



Tokyo Tech

日本物理学会2023年春季大会

次世代重力波検出器に向けた非線形光学効果を用いた
信号増幅システムの開発 X

東工大理

鈴木海堂, 原田健一, 小田部荘達, 宗宮健太郎

2023年3月22日(水)

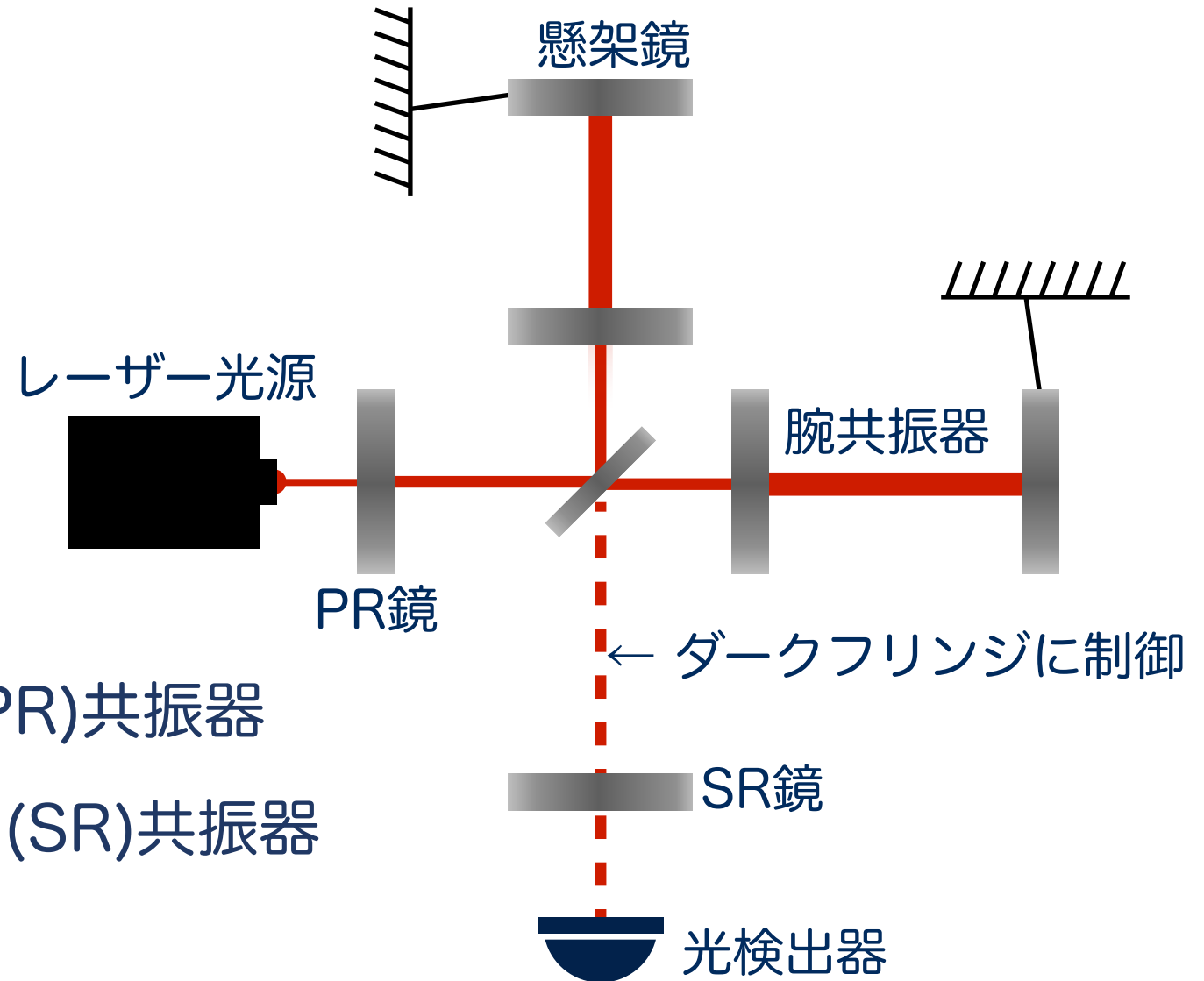
重力波検出器

- 現在稼働中の検出器

- ▶ KAGRA , LIGO ,
- ▶ Virgo , etc.

- 信号増幅技術

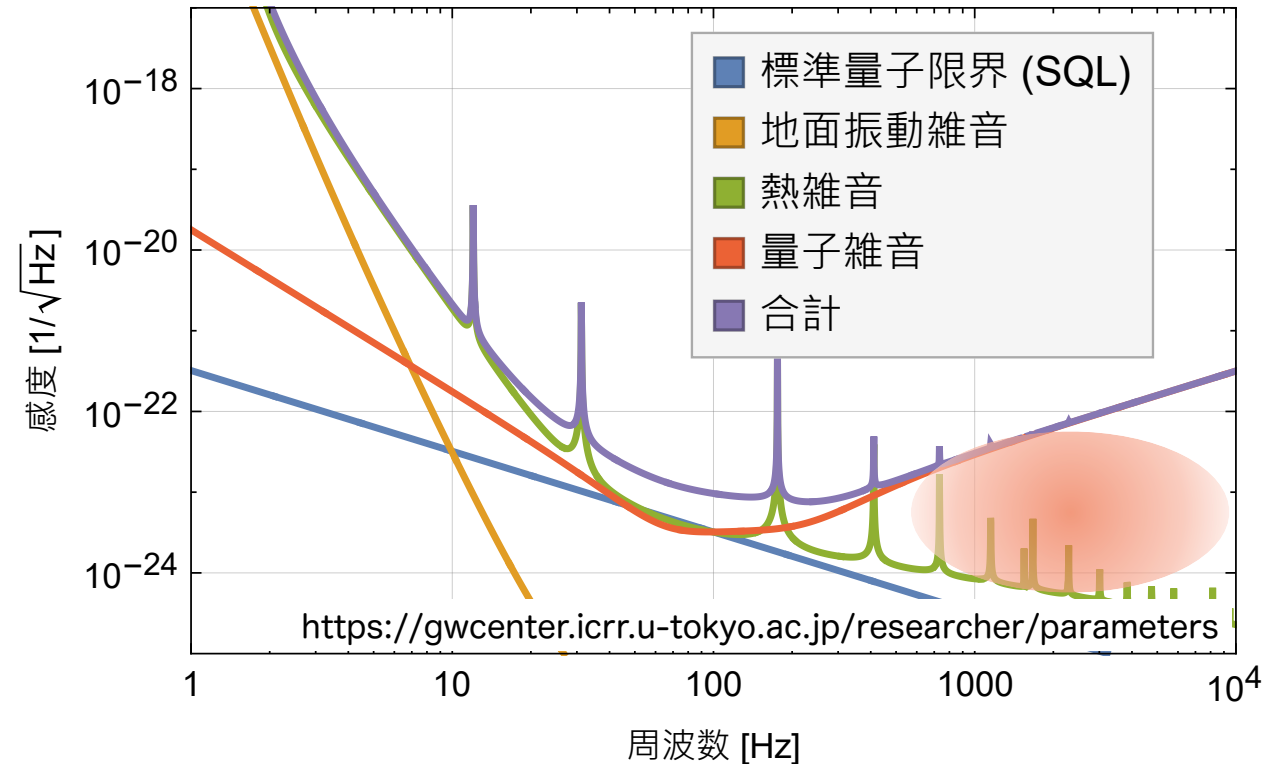
- ▶ 腕共振器
- ▶ パワーリサイクリング (PR)共振器
- ▶ シグナルリサイクリング (SR)共振器

