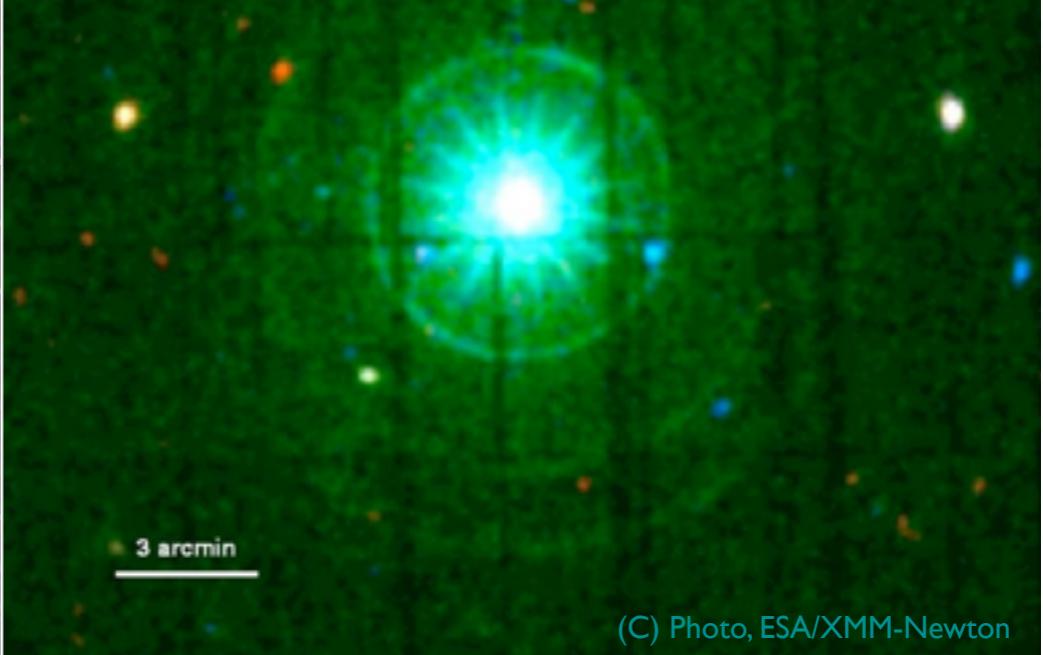


宇宙最強の磁石星“マグネター”から 中性子星の統一理解へ

Enoto Teruaki
榎戸 輝揚 (X線天文学)
京都大学
白眉センター / 宇宙物理学教室

目には見えないX線で 輝く中性子星の研究 (マグネター 1E 1547.0-5408)



X線

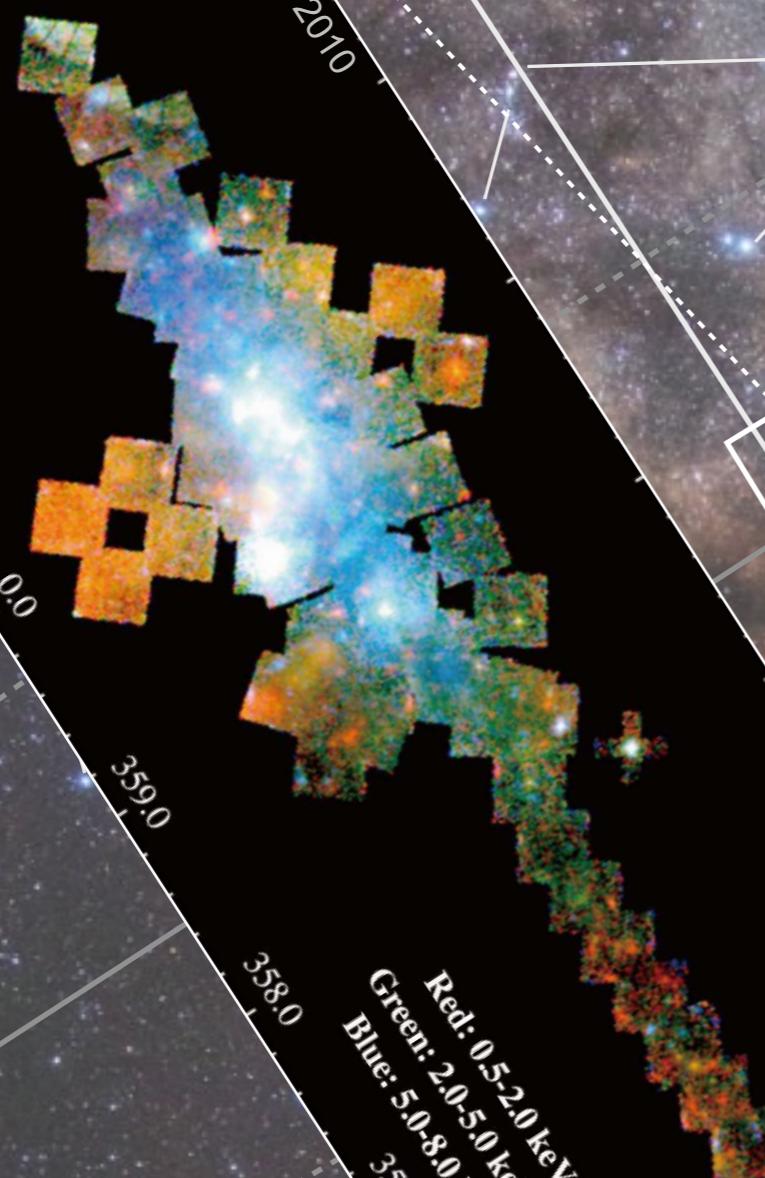
天の川銀河の中心

Red: 0.5-2.0 keV
Green: 2.0-5.0 keV
Blue: 5.0-8.0 keV

359.0

358.0

357.0



R. P. ファインマン 「ファインマン物理学教程」より

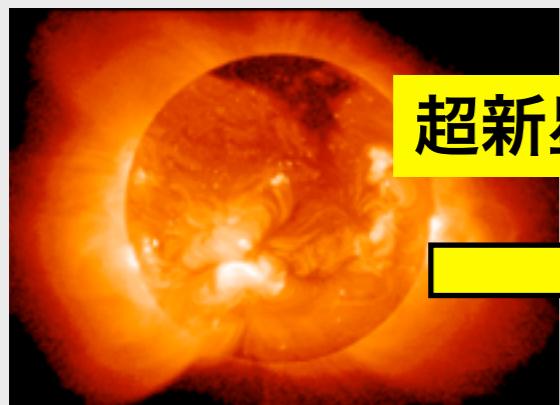
もっとも印象的な発見は、
星をたえず燃やしつづけているエネルギーの源泉である。
星を輝かせるのには核反応がおこっているに違いない、
と気がついた発見者は、夜、彼女と外に出ていた。

「なんて星がきれいなんでしょう」と彼女がささやく。
彼は言った、
「そうだね。星がなぜ光るか、その訳をしっているのは、いま世界で僕だけなんだ」

... 一説によれば、H. A. Bethe (ベーテ) の逸話

星がどのように輝くかは大きな謎

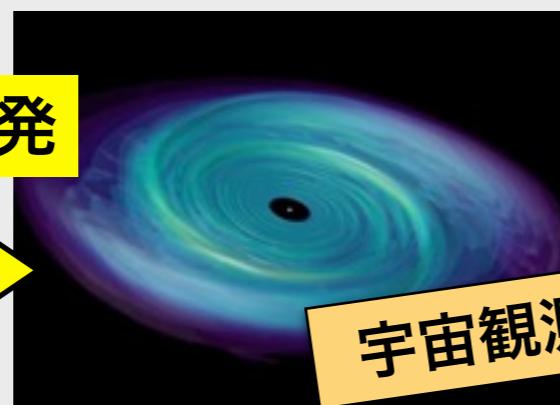
恒星(大質量星)



H・A・ベーテ (1938年)

核融合エネルギー

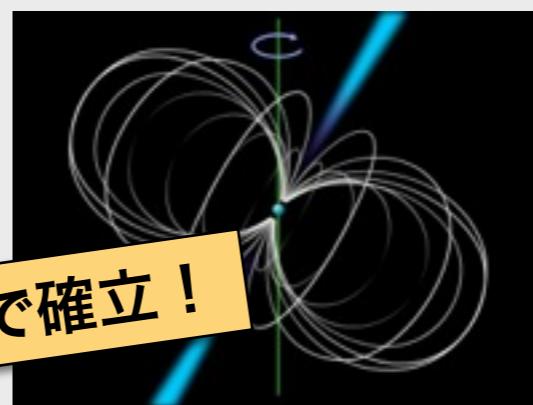
ブラックホール



小田稔(1971年)
日本のX線天文学の発展

重力エネルギー

中性子星



電波パルサーの発見
ノーベル物理学賞(1974年)

回転エネルギー

マグネター?



軟ガムマ線リピーター
特異X線パルサー

磁場エネルギー?



X線で見た銀河(天の川)

トピック

§1. 中性子星の基本物理量

§2. 中性子星の多様性

§3. 強磁場の体 マグネター

§4. 将来観測

星の進化と物質の循環

太陽のような軽い星

10億年

赤色巨星

星間ガス
星形成領域

重い星 ($>8-10 M_{\text{Sun}}$)

原始星

赤色
超巨星

100万年

中性子星

超新星爆発

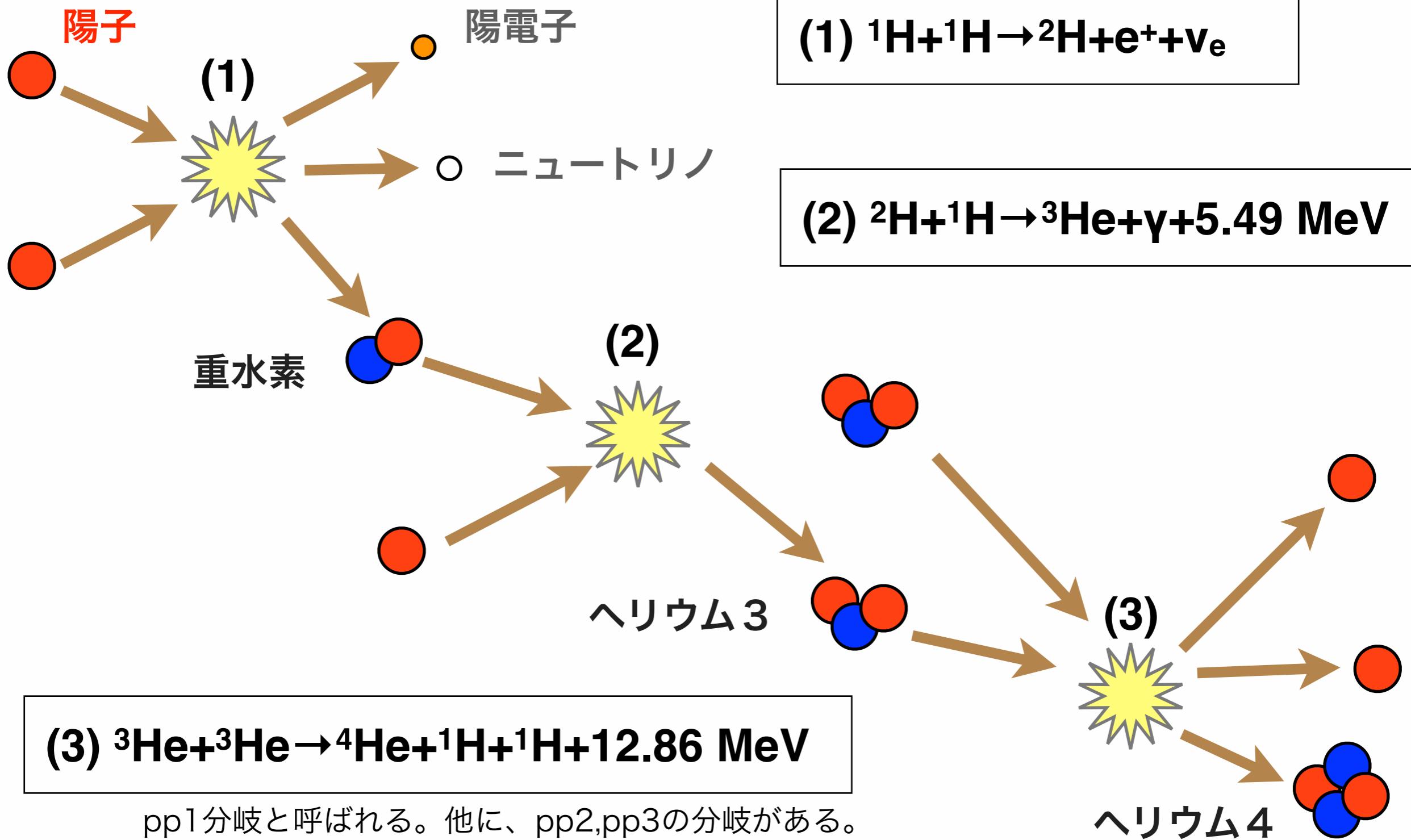
惑星状星雲

白色矮星

ブラックホール

核融合反応：pp チェーン

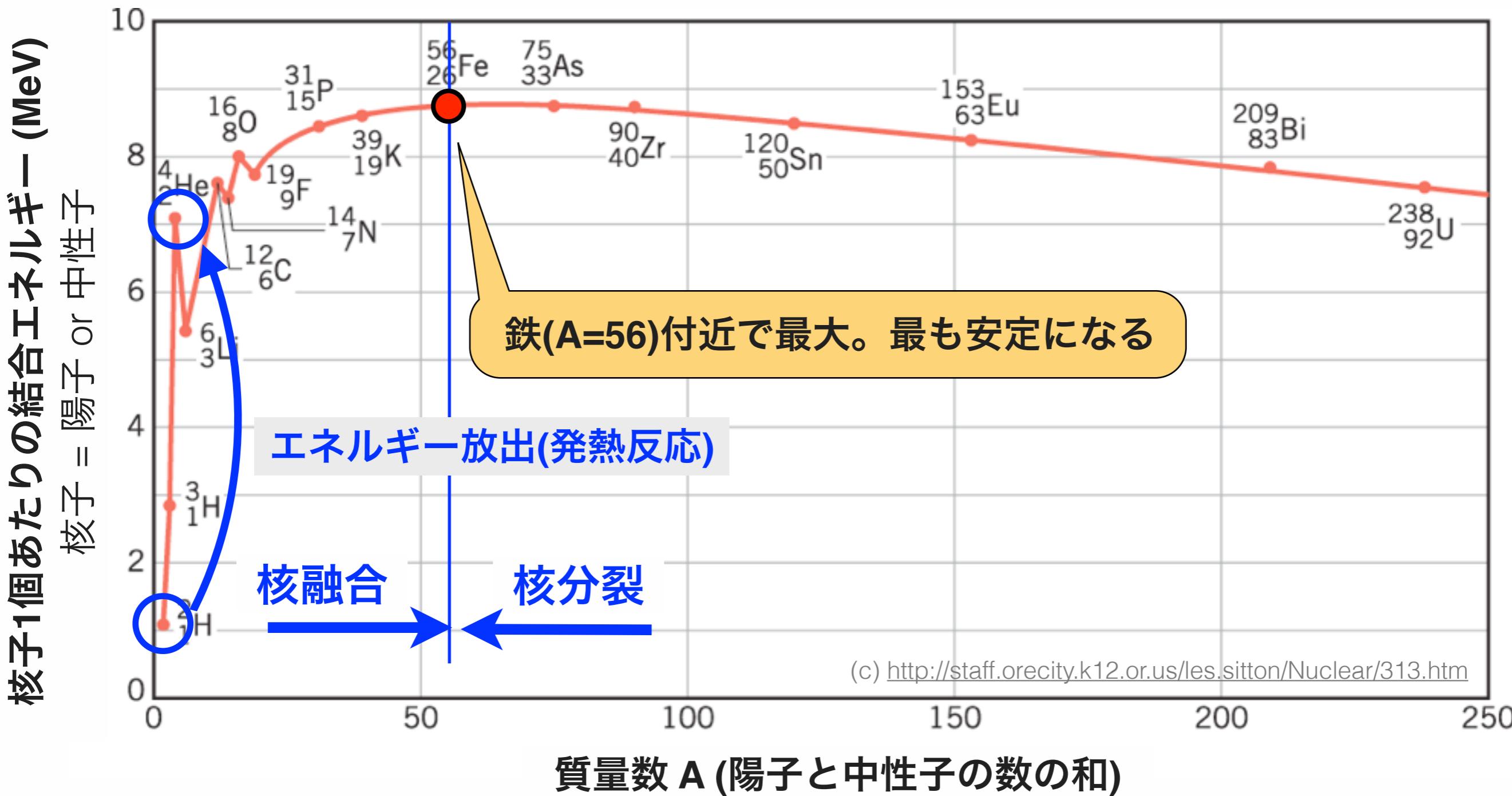
太陽程度かそれ以下の軽い星



4つの水素からヘリウムを作りエネルギーを放出

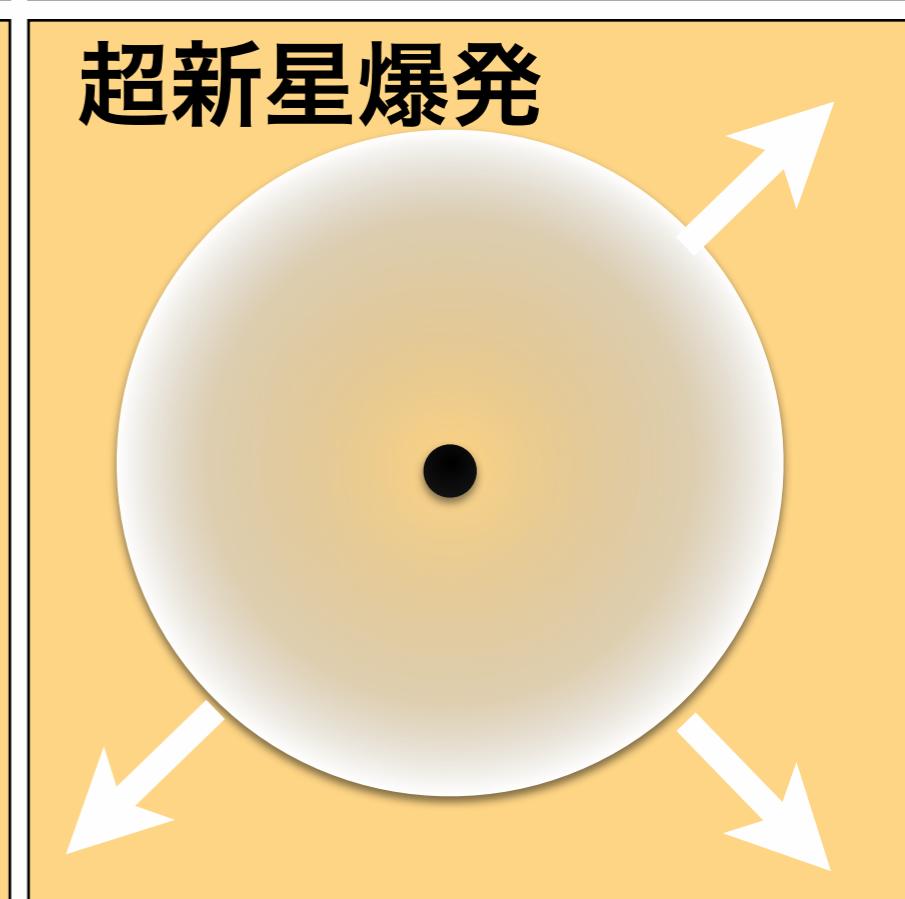
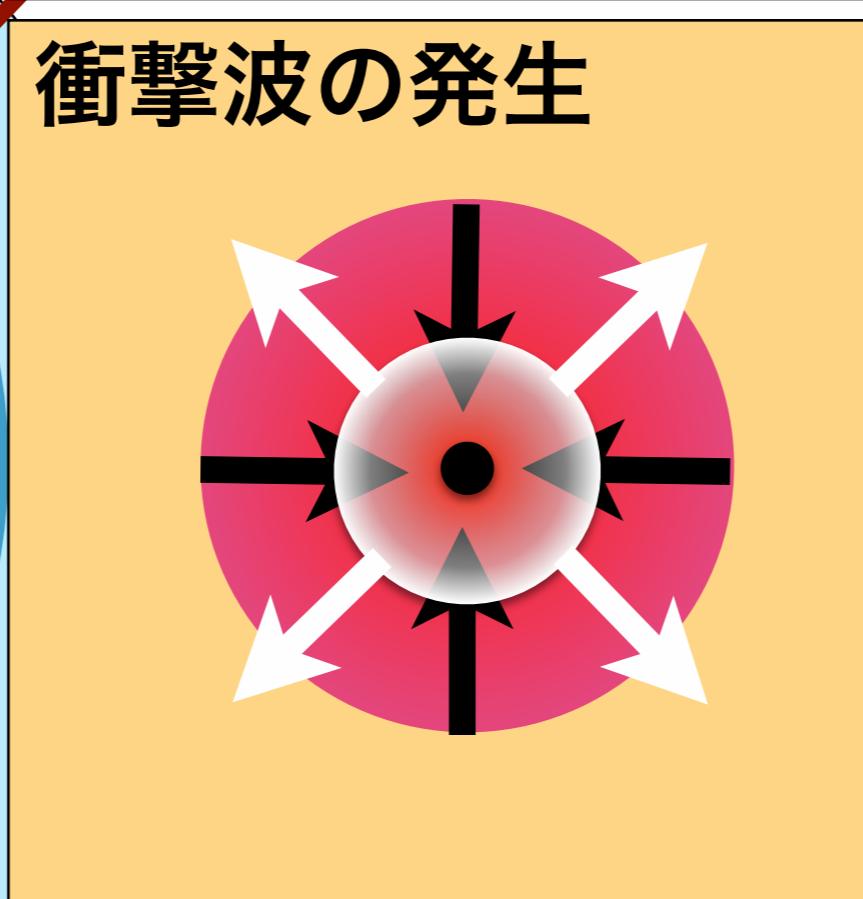
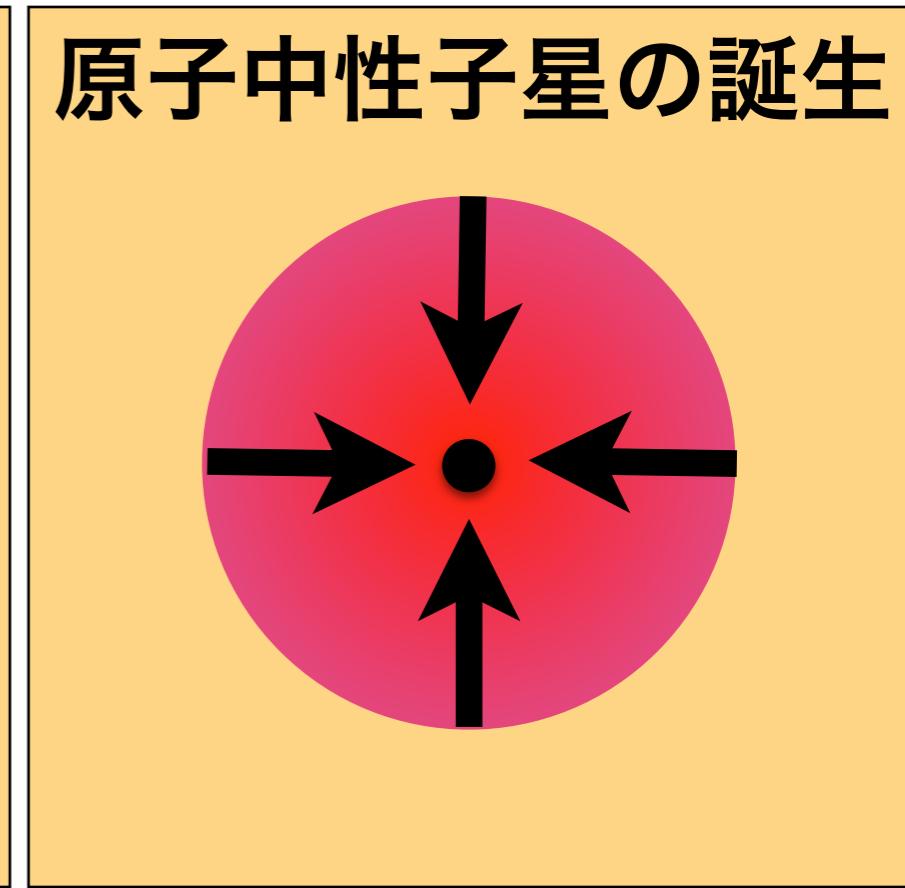
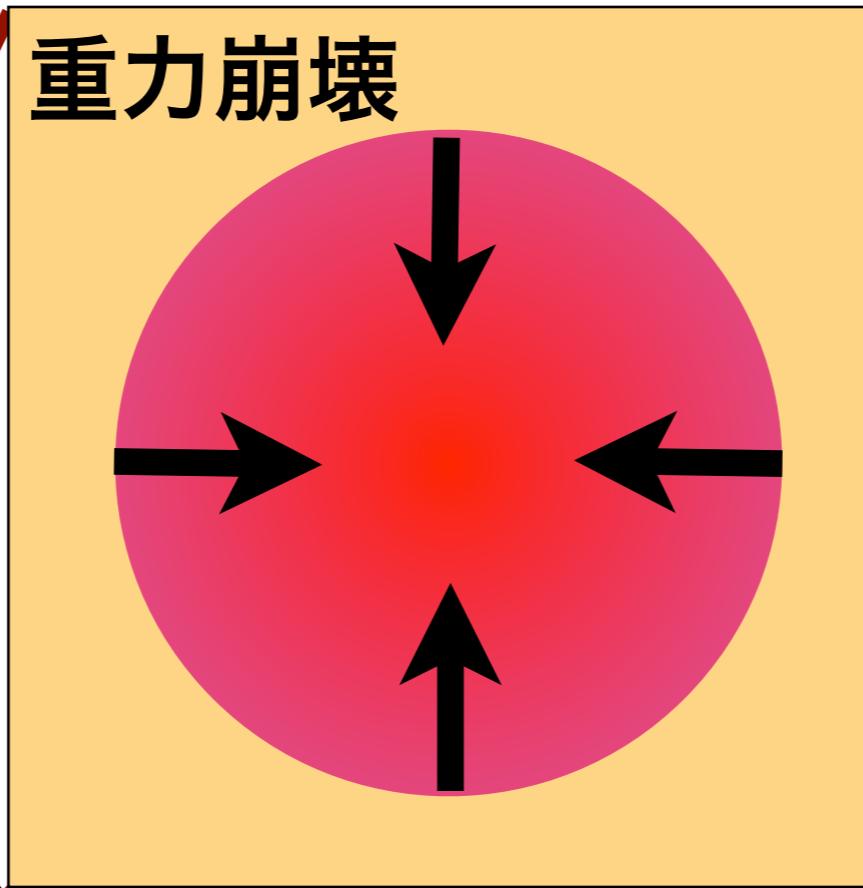
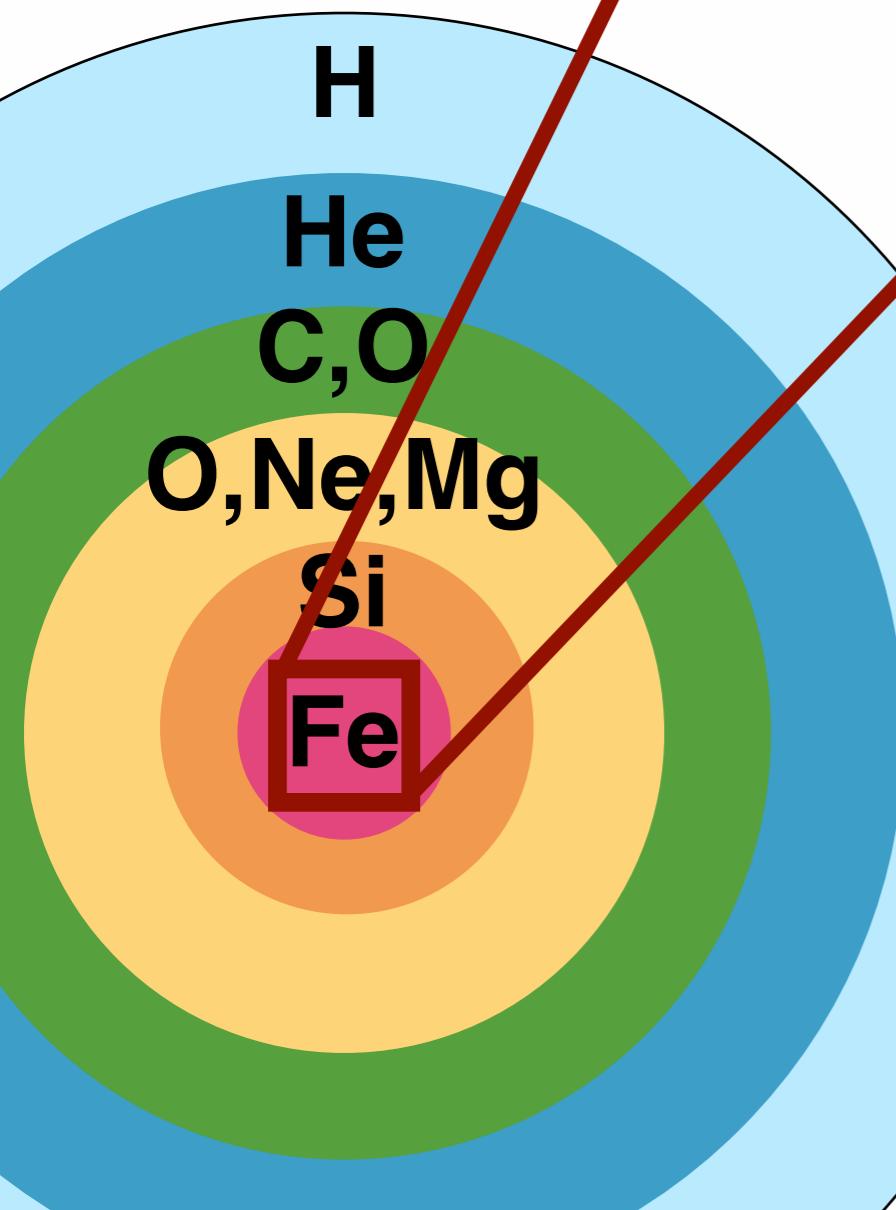
星の中での元素合成はどこまで続くか？

p-p チェーン(軽い星)や CNO サイクル(重い星)などで重い元素が合成されていく

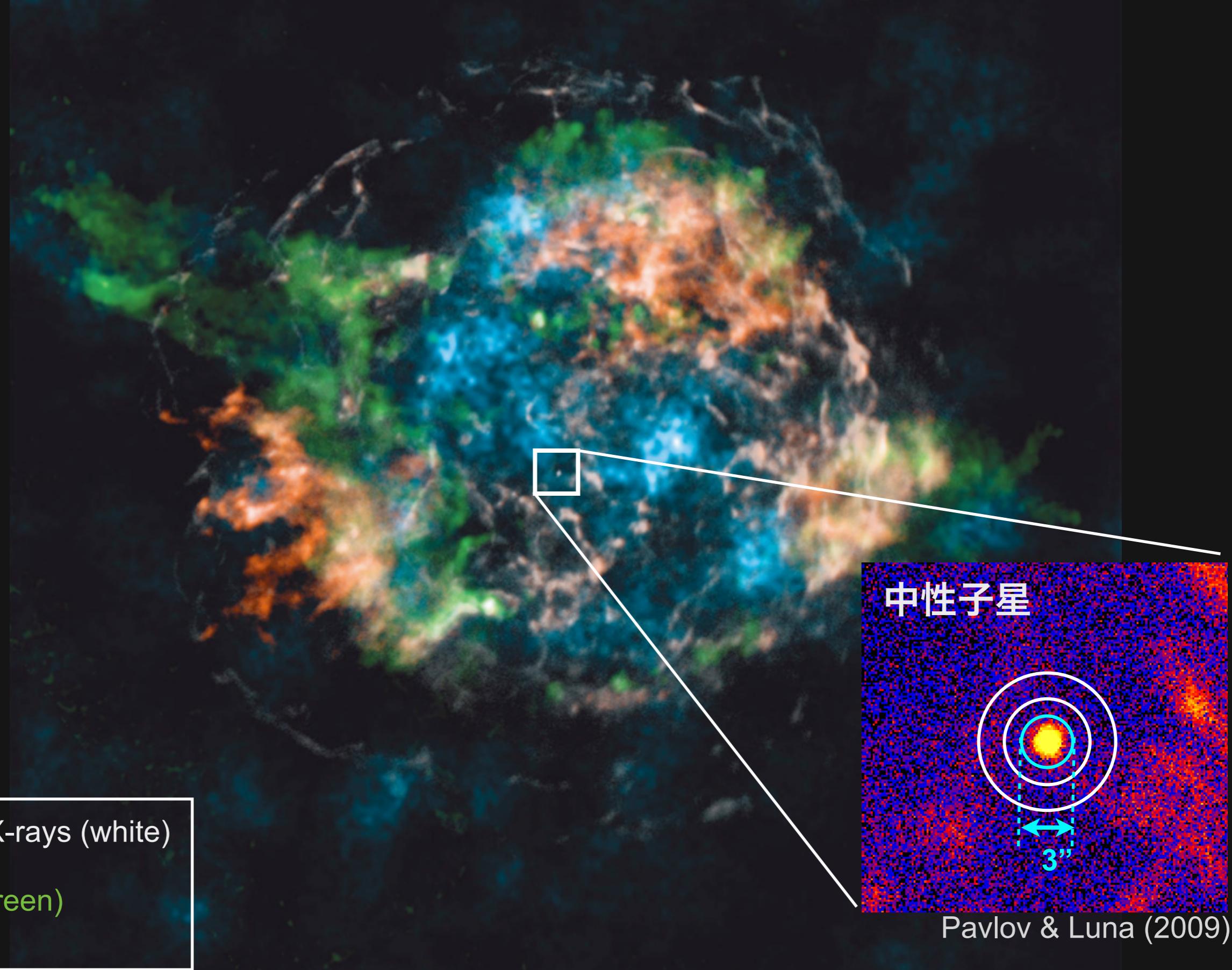


最も安定な鉄まで核融合が進みながら星を支える。
鉄の核反応はエネルギーを吸収し(吸熱)で星を支えられない。

大質量星の終末: 超新星爆発



超新星残骸 カシオペア座A



中性子星の内部(巨大な原子核)

半径 10-12 km

neutrino drip
 $4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$

原子核密度
 $2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

原子核密度の2倍

10^{15} g/cm^3

中性子星の大気

(とても薄い)
水素, ヘリウム, 炭素 (H, He, C)

アウタークラスト

原子核(鉄ほか)+電子

インナークラスト

中性子過剰核+電子+(超流動)中性子

アウターコア

(超流動)中性子+電子+(超伝導)陽子

インナーコア

なんかやばいことになっているらしい
ハイペロン?

