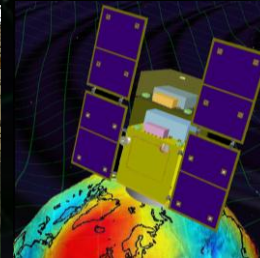
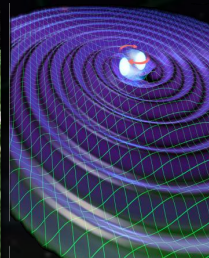
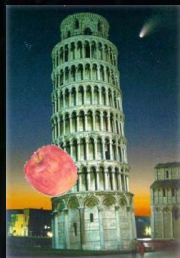


宇宙・高エネルギー物理学特別講義 III

重力波天文学

安東 正樹 (国立天文台)



第3章 観測とデータ解析

重力波検出器による観測

観測データの解析と解釈

⇒ 観測により得られた結果

連続重力波解析

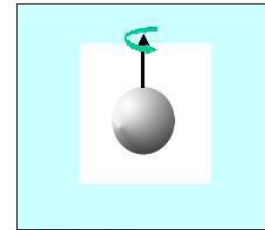
	短時間 (重力波イベント)	長時間 (定常重力波)
波形 予測可能	 <p>連星の合体 → チャープ波</p> <p>ガンマ線 バースト</p>	 <p>パルサー, LMXB → 連続波</p>
波形が 予測できない	 <p>超新星爆発 → バースト波</p>  <p>ソフトガンマ線 リピータ</p>	 <p>背景重力波 → 定常ランダム波</p>

・長期に渡って放射される

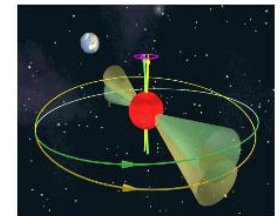
準定常的・正弦波的な重力波

- 発生源：高速回転するコンパクト星（パルサーなど）
- 非軸対称であることが必要。
- 振幅は小さいが長期間の積分が可能。

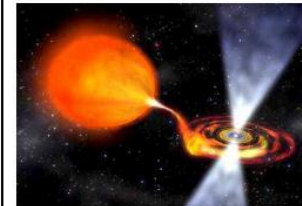
伊藤氏資料より (2011)



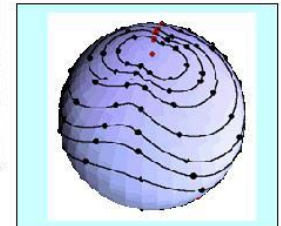
Mountain on a star



Wobbling star



Accreting star



Oscillating star

$$\text{非軸対称性} : \epsilon = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}$$

$$\text{山の高さ} : \sim 1\text{mm} \left(\frac{\epsilon}{10^{-7}} \right) \left(\frac{\text{Radius of NS}}{10\text{ km}} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{重力波振幅} : h_0 &= \frac{16\pi^2 G \epsilon I_{zz} f^2}{c^4 D_L} \\ &= 4.2 \times 10^{-27} \left(\frac{\epsilon}{10^{-7}} \right) \left(\frac{I_{zz}}{10^{45} \text{ g} \cdot \text{cm}^2} \right) \left(\frac{f_0}{100 \text{ Hz}} \right)^2 \left(\frac{D_L}{1 \text{ kpc}} \right) \end{aligned}$$

※強い磁場 (10^{15} G) をもつ

中性子星なら、 $\epsilon \sim 10^{-6}$ 程度になる。 Cutler (2002)

Maximum ellipticity (Owen 2005)

(1) Normal conventional neutron star.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} = & 3.4 \times 10^{-7} \left(\frac{\sigma_{\max}}{10^{-2}} \right) \left(\frac{1.4 M_{\odot}}{M} \right)^{2.2} \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^{4.26} \\ & \times \left[1 + 0.7 \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{10 \text{ km}}{R} \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

(2) Solid strange star

$$\begin{aligned} \epsilon_{\max} = & 2 \times 10^{-4} \left(\frac{\sigma_{\max}}{10^{-2}} \right) \left(\frac{1.4 M_{\odot}}{M} \right)^3 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^3 \\ & \times \left[1 + 0.14 \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{10 \text{ km}}{R} \right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

(3) Hybrid star

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_{\max}}{5 \times 10^{-6}} = & \left(\frac{\sigma_{\max}}{10^{-2}} \right) \left(\frac{1.4 M_{\odot}}{M} \right)^2 \left(\frac{R_c}{8 \text{ km}} \right)^6 \left(\frac{10 \text{ km}}{R} \right)^2 \\ & / \left[1 + 0.7 \left(\frac{M}{1.4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right) \right], \end{aligned} \quad (15)$$

伊藤氏資料より (2011)

• 重力波の放射 → パルサーはスピンドウン.

⇒ 重力波振幅に上限値.

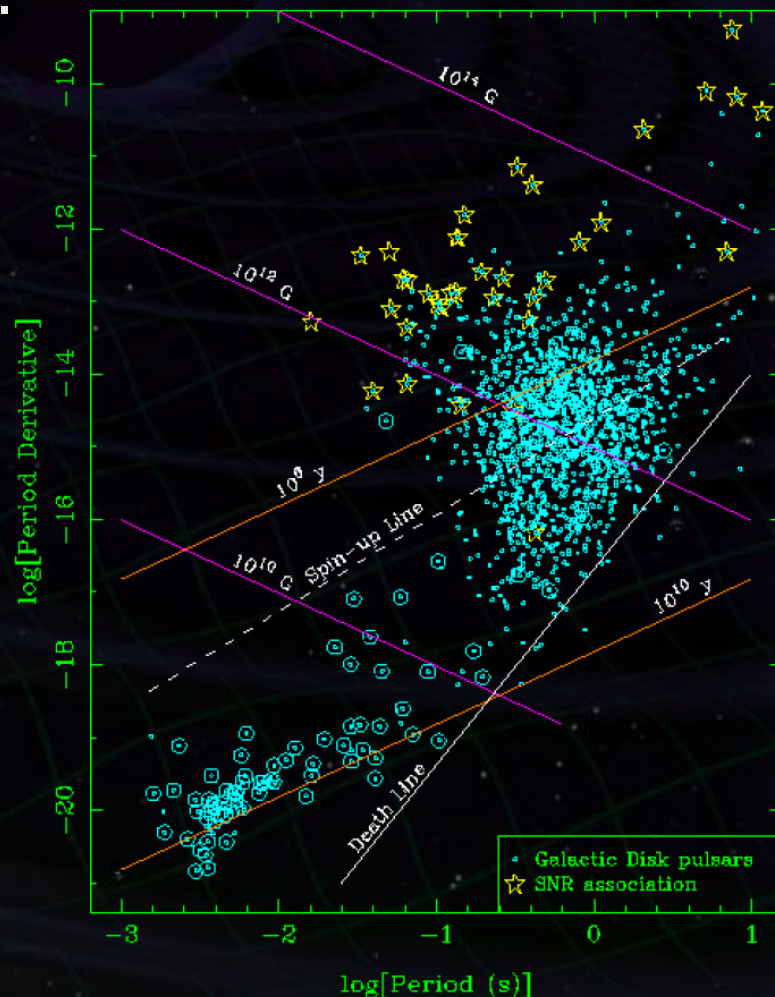
観測されたスピンドウンが全て重力波放射によるエネルギー損失に起因するとしたもの.

スピンドウンによる上限値

$$h_{\text{spin-down}} = \left(\frac{5 G I_{zz} \dot{P}}{2 c^3 D_L^2 P} \right)$$

※降着によりスピニアップされる可能性もある.

かにパルサー : $h_{\text{spin-down}} = 1.4 \times 10^{-24}$



- 連続重力波探査：波形が分かっている → マッチト・フィルター
 - 定常的に放射される正弦波信号を探査.
 - 狭い周波数帯に信号が集中 → 検出器雑音の周波数依存性は無視できる.

•**マッチト・フィルター** $S(t) = (x, T) = 4 \int_0^\infty \frac{\tilde{x}(f) \cdot \tilde{T}^*(f)}{S_n(f)} df$

白色雑音・正弦波信号

⇒ 連続波解析の場合 $\tilde{s}(f) = \int_{t_1}^{t_2} s(t) e^{-i\omega t} dt$

フーリエ変換に帰着

•SNR：積分時間の平方根で向上.

実際には、振幅・位相変調の効果を補正する必要がある。
(地球の自転・公転, パルサーのスピンドアウンなど)

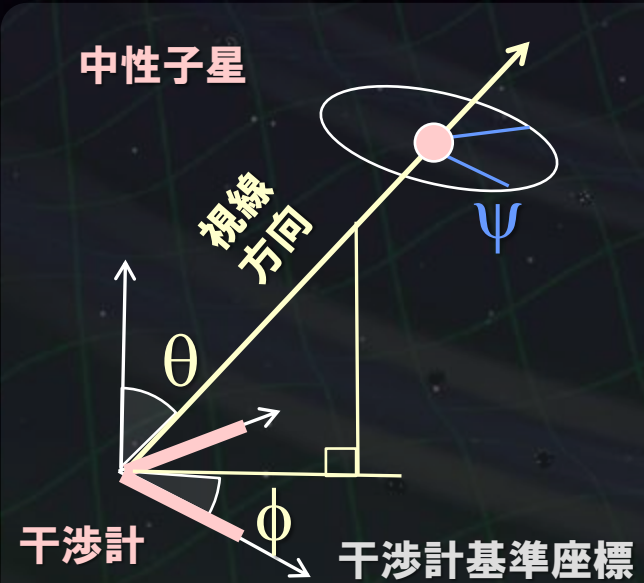
振幅・位相の変化

・地球の運動

- 地球の自転：アンテナパターンの時間変動 → 振幅変化.
 パルサーとの相対速度変化 → 位相変化.
- 地球の公転：パルサーとの相対速度変化 → 位相変化.

・パルサーの運動

- パルサーのスピンダウン → 位相変化.
- パルサーの固有速度 → 変動成分は位相変化.



