

中性子星および マグネータの観測の現状

牧島一夫

東京大学 理学系研究科（物理学専攻、
ビッグバン宇宙国際研究センター）

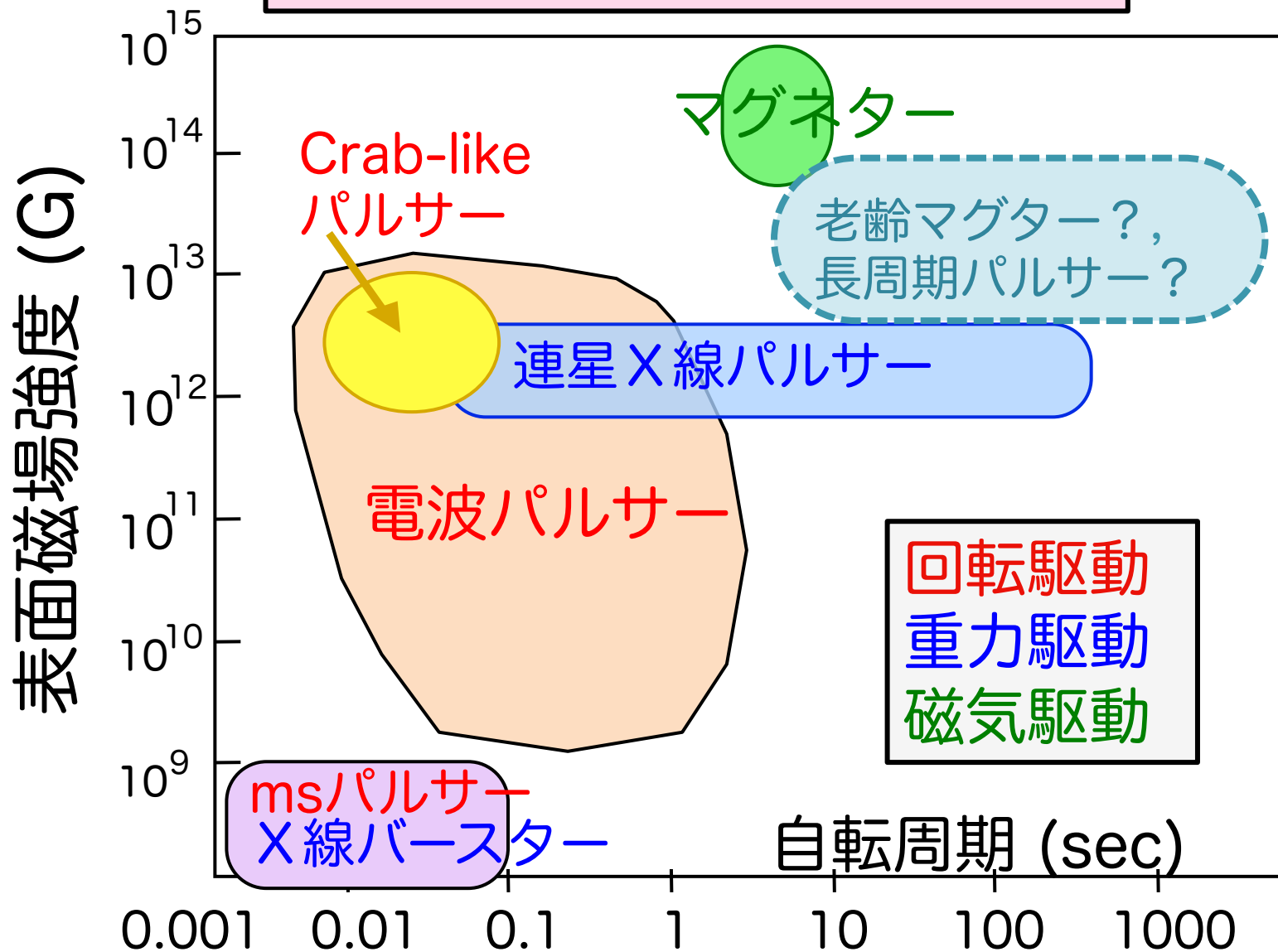
理研 宇宙観測実験連携研究グループ

NSの分類 (1)

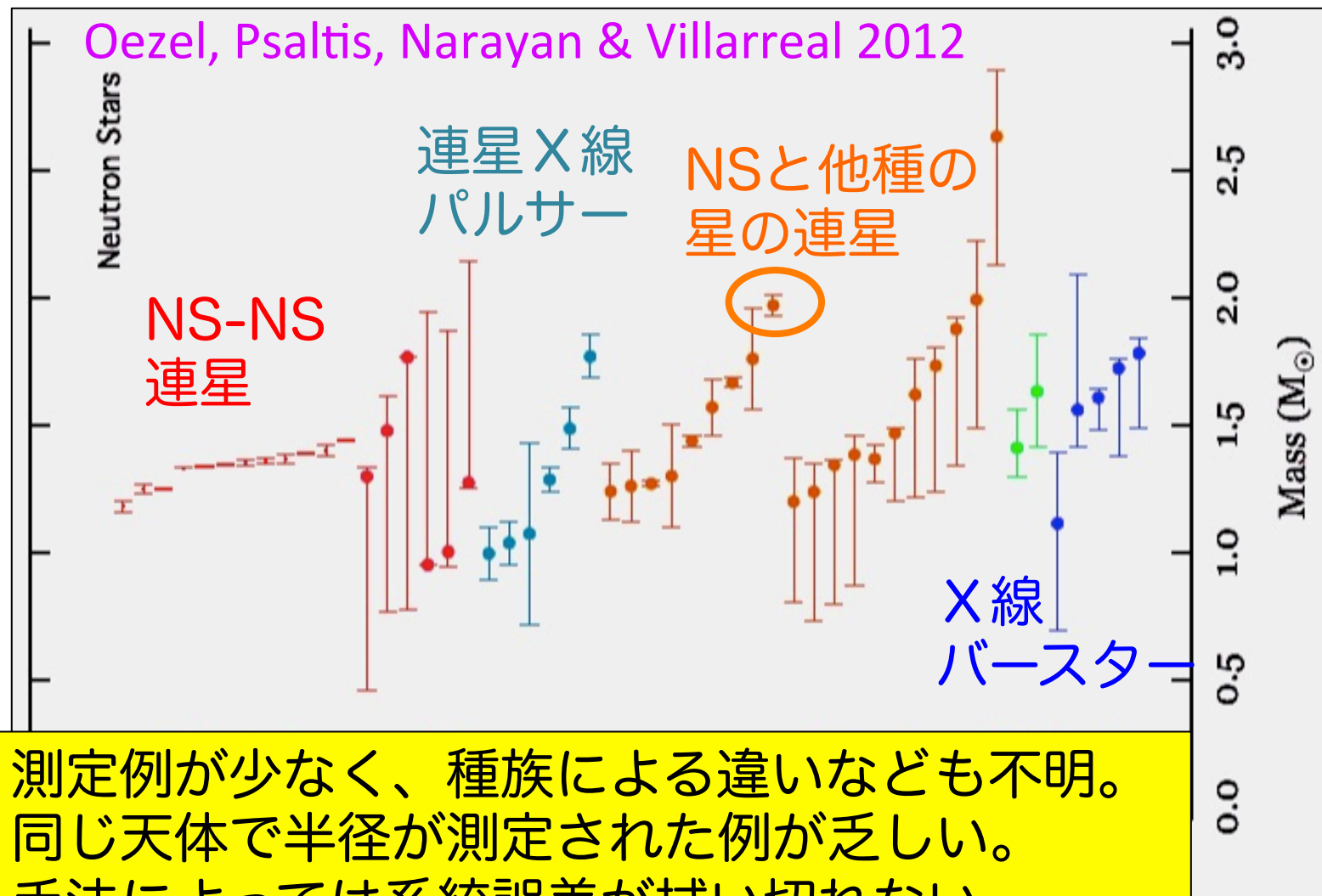
放射エネルギー源		$B=10^{8-9}$	$B=10^{11-13}$	$B=10^{14-15}$
熱	冷却はハイペロンの自由度に敏感	孤立中性子星 (磁場推定は難しい) T R		
回転	数百個が既知	ミリ秒パルサー B	B M 電波パルサー	?
重力	連星の相手から質量降着	X線 T R M バースター	連星X線パルサー B M	長周期パルサー?
磁場	磁気エネルギーを解放(?)	--	--	T B マグネター

