

重力波検出器KAGRAの 出力モードクリーナの 姿勢制御

宗宮研究室 粕谷順子

2016.2.23

CONTENTS

Introduction

重力波とは
重力波の検出
出力モードクリーナ

Control

出力モードクリーナの制御
フィードバック制御
実験で使った制御系

Experiment

角度制御
平行制御
制御信号の分離度

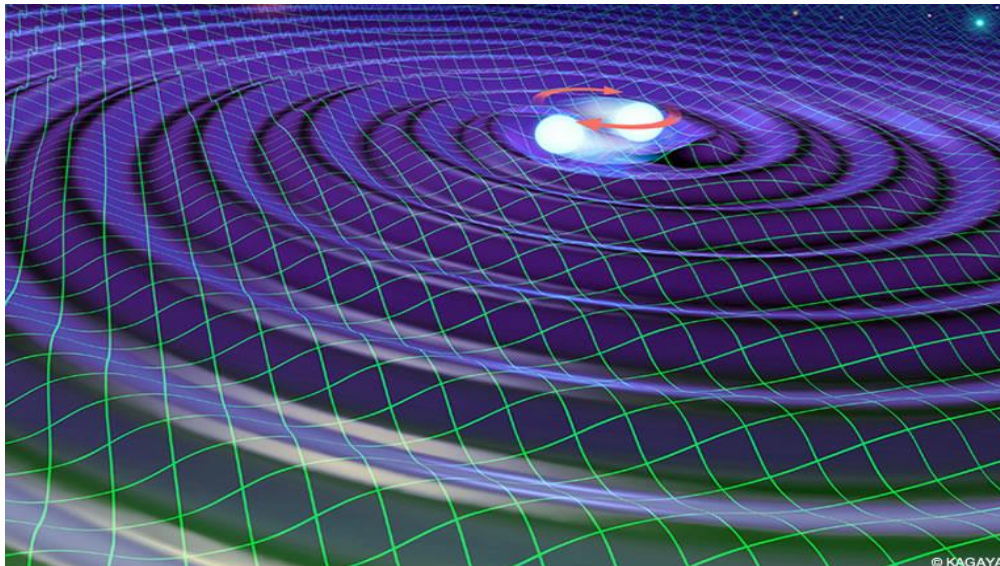
Conclusion/Future Plans

INTRODUCTION

INTRODUCTION

➤ 重力波とは

- 光速で伝搬する時空の歪み
- 発生源は超新星爆発, ブラックホール, 中性子星連星 etc...
- 時空の歪みは 10^{-21} とたいへん小さい
- アインシュタインの一般相対性理論から導かれた



中性子星連星から重力波が発生する
イメージ図
図：KAGAYA

BIG NEWS !!!!

➤ 2016年2月12日未明 発表 米国 Advanced LIGO **世界初の重力波検出に成功！**

検出されたのは・・・ブラックホール・ブラックホール連星の合体による重力波

PRL 116, 061102 (2016)  Selected for a Viewpoint in Physics
PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} was consistent with the predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes.

本日 16:30

本館H101にて

宗宮先生 河合先生 山口先生

重力波セミナー

皆様ご参加ください！！

これからのKAGRAのモチベーション

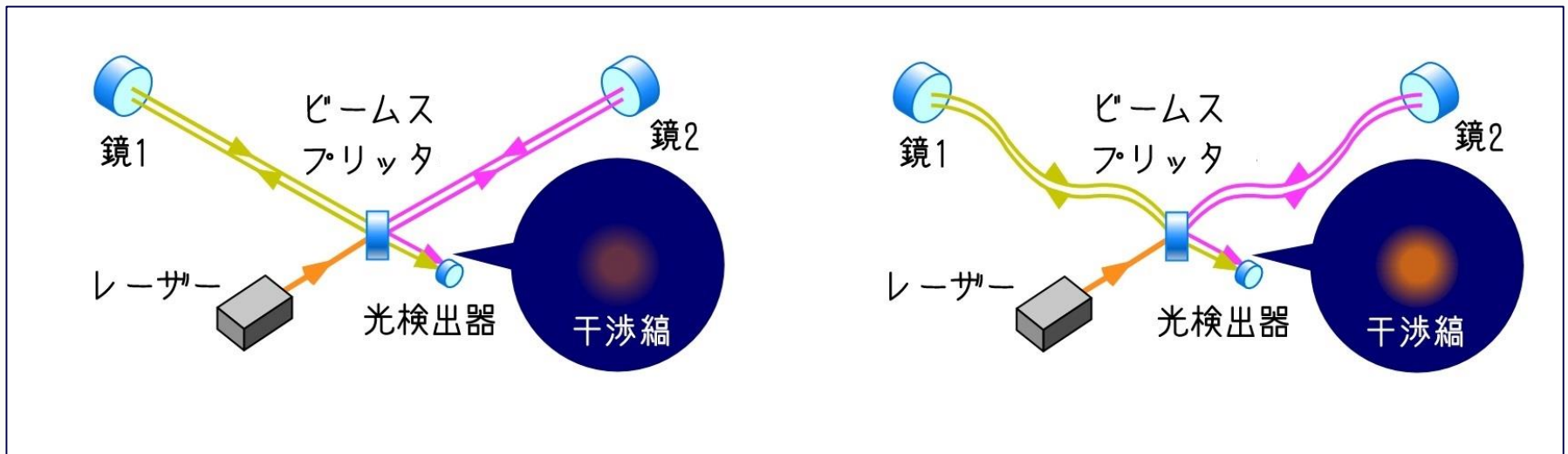
- 複数の検出器が必要な重力波天文学の創生
- 独自性(低温・地下)を生かしたLIGOとは異なる周波数帯域での重力波の検出
- 第三世代重力波検出器のプロトタイプ

