

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V

小田部 荘達, 宗宮 健太郎, 原田健一
東工大理

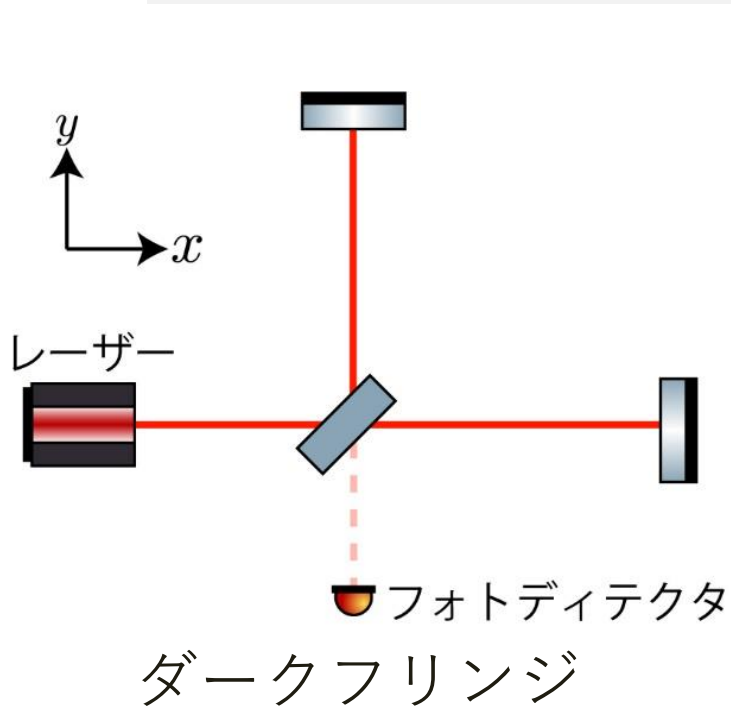


2020/10/7

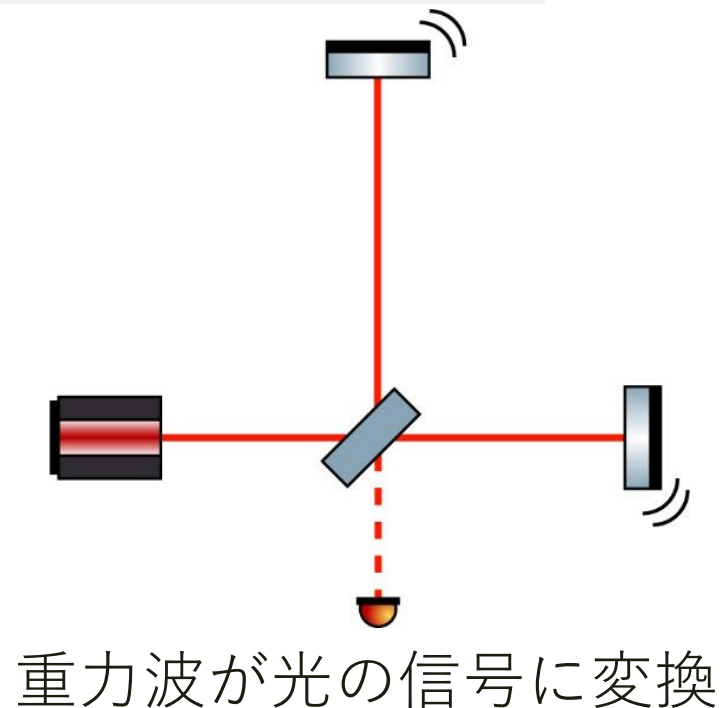
重力波検出器

重力波：時空の歪みが光速で伝わる現象

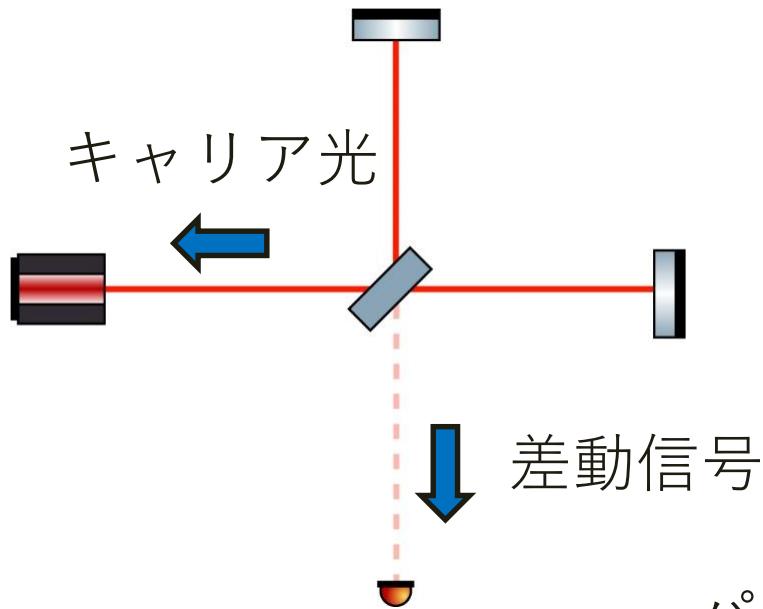
重力波の最低次は四重極放射→マイケルソン干渉計で検出



