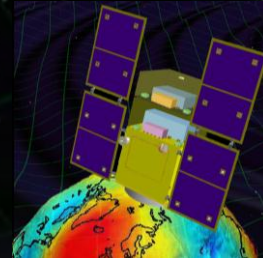
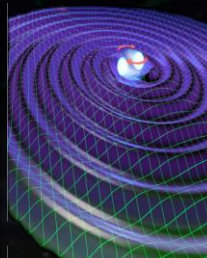
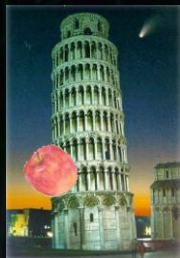


宇宙・高エネルギー物理学特別講義 III

# 重力波天文学

安東 正樹 (国立天文台)





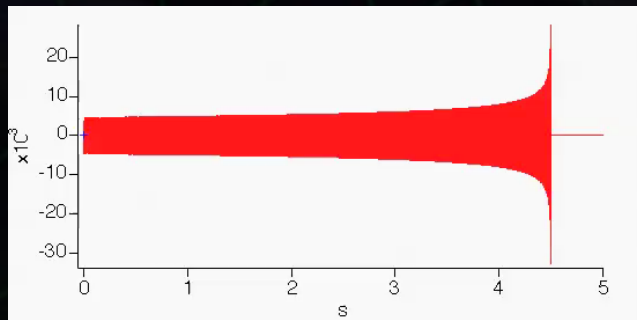
## 第2章：重力波の観測

「耳をすます」



## 第2章：重力波の観測

「耳をすます」



重力波の音 by 神田氏





## 第2章 重力波の検出

イントロダクション

重力波の検出原理

共振型検出器

干渉計型検出器

その他の検出器



## 第2章 重力波の検出

- ⇒ インTRODクシヨN
- 重力波の検出原理
- 共振型検出器
- 干渉計型検出器
- その他の検出器

## 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)

### 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  
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。

重力波検出実験が始まる契機となった。

#### 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.

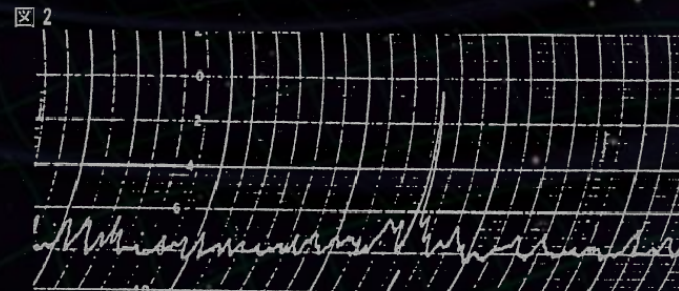
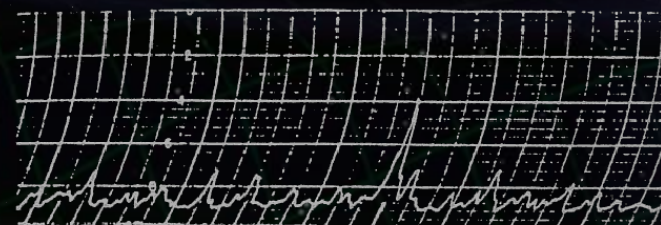


図2  
コインシデンスのタイム・マーク ↑ メリーランド大学の検出器



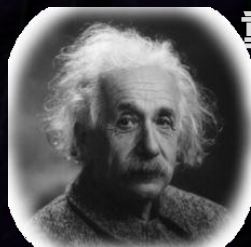
コインシデンスのタイム・マーク ↑ アルゴンヌ研究所の検出器

坪野公夫「時空のさざ波」より



# 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)

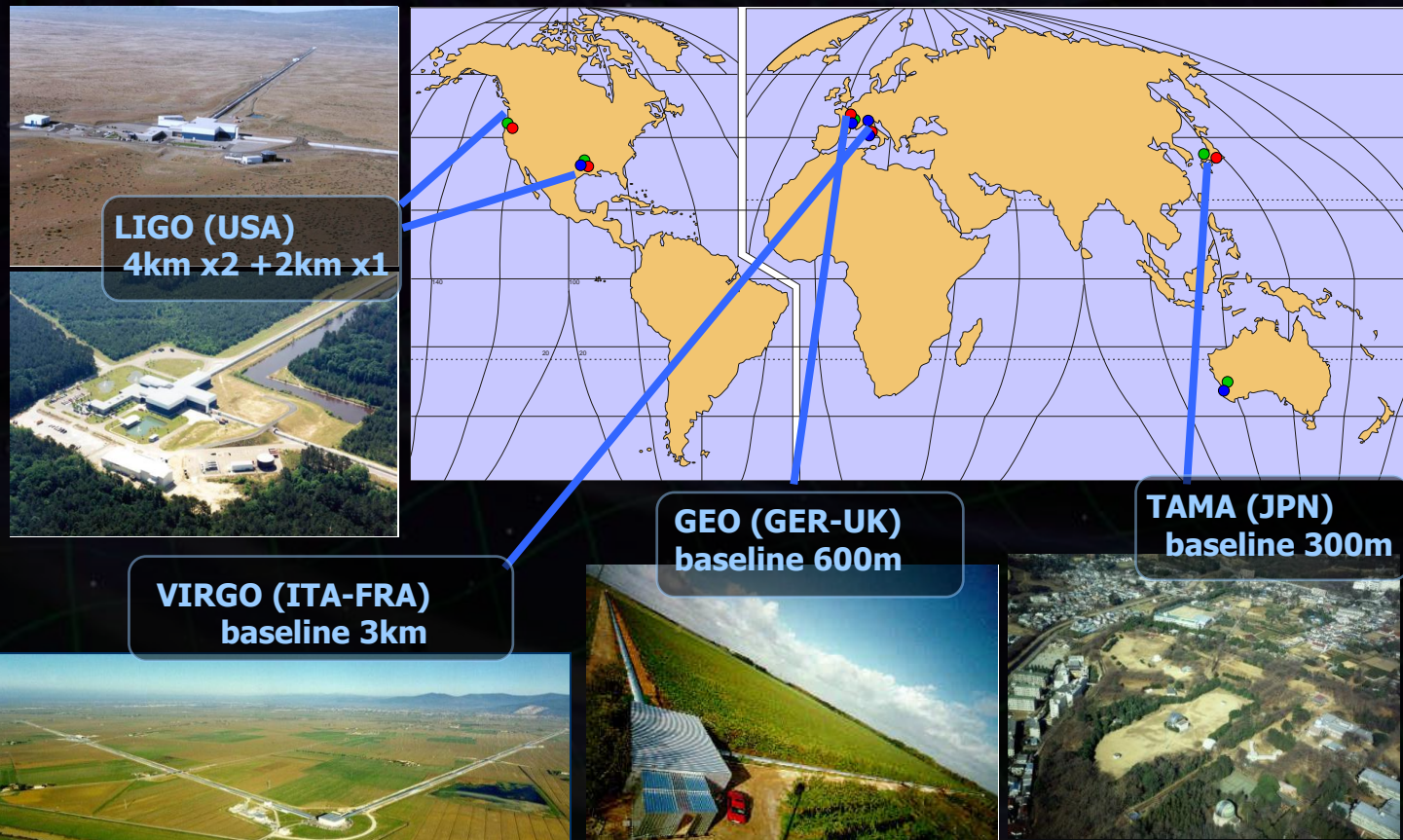




# 大型レーザー干渉計型重力波望遠鏡

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





# 第2世代 重力波望遠鏡

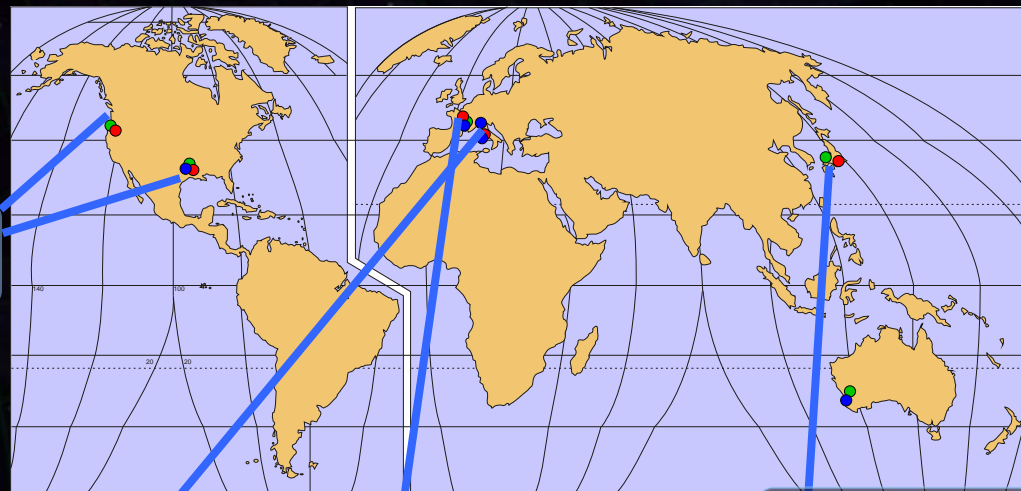
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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

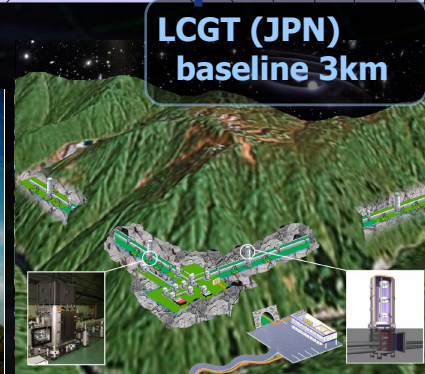
indigo



Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



LCGT (JPN)  
baseline 3km



## 第2章 重力波の検出

イントロダクション

⇒ 重力波の検出原理

共振型検出器

干渉計型検出器

その他の検出器

重力波

•重力波の効果

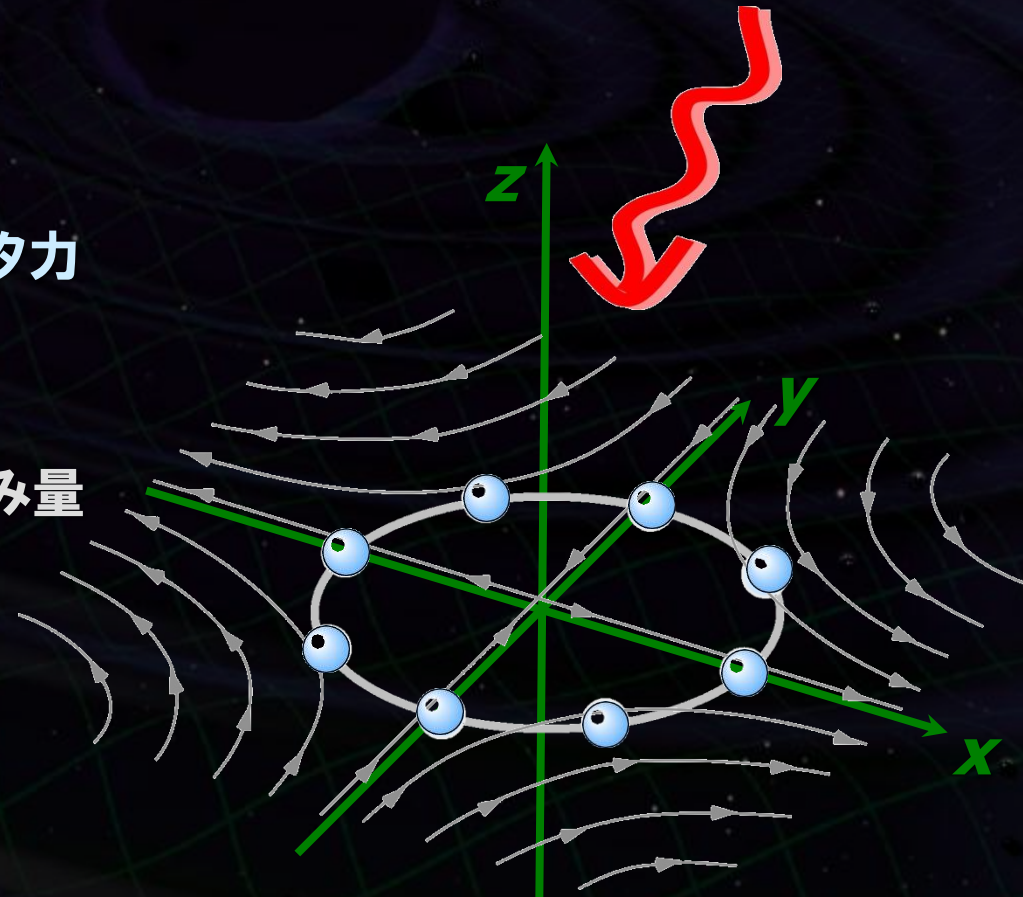
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

•重力波の振幅  $h$  : 無次元の歪み量

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

$\delta L$  : 距離変動

$L$  : 2点間の距離



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

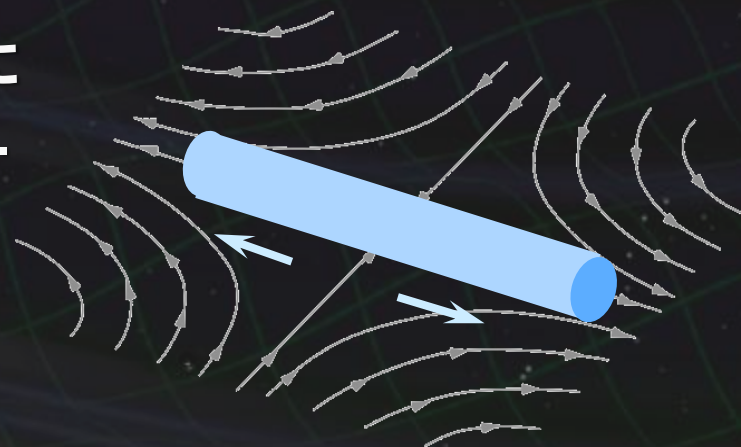
重力波が到来しても同じ座標に留まろうとする.

- 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.

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



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

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



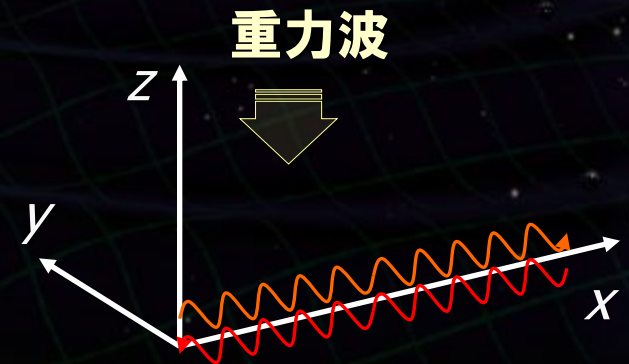
角周波数 $\Omega$ の光

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

重力波による位相変化



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





(重力波の周期) < (光の往復時間) のとき → 信号のキャンセル

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

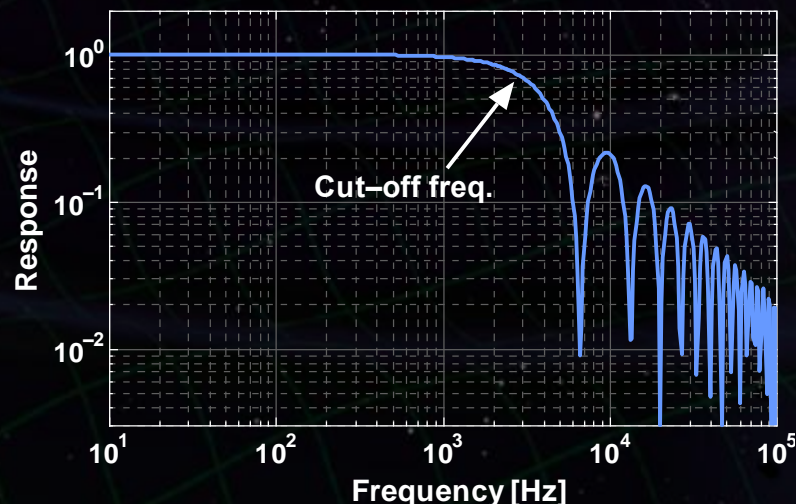
重力波による位相変化

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

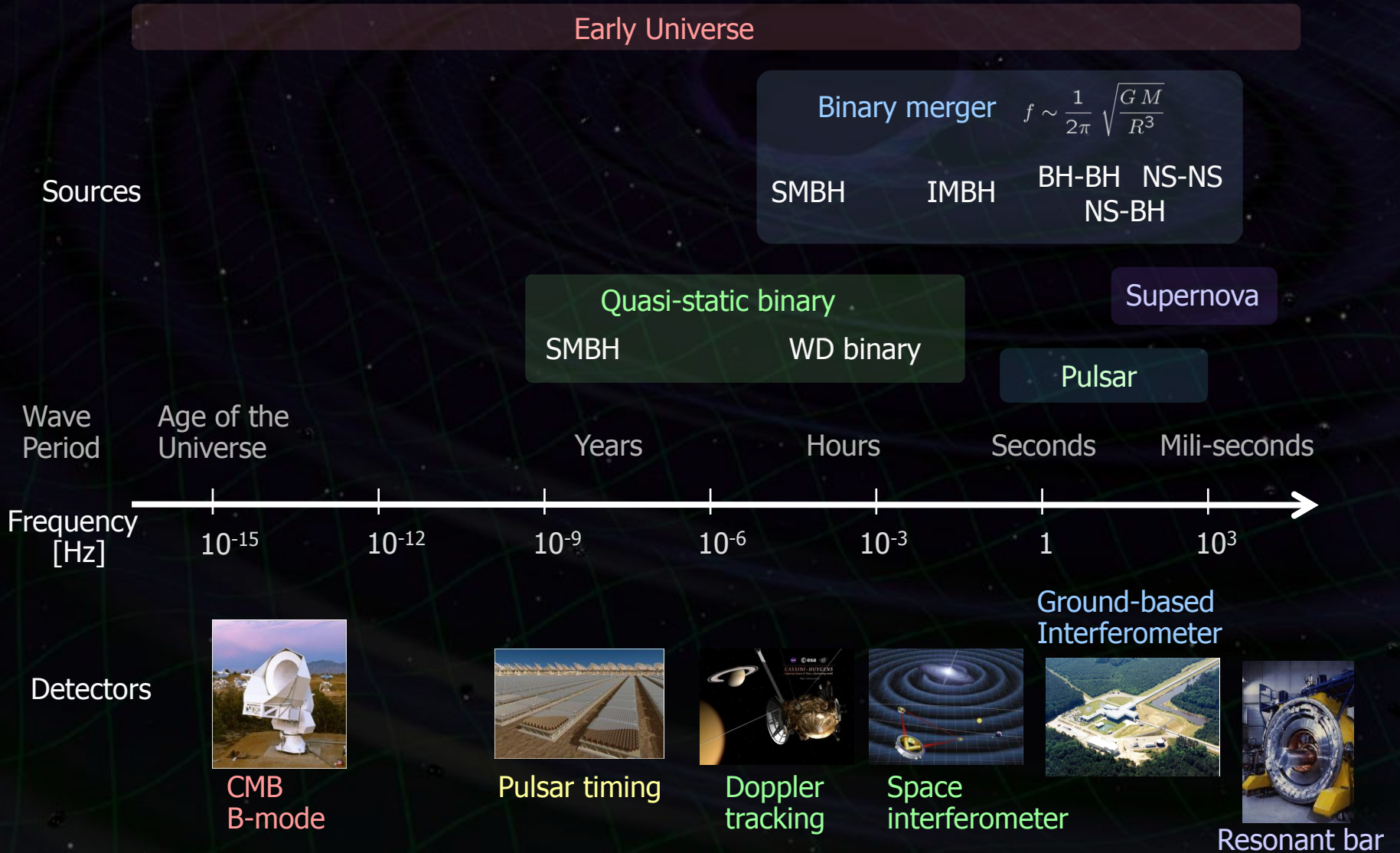


重力波の波長と最適な基線長の関係

$$L = \frac{\lambda_{\text{GW}}}{4} \rightarrow \text{光の往復の間に重力波が半波長通過}$$

(1kHzの重力波 → 基線長75km)