M =質量、 R =半径、 B =磁場、 T =表面温度
 M と R を同時に測定できた系は、あまり無い

NSの分類 (2)

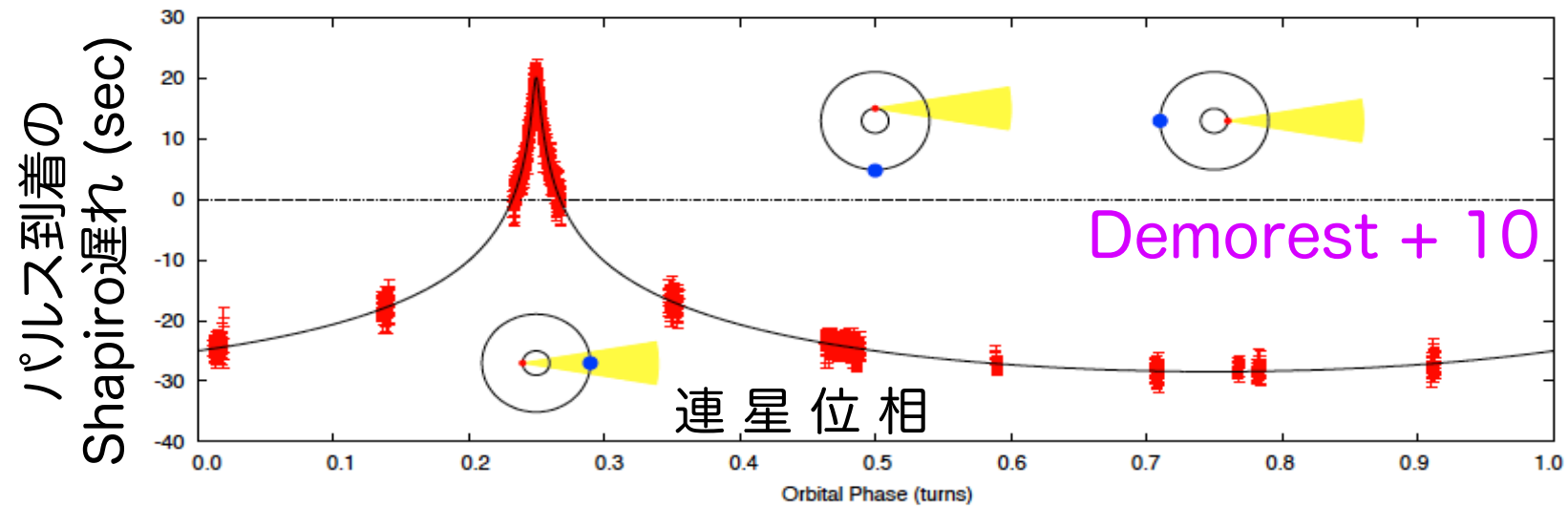


NS質量の測定結果

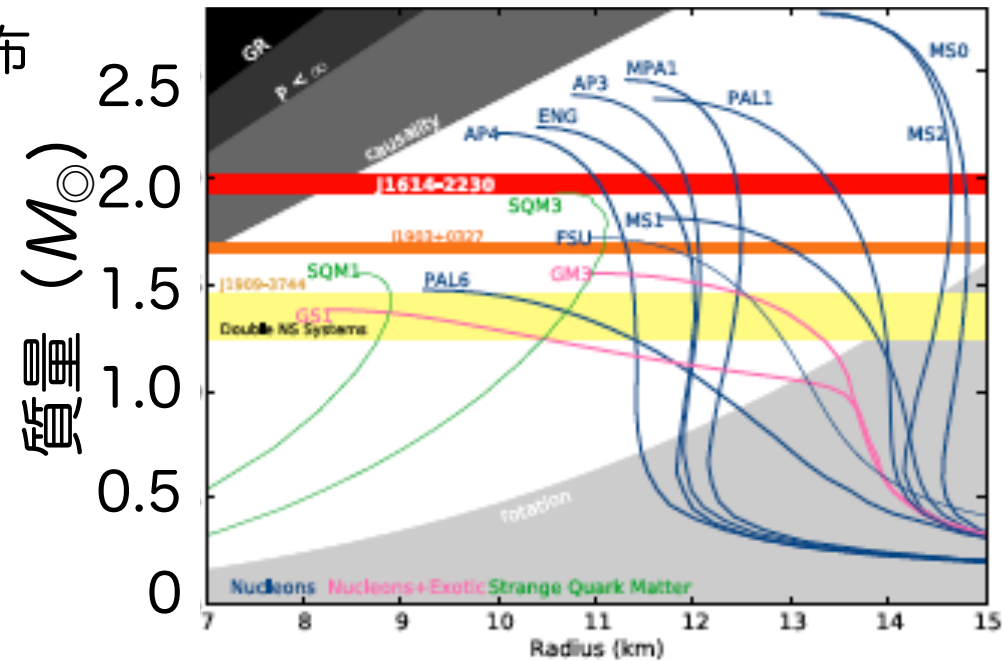
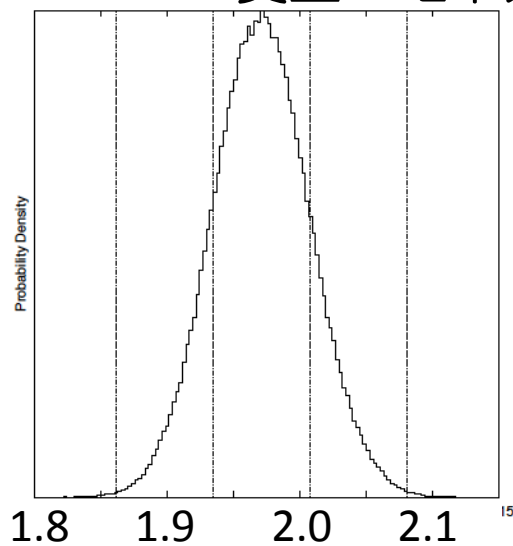


