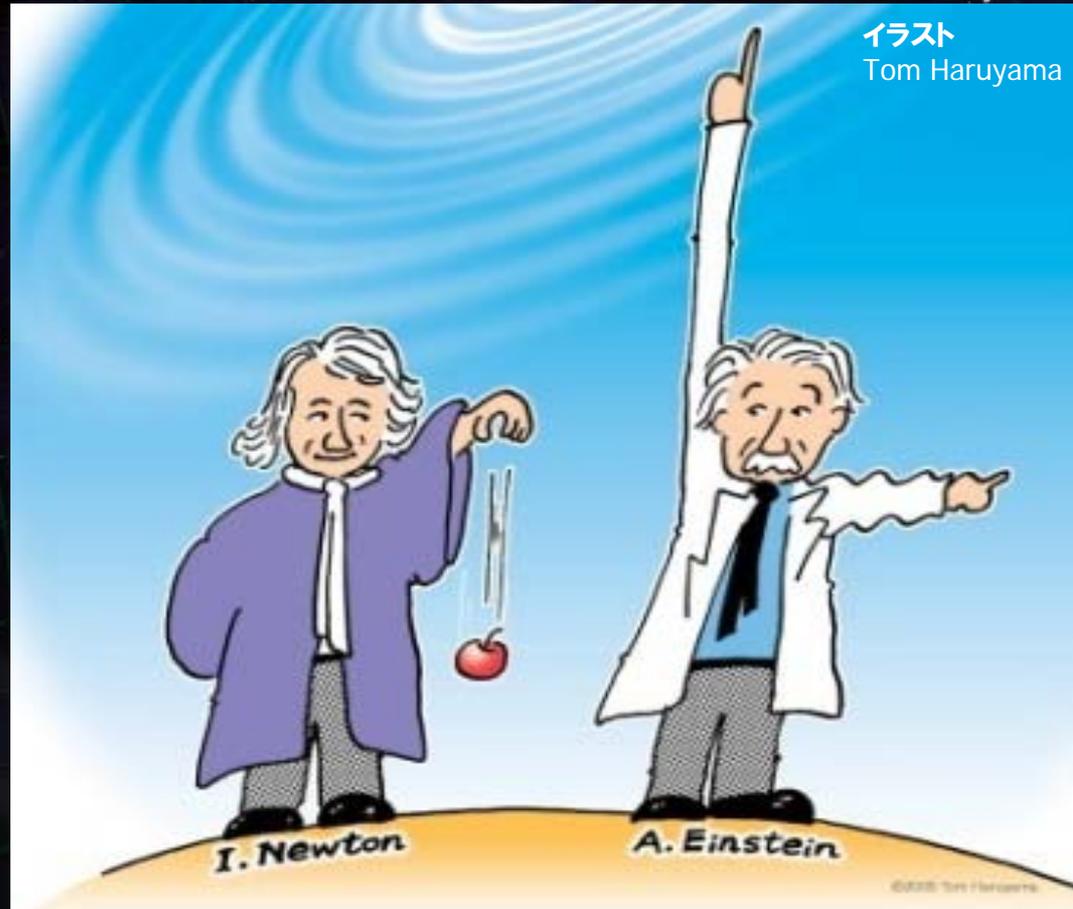


# 重力・重力波物理学



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

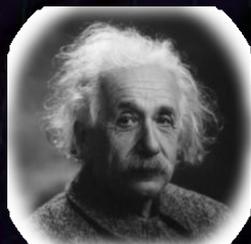
重力波の検出原理

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)

## 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-)

## 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)



## 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

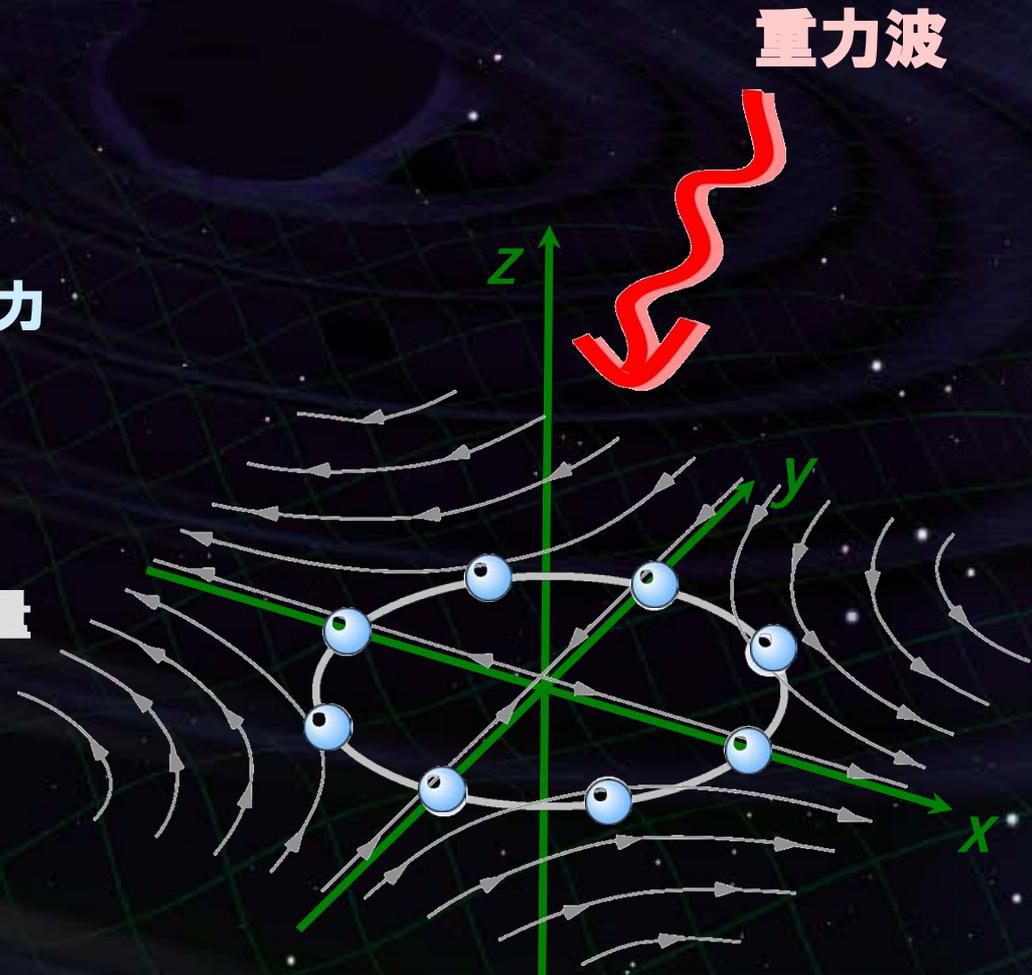
## 重力波の効果

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  $\Omega$ ) 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

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



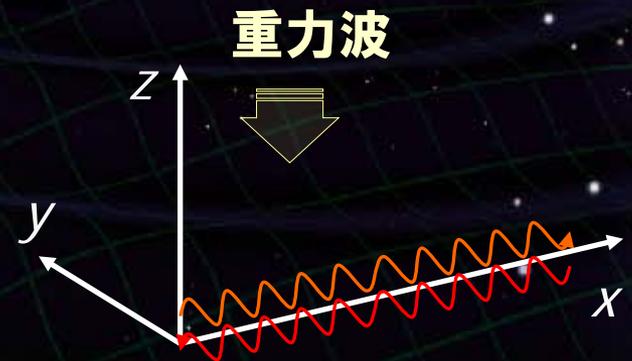
角周波数 $\Omega$ の光

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

重力波による位相変化



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



# 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

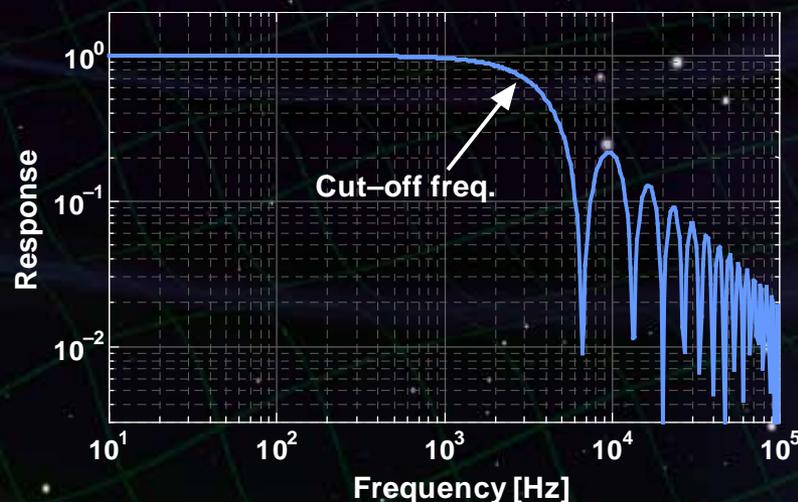
$$L = \frac{\lambda_{GW}}{4}$$



光の往復の間に  
重力波が半波長通過

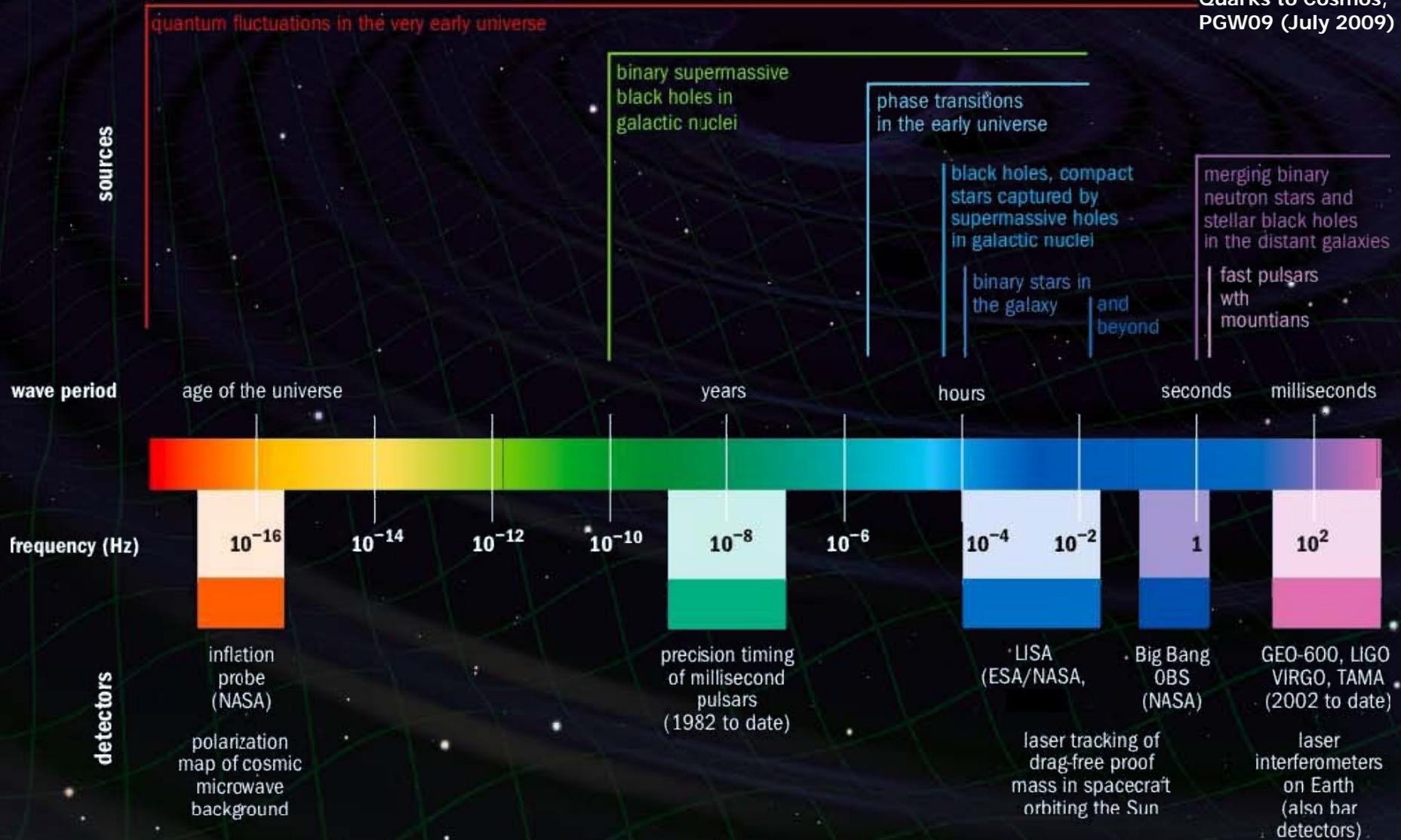
(1kHzの重力波 → 基線長75km)

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

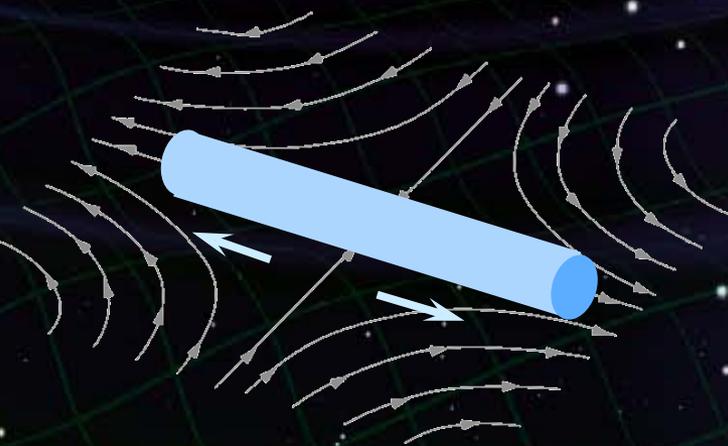
減衰係数

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



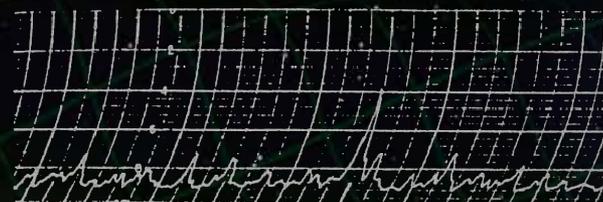
## 否定的な結論

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

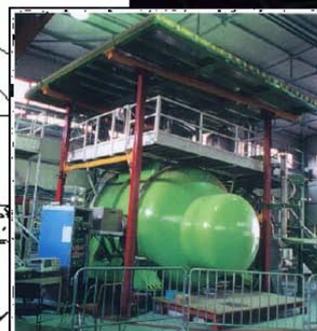
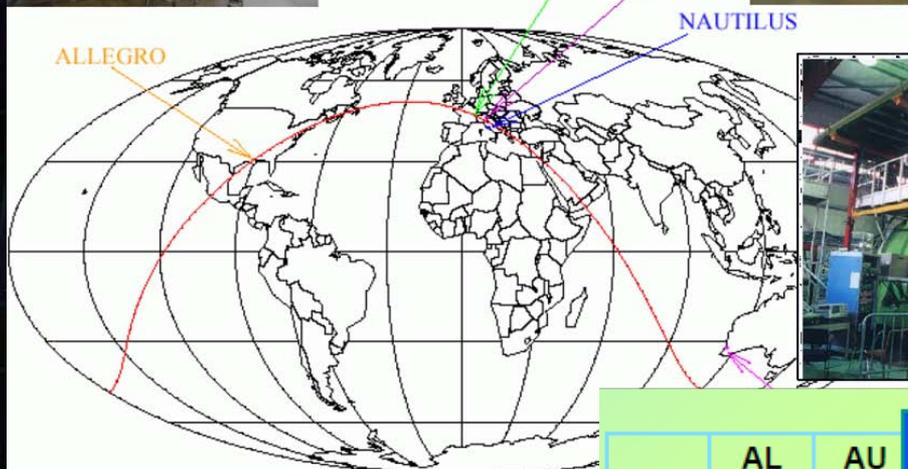
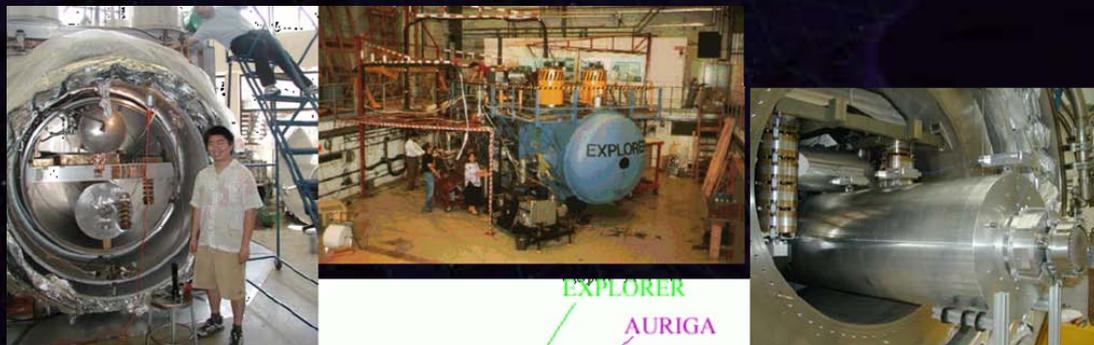