内部は地上実験では到達できない高密度
原子核物理の盛んな研究対象

中性子の縮退圧で支える星

主系列星

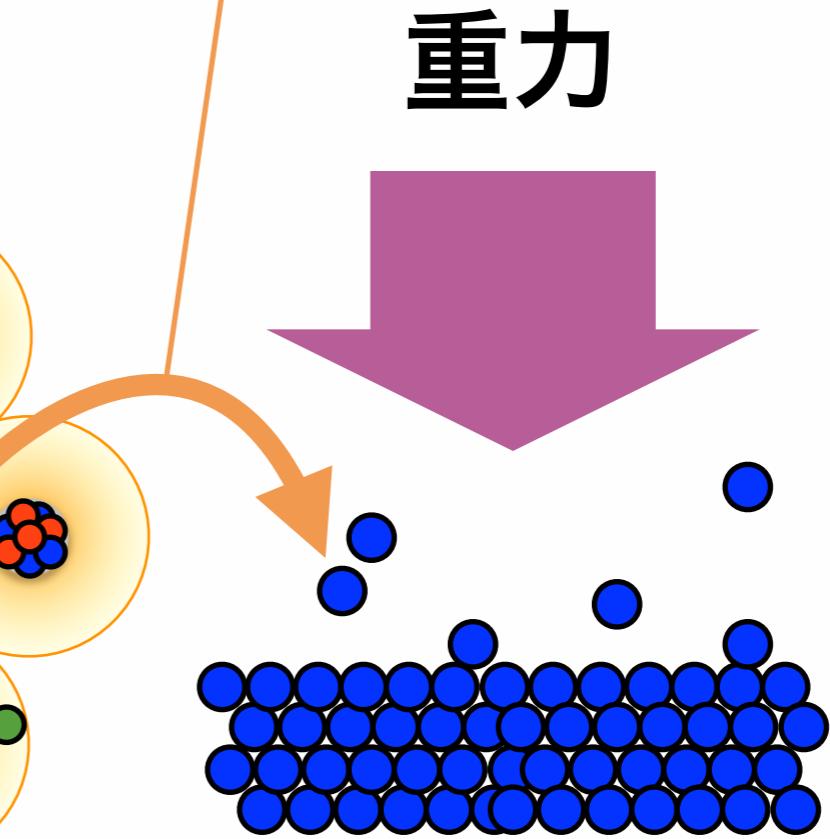
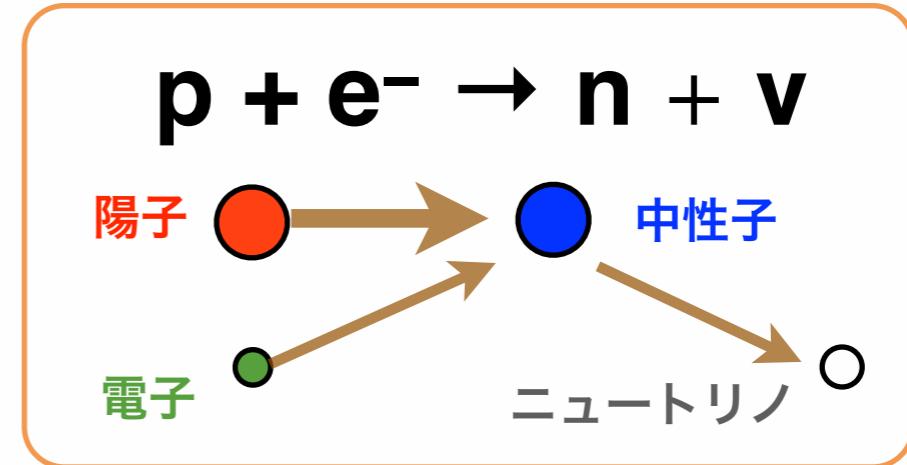
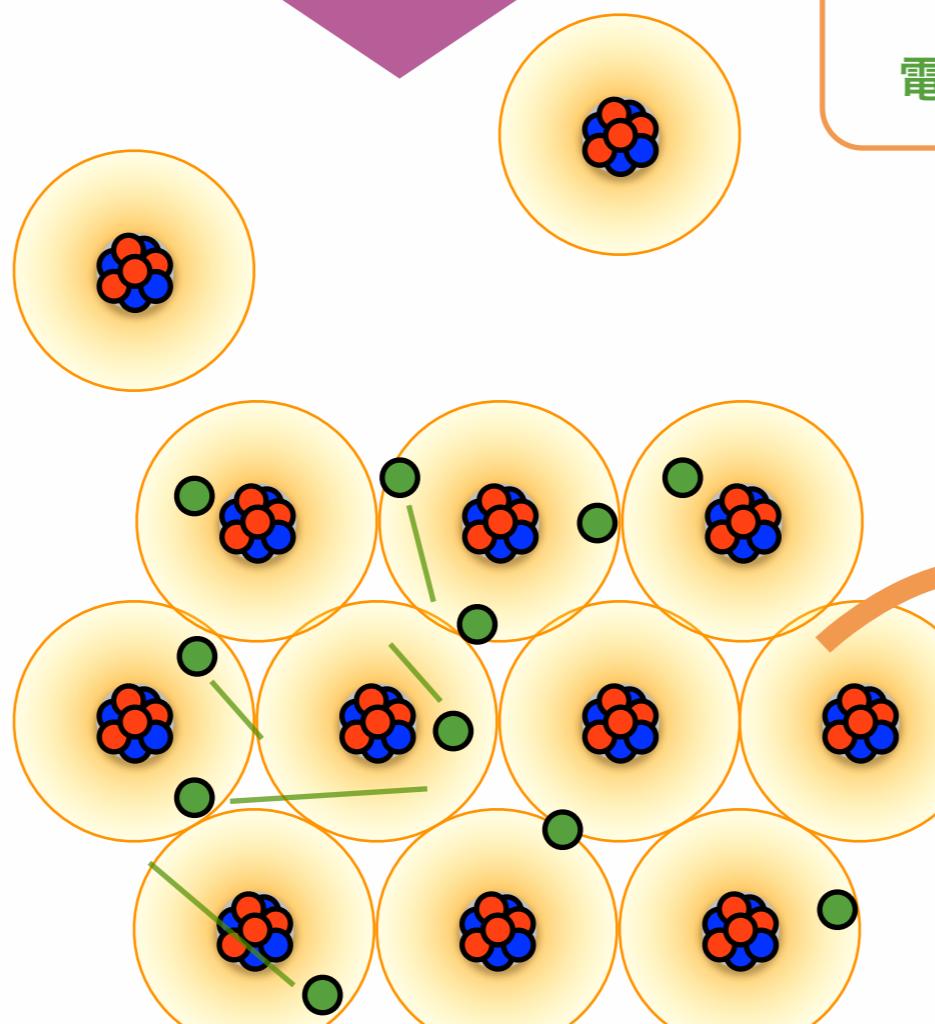
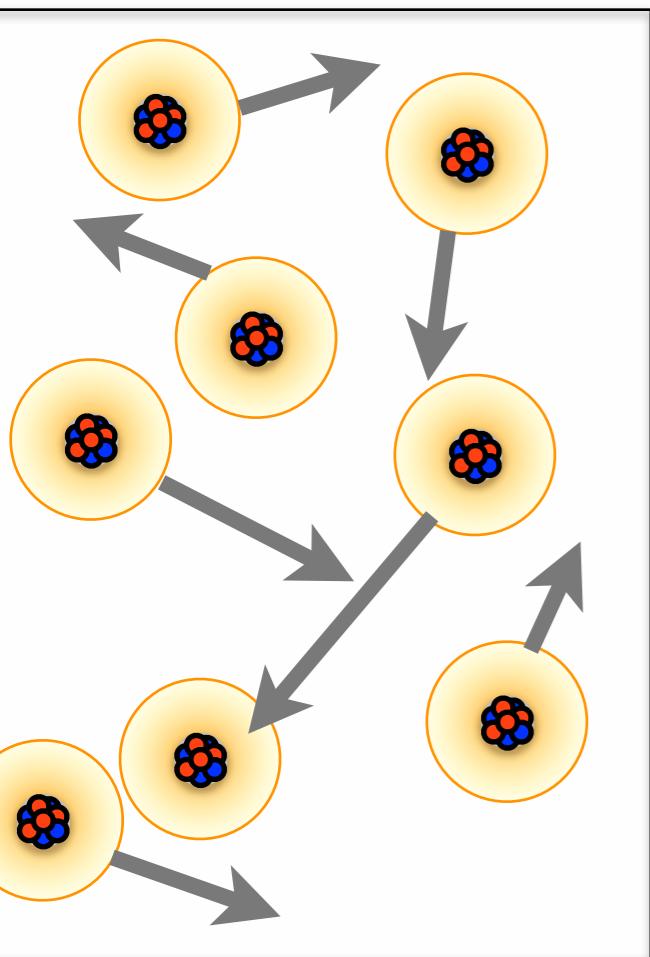
白色矮星

中性子星

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

ミクロとマクロを結ぶ

封筒の裏

重力

$$P_G \sim \frac{GM\rho}{R} \sim GM^{\frac{2}{3}}\rho^{\frac{4}{3}}$$

縮退圧(相対論的)

$$P_d \sim \hbar c \left(\frac{\rho}{m_p} \right)^{\frac{4}{3}}$$

質量

半径

白色矮星

中性子星

→ チャンドラセカール質量

白色矮星の最大質量
典型的な中性子の質量

$$Mc = m_p \alpha_G^{-\frac{3}{2}} = 1.4 M_\odot$$

.....マクロな量..... ミクロな量

重力微細構造定数
 $\alpha_G = Gm_p^2/\hbar c = 5.9 \times 10^{-39}$

白色矮星

$$M_{WD} R_{WD}^3 = \alpha_G^{-3} m_e \lambda_e^3$$

$$R_{WD} \sim R_\odot / 100 \sim 10^4 \text{ km}$$

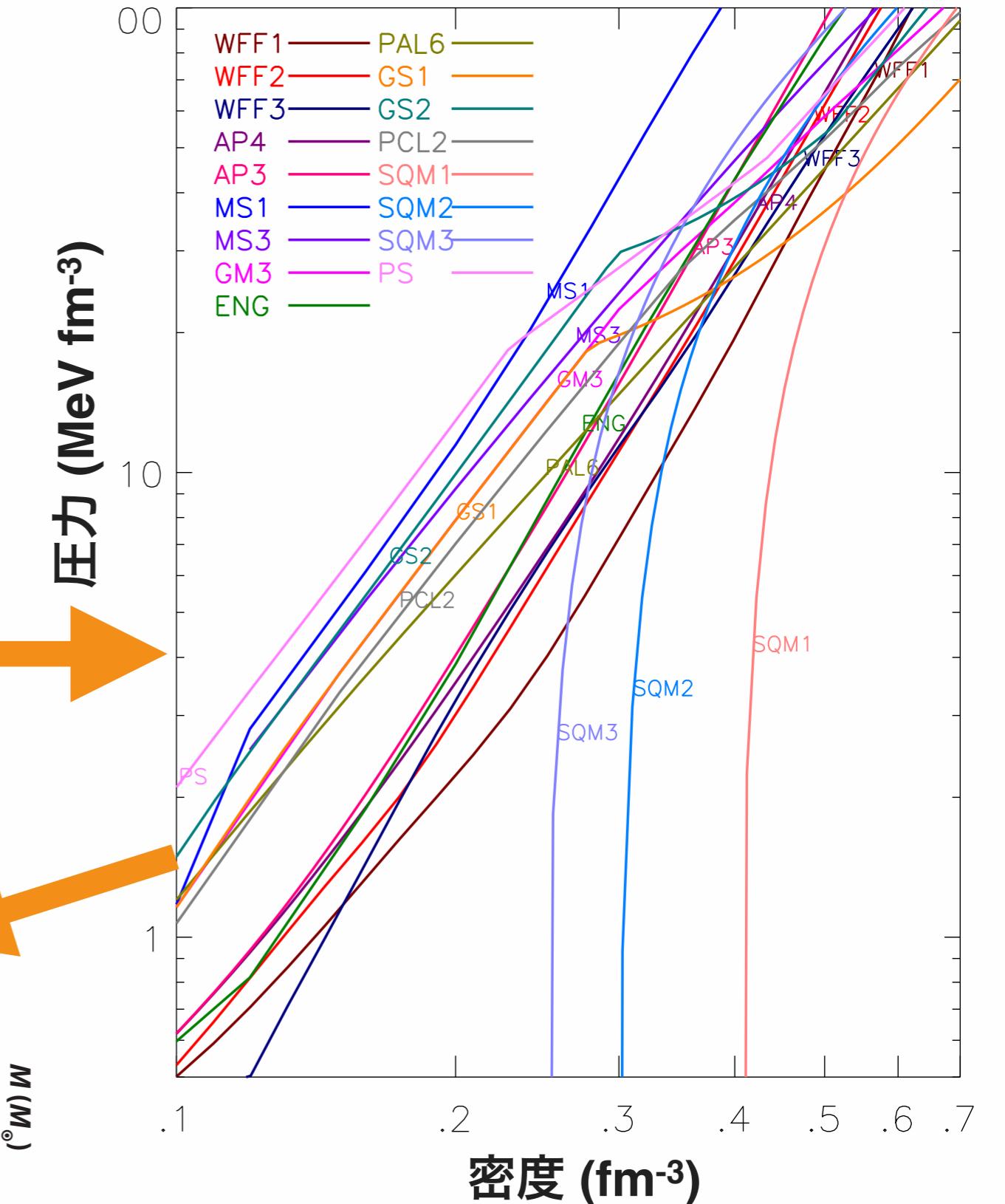
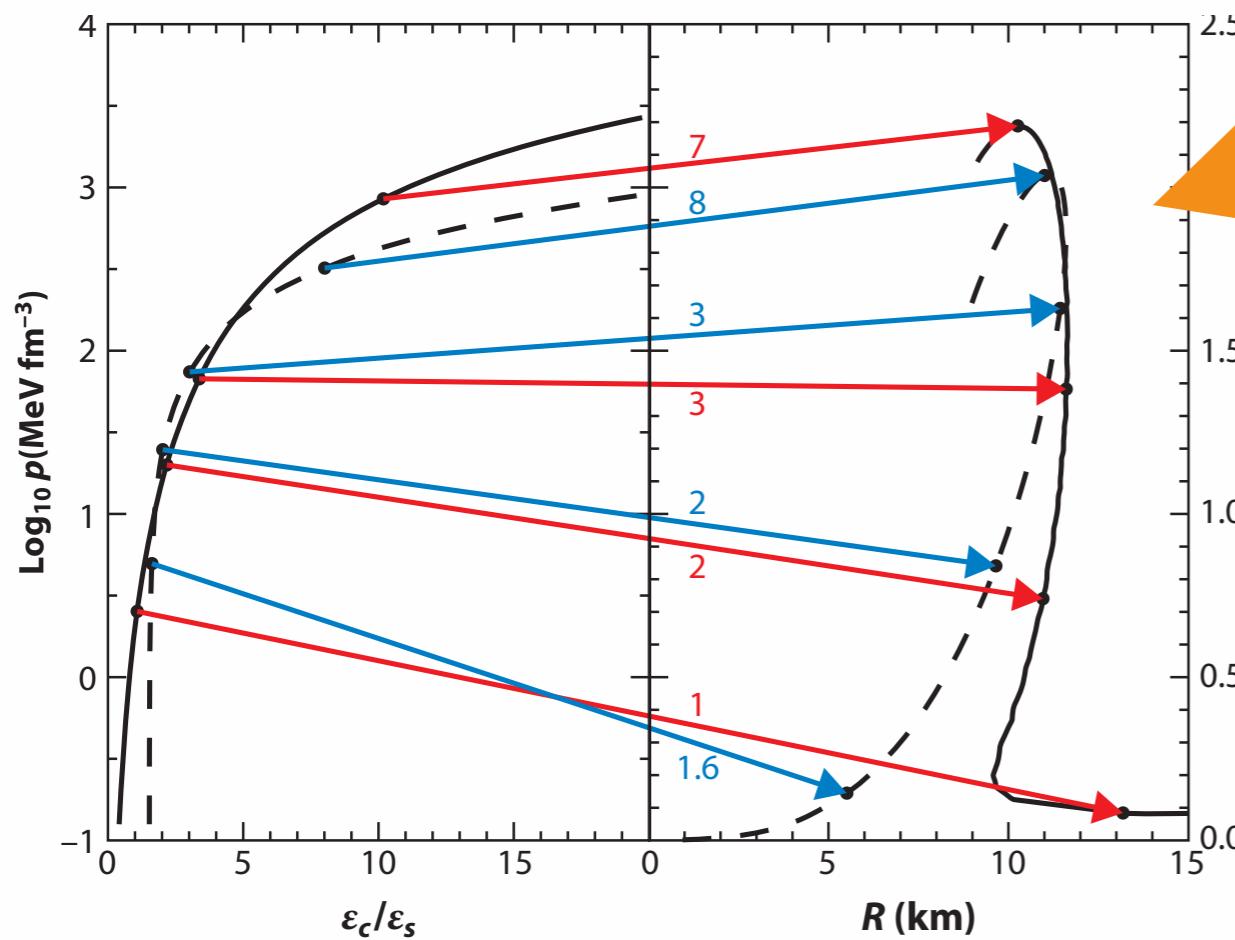
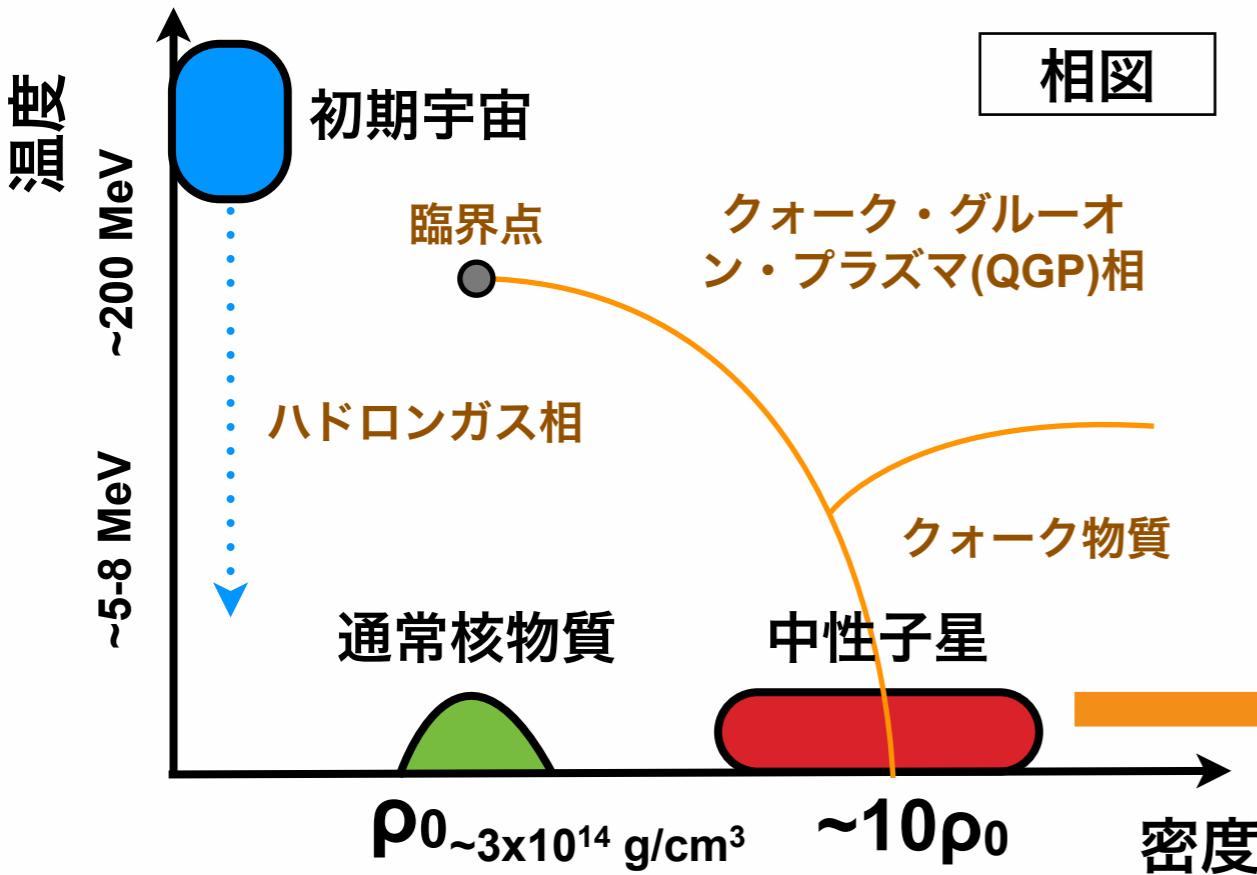
中性子星

$$M_{NS} R_{NS}^3 = \alpha_G^{-3} m_p \lambda_p^3$$

$$R_{NS} \sim R_{WD} / 1000 \sim 10 \text{ km}$$

中性子星の質量と半径の推定 → 核力, 一般相対論の効果

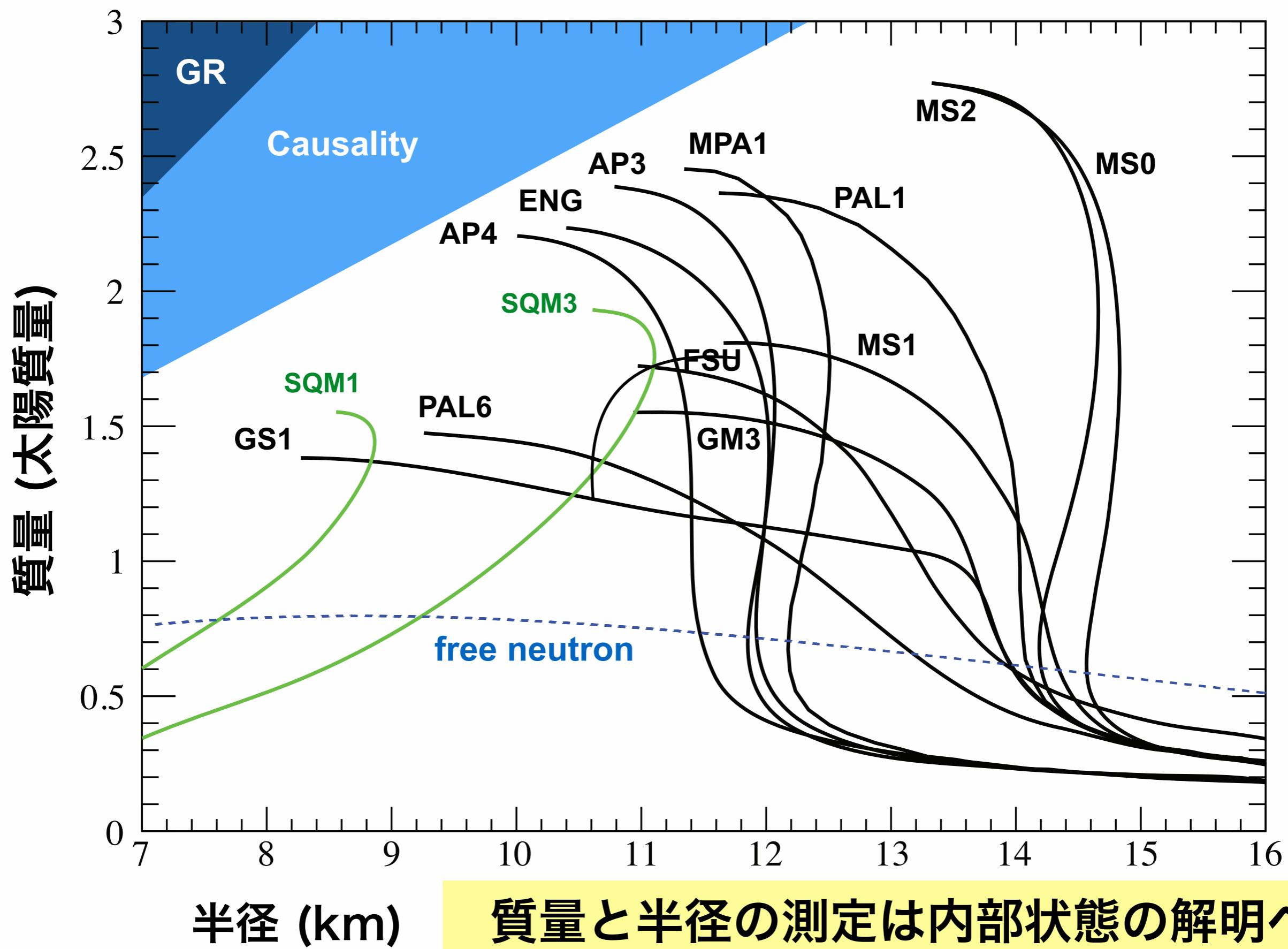
高密度の状態方程式



様々な状態方程式の理論が提案
(P, ε) は (M, R) と対応

中性子星の質量と半径

Lattimer, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. (2012)
Free neutron case by K. Hotokezaka
Oppenheimer & Volkov, Phys. Rev. (1939)

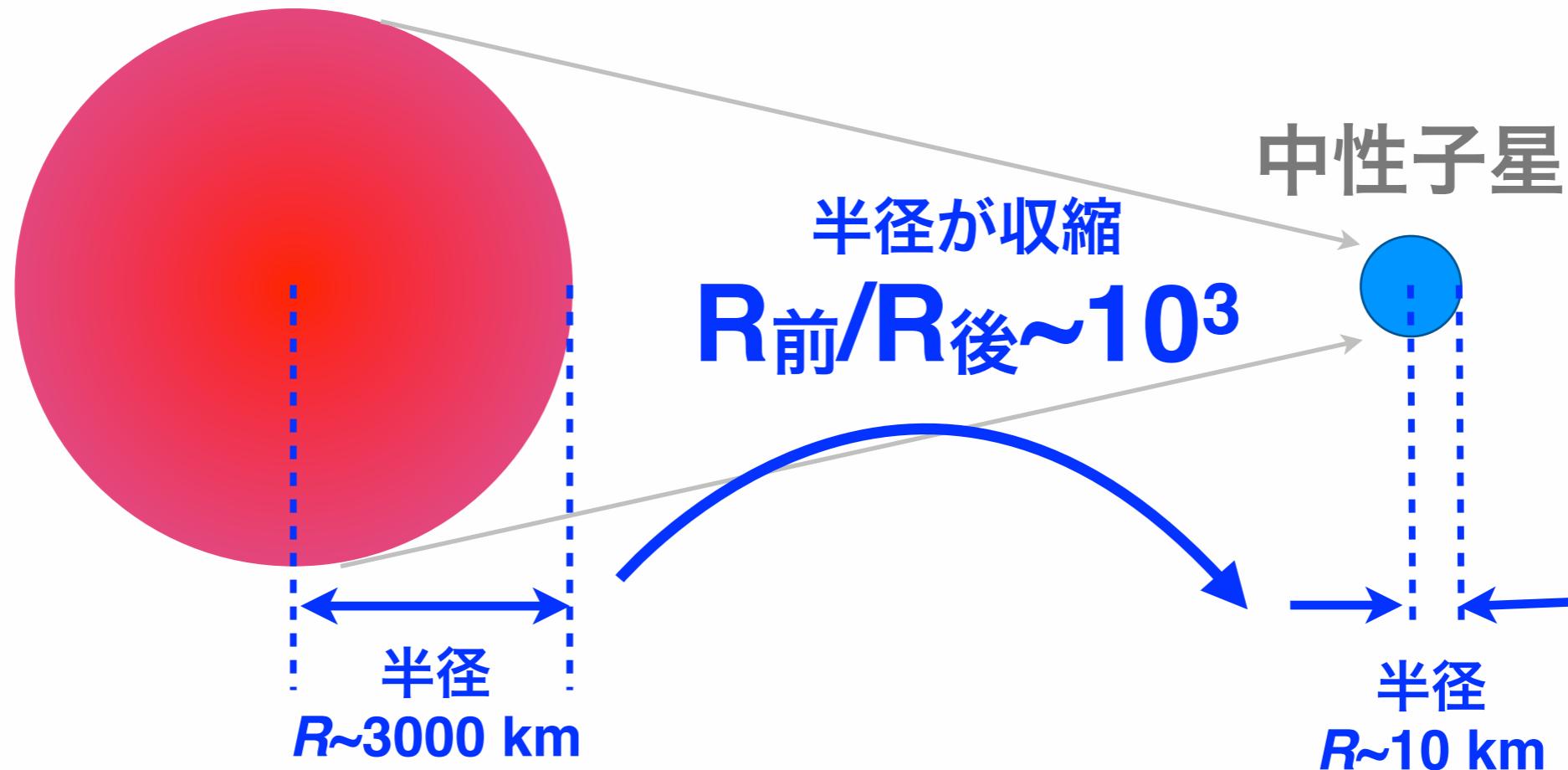


中性子星はどんな天体か？

封筒の裏
計算

大質量星の鉄コア

(おおらかな気持ちで見てネ)



角運動量の保存 $M R^2 \Omega = \text{一定} \rightarrow \Omega \propto (R_{\text{前}}/R_{\text{後}})^2$

(質量) (半径) (回転各周波数)

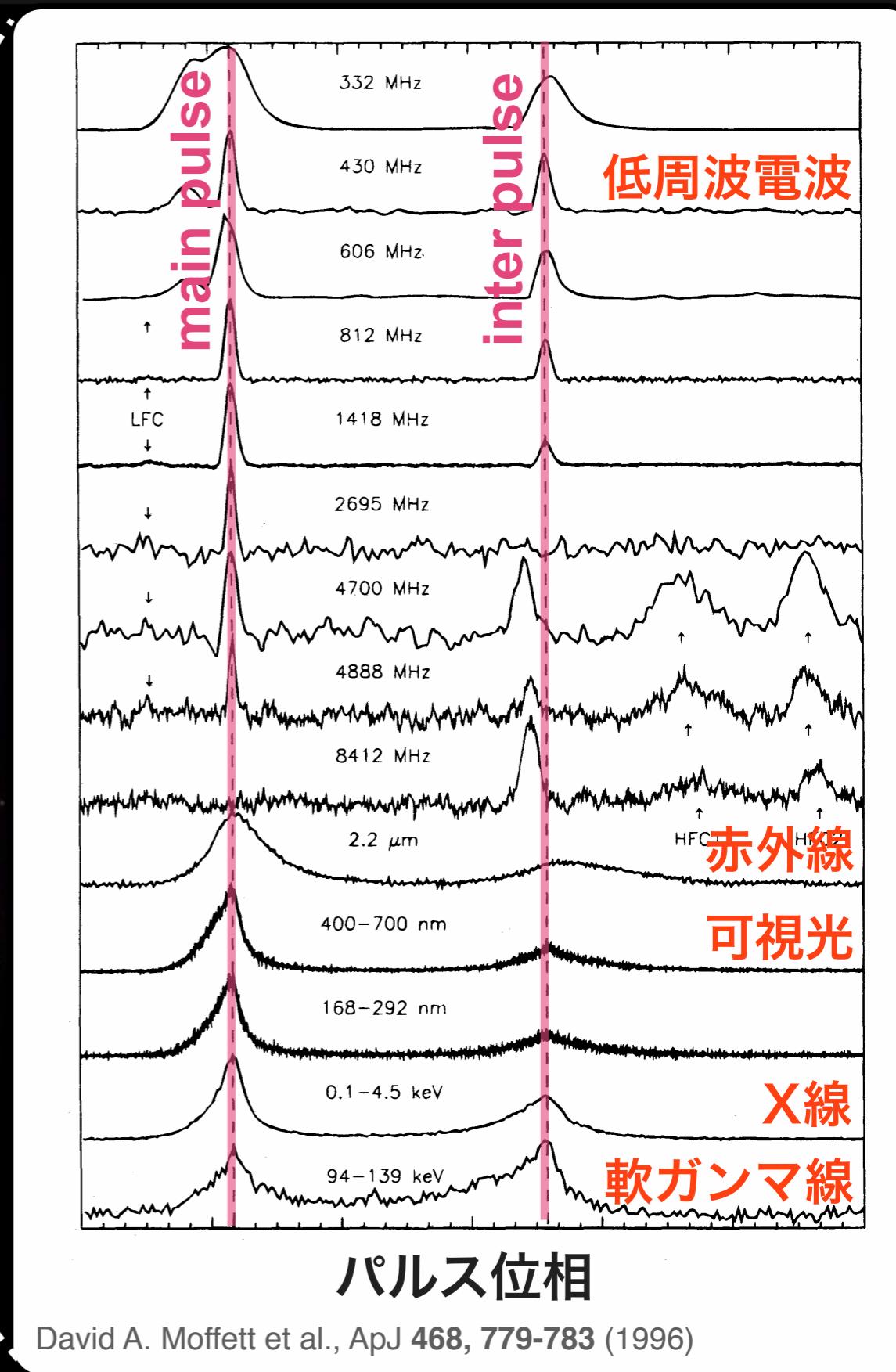
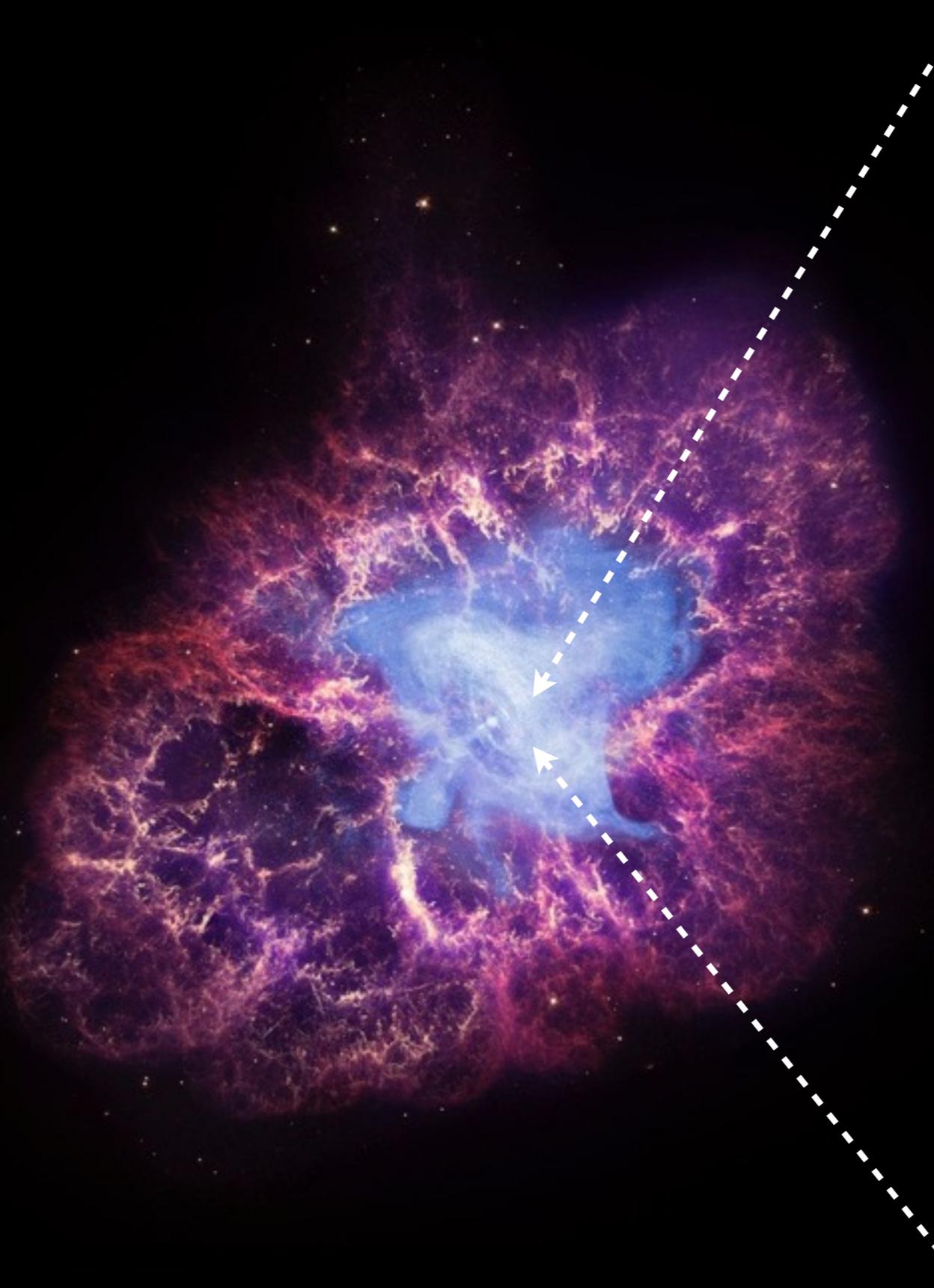
磁束の保存 $R^2 B = \text{一定} \rightarrow B \propto (R_{\text{前}}/R_{\text{後}})^2$

(半径) (磁場の強さ)