# 重力波検出器の種類





## 第2章 重力波の検出

イントロダクション

重力波の検出原理

⇒ 共振型検出器

干渉計型検出器

その他の検出器

## 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

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

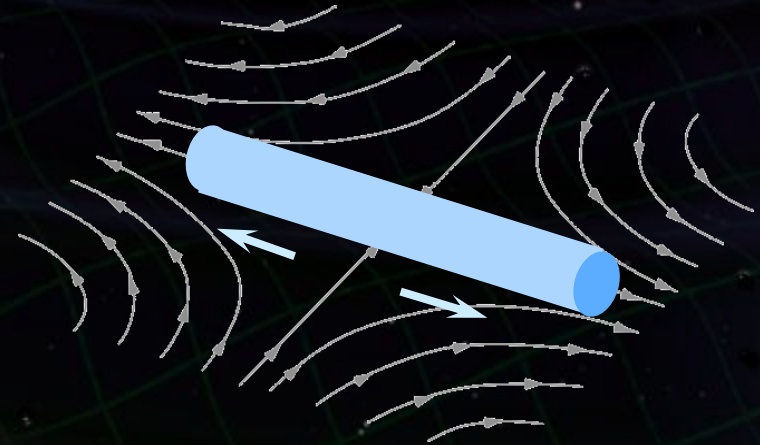
### 調和振動子の運動方程式

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

↑  
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





## 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

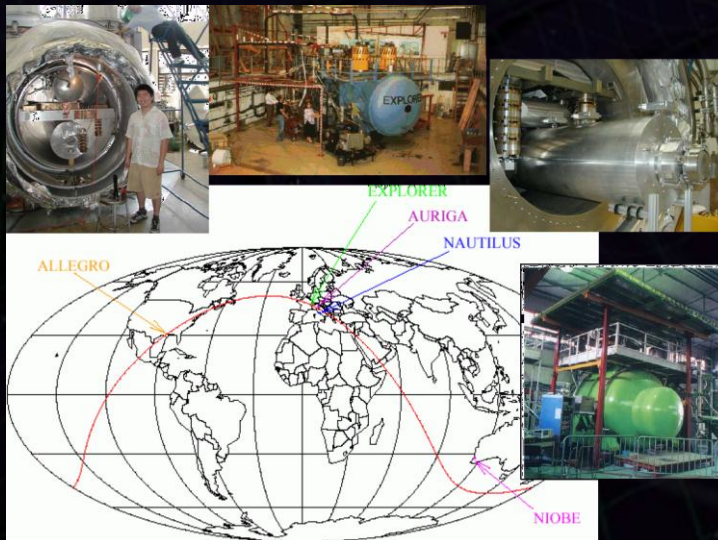
(Frascati National Laboratory, 1995-)

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

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



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

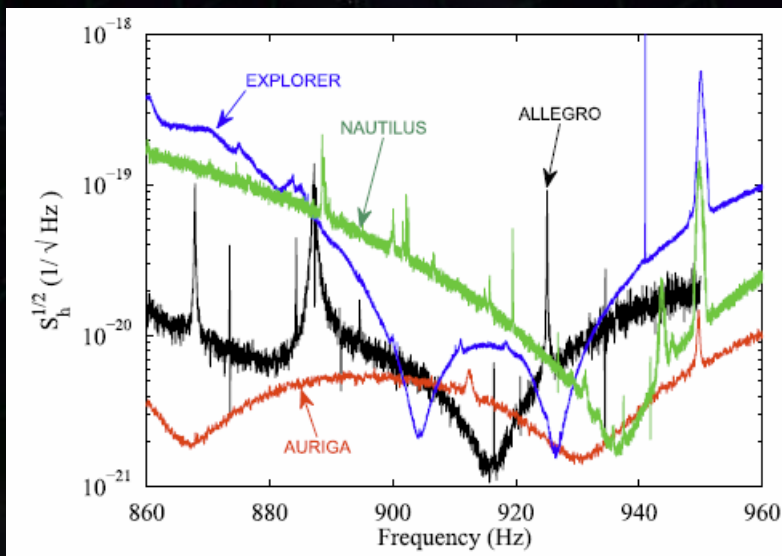
Duty cycle : 57% (4 detectors)  
94% (>3 detectors)

⇒ 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)



## 第2章 重力波の検出

イントロダクション

重力波の検出原理

共振型検出器

⇒ 干渉計型検出器

その他の検出器

# 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

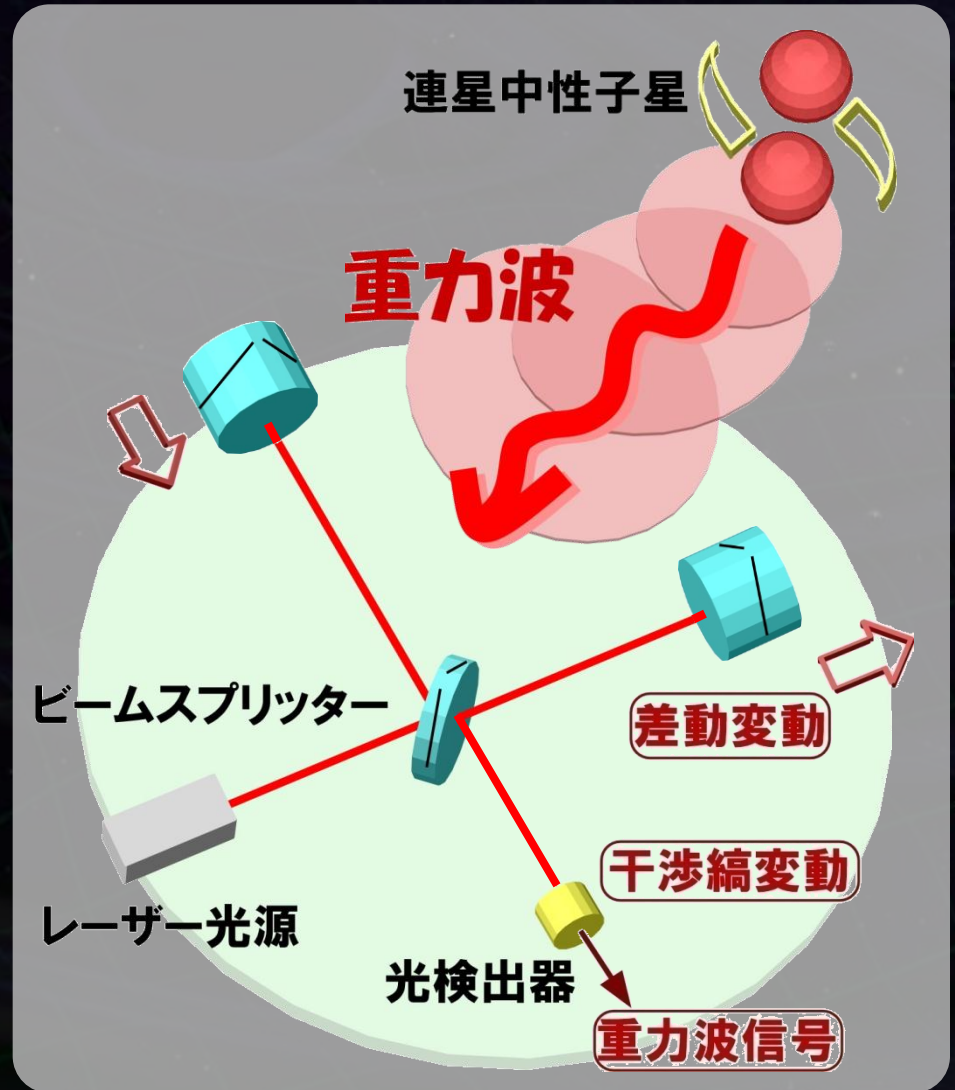


それぞれ、鏡で打ち返し干渉させる  
干渉光を光検出器で観測する

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

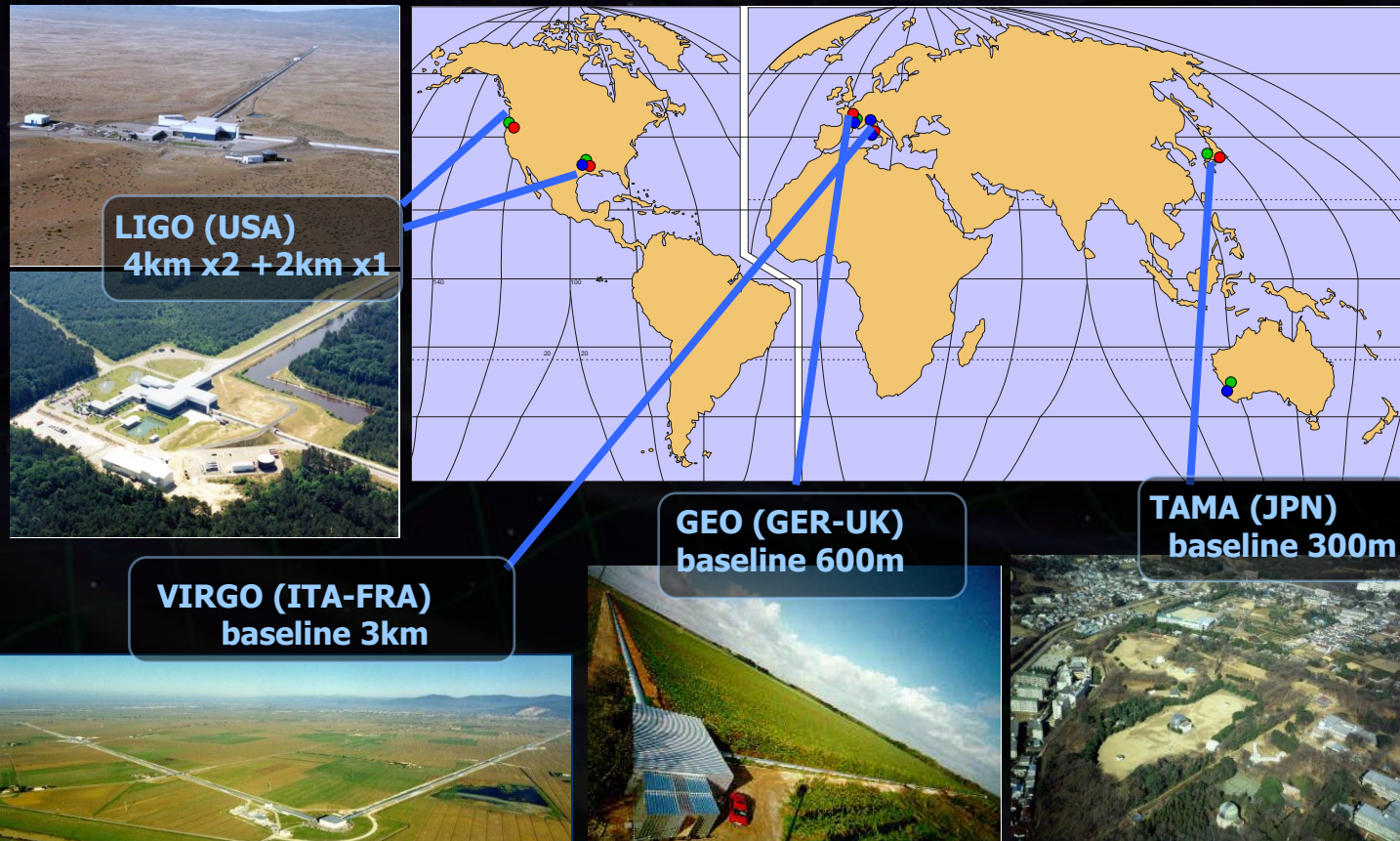




# 大型レーザー干渉計型重力波望遠鏡

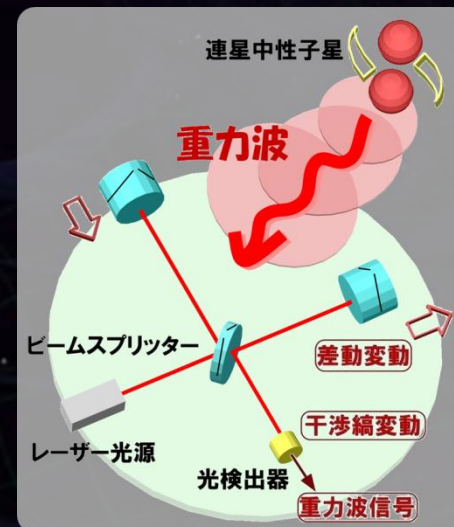
第1世代 大型干渉計 (1999年頃から稼働)

世界で4プロジェクト 6台 → 国際観測ネットワーク



## • 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.



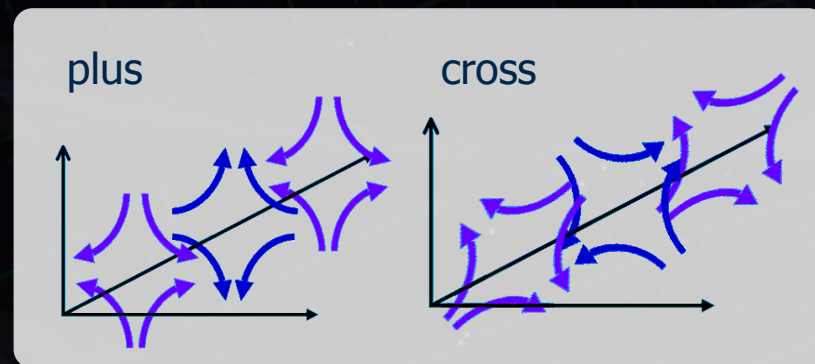
## • 入射重力波の偏波

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

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

$h_+$  : Plus mode

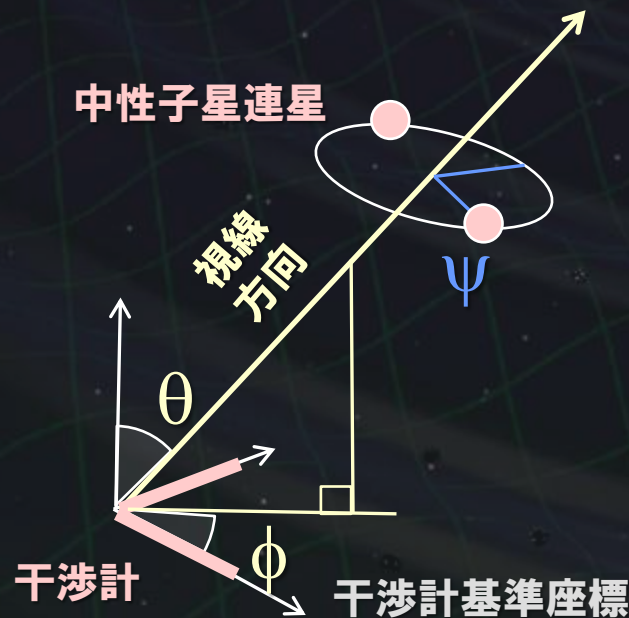
$h_\times$  : Cross mode





- ・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

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

$\theta, \phi$  : 天球上の位置

$\psi$  : 偏極角 (x軸の相対角)

# 干渉計の指向性

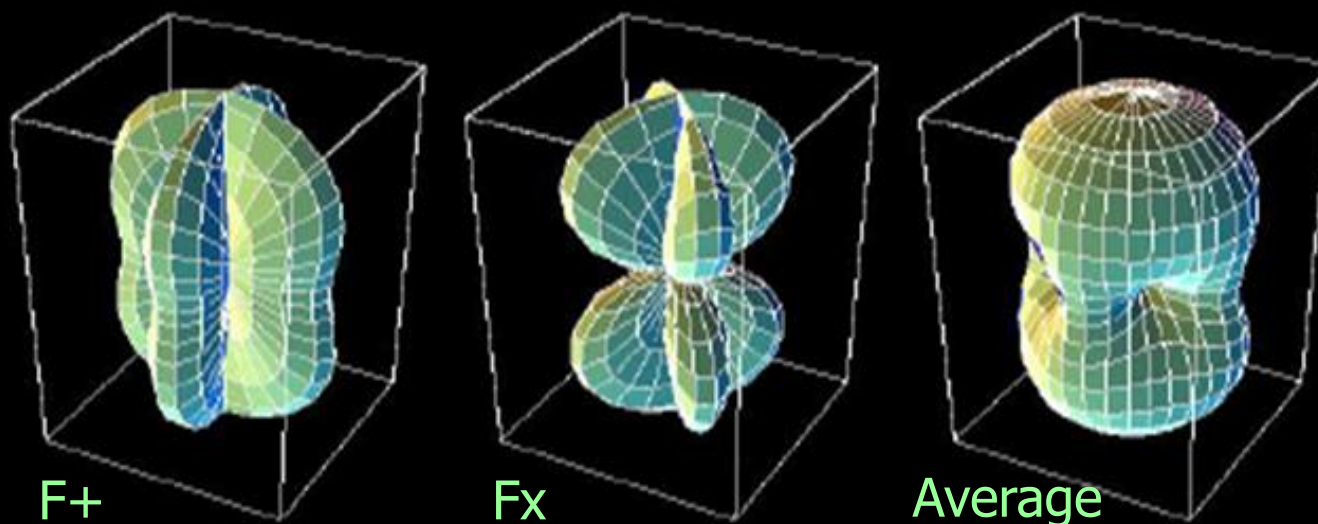
- 干渉計型重力波検出器: 指向性・偏波依存性がある。

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

## 干渉計のアンテナパターン

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

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





## 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

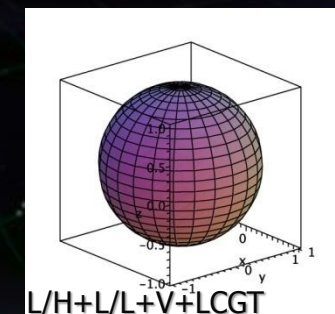
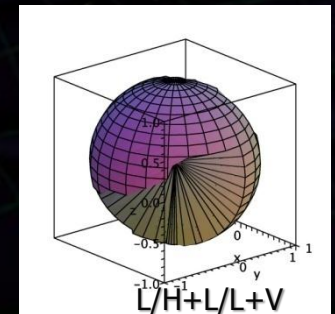
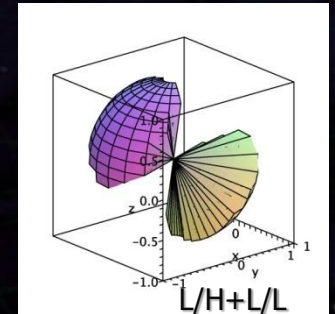
### 実際上の意義

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

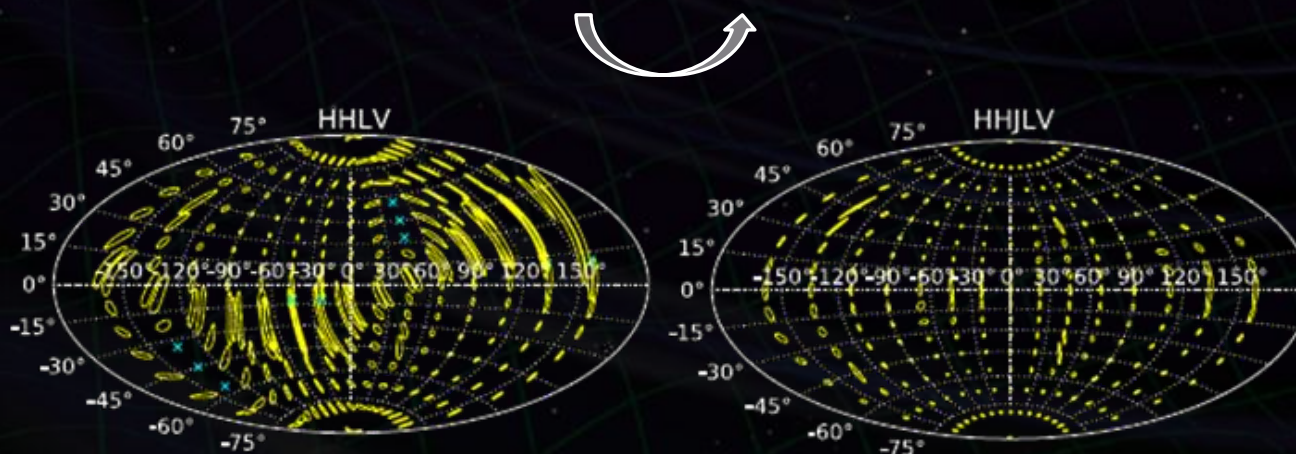


## Angular resolution for the source

By H. Tagoshi

	LHV	LHVJ	LHVA	LHVJA
average of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	34.4	7.26	4.20	2.78
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	10.8	3.54	2.20	1.46

H: LIGO--Hanford  
 L: LIGO--Livingston  
 V: Virgo, J: KAGRA  
 A: LIGO--Australia



S.Fairhurst  
 CQG 28(2011) 105021

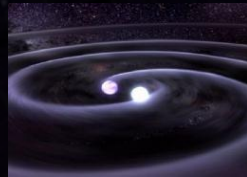
Adding KAGRA to (aLIGO + adv. VIRGO) network  
 → Factor  $\sim 3-4$  improvement in sky area



# 重力波望遠鏡の高感度化

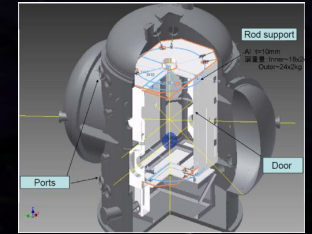
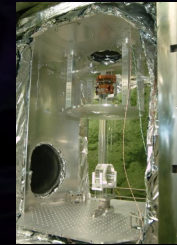
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



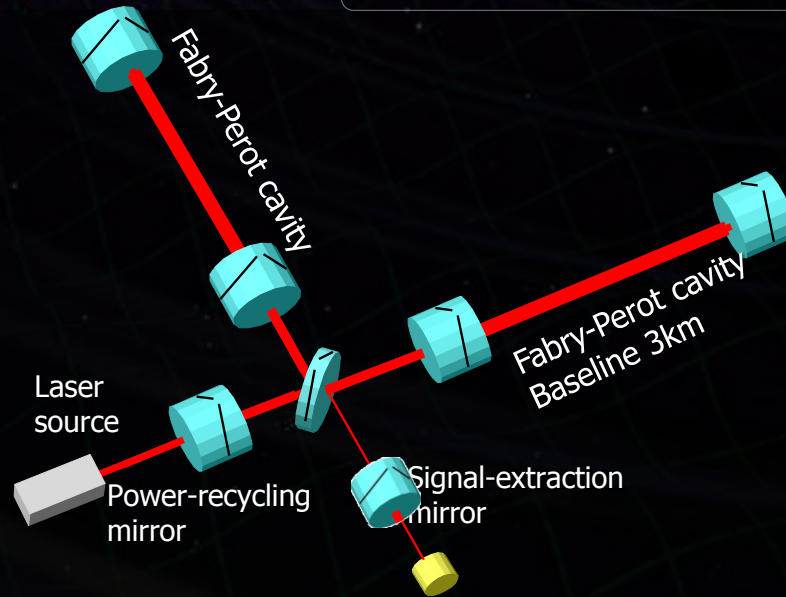
## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



