

マグネター星震学

榎山和己 (京大・天体核・D2)

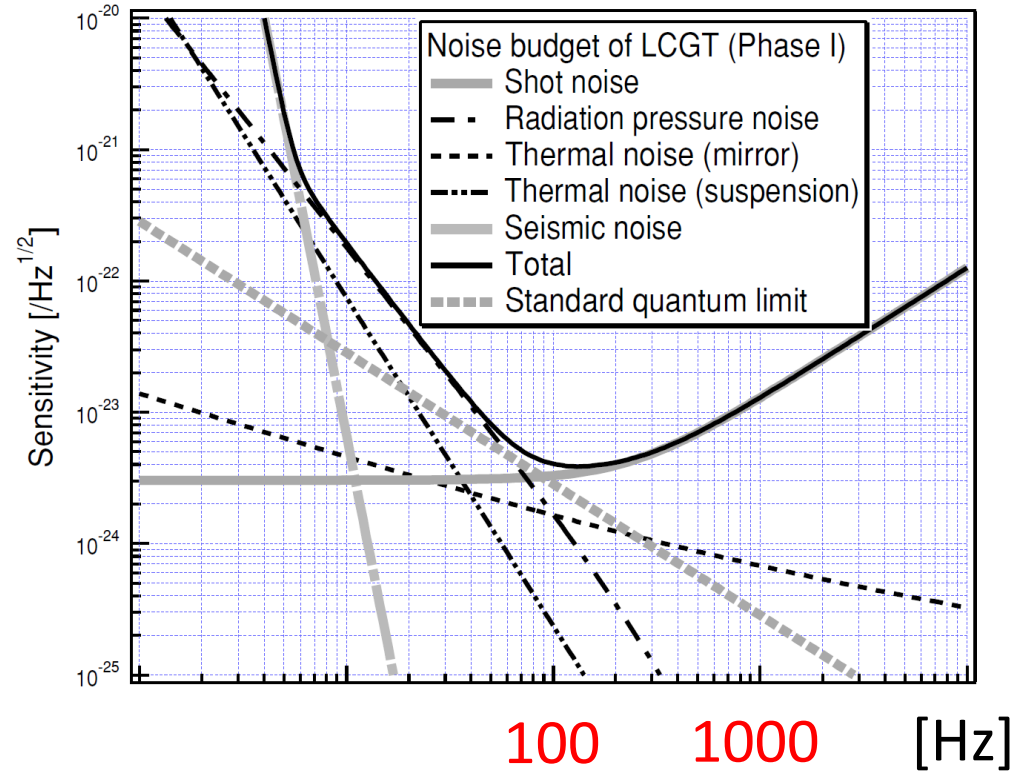
井岡邦仁 (KEK)

Congratulation!

- “LCGT計画の一部の推進が認められた。”



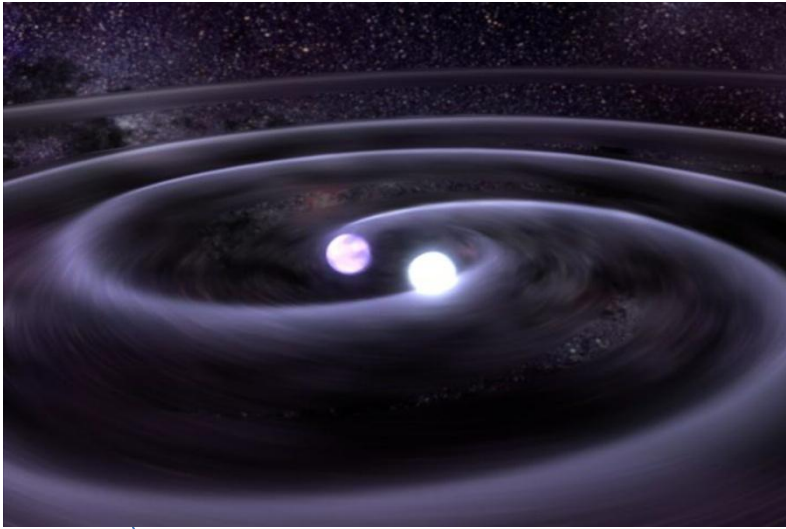
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/lcgt/lcgt2010j.html>