重力波

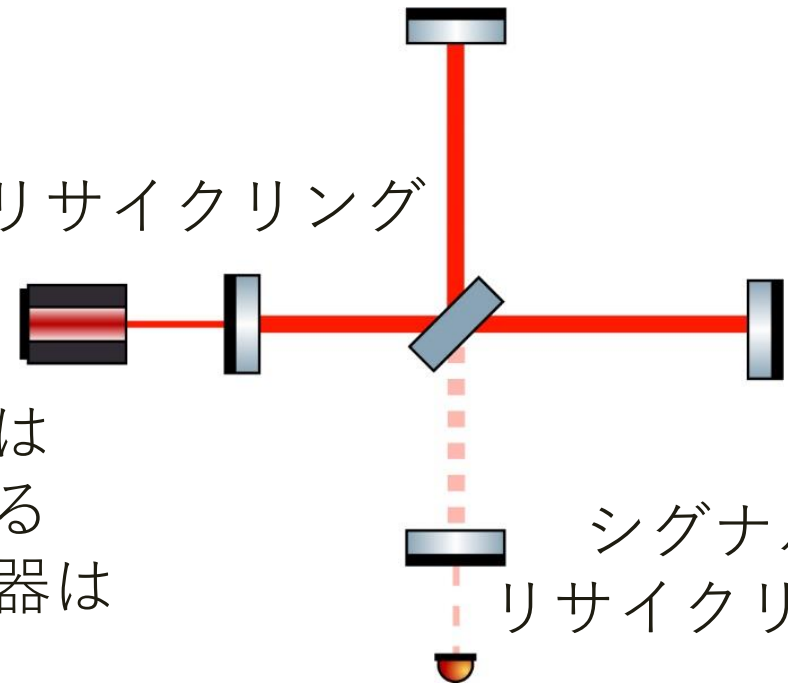


マイケルソン干渉計とリサイクリング



マイケルソン干渉計は
レーザー光と信号を分離する

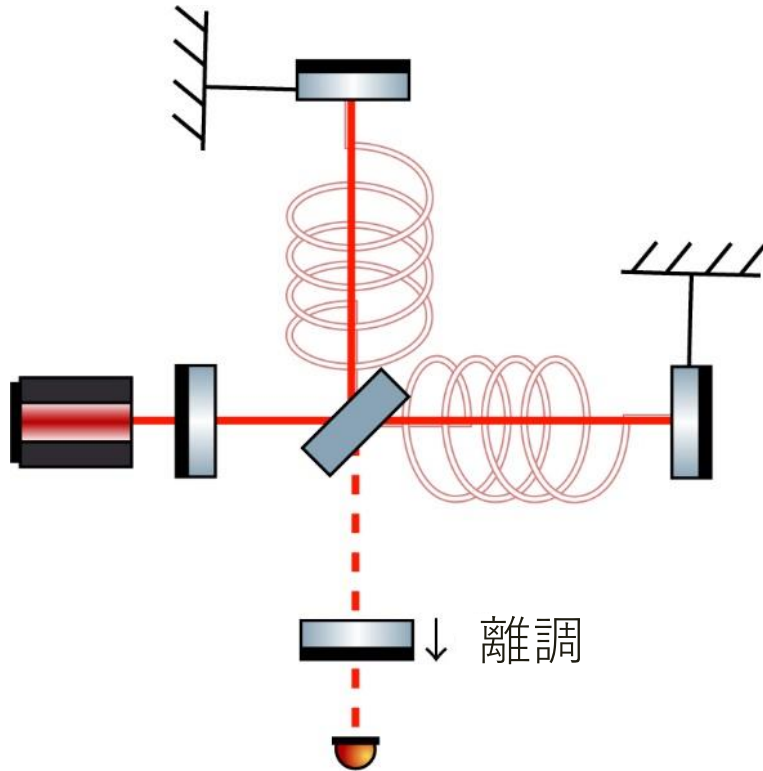
パワーリサイクリング



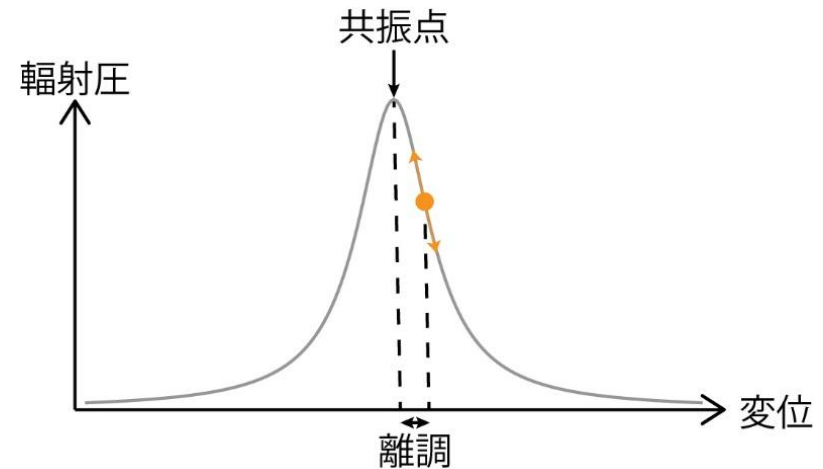
- パワーリサイクリング共振器は
キャリア光強度のみを増幅する
- シグナルリサイクリング共振器は
信号応答率のみを増幅する

