

X線による中性子星の観測

理化学研究所グローバル研究クラスタ研究顧問
牧島一夫

- § 1. 星の基本性質
- § 2. 白色矮星と中性子星
- § 3. 中性子星の観測
- § 4. 中性子星の質量と半径
- § 5. 中性子星の磁場
- § 6. マグネター
- § 7. 今後の見通し

§ 1. 星の基本性質

(1-1) 星とは何か

星とは、重力による内向き加速度 $g = -GM/R^2$ が、何らかの圧力 p による外向きの力と、安定に釣り合っている系。

- ・ $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$ = 重力定数; M = 質量; R = 半径; V = 体積
- ・ 自己重力エネルギー: $\Phi = -(\text{数係数}) \times GM^2/R$ (一様なら 3/5)
- ・ 内部エネルギー: $U = (\text{数係数}) \times pV$ (p は平均圧力)
- ・ ビリアル定理 ($\ni \Phi + U$ の極小化 $\ni |\Phi|$ と U の概略等分配)

$$GM^2/R = (\text{数係数}) \times pV$$

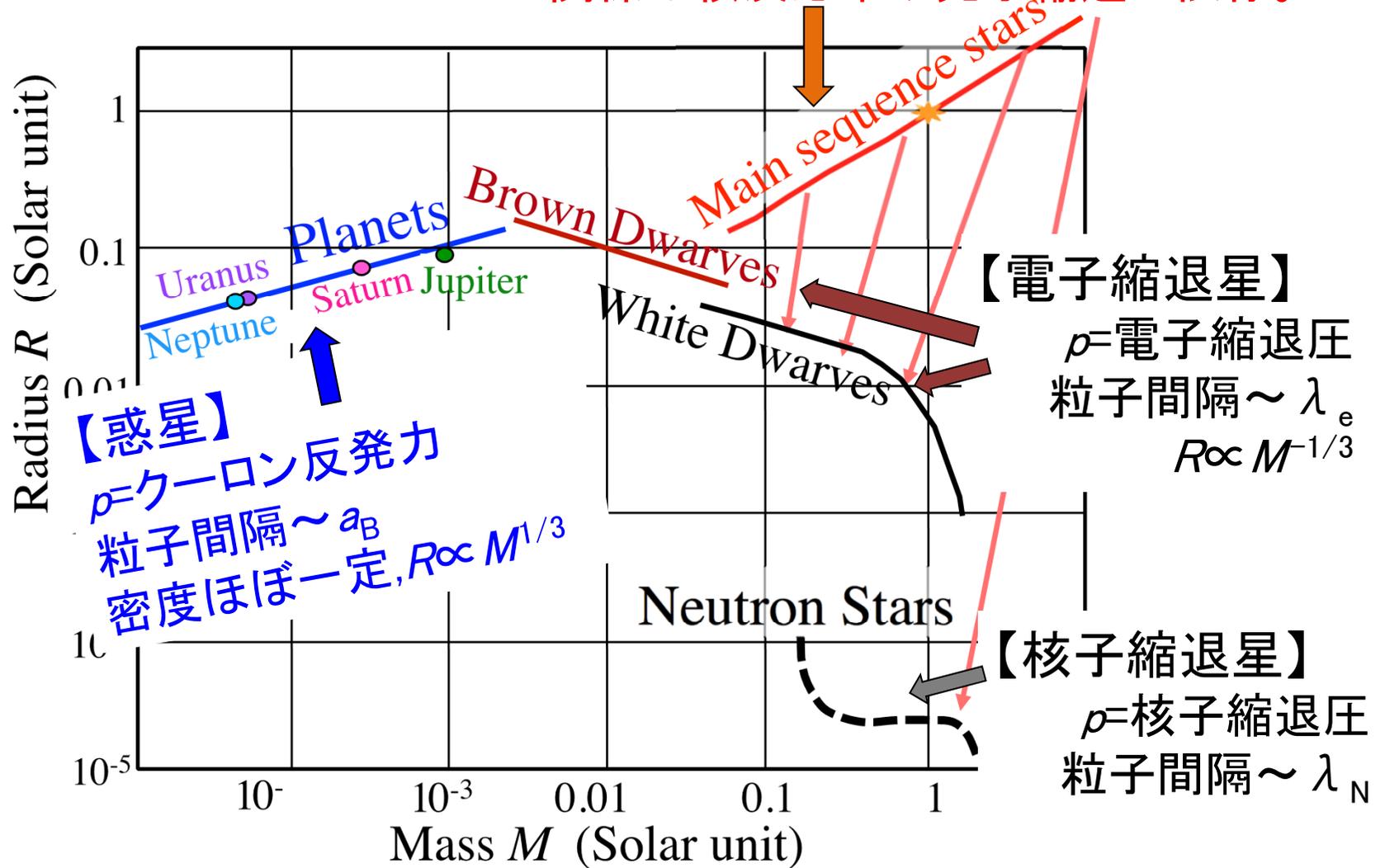
- ・ 左辺は普遍的だが、右辺は状態方程式 EOS $p = p(\rho)$ に依存。EOS の違いで、様々な種類の星が存在する。

(1-2) いろいろ いろいろな星の例

【主系列星 = 水素燃焼中】

$p = nkT$ (古典的ガス圧)

R と M の関係は核反応率や光子輸送に依存。



(1-3) 恒星の不思議な性質

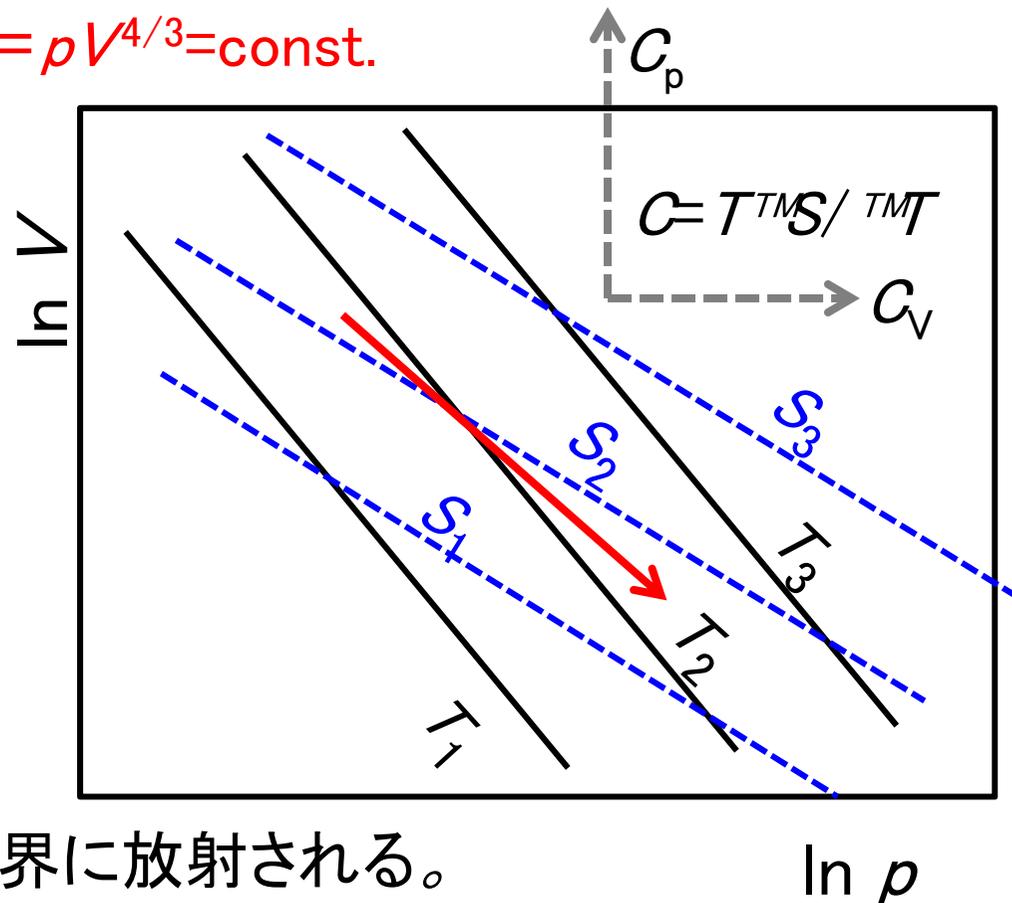
$$GM^2/R = (\text{数係数}) \times pV$$

$M = \text{const.}$ の条件下で、 $pVR = pV^{4/3} = \text{const.}$

等温変化 $pV = \text{const.}$

断熱変化 $pV^{5/3} = \text{const.}$

- ・星は自己重力で→に進化。
- ・星が外界へ放射すると星はより**高温高密度**に。**比熱が負**。
- ・重力エネルギーの解放 $|\Delta\Phi|$ の半分が内部エネルギー ΔU として蓄積され、残り半分が外界に放射される。
- ・星と外界は、ますます熱平衡から離れる向きに進む。
- ・星のエントロピーは自発的に減少。星+外界の S は増加。



(1-4) 恒星の進化

再び $GM^2/R \sim pV$ その両辺に m_p/M を掛けると

$$Gm_p M/R \sim Vp (m_p/M) = Vn \overset{M}{m_p} kT/M = kT$$

$$\cdot kT \sim Gm_p M/R = 2.0 \times (M/M_\odot)(R_\odot/R) \text{ keV}$$

より正確に太陽中心では、 $kT=1.34 \text{ keV}$

- ・粒子の熱エネルギー $\propto M/R$
- ・電子のFermiエネルギー $\propto n_e^{2/3} \propto M^{2/3}/R^2$
- ・進化して中心部が縮むにつれ、どこかで、
熱エネルギー < Fermiエネルギーで縮退。
- ・軽い星ほど縮退しやすい。

(1-5) フェルミエネルギーと縮退圧

- ・縮退したフェルミオンの数密度 n

- ・平均粒子間隔 $d \sim n^{-1/3}$

- ・不確定性関係よりフェルミ運動量

$$q_F \sim h/d \sim hn^{1/3}$$

- ・非相対論的フェルミエネルギー

$$\varepsilon_F = q_F^2/2m \sim (h^2/2m)n^{2/3}$$

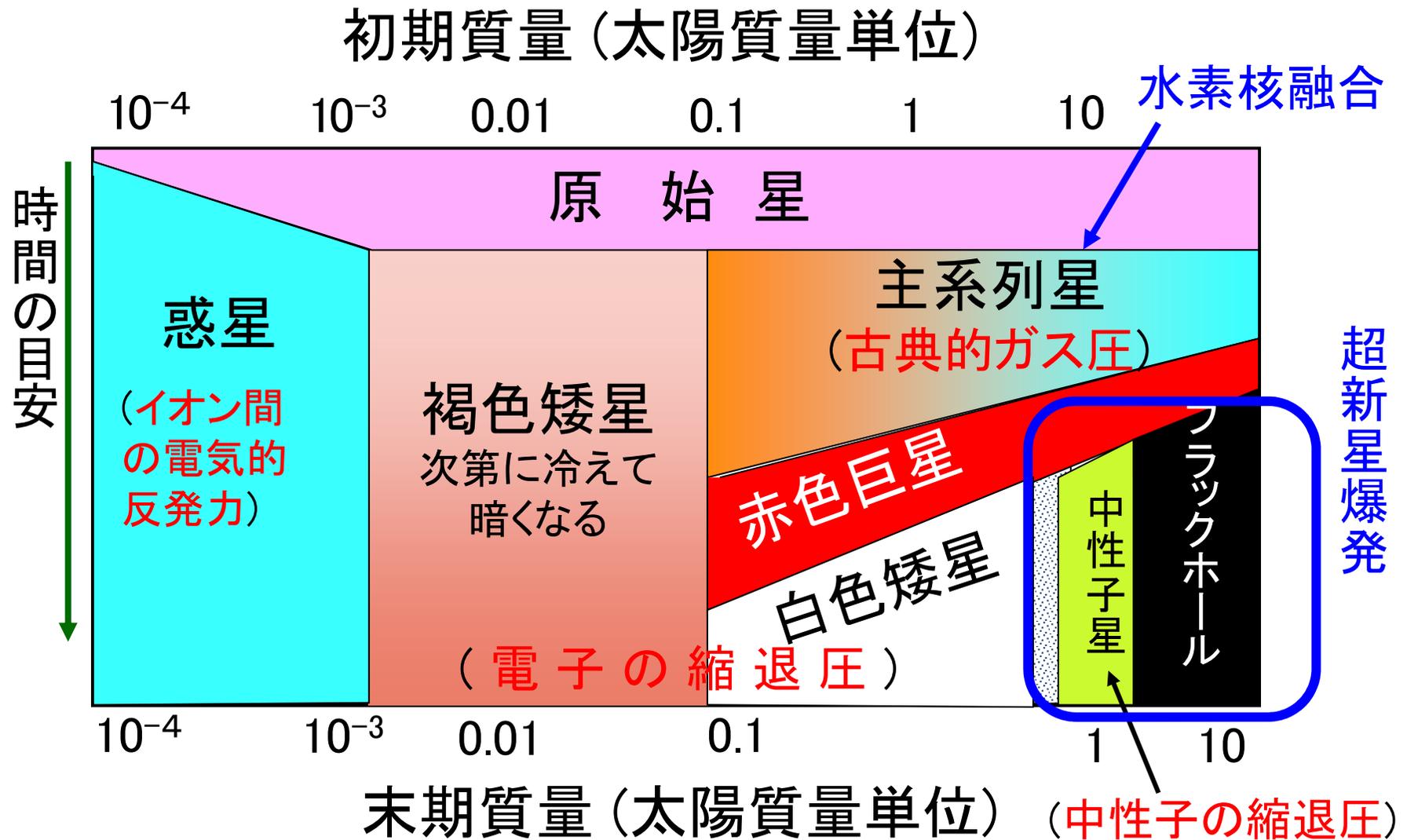
- ・非相対論的縮退圧

$$p = (\gamma - 1)u = (2/3)(3/5)n\varepsilon_F \propto n^{5/3}$$

- ・超相対論的な場合は、

$$\varepsilon_F = cq_F \propto n^{1/3}, \quad p \propto n^{4/3}$$

(1-6) 星の進化・終末の概念図



§ 2. 白色矮星と中性子星

(2-1) フェルミ縮退圧で支えられた星

三たび $GM^2/R \sim pV$

縮退圧 $p \propto n^{5/3} \propto (M/V)^{5/3}$ が卓越するなら

$$M^2/R \propto (M/V)^{5/3} V = M^{5/3} V^{-2/3} \propto M^{5/3} R^{-2}$$

$R \propto M^{-1/3}$; 重くなるほど重力が増加するので、密度を高めて縮退圧を増やす必要がある。

電子縮退で支えられた星 = 白色矮星

$$R = (\text{数係数}) \cdot \lambda_e \cdot (M/m_p)^{-1/3} \alpha_G^{-1}$$

$$\lambda_e = h/m_e c = \text{電子コンプトン波長} = 2.4 \times 10^{-12} \text{ m}$$

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

(2-2) 白色矮星(WD)

