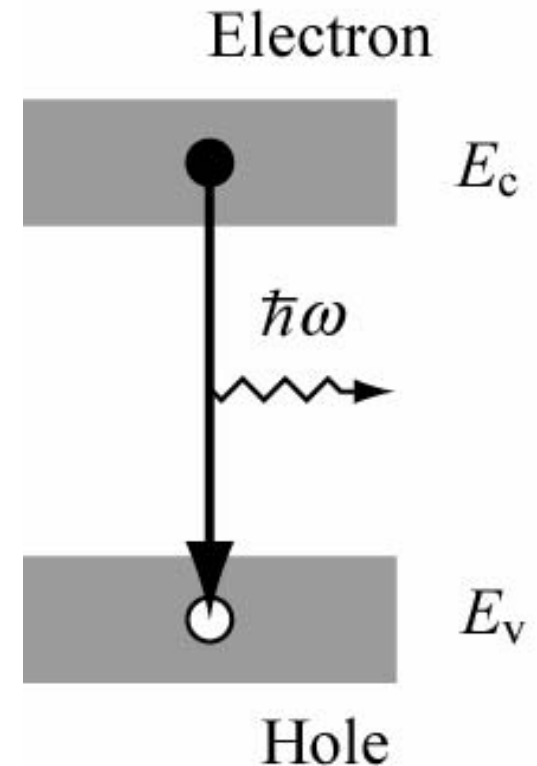


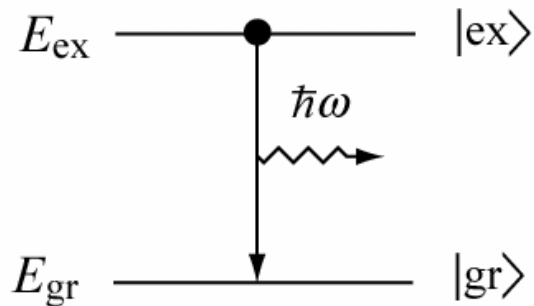
# 自然放出の制御

- 自然放出
  - 伝導電子と正孔との再結合
  - 真空場のゆらぎによる誘導放出
    - Cavity QED

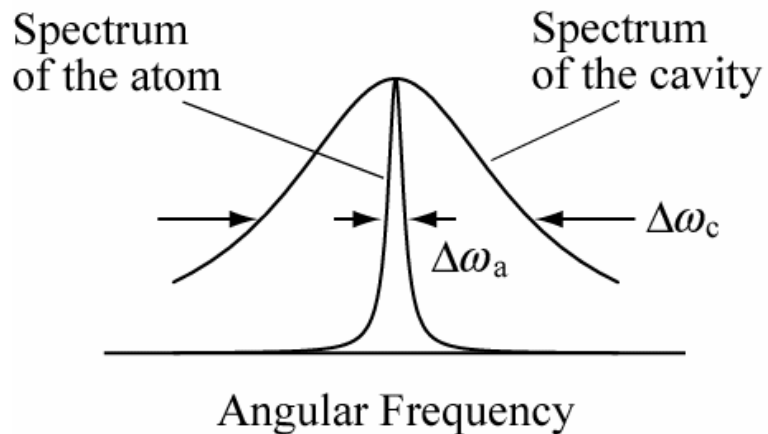
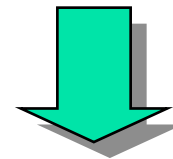


# 自然放出の制御

## ■ フェルミの黄金率



ローレンツ型  
スペクトル

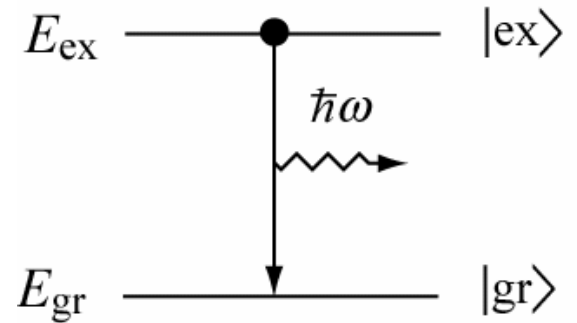


$$\Delta\omega \propto \tau^{-1}$$

# 自然放出の制御

## ■ フェルミの黄金率

### 原子の遷移レート



$$W = \frac{2\pi e^2}{\hbar} \sum_l \mu_l^2 \frac{\hbar\omega_l}{2V\varepsilon} \sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}) \times (n_l + 1) F(E_{\text{ex}} - E_{\text{gr}} - \hbar\omega_l)$$

$$W_{\text{sp}} = \frac{2\pi e^2}{\hbar} \sum_l \mu_l^2 \frac{\hbar\omega_l}{2V\varepsilon} \sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}) F(E_{\text{ex}} - E_{\text{gr}} - \hbar\omega_l)$$

