

Xeガスに対するマクロコヒーレンス 生成に向けた励起光源開発

岡井晃一

M2

岡山大学 異分野基礎科学研究所

量子宇宙研究コア

SPAN Collaboration

流れ

- インTRODクシヨN
 - SPAN Collaboration
 - RENP過程
 - マクろコヒーレンス増幅機構
- Xe 3光子励起実験
- 周波数安定化システム
 - 周波数安定化の必要性
 - 手法
 - システム構成
 - 装置の概観
 - 周波数安定性の評価
- まとめ

流れ

- インTRODクシヨN
 - SPAN Collaboration
 - RENP過程
 - マクろコヒーレンス増幅機構
- Xe 3光子励起実験
- 周波数安定化システム
 - 周波数安定化の必要性
 - 手法
 - システム構成
 - 装置の概観
 - 周波数安定性の評価
- まとめ

SPAN Collaboration

SPectroscopy of **A**tomic **N**eutrino

原子を用いて未解明なニュートリノの諸性質を決定する！

SPAN Collaboration

SPectroscopy of **A**tomic **N**eutrino

原子を用いて未解明なニュートリノの諸性質を決定する！

どうやって？

SPAN Collaboration

SPectroscopy of **A**tomic **N**eutrino

原子を用いて未解明なニュートリノの諸性質を決定する！



REN P過程

Radiative **E**mission of **N**eutrino **P**air

SPAN Collaboration

SPectroscopy of Atomic Neutrino

原子を用いて未解明なニュートリノの諸性質を決定する！

どうやって？

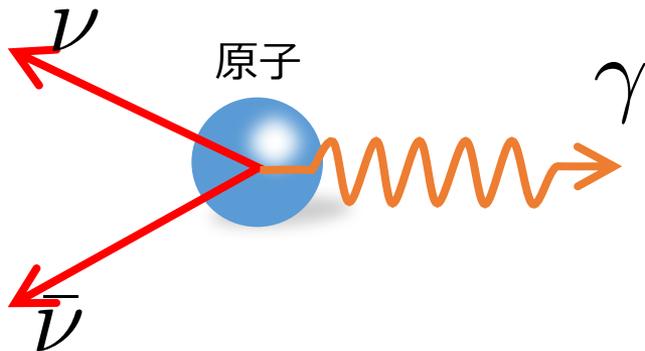


RENP過程

Radiative Emission of Neutrino Pair

光子を伴うニュートリノ対放射

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$



SPAN Collaboration

SPectroscopy of Atomic Neutrino

原子を用いて未解明なニュートリノの諸性質を決定する！

どうやって？

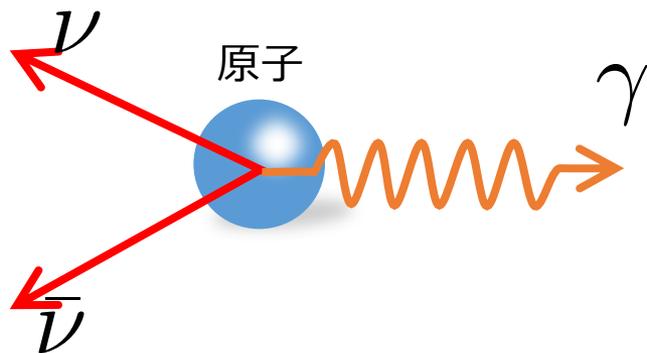


REN_P過程

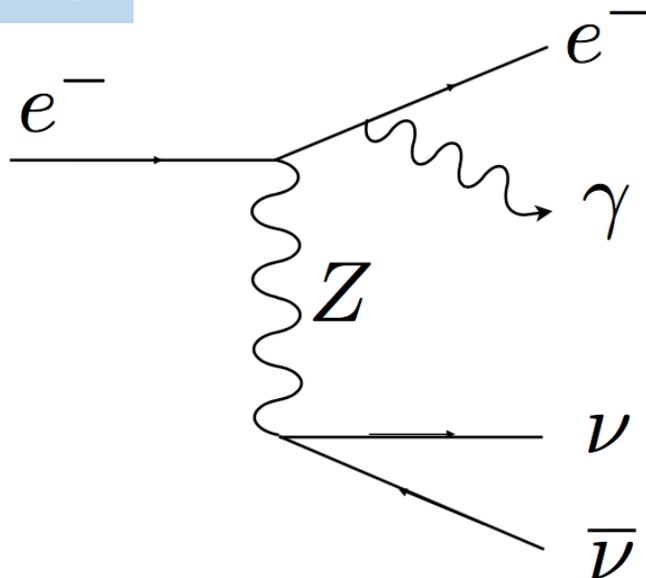
Radiative Emission of Neutrino Pair

光子を伴うニュートリノ対放射

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$

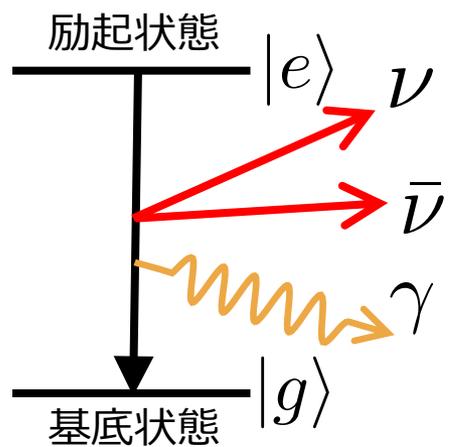


素過程



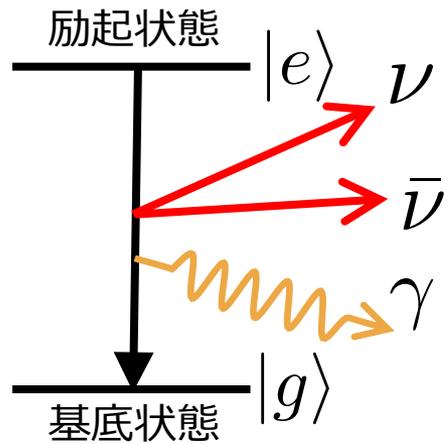
RENP過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$

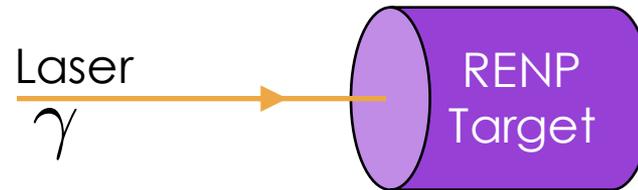


RENp過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$

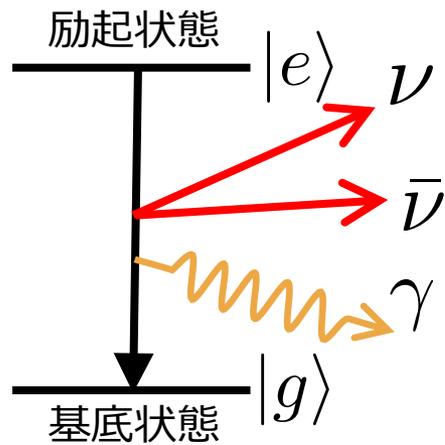


実験イメージ

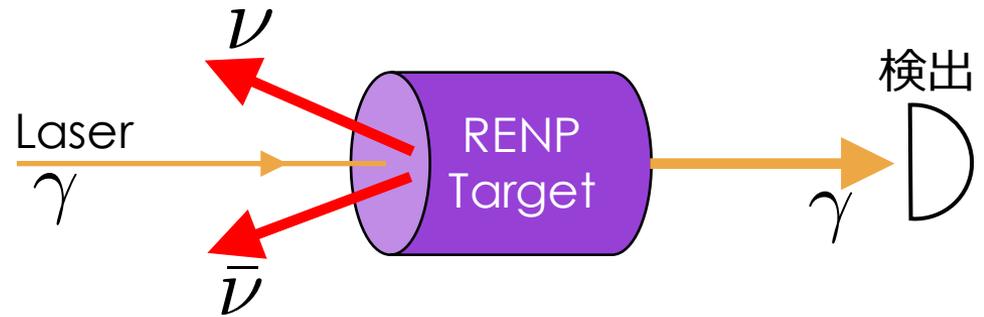


RENPN過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$

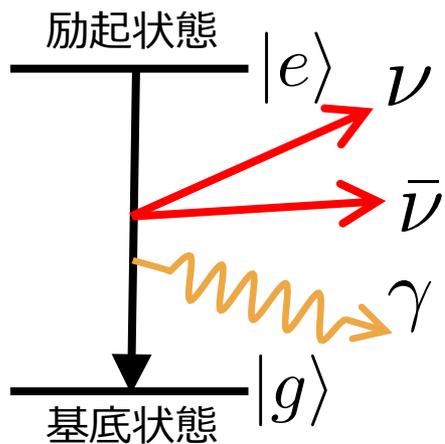


実験イメージ

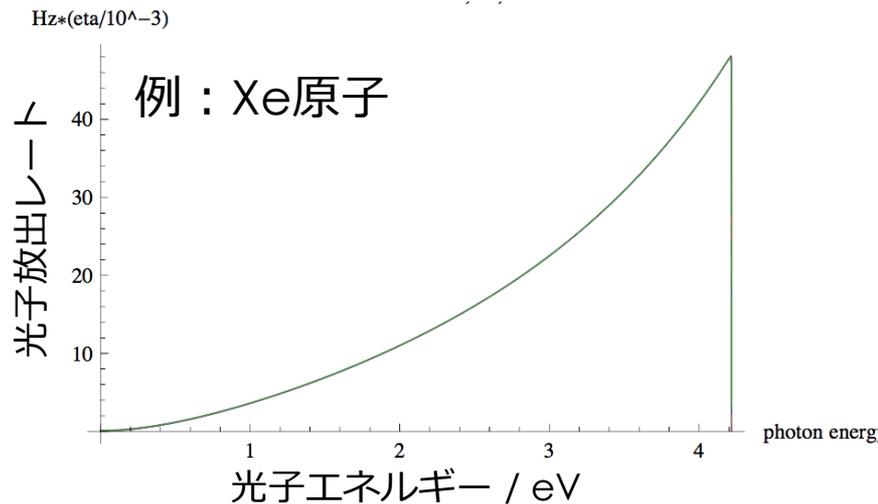
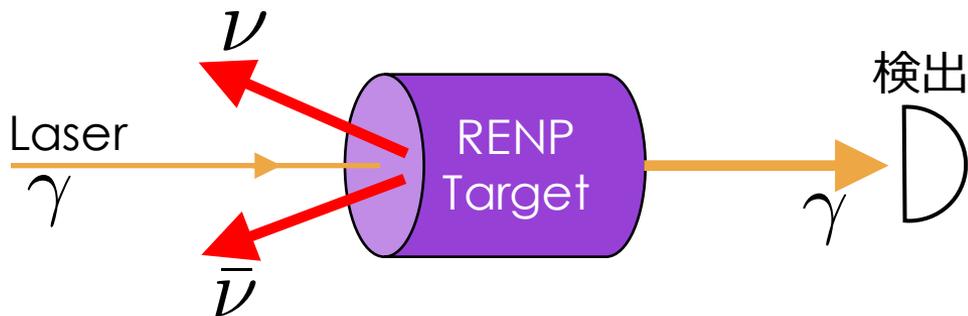


RENPN過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$

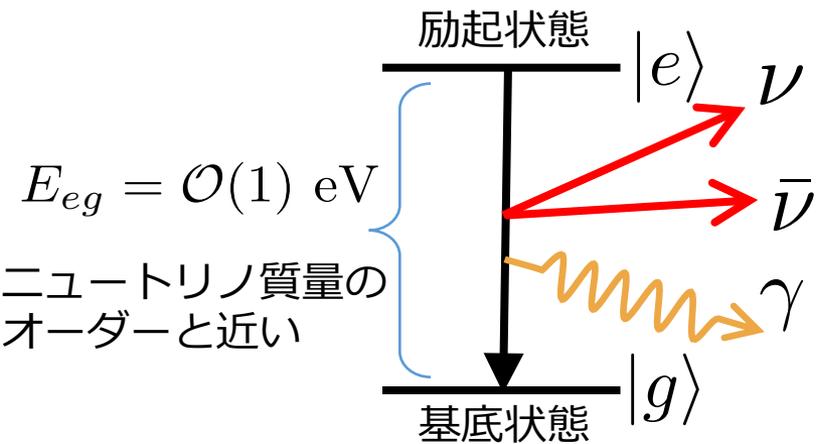


実験イメージ



RENP過程

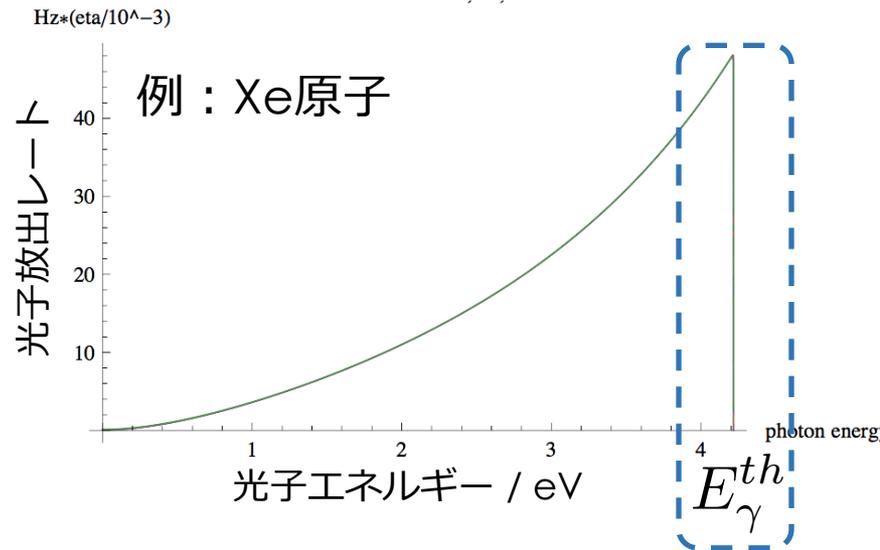
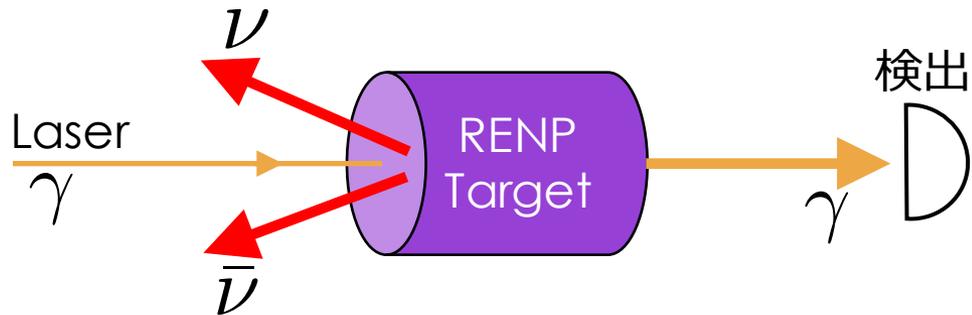
$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$



エネルギー・運動量保存則から、

$$\text{閾値} : E_{\gamma}^{th} = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{[(m_i + m_j)c^2]^2}{2E_{eg}}$$

