

レーザー干渉計と 量子センシング

道村唯太

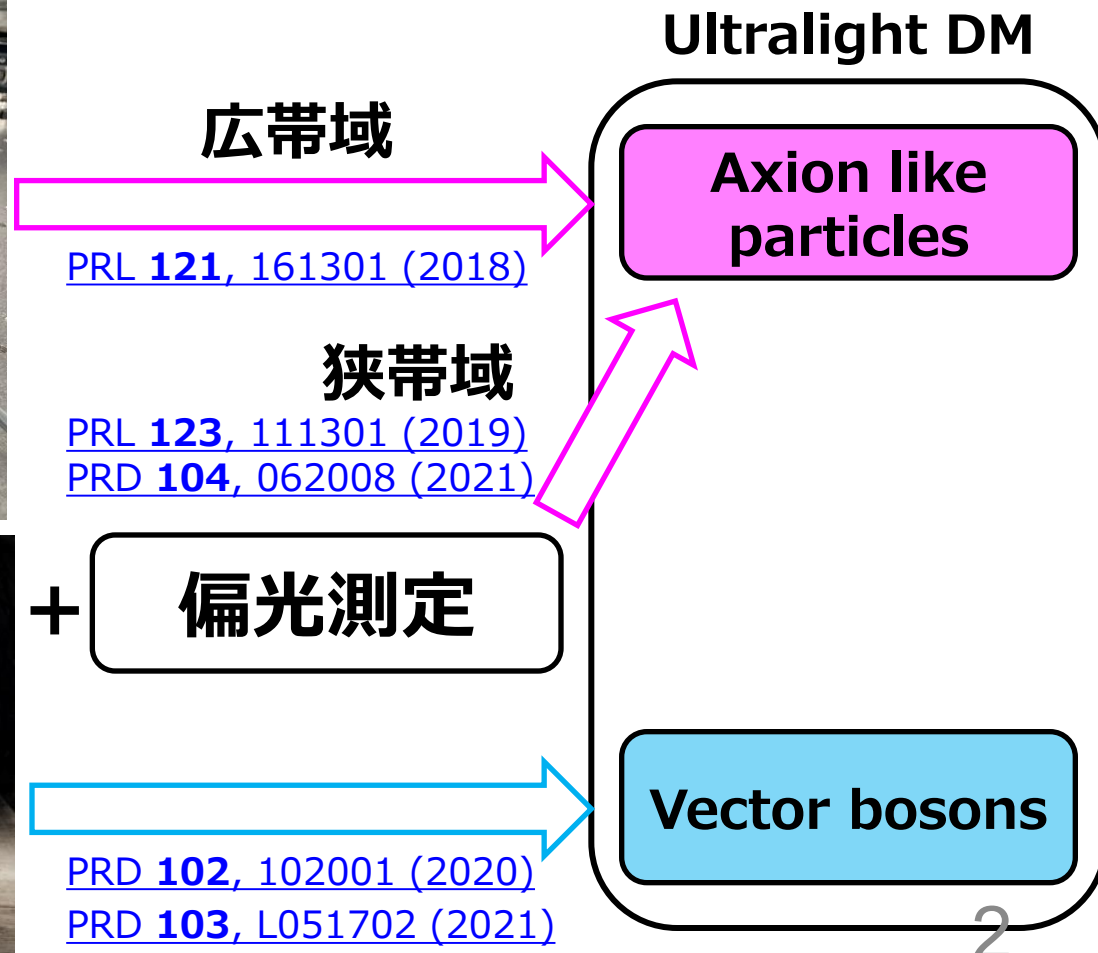
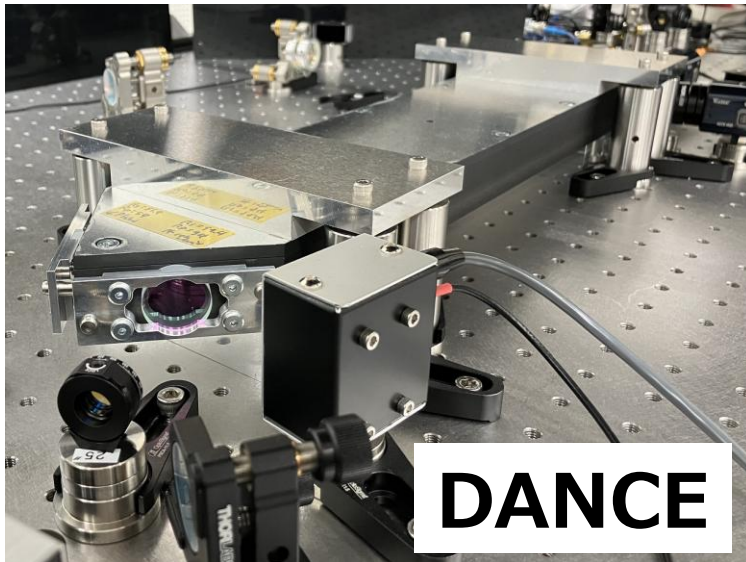
東京大学 大学院理学系研究科附属

ビッグバン宇宙国際研究センター

michimura@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

やっていること

- テーブルトップ実験(DANCE)と重力波望遠鏡を用いた、アクシオン(ALPs)とベクトルボゾン探索



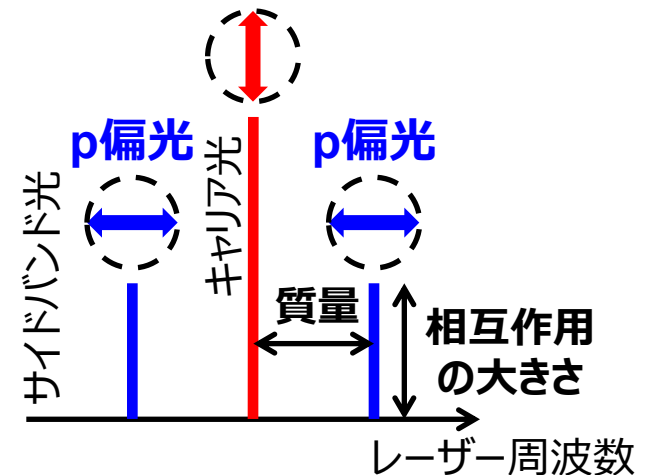
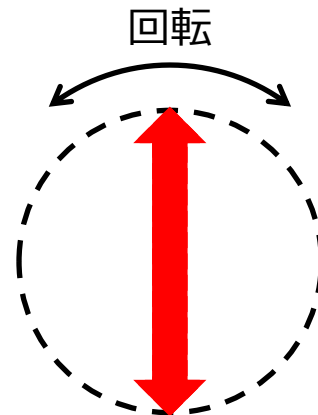
アクシオンと光子の相互作用

- 相互作用により右円偏光と左円偏光に位相速度差

$$c_{L/R} = \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(m_a t + \delta_\tau)}$$

相互作用係数 $g_{a\gamma}$
 光の波数 k
 アクシオン場の振幅 a_0
 アクシオン質量 m_a
 アクシオン質量に対応した周波数 $m_a t + \delta_\tau$
 s偏光

- 直線偏光の偏光面が周期的に回転
s偏光の場合、p偏光成分が生じる



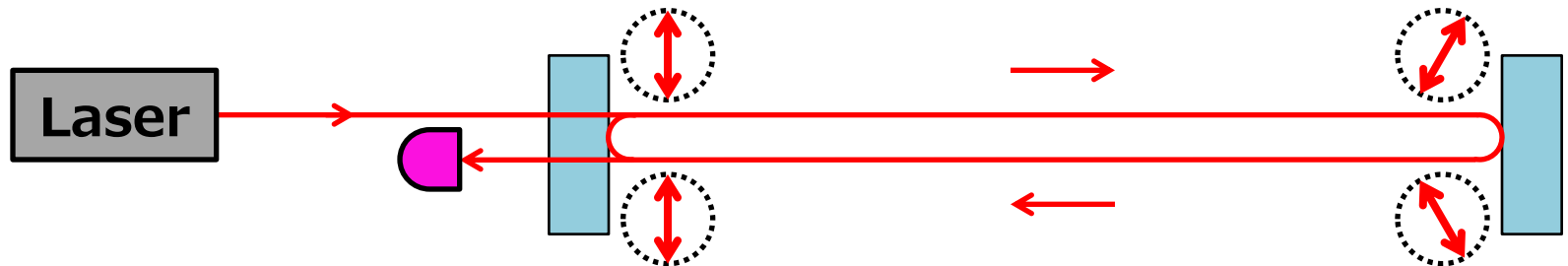
- 重力波(とスカラー、ベクトル、テンソル場)の場合はキャリアと同じ偏光の信号サイドバンド、アクシオンの場合は直交する偏光の信号サイドバンドになるだけで、あと基本的技術は同じ！

光共振器を用いた信号増幅

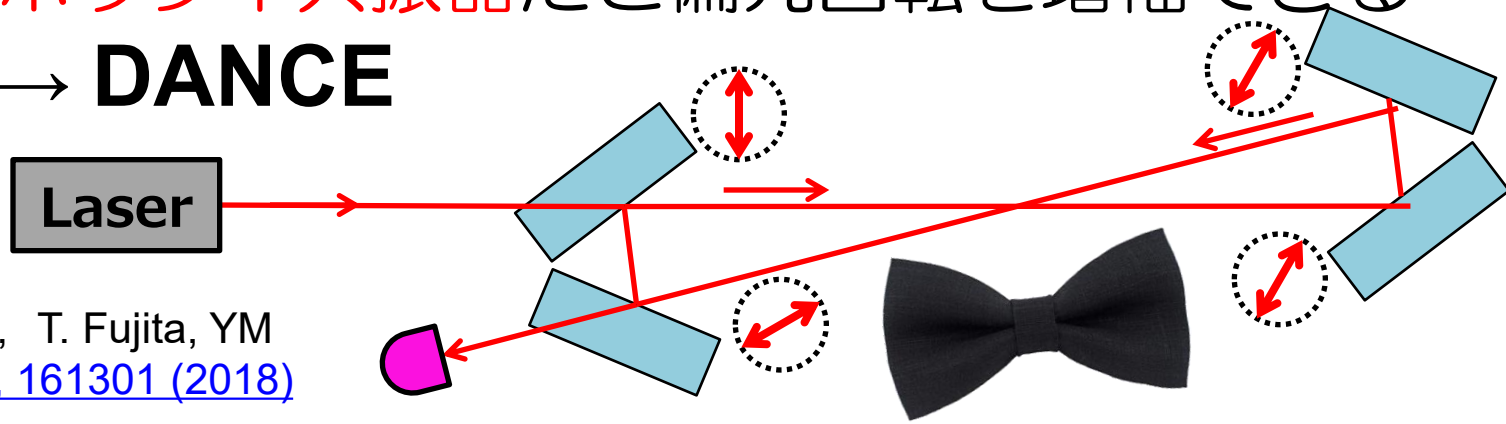
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が反転してしまう

