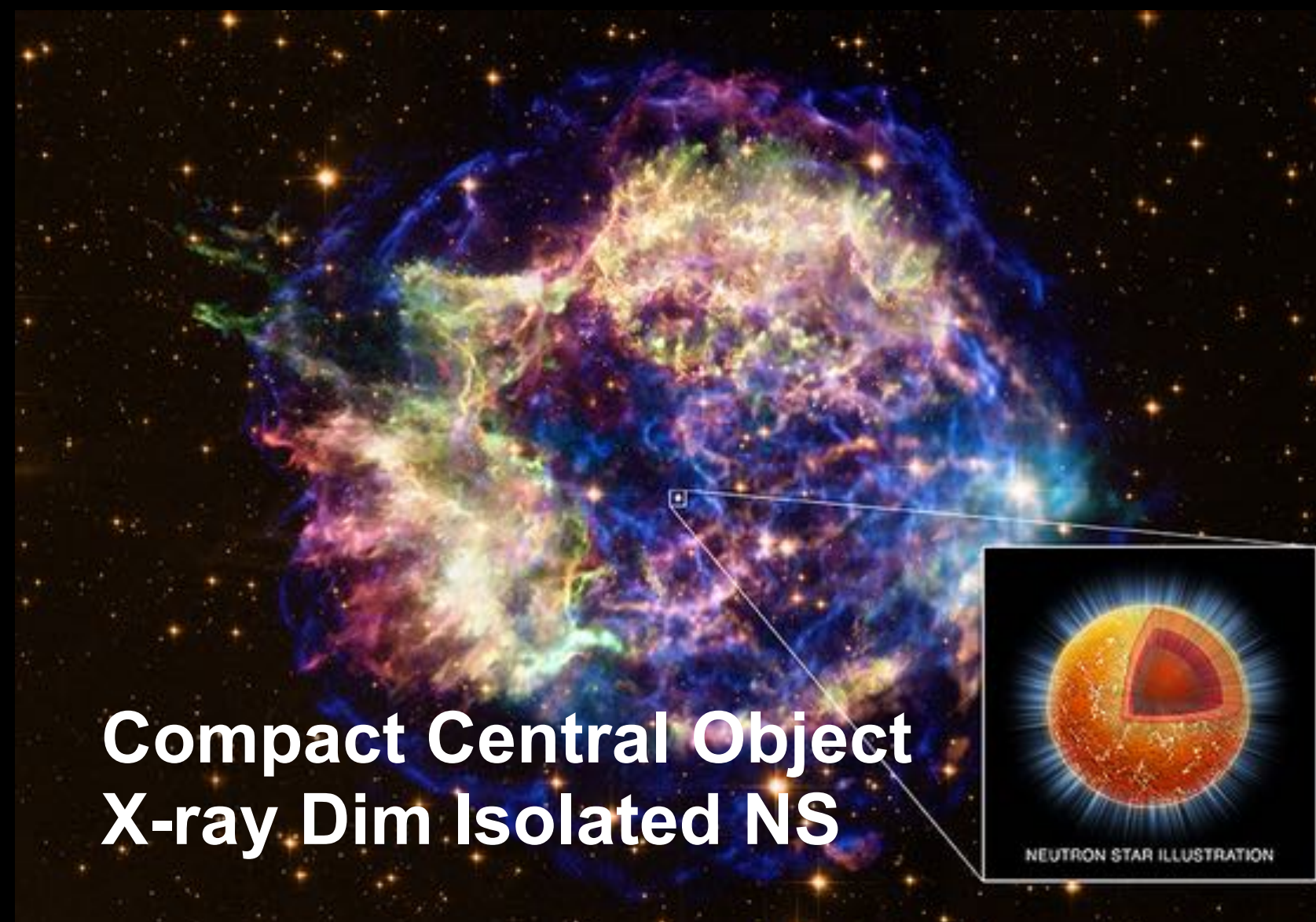
Radio Pulsar  
(Millisecond Pulsar)

**Accretion**



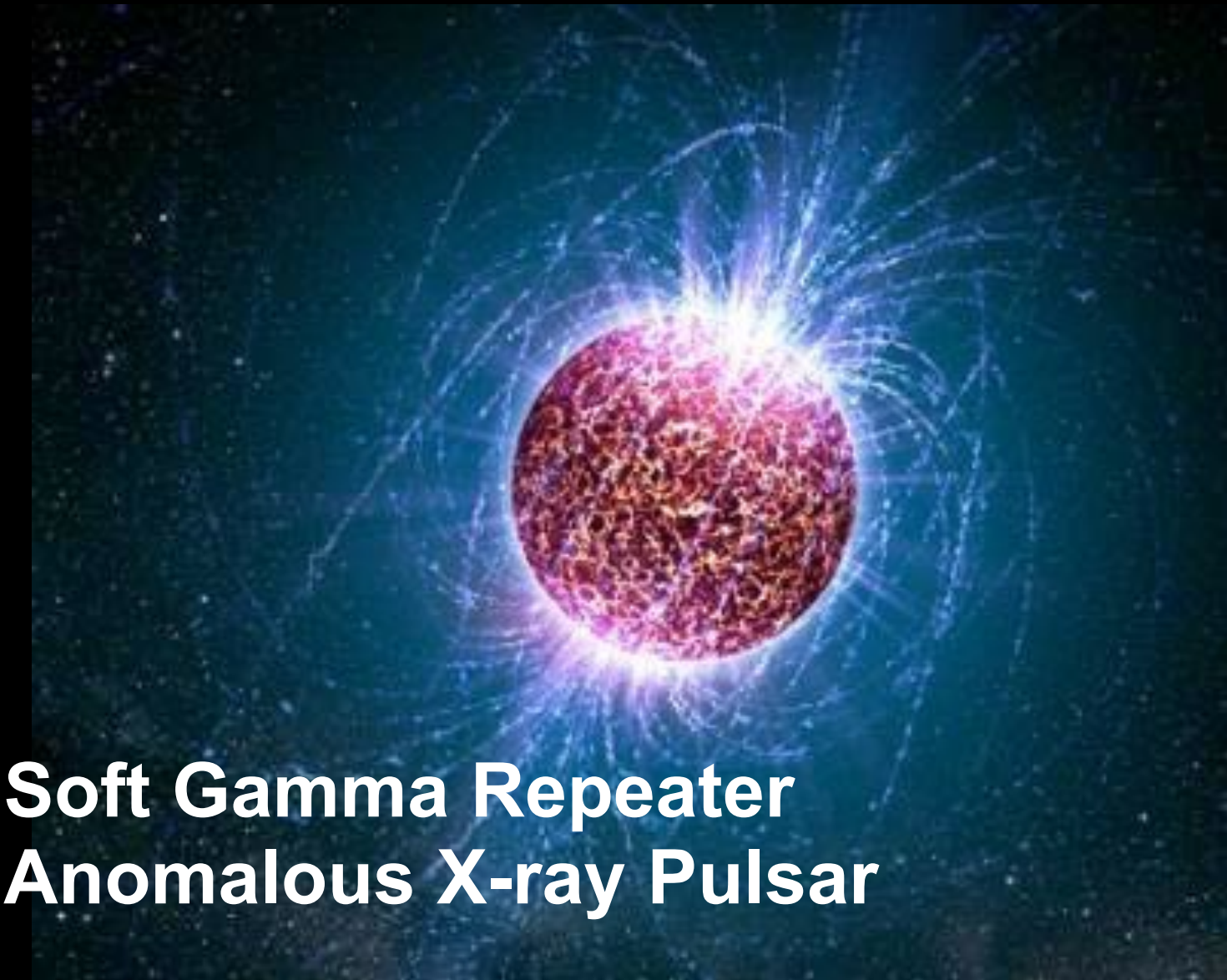
High Mass X-ray Binary  
Low Mass X-ray binary

**Thermal**



Compact Central Object  
X-ray Dim Isolated NS

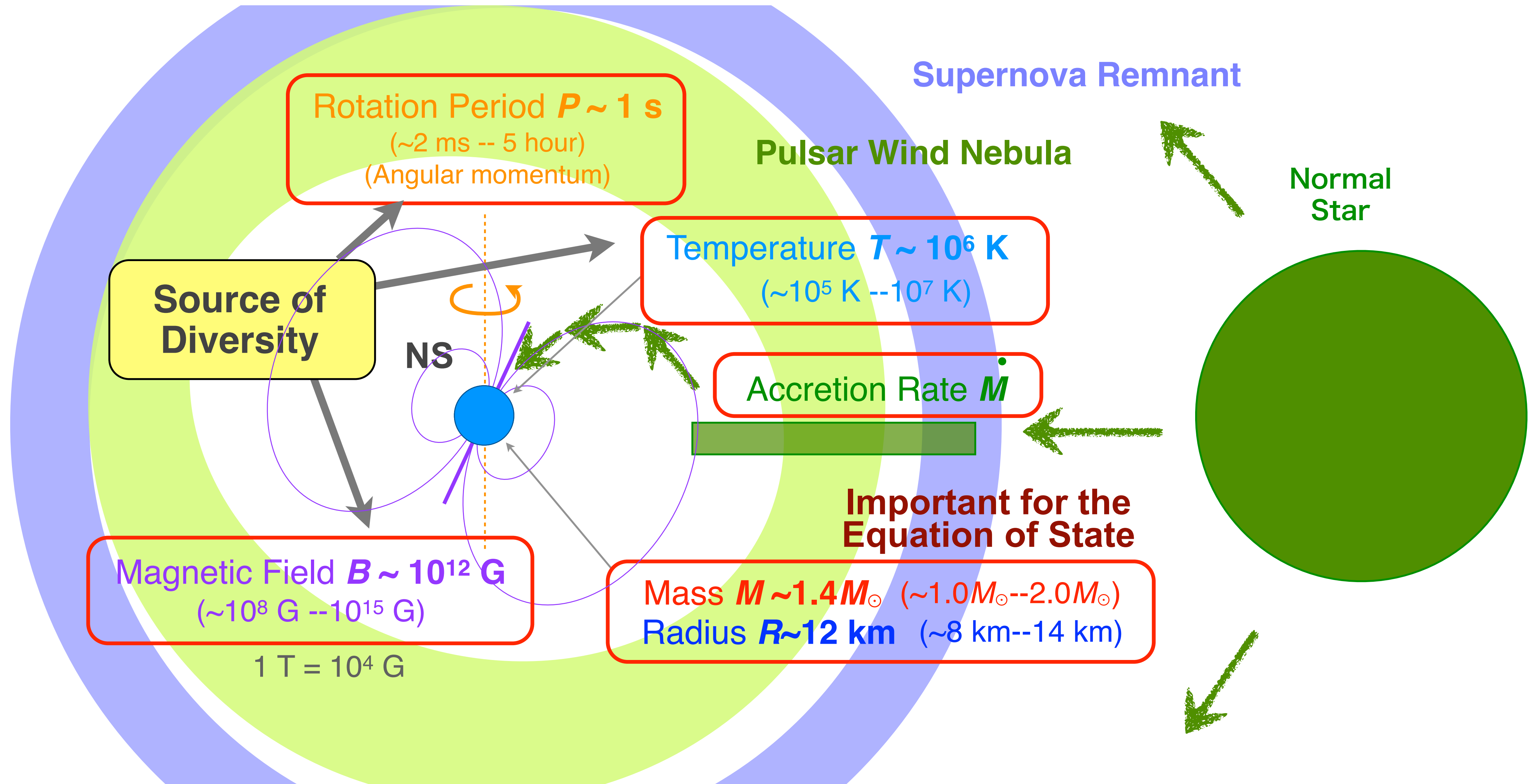
**Magnetic**



Soft Gamma Repeater  
Anomalous X-ray Pulsar

# Neutron stars as laboratories for extreme physics

- Dense nuclear matter, strong gravity, rapid rotation, and strong magnetic field



## Review

# Observational diversity of magnetized neutron stars

Teruaki Enoto<sup>1</sup> , Shota Kisaka<sup>2,3,4</sup> and Shinpei Shibata<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Astronomy and The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, Kyoto 606-8302, Japan

<sup>2</sup> Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, Sendai, 980-8578, Japan

<sup>3</sup> Astronomical Institute, Tohoku University, Sendai, 980-8578, Japan

<sup>4</sup> Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, Sagamihara, 252-5258, Japan

<sup>5</sup> Department of Physics, Yamagata University, Kojirakawa 1-4- 12, Yamagata, 990-8560 Japan

E-mail: [teruaki\\_enoto@10.alumni.u-tokyo.ac.jp](mailto:teruaki_enoto@10.alumni.u-tokyo.ac.jp), [kisaka@astr.tohoku.ac.jp](mailto:kisaka@astr.tohoku.ac.jp)  
and [shibata.shimpei@gmail.com](mailto:shibata.shimpei@gmail.com)

Received 8 August 2018, revised 8 May 2019

Accepted for publication 22 August 2019

Published 24 September 2019

Corresponding Editor Professor Gordon Baym

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6633/ab3def>

Python code to draw P-Pdot diagram

[https://colab.research.google.com/drive/1hrA6KDAILf1IJT9NinFYIR6X9iskG\\_td](https://colab.research.google.com/drive/1hrA6KDAILf1IJT9NinFYIR6X9iskG_td)



# 本日の話題

- 中性子星の観測的な多様性（特にマグネター）
- 国際宇宙ステーションに搭載された NICER
- 中性子星の質量と半径を宇宙観測で計測する
- かにパルサーの巨大電波パルス（高速電波バースト）

# Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER)

Soft X-ray timing spectroscopy for neutron star structure, dynamics, and energetics as the ISS external attached payload with active pointing, launched on June 3, 2017

© NASA/GSFC, NICER Team

- 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)

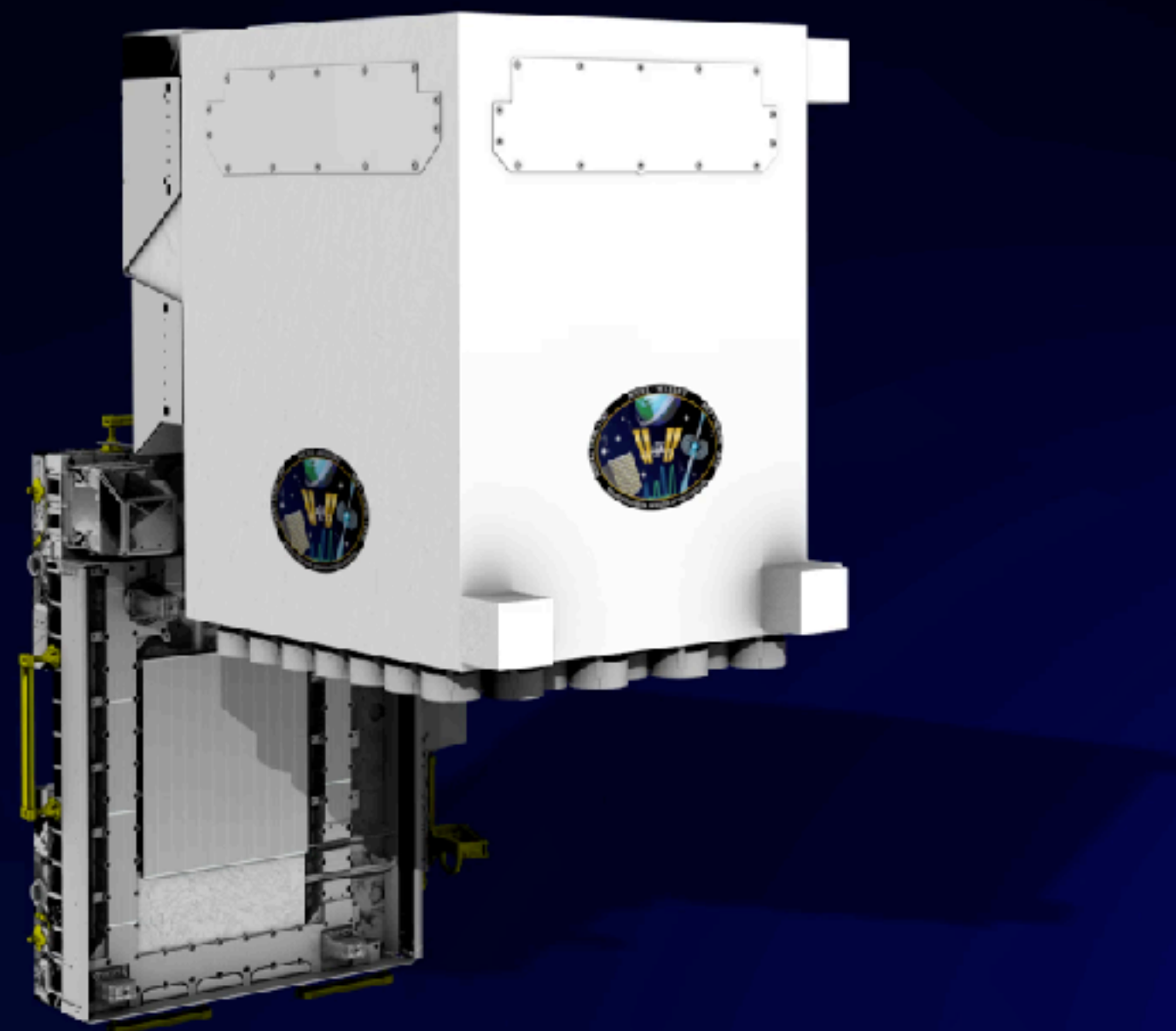
Gendreau et al., SPIE (2012), Arzoumanian et al., (2014)

# NICER

Neutron Star Interior Composition Explorer

(c) NICER Team

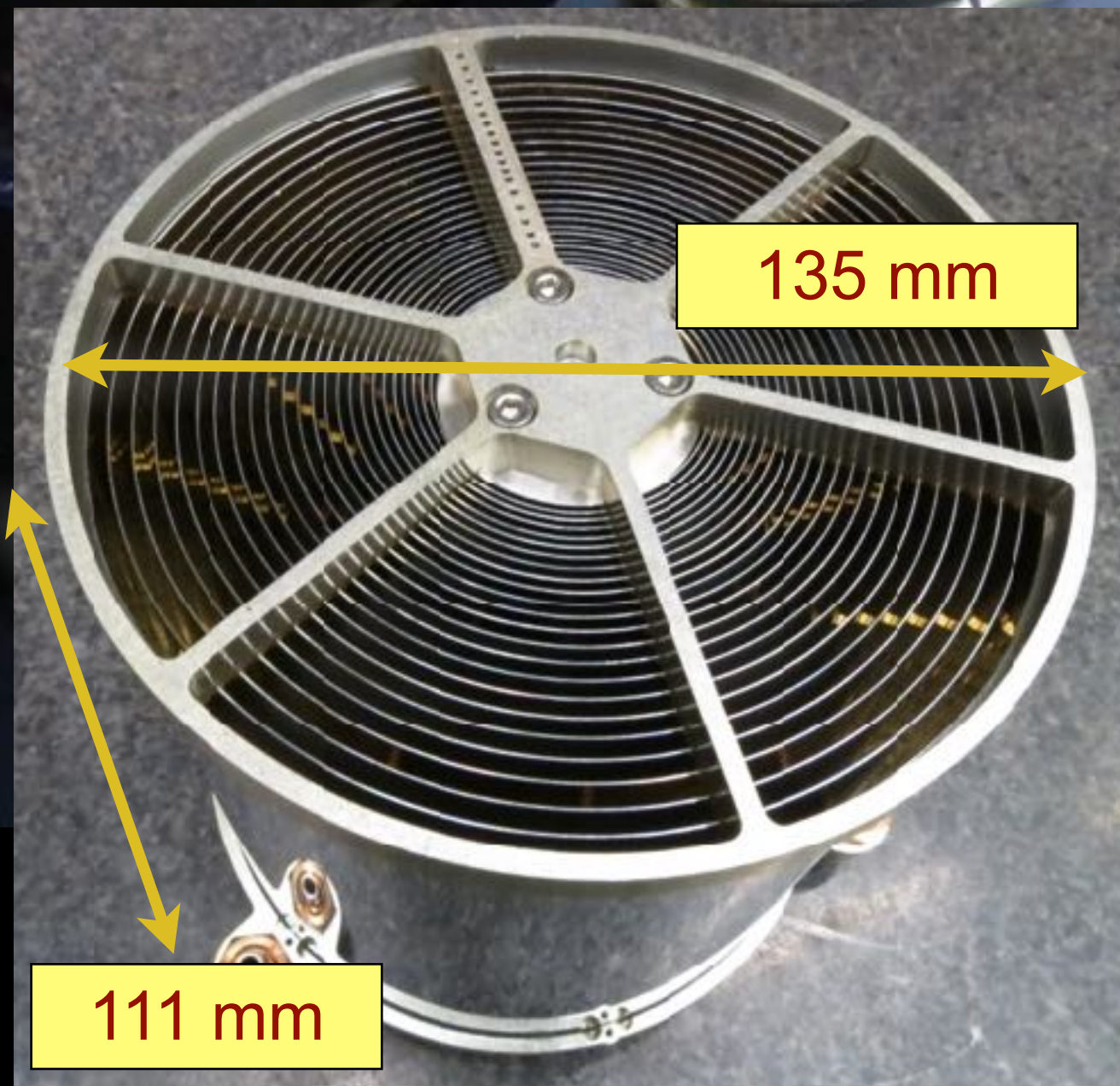
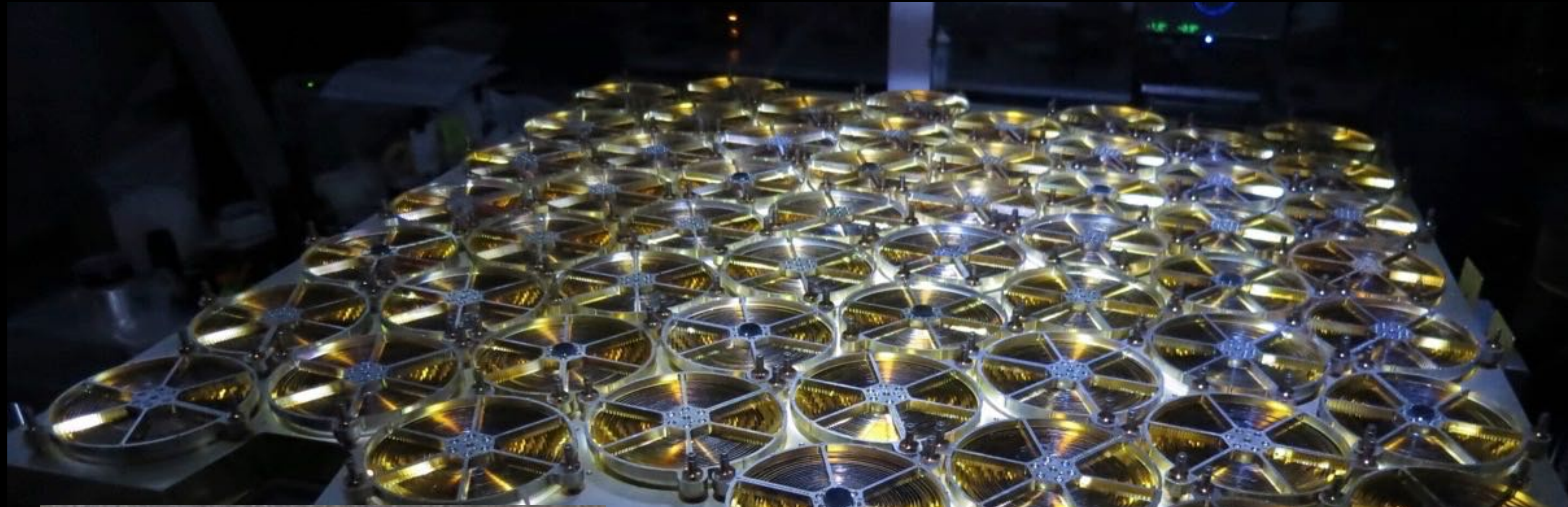
(PI: K. Gendreau, NASA/GSFC)



- 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)

# X線集光系 (X-Ray Concentrator optics; XRC)

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

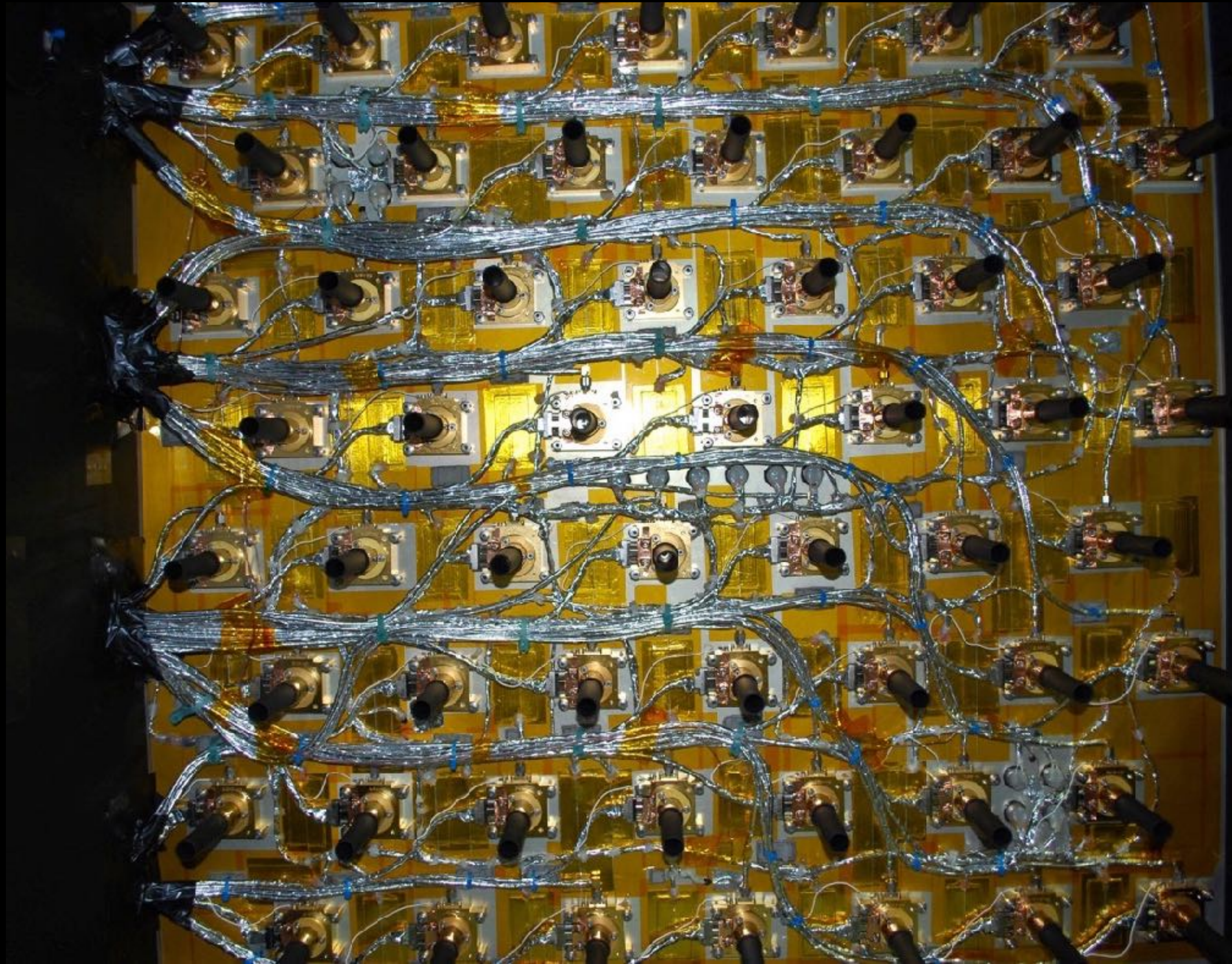


- Multiple 24 shells are confocally nested to increase an effective area. (24x56=1344 foils)
- Grazing incidence optic of a parabolic gold surface to focus X-rays onto a detector (2 mm).
- Focal length = 1085 mm
- Total effective area > 1800 cm<sup>2</sup> @1.5 keV

**NASA 検出器チームの一員として  
X線集光系の開発と製作に携わる**

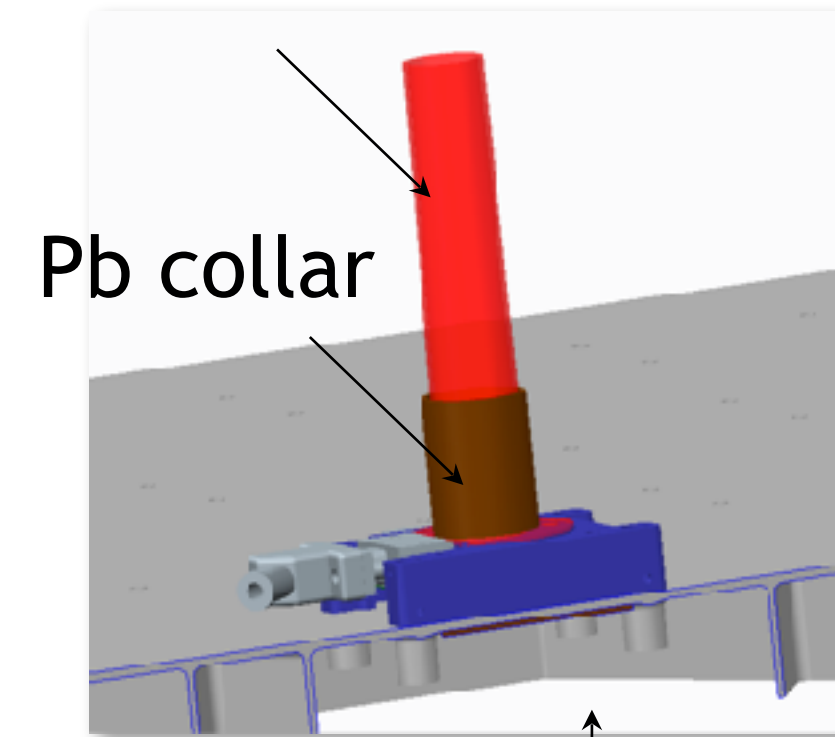
# Silicon Drift Detectors (SDDs)

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

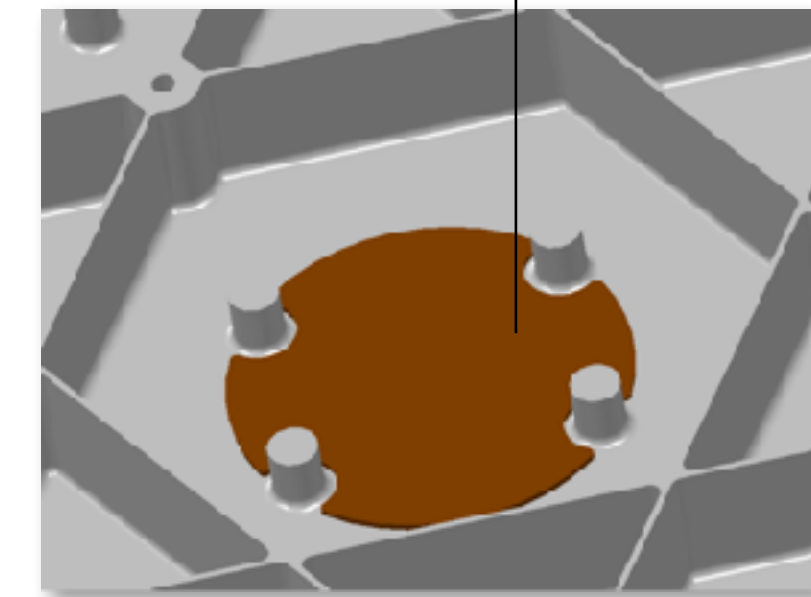


*Radiation  
shielding*

Au/Ag “traffic cone”



Pb disk



# 2017年6月3日 スケースX社による打ち上げ

NICER を搭載したファルコン9 ロケット@ケネディ宇宙センター

SpaceX "CRS-11 Hosted Webcast" YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=JuZBOUMsYws>

# 2017年6月3日 スペースX社による打ち上げ



Buzz Aldrin

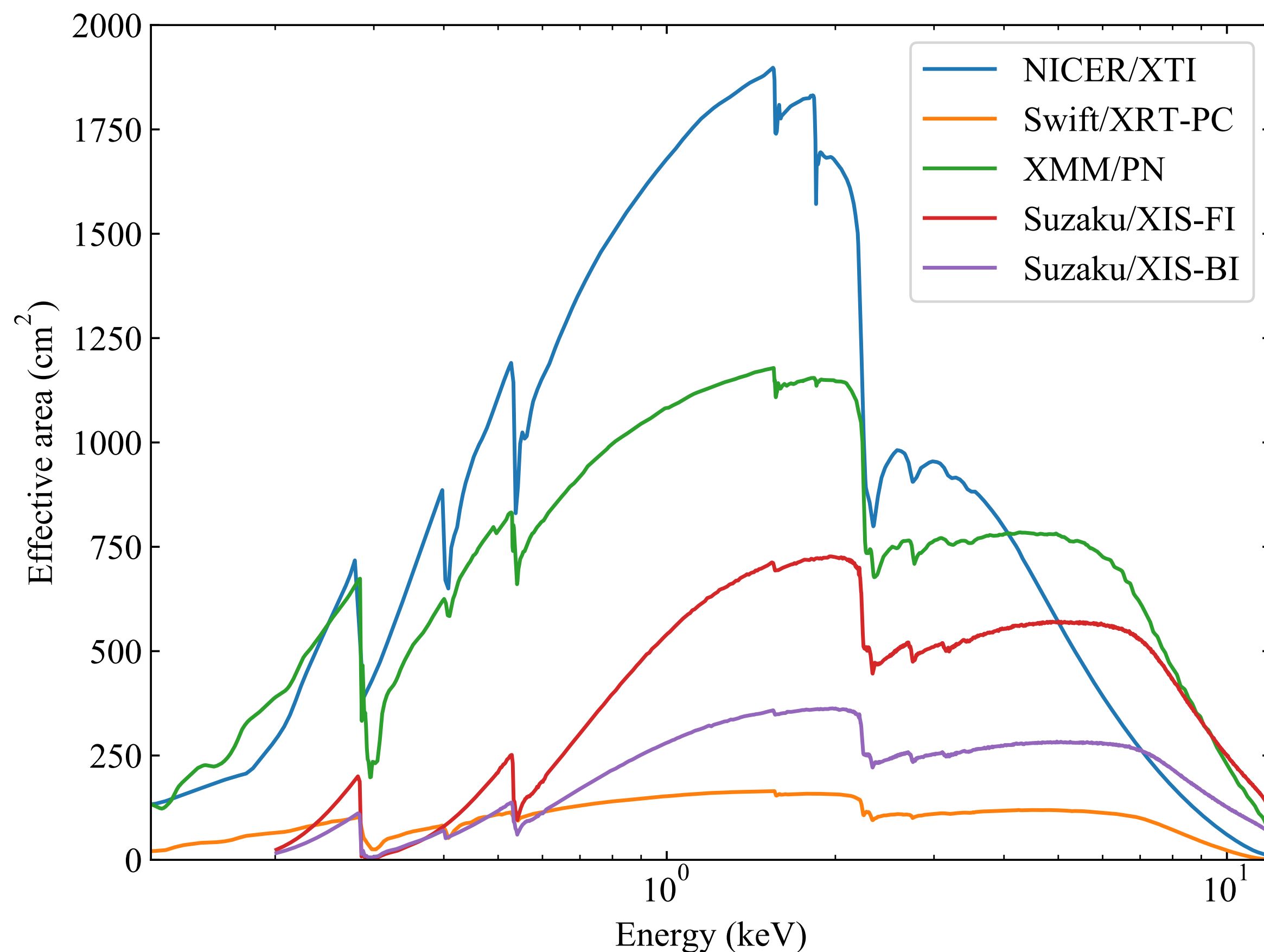
榎戸

K. Gendreau



NICER を搭載したファルコン9ロケット@ケネディ宇宙センター

# NICER の大有効面積の威力



- 1.5 keVでXMM-Newton 衛星の約2倍にあたる1900 cm<sup>2</sup>の有効面積を使い、かにパルサーの巨大電波パルスに伴うX線増幅を発見

Enoto et al., Science, 372, 187-190 (2021) [arXiv: 2104.03492]

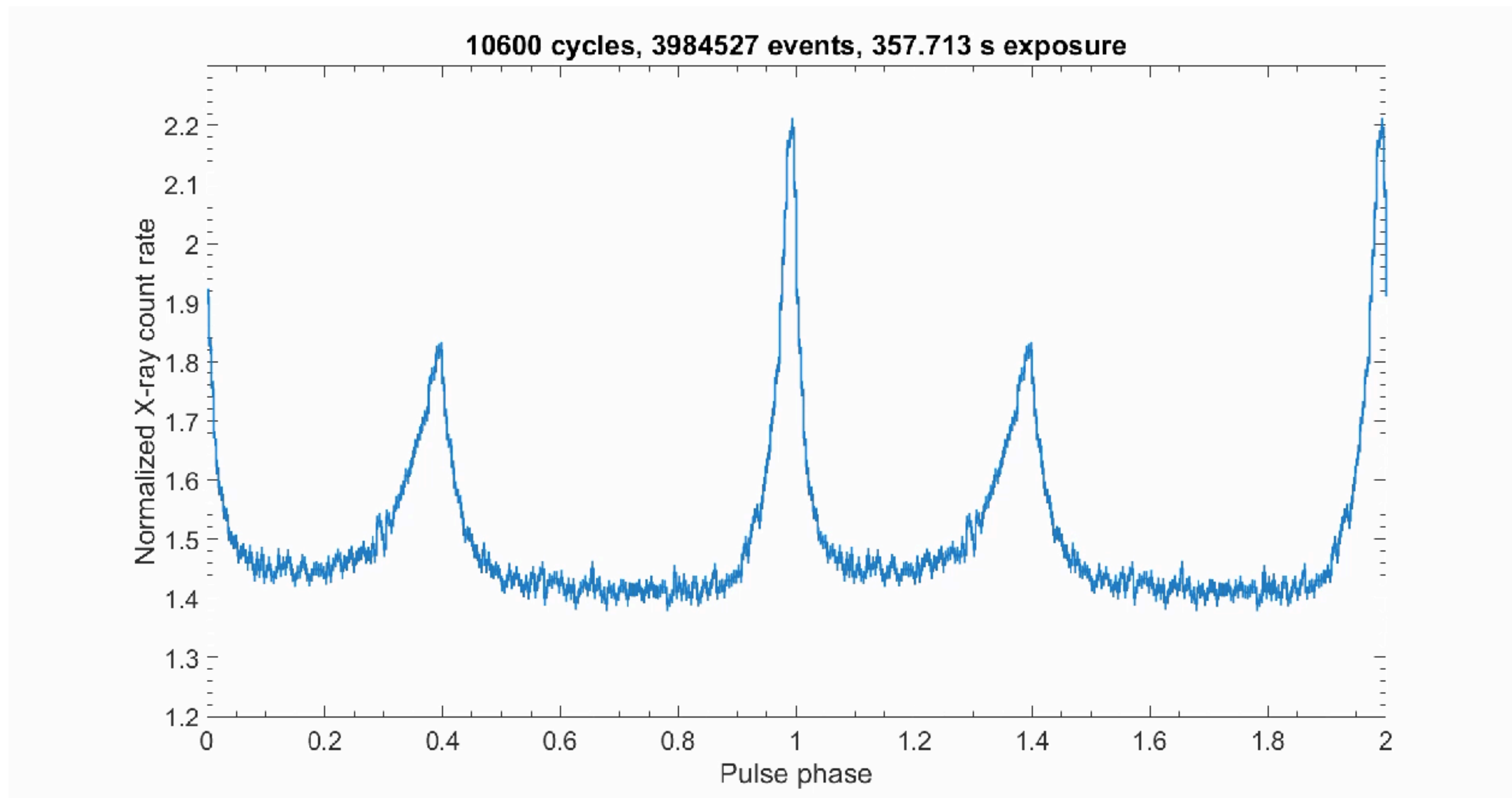
かにパルサーを見るNICERと臼田・鹿島さん  
NICER, Usuda, and Kashima are watching the Crab Pulsar