(6桁近くも) 高速で自転し磁場の強い星が生まれる！

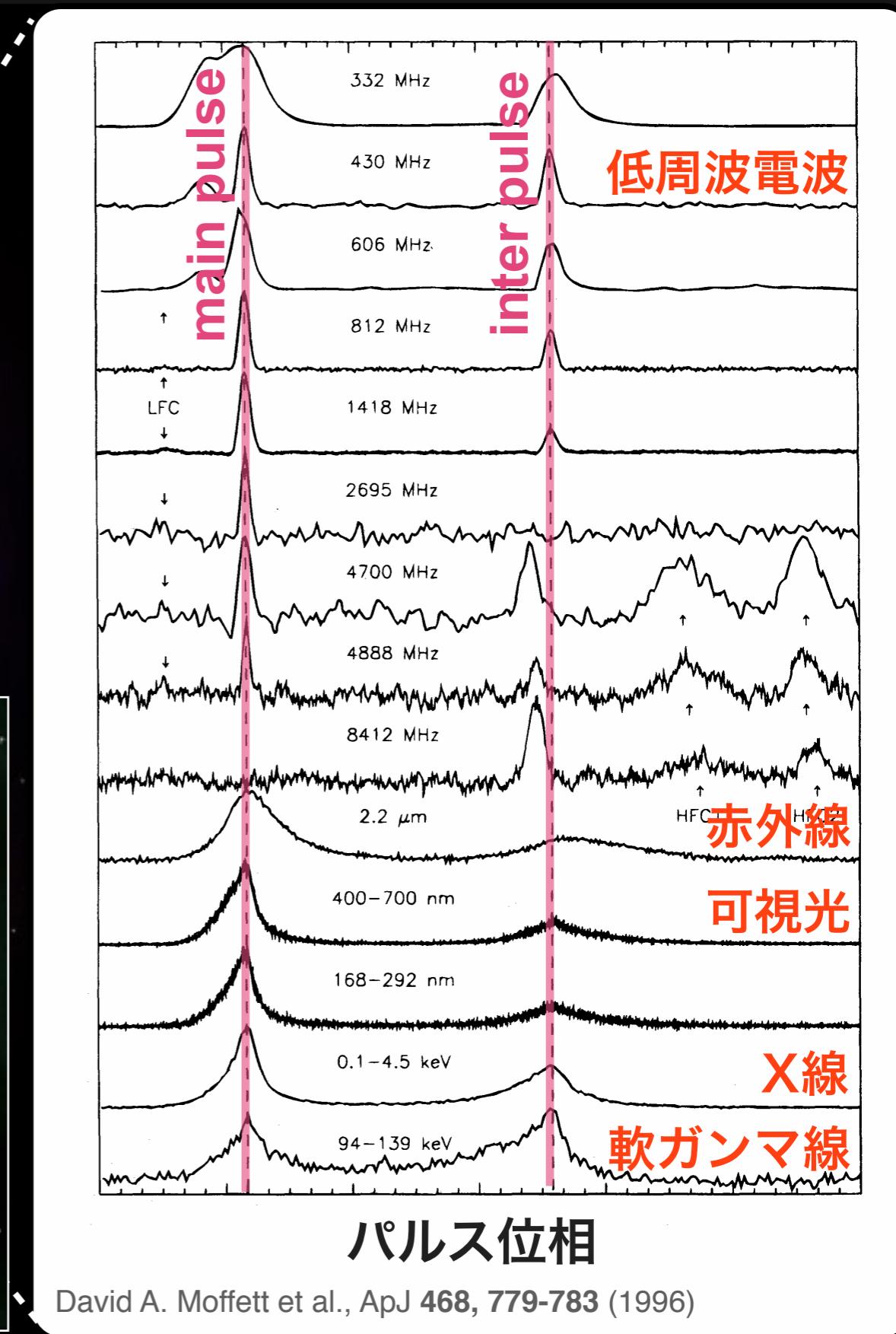
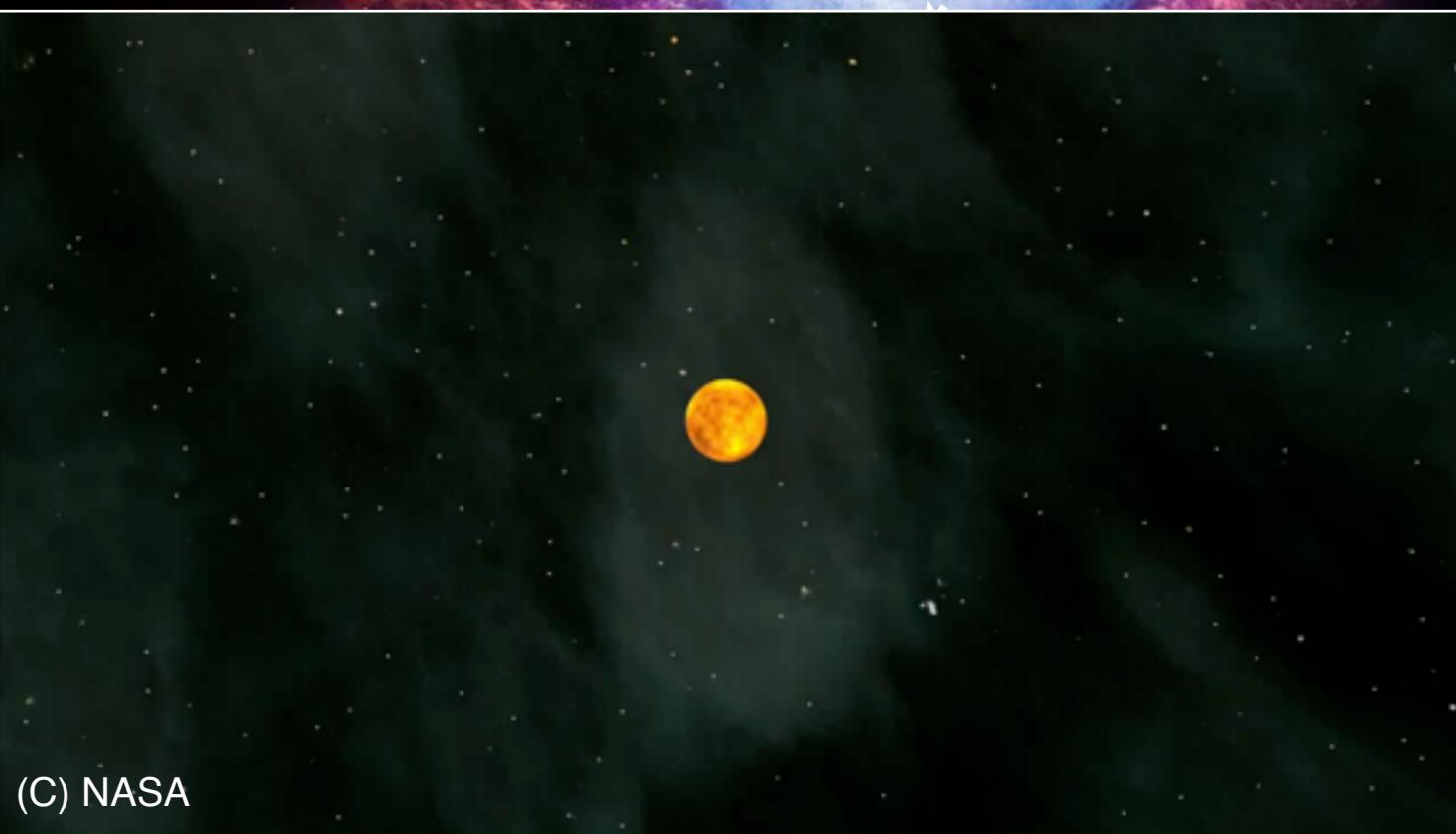
かにパルセー(中性子星)

自転周期 $P = 33$ ミリ秒

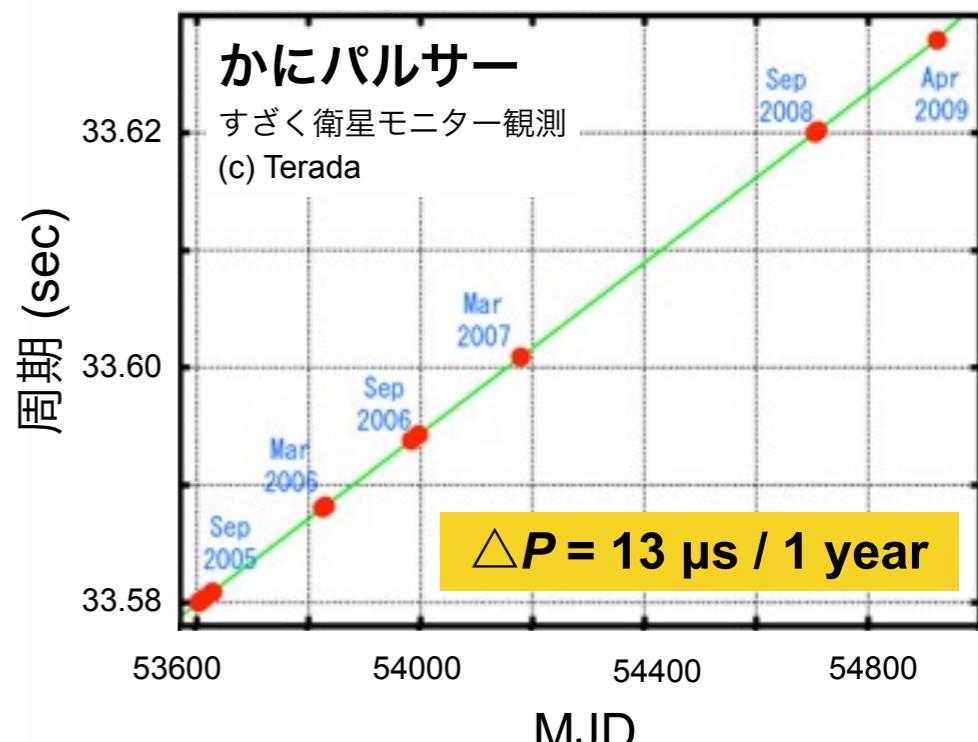
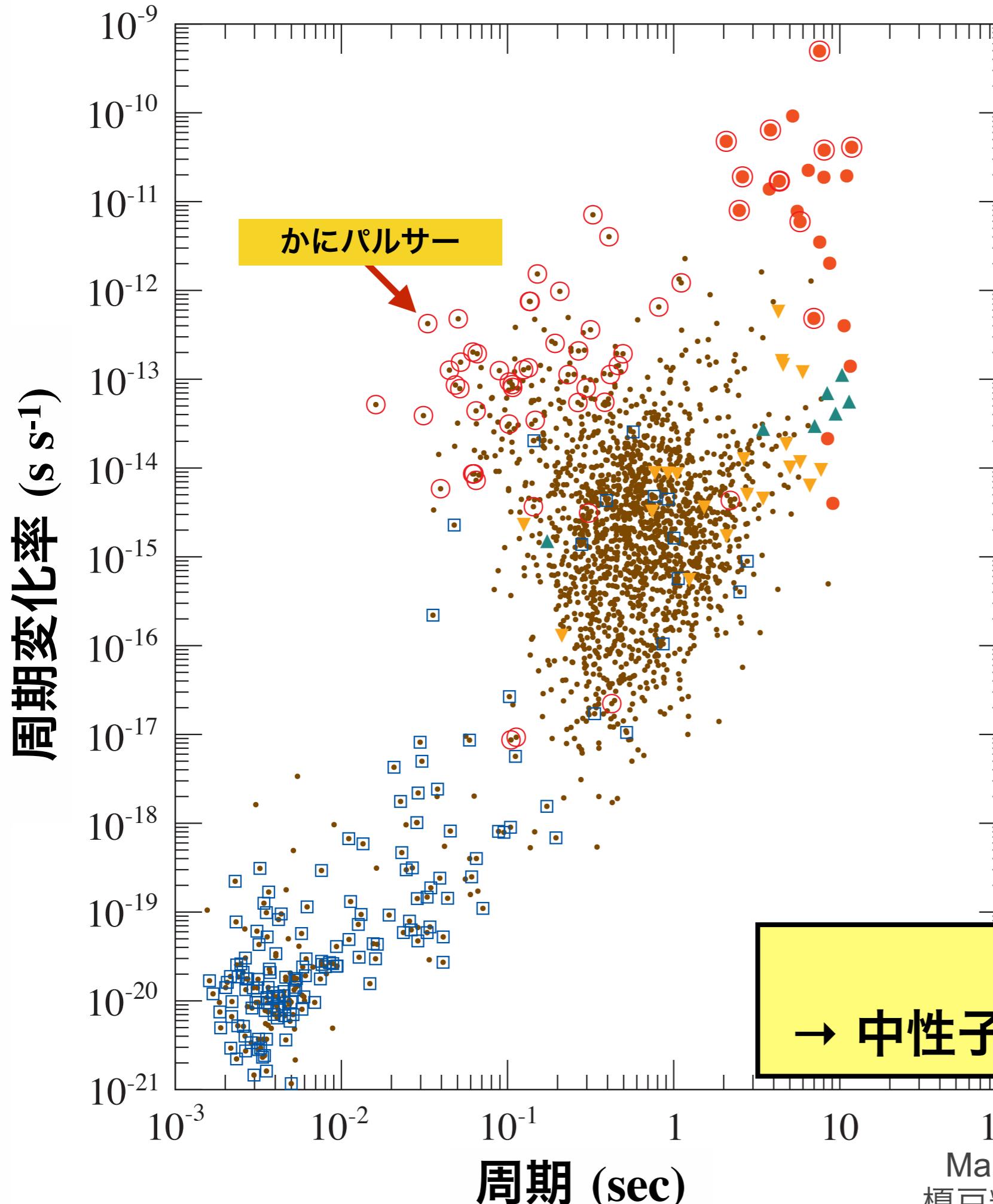


かにパルセー(中性子星)

自転周期 $P = 33$ ミリ秒



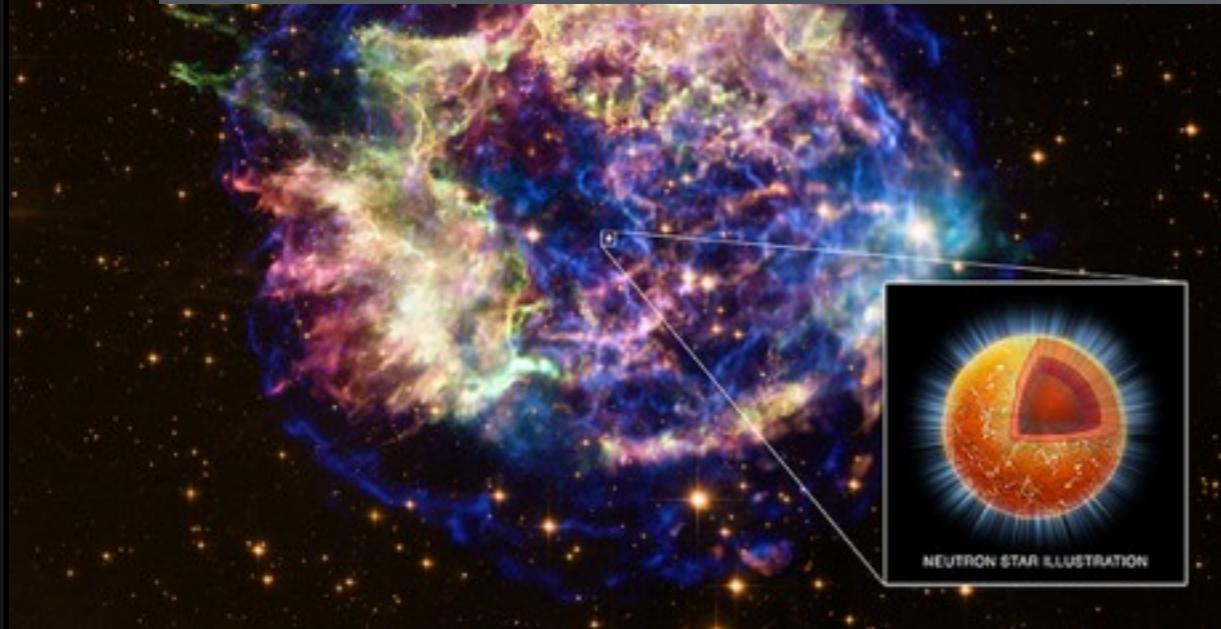
周期変化率の測定



中性子星の放射エネルギー源

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



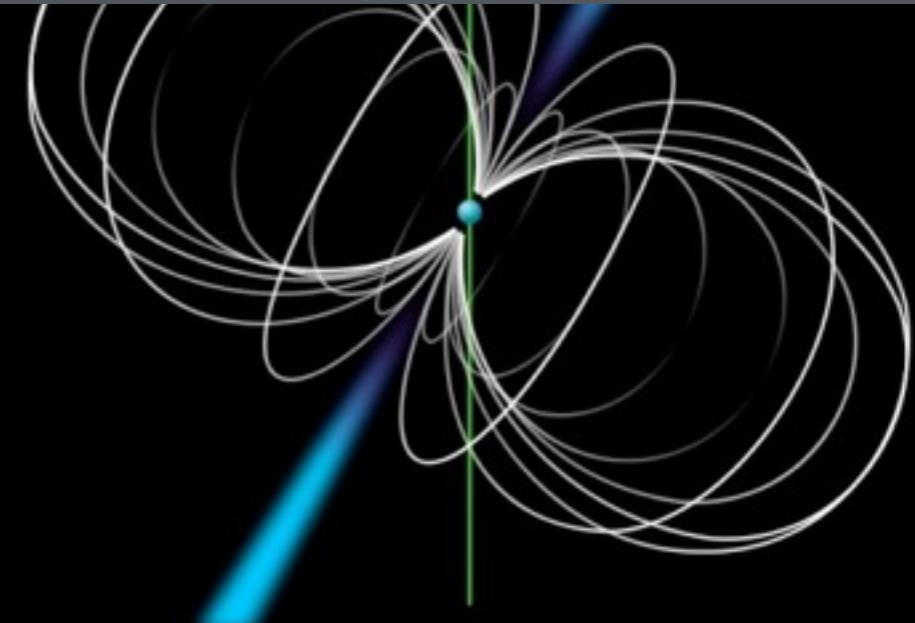
重力エネルギー: 連星での質量降着

X線連星での明るい放射(複数のサブ種族)



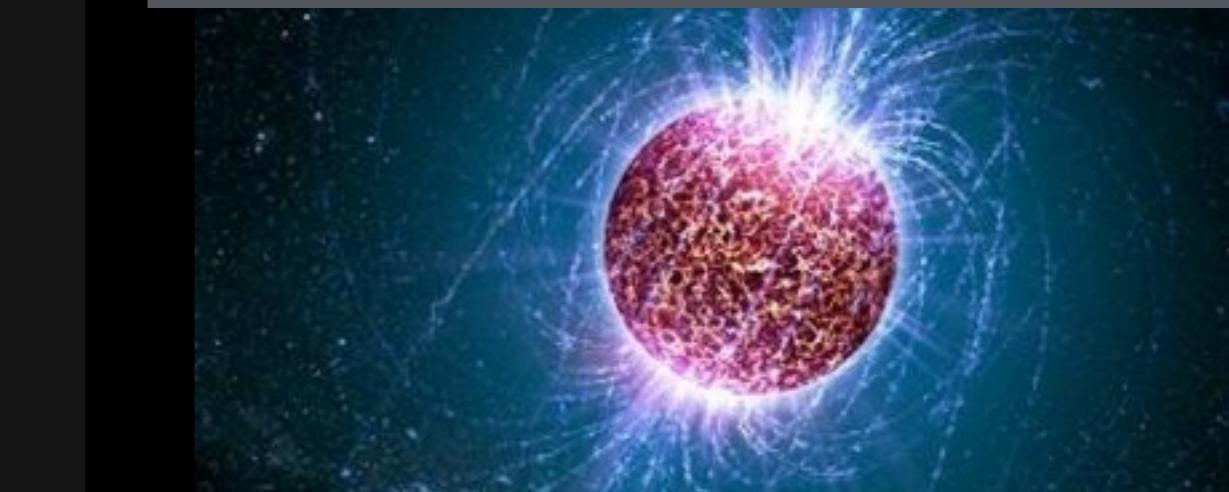
回転エネルギー: 非熱的な放射

大多数の電波パルサーや一部のミリ秒パルサー



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



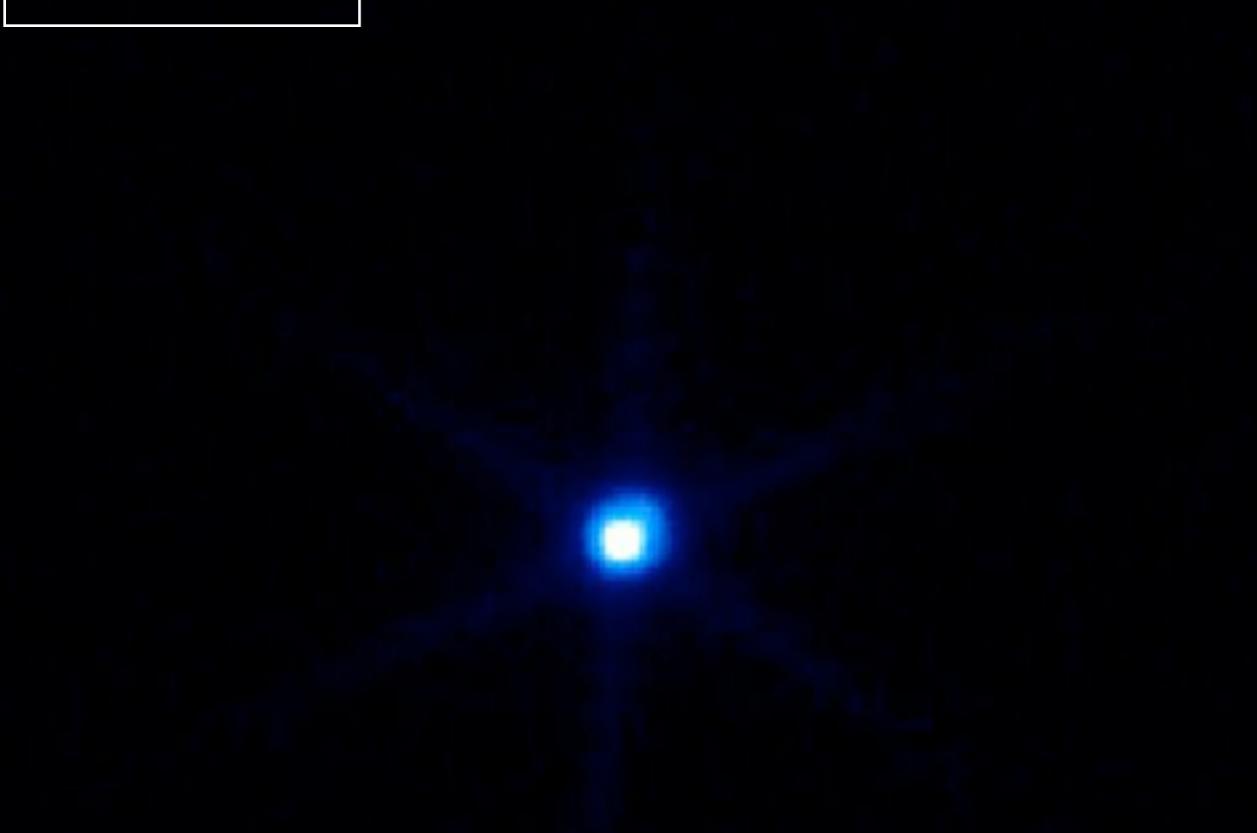
いずれの場合もX線に卓越した放射が現れる！

残熱で輝く中性子星

X-ray Dim Isolated Neutron Stars

地球近傍の電波放射のない孤立中性子星
で、数秒の自転周期で熱的X線を示す。

X線画像



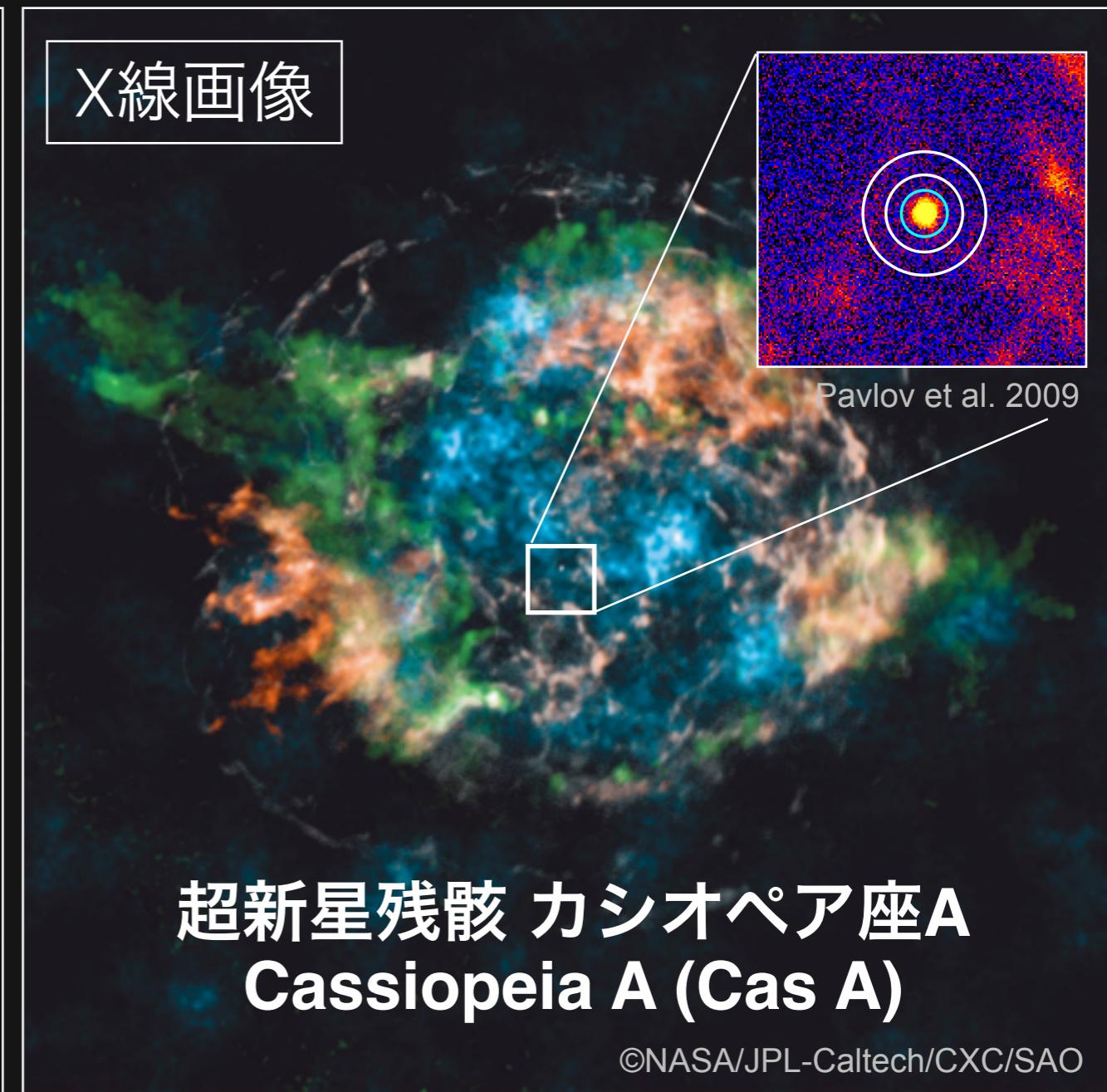
地球上に最も近い孤立中性子星
RX J1856.5-3754

Image credit: Chandra X-ray Observatory

Compact Central Objects

若い超新星残骸の中心の軟X線源で、
電波は出さずX線パルスも未検出か弱い。

X線画像



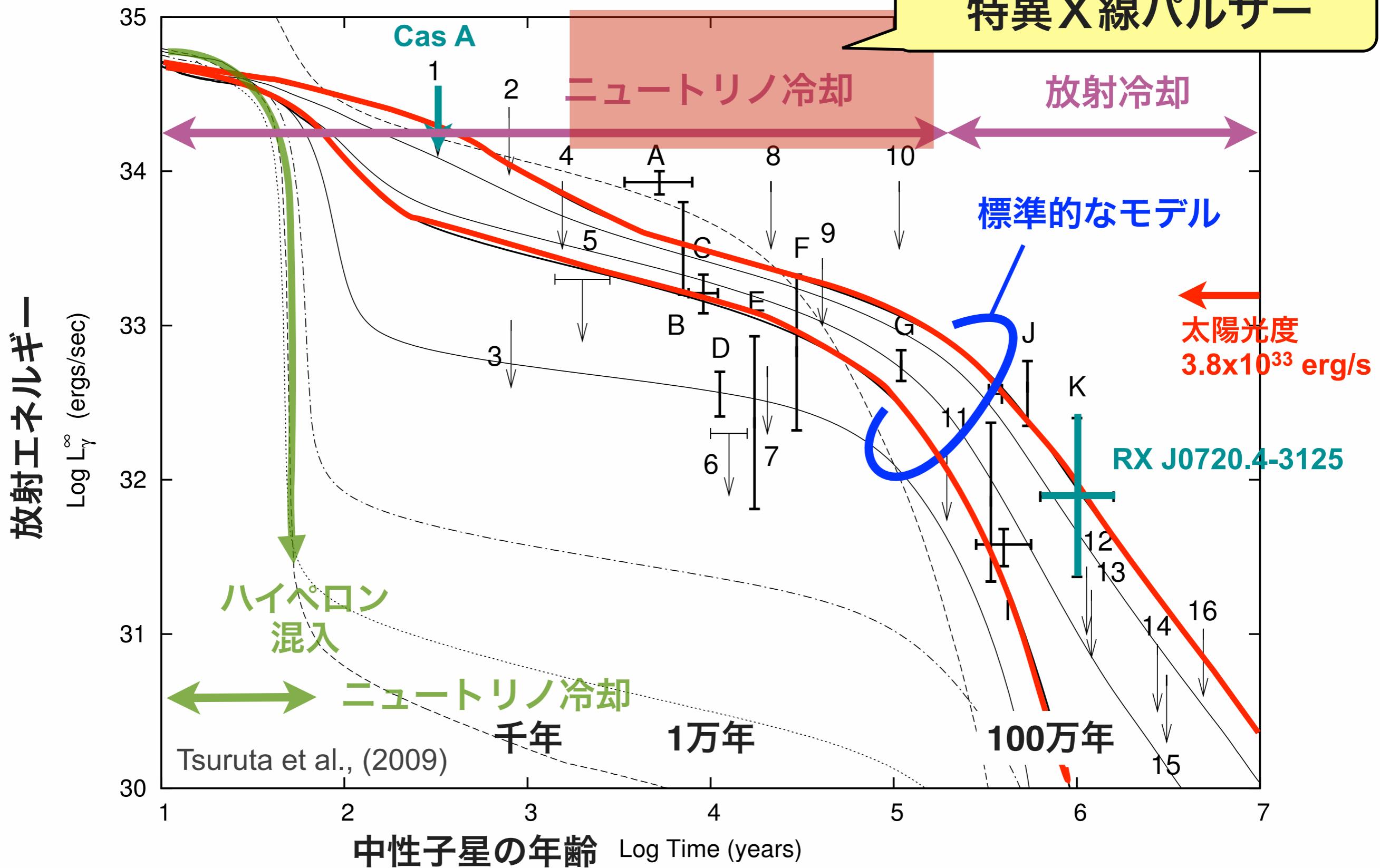
超新星残骸 カシオペア座A
Cassiopeia A (Cas A)

©NASA/JPL-Caltech/CXC/SAO

中性子星の表面の黒体放射から温度を測ることができる

中性子星の冷却 (熱進化)

軟ガンマ線リピーター
特異X線パルサー



星内部の組成や状態を探ることができます。

回転で輝くパルサー: 磁場を見積もる

孤立中性子星は減速していく → 回転エネルギー L_{rot} が減少していく
真空中で回転する磁石とみなす → 磁気双極子放射 L_{mag} で放出する

$$L_{\text{mag}} = L_{\text{rot}}$$

(注) L_{rot} はスピンドウン光度と呼ばれます

チャンドラX線望遠鏡



θ = 回転軸と磁軸のなす角度

$\mu = BR^3$ = 磁気双極子モーメント(磁石の強さ)

I = 慣性モーメント $\sim 10^{45} \text{ g cm}^2$

$\Omega = \text{角周波数} = 2\pi / P$

$$L_{\text{rot}} = \frac{dE_{\text{rot}}}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I \Omega^2 \right) = 3.9 \times 10^{46} \frac{\dot{P}}{P^3} \text{ erg/s}$$

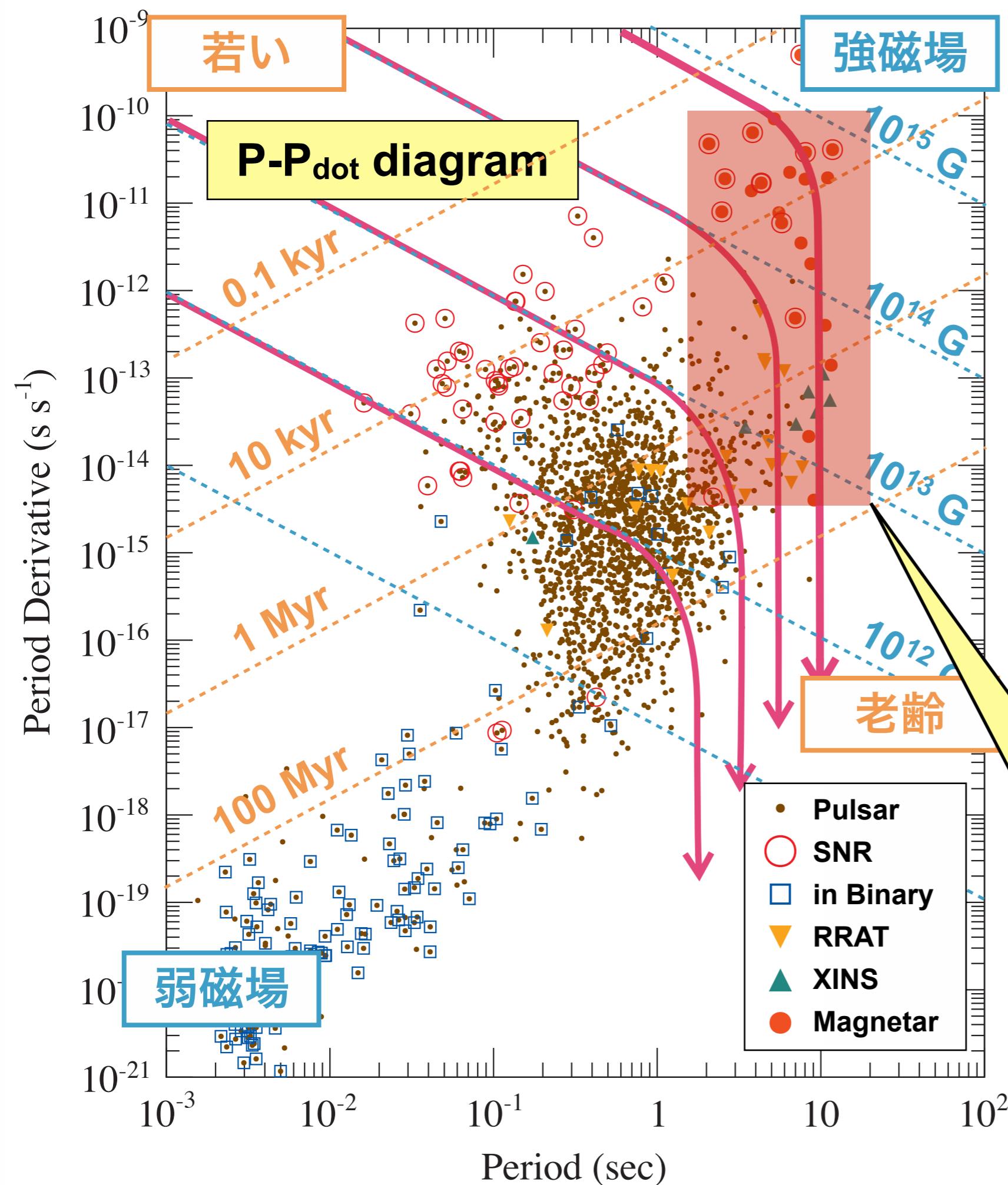
$$L_{\text{mag}} = \frac{2}{3c^3} |\ddot{\mu}|^2 = \frac{2}{3c^3} |\mu|^2 \Omega^4 \sin^2 \theta \propto \frac{B^2}{P^4}$$

双極子磁場
(表面)

$$B = 1.0 \times 10^{12} \sqrt{\left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right) \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15} \text{ s/s}} \right)} \text{ G}$$

パルス周期の観測から磁場を推定することができる

中性子星の進化



磁場

$$B \propto \sqrt{PP'}$$

特性年齢

$$\tau = P/(2P')$$

中性子星の進化は未解決

磁場減衰していれば

(Colpi et al, 1999),

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

($\alpha = 0$ is plotted)