INTRODUCTION

➤ 重力波の検出

重力波により2点間の距離が変化する性質を利用する

⇒ **レーザー干渉計型重力波検出器**



空間が歪んでいない場合

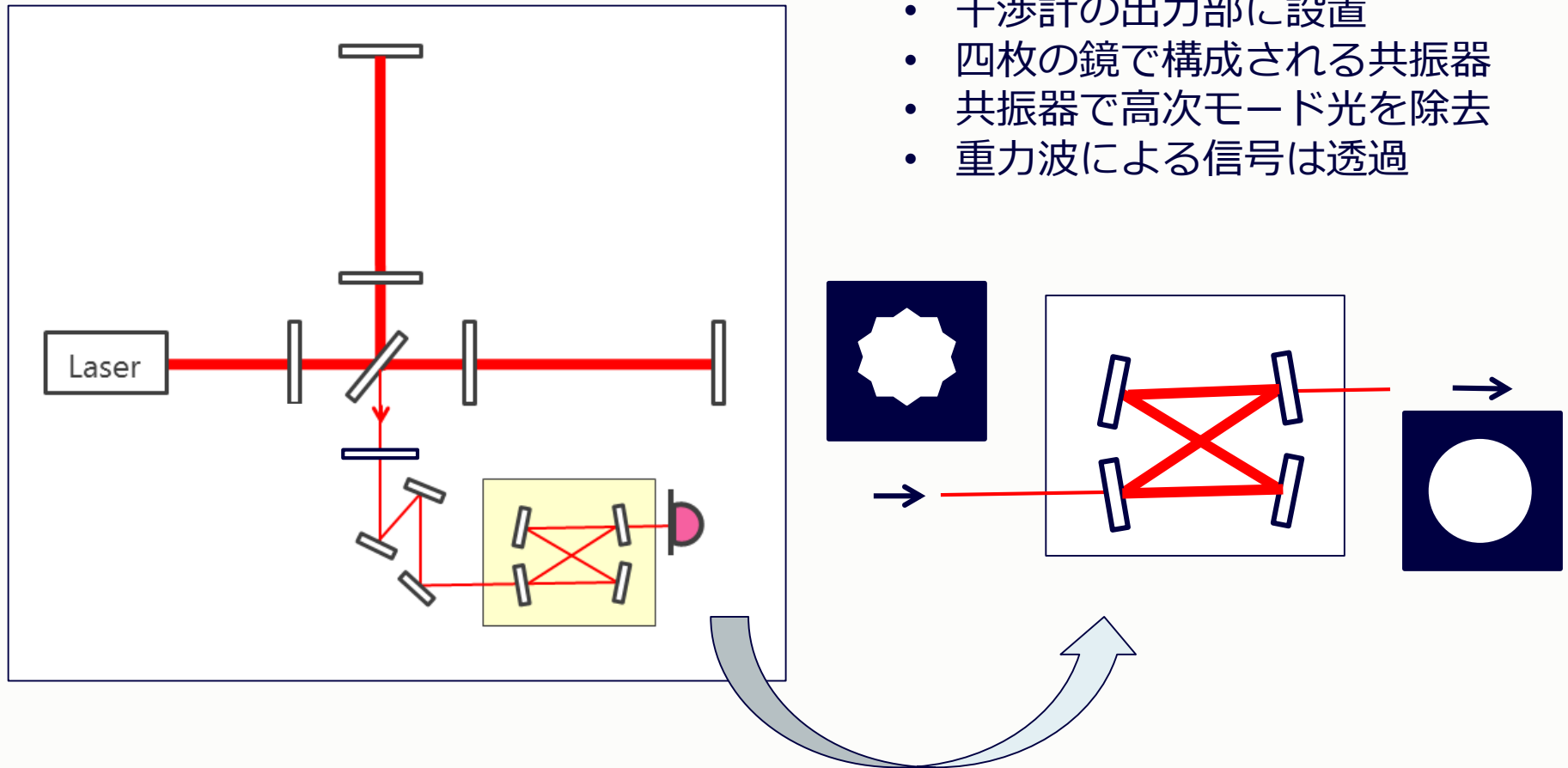
⇒ 干渉縞が**暗い**

空間が歪んでいる場合

⇒ 干渉縞が**明るい**

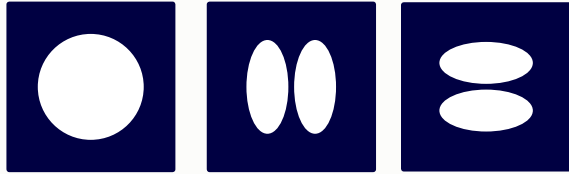
INTRODUCTION

➤ 出力モードクリーナ=レーザー干渉計の出力を綺麗にする装置



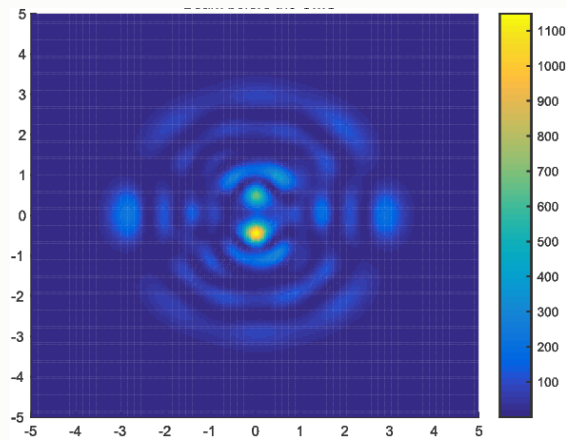
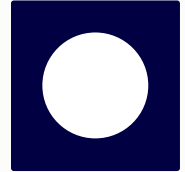
INTRODUCTION

➤ 出力モードクリーナのしくみ



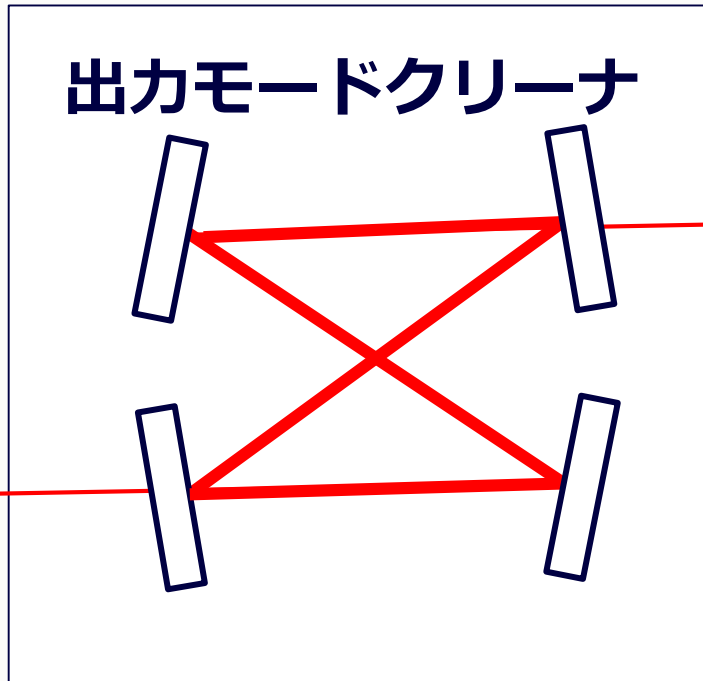
← 基本モード
+ 高次モード

基本モードのみ→

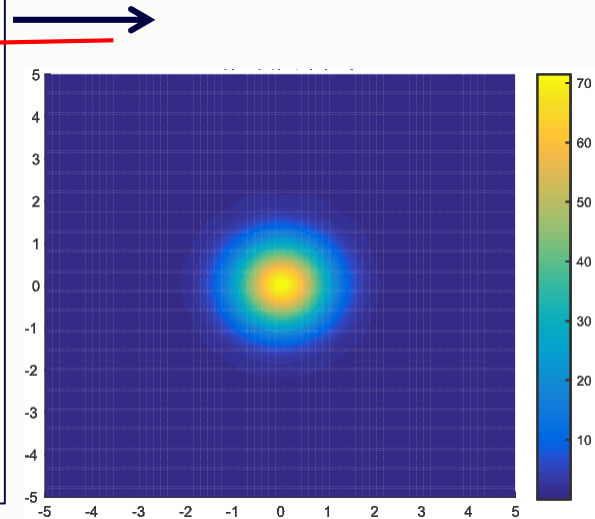


汚い光

出力モードクリーナ



綺麗な光



CONTROL

CONTROL

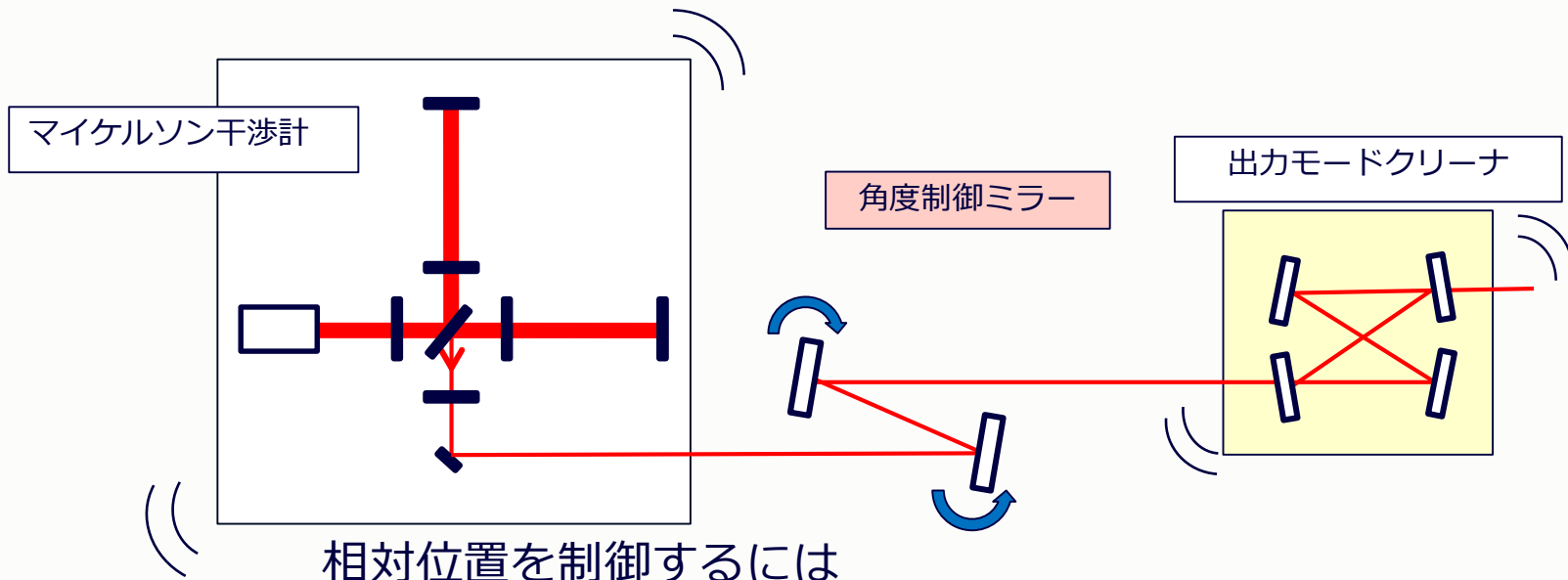
- 出力モードクリーナの共振器の長さ制御 → 宗宮研 修士論文
- 出力モードクリーナの姿勢制御

