

超高周波重力波検出器のその後

東大天文D3

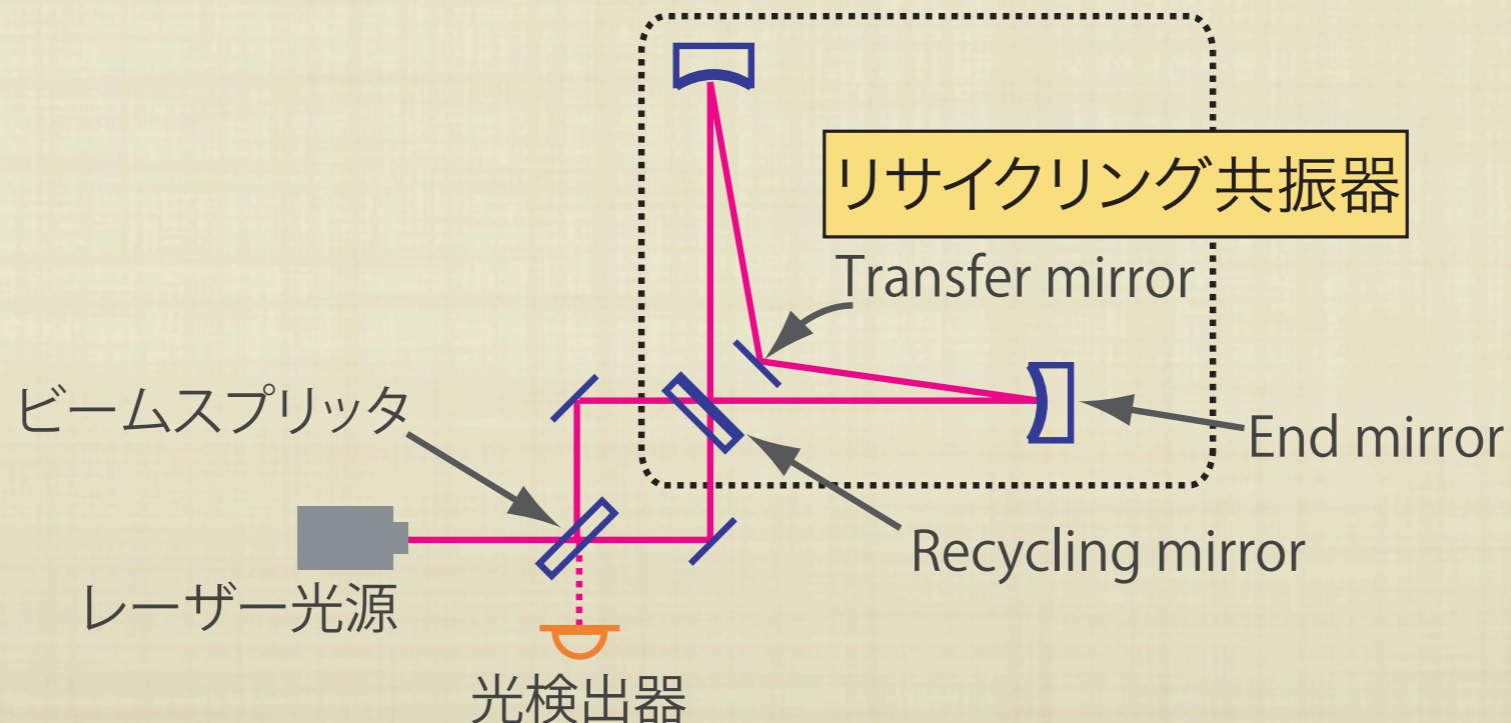
阿久津 智忠

重力波研究交流会 平成20年3月7日(金) 東京大学/本郷

概要

- 100MHz重力波を検出できるレーザー干渉計を2台構築し、重力波背景放射の検出を試みた。

100MHz付近の重力波背景放射に対し、直接測定による上限値を更新した。



もくじ

1. はじめに
2. 超高周波重力波
3. 本実験で用いた重力波検出器
4. データ解析
5. まとめ

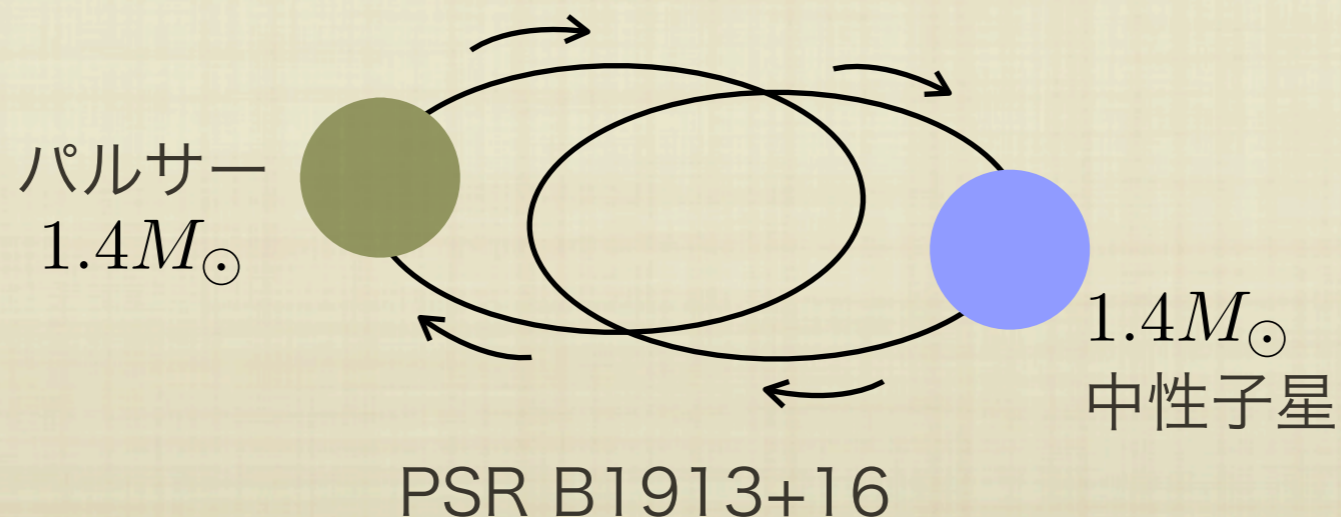
もくじ

1. はじめに
2. 超高周波重力波
3. 本実験で用いた重力波検出器
4. データ解析
5. まとめ

重力波とは

■ 一般相対論から予言される重力の波動現象

- * 質量の加速度運動で放出される
- * 存在は間接的に証明されている
 - * 電波観測: PSR B1913+16の公転周期が減少中
 - * 重力波放出によるエネルギーロスでほぼ説明がつく
- * 未だに直接検出されていない



重力波の性質

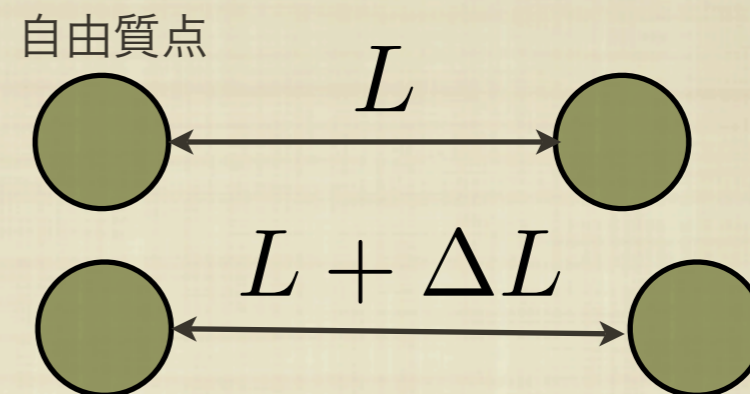
■ 重力波の振幅 $h \sim \Delta L/L$

* 自由質点間の距離が歪む

■ 横波

* 偏波2つ

■ 光速で伝播



偏波: プラスモード

一般に期待される重力波源

■ 激しい天体現象

- * コンパクト連星の公転運動および合体

 - * 中性子星、ブラックホール

- * 超新星爆発

- * 非軸対称なコンパクト天体の自転運動

- * (重力波の背景放射)

■ 希な現象

- 振幅は小さい $h \simeq 10^{-21} - 10^{-22}$

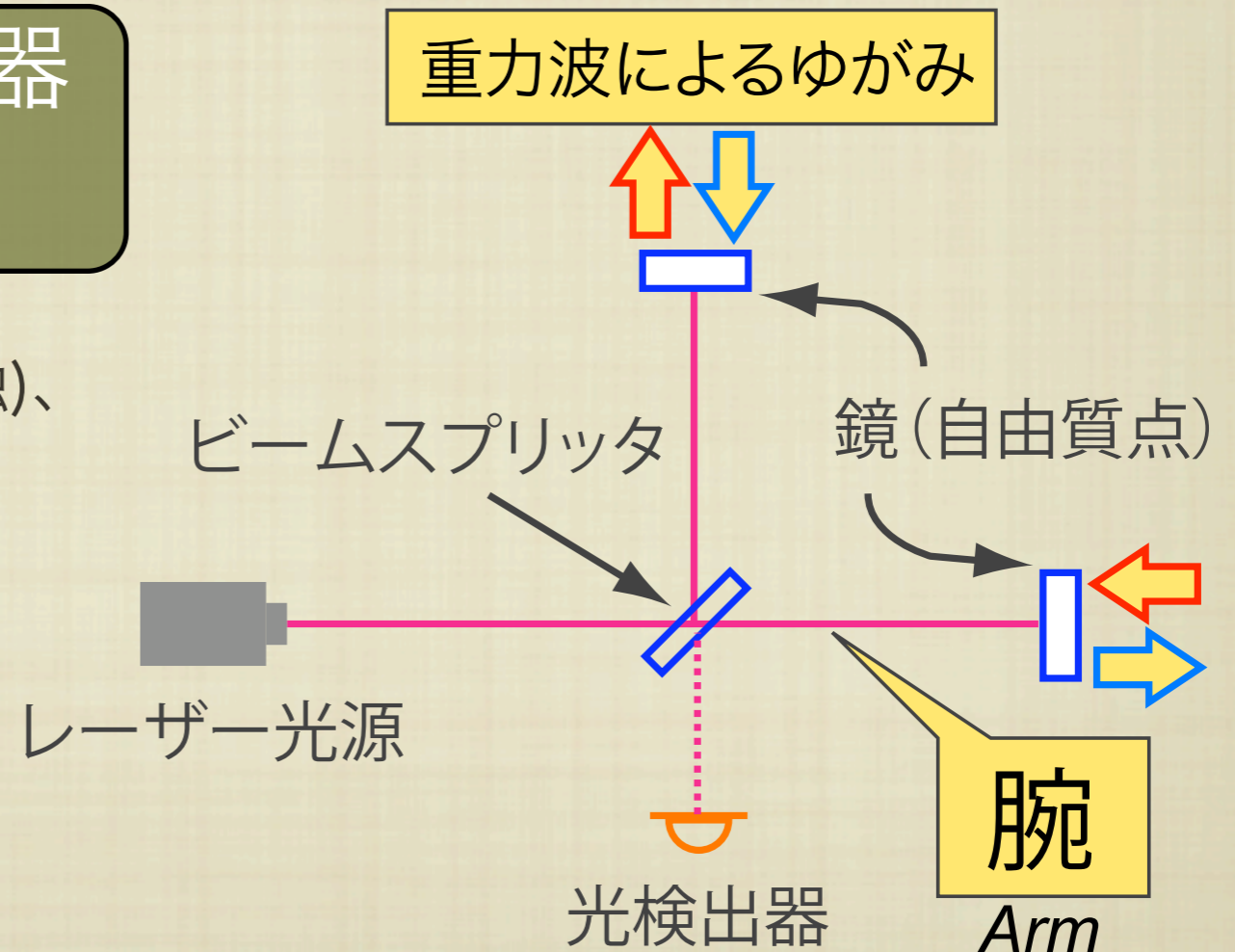
- 低周波 波長のスケールが天体自身または公転軌道程度

マイケルソン干渉計型重力波検出器

- 重力波で腕の光路長が差動変化
- 差動変化を干渉縞の明滅として検出

世界の大型干渉計型検出器 の基礎

- * 例: TAMA(日)、LIGO(米)、GEO(独)、VIRGO(伊)
- * 観測周波数: 10 Hz - 10 kHz
=> 理由後述



本研究の位置づけ

重力波による天文学の創成を目指した、
重力波の直接検出実験の1つ

- * 電磁波: いろいろな波長で観測が行われている
- * 重力波: 主な実験は 10 Hz - 10 kHz
 - * 高周波では少ない: 100MHzの例=>

A. M. Cruise and R. M. J. Ingley (2006)
Class. Quantum. Grav. **23**, 6185

導波管に閉じこめた電波の偏光ベクトルを利用

本研究では

100MHz 重力波を検出できるレーザー干渉計を
2台開発し、重力波背景放射の検出を試みた

もくじ

1. はじめに
2. 超高周波重力波
3. 本実験で用いた重力波検出器
4. データ解析
5. まとめ

100MHzの重力波

■ とくに100MHzを選んだ理由

* 高周波ではあまり実験例がない

* 高周波であればほぼどこでも選べる

* **100MHzが実験しやすい** (後述、テーブルトップで実験できる)

ここで説明すること

- ・ 100MHzの重力波源
- ・ 超高周波重力波をとらえるための干渉計
- ・ 到達可能な感度

100MHzの重力波源

主に背景放射が考えられている

> 位相と振幅がランダムで、いろいろな方向からやってくる重力波の重ね合わせ

■ 宇宙初期に起源

* インフレーション

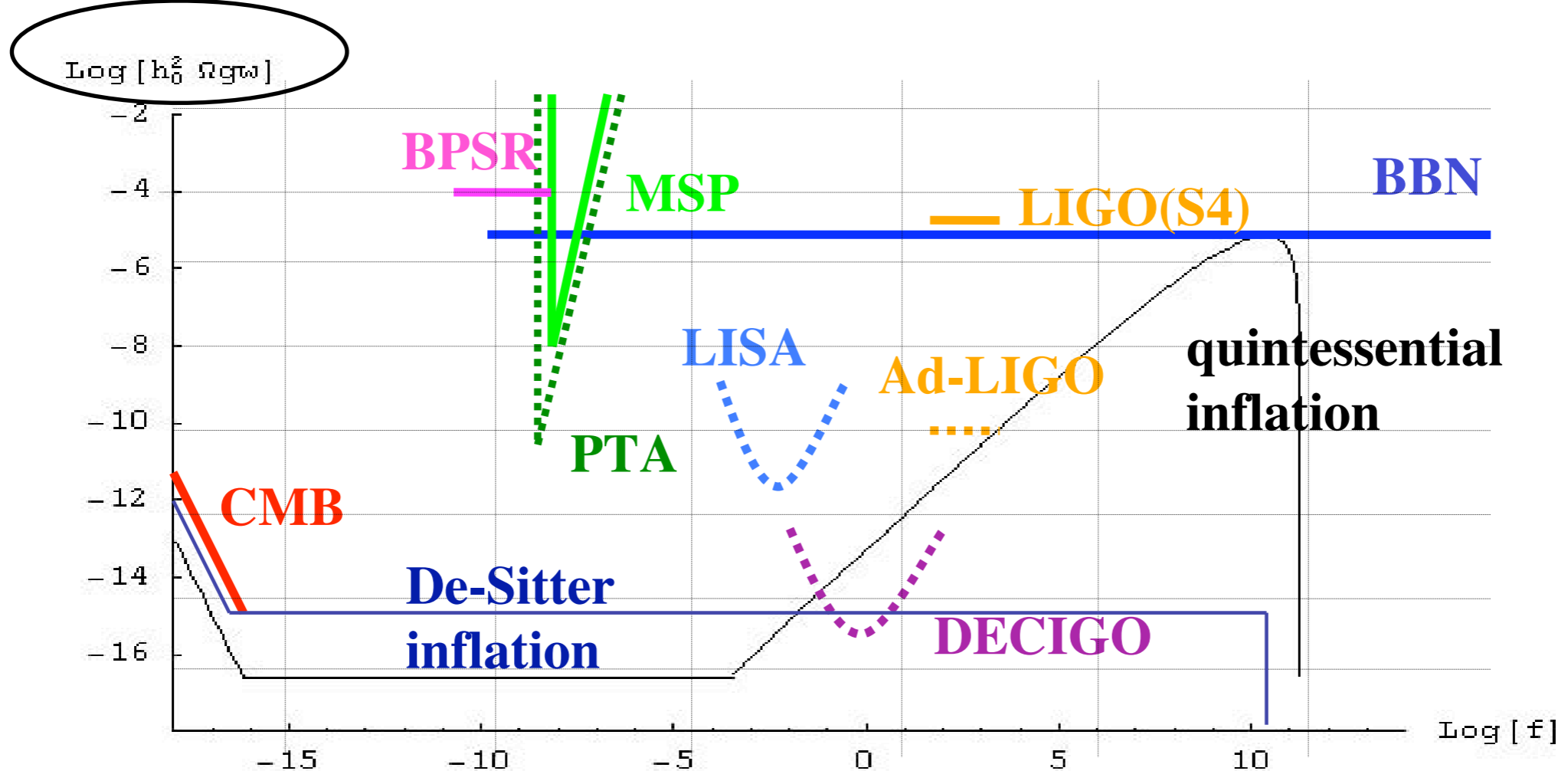
* シナリオによっては高周波にピーク

* ヘリウム4の観測量による間接的upper limit
(Big bang nucleosynthesis)

* 原始ブラックホール連星など

予想されるスペクトル

重力波のエネルギー密度（無次元量で定義）



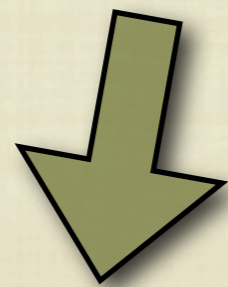
100 MHz での直接観測では、[A.M.Cruise & R.M.J.Ingley 2006] が
 $h_0^2 \Omega_{gw} \sim 10^{34}$

従来の検出器（マイケルソン干渉計型）

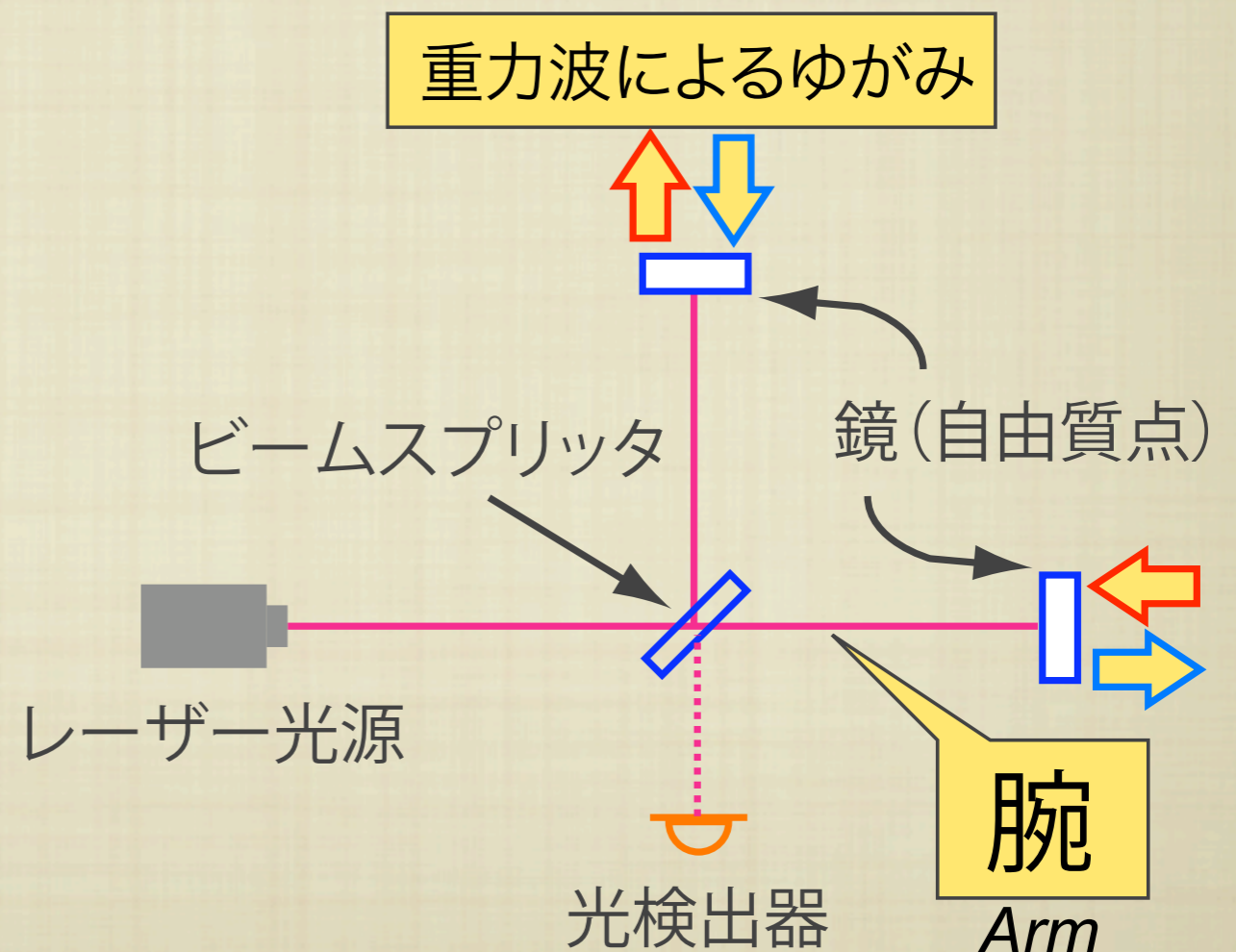
高周波重力波に対して感度が悪い

- * 低周波では腕を長くすれば感度改善 (例) 日本TAMA: 300m, 米LIGO: 4km
LCGTは3kmの予定
- * 高周波では腕を長くしても改善しない!!