強磁場 $B > 10^{14-15} \text{ G}$

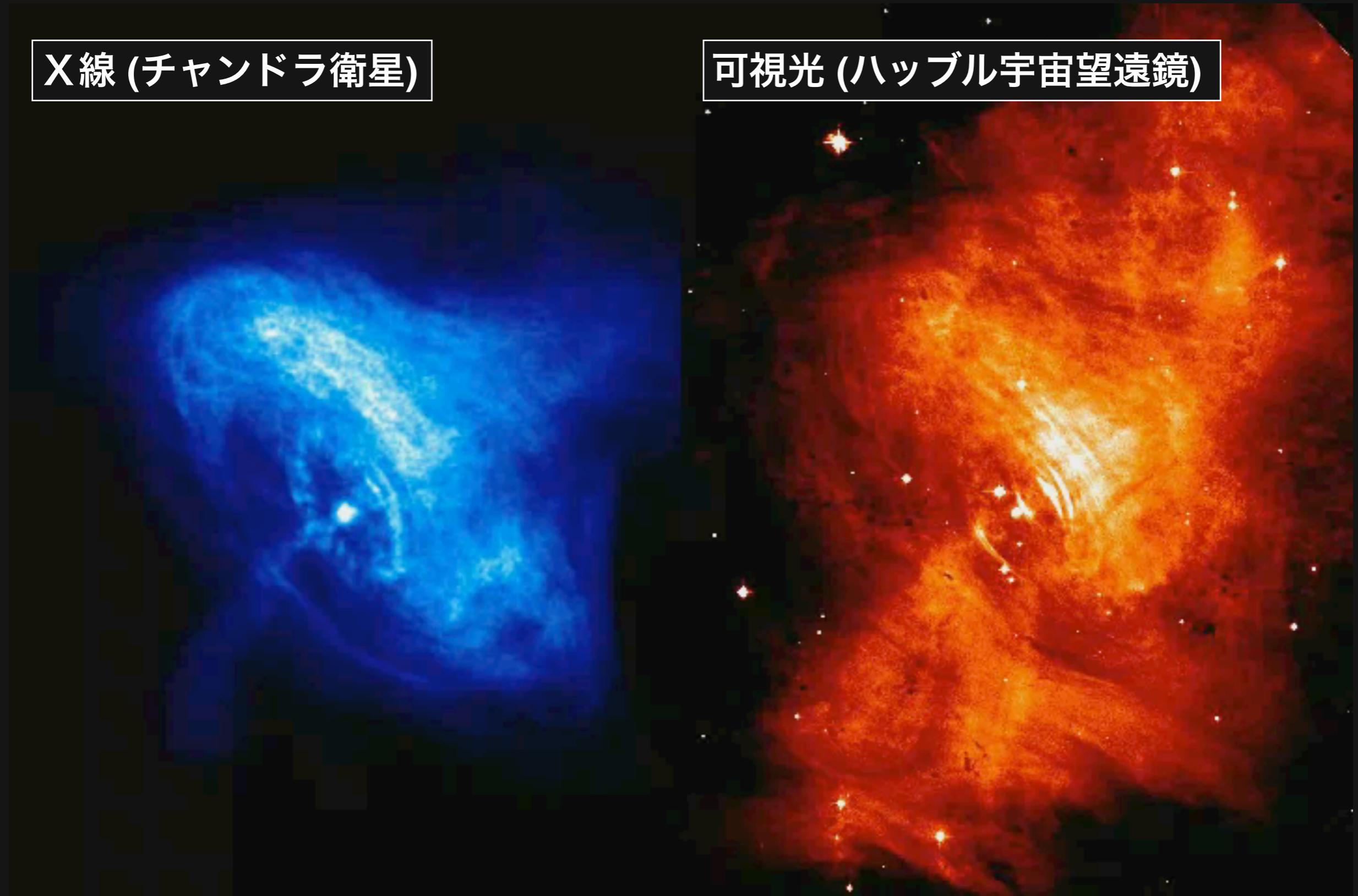
領域に見つかってきた
軟ガンマ線リピーター
特異X線パルサー

かに星雲の長期観測

2000年11月～2001年4月

X線 (チャンドラ衛星)

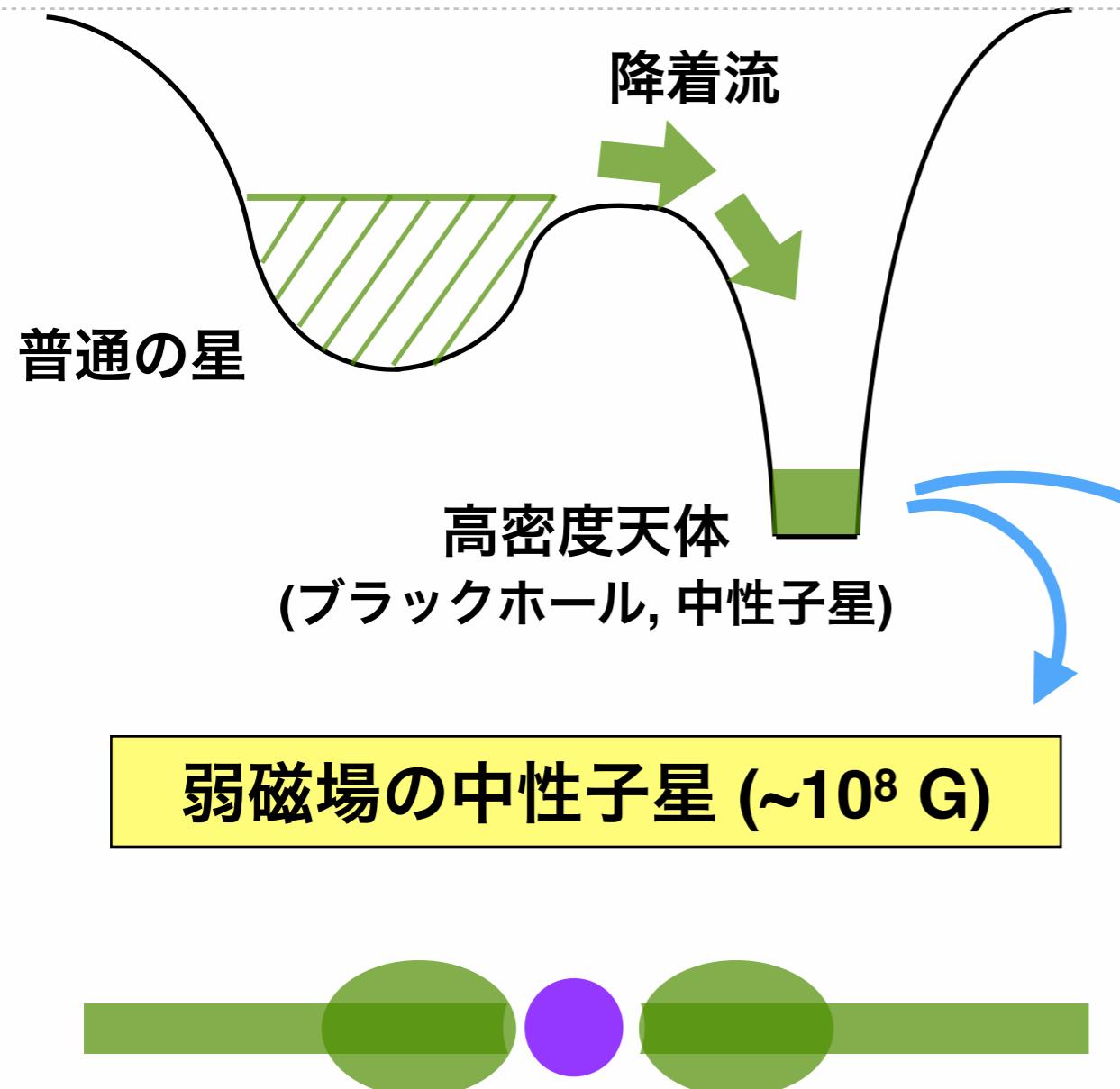
可視光 (ハッブル宇宙望遠鏡)



パルサー風が吹き出している現場が観測されている

質量降着で輝くX線パルサー

重力ポテンシャル



降着円盤は星の表面付近まで到達。
星全体に広く降着 ⇒ パルスは見えない
質量降着によってスピンアップ

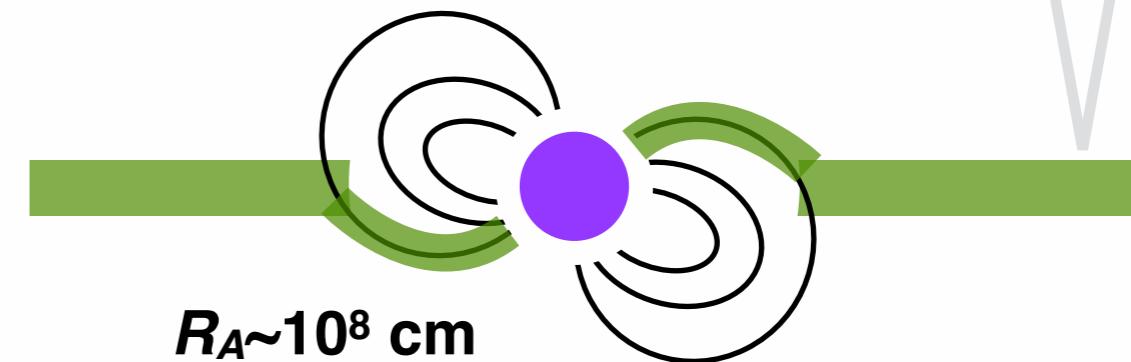
- 物質がケプラー回転しながら降着

$$mr\Omega^2 = \frac{GmM}{r^2} \rightarrow v = r\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- 星からの距離 r で磁場は $B \propto r^3$ で減衰

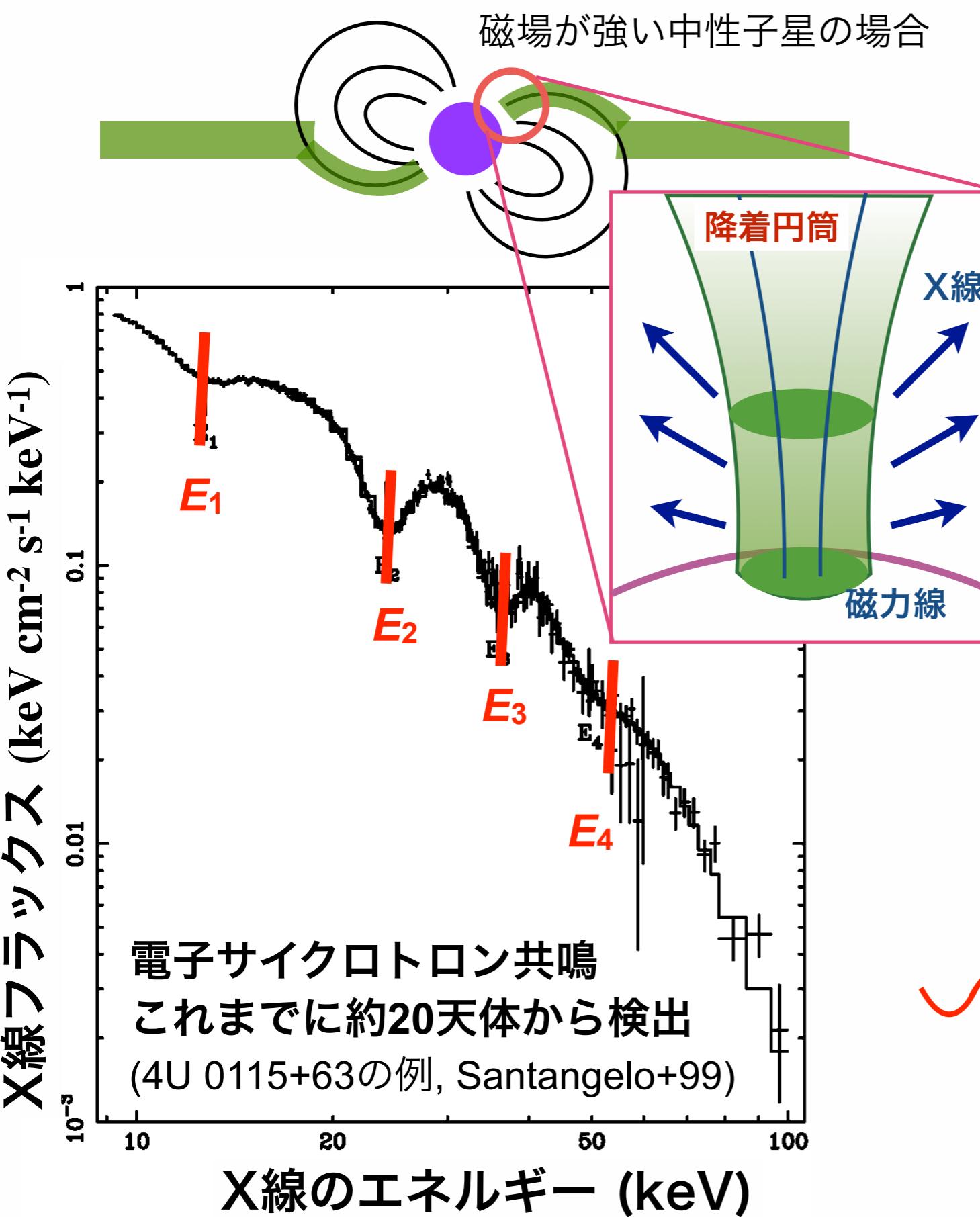
$$\frac{B^2}{8\pi} = \rho v^2 \rightarrow \text{アルフベン半径}$$

強磁場の中性子星 ($\sim 10^{12}$ G)



磁気圧で止められ磁力線に沿って降着。
磁極に絞られて降着 ⇒ X線パルスが発生
パルス周期は比較的遅い(数十秒~数百秒)

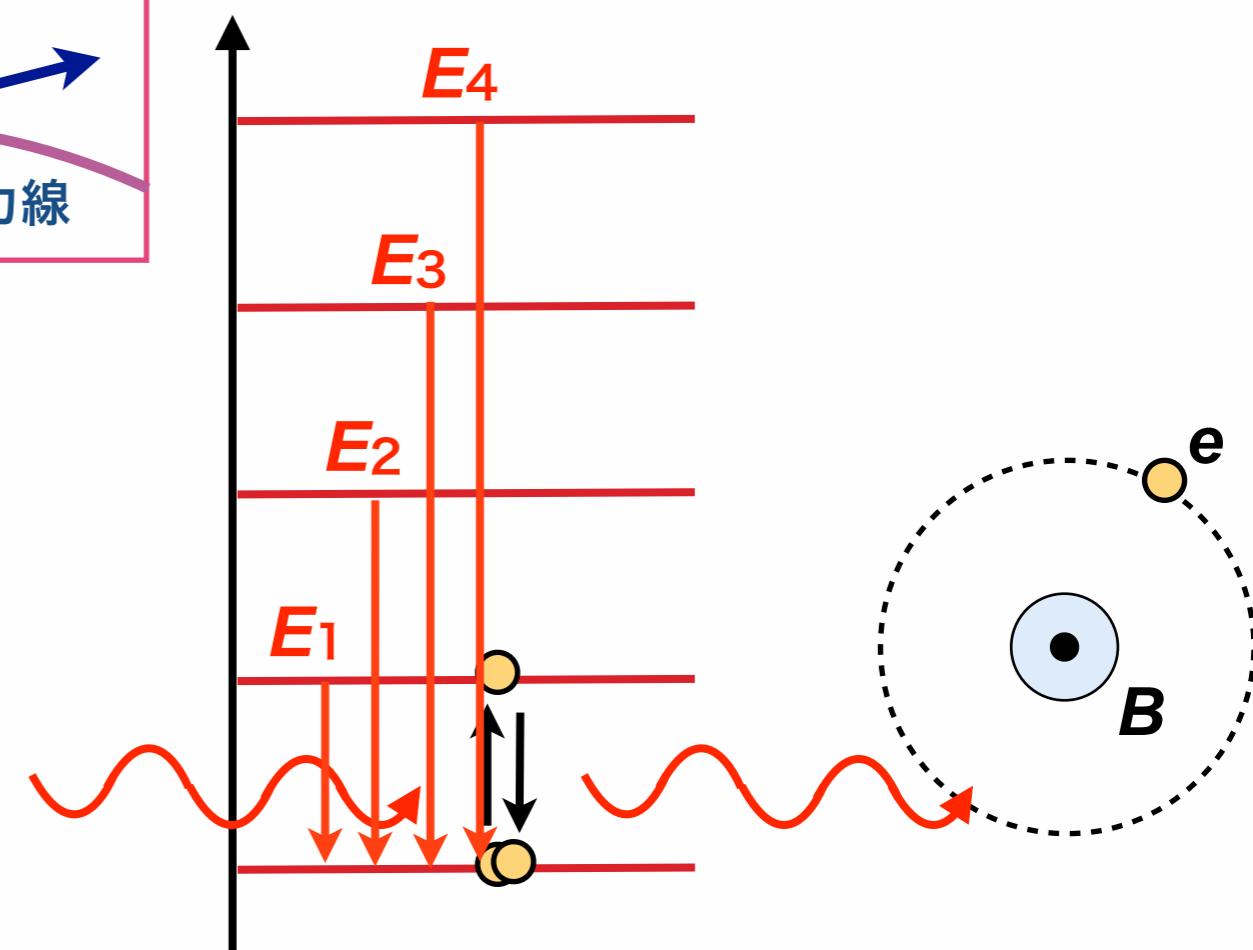
電子サイクロトロン共鳴で磁場を測る



磁場中の電子

$$E_n = n\hbar\omega_c = m_e c^2 \frac{B}{B_c} \cdot n$$
$$B_{\text{cr}} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.4 \times 10^9 \text{ T}$$

11 keV の共鳴 $\rightarrow B=10^{12} \text{ G}$

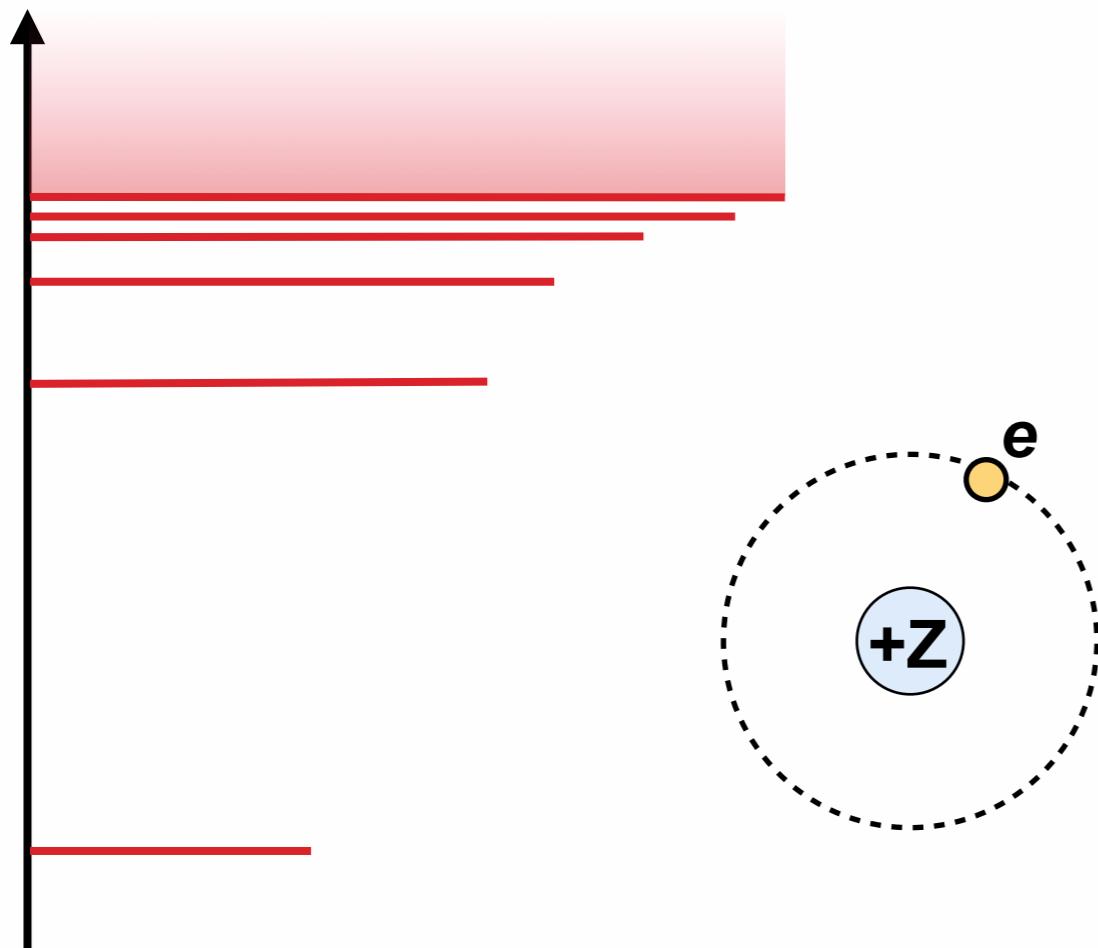


電子サイクロトロン共鳴で磁場を測る

原子に束縛された電子

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

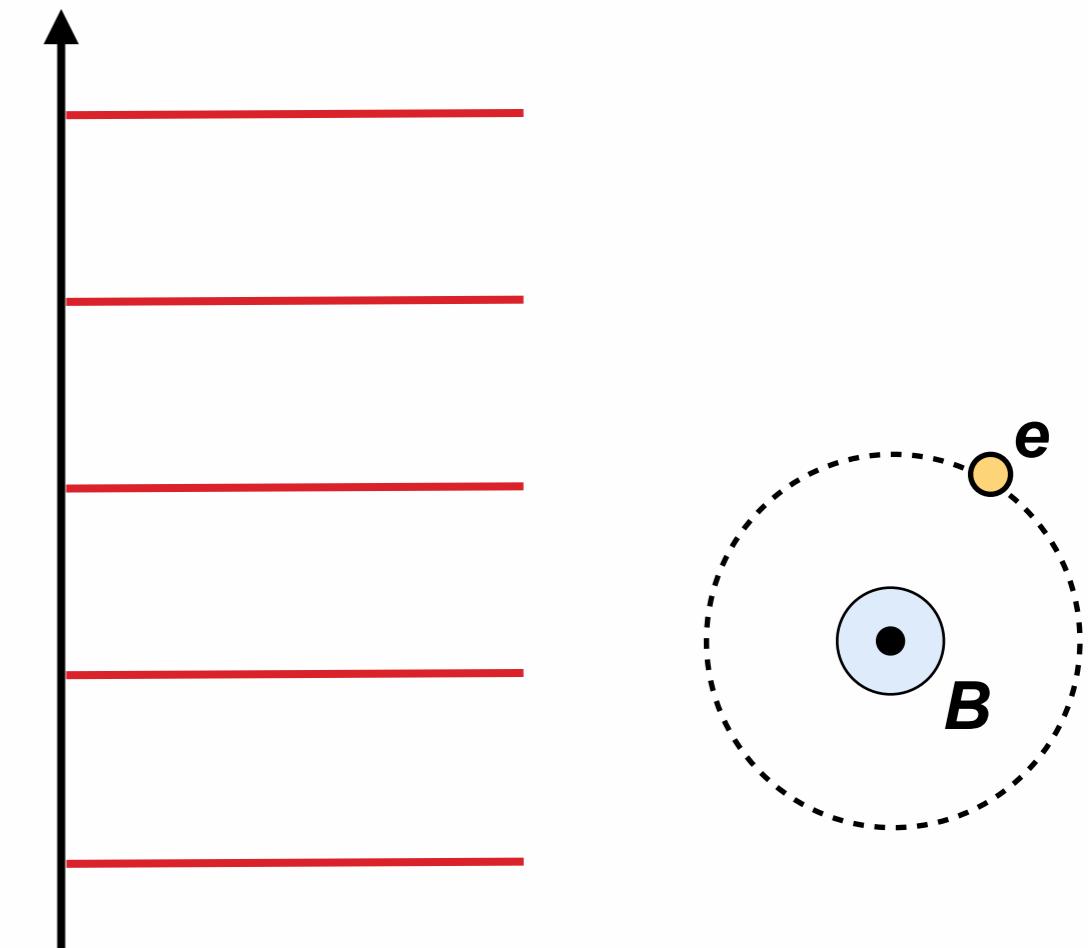
$E_n \sim 13.6 \text{ eV}$ for H ($Z=1$)
 $7 \sim 9 \text{ keV}$ for Fe ($Z=26$)



磁場中の電子

$$E_n = n \hbar \omega_c = m_e c^2 \frac{B}{B_c} \cdot n$$
$$B_{\text{cr}} = \frac{m_e^2 c^3}{\hbar e} = 4.4 \times 10^9 \text{ T}$$

11 keV の共鳴 $\rightarrow B=10^{12} \text{ G}$



$P-P_{\text{dot}}$ とは別の中性子星の磁場の有効な診断方法

中性子星の放射エネルギー源

熱エネルギー: 超新星爆発後の残熱

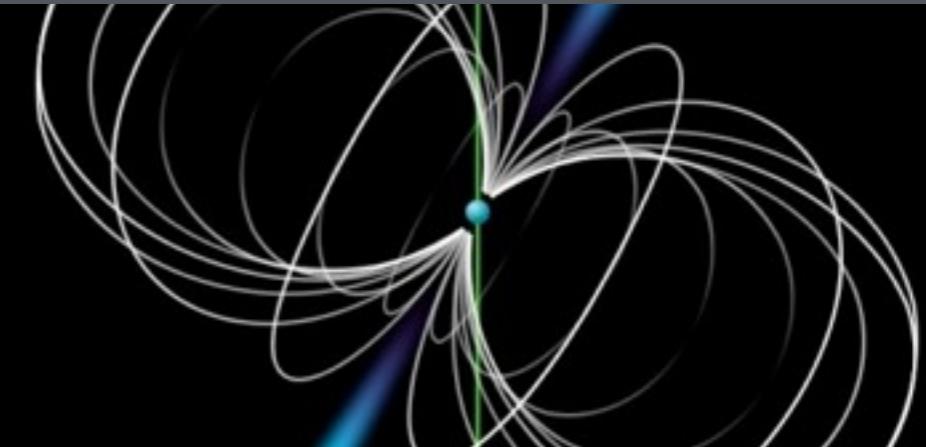
超新星残骸の中心の熱放射をする中性子星



→ 表面温度や冷却曲線を調べる

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



→ 自転周期の測定から磁場を推定

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)



→ 電子サイクロトロン共鳴で磁場

磁場エネルギー: 磁場が強い種族

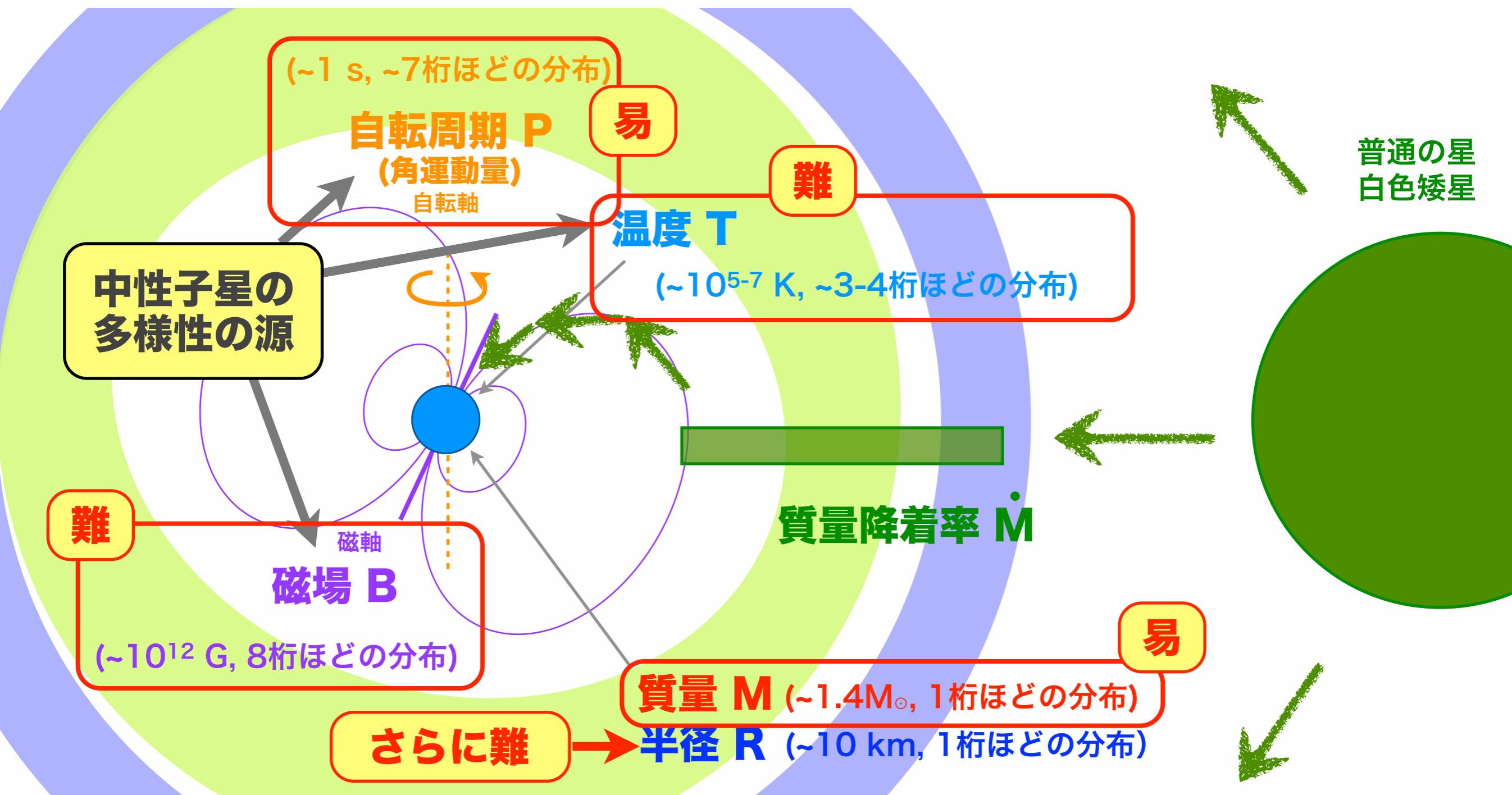
マグネター(SGR,AXP)と呼ばれる新種族



→ これから説明

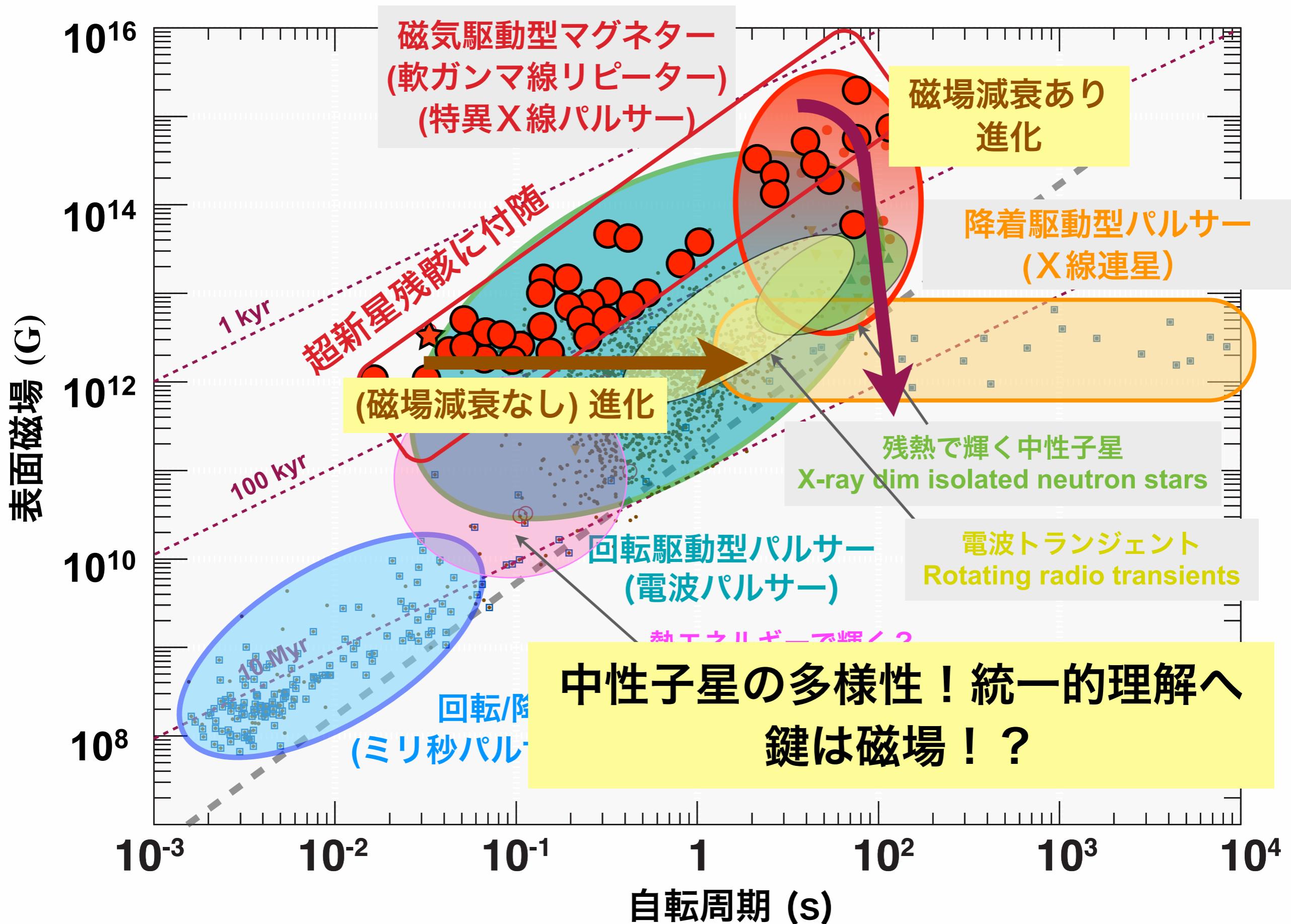
中性子星を特徴づける物理量

中性子星: 高密度、強磁場、高速回転など極限的な環境が発現する宇宙の実験室



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。特に鍵になるのは磁場！？

中性子星の進化: 周期 vs. 磁場

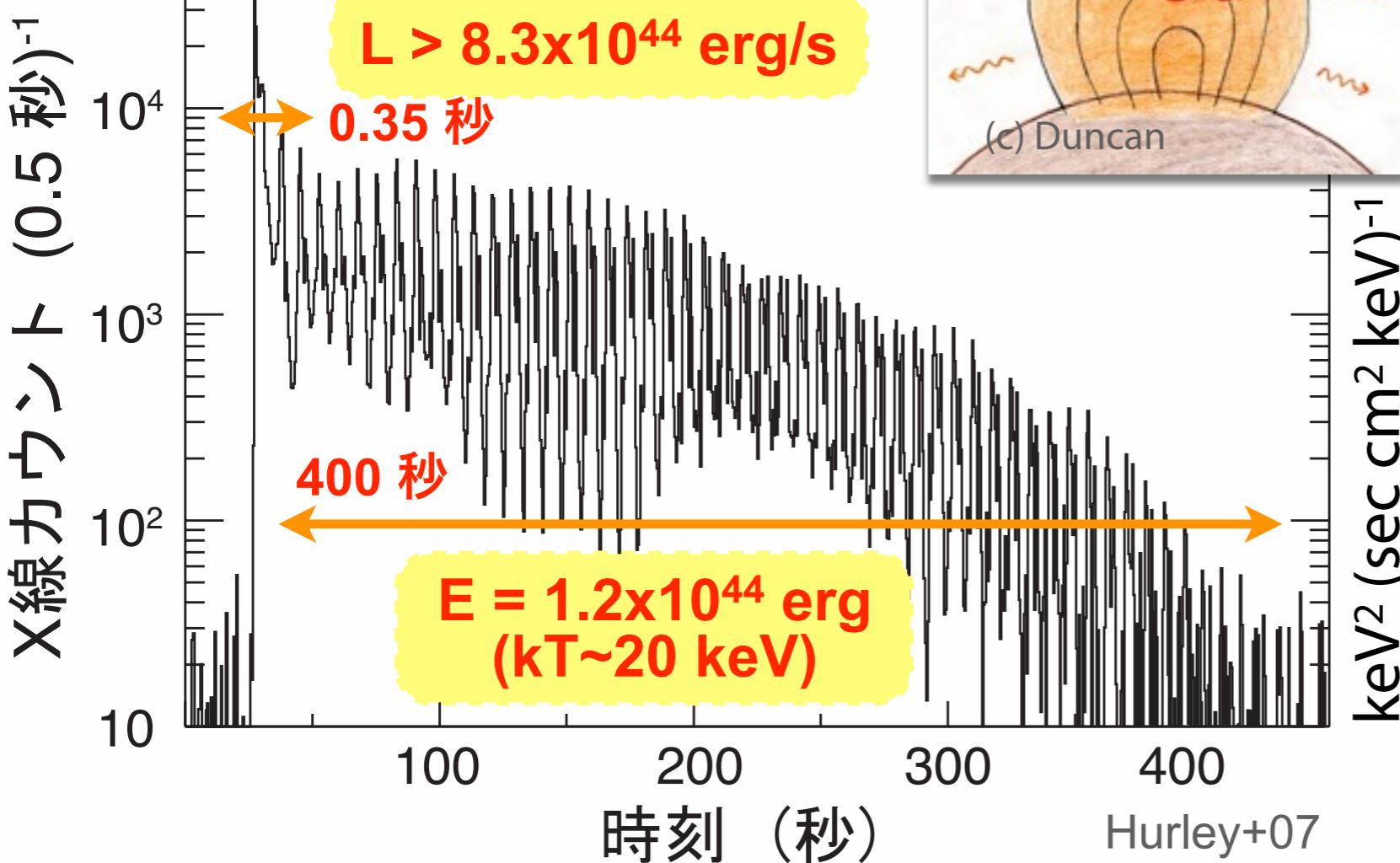


Magnetar (マグネター)
= **magnet+star** (磁石星)

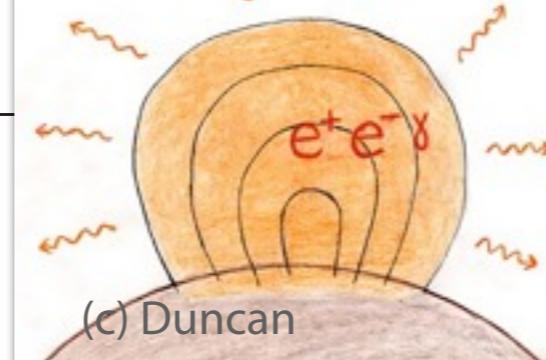
軟ガンマ線リピーター (Soft Gamma Repeater)

バースト活動で ~5 天体ほど発見. 他の中性子星にない特徴.

