

LCGTの主干涉計設計

麻生 洋一

宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 辰巳大輔
阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹
新井宏二, 山本博章, LCGT Collaboration

東大理, その他いろいろ

2011年9月18日 日本物理学会秋季大会 弘前大学文京町キャンパス

LCGT

- 日本の次世代重力波検出器
- 神岡鉱山の地下，低温鏡，基線長3km
- 連星中性子星合体：一年に1回以上観測

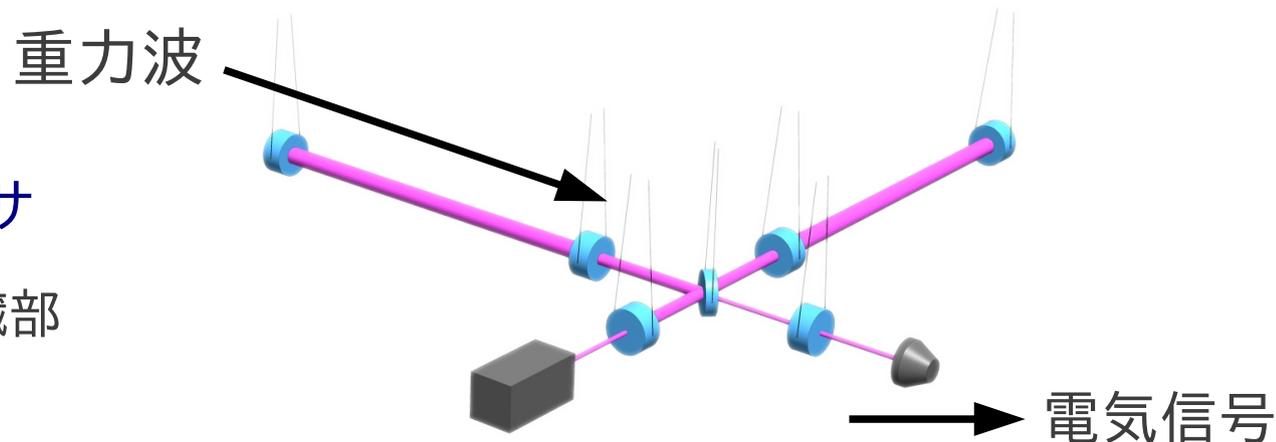


2010年 最先端研究基盤事業としてスタート!

主干涉計

主干涉計: トランスデューサ

干涉計型重力波検出器の心臓部



主干涉計設計項目

- 干涉計方式: RSE
- 鏡反射率: 観測帯域
- 制御方式
- RC長/変調周波数
- 共振器空間モード設計
- レイアウト

干涉計方式・帯域

干涉計方式

Power Recycled Resonant Sideband Extraction

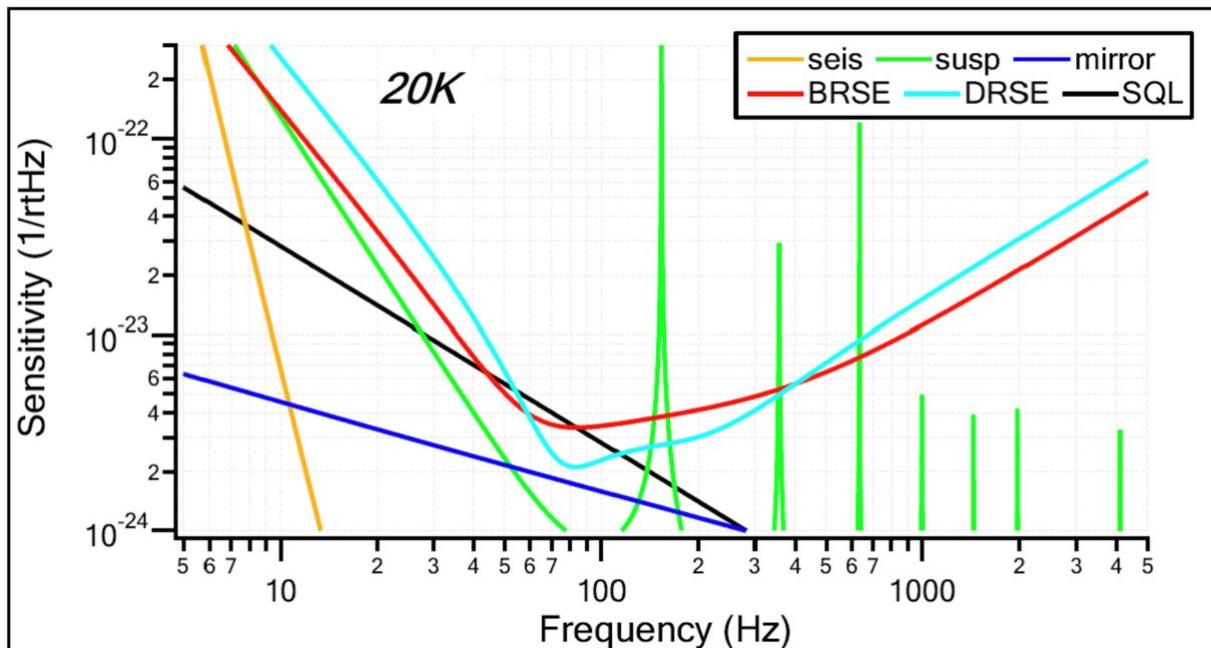
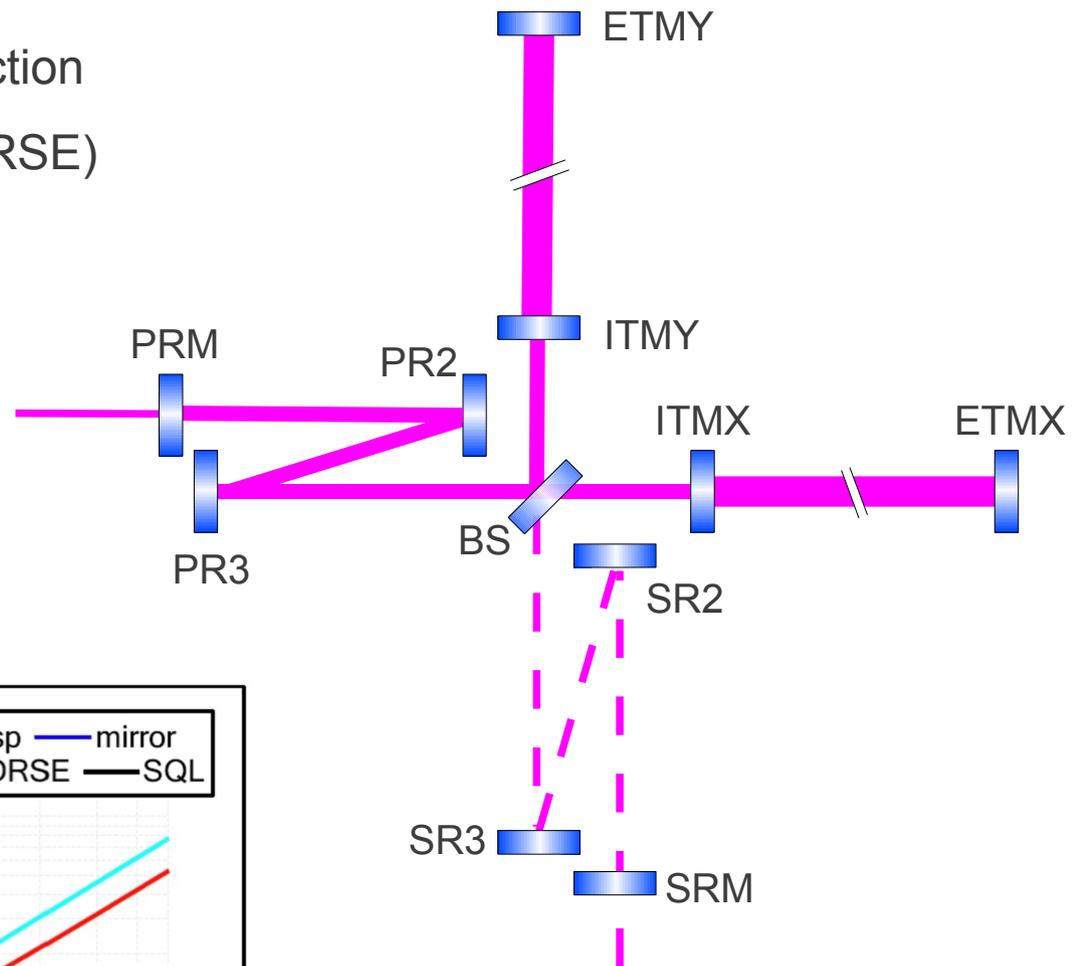
Signal Recycling: 可変 Detuning (BRSE, DRSE)

