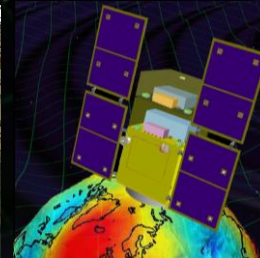
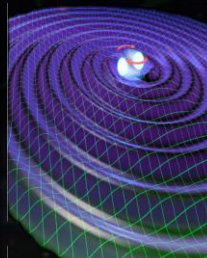
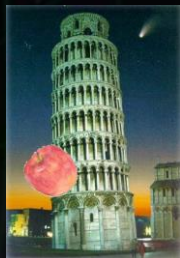


共通基礎天文学

重力波天文学

安東 正樹 (国立天文台)



講義の予定

第1回 重力波による天文学

第2回 観測技術と観測結果

第3回 次世代重力波望遠鏡

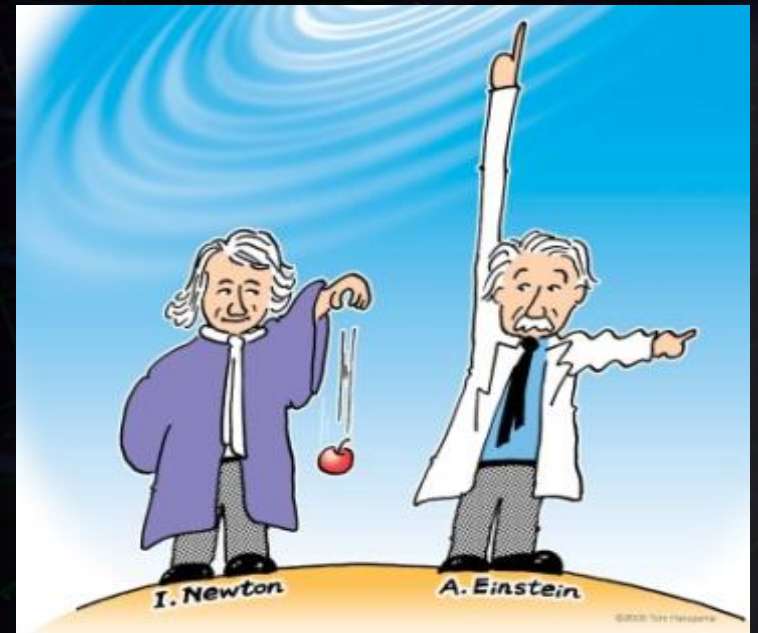
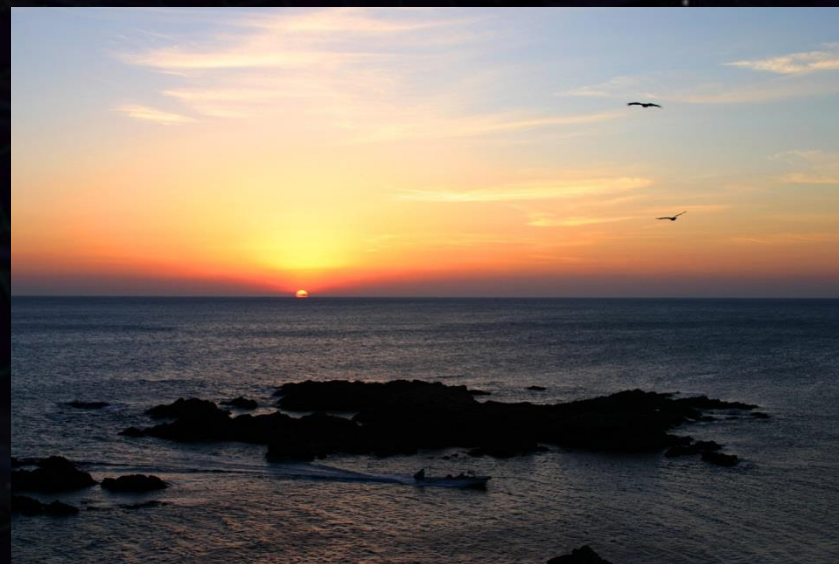


イラスト Tom Haruyama

挑戦のはじまい!!!

- 重力波検出の試み -



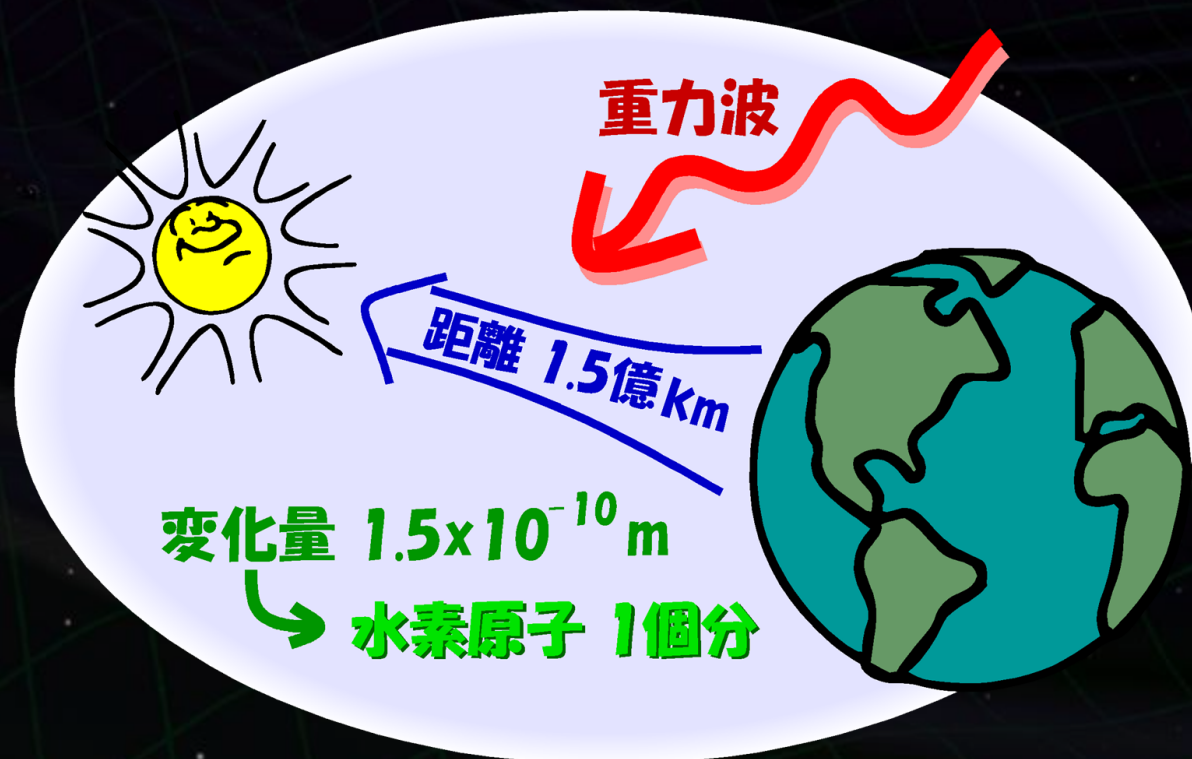
(例) 地球-太陽間の距離変動

距離 1.5×10^{11} m



1.5×10^{-10} m の距離変動

重力波振幅 10^{-21}



共振型重力波検出器 (1960年- ジョセフ-ウェーバー)

重力波による潮汐力変動
→ 弾性体振動として検出.

質量: 1.4 ton , 常温に設置
共振周波数: 1.66 kHz, PZTトランスデューサ
約1000km離れた 2か所での観測
(メリーランド大学, アルゴンヌ国立研究所)



「ウェーバーイベント」(1969年)

J.Weber, PRL (1969)

EVIDENCE FOR DISCOVERY OF GRAVITATIONAL RADIATION*

J. Weber

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland, College Park, Maryland 20742
(Received 29 April 1969)

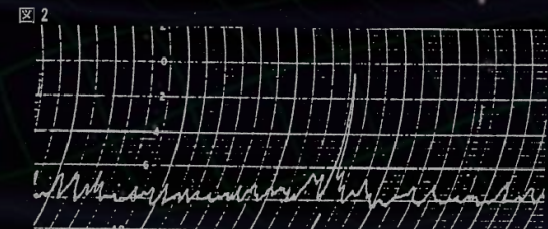
Coincidences have been observed on gravitational-radiation detectors over a base line of about 1000 km at Argonne National Laboratory and at the University of Maryland. The probability that all of these coincidences were accidental is incredibly small. Experiments imply that electromagnetic and seismic effects can be ruled out with a high level of confidence. These data are consistent with the conclusion that the detectors are being excited by gravitational radiation.

重力波検出の報告

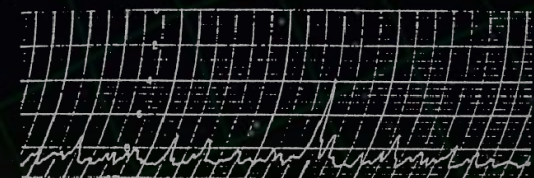
1000km離れた2台の検出器での同時信号

1日に数回のイベント

銀河中心方向から多くのイベント



コインシデンスのタイム・マーク | メリーランド大学の検出器

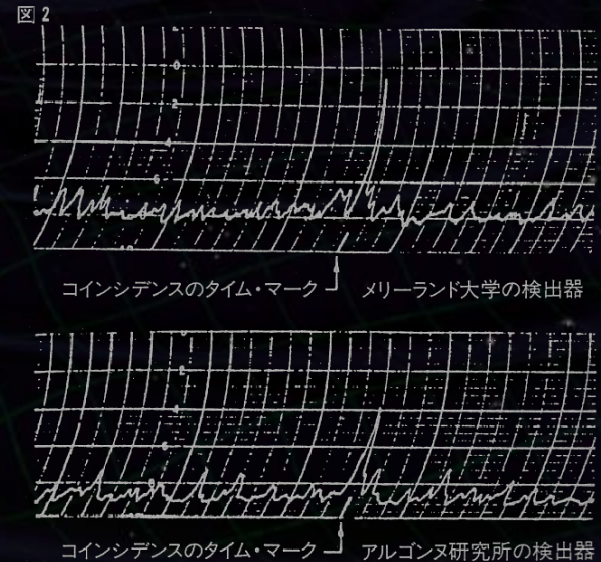


コインシデンスのタイム・マーク | アルゴンヌ研究所の検出器

坪野公夫「時空のさざ波」より

否定的な結論：

- 頻度・振幅が大きすぎる
1000万年で銀河が消滅する程度に
相当するエネルギー放出レート。
- 追試(~19台)では検出されなかった。

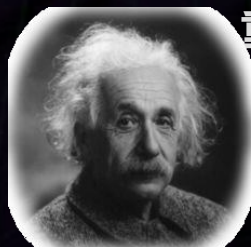


坪野公夫「時空のさざ波」より

重力波検出実験が始まる契機となった。

重力波検出実験の歴史

一般相対性理論
(アインシュタイン, 1916)



重力波の予言
アインシュタイン, 1916)



共振型アンテナ
(ウェーバー, 1960-)

重力波観測の報告
(ウェーバー, 1969)

連星パルサーの発見
(ハルス・テイラー, 1974)

重力波存在の証明
(ハルス・テイラー, 1979)



低温アンテナ
(Explorer etc, 1990-)

極低温アンテナ
(Nautilus etc, 1996-)

国際共同観測
(IGEC, 1997-)



干渉計型アンテナ
(1970頃-)

大型干渉計の建設
(1995頃-)

TAMAによる観測開始
(1999-)

LIGOによる観測開始
(2002-)

共同観測観測
(2003-)

望遠鏡による観測
(ガリレオ, 1609)

宇宙放射線の発見
(ヘス, 1912)

**銀河中心からの
電波観測**
(ジャンスキー, 1931)

さそり座X線源の観測
(ジャコーニ, 1962)

宇宙背景放射の発見
(ペンジラス・ウィルソン, 1964)

太陽ニュートリノ観測
(デービス, 1964)

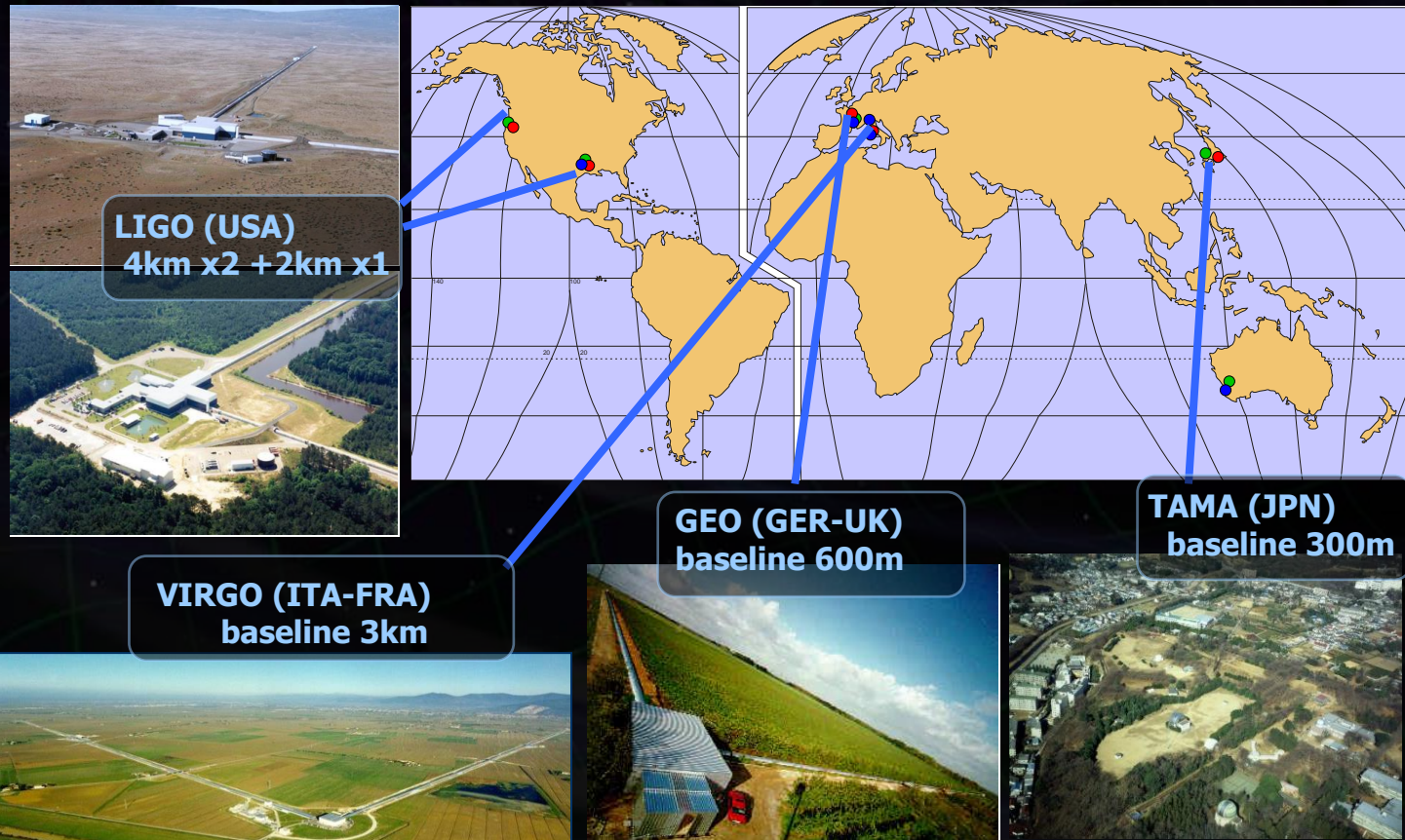
**超新星爆発からの
ニュートリノ観測**
(小柴, 1987)



大型レーザー干渉計型重力波望遠鏡

第1世代 大型干渉計 (1999年頃から稼働)

世界で4プロジェクト 6台 → 国際観測ネットワーク



耳をすます!!!