巨大フレア (歴史上 3 件)

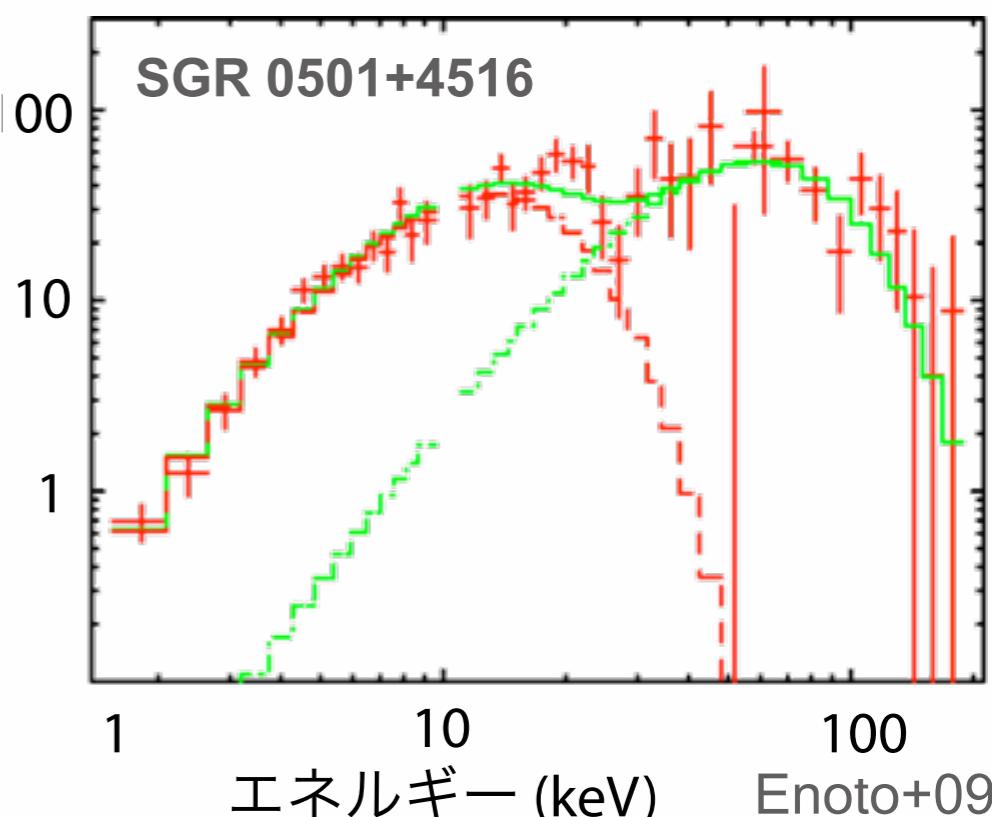


fireball?



ショートバースト

- 数百ミリ秒のスパイク状
- 2 温度の黒体放射



- エディントン光度($\sim 10^{38}$ erg/s)を 6 衡も超える巨大フレア
- 400 秒に渡って、数十 keV のプラズマを閉じ込めるには $B > 10^{14}$ G 必要

特異X線パルサー (Anomalous X-ray Pulsar)

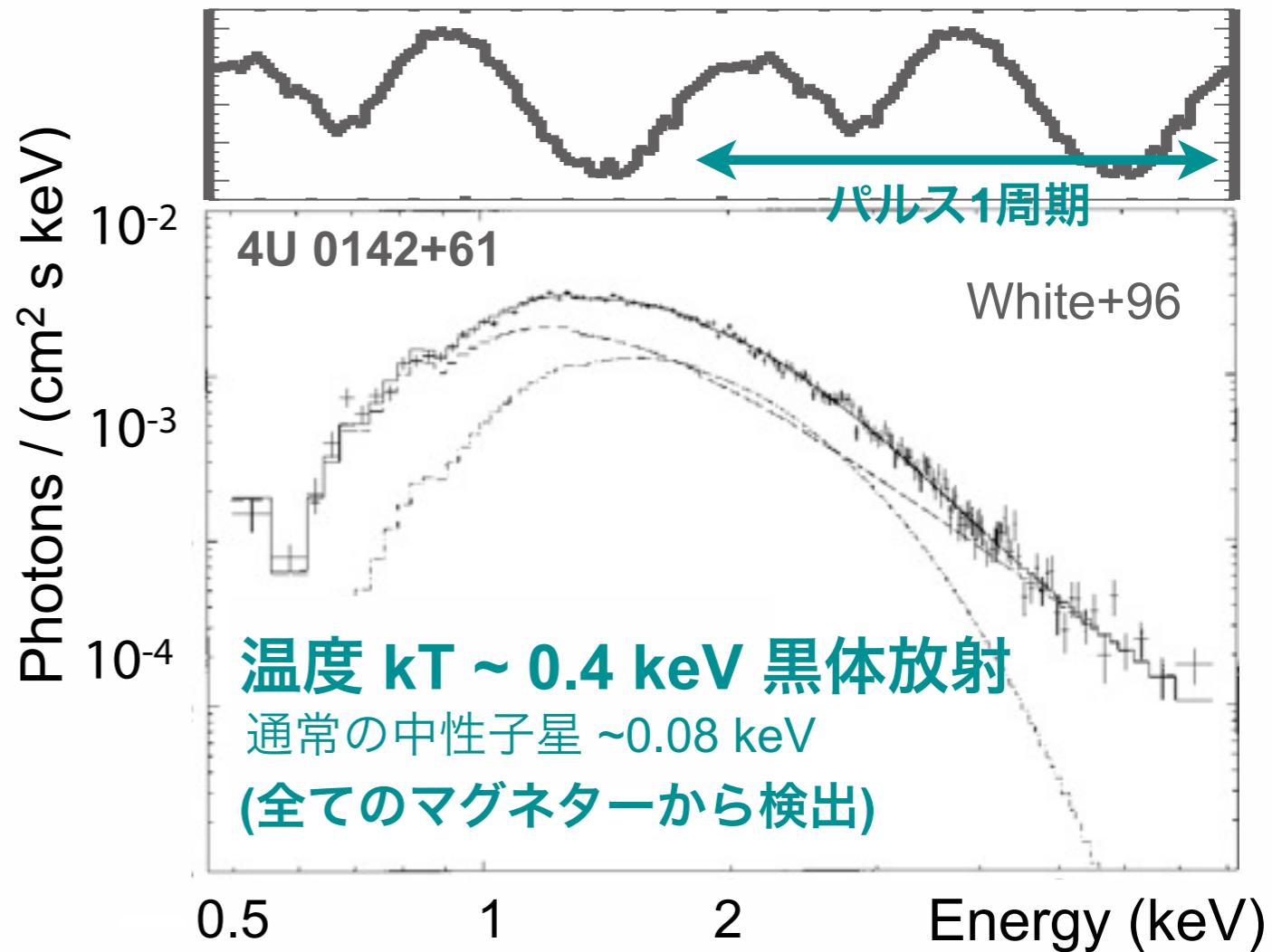
定常的で明るいX線源として~15天体ほどが発見。

いくつかはSNRに付随



比較的若いパルサーを示唆

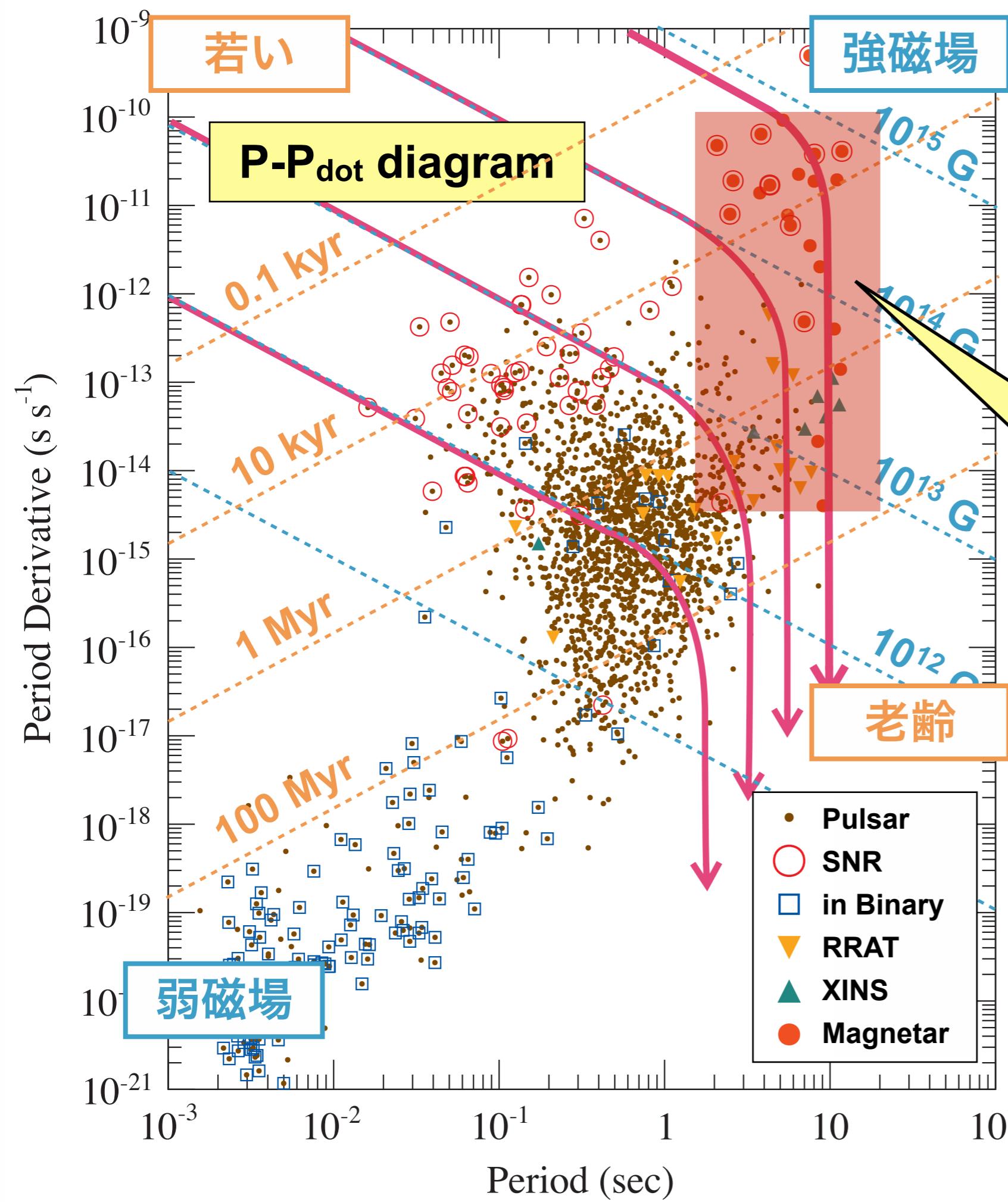
パルスした定常X線放射 (<10 keV)



星表面近くからの熱的な放射

$L_x > L_{sd}$ で回転では説明できない。連星の証拠がなく降着型でもない。

中性子星の進化



磁場

$$B \propto \sqrt{PP'}$$

特性年齢

$$\tau = P/(2P')$$

軟ガンマ線リピーター
特異X線パルサー

強磁場 $B > 10^{14-15}$ G
若い天体 $\tau < 10-100$ kyr

弱磁場

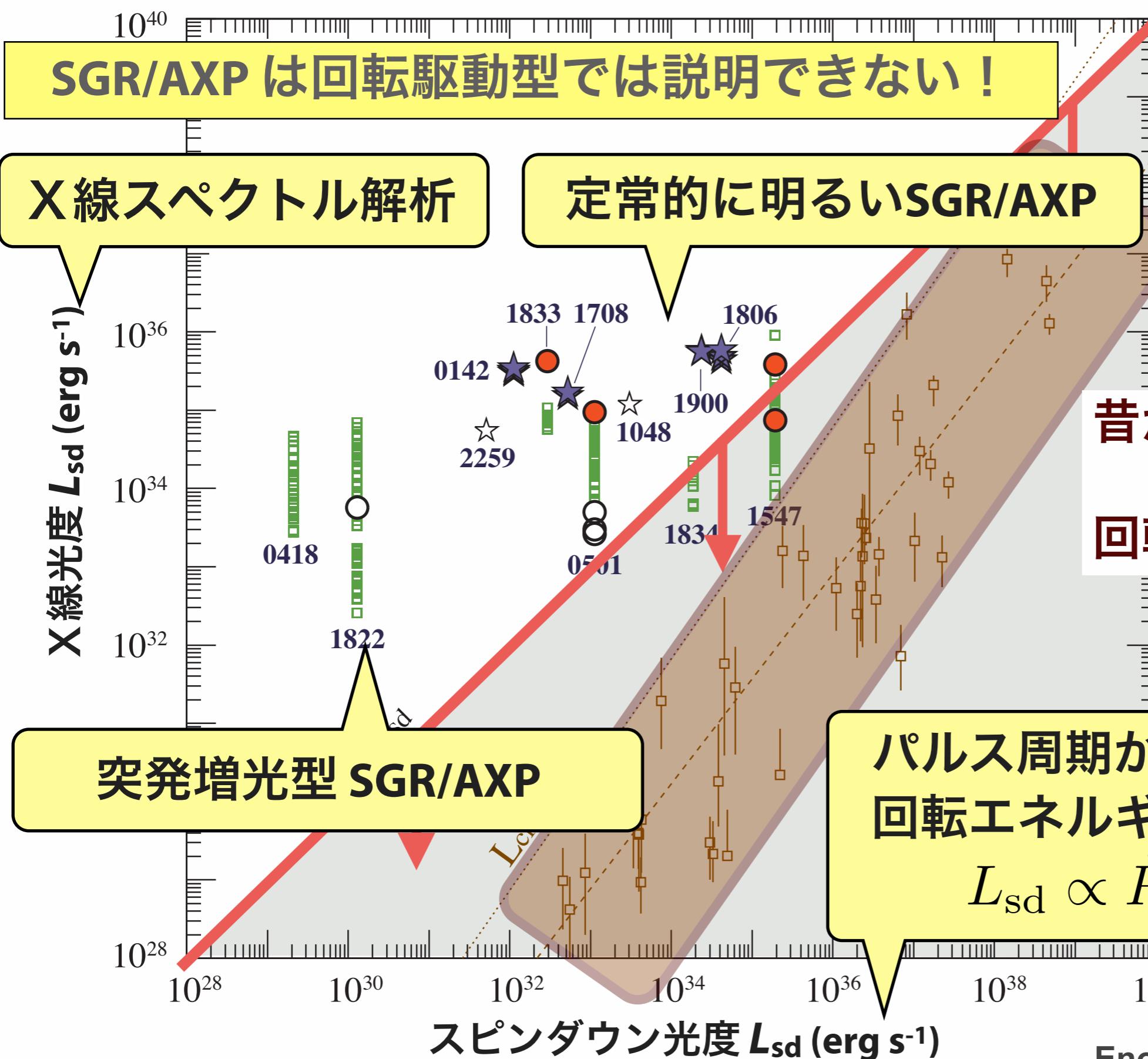
強磁場

P-P_{dot} diagram

老齢

- Pulsar
- SNR
- in Binary
- ▽ RRAT
- △ XINS
- Magnetar

X線光度 vs. スピンダウン光度



回転エネルギーの
減少でX線放射を
説明できる領域

昔から知られていた
古典的な
回転駆動型パルサー

パルス周期から求まる
回転エネルギー減少率

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

マグネター仮説

榎戸,天文月報,2012年7月号,skylight 解説記事

B~ 10^{14-15} G ときわめて磁場の強い特殊な高密度天体で、内部に蓄えた莫大な磁場エネルギーを解放して輝く磁気駆動型の天体、マグネターではないか？

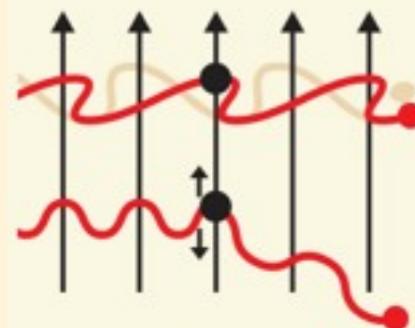
Thompson & Duncan+95, 96

1. SNR に付随、遅い自転 P & Pdot 大 ⇒ 若く ($\tau < 100$ kyr) & 強磁場 B~ 10^{14-15} G
2. X線光度 $L_x \gg$ スピンドウン光度 L_{sd} ⇒ 回転駆動型パルサーではない
3. 連星の兆候なし ⇒ 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 ⇒ B > 10^{14} G で散乱断面積の抑制？
5. 陽子サイクロotron共鳴の兆候 ⇒ B > 10^{14} G を示唆
6. バースト活動 ⇒ 磁気エネルギーの散逸 (e.g., 磁気リコネクション)??

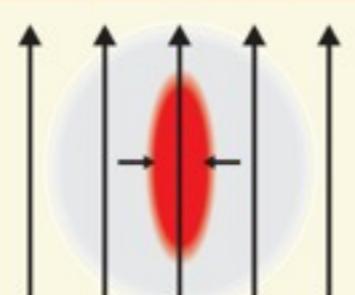
QED 臨界磁場

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

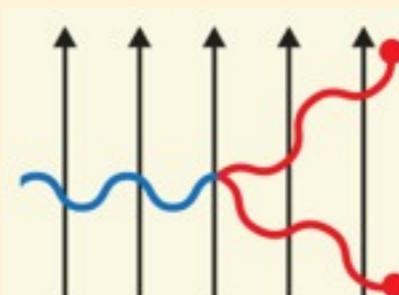
散乱断面積の抑制



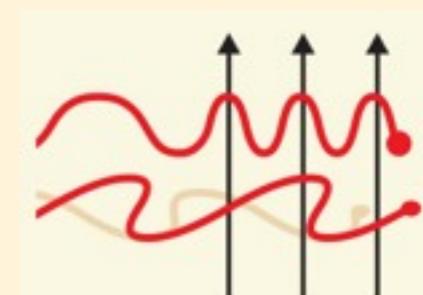
原子の変形



光子の自然分裂

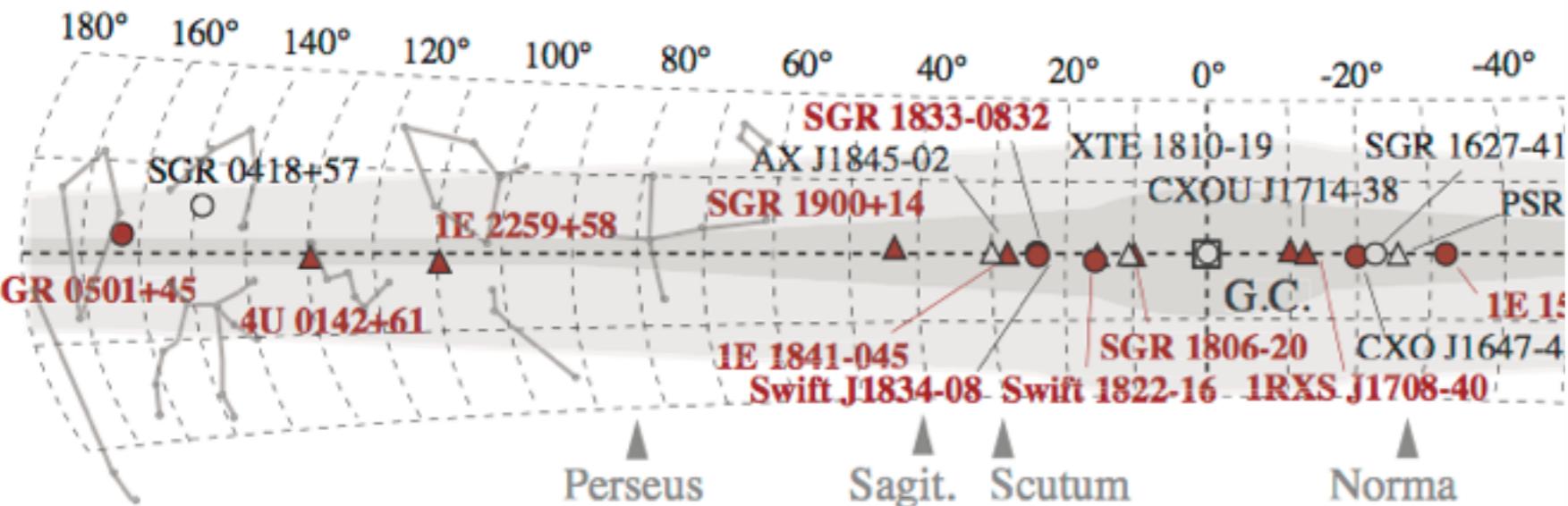


真空の複屈折

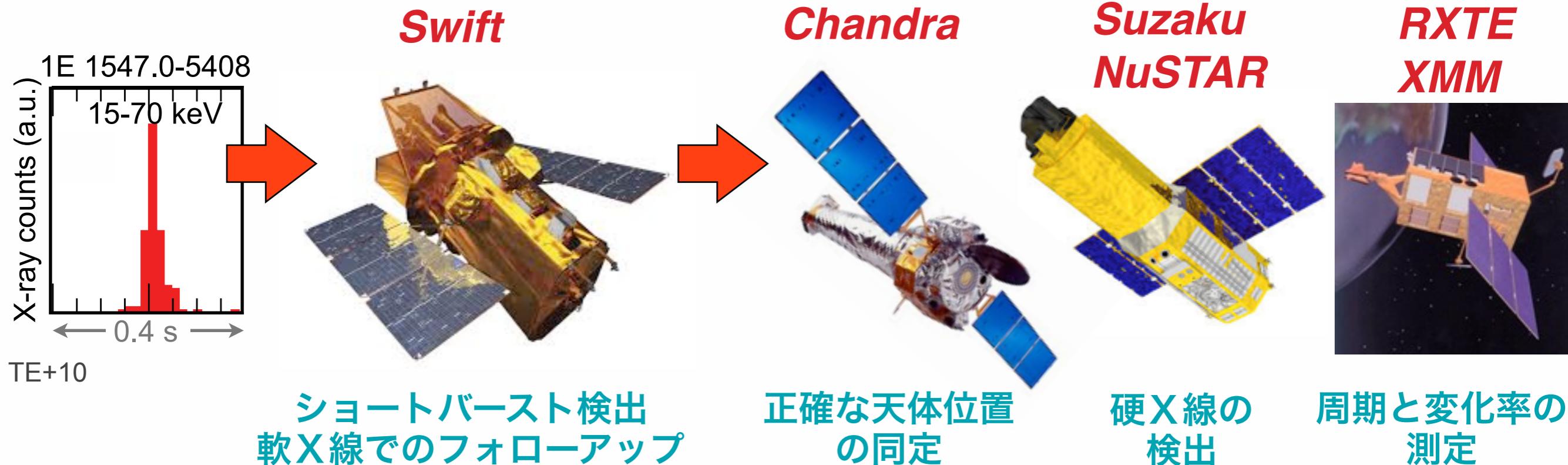
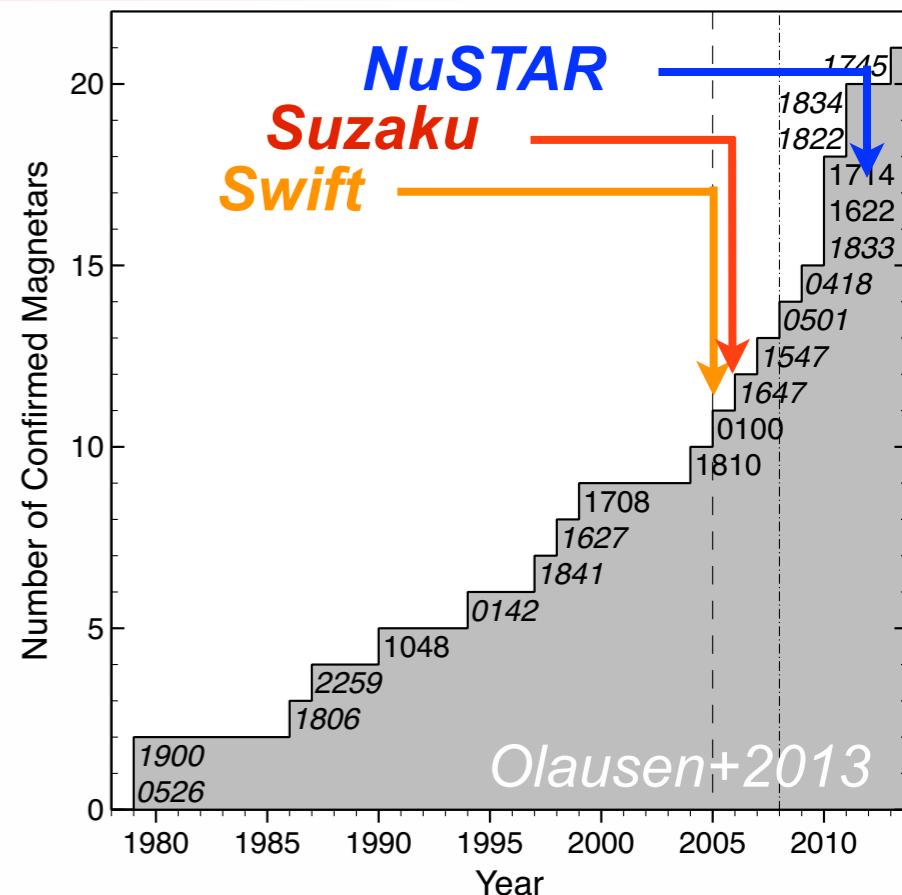


マグネターは地上で到達できない極限物理を調べる実験室！

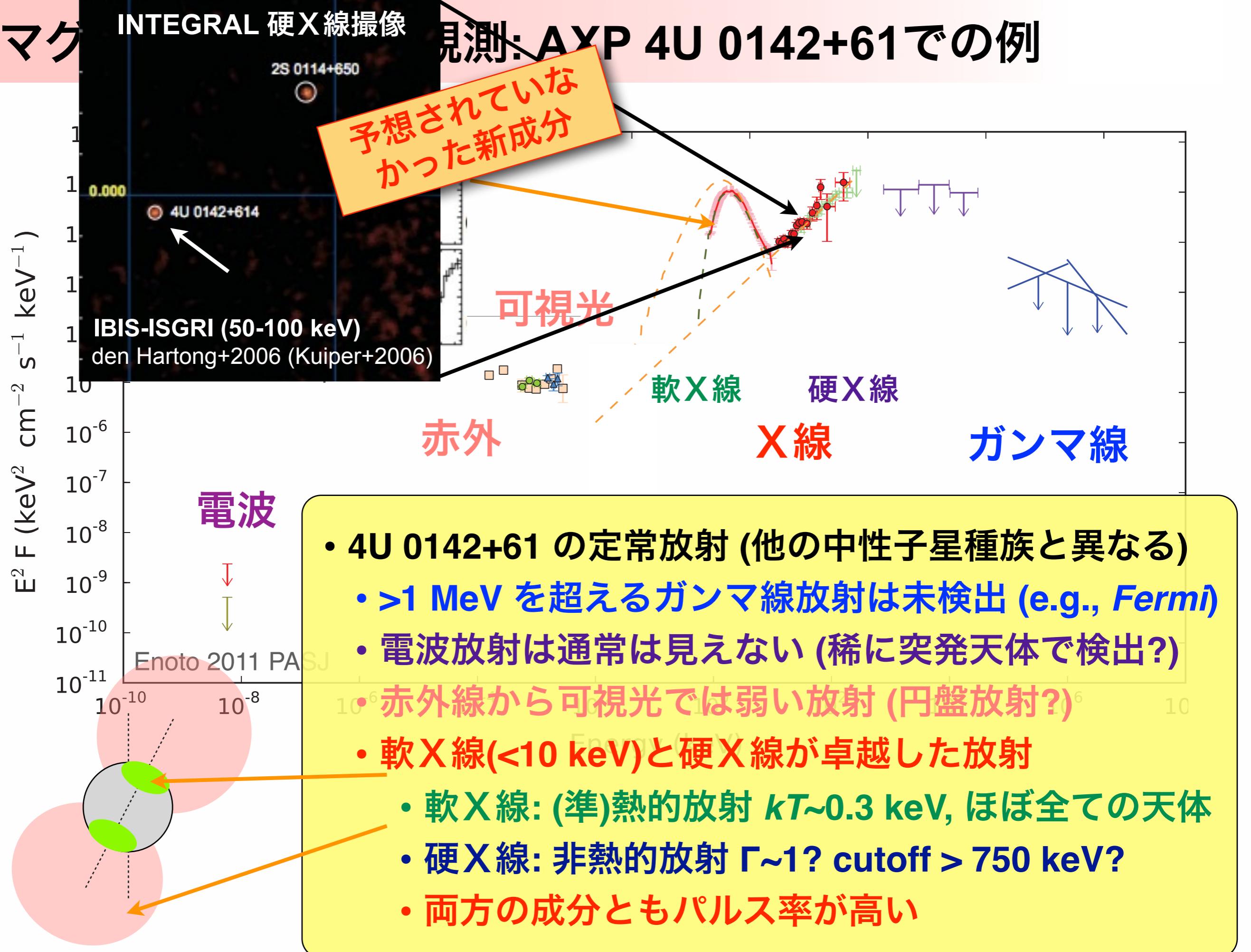
突発増光するマグネターの発見



Swift 衛星は年に 1-2 天体ほどの新マグネターを発見
知られているマグネター数は ~28 個ほどに増加 !!

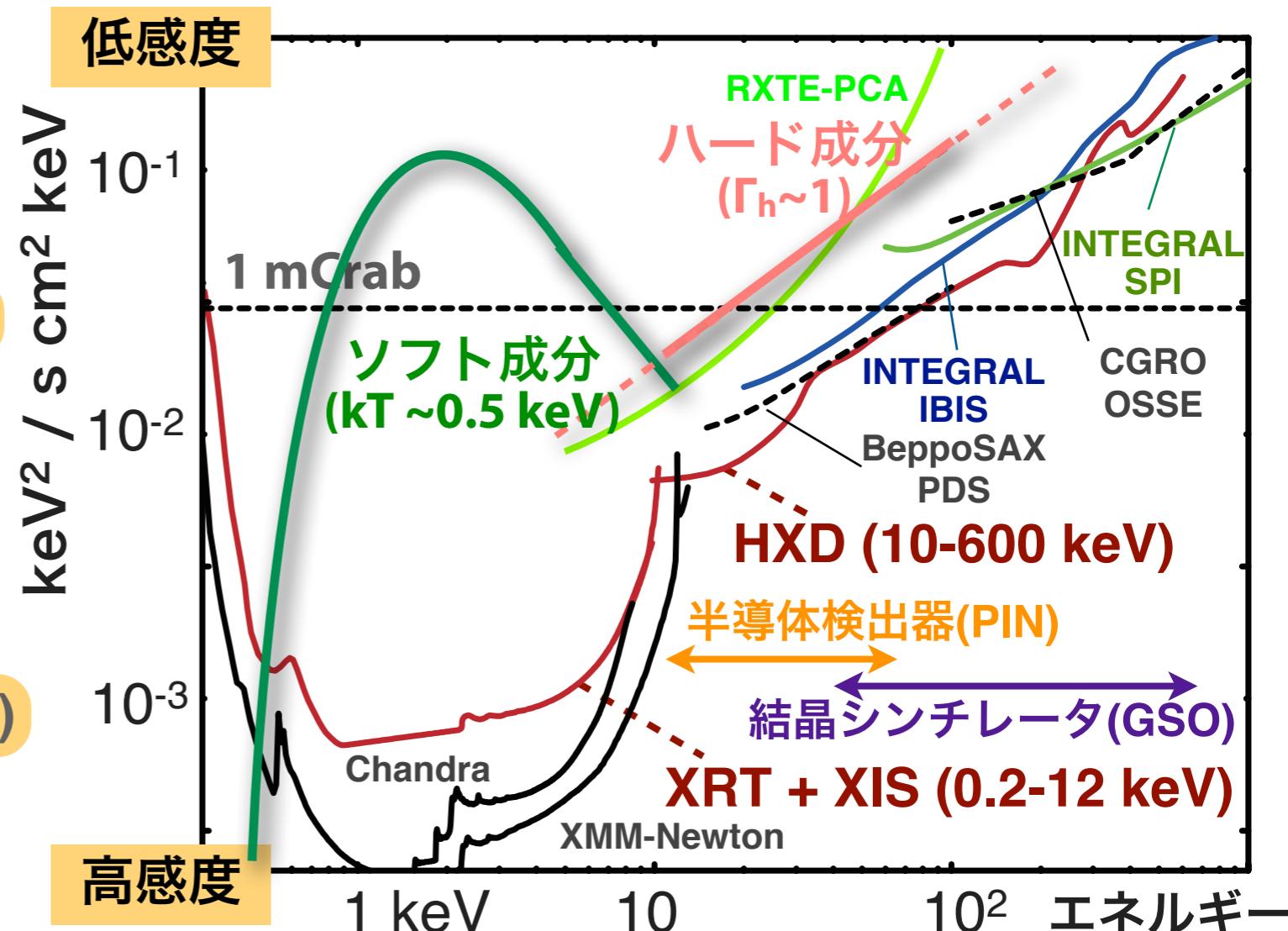
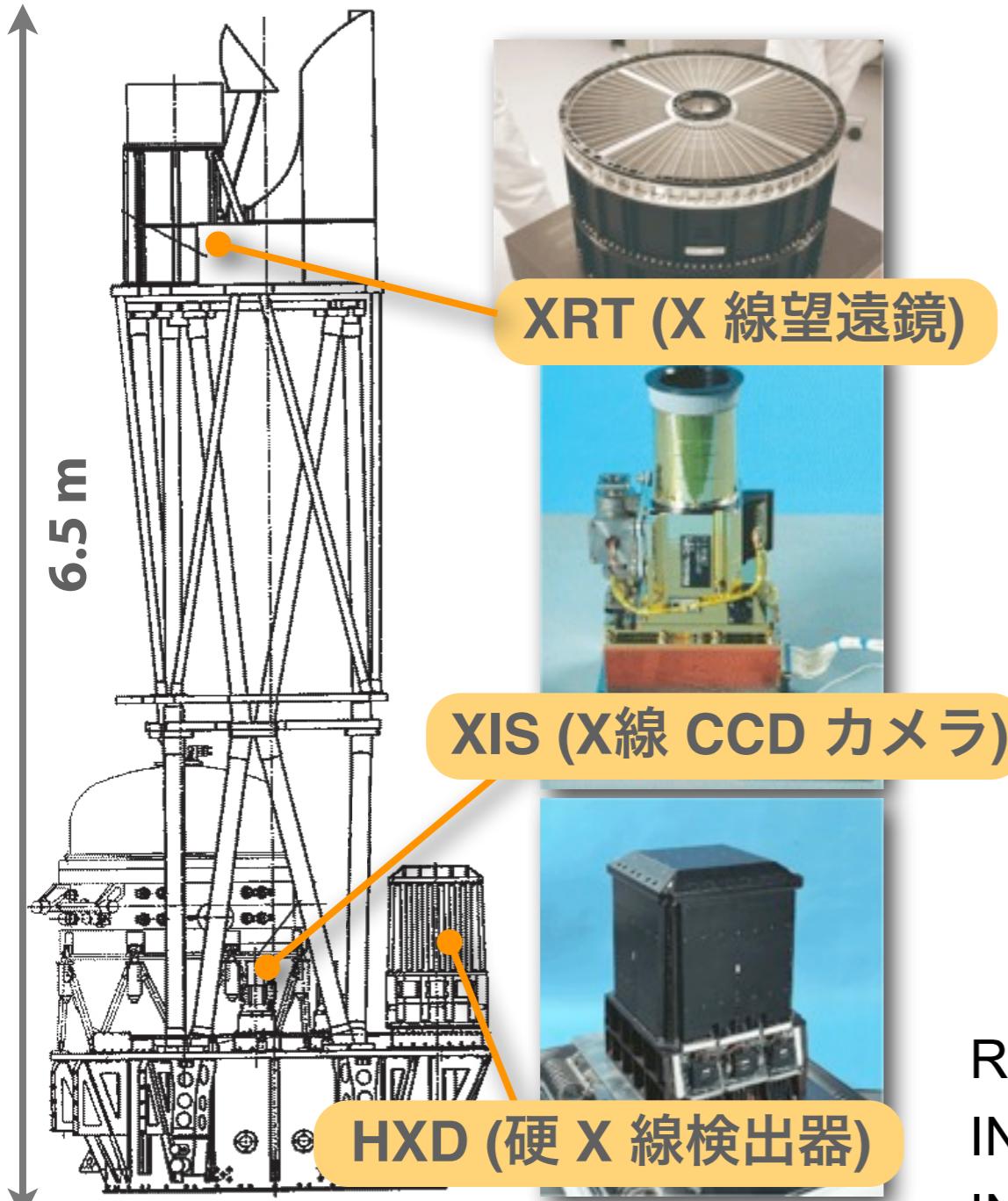


