

# Finesse measurement of an optical cavity for vacuum induced transparency

工学系研究科物理工学専攻(小芦研)M1 市田昌己

# 目次

- 背景
  - 光子数分離とは
  - 非破壊光子数分離の必要性
- 原理
  - 光と原子の相互作用
  - 電磁誘起透明化(EIT)
  - 真空誘起透明化(VIT)
  - VITを利用した光子数分離
- 実験の進捗状況
  - 共振器の設計
  - 共振器のフィネス(反射率)の評価
- まとめと今後の展望

# 目次

- 背景
  - 光子数分離とは
  - 非破壊光子数分離の必要性
- 原理
  - 光と原子の相互作用
  - 電磁誘起透明化(EIT)
  - 真空誘起透明化(VIT)
  - VITを利用した光子数分離
- 実験の進捗状況
  - 共振器の設計
  - 共振器のフィネス(反射率)の評価
- まとめと今後の展望

# 非線形光学効果

## ・非線形光学効果

物質に対して光を入力として用いたときに生じる効果のうち、その大きさが入射光の強度に比例しないような現象.

- ・ 高調波発生
- ・ Kerr effect, Pockels effect
- ・ 多光子遷移  
など

## ・ 様々な応用

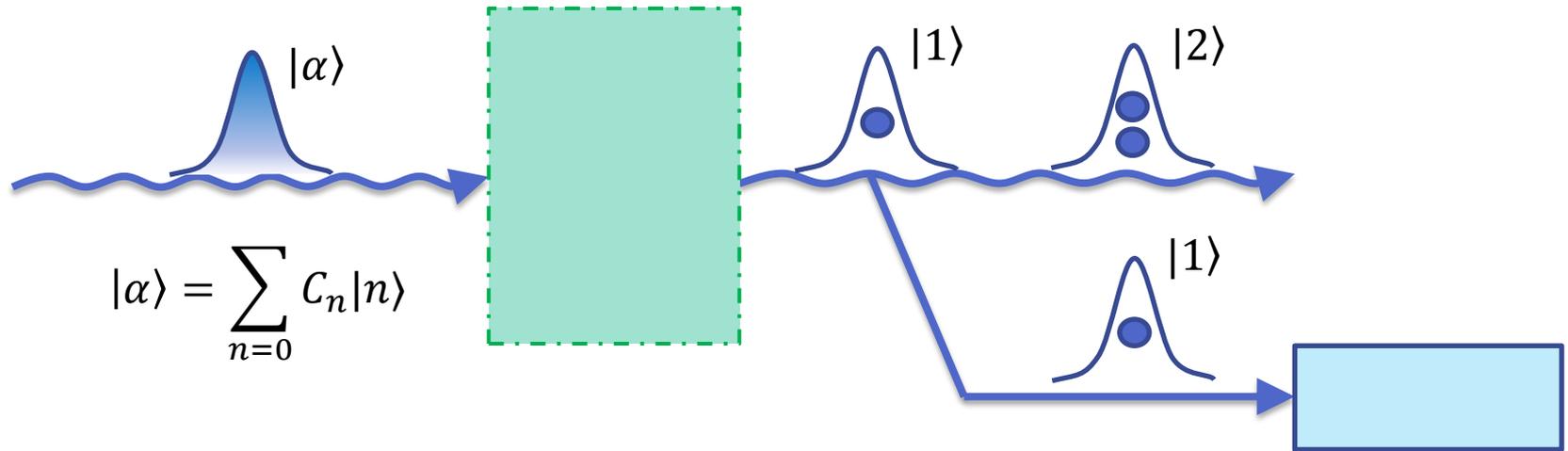
- ・ 光スイッチング
- ・ Pockels素子
- ・ 量子計算のための nonlinear gate など

(Universal gate set: Hadamard, phase,  $\pi/8$ , C-NOT)

・ 光子数分離?

- ・ 光同士での相互作用を必要とするため, 線形効果に比べ効率が低い.

