




# 変位雑音・周波数雑音フリー 重力波検出器の開発

苔山圭以子

お茶の水大学 人間文化研究科  
複合領域科学専攻 素粒子研究室  
@ NAOJ, 重力波研究交流会4月



- イン트로ダクション
- 本研究: 変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出器 (DFI) の目的
- DFIの原理
- DFIの光学設計
- DFI原理実験
- DFIの感度と課題
- その他の光学設計の可能性
- まとめ

- イン트로ダクション
- 本研究: 変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出器 (DFI) の目的
- DFIの原理
- DFIの光学設計
- DFI原理実験
- DFIの感度と課題
- その他の光学設計の可能性
- まとめ

# イントロダクション

---

- S.Kawamura & Y.Chen, 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93**, 211103  
Y.Chen & S.Kawamura, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96**, 231102  
の論文によって提案された、  
新しいタイプのレーザー干渉計型重力波検出器
- 光学要素の変位をまったく感じない重力波検出器
  - ▶ 地面振動・熱雑音・輻射雑音を感じないために  
原理的にはショットノイズだけで感度をリミットされる
- Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103で  
提案された、4台のマツハツエンダー干渉計を組み合わせた光学設計の  
DFIの原理実験を行った

- イン트로ダクション
- 本研究: 変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出器 (DFI) の目的
- DFIの原理
- DFIの光学設計
- DFI原理実験
- DFIの感度と課題
- その他の光学設計の可能性
- まとめ

# 本研究の目的

- 現在の重力波検出器では、それぞれの雑音に対していろいろな対策が施されている。



- 鏡変位による雑音(地面振動・熱雑音)を一挙に消す方法が考え出された

変位雑音・周波数雑音フリー干渉計,  
Displacement- and frequency-noise-free interferometer, DFI

- S. Kawamura and Y. Chen, Phys.Rev.Lett.93, 211103 (2004)
- Y. Chen and S. Kawamura, Phys.Rev.Lett.96, 231102 (2005)

DFIを構築し、変位雑音のキャン  
セルを実験的に確かめる

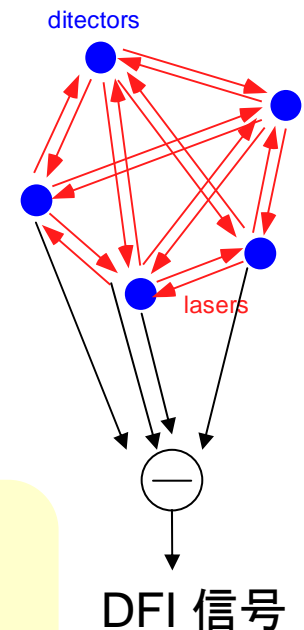
- イン트로ダクション
- 本研究: 変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出器 (DFI) の目的
- **DFIの原理**
- DFIの光学設計
- DFI原理実験
- DFIの感度と課題
- その他の光学設計の可能性
- まとめ

# DFIの原理 (1)

- レーザ干渉計の重力波への応答とミラー変位への応答は、違っている



- $d$  次元空間で  $N$  個のテストマス 間の光のtravel timeを計測する
- 重力波がきたときは、テストマス間の距離が変わり、光のtravel time が変化する
- 各テストマスは、固有の変位雑音(  $dN$  個)と時計雑音(  $N$  個)を持つ
- 測定チャンネル  $N(N-1) \rightarrow N(N-1) > N(d+1)$
- 雑音  $N(d+1)$  個



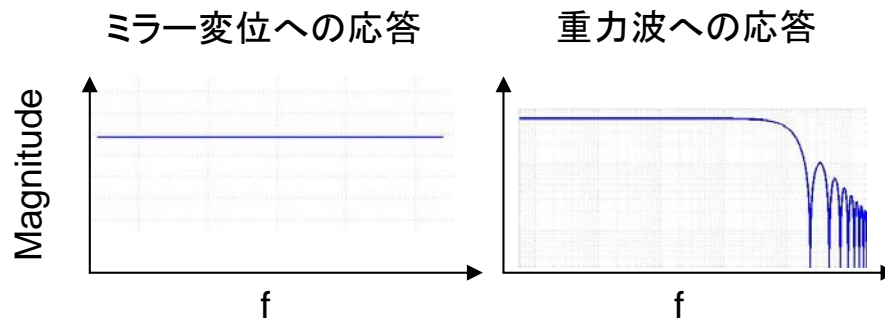
$N > d + 2$  であれば、複数の信号を組み合わせて変位雑音・時計雑音だけ消し去り、重力波信号は残すという組み合わせが存在する



# DFIの原理 (2)

干渉計にやきなおした場合：

- テストマス→ミラー、光→レーザー
  - テストマスの変位雑音・時計雑音 →ミラーの変位雑音、レーザーの周波数雑音
  - Travel timeの変化 → 2つの光路長の差として検出
  - 干渉計出力信号を組み合わせ、変位雑音成分だけを消去することができ
- マイケルソン干渉計の例