腕共振器

- 長さ3km
- Finesse: 1500

Recycling共振器

- Power Recycling Gain: 10
- Signal Band Gain (BRSE): 24
- 可変 Detuning



干渉計パラメータ決定手順

ここまでで決まっているパラメータ

- 各鏡の反射率
- 腕共振器の長さ

これから決めるパラメータ

- Recycling共振器長
- Michelson Asymmetry
- 各鏡の曲率
 - 腕共振器g-factor
 - Recycling共振器安定性(折り返し)
- 詳細なレイアウト
- 誤差を含めた鏡の仕様

制御方式
RF+DC

共振器長, Michelson Asymmetry
Sideband共振条件

腕共振器g-factor
輻射圧不安定性・Parametric Instability

Recycling共振器デザイン
折り返し・共振器安定度・曲率誤差感度

詳細レイアウト
Wedge角・不要光取り回し

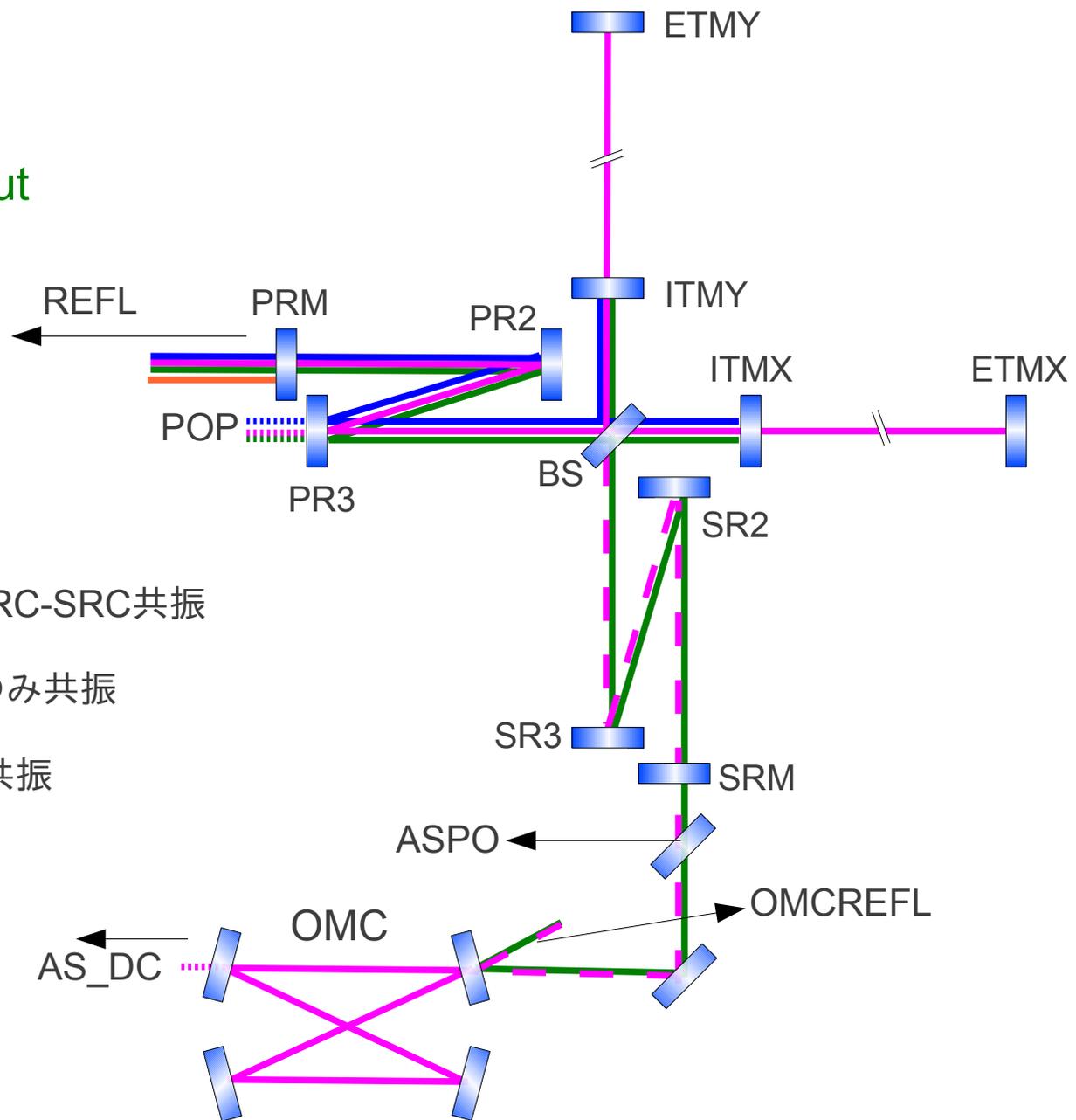
干渉計長さ制御

RF Frontal Modulation法 + DC Readout

重力波信号 (DARM): DC Readout
その他: RF Readout

共振条件

- Carrier
- f1 sideband (PM 16.875MHz): PRC-SRC共振
- f2 sideband (PM 45MHz): PRCのみ共振
- f3 sideband (AM 56.25MHz): 非共振



RC長, 変調周波数

前記共振条件を満たすRC長,変調周波数の組は無数にある

拘束条件

- $f_2 = 45\text{MHz}$ (高すぎない)
- f_2 はMichelson完全反射
(Michelson Asymmetry (L_{as}) = 3.3m or 6.6m)
- $65\text{m} < L_{prc}, L_{src} < 85\text{m}$ (輻射シールド、折り返し)
- MC長: f_1, f_2 両方透過, 長すぎない(<30m)
- 3倍波復調, Non-Resonant Sideband

可変Detuning

適切なSRC共振幅: 3.5度のDetuning → f_1 がPRC-SRCの共振幅内に留まる

PRC-SRC結合共振器のFinesse: Michelson反射率に依存

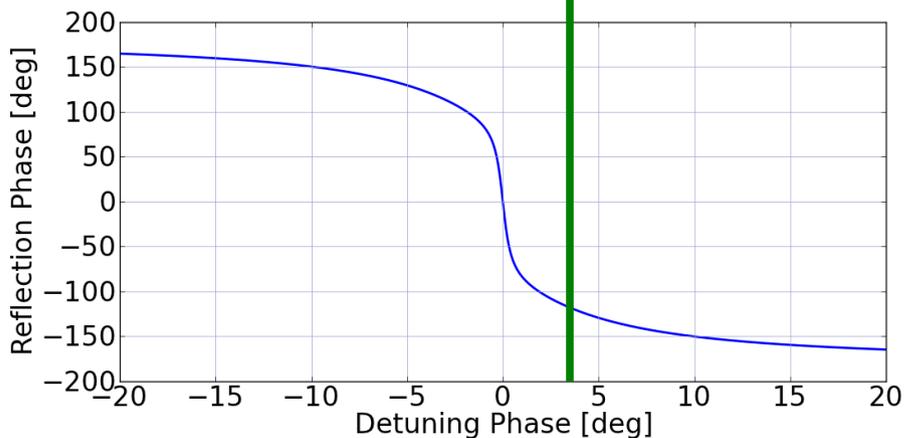
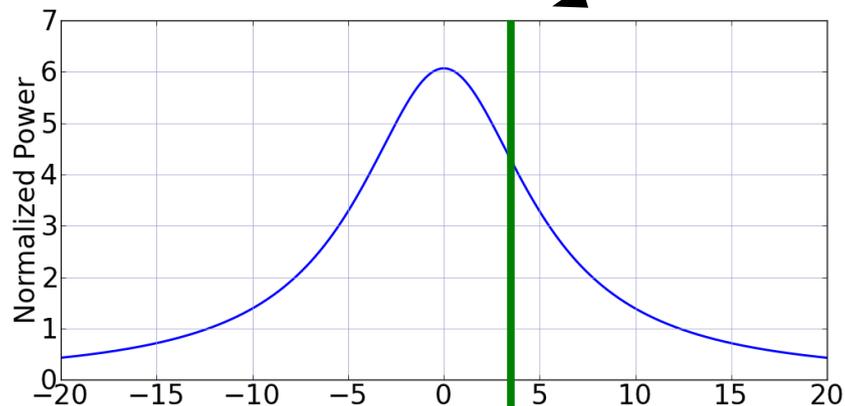
PRM反射率 ~ Michelson反射率 ---> 低Finesse