腕に光が滞在している間に重力波の位相が変わってしまう



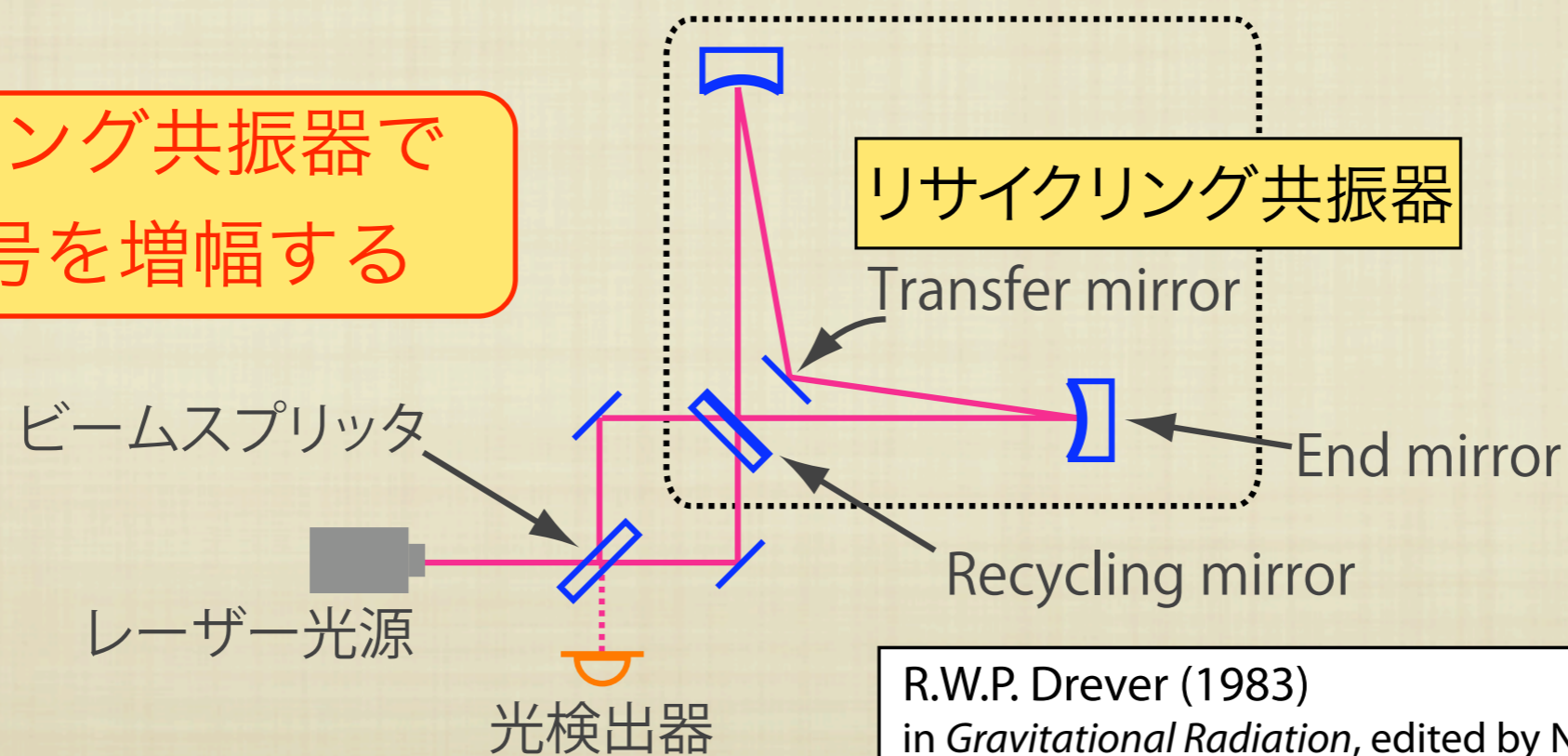
正味の光路長変化が小さくなってしまふ



超高周波重力波をとらえるには

- シンクロナス・リサイクリング干渉計
 - * 利点: マイケルソンより高感度にできる
 - * 難点: 感度の向上に比例して狭帯域化
 - * 特定の周波数でのみ高感度になる

リサイクリング共振器で
重力波信号を増幅する

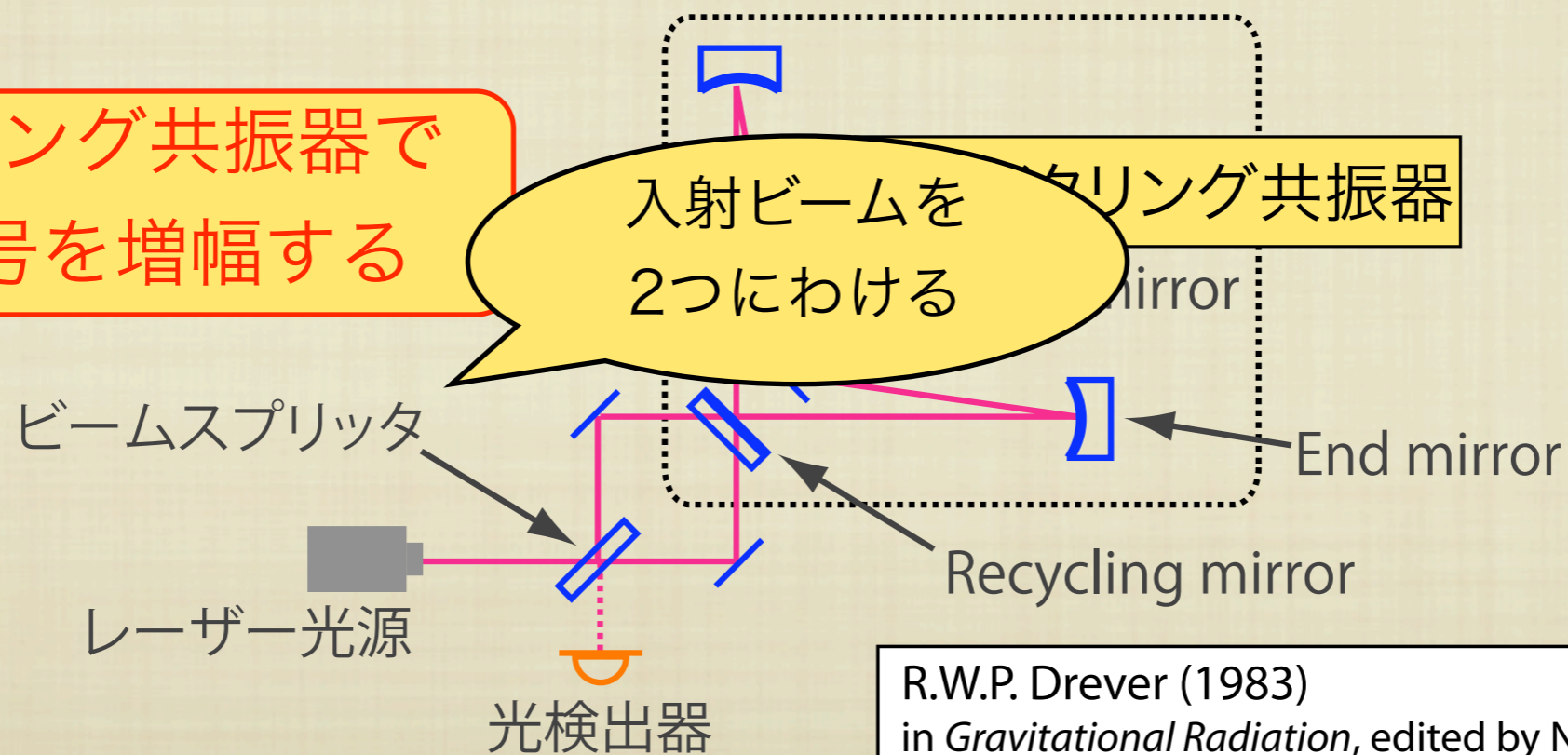


R.W.P. Drever (1983)
in *Gravitational Radiation*, edited by N.Deruelle and T. Piran

超高周波重力波をとらえるには

- シンクロナス・リサイクリング干渉計
 - * 利点: マイケルソンより高感度にできる
 - * 難点: 感度の向上に比例して狭帯域化
 - * 特定の周波数でのみ高感度になる

リサイクリング共振器で
重力波信号を増幅する

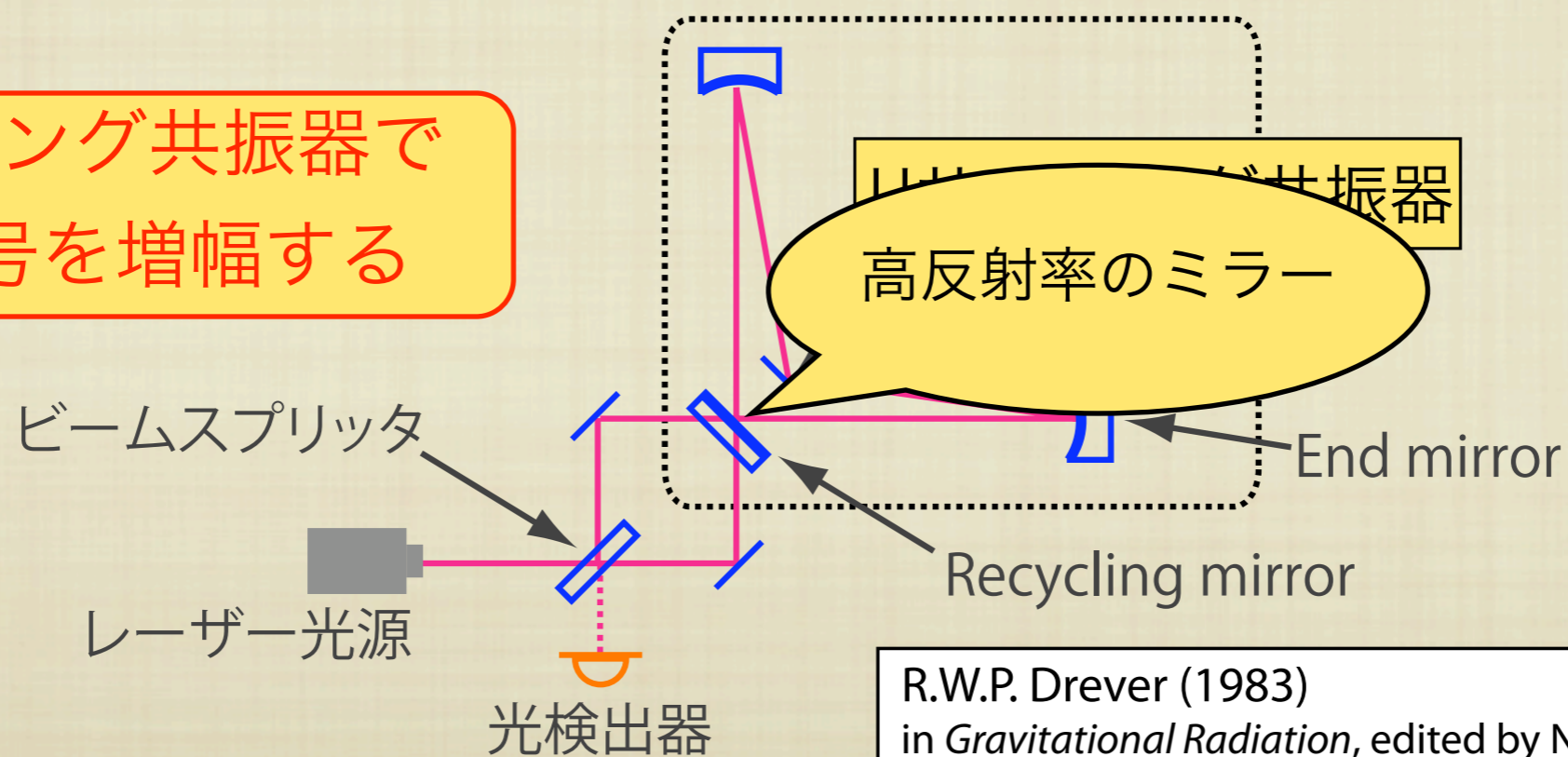


R.W.P. Drever (1983)
in *Gravitational Radiation*, edited by N.Deruelle and T. Piran

超高周波重力波をとらえるには

- シンクロナス・リサイクリング干渉計
 - * 利点: マイケルソンより高感度にできる
 - * 難点: 感度の向上に比例して狭帯域化
 - * 特定の周波数でのみ高感度になる

リサイクリング共振器で
重力波信号を増幅する



R.W.P. Drever (1983)
in *Gravitational Radiation*, edited by N.Deruelle and T. Piran

超高周波重力波をとらえるには

■ シンクロナス・リサイクリング干渉計

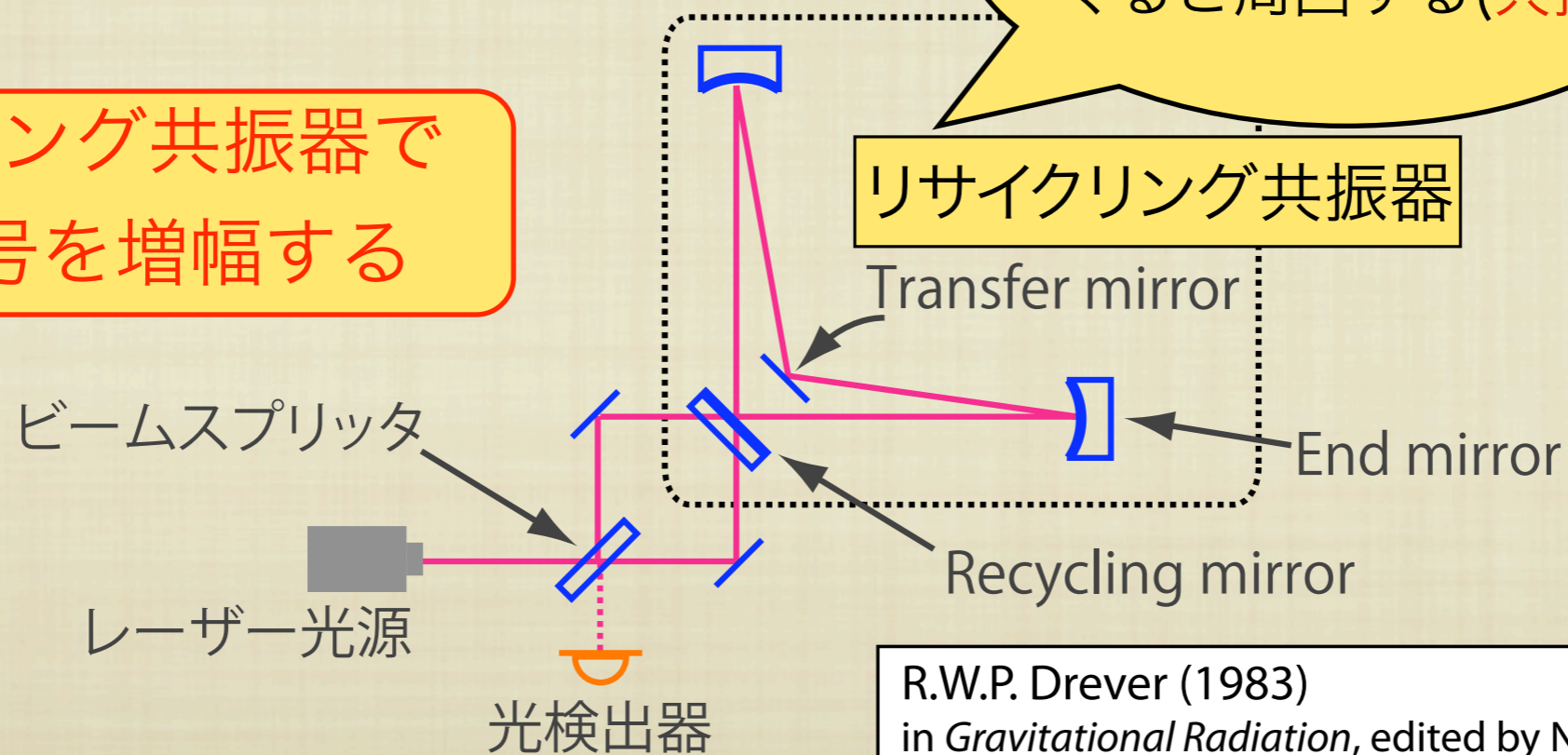
* 利点: マイケルソンより高感度にできる

* 難点: 感度の向上に比例して狭帯域

* 特定の周波数でのみ高感度になる

共振器(cavity)内を
光が右回り・左回りにぐる
ぐると周回する(共振)

リサイクリング共振器で
重力波信号を増幅する

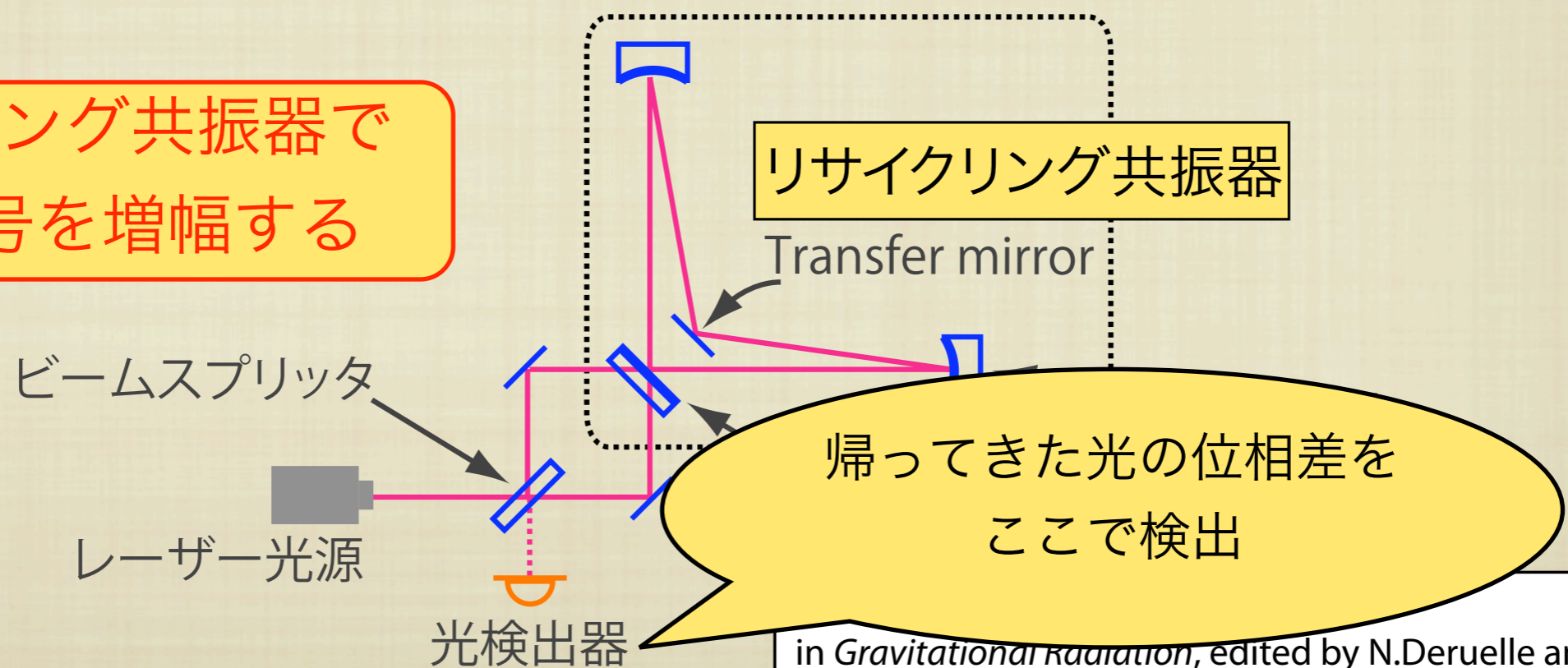


R.W.P. Drever (1983)
in *Gravitational Radiation*, edited by N. Deruelle and T. Piran

超高周波重力波をとらえるには

- シンクロナス・リサイクリング干渉計
 - * 利点: マイケルソンより高感度にできる
 - * 難点: 感度の向上に比例して狭帯域化
 - * 特定の周波数でのみ高感度になる