干渉計のアンテナパターン

$$F_+(\theta, \phi, \psi), F_{\times}(\theta, \phi, \psi)$$

θ, ϕ : 天球上の位置
 ψ : 偏極角 (x軸の相対角)

振幅・位相の補正

- ・振幅・位相変化の効果も含めてテンプレートとする.
- 既知のパルサーからの重力波探査
 - 天球上の位置, スピンダウンなどの情報がある.
 - 変調がかけられた重力波形をテンプレートとする.

$$h(t) = A(t) \times e^{-i[\omega t - \phi(t)]}$$

↑
振幅変調

↑
位相変調

$$\Leftrightarrow \tilde{s}(f) = \int_{t_1}^{t_2} s(t) \cdot A(t) e^{-i\phi(t)} e^{-i\omega t} dt$$

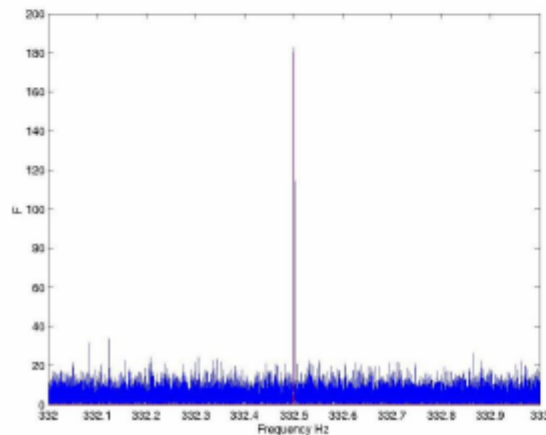
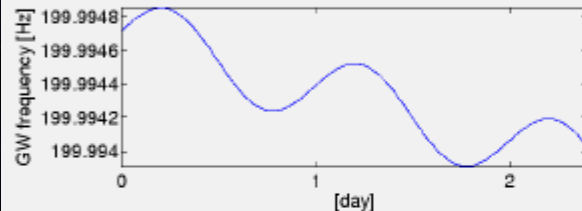
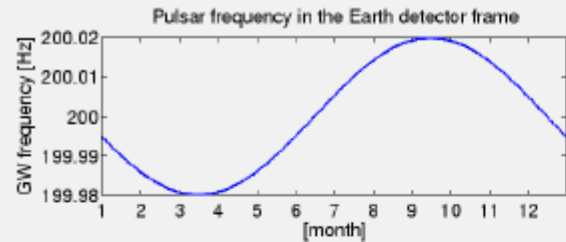
検出器出力の

振幅・位相復調に相当.

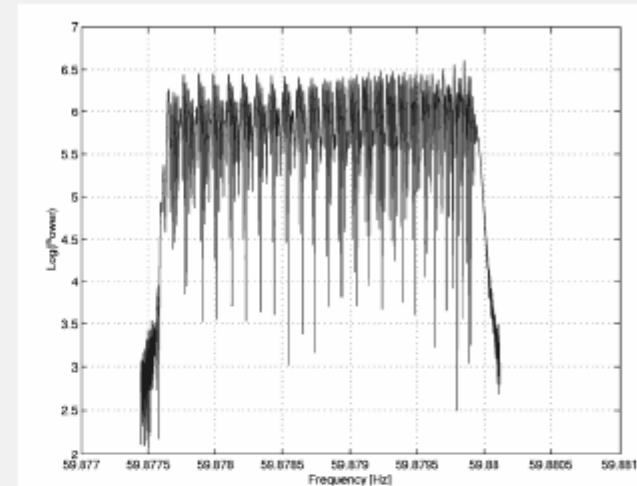
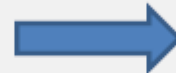
- 未知のパルサーからの重力波探査
 - 未知パラメータ領域を探索.
 - * 超新星残骸での探査 : 位置は分かる, 周波数・スピンダウンは未知.
 - * 未知パルサーの探査 : パラメータ領域をスキャン.

伊藤氏資料より (2011)

地球上の検出器での重力波周波数



Fourier Transform



Demodulation:
Dopper効果で複数の周波数ピンに広がったパワーを、周波数ピン1個にまとめて信号対雑音比 (Signal to noise ratio: SNR)を稼ぐ。

13

パルサー信号を記述するパラメータ

• 波源の物理量 3つ + α

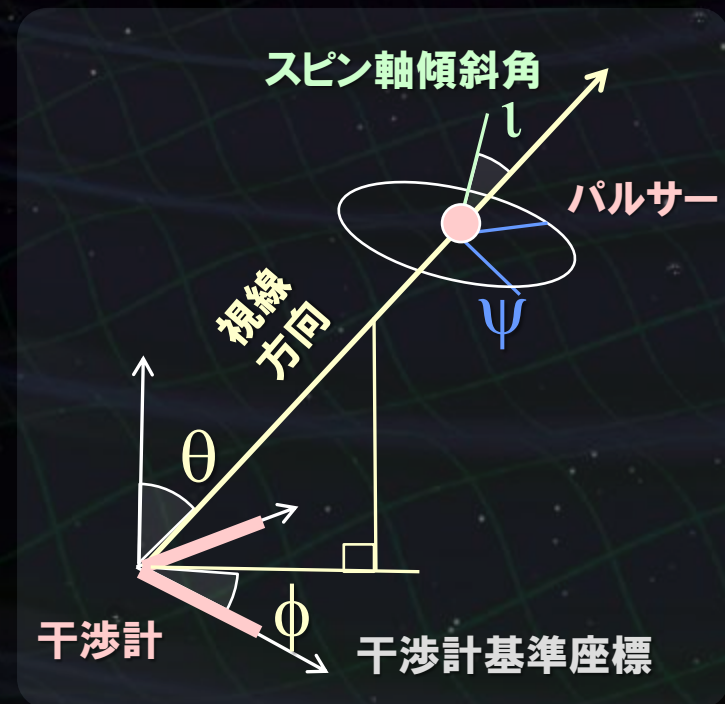
Frequency	f
Freq. change	\dot{f}, \ddot{f}, \dots
Angle between spin and symmetric axes	Θ

• 望遠鏡との位置関係 8つ

Luminosity distance	D_L
Inclination angle	i
Source sky position	θ, ϕ
Polarization angle	ψ
Earth position	r

• 観測時のパラメータ 2つ

Initial phase	ϕ_0
Initial frequency	f_0



• Maximum-likelihood法

→ パラメータのうち幾つかは解析的に最大化できる.

Jarawnoski, Krolak,
and Schutz (1998)

Inclination angle	ι	Initial phase	ϕ_0
Polarization angle	ψ	Amplitude	$h_0 \sin \Theta$

F-Statistics

$$\mathcal{F} = \frac{T_0}{S_n(2f_0)} \frac{B|F_a|^2 + A|F_b|^2 - 2CR(F_a F_b^*)}{AB - C^2}$$

$$F_a = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} dt x(t) a(t) e^{-2i\Phi_s(t)} e^{-4i\pi f_0[t + \Phi_m(t)]}$$

$$F_b = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} dt x(t) b(t) e^{-2i\Phi_s(t)} e^{-4i\pi f_0[t + \Phi_m(t)]}$$

信号位相 $\Phi(t) = 2\pi f_0[t + \Phi_m(t; \alpha, \delta)] + \Phi_s(t; f^{(k)}, \alpha, \delta)$

$A = (a||a), B = (b||b), C = (a||b)$ **ただし** $(x||y) \equiv \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t)y(t)dt$

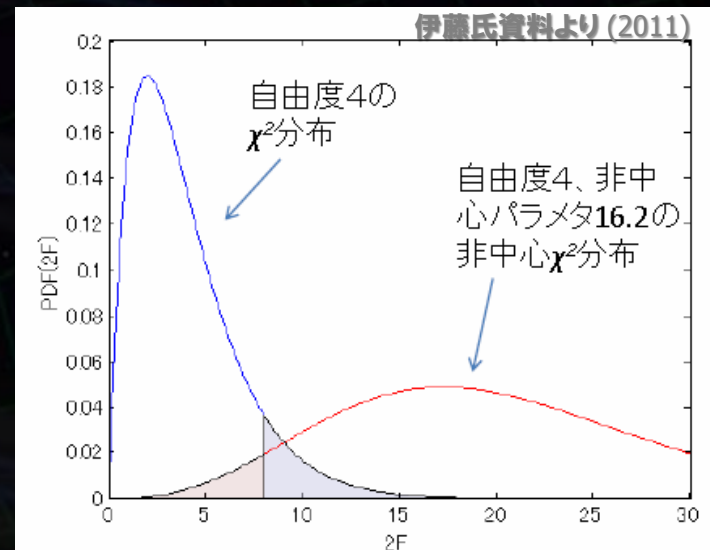
• F-Statistics : 統計的性質が解析的に求められる.

- 信号が無い時 : $2F$ は自由度4の χ^2 分布に従う.
- 信号がある時 : $2F$ は自由度4の非中心 χ^2 分布に従う

$$\text{SNR} : (\text{SNR})^2 \propto \frac{T_0 h_0^2}{S_n(2f_0)}$$

観測時間 →
← 重力波振幅
← 検出器雑音レベル

FAR, FDRを解析に求めることも可能.



•未知のパルサー

→地球の運動による変調の効果を補正するため、
天球上の細かい領域ごとに探査する必要がある。

⇒ 計算機リソースの問題。

- 信号成分が (変調補正 + フーリエ変換)
の結果、1つの周波数ビンに入る必要がある。
→ 必要な角度分解能は $1/T^2$ に比例
→ 天球上で探査すべき領域数は T^4 に比例して増大。

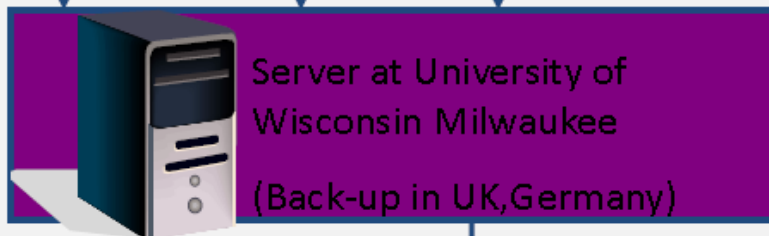
(Ex.) 800CPU (2GHz)クラスタで全天探査

→ 1ヶ月分のデータを解析するのに2000年かかる。

- ⇒ •理想的なコヒーレンと解析を諦める。 Stack-Slide法など。
•計算機能力の獲得を目指す。 → Einstein@Home

Einstein@Home

Participants computers at their homes/offices



data

result



Prepare the data



Analyze the results

AEI Germany
UWM USA

- ボランティアを募って、パソコンの計算能力をネット越しに提供してもらい、重力波パルサーを探索するSETI@Home likeなプロジェクト (BOINC based)
- もともとはパルサーからの重力波を探索するのが目的。
- 1/3の時間はアレシボのデータを使って電波パルサーを探索。
- <http://einstein.phys.uwm.edu/>

伊藤氏資料より (2011)

35

電波パルサー発見のおしらせ

日付 [2010年9月8日 5:38](#)
 件名 [Einstein@Home announces first pulsar discovery](#)
 送信元 einstein.phys.uwm.edu

Mail from

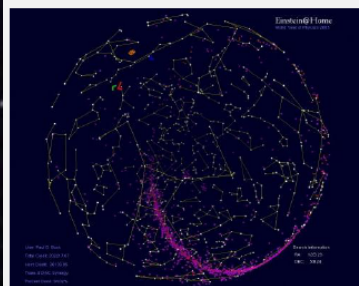
Dear Einstein@Home volunteer,

I want to share some good news with you.

