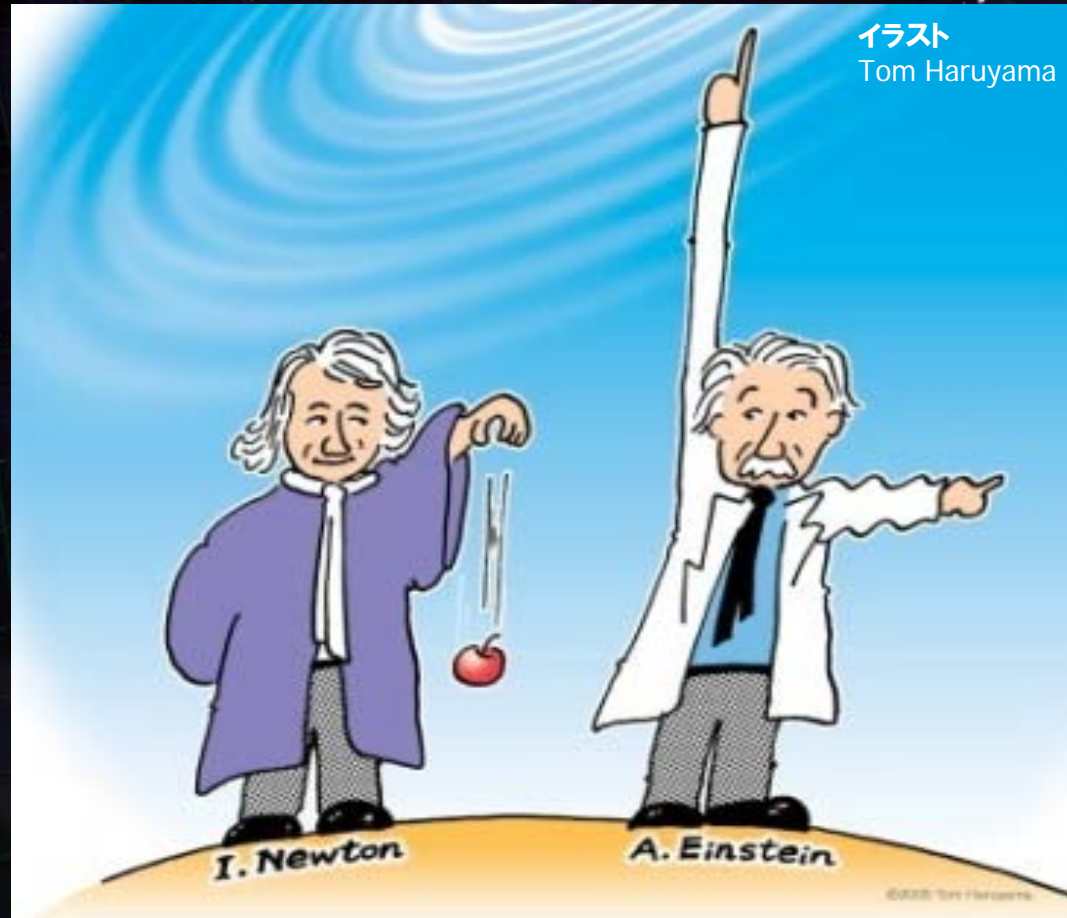


重力・重力波物理学



安東 正樹 (京都大学 理学系研究科)

特別講義 (2009年9月29日, 京都大学)

第2章 重力波の検出

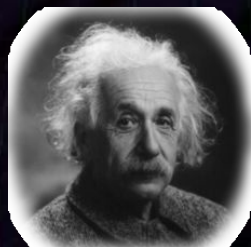
重力波の検出原理

重力波検出器

重力波検出実験のこれまで

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

(ベンジマス・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)



第2章 重力波の検出

⇒ 重力波の検出原理 重力波検出器

重力波の効果

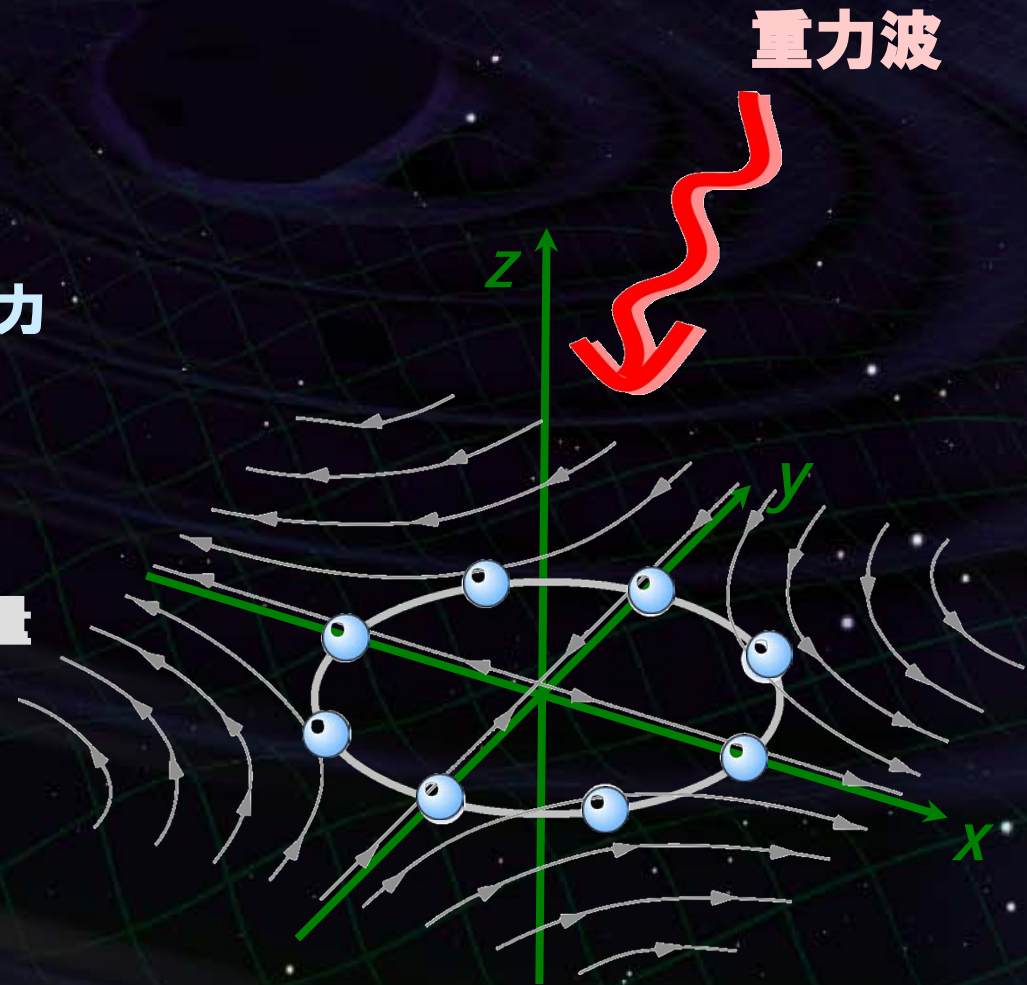
重力波の効果

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

$$h = 10^{-21}$$

→ 1mの距離が
 10^{-21} m 伸縮する



重力波による位相変化

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

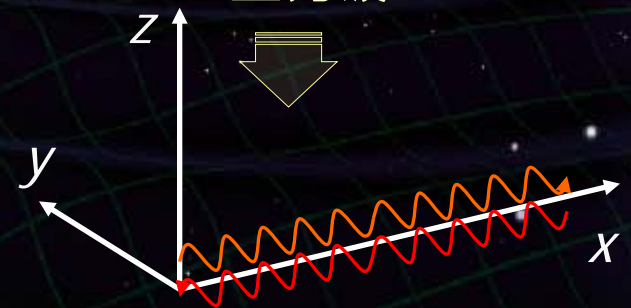
$$\Delta \phi = \frac{2L\Omega}{c} + \frac{\Omega}{2} \int_{t-2L/c}^t h(t') dt'$$

重力波による位相変化



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

重力波



周波数応答

光の滞在時間の増大

→ 重力波信号の積算



滞在時間が長すぎると、

信号のキャンセルが起こる

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

重力波による位相変化

フーリエ変換



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

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

応答関数

重力波の波長と最適な基線長の関係

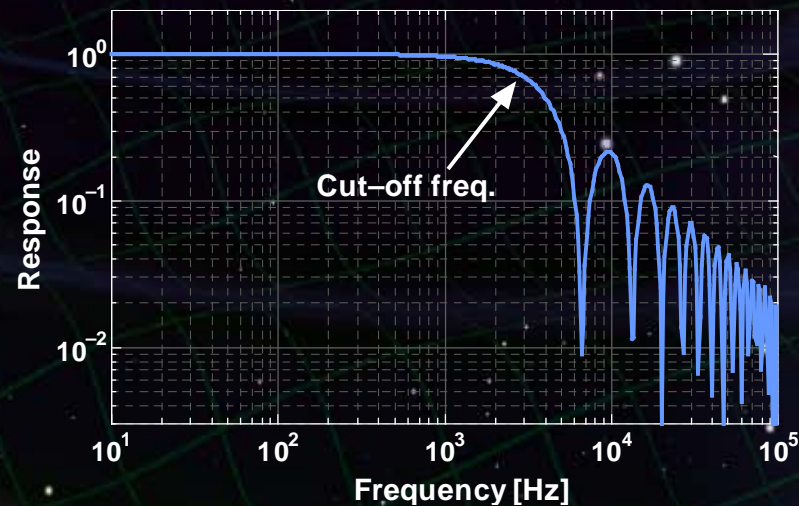
$$L = \frac{\lambda_{GW}}{4}$$



光の往復の間に
重力波が半波長通過

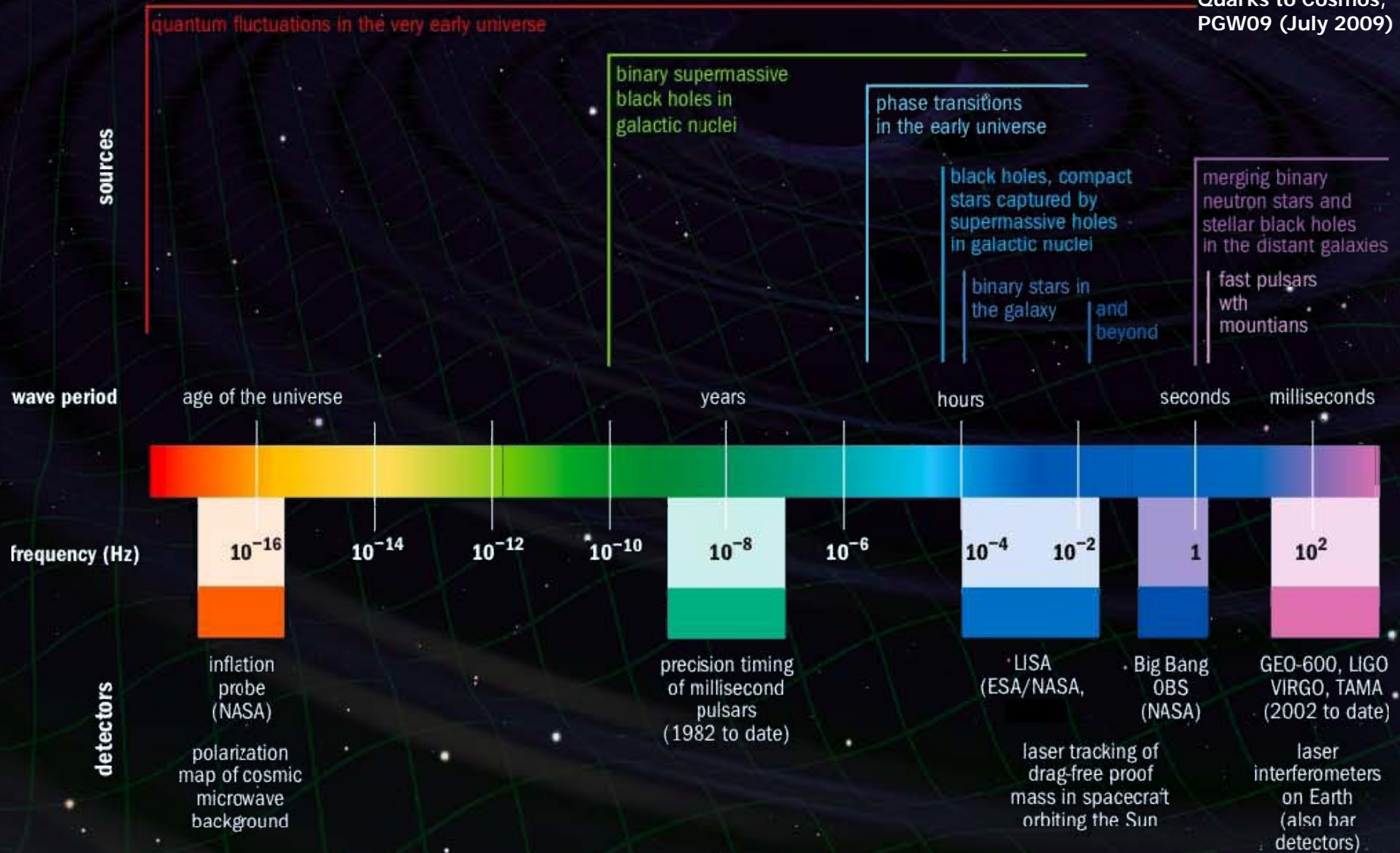
(1kHzの重力波 → 基線長75km)

重力波に対する周波数応答



重力波源と検出器

Craig Hogan,
Quarks to Cosmos,
PGW09 (July 2009)



第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

⇒ 重力波検出器

共振型アンテナ

レーザー干渉計

ドップラートラッキング

パルサータイミング

CMB B-mode

第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

重力波検出器

- ▶ 共振型アンテナ
- レーザー干渉計
- ドップラートラッキング
- パルサータイミング
- CMB B-mode

共振型検出器

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

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

換算質量

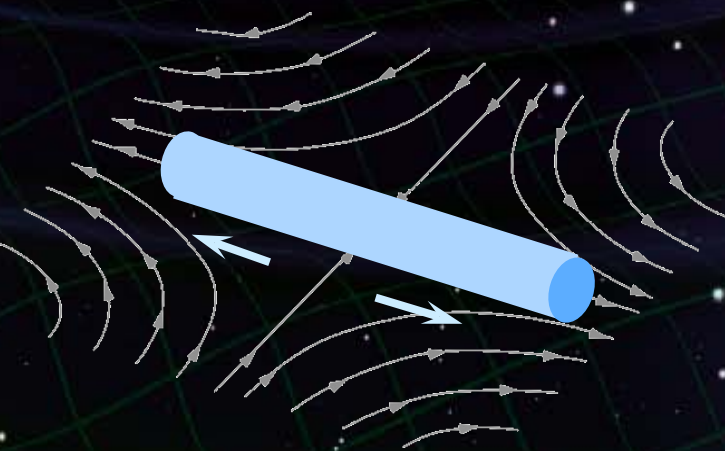
減衰係数

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



重力波検出の最初の試み

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
共振周波数: 1.66 kHz
PZTトランスデューサ
常温に設置
メリーランド大学, アルゴンヌ
国立研究所の2台での観測



「ウェーバーイベント」(1969年)

ウェーバーによる重力波検出の報告

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

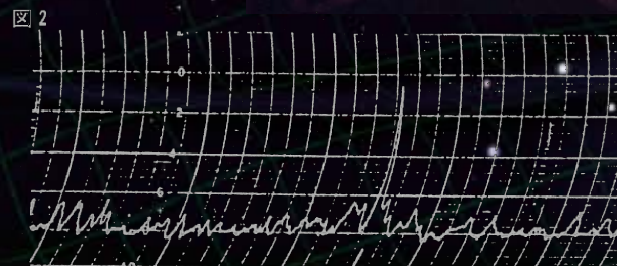
銀河中心方向から多くのイベント



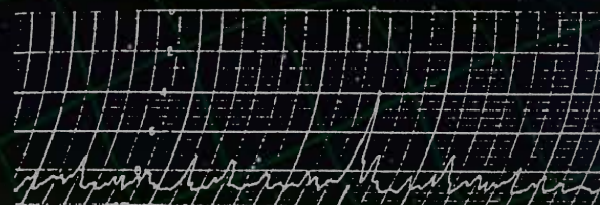
否定的な結論

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

重力波検出実験が始まる契機となった



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

共振型検出器の雑音

感度を制限する要因

熱雑音

弾性体の熱振動 ← 揺動散逸定理
弾性体の温度と機械損失 で決まる揺動力

⇒ 低温化

$$f_{B,rms}^2 = \langle f_B^2 \rangle = 4\gamma k_B T_M$$

↑ ↑ ↑
揺動力 ボルツマン定数 温度

トランスデューサの雑音

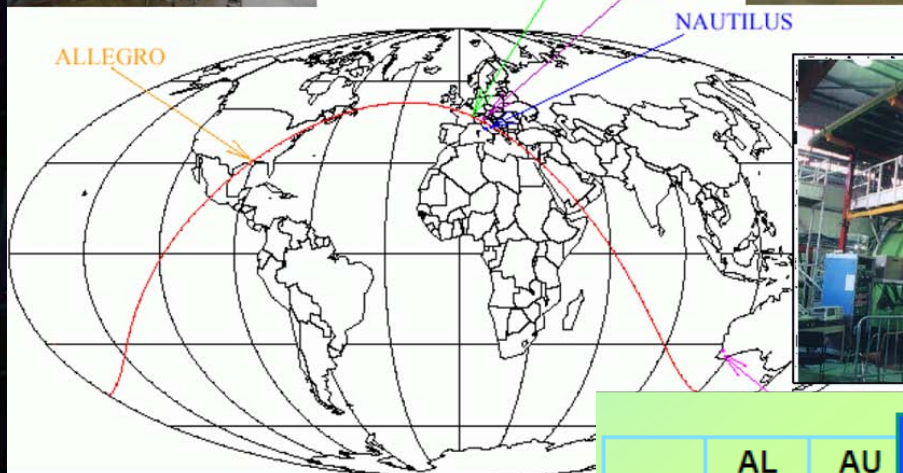
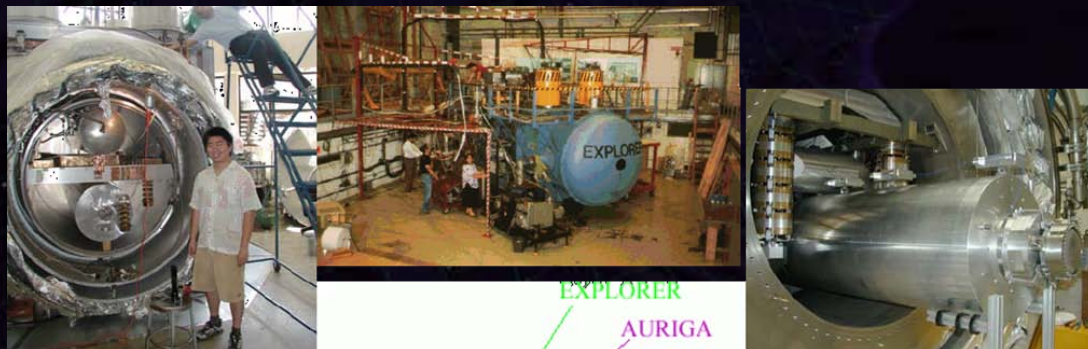
弾性体振動の読み取り雑音
センサの変位雑音,
等価雑音力 (弾性体への反作用力)

