

Physics and Observations of Neutron Stars

中性子星の物理と観測

Teruaki Enoto
榎戸 輝揚

理化学研究所, NASA/GSFC

新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」
第二回ウィンタースクール・中性子星の核物質
2014年12月25日 理化学研究所

自己紹介

専門: X線天文学

研究テーマ: 中性子星の観測的研究

所属: 理研の玉川研, NASA/GSFC

職場: Washington D.C GSFC

X線ミッション:

宇宙X線観測衛星「すざく」

次期X線観測衛星 ASTRO-H

偏光X線専門衛星 GEMS

中性子星観測ミッション NICER

修論: 雷雲での電子加速の観測的研究

博論: マグネターの観測的研究(すざく)



スタンフォード時代:
~~遊ぶ日々~~
⇒ASTRO-H 検出器



去年: X線偏光衛星 GEMS

今年: 中性子星観測 NICER



対象と目的



原子核理論と宇宙観測の間では、
同じ中性子星への興味・理解でも大きな違いがある。

中性子星の基本は、共通の基礎物理によって理解できるが、
宇宙観測で見える中性子星は予想以上に多様性に富む。

専門が宇宙物理でない大学院生を主な対象に
中性子星の観測のダイジェストを提供することを目的。

「中性子星の物理と観測」 目次

1. 中性子星の基本パラメータ (M, R, P, T, B)
2. 宇宙観測でわかる中性子星の多様性
3. 観測から基本パラメータを測定する

中性子星の質量

中性子星: 中性子(スピン1/2のフェルミ粒子)の縮退圧で重力を支える星

重力

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

縮退圧

$$P_d \sim \hbar c \left(\frac{\rho}{m} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (\text{相対論的})$$

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

白色矮星に対するチャンドラセカル質量
(封筒の裏計算レベルでの典型的な中性子星の質量)

核力、一般相対論の効果まで含めた状態方程式は理論家さんの講義を参照

重力微細構造定数 (無次元)

$$\alpha_G = Gm_p^2/\hbar c = 5.9 \times 10^{-39}$$

陽子質量

$$m_p = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$$

太陽質量

$$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$$

中性子星の半径

白色矮星 $M_{\text{WD}} R_{\text{WD}}^3 = \alpha_G^{-3} m_e \lambda_e^3$ 電子コンプトン波長 $\lambda_e = \frac{h}{m_e c}$

中性子星 $M_{\text{NS}} R_{\text{NS}}^3 = \alpha_G^{-3} m_p \lambda_p^3$ バリオン(陽子、中性子) $\lambda_p = \frac{h}{m_p c}$

beautiful formulae by Landau

$$R_{\text{WD}} \sim 7.4 \times 10^8 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \text{ cm} \sim \frac{R_{\odot}}{100}$$

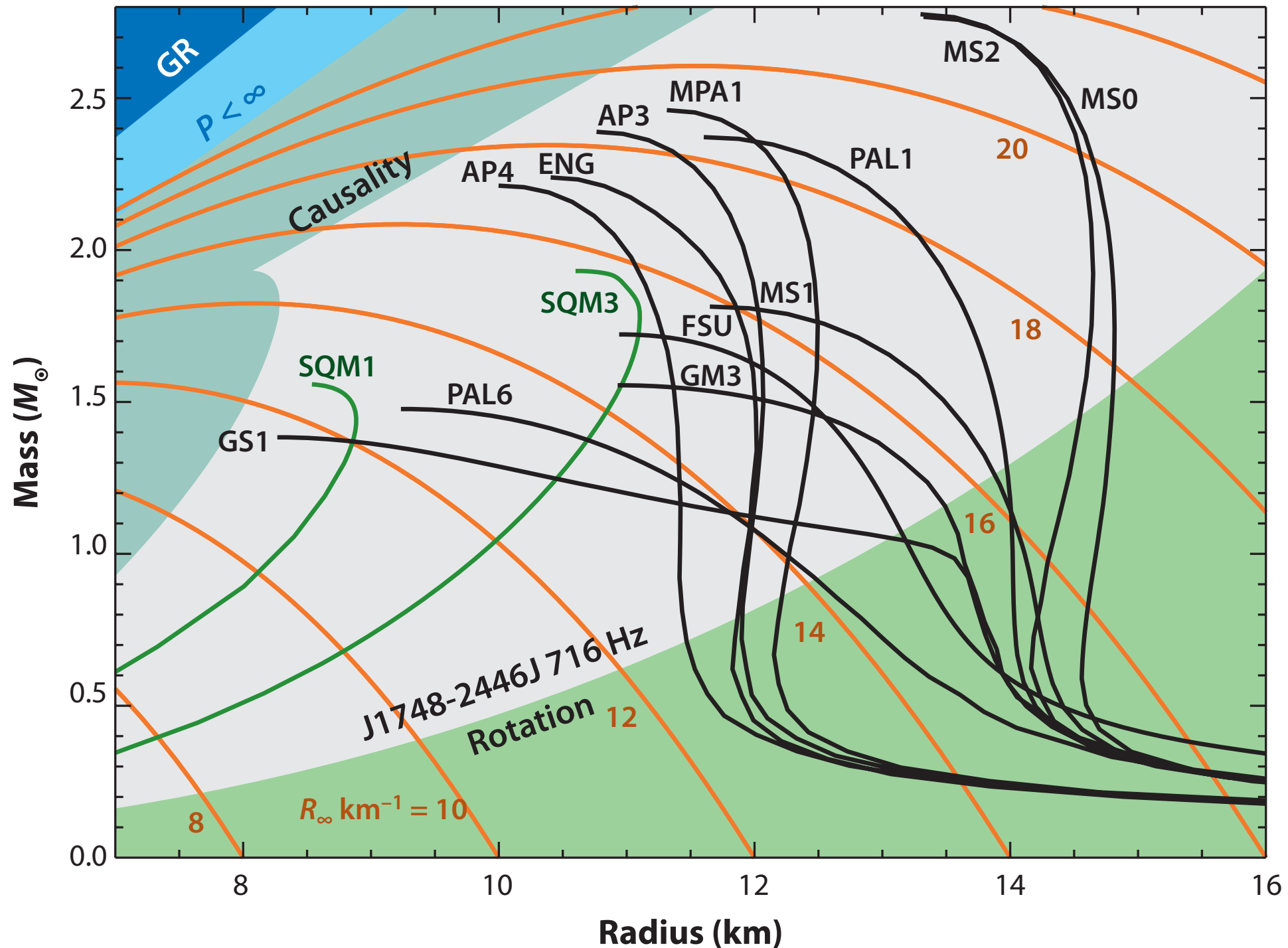
$$R_{\text{NS}} = \frac{R_{\text{WD}}}{1000} \sim 10^6 \text{ cm} = 10 \text{ km}$$

典型的な中性子星: $M_{\text{NS}} \sim 1.4 M_{\odot}$, $R_{\text{NS}} \sim 10 \text{ km}$

太陽半径

$$R_{\odot} = 6.96 \times 10^{10} \text{ cm}$$

中性子星の質量-半径の理論曲線

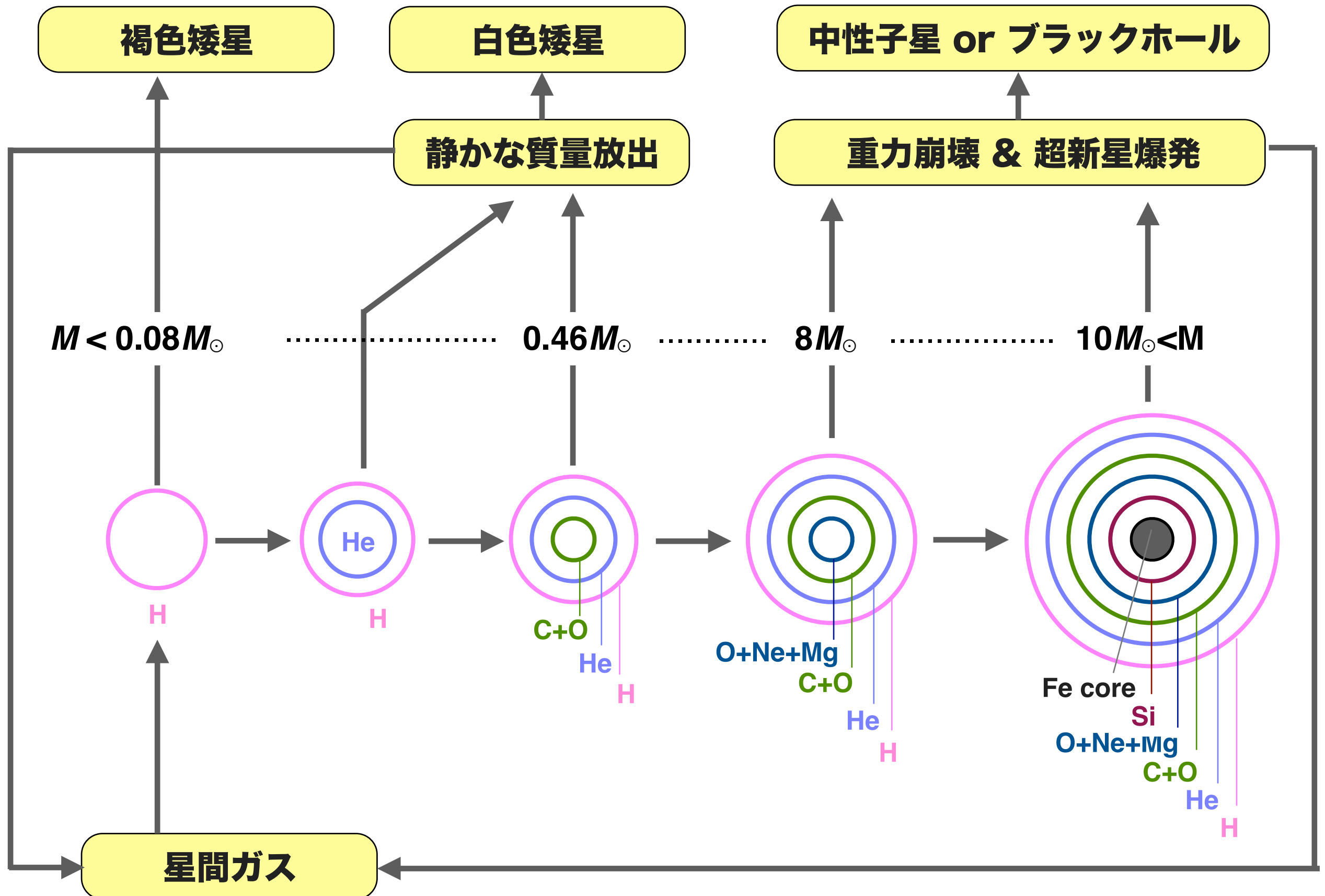


$M_{\text{NS}} \sim 1.4 M_{\odot}$ (0.2-2.5 $M_{\odot}$; 0.1-1.7 $M_{\text{典型値}}$)

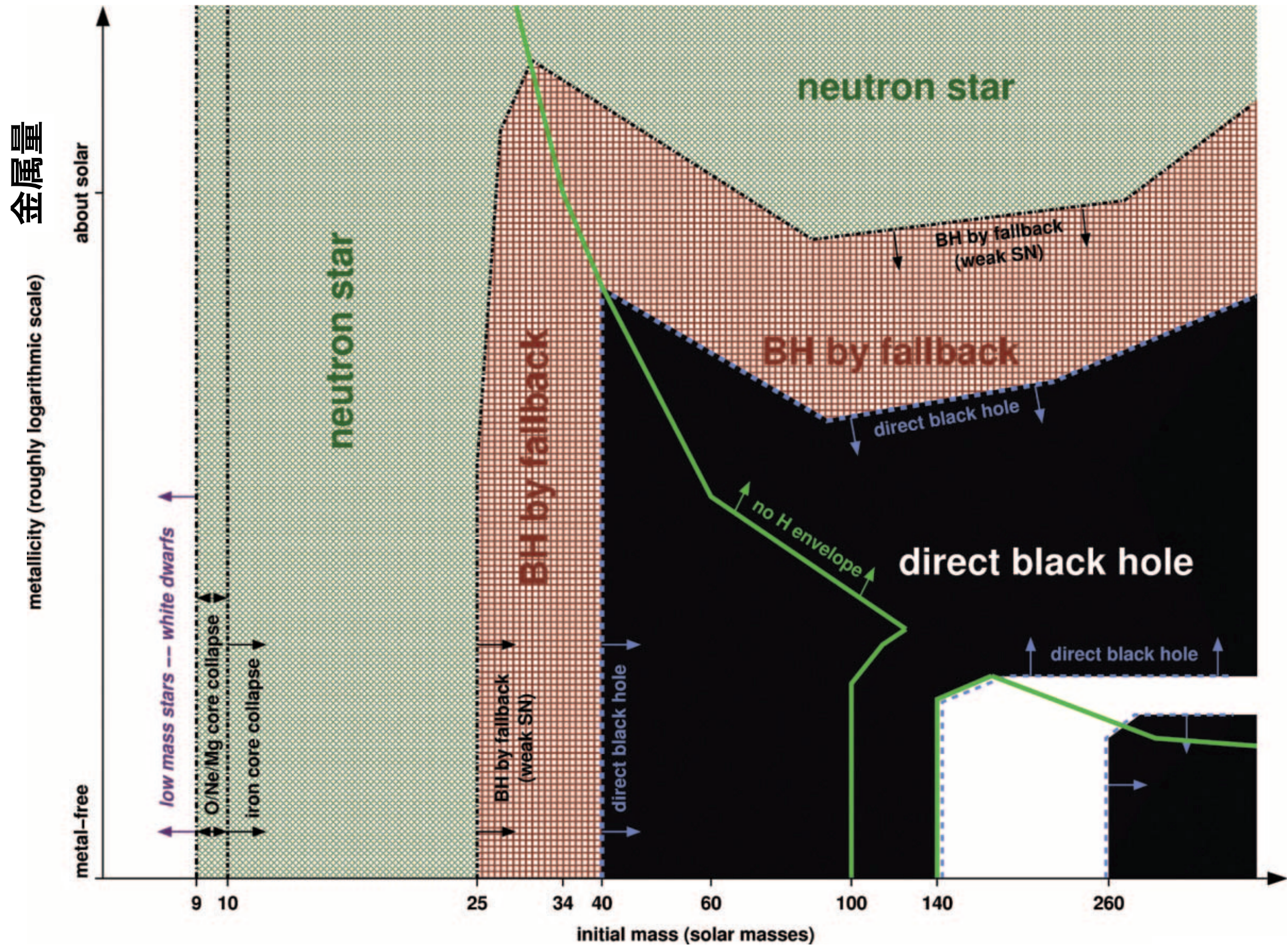
$R_{\text{NS}} \sim 10 \text{ km}$ (8-15 km; 0.8-1.5 $R_{\text{典型値}}$)

James M. Lattimer, "The Nuclear Equation of State and Neutron Star Masses", *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2012

大質量星の進化とその終末

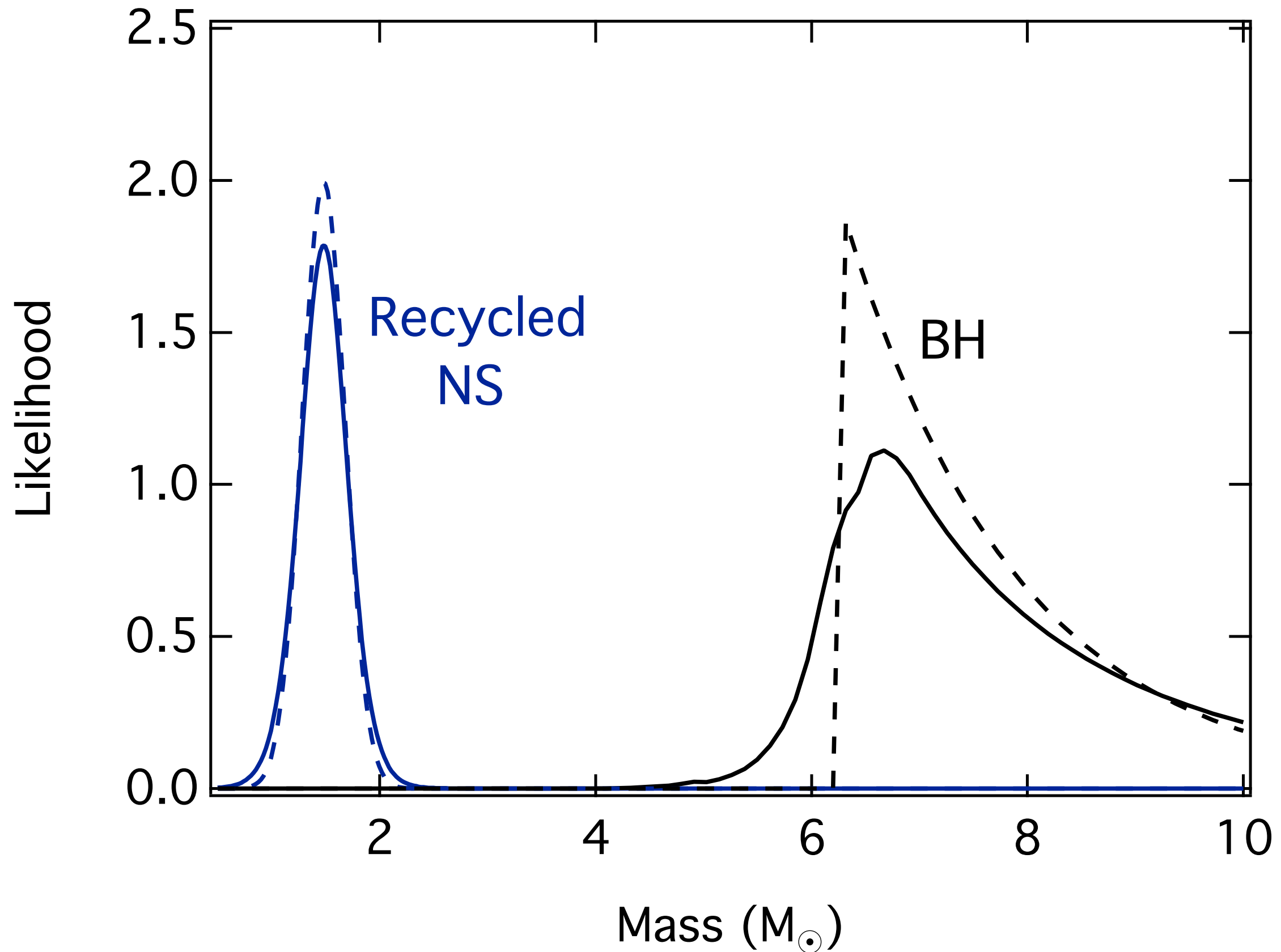


初期質量と中性子星の形成



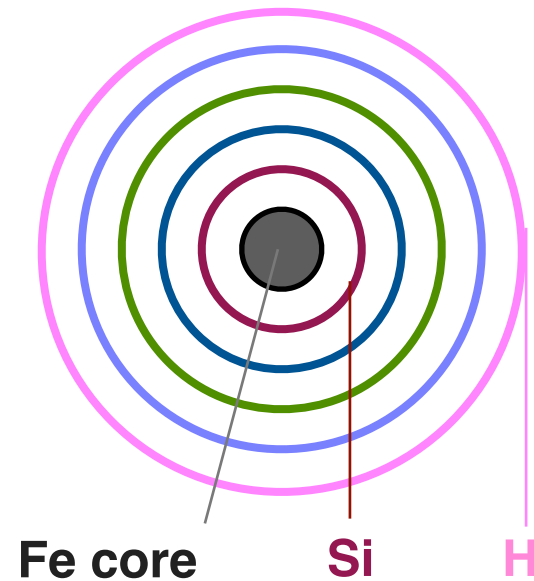
初期質量 $M (M_{\odot})$

推定された中性子星とブラックホール質量の分布



F. Ozel, "On the Mass Distribution and Birth Masses of Neutron Stars", *Astro. Phys. Jour.* **757**, 2012

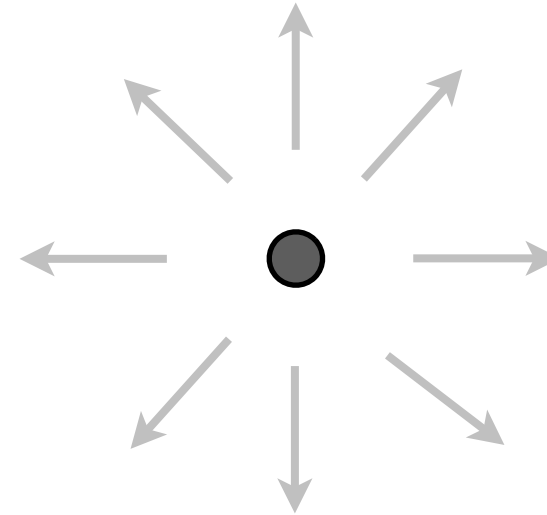
大質量星の超新星爆発



大質量星

$$M \sim 1.4 M_{\odot} \text{ (core)}$$

$$R \sim 2500 \text{ km}$$



中性子星

$$M \sim 1.4 M_{\odot}$$

$$R \sim 10 \text{ km}$$

角運動量の保存

$$M R^2 \Omega = \text{const}$$



$$P = 2\pi/\Omega \sim \text{ms} - \text{sec}$$

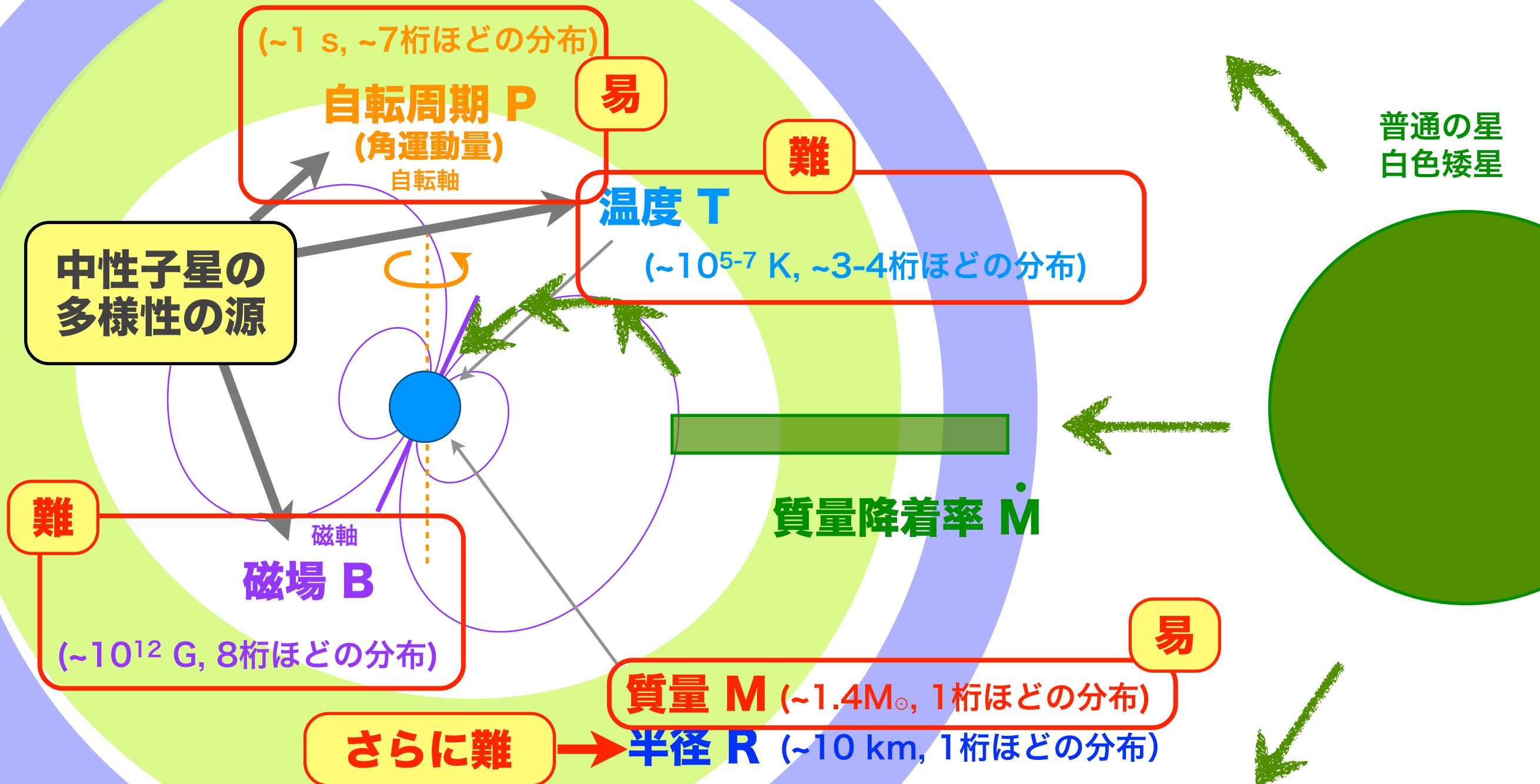
磁束の保存

$$R^2 B = \text{const}$$



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

中性子星の物理量と多様性 (まとめ)



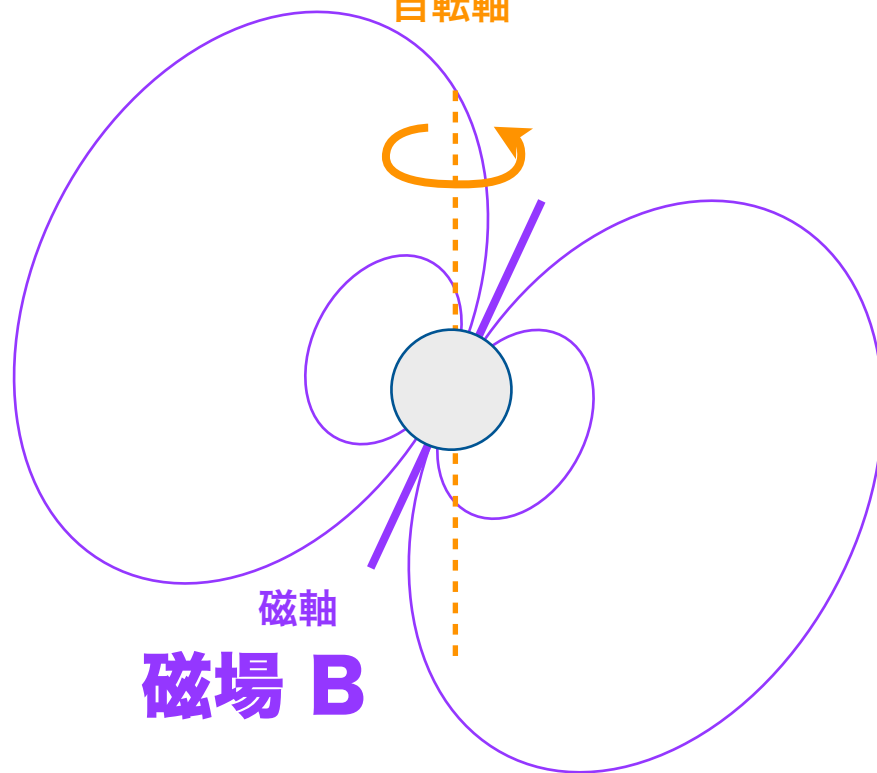
中性子星の基本的な物理パラメータの違いに加え、周辺環境との相互作用で多様な系が現れる (Neutron Star Zoo)。複雑だが、かつ面白い。

中性子星の物理量と多様性 (まとめ)

(~1 s, ~7桁ほどの分布)

自転周期 P
(角運動量)

自転軸



磁場 B

(~ 10^{12} G, 8桁ほどの分布)

⇒ 回転駆動型パルサー

パルサーの発見: PSR B1919+21

Pulsating Source of Radio

B=1950年分点, J=2000年分点

赤道座標の経度 (赤経, 1周=360°)

赤道座標の緯度 (赤緯, 1周=24時間)

a.k.a. CP 1919, PSR J1919+2153



Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source

by

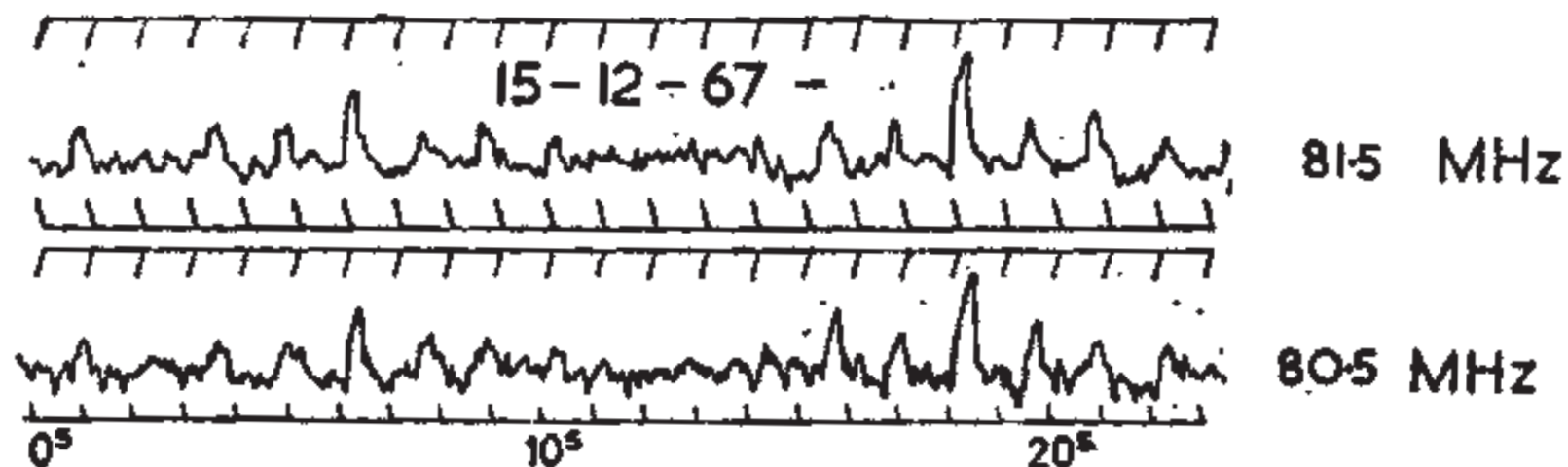
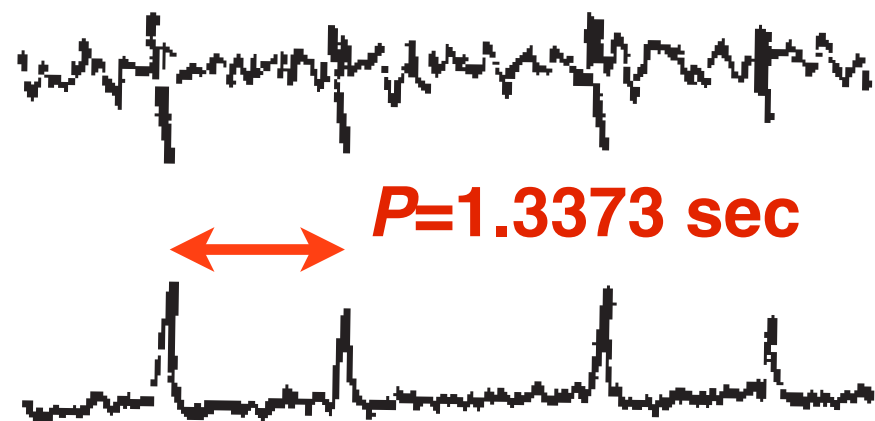
A. HEWISH
S. J. BELL
J. D. H. PILKINGTON
P. F. SCOTT
R. A. COLLINS

Mullard Radio Astronomy Observatory,
Cavendish Laboratory,
University of Cambridge

A. Hewish, S. J. Bell et al., 217, 5130, 709-713, *Nature* (1968)

→ Hewish 1974年ノーベル物理学賞

Unusual signals from pulsating radio sources have been recorded at the Mullard Radio Astronomy Observatory. The radiation seems to come from local objects within the galaxy, and may be associated with oscillations of white dwarf or neutron stars.



電波によるパルサー観測



グリーンバンク望遠鏡

(Green Bank Telescope, GBT)

0.1-116 GHz, 100 m, アメリカ合衆国



ジョドレルバンク天文台

(Jodrell Bank Observatory)

イギリス/マンチェスター大学



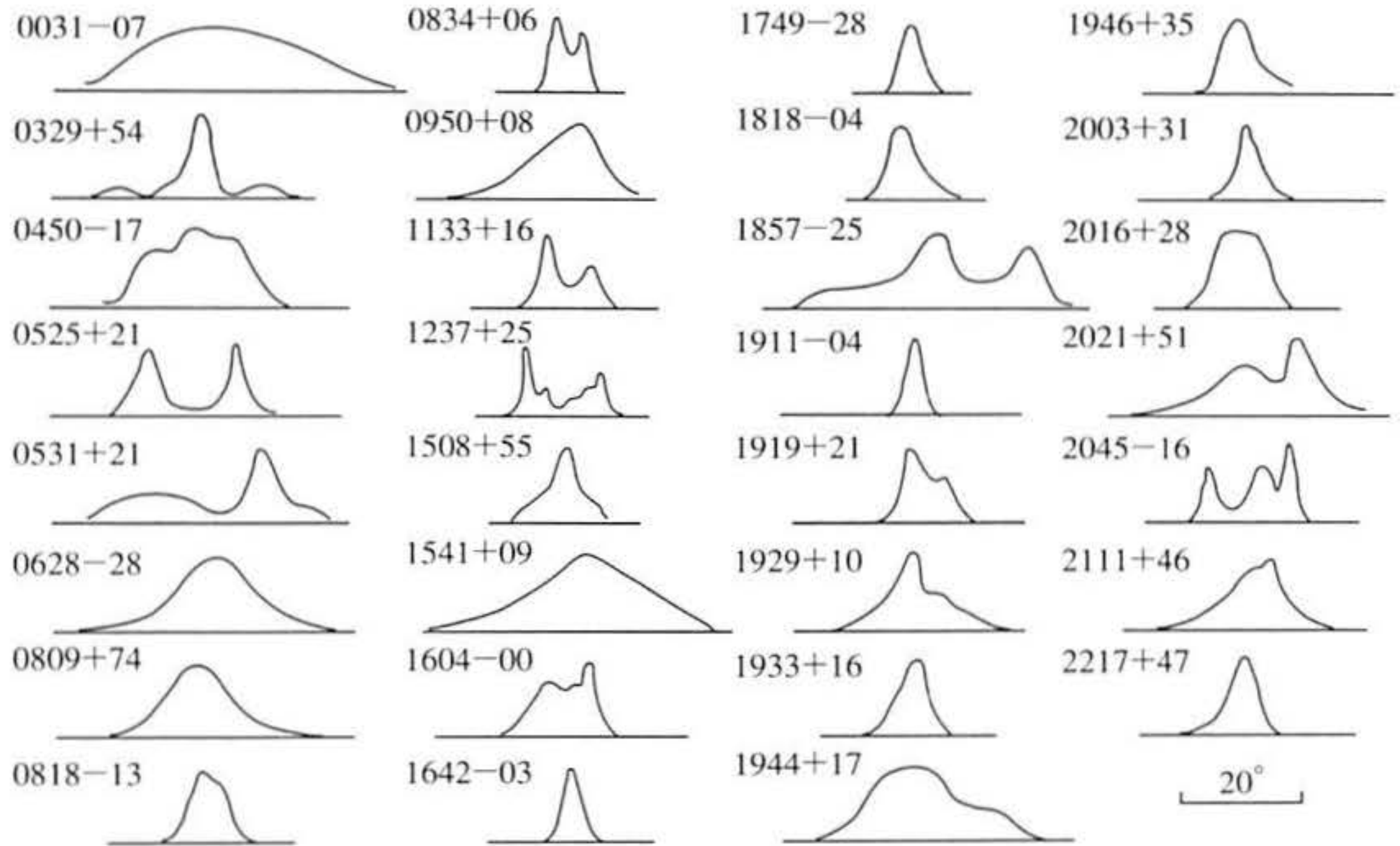
野辺山

45 m 電波望遠鏡, 日本

パークス天文台
64 m 電波望遠鏡
400 MHz -- 43 GHz
オーストラリア



さまざまな電波パルスの波形

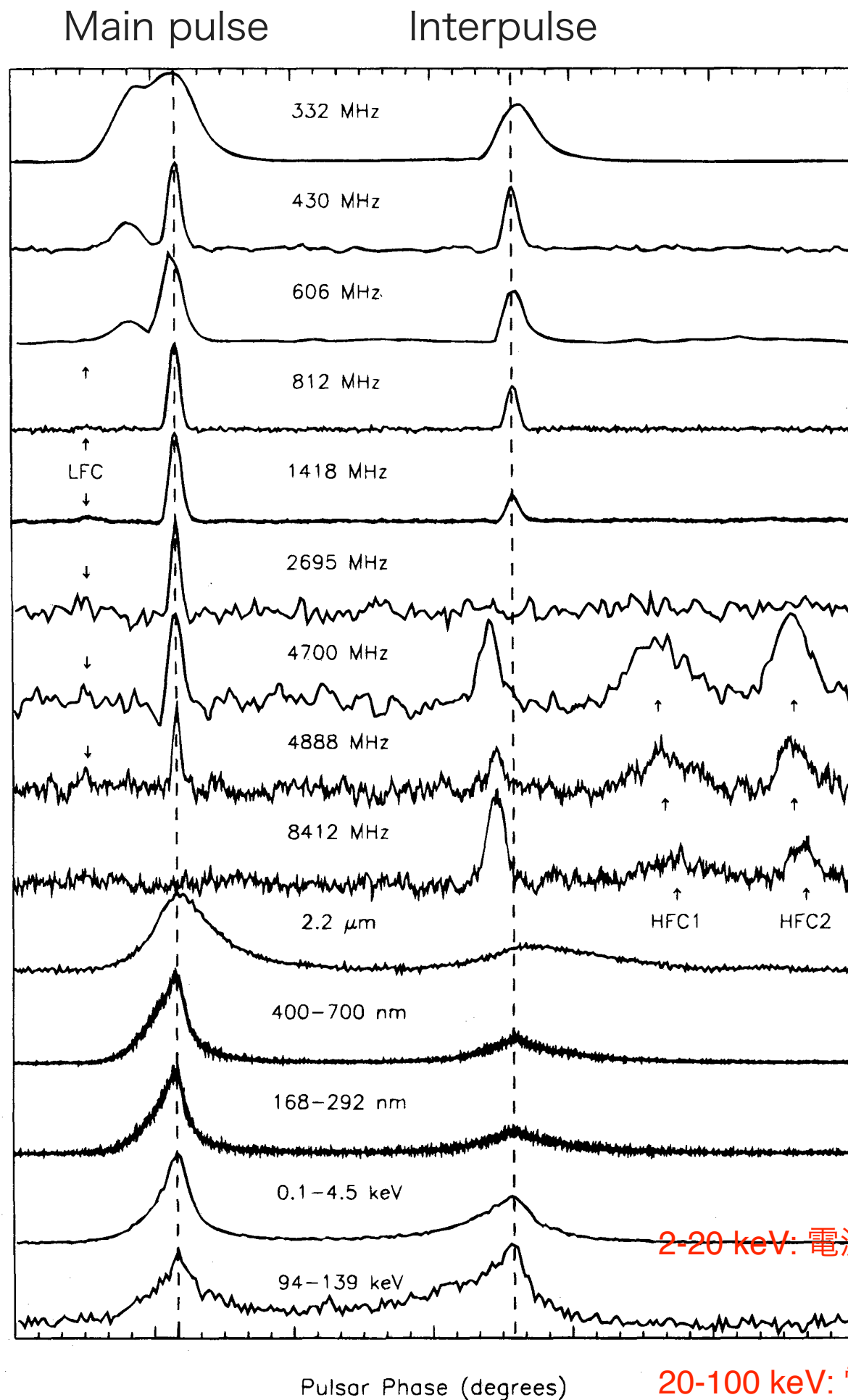


Lyne, A. G., 1990 (1 周期を 360° とする)

かに星雲 (Crab Nebula)



J. Jeff Hester, "The Crab Nebula: An Astrophysical Chimera", Annu. Rev. Astro. Astrophysics.



低周波電波

かにパルサー

Crab Pulsar

33.09 ms 周期の発見 (1969年)

Comella et al., Nature 221, 453 (1969)

Staelin & Reifenstein, Science 162, 1481 (1968)

現在: 33.6 ms

多くの観測装置の較正用の標準光源

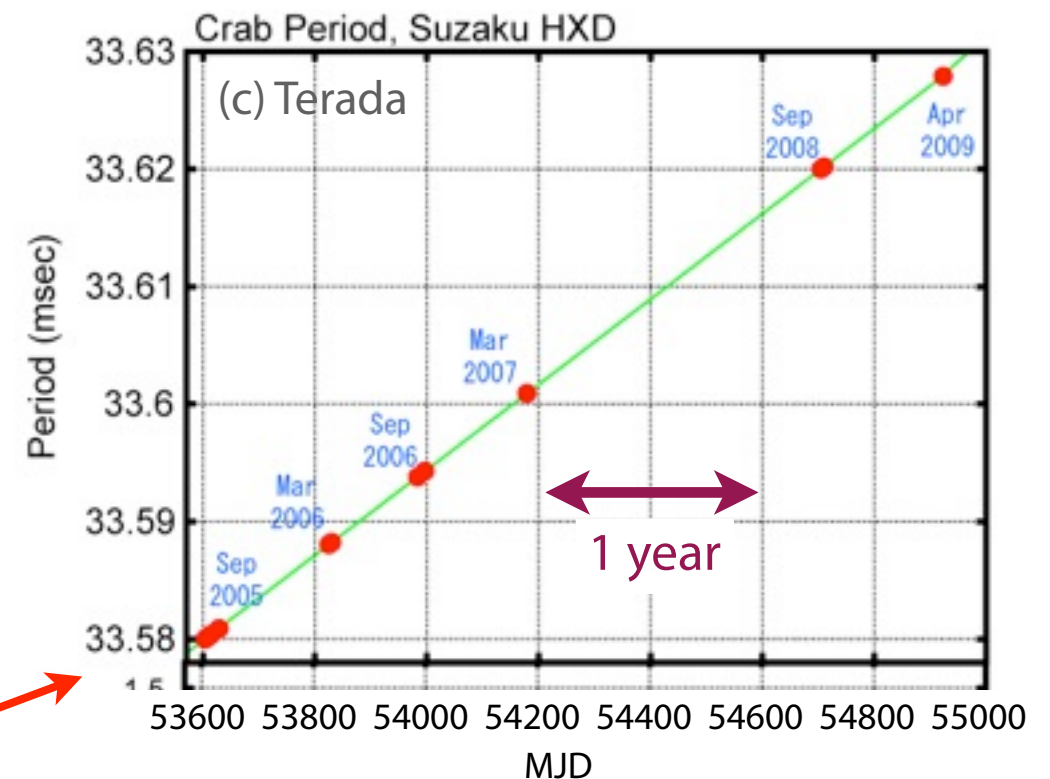
Jodrell Bank 天文台によりモニタ観測

赤外線

可視光

X線

軟ガンマ線



2-20 keV: 電波より ~310 μ s 先行

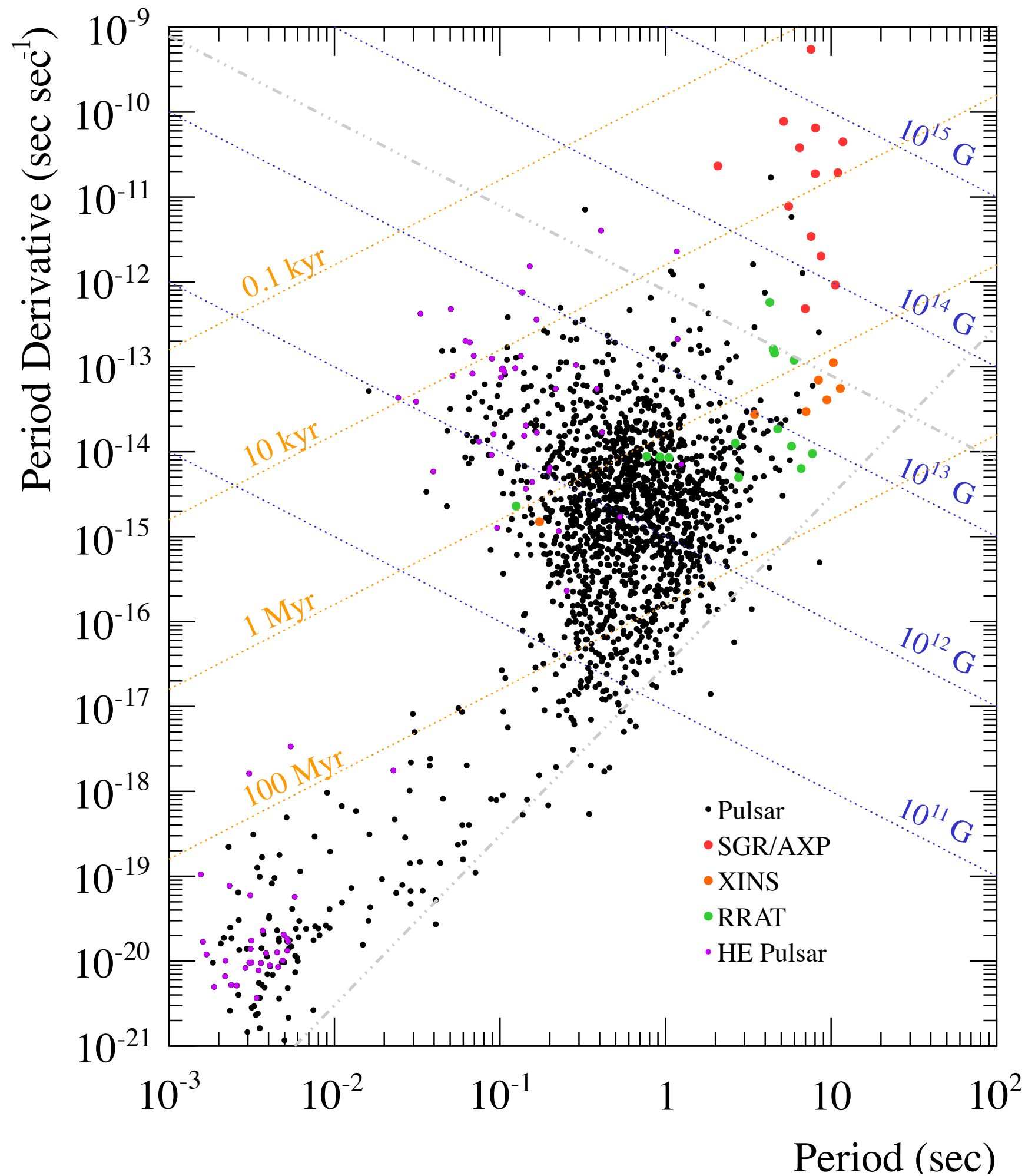
20-100 keV: 電波より ~275 μ s 先行

パルス周期変化率

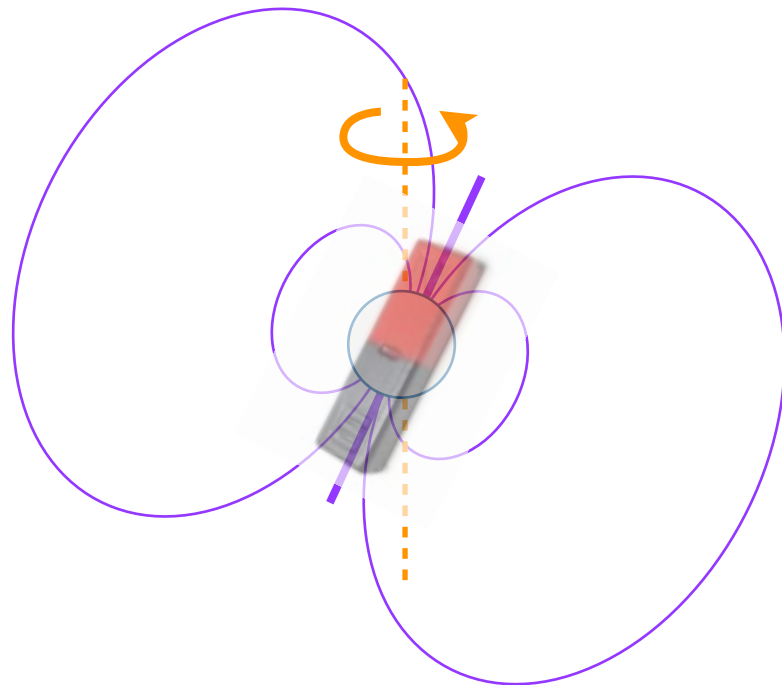
$\dot{P} \sim 4.2e-13$ s/s

$\Delta P \sim 13 \mu$ s @ 1 year

P-Pdot 図



P と P_{dot} からわかるパルサーの磁場



真空中で回転する磁石からの
磁気双極子放射を仮定する

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

I = 慣性モーメント $\sim 10^{45}$ g cm²

Ω = 角周波数 = $2\pi / P$

スピンドアウン光度 (回転エネルギーの減少)

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

磁気双極子放射

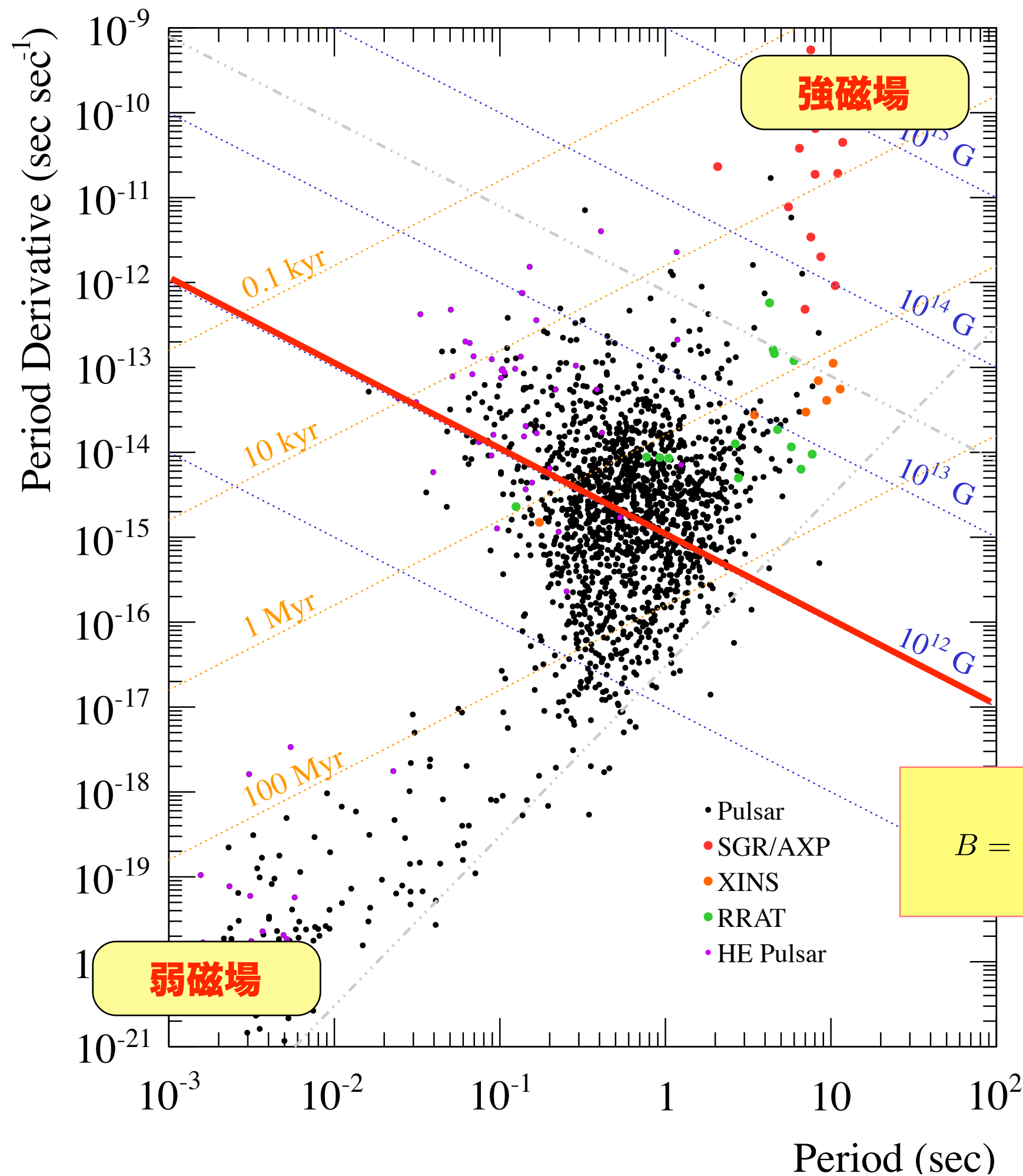
$$L_{\text{mag}} = \frac{2}{3c^3} |\ddot{\mu}|^2 = \frac{2}{3c^3} |\mu|^2 \Omega^4 \sin^2 \theta \propto \frac{B^2}{P^4}$$

$$L_{\text{rot}} \sim L_{\text{mag}} \longrightarrow$$

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

典型的な磁場強度 $B \sim 10^{12}$ G

P-Pdot 図



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

パルサーの減速

一般化した減速の式 $\dot{\Omega} = -k\Omega^n$

n : braking index
(P-Pdot 傾き 2-n)

星風(n=1)

磁気双極子放射(n=3)

