

---

若手 ICT 研究者育成型  
通信波長帯單一双極子による  
自然放出制御デバイスの研究開発

---

研究期間  
平成19年度～平成21年度（3年間）

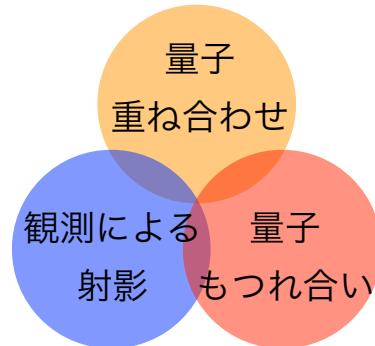
研究代表者  
NTT物性科学基礎研究所 傑毅彦

# 研究開発背景

## 次世代量子情報通信技術

量子力学に基づく情報処理・伝送  
従来技術の物理的限界を打破

### 量子情報通信における基本構成要素

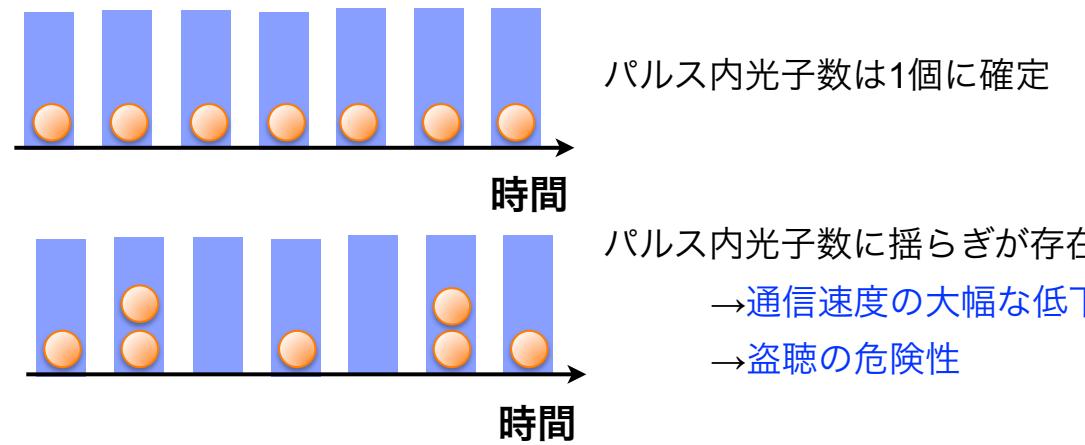


- ・量子暗号
  - ・量子通信
  - ・量子コンピュータ
- が実現可能に

- ・単一光子発生素子 (qbit生成)
  - ・単一光子検出器 (qbit検出)
- の開発が不可欠

### 単一光子光源の現状

理想的には・・・ *Single Photon Pulse*



現状は・・・ *Weak Coherent Pulse*  
(減衰させたレーザ光)