- 重力波望遠鏡 -



電磁波

- 光速で伝播する
電磁場の変動

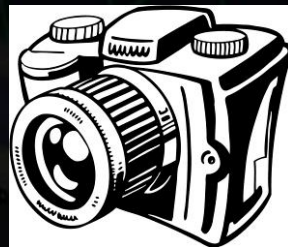


- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱



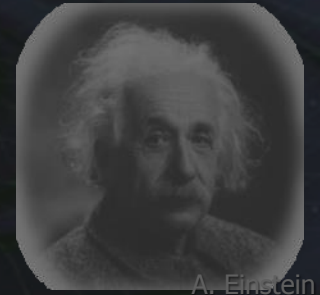
波源の各所から放射

→ 画像として観測.



重力波

- 光速で伝播する
時空の歪み



- 質量の加速度運動により生成
- 物質に対して **強い透過力**



波源全体の運動から放射

→ 時系列変動
として観測.



重力波

重力波の効果

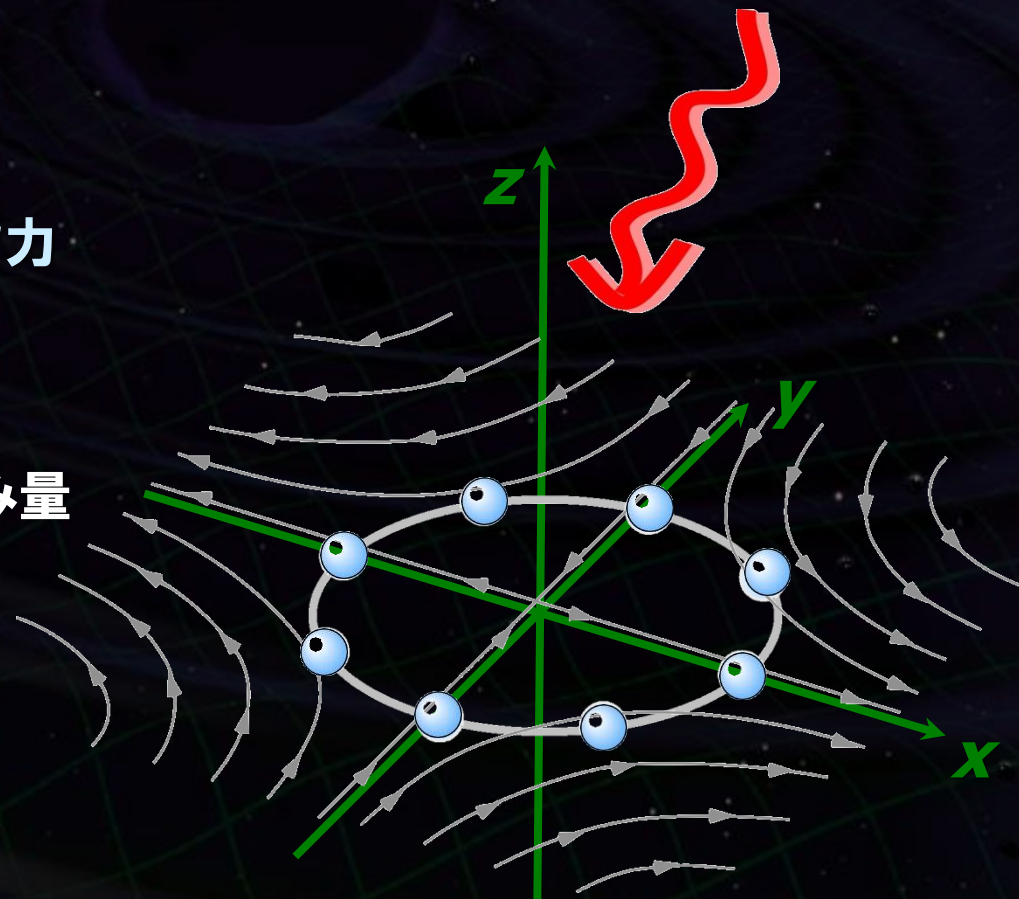
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

$$h \sim \delta L / L$$

δL : 距離変動

L : 2点間の距離



$h = 10^{-21} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が 10^{-21}m 伸縮.

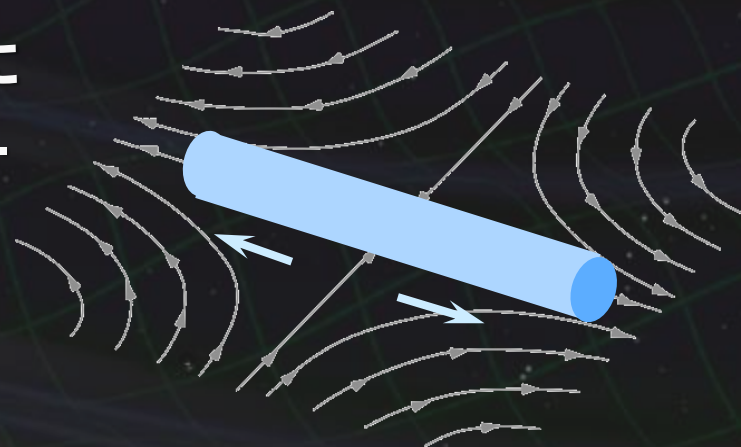
重力波 → 大きさを持った弾性体への潮汐力

- 弾性体内の各点
重力波が到来しても同じ座標に留まろうとする.
- 各点間の距離は重力波によって変動.

⇒ 重力波による歪み力 (四重極の性質 → 潮汐力)

X軸に沿っておかれた棒状弾性体に
+モードの重力波が入射した場合.
→ 棒を伸縮させる力がはたらく.

$$F_{\text{gw}} \sim \frac{1}{2} M L \ddot{h}_+$$



重力波による潮汐効果を弾性体の振動を利用

弾性体の振動モードに注目

⇒ 重力波による潮汐力

$$f_{\text{GR}}(t) = \frac{1}{4} \ddot{h}_{ij}(t) q^{ij}$$

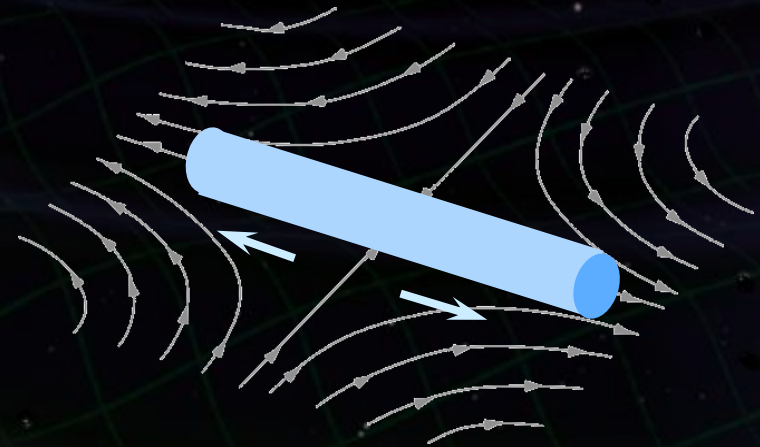
弾性体の動的4重極モーメント

$$q^{ij} = \int \rho \left(x_i w_j + w_i x_j - \frac{2}{3} \sum_k x_k w_k \right) dV$$

調和振動子の運動方程式

$$\mu \ddot{\xi} + \gamma \dot{\xi} + \kappa \xi = f_{\text{GR}}(t)$$

μ ← 換算質量
 γ ← 減衰係数
 κ ← ばね定数



共振周波数 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa}{\mu}}$ で高い感度をもつ

共振型重力波検出器 (1960年- ジョセフ-ウェーバー)

重力波による潮汐力変動
→ 弾性体振動として検出.

質量: 1.4 ton, 常温に設置
共振周波数: 1.66 kHz, PZTトランスデューサ
約1000km離れた 2か所での観測
(メリーランド大学, アルゴンヌ国立研究所)



2007年まで4台が稼働:

Nautilus (Frascati), Explorer (Geneva), Auriga (Padova), Allegro (LSU)

Nautilus

(Frascati National Laboratory, 1995-)

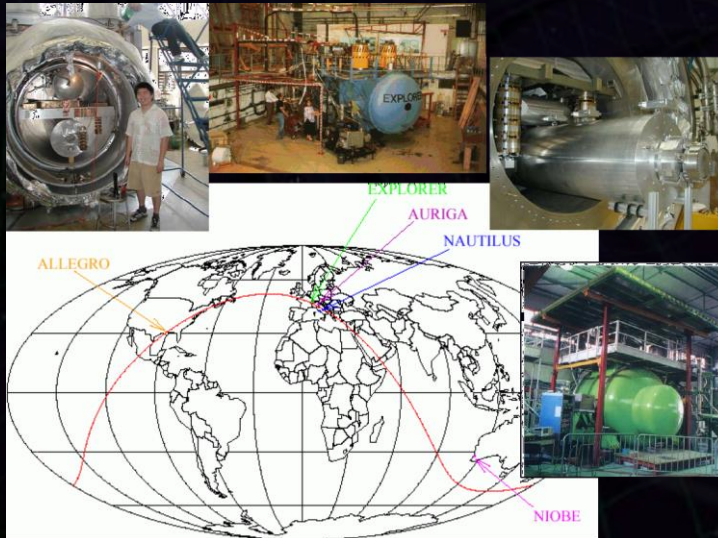
- Bar (Al5056)
Length : 3.0 m, Diameter 0.6 m
Weight : 2,350 kg
- Readout: Capacitive + DC SQUID
- Temperature : 0.1 K
- Sensitivity :
 $2 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$ (around 940 Hz)

Astone+, Astropart. Phys. (1997), Astone+, PRD (2010)



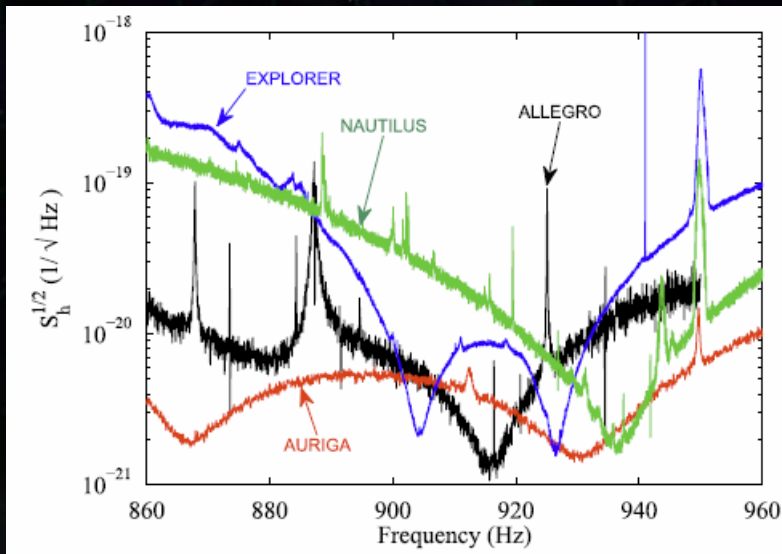
共振型アンテナネットワーク

From presentation of Stan Whitcomb (2007)



IGEC-2 (2005-2007) :
共振型アンテナによる国際協力観測

観測期間 : 515 日
Duty cycle : 57% (4 detectors)
94% (>3 detectors)



バースト的な重力波に上限値

$$h_{rss} \leq 10^{-19} [1/\text{Hz}^{1/2}]$$

(False Alarm Rate : 1/century)

感度はLIGO S5より悪いが、
FAはこれまでで一番良い制限。

Astone+, PRD (2010)

もっと長く!!!

- レーザー干渉計型
重力波望遠鏡 -



重力波

重力波の振幅 h : 歪み量

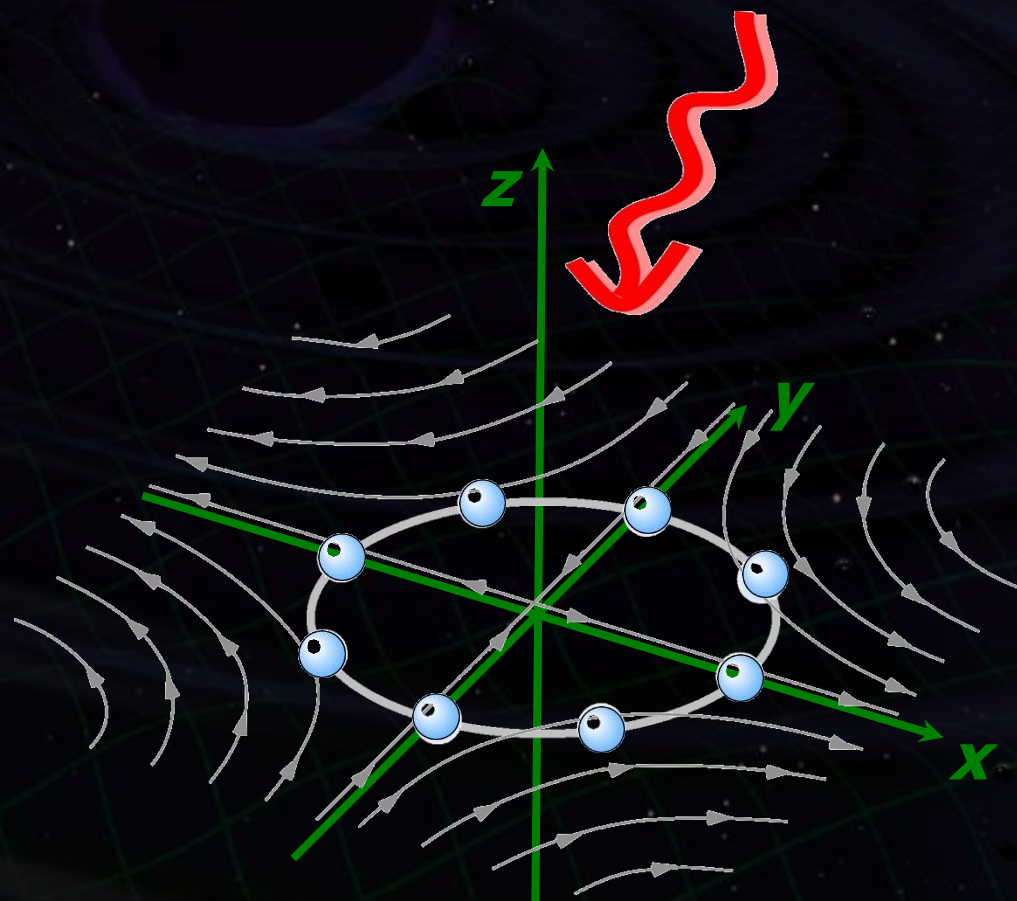
$$h \sim \delta L / L$$

δL : 距離変動

L : 2点間の距離

基線長が長いほど有利

→ レーザー干渉計



$h = 10^{-21} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が 10^{-21}m 伸縮.