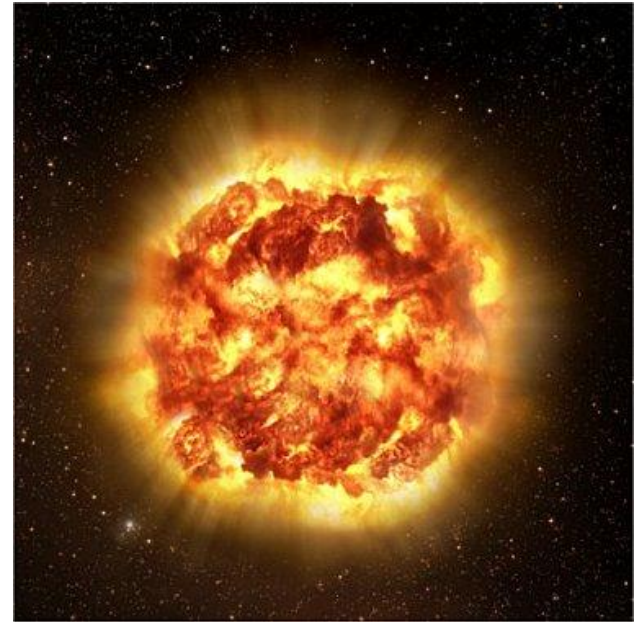
Kuroda 2006

- 重力波天文学時代の幕開けは近い！

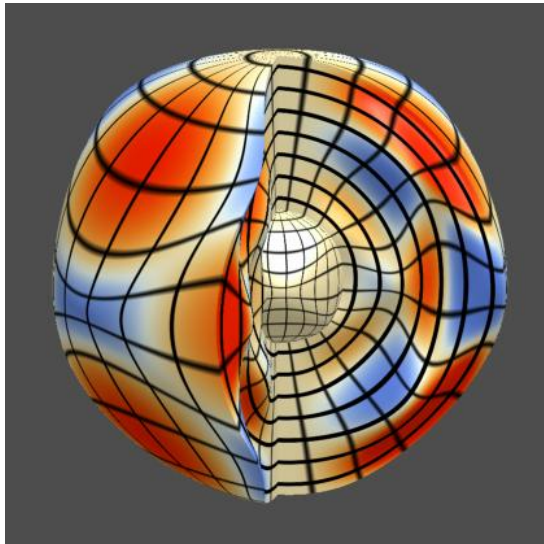
The Preliminary Survey for 100–1000Hz GW sources



コンパクト連星及びその合体



超新星爆発



中性子星の“地震”