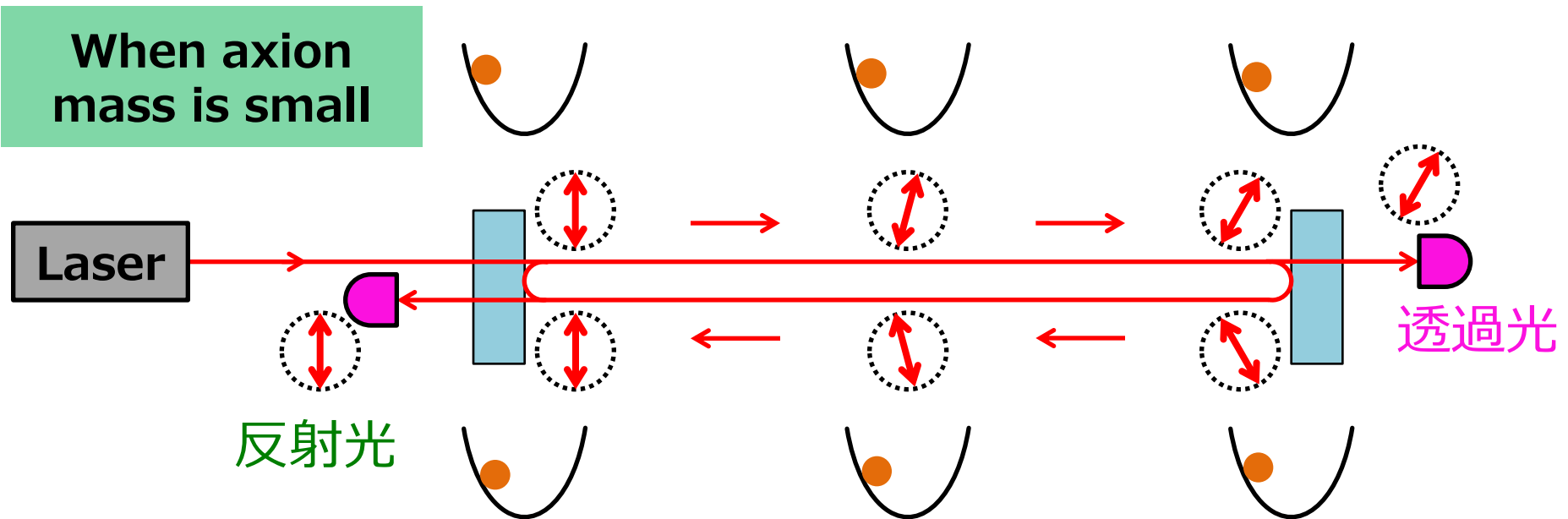


- ボウタイ共振器だと偏光回転を増幅できる
→ **DANCE**



線形光共振器による探索

- 鏡での反射により偏光が反転してしまうため、アクシオンの振動周期が光の往復時間より長い場合は反射光での探索は困難
- 長基線長であれば透過光での探索は可能



線形光共振器による探索

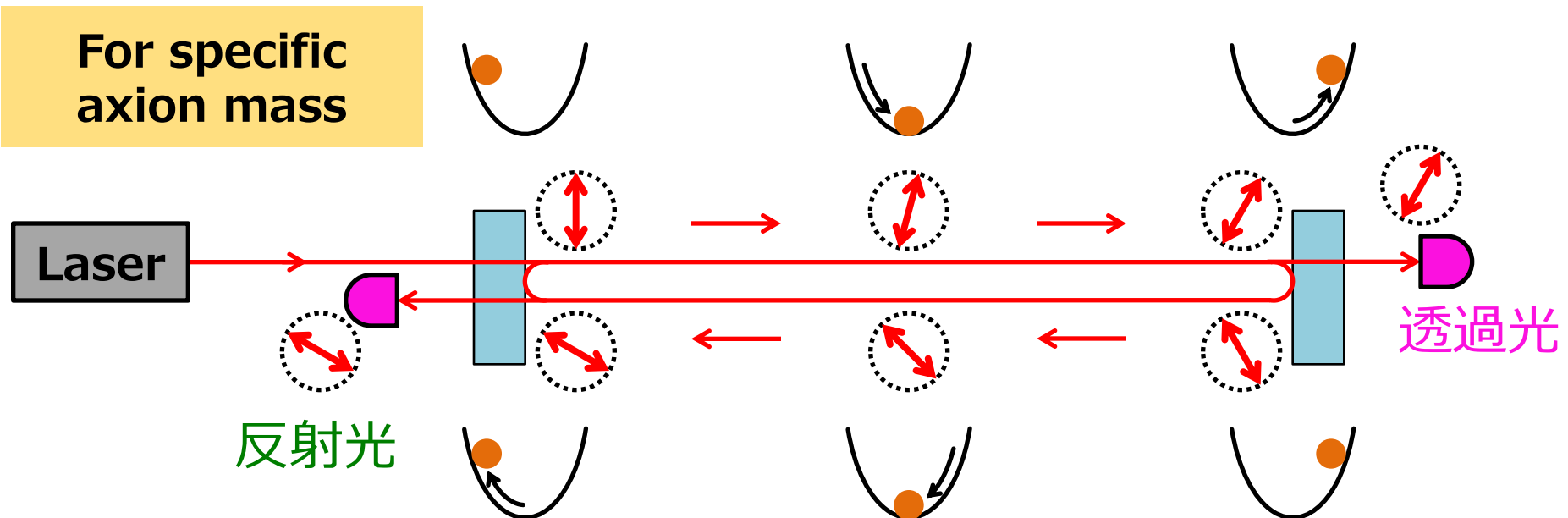
- 光の往復時間がアキソン振動周期の奇数倍のときは、鏡による偏光の反転を利用し、反射光での信号増幅が可能
- 重力波望遠鏡の腕共振器に使える

K. Nagano, T. Fujita, YM, I. Obata

[PRL **123**, 111301 \(2019\)](#)

K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki,
T. Fujita, YM, I. Obata

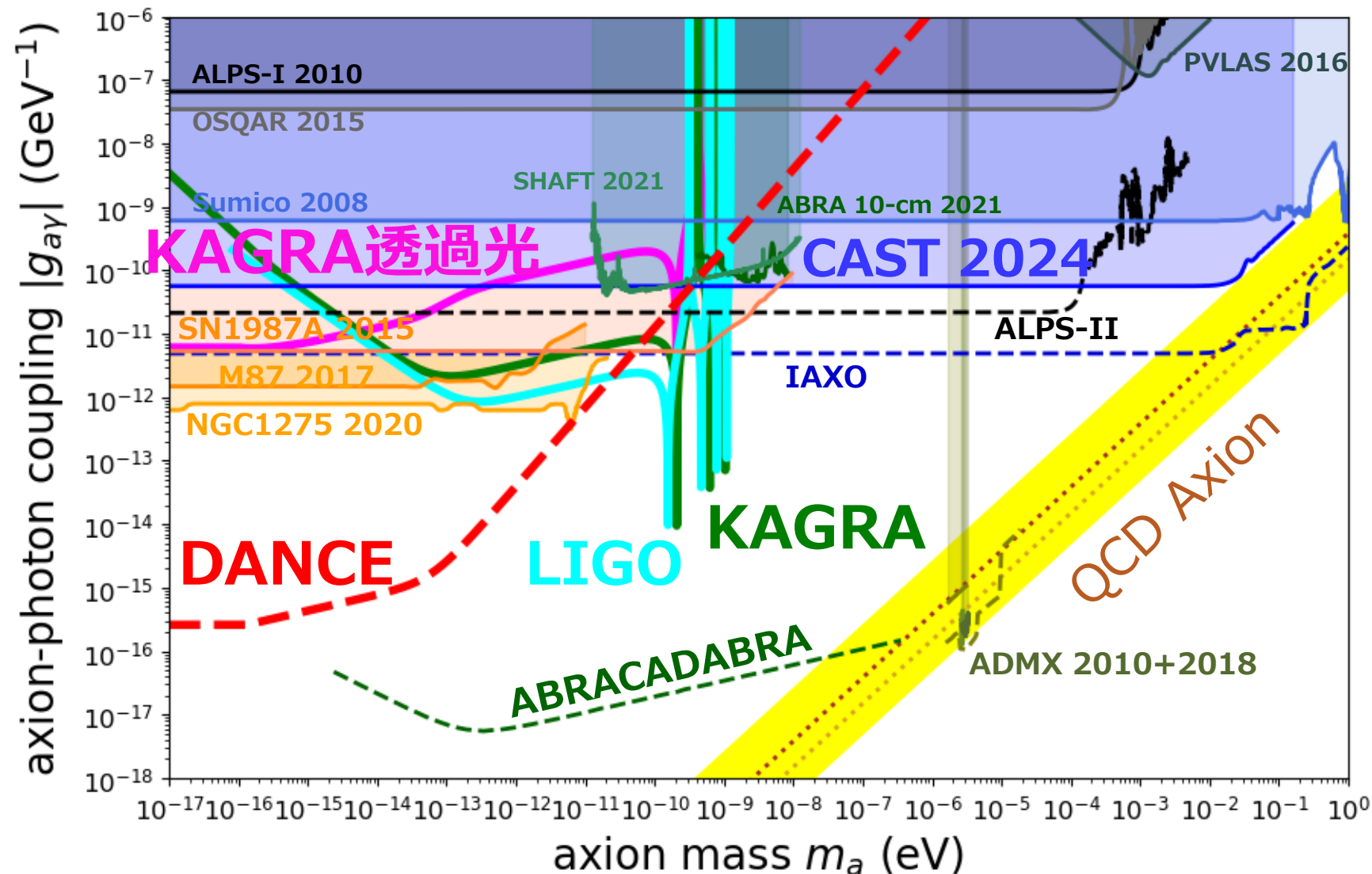
[PRD **104**, 062008 \(2021\)](#)



