

2017.12.14

第121話 サイエンスカフェ

光微小共振器

～ナノサイズの「合わせ鏡」～

静岡大学 理学部 物理学科 阪東一毅

- 有機結晶平面型微小共振器
- 有機結晶リング型微小共振器

講演内容

はじめに

1. 「合わせ鏡」の都市伝説
2. 「微小共振器」とは
3. 「微小共振器」は科学的に面白い
4. 本研究の微小共振器

基礎知識

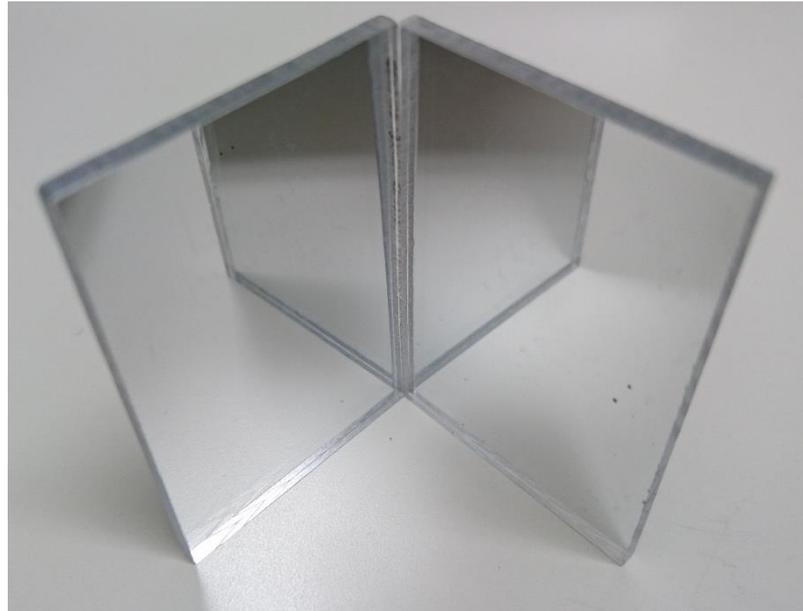
1. 光は波
2. 薄膜干渉(シャボン玉の色)
3. 有機結晶平面型微小共振器
4. 有機結晶リング型微小共振器

微小共振器業界の研究課題

1. センサー
2. 光の疑似原子
3. カシミール効果
4. 巨視的な量子凝縮
5. 計測システム(顕微鏡)

「合わせ鏡」の都市伝説

合わせ鏡の都市伝説



- 真夜中12時に鏡を二枚合わせると霊が現れる。
- 過去と未来の自分が見える。

など

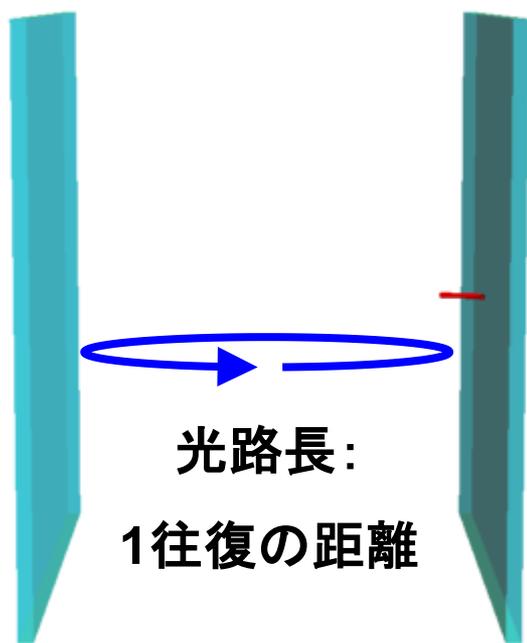
もちろん、科学的根拠はありません！

「微小共振器」とは

光を閉じ込める構造

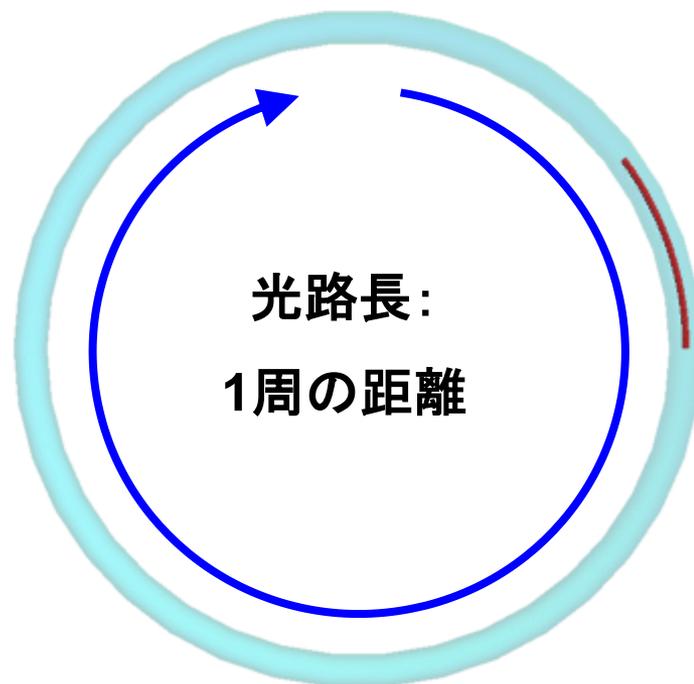
平面型共振器

鏡を向い合せたもの



ファイバーリング共振器

光ファイバーの両端をつなげたもの



微小共振器: 光路長が光波長サイズくらい(数百nm~数 μ m)のもの

光を閉じ込めると様々な物理現象が現れる

「微小共振器」は科学的に面白い

真理の追究

- **ボース・アインシュタイン凝縮**
 - ・・・巨視的に量子力学を見る。
 - 超伝導、ヘリウム超流動
 - 中性子星内部の超伝導・超流動相
- **光の疑似原子**
 - ・・・光で原子軌道を再現。
- **カシミール効果**
 - ・・・真空は空っぽではない。
- **パーセル効果**
 - ・・・原子の励起寿命を制御する。

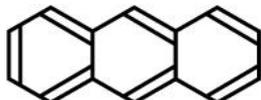
産業への貢献

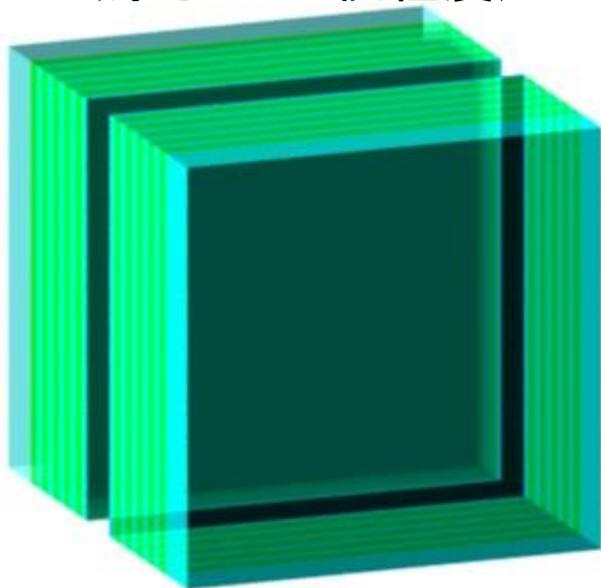
- **レーザー**
- **センサー**
 1. 温度センサー
 2. バイオセンサー
 3. ジャイロセンサー(姿勢制御)
- **光波長多重通信**

有機結晶平面型微小共振器

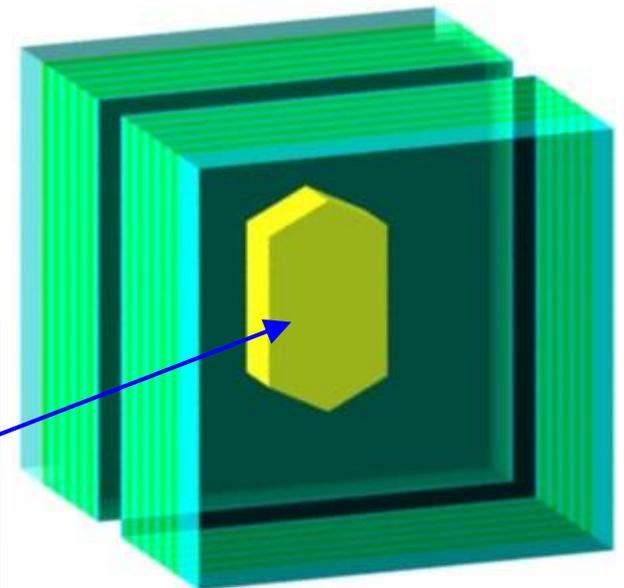
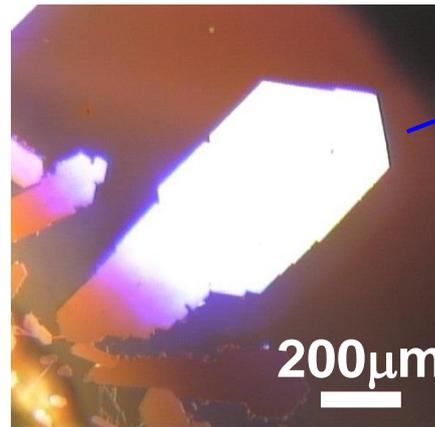
有機結晶を挟んだ平面型微小共振器

共振器隙間 $\sim 100\text{nm}$
(原子1000個程度)

アントラセン結晶 



誘電体多層膜ミラー



光励起により強く発光する

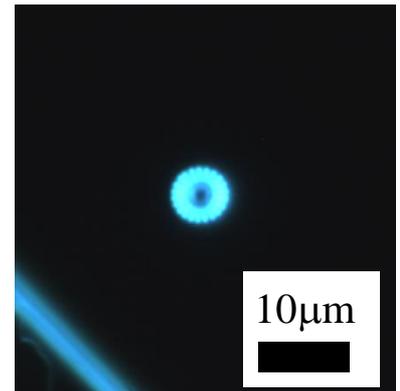
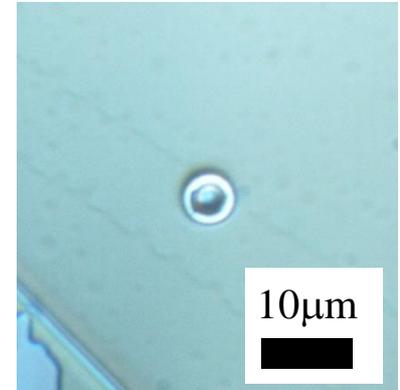
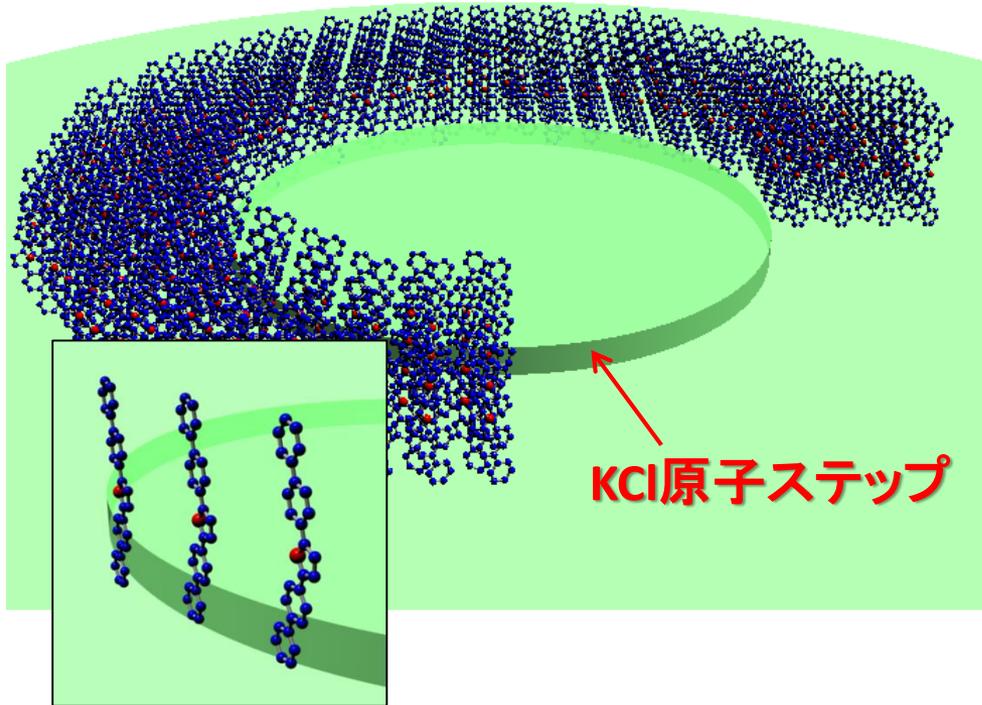
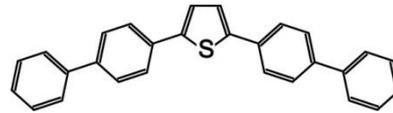
K. Bando et al. Appl. Phys. Express 6, 111601 (2013)