Michelson反射率: L_{as} と f_1 の周波数に依存

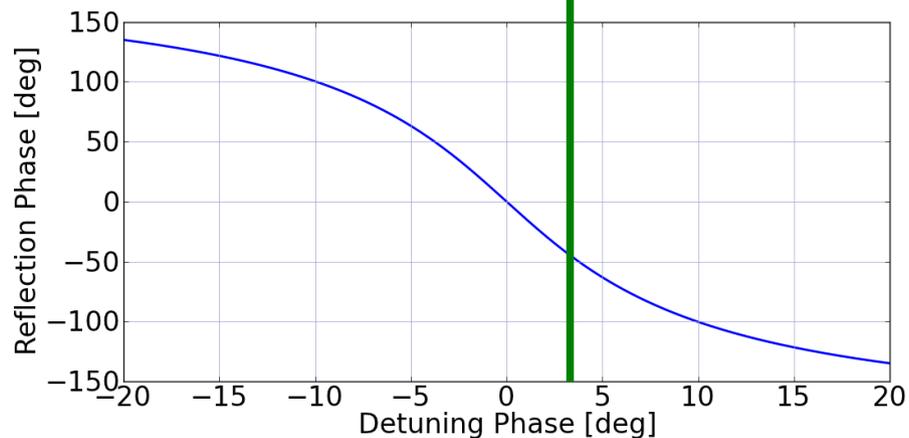
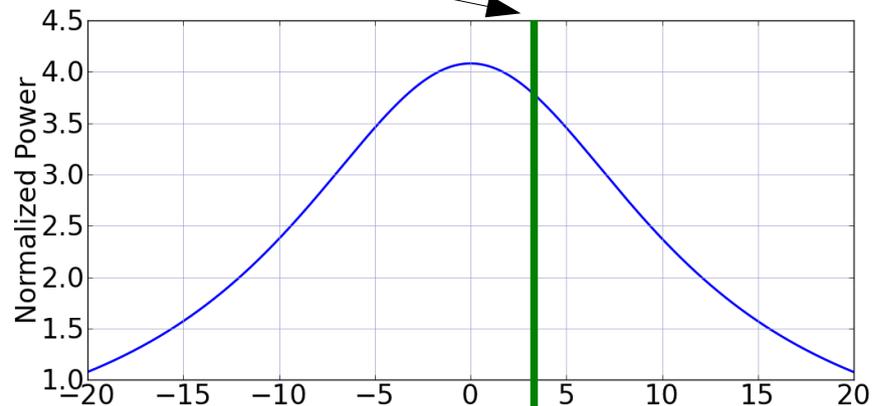
適切なMichelson反射率を持つ L_{as} と f_1 の組を選ぶ

SRC共振

3.5度



Michelson反射率: 10%



Michelson反射率: 50%

PRM反射率: 90%

パラメータスキャン

Figure of Merit

Nonlinearity=2次の係数/1次の係数

f1/f2	PRC/SRC	f1(MHz)	MC(m)	Lp(m)	Ls(m)	Is (BRSE)	Is (DRSE)	linearity (DRSE)
5/6	anti/reso	37.5	20	70	70	0.00140	0.00061	-0.63183
2/7	anti/reso	~12.9	23	70	70	0.00403	0.00182	-0.59047
3/7	anti/reso	~19.3	23	70	70	0.00839	0.00416	-0.49474
2/8	anti/reso	11.25	27*	79.9	79.9	0.00312	0.00139	-0.60448
3/8	anti/reso	16.875	27	79.9	79.9	0.00670	0.00319	-0.53623
7/8	anti/reso	39.375	27	66.6	66.6	0.00079	0.00034	-0.64081
2/9	anti/reso	10	30	89.9	89.9	0.00248	0.00109	-0.61486
4/9	anti/reso	20	30	89.9	89.9	0.00887	0.00447	-0.48042
2/10	anti/reso	9	17	83.3	83.3	0.00202	0.00088	-0.62215
3/10	anti/reso	13.5	33	66.6	66.6	0.00444	0.00202	-0.58195
4/10	anti/reso	18	17	66.6	66.6	0.00741	0.00357	-0.52424
9/10	anti/reso	40.5	33	83.3	83.3	0.00051	0.00022	-0.64465
5/6	reso/anti	37.5	20	60	60	0.00370	0.00360	-0.01577
6/7	reso/anti	~38.6	23	70	70	0.00279	0.00275	-0.00785
2/8	reso/anti	11.25	27*	73.3	73.3	0.00739	0.00644	-0.07847
3/8	reso/anti	16.875	27	66.6	66.6	0.01143	0.00757	-0.25657
7/8	reso/anti	39.375	27	79.9	79.9	0.00216	0.00215	-0.00386
8/9	reso/anti	40	30	60	60	0.00173	0.00173	-0.00172
3/10	reso/anti	13.5	33	83.3	83.3	0.00950	0.00744	-0.14314
9/10	reso/anti	40.5	33	66.6	66.6	0.00141	0.00141	-0.00046
5/6	reso/reso	37.5	20	60	70	0.00133	0.00133	-0.00017
7/8	reso/reso	39.375	27	79.9	66.6	0.00233	0.00231	-0.00479
9/10	reso/reso	40.5	33	66.6	83.3	0.00350	0.00342	-0.01388

最終候補

f1周波数	9MHz	11.25MHz	16.875MHz
Lprc	74.95m	73.28m	66.62m
Lsrc	74.95m	73.28m	66.62m
Las	6.66m	3.33m	3.33m
Lmc	33.3m	26.65m	26.65m
f3	13.5MHz($f_2 \cdot 3/10$)	61.9MHz($f_2 \cdot 11/8$)	56.3MHz ($f_2 \cdot 10/8$)
DDM freq.	22.5MHz, 31.5MHz	16.9MHz, 50.6MHz	11.25MHz, 39.4MHz