干渉計と出力モードクリーナの相対位置を制御

干渉計と出力モードクリーナがバラバラに振動し

干渉計の出力が出力モードクリーナに正しく入射しなくなってしまう

⇒2枚の鏡で制御する



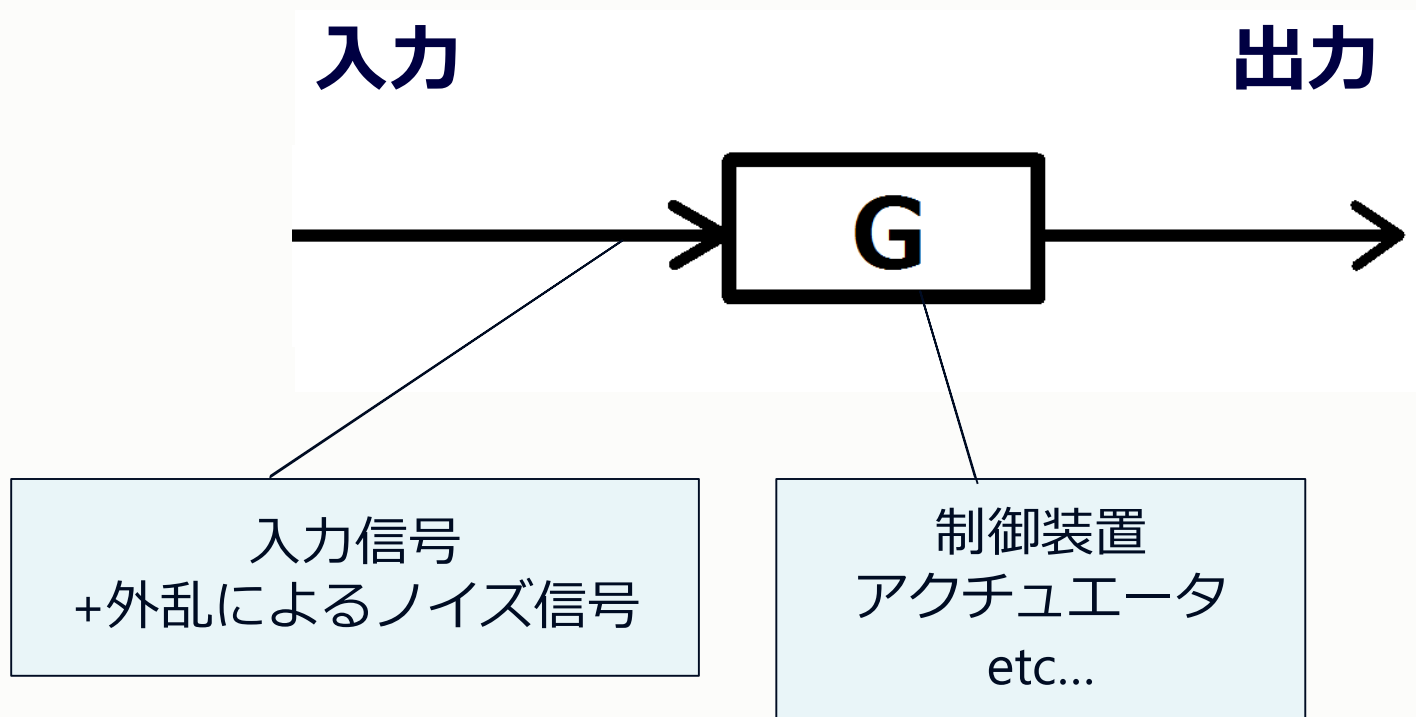
相対位置を制御するには

角度方向 と **平行方向** の**2自由度**の制御が必要

CONTROL

➤ フィードバック制御

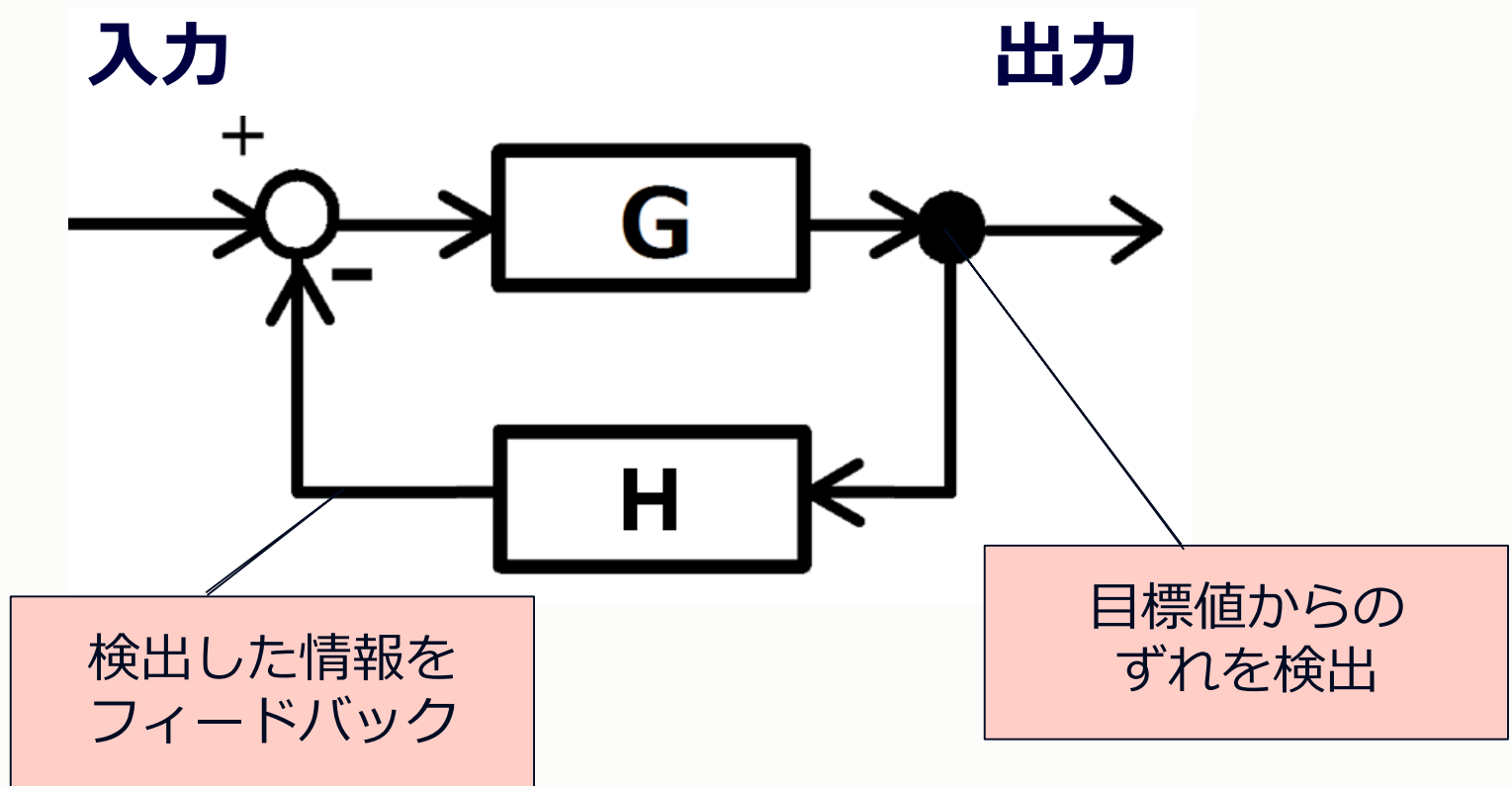
- 常に目標値からのずれを検出し制御する
- 変化する外乱に強い
- 入力と出力の比：伝達関数 G