重力波検出器と光ばね

シグナルリサイクリング共振器を共振状態からずらす（離調する）



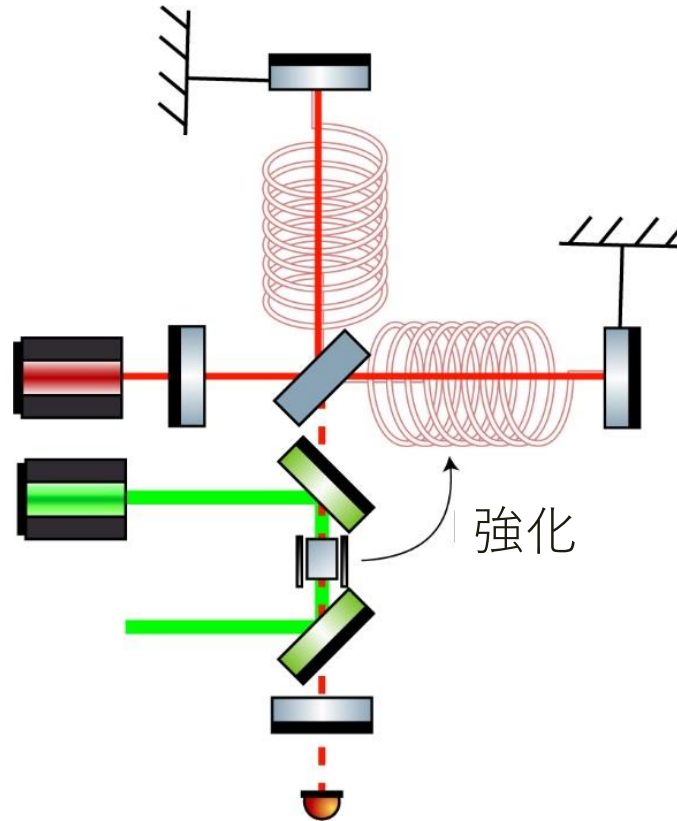
光子が鏡を押す力（輻射圧）が
変位に比例するようになる
→光によって鏡が束縛される