銀河系内には多数のマグネターが隠れている。中性子星の謎を解く鍵になるか？



すざく衛星

日本で 5 番目の宇宙 X 線観測衛星 (2005年7月に打ち上げ, 570 kmへ)



RXTE ; 感度/帯域が不十分

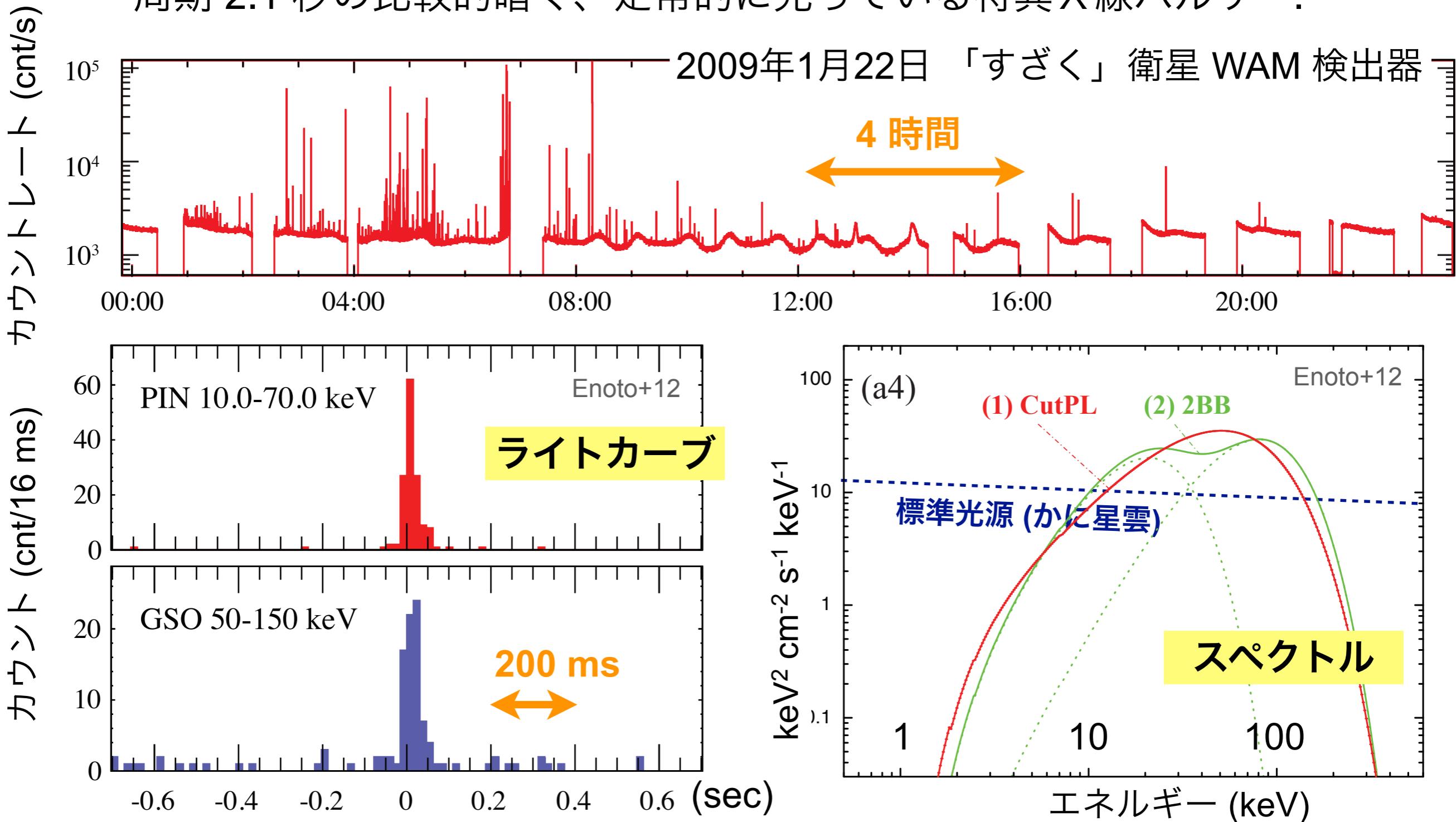
INTEGRAL ; <15 keV に感度なし, 数週間の観測が必要

INTEGRAL+Newton; 厳密な意味での同時観測ではない

すざく衛星はソフト・ハード両成分を、同時に短時間で観測できる

AXP 1E 1547.0-5408 の X 線アウトバースト(1)

周期 2.1 秒の比較的暗く、定常に光っている特異 X 線パルサー。

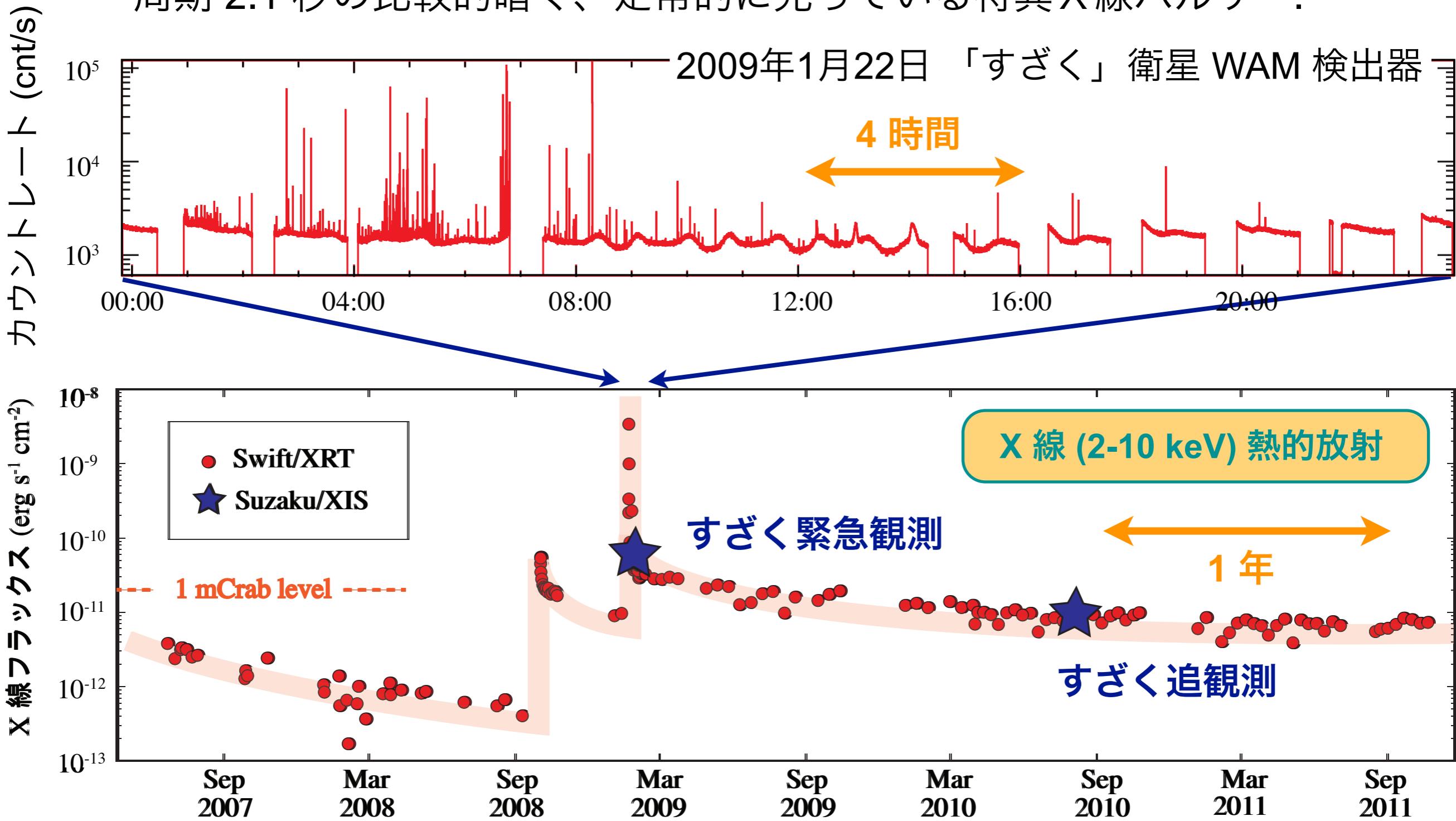


特徴1: きわめて明るい、短時間バースト(Short Burst)を頻発。

継続時間 ~百ミリ秒、2 温度の黒体放射スペクトル ($kT \sim 4, 11 \text{ keV}$)

AXP 1E 1547.0-5408 の X 線アウトバースト(2)

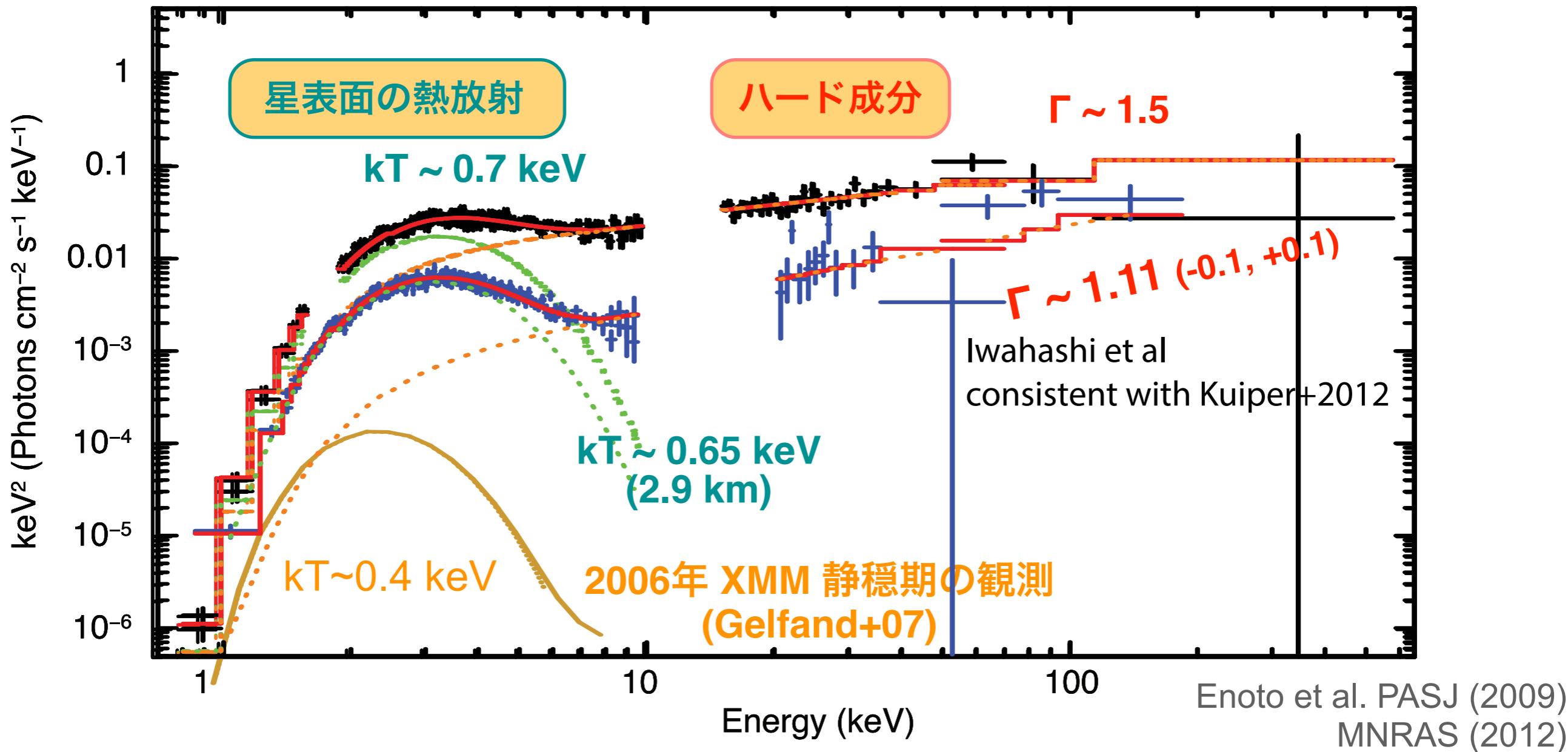
周期 2.1 秒の比較的暗く、定常に光っている特異 X 線パルサー。



特徴2: 定常 X 線が~2-3 枝も突発増光。数ヶ月かけて減光。

AXP 1E 1547.0-5408 の X 線アウトバースト(3)

すざく緊急観測 2009年1月(33 ks)

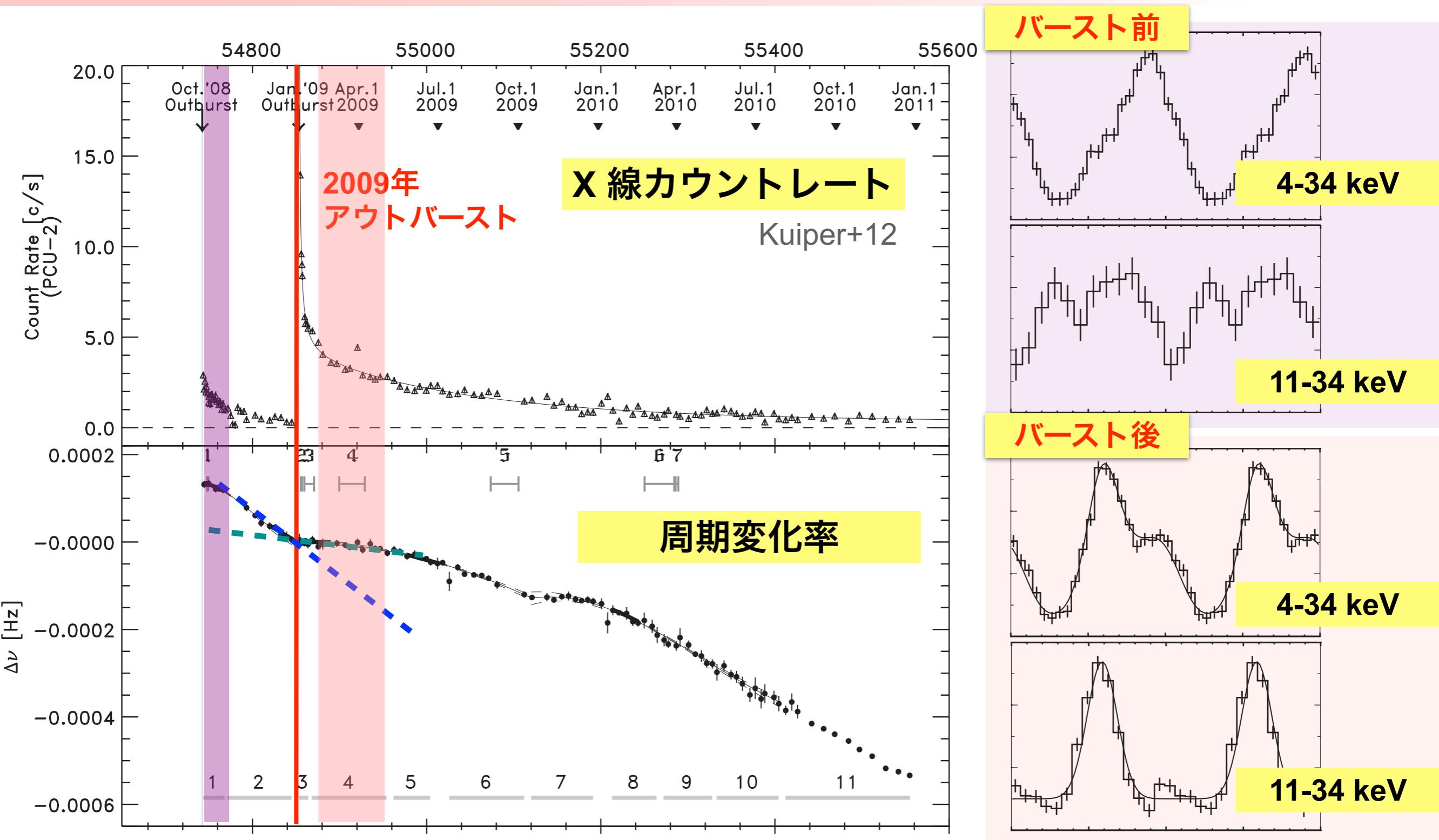


アウトバースト中の天体から明確なハード成分を世界で初めて発見。
1年後の追観測でもハード成分を検出。両成分とも徐々に減光していた。

特徴2: 定常X線が~2-3桁も突発増光。数ヶ月かけて減光。

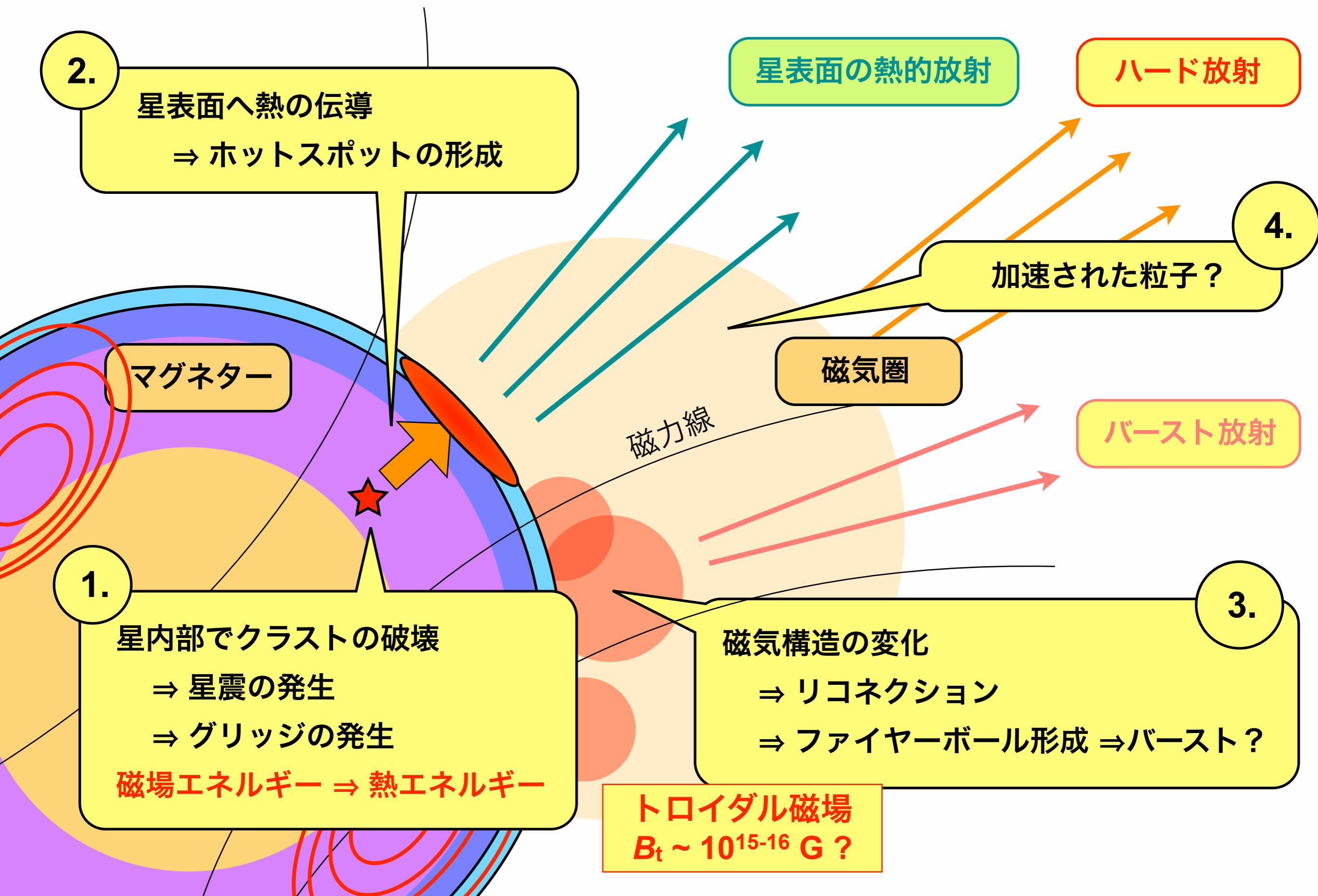
星表面の熱的放射と 10 keV 以上で卓越するハード成分が共に増光

AXP 1E 1547.0-5408 の X 線アウトバースト(4)



特徴3: 自転周期の変化率にとび (グリッジ) が観測されることがある
バーストの前後でパルス波形の変化 → 星表面にホットスポットの出現

X線アウトバーストにおけるエネルギー解放



マグネター表面温度と内部磁場の散逸？

$E_{\text{magnetic}} \Rightarrow E_{\text{thermal}}$

$$S\Delta R \frac{d}{dt} \left(\frac{B^2}{8\pi} \right) = S\sigma T^4$$

volume *B-field dissipation emission*

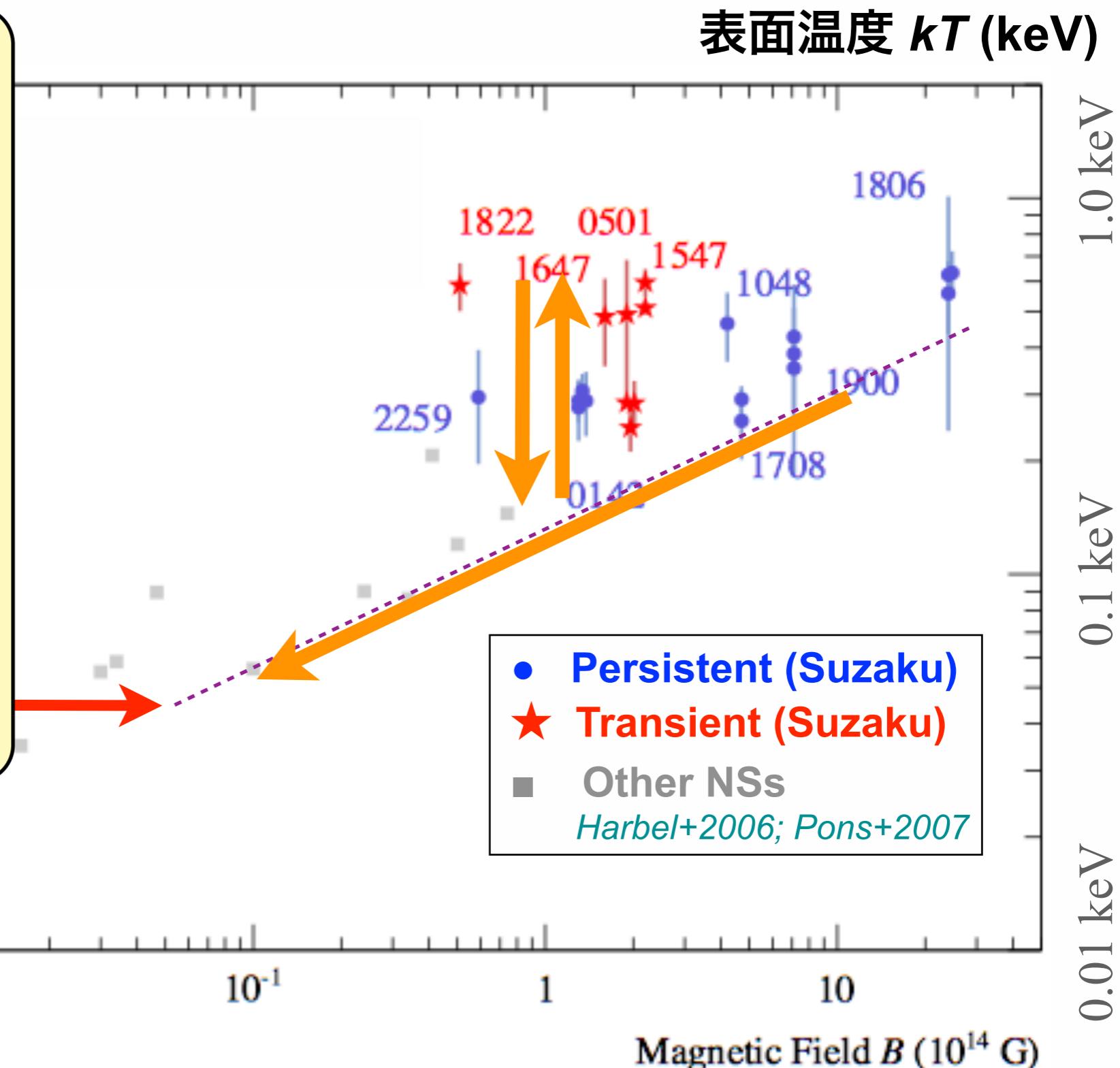
磁場減衰 $\frac{dB}{dt} = -aB$

$$kT \sim B^{+0.5}$$

表面積と温度

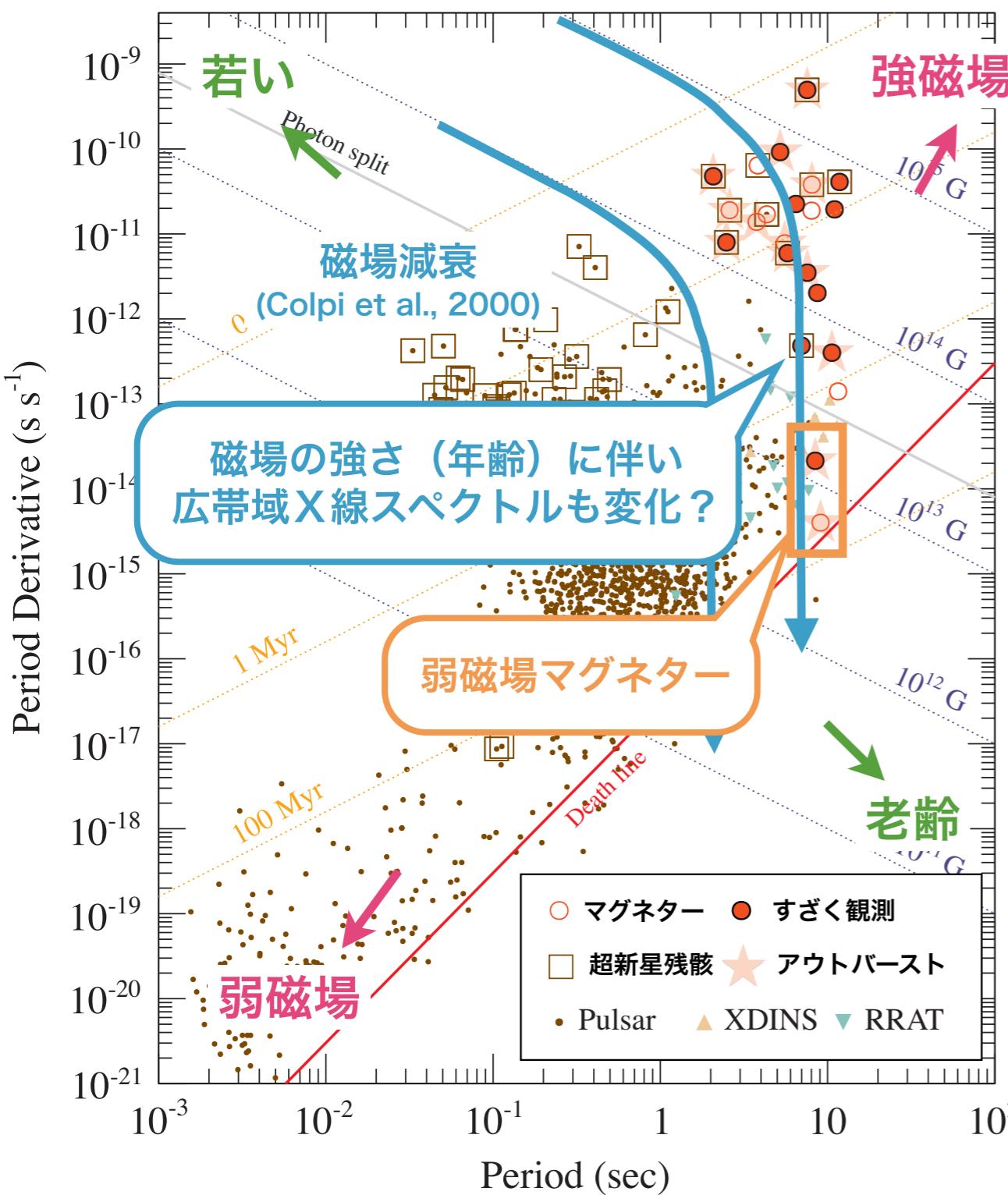
S, T

厚さ
 ΔR

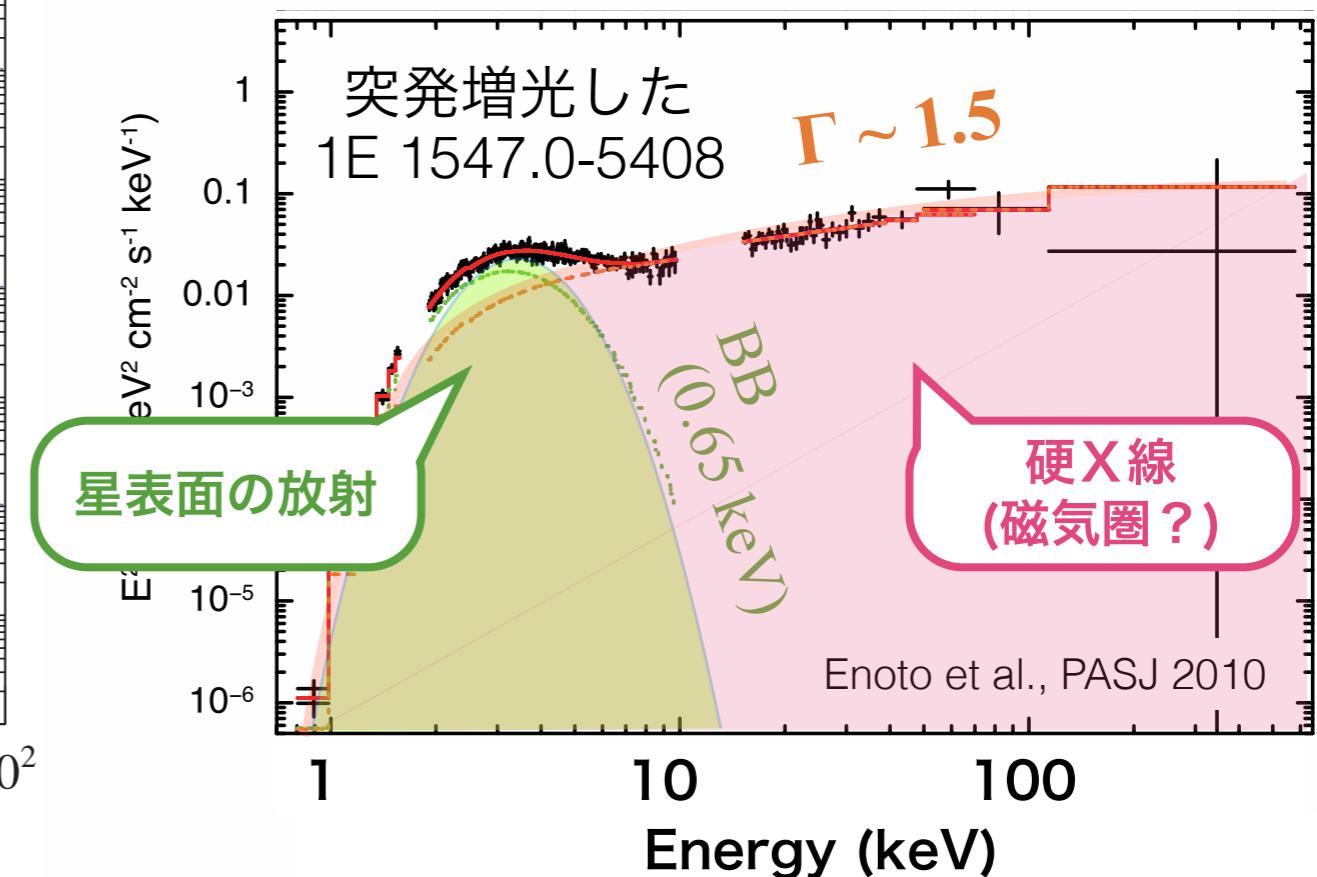


磁場エネルギー散逸の間接的な証拠のひとつ

すざく衛星によるマグネター観測



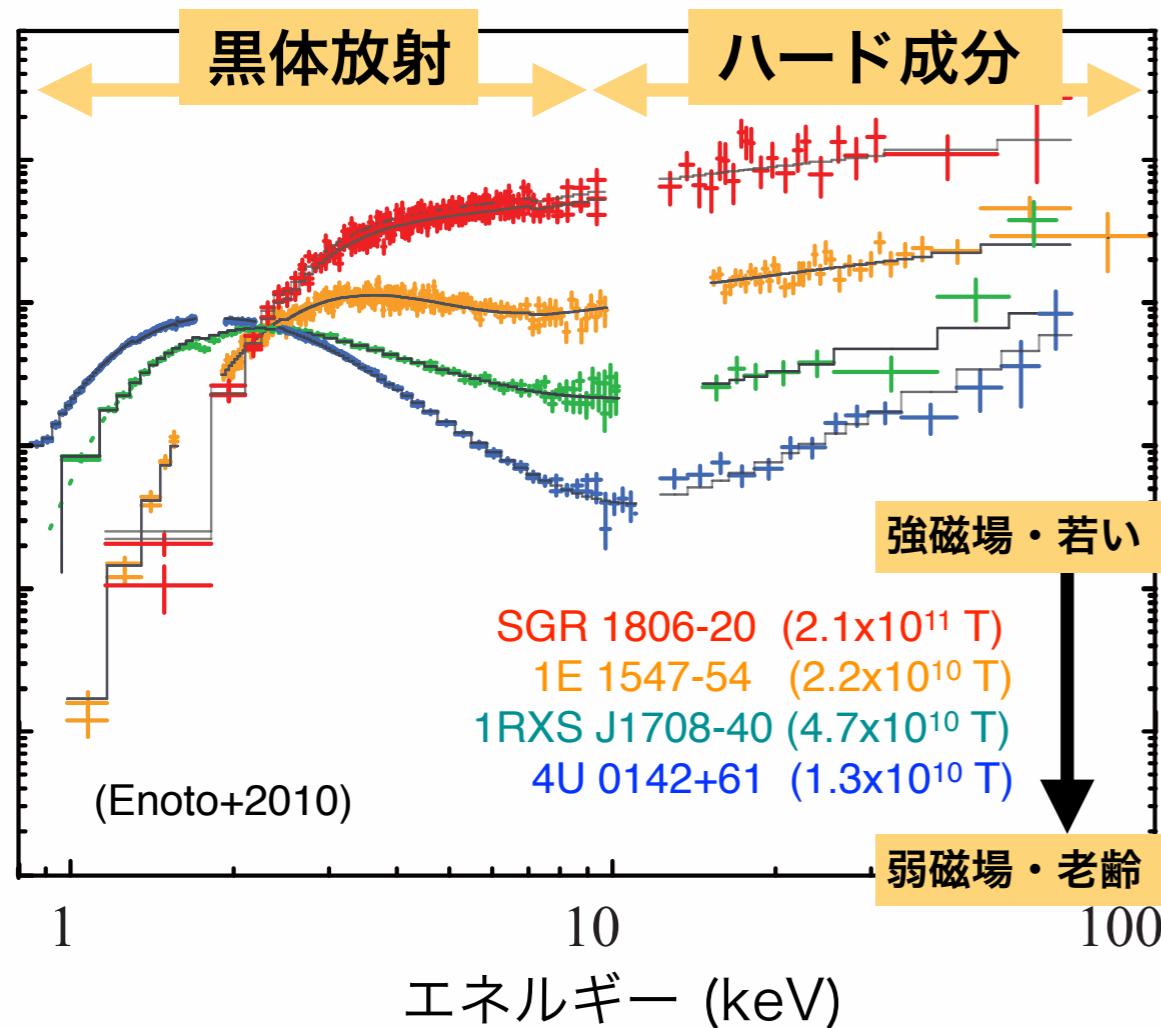
- すざく観測: 2005年7月-2015年8月
- マグネター約23個中の15天体を観測
- 突発天体から硬X線を発見 (TE+2010)
- 磁場強度は硬X線スペクトルに影響?
 - (Enoto et al. ApJL 2010)
- 弱磁場マグネターの発見



マグネターの振る舞いはダイポール磁場の強さ B_d でどこまで表現できるか?