CONTROL

➤ フィードバック制御

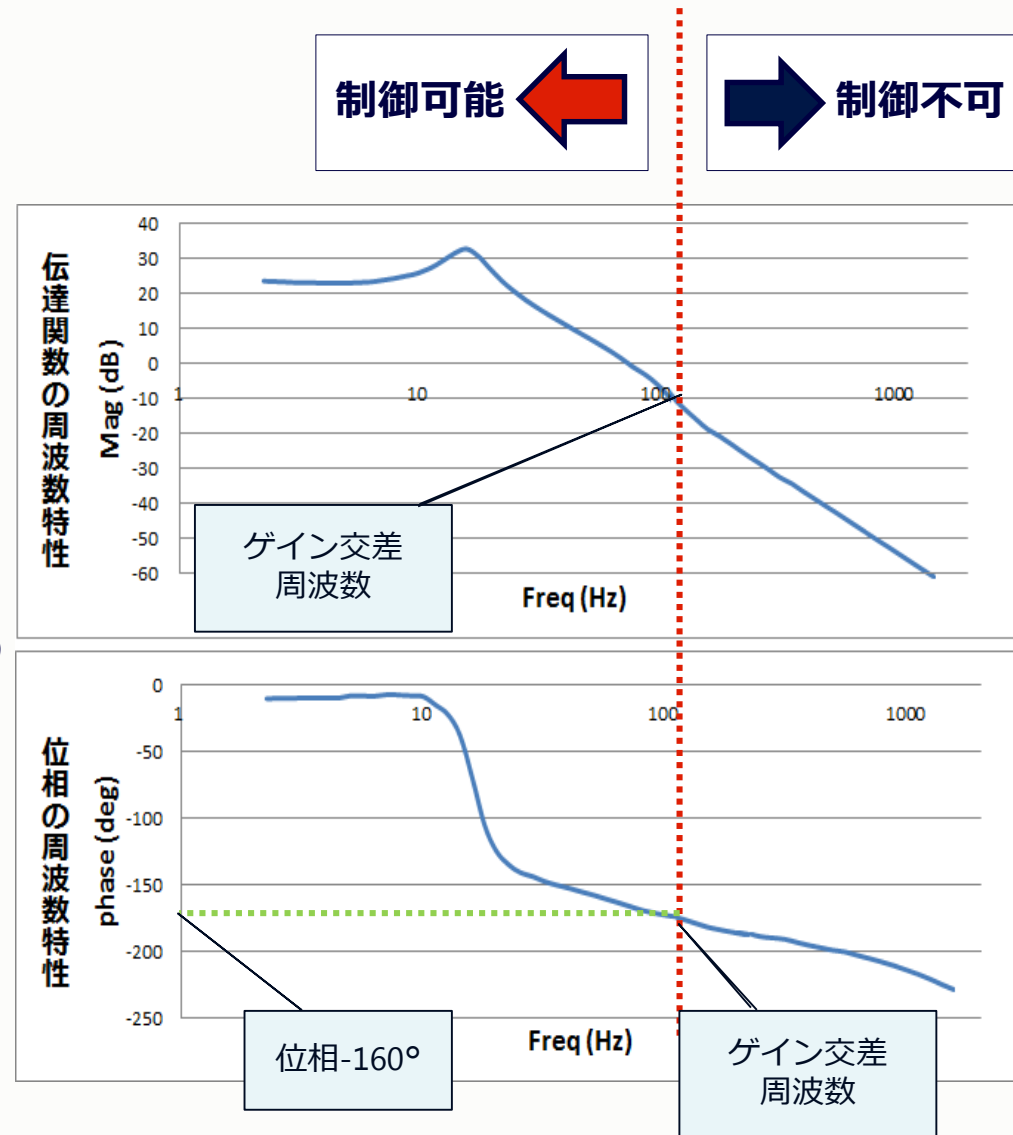
- 常に目標値からのずれを検出し制御する
- 変化する外乱に強い
- 入力と出力の比：伝達関数 G



CONTROL

➤ 制御の安定性

- ボード線図：
制御系のゲイン・位相の
周波数特性を表すグラフ
- ゲインが 0 dB を横切る
ゲイン交差周波数以下の周波数で
制御可能
- 安定な制御でゲイン交差周波数での
位相が -180° 以上



CONTROL

➤ 出力モードクリーナの姿勢制御の制御系

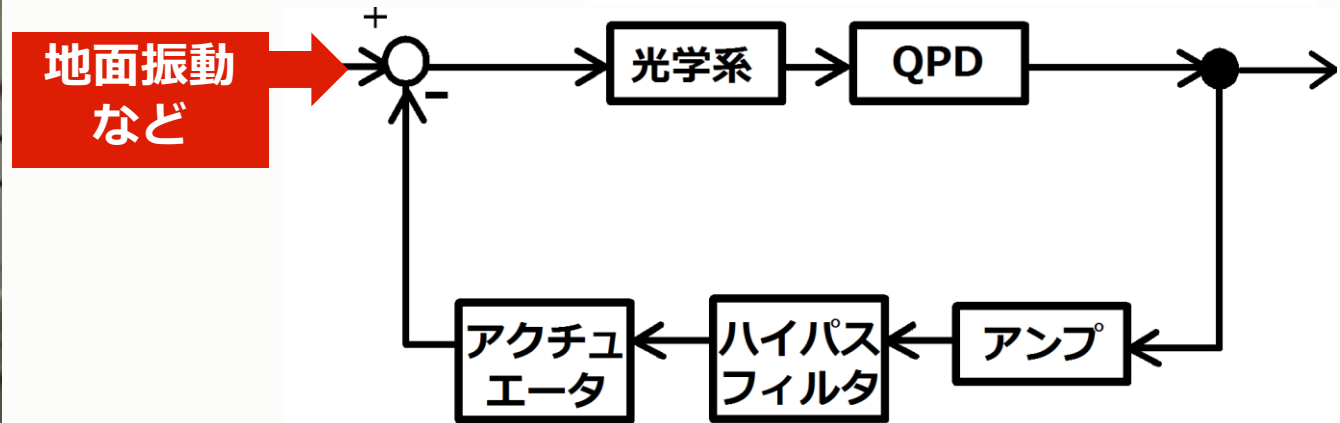
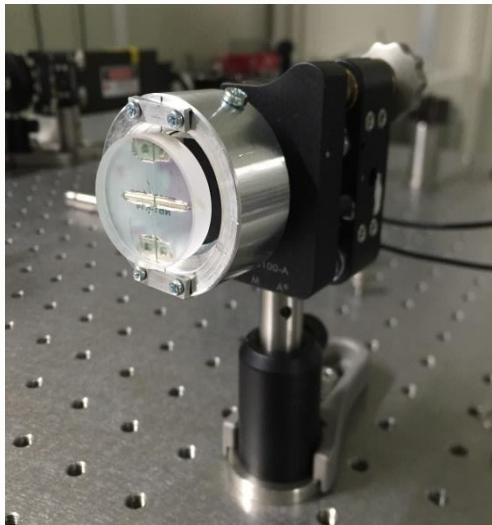
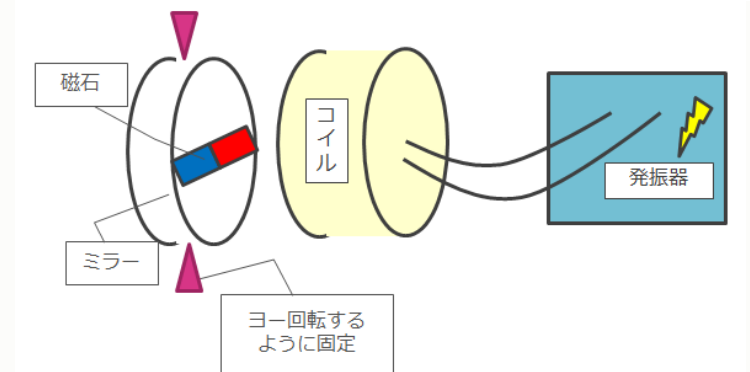
• 相対位置の検出