～数kmスケールを持つ光ばねの共振で重力波信号を増幅！
だが光ばねの硬さはレーザーパワーに依存し限界がある……
KAGRAの場合共振周波数は～100Hz程度

光ばねの強化

共振器内強度を変更せずに光ばねを強化する手法を提案



非線形光学効果で通常では達成できない信号増幅度を実現

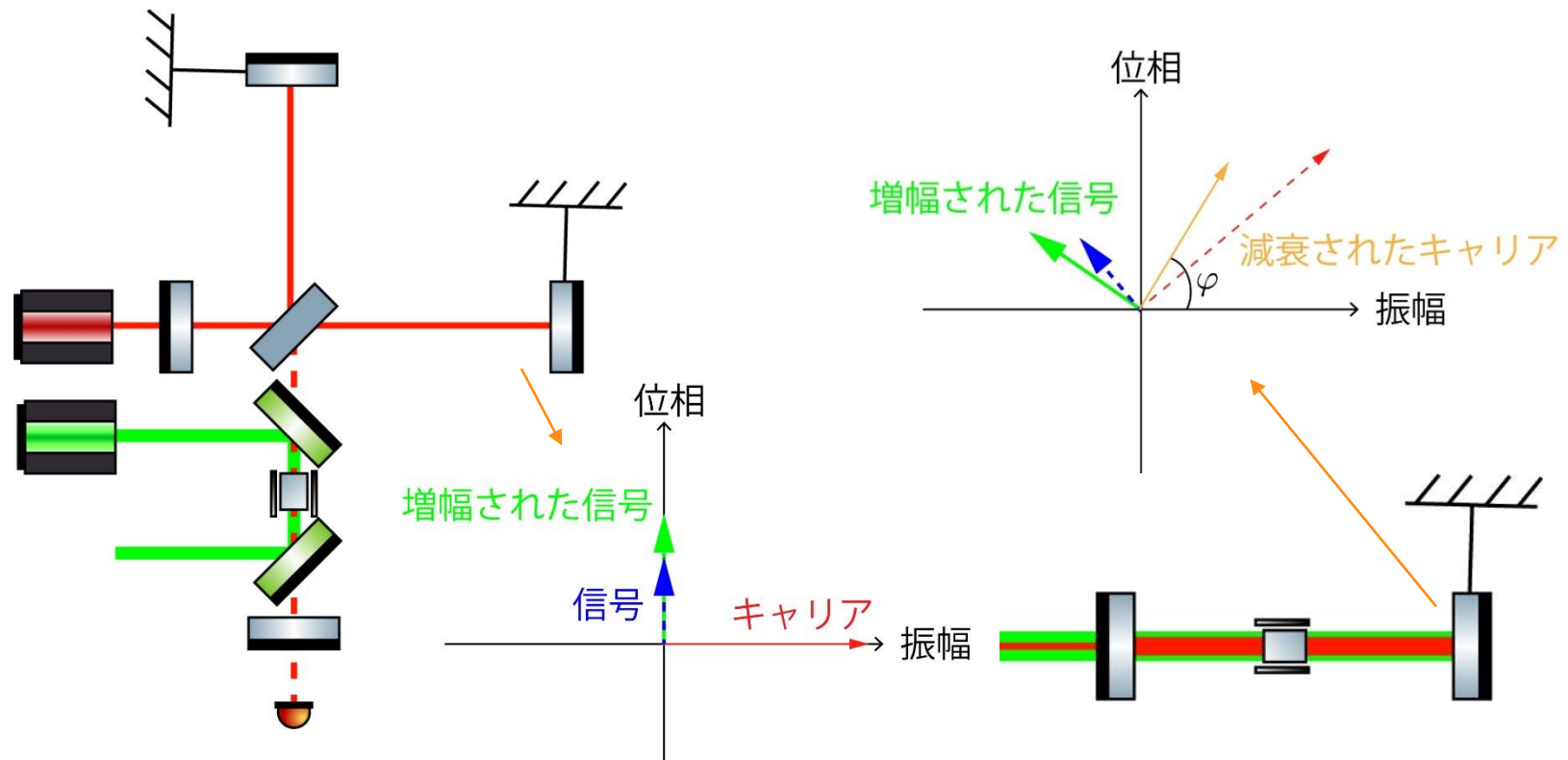
→光ばねの共振周波数も変更できる

共振周波数 $\sim$ kHzの光ばねで中性子星連星合体の重力波を増幅

実験の目標

光ばねが非線形光学効果で強化されることを
実験的に確認したい

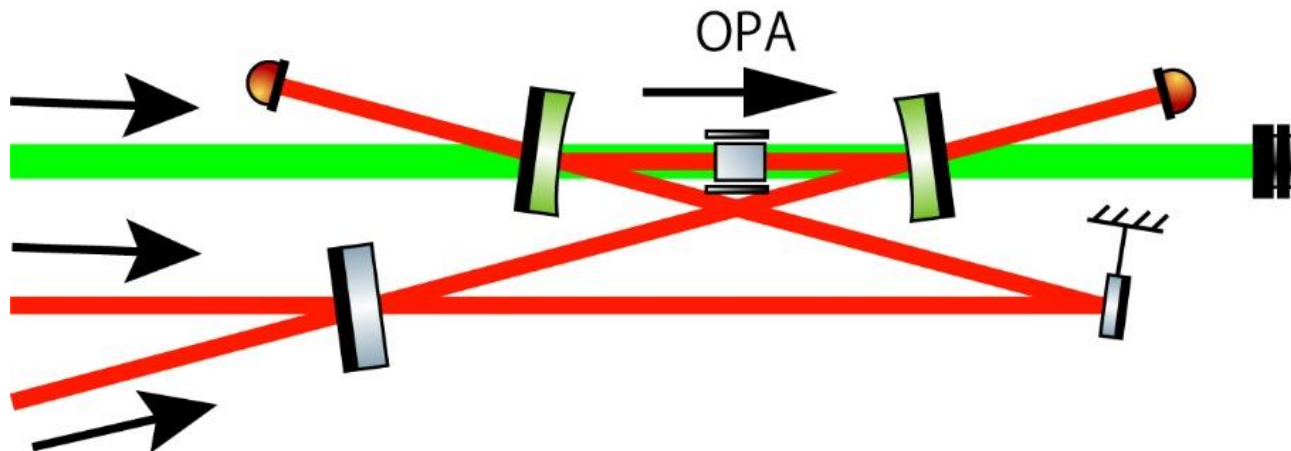
レーザー光・信号を増幅できるファブリー・ペロー共振器を用いる
→デュアルリサイクリングマイケルソン干渉計と同様の実験が可能？