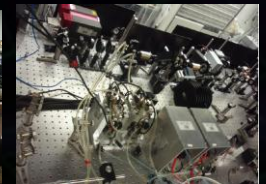
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



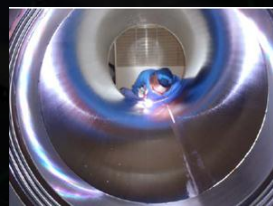
## ・光の量子雑音

大型干渉計  
干渉計方式の工夫  
高出力レーザー光源  
高性能鏡



## ・真空システム

光路長の揺らぎ  
音響雑音などの低減

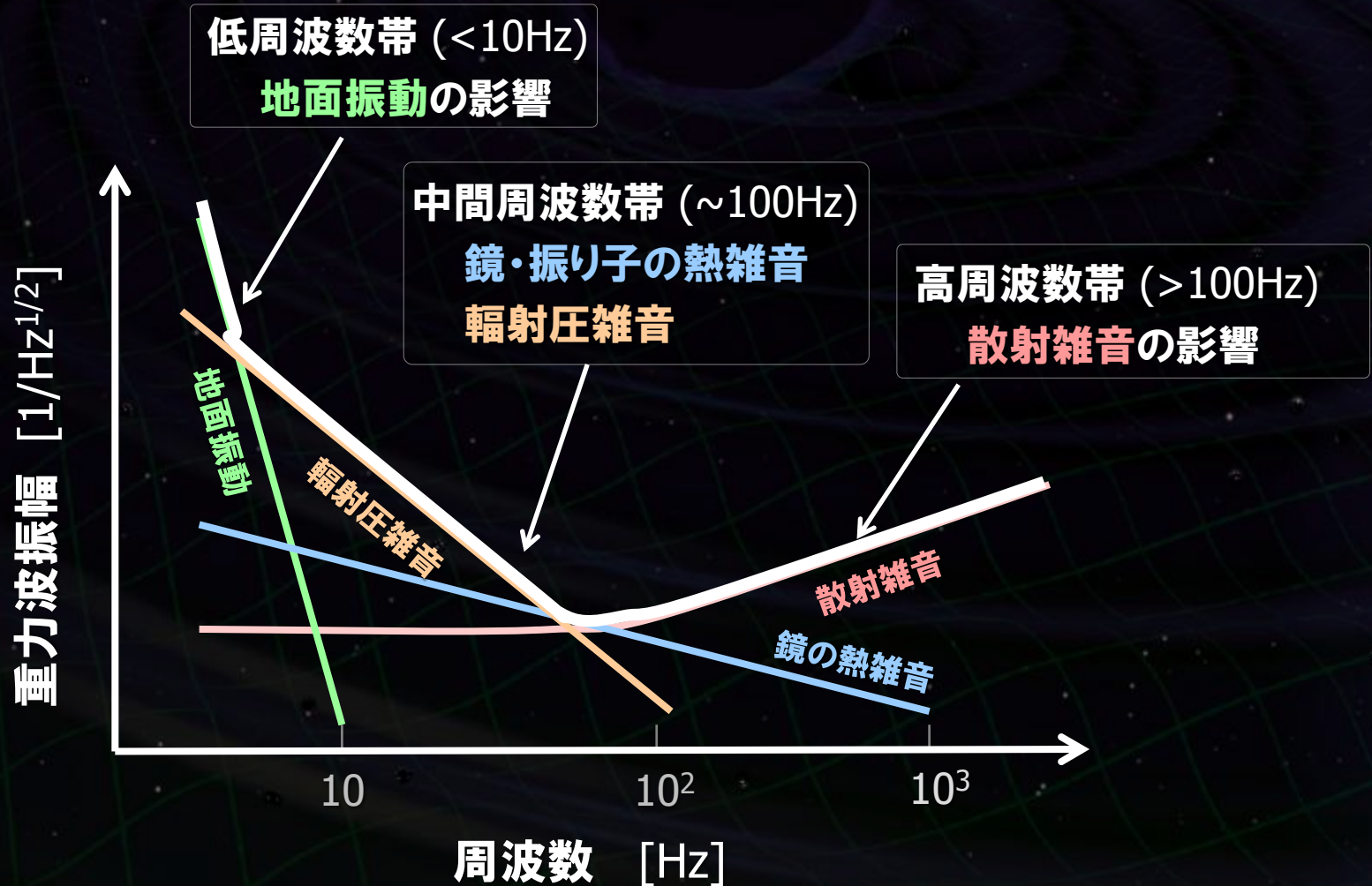


## ・長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系  
環境モニタ, データ保管・分配



# 重力波検出器の感度





## ・光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音

- **散射雑音** (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- **輻射圧雑音** (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[  $P$  : 干渉計入射光パワー ]

**標準量子限界** (Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} \propto \frac{1}{\sqrt{M} L^2} \left[ \begin{array}{l} M : \text{鏡の質量} \\ L : \text{基線長} \end{array} \right]$$



長い干渉計基線長  
大質量鏡

LCGT : 大型・大光量干渉計

基線長 3km, 鏡質量 22kg, 干渉計内光パワー ~800kW

Fundamental sensitivity limitation  
in interferometric detectors

Shot noise

Quantum fluctuation in phase

$$\delta h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

Radiation pressure noise

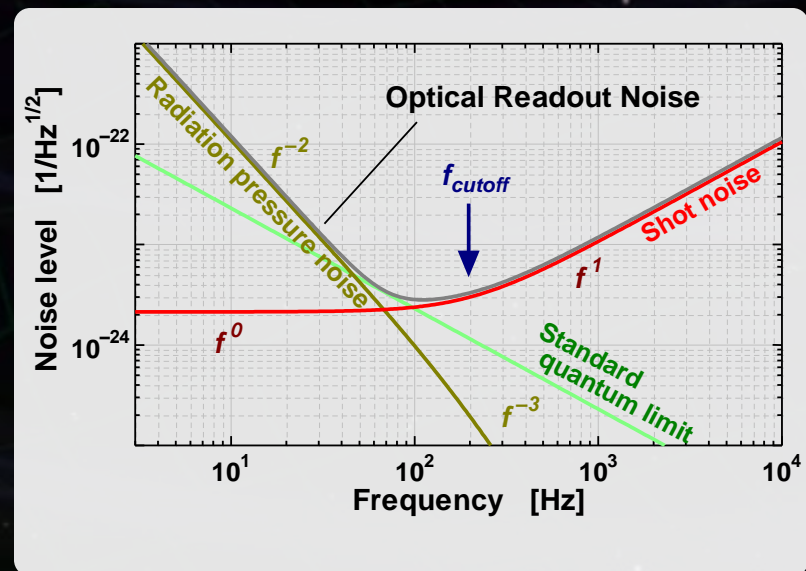
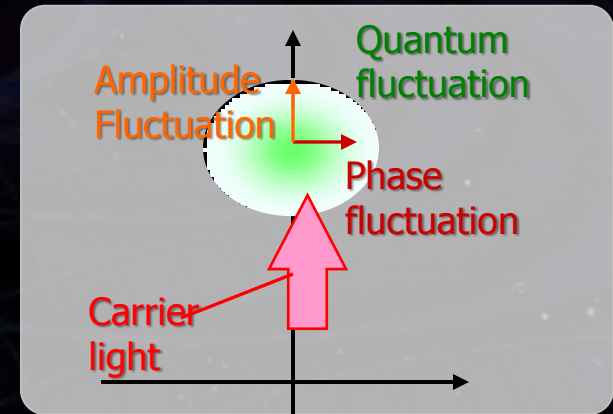
Quantum fluctuation in amplitude

$$\delta h_{\text{rad}} \propto \sqrt{P}$$



Standard Quantum limit

$$h_{\text{SQL}} = \frac{1}{2\pi L f} \sqrt{\frac{8\hbar}{m}}$$





# 干渉計方式の比較

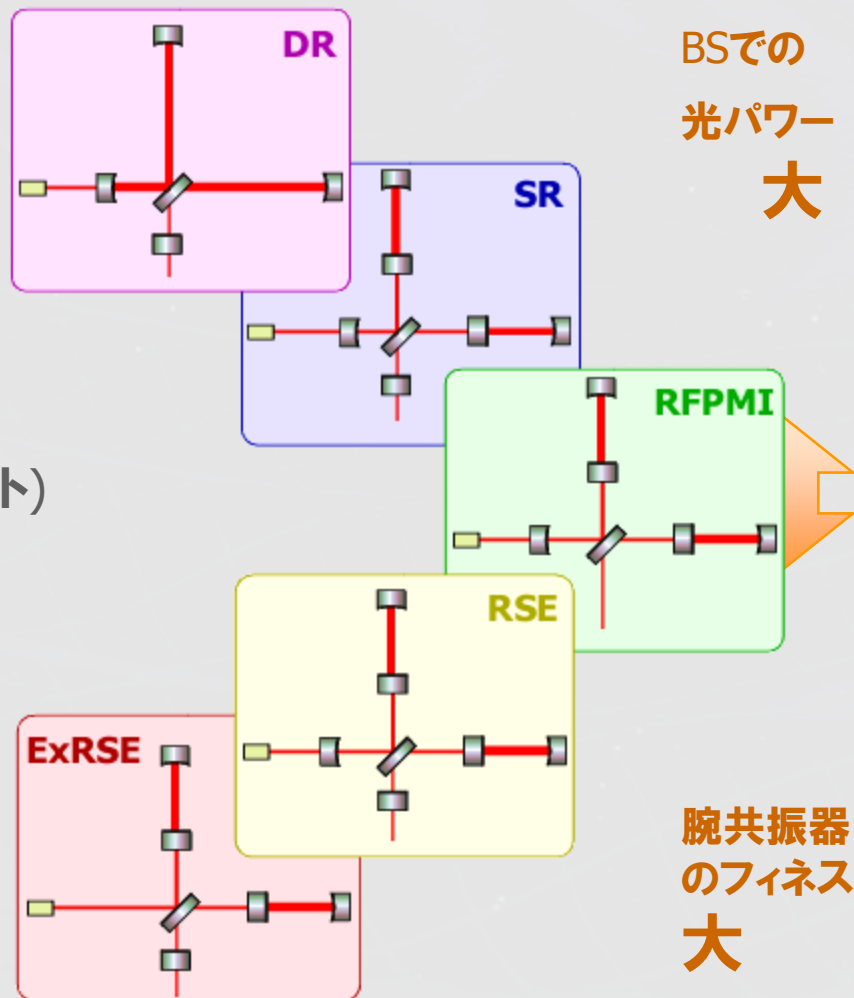
原理的には、どの方式でも  
同じ光パワーと信号帯域  
を実現する事ができる

光パワー：腕共振器とPRM  
信号帯域：腕共振器とSRM

実際上の問題を考慮して選択される  
光のロス（鏡のロス、有限のコントラスト）  
制御の容易さ（制御すべき自由度）

計画中の将来の干渉計 (LCGT, Ad. LIGO)  
→ RSE方式が採用される予定

大光量を実現しやすい  
基材のロス(発熱)が問題になりにくい  
狭帯域化が可能

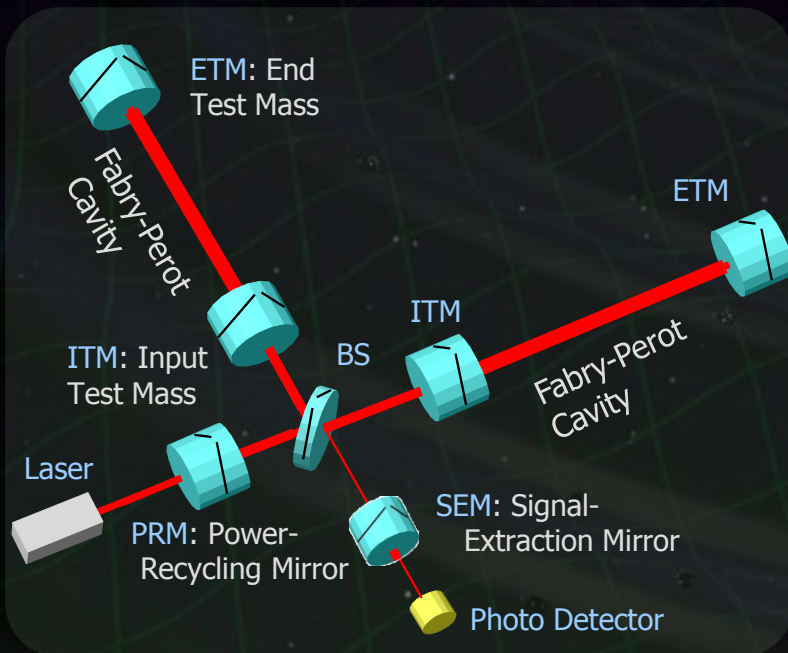


## RSE (Resonant-Sideband Extraction)

J.Mizuno (1993)

- 干渉計内の高レーザー光量の蓄積.
- 観測周波数帯の可変・狭帯域化を可能にする.

⇒ KAGRA, aLIGO, Ad.Virgoで用いられる.



- 腕共振器内に高いレーザーパワーを実現  
Robust against optical losses  
in central interferometer part.  
(Substrate loss, Contrast defect)
- 鏡基材での熱吸収を低減  
→ Critical to cool ITM (Input Test Mass)  
down to cryogenic temperature.
- 観測周波数帯域を調整可能.  
Detector response (frequency band)  
is optimized for target GW signals.



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

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



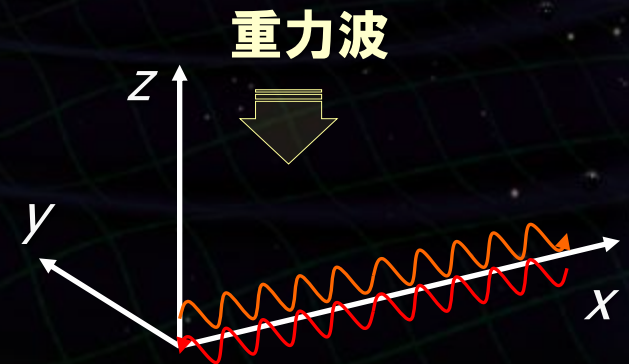
角周波数 $\Omega$ の光

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

重力波による位相変化



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

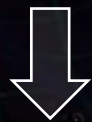


## 重力波の効果 → 重力波による光の位相変調

### 光の位相変調

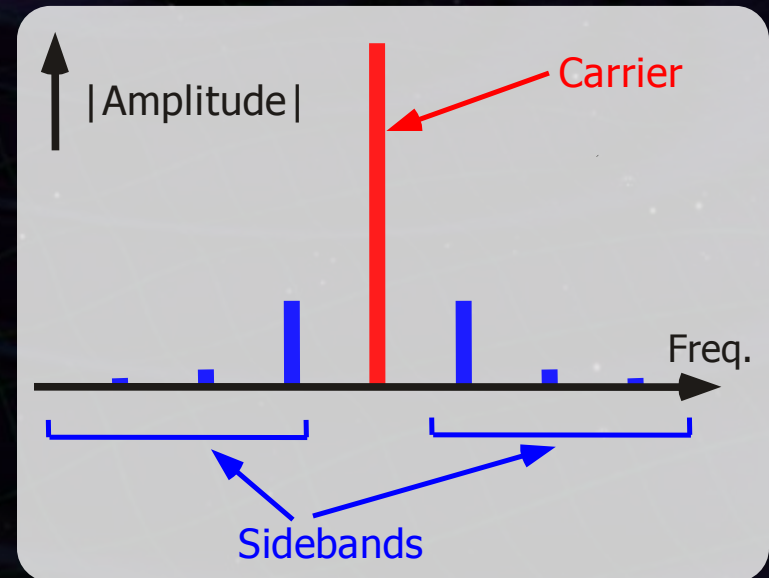
$$E = E_0 e^{i\Omega t} \times e^{im \cos(\omega t)}$$

位相変調成分



ベッセル関数  
を用いて展開

$$E = E_0 e^{i\Omega t} \sum_n \left[ i^n J_n(m) e^{in\omega t} \right]$$



変調周波数だけ離れた成分の和

搬送波(キャリア), 側波帯(サイドバンド)

重力波信号 → サイドバンド (信号サイドバンド) として現れる



## 変調の様子を図解

→ フェイザーダイアグラム

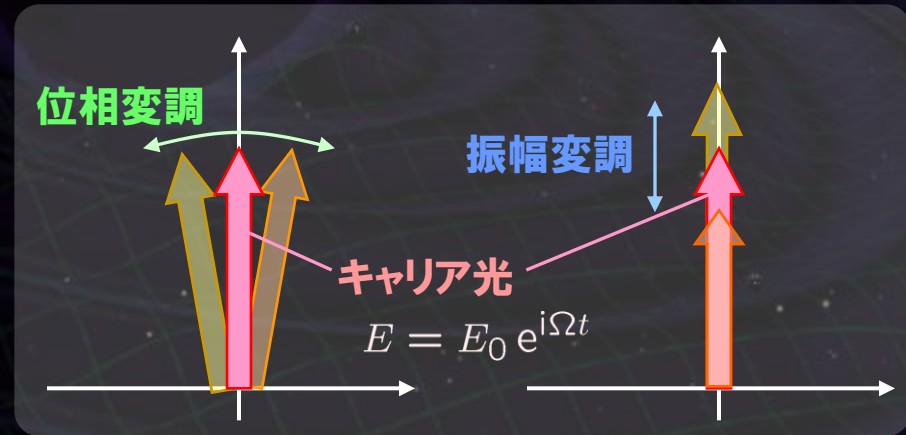
キャリア光を基準に

電場のベクトルを図示

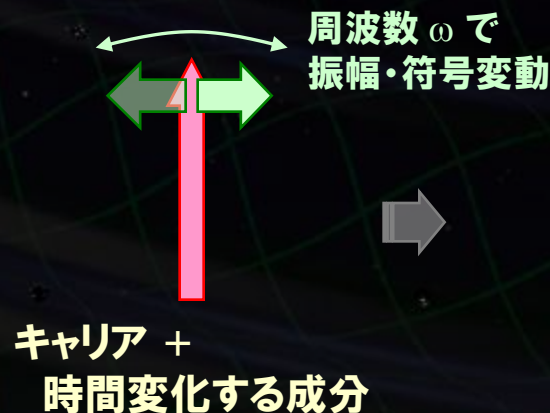
(例)

位相変調：ベクトルの位相が時間変化

振幅変調：ベクトルの振幅が時間変化



## ベクトルの分解 (位相変調)



# 重力波信号の大きさ

## 重力波の効果

→ 重力波による光の位相変調成分  
(信号サイドバンド)

$$E_s = \pm i E_0 e^{i\Omega t} J_1(\Delta\phi) e^{\pm i\omega t}$$



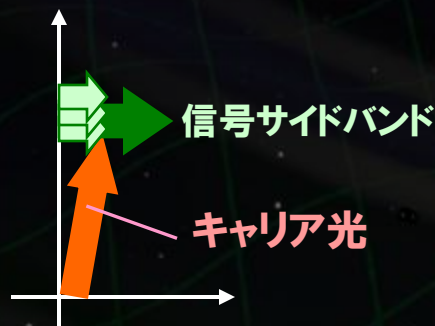
重力波信号を大きくするために...

