

超強磁場中性子星マグネターに関する研究

～観測上の多様な振る舞いの統一理解と
将来観測実験の推進～

Enoto Teruaki

榎戸 輝揚 (X線天文学者)

京都大学

白眉センター / 宇宙物理学教室

はじめに: お世話になった皆様へ

- ・ 本奨励賞にご推薦いただいた堂谷忠靖先生
- ・ 大学院からご指導いただいている牧島一夫先生
- ・ K. Gendreau 博士, Z. Arzoumanian 博士, 岡島崇 博士をはじめとした NICER 検出器・サイエンスチーム
- ・ 研究員時代を支えてくださった、玉川徹先生, 柴田晋平先生, 上田佳宏先生, 田島宏康先生, R. Blandford 先生, K. Jahoda 先生
- ・ すぐ衛星をはじめとする、X線天文学のみなさま
- ・ 田中孝行さん、山口弘悦さん、北口貴男さん、岩切渉さん、木坂将大さん、中野俊男さん他、先輩・同僚・後輩のみなさま
- ・ 京都大学白眉プロジェクトと日本学術振興会のみなさま

田中靖郎先生へのご報告

ひのとり (1981), てんま (1983), あすか (1994) から日本の
X線天文学を開拓。海外でのポスドク時代の交流で感銘。

中野俊男君

榎戸

田中靖郎先生

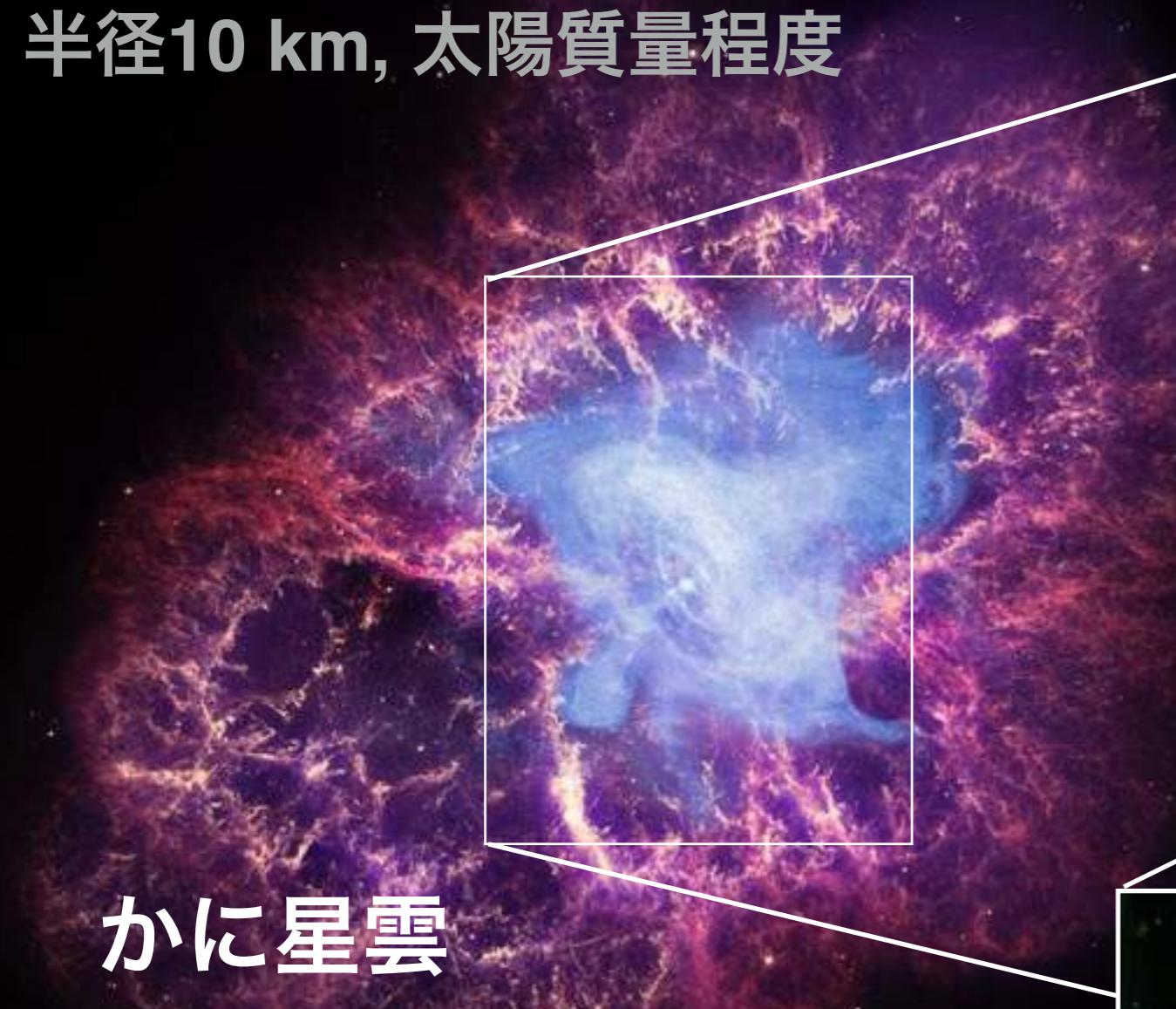
嘉子さん

笹野理君



中性子星: 極限的な宇宙の実験室

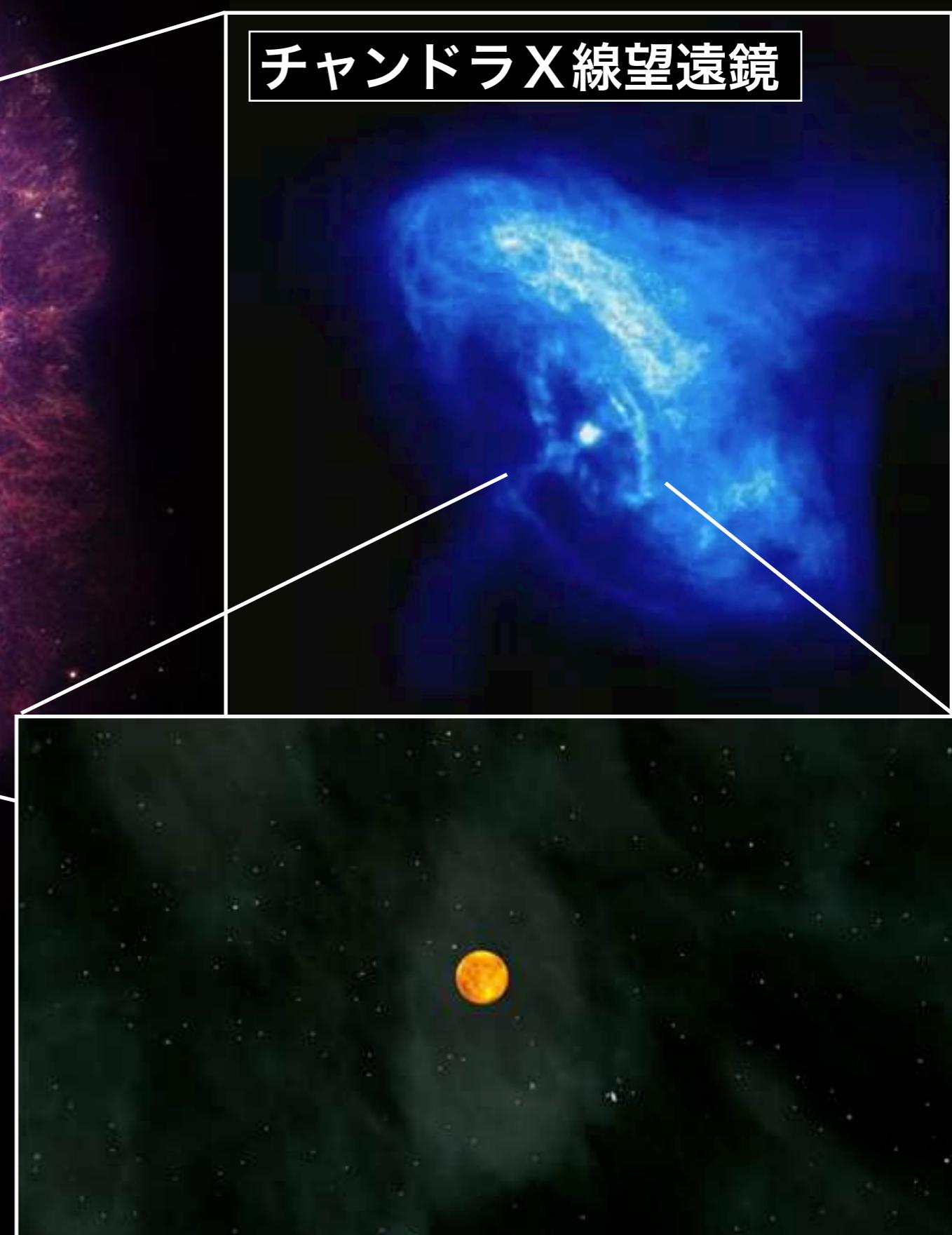
半径10 km, 太陽質量程度



かに星雲

地上で実現できない
高密度、強重力、強磁場
高速回転、強輻射場など

チャンドラX線望遠鏡



中性子星：超新星爆発が残すコンパクト天体

主系列星

白色矮星

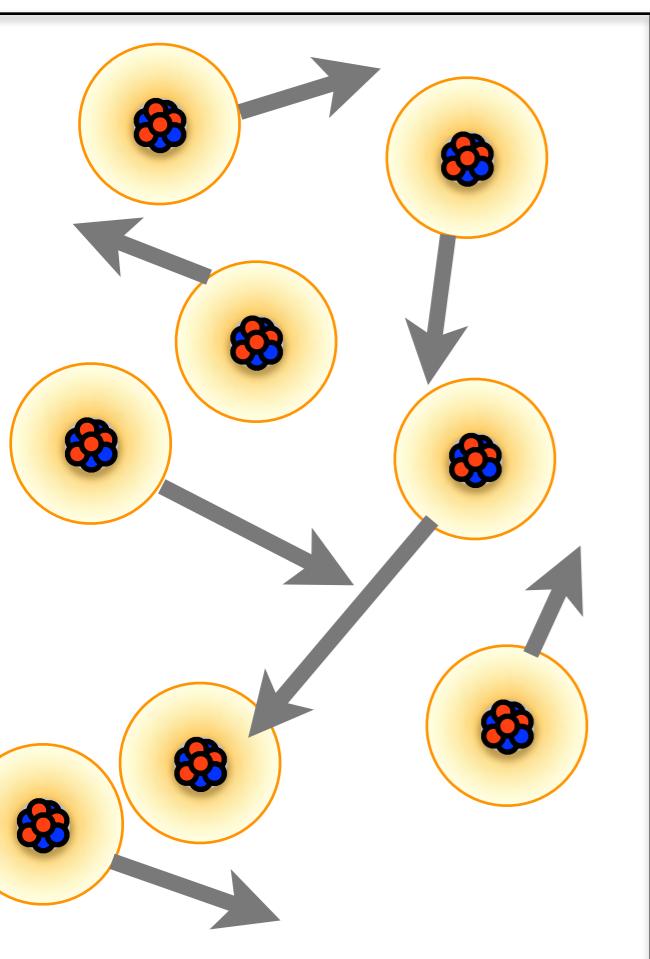
中性子星

ブラックホール

重力

重力

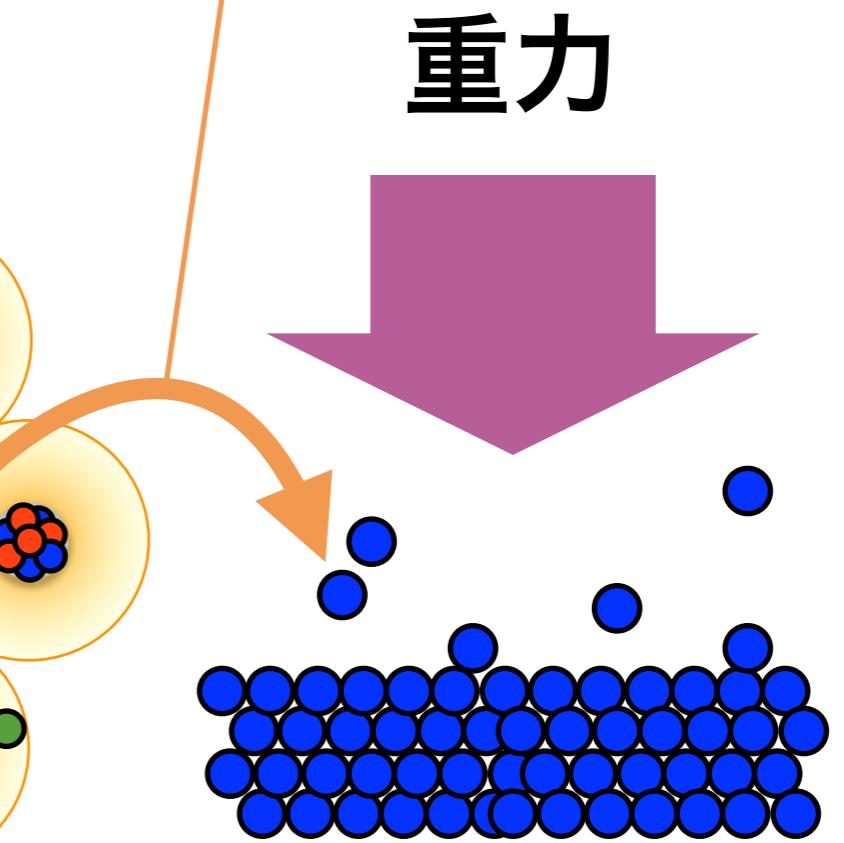
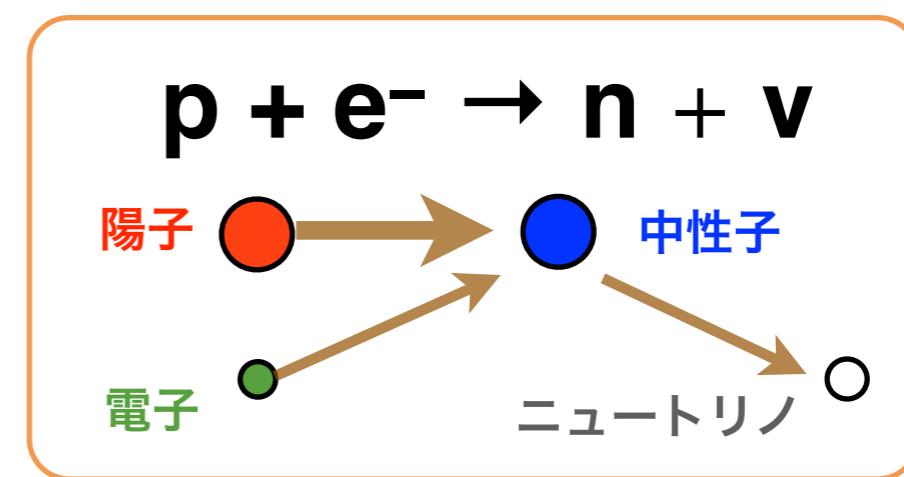
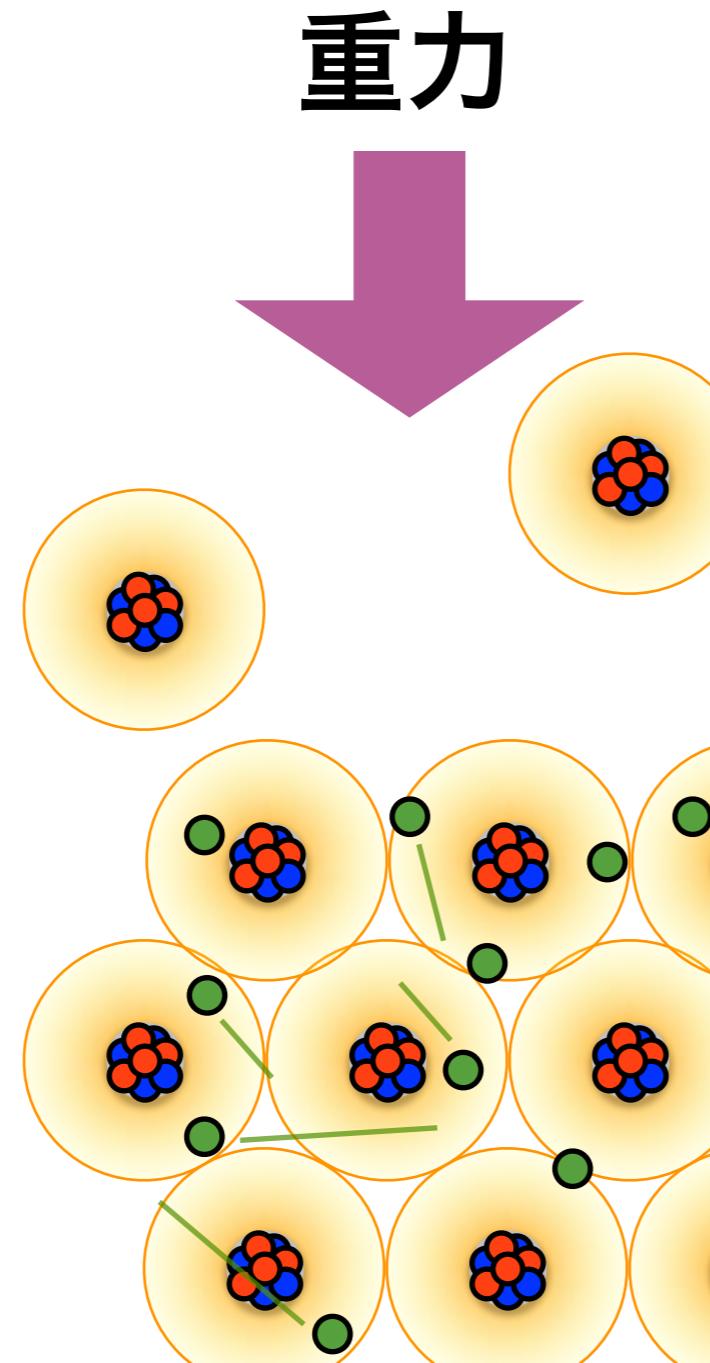
重力