重力波放射(n=5)

$$\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} \sim \dot{M}\Omega^2$$

$$\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} \sim B^2\Omega^4$$

$$\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} \sim q^2\Omega^6$$

$$\Omega(t) = \Omega_0 \left(1 + \frac{t}{\tau_0}\right)^{-\frac{1}{n-1}}$$

$$P_0 \ll P \text{ なら } \tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

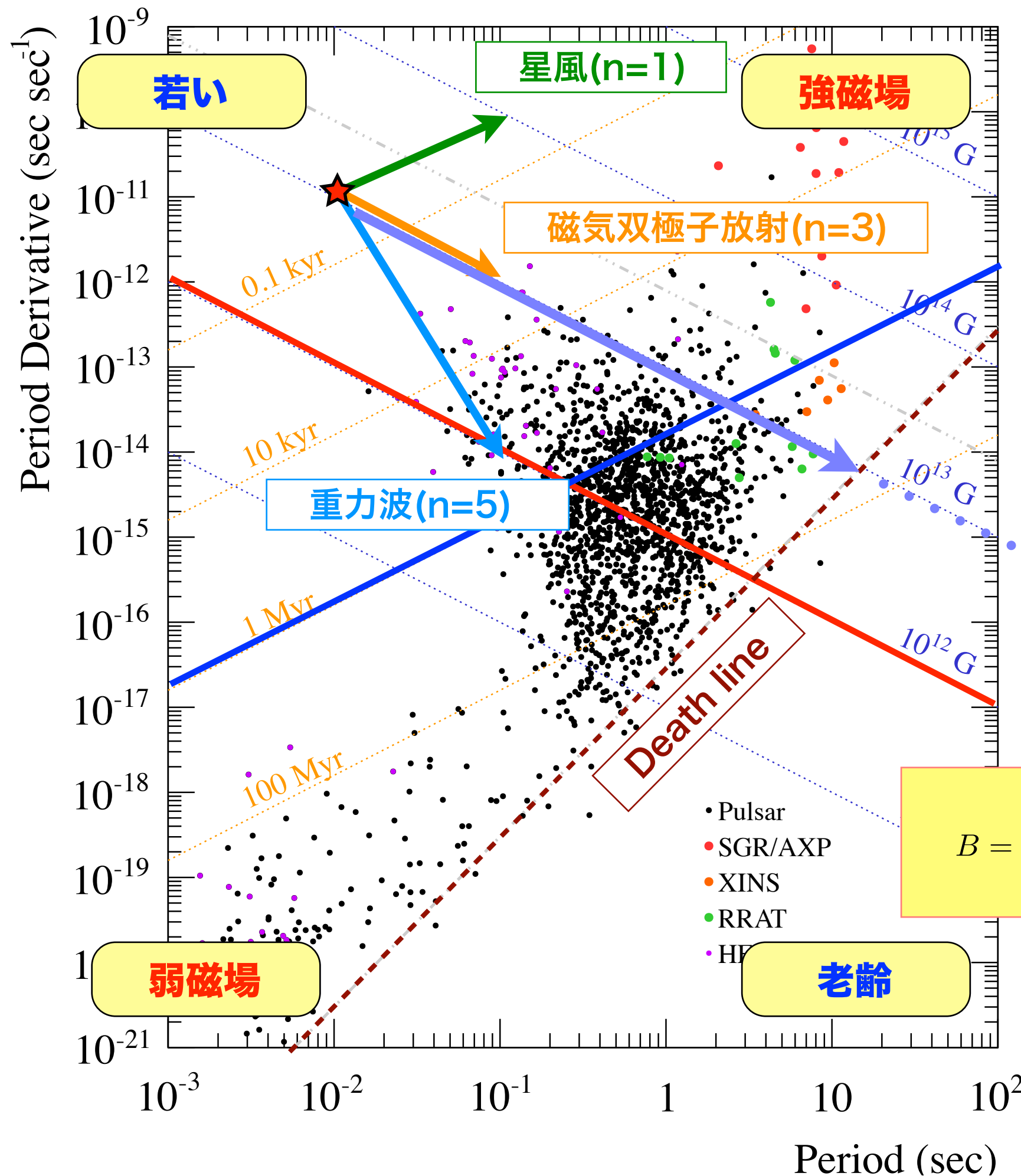
$$\left(t = \frac{P^2 - P(0)^2}{2P\dot{P}}\right)$$

Pulsar	n	Reference
B0531+21	2.51(1)	Lyne et al. (1993)
J0537-6910	-1.5	Middleditch et al. (2006)
B0540-69	2.140(9)	Livingstone et al. (2007)
B0833-45	1.4(2)	Lyne et al. (1996)
J1119-6127	2.91(5)	Weltevrede et al. (2011)
B1509-58	2.839(1)	Livingstone et al. (2007)
J1846-0258	2.65(1)	Livingstone et al. (2007)
J1734-3333	0.9(2)	this work (Espinoza et al. 2011)

Espinoza et al., 2011

(e.x) Crab Pulsar; $\tau_c = 1246$ yr
vs. True age = 956 yr (Historical record in 1054)

P-Pdot 図



$\tau_c = 1$ Myr の年齢の線(傾き +1)

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

$B \sim 10^{12}$ G 磁場の線(傾き -1)

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

パルサー発見前(1969)の中性子星の議論

天文月報

“中性子星なら黒体放射が見えるはず”

X線源 Crab

⇒ 月の遮蔽観測から広がったX線源

⇒ かに星雲 (パルサーも後に発見)

X線源 Sco X-1

⇒ X線放射が黒体放射ではない

⇒ 円盤の放射 (中性子星と後に確認)



中 性

鶴田幸子先生

準星，X線源等の問題がまだ解決されず，理論家の頭を悩ましていた今，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

れず，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，観測された線の特性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

大きな発見の前には、そこへ至る道を醸成する空気がある？

X線やガンマ線によるパルサー観測

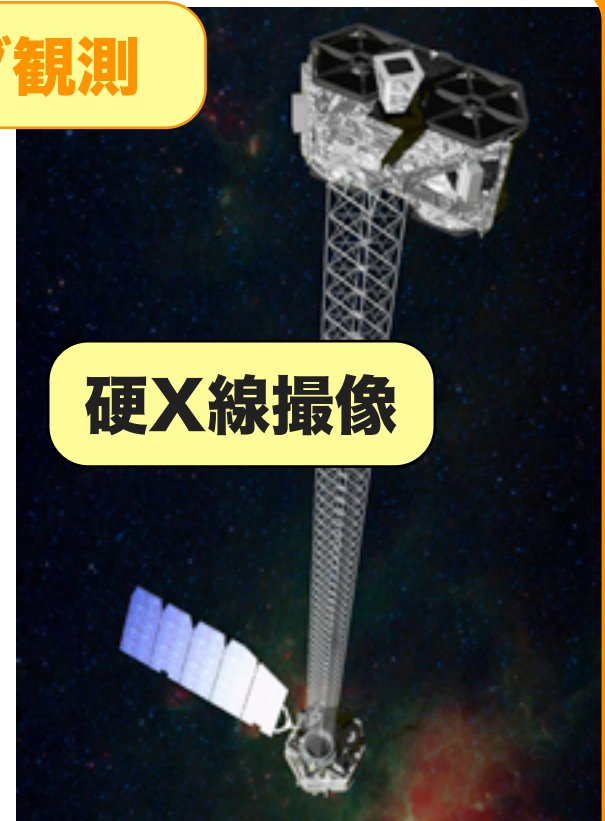


ポインティング観測

広エネルギー帯域

すざく衛星
(X線衛星 0.5-600 keV)

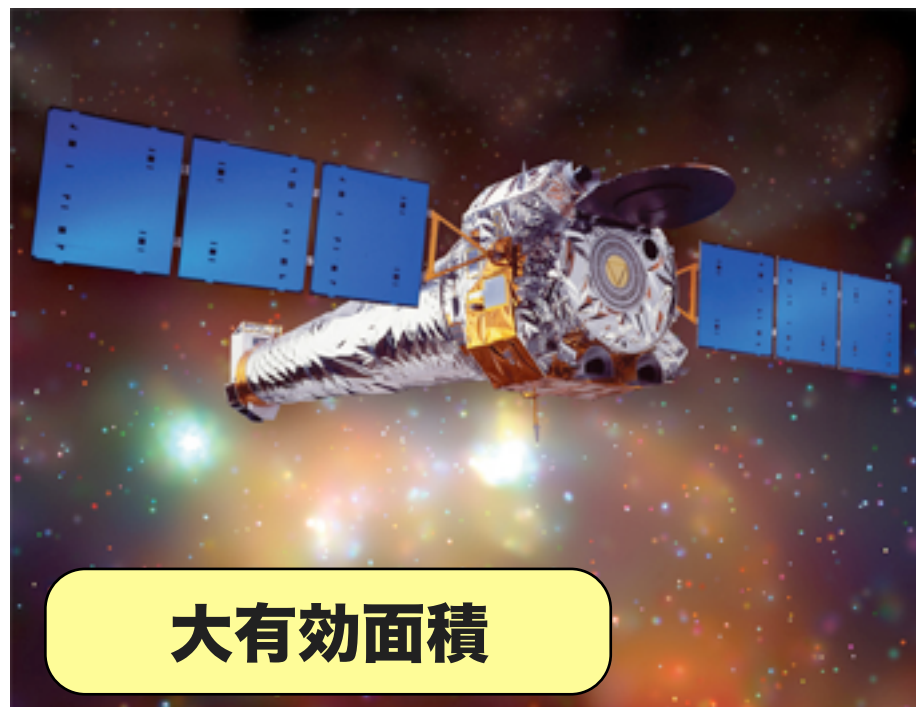
NuSTAR衛星
(3-80 keV)



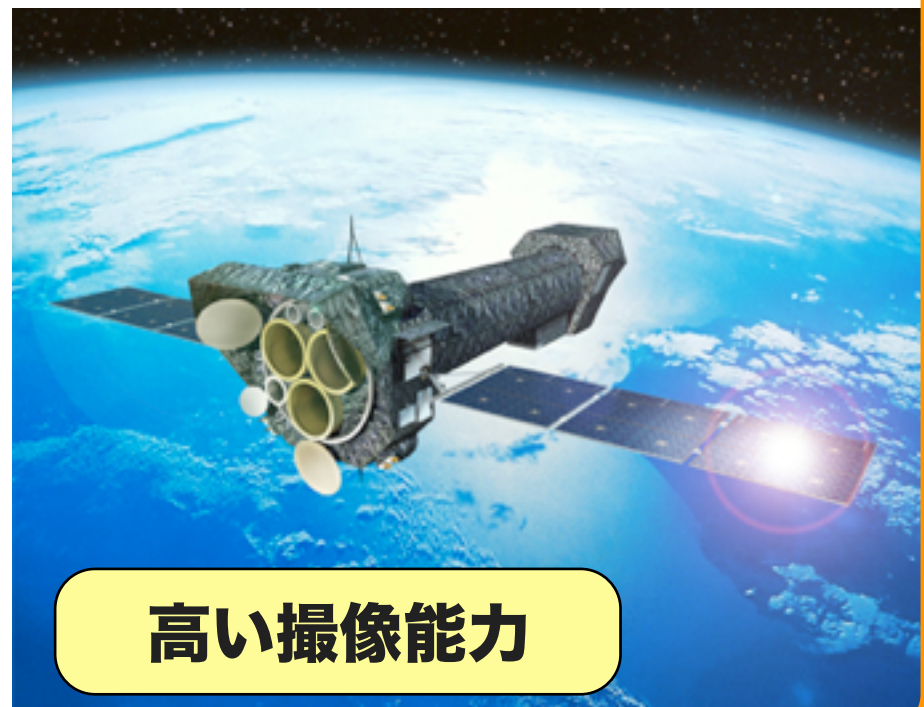
硬X線撮像

チャンドラ衛星
(X線衛星 0.1-10 keV)

ニュートン衛星
(X線衛星 0.2-12 keV)



大有効面積



高い撮像能力



全天サーベイ

Fermi衛星
(0.03-300 GeV)

MAXI
(0.5-30 keV)



MAXI が見たX線源

中性子星

中性子星

GRB090831A

さそり座X-1

ケンタウルス座A

はくちょう座X-1

4U2206+54

GRS1915+105

XTE J1752-223

A0535+26

かに星雲

GRB090926B

JAXA/RIKEN/MAXI



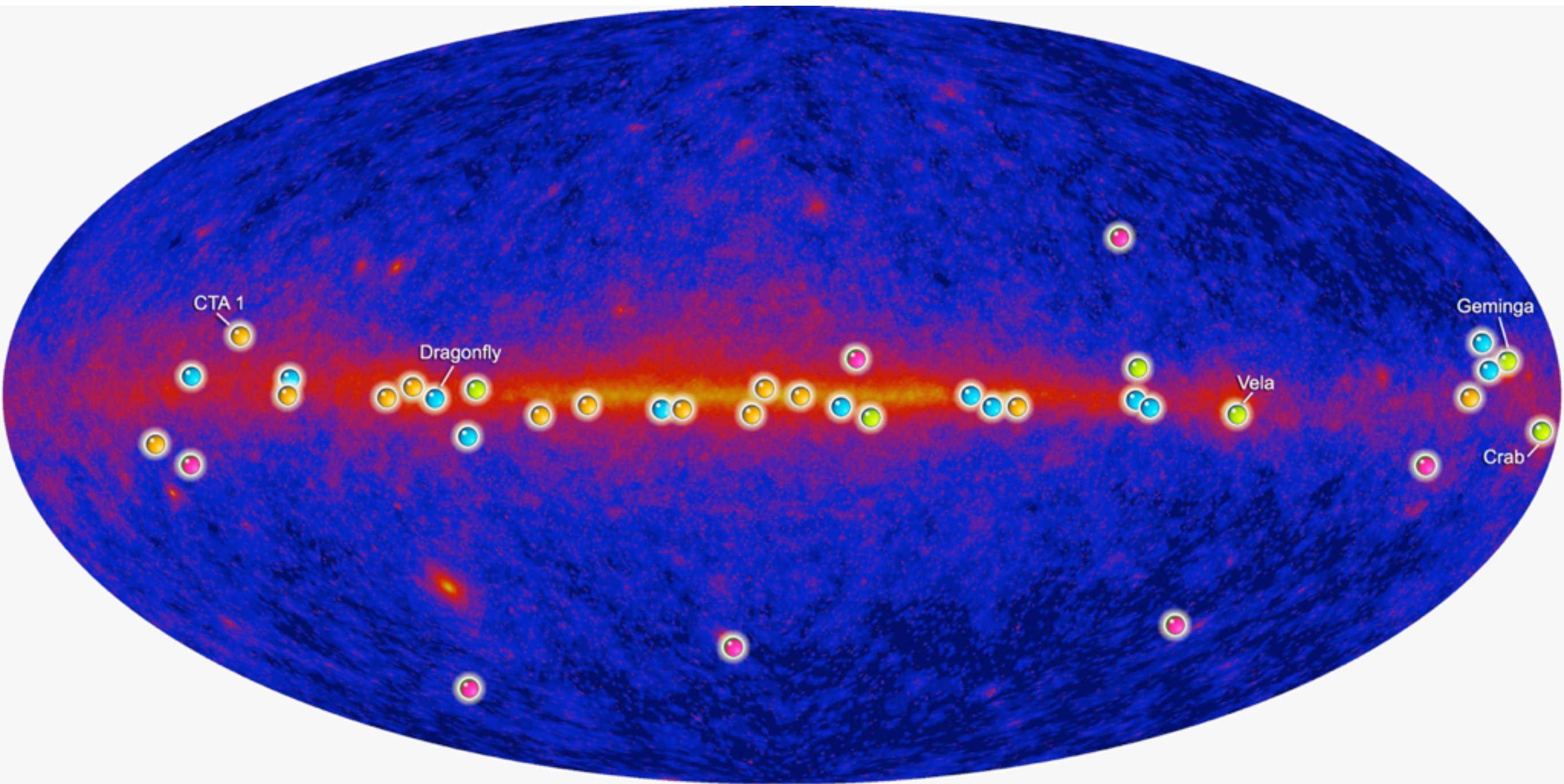
5127E009561

© NASA



国際宇宙ステーションに搭載

Fermi 衛星で発見が続くガンマ線パルサー



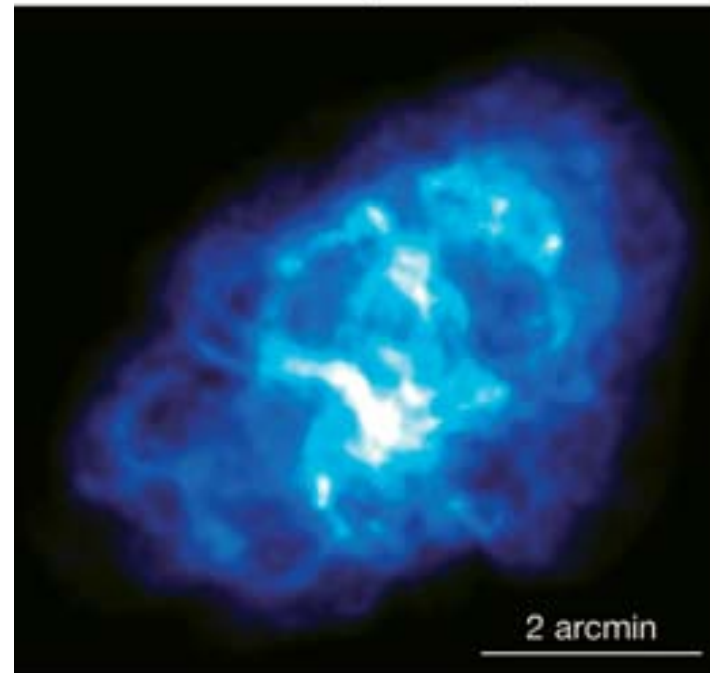
Fermi Pulsar Detections

- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

さまざまな波長で見た「かに星雲」

電波

Radio (NRAO)



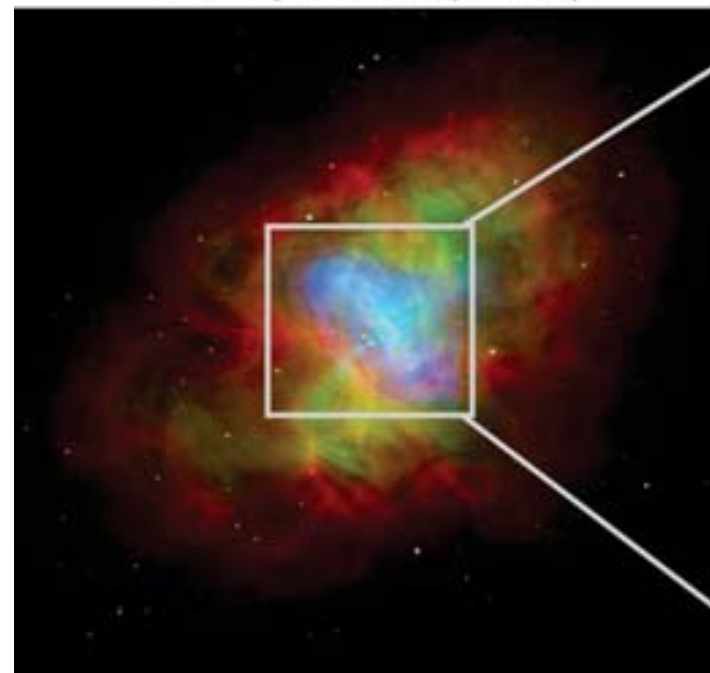
Optical (ESO)



可視光

c

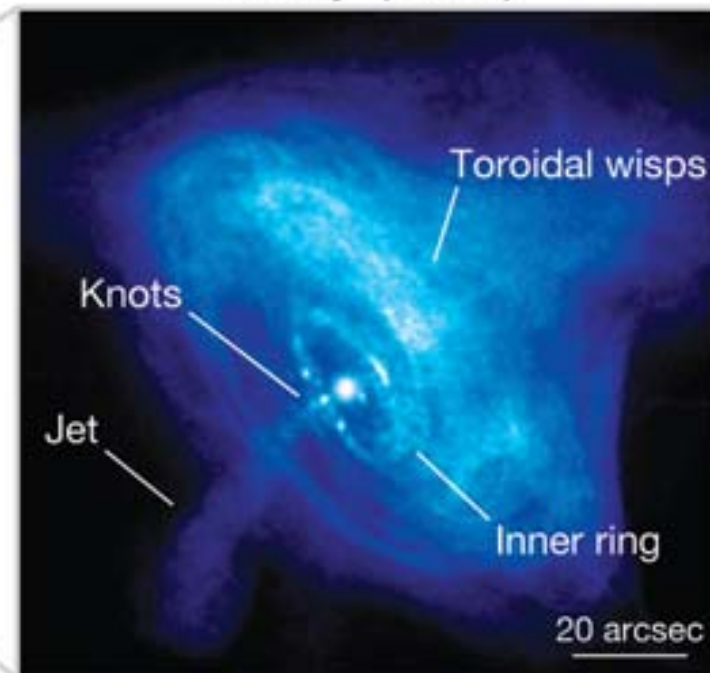
Composite (CXC)



可視光 + X線

d

X-ray (CXC)



X線

Bryan M. Gaensler and Patrick O. Slane, "The Evolution and Structure of Pulsar Wind Nebula", Annu. Rev. Astro. Astrophysics.

中性子星の物理量と多様性 (まとめ)

(~1 s, ~7桁ほどの分布)

自転周期 P
(角運動量)

自転軸



磁軸

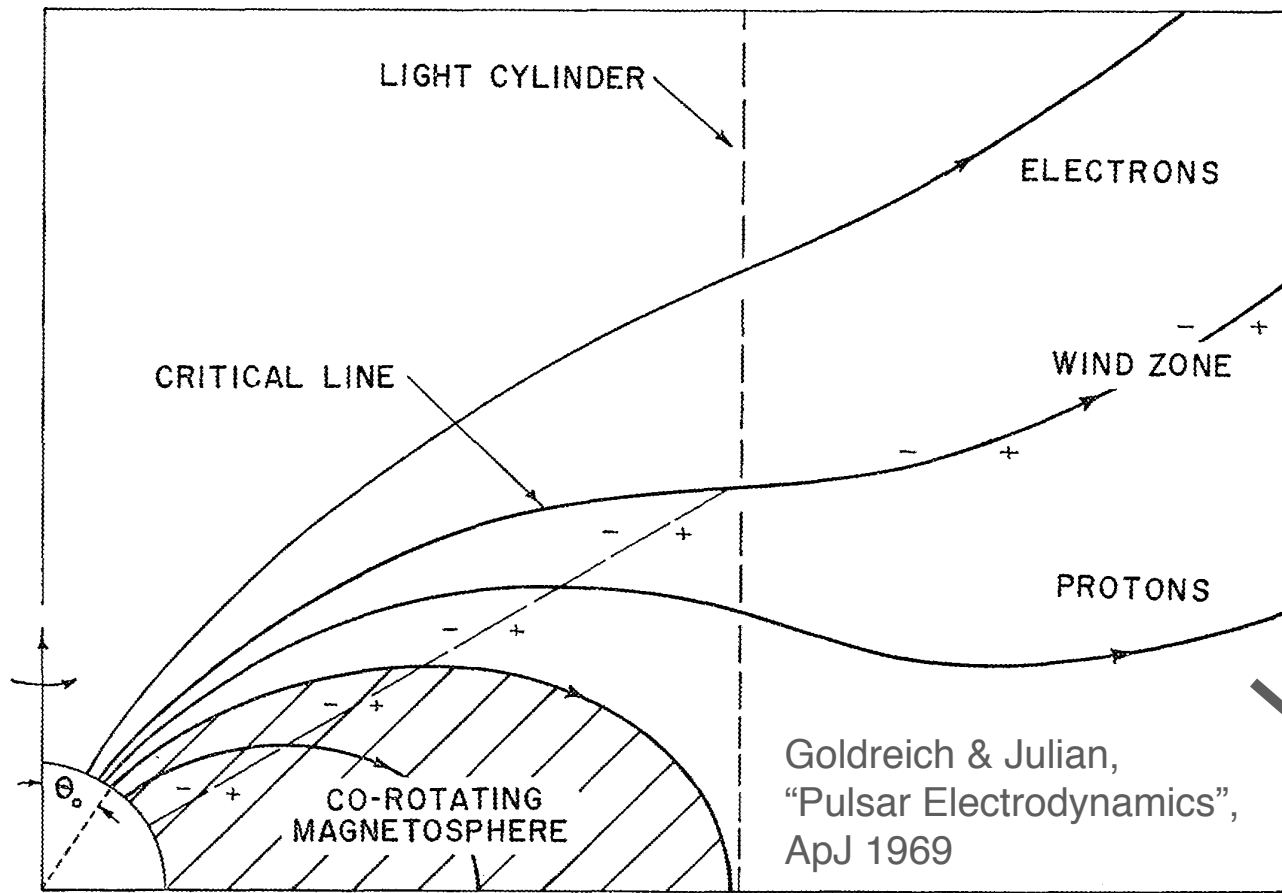
磁場 B

(~ 10^{12} G, 8桁ほどの分布)

パルサー星雲

パルサー(孤立中性子星)の磁気圏

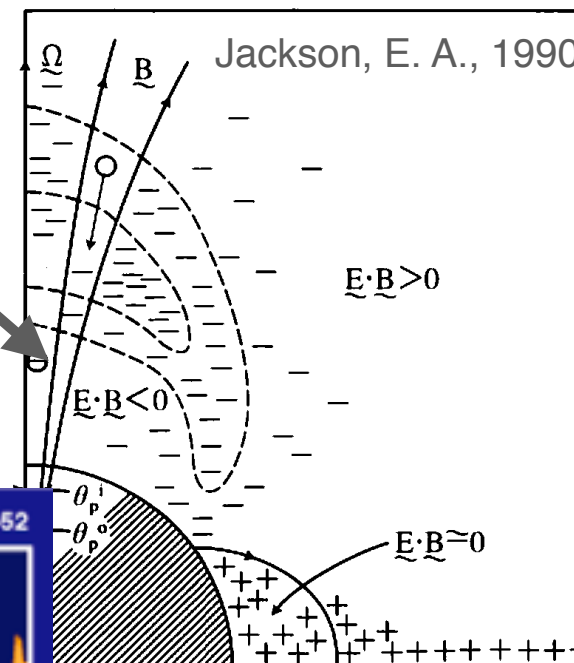
回転駆動型パルサー



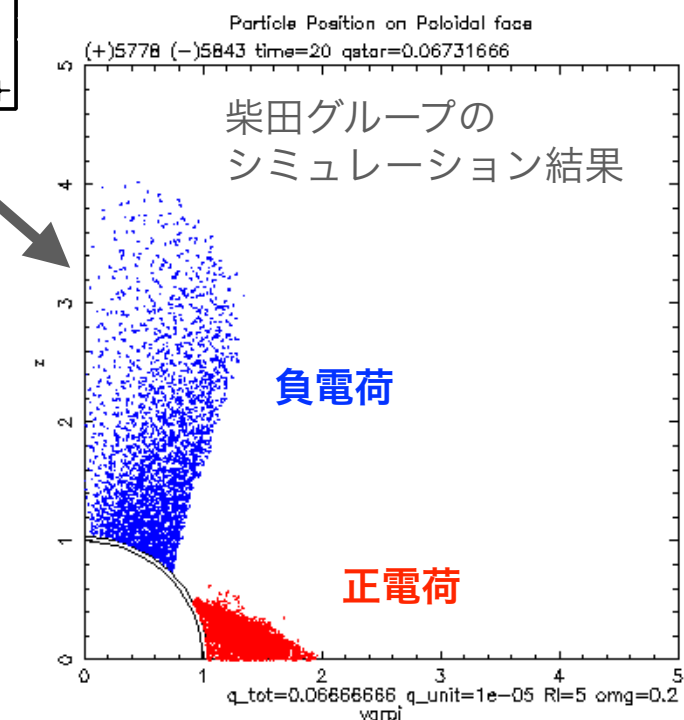
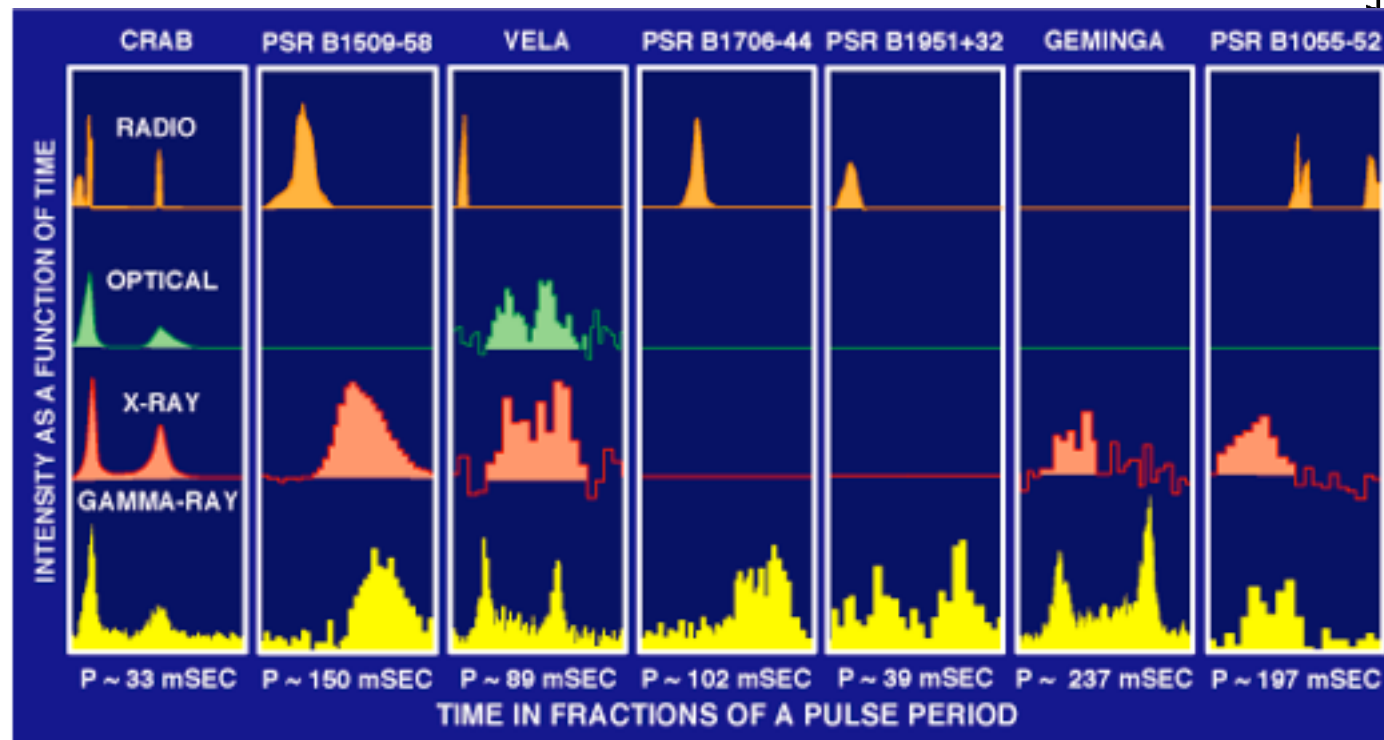
磁石が回転
 ⇒電場が誘起 ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)
 ⇒電荷による遮蔽
 ⇒磁気圏形成

光円柱

$$R_L = \frac{c}{\Omega}$$

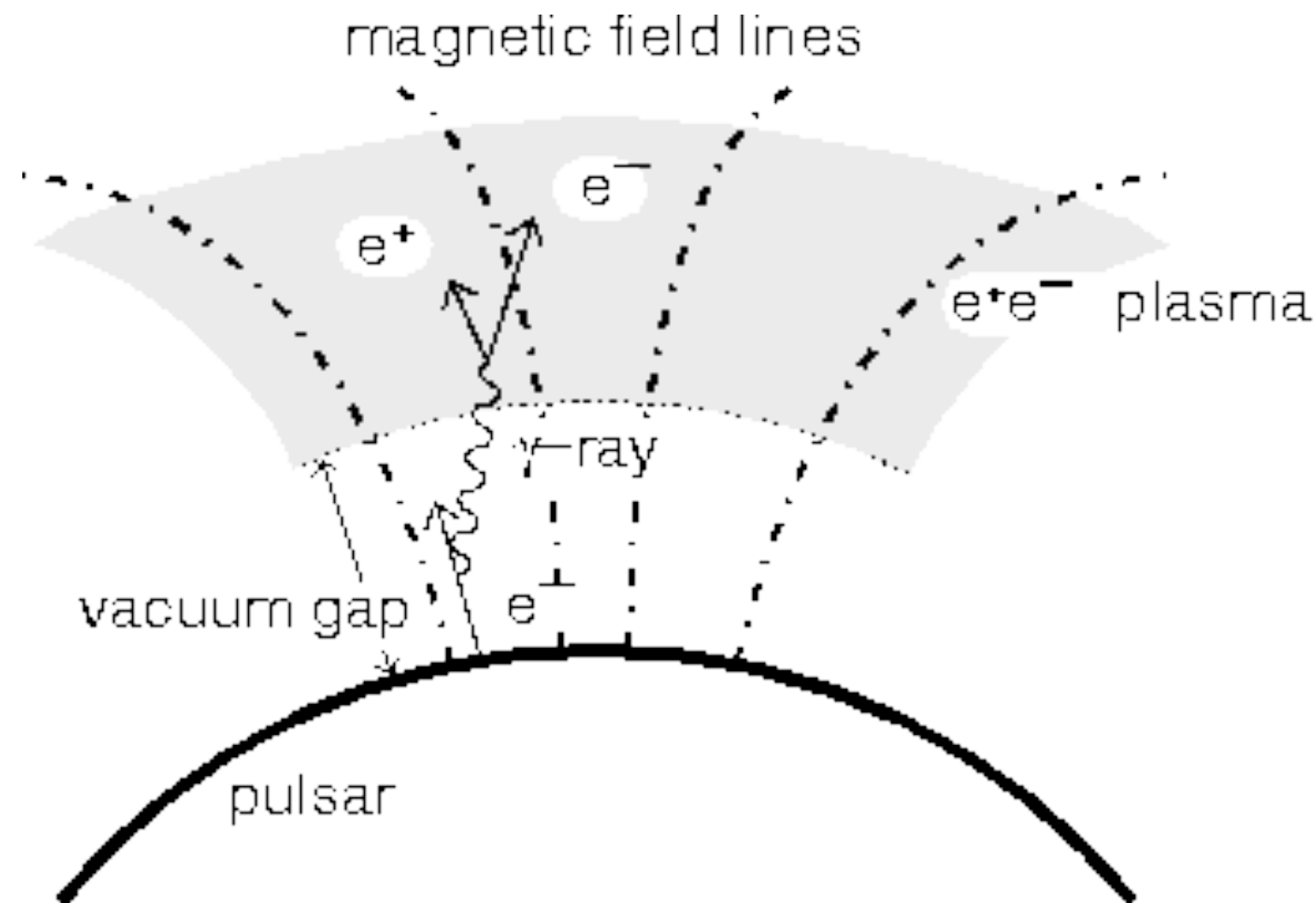
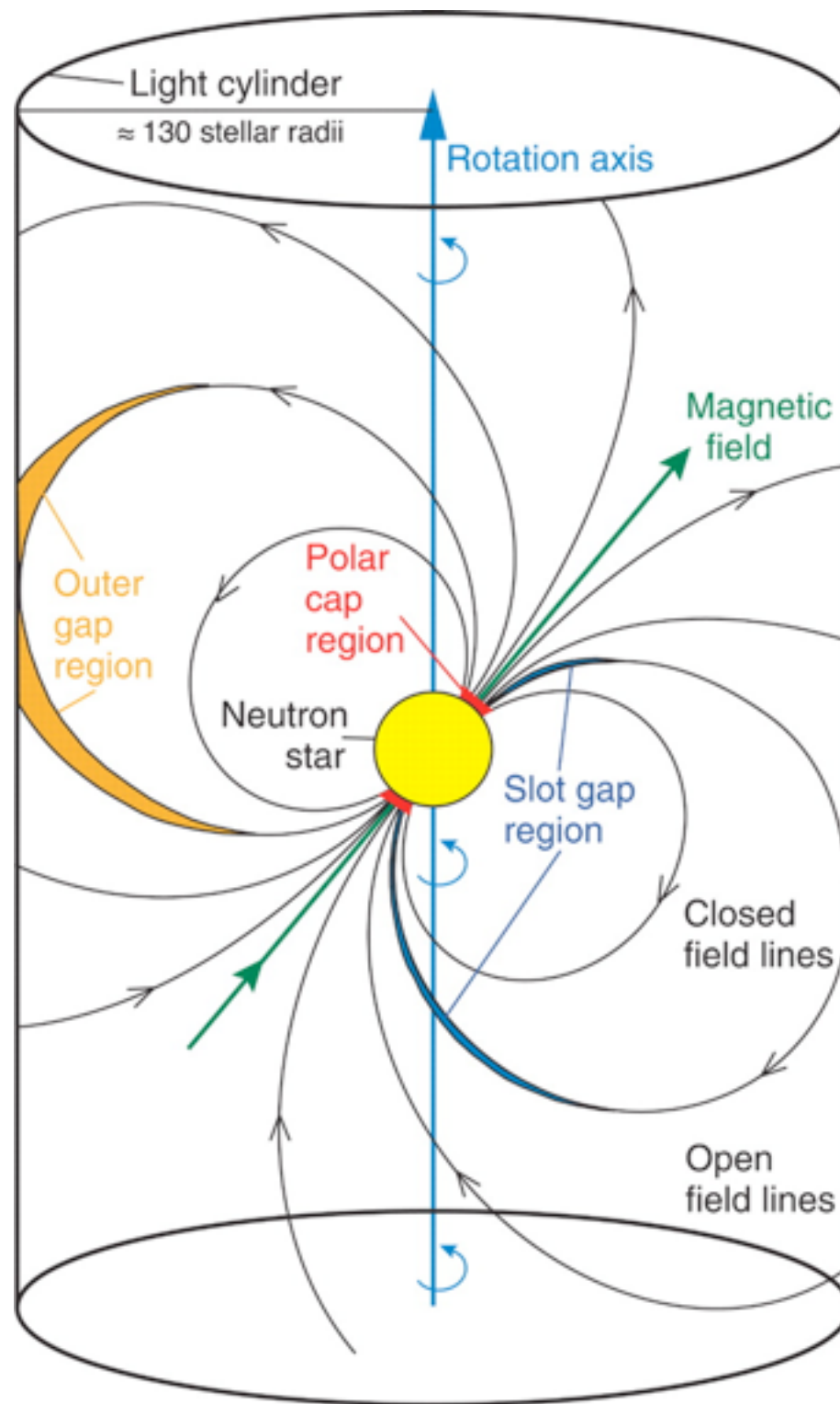


パルサー磁気圏は
 まだ十分に理解
 されていない。



パルサーの電磁波の放出

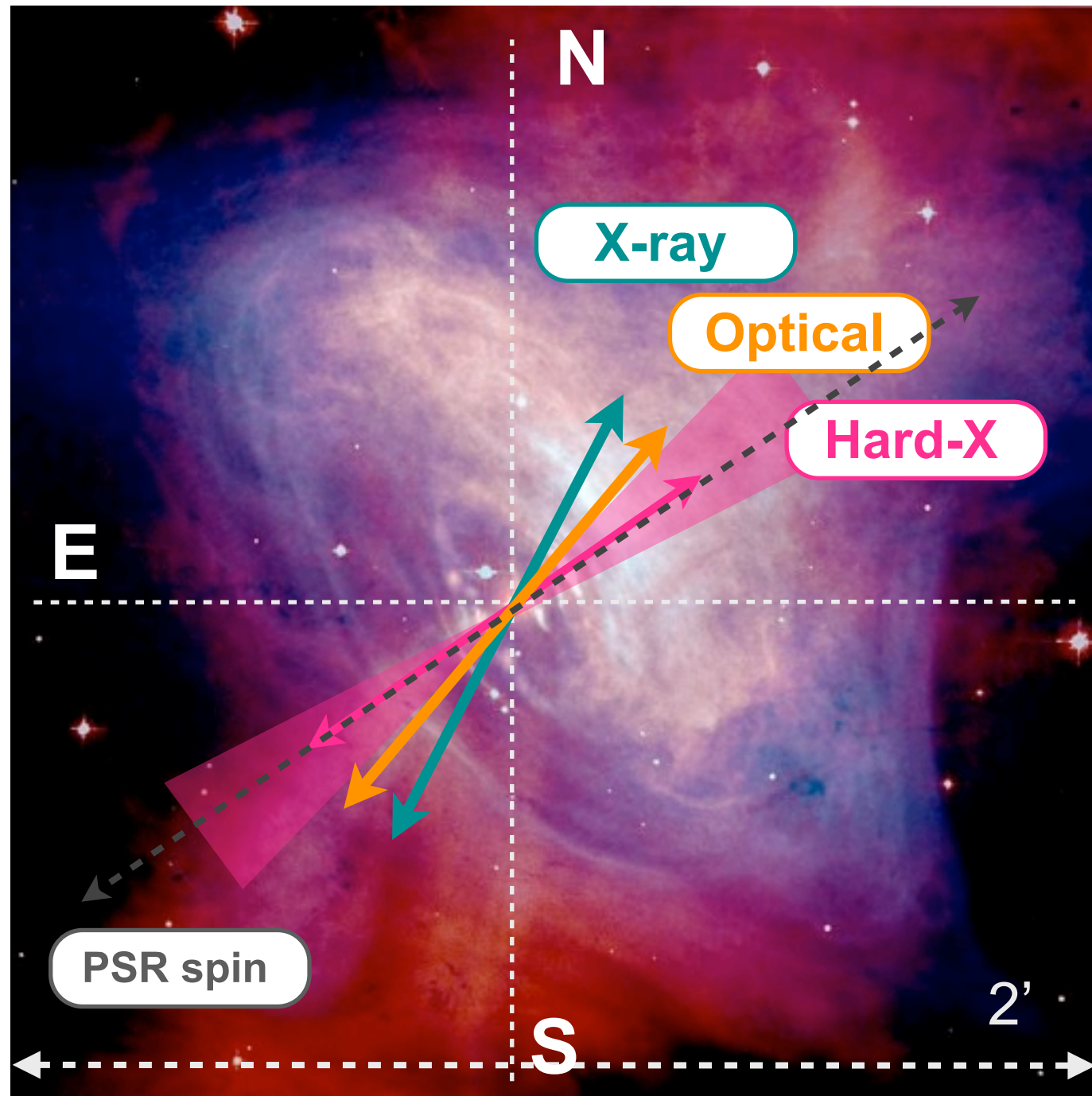
回転駆動型パルサー



磁力線に沿う電場により粒子加速
電子・陽電子のパルサー風の生成
磁力線に沿って電波～ガンマ線の放出

パルサーでの電磁波放出はまだ未解決の問題

かにパルサーのX線偏光の観測



$PD=19.2\pm0.9\%$, $PA=155.8\pm1.4^\circ$
at 2.6/5.2 keV
(OSO8, Weisskopf+78)

off-pulse extraction

$PD=9.7\pm0.1\%$, $PA=139.8\pm0.2^\circ$
Optical ($V\sim16.6$) $<5''$ from PSR
(Smith+88, Slowikowska+09)

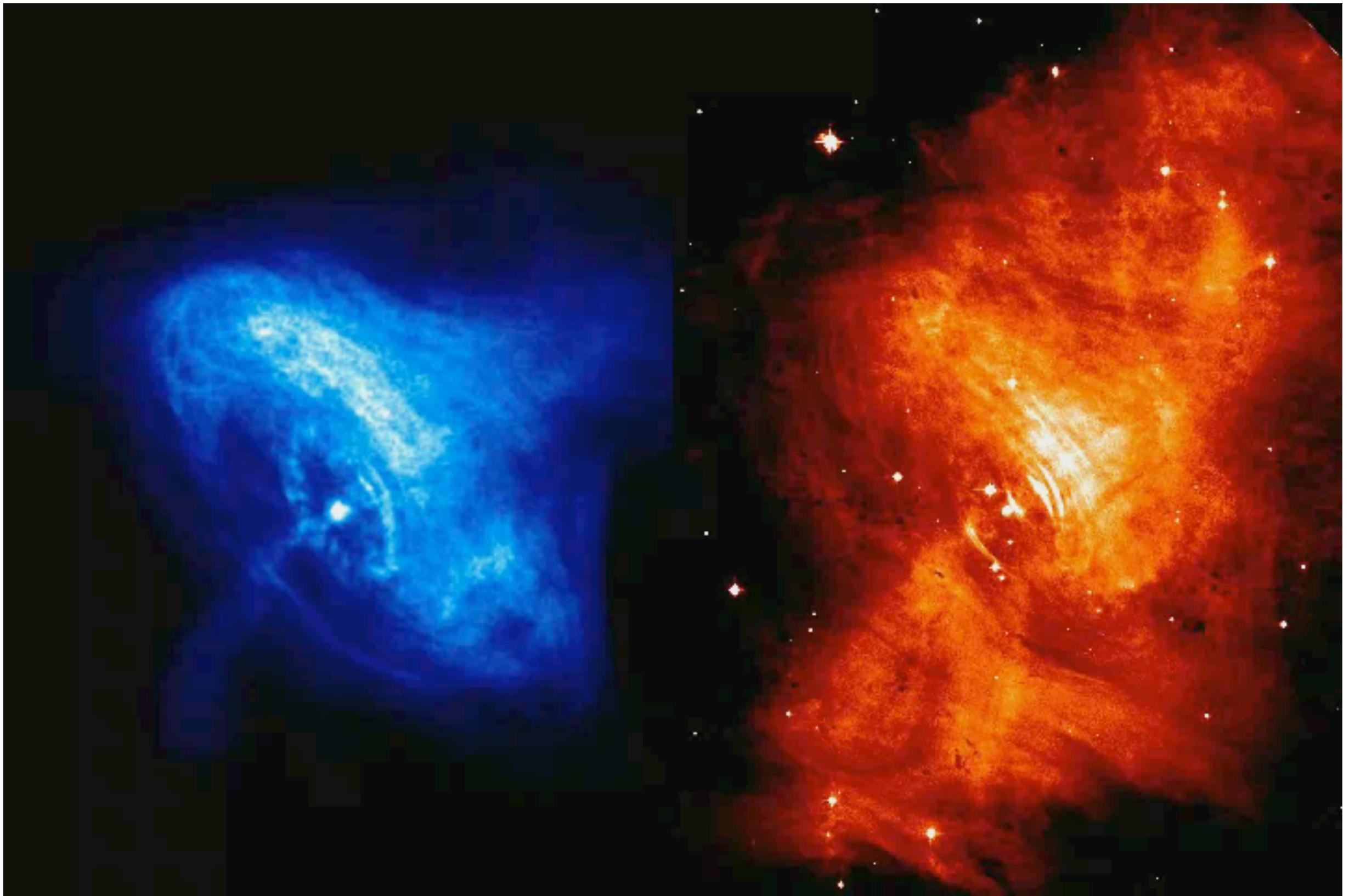
$PD=46\pm10\%$, $PA=123\pm11^\circ$
at 0.1-1 MeV
(INTEGRAL SPI, Dean+08)

off-pulse extraction

$PA=124\pm0.1^\circ$
Pulsar spin orientation (Ng+2004)

理研-NASA で共同で開発を進めている偏光X線ガス検出器により観測が可能

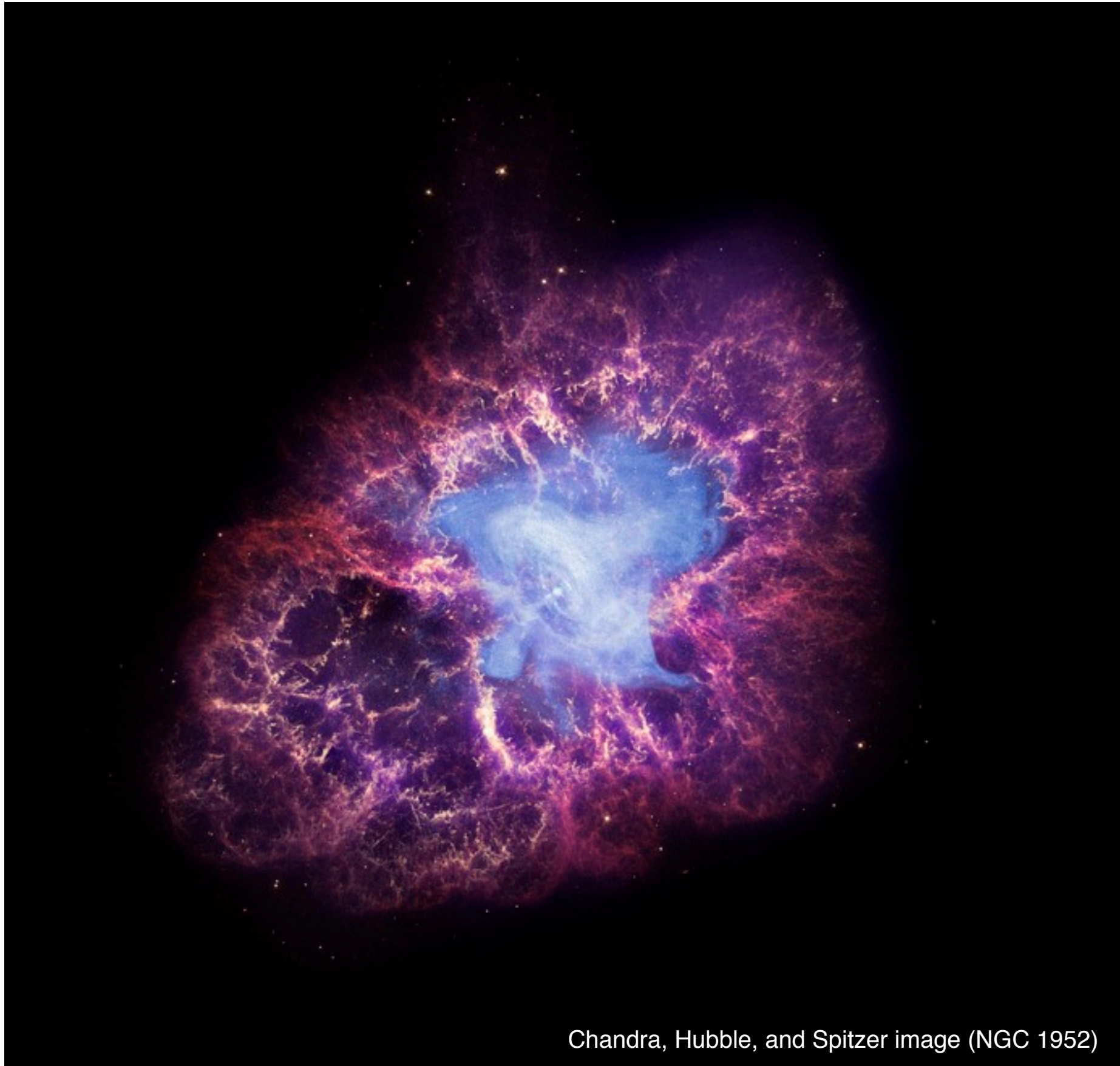
かに星雲・かにパルサーの長期観測



Chandra X-ray Image

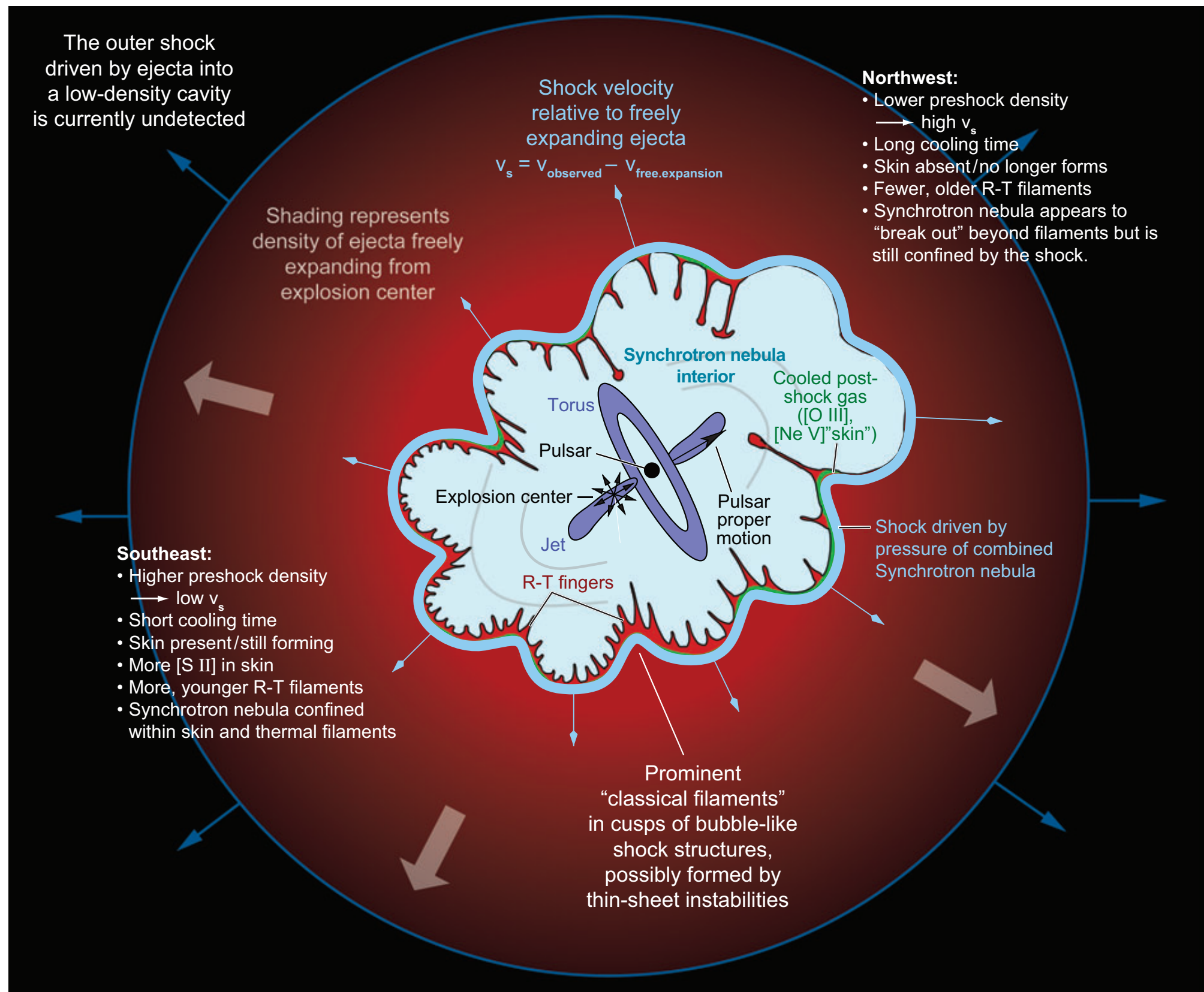
Hubble Space Telescope

かに星雲 (Crab Nebula)