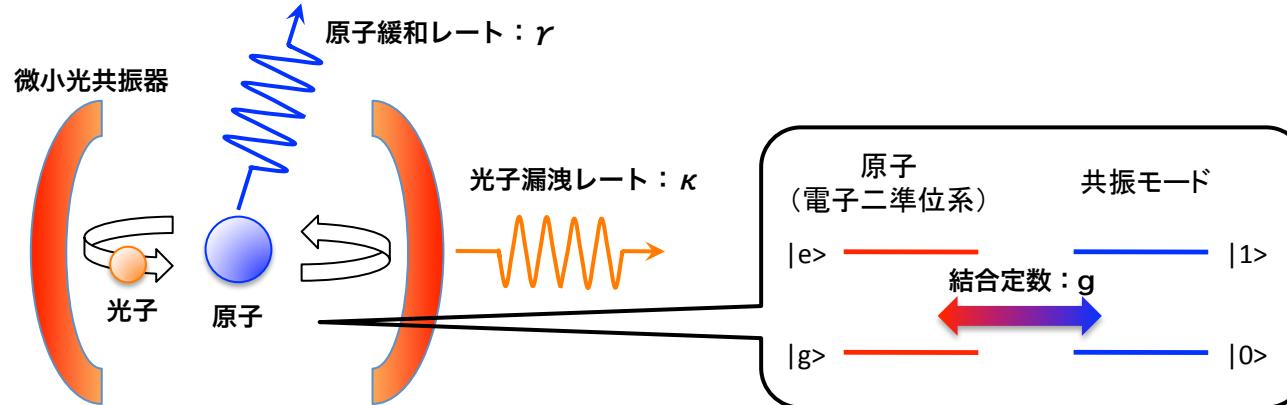
固体材料 かつ  
高繰り返し・オンデマンド発生が可能な

真の単一光子源が必要



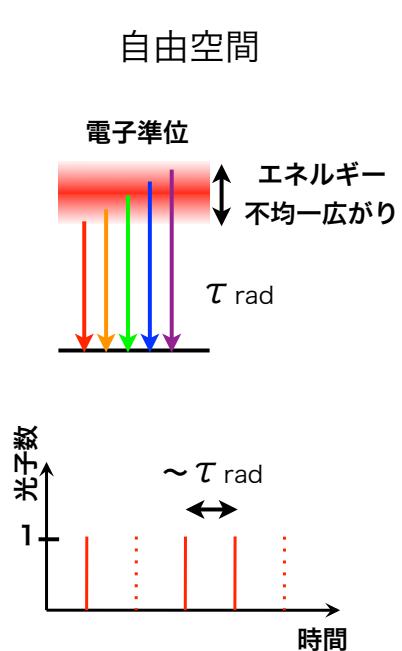
# 本研究のアプローチ：cQED効果による自然放出制御

## 共振器量子電気力学 (Cavity Quantum Electrodynamics, cQED)

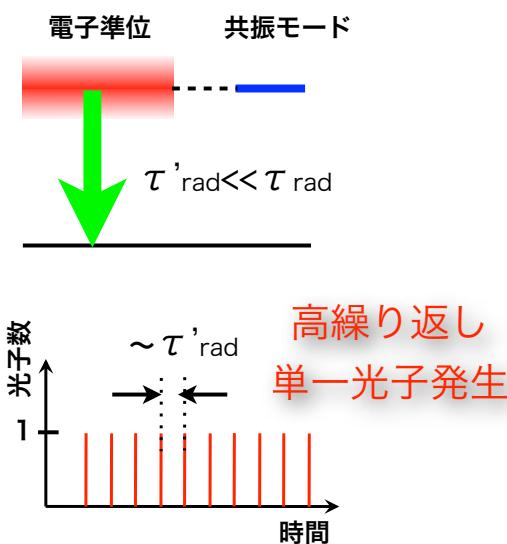


**弱結合状態** :  $g \ll \kappa, \gamma$   
自然放出レートの増強  
(パーセル効果)  
**強結合状態** :  $g \gg \kappa, \gamma$   
ラビ振動 (分裂)

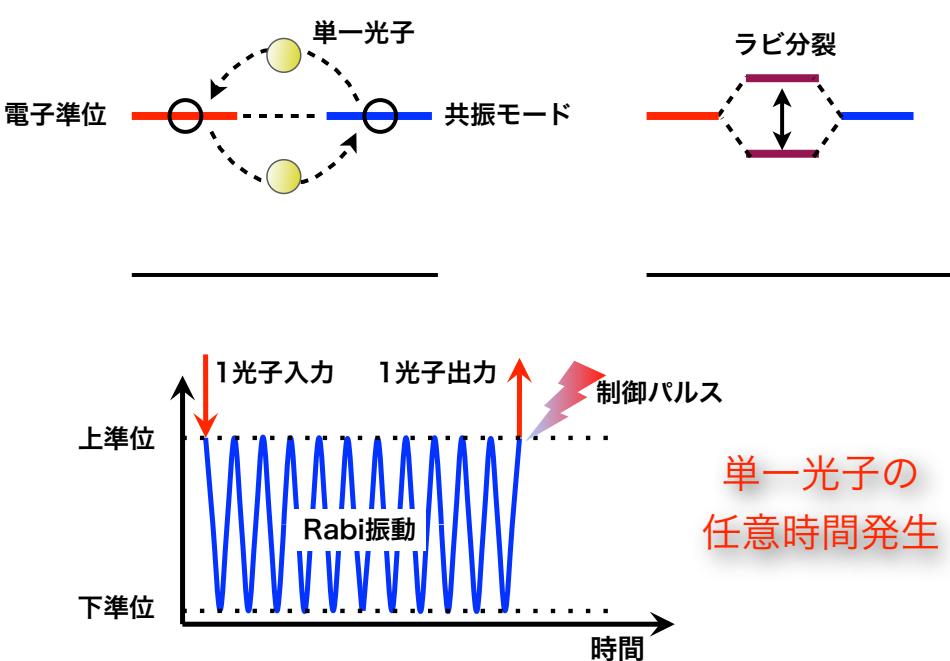
### 自然放出静的制御 (弱結合)



### 微小共振器内 (パーセル効果)



### 自然放出動的制御 (強結合)

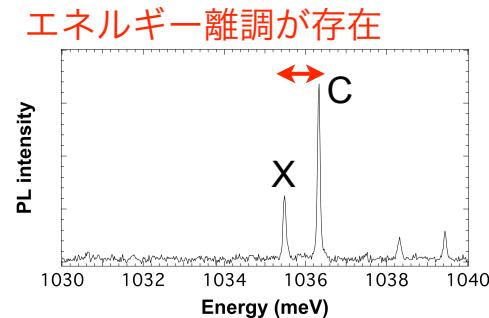
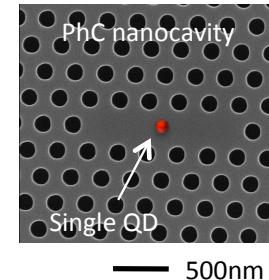