# 自然放出の制御

- 自由空間

- 発光波長に比べて十分大

- 共振モードスペクトル

ほぼ連続

自然放出  
レート

$$W_{\text{sp, free}} = \frac{e^2 \omega_0^3 n_{\text{rc}}^3}{3\pi c^3 \hbar \epsilon} \bar{\mu}^2$$

# 自然放出の制御

## ■ 自然放出レート

$$W_{\text{sp}} = \frac{2\pi e^2}{\hbar} \sum_l \mu_l^2 \frac{\hbar \omega_l}{2V\epsilon} \sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}) \times F(E_{\text{ex}} - E_{\text{gr}} - \hbar \omega_l)$$

体積, 位置  
に依存

自由  
空間

$$W_{\text{sp, free}} = \frac{e^2 \omega_0^3 n_{\text{rc}}^3}{3\pi c^3 \hbar \epsilon} \bar{\mu}^2$$

体積, 位置  
に独立

# 自然放出の制御

- 微小共振器

- 発光波長と同程度のサイズ

- 共振モードスペクトル

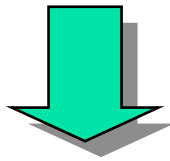
離散的

$$W_{\text{sp, micro}} = \frac{\pi e^2}{\hbar} \mu_1^2 \frac{\hbar \omega_l}{V \epsilon} \frac{1}{\hbar \Delta \omega_c} \sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r})$$

# 自然放出の制御

## ■ 微小共振器と自由空間

$$\omega_0 = \omega_l$$

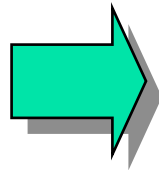


$$\frac{W_{\text{sp, micro}}}{W_{\text{sp, free}}} = \frac{3}{8\pi} \frac{\lambda_l^3}{n_{\text{rc}}^3} \frac{1}{V} \frac{\omega_l}{\Delta\omega_c} \sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r})$$

# 自然放出の制御

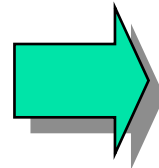
## ■ 微小共振器と自由空間

$$V \approx \frac{\lambda_l^3}{n_{rc}^3}, \quad \frac{\omega_l}{\Delta\omega_c} \gg 1, \quad \sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}) = 1$$