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

↑ ↑ ↑
換算質量 減衰係数 ばね定数

⇒ 高感度センサ

共振型アンテナネットワーク



IGEC-1 (1997-2000)

4年間の観測

4台: 29 days

3台: 178 days

2台: 713 days

IGEC-2 (2005-)

2005年に半年間の観測

約3倍の感度の向上

($\sim 10^{-21} / \text{Hz}^{1/2}$ の感度)

3台: 130 days

From presentation of Stan Whitcomb (2007)

	AL	AU	EX	NA	
	0	172.9	151.8	150.2	96%
	0	0	158.0	135.3	87%
	0	0	0	155.0	86%
days of operation					

Giovanni Prodi

AURIGA- EXPLORER- NAUTILUS
ALLEGRO to be added

- no detector 0.6 days
- Single 3.6 days
- Double 45.0 days
- Triple 130.8 days

第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

重力波検出器

- 共振型アンテナ
- ⇒ レーザー干渉計
- ドップラートラッキング
- パルサータイミング
- CMB B-mode

レーザー干渉計型重力波検出器

基本：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

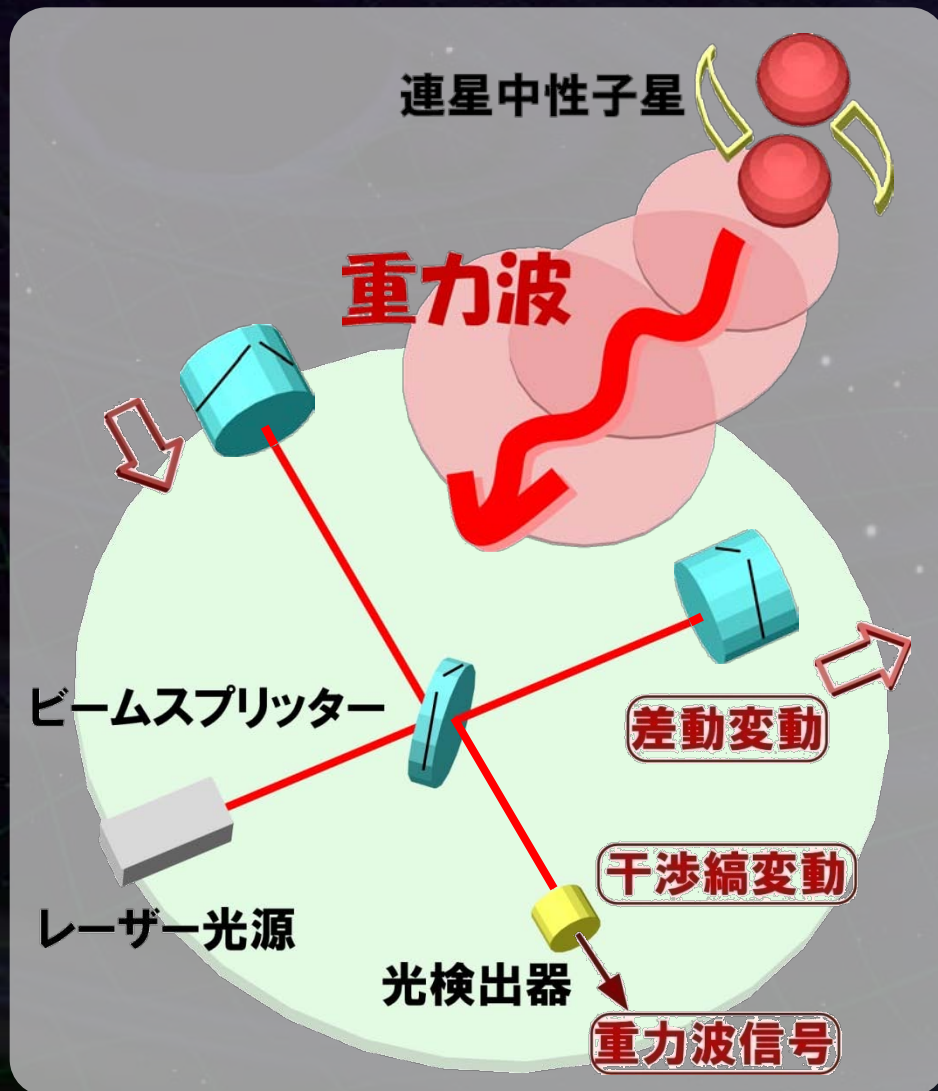


それぞれ、鏡で打ち返し干渉させる
干渉光を光検出器で観測する

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干渉光量の変動として検出



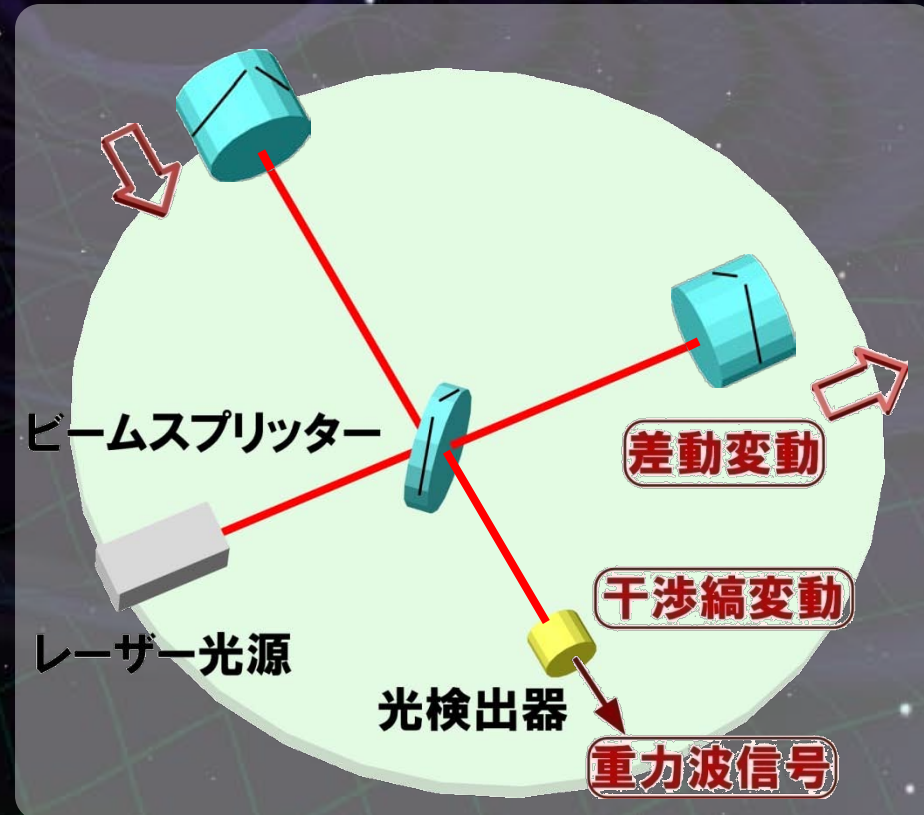
マイケルソン干渉計

直交する2方向からの光の干渉

(2方向で逆符号の位相変化を受ける)

$$P \propto |E_0 e^{i\Omega t + i\phi} - E_0 e^{i\Omega t - i\phi}|^2$$
$$= 2|E_0|^2 [1 - \cos(\Delta\phi)]$$

重力波信号

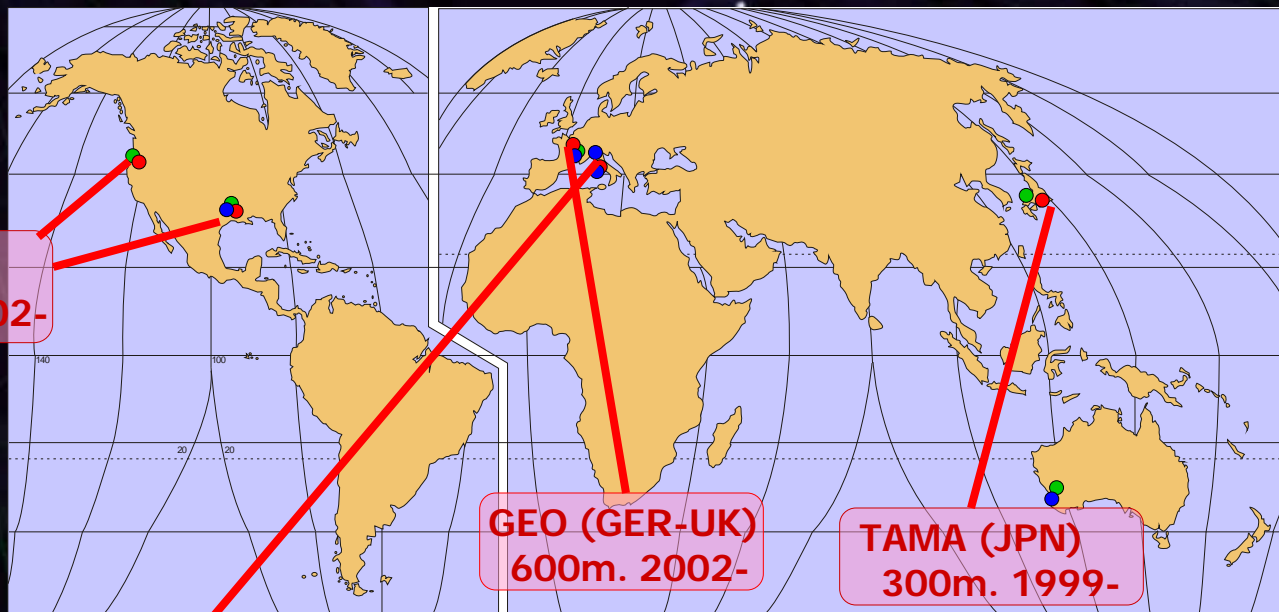


世界の重力波検出器

稼働中のレーザー干渉計型検出器：6台（4プロジェクト）



LIGO (USA)
4km x 2. 2002-



VIRGO (ITA-FRA)
3km. 2004-



TAMA300

基線長300mの レーザー干渉計型重力波検出器

1995年 建設開始, 1999年 観測開始
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)

銀河系内の連星中性子星合体の探査

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)

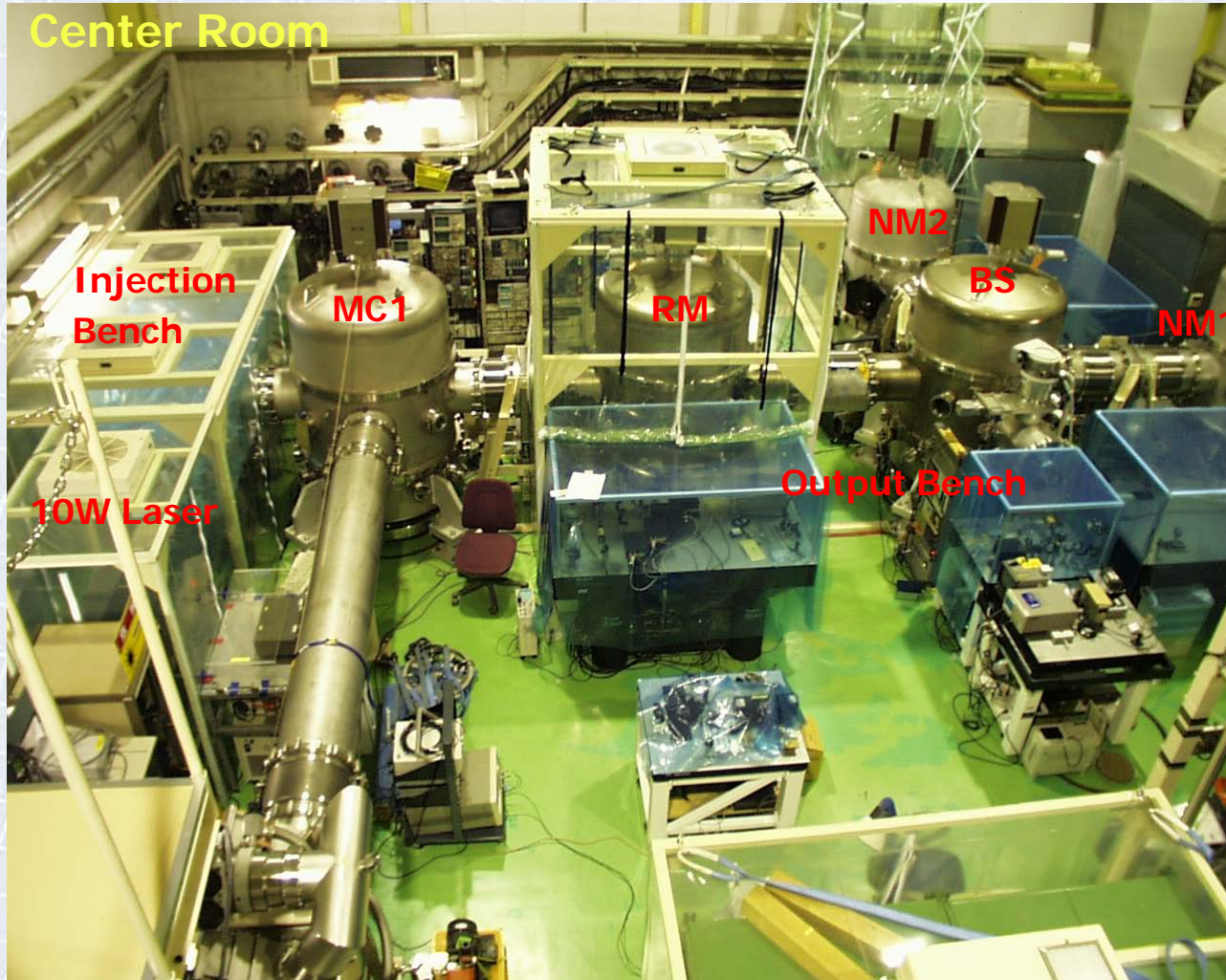
Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000–2004

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,^{10,1} Hideo Iguchi,¹² Yukiyo 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 Mitsuuru 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,^{8,4} 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 Somya,³⁴ Toshikazu Suzuki,¹⁰ Hideyuki Tagoshi,⁸ Hirotaka Takahashi,³⁴ Ryutarō Takahashi,⁴ Akiteru Takamori,⁵ 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,²⁷ 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 Tatsuhiro 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

TAMA300 (2)

Center Room



Beam tube

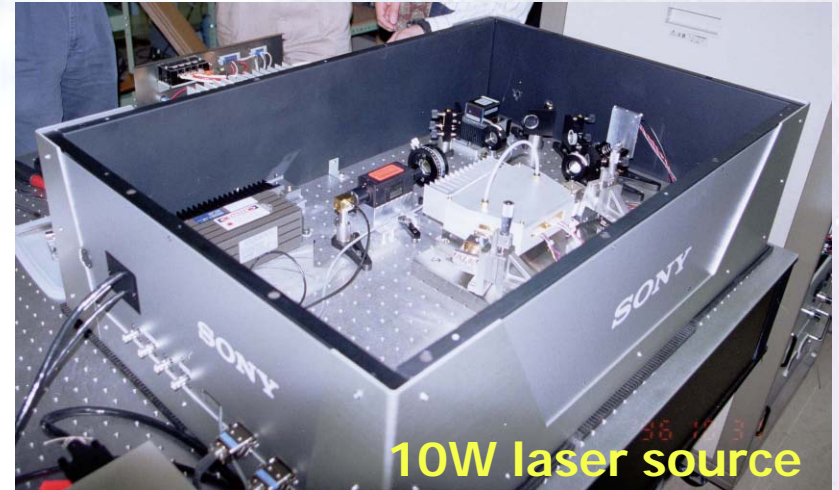


End Room

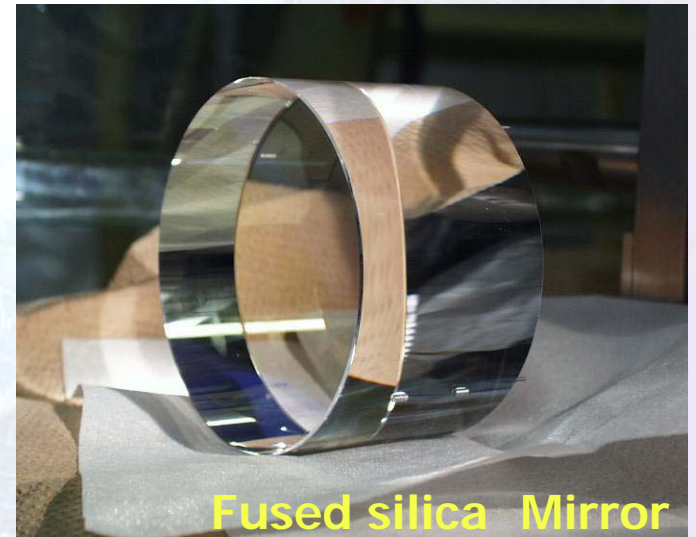


TAMA300 (3)