- パルサーのglitch

- **マグネターのgiant flare**

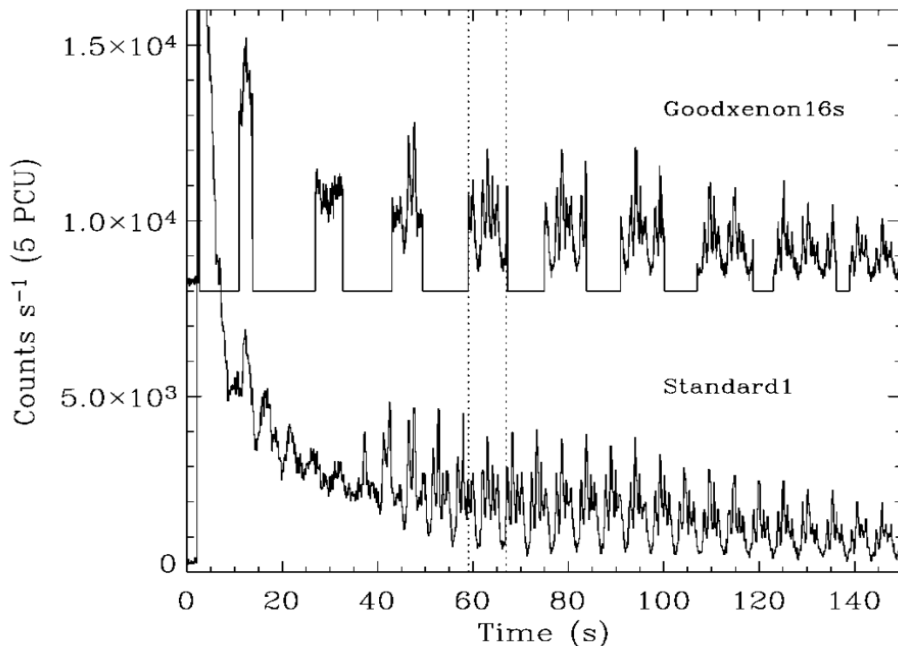
Magnetars as the GW sources

- マグネター = 超強力な磁場を帯びた中性子星

$$B \geq 10^{14-15} \text{ G} > B_c = m_e^2 c^3 / e \hbar$$

- フレア活動

- 再帰的にX線- γ 線をバースト放射 (SGR)
- 特にgiant flareは強力！



Strohmayer et al 2005

- $E_{GF} \geq 10^{46} \text{ erg}$

- Burst raising time

$$\sim 0.01 \text{ sec} \sim R_{NS} / v_a$$

v_a : Alfvén velocity



磁場の大規模な組み換え？
磁場起源の振動を励起？

マグネター星震学 1

- GWs ← 星の慣性モーメント変化 ← 極性 (polar) 振動

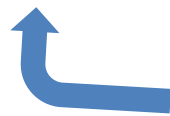
- fluid polar modes (Kokkotas & Schmidt 1999)

$$f_f \sim \text{kHz} \quad \tau_f \sim 0.1 \text{sec}$$

- Alfven polar modes (Sotani & Kokkotas 2009)

$$f_a \approx \frac{1}{2R} \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}} \sim 200 \text{Hz} \quad @ \quad B \sim 4 \times 10^{16} \text{G}$$

$$\tau_a \sim 10^6 \times \tau_f \sim 10^5 \text{sec} \sim \text{a day} !!$$


$$\tau_a \sim E/L_{GW}, \quad L_{GW} \propto f_a^{\textcircled{6}}$$

Alfven polar modeが励起されると長期間(～a day)にわたり重力波が放射されるかもしれない!

マグネター星震学 2

Alfven polar modes の振動数は中性子星内部の磁場に依存。



- ①重力波の振動数から内部磁場の強さを測る。
- ②重力波の振動数の時間変化から磁場の散逸率を測る。

振動数の変化率の評価

$$\dot{B} \approx \frac{B}{\tau_{mag}} \sim 10^5 \text{G/sec}, \quad \longrightarrow \quad \dot{f}_a \approx \frac{1}{2R} \frac{\dot{B}}{\sqrt{4\pi\rho}} \sim 10^{-9} \text{Hz/sec}$$

$$\Delta f_a \approx \dot{f}_a \times \tau_{GW} \sim 10^{-4} \text{Hz}$$

振動数の分解能 $\sim 1 / \tau_{GW} \sim 10^{-5} \text{Hz}$ \longrightarrow 観測可能!

②に関してはGWの放射durationが長いことが重要!