- ・測定例が少なく、種族による違いなども不明。
- ・同じ天体で半径が測定された例が乏しい。
- ・手法によっては系統誤差が拭い切れない。

~2 M_☉のNS : 白色わい星との連星



このNSの質量の確率分布



2012/8/30

基研 ハドロン物質の諸相

5

X線バースターのX線分光(1)

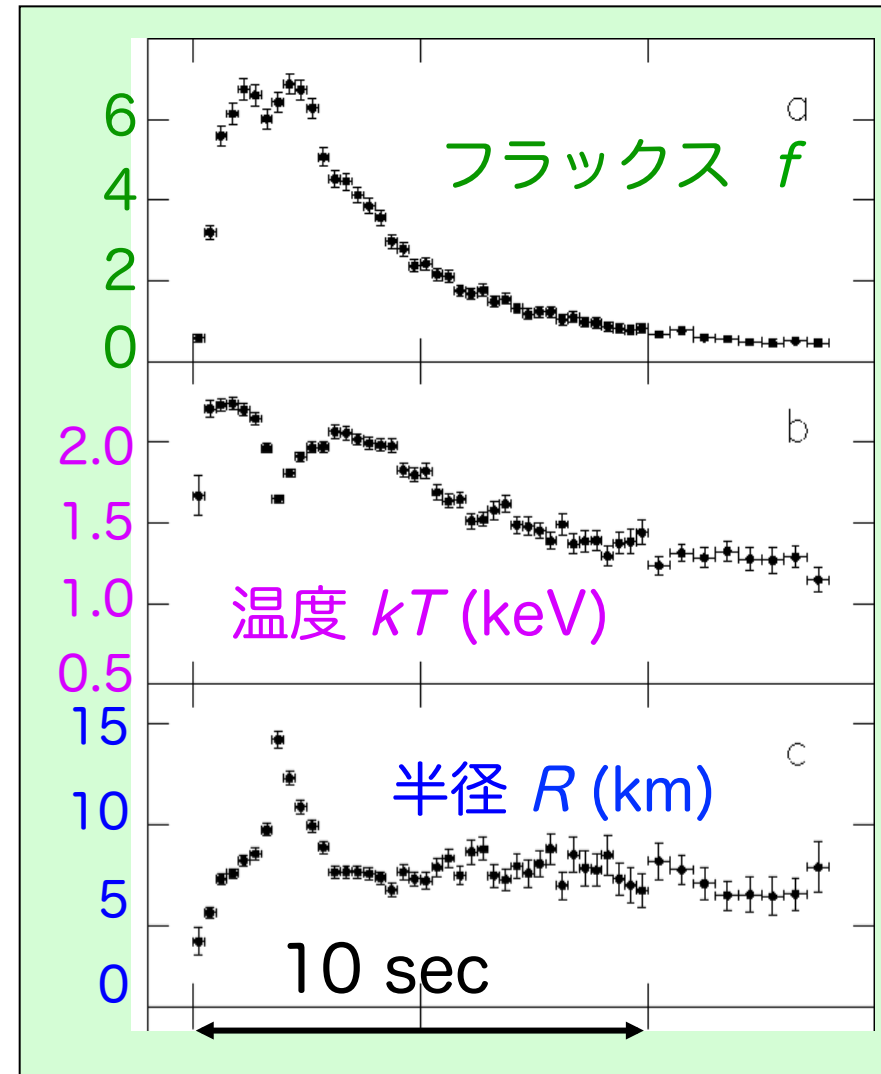
- 弱磁場NSに連星の相手からガスが降着する系。
- NSの表面で爆発的な核融合 ($H \rightarrow He$ or $He \rightarrow C$)。X線バースト。
- NS 表面は一挙に加熱され等温に。黒体放射をX線として放射し冷却。
- 黒体放射温度 kT と flux f を測定。
- シュテファン=ボルツマンの法則を用いて半径を推定。 $R \sim 10$ km

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

$$R = D(f / \sigma T^4)^{1/2}$$

距離 D はバーストピークがEddington限界にあると仮定し推定。不定性大。

NS大気による散乱で、黒体放射からずれる効果 (色温度 > 有効温度)。



Kuulkers & van der Klis (2000)