共振器内で発光が閉じ込められる

有機結晶リング型微小共振器

自己組織化有機リング結晶によるリング型微小共振器

BP1T結晶

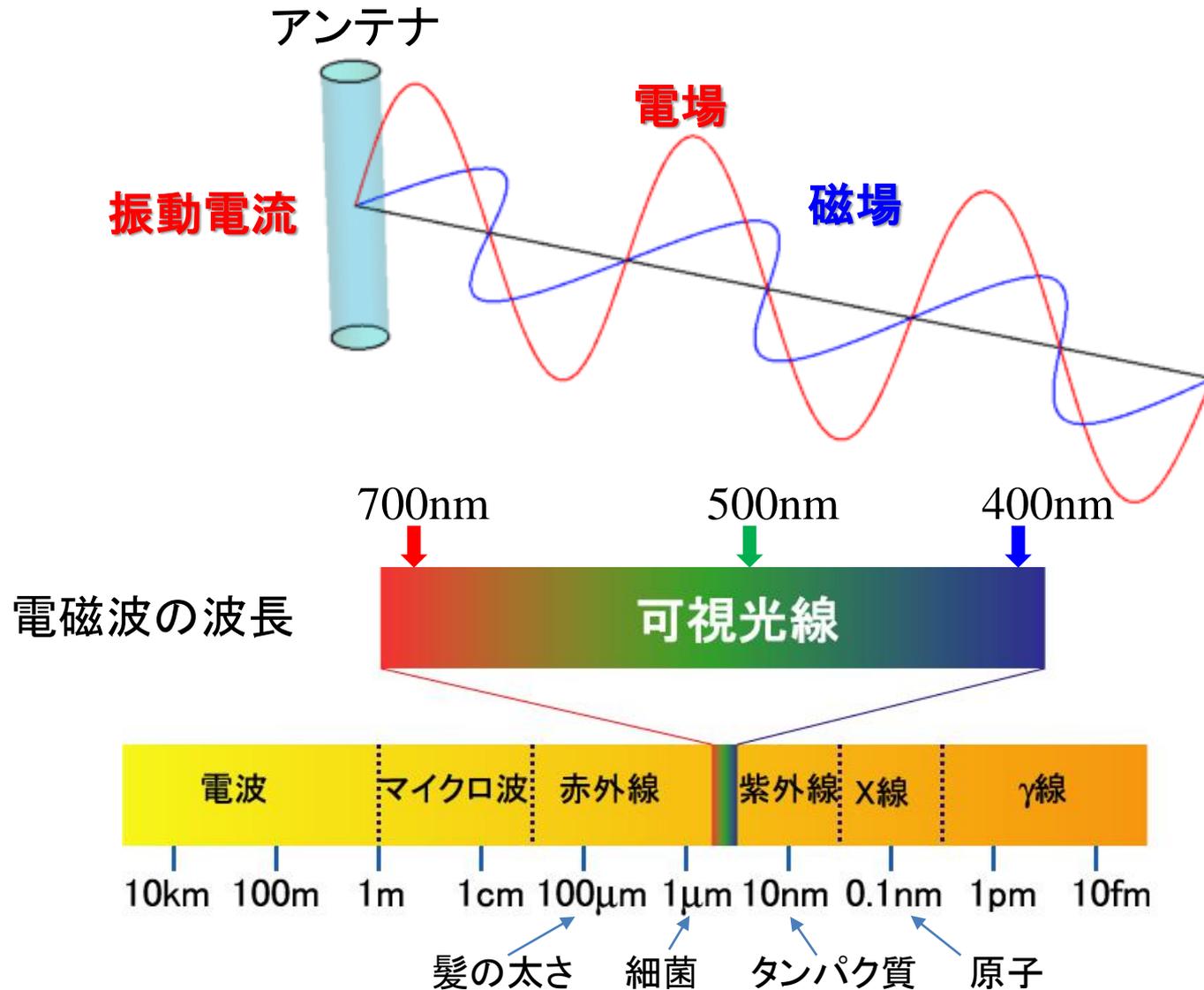


光励起により強く発光する

結晶の形状そのものが光を閉じ込める

光は波

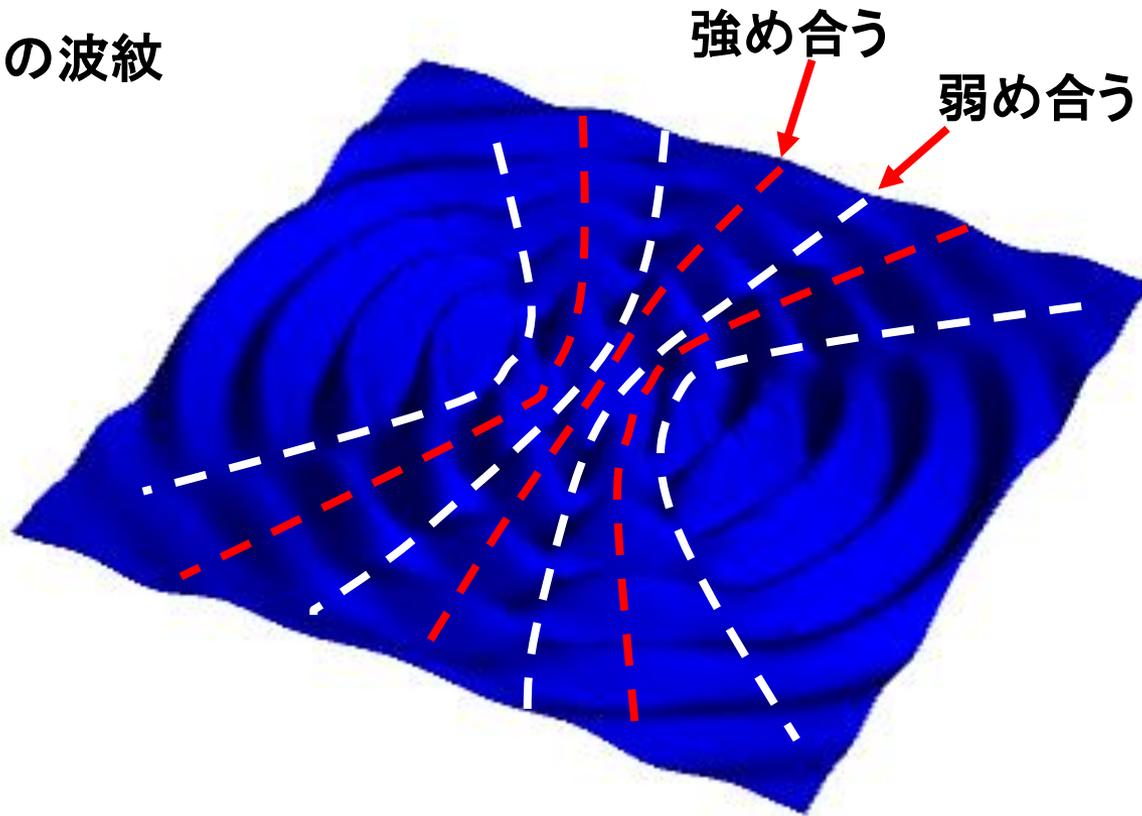
光 = 電場と磁場の波 (電磁波)



光は波

波の重要な特徴：干渉

水面の波紋



二つの波を重ねると強め合ったり、弱めあったりする → **波の干渉**

共振器の理解に重要

光は波

波の重要な特徴：干渉

音波の干渉の例

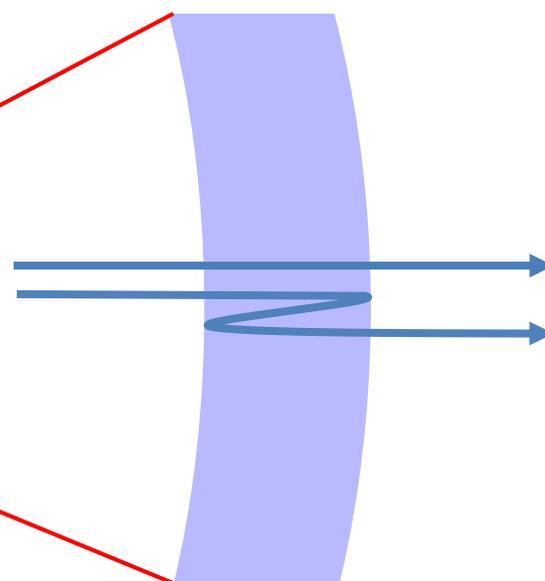
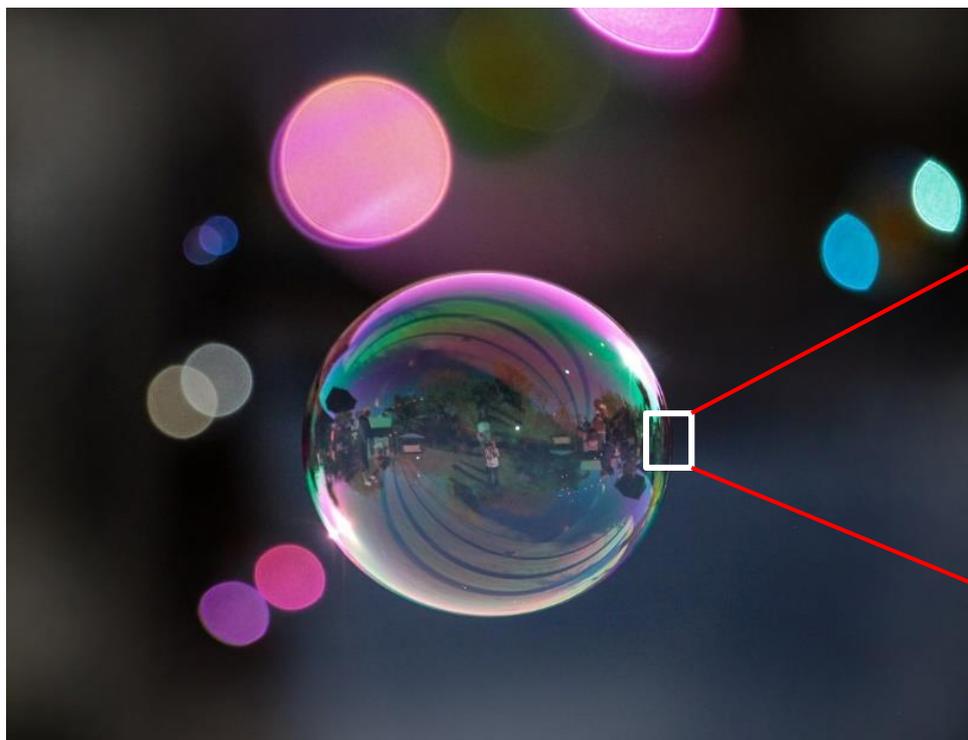
ノイズキャンセリングヘッドホン



周囲のノイズを消すことができる。

シャボン玉の色

シャボン玉の色は光の干渉

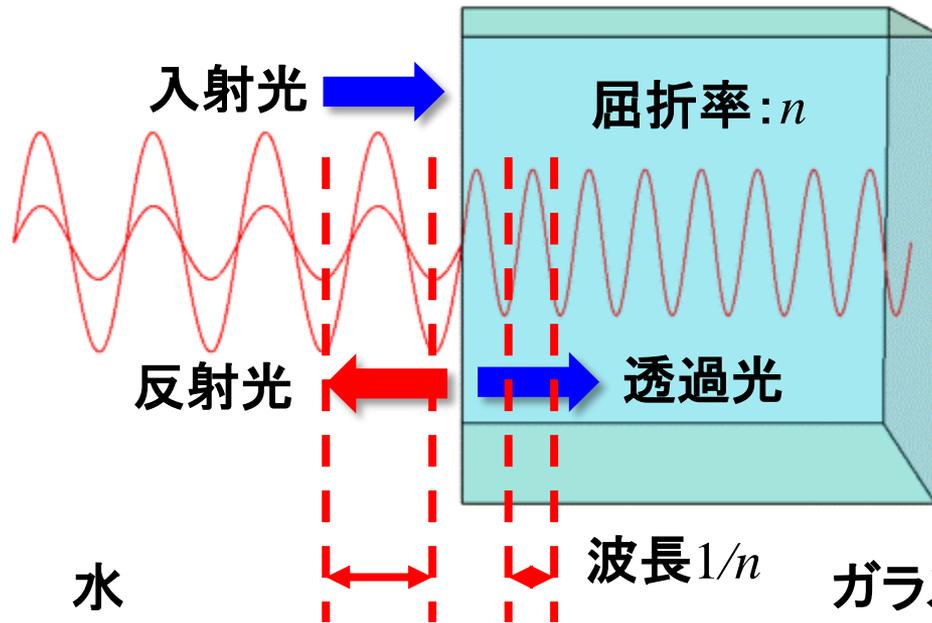


膜の厚みが
色を決定

シャボン玉の膜を透過した光と内部反射した光が重なる

光の反射と透過

透明な物質への光の透過と反射は
屈折率で決まる



透過率: $T = \frac{4n}{(1+n)^2}$

反射率: $R = \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2$

水

屈折率: $n=1.33$

透過率: $T = 98\%$

反射率: $R = 2\%$

ガラス

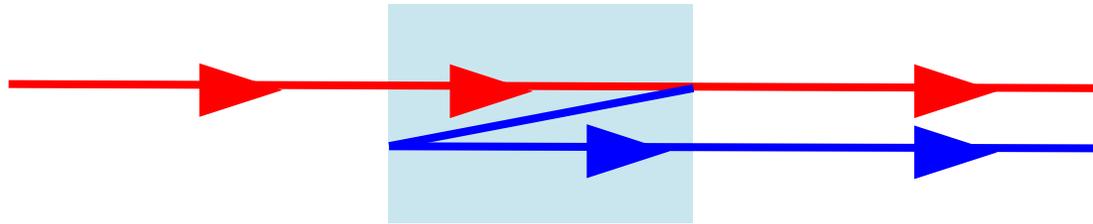
屈折率: $n=1.5$

透過率: $T = 96\%$

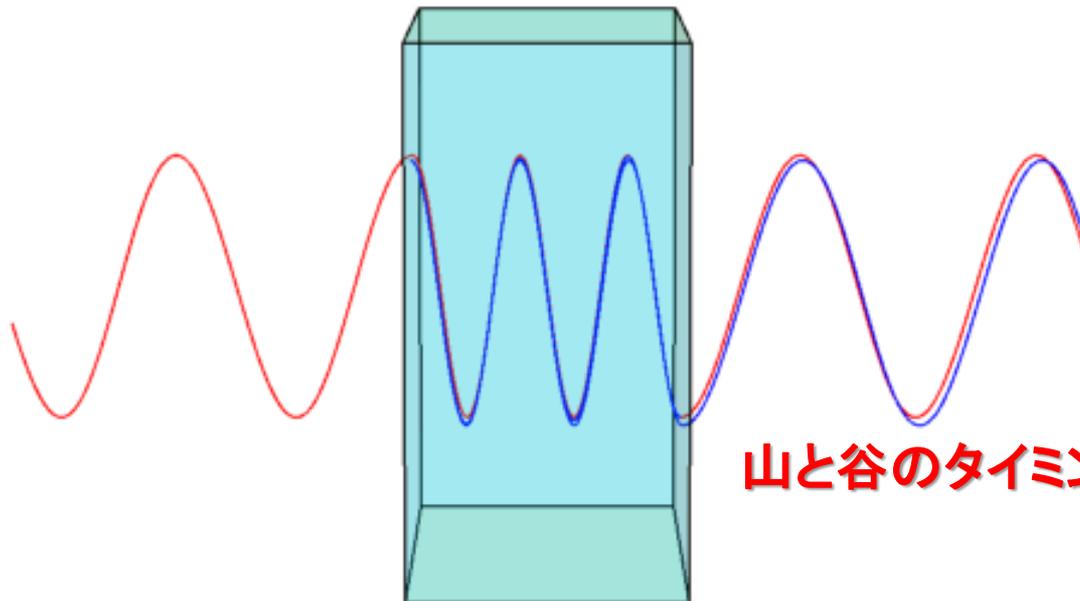
反射率: $R = 4\%$

光の反射と透過

光の多重反射により干渉が生じる



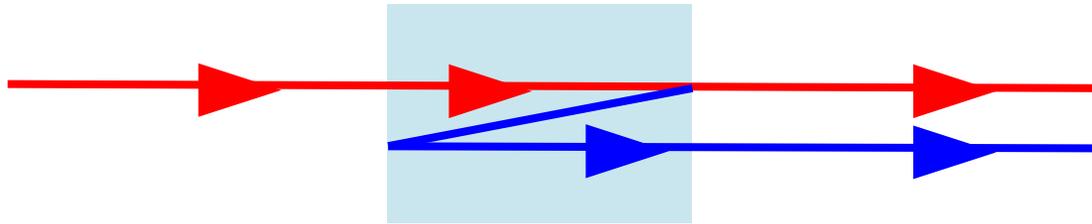
光路長(1往復)=5波長



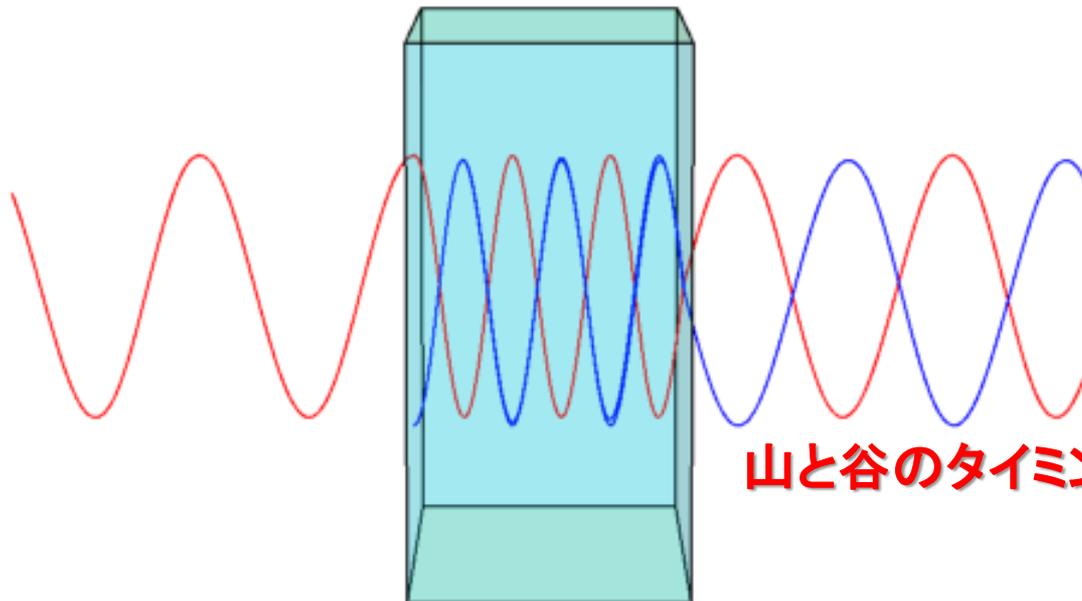
光路長が波長の整数倍のとき → 強め合う干渉(透過100%)