For more than a year, Einstein@Home has been using about one-third of the available computer time to search for radio pulsars in data from the Arecibo Observatory. I'm happy to report that we found our first radio pulsar last month: PSR J2007+2722. It is still not sure, but this appears to be a rare type of object called a Disrupted Recycled Pulsar. The discovery was published on-line by the journal Science, on Thursday August 12th.

Congratulations to our volunteers [Chris and Helen Colvin \(Ames, Iowa, USA\)](#) and [Daniel Gebhardt \(Universitaet Mainz, Musikinformatik, German\)](#), whose computers discovered the pulsar with the highest significance!³⁷

Einstein@Home



スクリーンセーバーをもらえます。

2010年11月23日 <http://jp.boincstats.com/>

	合計	活動中
参加者	282,162	47,336
計算機	1,918,772	127,102
チーム	9,576	3,087
国	216	168
総功績 (credit)	25,407,074,676	
最近の功績増加量の平均値	34,491,248	
浮動小数点演算速度 (演算回数/毎秒) の平均値	172,456.2 GigaFLOPS / 172.456 TeraFLOPS	

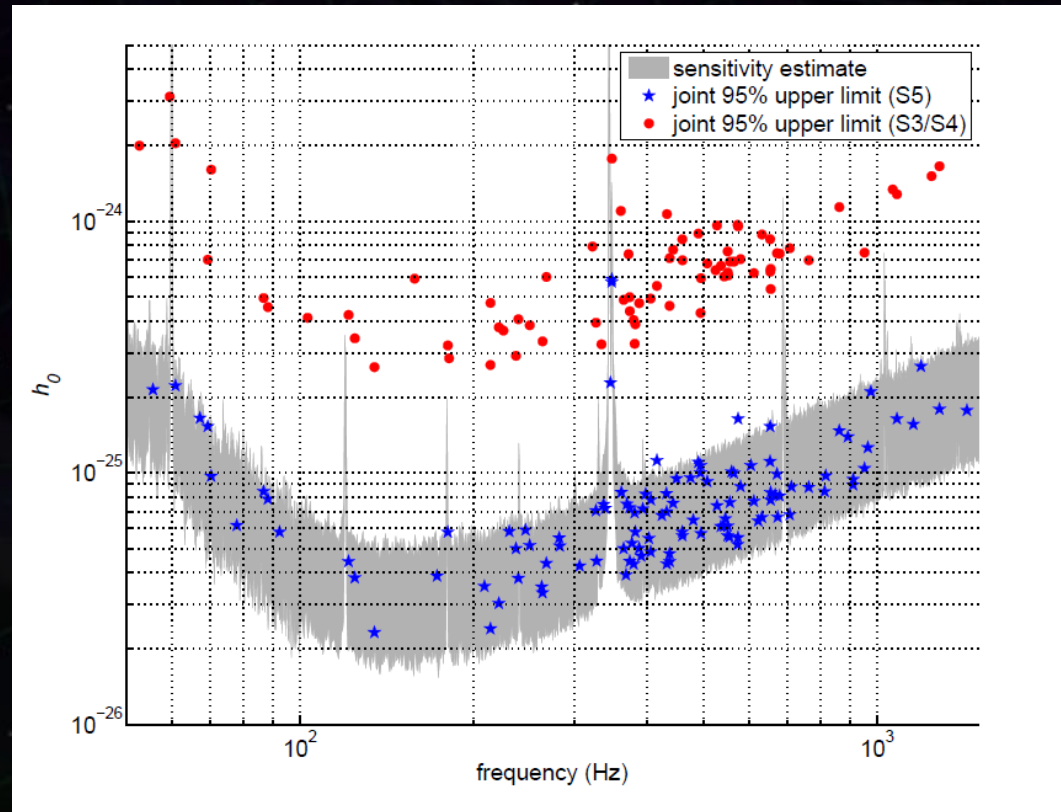
172 TFlops

地球シミュレータ 36 TFlops (2002-2004)
 Blue Gene/L 596 Tflops (2004-2008)
 京 10,000 Tflops (2011)

伊藤氏資料より (2011)

・既知パルサーからの重力波探査

- 116個のパルサー (電波パルサー, X線パルサー)
- LIGO S5 の 3台x500日以上 of データ.
- パルサーの非対称性 (ellipticities) : **上限値** $\varepsilon \sim 10^{-7}$



Abbott+, ApJ (2010)

・3つのパルサーについて、スピンドウンから求められる'理論的'上限値を超えた。

- **かにパルサー**：電波パルサー

周波数 : ~ 30 Hz

スピンドウン : $\sim -5 \times 10^{-9}$ Hz/s

重力波振幅上限値 : 2×10^{-25} (C.L.95%)
(スピンドウン上限値の 20%弱)

- **PSR J0537-6910**：X線パルサー

RXTEのデータを使用。

周波数 : 61.99... Hz

スピンドウン : $-1.994 \dots \times 10^{-10}$ Hz/s

- **PSR J1952-3252**：電波パルサー

RXTEのデータを使用。

周波数 : 25.30 Hz

スピンドウン : -3.73×10^{-12} Hz/s

Abbott+, ApJ (2010)

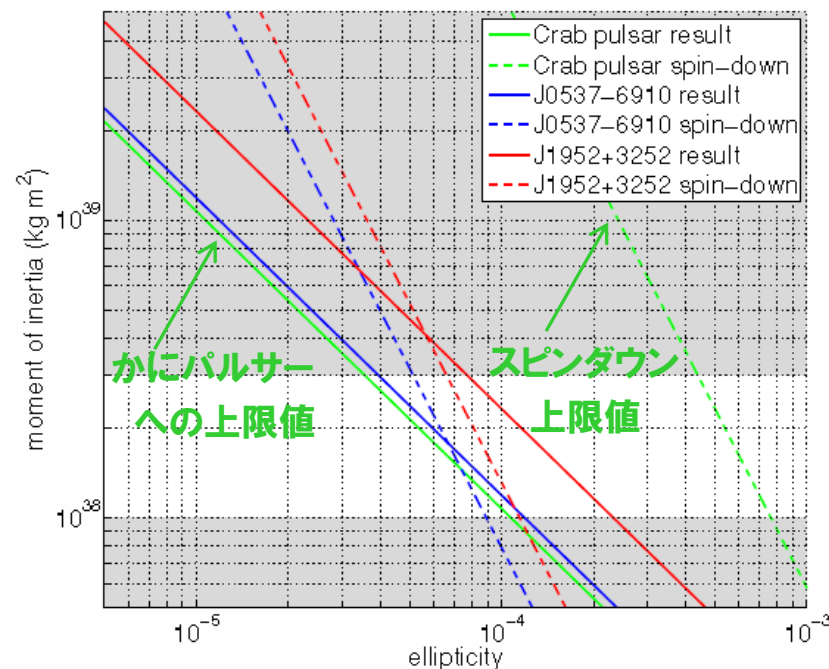


Figure 5. Results of the Crab pulsar, J0537-6910, and J1952+3252 analyses, and the spin-down limits, plotted on the moment of inertia-ellipticity plane. The results used are those from model (1) and with restricted priors on the angular parameters for the Crab pulsar and J0537-6910. Areas to the right of the diagonal lines are excluded. The shaded regions are those outside the theoretically predicted range of moments of inertia $I_{38} = 1-3$.

・最近の結果.

- **Velaパルサー** : 電波パルサー Abbott+, ApJ 737 (2011) 93.

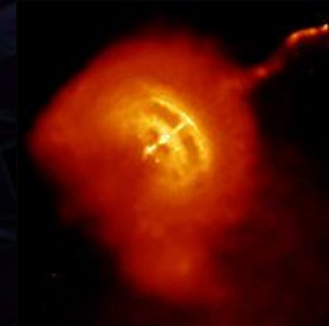
周波数 : ~ 11.19 Hz

スピンドウン : $\sim -5 \times 10^{-11}$ s/s

Virgo VSR2 の観測データを使用.

→ 重力波振幅上限値 : 2×10^{-24} (C.L.95%)

(スピンドウン上限値の 41%)



- **カシオペア座**: 約300年前の超新星残骸 Abbott+, ApJ. 722 (2010) 1504

周波数 : 未知 → 100-300 Hzを探索.

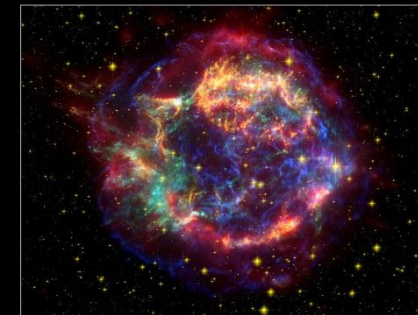
スピンドウン, 周波数2回微分もパラメタ探索.

位置は特定できる.

LIGO S5 2台の観測データ12日分を使用.

→ 重力波振幅上限値 : 1.2×10^{-24} (C.L.95%)

r-mode不安定性に対する上限値.