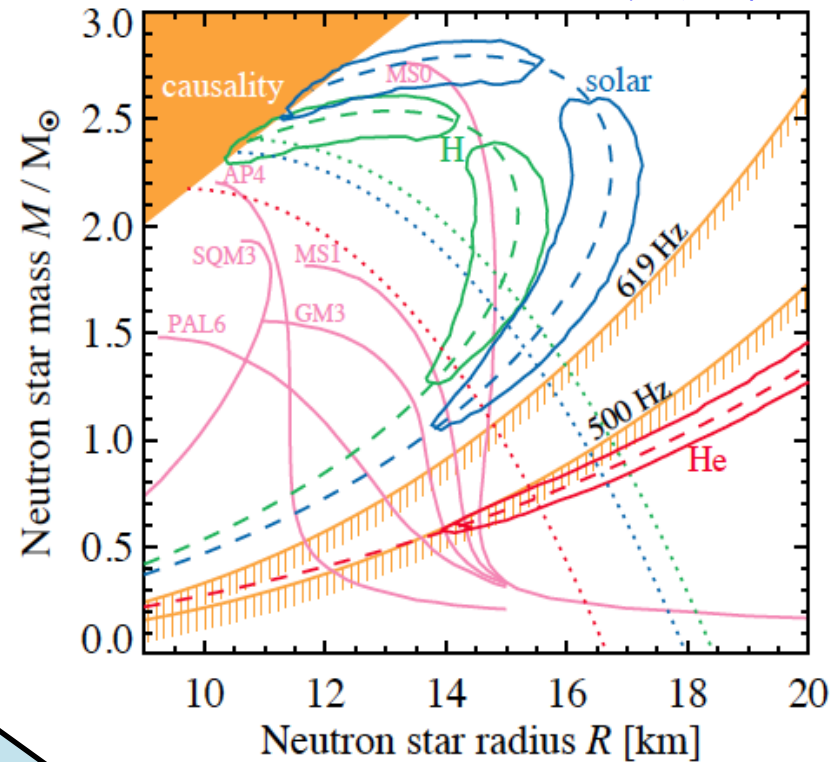
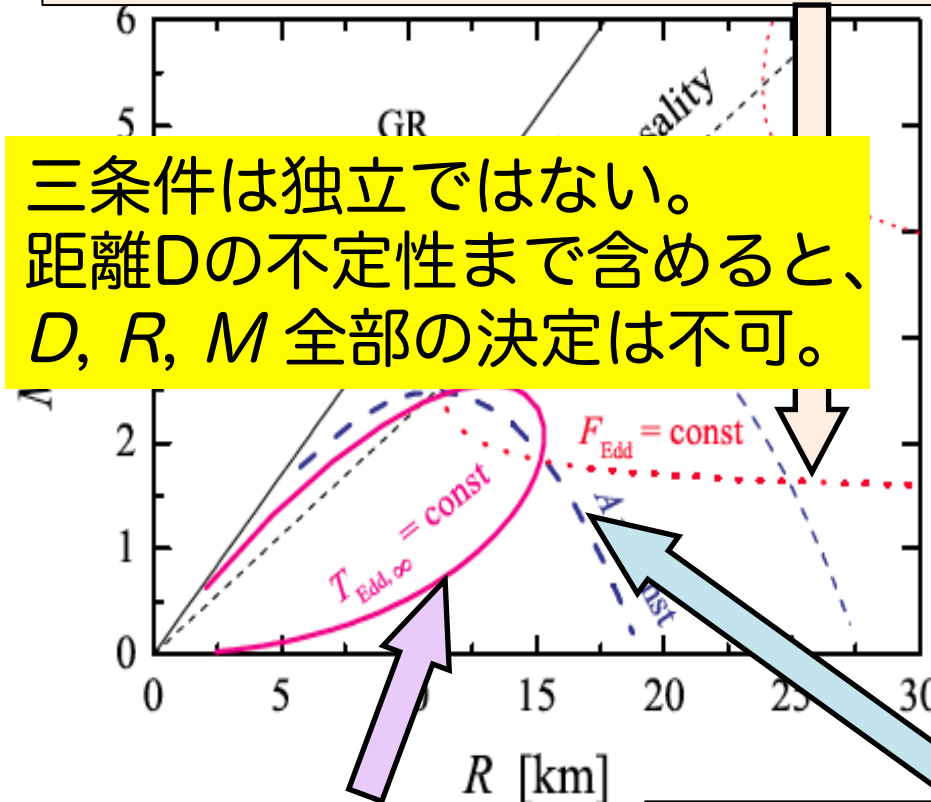
X線バースターのX線分光(2)

(Suleimanov+11)

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

三条件は独立ではない。
距離Dの不定性まで含めると、
 D, R, M 全部の決定は不可。

4U 1724-307の測定例



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 ($R^2 T^4 \propto f D^2$)

M - R 関係の測定の現状

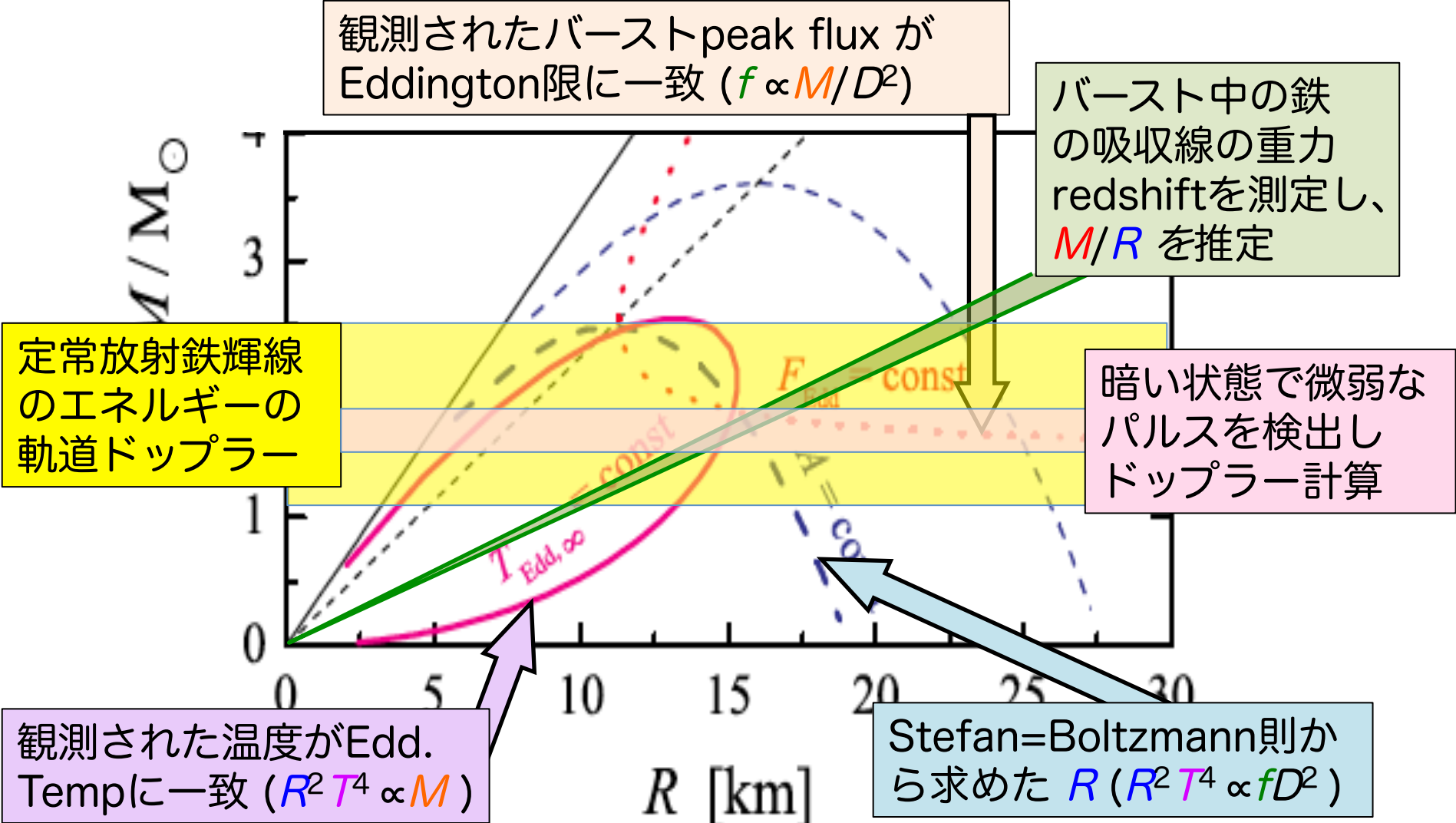
- ◇ データは増えつつあるが、まだ例数が不足、結果は混沌。
- ◇ 同一NSに対し、(M , R) 面上で独立な2つの情報が得られた例が、少ない。
- ◇ さまざまな系統誤差が、詰め切れていない。