重力波は積分効果として  
レーザーに位相変化を与えるので、  
重力波の波長とレーザー光路が  
同等な長さのとき、位相変化が  
キャンセルされる

# テストマスの配置

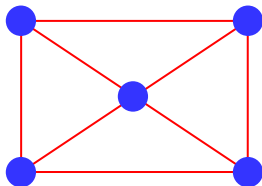
## ■ 1次元配置 $d = 1$

➤ 重力波信号もいっしょに消えてしまう NG



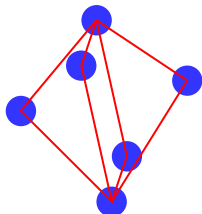
## ■ 2次元配置 $d = 2$

➤ DFIの重力波への応答  $f^3$

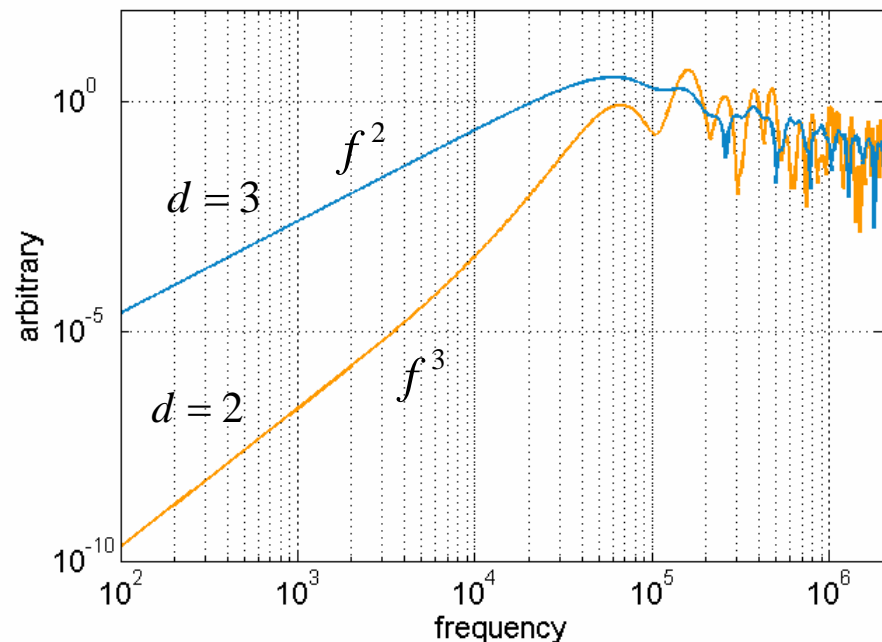


## ■ 3次元配置 $d = 3$

➤ DFIの重力波への応答  $f^2$



DFIの重力波への応答

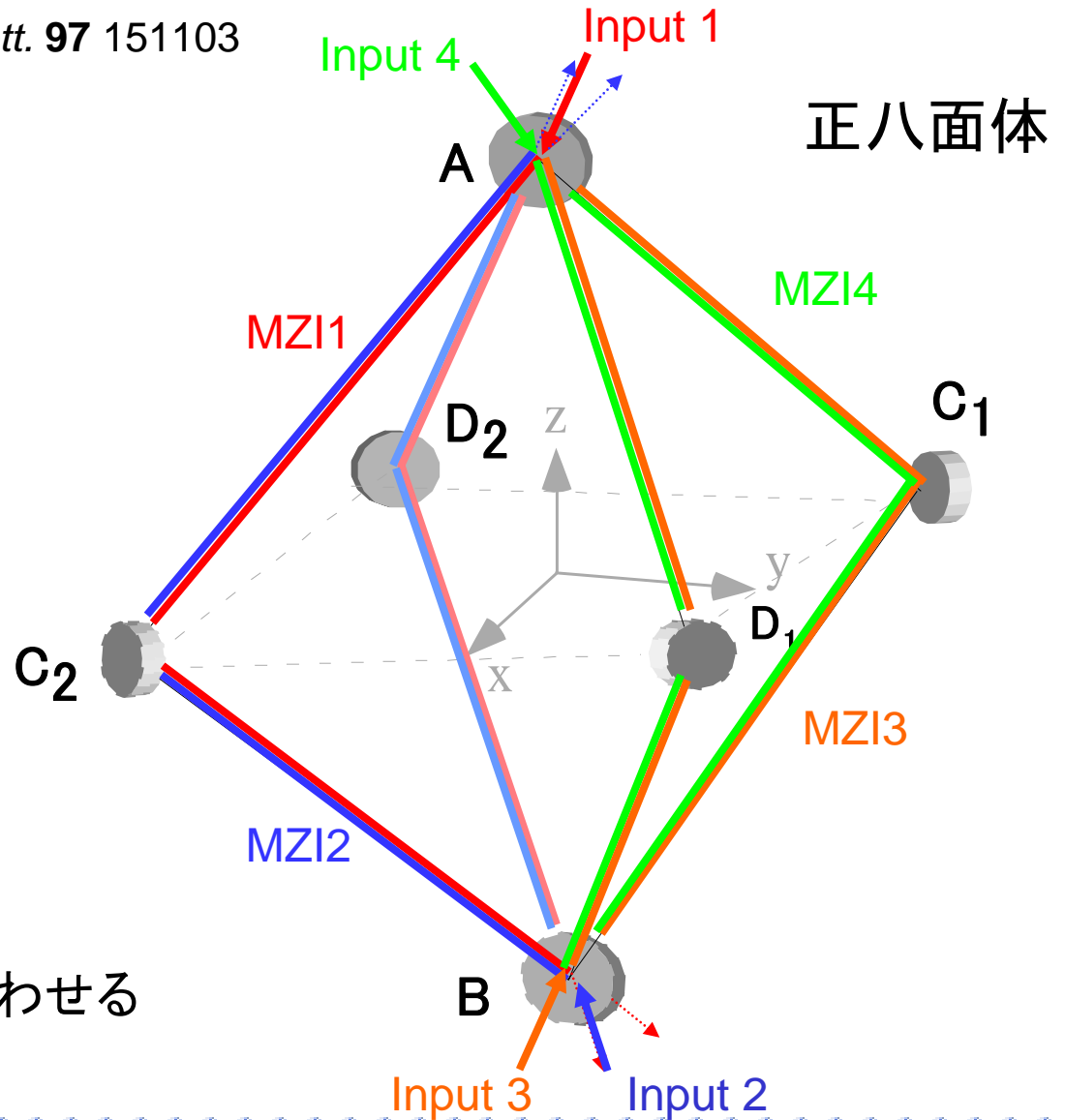


低周波では両者の効果を区別できないので重力波の一部もキャンセルされる。  
キャンセル度合いは光学設計による。

# DFI 光学設計

Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103

■ DFIは、4台の等アーム長  
マツハ・ツェンダー干渉計  
(MZI)から構成される

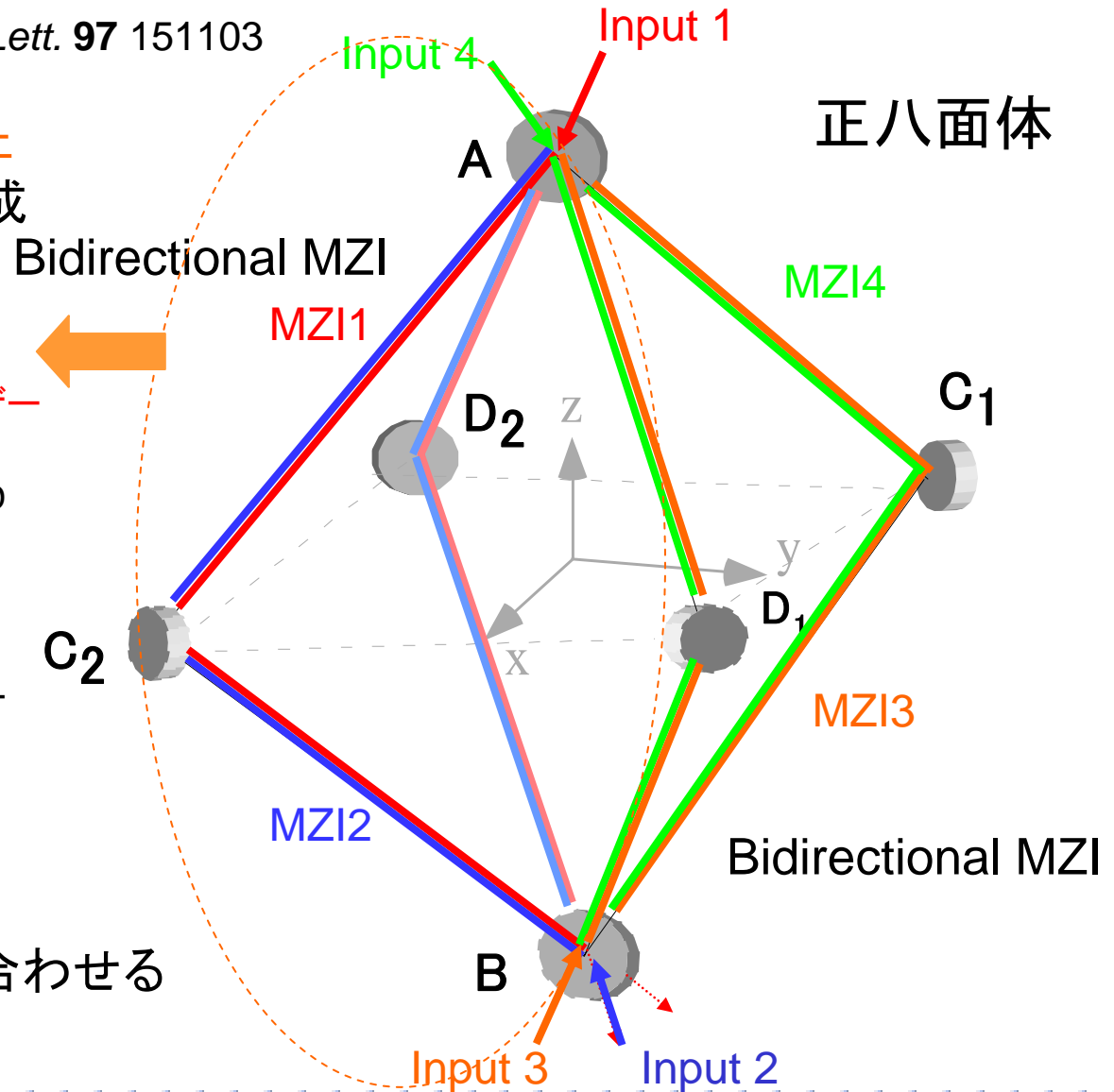
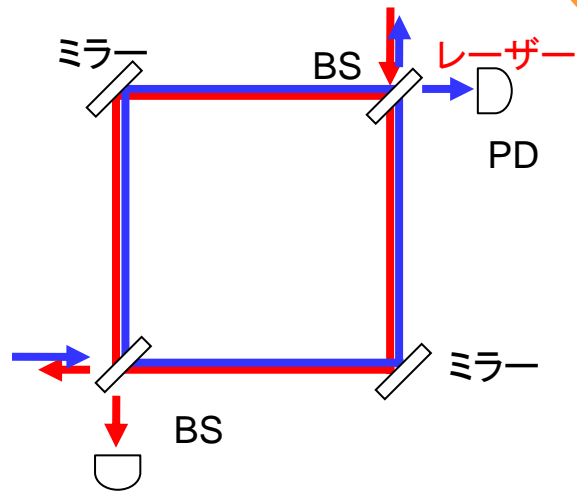


■ 4台のMZIの信号を組み合わせる

# DFI 光学設計

Y. Chen, et al., 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103

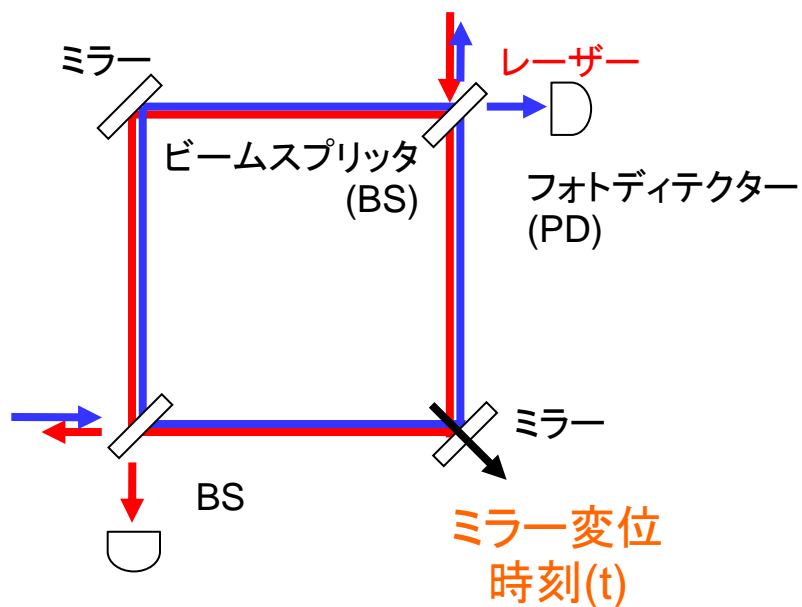
■ DFIは、4台のマツハ・ツェンダー干渉計(MZI)から構成される



■ 4台のMZIの信号を組み合わせる

# Bi-directional MZI (1)

ミラーの変位雑音はキャンセルされる



■ミラー変位への応答

$$MZI1 = \delta L$$

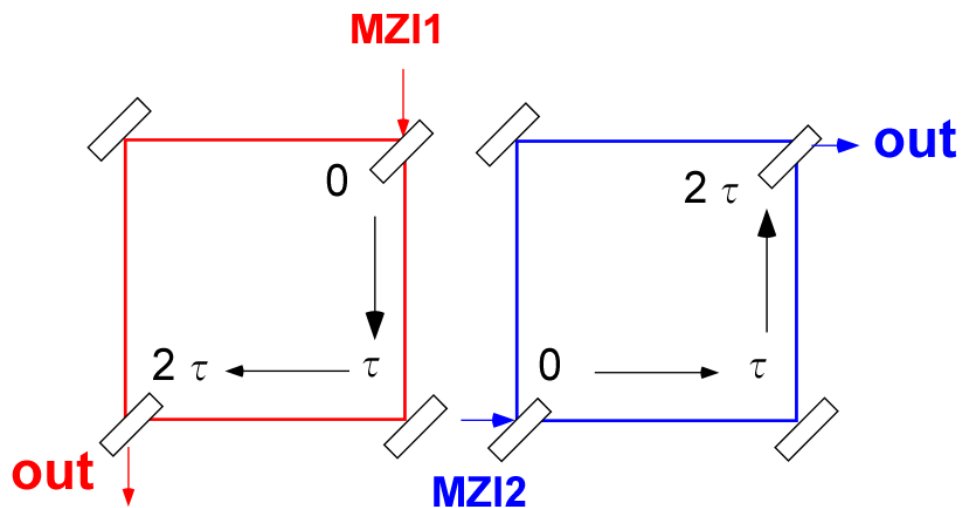
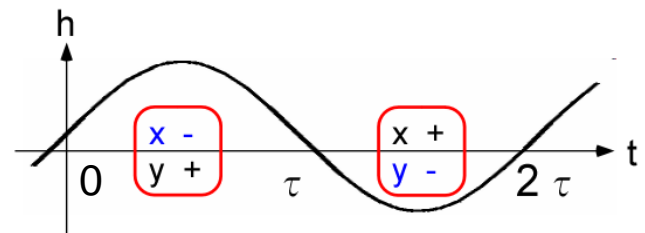
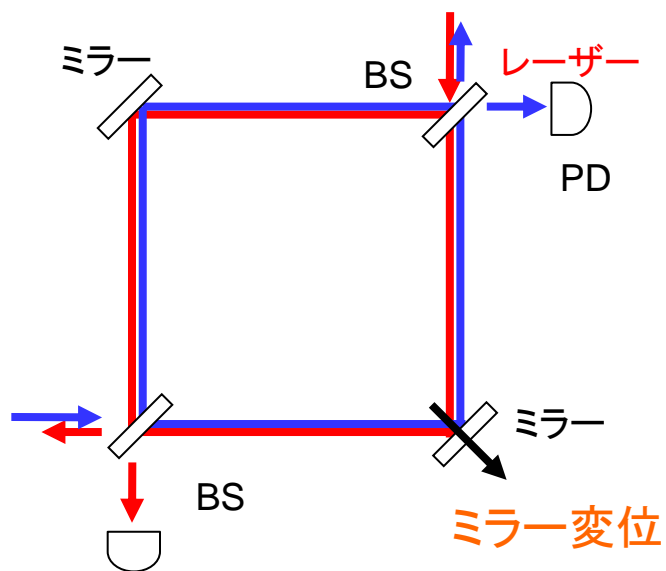
$$MZI2 = \delta L$$