スクイーズ角（キャリアとポンプの位相差）を正しく取れば等価な系

実験のセットアップ

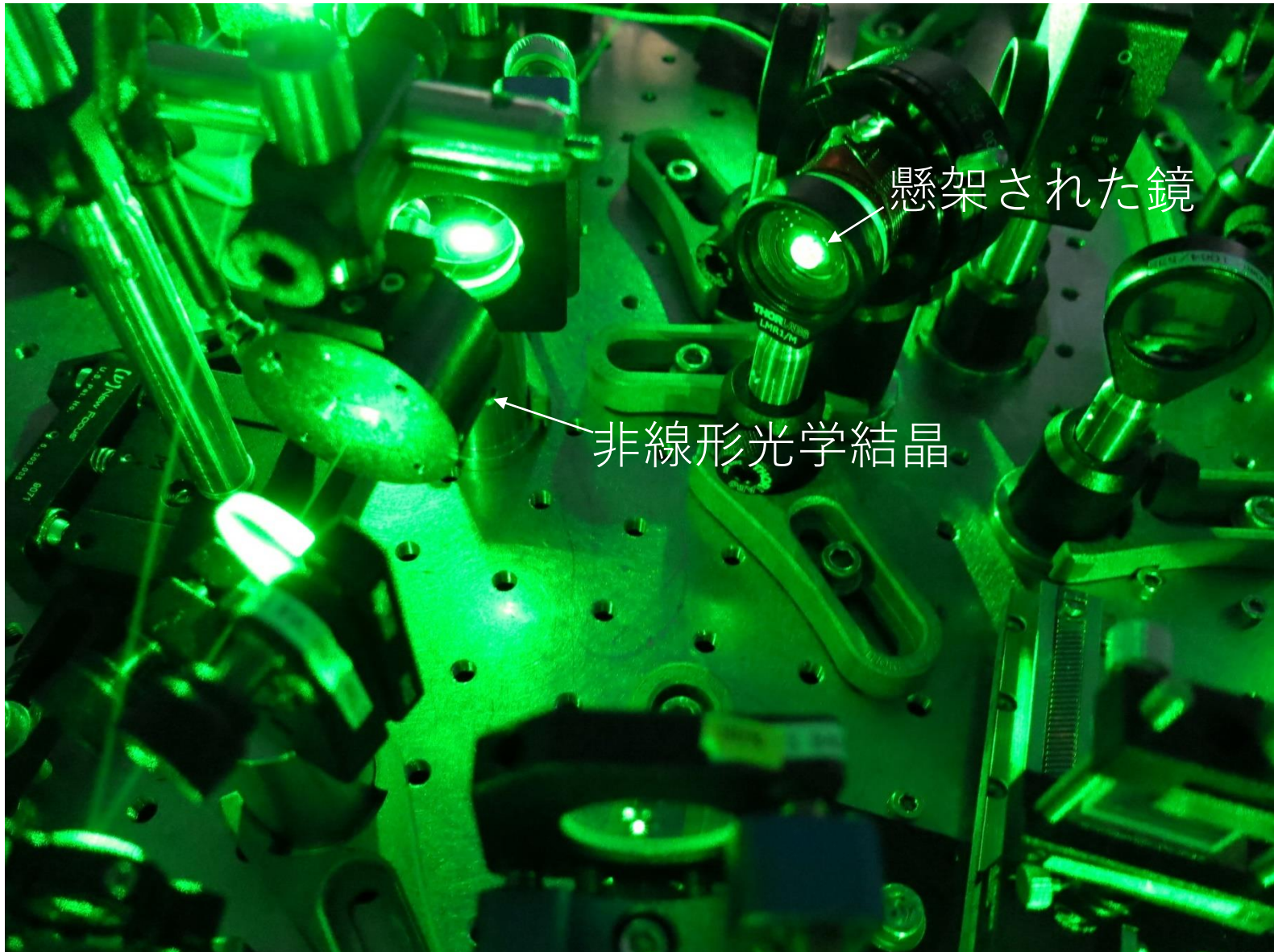
光パラメトリック増幅(OPA)で光ばねの強化を行う



532 nm(緑)レーザーで1064 nm(近赤外)レーザーを増幅
曲率付き鏡でビームを絞り高効率のOPAを行う

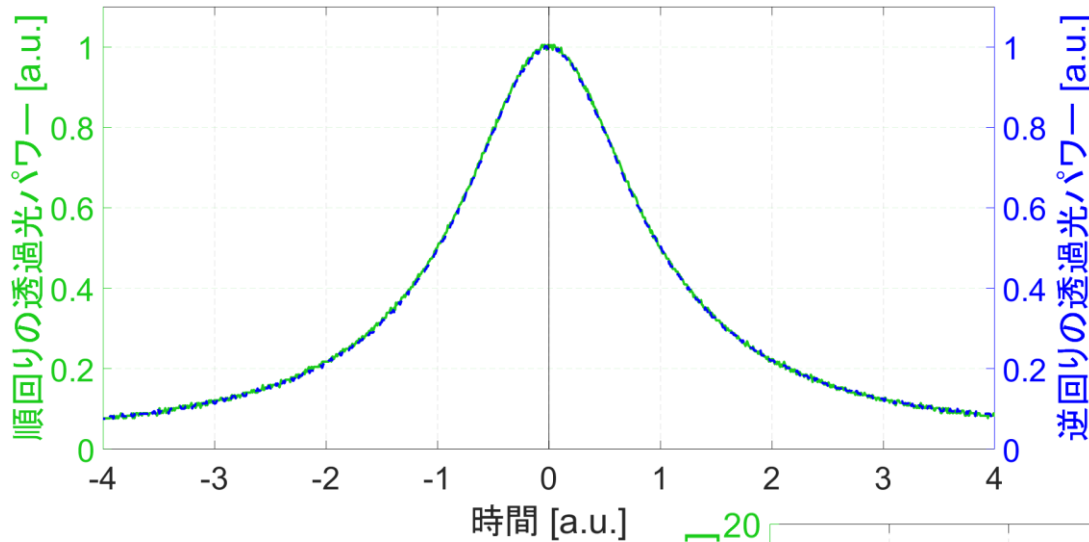
共振器には順回りと逆回りにレーザーを入射し
OPAされた光とOPAされていない光を測定して比較