今後の見通し

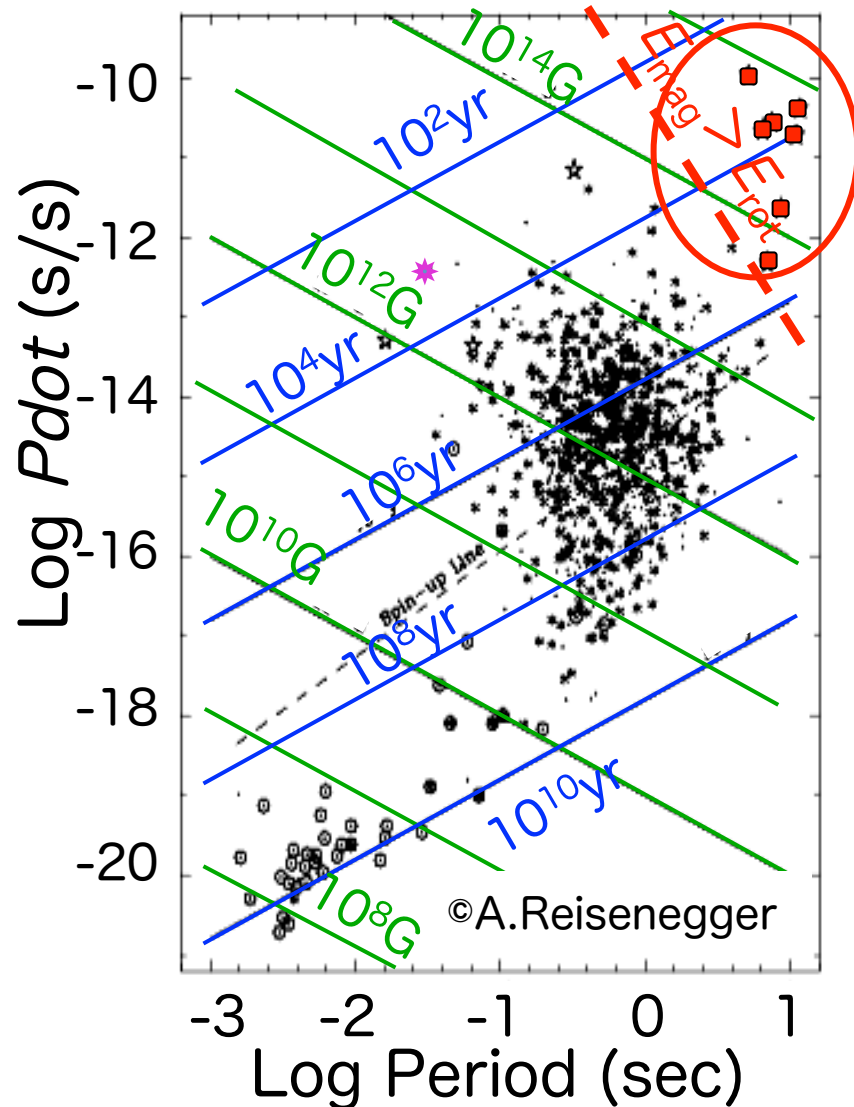
次期X線衛星ASTRO-H (2014打上予定) を用いたX線バースターのX線観測が有望。

- ◇ 「すざく」を上回る、**広帯域での高い検出感度**。
- ◇ 「すざく」で動作しなかったマイクロカロリメータによる**高精度のX線分光** ($\Delta E/E \sim 0.07\%$)。

ASTRO-H によるX線バースターの観測



NSの磁性：P-Pdot図



“パルサーは回転エネルギーを磁気双極子に変換することでスピンドアウンする”