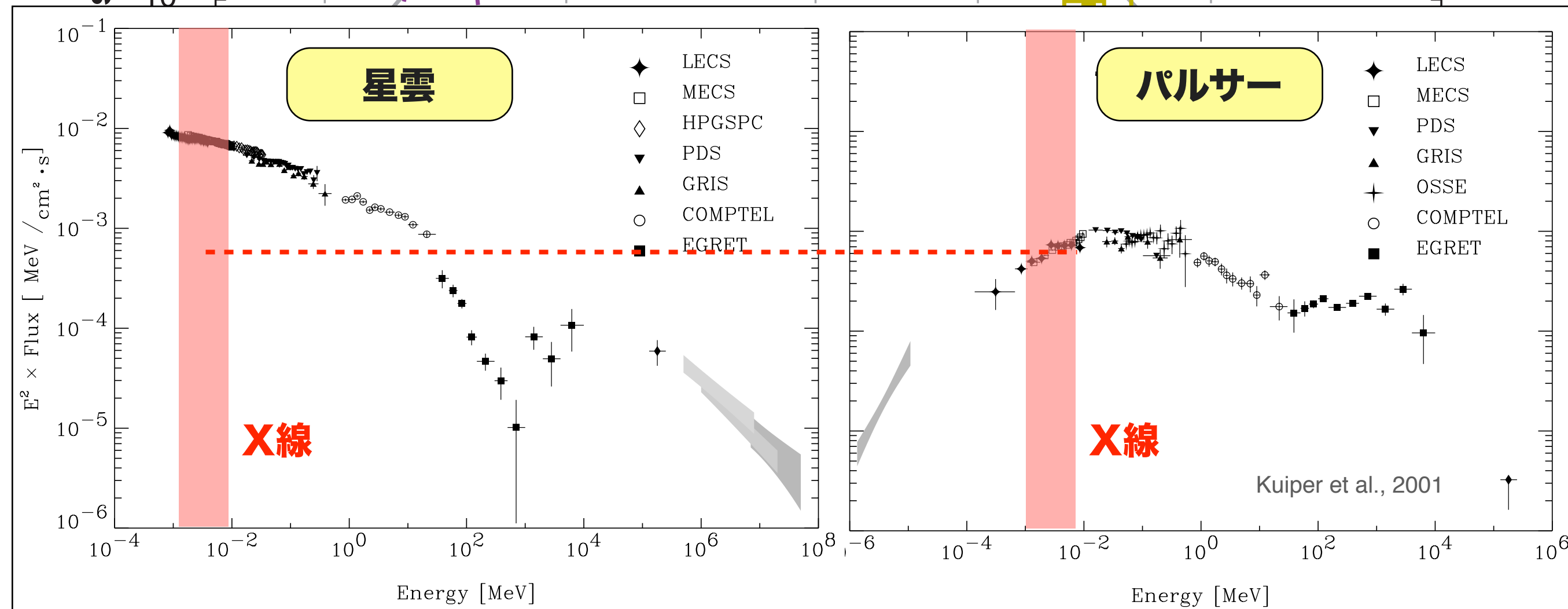
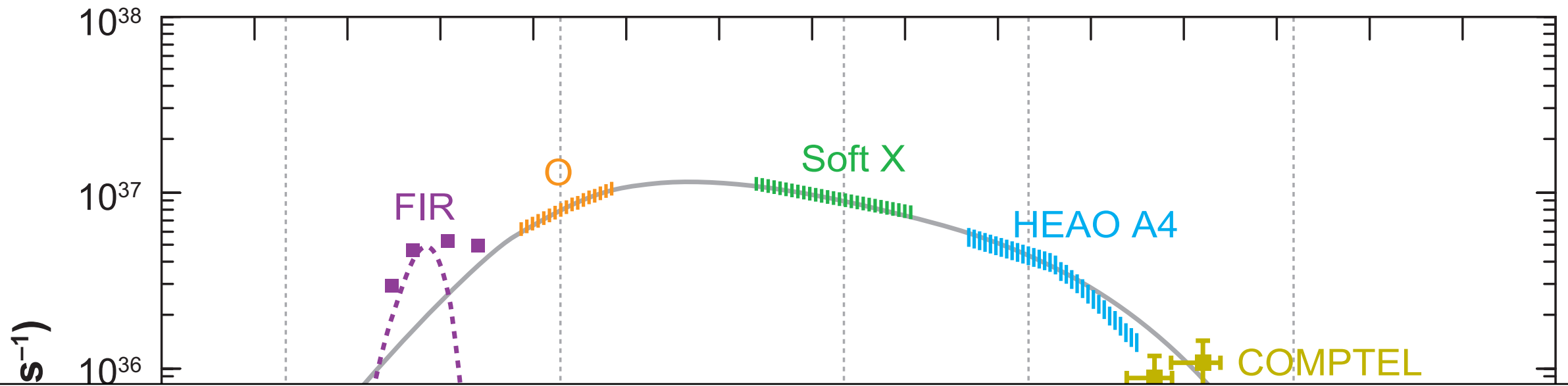
Chandra, Hubble, and Spitzer image (NGC 1952)

かに星雲の構造とパルサー星雲



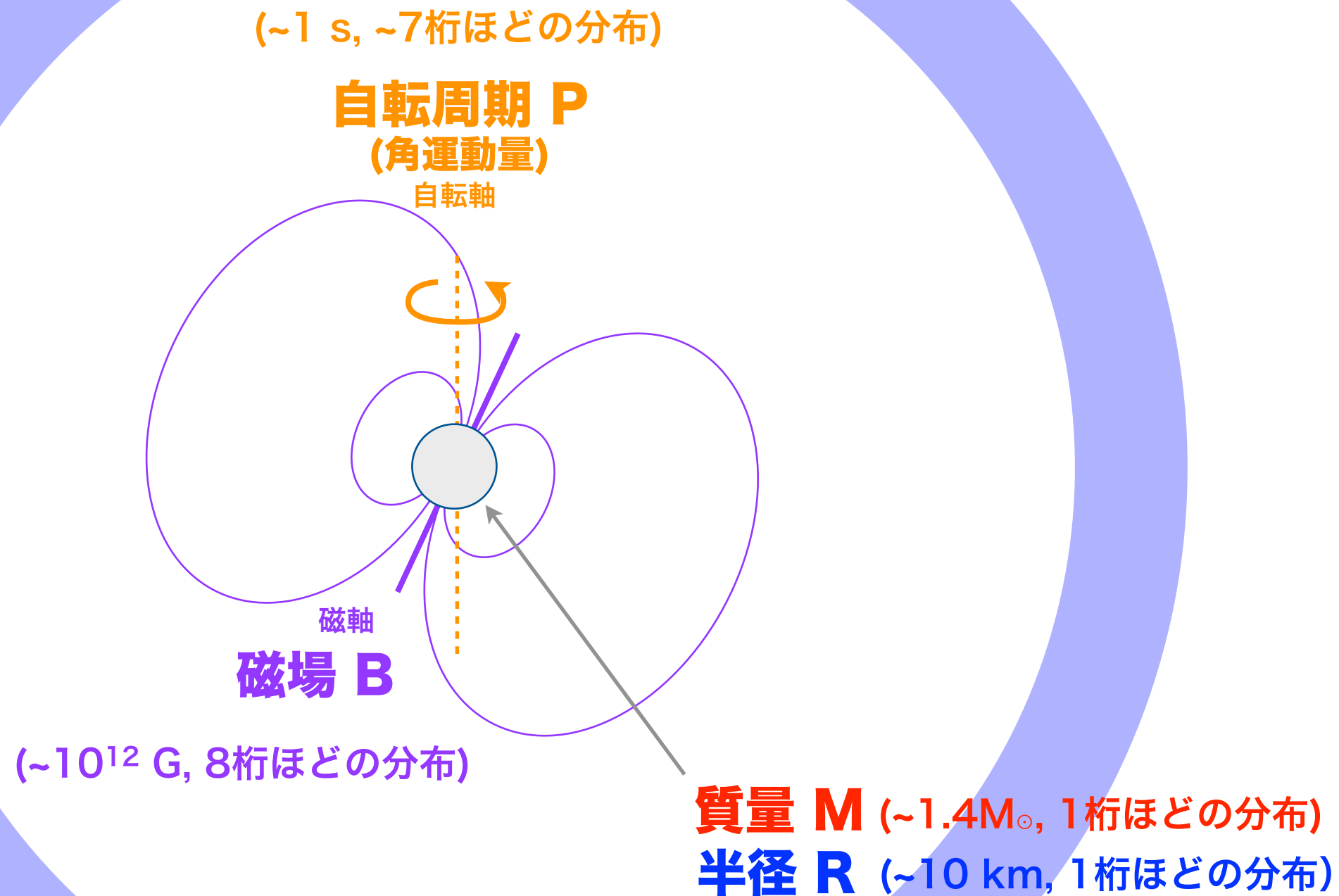
J. Jeff Hester, "The Crab Nebula: An Astrophysical Chimera", Annu. Rev. Astro. Astrophysics.

かに星雲の広帯域スペクトル



J. Jeff Hester, "The Crab Nebula: An Astrophysical Chimera", Annu. Rev. Astro. Astrophysics.

中性子星の物理量と多様性 (まとめ)



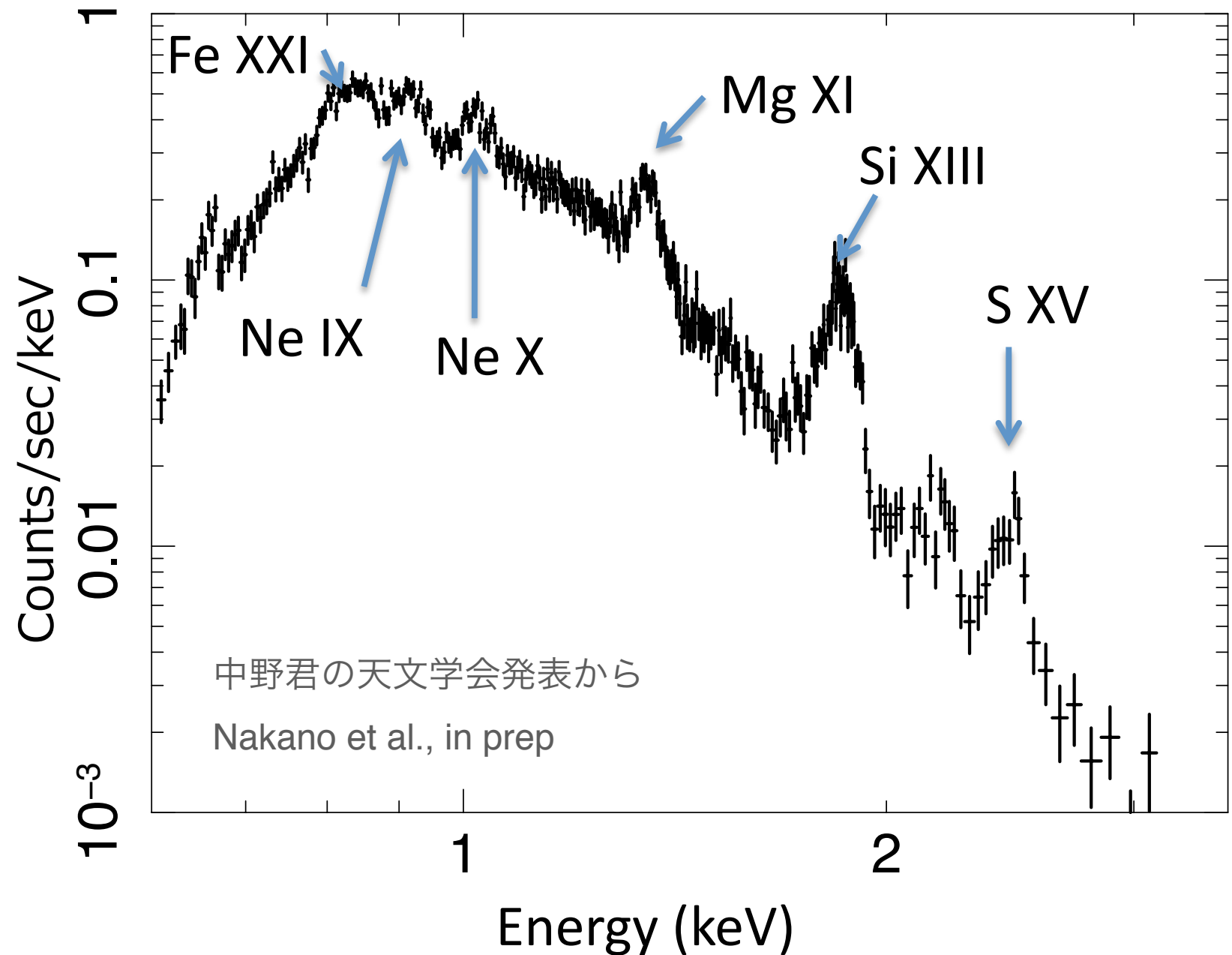
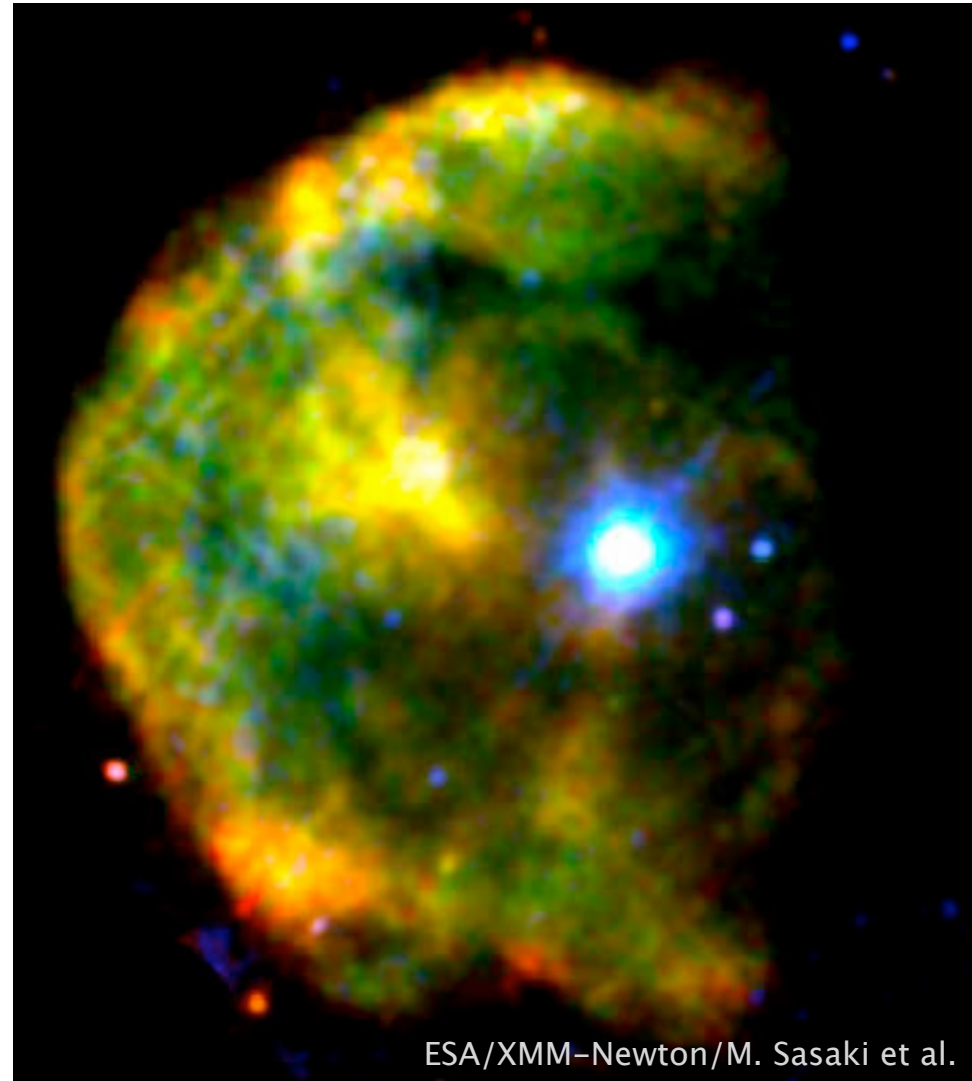
超新星残骸

超新星残骸カシオペア座Aと中性子星



Chandra X-ray Image of Cassiopea A (Stage+2006)

超新星残骸から探るパルサー母天体



中心に中性子星をもつ超新星残骸 CTB 109 のX線スペクトル
元素組成、爆発のタイプとエネルギー、年齢などを推定できる

超新星残骸の研究はX線天文学の一大分野のひとつ

中野君の発表(金曜日)

中性子星の物理量と多様性 (まとめ)

(~1 s, ~7桁ほどの分布)

自転周期 P
(角運動量)

自転軸

温度 T

(~ 10^5 - 10^7 K, ~3-4桁ほどの分布)

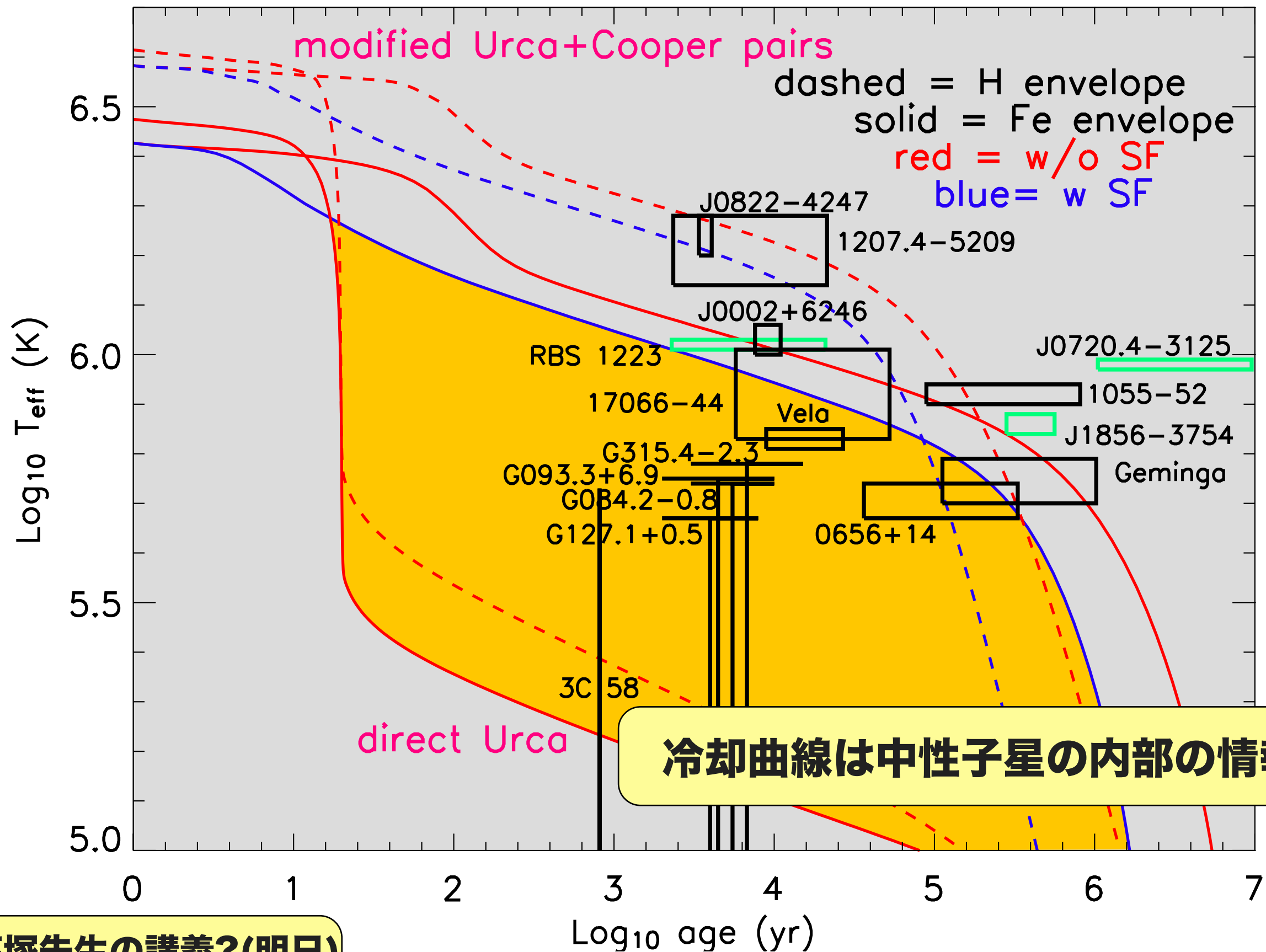
磁軸

磁場 B

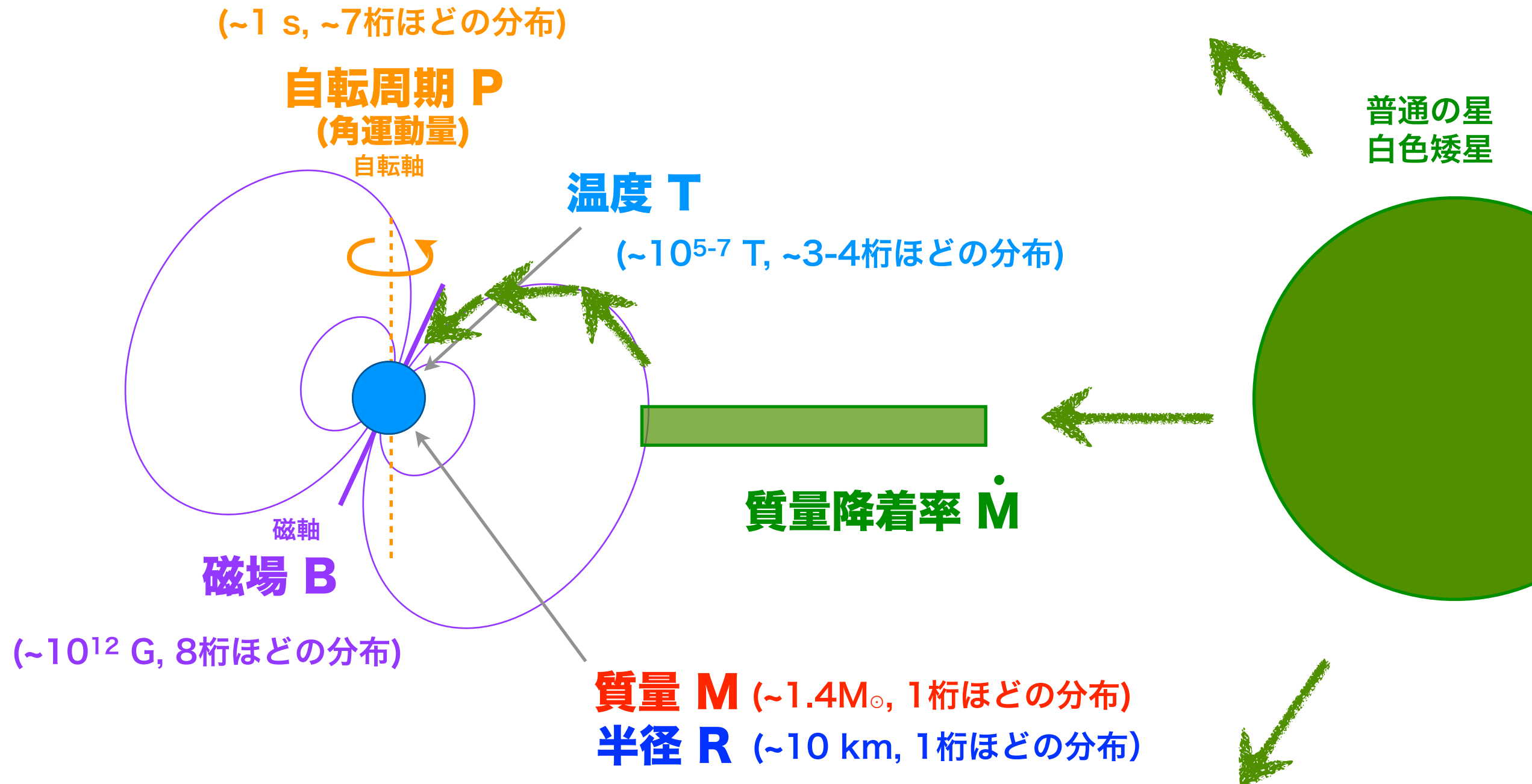
(~ 10^{12} G, 8桁ほどの分布)

超新星残骸

中性子星の冷却曲線



中性子星の物理量と多様性 (まとめ)

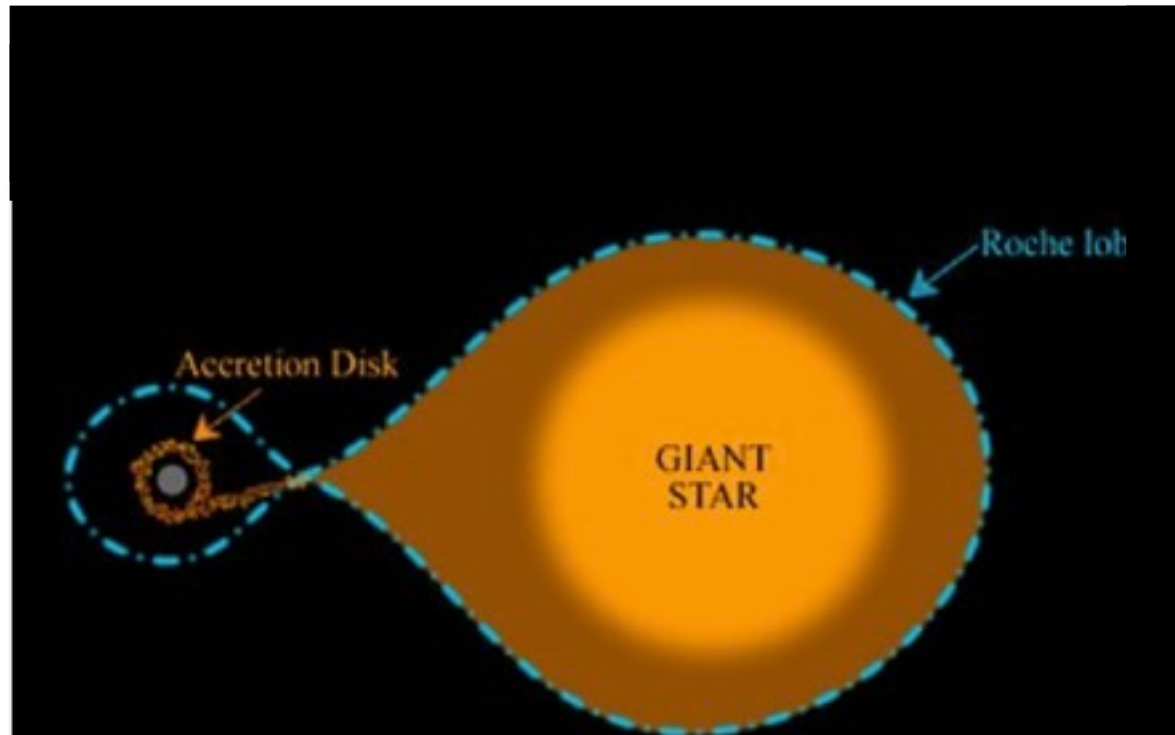


⇒ 降着駆動型パルサー

X線連星の分類

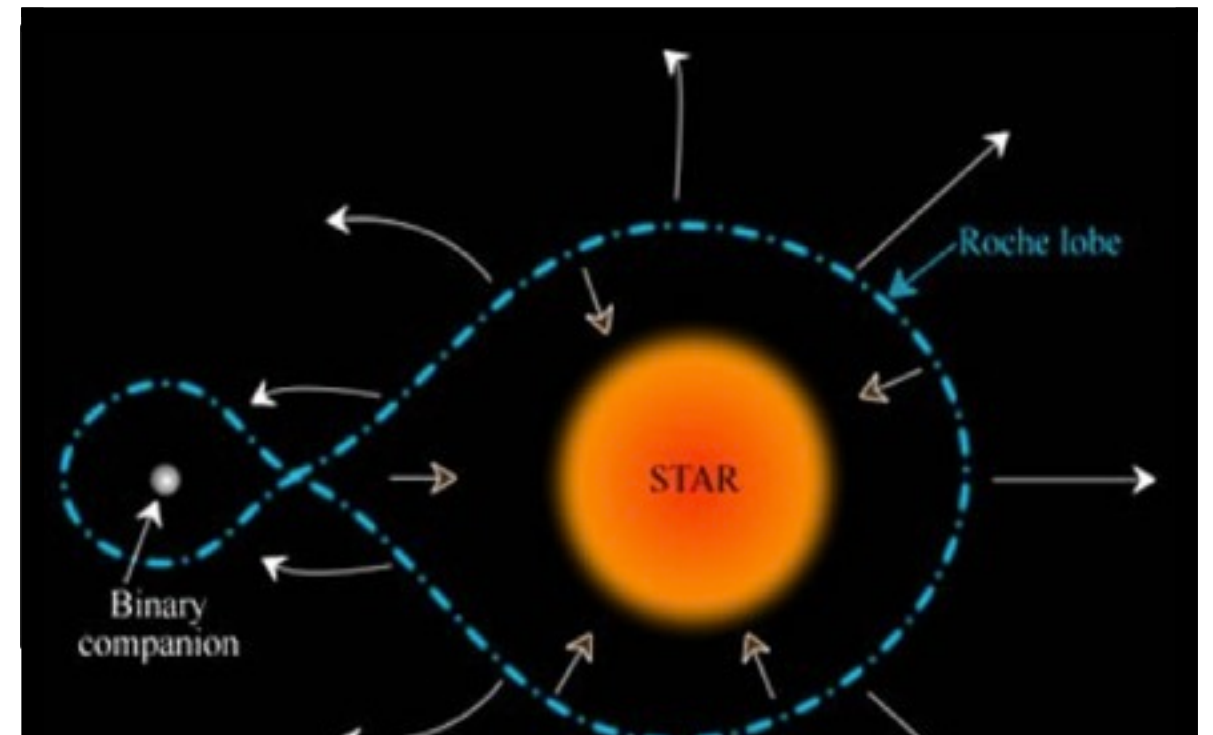
小質量X線連星

Low Mass X-ray Binaries (LMXBs)



大質量X線連星

High Mass X-ray Binaries (HMXBs)



High Mass, Low Mass は光学主星の特徴！ 中性子星の質量ではない！

年齢: old population (1000 Myr)

主星: K-M 型

$M_c \sim 1 M_\odot$ ($M_c < \sim 2-3 M_\odot$)

降着: Roche lobe flow

スペクトルの吸収が弱い

stellar mass の分布に一致

年齢: young population (10 Myr)

主星: late O-B(e) 型

$M_c > 10 M_\odot$

降着: 強い星風

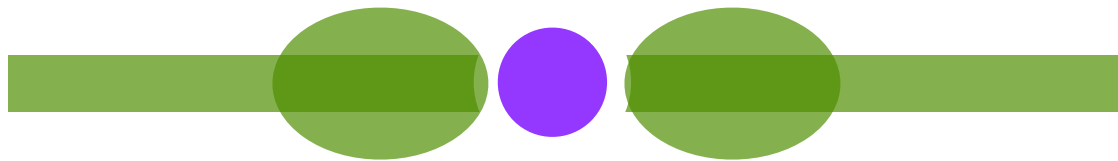
スペクトルに吸収が見られる

おもに星形成領域で見られる

中性子星の磁場による降着の違い

磁場が弱い中性子星($\sim 10^8$ G)

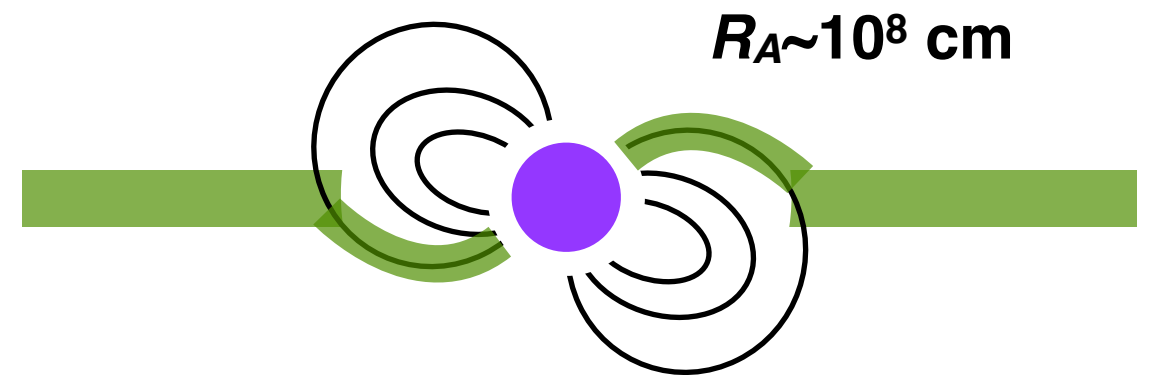
おもに LMXB 中に見られる



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

磁場が強い中性子星($\sim 10^{12}$ G)

おもに HMXB 中に見られる



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 $\Rightarrow$ 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)

物質がケプラー回転しながら降着

$$mr\Omega^2 = \frac{GmM}{r^2}$$

アルフベン半径 R_A

$$\frac{B^2}{8\pi} = \rho v^2 \quad (B \propto r^{-3})$$

$$v = r\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$r_A = \left(\frac{\mu^4}{2GM\dot{M}^2} \right)^{1/7} = 3.2 \times 10^8 \dot{M}_{17}^{-2/7} \mu_{30}^{4/7} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1/7} \text{ cm}$$

HMXB 中のX線パルサー波形

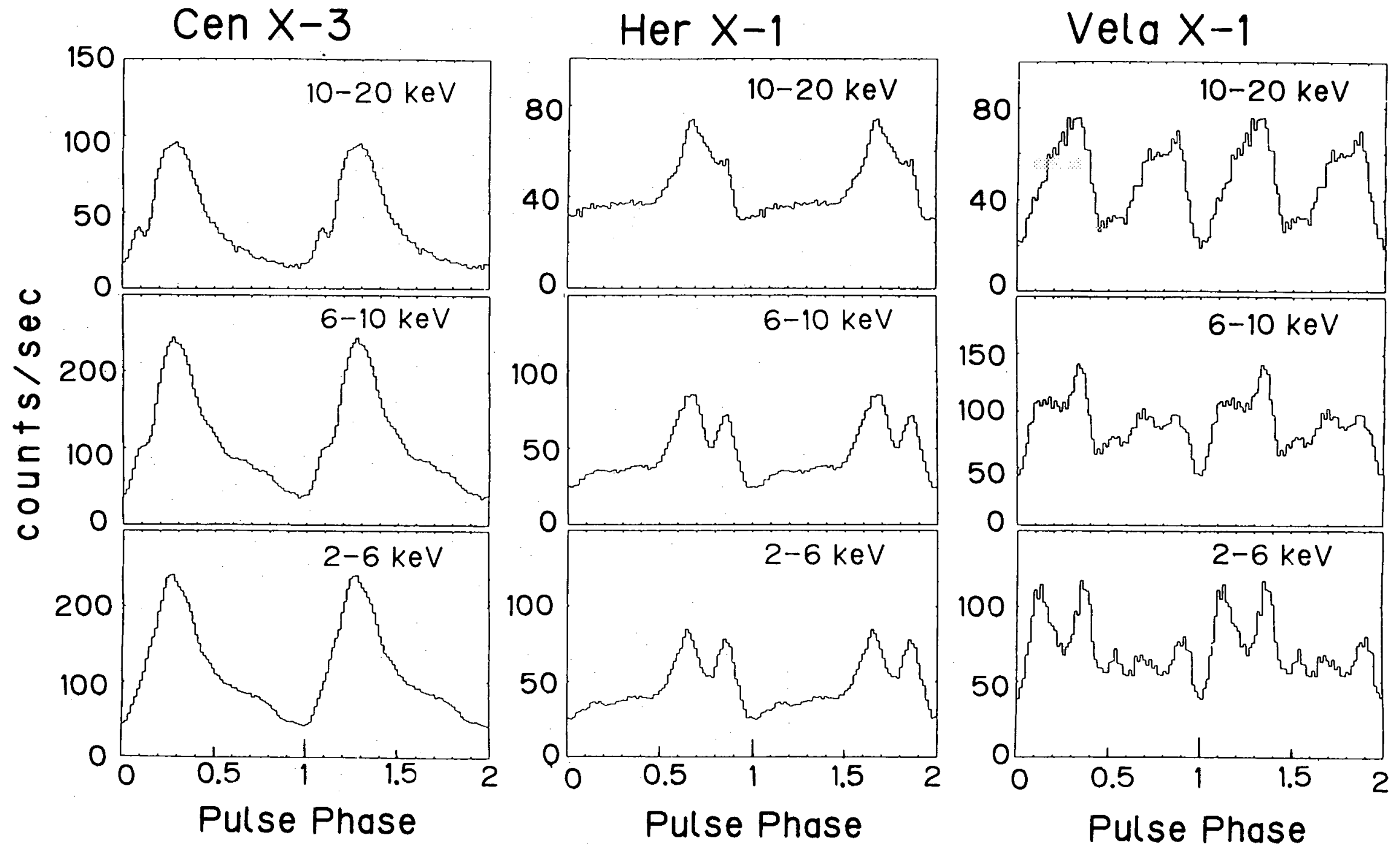


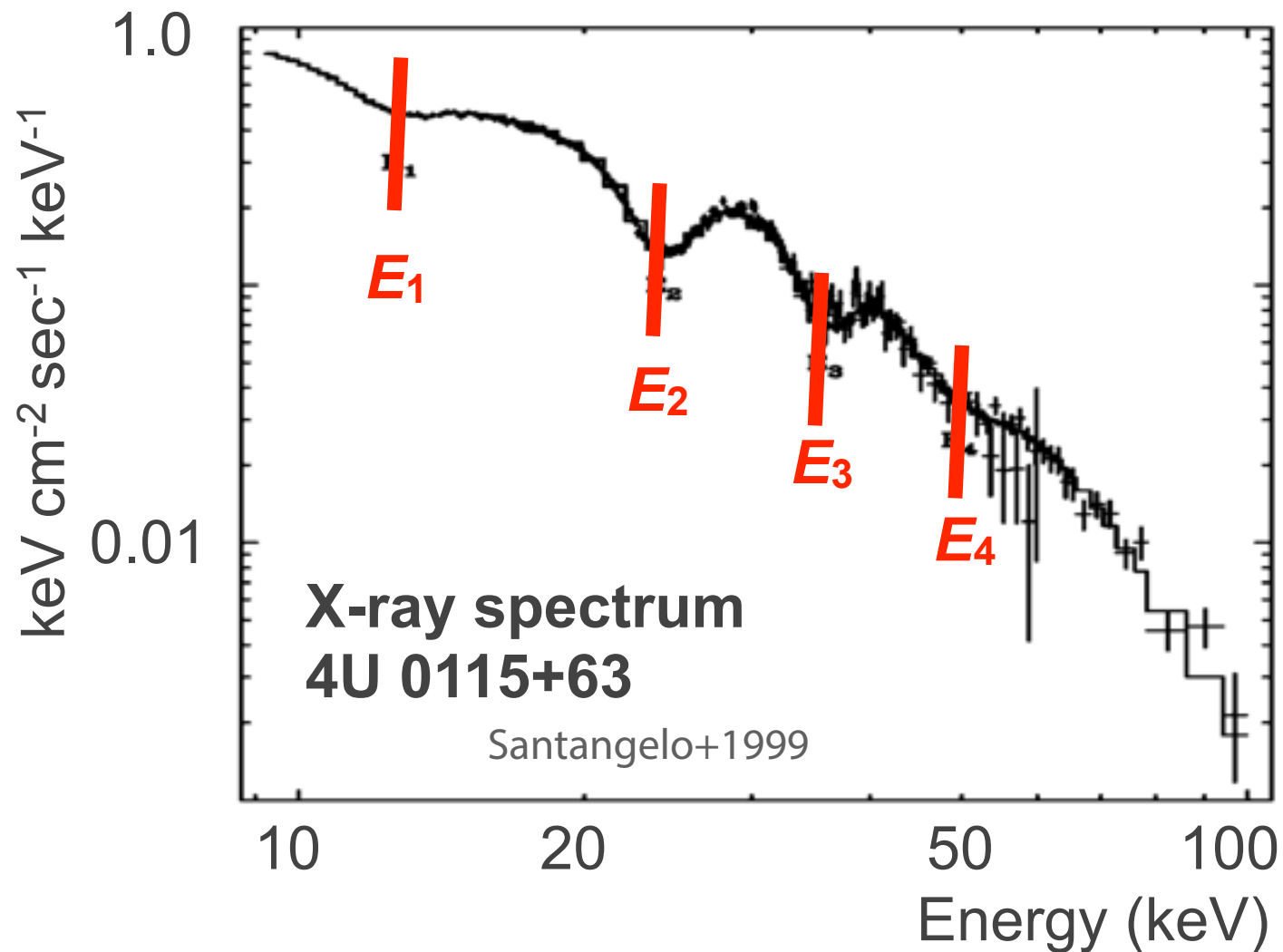
Fig. 3. Average pulse profiles observed by Tenma in three different energy bands for three typical X-ray pulsars, Cen X-3, Her X-1, and Vela X-1.

$\dot{P}$ は長期では安定していない。

中性子星の磁場の推定：電子サイクロトロン共鳴

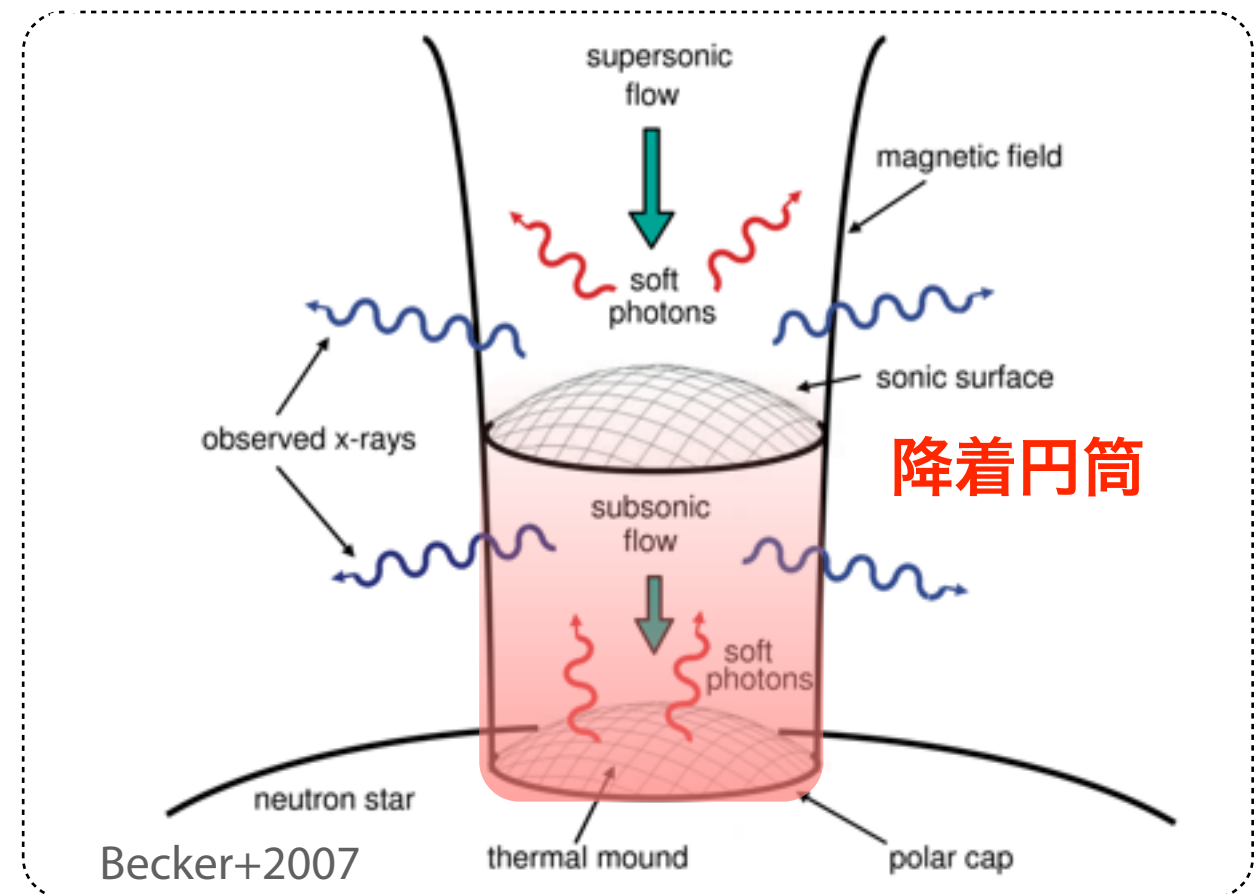
Cyclotron Resonance Scattering Feature

$$E_a = 11.6 (1 + z)^{-1} \frac{B}{10^{12}(\text{G})} \text{ keV}$$



These features were discovered from ~20 sources with $B \sim 10^{11-13} \text{ G}$.

重力エネルギー



X線パルサーの電子サイクロトロン共鳴

Table I. The X-ray binary pulsars with CRSF.

Object	E_a [keV]	Instruments
4U 0115+63	11.8, 24.1	¹⁰⁾ <i>HEAO-1</i>
	34.5, 47.0	⁷⁾ <i>SAX</i>
	66.5	⁸⁾ <i>RXTE</i>
4U 1907+09	18, 38	¹¹⁾ <i>Ginga</i> ¹²⁾ <i>SAX</i>
4U 1538-52	20	¹³⁾ <i>Ginga</i>
Vela X-1	24, 52	¹⁴⁾ <i>Mir</i> ¹⁵⁾ <i>RXTE</i>
X0331+53	26,	¹⁶⁾ <i>Ginga</i>
	49, 74	¹⁷⁾ <i>Integral</i>
Cep X-4	28	¹⁸⁾ <i>Ginga</i>
Cen X-3	29	¹⁹⁾ <i>SAX</i>
X Per	29	²⁰⁾ <i>RXTE</i>
MXB 0656-072	32.8	²¹⁾ <i>RXTE</i>
XTEJ1946+27	36	²²⁾ <i>RXTE</i>
4U 1626-67	37	²³⁾ <i>SAX</i>
GX 301-2	37	²⁾ <i>Ginga</i>
Her X-1	41	¹⁾ Balloon
A0535+26	50, 110	^{14), 24)} <i>HEXE</i>
		²⁵⁾ <i>Suzaku Integral RXTE</i>
GS1843+00	20 ?	²⁾ <i>Ginga</i>
OA01657-415	36 ?	²⁶⁾ <i>SAX</i>
LMC X-4	21 ? 100 ?	²⁾ <i>Ginga</i> ²⁷⁾ <i>SAX</i>

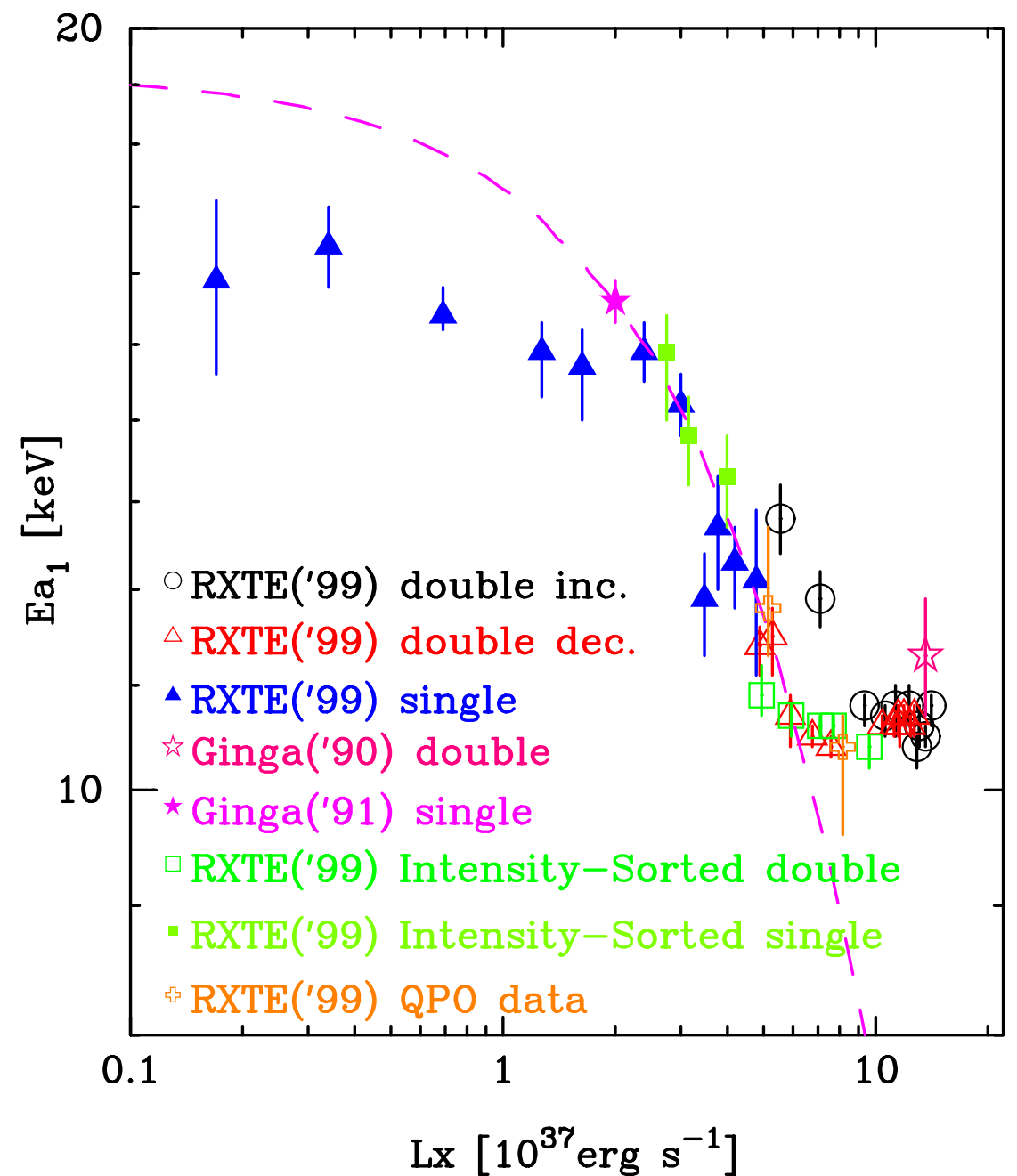
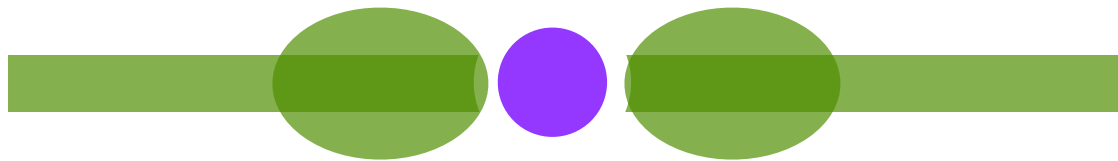


Fig. 1. Change of the CRSF energy with luminosity in 4U0115+53 taken from Nakajima 2006.⁹⁾ The dashed line is the prediction by the height model ($E_0 = 18$ keV).