光の反射と透過

光の多重反射により干渉が生じる



光路長(1往復)=5.5波長



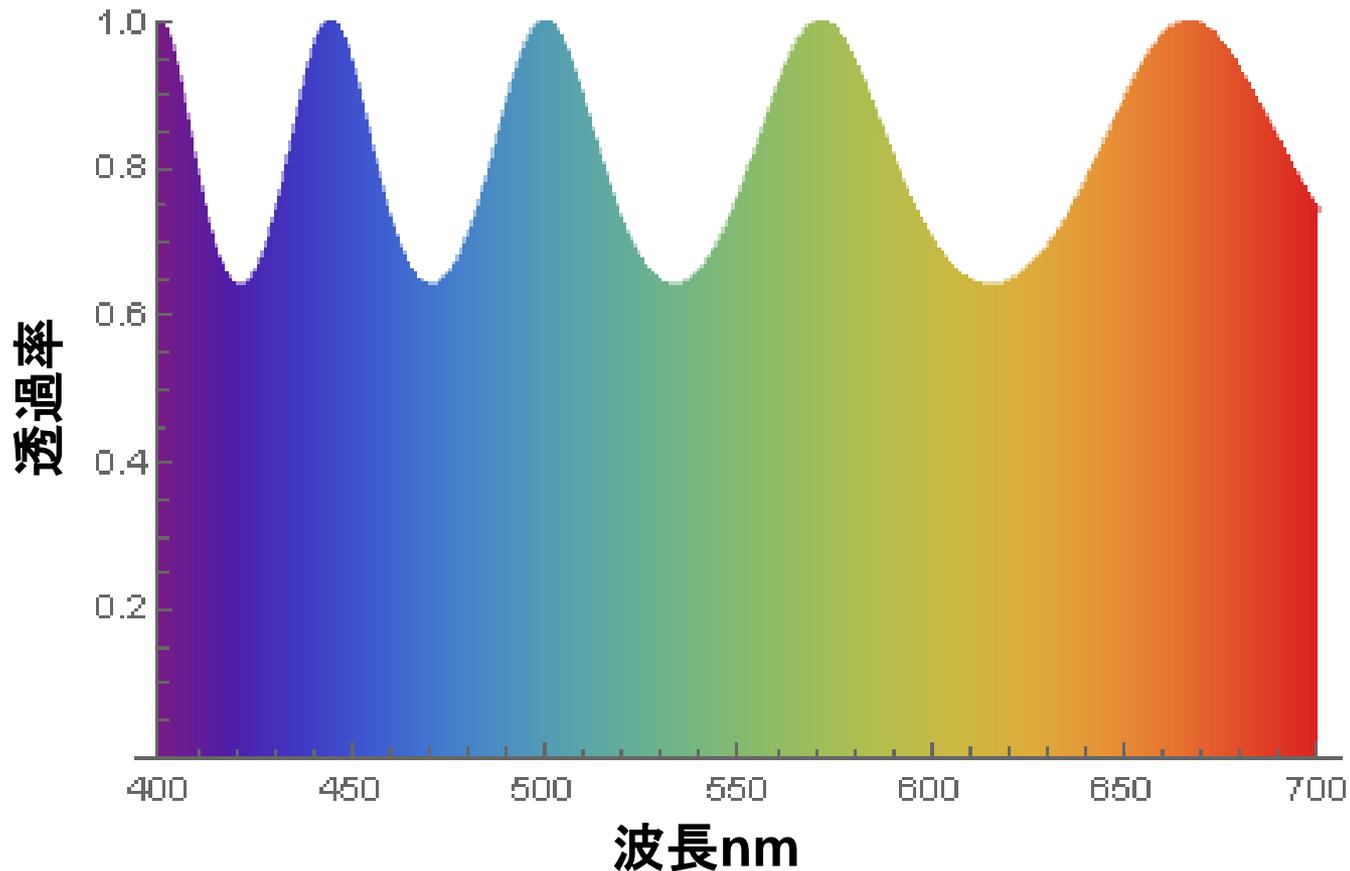
山と谷のタイミングが不一致

光路長が波長の半整数倍のとき → 弱め合う干渉

薄膜の色あい

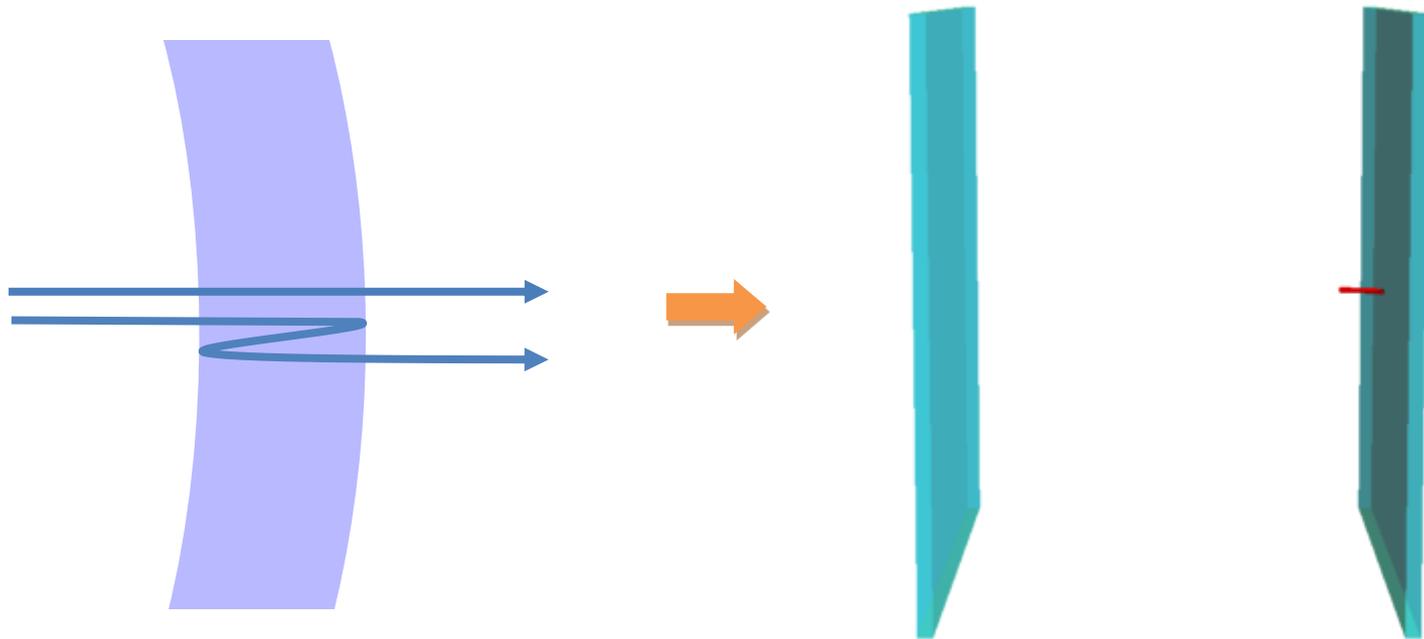
膜厚1000nmの物質（屈折率2）の色合い

光路長=10波長 9波長 8波長 7波長 6波長



薄膜は広い意味で共振器

薄膜の表面は反射率の低いミラー



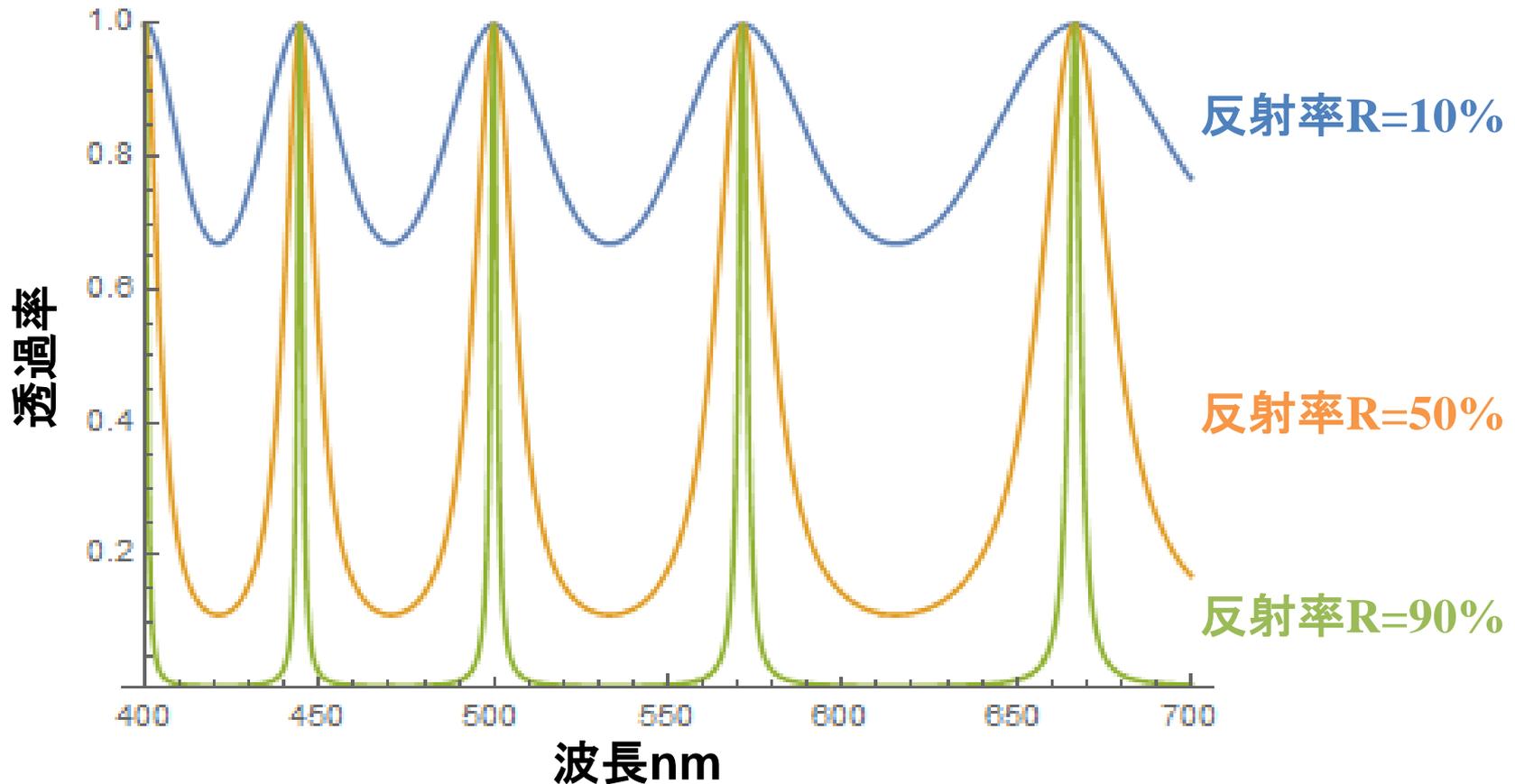
薄膜内部の多重反射は一種の共振器

⇒ 反射率を上げれば共振器へ

共振器の光閉じ込め

膜厚膜の反射率物質で屈折率2共振器含い

光路長=10波長 9波長 8波長 7波長 6波長

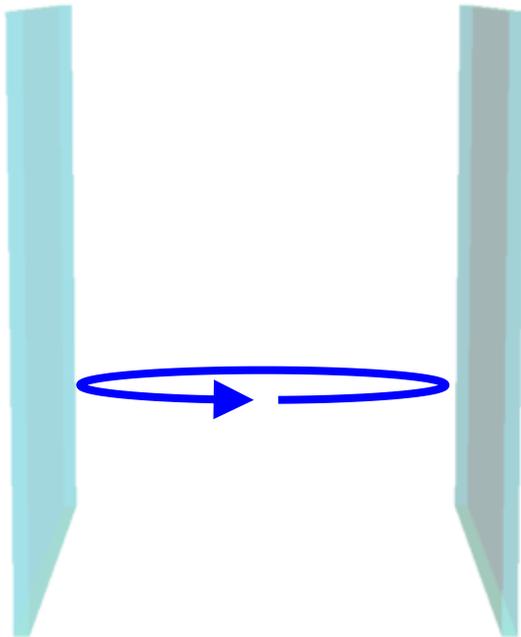


共振器中には特定の波長しか存在しなくなる

共振器の光閉じ込め

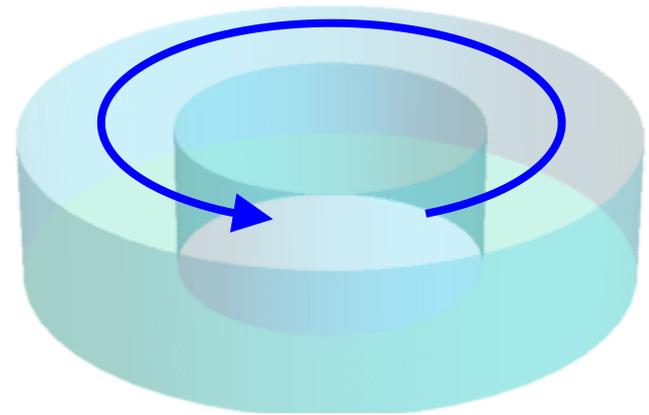
共振器：光の波を閉じ込める道具

平面型共振器



光路長 = 波長8個分

リング型共振器



光路長 = 波長5個分

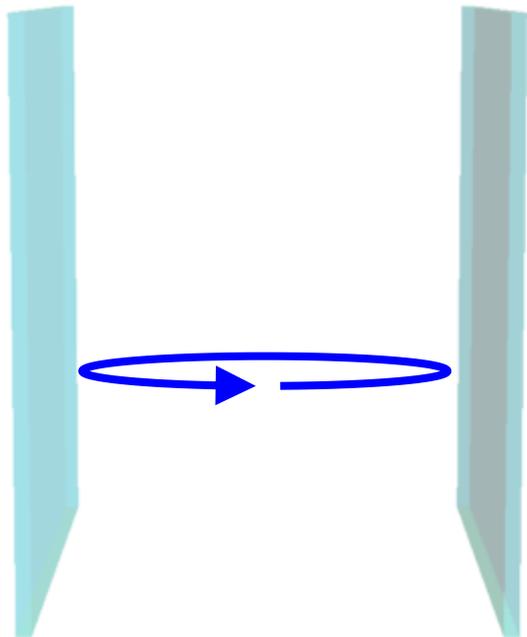
共振条件：光路長が光波長の整数個

共振条件を満たす波長の光だけが閉じ込められる

共振器の光閉じ込め

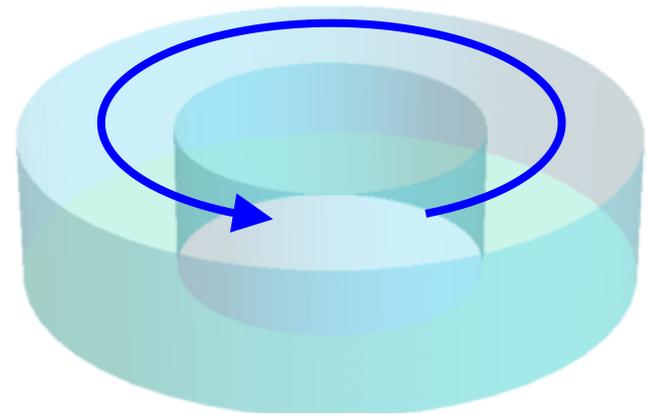
共振器：光の波を閉じ込める道具

平面型共振器



光路長 = 波長7.7個分

リング型共振器



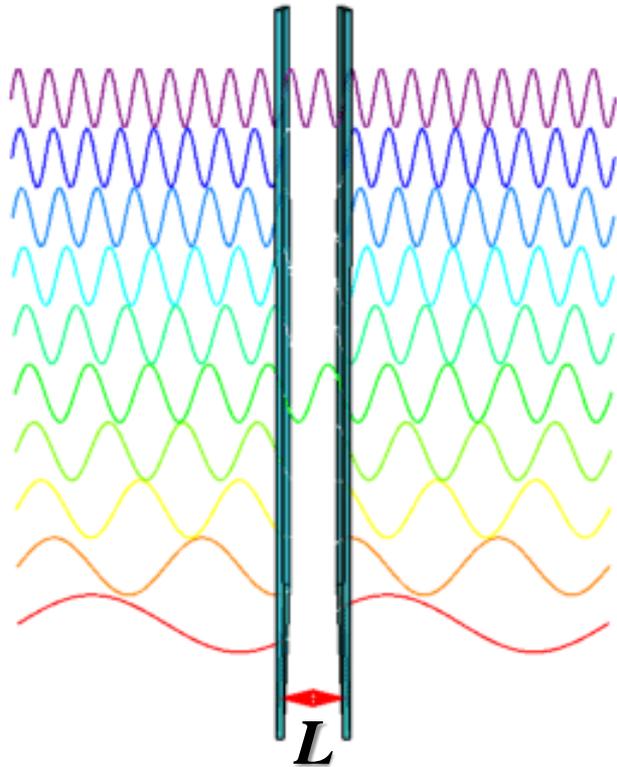
光路長 = 波長4.7個分