$$MZI1 - MZI2 = 0$$

Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103

# Bi-directional MZI (2)

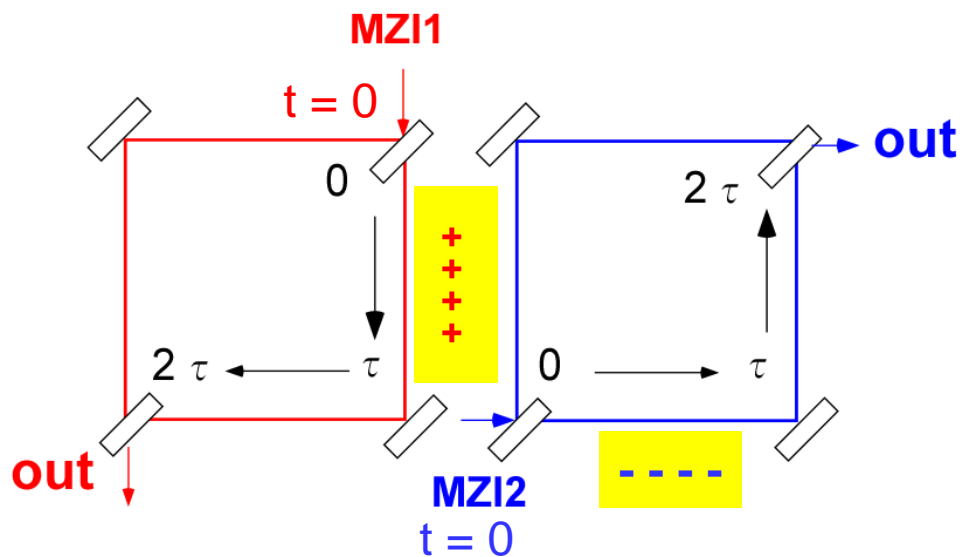
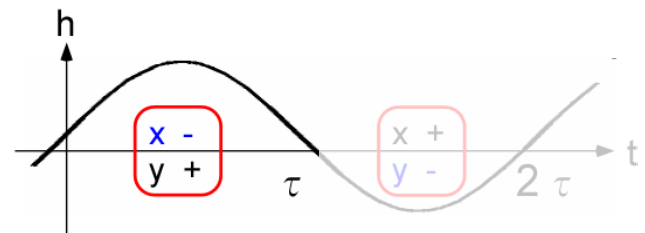
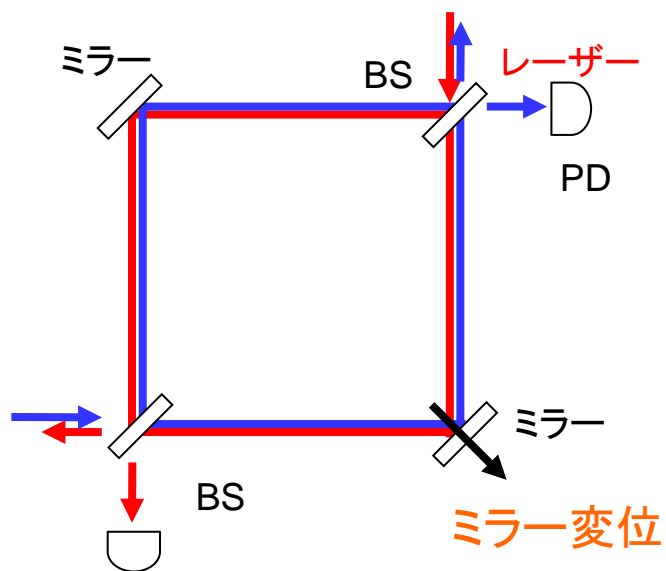
重力波信号はキャンセルされない



Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103

# Bi-directional MZI (2)

重力波信号はキャンセルされない



Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103





# Bi-directional MZI (2)

重力波信号はキャンセルされない

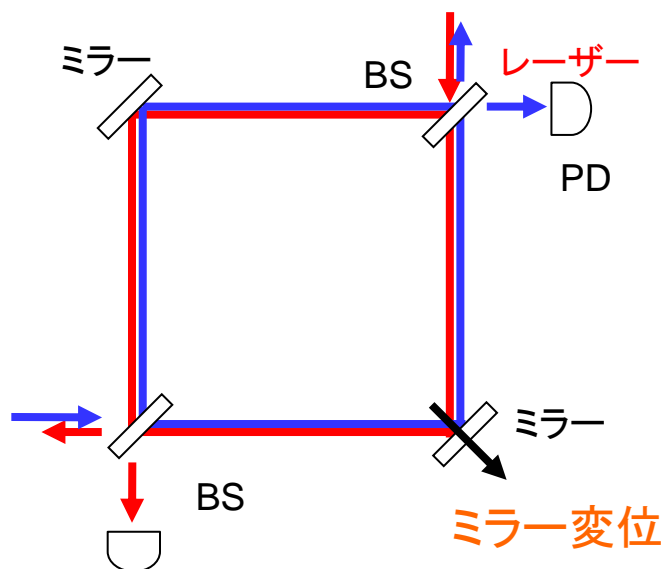
## ■ 重力波変位への応答

$$\text{MZI1} = +\delta L$$

$$\text{MZI2} = -\delta L$$

$$\text{MZI1} - \text{MZI2} = 2\delta L$$

- 引き算によって信号はキャンセルされない
- BSの変位は、2台のMZIで変位を感じる時間が違うので、完全にキャンセルできない
- もう一組のBDMZIを組み合わせる



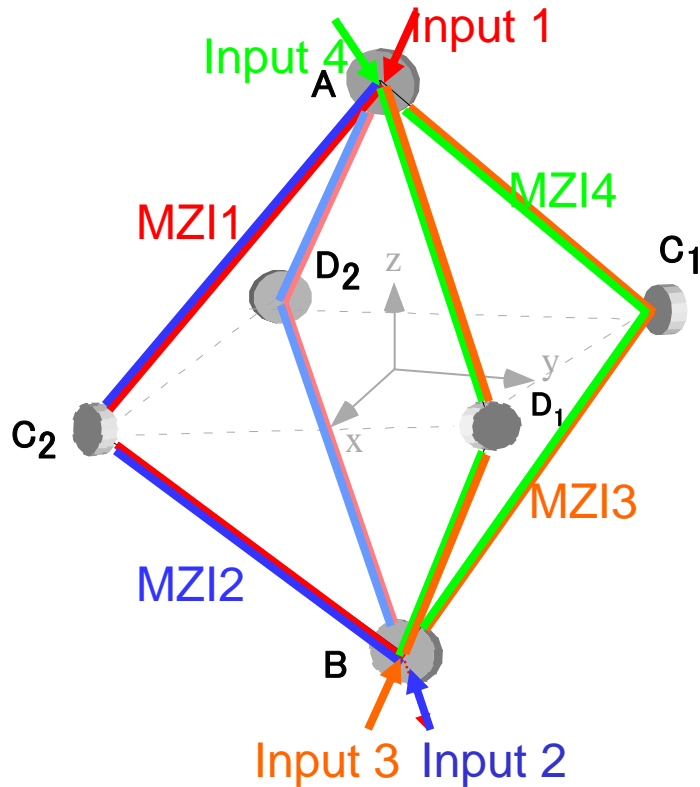
Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103

# DFI 光学設計

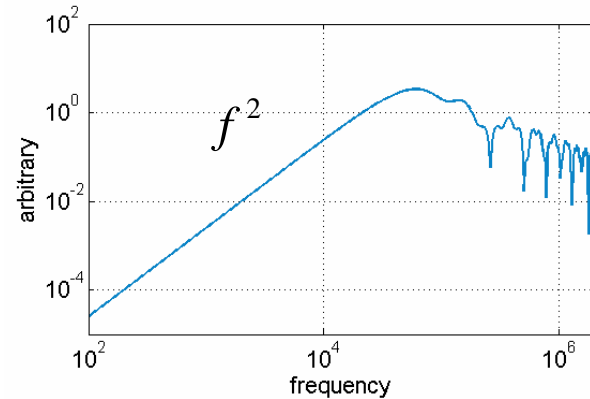
Y. Chen, *et al.*, 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 151103