# 光子数分離

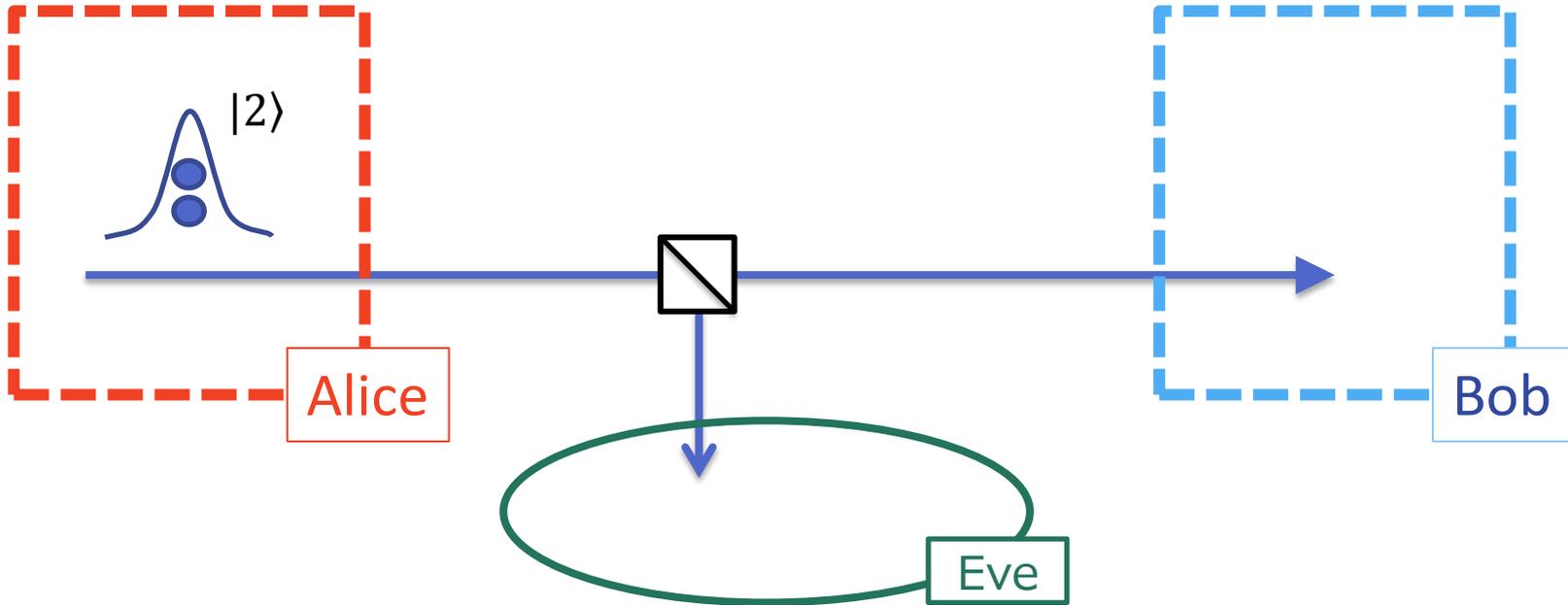


複数の光子数状態の重ねあわせ(e.g. Coherent状態)を各光子数状態へ分離する

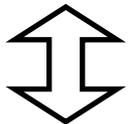
非破壊的に分離ができるなら、光子数の確定した状態を利用できる。

⇔ 光子検出器での破壊測定

# 量子通信への応用

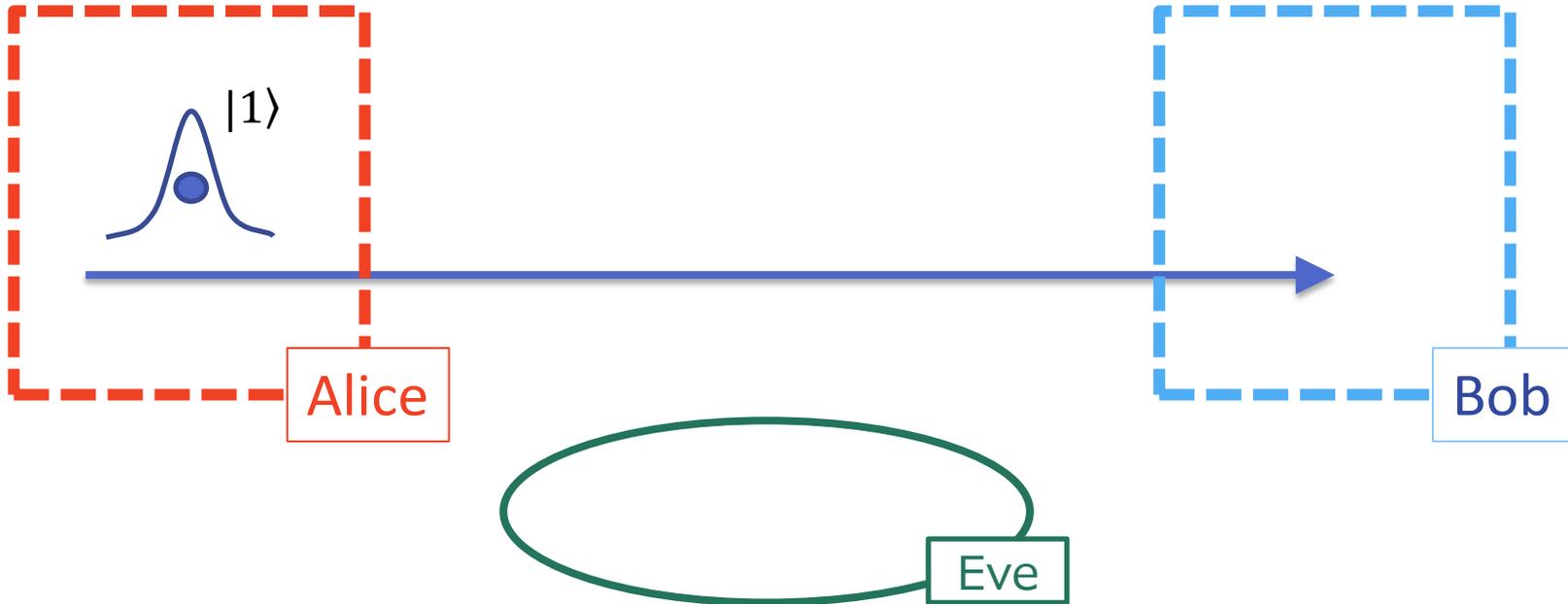


・複数光子状態 : 光子の一部を取り出して情報を抜き取る光子数分離攻撃が可能

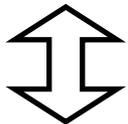


・単光子状態 : 光子の一部を取り出して情報を抜き取ることができない

# 量子通信への応用



・複数光子状態 : 光子の一部を取り出して情報を抜き取る光子数分離攻撃が可能



・単光子状態 : 光子の一部を取り出して情報を抜き取ることができない

# (量子リソグラフィ)

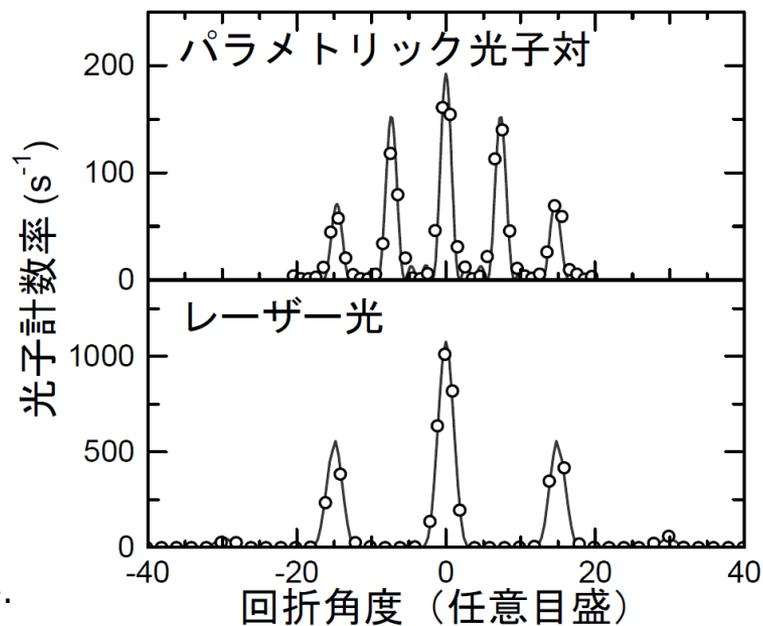
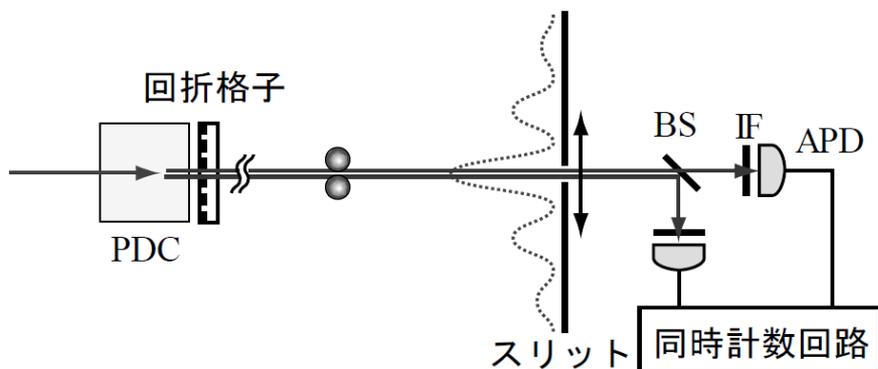
• n photon state

$$\mathcal{H}_{\text{photon}} = \hbar\omega a^\dagger a \quad \dots \text{時間発展: } e^{-\frac{i}{\hbar}\mathcal{H}t} |n\rangle \Rightarrow e^{-in\omega t} |n\rangle$$

↑  
位相変化=角周波数×n

光路長差  $d \rightarrow$  位相差  $\Delta\phi = nkd$

• 古典光に比べてn倍細かい干渉縞が得られる.



多光子状態の不思議な干渉. -フォトニック・ド・ブroy波長と量子リソグラフィ-.  
枝松 圭一. から引用

# まとめ＋方針

- 光と原子気体との相互作用を利用して、量子情報へ応用可能な非線形光学効果を観測する.
- 現在の目標は光子数分離

## 非線形光学効果

- 物質に対して光を入力として用いたときに生じる効果のうち、その大きさが入射光の強度に比例しないような現象.

## 光子数分離

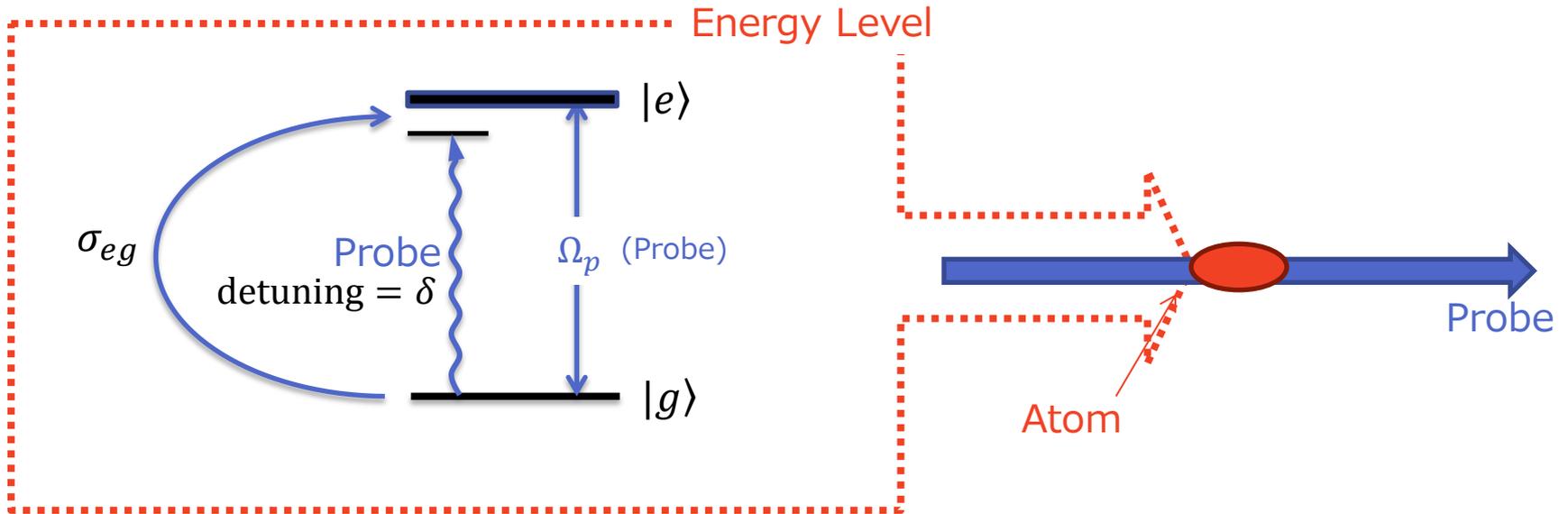
- 複数の光子数状態の重ね合わせを、光子数がある値に確定した状態へ射影すること

- 単光子状態…安全な量子通信
- 複数光子状態…量子リソグラフィ等

# 目次

- 背景
  - 光子数分離とは
  - 非破壊光子数分離の必要性
- 光子数分離の原理
  - 光と原子の相互作用
  - 電磁誘起透明化(EIT)
  - 真空誘起透明化(VIT)
  - VITを利用した光子数分離
- 実験の進捗状況
  - 共振器の設計
  - 共振器のフィネス(反射率)の評価
- まとめと今後の展望

# 光-原子間相互作用



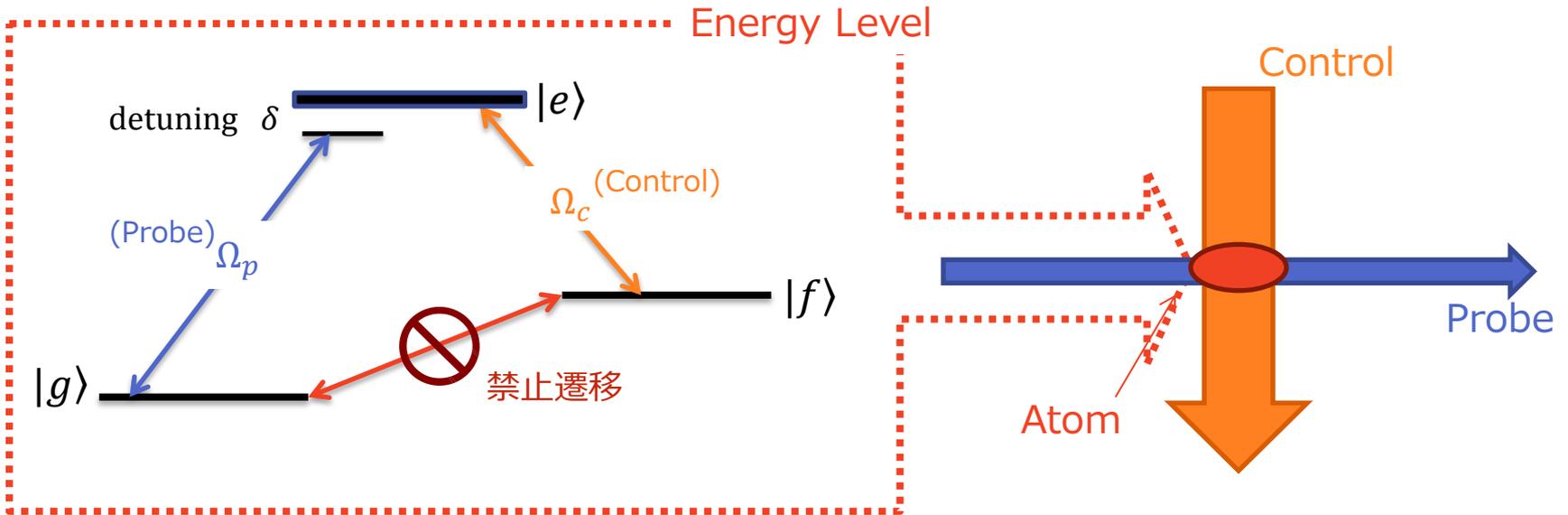
2準位間での相互作用

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{int} &= -\mathbf{d} \cdot \mathbf{E} \\ &= -\frac{\hbar\Omega_p}{2} \sigma_{eg} + H.C. \end{aligned}$$

$$\Omega_p = \frac{\langle e | \mathbf{d} \cdot \mathbf{E} | g \rangle}{\hbar}$$

$$\sigma_{eg} = |e\rangle\langle g|$$

# 3準位間相互作用



3準位間での相互作用(干渉)

$$\frac{\mathcal{H}_{int}}{\hbar} = -\frac{\Omega_p}{2} \sigma_{eg} - \frac{\Omega_c}{2} \sigma_{ef} + H.C.$$