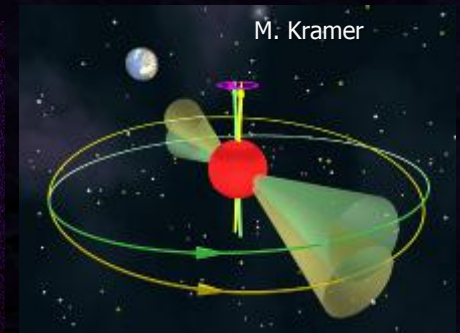
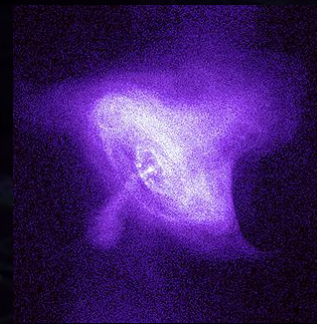
Cassiopeia A Supernova Remnant
NASA / JPL-Caltech / D. Krause (Brewster Observatory)
©2005-14c

Spitzer Space Telescope • MIPS
Hubble Space Telescope • ACS
Chandra X-Ray Observatory

高速回転する中性子星
非軸対称性 → 重力波

連続波

定常的・周期的な重力波
振幅は比較的小さい



長時間積分 → 信号を増幅

$$\tilde{s}(f) = \int_{t_1}^{t_2} s(t) e^{-i\omega t} dt \rightarrow \text{フーリエ変換}$$

既知のパルサー (電波, X線などでの観測)
ターゲットの位置, 周波数などの情報
→ 地球運動の影響 (ドップラー効果)
を補正して観測データを長時間積分

未知のパルサー

全天探査 → 膨大な計算コストを要する
Einstein@Home など



<http://www.einsteinathome.org/>

~180,000 users

背景重力波解析

	短時間 (重力波イベント)	長時間 (定常重力波)
波形 予測可能	 <p>連星の合体 → チャープ波</p> <p>ガンマ線 バースト</p>	 <p>パルサー, LMXB → 連続波</p>
波形が 予測できない	 <p>超新星爆発 → バースト波</p>  <p>ソフトガンマ線 リピータ</p>	 <p>背景重力波 → 定常ランダム波</p>

•背景重力波：

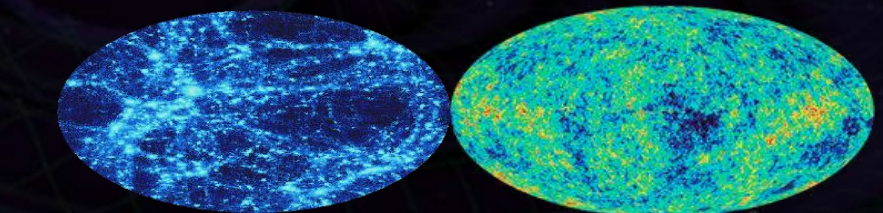
全天から放射されている, 定常的に存在するランダム波

- 初期宇宙

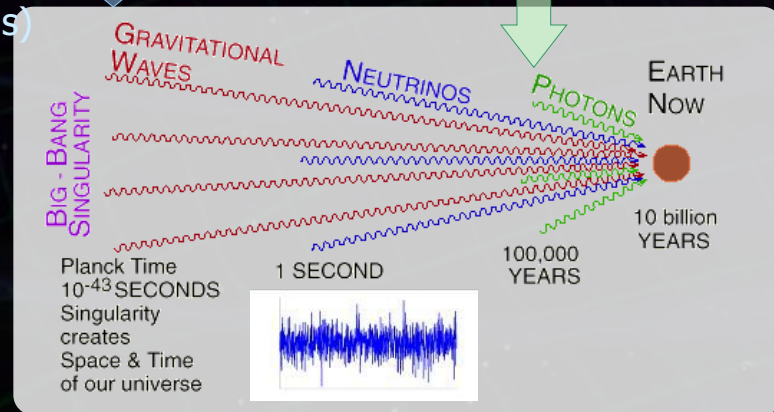
(インフレーション, 相転移, 宇宙ひも)

- 多くの天体現象からの重力波

の重ね合わせ (連星, 重力崩壊など).



Cosmic GW Background (10^{-22} s) CMB (10^{+12} s)



重力波のエネルギー密度

重力波の密度

$$\Omega_{GW}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{GW}(f)}{d \ln f}$$

宇宙の臨界密度

等価な重力波スペクトル

ハッブル定数

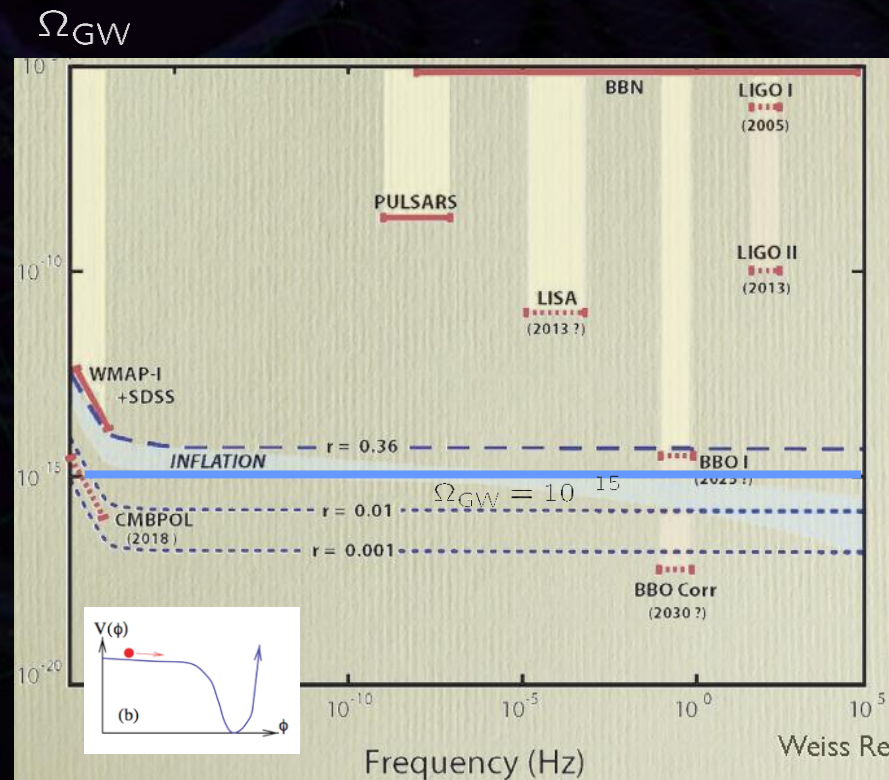
$$\tilde{h}_{GW}^2(f) = \frac{3H_0^2}{10\pi^2 f^3} \Omega_{GW}(f)$$

CMBの テンソル・スカラー比

インフレーションのエネルギースケールに対応

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4} \text{ [GeV]}$$

$$r = \frac{(\text{Tensor mode energy})}{(\text{Scalar mode energy})}$$



Meyer (Fujihara Seminar 2009)

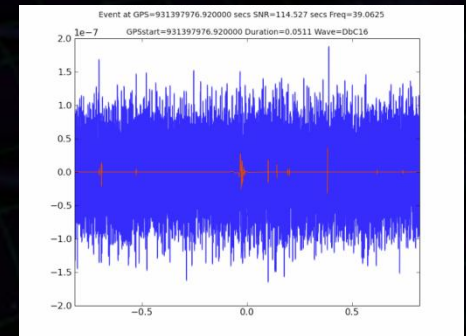
• 定常的なランダム波 → 検出器雑音との区別が必要.

⇒ 複数台での相関をとる.

2台の検出器出力 d_1, d_2 の相関: $\int_0^T dt d_1(t) d_2(t)$

長時間積分 → $\text{SNR} \propto T^{1/2}$ で向上.

他の検出器出力をテンプレートとした
マッチト・フィルタリングと考えることができる.



- 2台の検出器の相関の強さに
応じて重み付け → 最適フィルタ

相関解析の出力

$$\hat{\Omega}_{GW} = \int df \tilde{s}_1^*(f) \tilde{Q}(f) \tilde{s}_2(f)$$

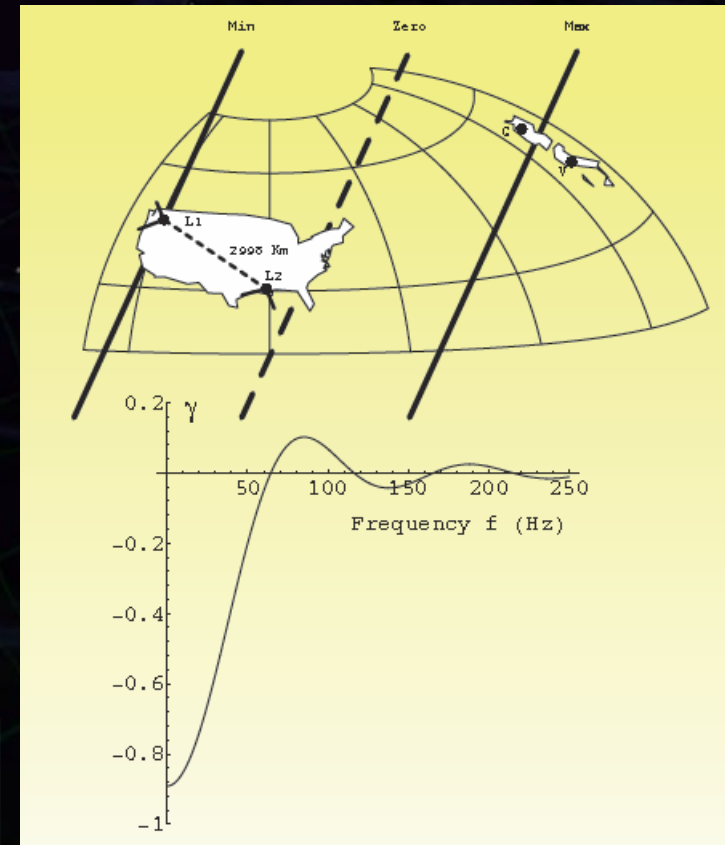
$$\tilde{Q}(f) \propto \frac{\gamma(f)}{f^3 S_1(f) S_2(f)}$$

← Overlap Reduction Function
← 各検出器の雑音

- 等方的な背景重力波探査の場合.