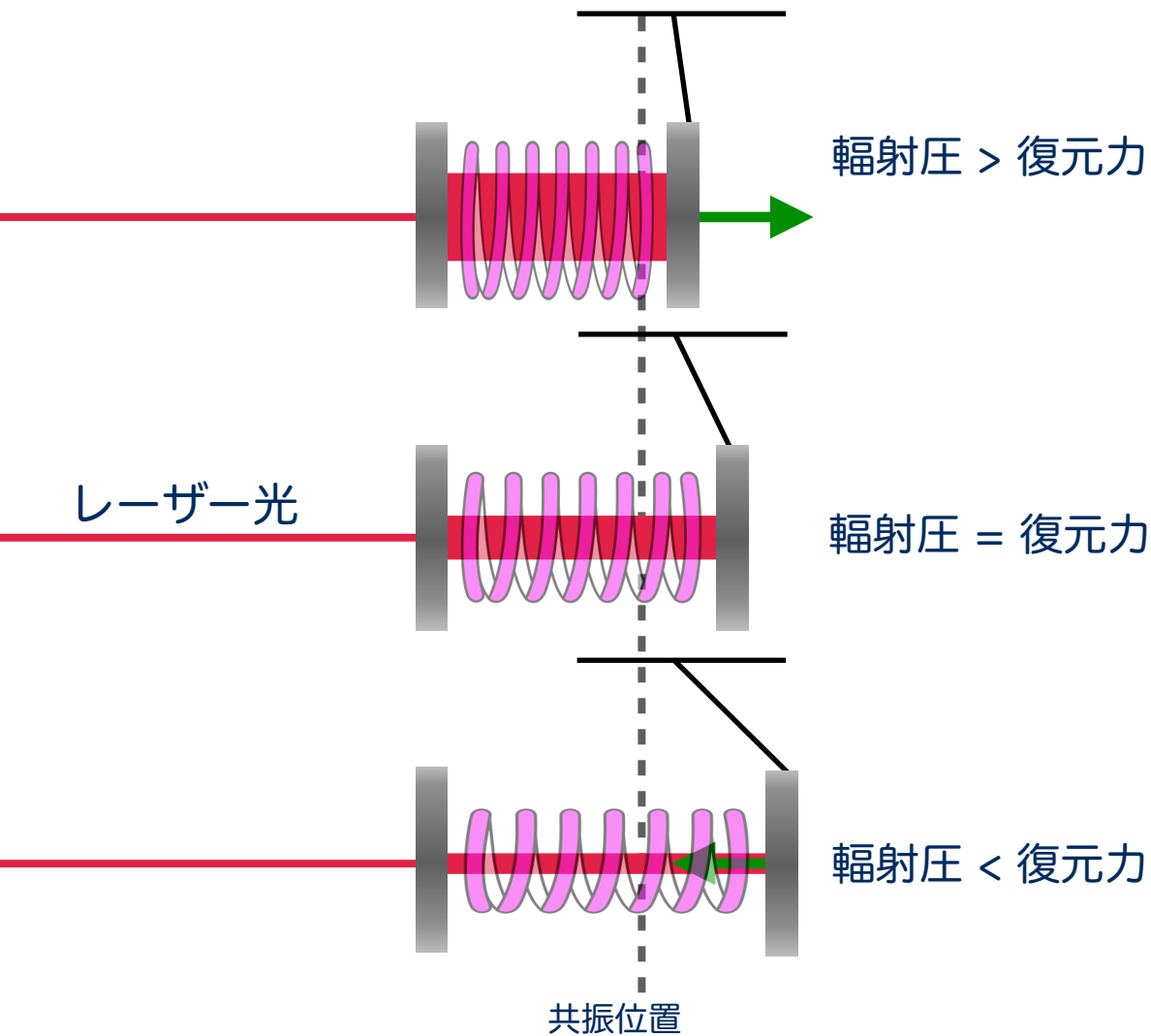


これまでの重力波の観測

- 2015年 9月に初検出
- 累計90イベントを達成
 - ➡ 中性子星連星合体は合体前の信号のみ
 - ➡ 高周波帯域の量子雑音による制限
 - ➡ 干渉計内光量の増強は技術的に限界 (~100 kW)
- 帯域拡張のための新技術
 - ➡ 光パラメトリック増幅を用いた光バネの強化

KAGRAの感度





- 機械的な復元力と光の輻射圧によって生み出されるバネ
- 共振器長を共振位置から離調することで発生
- 共振周波数 f_{OS} 付近で信号が増幅される
 - ➔ $f_{OS}^2 \propto$ 輻射圧
 - \propto レーザー光強度
 - ➔ $f_{OS} \sim 100$ Hzが限界

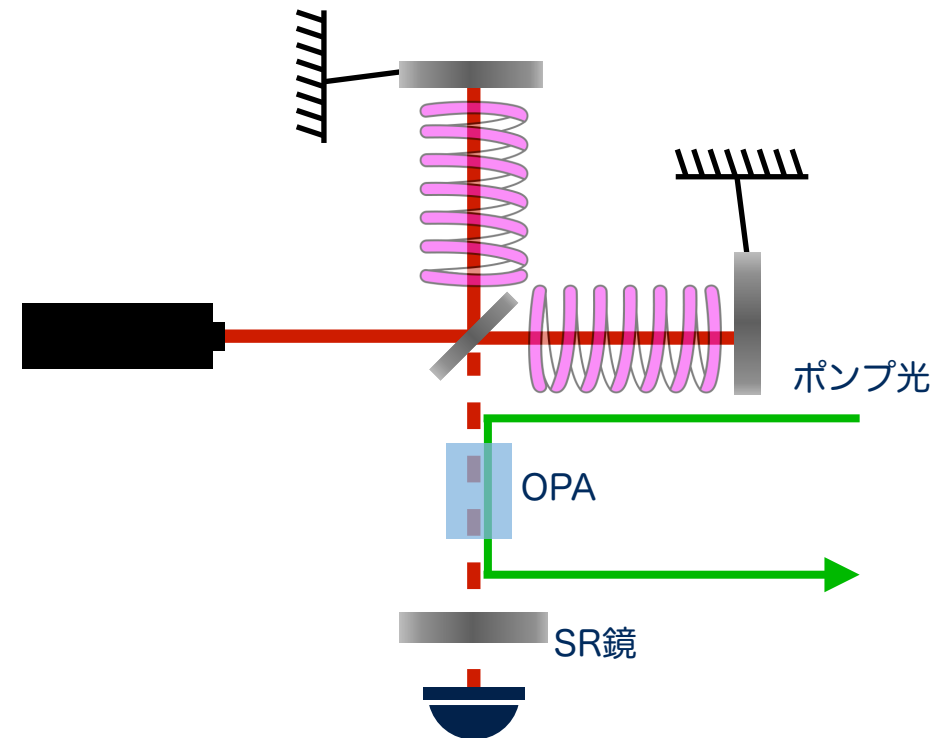
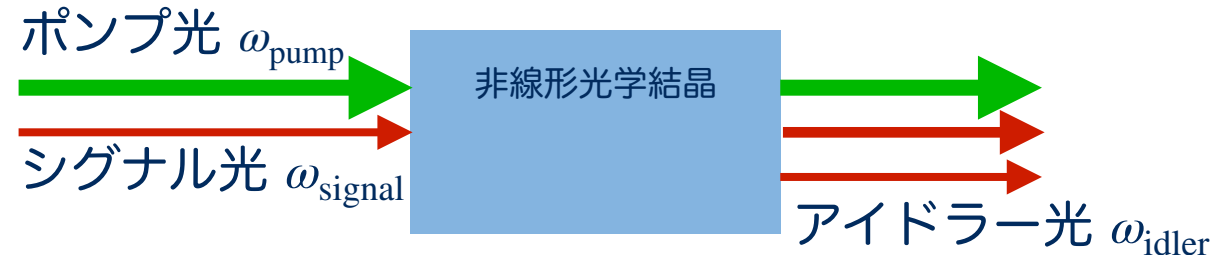
光パラメトリック増幅 (OPA)

- 2次の非線形光学効果により
ポンプ光がシグナル光と
アイドラー光に変換される:

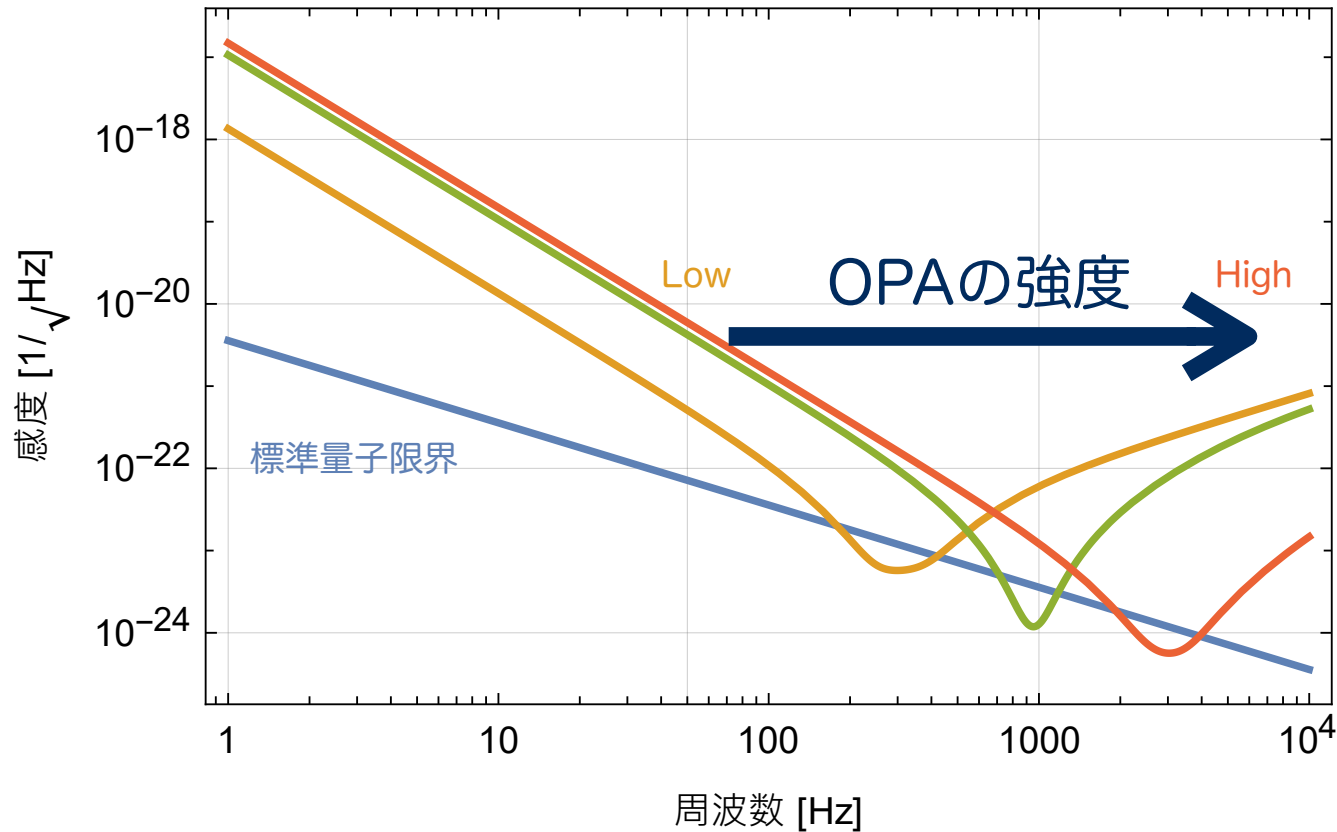
$$\omega_{\text{idler}} = \omega_{\text{pump}} - \omega_{\text{signal}}$$