マグネター星震学 3

- オーダー評価

- 星の変形

$$\frac{\Delta I}{I} \equiv \epsilon \lesssim \frac{(B^2/8\pi)(4\pi R^3/3)}{GM^2/R} \sim 4 \times 10^{-4} \left(\frac{B}{4 \times 10^{16} \text{G}} \right)^2$$

- エネルギー

$$\Delta W \approx \frac{\epsilon^2 |\mathcal{W}|}{5} \sim 2 \times 10^{46} \left(\frac{\epsilon}{4 \times 10^{-4}} \right)^2 \text{ erg}$$

- 重力波振幅

$$h\sqrt{N} \approx h\sqrt{f_a \tau_a} \sim 8 \times 10^{-22} \left(\frac{\epsilon}{4 \times 10^{-4}} \right) \left(\frac{f_a}{200 \text{Hz}} \right)^{-1/2} \left(\frac{d}{10 \text{kpc}} \right)^{-1}$$

LCGT, Advanced LIGO, Advanced VIRGOでdetect可能！！

Event rate $\sim 1 / 10 \text{ yr}$

マグネター星震学 4

- The wave form of the GWs

$l=2, m=0$ the polar Alfvén mode + rotation (\sim sec)

$$h_+ + ih_\times = \frac{\epsilon I}{d} (\mathcal{A} + i\mathcal{B}) \exp\left(-\frac{\pi f_a t}{Q}\right) \cos \Psi(t)$$

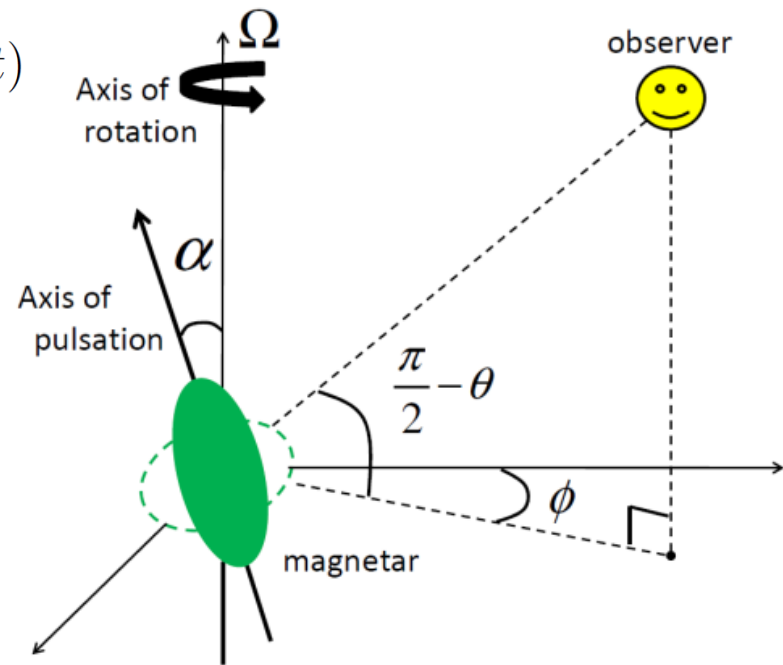
$$\Psi(t) = \psi_0 + 2\pi \left\{ f(t - t_0) - \frac{1}{2} \dot{f}(t - t_0)^2 + \dots \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \mathcal{A}(t, \Omega, \alpha, \theta, \phi) \\ \mathcal{B}(t, \Omega, \theta, \alpha, \phi) \end{array} \right) \text{ Geometrical factors}$$