Mirror suspension



10W laser source



Fused silica Mirror

LIGO

基線長4km 2台, 2km 1台の レーザー干渉計重力波検出器

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 14Mpc まで観測可能
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)

連星中性子星探査

イベントレート上限値 : 2.5 events/yr/gal (S4)

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

パルサー探査

既知のパルサー: $h < 3 \times 10^{-25}$ (PSR J1605-7202)

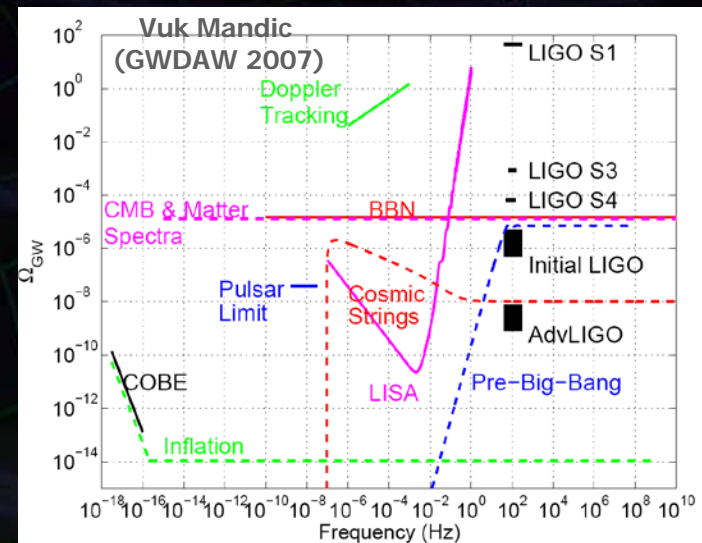
(Crabパルサー: 理論的上限値より厳しい制限)

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

$\Omega_{GW} < 6.5 \times 10^{-5}$ (ビッグバン元素合成上限に迫る)



•GEO600



- Interferometer with 600 m arms, located near Hannover

Leibniz
Universität Hannover



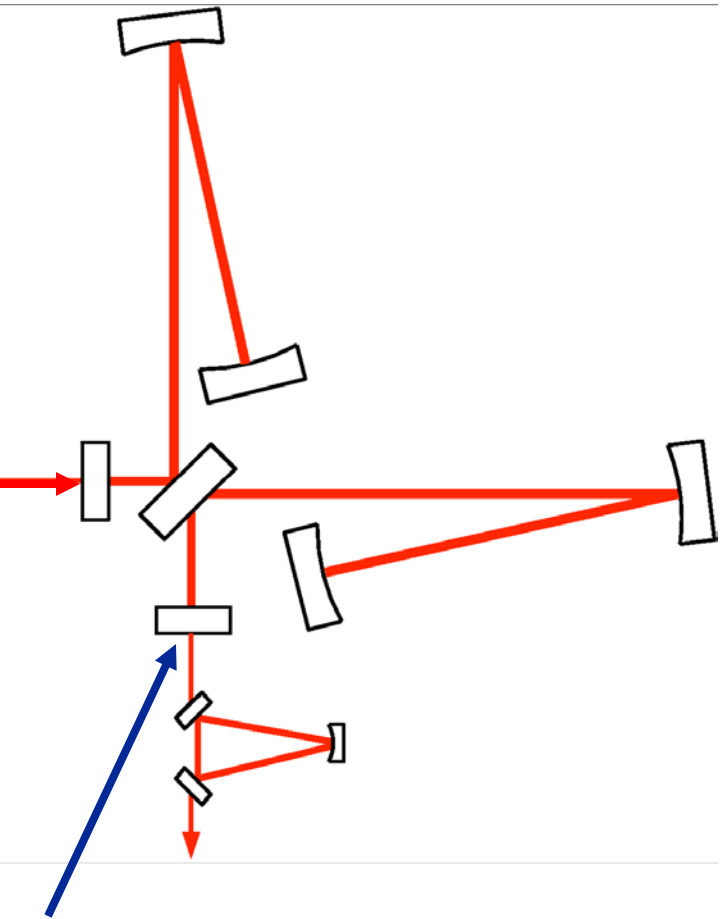
Universitat de les
Illes Balears



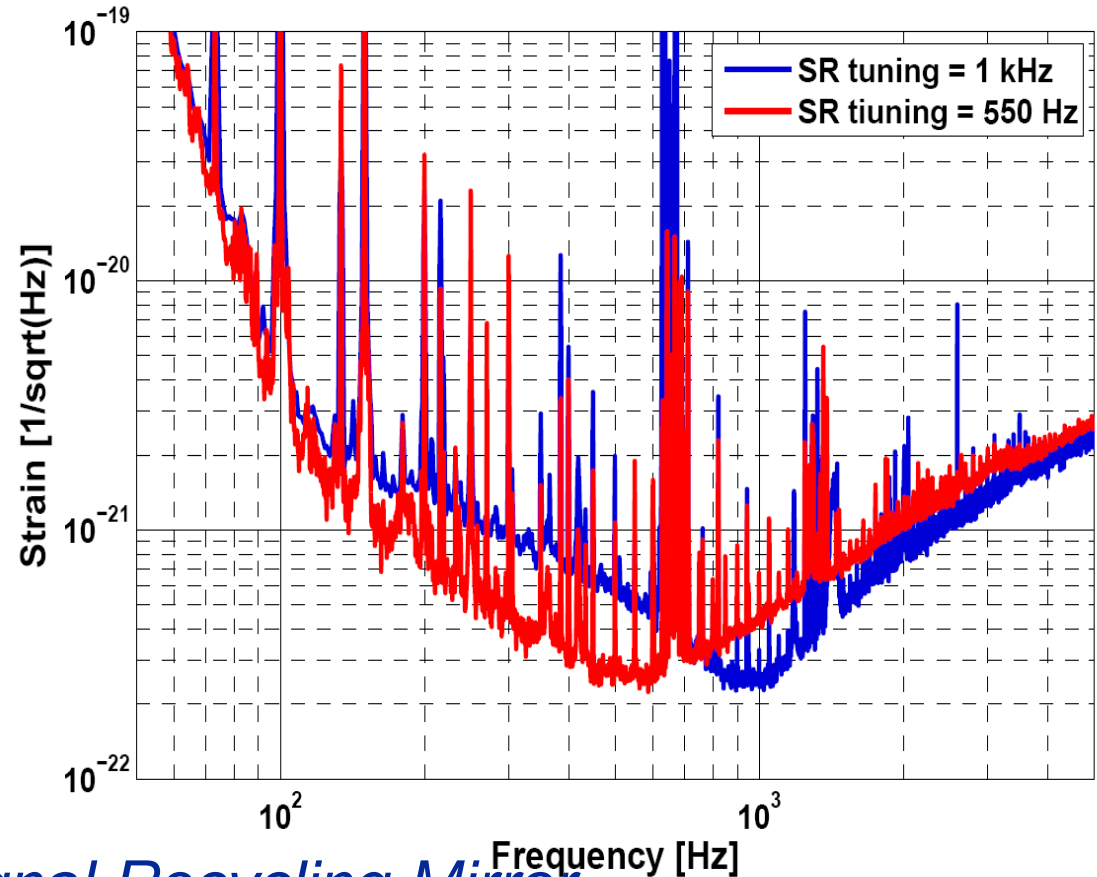
UNIVERSITY OF
BIRMINGHAM

CARDIFF
UNIVERSITY

GEO600: Signal Recycling

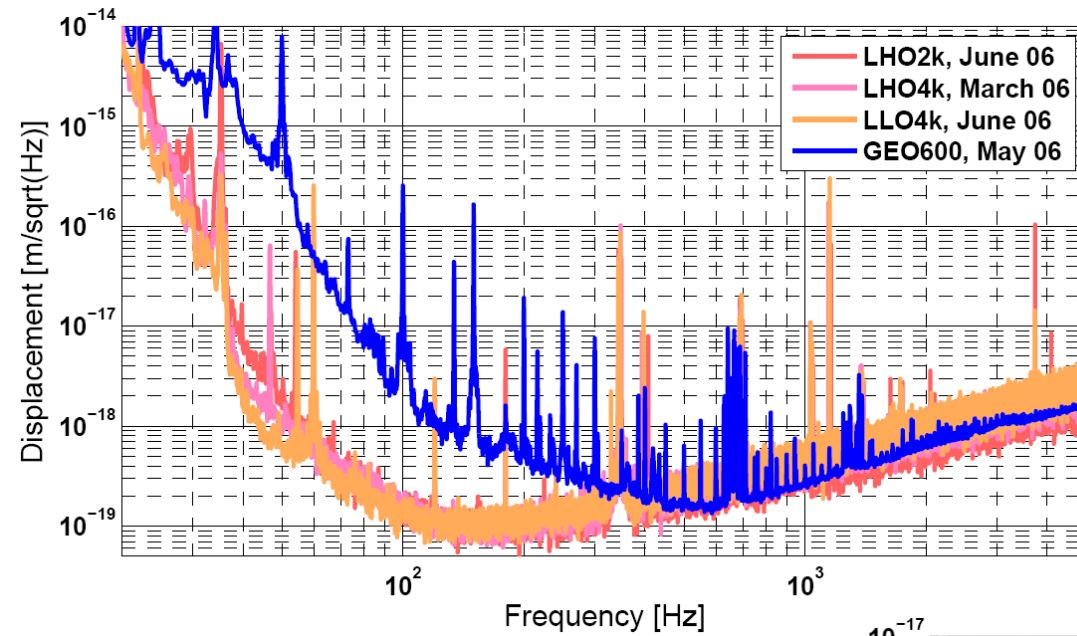


•Signal Recycling Mirror



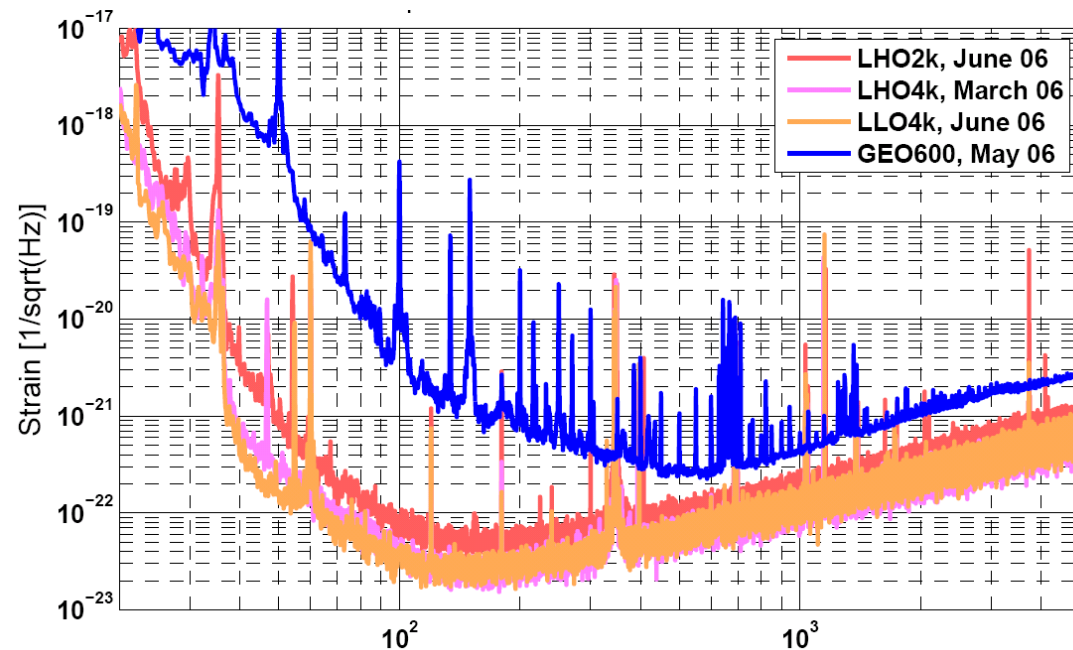
•Location of Signal Recycling Mirror
Changes Frequency Response
(Frequency of Maximum Sensitivity)

The Importance of Length



- Displacement Sensitivity
- Measure of Experimenter's skill

- Strain Sensitivity
- Measure of Experiment's funding



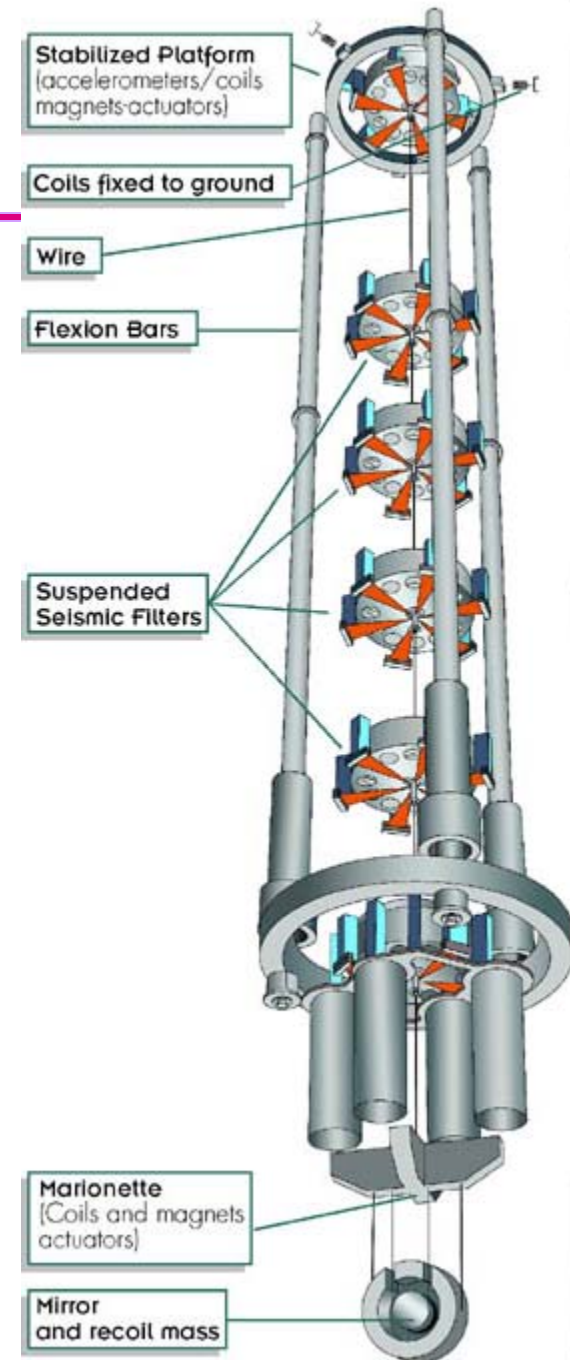
- Collaboration of France, Italy,
• Netherlands, Poland

- One interferometer
with 3 km arms,
located near Pisa

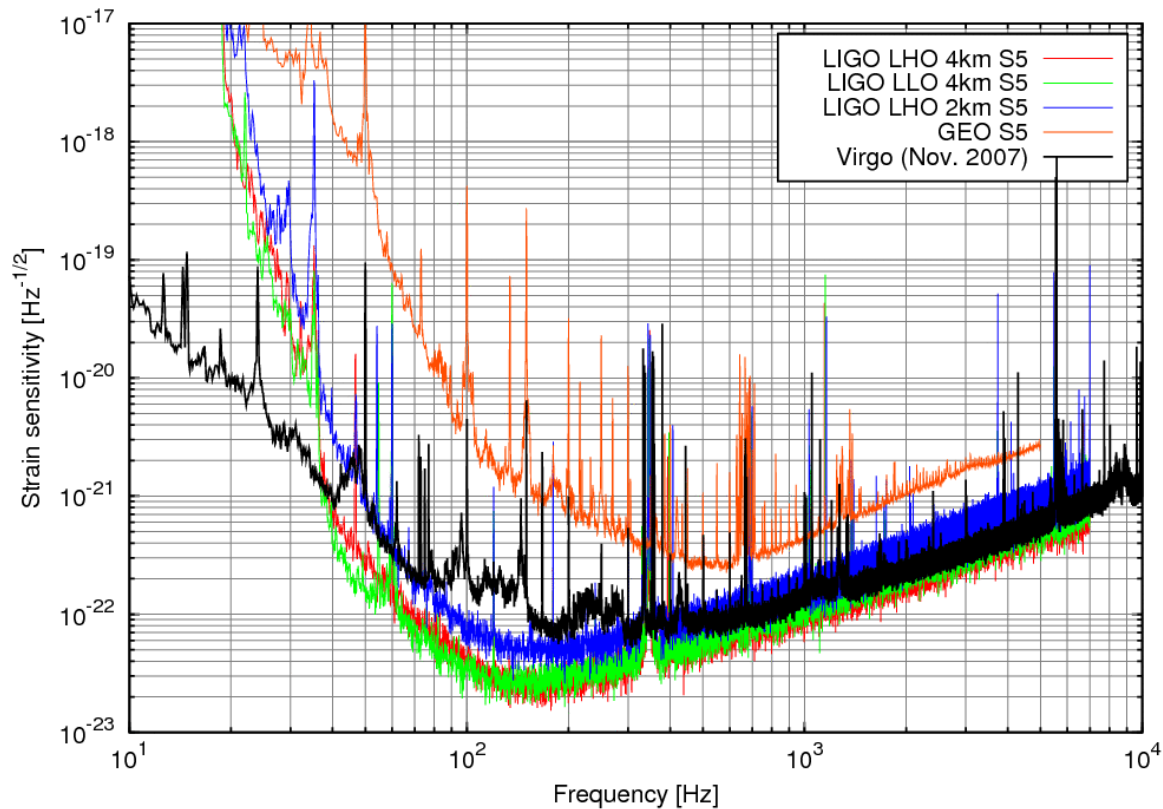


Virgo Interferometer

- Advanced suspension/seismic isolation system (“Super-attenuator”)
 - » Greatest low frequency capability
- Fabry-Perot Michelson configuration with power-recycling
 - » Similar to LIGO and TAMA