長波長でのORF

$$\gamma(f) \equiv \frac{5}{8\pi} \sum_{A=(+, \times)} \int_S \hat{\Omega} e^{2\pi i f \hat{\Omega} \cdot \Delta \mathbf{x} / c} F_1^A(\hat{\Omega}) F_2^A(\hat{\Omega})$$



From presentation by B.Allen (2009)

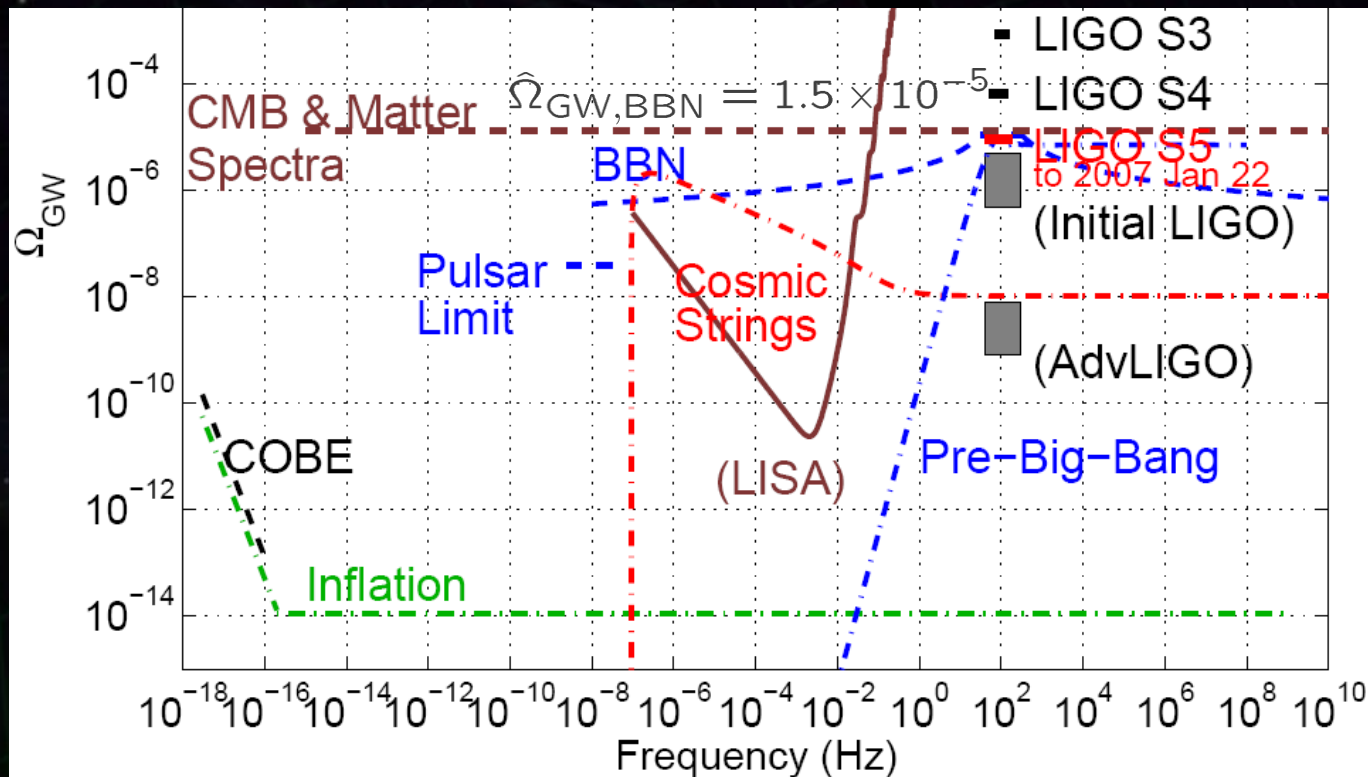
LIGO S5

感度の良い 41.5-177.5Hz のデータを使用

→ BBNより良い上限値

$$\hat{\Omega}_{\text{GW}} = 6.9 \times 10^{-6} \quad (95\% \text{ CL})$$

LIGO and VIRGO collab.,
Nature 460 (2009) 08278.



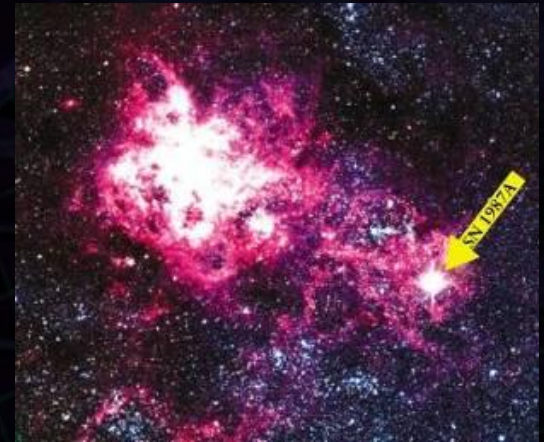
John T. Whelan for the LSC, AAS Meeting, Jan 2008

超新星爆発からの重力波解析

	短時間 (重力波イベント)	長時間 (定常重力波)
波形 予測可能	 <p>連星の合体 → チャープ波</p> <p>ガンマ線 バースト</p>	 <p>パルサー, LMXB → 連続波</p>
波形が 予測できない	 <p>超新星爆発 → バースト波</p>  <p>ソフトガンマ線 リピータ</p>	 <p>背景重力波 → 定常ランダム波</p>

•短時間のバースト的な重力波放射

- 星の重力崩壊 超新星爆発/ガンマ線バースト.
- マグネターの磁気フレア Soft Gamma-ray repeater.
- パルサーの振動 パルサーグリッチ, 降着による星震.



•四重極公式
$$h = \frac{2G}{c^4 D_L} \ddot{I}_{ij}$$

非球対称的なバルクな質量運動

$$h \sim 10^{-20} \left(\frac{\delta_{\text{non-sphere}}}{0.1} \right) \left(\frac{10 \text{ kpc}}{D_L} \right) \left(\frac{M}{1.4 M_\odot} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right) \left(\frac{f}{1 \text{ kHz}} \right)^2$$

•破壊的な天文現象 → 波形予測が困難.



マッチド・フィルタは使えない
信号パワーを効率的に取り出す
'バーストフィルター'を用いる

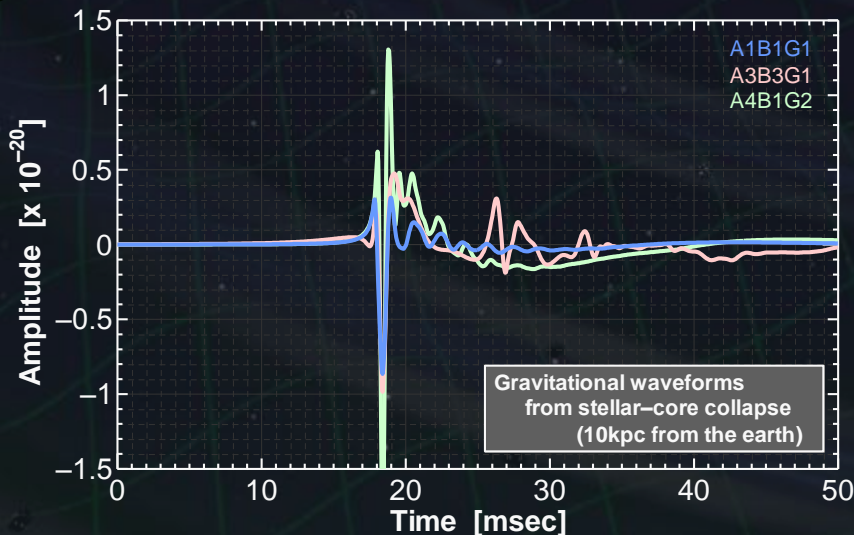
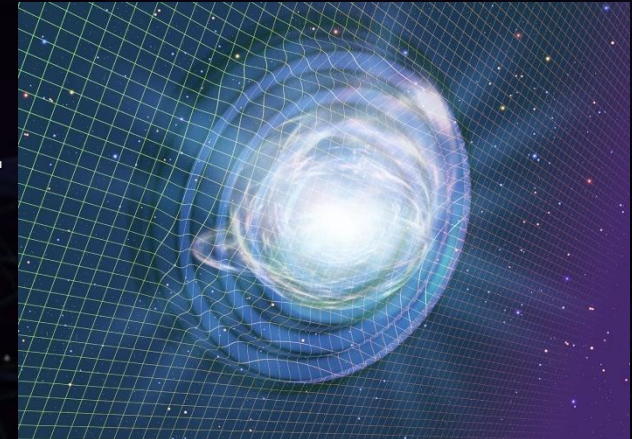
数値シミュレーション (コアバウンス)

- 重力波の典型的な波形が予測されている。
- 状態方程式や回転モデルによって異なる波形。
- 全ての条件は網羅されていない。

⇒ 共通の特徴：短いバースト信号

Spike wave $\sim 1\text{msec}$

Duration time $< 30\text{msec}$



H.Dimmelmeier+, Astron. Astrophys. 393 (2002) 523.