四分割フォトディテクタ(QPD)：受光面が分割されたフォトディテクタ
出力の差でビームが当たっている位置を測定



• アクチュエータ

角度制御ミラー：磁石を背面に取り付けた鏡を
後ろからコイルで角度調整



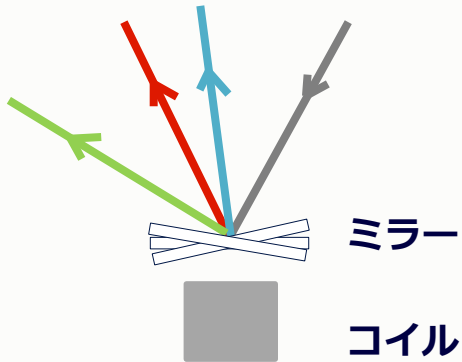
干渉計と出力モードクリーナの相対位置のずれをフィードバック

EXPERIMENT

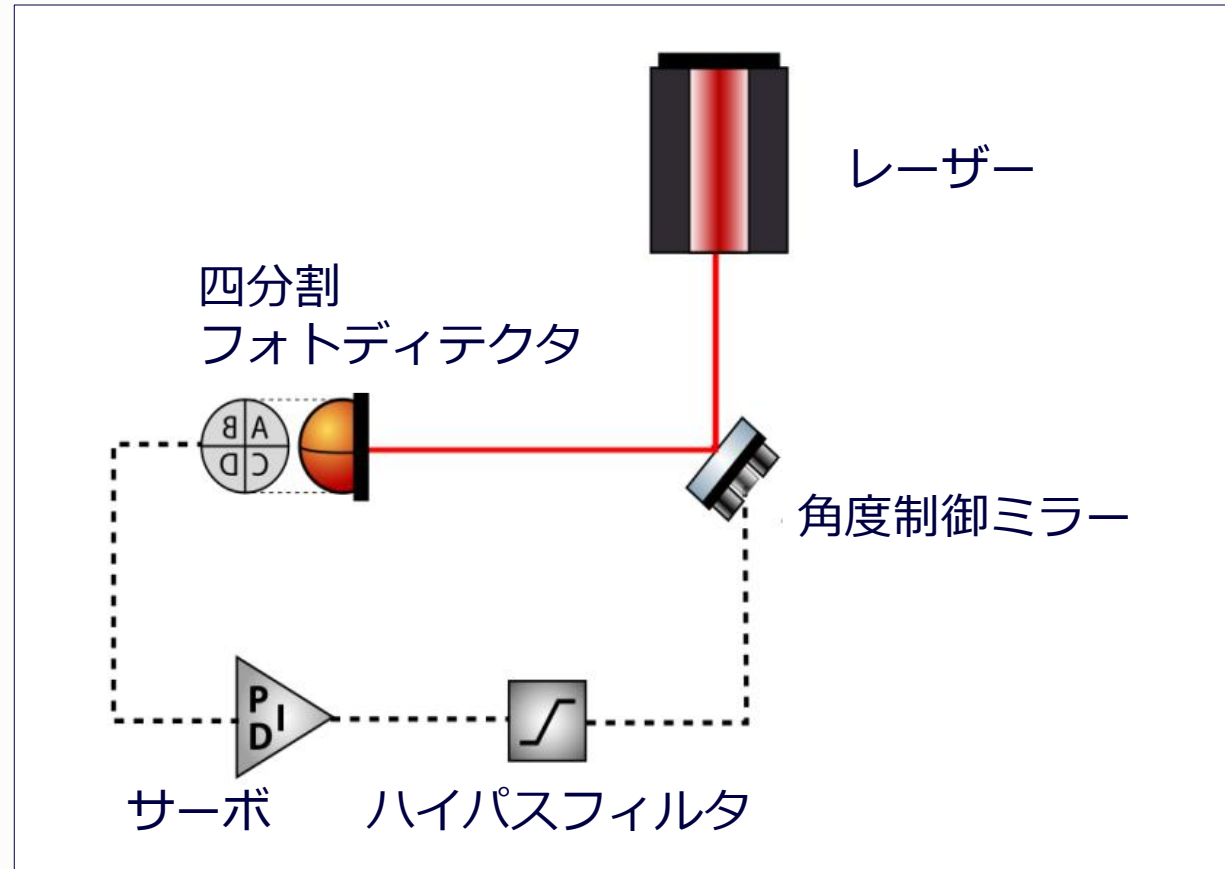
EXPERIMENT

➤ 角度制御実験

1つの角度制御ミラーで
ビームを角度方向に制御

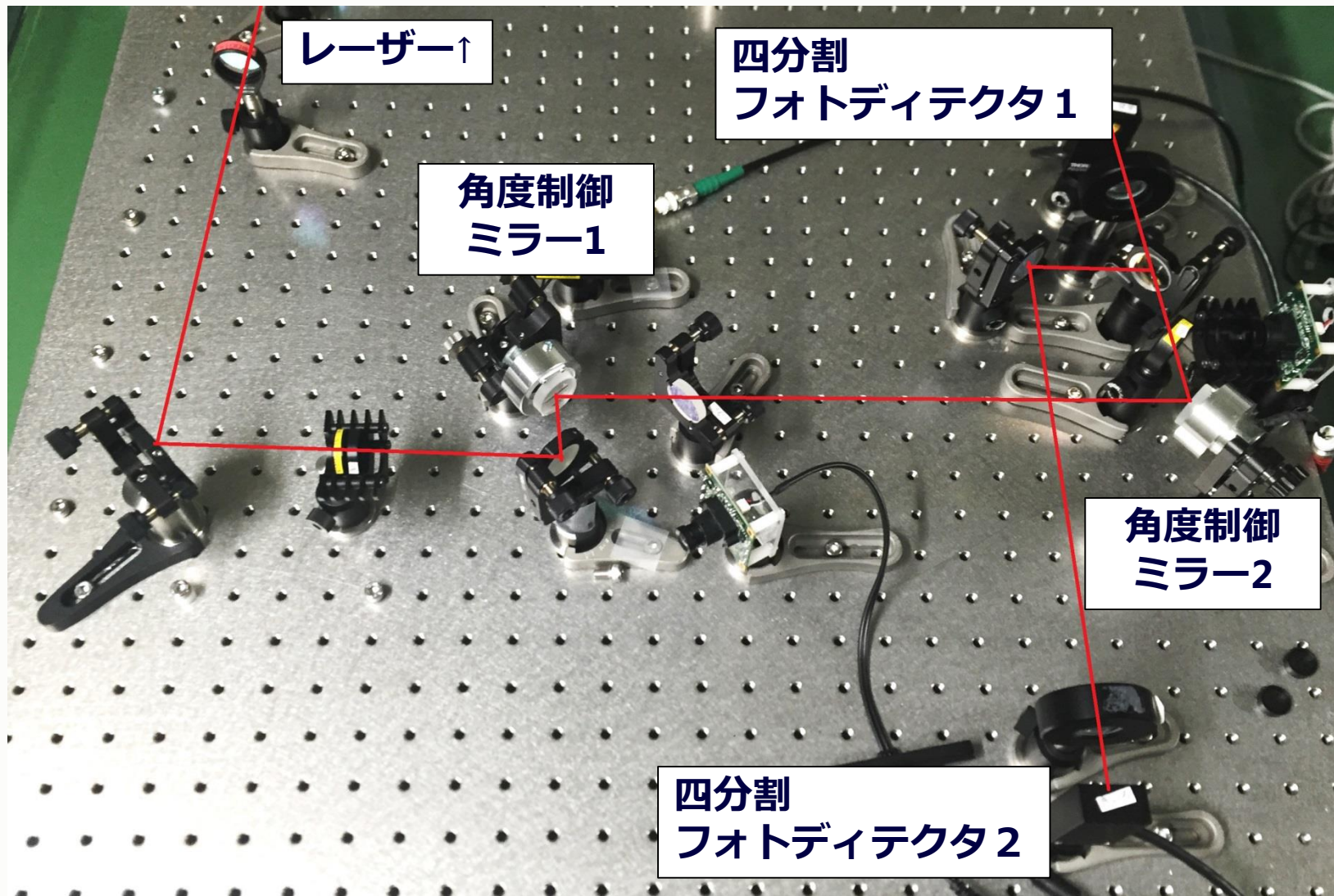