# NICER の大有効面積の威力

かにパルサーを見るNICERと臼田・鹿島さん  
 NICER, Usuda, and Kashima are watching the Crab Pulsar



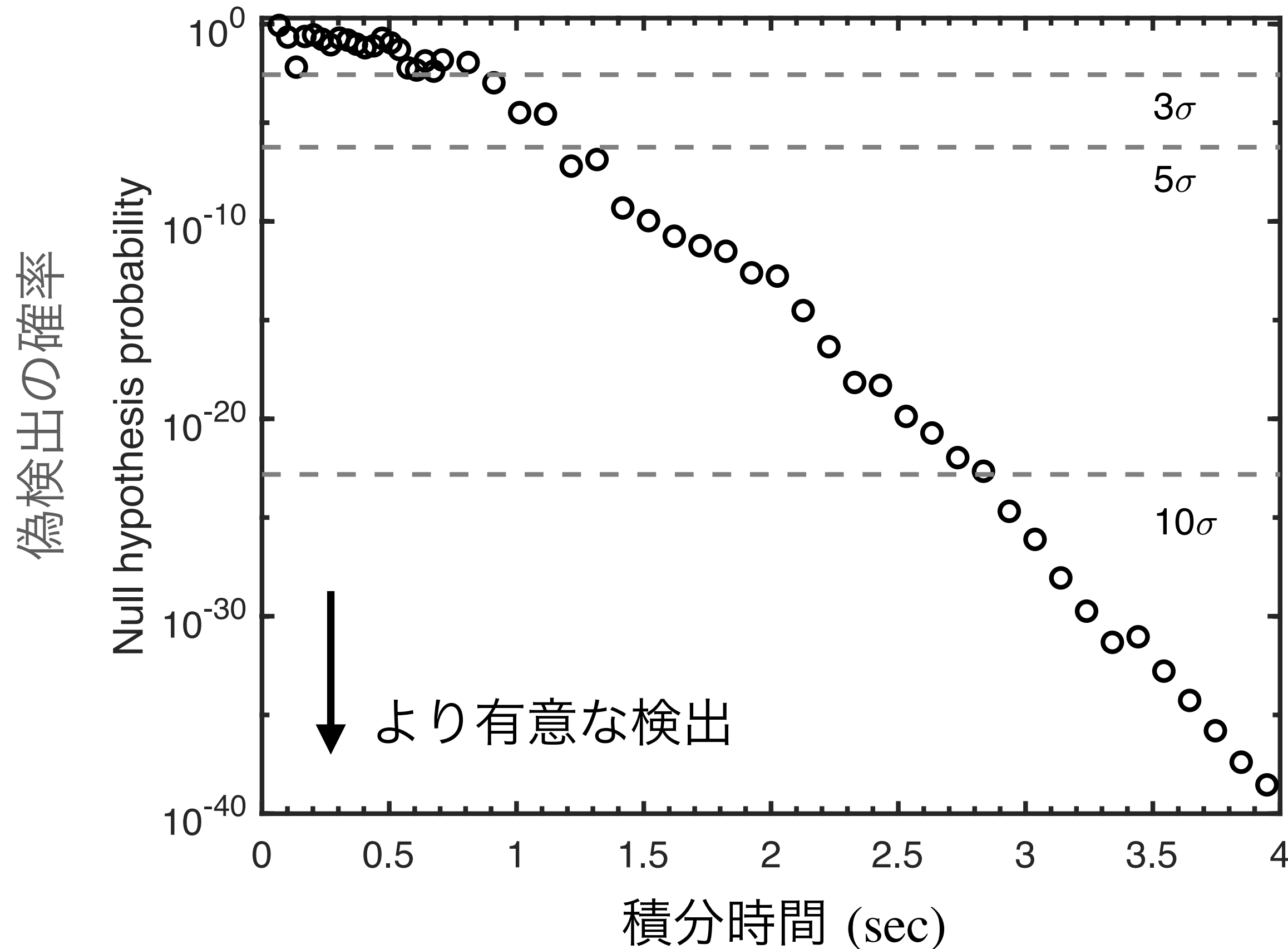
- 1.5 keVでXMM-Newton 衛星の約2倍にあたる1900 cm<sup>2</sup>の有効面積を使い、かにパルサーの巨大電波パルスに伴うX線増幅を発見

Enoto et al., Science, 372, 187-190 (2021) [arXiv: 2104.03492]

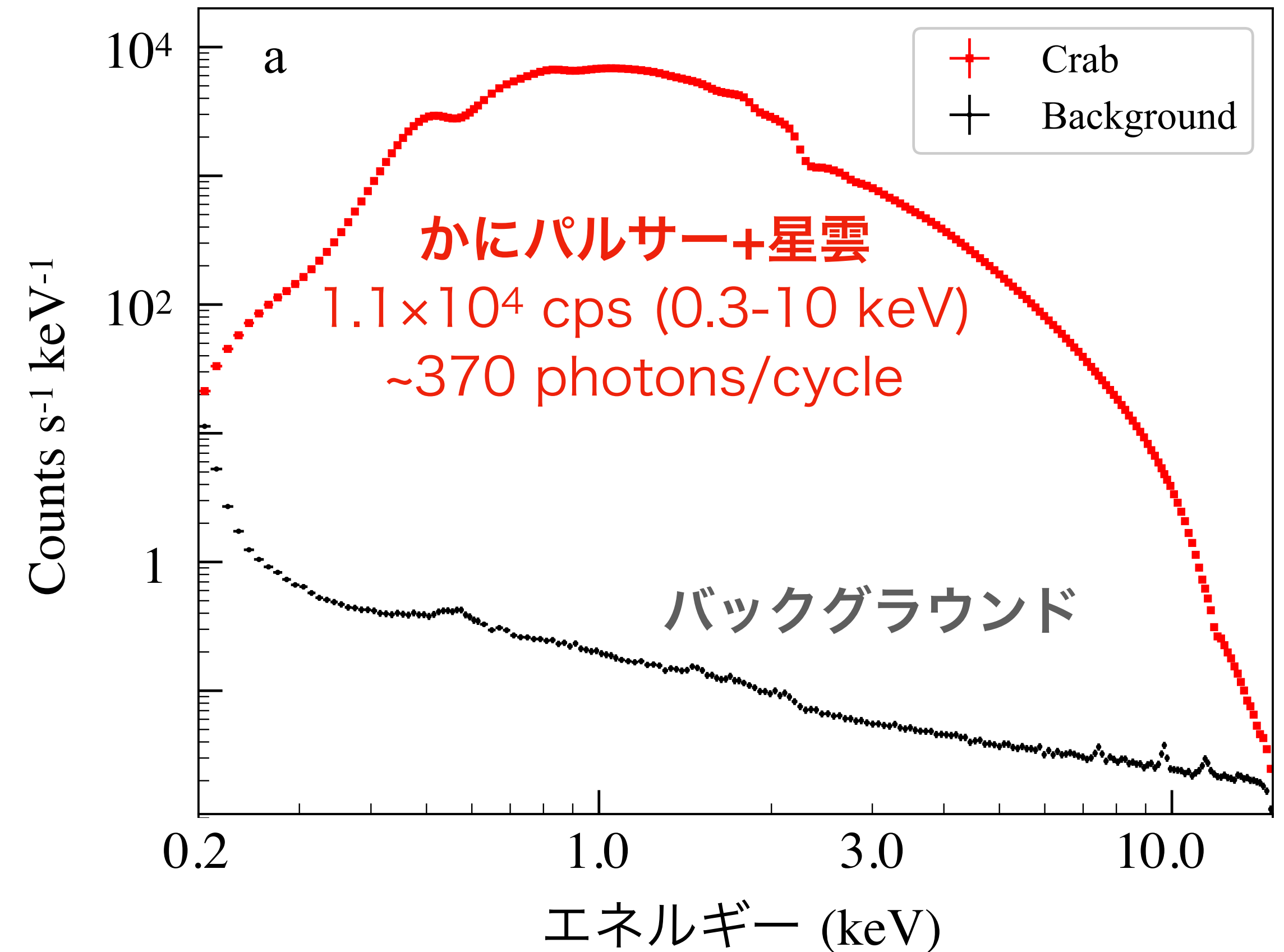


# 集光性能の威力: かにパルサーのX線パルス

## パルス検出の有意性



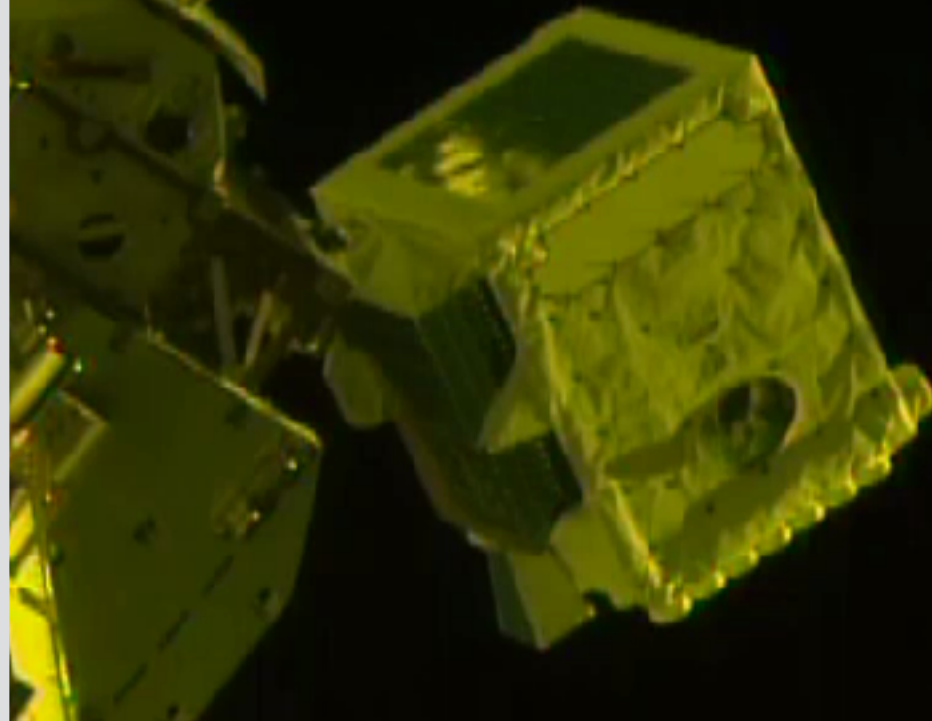
## X線スペクトル



- パルス信号は約 1 秒で統計的に有意な検出に到達！ひとみ SXS の約50倍の統計
- パイルアップ、デッドタイム、データ転送の影響なし (スループット  $3.8 \times 10^4$  cps)

# MAXI-NICER 連携 OHMAN 計画

NICER



迅速に深く観測

突発天体  
アラート

全天 X 線観測装置 MAXI



浅く広く新天体を監視

MAXI で見つけた天体を NICER でフォローアップ観測。  
すでにブラックホールや星のフレアで成果があがっており、  
宇宙ステーション上での「国際連携」への米国の期待は大きい

On-orbit Hookup of MAXI and NICER (OHMAN) 計画

# 本日の話題

- 中性子星の観測的な多様性（特にマグネター）
- 国際宇宙ステーションに搭載された NICER
- 中性子星の質量と半径を宇宙観測で計測する
- かにパルサーの巨大電波パルス（高速電波バースト）

# 中性子星の質量と半径

- 以下の話題をレビューする。
  - 高密度核物質の状態方程式を理解するために、天体観測はどんな貢献できるのか？
  - 最新の宇宙X線による質量と半径の測定から、状態方程式はどう制限されたのか？
  - 状態方程式が制約されると、宇宙観測からどのような新しい知見を与えられるか？

(榎戸, 安武 「宇宙観測で見えてきた中性子星の状態方程式」 日本物理学会誌2021年10月号)

## 宇宙観測で見えてきた中性子星の状態方程式



榎戸 輝揚  
理化学研究所榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム  
teruaki.enoto@riken.jp



安武 伸俊  
千葉工業大学情報科学部/日本原子力研究開発機構  
nobutoshi.yasutake@p.chibakoudai.jp

中性子星は、太陽よりも1桁大きな質量の恒星が寿命を迎え、重力崩壊して残される高密度(コンパクト)天体である。半径10 kmほどの中性子星が太陽の1.4倍もの質量をもつため、内部は原子核の密度を超える高密度となる。中性子星は、およそ半世紀前に周期的に電波で明滅するパルサーとして発見され、これまでに銀河系や近傍の銀河に2,800個を超える天体が見つまっている。中性子星は表面から放出される光が曲がるほどの強い重力場をもち、量子電磁力学における臨界磁場を超える強磁場の物理現象が発現するなど、極限物理の実験室である。そのため、天文学のみならず基礎物理の観点からも関心がもたれている。

中性子星が理論的に提唱された時代から、この奇妙な星内部の高密度な核物質の状態方程式の解明は、重要な未解決問題であり続けてきた。星の中心部は、地上の原子核実験では到達できない密度領域にある。状態方程式のミクロな密度と圧力は、天体の内部構造を考えて積分すると、中性子星の質量と半径のマクロな物理量に対応する。したがって、質量と半径を宇宙観測で測定することで内部の状態を調べることができる。このように中性子星は、天文学と原子核物理の融合的な研究対象といえる。

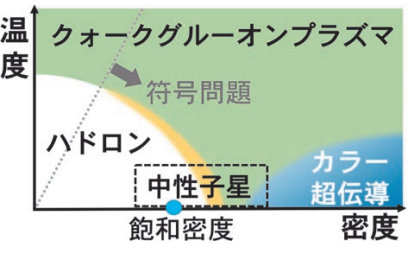
天体の質量は、連星運動をするパルサーの規則的な電波パルスの測定から精度よく求められる場合も多い。一方、電波放射が星表面から離れた磁気圏に由来するため、電波では天体の半径を探ることができない。中性子星の表面からの熱的放射に相当するX線の観測が必要になる。しかし、表面からの放射は、大気組成、磁場による表面温度の非一様性、放射領域の形状や、磁気圏放射の混入などの不定性に加え、天文学で

は常に大きな問題となる天体までの距離測定の難しさもあり、信頼性のある測定が難しかった。近年の多波長観測の進展により、中性子星の観測的特徴の理解が進み、その多様性は「中性子星の動物園」とよばれるようになった。このような観測的多様性は、天体の質量と半径の違いのみならず、中性子星の表面磁場の強度や構造、温度分布、自転周期などの違いによって生み出されたもので、質量と半径の測定を行うときには邪魔な不定性を生み出しうる。しかし、これらの特徴を注意深く理解していくことで、いくつかの種族の天体やそこで起きる現象をうまく利用して、中性子星の質量と半径を測定できることがわかり、複数の有効な手法が提案されるようになってきた。

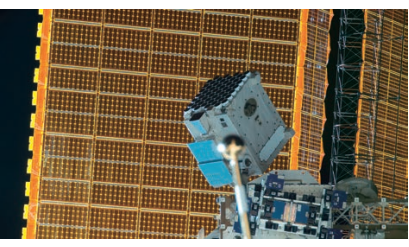
国際宇宙ステーションに搭載されたX線望遠鏡NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) は、高い集光能力を活かして複数のミリ秒パルサーを観測し、gravitational light-bendingを用いた中性子星の質量と半径の測定から、状態方程式を明らかにするプロジェクトである。打ち上げ後、手始めに4.87ミリ秒で自転する孤立中性子星 PSR J0030+0451 で10%の精度で質量と半径を測定した。さらに、シャピロ遅れの電波観測から、連星中のミリ秒パルサーで質量が太陽の2倍を超えると明らかになった PSR J0740+6620 の測定も報告され、今後の観測例の増加が期待できる。さらに、近年の地上の原子核実験や連星中性子星の合体による重力波を用いた測定なども組み合わせると、中性子星の高密度物質の状態方程式がだんだんと絞り込まれ、新たな研究段階に入りつつある。

### 用語解説

**中性子星の高密度状態:** 高エネルギー状態であるクォーク物質やハドロン物質を表すQCD相図(下図)において、低温・高密度の領域はよくわかっていない。符号問題のため格子QCDによる第一原理計算が破綻することや、この領域を直接的に制限できる原子核実験もないためである。特にこの領域では、カラー超伝導とよばれるエキゾチックな物質状態が理論的に予言されており、物性的観点からも関心を集めている。一方で、この領域はまさに中性子星の内部に対応しているため、天文観測が重要な役割を担っている。



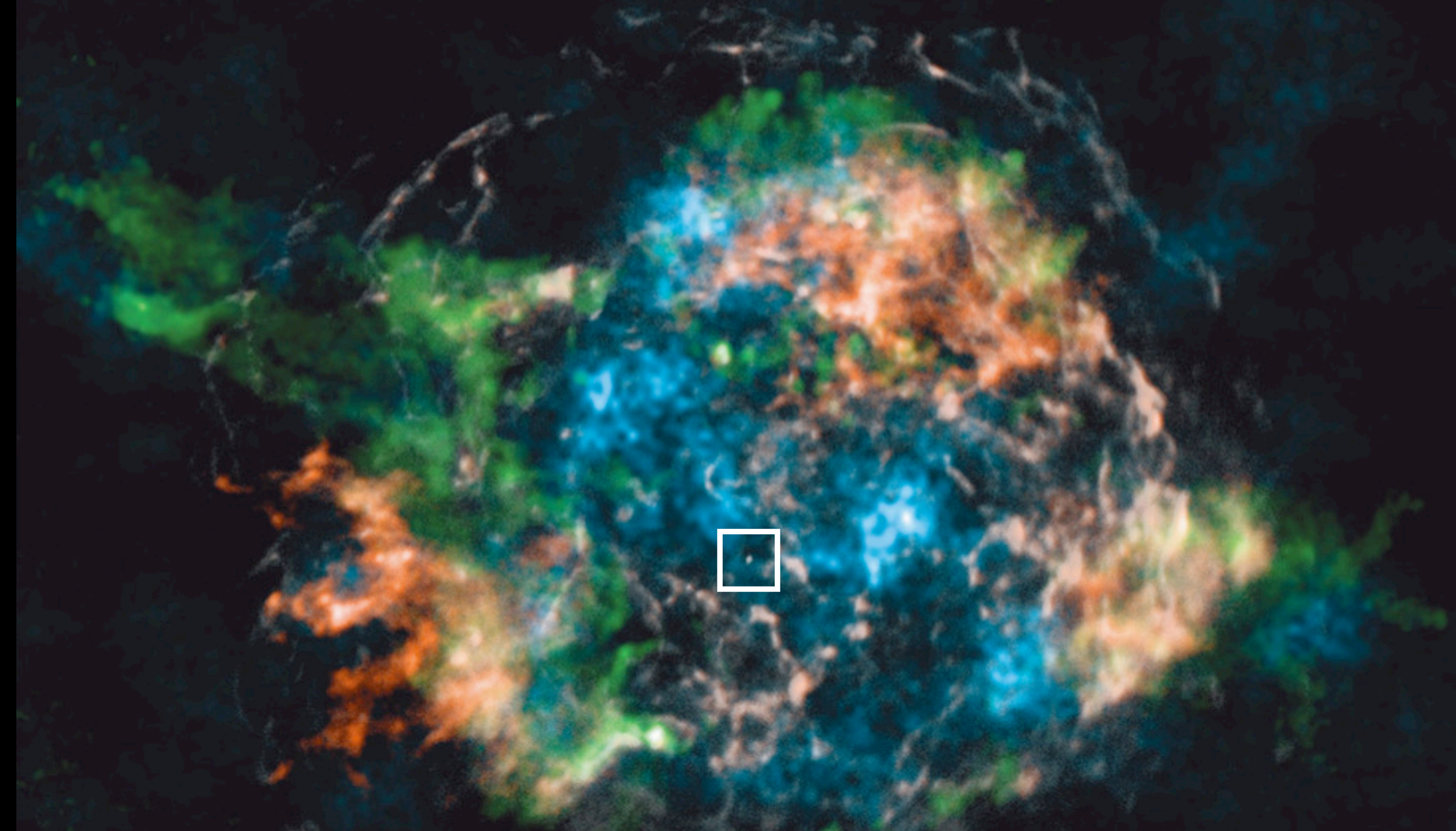
**X線望遠鏡NICER:** 中性子星の高密度な内部の状態方程式は、天体の質量と半径の測定から迫ることができる。これを狙って2017年に打ち上げられ、国際宇宙ステーションに搭載されたX線望遠鏡が、NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) である。中性子星の表面放射に対応する1.5 keV付近で過去最高の集光能力を誇り、ミリ秒パルサーの質量と半径の測定を行っている。



Credit: NASA

# 中性子星の高密度な内部状態

- 大質量星の重力崩壊により中性子星（質量  $M \sim 1.4 M_{\text{sun}}$ 、半径  $R \sim 10 \text{ km}$ ）が形成される。
- 原子核密度  $3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  を超える高密度な内部構造
- 中性子星内部の高密度状態の状態方程式は、地上での原子核物理学だけでは特定できない大きな未解決問題である。



Supernova Remnant  
Cassiopeia A

4-6 keV X-rays (white)

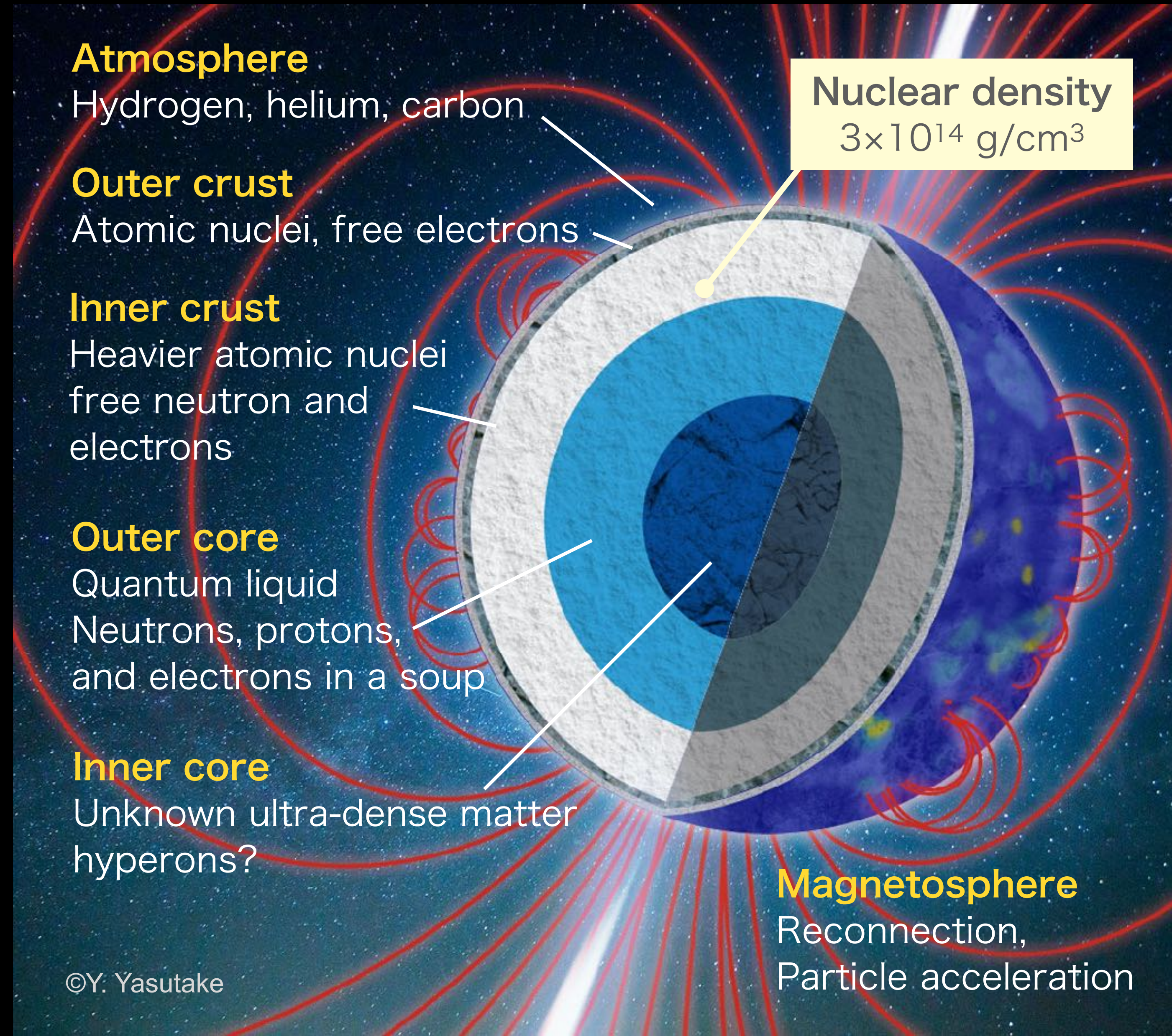
Fe (red)

Si, Mg (green)

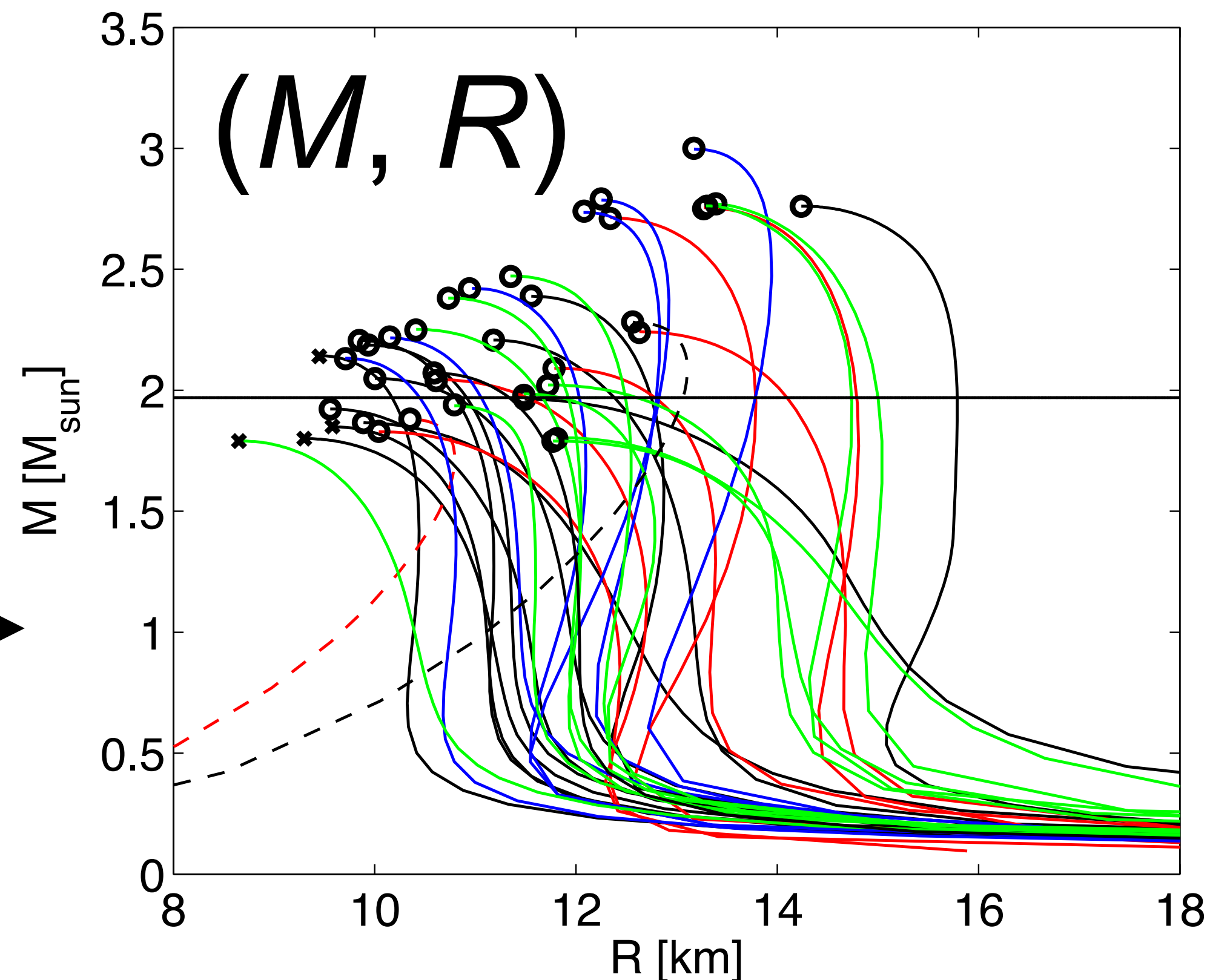
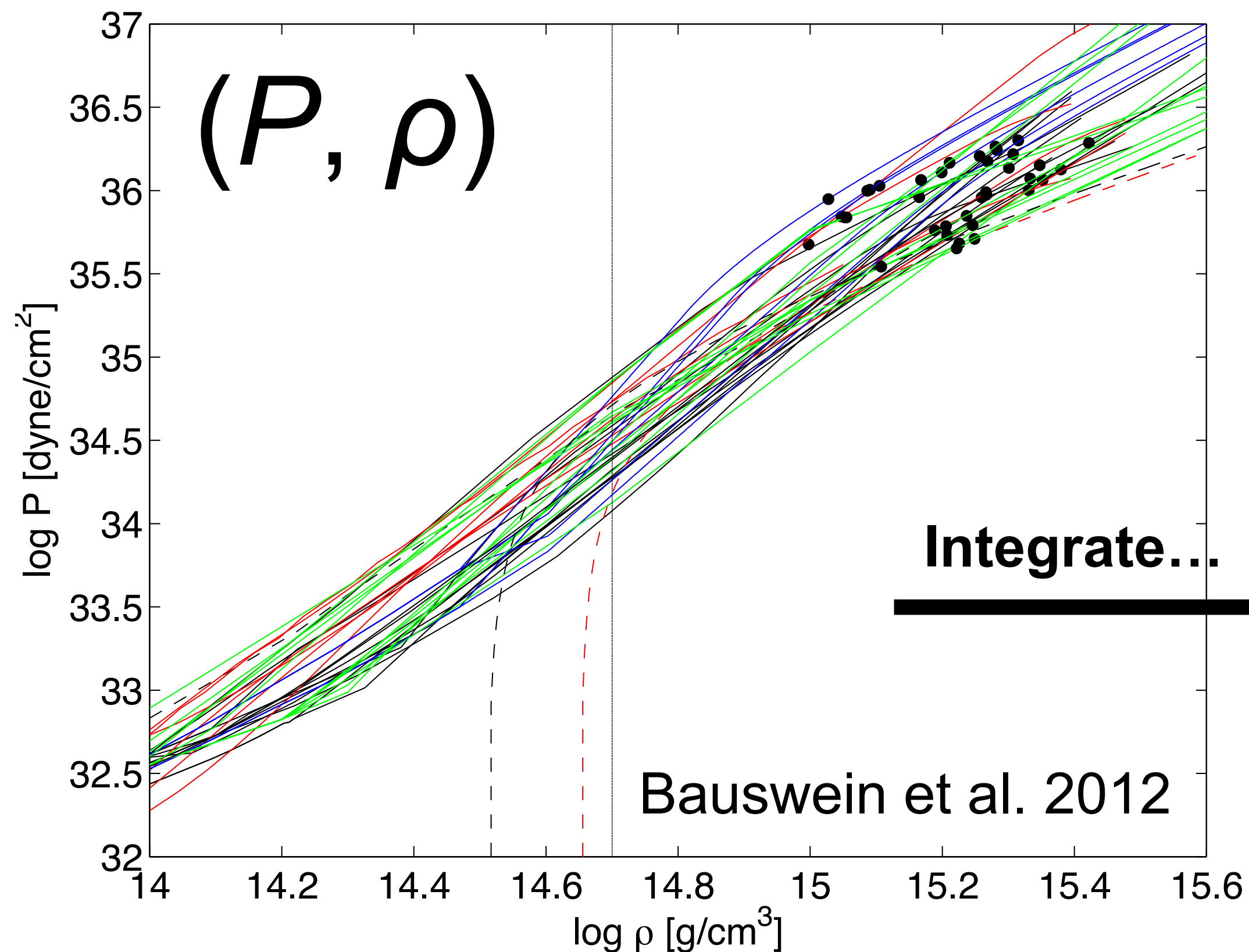
Ti (blue)

# 中性子星の高密度な内部状態

- 大質量星の重力崩壊により中性子星（質量  $M \sim 1.4M_{\text{sun}}$ 、半径  $R \sim 10 \text{ km}$ ）が形成される。
- 原子核密度  $3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  を超える高密度な内部構造
- 中性子星内部の高密度状態の状態方程式は、地上での原子核物理学だけでは特定できない大きな未解決問題である。



# 中性子星核物質の状態方程式



$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM(r)}{r^2}$$

外向き圧力

自己重力

力の釣り合い

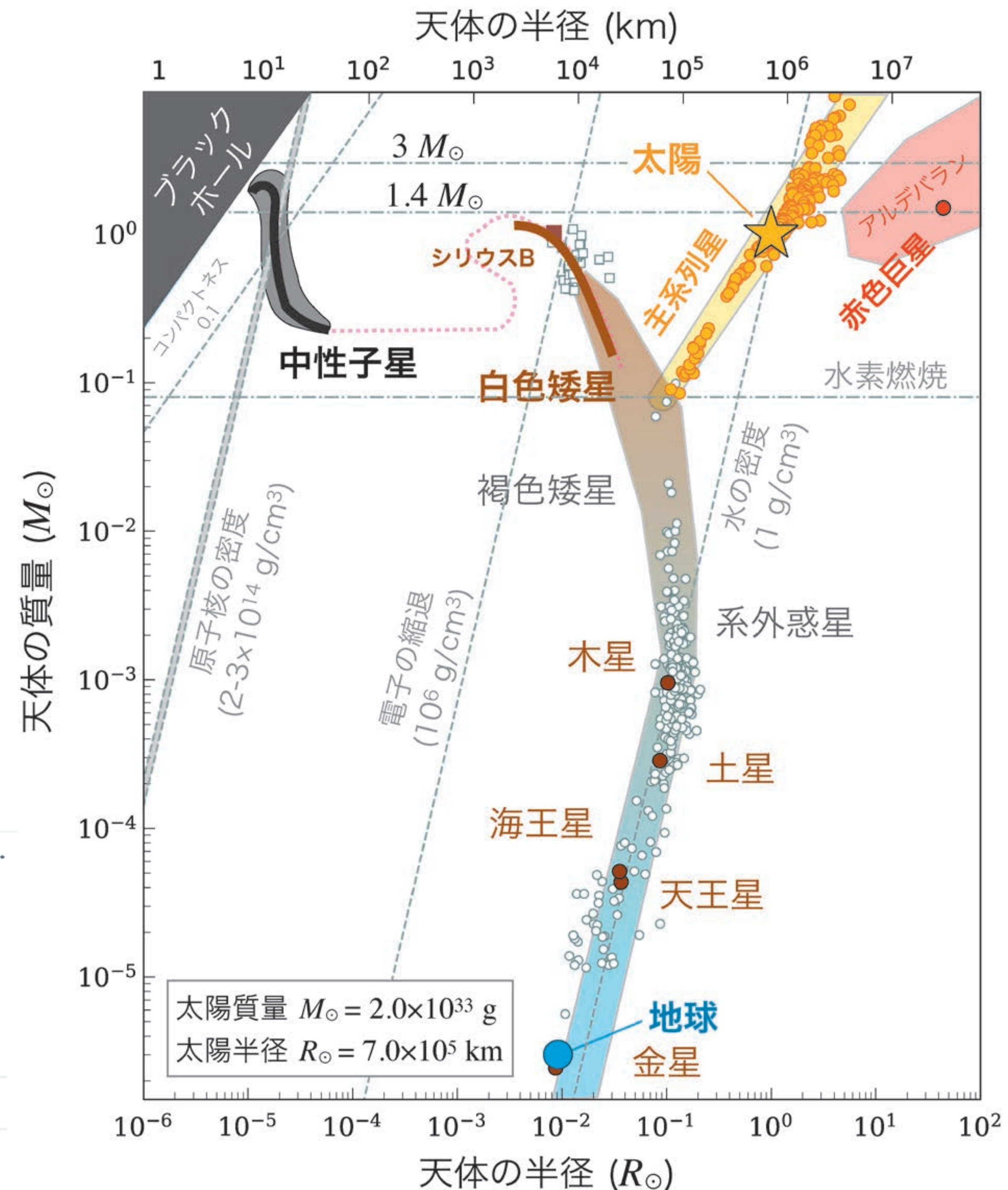
(Non relativistic case,  
Relativistic case is  
the TOV equation)

- 状態方程式  $(P, \rho)$  はマクロな質量と半径の曲線に対応  $(M, R)$
- 宇宙観測での測定が期待できる



# 天体の質量と半径

- 中性子星の M-R 関係は、宇宙の様々な天体の M-R 関係の中で最も極端な部分のひとつ
- 惑星: 電気的な反発力,  $M \sim R^3$
- 恒星: ガス圧や輻射圧,  $M \sim R$
- 白色矮星: 電子の縮退圧,  $M \sim R^{-1/3}$
- 中性子星: 中性子の縮退圧・核力  $M \sim R^0$ ?



ENOTO, Teruaki @teru\_enoto

This diagram shows mass and radius of various celestial bodies in the universe. Planets, stars, white dwarfs, neutron stars, and black holes are included. Each star is being crushed by gravity, but pushed back by different pressures. Original diagram is for a review in Japanese.

