

# *Modulation system for length sensing of the main interferometer*

---

KOHEI YAMAMOTO

FIRST-YEAR MASTER'S STUDENT IN KAJITA LAB

# *Abstract*

**My work is about the modulation system for length sensing of the main interferometer, KAGRA. We are planning to use Mach-Zehnder interferometer with delay line for this purpose. Two main advantages of this strategy are,**

- 1. we can detune SRC**
- 2. we can lock center region independently from arm region.**

**Here I mainly want to explain how this optical system works and report results I got so far.**

**I also mention other works I'm doing.**

# Outline

- データ解析グループ(DAS)に顔を出している話
- 天文台で阿久津さんのTMS開発を手伝っている話
- KAGRAの信号取得用の変調システム

# Outline

- データ解析グループ(DAS)に顔を出している話
- 天文台で阿久津さんのTMS開発を手伝っている話
- KAGRAの信号取得用の変調システム

# DASの話

- ・現在, 田越先生に教えてもらったLIGOのon-line(off-line)解析用のpipelineであるgstLAL (PyCBC, IHOPE, FINDCHIRP)の論文を色々勉強している



全く同じpipelineにするわけではもちろんないが, そのうちKAGALIの開発を真面目に始める時に色々役立つと思う.

- ・parameter estimation用のpipeline, LALInferenceの勉強もそのうち始めたい.



GW170817に関して, KAGRAが(ある仮定の元で)稼働していたらどう見えていたか(distanceとinclinationの縮退がどう見えるかとか?)

# Outline

- データ解析グループ(DAS)に顔を出している話
- 天文台で阿久津さんのTMS開発を手伝っている話
- KAGRAの信号取得用の変調システム

# TMSの話

Q. TMSとは?

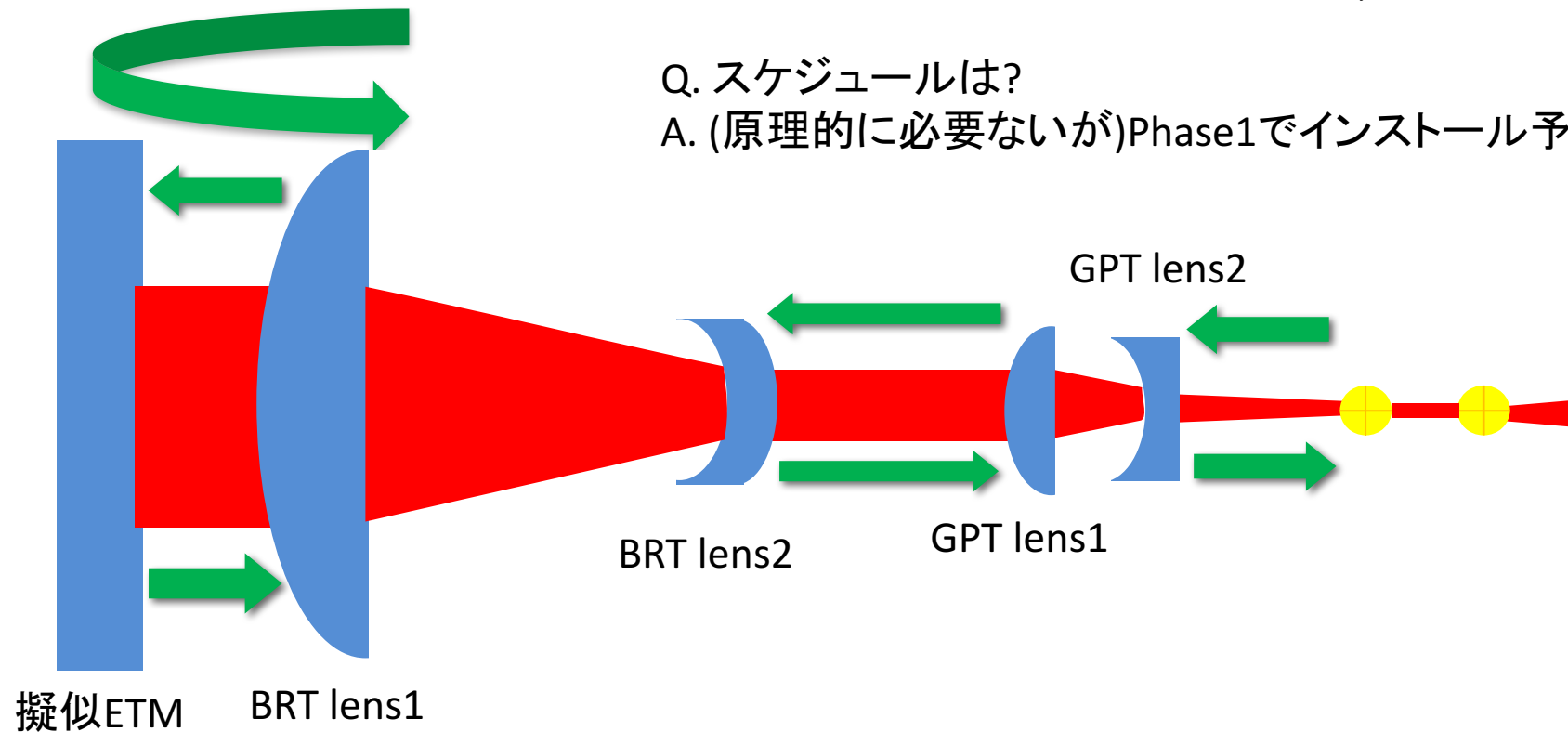
A. 腕共振器のETMの後ろにインストールする予定の光学系

Q. 役割は?

A. 透過光をレンズで絞ってQPDに導き, レーザー軸のズレを検出

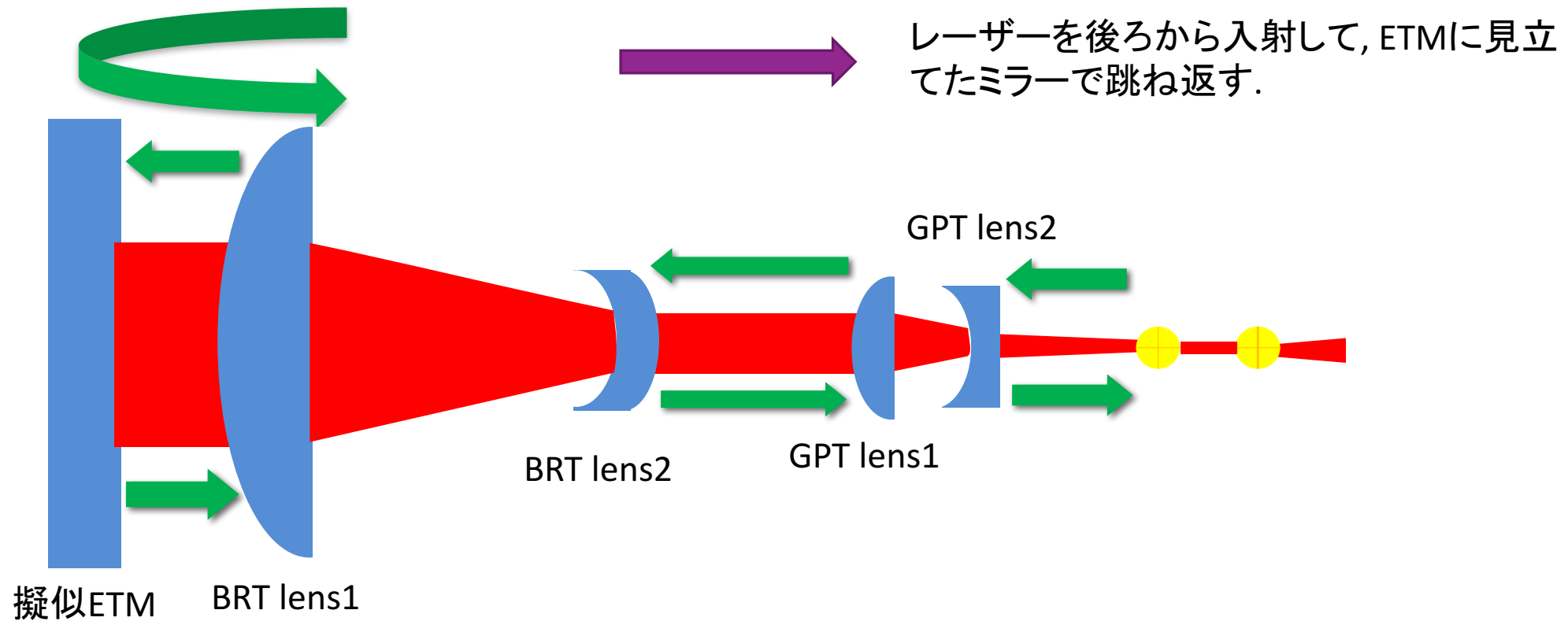
Q. スケジュールは?