日本のX線衛星「すざく」による系統的な観測

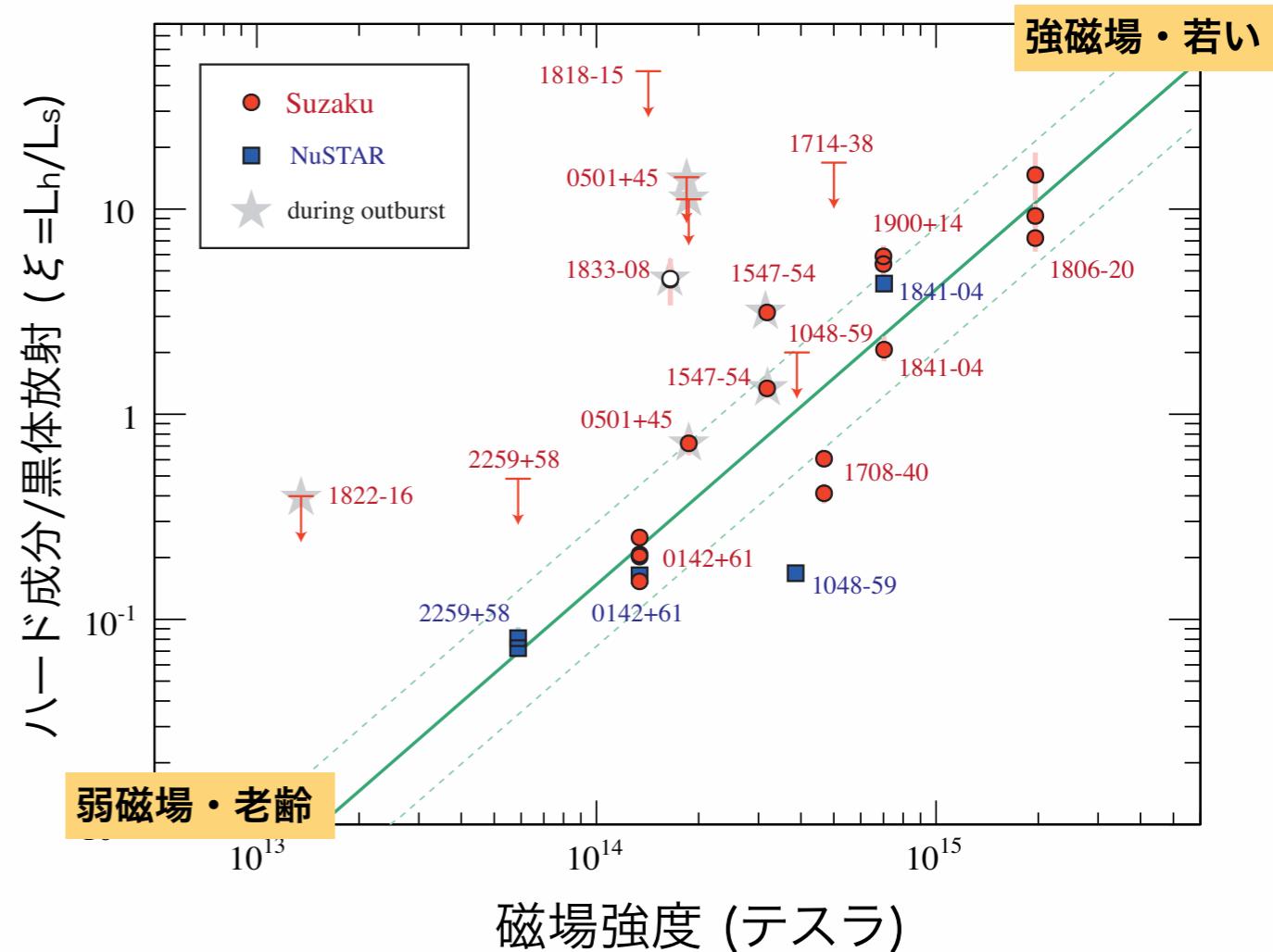
新たに見つかったハード成分を「すざく」で次々検出



熱的放射と非熱的放射の強度比は磁場に相関

$$\begin{aligned}\xi &= L_h/L_s \\ &= (0.045^{+0.024}_{-0.016}) \times (B_d/B_{\text{QED}})^{1.44 \pm 0.19}\end{aligned}$$

マグネターの広帯域スペクトルの系統的進化を発見



硬X線成分の光子指数も磁場に相関

$$\Gamma_h = (0.19 \pm 0.17) \times (B_d/B_{\text{QED}})^{0.76 \pm 0.16}.$$

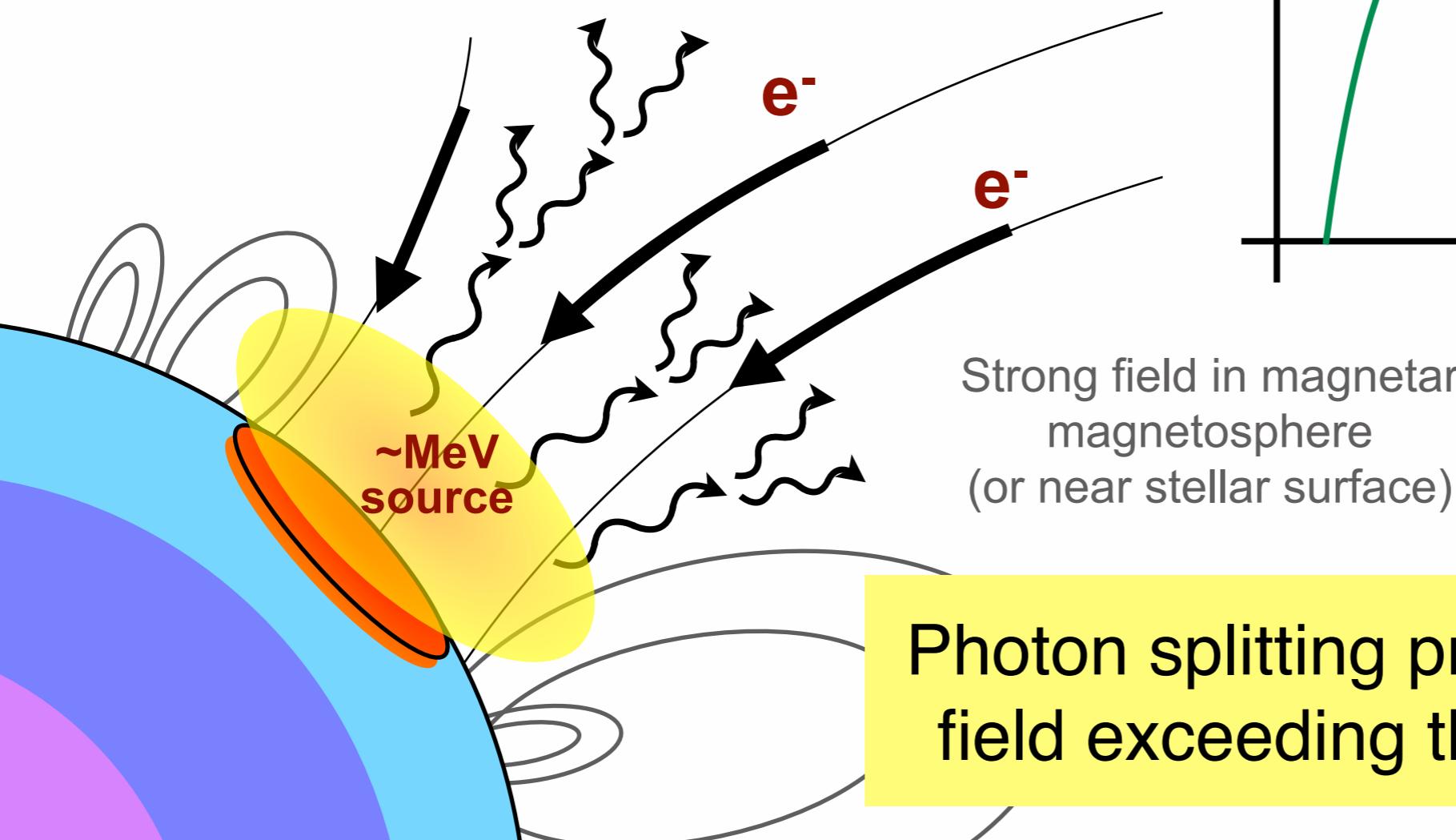
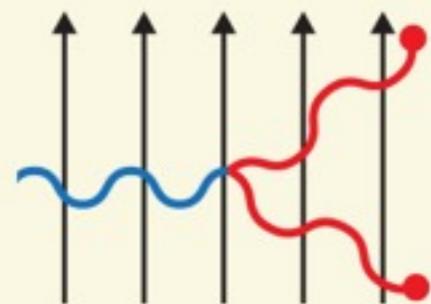
マグネター広帯域スペクトルは、パルサーの特性年齢や磁場強度に伴い、スペクトル進化する兆候を発見。SGR/AXPに統一的な解釈できる？

Origin of Hard X-rays: QED effect?

$B > \text{QED Critical Field}$

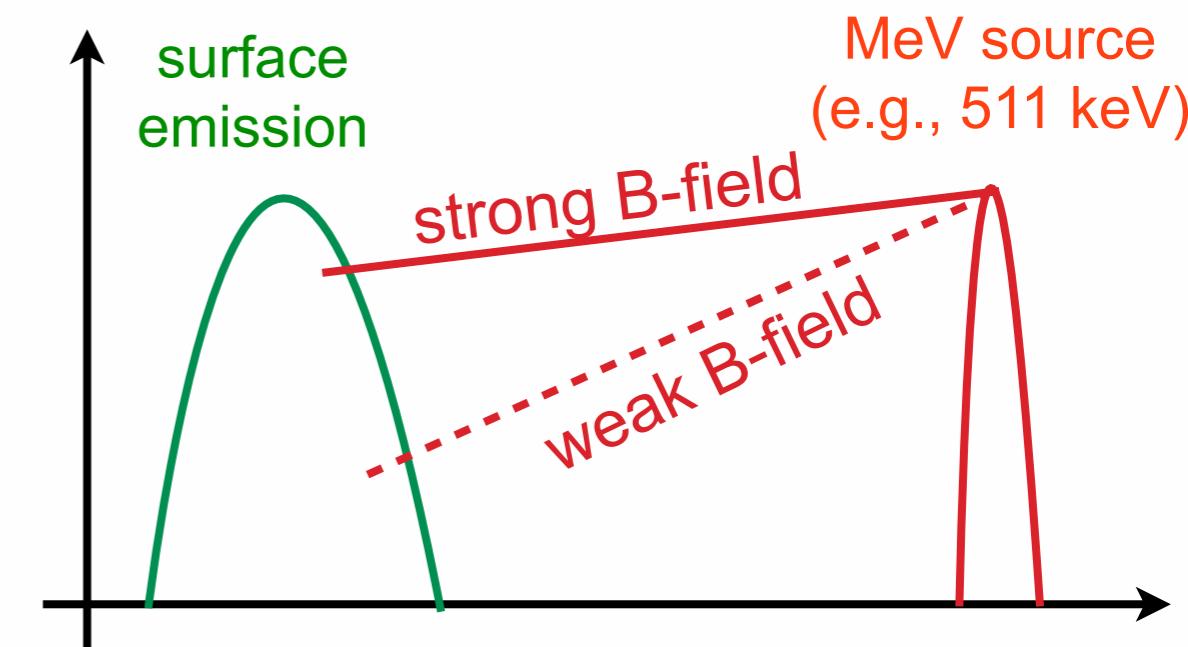
$$B_{\text{QED}} = 4.4 \times 10^{13} \text{ G}$$

Photon Splitting



Several models

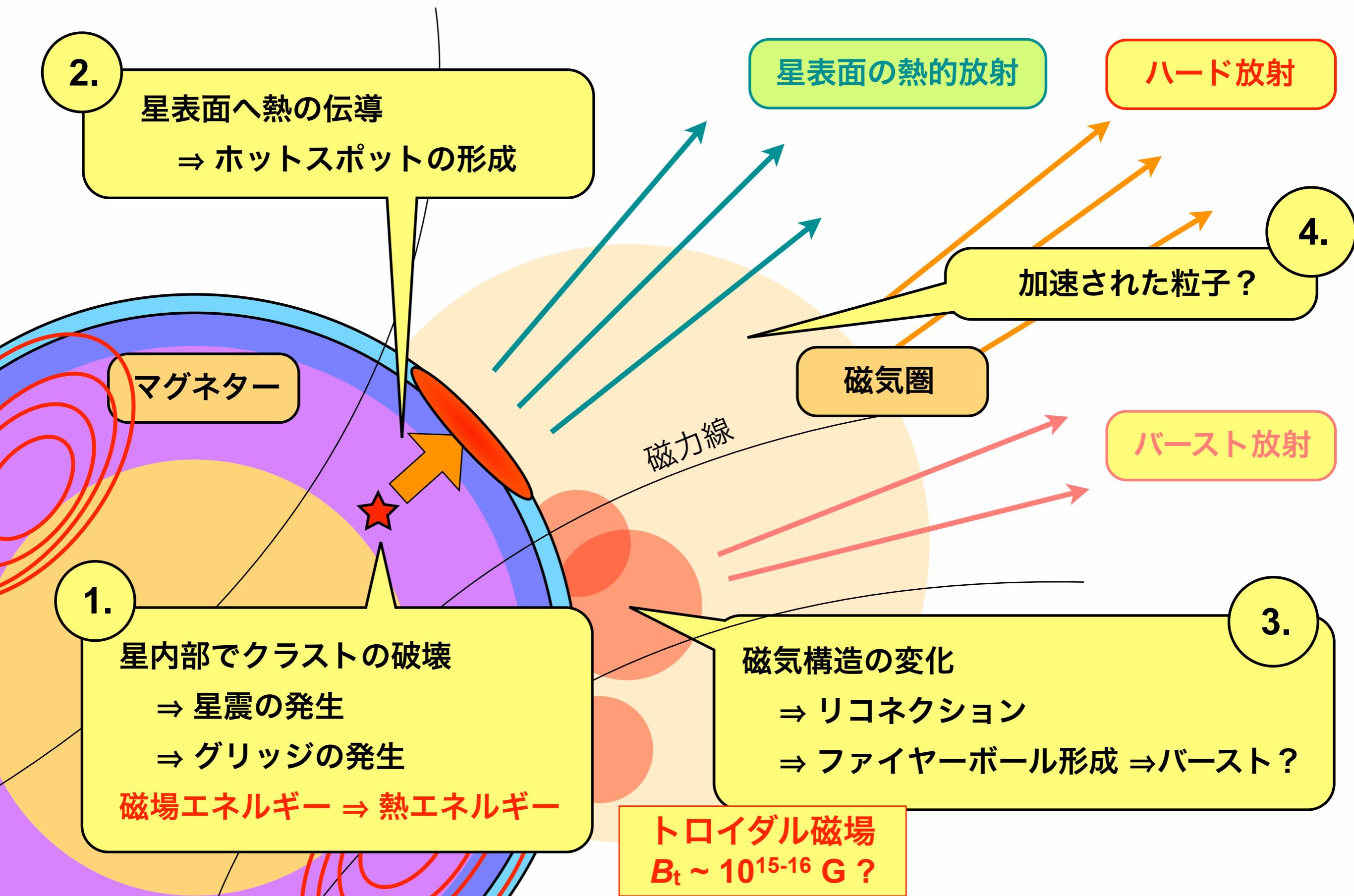
- Thermal Bremsstrahlung (Thompson & Beloborodov 05)
- Resonant Compton up-scattering (Baring & Harding 07)
- Others (Heyl & Hernquist 2007, Beloborodov 2013
Trumper+2010, Kuiper+2006)



down-cascade
due to the photon splitting

Photon splitting process appeared in B -field exceeding the QED critical field?

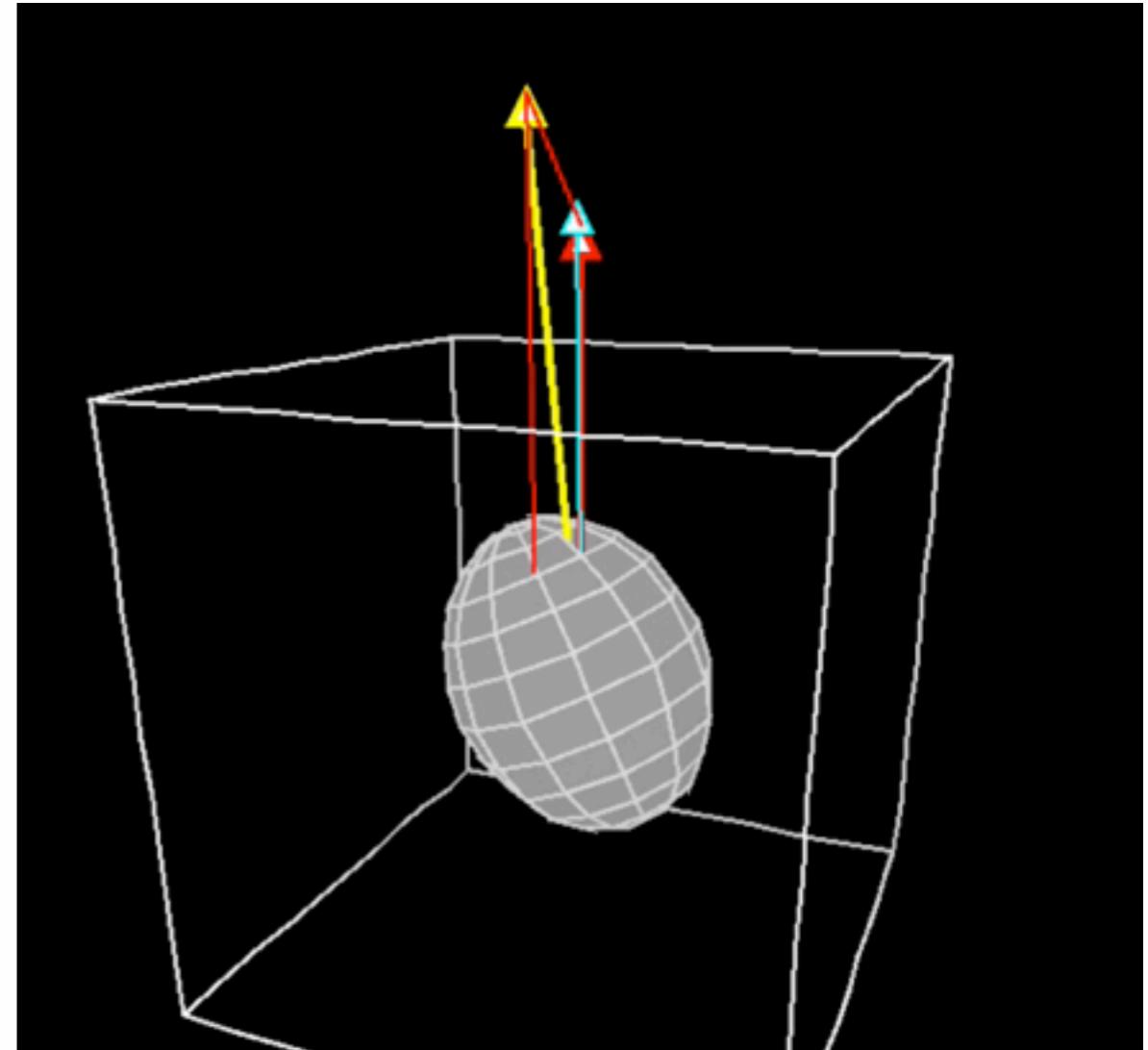
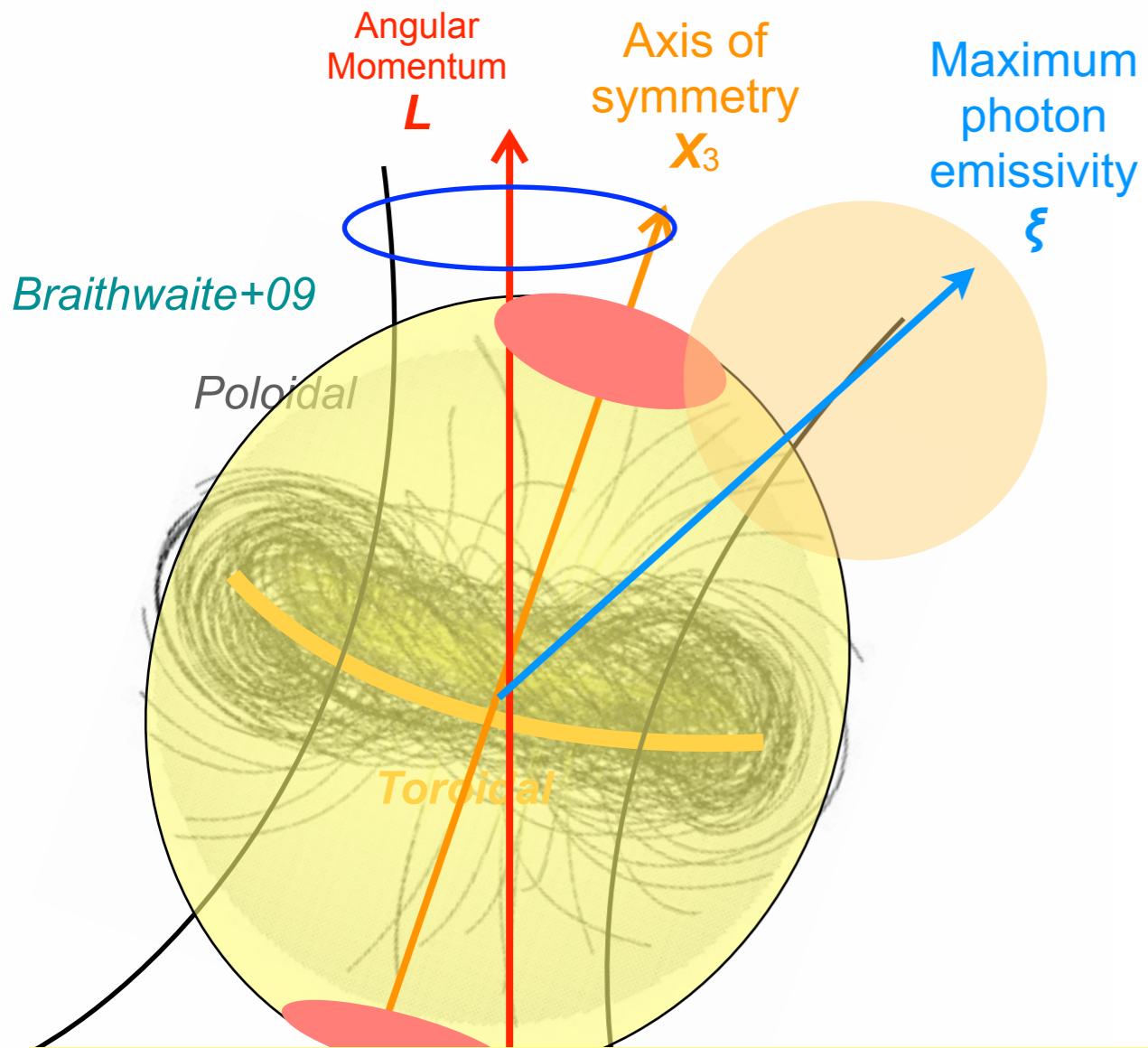
X線アウトバーストにおけるエネルギー解放



Toroidal Magnetic Field

Huge energy reserver is needed inside the magnetars

⇒ Strong toroidal Field inside NSs? (can not be measured by $P-P_{\text{dot}}$)

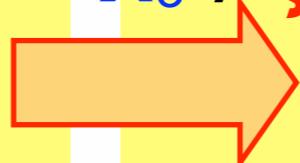


Free Precession with period Q

Toroidal B-field ⇒ Prolate shape

$$\epsilon = \frac{\Delta I}{I} \sim 10^{-4} \left(\frac{B_t}{10^{16} \text{ G}} \right)^2$$

$x_3 \neq \xi$

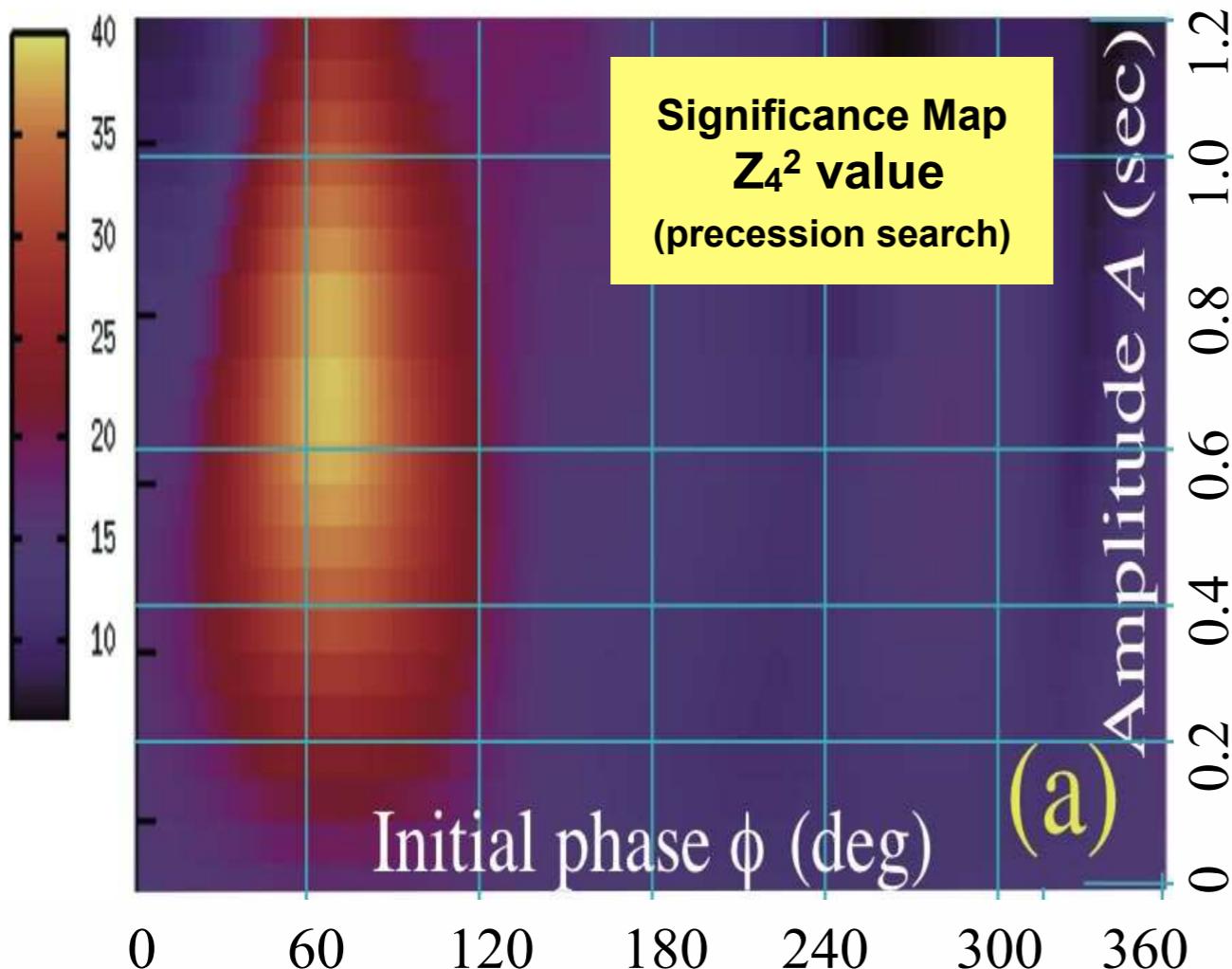


$$Q = \frac{P_{\text{spin}}}{\epsilon}$$

(see., e.g., Landau & Lifshitz textbook)

Evidence for Precession

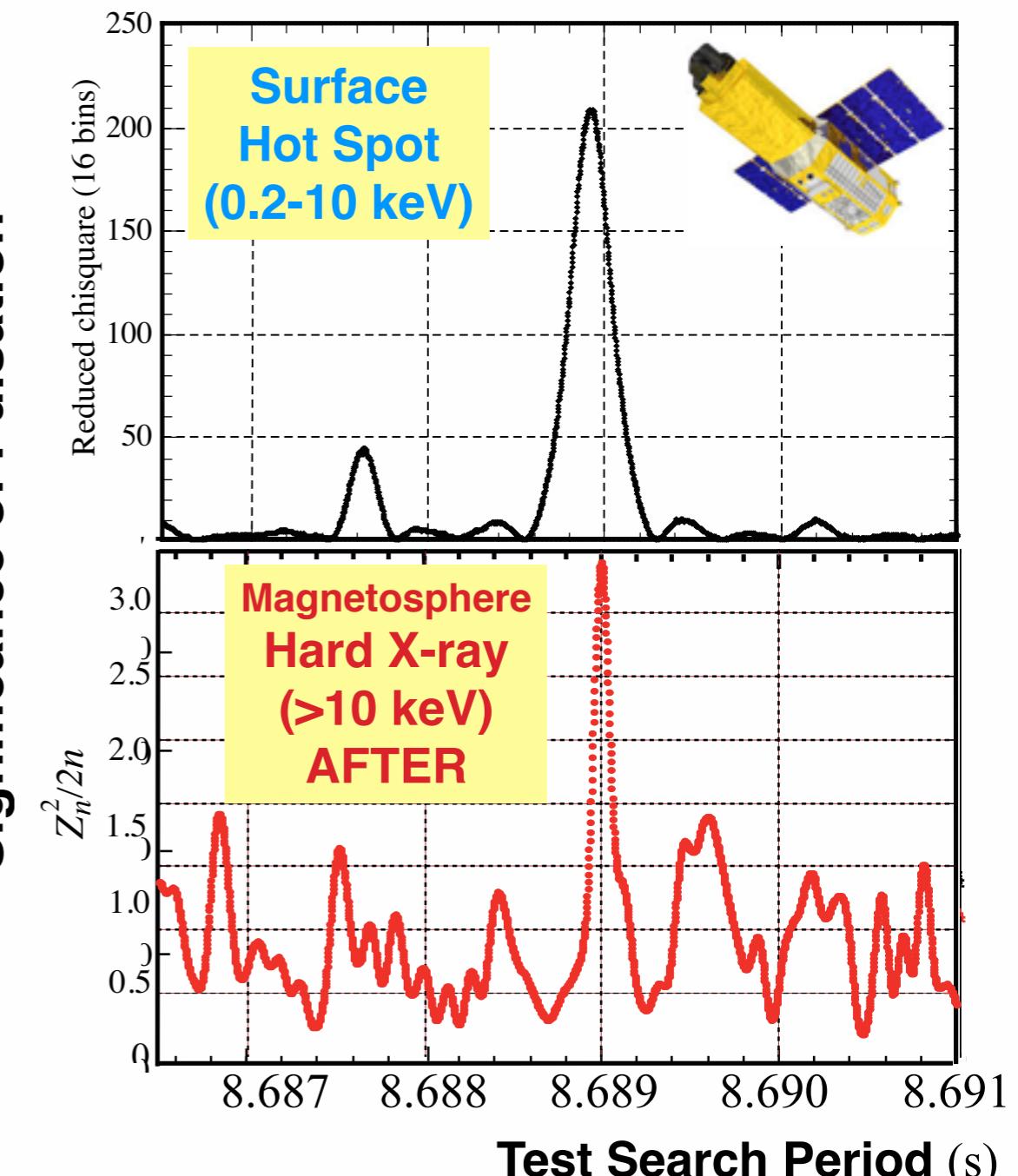
Prototypical AXP 4U 0142+61 ($P=8.69$ s, Poloidal field $B_d \sim 1.3 \times 10^{14}$ G)



Hard X-ray shows a sinusoidal, $T=1.5$ hour, phase modulation (amplitude 0.7 s)

Makishima, TE et al., PRL, 2014

$$\epsilon \sim \frac{8.69 \text{ s}}{1.5 \text{ h}} \sim 1.6 \times 10^{-4}$$



Toroidal B -field $B_t \sim 10^{16}$ G

$$\epsilon \sim 10^{-4} (B/10^{16} \text{ G})^2$$

also from 1E 1547.0-5408 (Makishima, TE et al., PASJ, 2015) and two more sources (NuSTAR)

マグネターに関する諸問題

1. SGRとAXPのエネルギー源は磁場？マグネター仮説と対立仮説の検証！
2. 中性子星の磁場はどのように保持され進化する？観測とどう整合する？
3. 磁場エネルギー散逸の場所は？ 内部(クラスト)？磁気圏？表面大気？
4. 電磁波の放射は？QED磁場は硬X線に？軟X線の偏光？電波・可視は？
5. 強磁場パルサーは静穏期マグネターか？老齢なマグネターは隠れてる？
6. 陽子サイクロトロン、自由歳差(トロイダル磁場)をどう検証していくか？
7. 定常X線とバースト放射(short burst)の関係は？グリッジとの関係は？
8. 超新星爆発でマグネターはどう生まれるか？キック速度、初期磁場は？
9. なぜマグネター星雲(PWN)は見えないか？宇宙線は流れ出しているのか？
- 10.QPO 観測, 星振学, 星の内部構造へのアプローチを深めるには？
- 11.ガンマ線バースト、超新星爆発でマグネター誕生は見えているのか？
- 12.ULX Pulsar (M82), 銀河中心マグネター, Fast Radio Burst との関係？
- 13.ASTRO-H, NICER, PRAXyS の将来計画で独自視点でどう切り込む？
- 14.巨大フレアのメカニズムは？次に起きたらどんな観測を行えば良いか？