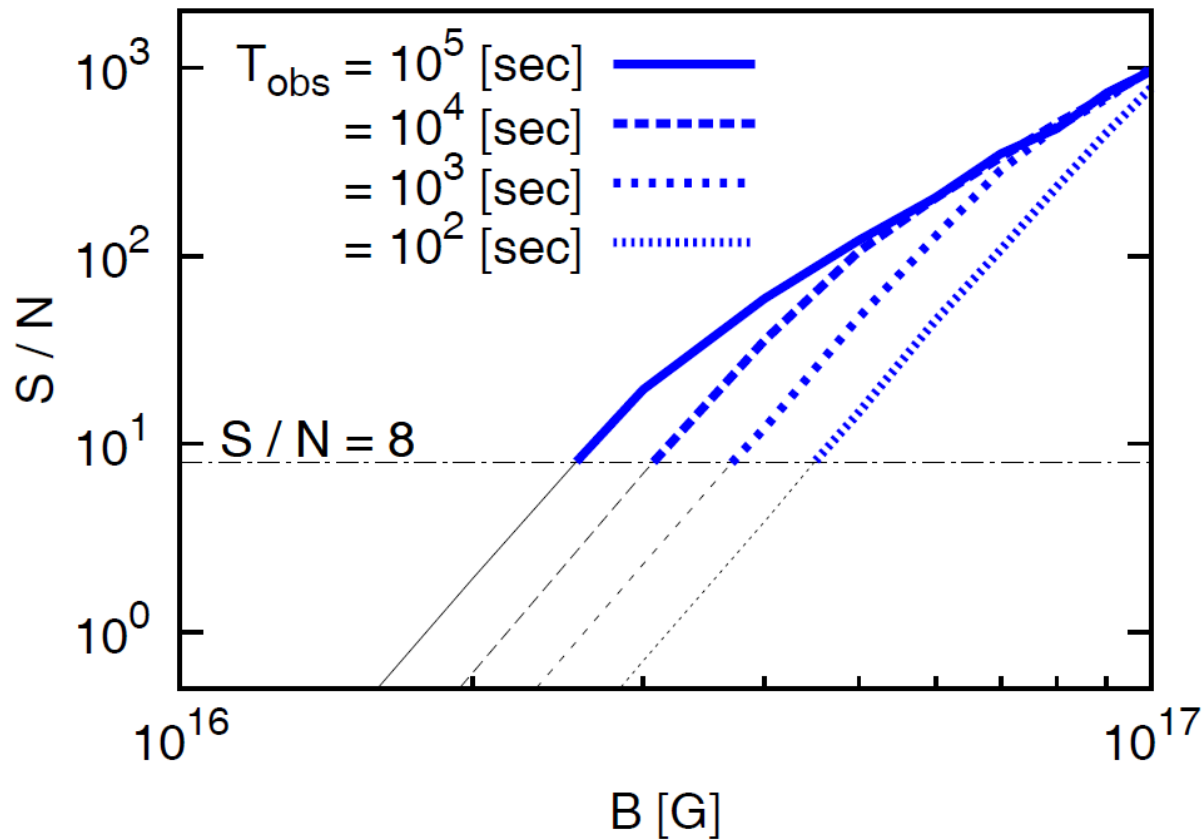
$$f \propto B, \quad \partial f / \partial t \propto \partial B / \partial t$$