ガス圧+放射圧

電子の縮退圧

中性子の縮退圧



より正確には「核力」が効いて支えられる

パルサー発見から50周年

1967



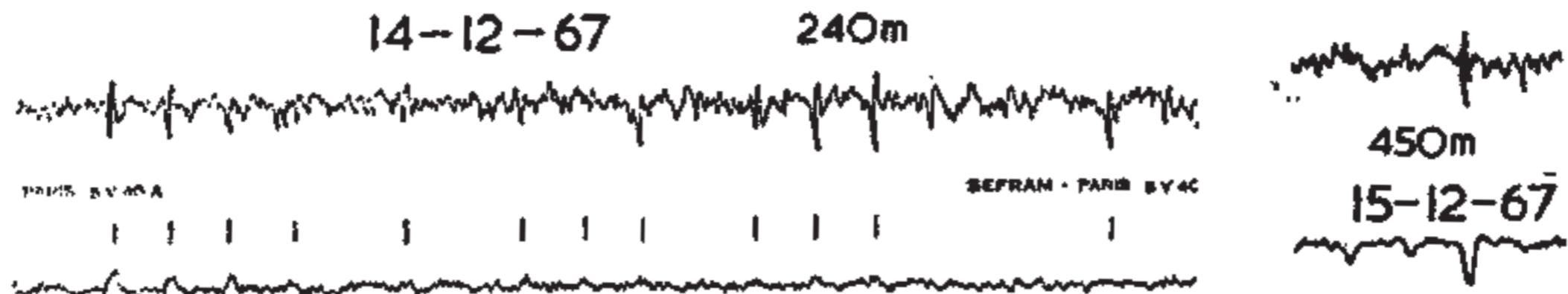
パルサー発見の電波望遠鏡

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

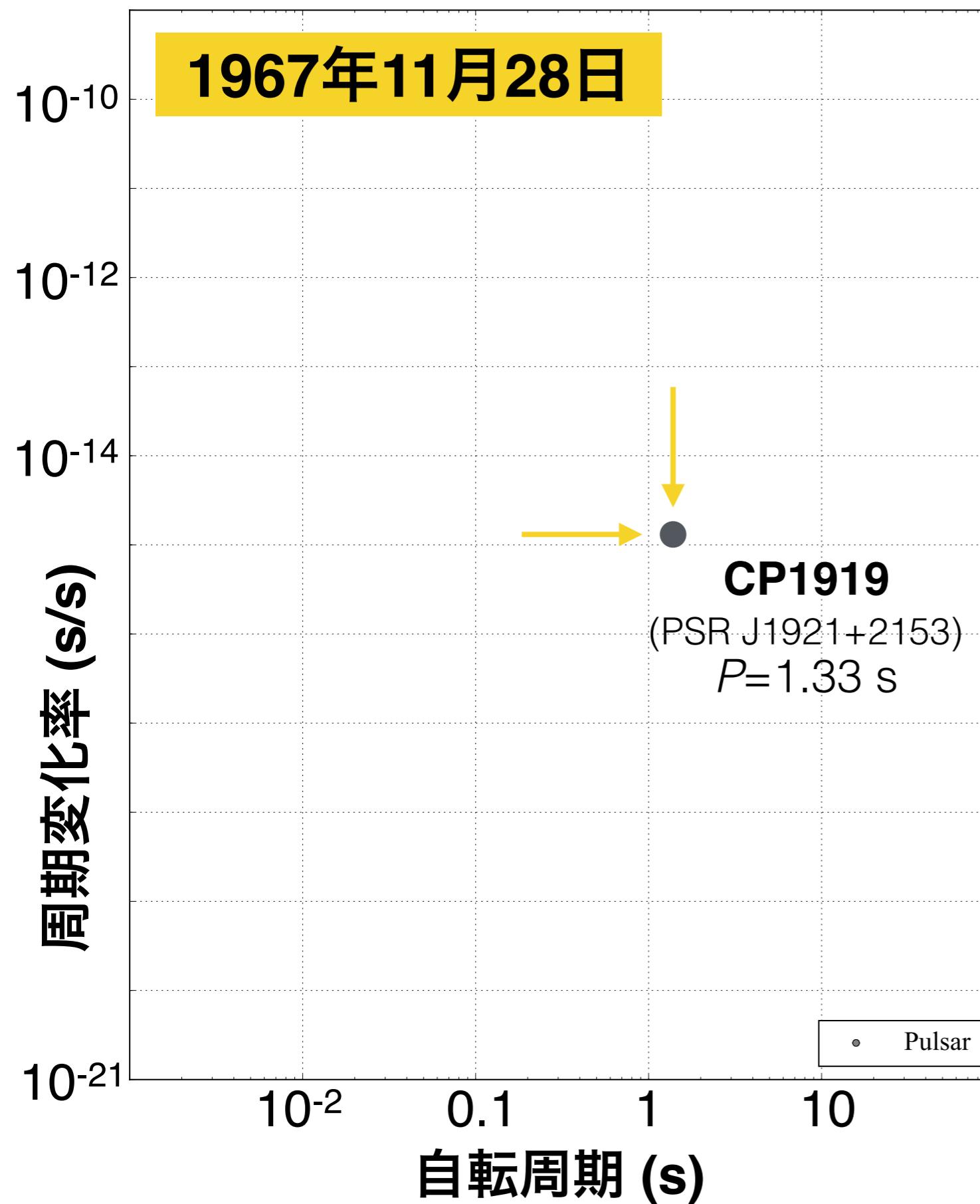


榎戸

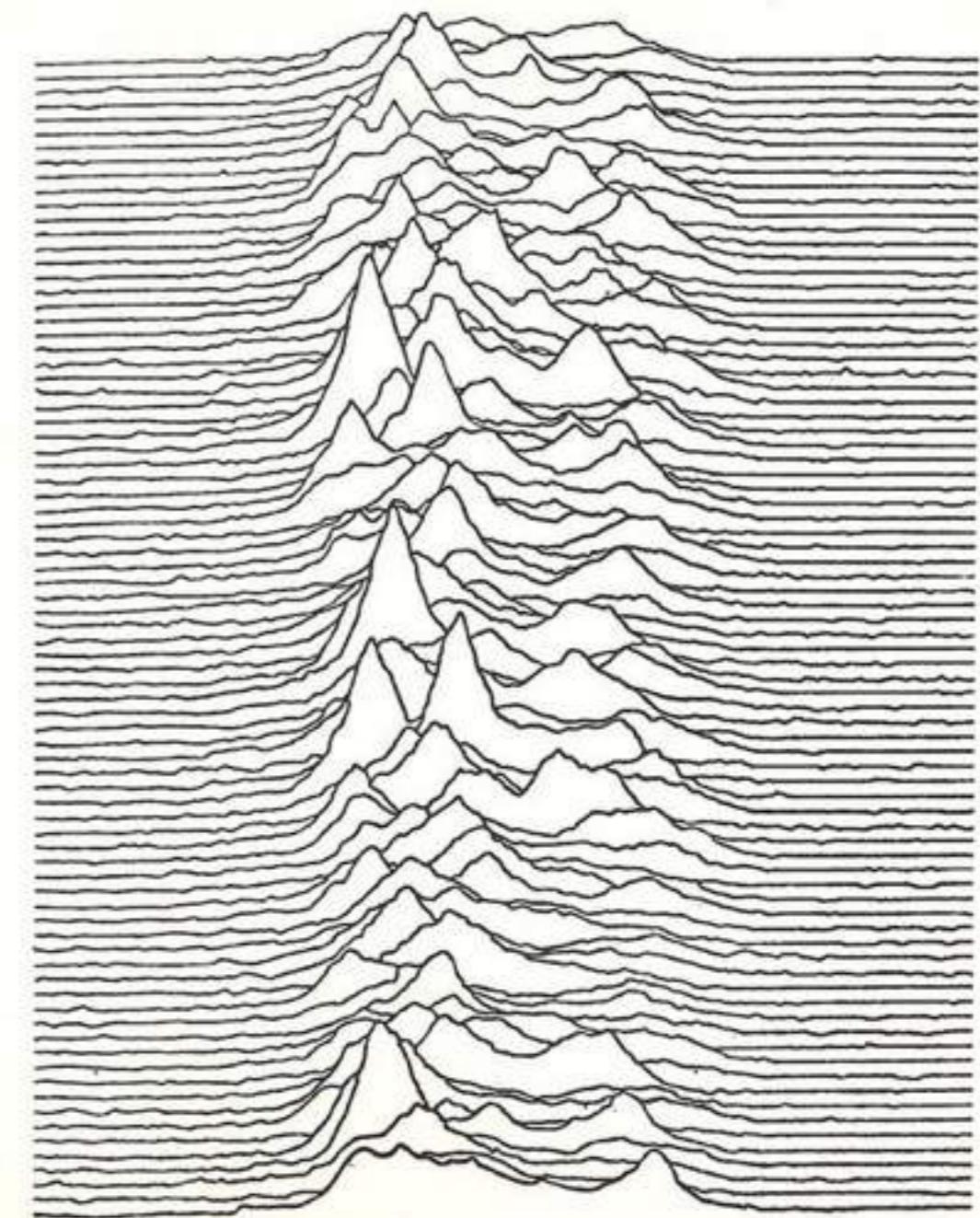
J. B. Burnell さん



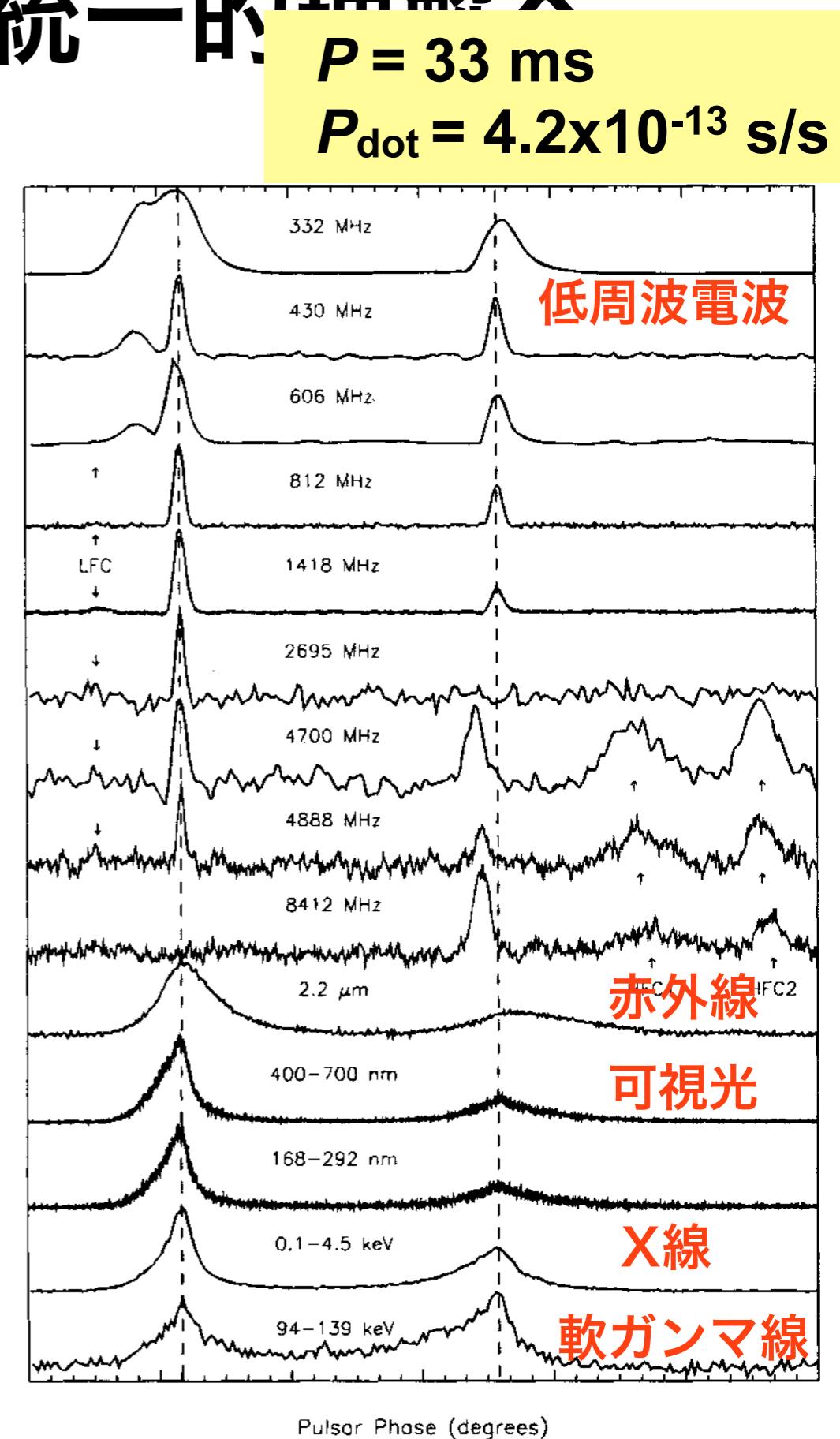
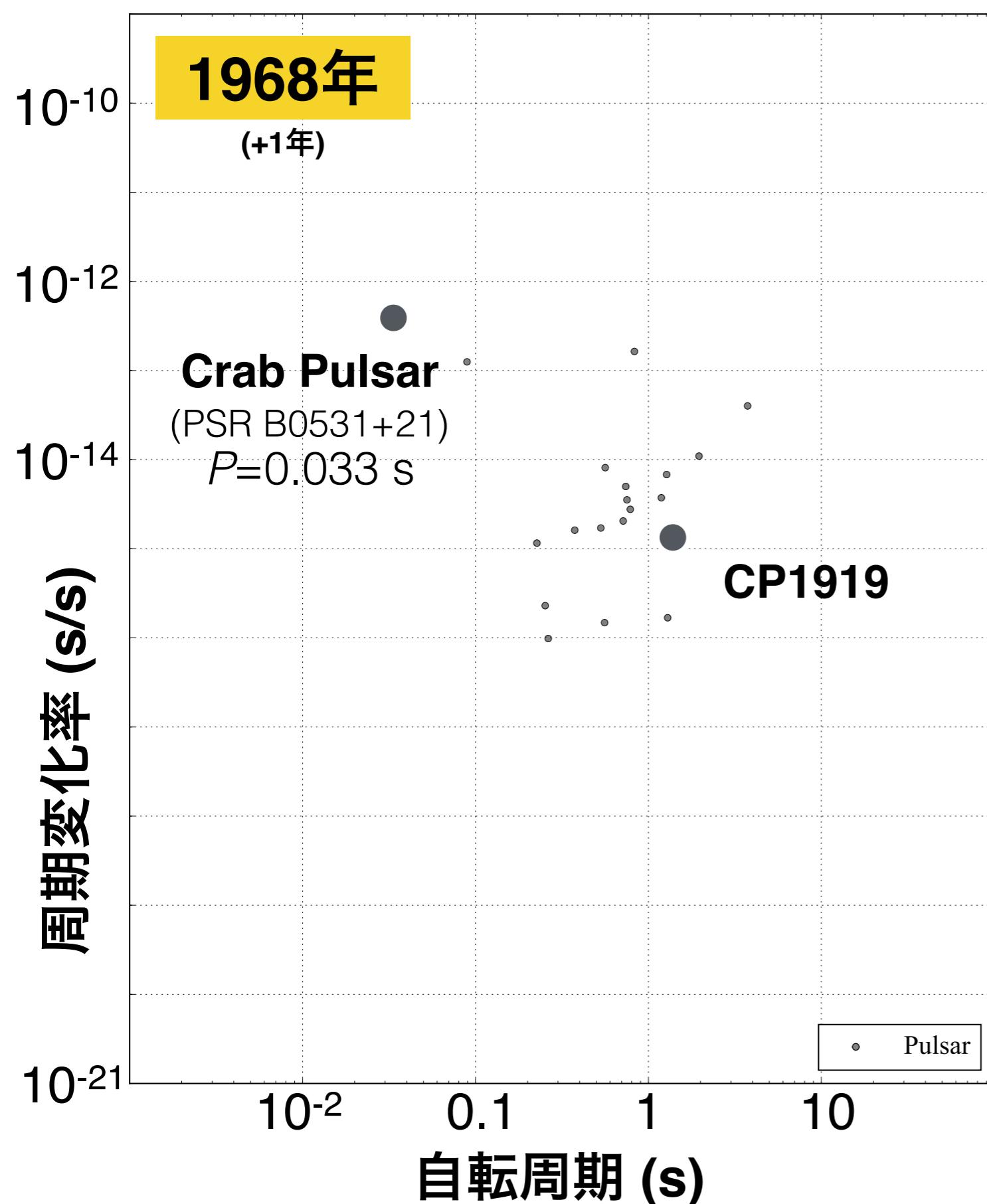
中性子星の多様性: 進化の統一的理解へ