ツイートを翻訳

154 件のリツイート 31 件の引用ツイート 608 件のいいね

ENOTO, Teruaki @teru\_enoto

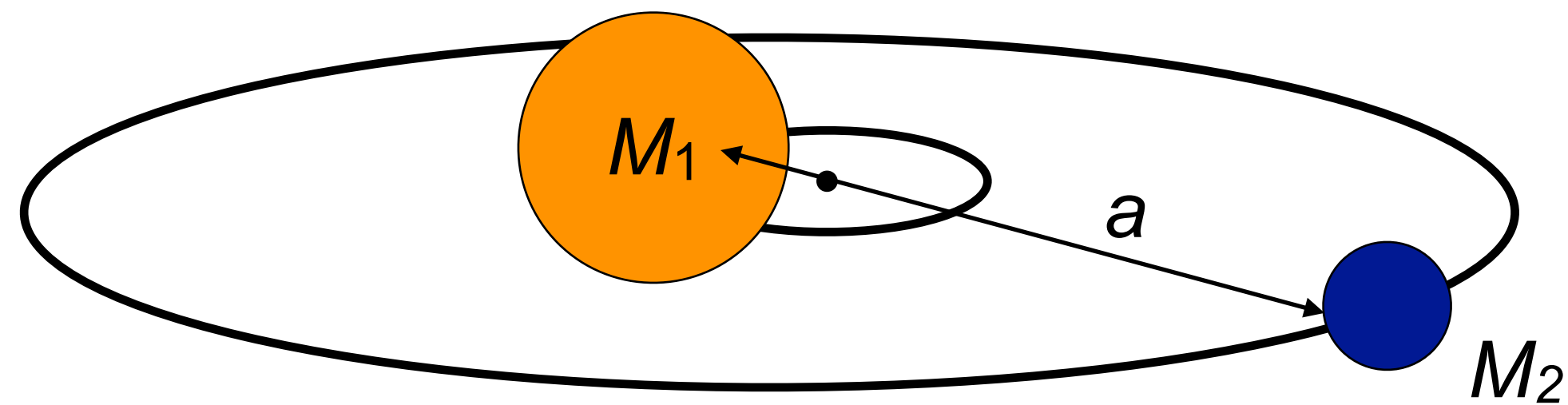
「宇宙観測で見えてきた中性子星の状態方程式」([bit.ly/3aaZZDY](https://bit.ly/3aaZZDY))の記事用に、宇宙の多様な天体の質量と半径を整理した図です。惑星から恒星、白色矮星や中性子星、ブラックホールまで網羅した図は、ほとんど描かれないのですが、この図には天体物理の面白い要素が満載です。天体って不思議。

393 件のリツイート 20 件の引用ツイート 1,088 件のいいね

# 天体の質量と半径の天文学的な測定

## 質量

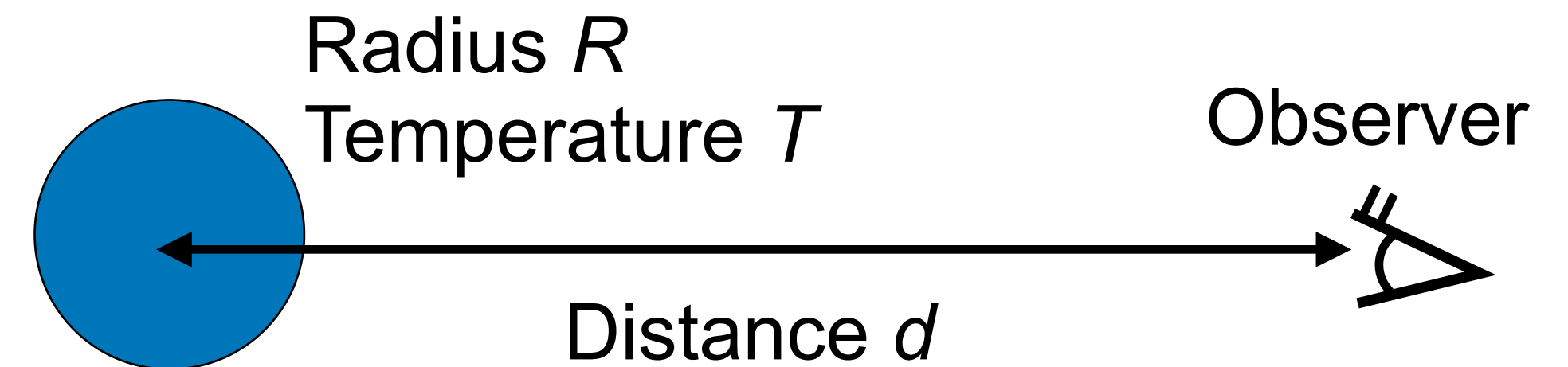
- 電波、X線、ガンマ線パルスで連星運動を利用した精密質量測定
- 測定の不定性の影響を受けにくい



$$G(M_1 + M_2) = a^3 \left( \frac{2\pi}{P} \right)^2$$

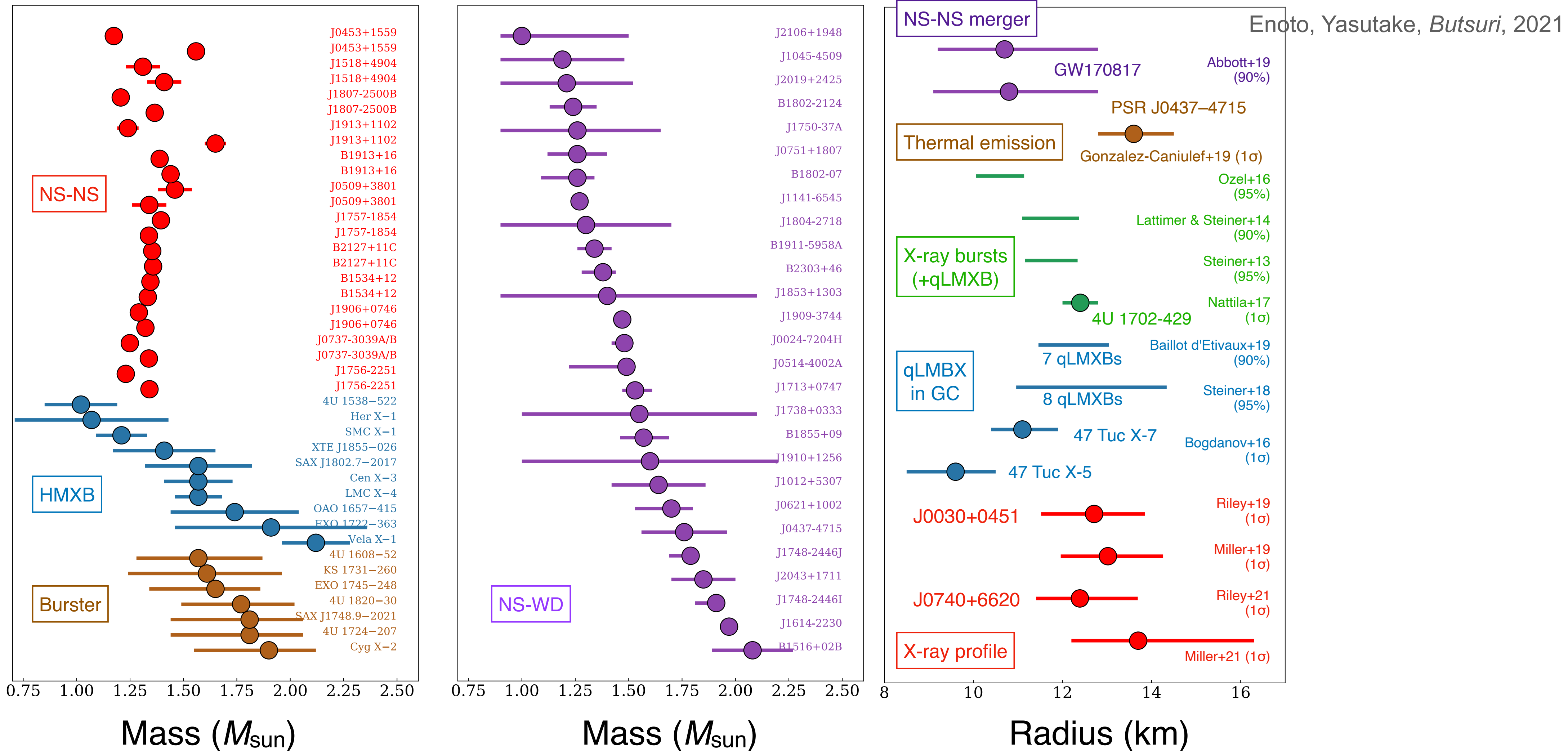
## 半径

- X線での表面放射から、半径を推定する必要がある
- 距離、大気組成などの不定性



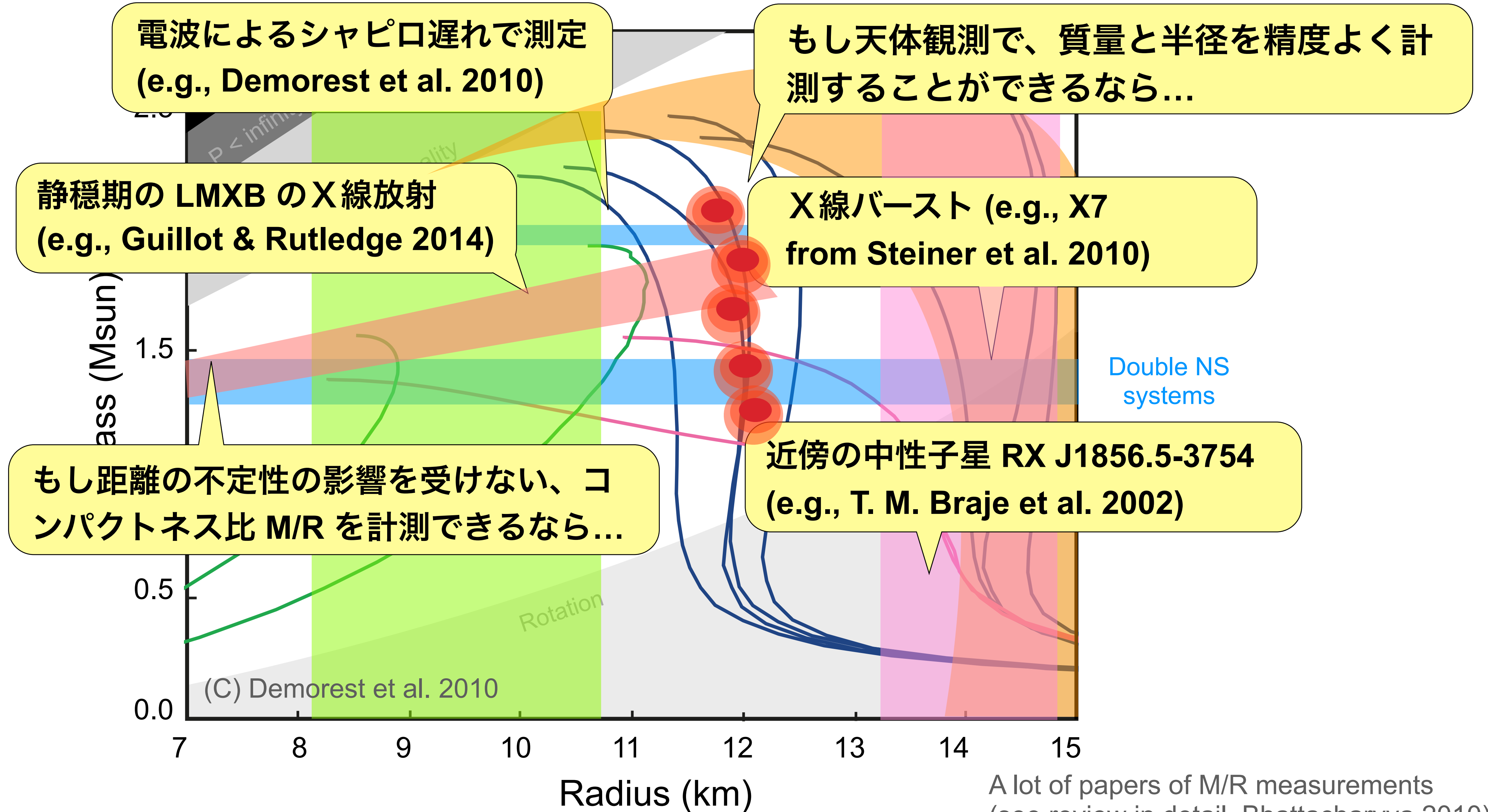
$$f = \frac{L}{4\pi d^2} = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi d^2}$$

# 天体の質量と半径の天文学的な測定

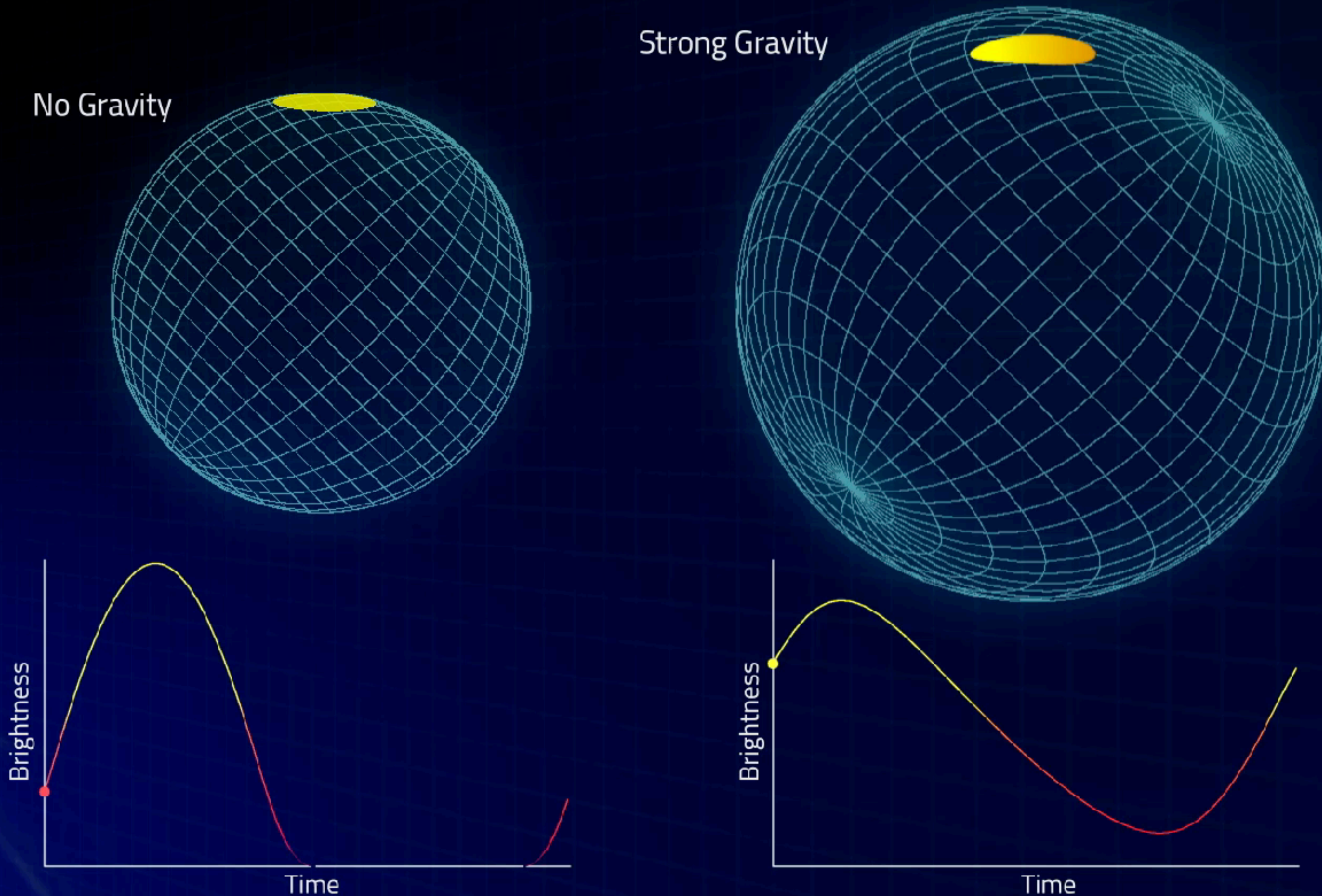


- 中性子星連星、高質量X線連星 (HMXB)、中性子星と白色矮星の連星では、質量測定は数多く行われているが、半径の測定は限られており、比較的大きな誤差がある。

# 天体の質量と半径の天文学的な測定

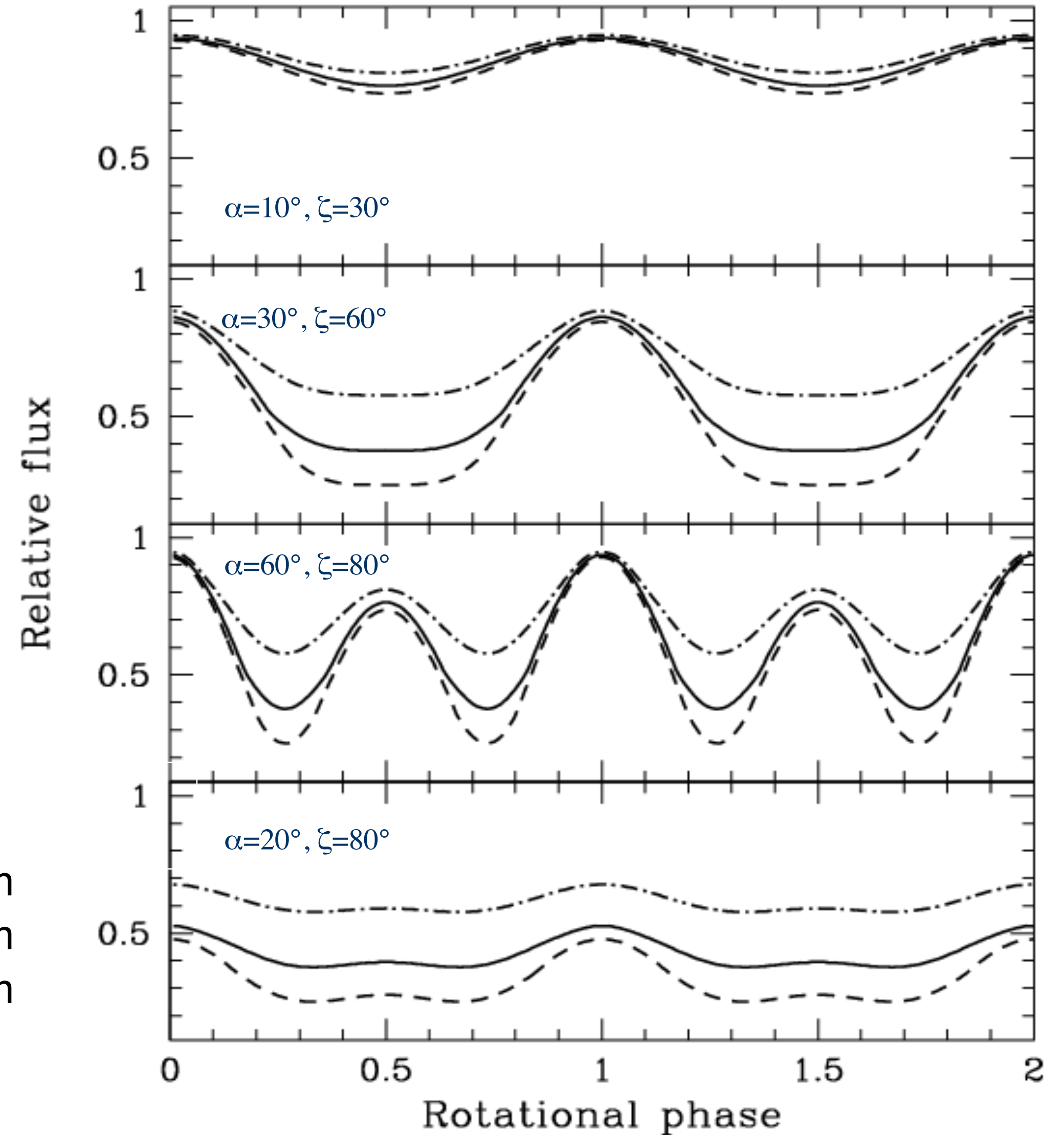
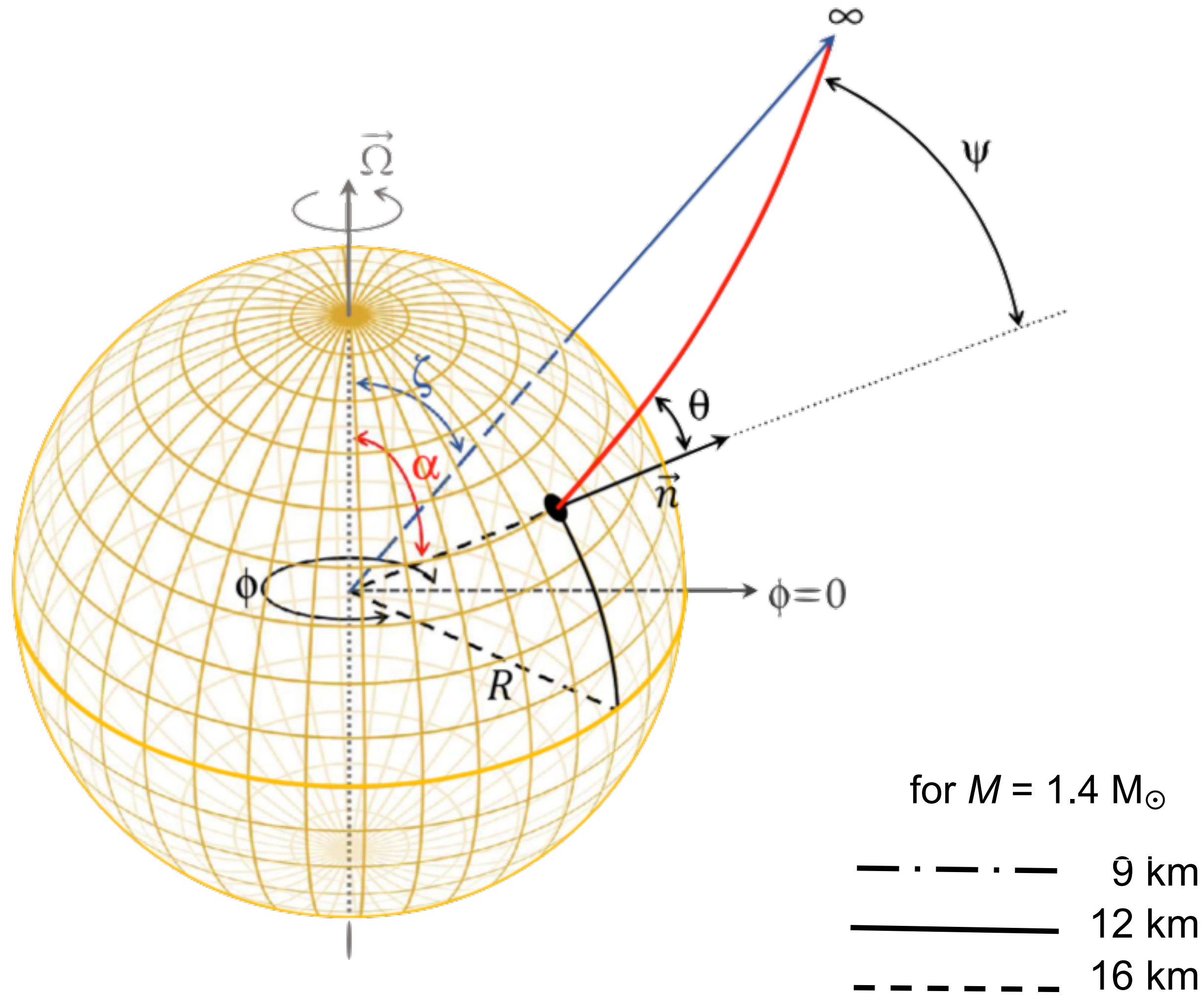


# 重力場で曲がる光から中性子星コンパクトネス測定



- 重力による光の曲がり具合を、ライトカーブの精緻なモデリングと比較・測定し、コンパクト性 ( $M/R$ ) とホットスポットの形状を推定
- ターゲット天体：非降着型の高速自転するミリ秒パルサー。回転するホットスポット放射の変調の深さを調べる

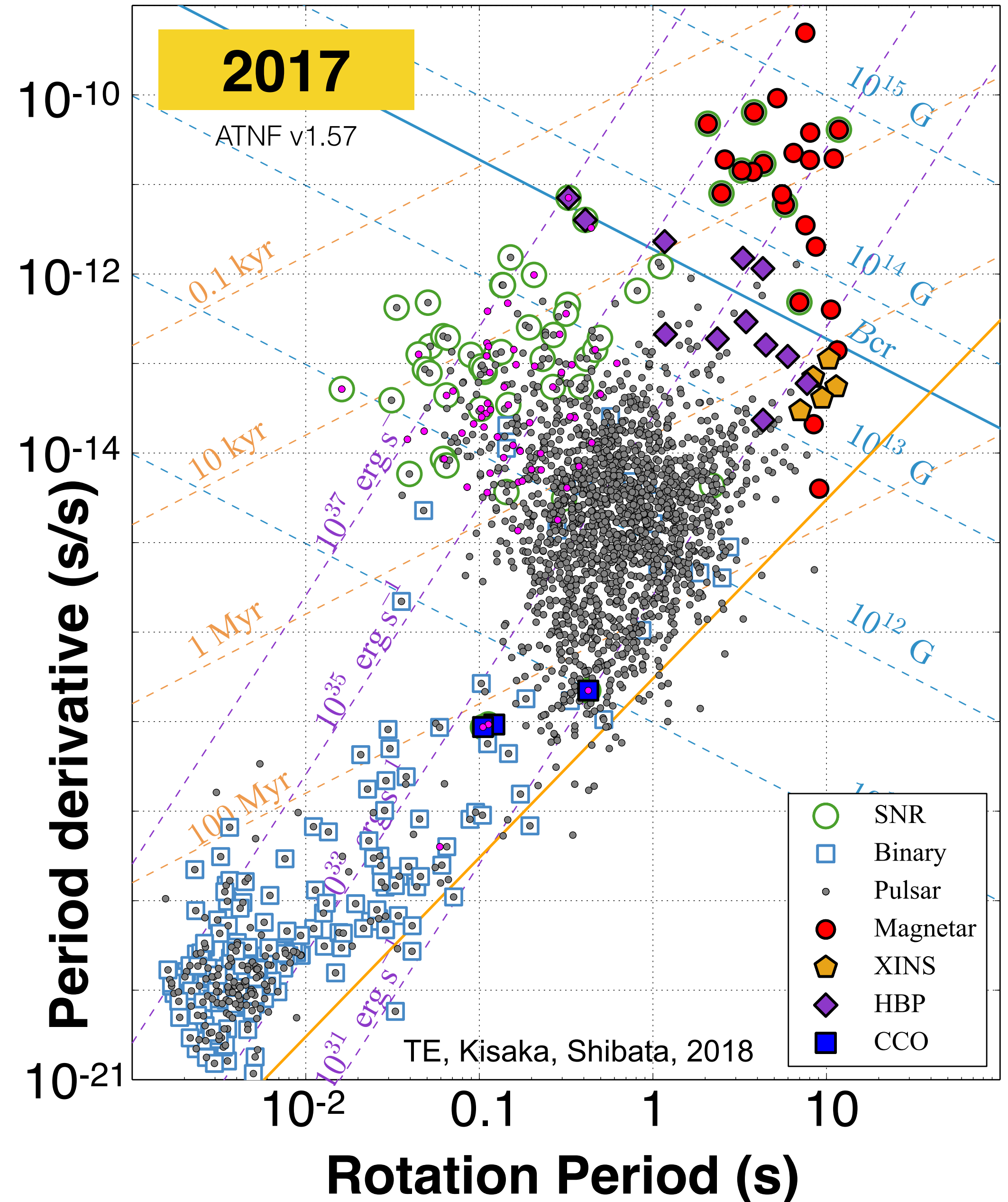
# 重力による光の曲がりを受けたX線パルス波形



Bogdanov, Rybicki, & Grindlay, *ApJ*, 670, 668 (2007)  
(Gendreau, Arzoumanian, and NICER Collaboration)

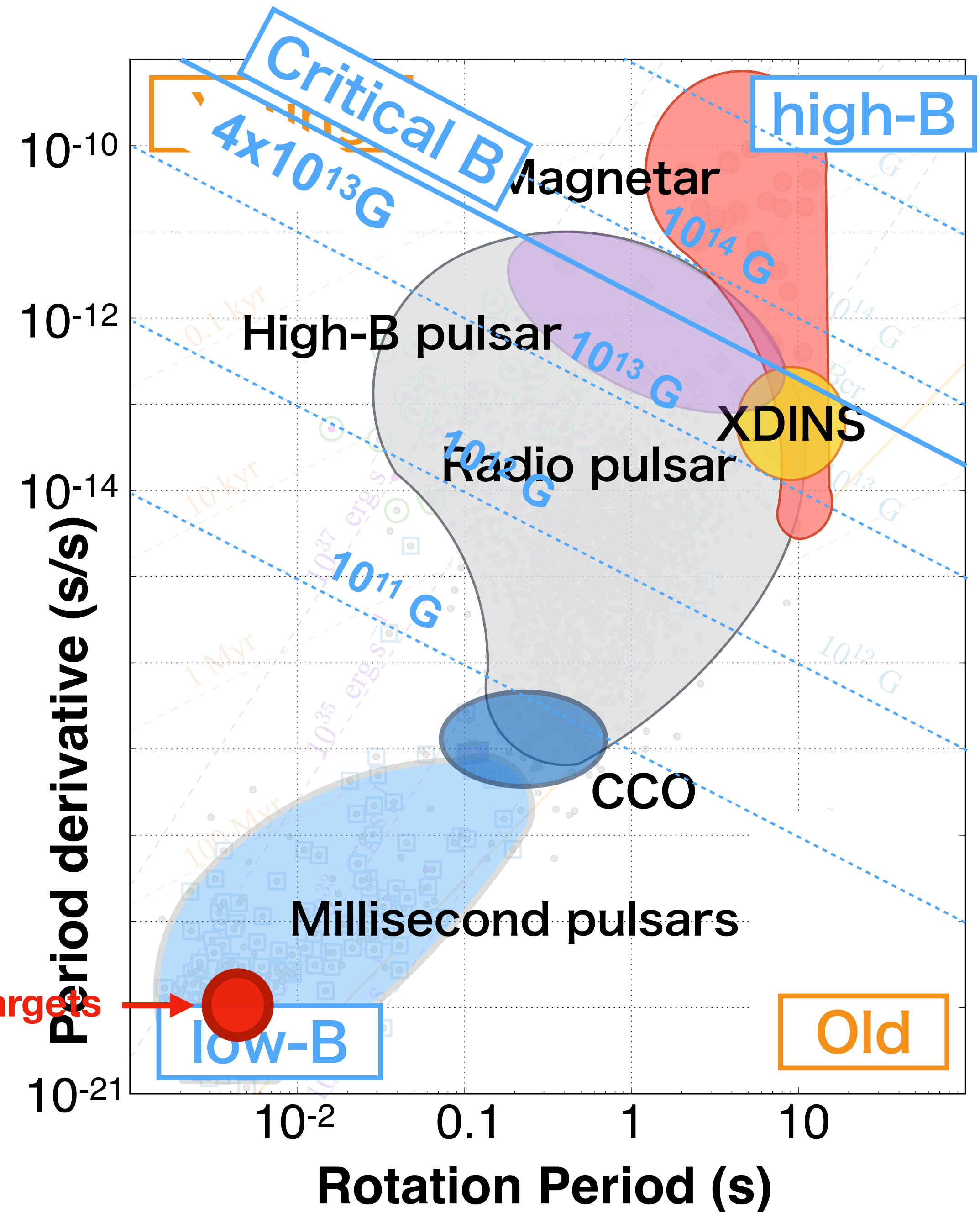
# 質量・半径測定ターゲット

- 中性子星の多様性
- 回転するミリ秒パルサーは、M-R 測定に適したターゲット。その理由は...
- 軟X線は磁極付近の高温領域からの熱放射によって発生する。
- X線パルスが常に発生し、そのビームパターンやスペクトルは比較的よく理解されている。
- 恒星の自転は速く、長い時間スケールで安定している。



# 質量・半径測定ターゲット

- 中性子星の多様性
- 回転するミリ秒パルサーは、M-R 測定に適したターゲット。その理由は...
- 軟X線は磁極付近の高温領域からの熱放射によって発生する。
- X線パルスが常に発生し、そのビームパターンやスペクトルは比較的よく理解されている。
- 恒星の自転は速く、長い時間スケールで安定している。

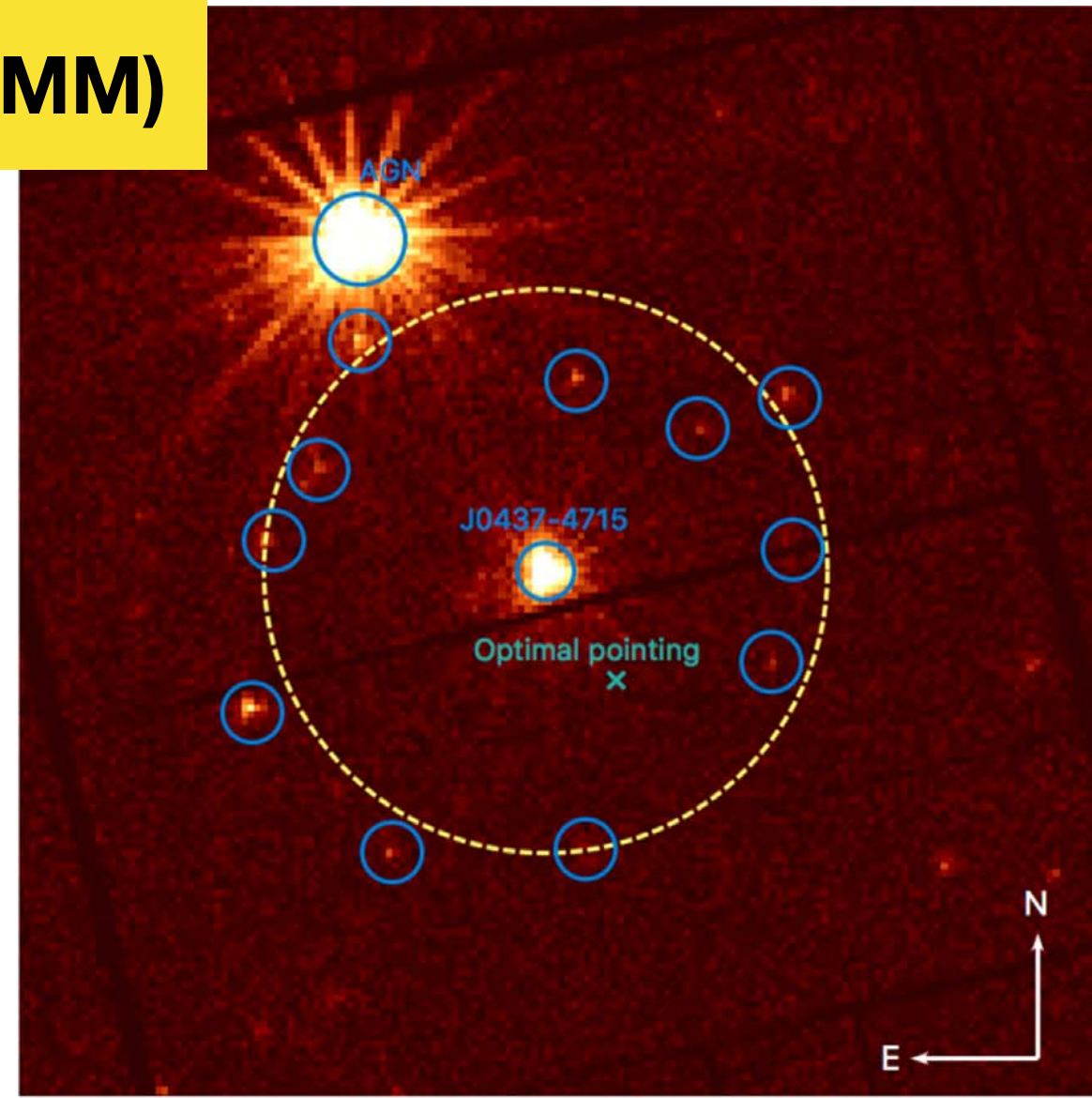




# 地球近傍の4つの回転駆動型のミリ秒パルサー

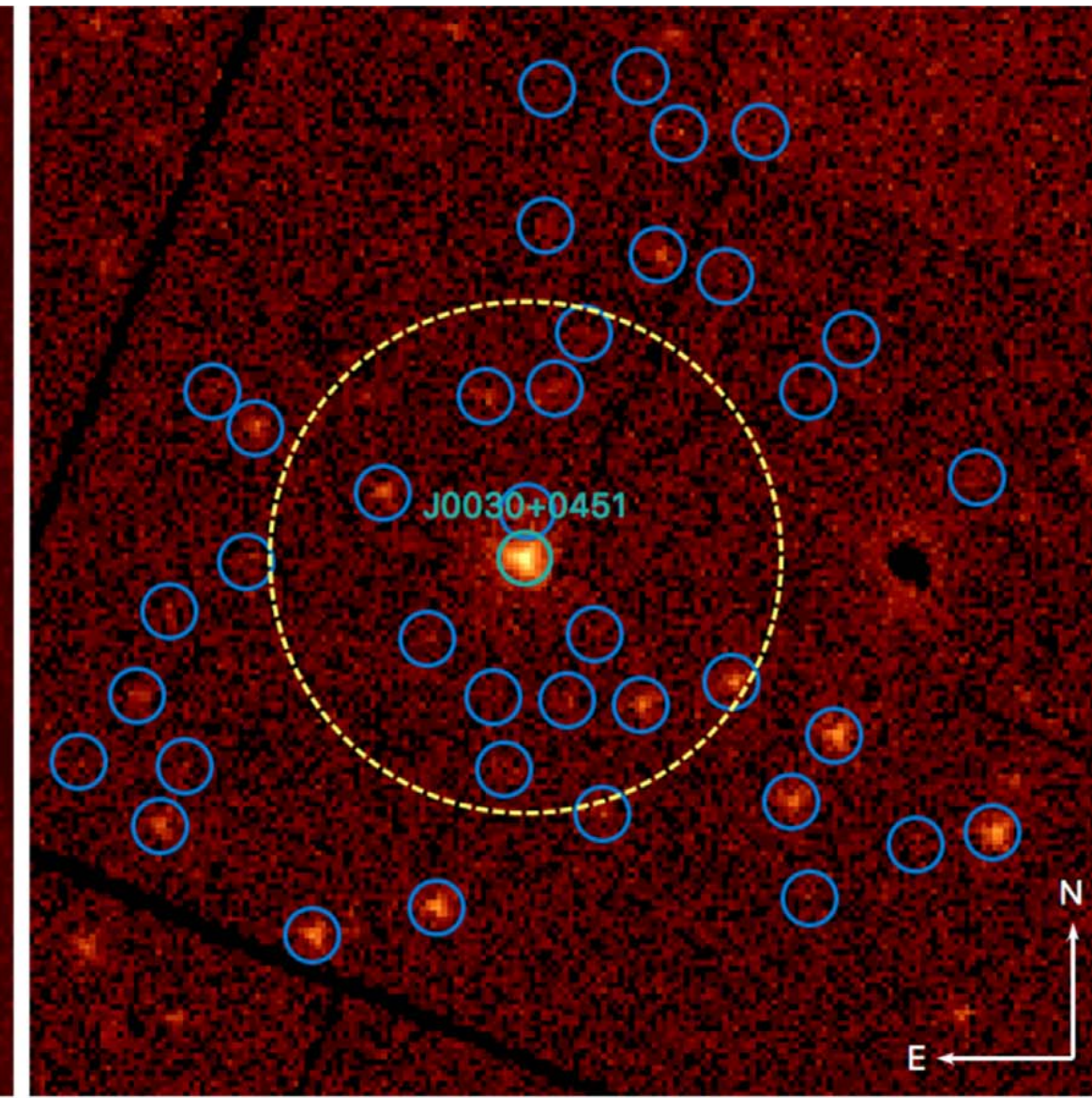
X-ray image (XMM)

**J0437-4715**  
 $P=5.76$  ms  
 $d=157$  pc

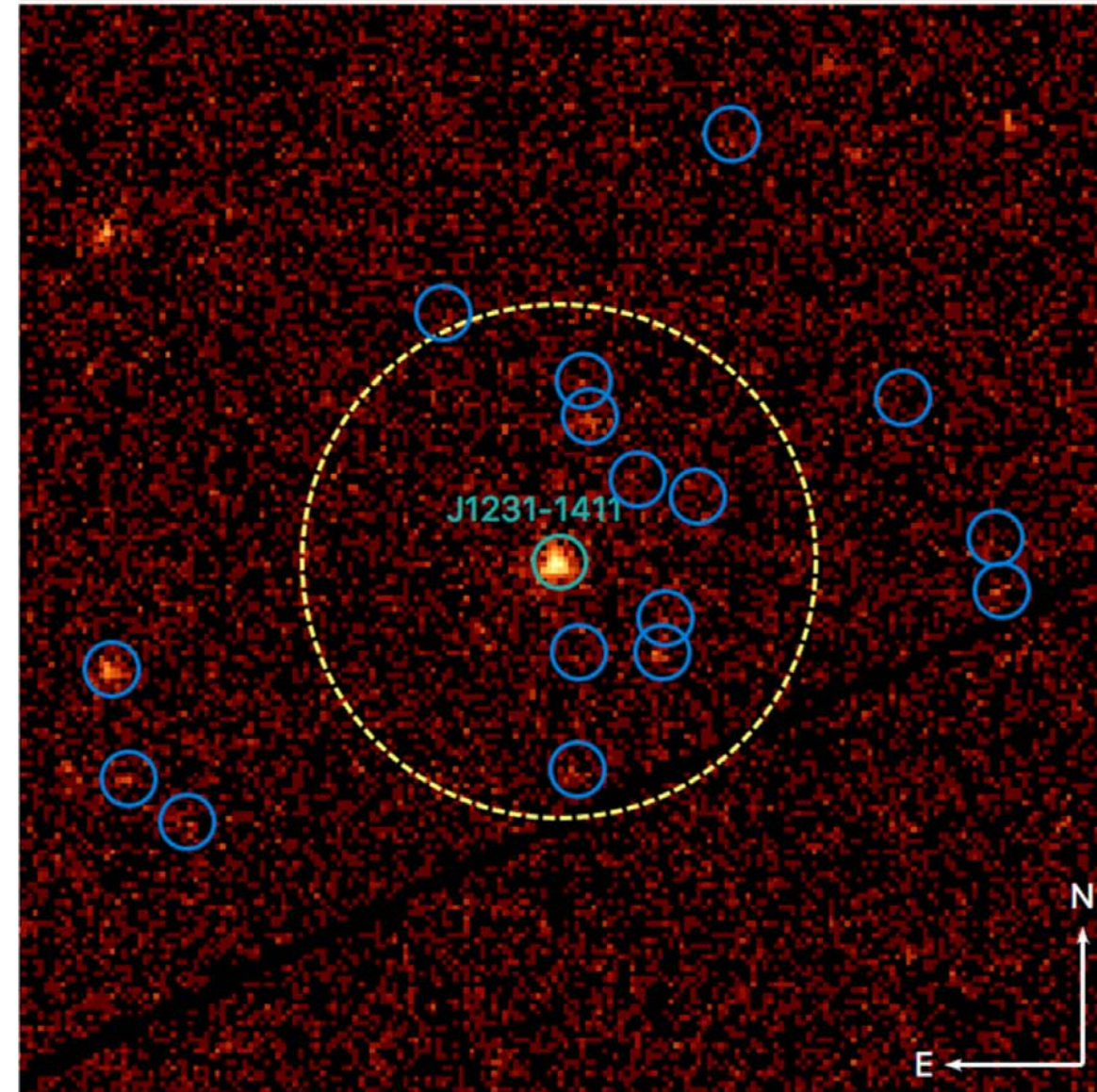


Bogdanov et al., ApJL, 2019a  
Circle: NICER PSF of 6'2 (HPD)