■ MZI1, MZI4 と MZI2, MZI3の組でA, Bをキャンセル

■ DFI信号= $(MZI1 - MZI2) - (MZI4 - MZI3)$



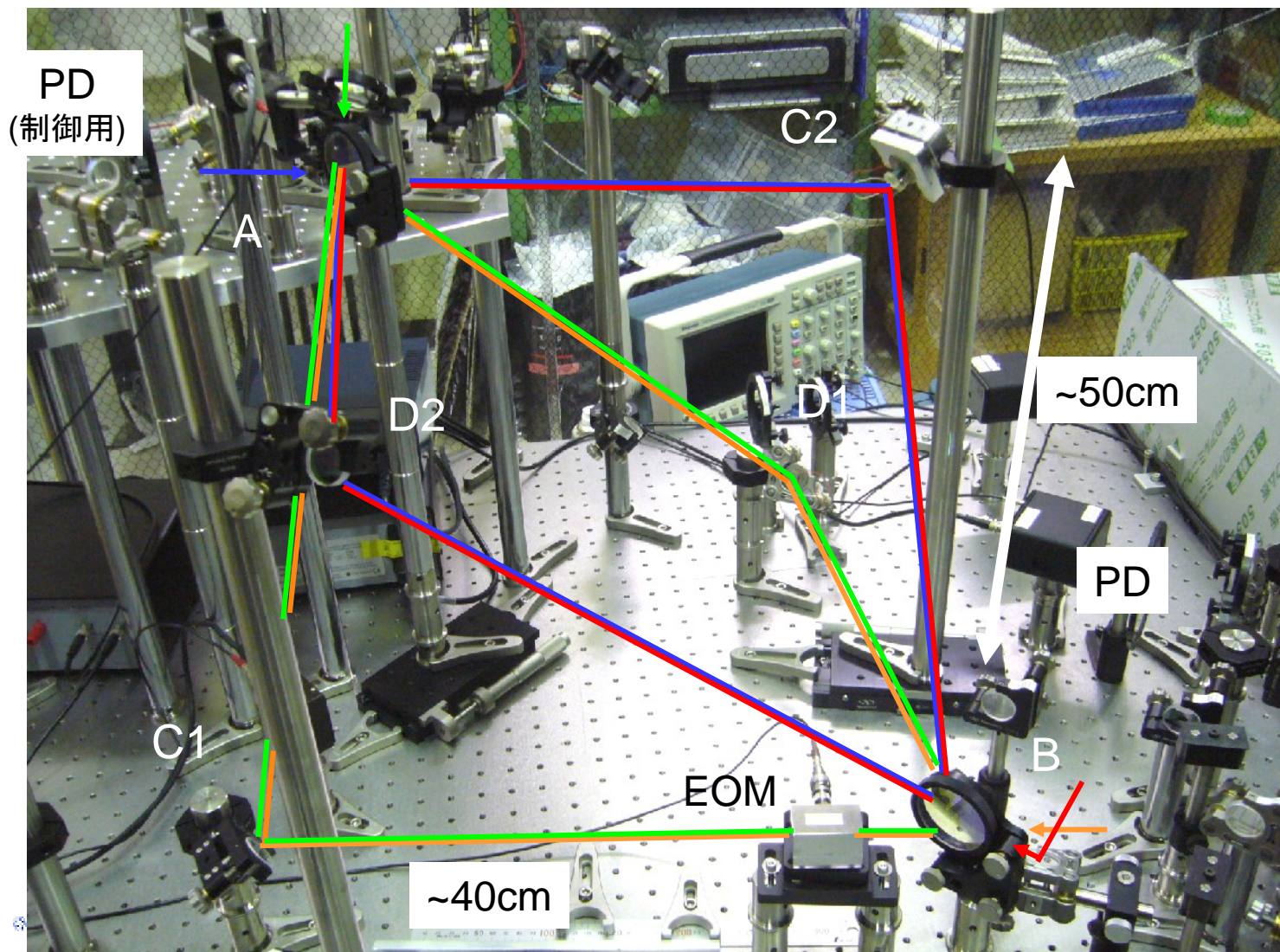
重力波への応答



■ 周波数雑音は、アーム長が等しいため各MZIで自動的にキャンセルされる (以降、実験では変位雑音にだけ着目)