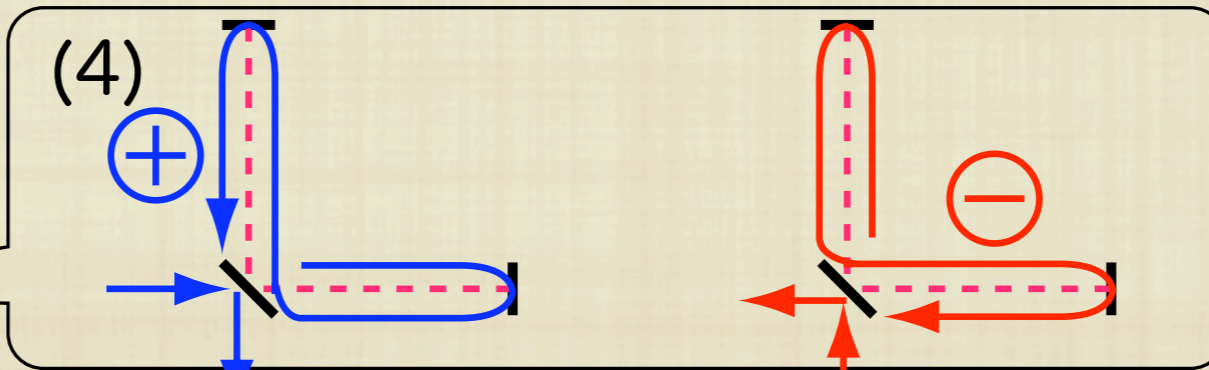
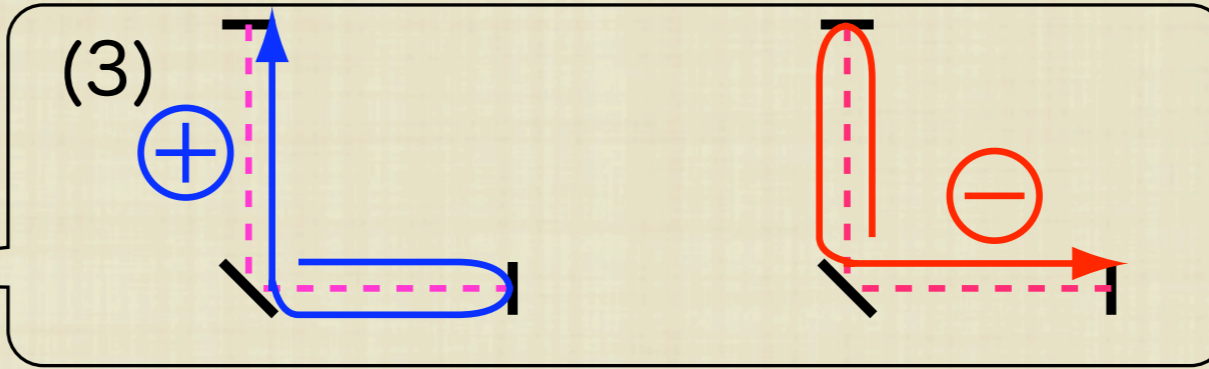
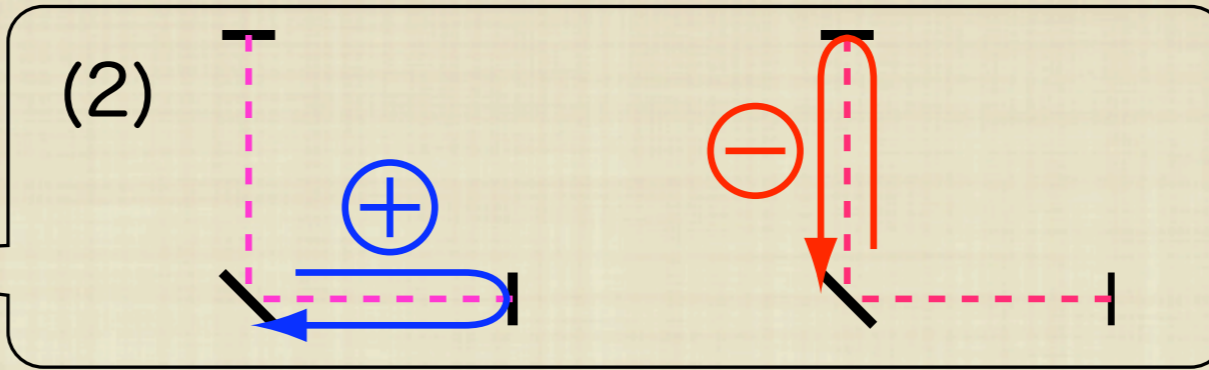
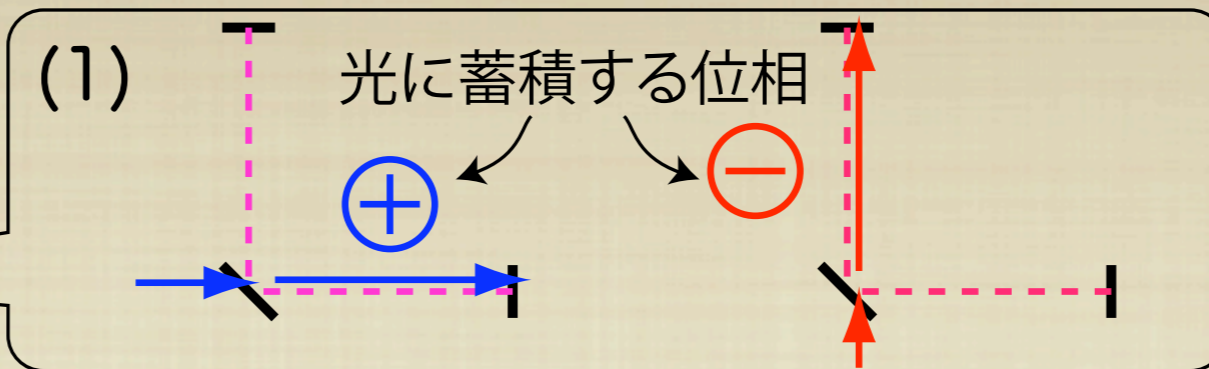
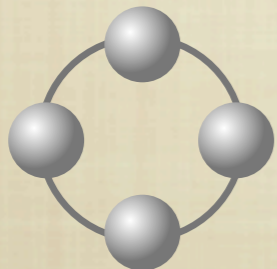
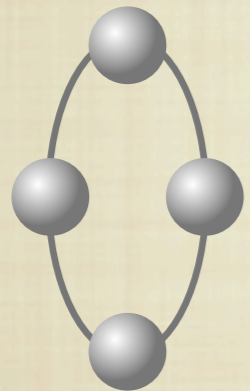
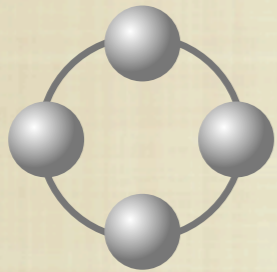
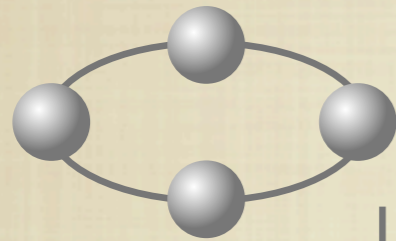
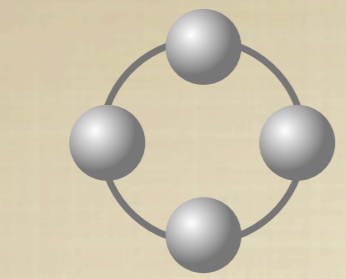
リサイクリング共振器で
重力波信号を増幅する



in *Gravitational Radiation*, edited by N. Deruelle and T. Piran

光がcavityを1周する時間と同じ周期の
重力波を考える

重力波の位相

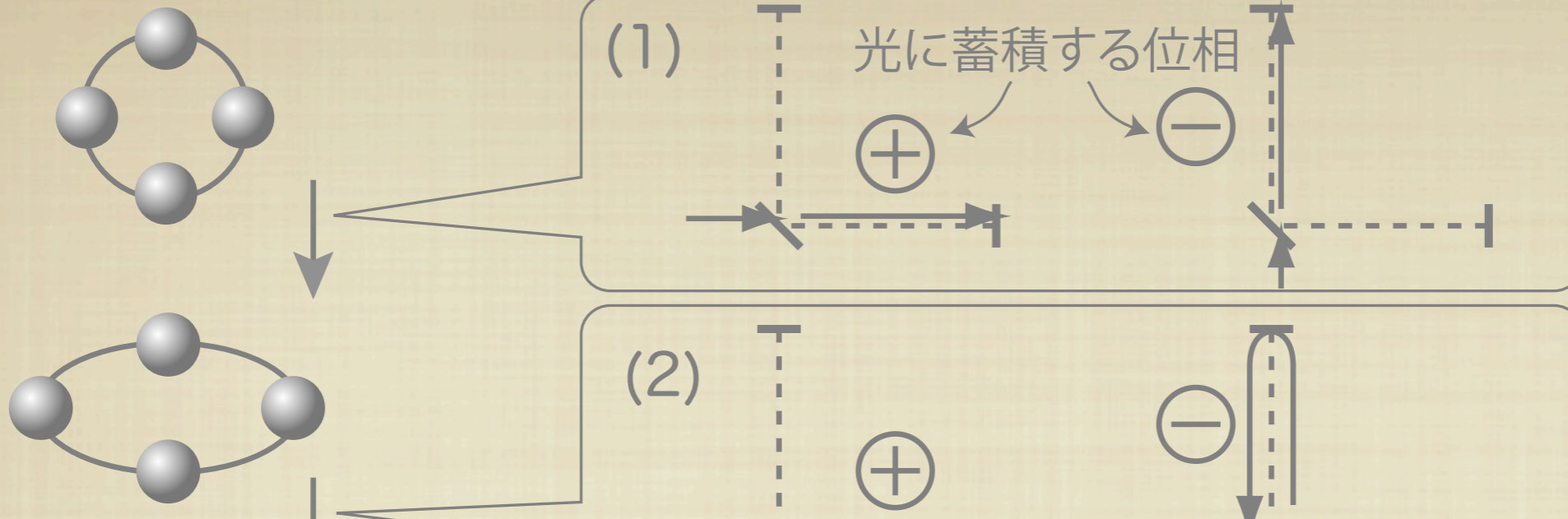


重力波の周期 = 光が1周する周期

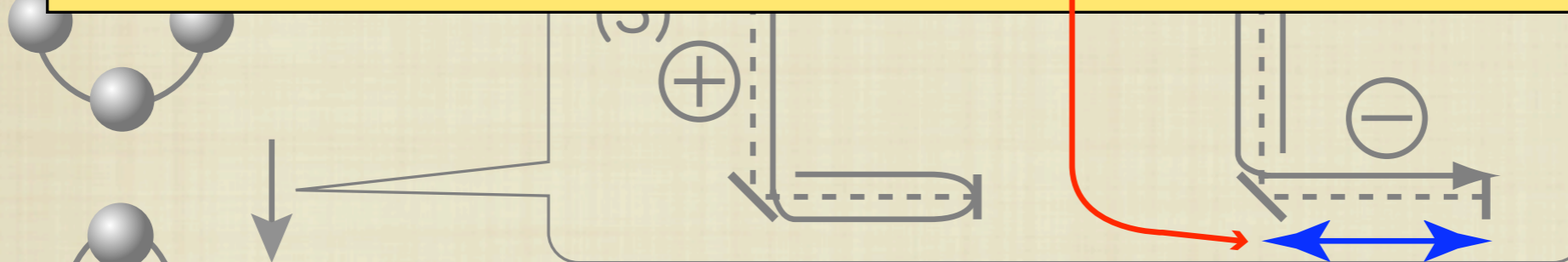
であれば、cavity 内部の光の余剰位相は増え続ける

この繰り返りで重力波信号が増幅される

重力波の位相



重力波100MHz => 基線長 75 cm



テーブルトップで実験できる

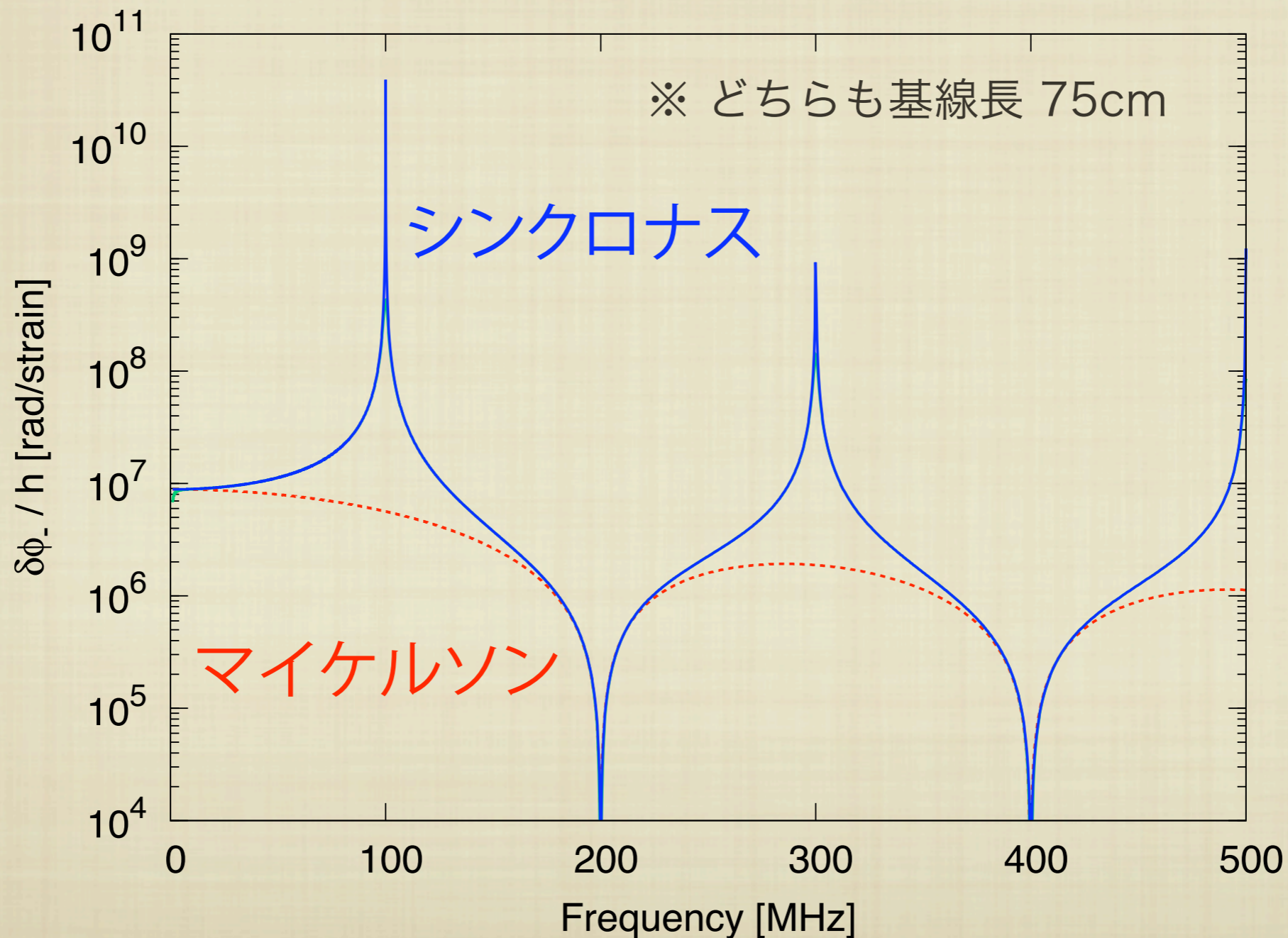
重力波の周期 = 光が1周する周期

であれば、cavity 内部の光の余剰位相は増え続ける

この繰り返しで重力波信号が増幅される

重力波への応答

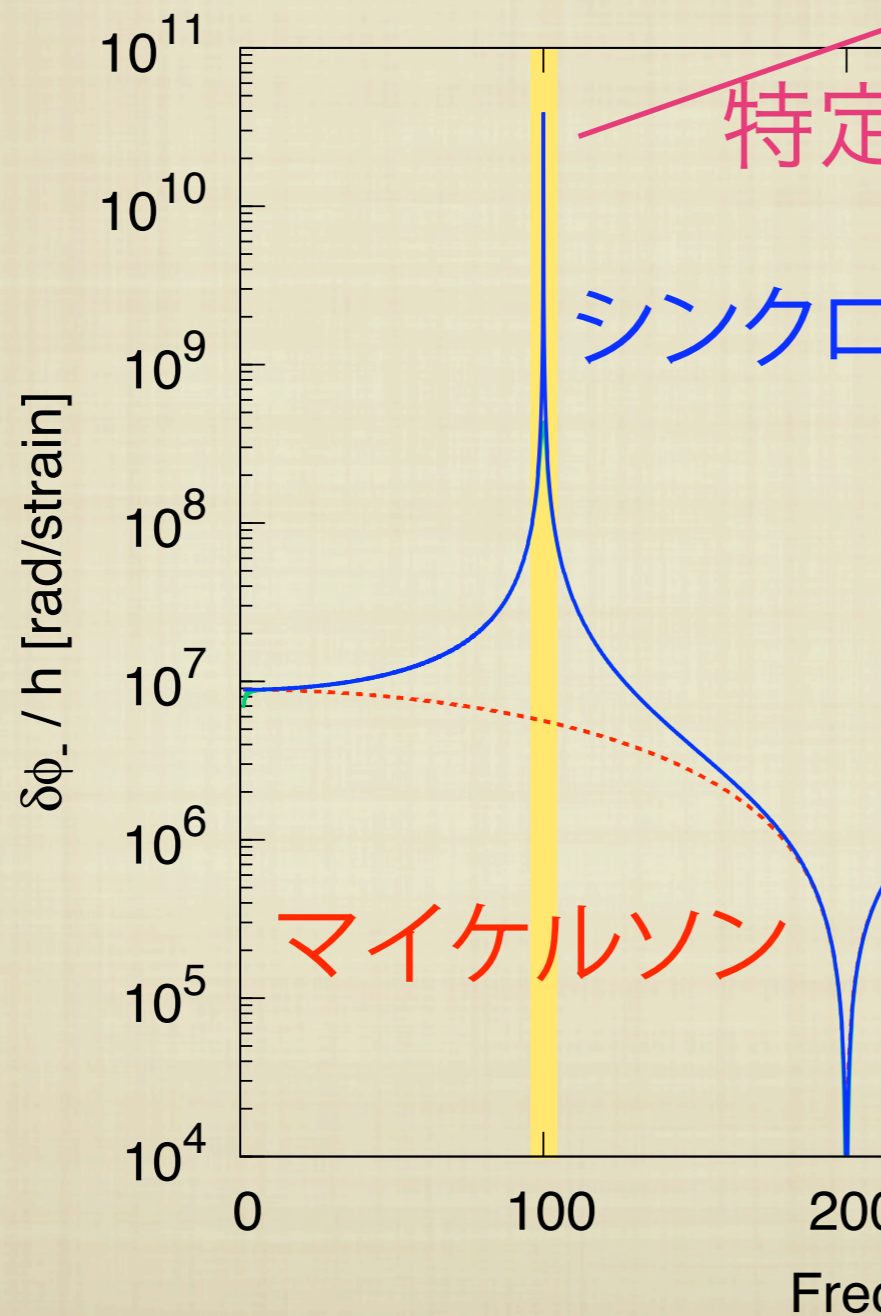
特定の周波数でマイケルソンの応答を上回る



重力波への応答

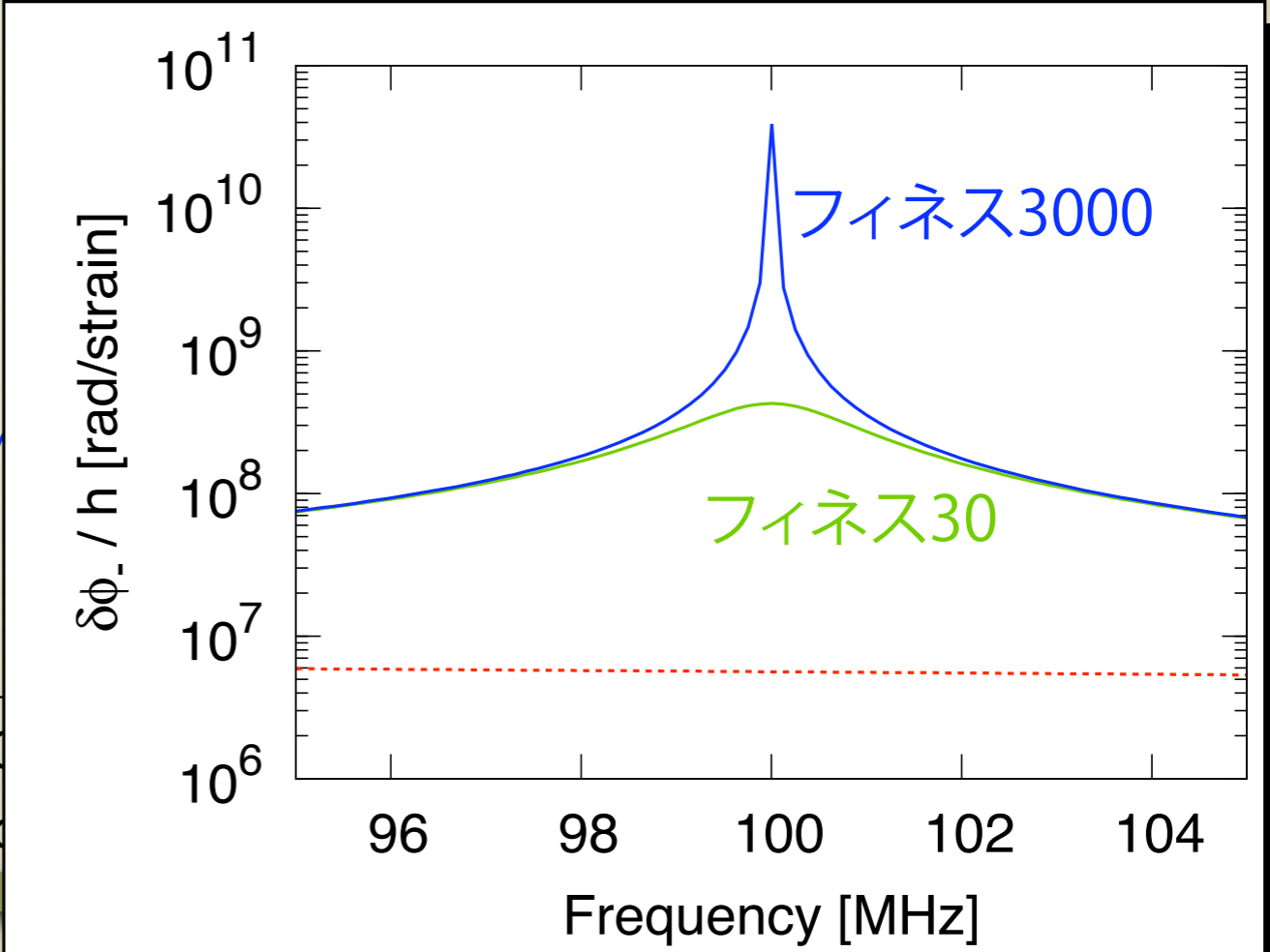
※フィネスは共振の鋭さを表す量で、
cavity内の光の周回回数に比例する

フィネスを高くすると高感度化



特定の周波数でだけ

シンクロナス



フィネス3000

フィネス30

Frequency [MHz]