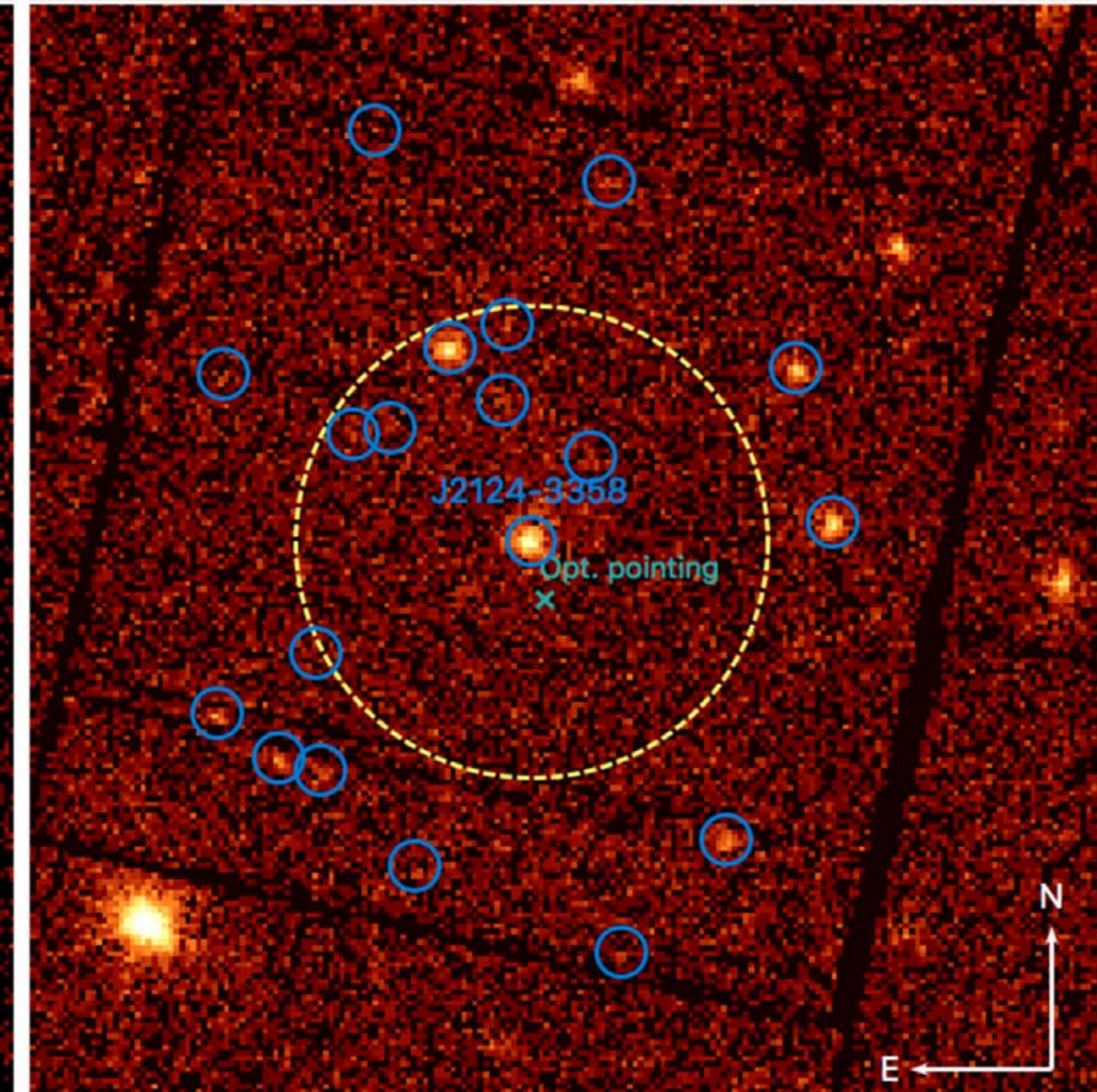
**J0030+0451**  
 $P=4.87$  ms  
 $d=325$  pc



**J1231-1411**  
 $P=3.68$  ms  
 $d=420$  pc

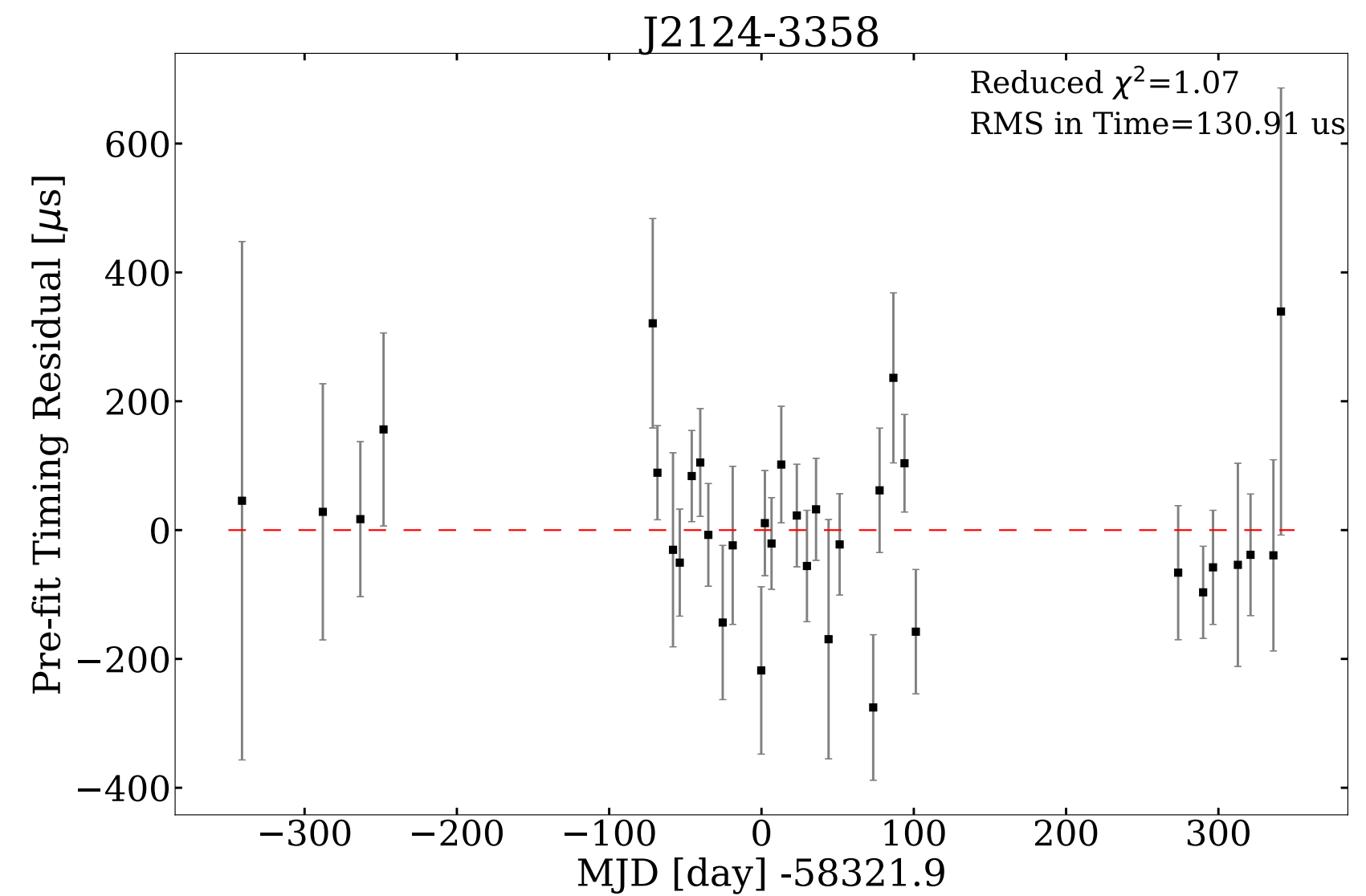
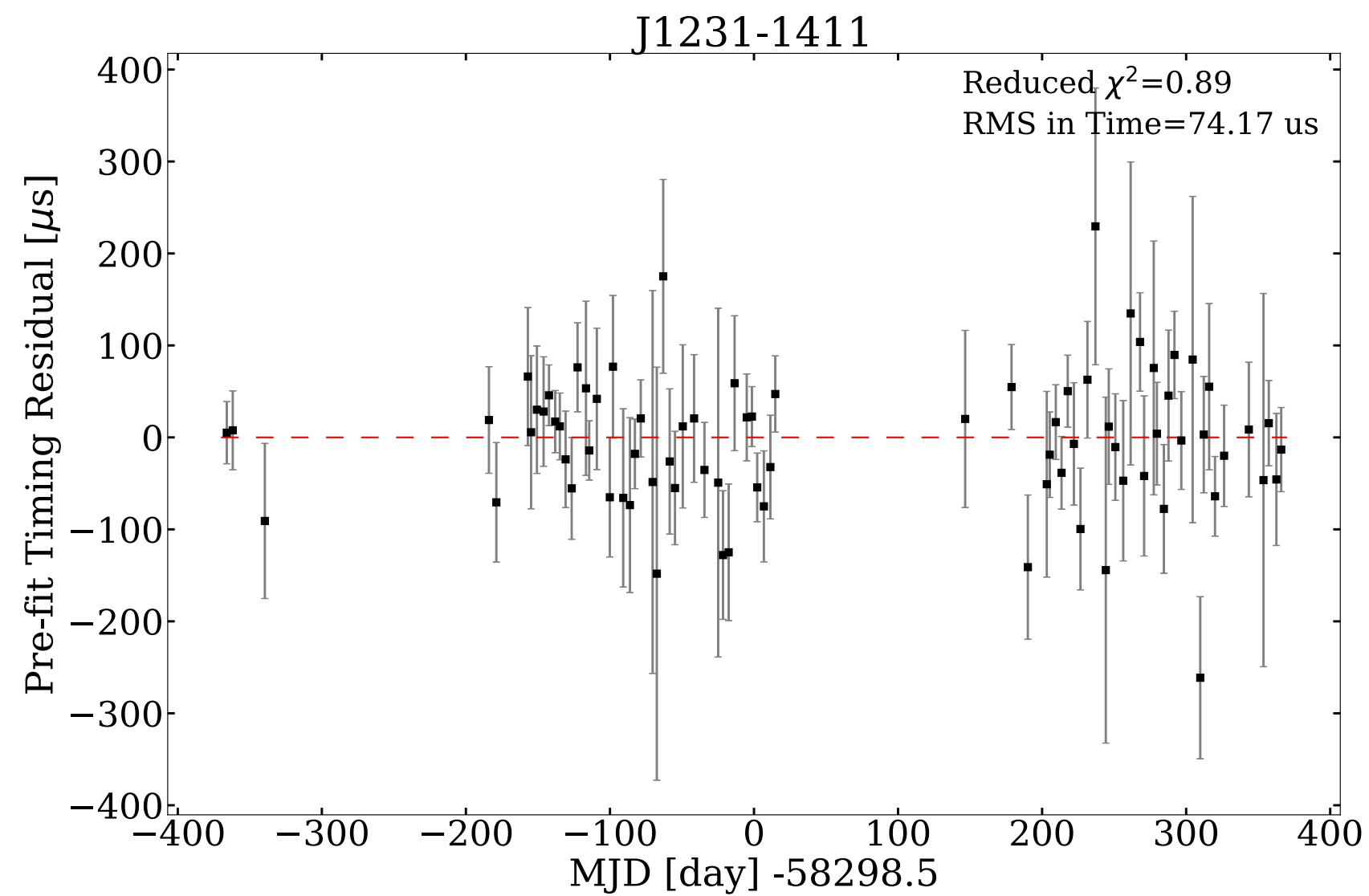
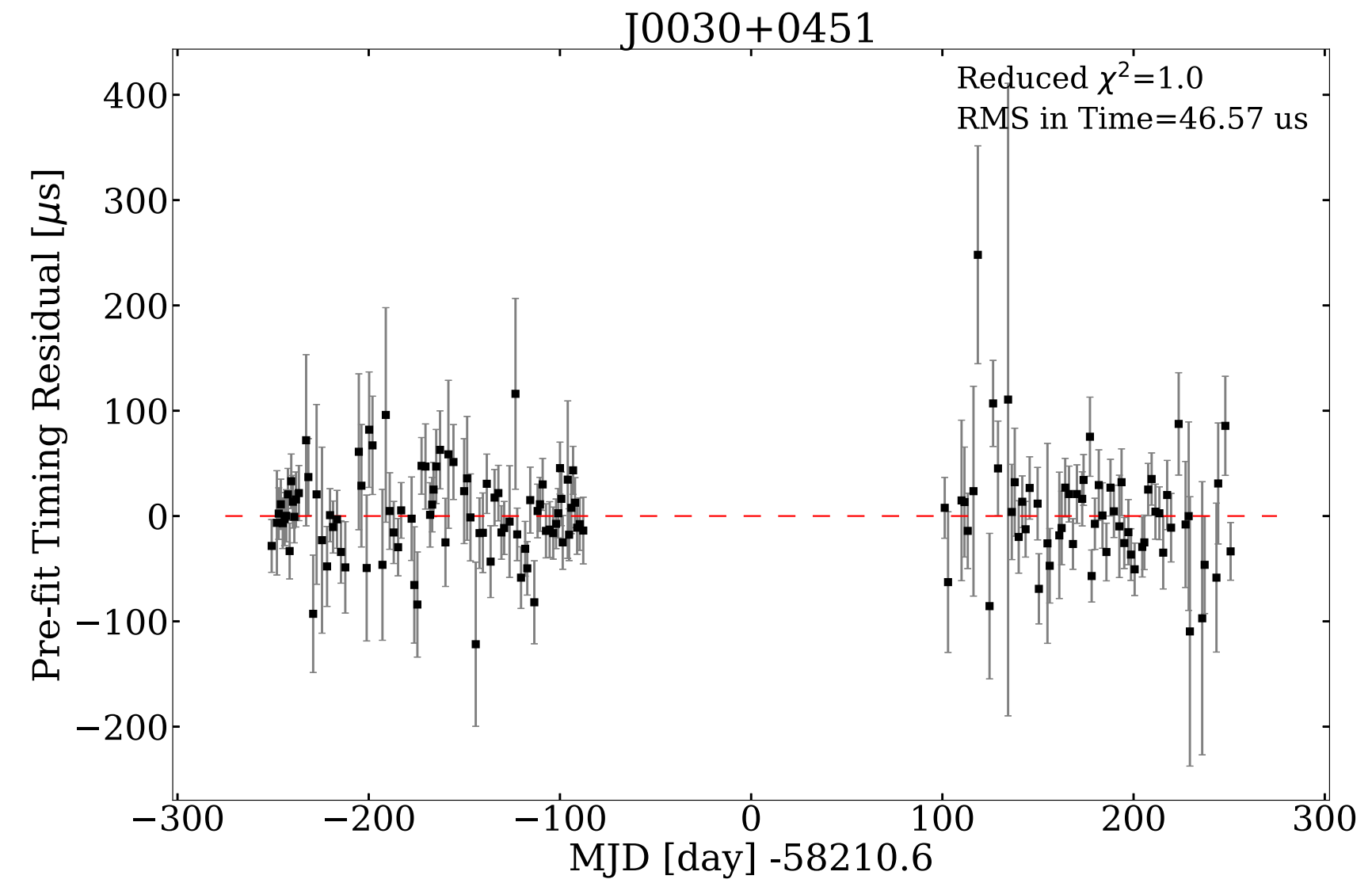
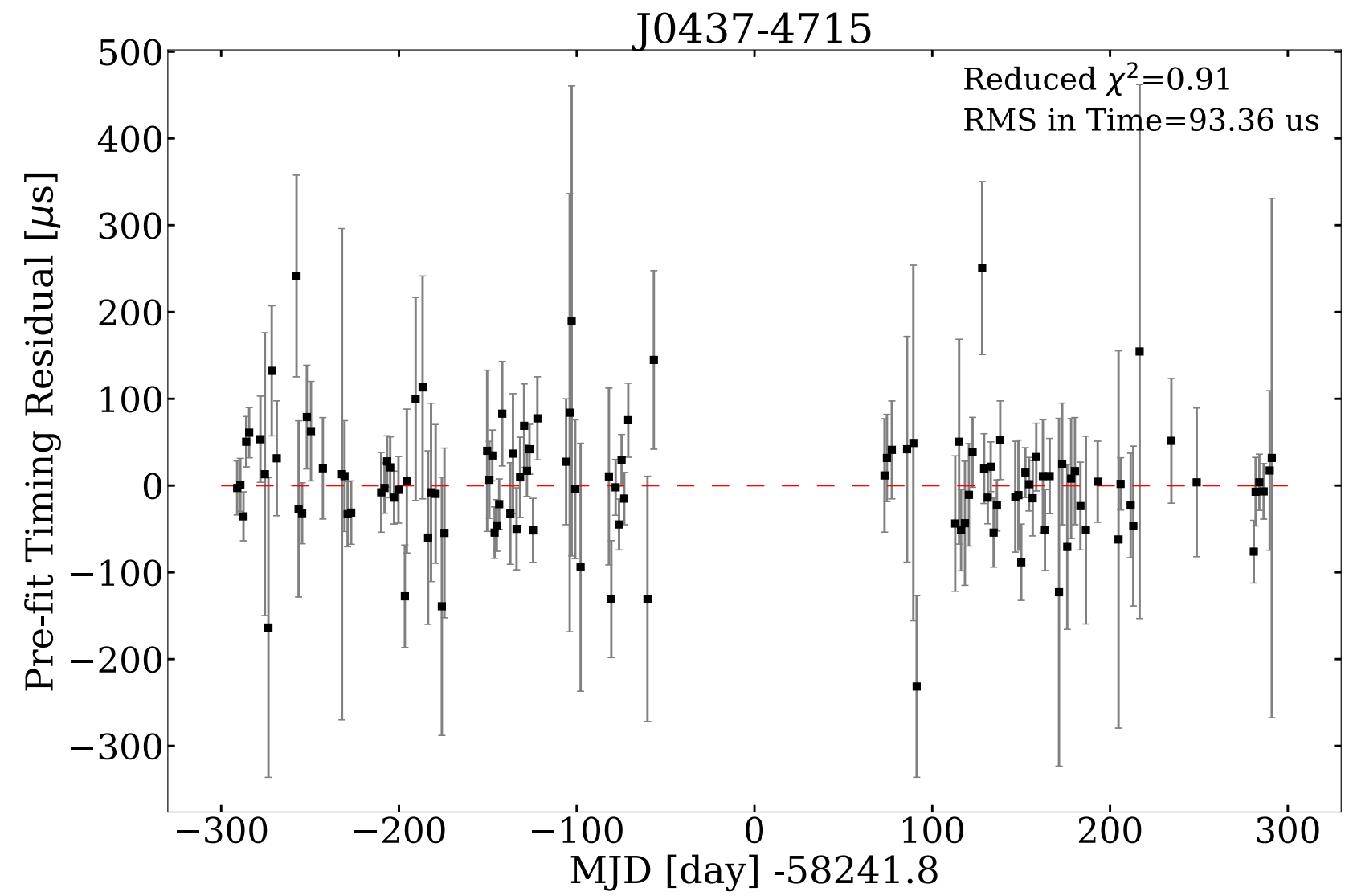


**J2124-3358**  
 $P=4.93$  ms  
 $d=410$  pc



# 地球近傍の4つの回転駆動型のミリ秒パルサー

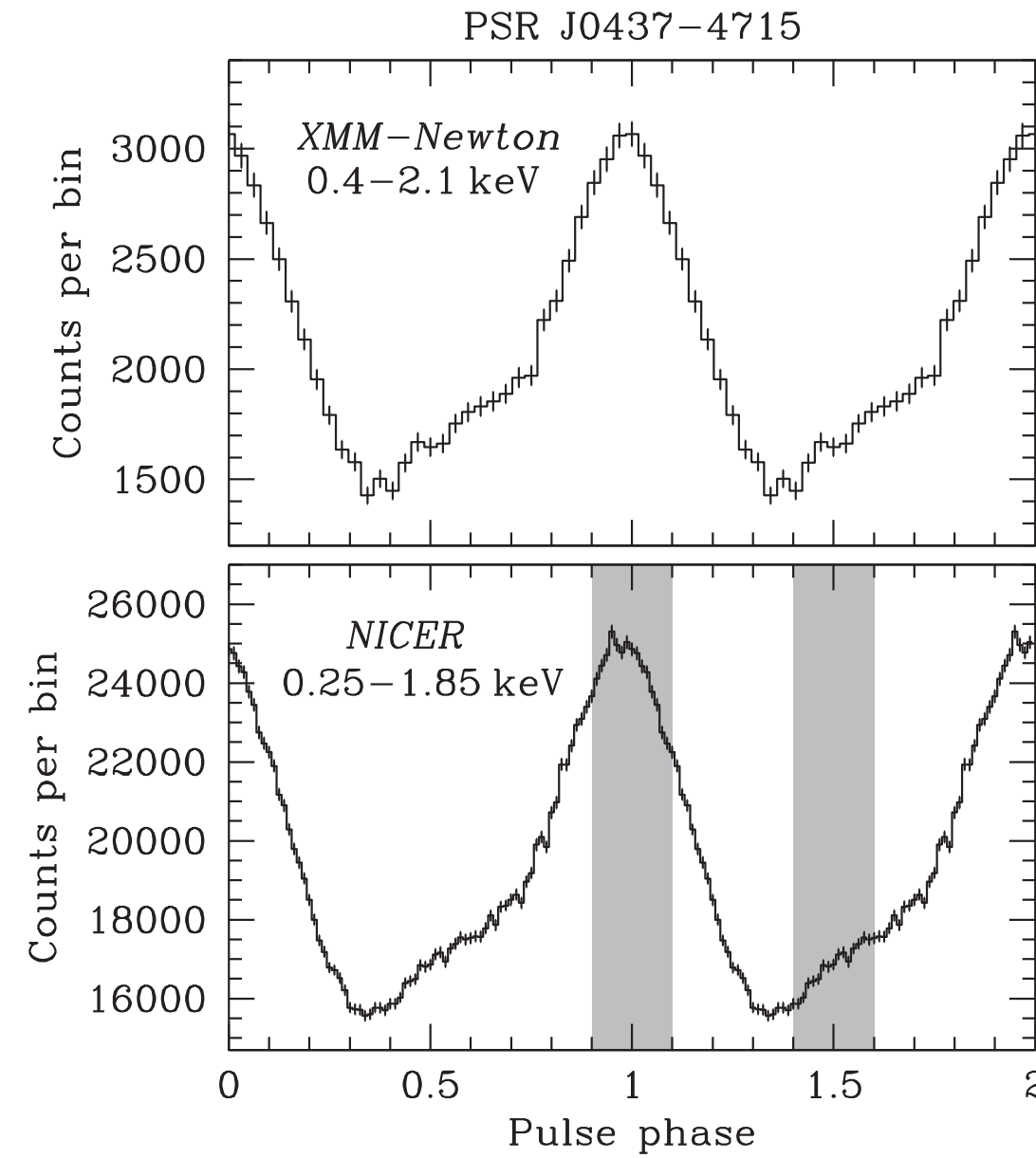
Timing Residual



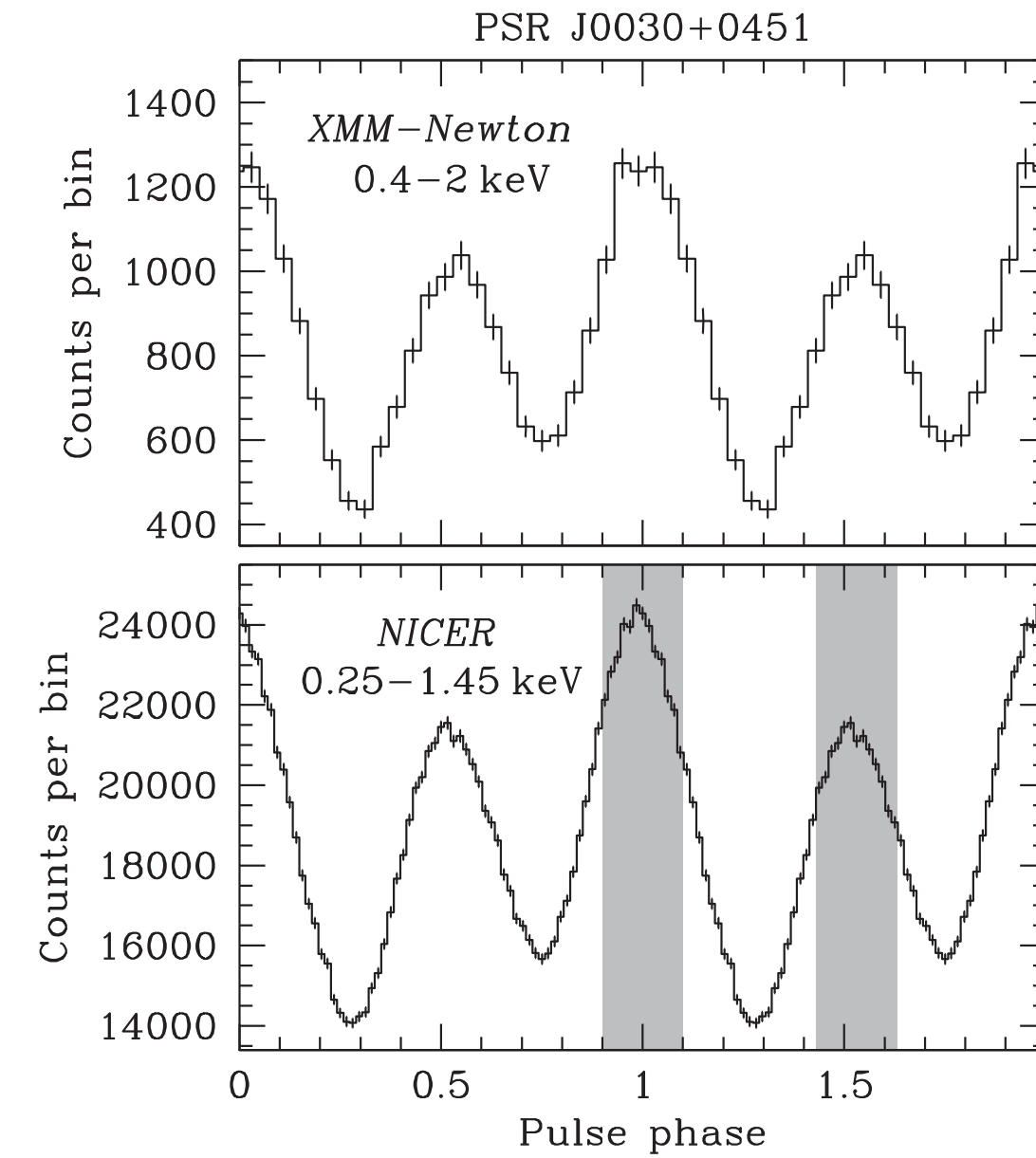
# 地球近傍の4つの回転駆動型のミリ秒パルサー

## X-ray Profiles

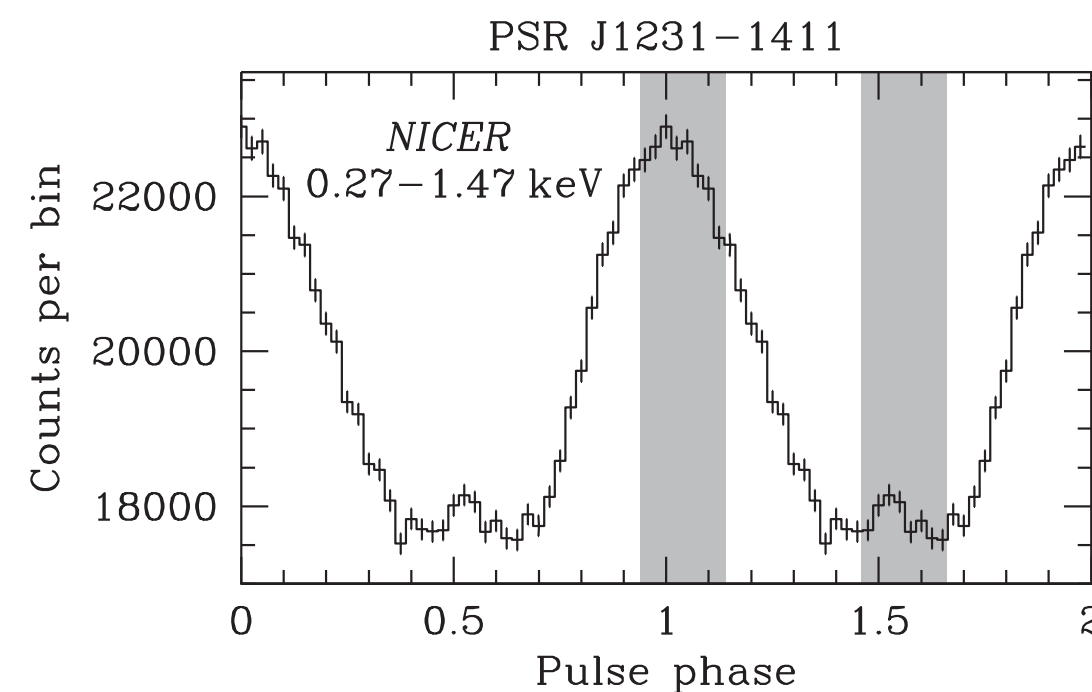
**J0437-4715**  
 $P=5.76$  ms  
1.43 cps  
(NICER rate)



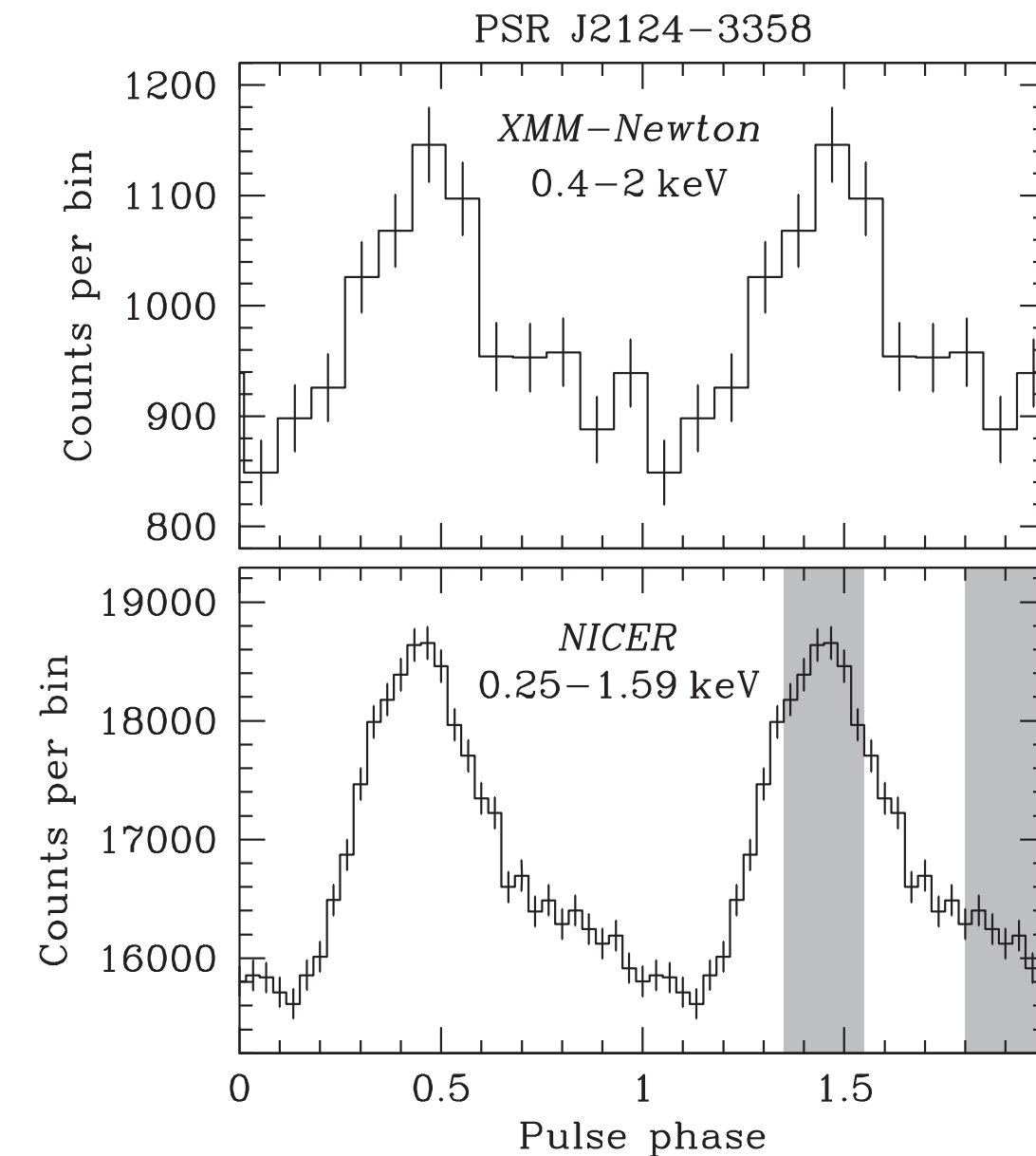
**J0030+0451**  
 $P=4.87$  ms  
0.314 cps