この人に決定♪

信号取得ポート

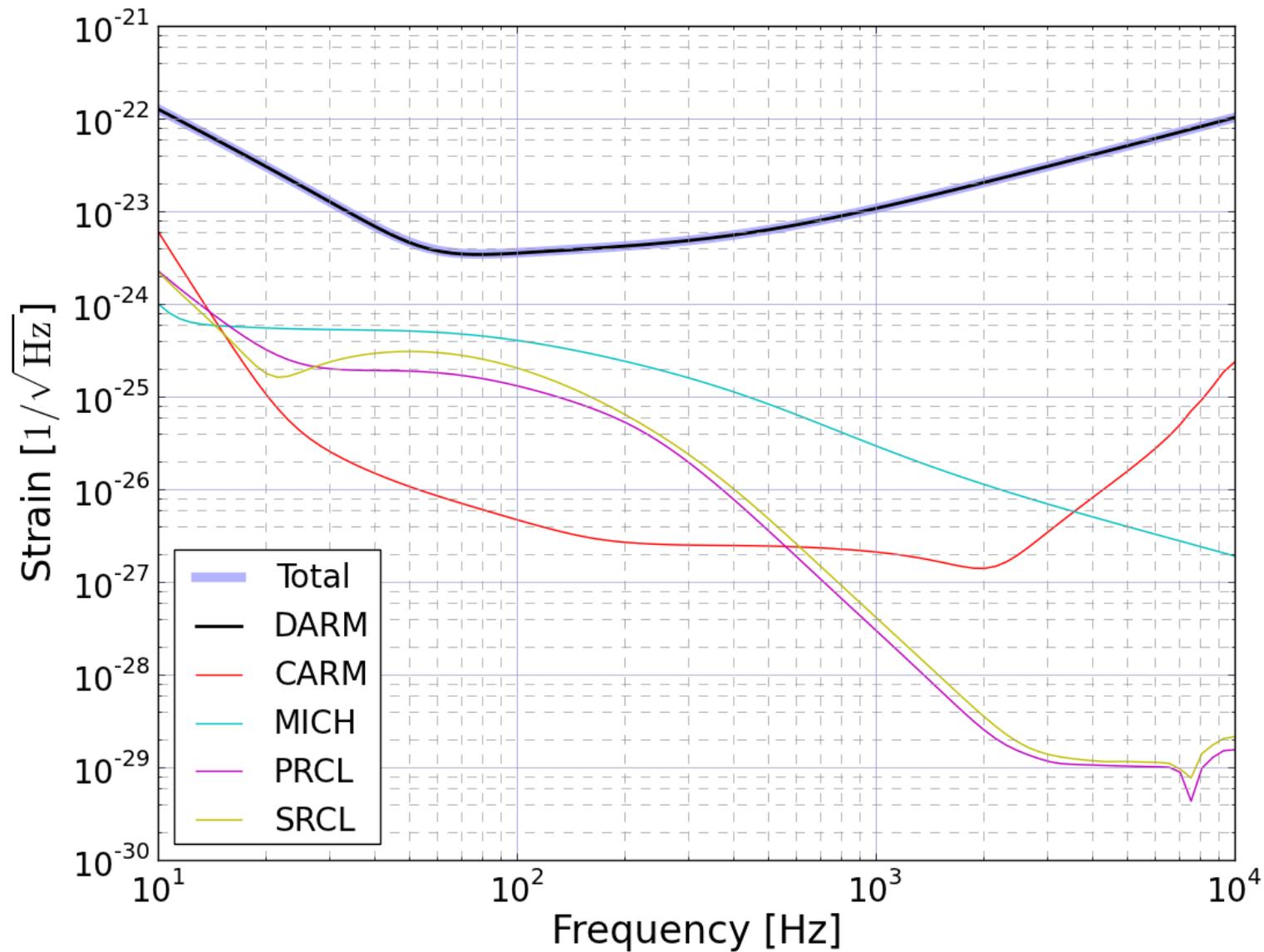
腕共振器差動(重力波信号): 透過ポート(AS) DC Readout

腕共振器同相(主に周波数雑音): 反射ポート f1とCarrierのビート

Michelson: 反射ポート f1とCarrierのビート(Q位相)

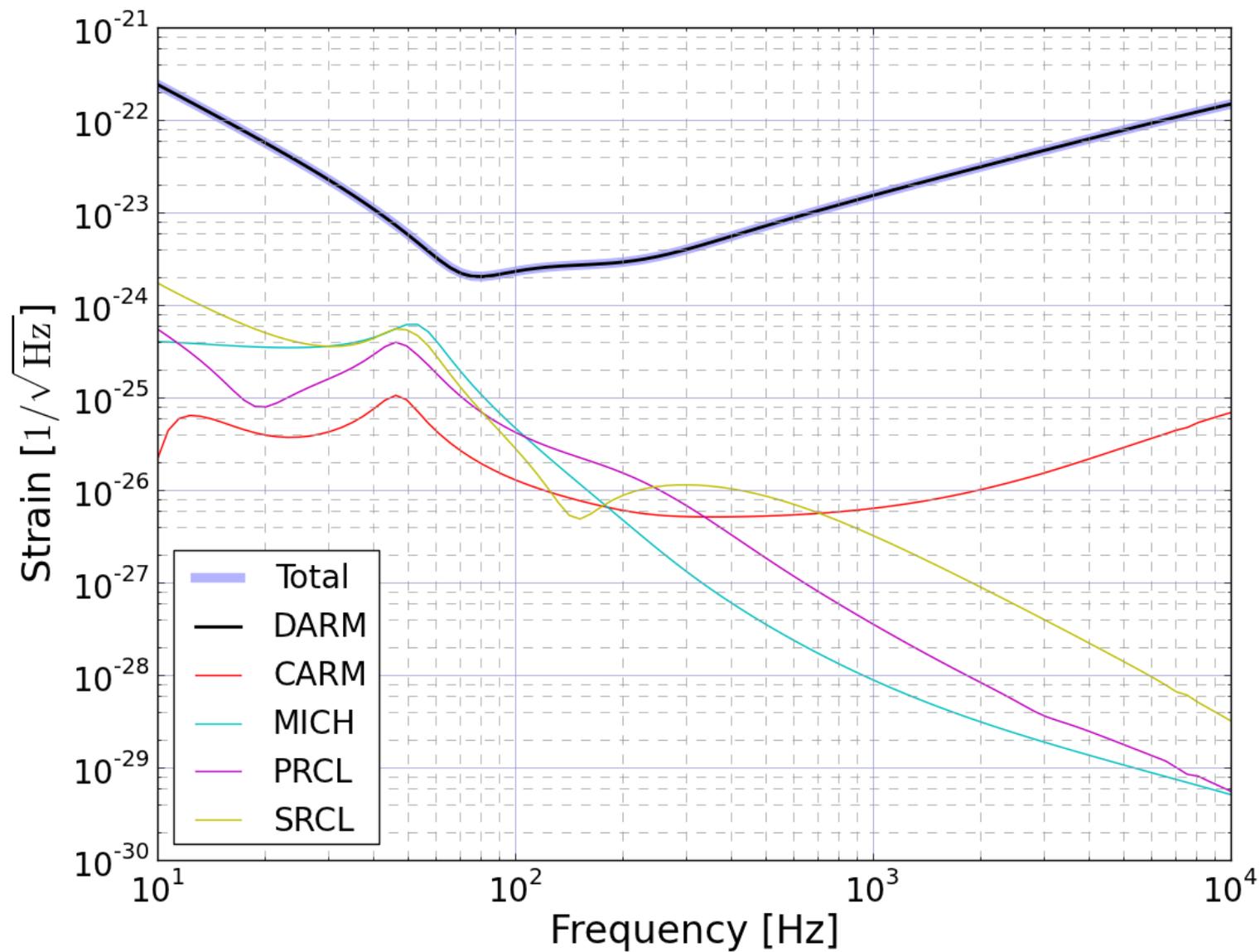
Power Recycling Cavity: PRC内Pick-offポート f2とCarrierのビート

Signal Recycling Cavity: PRC内Pick-offポート f1とCarrierのビート



DRSE

Feed Forward Gain = 100



腕共振器 g-factor

g-factor

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

L : 共振器長

R_1, R_2 : 共振器を構成する鏡の曲率

横モード間隔: $\gamma = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2}$ γ が0に近いと不安定(高次モードが共振)

g-factorが関係する項目

- ビームスポットサイズ ==> 熱雑音, (熱レンズ)
- Parametric Instability
- 輻射圧による回転不安定性 (角度制御 道村講演 18pSV-2)