物理科学月刊誌「パリティ」に解説記事

http://pub.maruzen.co.jp/book_magazine/magazine/pub-zassi-j.html

8月号予告 特集：マグネター

7月24日発売
定価（本体1,400円+税）

特集記事

超強力な磁場をもつ天体「マグネター」は多くの謎に包まれてきた。本特集では、観測の進展や理論研究から明らかになった「マグネター」の最前线に迫る。

宇宙最強の磁石星：マグネター
観測で垣間見る極限物理

強磁場が中性子星に及ぼす影響：定常状態にある磁場星の構

articles

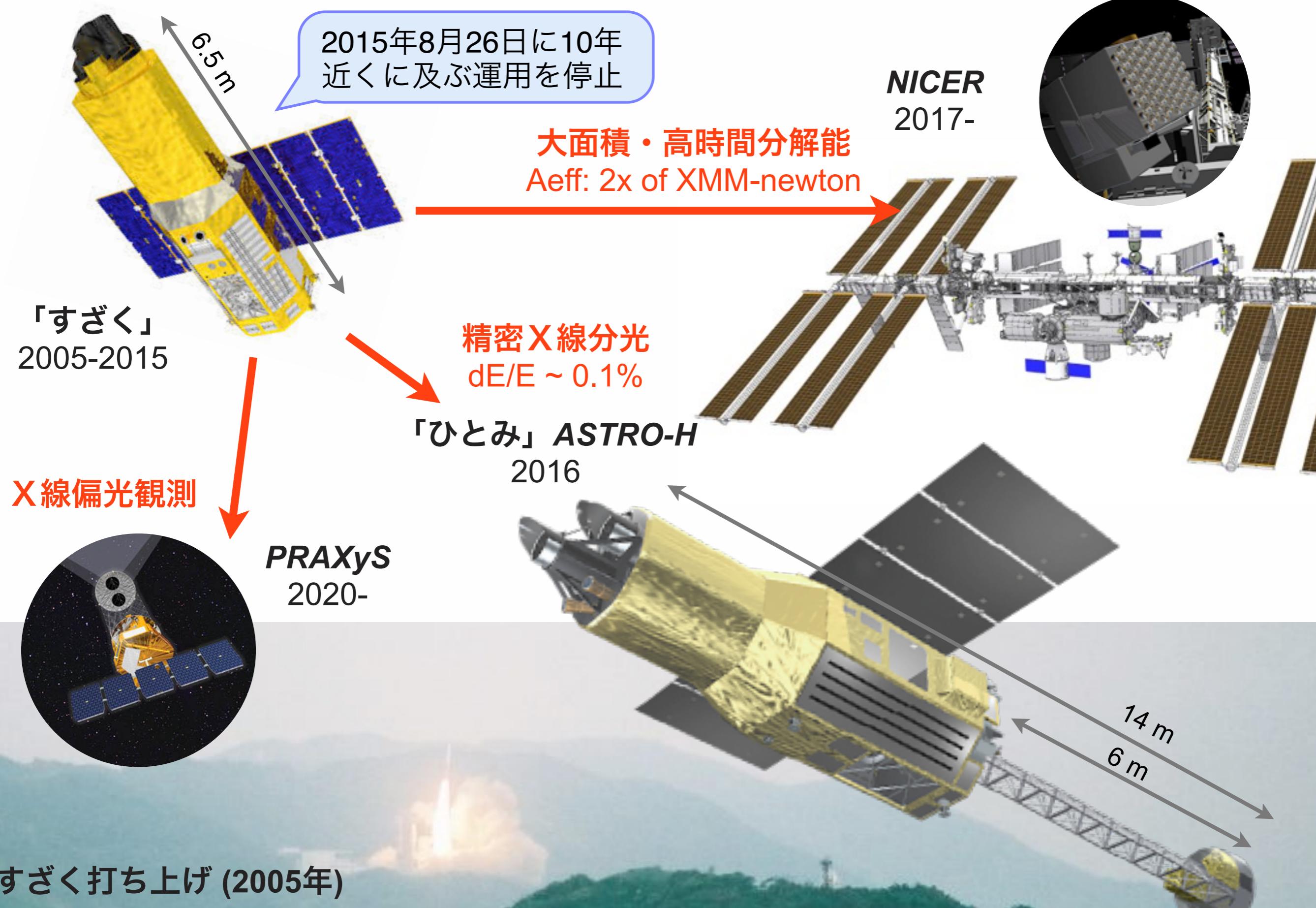
なぜある量子状態が選択されるのか

シュレーディンガーの猫の思考実験は有名であるが、私たちは猫の生死のどちらか、ある選択された状態のみを経験する。このような量子状態の選択に関する新しい理論である「量子論的ダーウィニズム」について解説する。

news

ナノ液滴における量子渦

将来のX線観測



ひとみ衛星 (ASTRO-H) の打ち上げ



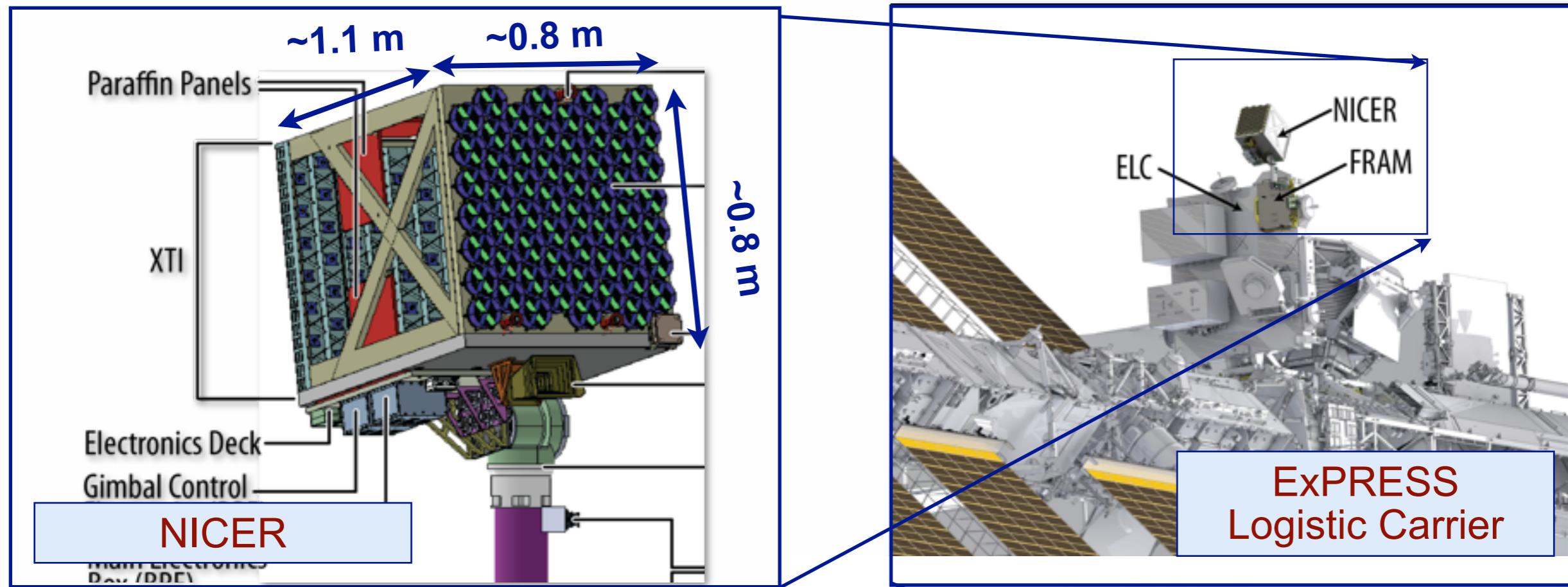
ISAS/JAXA

日本の5代目のX線衛星、種子島から H-IIA ロケットで打上に成功

中性子星の内部を探る NICER プロジェクト

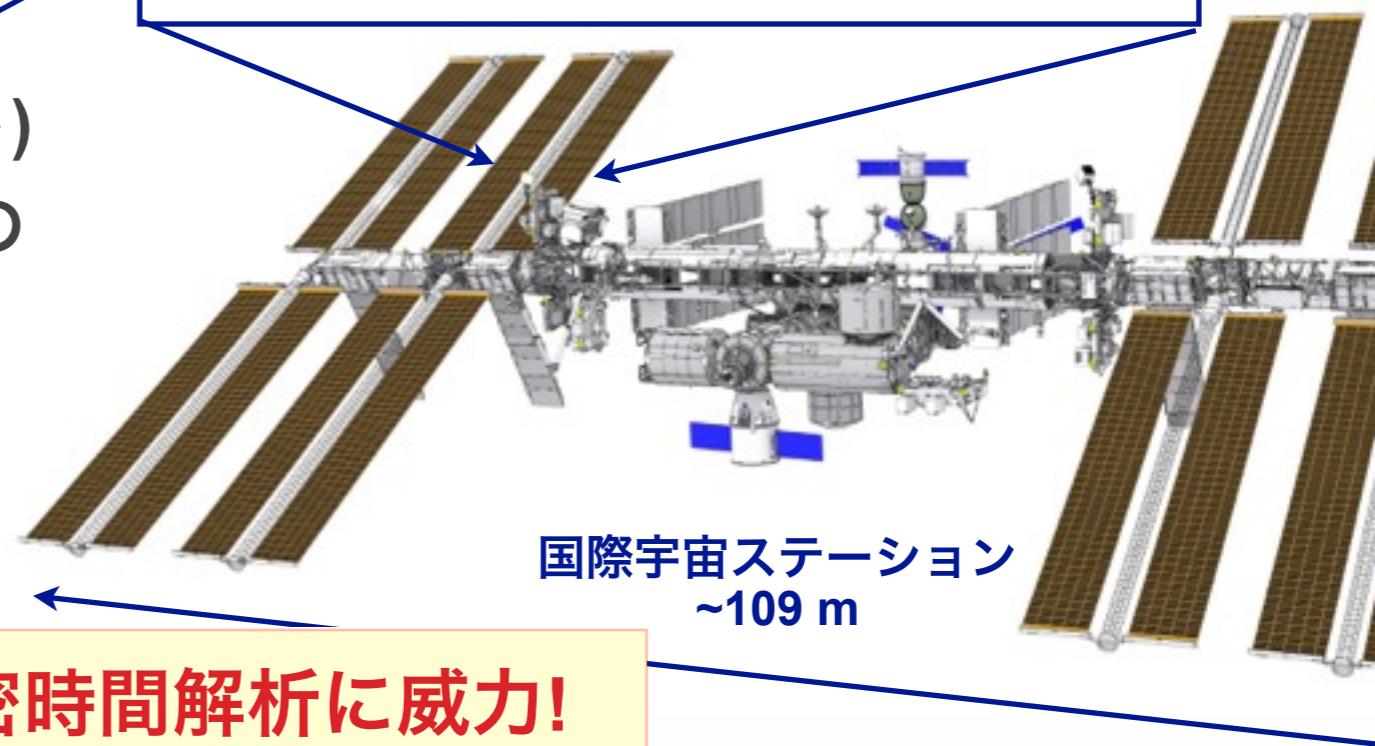
Neutron star Interior Composition ExploreR (NICER)

2017年春にISSへ搭載 !!



- 56 個 の (X線集光系+シリコンドリフト)
- 0.2-12 keV: NS 表面のホットスポットの熱放射 ($T \sim 0.3$ keV) に最適化
- $A_{\text{eff}} > 2000 \text{ cm}^2$ at 1.5 keV, XMM の2倍
- $\Delta t \sim 200 \text{ ns}$ ($\Delta E \sim 85 \text{ eV}$ at 1 keV)

強度変動するコンパクト天体の超精密時間解析に威力!



内部の高密度状態は質量と半径の精密測定が必要

Precise radio measurements
(e.g., Demorest et al. 2010)

Quiescent LMXB emission
(e.g., Guillot & Rutledge 2014)

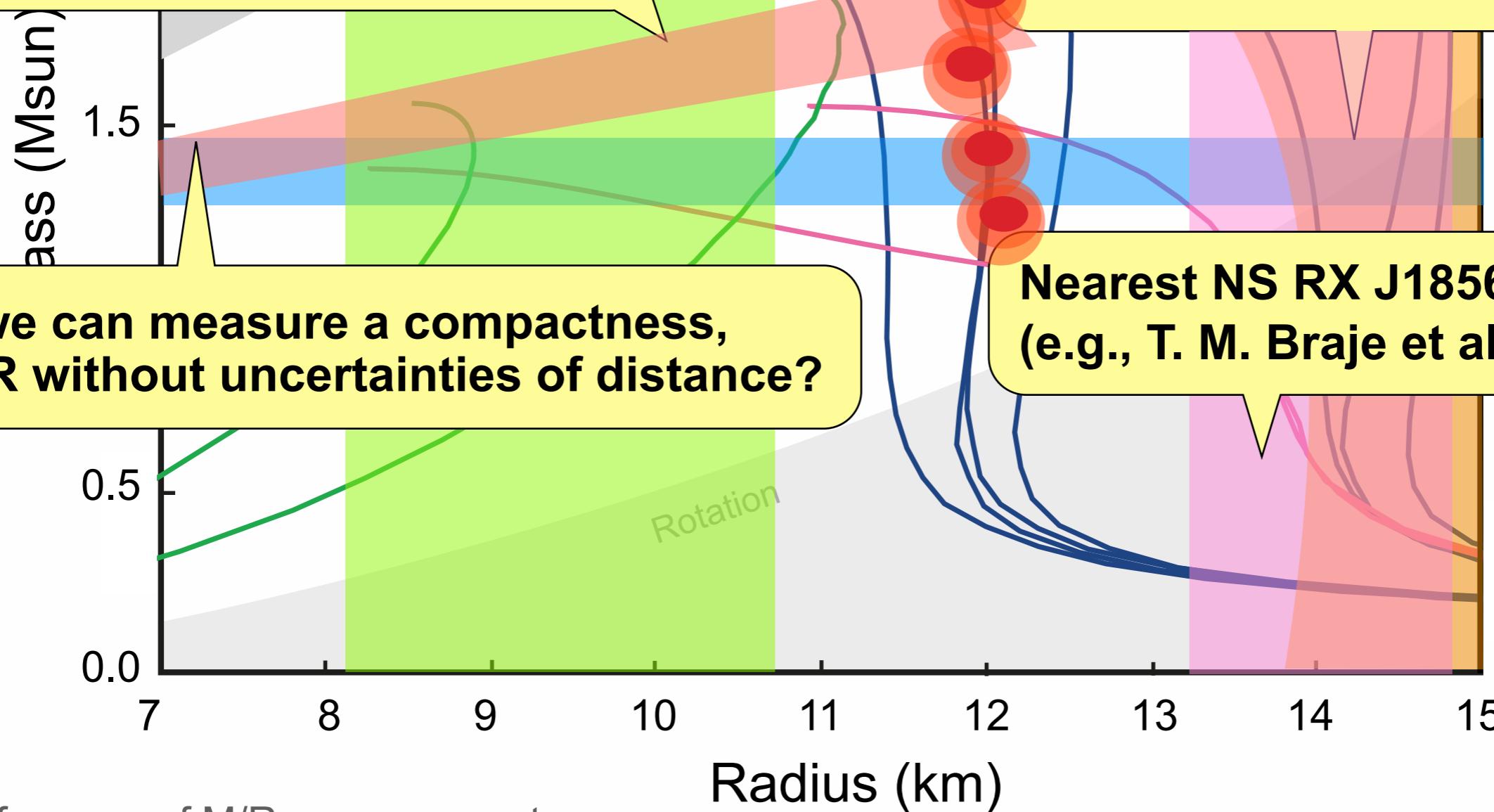
Astronomical observations
of M & R (our or my dream)

X-ray burst method (e.g., X7
from Steiner et al. 2010)

If we can measure a compactness,
M/R without uncertainties of distance?

Nearest NS RX J1856.5-3754
(e.g., T. M. Braje et al. 2002)

Double NS
systems



A lot of papers of M/R measurements
(see review in detail, Bhattacharyya 2010)

EoS Curves from Demorest et al. 2010

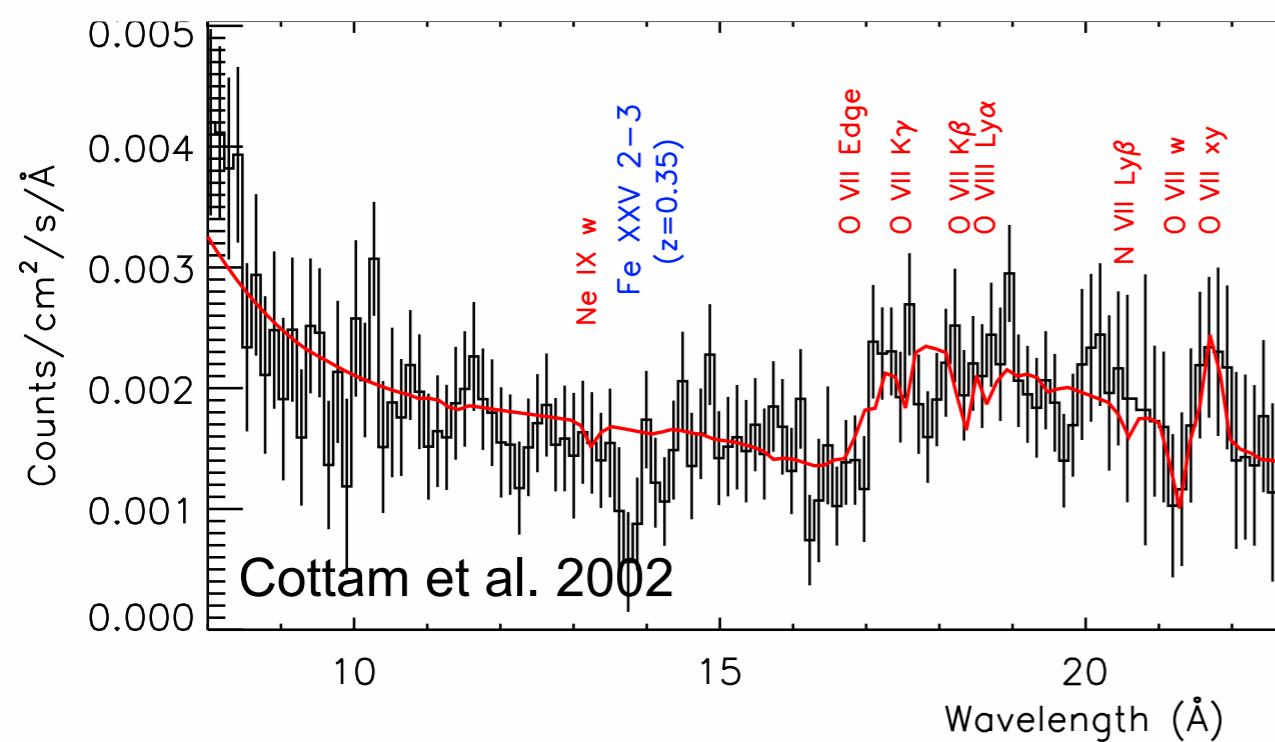
中性子星の半径の精密測定には？

- 質量 M は、パルサーの連星運動から精度の良い測定が可能 (電波)。
- 半径 R は、NS 表面の放射(X線)で計測。きわめて難しい。
 - 不定性：天体までの距離、星の大気組成、磁場の影響。
- M/R は重力赤方偏移 z (~ 0.2) から。距離によらない。

$$1 + z = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 R}\right)^{-1/2}$$

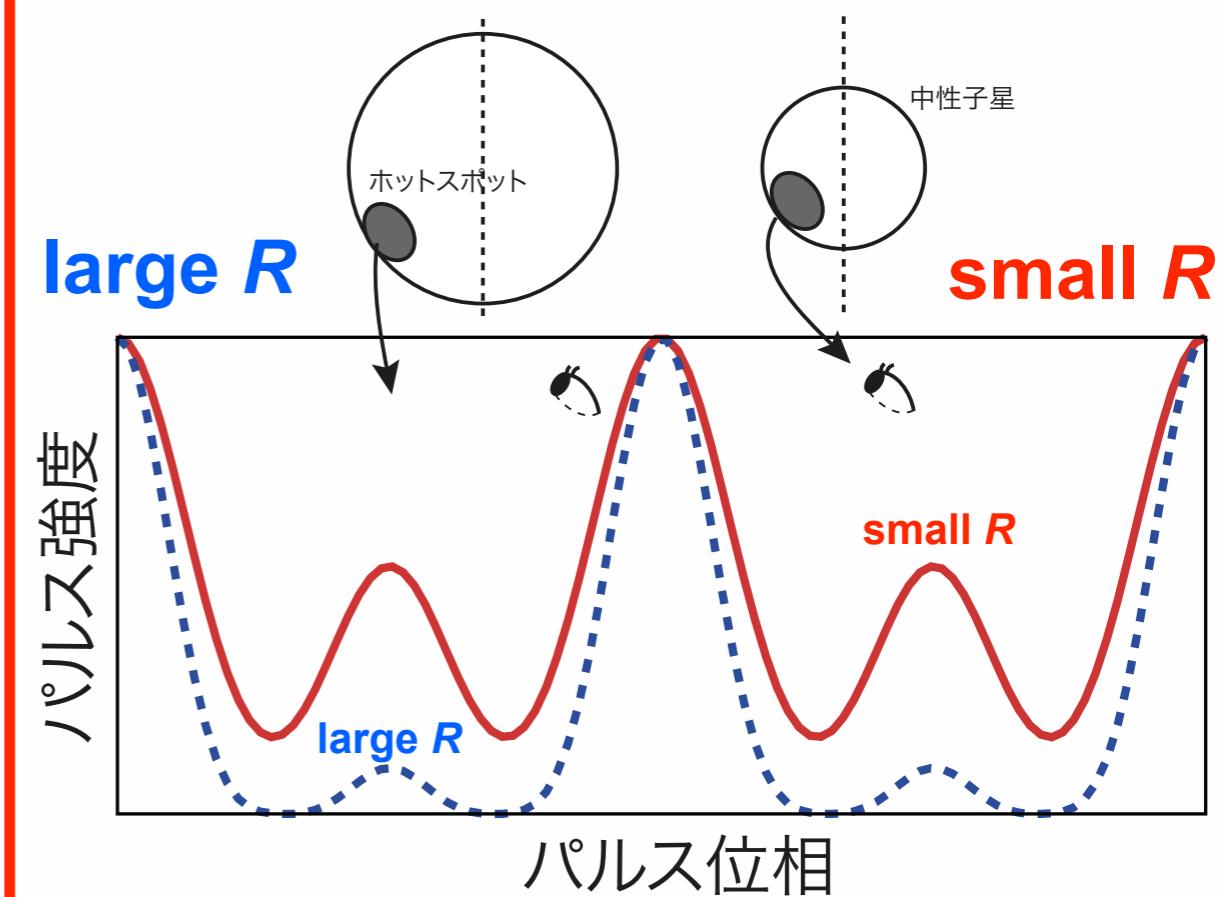
方法1: スペクトル中の吸収線

XMM-Newton衛星による EXO 0748-676 からの検出、その後の観測で追試できず(Cottam+08)



⇒ 高エネルギー分解能 (ひとみ衛星)

方法2: 表面パルスの重力場変形



⇒ 光子統計と高い時間分解能

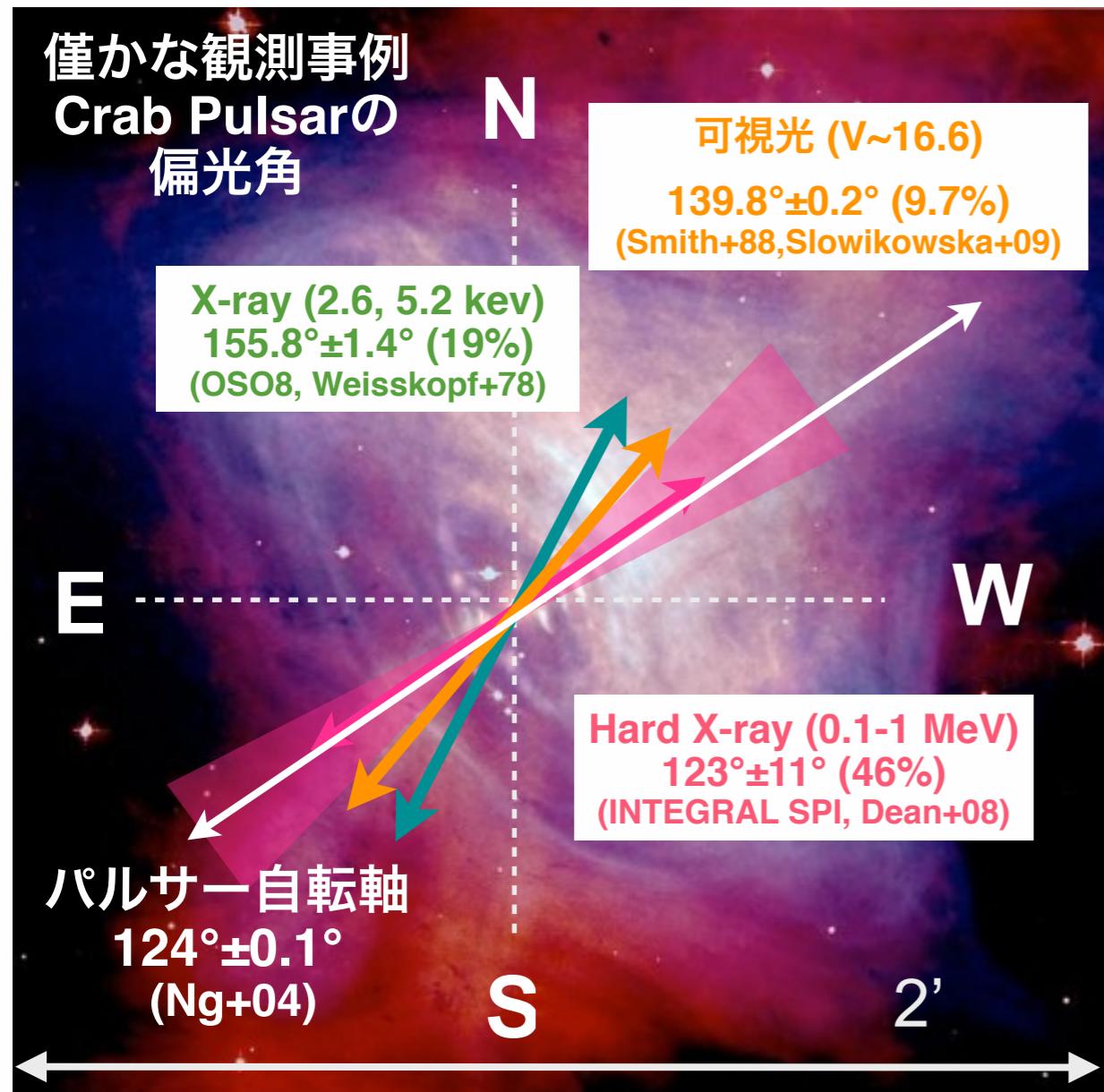
海外での武者修行の時に参加、成果に期待！

NICER (Neutron star Interior ExploreR)



X線偏光は未開拓の観測手法

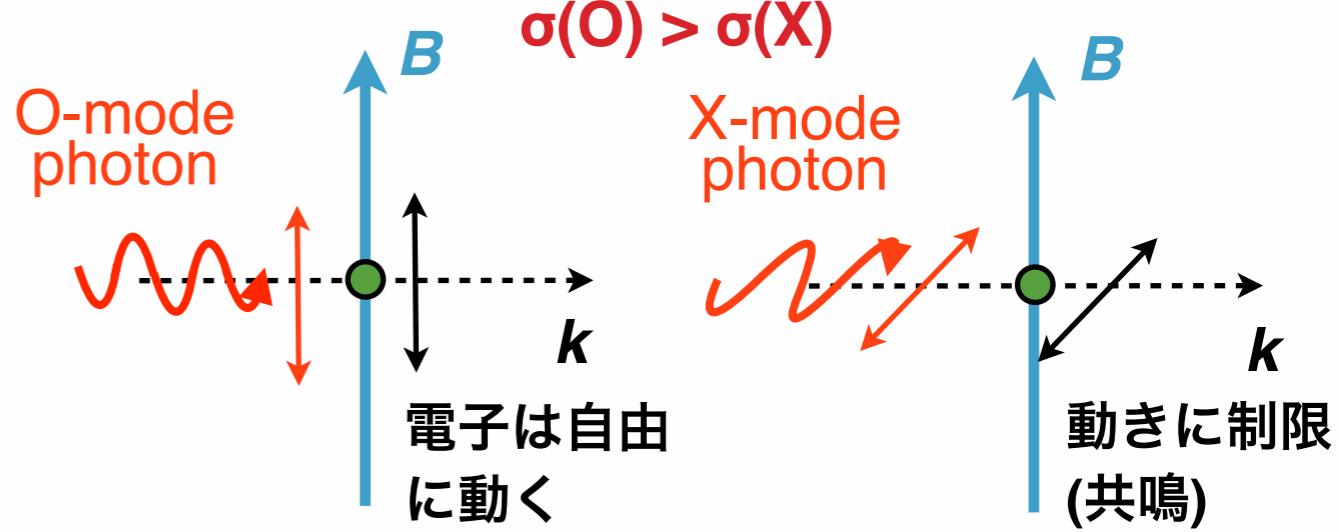
X線天文学では、撮像、分光、時間変動に加えて4つ目の観測軸が「偏光」
1970年代に弾道口ケット/OSO-8衛星での僅かな観測例の後、30年間の空白
2000年代に技術的な進展 (INTEGRAL, IKAROS-GAP, PoGoLITE ほか)



偏光のサイエンス

- マグネター仮説の検証

強磁場で散乱断面積が偏光に大きく依存



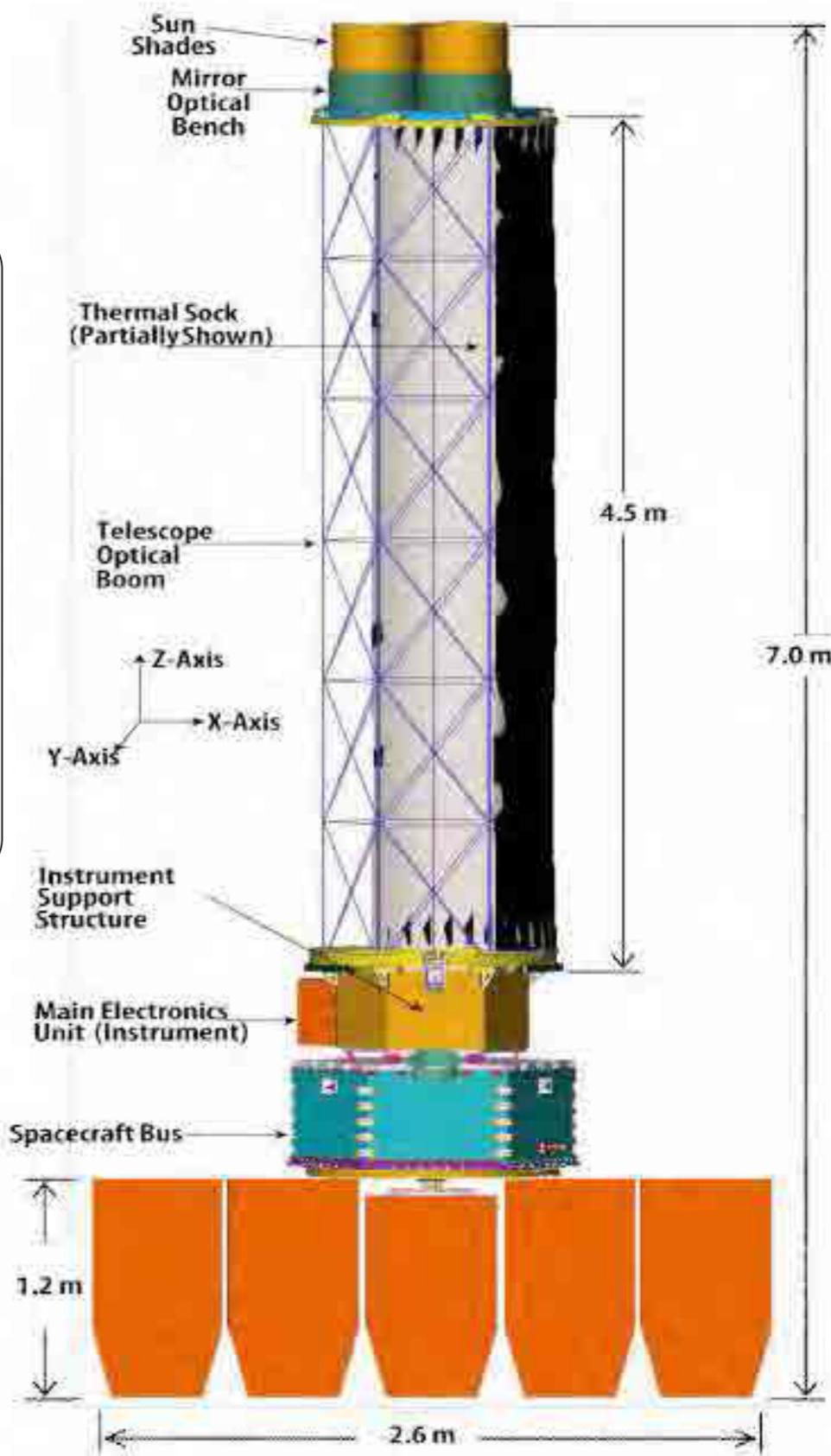
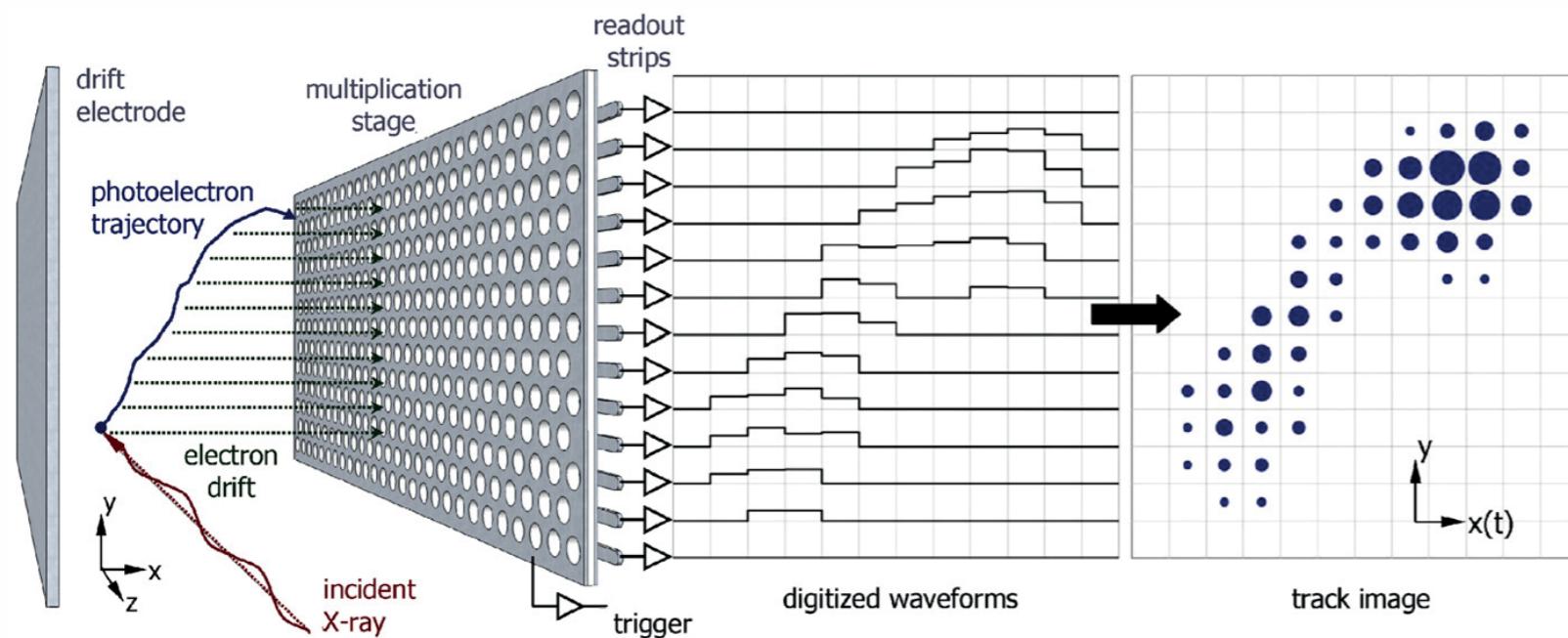
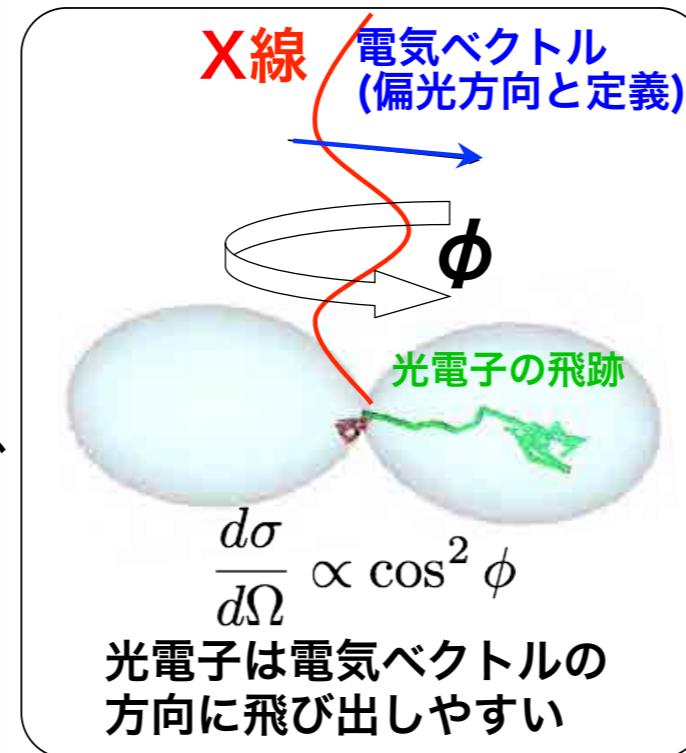
- パルサー粒子加速域の決着
- X線パルサーの降着モデル
- ブラックホール時空構造の検証

高い偏光度が予想される天体を狙い、X線偏光に特化した専門衛星

X線偏光の専門衛星 PRAXyS

Polarimeter for Relativistic X-ray Sources

- 2-10 keV で OSO-8 より 2桁ほど高感度の観測
- 100 ks で 10 mCrab 天体 から 1% の直接偏光の検出
- 光電子の飛跡を精密測定し、 偏光方向を決定する。
- Time Projection Chamber 技術を応用し飛跡決定。



NASA, 理研, 名古屋大, 広島大, 京都大を中心開発中！

まとめ

1. 中性子星は、強重力場・高密度・強磁場・高速回転など極限的な物理環境が実現する宇宙の実験室である。
2. 熱、回転、重力、磁場などをエネルギー源として、多様な中性子星が知られている。物理量で整理した統一理解へ。
3. 宇宙で最強の磁場をもつマグネター(磁石星)は特異な磁気活動を示し、磁場の進化を通して中性子星の統一理解する鍵となる。