Matched filtering + Fisher analysis

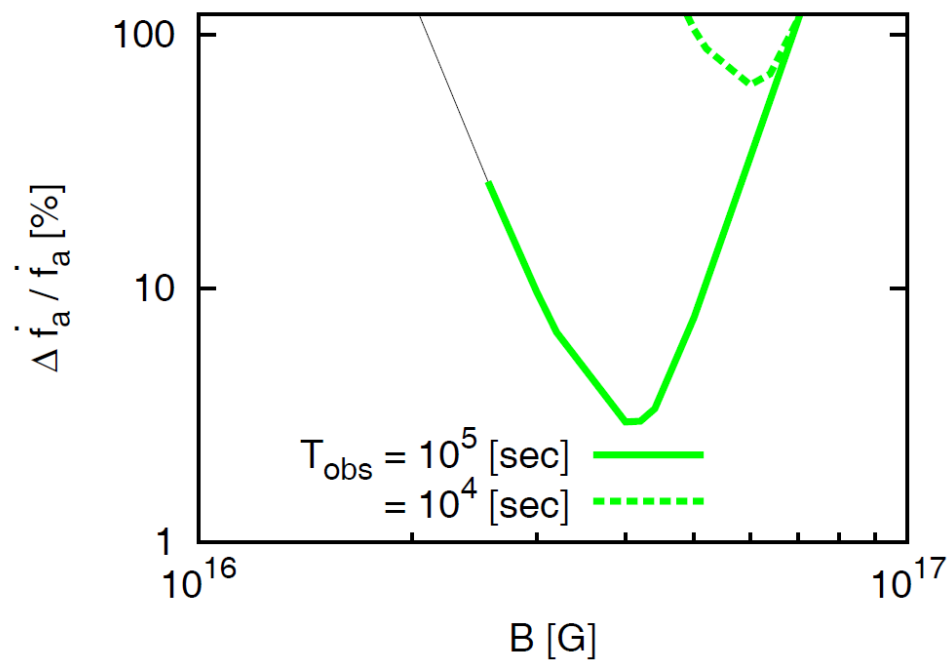
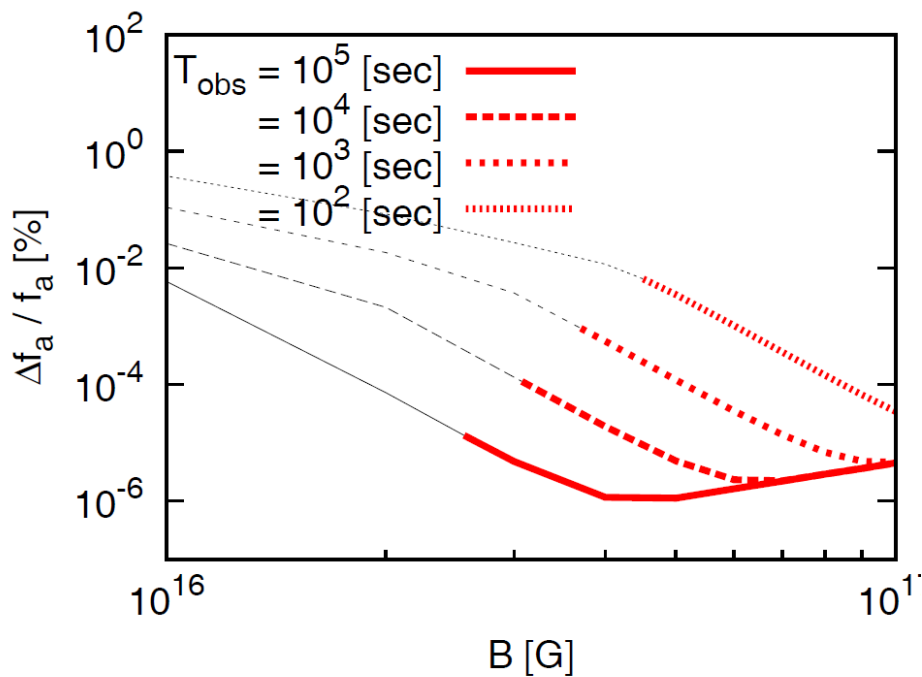