中性子星の磁場による降着の違い

磁場が弱い中性子星($\sim 10^8$ G)

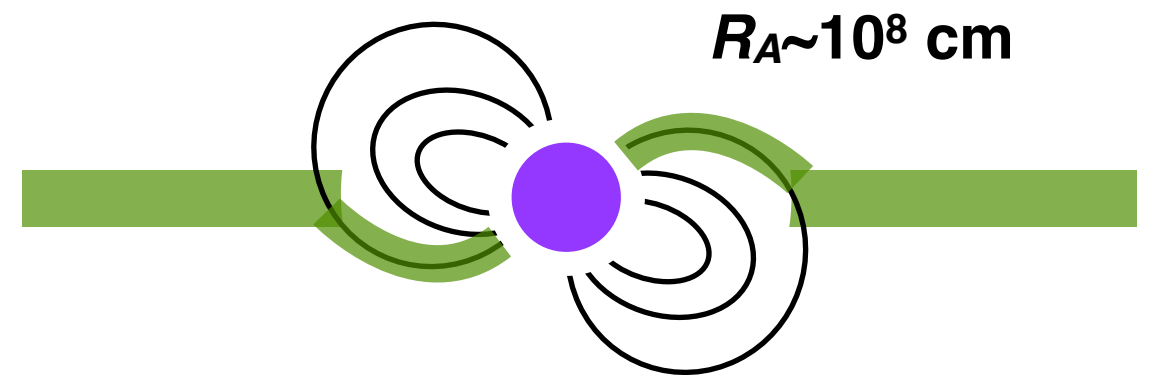
おもに LMXB 中に見られる



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

磁場が強い中性子星($\sim 10^{12}$ G)

おもに HMXB 中に見られる



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 $\Rightarrow$ 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)

物質がケプラー回転しながら降着

$$mr\Omega^2 = \frac{GmM}{r^2}$$

$$v = r\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

アルフベン半径 R_A

$$\frac{B^2}{8\pi} = \rho v^2 \quad (B \propto r^{-3})$$

$$r_A = \left(\frac{\mu^4}{2GM\dot{M}^2} \right)^{1/7} = 3.2 \times 10^8 \dot{M}_{17}^{-2/7} \mu_{30}^{4/7} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1/7} \text{ cm}$$

小質量X線連星(LMXB) と X 線バースト

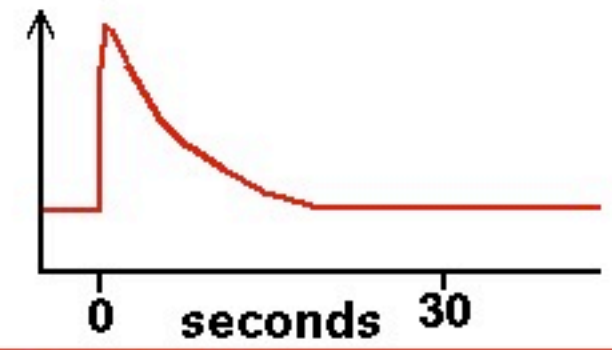
A Low Mass X-Ray Binary: 4U 1820-30

Earth 

130,000 km

White Dwarf

X-Ray Emission: BURSTS



X - Rays

Accretion Disk

Neutron Star

1,200 km/sec

SUN

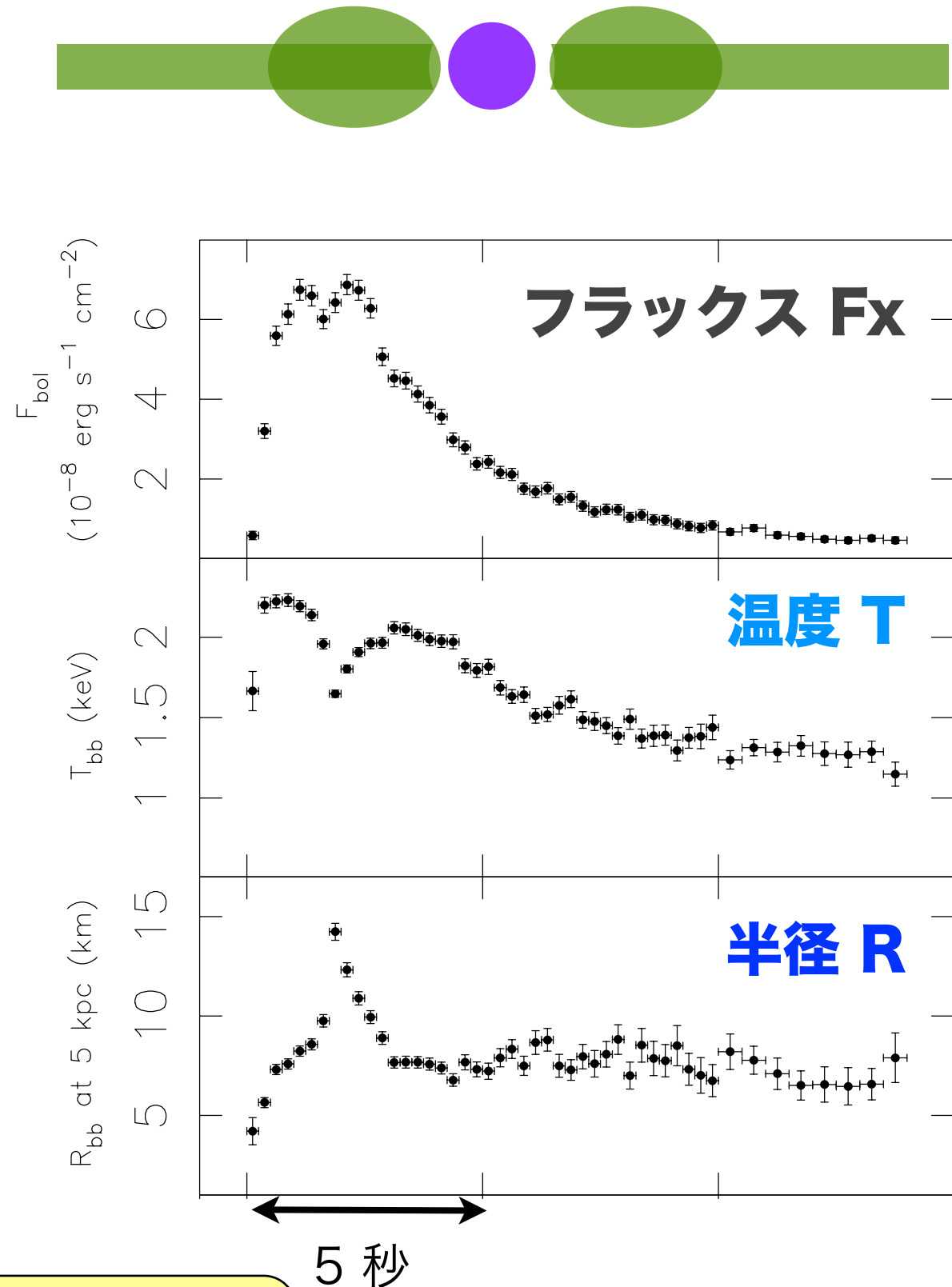
X線バースト

- 弱磁場NSに相手の星からガス降着。
- NSの表面で爆発的な核融合(H→He or He→C) 。X線バースト。
- NS 表面は一気に加熱され等温に。黒体放射をX線として放射し冷却。
- 典型的に ~10秒のタイムスケールでエディントン光度まで($\sim 10^{38}$ erg/s)
- 黒体放射 kT とフラックス F_X からステファン=ボルツマン則で半径推定。

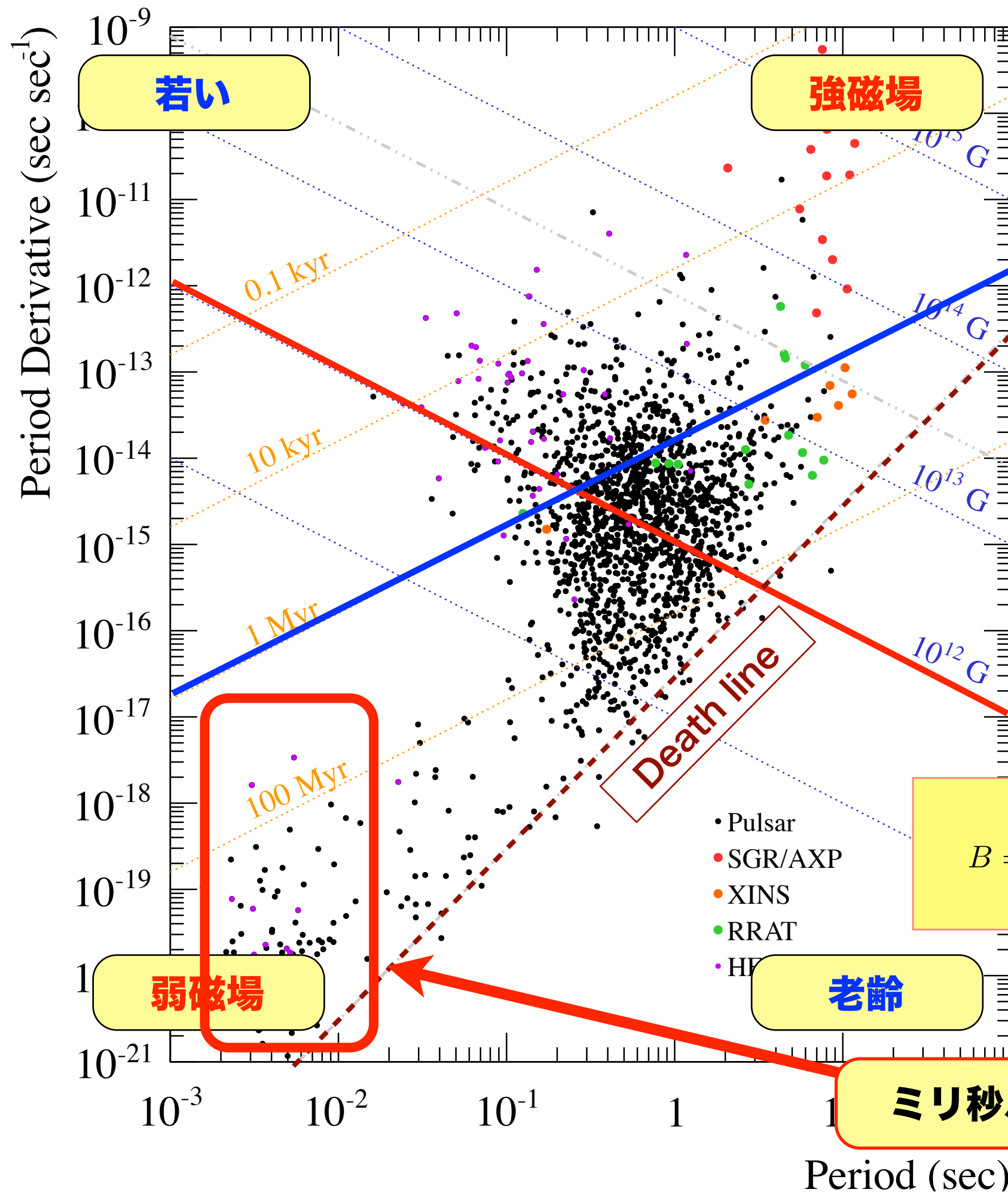
$$4\pi D^2 F_X = L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$R = D \left(\frac{F_X}{\sigma T^4} \right)^{1/2}$$

堂谷先生の発表(金曜)



P-Pdot 図



$\tau_c = 1$ Myr の年齢の線(傾き +1)

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

$B \sim 10^{12}$ G 磁場の線(傾き -1)

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

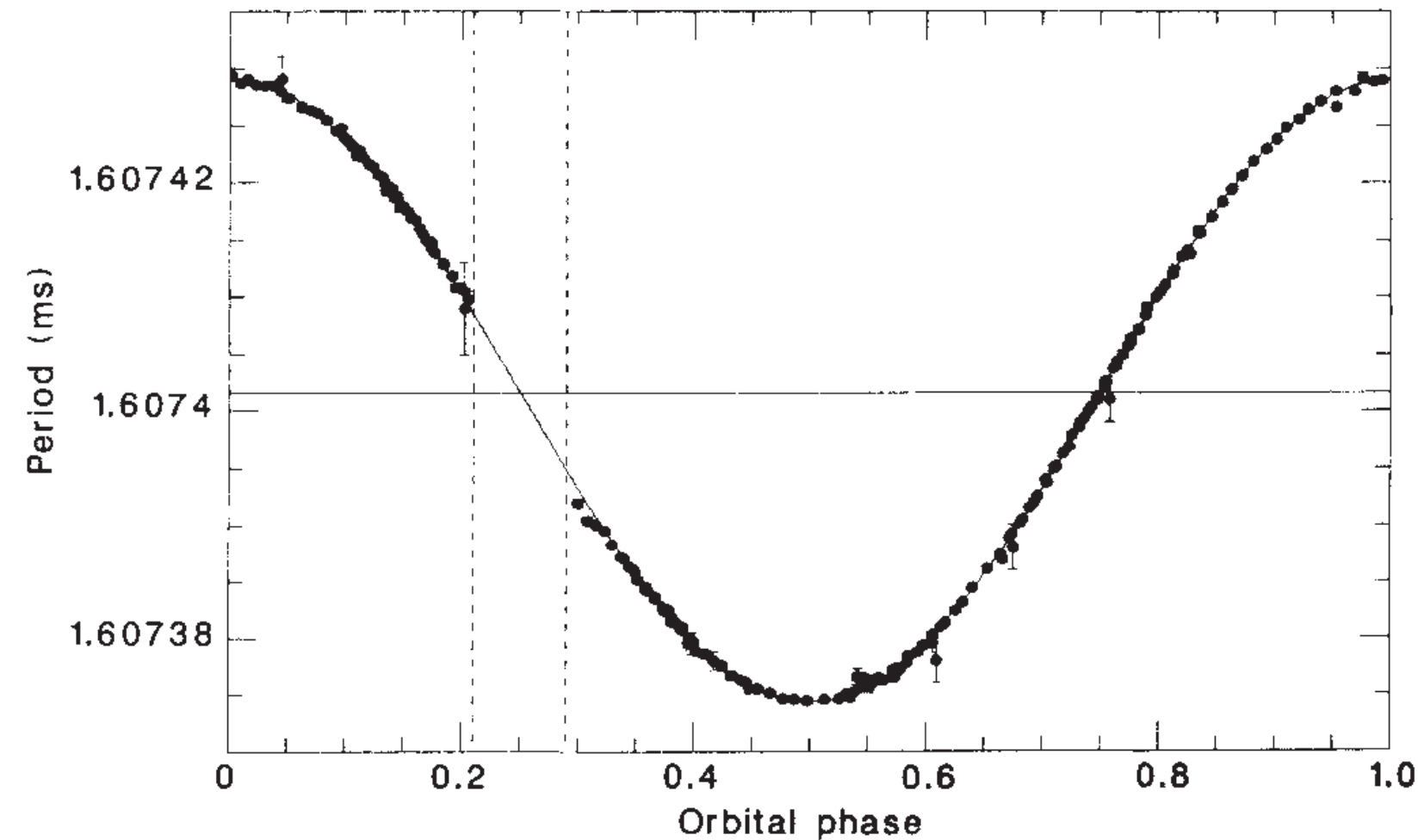
ミリ秒パルサーの特徴

自転周期が 1-10 ms で電波、X線、ガンマ線で観測される

球状星団で多く見られ、連星中にあることが多い

電波によりパルス周期を精度よく測定できる(太陽系外惑星 PSR B1257+12)

連星ミリ秒パルサー PSR 1957+20



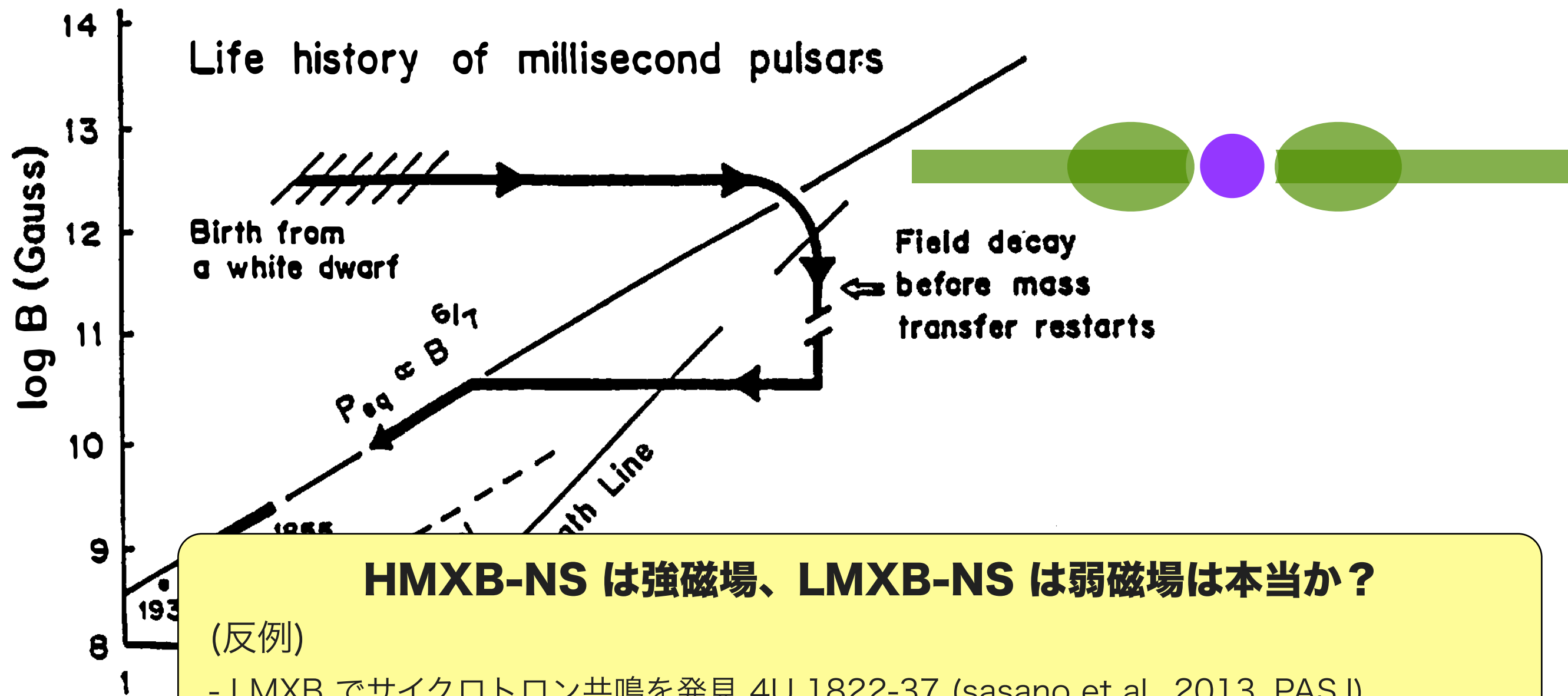
Fruchter A. S. et al., Nature 1988

球状星団ターザン5



ミリ秒パルサーの起源 (標準進化モデル)

もとは自転周期の長いパルサーが降着の過程(LMXB-NS)でスピナップした？



HMXB-NS は強磁場、LMXB-NS は弱磁場は本当か？

(反例)

- LMXB でサイクロトロン共鳴を発見 4U 1822-37 (sasano et al., 2013, PASJ)
- 同じく Her X-1 でもサイクロトロン共鳴が存在
- 若いミリ秒パルサーで磁場が強い兆候のある PSR B1937+21 (Kiziltan et al., 2009, ApJ)
- 自転周期が 5.6 hour と長く強磁場の LMXB 4U 1954+319 (Enoto et al., in prep)

FIGURE 1
recycled

1990, *Adv. Space Res.*, 10, no. 2, 167; © 1990 Pergamon Press PLC.

中性子星の物理量と多様性 (まとめ)

電波からガンマ線に
及ぶパルス周期観測

(~1 s, ~7桁ほどの分布)

自転周期 P
(角運動量)

自転軸

温度 T

(~ 10^5 - 10^7 K, ~3-4桁ほどの分布)

磁軸

磁場 B

(~ 10^{12} G, 8桁ほどの分布)

質量 M (~ $1.4M_{\odot}$, 1桁ほどの分布)

半径 R (~10 km, 1桁ほどの分布)

$P-P_{\dot{P}} \Rightarrow$ ダイポール磁場
電子サイクロトロン共鳴

中性子星の物理と観測

**自轉周期 P
(角運動量)**

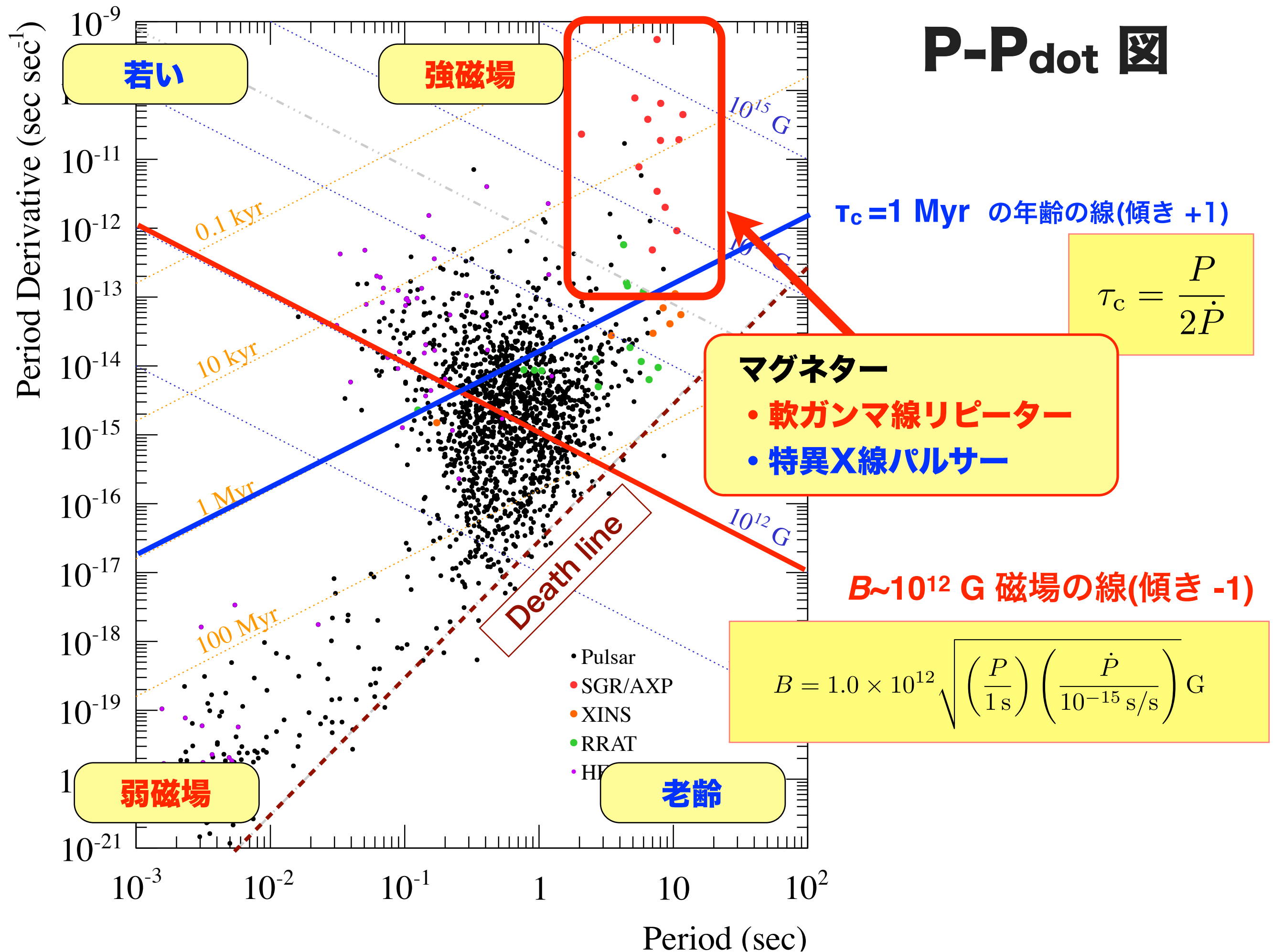
質量 M
半径 R

磁場 B

榎戸 輝揚

55

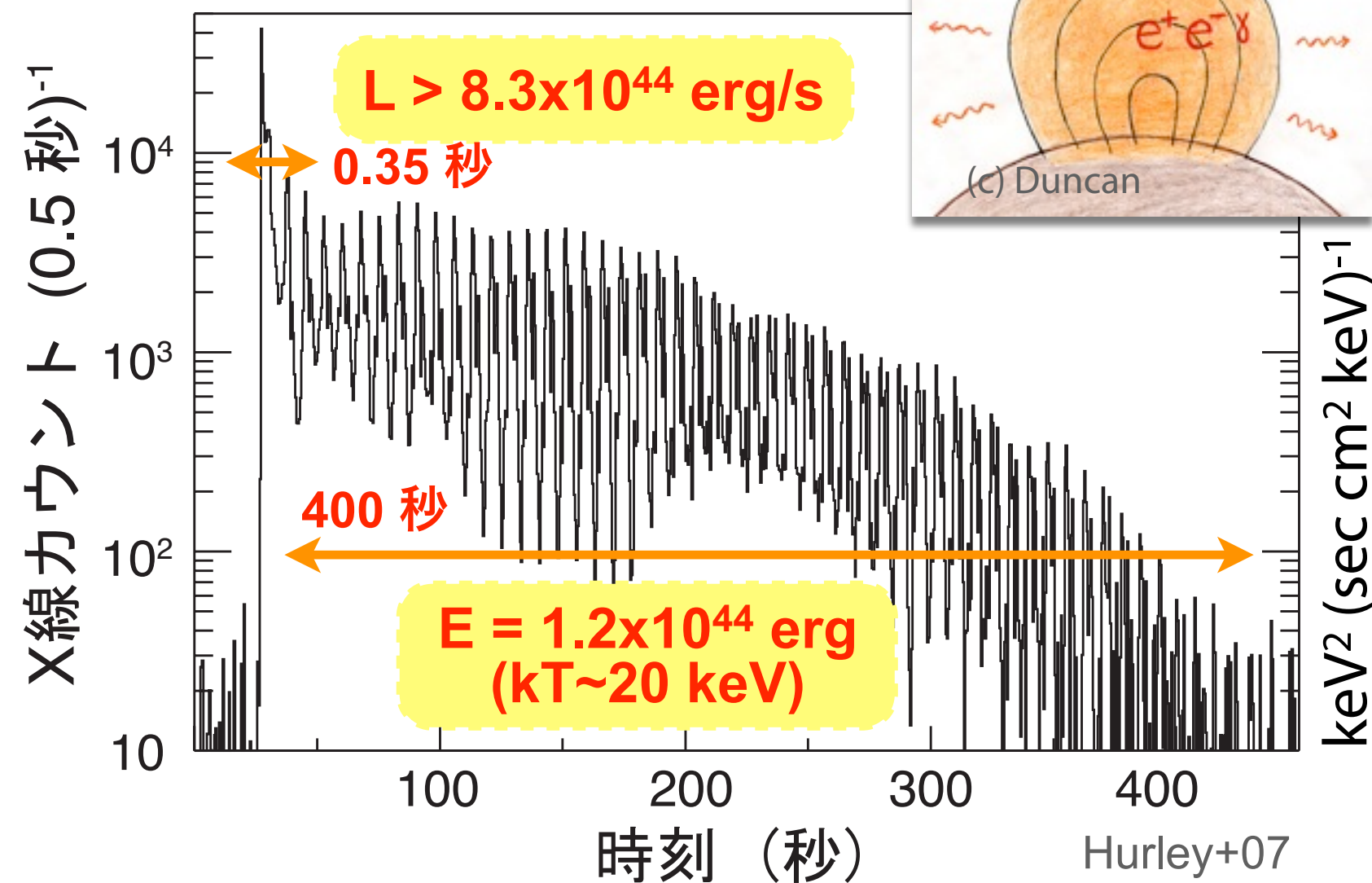
P-Pdot 図



軟ガンマ線リピーター (Soft Gamma Repeater)

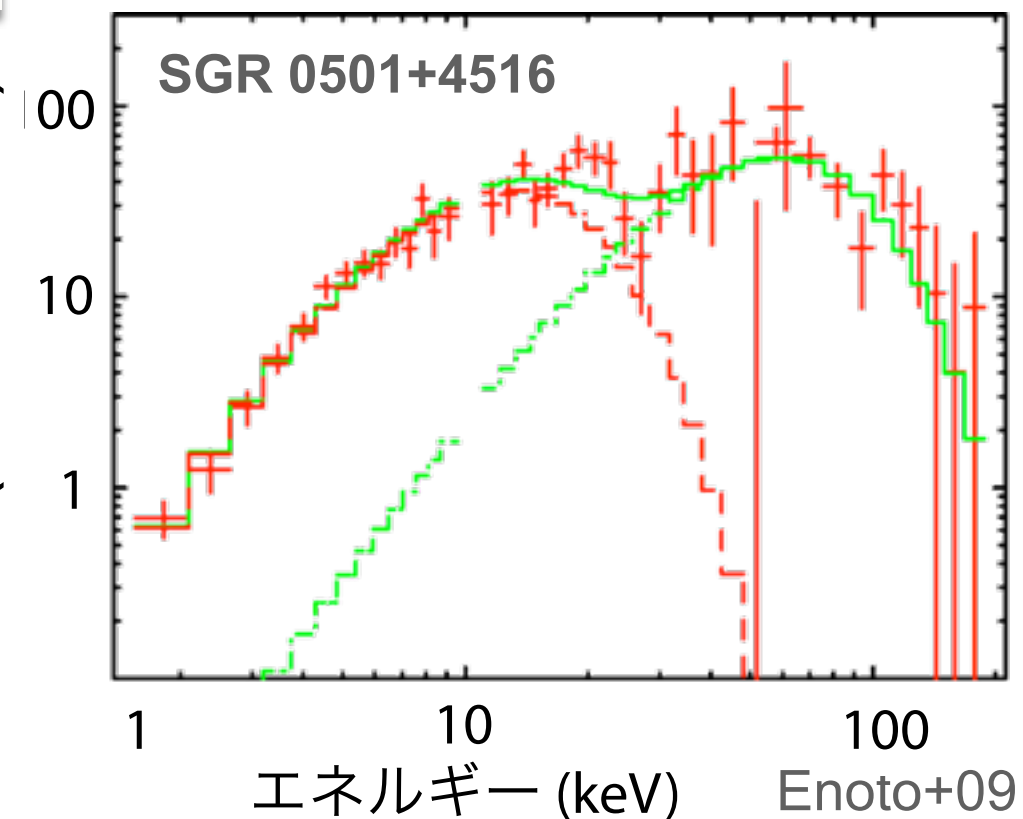
バースト活動で ~5 天体ほど発見. 他の中性子星にない特徴.

巨大フレア (歴史上 3 件)



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 桁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.

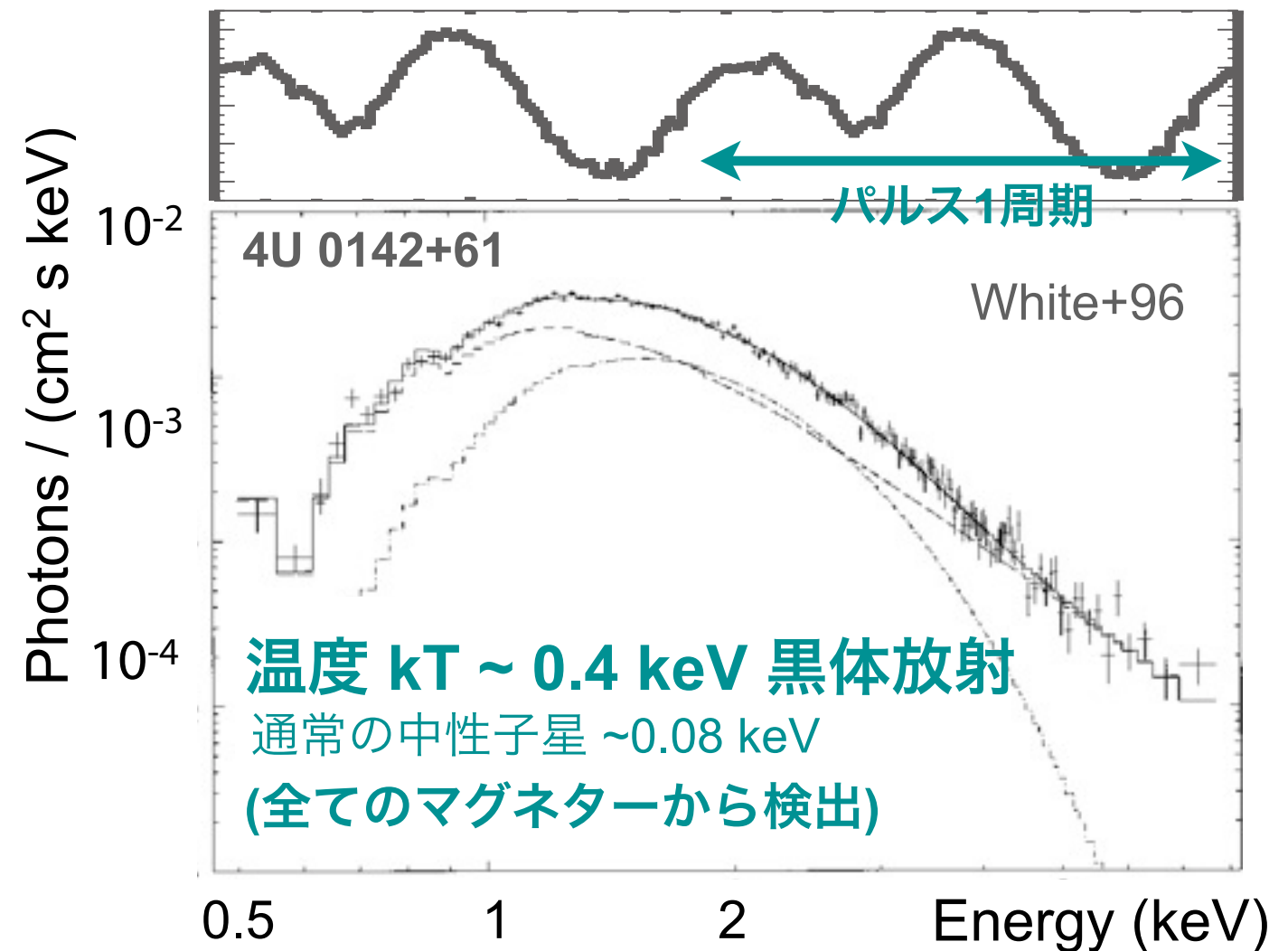
いくつかは SNR に付随

パルスした定常 X 線放射 (<10 keV)



Chandra Image (c)CXO

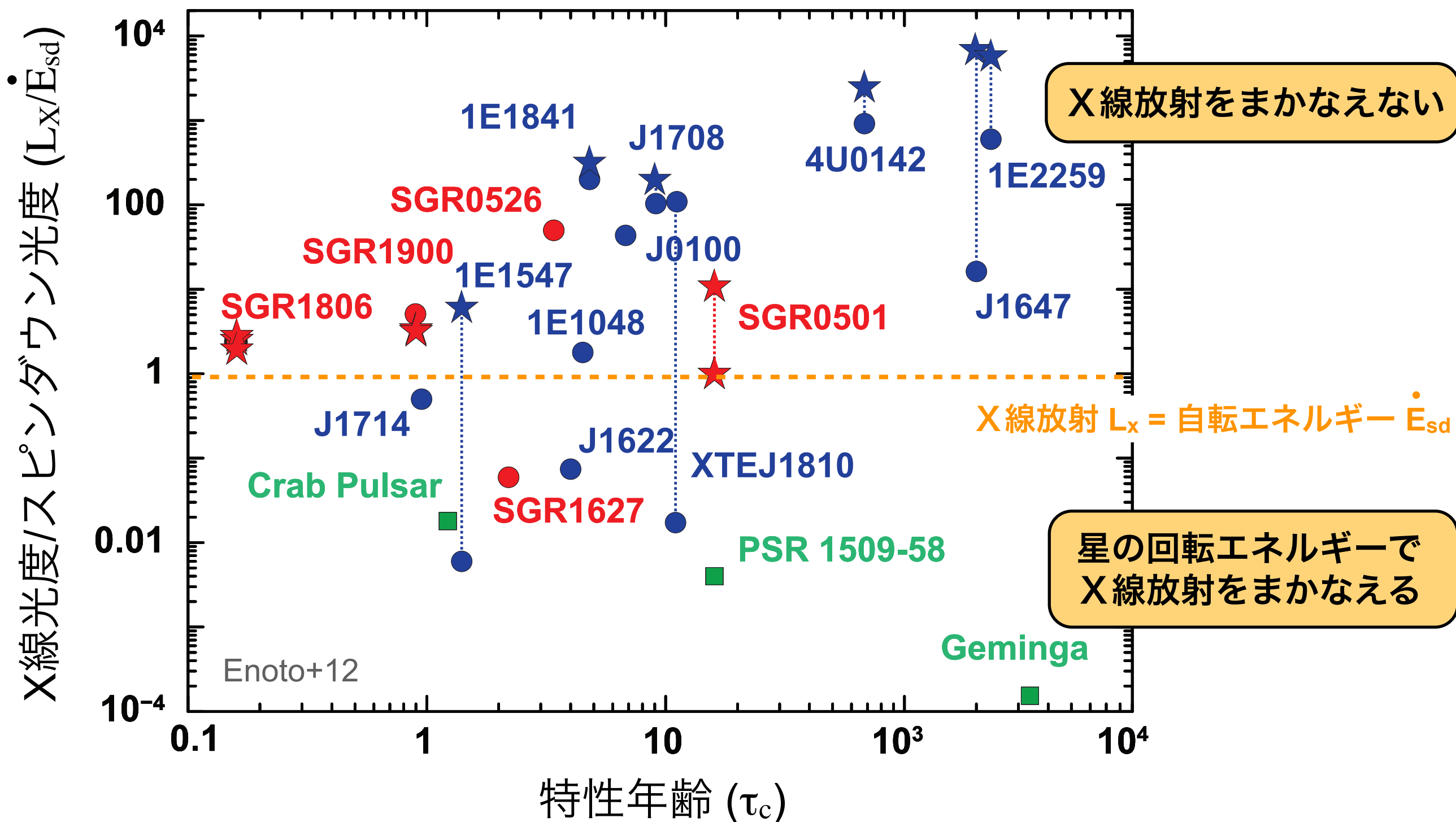
比較的若いパルサーを示唆



星表面近くからの熱的な放射

通常の X 線パルサーの枠組みでは十分に説明できない天体

X線放射のエネルギー源は？



X線光度はスピンドアウン光度を 2-3 桁も凌駕 $\Rightarrow$ 回転駆動型パルサーでない
 連星の証拠なし $\Rightarrow$ 降着駆動型パルサーでない (例: 1E 2259+586 Koyama+89, Kaspi+99)

“マグネター仮説”

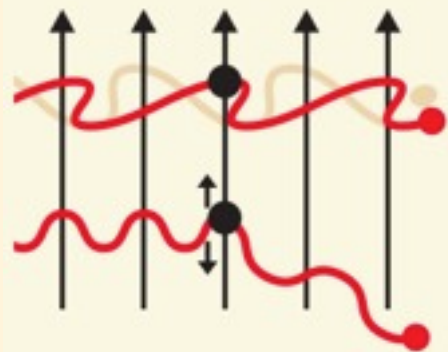
マグネターの観測は地上では到達できない強磁場
極限物理を調べる宇宙の実験室！

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)??

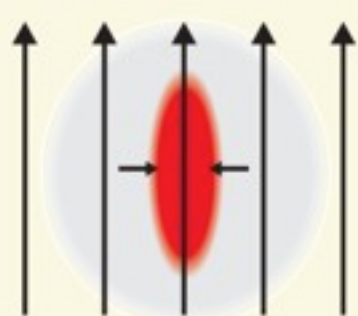
QED 臨界磁場

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

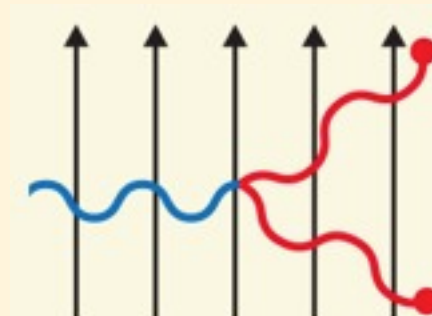
散乱断面積の抑制



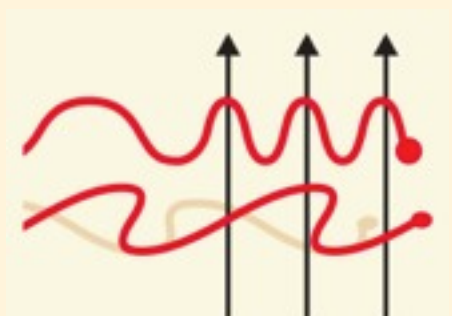
原子の変形



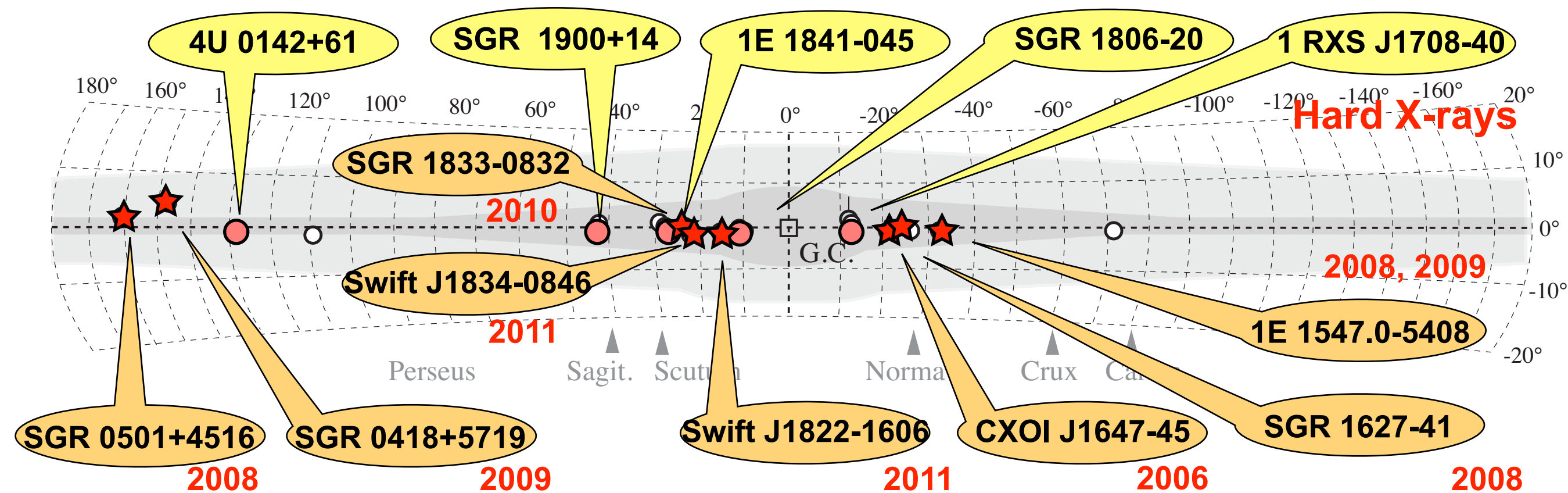
光子の自然分裂



真空の複屈折



銀河系内にこれまでに発見されたマグネター

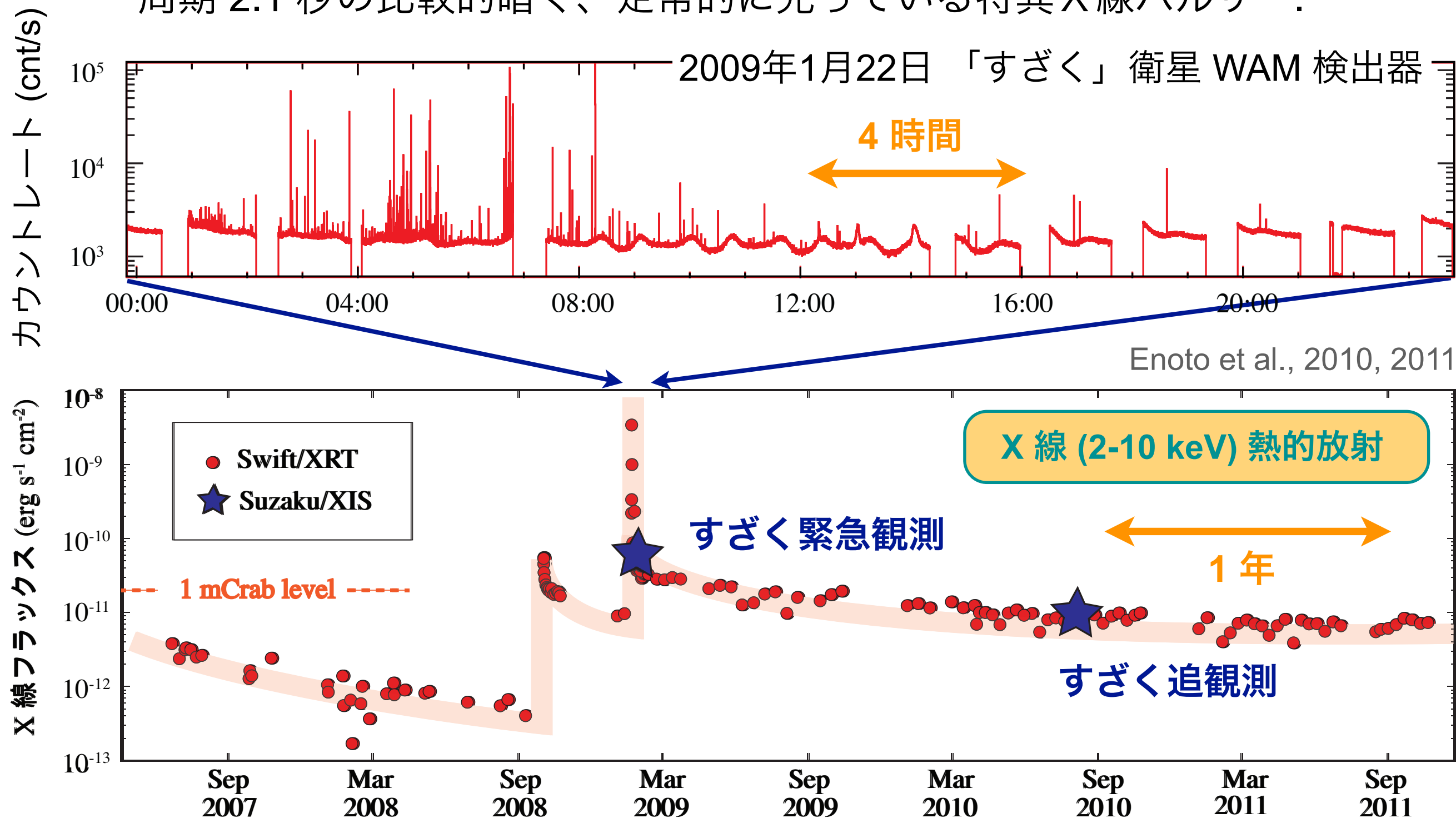


新しいマグネターが年に 1-2 個ほど見つかるようになってきた

1. ガンマ線バースト観測衛星 Swift が継続時間 ~ 100 ms のバーストを検出。
2. 引き続き、継続時間の短いバーストが連射されることを確認。
3. 直後のフォローアップ観測で増光したX線天体を発見。
4. 世界中のX線衛星、可視光・電波天文台がフォローアップ観測が実施。
5. 過去のアーカイブデータから暗いX線天体が同定。

AXP 1E 1547.0-5408 の X 線アウトバースト

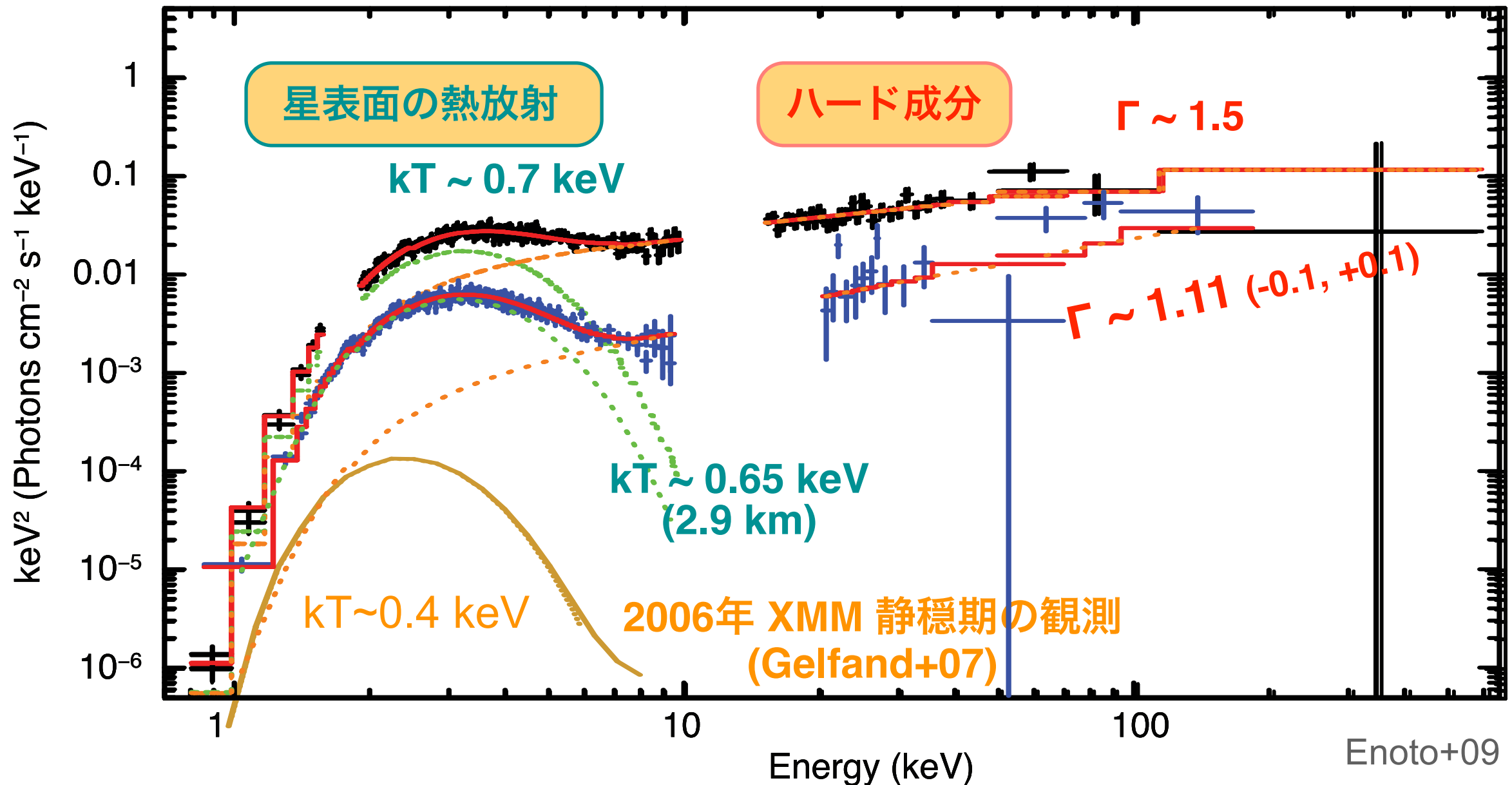
周期 2.1 秒の比較的暗く、定常的に光っている特異 X 線パルサー。



定常 X 線が~2-3 桁も突発増光。数ヶ月かけて減光。
X 線で極めて明るいショートバーストも頻発

AXP 1E 1547.0-5408 の X 線アウトバースト

すざく 緊急観測 2009年1月(33 ks)



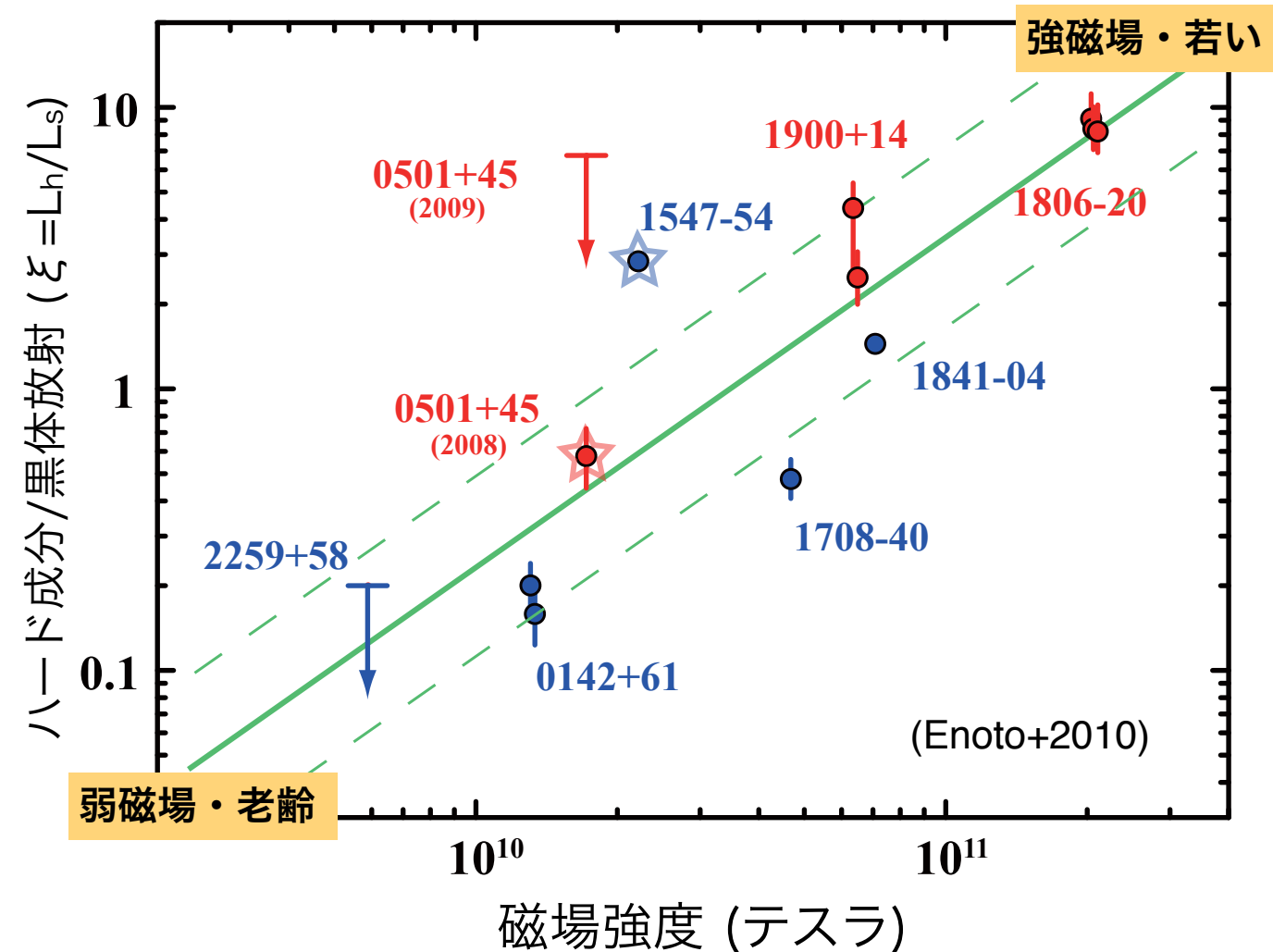
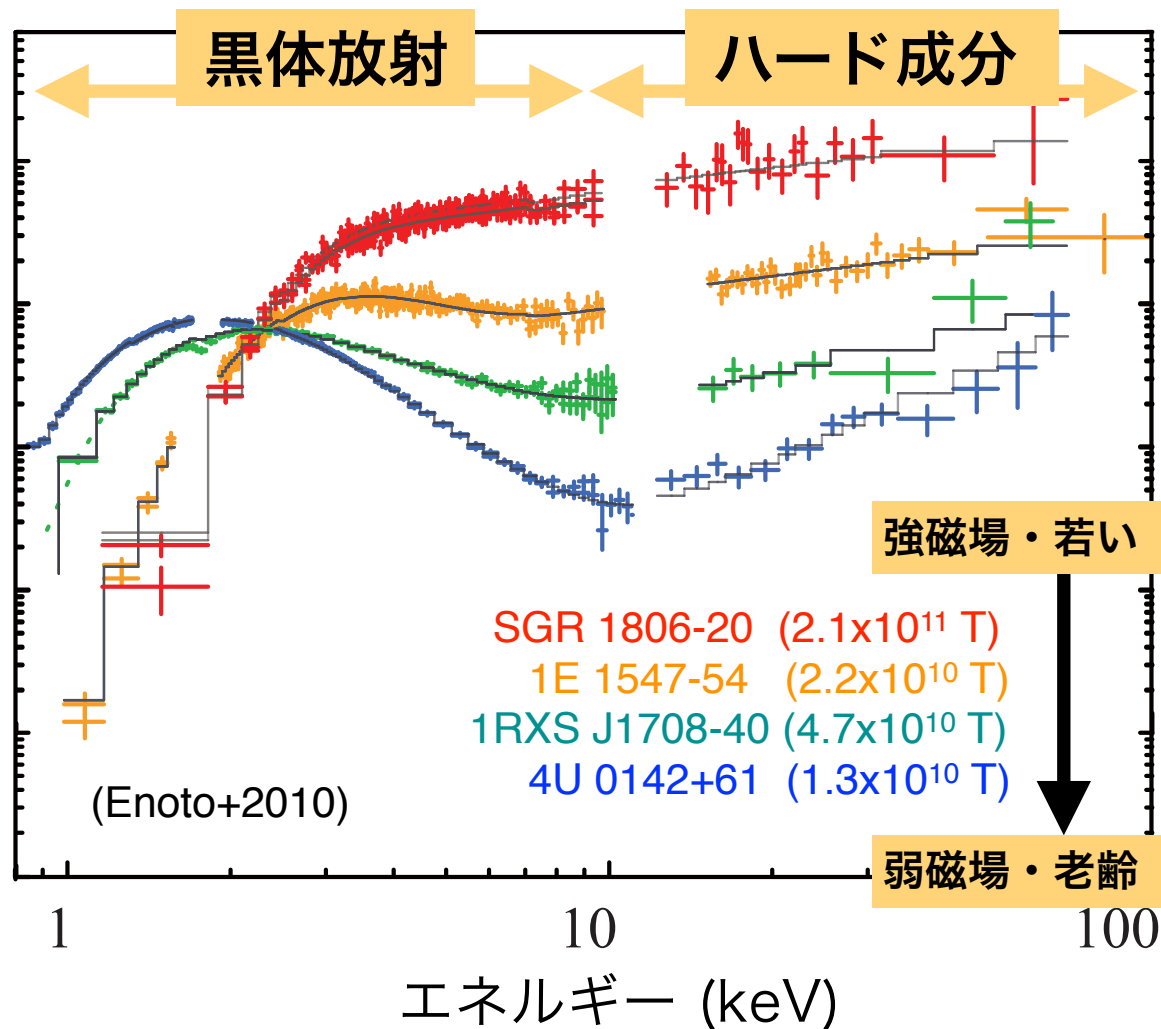
星表面からの放射に加え、磁気圏からの硬X線を世界で初めて検出。
1年後の追観測でも追認。