$$I\omega\dot{\omega} \propto (B\sin\theta)^2\omega^4R^2$$

$$\longrightarrow B\sin\theta \propto \sqrt{P\dot{P}}$$

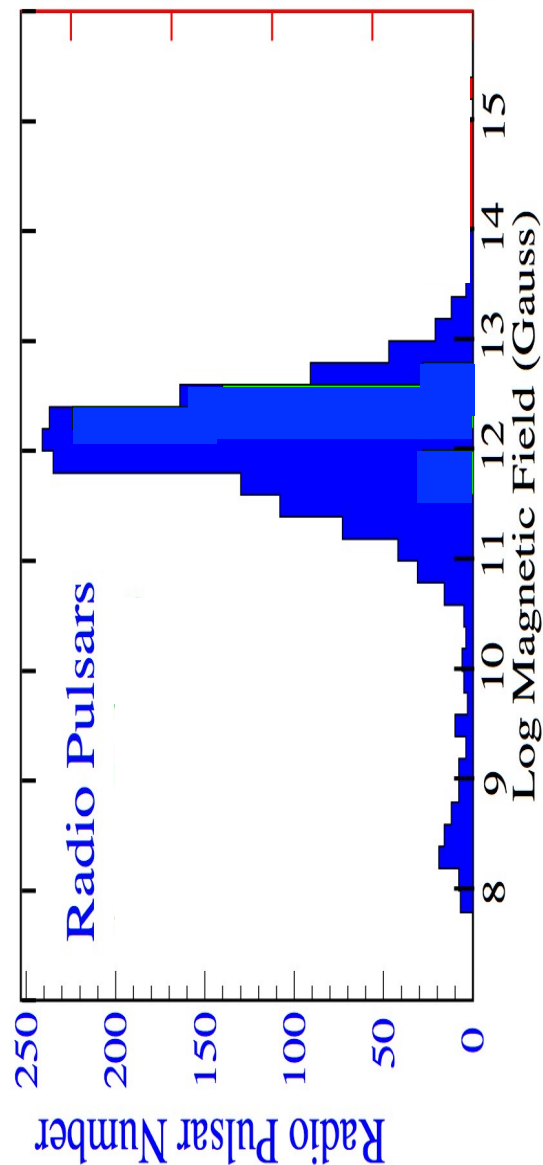
$$d\omega/dt \propto -B^2\omega^3$$

$$\longrightarrow P(t) = P_0(1 + t/t_0)^{-1/2}$$

特性年齢

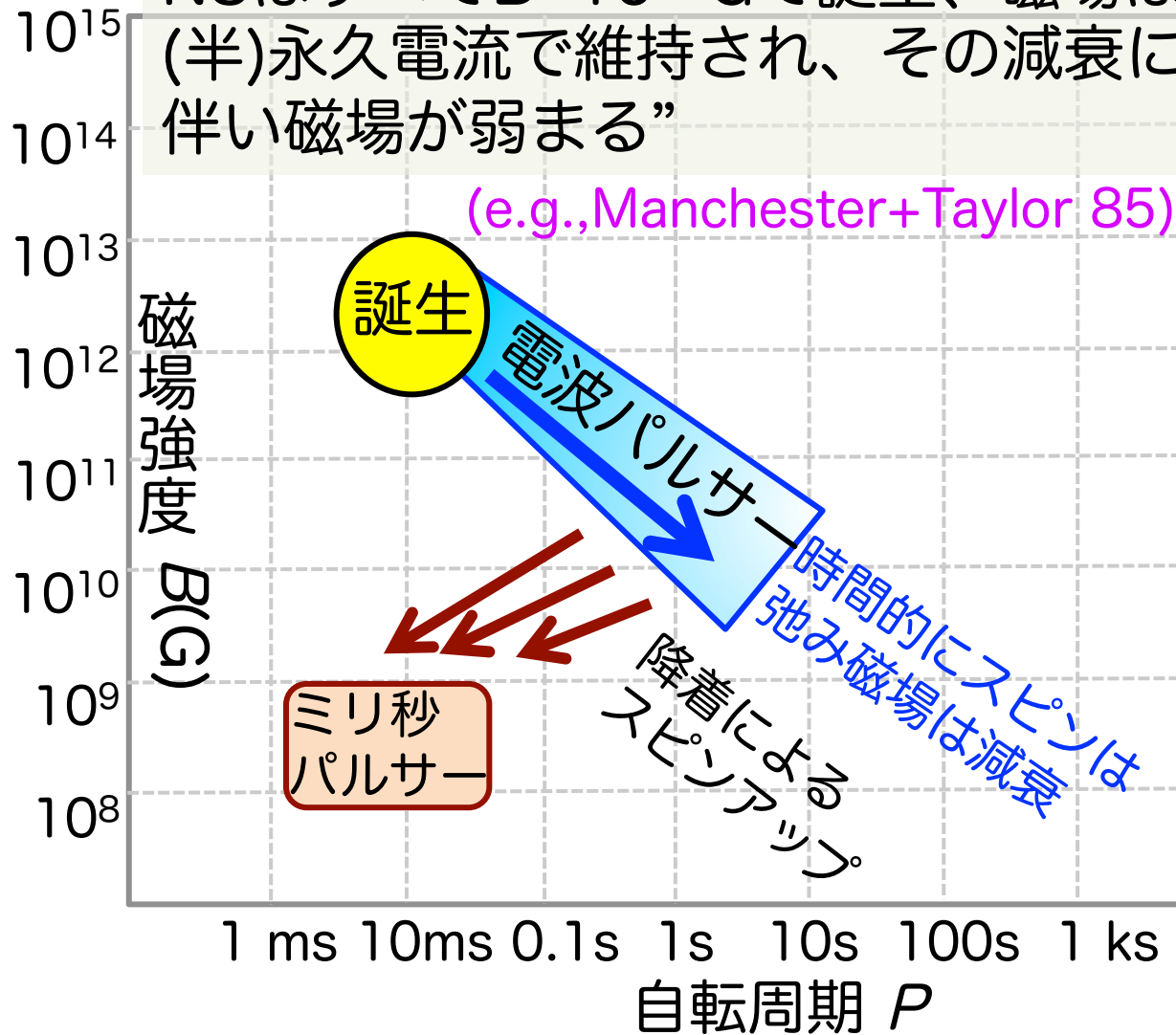
$$\tau \equiv P/2\dot{P}$$

磁場と自転周期の変化：(1)1990年代



“NSはすべて $B \sim 10^{12}$ Gで誕生、磁場は(半)永久電流で維持され、その減衰に伴い磁場が弱まる”