### 基線長を大きくする

→ 光と重力波が作用する時間の増大

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

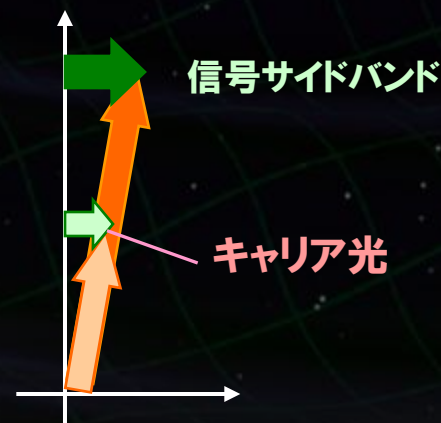
重力波による位相変化



### 光のパワーを大きくする

→ 変調成分の増大

$$E_s = i E_0 e^{i\Omega t} J_1(m) e^{i\omega t}$$





## ファブリ・ペロー共振器

2枚の鏡の間で光を往復させる

(入射光と、往復した光の位相を揃える)

入射光と、共振器内部の電場の振幅比

$$g = t_F \times \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (r_F r_E)^n e^{-in\Phi} \right]$$

$$= \frac{t_F}{1 - r_F r_E e^{-i\Phi}}$$

共振：  $\Phi = 2L\Omega/c = 2\pi \times (\text{integer})$

(入射光と、往復した光の位相を揃える)

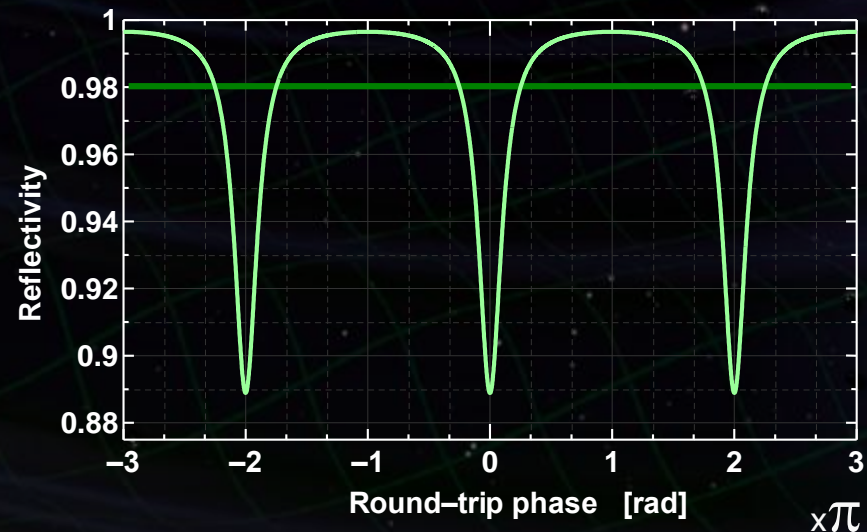
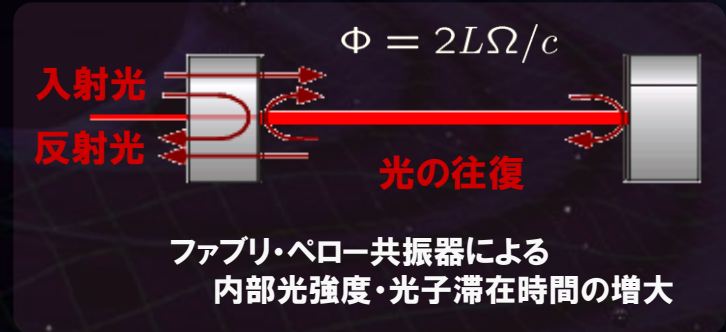


光量の増大

$$G = \frac{t_F^2}{(1 - r_F r_E)^2} \sim 1/t_F^2$$

滞在時間の増大

$$\tau = \frac{2L}{c} \times \frac{\sqrt{r_F r_E}}{(1 - r_F r_E)}$$



## 光の滞在時間の増大

→ 信号のキャンセルも起きる

滞在時間の増大

$$\tau = \frac{2L}{c} \times \frac{\sqrt{r_F r_E}}{(1 - r_F r_E)}$$

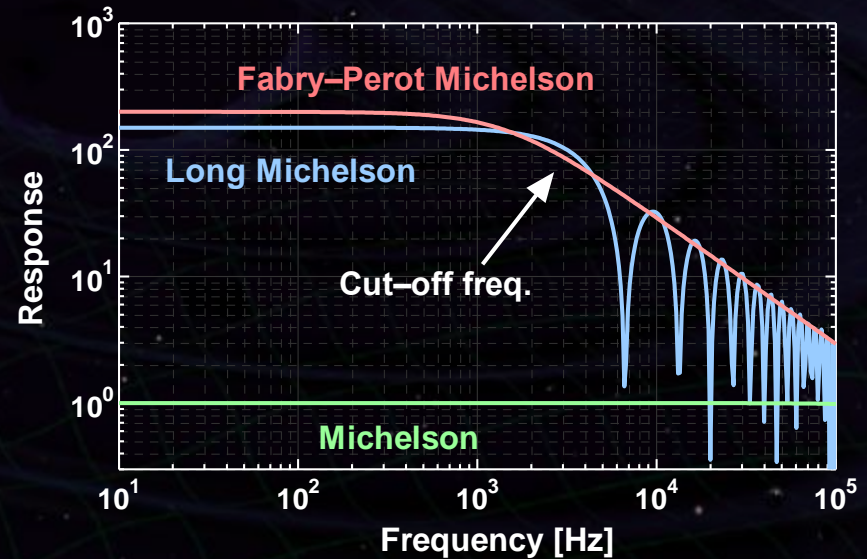
最適基線長が短くなる

信号サイドバンド成分の周波数は、  
キャリア光と  $\omega$  だけ違う

$$g = \frac{1}{1 - r_F r_E e^{-i\Phi}}$$

→ 共振条件から少しずれる  
(共振器内を往復するたびに位相が少しずれる)

⇒ 信号の積算効果が弱まる





・重力波信号は微弱 → 信号成分 (信号サイドバンド) 成分の増大が必要.

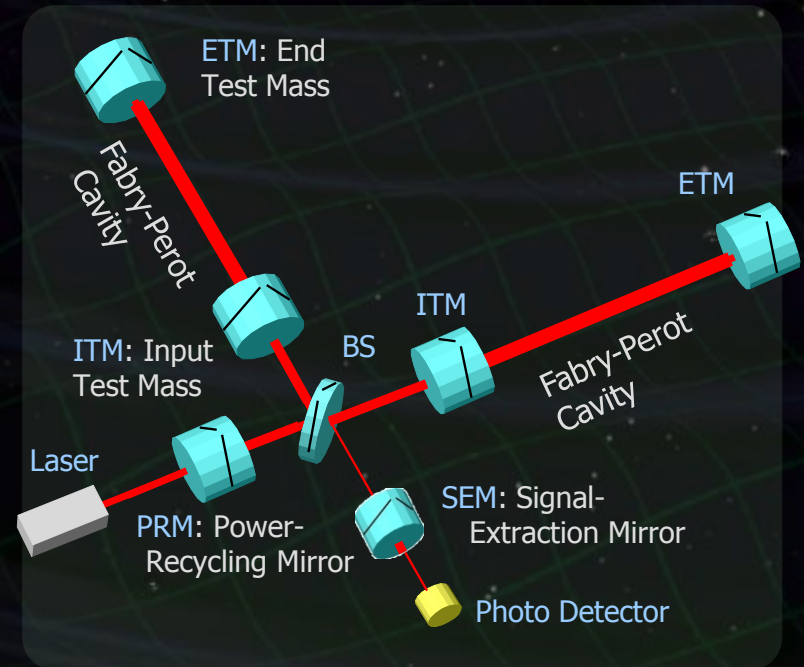
- 腕内の光パワーを増大させる
- 光の滞在時間を増大させる.



腕をFP共振器にし、光を蓄積.  
信号キャンセルのため限界がある.

## RSE (Resonant-Sideband Extraction)

- 干渉計内の高レーザー光量の蓄積.
- 観測周波数帯の可変性・狭帯域化を可能にする.

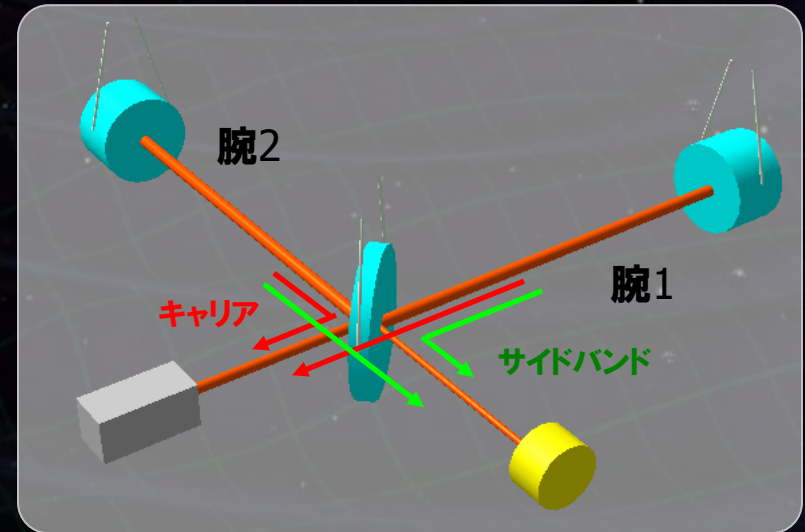
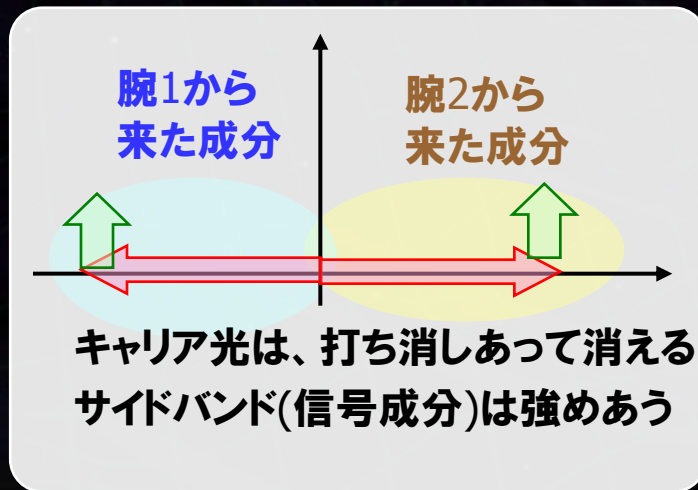


# マイケルソン干渉計の動作点

暗縞 (ダークフリンジ) で動作する場合



両腕からのキャリアの位相差 : 180度



## 光の成分の分離

キャリア → 全て光源方向へ

サイドバンド → 全て光検出器方向へ

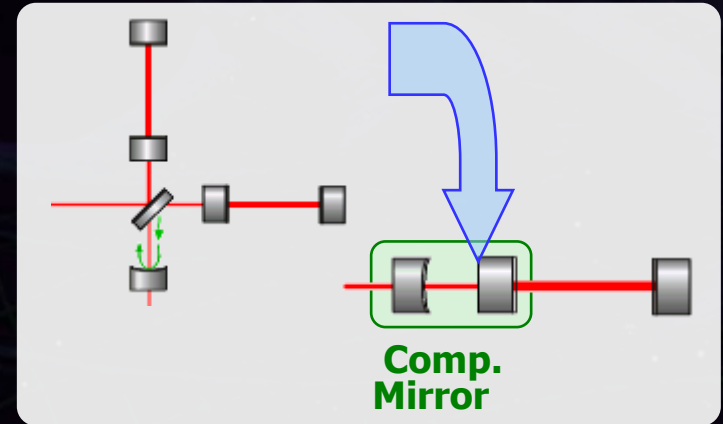


両腕からの信号成分は同等に足される



BSで折り返した3枚鏡構成  
FMとSRMからなるFPを→1枚の合成鏡

$$r_{CM} = -r_F + \frac{t_F^2 r_S e^{-i\phi}}{1 - r_F r_S e^{-i\phi}}$$

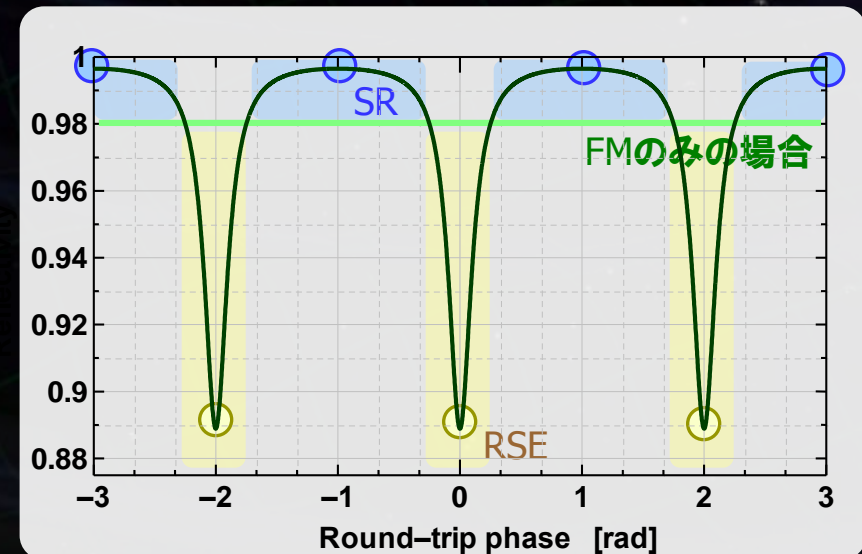


合成鏡の反射率：動作点に依存

**共振** → 反射率小 (透過率大)  
信号滞在時間：減少 ⇨ RSE

**反共振** → 反射率大 (透過率小)  
信号滞在時間：増加 ⇨ SR

(Signal Recycling)



## 観測周波数帯の狭帯域化

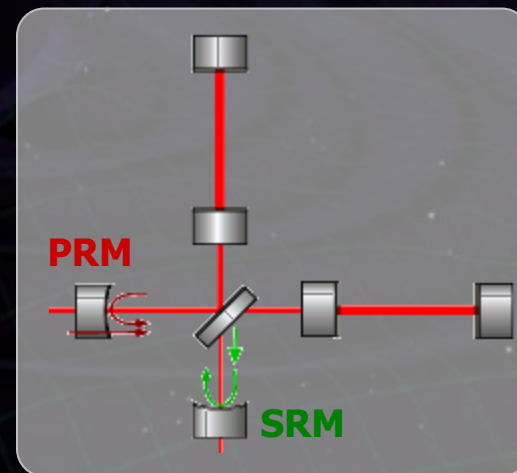
特定の周波数帯に最適化 → 感度の向上

PRC : キャリア (角周波数 $\Omega$ ) に共振

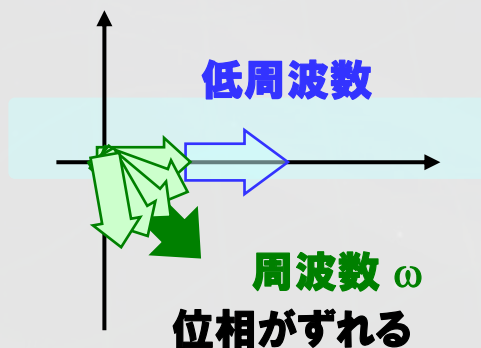
SEC : サイドバンド (角周波数  $\Omega+\omega$ ) に共振

(デチューニング, Detuning)

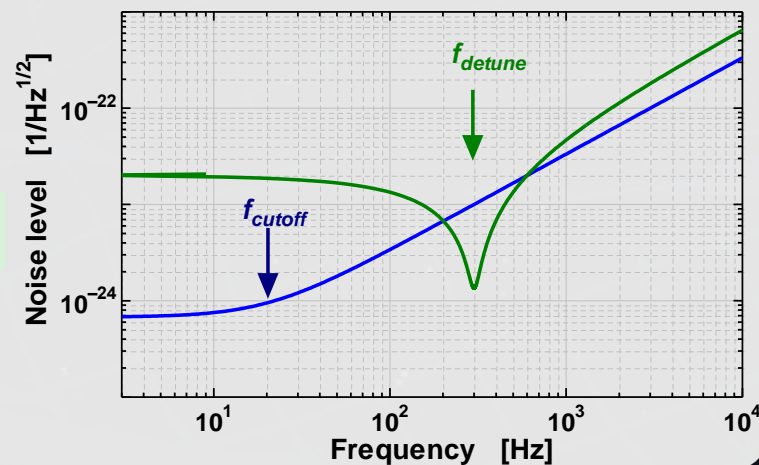
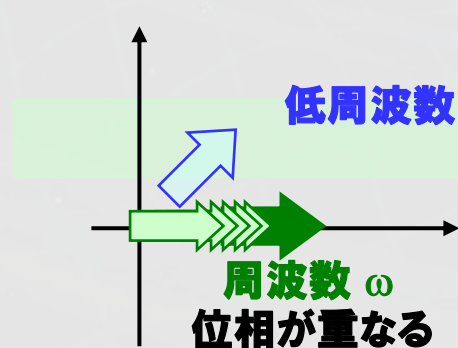
⇒ 周波数  $\omega$  の信号を効率的に積算



### ブロードバンド条件



### デチューン条件





干渉計 → 検出器側で暗縞に干渉  
ほとんど全ての光は光源側に反射される

➡ MI干渉計を一枚の鏡とみなす

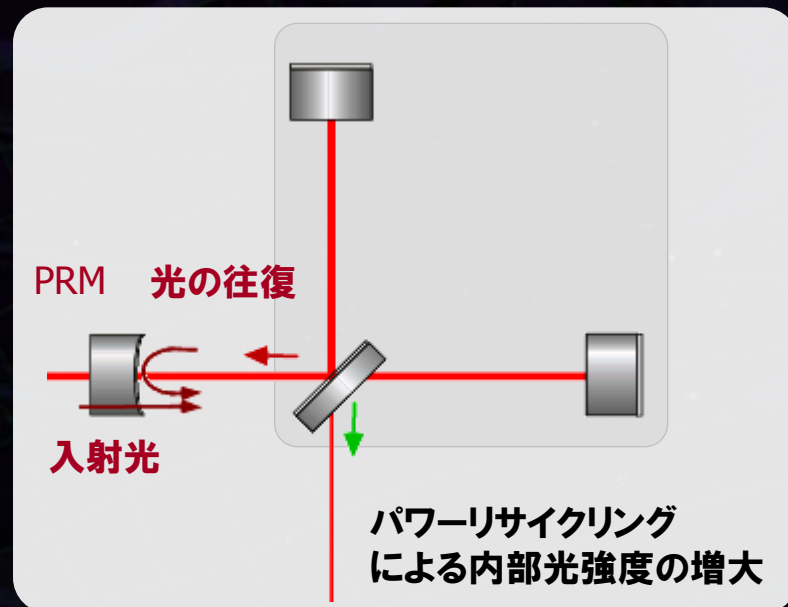
入射光と、干渉計内部の電場の振幅比

$$g = \frac{t_R}{1 - r_R r_{MI} e^{-i\Phi}}$$

共振 :  $\Phi = 2L\Omega/c = 2\pi \times (\text{integer})$   
(入射光と、往復した光の位相を揃える)

干渉計内の光強度の増大

$$G = \frac{t_R^2}{(1 - r_R r_{MI})^2} \sim 1/t_R^2$$



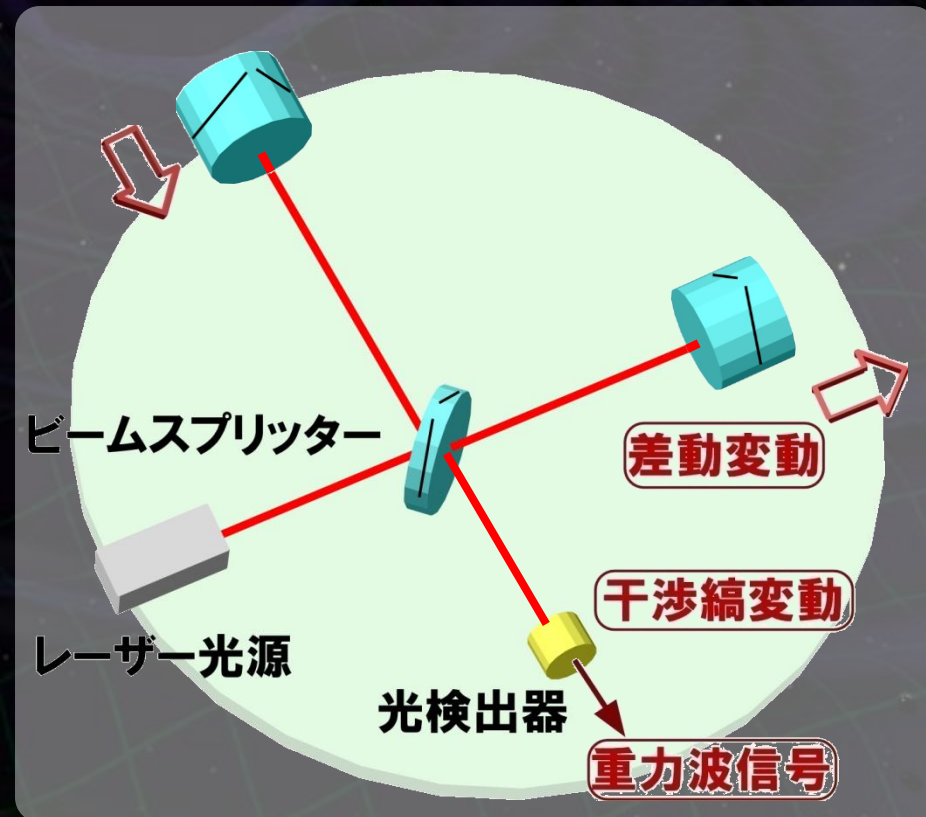
新しく入ってくる  
光と強めあう

干渉計内の  
光パワーが増加

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





## 検出器 (フォトディテクター)

光の平均パワーを検出 (電場の絶対値の2乗に比例)

$$P \propto |E_0 e^{i\Omega t + i\phi}|^2 = |E_0|^2$$

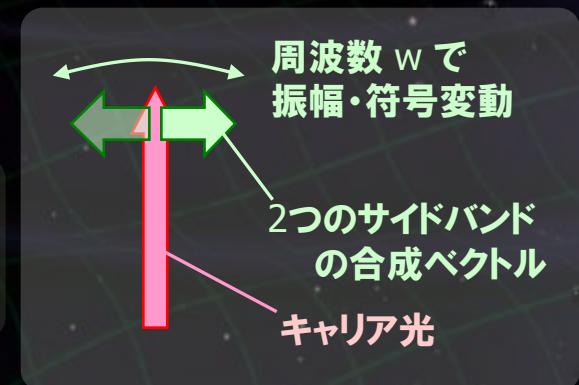
➡ 重力波を含む位相情報は失われる

キャリア + サイドバンド で考えた場合

$$P \propto |E_c + E_s|^2$$

$$= |E_c|^2 + |E_s|^2 + 2|E_c| \cdot |E_s| \cos \theta$$

ベクトルの内積 (干渉項)