- SR干渉計でのOPA

- ➔ 光バネの強化 (\sim kHz)が可能
- ➔ 高周波の感度が向上



光バネを強化した干渉計の感度

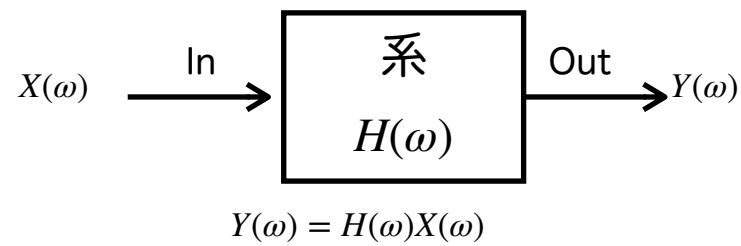


- OPA強度の増加に伴い高周波の感度が向上
 - ➔ kHz帯での観測が可能
 - ▶ 中性子星連星合体
 - ▶ 超新星爆発
 - ➔ 新しい物理の解明

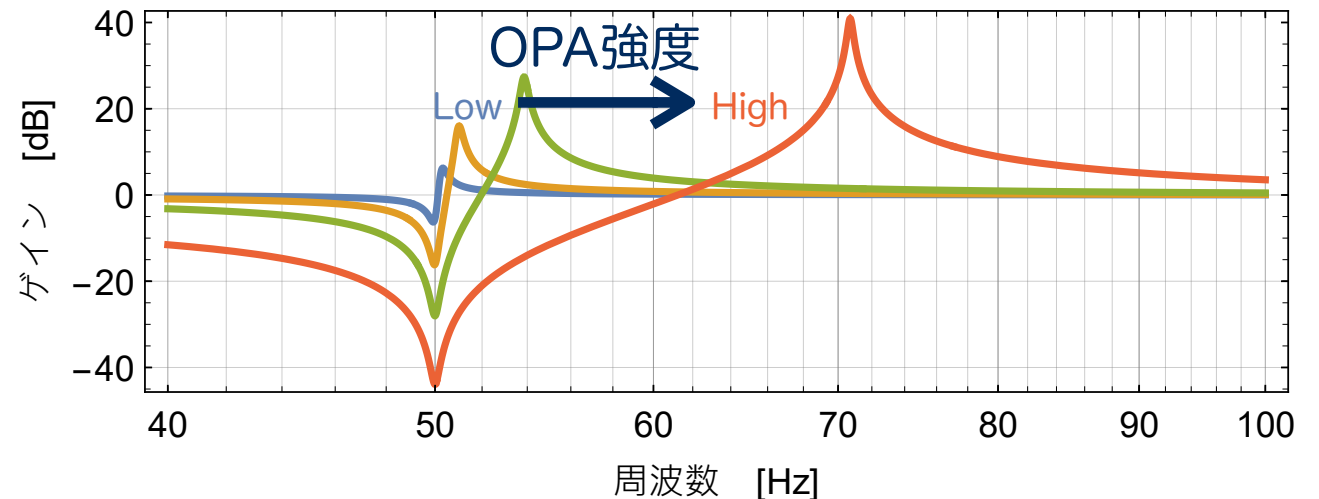
OPAの強度を変化させながら 伝達関数を測定し f_{OS} の変化を調べる

伝達関数:

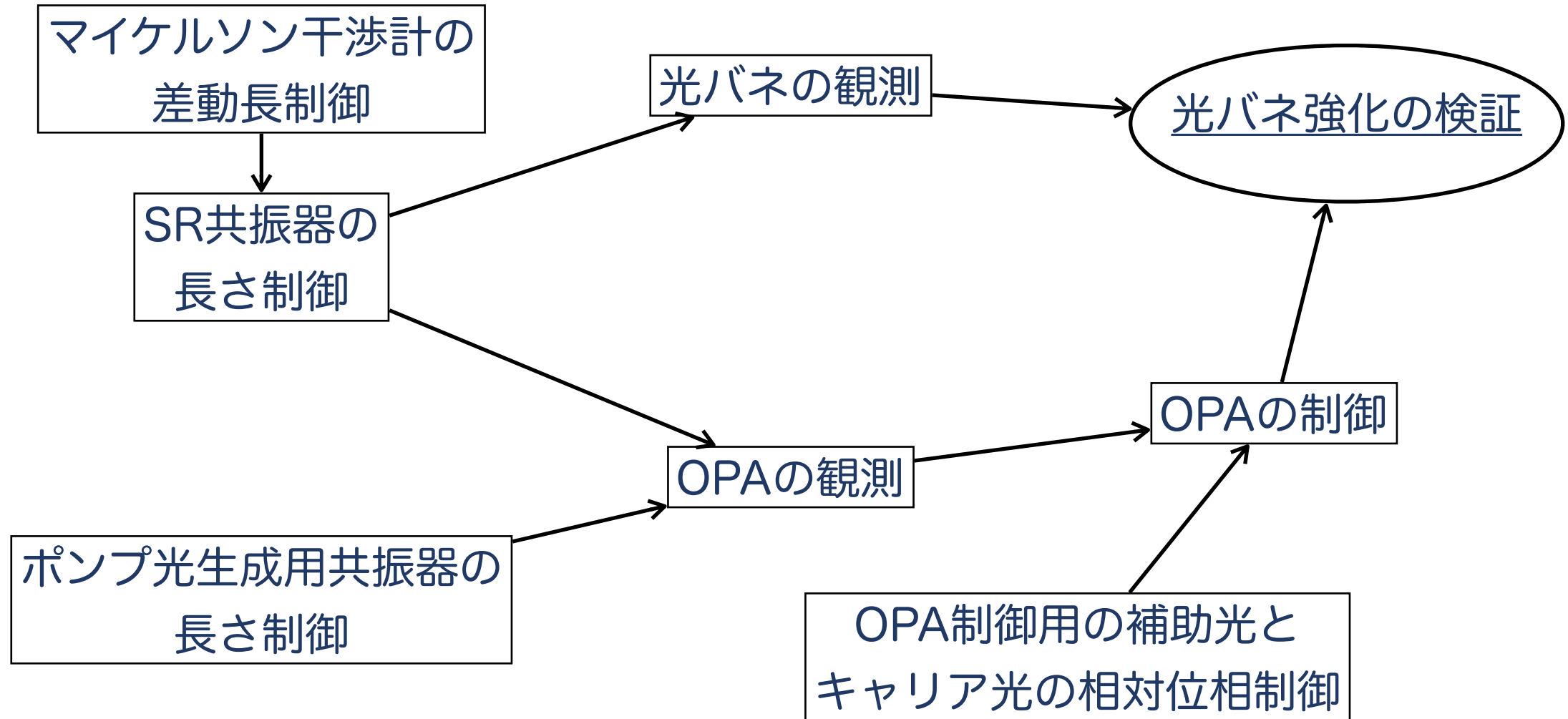
系の入出力関係を表現する
周波数応答関数



光バネの伝達関数



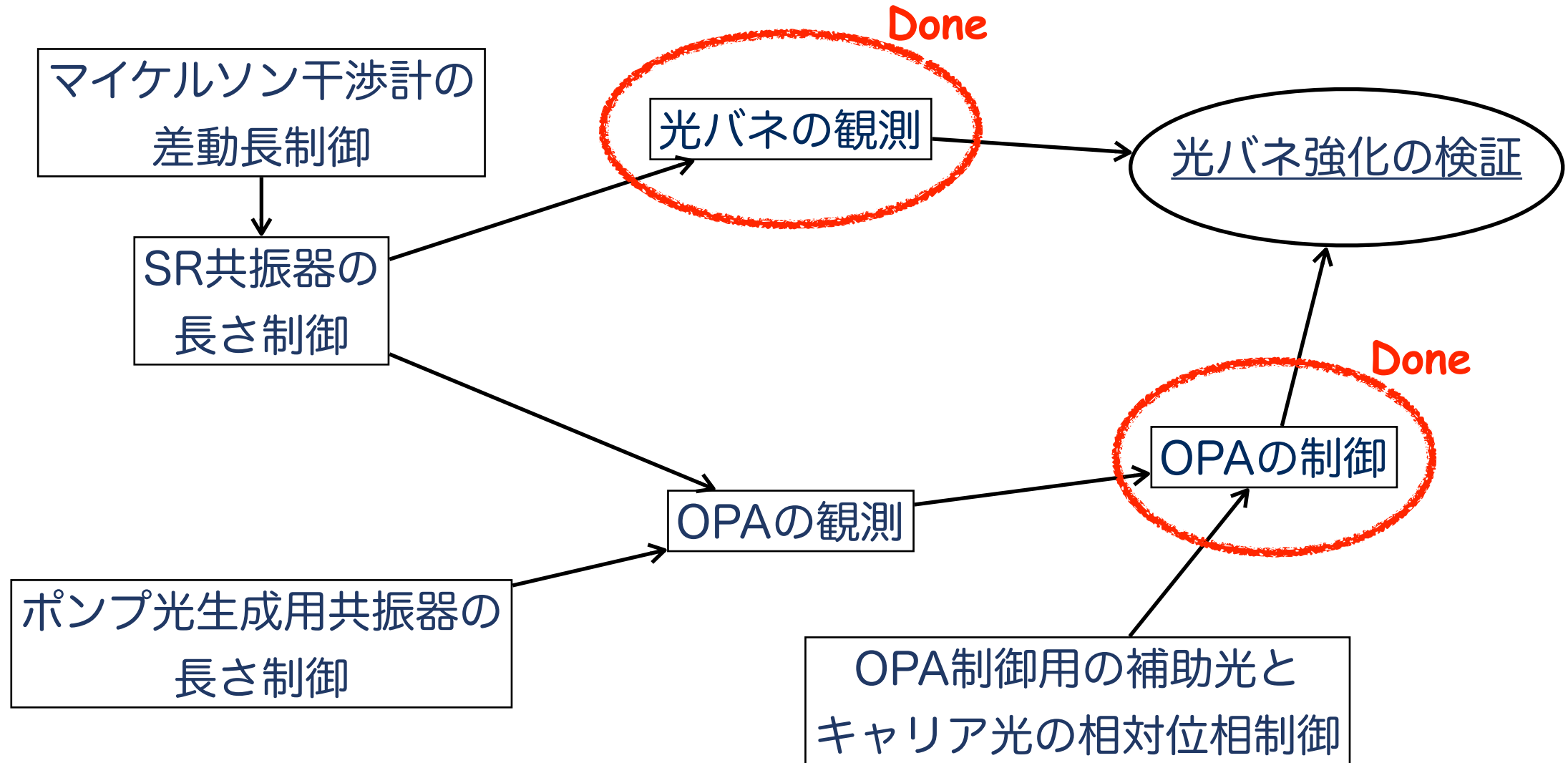
実験のフローチャート



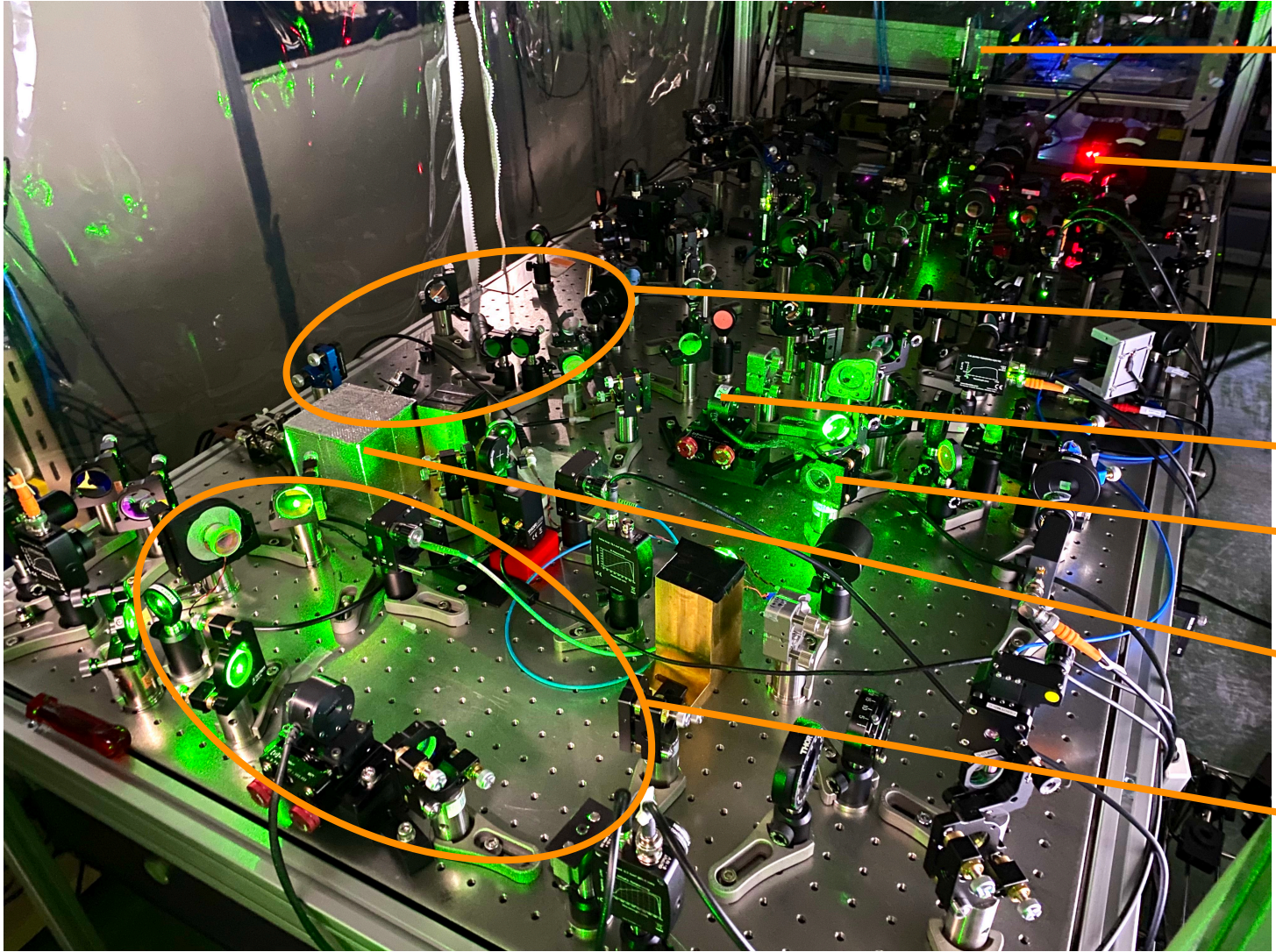
- STEMLab 125-14
 - ▶  redpitaya社の
シングルボードコンピュータ
 - ▶ 125 MS/s
 - ▶ 14 bit ADC/DAC
 - ▶ ~400 \$
 - ▶ Pythonでの運用が可能



実験のフローチャート



セットアップ



ファイバアンプ
($P_{out} \leq 12 \text{ W}$)

主レーザー
(1064 nm, 近赤外光)