回転波近似,  $\delta = 0$

# 電磁誘起透明化(EIT)

▪ Dark State  $|D\rangle$

$$|D\rangle = \frac{\Omega_c |g\rangle - \Omega_p |f\rangle}{\Omega} \quad (\delta = 0, \Omega_c \gg \Omega_p)$$

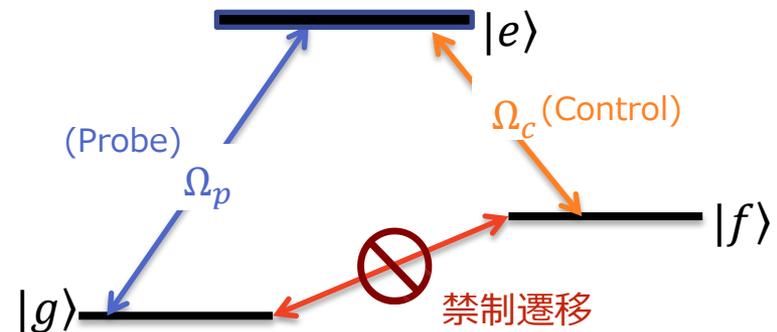
$$\frac{\mathcal{H}_{int}}{\hbar} = -\frac{\Omega_p}{2} \sigma_{eg} - \frac{\Omega_c}{2} \sigma_{ef} + H.C. \quad \text{の固有状態のひとつ.... } \mathcal{H}_{int}|D\rangle = 0$$

《性質》

•  $|g\rangle, |f\rangle$ 準位が安定ならば長い寿命を持ち, 十分に長い時間が経てば相互作用, 自然放出等によって原子の状態は $|D\rangle$ に収束する.

• Probe, Control光との相互作用によっては準位間の遷移が起こらない

$$\langle i|\mathcal{H}_{int}|D\rangle = 0$$



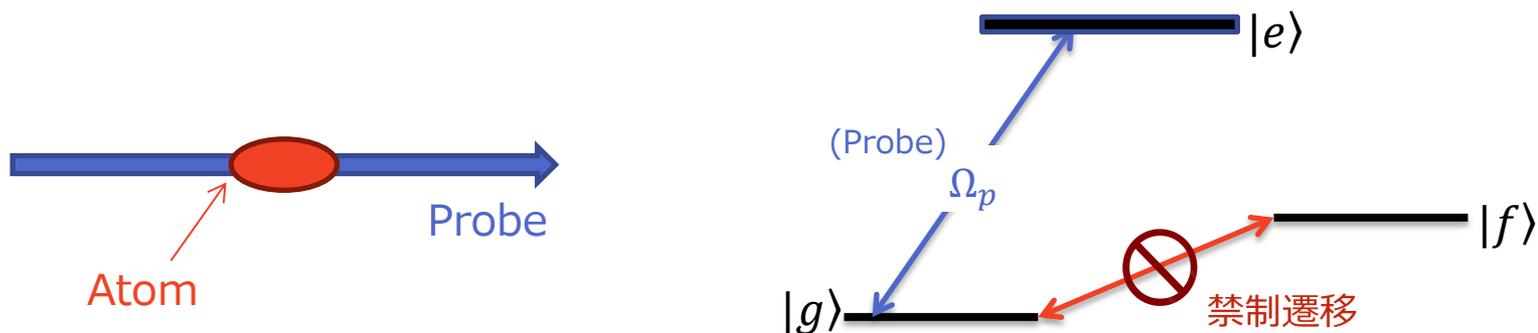
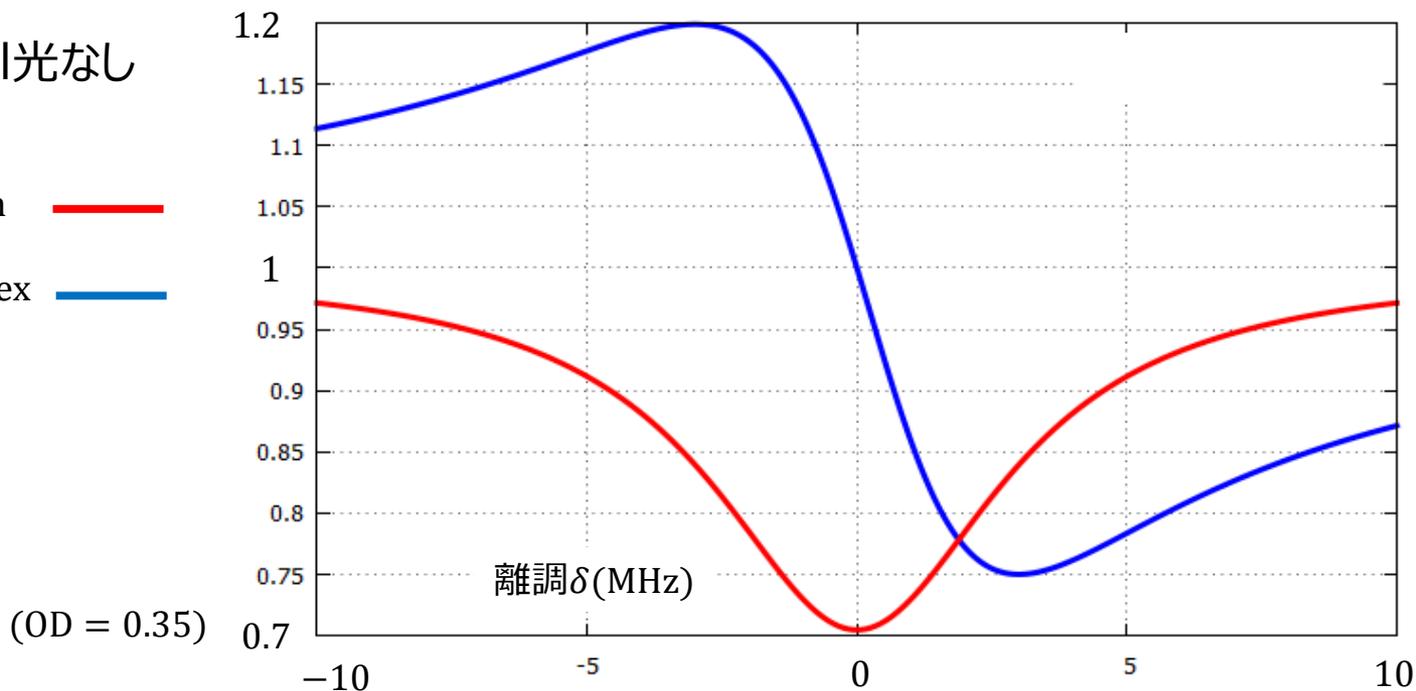
強いControl光の入射によって原子がProbe光を透過するようになる  
→ 電磁誘起透明化(EIT)

# 電磁誘起透明化(EIT)

◎ Control光なし

Transmission 

Refractive Index 



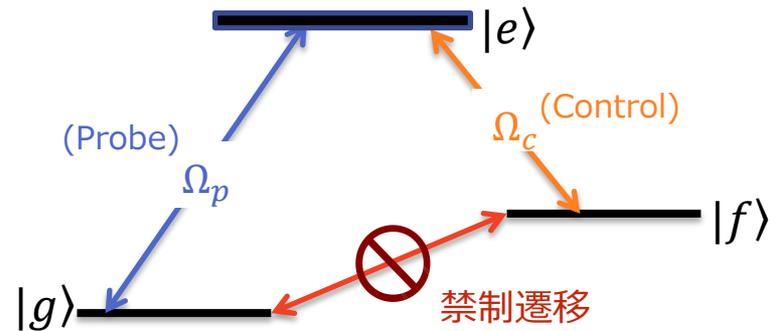
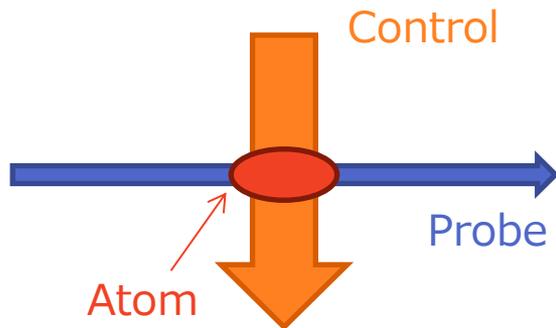
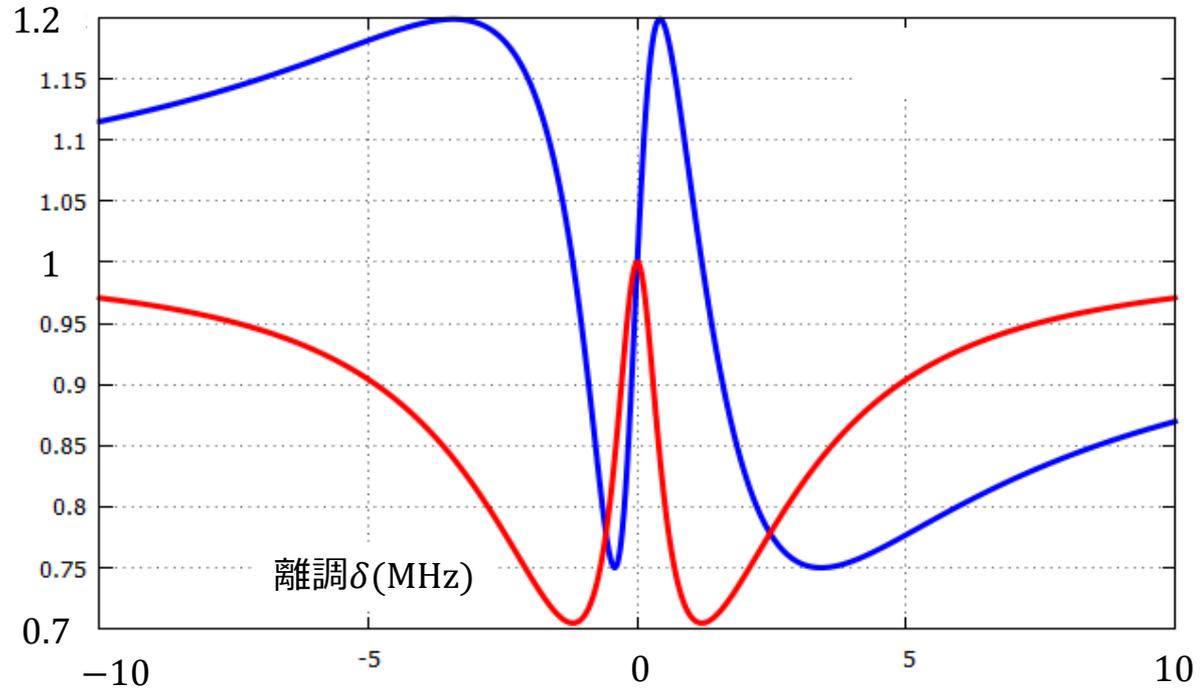
# 電磁誘起透明化(EIT)