結果 1：信号/ノイズ比



Detector はLCGT、マグネターまでの距離は10kpcを仮定。

結果 2：磁場とその散逸率への制限

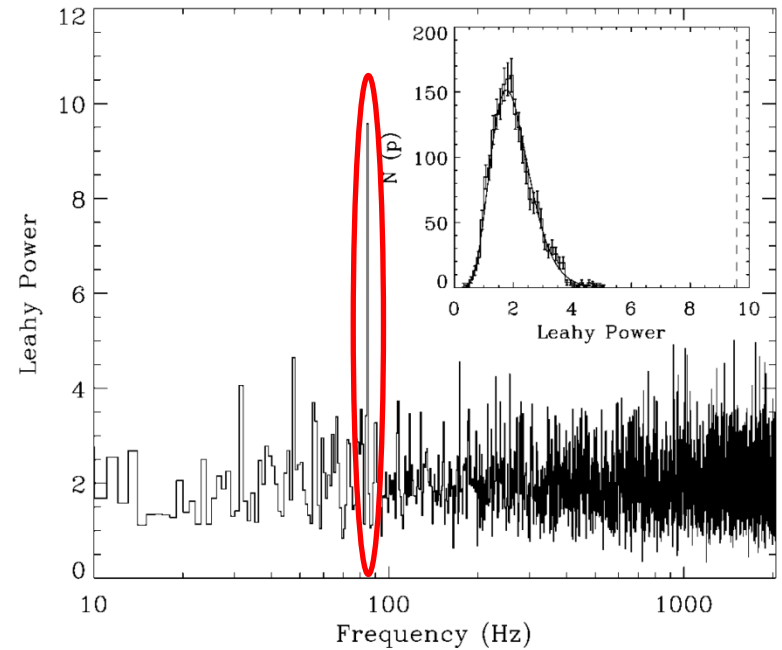
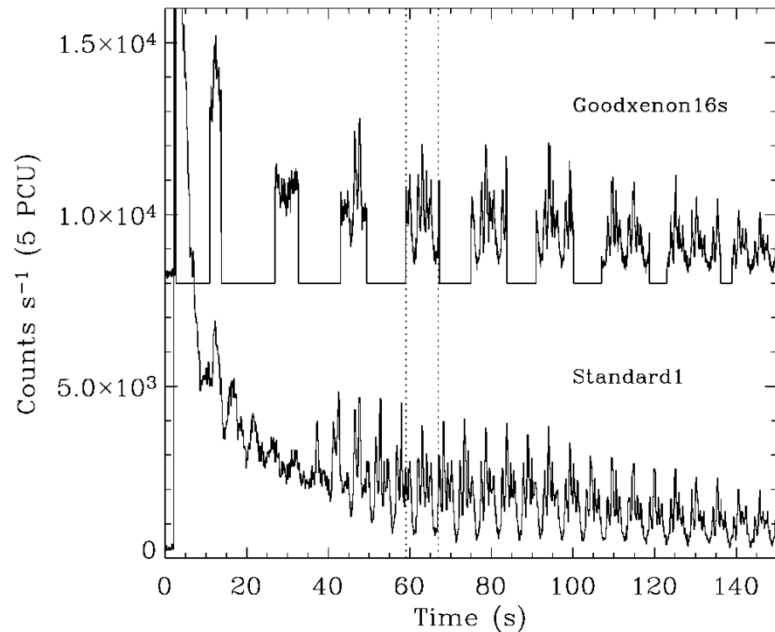


< 3×10^{16} Gの磁場でも長時間 (~ a day) 観測することで
マグネター内部の磁場とその散逸率を測ることができる。

まとめ

- 重力波天文学の時代がまもなくやってくる。
- マグネターはLCGTの重力波源になりうる。
 - Giant flare時にAlfven polar modeがたつと、長期間 (~a day) にわたり重力波が放射されるかもしれない。
 - この重力波をdetectすることによりマグネター内部の磁場とその散逸率を測ることができるかもしれない。
- 重力波星震学
 - 固有振動の振動数だけでなく、その時間微分項も将来観測では同定可能。そこから様々な物理を探る。

The Giant Flares and QPOs



Observation	Frequency	FWHM (Hz)	Period (s)	Satellite
a	17.9 ± 0.1	1.9 ± 0.2	60–230	RHESSI
b	25.7 ± 0.1	3.0 ± 0.2	60–230	RHESSI
c	29.0 ± 0.4	4.1 ± 0.5	190–260	RXTE
d	92.5 ± 0.2	$1.7^{+0.7}_{-0.4}$	170–220	RXTE
e	92.5 ± 0.2	$1.7^{+0.7}_{-0.4}$	150–260	RXTE
f	92.7 ± 0.1	2.3 ± 0.2	150–260	RHESSI
g	92.9 ± 0.2	2.4 ± 0.3	190–260	RXTE
h	150.3 ± 1.6	17 ± 5	10–350	RXTE
i	626.46 ± 0.02	0.8 ± 0.1	50–200	RHESSI
l	625.5 ± 0.2	1.8 ± 0.4	190–260	RXTE
m	1837 ± 0.8	4.7 ± 1.2	230–245	RXTE