マグネターX線放射 = 星表面の熱的放射 + 磁気圏の放射

日本の X 線衛星「すざく」による系統的な観測

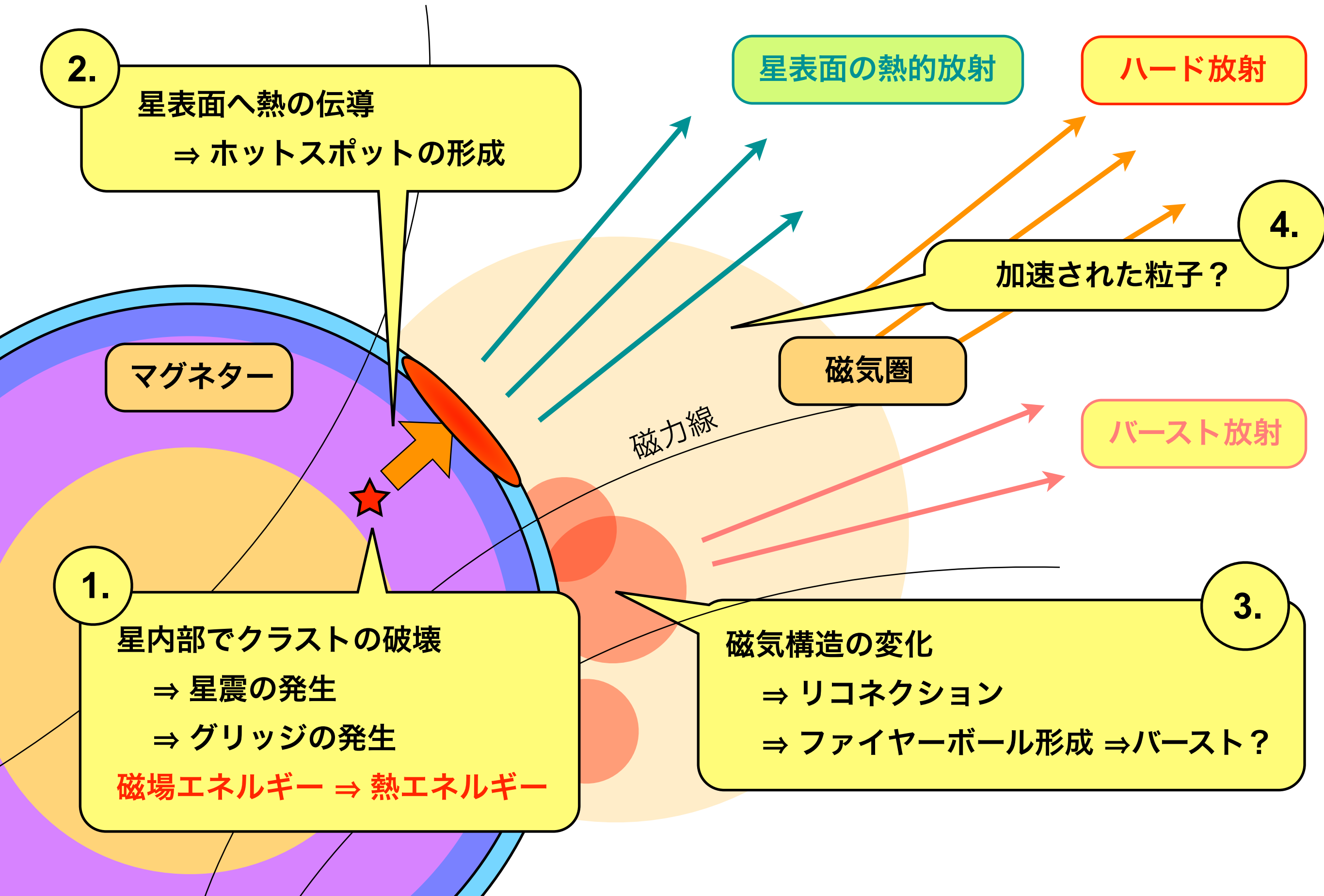
新たに見つかったハード成分を「すざく」で次々検出

マグネターの広帯域スペクトルの系統的進化を発見



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？

X線アウトバーストにおけるエネルギー解放



マグネター仮説は正しいか？

日本天文学会 天文月報 7月号 「硬X線によるマグネター研究の進展 ~宇宙で最強の磁石星?~」

Google で “天文月報”、”マグネター” で検索

http://www.asj.or.jp/geppou/contents/2012_07.html



硬X線によるマグネター研究の進展 — 宇宙で最強の磁石星? —

榎 戸 輝 揚

〈Kavli Institute for Particle Astrophysics & Cosmology, Stanford University, Physics Astrophysics Building, 452 Lomita Mall, MC 4085, Stanford, CA 94305-4085, USA〉

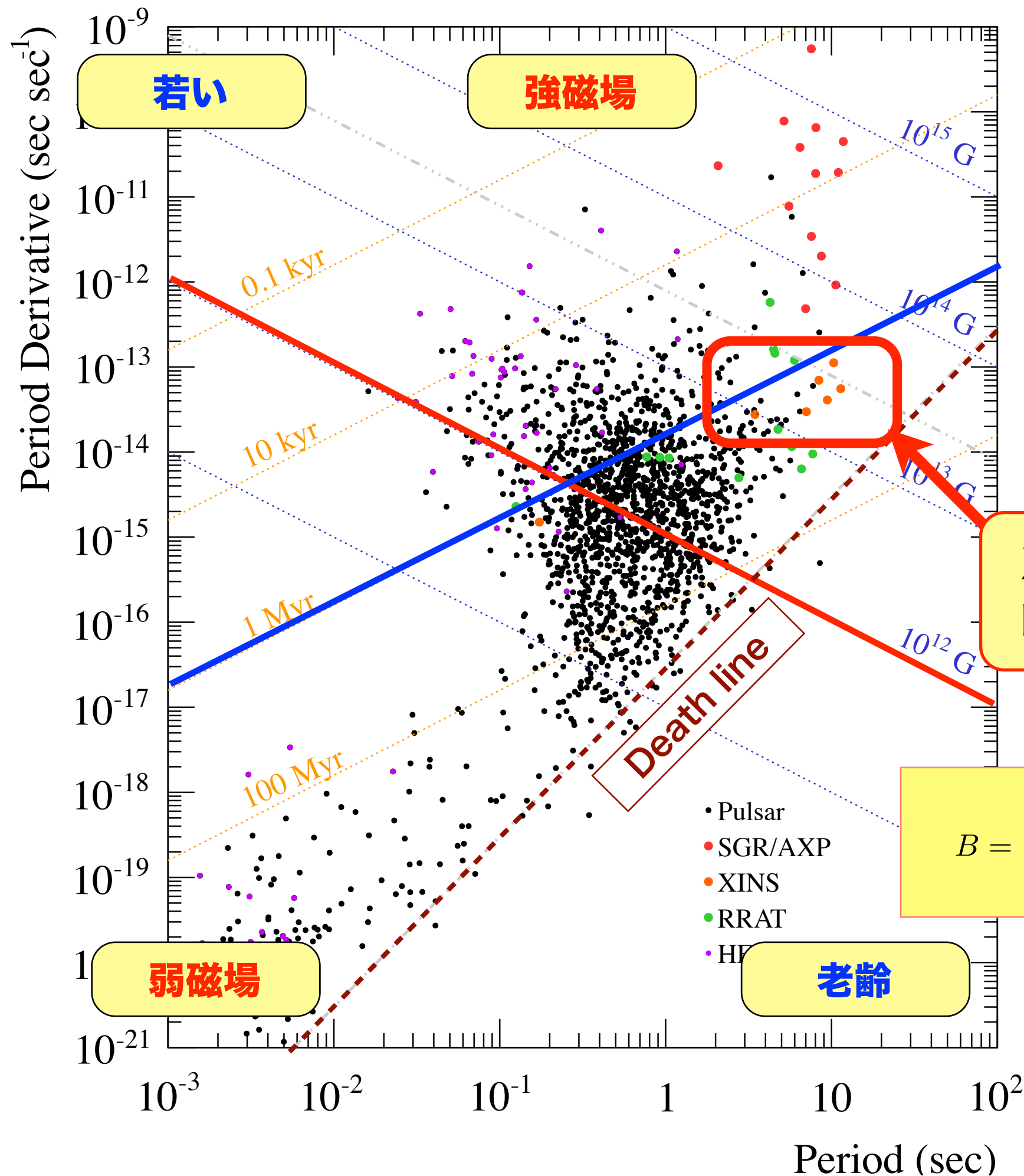
e-mail: teru.enoto@riken.jp, teruaki.enoto@gmail.com

銀河系内やマゼラン雲には、星の自転や物質の降着といった標準的なエネルギー源ではX線のエネルギー放射を説明できない、特異なパルサーが見つっている。観測された特徴から、磁場の強さは通常の中性子星を2桁以上も凌駕し、磁場をエネルギー源とする磁気駆動型の天体“マグネター”と考えられるようになった。これはまだ仮説の域を出ないものの、これらの天体が突発的に放つバーストやX線増光の検出で新天体も相次いで発見され、これまで考えられていた以上に銀河系に存在するようである。本稿では、マグネター観測の進展を紹介するとともに、新たな観測の窓である硬X線に着目し、「すざく」衛星で示唆された系統的なスペクトル進化について報告する。

表1 マグネターと総称される天体の特徴一覧

1. パルス周期が長く ($P=2-11$ s), 周期の変化率が大きい ($\dot{P}=10^{-12}-10^{-9}$ s s $^{-1}$). これらから求まる表面磁場は臨界磁場を超える ($B_s > B_{cr} = 4.4 \times 10^{13}$ G).
2. 定常的に輝いている軟X線 ($\sim 1-10$ keV) の光度 $L_X \sim 10^{35}$ erg s $^{-1}$ は、スピンドウン光度 $\dot{E}_{sd} = 10^{32-34}$ erg s $^{-1}$ を1-3桁上回る。
3. 安定したX線パルスには、ドップラー変調など、連星をなす証拠が見当たらず、孤立星と考えられる。
4. 周期と変化率から計算される特性年齢は $\tau_c < 100$ kyr と若く、いくつかの天体は超新星残骸に付随する。
5. 軟X線の定常放射のスペクトルは $kT \sim 0.5$ keV の黒体放射に近く、これはマグネター以外の孤立中性子星の表面温度より高い。
6. 定常X線は希に、少なくとも2-3桁ほどの突発増光を起こし、1-2カ月ほどで徐々に減光する。
7. 歴史的に3例の巨大フレアが観測された。継続時間 ~ 400 秒に及び、温度数十keVのプラズマの閉じ込めを起こすには $\geq 10^{14}$ ガウスの磁場が必要になる。
8. 突発的に、数十ミリ秒の2温度黒体放射で近似できる短時間バースト (short burst) を起こす。そのX線光度はエディントン光度を超える場合もあり、強磁場中で電子-光子相互作用の断面積が小さくなった効果という指摘もある。定常X線の増光に連動することが多い。
9. ほとんど電波パルスが検出できない。強磁場での光子分裂が e^+/e^- 対生成より卓越するための影響という指摘もある。
10. ~ 10 keV以上で卓越する、光子指数 $\Gamma_h \sim 1$ のハード成分 (硬X線放射) が、静穏期と活動期のマグネターから確認され始めている (本稿の主題)。

P-Pdot 図



$\tau_c = 1$ Myr の年齢の線(傾き +1)

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

X-ray Dim Isolated Neutron Stars

$B \sim 10^{12}$ G 磁場の線(傾き -1)

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

熱エネルギー: X-ray Dim Isolated Neutron Stars

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。

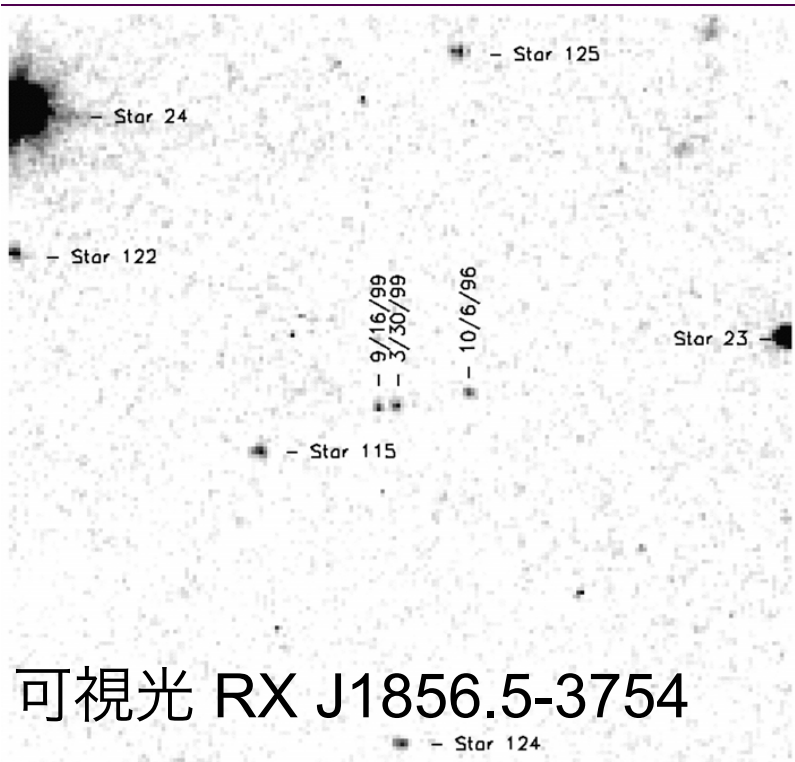
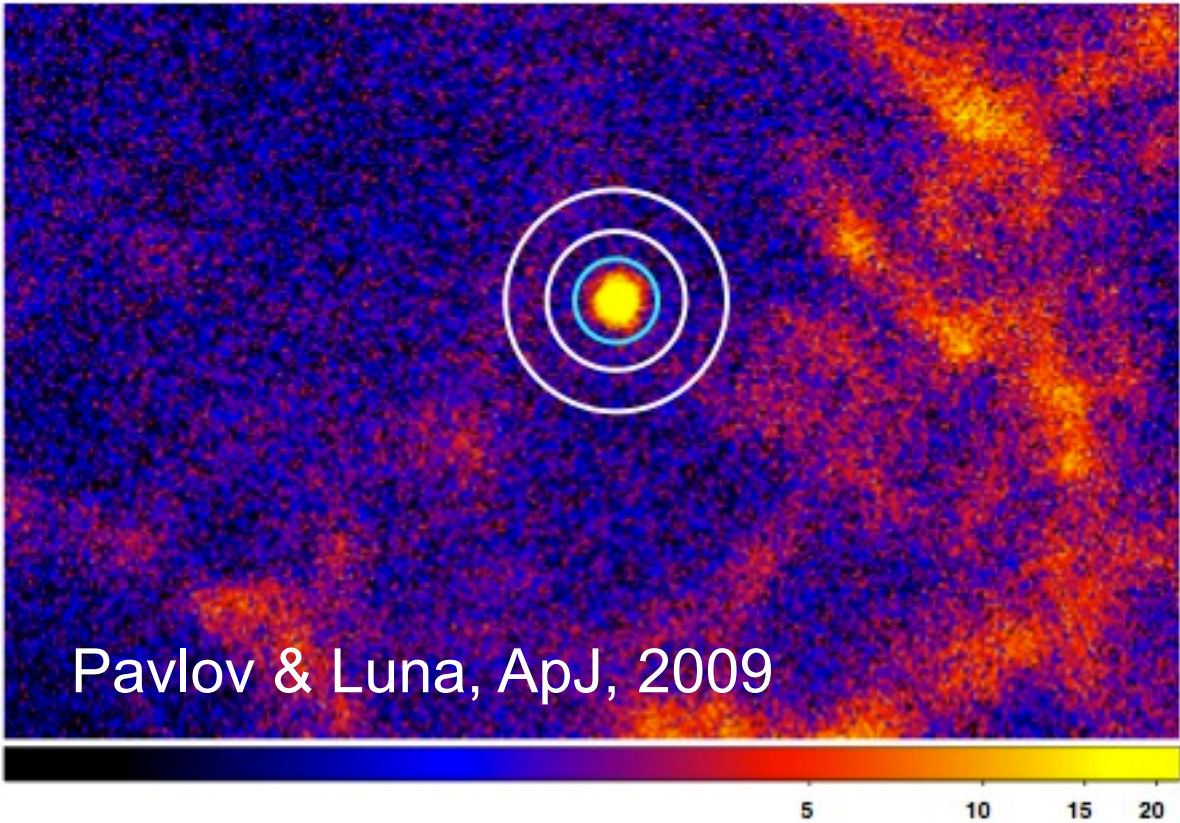
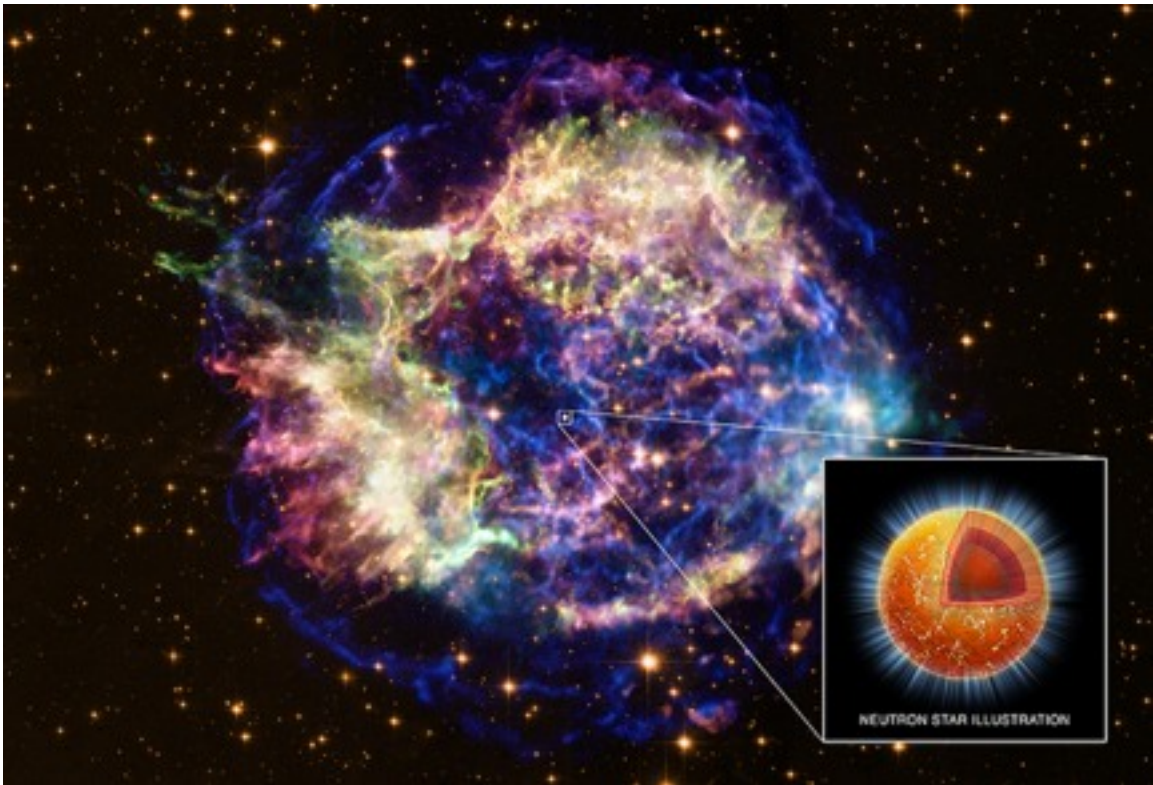


Table 1 X-ray and optical properties of the Magnificent Seven (Haberl, 2008)

Object	kT eV	Period s	Amplitude %	Optical mag	PM mas/year
RX J0420.0–5022	44	3.45	13	B = 26.6	
RX J0720.4–3125	85-95	8.39	8-15	B = 26.6	97
RX J0806.4–4123	96	11.37	6	B > 24	
RBS 1223 ^(a)	86	10.31	18	m _{50ccd} = 28.6	
RX J1605.3+3249	96	6.88?	?	B = 27.2	145
RX J1856.5–3754	62	—	<1.3	B = 25.2	332
RBS 1774 ^(b)	102	9.44	4	B > 26	

熱エネルギー: Compact Central Object

若い超新星残骸の中心の軟X線源。電波放射のないX線で検出できる孤立中性子星？



Pavlov & Luna, ApJ, 2009

(De Luca, 2007)

CCO	SNR	Age (kyr)	d (kpc)	P (s)	f_p^a (%)	B_s (10^{11} G)	$L_{x,bol}$ (erg s^{-1})
RX J0822.0 – 4300	Puppis A	3.7	2.2	0.112	11	<9.8	6.5×10^{33}
CXOU J085201.4 – 461753	G266.1 – 1.2	1	1	...	<7	...	2.5×10^{32}
1E 1207.4 – 5209	PKS 1209 – 51/52	7	2.2	0.424	9	<3.3	2.5×10^{33}
CXOU J160103.1 – 513353	G330.2 + 1.0	$\gtrsim 3$	5	...	<40	...	1.5×10^{33}
1WGA J1713.4 – 3949	G347.3 – 0.5	1.6	1.3	...	<7	...	$\sim 1 \times 10^{33}$
CXOU J185238.6 + 004020	Kes 79	7	7	0.105	64	0.31	5.3×10^{33}
CXOU J232327.9 + 584842	Cas A	0.33	3.4	...	<12	...	4.7×10^{33}
XMMU J172054.5 – 372652	G350.1 – 0.3	0.9	4.5	...	...	...	3.4×10^{33}
XMMU J173203.3 – 344518	G353.6 – 0.7	~ 27	3.2	...	...	...	1.0×10^{34}
CXOU J181852.0 – 150213	G15.9 + 0.2	1 – 3	(8.5)	...	...	...	$\sim 1 \times 10^{33}$

中性子星のエネルギー源

回転エネルギー

$B \sim 10^{8-12} \text{ G}$

電波パルサー
ミリ秒パルサー

重力エネルギー

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

大質量X線連星
小質量X線連星

熱エネルギー

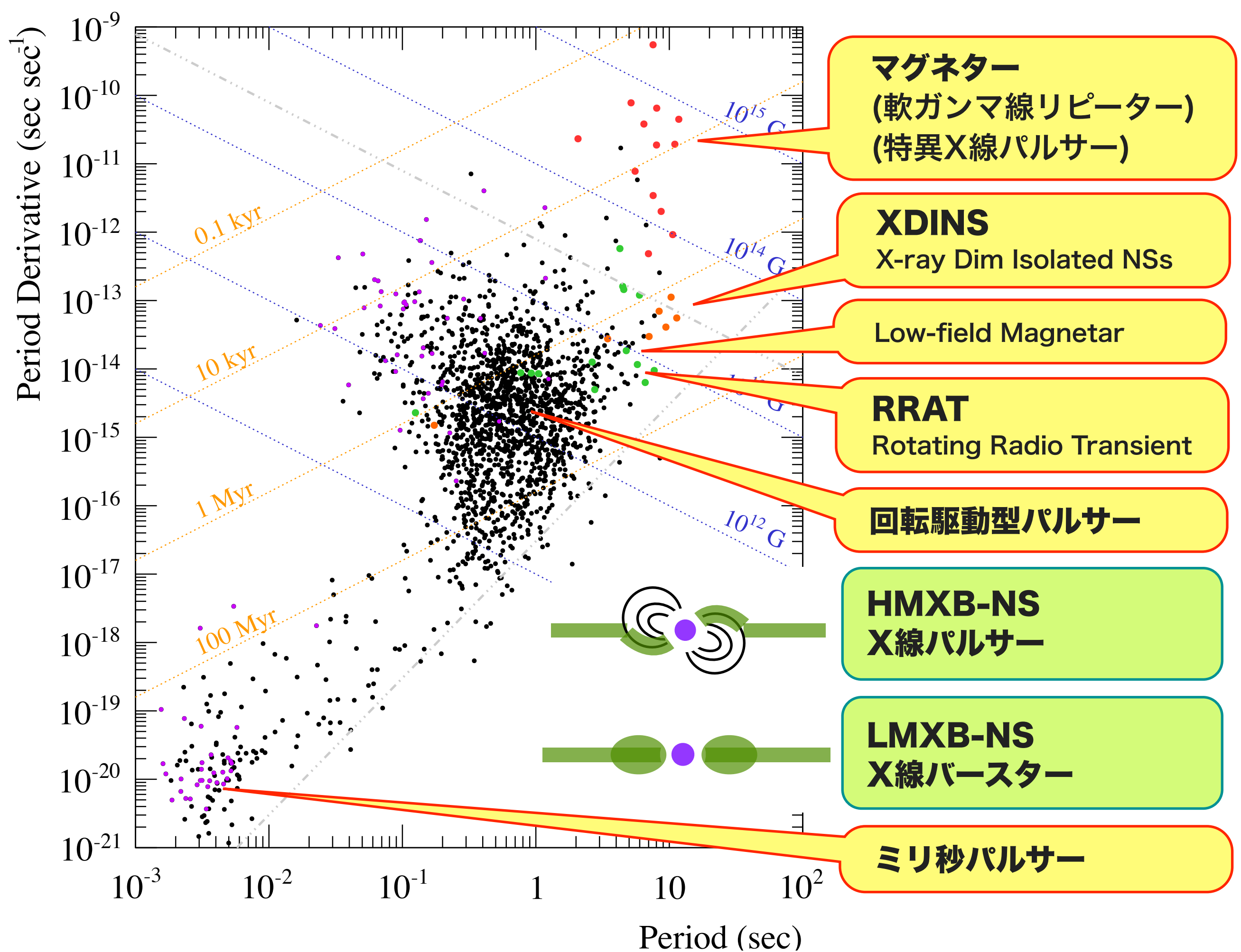
$B \sim ??$

CCO
XDINS

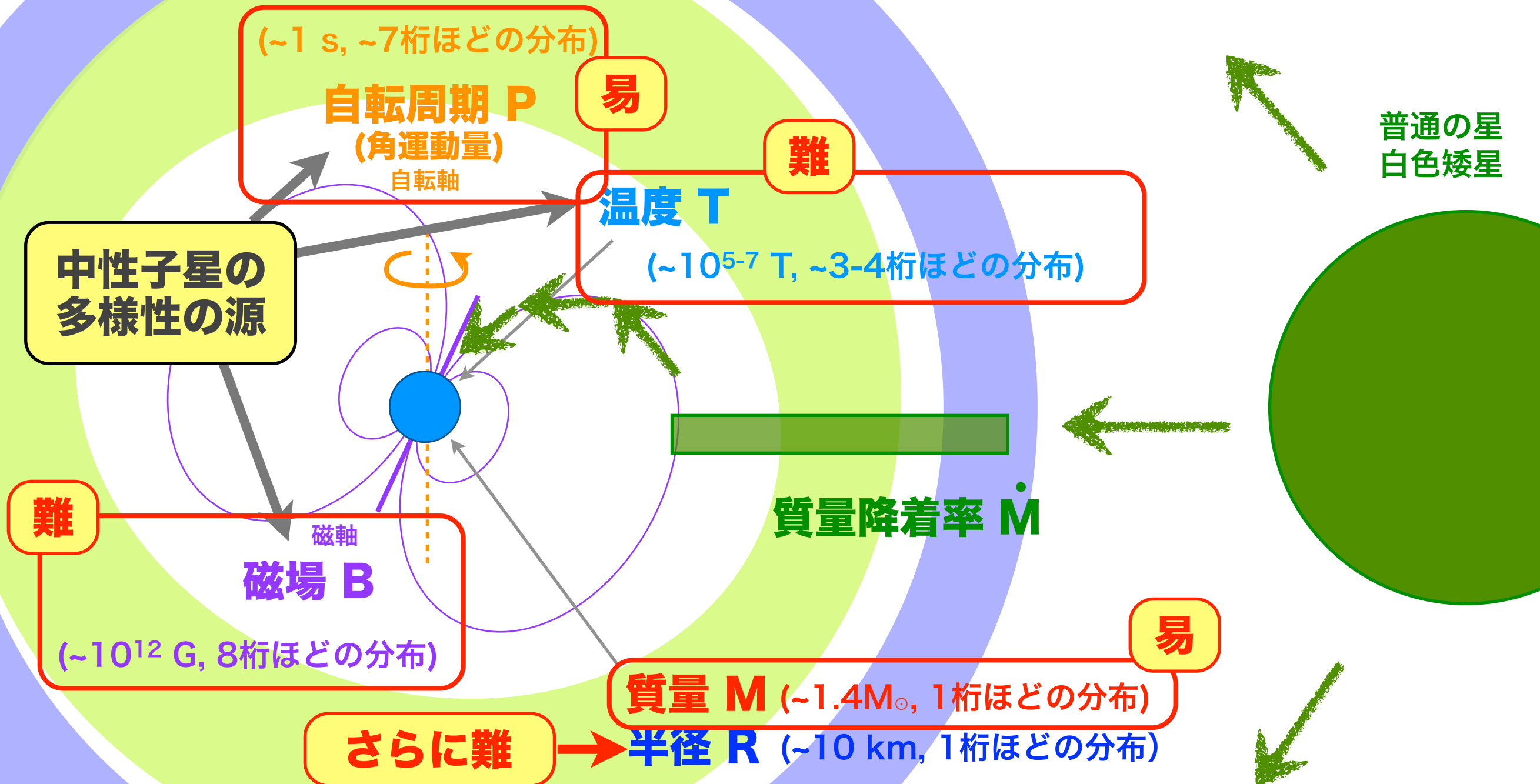
磁場エネルギー

$B \sim 10^{14-15} \text{ G}$

軟ガンマ線リピーター
特異X線パルサー

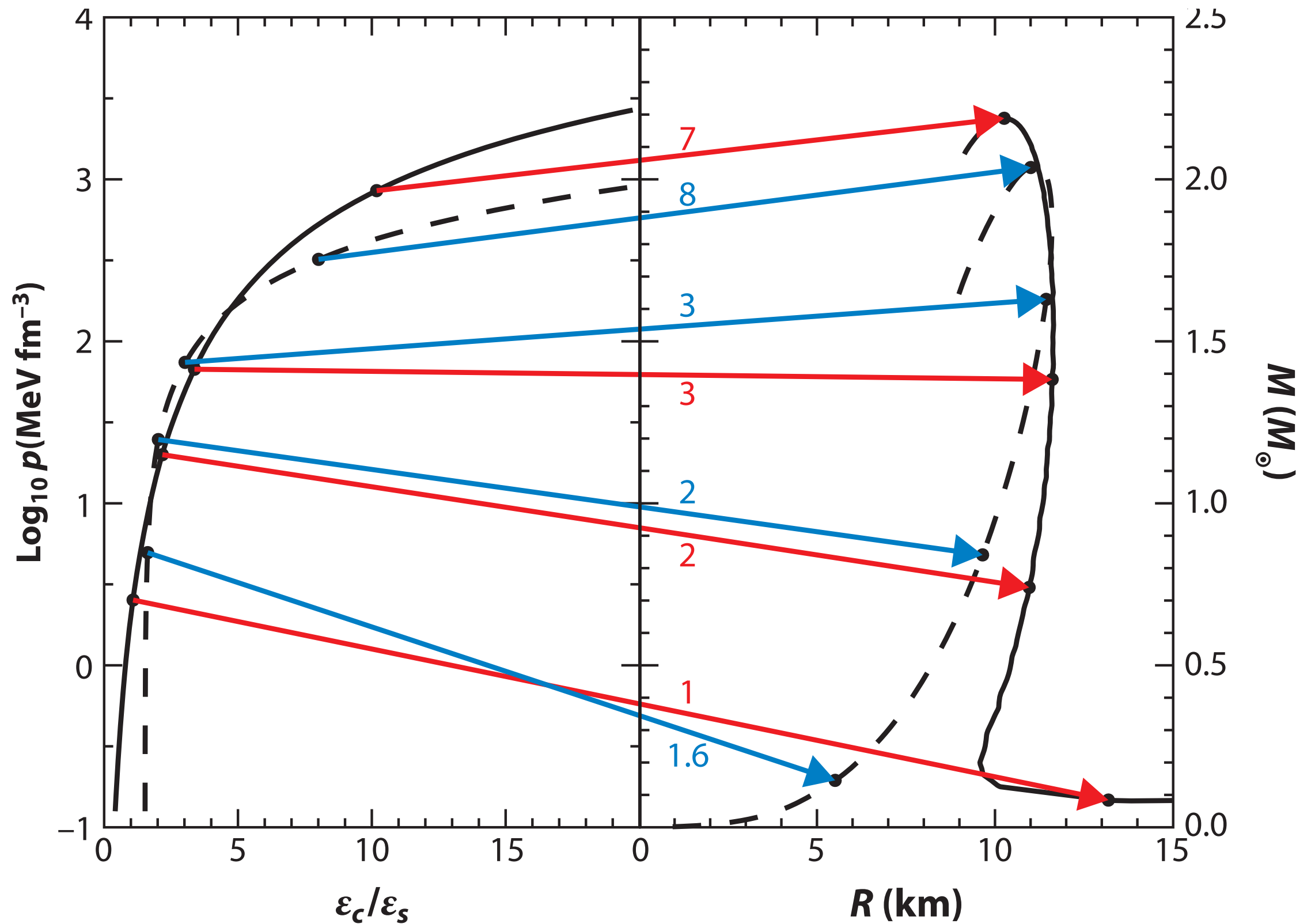


中性子星の物理量と多様性 (まとめ)



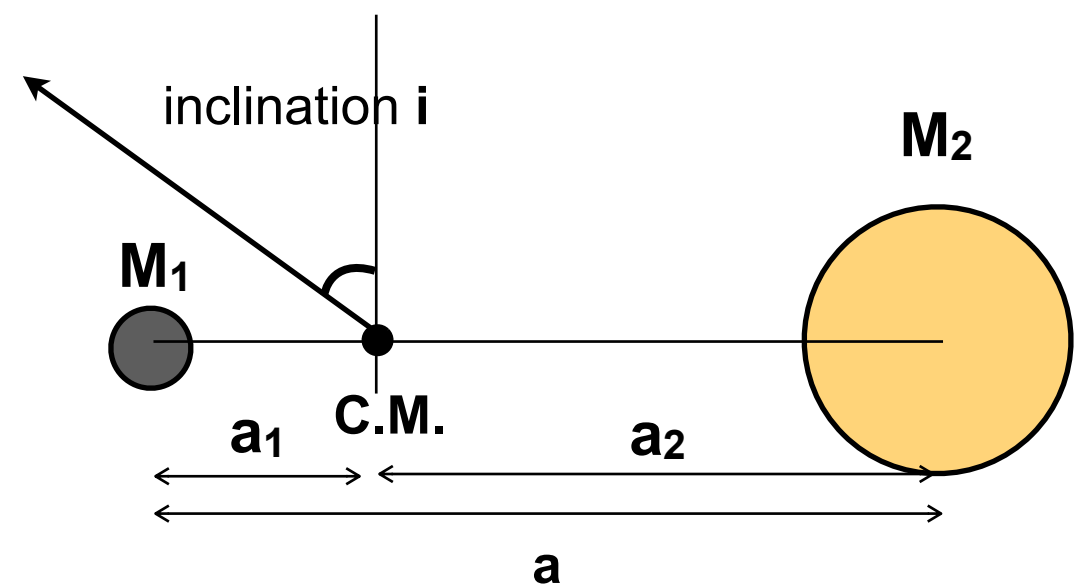
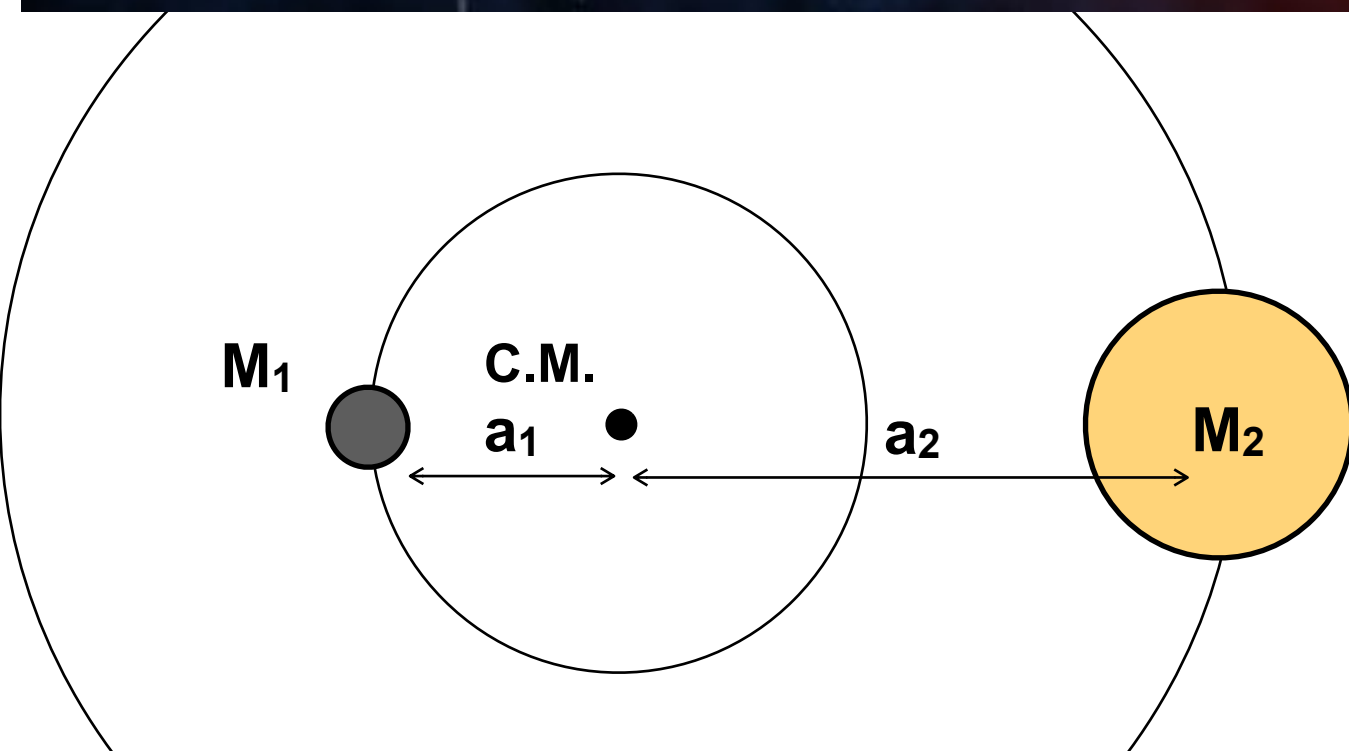
中性子星の基本的な物理パラメータの違いに加え、周辺環境との相互作用で多様な系が現れる (Neutron Star Zoo)。複雑だが、かつ面白い。

中性子星の質量・半径は内部状態方程式と対応

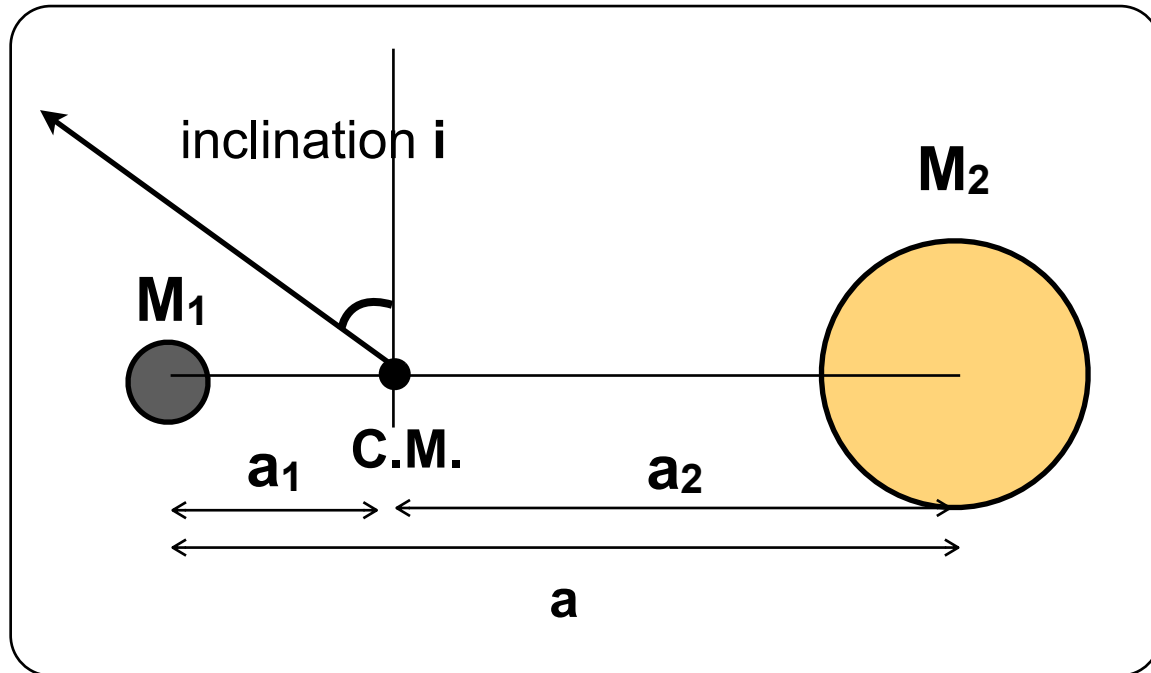


James M. Lattimer, "The Nuclear Equation of State and Neutron Star Masses", *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2012

質量を測る: 連星の公転運動を使う



質量を測る: 連星の公転運動を使う



重心

$$M_1 a_1 - M_2 a_2 = 0$$

Doppler 振幅

$$v_1 = \frac{2\pi}{P} a_1 \sin(i)$$

Kepler の法則

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

$$f(M_1, M_2, i) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{P v_1^3}{2\pi G} \quad \text{観測量}$$

X線連星の場合、

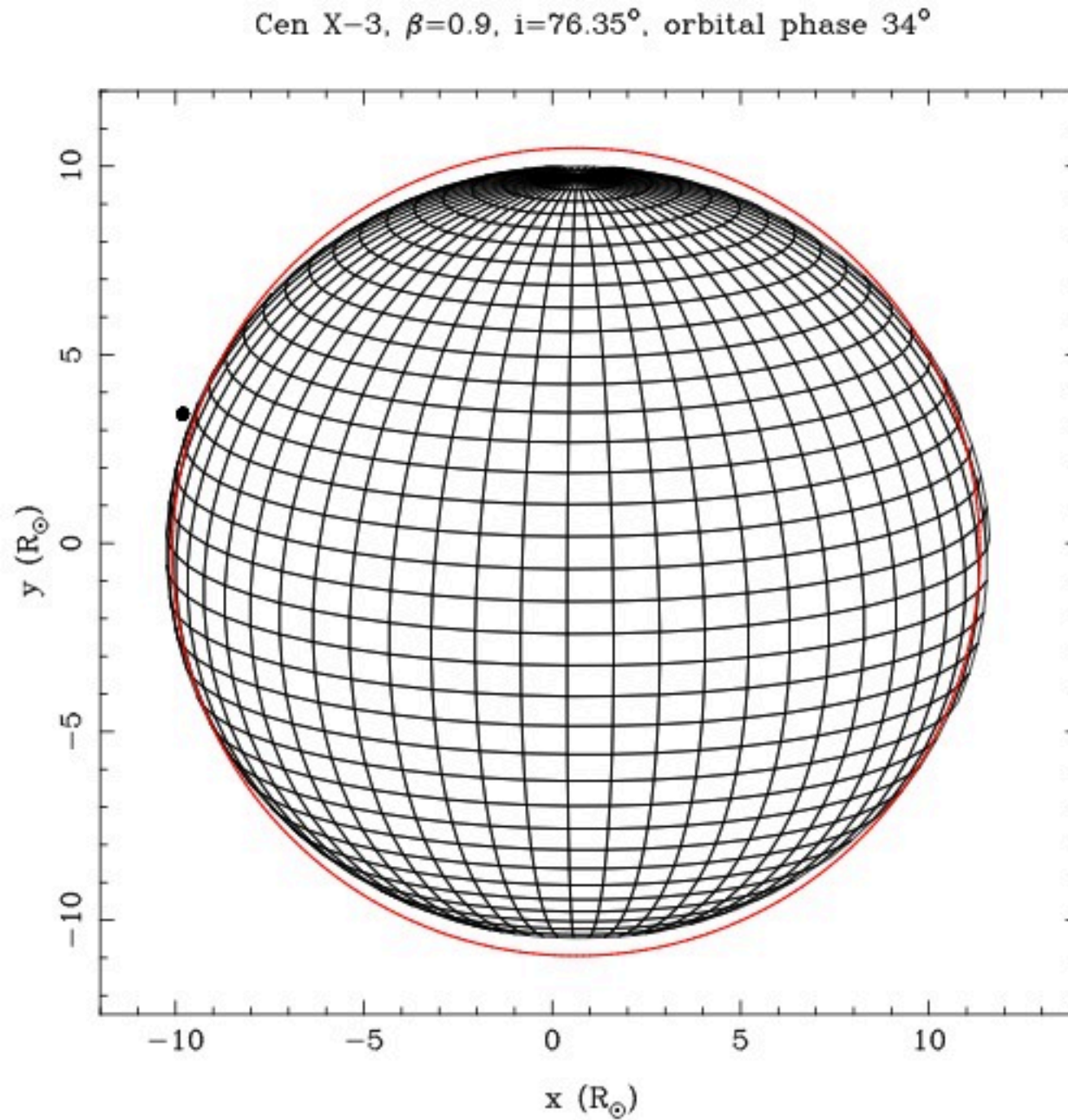
$$f_X = \frac{(M_O \sin i)^3}{(M_X + M_O)^2} \quad f_O = \frac{(M_X \sin i)^3}{(M_X + M_O)^2} \quad q = \frac{M_X}{M_O} = \left(\frac{f_O}{f_X} \right)^{1/3}$$

$$M_X = \frac{f_X q (1 + q)^2}{\sin^3 i}$$

inclination は
a) 可視光のライトカーブ
b) X 線星の食
などを利用して求める。

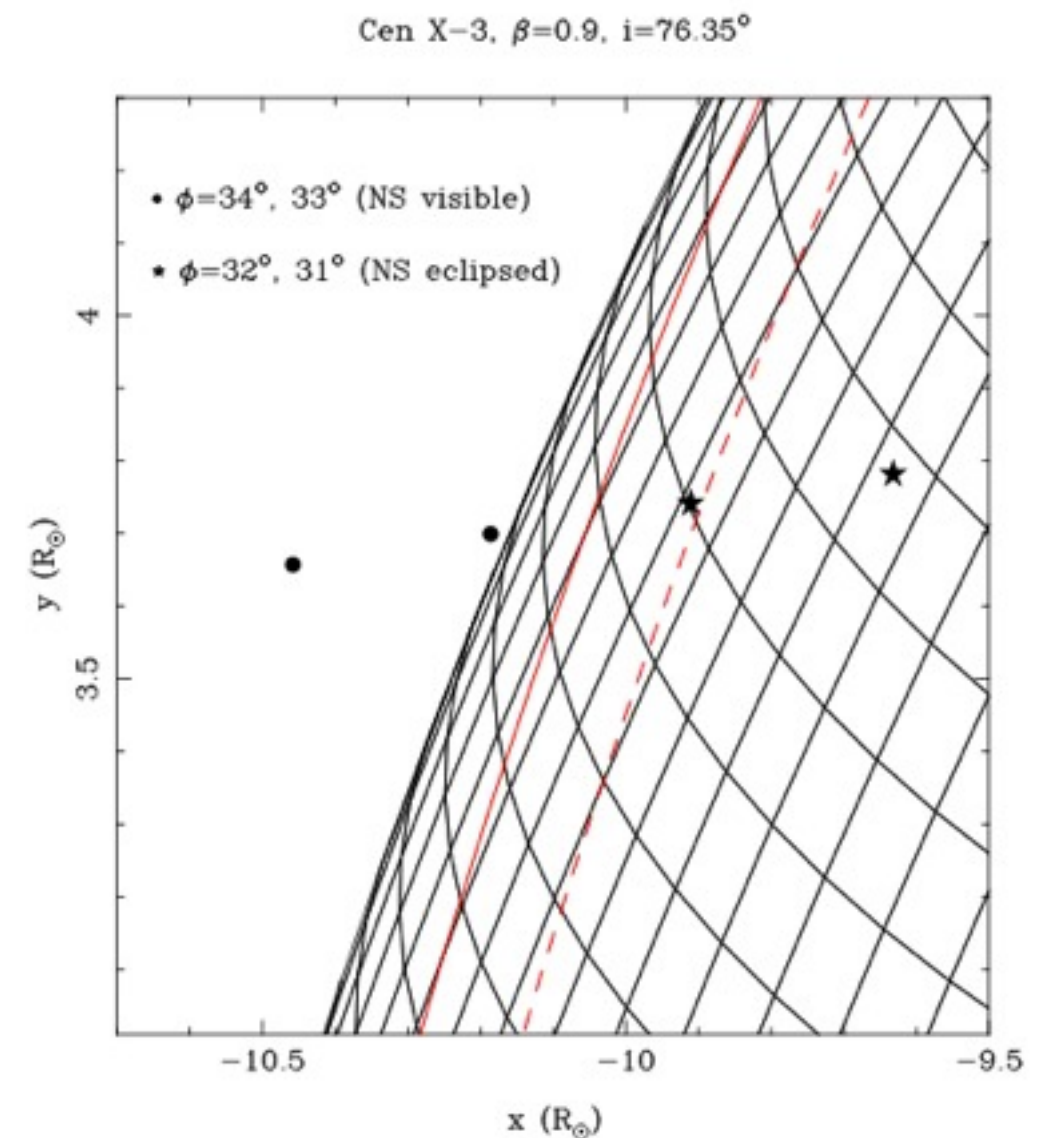
(例1) X-ray Pulsar (NS+OB Supergiant)

Rawls+2011



$$\sin i = \frac{\sqrt{1 - (R/a)^2}}{\sin \theta_e}$$

θ_e : eclipse half angle
 R : Optical stellar radius
 a : Orbital separation



(例1) X-ray Pulsar (NS+OB Supergiant)

Rawls+2011

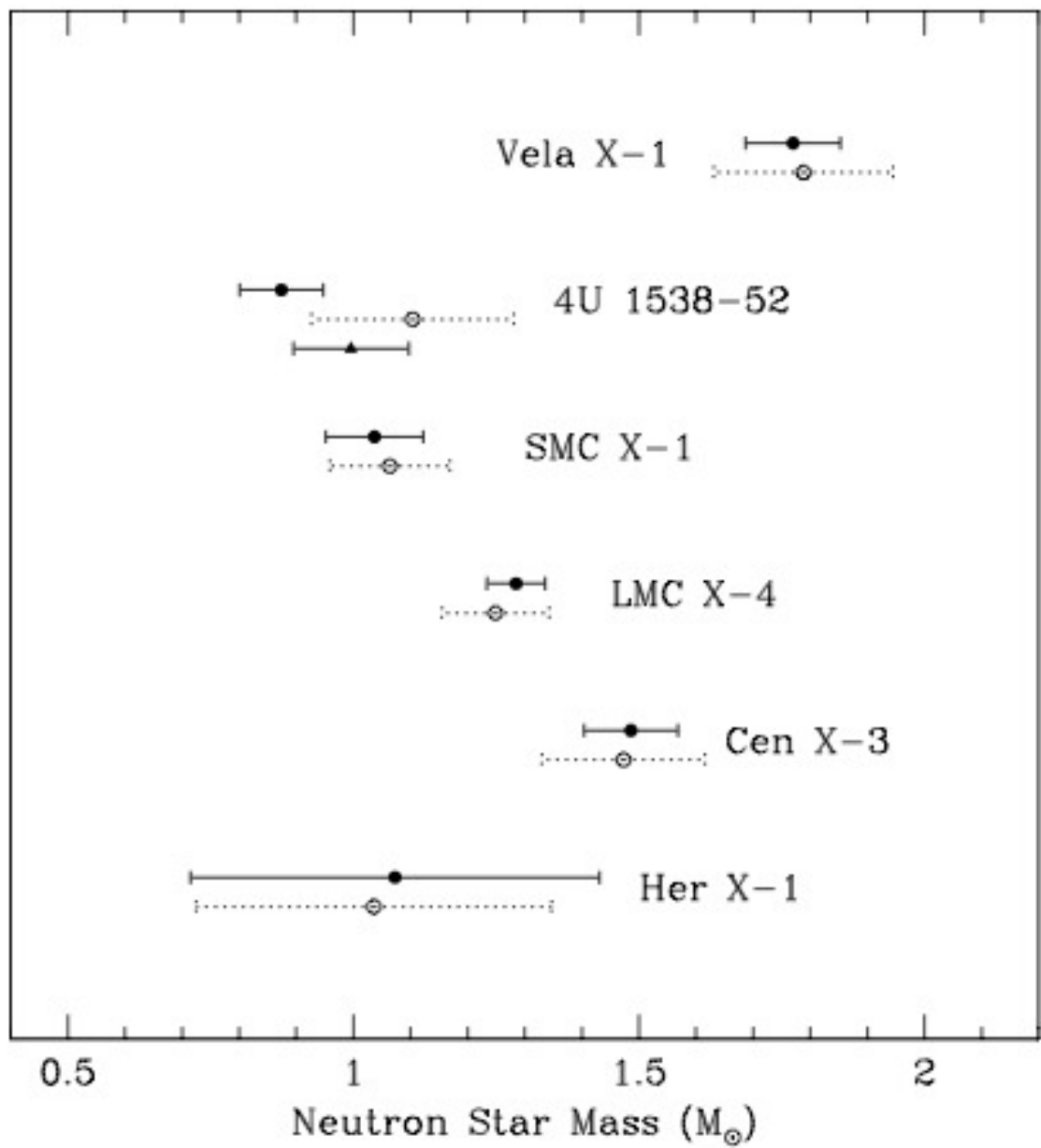


Table 3. Analytic Neutron Star Masses^a

System	$M_X (M_{\odot})$	i (deg)
Vela X-1	1.617 ± 0.130	85.9 ± 2.0
4U 1538-52 ^b	0.859 ± 0.200	67.3 ± 4.4
SMC X-1	1.067 ± 0.116	67.8 ± 4.7
LMC X-4	1.252 ± 0.108	68.8 ± 3.9
Cen X-3	1.349 ± 0.146	72.5 ± 4.8
Her X-1	0.890 ± 0.280	82.0 ± 3.7