**J1231-1411**  
 $P=3.68$  ms  
0.210 cps



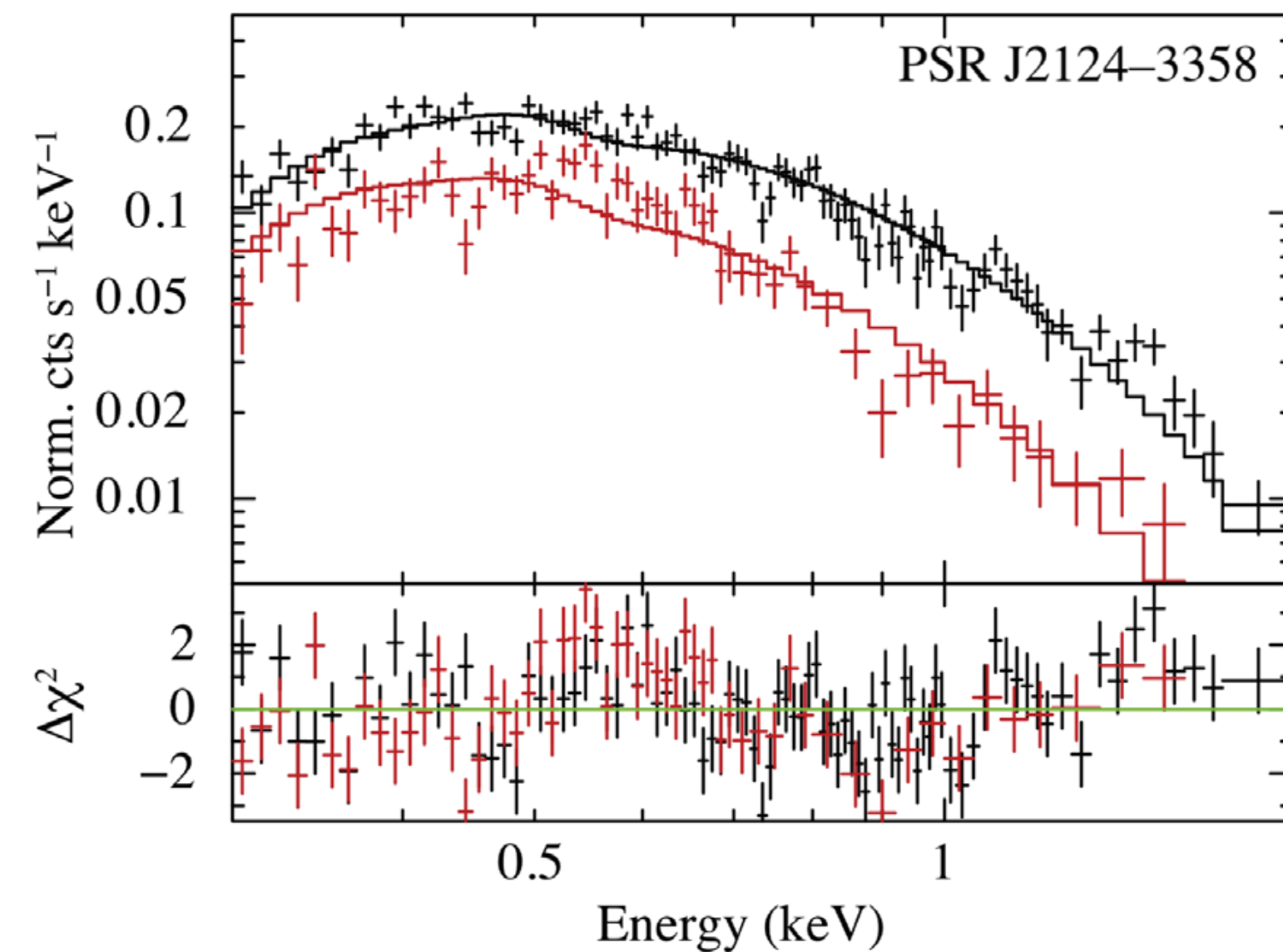
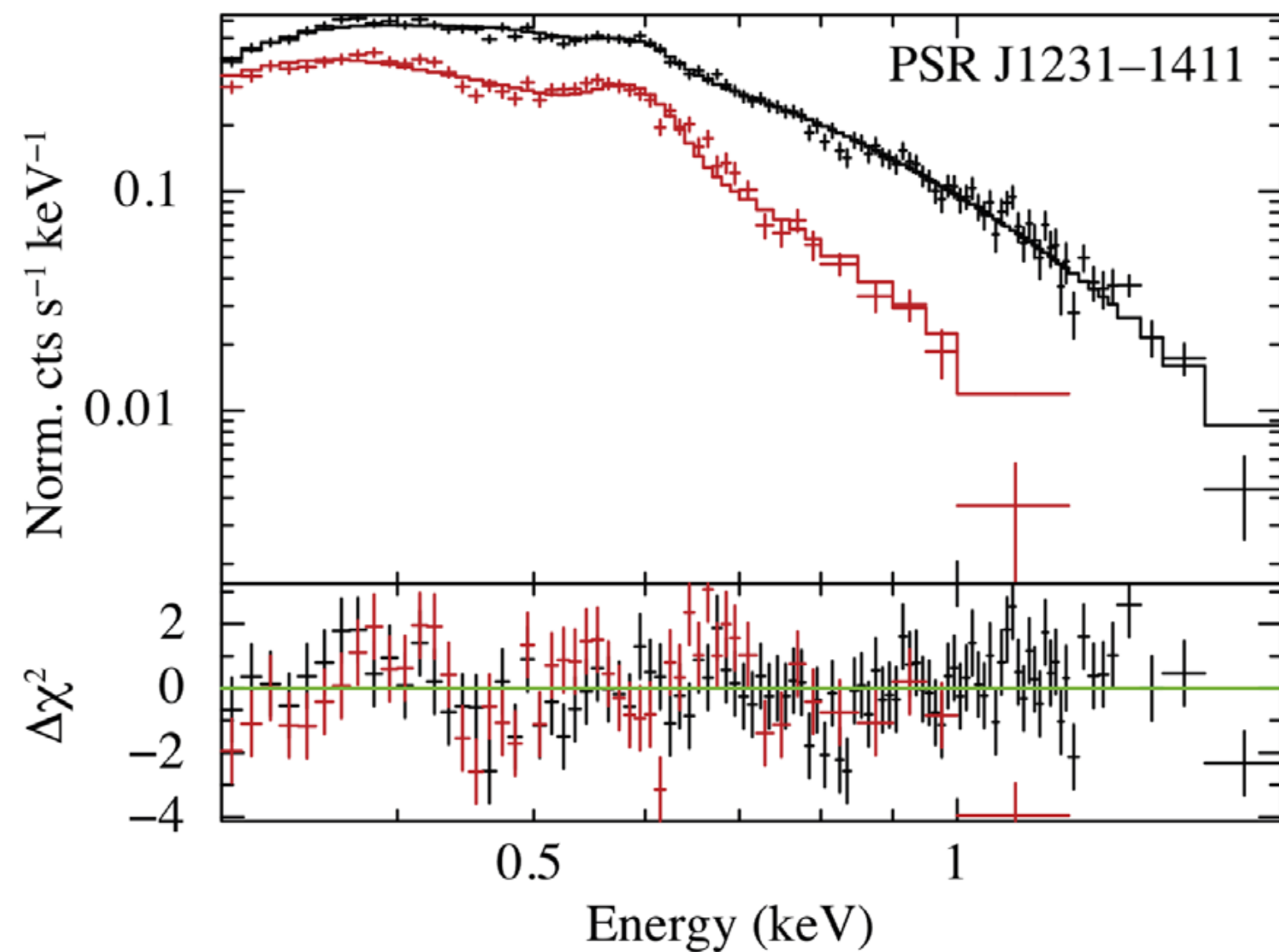
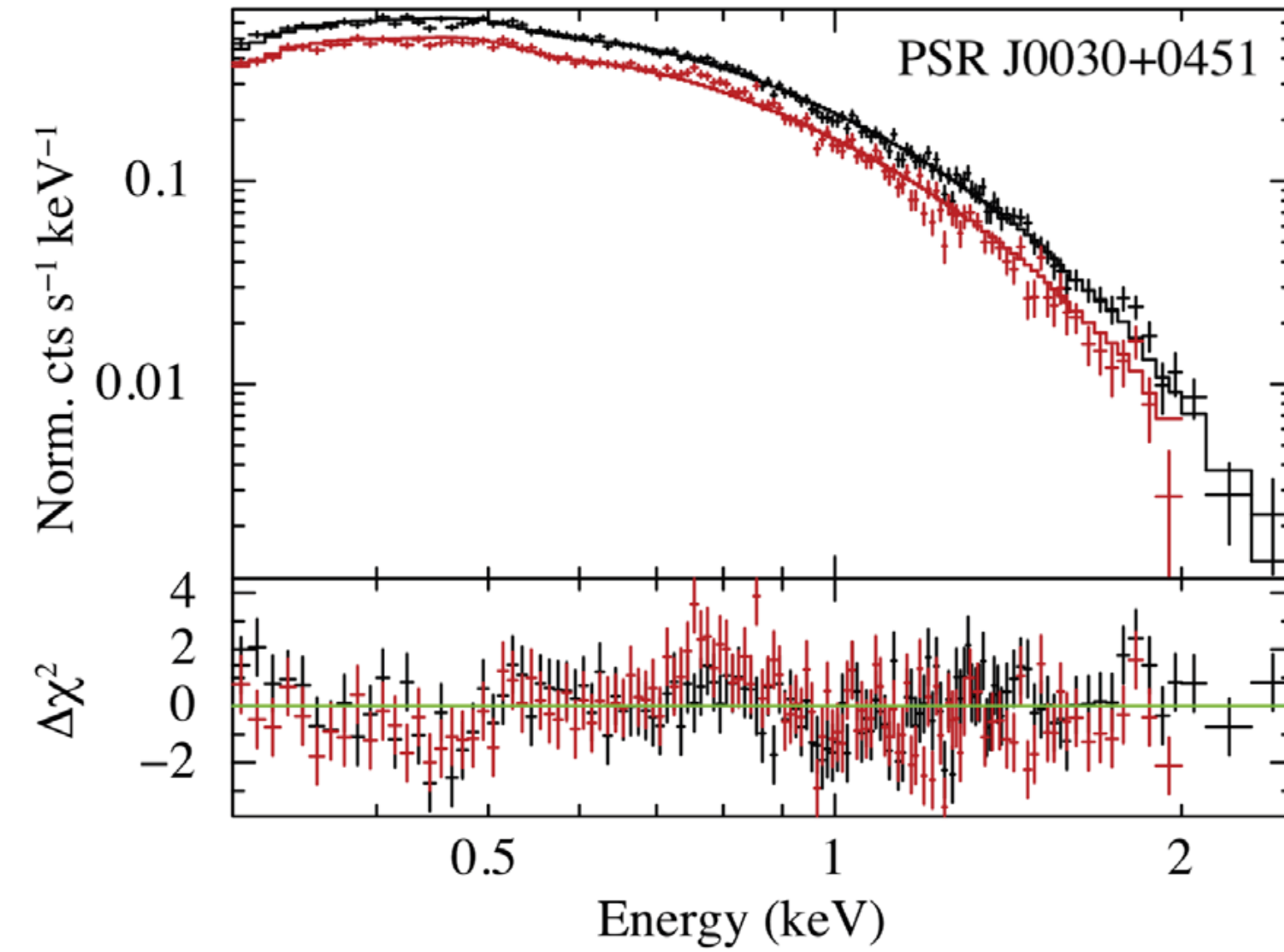
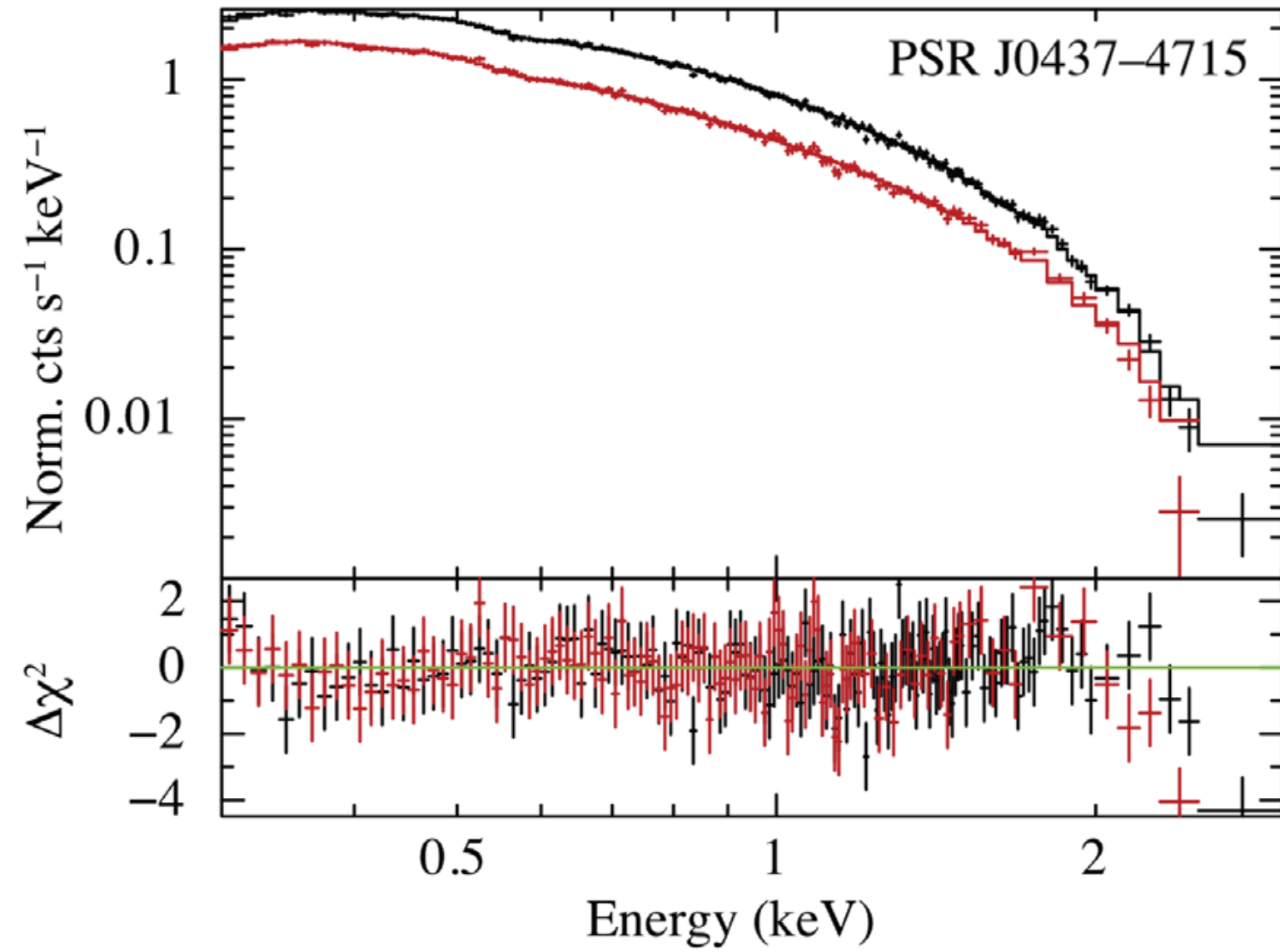
**J2124-3358**  
 $P=4.93$  ms  
0.110 cps



# 地球近傍の4つの回転駆動型のミリ秒パルサー

X-ray Spectra

Black: 1st peak  
Red: 2nd (sub) peak

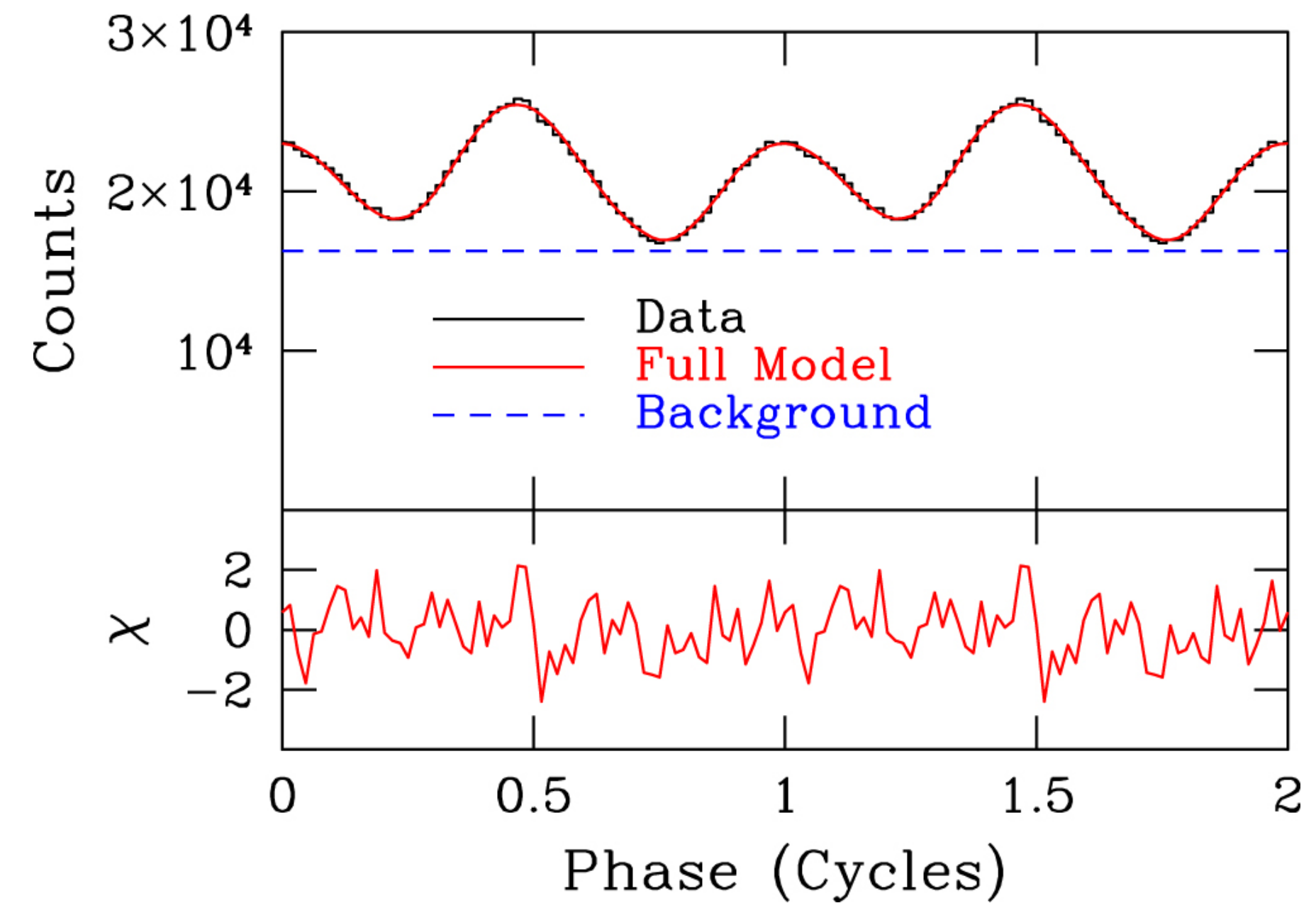
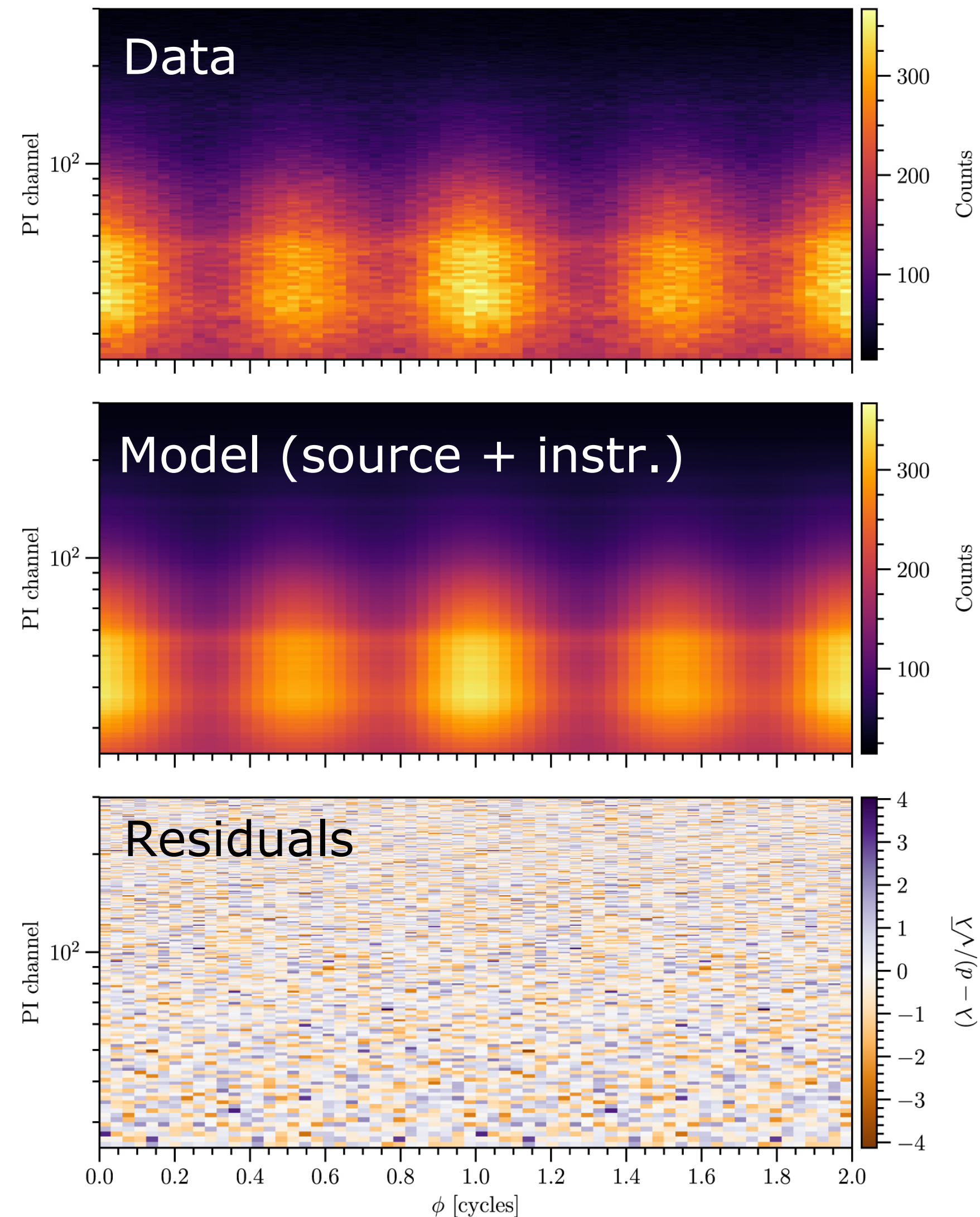


# 最初のターゲット: ミリ秒パルサー PSR J0030+0451

- $P=4.87$  ミリ秒のパルサー ( $f = 205$  Hz) で長期に自転が安定
- NICER はこのパルサーを 2017-2018年にかけて合計1.94 Msec 観測し自転やX線フラックスに特段の変化はなかった。
- ホットスポットからのそれぞれのパルスピークの放射は、単一温度の水素大気モデルでよく記述される。
- NICERチームと共同研究者は、高速回転する中性子星からの表面放射の数値計算コードを開発した。
- パルサーのパルス波形のベイズ推定から、パルサーの質量と半径を測定できる。

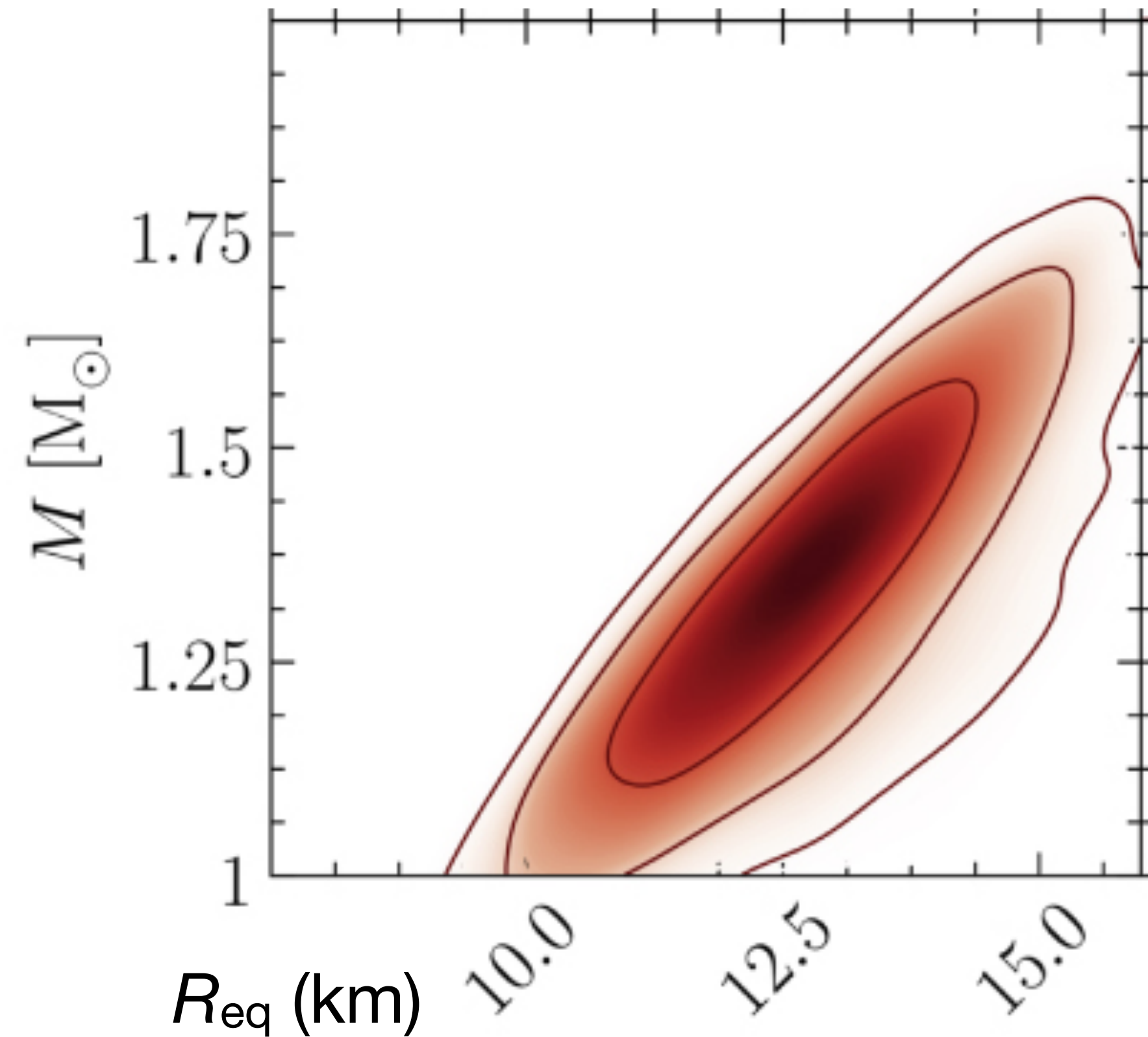
# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 の NICER 観測

Two independent methods showed identical results for mass and radius!

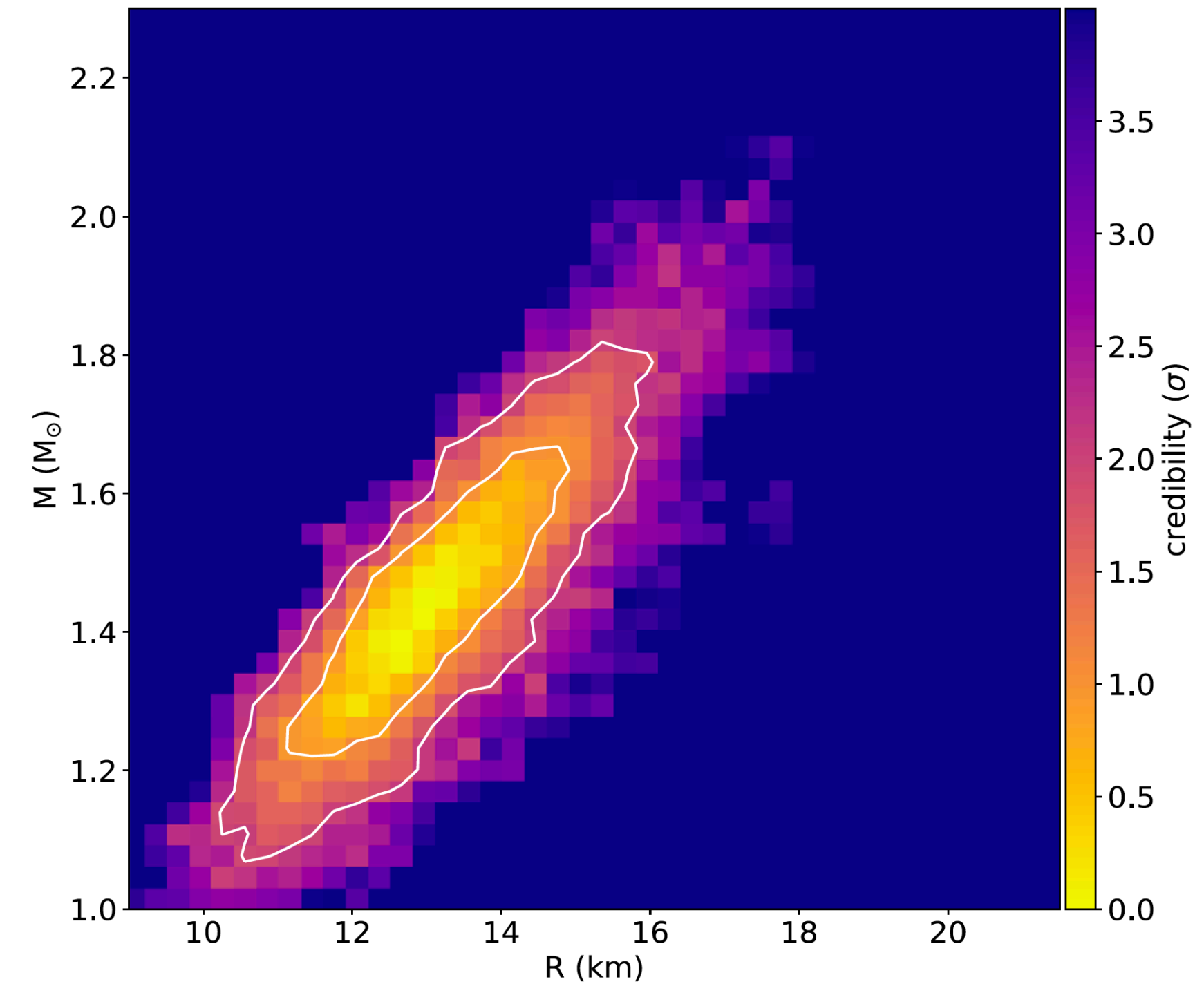


# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 の NICER 観測

Two independent methods showed identical results for mass and radius!



$$M = 1.34 \pm 0.15 M_{\text{sun}}$$
$$R = 12.71 \pm 1.17 \text{ km}$$



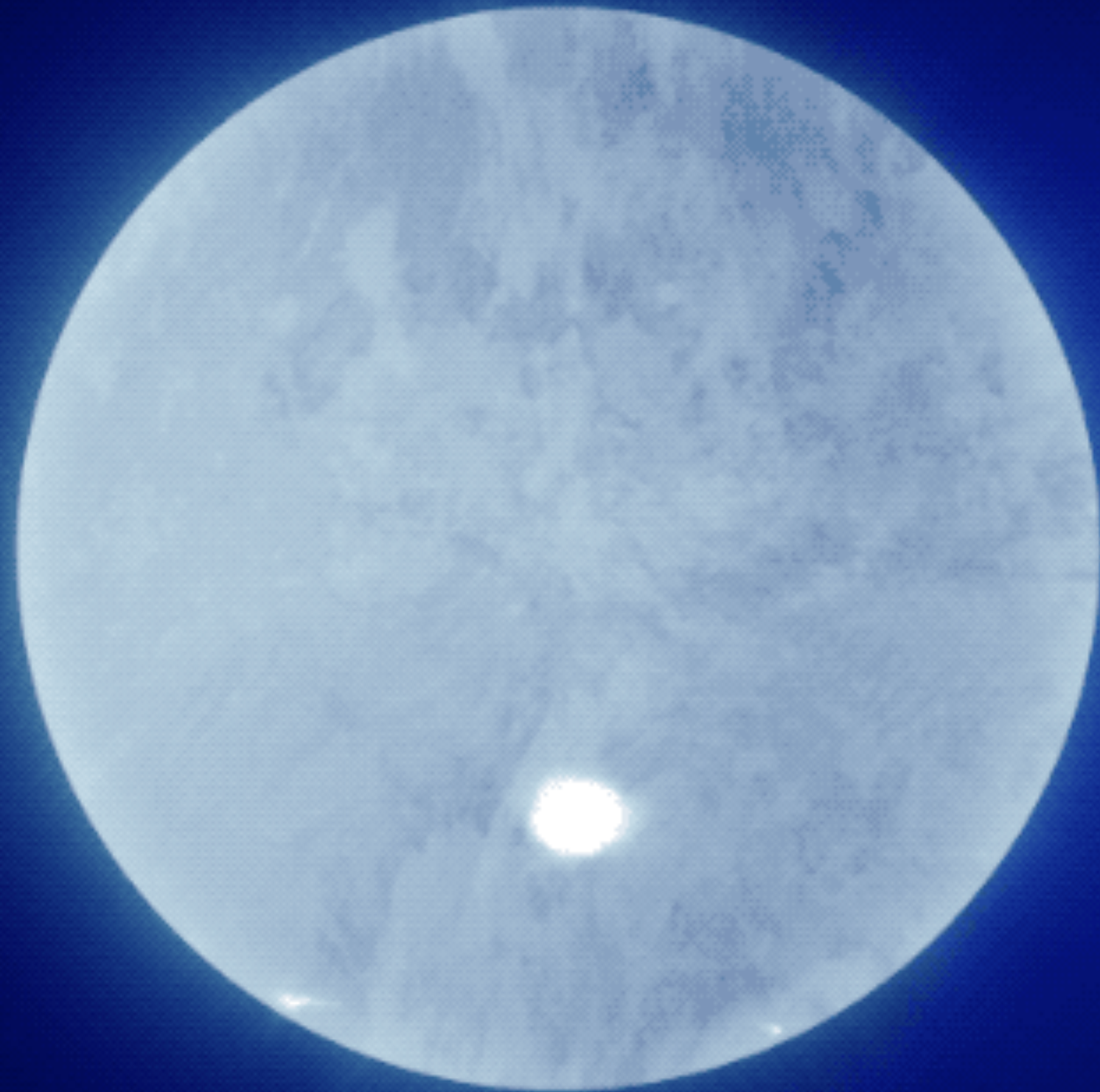
$$M = 1.44 \pm 0.15 M_{\text{sun}}$$
$$R = 13.02 \pm 1.15 \text{ km}$$

# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 の NICER 観測

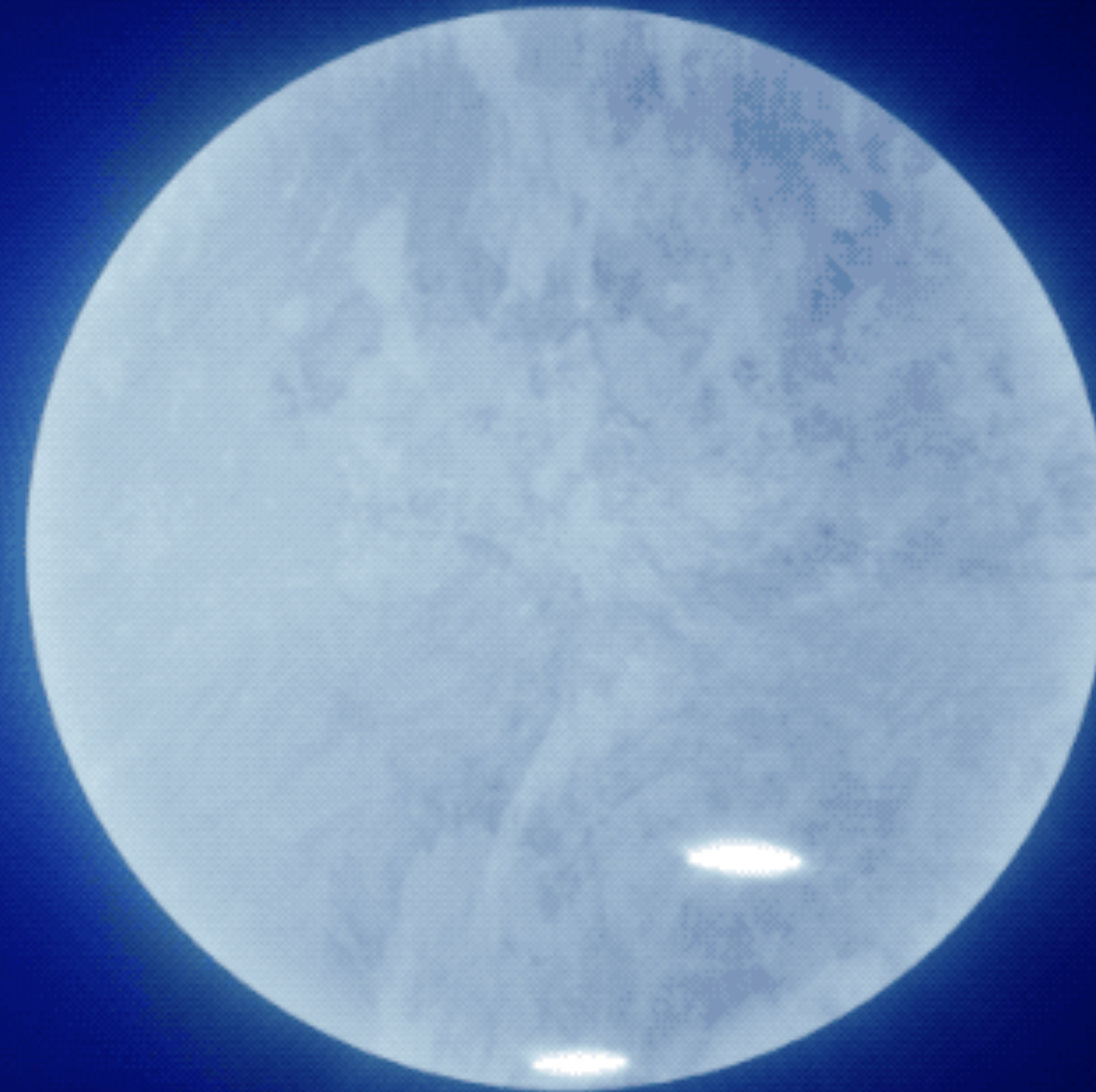
Two independent methods showed identical results for mass and radius!

NICER Press Release Webpage

[https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus\\_on\\_NICER\\_Constraints\\_on\\_the\\_Dense\\_Matter\\_Equation\\_of\\_State](https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_NICER_Constraints_on_the_Dense_Matter_Equation_of_State)



two hot spots — one small and circular, the other long and crescent-shaped

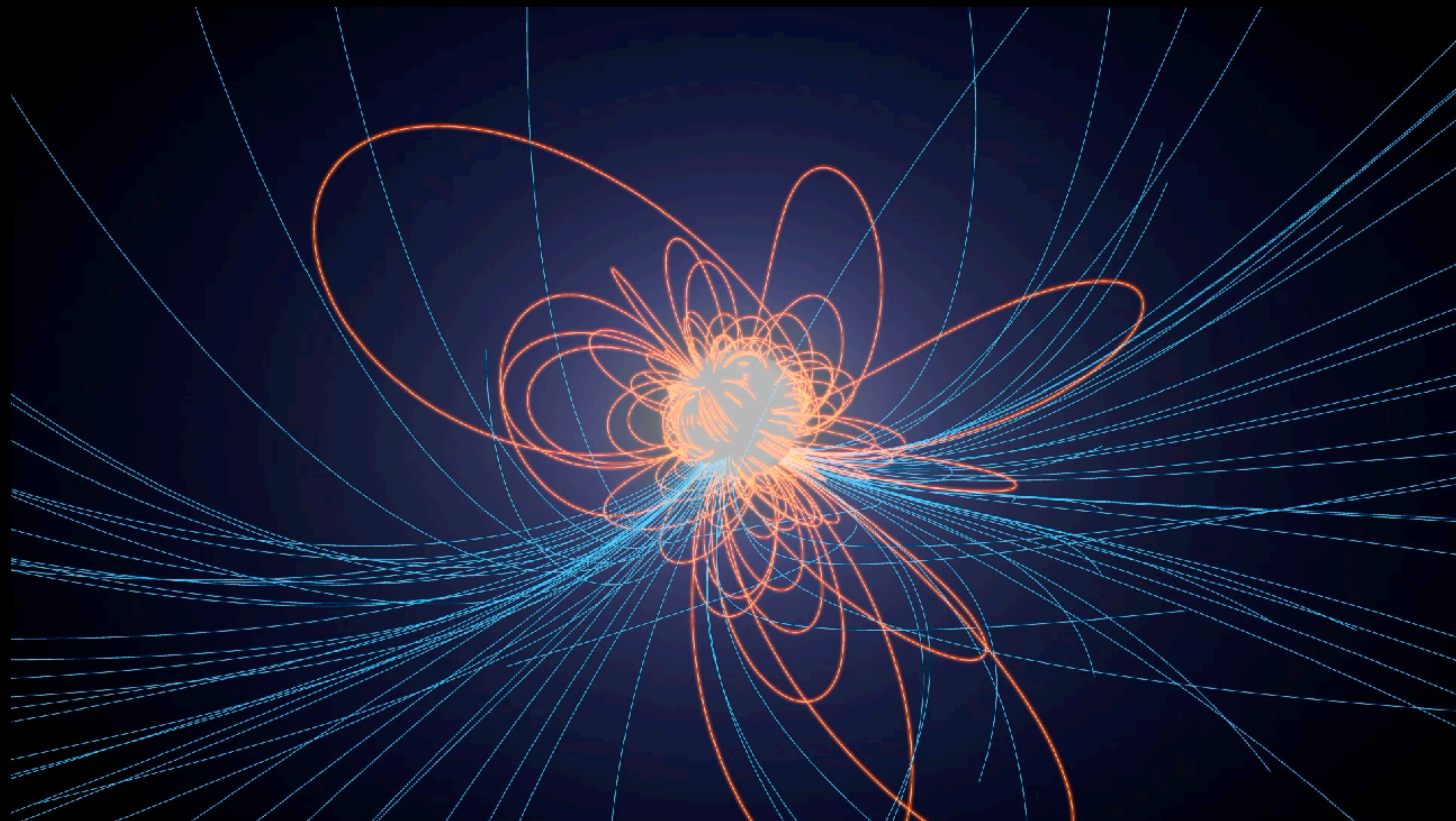


two or three oval-shaped hot spots



# パルサーの磁場形状を考え直す

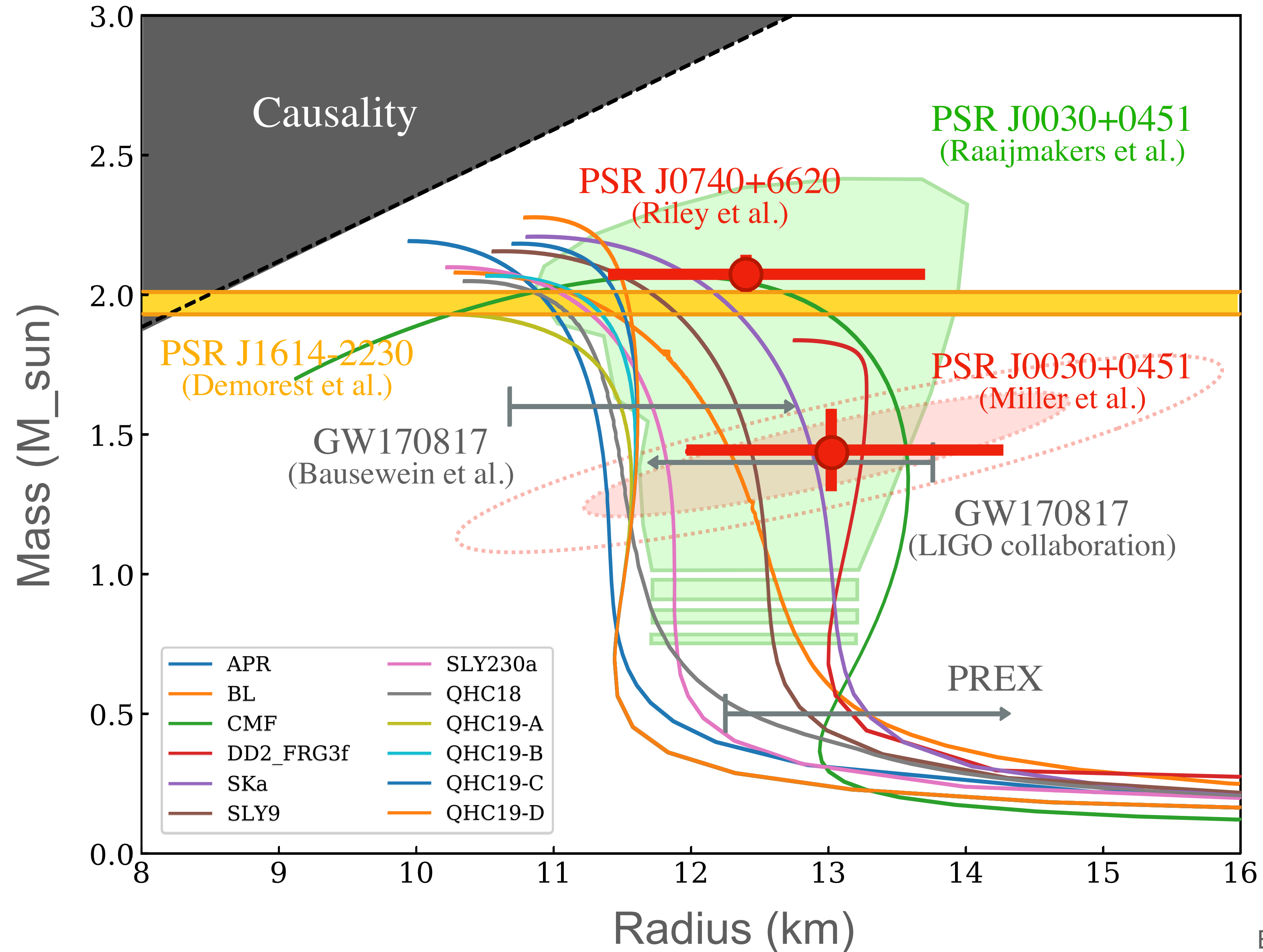
More complex than a single dipole.