光路長が光波長の整数個でないとき光は消滅

共振条件を満たす波長の光だけが閉じ込められる

共振器の光閉じ込め

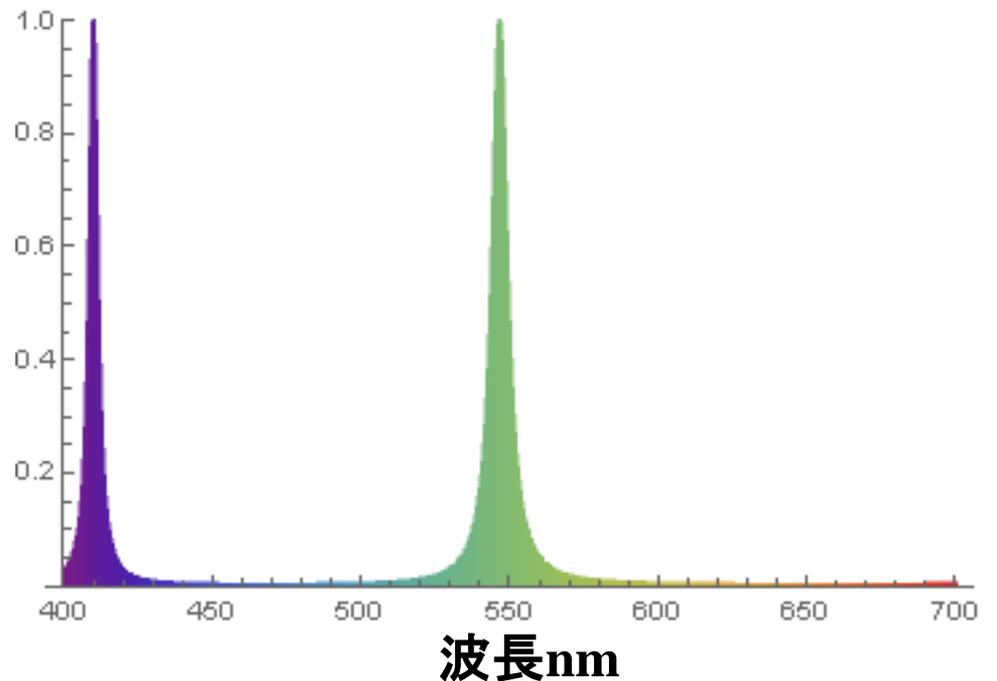
整数個の波長が光路長に一致する光だけが生き残る



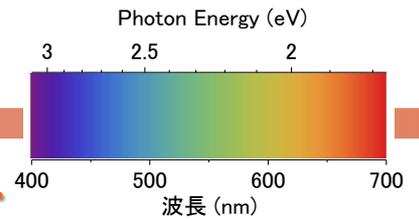
$$2nL = m\lambda$$

- n 屈折率
- λ 光波長
- m 整数

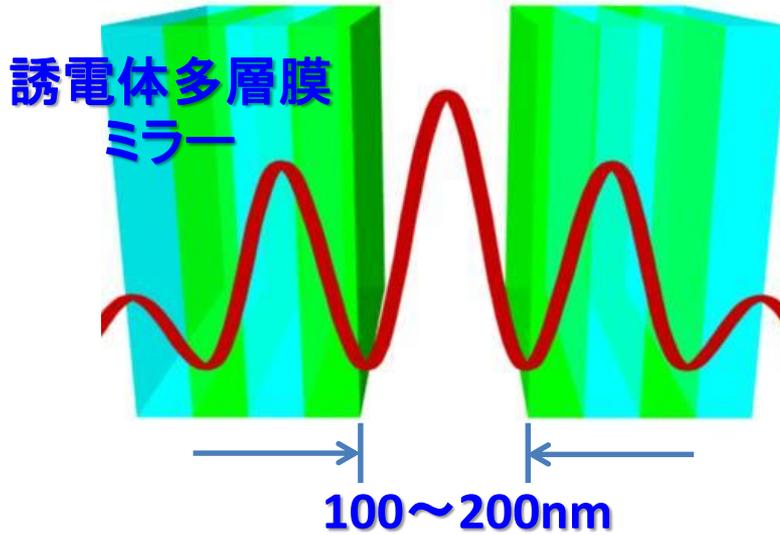
透過スペクトル



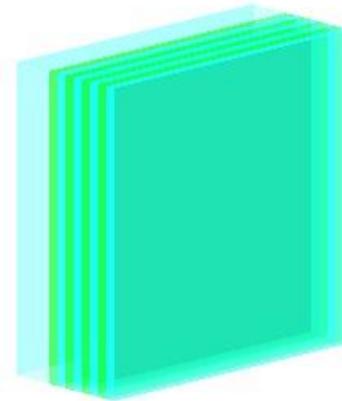
平面型共振器のミラー



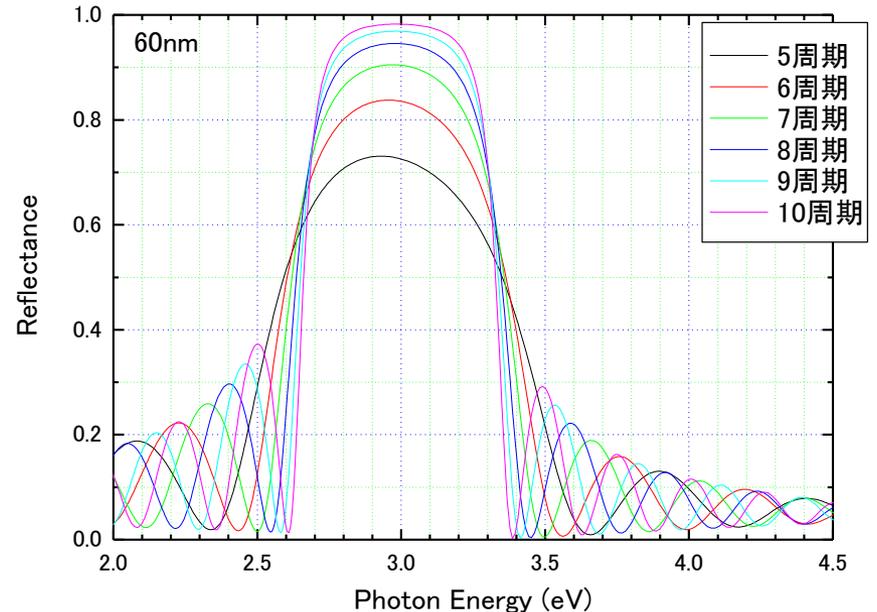
微小共振器
数波長の光を閉じ込める



誘電体多層膜ミラー

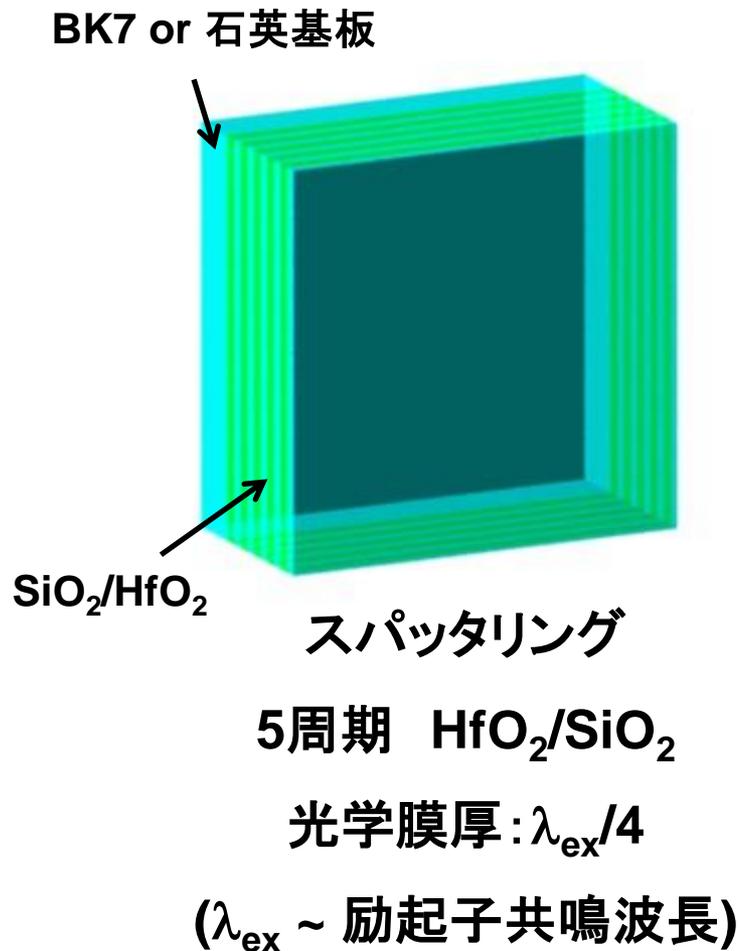


膜厚 $\lambda/4$ の周期構造

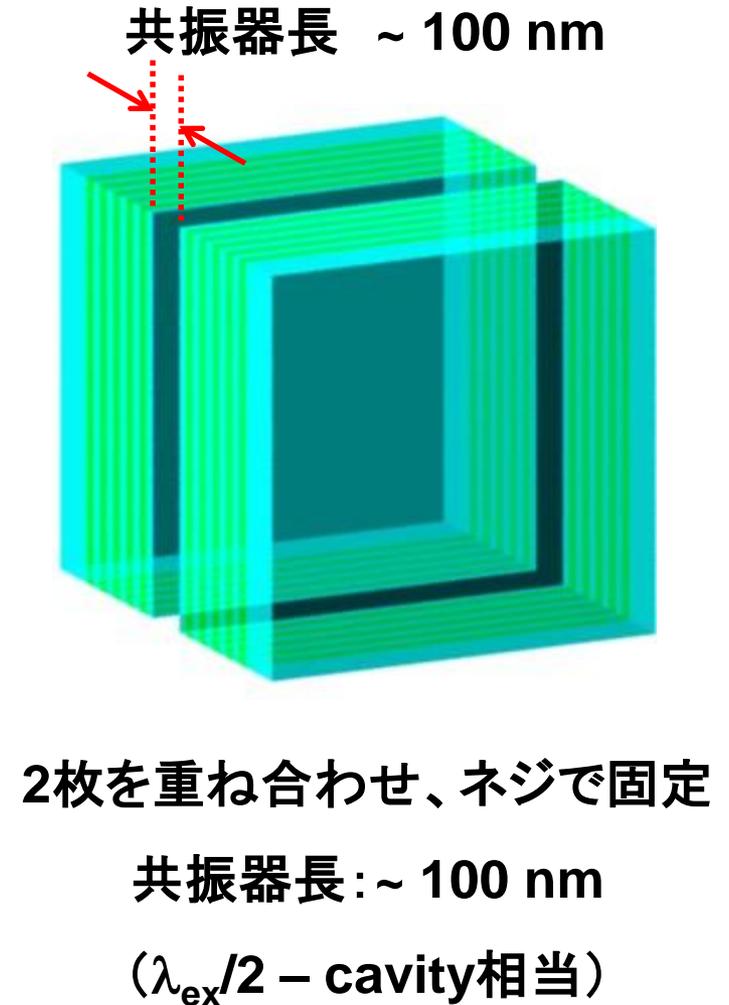


平面型微小共振器作製

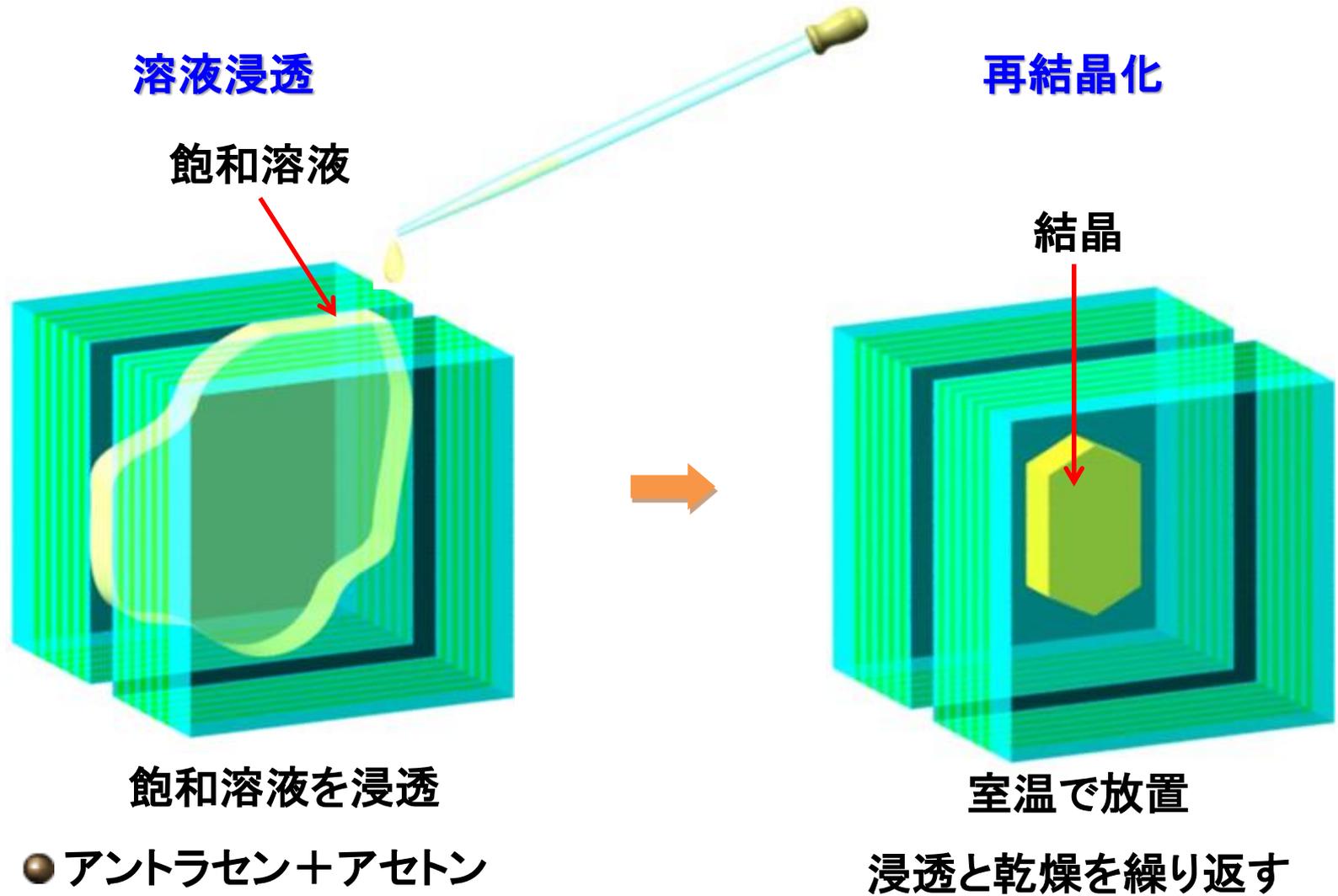
誘電体多層膜ミラー



微小共振器

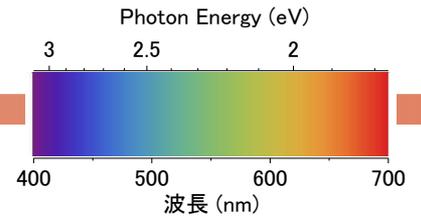


平面型微小共振器作製

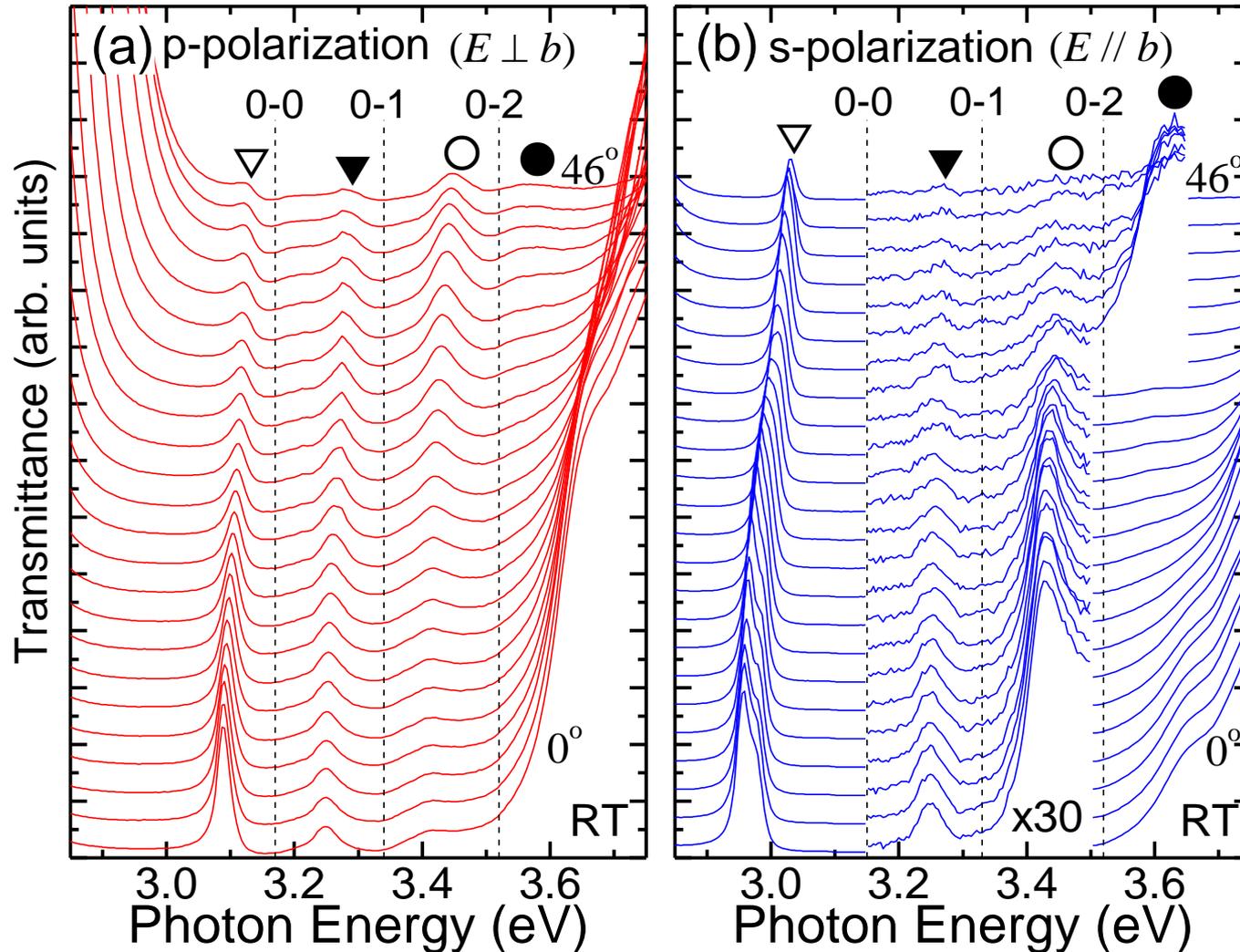


手作業で光波長数個程度の共振器ギャップの作製に成功！

有機結晶平面型微小共振器



透過スペクトル上の共振器モード

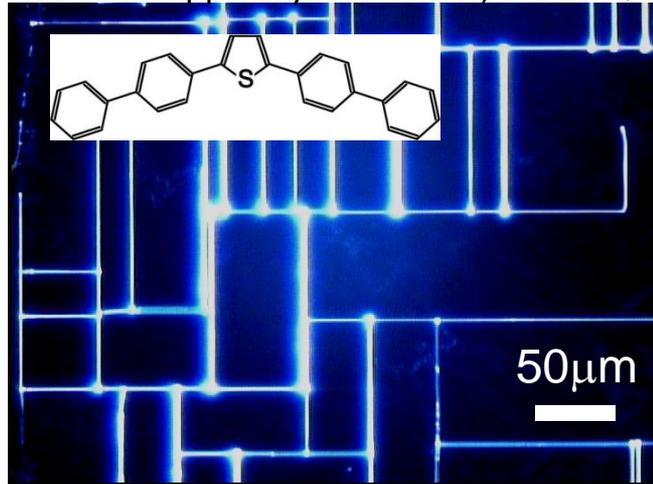


有機結晶リング型微小共振器

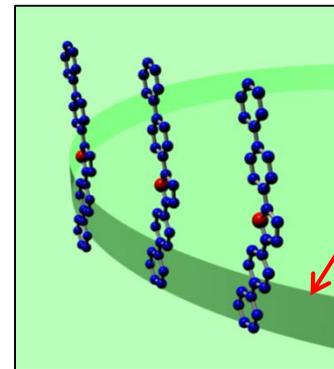