到達しうるノイズレベル

■ “Strain noise”で表現

* 干渉計のノイズを重力波に換算したもの

* strain (歪み) 振幅は無次元量

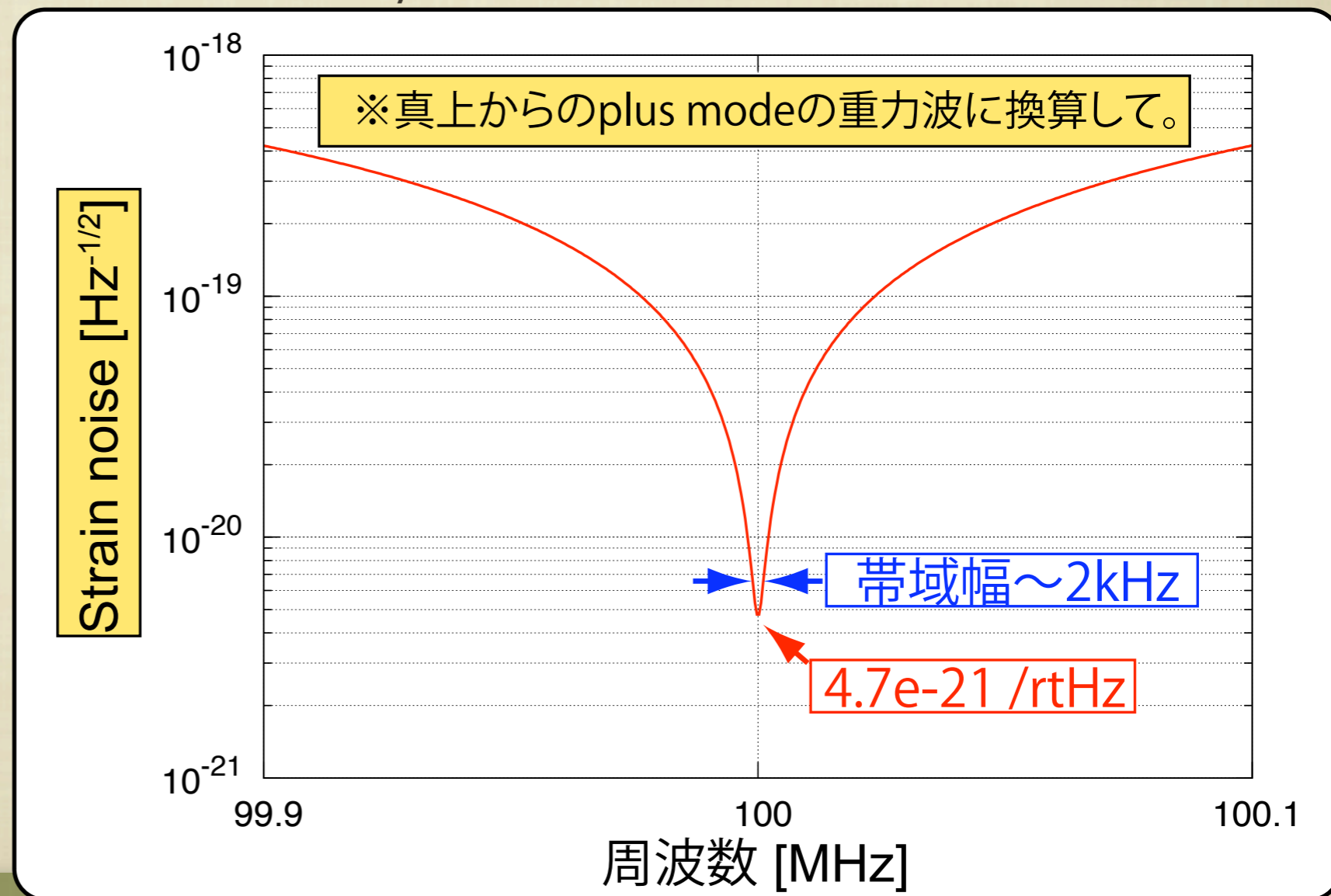
* そのパワースペクトル密度の1/2乗

・ 仮定

ノイズ源: shot noiseだけ

Laser光源: 500mW

Cavityのフィネス: 45,000



つまり赤線はS/N=1に相当

とくにランダム信号状の背景放射に対し

複数台の出力の相互相関を計算して
互いに無相関なノイズを落とす

単体 strain noise: $h_{\text{sn}} \simeq 4.7 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$

単体全天平均: $h_{\text{rms}} \simeq 7.6 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$

重力波のエネルギー密度

$$h_0^2 \Omega_{\text{gw}}(f) = 7.2 \times 10^{19} \left(\frac{f}{100 \text{ MHz}} \right)^3 \left(\frac{h_{\text{rms}}(f)}{7.6 \times 10^{-21}} \right)^2$$

2台で1年相関後

$$h_0^2 \Omega_{\text{gw}}(f) = 2.8 \times 10^{14} \left(\frac{f}{100 \text{ MHz}} \right)^3 \left(\frac{h_{\text{rms}}(f)}{7.6 \times 10^{-21}} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ yr}}{T} \right)^{1/2} \left(\frac{2 \text{ kHz}}{BW} \right)^{1/2}$$

※光強度: 500mW

$$\Omega_{\text{gw}}(f) \equiv \frac{4\pi^2}{3H_0^2} f^3 h_{\text{rms}}^2(f)$$

$$h_{\text{rms}} \simeq 1.63 h_{\text{sn}} @ 100 \text{ MHz}$$

ハッブル定数 $H_0 \equiv h_0 \times 100 \text{ km/s/Mpc}$

もくじ

1. はじめに
2. 超高周波重力波
3. 本実験で用いた重力波検出器
4. データ解析
5. まとめ

今回の実験に関して

開発ロードマップ

今回やった部分

1台目(低フィネス)の開発

フィネス100、大気中

2台目(低フィネス)の開発

データ解析

高フィネス版の開発

フィネス45,000 in vacuum

ふたたびデータ解析

■ 実験・確認すべき事が3点

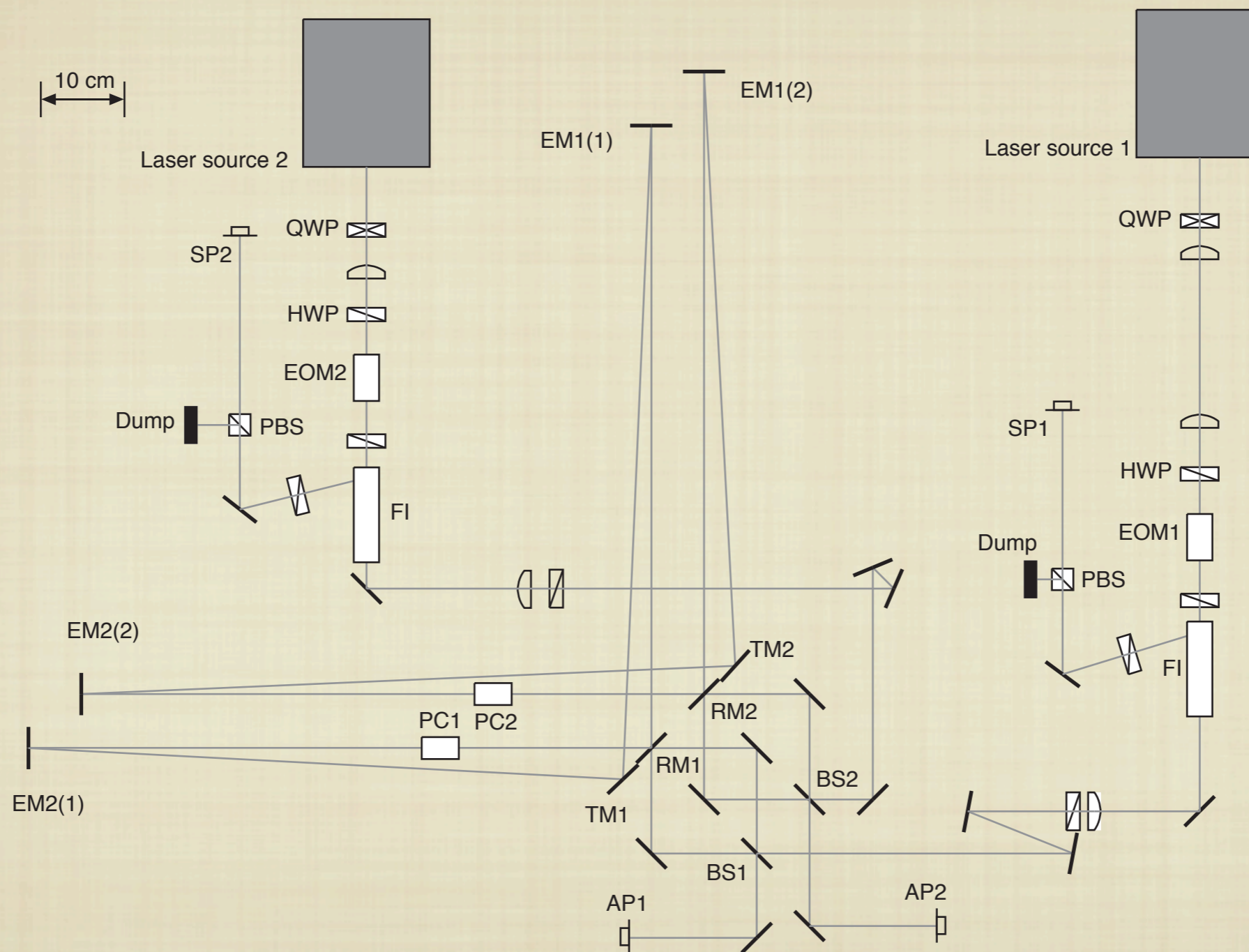
* そもそもcavityがロックするの
か?