Strohmayer et al 2005

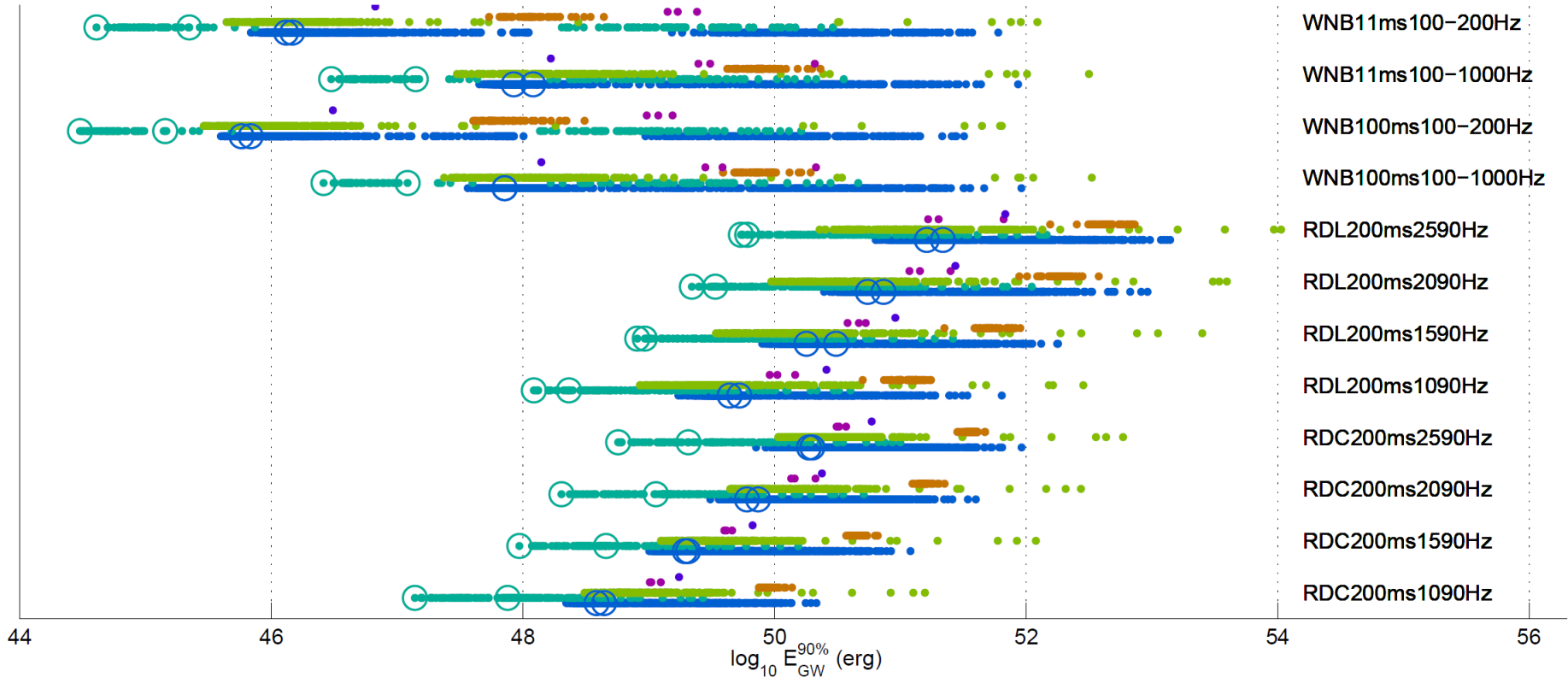
~100Hz QPOs have been observed.

Abbott et al 2007

マグネター星震学 0

- The pulsation modes of the magnetars
 - crust modes ($\sim 100\text{Hz}$)
 - Fluid modes ($\sim \text{kHz} \sim v_s/R$)
 - torsional modes
 - polar modes
 - Alfvén modes ($\sim 100\text{Hz} \sim v_a/R \propto B$)
 - torsional modes
 - polar modes

GW from Magnetar - 現状の制限



(注) データ解析は高々 $\sim 10^3 \text{sec}$ しか行ってない。