実験の写真



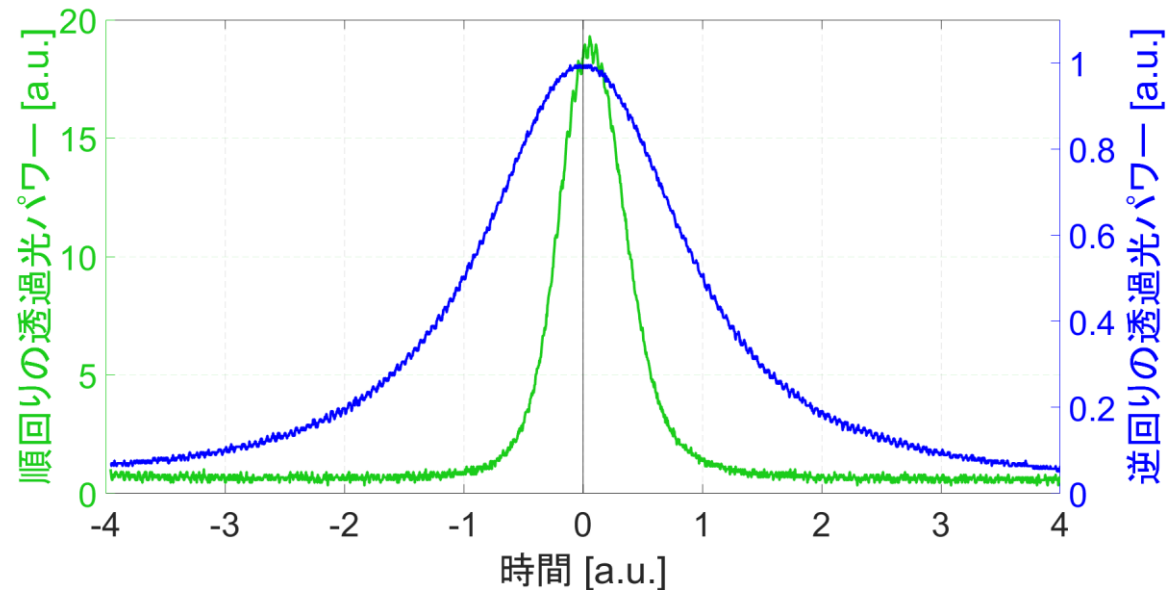
パワー増幅と信号増幅

スペクトルからOPAの影響を見積もる



OPAなしの場合：
順回りと逆回りが
非常によく一致

OPAありの場合：
順回りに0.6 mW入射
(低入射強度はOPAの
増幅リミットのため)
強度増幅：**19倍**
信号増幅：**1.43倍**



光ばねの硬さ推定

光ばねの共振周波数は以下のように表せる：

$$f_{\text{opt}} \sim \sqrt{P_{\text{in}} \mathcal{F}^2 / m}$$

P_{in} ：入射光強度 m ：鏡の質量

$\mathcal{F}$ ：フィネス（共振器内の往復回数）

OPAなしのいくつかのセットアップで光ばねを観測した

- $m = 210 \text{ mg}$, $\mathcal{F} \sim 400$, $P_{\text{in}} \sim 120 \text{ mW} \rightarrow f_{\text{opt}} \sim 100 \text{ Hz}$ (2018/8)
- $m = 210 \text{ mg}$, $\mathcal{F} \sim 1000$, $P_{\text{in}} \sim 140 \text{ mW} \rightarrow f_{\text{opt}} \sim 250 \text{ Hz}$ (2019/3)
- $m = 280 \text{ mg}$, $\mathcal{F} \sim 300$, $P_{\text{in}} \sim 570 \text{ mW} \rightarrow f_{\text{opt}} \sim 140 \text{ Hz}$ (2020/2)

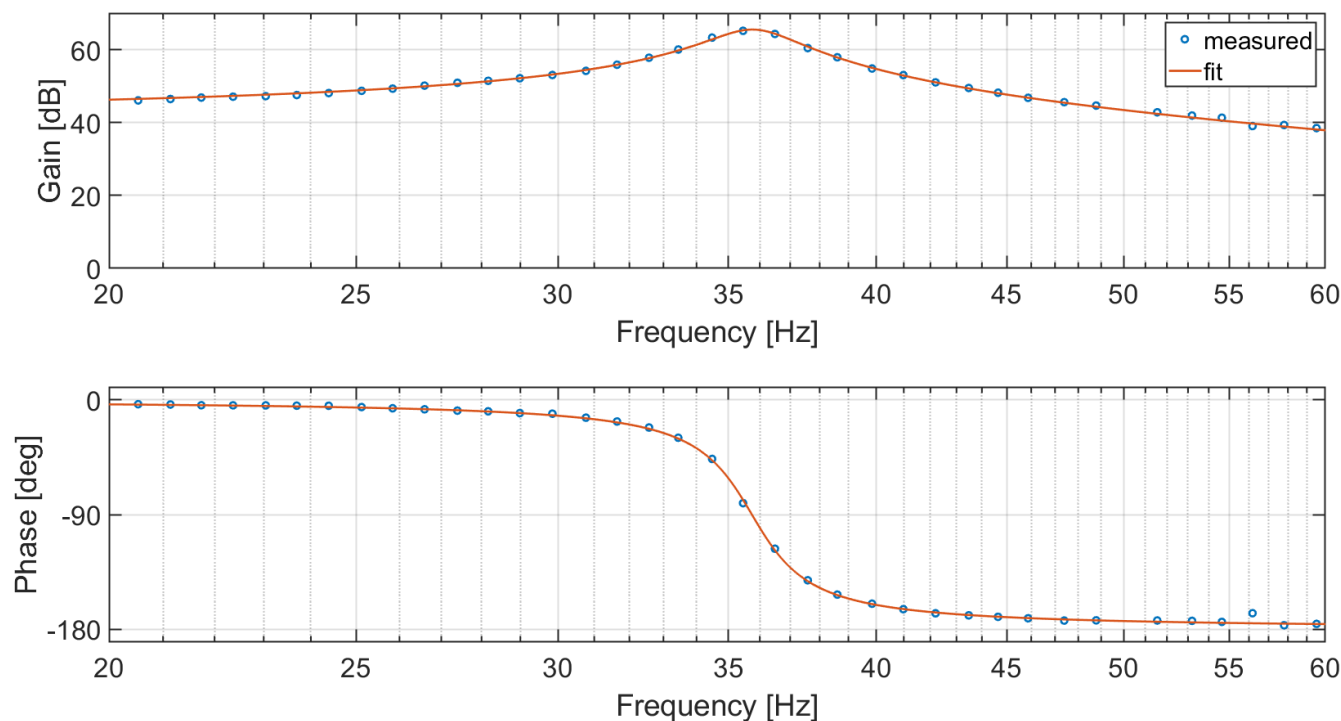
現在のセットアップ（OPAなし） $m = 280 \text{ mg}$, $\mathcal{F} \sim 100$, $P_{\text{in}} \sim 0.6 \text{ mW}$
（低フィネスは非線形光学結晶のクリップロスのため）