位相変調 : キャリアとサイドバンドは直交

➡ サイドバンドに比例した情報は損なわれる

光の位相検出 → 干渉を用いる

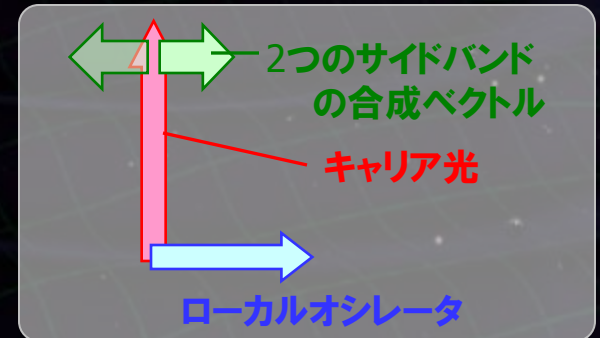
信号成分と同じ向きの電場ベクトルを持った別の光 (局部発振波, ローカルオシレータ) を導入

キャリアと同じ周波数の光 : ホモダイン法

$$P \propto |E_0 e^{i\Omega t + i\phi} + iE_{l0} e^{i\Omega t}|^2$$

$$= (\text{DC}) + 2|E_0| \cdot |E_{l0}| \sin \phi$$

位相の情報

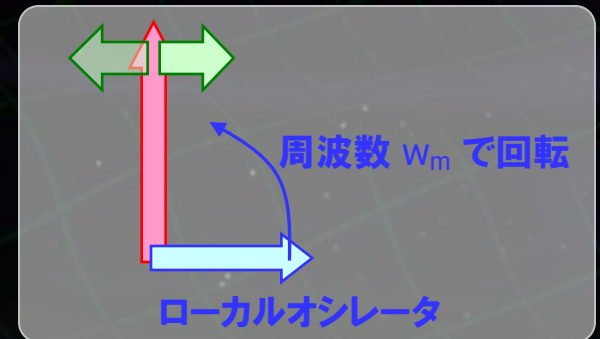


キャリアと別の周波数の光 : ヘテロダイン法

$$P \propto |E_0 e^{i\Omega t + i\phi} + iE_{l0} e^{i(\Omega + \omega_m)t}|^2$$

$$= 2|E_0| \cdot |E_{l0}| \cos \omega_m t \sin \phi + \dots$$

位相の情報





## ホモダイナ法

キャリア光をローカルオシレータとして用いる

### オフセットマイケルソン法

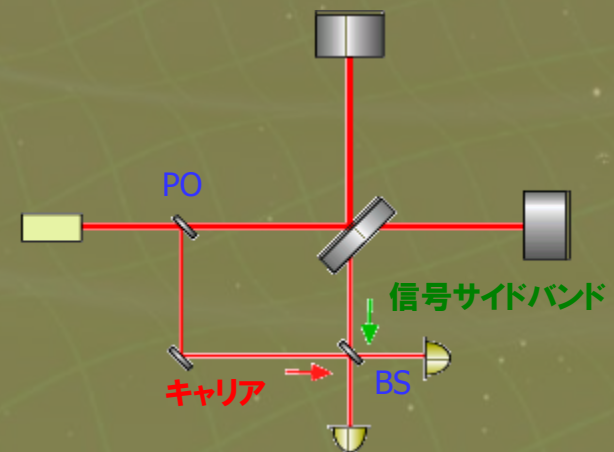
マイケルソン干渉計の動作点を  
ダークフリンジ (暗縞) からずらす



パワーリサイクリングとの共存に問題  
動作点のずれ → 強度雑音など

### 外部変調法 (External mod.)

キャリア光を別経路で導入



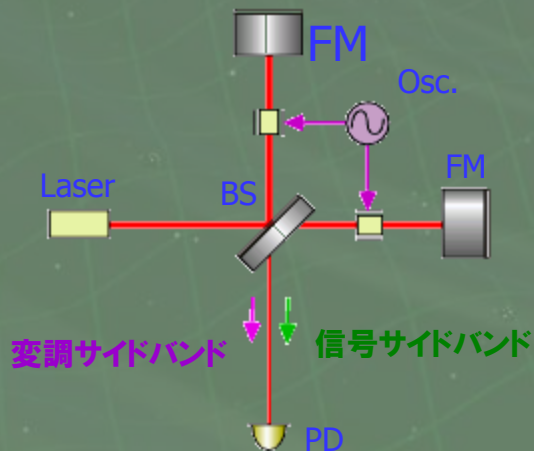
制御すべき自由度が1つ増える

## ヘテロダイン法

### 変調成分 (主にRF周波数帯) とのビートによる信号取得

#### 内部変調法 (Internal mod.)

腕内部で差動で変調をかける

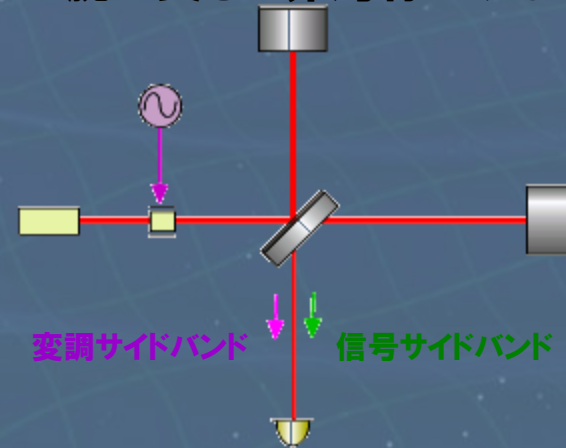


干渉計内部に変調器

→ コントラスト低下、光損失  
高光量に耐え得る変調器が必要

#### 前置変調法 (Frontal mod.)

干渉計入射前に変調をかける  
腕の長さを非対称にする



非対称性の影響

それなりの高光量に耐え得る変調器  
TAMAなどで用いられている

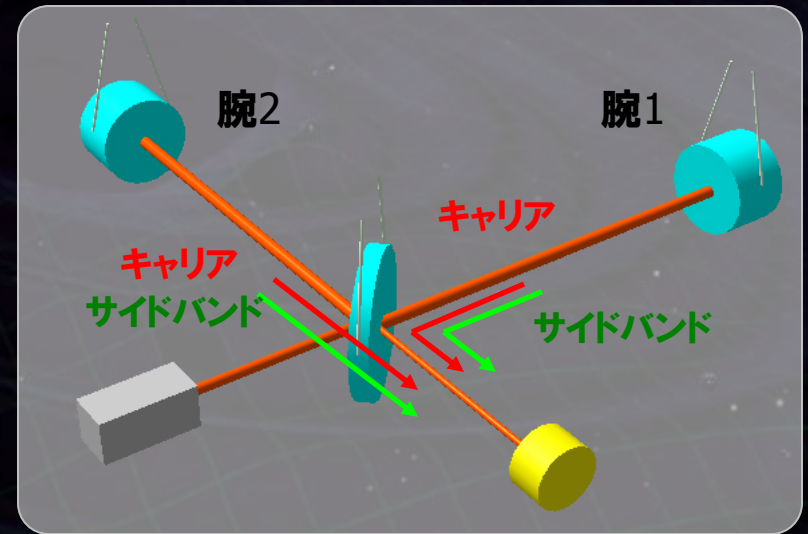


# マイケルソン干渉計

差動型マイケルソン干渉計  
干渉時の2つの出口に同量の光



両腕からのキャリアの位相差：90度

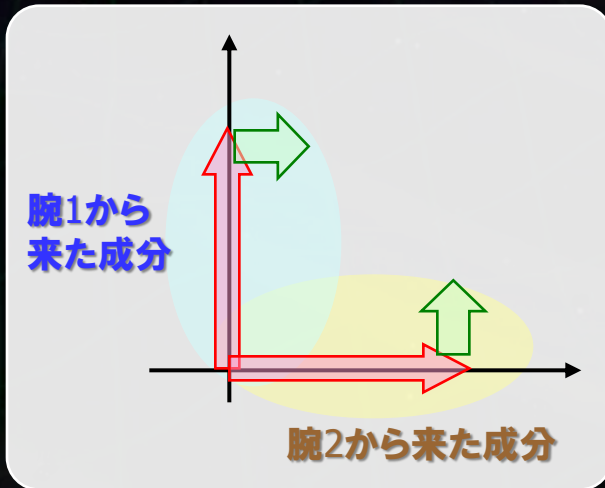


各腕からのキャリアは、  
他方の腕のサイドバンドと干渉（ホモダイン法）

➡ 2つの干渉信号（差動変動）は同符号で現れる  
（重力波の四重極特性より）



重力波を検出できる

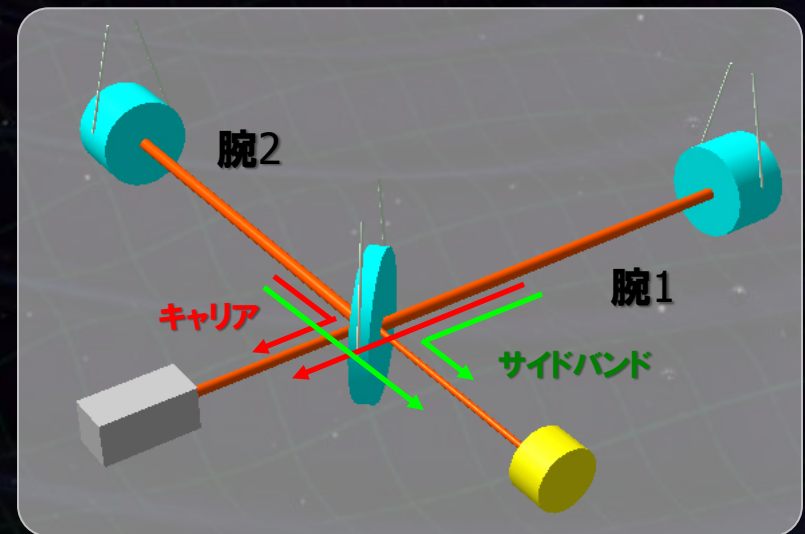
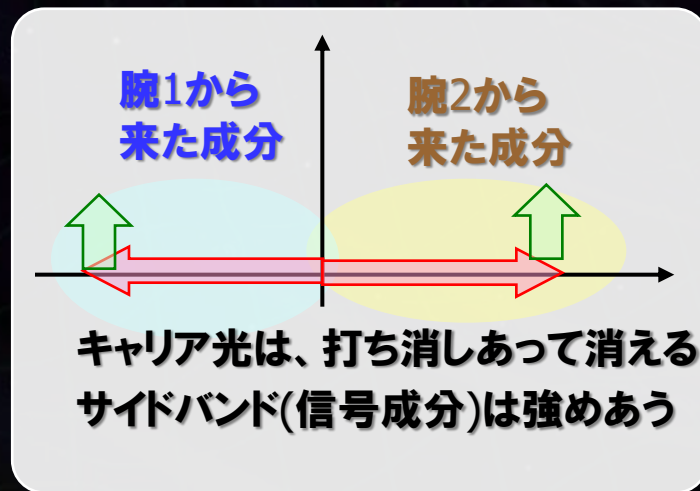


# マイケルソン干渉計の動作点

暗縞 (ダークフリンジ) で動作する場合



両腕からのキャリアの位相差 : 180度



## 光の成分の分離

- キャリア → 全て光源方向へ
- サイドバンド → 全て光検出器方向へ



信号検出には  
ローカルオシレータが必要

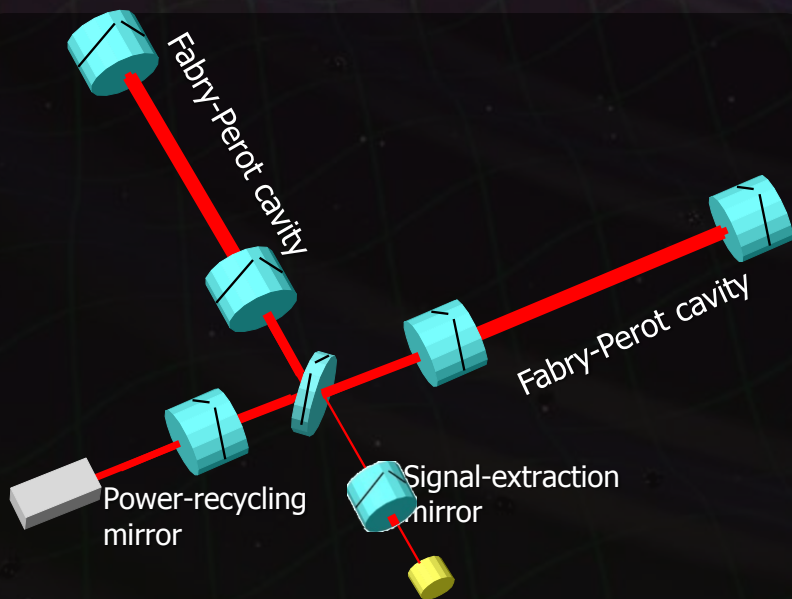


High-freq. ( $> 100$  Hz) improvement

Shot noise reduction by high power in arm cavities

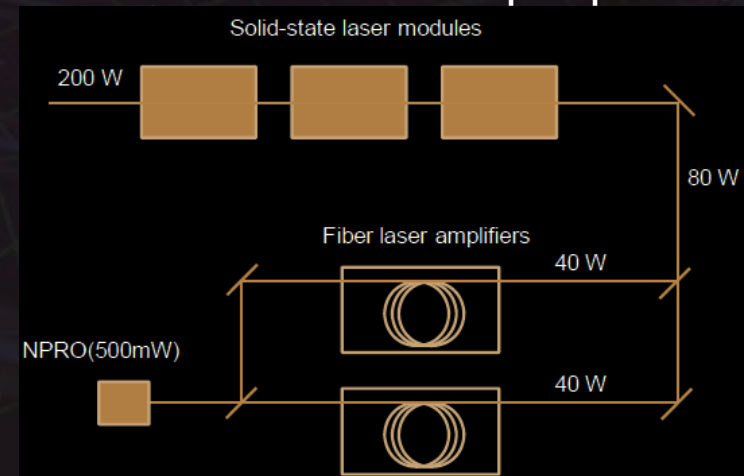
## Optical configuration

Fabry-Perot Michelson  
interferometer with RSE  
(Resonant-Sideband Extraction)



## High-power laser source

Nd:YAG laser source with  
 $> 180$ W output power



## Low-loss mirror

Optical loss  $< 100$ ppm (round-trip)  
 $< 45$ ppm in reflection

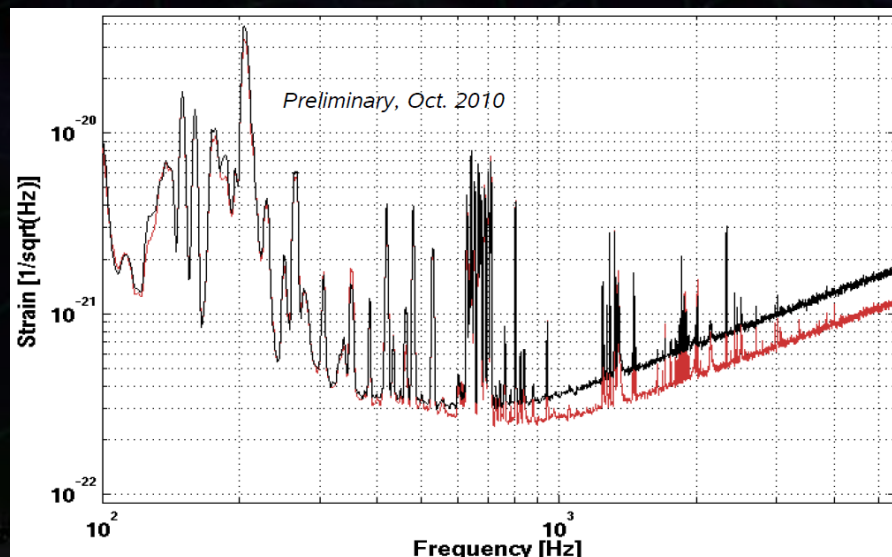
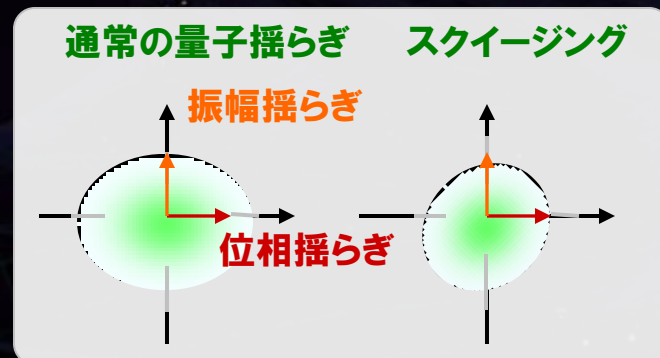
# スクイーピングによる感度の向上

## 標準量子限界を超える測定

→ スクイーピング (光の量子状態を変える)

### 2つのスクイーピング

- スクイズされた真空場を導入
- 狭帯域化によるスクイーピング (Ponderomotive squeezing)



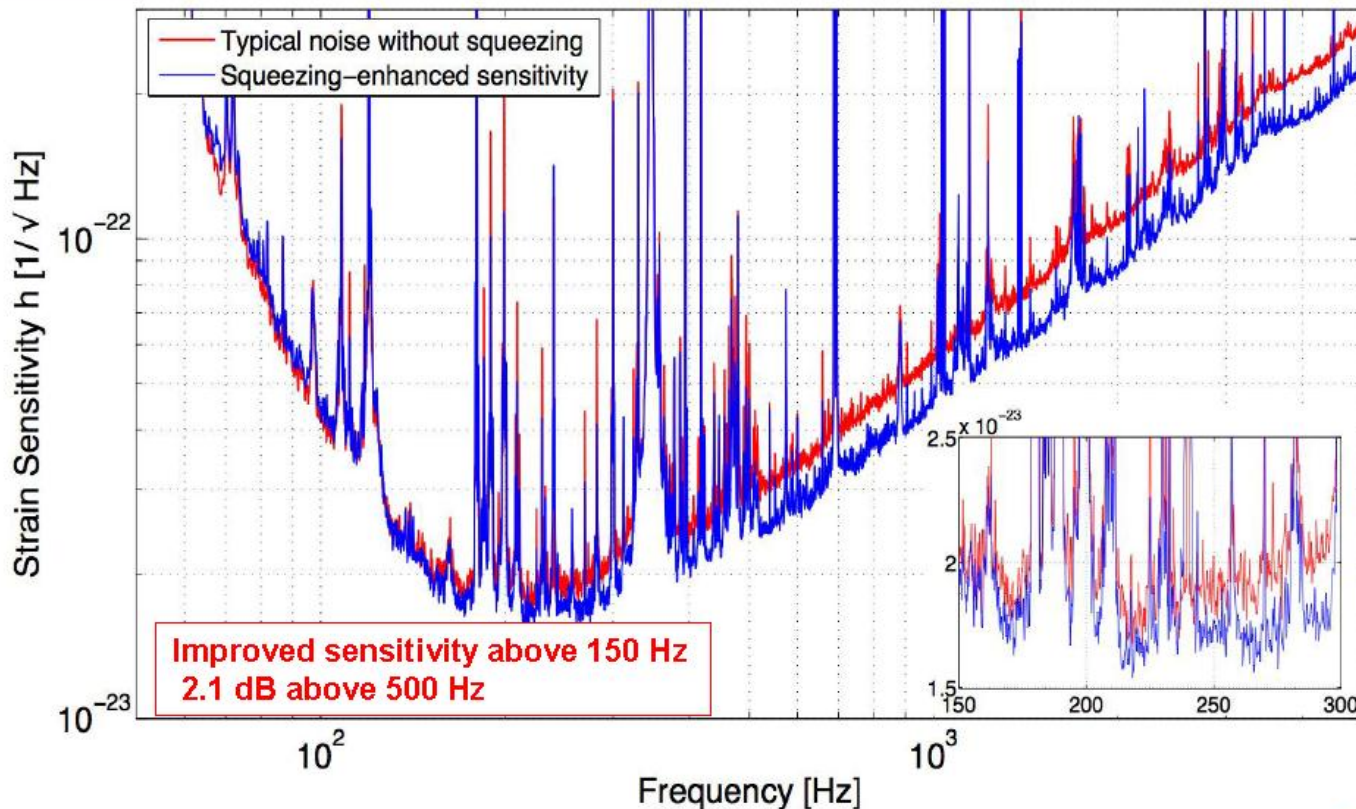
Hartmut Grote for the LSC  
LSC-Virgo meeting  
Arcadia, March, 2011  
LIGO-G1100206

Hartmut Grote, LV meeting March 2011



## Using Squeezed Light to Improve LIGO Sensitivity

LSC, "Enhancing the astrophysical reach of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light", in preparation



Marcel Grossman 13, Stockholm, 4 July 2012

## ・熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントに 機械損失 → 揺動力 (揺動散逸定理)

- 鏡の熱雑音 : 鏡基材, コーティング面などでの損失.
- 振り子の熱雑音 : 鏡の懸架ワイヤ等での損失.

### 熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

$T$  : 温度 [K]  
 $Q$  : 機械損失の逆数

⇒ 温度を下げる  
良い材質を選ぶ  
低減する干渉計構成

KAGRA : 低温干渉計 → 熱雑音を低減するクリアな方法.

- 鏡 ~20K, 振り子 ~16K
- 付加的な効果 : 機械損失の低減, 熱レンズ効果の低減, パラメトリック不安定性の低減.