* この干渉計自体が今回はじめて
実装された

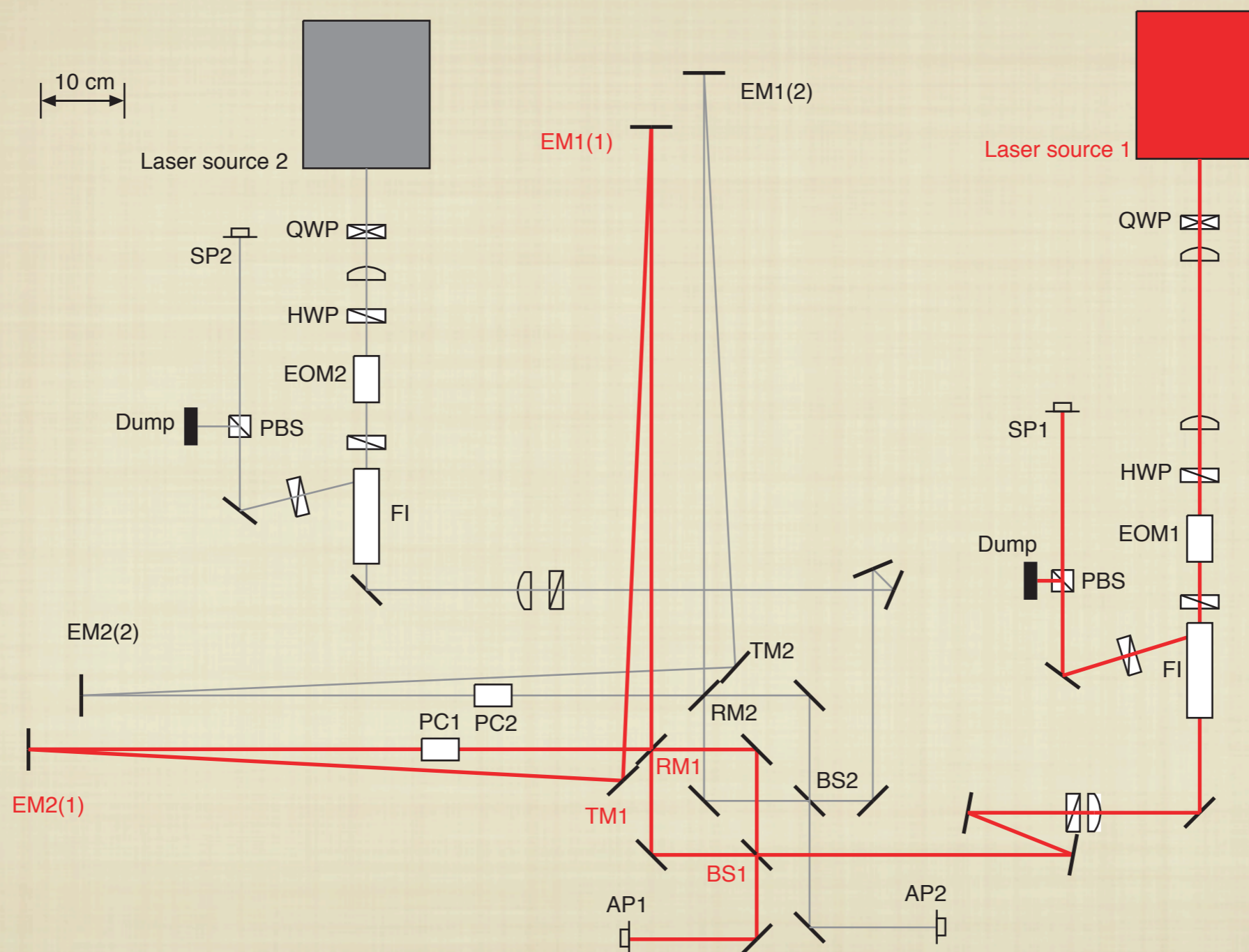
* 重力波信号の具体的な取り出し
方法

* 干渉計の出力と重力波振幅の対
応づけ => いわゆるcalibration

実際の光学系の簡略図

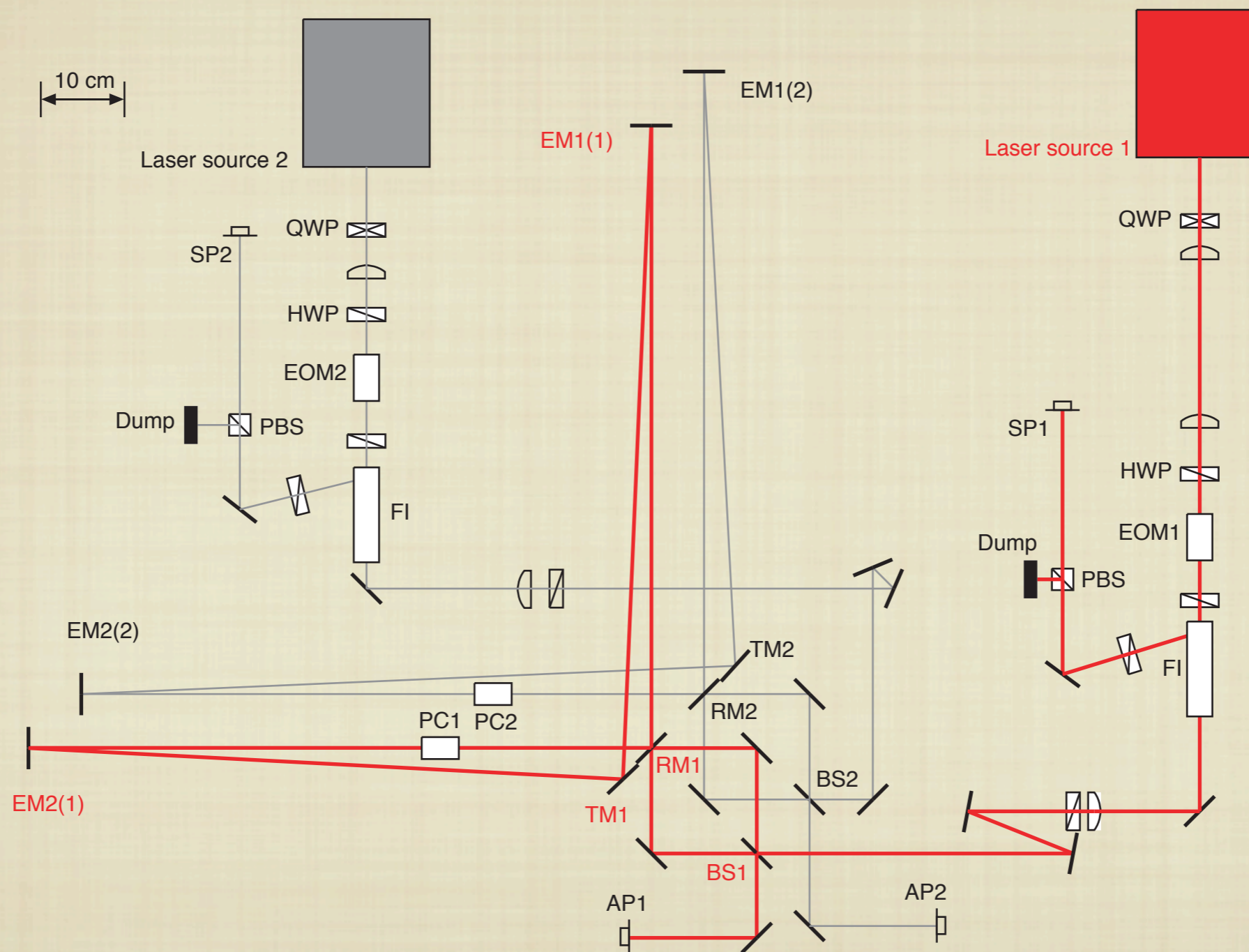


実際の光学系の簡略図

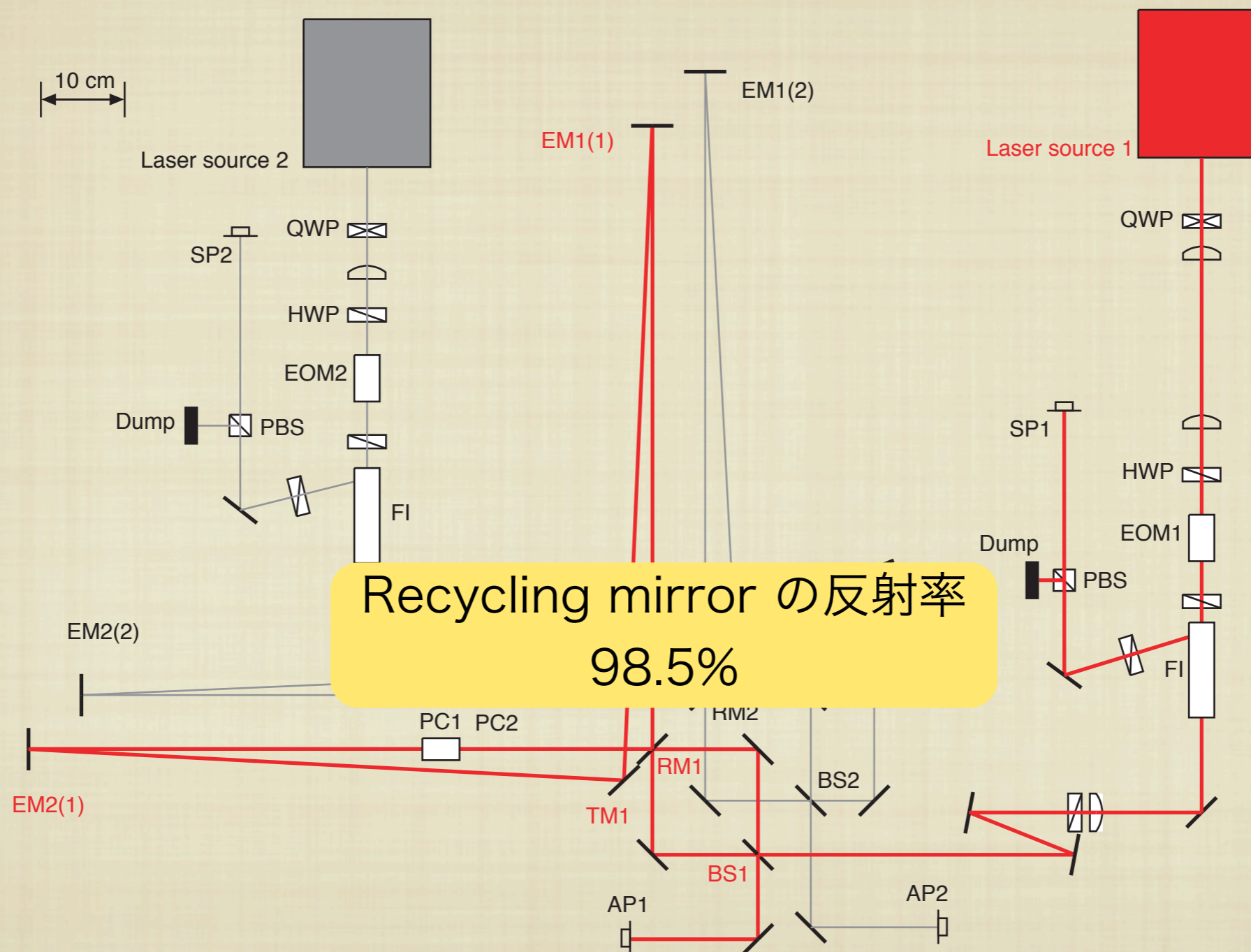


実際の光学系の簡略図

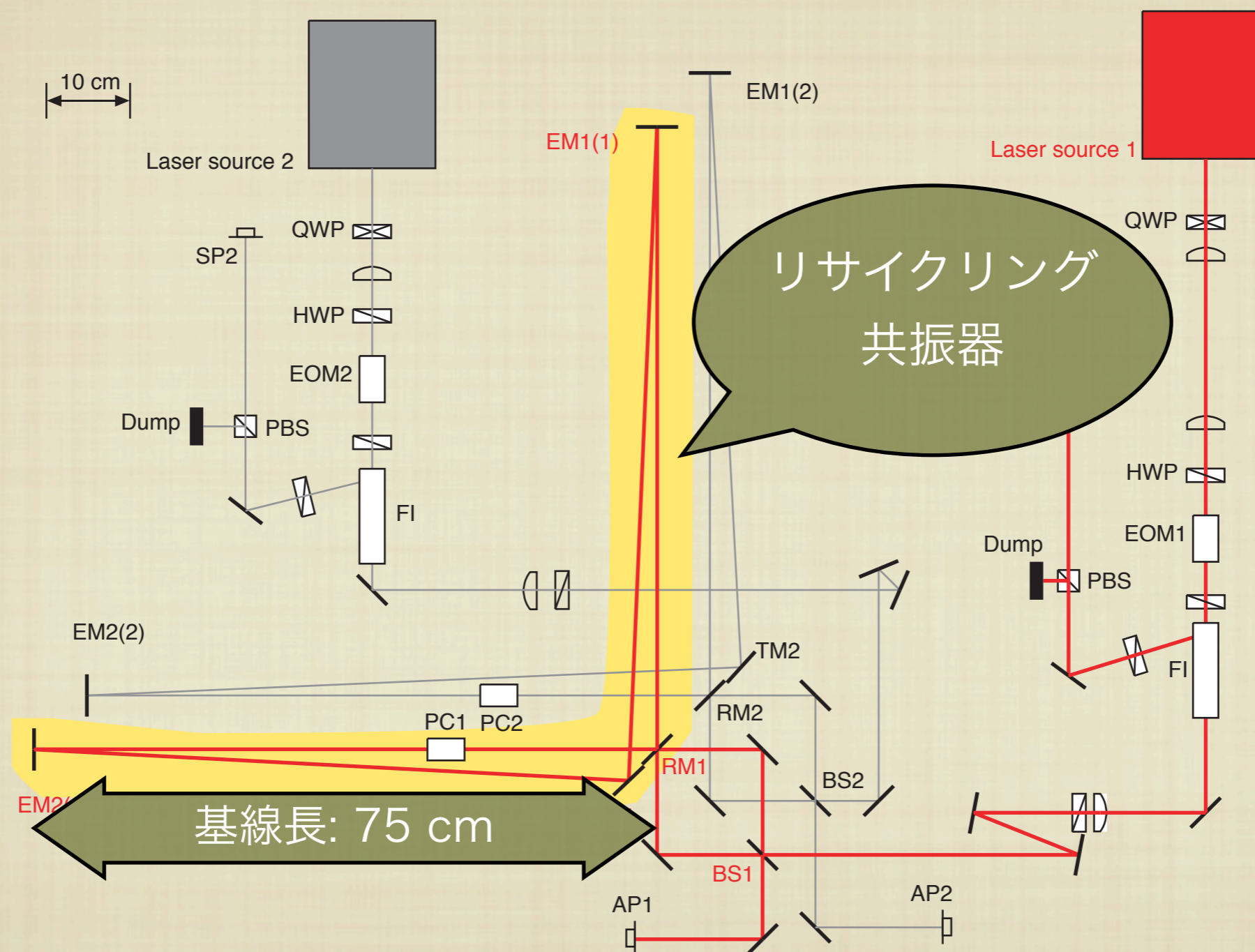
光源
強度:500 mW
波長:1.064 μm



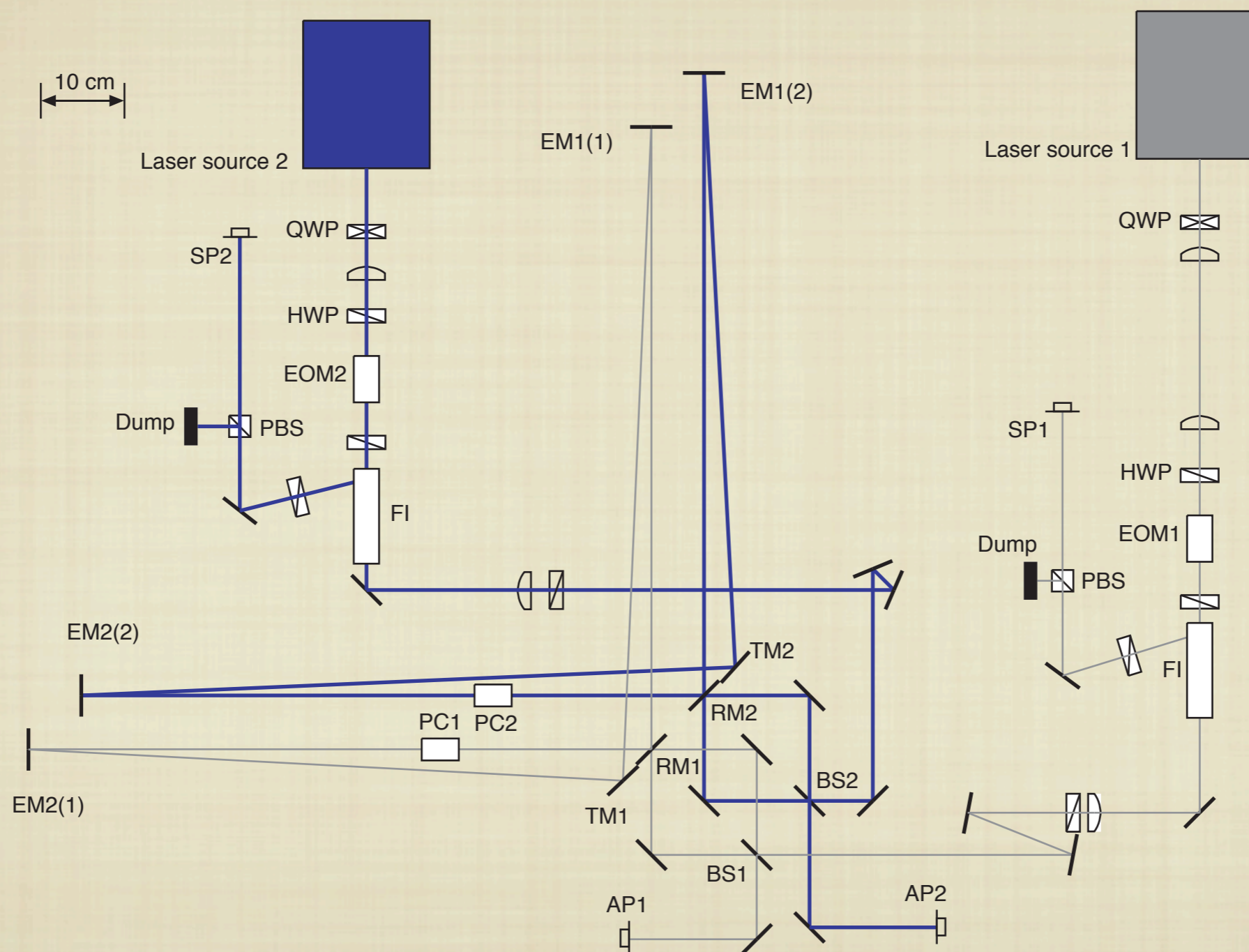
実際の光学系の簡略図



実際の光学系の簡略図

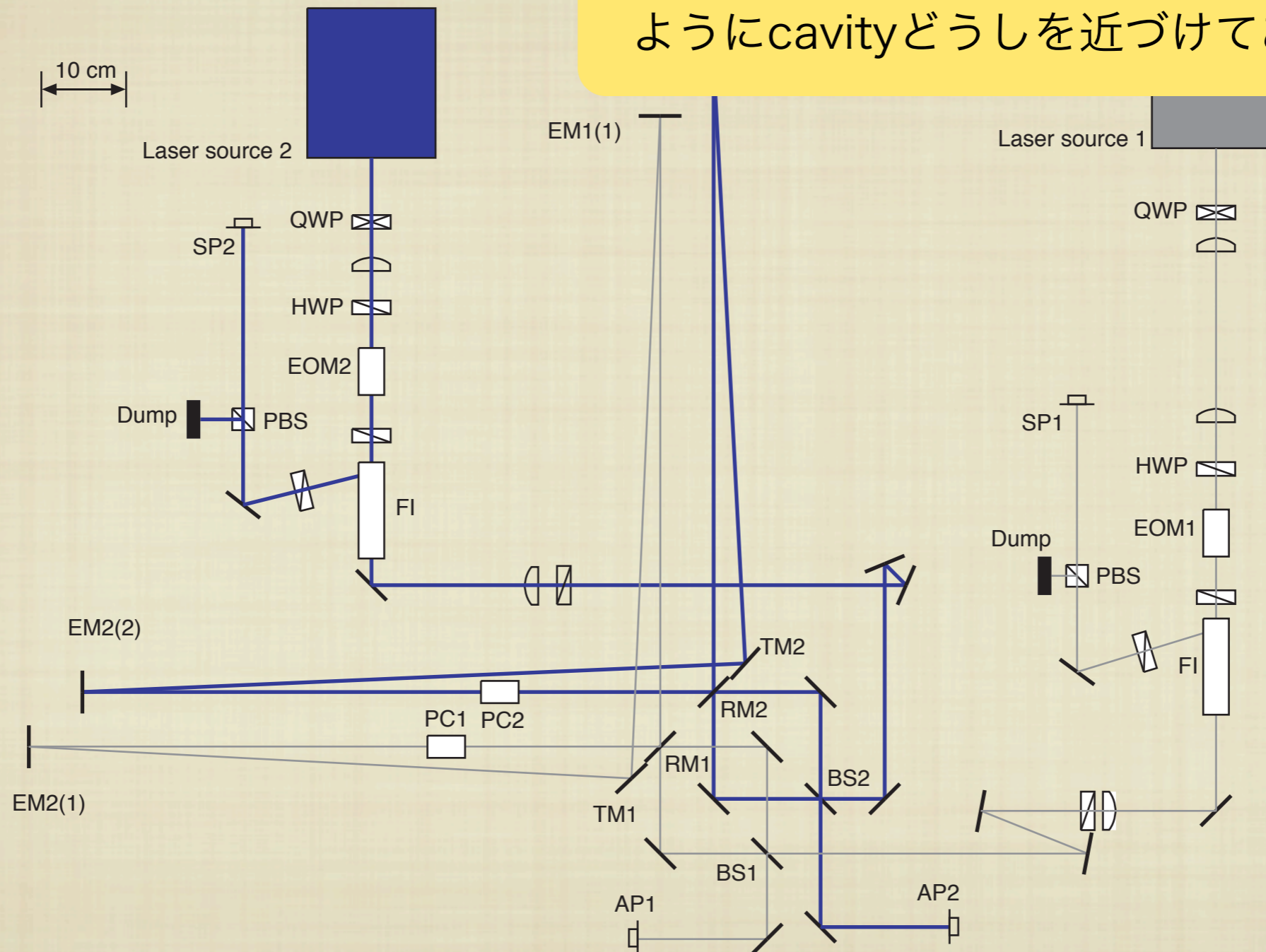


実際の光学系の簡略図



実際の光学系の簡略図

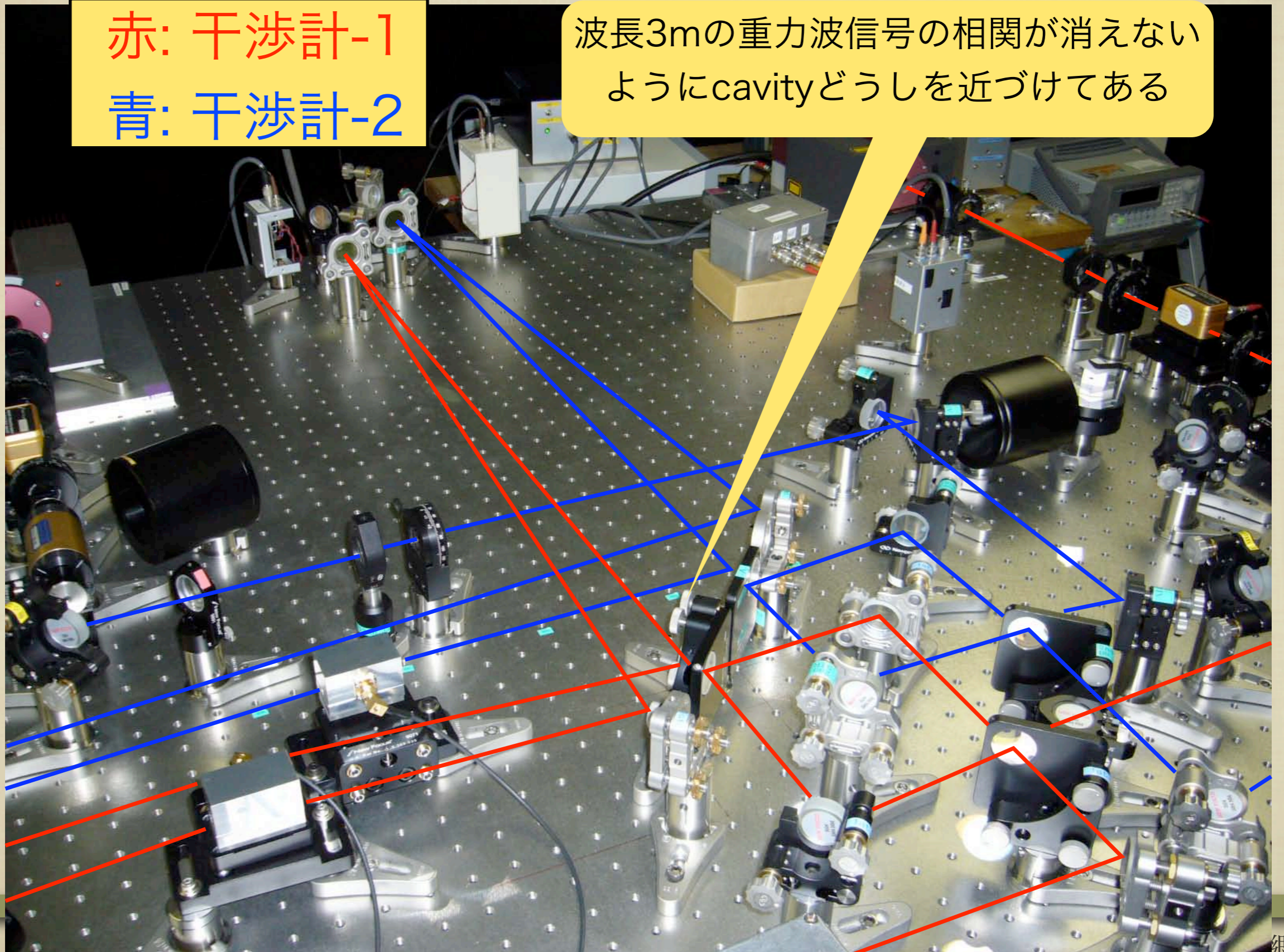