四分割フォトディテクタの信号を
角度制御ミラーにフィードバック



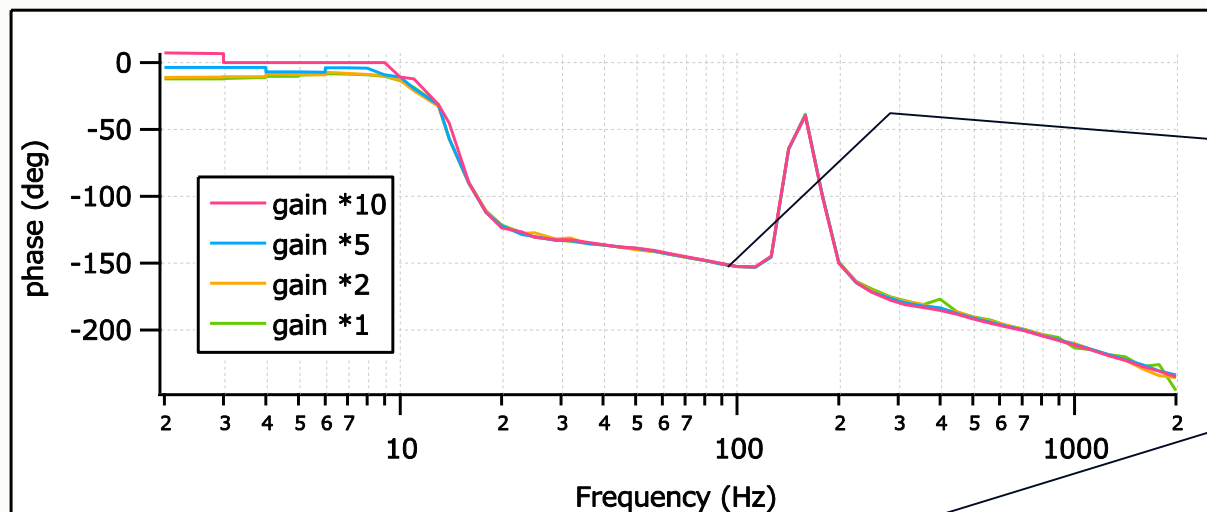
EXPERIMENT

➤ 光学系



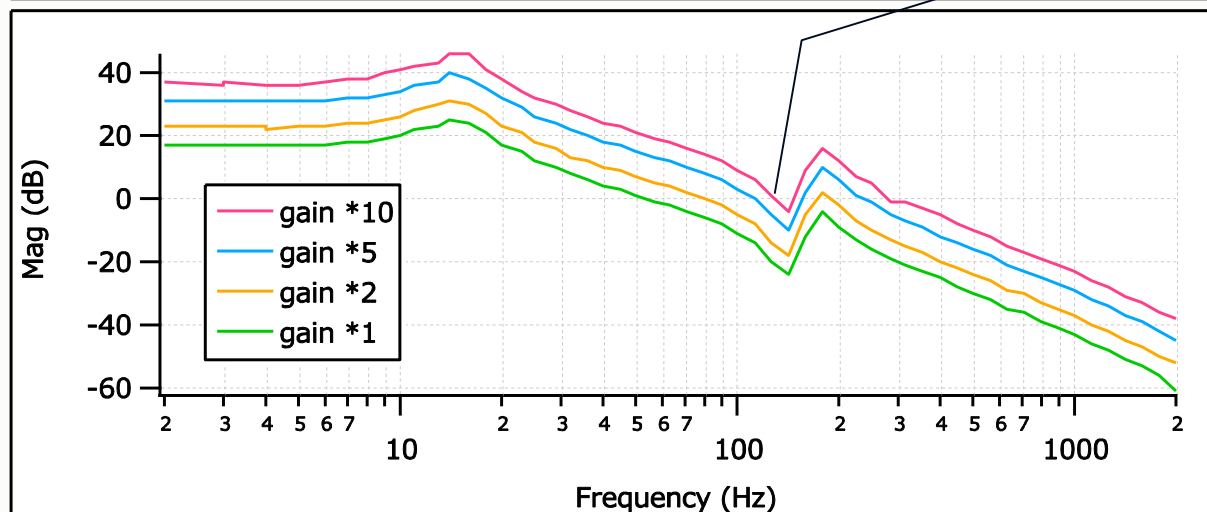
EXPERIMENT

➤ 角度制御実験の結果



位相
-150°

ゲイン交差
周波数100Hz



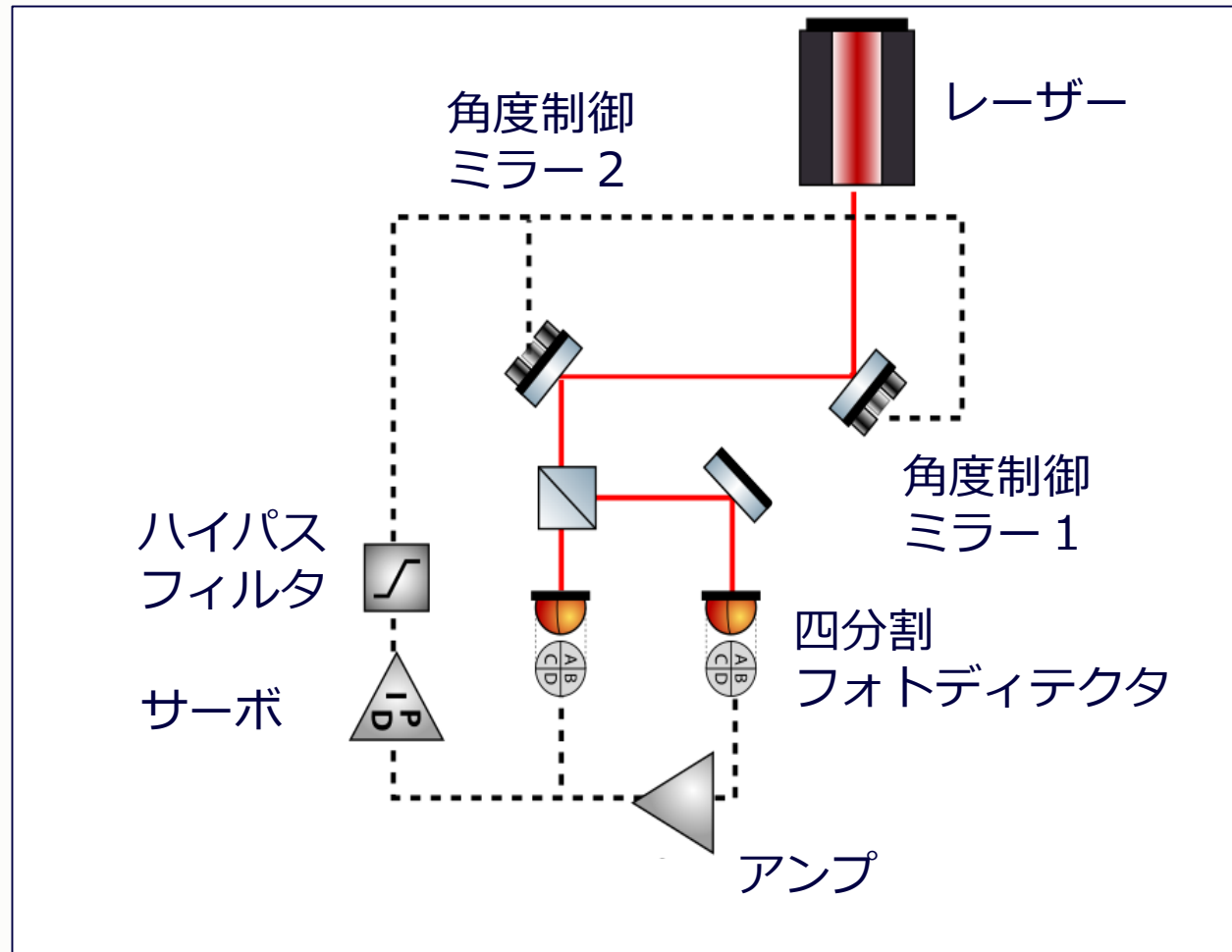
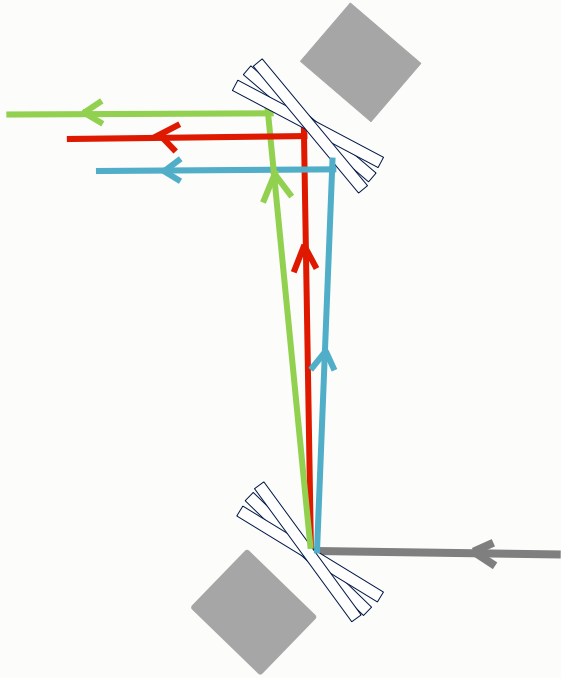
KAGRAの制御の要求値
0 Hz – 20 Hz