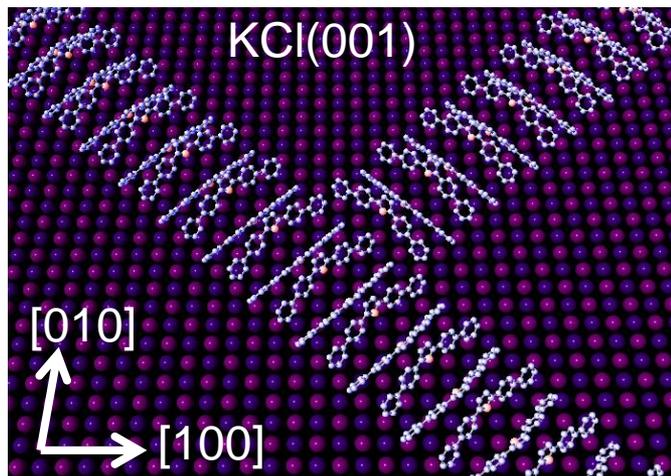
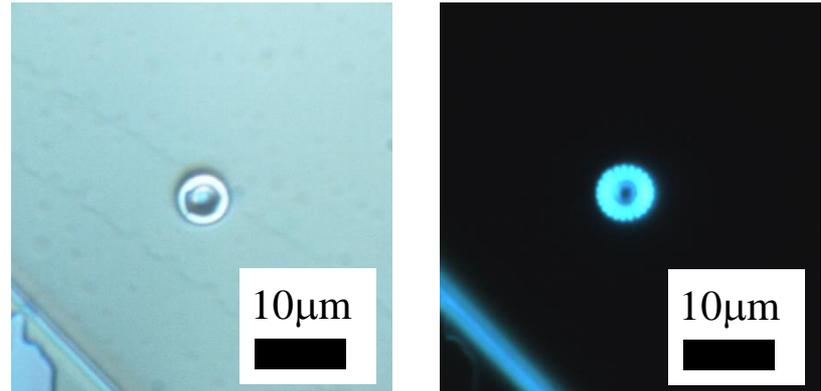
自己組織化有機リング結晶によるリング型微小共振器

BP1Tニードル結晶

K. Bando et al. Appl. Phys. Lett. 103, 023304 (2013)



BP1Tリング結晶

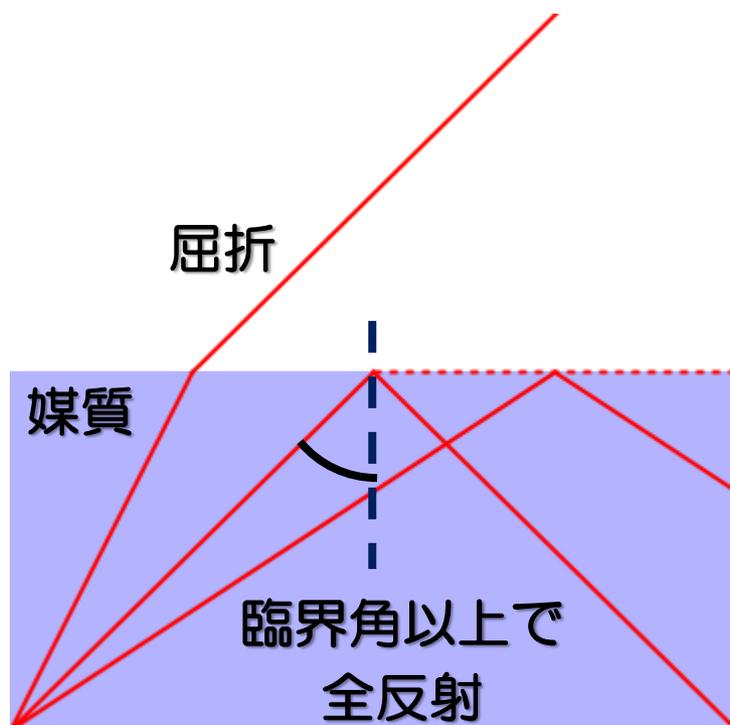


KCl原子ステップ

自然にリング構造が形成
することを発見!

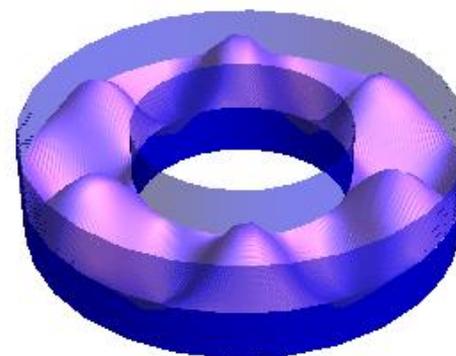
全反射で光を閉じ込めるリング形状

全反射（反射率～100%）



水の臨界角48.6°

ウィスパリング
ギャラリーモード

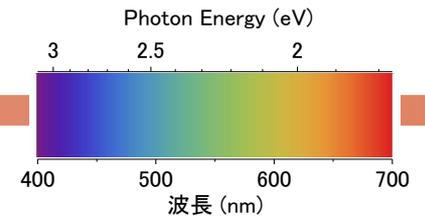


全反射し
続ける

定在波
(周期的境界条件)
波長の整数倍

$$nL = m\lambda$$

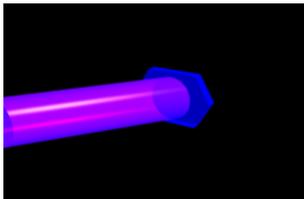
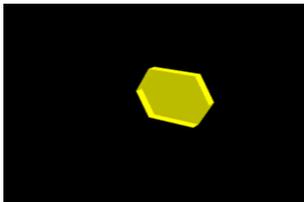
有機結晶平面型微小共振器の光閉じ込め



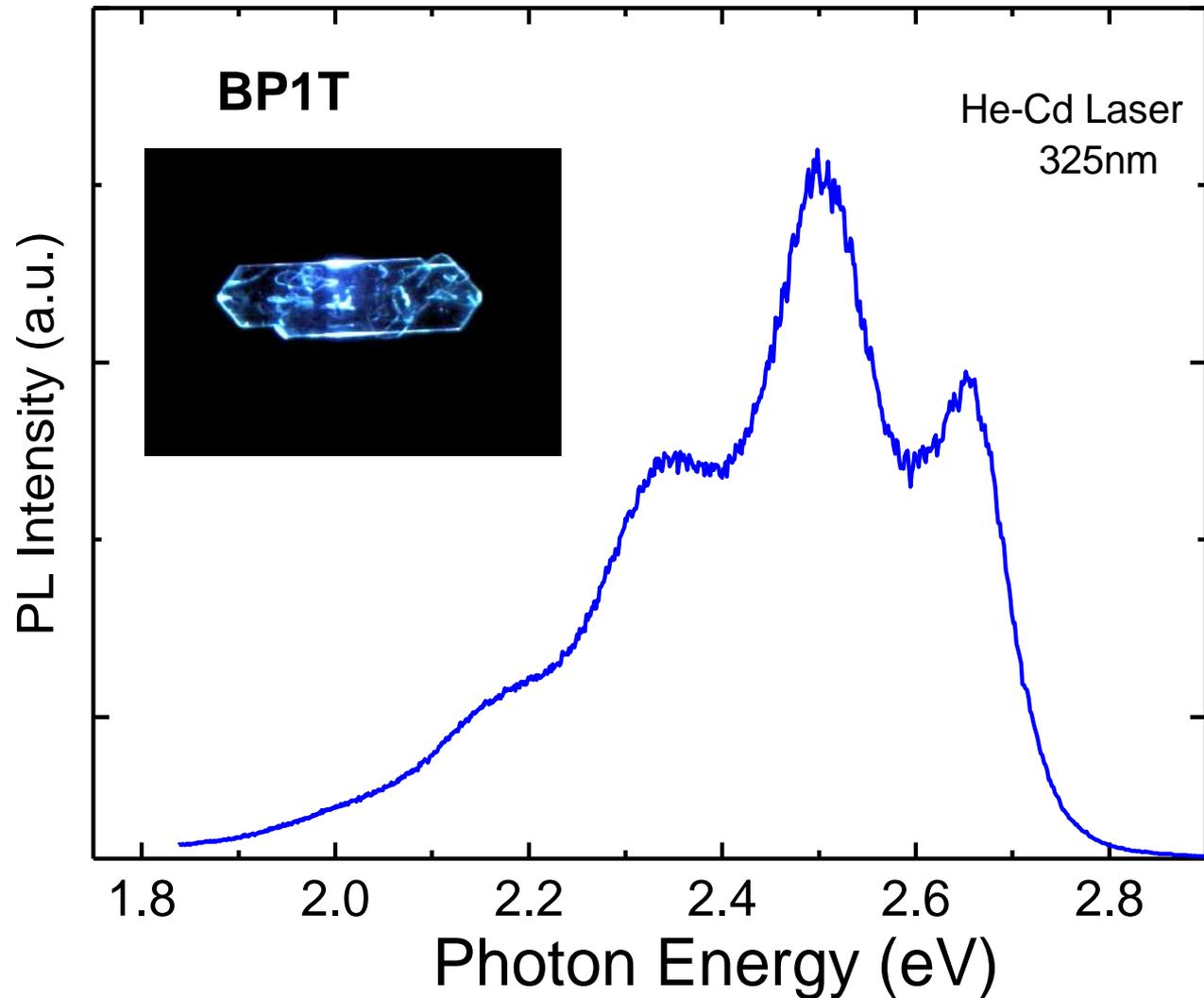
通常の発光スペクトル

BP1T結晶

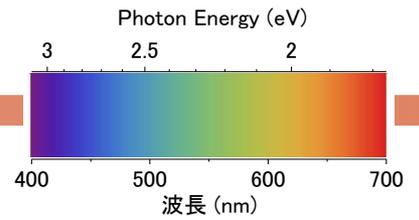
(通常の結晶)



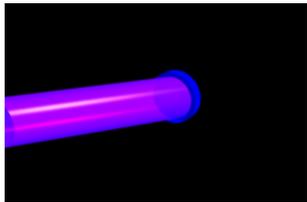
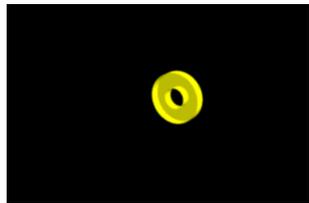
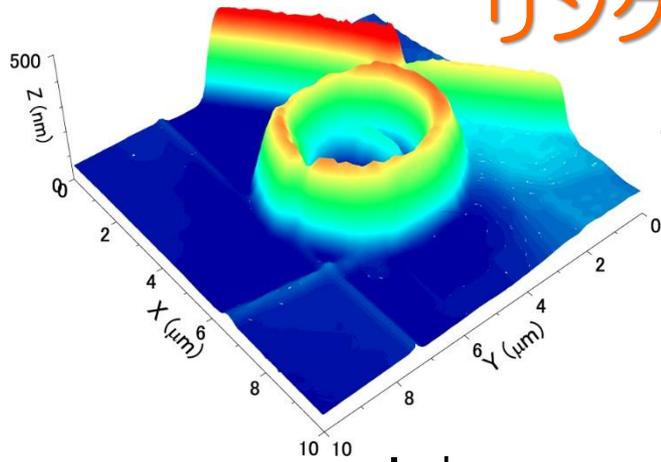
紫外レーザー
で励起