## 機械的振動 → 調和振動子

運動方程式 (ランジュバン方程式)

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = f_n$$

熱揺動力

機械損失と関係

(揺動散逸定理)

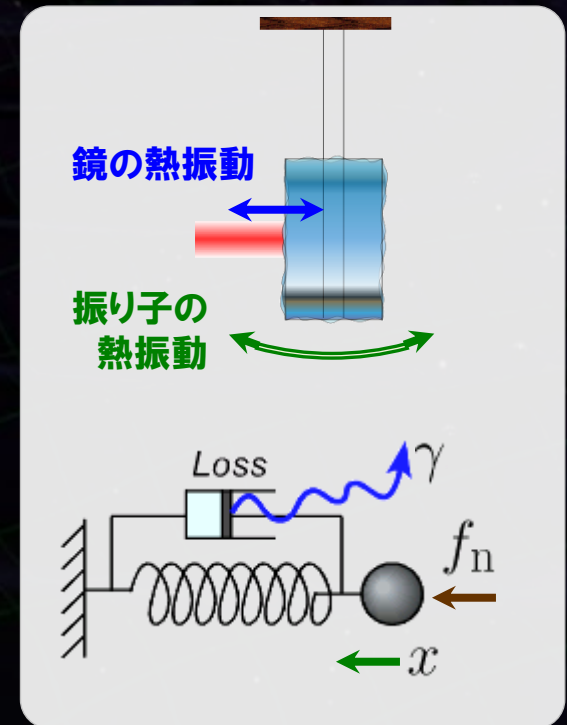
$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B\gamma T \quad (\text{白色雑音})$$

共振の鋭さ : Q値

$$Q = \frac{m\omega_0}{\gamma}$$

変動のスペクトル

$$\sqrt{\langle f_n^2 \rangle} \propto \sqrt{T/Q}$$



- Q値を上げる (機械損失を下げる)
  - 使用する材質を選ぶ (鏡基材, 懸架ファイバー, 鏡コーティング)
- 工夫により影響を抑える.
  - 鏡の熱雑音 – 鏡にあたるビーム径を大きくする.
  - 振り子の熱雑音 – 制御で抑えるなど.
- 冷却する.
  - 鏡, 振り子の温度を下げる.



# 鏡-振り子の冷却

## 鏡-振り子を冷却する

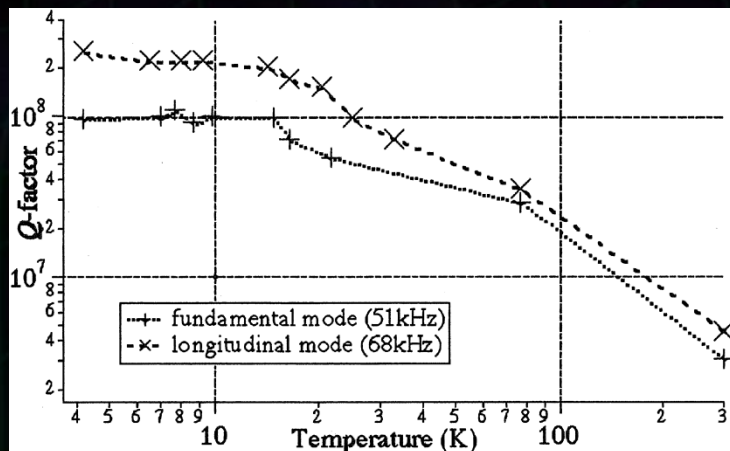
→ 熱雑音を低減する明確な方法.

- 付加的な効果 (サファイヤ, シリコン):  
機械損失の向上, 熱伝導率の向上

変動のスペクトル

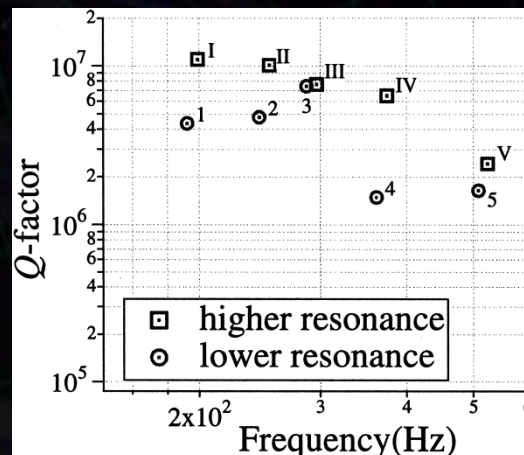
$$\sqrt{\langle f_n^2 \rangle} \propto \sqrt{T/Q}$$

### サファイヤ基材の機械損失



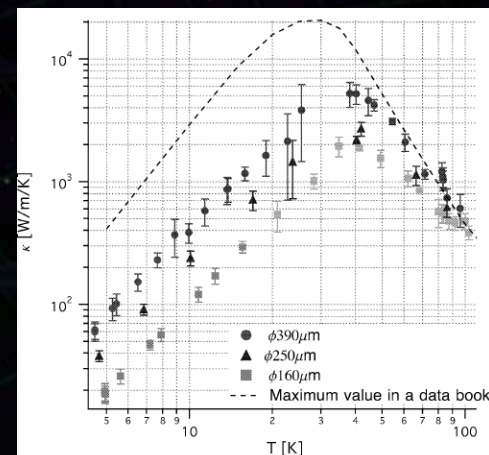
Uchiyama+, Phys Let. A (1999)

### サファイヤファイバの機械損失



Uchiyama+, Phys. Let. A (2000)

### サファイヤの熱伝導率

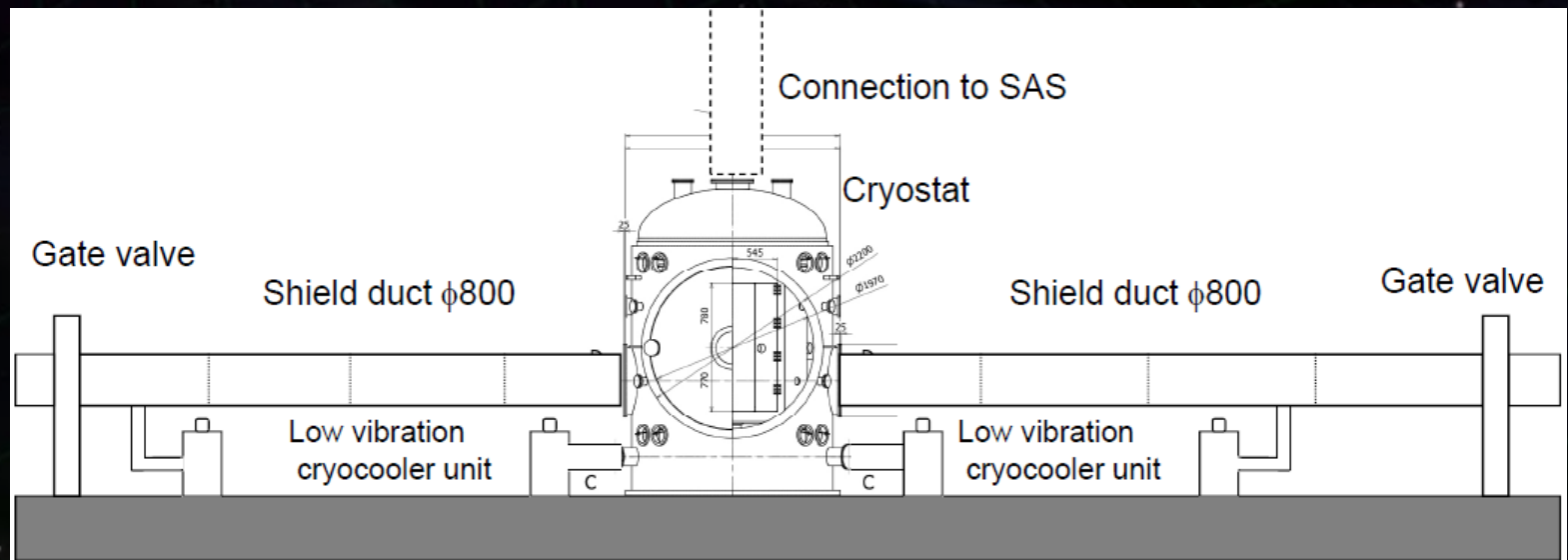
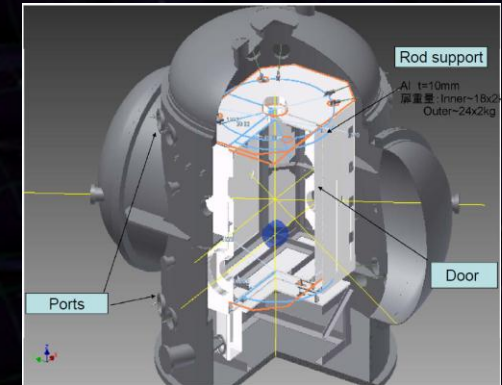


Tomaru+, Phys. Let. A (2002)

## • 実際上の問題を考慮する必要がある

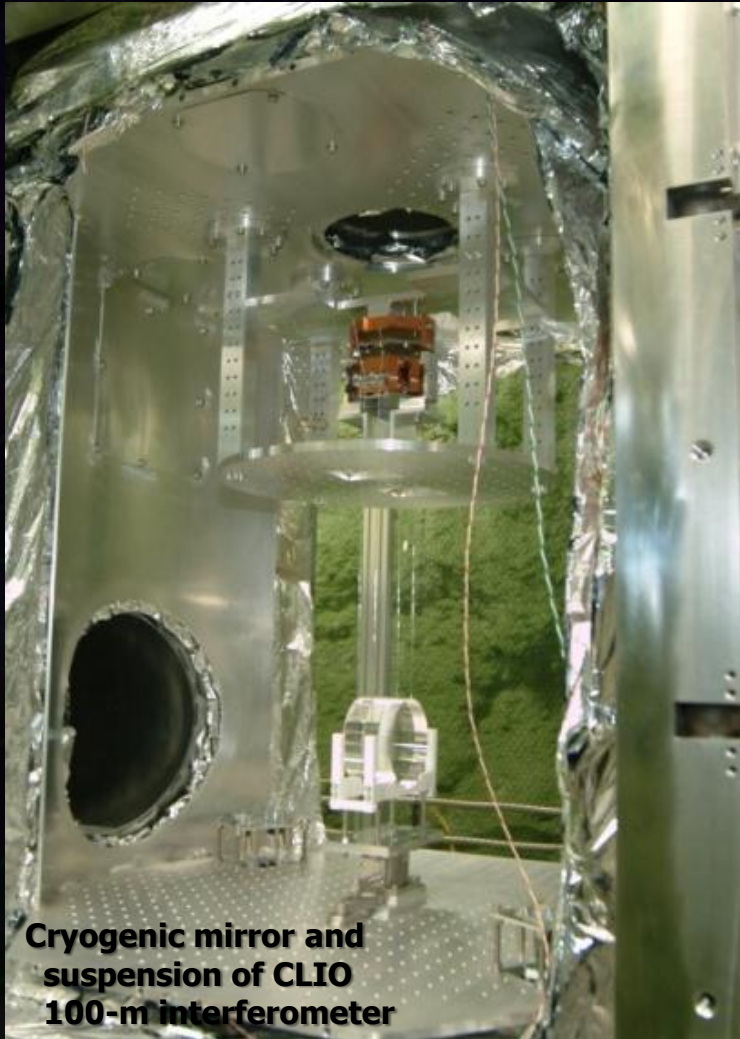
- 十分な冷却能力：クライオスタットの断熱，内部発熱の低減.
- 冷凍機に起因する振動（地面・音経由，熱伝導路経由）.
- 残留気体流入による光学特性の劣化.
- 冷却路による防振特性の劣化.

⇒ 二重断熱クライオスタット + シールドダクト.  
低振動型パルスチューブ冷凍機.  
サファイヤファイバによる低温懸架装置.

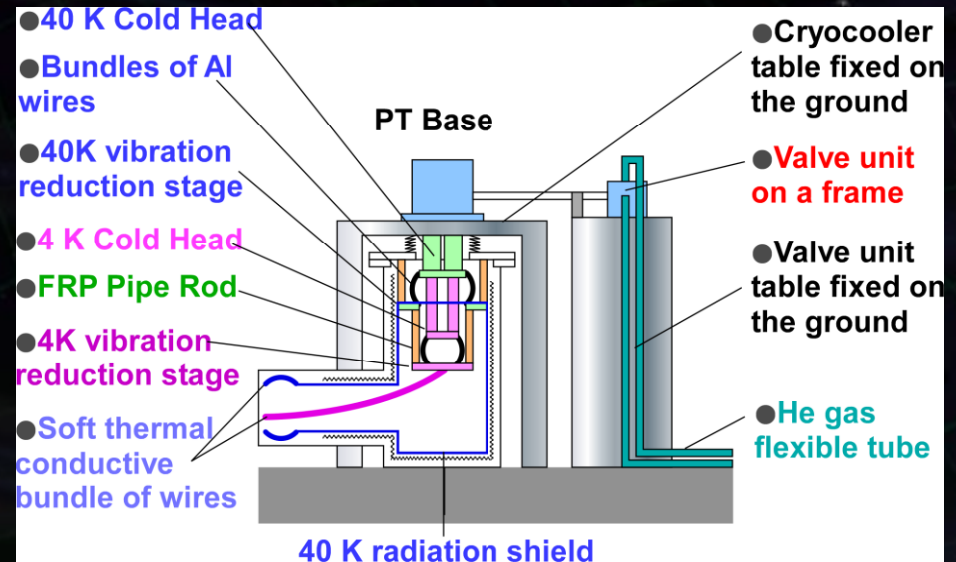




# 鏡-振り子の冷却



## Low-vibration Cryo-cooler design



## ・地面振動 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

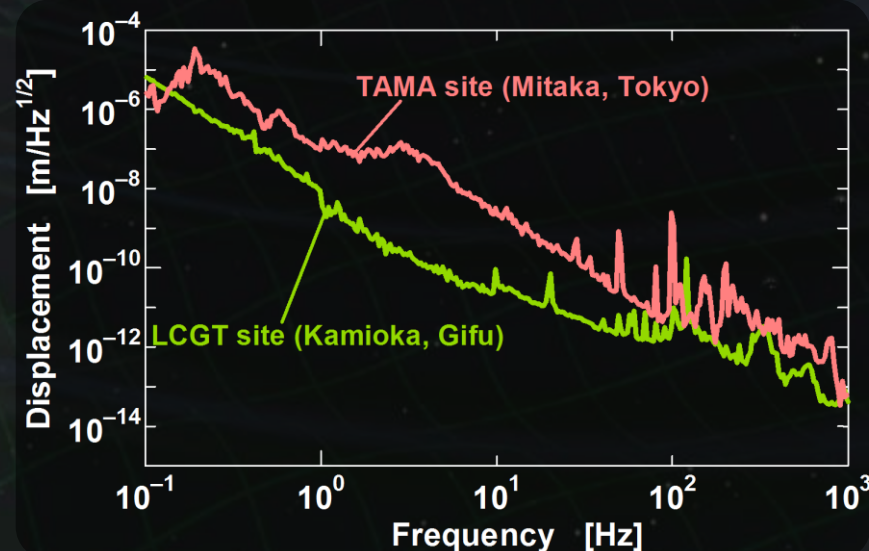
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.  
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

### 地面振動レベル

- 地下サイトでは2-3桁小さい
- 高周波数で低減.

$$\delta x_{\text{seis}} \sim \frac{10^{-9}}{f^2} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

(神岡サイトでの値,  $f$ : 周波数, )



KAGRA : **地下サイトに建設** → 2-3桁小さい常微動, 長期安定な環境.

**高性能防振装置 SAS** : 多段・低周波の防振装置.



## Passive isolator

(Require no energy supply)

⇒ Supported by spring or pendulum

Basic unit : single pendulum

Isolation Ratio:

Disp. ratio of mass to platform

$$\frac{x}{x_0} = \frac{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0}}{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

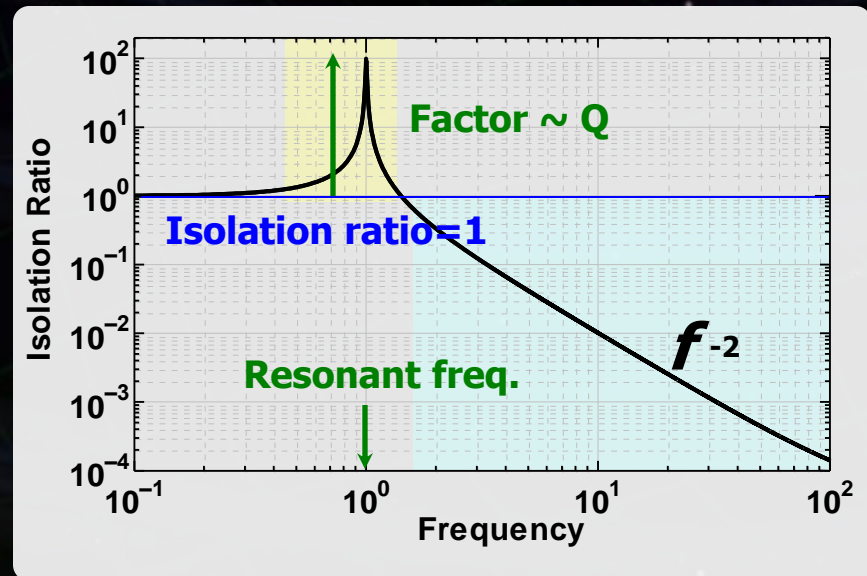
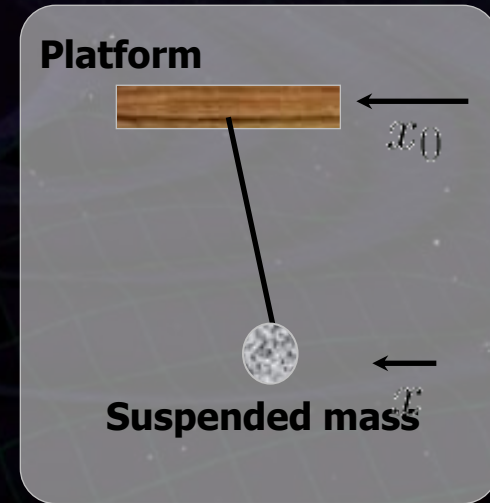
$f$  : Frequency

$f_0$  : Pendulum frequency

$Q$  : Q-value

(sharpness of resonance)

→ Isolation above  $f_0$



# High-performance isolator

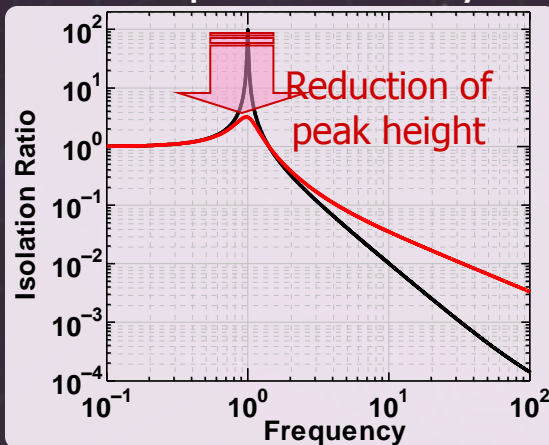
Better seismic attenuator

→ Improve stability and isolation ratio

## Damping

Reduce Q-value

→ improve stability

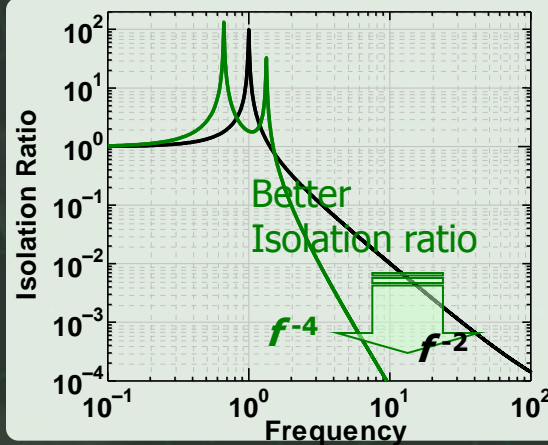


Degraded isolation

## Multi stage

More steep reduction

→ Better isolation

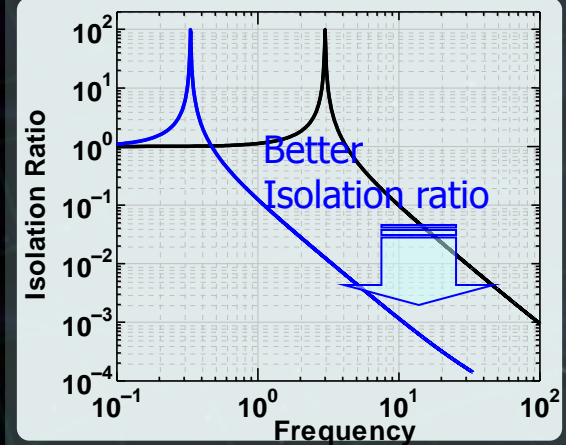


Resonant peaks

## Low reso. freq.

Low-freq. cut-off

→ Better isolation



Drift by environment

Combine them in design of the seismic attenuator



## 防振装置の多段化

理想的な $n$ 段振り子の防振比

$$\frac{x}{x_0} \sim \left(\frac{f_0}{f}\right)^{2n}$$

段数が多いほど急峻な防振特性  
段数分の共振のピーク

多くの共振がカップルした複雑な応答



ダンピングにより安定動作のためには、  
(防振比を損なわない設計が必要)  
応答が複雑になる  
→ 制御系の設計に注意が必要

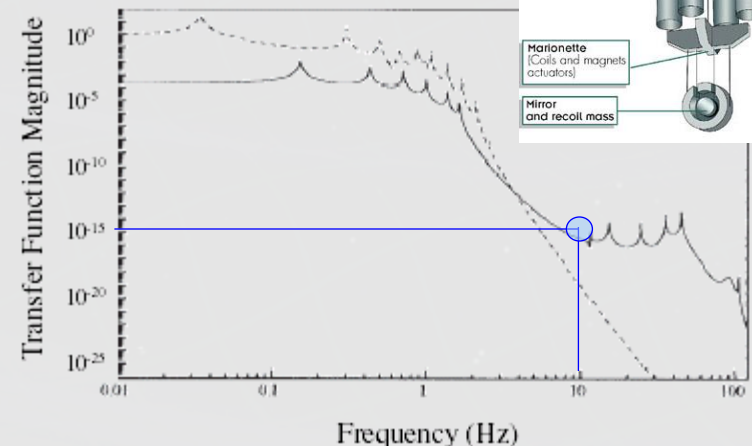
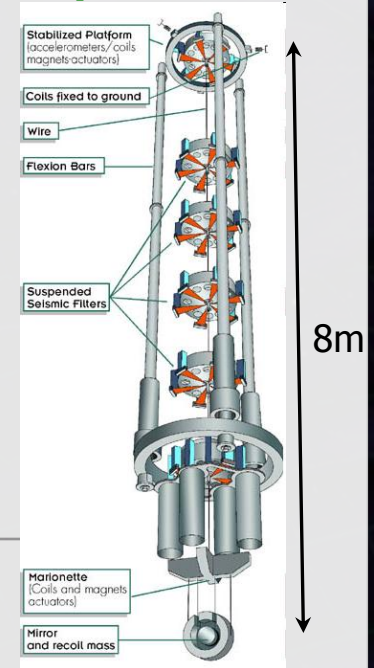
## VIRGO (Super Attenuator)

