ナノ量子エレクトロニクス

GCOE特別研究ユニット

青木隆朗

はじめに

GCOE特別研究ユニット（特別講座）

境界・融合分野の研究を推進

新分野の開拓

ナノ量子エレクトロニクス

量子エレクトロニクス

光と物質の量子力学的な相互作用に関する物理

メーザーの発明(1954)・電波分光学の発展　　エレクトロニクス

レーザーの発明(1960)

⇩

原子・分子と電磁波のコヒーレントな相互作用

霜田光一「量子エレクトロニクスの変遷」
日本物理学会誌51号 p.179 (1996)

ナノ量子エレクトロニクス

ナノスケールの系

物質の量子性
粒子数・自由度小

→ 創発性の発現

ナノテクノロジー

境界条件を設計する

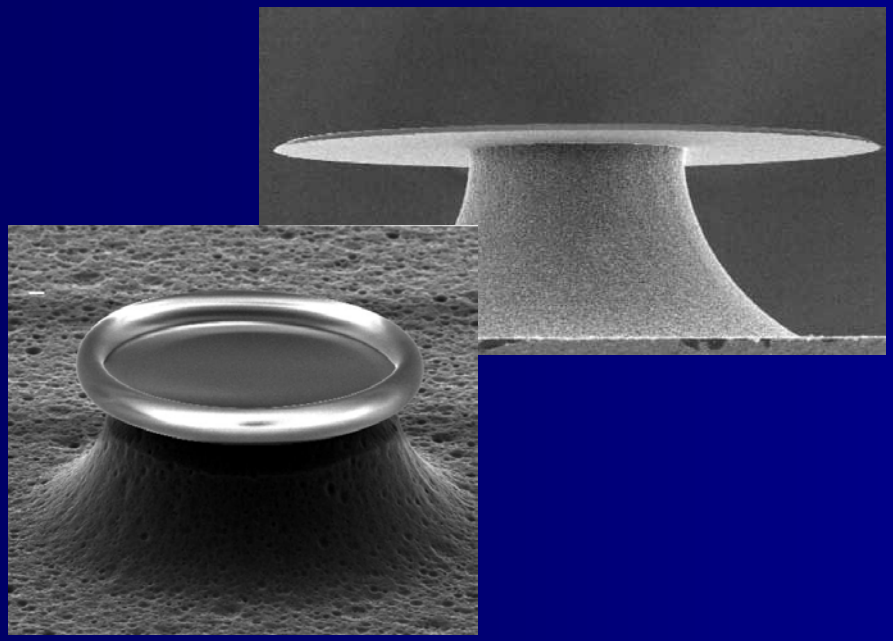
はじめに

ナノ量子エレクトロニクス

ナノスケールの系における
光と物質の量子力学的な相互作用の研究

ナノ量子エレクトロニクス

微小共振器

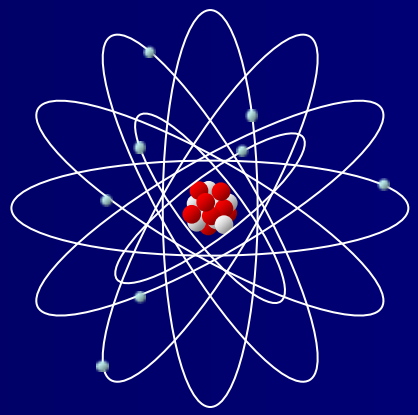


（波長オーダーの）小さな空間に光を閉じ込める

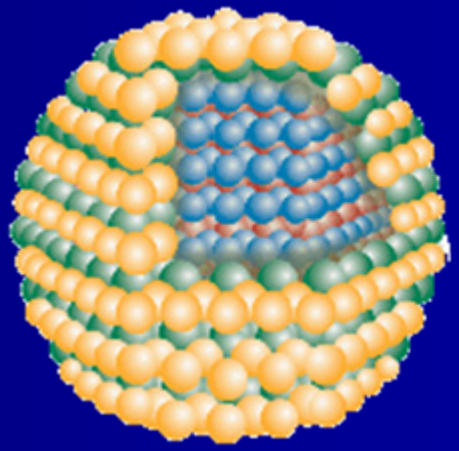
光と物質の相互作用の増強

ナノ量子エレクトロニクス

原子



半導体量子ドット



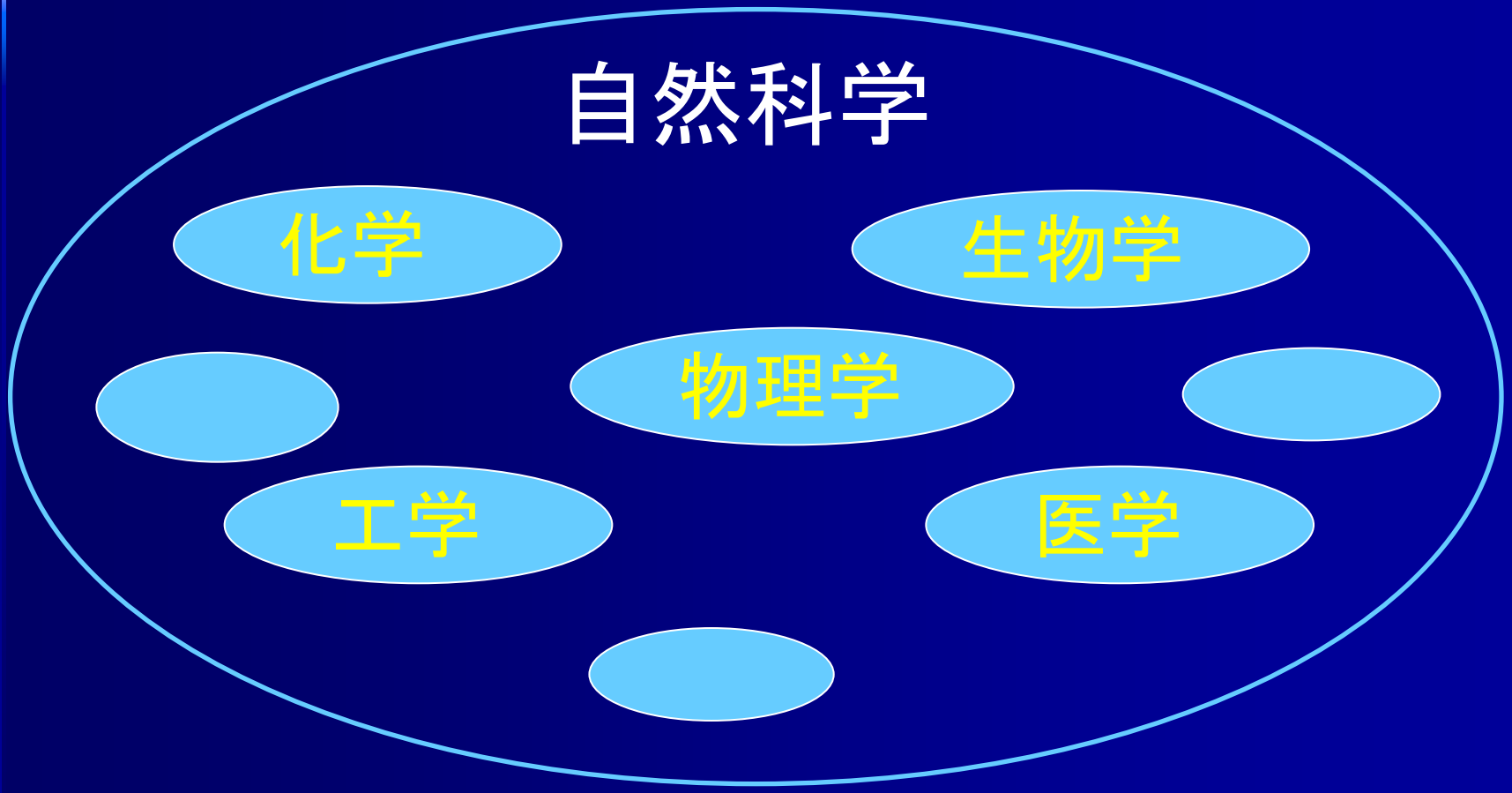
単一粒子

普遍性と創発性