WDの半径は、計算と観測から数値的に

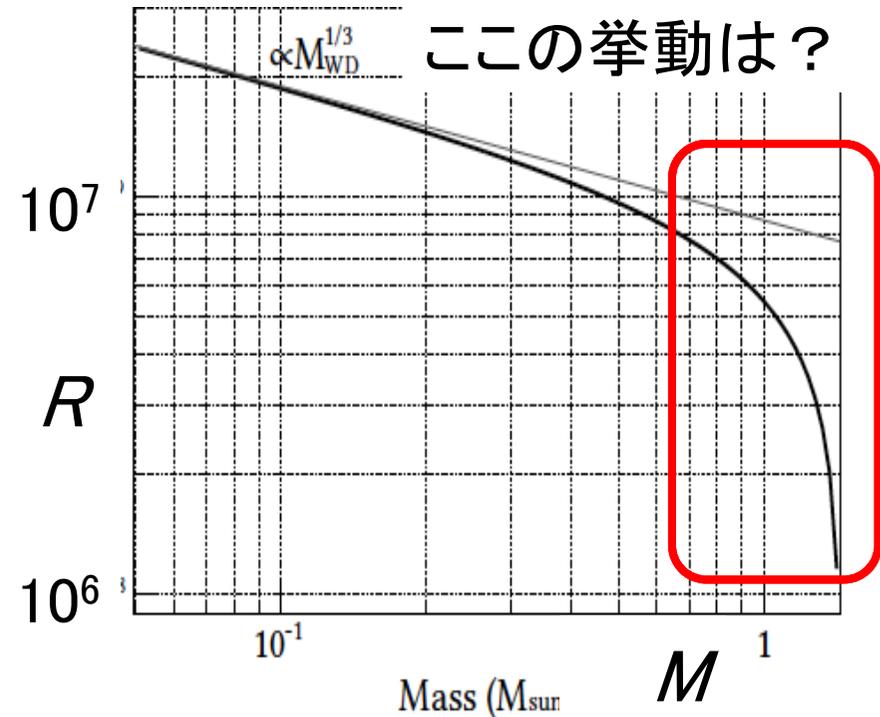
$$R = 7.3e6 (M/M_{\odot})^{-1/3} (f_b/2)^{-5/3} \text{ m}$$
$$= 0.011 R_{\odot} (\dots)(\dots) \sim \text{地球サイズ}$$

$f_b = (\text{核子数} / \text{電子数})$

太陽の平均比重は1.45、
粒子間隔はBohr半径 a_B
程度。たほうでWDでは粒
子間隔 $\sim \lambda_e$ である。

$$\lambda_e / a_B = 2\pi \alpha = 0.046$$

$$\alpha = e^2 / 2 \varepsilon_0 hc = 1/137$$



(2-3) 縮退星の上限質量

四たび $GM^2/R \sim pV$

- ・縮退電子が超相対論的なら、 $p \propto n^{4/3} \propto (M/V)^{4/3}$

$$M^2/R \propto (M/V)^{4/3} V = M^{4/3} V^{-1/3} \propto M^{4/3} R^{-1}$$

R が消え $M^{-1/3}$ が一意に決まる \rightarrow 上限質量

- ・WDの上限質量 (Chandrasekhar mass)は、
詳しい計算では、

$$M = (\text{数係数}) \times m_p \alpha_G^{-3/2} (f_b/2)^{-2} = 1.47 M_\odot$$

- ・褐色矮星(軽過ぎて水素核融合を起こせない星)は $f_b = 1.2$ (H+Heの宇宙組成)なので上限質量は $\sim 4M_\odot$ と計算されるが、実際は $> 0.08M_\odot$ では核融合が起き、星になる。

(2-4) 中性子星の概略

- WD矮星では(復習)

$$R_{\text{WD}} = (\text{数係数}) \lambda_e (M/m_p)^{-1/3} \alpha_G^{-1} (f_b/2)^{-5/3}$$

- 初期質量 $> 10M_{\odot}$ の星では、コアがChandrasekhar質量より重く電子縮退圧では支えられない。収縮で高密度 ($> 10^{11} \text{ kg/m}^3$) になり、電子の ε_F が $\sim \text{MeV}$ を超え、



が右方向へのみ進行、中性子化が起き、超新星爆発。

- 中性子星の縮退圧で支えられた**中性子星(NS)**ができる。

- 半径はWDの $\lambda_e \propto 1/m_e$ を核子コンプトン波長 $\lambda_N \propto 1/m_N$ で置き換え $f_b=1$ とすればよいので、

$$R_{\text{NS}}/R_{\text{WD}} = 2^{5/3} (m_e/m_N) (M_{\text{NS}}/M_{\text{WD}})^{-1/3} \sim 1/600 \sim \text{恒星の} 10^{-5}$$

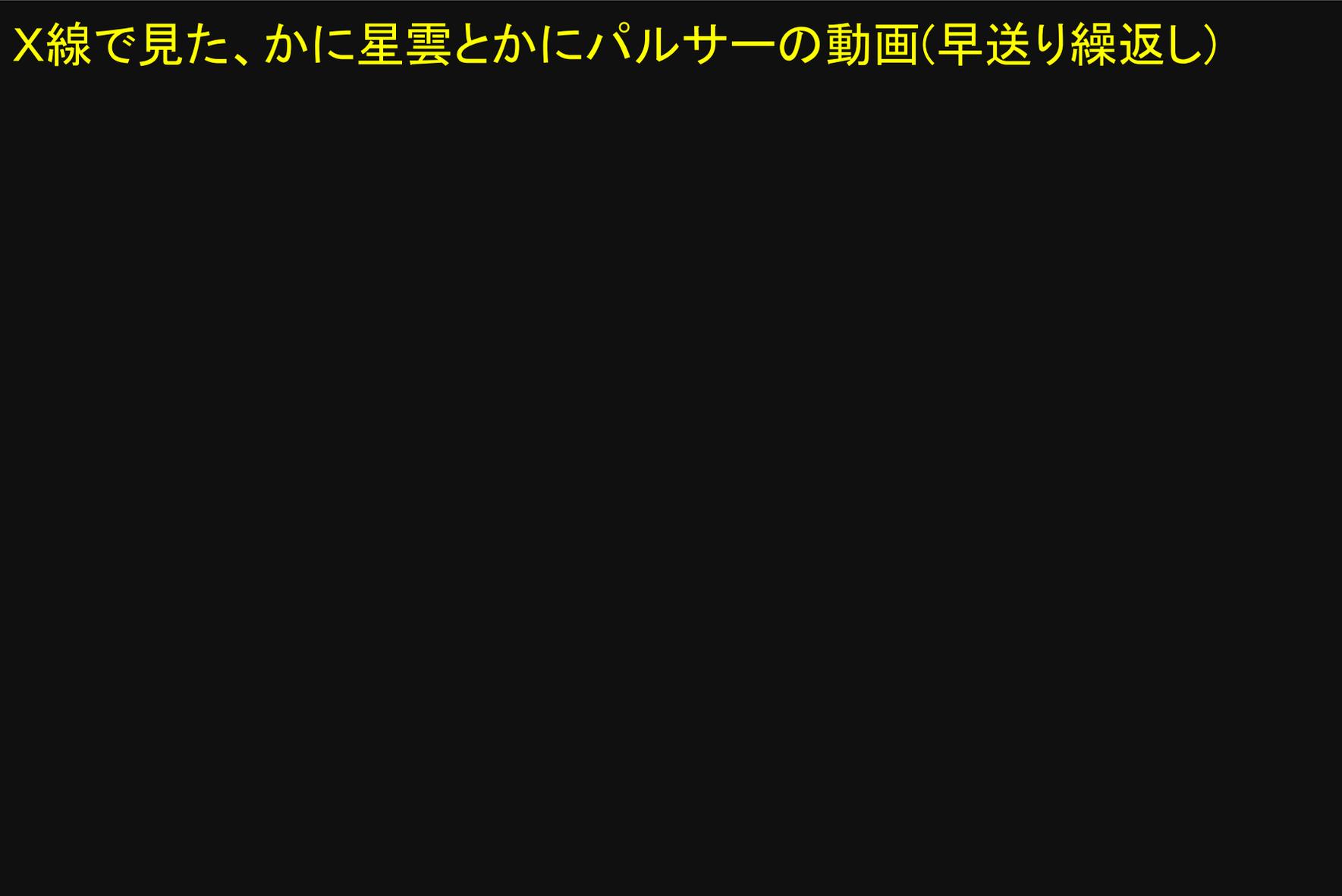
$$R_{\text{WD}} \sim 7e6 \text{ m とすれば、} R_{\text{NS}} \sim 11 \text{ km}$$

「NSとWDの半径の比は、電子と核子の質量比にほぼ一致」

「恒星とNSの半径の比は、原子と原子核の半径比にほぼ一致」

(2-5) 中性子星の実例

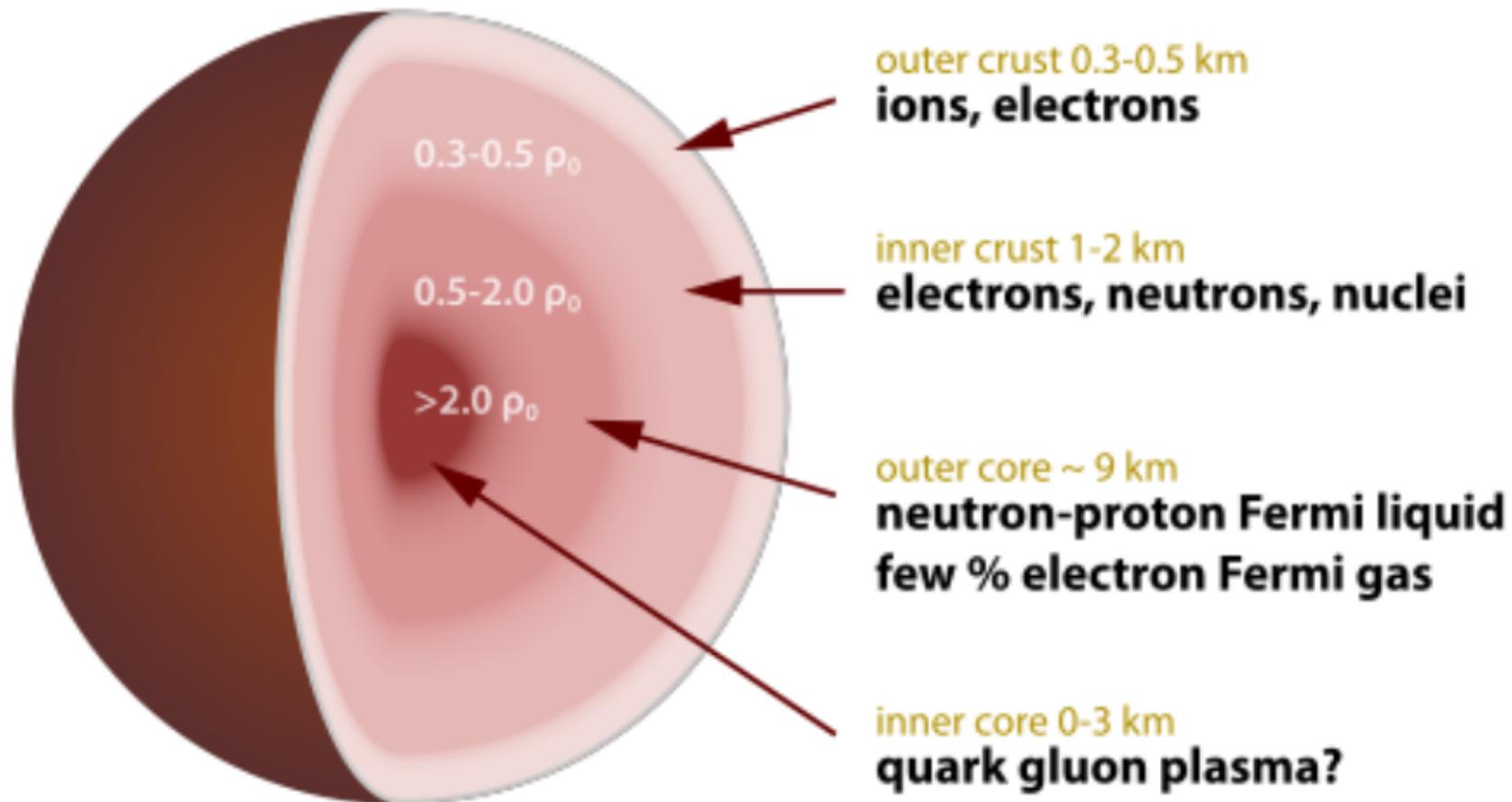
X線で見た、かに星雲とかにパルサーの動画(早送り繰返し)



(2-6) 中性子星の基本性質

- ・半径: およそ $10 \sim 12$ km
- ・質量: およそ $1.4 \pm 0.4 M_{\odot}$
- ・上限質量: 自由フェルミ気体としての性質に加え、一般相対論と核力が効く。おおまかに $\sim 3 M_{\odot}$
- ・密度: 通常物質より15桁も高く、
平均で $\rho = 7e17 (M/1.4M_{\odot})(R/10\text{km})^{-3} \text{ kg/m}^3$
原子核核密度 $\rho_0 = 2.3e17 \text{ kg/m}^3$ を超える。
- ・自転周期: $1.5 \text{ ms} \sim 10^4 \text{ s}$ (周期 $< 0.5 \text{ ms}$ では破壊)
e.g., 約1ヶ月で自転する太陽をの半径を、約5桁縮め
10 kmにすれば、自転周期は10桁短くなり $\sim 0.5 \text{ ms}$
- ・磁場: $10^4 \sim 10^{11} \text{ T}$ ($10^8 \sim 10^{15} \text{ T}$)
e.g., 太陽を縮めNSにすれば、およそ0.01Tの太陽磁場
は磁束の保存で10桁も増え、 $\sim 10^8 \text{ T}$ に。

(2-7) 中性子星の内部構造



(2-8) 恒星、白色矮星、中性子星

	重力エネルギー	原子核エネルギー	比
恒星	$\sim \text{keV}$	$\sim \text{MeV}$	$1e^{-3}$
白色矮星	$\sim 0.1 \text{ MeV}$		~ 0.1
中性子星	$\sim 200 \text{ MeV}$		$1e^2$

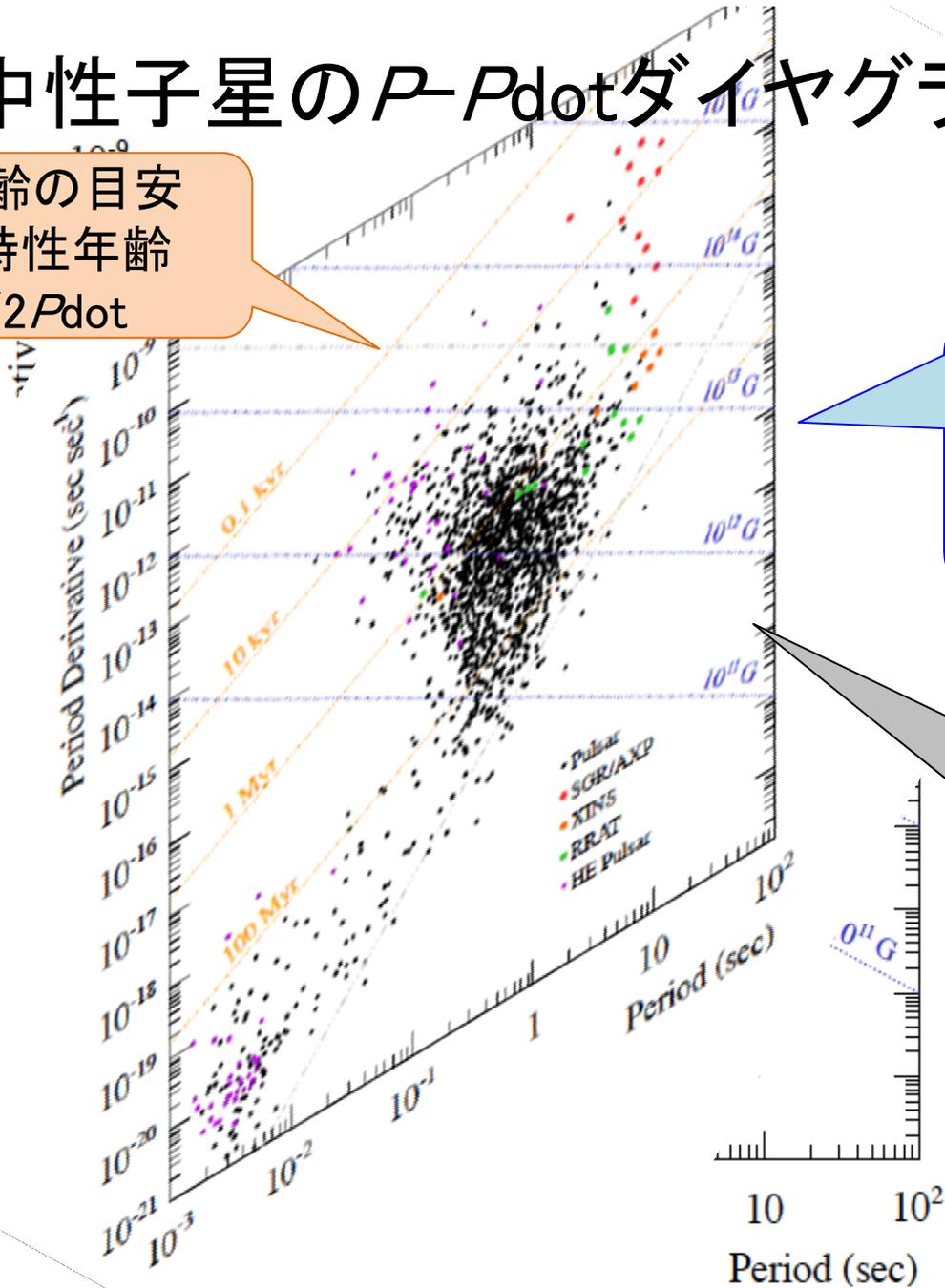
§ 3. 中性子星の観測

(3-1) 中性子星の未解決課題

- ・NSはいかに形成されるか。超新星爆発の他に、降着WDの重力崩壊も？
- ・単独NSと連星中のNSは、同じ過程でできたのか？
- ・なぜ連星をなすマグネターが発見されないのか？
- ・なぜNSの質量は、 $1.4 M_{\odot}$ 近傍に揃っているのか？
- ・原子核のEOSをどうすれば特定できるか。半径と質量、他に？
- ・NSの磁場 B は、なぜ7桁もばらつき、NSの形成にどう関係するのか？
- ・磁場のばらつきの、どこまでが先天的で、どこからが後天的か？
- ・この強い磁場は、いかに保持されるか。電磁石か永久磁石か？
- ・NSではどこまで粒子加速が起きているか？
- ・「陽電子異常」はパルサー起源か？
- ・重力波の検出からNSに関して何がわかるか？
- ・ M, R, B , 自転周期 P 以外の物理量が測定できるか？