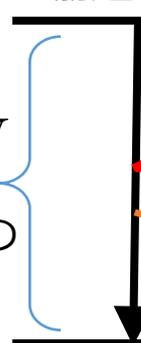
実験イメージ



RENp過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle$$

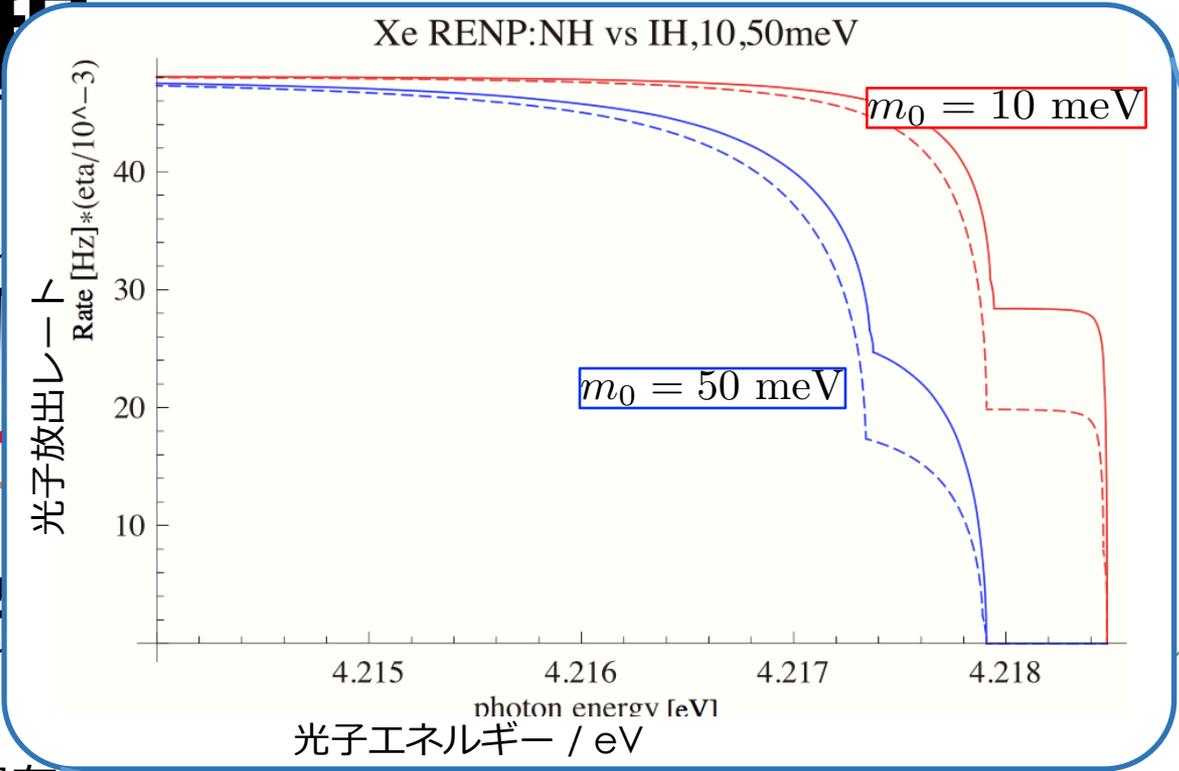
励起状態



$$E_{eg} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$$

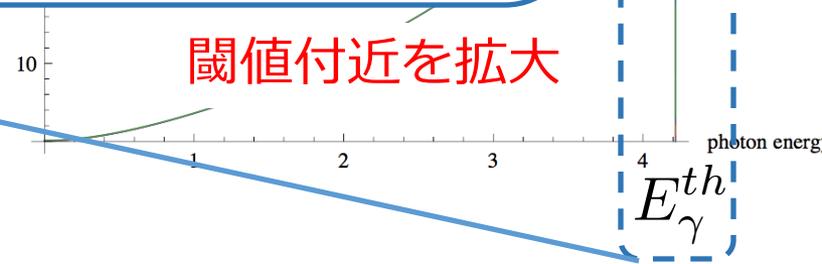
ニュートリノ質量のオーダーと近い

基底状態



エネルギー・運動量保存則から、

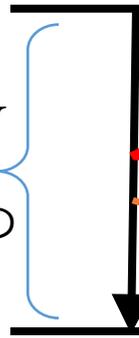
$$\text{閾値} : E_{\gamma}^{th} = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{[(m_i + m_j)c^2]^2}{2E_{eg}}$$



RENP過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle$$

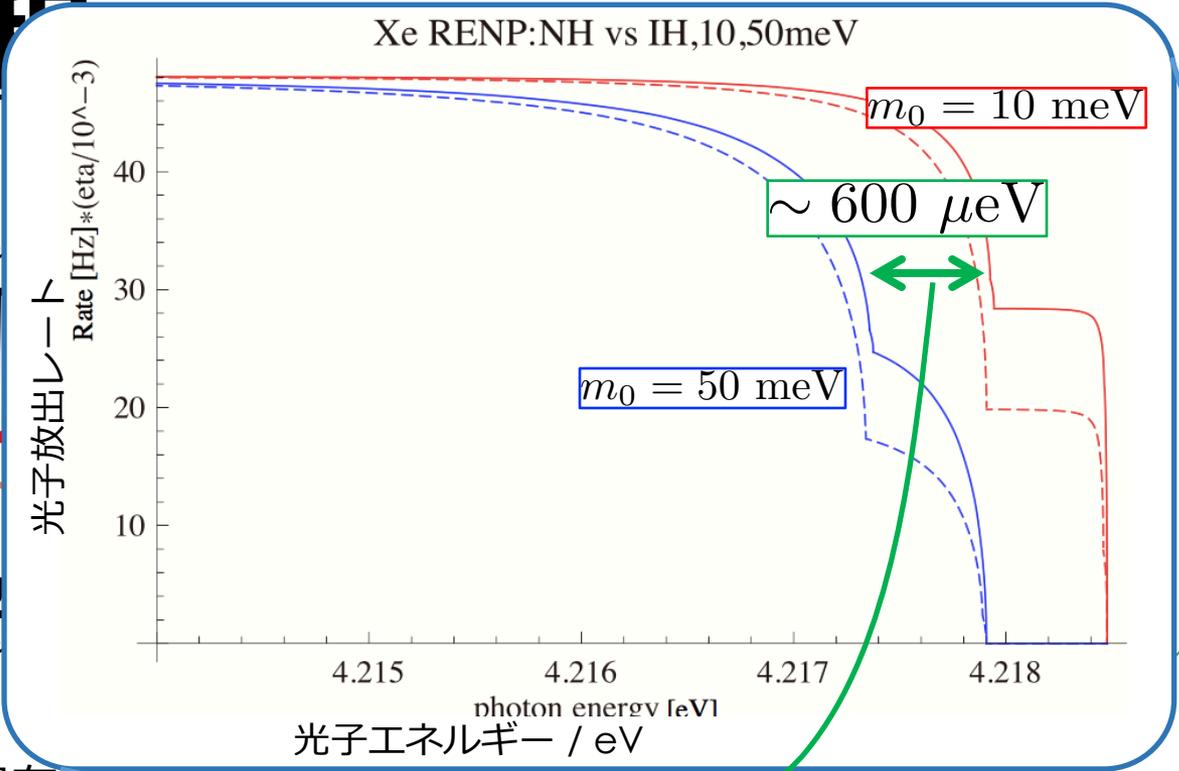
励起状態



基底状態

$$E_{eg} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$$

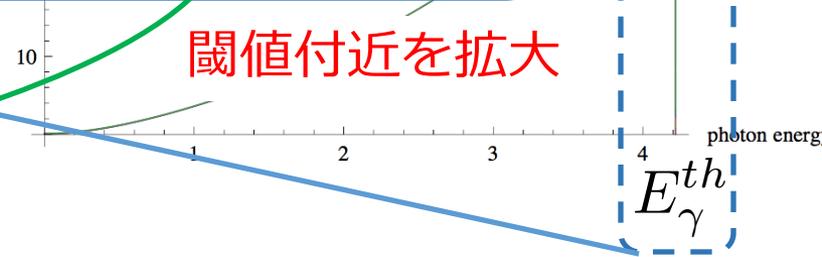
ニュートリノ質量のオーダーと近い



エネルギー・運動量保存則から、

$$\text{閾値} : E_{\gamma}^{th} = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{[(m_i + m_j)c^2]^2}{2E_{eg}}$$

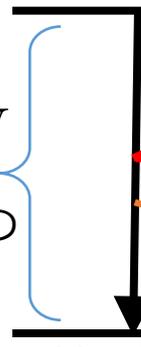
閾値付近を拡大



RENP過程

$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle$$

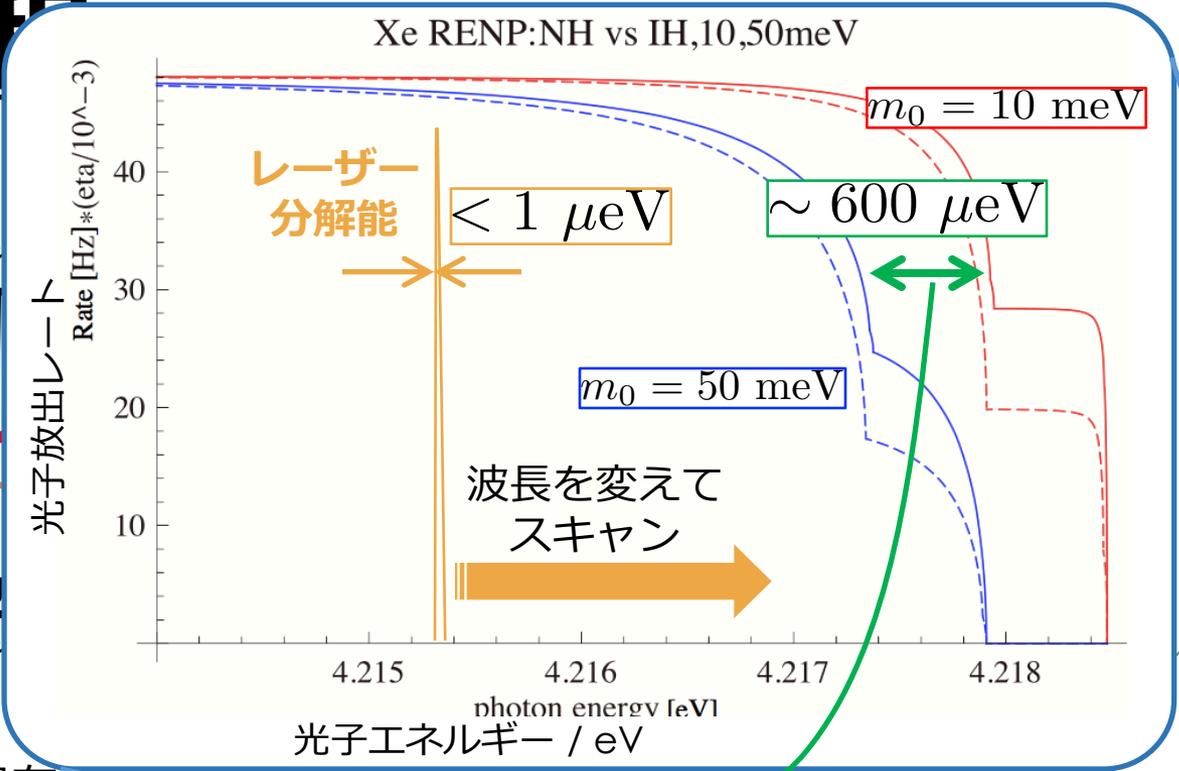
励起



$$E_{eg} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$$

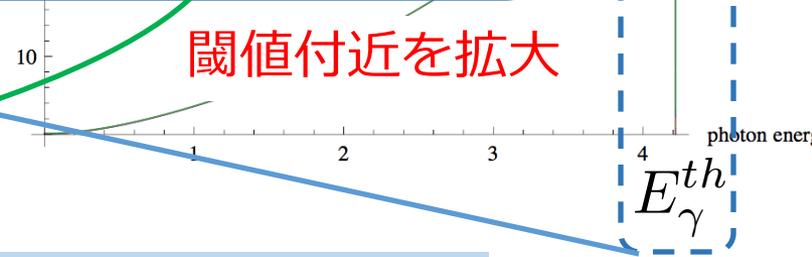
ニュートリノ質量の
オーダーと近い

基底



エネルギー・運動量保存則から、

$$\text{閾値: } E_{\gamma}^{th} = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{[(m_i + m_j)c^2]^2}{2E_{eg}}$$



**レーザーの分解能 (<1μeV) でスキャン!
ニュートリノ質量を高精度で決定可能!**

RENP過程

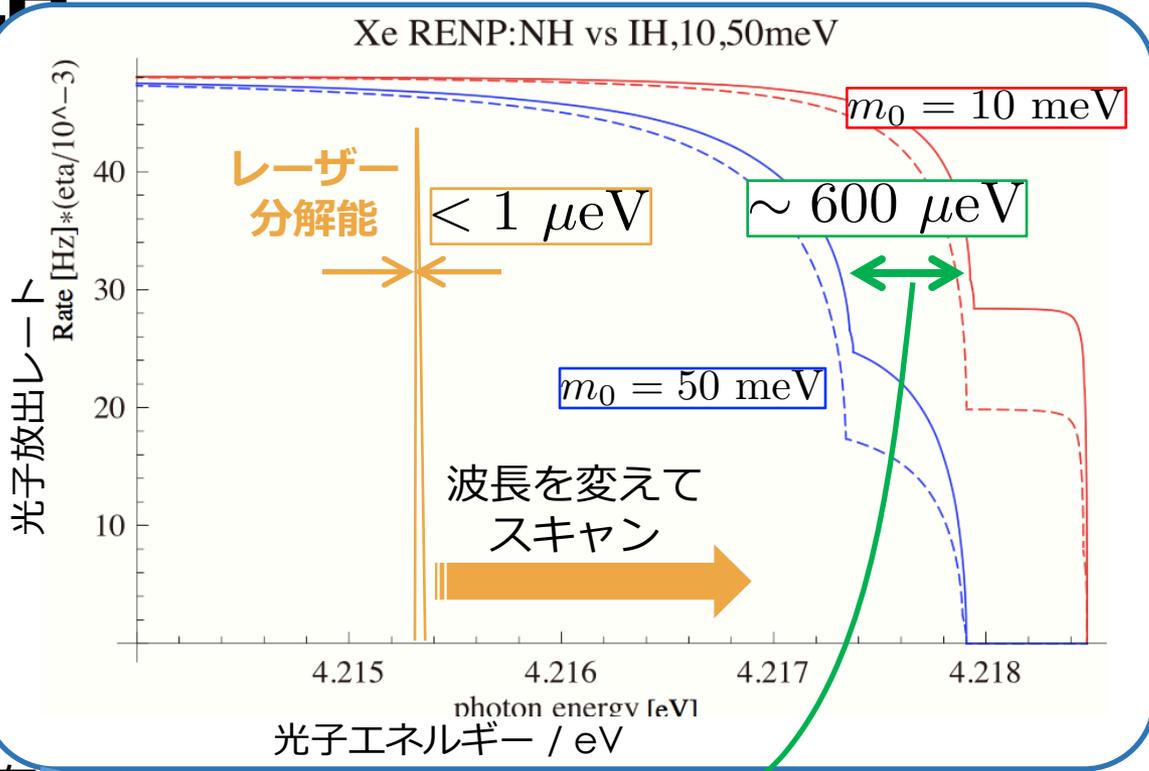
$$|e\rangle \rightarrow |g\rangle$$

励起

基底

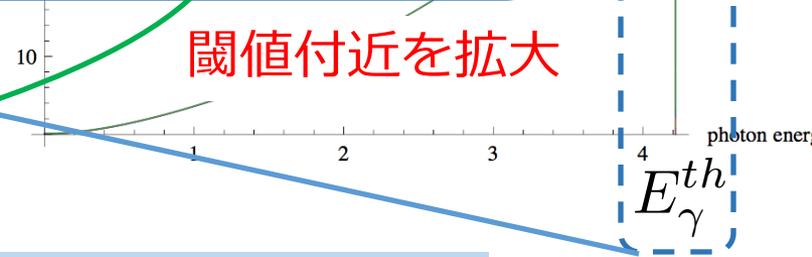
$$E_{eg} = \mathcal{O}(1) \text{ eV}$$

ニュートリノ質量の
オーダーと近い



エネルギー・運動量保存則から、

$$\text{閾値: } E_{\gamma}^{\text{th}} = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{[(m_i + m_j)c^2]^2}{2E_{eg}}$$



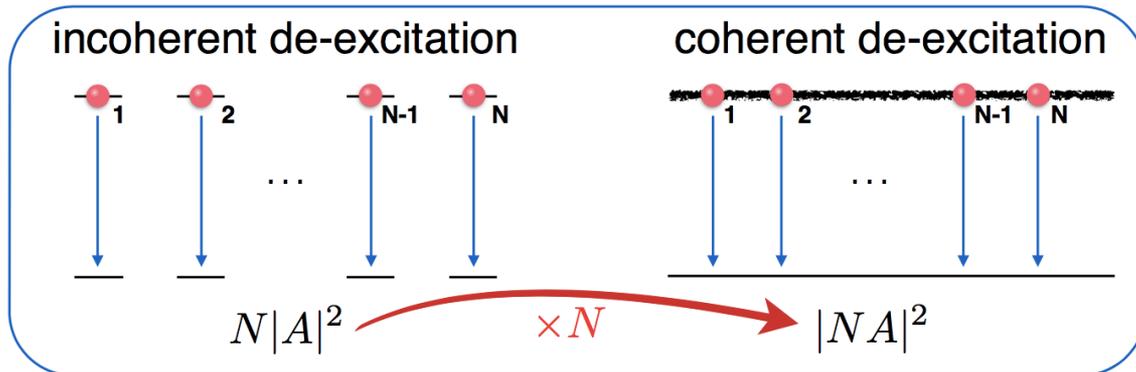
**レーザーの分解能 ($< 1 \mu\text{eV}$) でスキャン!
ニュートリノ質量を高精度で決定可能!**

しかし... RENPのレート: $\Gamma_{\text{RENP}} \sim 10^{-34} \text{ Hz}$ (10²⁶年に一回程度)