- In 2007, Virgo and the LIGO Scientific Collaboration (including GEO) signed an agreement to jointly analyze all future data
- Beginning in May 2007, took 5 months of joint data (LIGO S5, Virgo VSR1)
- Analysis still underway

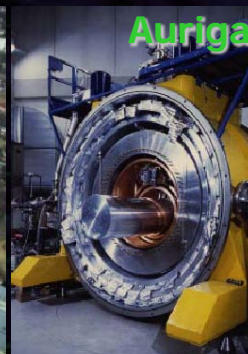


地上重力波検出器の現状

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

第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

重力波検出器

共振型アンテナ

レーザー干渉計

⇨ ドップラートラッキング

パルサータイミング

CMB B-mode

ドップラートラッキング

地球 - スペースクラフト間 のマイクロ波通信を利用

通信の往復時間 (位相変化) を測定

干渉計の応答と同様に考えることができる

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

重力波による位相変化

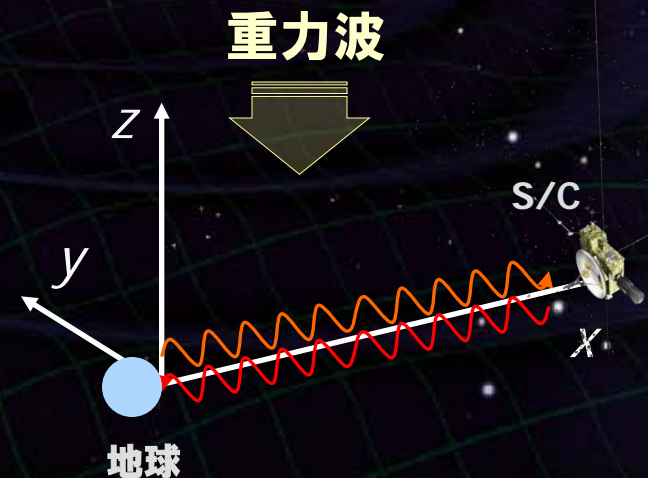
観測周波数帯

低周波数 電磁波の往復期間 ($\sim 10^4$ sec)

高周波数帯 増幅器の雑音

感度を制限する要因

星間プラズマ, 電離層遅延,
太陽風, 衛星軌道誤差



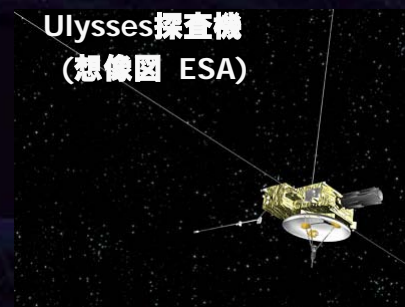
深宇宙探査機による観測

探査機 ULYSSES

1992年 の木星スイングバイ時
約40日間の観測

$$2.3 \times 10^{-4} \leq f \leq 5 \times 10^{-2} \quad [\text{Hz}]$$

の周波数帯で重力波信号の上限値



Ulysses探査機
(想像図 ESA)



スペースシャトルから
放出された直後の
Ulysses探査機
(1990年)

探査機 CASSINI

(1997年 打ち上げ → 土星探査)

2001- 2004年 約40日間の観測 x 3回

2周波数 (X-band 8.4GHz, Ka-band 32GHz)

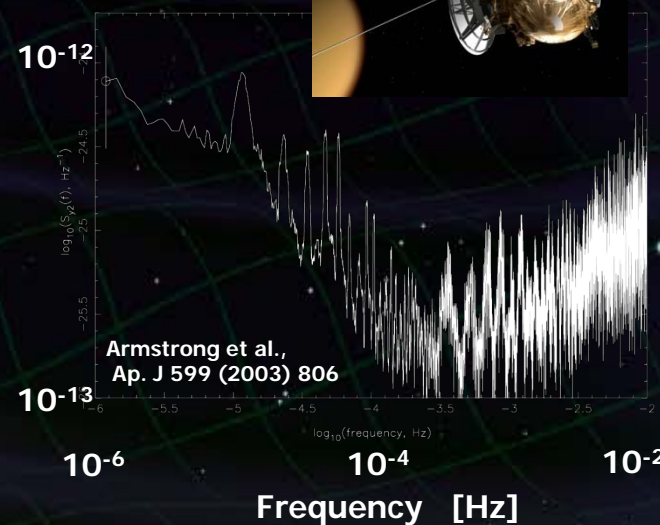
観測により星間プラズマの影響を補正

電波の往復時間 5700 – 5900 sec

感度 $h \sim 10^{-13} \quad [\text{Hz}^{-1/2}]$ (~数 mHz帯)

それまでの上限値を3桁向上

CASSINI探査機
(想像図, ESA)



第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

重力波検出器

共振型アンテナ

レーザー干渉計

ドップラートラッキング

⇨ パルサータイミング

CMB B-mode

パルサータイミング

パルサーは精度の良い時計

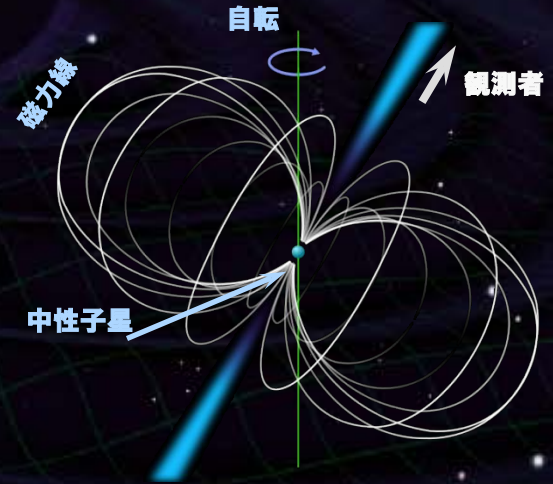
→ パルスタイミングの変動から重力波を検出

(地球 - パルサー間の位相変化を検出)

$$h \sim 2\pi\nu_P \cdot \Delta t_P$$

↑
パルス周波数

↑
パルスタイミングのずれ
(Timing Residual)



パルスタイミング

n : 観測開始からのパルス数

$$t_{\text{pulse}} - \Delta t_P$$

$$= t_0 + P_0 \cdot n + \frac{1}{2} P_0 \dot{P}_0 \cdot n^2 + O(n^3)$$

↑
スピンドウンの効果

電波望遠鏡による長期間の観測

→ 低周波数での重力波観測

(背景重力波, 大質量BH連星の合体)

Pulsar	Telescope	Span (d)	N	rms residual (μs)
J0437-4715	Parkes	815	233	0.12
J1024-0719	Parkes	861	92	1.10
J1713+0747	Parkes	1156	168	0.23
J1744-1134	Parkes	1198	101	0.52
J1857+0943	Arecibo/Parkes	7410	398	1.12
J1909-3744	Parkes	866	2859	0.29
J1939+2134	Parkes	862	231	0.21

タイミング誤差

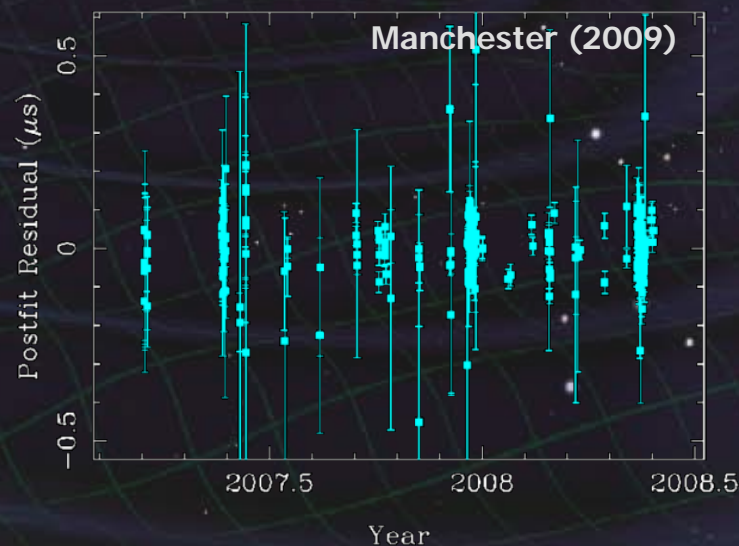
感度を制限する要因

パルサー自身の変動 グリッチ, 形状変化
パルサー軌道の変動 伴星の影響, 母銀河の運動
星間物質の影響
地球近辺の影響 軌道精度
観測器の誤差 時計の精度, 非線形性,
 校正誤差, 受信機の雑音

46個のミリ秒パルサーについて
高品質のデータ
(rms Residual < 2.5 μs) が得られている

Timing Residuals for PSR J0437-4715

0437-4715 (rms = 0.056 μs) post-fit



- Parkes Observatory
- 1.2 years data span
- 211 TOAs, each 64 min observation time

パルサータイミングによる制限

複数のパルサーの観測結果をまとめる

8年間の観測 Janet et al. (2006)

$$\Omega_g = \frac{\rho}{\rho_c} < 1.9 \times 10^{-8} \quad (\text{C.L. 95\%})$$

$$(4.4 \times 10^{-9} \text{ Hz})$$

Pulsar	Telescope	Span (d)	N	rms residual (μs)
J0437-4715	Parkes	815	233	0.12
J1024-0719	Parkes	861	92	1.10
J1713+0747	Parkes	1156	168	0.23
J1744-1134	Parkes	1198	101	0.52
J1857+0943	Arecibo/Parkes	7410	398	1.12
J1909-3744	Parkes	866	2859	0.29
J1939+2134	Parkes	862	231	0.21

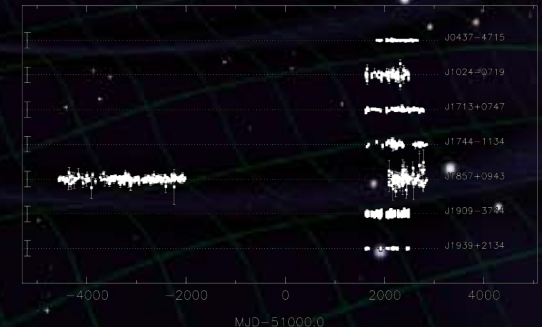
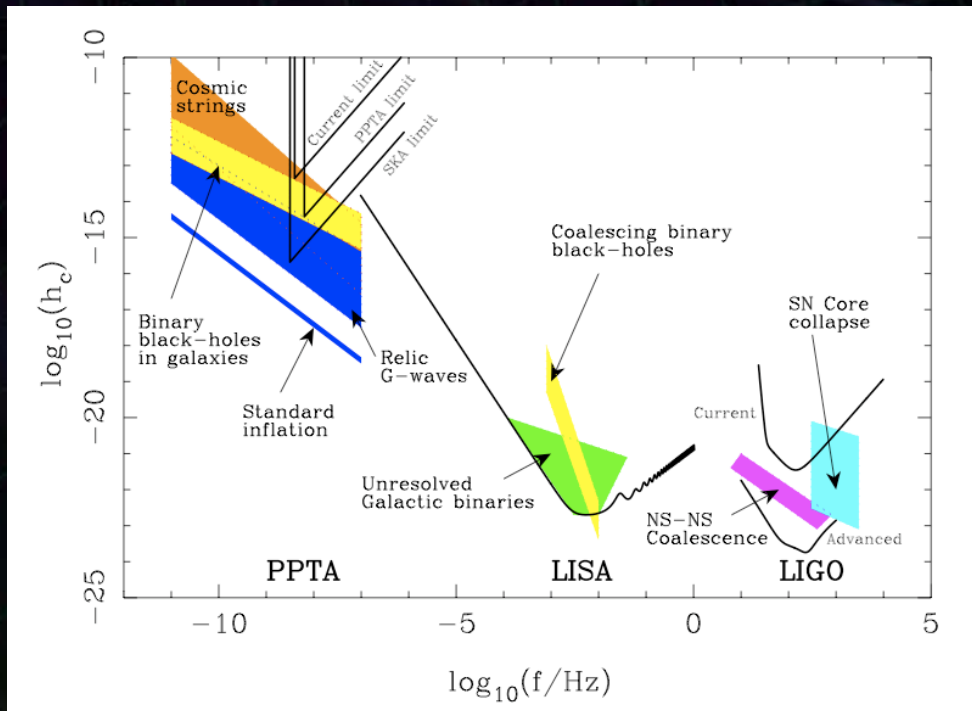


Fig. 1.— Pulsar timing residuals. The length of the vertical line on the left hand edge represents $10\mu\text{s}$.

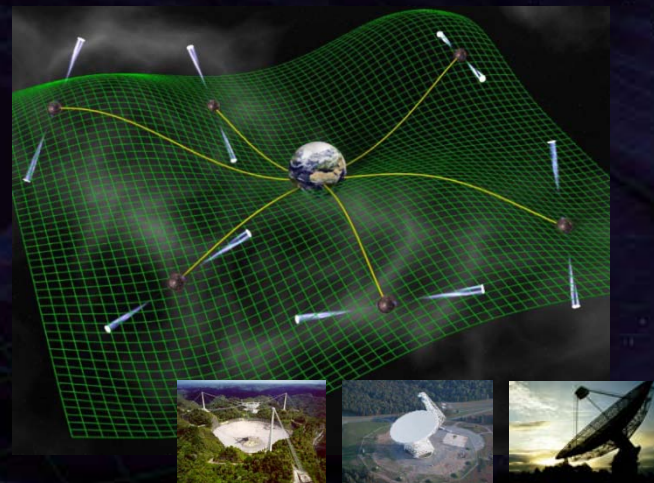
Manchester (2009)

パルサータイミングアレー

複数のパルサー観測 → 相関解析

⇒ 背景重力波,
超巨大BH合体からの重力波の検出を目指す

要求条件 20個の安定なミリ秒パルサー
100nsecの精度
5-10年 毎週の観測



European Pulsar Timing Array (EPTA)

電波望遠鏡 Westerbork, Effelsberg,
Nancay, JodrellBank, (Cagliari)
普段は個別に運用・高感度が必要な時に同時観測
9個の安定パルサー (rms Residual < 2.5 μ s)

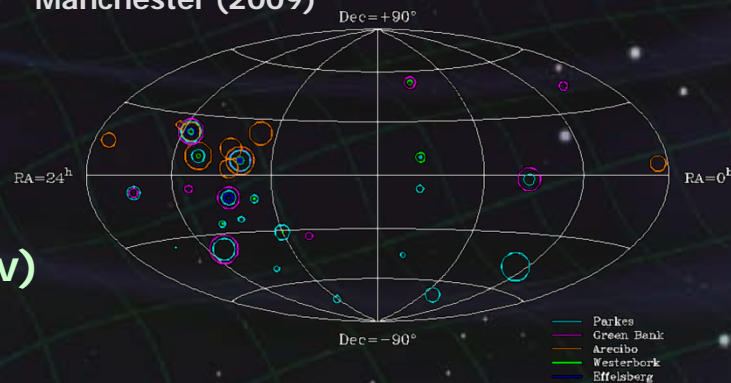
North American pulsar timing array (NANOGrav)

Arecibo and Green Bank のデータを使用
17個の安定パルサー

Parkes Pulsar Timing Array (PPTA)

Parkes 64m 電波望遠鏡 (Australia)
20個の安定パルサー

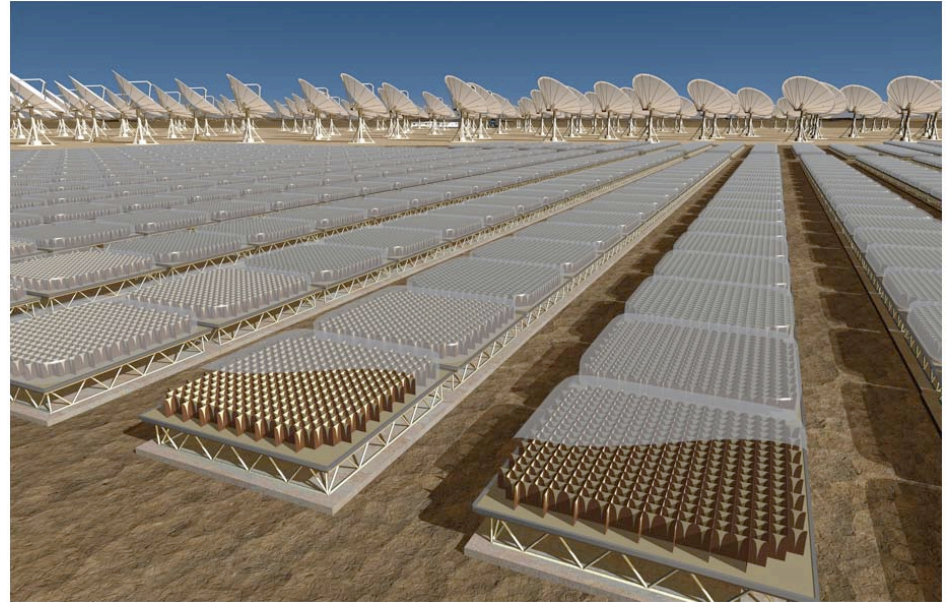
Manchester (2009)