(3-2) 中性子星の P - \dot{P} ダイアグラム

系の年齢の目安
となる、特性年齢
 $\tau_c = P/2\dot{P}$

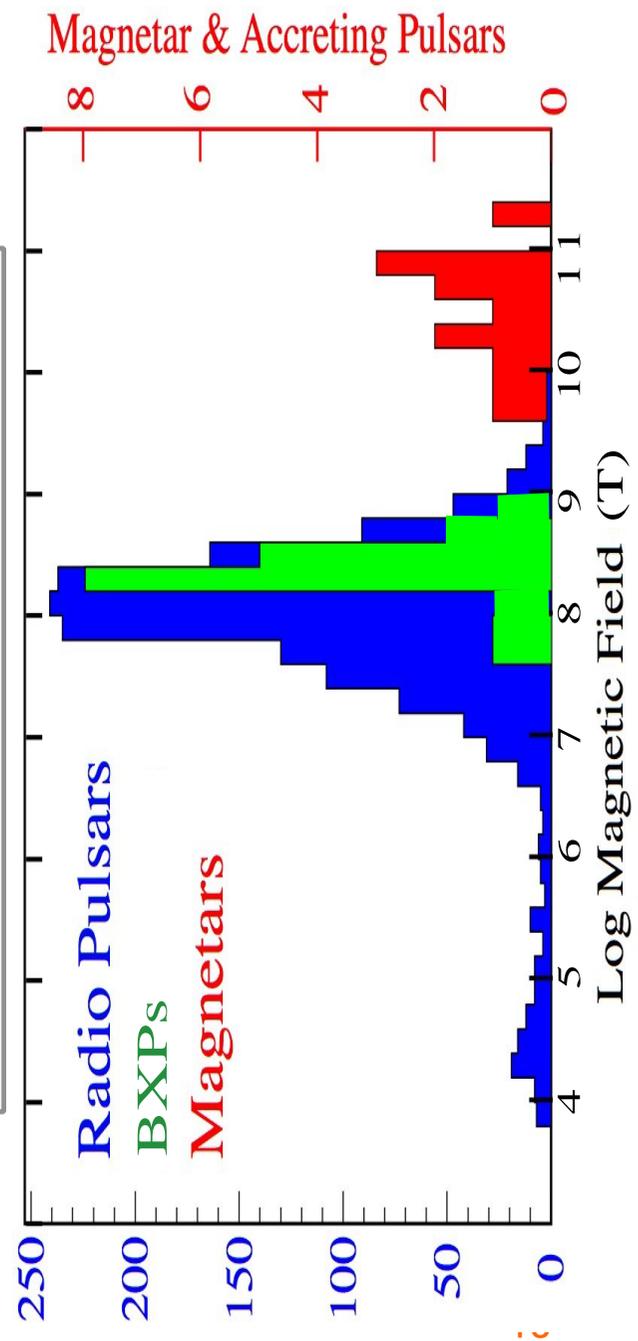
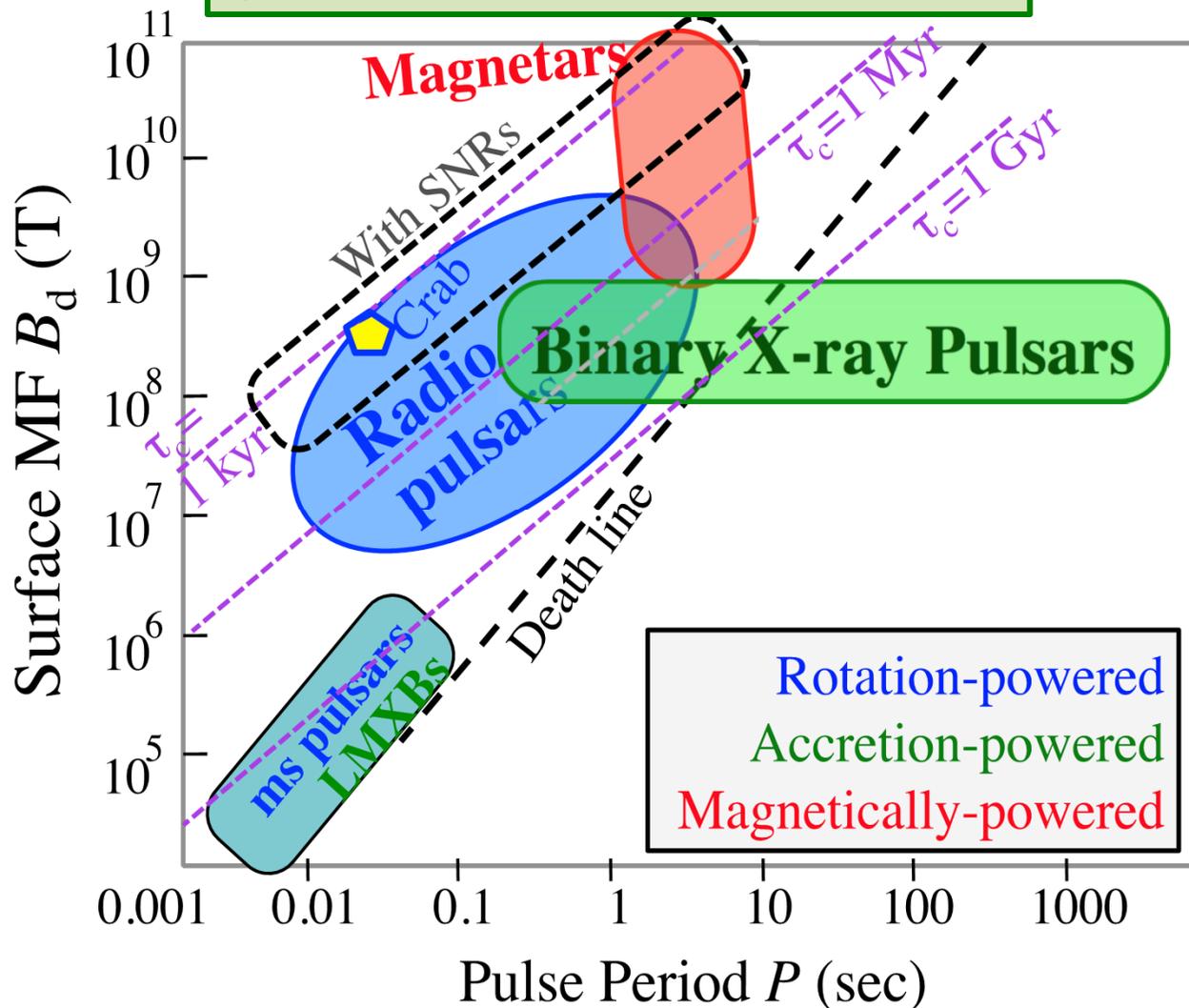


磁気双極子放射で
スピンドウンすると
仮定して求めた表
面磁場強度。

Death line. この
右側では放射
効率が低い。

(3-3) P - B ダイアグラム

(P , $P\dot{}$)図では表現できなかった降着型NSも示すことができる



(3-4) NSの分類

周期 P 、質量 M 、半径 R 、表面温度 T

Energy Source	$B=10^{4-5} T$	$B=10^{6-9}$	$B=10^{10-11}$
内部エネルギー	孤立中性子星 $(P), T$	--	--
回転エネルギー	ミリ秒 パルサー P, M, B	電波 パルサー P, M, B	--
降着(重力) エネルギー	X線 バースター $(P), (M), R, T$	連星X線 パルサー-(BXP) $P, M, B, (R)$	一群の長周期 BXP?
磁気エネルギー	--	CCO (Central Compact Objects)?	マグネター P, B, T

(3-5) 回転駆動NS

NSの自転エネルギーは

$$E_{\text{rot}} = \frac{I}{2} \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2 = 2.0 \times 10^{40} I_{38} \left(\frac{P}{0.3\text{s}} \right)^{-2} \text{ J}$$

慣性モーメントin
 10^{38} kg m^2

この自転エネルギーが消費されると \dot{P} が発生し、光度は

$$L_{\text{rot}} = -\frac{dE}{dt} = \frac{(2\pi)^2 I}{P^3} \dot{P} = 1.5 \times 10^{26} I_{38} \left(\frac{P}{0.3\text{s}} \right)^{-3} \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15}\text{s/s}} \right) \text{ W}$$

となる。それを磁気双極子放射の理論的光度

$$L_{\text{M2}} = \frac{(2\pi/3) (B_d R^3 \sin \theta)^2}{c^3 \mu_0} \left(\frac{2\pi}{P} \right)^4$$

$2\pi B_d R^3 =$ 磁気双極子

に等しいと置くと、NS表面での双極子磁場強度が求まる；

$$B_d \sin \theta = 0.32 \times 10^8 \left(\frac{P}{0.3\text{s}} \right)^{1/2} \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15}\text{s/s}} \right)^{1/2} \text{ T}$$

(3-6) 降着駆動NS

NSの重力ポテンシャルは、 ~ 200 MeV/nucleon. 合計 ΔM の物質が降着すると、解放される重力エネルギーは

$$E_{\text{grav}} = G \frac{M_{\text{NS}} \Delta M}{R_{\text{NS}}} = 3.4 \times 10^{42} \left(\frac{M_{\text{NS}}}{1.4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{R_{\text{NS}}}{11 \text{ km}} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta M}{10^{-4} M_{\odot}} \right) \text{ J}$$

質量降着率を \dot{M} とすれば、光度は

$$L_{\text{grav}} = 1.7 \times 10^{28} \dot{M} / \left(1 \times 10^{12} \text{ kg s}^{-1} \right) \text{ W}$$

トムソン散乱
の断面積

しかし降着率には、放射圧と重力が釣り合うEddington限界は超えられない(放射圧でガスが吹き飛ぶ):

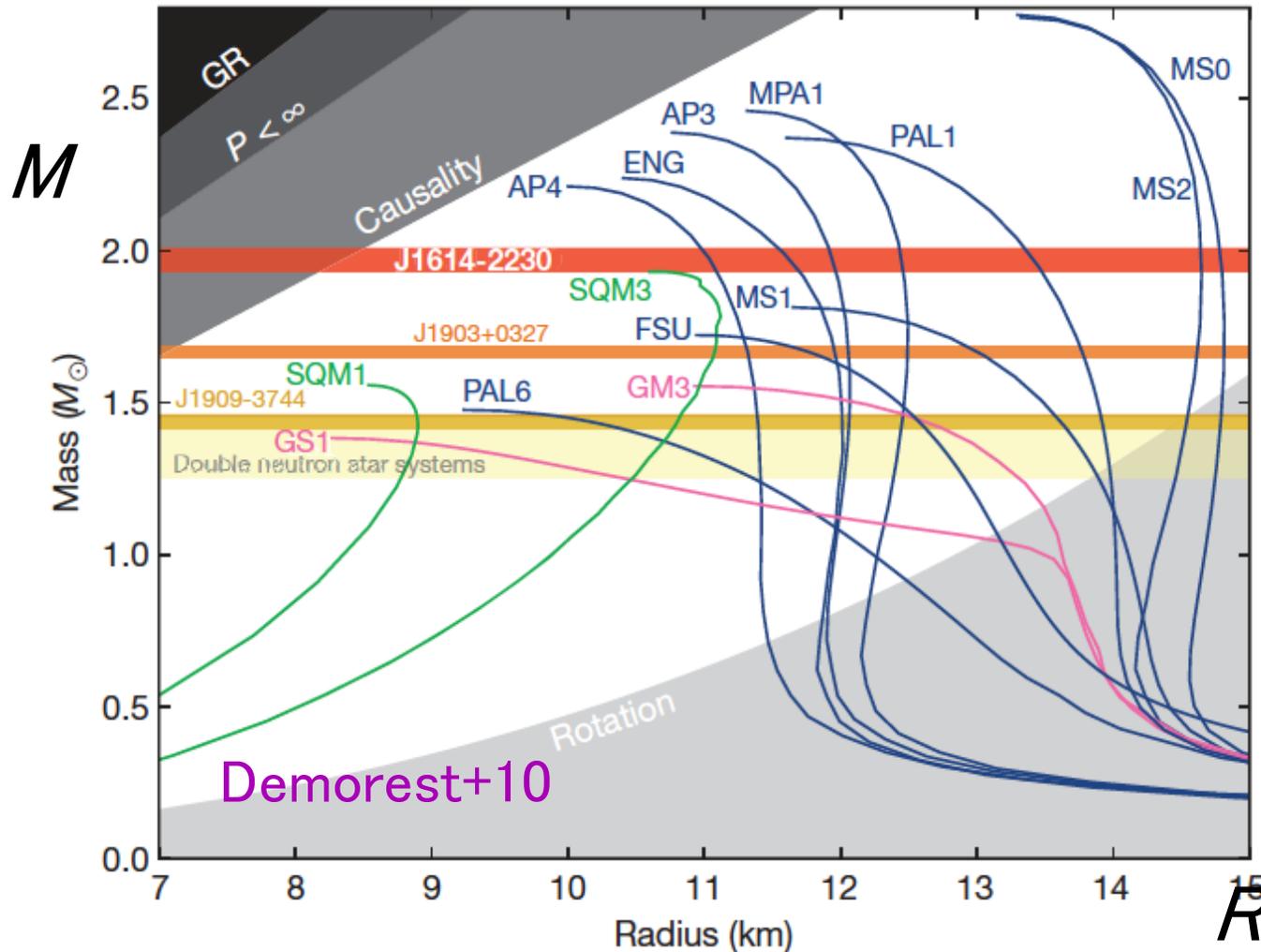
$$L_{\text{Edd}} = 4\pi c G M_{\text{NS}} m_{\text{p}} f_{\text{b}} / \sigma_{\text{T}} = 2.1 \times 10^{31} \left(M_{\text{NS}} / 1.4 M_{\odot} \right) \left(f_{\text{b}} / 1.16 \right) \text{ W}$$