# 研究開発概略

## 1. 通信波長帯量子ドット (QD) -ナノ共振器結合系の作製とエネルギー同調方法の確立

QD内励起子：原子的電子二準位系  
通信波長帯発光

フォトニック結晶ナノ共振器：  
微小体積に強い光閉じ込め

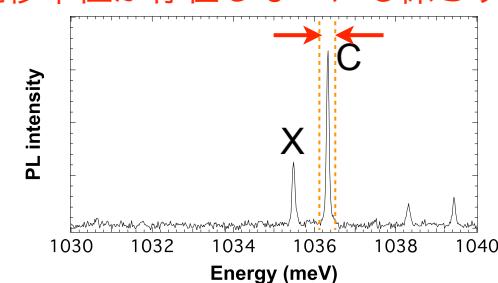


## 2. 固体特有現象の解明による静的自然放出制御高効率単一光子発生

非共鳴共振モード発光の存在：単一光子発生を阻害  
原因とその抑制方法

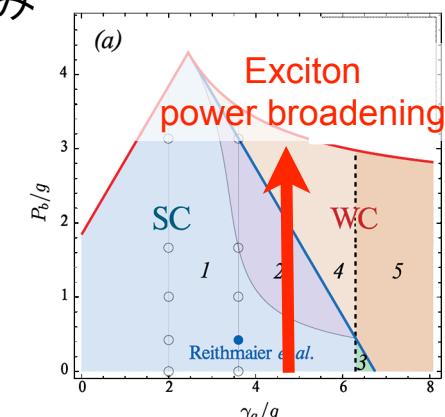
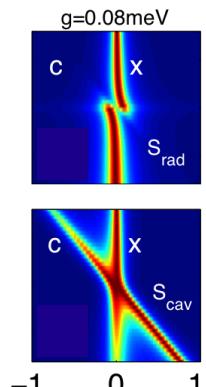
パーセル効果による単一光子発光の増強

遷移準位が存在しないにも係らず発光



## 3. 単一励起子-光子強結合状態の形成とその動的制御の試み

発光による強結合状態の観測：  
新規モデルによる構造設計  
強結合状態の形成・崩壊の任意制御：  
励起子Power broadeningを用いた試み



# 成果1

---

通信波長帯QD-ナノ共振器結合系の作製と  
エネルギー同調方法の確立

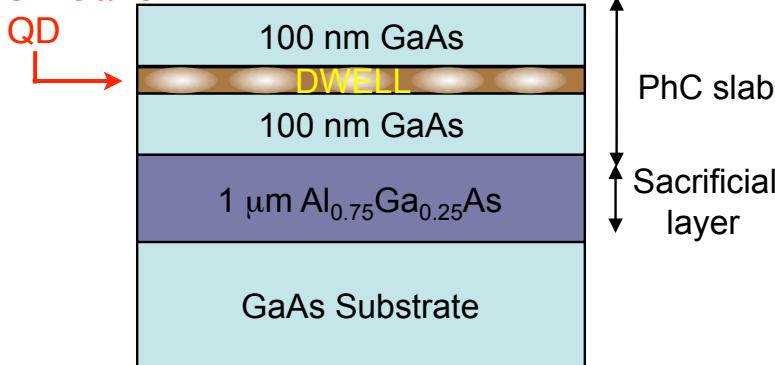
---

# 通信波長帯QD-ナノ共振器結合系の作製

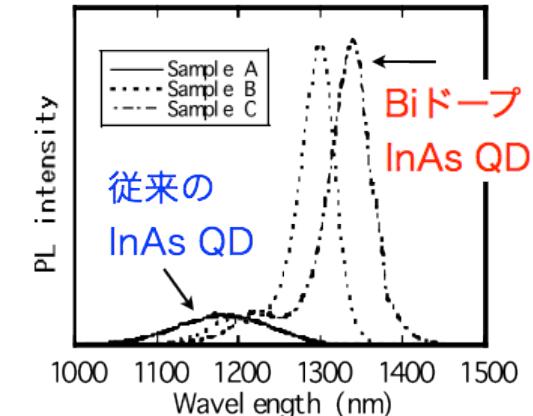
## Bi:InAs/InGaAs QDウェハ

Okamoto *et al.*, JJAP *in press.*

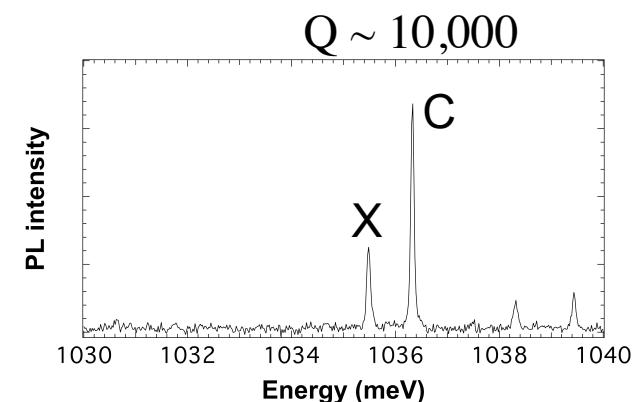
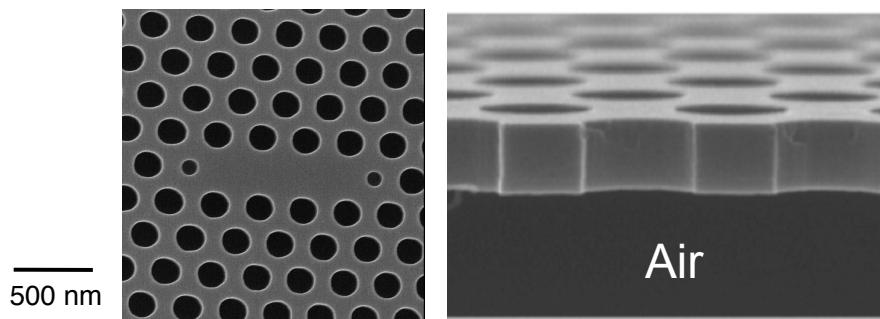
Bi:InAs/InGaAs