マイケルソン干渉計

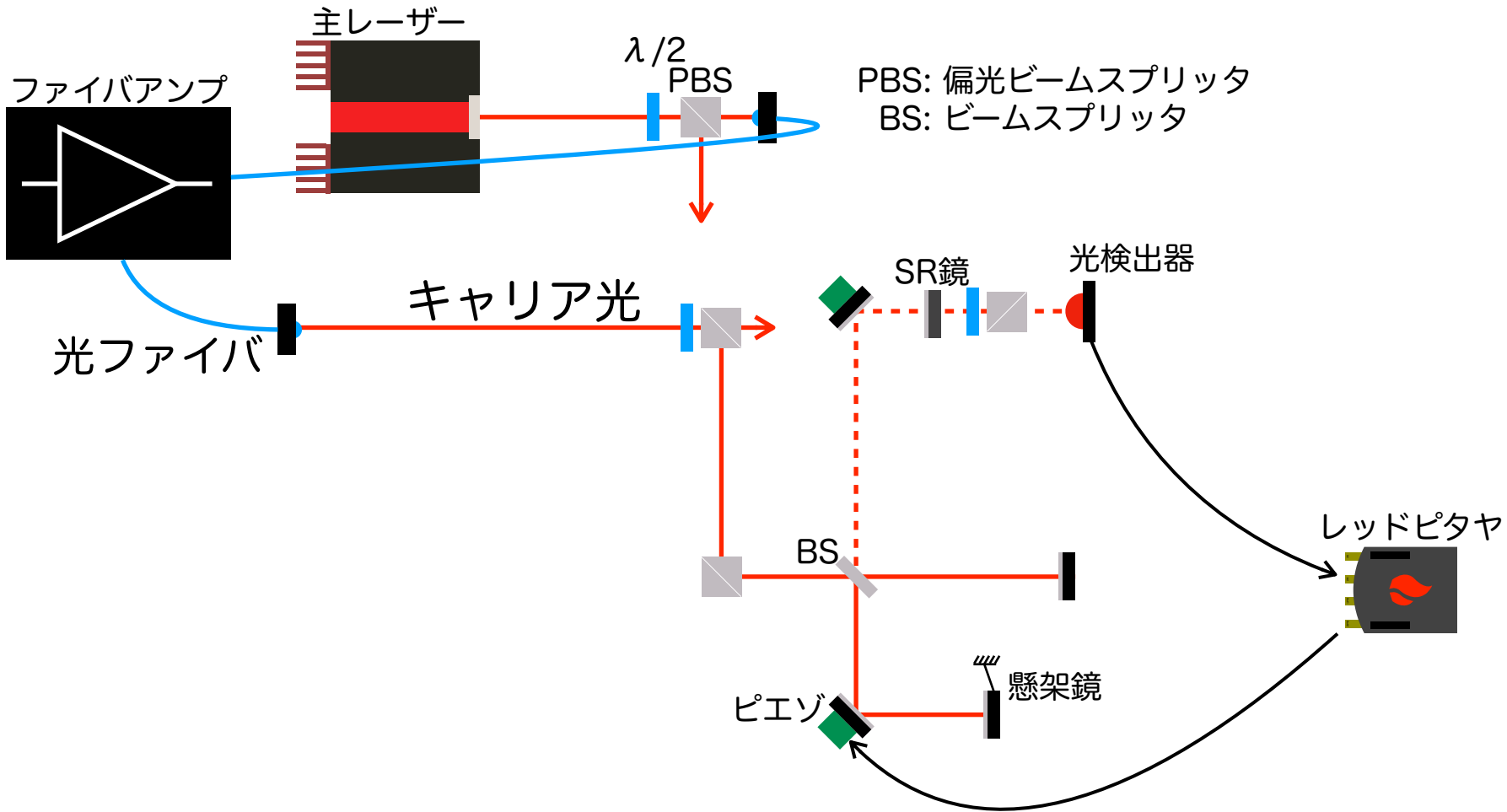
OPA用結晶

SR鏡

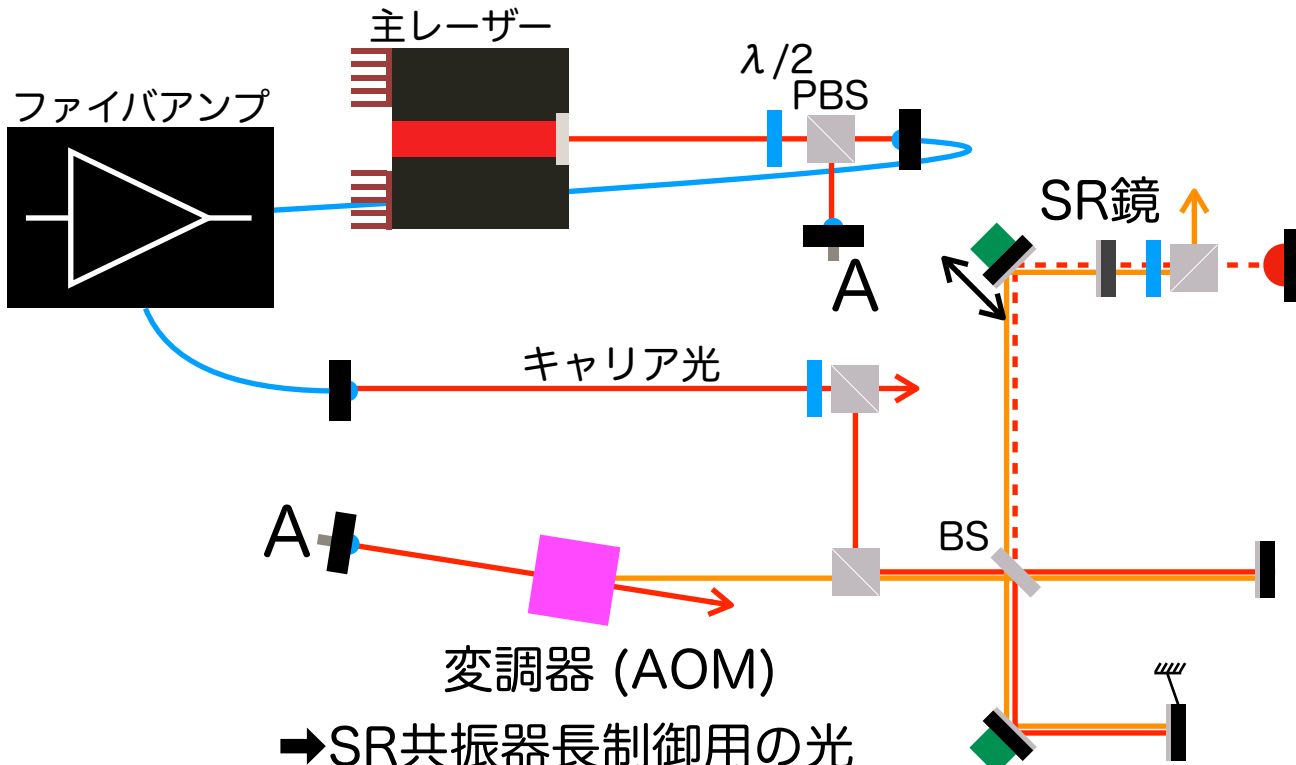
懸架鏡 (カバーの中)
サスペンション及びマウントの作成:
東工大オープンファシリティセンター制作部門

ポンプ光生成用共振器
(532nm, 緑色)

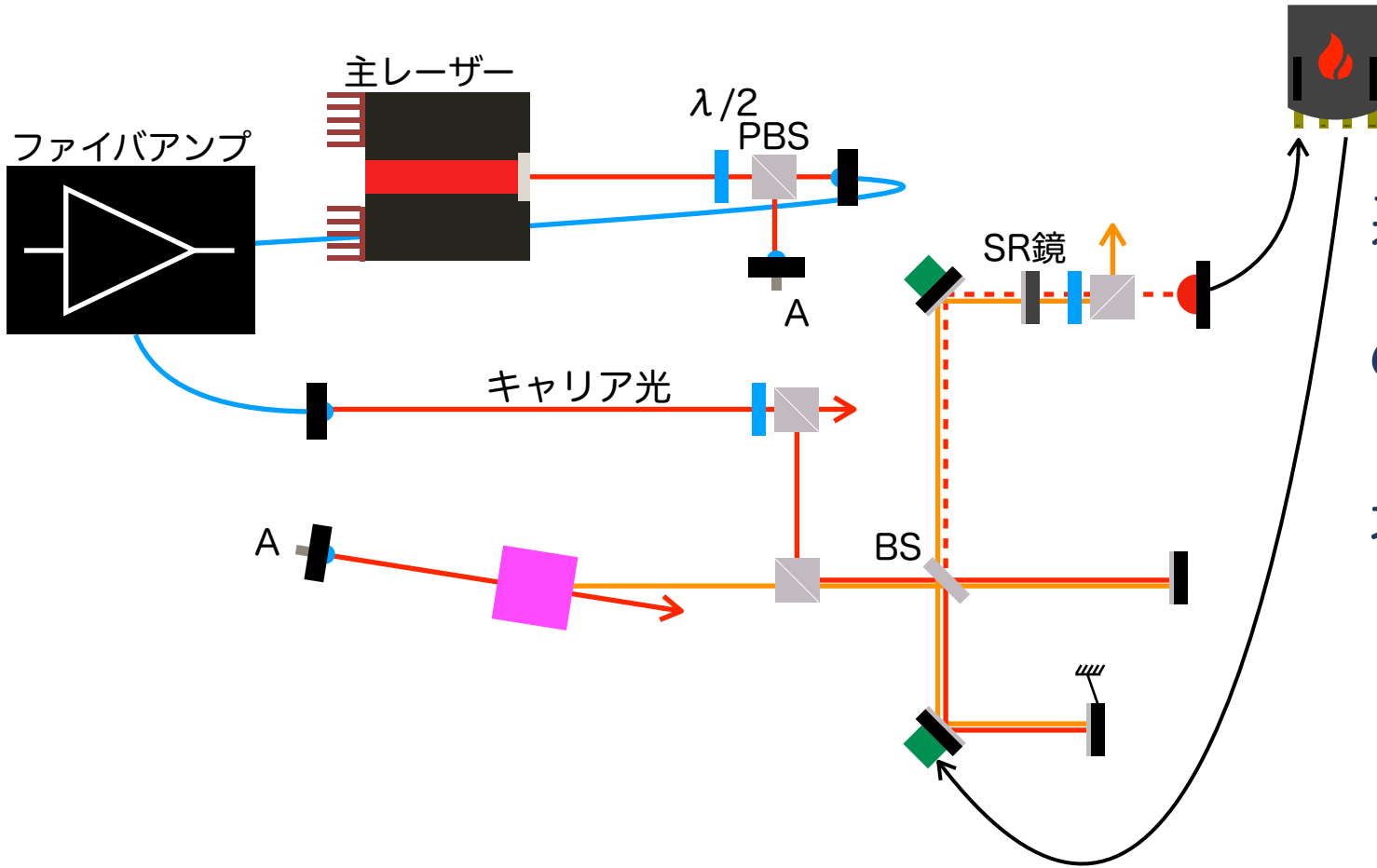
光バネ生成実験



光バネ生成実験



- SR共振器長制御用の光 (サブキャリア光)を作る
- 変調周波数によって 離調角 (共振器長)が決まる

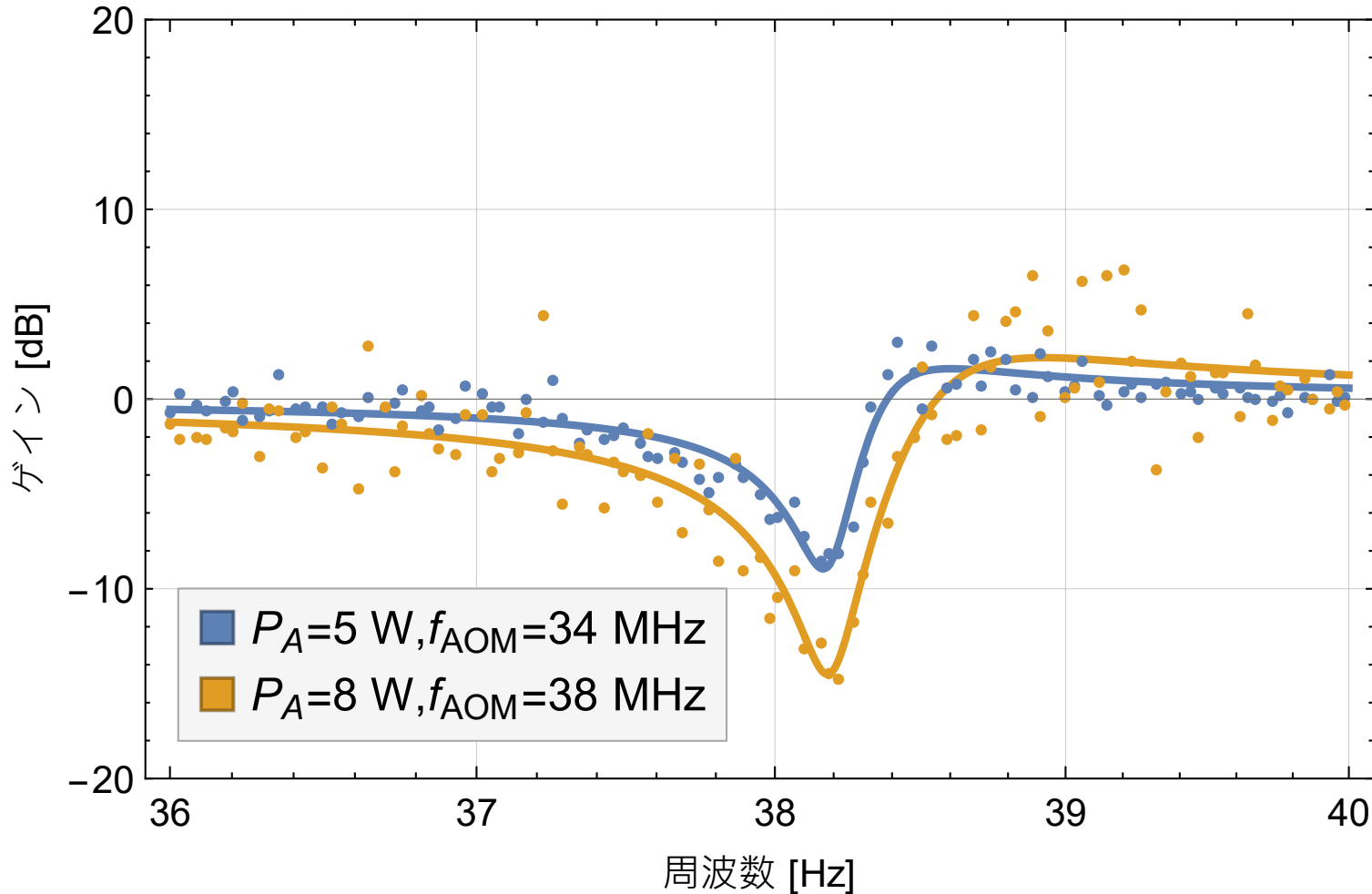


系全体の閉ループ伝達関数:

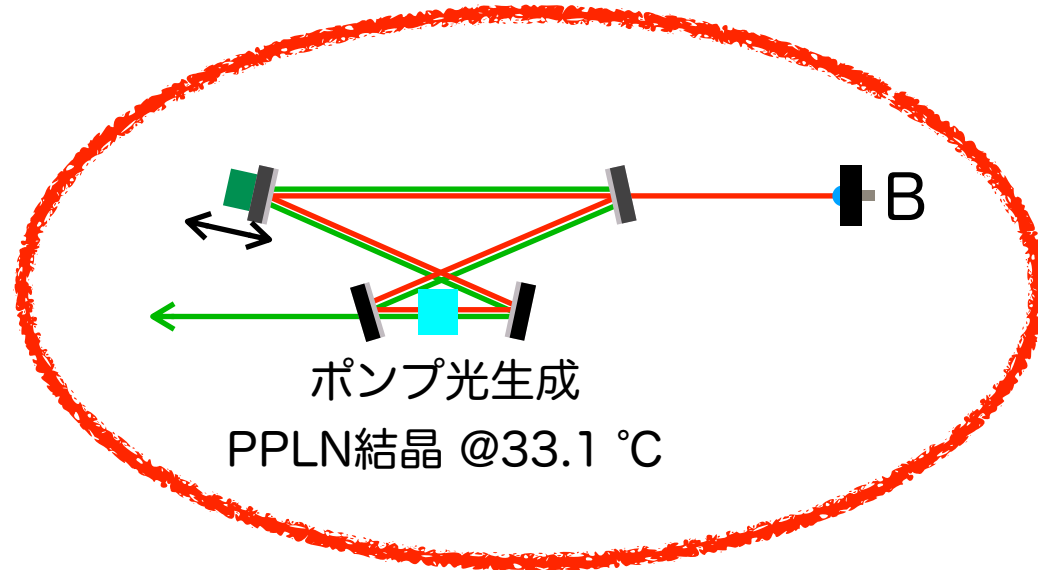
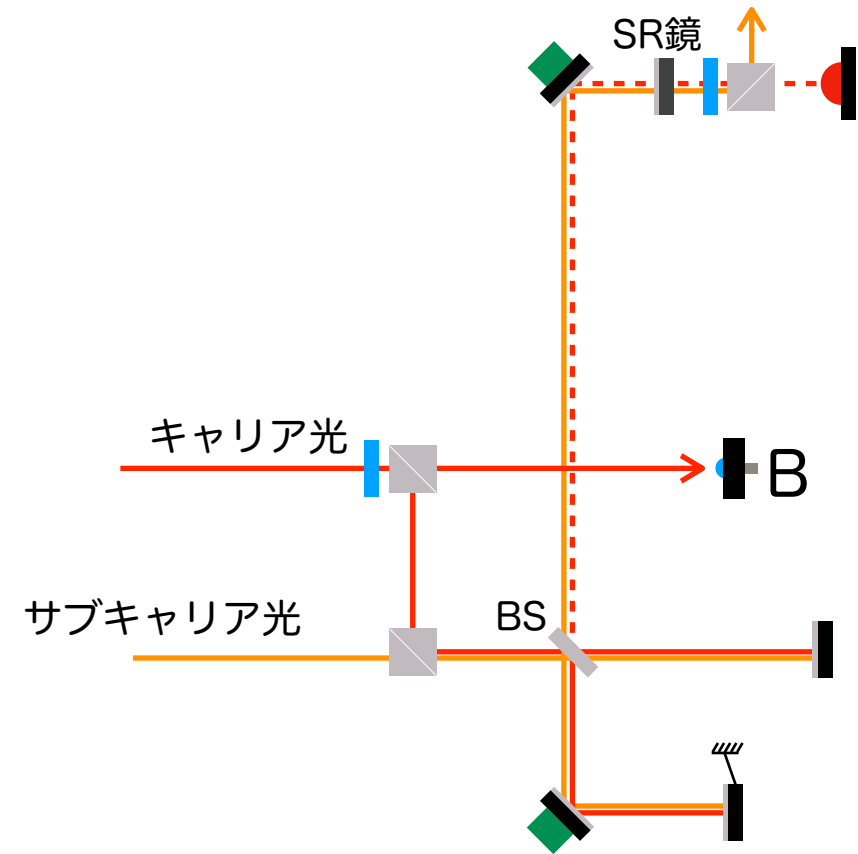
$$G_{CL} = \frac{1}{1 - H_{SRMI}H_{OS}F}$$