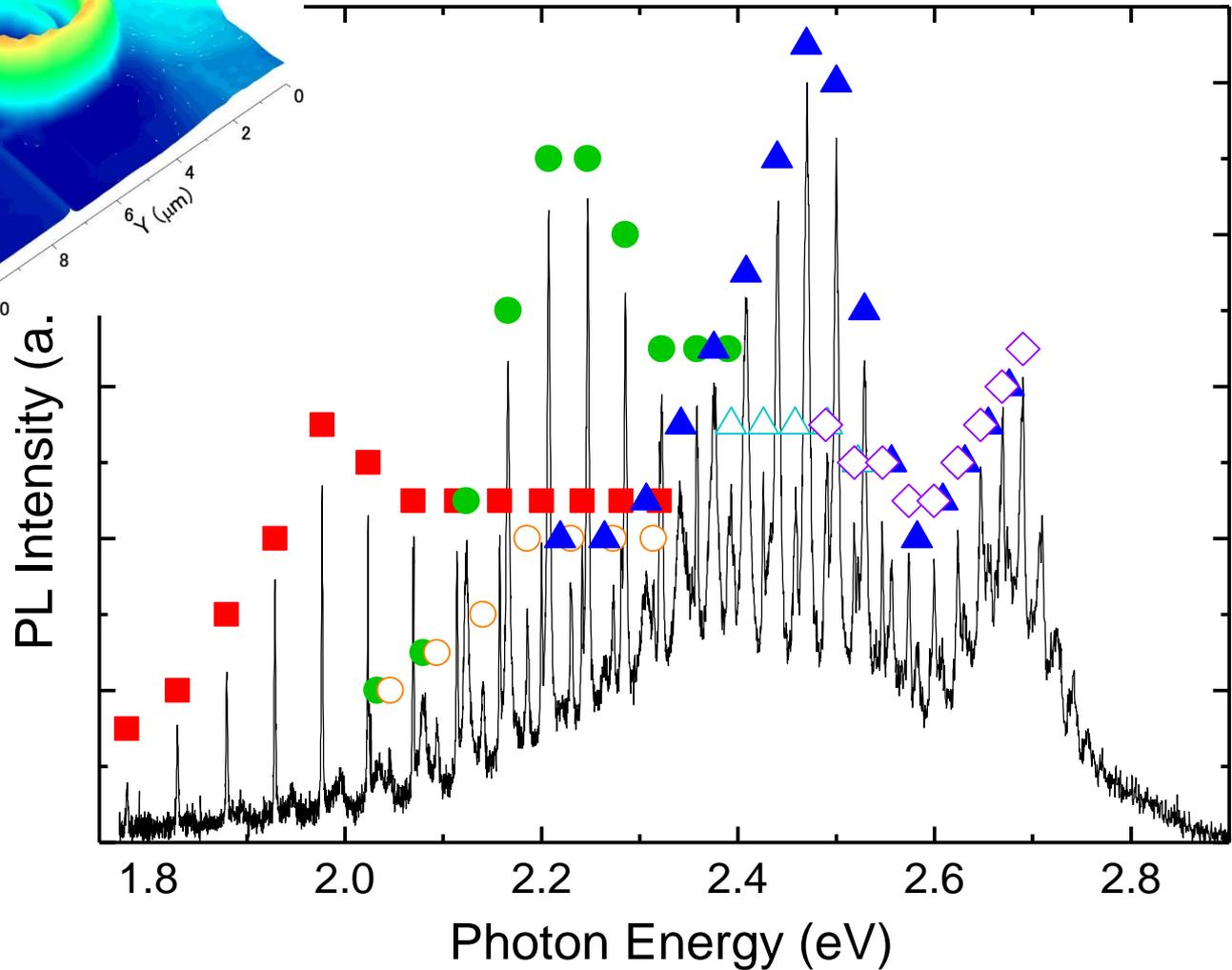
有機結晶平面型微小共振器の光閉じ込め



リング結晶の発光スペクトル

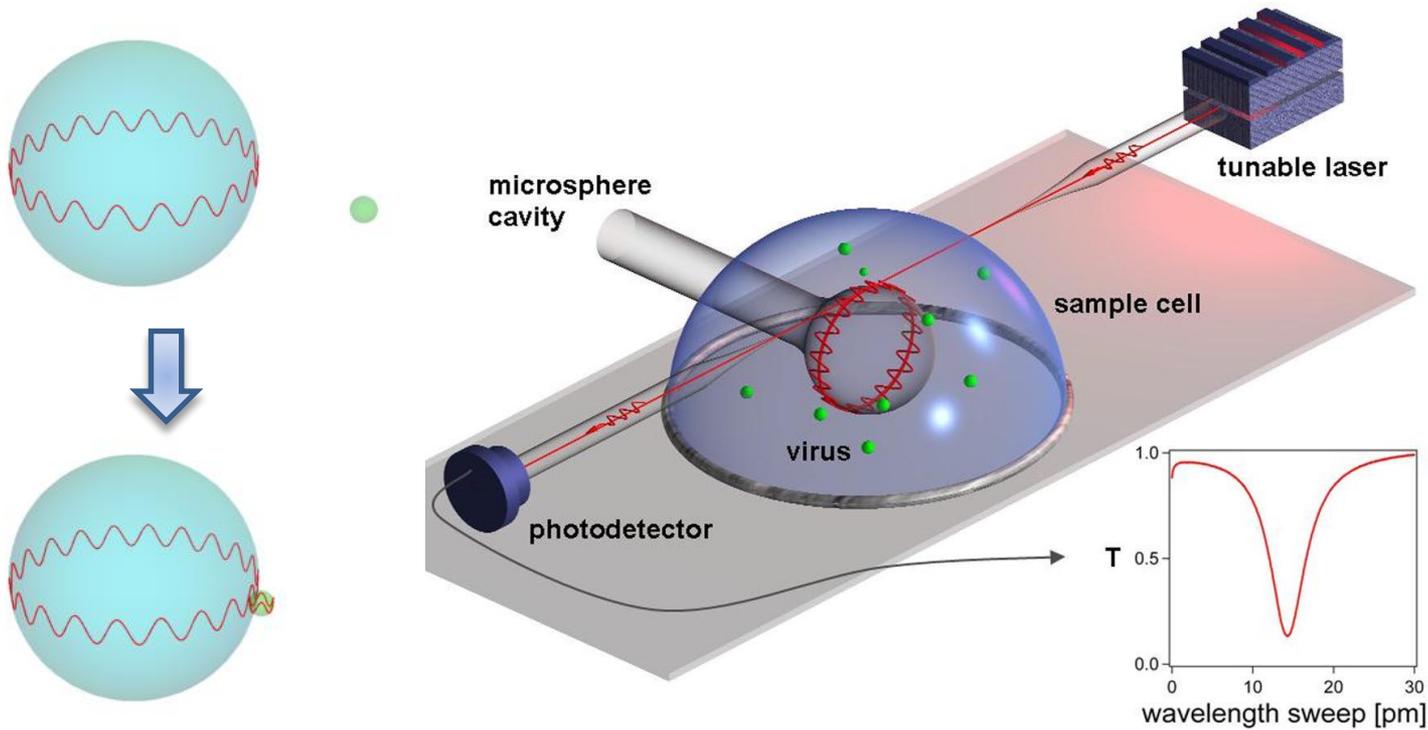


紫外レーザー
で励起



センサー

バイオセンサー

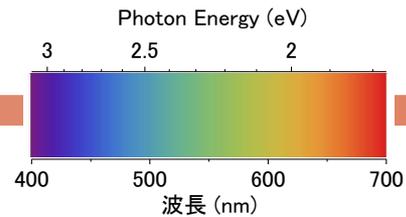


F. Vollmer, et al, PNAS **105**, 20701, (2008).

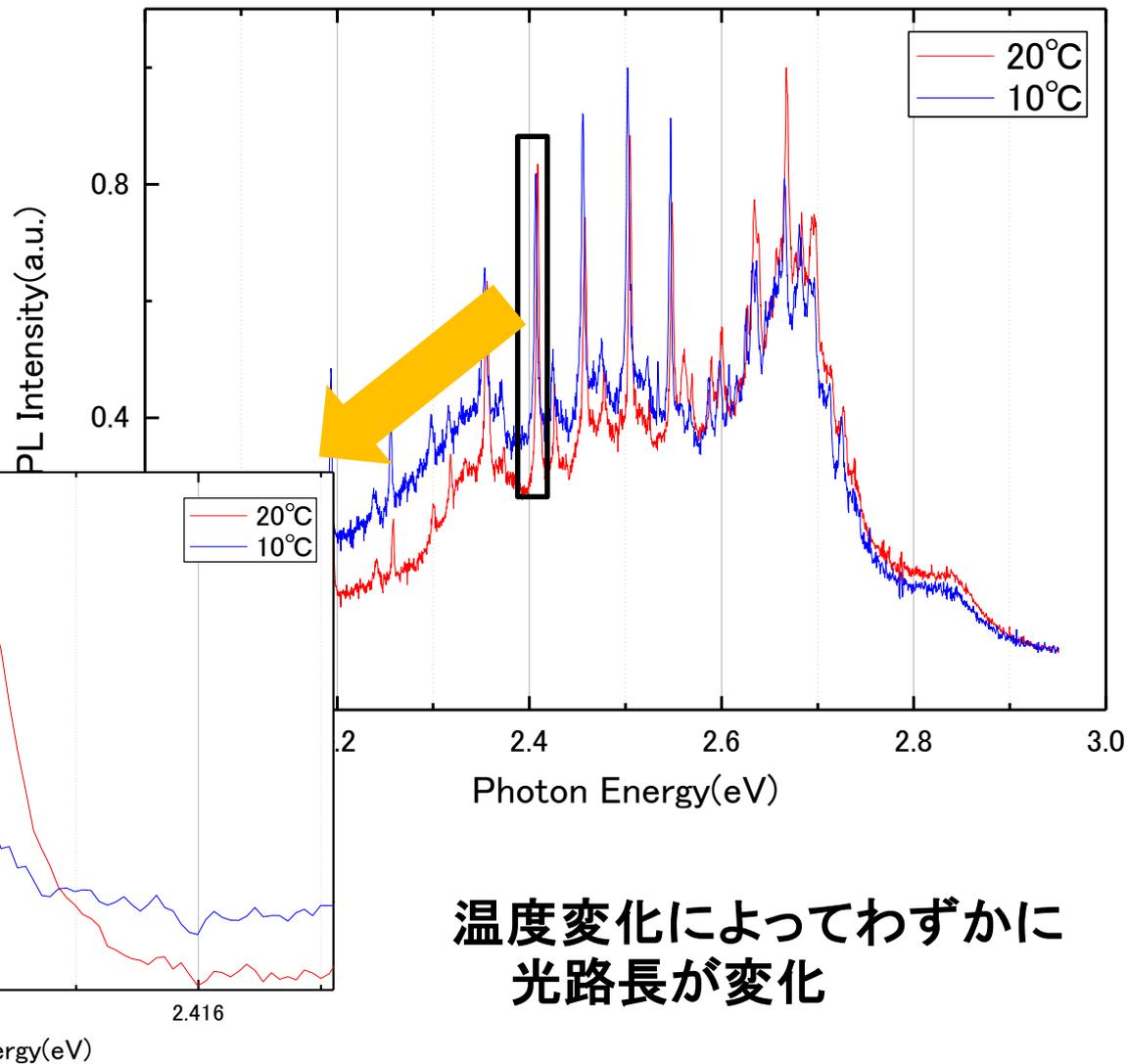
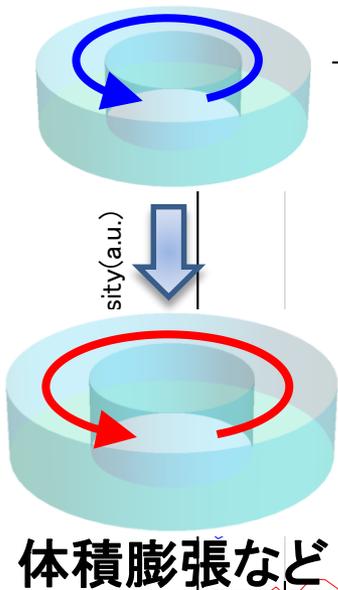
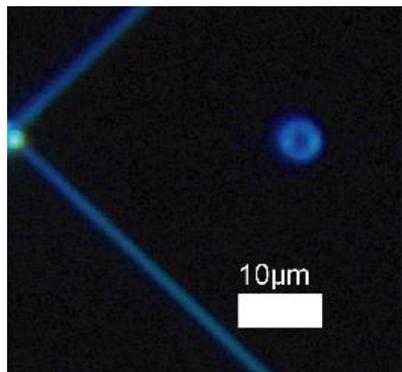
液体中のウイルス検出

リング共振器に付着するとわずかに光路長が変化

センサー



温度センサー

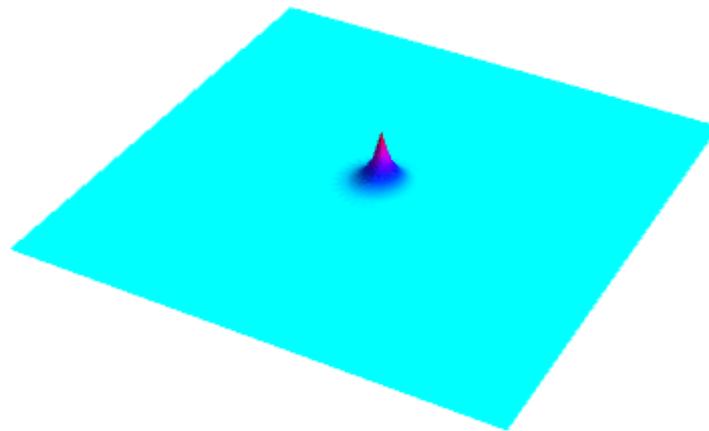
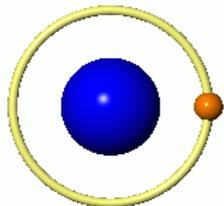


温度変化によってわずかに
光路長が変化

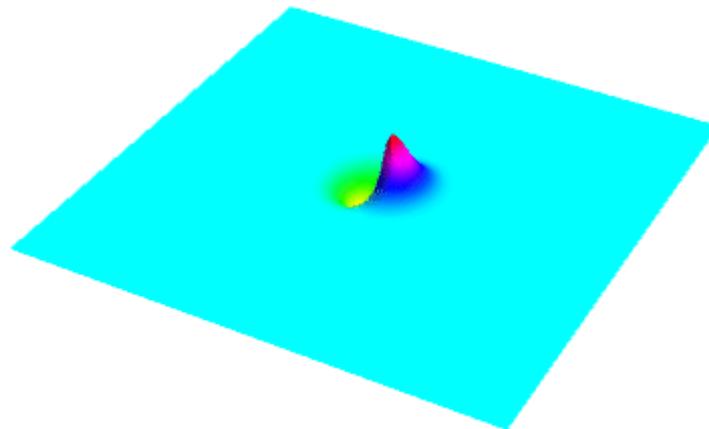
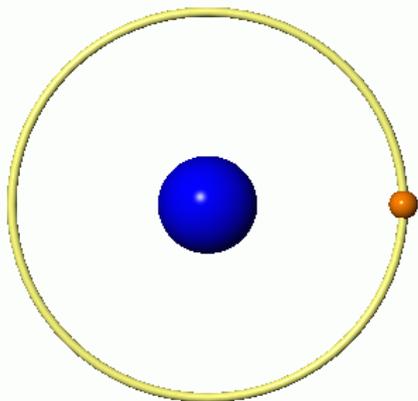
光の疑似原子

原子における電子の軌道

1s軌道 (K殻)



2p軌道 (L殻)

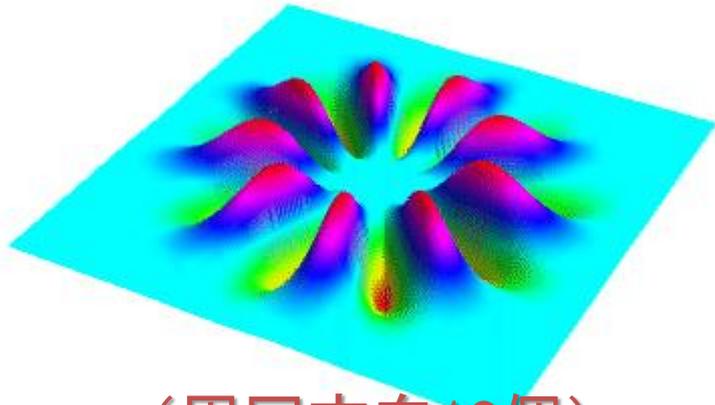


光の疑似原子

リング共振器は原子中の電子と類似している

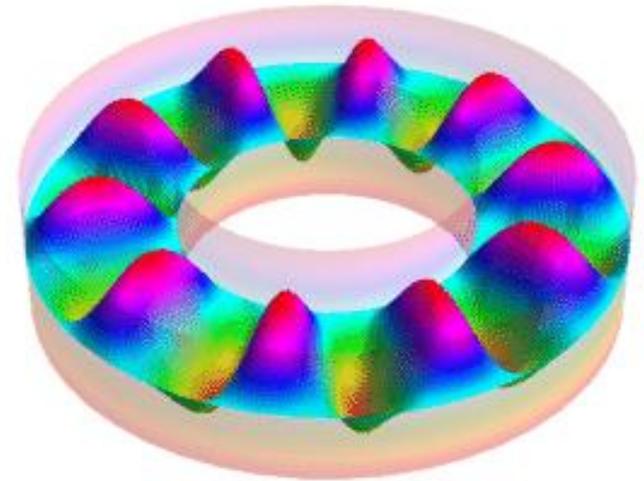
電子軌道

(原子中の電子の波)