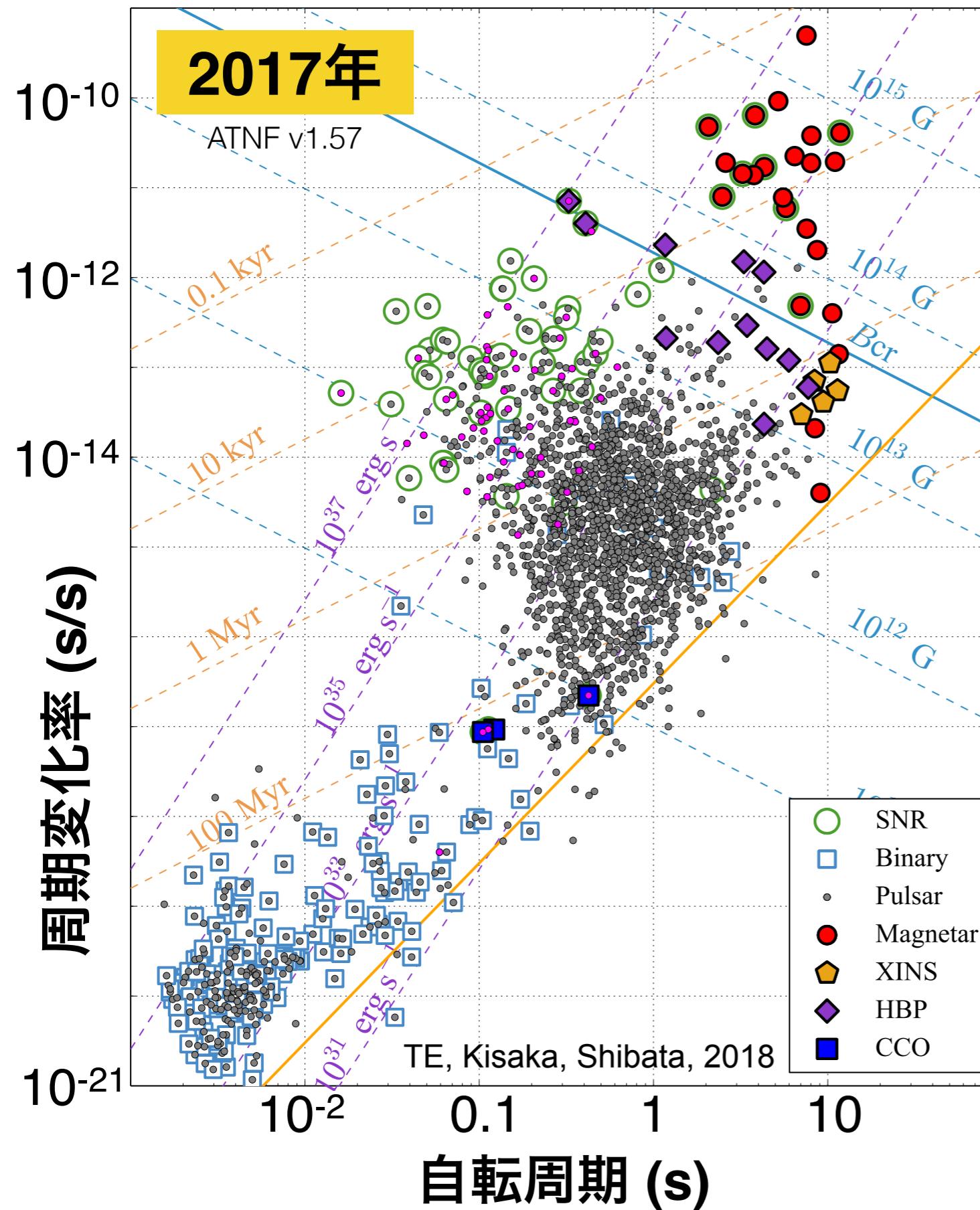
6.7: Successive pulses from the first pulsar discovered, CP 1919, are here superimposed vertically. The pulses occur every 1.337 seconds. They are caused by a rapidly-spinning neutron star.



中性子星の多様性: 進化の統一的理論への道



中性子星の多様性: 進化の統一的理解へ

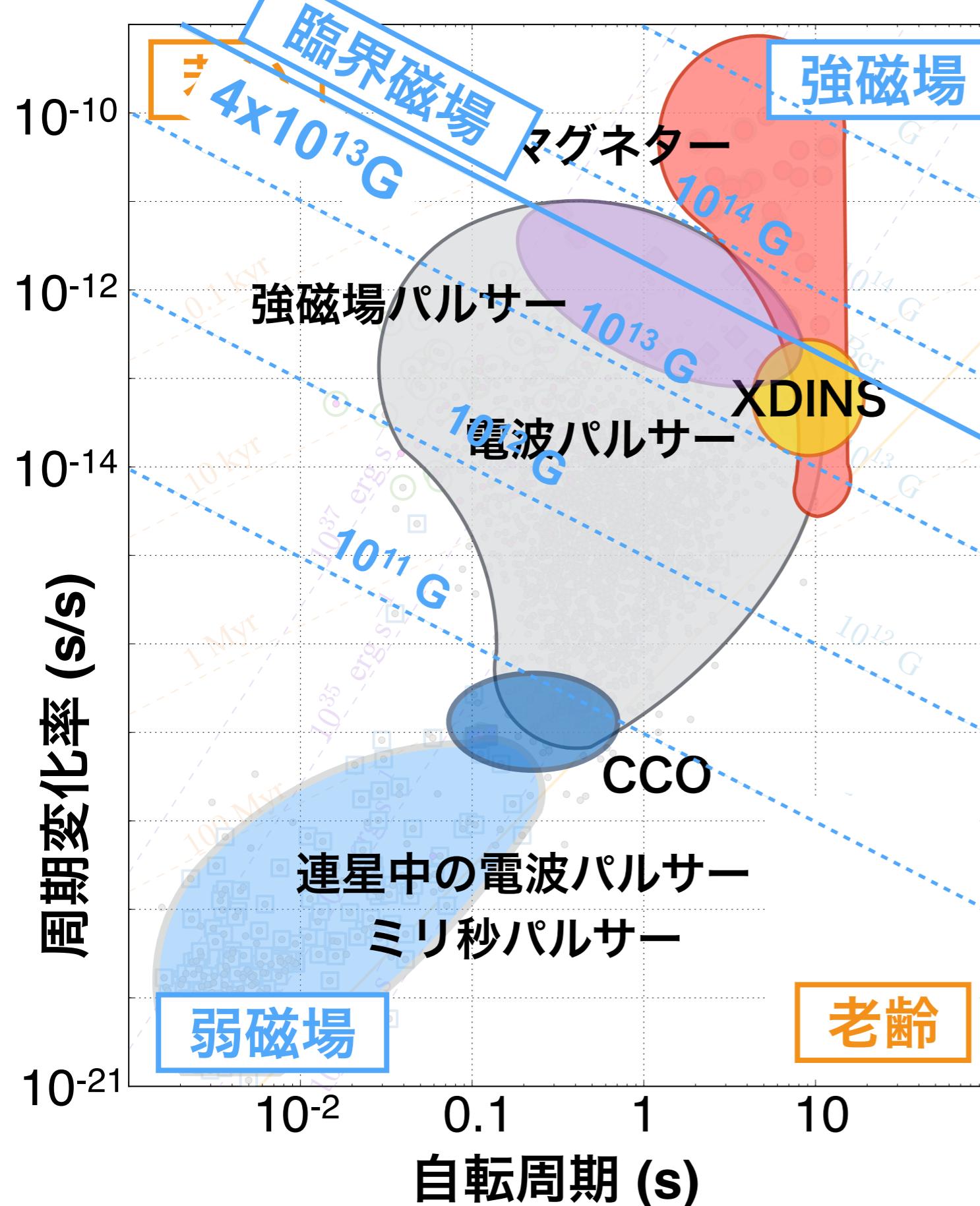


2500

(

- 可視光
- X
- ガンマ線

中性子星の多様性: 進化の統一的理解へ



2500

(

- 可視光
- X
- ガンマ線

「中性子星」研究の醍醐味は基礎物理と多様性が両立！

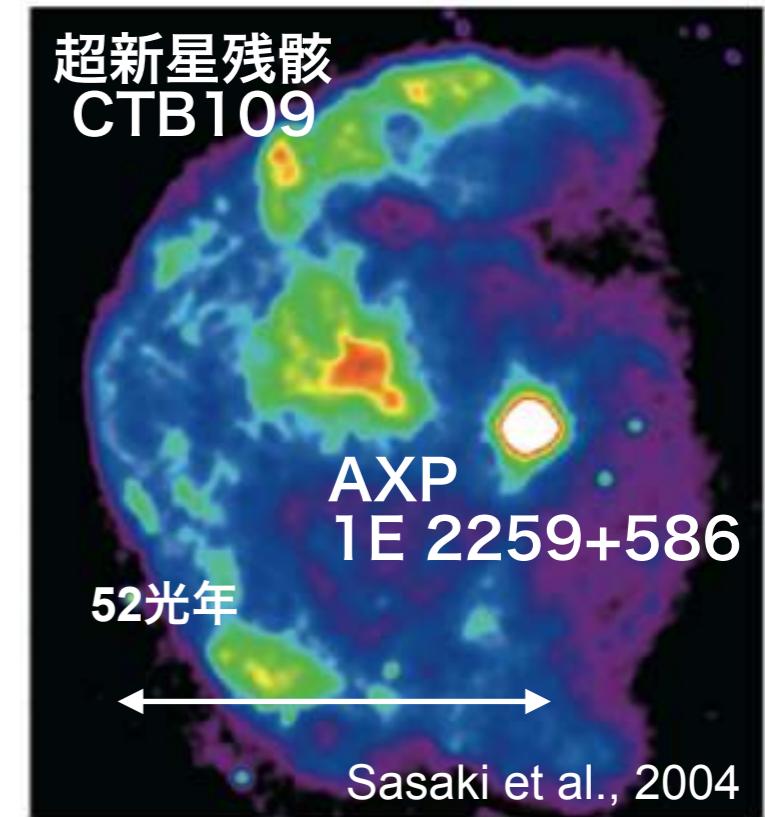
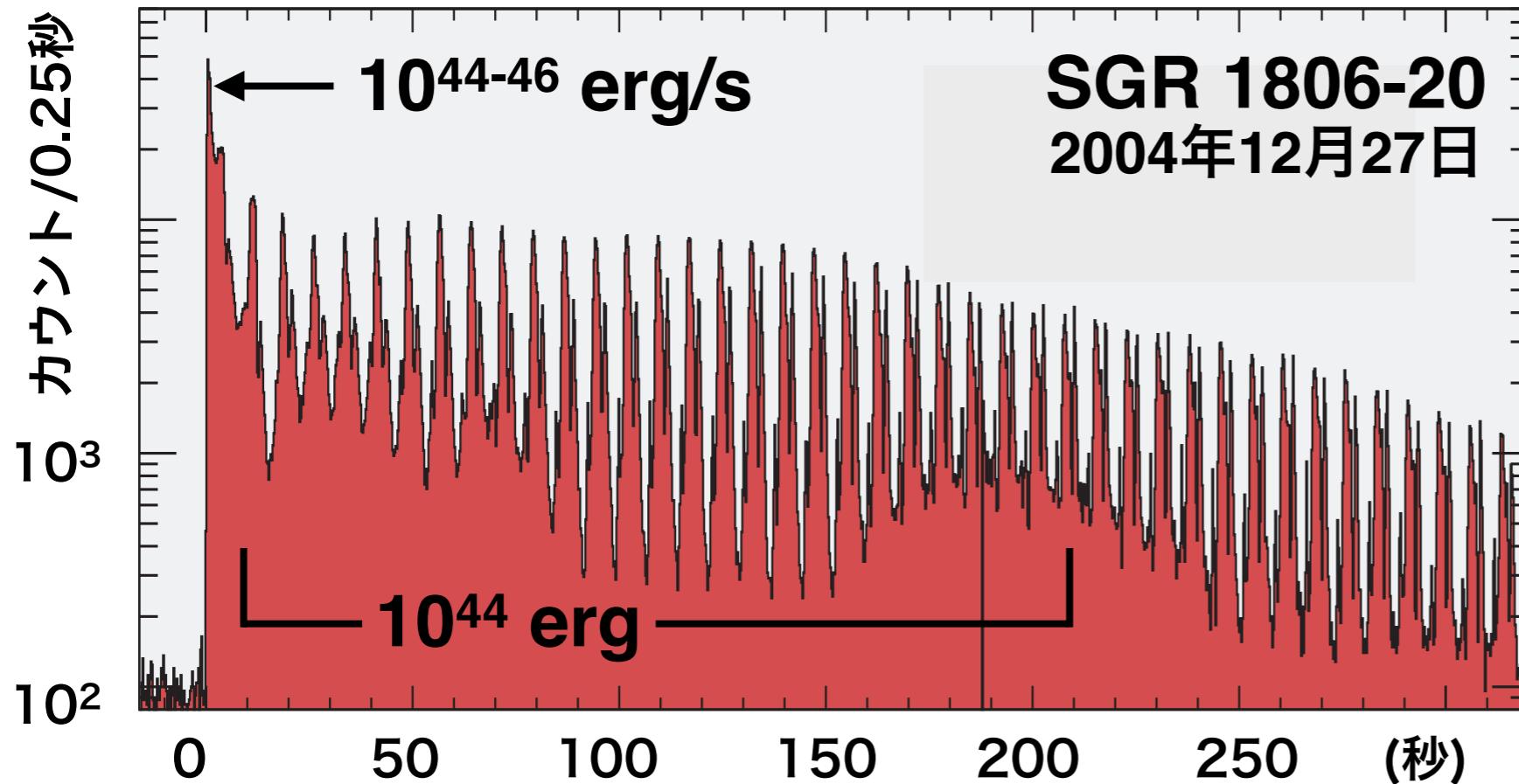
統一的理解への挑戦
(どう進化するか?)