◎ Control光あり

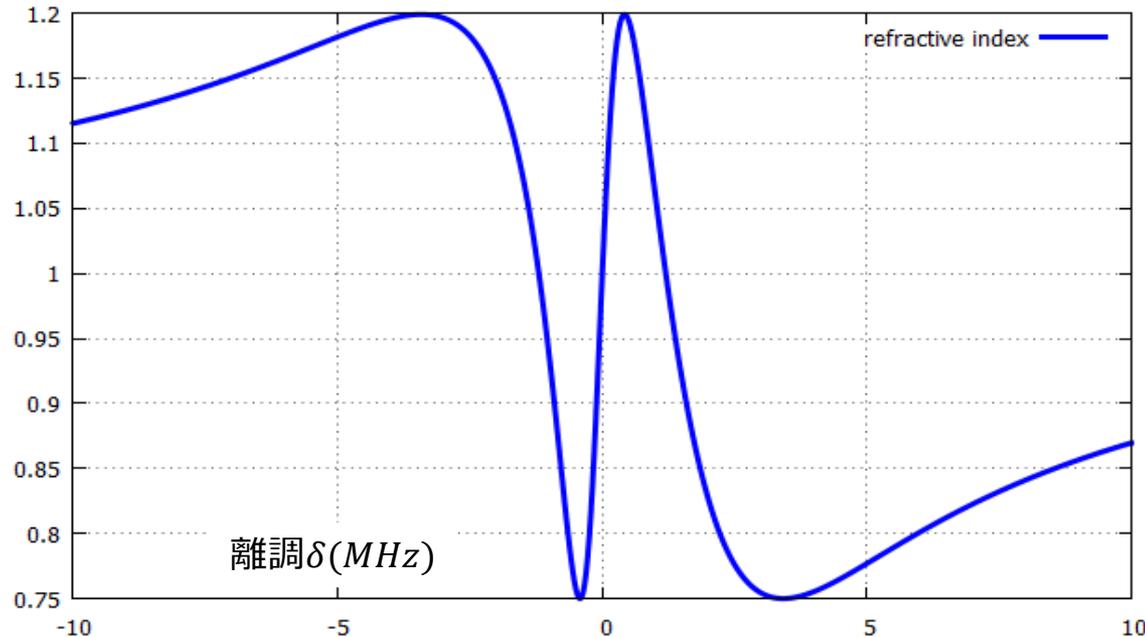
Transmission —

Refractive Index —

( $\Omega_c = 1.5\text{MHz}$ ,  $OD = 0.35$ )



# 電磁誘起透明化(EIT)



- 原子中を伝搬する光の群速度

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}$$

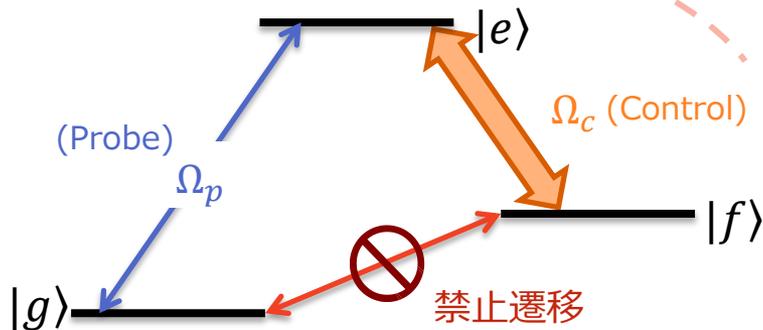
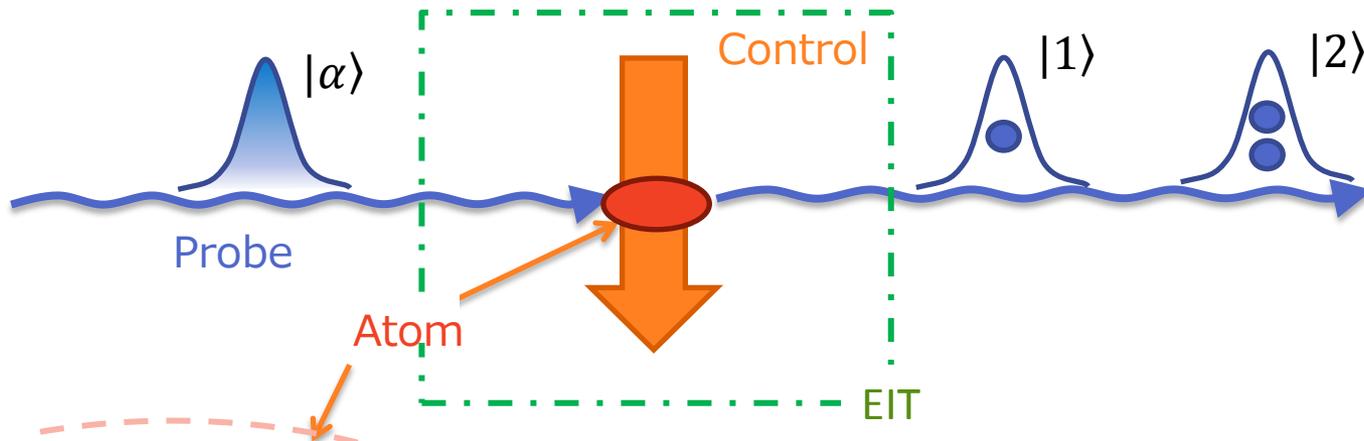
屈折率が共鳴点付近で急激に変化 → 群速度に遅延が生じる

- EITにより遅延を受けた光は吸収されず透過 → 利用可

# EITを利用した光子数分離？

EITによって、原子集団を透過するProbe光には遅延が生じる。

→EITを利用してCoherent状態を光子数状態へ分離できるか？



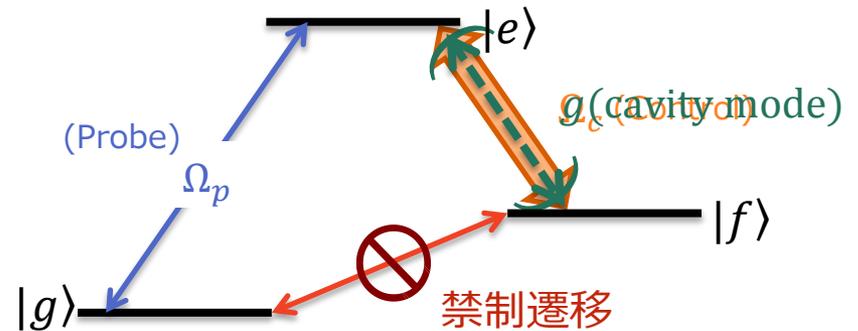
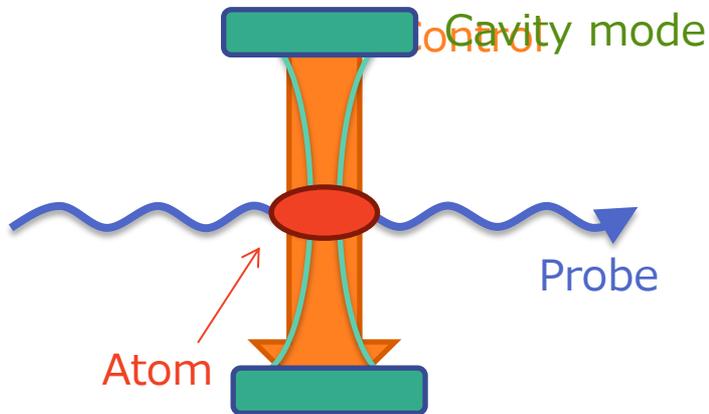
→できない

•Control光によって原子がすでに多数の光子と相互作用をしているため、1光子程度のProbe光の強度変化はほぼ無視される。

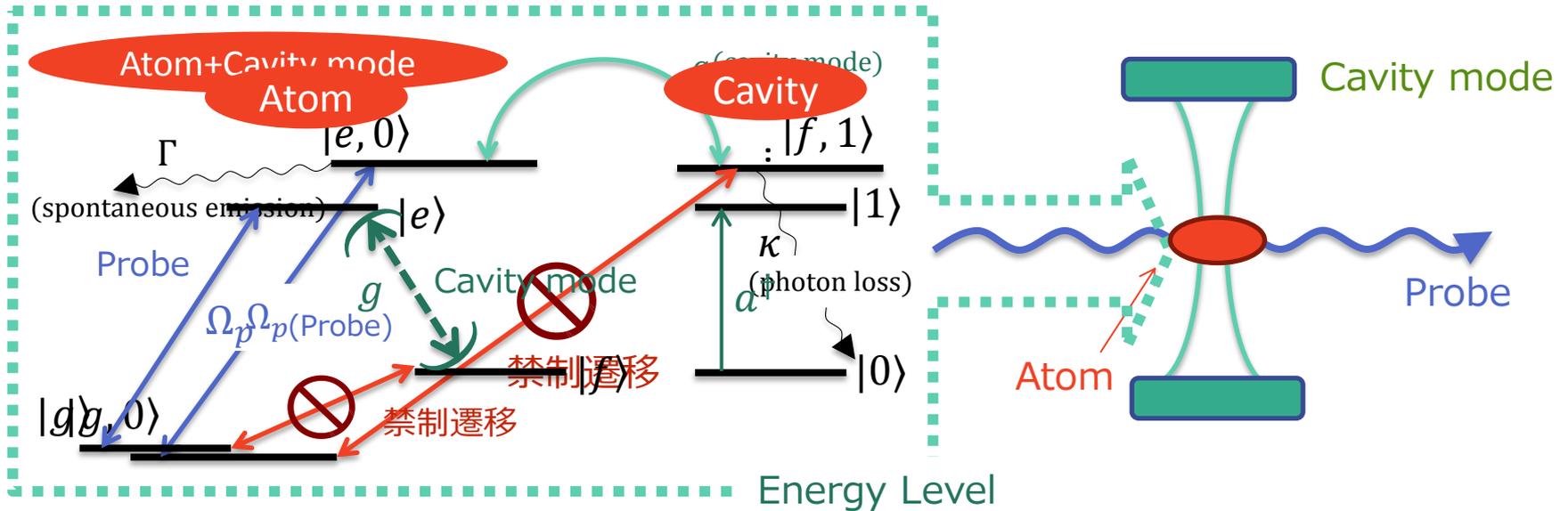
# EIT $\rightarrow$ VIT

◎ EITと同じ3準位系を利用して光子数分離を行うために:

- $|e\rangle, |f\rangle$ 準位の結合強度を保ちつつ,  
•  $|e\rangle, |f\rangle$ 準位を結合している光子数を減らす.
- Control光によるカップリングを共振器モードによるものに置き換える.  
EITと同様に透過と遅延が生じ, これは真空誘起透明化(VIT)と呼ばれる.