# 3D DFI 実験

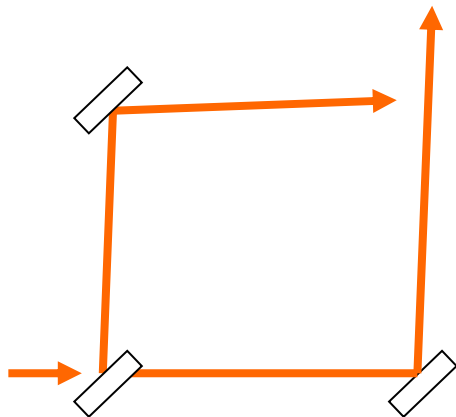
## セットアップ



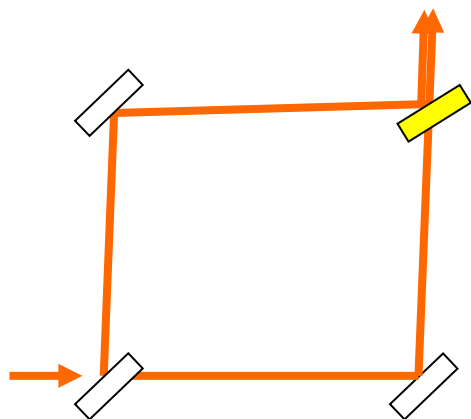
# アライメント方法

## ■ 通常のMZI(1台)のアライメント

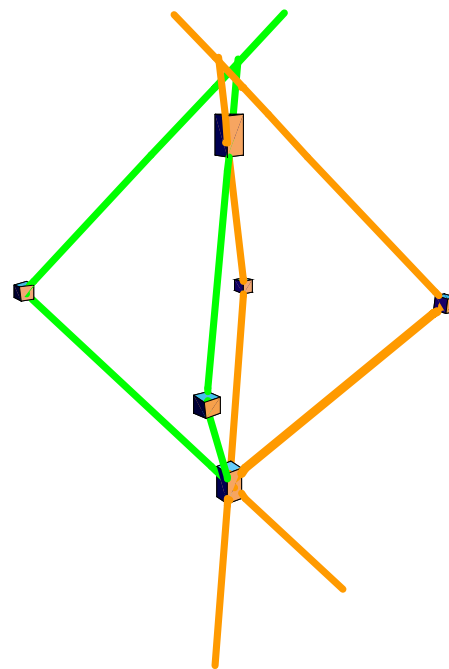
ミラーの位置が適当でも、角度が適切であれば、



最後のBSの位置・角度をあわせればアライメントは合う



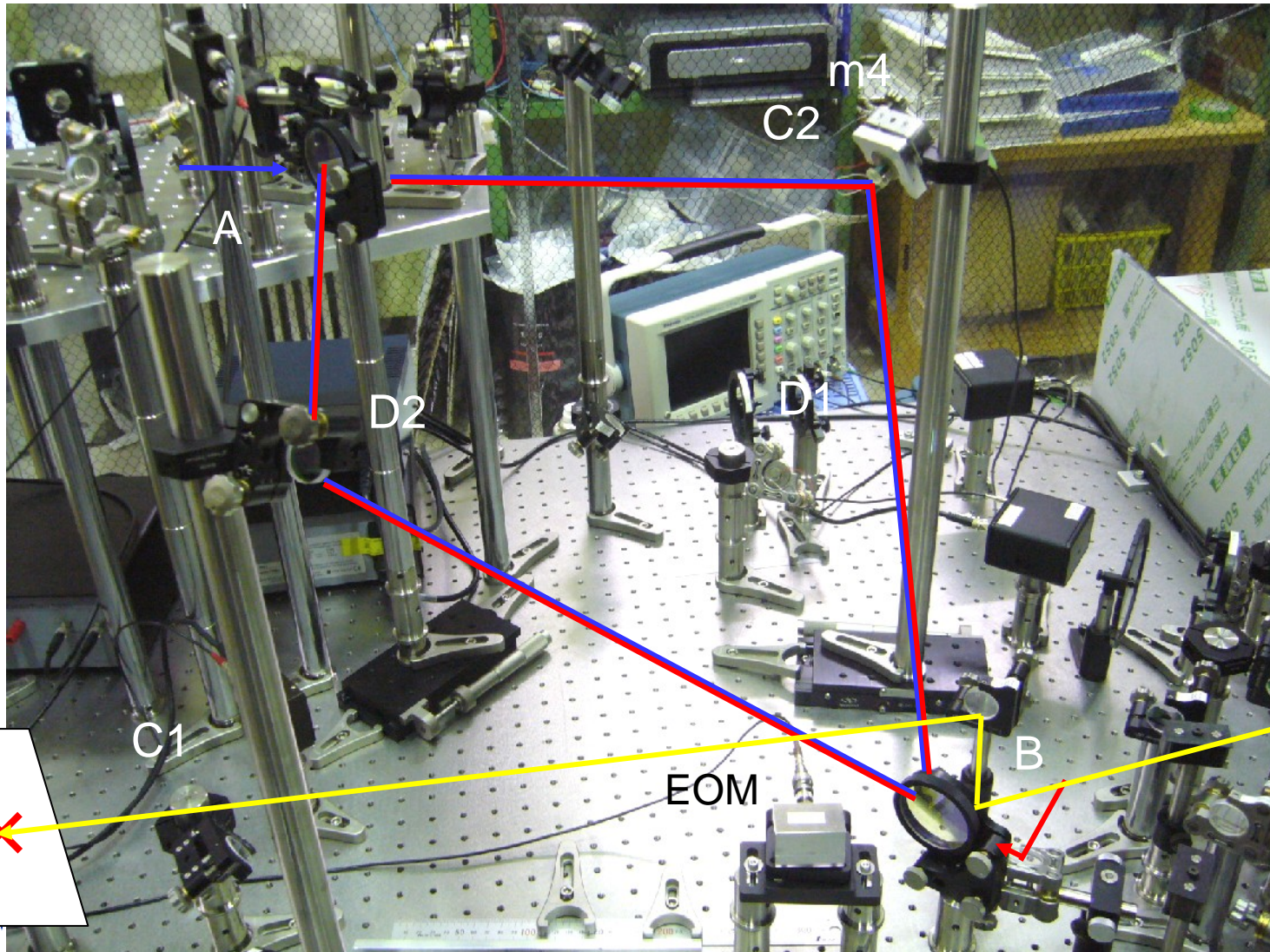
## ■ DFIの場合



BSとミラーの位置、角度が適切でないと、3次元空間内の一点で交わらない

# 3D DFI 実験

## アライメント方法

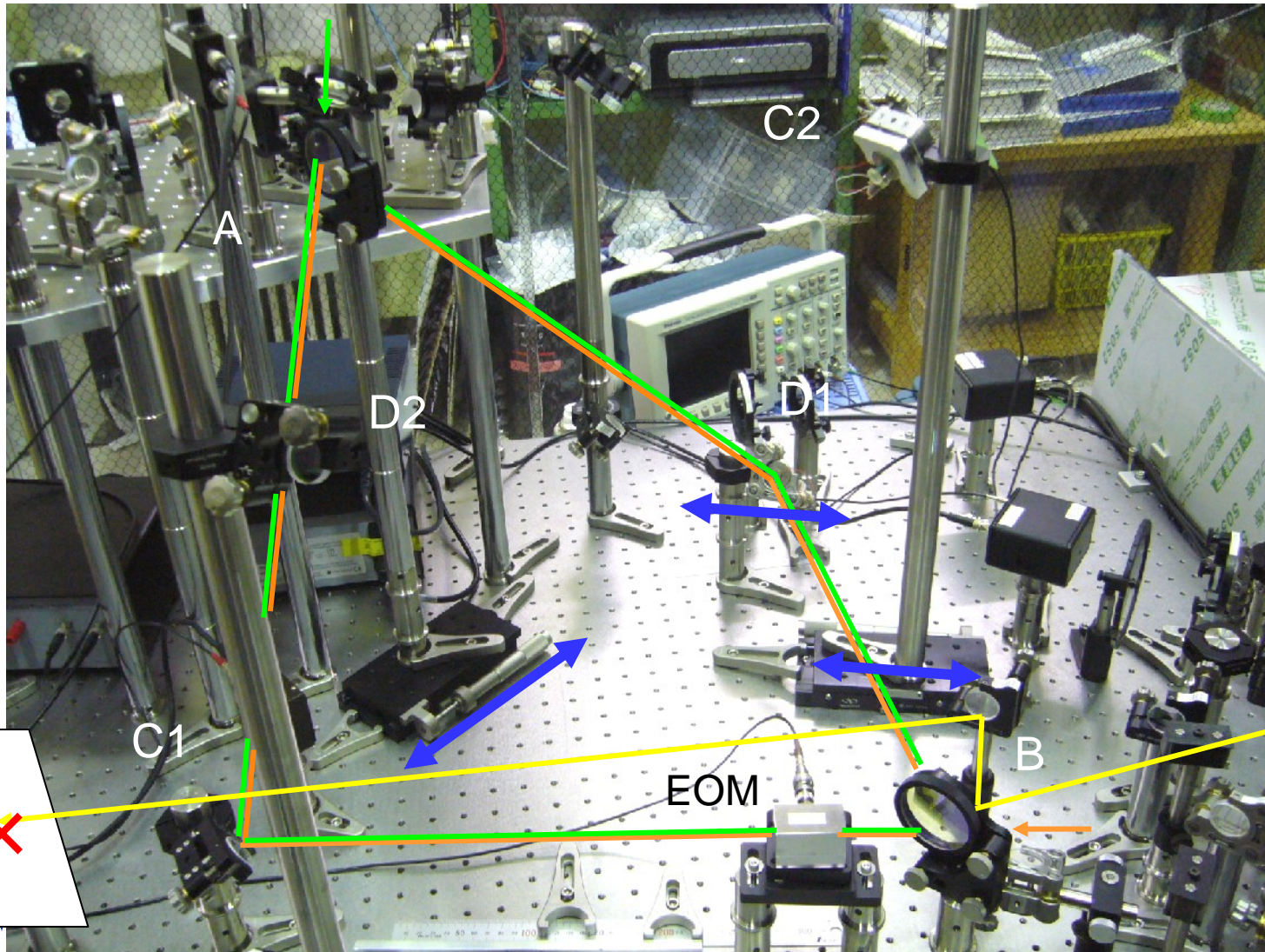


スクリーン

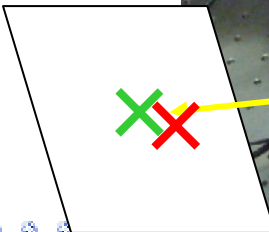
Optical lever

# 3D DFI 実験

## アライメント方法

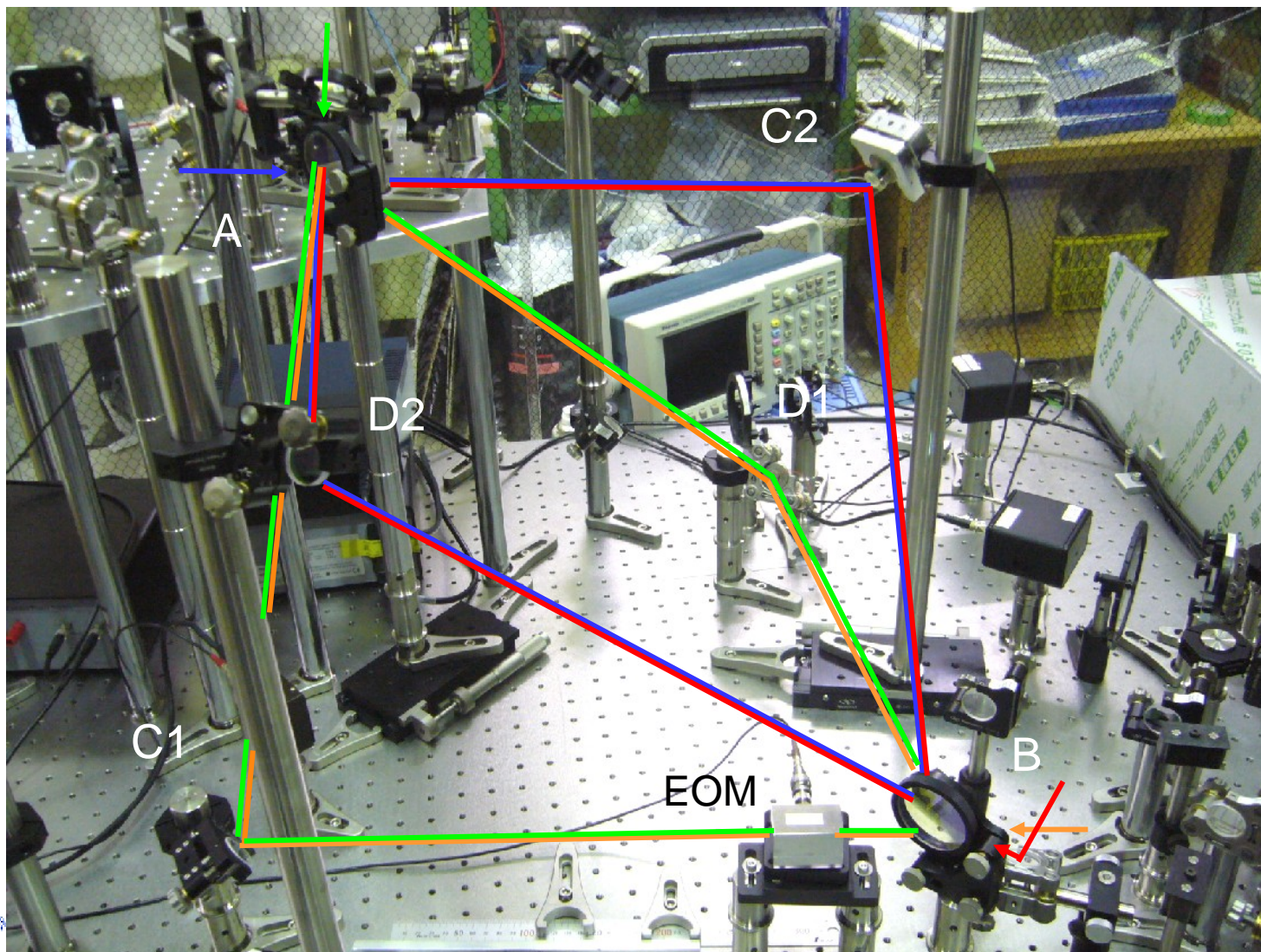


スクリーン



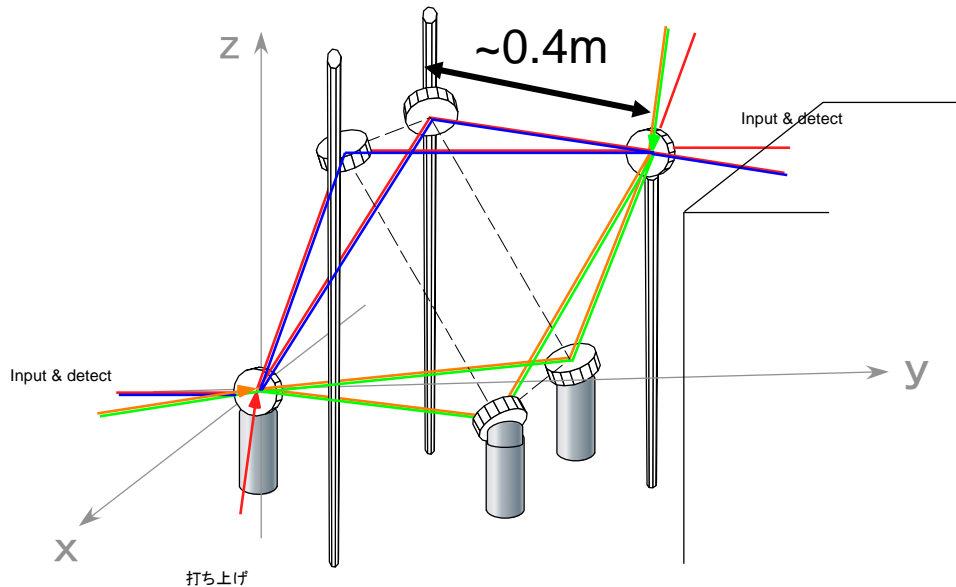
# 3D DFI 実験

## アライメント方法



# 測定

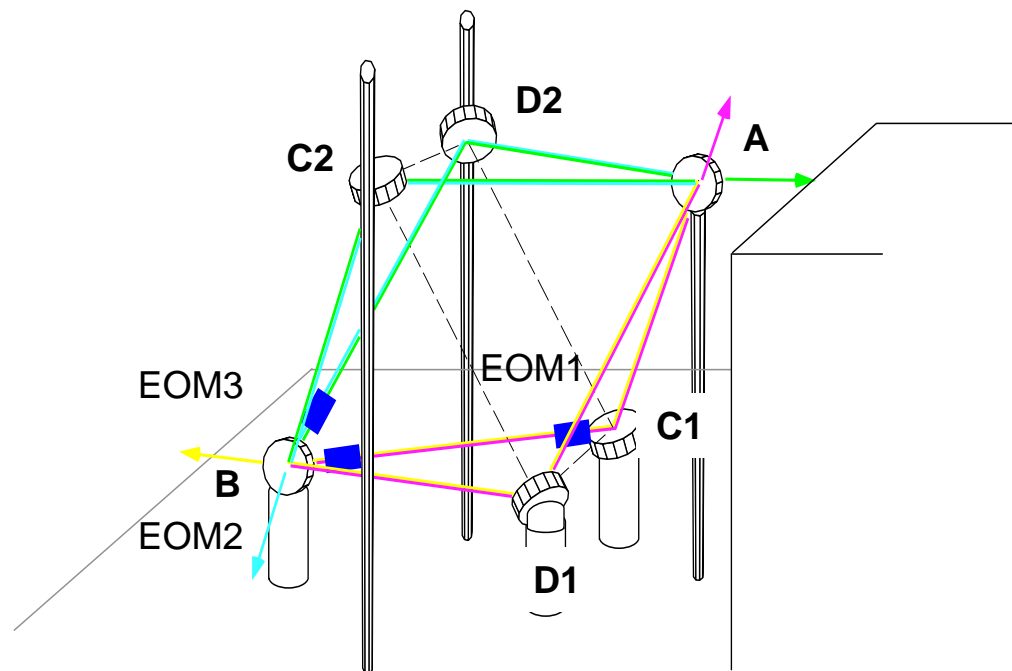
- (1) DFI信号ではミラー・BSの両方の光学要素の**変位雑音**が**キャンセル**することを確認する
- (2) DFI信号をとっても **重力波信号が残る**ことを確認する



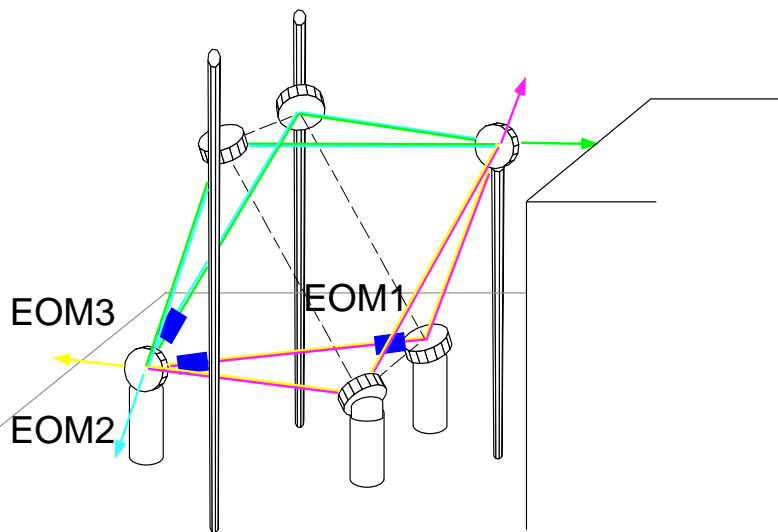


# 3D DFI実験(1) – 変位雑音キャンセル

- 変位雑音のシミュレートは、EOMで再現する
  - C1、Bの位置にEOMをセットし、シグナルアナライザからの swept-sine-noise source で変位雑音による位相変化を与える
  - 高周波での実験のため