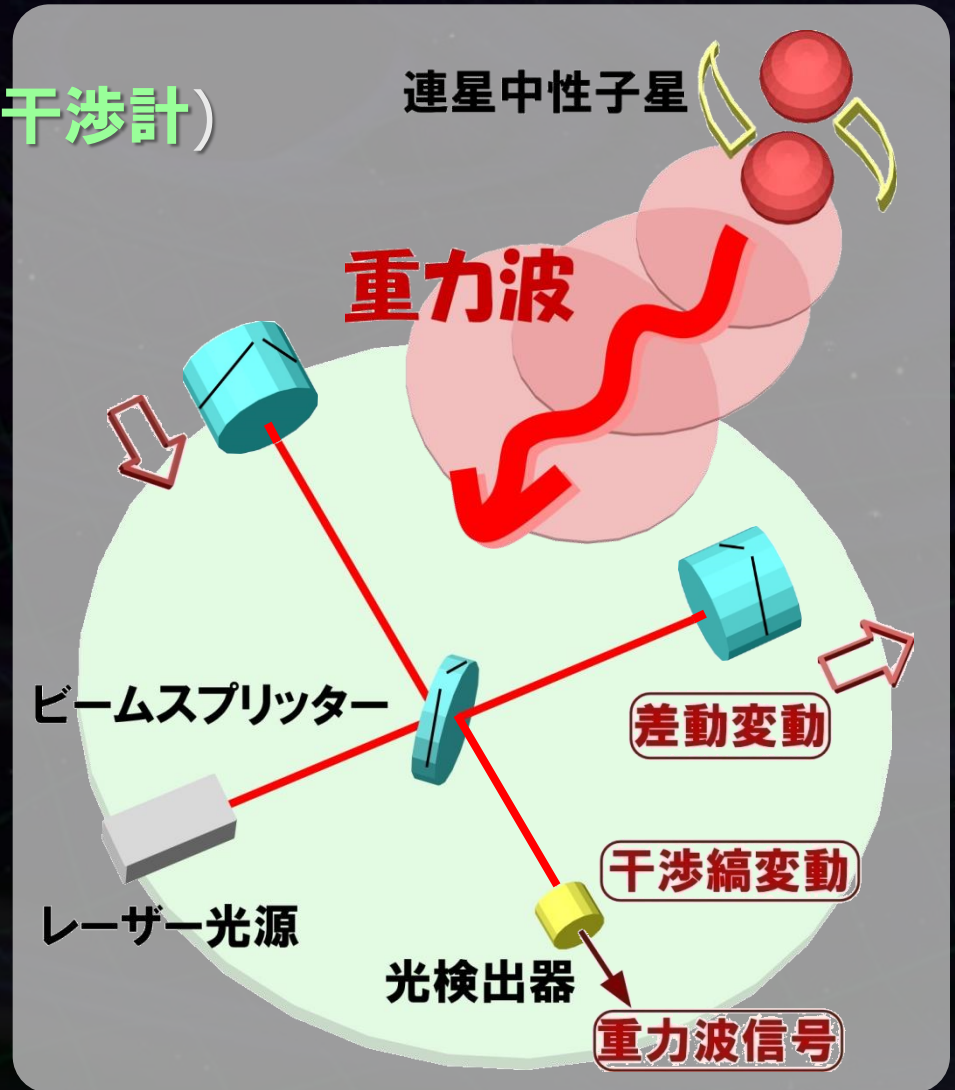
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干涉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干涉光量の変動として検出



x軸上を往復する光 (角周波数 Ω) を考える

4次元線素の式

$$ds^2 = -(c dt)^2 + [1 + h(t)] dx^2 = 0$$



移項して両辺を積分
hの1次の効果まで考慮

$$\Delta t = \frac{2L}{c} + \frac{1}{2} \int_{t-2L/c}^t h(t') dt'$$



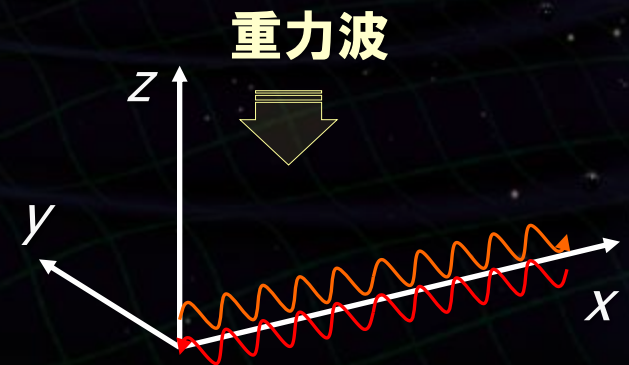
角周波数 Ω の光

$$\Delta \phi = \frac{2L\Omega}{c} + \frac{\Omega}{2} \int_{t-2L/c}^t h(t') dt'$$

重力波による位相変化



$$h \sim \frac{\delta L}{L} \sim \frac{\delta \nu}{\nu}$$



(重力波の周期) < (光の往復時間) のとき → 信号のキャンセル

$$\Delta\phi = \frac{2L\Omega}{c} + \frac{\Omega}{2} \int_{t-2L/c}^t h(t') dt'$$

重力波による位相変化

フーリエ変換

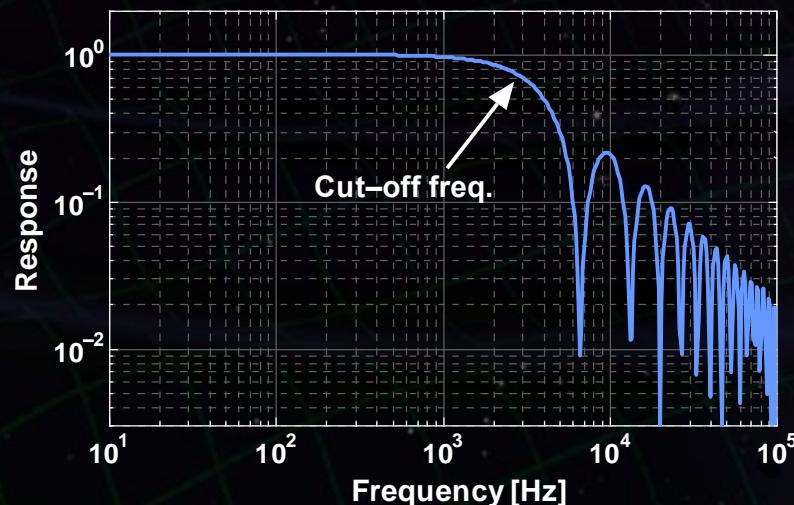


$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{h}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

$$\delta\tilde{\phi}(\omega) = \frac{\Omega}{\omega} \sin\left(\frac{L\omega}{c}\right) e^{-iL\omega/c} \times \tilde{h}(\omega)$$

応答関数

重力波による位相変化の周波数応答



重力波の波長と最適な基線長の関係

$$L = \frac{\lambda_{GW}}{4}$$



光の往復の間に
重力波が半波長通過

(1kHzの重力波 → 基線長75km)

重力波の入射方向

- 干渉計に対して垂直方向からの重力波入射に感度が高い.
- 全く感度が無い方向もある.

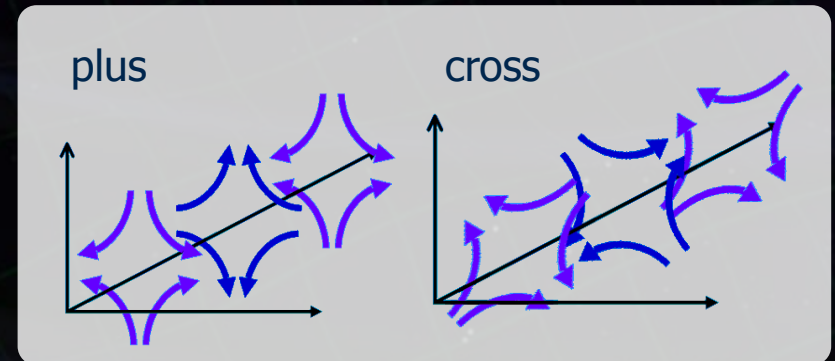
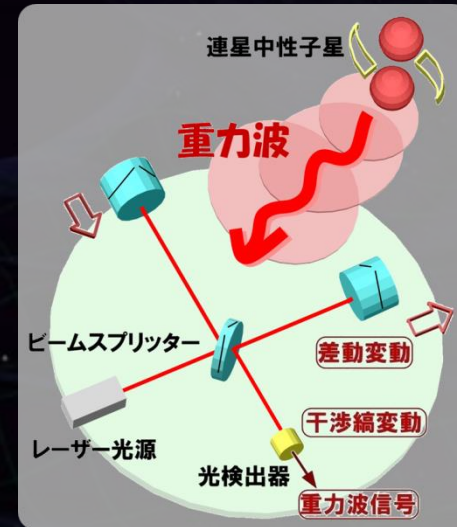
入射重力波の偏波

$$h_{ij} = A_{ij} \times \exp [i(\omega t - kz)]$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

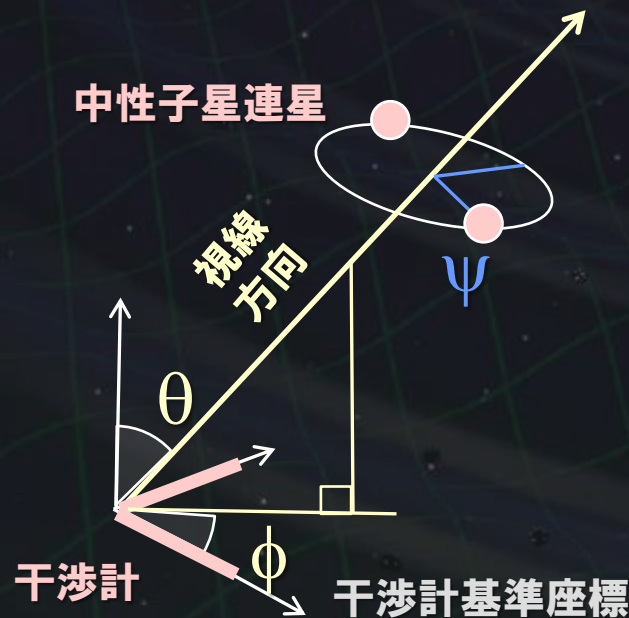
h_+ : Plus mode

h_\times : Cross mode



干渉計型重力波検出器の出力：2つの偏波成分の重ね合わせ。

$$h_{\text{obs}}(t) = F_{+} \cdot h_{+}(t) + F_{\times} \cdot h_{\times}(t)$$



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)

干渉計の指向性

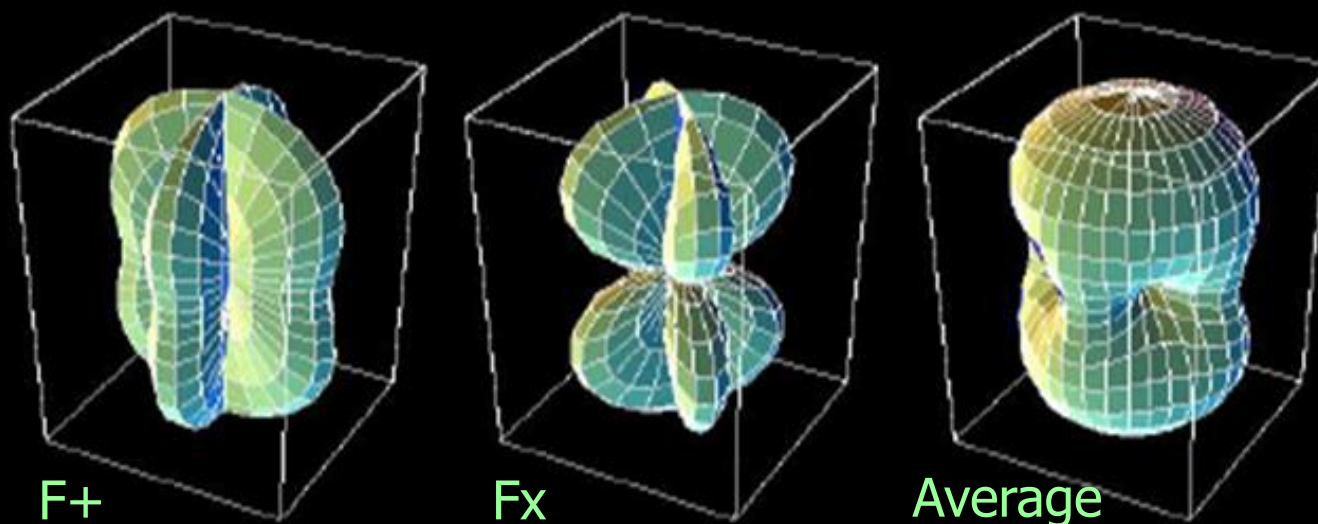
干渉計型重力波検出器: 指向性・偏波依存性がある.

$$h_{\text{obs}}(t) = F_{+} \cdot h_{+}(t) + F_{\times} \cdot h_{\times}(t)$$

干渉計のアンテナパターン

$$F_{+} = -\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \cos 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \sin 2\psi$$

$$F_{\times} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos 2\phi \sin 2\psi - \cos \theta \sin 2\phi \cos 2\psi$$



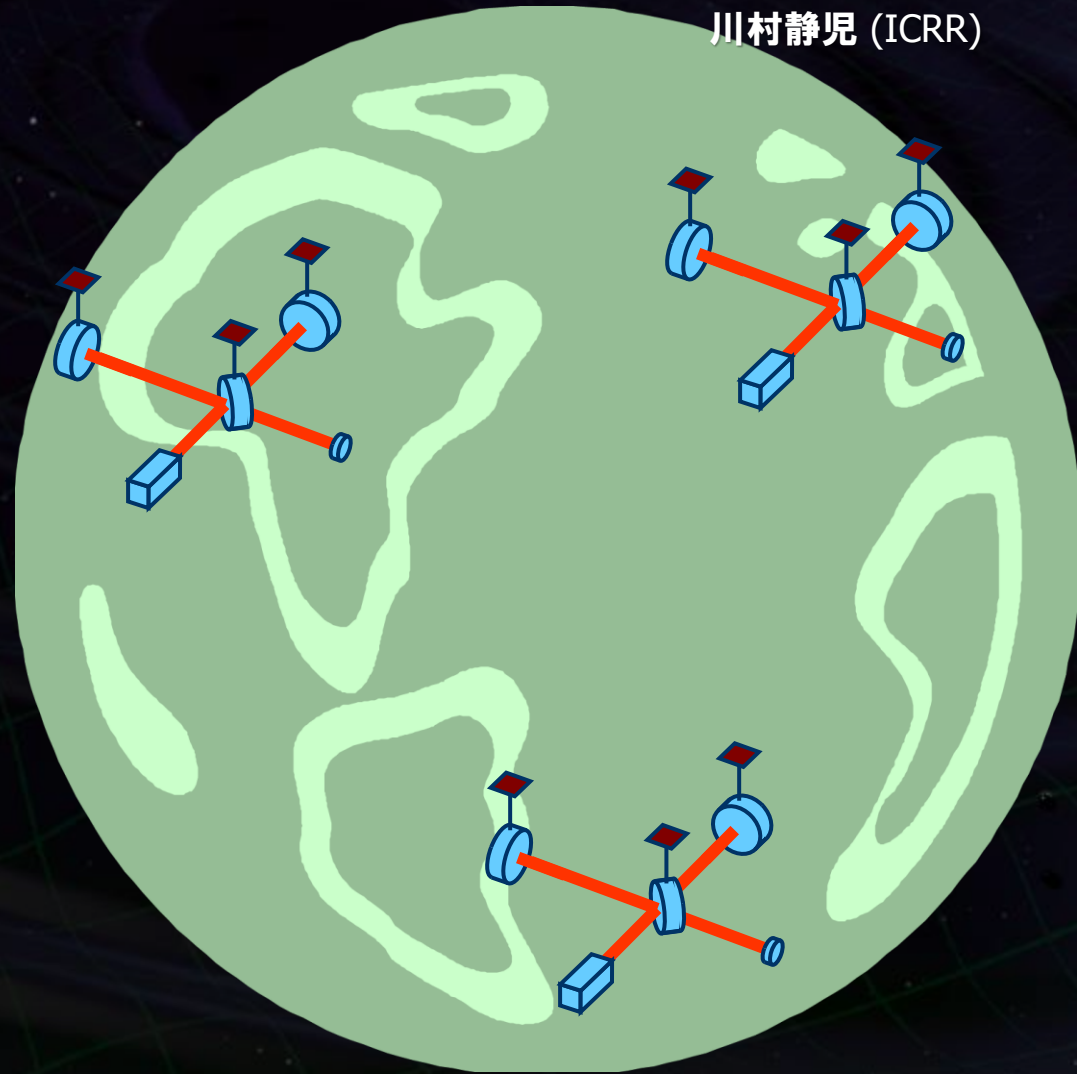
国際観測網での同時観測

アニメーション：
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測



到着時間の差から
波源の方向が分かる！



複数台での同時観測

天文的な意義

天球のカバー ← 干渉計は 弱い指向性を持つ
検出された場合 --- 天文的情報の取得

波源の位置, 偏波 の情報の取得

→ 最低3台, 指向性を考慮するとさらに必要

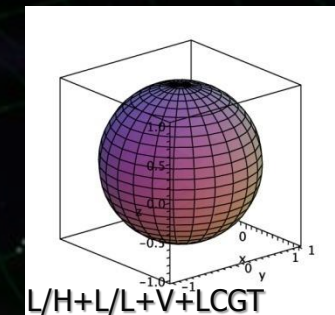
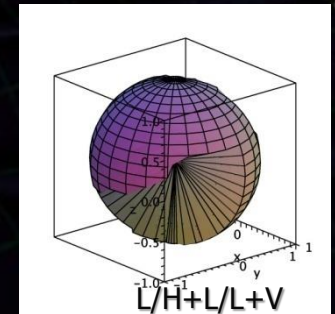
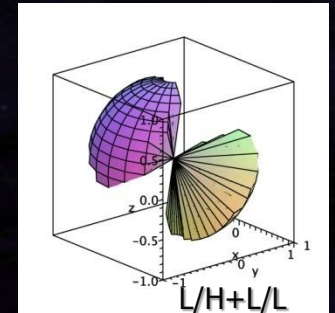
実際上の意義