# 真空誘起透明化(VIT)



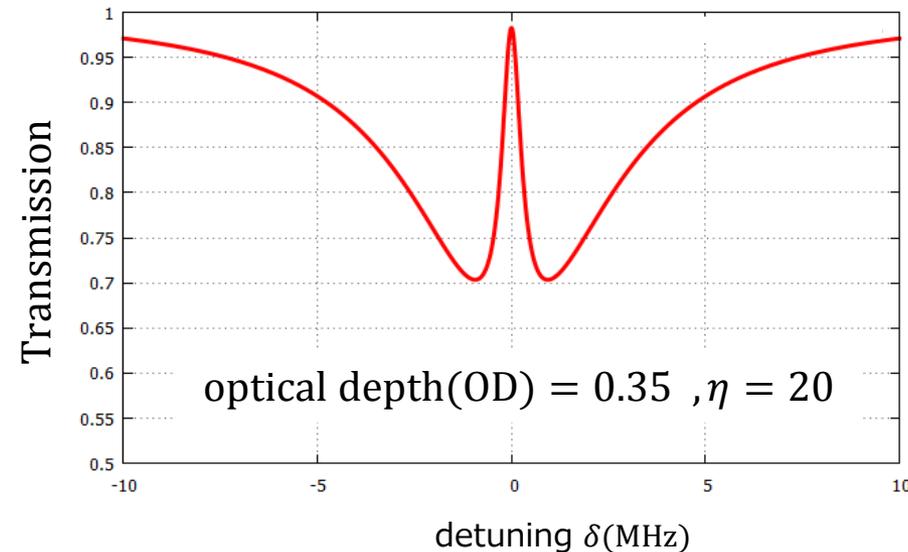
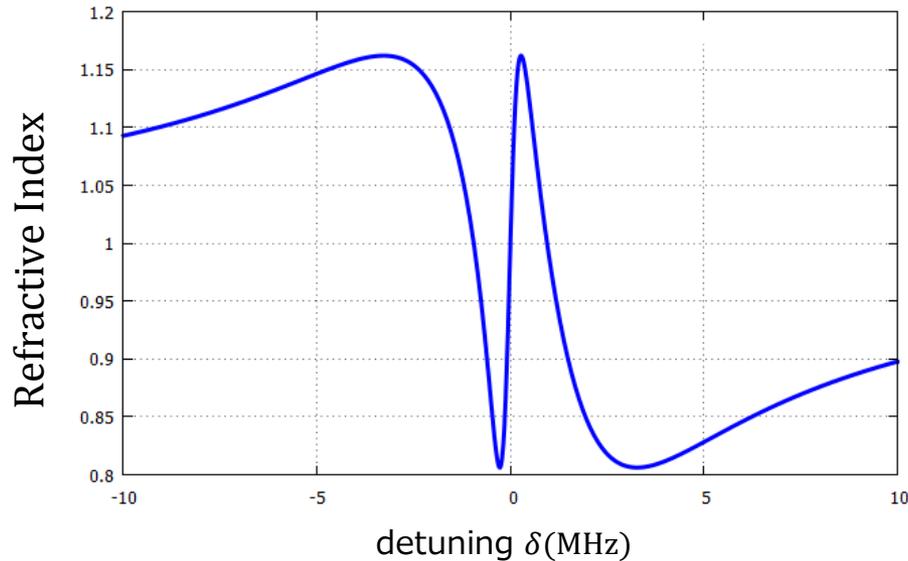
$$\frac{\mathcal{H}_{int}}{\hbar} = -\frac{\Omega_p}{2} \sigma_{eg} - ga\sigma_{ef} + H.C. \quad g = \sqrt{\frac{\omega}{2\epsilon_0 \hbar V}} f(r) : \text{vacuum Rabi frequency}$$

$$= \sum_m -\frac{\Omega_p}{2} |g, m\rangle \langle e, m| - \sqrt{m} g |e, m\rangle \langle f, m+1| + H.C.$$

$$g_m = \sqrt{m} g_1$$

Photon number in the cavity

# 真空誘起透明化(VIT)



•原子中を伝搬する光の群速度

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}$$

→EITと同様に遅延と透過が生じる

•遅延 $\tau_m$

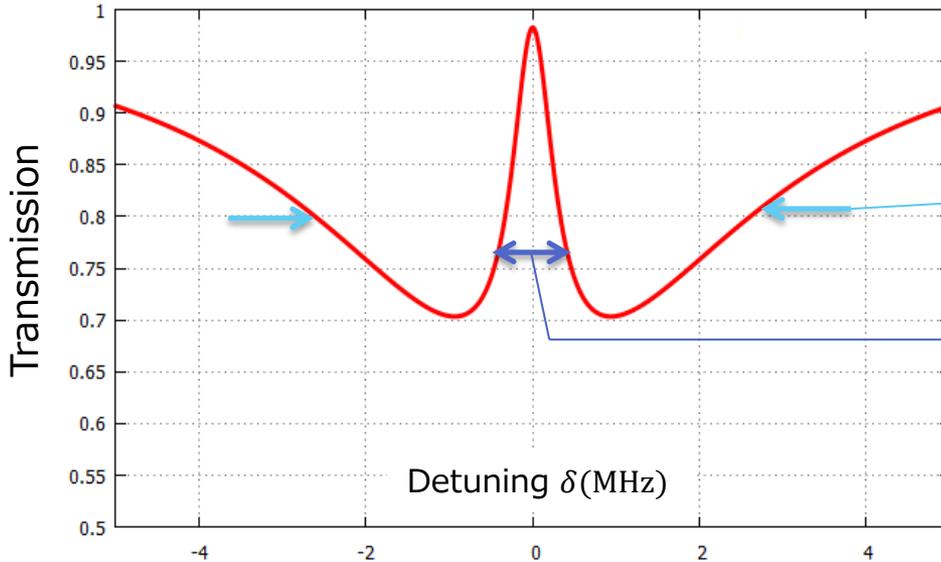
$$\tau_m = \frac{OD}{\kappa} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \cdot \frac{1}{m + 1}$$

m:photon number

Gor Nikoghosyan, Michael Fleischhauer,  
Arxiv:0910.1900v2,2010

$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} : \text{Cooperative parameter}$$

# VITで生じる遅延



◎ VITスペクトルの主なスケール

~原子線幅 ( $\Gamma \sim 6\text{MHz}$ )

VITスペクトル幅...  $\frac{(1+\eta)\kappa}{2}$  (Rad/sec)

$\kappa$  : photon loss rate



• 遅延  $\tau_m$  (理論)

$$\tau_m = \frac{OD}{\kappa} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{1}{m+1}$$

m: photon number

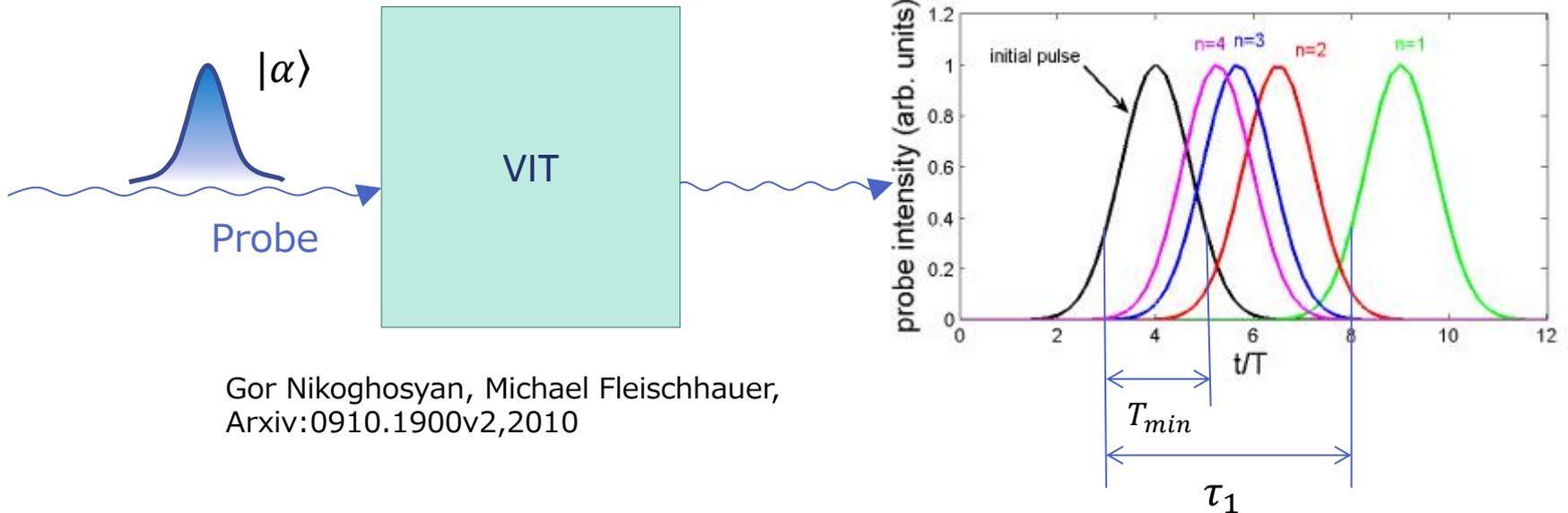
Gor Nikoghosyan, Michael Fleischhauer,  
Arxiv:0910.1900v2,2010