波長3mの重力波信号の相関が消えないようにcavityどうしを近づけてある



実際の干渉計

赤: 干渉計-1
青: 干渉計-2

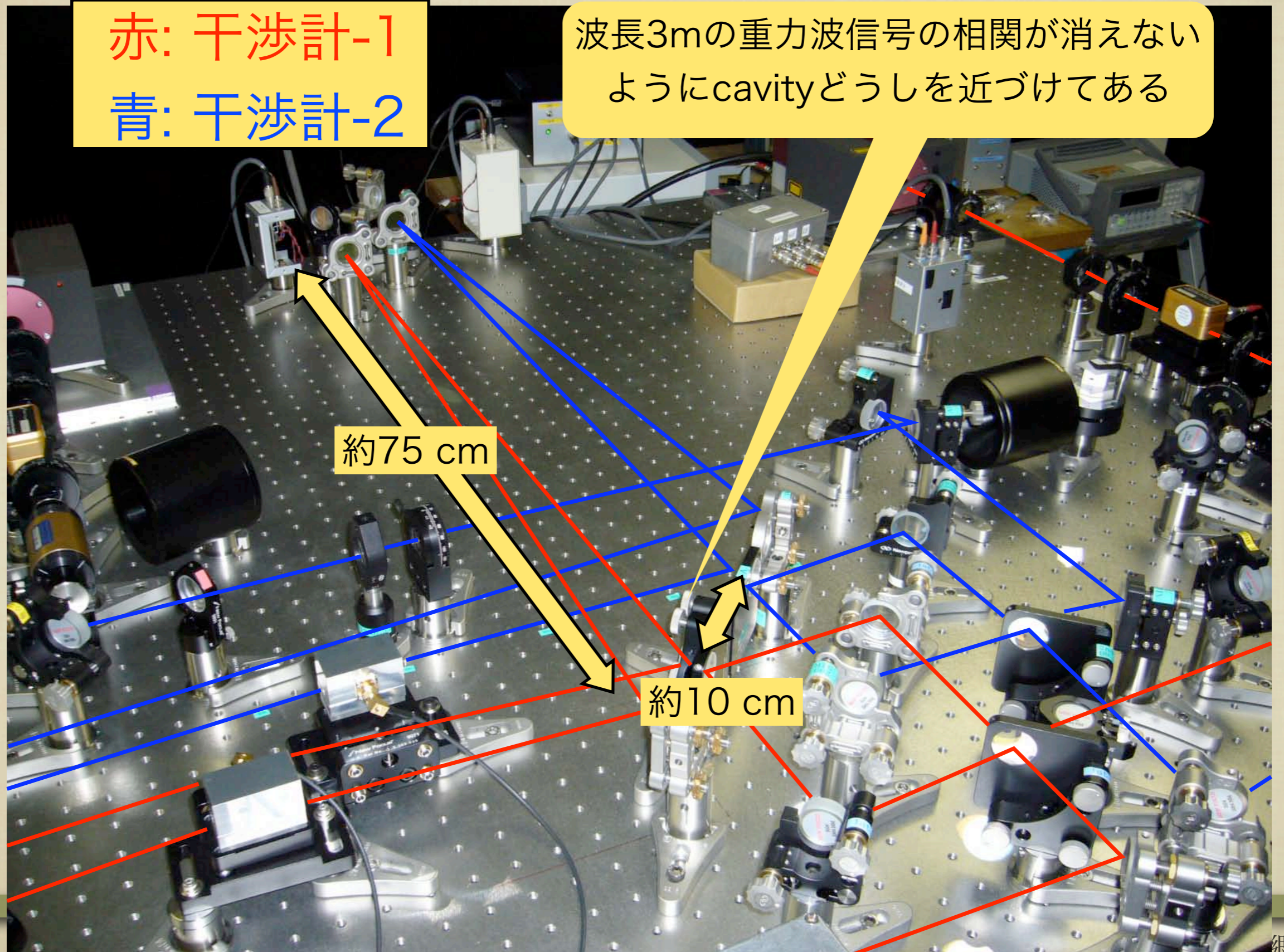
波長3mの重力波信号の相関が消えない
ようにcavityどうしを近づけてある



実際の干渉計

赤: 干渉計-1
青: 干渉計-2

波長3mの重力波信号の相関が消えないようにcavityどうしを近づけてある

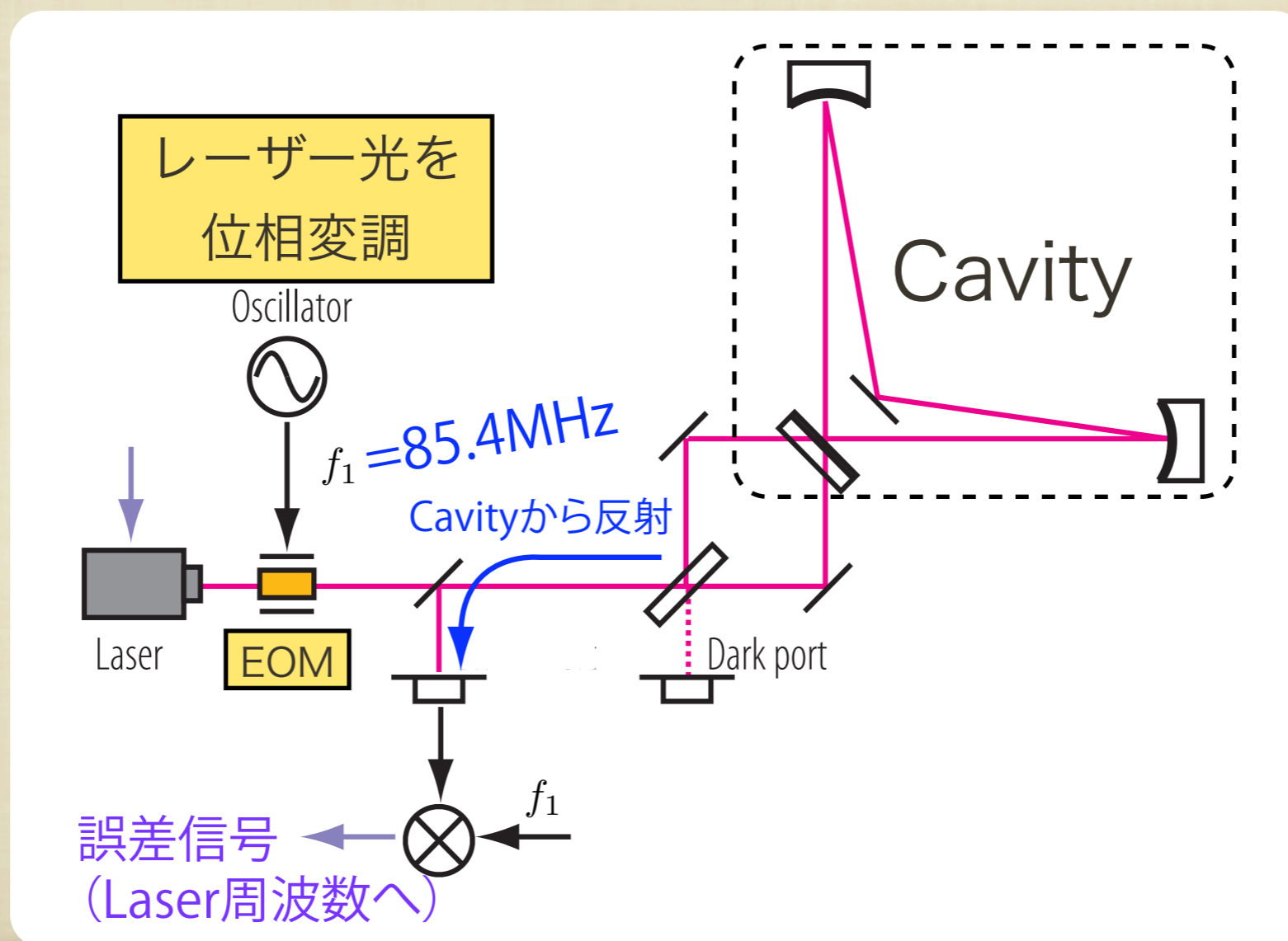


約75 cm

約10 cm

Pound-Drever-Hall法による制御

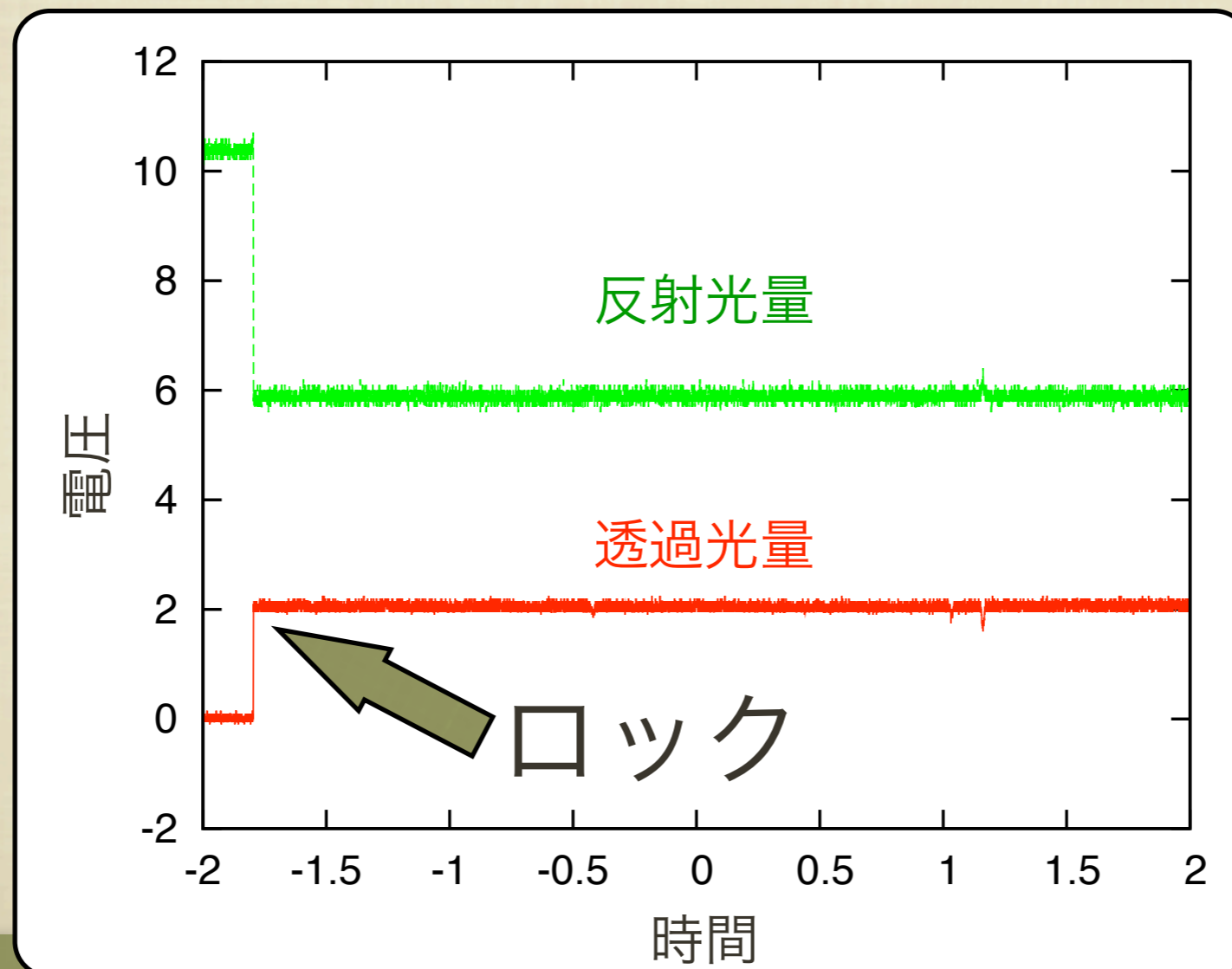
Cavityに光が共振し続けるように、
レーザーの周波数を制御する



Cavityのロック

■ Cavityの透過光量の変化

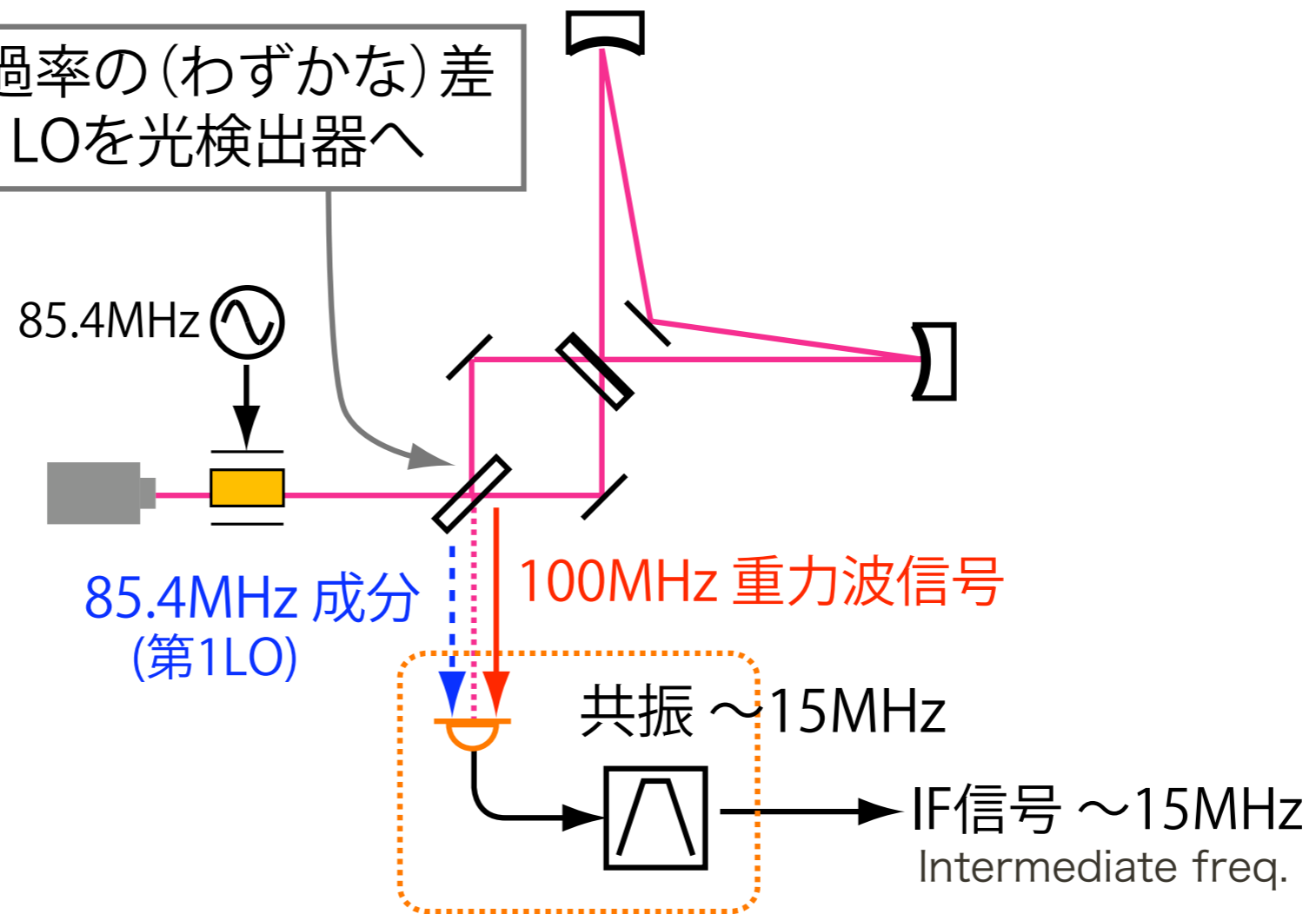
- * 光が共振するとcavity内部の光量が増加
- * よってcavityを透過する光の量も増える