宇宙最強の磁石星 マグネター

軟ガンマ線リピーター
Soft Gamma Repeater (SGR)

特異X線パルサー
Anomalous X-ray Pulsar (AXP)

巨大ガンマ線フレアなどの爆發現象 X線光度 >> スピンダウン光度



SGR と AXP は中性子星より2桁以上に磁場が強く、
磁気エネルギーで輝く新種の天体か？(マグネター仮説)

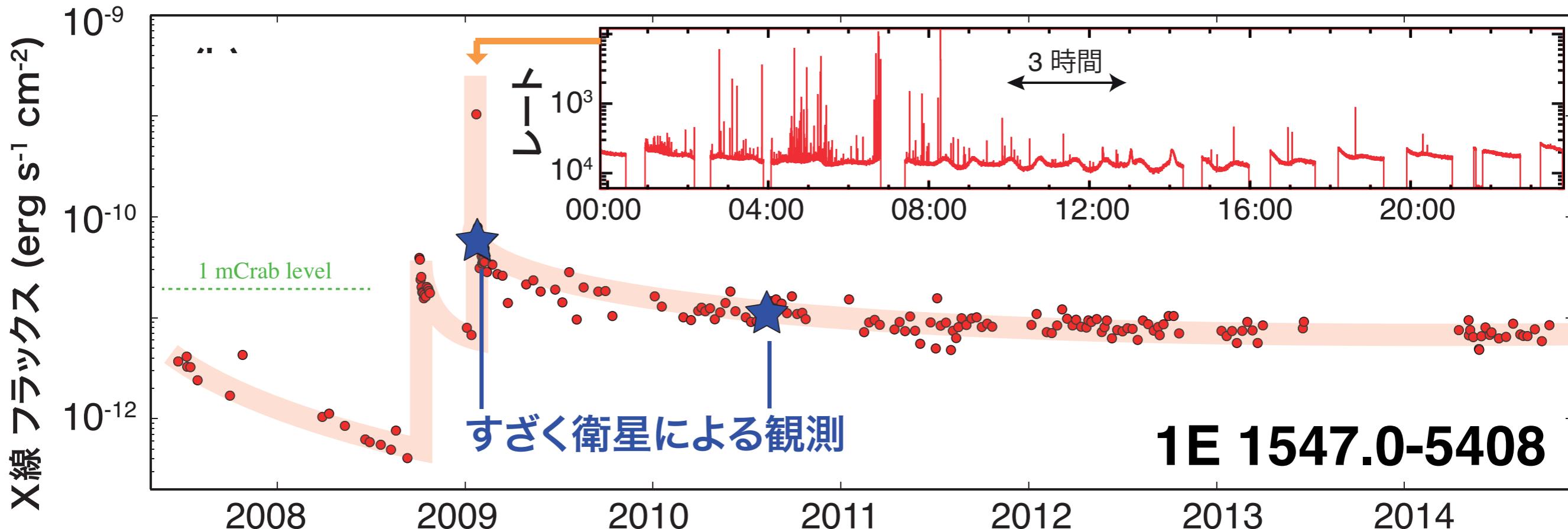
X線天文衛星すばく：硬X線での奮闘

X線CCD (XIS) と硬X線検出器 (HXD) を併用し
0.2-600 keV での広帯域観測を実現！

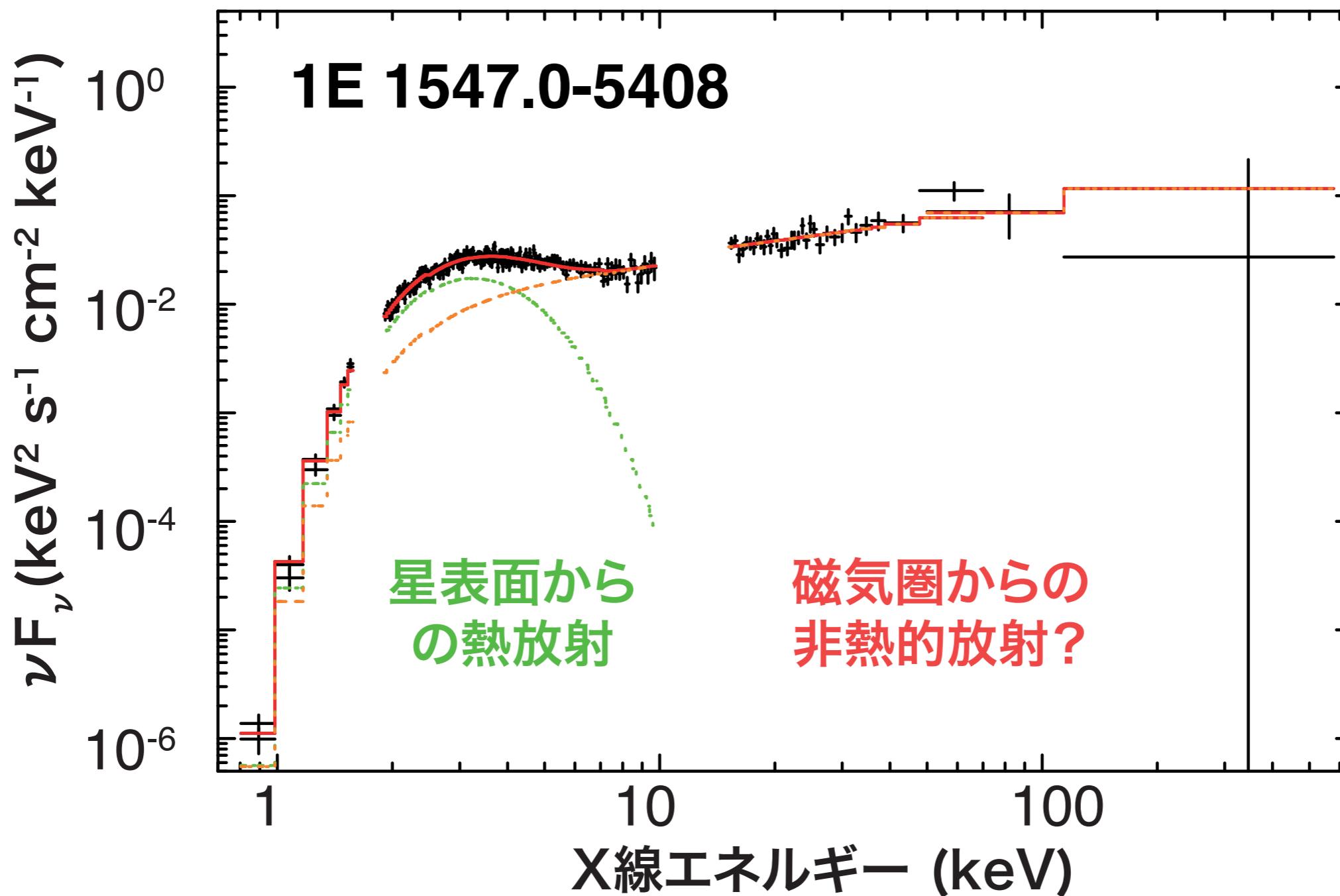


磁気活動で突然的に明るくなるマグネター

- Swift衛星の活躍で突然増光する新天体の発見が増加
- すばくも新天体 SGR 0501+4516 を世界に先駆け報告
(Enoto et al., ApJL 2009, ApJ 2010)
- AXP 1E 1547.0-5408 では、連射されるバースト放射を軌道上で検出し、増光中の天体に緊急観測を実施した
(Enoto et al., PASJ 2010, MNRAS 2012)

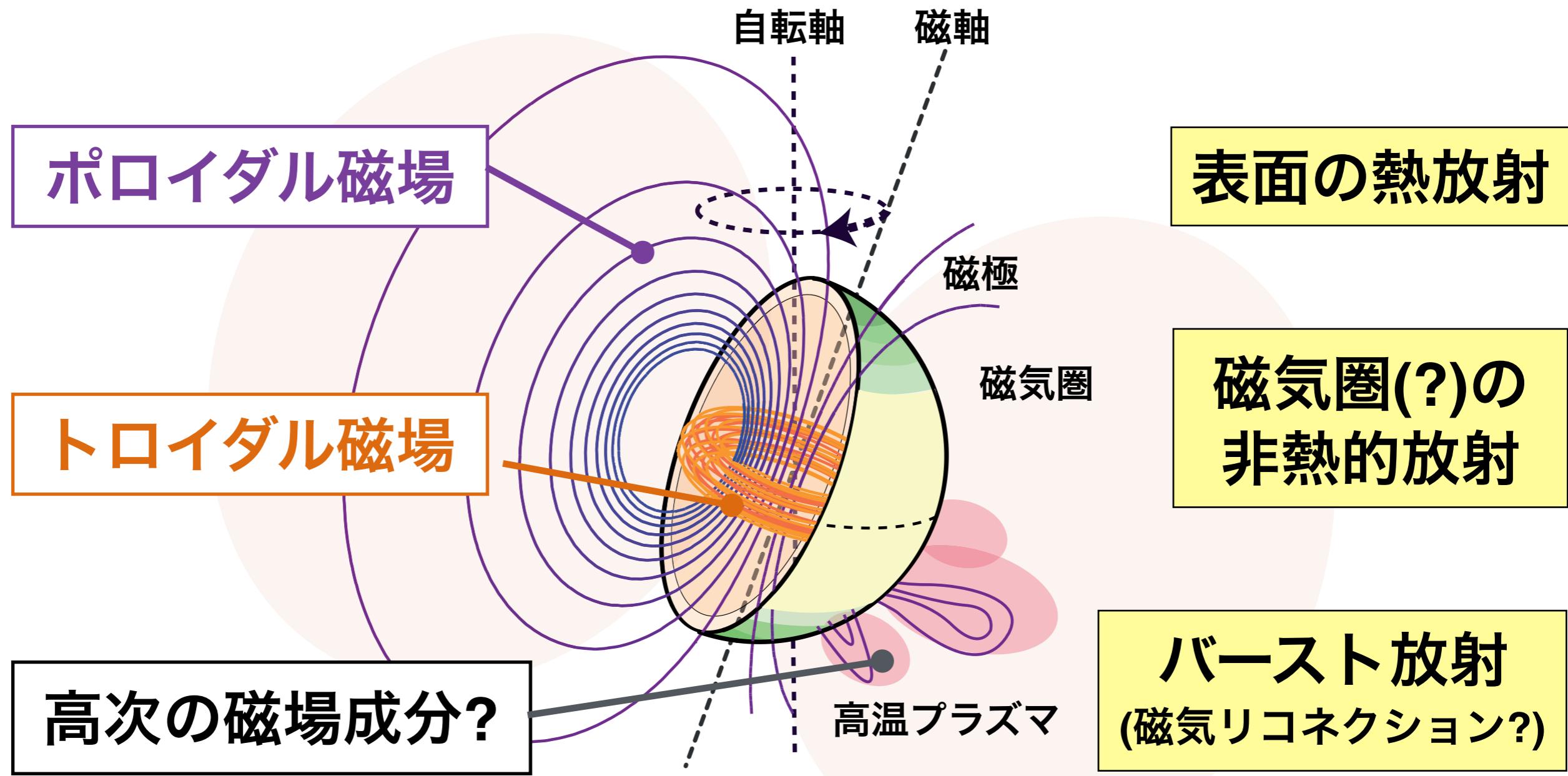


マグネター活動期に硬X線放射を発見



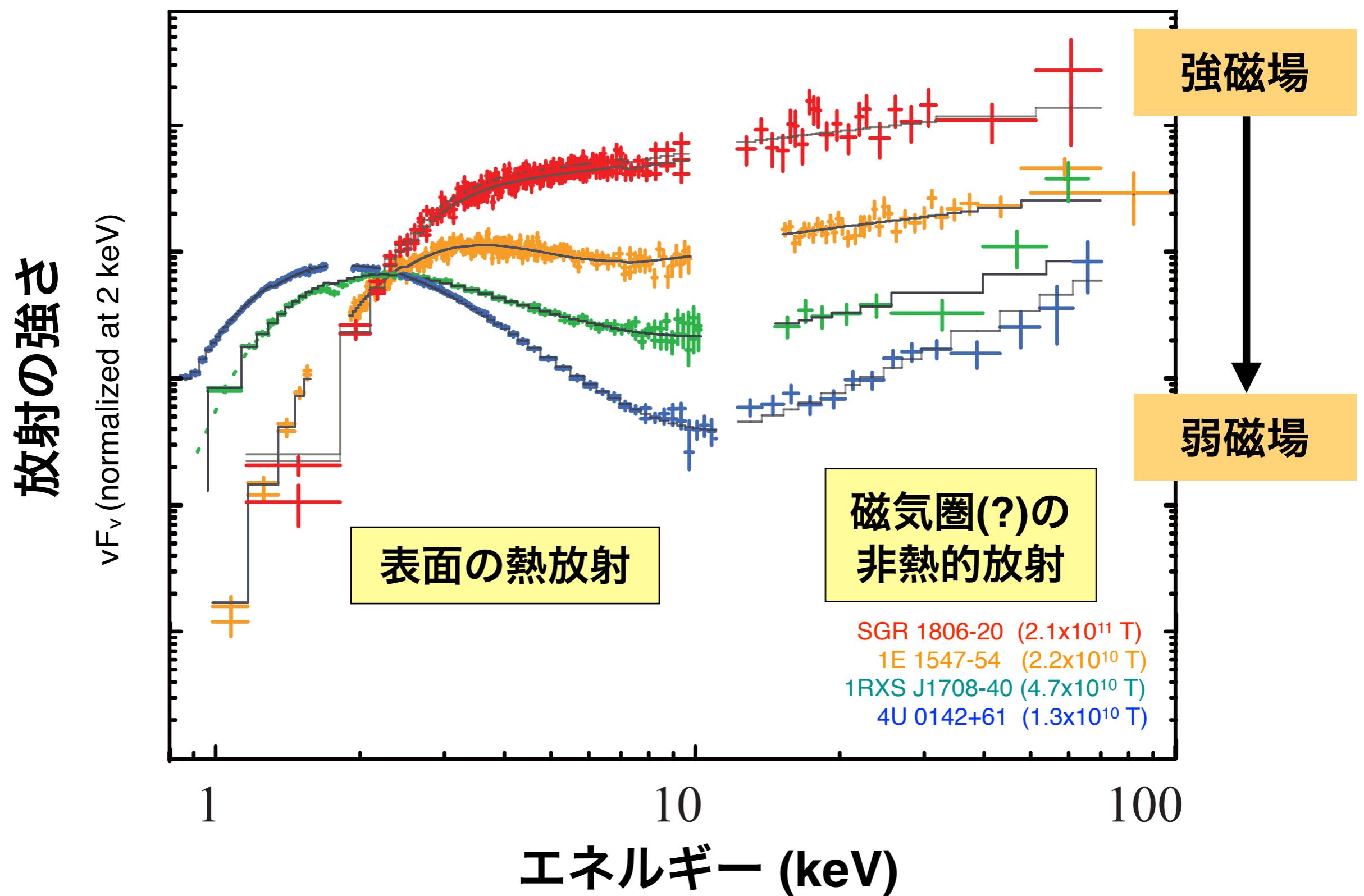
星表面からの熱放射のみと思われていたマグネターで
硬X線で卓越する放射成分を見つけ観測の窓が広げた