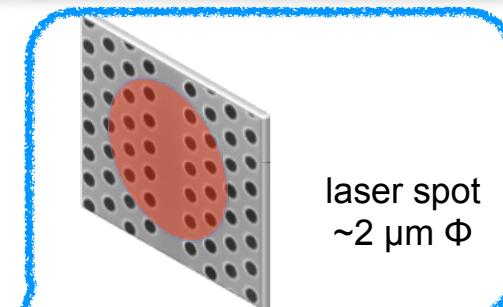
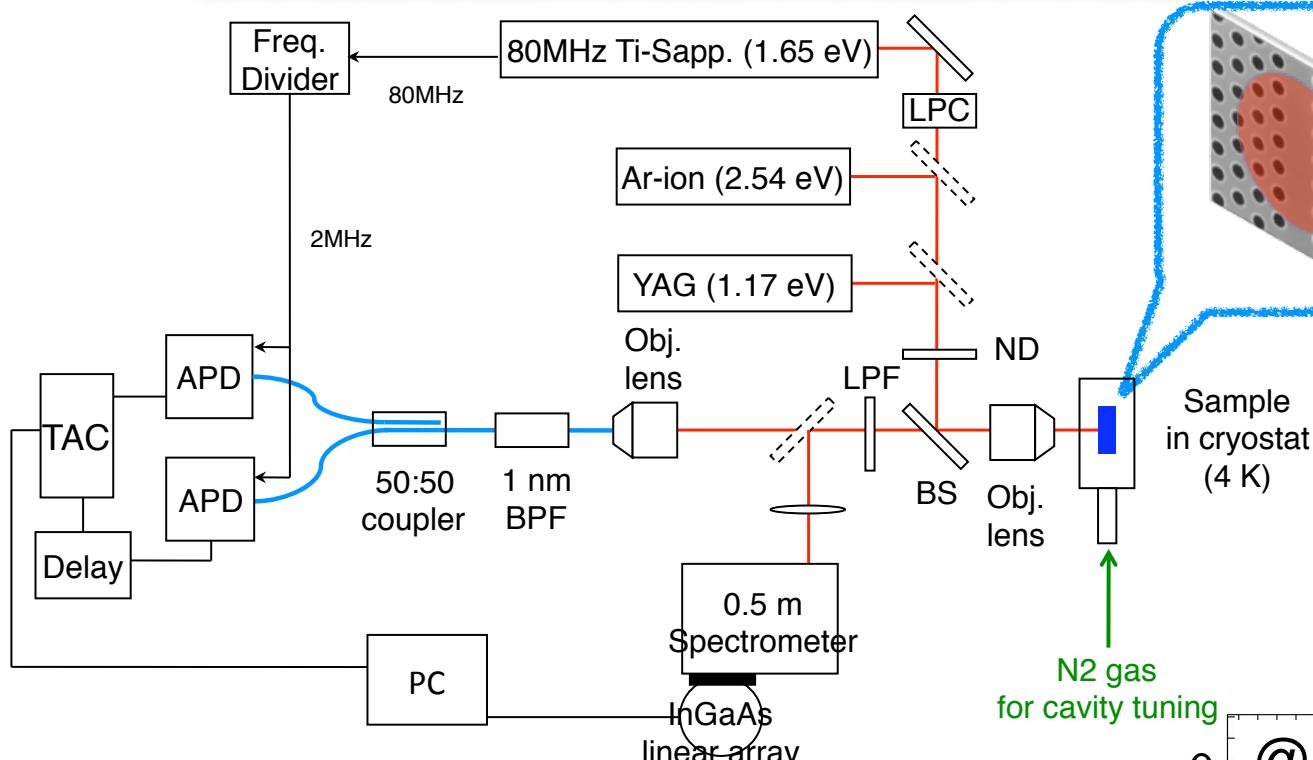
- ・通信波長帯発光
- ・低密度化が可能
- ・高い発光効率