重力波信号の取り出し

受光するときに中間周波数へ
down convertする

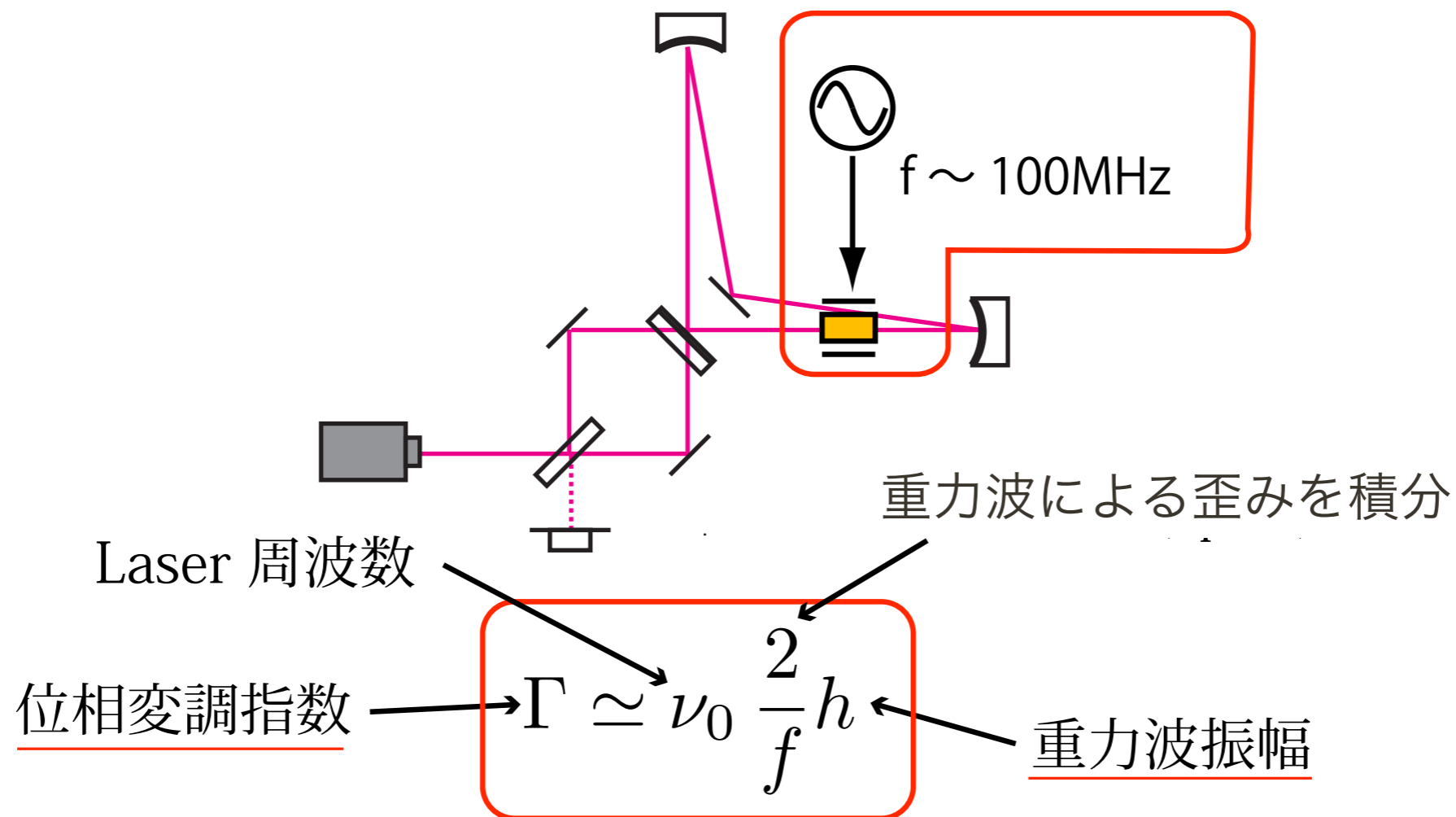
BS 反射率/透過率の(わずかな)差
を利用して第1LOを光検出器へ



LO: local oscillator

干渉計の出力を重力波振幅へ校正

Cavity内の光を位相変調し、
重力波の代わりにする

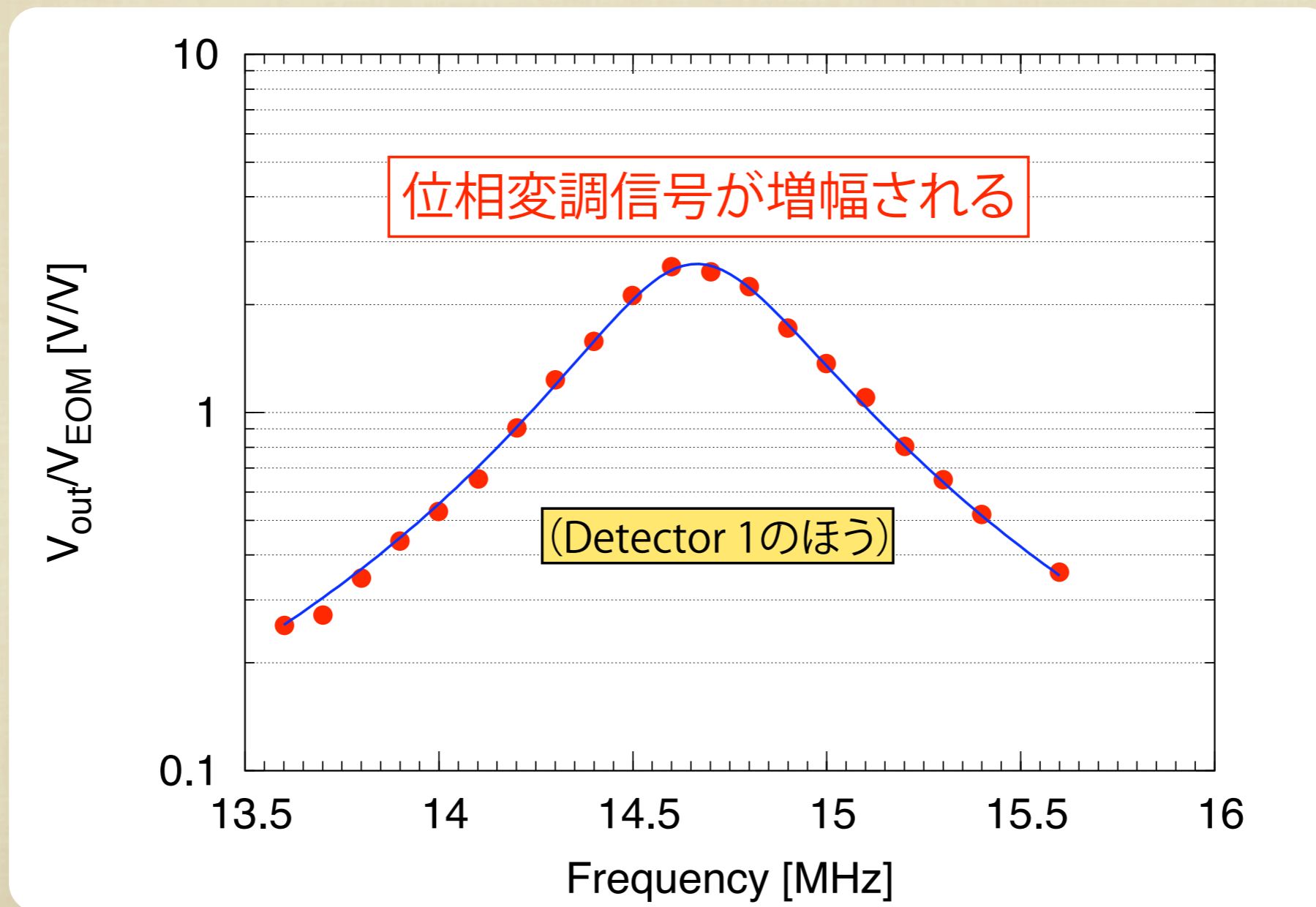


※ Cavityのend mirror近くにcellを置いた場合。

変換係数の測定例

- 測定結果が理論曲線でfitできることを確認

* 理論線 \leftarrow Cavityによる共振特性とPDの共振特性 光検出器の回路から

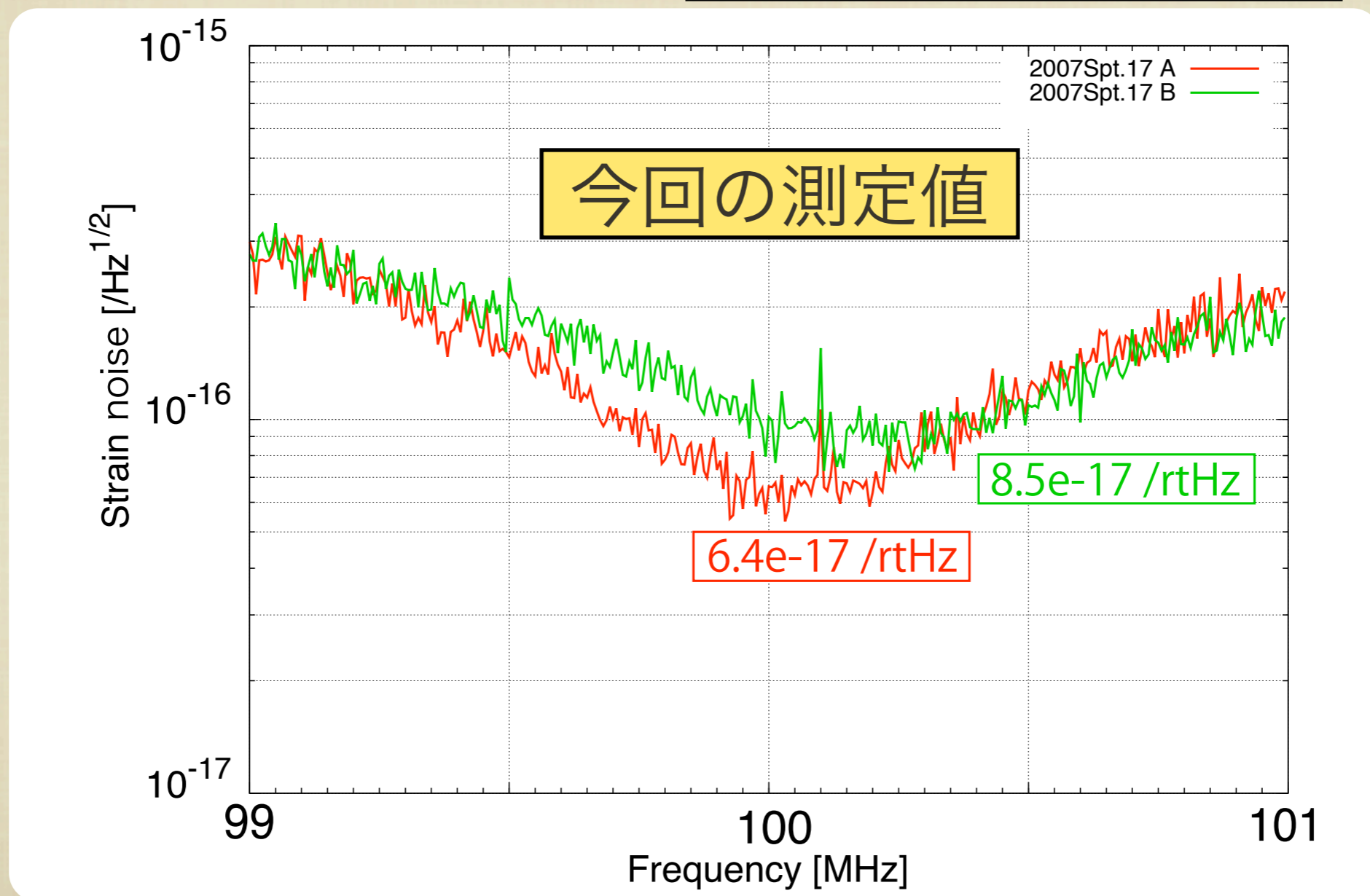


各干渉計の感度

- 100MHz付近で**最高感度**を達成

* 今までの値: $10^{-14} \text{ Hz}^{-1/2}$

A. M. Cruise and R. M. J. Ingley (2006)
Class. Quantum. Grav. **23**, 6185

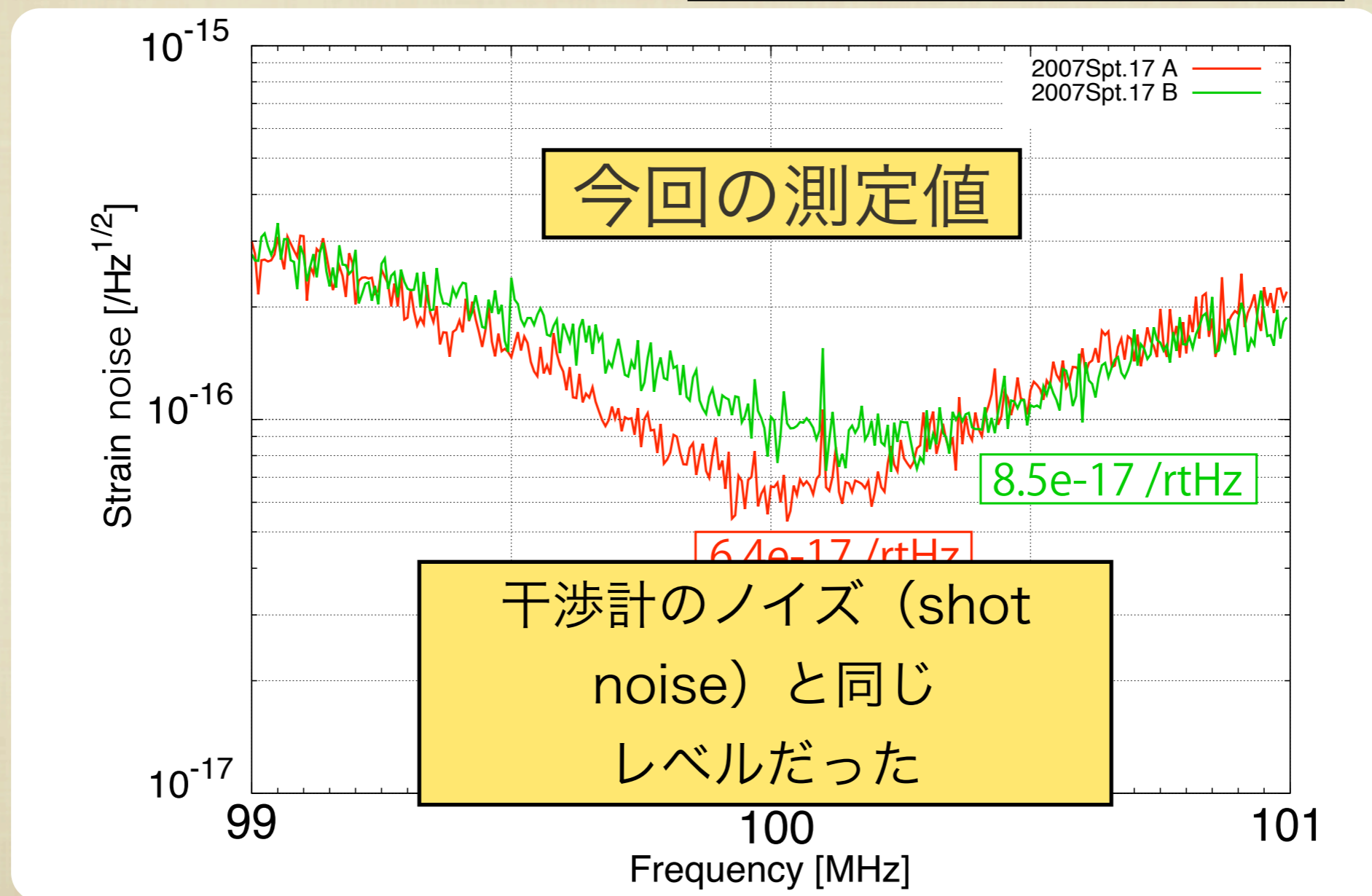


各干渉計の感度

- 100MHz付近で**最高感度**を達成

* 今までの値: $10^{-14} \text{ Hz}^{-1/2}$

A. M. Cruise and R. M. J. Ingley (2006)
Class. Quantum. Grav. **23**, 6185

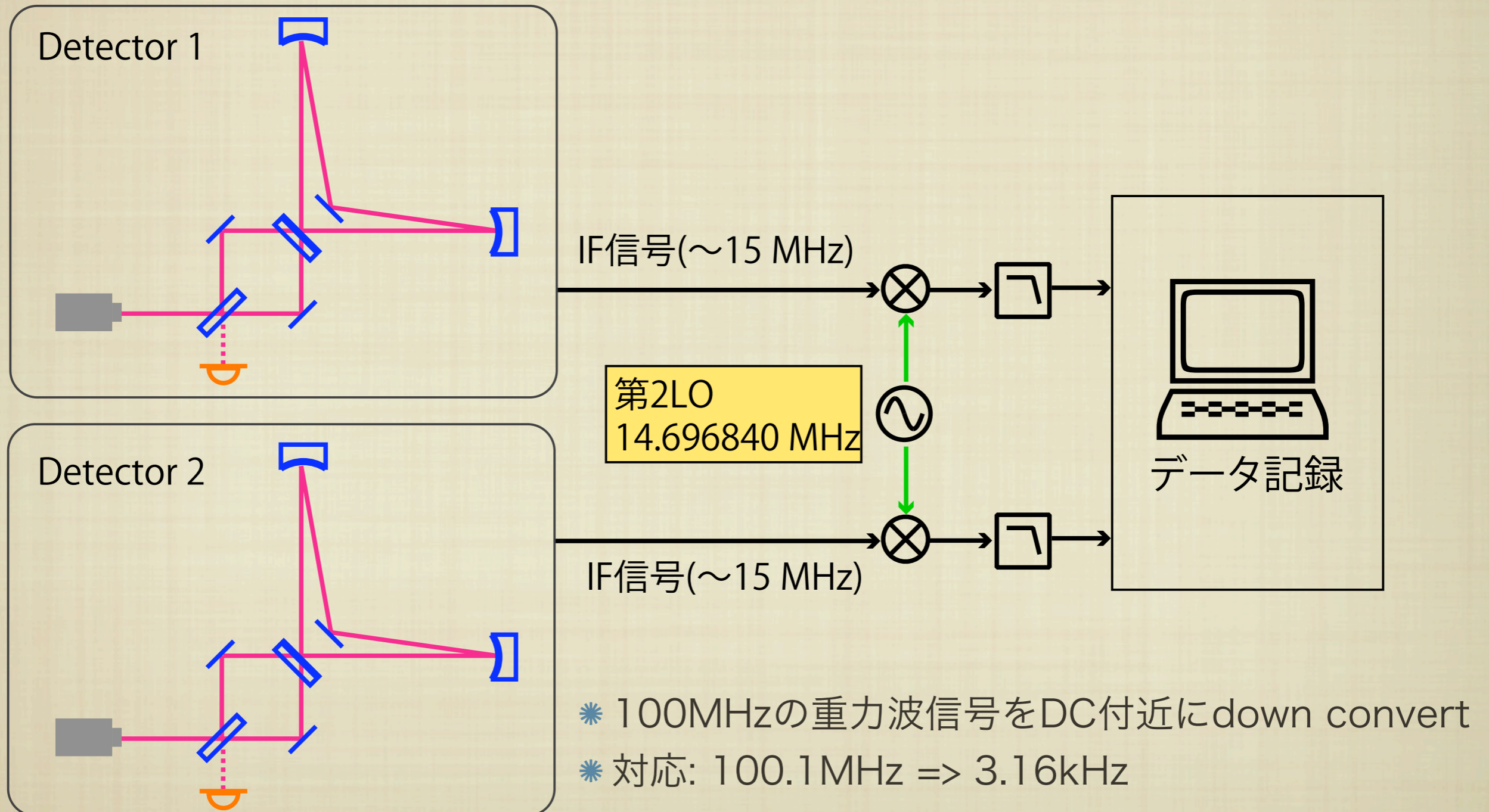


もくじ

1. はじめに
2. 超高周波重力波
3. 本実験で用いた重力波検出器
4. データ解析
5. まとめ

データ解析のために

100.1MHzのまわり2kHzを取り出す



以下では

- 解析に使用した諸量の定義
 - * 相互相関量
 - * 推定の不定性
 - * 信号対雑音比(S/N)
- 実際の解析
 - * 重力波背景放射のエネルギー密度の上限値

干渉計の出力

$$\text{干渉計からの出力: } x(t) = s(t) + n(t)$$

重力波信号 ノイズ

信号とノイズを含む

■ 仮定

* $s(t)$ と $n(t)$ はランダム信号

* 各々のアンサンブル平均はゼロ

$$\langle s(t) \rangle = 0$$

$$\langle n(t) \rangle = 0$$

* 重力波とノイズは相関なし $\langle s(t)n(t) \rangle = 0$

2台の干渉計からの出力

$$\text{干渉計1の出力: } x_1(t) = s(t) + n_1(t)$$

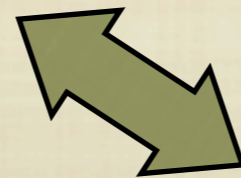
$$\text{干渉計2の出力: } x_2(t) = s(t) + n_2(t)$$

2台のノイズは無相関とする

$$\langle n_1(t)n_2(t) \rangle = 0$$

$x_1(t)$ & $x_2(t)$ の相互相関関数に信号だけ残る

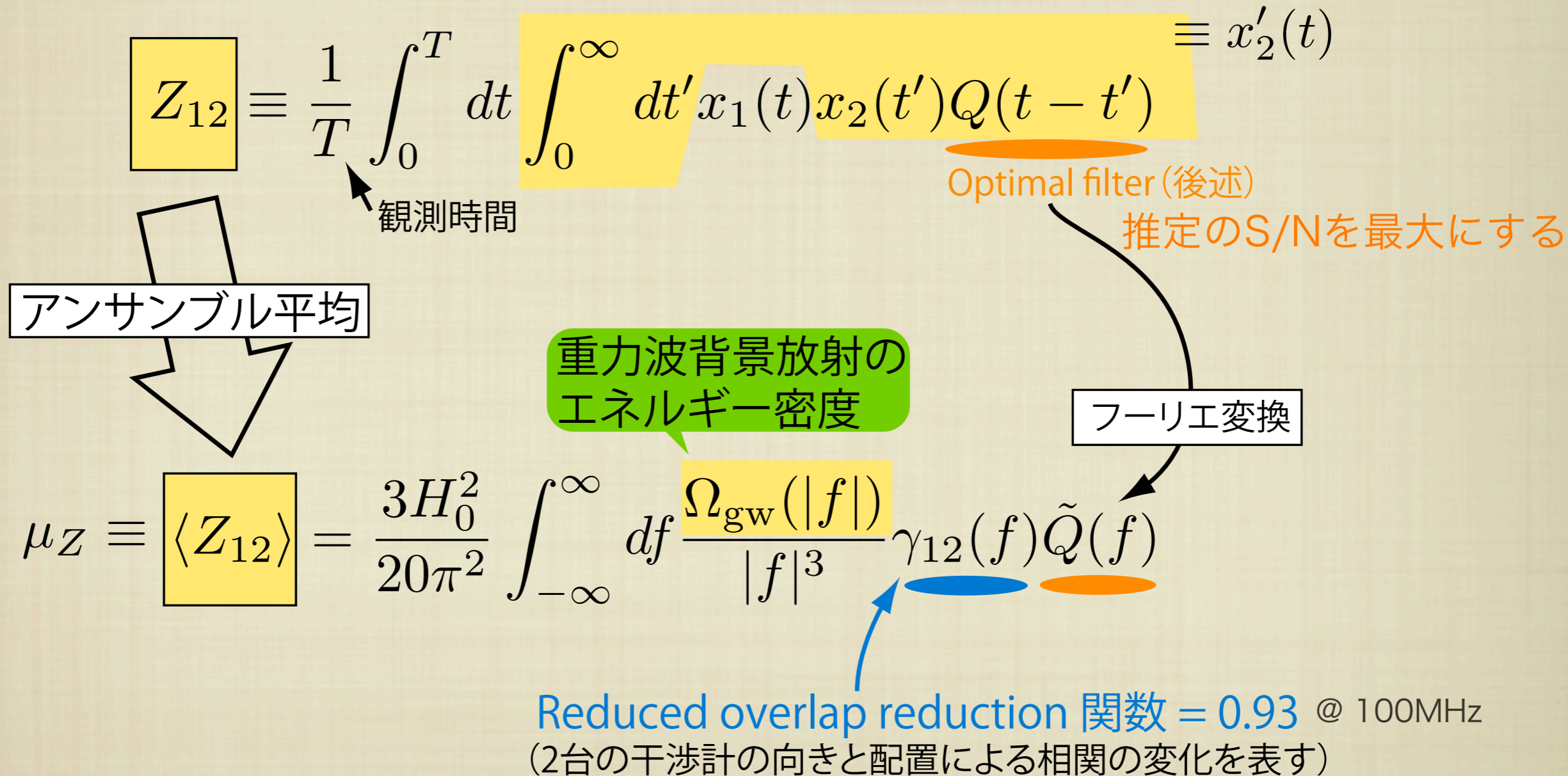
$$\langle x_1(t)x_2(t) \rangle = \langle s^2(t) \rangle$$



$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_1(t)x_2(t) dt$$

解析に使った相互相関量

相互相関量: 2つの干渉計出力の積を
時間平均したもの



H_0 : ハッブル定数

分散は観測時間に逆比例

観測時間 $T \rightarrow$ 無限大 なら分散はゼロ

$$\sigma_Z^2 \equiv \langle Z_{12}^2 \rangle - \langle Z_{12} \rangle^2$$

$$\simeq \langle Z_{12}^2 \rangle$$

重力波信号よりも干渉計ノイズの方がずっと大きいと仮定

$$\simeq \frac{1}{4T} \int_{-\infty}^{\infty} df P_1(|f|) P_2(|f|) |\tilde{Q}(f)|^2$$

干渉計1のノイズ 干渉計2のノイズ

信号対雑音比(S/N)

S/N: 観測時間の1/2乗に比例して向上

$$\frac{\mu_Z}{\sqrt{\sigma_Z^2}} = \frac{3H_0^2}{10\pi^2} \sqrt{T} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} df \frac{\Omega_{\text{gw}}^2(|f|) \gamma_{12}^2(f)}{|f|^6 P_1(|f|) P_2(|f|)}}$$

左辺: S/Nの定義

この項が以下のoptimal filterで最適化されている

■ Optimal filterについて

- * S/Nを最大化するように選んである
- * ノイズの多い周波数成分からの相互相関への寄与を低下させる

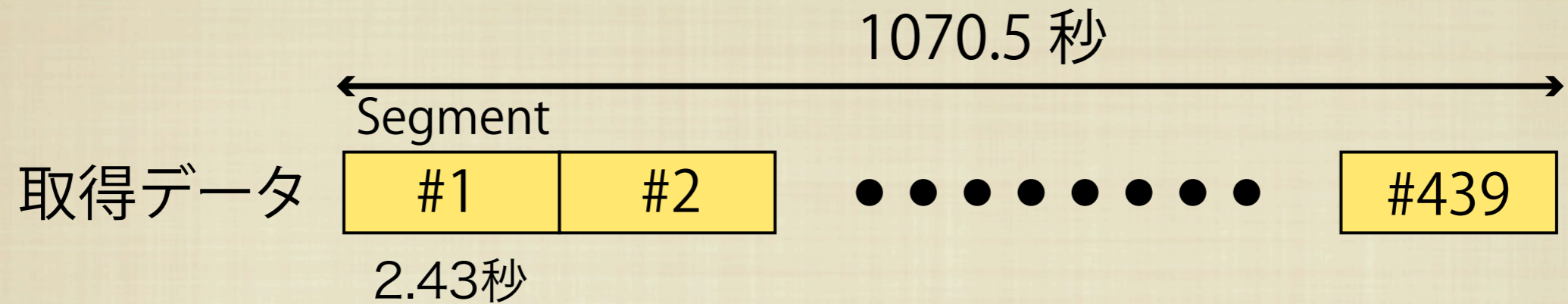
$$\tilde{Q}(f) = K \frac{\Omega_{\text{gw}}(|f|) \gamma_{12}(f)}{|f|^3 P_1(|f|) P_2(|f|)}$$

(Kは定数)

※形式上は低周波の観測と同じもの

B. Allen and J. D. Romano (1999)
Phys. Rev. D **59**, 102001

実際の解析



■ 各セグメントについて

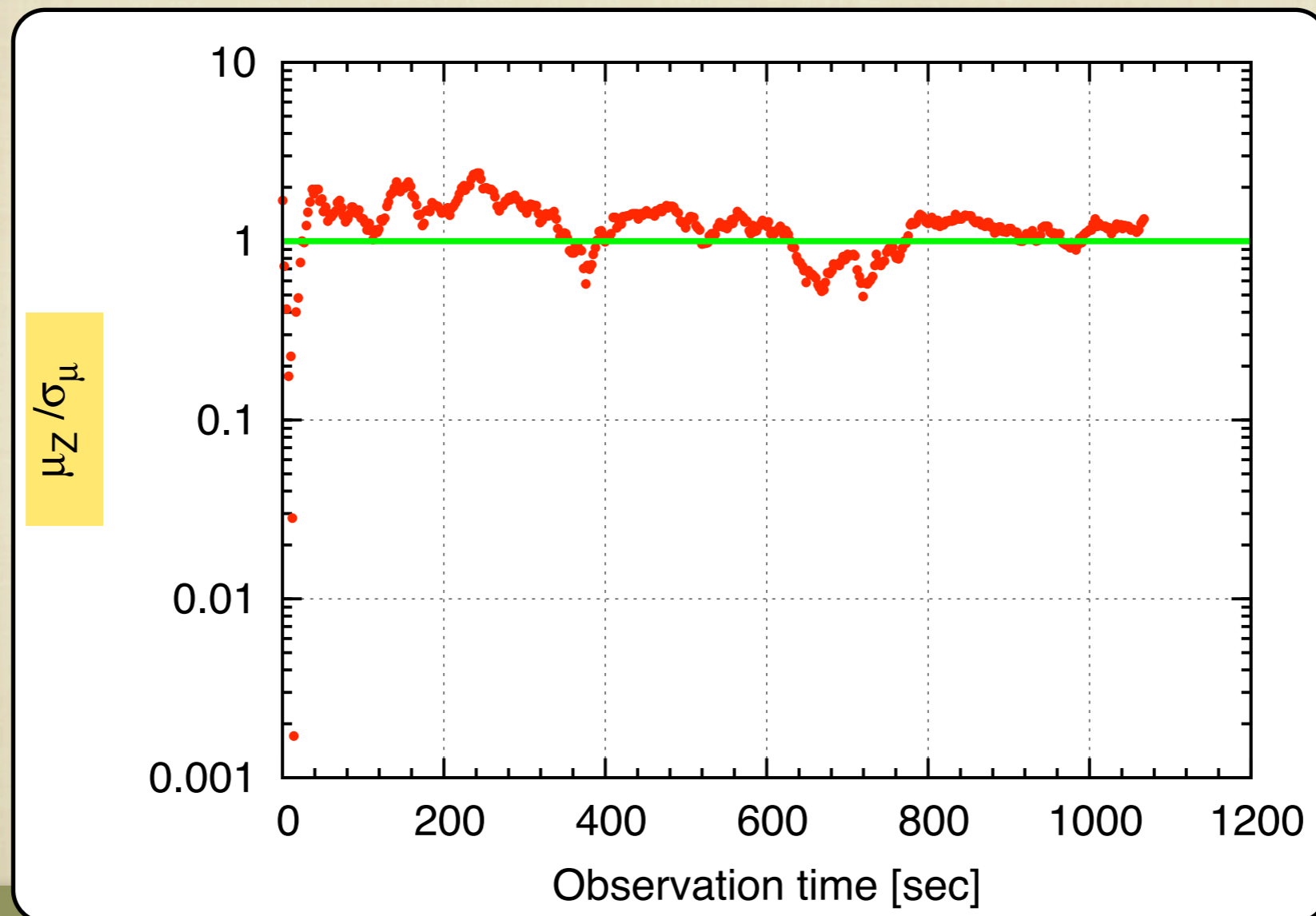
- * 相互相関 Z_{12} と不定性 σ_Z を計算
- * S/Nが求まる