高さ 8m

水平方向 9段  
鉛直方向 6段

最上部でダンピング  
鏡と鏡上部で位置制御

10Hzで15桁程度の防振



# 低共振周波数化

振り子等の共振周波数の低下

→ 防振比の向上

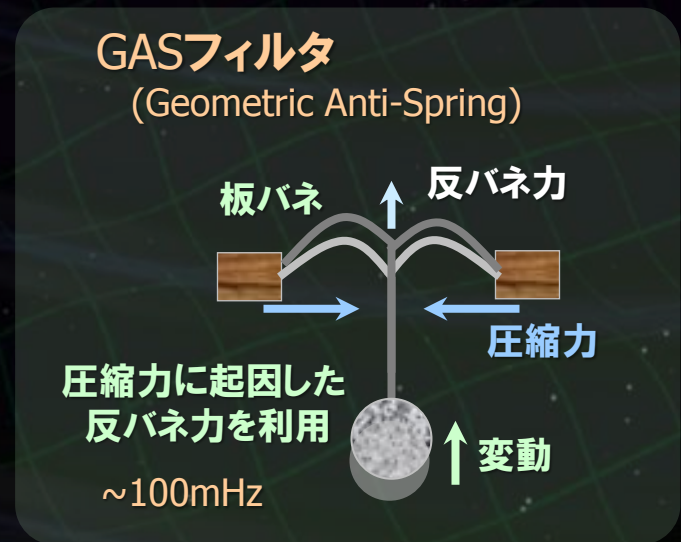
共振周波数：防振系の大きさに制限される

⇒ 工夫が必要：反バネの利用  
(変動を増加させる向きの力)

振り子 (横防振)  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$

バネ (縦防振)  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l_0}}$

およそ 1Hz → 25cm



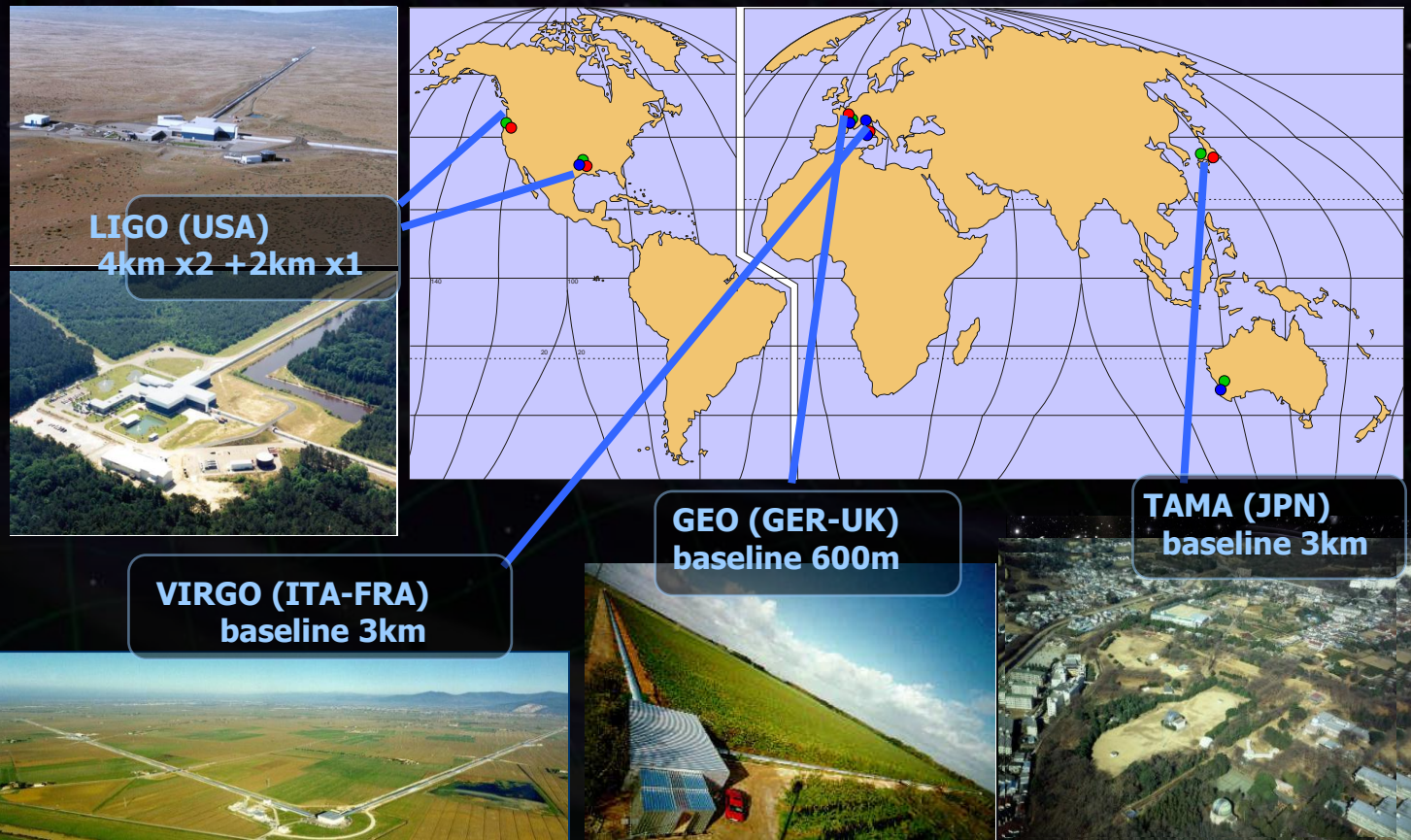
柔らかい系になる → ドリフトに影響されやすくなる



# 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





# 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



## 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)

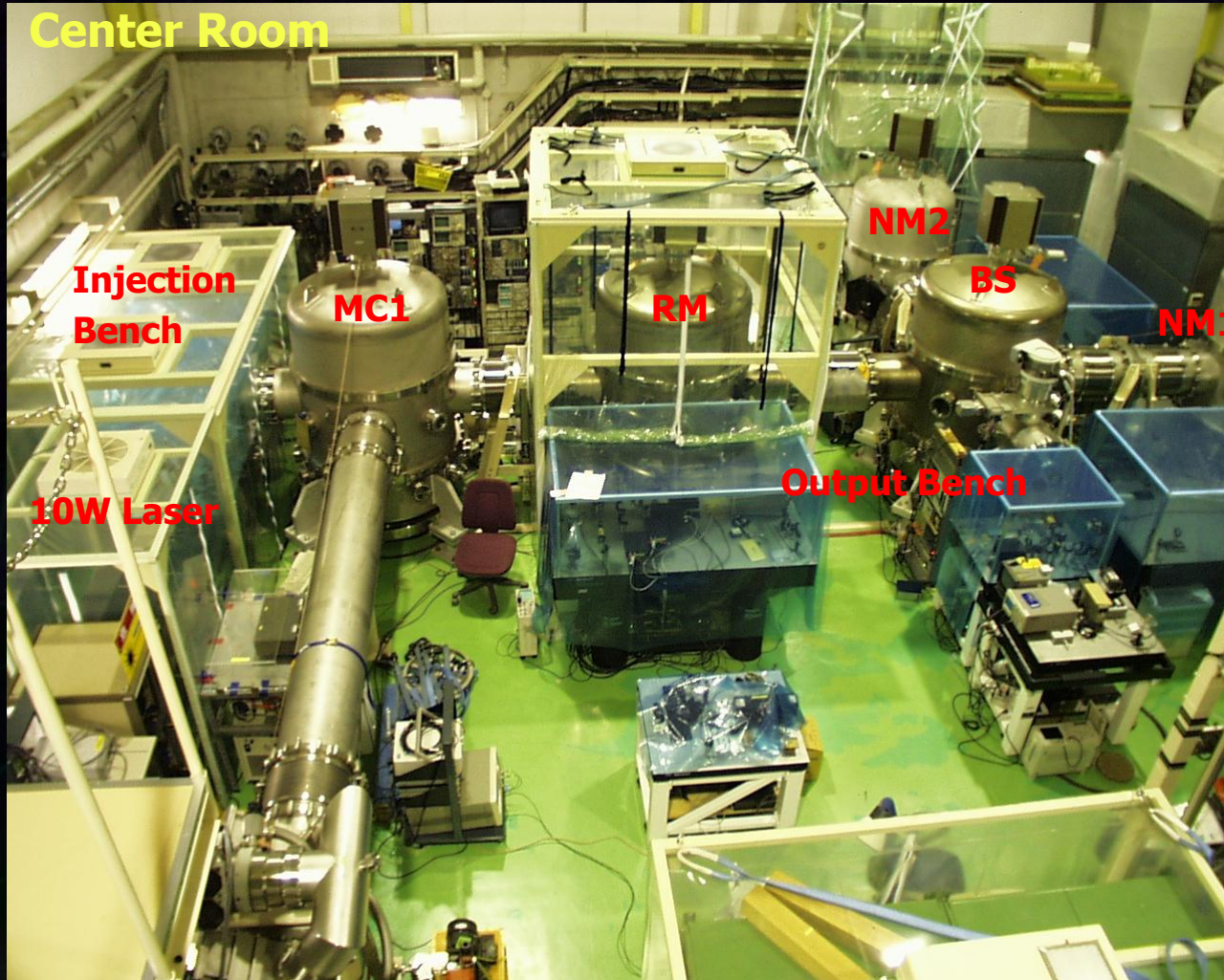
**Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000–2004**

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> Mitsuru 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>23</sup> Hisaaki Shinkai,<sup>33</sup> Takakazu Shintomi,<sup>10</sup> Kenji Soida,<sup>3</sup> Kentaro Somiya,<sup>34</sup> Toshikazu Suzuki,<sup>10</sup> Hideyuki Tagoshi,<sup>8</sup> Hirotaka Takahashi,<sup>34</sup> Ryutarou 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



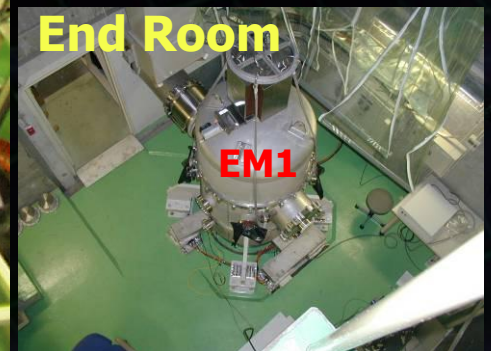
## Center Room



## Beam tube

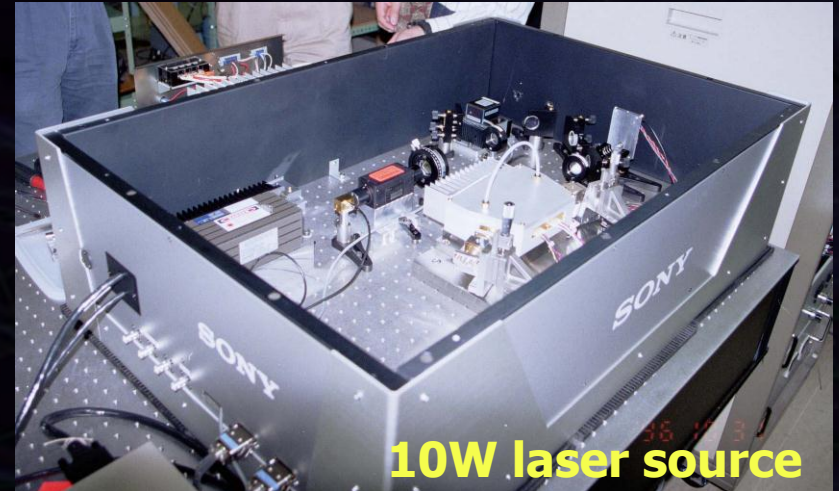
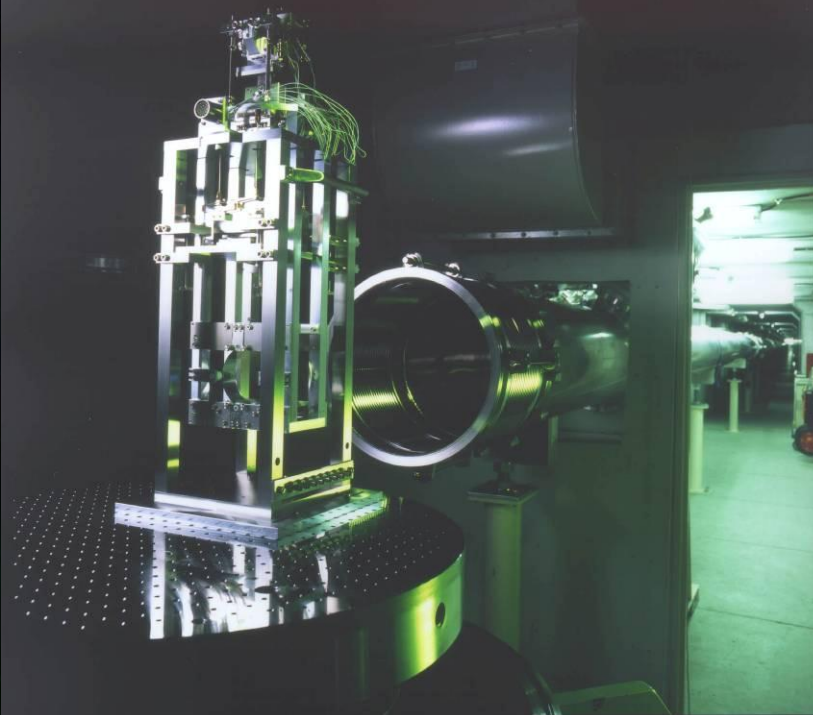


## End Room

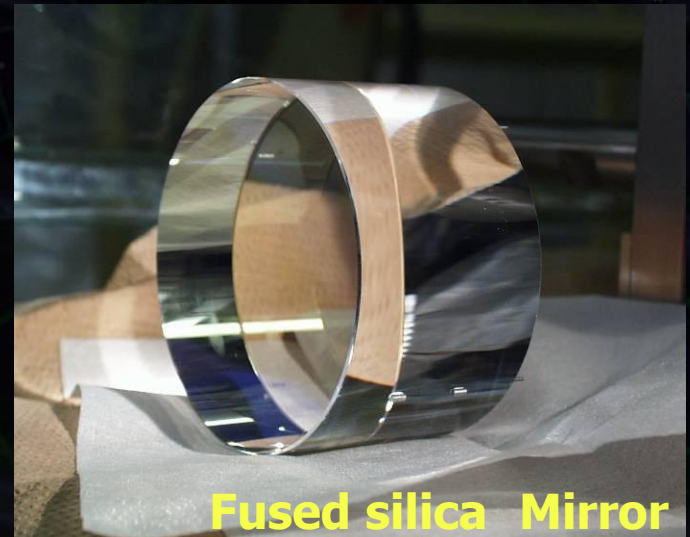




**Mirror suspension**



**10W laser source**



**Fused silica Mirror**



## 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)

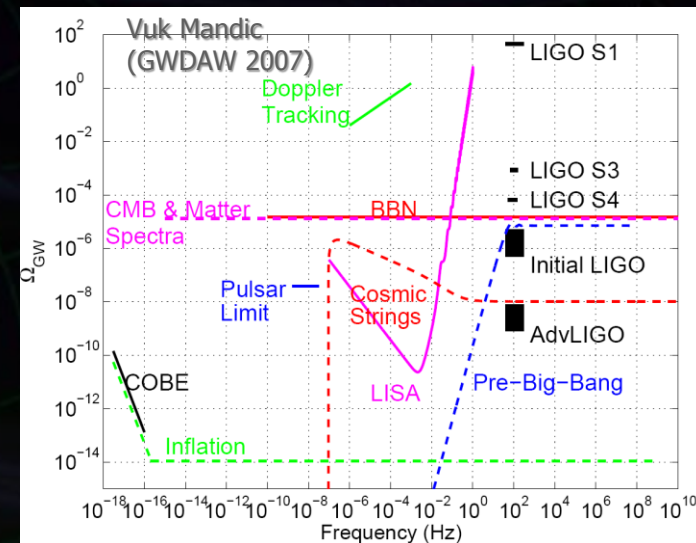
(Crabパルサー: 理論的上限値より厳しい制限)

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)





# 第2世代 重力波望遠鏡

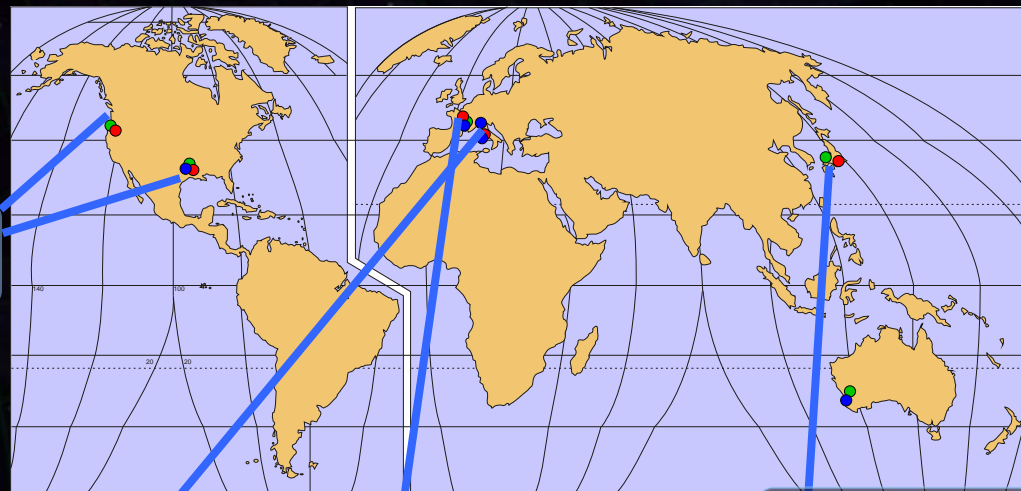
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 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

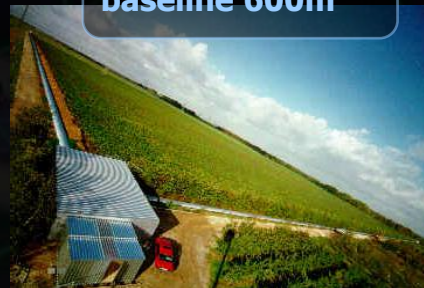


LIGO-India  
in proposal

indigo



Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m



LCGT (JPN)  
baseline 3km



# 第2世代 重力波望遠鏡

## •aLIGO

- 基線長 4km、施設・真空系: そのまま利用
- 光学系・防振系・制御系など: ほぼ取り換え
- スクイーミングのテスト実験  
6dBのSqueezing → 感度向上を目指す.

インストール作業進行中

## •Advanced VIRGO

- 基線長 3kmのまま, 干渉計構成変更(RSE).
- 光源の変更 → ファイバーレーザー.
- 鏡の熱補償, 出射光学系変更.

インストール作業進行中

David Shoemaker, LV meeting March 2011

**LIGO** Big News since we last met:  
The start of Installation

- 20 October 2010: Handoff of Observatories to aLIGO
- A very significant transition for aLIGO
- Most chambers now empty
- First new parts going in now

21:43:45e  
03/01/11

Y ARM  
CAM-002 M

The slide contains two photographs: one showing a large cylindrical component being moved by a crane in a cleanroom, and another showing a similar component being lowered into a chamber.

**Advanced Virgo** **ADVANCED VIRGO**

GIOVANNI LOSURDO - INFN Firenze  
Advanced Virgo Project Leader

for the VIRGO Collaboration

VIR-0152A-11  
LIGO-G1100311-v1

The slide features an aerial photograph of the Virgo interferometer's long arms stretching across a rural landscape.