## フォトニック結晶ナノ共振器



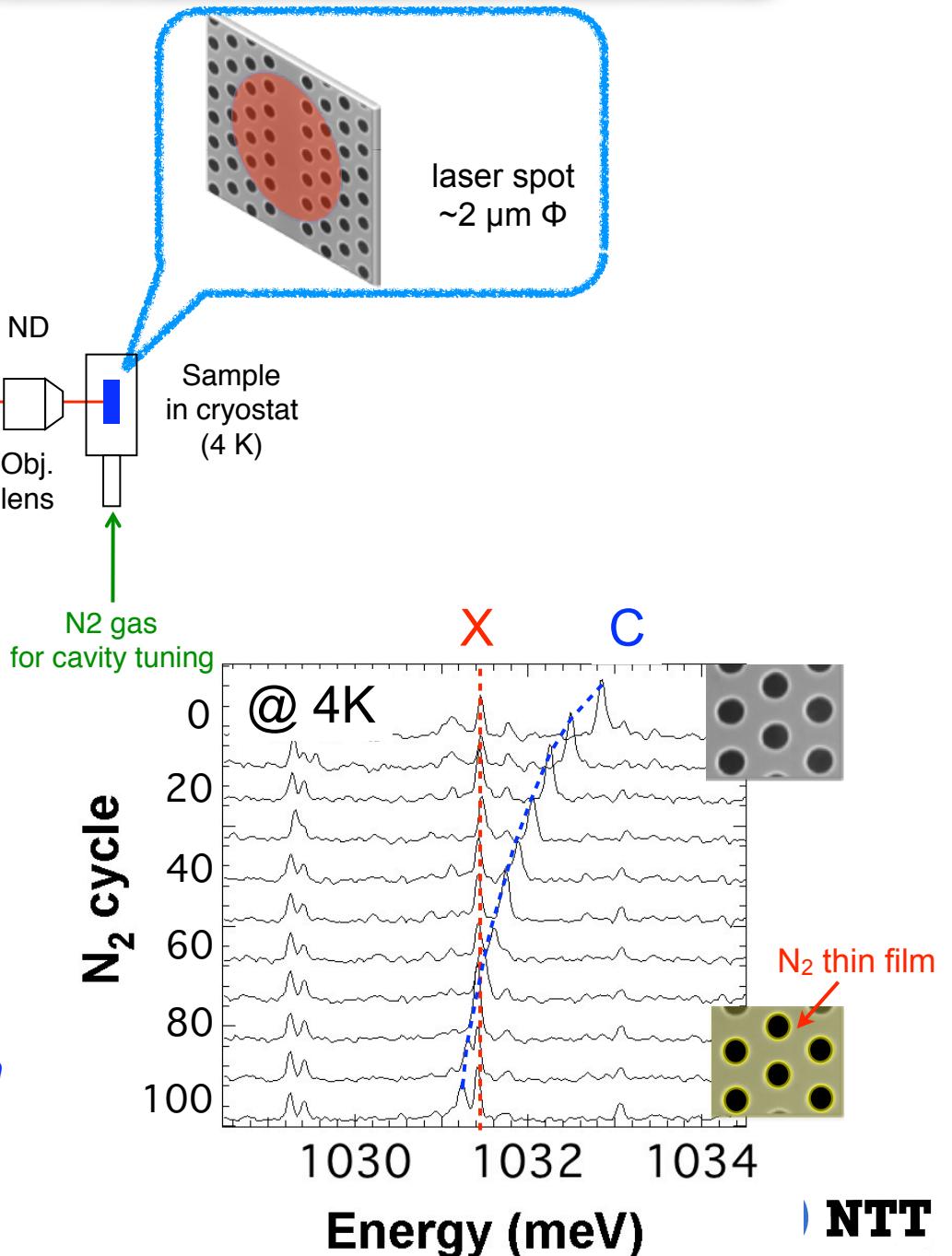
# 光学測定系とエネルギー同調方法



共振モードエネルギーのみを変化可能

C: refractive index change of *Air Region*

X: no change of energy and dephasing



## 成果2

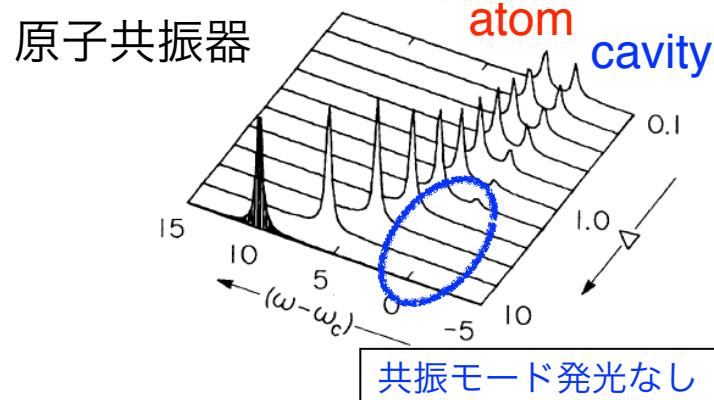
---

固体特有現象の解明による  
静的自然放出制御高効率单一光子発生

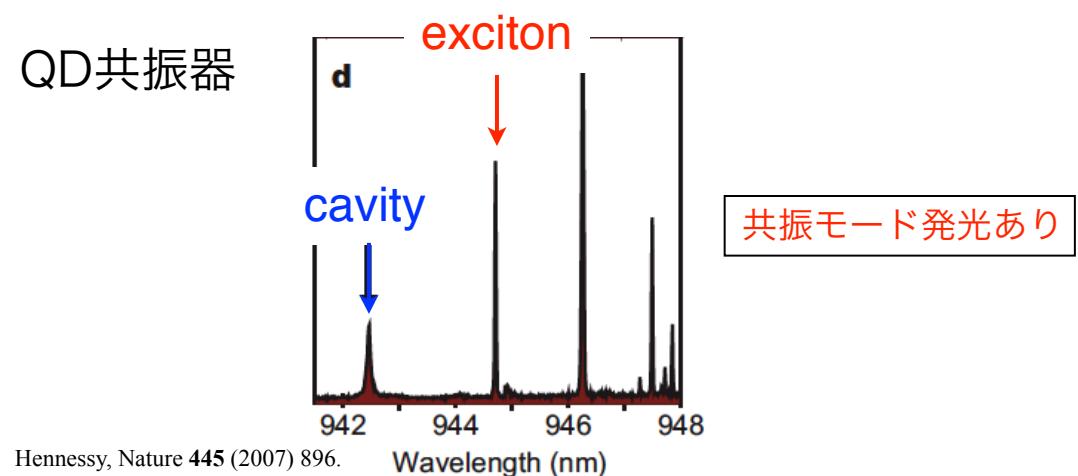
---

# 固体特有の非共鳴共振モード発光

## 非共鳴共振器発光

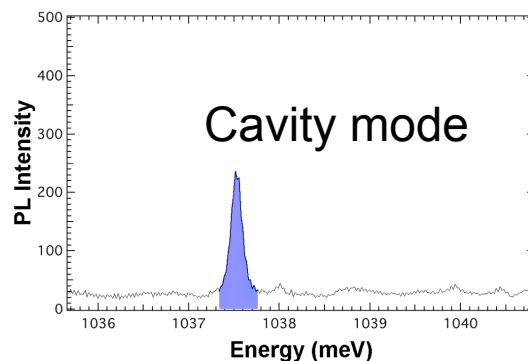
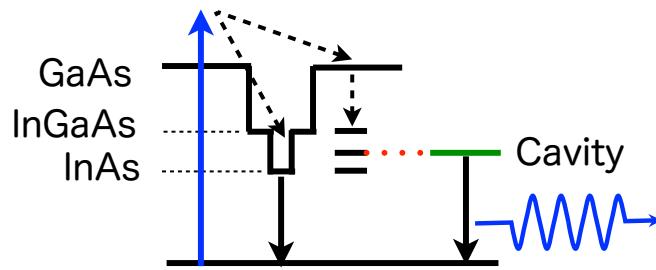


Sanchez-Mondragon, PRL 51 (1983) 550.