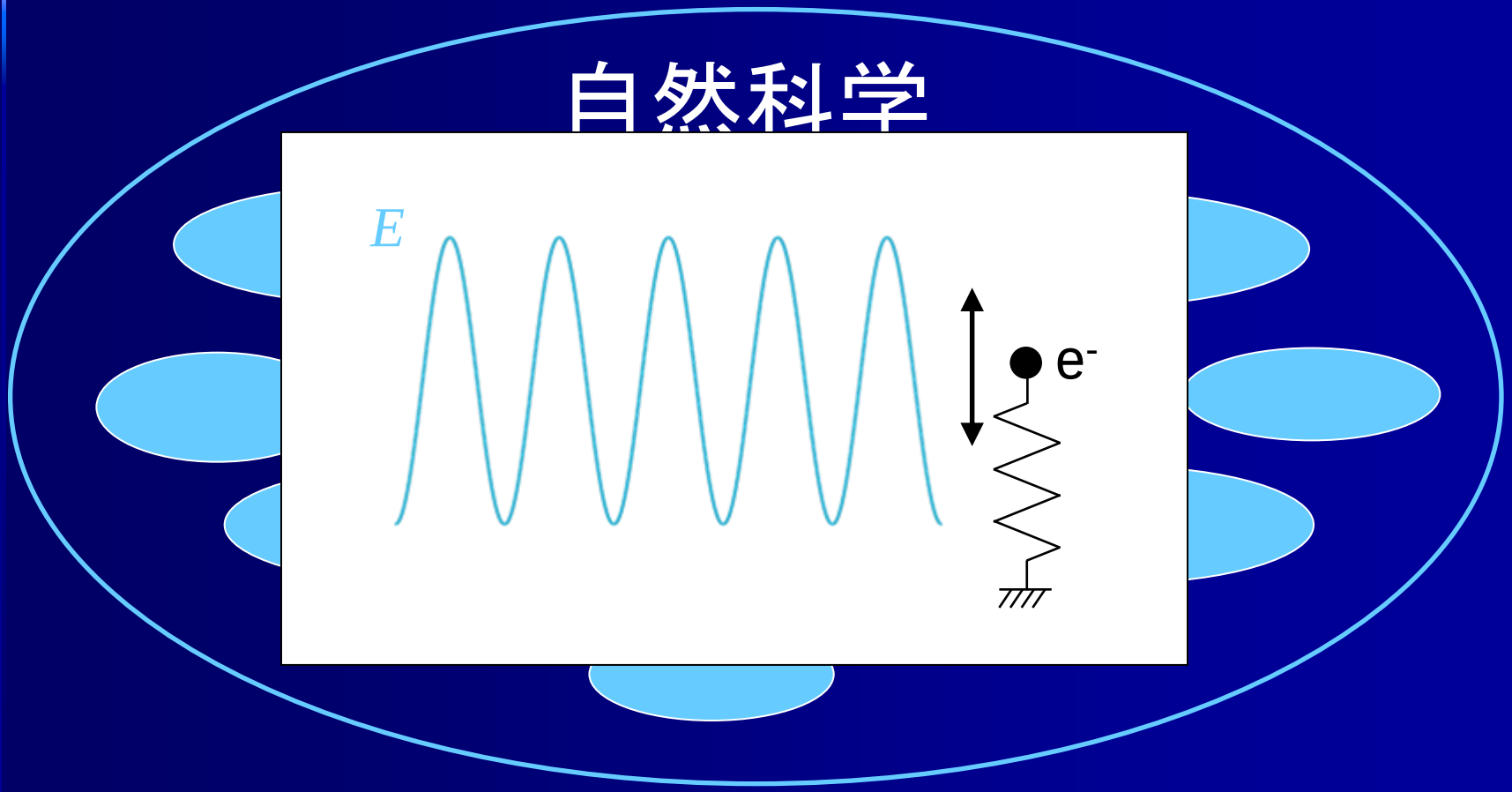
普遍性:　光と物質の相互作用

創発性:　原子と量子ドット

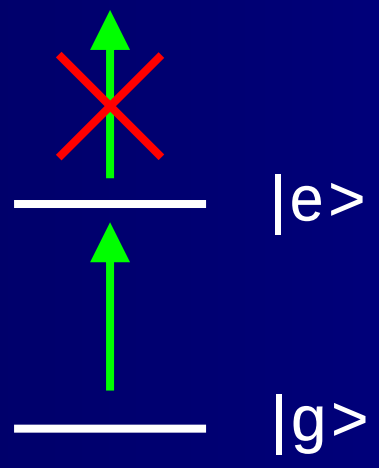
光科学～光と物質の相互作用

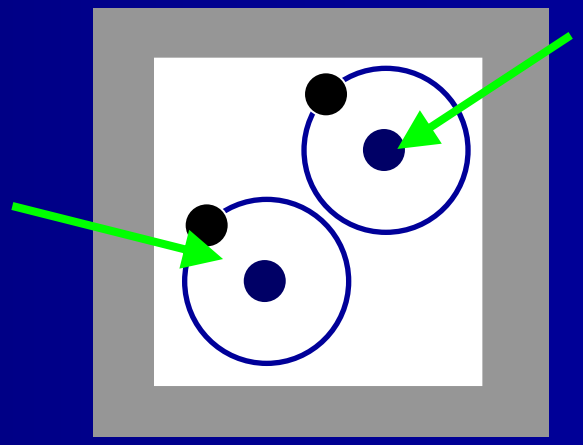


光科学～光と物質の相互作用



原子と量子ドット





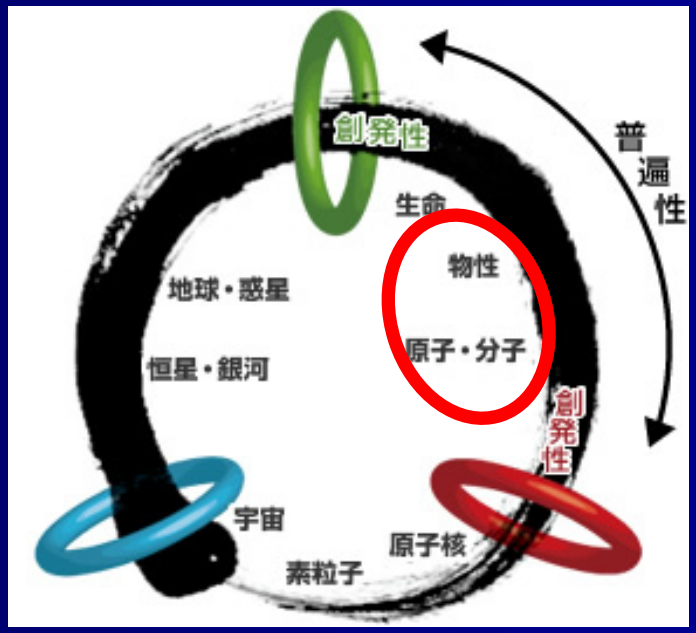
単一原子

単一量子ドット

普遍性と創発性

普遍性:　光と物質の相互作用

創発性:　原子と量子ドット



これまでの研究歴

1. 半導体励起子系の非線形光学応答（光物性）

2. スクイーズド光を用いた量子光学・量子情報

3. トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学

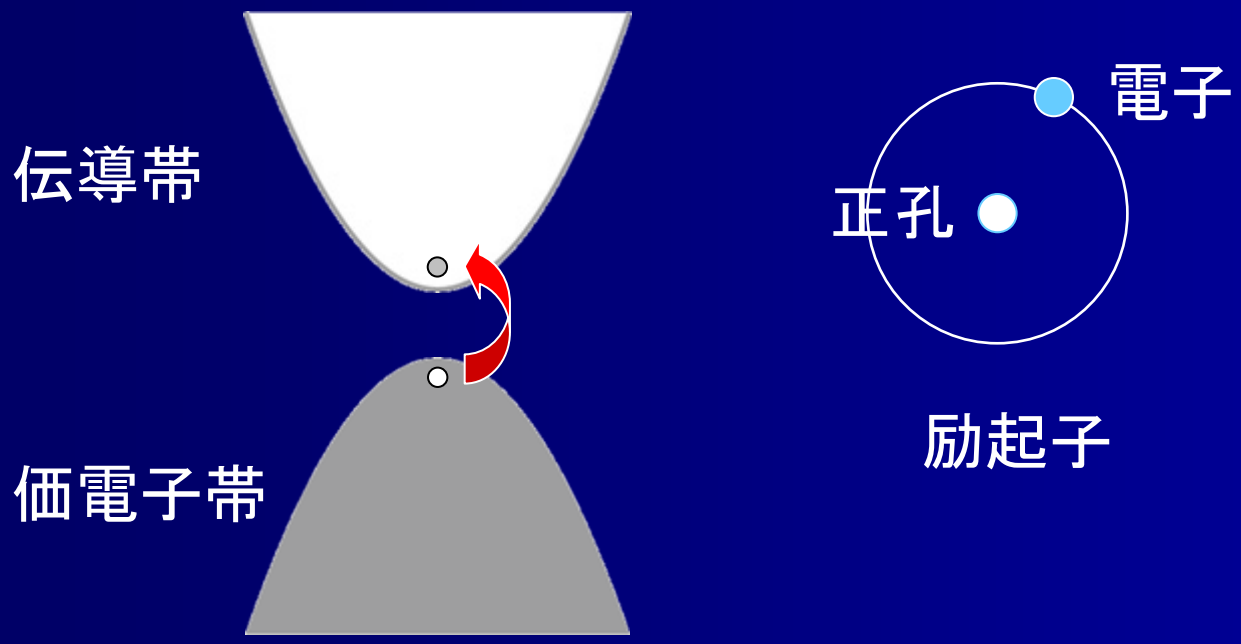
これまでの研究歴

1. 半導体励起子系の非線形光学応答（光物性）

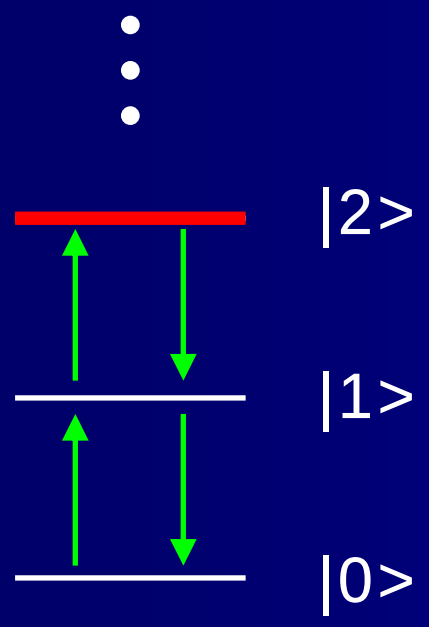
2. スクイーズド光を用いた量子光学・量子情報

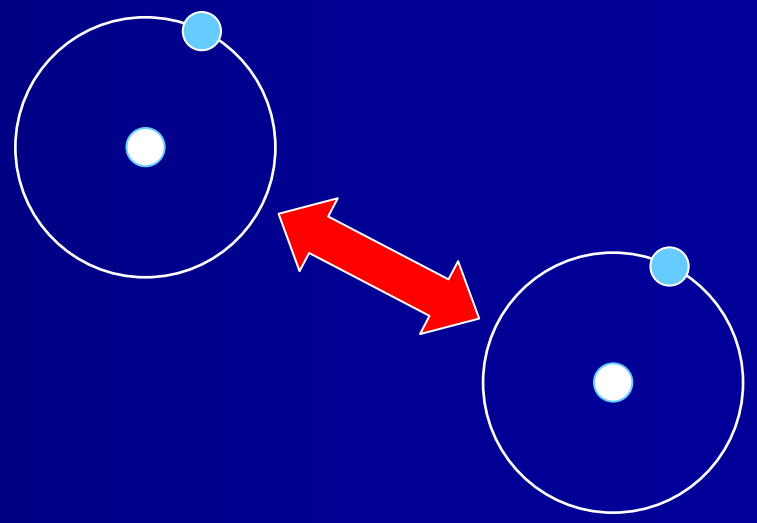
3. トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学