A. (原理的に必要ないが)Phase1でインストール予定->グリーンで検証

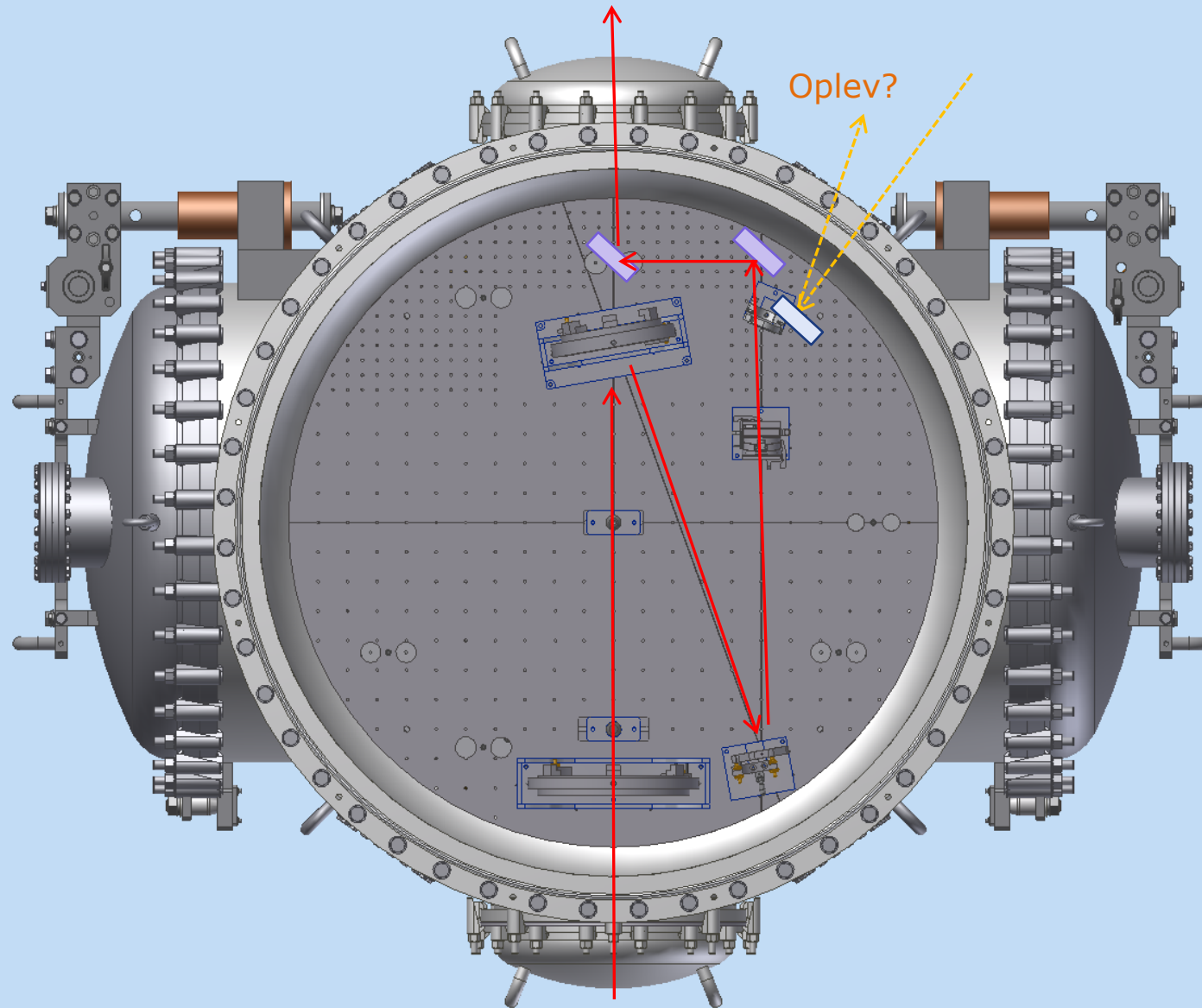


# TMSの話

でもKAGRAのキャリアレーザーのETMでの半径(35.3mm)と同程度のレーザーを用意するのは厳しいので...







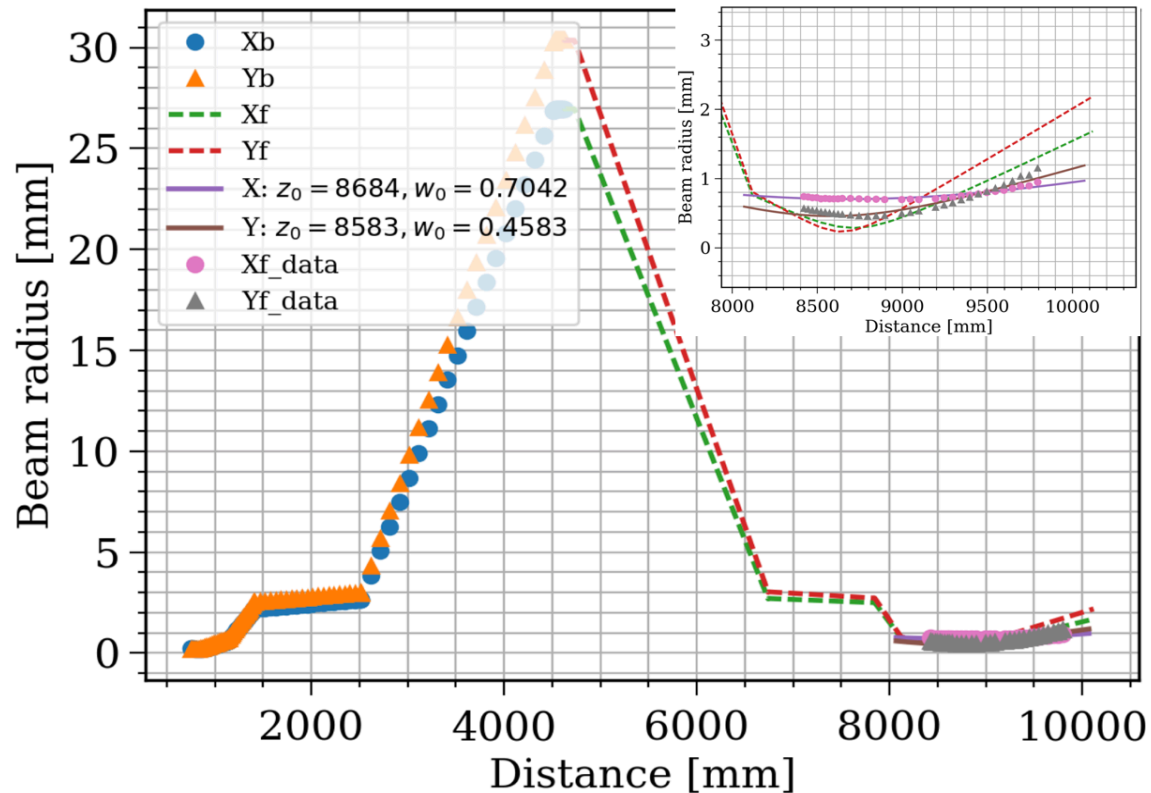
# TMSの話

目標: インพุットレーザーのデータから計算されるアウトプットレーザーと実際のアウトプットがあっていることを確認したい



アウトプットが計算と全く合わない...