これがNS全体から黒体放射で出るなら、その温度は

$$T_{\text{bb}} = \left(\frac{L_{\text{grav}}}{4\pi R_{\text{NS}}^2 \sigma} \right)^{1/4} = 1.5 \times 10^7 \left(\frac{L_{\text{grav}}}{L_{\text{Edd}}} \right)^{1/4} \text{ K}$$

§ 4. 中性子星の質量と半径

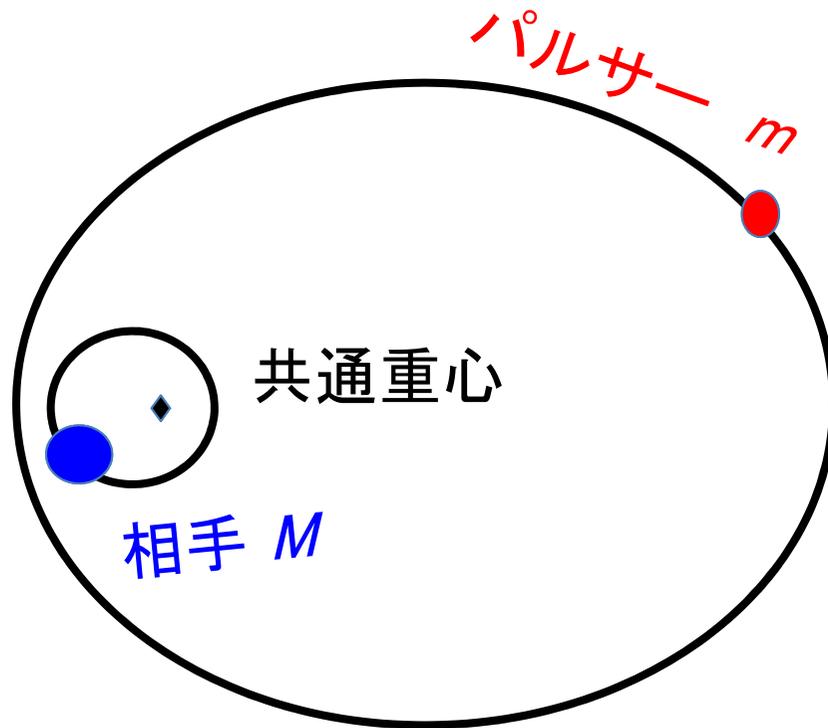
(4-1) EOSを絞り込む



多数の天体で M と R を、できれば同時に測定したい。

特に R が難しくかつ重要。

(4-2) NS質量の測定方法: 連星系



ケプラーの第三法則

$$G(m+M) = a^3(2\pi/T)^2$$

T : 軌道周期(観測可)

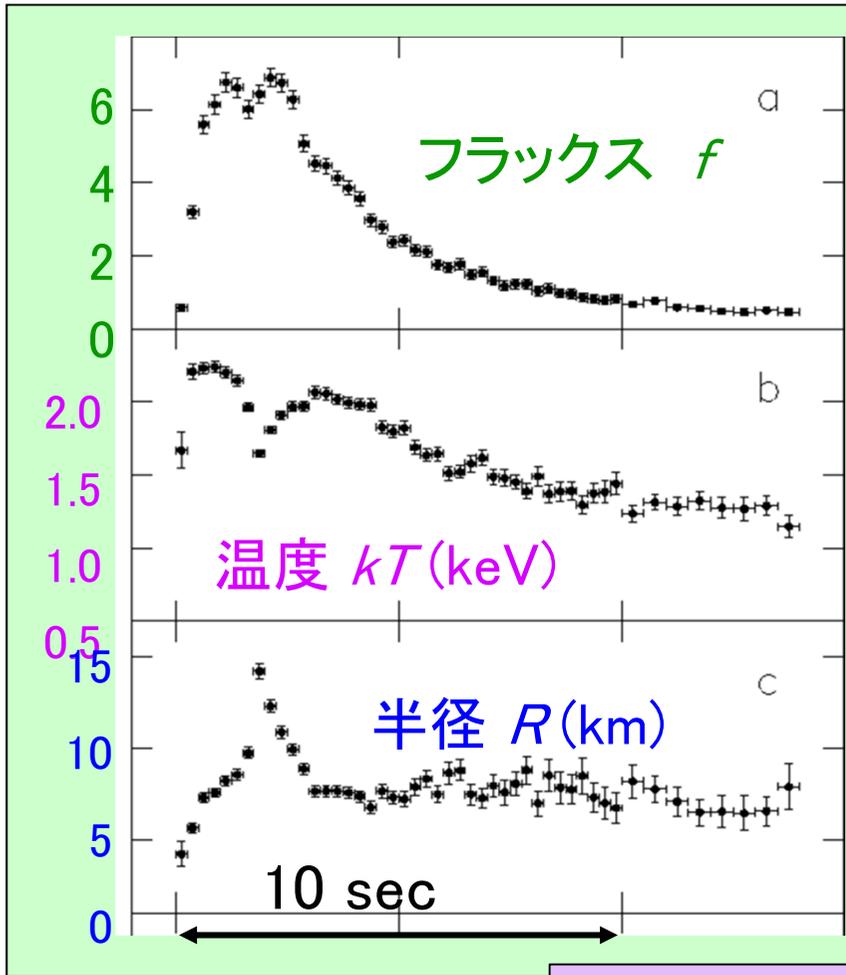
未知数 $m, M, a, (i)$

パルサーのパルスドップラー情報と、もう1組の情報があれば、ほぼ未知数がすべて決まる。

「もう1組の情報」の例:

- ・相手の星の光学ドップラー効果
- ・相手の星の光学スペクトル型から M を推定
- ・相手の重力場によるパルスの一般相対論的遅れ

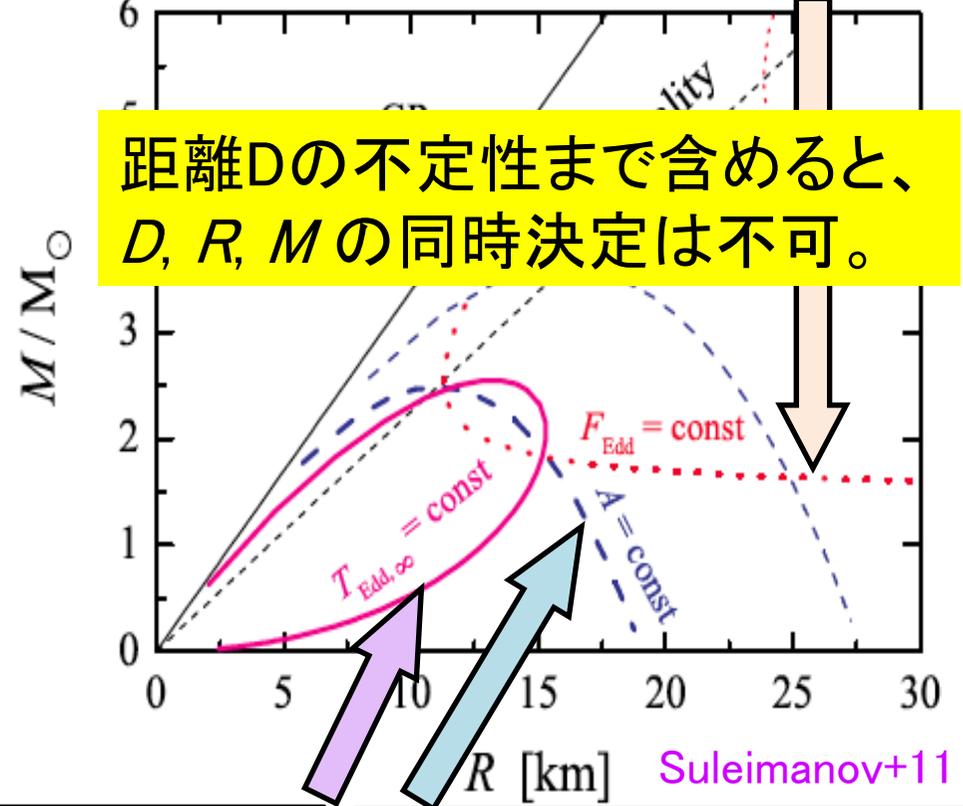
(4-4) X線バースト(NS表面の爆発的核融合)



Kuulkers & van der Klis (2000)

観測されたバーストpeak flux が Eddington限界に一致 ($f \propto M/D^2$)

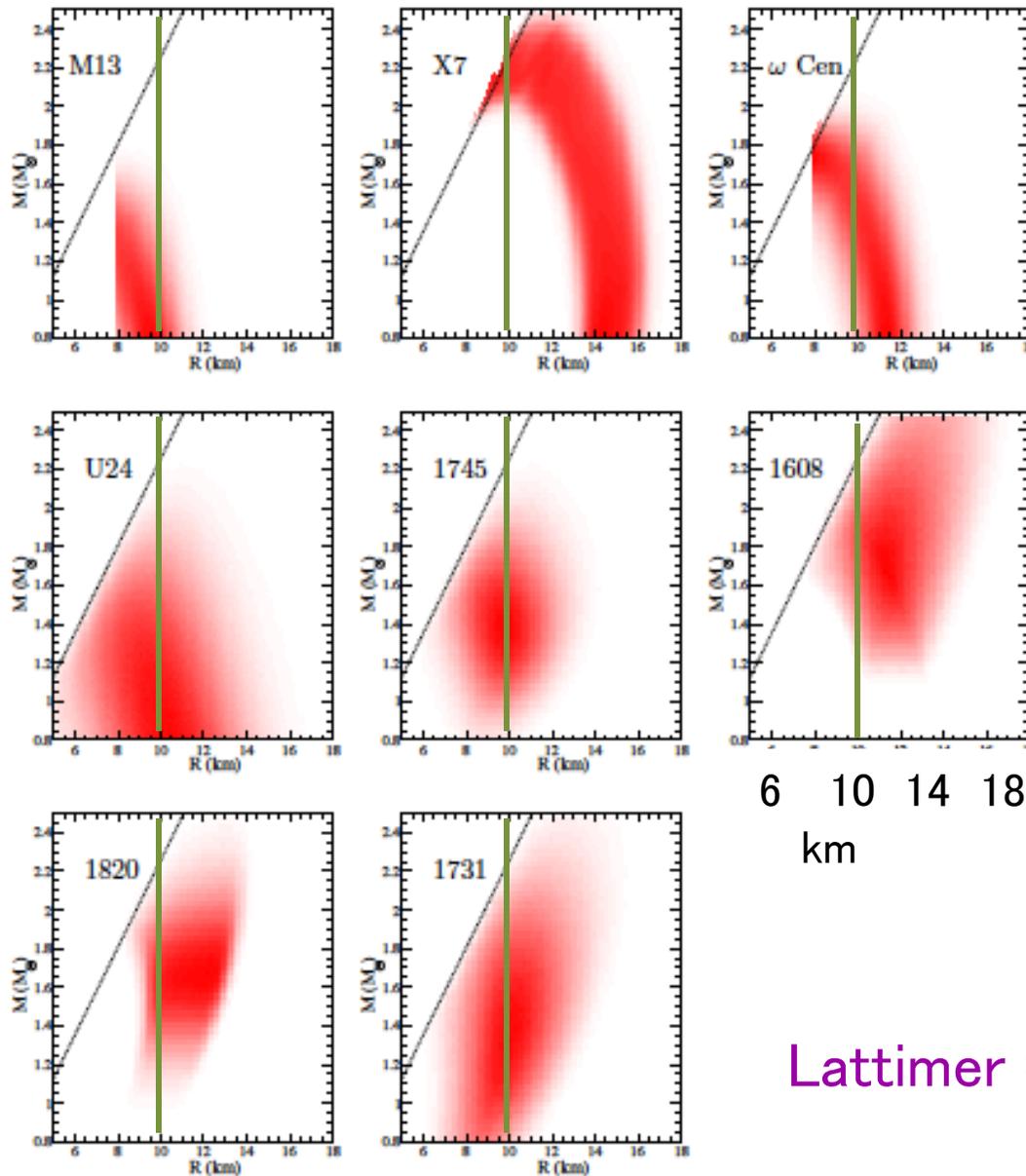
距離Dの不定性まで含めると、 D, R, M の同時決定は不可。



観測された温度がEdd. Tempに一致 ($R^2 T^4 \propto M$)

Stefan=Boltzmann則から求めた R ($R^2 T^4 \propto f D^2$)

(4-5) X線バーストを用いた測定結果



いろいろなX線バースト源の解析結果。

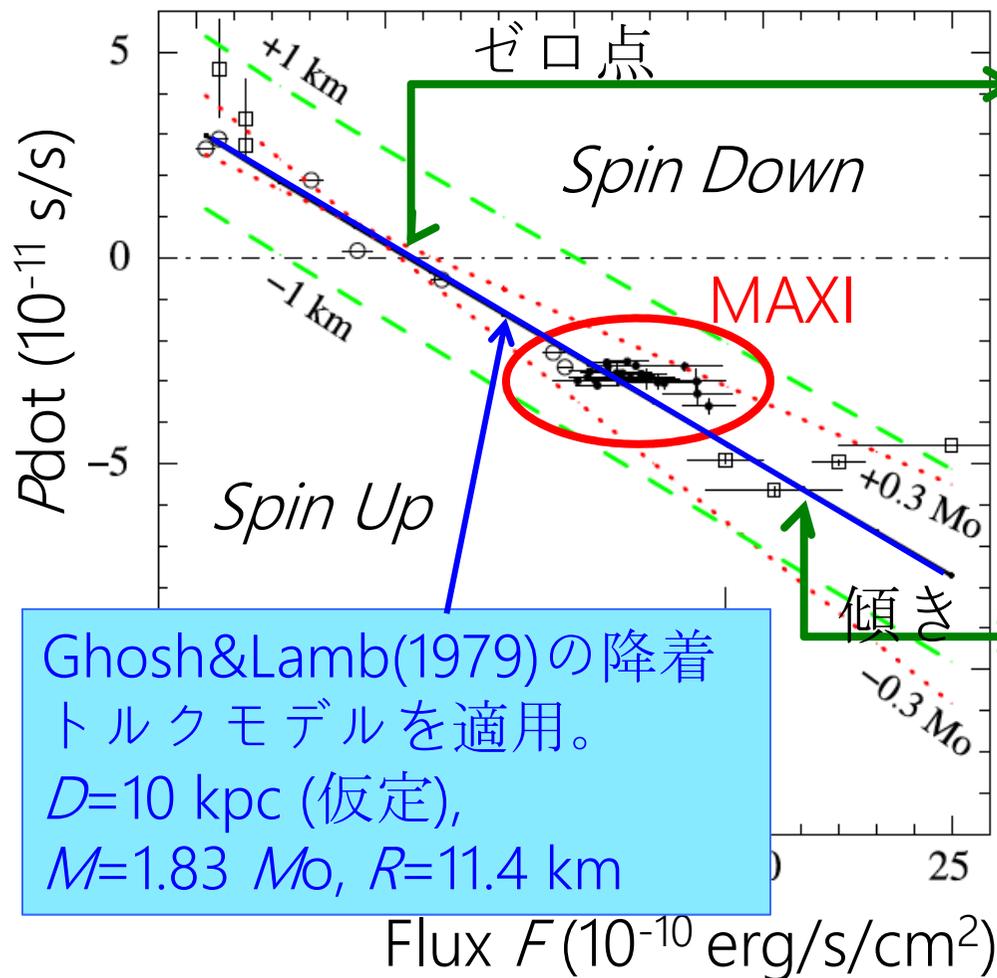
測定された半径は、おおむね 8-14 km.