Hennessy, Nature 445 (2007) 896.

## 非共鳴共振器発光の原因と単一光子発生への影響



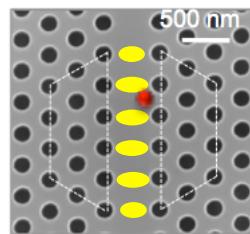
- ・ 単一光子発生を阻害？
- ・ 電流注入動作では回避不可

共振モード発光はバリア層準位からの  
背景輻射（複数光子）に起因

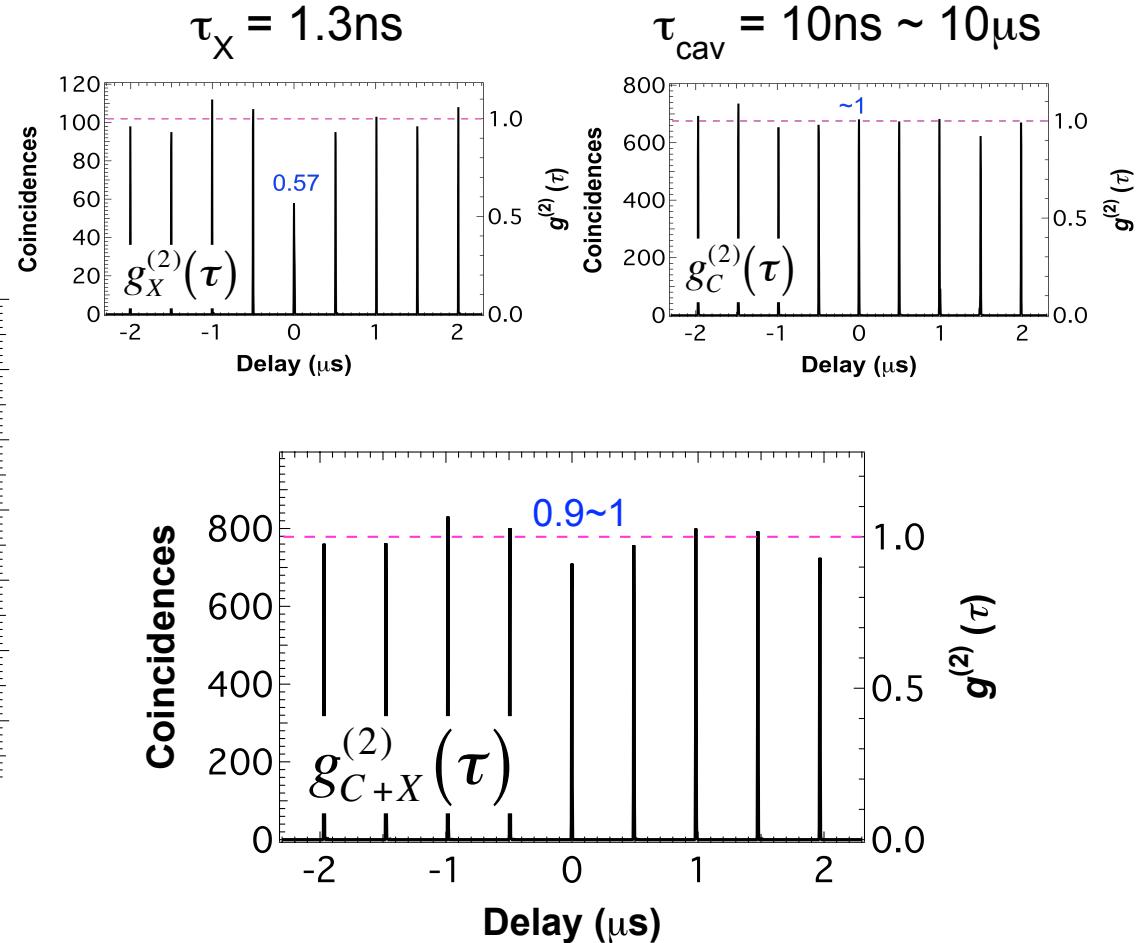
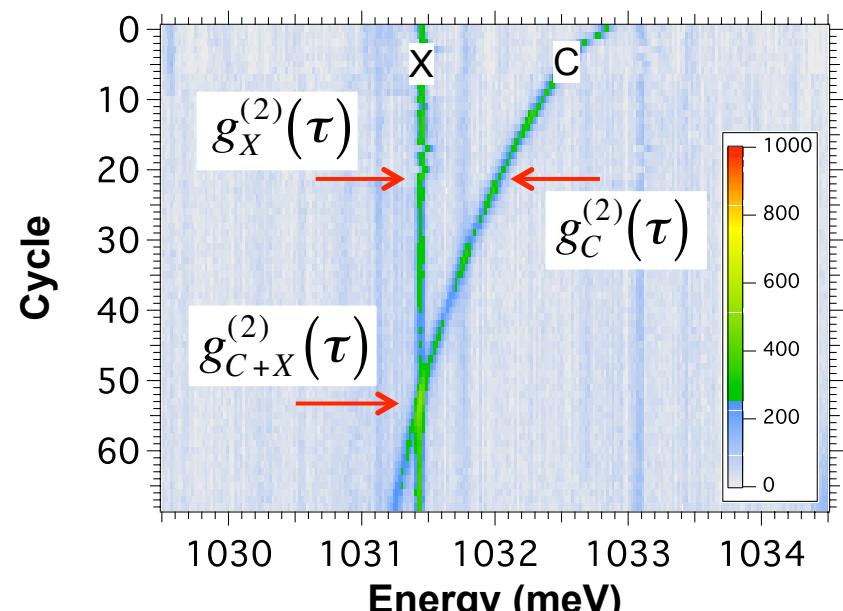
Tawara *et al.*, Opt. Express 17 (2009) 6643.