マグネターからのX線放射の起源

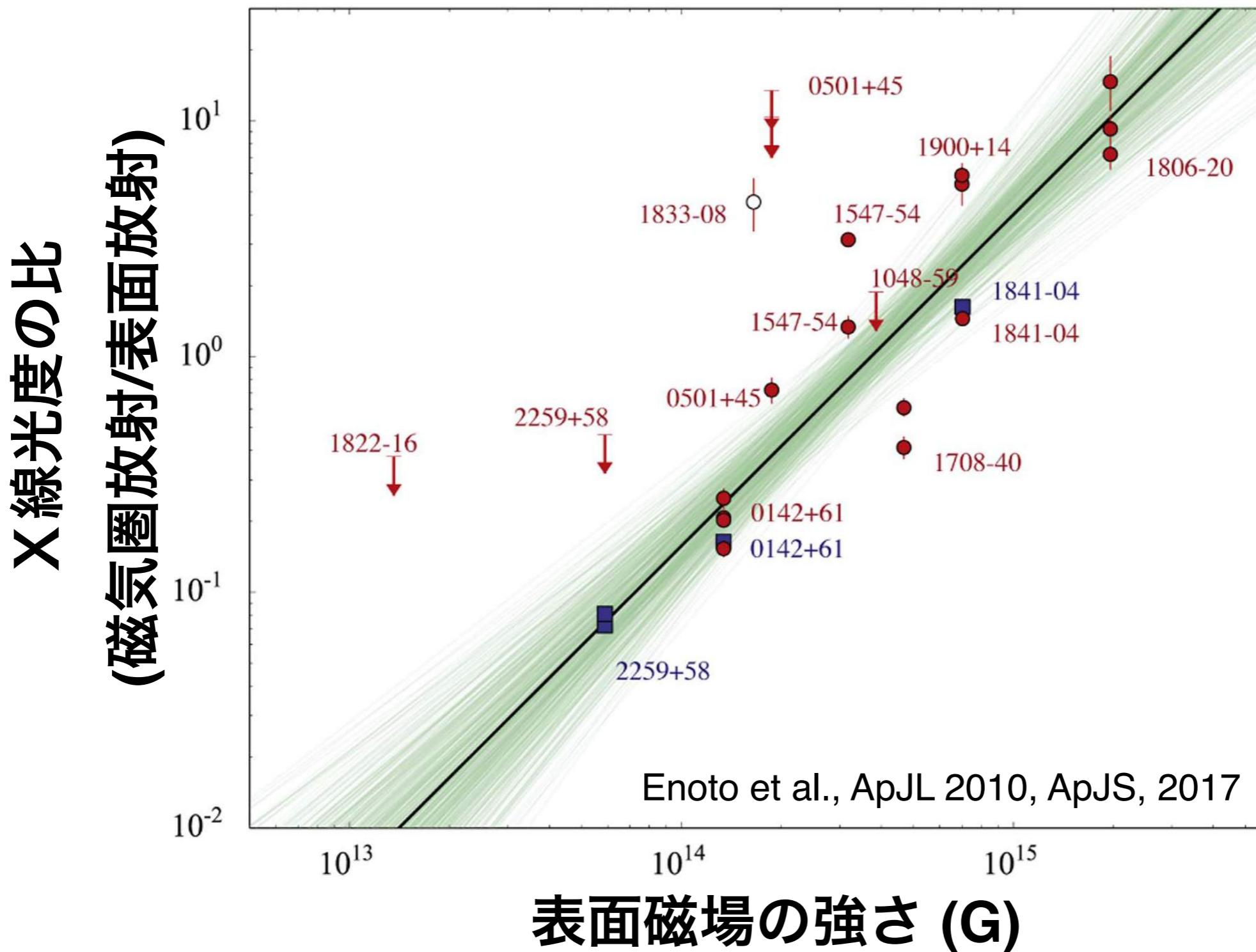


内部に蓄えた磁気エネルギー解放が、表面からの熱放射
磁気圏からの非熱的放射、バースト放射になる

磁場強度が決めるマグネターX線放射

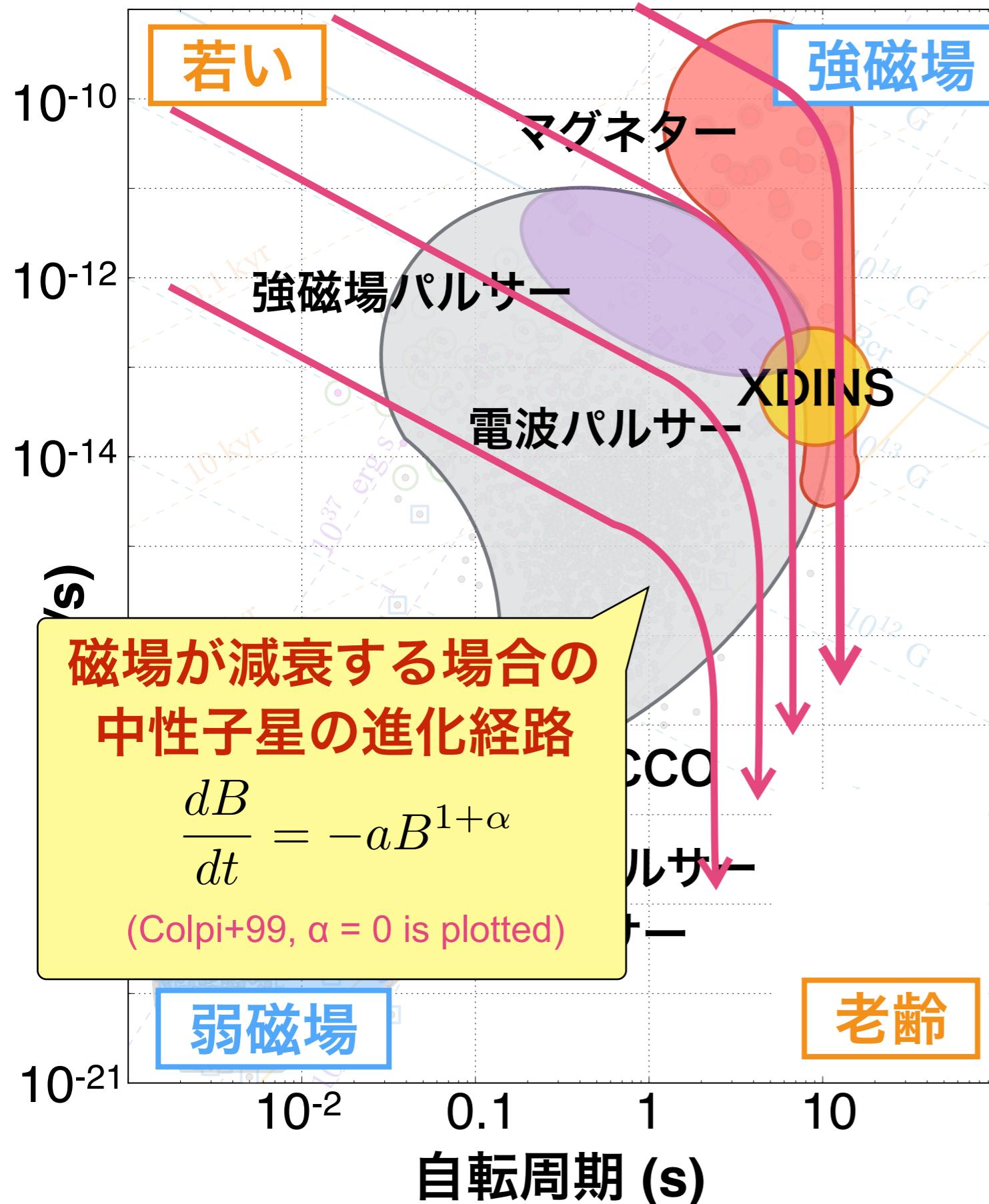


磁場強度が決めるマグネターX線放射



強磁場ほど硬X線(磁気圏)が卓越するスペクトル進化

マグネターの進化と磁場減衰



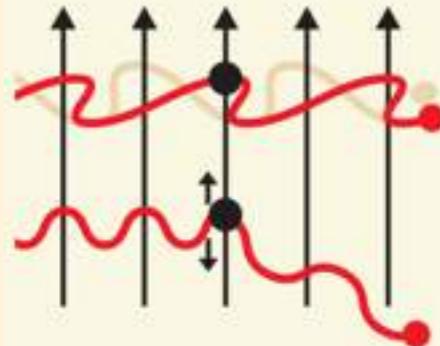
- 磁気エネルギー解放しながら P-Pdot 図上を移動
- X線スペクトルも磁場減衰に伴って系統的に変化
- まれに突発的な X 線増光(アウトバースト)を出す
- マグネターの末裔と思われる種族の天体も示唆
- マグネターと電波パルサーの境界領域の開拓も進む

X線偏光で探る超強磁場の世界

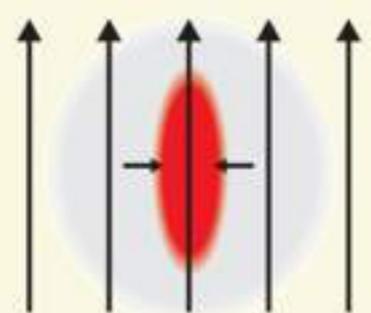
QED 臨界磁場

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

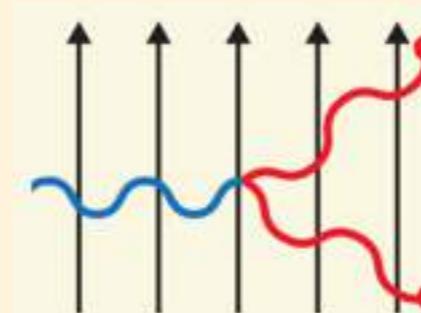
散乱断面積の抑制



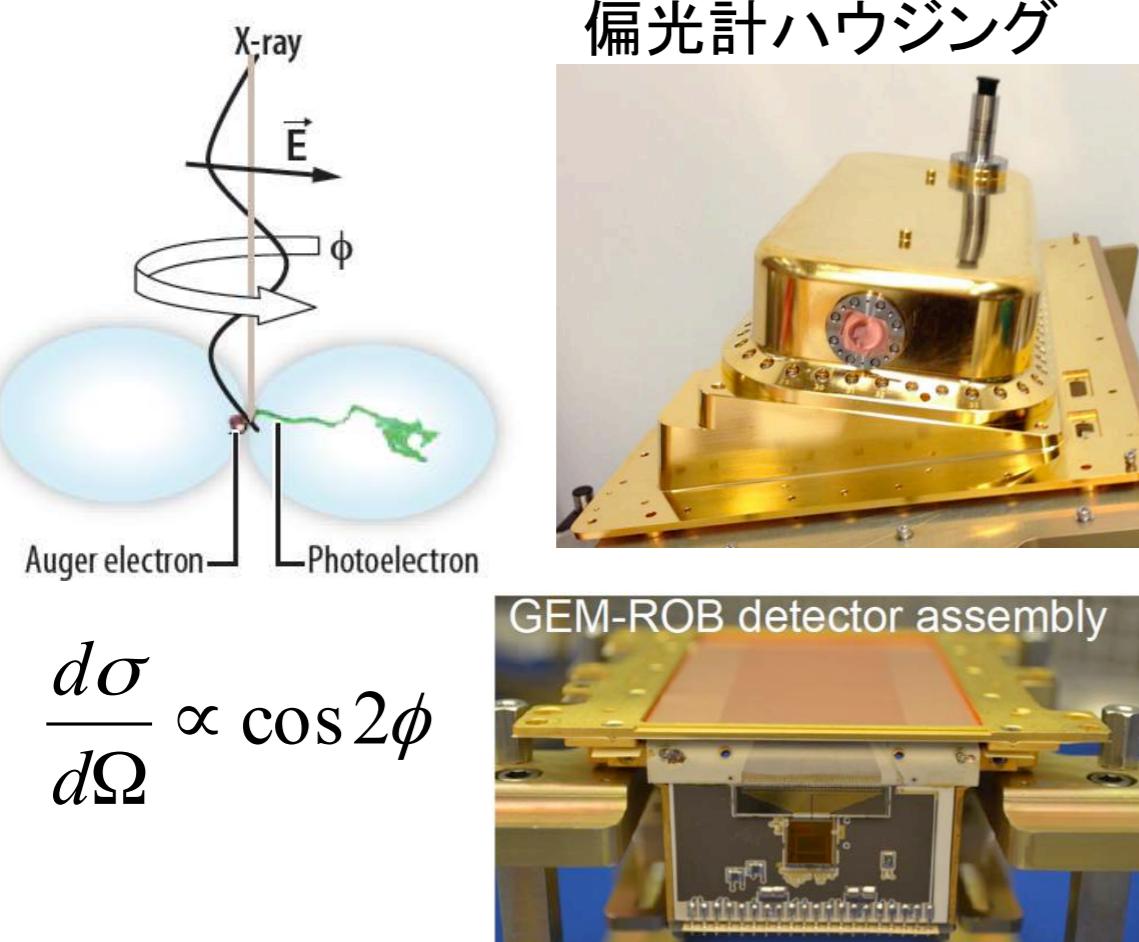
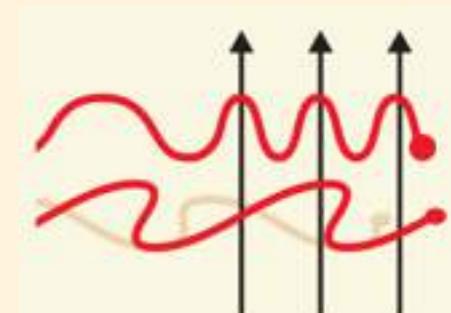
原子の変形



光子の自然分裂



真空の複屈折

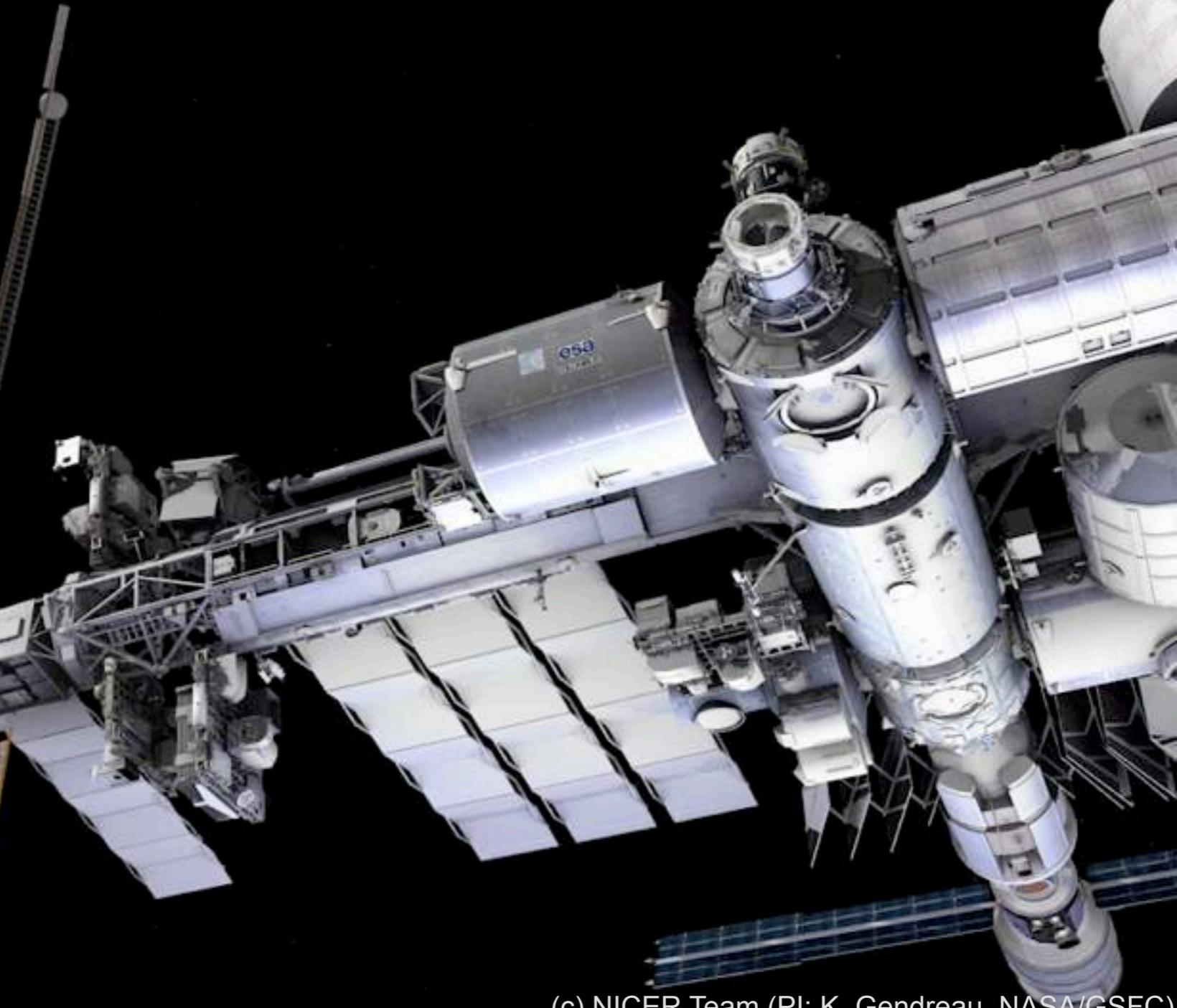
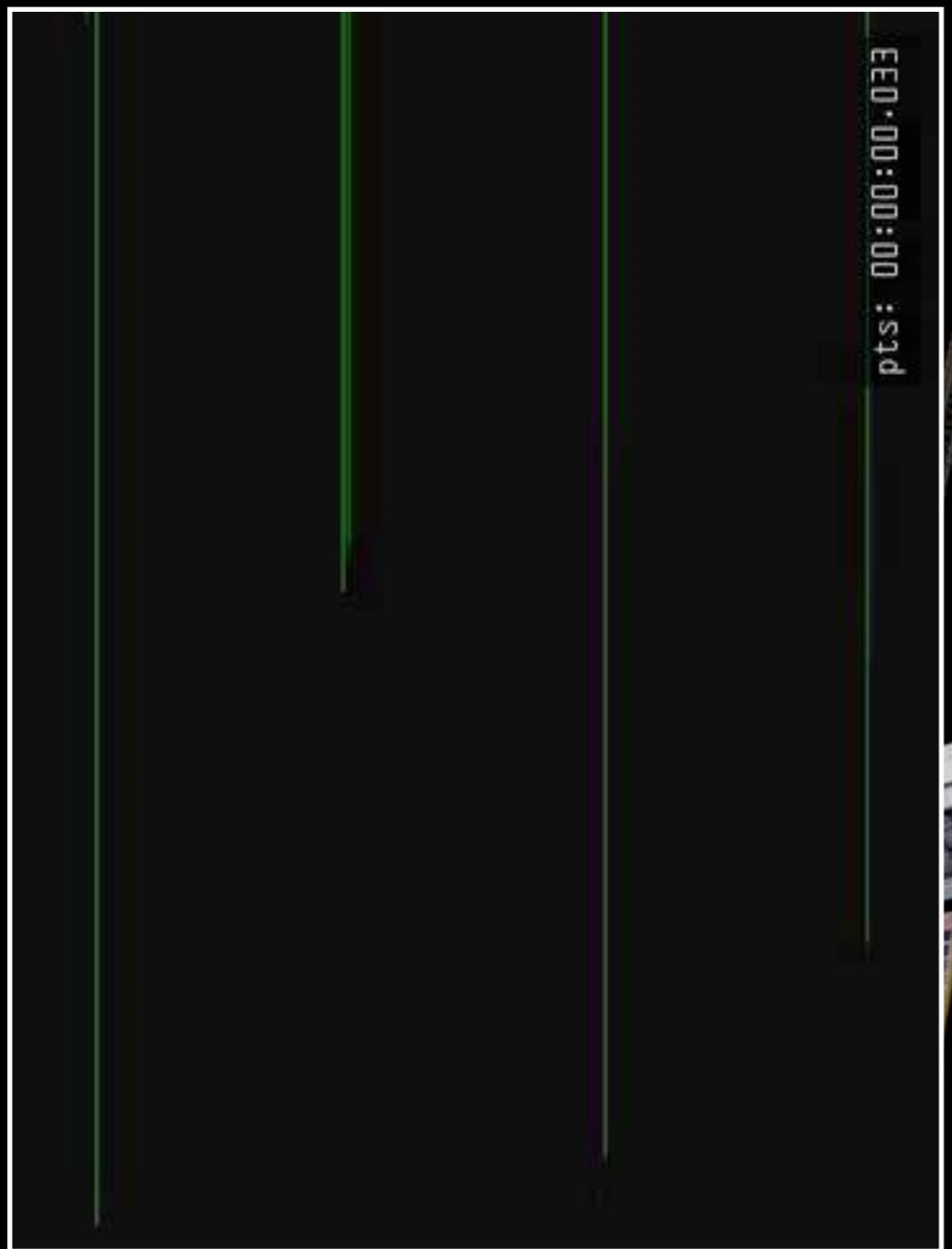