半導体励起子系の非線形光学応答

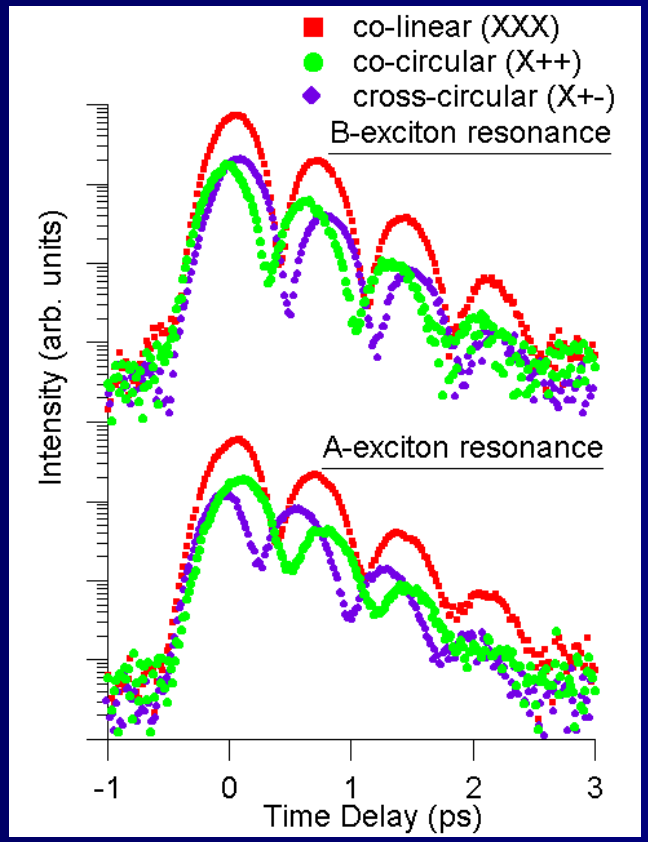


半導体励起子系の非線形光学応答





半導体励起子系の非線形光学応答



価電子帯が異なる励起子を
同時に共鳴励起

↓

3次の非線形分極：量子ビート

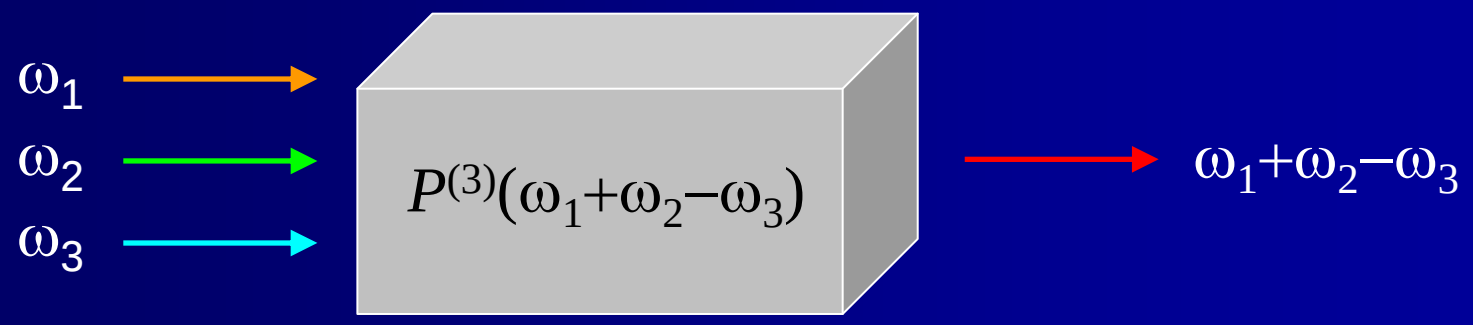
入射光の偏光に依存した
量子ビートの位相

↓

スピンに依存した励起子間
相互作用

T. Aoki *et al*., Phys. Rev. Lett. **82**, 3108-3111 (1999)

半導体励起子系の非線形光学応答



半古典論（物質のみ量子化・光は古典的）

自由度大 → 緩和の影響大

光の量子性の損失

これまでの研究歴

1. 半導体励起子系の非線形光学応答（光物性）

2. スクイーズド光を用いた量子光学・量子情報

3. トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学

スクイーズド光を用いた量子光学・量子情報

$$\hat{x} = \hat{a}^\dagger + \hat{a}$$

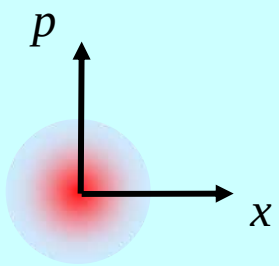
$$\hat{p} = i\left(\hat{a}^\dagger - \hat{a}\right)$$

$\hat{a}$:複素振幅

$\hat{x}, \hat{p}$:直交位相振幅

$$\left[\hat{x}, \hat{p}\right] = 2i$$

真空状態（0光子状態）

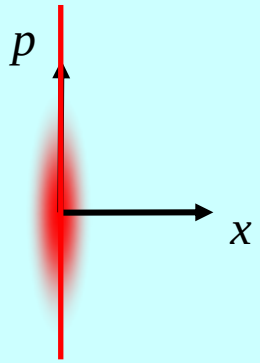


$$|0\rangle$$

$$\left\langle (\Delta x)^2 \right\rangle = 1$$

$$\left\langle (\Delta p)^2 \right\rangle = 1$$

スクイーズド状態



$$\hat{S}(r) \equiv \exp\left[\frac{r}{2}\left(\hat{a}^2 - \hat{a}^{\dagger 2}\right)\right]$$

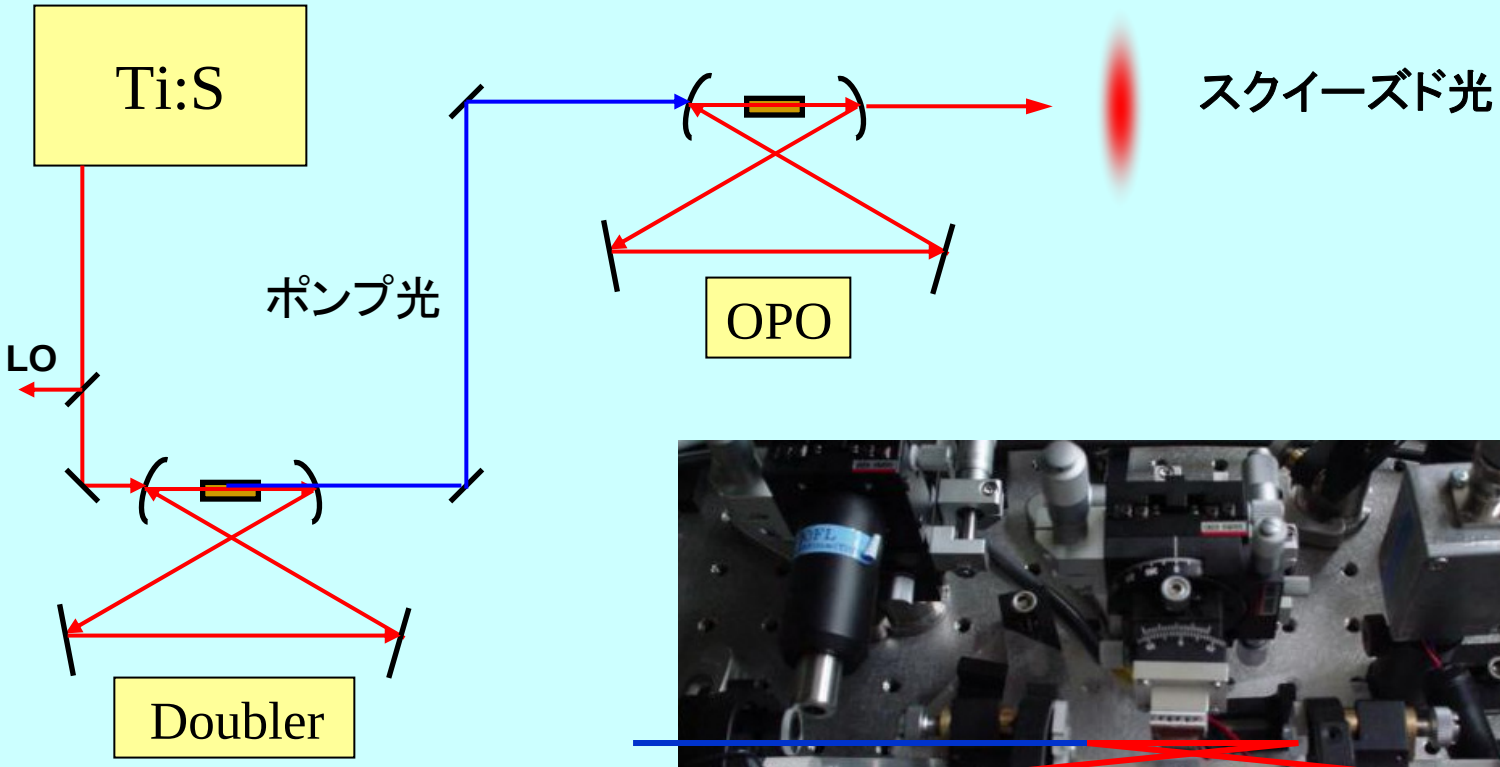
$$|\varphi\rangle = \hat{S}(r)|0\rangle$$