制御に成功

EXPERIMENT

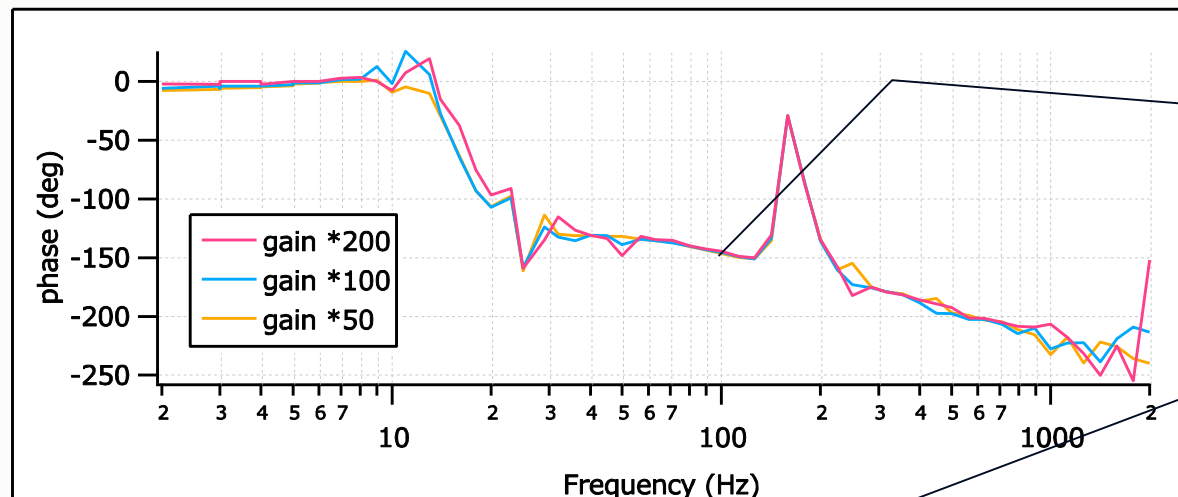
➤ 平行制御実験

2つの角度制御ミラーを
同相に揺らし
ビームを平行方向に制御



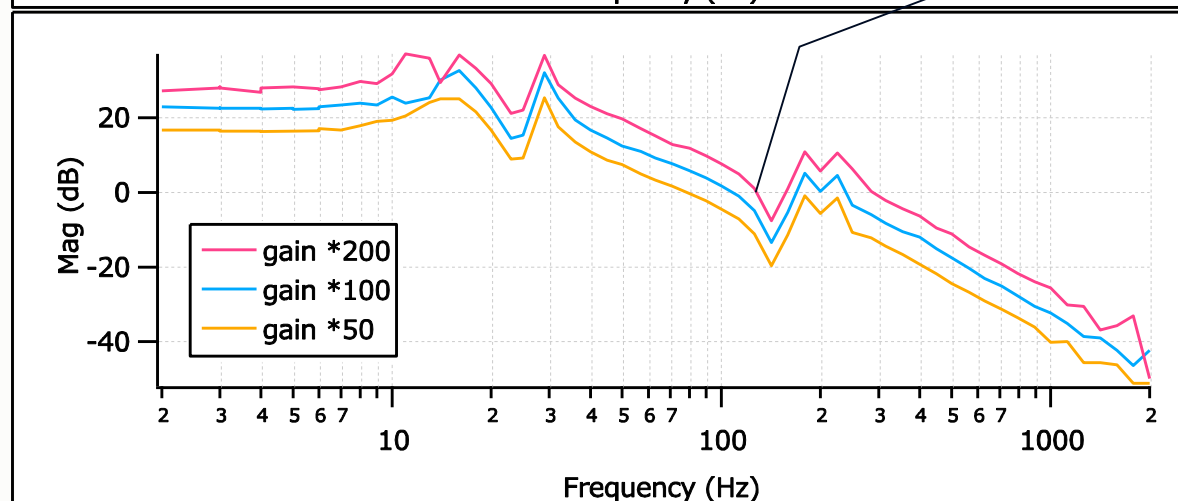
EXPERIMENT

➤ 平行制御実験の結果



位相
-150°

ゲイン交差
周波数100Hz



KAGRAの制御の要求値
0 Hz – 20 Hz

同じく
制御に成功

EXPERIMENT

➤ 同時制御と制御信号の分離度

角度(平行)方向に鏡が揺れた場合に平行(角度)制御信号が出ると
余計な制御がなされる ⇒ **制御信号の分離**

	角度制御 信号	平行制御 信号
鏡を角度方向に 揺らす	○	×
鏡を平行方向に 揺らす	×	○

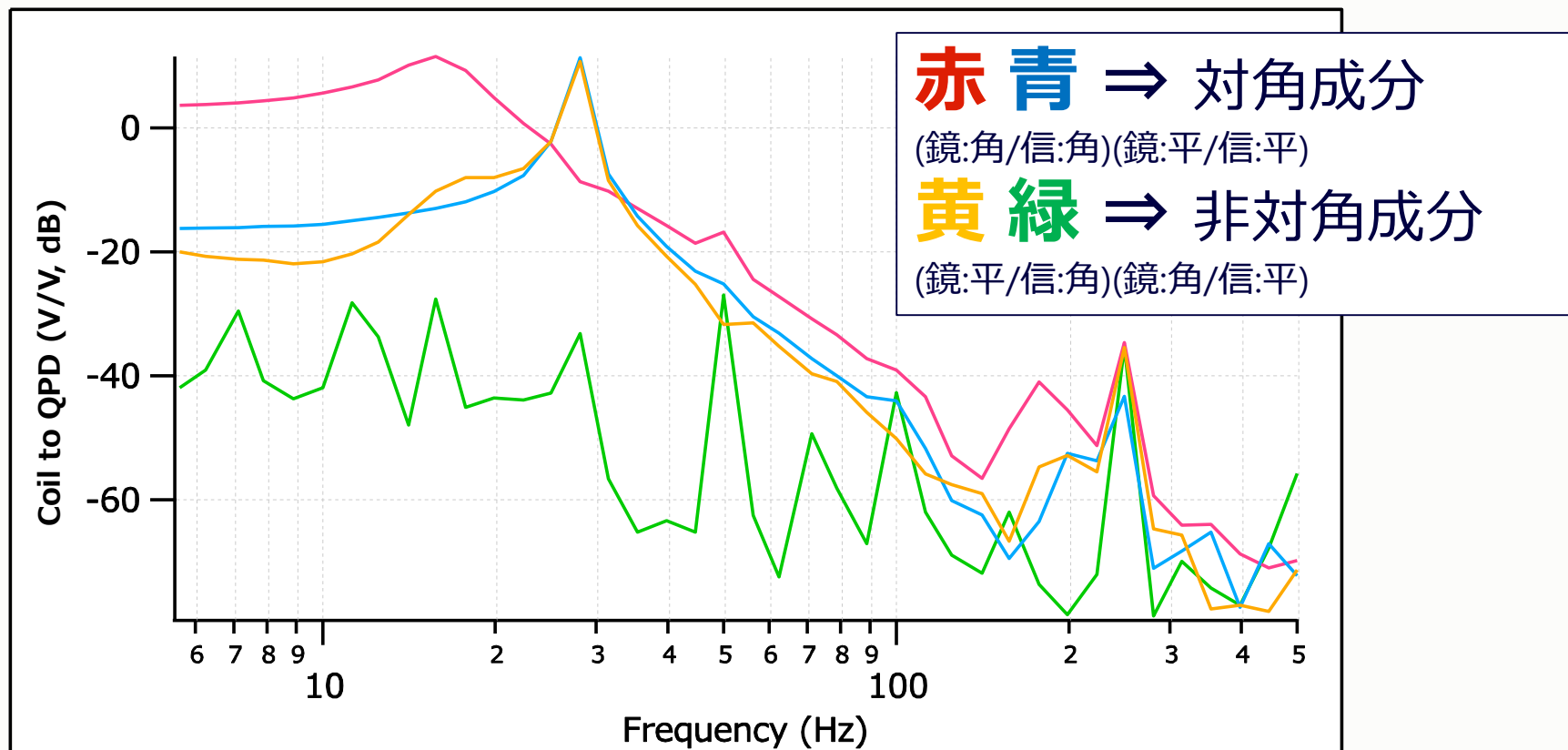
対角成分 : 必要
非対角成分 : 不要

EXPERIMENT

➤ 同時制御と制御信号の分離度

黄色(鏡を平行に揺らした場合の角度制御信号)が大きい

→ **改善が必要**



CONCLUSION

干渉計と出力モードクリーナの相対的な振動を抑える制御が必要
角度方向と平行方向の2自由度の制御が必要

KAGRAの制御の要求値

0 Hz – 20 Hz

- 角度制御………**100Hz**以下の周波数で**制御成功**
- 平行制御………同じく**100Hz**以下の周波数で**制御成功**
- 信号の分離………ほとんどの周波数帯で**分離成功**
一部分離できていない周波数がある
⇒**改善が必要**