到達感度

- CASTを超える感度が可能

* ショットノイズの場合、1年間の観測を仮定

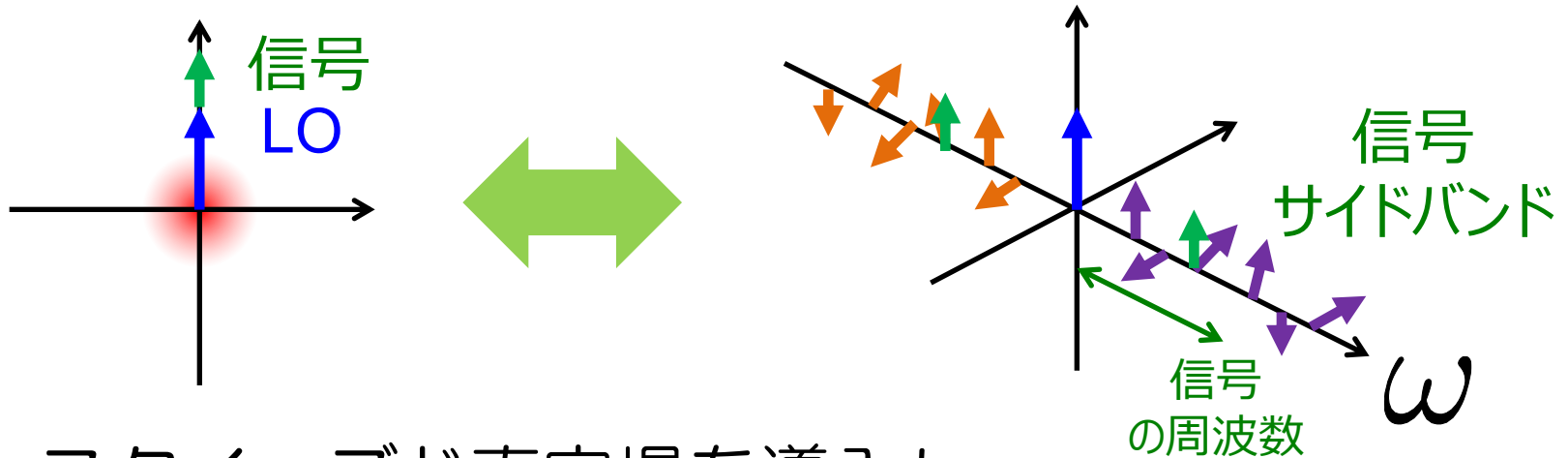


ショットノイズ限界を超える方法

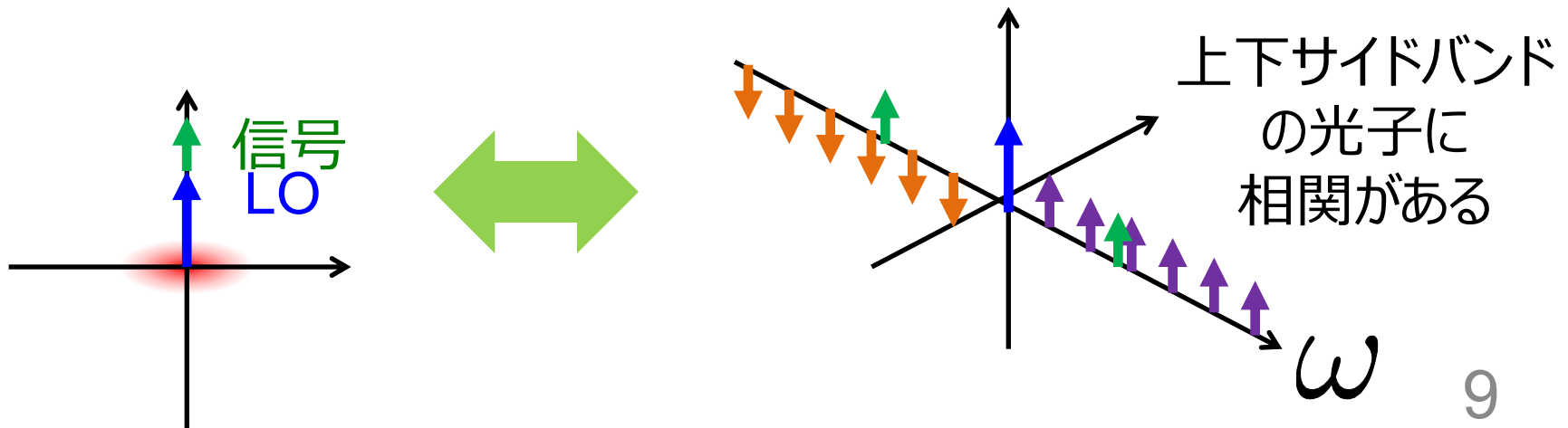
- スクイーズド真空場の導入(C01-C04全てに使えるはず)
- 光子計数法の利用(単一光子検出器; C03との連携?)
- なお、これらでは標準量子限界(SQL)を超えられるわけではない
 - そもそもアクシオン検出の標準量子限界とは?
 - 偏光測定 Back-action はなにか?
- SQL を超える方法としては、例えば原子(Rbなど)を使う方法がある(C01との連携?)
 - Ma+, [PRA 92, 023807 \(2015\)](#)
 - Zhou+, [PRD 92, 082002 \(2015\)](#)
 - Khalili & Polzik, [PRL 121, 031101 \(2018\)](#)

スクイージング

- ショットノイズの原因は真空場ゆらぎ

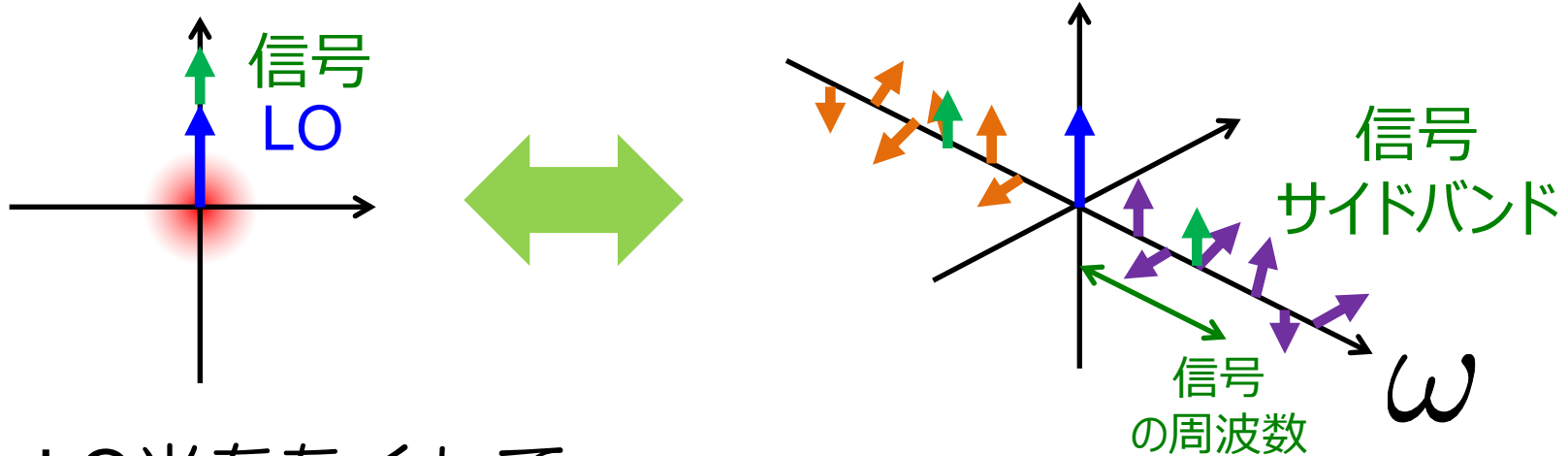


- スクイズド真空場を導入し、ゆらぎを圧搾することで雑音を低減



光子計数(Photon Counting)

- ショットノイズの原因はLO光と真空場の干渉

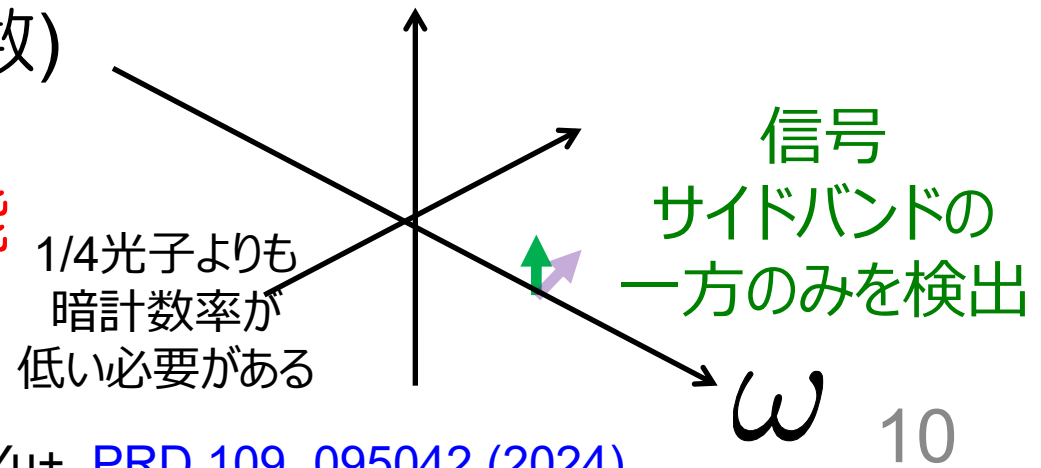


- LO光をなくして
変位信号サイドバンド
を直接検出(光子計数)
すれば、

散射雑音は回避可能

- ただし、信号は
変位の2次になる

光学的にフィルタ



1/4光子よりも
暗計数率が
低い必要がある

おまけ

レーザー光と振幅・位相

- 電場は下記のように書ける

$$E = E_0 e^{i(\omega t - \phi)}$$

電場振幅

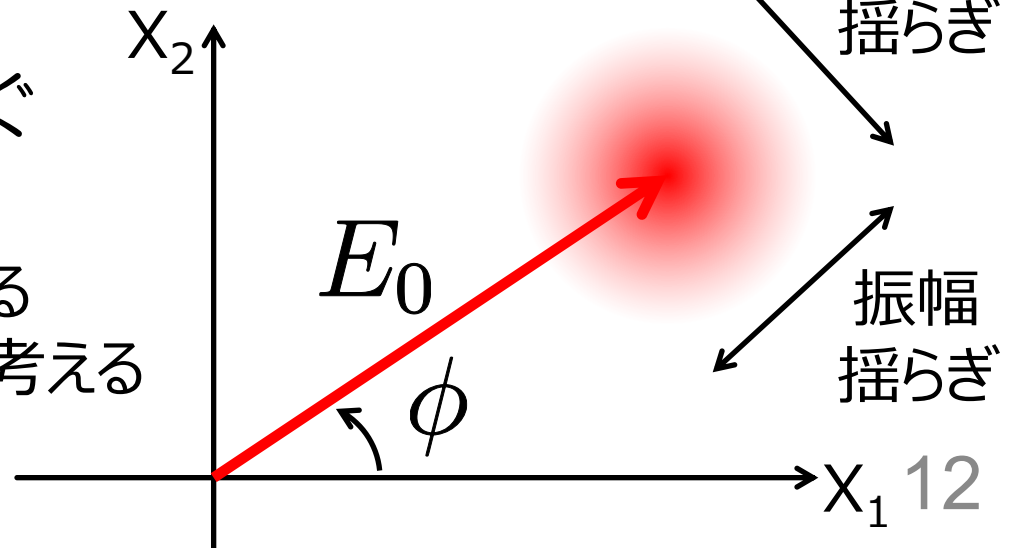
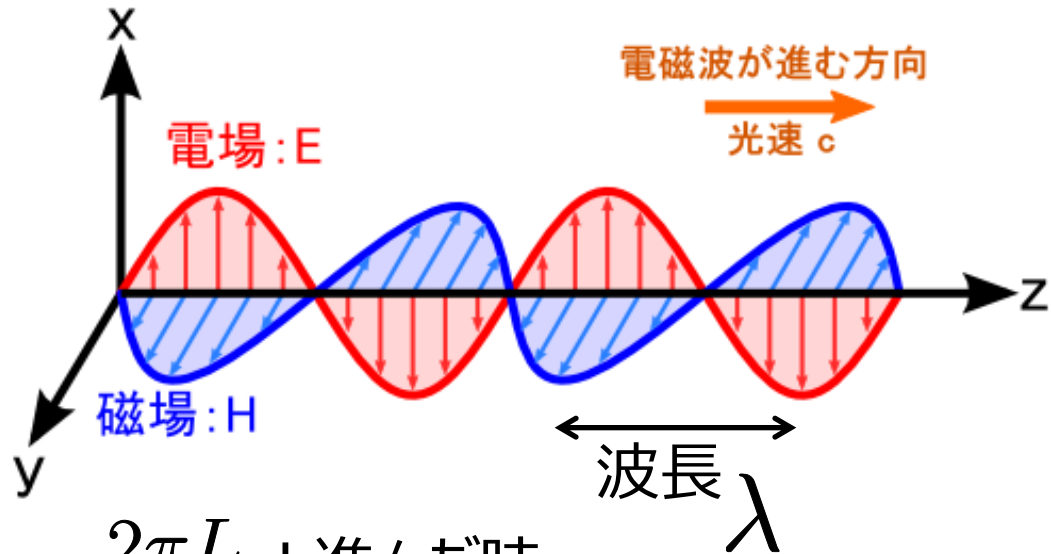
レーザーの位相
角周波数