Input, outputはOct25, D4はOct30(0.02mmだけ違う)(ミラーのセンターにレーザーを合わせた後\*Din修正)

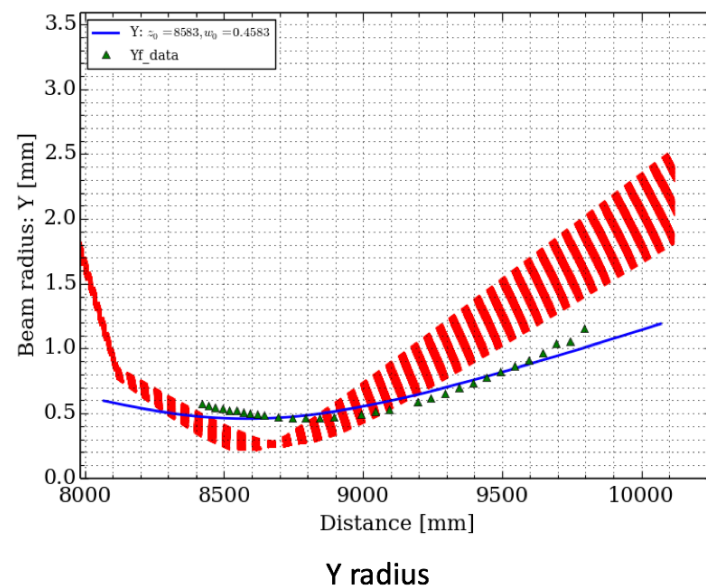
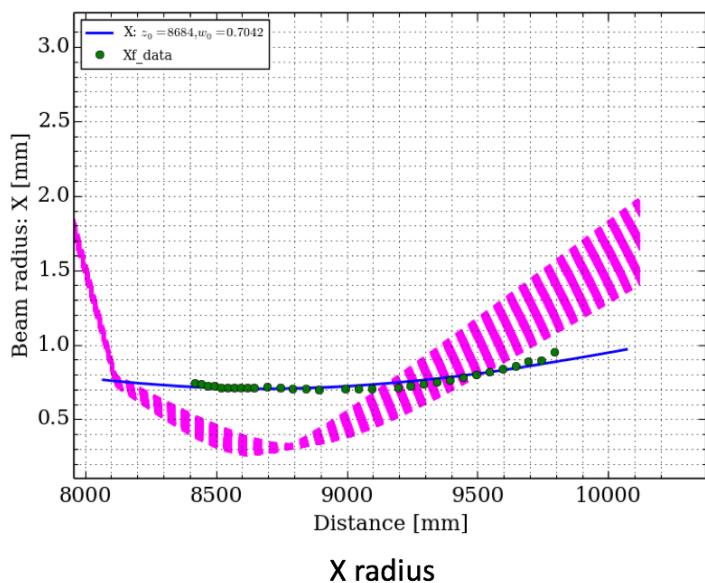


- ・そもそも入射レーザーがかなり歪んでいるような気がする
- ・アウトプットはGPT系にとってもsensitive(FARO)
- ・軸ズレて収差とか入ってるかなあ...

# TMSの話

sensitiveなGPT系の曲率の誤差とかでは説明できなかった...

Input, outputはOct25, D4はOct30(266.72mm)  
GPT lens1, 2の曲率半径を0.5%の誤差の範囲で振った



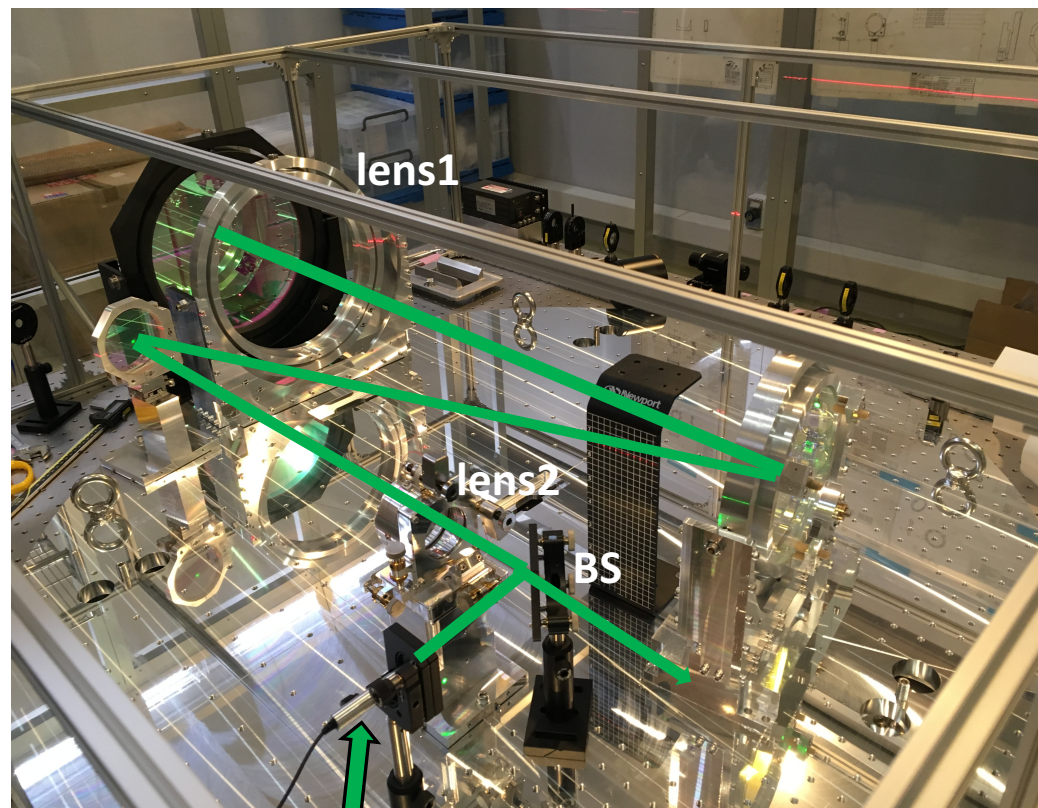
GPT系の前においているレンズ  
とかのミスアラインメントなのだ  
ろうか...



潔くGPT系を諦めることにした

# TMSの話

そもそも今回インストールするのはステージの上に乗っているBRT系のみであり, BRT系が変な収差などを引き起こしていないことを確認できればいい.