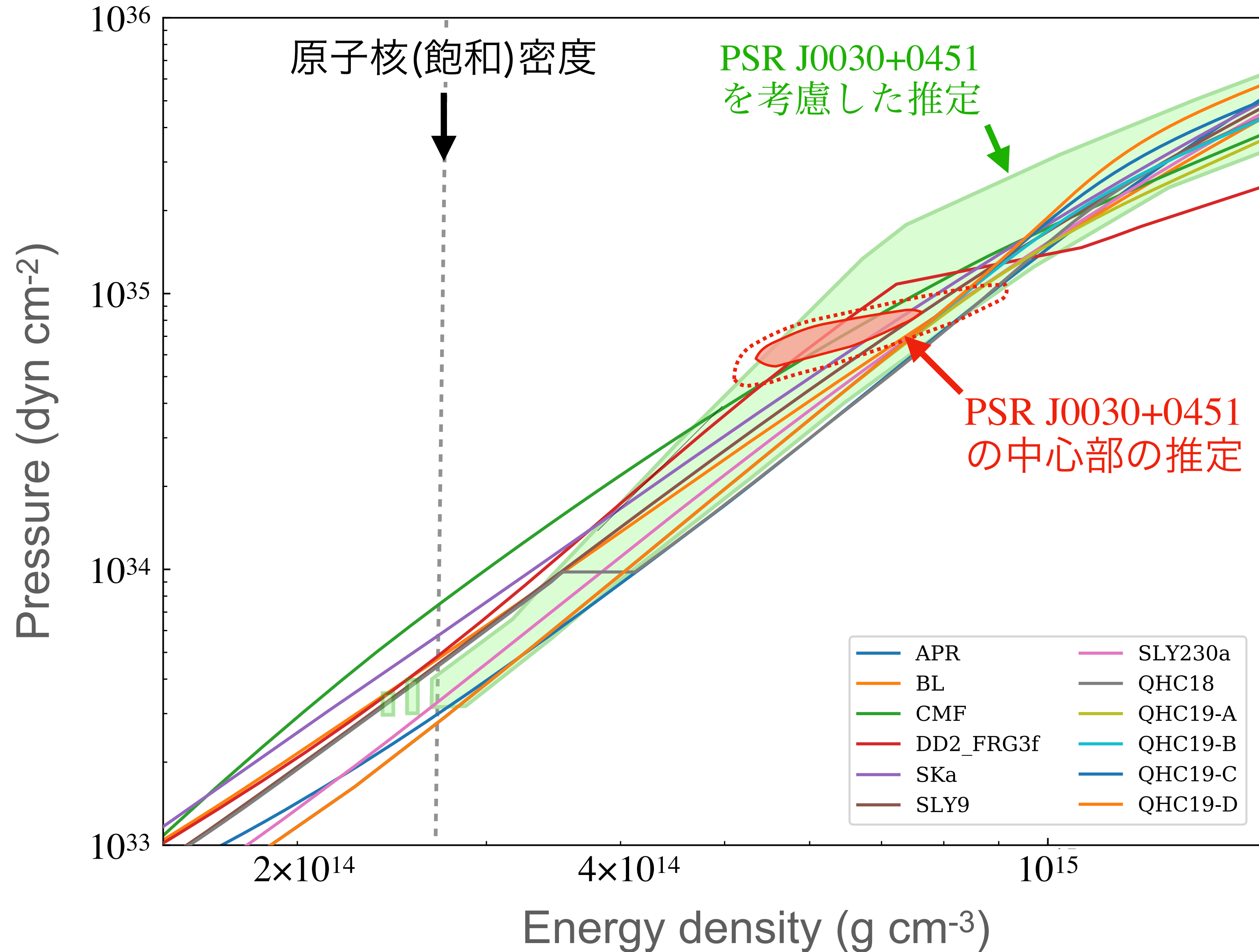
# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 測定の意義

- 同一の天体から初めて精度のよい ( $\pm 10\%$ ) 質量と半径を測定を行った。連星運動を使わない孤立パルサーとしての質量測定。
- パルサー表面のホットスポットの位置、形、大きさ、温度に関する詳細な地図を作成。ダイポール磁場ではない形状を示唆。
- 高密度核物質の状態方程式に対する新しい制限。圧力と密度の相図の上で30%ほど強い制限を得ている。

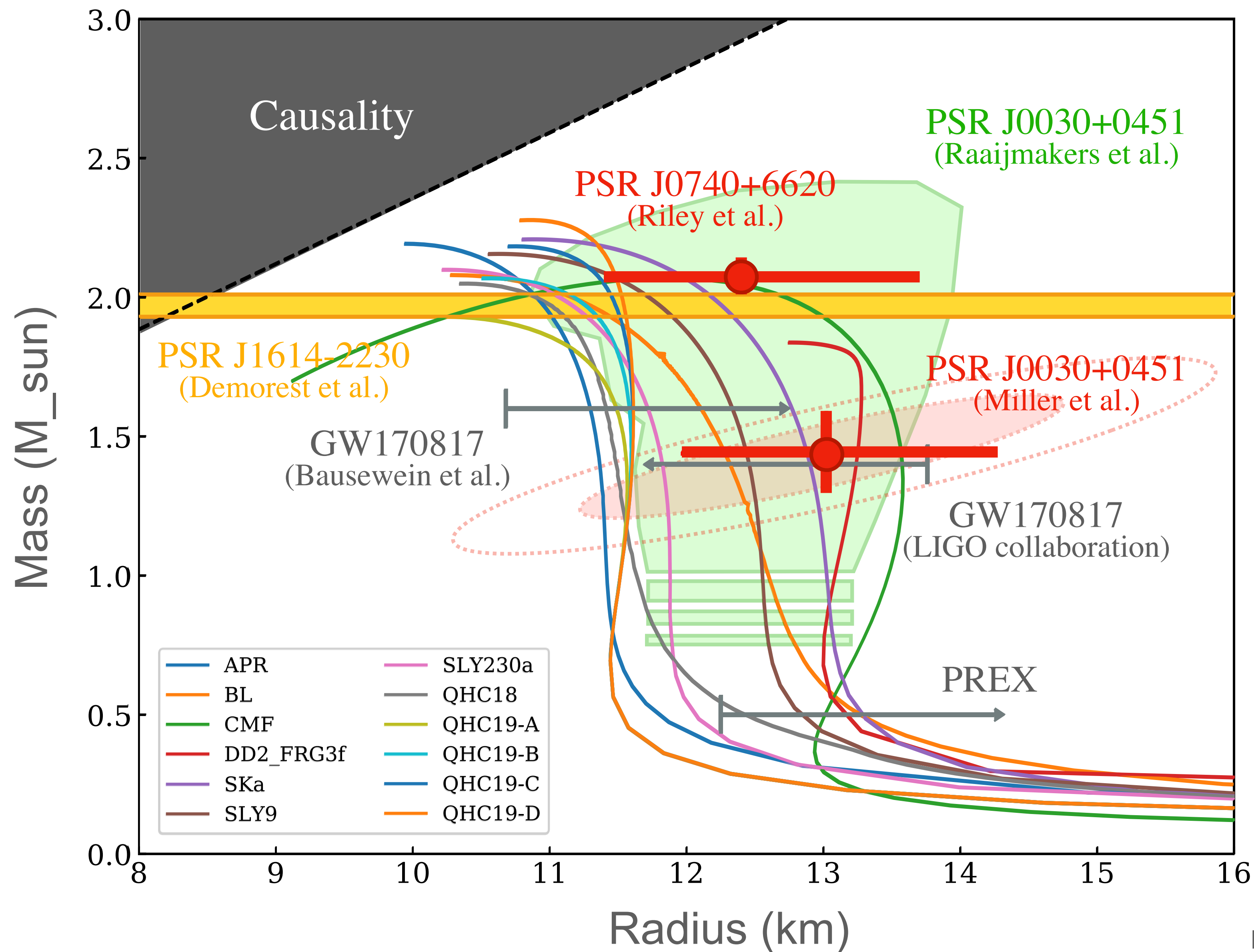
# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 の質量と半径



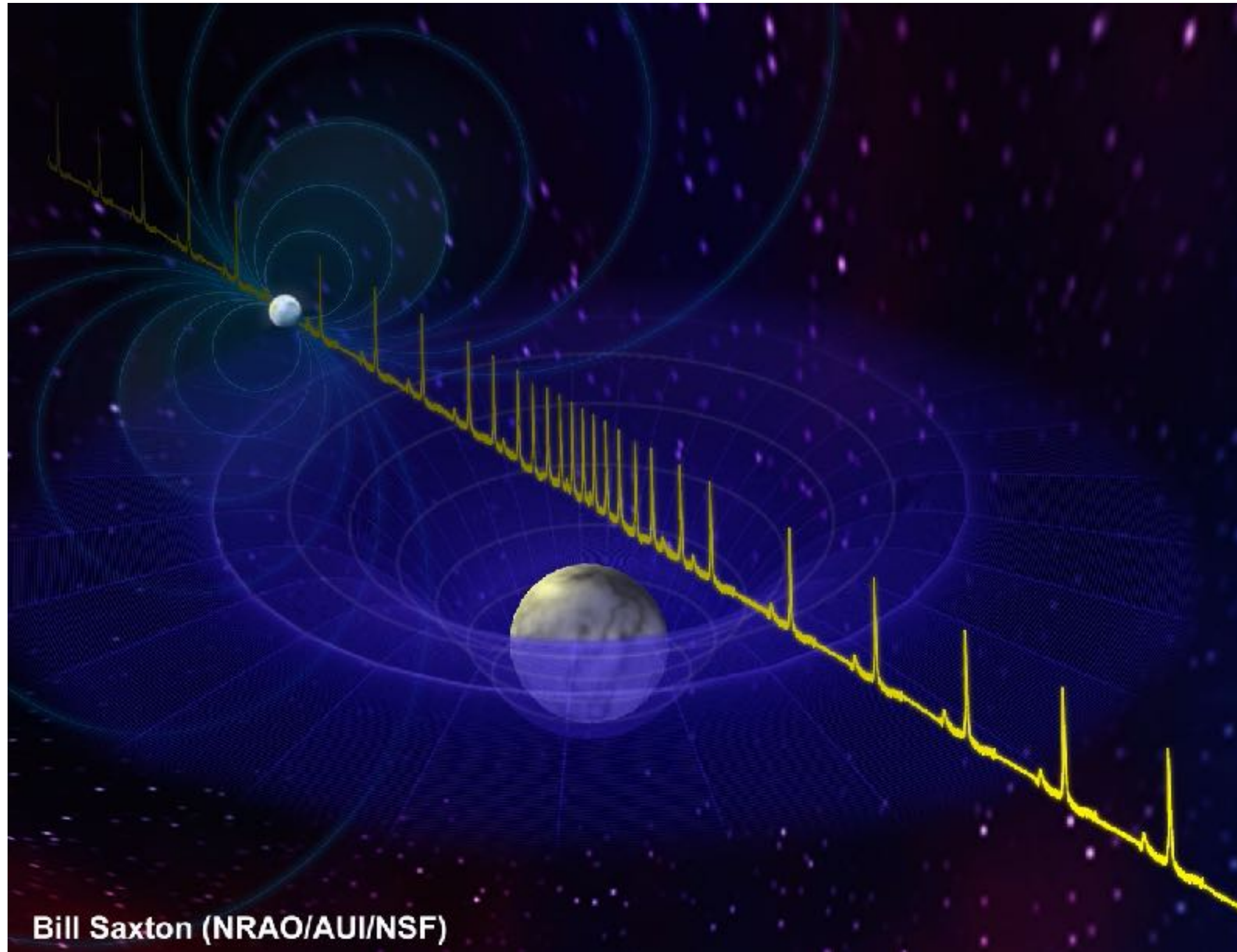
# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 の圧力と密度



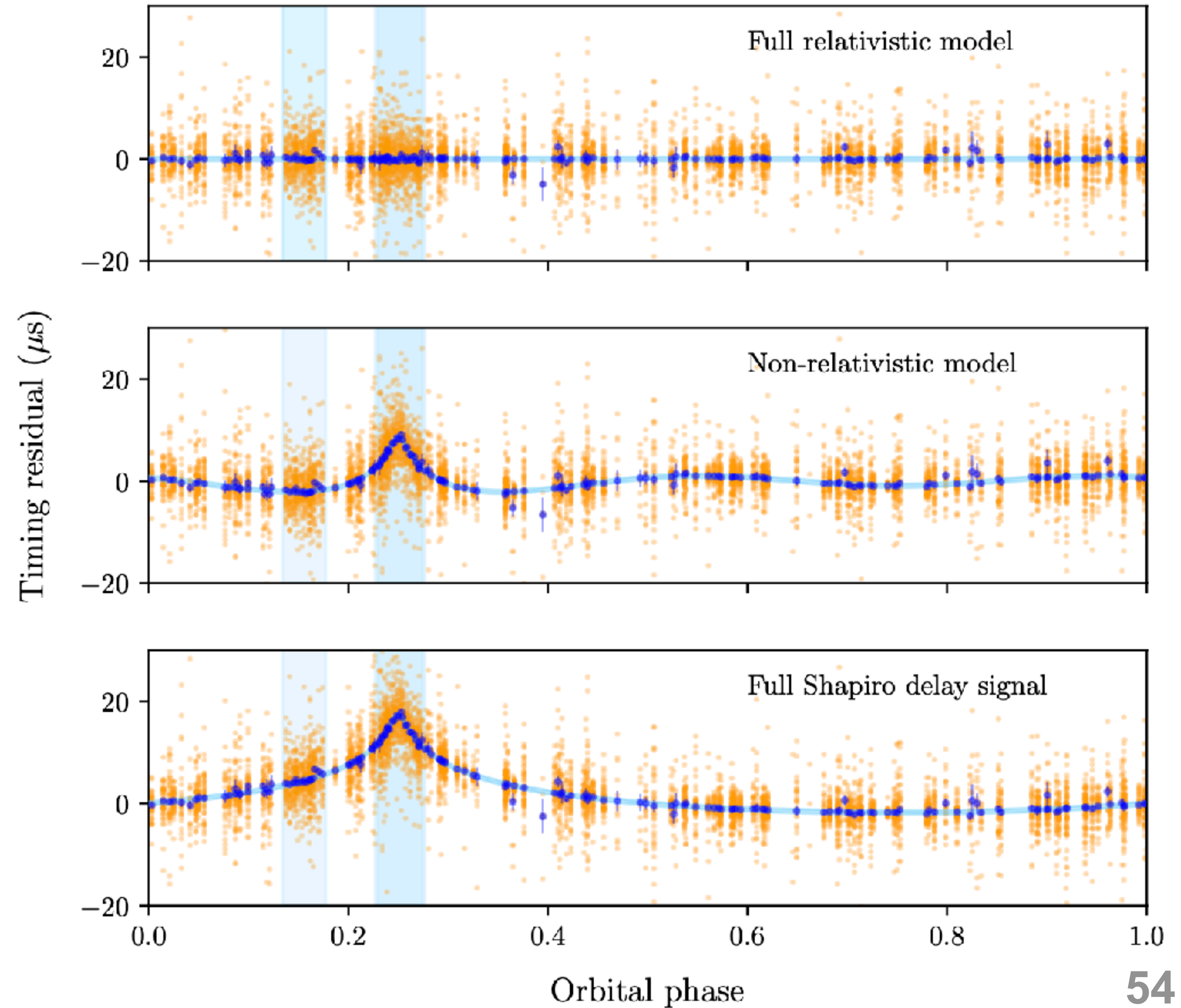
# ミリ秒パルサー PSR J0030+0451 の質量と半径



# PSR J0740+6620 — シャピロ時間遅れ 2.1 Msun



J0740+6620 residuals

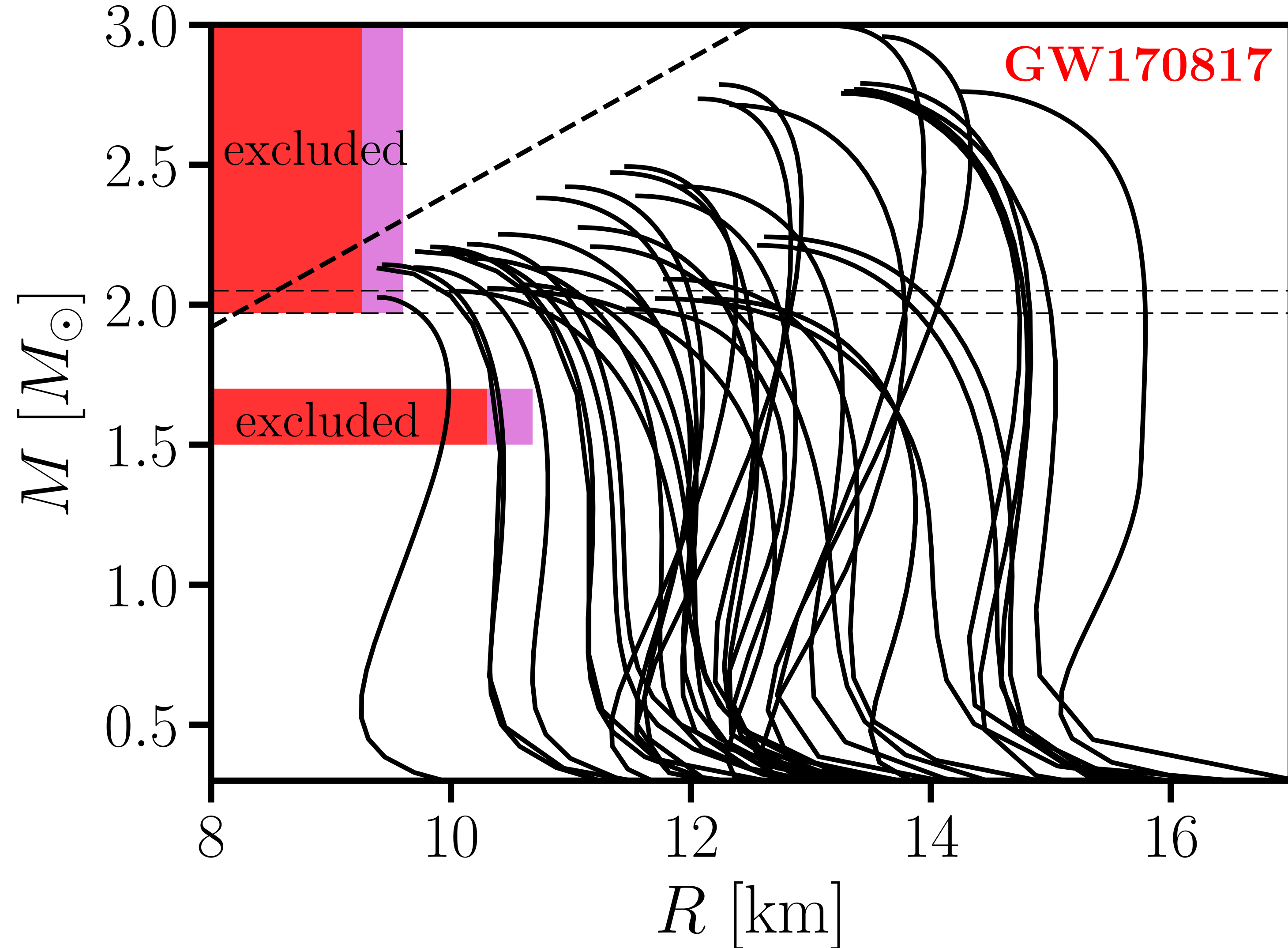


Cromartie et al., Nature Astronomy 2020

Miller et al., arXiv:2105.06979

Riley et al., arXiv:2105.06980

# 重力波イベント GW170817 からの質量・半径の制限



Bauswein et al., 2017

<https://arxiv.org/pdf/1710.06843.pdf>

- $R > 10.68(-0.05, +0.15)$  km for  $M=1.6 M_{\text{sun}}$ , non-rotating NS
- $R > 9.60 (-0.03, +0.14)$  km for maximum mass NS

# 2022 Bruno Rossi Prize (ブルーノ・ロッシ賞)

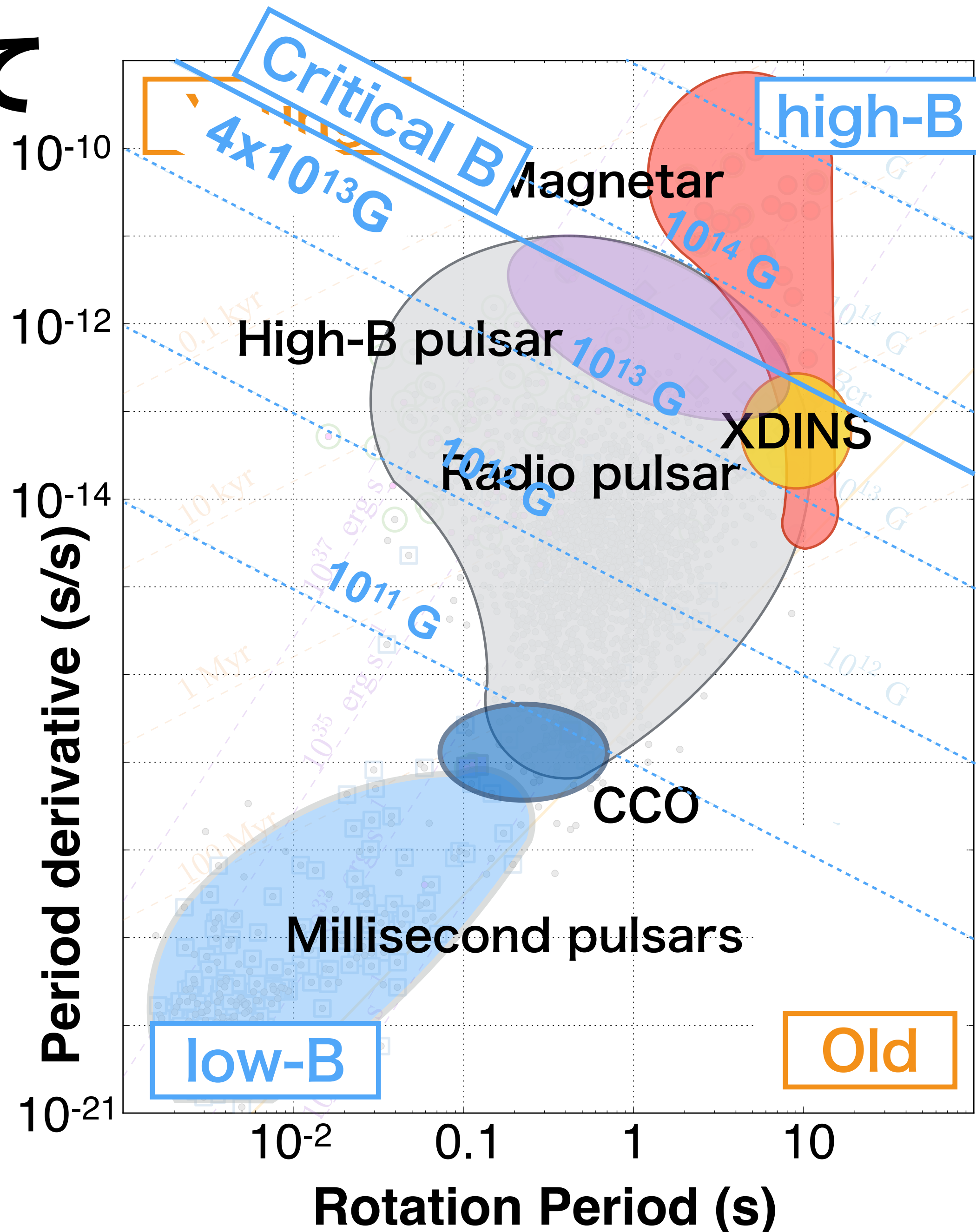
## 2022 Keith Gendreau, Zaven Arzoumanian and the NICER team

The 2022 Bruno Rossi Prize has been awarded to Keith Gendreau, Zaven Arzoumanian and the NICER team "for development of the Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) and the revolutionary insights it is providing about the extreme environments of neutron stars and black holes, including the first precise and reliable measurement of a pulsar's mass and radius from detailed modeling of its pulsed waveform." The NICER team is Diego Altamirano (U. Southampton), Lorella Angelini (GSFC), Zaven Arzoumanian (NASA/GSFC), Michiel Baubock (U. Arizona), Peter Becker (GMU), Anna Bilous (U. Amsterdam), Slavko Bogdanov (Columbia U.), Esra Bulbul (MPE), Peter Bult (NASA/GSFC), Ed Cackett (Wayne State U.), Deepto Chakrabarty (MIT), Jerome Chenevez (DTU), Devarshi Choudhury (U. Amsterdam), Joel Coley (Howard U.) Mike Corcoran (CUA & NASA/GSFC), Julia Deneva (GMU), Alex Dittman (UMd), John Doty (Noqsi Aerospace Ltd.), Steve Drake (USRA & NASA/GSFC), Steve Eikenberry (UCF), Teruaki Enoto (Riken), Andrew Fabian (Cambridge), Elizabeth Ferrara (NASA/GSFC), Keith Gendreau (NASA/GSFC), Sebastien Guillot (U. Toulouse), Tolga Guver (Istanbul U.), Kenji Hamaguchi (UMBC & NASA/GSFC), Alice Harding (NASA/GSFC), Jason Hessels (U. of Amsterdam), Wynn Ho (Haverford), Jeroen Homan (Eureka Scientific), Wataru Iwakiri (Chuo U.), Keith Jahoda (NASA/GSFC), Gaurava Jaisawal (U. Denmark), Peter Jenke (UAH), Erin Kara (MIT), Vicky Kaspi (McGill U.), Laurens Keek (cosine B. V.), Matthew Kerr (NRL), Fred Lamb (U. of Illinois, Urbana-Champaign), James Lattimer (SUNY Stony Brook), Natalia Lewandowska (Haverford), Bennett Link (MSU), Mike Loewenstein (UMCP & NASA/GSFC), Andrea Lommen (Haverford), Renee Ludlam (CalTech), Simin Mahmoodifar (NASA/GSFC), Walid Majid (JPL), Christian Malacaria (USRA & NASA/MSFC), Craig Markwardt (NASA/GSFC), Cole Miller (UMCP), Jon Miller (U. Michigan), Sharon Morsink (U. Alberta), Joey Neilsen (Villanova), Melania Nynka (MIT), Takashi Okajima (NASA/GSFC), Feryal Ozel (U. Arizona), Dheeraj Pasham (MIT), Katja Pottschmidt (UMBC & NASA/GSFC), Gregory Prigozhin (MIT), Dimitrios Psaltis (U. Arizona), Geert Raaijmakers (U. of Amsterdam), Scott Ransom (NRAO), Paul Ray (NRL), Ron Remillard (MIT), Thomas Riley (U. Amsterdam), Tuomo Salmi (U. Amsterdam), Jack Steiner (MIT), Abigail Stevens (U. Michigan), Tod Strohmayer (NASA/GSFC), Andrei Timokhin (U. of Zielona Gora), Francesco Tombesi (UMCP & NASA/GSFC), Phil Uttley (SRON), Christo Venter (North-West U.), Serena Vinciguerra (U. Amsterdam), Anna Watts (U. Amsterdam), Colleen Wilson-Hodge (NASA/MSFC), Zoawar Wadiasingh (NASA/GSFC & NPP) Mike Wolff (NRL), Kent Wood (NRL), George Younes (NASA/GSFC & NPP)

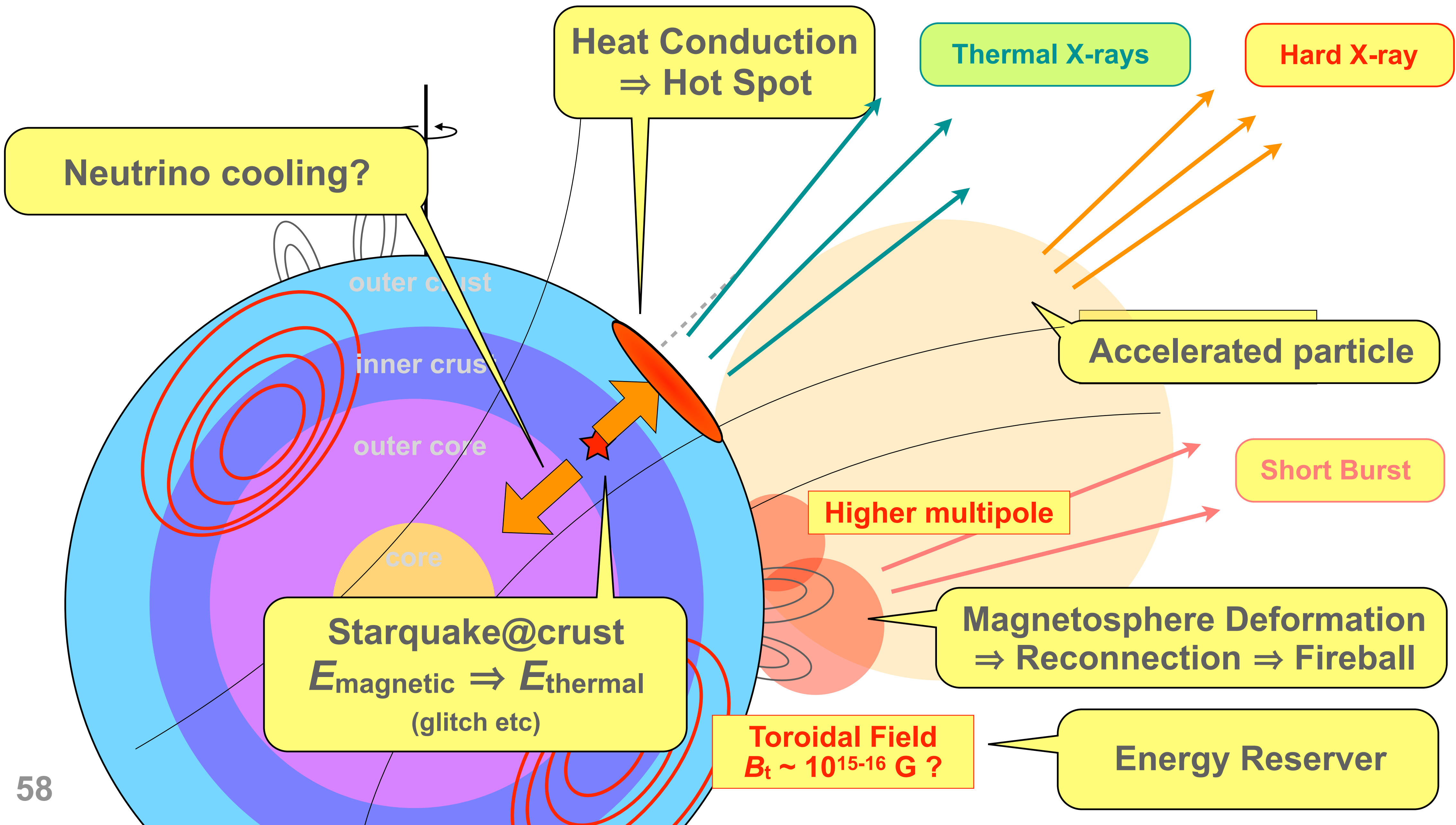


# 中性子星の状態方程式を超えて

- 状態方程式が強く制約されると、天体物理学的観測はどのような新しい情報を提供できるのか？
- マグネター：宇宙最強の磁石星
- パルサーの種族（軟ガンマリピーターと特異X線パルサー）は、星内部に蓄えられた磁気エネルギーを動力源とする $B \sim 10^{14-15}$  Gの超強磁の中性子星である。

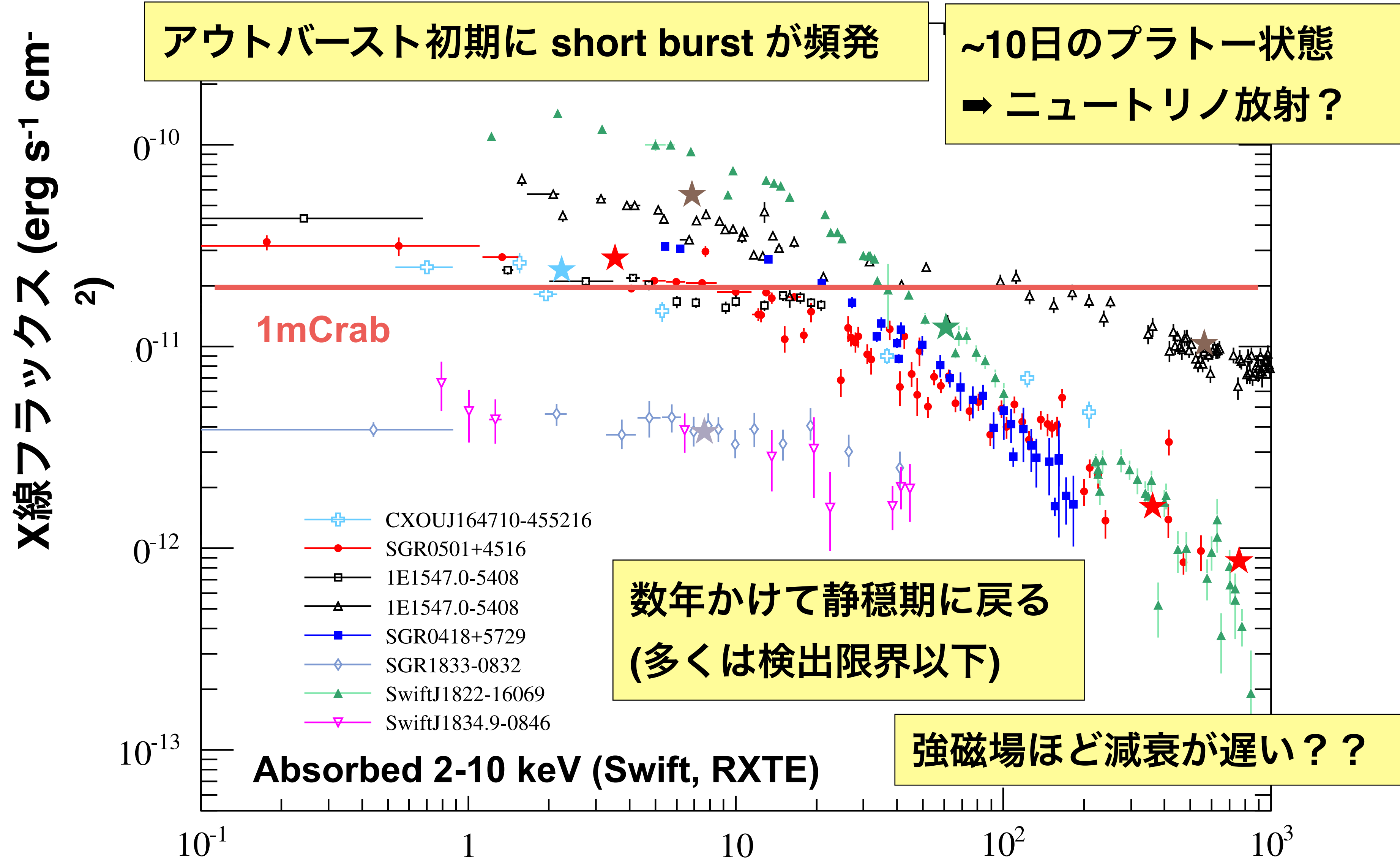


# マグネターのニュートリノ冷却？



# 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

バーストの経過日数

(Enoto et al., ApJS 2017)

# 中性子星の組成測定は？

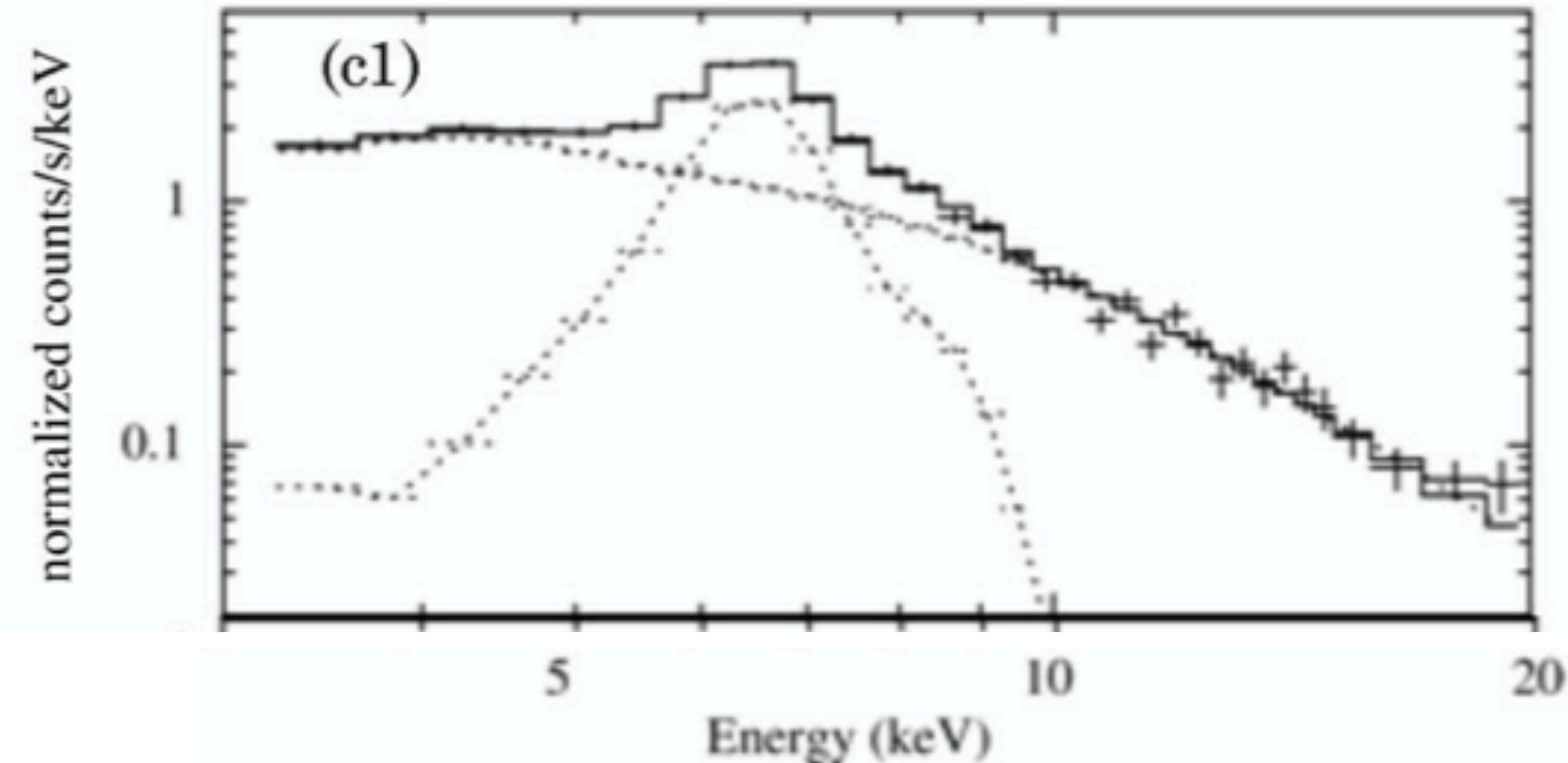
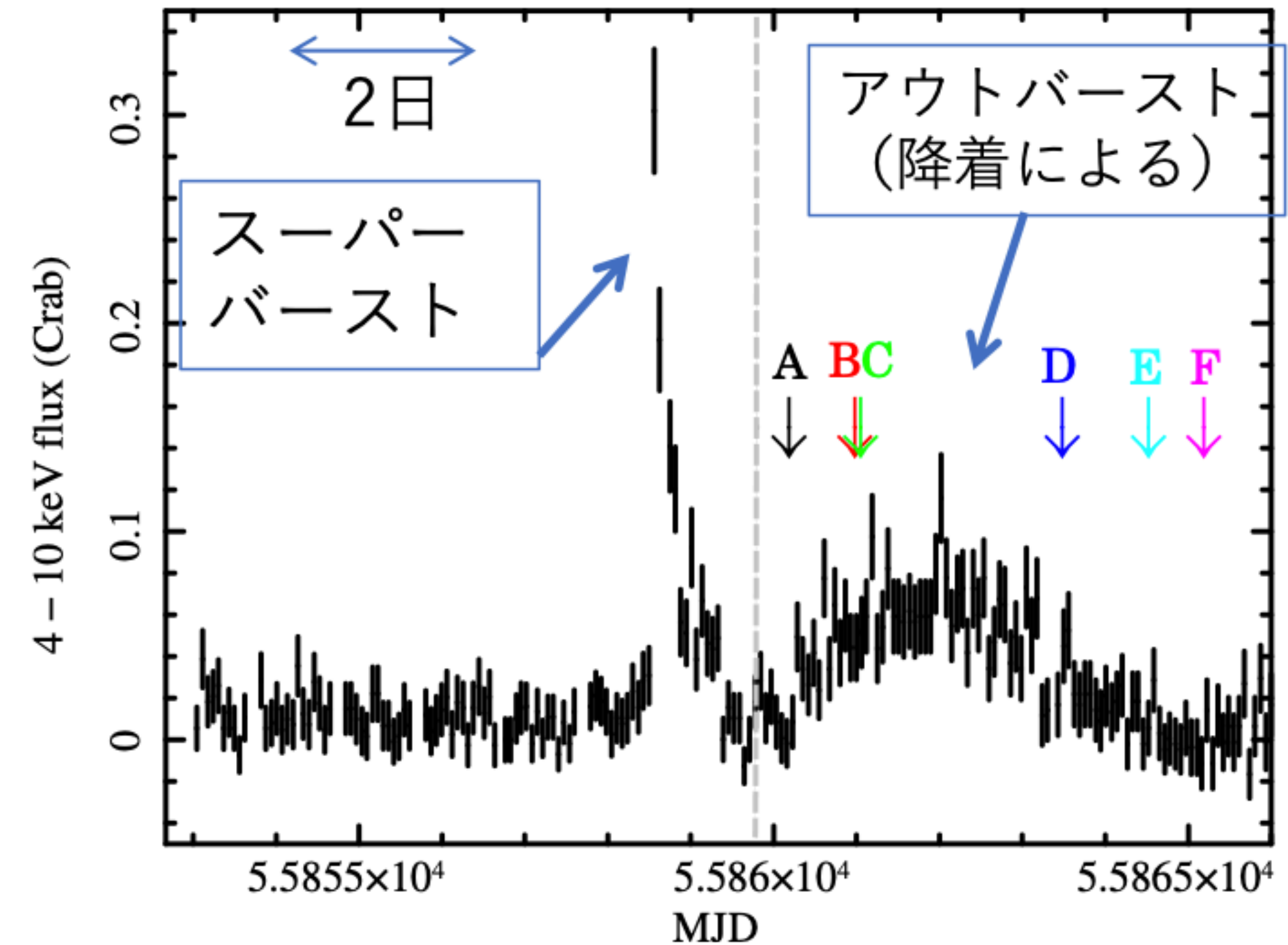
岩切さんの発表スライドから