- 30 MSPs being timed in PTA projects world-wide
- Circle size ~ (rms residual)⁻¹
- 12 MSPs being timed at more than one observatory

The Square Kilometre Array

- Next Generation Radio Telescope
- Built in South Africa or Western Australia in ~2020
- 50x sensitivity of current best interferometer
- Key science project: “*Strong field tests of gravity using pulsars and black holes*” - will be used as a “gravitational wave” telescope



<http://www.skatelescope.org/photo/material/S22-Abb1.jpg>

George Hobbs
Australia Telescope National Facility
george.hobbs@csiro.au

第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

重力波検出器

共振型アンテナ

レーザー干渉計

ドップラートラッキング

パルサータイミング

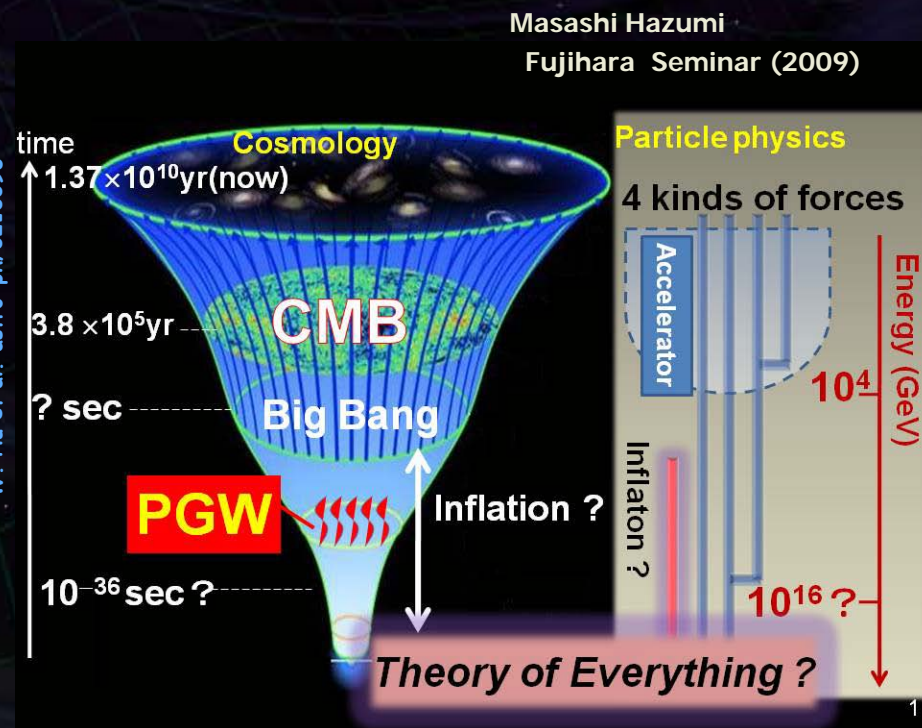
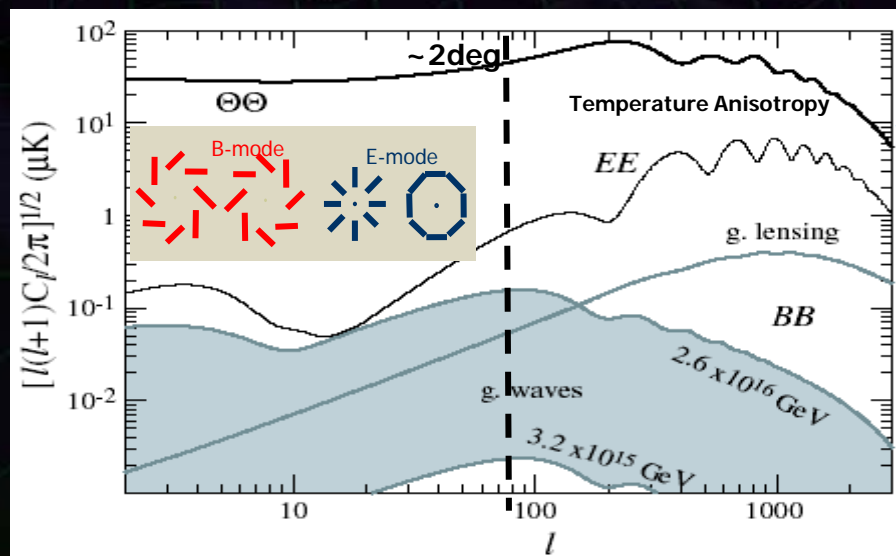
⇒ CMB B-mode

CMB B-mode 偏光

宇宙背景放射 (CMB, Cosmic Microwave Background)

B-mode 偏光成分から重力波を観測

⇒ 初期宇宙 (インフレーション期) からの重力波



Masashi Hazumi
Fujihara Seminar (2009)

その他の検出法

原子干渉計

レーザー冷却された原子の干渉を利用
1Hz以下の低周波数帯をターゲットにする
散射雑音 (有限の原子数に起因) で感度が制限

天体の固有振動

天体の固有振動の重力波による励起を観測
地球については、地震計
ネットワークを利用して観測が行われている

第2章 重力波の検出

重力波の検出原理

→ 潮汐力を観測

自由質点間の距離を観測

重力波検出器

共振型検出器

レーザー干渉計検出器

ドップラートラッキング

パルサータイミング

CMB



第2章 終わり

重力波検出器

共振型重力波検出器

弾性体に働く潮汐力を検出

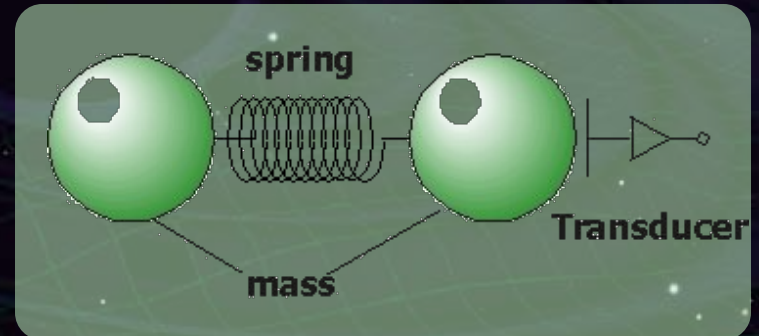
大きな弾性体

(Al5056, 重さ 2ton, 長さ3m)

低雑音トランスデューサ

低温 → 0.1 K

共振周波数 1kHz付近



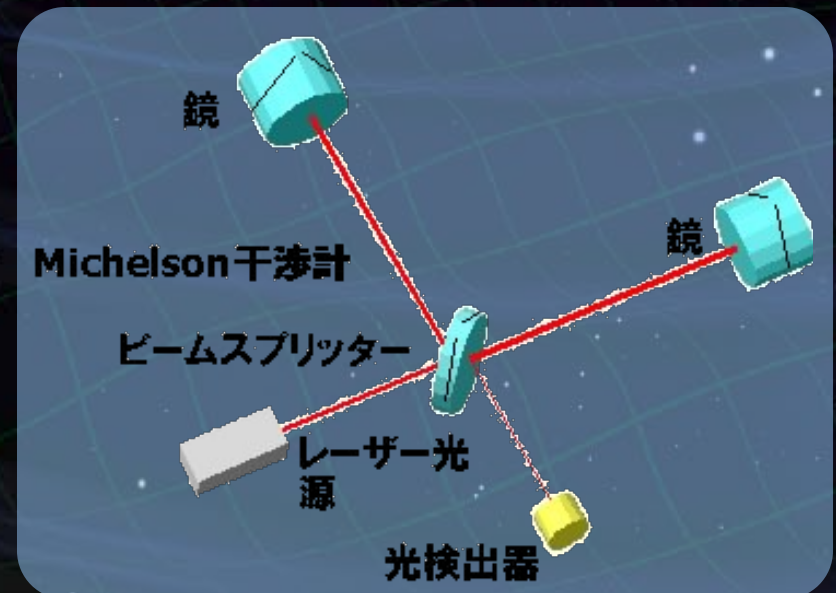
自由質点型検出器

自由質点間の距離を測定

(レーザー干渉計型検出器)

長基線長レーザー干渉計

(300m – 4km)



重力波観測の現状 (まとめ)

国際的観測ネットワーク (レーザー干渉計型 : 6台, 共振型検出器 : 3台)

→ 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



**幸運であれば
重力波を検出できる
天文学に貢献できる
成果が生まれつつある**

連星中性子星合体イベント : 70kpc ~ 14Mpcの観測レンジ

→ **近傍銀河でイベントがあれば検出可能**

超新星爆発

銀河中心付近のイベントをなんとか検出できる

パルサー

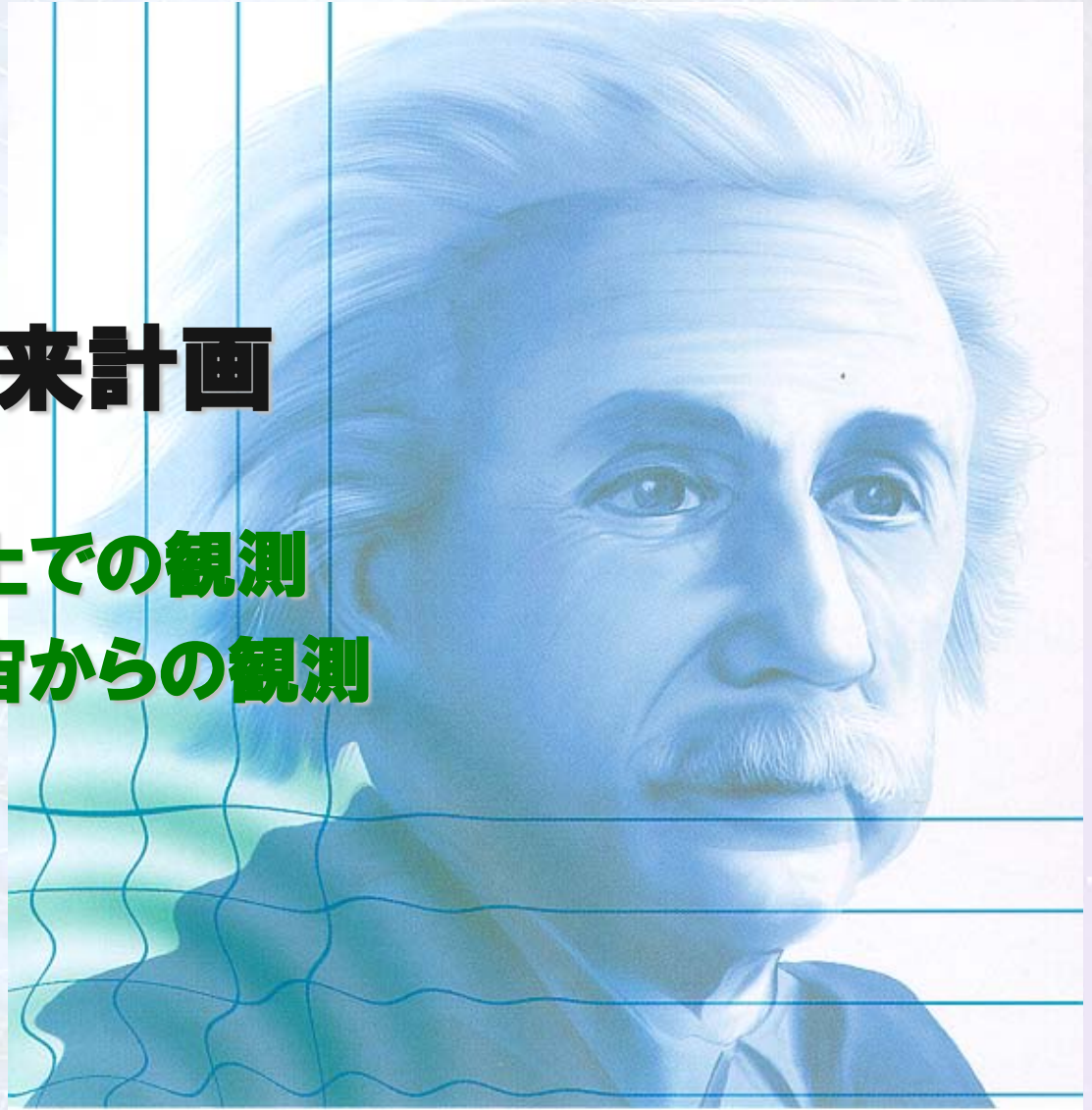
理論的上限值より厳しい制限

バックグラウンド重力波探査

ビックバン元素合成上限に迫る

3. 将来計画

地上での観測
宇宙からの観測



重力波による本格的な天文学

● 将来計画

稼働中の重力波検出器: 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

ただ... そのようなイベントは極めて稀 (10^{-5} event/yr/gal)

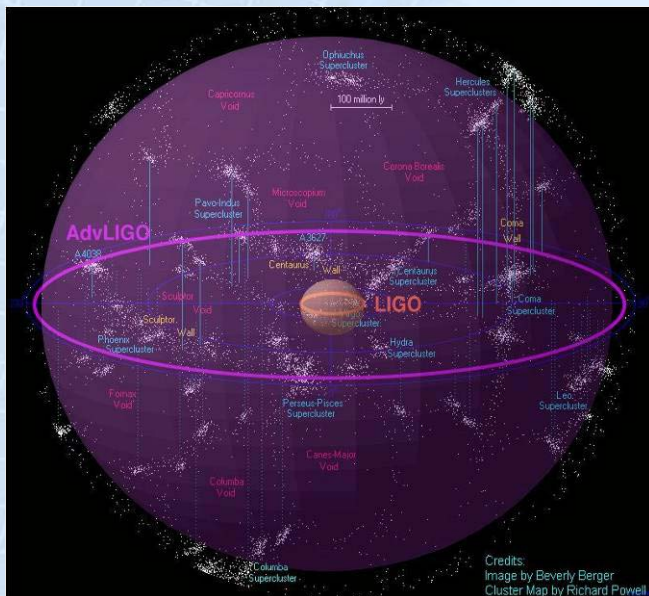
本格的な天文学への2つの方向

高感度化

より多くの銀河をカバーする

感度10倍向上 → イベント数は1000倍

年間数回以上の重力波イベント



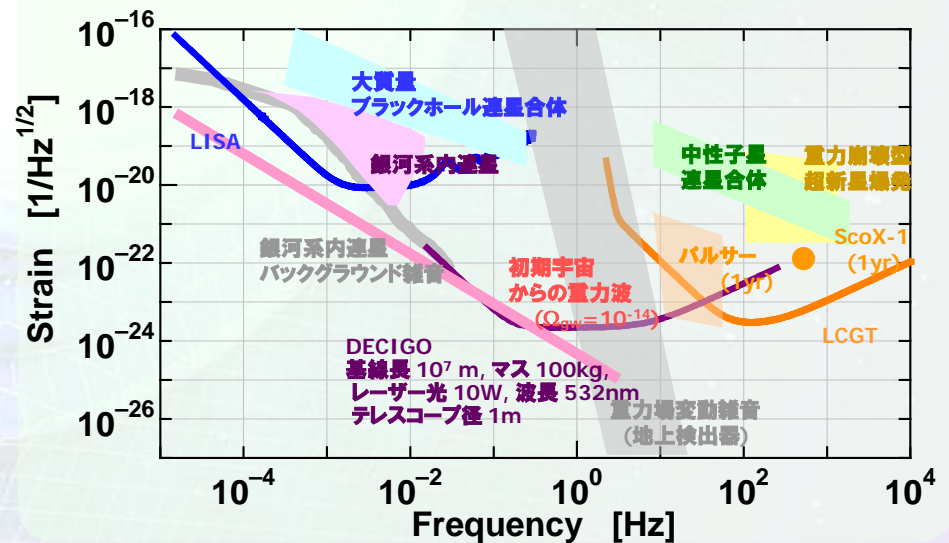
広帯域観測

さまざまな対象を観測

重力波の周波数:

天体変動のスケールに依存

定常的な重力波の観測



高感度化の価値

重力波の振幅 --- 距離に反比例



感度が 10倍向上

→ イベントレートは 1000倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

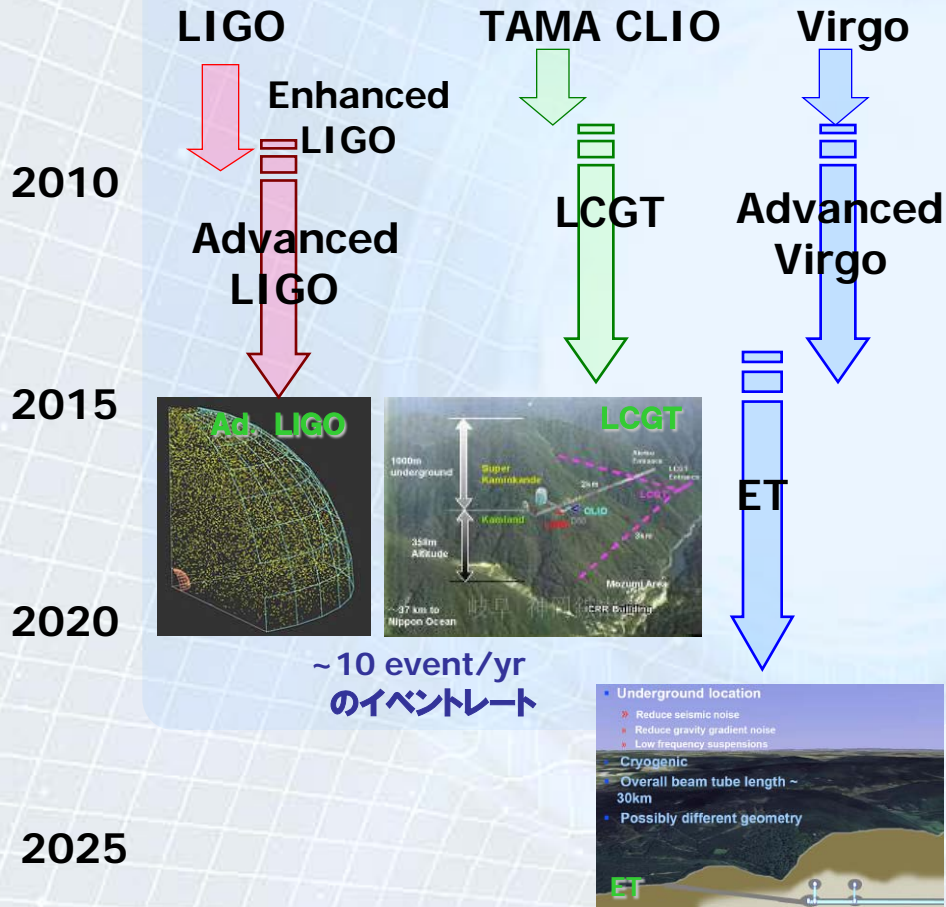
~ Advanced LIGO 3時間の観測



将来計画

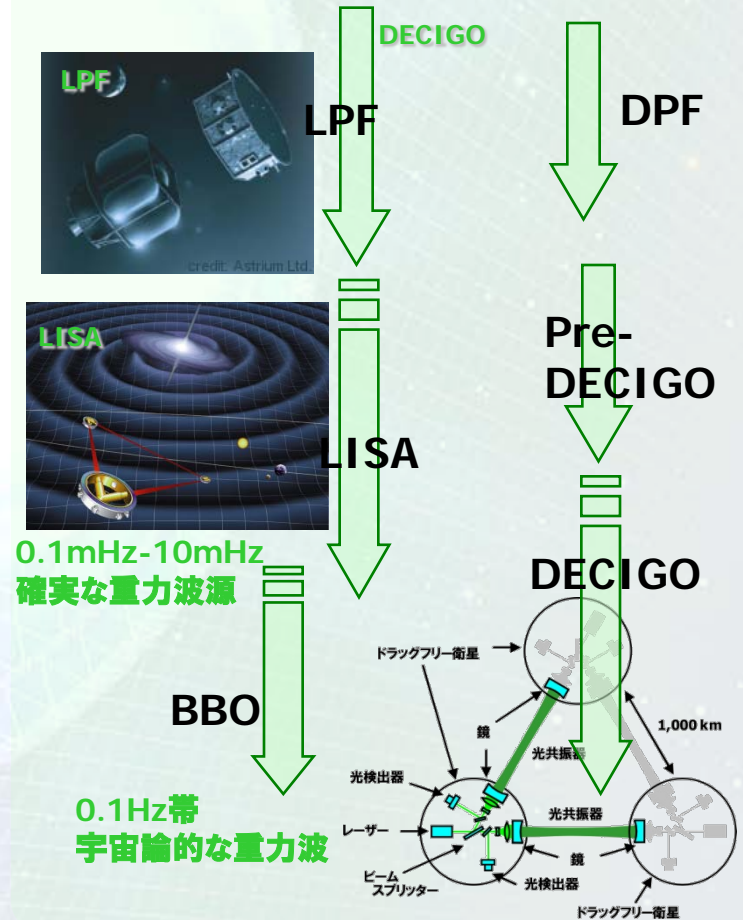
地上検出器

より遠くを観測 (10-1kHz)



宇宙検出器

長基線長がとれる
低周波数帯の重力波を観測



LIGOの高感度化

Enhanced LIGO

現在のLIGOのアップデート

感度を2倍に

観測可能距離: 30Mpc

Advanced LIGO技術の先行導入

高出力レーザー光源, 入射光学系

光学系の熱歪み対策

信号検出法

2009年 観測開始

Advanced LIGO

現在のLIGOの10倍の感度

低周波数感度の向上

観測可能距離: 350Mpc

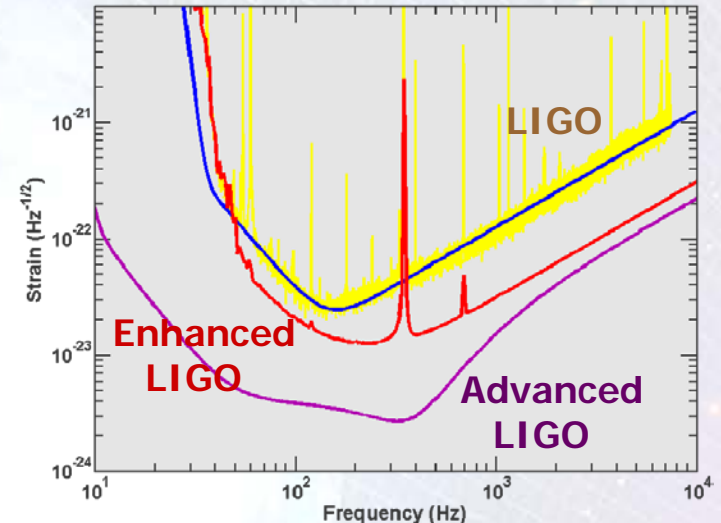
干渉計方式, 信号検出法の変更

高出力レーザー光源

熱雑音の低減

高性能防振装置

2014-15年 観測開始



Parameter	LIGO	Advanced LIGO
Input Laser Power	10 W	180 W
Mirror Mass	10 kg	40 kg
Interferometer Topology	Power-recycled Fabry-Perot arm cavity Michelson	Dual-recycled Fabry-Perot arm cavity Michelson
GW Readout Method	RF heterodyne	DC homodyne
Optimal Strain Sensitivity	$3 \times 10^{-23} / \text{rHz}$	Tunable, better than $5 \times 10^{-24} / \text{rHz}$ in broadband
Seismic Isolation Performance	$f_{low} \sim 50 \text{ Hz}$	$f_{low} \sim 10 \text{ Hz}$
Mirror Suspensions	Single Pendulum	Quadruple pendulum

LCGT

LCGT (Large-scale cryogenic Gravitational-wave Telescope)

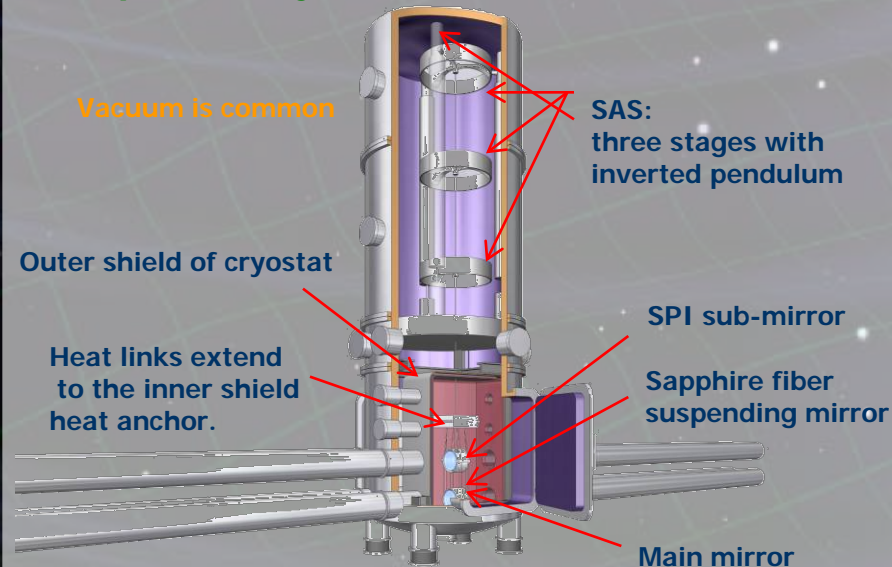
Advanced LIGOと同等の感度 (検出可能距離 ~200Mpc)

低温干渉計 鏡の温度: 20K → 熱雑音の低減
地下に設置 神岡鉱山 (地下 1000m) → 地面振動の低減, 安定な連続動作
大型干渉計 基線長 3km x 2台, 高出力レーザー
→ コインシデンス解析による偽イベントの除去

2014年頃 観測開始を目指す



Suspension system



ET

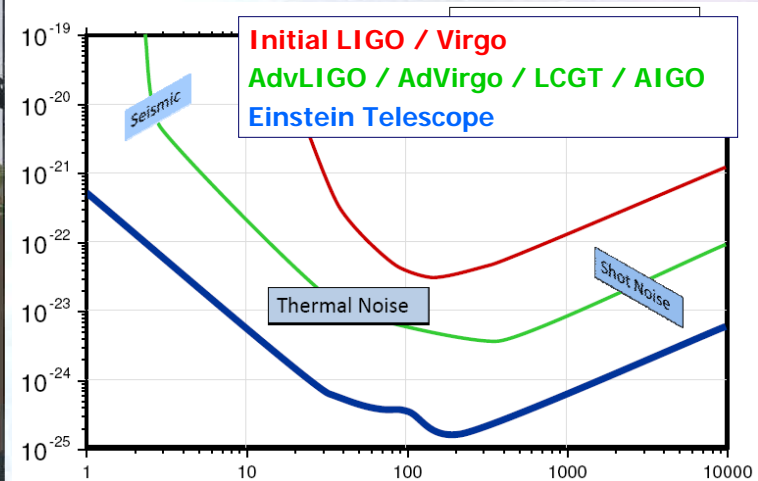
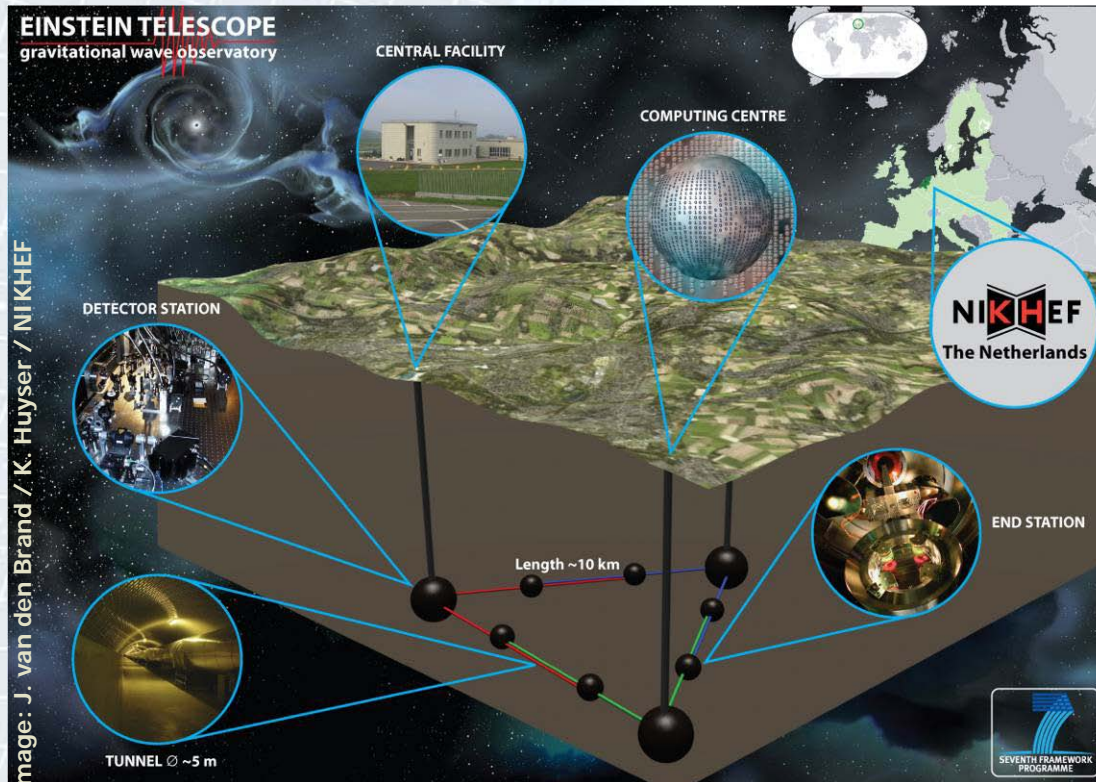
ET (Einstein Gravitational-Wave Telescope)

ヨーロッパの計画

基線長30kmの低温・地下干渉計

Advanced LIGO/ LCGT の10倍の感度を目指す

2021年 観測開始?

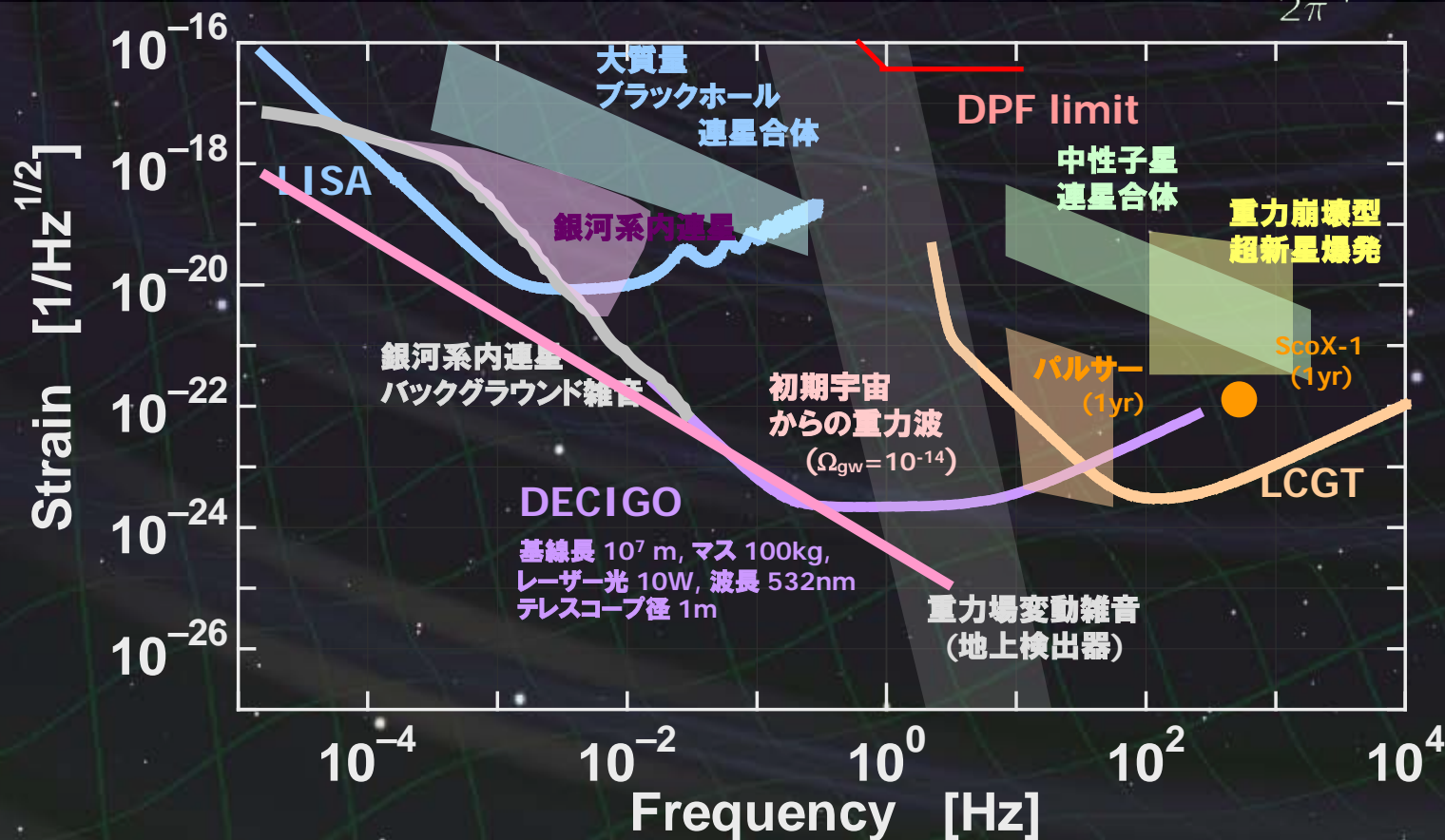


M. Punturo, GW Advanced Detector Workshop, May 2008

観測周波数帯と観測対象

- 地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など
 DECIGO : 0.1 - 1Hz → 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波
 LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど

$$f \sim \frac{1}{2\pi} \sqrt{GM/R^3}$$



DECIGO

DECIGO

(DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

スペース重力波アンテナ

0.1Hz付近の重力波の観測を行う

(LISAと地上検出器の狭間の周波数帯)

光共振型マイケルソン干渉計
アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W,
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m