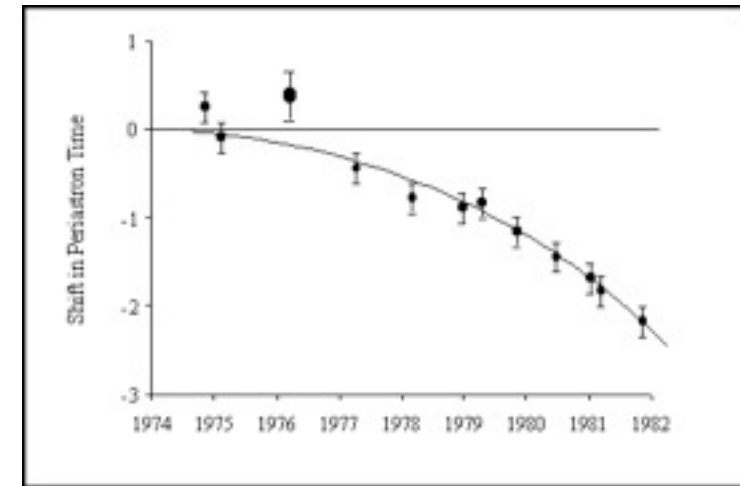
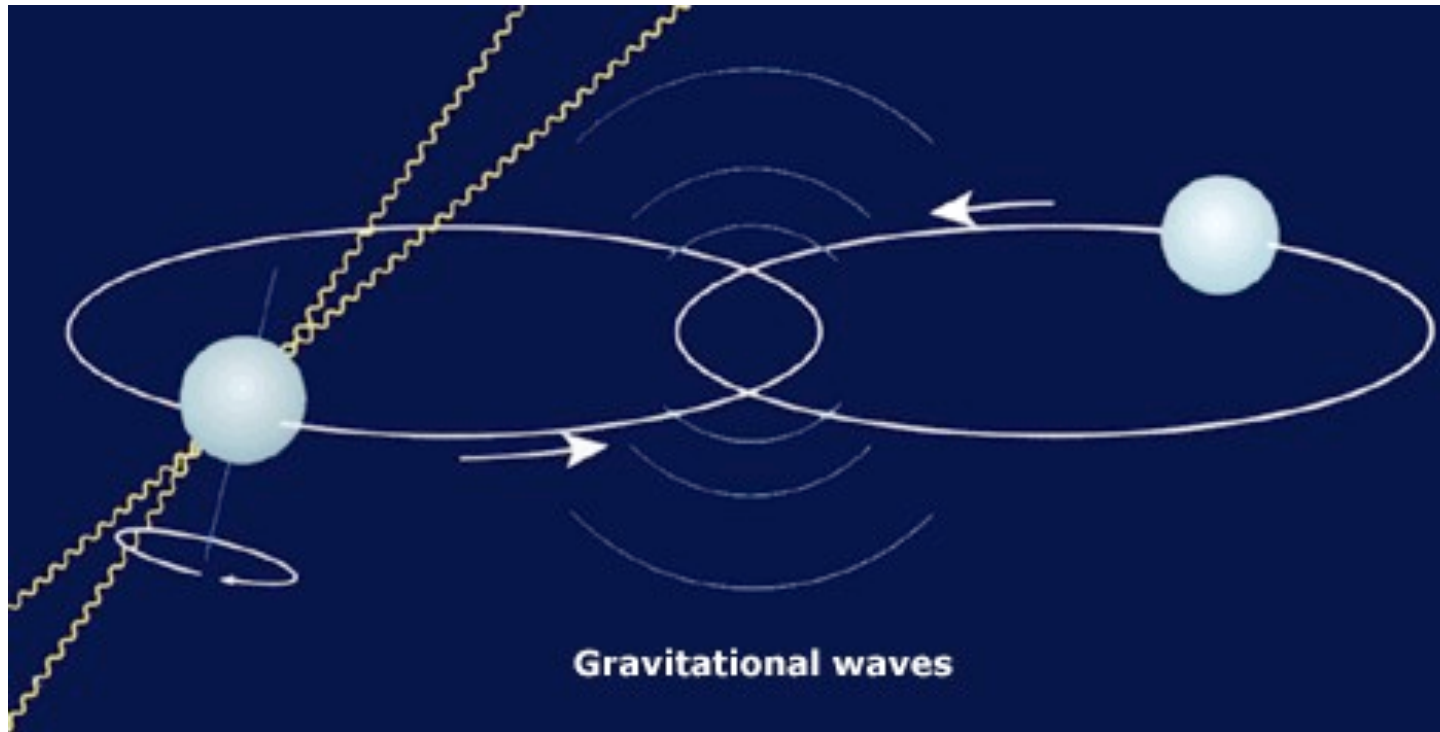
相対誤差

8.0 %
23%
11%
8.6%
11%
31%

質量関数 $f(M_X, M_O, i)$ は、連星運動のドップラー観測から精度よく求まる。
これから中性子星(X線星)の質量を測定するには、inclination i と 伴星(一般には可視光天体)の質量 M_O を精度良く求める必要がある。

(例2) Binary Pulsar (NS+NS System)

PSR 1913+16 の電波観測 (重力波の間接的証拠として 1993 年にノーベル賞)



Taylor & Weisberg (1982)

$$M_{\text{NS1}} = 1.41 \pm 0.06 M_{\text{sun}} \text{ (4.3\%)}$$

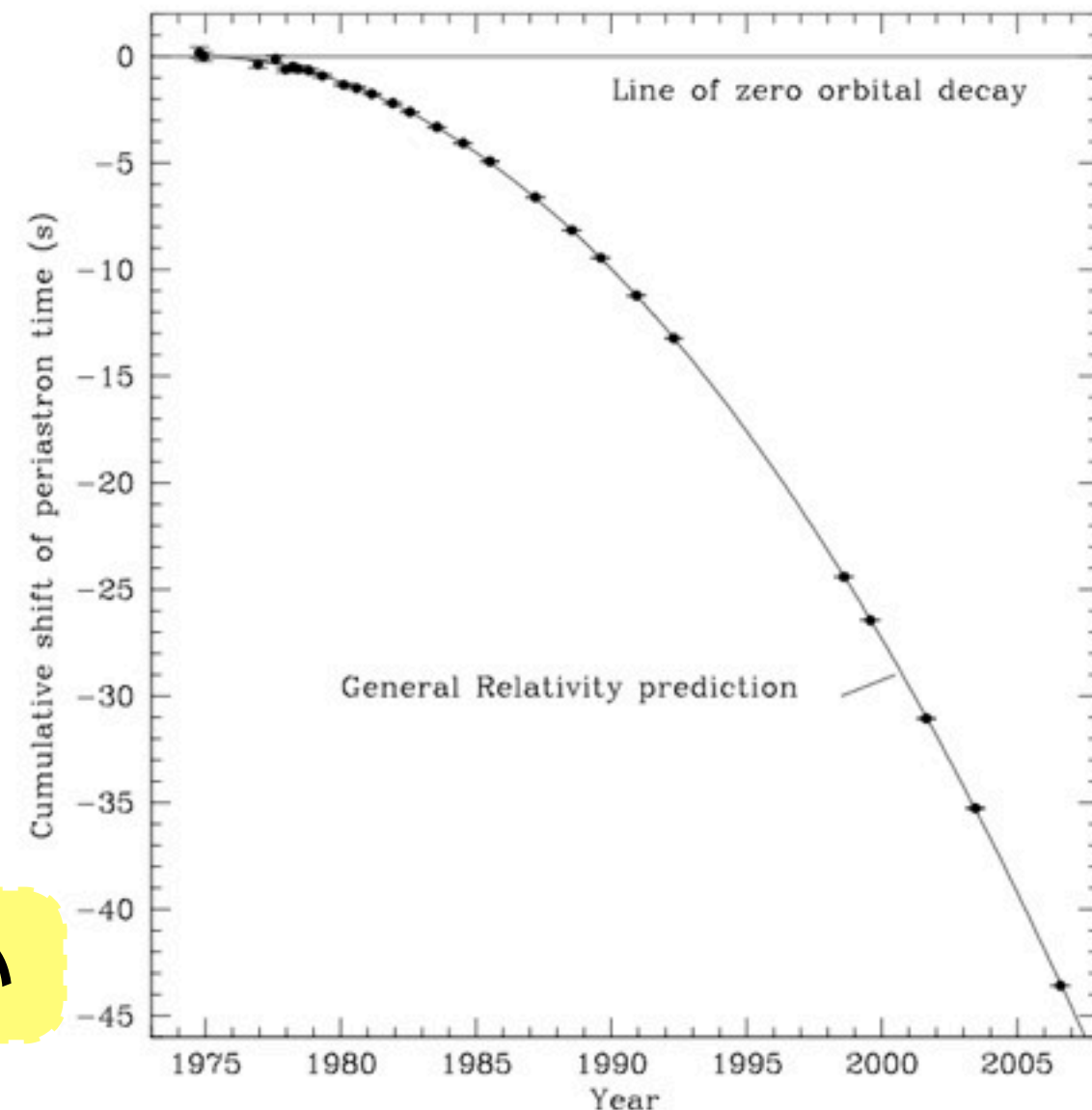
$$M_{\text{NS2}} = 1.41 \pm 0.06 M_{\text{sun}} \text{ (4.3\%)}$$

Weisberg & Taylor (2010)

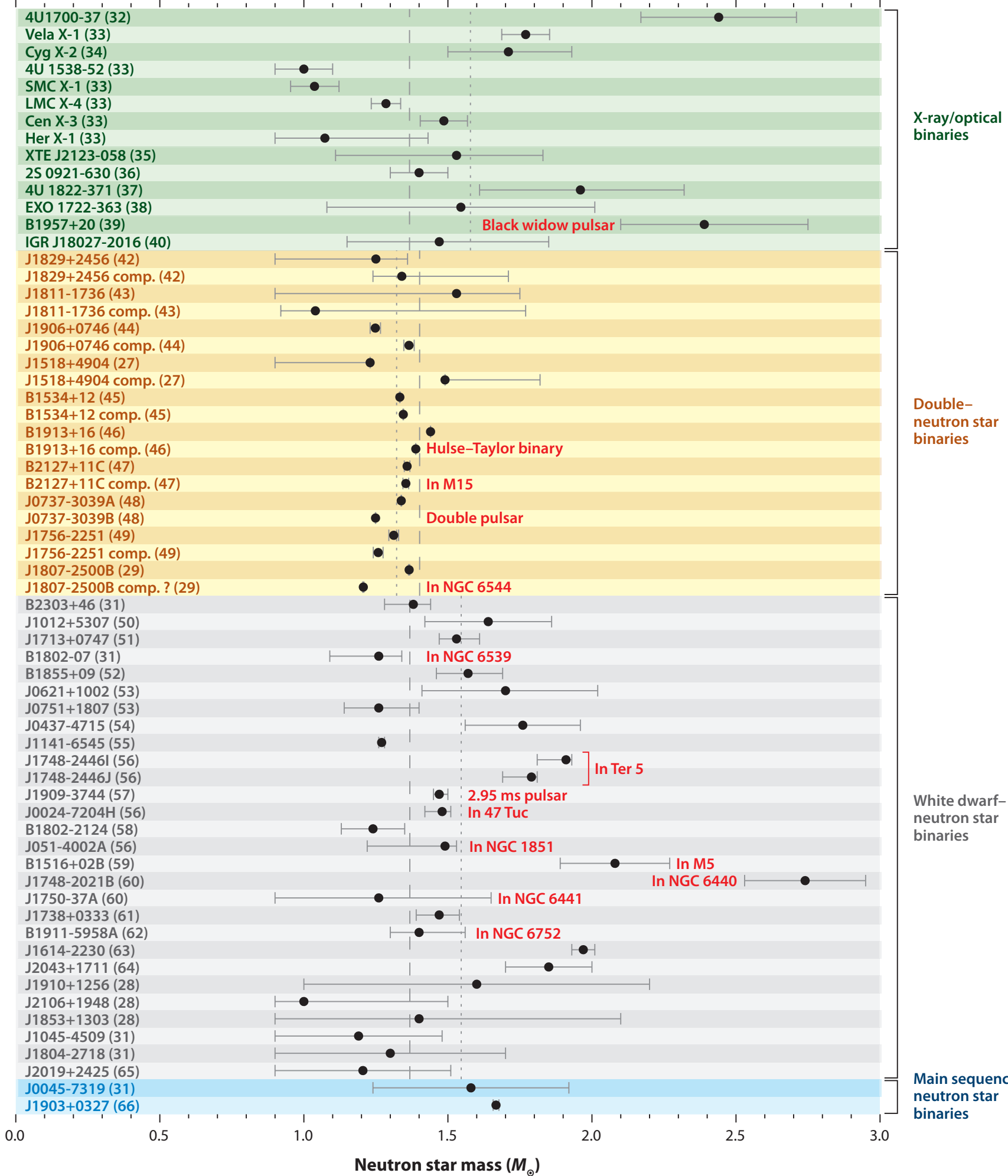
$$M_{\text{NS1}} = 1.4398 \pm 0.0002 M_{\text{sun}} \text{ (0.013\%)}$$

$$M_{\text{NS2}} = 1.3886 \pm 0.0002 M_{\text{sun}} \text{ (0.014\%)}$$

一般相対論のみに立脚しモデル依存が少ない

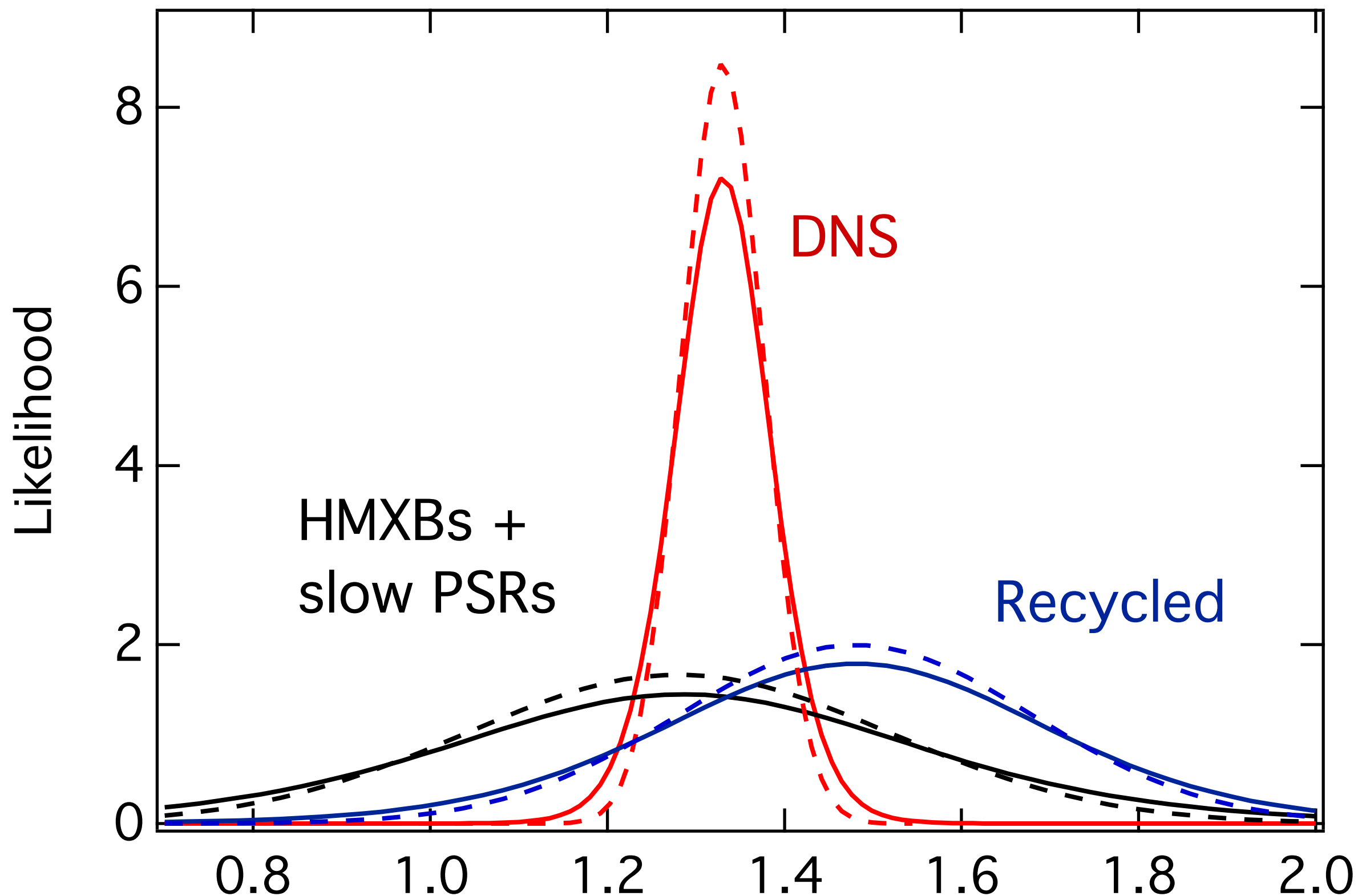


中性子星の質量



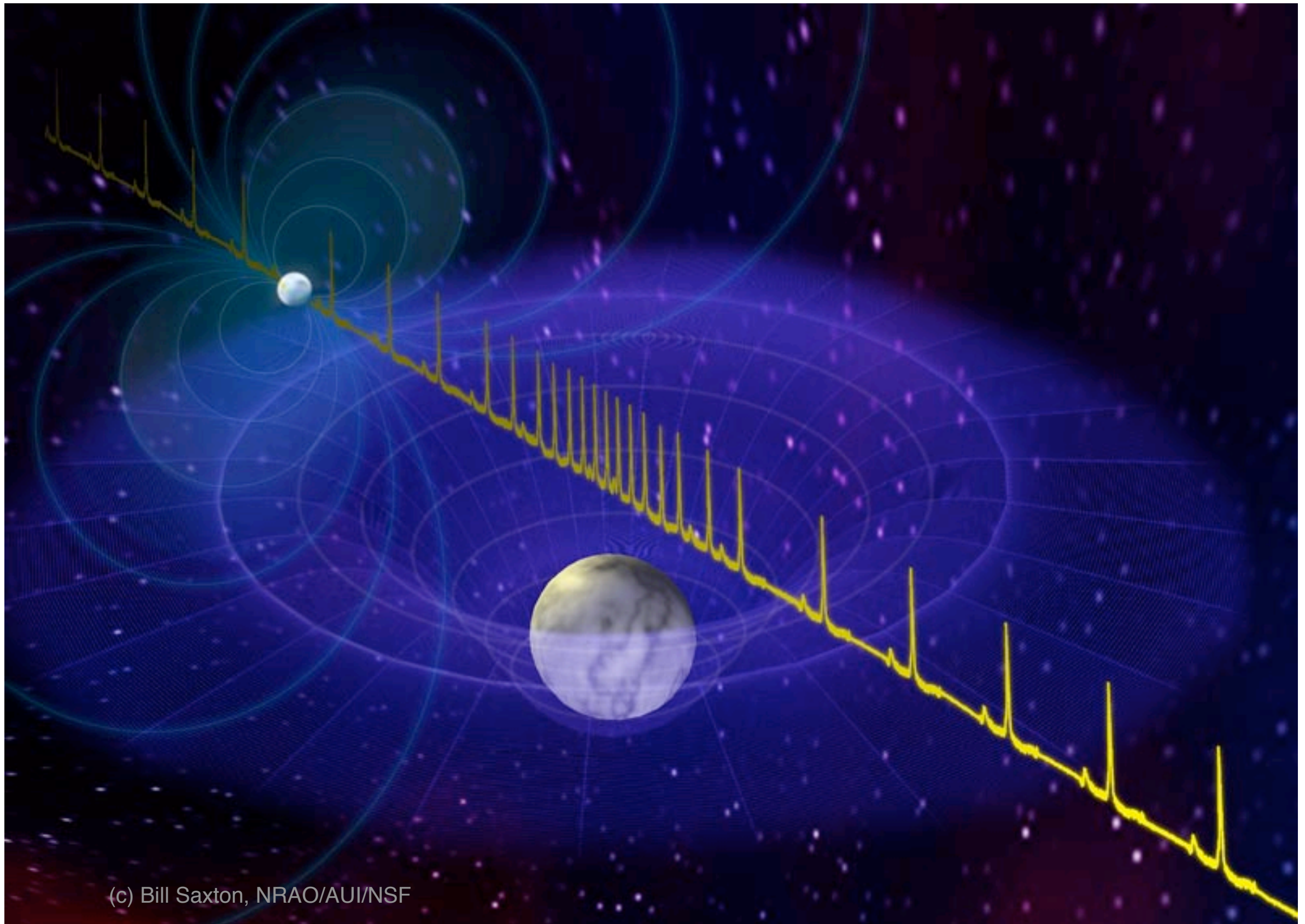
James M. Lattimer, “The Nuclear Equation of State and Neutron Star Masses”, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2012

異なる中性子星の種族での質量



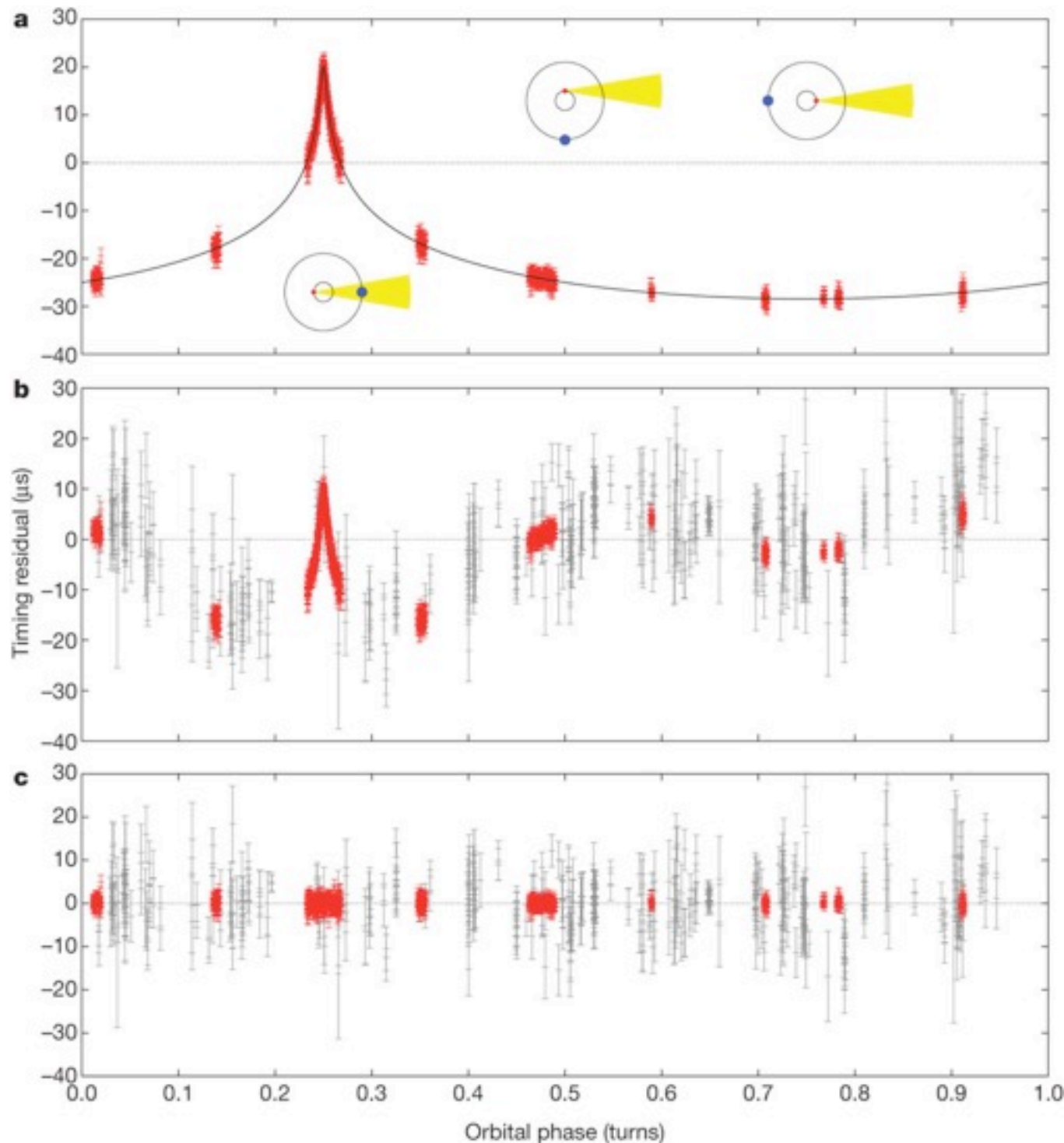
F. Ozel, "On the Mass Distribution and Birth Masses of Neutron Stars", *Astro. Phys. Jour.* **757**, 2012

(例3) Shapiro Delay (NS+WD System)



(例3) Shapiro Delay (NS+WD System)

曲がった空間を通過する際のパルスの遅れ



$$\Delta t = -\frac{R_s}{c} \ln(1 - \mathbf{u}_{NS} \cdot \mathbf{u}_{WD})$$

Schwarzschild radius of gravitational mass

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Unit vector pointing to the NS, WD

$$\mathbf{u}_{NS}, \mathbf{u}_{WD}$$

most inclined pulsar system J1614-2230

$$M_{WD} = 0.500 \pm 0.006 M_{\text{sun}} \text{ (1.2\%)}$$

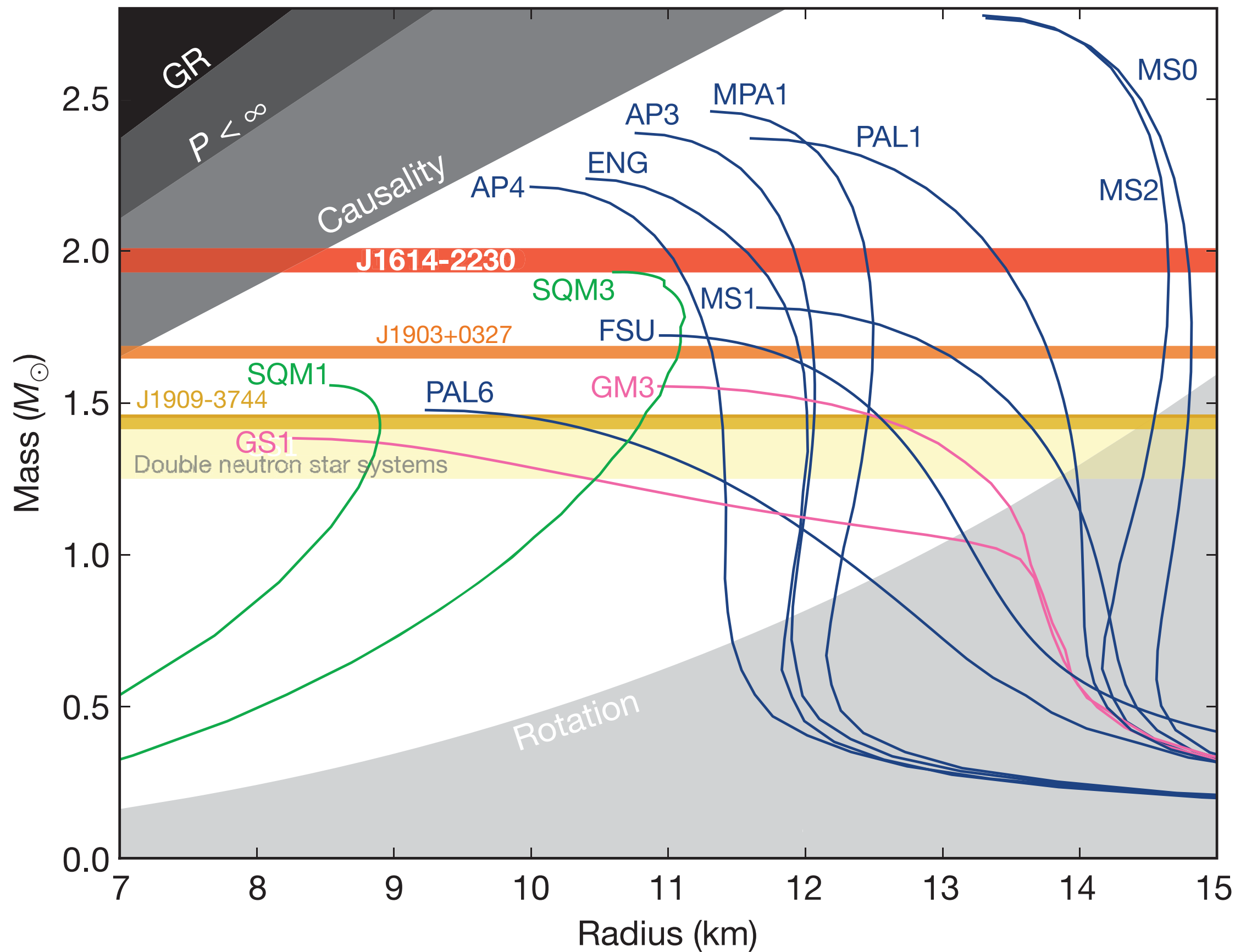
$$i = 89.17 \pm 0.02 \text{ deg (0.02 \%)}$$

$$M_{NS} = 1.97 \pm 0.04 M_{\text{sun}} \text{ (2.0\%)}$$

Demorest+2010

質量の測定精度は 0.01-10% ほどが達成。

半径を測る：中性子星表面からの黒体放射



半径と温度を測る：中性子星表面からの黒体放射

温度 T , 半径 R の黒体放射の星が距離 d にある場合、観測されるフラックス F は、

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4 \quad F = L / (4\pi d^2)$$

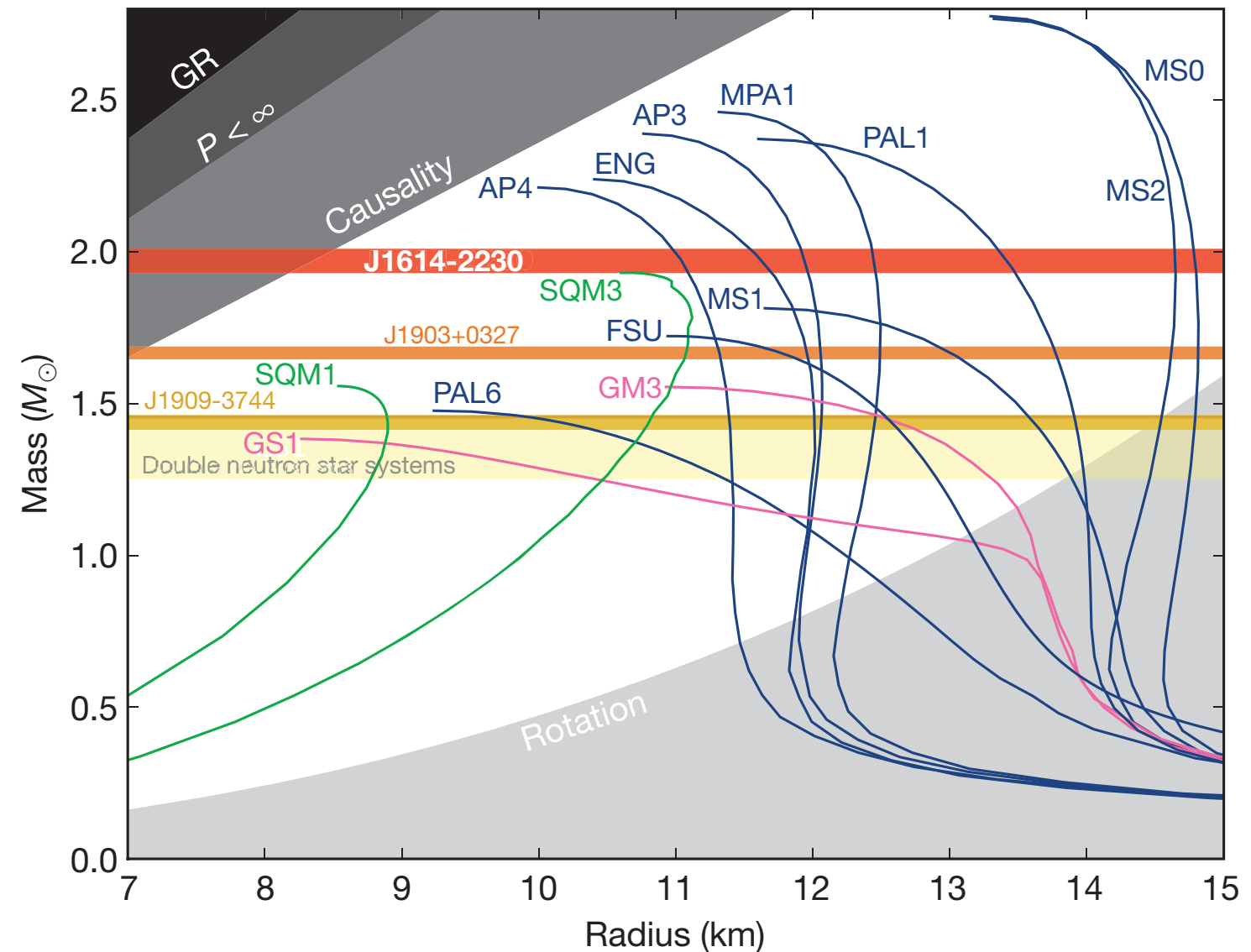
$$R = d \sqrt{F / (\sigma T^4)}$$

星の半径 R を精度よく求めるには、

- 1) 天体までの距離 d が精度よく求まる、
 - 2) 黒体放射の仮定から大きくずれない、
- という条件を満たす必要がある。

状態方程式の議論をするためなら、

R の相対測定精度は 10% ほどが要求？



(例1) RX J1856.5-3754

最も地球に近い孤立中性子星 X-ray Dim Isolated Neutron Star
星表面からの熱放射により輝く。可視光/X線で検出。

距離の推定

近傍で可視光で検出できるので、HST で視差が使える。

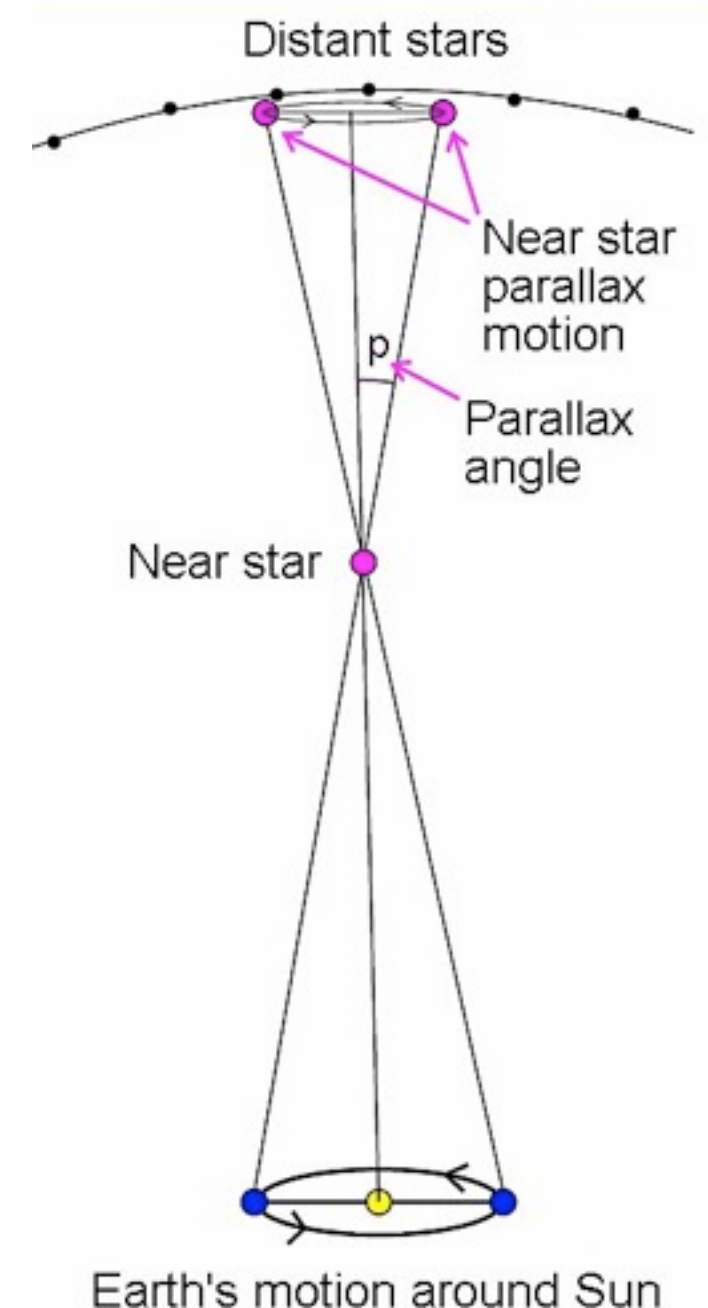
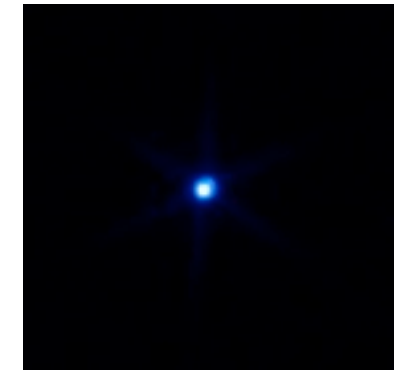
$d = 61 (+9, -8) \text{ pc}$ (~15%) Walter+2001

$d = 142 (+58, -39) \text{ pc}$ (~45%) Kaplan+2002

$d = 117 (+12, -12) \text{ pc}$ (~10%) Walter+2002

教訓

- 1) 距離の推定は難しい
- 2) そもそも測定の系統誤差の評価が甘い
- 3) 相対誤差にして数十%が現状の限界



(例1) RX J1856.5-3754

温度の推定

星を一様な黒体放射で仮定してよいか？

- 1) 磁場・大気モデルの依存性はないか？ (spectral feature がなければよい)
- 2) 星表面を一様温度で仮定できるか？ (パルスがなく、一温度で近似できる)
- 3) 星間空間のX線吸収の仮定は正しいか？

Drake et al., ApJ, 2002 では Chandra の観測からの
温度 $T \sim 60$ eV と前述の距離より

半径 $R = 3.8\text{--}8.2$ km

と報告した。中性子星としては小さな半径なので、
クォーク星の可能性もあるとして議論を呼んだ。

Drake 論文では上の 1) 2) が成り立つと仮定した。

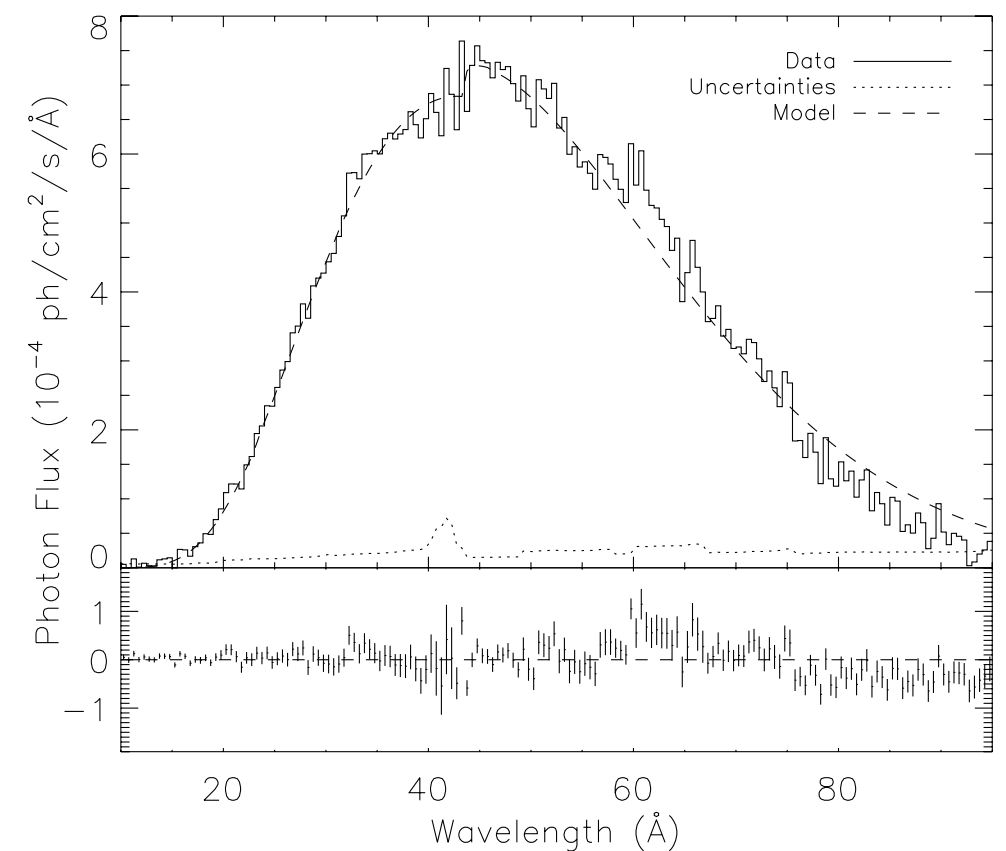
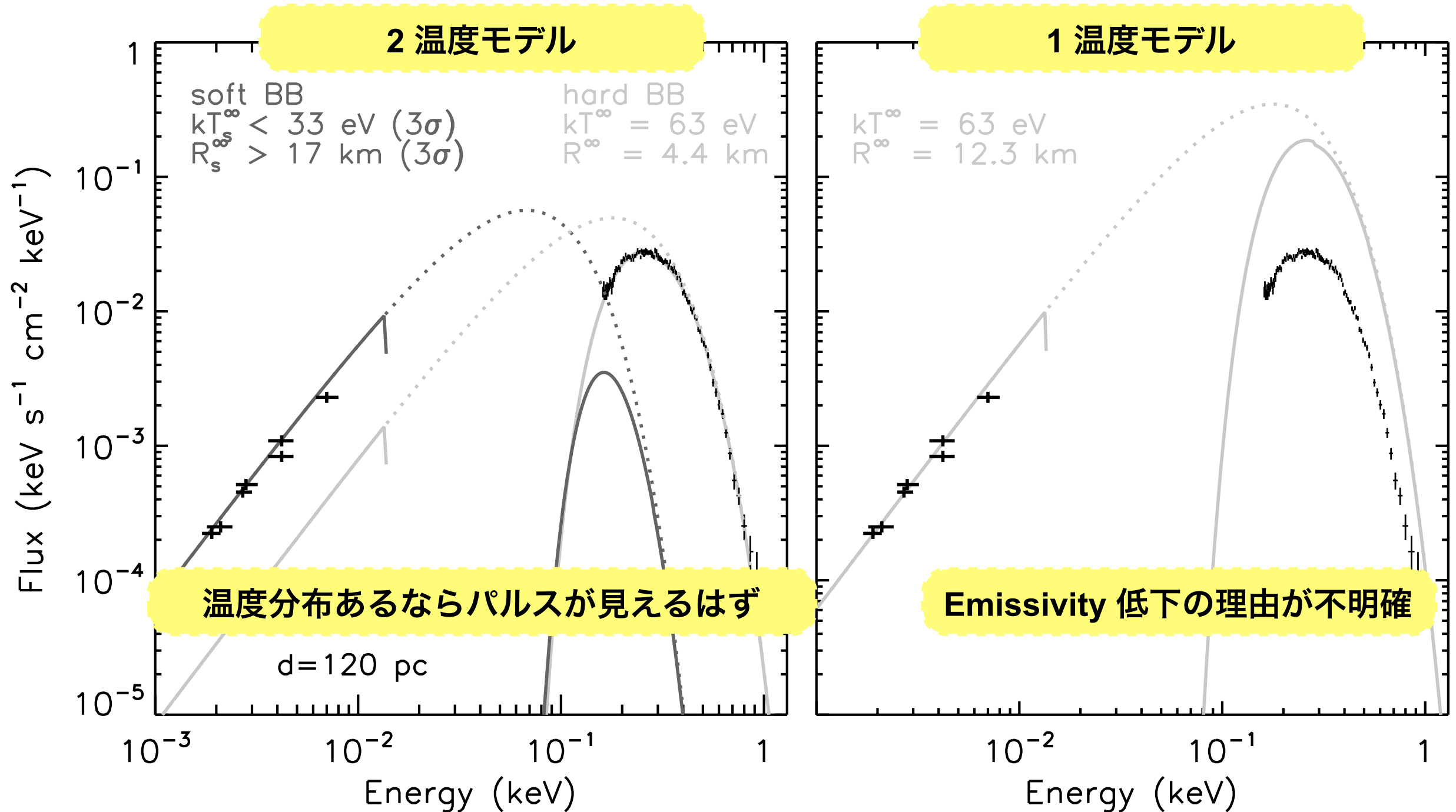


FIG. 1.—Combined positive and negative order spectra of RX J1856.5–3754 binned at 0.5 Å intervals, shown with the best-fit blackbody model with parameters corresponding to method 2 in § 4 and residuals (observations–model). The deviations from this model are consistent with Poisson statistics after allowing for calibration uncertainties at the C K edge and over broader wavelength intervals. The apparent edge at 60 Å results primarily from one of the HRC-S plate gap boundaries and small residual QE differences between positive- and relative negative-order outer plates.

(例1) RX J1856.5-3754

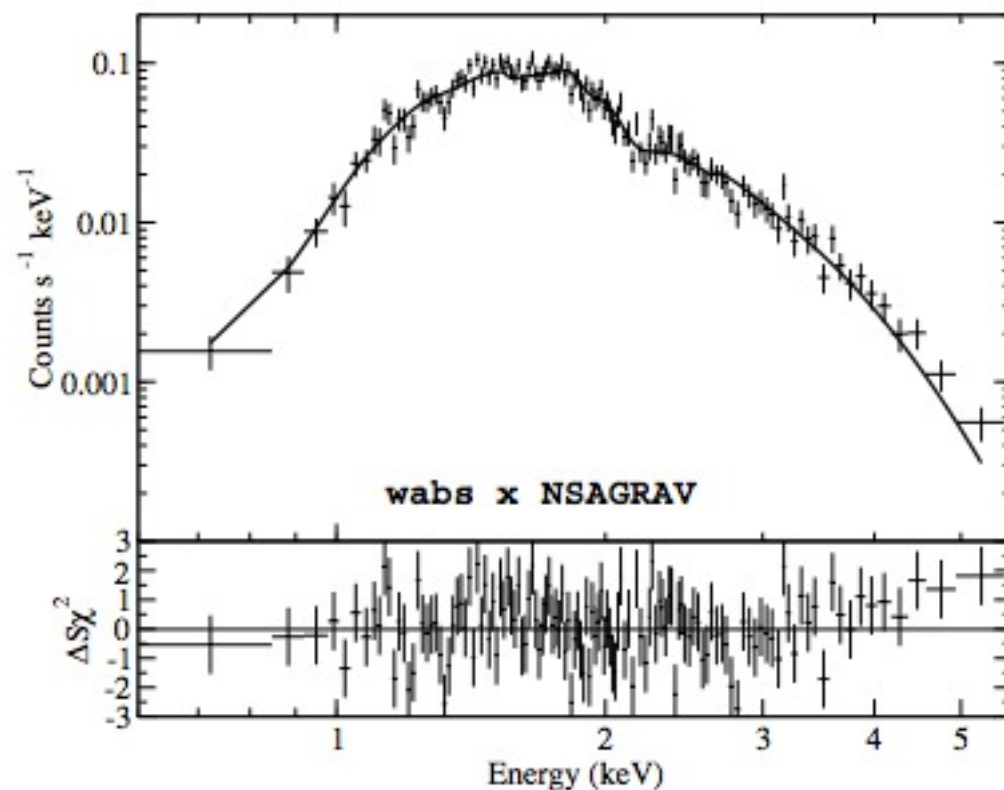
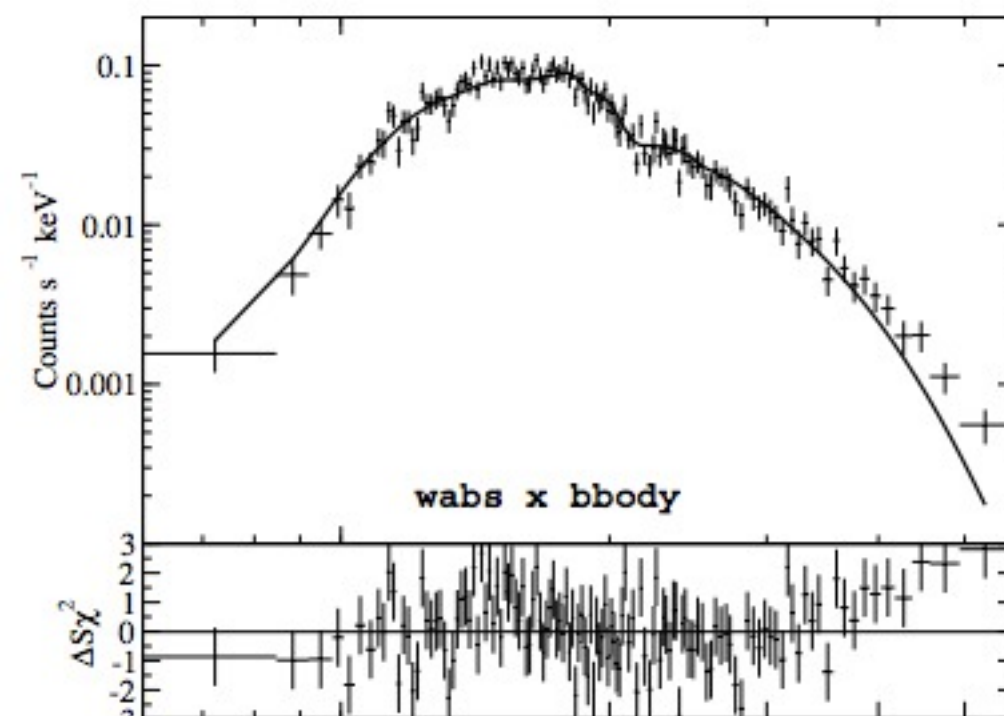
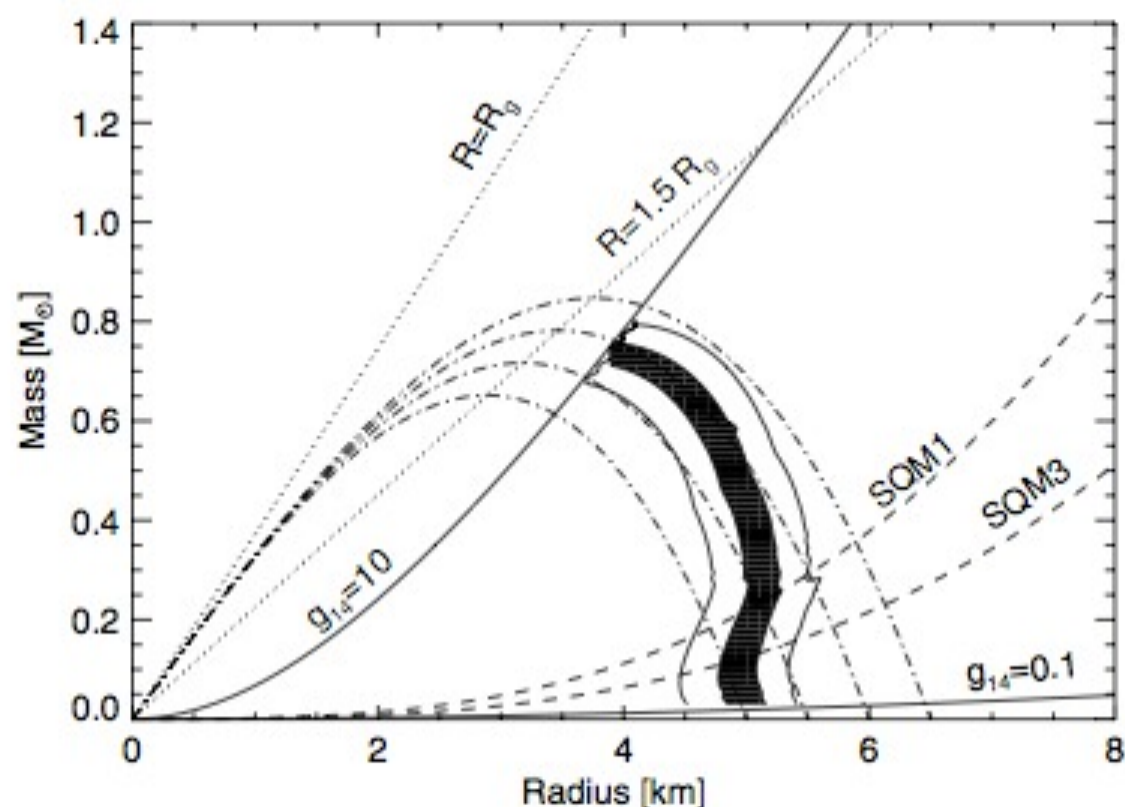
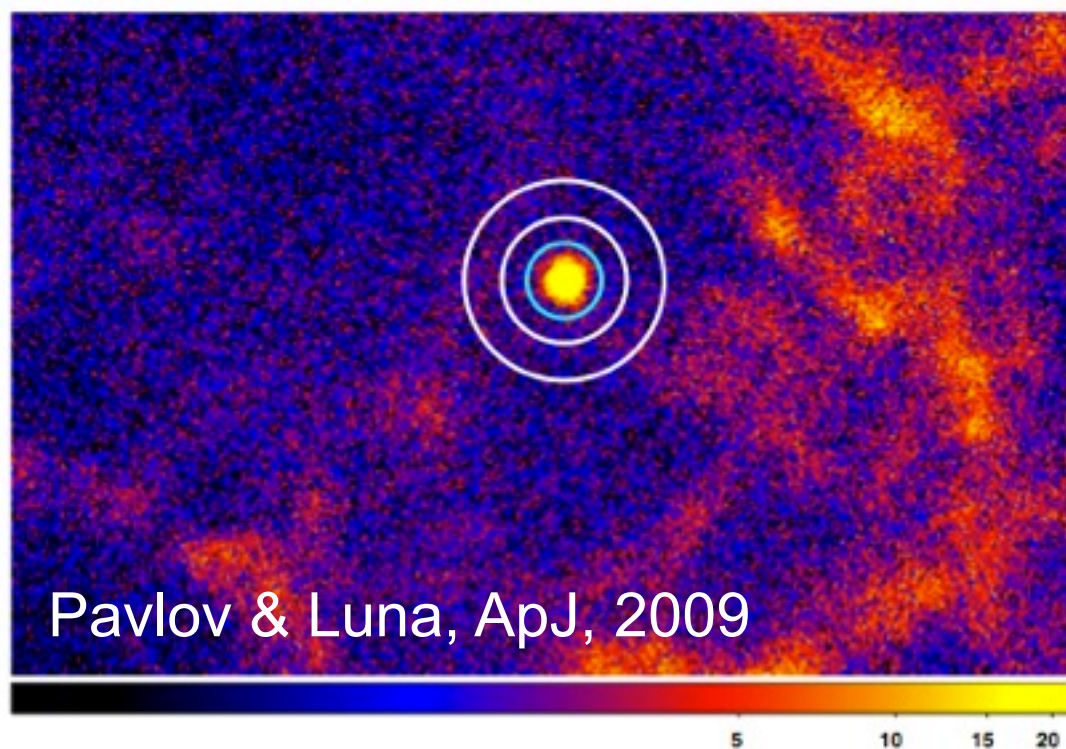
Burwitz, A&A, 2003 では 1 温度では合わないのではないかと指摘。(仮定 1 が崩れた?)