コインシデンスのタイム・マーク | アルゴンヌ研究所の検出器

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%
AL	0				87%
AU	0	172.9	158.0		86%
EX	0	151.8	158.0	155.0	
NA	0	150.2	135.3	155.0	

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

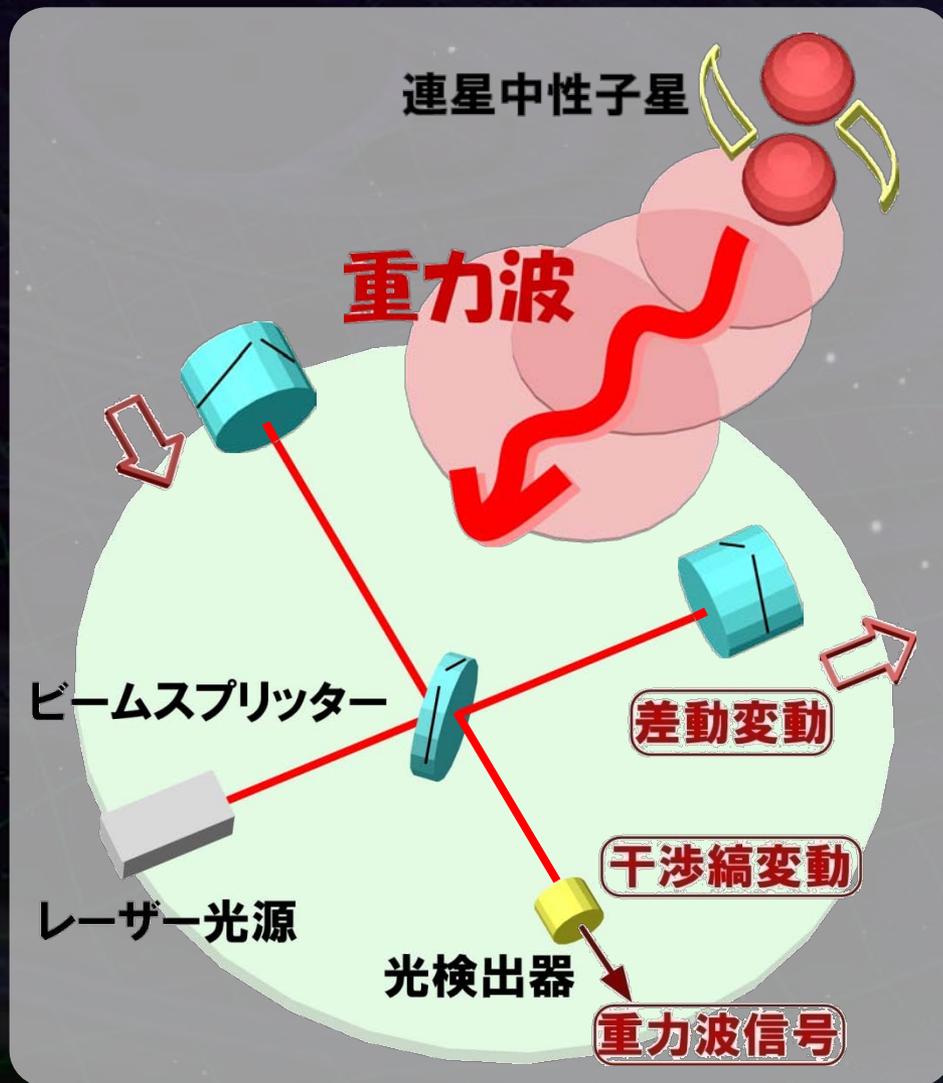


それぞれ、鏡で打ち返し干渉させる  
干渉光を光検出器で観測する

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



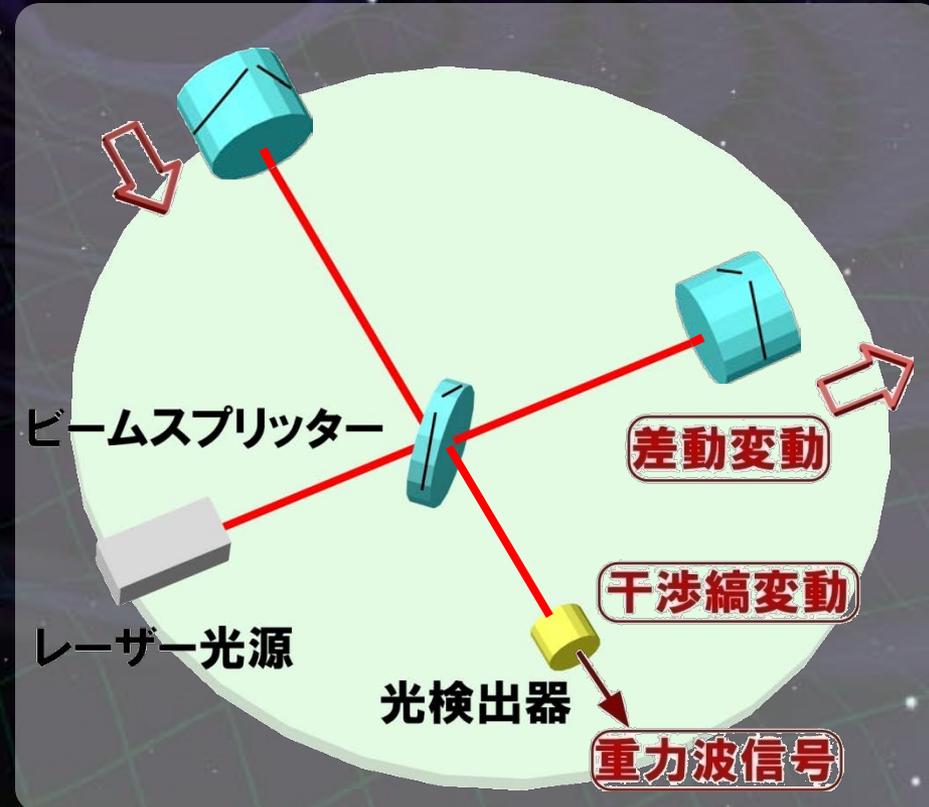
# マイケルソン干渉計

## 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)

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

重力波信号



# 世界の重力波検出器

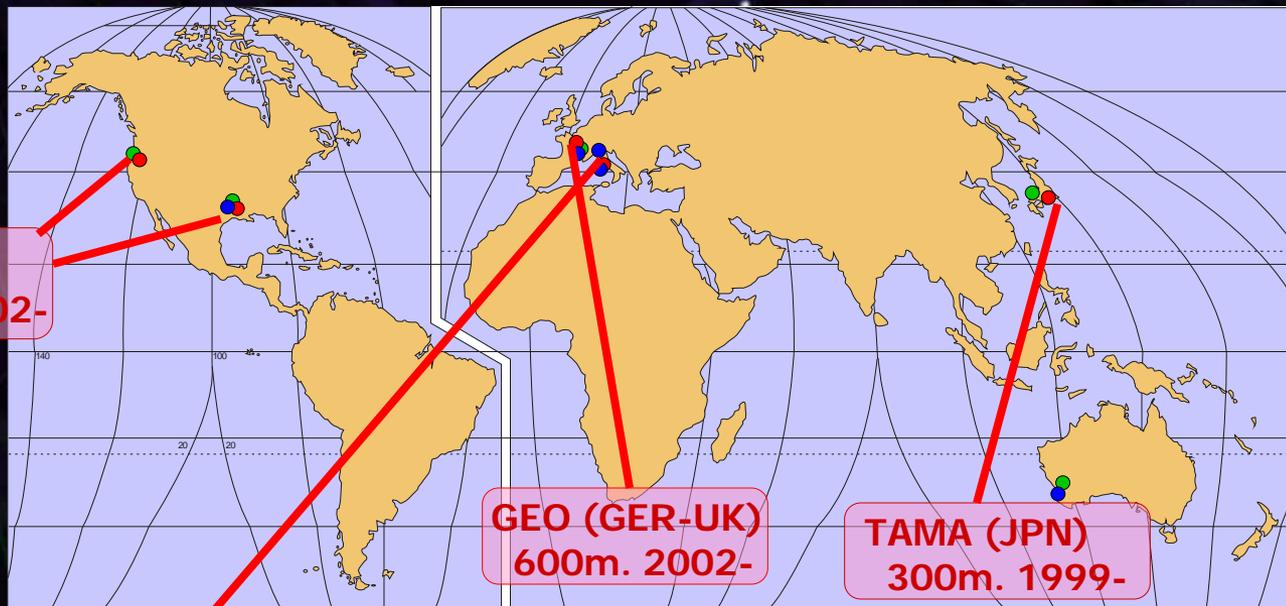
稼働中のレーザー干渉計型検出器：6台 (4プロジェクト)



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)

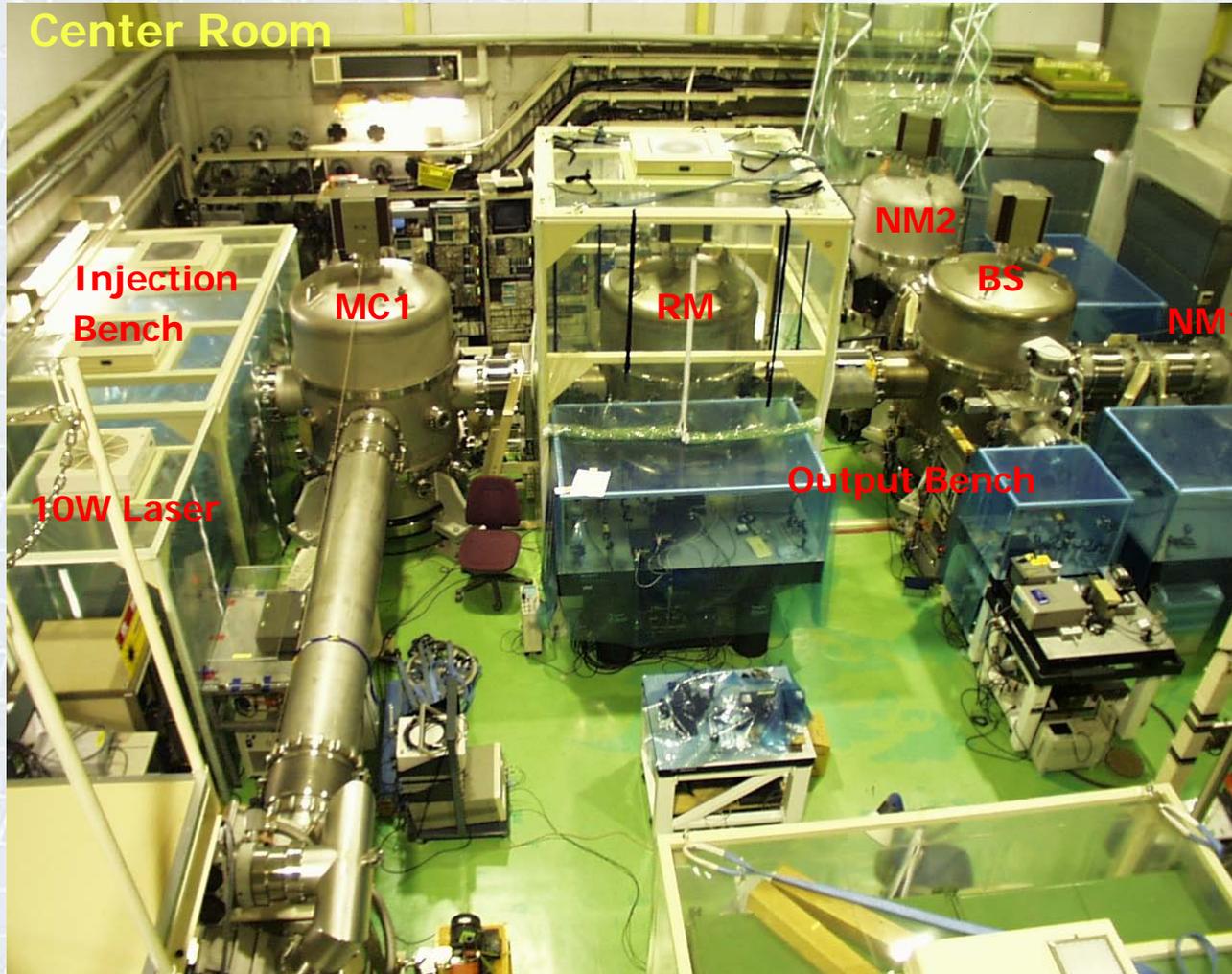
### Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000–2004