• Probe光としてパルス光を用いる場合の時間幅

$$T_{min} = \frac{2}{(1+\eta)\kappa}$$

$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} \quad \text{: Cooperative parameter}$$

# VITを利用した光子数分離



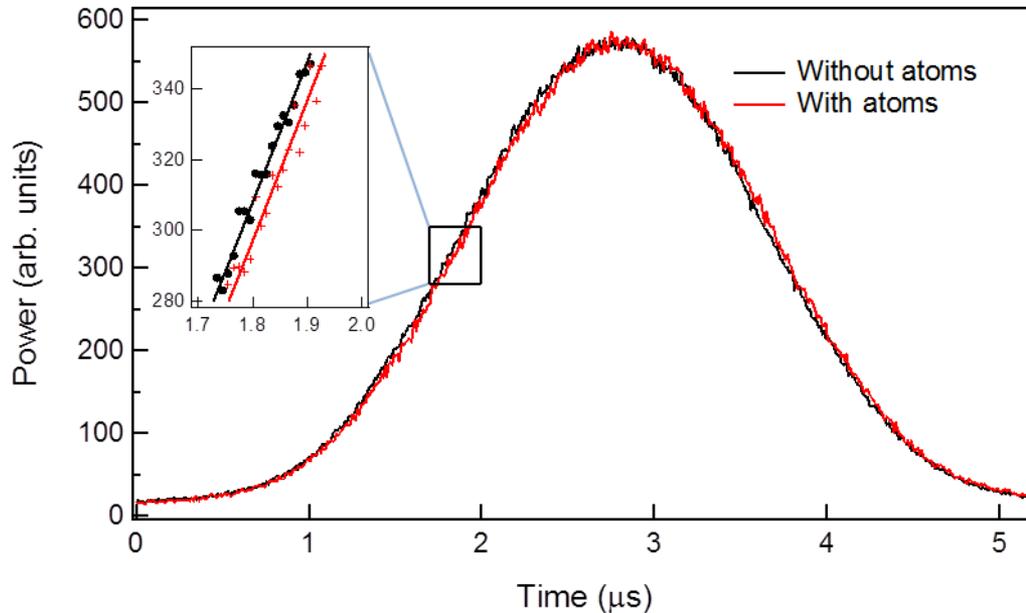
Gor Nikoghosyan, Michael Fleischhauer,  
Arxiv:0910.1900v2,2010

•パルスの時間幅 $T_{min}$ に比べ遅延 $\tau_m$ が大きいほど光子数分離の性能は良い

$$\frac{\tau_m}{T_{min}} = \frac{OD}{2} \cdot \frac{\eta}{1 + \eta} \cdot \frac{1}{1 + m}$$

- 原子気体の光学的厚さOD
- Cooperative Parameter  $\eta$  を大きくする

# VITを利用した光子数分離



Haruka Tanji-Suzuki, et al. Science 333, 1266 (2011)

◎ 先行実験

Probe光に生じる群速度の測定

$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} = 3.7$$

$$OD \sim 0.5$$

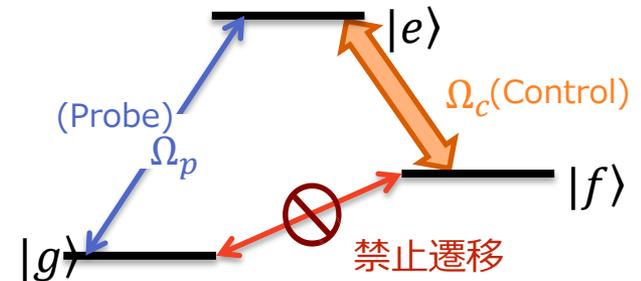
$$\tau = 25.4 \pm 1.7 \text{ ns}$$
$$v_g = 1760 \text{ m/s}$$

光子数分離を行うには遅延の大きさが不十分  
原子-光子相互作用をより強くする必要がある

# まとめ

- $\Lambda$ 型の3準位原子の一つの遷移に共鳴する微弱な光(Probe光)が入射するとき、もう一方の遷移が強く結合されているとProbe光は透過し、群速度の低下が生じる

- Control 光によって結合されている → EIT
- Cavity-modeによって結合されている → VIT



- Probe光の含む光子数に対してVITの応答は変化し、遅延や透過率などについての光子数依存性をもつ
- 実際に遅延が生じることは実験で確かめられているが、その光子数依存性を確認できるほど大きくはなく、原子とCavity-modeの結合を更に強くする必要がある

# 目次

- 背景
  - 光子数分離とは
  - 非破壊光子数分離の必要性
- 光子数分離の原理
  - 光と原子の相互作用
  - 電磁誘起透明化(EIT)
  - 真空誘起透明化(VIT)
  - VITを利用した光子数分離
- 実験の進捗状況
  - 共振器の設計
  - 共振器のフィネス(反射率)の評価
- まとめと今後の展望

# パラメータの最適化

$$\frac{\tau_m}{T_{min}} = \frac{OD}{2} \cdot \frac{\eta}{1+\eta} \cdot \frac{1}{1+m}$$

◎ OD : 高密度なRb原子気体のトラップ → B4の卒論の課題  
Probe光をCavityに共鳴させる.  $\langle OD_{eff} \rangle = \langle N \rangle \times OD_{atom}$

◎  $\eta$  : 他のパラメータを用いて書き直すと

$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} = \frac{24\mathcal{F}}{\pi k^2 w_0^2}$$

$$\langle N \rangle = \frac{\mathcal{F}}{2\pi}$$

photonが入射から透過までに  
Cavity内を往復する回数の期待値

$$\mathcal{F} : \text{Finesse} \left( = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \right)$$

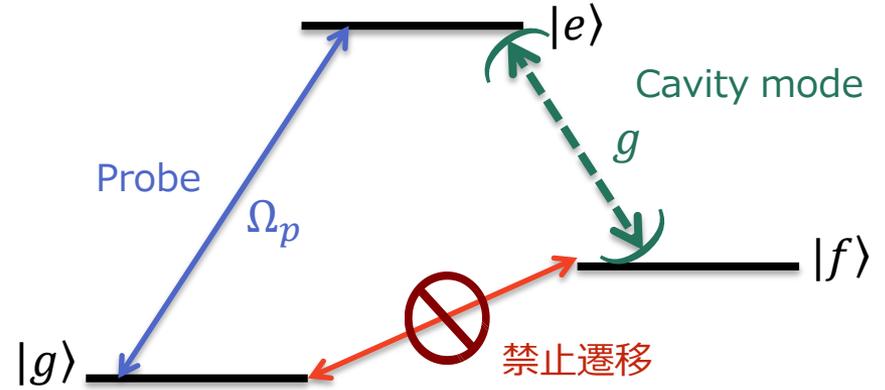
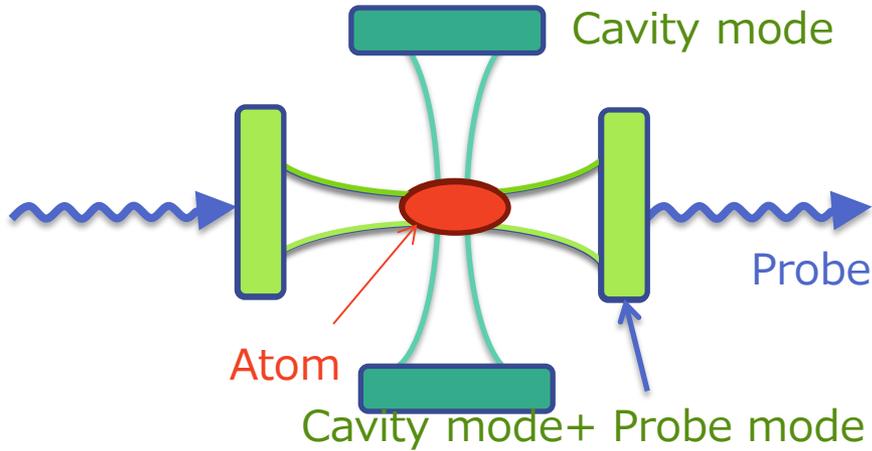
$w_0$ : Beam waist



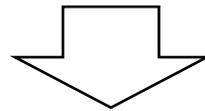
高反射率のミラーを用いて  
 $w_0$ の小さなCavityを組む。

$k$  : wave number(Probe光にCouplingする遷移周波数)

# 共振器の設計



Probe光に共鳴するCavity + Control用のCavity = 技術的な問題があり,避けたい



一つのCavityにProbe光とControl用のモードを同時に共鳴させる

# 共振器の設計

◎ 共振器がRb原子の2つの遷移に共鳴

- $\lambda = 780\text{nm}$
- Rubidium 87の5S軌道の超微細分裂に共鳴  
+ ほぼ定在波の節と腹が一致

$$\rightarrow \nu_{FSR} = 3.4173\text{GHz}$$

$$\rightarrow L = 4.38\text{cm}$$

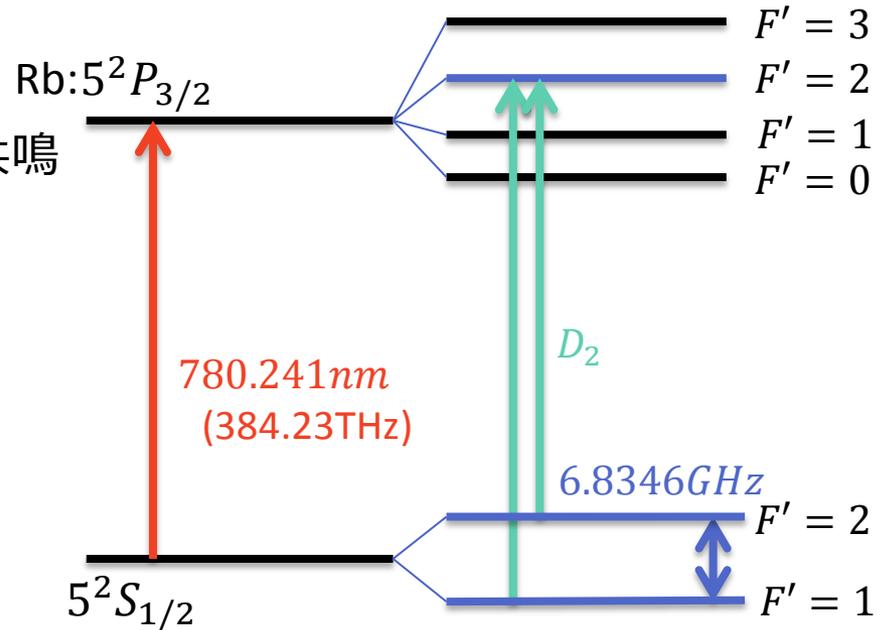
◎ Beam waist

$$w_0^2 = \frac{L\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{2R}{L} - 1} \rightarrow R \gtrsim \frac{L}{2}$$

$$R = 2.21\text{cm} \quad \eta = 20$$

◎ 高反射率のミラー

$$\mathcal{F} = 1.0 \times 10^5 \quad (R \sim 99.997)$$



$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} = \frac{24\mathcal{F}}{\pi k^2 w_0^2} \sim 20$$