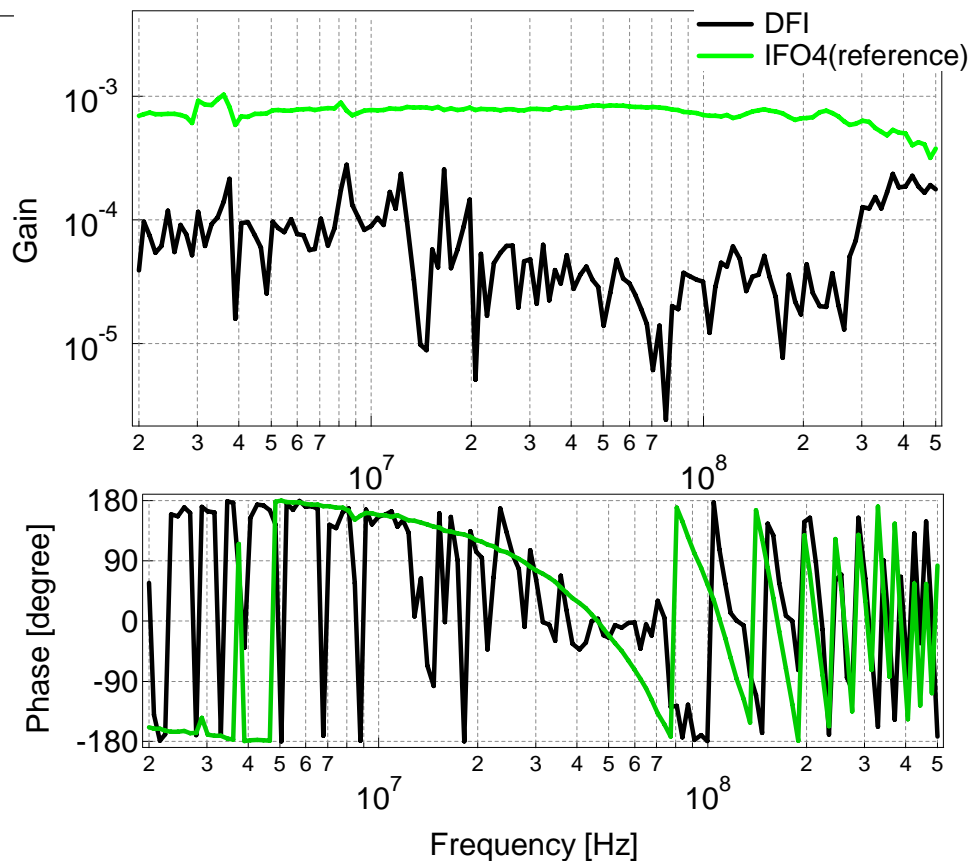
# 3D DFI 実験結果 - 変位雑音



ミラー・BS変位を同時にシミュレートするために3つのEOMを同時にドライブした

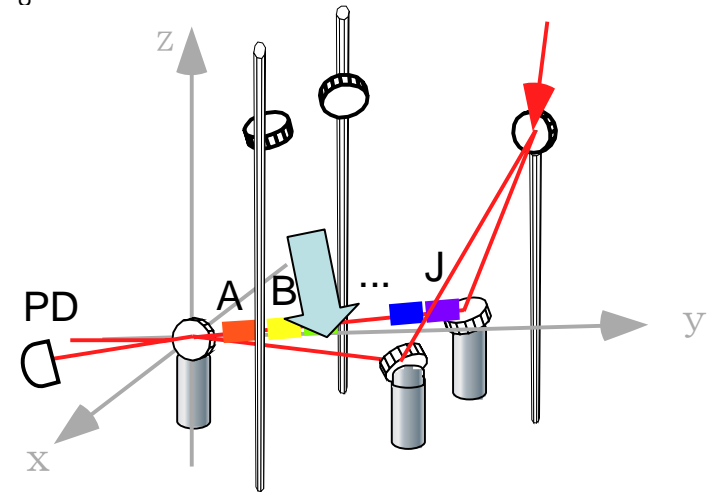
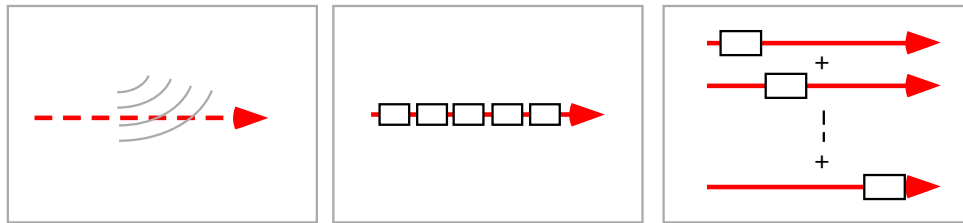
ミラー・BS変位成分とも、約1.5桁のキャンセルを達成

## EOM1からDFI信号への伝達関数

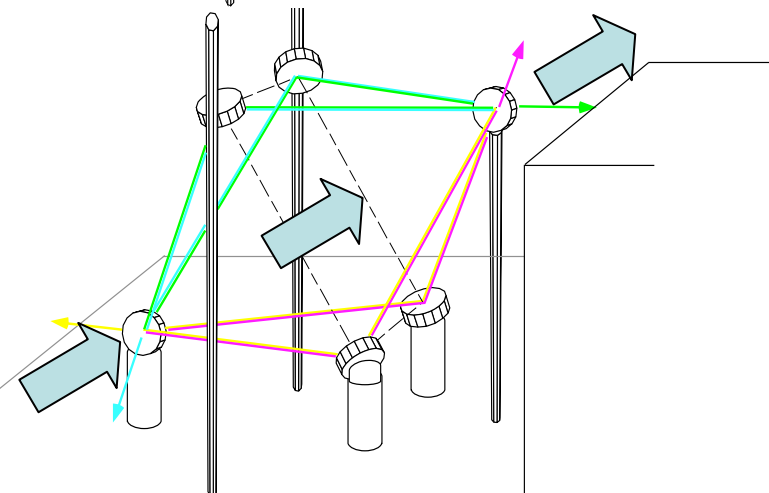


# 3D DFI実験(2) – 重力波応答

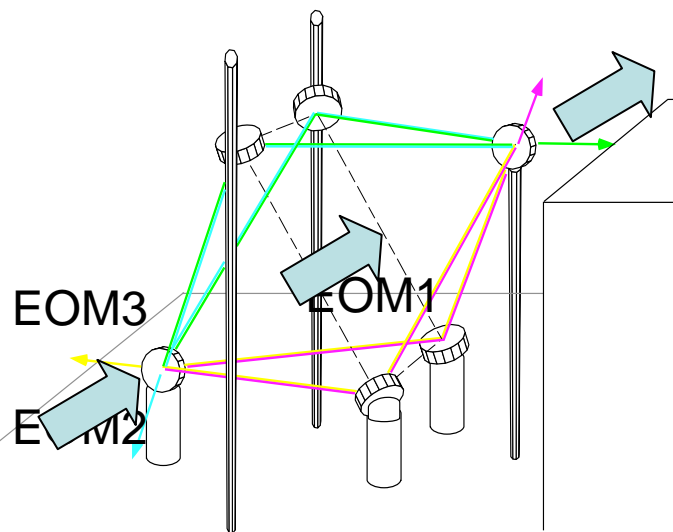
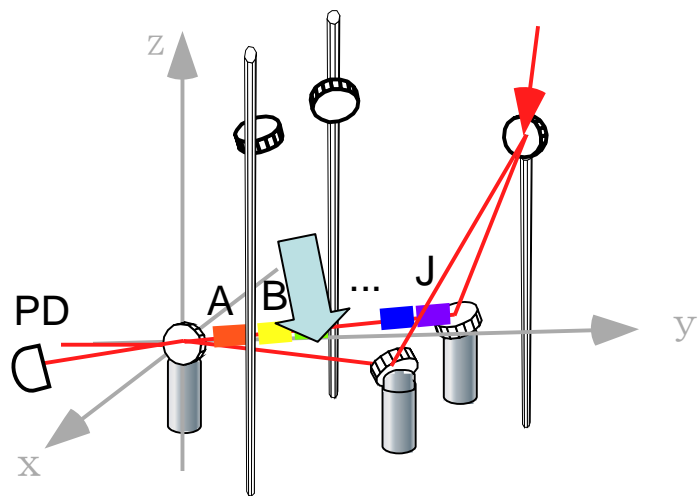
- 重力波信号は複数のデータを組み合わせることにより、再現
  - ▶ 実際の重力波の効果を再現するには、光路すべてに位相変化を与えなければならない。つまり、EOMで光路を埋め尽くさなければならない。