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

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

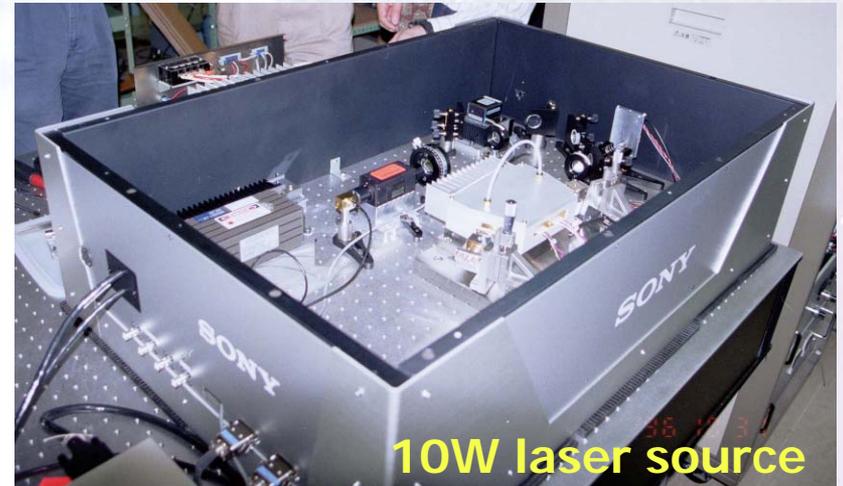


End Room

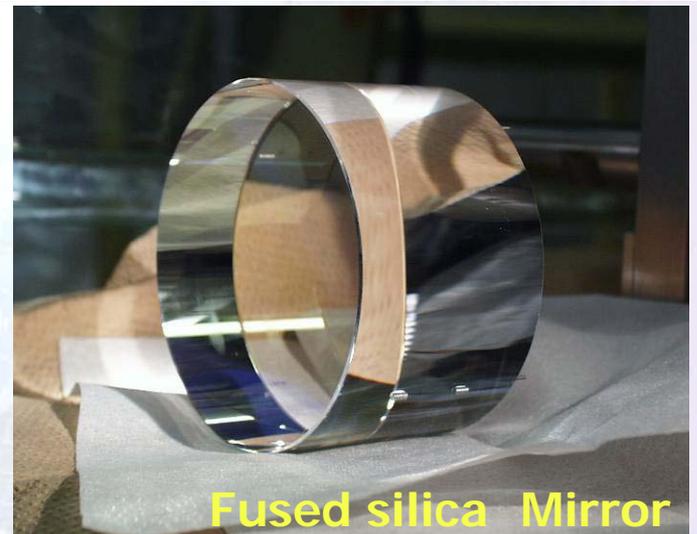


# TAMA300 (3)

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)

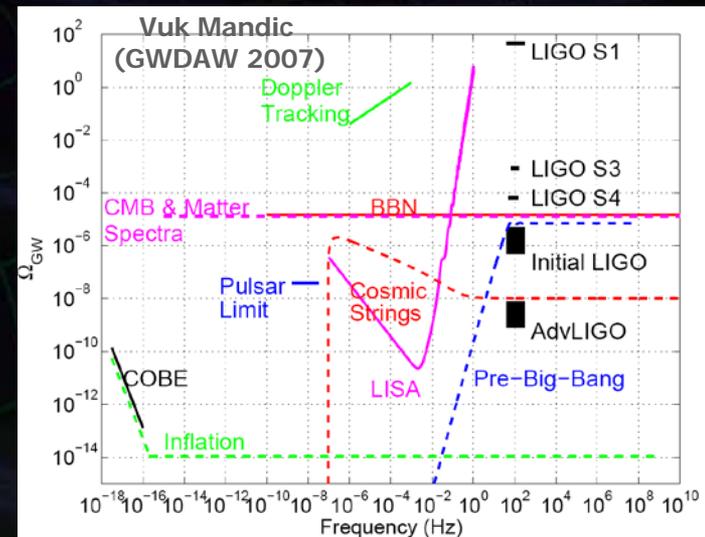
(Crabパルサー: 理論的上限値より厳しい制限)

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

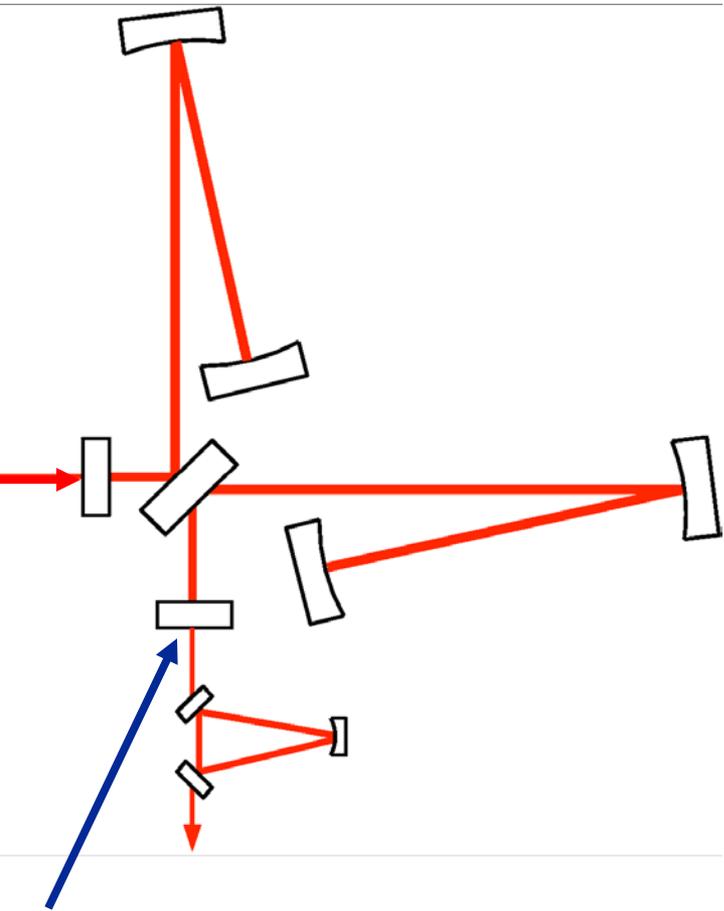
Leibniz  
Universität Hannover



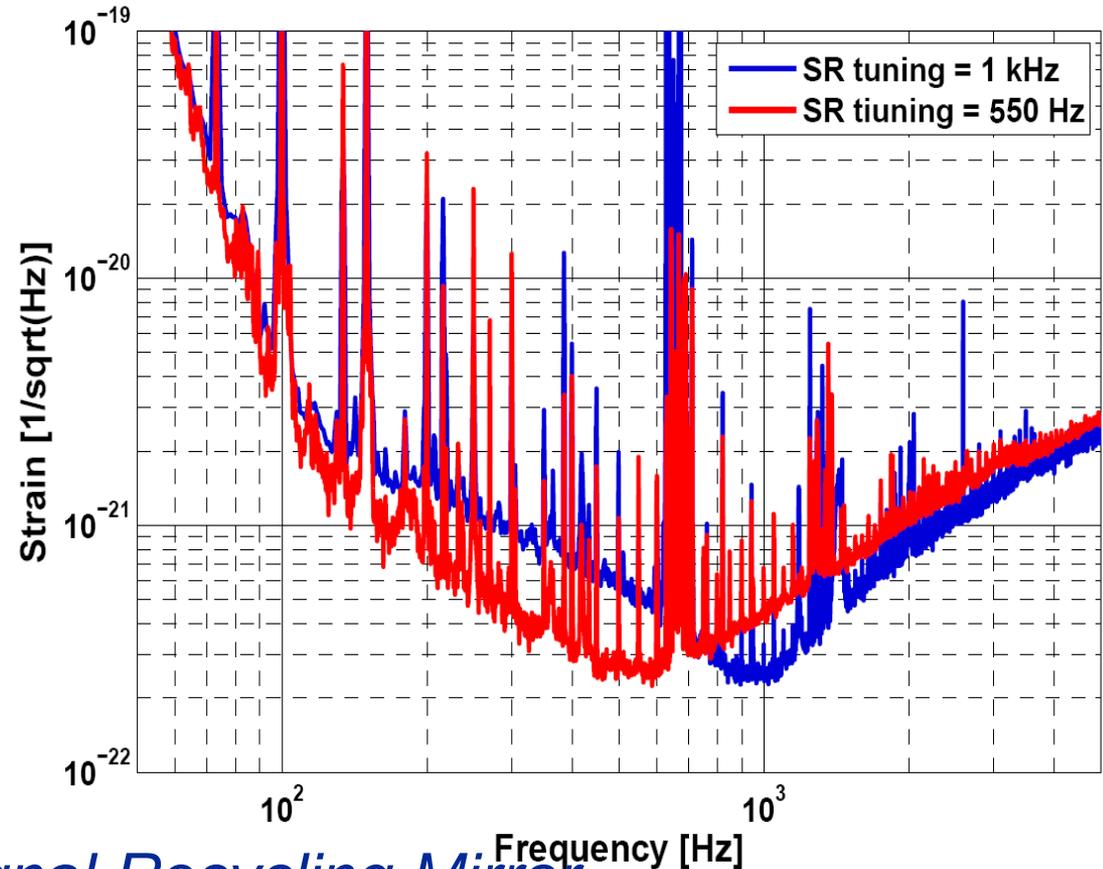
Universitat de les  
Illes Balears

CARDIFF  
UNIVERSITY

# GEO600: Signal Recycling

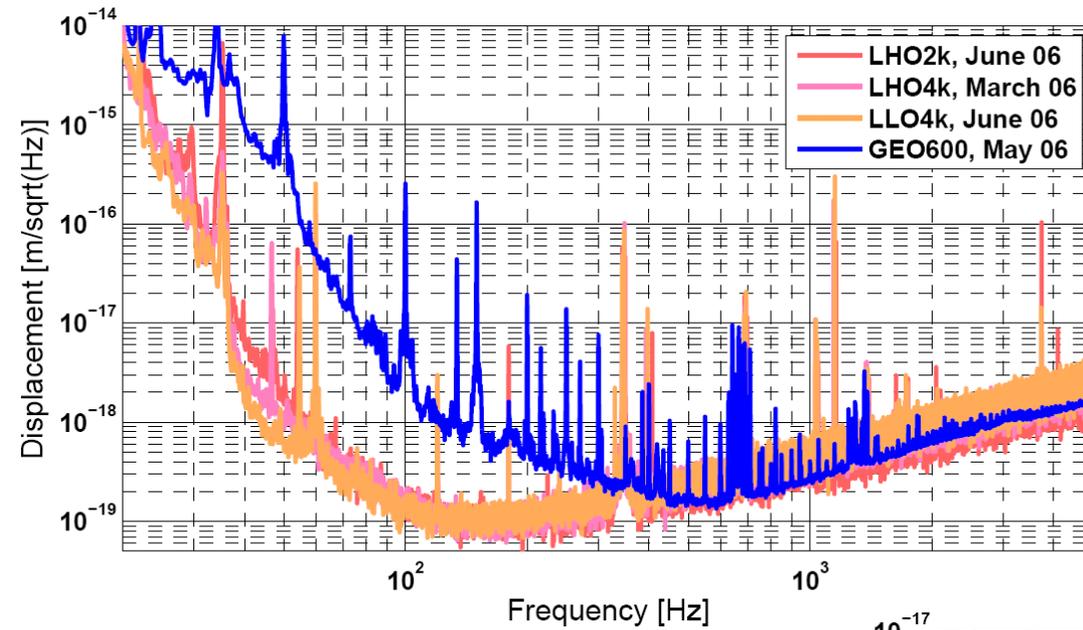


•Signal Recycling Mirror



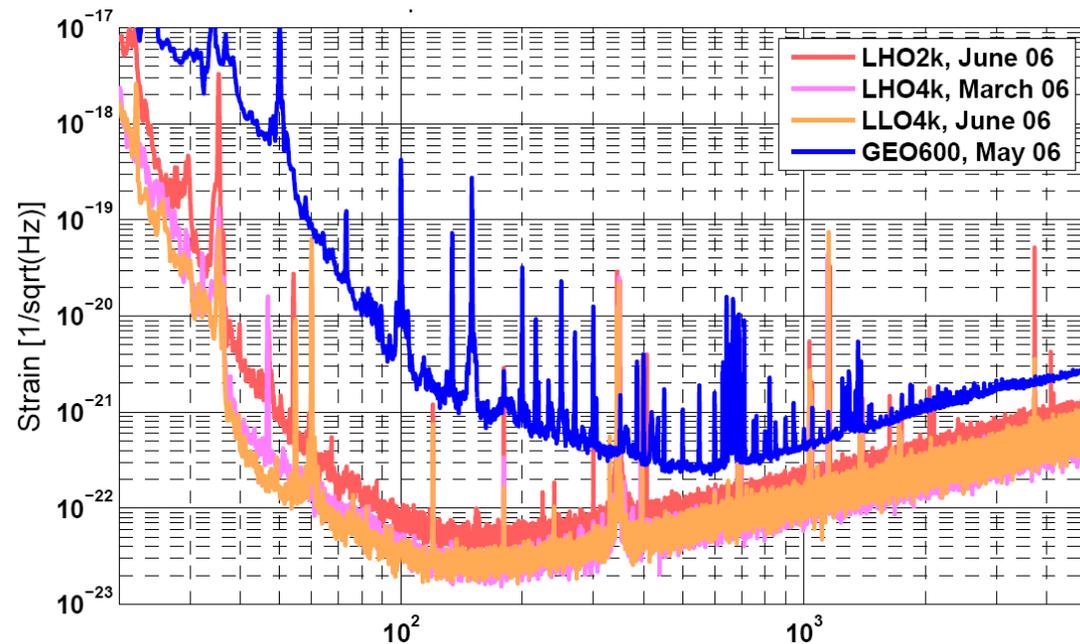
•Location of Signal Recycling Mirror  
Changes Frequency Response  
(Frequency of Maximum Sensitivity)

# The Importance of Length



- Displacement Sensitivity
- Measure of Experimenter's skill

- Strain Sensitivity
- Measure of Experiment's funding



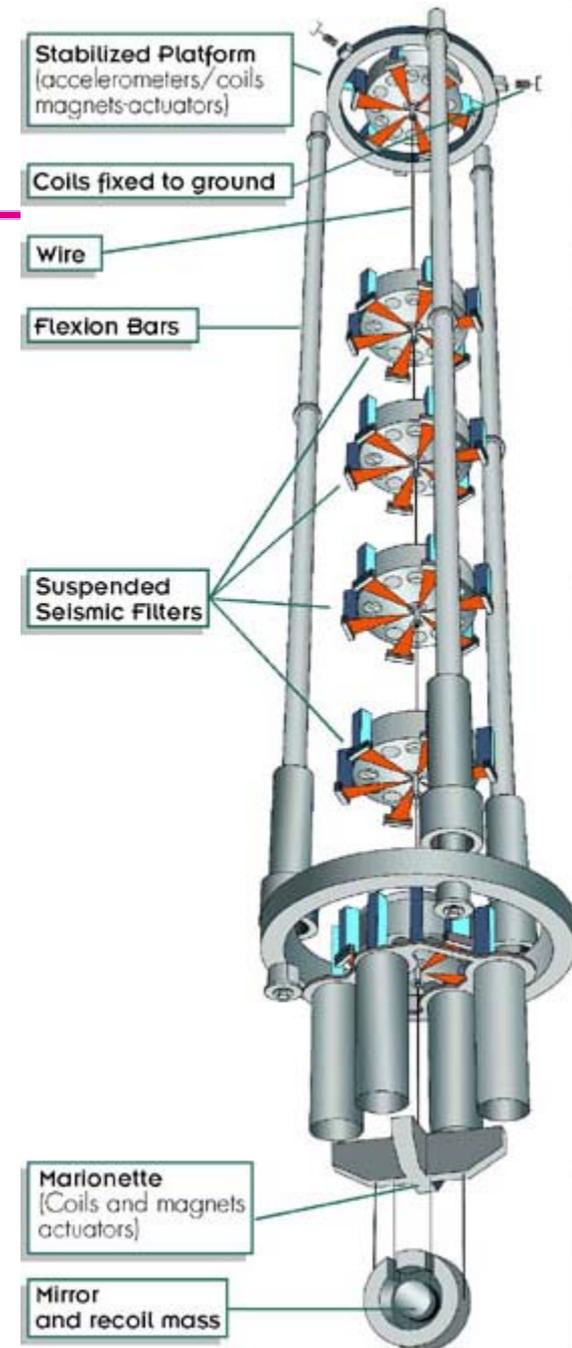
- Collaboration of France, Italy,  
• Netherlands, Poland