$$\left\langle (\Delta x)^2 \right\rangle = e^{-2r}$$

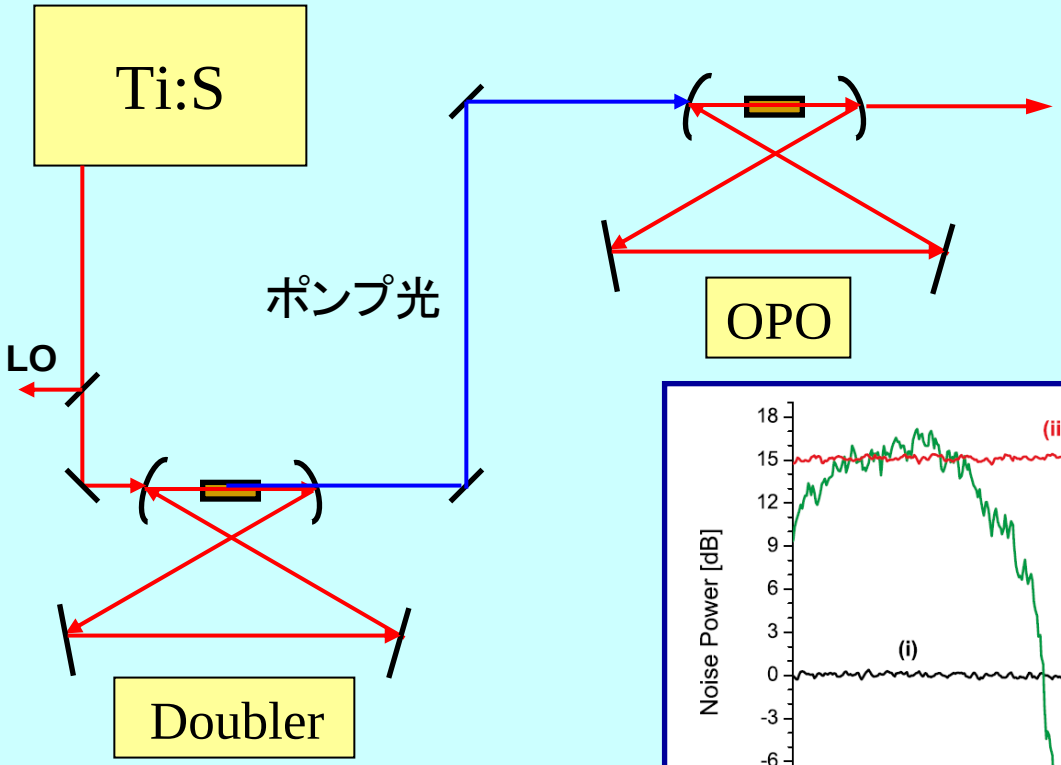
$$\left\langle (\Delta p)^2 \right\rangle = e^{+2r}$$

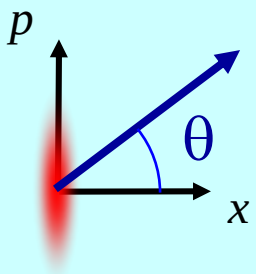
$$\xrightarrow{r \to \infty} |x = 0\rangle$$

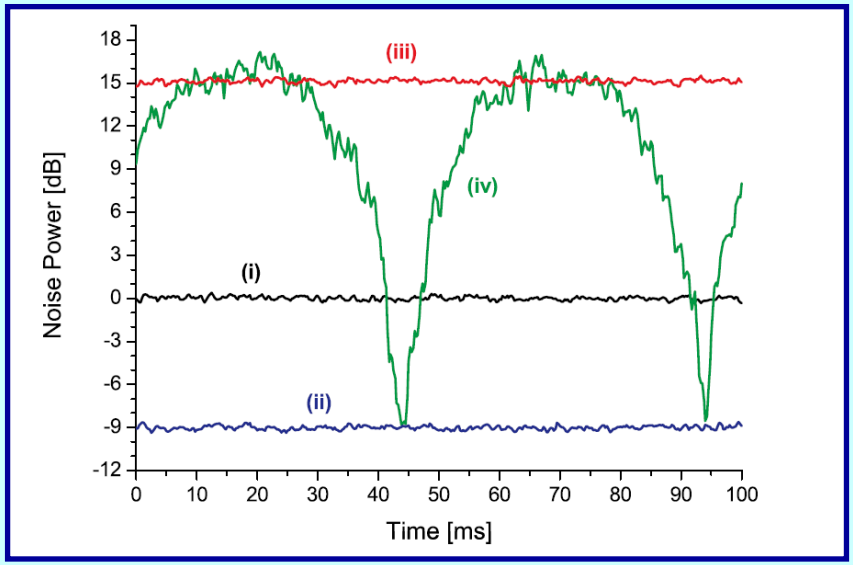
スクイーズド光の発生



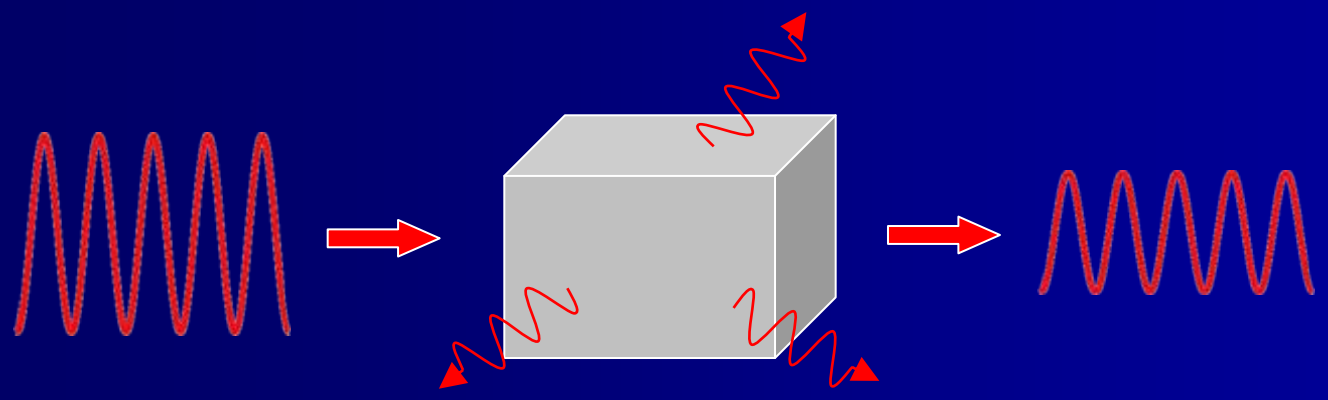
スクイーズド光の発生


Ti:S
ポンプ光
LO
OPO
Doubler

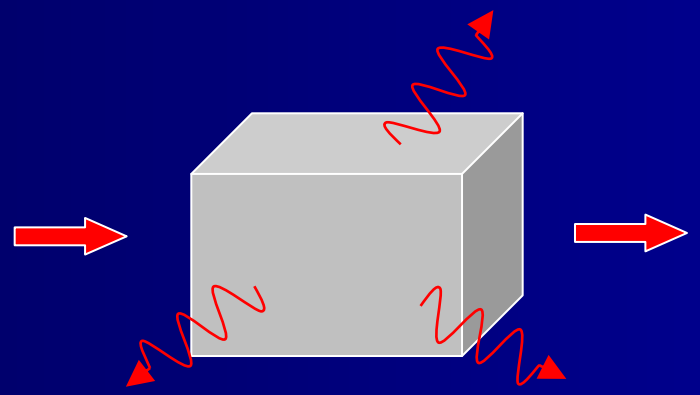

p
θ
x

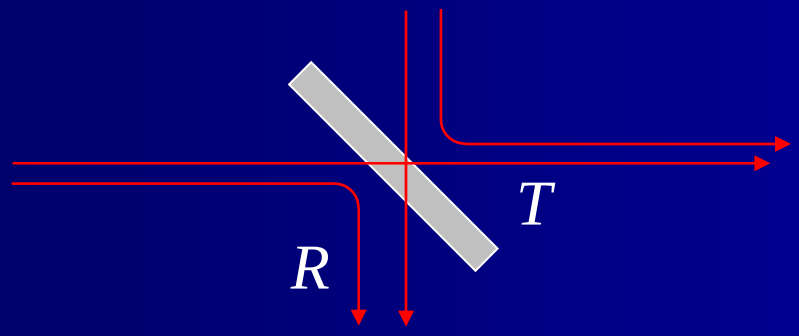

Noise Power [dB]
Time [ms]
(i)
(ii)
(iii)
(iv)
18
15
12
9
6
3
0
-3
-6
-9
-12
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