予想振幅：

銀河中心イベント (8.5kpc) で

$$h_{\text{rss}} : 4 \times 10^{-22} \text{ [1/Hz}^{1/2}\text{]}$$

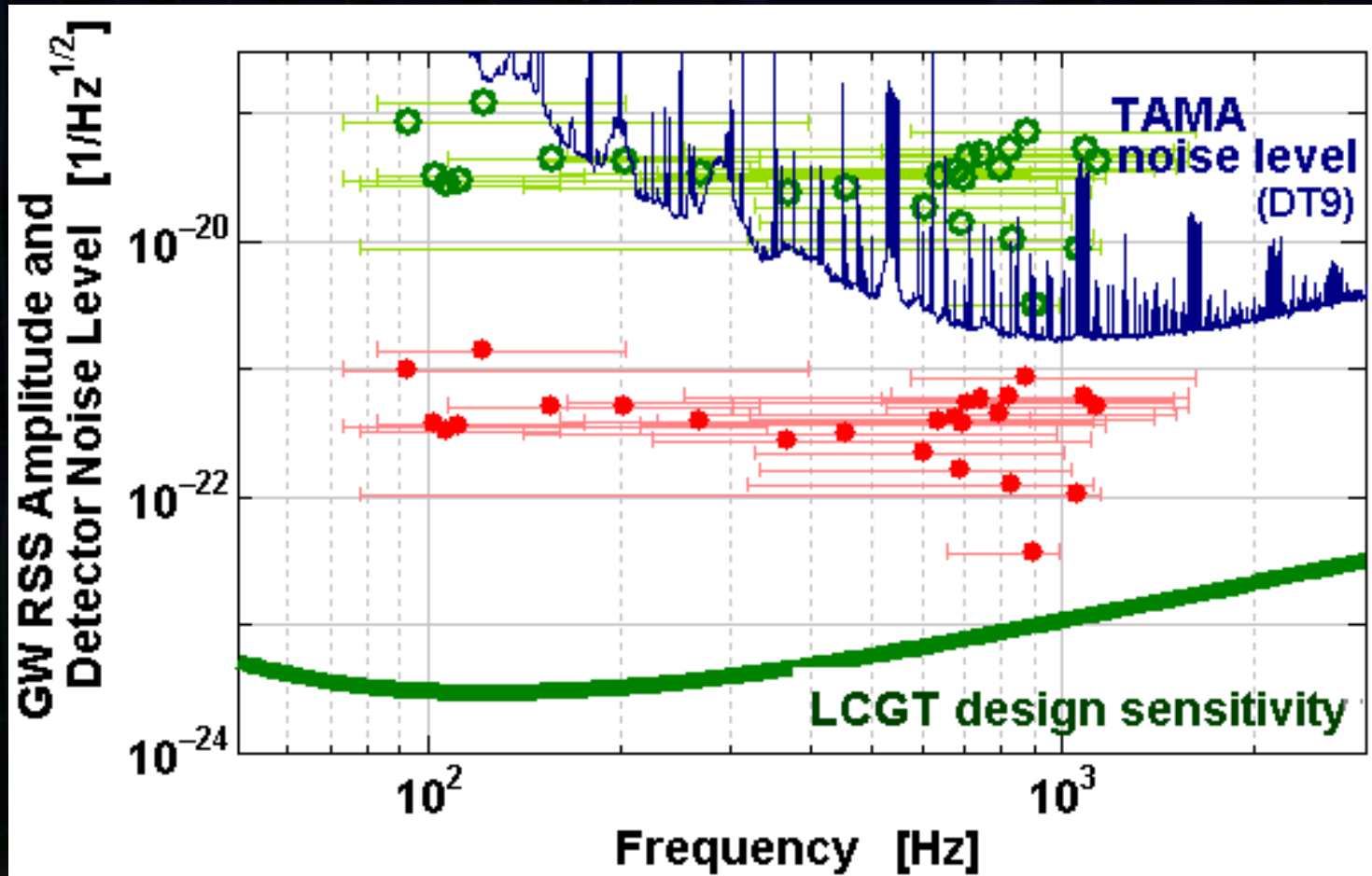
放射エネルギー：

$$E_{\text{tot}} : 9 \times 10^{-8} \text{ [} M_{\text{solar}} c^2\text{]}$$

h_{rss} ：重力波の Root-Sum-Square 振幅

$$h_{\text{rss}} = \sqrt{\int |h(t)|^2 dt}$$

GW from stellar-core collapses



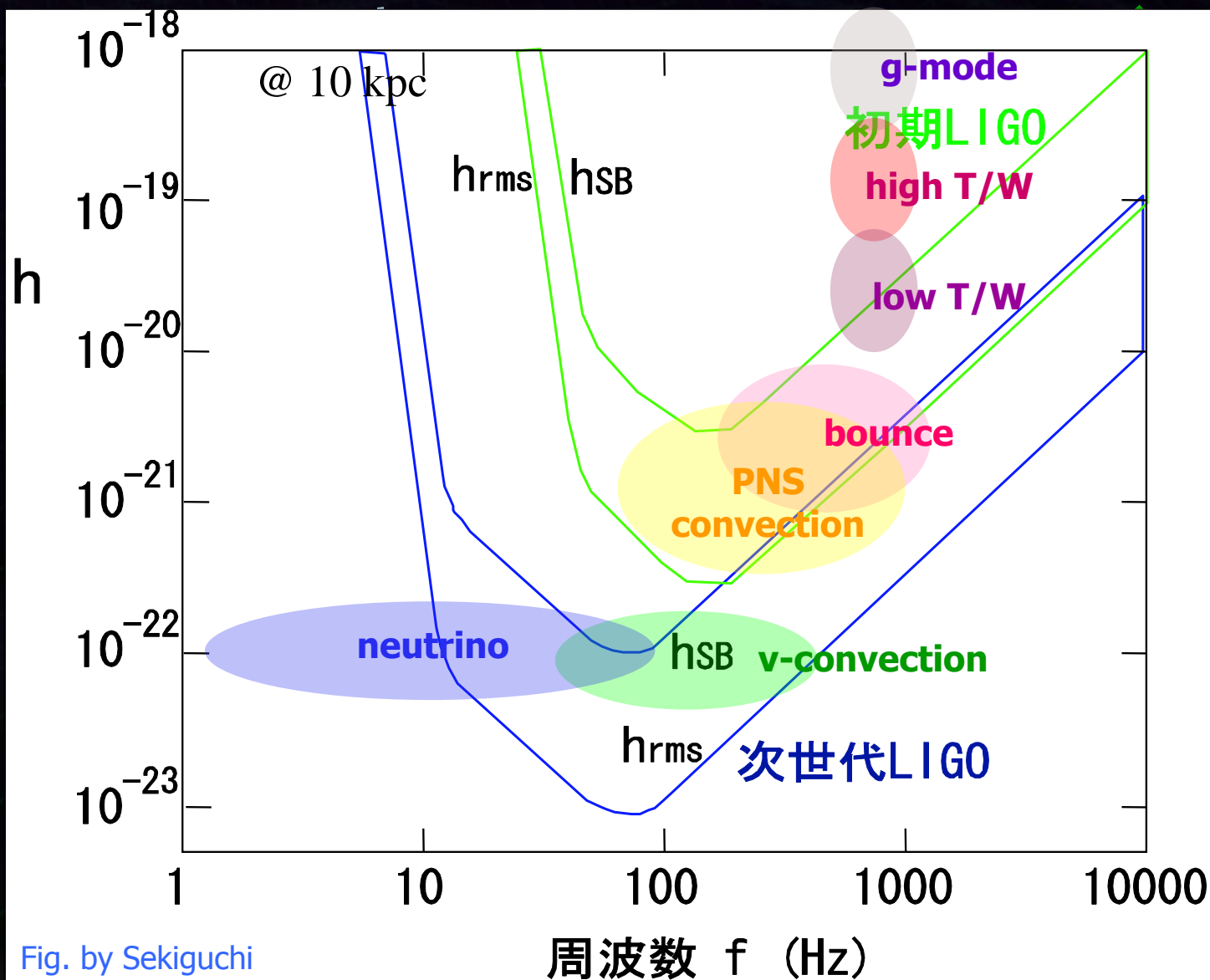


Fig. by Sekiguchi

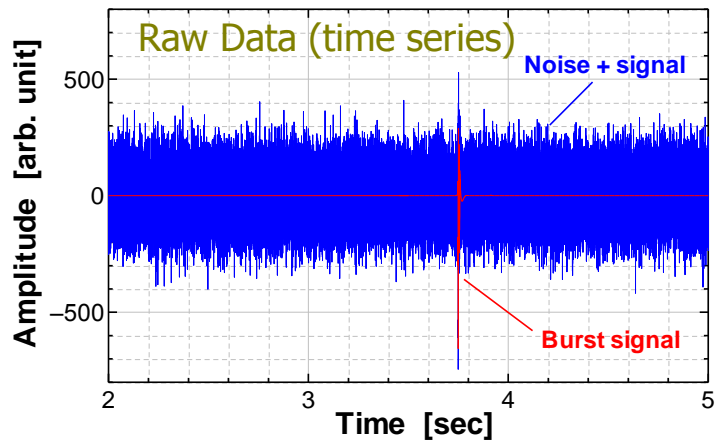
・'バーストフィルタ'を用いる

- 短時間のスパイク的な波形を取り出すフィルタ.
- 短時間に集中した信号エネルギーを取り出す方法
(Excess-power filter, ALF filter, Wavelet filter, など)
- 一般的な波形を仮定する方法
(Sine-Gaussian, Pulse correlation, など)
- 波形の仮定 : 検出効率 \leftrightarrow 波形不定性に対するロバストネス
- バーストリガー(信号候補)に対して複数台検出器でコインシデンス解析.

・複数台での相関解析を行う.

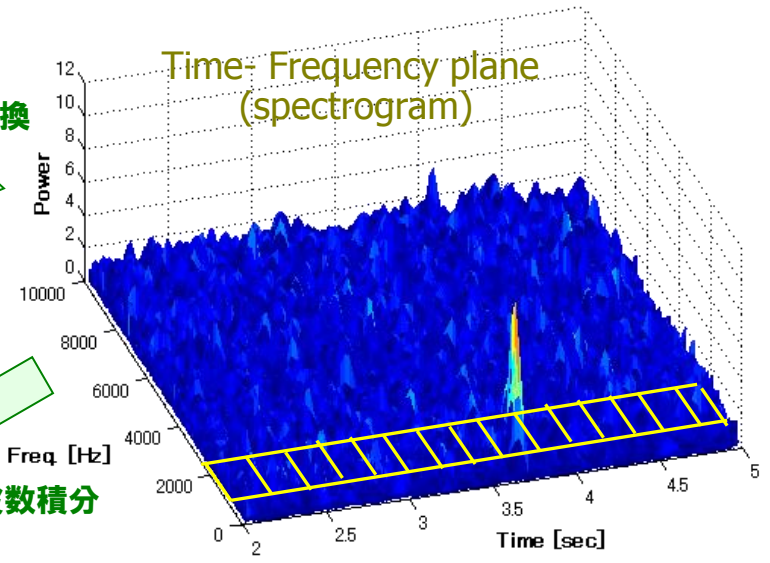
- コヒーレント解析:
検出器出力の線形結合として重力波信号を求める.
- 天球の各位置を探索する.