重力波信号は微弱

→ 多くの Fake event が現れる

複数台での同時検出

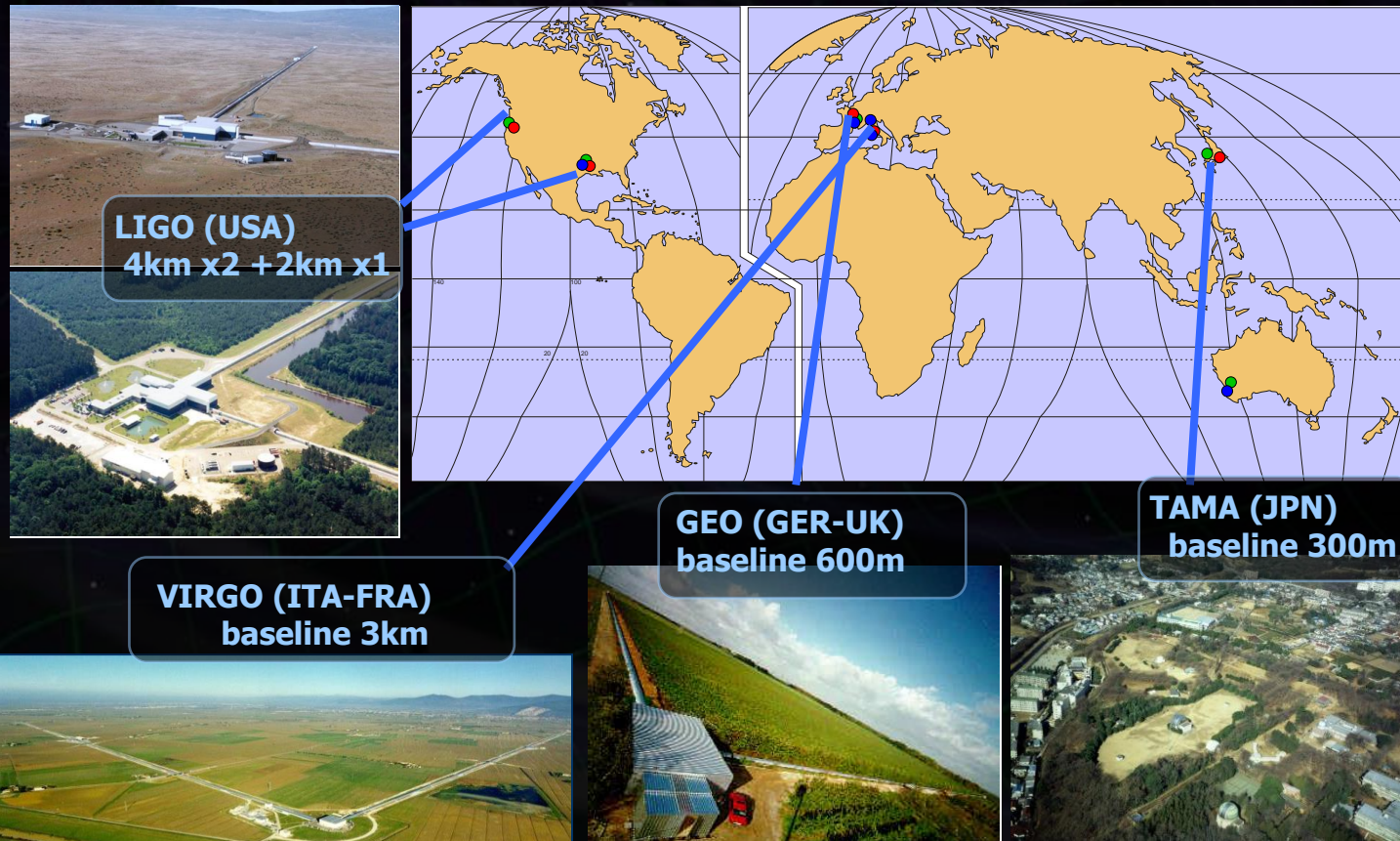
→ 検出の信頼度の向上, 偽イベントの除去



大型レーザー干渉計型重力波望遠鏡

第1世代 大型干渉計 (1999年頃から稼働)

世界で 4プロジェクト 6台 → 国際観測ネットワーク



宇宙のさえずり

- 重力波の観測運転 -



TAMA300

基線長300mレーザー干渉計型重力波検出器

国立天文台・三鷹キャンパスに設置。
1995年 建設開始, 1999年 観測開始。
将来のための中間ステップと、
実証型望遠鏡の2つの目的。

銀河系内を見渡せる感度

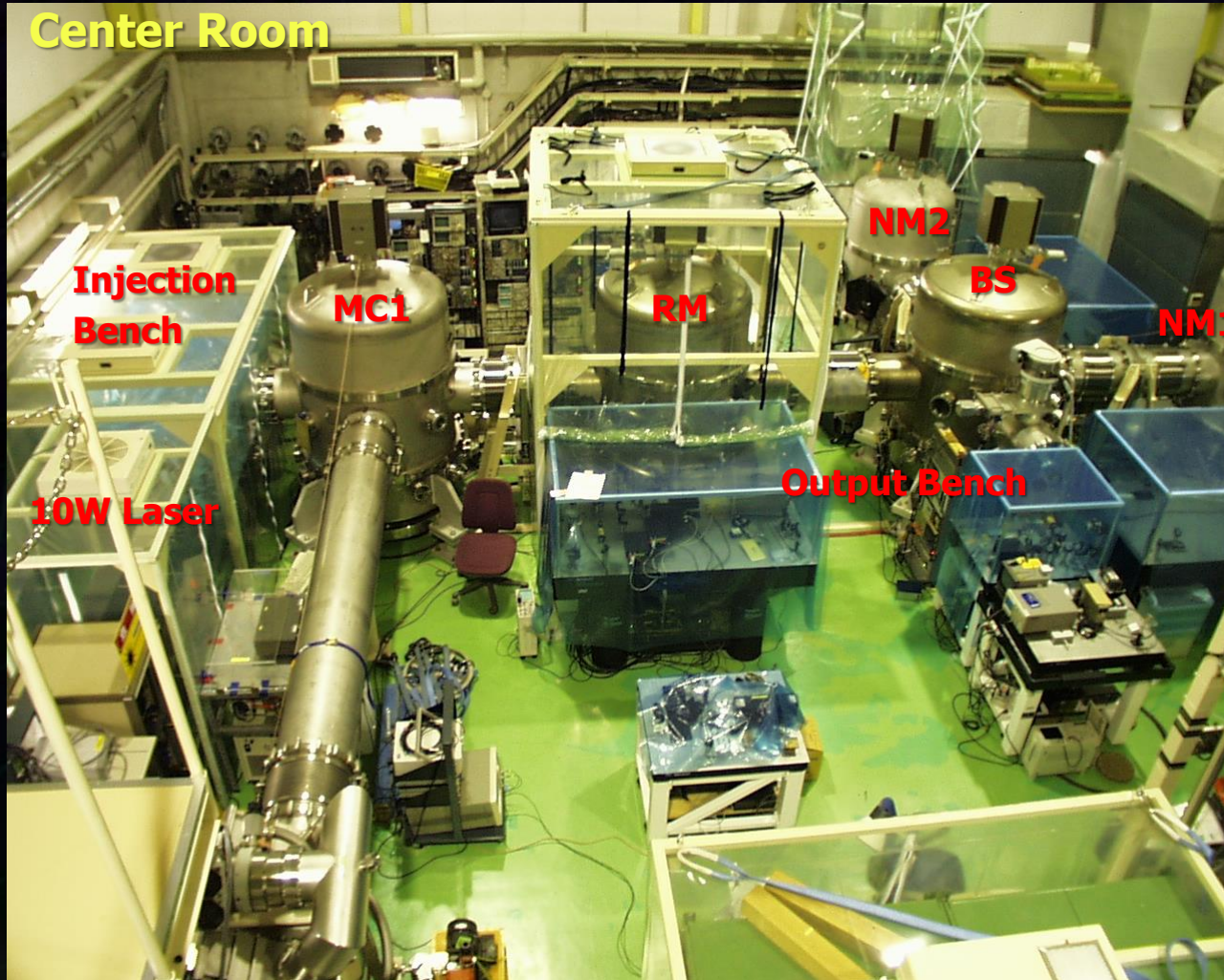
(世界最高感度 2000-2002年)

他の干渉計に先駆けた観測運転

(3000時間を超える観測データ)



Center Room



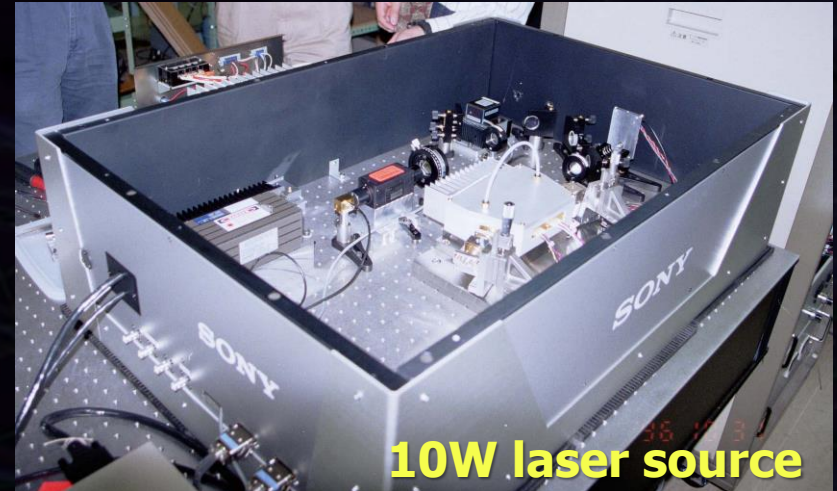
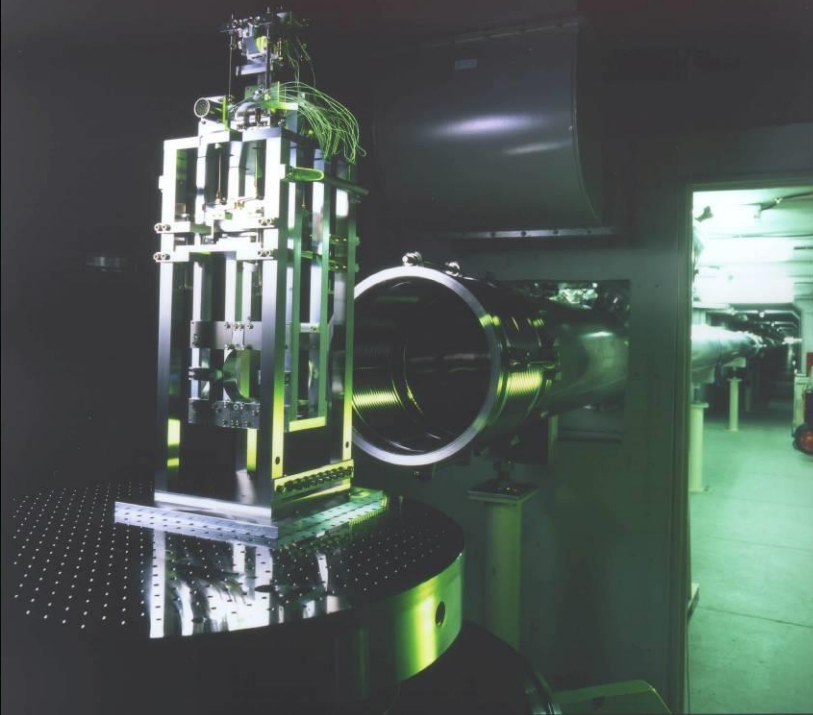
Beam tube