EOSを識別するには、まだ例数が不足で、結果の不一致も残る。

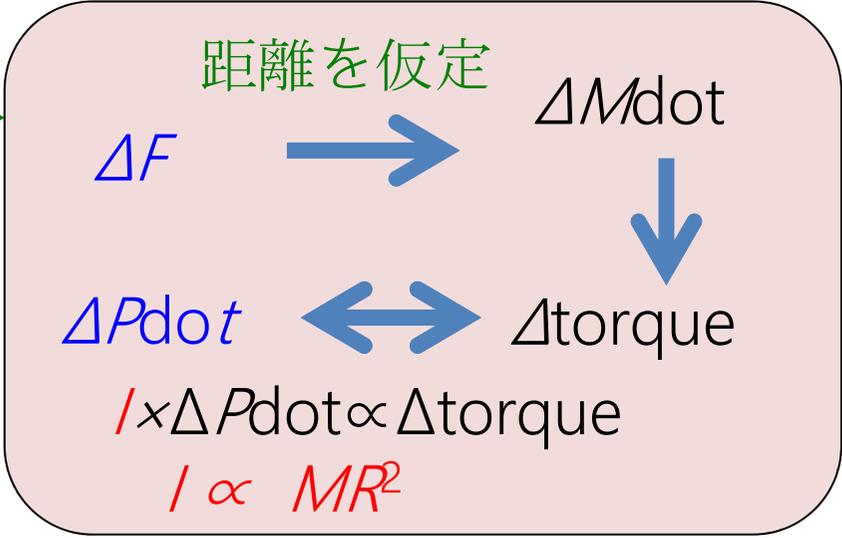
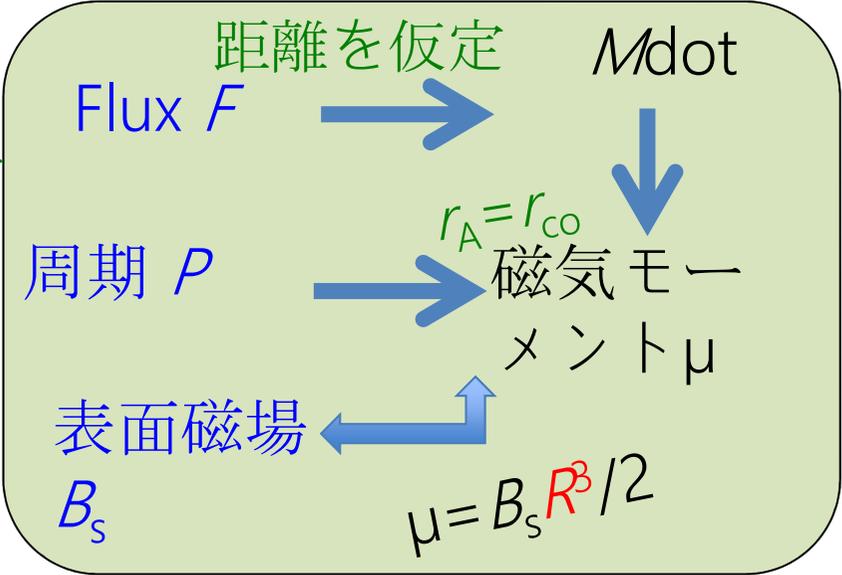
異なる種類のNSでの測定例が乏しい。
まだまだ！

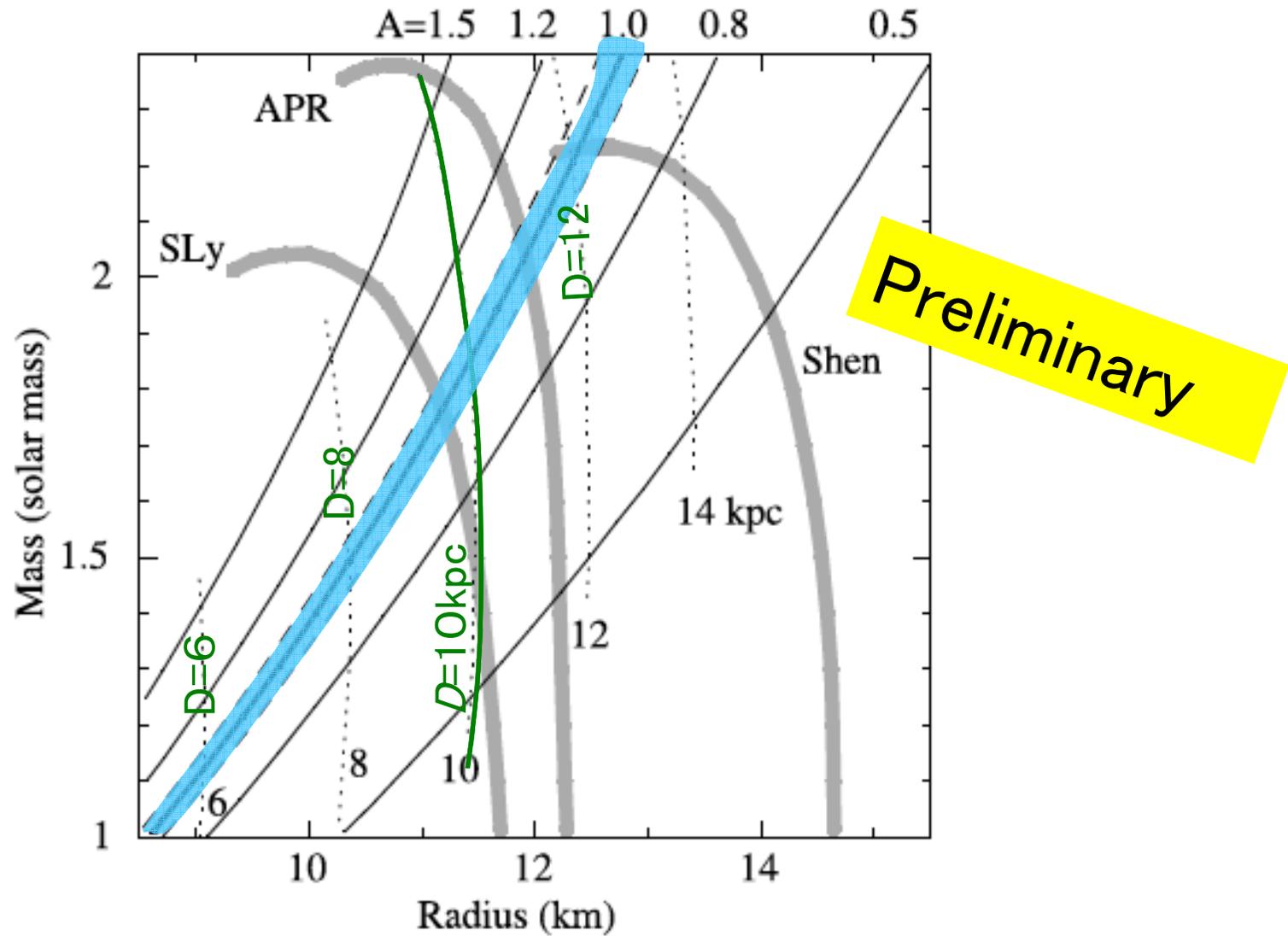
Lattimer (2012)

(4-6) 4U 1626-67 の降着スピナップ/ダウンの利用 (Takagi+16, Publ. Astro. Soc. J. in press)



Ghosh&Lamb(1979)の降着トルクモデルを適用。
 $D=10$ kpc (仮定),
 $M=1.83 M_{\odot}$, $R=11.4$ km

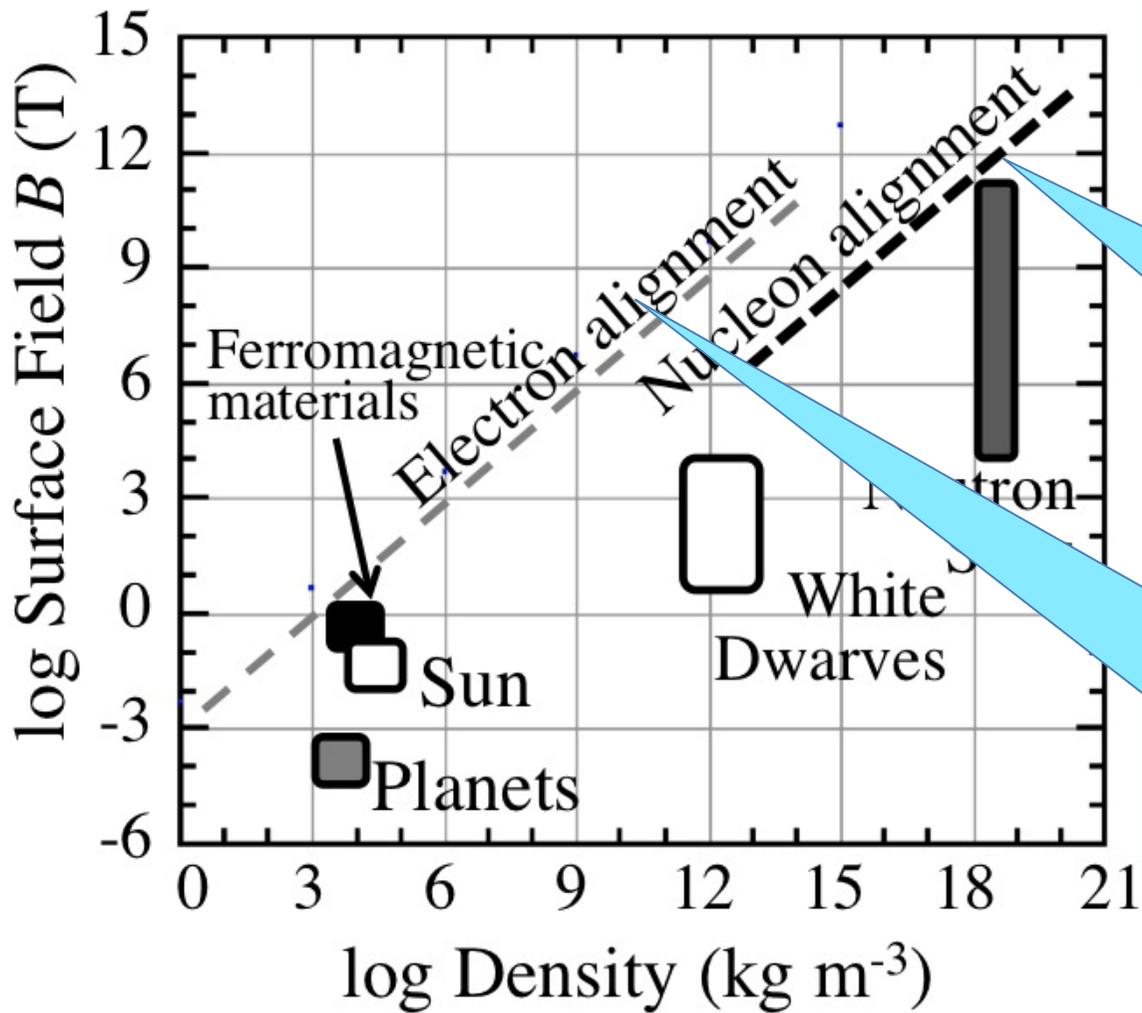




* パラメータ A は Ghosh & Lamb (1979) の降着トルクモデルの不定性を表す。

§ 5. 中性子星の磁場

(5-1) いろいろな天体の磁場



NSの磁場は通常、残留陽子の超流動が担うとされる。

しかし中性子のスピン整列でも強度は十分。

Bohr磁子は核磁子より1840倍も強い。NS内部に~1%残った電子の強磁性としても説明可。

(5-2) NSの磁場の測定方法

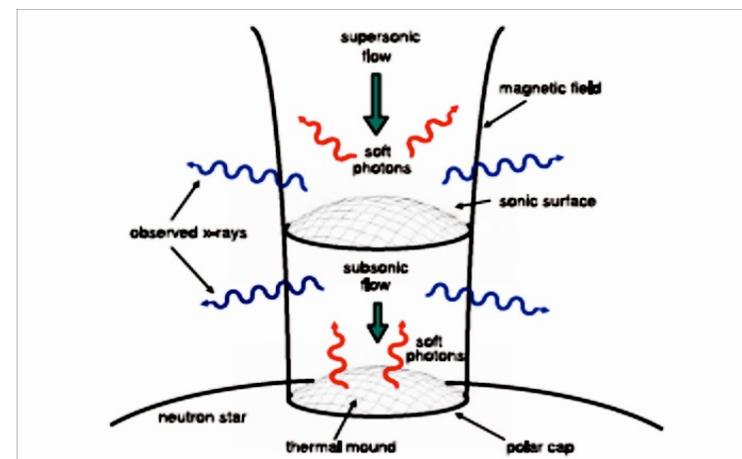
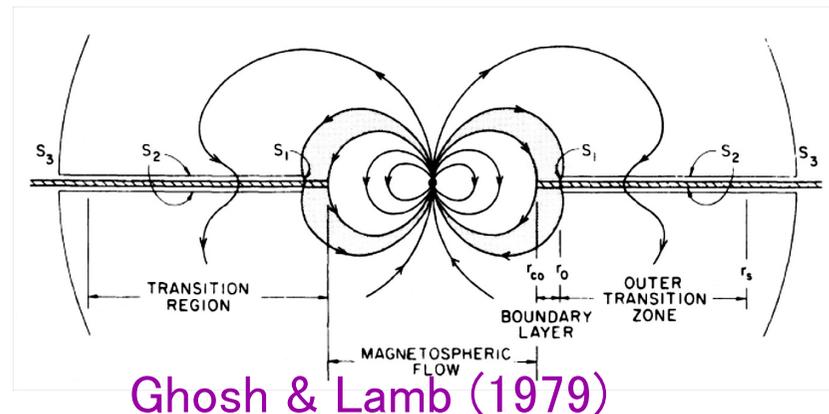
(1) 降着の無いNS (電波パルサー、マグネターetc.)

P と $P\dot{}$ から、磁気双極子(M2)放射によるスピンドアウンを仮定し、磁気モーメントを導出。

(2) 降着するNS (BXP etc.)