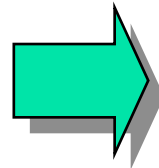
$$W_{sp, micro} > W_{sp, free}$$

$$\sin^2(\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}) = 0$$



$$W_{sp, micro} = 0$$

$$\omega_0 \neq \omega_l$$

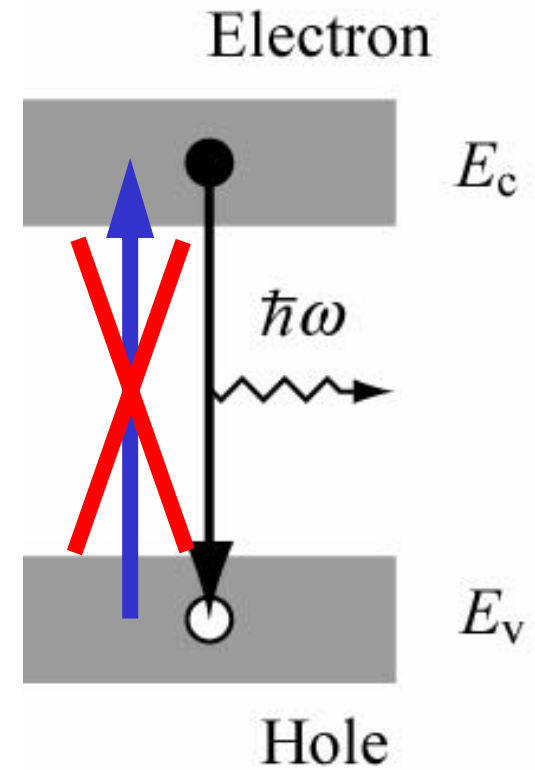


$$W_{sp, micro} < W_{sp, free}$$



# 自然放出の制御

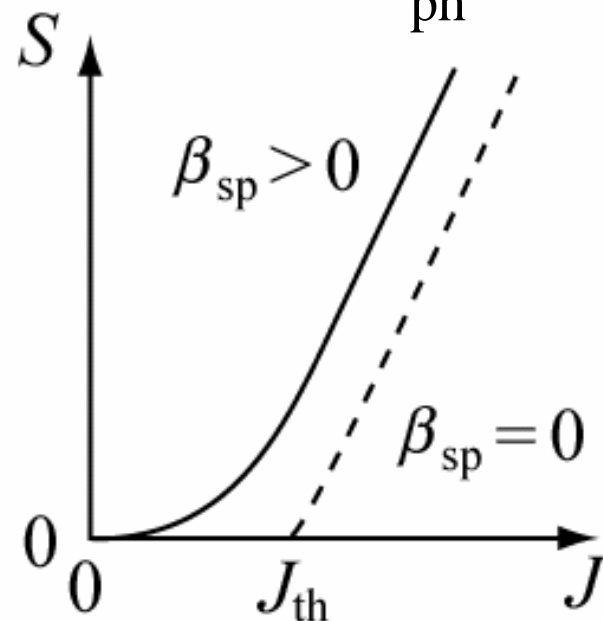
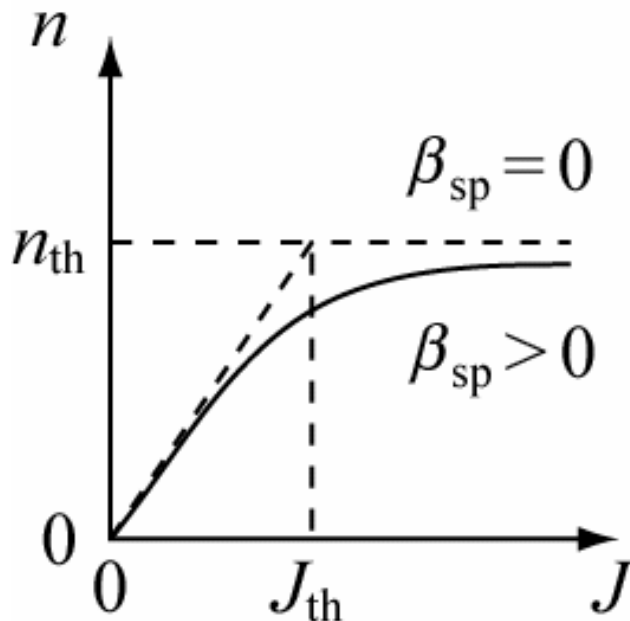
- 真空場のゆらぎ
  - 原子：励起状態
    - 同位相  $\Rightarrow$  遷移
  - 原子：基底状態
    - 逆位相  $\Rightarrow$  ~~遷移~~



# 自然放出の制御

## ■ 微小共振器レーザー

光子数密度  $\frac{dS}{dt} = G(n)S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \beta_{sp} \frac{n}{\tau_r}$