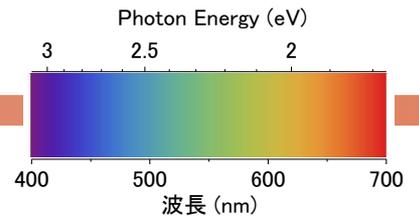
(周回方向10個)

リング共振器内の光の波

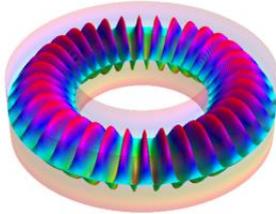


周回方向に波長の整数倍

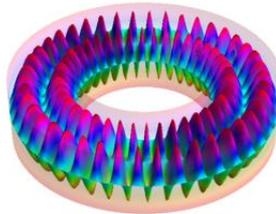
光の疑似原子



$m_r=1$
 $m_\phi=36$



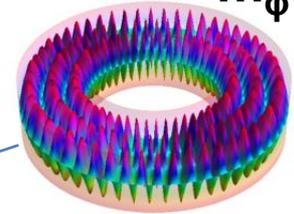
$m_r=2$



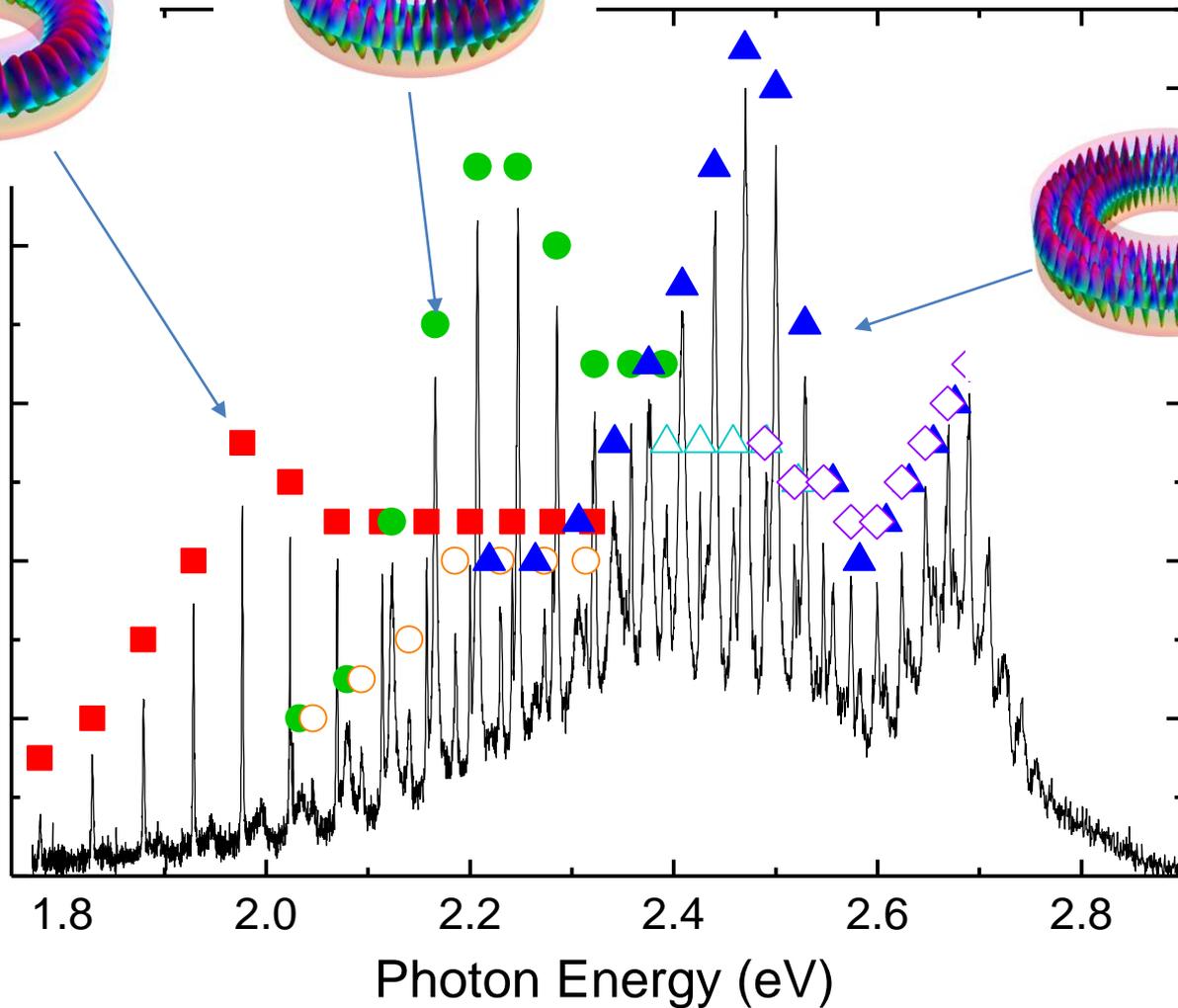
$m_\phi=42$

$m_r=3$

$m_\phi=54$



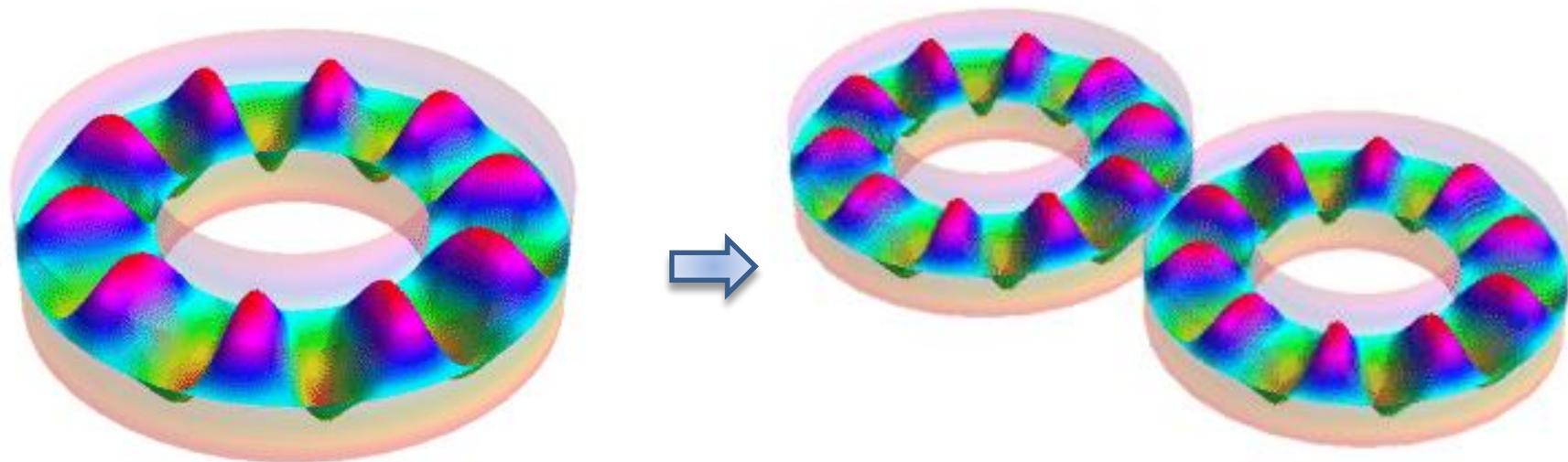
PL Intensity (a.u.)



横モード

光の疑似原子

リング共振器を二つ結合させると疑似分子

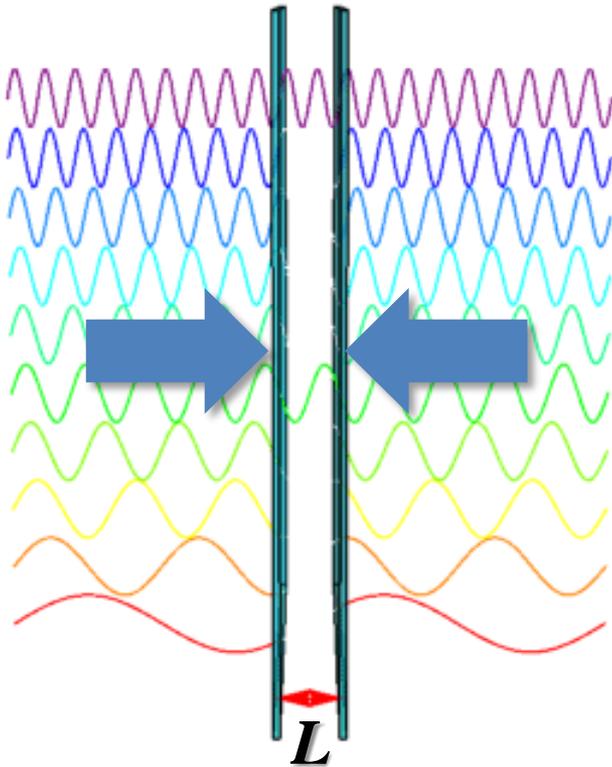


スペクトル上などで、分子と同様の現象が観測される可能性

光の原子 \Rightarrow 光の分子 \Rightarrow 光の固体(結晶)へ

カシミール効果

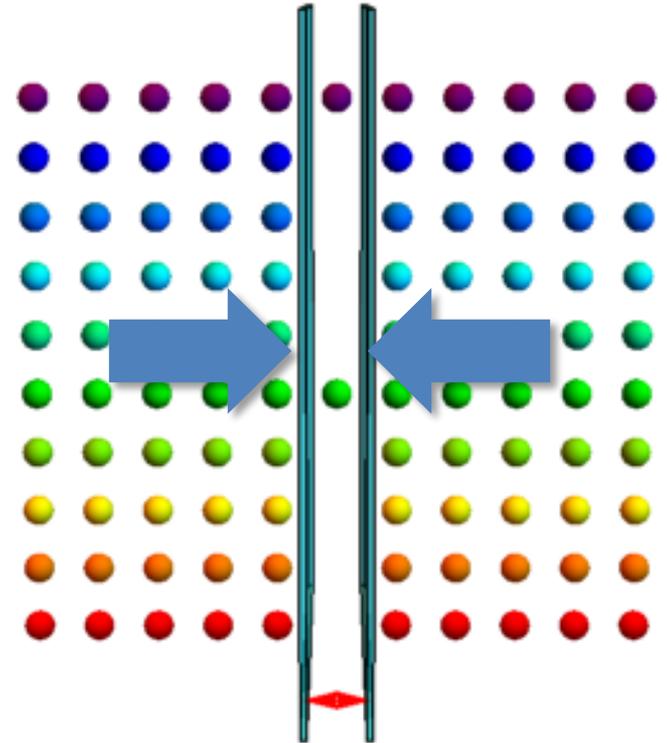
微小共振器の量子効果（仮想光子の生成消滅）



定在波条件
半波長の整数倍

$$2nL = m\lambda$$

n 屈折率
 λ 光波長
 m 整数

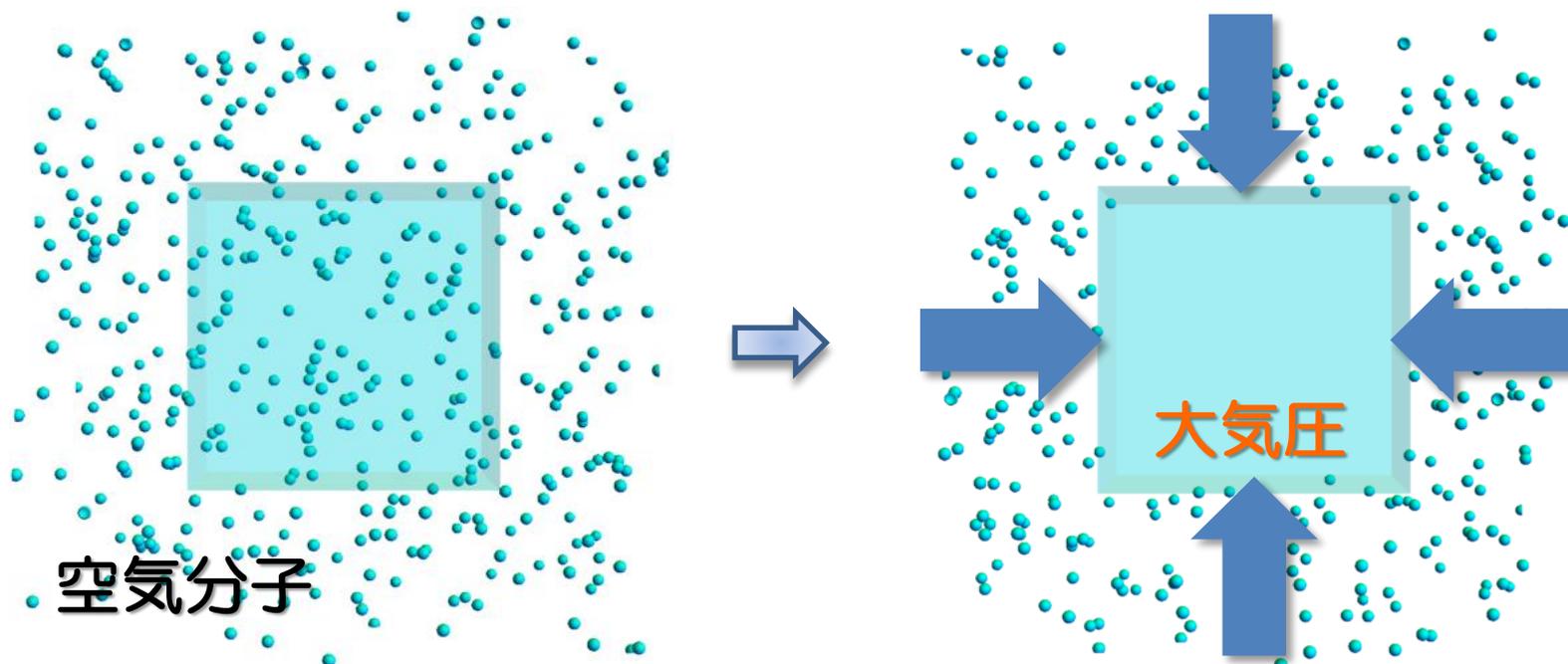


L の減少とともに存在可能な波（粒子）が減少。

共振器内部の真空エネルギー減少
共振器への圧力発生 → $L=10\text{nm}$ のとき1気圧

カシミール効果

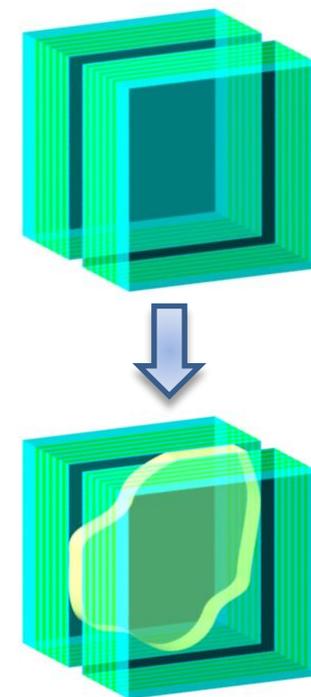
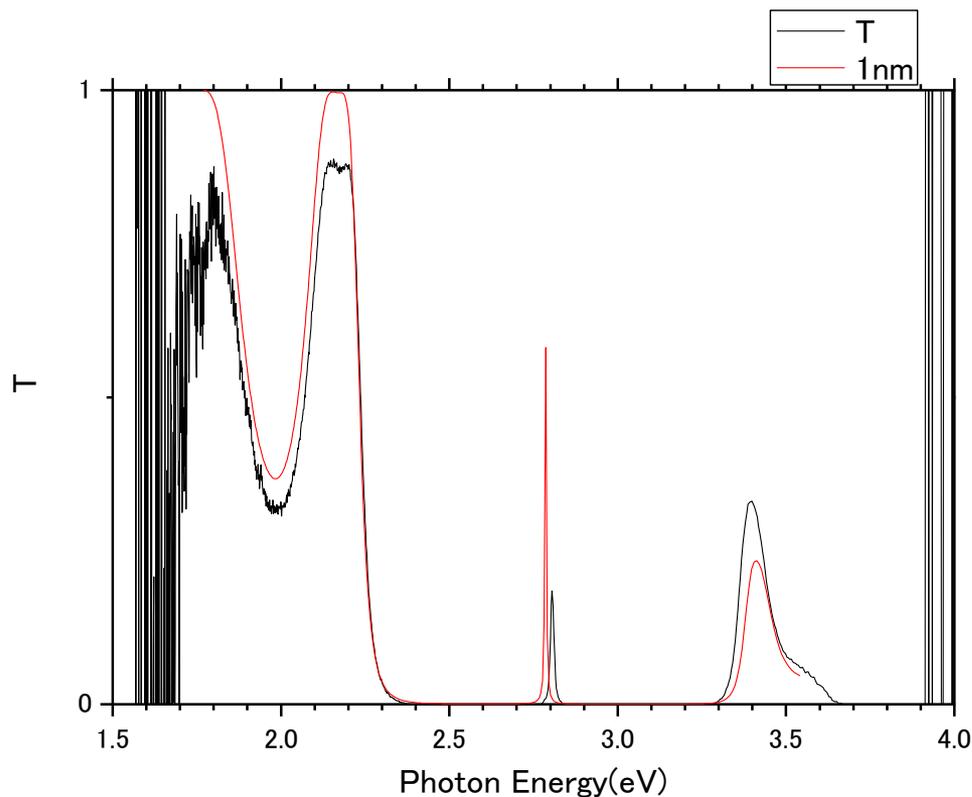
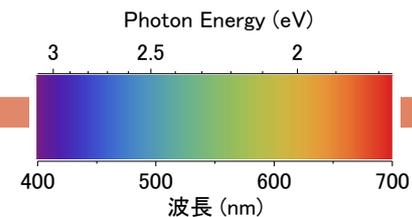
真空はからっぽではなく、仮想光子が存在する証拠。