Green Laser

GPT系は今後stageに乗せる時に, (うまく働いている)GPT系の出力をQPDに導くように配置してやれば良い



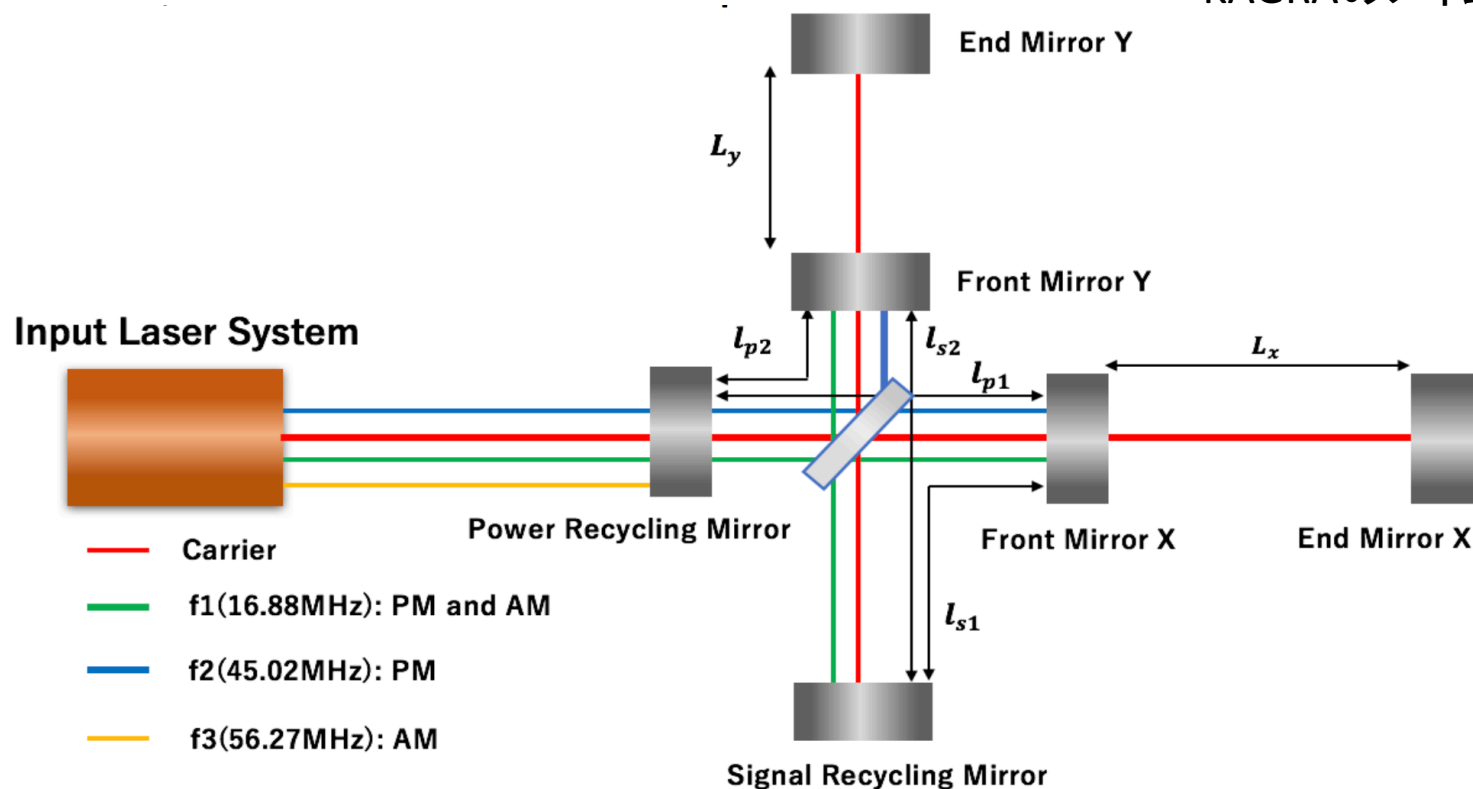
現在準備中です. 今年中にできればいいなあ

# Outline

- データ解析グループ(DAS)に顔を出している話
- 天文台で阿久津さんのTMS開発を手伝っている話
- **KAGRAの信号取得用の変調システム**

# 変調システムの話

KAGRAのメイン干渉計には制御すべき自由度が合計で5つある



➤ Arm:

$$CARM = (L_x + L_y)/2$$

$$DARM = (L_x - L_y)/2$$

➤ Center:

$$MICH = (l_{p1} - l_{p2})/2$$

$$PRCL = (l_{p1} + l_{p2})/2$$

$$SRCL = (l_{s1} + l_{s2})/2$$

このうち、DC readoutによって信号取得するDARM以外の自由度の信号取得ための変調システムとしてMach-Zehnder干渉計を用いる。



# 変調システムの話

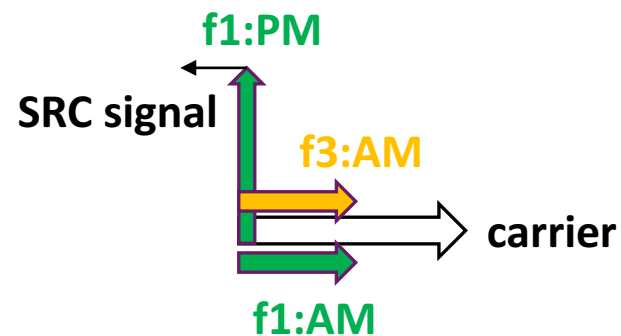
- KAGRAは低温システムにより鏡の熱雑音が小さいために、量子雑音が広い領域で感度を制限している
  - detuneをすることでSQLを超えるのは利点
- detuneをする方法
  1. エラー信号に電気信号でoffsetを加える方法
  2. AMによりoffsetを加える方法
    - 方法1により導かれたサイドバンドの雑音要求値が高かった(文献[1])
      - >方法2を用いる. その際の変調システムとしてdelay-line MZIを用いる.
- メイン干渉計のロックアクイジションとして、KAGRAは腕部分と中央部分のカップルをなくすためのAMサイドバンド(f3)を生成することのできるdelay-line MZIを用いることでより独立にロックができる.

[1] A. Aso et al. "Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector". Phys.Rev.D 88, 043007(2013)

# 変調システムの話

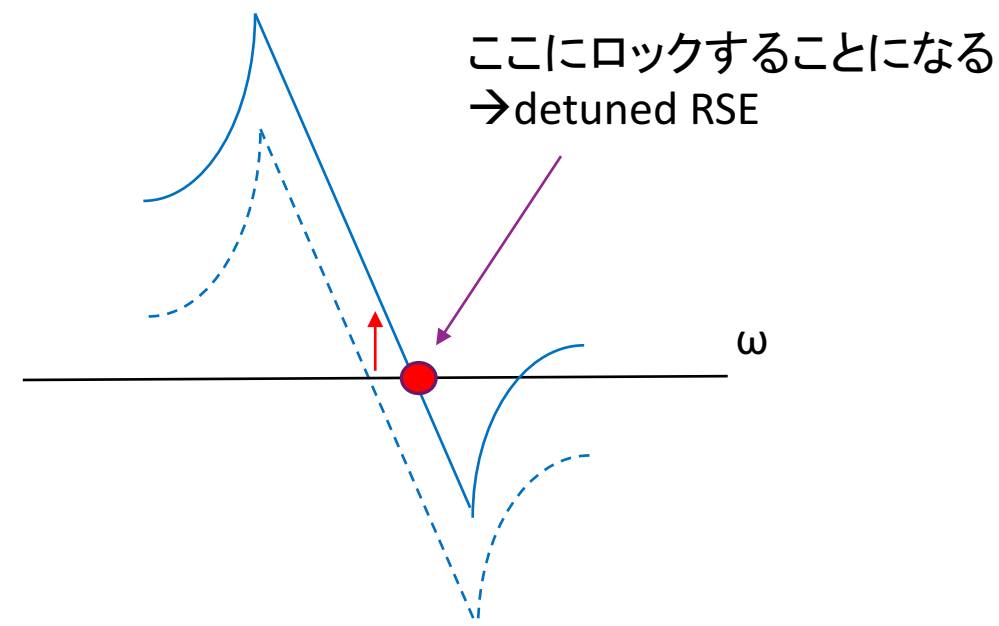
## Detuneについて...