→光ばねの共振周波数の推定値（OPAなし）： $f_{\text{opt}} \sim 1.5 \text{ Hz}$

→OPAで強化された光ばねの推定値： $f'_{\text{opt}} \sim 1.5 \times \sqrt{27} \sim 7.7 \text{ Hz}$

BeCu サスペンション

ベリリウム銅製のサスペンションを用いた



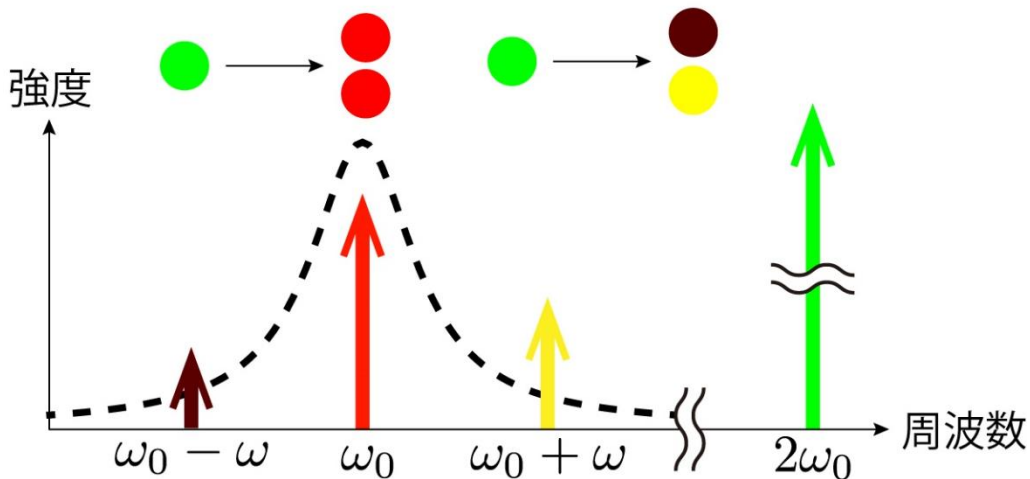
共振周波数は **35.74 ± 0.03 Hz**

→精密な測定が可能

ただし現在の光ばねよりも十分硬い

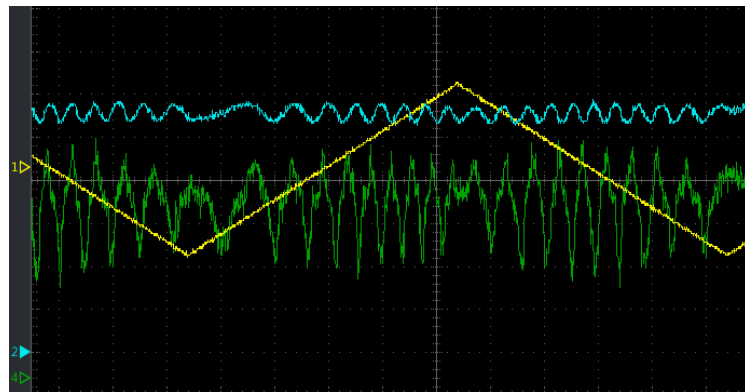
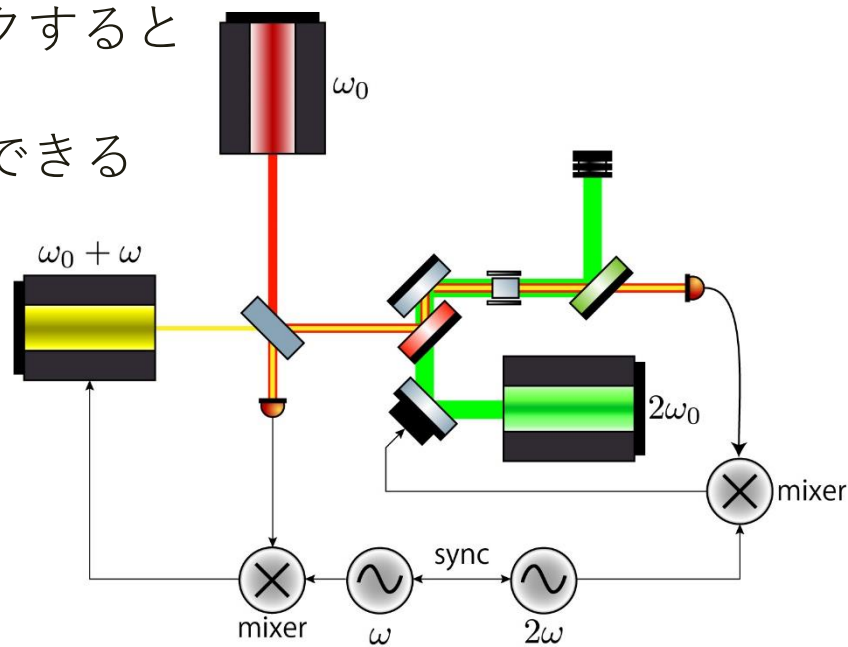
スクイーズ角の制御