# フィネス $\mathcal{F}$ の評価

$$\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} = \frac{24\mathcal{F}}{\pi k^2 w_0^2} \sim 20$$

$$\cdot w_0^2 = \frac{L\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{2R}{L} - 1}$$

共振器長 $L$ ：共振器を設置する際に調節可  
→ミラーの曲率半径 $R$ に誤差があっても補正できる

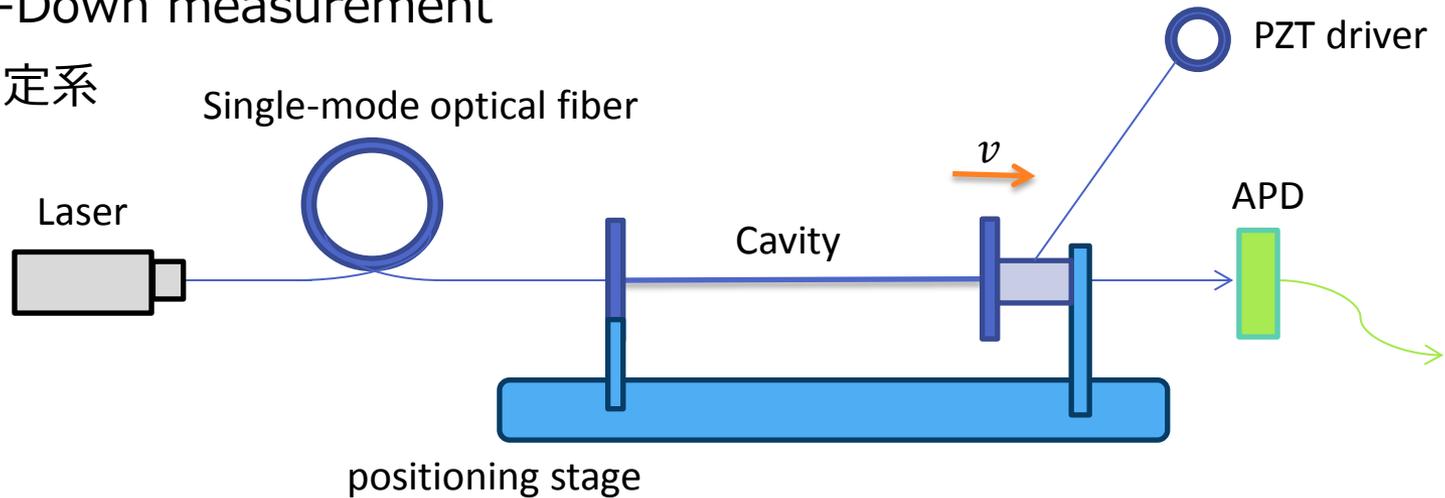
$$\cdot \mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad \left( \begin{array}{l} R = 0.9997 \rightarrow \mathcal{F} \sim 10^4 \\ R = 0.997 \rightarrow \mathcal{F} \sim 10^3 \end{array} \right)$$

- ・加工精度に依存,修正ができない → 予め評価しておく
- ・反射率やスペクトル幅の測定は難しい  
→共振器が共鳴から外れるときの減衰の様子から  
 $\mathcal{F}$ を測定する(Ring-Down measurement).

# Ring-Down measurement

- Ring-Down measurement

- 測定系



- 共振器の一方のミラーをPZTを用いて一定速度 $v$ で移動させる
    - 透過光をAPDに入射、出力をオシロスコープで測定

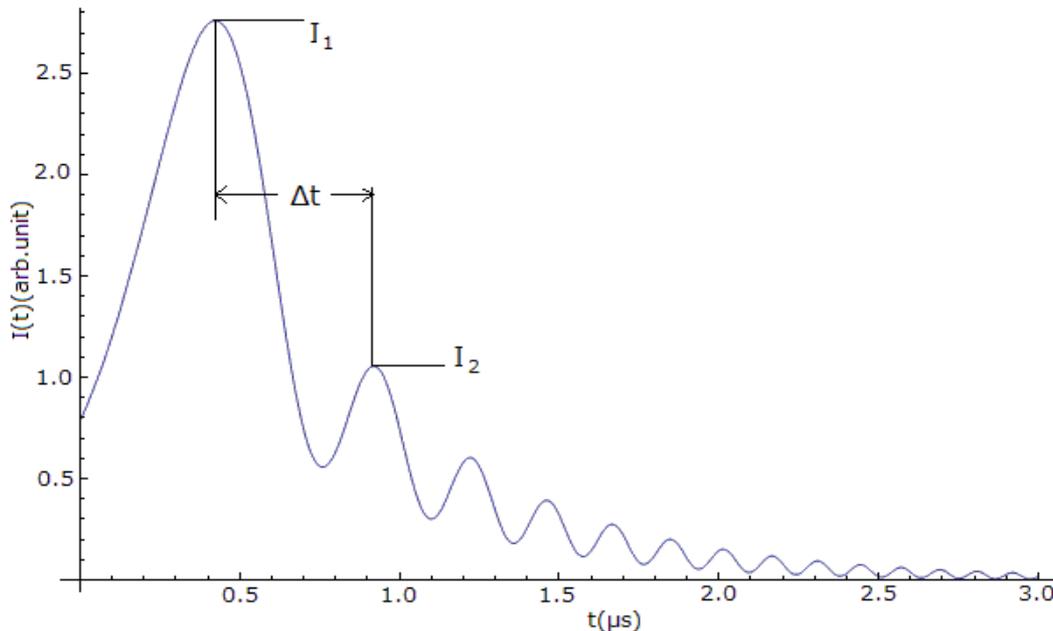
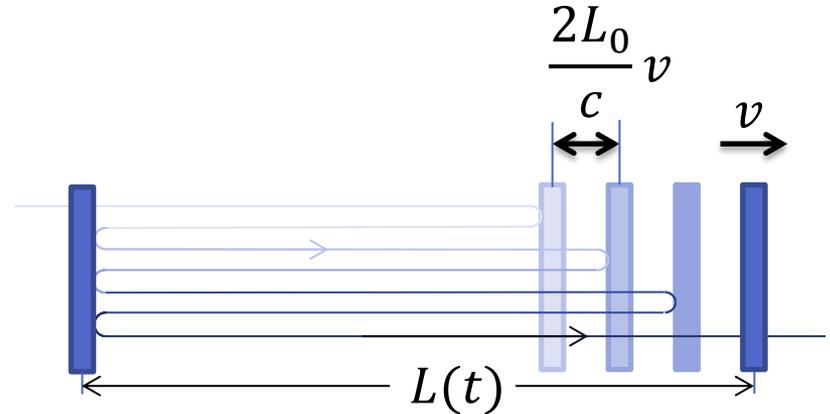
# Ring-Down measurement

透過光の電場

$$E(t) = E_0 \sum_{n=0}^{\infty} TR^n e^{i\phi_n(t)}$$

$$\phi_n = (2n + 1)\phi_0(t) - \pi n(n + 1)\Omega/v_{FSR}$$

(共振器をn往復した後,時刻tに共振器を透過する光に加わる位相変化)