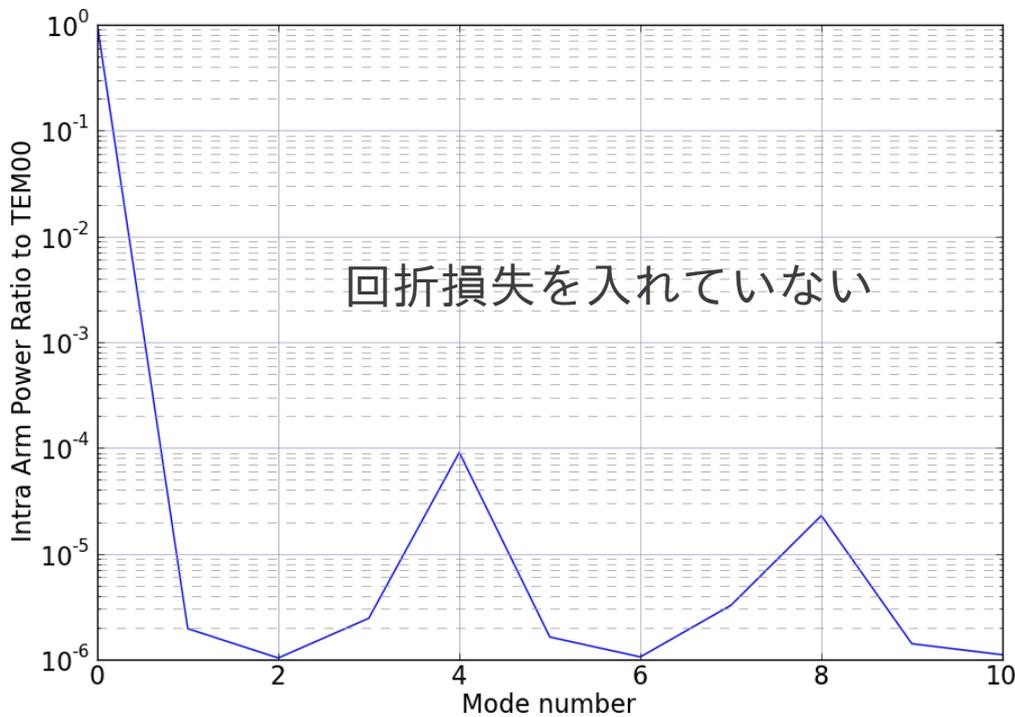
現行案

$R_1 = 1.68\text{km}$, $R_2 = 1.87\text{km}$

$g_1 = -0.786$, $g_2 = -0.604$

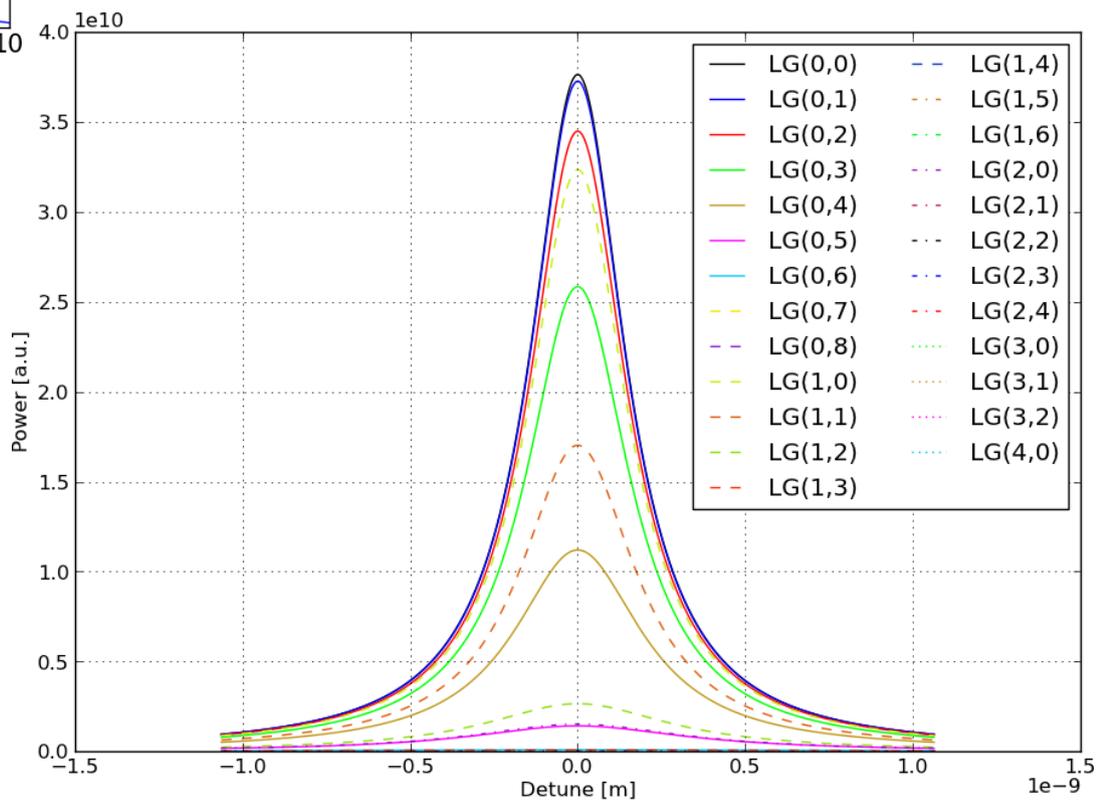
スポットサイズ: 3.5cm - 4.0cm

腕共振器の高次モード共振



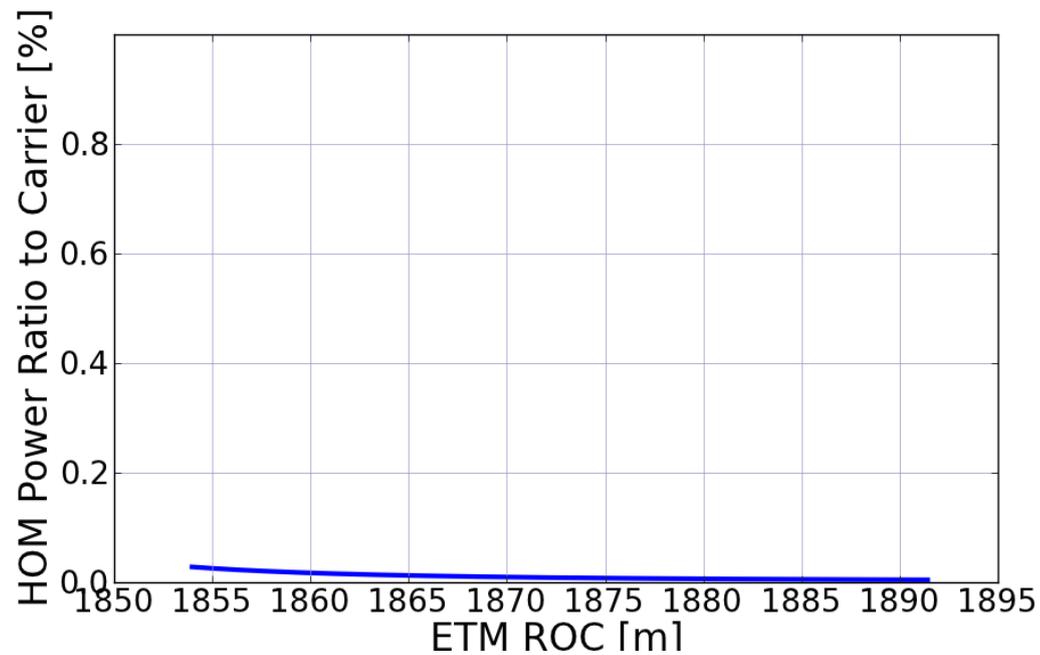
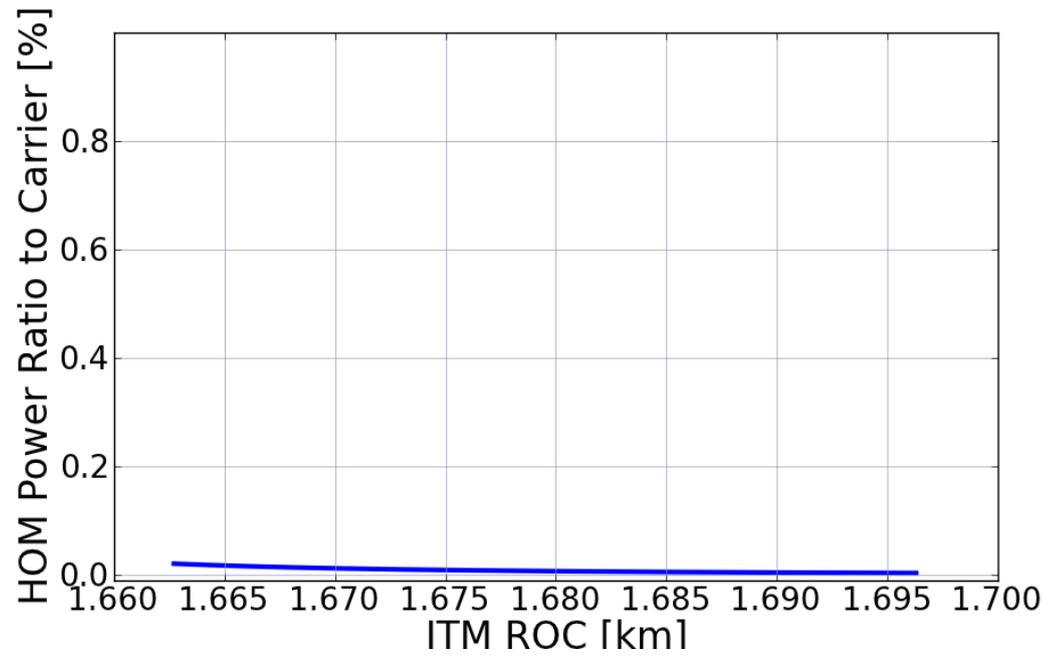
TEM00に対するパワー比