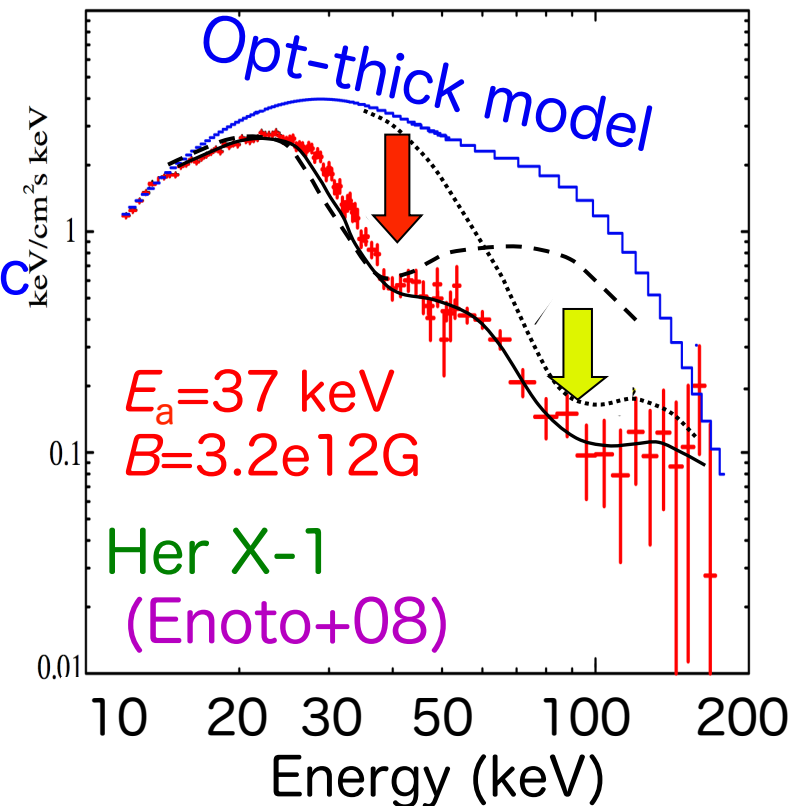
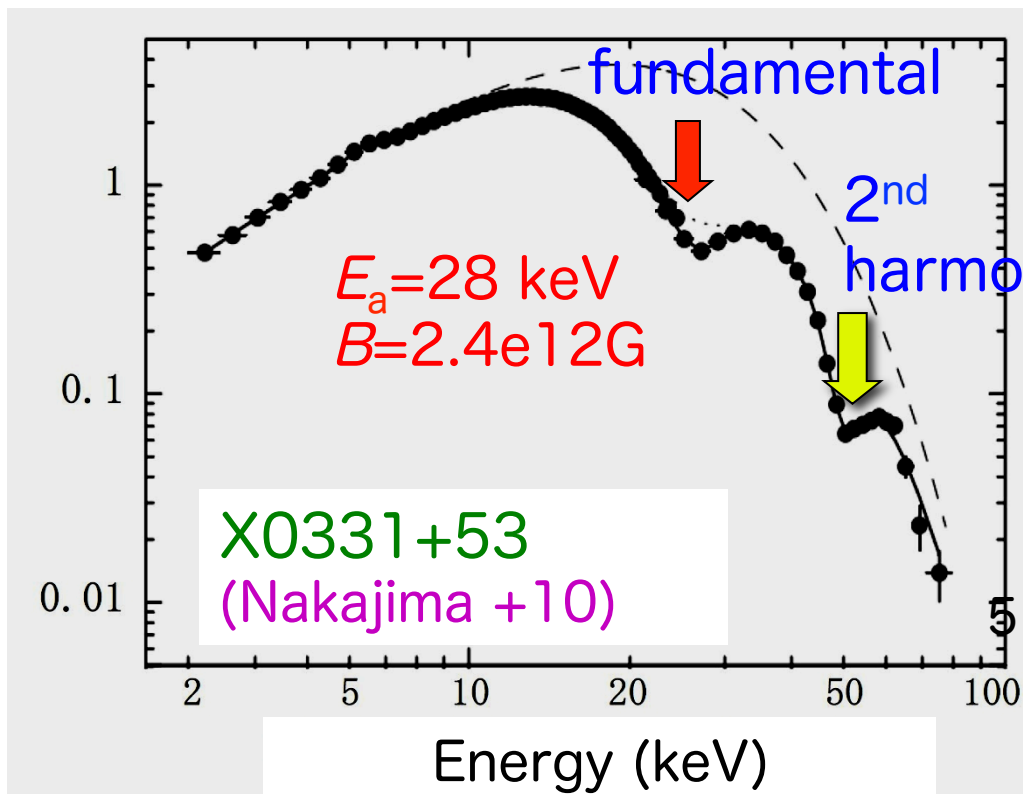
(e.g., Manchester+Taylor 85)



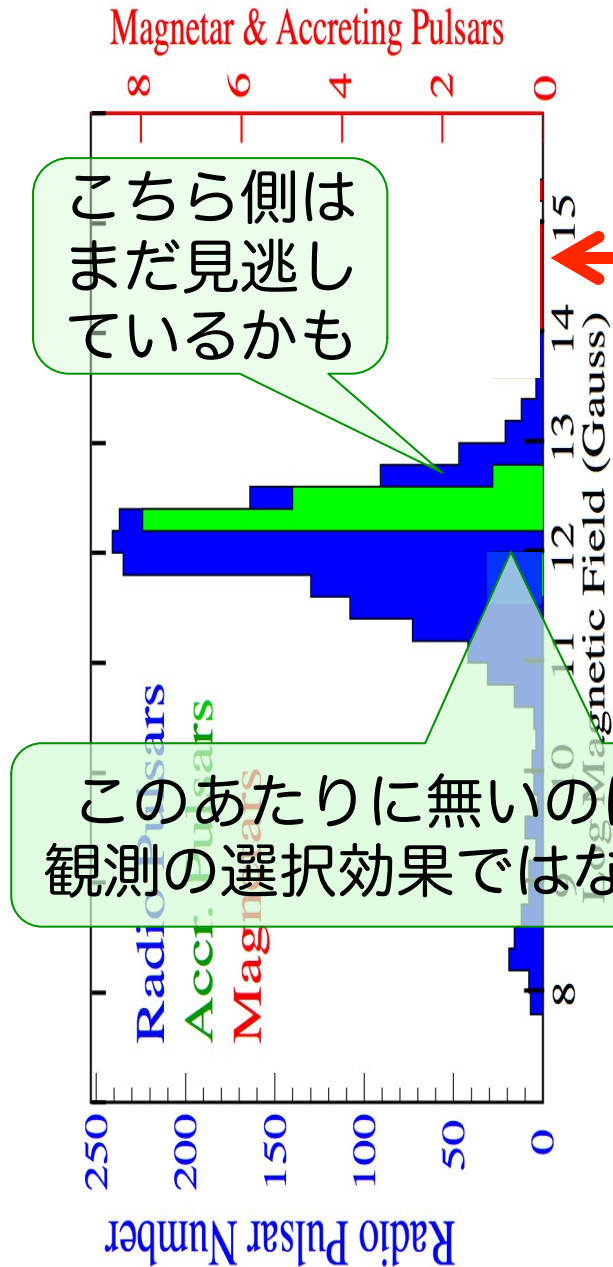
電子サイクロトロン共鳴(ECR)の利用

既知の連星X線パルサー~40 個の約半数で、スペクトル中に ECRによる吸収線を検出、磁場測定に成功 (Makishima +99).

$$\text{共鳴エネルギー} = \hbar e B / 2 \pi m_e = 11.6 (B/10^{12} \text{G}) \text{ keV}$$



磁場と自転周期の進化(2): 1990年代後半の変革



マグネター(超強磁場+磁気駆動?)の登場
(Duncan+Thompson 95)

降着トルクにより
スピン周期ばらつく

誕生

連星パルサー

電波パルサー
(伊藤+95)

磁場減衰の徴候
無し(三原+95,
牧島+99)

ミリ秒
パルサー

弱磁場で生まれるのか?
強磁場のものがどこかで
ジャンプするのか?