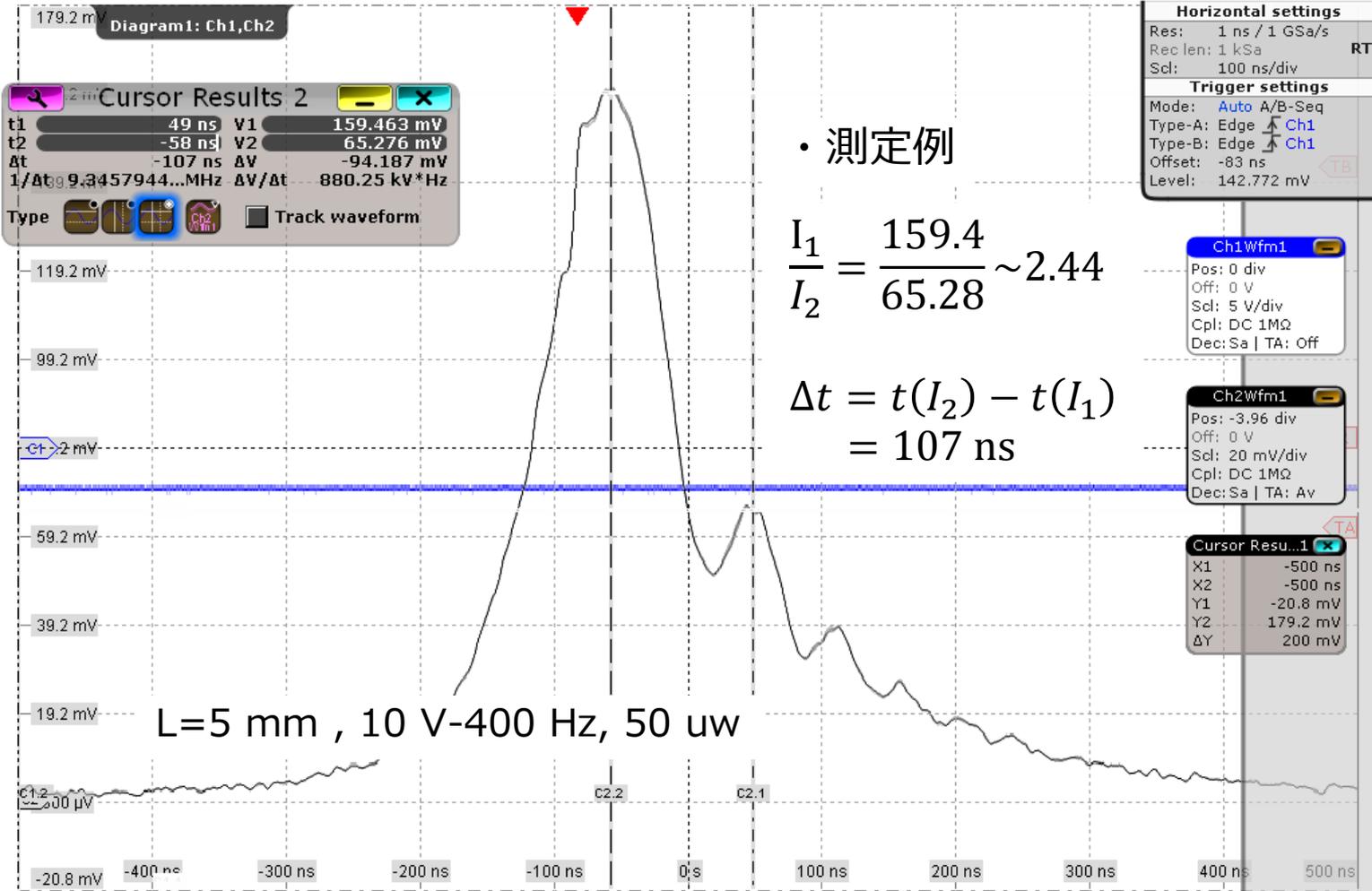


- $\phi_0(t) = 2\pi L(t)/\lambda$
- $\Omega = 2v/\lambda$  ( $\Omega/v_{FSR} \ll 1$ )

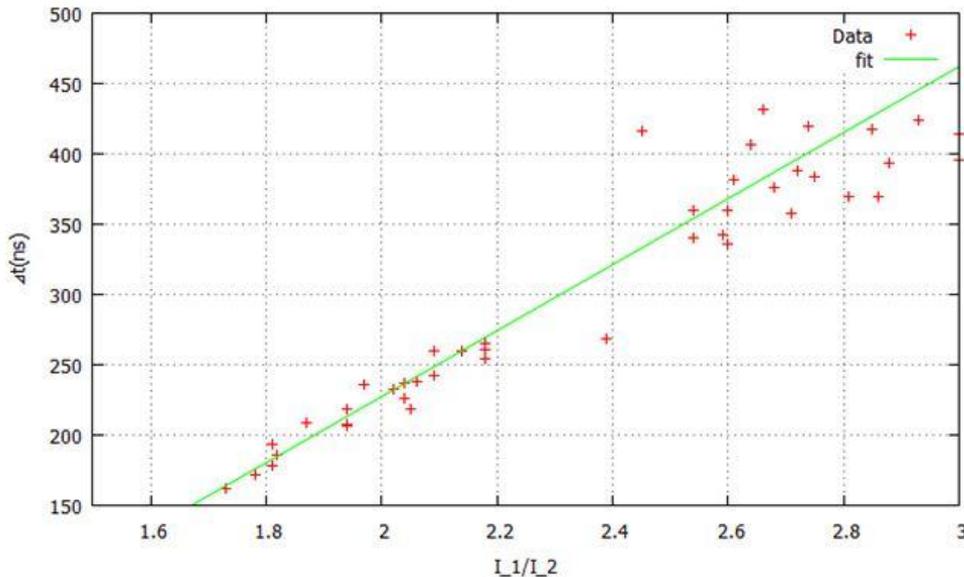
$$\Delta t \propto \frac{L_0 \mathcal{F} I_1}{2c\pi I_2} \quad (\kappa\Delta t \sim 1)$$

# Ring-Down measurement

2013-10-11  
04:07:17



# 測定結果



$$\Delta t(\text{ns}) = 235 \left( \frac{I_1}{I_2} - 1.05 \right)$$

$\pm 17(7\%)$                        $\pm 0.10(10\%)$

---


$$\mathcal{F} = 1.84 \times 10^4 (\pm 1.3 \times 10^3)$$

(L=23mm)

## ◎原因?

- ビームがミラーの中心に当たっていない? → ずらす( $\mathcal{F} \sim 1.7 \times 10^4$ )
- 表面が汚れている?
- 測定用に選んだものがたまたま不良品 → 変えても同程度( $1.7 \times 10^4$ )
- レーザーの強度が大きすぎる? → 弱くしても( $50\mu\text{W}$ )同じ
- レーザーの線幅の影響で測定が不正確? → 別の方法でも測定する.

# 透過光と反射光を利用した測定

- 入射光と共振器のカップリング効率:  $\epsilon$
- R: reflectance      • T: transmittance
- L: loss              (R + L + T = 1)

$$\mathcal{F} \cong \frac{\pi}{T + L}$$

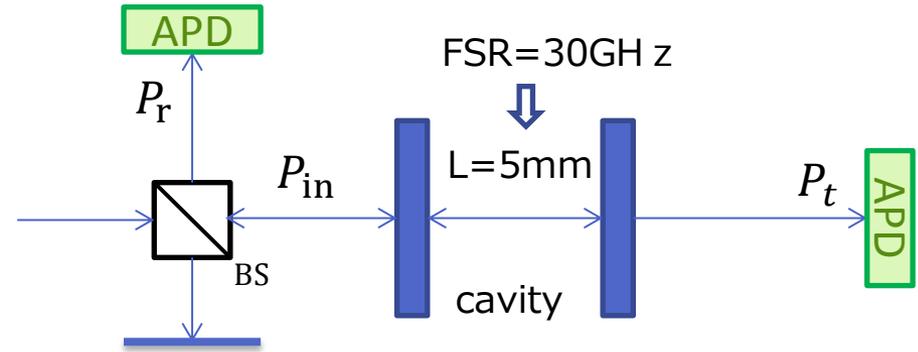
$$\frac{P_t}{\epsilon P_{in}} = T^2 \left( \frac{\mathcal{F}}{\pi} \right)^2$$

$$\left( 1 - \frac{1}{\epsilon} \right) + \frac{P_r}{\epsilon P_{in}} = L^2 \left( \frac{\mathcal{F}}{\pi} \right)^2$$

$$T = 2.0 \times 10^{-5}$$



Christina J. Hood, H. J. Kimble, Jun Ye  
Phys. Rev. A 64, 033804 (2001)



$\frac{P_t}{P_{in}}, \frac{P_r}{P_{in}}$  を測定し,  $\epsilon, L, \mathcal{F}$  について解く

$$\frac{P_t}{P_{in}} = 6.1(\pm 0.6) \times 10^{-3}$$

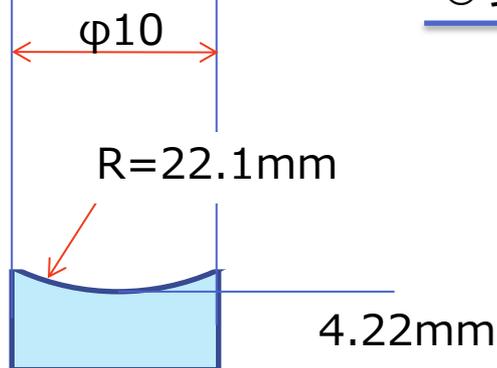
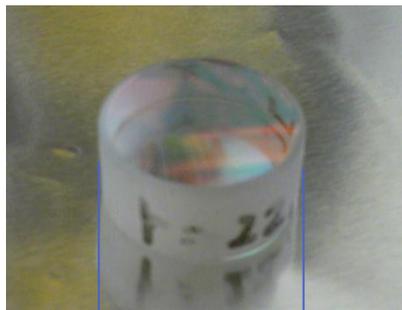
$$\frac{P_r}{P_{in}} = 0.82 \pm 0.03$$

$$7.4 \times 10^3 < \mathcal{F} < 1.4 \times 10^4 \quad (0.85 < \epsilon < 1)$$

同時に行ったRing-downの測定:  $\mathcal{F} = 1.0(\pm 0.2) \times 10^4$  ... 誤差の範囲内で一致

# ミラー表面の加工精度

## ◎測定結果



- $\mathcal{F} < 2.0 \times 10^4$

- Ring-downでの測定と、反射光と透過光を利用した測定 ( $T = 2.0 \times 10^{-4}$ を仮定)は誤差の範囲内で一致

## ◎シミュレーション

- $T = 2.0 \times 10^{-4}$  (分光計での測定で確認済み)

- $L \leq 1 \times 10^{-4}$

- $R \geq 99.997\%$  ( $\mathcal{F} \geq 1 \times 10^5$ )

- 表面粗さ  $\leq 3\text{\AA}$  ( $R < 25\text{mm}$ では測定不可)

$\mathcal{F} \geq 1 \times 10^5$ に必要な精度：表面粗さ  $\leq 1\text{\AA}$

・発注当時(去年)に比べて精度は良くなっているそうなので、もう一度発注,受け取り次第評価を行う。

# 目次

- 背景
  - 光子数分離とは
  - 非破壊光子数分離の必要性
- 光子数分離の原理
  - 光と原子の相互作用
  - 電磁誘起透明化(EIT)
  - 真空誘起透明化(VIT)
  - VITを利用した光子数分離
- 実験の進捗状況
  - 共振器の設計
  - 共振器のフィネス(反射率)の評価
- まとめと今後の展望

# まとめ

- Rb原子準位間遷移に強く結合するCavityの設計

Cooperative Parameter  $\eta = \frac{4g^2}{\kappa\Gamma} = \frac{24\mathcal{F}}{\pi k^2 w_0^2}$  を大きくとる.

- Beam waistをできるだけ小さく
- Optical Depthを大きくするため, Probe光も同時に共鳴させる

→ 共振器長L, 曲率半径Rの決定

- Finesseはできるだけ大きく(ただしTransmission dominant)

測定の結果:  $\mathcal{F} \leq 2 \times 10^4$  (表面粗さのため)

→再発注, 届き次第再評価の予定