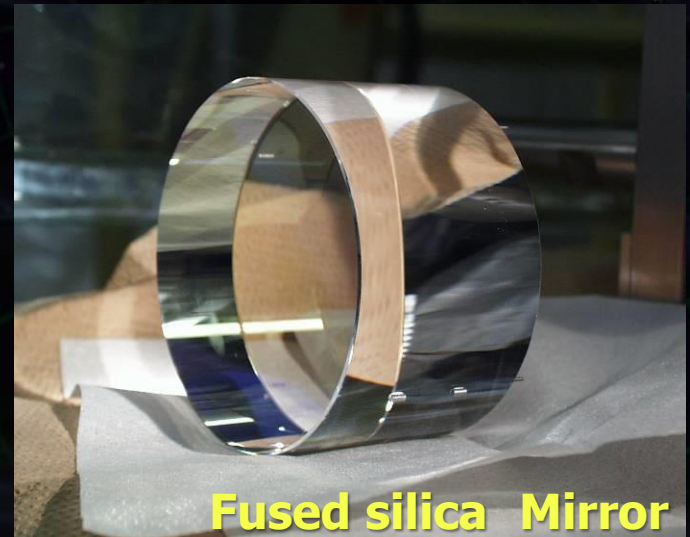
End Room



Mirror suspension

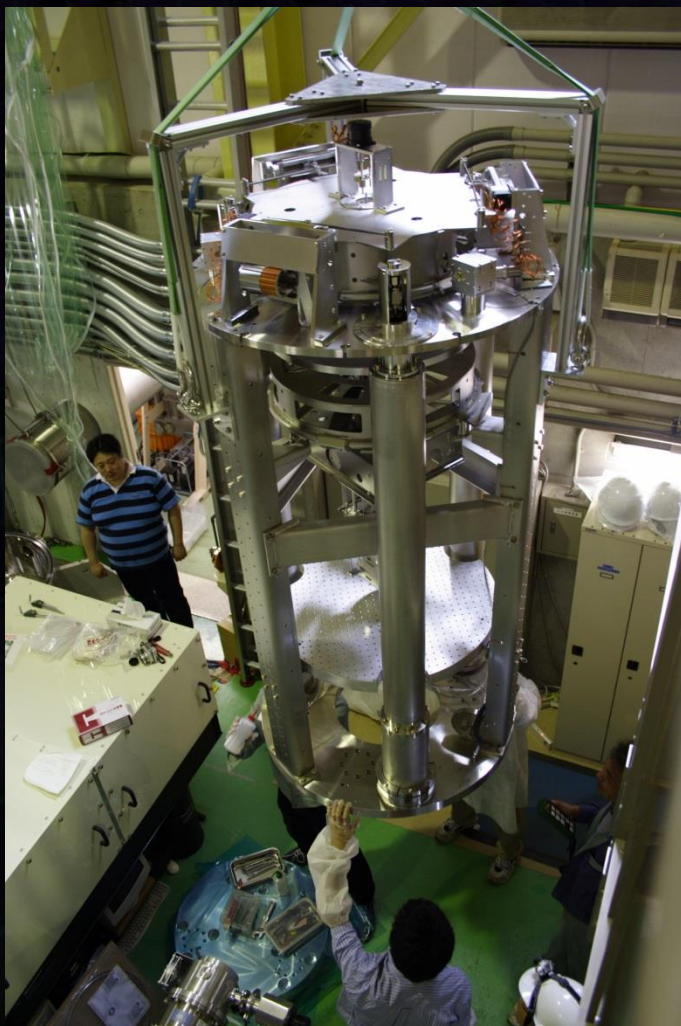


10W laser source



Fused silica Mirror

TAMA SAS



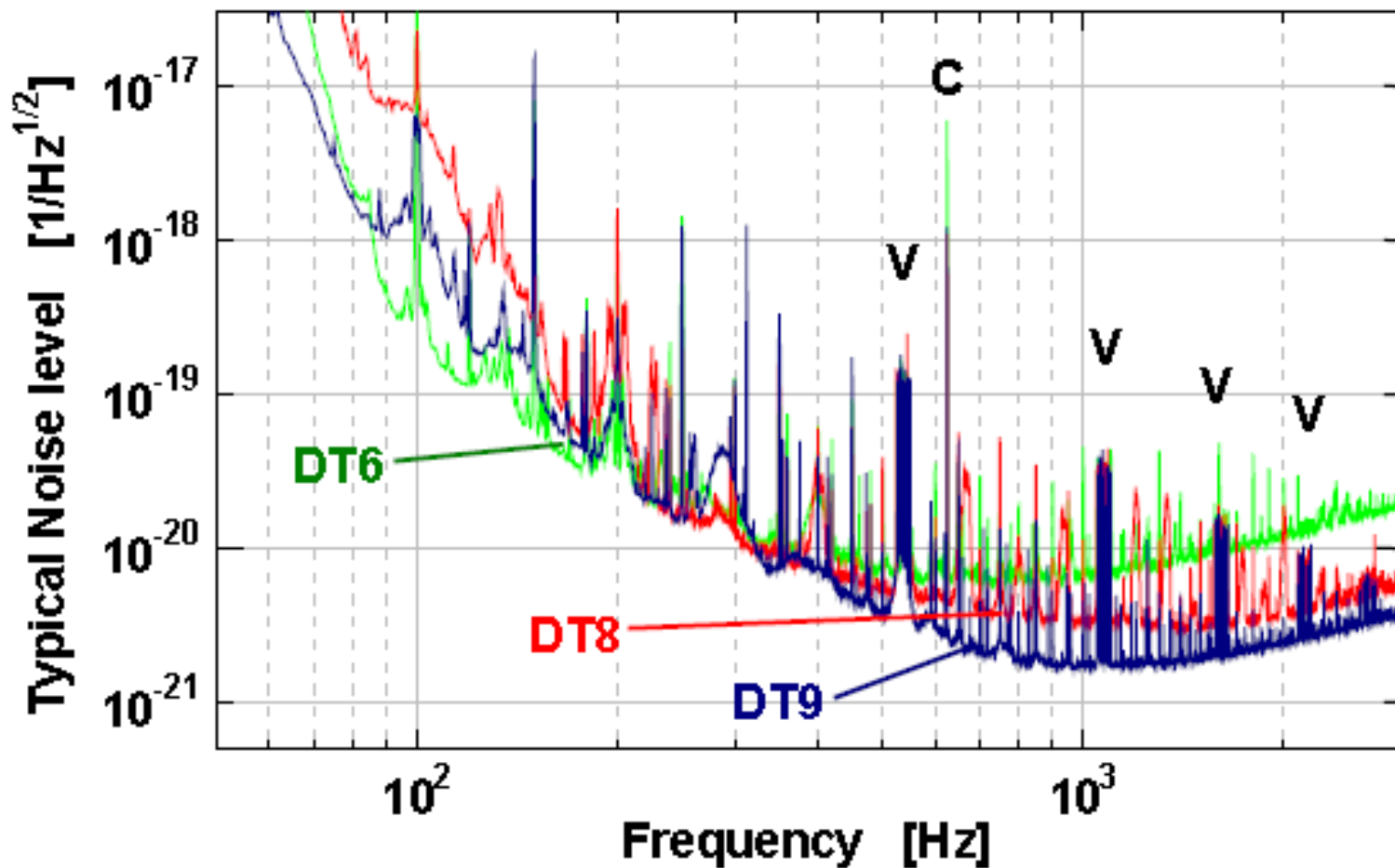
Control and DAQ



TAMA Data Taking

Data Taking		Objective	Observation time	Typical strain noise level	Total data (Longest lock)
DT1	August, 1999	Calibration test	1 night	3×10^{-19} /Hz ^{1/2}	10 hours (7.7 hours)
DT2	September, 1999	First Observation run	3 nights	3×10^{-20} /Hz ^{1/2}	31 hours
DT3	April, 2000	Observation with improved sensitivity	3 nights	1×10^{-20} /Hz ^{1/2}	13 hours
DT4	Aug.-Sept., 2000	100 hours' observation data	2 weeks (night-time operation)	1×10^{-20} /Hz ^{1/2} (typical)	167 hours (12.8 hours)
DT5	March, 2001	100 hours' observation with high duty cycle	1 week (whole-day operation)	1.7×10^{-20} /Hz ^{1/2} (LF improvement)	111 hours
DT6	Aug.-Sept., 2001	1000 hours' observation data	50 days	5×10^{-21} /Hz ^{1/2}	1038 hours (22.0 hours)
DT7	Aug.-Sept., 2002	Full operation with Power recycling	2 days		25 hours
DT8	Feb.-April., 2003	1000 hours Coincidence	2 months	3×10^{-21} /Hz ^{1/2}	1157 hours (20.5 hours)
DT9	Nov. 2003 - Jan., 2004	Automatic operation	6 weeks	1.5×10^{-21} /Hz ^{1/2}	558 hours (27 hours)

TAMA300の観測感度



MA+ PRD 71, 082002 (2005)

銀河系内の連星中性子星合体の探査

DT9 (第9回目の観測運転, 2003-2004)

観測可能距離 : 73kpc

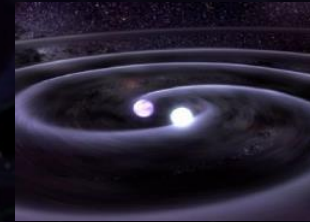
観測時間 : 486 hours

検出効率 : 69%



重力波は見つからず
イベント頻度への上限值
20 events/year (C.L. 90%)

(理論予測値 : 10^{-5} events/yr)



PHYSICAL REVIEW D 74, 122002 (2006)

Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000–2004

Tomomi Akutsu,¹ Tomotada Akutsu,² Masaki Ando,³ Koji Arai,⁴ Akito Araya,⁵ Hideki Asada,⁶ Youichi Aso,³ Mark A. Barton,¹ Peter Beyersdorf,⁴ Youhei Fujiki,⁷ Masa-Katsu Fujimoto,⁴ Ryuichi Fujita,⁸ Mitsuhiro Fukushima,⁴ Toshifumi Futamase,⁹ Yusaku Hamuro,⁷ Tomiyoshi Haruyama,¹⁰ Hideaki Hayakawa,¹ Kazuhiro Hayama,^{2,*} Gerhard Heinzel,¹¹ Gen'ichi Horikoshi,^{10,†} Hideo Iguchi,¹² Yuki Yoshi Iida,³ Kunihito Ioka,¹³ Hideki Ishitsuka,¹ Norihiko Kamikubota,¹⁰ Nobuyuki Kanda,¹⁴ Takaharu Kaneyama,⁷ Yoshikazu Karasawa,⁹ Kunihiko Kasahara,¹ Taketoshi Kasai,⁶ Mayu Katsuki,¹⁴ Keita Kawabe,¹⁵ Mari Kawamura,¹⁶ Seiji Kawamura,⁴ Nobuki Kawashima,¹⁷ Fumiko Kawazoe,¹⁸ Yasufumi Kojima,¹⁹ Keiko Kokeyama,¹⁸ Kazuhiro Kondo,¹ Yoshihide Kozai,⁴ Hideaki Kudoh,²⁰ Kazuaki Kuroda,¹ Takashi Kuwabara,⁷ Namio Matsuda,²¹ Norikatsu Mio,²² Kazuyuki Miura,²³ Osamu Miyakawa,²⁴ Shoken Miyama,⁴ Shinji Miyoki,¹ Hiromi Mizusawa,⁷ Shigenori Moriwaki,²² Mitsuru Musha,²⁵ Shigeo Nagano,²⁶ Yoshitaka Nagayama,¹⁴ Ken'ichi Nakagawa,²⁵ Takashi Nakamura,¹⁶ Hiroyuki Nakano,^{14,*} Ken-ichi Nakao,¹⁴ Yuhiko Nishi,³ Kenji Numata,²⁷ Yujiro Ogawa,¹⁰ Masatake Ohashi,¹ Naoko Ohishi,⁴ Akira Okutomi,¹ Ken-ichi Oohara,⁷ Shigemitsu Otsuka,³ Norichika Sago,^{8,†} Yoshio Saito,¹⁰ Shihori Sakata,¹⁸ Misao Sasaki,²⁸ Kouichi Sato,²⁹ Nobuaki Sato,¹⁰ Shuichi Sato,⁴ Youhei Sato,²⁵ Hidetsugu Seki,³ Aya Sekido,³⁰ Naoki Seto,³¹ Masaru Shibata,³² Hisaaki Shinkai,³³ Takakazu Shintomi,¹⁰ Kenji Soida,³ Kentaro Somiya,³⁴ Toshikazu Suzuki,¹⁰ Hideyuki Tagoshi,⁵ Hirotaka Takahashi,³⁴ Ryutarō Takahashi,⁴ Akitaru Takamori,² Shuzo Takemoto,¹⁶ Kohei Takeno,²² Takahiro Tanaka,¹⁶ Keisuke Taniguchi,³⁵ Shinsuke Taniguchi,³ Toru Tanji,²² Daisuke Tatsumi,⁴ C. T. Taylor,¹ Souichi Telada,³⁶ Kuniharu Tochikubo,³ Masao Tokunari,¹ Takayuki Tomaru,¹⁰ Kimio Tsubono,³ Nobuhiro Tsuda,²⁹ Yoshiki Tsunesada,⁴ Takashi Uchiyama,¹ Akitoshi Ueda,⁴ Ken-ichi Ueda,²⁵ Fumihiko Usui,³⁷ Koichi Waseda,⁴ Yuko Watanabe,²³ Hiromi Yakura,²³ Akira Yamamoto,¹⁰ Kazuhiro Yamamoto,¹ Toshitaka Yamazaki,⁴ Yuriko Yanagi,¹⁸ Tatsuo Yoda,³ Jun'ichi Yokoyama,³⁸ Tatsuru Yoshida,⁹ and Zong-Hong Zhu⁴

その他: バースト波探査, パルサー探査,
ブラックホール準固有振動探査 など

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

3000km離れた2つのサイト

ハンフォード 4km 1台, 2km 1台
 リビングストン 4km 干渉計

2002年観測開始

計画通りの感度を実現 (世界最高感度)

→ 連星中性子星合体に対して
 観測可能距離 14 MPC

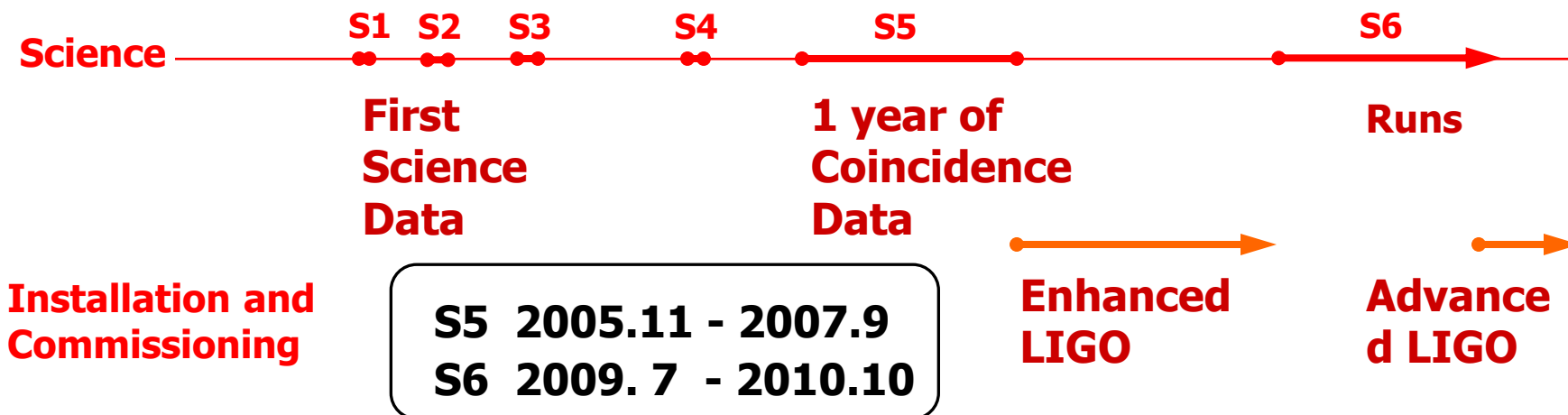
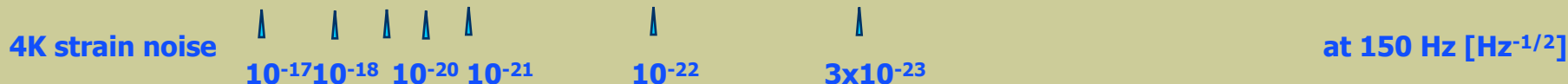
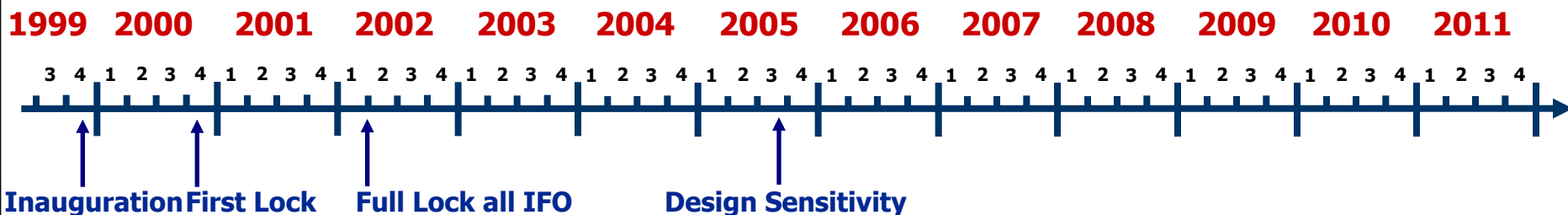
長期連続観測

→ 1年以上の3台同時観測データ
 (S5: 2005年11月 - 2007年10月)



Time Line

October 2008
Daniel Sigg



藁の中から針を探す!