順回りのOPAされた透過光をフィードバックすると増幅が最大となる点に制御できない
→サブキャリアを用いると線形信号を取得できる
光子に対するエネルギー保存に着目



別のサブキャリアがOPAにより生成
→差分周波数で復調すると線形信号になる

共振器があっても共振していれば
サブキャリア2つが等しく増幅されるので
実質的にシングルパスと同等



黄色：ポンプ光経路への入力 青：OPA後のPD
緑：復調後の信号

離調した共振器の場合

離調がある場合にスクィーズ角 θ の線形信号を取得できるかどうかは非自明
I-phase復調($\sin 2\omega$)とQ-phase復調($\cos 2\omega$)の計算結果は

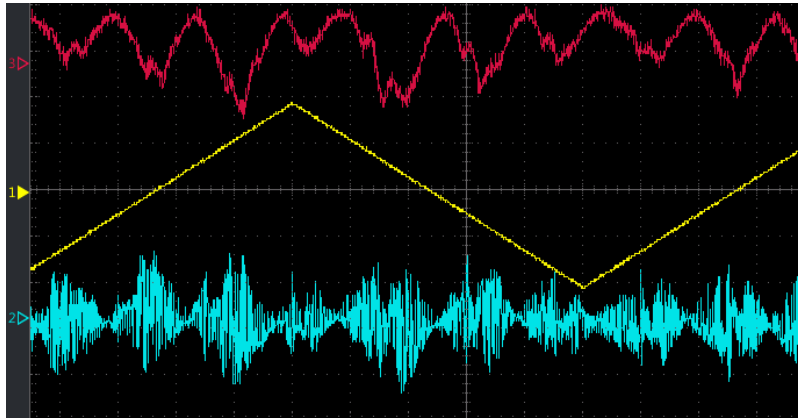
$$P^I = \Lambda_0 [\Lambda_1 \cos 2\theta + \Lambda_2 \sin 2\theta]$$

$$P^Q = \Lambda_0 [\Lambda_2 \cos 2\theta + \Lambda_1 \sin 2\theta]$$

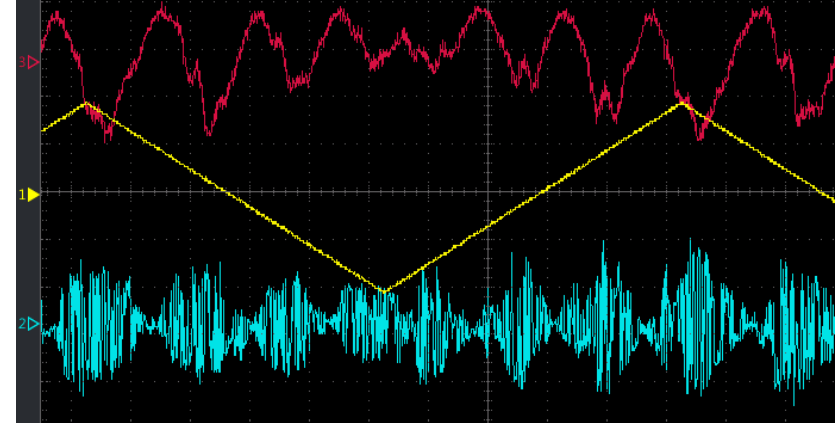
($\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2$ は共振器の線幅・離調角・サブキャリア周波数・スクィーズ率の関数)

共振幅程度の離調をした状態での復調後の信号を確認

復調初期位相0deg



復調初期位相90deg



黄色：ポンプ光経路への入力 青：ハイパスされた透過光 赤：復調後の信号

→初期位相による違いは見られなかった.....

まとめ

- 非線形光学効果で光ばねを強化できる
- ファブリー・ペロー共振器を用いても重力波検出器と同等の原理実証実験ができる
- OPAにより27倍程度光ばね定数を強化したあと数倍強化できれば観測できる見込み
- 光ばね定数 $\gtrsim$ 機械ばね定数を達成するために
 - スクイーズ角の制御方法を変更
→ レーザー位相制御に問題あり？
 - 532nmに対する共振器を構成する
 - より柔らかいサスペンションを用いる