マクロコヒーレンス増幅機構

原子系に“マクロ”なコヒーレンスを生成する

→レーザー光のコヒーレンスを系に移すイメージ

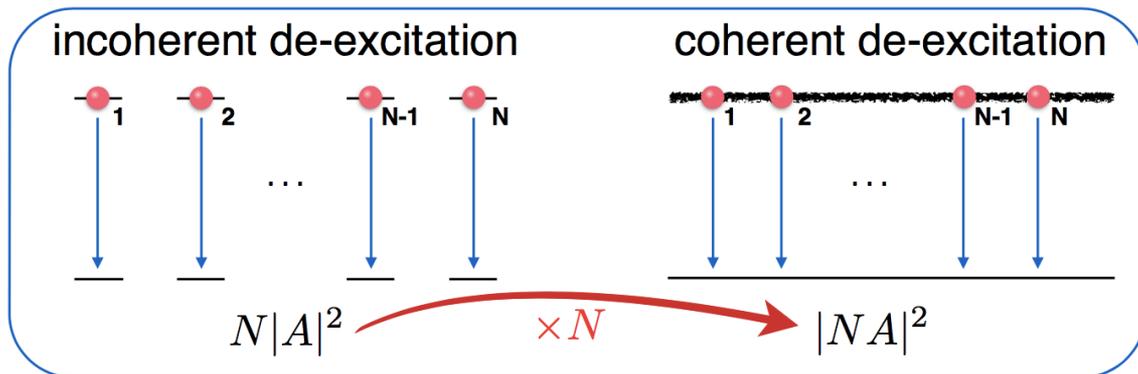


コヒーレンスな系では
脱励起レートが加速される
→RENPのような稀な過程を
ブースト可能！

マクロコヒーレンス増幅機構

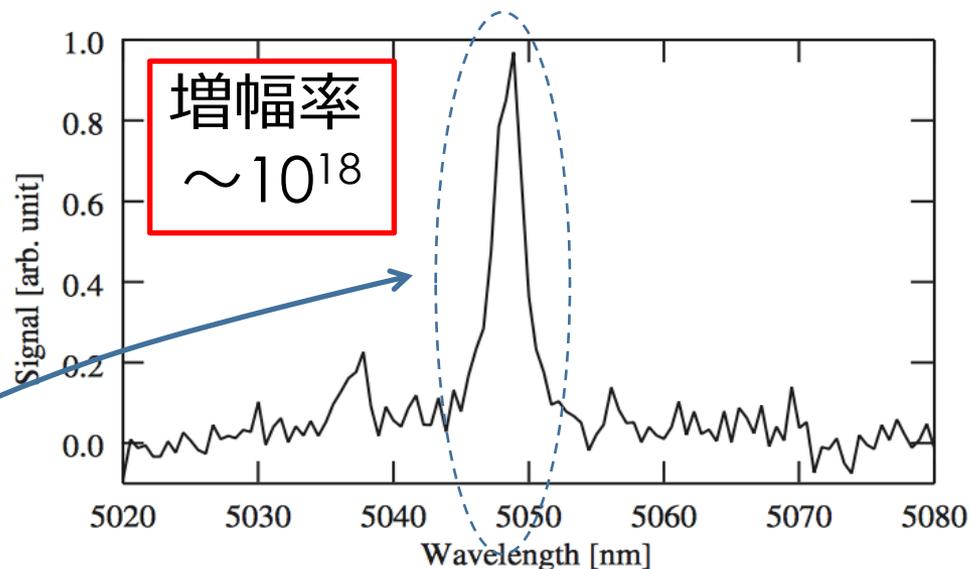
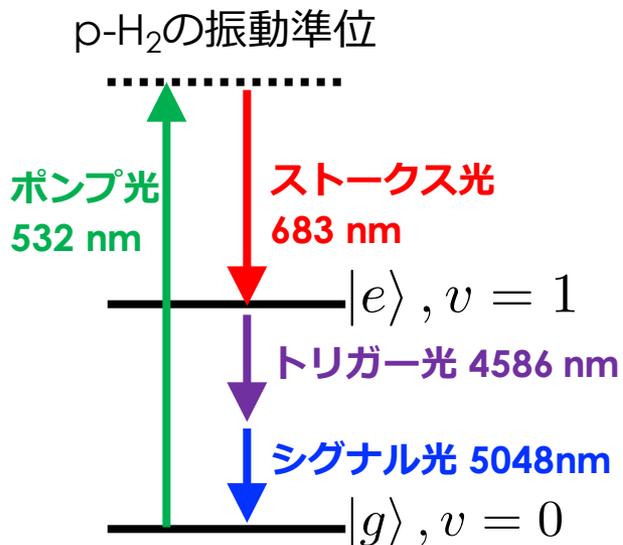
原子系に“マクロ”なコヒーレンスを生成する

→レーザー光のコヒーレンスを系に移すイメージ



コヒーレンスな系では
脱励起レートが加速される
→RENPのような稀な過程を
ブースト可能！

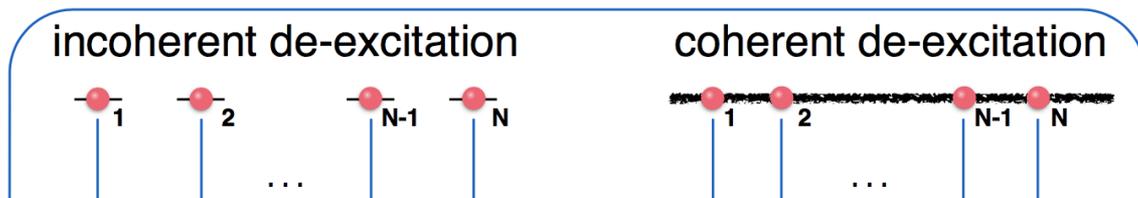
原理検証実験：p-H₂分子気体を使った2光子過程の増幅



マクロコヒーレンス増幅機構

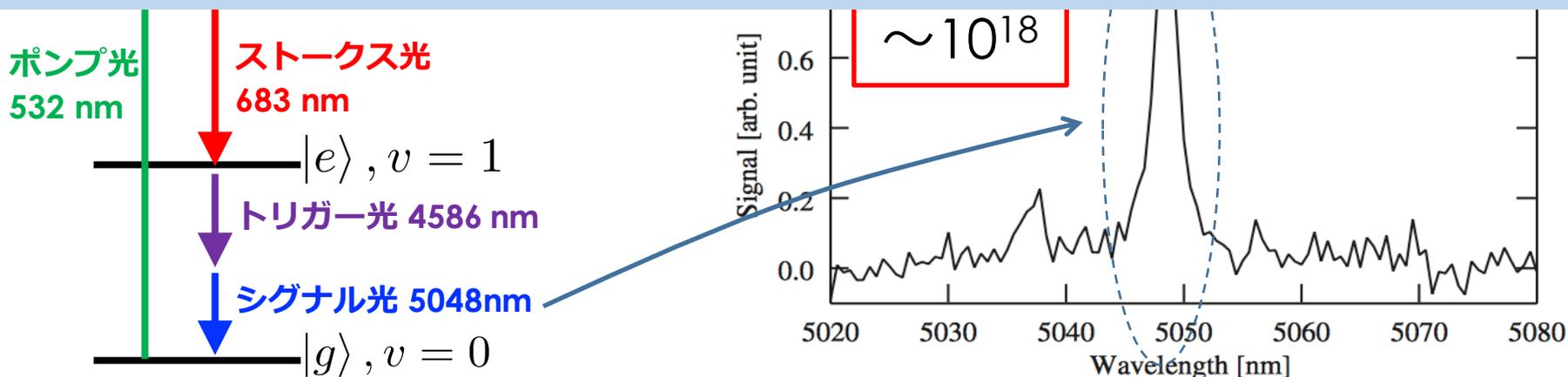
原子系に“マクロ”なコヒーレンスを生成する

→レーザー光のコヒーレンスを系に移すイメージ



コヒーレンスな系では
脱励起レートが加速される

テーブルトップでの ニュートリノ研究の可能性！！



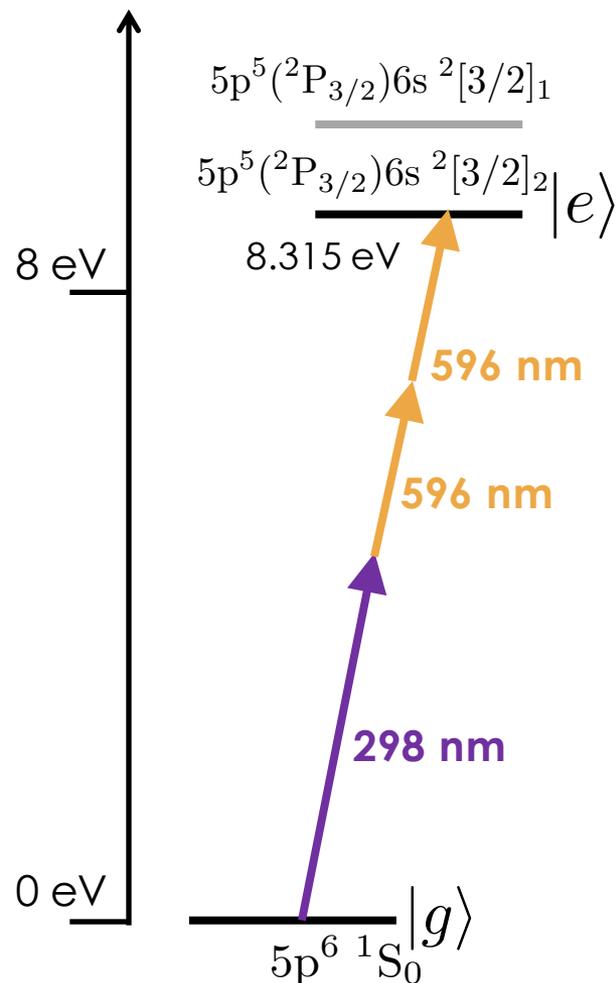
流れ

- インTRODクシヨN
 - SPAN Collaboration
 - RENP過程
 - マクろコヒーレンス増幅機構
- Xe 3光子励起実験
- 周波数安定化システム
 - 周波数安定化の必要性
 - 手法
 - システム構成
 - 装置の概観
 - 周波数安定性の評価
- まとめ

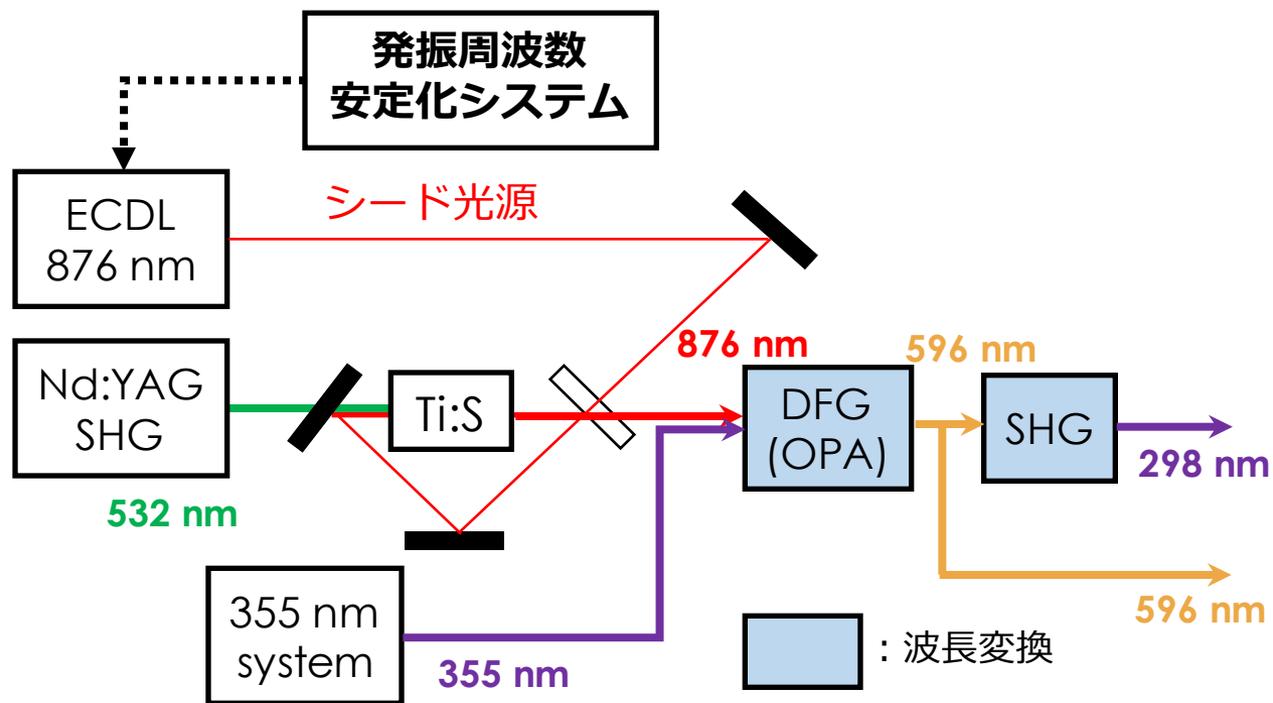
Xe 3光子励起実験

RENIP過程のターゲットとして期待されている！

エネルギー準位



励起光源



シード光源の長期的波長安定性が重要
→シード光源となるDLの発振周波数を安定化するシステムを構築

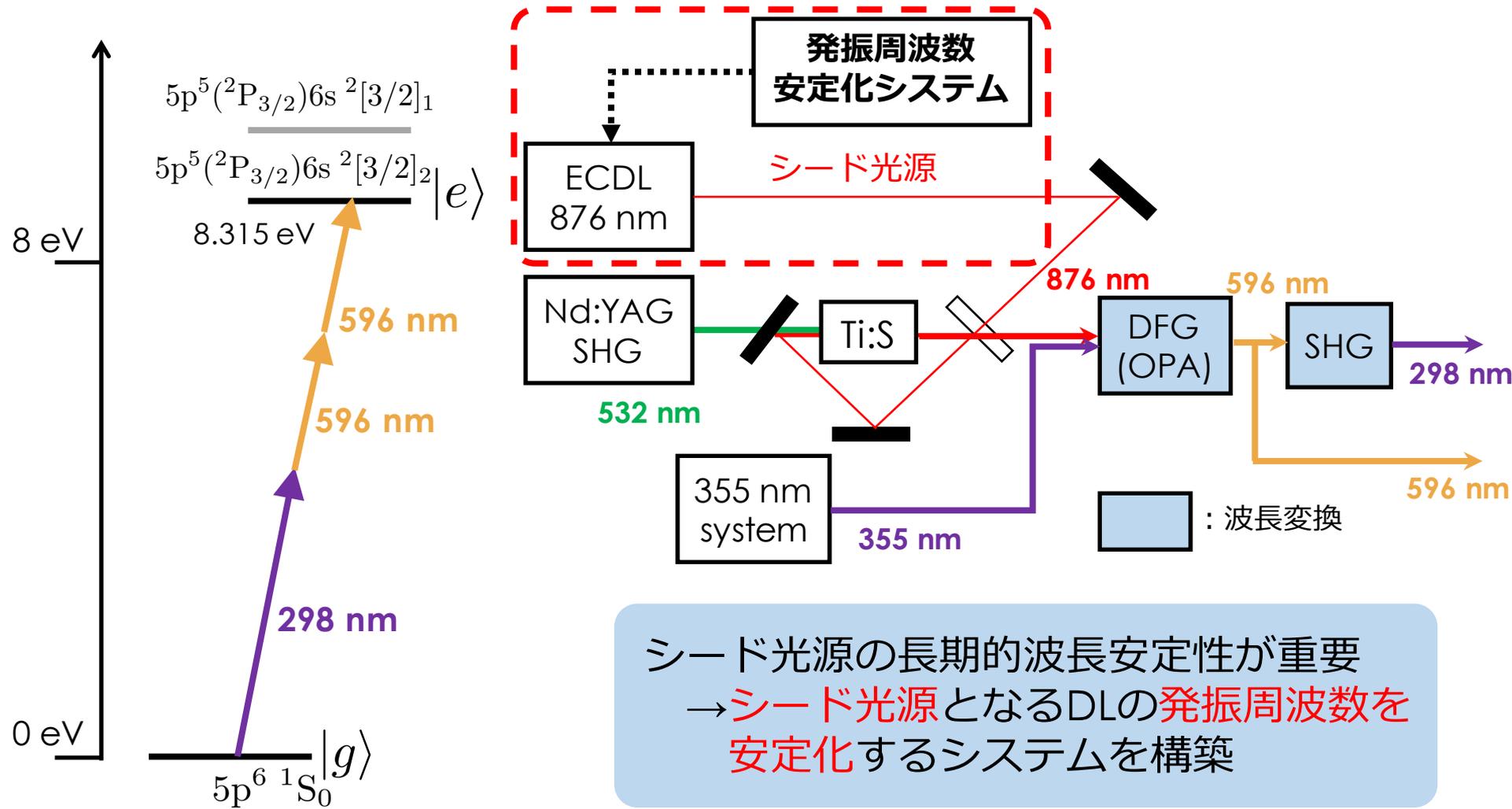
Xe 3光子励起実験

RENIP過程のターゲットとして期待されている！

エネルギー準位

励起光源

ここまで完成



シード光源の長期的波長安定性が重要
→シード光源となるDLの発振周波数を安定化するシステムを構築

流れ

- インTRODクシヨN
 - SPAN Collaboration
 - RENP過程
 - マクろコヒーレンス増幅機構
- Xe 3光子励起実験
- 周波数安定化システム
 - 周波数安定化の必要性
 - 手法
 - システム構成
 - 装置の概観
 - 周波数安定性の評価
- まとめ