高次モードの回折損失



腕共振器の高次モード共振 (鏡曲率誤差)

曲率誤差: +/-1%

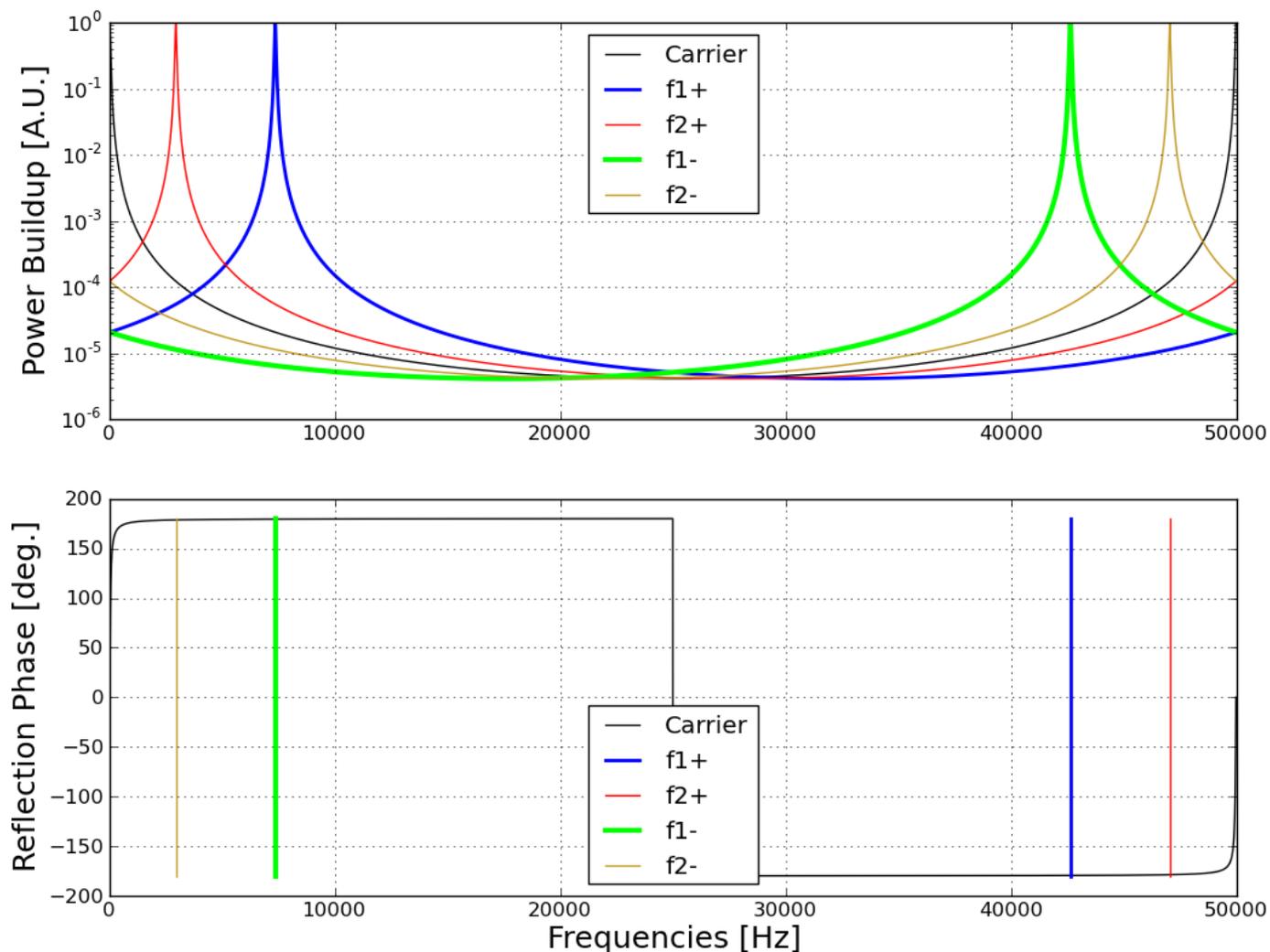


パラメータ微調整 (1) 変調周波数

- 腕共振器の反射位相: f_1 と f_2 で異なる \Rightarrow PRCに対する共振条件が異なる
- f_1 と f_2 をPRCに完全共振 \Rightarrow 反射位相の比=周波数比
- MC長を微調節 (1cmオーダー)
- PRC長, SRC長も微調節 (1cmオーダー)