- $M\dot{}$ (\propto 光度) と P から、降着トルクを考え磁気モーメントを推定。磁場が強いほど降着物質は外側でせき止められ、降着物質共回転するNSは長い P をもつ。
- BXPの降着円筒では電子サイクロトロン共鳴(CRSF)がX線領域に。

$$E_c = \frac{h e B}{2 \pi m_e} \\ = 11.6 (B / 10^8 \text{T}) \text{ keV}$$

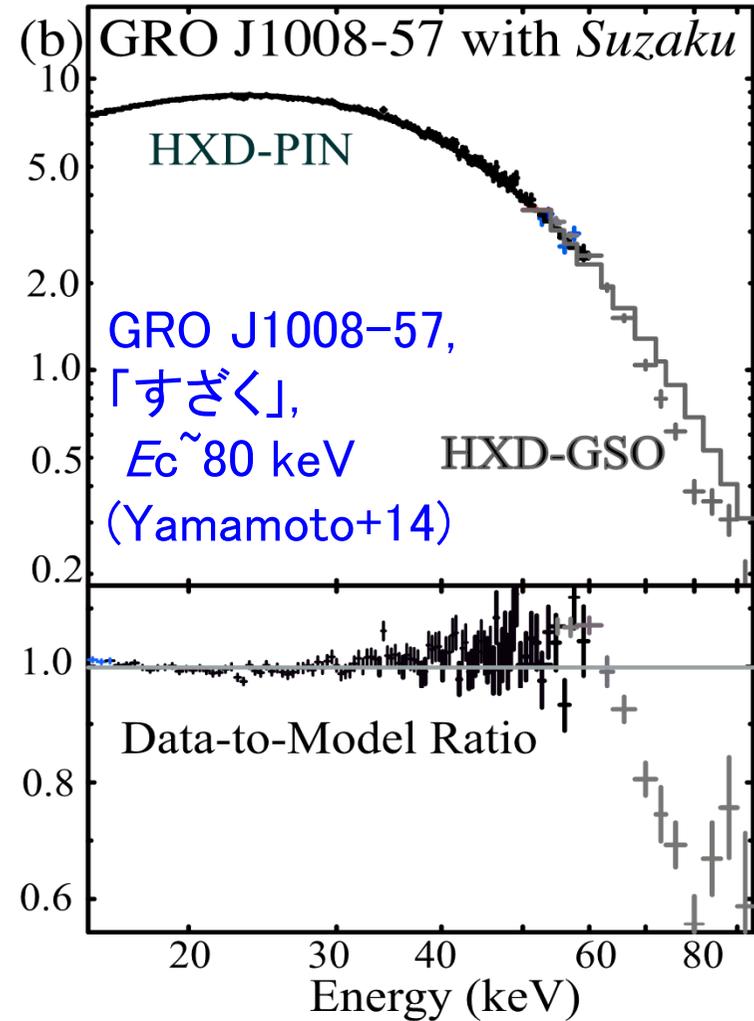
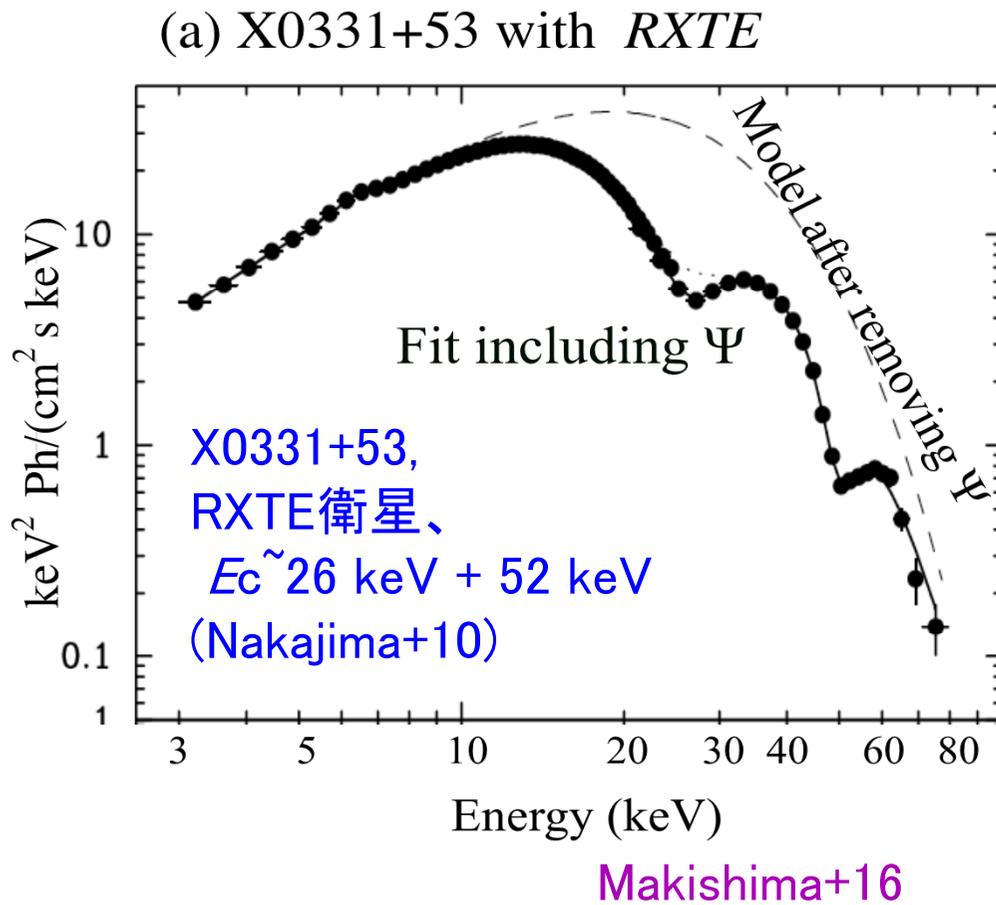


Becker +12

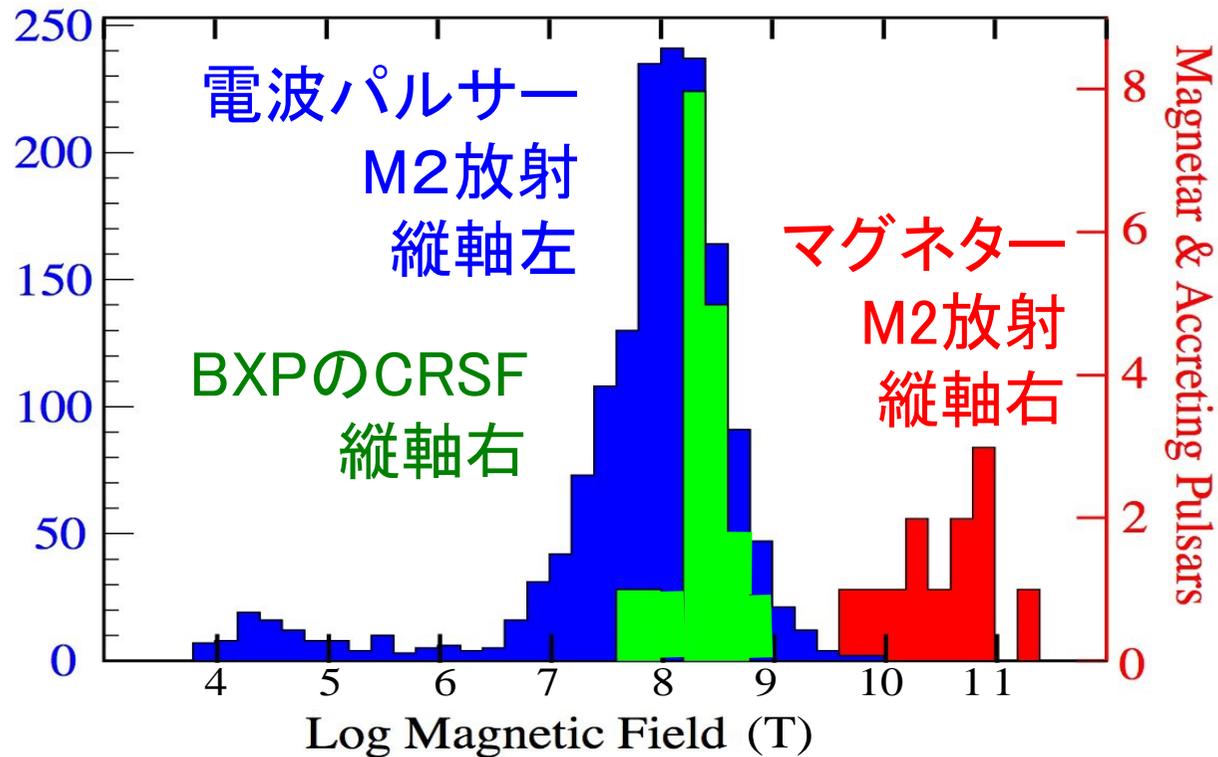
(5-3) 電子サイクロトロン共鳴(CRSF)

$$E_c = \hbar e B / 2 \pi m_e = 11.6 (B / 10^8 \text{T}) \text{ keV}$$

厳密には、これに重力レッドシフトの補正が必要。

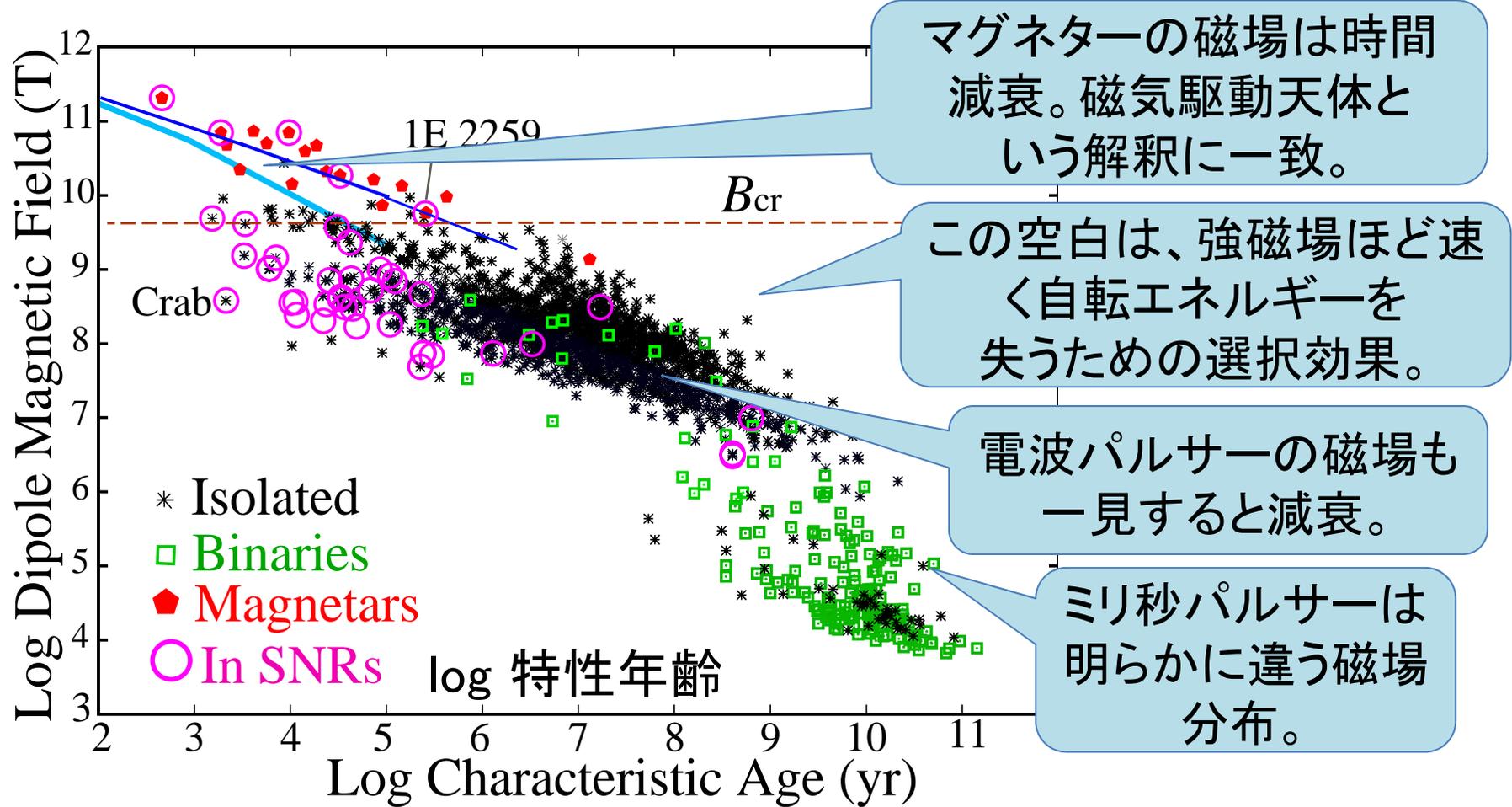


(5-4) 磁場の強度分布(再掲)



- ・ M や R は狭い分布をもつが、 B は7桁にも分布し、しかも明らかに3つのピーク。どう説明するか？
- ・ BXPの磁場は、 $(1-7) \times 10^8 \text{T}$ に集中、時間減衰する徴候なし (Makishima+99)。

(5-5) 降着のないNSの磁場の時間変化



NSは永久磁石で、何らかのタイミングで、強磁性から常磁性へ相転移するのでは？ (Makishima+99)

§ 6. マグネター(Magnetars)

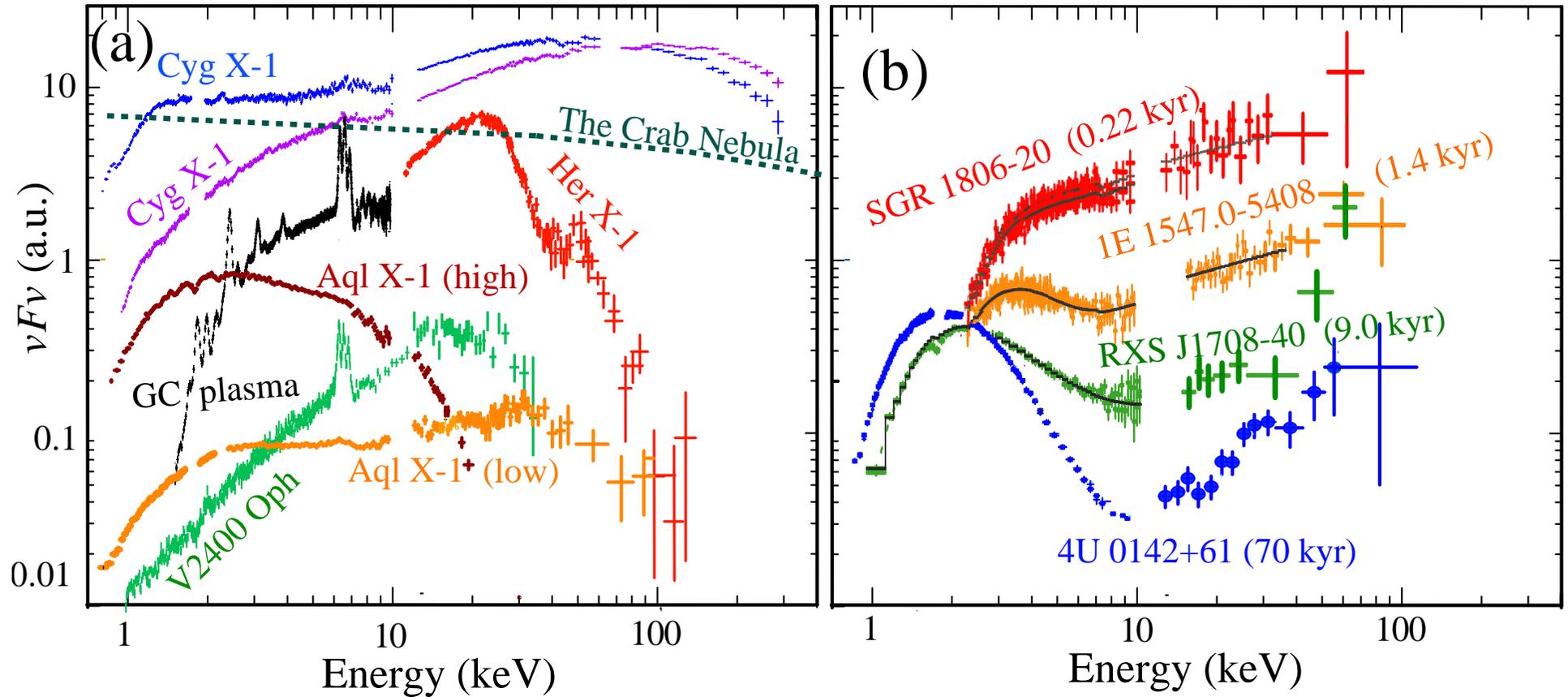
(6-1) マグネターとは

- X線のみを放射する孤立NSで、銀河系とマゼラン雲に～30個。超新星残骸(SNR)に付随するものが数例。連星や降着の徴候は無い。
- 「軟ガンマ線リピーター」と「異常X線パルサー」のサブクラスがある。
- パルス周期は 2-11 secに集中。 (P, \dot{P}) からM2放射を仮定して求めた双極子磁場は、 10^{10-11} T (10^{14-15} G)で、臨界磁場 $4.4e9$ Tを超える。
- 観測されるX線光度は、スピンドウンで賄える光度を1～2桁しのぐ。よって磁気駆動天体と考えられる (Thompson & Duncan 95, 96)。
- トランジェント的に出現するものが多い。ほぼ定常的なX線放射を示すものも、ときおりX線増光。そのような場合ほぼ必ず、マシンガンの「ショートバースト」を連射する。
- スペクトル黒体放射的な軟X線成分に加え、ひじょうに硬い硬X線成分を示す (Kuiper+06)。