- One interferometer  
with 3 km arms,  
located near Pisa

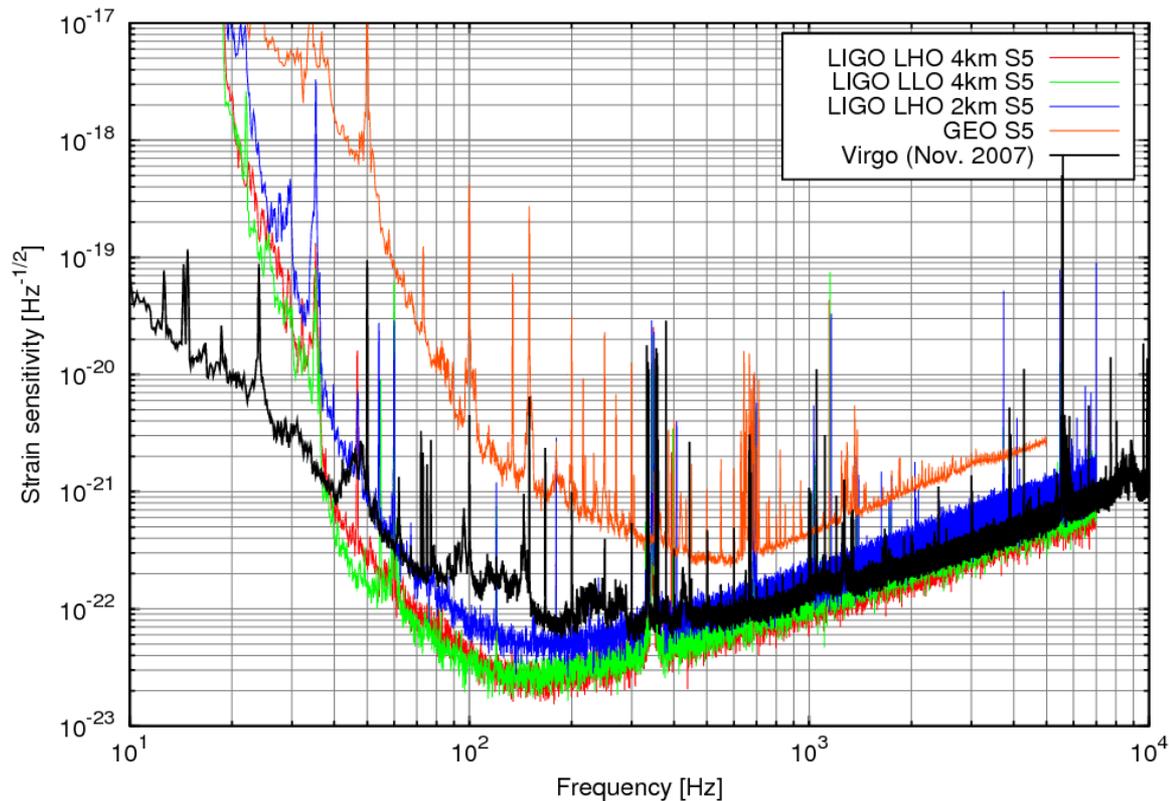


# Virgo Interferometer

- 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

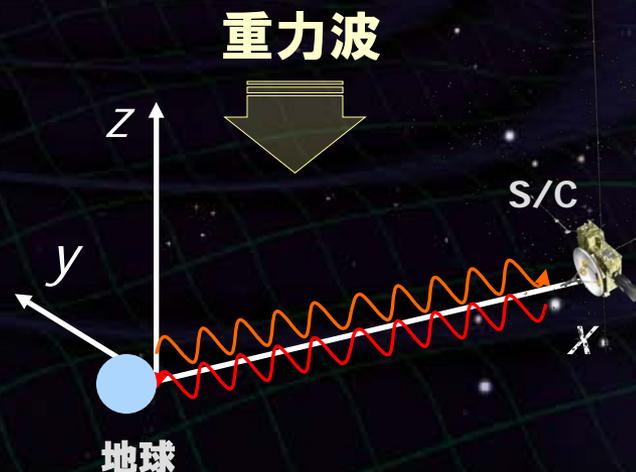
地球 - スペースクラフト間 のマイクロ波通信を利用

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

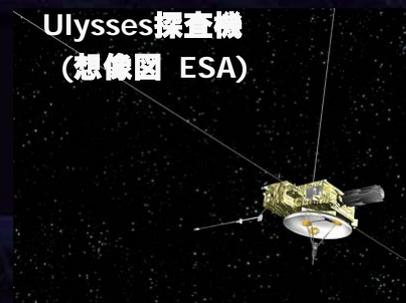
# 深宇宙探査機による観測

## 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)

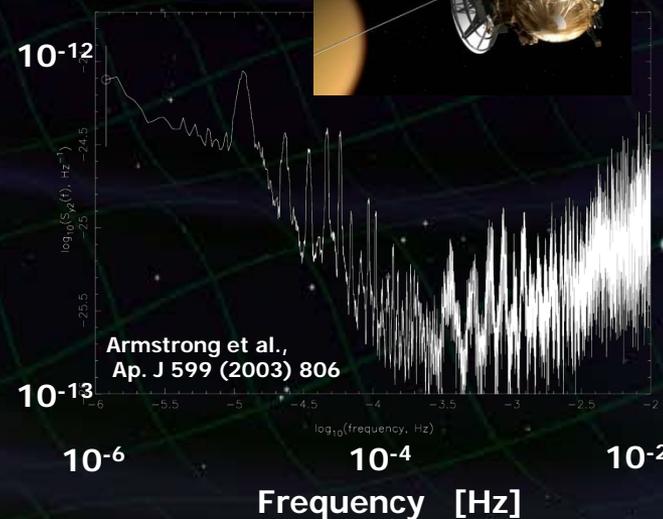
観測により星間プラズマの影響を補正

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

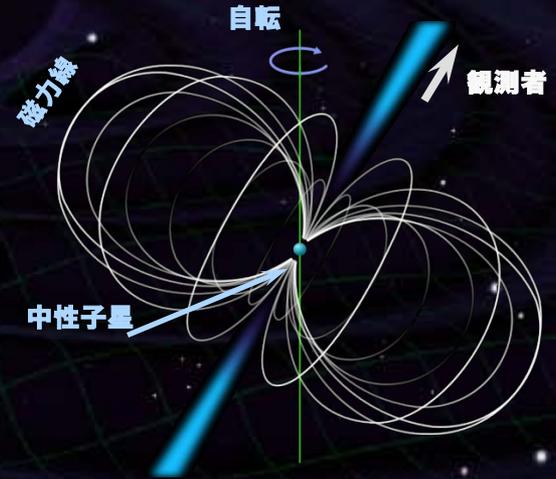
→ パルスタイミングの変動から重力波を検出

(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 ( $\mu\text{s}$ )
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

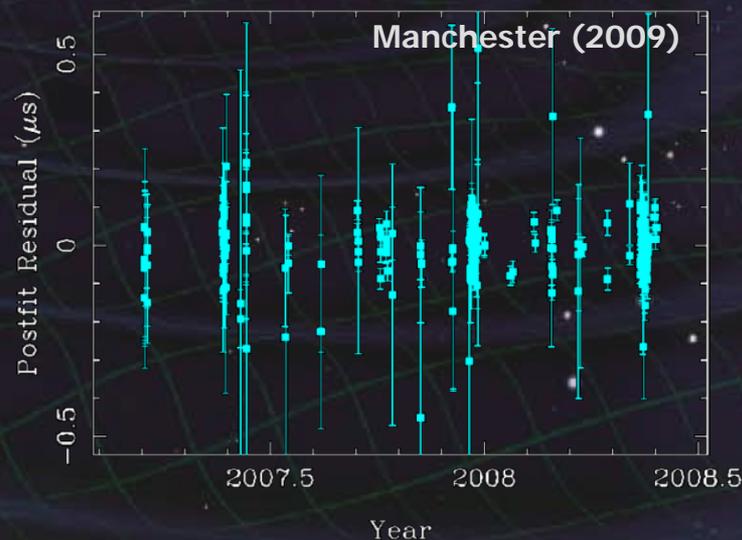
## 感度を制限する要因

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  $\mu\text{s}$ ) が得られている

## Timing Residuals for PSR J0437-4715

0437-4715 (rms = 0.056  $\mu\text{s}$ ) 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 ( $\mu\text{s}$ )
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

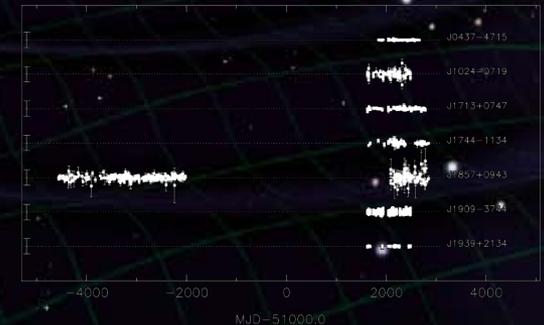
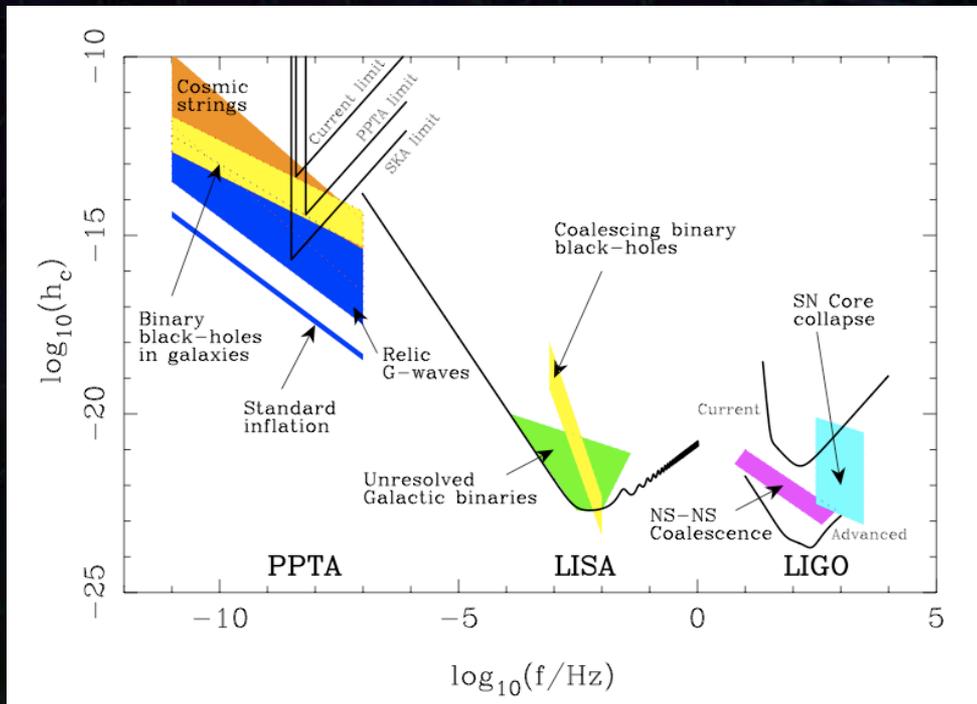


Fig. 1.— Pulsar timing residuals. The length of the vertical line on the left hand edge represents  $10\mu\text{s}$ .

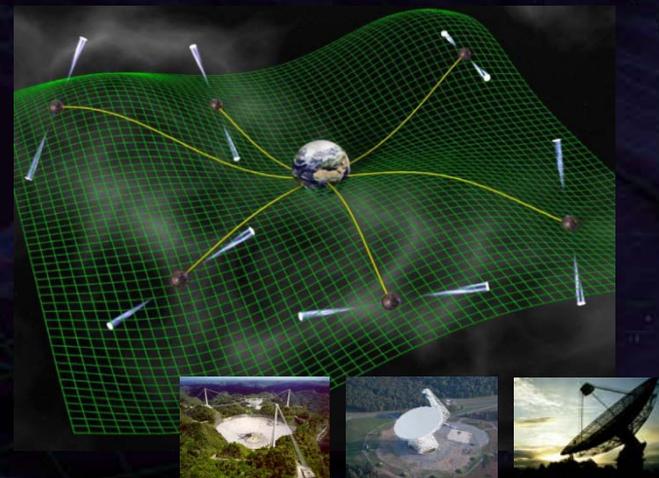
Manchester (2009)

# 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  $\mu$ s)

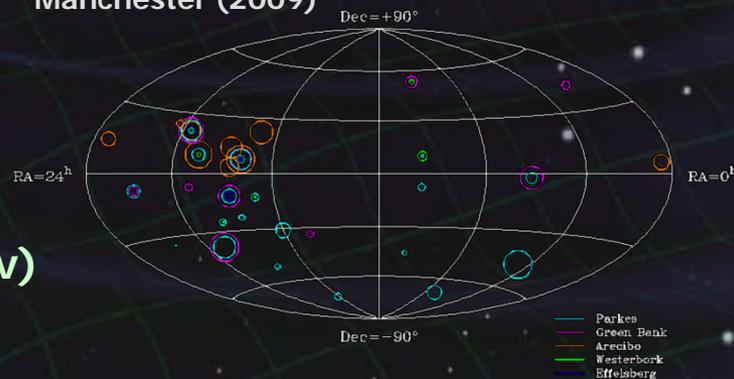
## North American pulsar timing array (NANOGrav)

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)<sup>-1</sup>
- 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