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad L \text{ 進んだ時の位相}$$

- 振幅も位相も揺らぐ
→ Ball on stick 描像

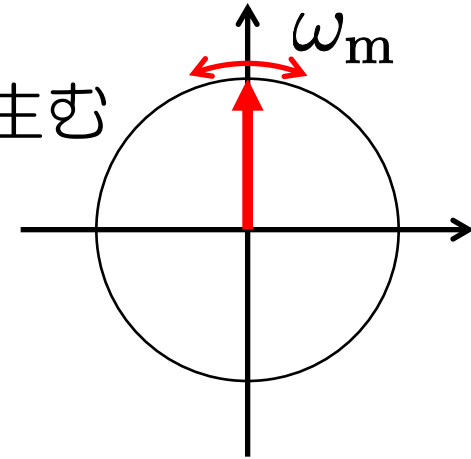
ωt で回転する
位相空間で考える



位相変調とサイドバンド

- 位相変調は2つのサイドバンドで近似的に表すことができる
- 重力波は位相変調サイドバンドを生む

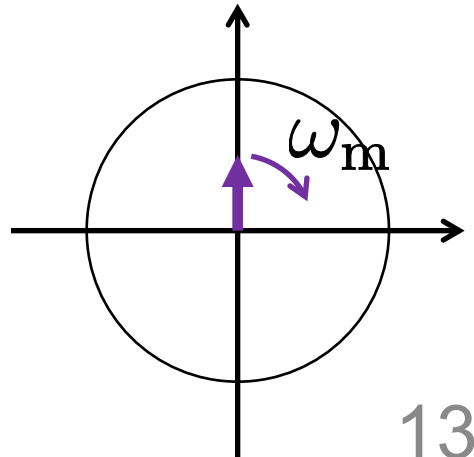
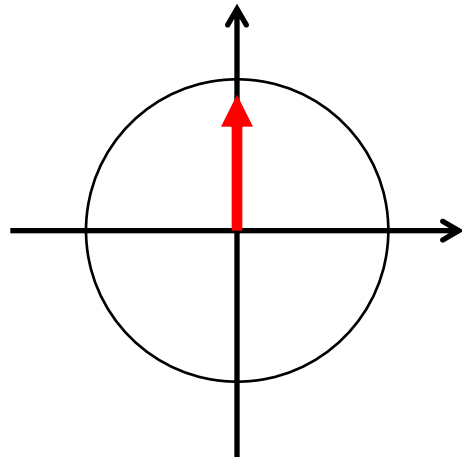
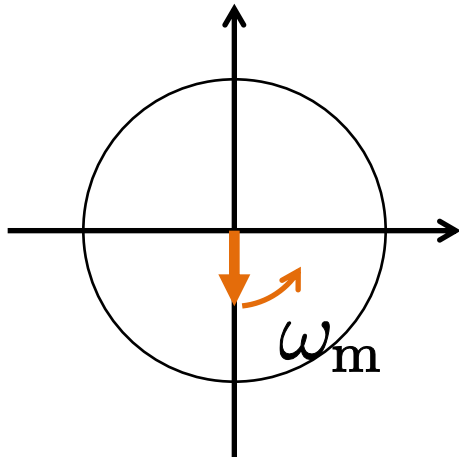
$$E e^{i(\omega t + \beta \sin \omega_m t)}$$



ベッセル関数による展開(近似)



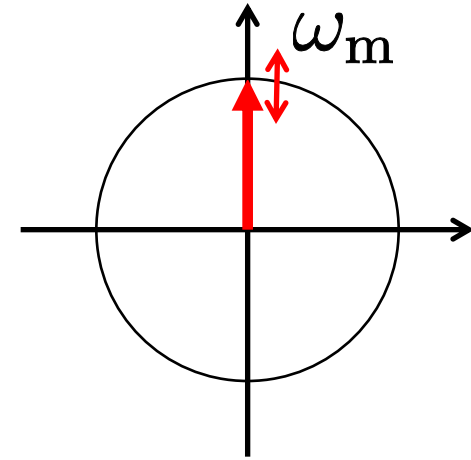
$$E [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \omega_m)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega - \omega_m)t}]$$



強度変調とサイドバンド

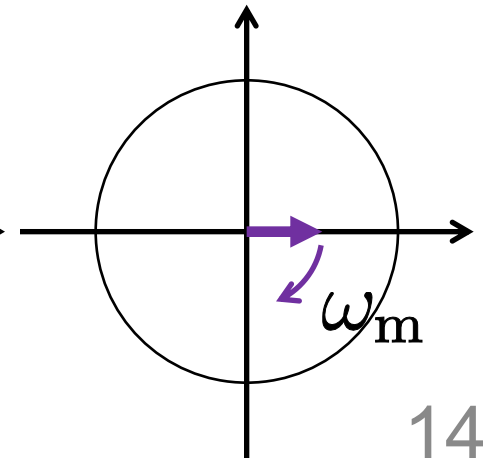
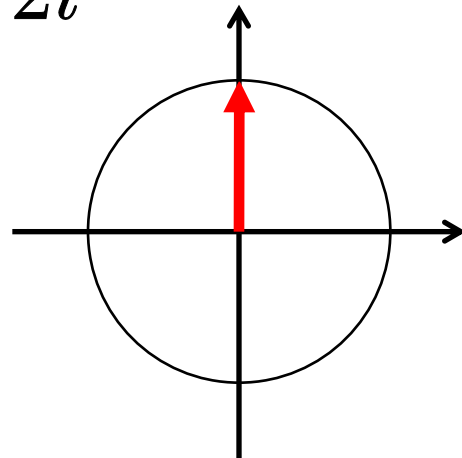
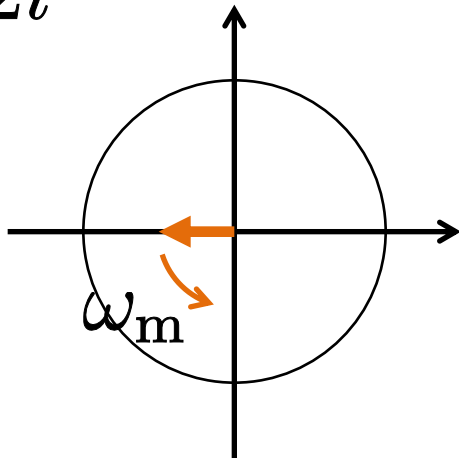
- 強度変調は2つのサイドバンドで表すことができる
- 強度変調のみ光検出器で検出可能

$$E(1 + \beta \sin \omega_m t)e^{i\omega t}$$



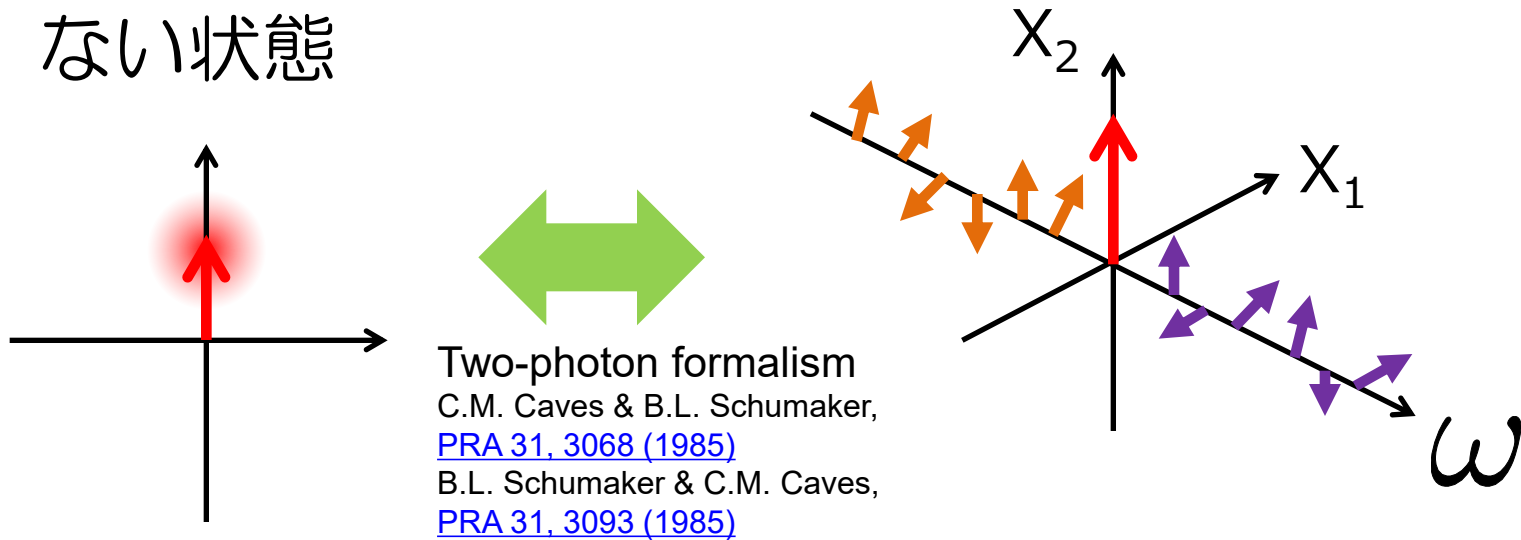
変形

$$E\left[e^{i\omega t} + \frac{\beta}{2i}e^{i(\omega+\omega_m)t} - \frac{\beta}{2i}e^{i(\omega-\omega_m)t}\right]$$