どちらのモデルでも半径はそれほど小さくない。しかもその後の観測で、 $P \sim 7.055$ 秒の弱い (PF $\sim 1.2\%$)パルスが検出された (Tiengo, ApJL, 2007)。仮定 2 も崩れた。

(例2) 超新星残骸 Cas A の中心にある CCO

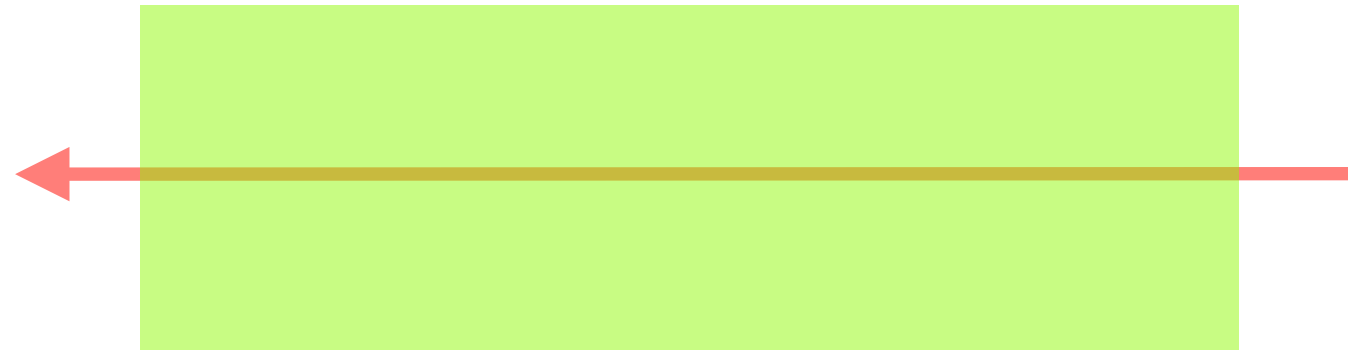
パルスは検出されず、一様温度の黒体放射モデルでは説明できない。水素の大気モデルを入
れると半径 $R \sim 5$ km, $M < 0.8$ Msun となるが、大気・星表面の温度分布のモデル依存あり。



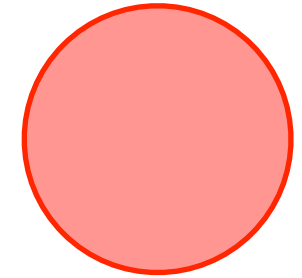
半径と温度を測る: X線のスペクトル解析



観測犬



星間物質
Interstellar Medium (ISM)



X線源(NS)
温度T, 半径R

$$\exp\{-\sigma(E)N_{\text{H}}\} \times (\text{Intrinsic Model})$$

$\sigma(E)$ 吸収断面積: エネルギー依存した断面積(cm^2)
星間物質として存在する各元素の寄与の和

N_{H} 水素柱密度: (水素に換算した)星間物質の厚み (cm^{-2})
XSPEC のフィットで得られる

中性物質による光電吸収の断面積

X線帯域で H, He の断面積は十分小さく無視できる。

重元素 C, N, O, Ne, S, Si, Fe の K, L, M 殻電子による吸収が最も効く。

束縛エネルギーに対応する吸収端以外では E^{-3} に比例し減少。

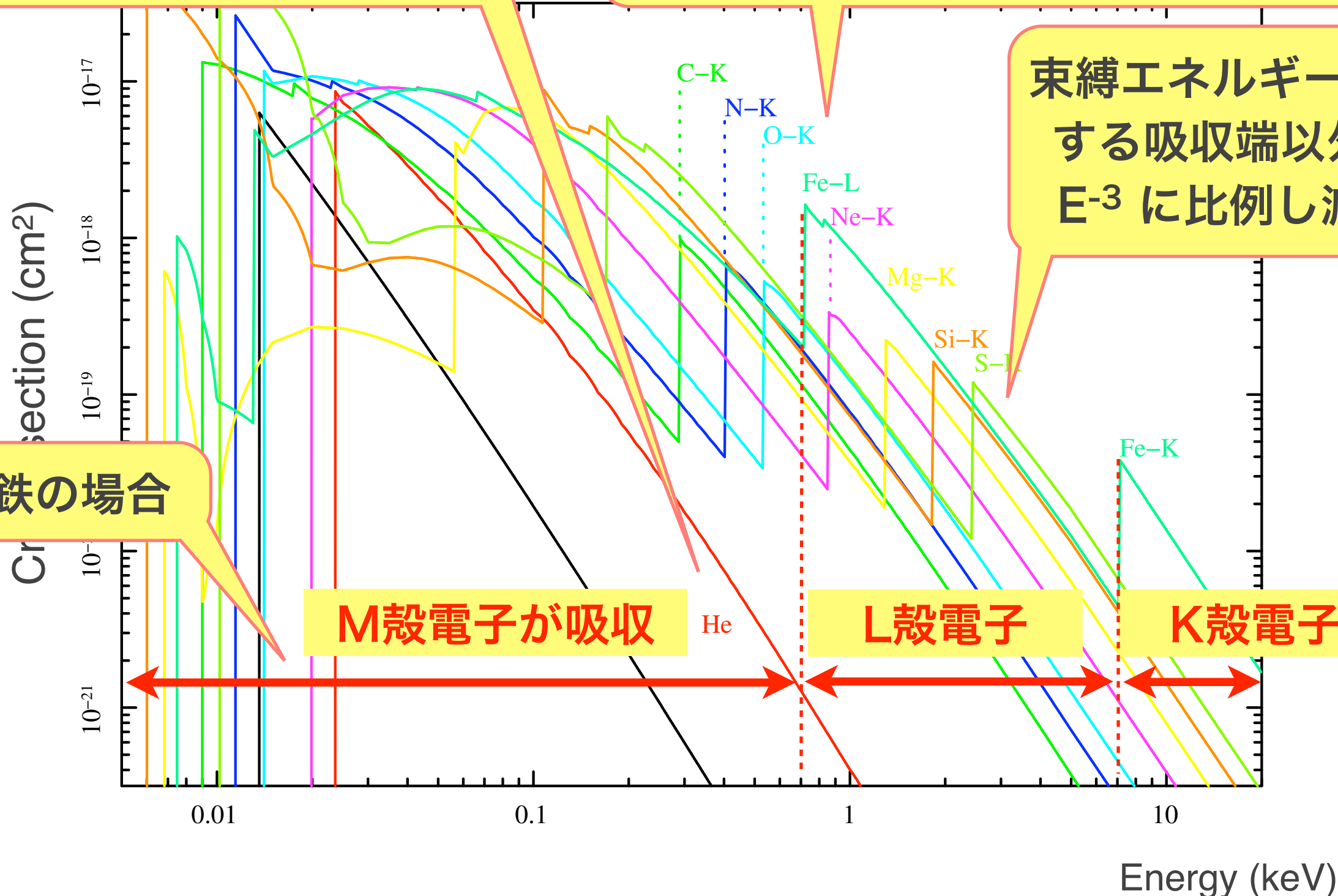
中性鉄の場合

M殻電子が吸収

He

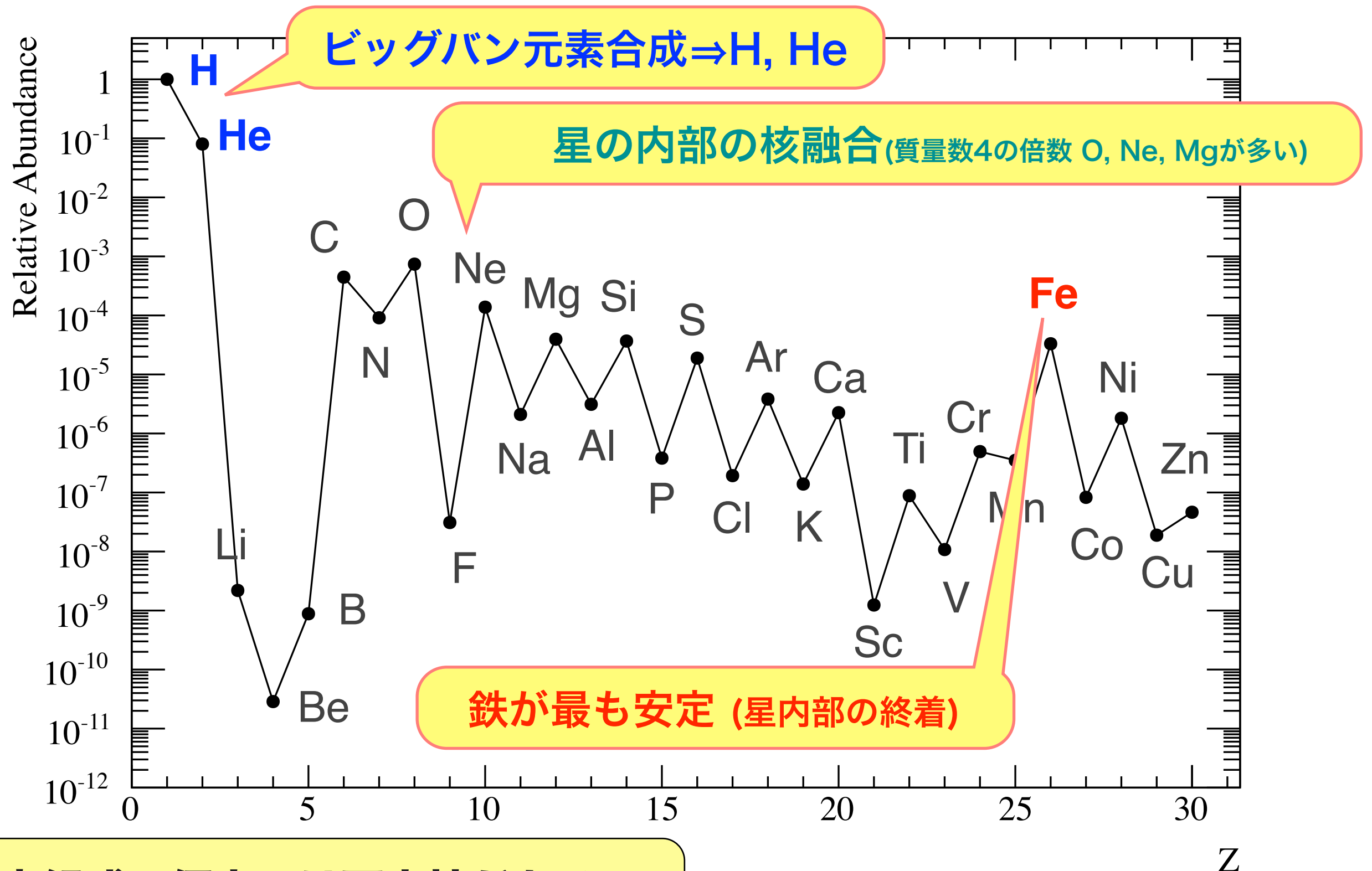
L殻電子

K殻電子



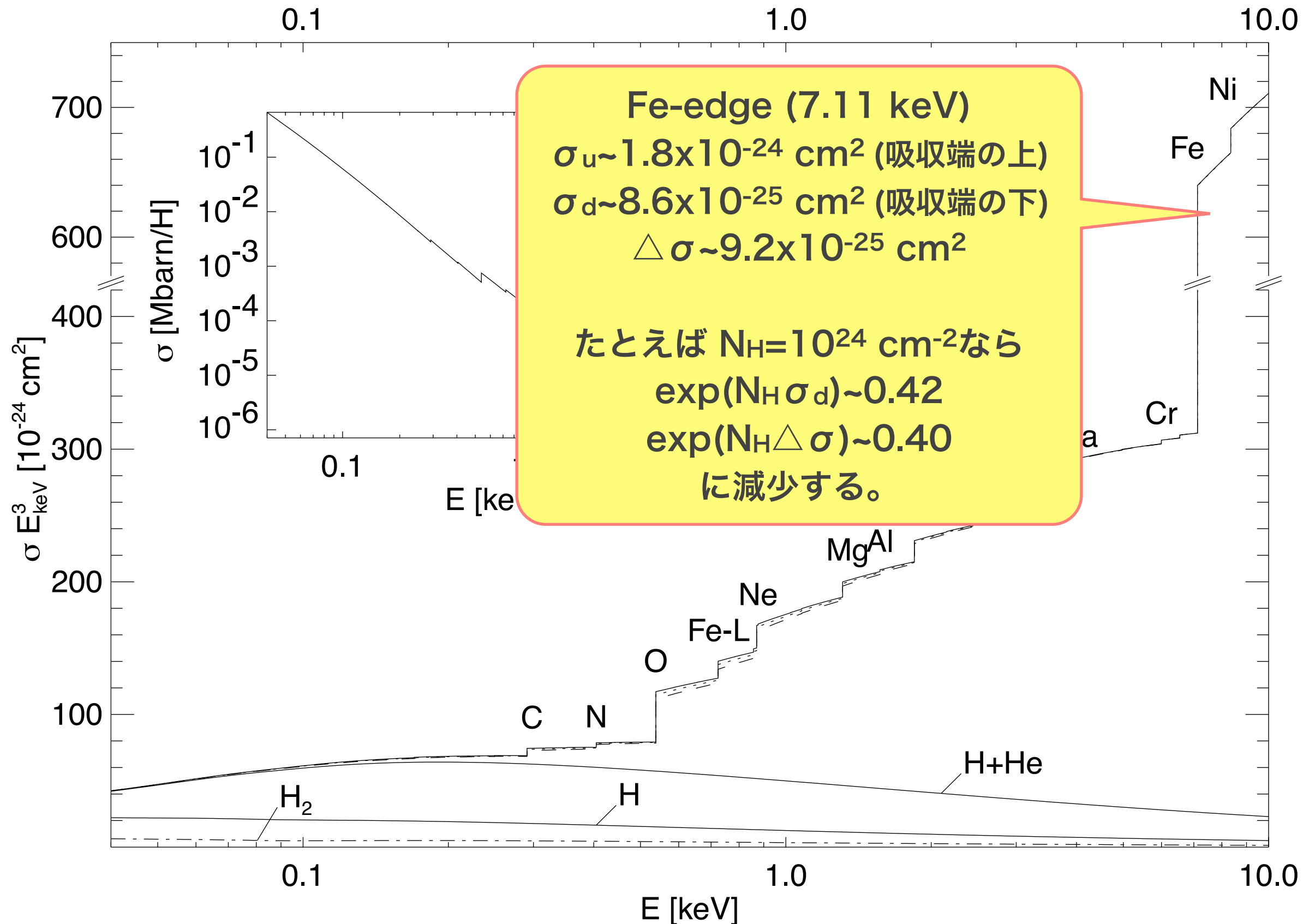
宇宙の元素組成

各元素からの光電吸収断面積を元素組成で重みを付けて足し合わせる

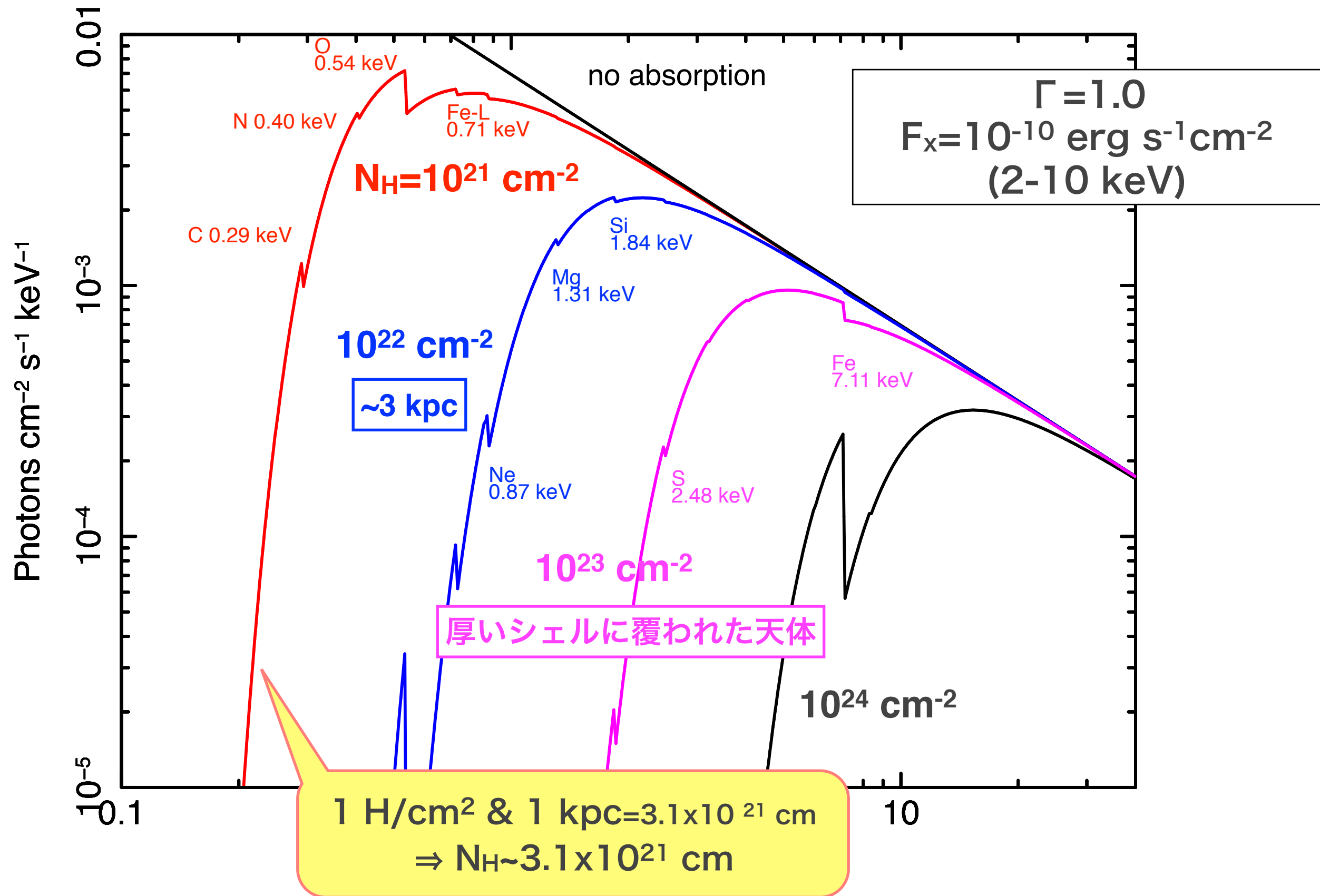


元素組成の仮定には不定性がある！

(元素ごとの吸収断面積)x(元素組成)

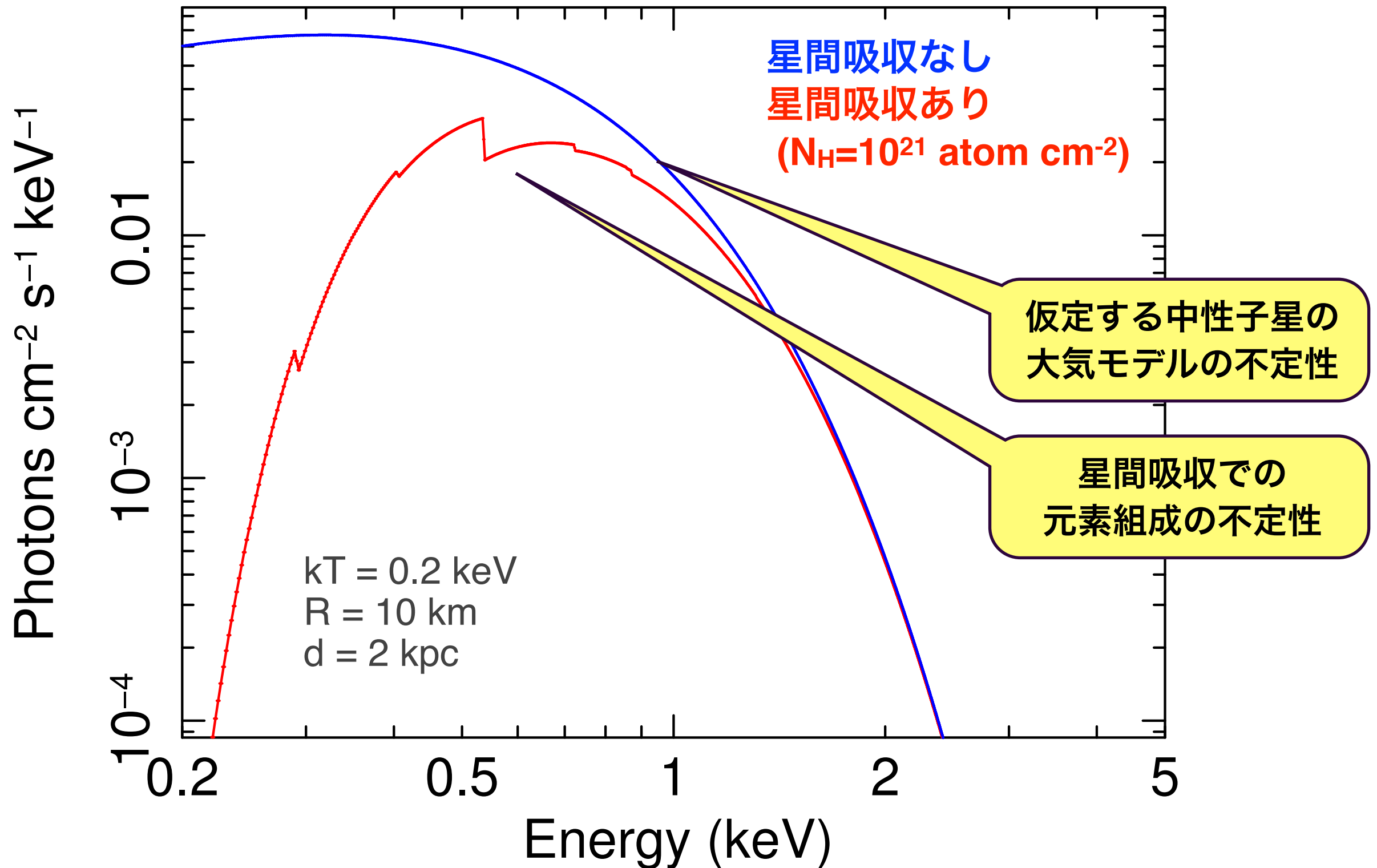


星間吸収を受けたスペクトル



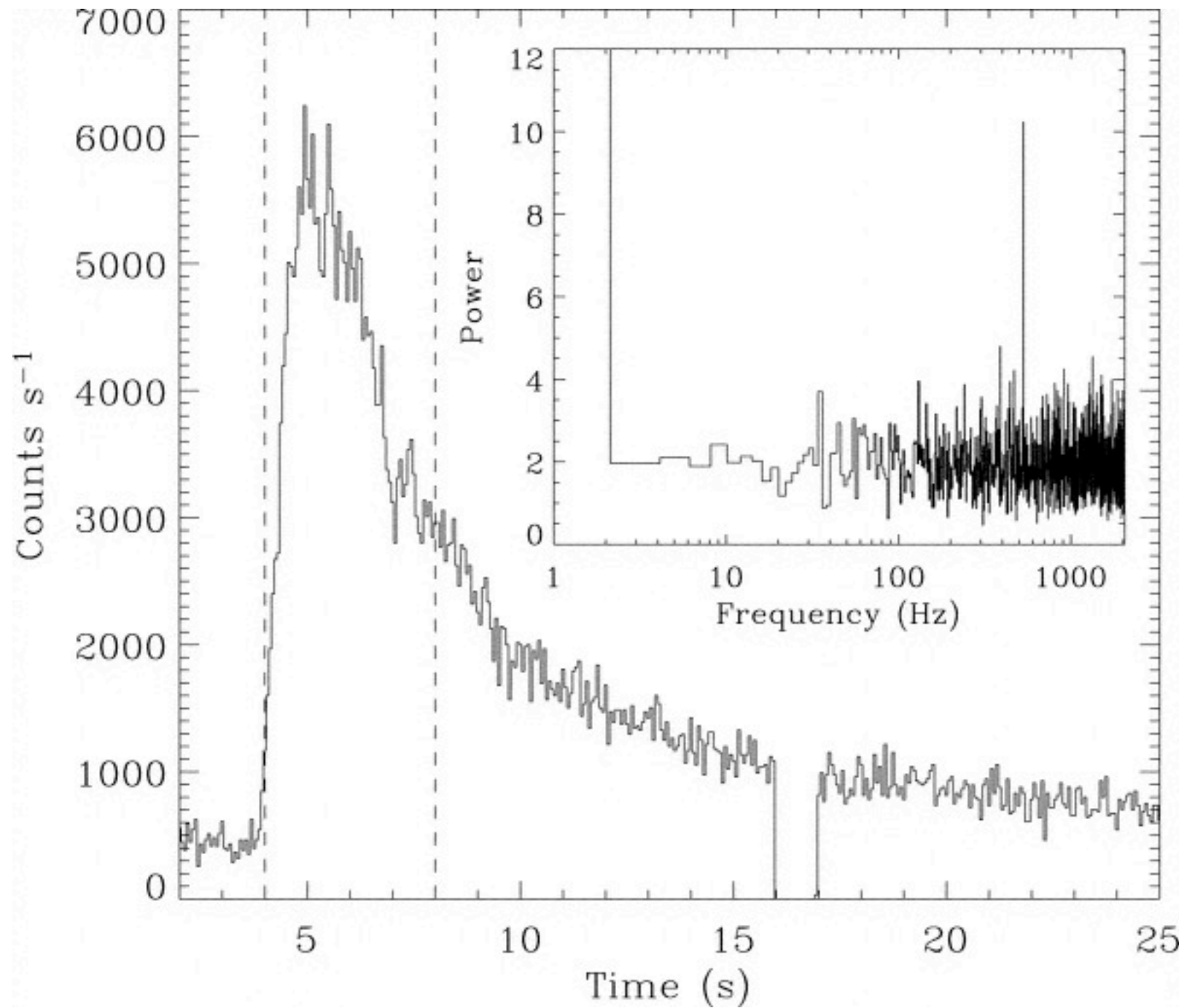
星間吸収を受けた黒体放射のスペクトル

距離 2 kpc にある半径 10 km, 温度 0.2 keV の中性子星の表面観測



半径を測る: X線バーストを利用する

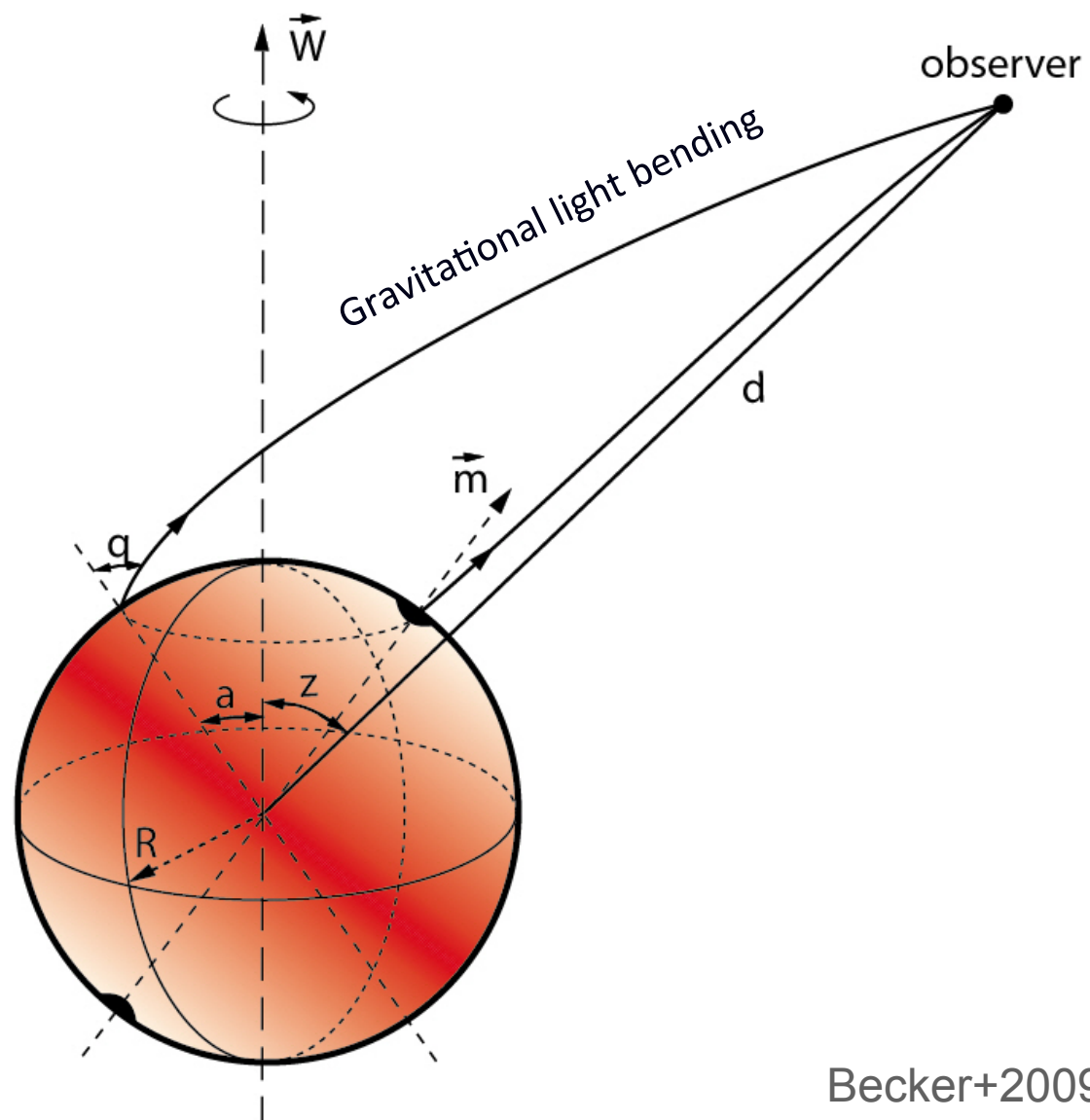
中性子星の表面に、水素やヘリウムが退席して温度と密度が上昇。He 燃焼($3\alpha \rightarrow 12\text{C}$)の熱核融合反応でエディントン光度に達するX線のバーストが10秒から数十秒にわたり生じる。



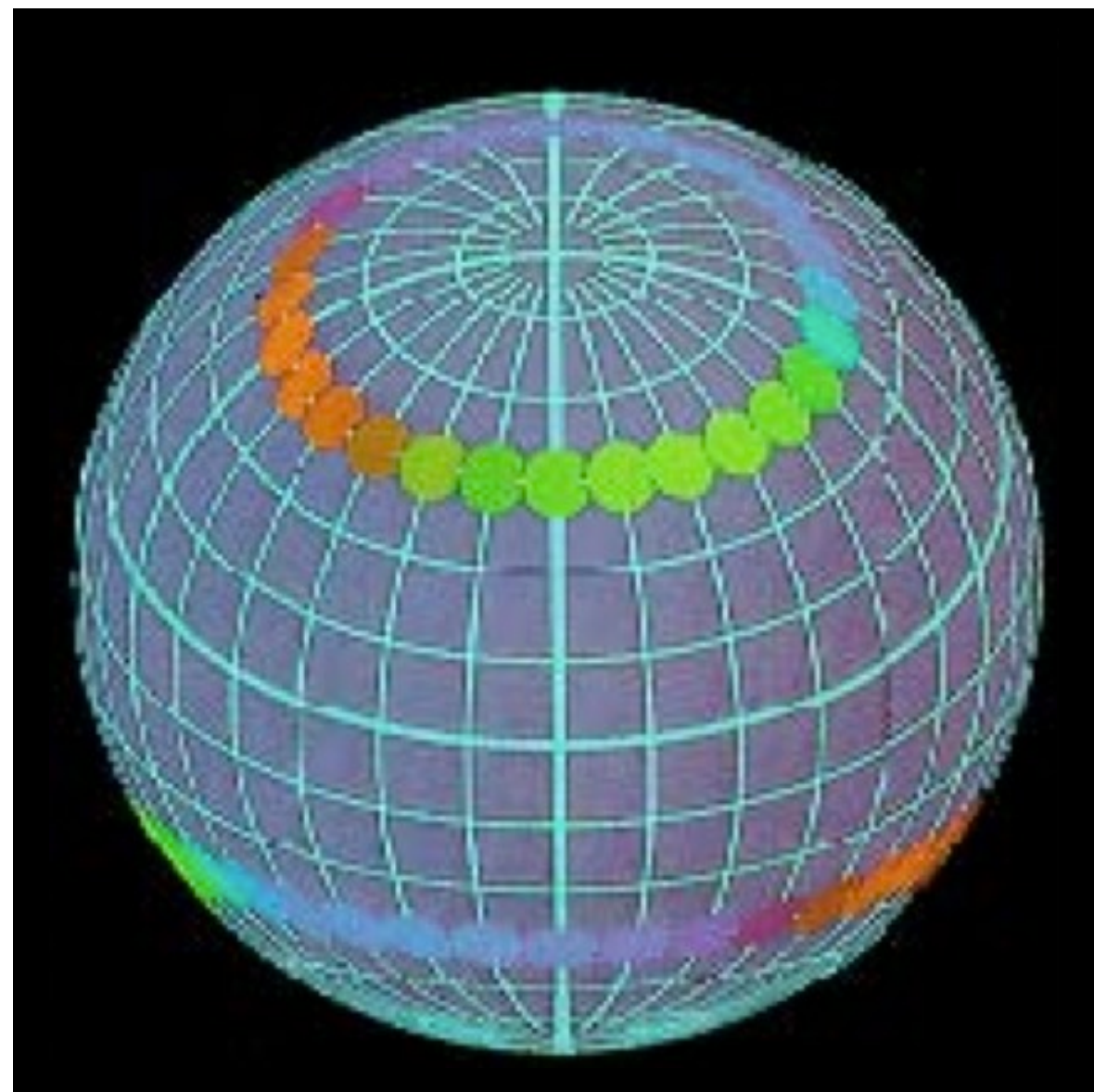
thermonuclear explosion

Photo Credit: David A. Hardy & PPARC

Gravitational Light Bending



Becker+2009



$$R_{\infty} = R \cdot (1 + z) = \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{R_s}{R}}}$$

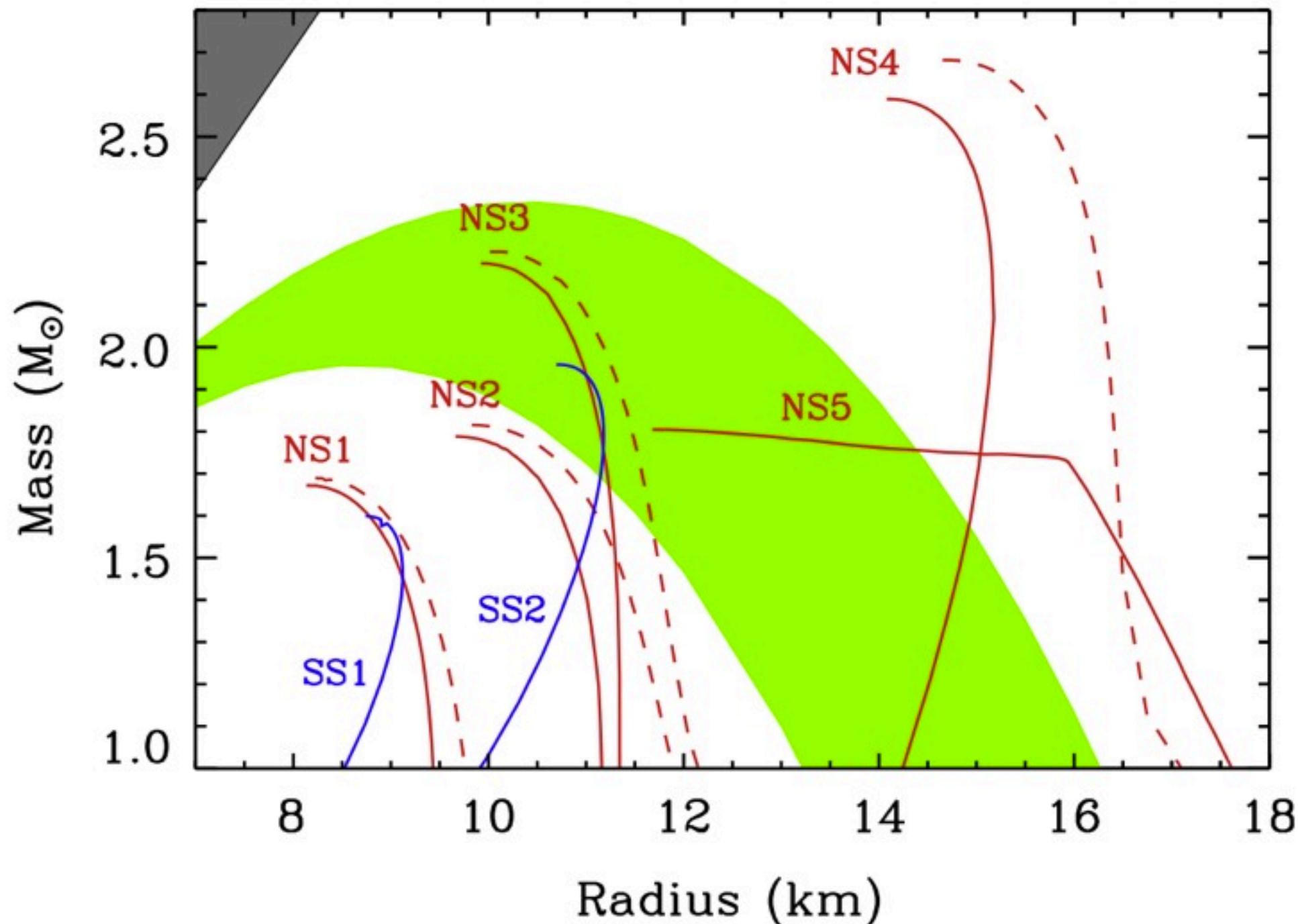
$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \sim 3 \text{ km} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)$$

1.4 太陽質量, 10 km 半径の中性子星: $z \sim 0.3$, 1.3 倍に見える

半径を測る: X線バーストの Continuum Spectrum

バースト時に星表面の全体が X 線で輝いていると仮定して,,,

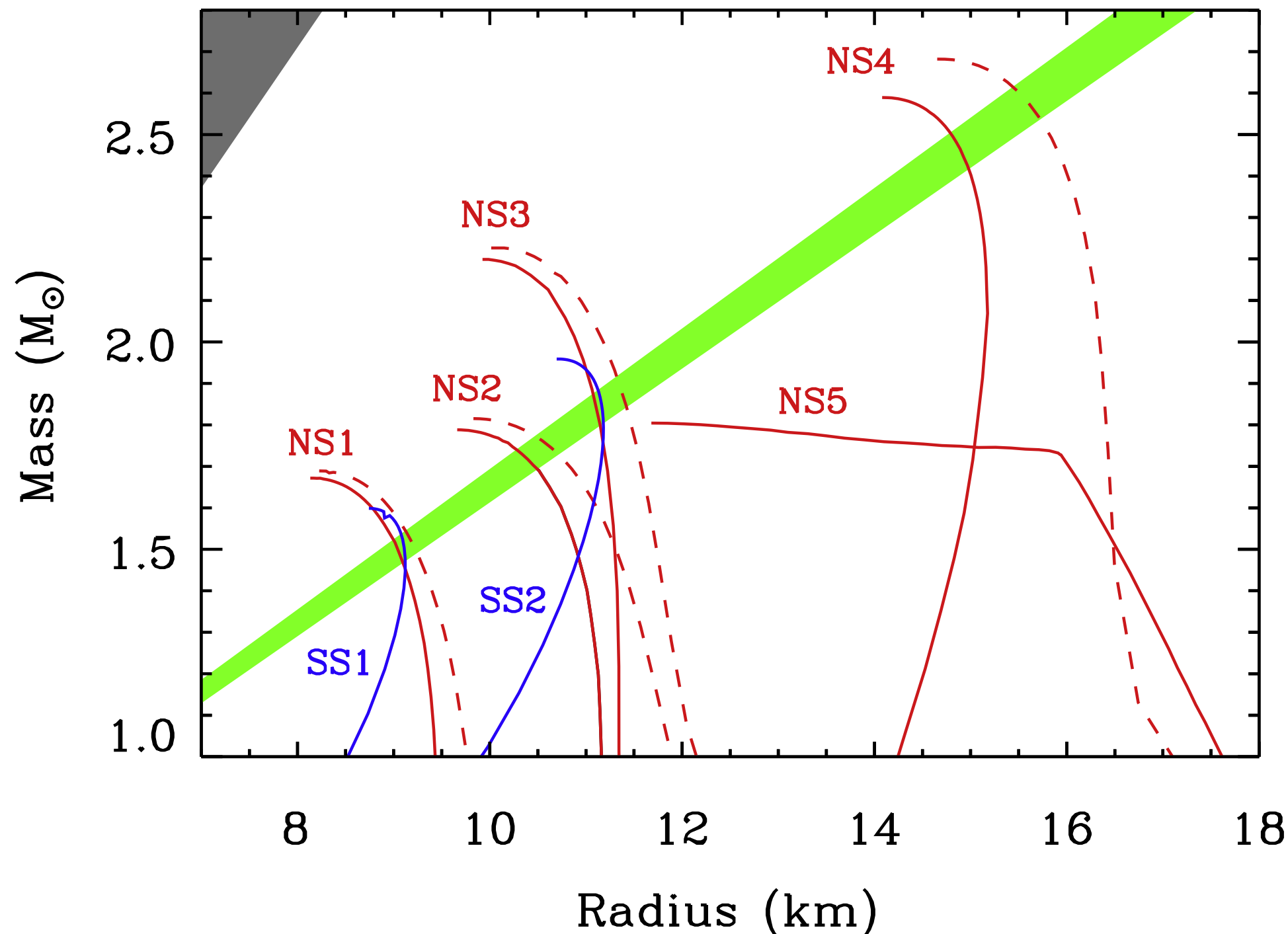
$$R_{\infty} \left(= R_{BB}(1+z)/f^2 \right) = d \sqrt{F_{\infty}/(\sigma T_{\infty}^4)}$$



半径を測る: X線バーストの Spectral Line Method

スペクトル中に見える吸収線の重力赤方偏移を利用。

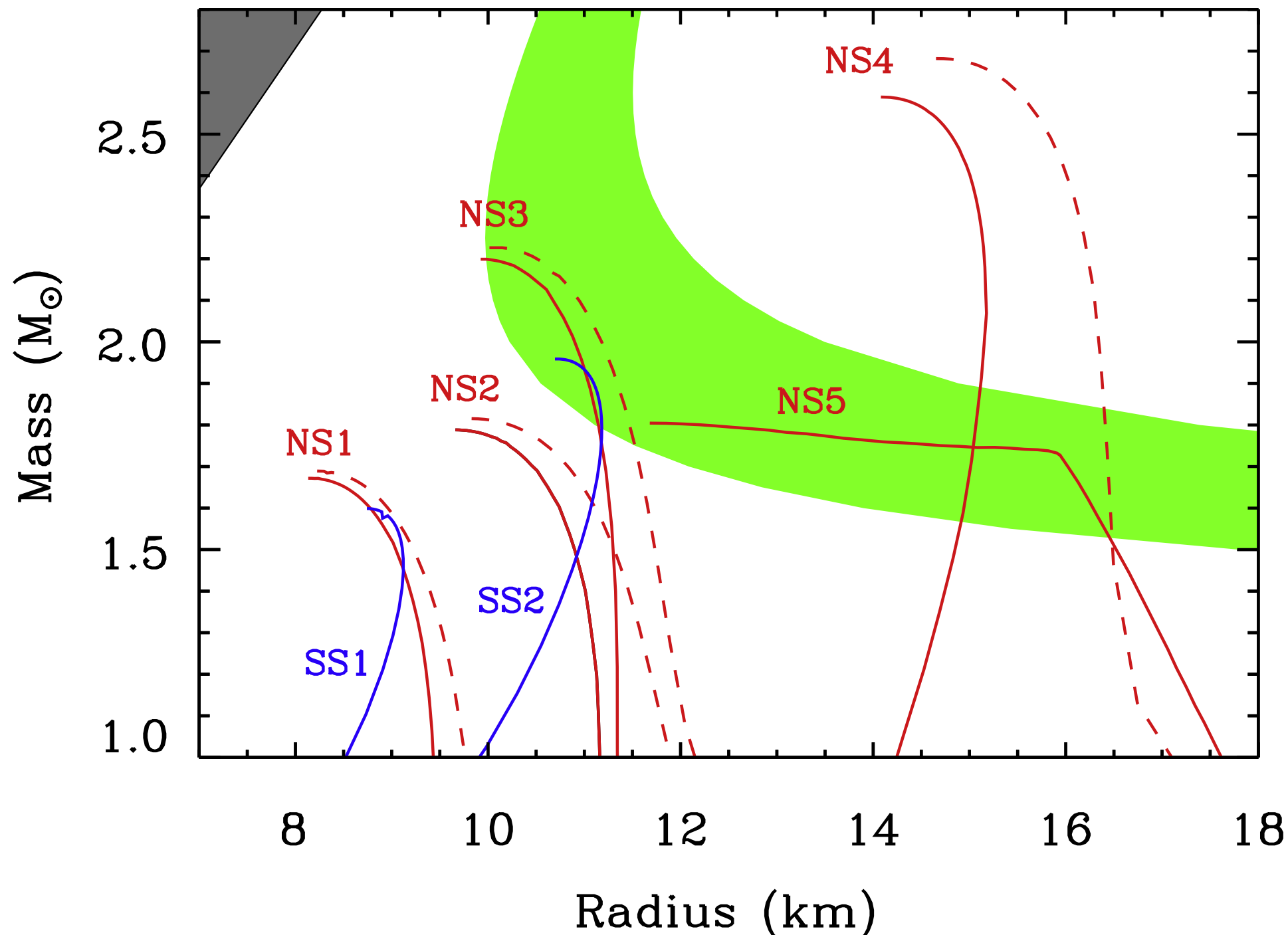
$$\frac{E_{em}}{E_{obs}} = 1 + z = \frac{1}{\sqrt{1 - 2GM/c^2 R}}$$



半径を測る: X線バーストの PRE

バースト初期は強い輻射圧で Photospheric Radius Expansion がおきエディントン光度へ。

$$4\pi d^2 F_{Edd} = \frac{4\pi G M c}{\kappa} (1+z)$$



半径を測る：X線バーストを利用する

Ozel, Nature 2006 では複数の方法を合わせて EXO 0748-676 の質量、半径を推定した

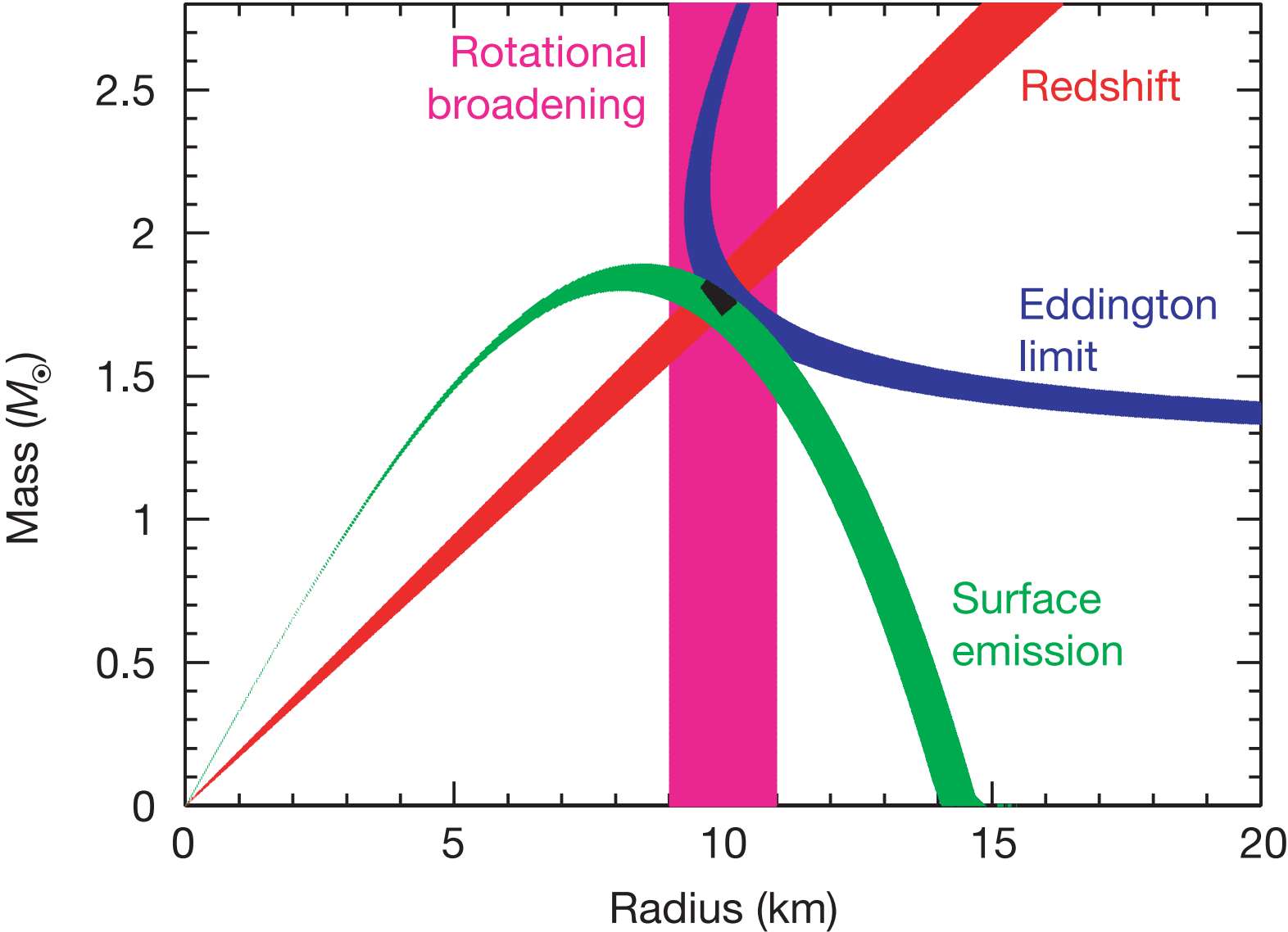


Table 2 | The neutron star properties that are obtained from the observations summarized in Table 1

Neutron-star property	Dependence on observables	Constraint
M	$\frac{f_{\infty}^4 c^5}{4G\kappa_{\text{es}}} \left(\frac{F_{\text{cool}}}{\sigma T_c^4} \right) \frac{[1-(1+z)^{-2}]^2}{(1+z)^3} F_{\text{Edd}}^{-1}$	$2.10 \pm 0.28 M_{\odot}$
R	$\frac{f_{\infty}^4 c^3}{2\kappa_{\text{es}}} \left(\frac{F_{\text{cool}}}{\sigma T_c^4} \right) \frac{1-(1+z)^{-2}}{(1+z)^3} F_{\text{Edd}}^{-1}$	$13.8 \pm 1.8 \text{ km}$
D	$\frac{f_{\infty}^2 c^3}{2\kappa_{\text{es}}} \left(\frac{F_{\text{cool}}}{\sigma T_c^4} \right)^{1/2} \frac{1-(1+z)^{-2}}{(1+z)^3} F_{\text{Edd}}^{-1}$	$9.2 \pm 1.0 \text{ kpc}$

13%

13%

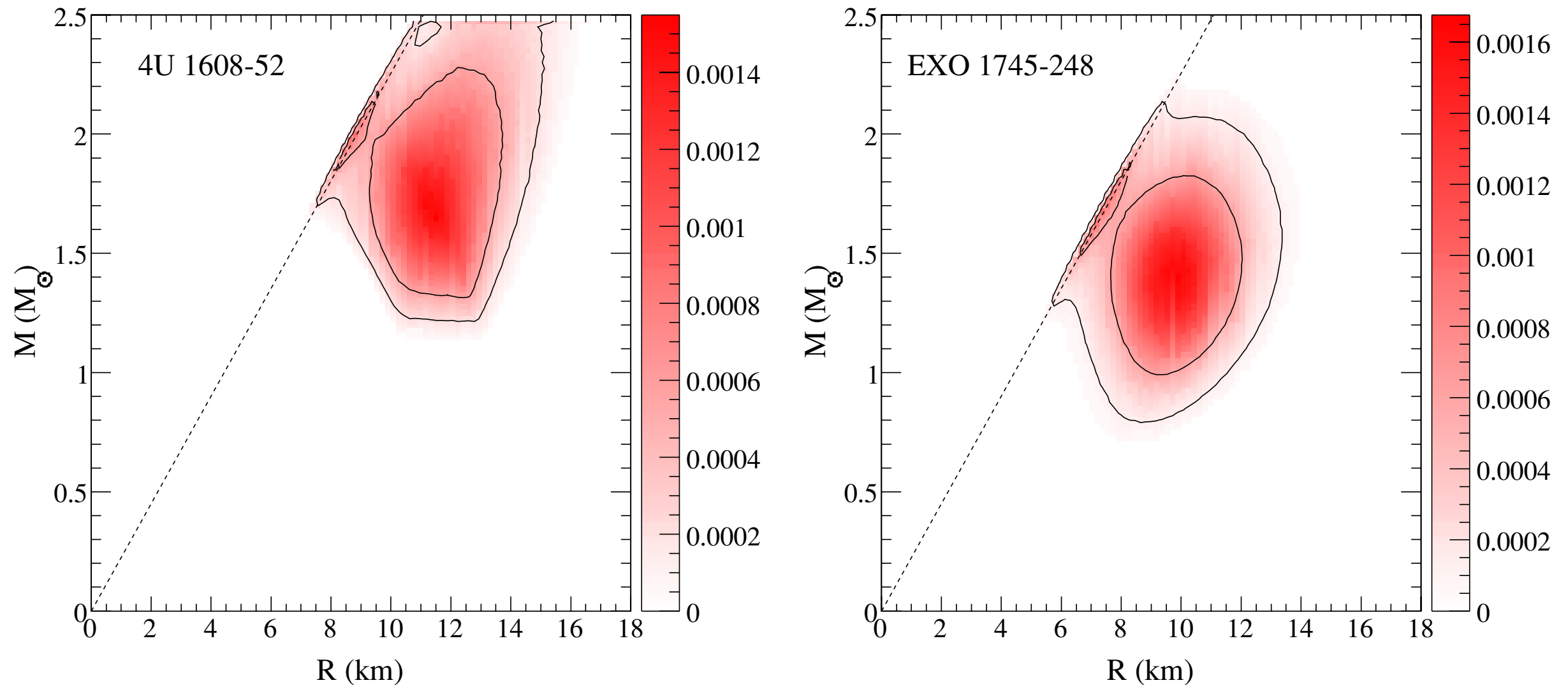
11%

視差による距離推定
よりは精度が良い？

Ozel, 2006

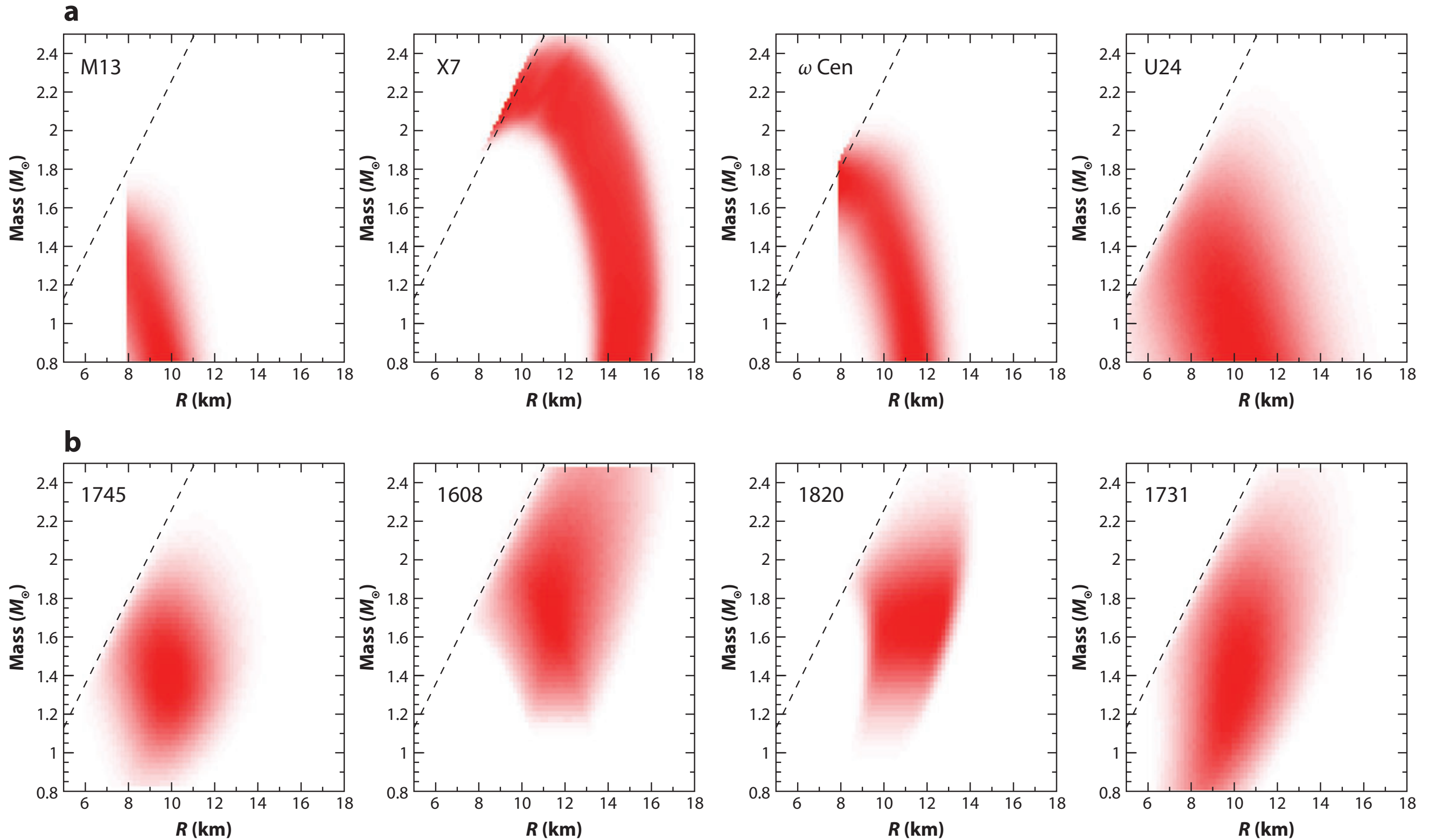
半径を測る: X線バーストを利用する

(Steiner, 2010)



X線バーストを用いた研究は、大有効面積(6000 cm^2) を誇る RXTE の近年の研究で成熟してきた。ただし、観測の不定性を評価する研究が必須。

中性子星の M-R 関係



その他の半径の推定方法 (1)

X 線バーストで検出される kHz QPO

(Bhattacharyya, 2010)

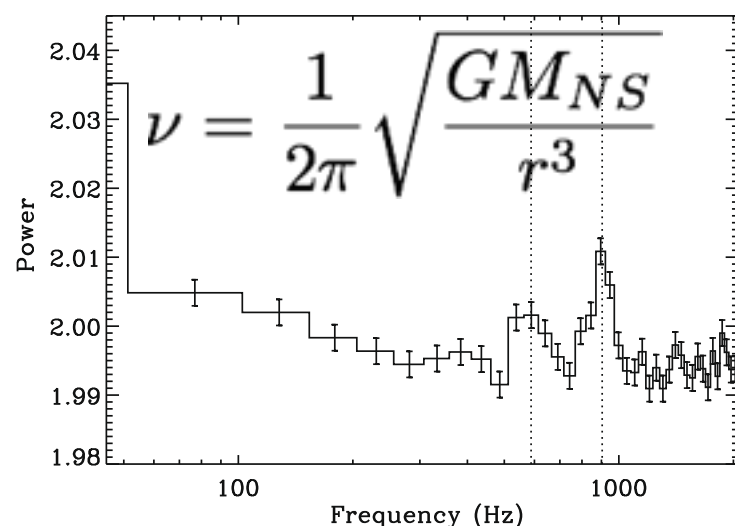


Fig. 11. Power spectrum of a neutron star LMXB showing a pair of kHz QPOs (see Section 3.3.1). The vertical dotted lines show the centroid frequencies of these QPOs.