- ・理研(玉川、北口ほか)を中心に国際連携で進むX線偏光の開拓
- ・おもに偏光計の装置開発やキャリブレーションから貢献
- ・NASA(GSFC, MSFC)との連携で進む国際プロジェクト
GEMS → PRAXyS → IXPE

IXPE = Imaging X-ray Polarimetry Explorer

国際宇宙ステーション搭載 NICER の登場

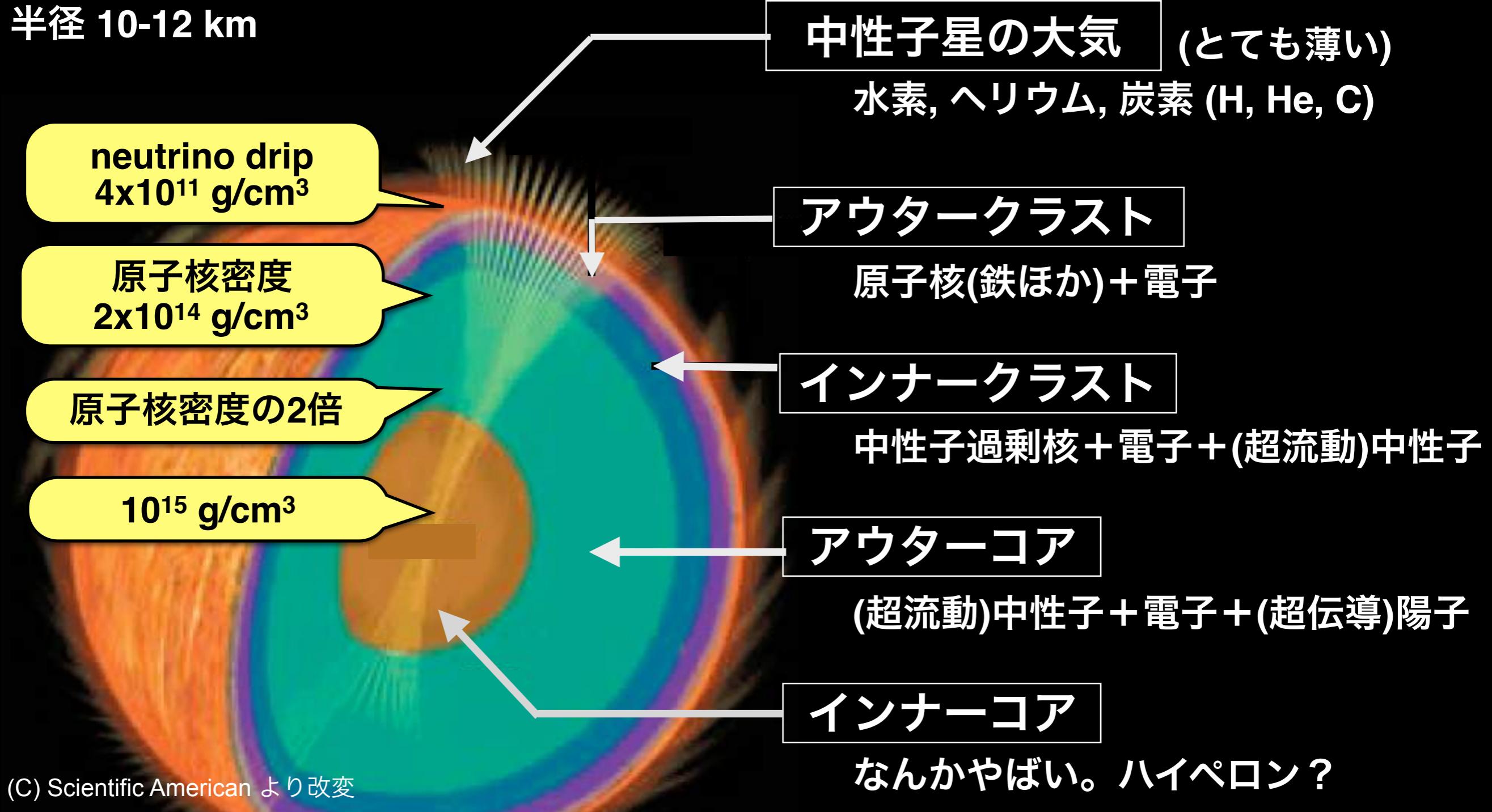
- Neutron star Interior Composition ExploreR (NICER)
- 高時間分解能・大統計の軟X線(0.2-12 keV)観測を実現
- 中性子星を主要ターゲットに18ヶ月の科学プログラム



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

中性子星の内部は巨大な原子核!?

半径 10-12 km



(C) Scientific American より改変

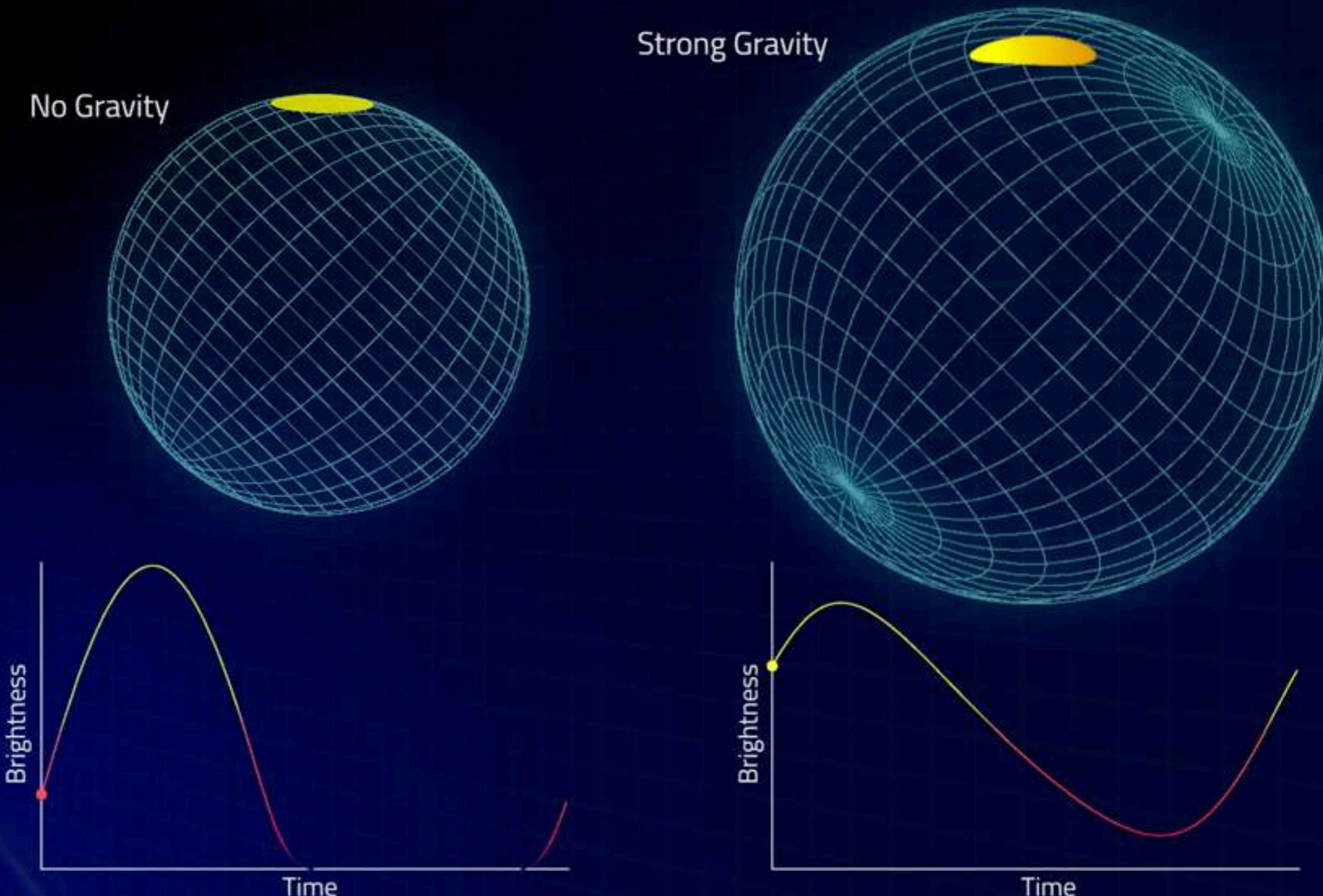
内部の高密度状態方程式は、物理学の未解決問題

NICER の主目的は状態方程式の観測的解明

X線パルス波形から質量と半径を決める

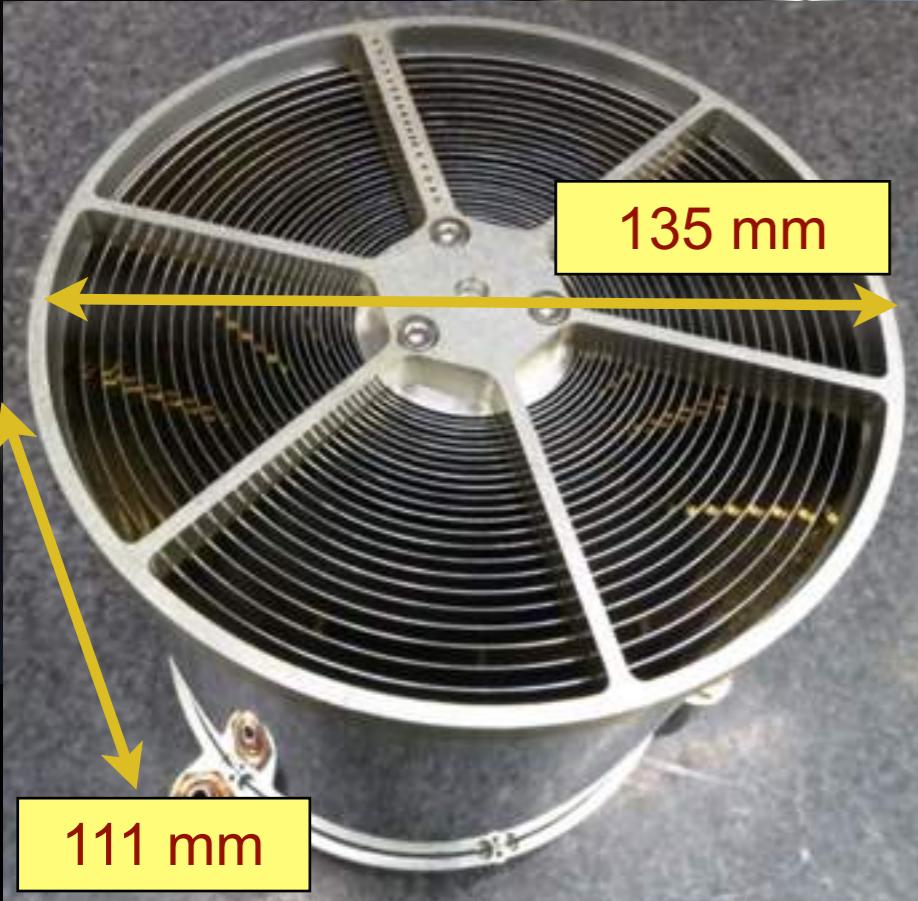
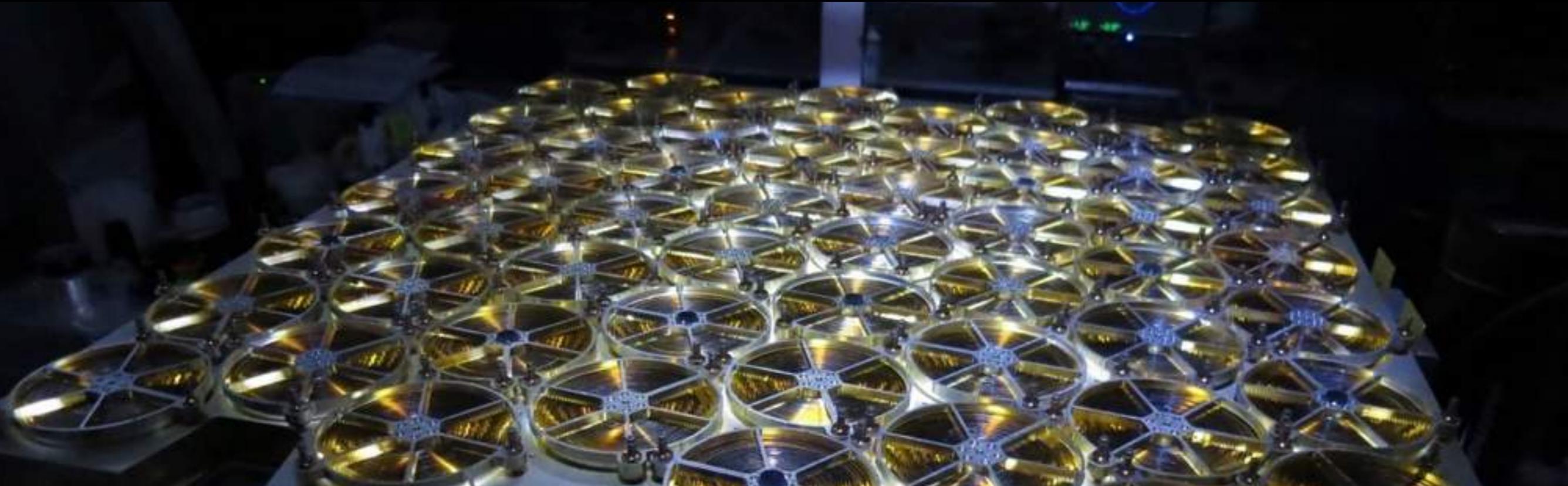
状態方程式は質量・半径と一対一に対応することが知られている

Gravitational light-bending



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. ($24 \times 56 = 1344$ 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 cm² @ 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

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

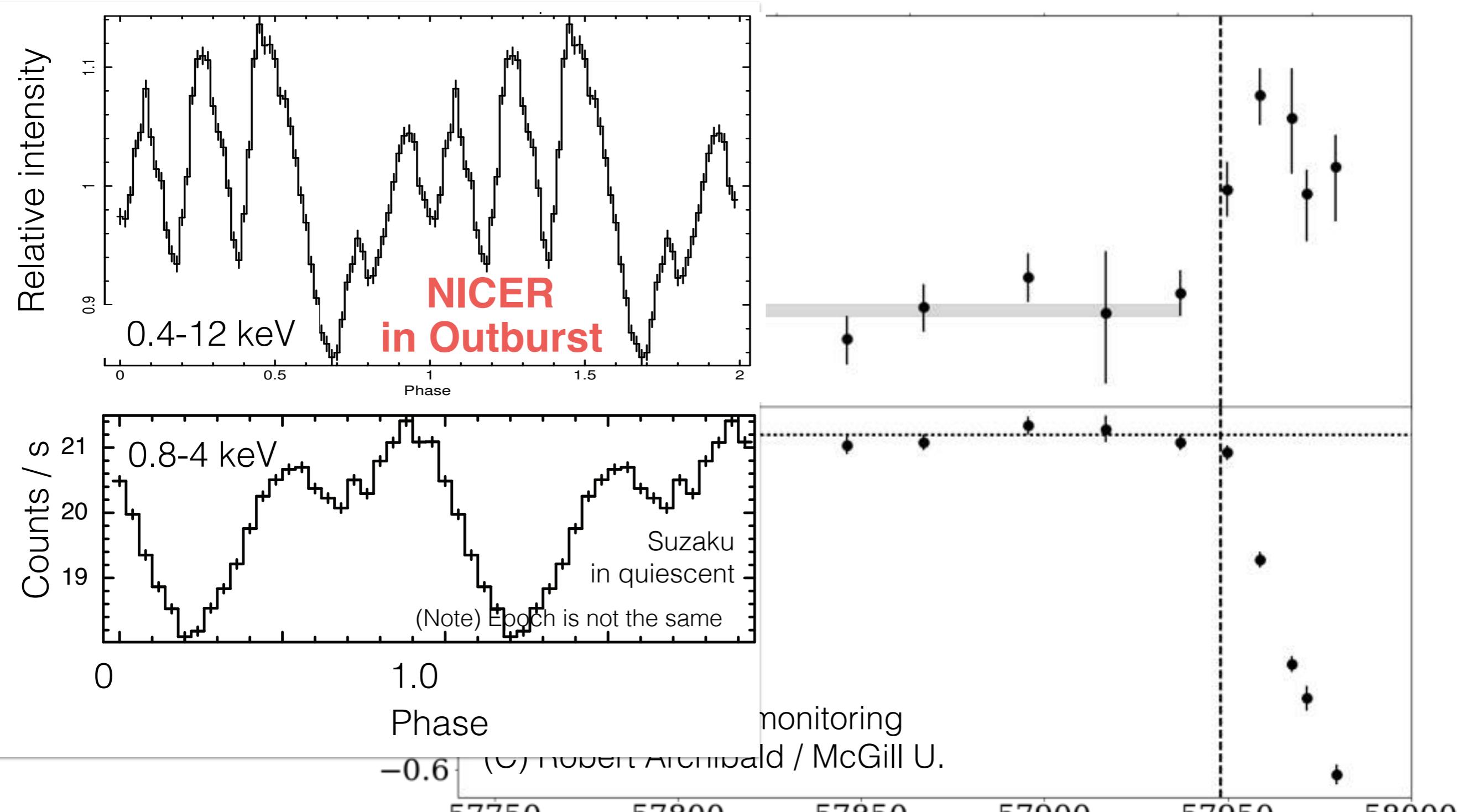
SpaceX “CRS-11 Hosted Webcast” YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=JuZBOUMsYws>