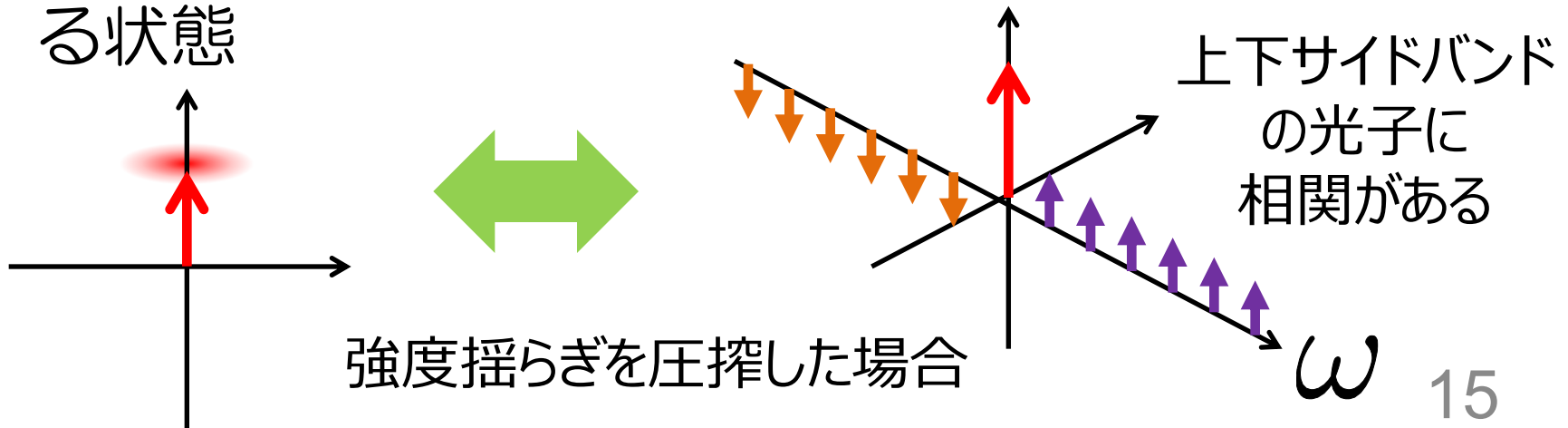


スクイーズド光

- コヒーレント光はサイドバンドの位相が揃っていない状態

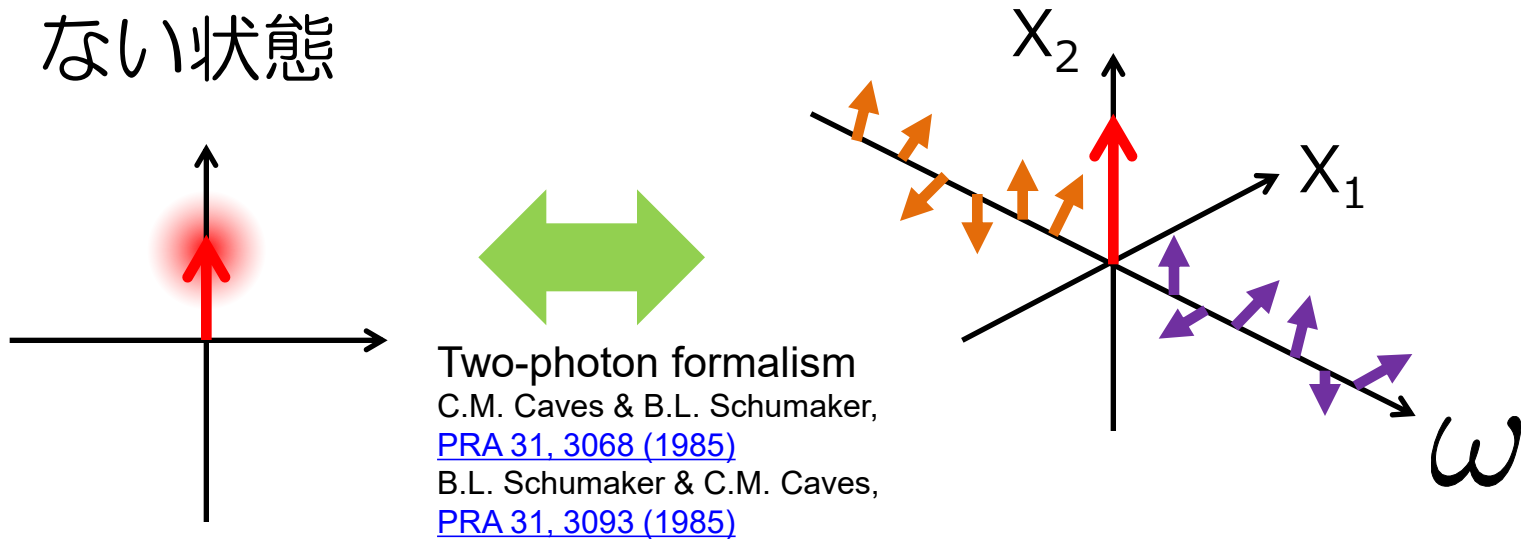


- スクイーズド光はサイドバンドの位相が揃っている状態

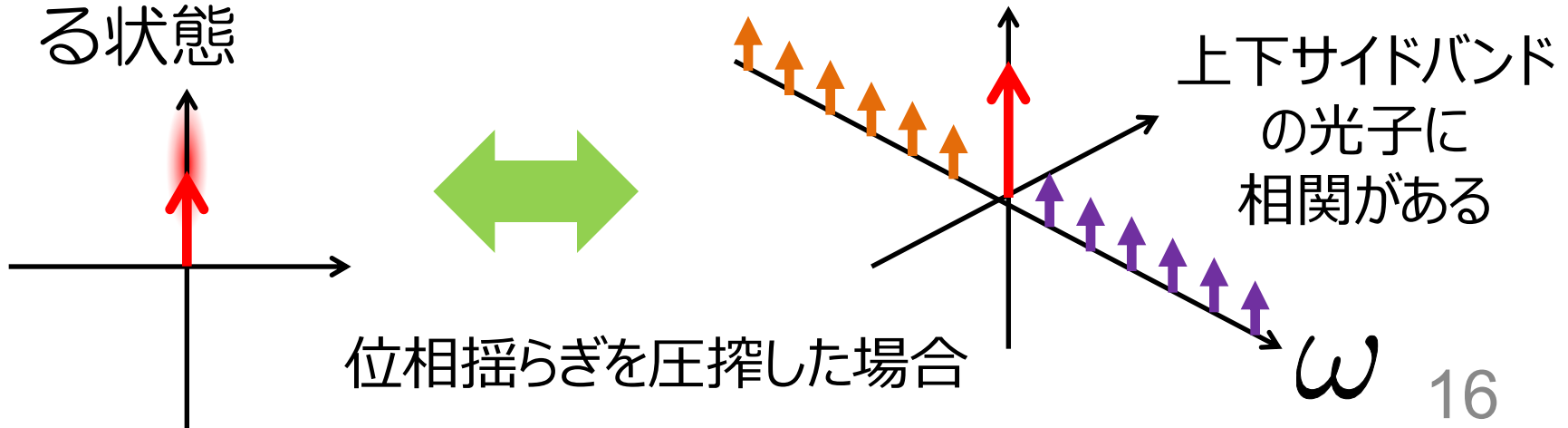


スクイーズド光

- コヒーレント光はサイドバンドの位相が揃っていない状態

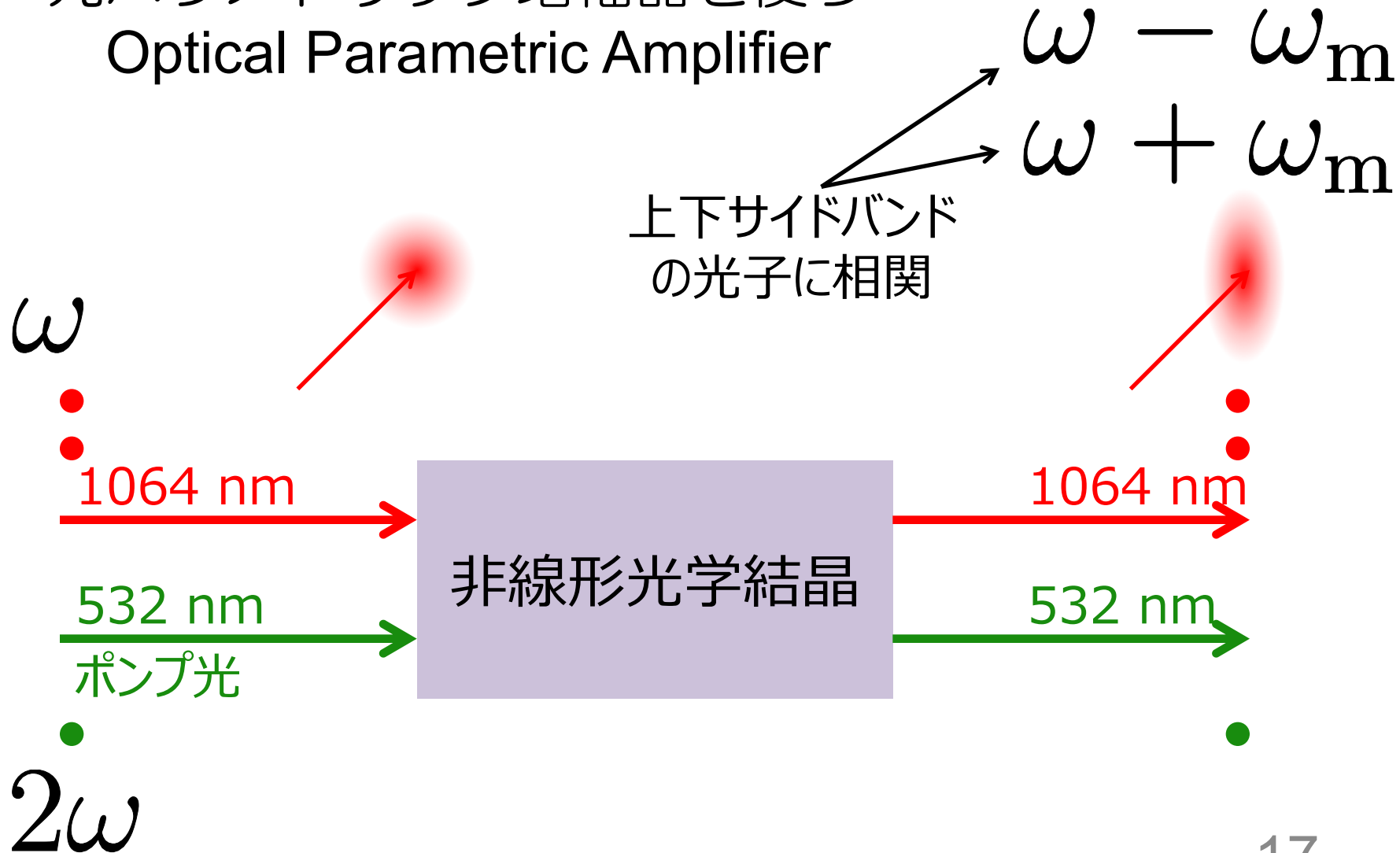


- スクイーズド光はサイドバンドの位相が揃っている状態



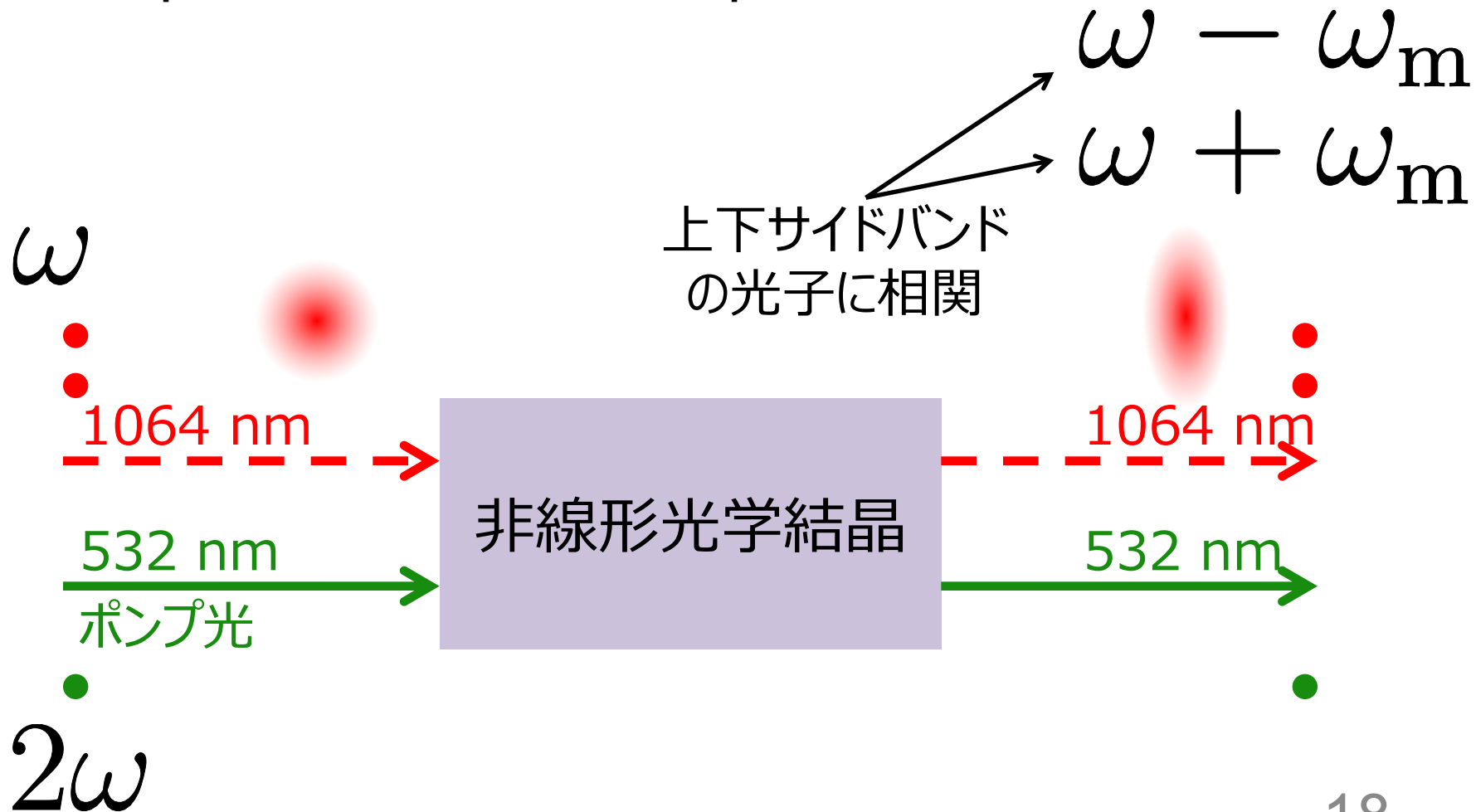