スクイーズド光と損失



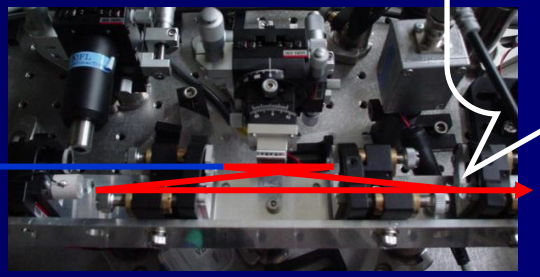
スクイーズド光と損失



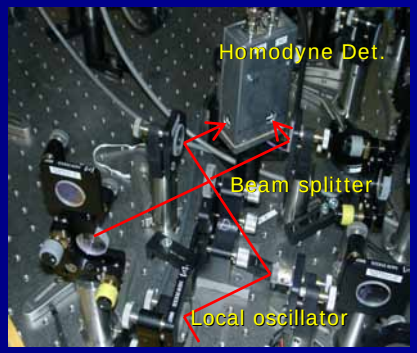


スクイーズド光と損失

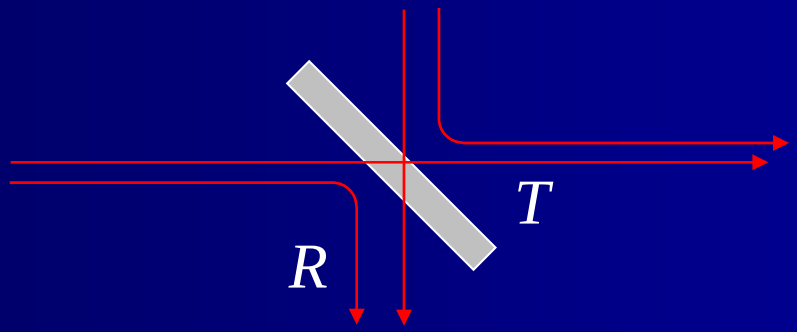
発生



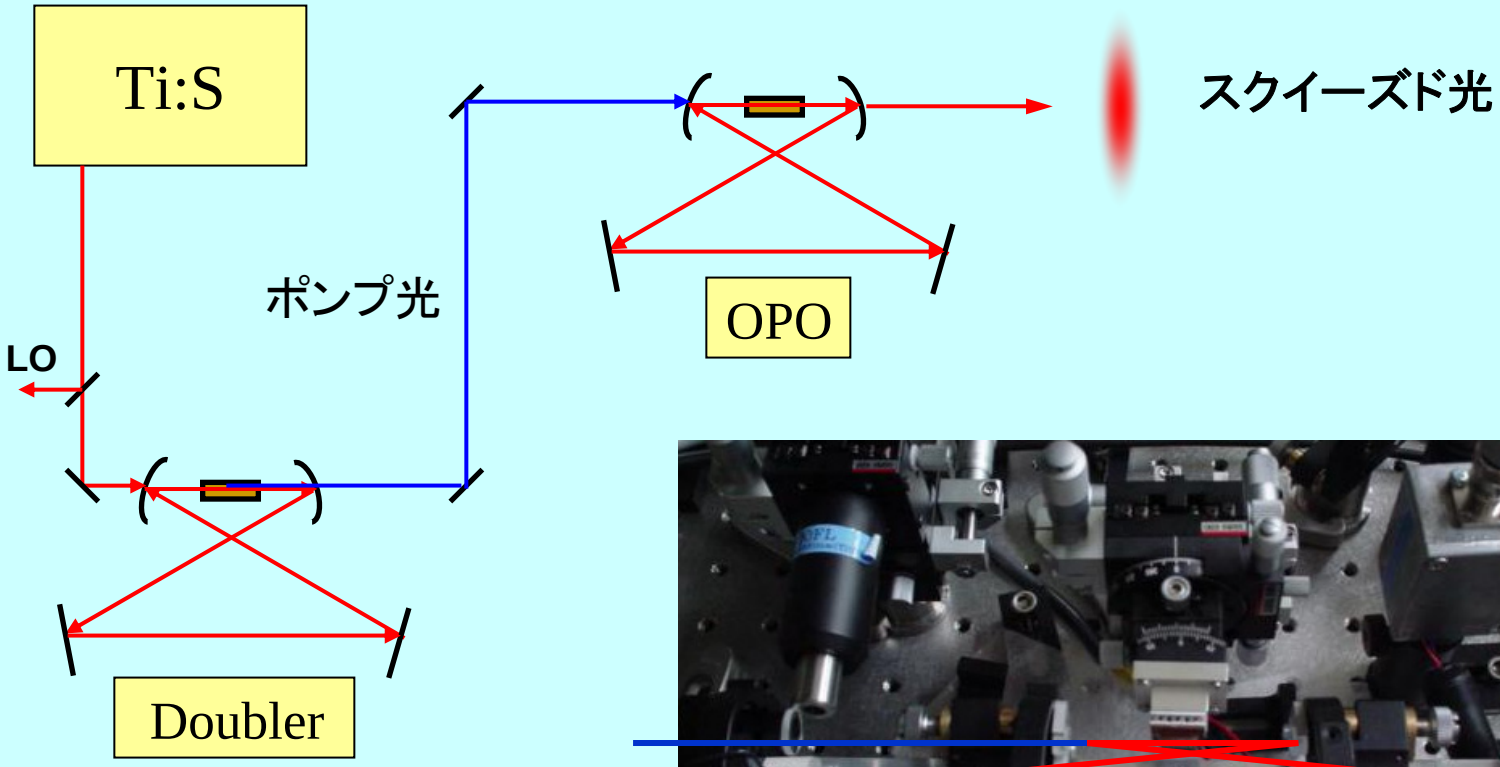
測定



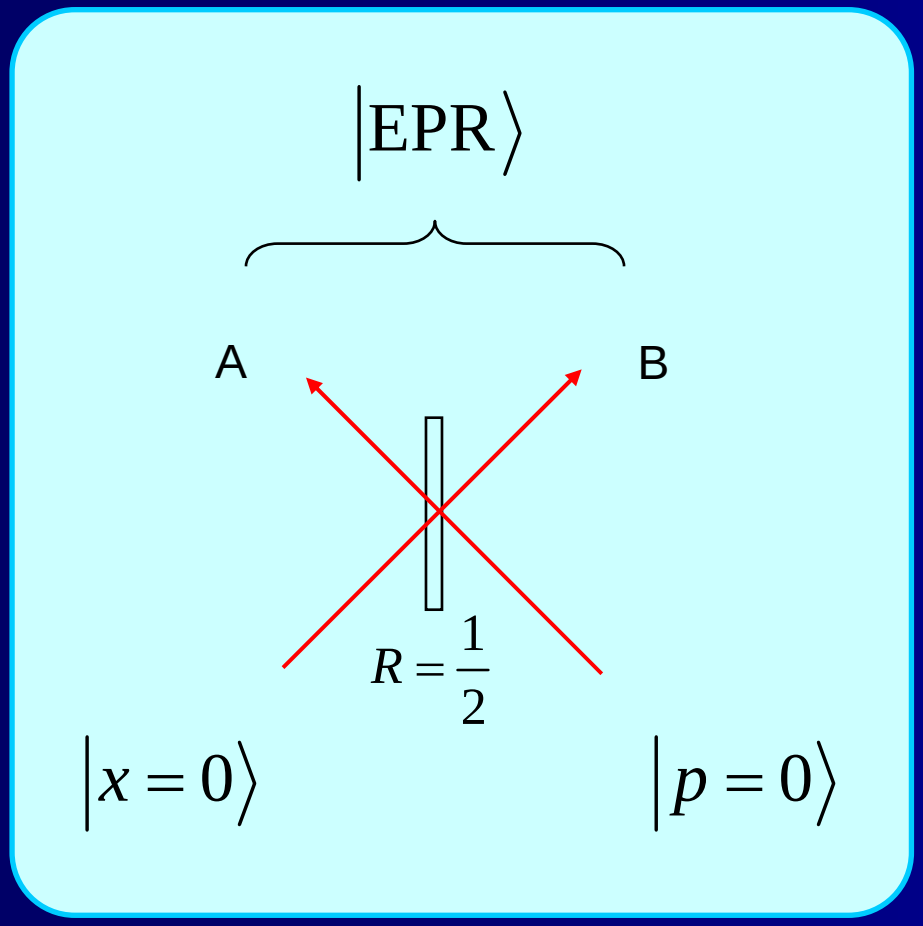
モードの単一性



スクイーズド光の発生



２粒子（モード）量子エンタングルメント



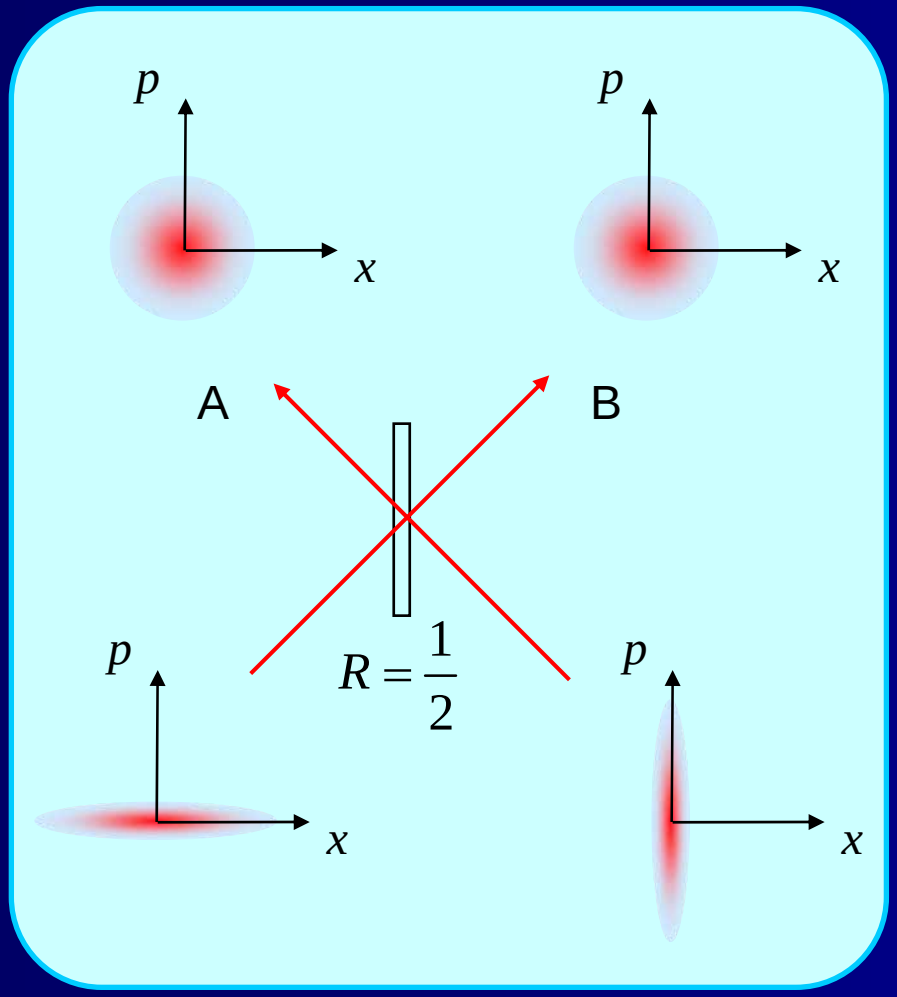
EPR状態

$$|\mathrm{EPR}\rangle \propto \int dx\, |x\rangle_{\mathrm{A}} |x\rangle_{\mathrm{B}}$$