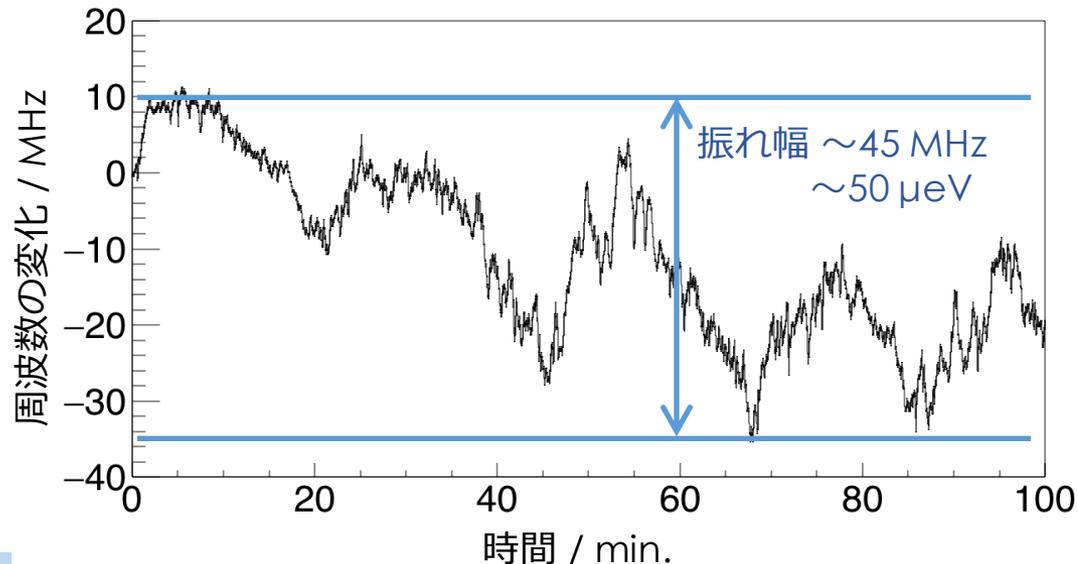
周波数安定化システム

なぜ周波数安定化？

マクロコヒーレンスの生成には励起光源のチューニングが必要

10 μeV 程度の差を制御

しかし... レーザーは時間とともに周波数ドリフト



システム要件

周波数安定性：

長期周波数安定度

$\pm 1 \text{ MHz}$ ($\sim 1 \mu\text{eV}$)

かつ、複製を容易に！

周波数安定化システム

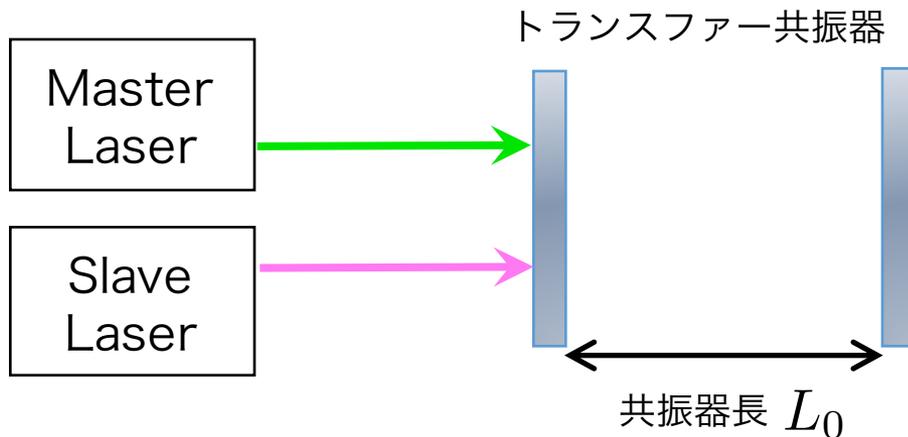
手法 トランスファー共振器を使う

2台のレーザー間で周波数安定性を伝達

- 安定化されている半導体レーザー → マスターレーザー
- 不安定な半導体レーザー → スレイブレーザー

掃引型トランスファー共振器

トランスファー光共振器に2つのレーザー光を入れる



周波数安定化システム

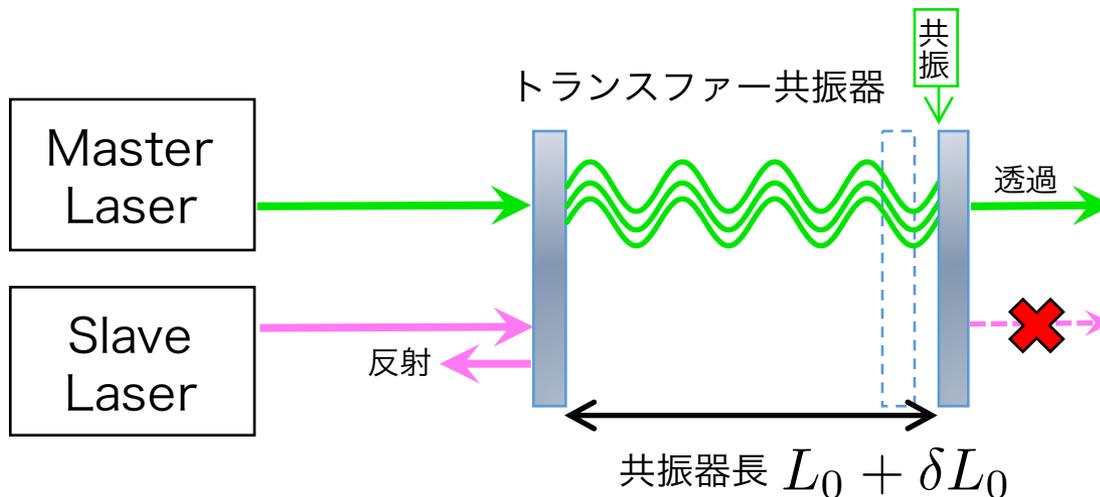
手法 トランスファー共振器を使う

2台のレーザー間で周波数安定性を伝達

- 安定化されている半導体レーザー → マスターレーザー
- 不安定な半導体レーザー → スレイブレーザー

掃引型トランスファー共振器

共振器長を連続的に変化させると…



周波数安定化システム

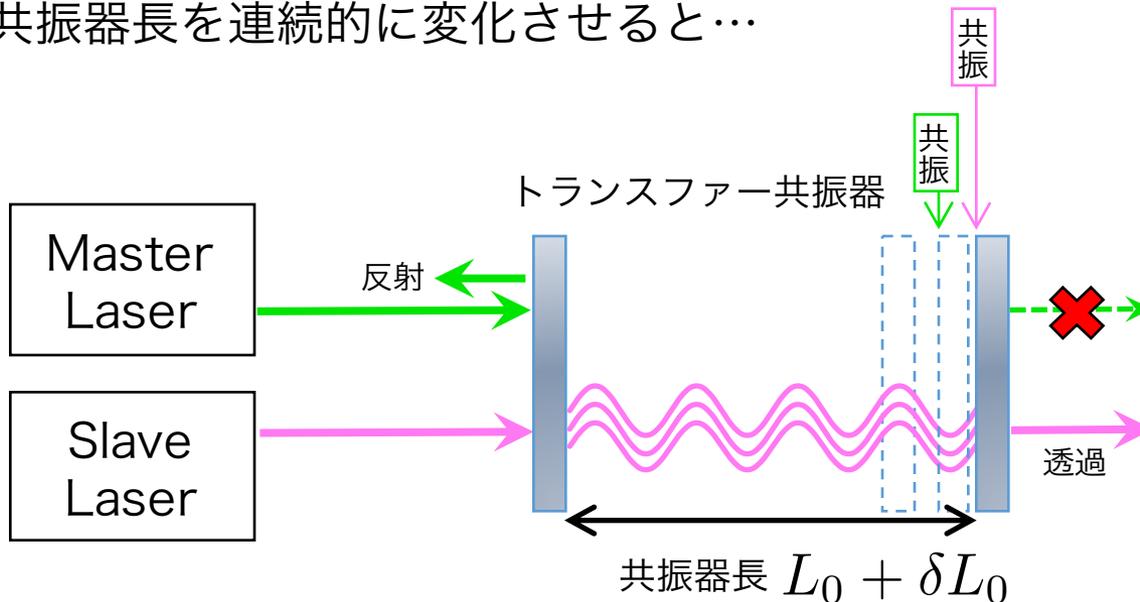
手法 トランスファー共振器を使う

2台のレーザー間で周波数安定性を伝達

- 安定化されている半導体レーザー → マスターレーザー
- 不安定な半導体レーザー → スレイブレーザー

掃引型トランスファー共振器

共振器長を連続的に変化させると…



周波数安定化システム

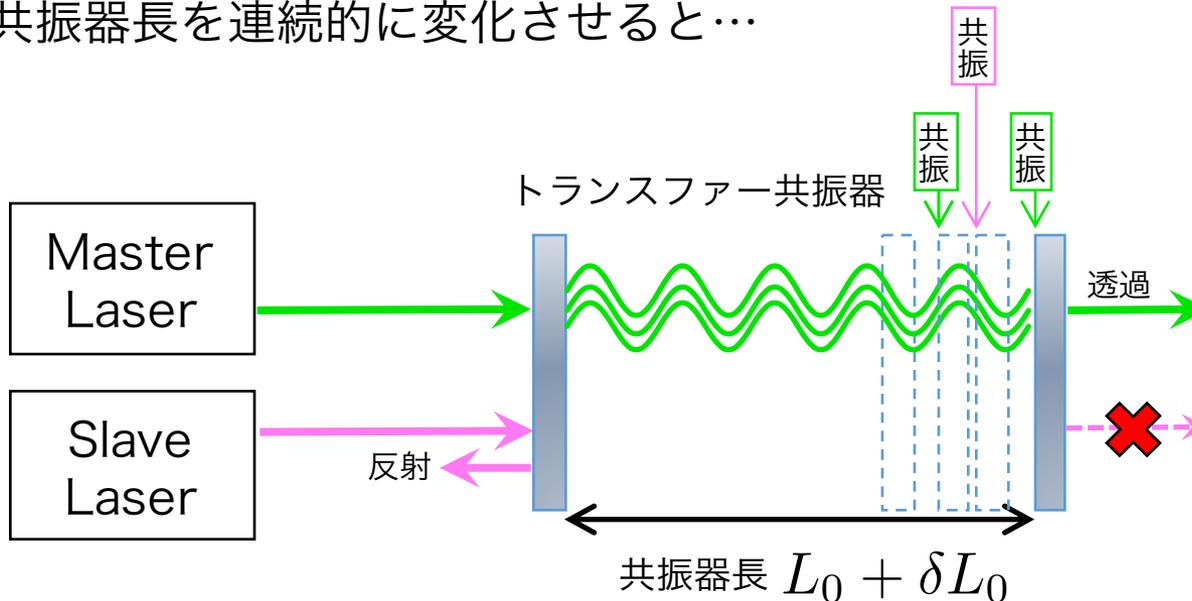
手法 トランスファー共振器を使う

2台のレーザー間で周波数安定性を伝達

- 安定化されている半導体レーザー → マスターレーザー
- 不安定な半導体レーザー → スレイブレーザー

掃引型トランスファー共振器

共振器長を連続的に変化させると…



周波数安定化システム

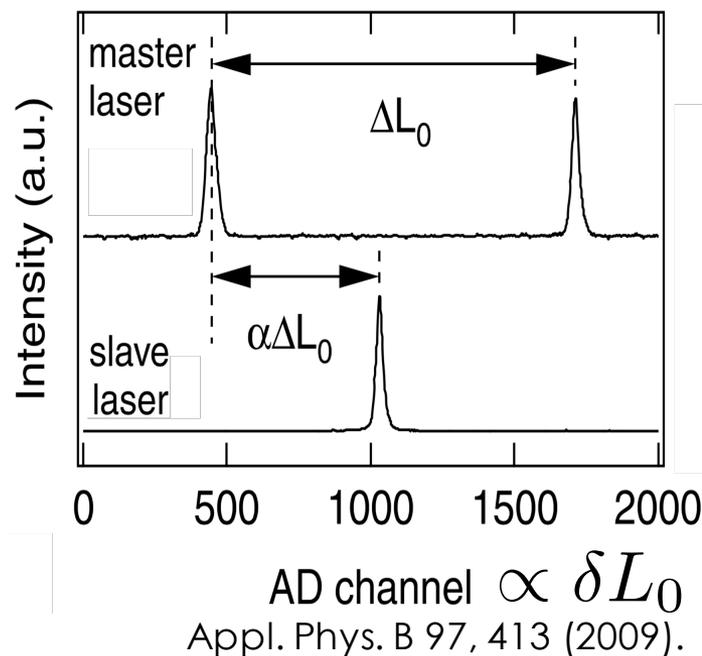
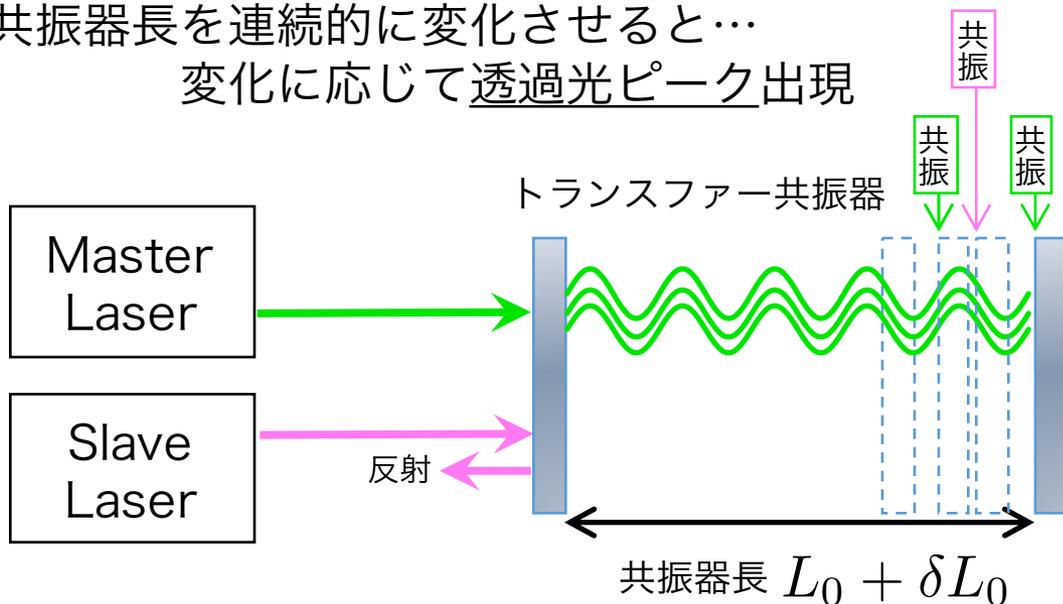
手法 トランスファー共振器を使う