- 重力波信号の探査 -



地上重力波望遠鏡のターゲット

地上重力波望遠鏡 -- 10Hz – 1kHz の観測周波数帯

⇒ **コンパクト天体, 高エネルギー天体現象**

中性子星

ブラックホール

初期宇宙

パルサー

超新星爆発

連星合体

背景重力波

軟ガンマ線リピーター

EMRI

電磁波
ニュートリノ
高エネルギー宇宙線

星の
振動
モード

長ガンマ線
バースト

短ガンマ線
バースト

準固有
振動

同時観測
数値相対論

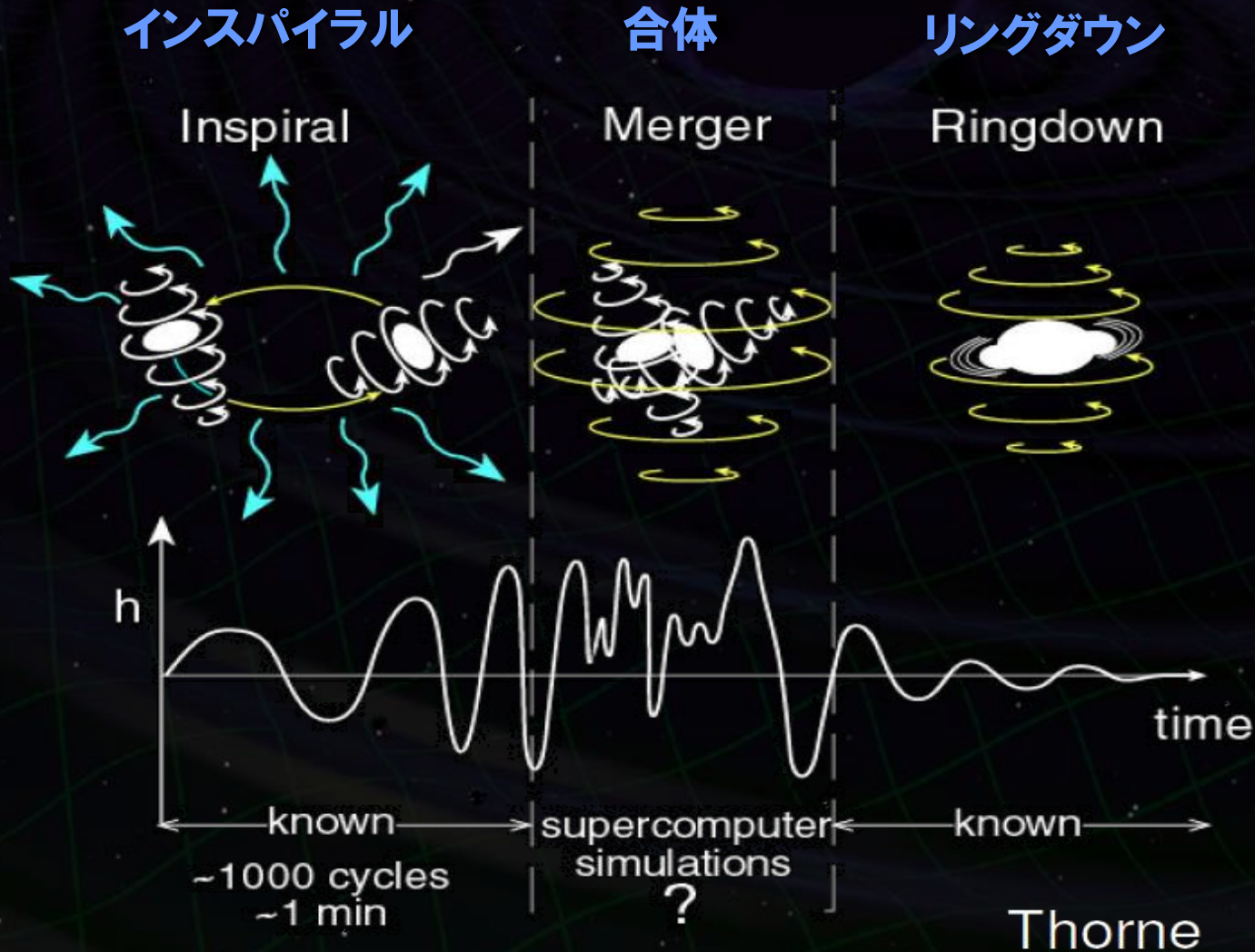
高エネルギー天体
現象の総合的理解

高密度天体の状態方程式
原子核物理

相対性理論の検証
強い重力場での物理法則

	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>

連星合体からの重力波の波形



連星合体イベントの頻度見積もり

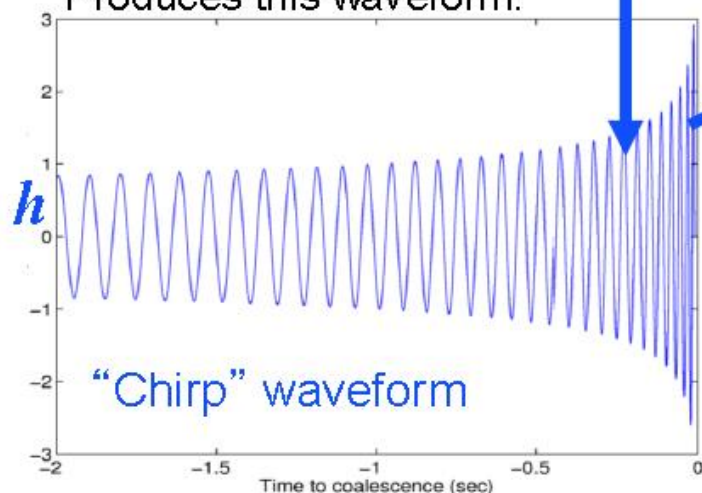
IFO	Source ^a	\dot{N}_{low} yr ⁻¹	\dot{N}_{re} yr ⁻¹	\dot{N}_{pl} yr ⁻¹	\dot{N}_{up} yr ⁻¹
Initial	NS-NS	2×10^{-4}	0.02	0.2	0.6
	NS-BH	7×10^{-5}	0.004	0.1	
	BH-BH	2×10^{-4}	0.007	0.5	
	IMRI into IMBH			$< 0.001^b$	0.01^c
	IMBH-IMBH			10^{-4d}	10^{-3e}
Advanced	NS-NS	0.4	40	400	1000
	NS-BH	0.2	10	300	
	BH-BH	0.4	20	1000	
	IMRI into IMBH			10^b	300^c
	IMBH-IMBH			0.1^d	1^e

Abadie+ CQG 27 (2010) 173001.

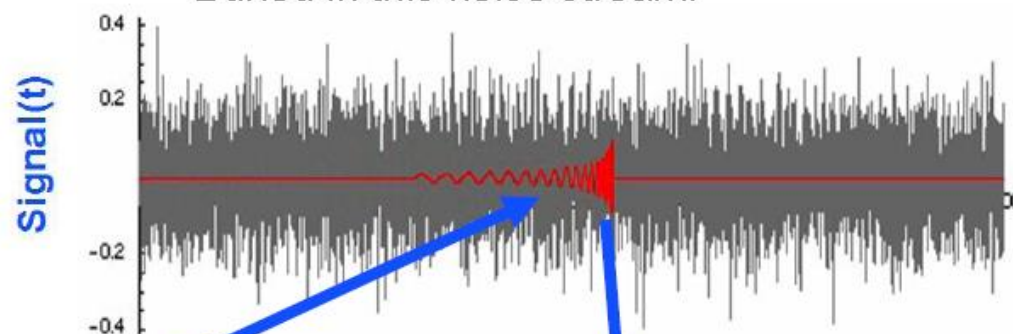
This source:



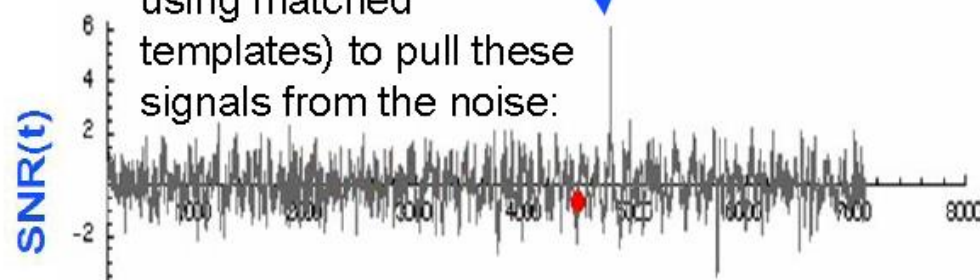
Produces this waveform:



Buried in this noise stream:



We use different methods (in this case optimal Wiener filtering using matched templates) to pull these signals from the noise:

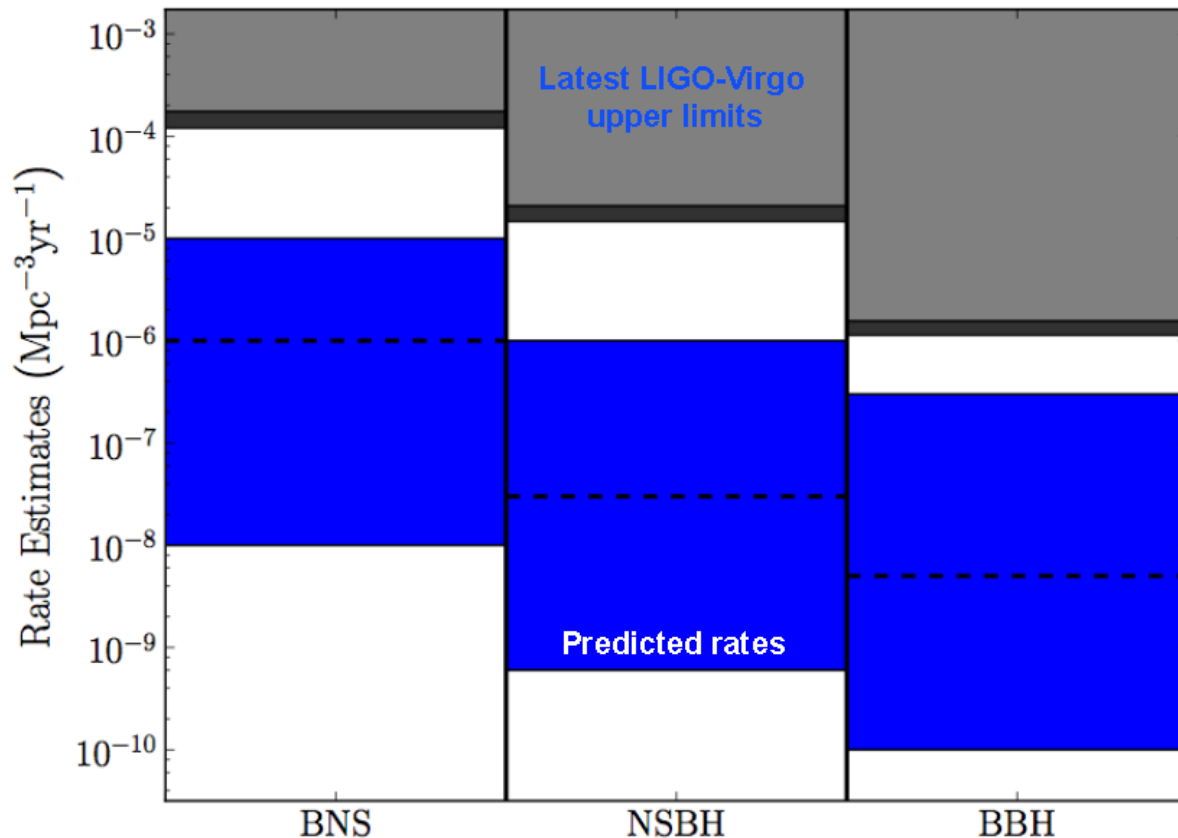


The problem is that non-astrophysical sources also produces signals (false positives)



Searching for Low Mass Compact Binary Coalescences

LIGO Scientific and Virgo Collaborations, "Search for Gravitational Waves from Low Mass Compact Binary Coalescence in LIGO's Sixth Science Run and Virgo's Science Runs 2 and 3", [Phys. Rev D85 \(2012\) 082002](https://arxiv.org/abs/2012.08202)



17

Marcel Grossman 13, Stockholm, 4 July 2012

ガンマ線バースト

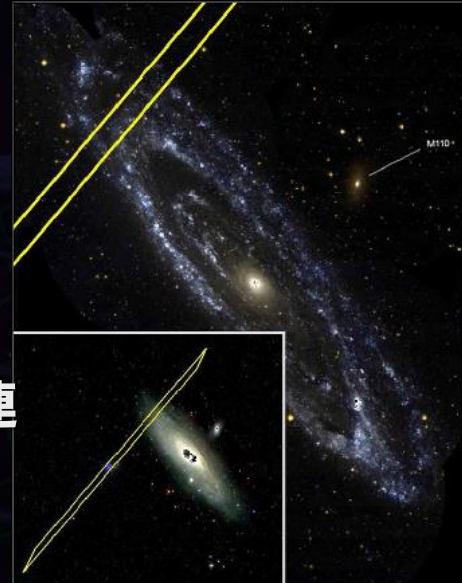
2007年に観測されたGRB070201

(Konus-Wind, INTEGRAL, MESSENGER)

→ M31 (アンドロメダ)

銀河方向で発生

継続時間の短いガンマ線バーストは、連星中性子星の合体に起因している可能性がある。



米国の地上重力波検出器LIGOが、十分な感度で観測を行っていた。

→ データ解析の結果、信号はなかった。

このShort GRBはM31で発生した連星中性子星合体に起因するものではない、と結論付けられた。

Abbott et al, arxiv:0711.1163.

伊藤氏資料より (2011)

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
- 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。

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

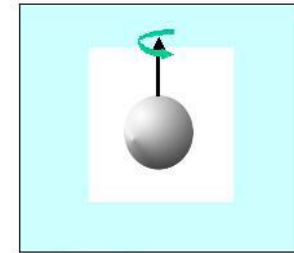
山の高さ：
$$\sim 1\text{mm} \left(\frac{\epsilon}{10^{-7}} \right) \left(\frac{\text{Radius of NS}}{10\text{ km}} \right)$$

重力波振幅：
$$h_0 = \frac{16\pi^2 G \epsilon I_{zz} f^2}{c^4 D_L}$$

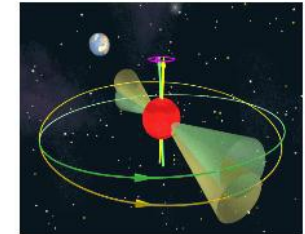
$$= 4.2 \times 10^{-27} \left(\frac{\epsilon}{10^{-7}} \right) \left(\frac{I_{zz}}{10^{45} \text{ g} \cdot \text{cm}^2} \right) \left(\frac{f_0}{100 \text{ Hz}} \right)^2 \left(\frac{D_L}{1 \text{ kpc}} \right)$$

※強い磁場 (10^{15} G) をもつ

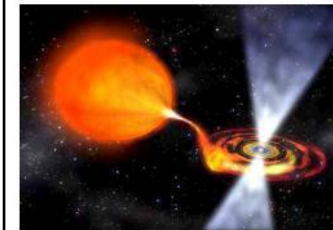
中性子星なら、 $\epsilon \sim 10^{-6}$ 程度になる。 Cutler (2002)



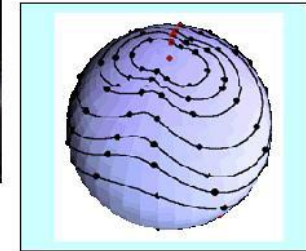
Mountain on a star



Wobbling star



Accreting star



Oscillating star

'理論的'な上限値

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.

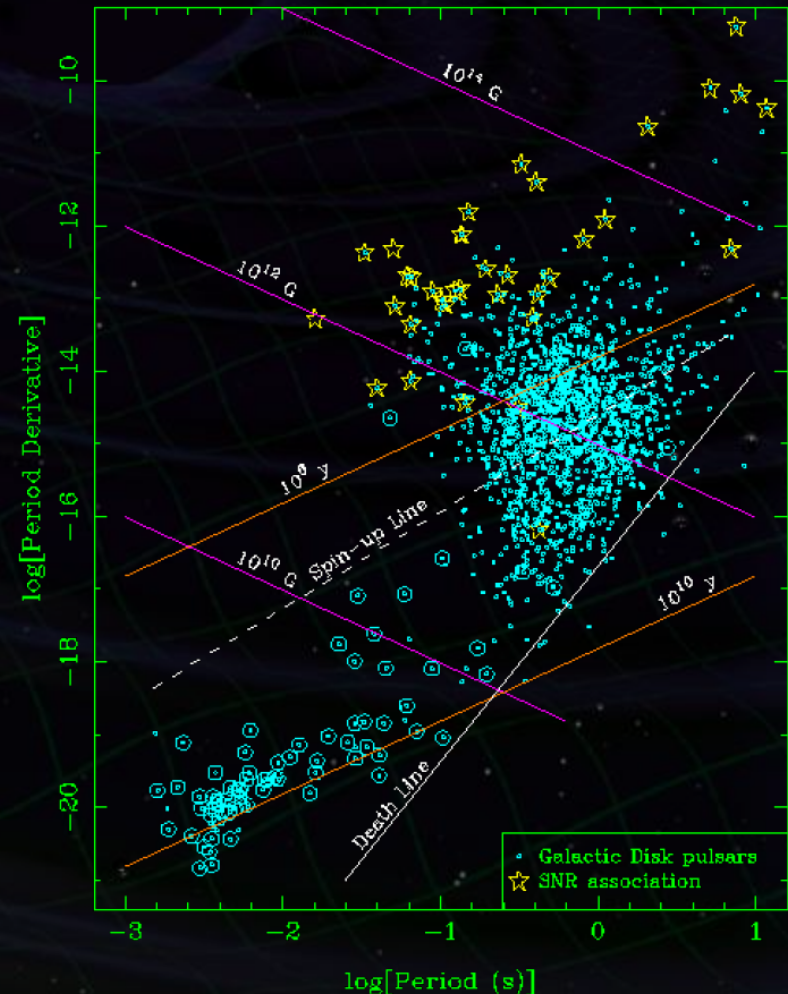
観測されたスピンドウンが全て重力波放射によるエネルギー損失に起因するとしたもの.