2017年6月3日 スケースX社による打ち上げ



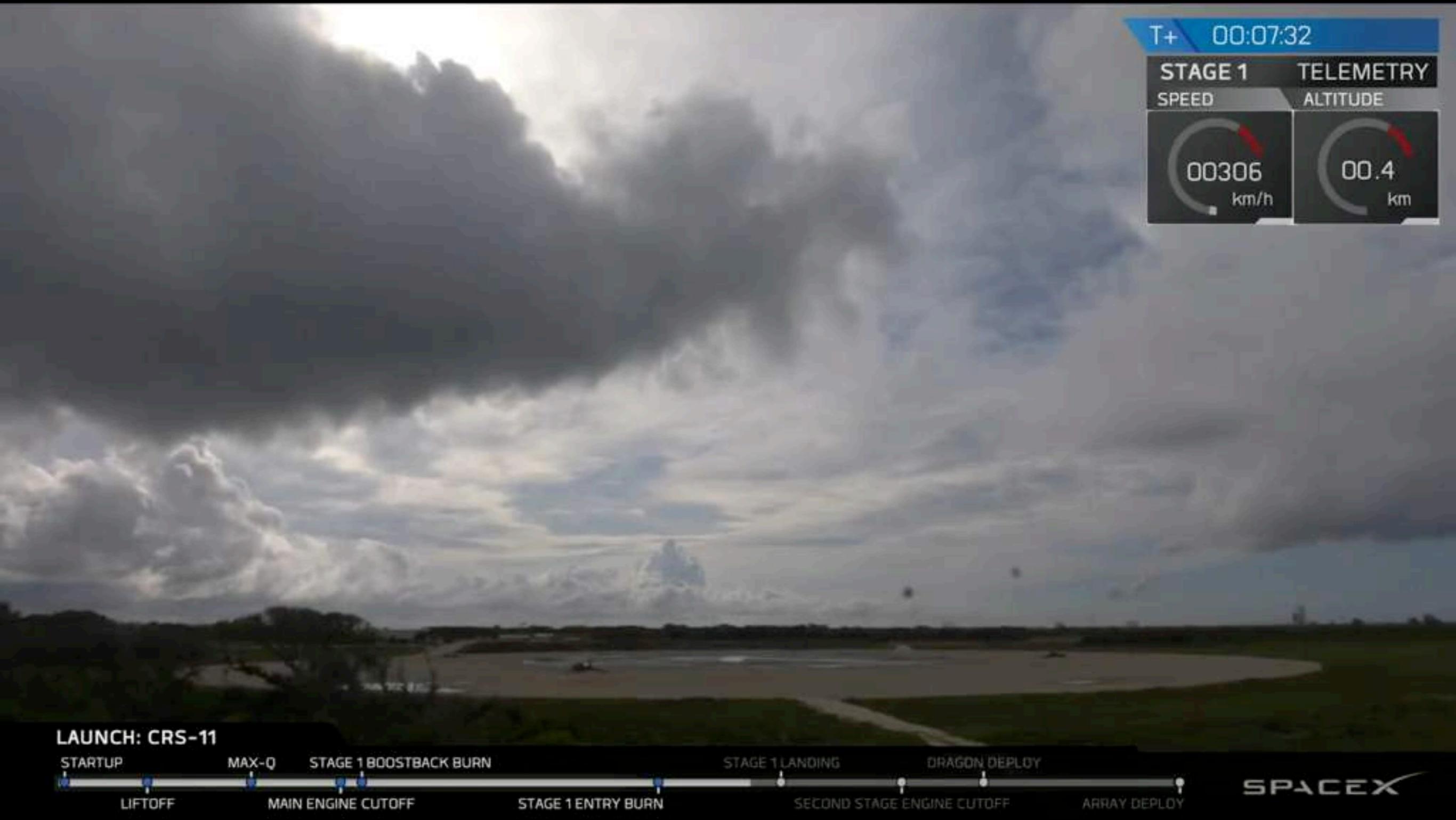
NICER を搭載したファルコン9ロケット@ケネディ宇宙センター

マグネター初期観測 (NICER M&M リード)



2017年7月13日のバースト放射の直後に緊急観測し
パルス波形の変化を計測。グリッジ直後の貴重なデータ

NICER の打ち上げ日に体験した新しい潮流

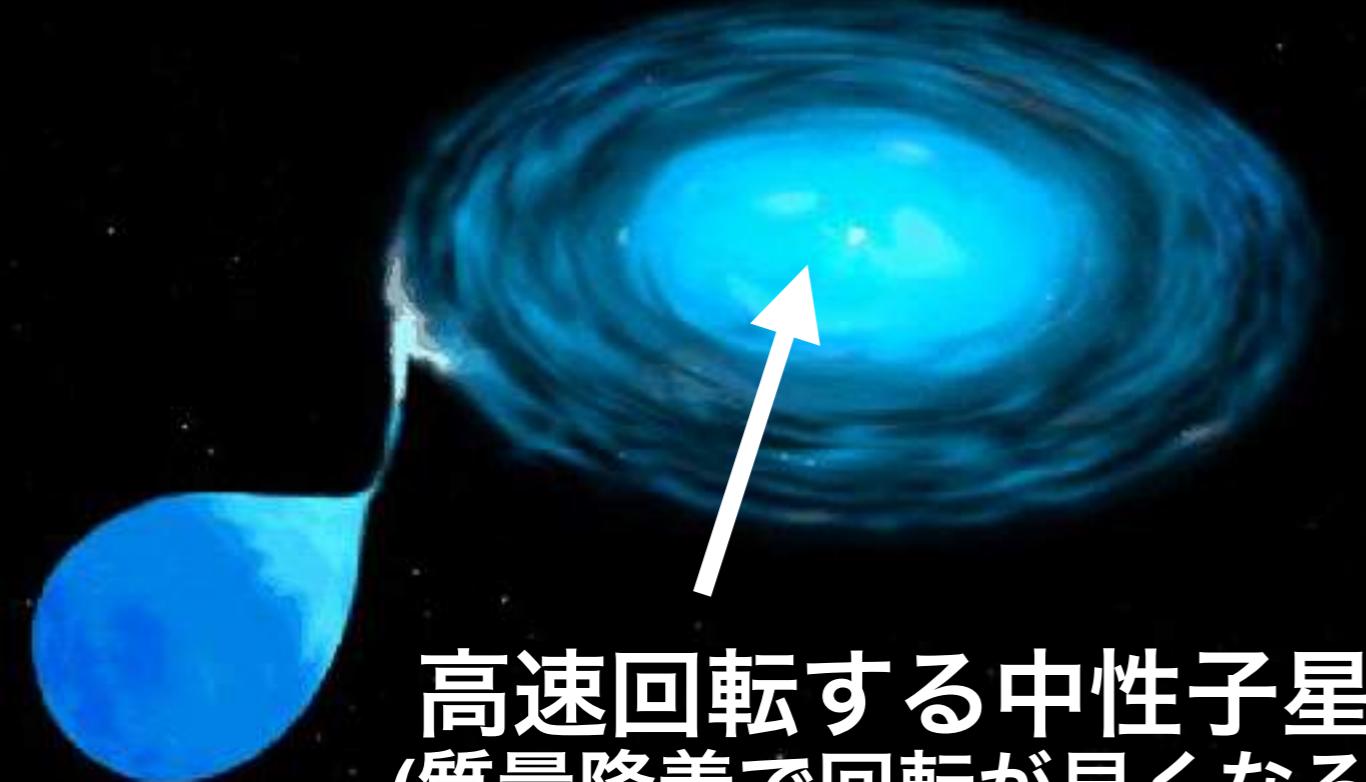


2017年6月3日、スペースX社 ファルコン9ロケットの打ち上げ

宇宙科学においても
新しい時代が来る

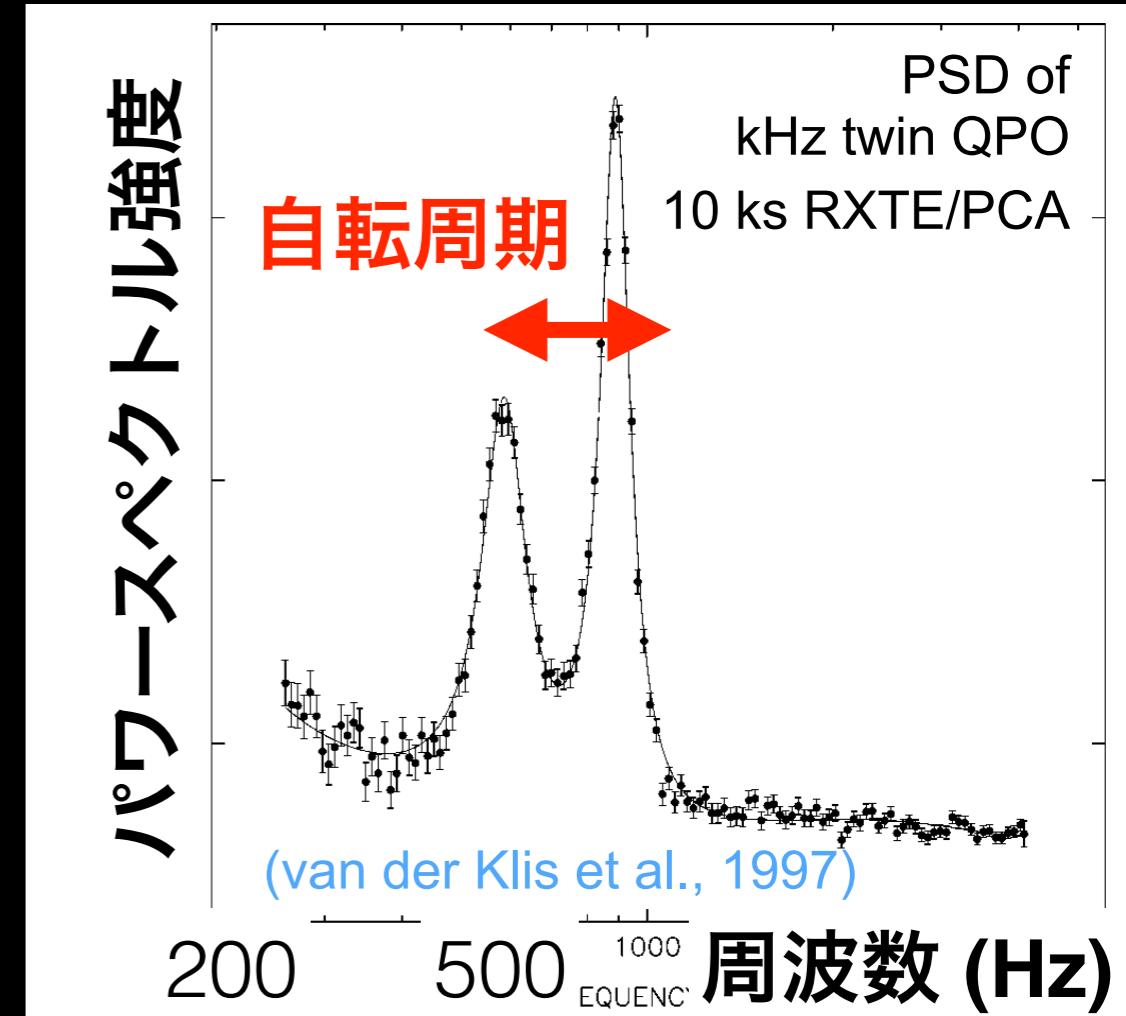
さそり座 X-1 (中性子星) の 定常重力波を狙う

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?

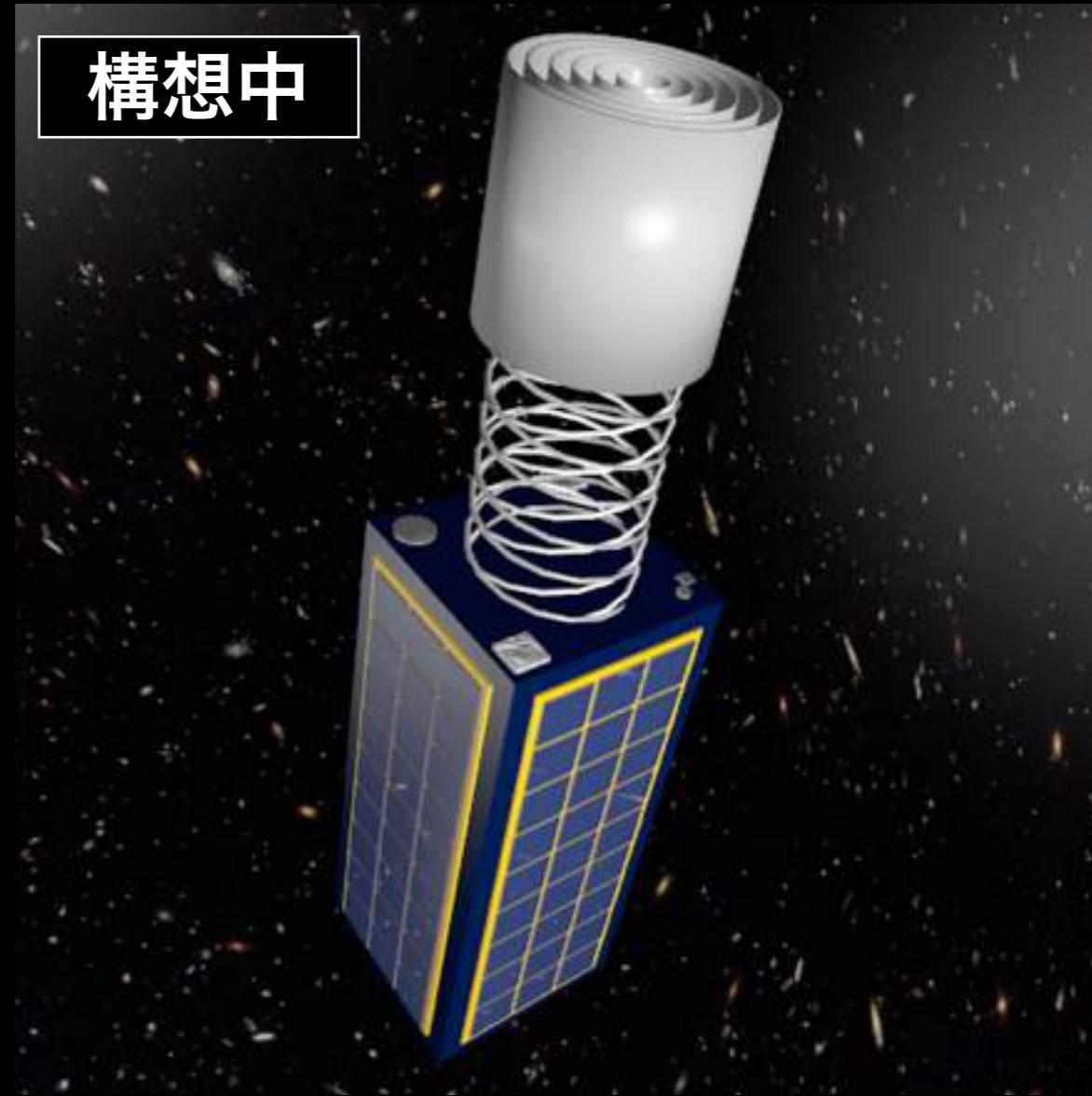


高速回転する中性子星
(質量降着で回転が早くなる)

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?
- ・周期は質量降着に応じて時間変動。重力波の探査が難しい。
- ・さそり座X-1は全天で最も明るく大型衛星で観測が困難。
- ・小型衛星で QPO モニタ観測し、重力波探査に貢献できるか?