$$x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} = 0$$

$$p_{\mathrm{A}} + p_{\mathrm{B}} = 0$$

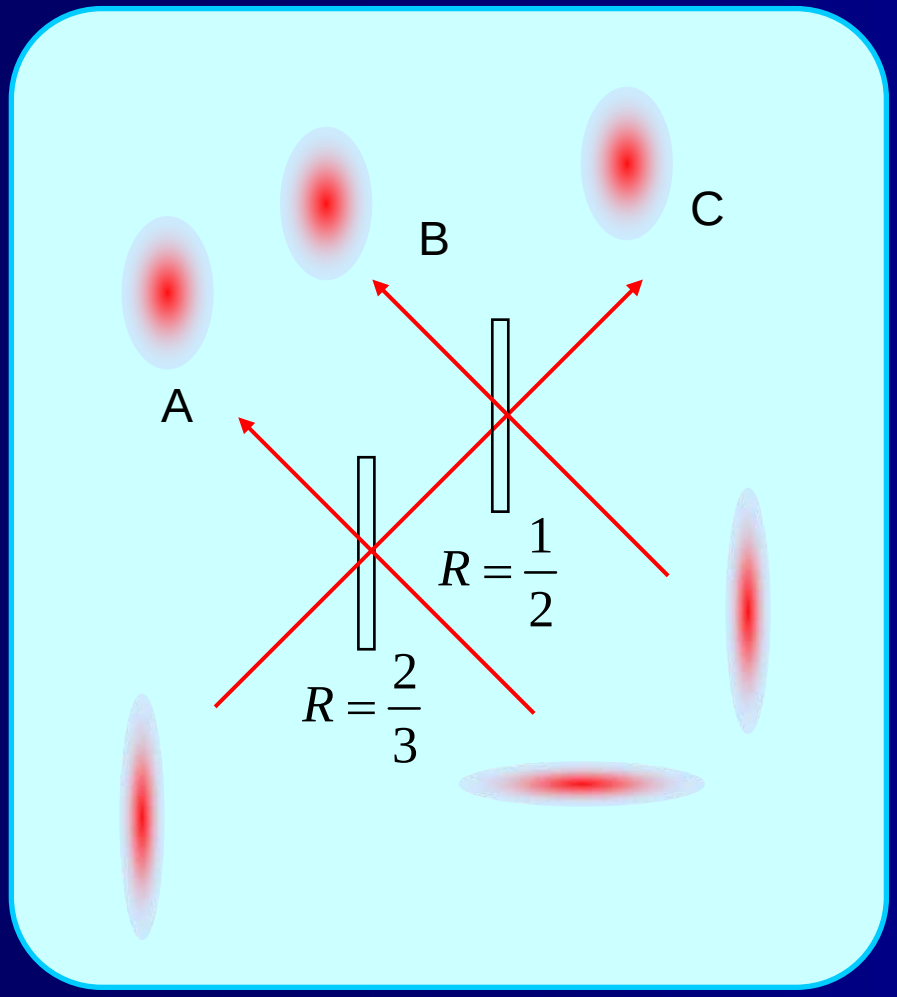
２粒子（モード）量子エンタングルメント



２モード間エンタングルメント

２本のスクイーズド光

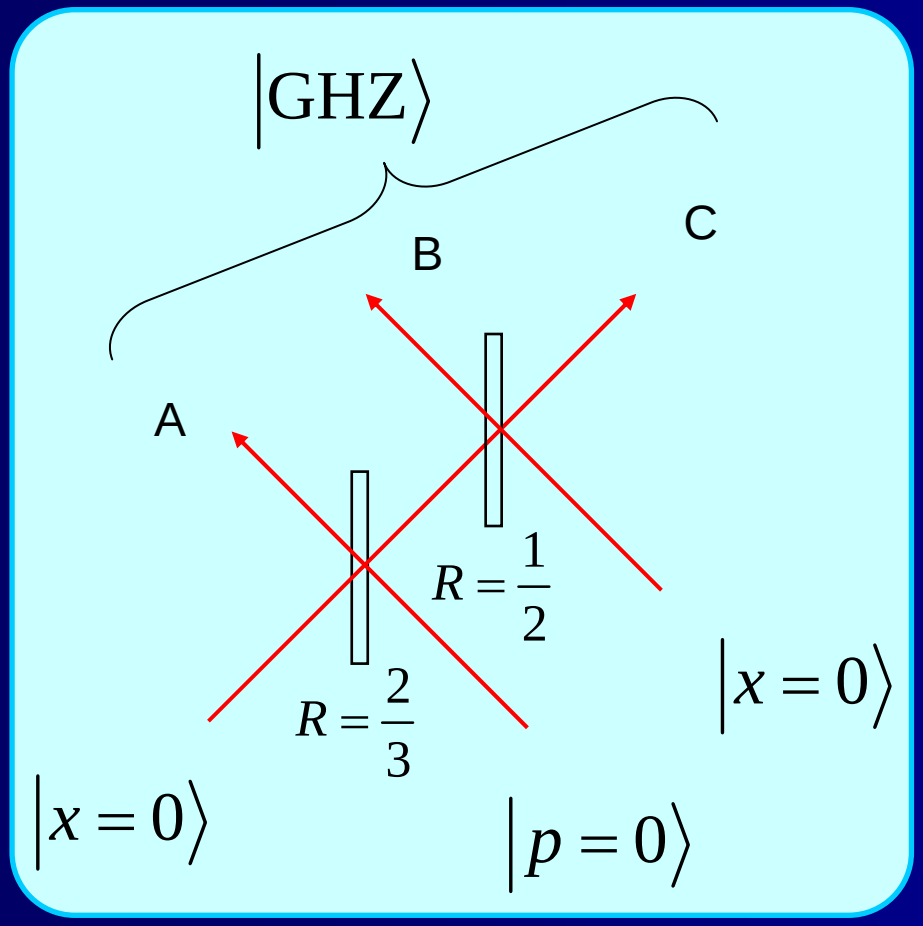
３粒子（モード）量子エンタングルメント



３モード間エンタングルメント

３本のスクイーズド光

２粒子（モード）量子エンタングルメント



$$|\mathrm{GHZ}\rangle \propto \int dx\, |x\rangle_{\mathrm{A}} |x\rangle_{\mathrm{B}} |x\rangle_{\mathrm{C}}$$

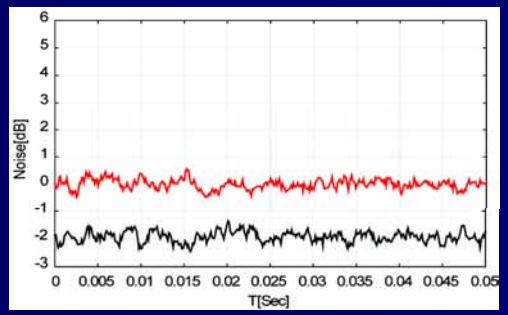
$$x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} = 0$$

$$x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{C}} = 0$$

$$x_{\mathrm{C}} - x_{\mathrm{A}} = 0$$

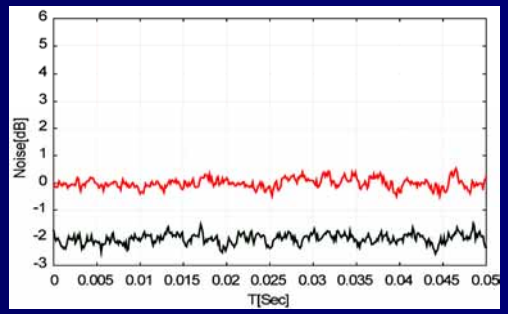
$$p_{\mathrm{A}} + p_{\mathrm{B}} + p_{\mathrm{C}} = 0$$