(6-2) 「すざく」によるマグネターのスペクトル

マグネター以外の代表的天体

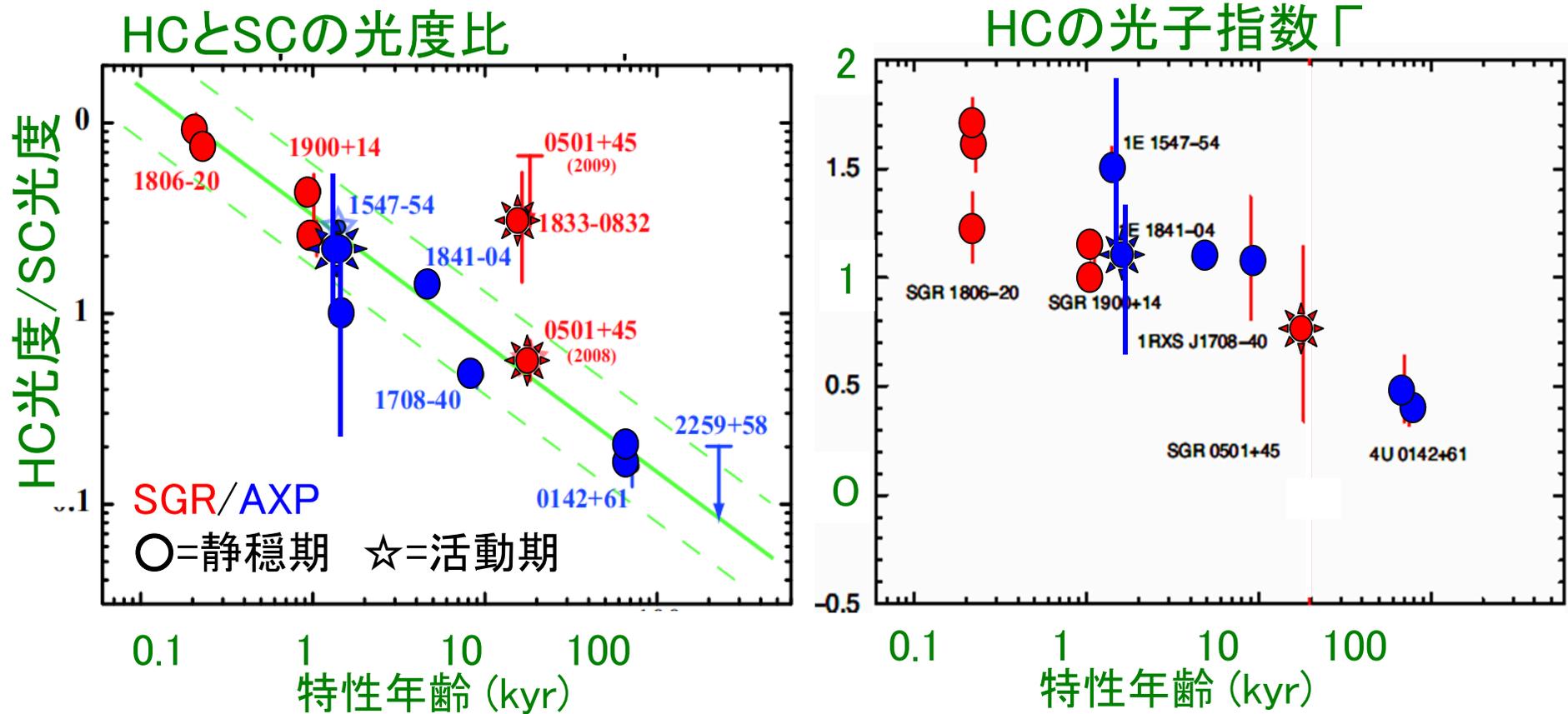
4つの代表的マグネター
(2 keV で規格化)



軟X線成分(SC)と硬X線成分
(HC)の2成分構造をもつ

(6-3) マグネターのスペクトルの進化

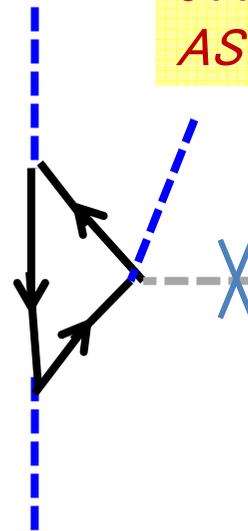
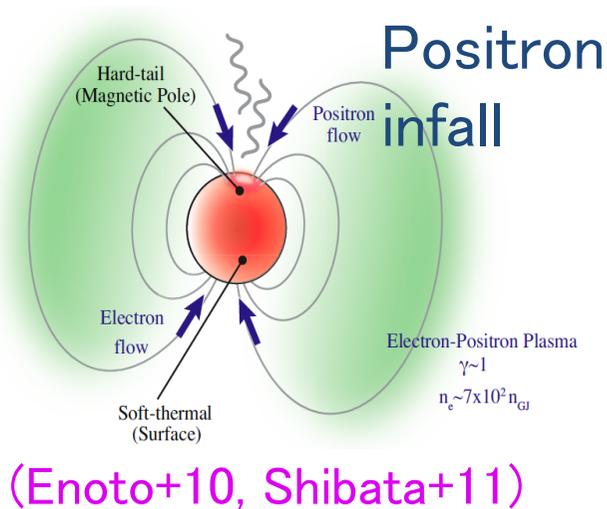
- ◇ マグネターの年齢を、パルサーの特性年齢 $\tau \equiv P/2\dot{P}$ で代表。
- ◇ 年齢とともにHC vs SCの光度比は下がるが、HCの傾きは硬くなる (Enoto+10c)。
- ◇ これらの傾向は、SGRとAXPの区別によらず、また活動期と静穏期でも大差ない (Iwahashi+13)。



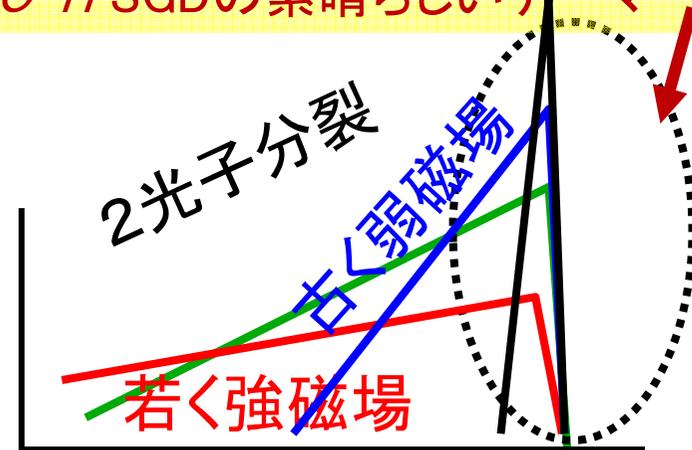
(6-4) HC(硬X線成分)の起源

- 異常に硬い($\Gamma = 0.3 \sim 1.5$) \rightarrow シンクロトロン、逆コンプトンはダメ
- 若い天体ではHC光度 \gg SC光度 \rightarrow HCは高い放射効率 \rightarrow 非熱的Bremsstrahlungダメ
- 年齢とともにHCがより硬くなるのは、粒子の叩き上げでは説明困難。

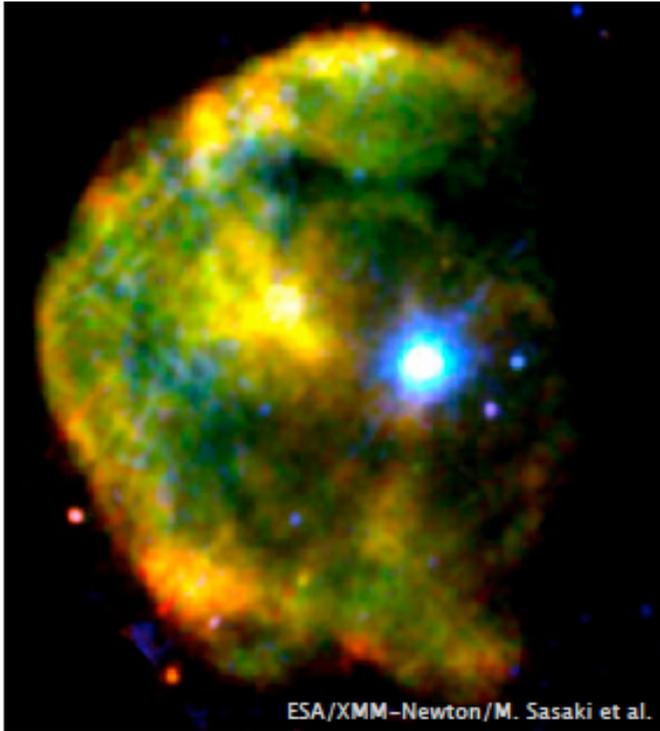
磁気圏で e^+e^- 生成 \rightarrow 遠心力が弱く e^+e^- はNS表面に落下し e^+ は対消滅 \rightarrow 生じた511 keV光子が、強磁場中で「2光子分裂」を繰り返し、低エネルギー側に連続成分を作る



511 keVより上で落ちるはず。
 ASTRO-H SGDの素晴らしいテーマ



(6-5) マグネターの誕生シナリオ



超新星残骸(SNR) CTB109と中心マグネター 1E2259+586 (Nakano+15)

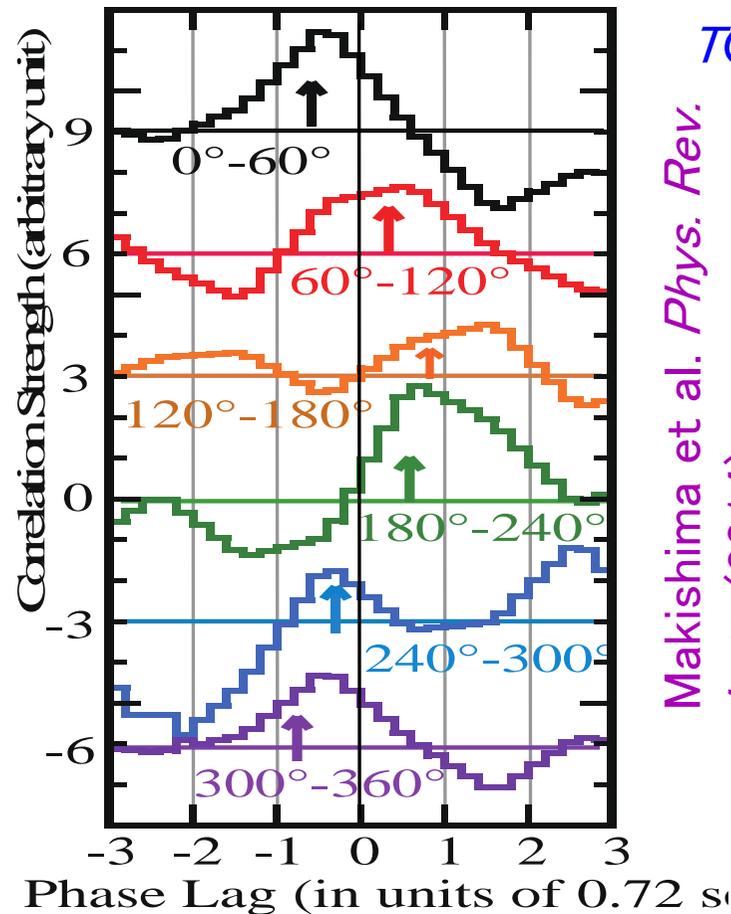
- SNRの推定年齢は ~ 13 kyr。マグネターの特性年齢は ~ 230 kyr だが、磁場が減衰していると考ええると、 ~ 13 kyrと考えてよい。
- X線放射プラズマの量を積算すると、CTB109のイジェクタ質量は、 $\sim 40 M_{\odot}$ に達する。

◇ 推測

- マグネターは、 $> 20 M_{\text{sun}}$ の重い星から作られるらしい。
- マグネターは極めて若く、**短時間で見えなくなるらしい。**
- 重力崩壊型SNでは $B \sim 10^8$ TのNSより、**マグネターの方が多く作られ、銀河面に大量の老齡マグネターが潜むか？**

(6-6) マグネターの自由歳差運動

「すぎく」による2つのマグネター 4U 0142+61 と 1E 1547-54の観測で、周期 P のパルスの位相が長い周期 T で、8~25%ほど変調されている現象を発見。前者では $P/T = \varepsilon = 1.6e-4$, 後者では $0.6e-4$ 。

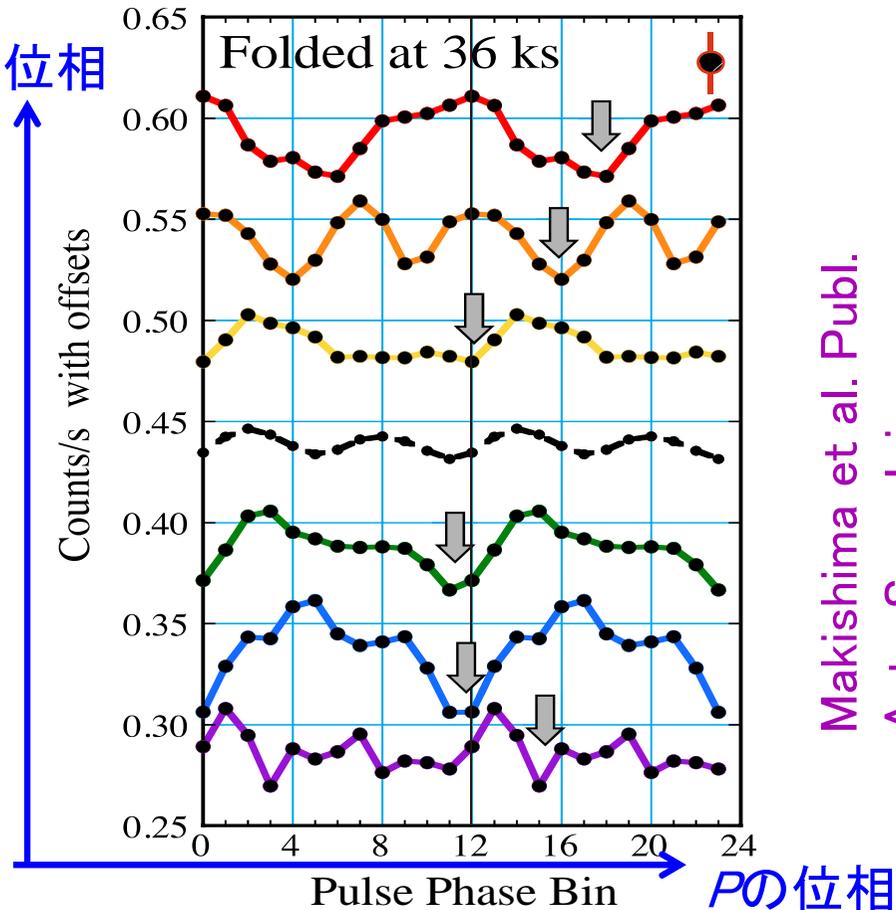


2016/2/24

中性子星ウインタースクール2016

T の位相

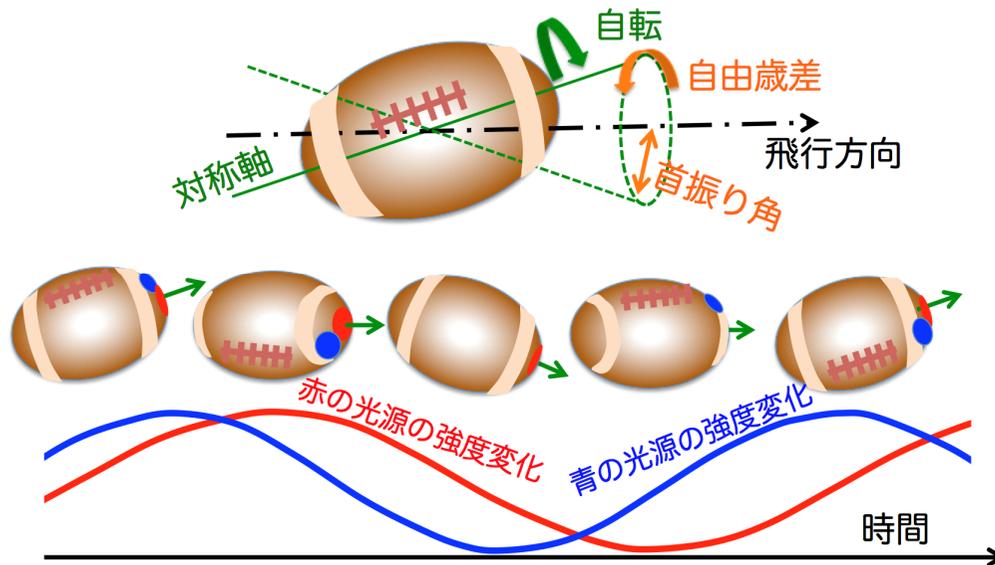
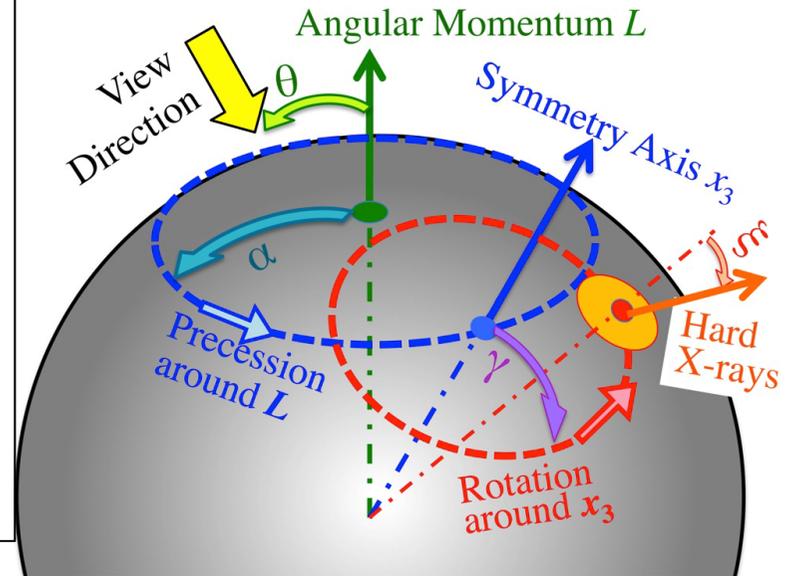
Makishima et al. *Phys. Rev. Lett.* (2014)