密閉容器内の空気を抜くのと同じ。⇒大気圧

カシミール効果

数nmの共振器隙間



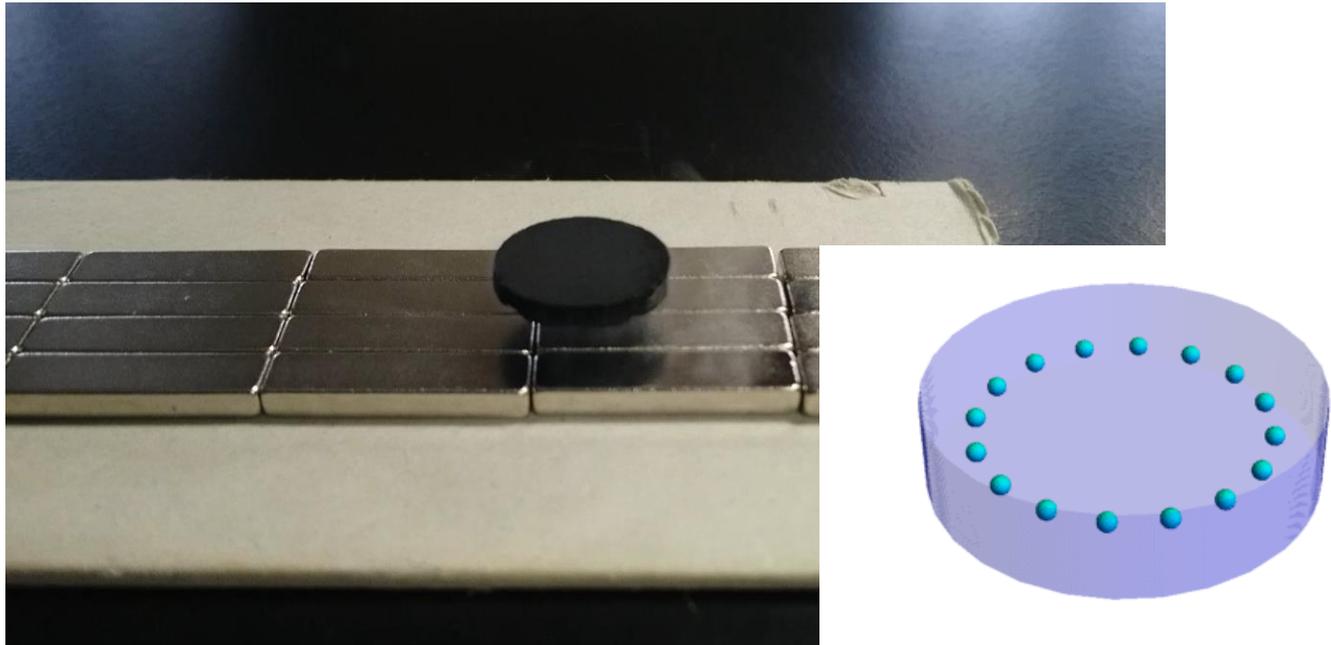
水（屈折率媒体）を注入すると間隔が広がる

⇒ 共振器内部の真空エネルギー増加？ → 圧力減少

超伝導・超流動

ボース・アインシュタイン凝縮による物理現象

超伝導

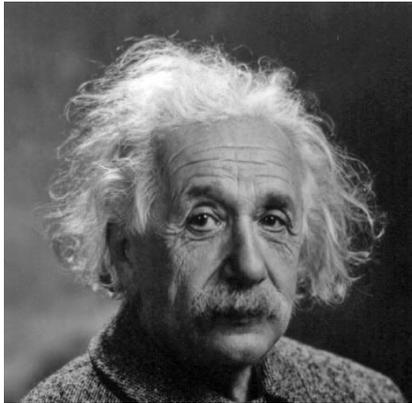


電子対が抵抗なく永久に流れ続ける

マイスナー効果

Bose-Einstein凝縮 (BEC)

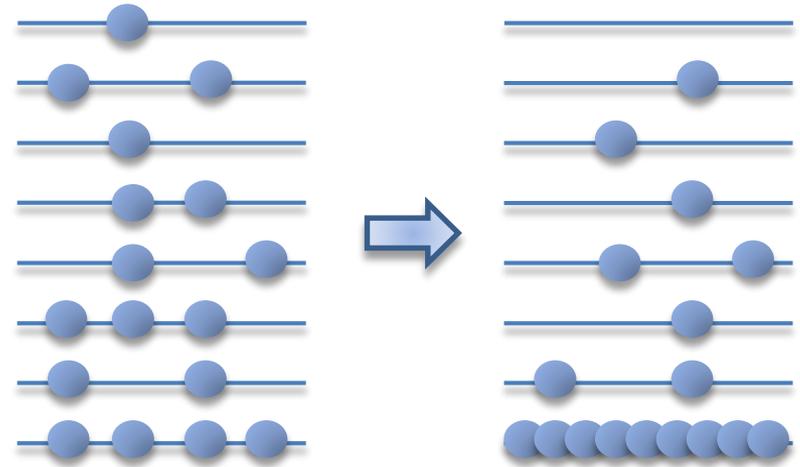
転移温度以下で多数の粒子が
最低エネルギー状態へ移行



1925年 BoseとEinsteinによる予言

- Bose粒子特有の現象
- 転移温度以下最低エネルギーへの凝縮

Bose粒子
一つの準位を多数の粒子が占有
BEC転移



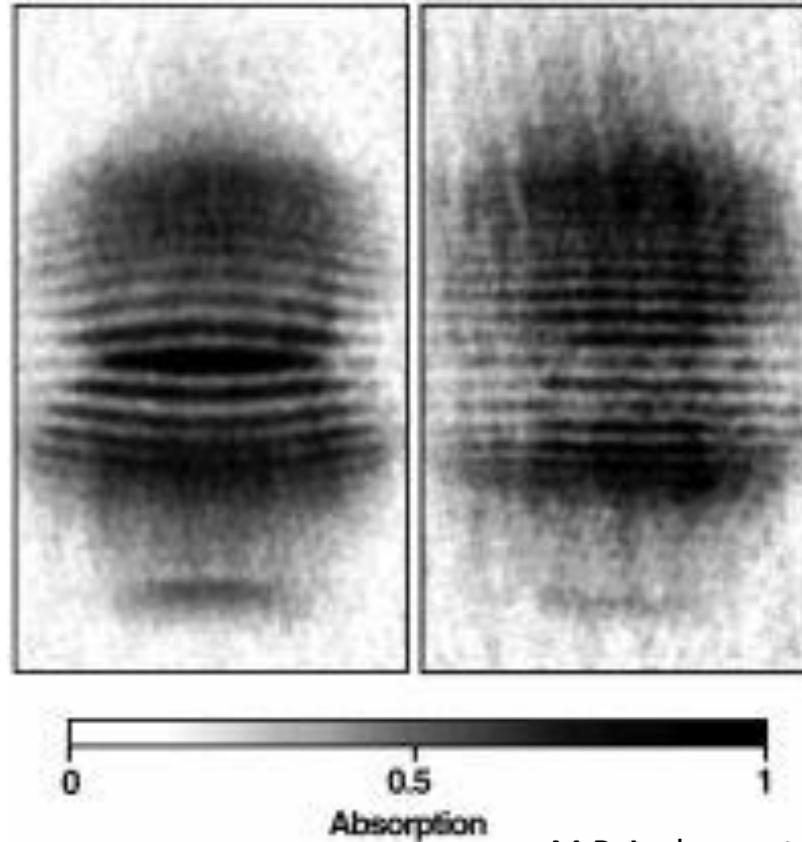
BEC転移温度

$$T_c = \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B} \left(\frac{n}{2.612} \right)^{\frac{2}{3}}$$

超伝導やHe超流動は極低温でしか起こらない。
中性子星の超流動を再現することは不可能。
→実験室内、室温環境下でBECを実現したい！

Bose-Einstein 凝縮 (BEC)

^{87}Rb 原子集団のBEC転移 (20nK) マクロな量子干渉



M.R.Andrews et al. Science 275, 637 (1997)

2001年ノーベル賞(ボース・アインシュタイン予言から約80年)

原子集団のBEC

BEC原子集団のマクロな量子干渉



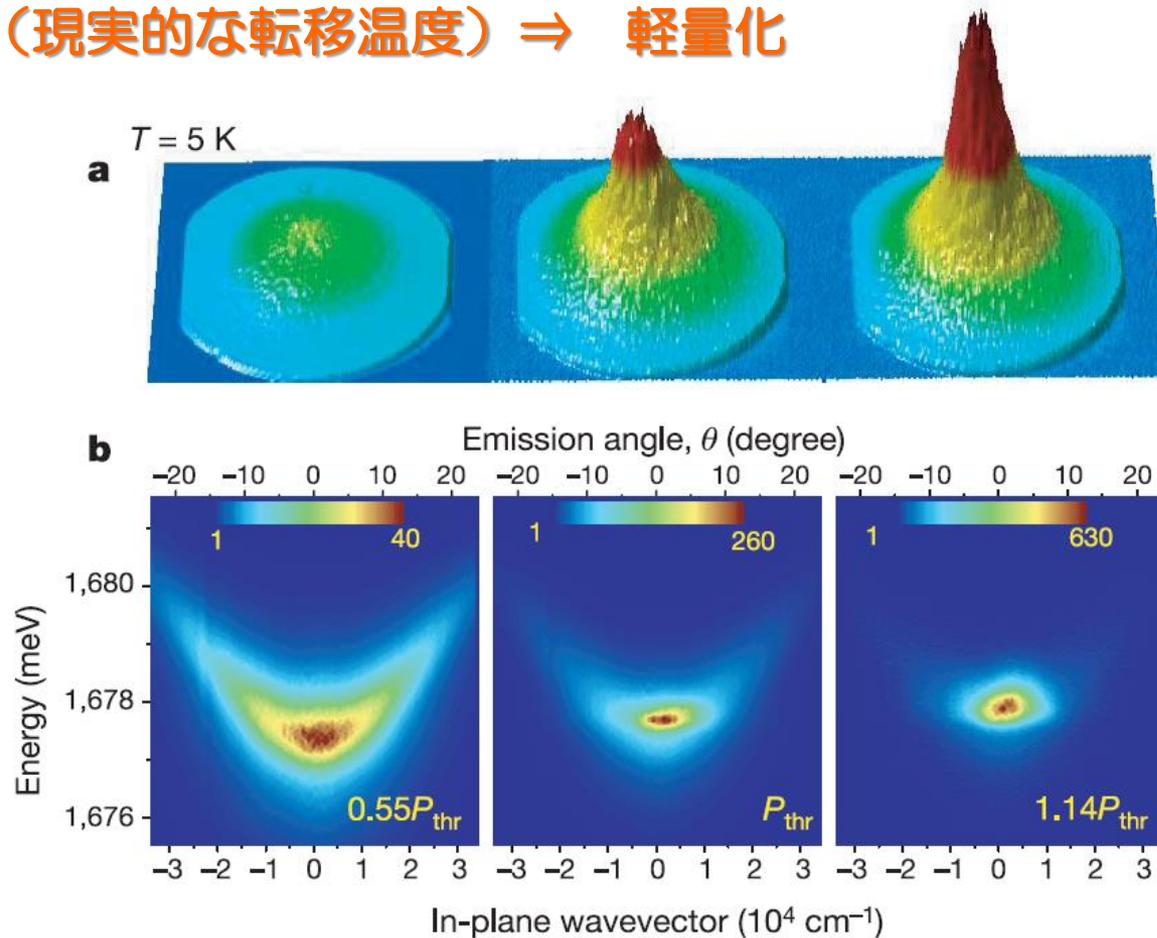
原子集団が一つの波のように振る舞う

BEC：多数の粒子が同一の量子状態

微小共振器によるBEC研究

BECに必要な条件

- ◆ 冷却時間（粒子の寿命） \Rightarrow 長寿命化
- ◆ 質量（現実的な転移温度） \Rightarrow 軽量化



微小共振器によるBEC研究

BECに必要な条件

- ◆ 冷却時間（粒子の寿命）⇒ 長寿命化
- ◆ 質量（現実的な転移温度）⇒ 軽量化

BEC転移温度

$$T_c = \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B} \left(\frac{n}{2.612} \right)^{\frac{2}{3}}$$

微小共振器中の光子が有利な理由

共振器は光子にとっての保存容器

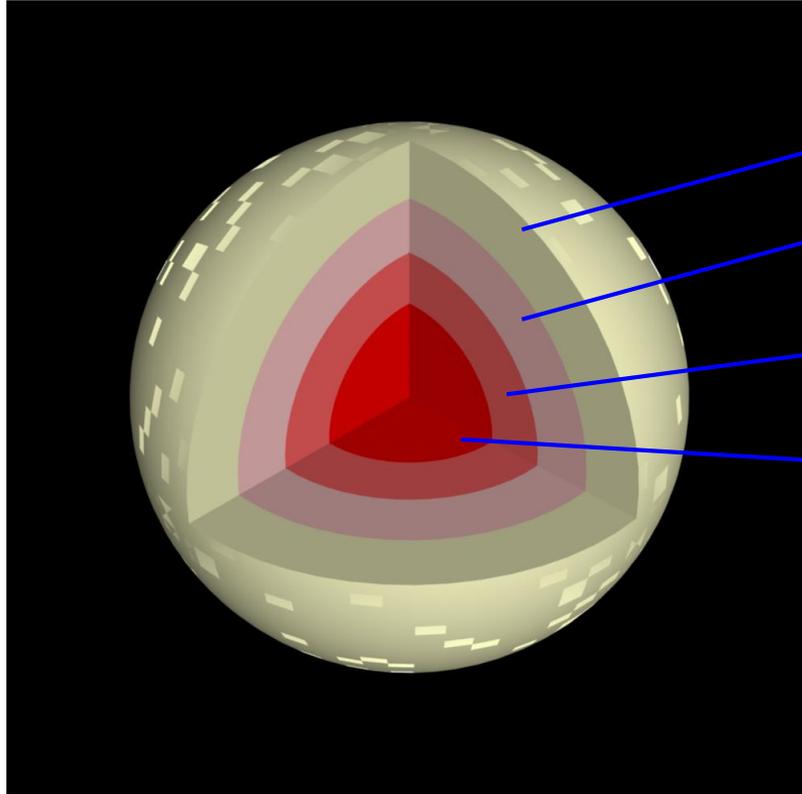
⇒ 保存できるので時間をかけて冷却できる。

光子は極めて質量が軽い

⇒ 転移温度を室温以上に設定できる。

中性子星における超伝導・超流動

中性子星



外殻: 原子核、電子

内殻: 中性子過剰核、中性子(超流動)、電子

外核: 中性子(超流動)、陽子(超伝導)、電子

内核: 中性子、陽子、ハイペロン、中間子、クォーク

- ◆ 中性子対の超流動相
- ◆ 陽子対の超伝導相

実験室レベルでの再現が目指せる