SRCに共振なのはf1サイドバンドであるので, SRCの信号はf1が運んでくる



Signalに加えて, f1:AMとf3のビートが  
定数項としてついてくる

(f3-f1)で復調





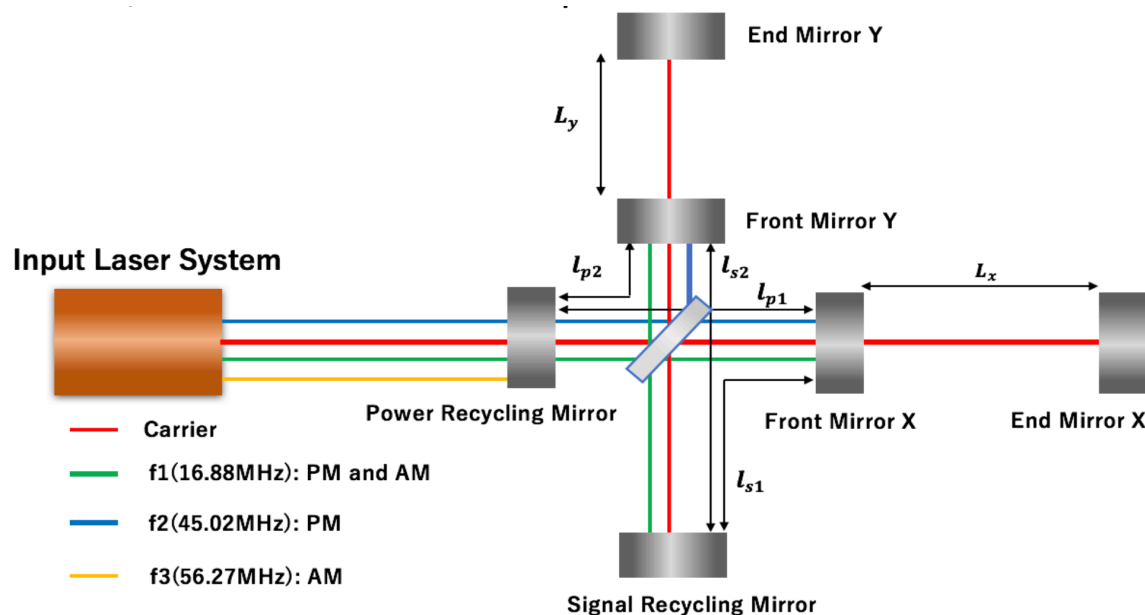
# 変調システムの話

## Armとcenterの独立なロックについて

f3:AMはどのcavityとも共振することのない安定なローカルオシレータとして使うことができる。



LIGOは三倍波復調(THD)を用いているが、これだと依然armとcenterのカップルがあることが報告されている[1]



\*THDはf1の基本波と二倍波のビートをとってくるが、この時復調した際にf1の三倍波とキャリアのビートが混ざってくる

\*\*カップルがあると、ロックアクイジションでarm cavityの周波数オフセットをグリーンから小さくしていく際に、既にロックしたcenter regionが影響を受けてしまう。

[1] A. Aso et al. "Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector". Phys.Rev.D 88, 043007(2013)

# 変調システムの話

## 各段階の目標

➤シミュレーション(解析):

**重力波信号に対応するDARM signalに影響しないという条件から得られる, Mach-Zehnder 干渉計の各要素のエラーに対する要求値の導出**

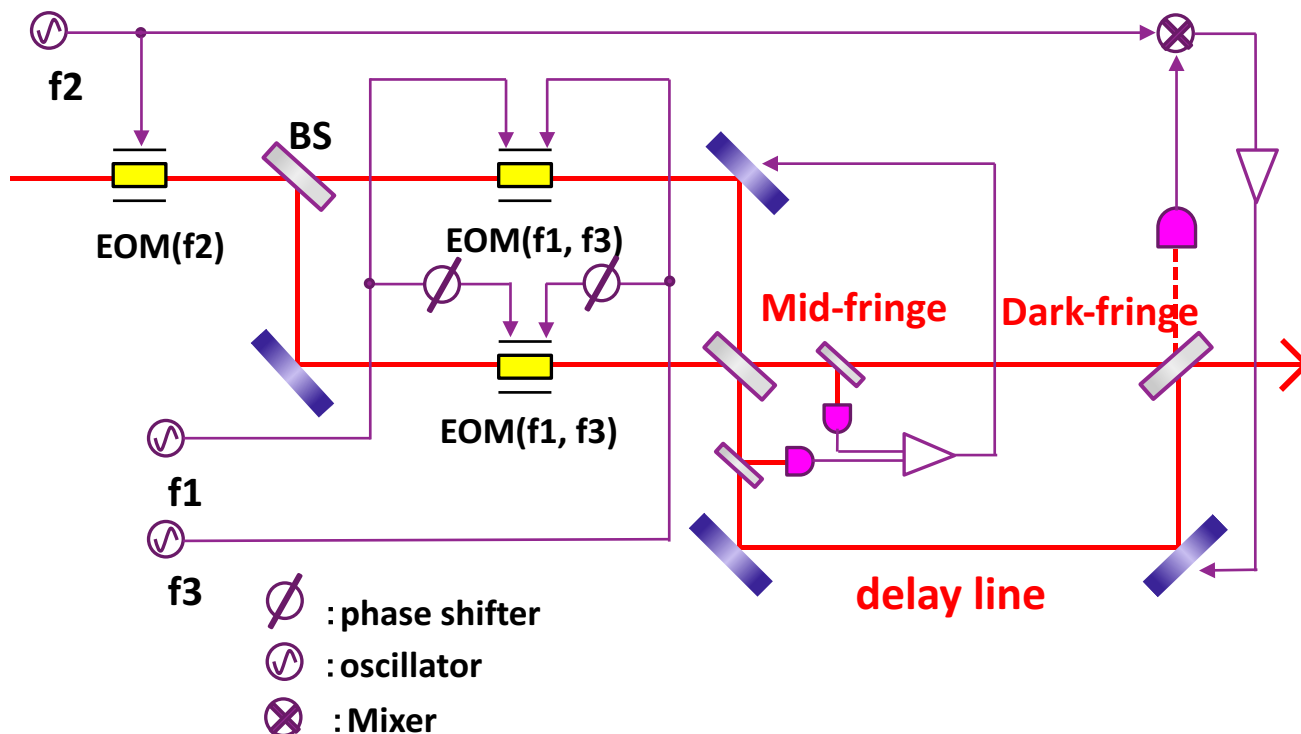
\*f3はロックアクイジションにのみ用いるので要求値はない.

➤実験:

**得られた要求値を実現するような光学系(光学素子)の開発. 実験検証. インストール(for phase2)**

# 変調システムの話

Delay-line Mach-Zehnder干渉計は以下のような構成となっている



carrierについてミッドFRINGE, ダークFRINGEが保たれている状態でのf1, f3の理論式は以下のように導ける

$$E_{out} = e^{i\Omega t} \left\{ A + \left| 2\sqrt{2}m \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \cos\left(\omega_m t + \frac{\theta + \varphi - \pi}{2}\right) \right. \text{AM} \\ \left. + i \left| 2\sqrt{2}m \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \cos\left(\omega_m t + \frac{\theta + \varphi - \pi}{2}\right) \right\} \text{PM}$$

$\varphi$ : EOM間の位相差

$\theta$ : delay lineにおいてcarrierに対して進むサイドバンドの位相


# 変調システムの話

Outputについてもう少し...

Phase shifterで選べるEOM間の位相差 $\phi$ によって、AMとPMの混ざり具合を変えられる

$$E_{out} = e^{i\Omega t} \left\{ A + \left| 2\sqrt{2}m \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \cos\left(\omega_m t + \frac{\theta + \varphi - \pi}{2}\right) \right. \\ \left. + i \left| 2\sqrt{2}m \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \cos\left(\omega_m t + \frac{\theta + \varphi - \pi}{2}\right) \right\}$$

つまりf3について $\theta = 180^\circ$ にすれば、f3はAM成分のみになる

 この条件を満たすように、delay lineの長さ $L \cong 2.66\text{m}$ に設定している

# 変調システムの話

Outputについてもう少し...

$$E_{out} = e^{i\Omega t} \left\{ A + \underbrace{\left| 2\sqrt{2}m \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \cos\left(\omega_m t + \frac{\theta + \varphi - \pi}{2}\right)}_{AM} \right.$$

$$\left. + i \underbrace{\left| 2\sqrt{2}m \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right| \cos\left(\omega_m t + \frac{\theta + \varphi - \pi}{2}\right)}_{PM} \right\}$$



--> Amplitude noise



--> Phase noise

# 変調システムの話

MZIを用いて生成するサイドバンドは以下のとおり.

	frequency [MHz]	type	resonance
f1	16.88	PM and AM	PRC-SRC
f2	45.02	PM	PRC
f3	56.27	AM	Non resonant