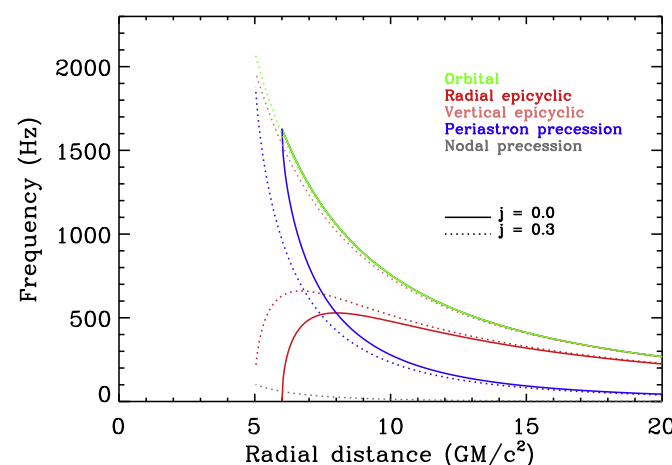
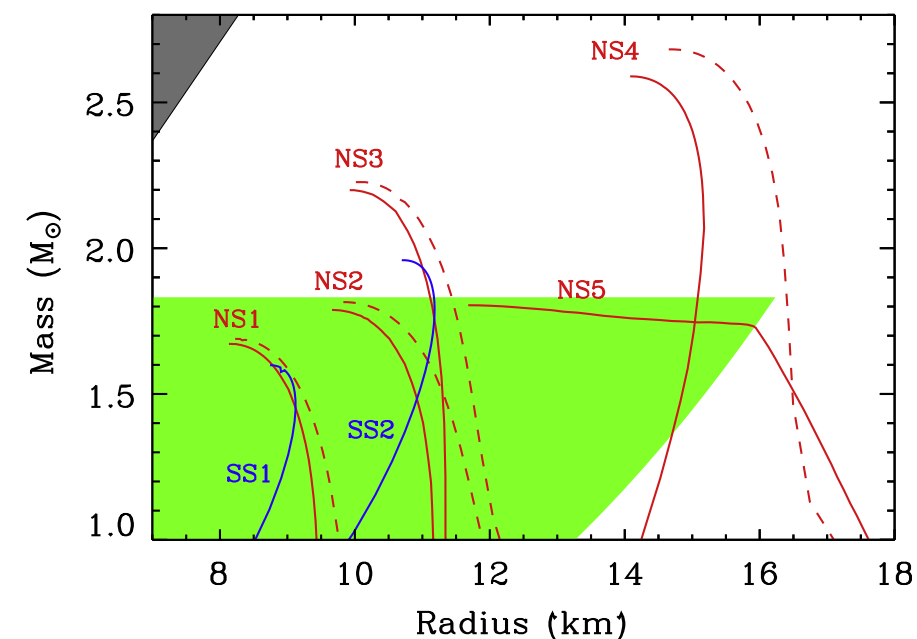
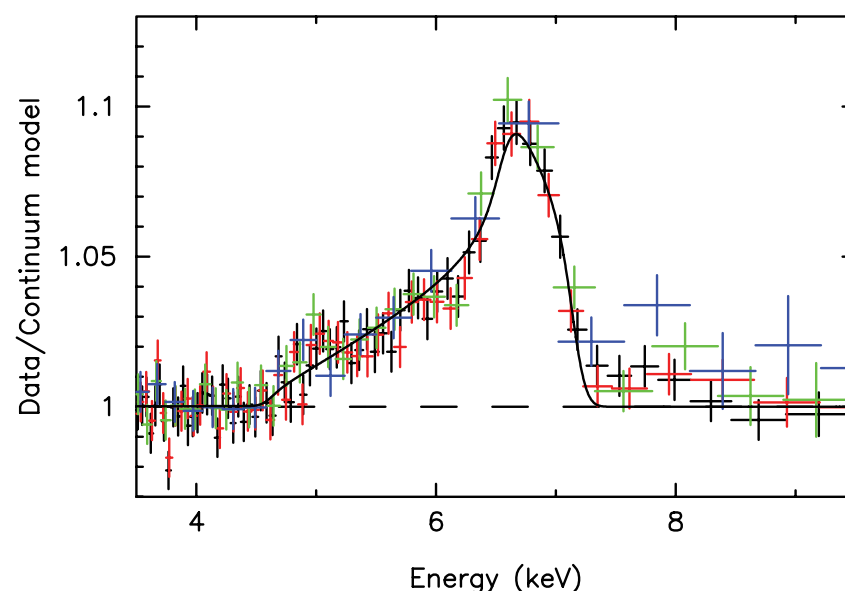
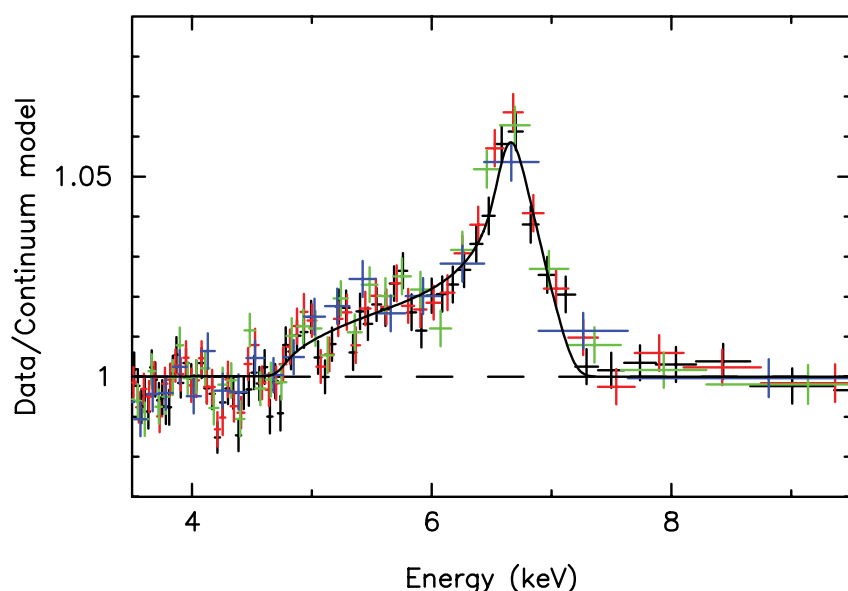


Fig. 12. This figure shows the radial profiles of various frequencies (color coded) of equatorial circular orbits in Kerr spacetime (see Section 3.3.1). Two angular momentum parameters ($j = 0.0$ (solid) and $j = 0.3$ (dotted)), and neutron star mass $= 1.35M_{\odot}$ are used. These frequencies may be useful to understand the kHz QPOs (see Section 3.3.1). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this paper.)

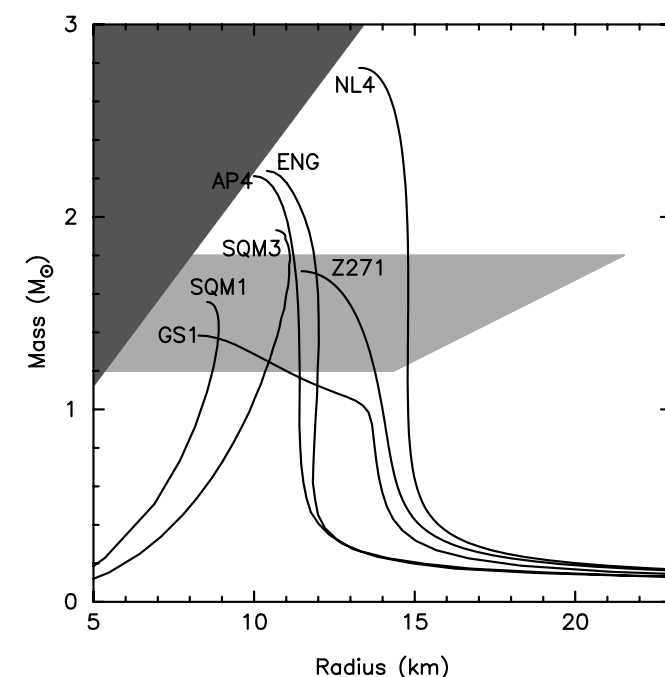


降着円盤の内側の鉄輝線の広がり

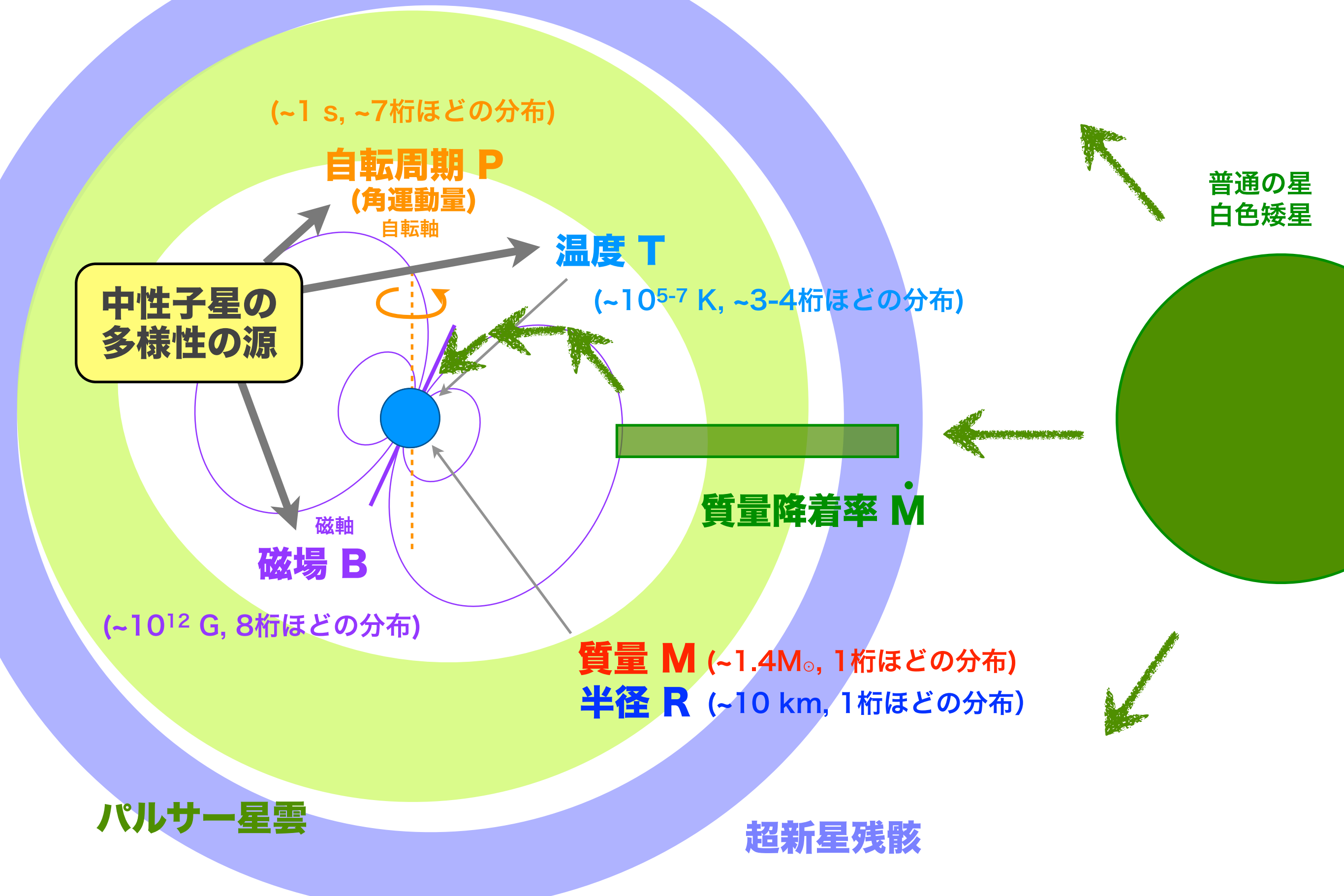
(Cackett, 2010)



Left: Fe line profile for Cyg X-2, excluding a central circular region of varying radius. Black: exclusion circle radius = 0 pixels, red: radius = 30 pixels, blue: radius = 60 pixels, green: radius = 90 pixels. The Fe K line profile remains consistent regardless of the extraction region used. Right: Fe line profile for Ser X-1 *Suzaku* observation. Only data from XIS 3 are shown. Colors denote the same size extraction regions as for Cyg X-2.



中性子星の物理量と多様性 (まとめ)



中性子星の物理量を測る

質量 M , 半径 R , 表面温度 T , 自転周期 P , 磁場 B

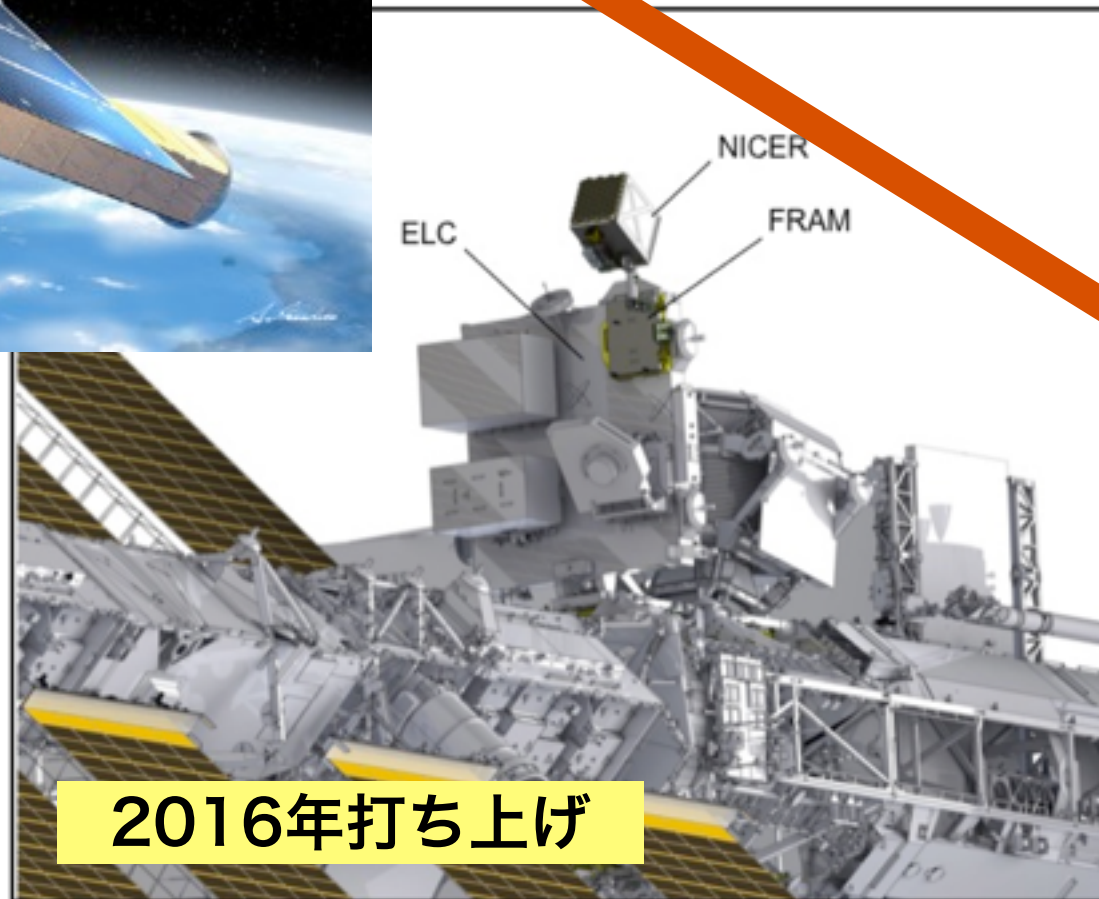
放射エネルギー源		周期 P	$B=10^{8-9}$	10^{11-13}	10^{14-15} G
熱	冷却は NS 内部状態に強く依存する	0.1~10 s	孤立中性子星 (M,B測定は難) R, T		
回転	銀河系に 2000個ほど発見	0.1-10 s ~1-10 ms	ミリ秒パルサー $(M), B$	電波パルサー $(M), B$	
重力	連星相手からの質量降着	$60-10^4$ s ~1-10 ms?	X線バースター M, R, T	X線パルサー M, B	長周期パルサー? $B?$
磁場	磁場エネルギーを解放? 新しい種族	2-10 s			マグネター T, B

質量 M と 半径 R の同時観測の例は少ない。
新しく見つかって来た中性子星を使った M-R 測定を狙う

X線の将来ミッション



ASTRO-H 衛星
(X線衛星 0.5-600 keV)



NICER
(2-10 keV, 大有効面積)

GEMS 衛星(計画中)
X線偏光の専門観測



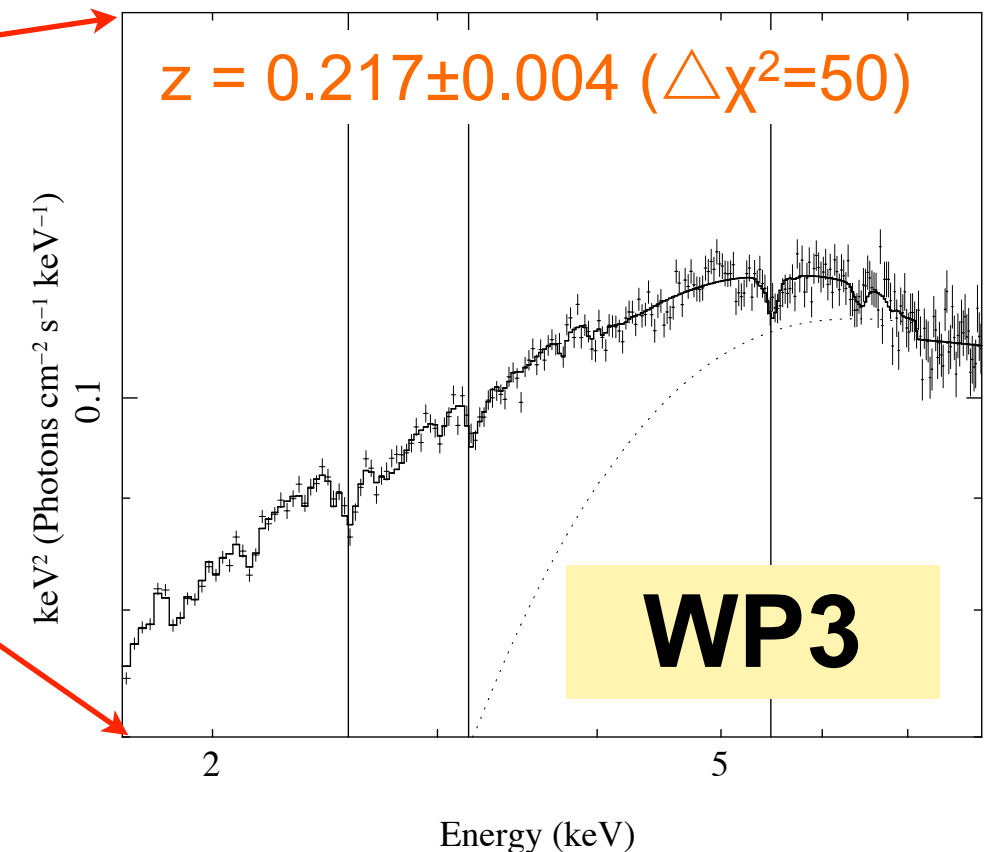
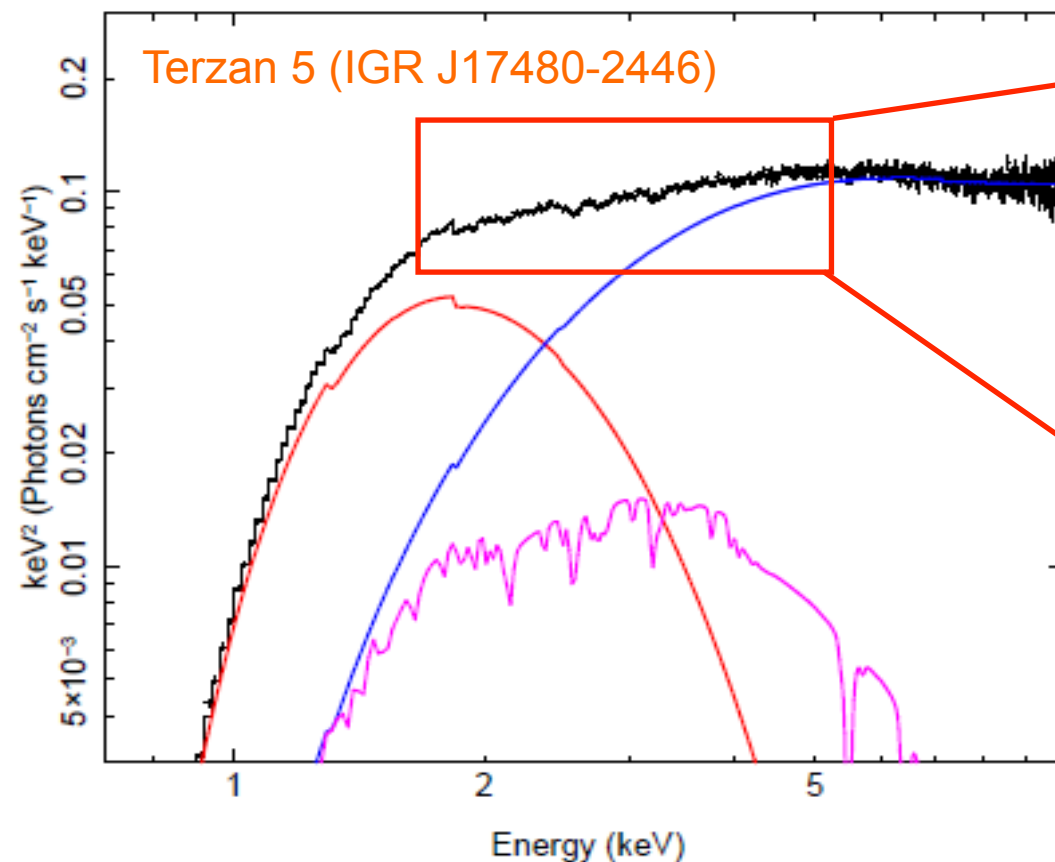
Gravitational Redshift: M/R (LMXB)



- **Measurement of redshifted narrow atomic features (WP3)**
 - direct M/R measurement; free from the uncertainty of the distance
- **Appeling but quite challenging. Requirement:**
 - metal is not completely ionized (<1.5 keV for Fe) under a low luminosity
 - not substantially broadened by thermal, magnetic or rotational effects
- **Terzan 5 (slow spin, low magnetic field? LMXB) in globular cluster**
 - Need a further feasibility study: confusion of X-ray sources in a globular cluster. Is there another appropriate target (e.g., face-on LMXB system)?

SXS 100 ks simulation

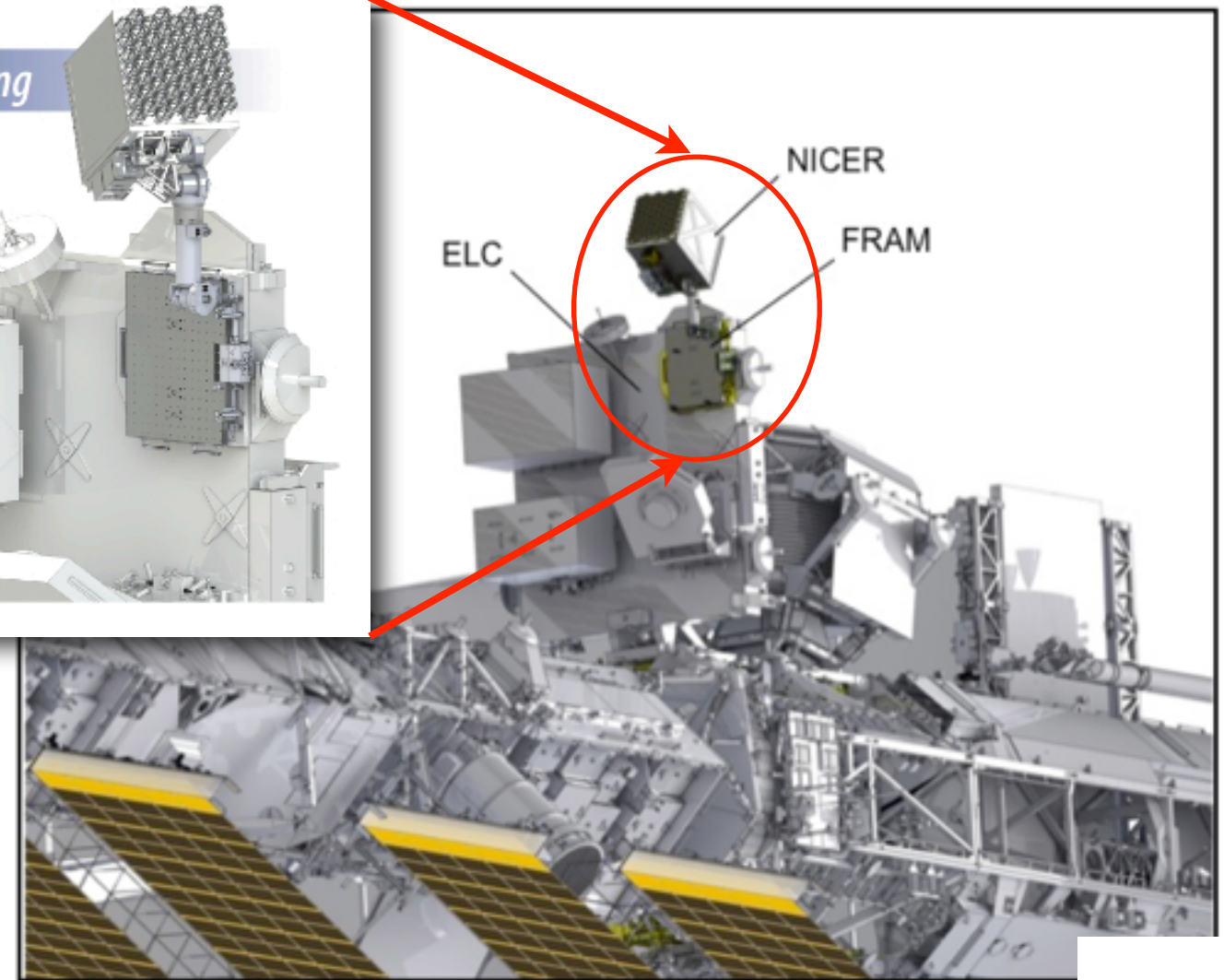
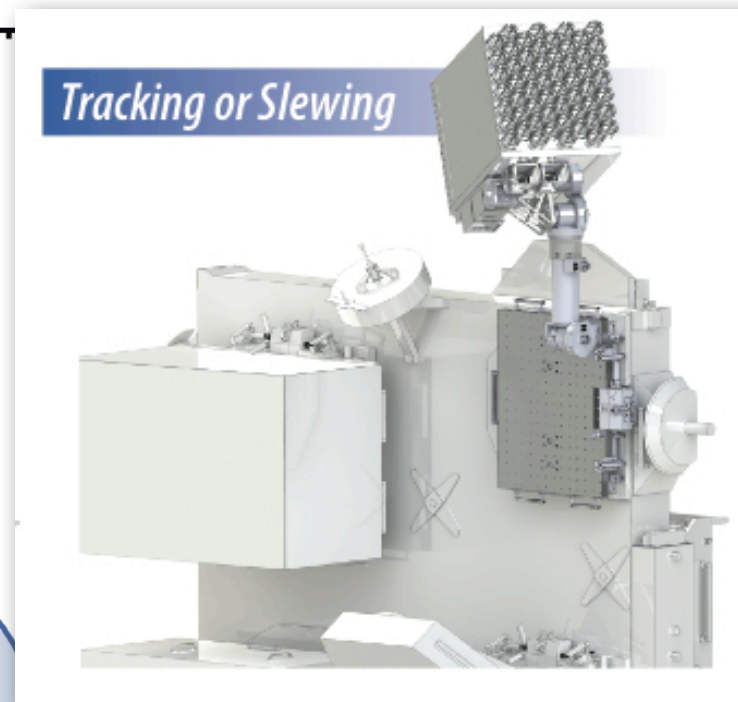
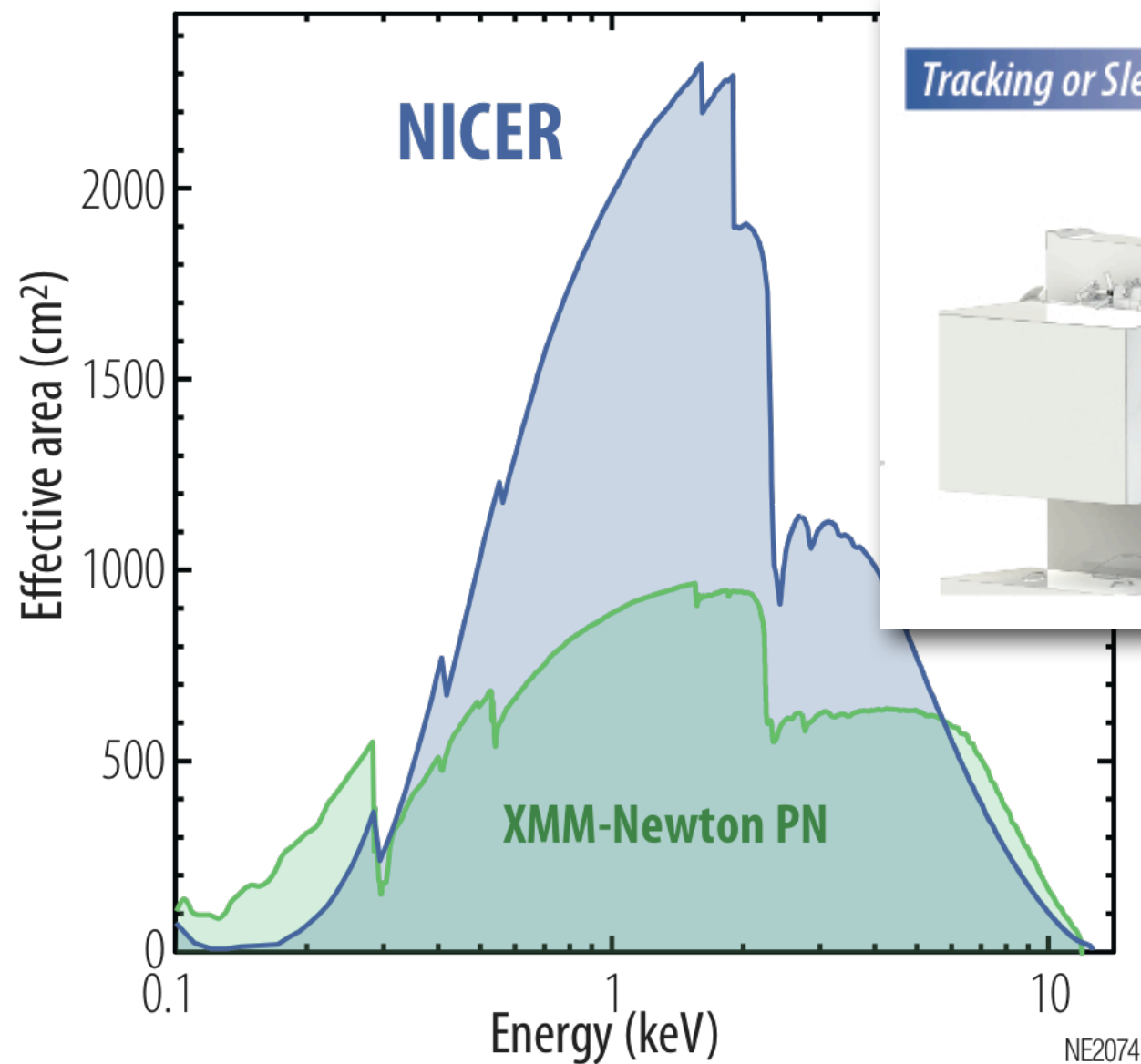
Absorptions at He-like Ar, Ca and Fe



中性子星の M-R を測る NICER 計画

Neutron star Interior Composition Explorer (NICER)

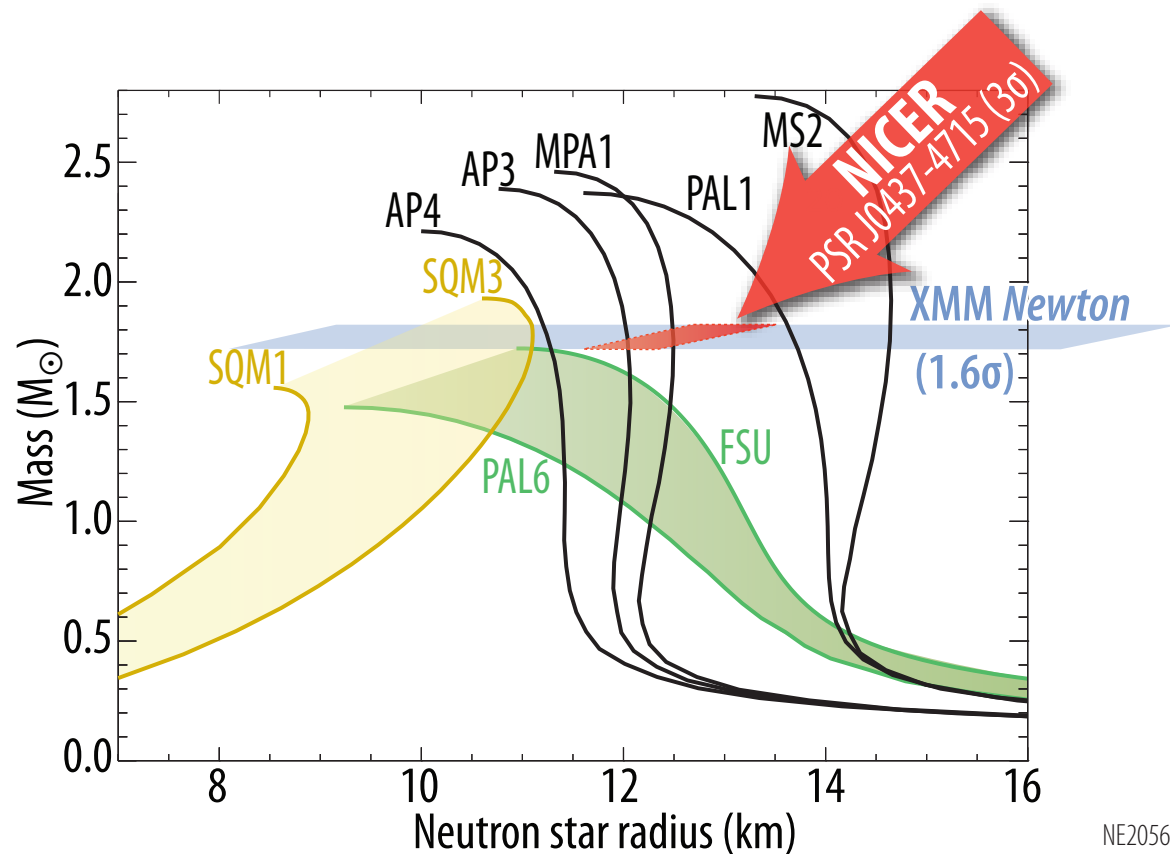
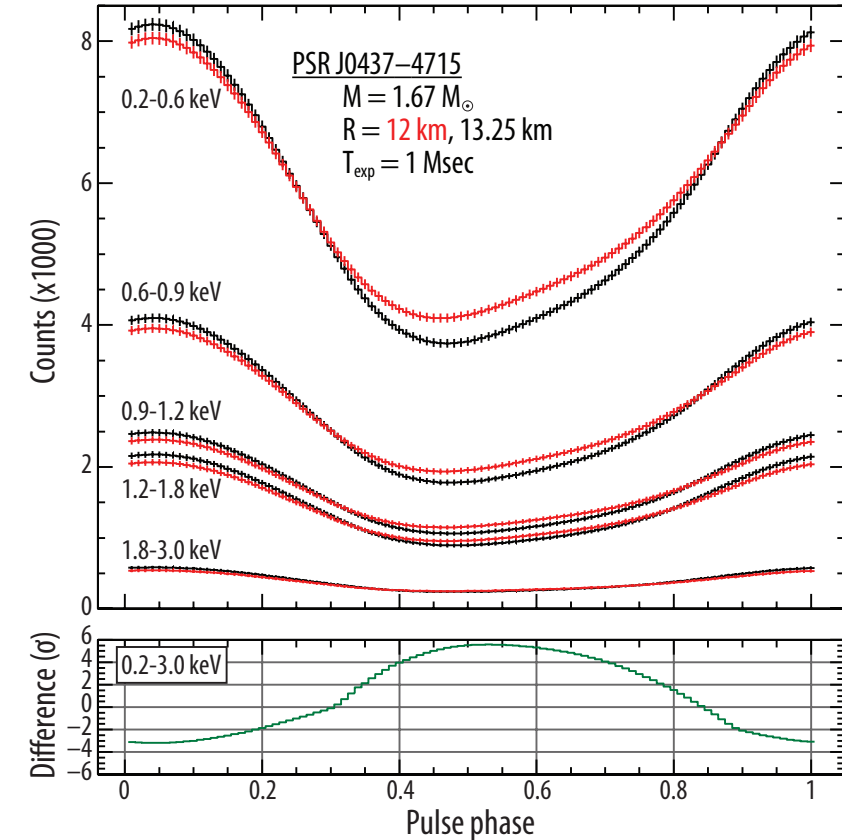
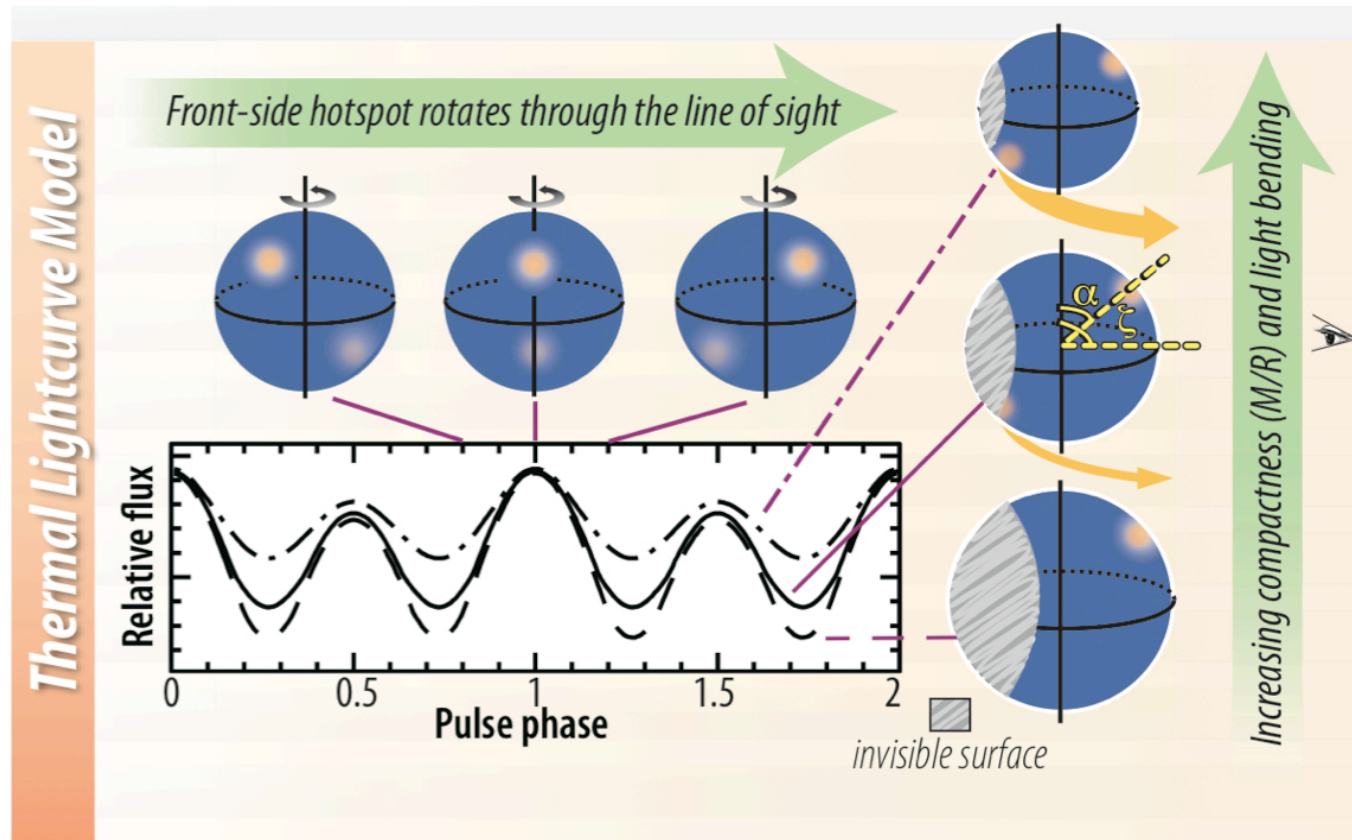
Approved as a NASA Explorer Mission of Opportunity



Gendreau, Arzoumanian, and Okajima et al. 2012, SPIE

- 56個の X 線集光系 + シリコンドリフト検出器。
- 2016 年に国際宇宙ステーション ISS に搭載予定。
- 0.2-10 keV の軟X線で過去最高の有効面積 (光子統計)を実現。
- NASA ゴダード宇宙飛行センターで集光系の開発を遂行中。

重力レンズ効果でコンパクト比 M/R を測る

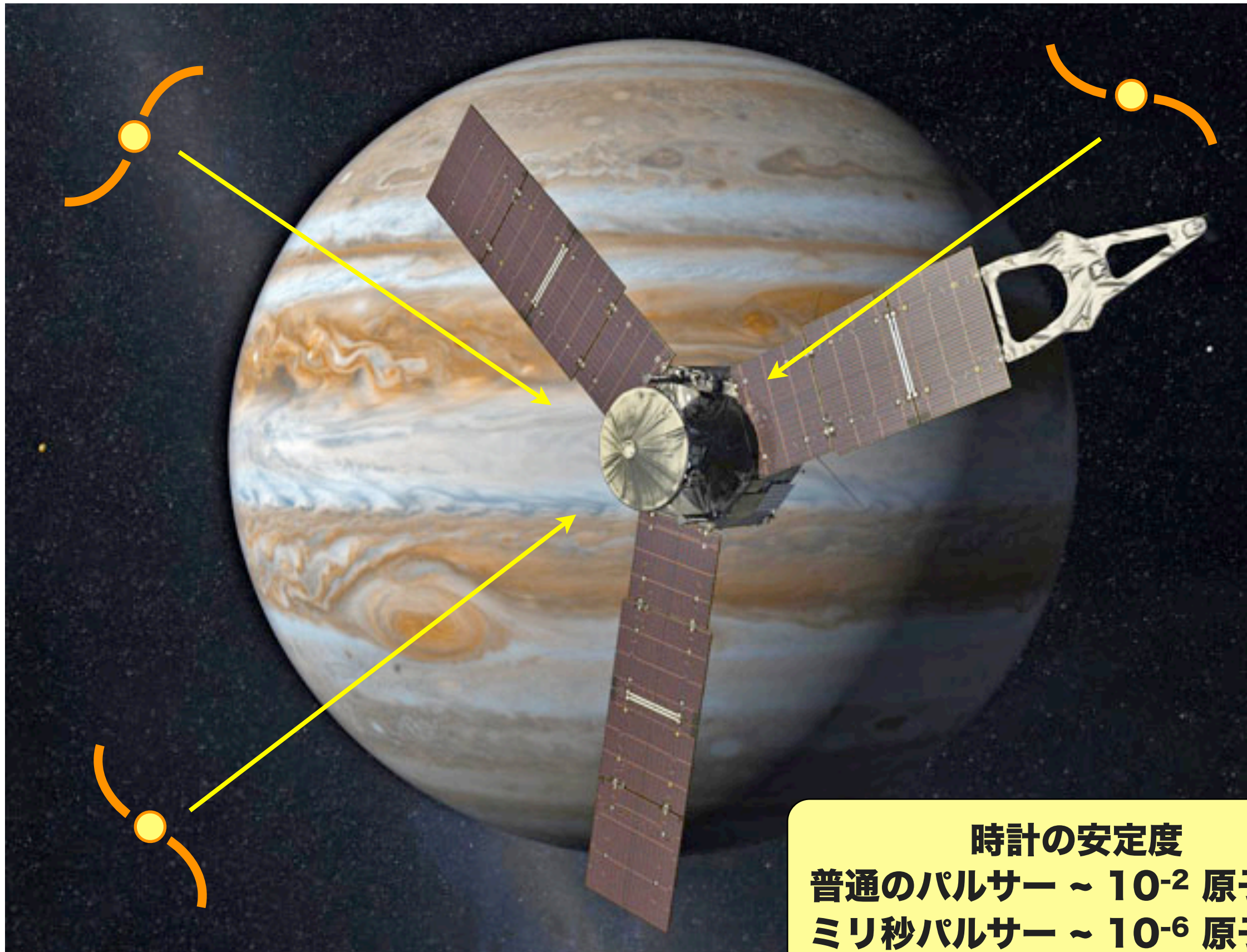


- 星表面のホットスポットからの熱放射の時間変動を解析し、重力レンズ効果を計測して、中性子星の状態方程式をかつてない精度で測定、決定することを狙う。

Gendreau, Arzoumanian, Okajima et al. 2012

NE2056

パルサーが深宇宙探査で GPS になる未来



まとめ

- 中性子星は、質量 M 、半径 R 、自転周期 P 、温度 T 、磁場強度 B という5つの基本パラメータをもつ。 M 、 R が $M \sim 1.4M_{\odot}$ と $R \sim 10 \text{ km}$ に集中するのに比べ、 P , T , B は幅広い桁で分布する。
- 観測された中性子星は、これらのパラメータの多様性に加え、星間物質、連星などの周辺環境の違いで、回転エネルギー、重力エネルギー、熱エネルギー、磁場エネルギーなど、異なるエネルギー源で多様な特徴をもつ。
- 質量 M と半径 R を決めるには、これらの多様性とそれに由来する測定の不定性を十分に見極めることが必要である。

- Andrew Lyne and Francis Graham-Smith, “Pulsar Astronomy”, *Cambridge Astrophysics*
- Stuart L. Shapiro, Saul A. Teukolsky, “Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars”, *Wiley*
- Peter Meszaros, “High-Energy Radiation from Magnetized Neutron Stars”
- Lyne and Graham-Smith, “Pulsar Astronomy”, *Cambridge Univ. Press*
- 柴崎徳明 「中性子とパルサー」 New Cosmos Series
- 柴田晋平 「宇宙の灯台 パルサー」
- 榎戸輝揚 「硬X線によるマグネター研究の進展」, 天文月報 2012年7月号