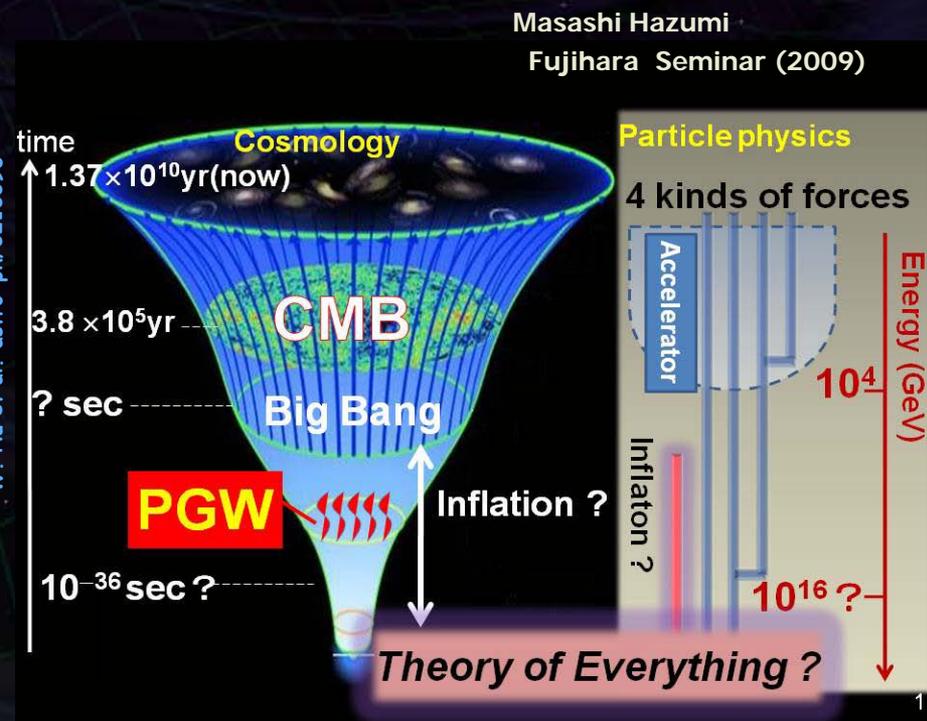
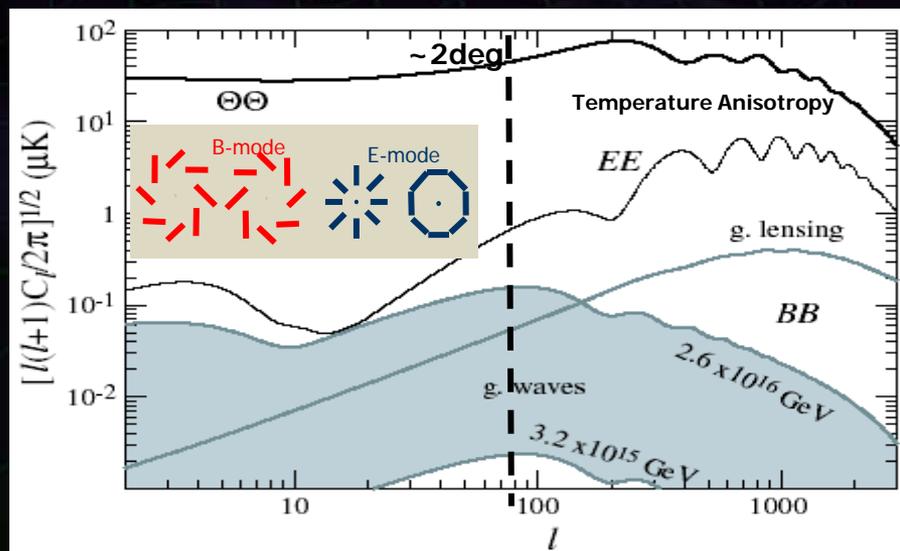
⇒ CMB B-mode

# 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



# 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

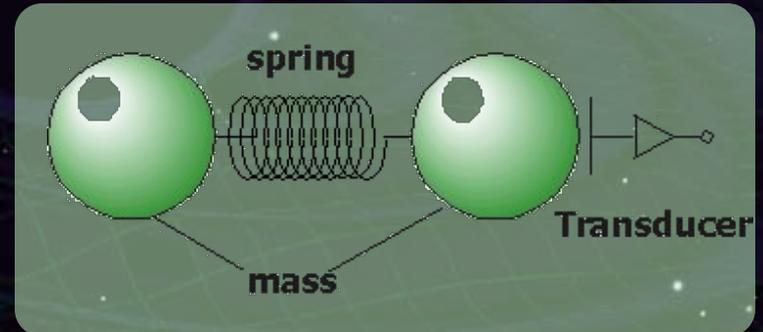
大きな弾性体

(Al5056, 重さ 2ton, 長さ3m)

低雑音トランスデューサ

低温  $\rightarrow 0.1\text{ K}$

共振周波数 1kHz付近



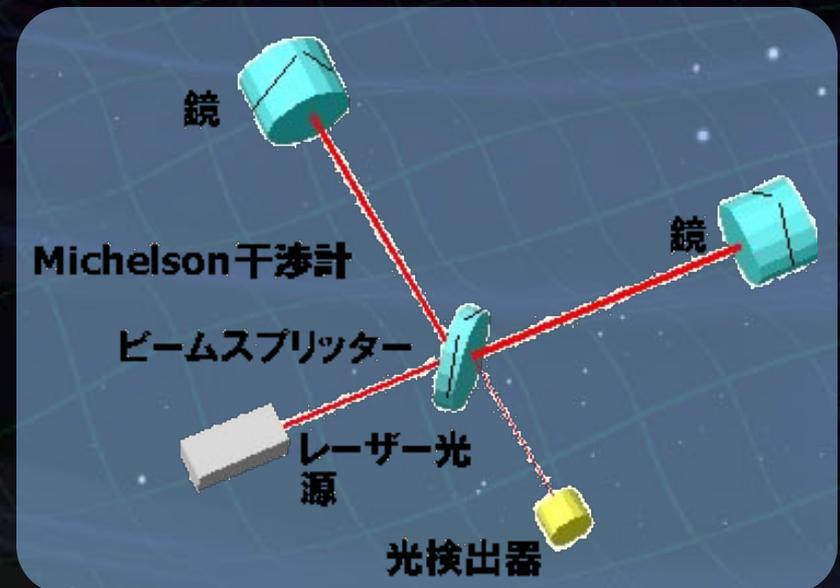
## 自由質点型検出器

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

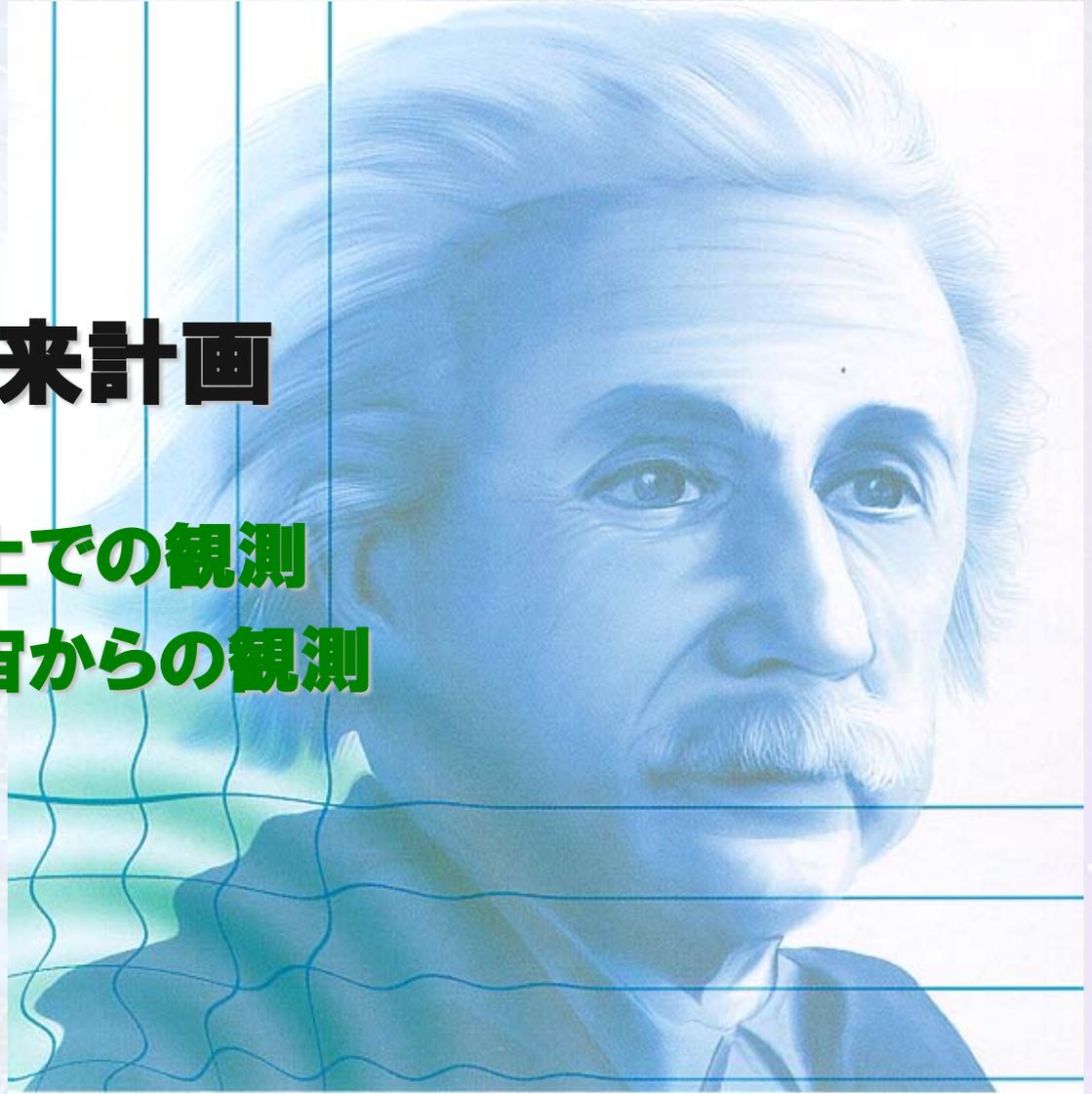
理論的上限值より厳しい制限

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)