■ アンサンブル平均

- * 各セグメントからの値のmeanでアンサンブル平均を近似する

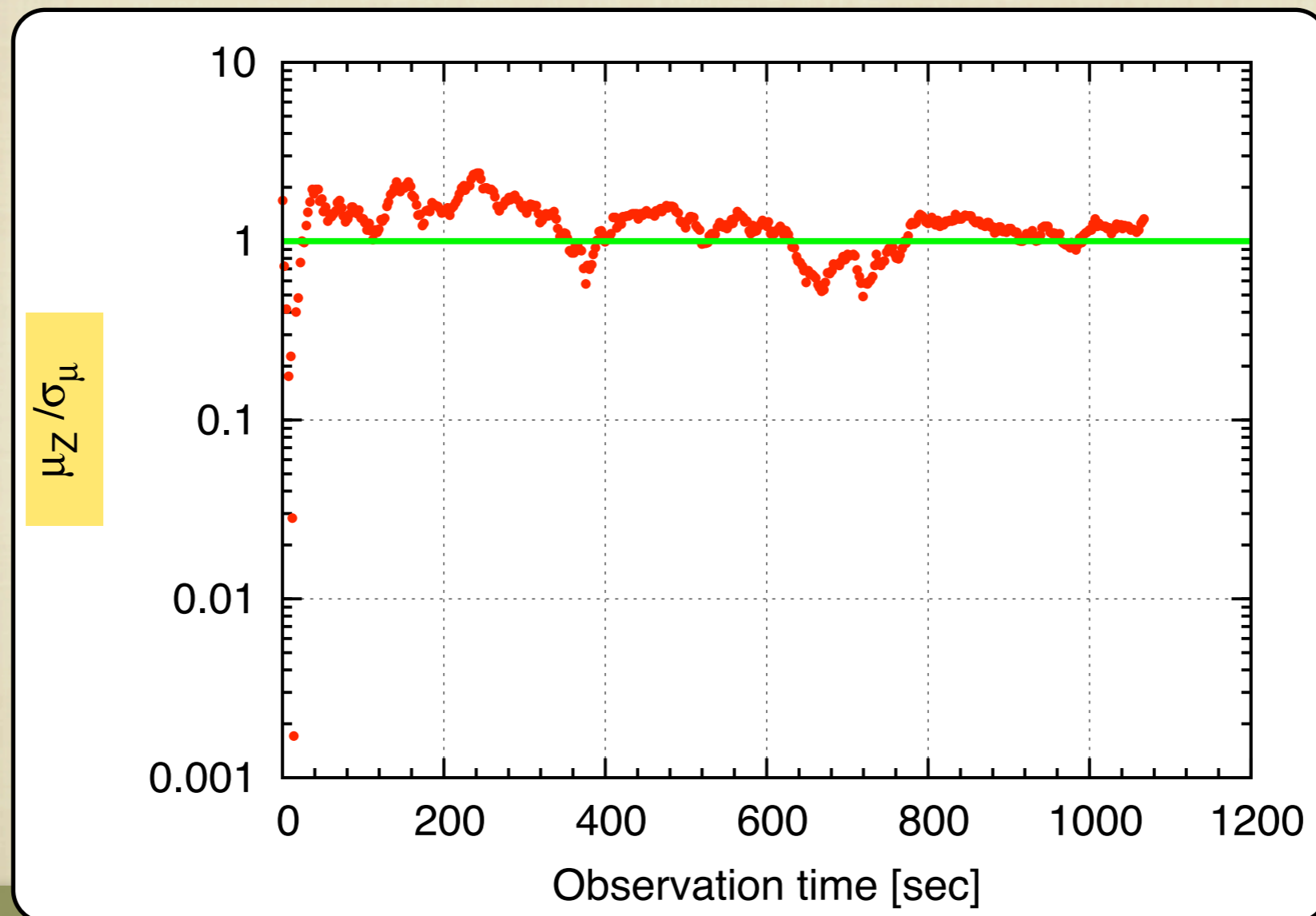
なにか相関する信号が見えているか？

- 測定されたS/Nを観測時間に対してプロット
 - * なんらかの相関があれば時間の1/2乗で増加
 - * 相関がなければS/N=1のまま



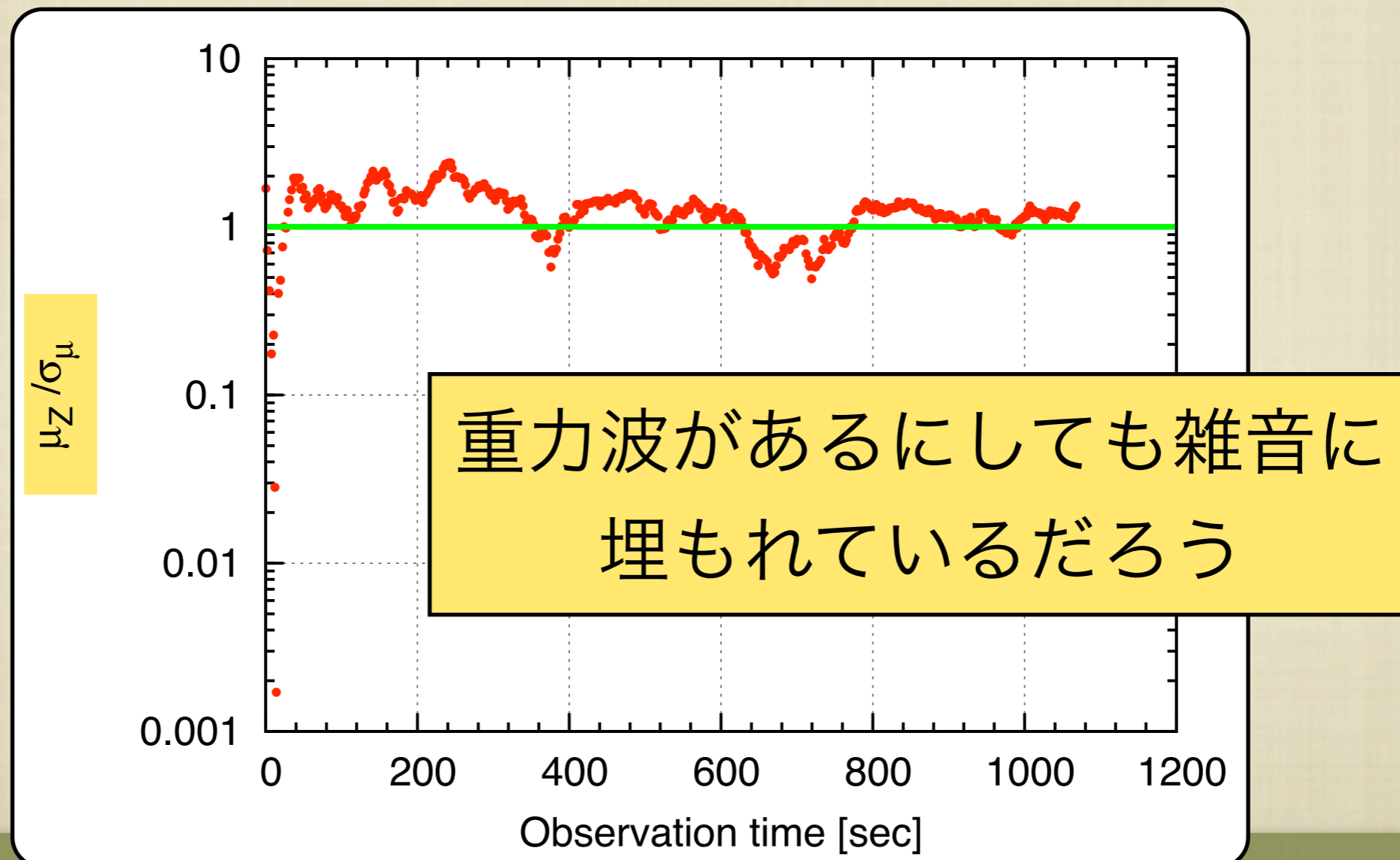
なにか相関する信号が見えているか？

- 測定されたS/Nを観測時間に対してプロット
 - * なんらかの相関があれば時間の1/2乗で増加
 - * 相関がなければS/N=1のまま



なにか相関する信号が見えているか？

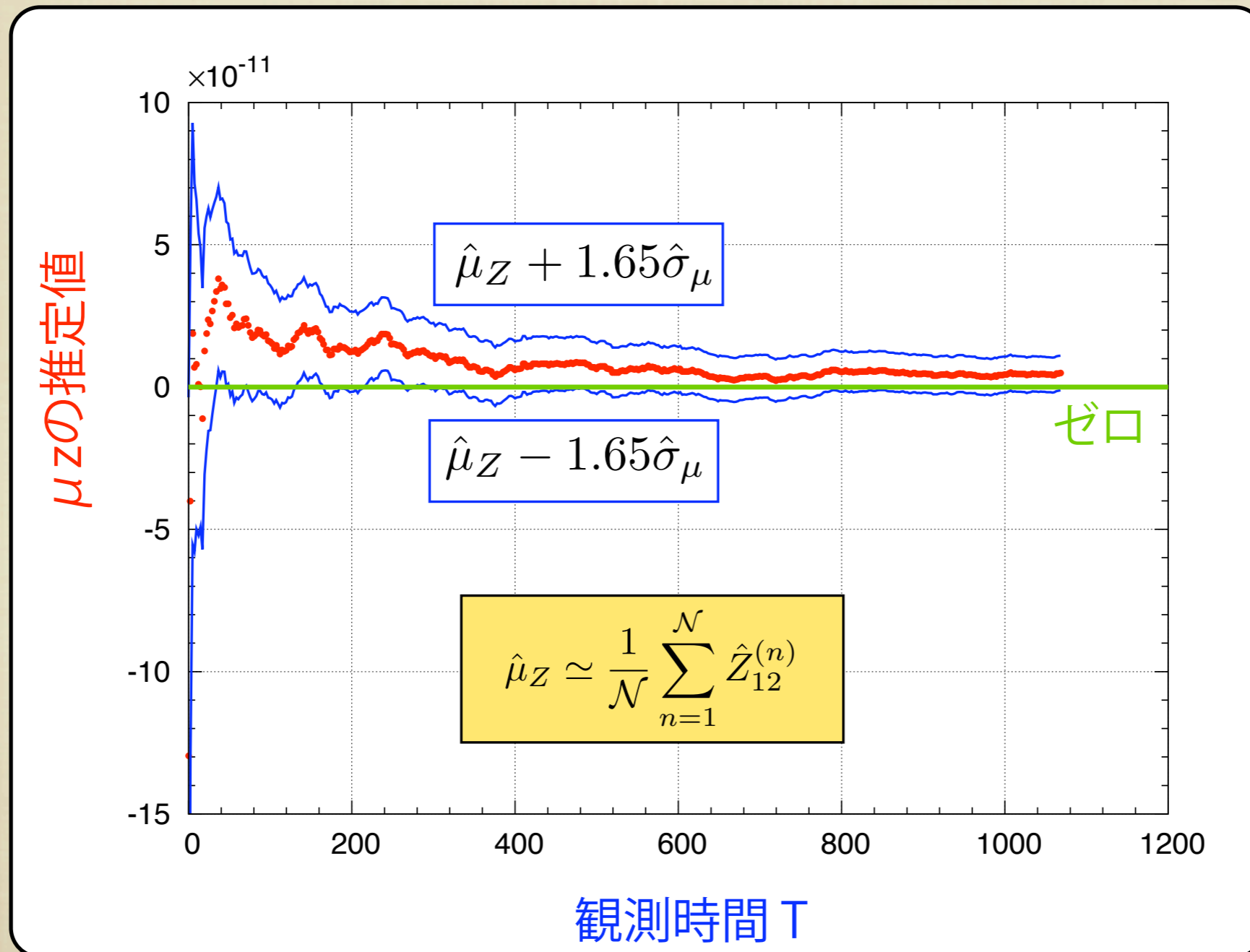
- 測定されたS/Nを観測時間に対してプロット
 - * なんらかの相関があれば時間の1/2乗で増加
 - * 相関がなければS/N=1のまま



μ_z 推定値と両側90%信頼区間

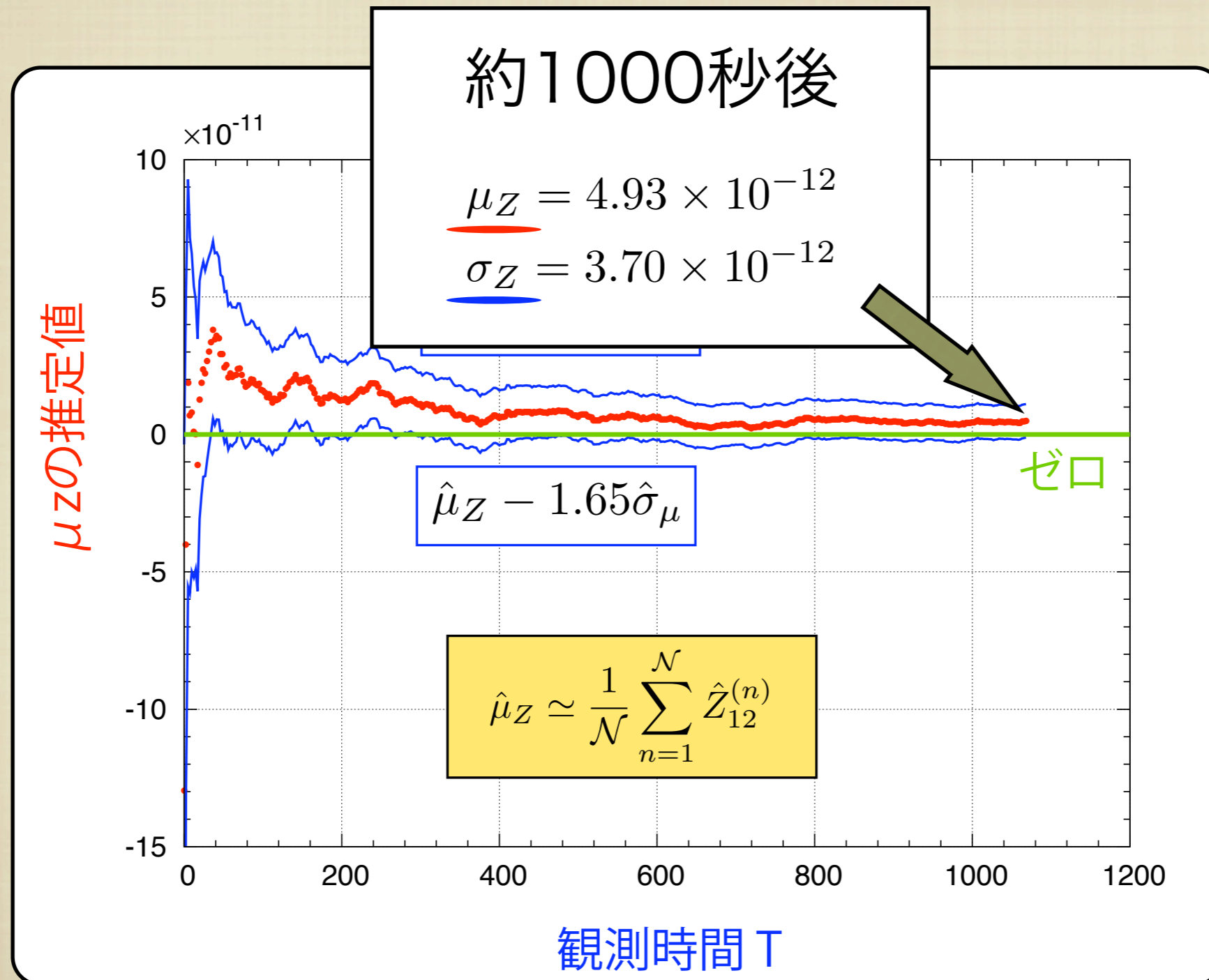
- 各セグメントの値を平均していったものをプロット

先ほどの図よりS/N=1のままではあるが、そのノイズ自体は時間とともに減っていく



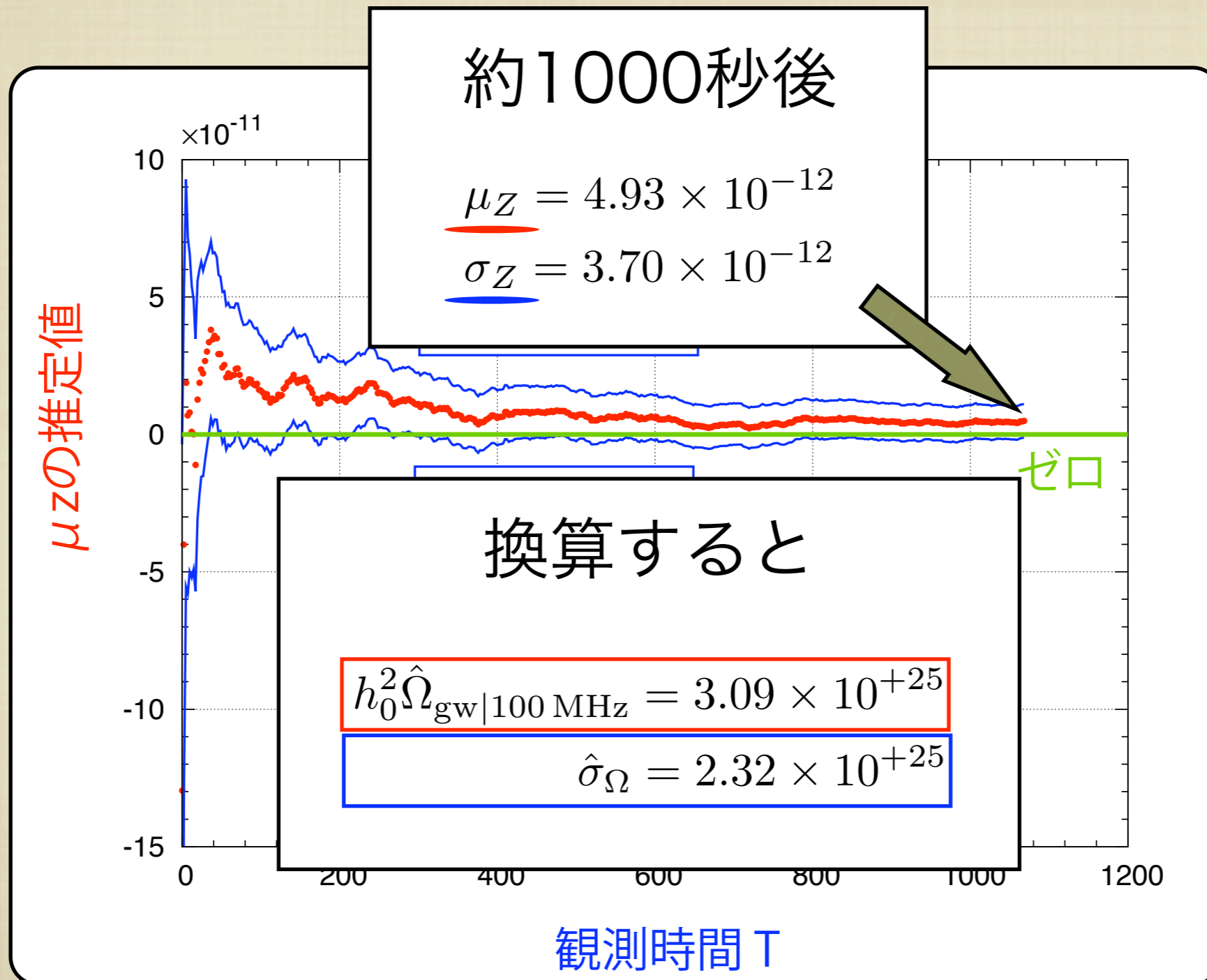
μ_z 推定値と両側90%信頼区間

- 各セグメントの値を平均していったものをプロット



μ_z 推定値と両側90%信頼区間

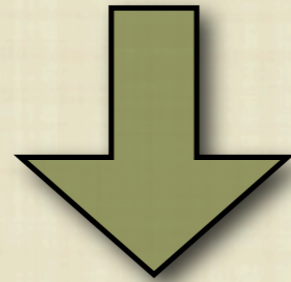
- 各セグメントの値を平均していったものをプロット



One-sided 90% upper limit

S/Nが時間の1/2乗で増えないので

- 相関する信号は無いように見える
 - * 重力波は見えていないらしい
 - * 2つの干渉計間で相関するノイズも見えていないらしい



重力波の上限として片側90%信頼区間をとると

$$h_0^2 \hat{\Omega}_{\text{gw}|100 \text{ MHz}} + 1.28 \hat{\sigma}_\Omega \simeq 6 \times 10^{+25}$$

Cruiseらの上限を更新した

$$(h_0^2 \Omega_{\text{gw}|100 \text{ MHz}} < 10^{34})$$

もくじ

1. はじめに
2. 超高周波重力波
3. 本実験で用いた重力波検出器
4. データ解析
5. まとめ

まとめ

■ 本研究の内容

- * 重力波天文学の創成を目指した実験
- * 100 MHzにおける重力波背景放射の直接測定を試みた
- * シンクロナス・リサイクリング干渉計 2台で相関処理

■ 成果

- * 干渉計は2台とも稼働した: strain noise $< 10^{-16} \text{ Hz}^{-1/2}$
- * 約1000秒の観測と相関解析により、重力波背景放射に対し、90%信頼上限で $h_0^2 \Omega_{\text{gw}}|_{100 \text{ MHz}} < 6 \times 10^{25}$

これまでに直接測定から得られていた上限値
を更新した

まとめ (つづき)

- 今後の課題など
 - * 単体感度の改善
 - * 真空槽へ入れる
 - * Cavityを構成する鏡の反射率を上げる
 - * 観測時間を伸ばす
 - * 干渉計の長期安定度をあげる

おわり

註: ほぼD論審査会の使い回しでした。あしからず。

$\langle Z_{12} \rangle$ の推定値の不定性

分散は観測時間に逆比例

観測時間 $T \rightarrow$ 無限大 なら分散はゼロ

$$\sigma_Z^2 \equiv \langle Z_{12}^2 \rangle - \langle Z_{12} \rangle^2 \\ \simeq \langle Z_{12}^2 \rangle$$

重力波信号よりも干渉計ノイズの方がずっと大きいと仮定

$$\simeq \frac{1}{4T} \int_{-\infty}^{\infty} df P_1(|f|) P_2(|f|) |\tilde{Q}(f)|^2$$

干渉計1のノイズ 干渉計2のノイズ

定義(パワースペクトル密度)

$$\langle \tilde{n}_i^*(f) \tilde{n}_i(f') \rangle = \frac{1}{2} P_i(|f|) \delta(f - f') \\ (i=1,2)$$