互いに1000km離れた
試験質量 (鏡) の間の距離を
レーザー干渉計によって精密測距

試験質量は、

S/C内に非接触保持

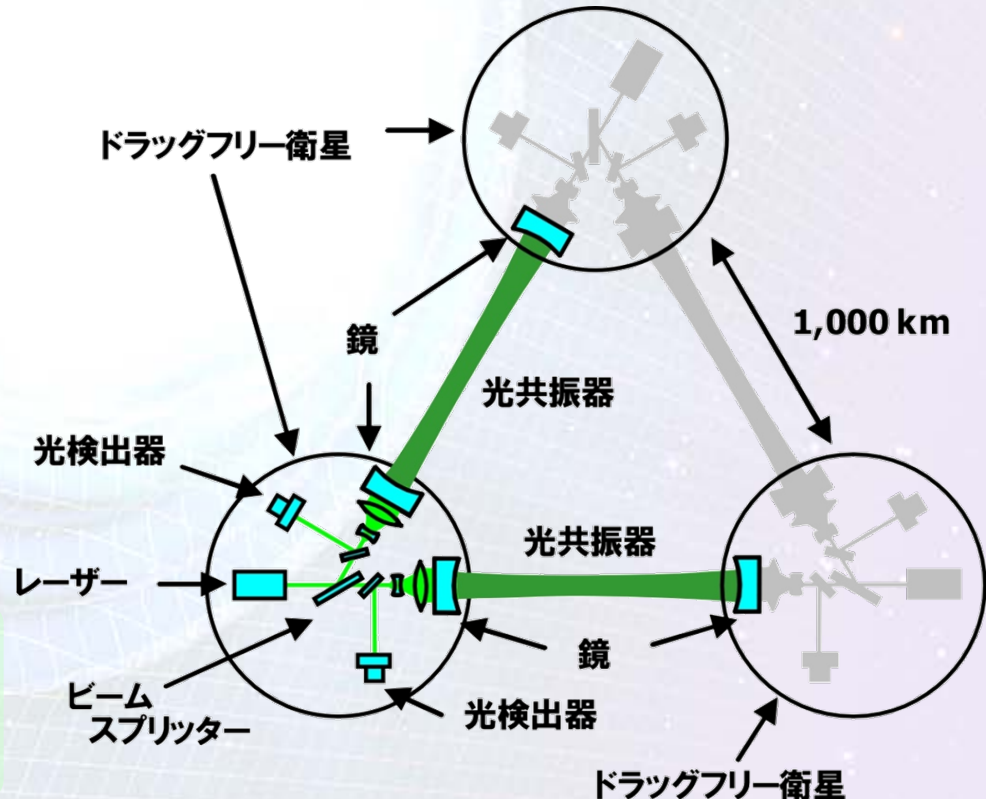
→ 太陽輻射圧変動などの
外乱を避ける

試験質量の位置を基準に

S/C位置を制御する:

ドラッグフリー制御

重力波検出器の原理
(自由質点間の距離変動を観測)
を、ほぼそのまま実現



LCGTとAd. LIGO

LCGT (JPN)

2 detectors (3km)
(2 close detectors)

Long baseline
Better seismic
attenuation system

Underground site

Low-mechanical-loss
mirrors and suspensions

Cryogenic (20k)

High-power laser source
Low-loss optics
Broad-band RSE config.

Scale

Seismic noise
reduction

Thermal noise
reduction

Quantum noise
reduction

Advanced LIGO (USA)

3 detectors (4km)
(2 close, 1 separated)

Long baseline
Better seismic
attenuation system
Suburban site

Low-mechanical-loss
mirrors and suspensions

Flat-top beam

High-power laser source
Low-loss optics
Detuned RSE config.

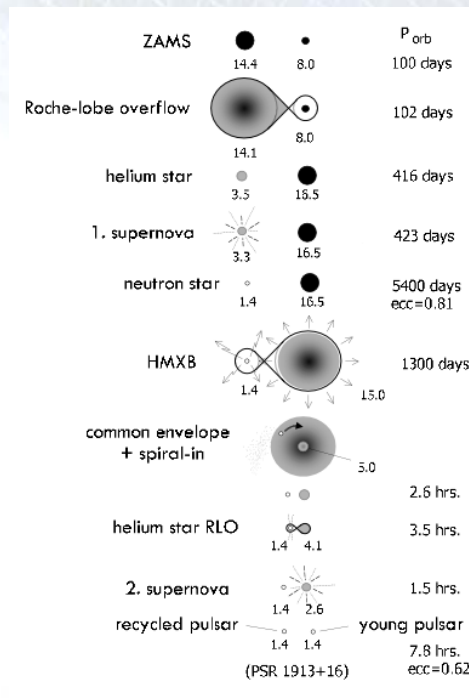
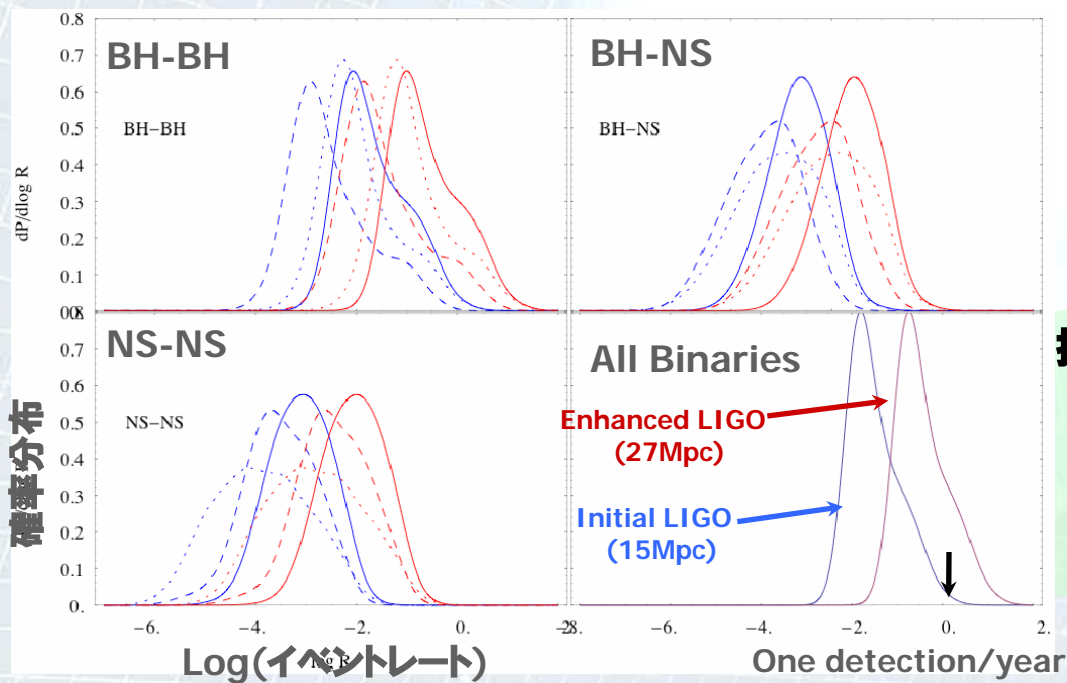
LIGO/LCGTで重力波は見つかるか？

Richard O'Shaughnessy,
V. Kalogera, K. Belczynski (GWDAAW-12, 2007)

'Probability of detecting compact
binary coalescence with enhanced LIGO'

O'Shaughnessy et al astro-ph/0706.4139

連星進化モデルをもとに、
シミュレーションを行い、検出確率を推定



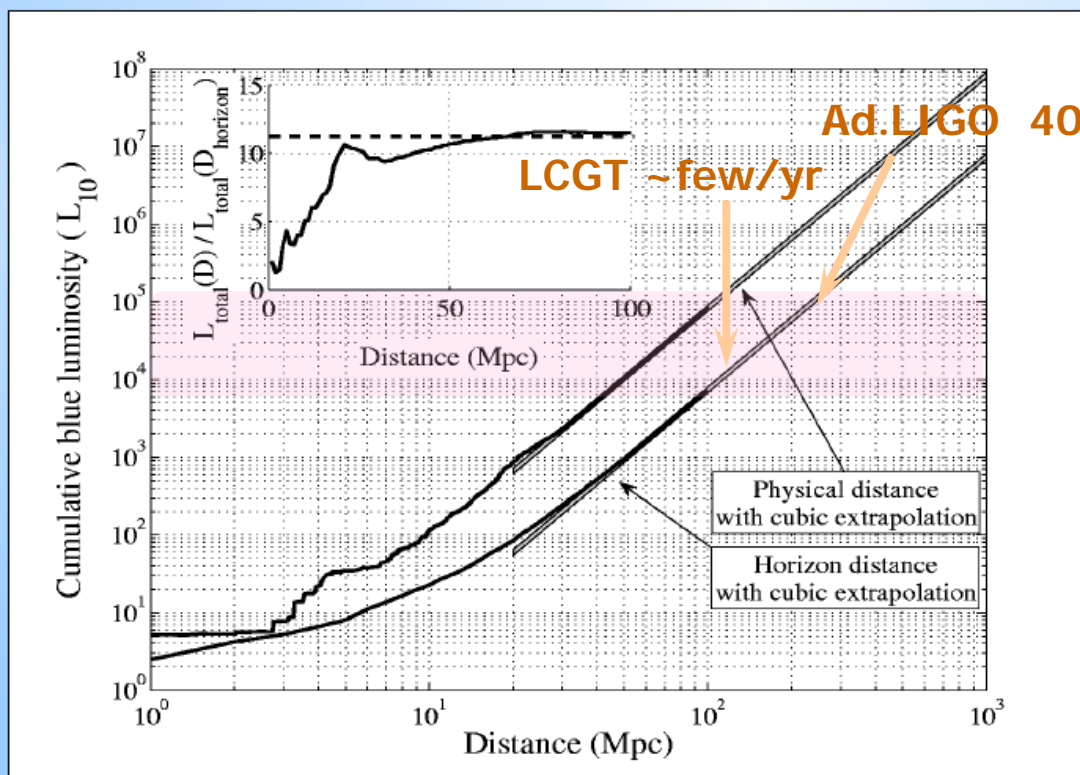
Voss and Tauris
(2003)

推定された検出確率 (1年間の観測) :

Initial LIGO (現在): 0.01-5%
Enhanced LIGO (2009): 34%
Advanced LIGO (2014): 99.9%

Cumulative luminosity function

Catalog of galaxies has been developed and cumulative luminosity $C(D_H)$ computed as a function of the distance (Kopparapu et al, arXiv:0706.1283v1)



Rate

$$(10-170) \times 10^{-6} \text{ [events/ yr/L}_{10}]$$

Horizon distance of a search:
maximum distance at which a signal may still be detected.

LISA

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

3機のスペースクラフトで構成された**基線長500万km**の干渉計

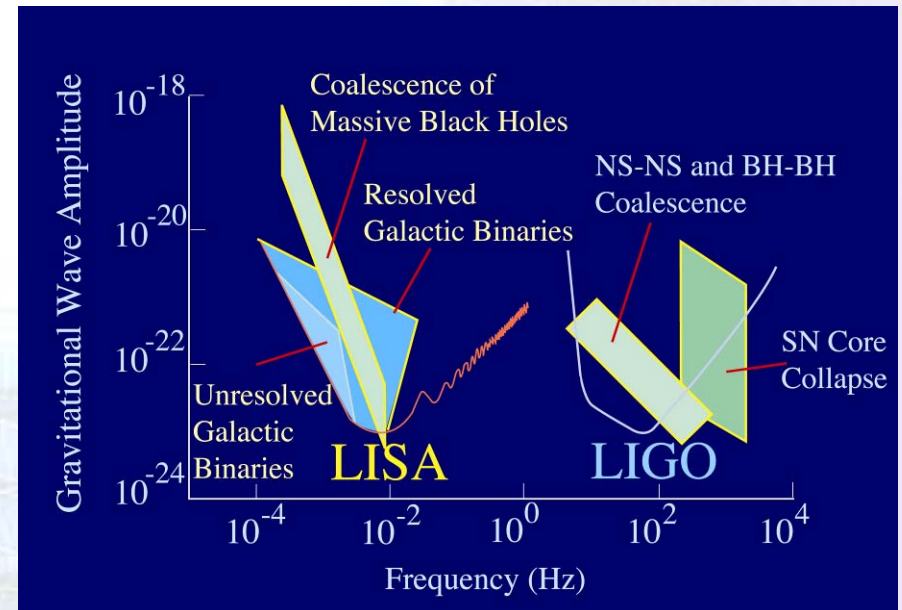
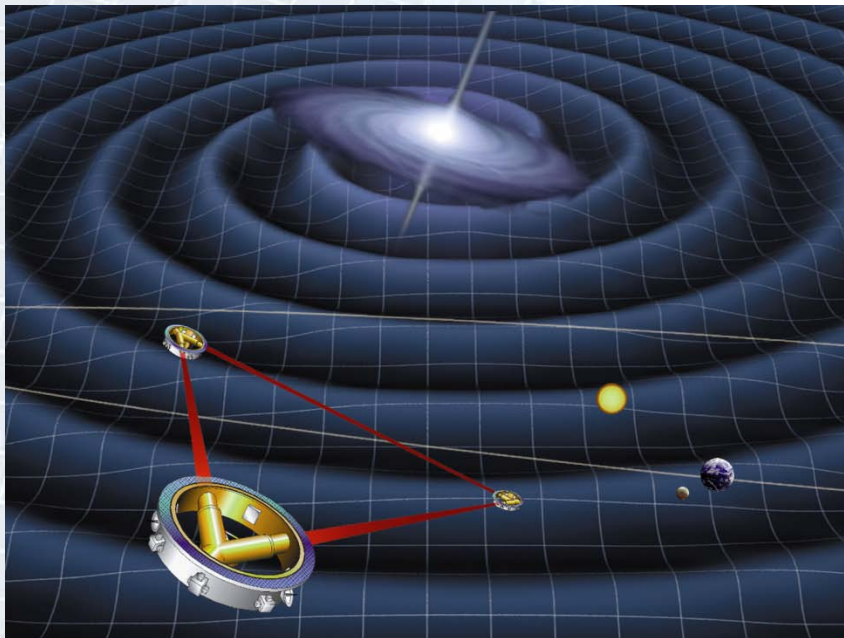
0.1mHz - 1Hz の周波数帯をターゲット

超巨大ブラックホールの合体 → ブラックホールまでの距離の測定

星の巨大ブラックホールへの落下 → 時空のマッピング情報

銀河系内連星 (確実な波源) → 強い潮汐相互作用, 質量移動への知見

ESA/NASA共同で、**2014年以降**に打ち上げ予定



LISAの状況

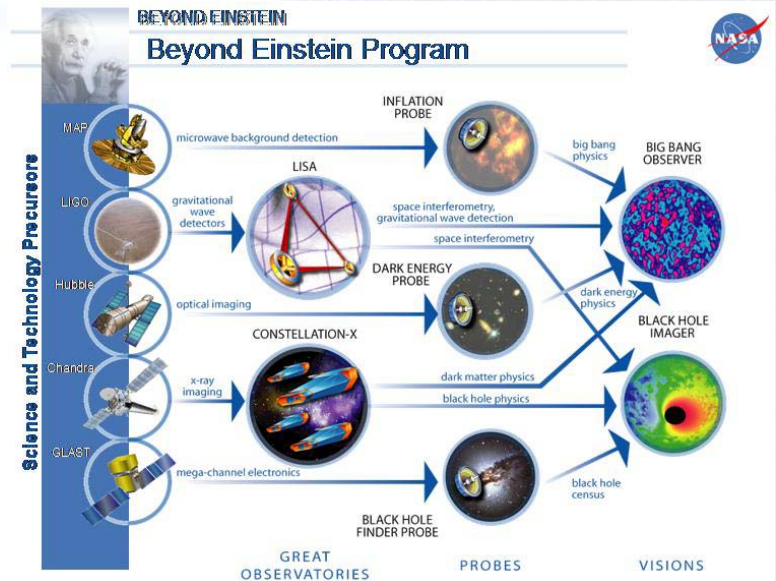
●LISAの状況

BEPAC (Beyond Einstein Program Assessment Committee)

Beyond Einsteinミッションの
どれを最初に打ち上げるかを検討

Constellation-X
Laser Interferometer Space Antenna
Joint Dark Energy Mission
Inflation Probe
Black Hole Finder probe

9月にレポートをまとめた
→ JDEM/SNAP を最初に打ち上げる
LISAも当面サポートする



"On purely scientific grounds LISA is the mission that is the most promising and least scientifically risky ... Thus, the committee gave LISA its highest scientific ranking."

"The committee believes it is more responsible technically and financially to propose a LISA new start after the Pathfinder results are taken into account."