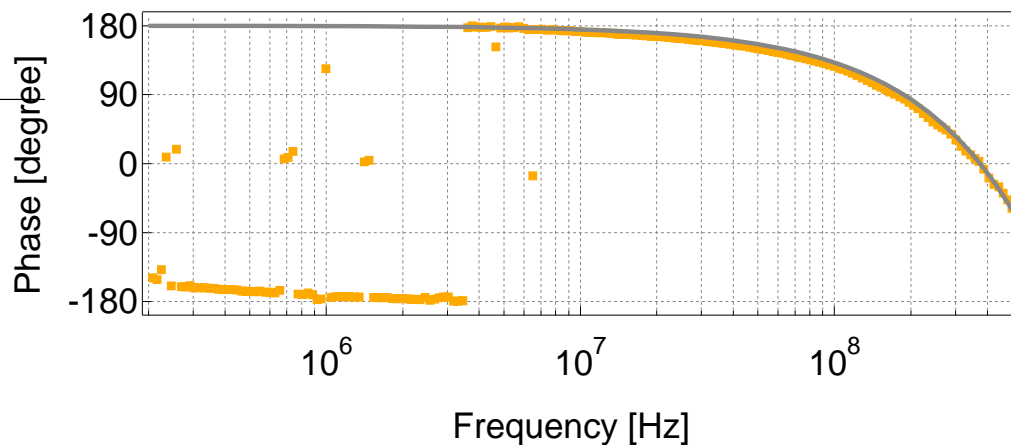
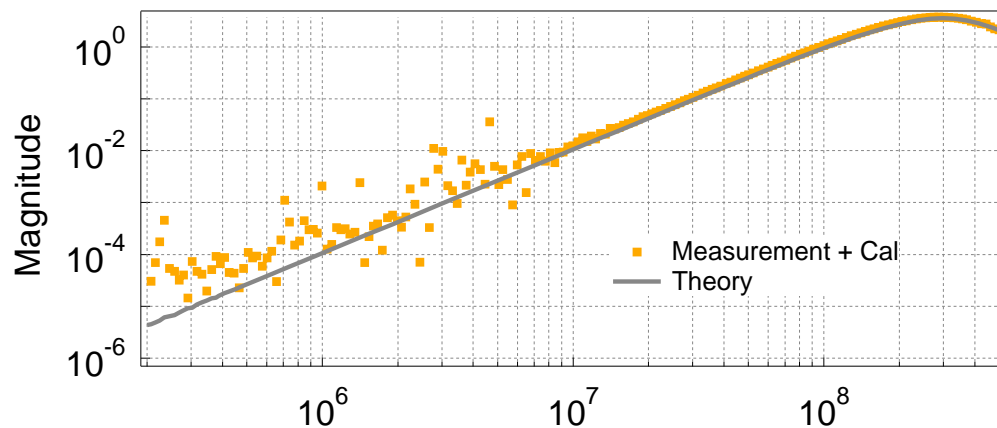
- 4cmごとにEOMを配置 (10箇所)
- それぞれの位置でのEOMからPDへの伝達関数を測定
- それぞれの応答に、図の方向から重力波が来た場合に対応する適切な位相遅延をつけ演算する



# 3D DFI 実験 - 重力波 (2)



重力波からDFI信号への伝達関数



重力波応答が再現され  
重力波は残ることが示された

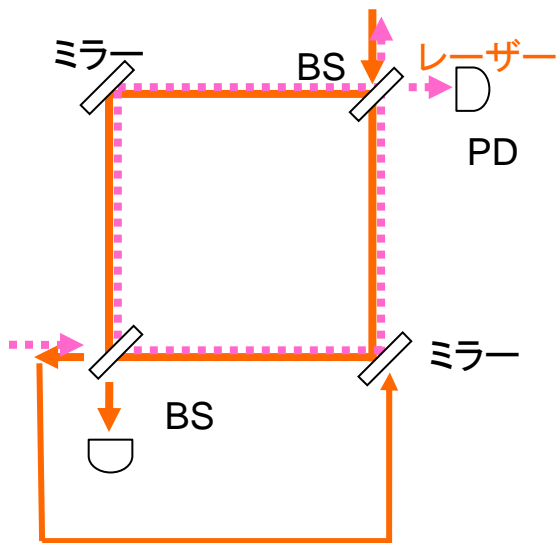
- イン트로ダクション
- 本研究: 変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出器 (DFI) の目的
- DFIの原理
- DFIの光学設計
- DFI原理実験
- **DFIの感度と課題**
- その他の光学設計の可能性
- まとめ

- 3D Full DFI 低周波での感度
- 問題点

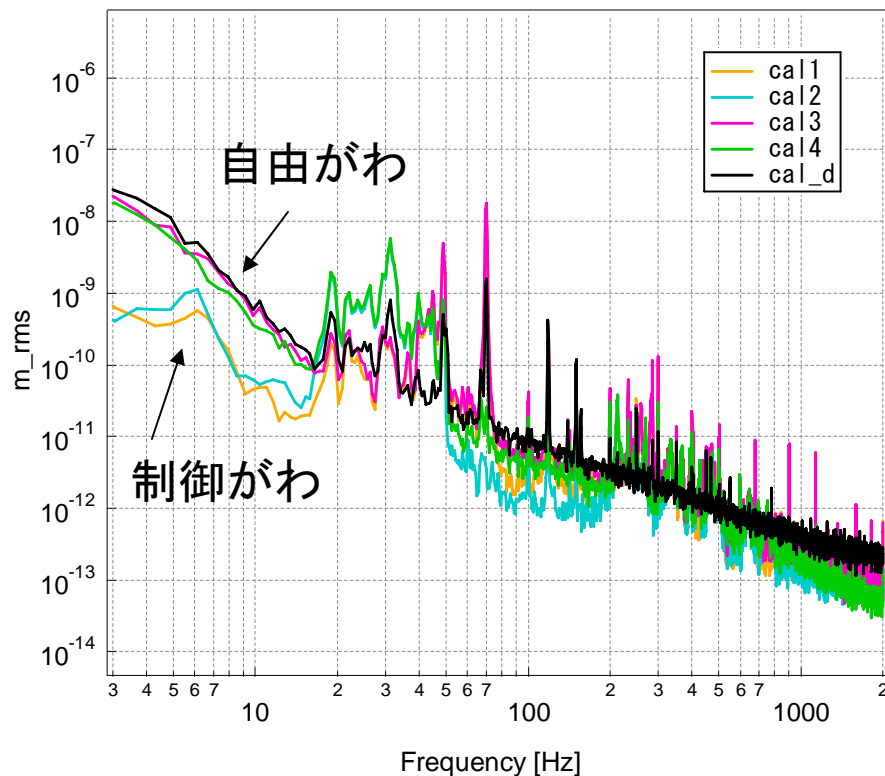
# 3D DFI 雑音レベル

- より実践的な実験として低周波でのノイズレベルの計測を行った。
- この帯域では重力波が生き残らないのだが、Bidirectional MZIの動作の確認などのため

ノイズレベルのバランスがとれずほとんどキャンセルが達成できない。



2つのうちひとつの制御信号で制御、  
もう一台は光路がぴったり重なっているため  
制御がいない

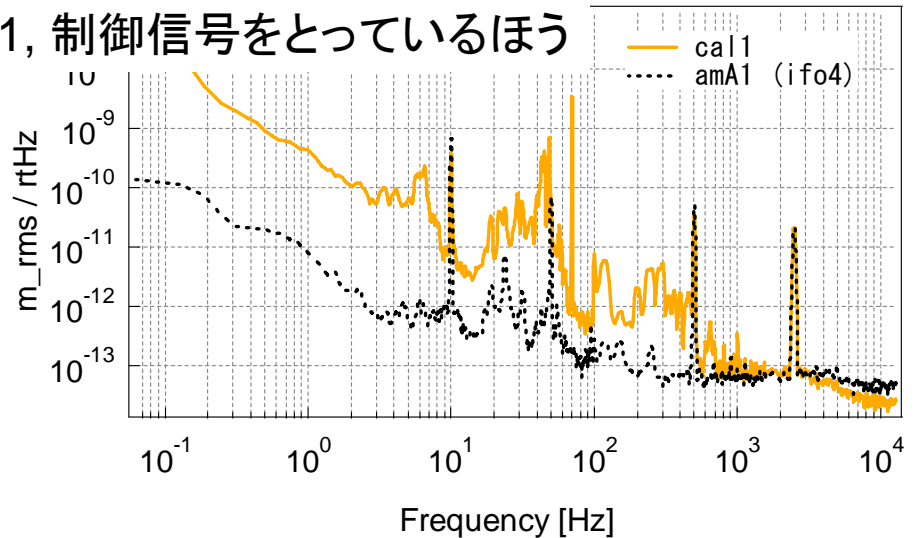


# Bidirectional MZIの雑音レベルの差

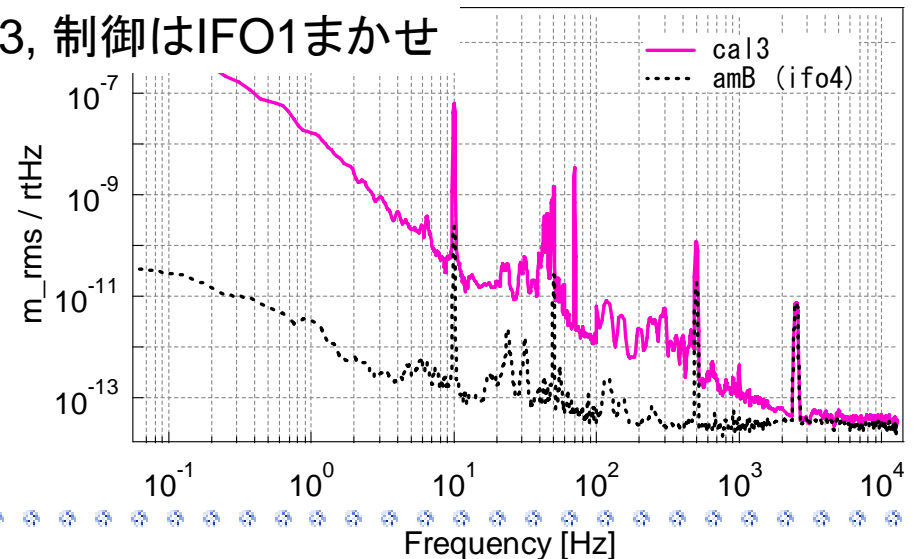
2組bidirectional MZIのうちの1つの雑音レベルと強度雑音レベル

- ショットノイズ – 影響なし
  - ダークノイズ – 影響なし
  - エレキノイズ – 影響なし
  - 周波数ノイズ – ないはず
  - 強度雑音- きいている？
- 差動法ではなく一つのPDからの  
信号+オフセットで制御しているし...

IFO1, 制御信号をとっているほう



IFO3, 制御はIFO1まかせ



よくわからない雑音投影機構が  
Bidirectional MZIにある？

実験のタイムリミットがきたので  
あきらめました...