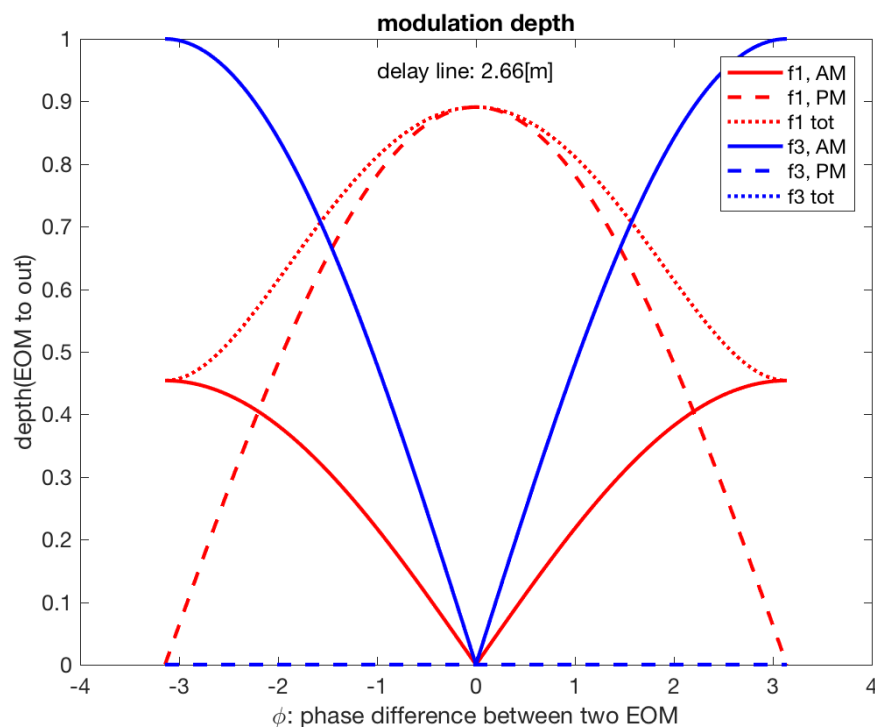
↑  
IMCを抜けてこなければいけないので, IMCのフリースペクトラルレンジの整数倍にそれぞれ設定されている