Makishima et al. *Publ. Astr. Soc. J. in press* (2016)

解釈:

- これらマグネターの内部には、 $\sim 10^{12}\text{T}$ の強烈なトロイダル磁場が存在し、星が $(I_3 - I_1)/I_1 = \varepsilon$ だけ縦長に変形。
- このため自由歳差運動が発生。自転と歳差運動の周期は、 ε だけ異なる。
- 2つの周期のビートとして T が発し。



ラグビーボールは、対称軸の回りに5回スピンする間に、対称軸は3回の首振りを行う。
 $P_1:P_3=5:3$ で、 $P_1 > P_3$ なのは、レモン型 ($I_1 > I_3$) 物体の特徴。
 ボールを徐々に丸くしてゆくと、1:1 に近づく。

§ 7. 今後の展望

(7-1) 「ひとみ」(ASTRO-H)打ち上げ成功

2月17日17時45分(日本標準時)、晴天の種子島宇宙センターからH-IIAロケット30号機で、日本6機目のX線天文衛星ASTRO-Hが打ち上げられました。ロケットは正常に飛行し、打ち上げ後14分15秒に衛星を分離、その後19時40分に衛星の電波が内之浦局で受信され、太陽電池パドルの展開が正常に行われたことを確認しました。打ち上げ後、ASTRO-Hは「ひとみ」と命名されました。

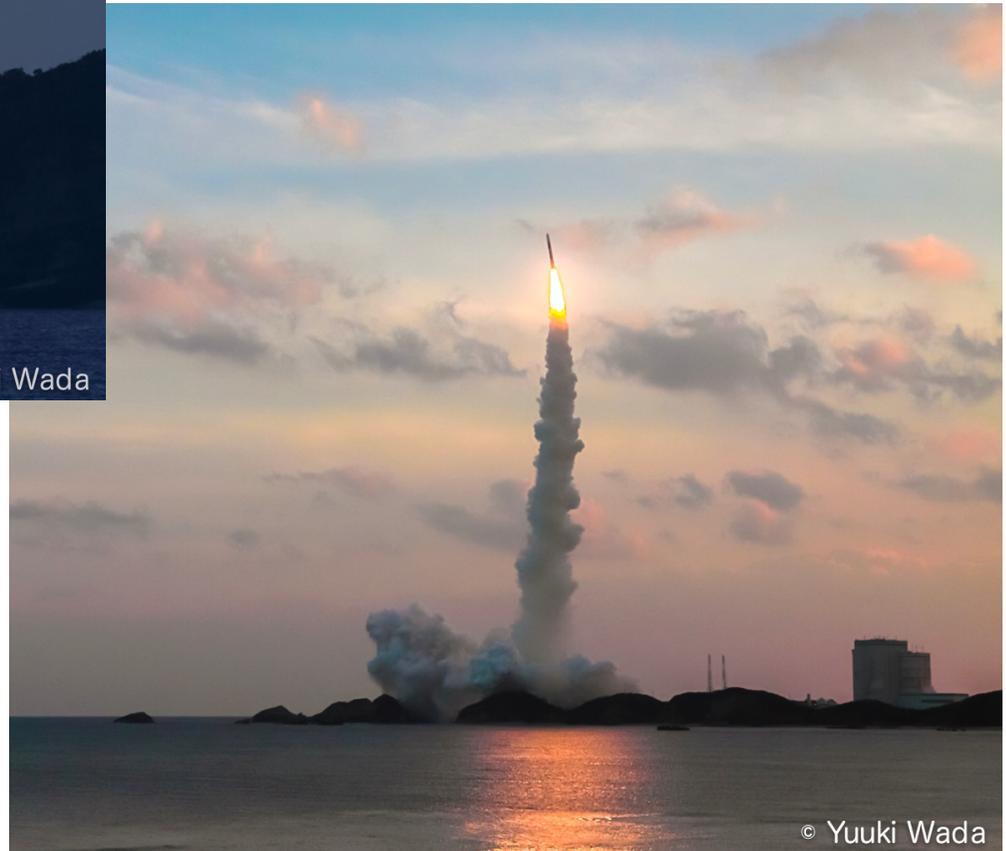
プロジェクトリーダーの宇宙研・高橋忠幸教授の談話：
ASTRO-Hは「熱い宇宙の中を観るひとみ」であることから、「ひとみ」と命名します。「竜を画いてひとみを点ず(画竜点睛)」の故事において、ひとみを描きこんだ途端に、竜が天に昇ったように、物事の最も肝要なところという意味に使われます。また瞳は、眼の中で光を吸い込む部分でもあり、光すら吸い込んでしまうブラックホールは宇宙の瞳であるともいえます。



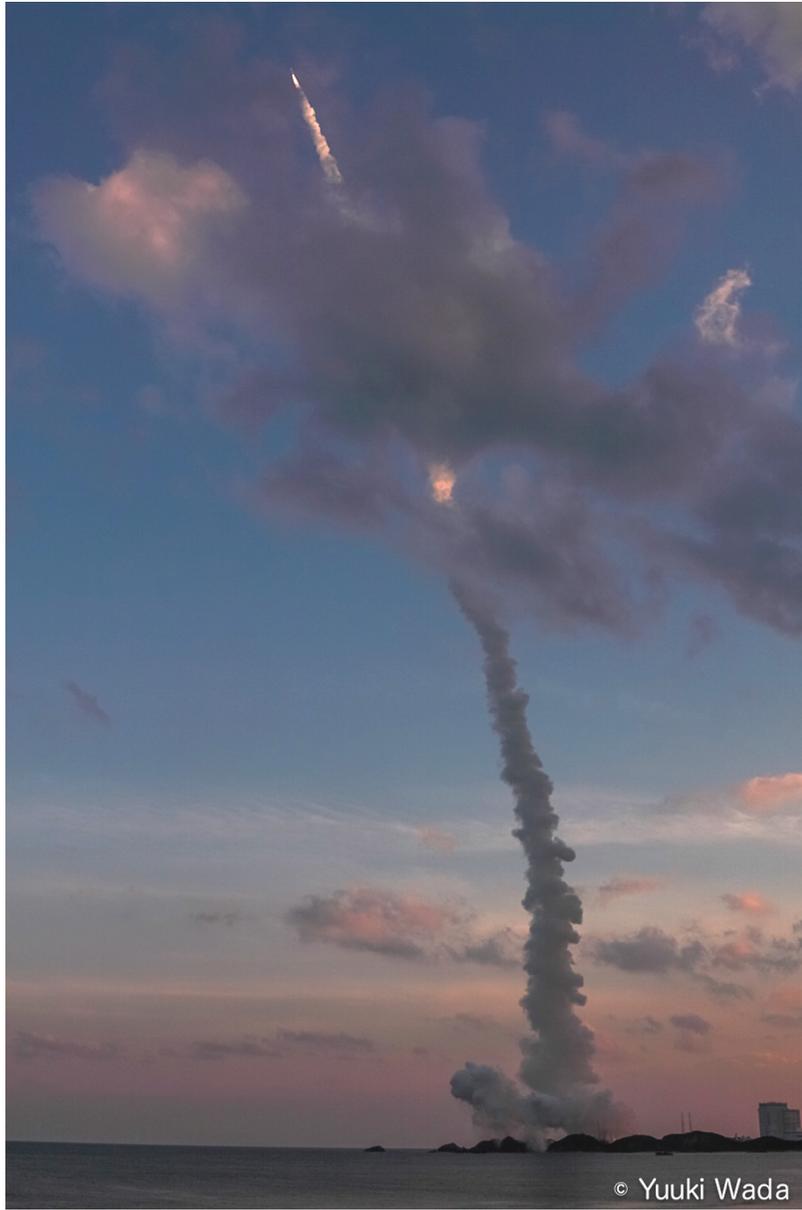


© Yuuki Wada

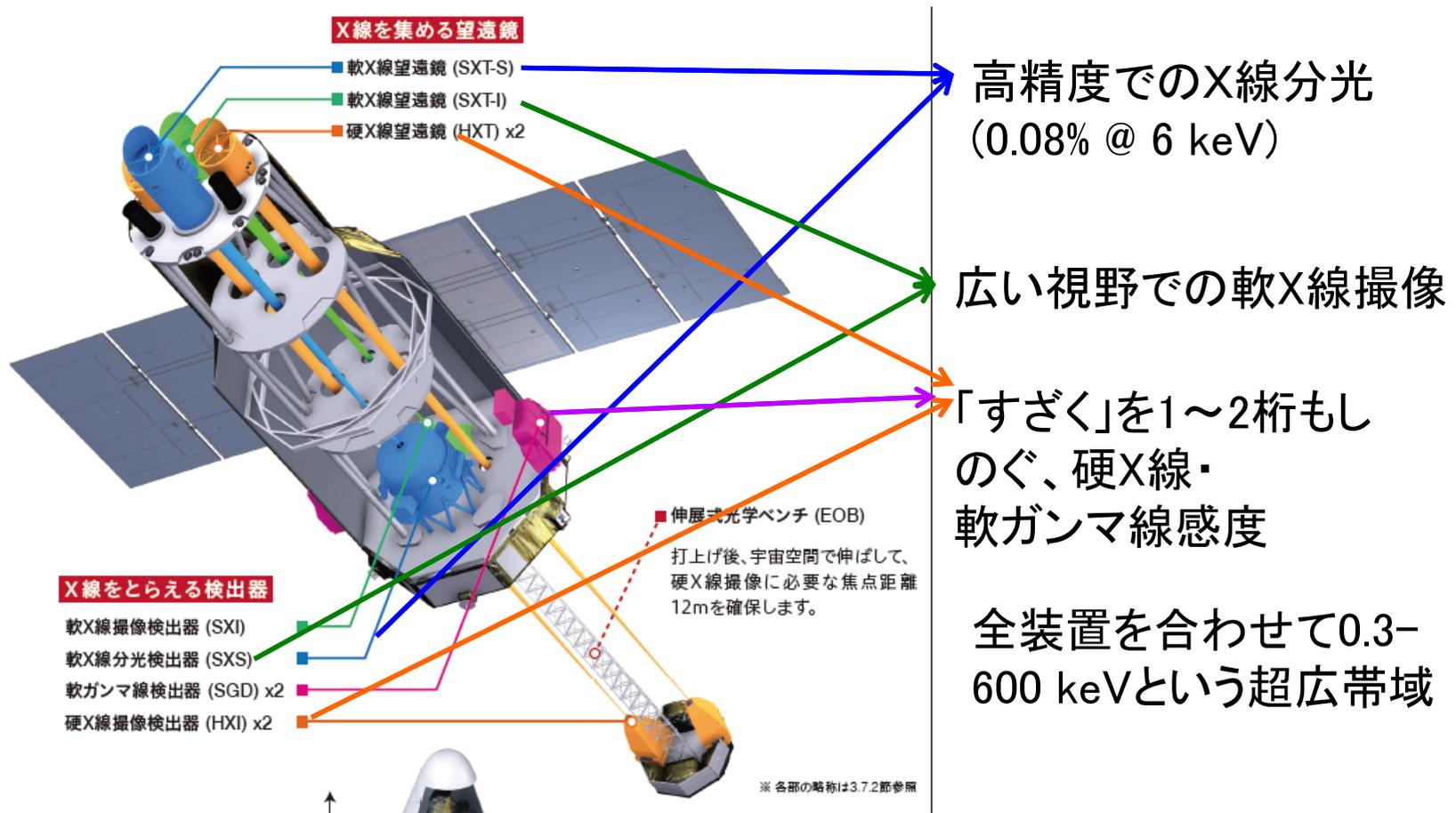
東大中澤研
M1和田有希君撮
影



© Yuuki Wada



(7-2) 「ひとみ」搭載装置

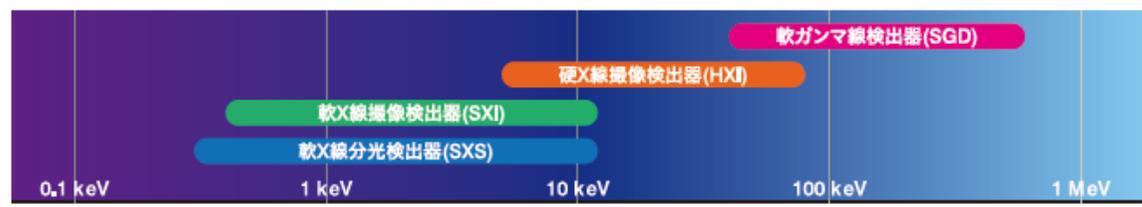


高精度でのX線分光
(0.08% @ 6 keV)

広い視野での軟X線撮像

「すざく」を1~2桁ものぐ、硬X線・軟ガンマ線感度

全装置を合わせて0.3-600 keVという超広帯域



(7-3) 今後の夢(♥=インパクト大、※=挑戦的)

「ひとみ」軟X線分光計(SXS; 0.3-10 keV)を用い:

- ・♥マグネターの軟X線領域で陽子サイクロトン共鳴を探す。
- ・BXPの蛍光鉄輝線に、磁気圏周辺での回転ドップラー検出。

「ひとみ」硬X線イメージャー(HXI; 6-80 keV)を用い:

- ・BXPから新たなCRSFを発見、例数を増やす。
- ・♥銀河面に潜む大量の老齡マグネターを探す。
- ・♥マグネターやCCOなどから自由歳差運動を検出。
- ・※NSの表面状態を探查できる可能性を開拓。

「ひとみ」軟ガンマ線検出器(SGD; 50-600 keV)を用い:

- ・ > 100 keV ($B > 10^9$ T) のCRSFをもつBXPを探查。
- ・♥マグネターの > 500 keVで、期待されるcutoff探查。
- ・※BXPから、硬X線の偏光が検出できるかも。

国際宇宙ステーション搭載MAXIを用い:

- ・♥降着トルク法で、数例のBXPの M や R (または B)を推定。

電磁波と大気の透過率