## ・ X線分光による表面組成の研究

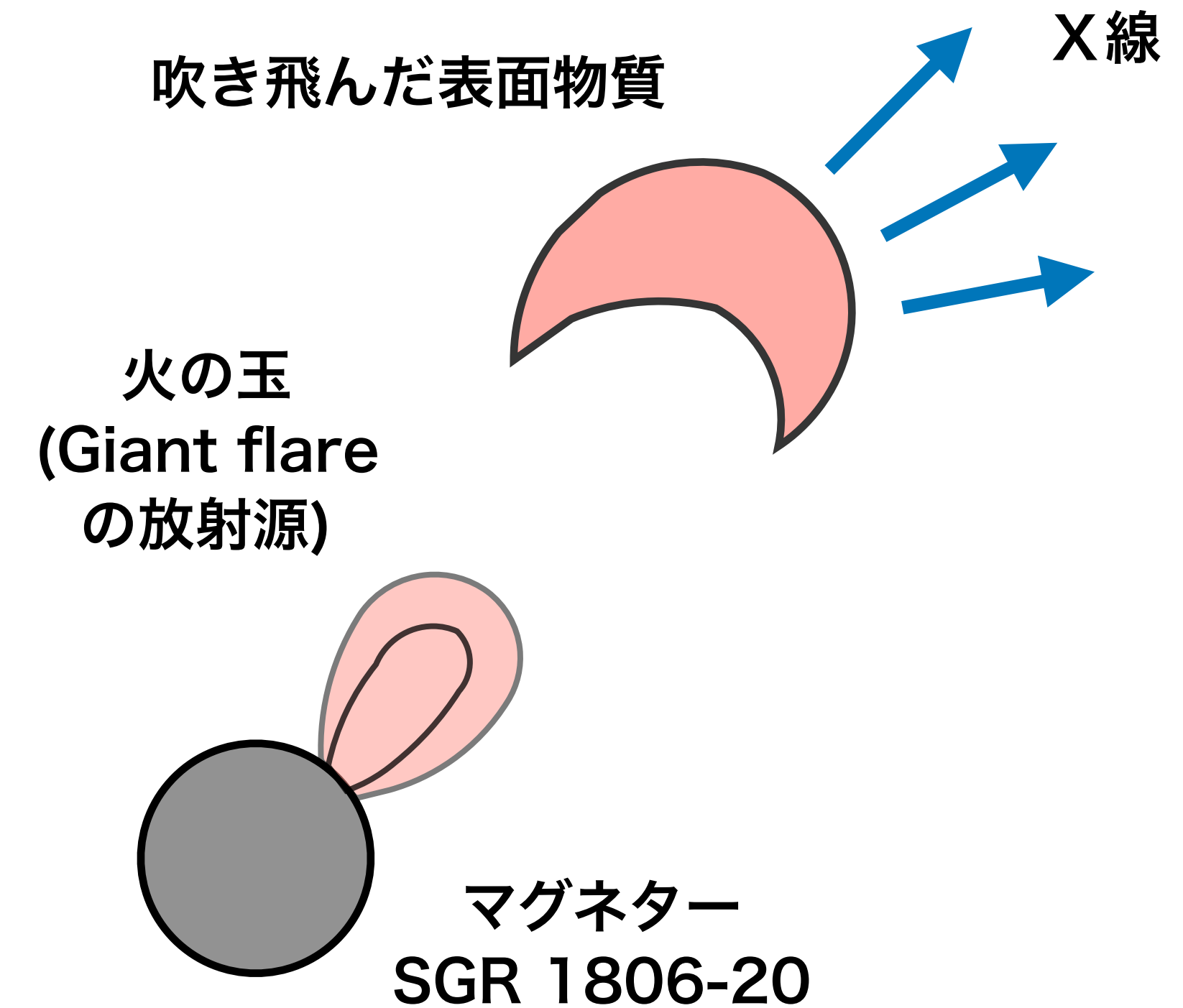
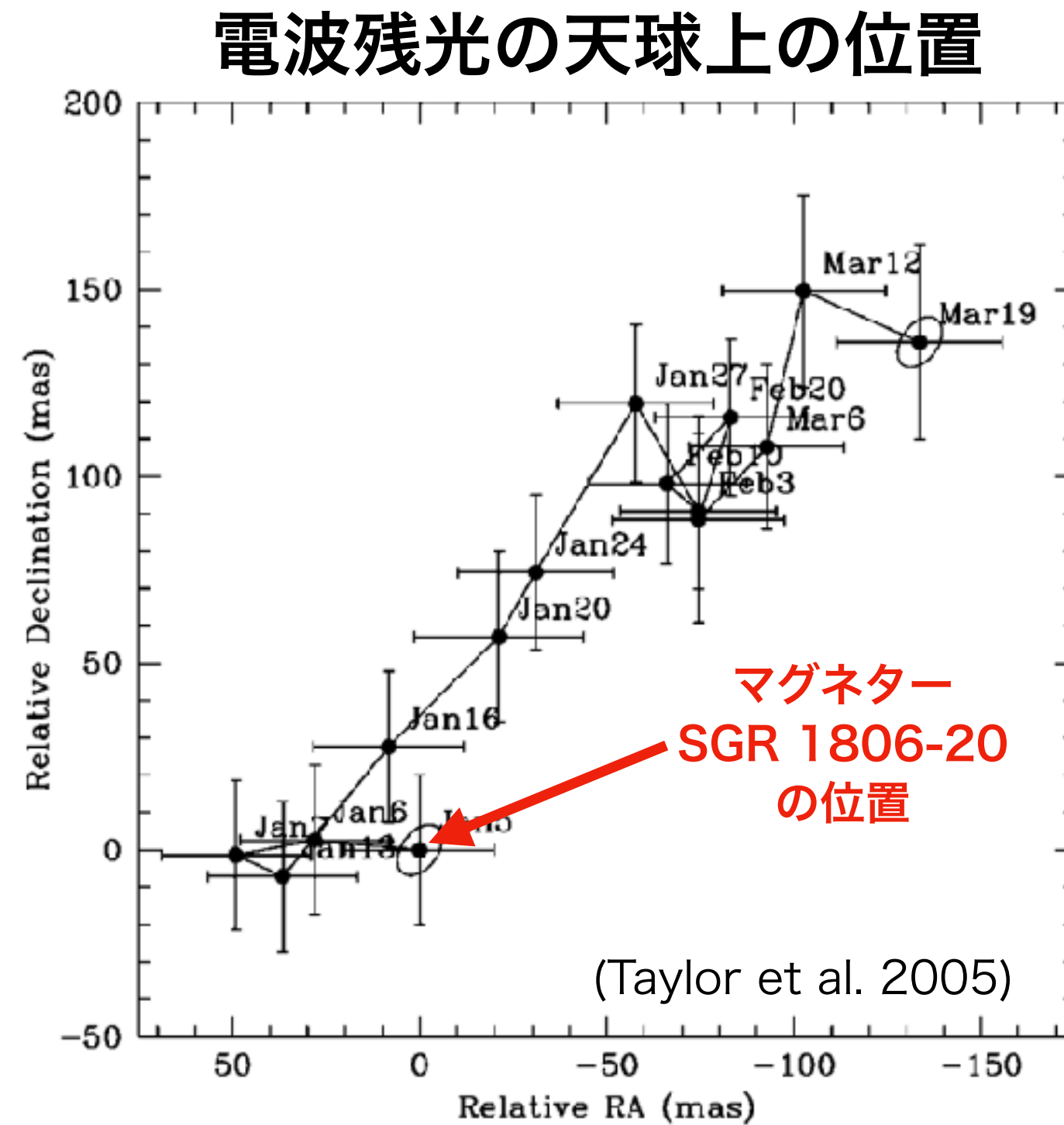
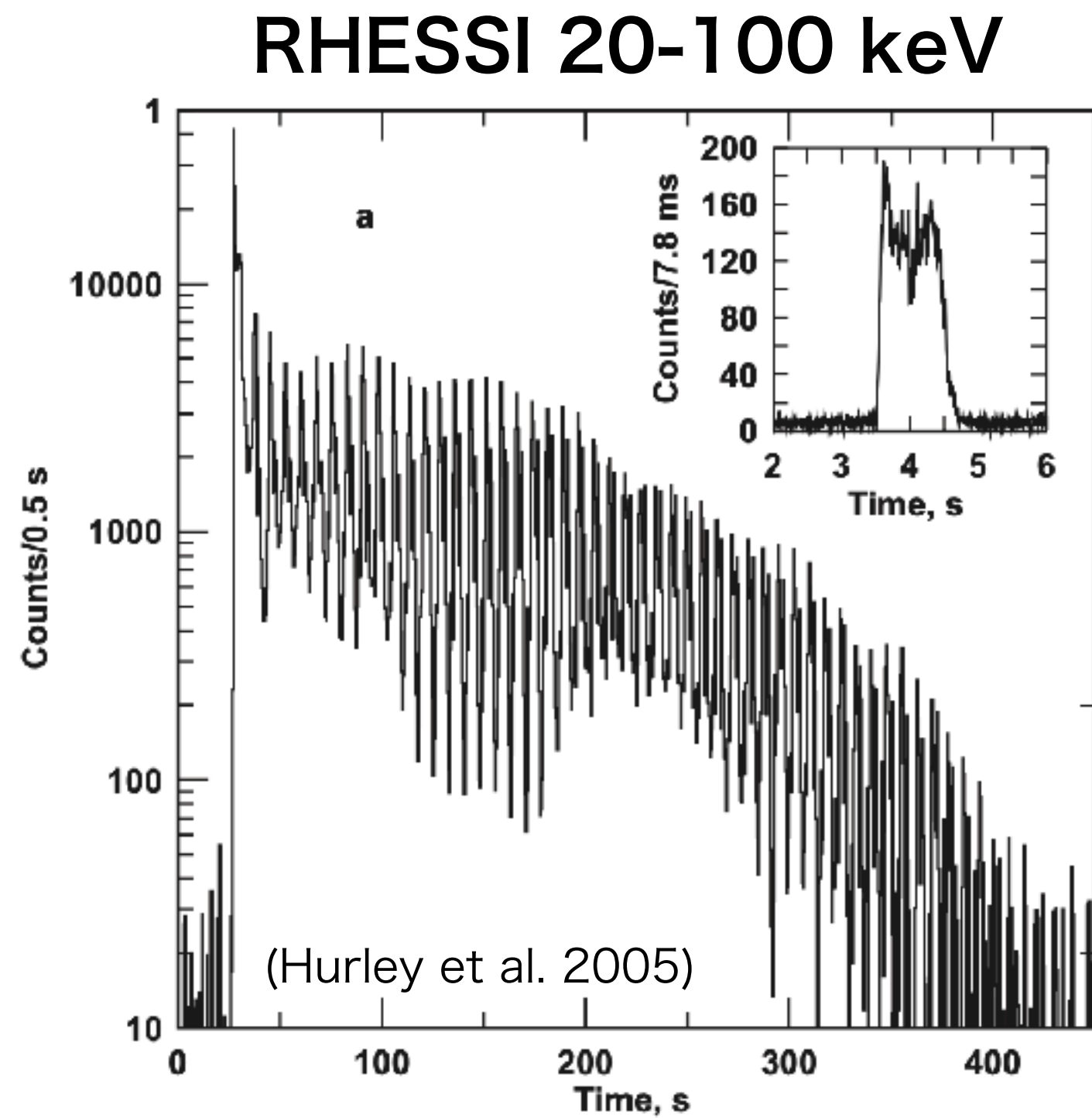
- ・ EXO 1745-248 のスーパーバースト後に、MAXI が観測した輝線構造は、赤方偏移したTi, Cr, Fe, Co の電荷交換反応 (Iwakiri et al. 2021)
- ・ 中性子星の大気組成で表面からの熱放射 (黒体放射) の形が違うことを利用する

## ・ 質量と半径の測定ではない研究

- ・ 準周期振動 (QPO)
- ・ マグネターの X線バーストのような熱的な応答 (熱容量を測る)



# マグネターの巨大フレアで組成測定？

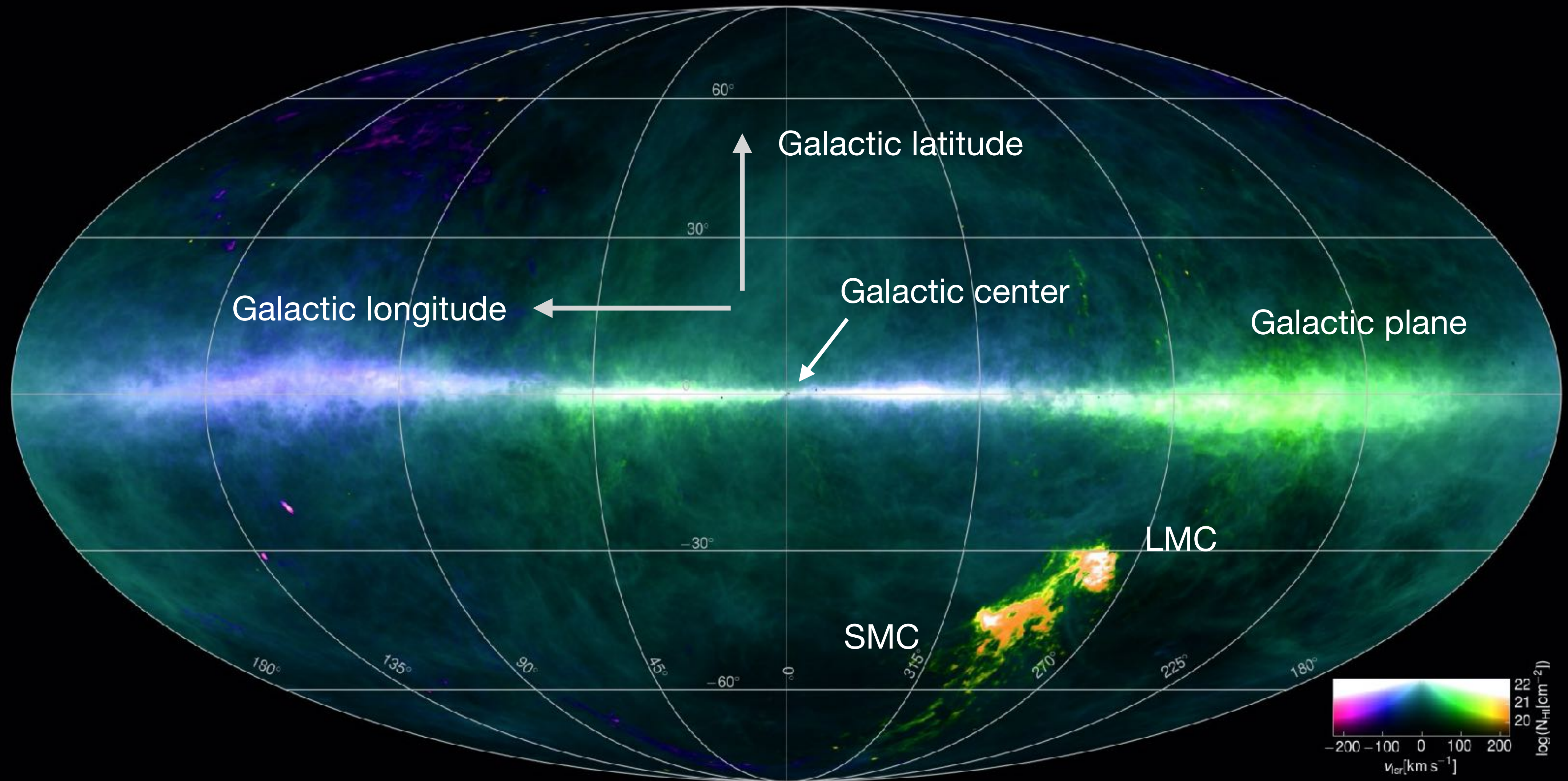


- ・ 2004年12月27日に観測された、SGR 1806-20 の巨大フレア (Giant flare)
- ・ マグネターから遠ざかる電波残光が3月まで観測、表面物質が吹き飛んだ？
- ・ マグネターからのX線で電離した、表面物質の輝線や吸収線から成分診断？
- ・ 2004年は太陽角制限でX線観測を数ヶ月できず→XRISMの精密X線分光

# 本日の話題

- 中性子星の観測的な多様性（特にマグネター）
- 国際宇宙ステーションに搭載された NICER
- 中性子星の質量と半径を宇宙観測で計測する
- かにパルサーの巨大電波パルス（高速電波バースト）

# All-sky radio image



Neutral hydrogen atom (HI, 21 cm/1420 MHz)  
Effelsberg 100-m dish (Germany) & Parks 64-m dish (Australia)

<https://www.icrar.org/HI4PI/>  
<https://apod.nasa.gov/apod/ap161024.html>

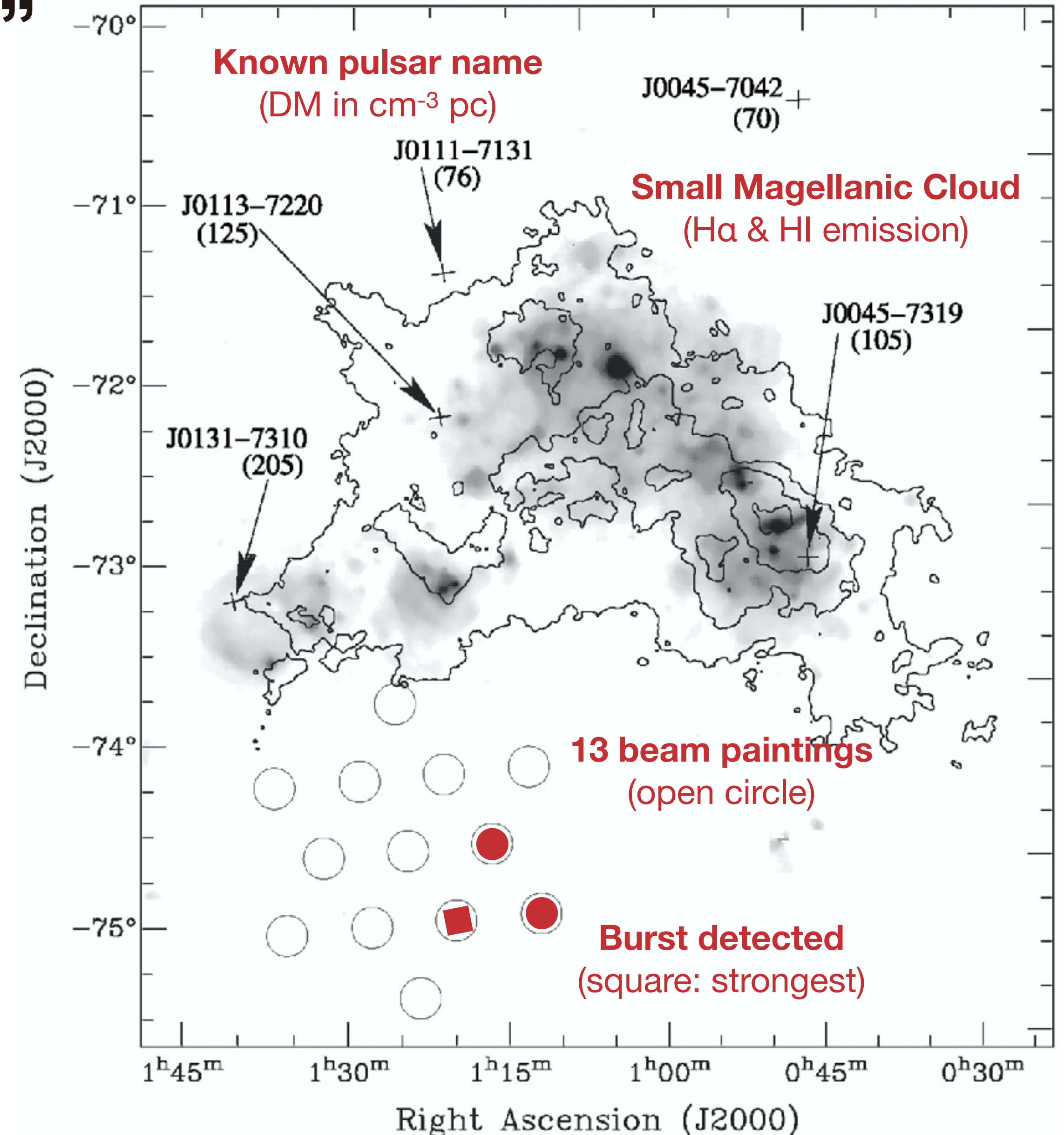


# 64-m Parkes radio telescope



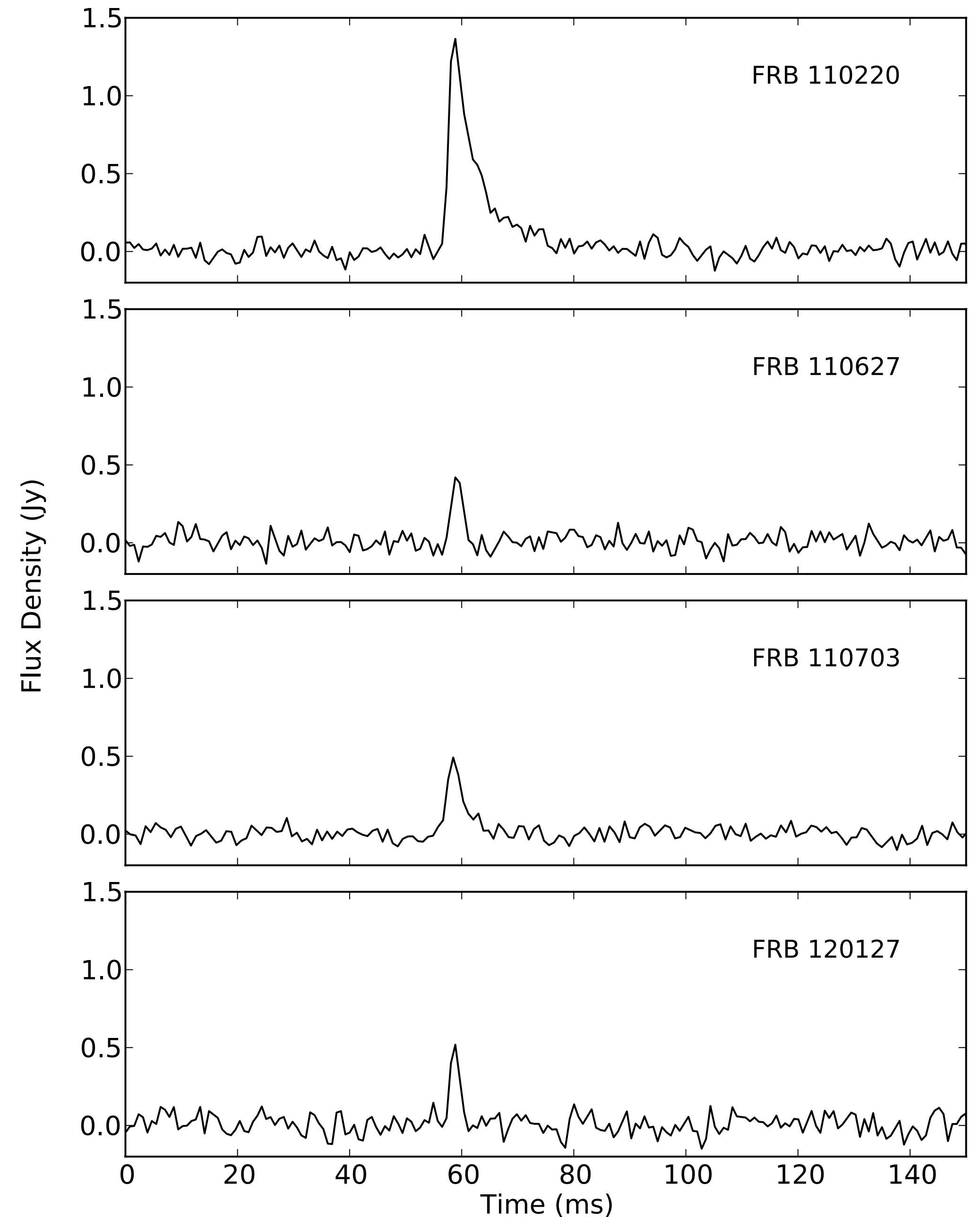
# Mysterious “Lorimer burst”

- Motivated by transient pulse of pulsars
- Archival data of 1.4 GHz survey of the Magellanic Cloud using the 64-m Parkes Radio Telescope in Australia
- Mysterious burst on 24 August, 2001
  - Located 3 degree from the SMC
  - Single event, not recursive
  - Bright 30 Jy ( $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ )
  - Short duration  $< 5 \text{ msec}$
  - $\text{DM} = 375 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$  (distant?  $< \sim 1 \text{ Gpc}$ )



# Fast radio bursts (FRBs)

- Four FRBs were further reported in 2013.
- Short duration: ~a few ms or less
- Fluence  $S = 0.6\text{-}8.0$  Jy ms @ 1.3 GHz
- High Galactic latitude  $|b| > 41$  deg
- $R_{\text{FRB}} \sim 10^{-3}$  / galaxy / year
  - $R_{\text{GRB}} \sim 10^{-6}$  / galaxy / year
  - $R_{\text{CCSN}} \sim 10^{-2}$  / galaxy / year
- DM = 553-1103  $\text{cm}^{-3}$  pc
  - Cosmological distance:  $z = 0.45\text{-}0.81$



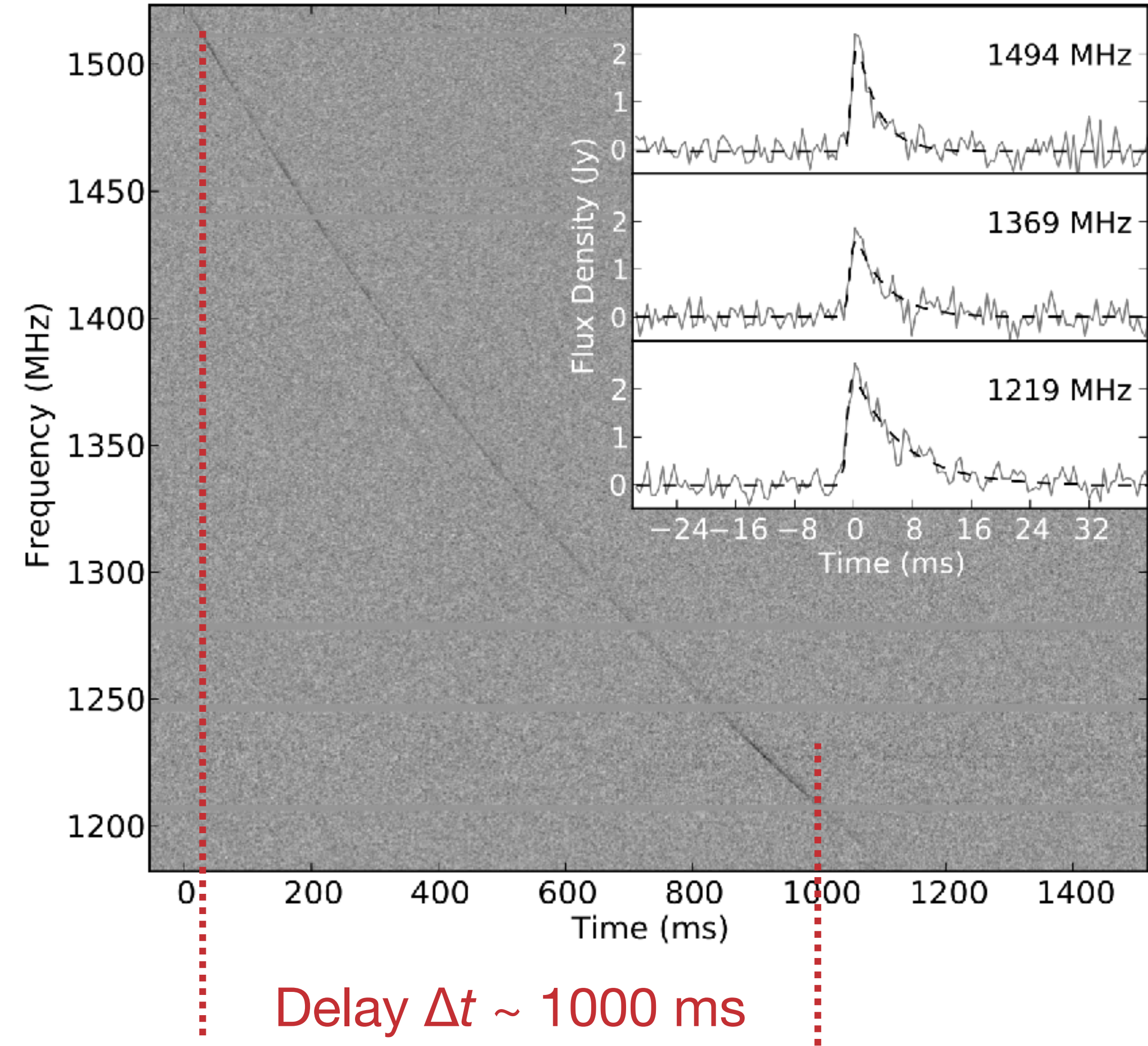
# Dispersion Measure (DM)

Thronton et al., Science, 2013

$$DM = \int_0^d n_e dl \quad (\text{cm}^{-3} \text{ pc})$$

- Integrated column density ( $n_e$ ) of free electrons along the line of sight
- This makes a frequency-dependent dispersive delay  $\Delta t$  through a plasma

$$\Delta t = \frac{e^2}{2\pi m_e c} \frac{DM}{\nu^2}$$
$$= 4.14 \times 10^3 \text{ sec} \left( \frac{DM}{\text{cm}^{-3} \text{ pc}} \right) \left( \frac{\nu}{1 \text{ MHz}} \right)^{-2}$$



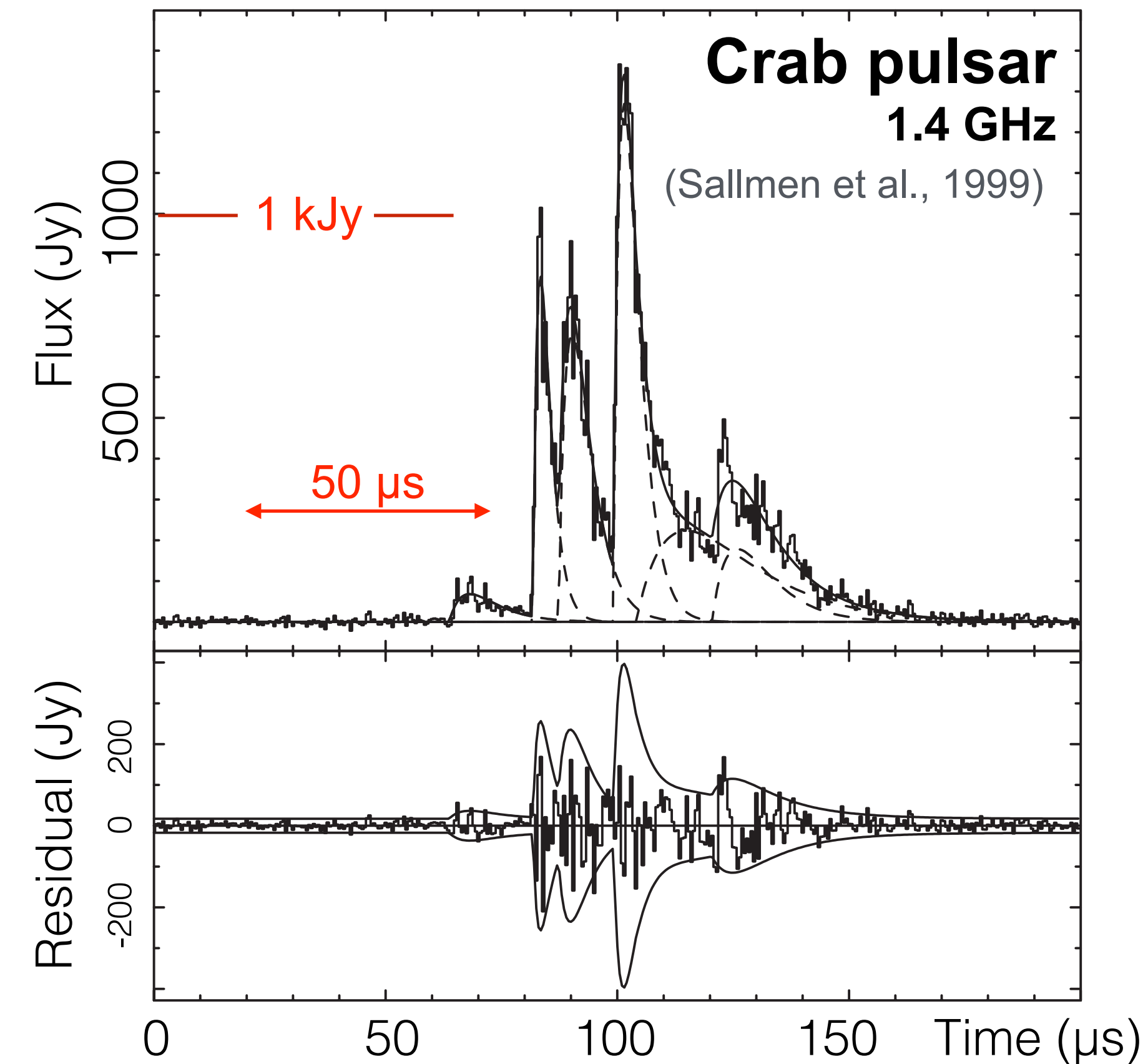
- DM (delay) is a good indicator of a source distance!