2台のレーザー間で周波数安定性を伝達

- 安定化されている半導体レーザー → マスターレーザー
- 不安定な半導体レーザー → スレイブレーザー

掃引型トランスファー共振器

共振器長を連続的に変化させると…
変化に応じて透過光ピーク出現



周波数安定化システム

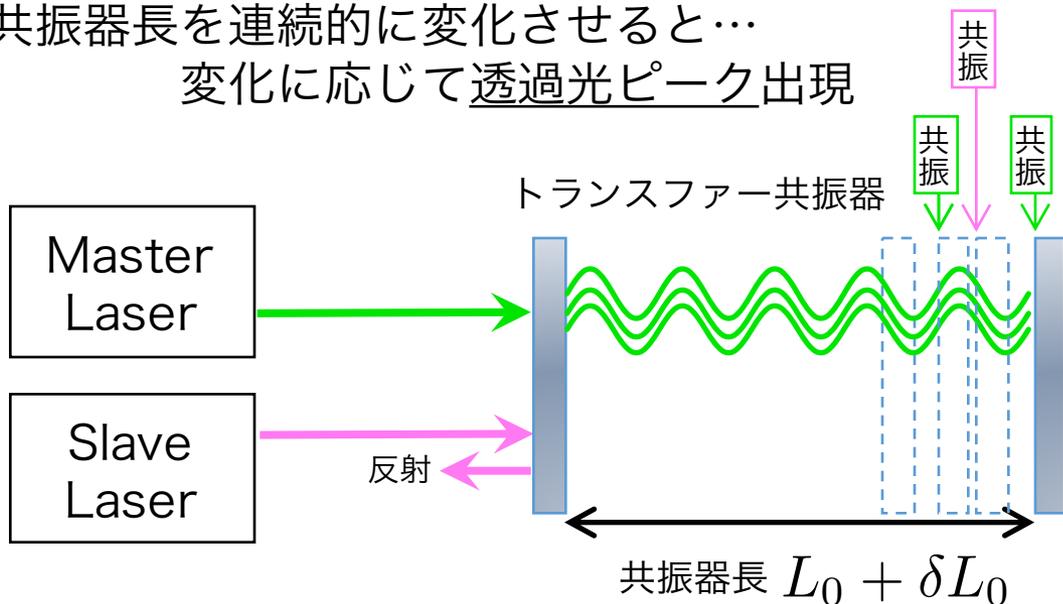
手法 トランスファー共振器を使う

2台のレーザー間で周波数安定性を伝達

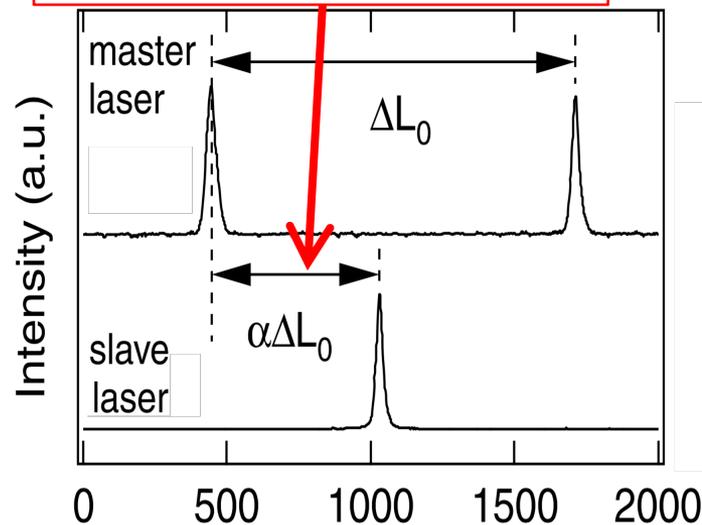
- 安定化されている半導体レーザー → マスターレーザー
- 不安定な半導体レーザー → スレイブレーザー

掃引型トランスファー共振器

共振器長を連続的に変化させると…
変化に応じて透過光ピーク出現



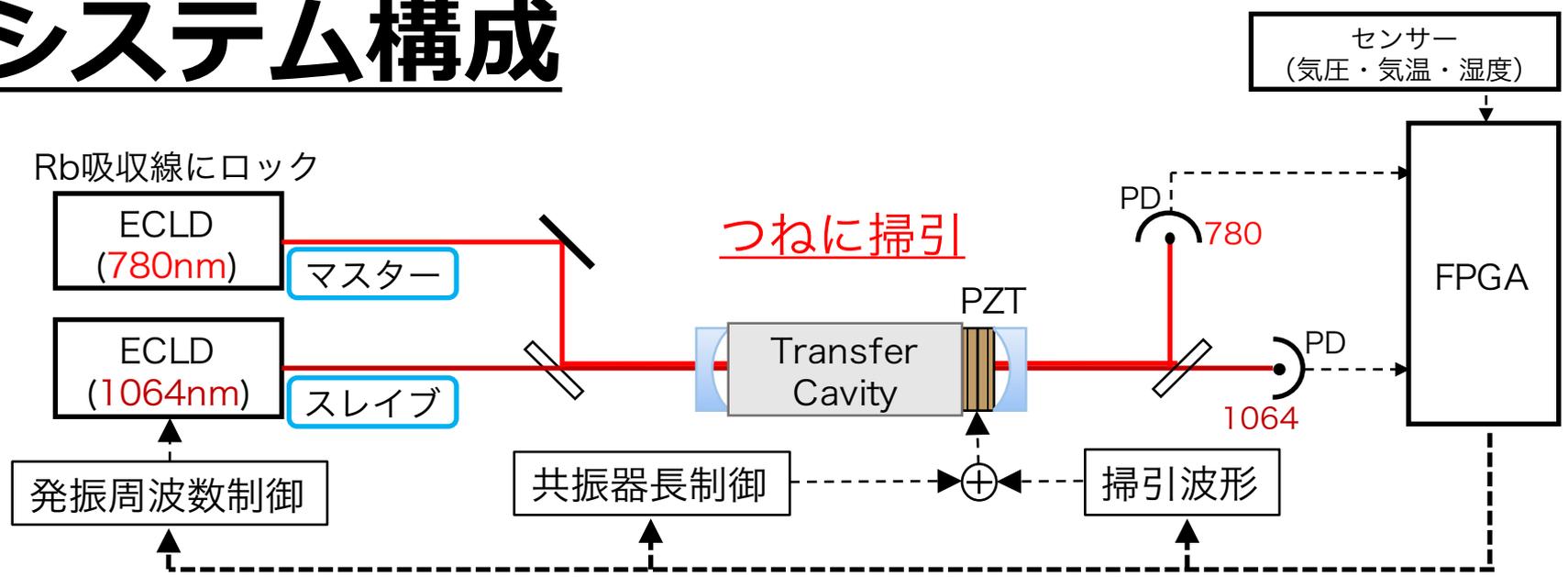
透過光ピークの間隔を一定にして安定性を伝達



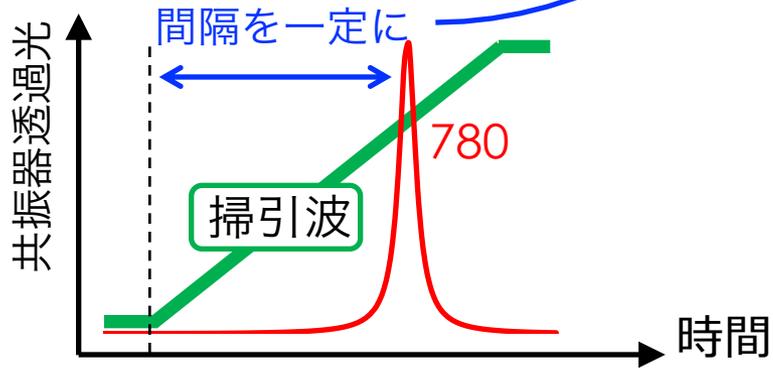
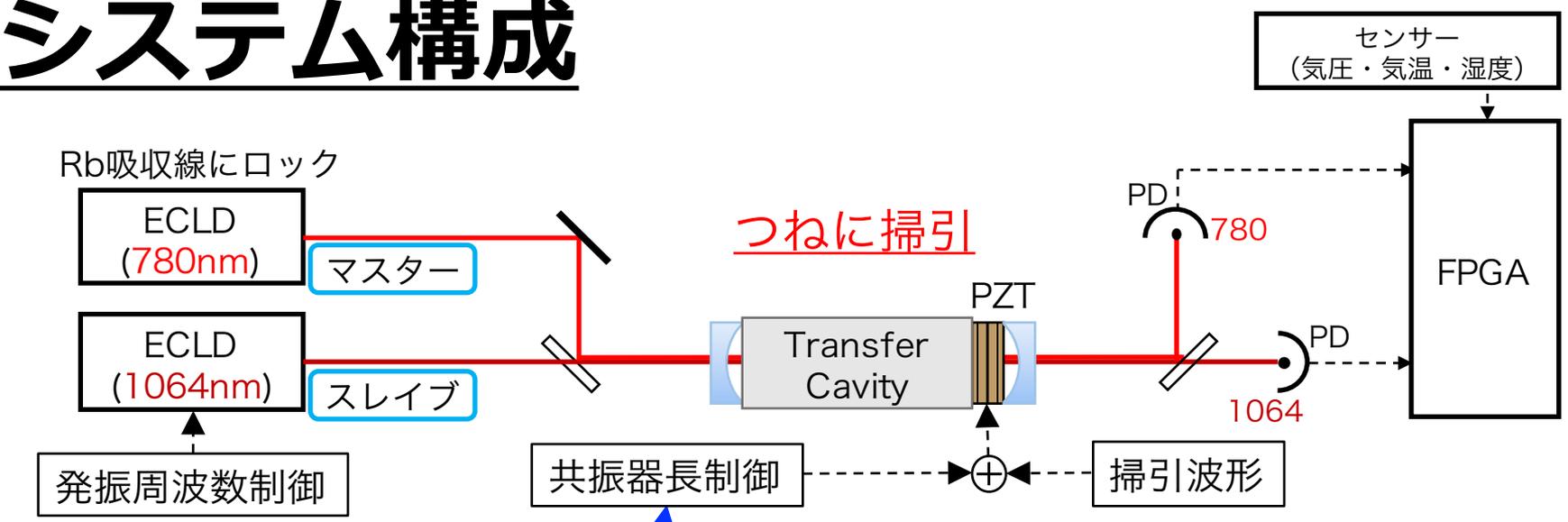
共振器やレーザーの制御にはFPGAを使用

AD channel $\propto \delta L_0$
Appl. Phys. B 97, 413 (2009).