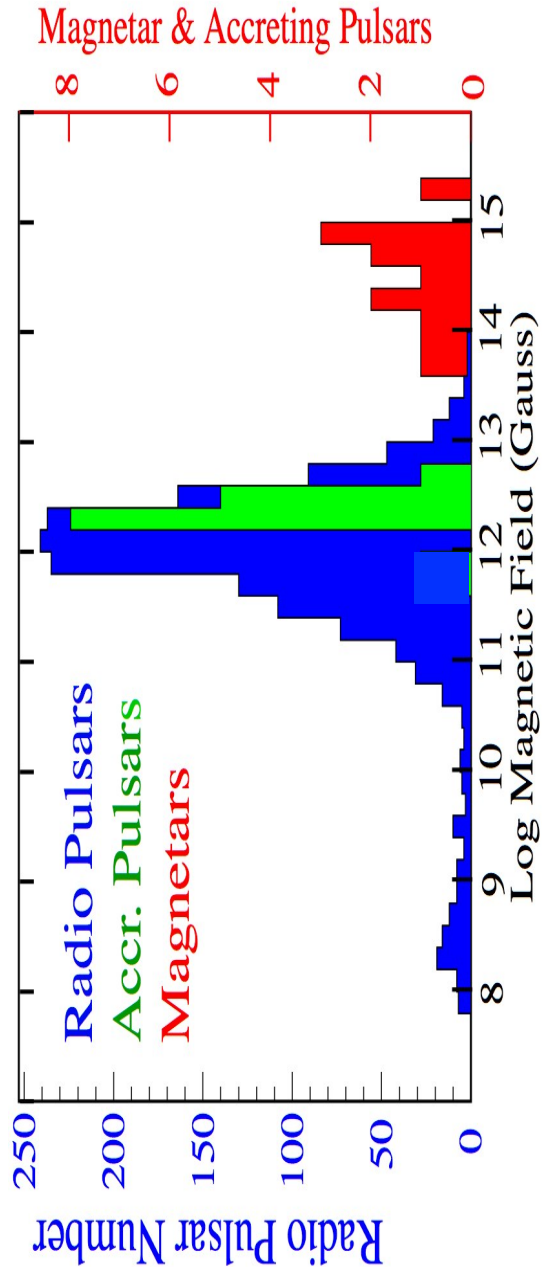
1 ms 10ms 0.1s 1s 10s 100s 1 ks
自転周期 P

NSの磁性の起源

- ◇ NSの磁場は何によって保持されているか？
- ◇ ECR計測の結果は「半永久電流とその減衰」では説明不可。
- ◇ 中性子の磁気モーメント整列による核物質強磁性？
(Makishima+99)

- ◇ NS全体が強磁性になれば、マグネターが十分に説明可能。
- ◇ 磁場は $\sim 10^{15}$ G から強磁性相が全体の1-0.1%になるまで磁区の対消滅などで減衰？ $< 10^{12}$ G には減衰せず？
- ◇ 弱磁場のNSは誕生時から、全体が常磁性、もしくはどこかの時点で、強磁性から常磁性に相転移？

磁場と自転周期の進化(3)



2012/8/30

極めて若い
→活動時間
短い→大量
に誕生？

誕生直後の急速
スピンドウン

誕生

マグネターを
含む連星？

誕生

電波パルサー

連星パルサー

弱磁場で誕生？
強磁場のもの相転移？

ミリ秒
パルサー

多数の見えない
マグネター末裔？
磁気活動は終了、
スピンは既に遅い

1 ms 10ms 0.1s 1s 10s 100s 1 ks

自転周期 P

ASTRO-Hによるマグネター研究戦略

1. マグネターと通常NSの誕生環境の違いを探る

高精度X線分光計で、マグネターに付随するSNRと他のII型SNRの違い（元素組成、爆発エネルギーetc.）を探索。

2. 大量の「活動を終えたマグネター」の探索

「あすか」銀河面サーベイ天体から候補を選び、CCDカメラで軟X線検出、硬X線イメージャーでパルスとハードテールを探索。

3. ギャップを埋める $B \sim 10^{13}$ G の天体を探索

超長周期X線パルサーなどの候補天体を観測：

3a. 硬X線イメージャーを用い、50-150 keVにECR探索。

3b. 高精度X線分光計でパルスに伴う鉄輝線のドップラー速度を測り、Alfven半径を決定。

4. マグネターが真に超強磁場天体であるか探る

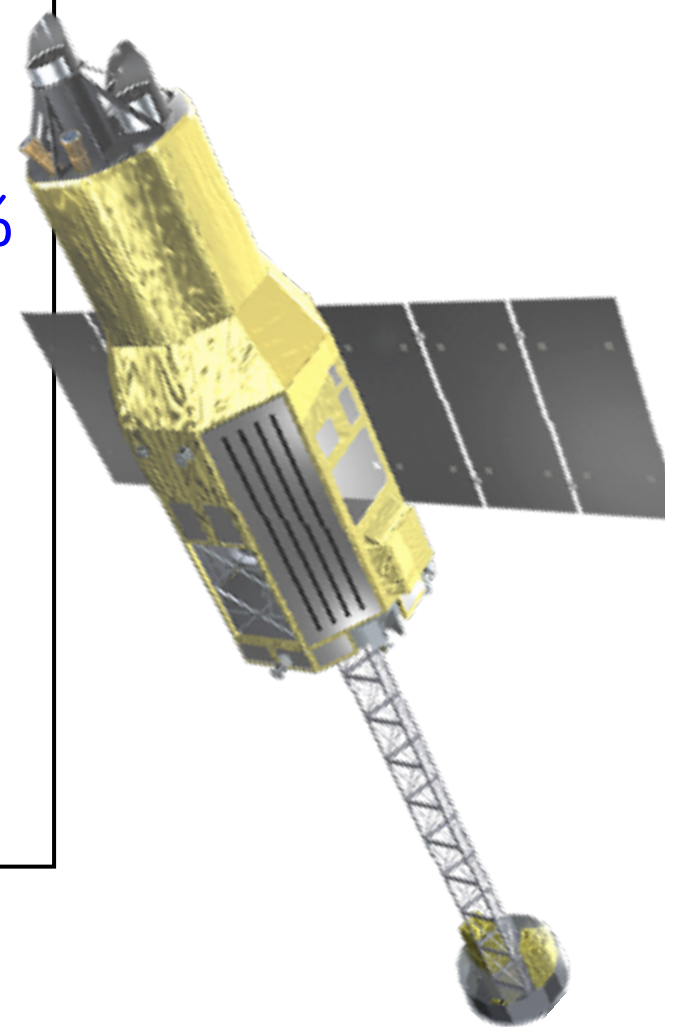
軟ガンマ線検出器でマグネターの200-600 keV を高感度で観測。
511 keV ガンマ線が「2光子分裂」を繰返し、硬いハード成分を作っているのでは？

ASTRO-H

「すざく」後継機、2014に打ち上げ予定

日本+米国NASA+欧州ESA+..の国際協力

- ◇ 軟X線ミラー+マイクロカロリメータ：
0.5-12 keV, エネルギー分解能 $\sim 0.1\%$
- ◇ 軟X線ミラー+ X線CCDカメラ：
0.3-12 keV、40分角の広視野撮像
- ◇ スーパーミラー + 硬X線イメージャー：
5~80 keV の撮像分光
- ◇ 軟ガンマ線検出器：
60~600 keV、コンプトンカメラ



X線で見た「かに星雲」とそのパルサー