# 自然放出の制御

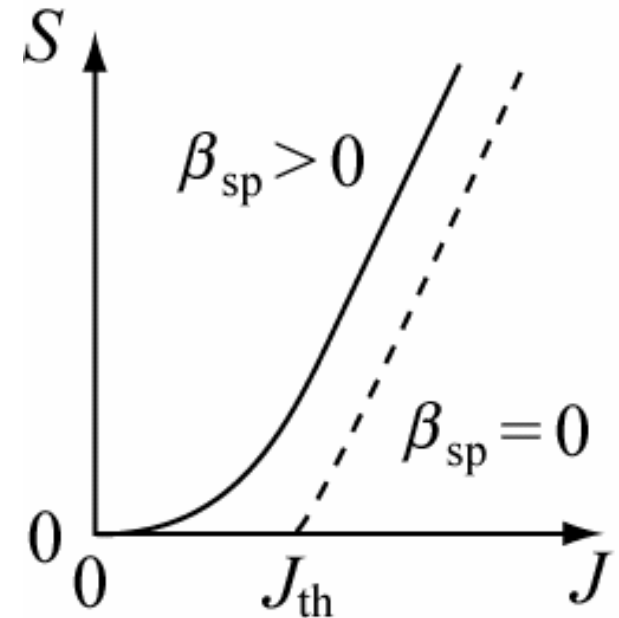
## ■ 微小共振器レーザー

### ■ 長所

- 低しきい値
- 高速変調

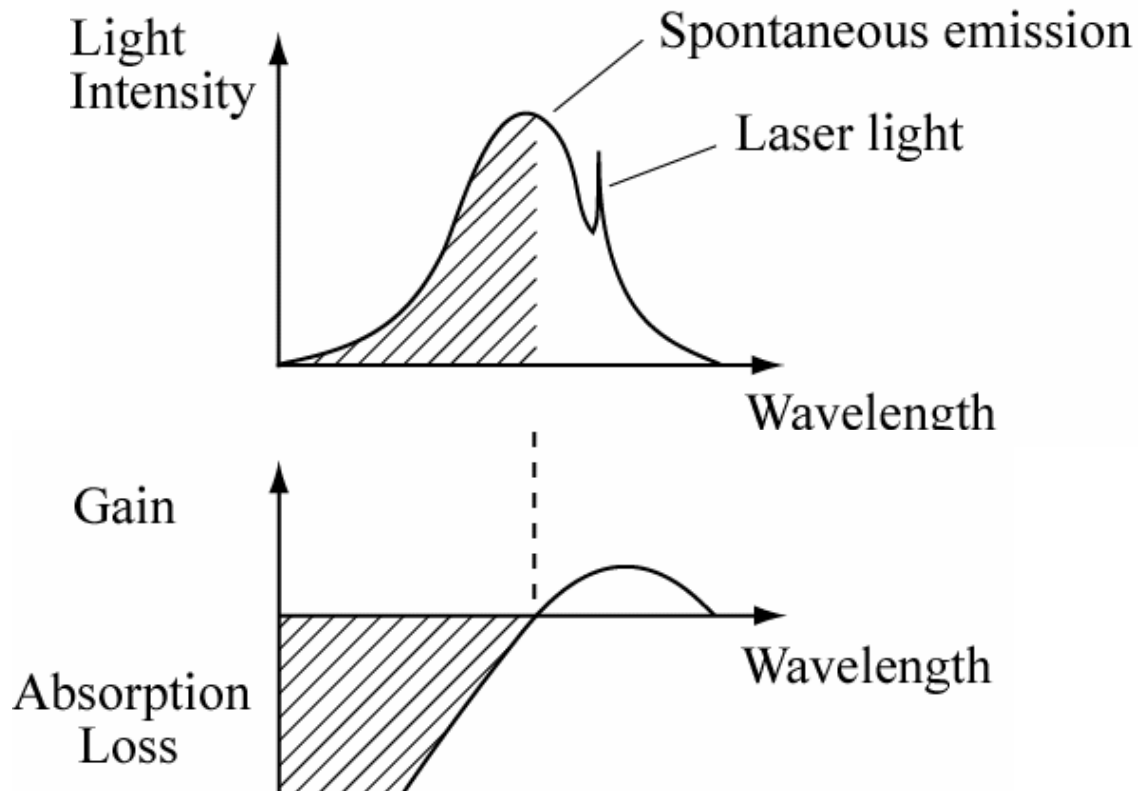
### ■ 短所

- 電気抵抗 大
- 光出力 小



# 自然放出の制御

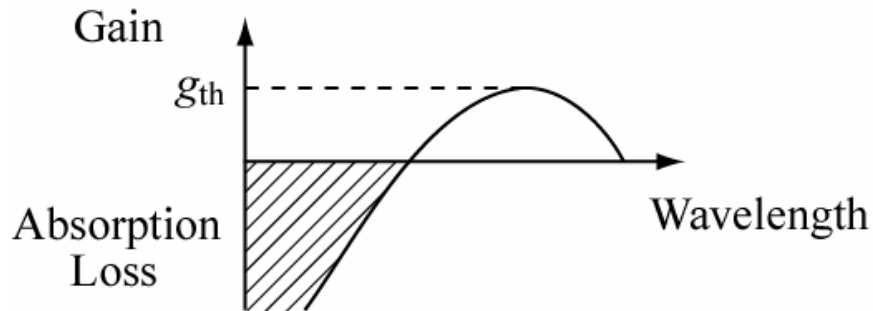
## ■ フォトン・リサイクリング



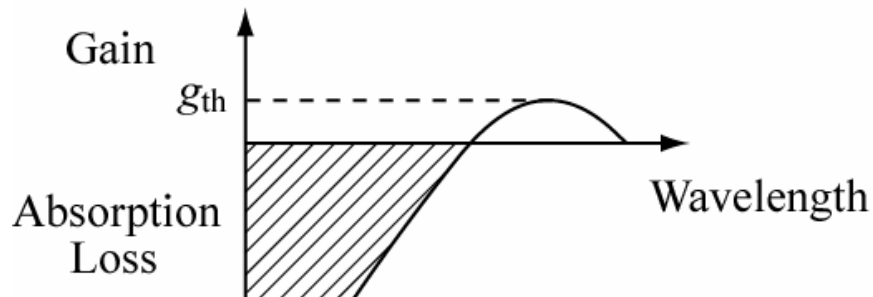
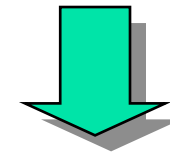
自然放出  
↓ 吸収  
キャリア  
再生

# 自然放出の制御

- フォトン・リサイクリング
- しきい値との関係



低しきい値

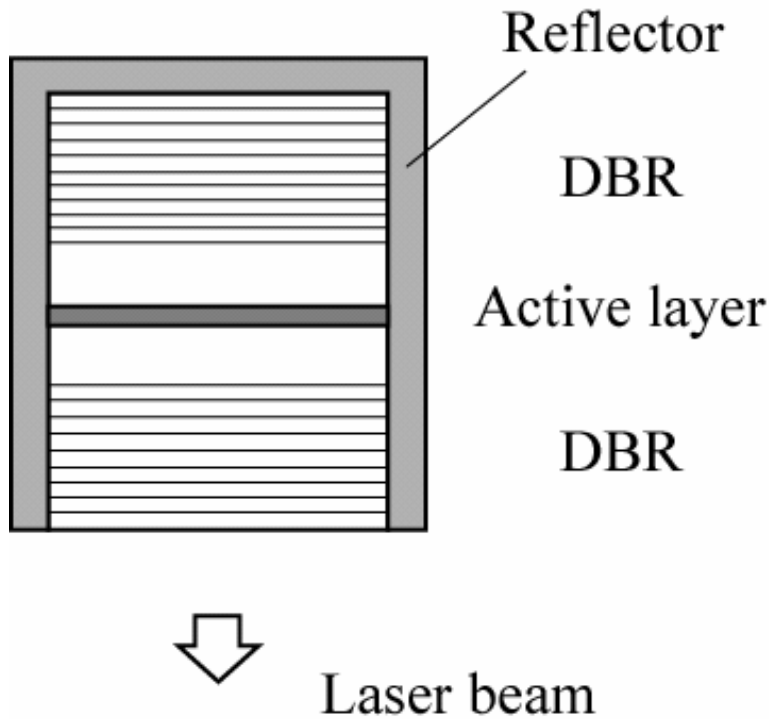


効果 大

# 自然放出の制御

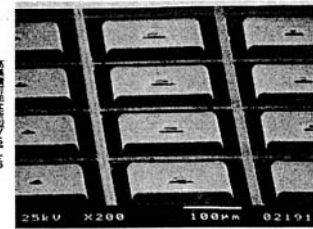
## ■ フォトン・リサイクリング

1992年9月10日(木) 日刊工業新聞



### 電力→光変換効率が10倍

光電融合素子



NEC

### 電流を発光層に集中

1チップ上に1千個搭載 超並列電算機に用途

科学技術

NEC(株)は、超並列電算機に用いる光電融合素子の開発に成功した。この素子は、従来のLED素子に比べて、電力を光に変換する効率が10倍向上し、1チップ上に1千個以上を高密度で搭載できる。超並列電算機の高速動作を実現する上で、この素子の開発は重要な役割を果たす。NECは、この素子の開発に、最先端の半導体技術と、光工学の知見を駆使している。また、この素子は、超並列電算機の高速動作を実現する上で、重要な役割を果たす。NECは、この素子の開発に、最先端の半導体技術と、光工学の知見を駆使している。また、この素子は、超並列電算機の高速動作を実現する上で、重要な役割を果たす。

# 自然放出の制御

## ■ 比較

	$\eta$	光出力	抵抗	作製
フォトン・リサイクリング	大	大	小	容易
微小共振器	小	小	大	困難