時間-周波数平面内で、信号パワーの集中を探索する

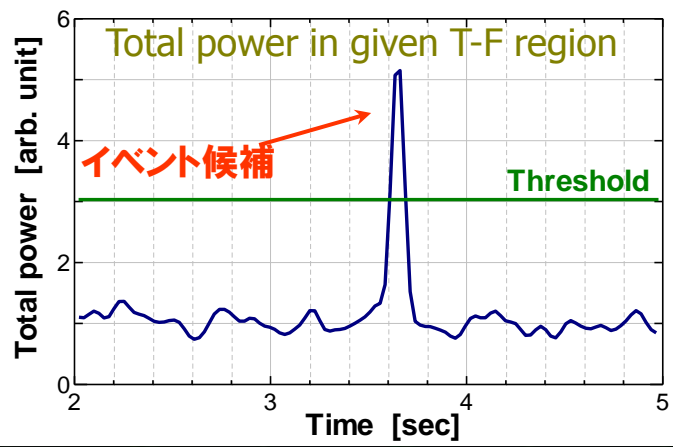
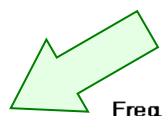


与えられた時間-周波数帯
に含まれる信号パワーを評価

フーリエ変換



周波数積分



フィルターのパラメータ：
時間幅, 周波数帯, 信号検出のしきい値
→ データに応じてチューニング

- 検出器の線形結合 → 逆問題を解く

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{h} + \mathbf{n}$$

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1+}(\theta, \phi) & F_{1x}(\theta, \phi) \\ \vdots & \vdots \\ F_{1d}(\theta, \phi) & F_{dx}(\theta, \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_+(t) \\ h_x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_d(t) \end{bmatrix}$$

data = detector response x gravitational wave + noise

重力波のレスポンス $\xi_i(t) = F_{i+}(\theta, \phi)h_+(t) + F_{ix}(\theta, \phi)h_x(t)$

重力波の再構成 $\mathbf{h} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{x}$

- 重力波の抽出は逆問題を解く事と同じ。
- 天球位置(θ, ϕ)を変えながら、最も尤もらしい重力波(\mathbf{h})を探す。

端山氏 資料より

•各天球位置でのLikelihood → 天球マップ

$$L = \max(-\|\mathbf{x} - A\hat{h}\|^2)$$

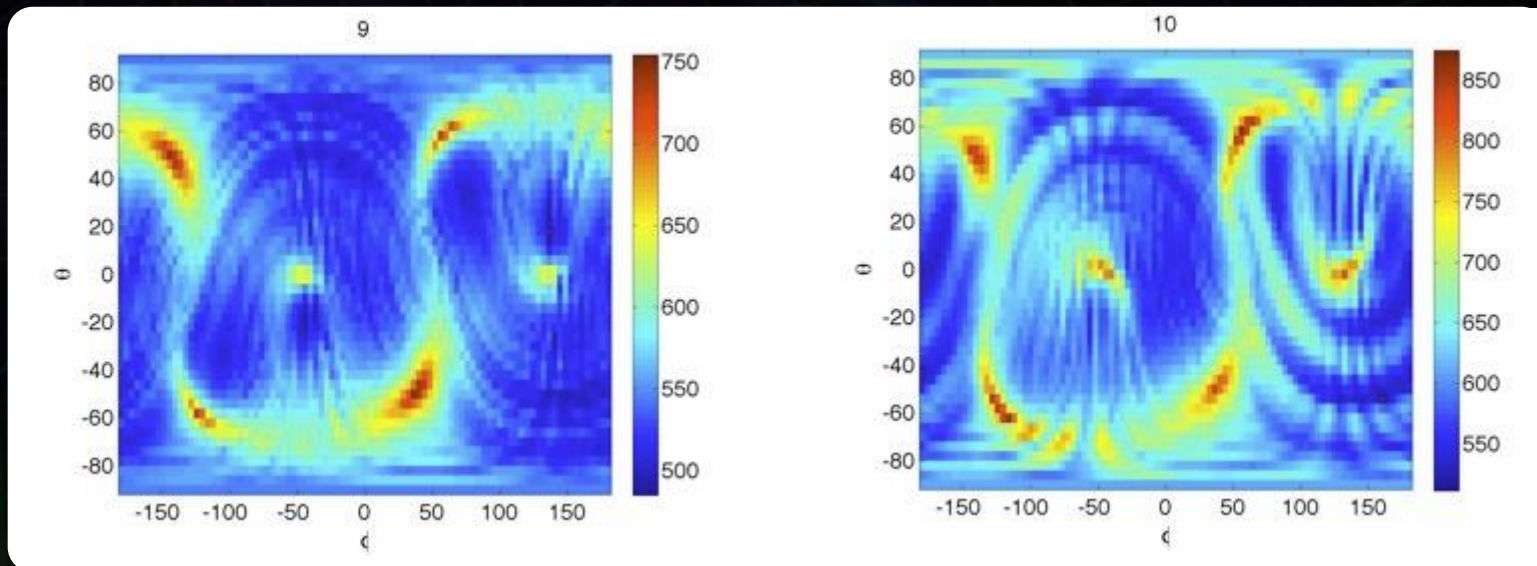
$$\text{ただし } (\|\mathbf{x}^2\|) = \sum_{i=1}^d \int_0^T x_i(t)^T x_i(t) dt$$

アンテナパターンの影響 → 天球位置によって検出効率が異なる。

LIGO (H1-H2-L1) + VIRGO (V1) の場合

雑音

雑音 + 信号



•各天球位置でのLikelihood → 天球マップ

$$L = \max(-\|x - Ah\|^2)$$

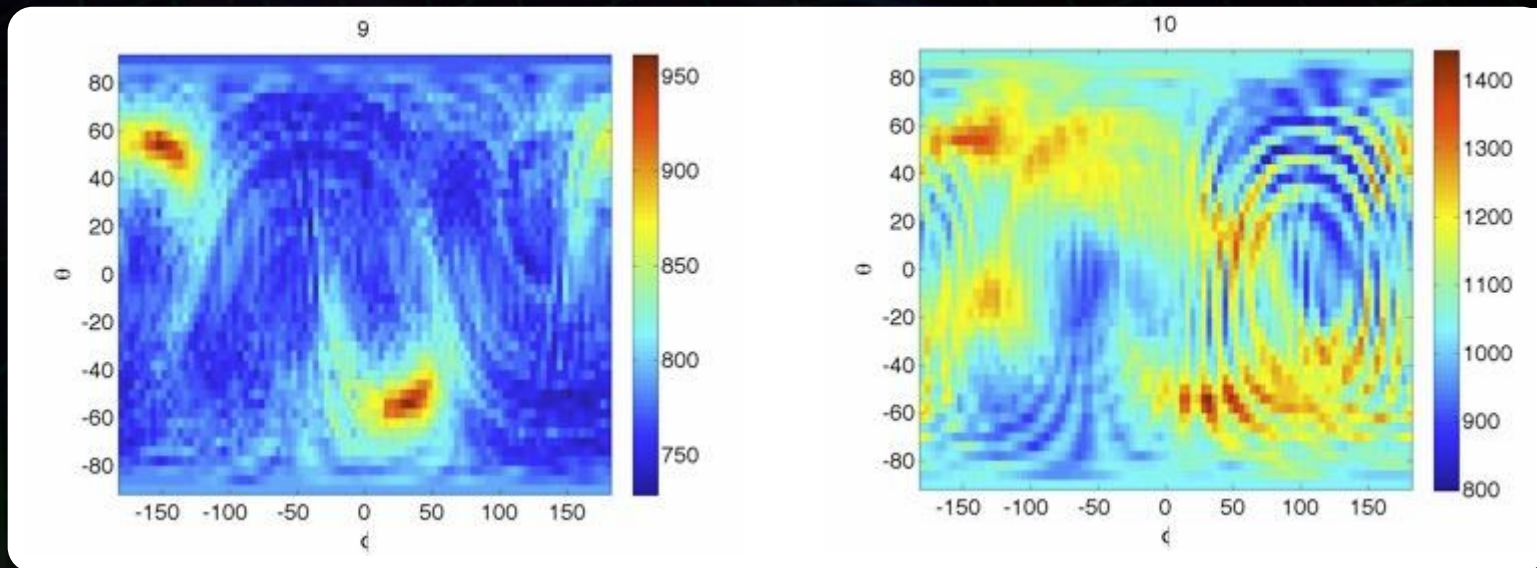
ただし $(\|x^2\|) = \sum_{i=1}^d \int_0^T x_i(t)^T x_i(t) dt$

アンテナパターンの影響 → 天球位置によって検出効率が異なる。

LIGO (H1-H2-L1) + VIRGO (V1) + LCGT の場合

雑音

雑音 + 信号



・バースト的な重力波信号探査 → 上限値

- 波源・波形を仮定しない (一般的な波形で探査).
- LIGO-VIRGOの4台のうち
最低2台が動いているデータを使用 → 266日分.
- コインシデンス解析.