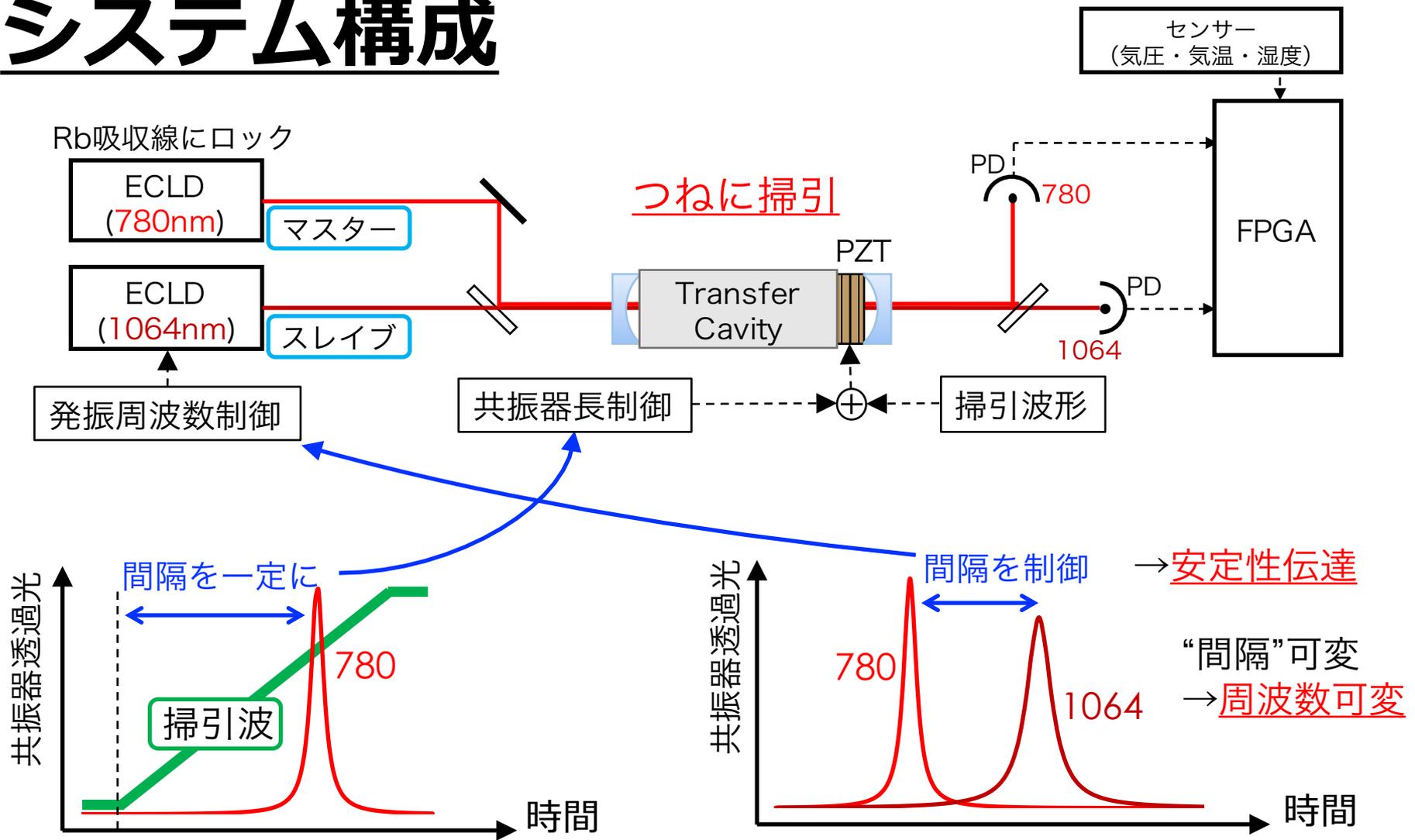
システム構成



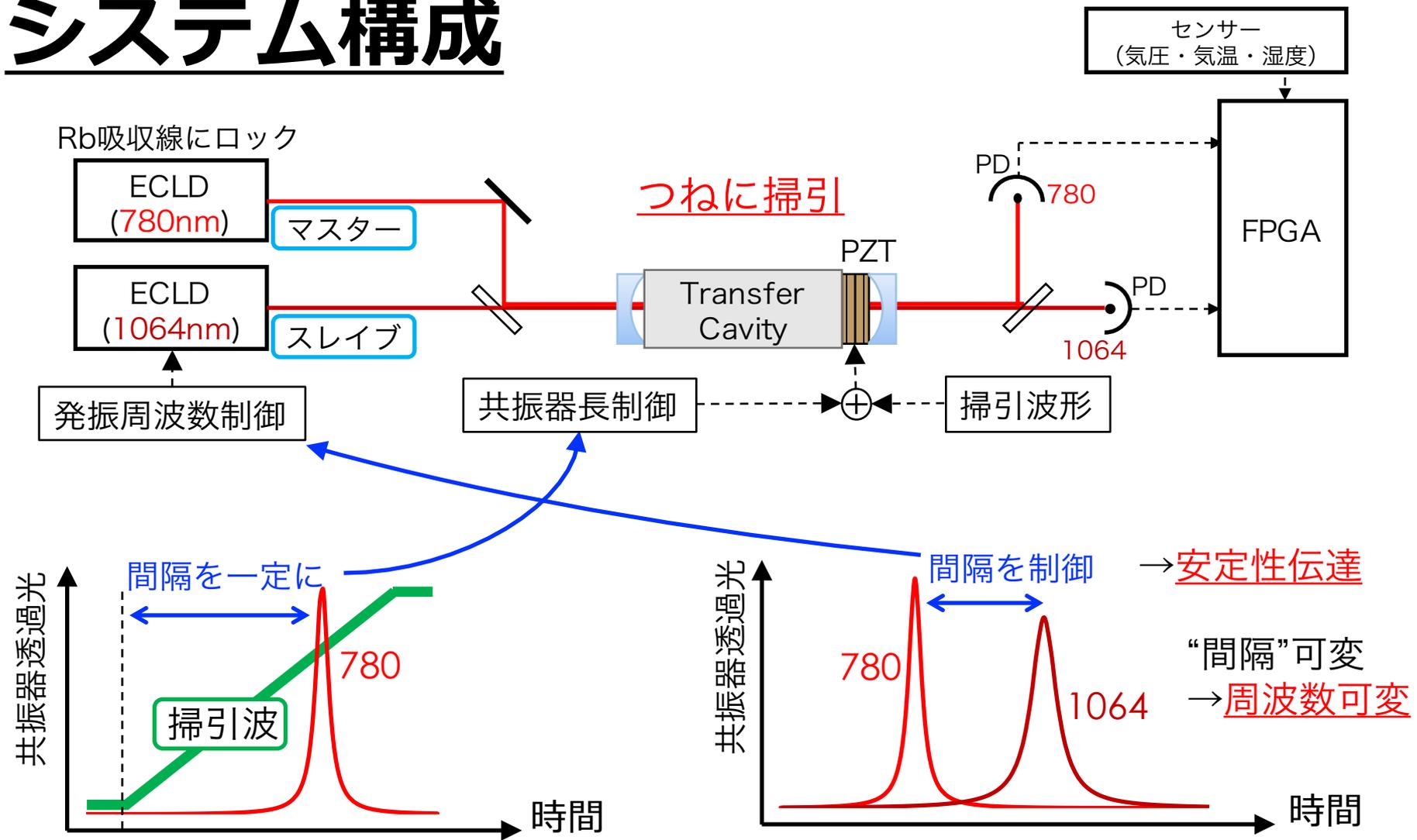
システム構成



システム構成



システム構成



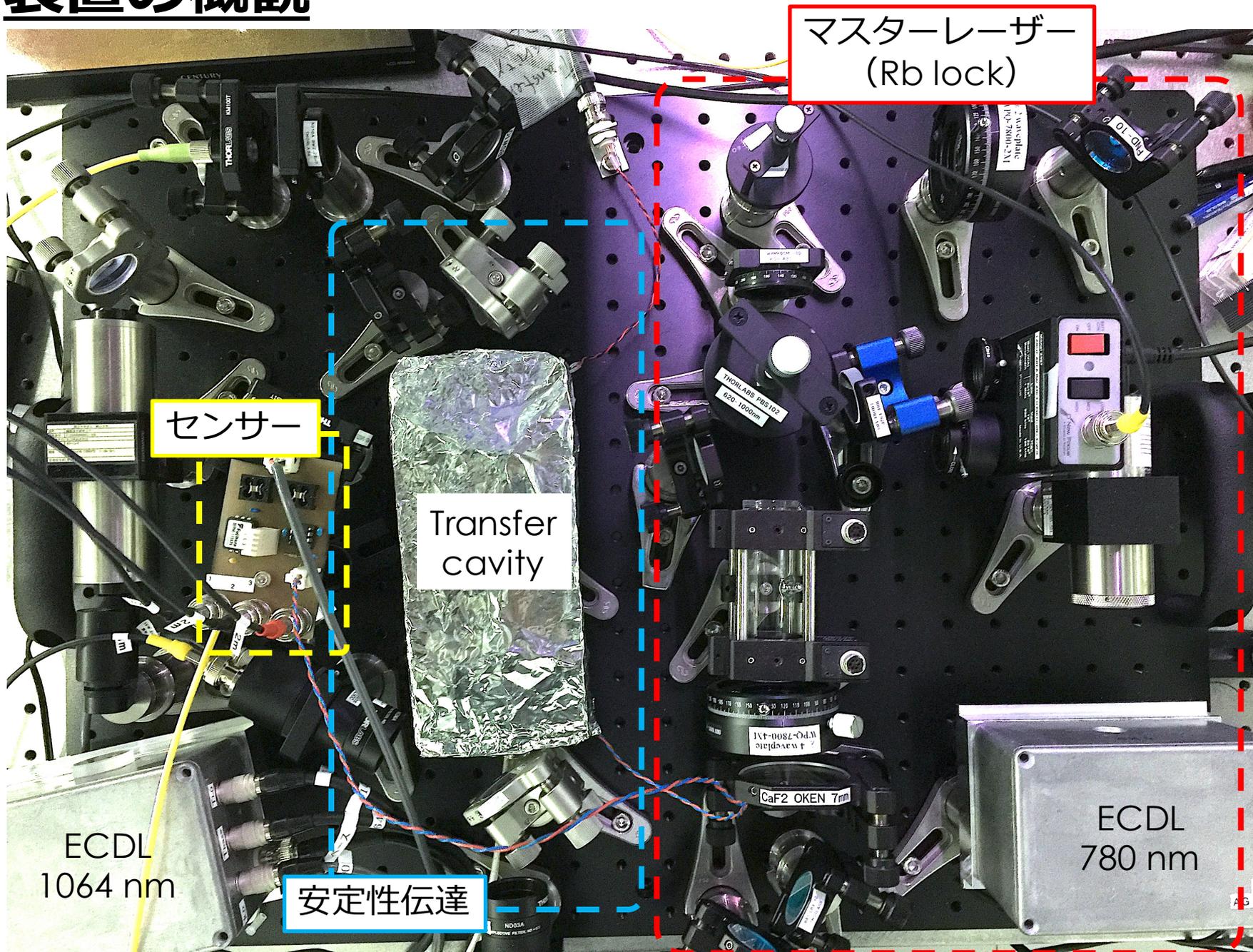
大気屈折率変化によるマスター・スレイブ間の周波数のズレを補正

予想値： $\sim 1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, $\sim 0.3 \text{ MHz/hPa}$

B. Edlén, Metrologia **2**, 71 (1966)

K. P. Birch, M. J. Downs, Metrologia **30**, 155 (1993)

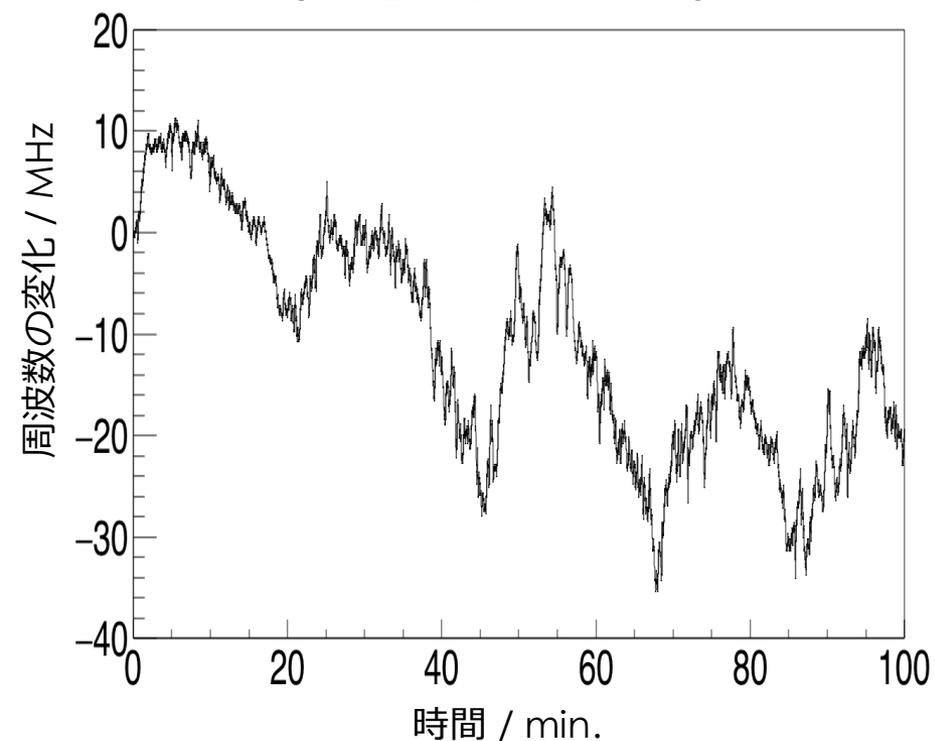
装置の概観



周波数安定性の評価

トランスファー共振器による安定化をしていない場合とした場合でスレイブレーザーの波長を測定

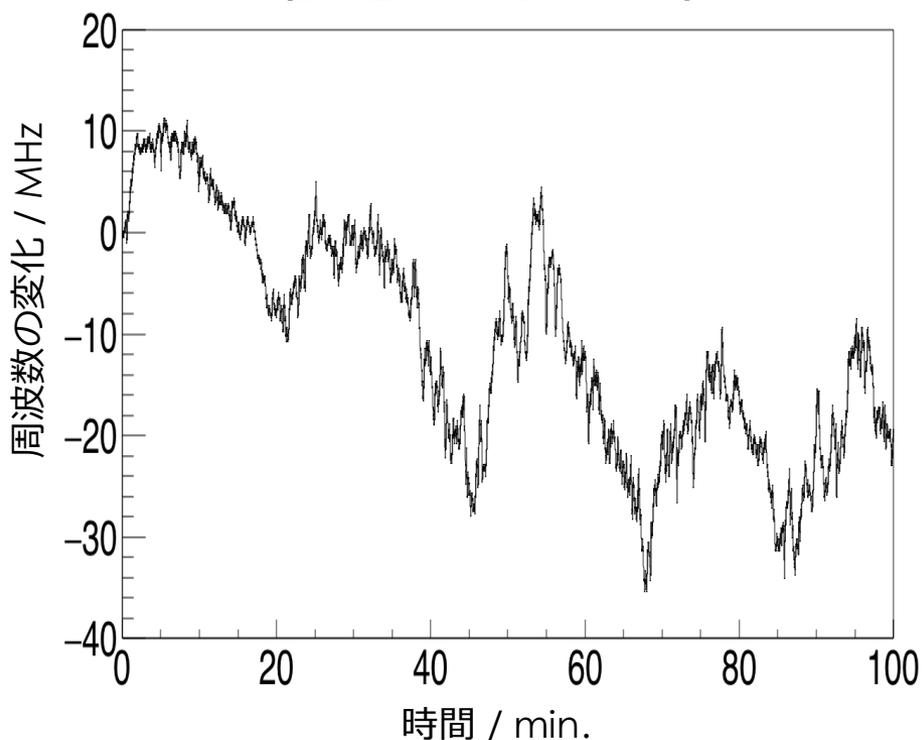
フリーラン
(安定化していない)



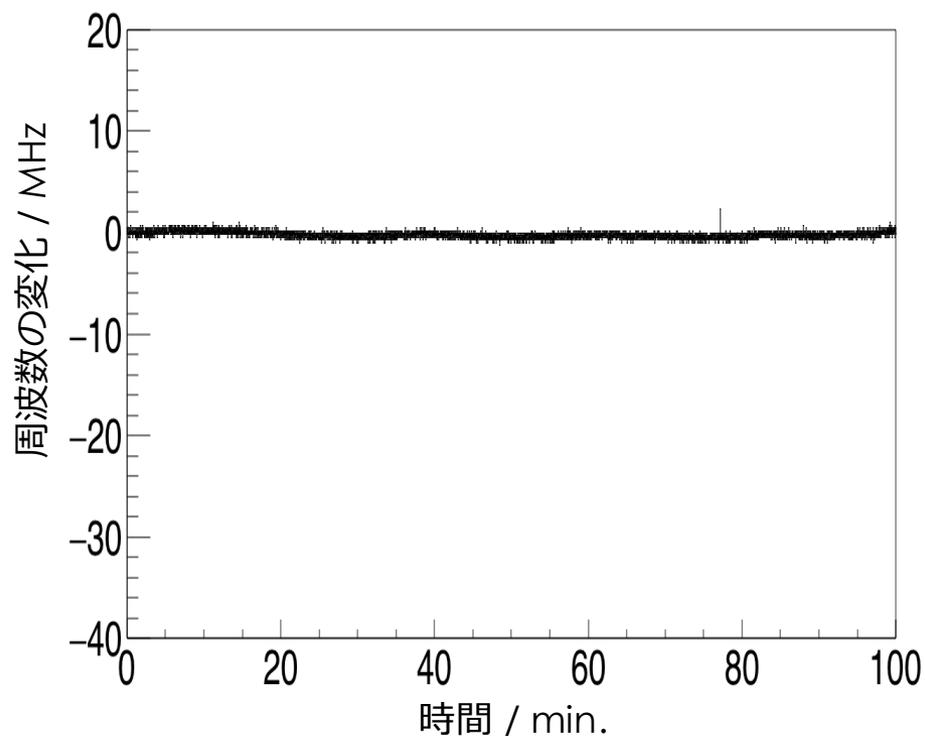
周波数安定性の評価

トランスファー共振器による安定化を**していない**場合と**した**場合でスレイブレーザーの波長を測定

フリーラン
(安定化していない)



周波数安定化
(トランスファー共振器で安定性伝達)

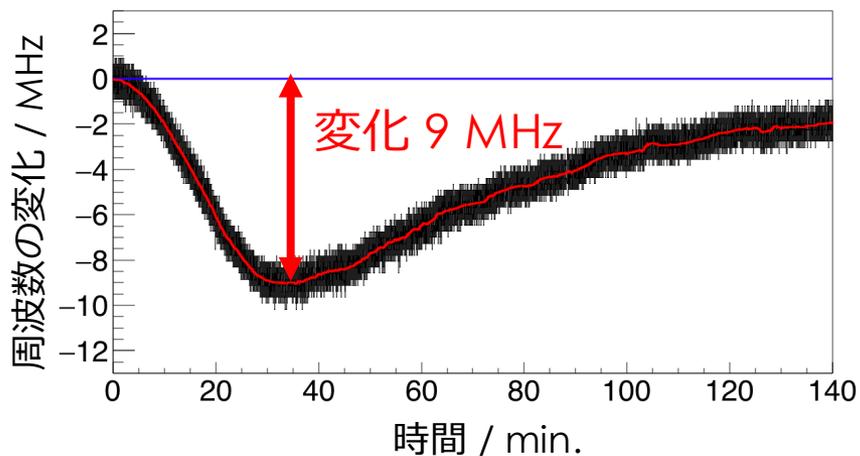
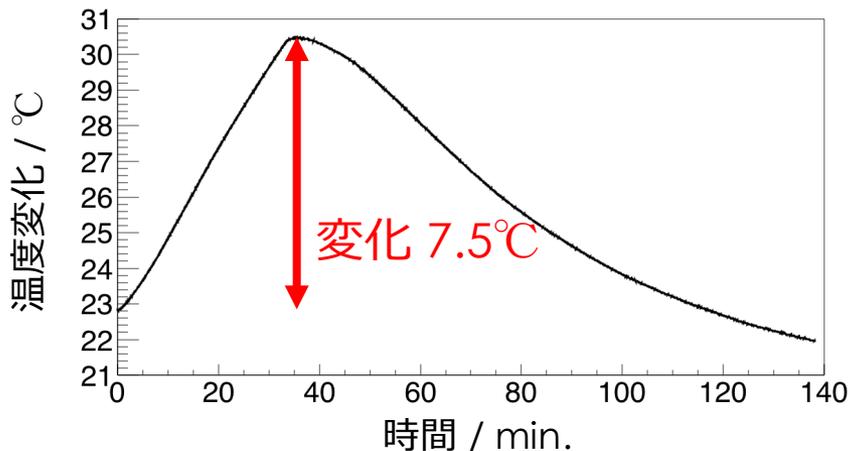


周波数安定性の評価

安定化させたスレイブレーザーの波長を測定

Edlénの実験式による屈折率補正なし・ありで比較

屈折率補正 なし

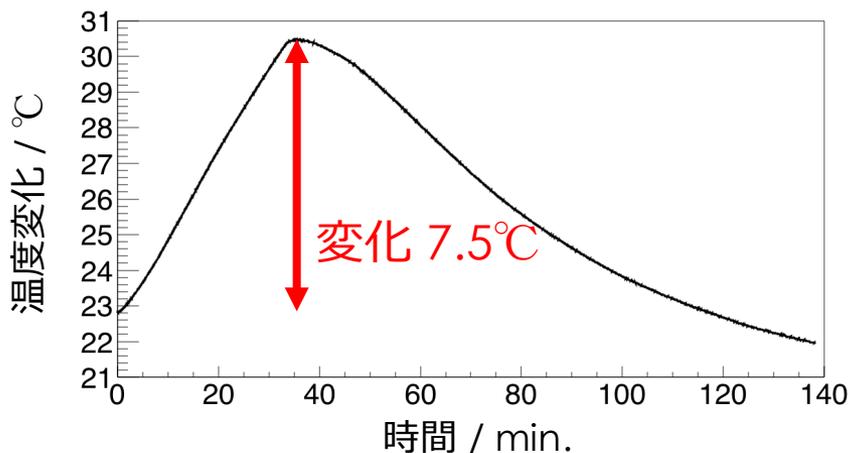


周波数安定性の評価

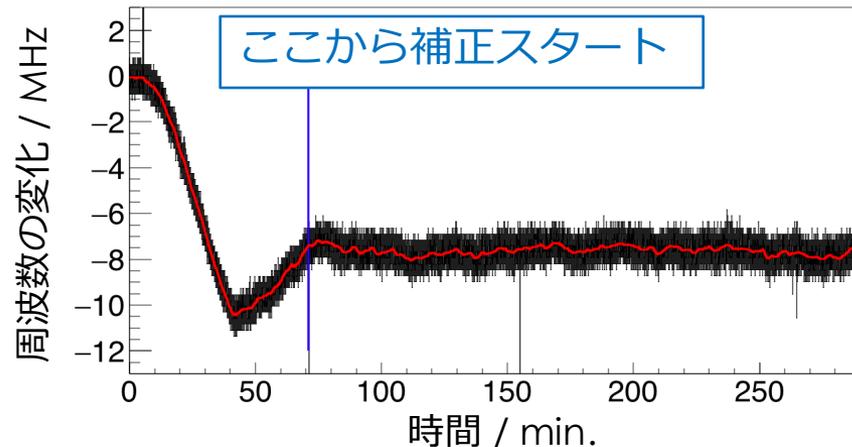
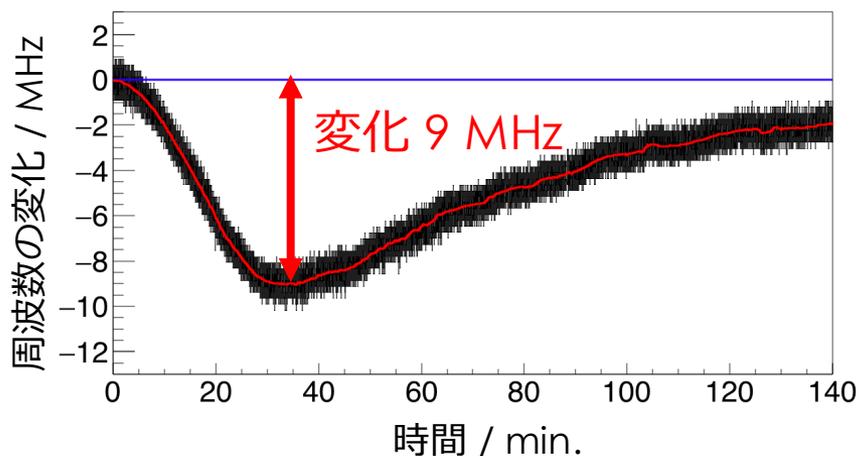
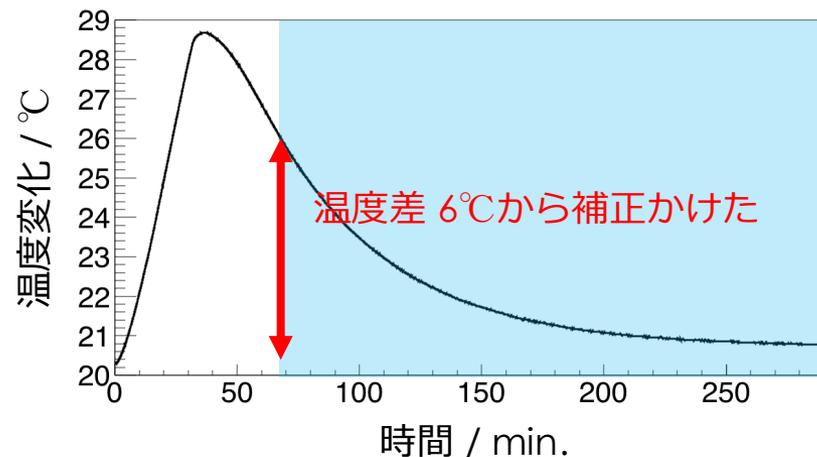
安定化させたスレイブレーザーの波長を測定