得られるサイエンスは高く評価

LPF(2009年)の結果を受けて
新しいスタートをするのが良い

DECIGOの感度

● 重力波に対する感度

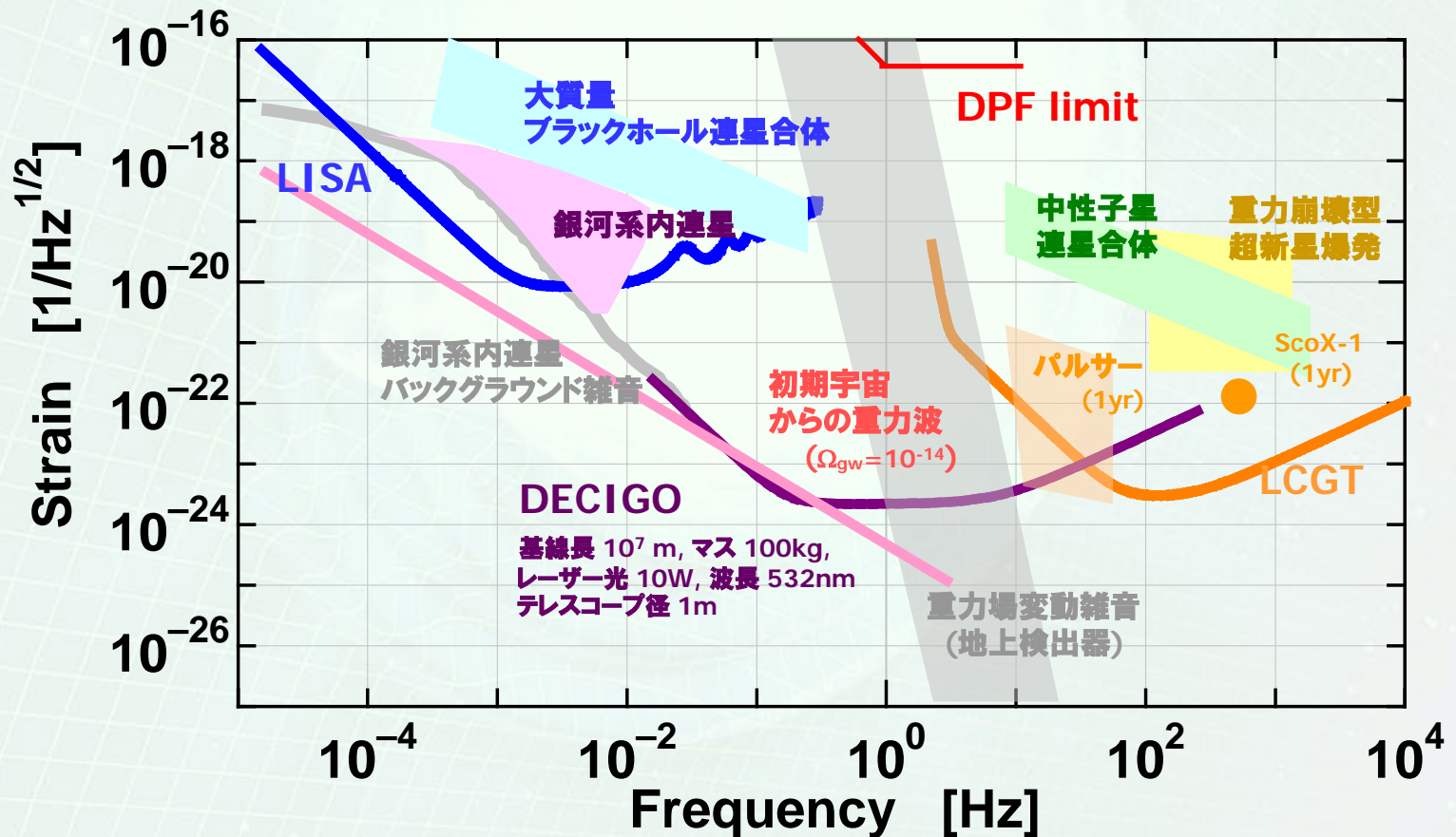
地上干渉計 : 10Hz - 1kHz

→ 中性子星など

DECIGO : 0.1 - 1Hz

→ 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波

LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど

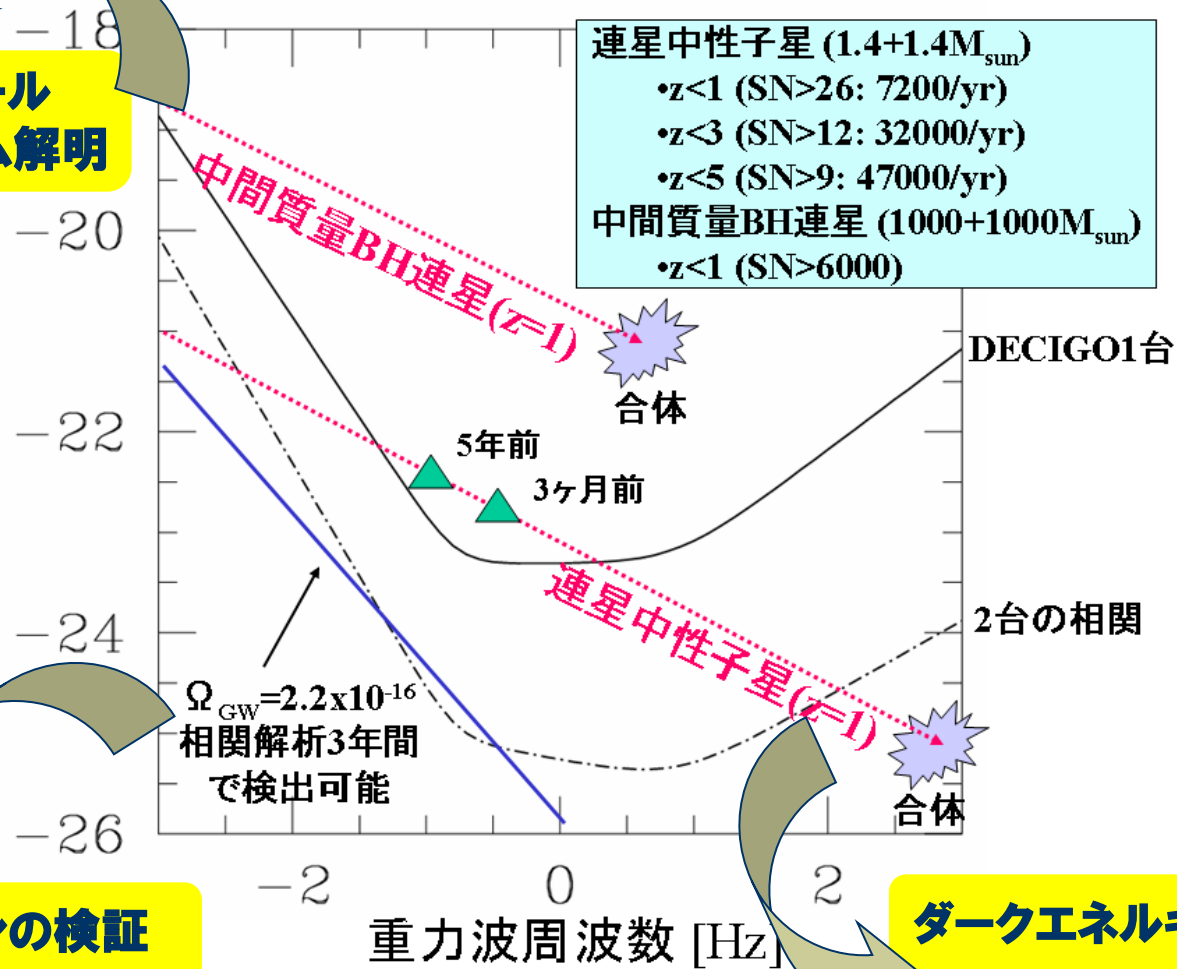


DECIGOの狙う重力波源とサイエンス

S.Kawamura
(2007)

巨大ブラックホール
形成のメカニズム解明

重力波振幅 [$\text{Hz}^{-1/2}$]



インフレーションの検証

ダークエネルギーの制限

DECIGOによるダークエネルギーの制限

'Standard Siren'

中性子星連星までの
距離-赤方偏移関係からモデルに制限

⇒ 宇宙の加速膨張の情報

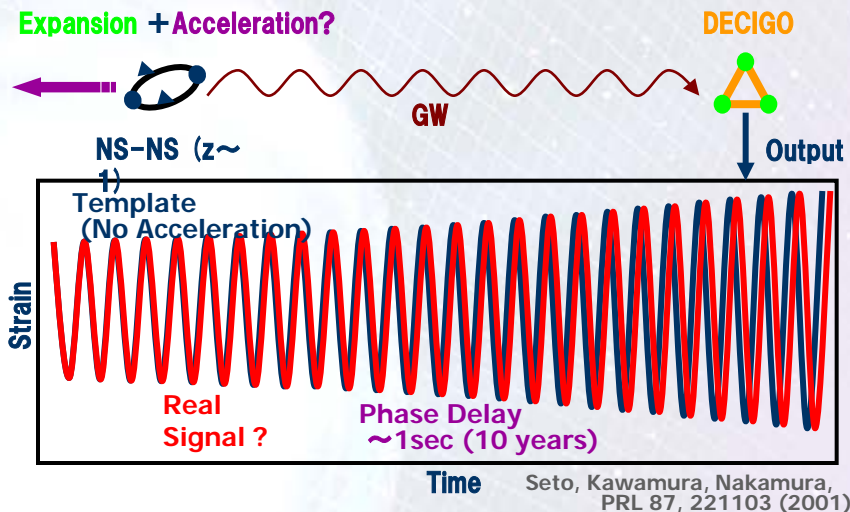
$\Delta\Omega_m, \Delta\Omega_w, \Delta w \approx 1\%$ で決定

距離: チャープシグナルから、直接決定

赤方偏移: host galaxyを特定

角度分解能 ~ 10 arcmin (1台)

at $z=1$ ~ 10 arcsec (3台)



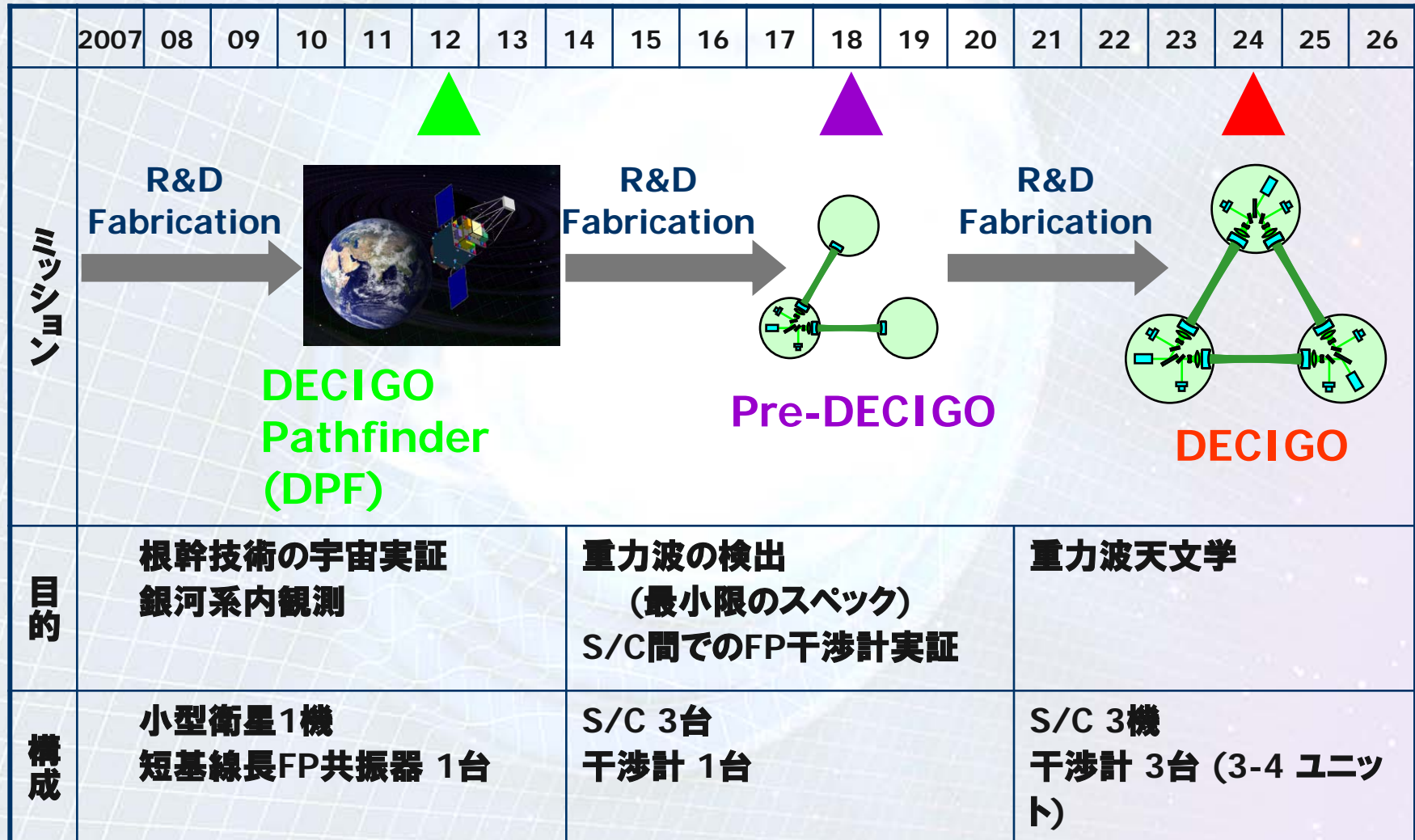
標準光源としての比較

高橋 龍一氏 (2006)

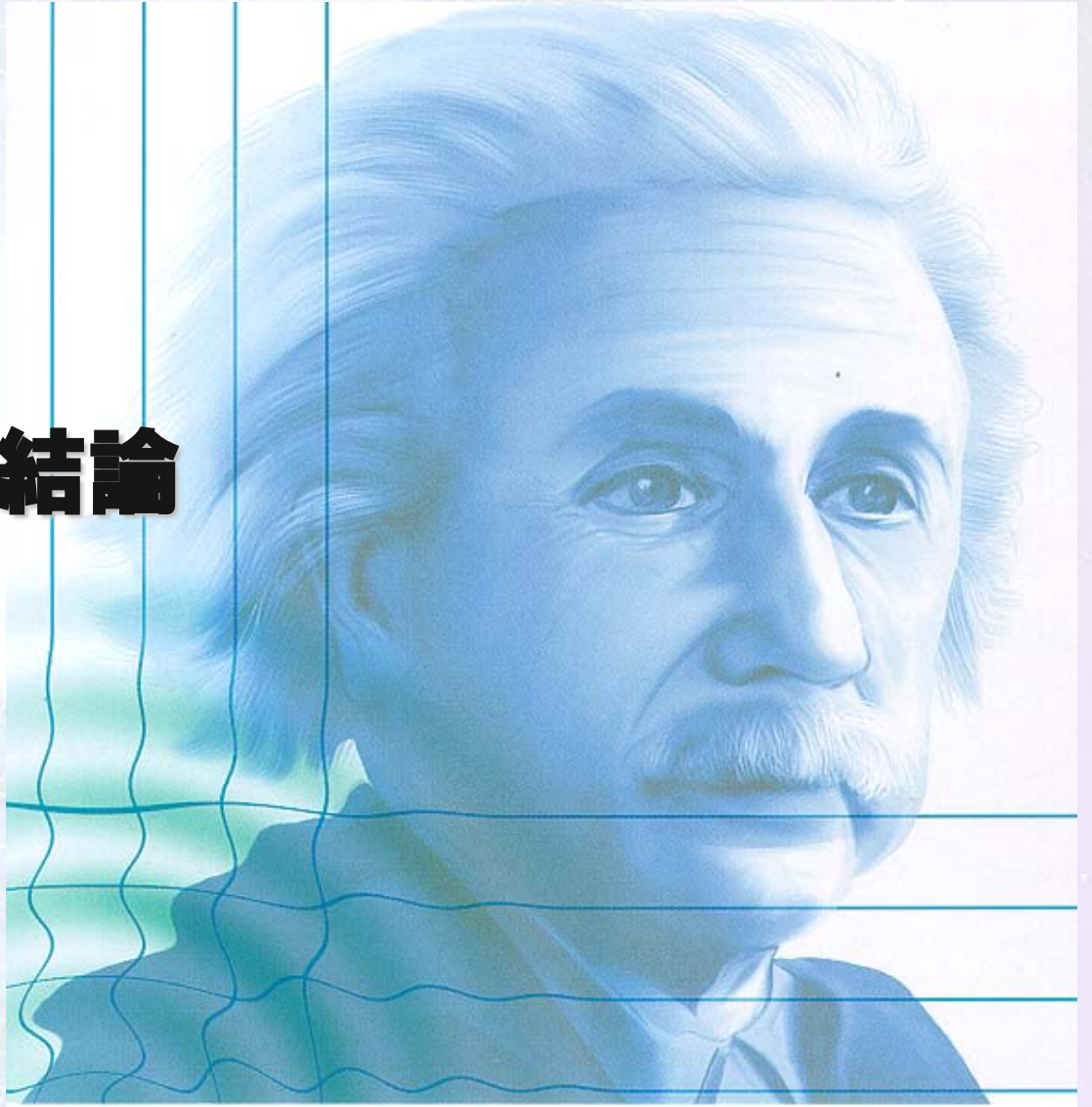
	超新星観測		中性子星連星観測
絶対光度	近傍の観測からの経験則	<	相対論
イベント数	年間2000個 (SNAP)	<	年間 10^{4-5} 個 (DECIGO)
距離の決定精度	約10%	≈	約10% at $z=1$
母銀河の特定	簡単?	>	1台では厳しい 複数台あれば可能?
その他	ダスト減光による不定性	<	物質による吸収・散乱は無視

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



4. 結論



結論

● 重力波天文学の見通し (個人的見解)

2016年前後：重力波の検出

(Advanced LIGO/LCGT/Advanced Virgo)

年間10回程度の 連星中性子星合体の検出

→ 相対論の検証

中性子星の状態方程式, ガンマ線バーストの起源?

重力崩壊星からの重力波

→ 超新星爆発のメカニズム

2020年前後：重力波による天体観測

(LISA, 地上からの観測)

巨大ブラックホール連星合体

→ 銀河形成への知見

星の巨大ブラックホールへの落下

→ ブラックホール時空への知見

銀河系内連星観測

→ 白色矮星などへの知見

パルサーの観測

2025年前後：重力波による宇宙論

(DECIGO, LISA, ETなど地上からの観測)

遠方の連星の観測

→ インフレーション, ダークエネルギーへの知見

中間質量ブラックホール連星合体

→ 銀河形成への知見

全く新しい重力波の発見



第 1 部

終わり