超新星爆発 ~ 10kpcまで感度がある
(モデル依存性は大きい)

S5 search (50% probability)

153 Hz, $Q = 8.9$ sine-Gaussian

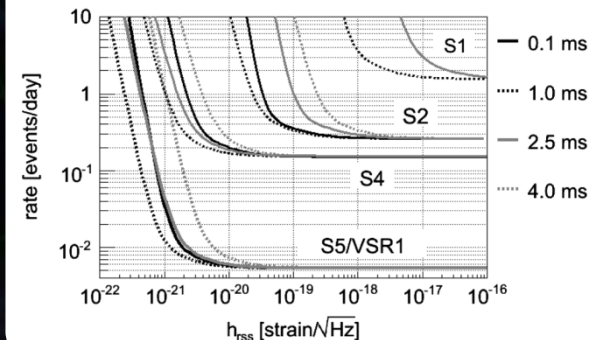
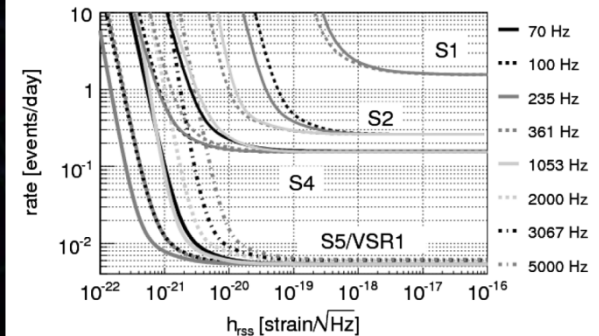
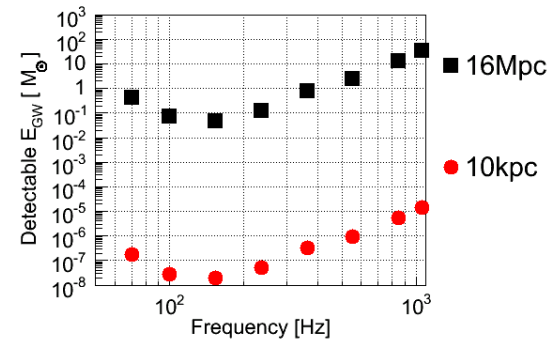
~ $2 \times 10^{-8} M_{\odot} c^2$ at 10 kpc

~ $0.05 M_{\odot} c^2$ at 16 Mpc

→ 上限値 2.0 yr^{-1}

(超新星爆発の理論予測 ~ $1/50 \text{ yr}^{-1}$)

観測可能な重力波エネルギー



Abadie+, PRD 81 (2010) 102001.

・ガンマ線バーストに同期した重力波信号探査.

- LIGO S5 - VIRGO VSR1 期間に起きた137個.
- 主に Swift 衛星のトリガーを用いる.
- 解析手法: コヒーレント探査.

GRB070429Bについて最も強い上限値

振幅 $h_{\text{rss}}^{90\%} = 1.75 \times 10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$

距離 $D^{90\%} = 26.2 \text{ Mpc}$

(150 Hz, 放射エネルギー $0.01 M_{\text{solar}}$ を仮定)

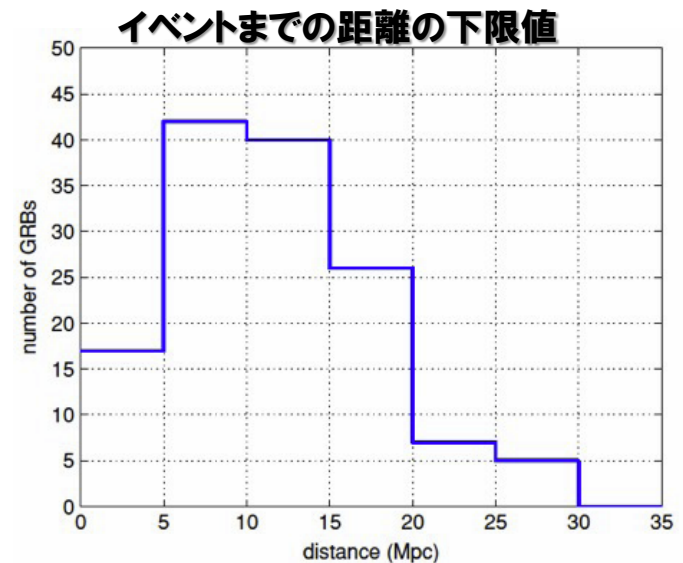
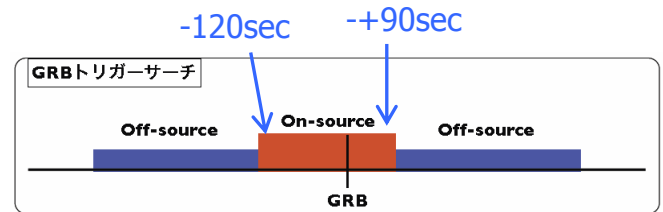
(サンプル中最も近いGRB 580 Mpc)

GRB070201 (M31方向でのGRB)

振幅 $h_{\text{rss}}^{90\%} = 6.38 \times 10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$

エネルギー $E_{\text{GW}}^{\text{iso}} = 1.15 \times 10^{-4} M_{\odot}$

(150 Hz, 距離 770 kpc)



Abbott+, ApJ 715 (2010) 1438.

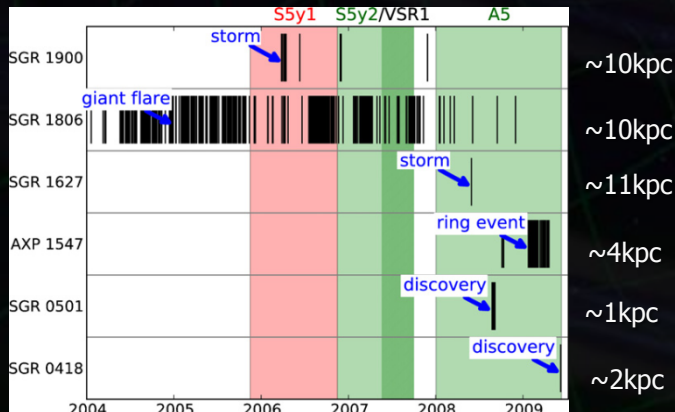
・非常に強い磁場を持った中性子星

- 20天体程度が見つかっている.
- Soft Gamma-ray repeater (SGR)
- Anomalous X-ray pulsar (AXP)

⇒ Giant flare : 突発的に起きる大エネルギー(10^{42} erg)のガンマ線放射.
クラストの破壊

→ 星震の励起と重力波放射.

6個のマグネターからの重力波探査.



Abadie+,
ApJ (2011)

ソフトガンマ線リピーター

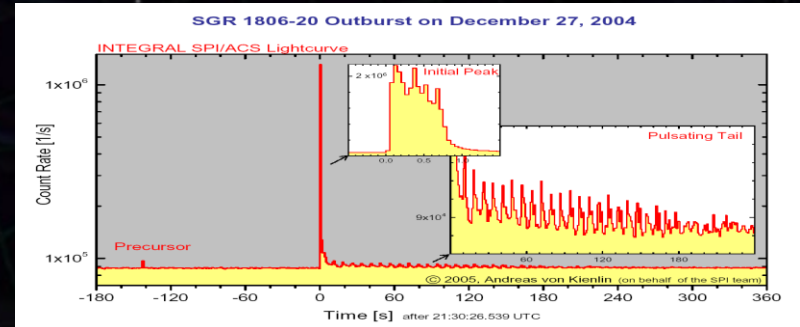
Hyperflare in SGR 1806-20 (December 27, 2004)

(RHESSSE, RXTE x-ray data)

距離 $\sim 6 - 10$ kpc.

エネルギー $\sim 10^{46}$ erg.

6分間程度継続.



1台のLIGO検出器 (H1) のみ稼動
信号は見つからず

感度 $E_{GW} \sim 4.3 \times 10^{-8} M_{SUN}$
(フレアの電磁エネルギーと同等)

Phys Rev D 76 (2007) 062003.

まとめ

	短時間 (重力波イベント)	長時間 (定常重力波)
波形 予測可能	 <p>連星の合体 → チャープ波</p> <p>ガンマ線 バースト</p>	 <p>パルサー, LMXB → 連続波</p>
波形が 予測できない	 <p>超新星爆発 → バースト波</p>  <p>ソフトガンマ線 リピータ</p>	 <p>背景重力波 → 定常ランダム波</p>

検出の試み：1960年代より行われる

現在, 大型検出器が稼働中

レーザー干渉計型：5台, 共振型検出器：3台



➡ 国際的観測ネットワーク

→ 検出の信頼度向上, 波源の方向特定, 重力波偏波の分離
1年を超える観測データが取得されている

連星中性子星合体イベント：50kpc~14Mpcの観測レンジ

→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

天文的に意味のある結果が得られつつある

連星中性子星探査

イベントレート上限値 : 8.7×10^{-3} events/yr/ L_{10}

バースト波探査

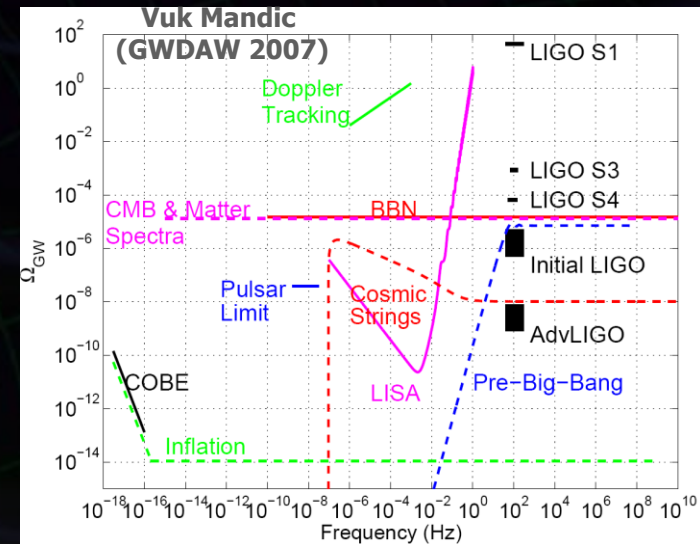
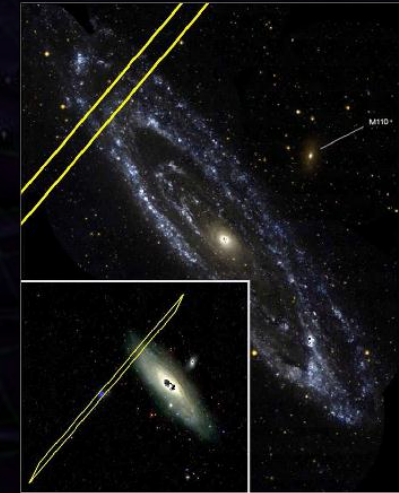
銀河中心付近の超新星爆発に、なんとか届く感度
 アンドロメダ付近で発生した
 ガンマ線バーストに対する知見

パルサー探査

既知のパルサー: $h < 3 \times 10^{-25}$ (PSR J1605-7202)
 (Crabパルサー: 理論的上限値より厳しい制限)
 全天探査: $h < 2 \times 10^{-24}$
 その他: LMXB, パルスの無い中性子星

バックグラウンド重力波探査

$\Omega_{\text{GW}} < 6.9 \times 10^{-6}$
 (ビッグバン元素合成上限より良い上限値)



第3章 終わり