を測定し、
光バネの伝達関数 $H_{OS}(\omega)$ を求める

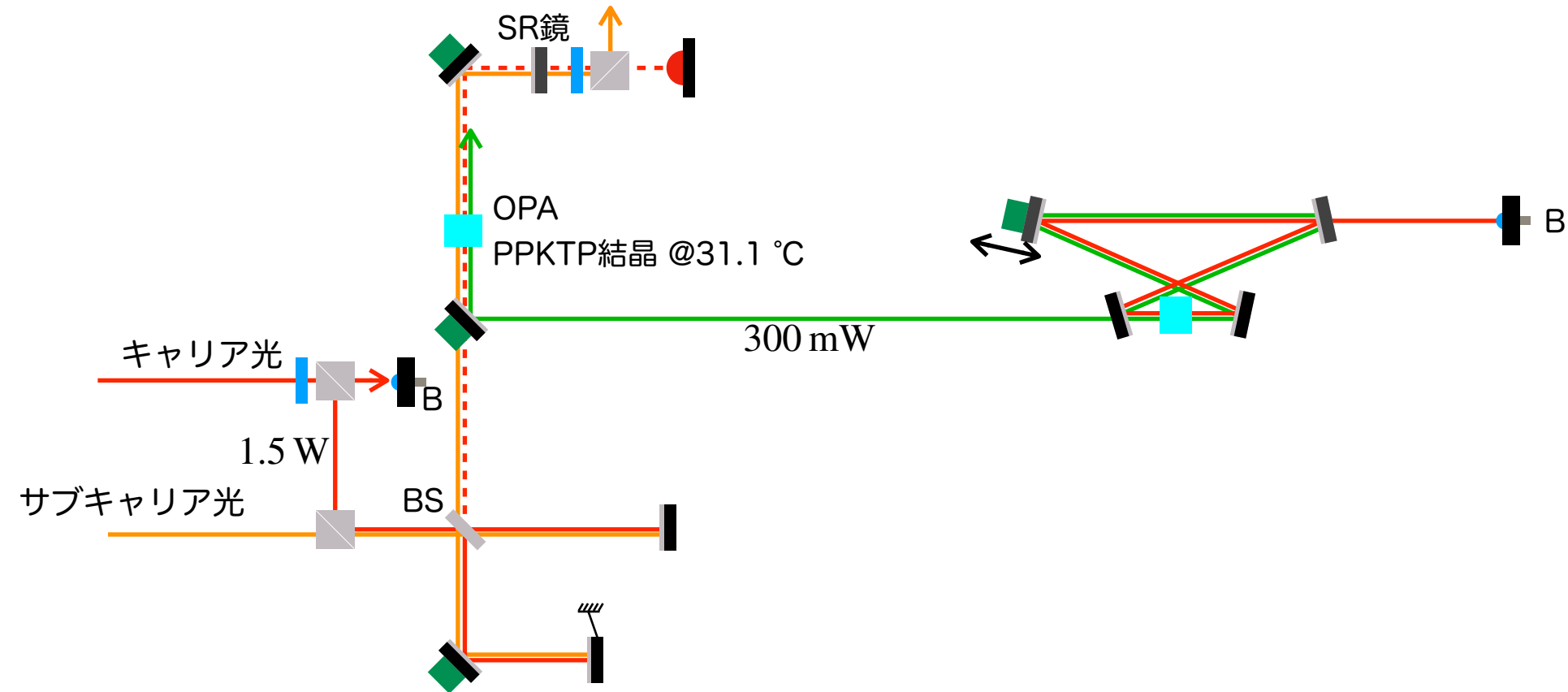
光バネの伝達関数の測定結果

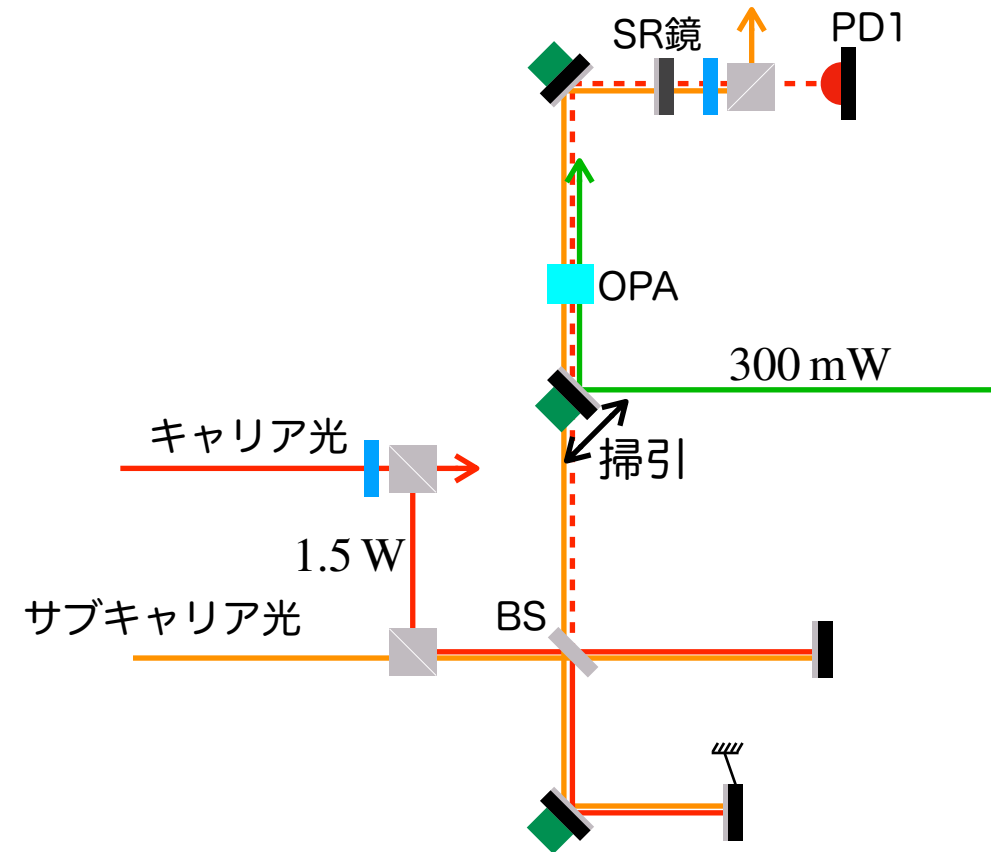


- 実線は $H_{\text{OS}}(\omega)$ の理論式によるフィット
- 青色: $f_{\text{OS}} \simeq 3.16\text{ Hz}$
- 橙色: $f_{\text{OS}} \simeq 4.76\text{ Hz}$
- SR干渉計では初めての観測

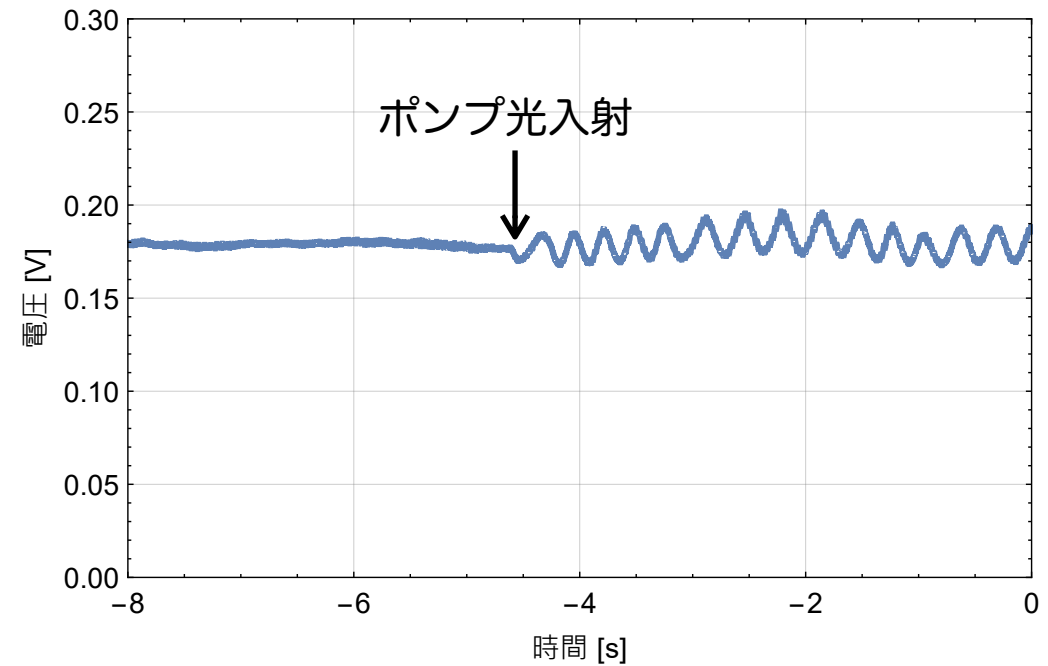


OPA実験

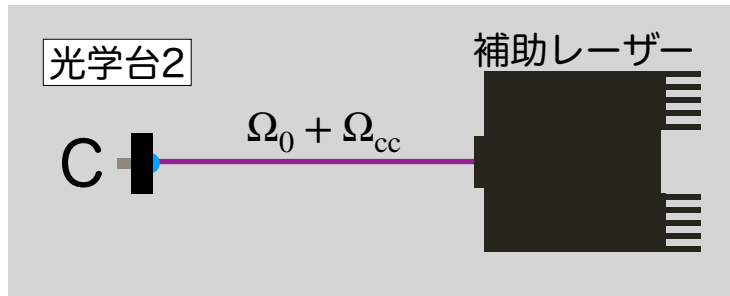
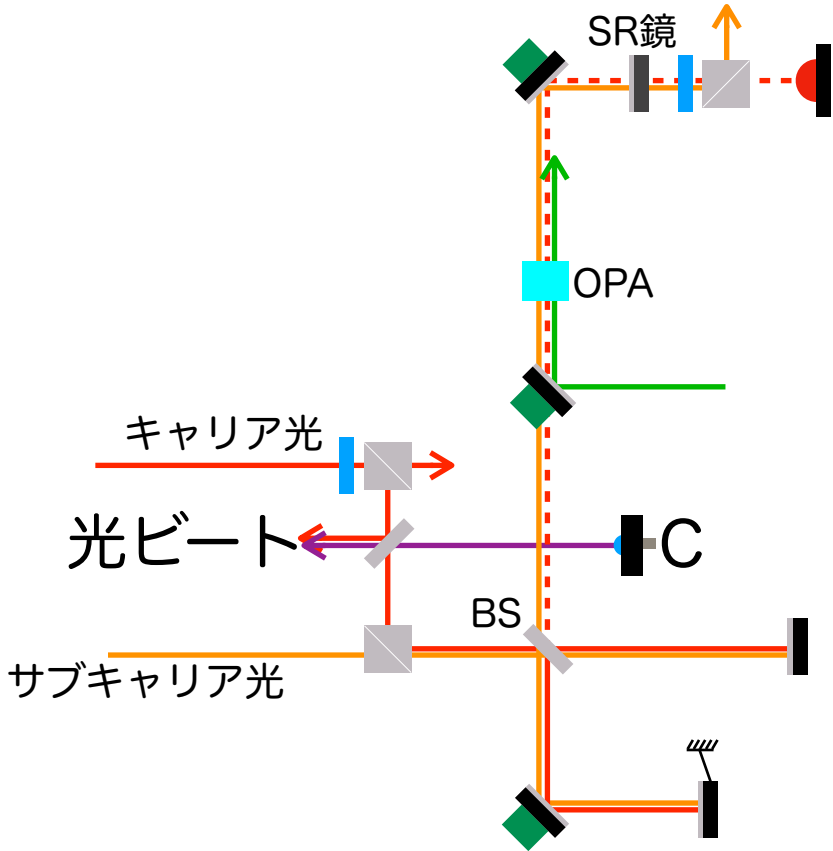