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 : $h_{\text{spin_down}} = 1.4 \times 10^{-24}$



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。

Abbott+, ApJ (2010)

- **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
 - 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
 - 周波数 : 25.30 Hz
 - スピンドウン : -3.73×10^{-12} Hz/s

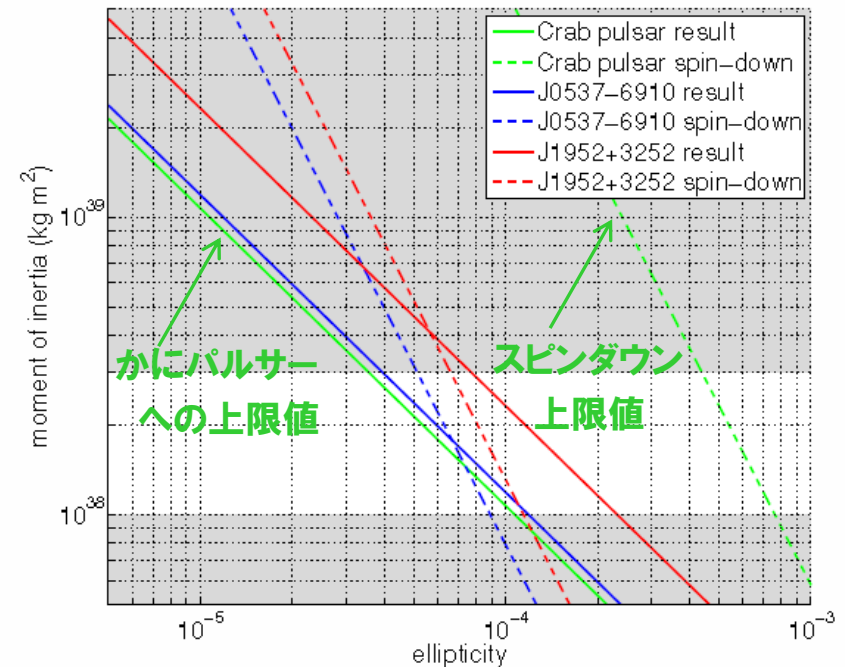
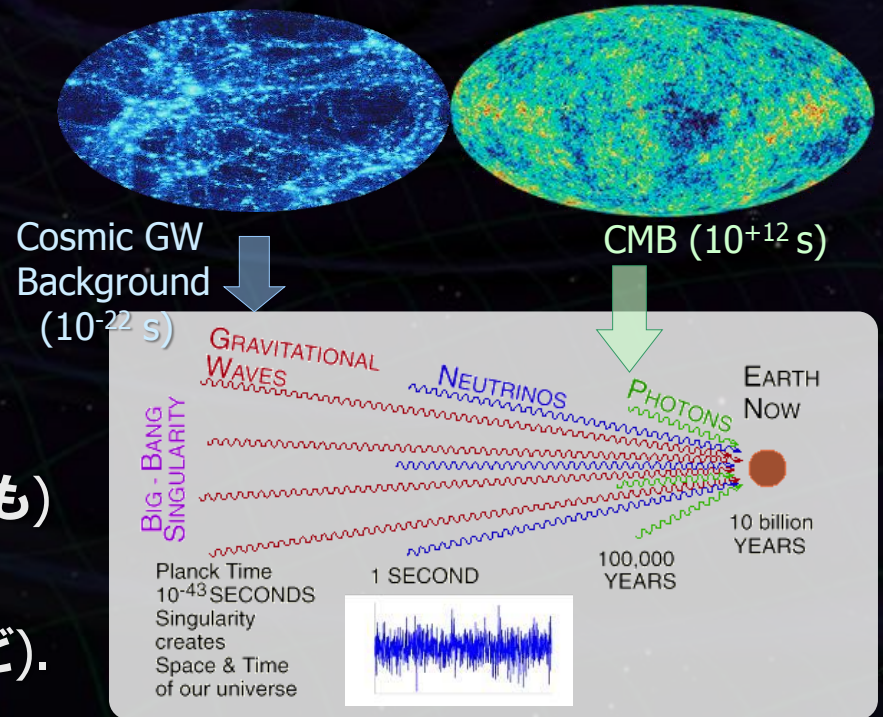


Figure 5. Results of the Crab pulsar, J0537–6910, and J1952+3252 analyses, and the spin-down limits, plotted on the moment of inertia–ellipticity plane. The results used are those from model (1) and with restricted priors on the angular parameters for the Crab pulsar and J0537–6910. Areas to the right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

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).



重力波のエネルギー密度

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

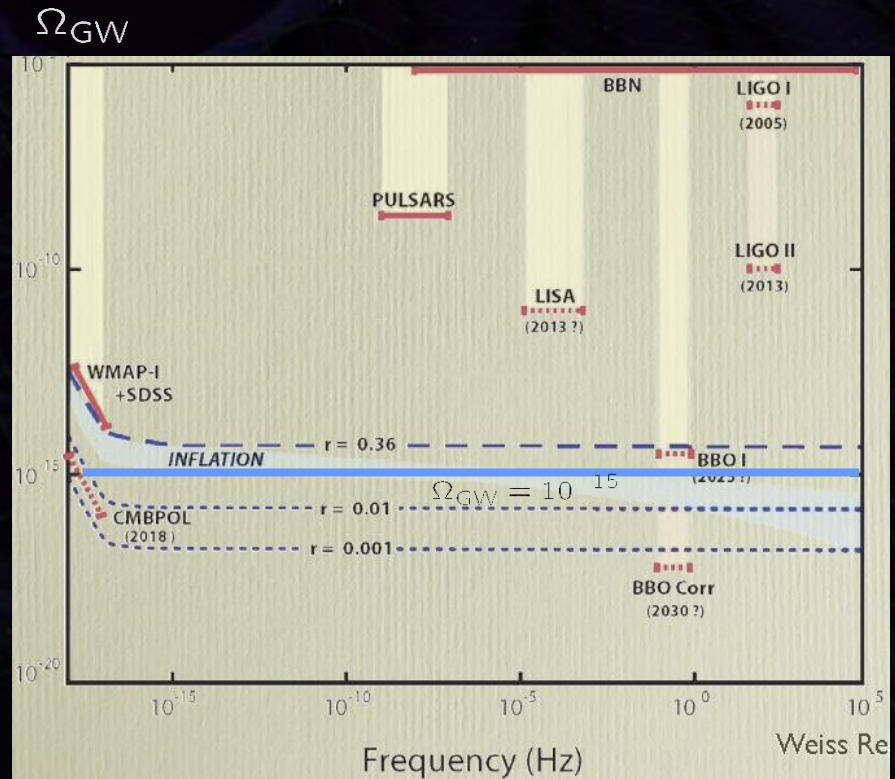
← 重力波の密度

← 宇宙の臨界密度

等価な重力波スペクトル

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

← ハッブル定数



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.

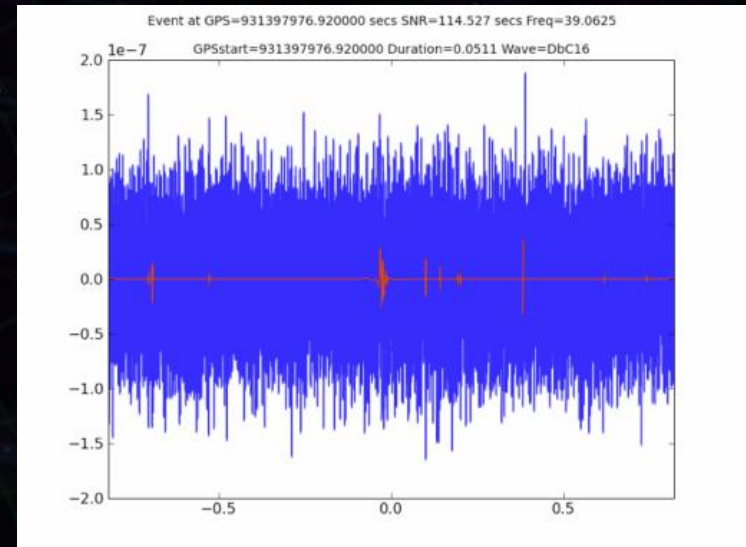
⇒ 複数台での相関をとる.

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.

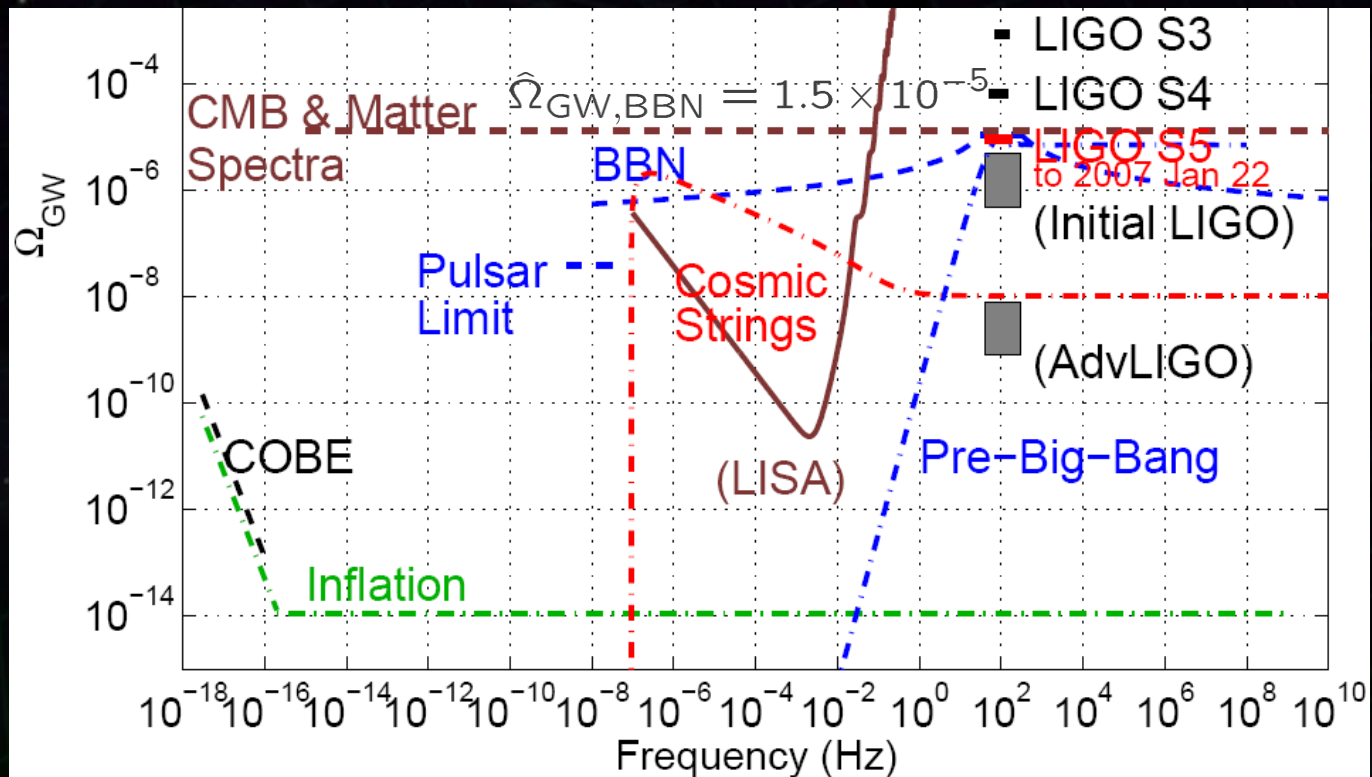


LIGO S5 感度の良い 41.5-177.5Hz のデータ

→ BBNより良い上限値

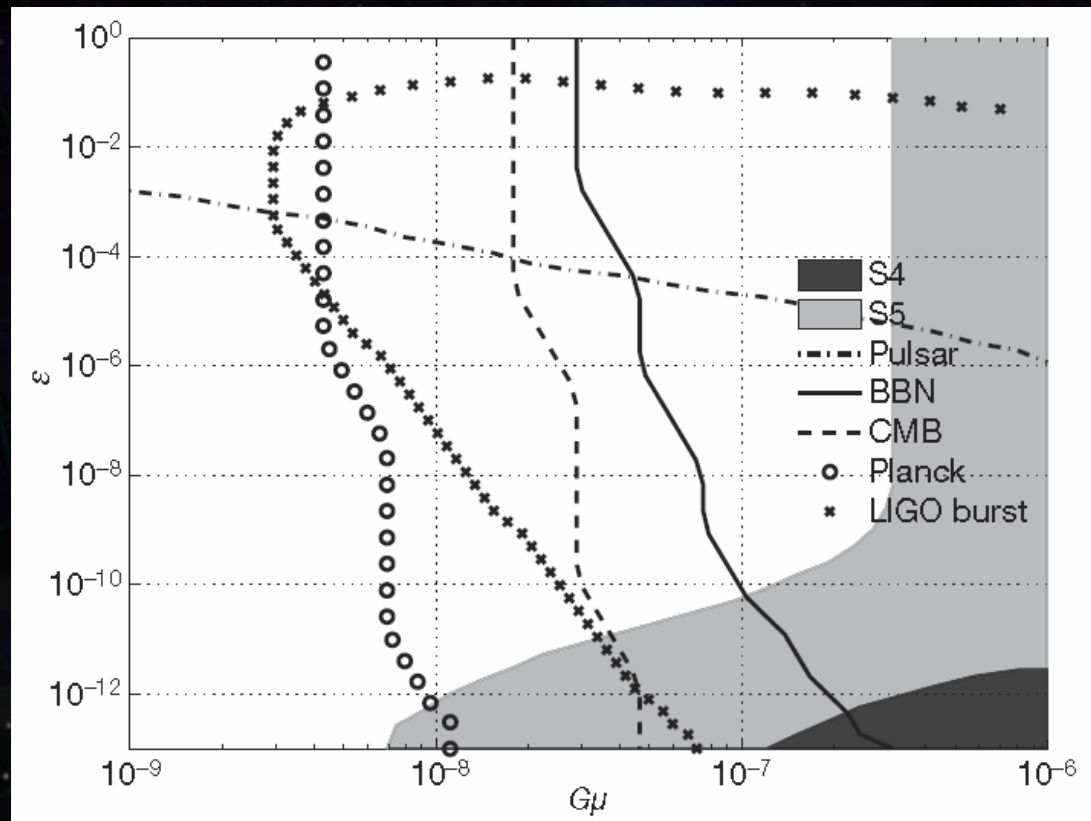
$$\hat{\Omega}_{\text{GW}} = 6.9 \times 10^{-6} \quad (95\% \text{ CL})$$

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



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

LIGO S5 感度の良い 41.5-177.5Hz のデータ → 宇宙紐についての制限



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.



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.



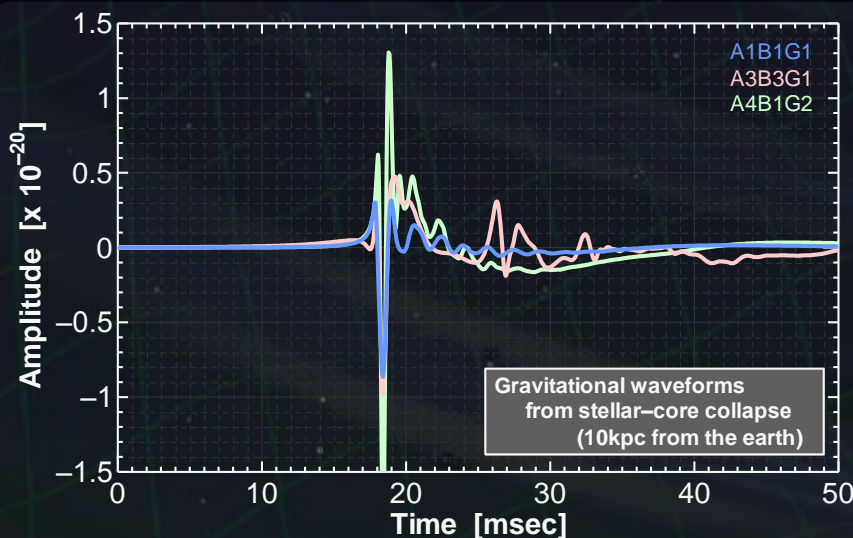
マッチド・フィルタは使えない
信号パワーを効率的に取り出す
‘バーストフィルター’を用いる

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。



⇒ 共通の特徴：短いバースト信号
Spike wave ~1msec
Duration time <30msec



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

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

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
- 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.