# もくじ

---

- イン트로ダクション
- 本研究: 変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出器 (DFI) の目的
- DFIの原理
- DFIの光学設計
- DFI原理実験
- DFIの感度と課題
- その他の光学設計の可能性
- まとめ

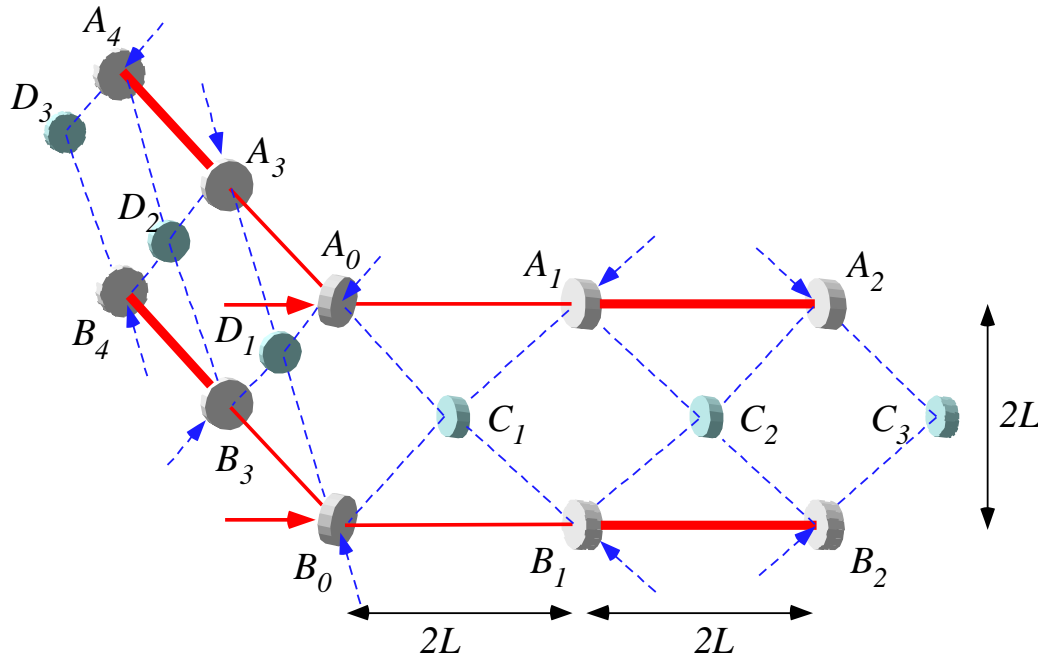


# その他の光学設計の可能性

---

- 現実的なサイズでは、変位雑音が存在する帯域で重力波もキャンセルされてしまう
- 重力波残存ピークを低くするための工夫:
  - キャビティーをくみあわせる
    - Double-L type w/cavity
    - Cubic type w/cavity
- 別アプローチDFI

# その他の光学設計 – Double-L type

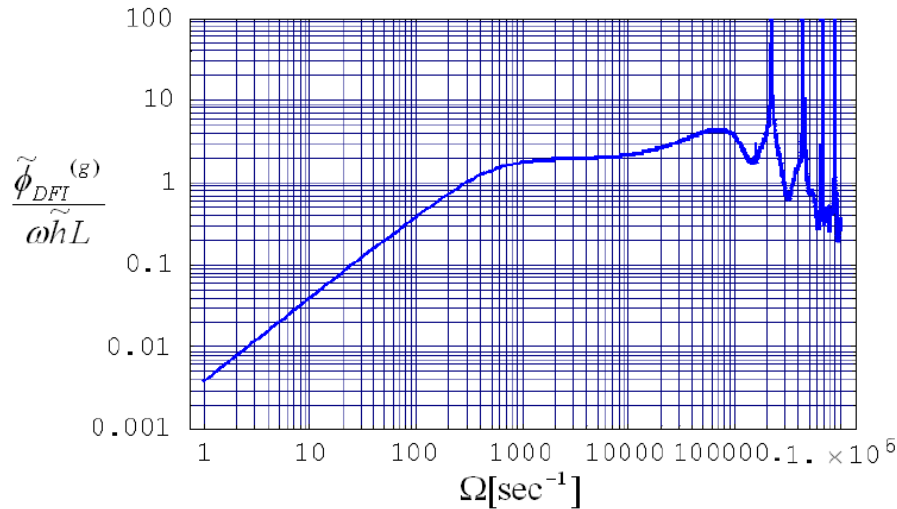


- FPMI x 2, Bidirectional MZI x 5
- 重力波はcavityで増幅される

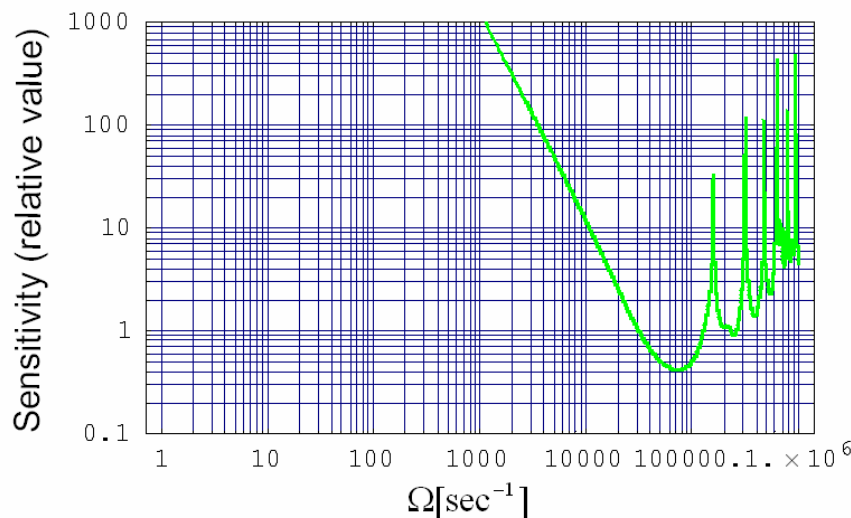
A. Nishizawa, Internal Document

# その他の光学設計 – Double-L type

## DFI信号の重力波応答

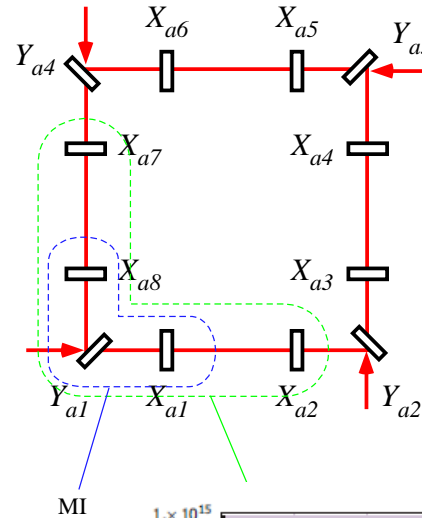
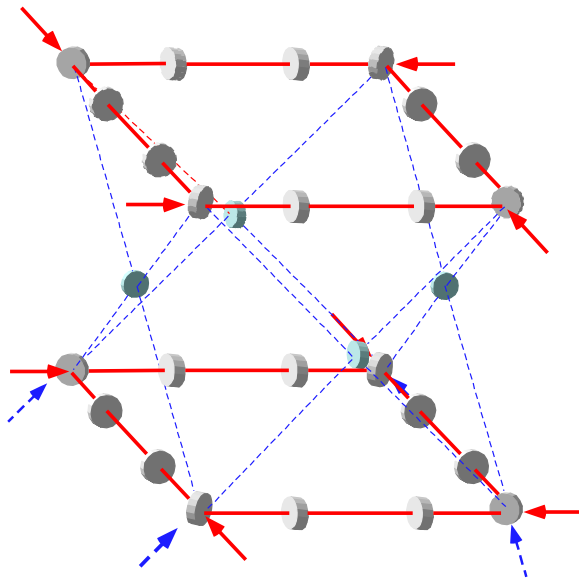


ショットノイズを入れたとき: 感度の逆数 (SNR=1となる雑音レベル)

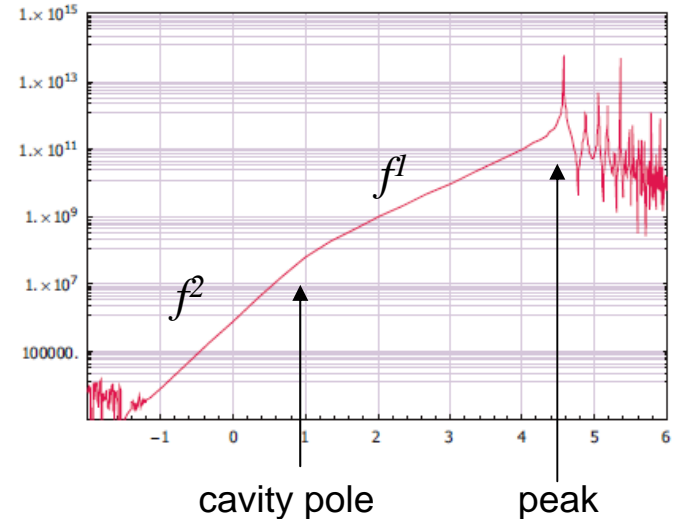


A. Nishizawa, Internal Document

# その他の光学設計 – Cubic type w/FP cavity



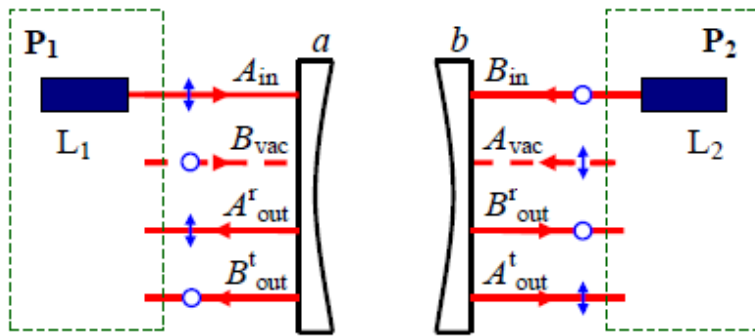
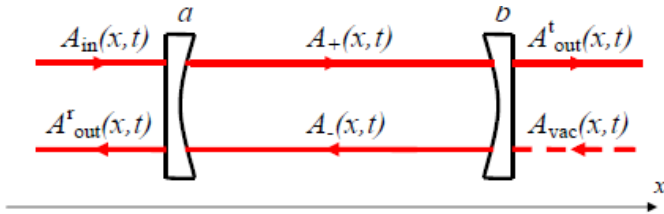
- FPMI x 8, MI x 8, MZI x 4
- 重力波応答
- Shot noiseを考慮した応答?



S. Sato, Internal Document

# その他の光学設計 ~別アプローチ

S.P.Taravrin, S.P.Vyatchanin, Physics Letters A372 (2007) 6801



- Moscow State University (ロシア)のグループ
- 実験的検証はBirmingham大で行われている
- cavity反射光とcavity透過光のミラーa, bへの応答の違いを利用したキャンセル方法 (Kawamura&Chen法とは違う)
- 両方向からレーザーを入れ、それぞれの透過光・反射光の(合計4つの)信号を、変位雑音は消去し重力波信号は残るように適切に演算する
- a, bの変位雑音は消えるがfrequency noiseは消えない
- Optical table P1, P2は完全に止まっているとする(もしくはa, bはP1, P2には固定されておらず別の変位雑音成分を持つとする)

# まとめ

---

- DFIは複数の干渉計の信号を組み合わせて、変位雑音をすべての周波数で除去することができる
- 3D DFIの原理実験を行った

- ✓ 3次元の光学設計であるDFIを構築し動作を実験的に確かめた
- ✓ DFI信号では変位雑音が実際にキャンセルされ、かつ重力波信号は残ることを確認した

- 実践的な雑音レベルではさらなる調査が必要
- 新たな光学設計の可能性の探索

---

Thank you 😊