# 非共鳴共振モード発光とその光子統計

Tawara *et al.*, Opt. Express 17 (2009) 6643.



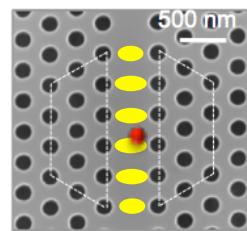
量子ドットは電磁界分布  
の節付近に存在



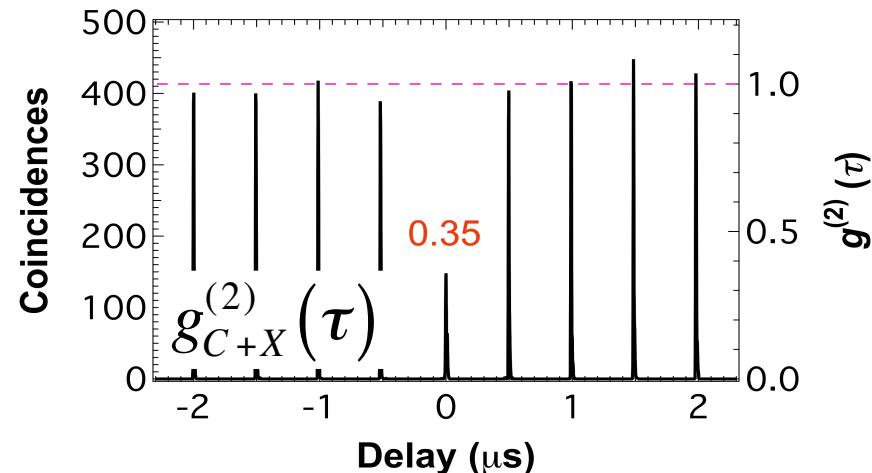
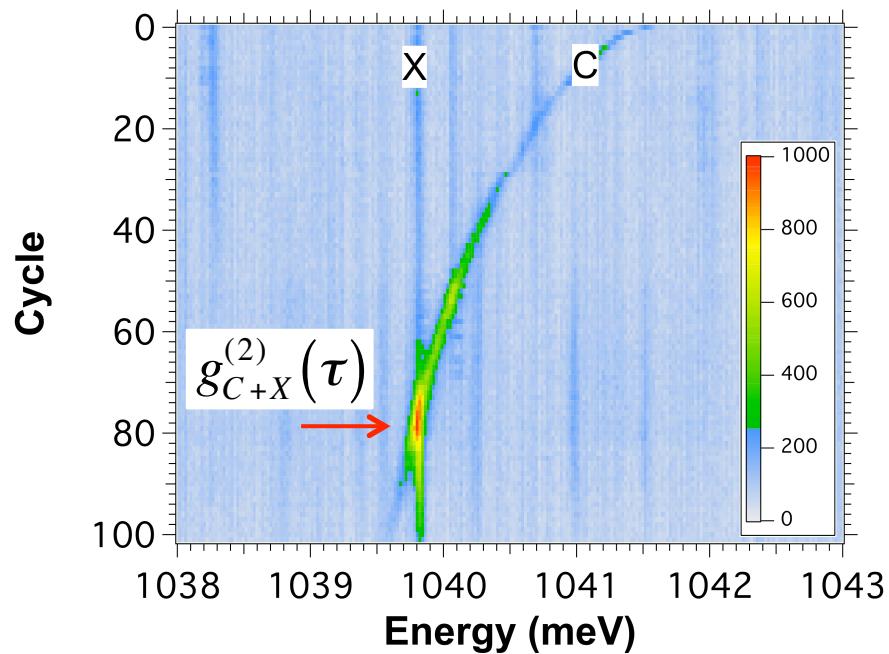
非共鳴共振モード発光が单一光子発生を阻害

# 非共鳴共振モード発光とその光子統計

Tawara *et al.*, Opt. Express 17 (2009) 6643.