Finesseに依存

→ 実測値を元に微調節

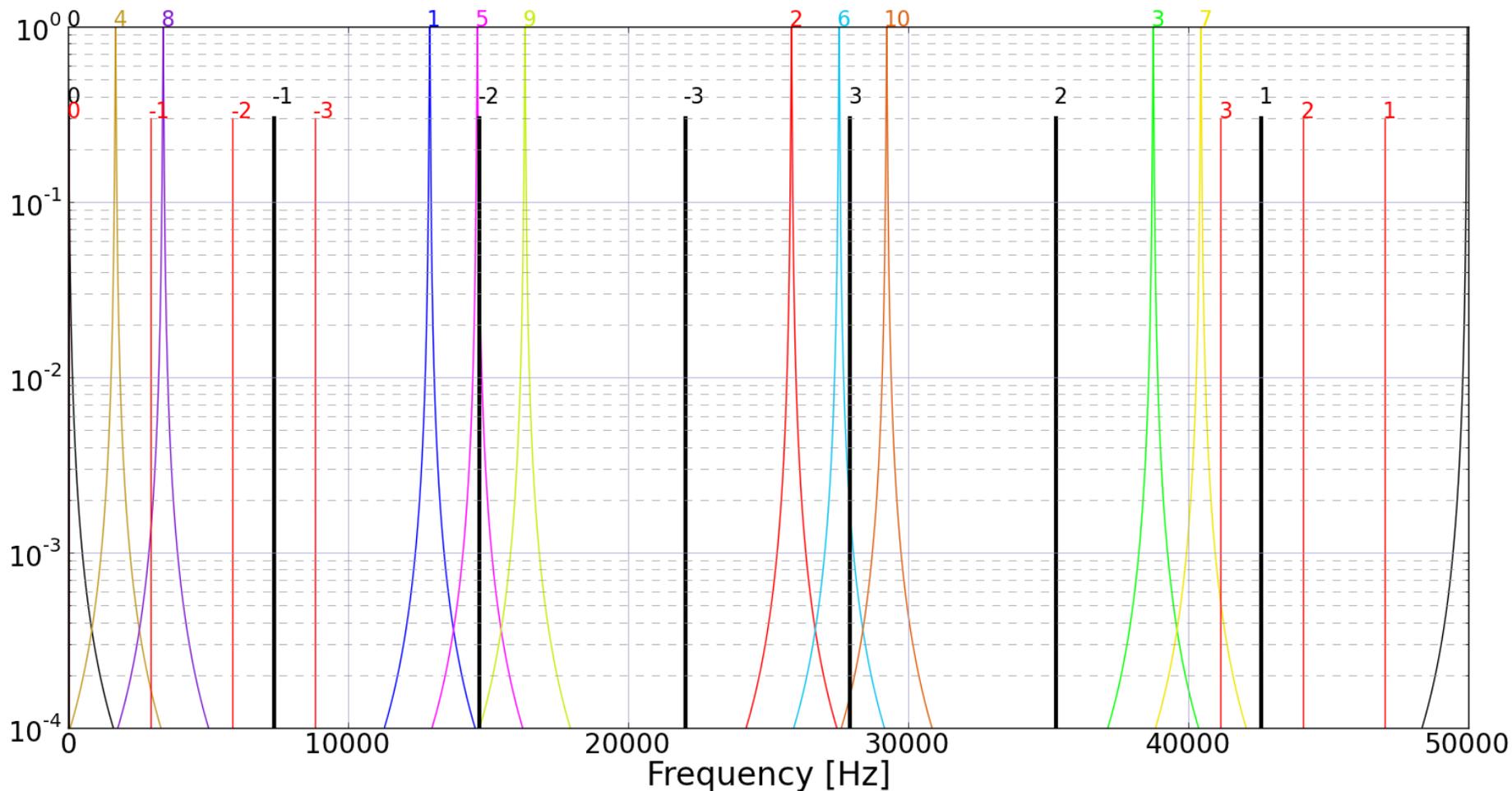


RF Sideband高次モードと腕共振器

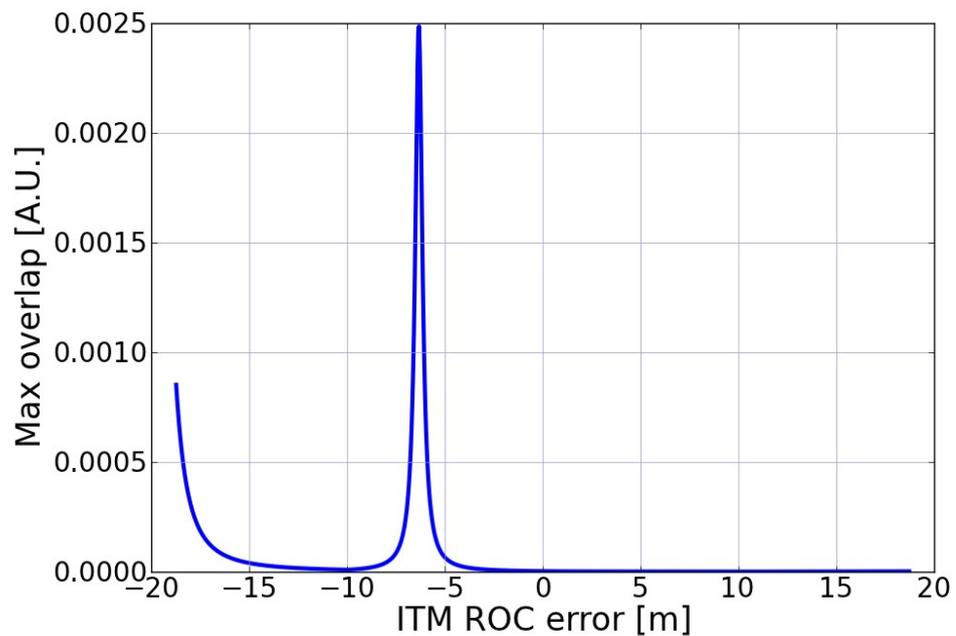
RF Sidebandの高次モードが腕に共振 ==>

- 腕のラインメント揺らぎ
- RF SBパワー

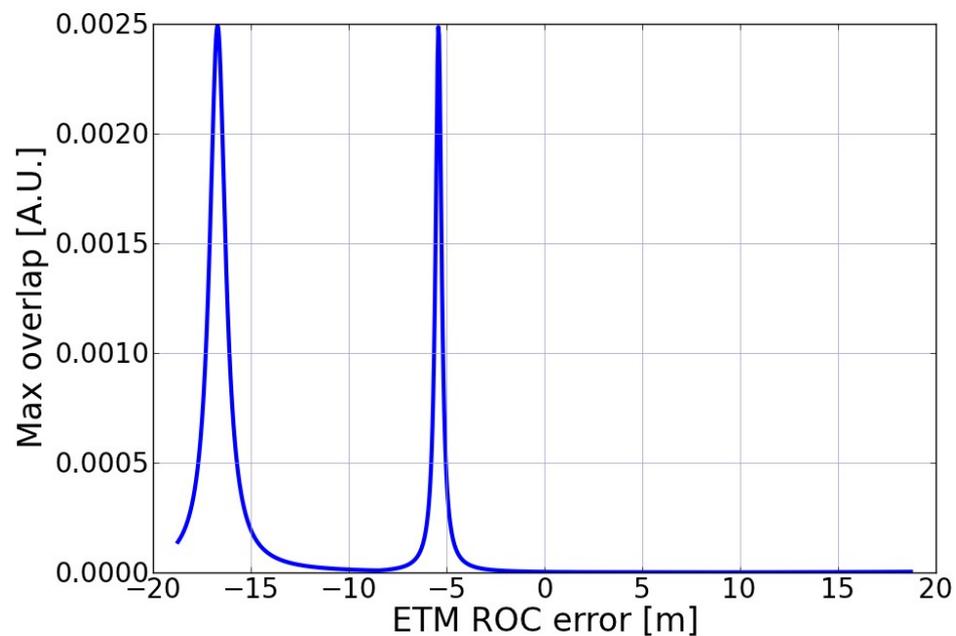
 結合



RF Sideband高次モードと腕共振器



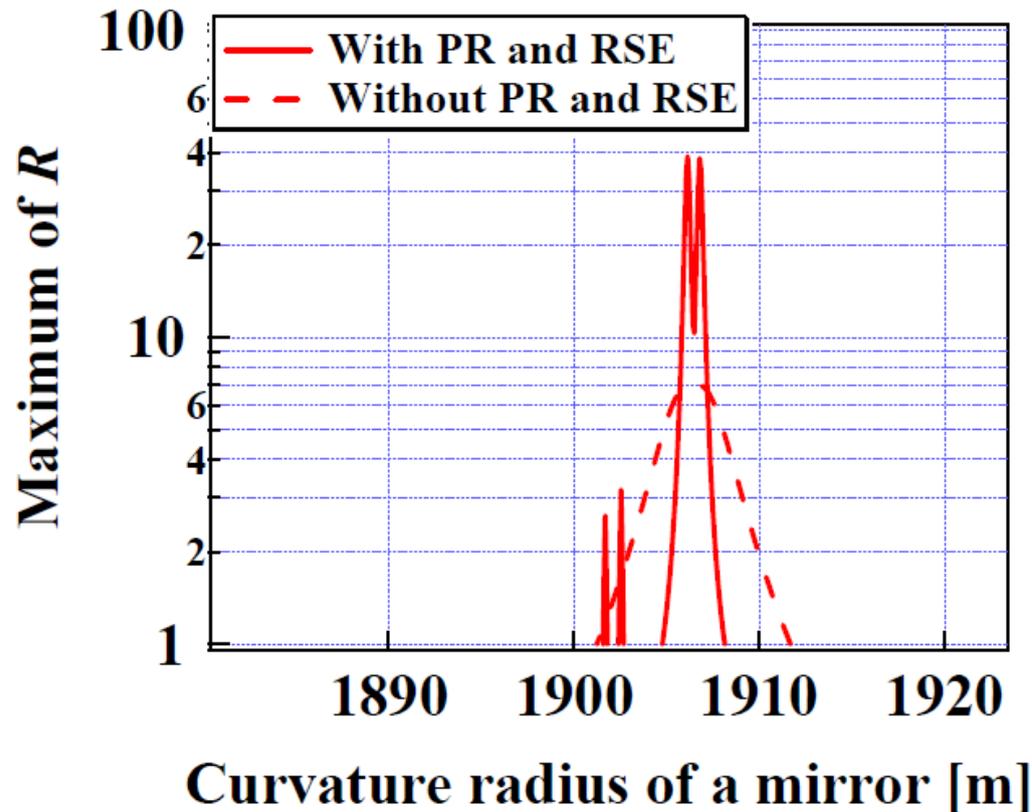
鏡の曲率誤差: +/-1%



Parametric Instability

- 共振器高次モードの輻射圧と鏡弾性モードの相互作用で生じる不安定性
- ビームスポットサイズ, 横モード間隔に依存
- $R > 1 \implies$ Parametric Instabilityが問題となる