3粒子（モード）量子エンタングルメント



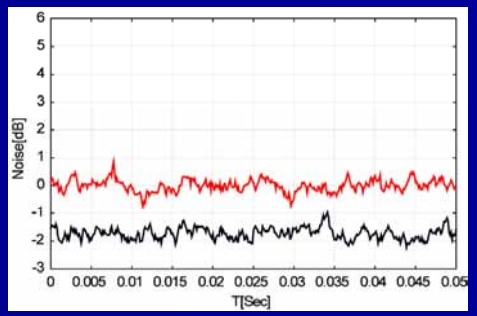
古典限界

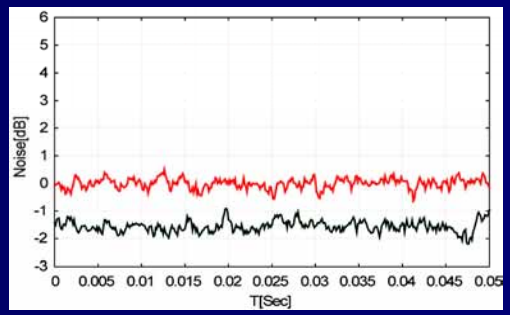
$$\left\langle \left[\Delta\left(\hat{x}_{\mathrm{A}} - \hat{x}_{\mathrm{B}} \right) \right]^2 \right\rangle$$



$$\left\langle \left[\Delta\left(\hat{x}_{\mathrm{B}} - \hat{x}_{\mathrm{C}} \right) \right]^2 \right\rangle$$

$$\left\langle \left[\Delta\left(\hat{p}_{\mathrm{A}} + \hat{p}_{\mathrm{B}} + \hat{p}_{\mathrm{C}} \right) \right]^2 \right\rangle$$





$$\left\langle \left[\Delta\left(\hat{x}_{\mathrm{C}} - \hat{x}_{\mathrm{A}} \right) \right]^2 \right\rangle$$

T. Aoki *et al*., Phys. Rev. Lett. **91**, 080404 (2003)

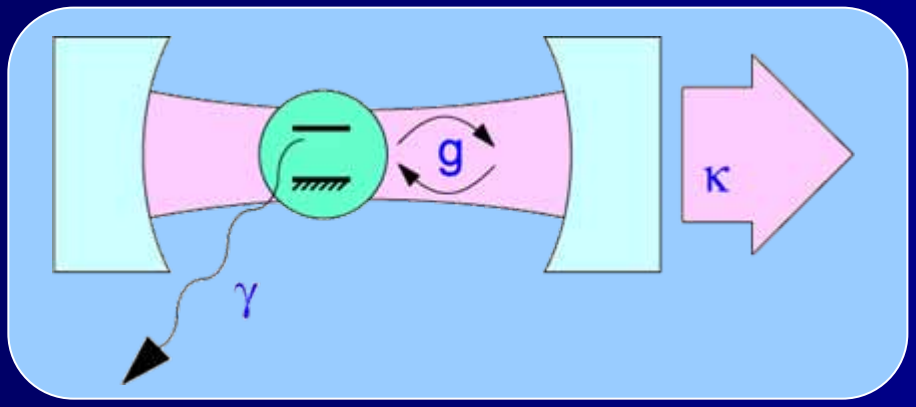
これまでの研究歴

1. 半導体励起子系の非線形光学応答（光物性）

2. スクイーズド光を用いた量子光学・量子情報

3. トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学

トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学



高フィネス微小共振器

- 光と原子の相互作用

$$g = \vec{d} \cdot \vec{E}_0$$

- 原子の緩和 γ
- 光の緩和 κ

$$\vec{E}_0 = \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2\varepsilon_0 V_{cavity}}}$$

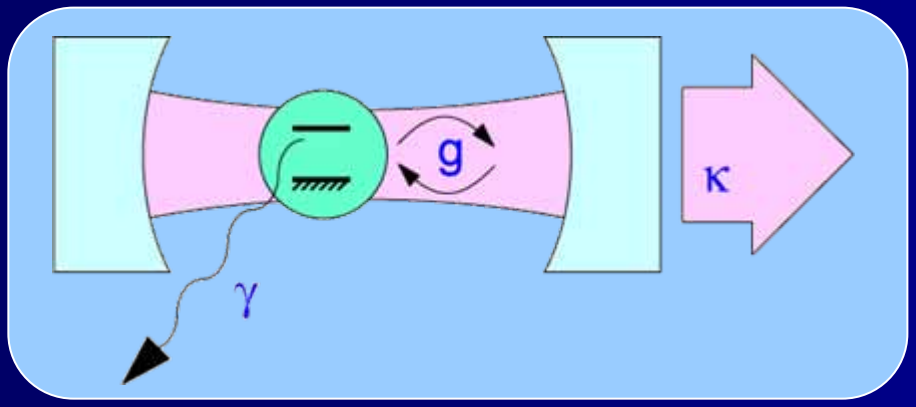
V : 小 → g : 大

強結合 : g □ γ, κ

光と原子のコヒーレントな相互作用に対してあらゆる緩和が無視できる

→ 系の量子状態をコヒーレントに制御できる

トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学



高フィネス微小共振器

- 光と原子の相互作用

$$g = \vec{d} \cdot \vec{E}_0$$

- 原子の緩和 γ
- 光の緩和 κ

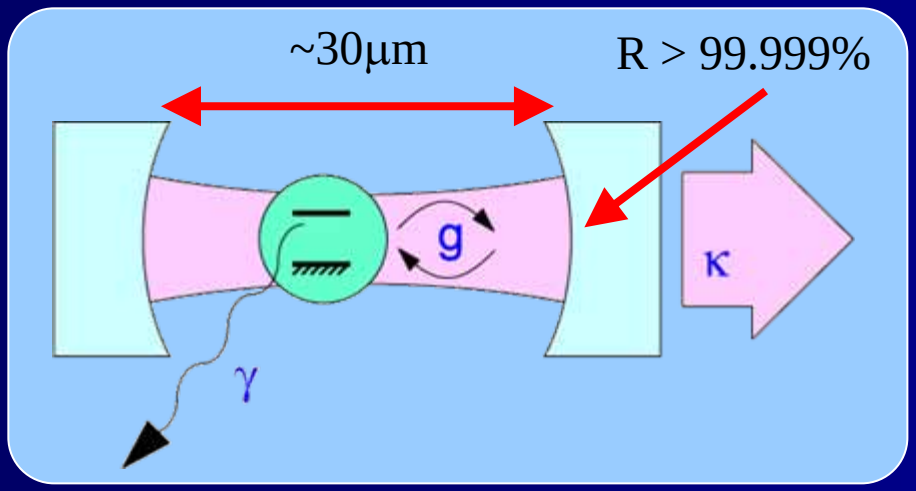
$$\vec{E}_0 = \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2\varepsilon_0 V_{cavity}}}$$