スクイーズド光の生成方法

- 光パラメトリック増幅器を使う
Optical Parametric Amplifier



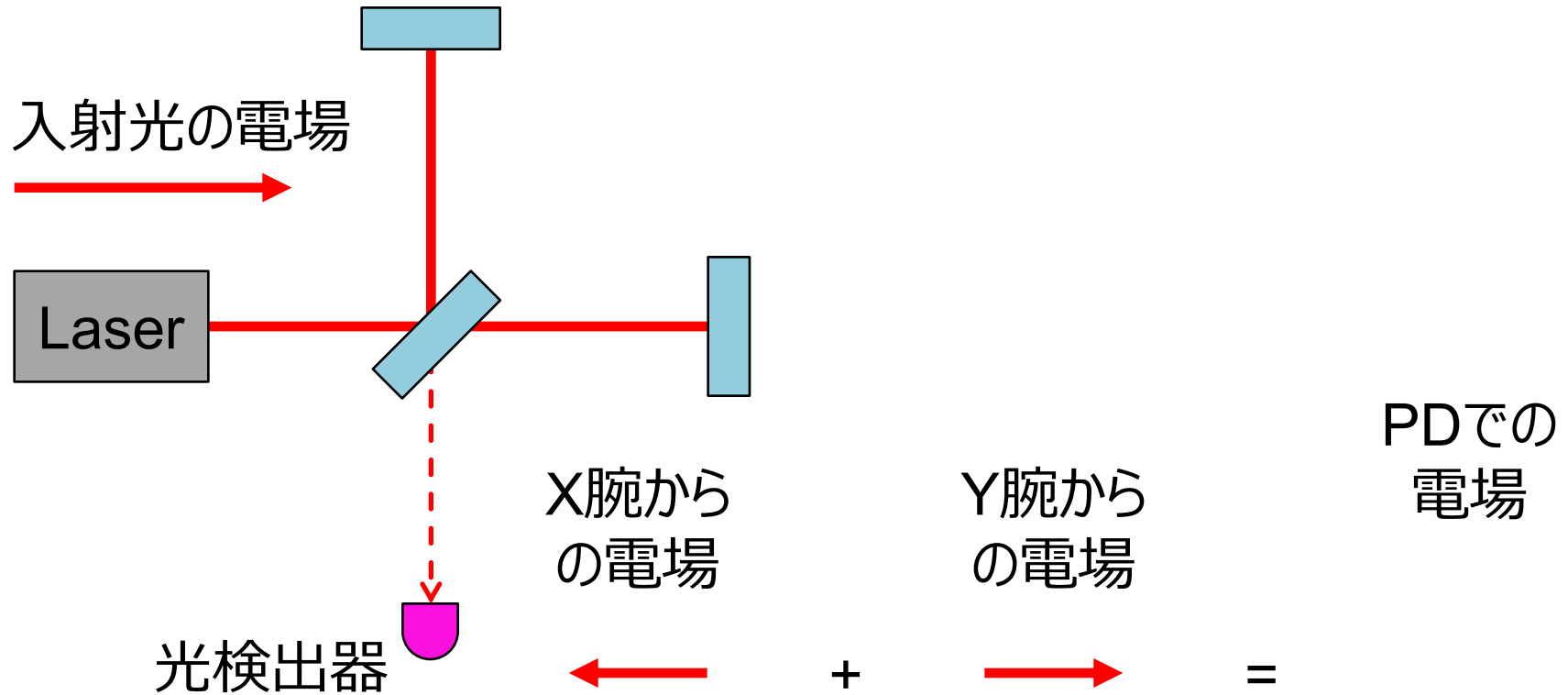
スクイーズド真空場の生成方法

- 光パラメトリック増幅器を使う
Optical Parametric Amplifier



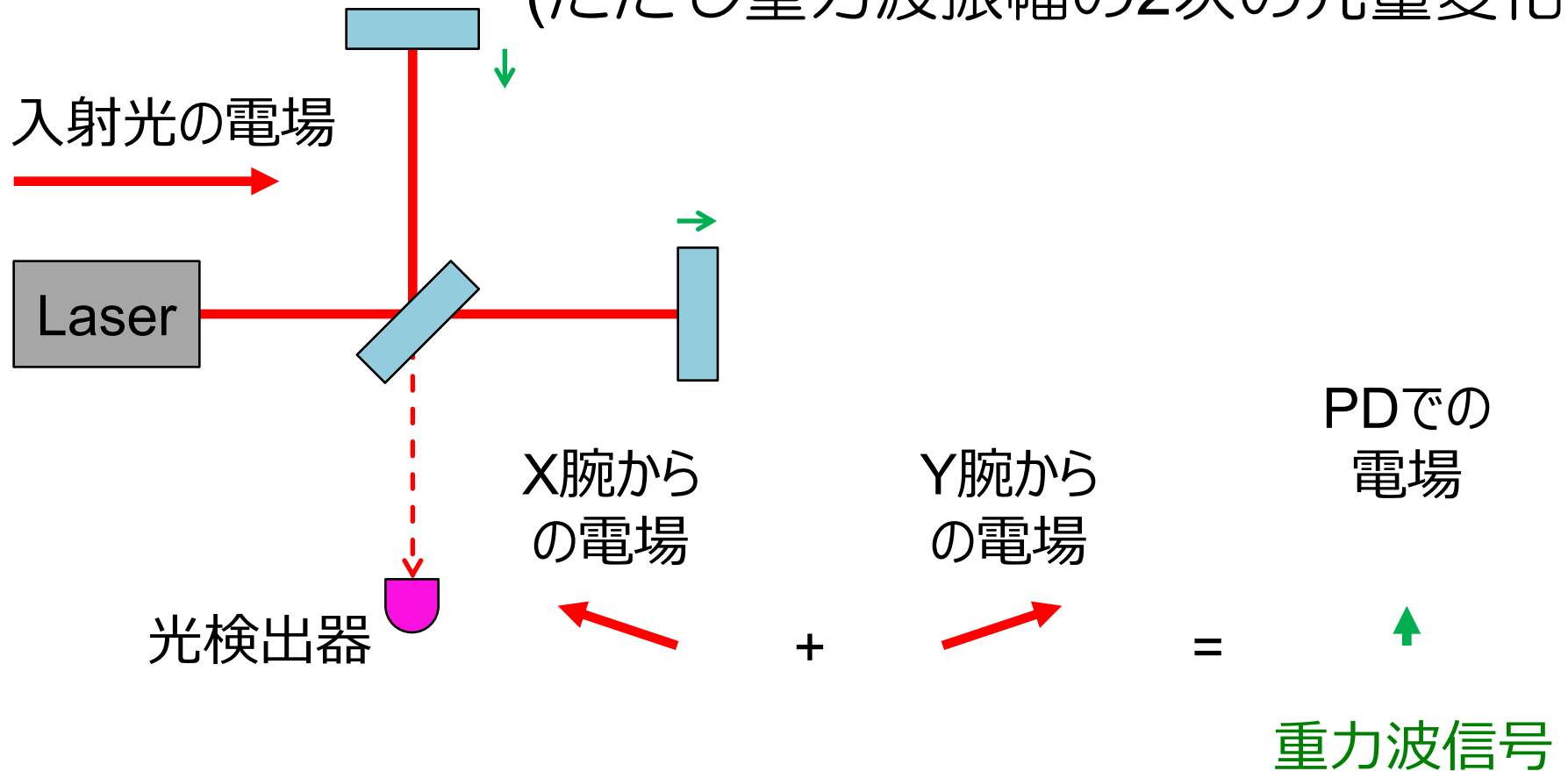
レーザー干渉計の原理

- 重力波が来ないと光は打ち消し合う



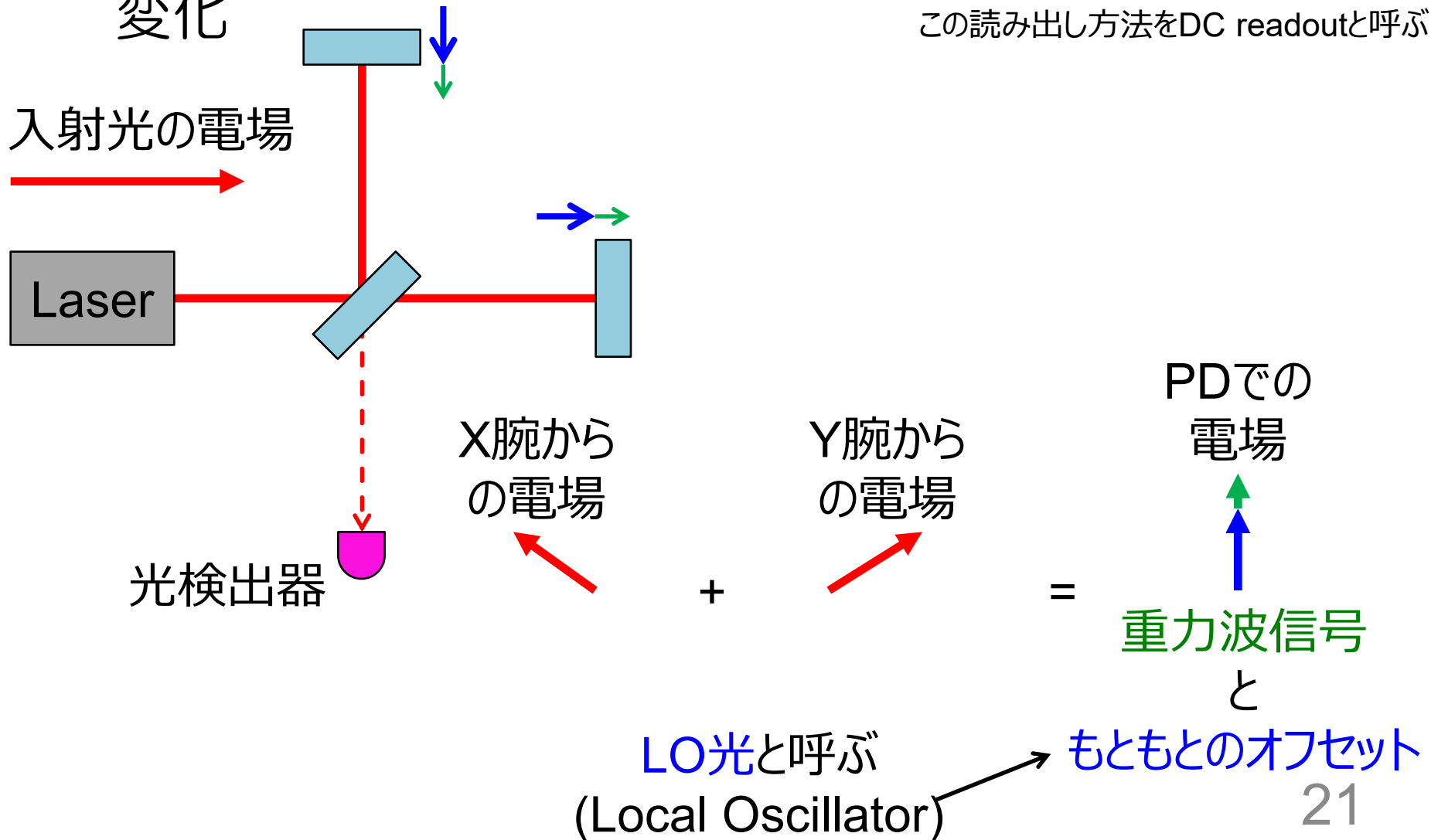
レーザー干渉計の原理

- 重力波が来ると光が出てくる
(ただし重力波振幅の2次の光量変化)