G. Losurdo LV meeting March 2011



Hartmut Grote, LV meeting March 2011

- GEO-HF: GEOのアップグレード
  - 基線長 600m → 高周波数感度を向上.
  - 高出力光源, スクイーミング  
→ 最大3.5dBの効果確認.

AstroWatch進行中



- LIGO-India (LIGO-Austreria)
  - aLIGOの1台を移設 → 角度分解能を上げる.
  - Established in August 2009 to coordinate the Indian GW community to participate in GW research!
  - Funding received for a 3m prototype interferometer at the Tata Institute for Fundamental Research.



# 地上重力波望遠鏡のロードマップ





## 第2章 重力波の検出

イントロダクション

重力波の検出原理

共振型検出器

干渉計型検出器

⇒ その他の検出器





## 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

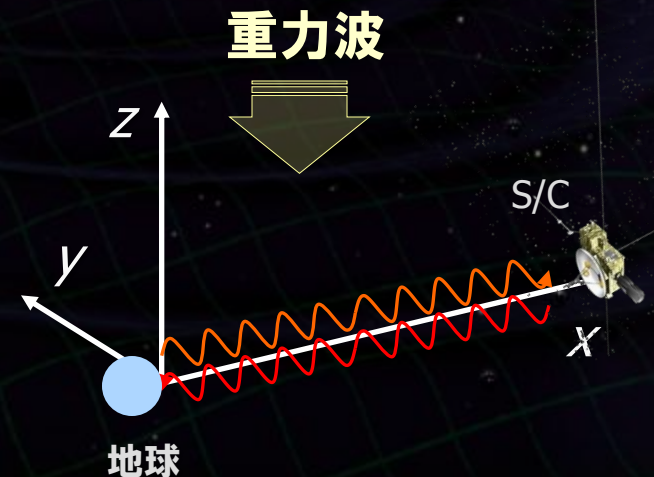
### 観測周波数帯

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



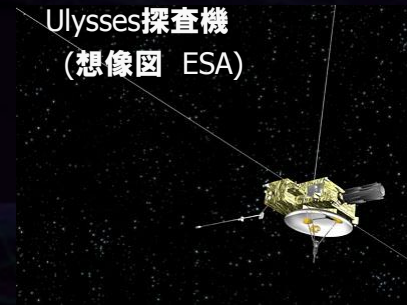
## 探査機 ULYSSES

- 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)

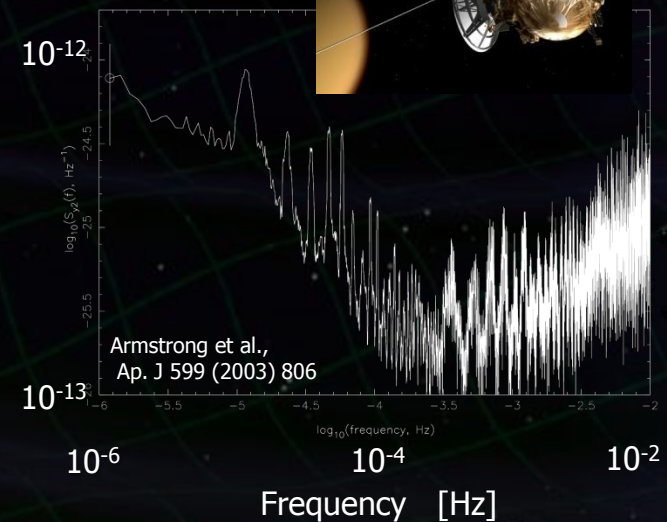
## 探査機 CASSINI (1997年 打ち上げ → 土星探査)

- 約40日間の観測 × 3回 (2001- 2004年)
- 2周波数観測により星間プラズマの影響を補正  
(X-band 8.4GHz, Ka-band 32GHz)
- 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

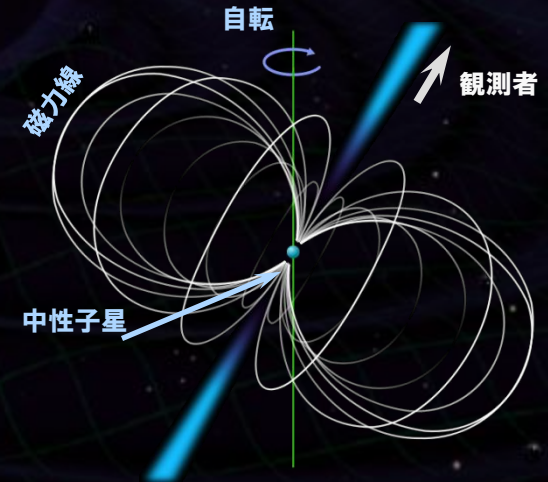
CMB B-mode

## 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

$$t_{\text{pulse}} - \Delta t_P = t_0 + P_0 \cdot n + \frac{1}{2} P_0 \dot{P}_0 \cdot n^2 + O(n^3)$$

↑ スピンダウンの効果

( $n$ : 観測開始からのパルス数)

### 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



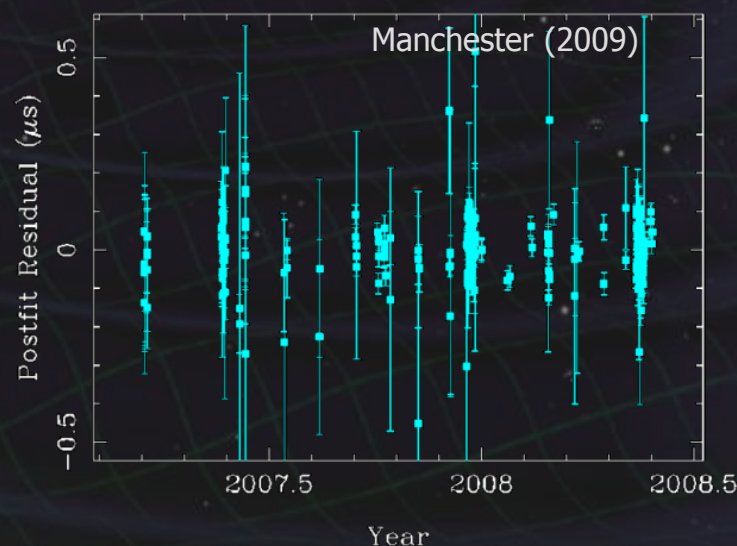
## 感度を制限する要因

- 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

## 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

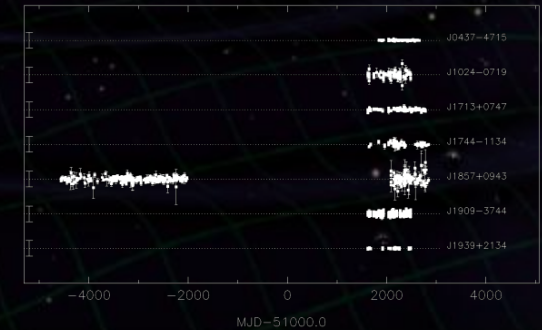
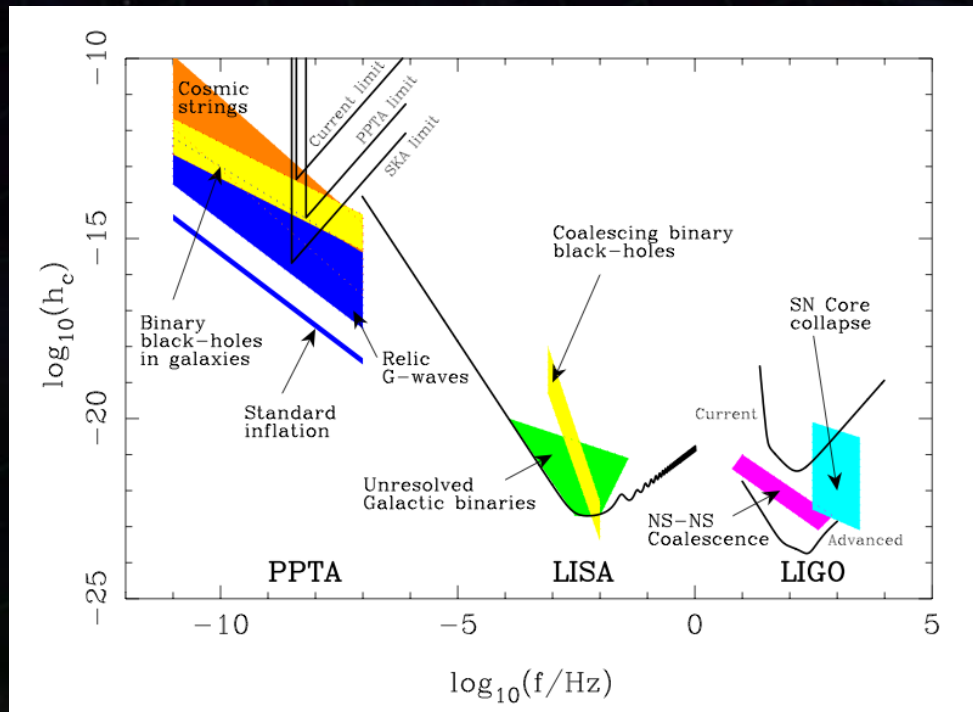


Fig. 1.— Pulsar timing residuals. The length of the vertical line on the left hand edge represents  $10\mu\text{s}$ .

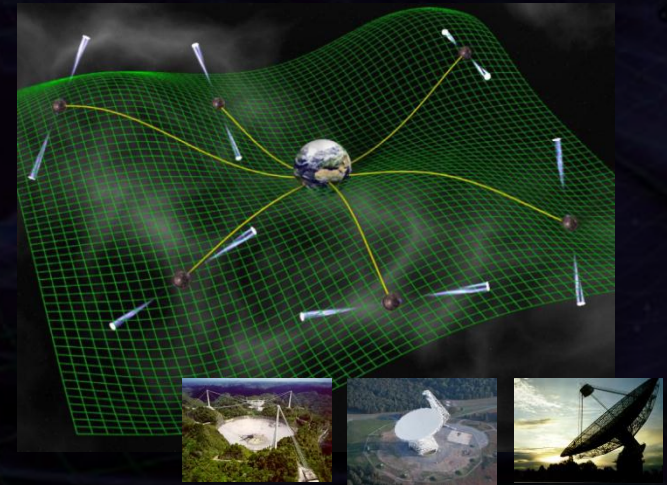
Manchester (2009)



## 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)

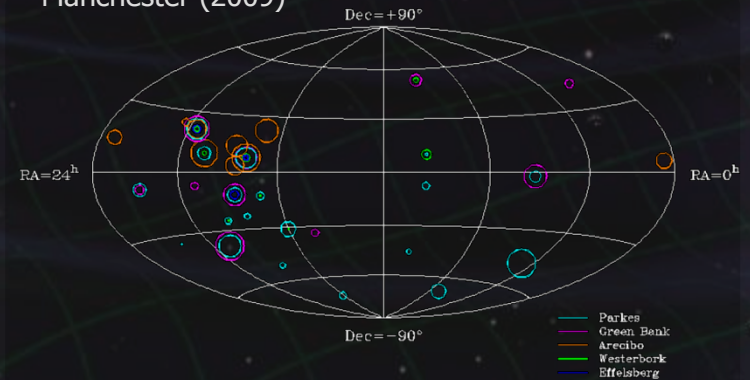
### North American pulsar timing array (NANOGrav)

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

George Hobbs  
Australia Telescope National Facility

- 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>



## 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

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

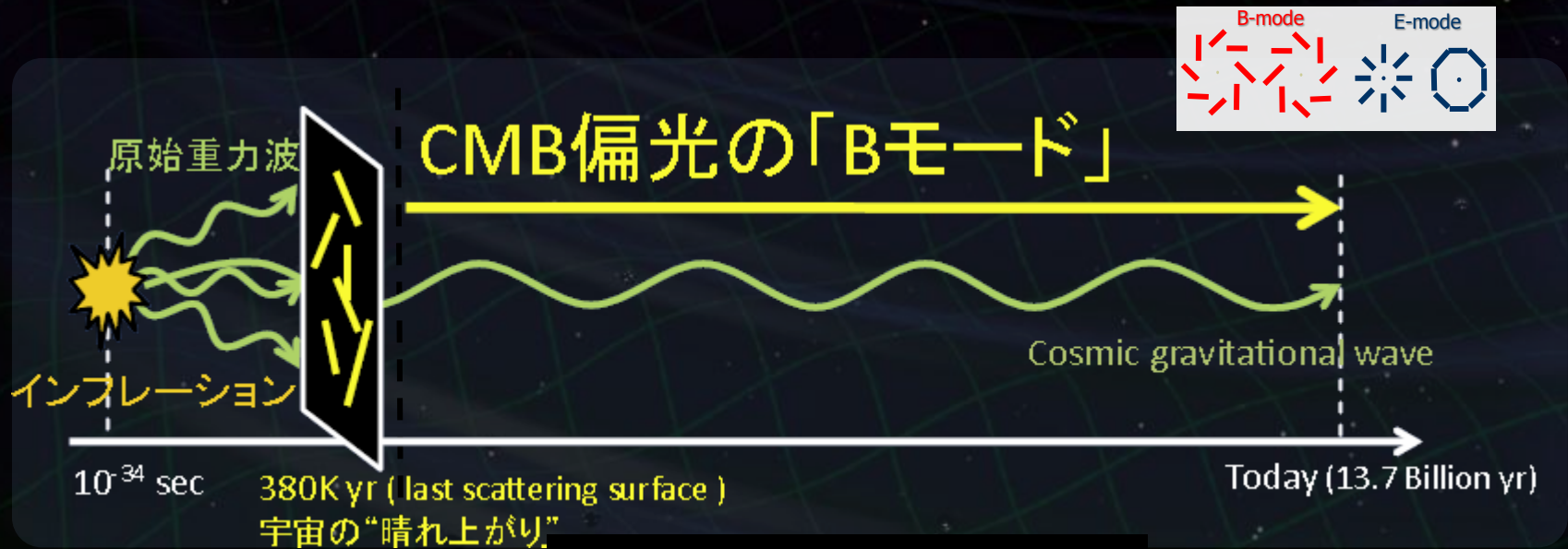


図: 田島氏談話会 (2011 京都大学)



## 重力波のエネルギー密度

重力波の密度

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

宇宙の臨界密度

等価な重力波スペクトル

ハッブル定数

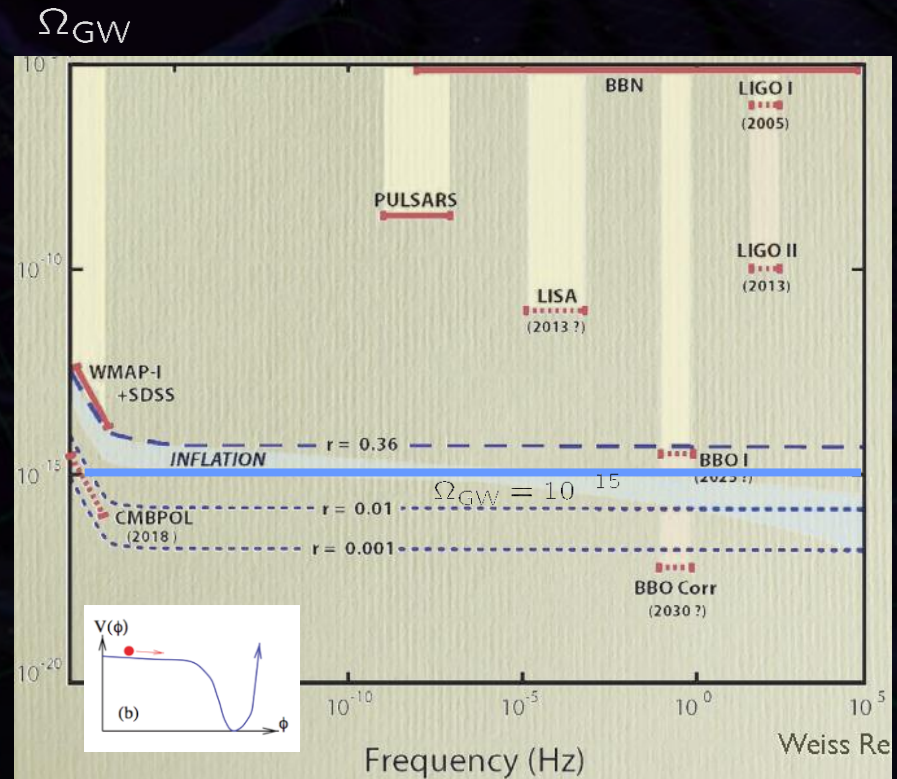
$$\tilde{h}_{GW}^2(f) = \frac{3H_0^2}{10\pi^2 f^3} \Omega_{GW}(f)$$

## CMBの テンソル・スカラー比

インフレーションのエネルギースケールに対応

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

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



Meyer (Fujihara Seminar 2009)

## Funded CMB Polarization Experiments

((near) completed: Bicep1, Boomerang, CBI, DASI, Maxipol, QUaD, WMAP, VSA)  
 (Proposed: ACT-POL, several others)

Name	Type/ location	Institutions	NEQ ( $\mu\text{K}\sqrt{s}$ )	Ell range	Frequencies	#Detectors	Resolution (arcmin)
Planck	Bolo- HEMT/Space	ESA, IAS-Orsay, Bologna + many	80 (@100G)	2-2000	25-1000	22H+32B (# of pol. ch)	8
Spider	Bolo/Balloon	CIT/JPL,CITA, CWRU,Stanford	4/3 (@ 96/145G)	2-250	96/145/225	288/512/512	60/40/30
BICEP2	Bolo/South Pole	CIT/JPL,CITA,Stanford		10-250	150	256	37
KECK array	Bolo/South Pole	CIT/JPL,CITA,Stanford		10-250	100/150/22 0	288/512/512	55/37/26
QUIET	HEMT/Chile	Chicago, CIT, JPL, <b>KEK</b> , Manchester, Miami, MPI, Oxford, Princeton, Stanford	12/9 (@ 40/90G)	20-1000	40,90	119x2 ~1000(P2)	10
EBEX	Bolo/Balloon	Minn, Berkeley, Brown, Cardiff, Columbia, McGill +8	5 (@150G)	20-1200	150,250,42 0	1406	8
PolarBeaR	Bolo/Chile	Berkeley,APC, Cardiff,Colorado, Imperial, <b>KEK</b> , McGill,UCSD	10 (@150G)	20-3000	90,150, 220	1274	3.5
SPTPOL	Bolo/South Pole	Chicago,Berkeley, Colorado, CWRU, Davis, JPL, McGill,SAO	14	20-10000	90,150, 220	1000-2000	1.1

Everyone except Planck claims  $r=O(0.01)$  sensitivity and results in 5 yrs.

compiled by Adrian Lee + MH

Hazumi (Fujihara Seminar 2009)



## •BICEP2 実験

(Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization, 南極)

全天の2%の領域を探索

$$r < 0.72 \text{ (C.L. 95\%)}$$

Chiang+, ApJ (2010)

## •QUIET 実験

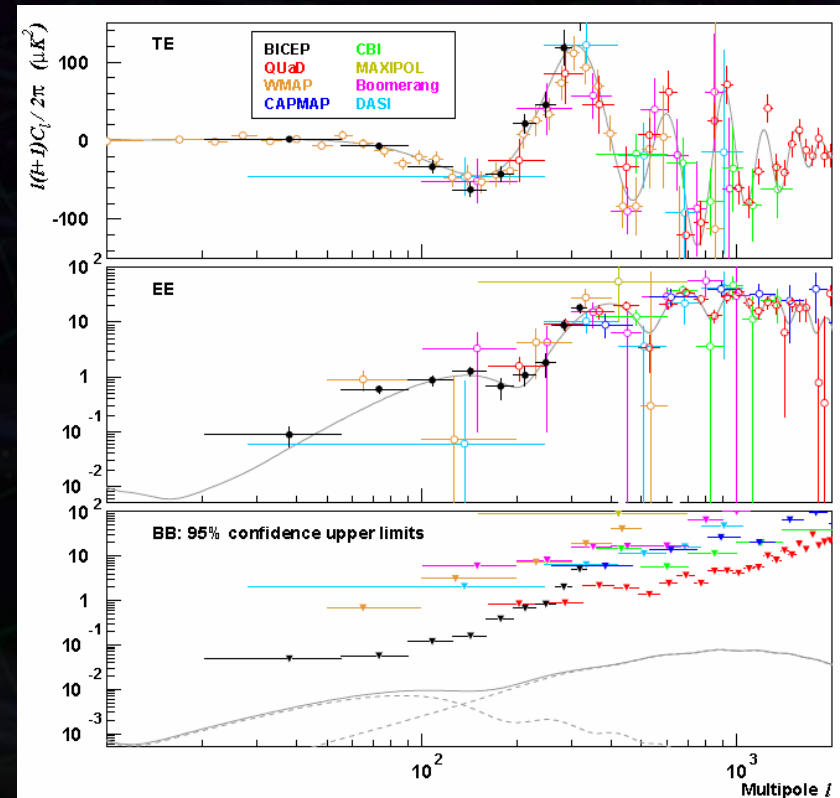
(Q/U Imaging Experiment, チリ・アタカマ)

全天の3%の領域を探索

$$r < 2.2 \text{ (C.L. 95\%)}$$

Bischoff+, arXiv:1012.3191

田島氏談話会 (2011 京都大学)



## 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

## ねじれ型望遠鏡

懸架された棒状試験マスの回転変動を観測  
低周波数の重力波観測が可能.

## 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偏光観測

## 第2章 終わり