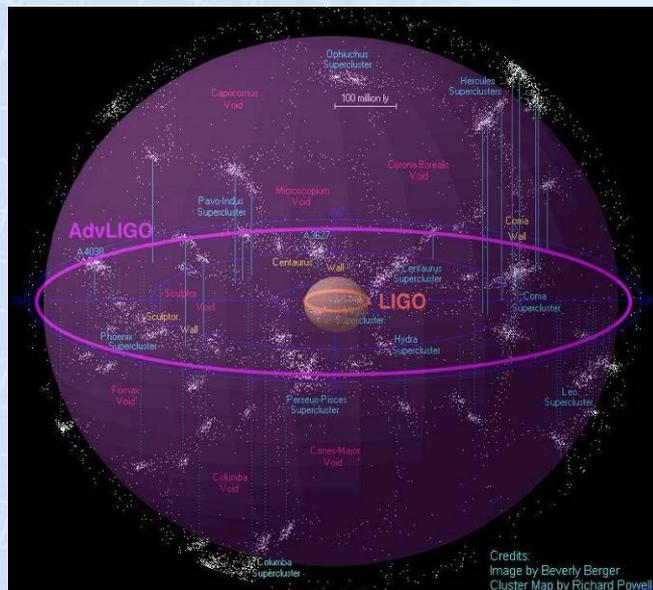
## 本格的な天文学への2つの方向

### 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



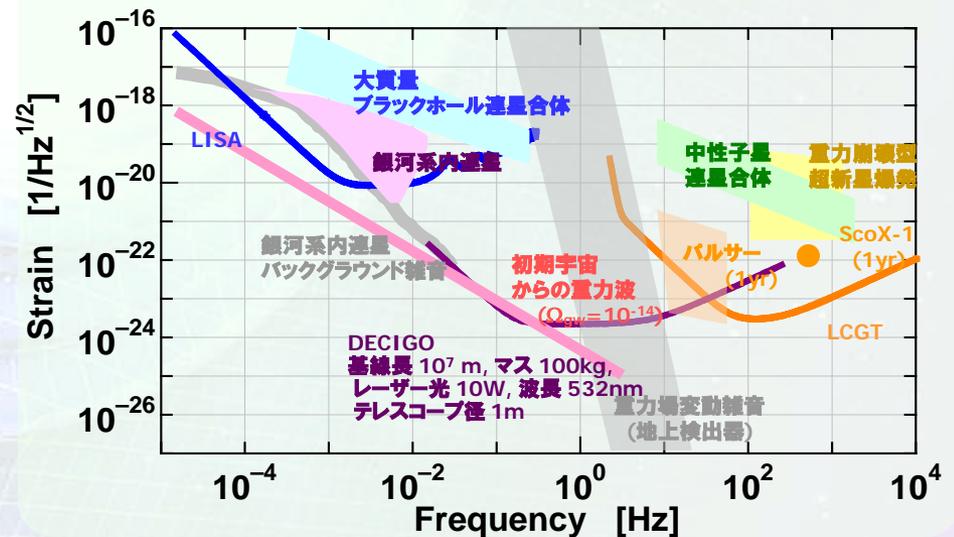
### 広帯域観測

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

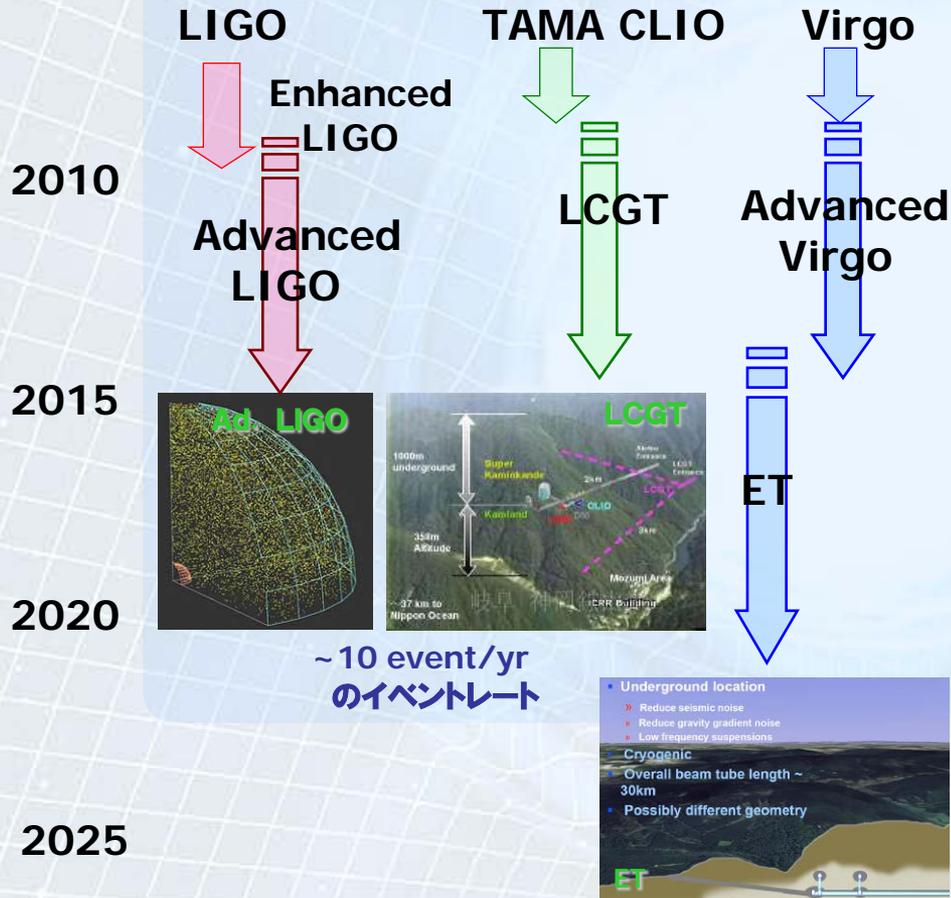
~ Advanced LIGO 3時間の観測



# 将来計画

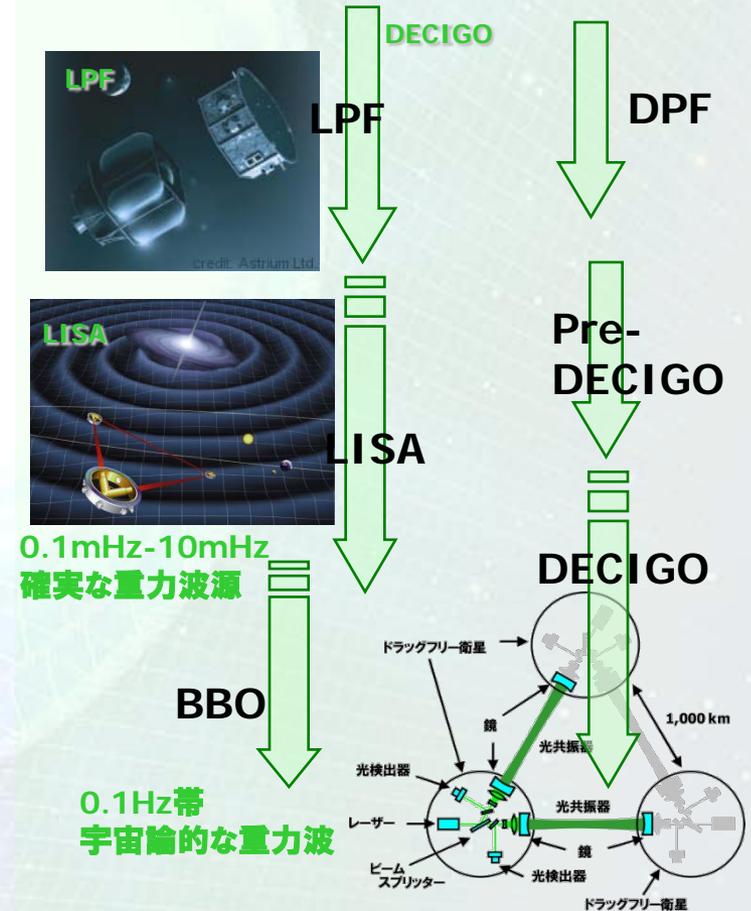
## 地上検出器

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

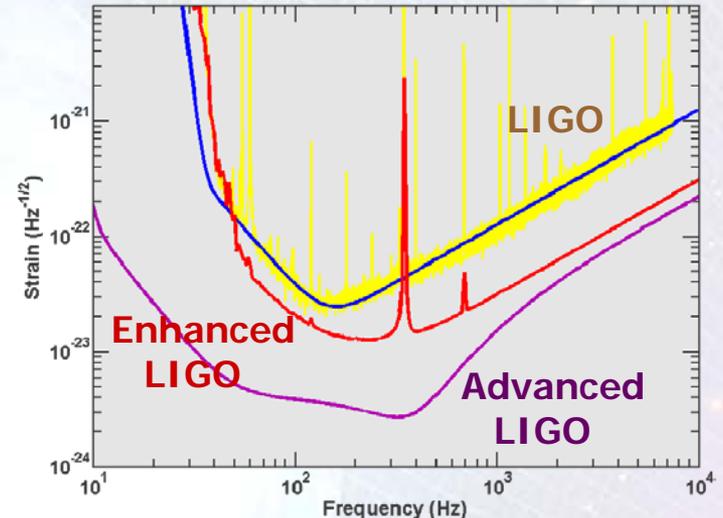
干渉計方式, 信号検出法の変更

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	$3 \times 10^{-23}$ / rHz	Tunable, better than $5 \times 10^{-24}$ / rHz in broadband
Seismic Isolation Performance	$f_{low} \sim 50$ Hz	$f_{low} \sim 10$ Hz
Mirror Suspensions	Single Pendulum	Quadruple pendulum

# LCGT

## LCGT (Large-scale cryogenic Gravitational-wave Telescope)

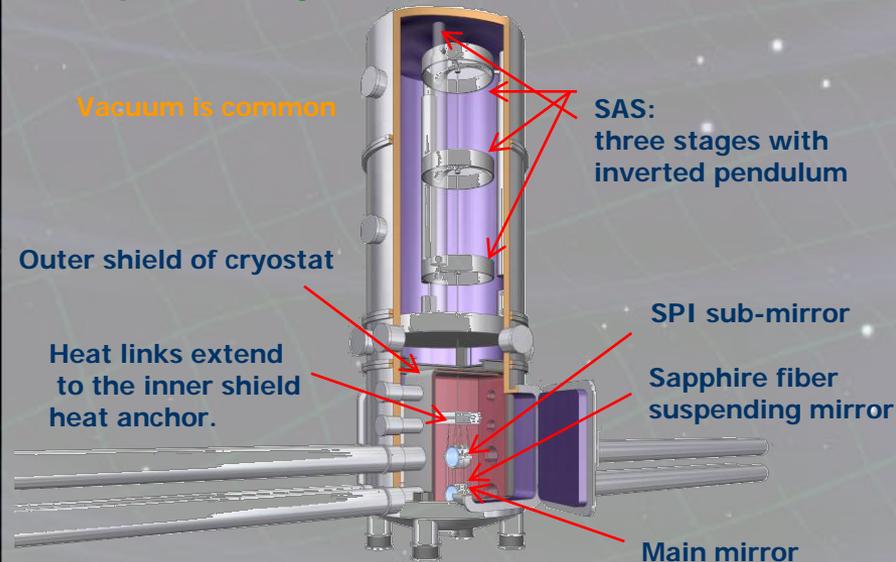
Advanced LIGOと同等の感度 (検出可能距離 ~200Mpc)

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

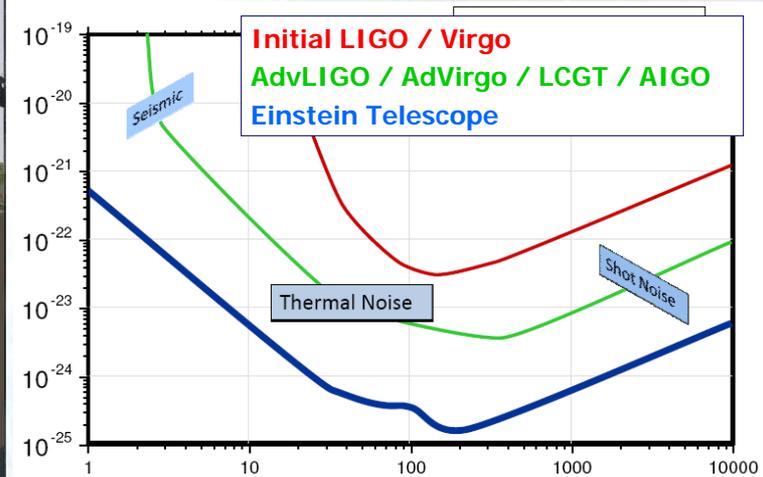
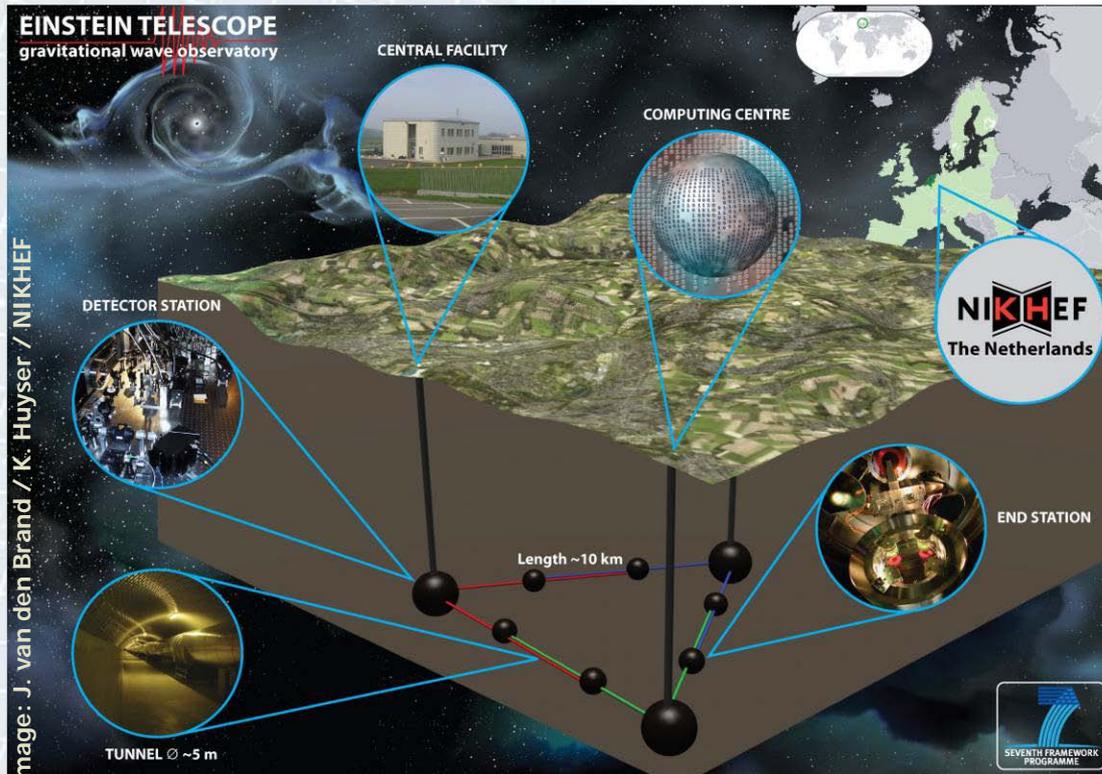
## ET (Einstein Gravitational-Wave Telescope)

### 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?

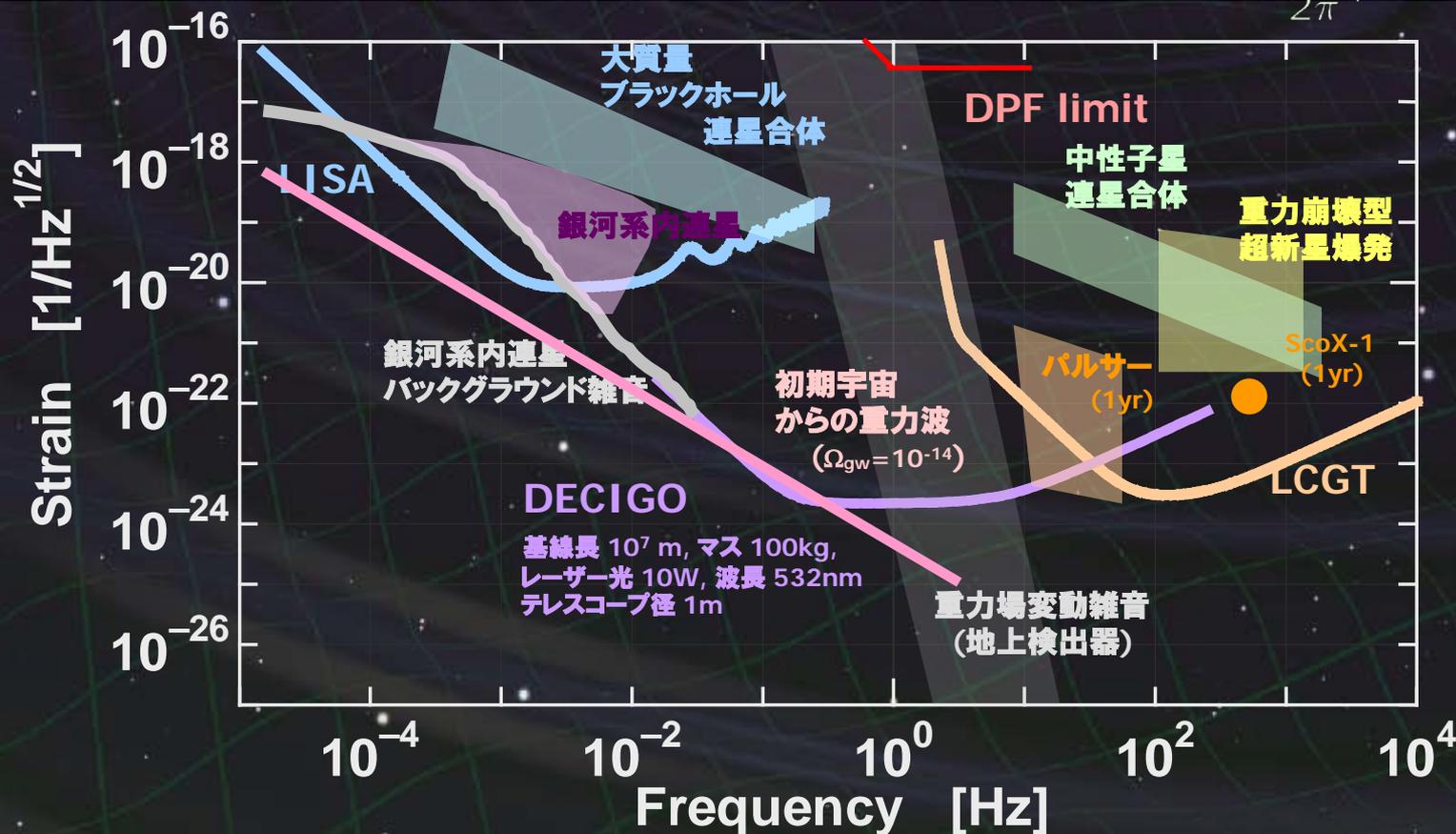


M. Punturo, GW Advanced Detector Workshop, May 2008

# 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

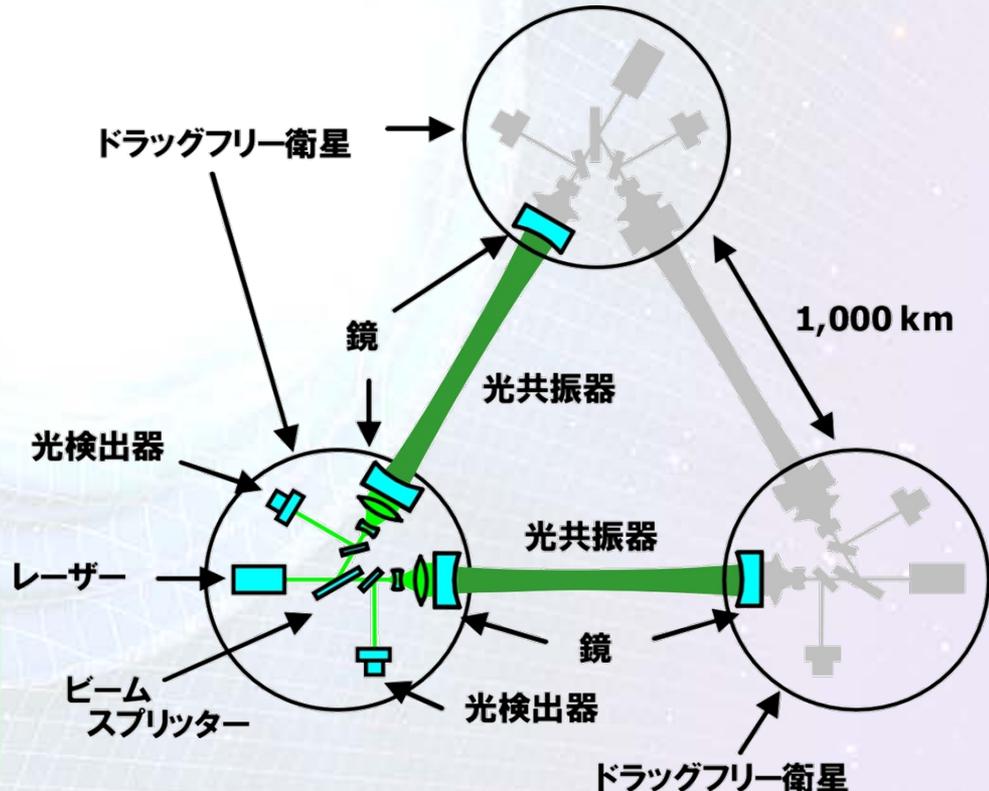
→ 太陽輻射圧変動などの  
外乱を避ける

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.