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

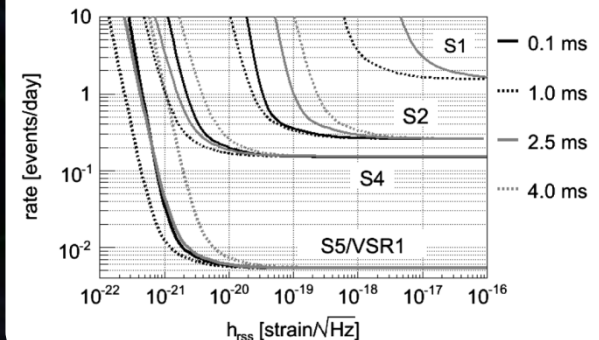
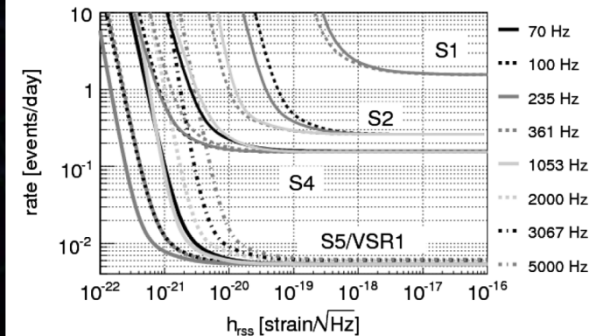
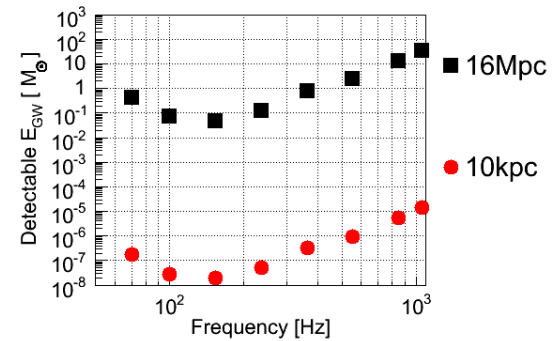
~ $2 \times 10^{-8} M_{\odot} c^2$ at 10 kpc

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

→ 上限値 2.0 yr^{-1}

(超新星爆発の理論予測 ~ $1/50 \text{ yr}^{-1}$)

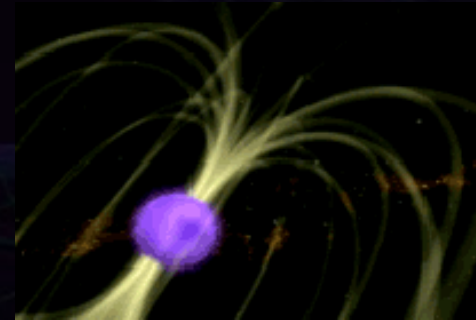
観測可能な重力波エネルギー



Abadie+, PRD 81 (2010) 102001.

非常に強い磁場を持った中性子星

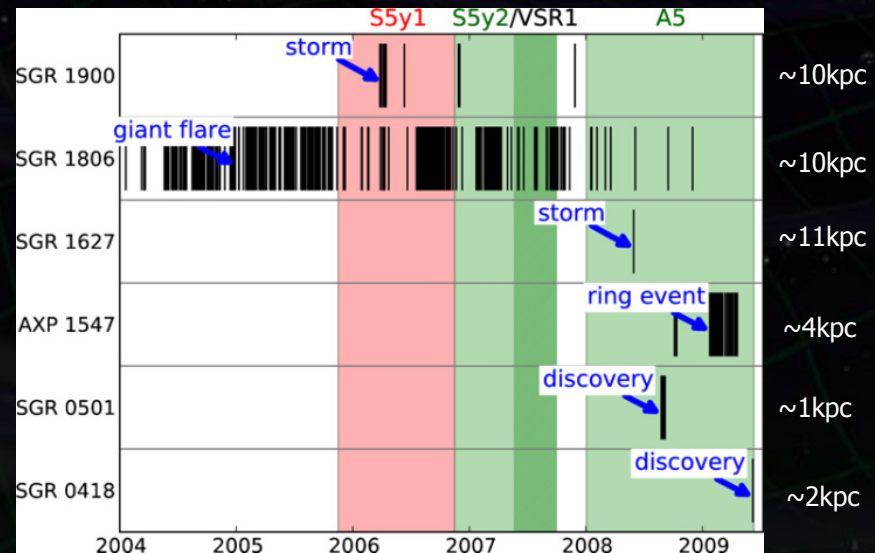
- 20天体程度が見つかっている.
- Soft Gamma-ray repeater (SGR)
- Anomalous X-ray pulsar (AXP)



⇒ Giant flare :

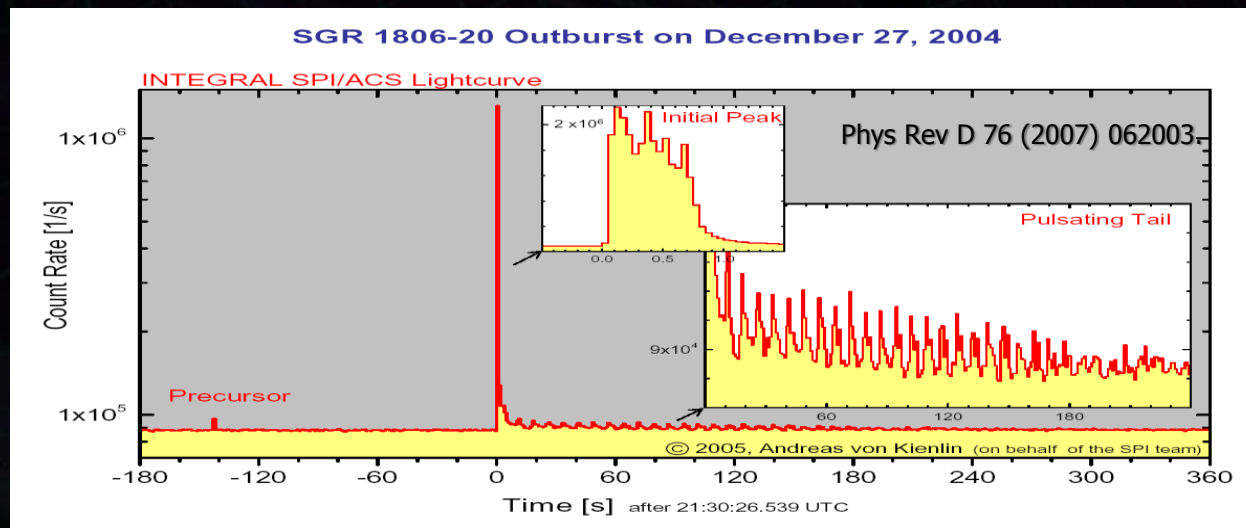
突発的に起きる大エネルギー(10^{42} erg)のガンマ線放射.
クラストの破壊 → 星震の励起と重力波放射.

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 (RHESSE, RXTE x-ray data)
Hyperflare in SGR 1806-20 (December 27, 2004)
距離 $\sim 6 - 10$ kpc, 磁場 10^{11} T.
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 \rightarrow 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)

	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>

第1世代 重力波検出器

検出の試み：1960年代より行われる

2000年前後より、大型干渉計型検出器が観測を開始

レーザー干渉計型：6台, 共振型検出器：3台



国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ

→ 科学的成果（上限値, 理論モデルへの制約など）

連星中性子星合体イベント：50kpc~20Mpc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

第2世代 重力波望遠鏡

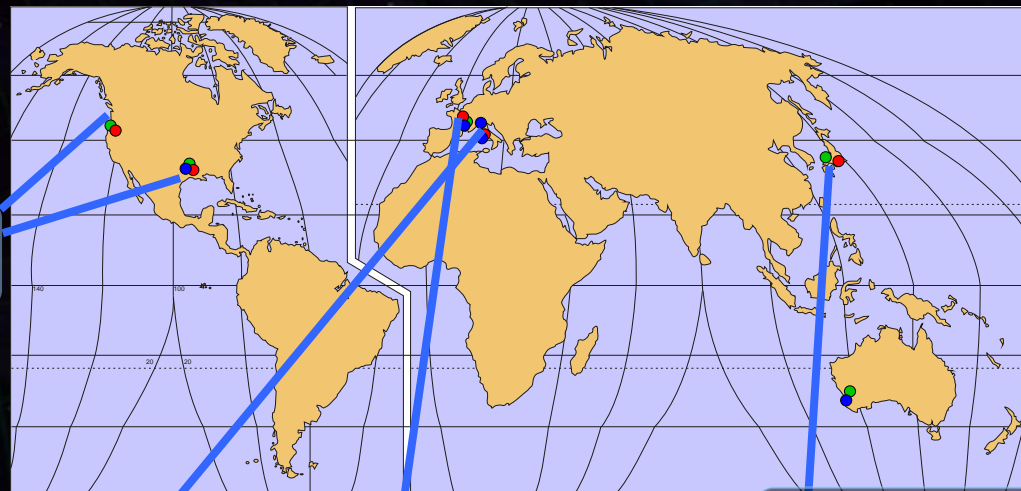
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学

(重力波の検出, 波源位置の特定, 波源の物理情報, ...)



aLIGO (USA)
4km x 2 (or3)



LIGO-Australia
in proposal

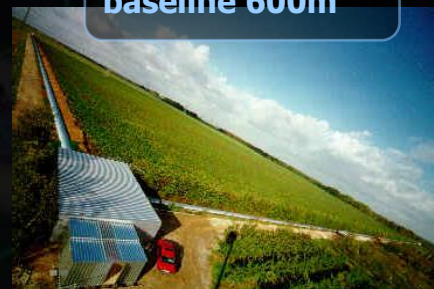


LIGO-India
in proposal

Adv. VIRGO (ITA-FRA)
baseline 3km



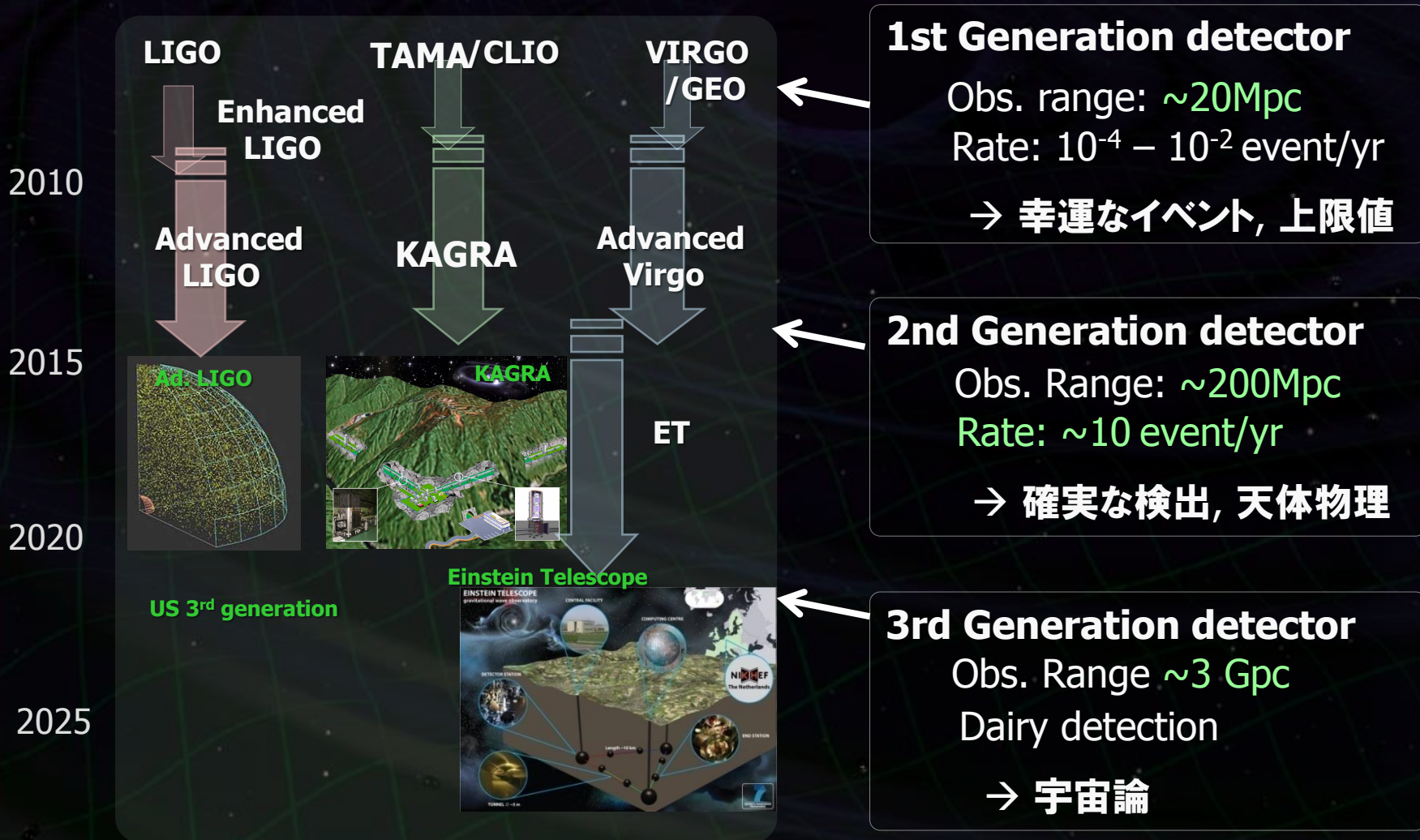
GEO-HF (GER-UK)
baseline 600m



KAGRA (JPN)
baseline 3km



地上重力波望遠鏡のロードマップ



- 重力波観測の試みは1960年代から続けられている。
- 現在の主流は、レーザー干渉計型重力波望遠鏡。
`第1世代`の干渉計が観測運転を行っている。
→ 20Mpc程度の観測可能距離が達成されている。
- 数多くの重力波信号探査解析が行われているが、
まだ重力波信号は見つかっていない。
- さまざまな天体現象に対して上限値を与えている。

講義の予定

第1回 重力波による天文学

第2回 観測技術と観測結果

第3回 次世代重力波望遠鏡

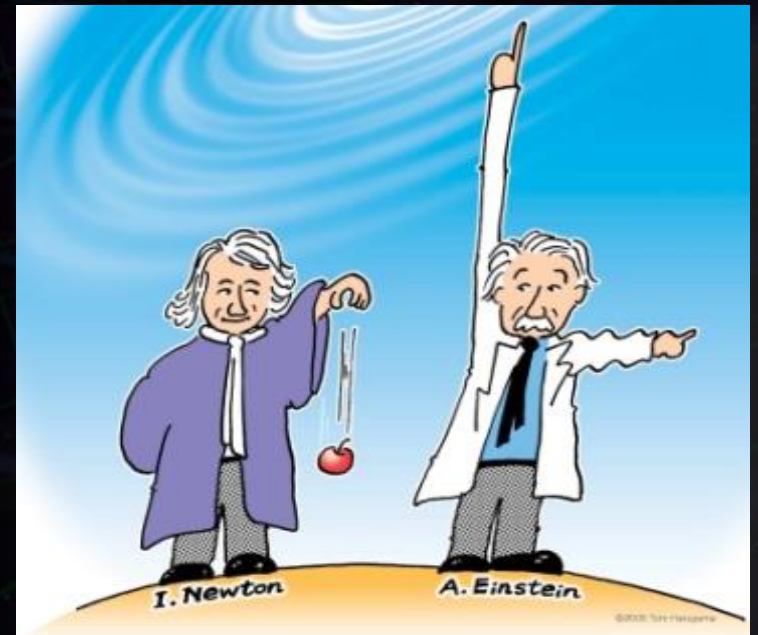


イラスト Tom Haruyama

第2回 終わり