Edlénの実験式による屈折率補正なし・ありで比較

屈折率補正 なし



屈折率補正 あり

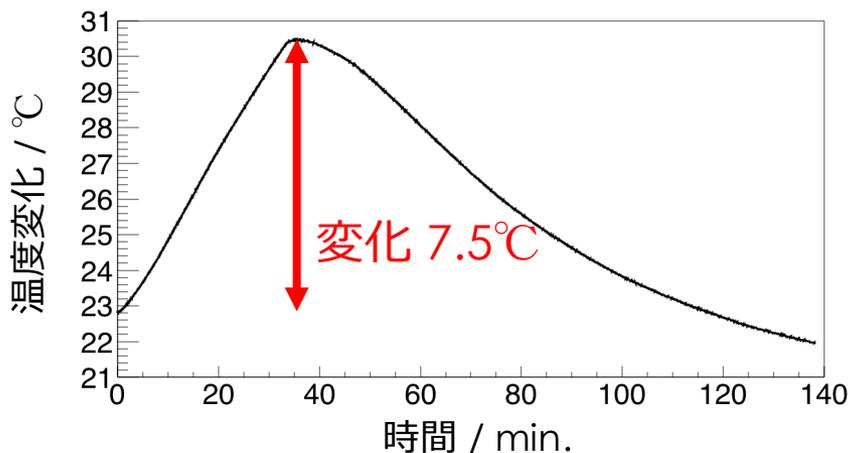


周波数安定性の評価

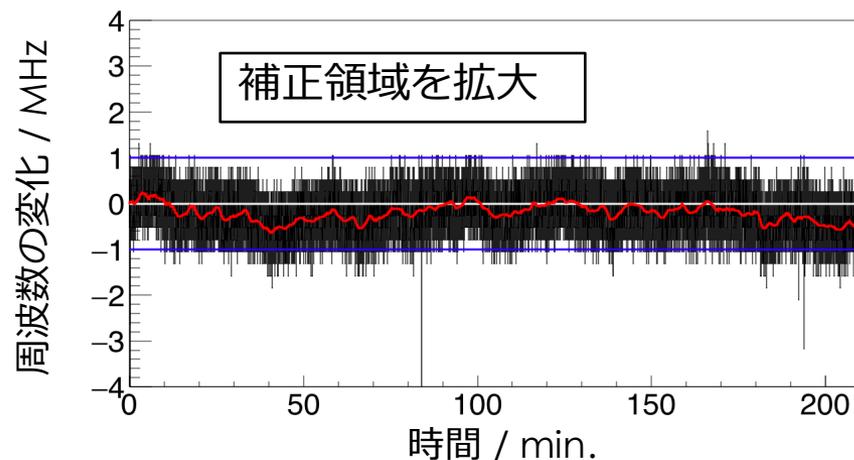
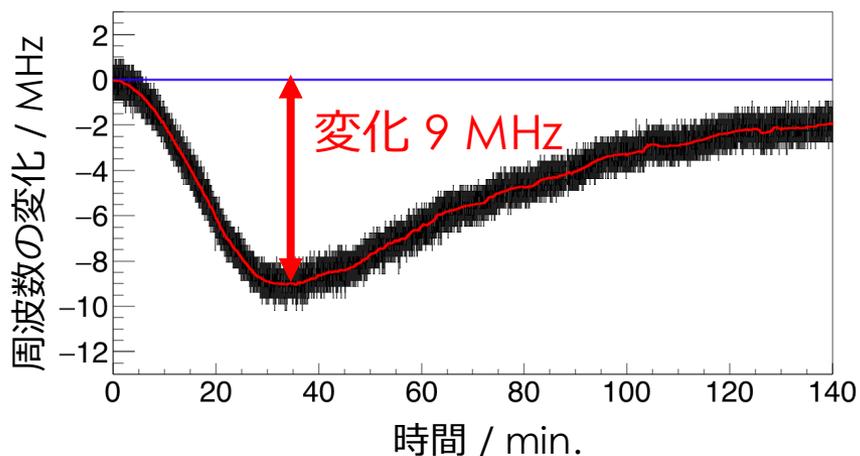
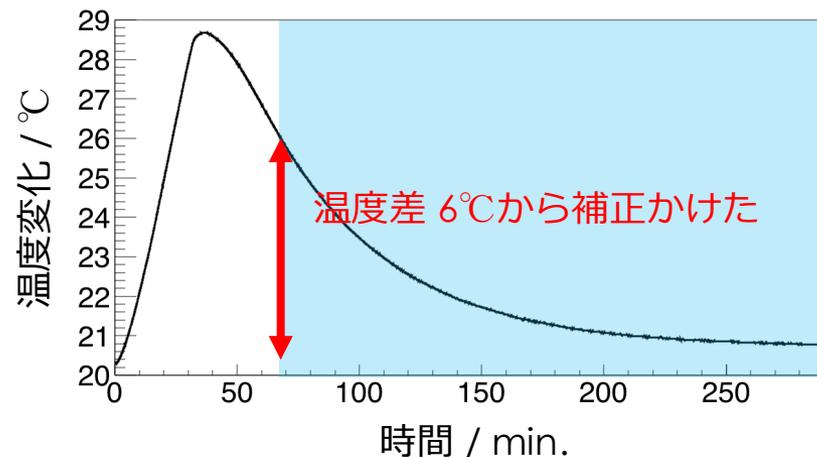
安定化させたスレイブレーザーの波長を測定

Edlénの実験式による屈折率補正なし・ありで比較

屈折率補正 なし



屈折率補正 あり



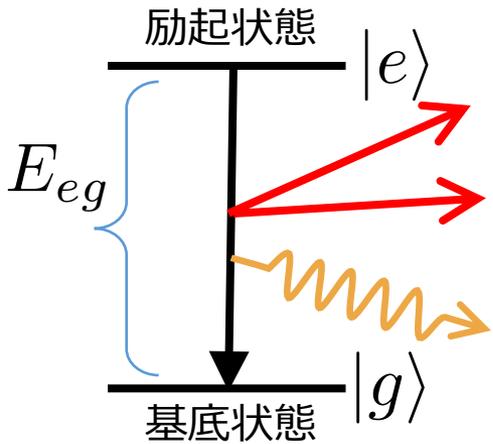
まとめ

- SPAN Collaborationでは原子を用いたニュートリノ研究を行っている
- 原子からの光子随伴ニュートリノ対放射 (RENP)
$$|e\rangle \longrightarrow |g\rangle + \gamma\nu\bar{\nu}$$
- マクロコヒーレント増幅機構により、稀な過程を増幅可能
- 原理検証実験として、Xeからの3光子放出の増幅実験
 - 光源開発を進めている
- 励起光源の周波数安定化のため、トランスファースタビライザ共振器とFPGAを用いた、複製容易な安定化システムを開発

補正なし	補正あり
1.2 MHz/°C	< 1 MHz

Backup

光子放出レートの閾値



エネルギー、運動量と質量の間には特殊相対論に基づき次の関係が存在

$$E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

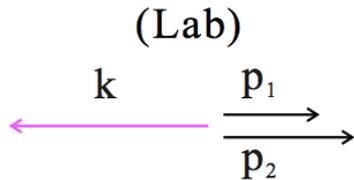
また、エネルギー・運動量保存則

$$E_{eg} = \underbrace{E_\gamma}_{\text{photon energy}} + \underbrace{E_1 + E_2}_{\text{neutrino energy}}$$

$$0 = \underbrace{\vec{k}}_{\text{photon momentum}} + \underbrace{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}_{\text{neutrino momentum}}$$

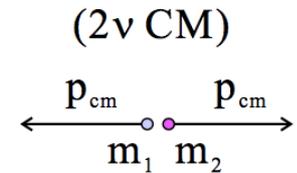
実験室系とニュートリノの重心静止系でのローレンツ不変量を比較する

実験室系



$$\begin{aligned} (Mc^2)^2 &= (E_1 + E_2)^2 - ((\vec{p}_1 + \vec{p}_2)c)^2 \\ &= (E_{eg} - E_\gamma)^2 - (\vec{k}c)^2 \\ &= E_{eg}^2 - 2E_{eg}E_\gamma \end{aligned}$$

ニュートリノ重心静止系



$$\begin{aligned} (Mc^2)^2 &= \left(\sqrt{(m_1c^2)^2 + (p_{cm}c)^2} + \sqrt{(m_2c^2)^2 + (p_{cm}c)^2} \right)^2 - 0^2 \\ p_{cm} &= 0 \text{ のとき } M \text{ 最小} : M_{\min} = m_1 + m_2 \end{aligned}$$

M 最小のとき E_γ 最大

$$E_\gamma = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{(Mc^2)^2}{2E_{eg}} \quad \longrightarrow \quad E_\gamma^{\text{th}} = \frac{E_{eg}}{2} - \frac{((m_1 + m_2)c^2)^2}{2E_{eg}}$$

原子系のコヒーレンス

コヒーレンスは密度行列の非対角成分として定義される

2準位系を考える

励起状態

————— $|e\rangle$

基底状態

————— $|g\rangle$

系の状態 (混合状態) : $|\psi\rangle = C_e(t) |e\rangle + C_g(t) |g\rangle$

密度演算子 : $\hat{\rho} = |\psi\rangle\langle\psi|$

$$= \begin{pmatrix} C_e C_e^* & C_e C_g^* \\ C_g C_e^* & C_g C_g^* \end{pmatrix}$$

コヒーレンス

ラビ振動を考慮 : コヒーレンスの最大値は 0.5

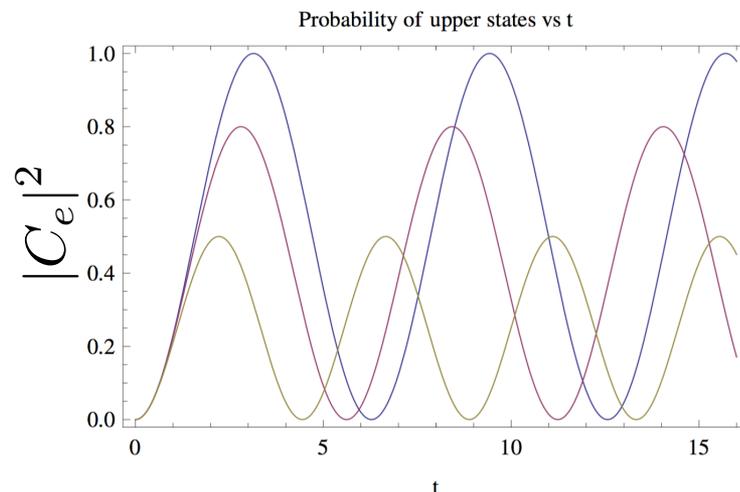
ラビ振動 原子の占有率がラビ振動数で振動

ラビ振動数 :

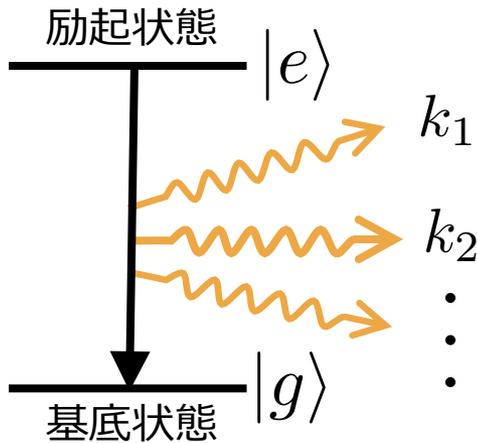
$$\Omega_R \equiv \frac{(-\vec{d}_{ge} \cdot \hat{\epsilon}) E_0}{\hbar}$$

$$|C_e(t)|^2 = \sin^2 \left(\frac{\Omega_R t}{2} \right)$$

$$|C_g(t)|^2 = \cos^2 \left(\frac{\Omega_R t}{2} \right)$$



マクロコヒーレンスと運動量保存



原子集団の脱励起過程を考える

$$|e\rangle \rightarrow |g\rangle + k_1 + k_2 + \dots$$

一般に、このような過程の遷移確率振幅は次のように表せる

$$A = \underbrace{\sum_a}_{\text{全原子の総和}} e^{i(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \dots) \cdot \vec{x}_a} \underbrace{\mathcal{M}_a}_{\text{原子位置による位相因子}}(e \rightarrow g) \underbrace{\mathcal{M}_a}_{\text{原子一つあたりの遷移確率振幅}}$$

多原子系の遷移確率は $|A|^2$

(1) \mathcal{M} の位相変化が大きい場合：干渉項 ($\mathcal{M}_a^* \mathcal{M}_b, a \neq b$) の寄与が消滅

$$|A|^2 \propto N |\mathcal{M}|^2$$

(2) \mathcal{M} の位相変化が無視できる場合：干渉項 ($\mathcal{M}_a^* \mathcal{M}_b, a \neq b$) の寄与が残る
各々の原子にコヒーレンスを形成

位相因子については、

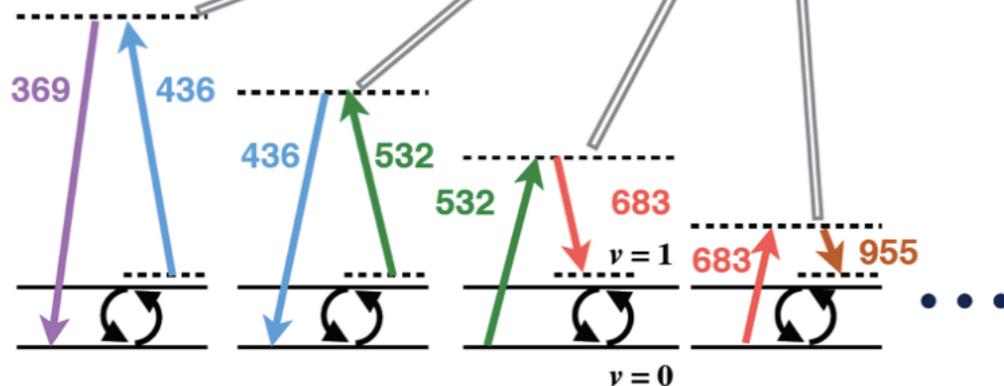
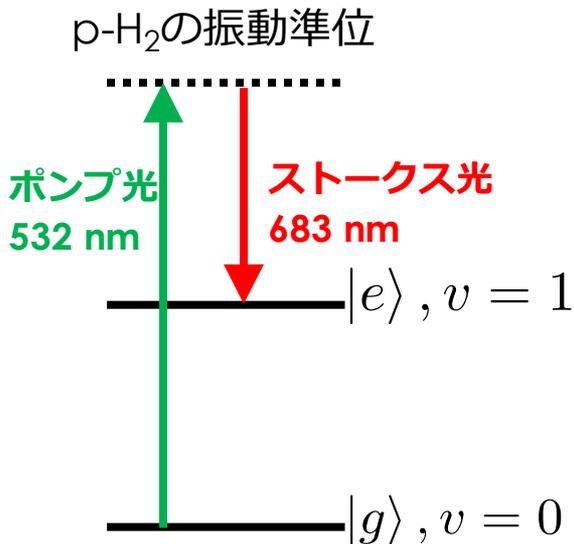
1粒子放出の場合は、 $|\vec{k} \cdot \vec{x}_a| \simeq \frac{2\pi|\vec{x}_a|}{\lambda} \ll 1$ が成立する範囲 \vec{x}_a 内では、条件(2)の場合、
波長程度の領域で $|A|^2 \propto N^2 |\mathcal{M}|^2$ だが、領域が狭いので N 少 (超放射として知られる)

多粒子放出の場合は、 $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \dots = 0$ であれば $e^{i(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \dots) \cdot \vec{x}_a} \simeq 1$