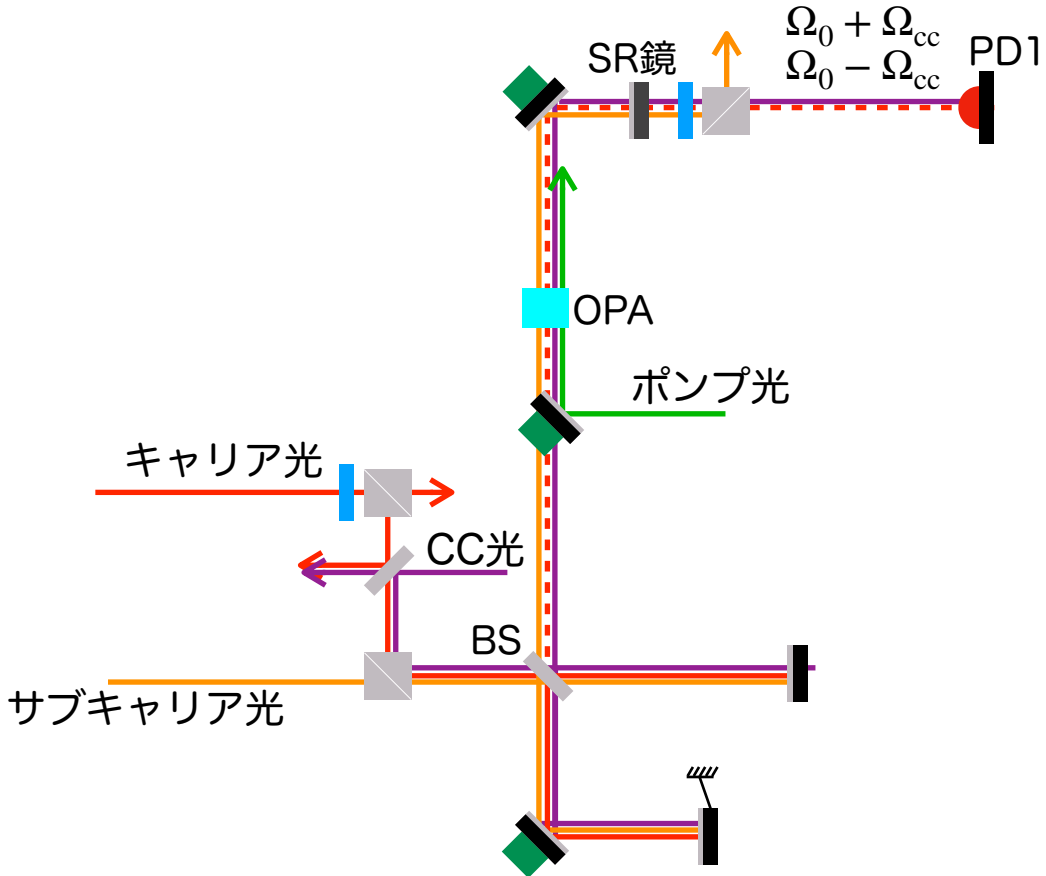
PD1の信号



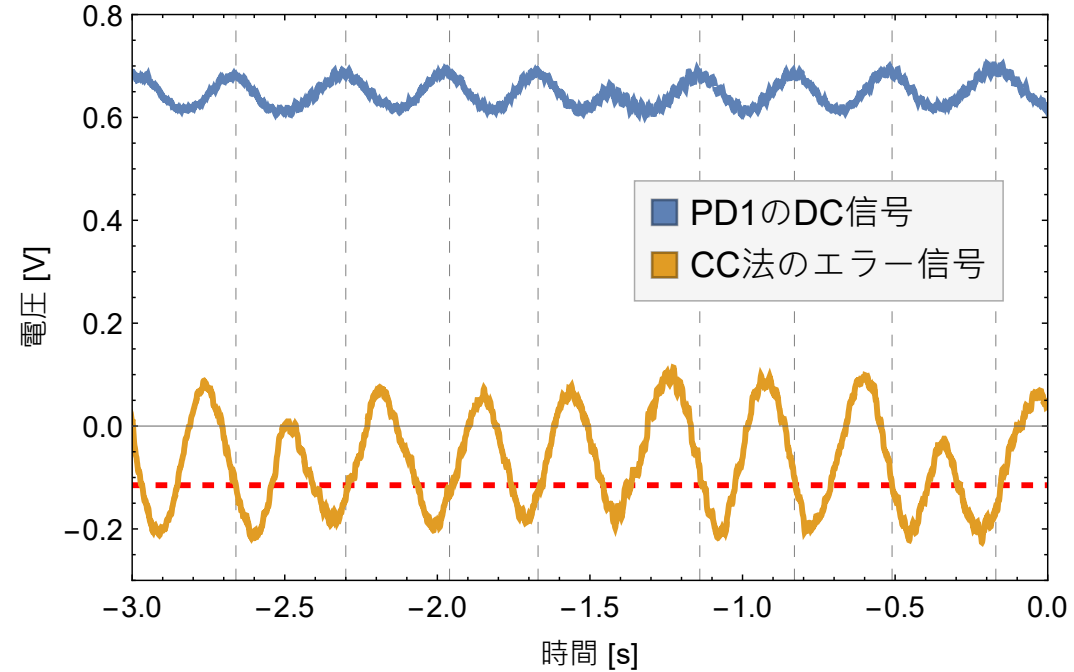
- 3自由度を制御してOPAを確認
- 0.47 dBの増幅を実現



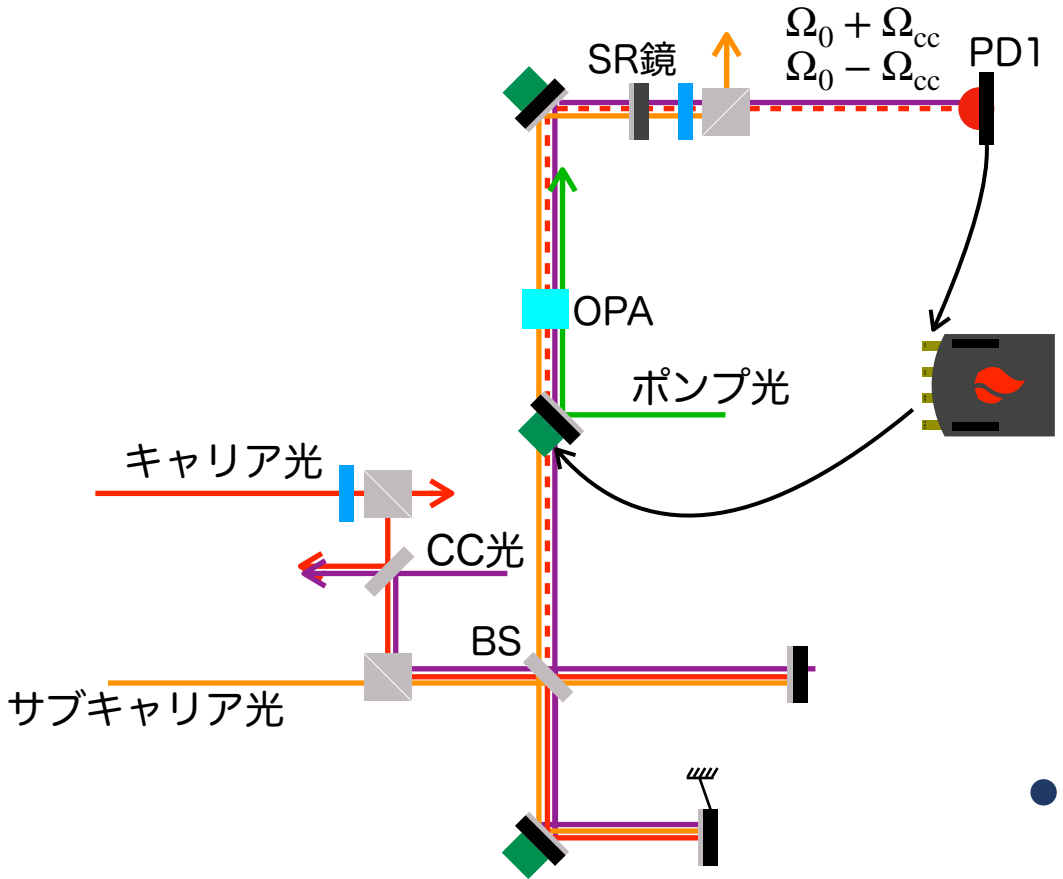
補助レーザーの光とキャリア光の間のビートを一定に保つことでそれぞれの光の相対位相を制御し、OPAの制御 (コヒーレント制御: CC) のための光 (CC光)を作る



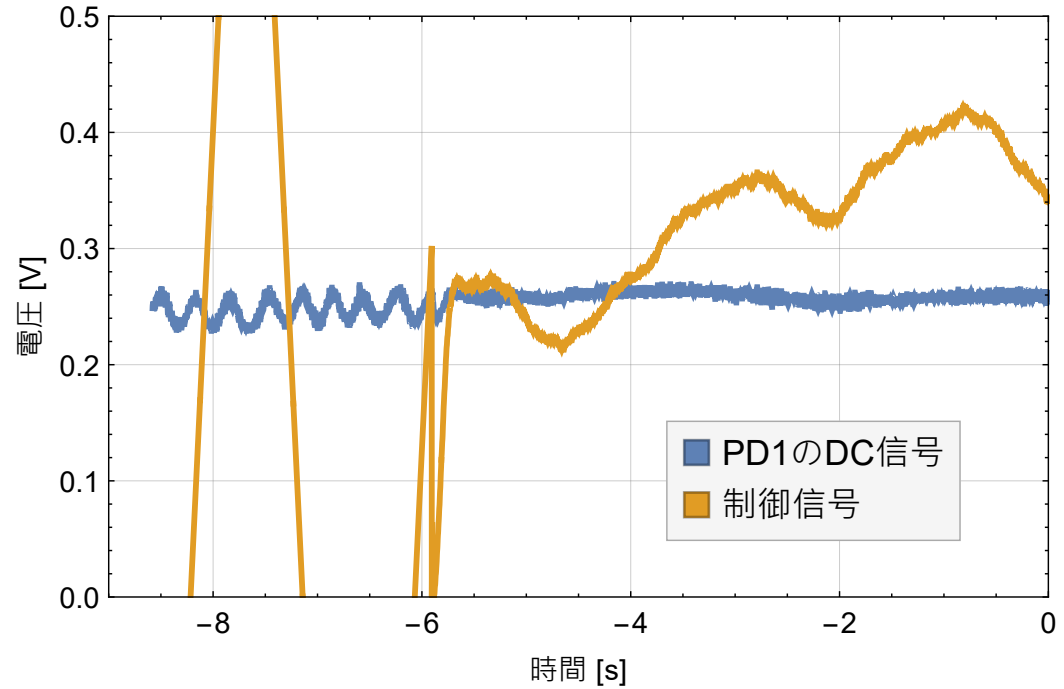
PD1の信号とエラー信号



- CC光がOPAされ
 $2\Omega_0 - (\Omega_0 + \Omega_{cc}) = \Omega_0 - \Omega_{cc}$ の光が発生
- $2\Omega_{cc}$ (= 14 MHz)で復調することで
 エラー信号を取得



PD1の信号とピエゾへの入力信号



- ポンプ光とキャリア光の相対位相を制御
- OPAを増幅の位置に保つことに成功

- 光パラメトリック増幅 (OPA)による光バネの強化を用いた重力波信号の増幅技術の原理検証に向けた実験を行なった。
- 信号リサイクリングマイケルソン干渉計での光バネの観測に成功した。
- デジタルシステムの導入によりOPAのコヒーレント制御を含む5自由度の同時制御を実現した。

今後の課題

- ▶ OPAの強度を変えながら伝達関数を測定することでOPAによる光バネの強化を検証する。
- ▶ キャリア光の安定化・ポンプ光の強化を行う。
- ▶ 必要に応じて防振・防音・懸架系の再検討を行う。