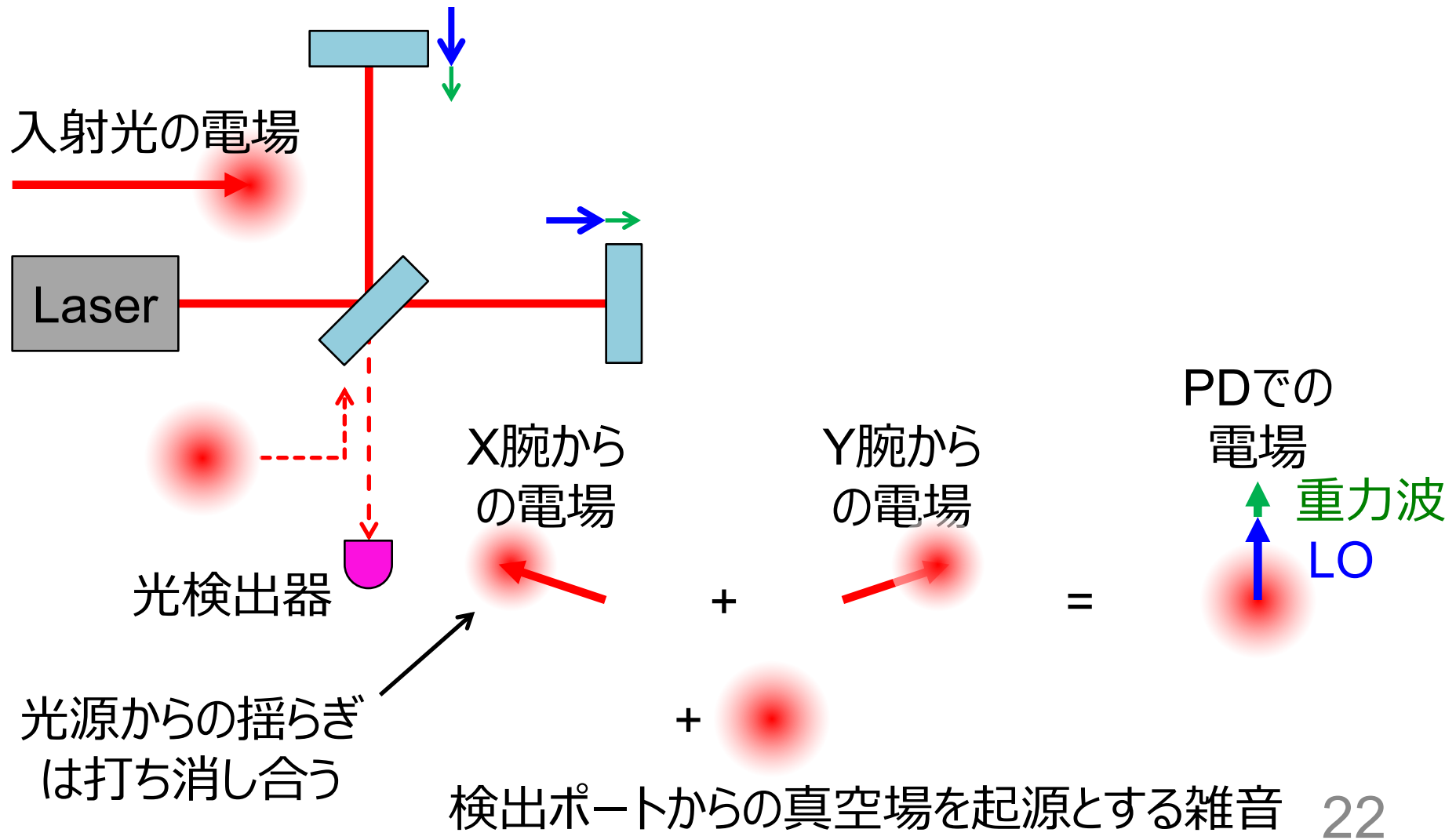
レーザー干渉計の原理

- 最初からずらしておけば、重力波振幅に1次の光量変化
- この読み出し方法をDC readoutと呼ぶ



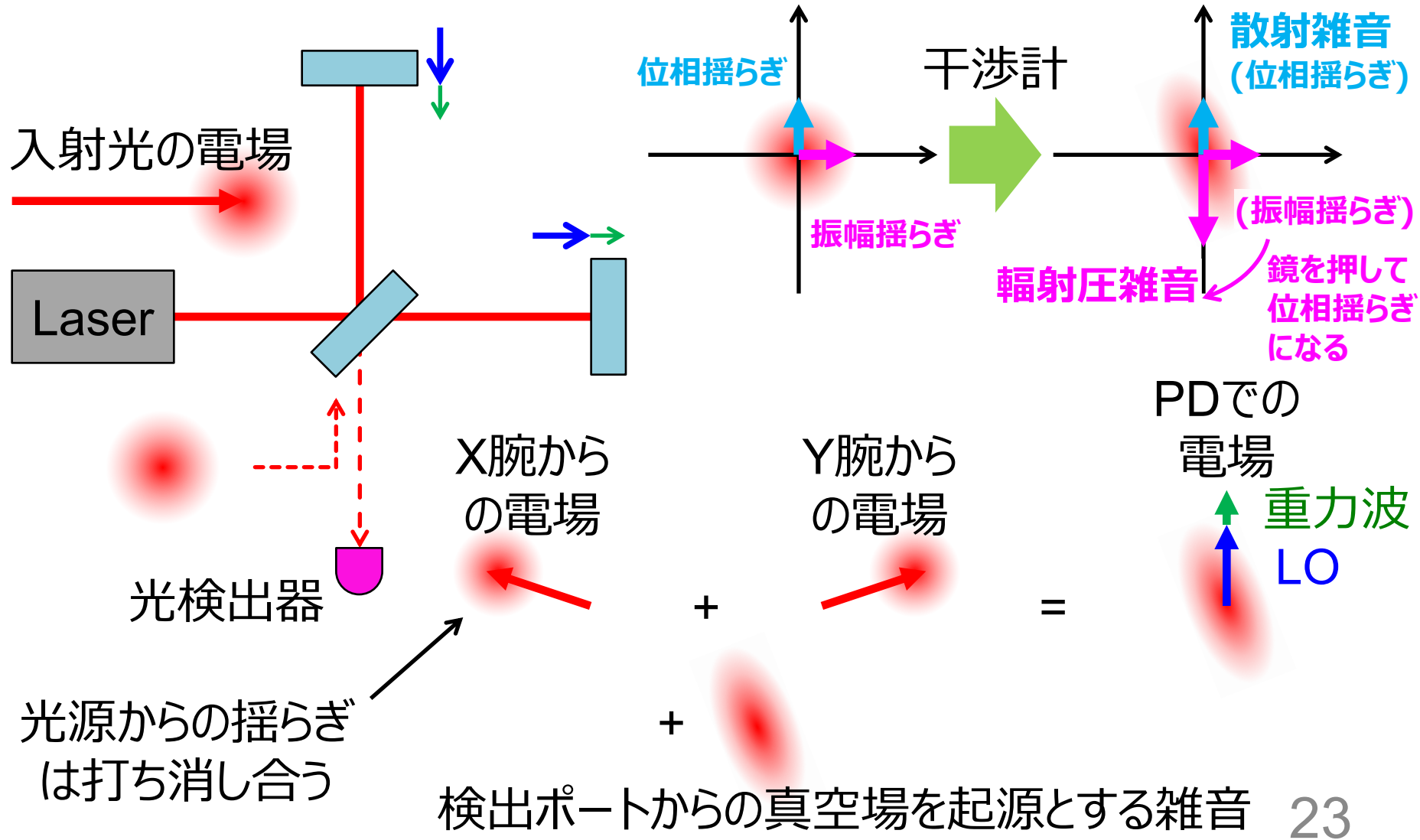
レーザー干渉計の量子雑音

- 検出ポートからの真空場が量子雑音の起源



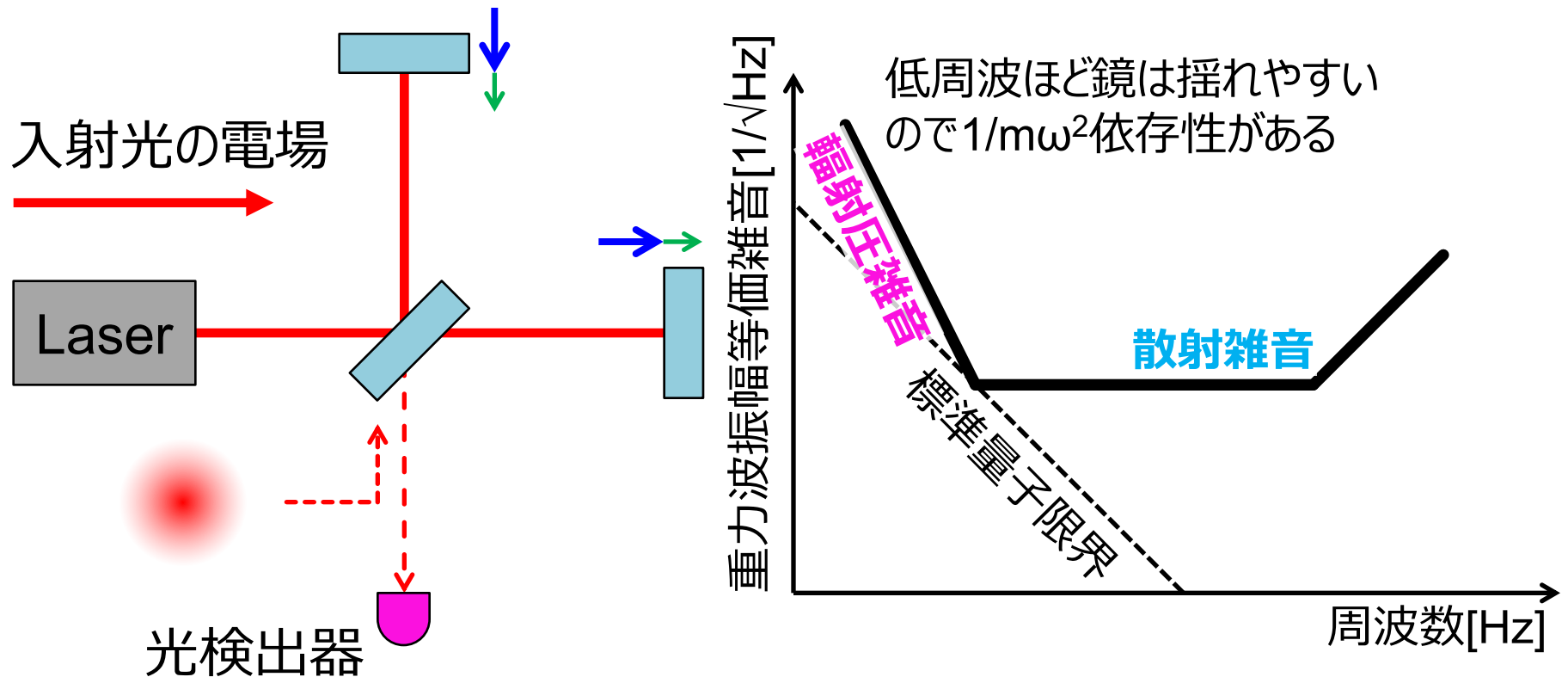
レーザー干渉計の量子雑音

- 真空場は鏡も揺らす(back action)



通常の量子雑音限界の感度

- 輻射圧雑音と散射雑音

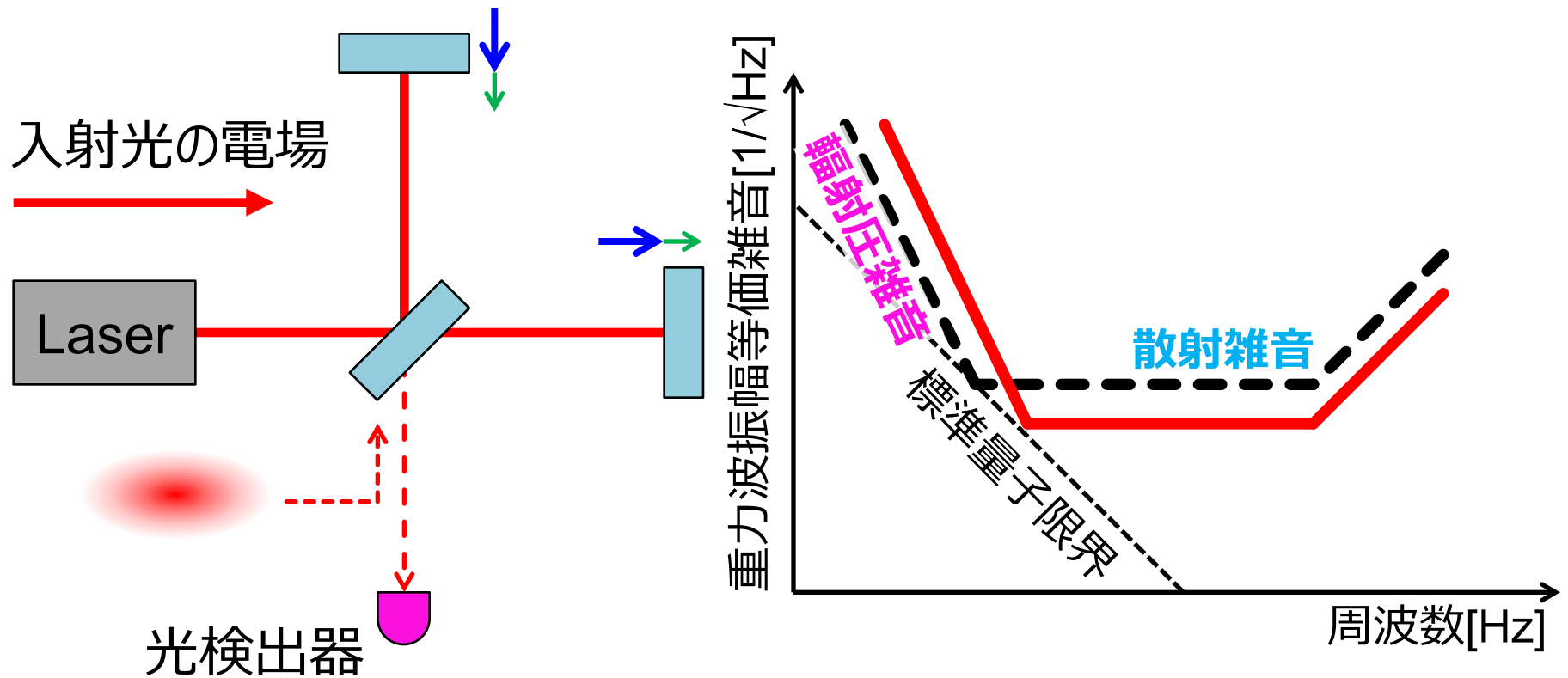


ちゃんとした計算は...

A. Buonanno & Y. Chen, [PRD 64, 042006 \(2001\)](#)