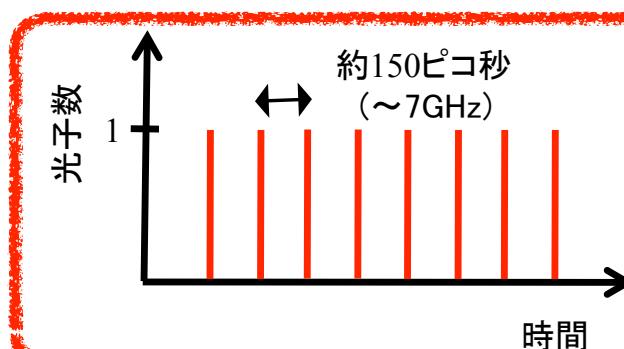
量子ドットは電磁界分布の腹付近に存在



$$\tau_X (1.3\text{ns}) \rightarrow \tau_{X+C} (\sim 150\text{ps}) \ll \tau_{\text{cav}} = 10\text{ns} \sim 10\mu\text{s}$$

パーセル効果による

- ・ 単一光子発生の促進
- ・ 非共鳴共振モード発光の抑制



- ・ 60%以上の純度
- ・ 約150ピコ秒での繰り返しでの単一光子発生が可能！

## 成果3

---

单一励起子-光子強結合状態の形成と  
その動的制御の試み

---

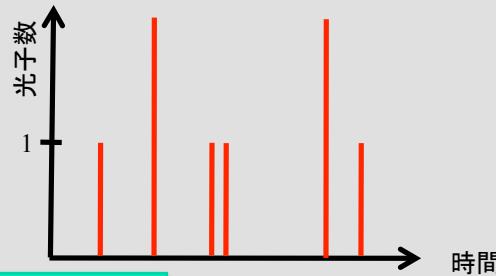
# まとめ

従来の単一光子発生  
(レーザ光強度を弱めたもの)

## 【問題点】

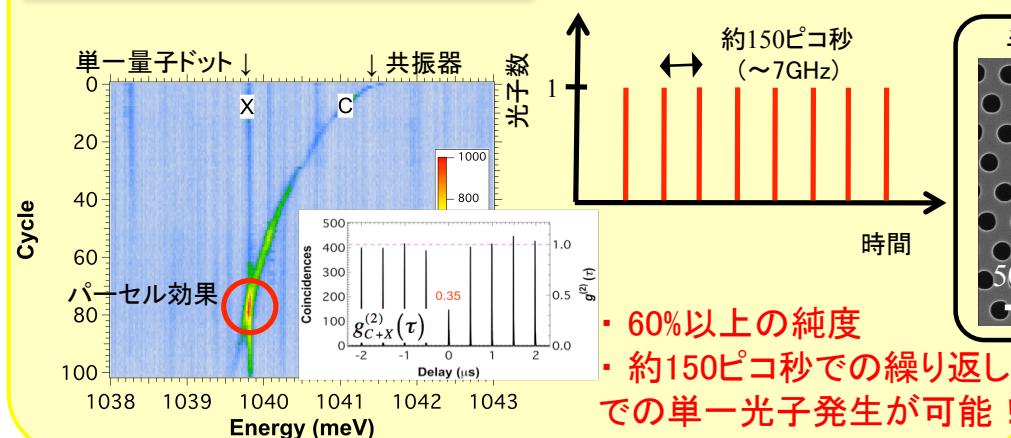
単一光子発生の

- ・純度低い
- ・タイミングバラバラ



## 本研究成果1

純度の高い単一光子発生(単一量子ドット-共振器弱結合)

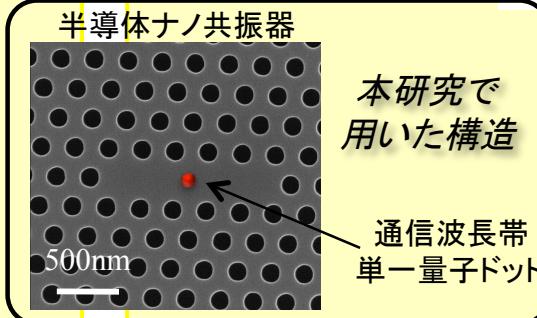
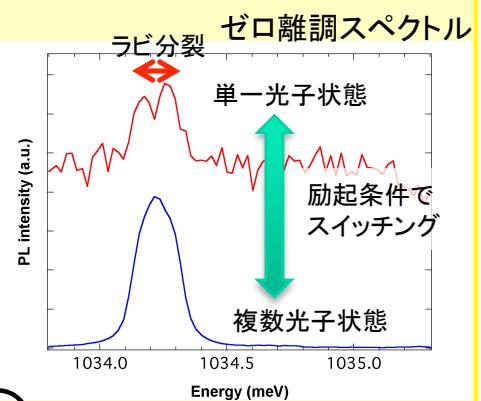
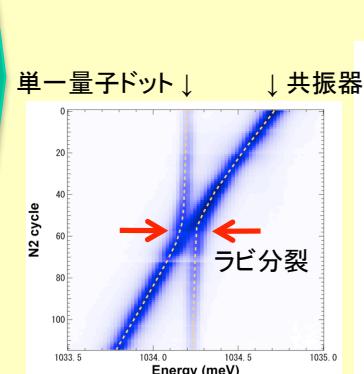


- ・60%以上の純度
- ・約150ピコ秒での繰り返しでの単一光子発生が可能！

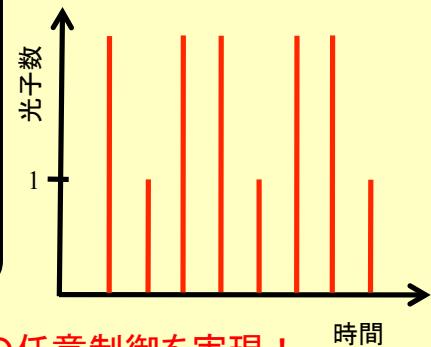
## 本研究成果2

## 単一光子の任意時間発生

(単一量子ドット-共振器強結合)



発生光子数(=1 or >1) の任意制御を実現！



次世代量子情報通信におけるキーデバイスの基本動作実証  
量子光メモリ等の量子光機能デバイスの動作原理に発展