# Characteristics of FRBs

1. Bright radio emission  $F \sim 0.2-120$  Jy @  $\sim 1$  GHz
2. Brightness temperature  $T_b = 10^{33-37}$  K  $\rightarrow$  Coherent radio emission
3. Large DM  $\sim 300-1600$  cm<sup>-3</sup> pc  $\rightarrow$  Cosmological distance ( $z < \sim 1$ )
4. Short duration  $\Delta t < 1$  ms  $\rightarrow$  Compact origin? ( $R \sim c \Delta t \sim 3 \times 10^2$  km  $\sim 30 R_{NS}$ )
5. Fluence  $S = F \Delta t = 1-10$  Jy ms  $\rightarrow$  Energetics  $E \sim 4 \times 10^{39}$  erg  $(d / 1 \text{ Gpc})^2$
6. High event rate  $R_{FRB} \sim 10^4$  / sky / day  $\rightarrow R_{FRB} \sim 0.1 R_{SN} \sim 10^4 R_{GRB}$
7. Repeating & Non-repeating?  $\rightarrow$  Multi-population?
8. Host galaxies  $\rightarrow$  FRB locations are different at different populations?
9. Faint FRB from a Galactic magnetar

# かにパルサーの巨大電波パルスの多波長観測

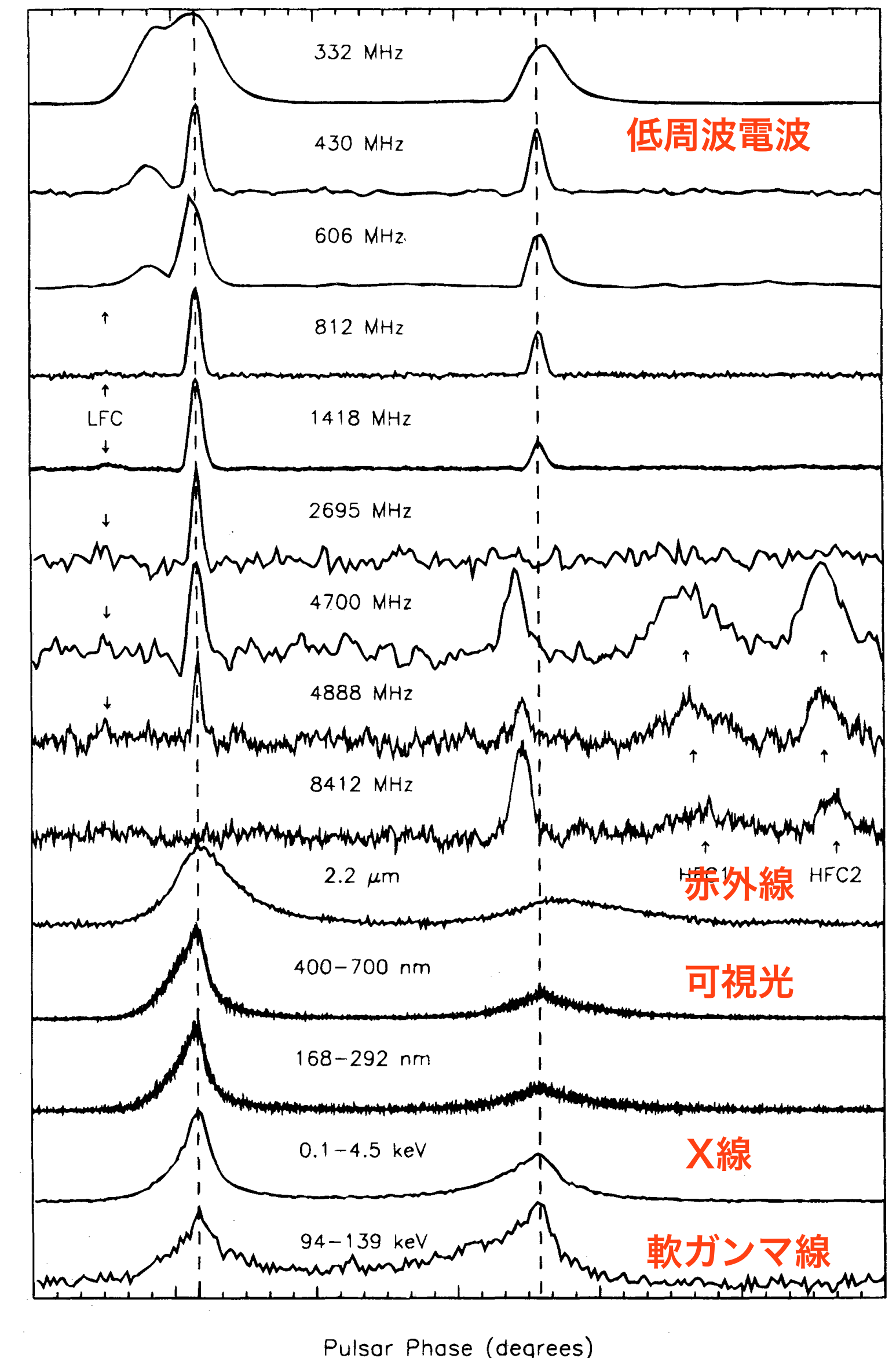
- 巨大電波パルスは通常パルスより  $10^{2-3}$  も明るい現象で、これまで十数個のパルサーから検出された。
- 観測的な特徴の類似性から、巨大電波パルスは高速電波バーストの発生メカニズムの候補のひとつ。
- かにパルサーの巨大電波パルスは、メインパルスかインターパルスの位相でランダムに発生する。
- かにパルサーで、巨大電波パルスに同期した数%の可視光の増光が発見された (Shearer et al., Science 2003)。
- X線・ガンマ線でも多くのグループが検出に挑戦してきたが、上限値のみ。



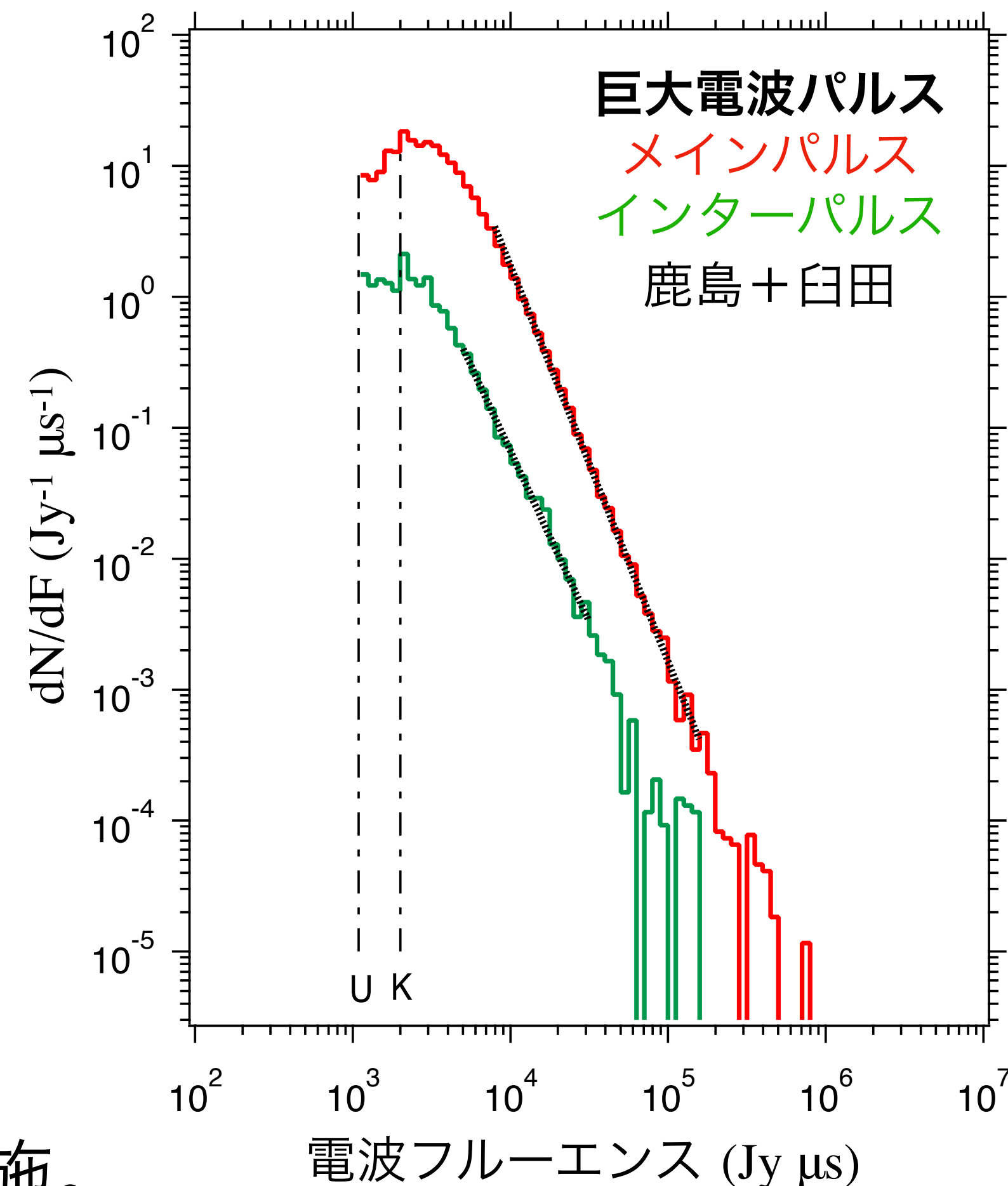
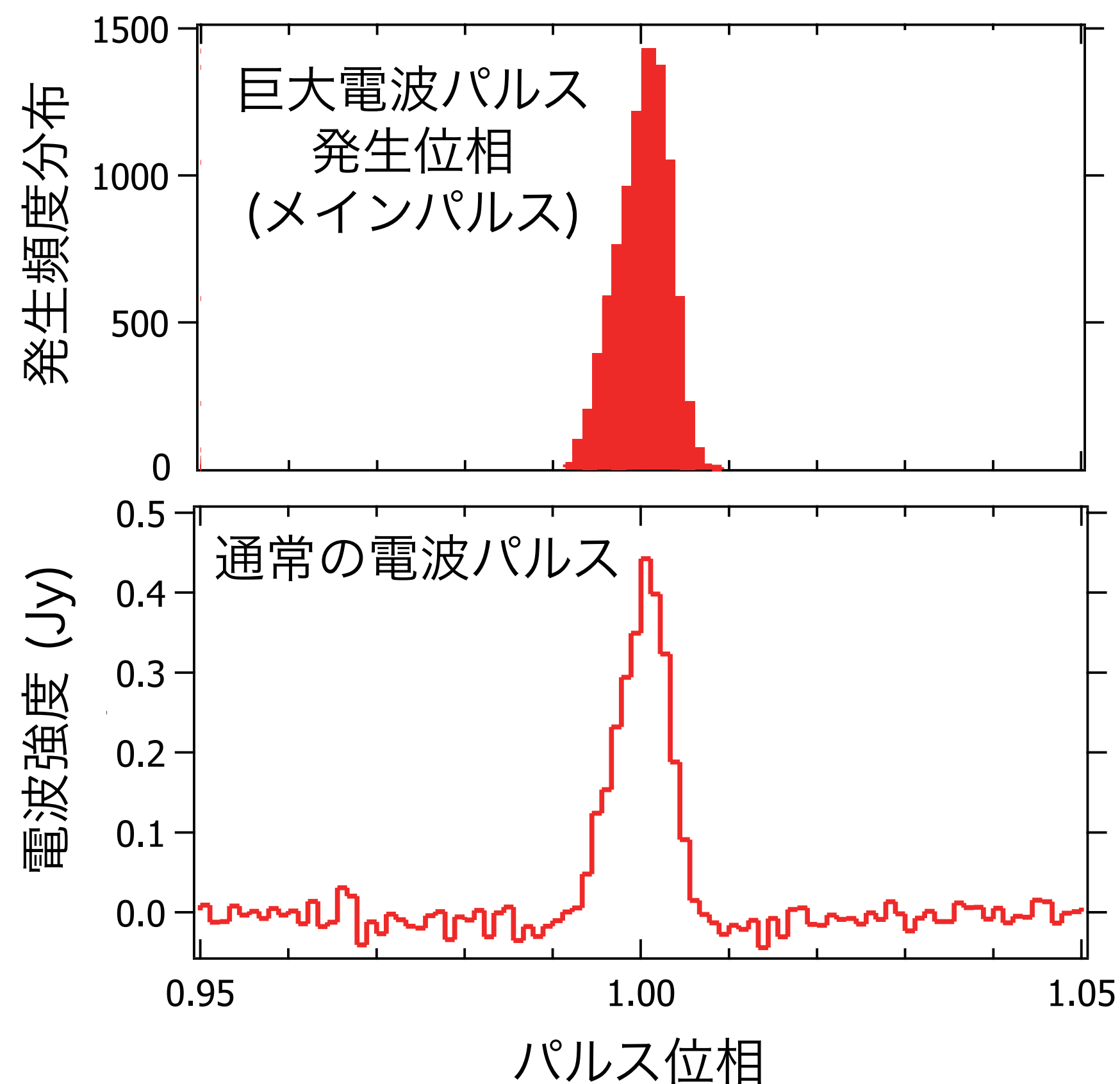
# かにパルサーの巨大電波パルスの多波長観測

- 巨大電波パルスは通常パルスより  $10^{2-3}$  も明るい現象で、これまで十数個のパルサーから検出された。
- 観測的な特徴の類似性から、巨大電波パルスは高速電波バーストの発生メカニズムの候補のひとつ。
- かにパルサーの巨大電波パルスは、メインパルスかインターパルスの位相でランダムに発生する。
- かにパルサーで、巨大電波パルスに同期した数%の可視光の増光が発見された (Shearer et al., Science 2003)。
- X線・ガンマ線でも多くのグループが検出に挑戦してきたが、上限値のみ。

David A. Moffett et al., ApJ 468, 779-783 (1996)

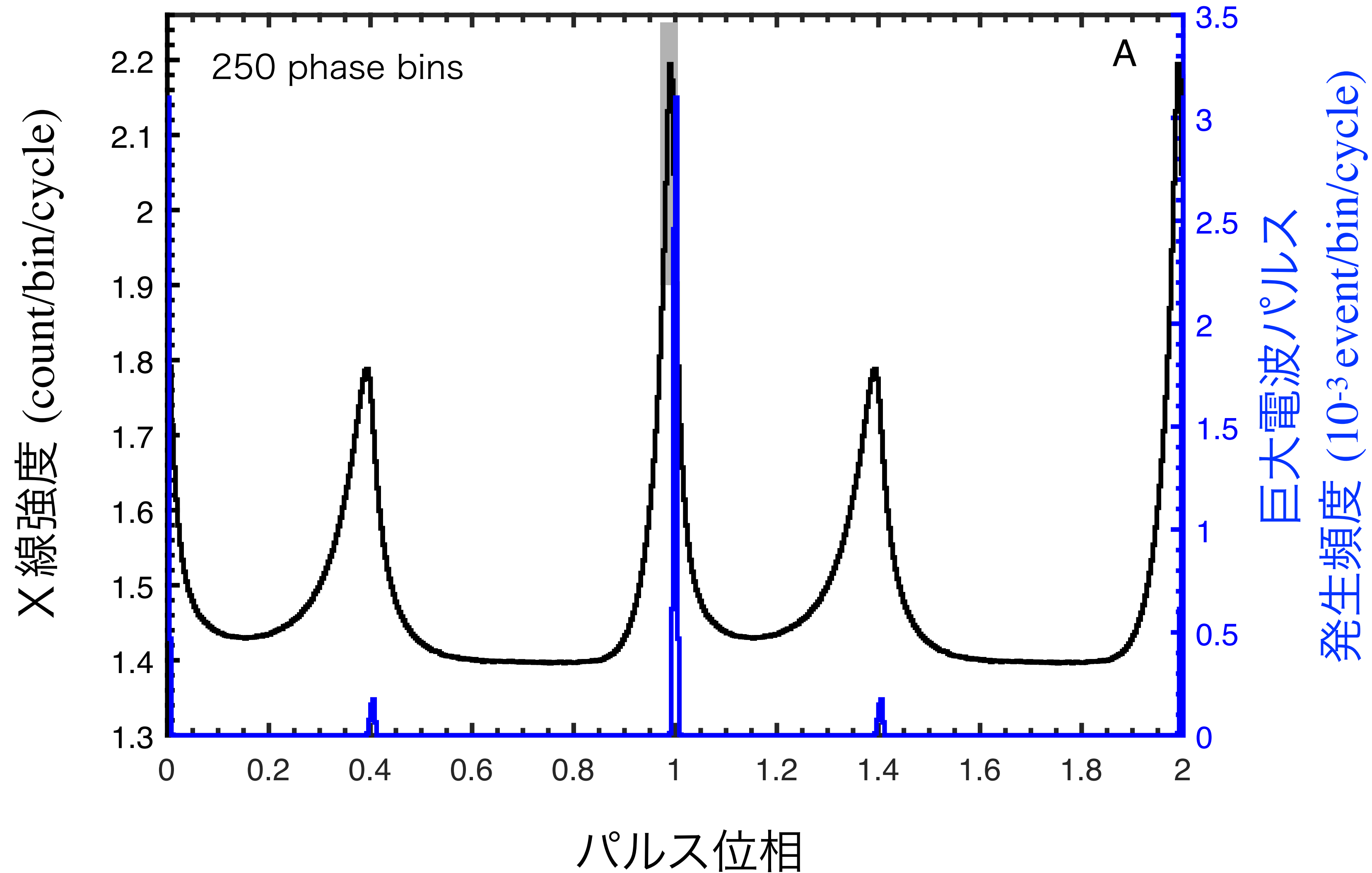


# 臼田と鹿島の電波望遠鏡と NICER の同時観測



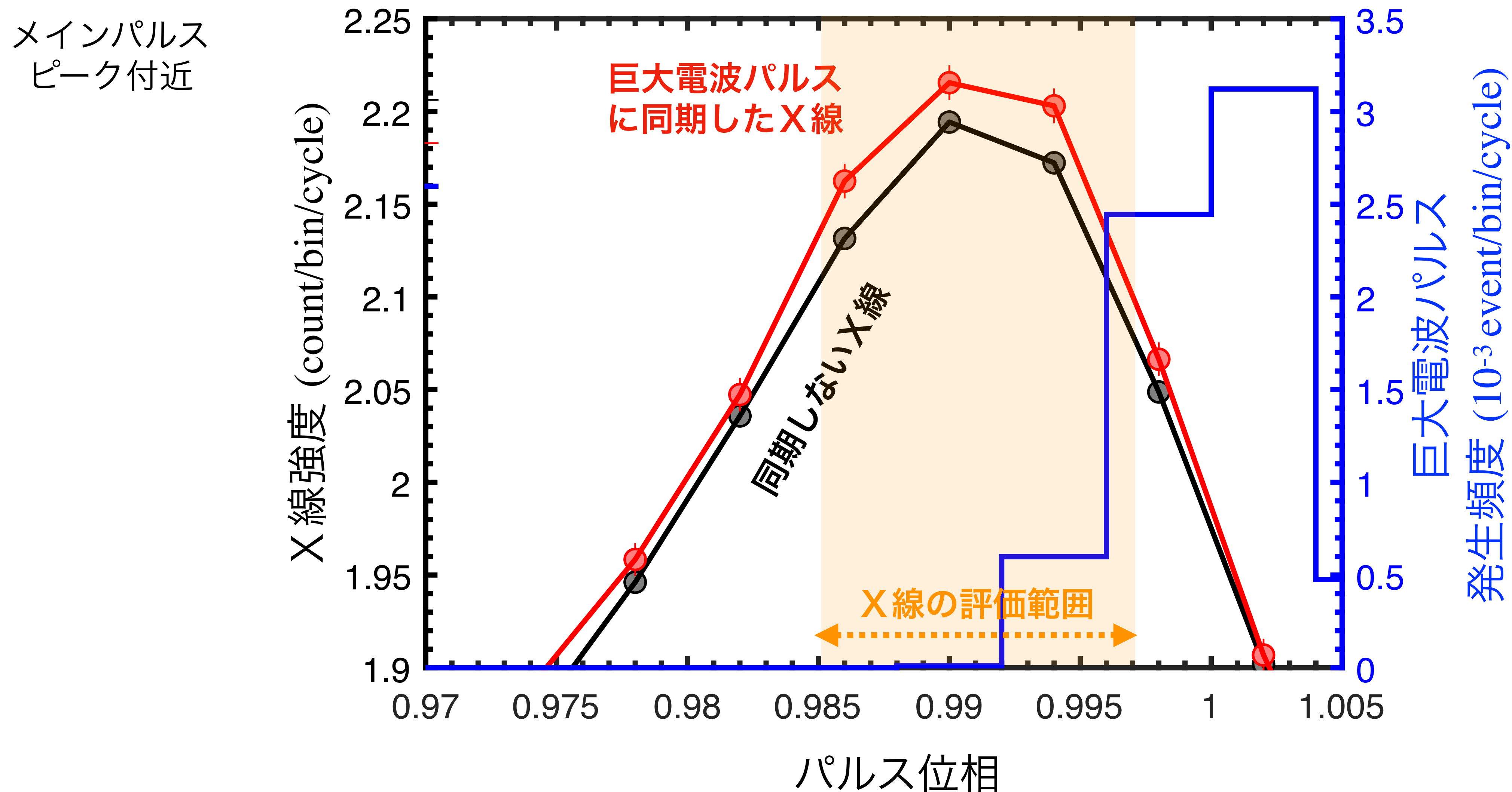
- 2年間に日本の電波望遠鏡と15回の同時観測(126 ks)を実施。
  - JAXA 臼田宇宙空間観測所の 64 m 電波望遠鏡 (2 GHz)
  - NICT 鹿島宇宙技術センター 34 m 電波望遠鏡 (2 GHz, 2019年度の台風5号の被害で運用終了)
- 巨大電波パルスを合計 $2.5 \times 10^4$ 個ほど検出した

# 巨大電波パルスに同期したX線超過の発見





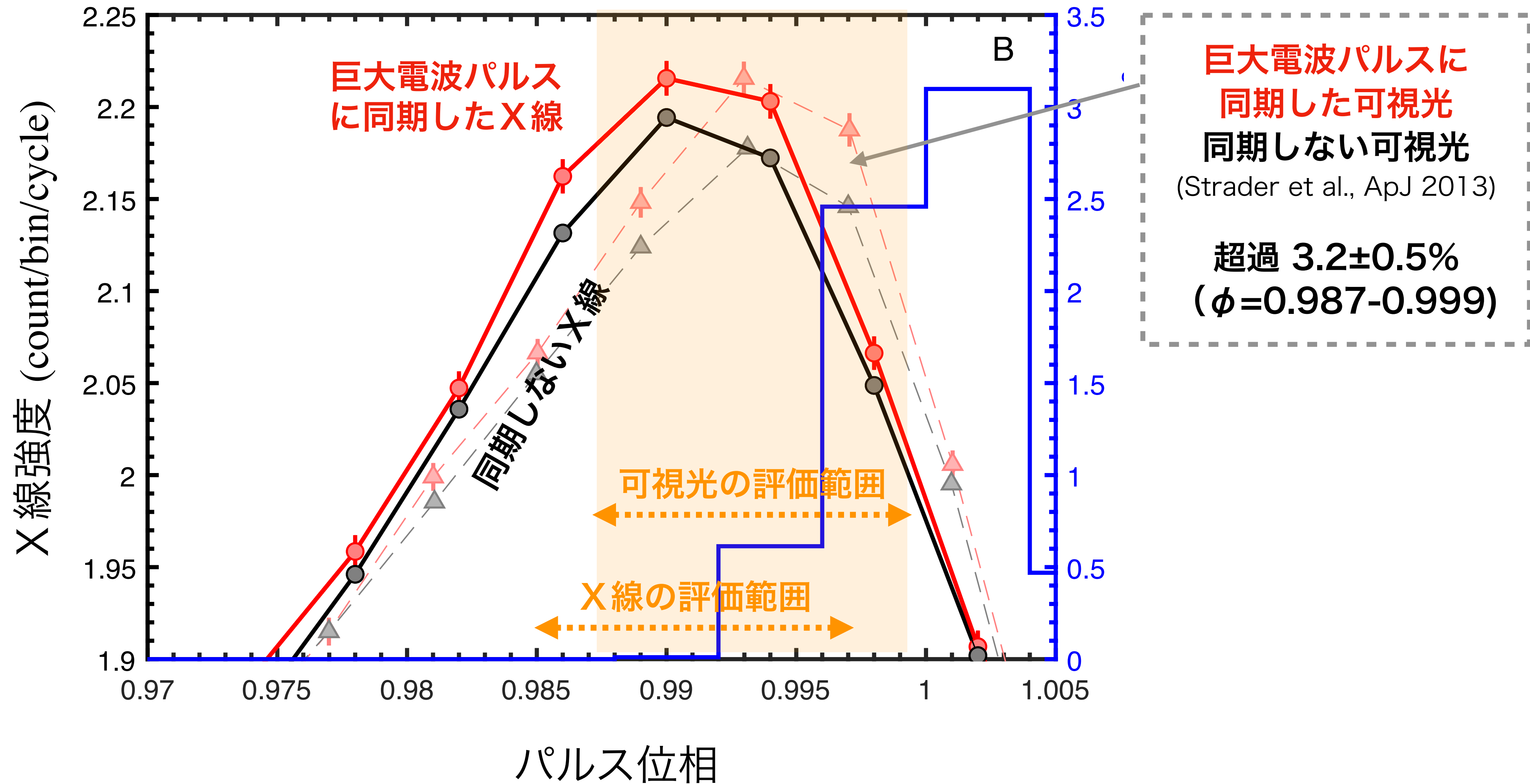
# 巨大電波パルスに同期したX線超過の発見



- X線はパルス位相  $\phi = 0.985 - 0.997$  で  $3.8 \pm 0.7\%$  ( $1\sigma$  誤差) 超過することを検出した。

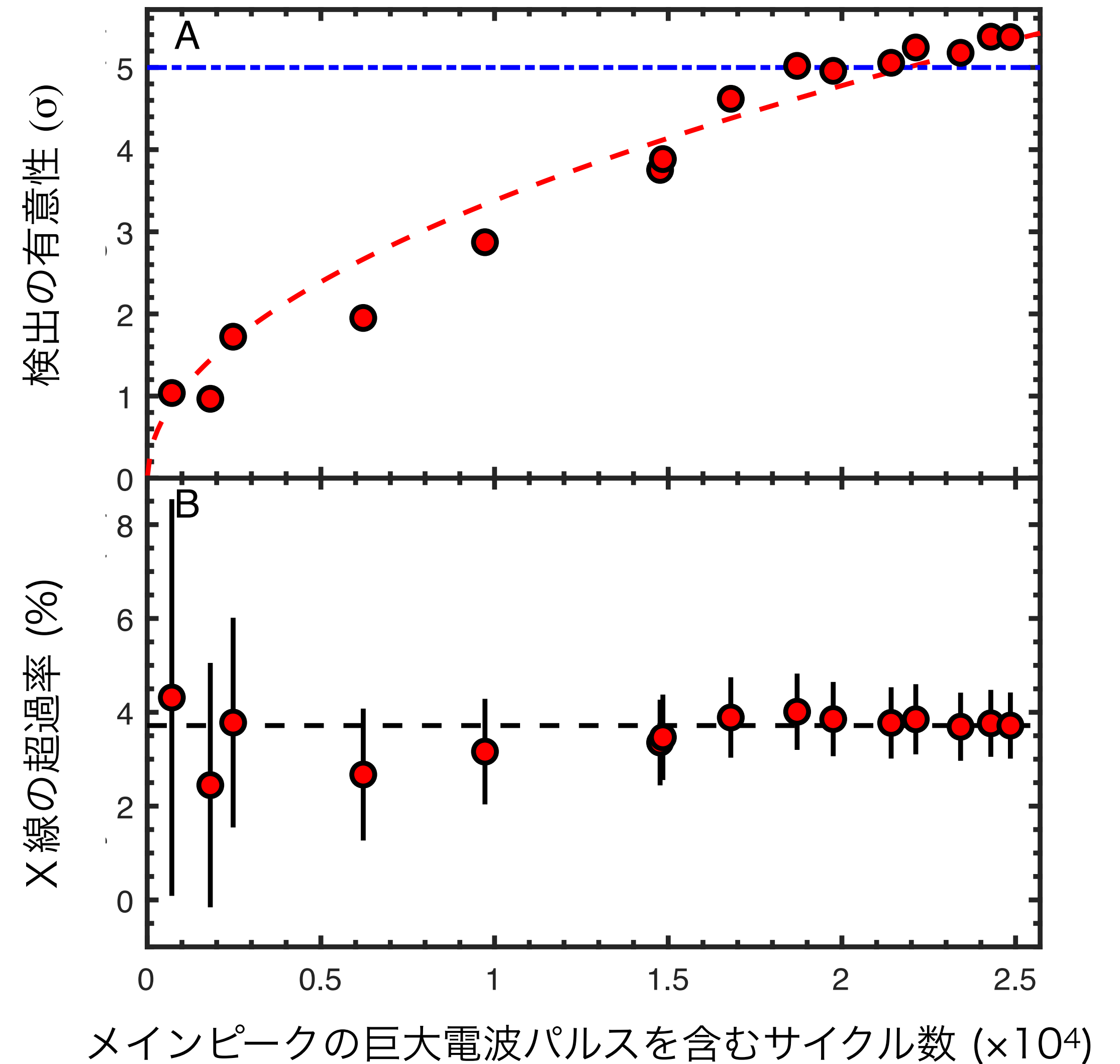
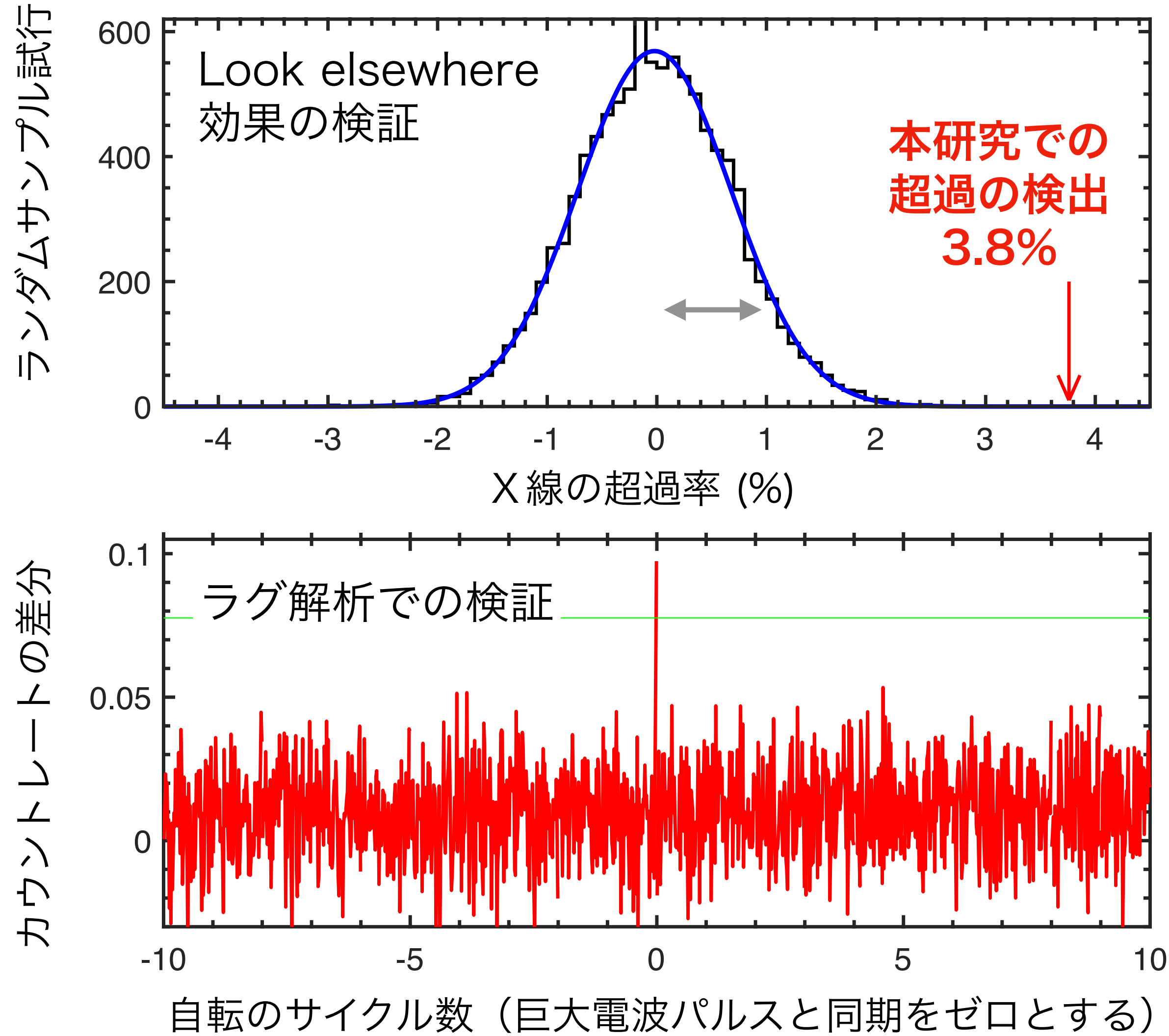
# 巨大電波パルスに同期したX線超過の発見

メインパルス  
ピーク付近



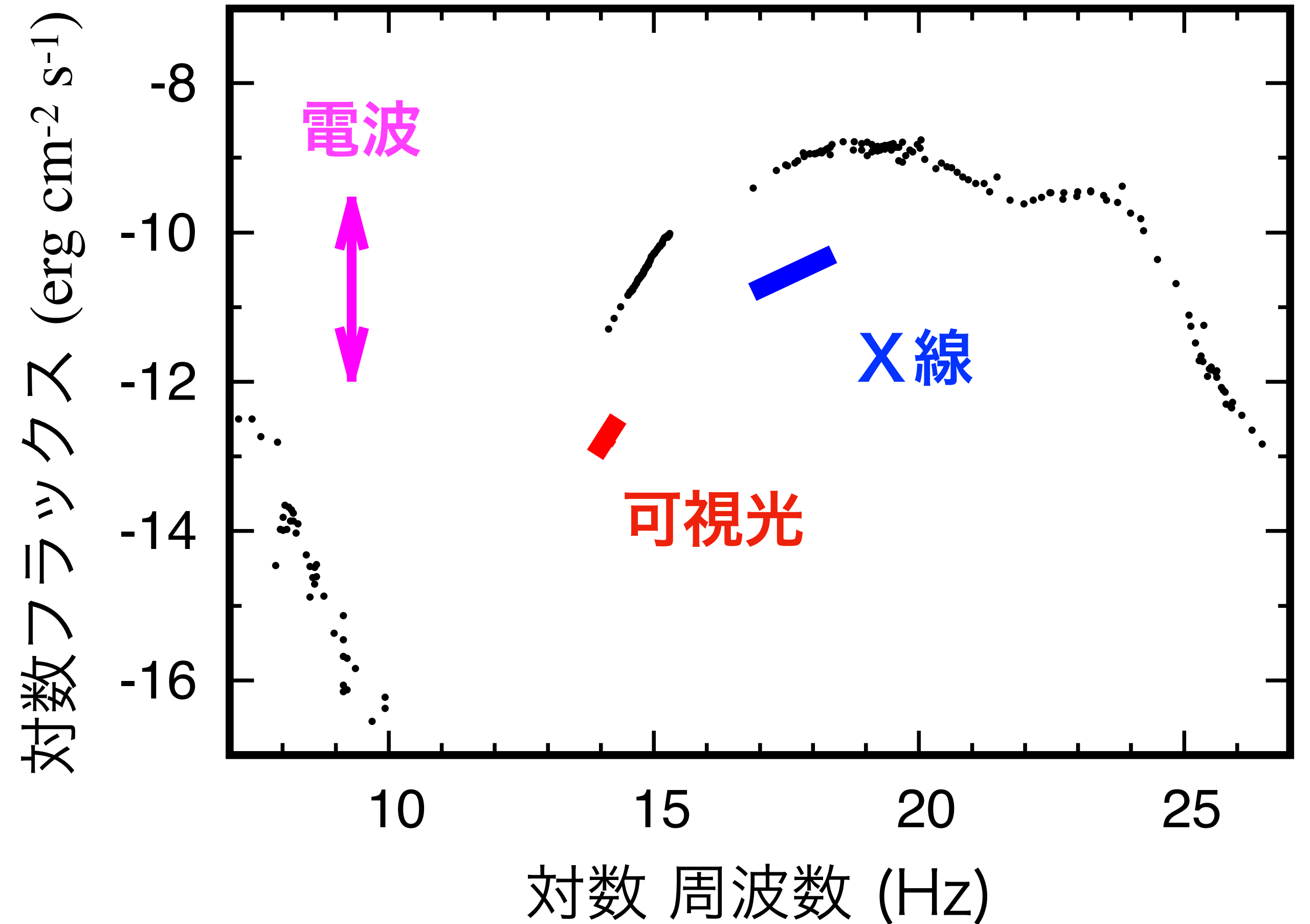
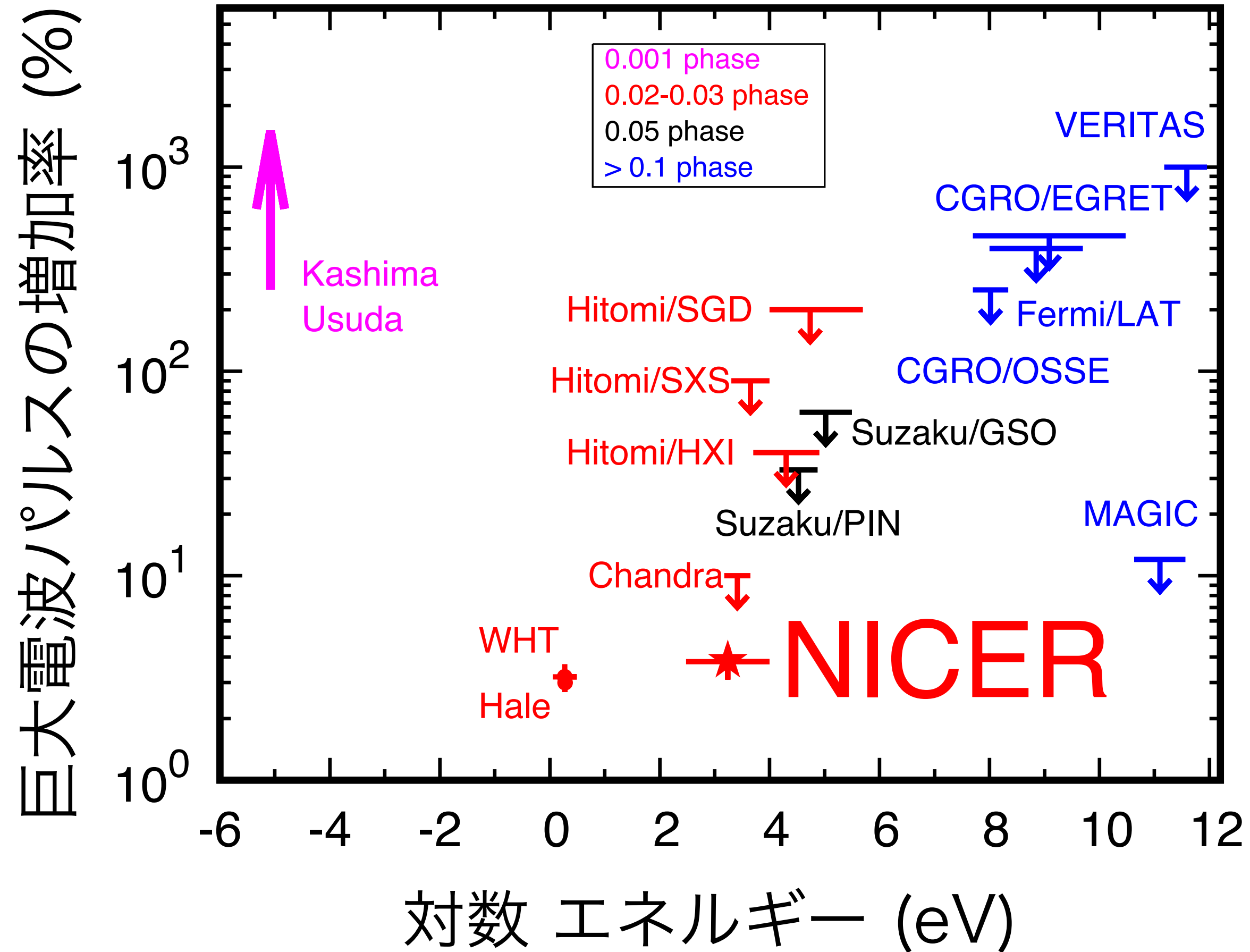
- X線はパルス位相  $\phi = 0.985-0.999$  で  $3.8 \pm 0.7\%$  ( $1\sigma$  誤差) 超過することを検出した。

# X線超過の有意性の検証



- 複数の方法で検出の妥当性を検証し、 $5.4\sigma$  の有意性で検出と主張できることを確認した。

# かにパルサーの巨大電波パルスでの超過成分



- ・ パルサーの放射成分は、X線のフラックス  $4 \times 10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  (0.3-10 keV)で、可視光(5,500Å)と電波(2 GHz)よりも、それぞれ $10^3$ 倍、 $10^7$ 倍も高い。
- ・ X線超過は、巨大電波パルス現象の放出エネルギーが1-2桁も大きいことを意味する

# 議論: X線超過の検出にはどういう意味があるか？

- そもそもパルサーの電磁波放射のメカニズムは、よくわかっていない。
- 複数パルスを実平均しないといけないう通常のパルス信号に対し、明るい巨大電波パルスは自転1周期の磁気圏応答を研究できるプローブである。
- コヒーレントな電波放射とインコヒーレントな可視光・X線の放射が、 $10^{2-3}$ 倍と~4%という極めて不均衡な増光率を示すのは不思議である。
- 放出エネルギーが1-2桁も大きいとわかり、星の回転エネルギーを起源とする巨大電波パルスを使う高速電波バーストの説明は難しくなる
- X線と電波による高速電波バーストの同時観測が行われたマグネター SGR 1935+2154 とあわせ、今後のパルサー観測で多波長相関が大切である。

# 本日のまとめ

- 中性子星の観測的な多様性（特にマグネター）
  - 観測的に異なる特徴をもつ、多様な中性子星の種族が見つかってきた。磁場に着目した中性子星の進化の理解が大切になっている。
- 国際宇宙ステーションに搭載された NICER
  - 2017年に観測を開始したX線望遠鏡 NICER は様々な中性子星の観測で活躍している。軟X線の集光効率が高く時間変動天体にも強い。
- 中性子星の質量と半径を宇宙観測で計測する
  - 中性子星の表面のホットスポットの熱放射が重力で曲がる効果で質量・半径比を測定することで、状態方程式を観測的に求める試みが進んでいる。
- かにパルサーの巨大電波パルス（高速電波バースト）
  - 謎の高速電波バーストの候補として、巨大電波パルスは中性子星の興味深い現象である。NICER X線と電波の同時観測で、かにパルサーから巨大電波パルスでのX線を発見した。