\vec{x}_a に関する制約が解ける 運動量保存 $|A|^2 \propto N^2 |\mathcal{M}|^2$ マクロコヒーレンス増幅

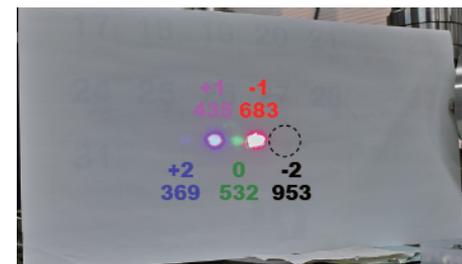
マクロコヒーレンスの測定

原理検証実験 p-H₂分子気体を使った2光子過程の増幅の場合



8次にまで及ぶラマンサイドバンドが観測されている

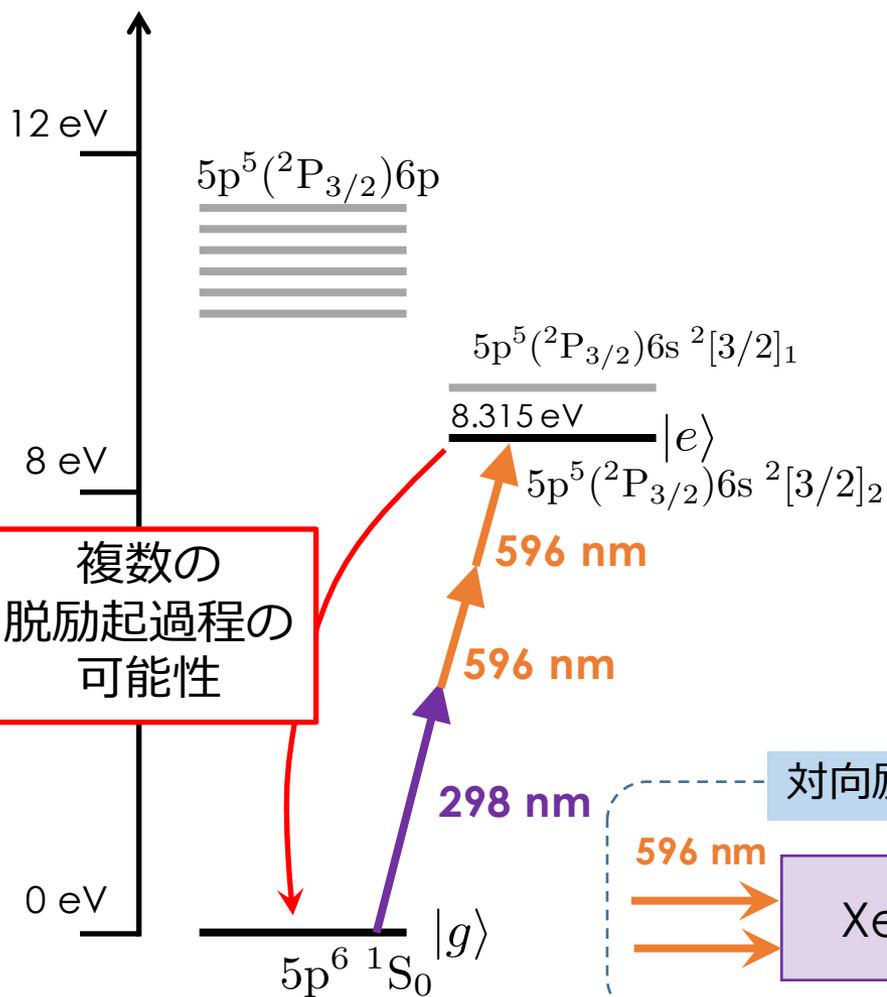
w/o コヒーレンス



Xe 3光子励起実験の目的

RENp過程のターゲットとして期待されている！

エネルギー準位



ラダー型対向3光子励起

$|g\rangle \longleftrightarrow |e\rangle$ 間はパリティ odd
→ 3光子で励起

E1 1光子・2光子遷移は禁制
→ RENp過程と競合しない

検証実験
としての
物理目標

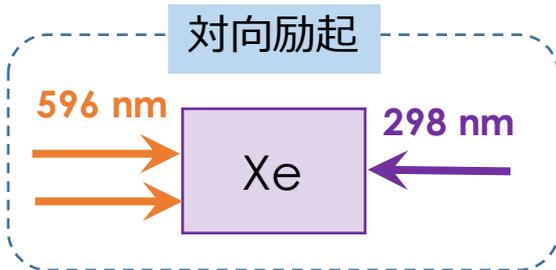
① : E1 × E1 × E1過程

E1遷移による3次の過程
3光子を放出
→ RENpに近い運動学

② : E1 × M1過程

RENpになりうる過程

- QED → 2光子放出
- QED+weak → 1光子+ニュートリノペア放出



大気の状態と屈折率変化

- 大気の屈折率依存性

- 光源の波長 λ

$$n \rightarrow n(\lambda, P, T, h)$$

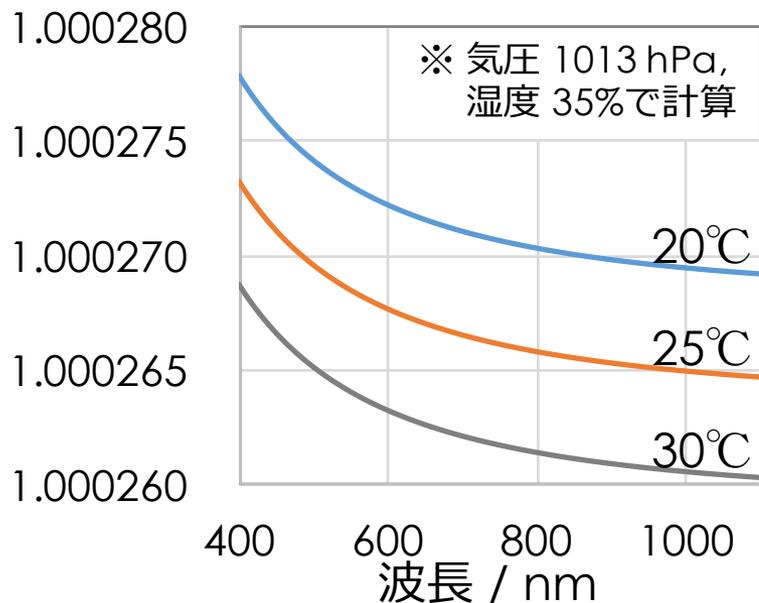
- 大気圧 P ・気温 T ・湿度 h など

- 屈折率変化 → 実験的に知られる (Edlénの実験式)

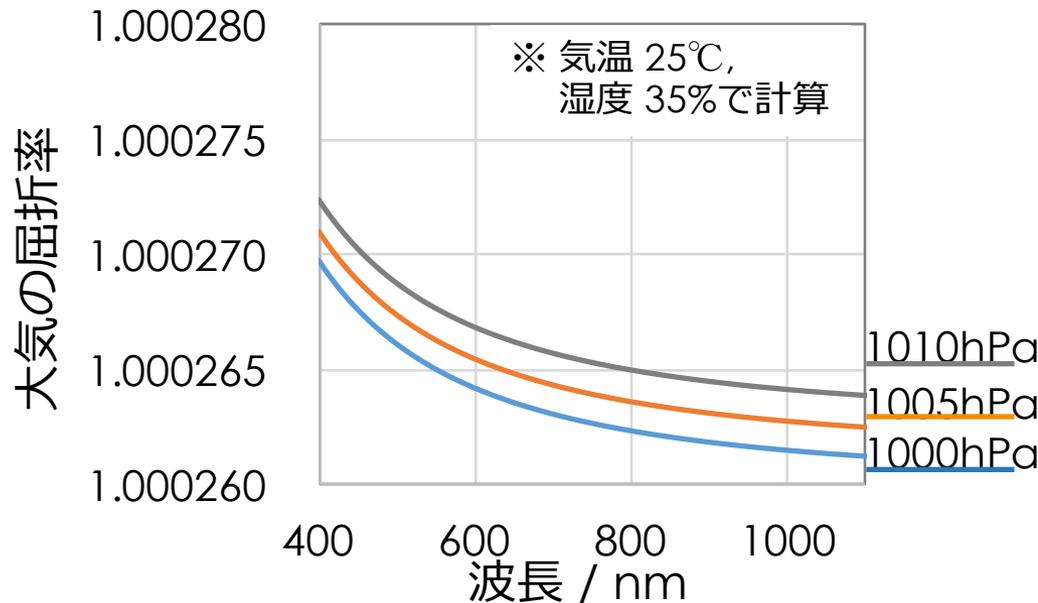
B. Edlén, Metrologia **2**, 71 (1966)

K. P. Birch, M. J. Downs, Metrologia **30**, 155 (1993)

大気屈折率の波長・気温依存性



大気屈折率の波長・気圧依存性



大気の状態と屈折率変化

- Edlenの式と、波長と周波数の関係 $\nu = \frac{c}{n\lambda}$ から周波数のズレを算出

- 波長の異なる光源間でのズレ $\delta\nu$

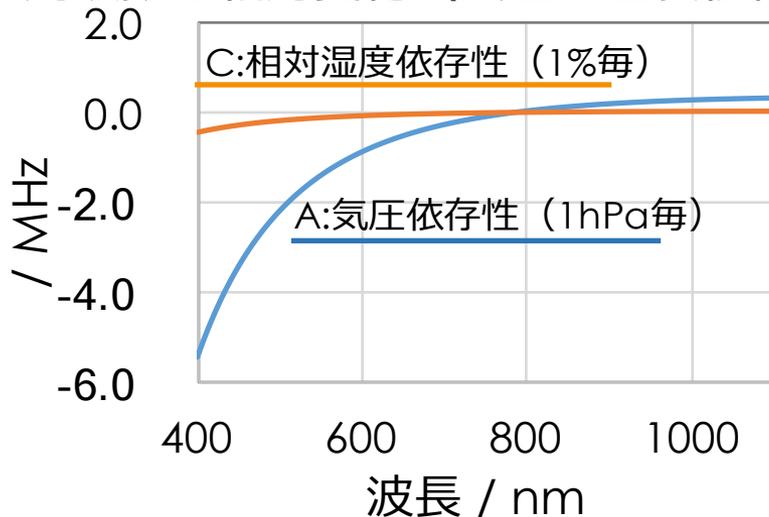
屈折率変化によって生じた各々の光源の周波数変化分の差

- P, T, h に対する分散関係より以下の形式に近似

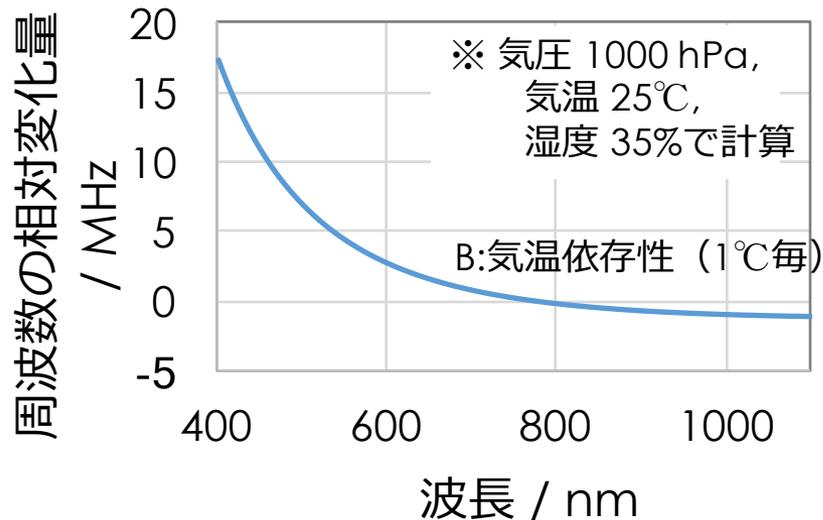
$$\delta\nu = A \delta P + B \delta T + C \delta h$$

波長 λ を決めると定数

780nmレーザーに対する
周波数の相対変化 (気圧・湿度依存性)

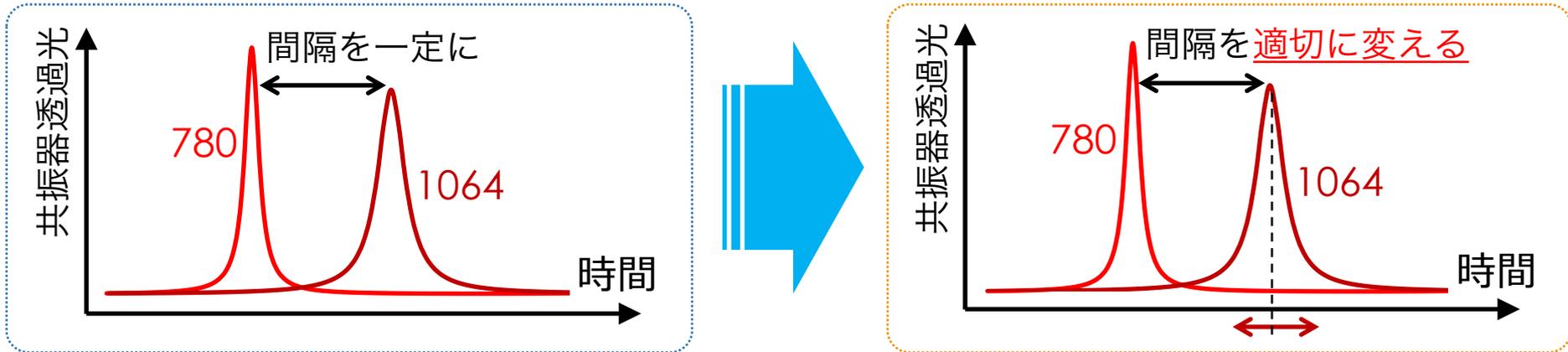


780nmレーザーに対する
周波数の相対変化 (気温依存性)



FPGAによる周波数の補正

- 透過光の間隔を変化させる



- 補正量の計算 ... Edlénの式 + 気圧・気温・湿度センサー

$$\delta\nu = A \delta P + B \delta T + C \delta h$$

A,B,Cをあらかじめ計算
テーブル作成しFPGAボード上の
メモリにロード

$\delta P, \delta T, \delta h$ を与える

- 使用したFPGAボード

- NI myRIO-1950 ... LabVIEWでプログラミング可能なFPGAボード†
 - FPGAチップ : Xilinx Z-7010, 667 MHz
 - Analog In x8, Analog Out x4, Digital I/O x16

共振器の温め方

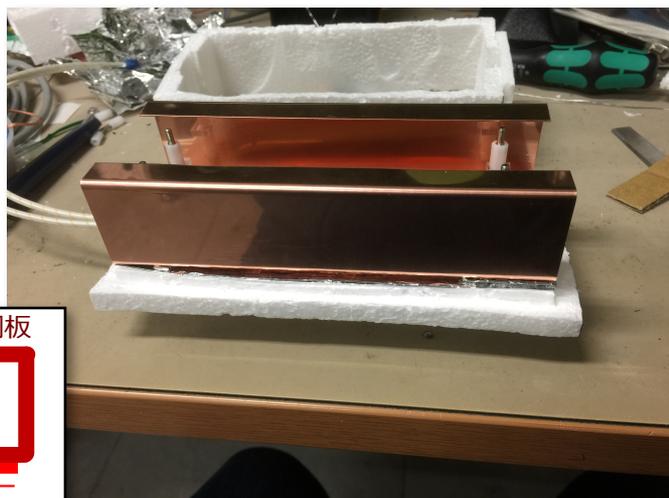
- 温度変化に対する周波数のズレを観測するため、共振器をヒーターで温める → できるだけ均一に！

- ①
発泡スチロールの土台の上にヒーター設置



熱伝導ペースト塗る

- ②
ヒーターの上に銅板（0.5mm厚）を乗せ固定

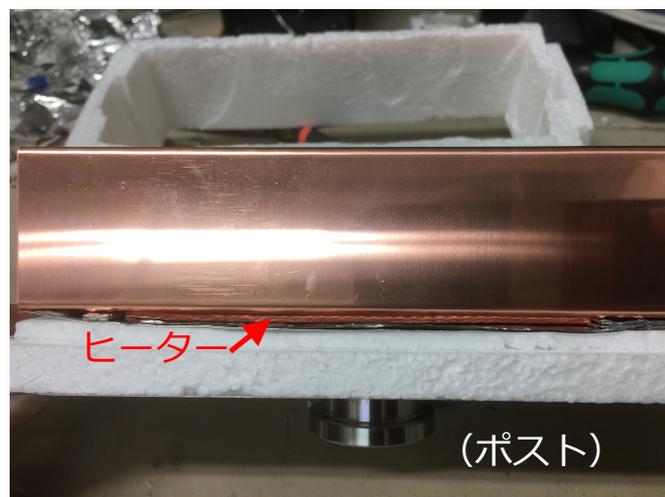


断面



- ③
横から見た様子

ヒーターと銅板の密着を確認



- ④
キャビティをマウント

横と上を発泡スチロールで覆った上でアルミホイール巻く

窓として亚克力板にφ4mmの穴を開け貼り付け