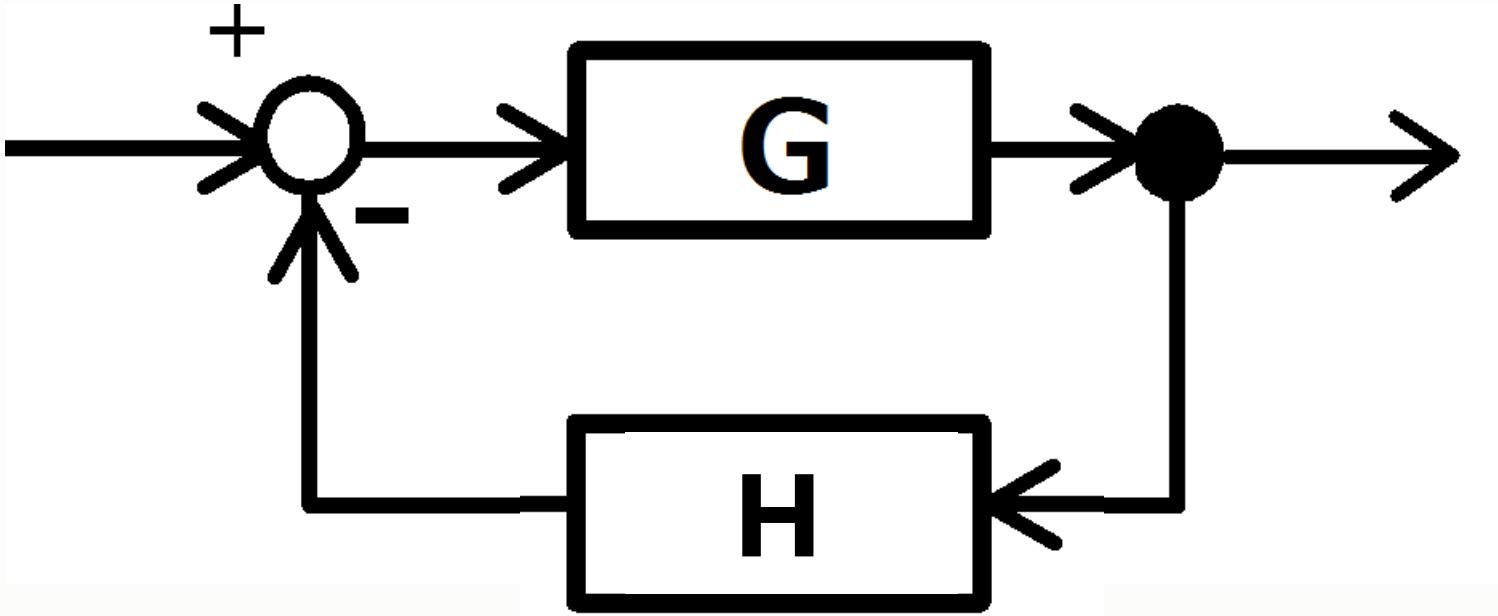
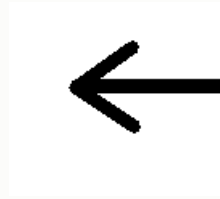
FUTURE PLANS

➤ 制御信号の分離度の改善

- ① 2つの角度制御ミラーの共振周波数を合わせる
- ② 2つの四分割フォトディテクタの出力の比率を変える
- ③ 2つの四分割フォトディテクタの置く位置を変える
- ④ 発振器でオフセットを加え非対角成分の信号を打ち消す

➤ 制御信号の選択

実験で制御に使用したレーザー光は基本モード光だったが
実際には高次モードも含む汚いレーザー光で制御する必要がある



CONTROL

➤ 出力モードクリーナの制御系

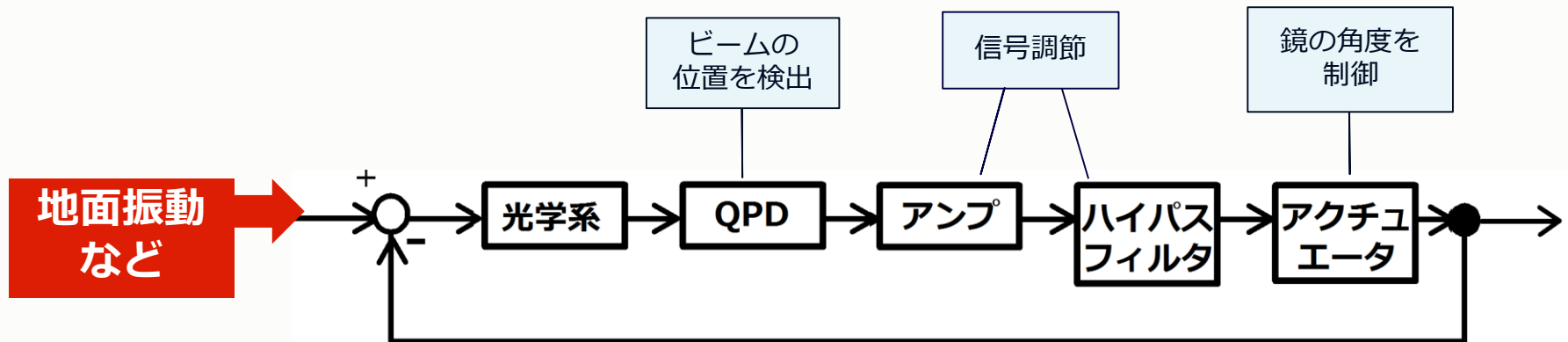
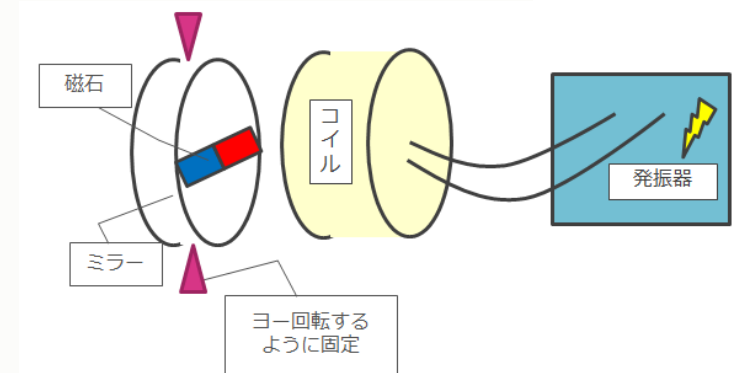
• 相対位置の検出

四分割フォトディテクタ(QPD)：受光面が分割されたフォトディテクタ
出力の差でビームが当たっている位置を測定

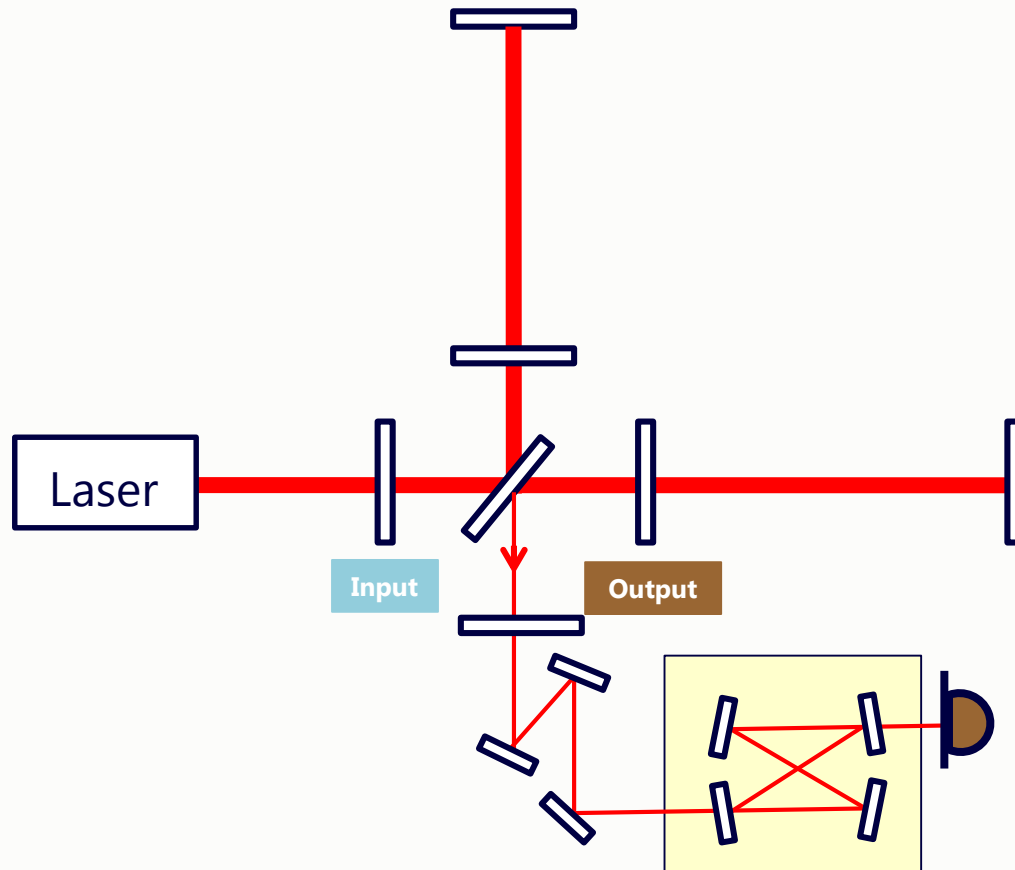


• アクチュエータ

角度制御ミラー：磁石を背面に取り付けた鏡を
後ろからコイルで角度調整



干渉計と出力モードクリーナの相対位置のずれをフィードバック



BIG NEWS !!!!