# 変調システムの話

シミュレーションで計算しても結果が合っているかはわからないので、解析的に結果が出せる場合について、解析計算とシミュレーション結果を比較することが重要。

## Case1. modulation depth

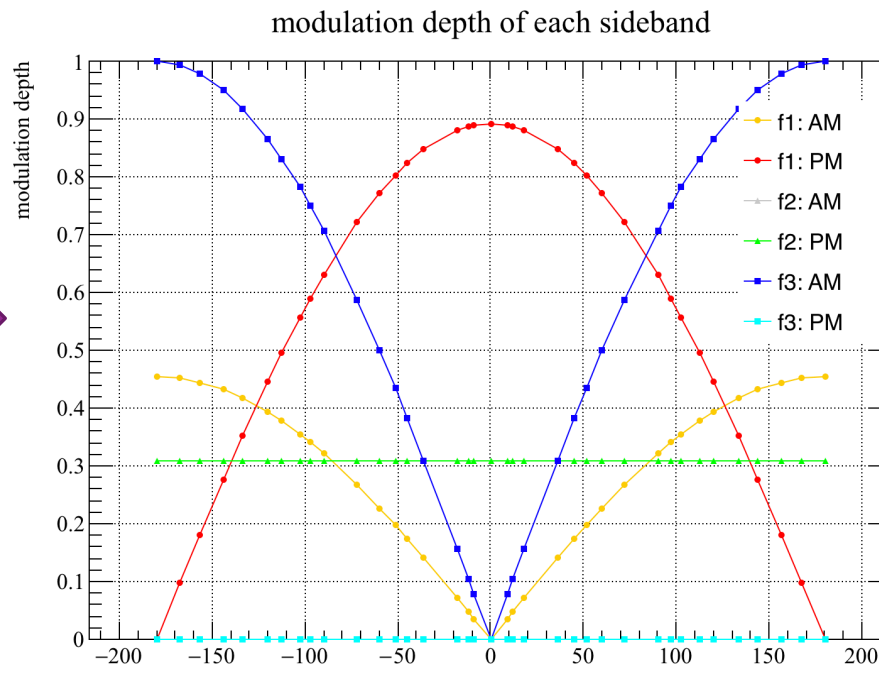
### 解析計算



再現できた



### シミュレーション



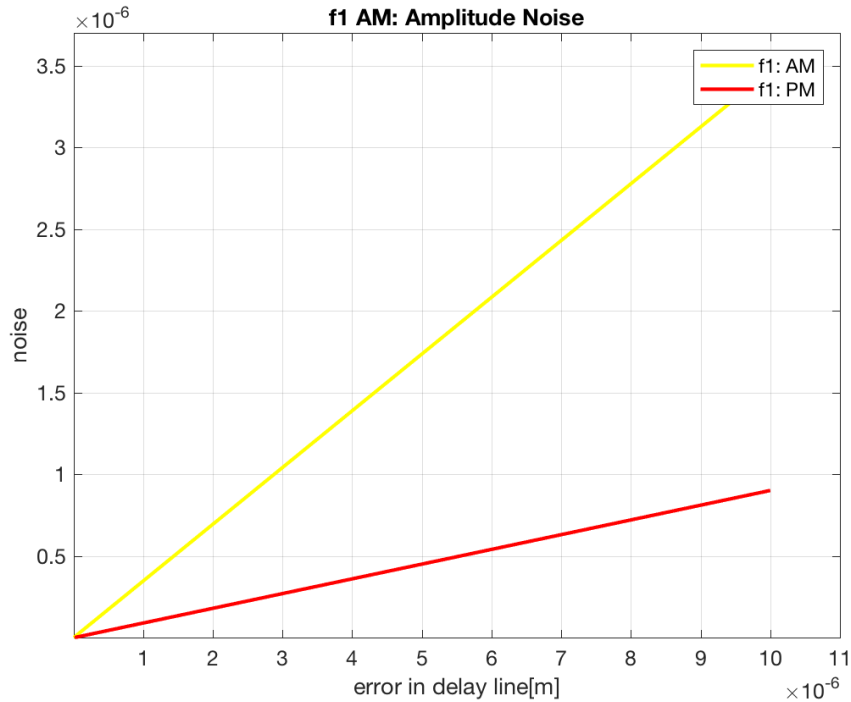
\*f2の振幅が30%まで減っている

- ・f1については位相差を変えることで、BRSEとDRSEを(detune phaseも)切り替えできる
- ・f3については位相差は大きい方がいい

# 変調システムの話

## Case2. delay lineの長さエラーに対するf1のamplitude noise

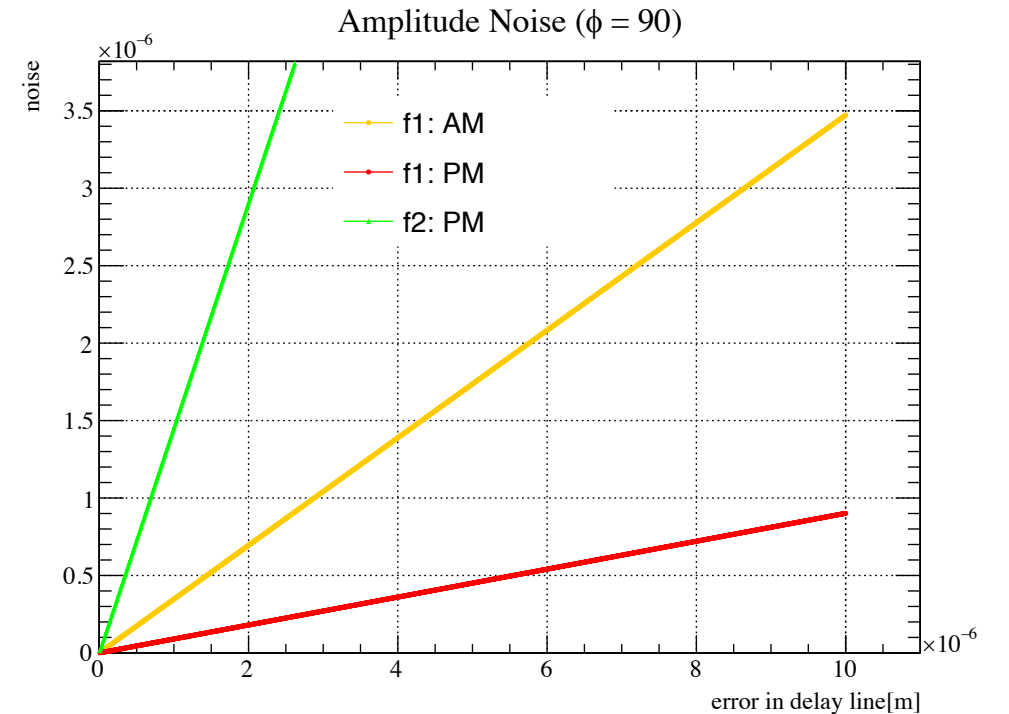
解析計算



再現できた



シミュレーション



\*解析的に求められる,「位相差 $\phi$ についての依存しない」という結果も確認できた



# 変調システムの話

MATLABで構成したMach-Zehnderがうまく動いてそうであることを確認した次は実際にMZIのノイズに対する要求値を求めていく。

## 考えられるノイズ

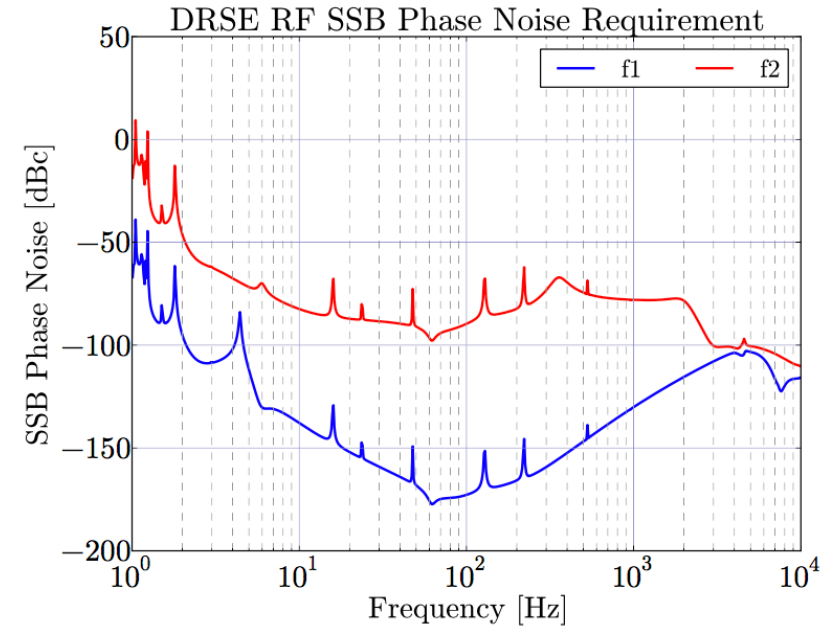
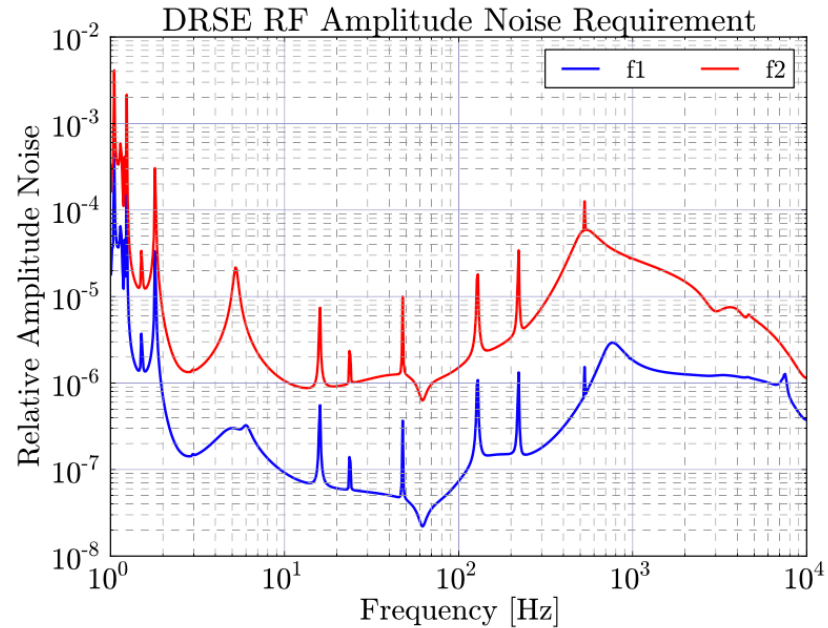
- delay lineノイズ(ダークフリンジからのずれ)
- ミッドフリンジからのずれ
- EOM間の位相差を与えるphase shifterのノイズ
- EOMの変換効率の差

もし変調システムのoutputのサイドバンドのノイズに対する要求値が決まっていれば、先に示したような、MZIのノイズからサイドバンドノイズへの伝達関数を求めれば、それをMZIのノイズの要求値に焼きなおすことができる。

実際にそういったサイドバンドのAmplitude noise, Phase noiseそれぞれに対する要求値は求められていて...

# 変調システムの話

これを伝達関数でMZIの要求値に変換すればいいのだが...



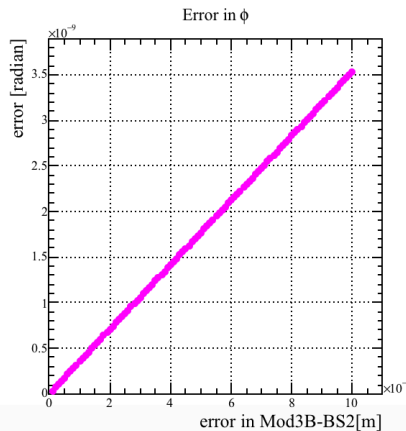
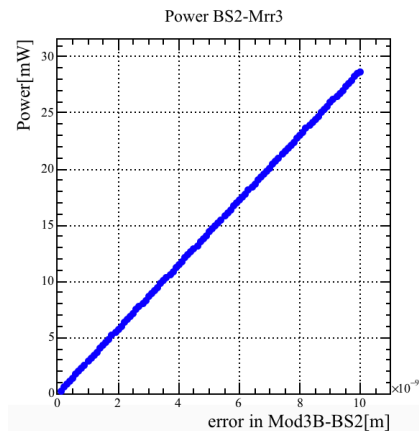
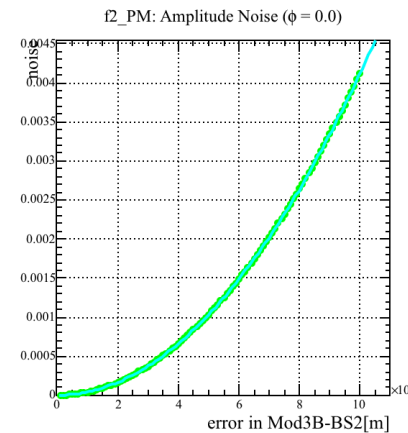
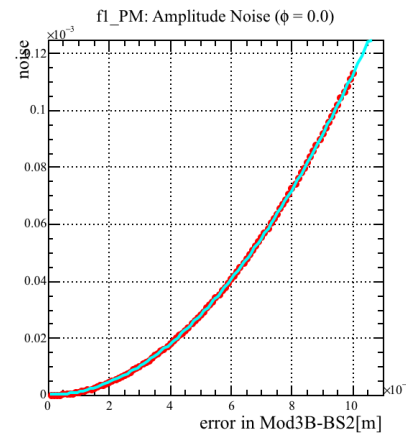
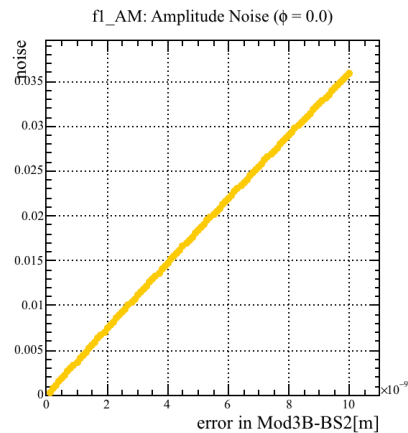
これはpureなPMについて求められたものであり, f1がAMを含んでいる際には使えないので, この計算結果を使う場合はEOM間の位相差 $\phi=0$ に設定しなければならない。

[1] A. Aso et al. "Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector". Phys.Rev.D 88, 043007(2013)

# 変調システムの話

とりあえず $\phi=0$ にして様々な要求値を求めてみた. ここではその一例として...