スクイズド真空場導入時の感度

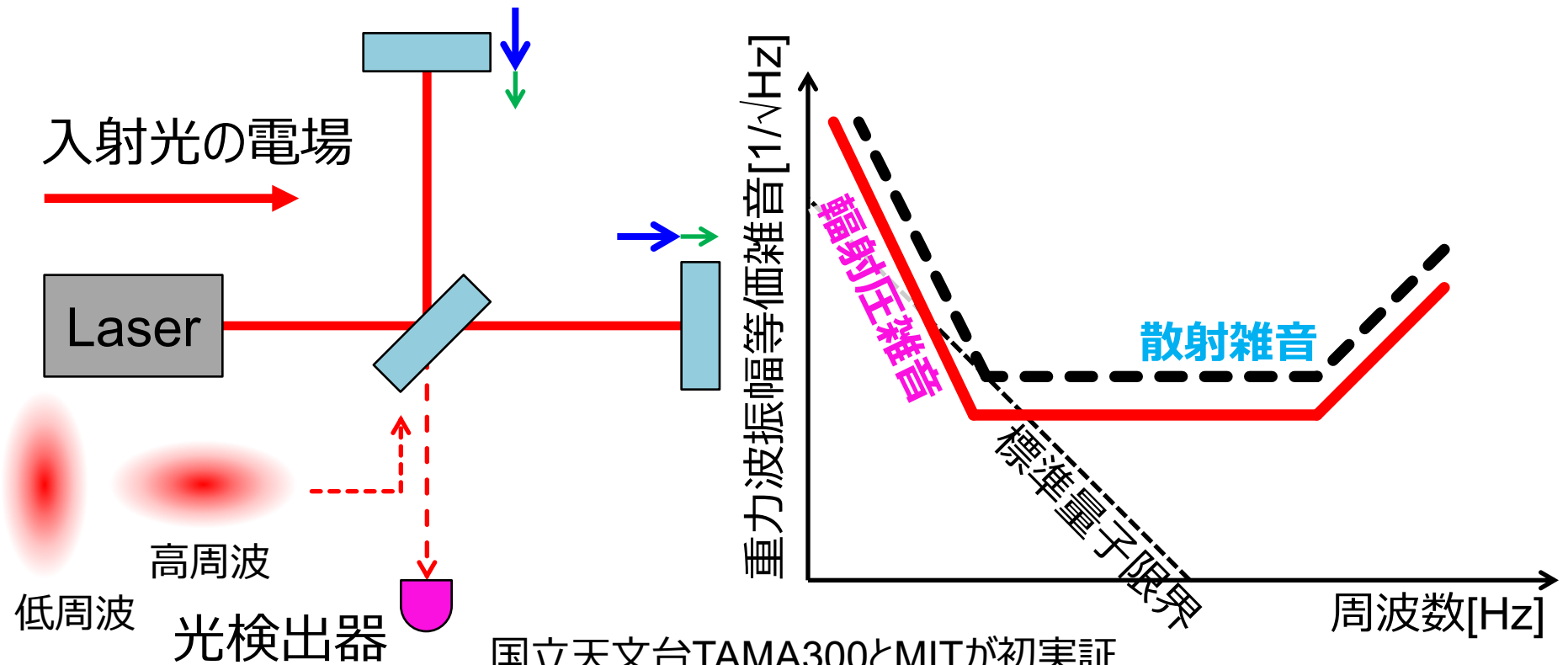
- ・ 輻射圧雑音は増幅、散射雑音は低減



※現状、LIGOとVirgoは6 dB程度
スクイズングできている
(将来計画では10 dBを予定)

周波数依存スクイズド真空場

- 輻射圧も散射雑音も低減、標準量子限界を超える



国立天文台TAMA300とMITが初実証

Y. Zhao+, [PRL 124, 171101 \(2020\)](#)

L. McCuller+, [PRL 124, 171102 \(2020\)](#)

LIGOとVirgoで導入済み

D. Ganapathy+, [PRX 13, 041021 \(2023\)](#)

Virgo, [PRL 131, 041403 \(2023\)](#)

バランス型ホモダイン測定(BHD)

- 輻射圧雑音を特定の周波数で打ち消す