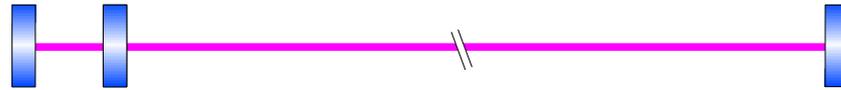
曲率半径の危険領域を避ける



Recycling共振器

直線型Recycling共振器

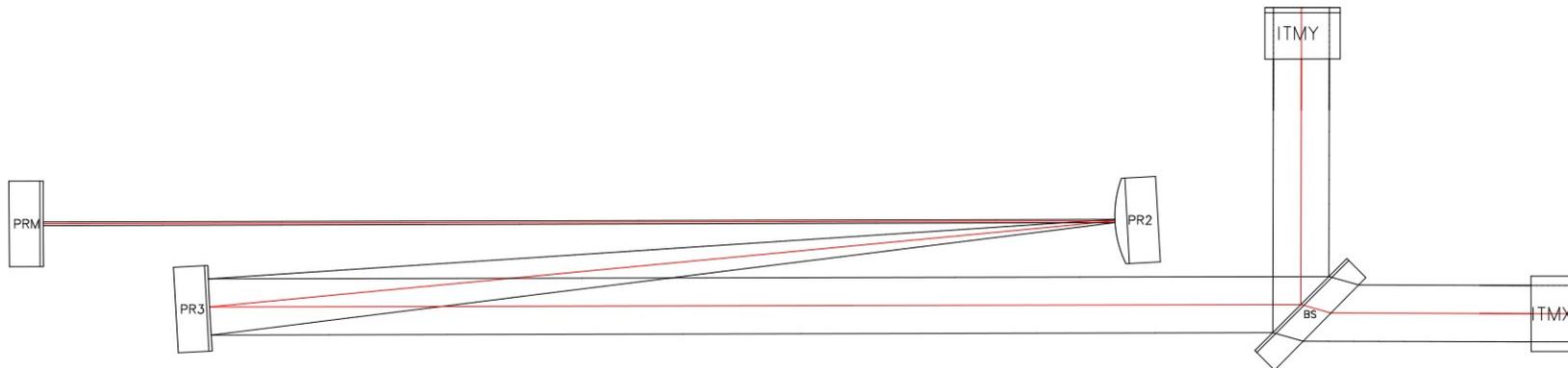
準不安定: 高次モードが縮退



PRC内でのRF Sidebandモードが定まらない
重力波Sidebandが高次モードへ散乱

安定Recycling共振器

Recycling共振器内でGouy位相を回す (ビームをフォーカスする)
腕を折り返す: Telescopeを組み込む



折り返し鏡の曲率誤差に敏感 (我妻講演 18pSV-3)
WFSの信号が減衰する (道村講演 18pSV-2)

光学レイアウト

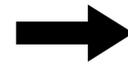
詳細な鏡の位置決定: 意外と複雑な仕事

拘束条件

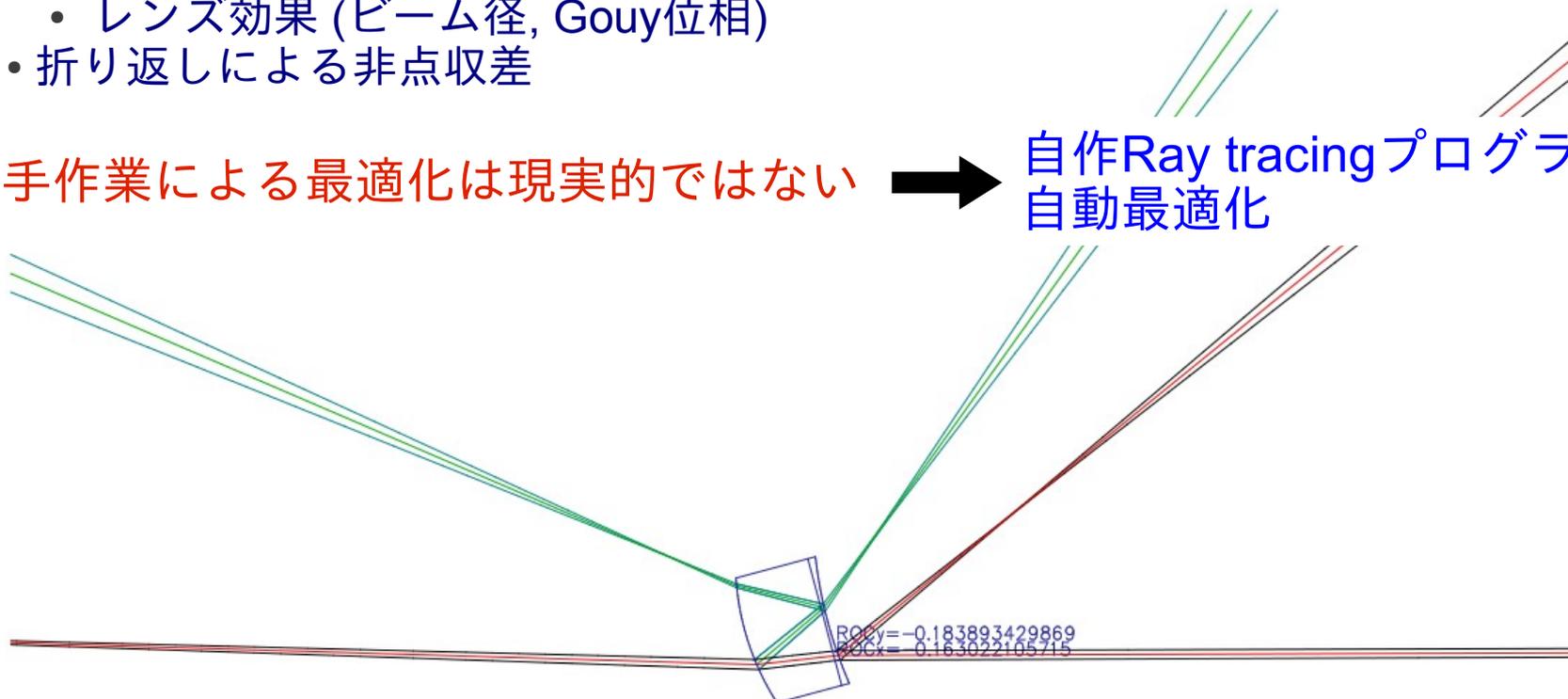
- ビームは各鏡の中心に当たる
- 二つの腕は直交
- ITMのHR面にビームが垂直入射
- POX, POYが分離可能

- BS, ITM透過
 - Wedgeによる屈折
 - 光学距離変化
 - レンズ効果 (ビーム径, Gouy位相)
- 折り返しによる非点収差

手作業による最適化は現実的ではない



自作Ray tracingプログラムによる自動最適化



結論

- LCGTの主干渉計パラメータ: (ほぼ)決定
- 干渉計制御信号取得方法: (だいたい)決定
- 変調周波数の微調節が必要
- Recycling共振器: 折り返す
- 曲率誤差対策: 練ってある
- 詳細な光学レイアウト: 自動生成可能

今後

- より具体的な制御系設計
- 必要なハードウェア/ソフトウェア実装
- コミッショニング