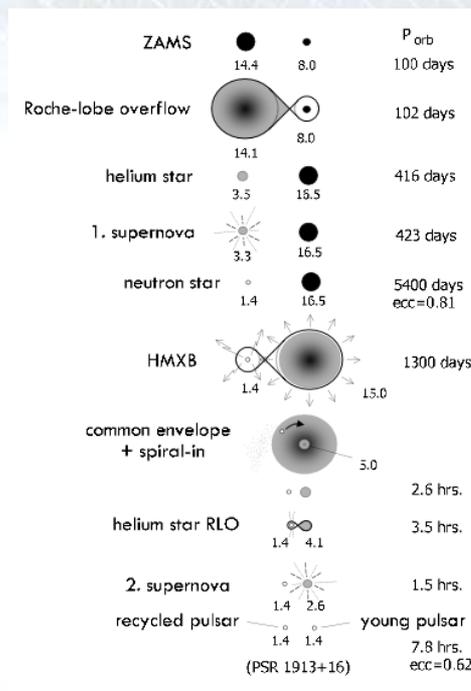
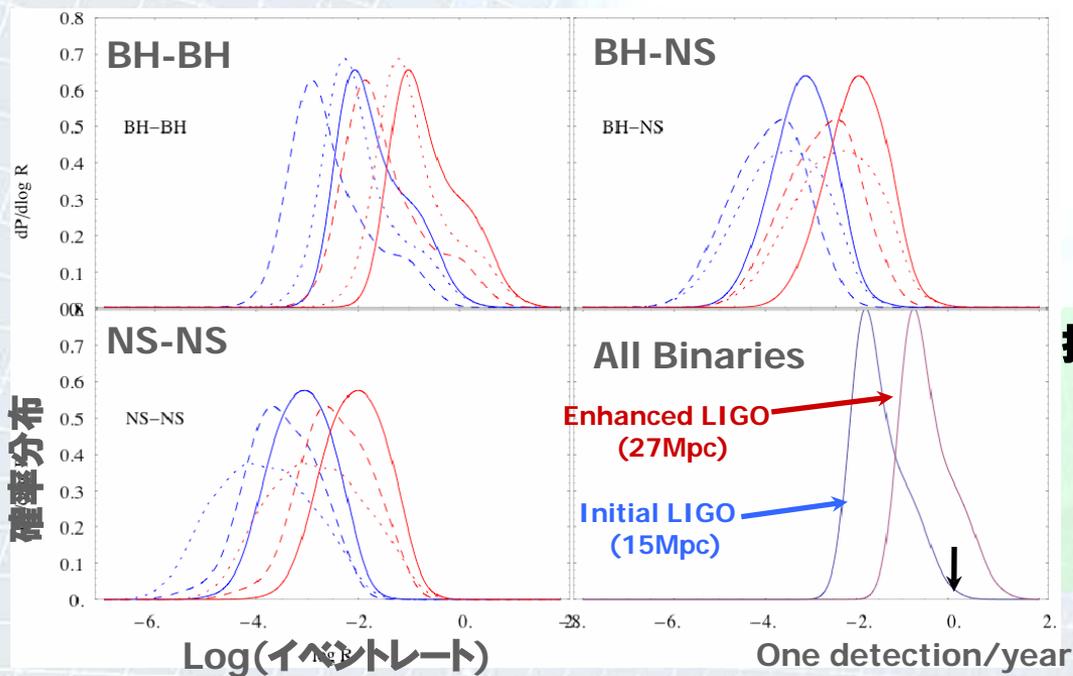
# LIGO/LCGTで重力波は見つかるか？

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



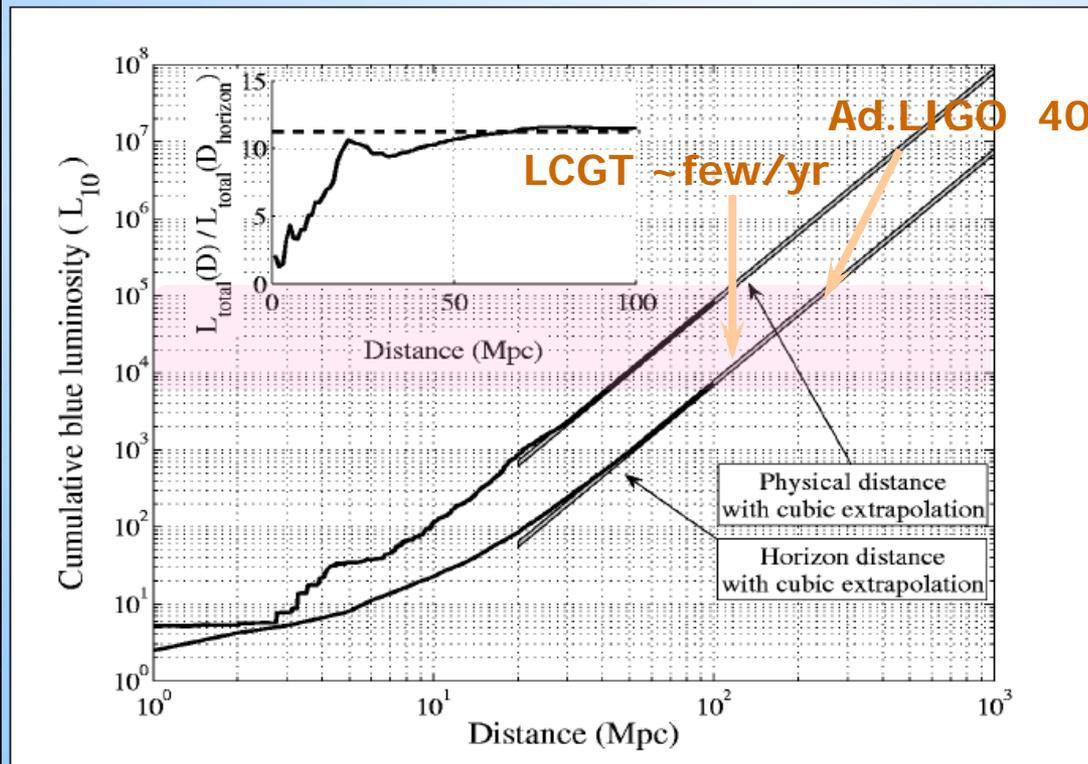
Voss and Tauris  
(2003)

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

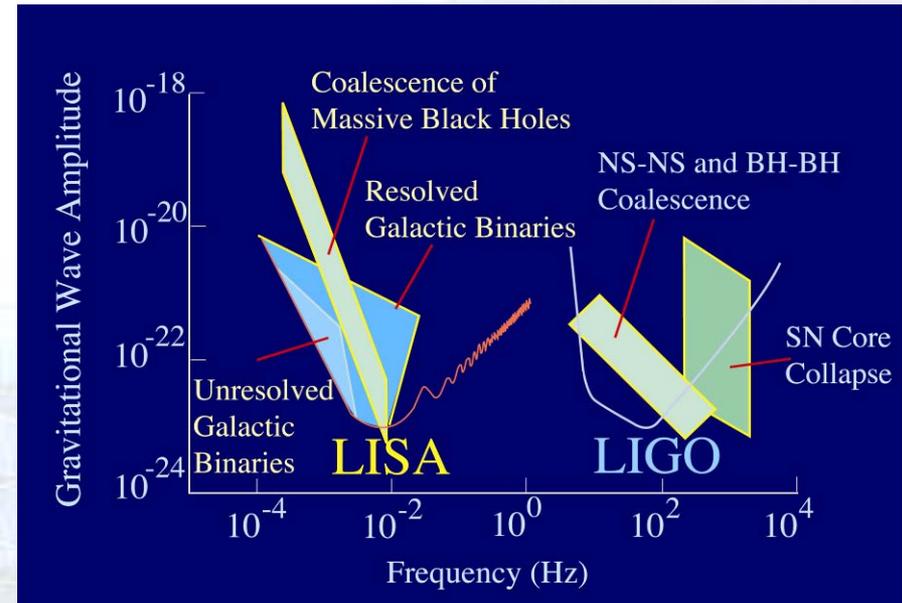
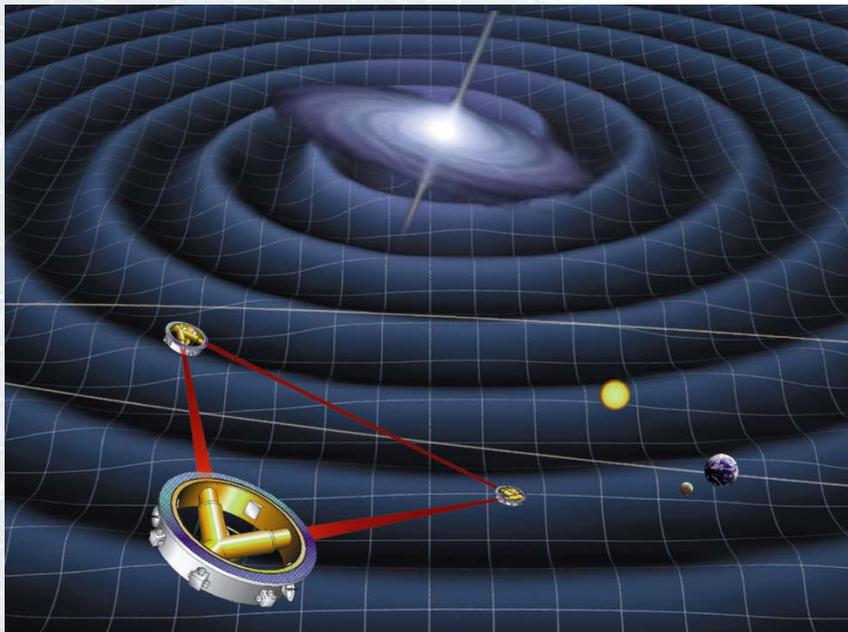
**0.1mHz - 1Hz** の周波数帯をターゲット