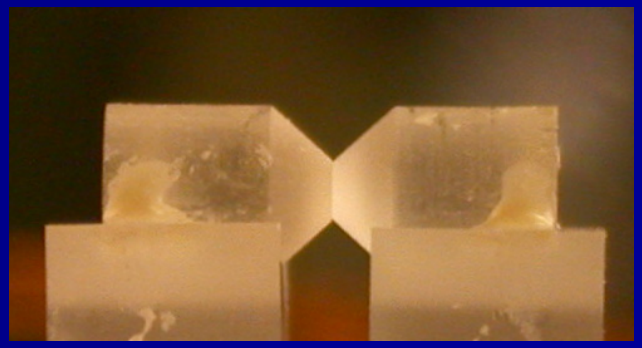
V : 小 → g : 大

- 単一原子による単一光子レベルでの非線形光学応答
- 顕著な量子性 → 非古典光発生
  特異な量子状態の生成

トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学

ファブリーペロー共振器



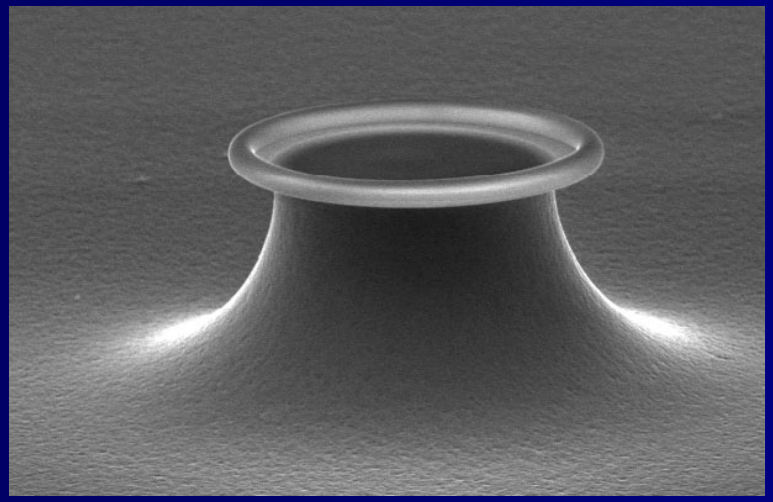


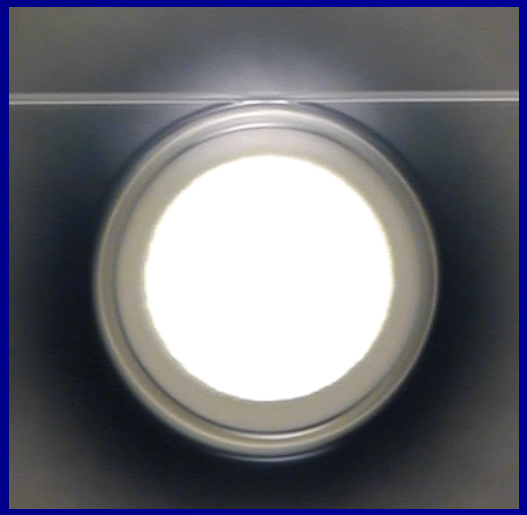
- 高Q値化・微小化の限界
- スケーラビリティの低さ
- 外部結合効率の低さ

トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学

トロイド型共振器

D. K. Armani *et al.*, Nature **421**, 925-929 (2003).



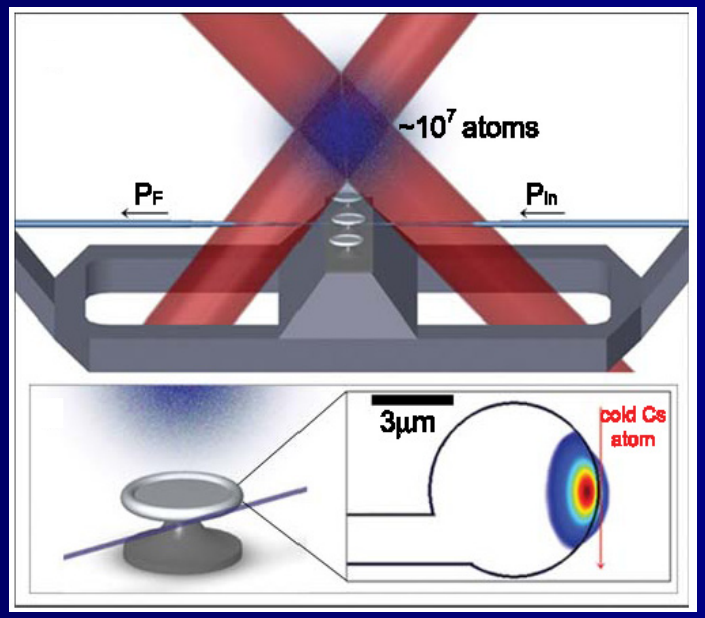


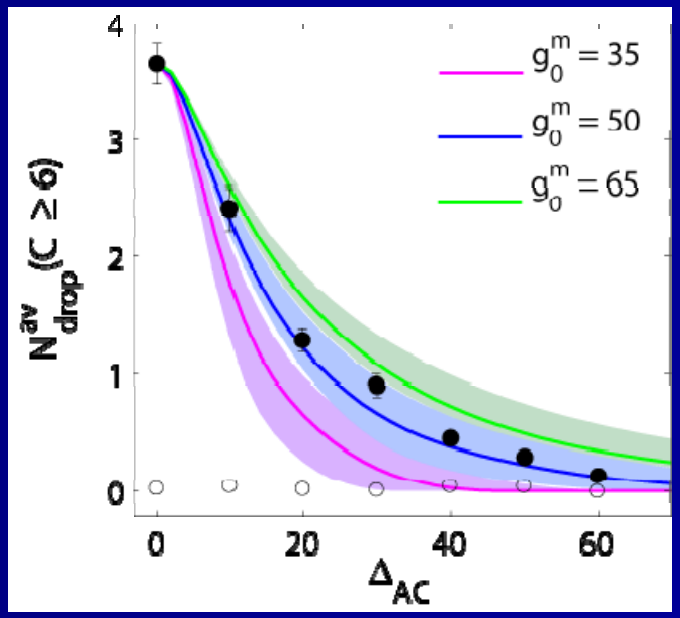
高いQ値（10^7～10^{10}）、微小モード体積

シリコンチップ上に大量に作製可能

ファイバーとの高効率（～99.9%）カップリング

トロイド型微小共振器と単一原子の量子光学



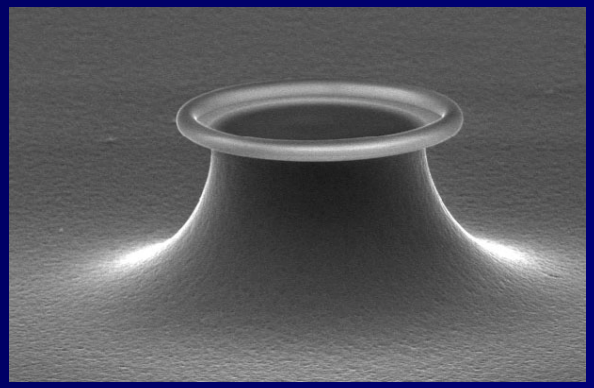


強結合：g □ γ, κ

T. Aoki *et al*., Nature **443**, 671 (2006)

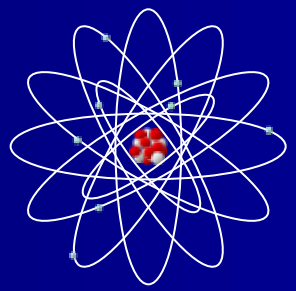
ナノ量子エレクトロニクス

微小共振器

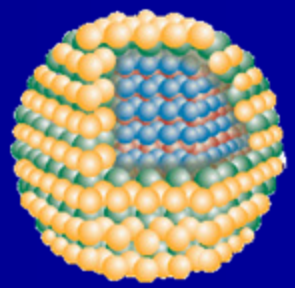


＋

単一原子



単一量子ドット



新分野への展開　～　量子情報

量子情報技術の実現に向けた実験

- 超伝導（ジョセフソン接合）
- NMR（分子の核スピン）
- イオントラップ
- 中性原子（光格子）
- 光

検出・伝送が容易
高いコヒーレンス

光を使った量子情報

qubit　単一光子の偏光状態

$$|\psi\rangle = \alpha|\mathrm{H}\rangle + \beta|\mathrm{V}\rangle$$

$|\mathrm{H}\rangle$　横偏光状態

$|\mathrm{V}\rangle$　縦偏光状態

- qubit を多数用意

  単一光子源

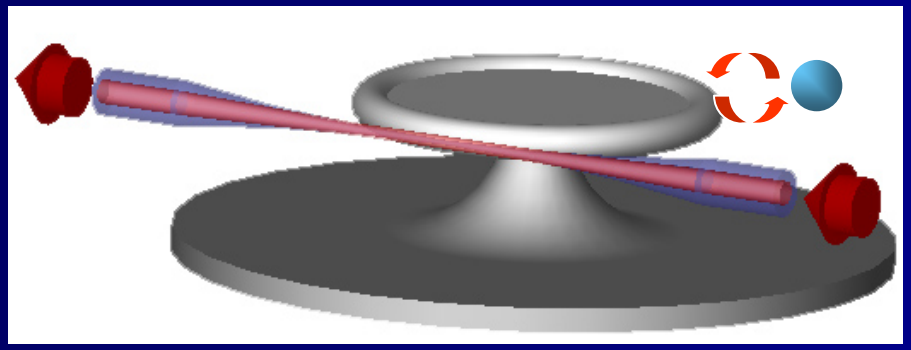
  （単一モードに対して偏光の定まった決定論的単一光子発生技術）

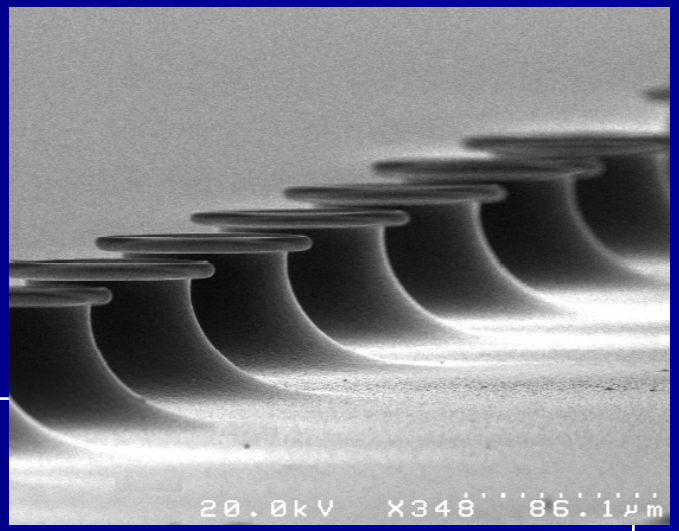
- 演算操作

  非線形相互作用

  （単一光子に対する180°の非線形位相シフト）

光を使った量子情報





- qubit を多数用意

  単一光子源

  （単一モードに対して偏光の定まった決定論的単一光子発生技術）

- 演算操作

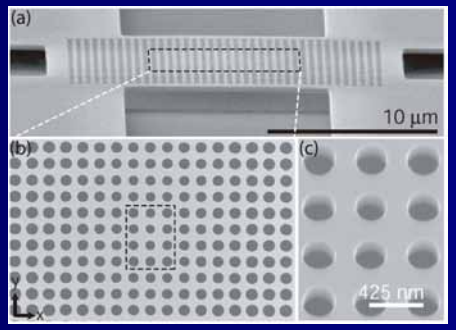
  非線形相互作用

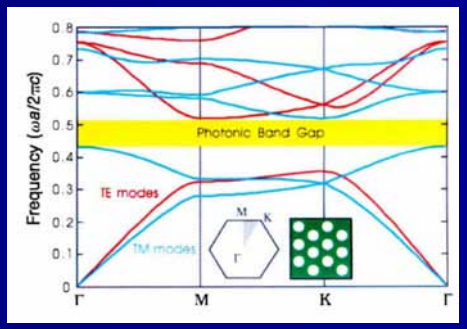
  （単一光子に対する180°の非線形位相シフト）

新しい系の創出

相互作用する光～光の結晶化

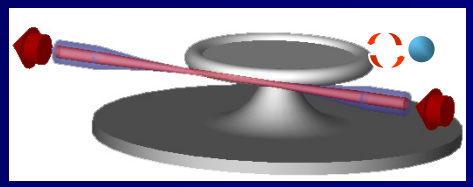
フォトニック結晶：１電子近似のバンド理論に相当

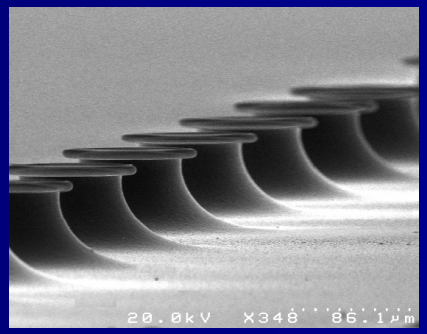




J. D. Joannopoulos *et al.*, Nature **386**, 143 (1997).

“強相関光子系”





M. J. Hartmann *et al.*, Nature Physics **2**, 849 (2006) ; Phys. Rev. Lett. **99**, 103601 (2007).

まとめ

GCOE特別研究ユニット（特別講座）

「普遍性と創発性」

境界・融合分野の研究を推進

新分野の開拓

ナノ量子エレクトロニクス