**E.g. f1:PM, f2:PMのamplitude noiseから得られるミッドフリンジノイズの要求値**



これを見るとPMの変動が長さ変動 $\delta l$ の2次に比例していることがわかる...

$$f1: \delta Amp = 1.07707 \times 10^{12} \times \delta l^2, \quad f2: \delta Amp = 4.12672 \times 10^{13} \times \delta l^2$$

# 変調システムの話

正確なミッドFRINGEがわからないため、常に誤差 $\Delta l$ が存在すると仮定し、その周りで(地面振動などにより)時間変動する誤差 $\delta l$ があるとする。

$$\delta Amp \propto \Delta l \times \delta l \longleftarrow \delta l \text{ に対する伝達関数を見積れる!}$$

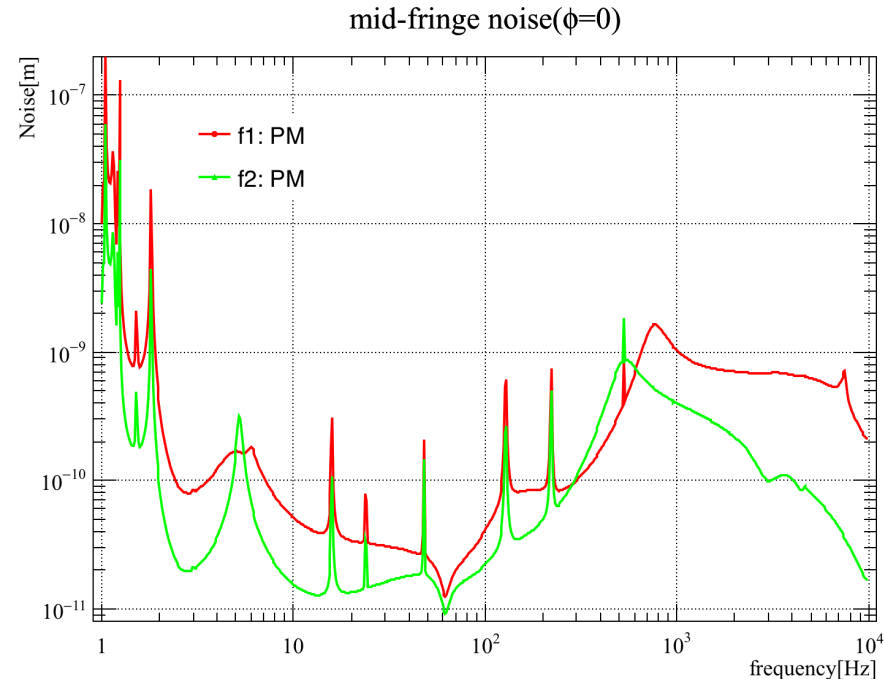
\* $\Delta l$ はミッドFRINGEにすべきBS直後のパワーのずれが1%(この妥当性が不安)に対応するときの値を用いる。  $\Delta l = 1.659 \times 10^{-9} [m]$

結局...

$$f1: \frac{\delta l}{\delta Amp} = 5.596 \times 10^{-4}$$

$$f2: \frac{\delta l}{\delta Amp} = 1.461 \times 10^{-5}$$

これはショットノイズの観点から見るとちよいと厳しい。“方法1”が理由か??



# 変調システムの話

実際にAMも含んだ場合についてん要求値を出すには, KAGRA全体のコードがあるので, そこに自分で書いたMZIのコードを組み込んで, MZIからDARMまでのノイズカップリングを計算するのが一番簡単だろうということになった.



現在までに出した結果は, KAGRAのコードを用いてそのうち出す結果との比較に使うことができる.

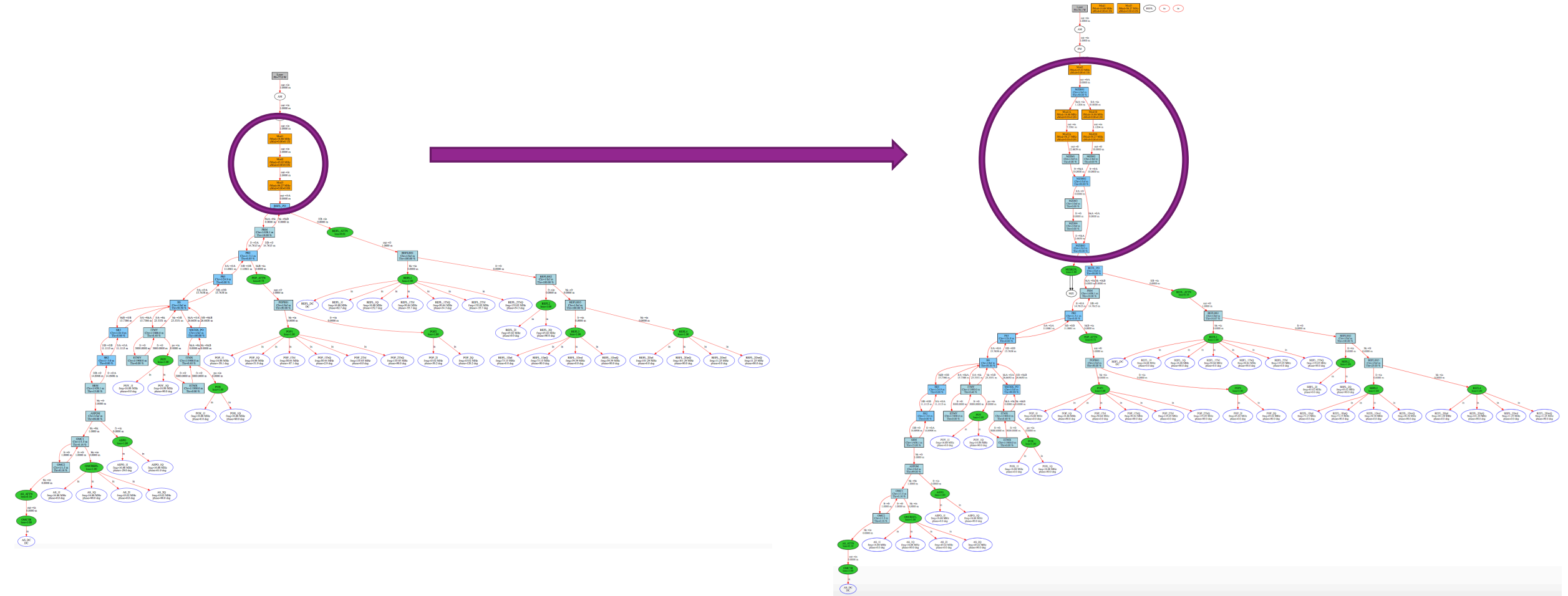
	Phase difference b/w EOMs	availability
Results so far	zero	○
	Non-zero	×
Future results	zero	○
	Non-zero	○



ここが比較できる

# 変調システムの話

今のところ...



## **Future work**

- Detune phaseをどのように渡すのか考えなければならない.
- Noise coupling(とrequirement)をどのように計算しているのかしっかりと理解しないとイケない.
- 年明けから本郷でtable topで簡単な検証(実験のお勉強)
- 4,5月あたりで実際に神岡で実験, インストール