構想中

大規模実験の時代に
少人数チームでサイエンスが出せるか？

雷雲と雷からの高エネルギーガンマ線放射

雷雲も、宇宙や深海と並ぶ人類未踏の研究対象
X線天文学の技術応用で、少人数チームで挑む

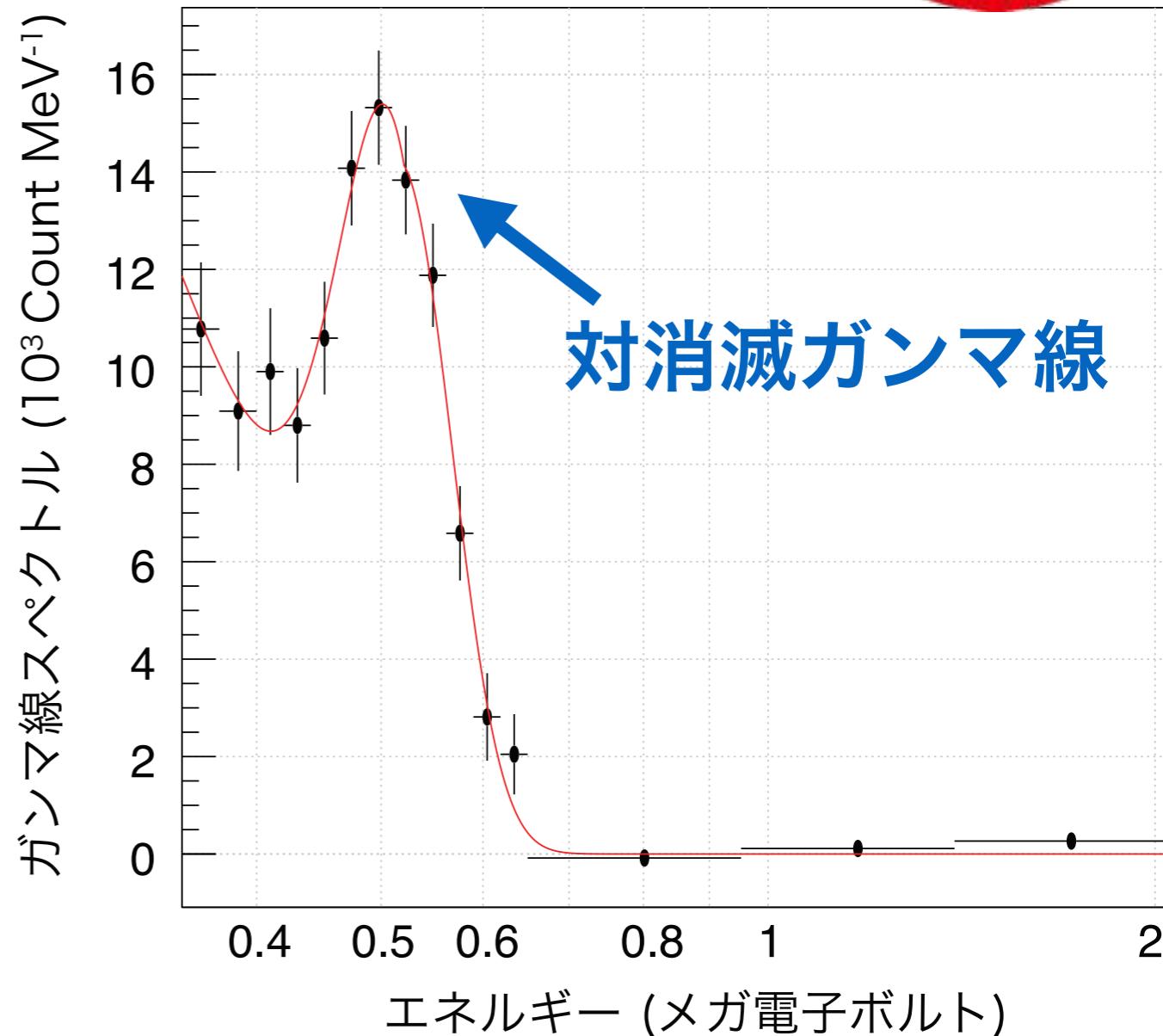
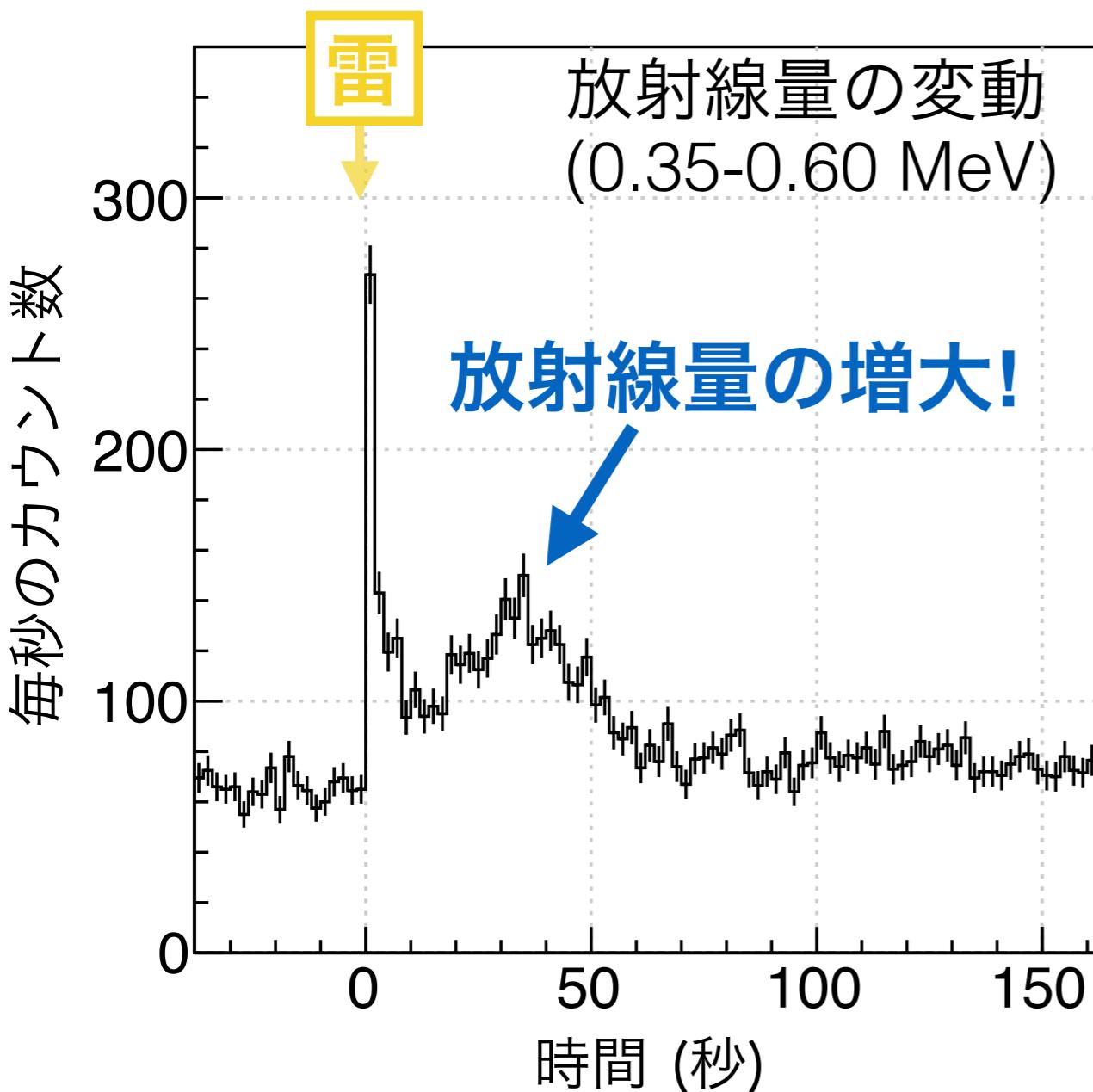
学術系クラウドファンディング
で資金調達→多地点放射線計測



Santiago Borja | 2016 National Geographic Nature Photographer of the Year
© Copyright Santiago Borja. All rights reserved.

雷から光核反応を観測的に発見！

雷は核反応で窒素・炭素の同位体を生成する



少人数でトップサイエンス (Enoto et al., Nature 2017)
2017年度物理分野のトップ10に選出 (英国物理学会)

高エネルギー大気物理学への挑戦

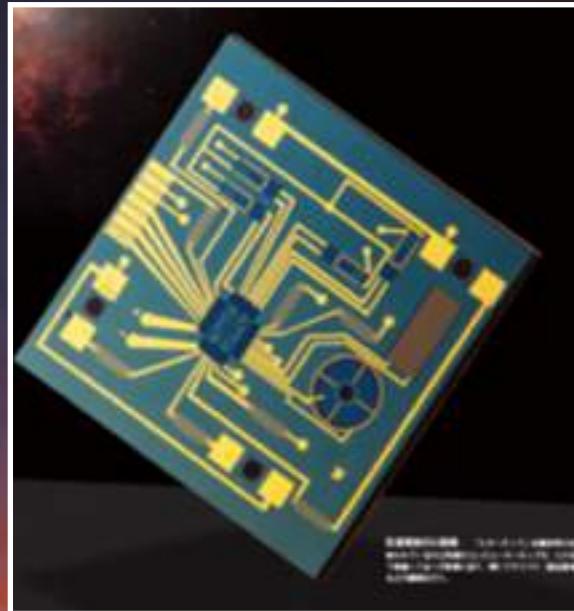
では、系外惑星の大気での高エネルギー物理は？



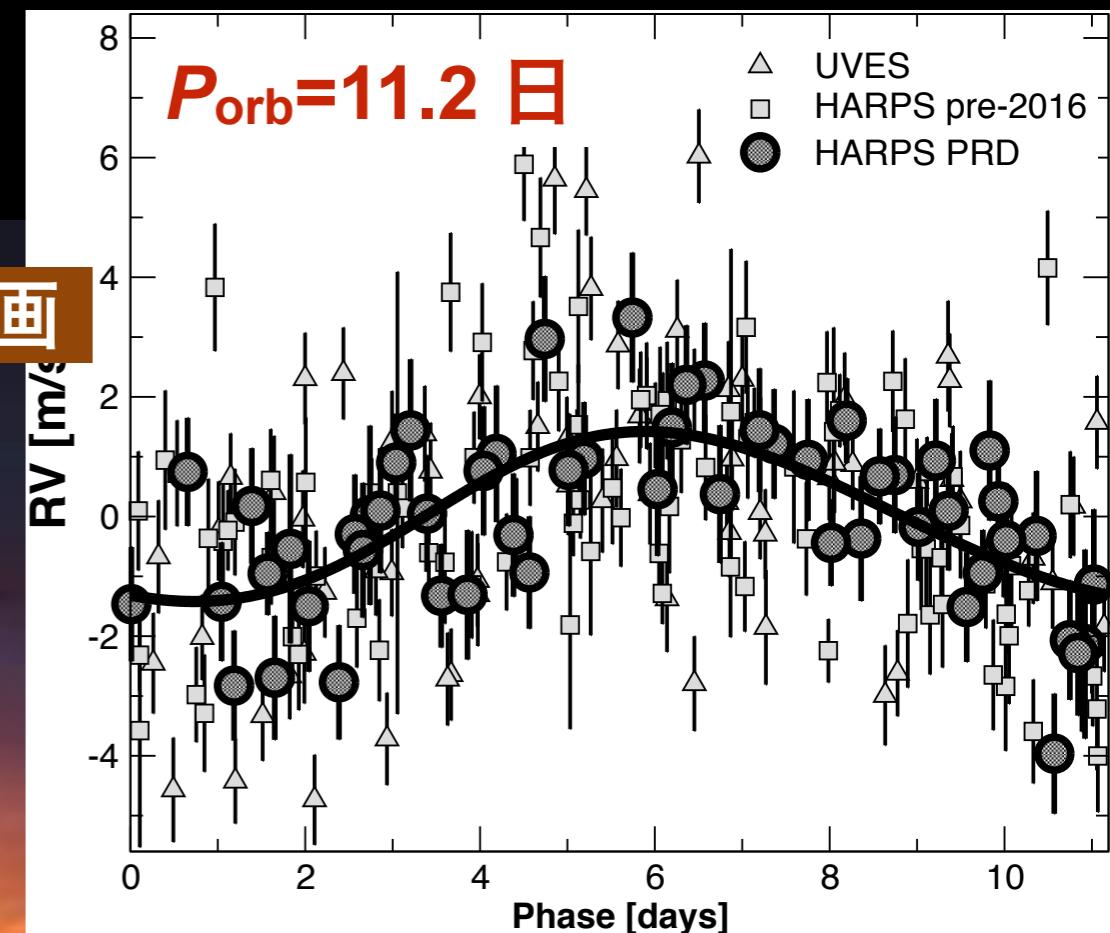
プロキシマ・ケンタウリにハビタブルな惑星!?

4.2 光年のお隣さんの星 (dM5.5e)

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



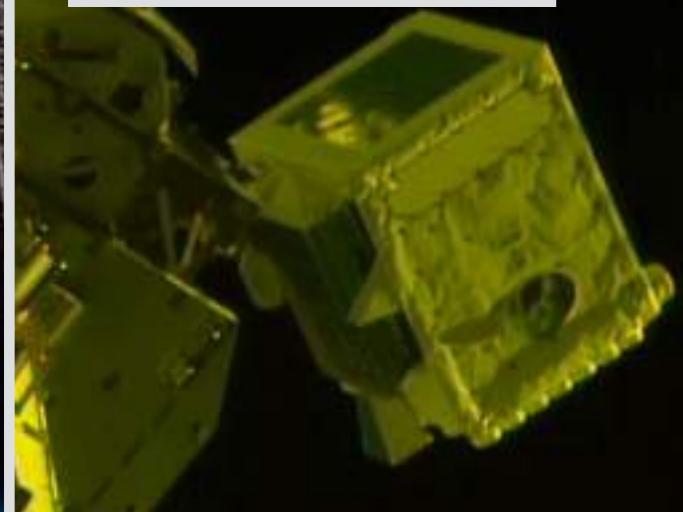
←野心的スタートショット計画



- X線光度は太陽と同程度で、惑星への距離0.05AU。影響は？
- 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: 可視光の変動と反相関との指摘？
- NICER で磁気活動の長期モニタリング観測を開始した！

MAXI-NICER 連携 OHMAN 計画

NICER



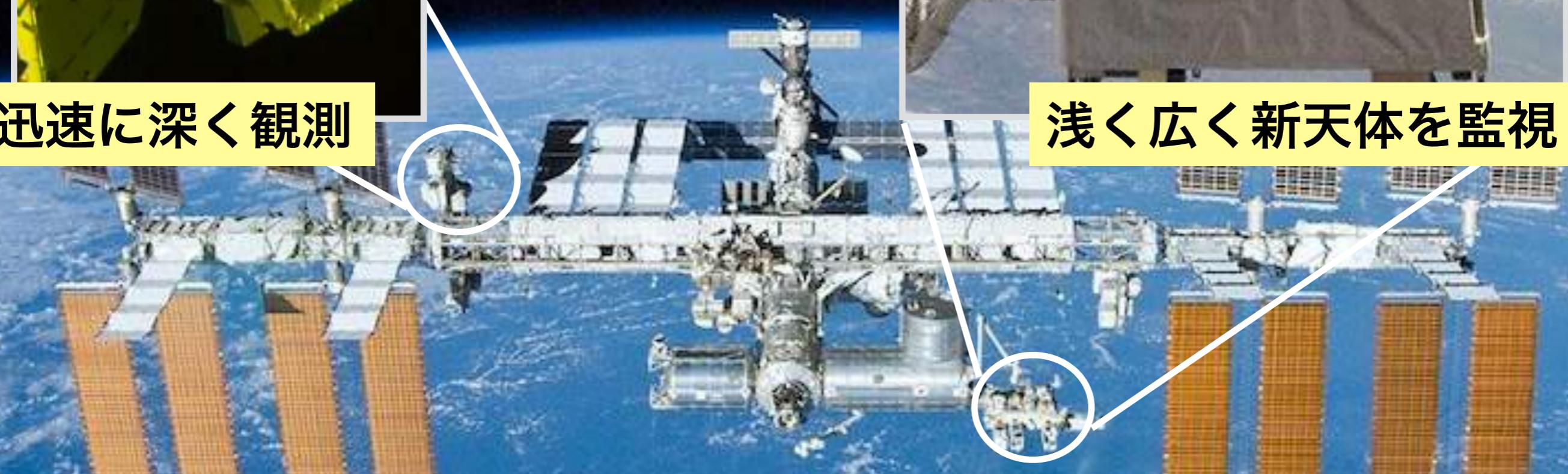
突発天体
アラート

全天X線観測装置 MAXI



迅速に深く観測

浅く広く新天体を監視



岩切、三原ら(理研)と協力し、MAXI-NICER 連携を推進！
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 (OMAN) 計画

まとめ

- ・中性子星の観測には、普遍的な物理の研究と多様性の両方の醍醐味がある。物理の基本的な未解決問題へ挑める。
- ・日本のX線衛星も駆使して、マグネターの硬X線放射という新しい窓を開拓し、スペクトル進化を統一的に研究した。
- ・中性子星の研究を通じ、尊敬できる研究者に出会えたことを大変幸せに思います。