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

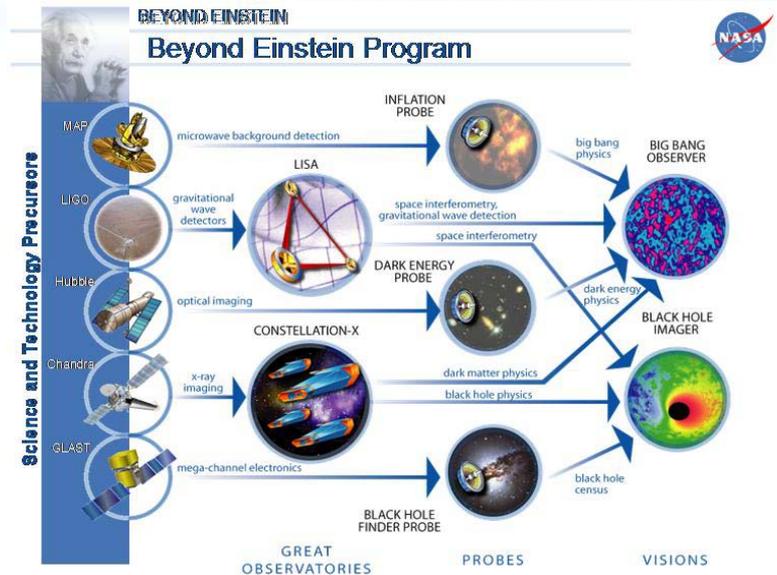
## ●LISAの状況

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

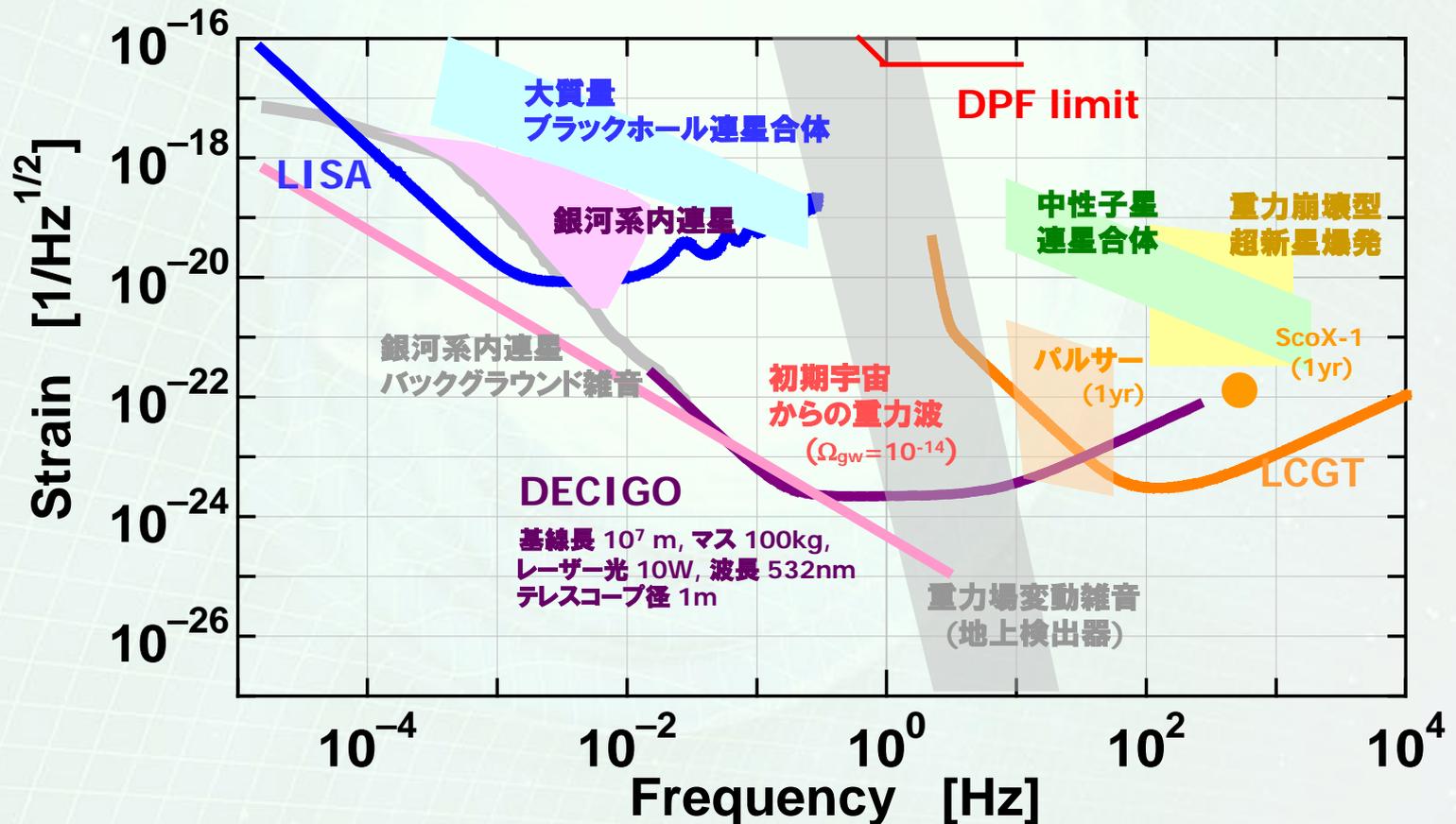
地上干渉計 : 10Hz - 1kHz

→ 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

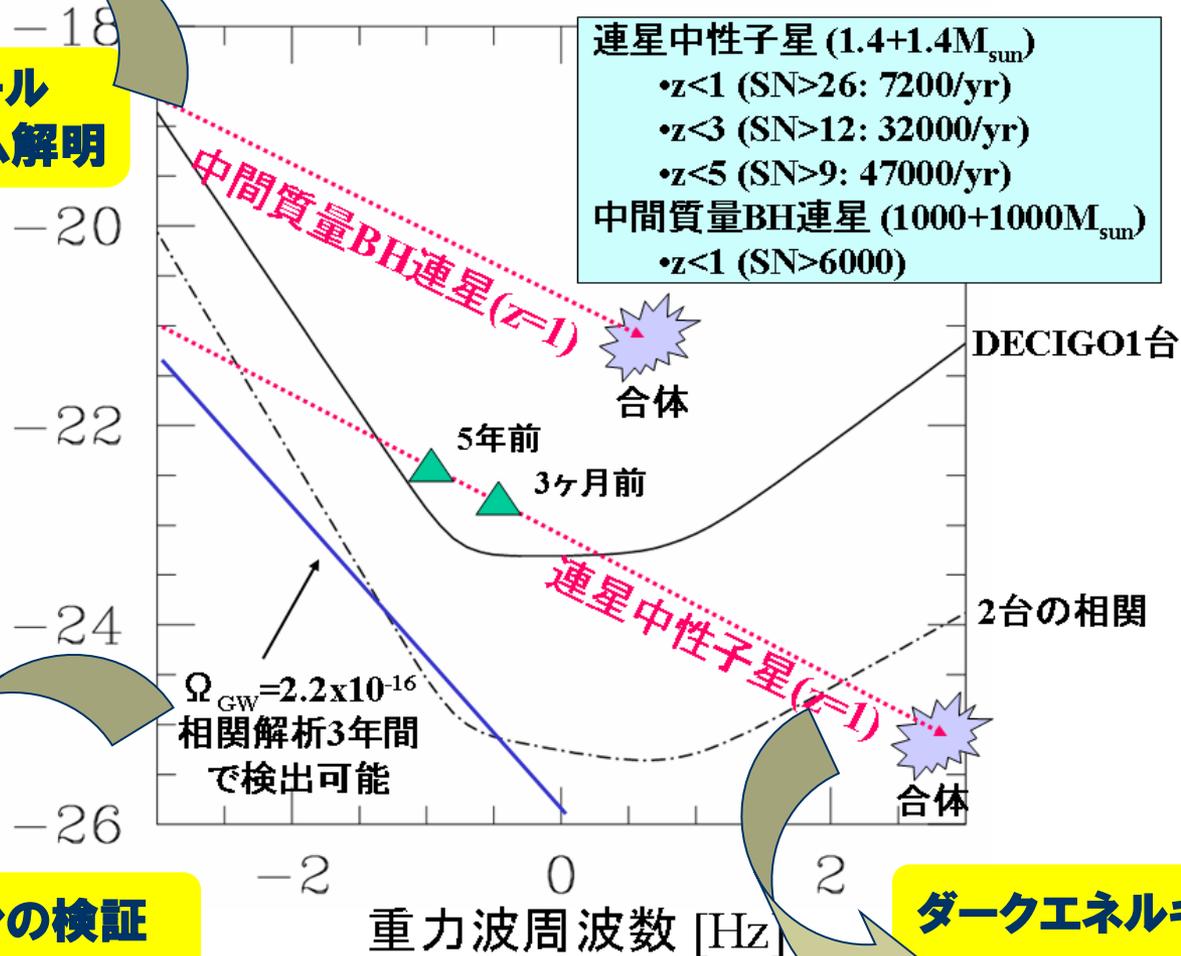


# DECIGOの狙う重力波源とサイエンス

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

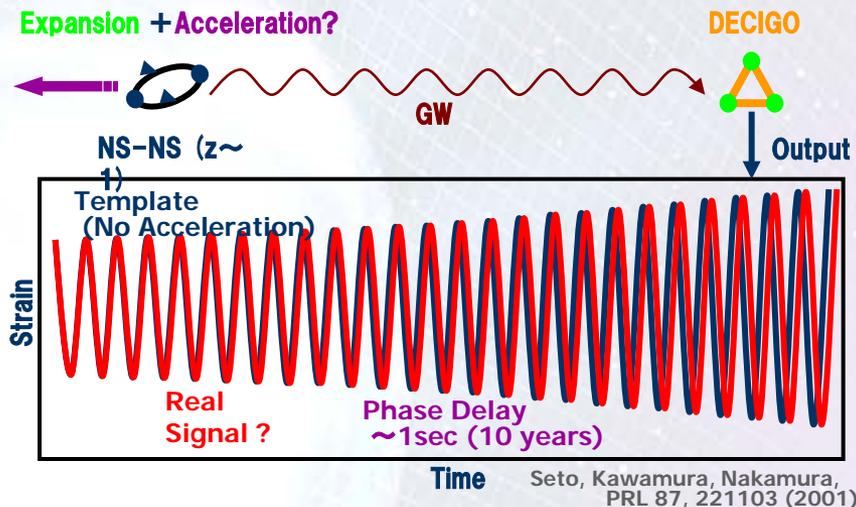
$\Delta\Omega_m, \Delta\Omega_w, \Delta w \approx 1\%$  で決定

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  $\sim 10$ arcmin (1台)

at  $z=1$   $\sim 10$ arcsec (3台)



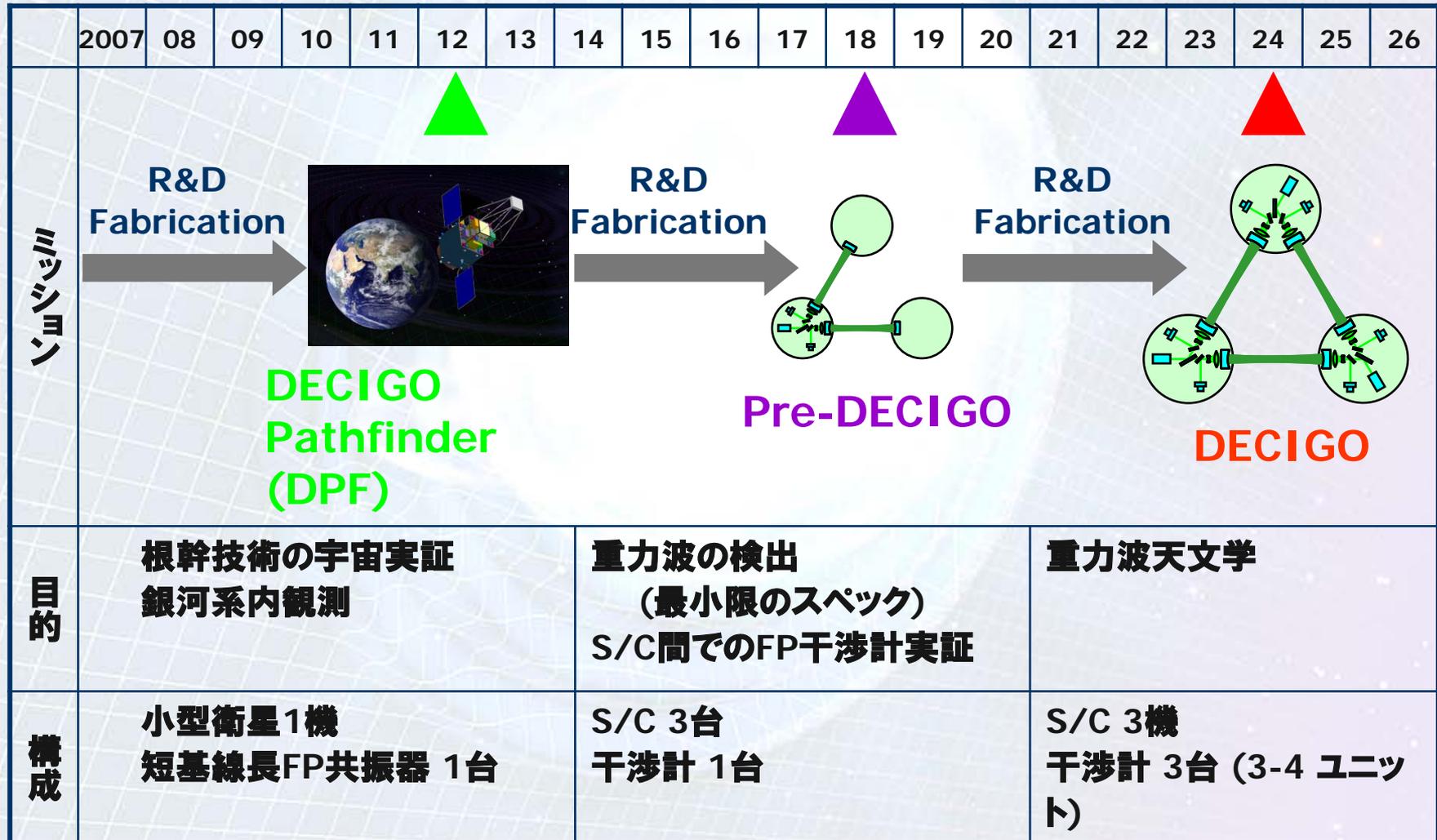
## 標準光源としての比較

高橋 龍一氏 (2006)

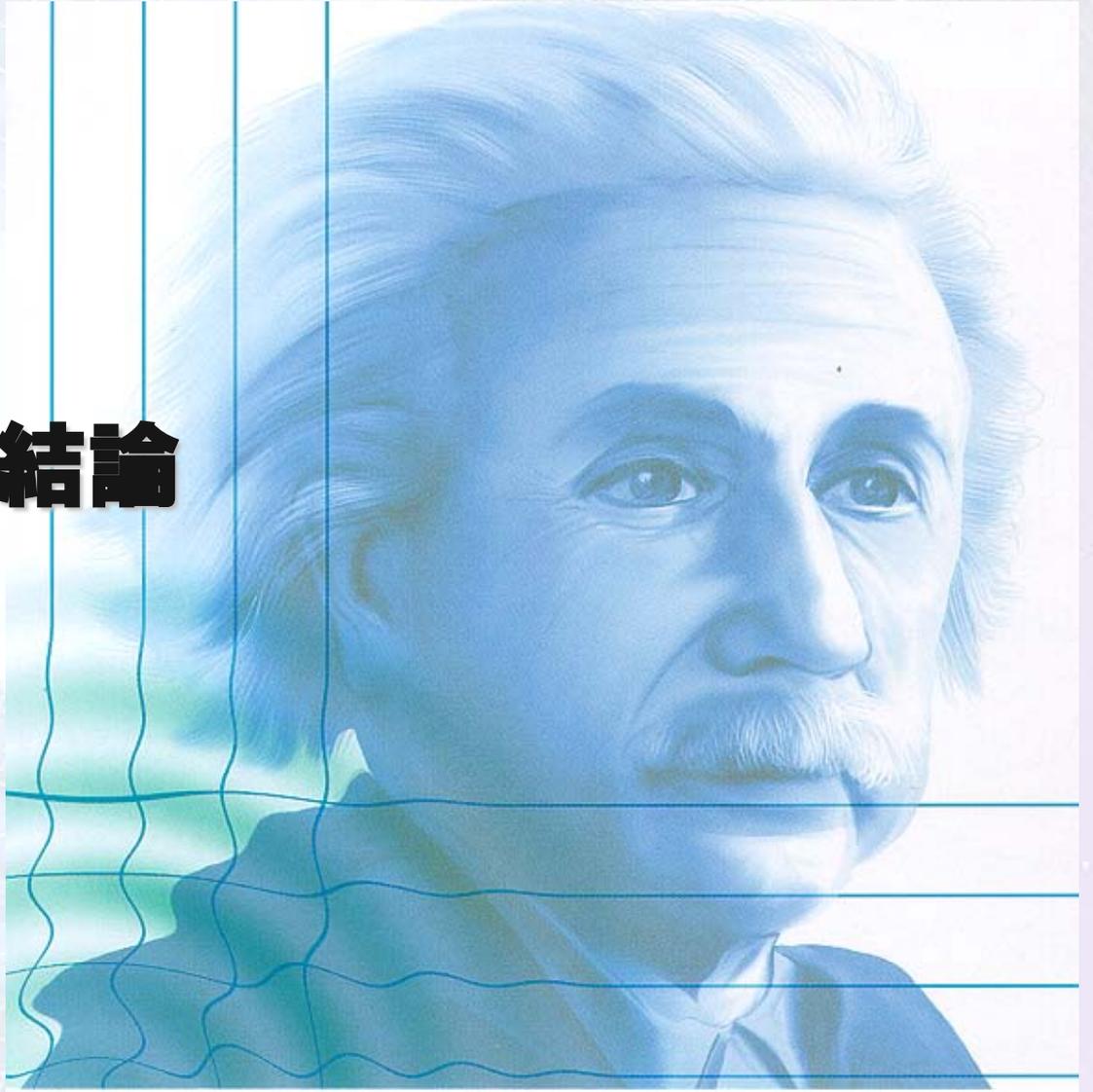
	超新星観測		中性子星連星観測
絶対光度	近傍の観測からの経験則	<	相対論
イベント数	年間2000個 (SNAP)	<	年間 $10^{4-5}$ 個 (DECIGO)
距離の決定精度	約10%	$\approx$	約10% at $z=1$
母銀河の特定	簡単?	>	1台では厳しい 複数台あれば可能?
その他	ダスト減光による不定性	<	物質による吸収・散乱は無視

# 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