



UT-PSC  
Photon Science Center of the University of Tokyo

2012/3/19 サイエンスキャンプ@東大

# 光の量子性とその応用

東京大学大学院工学系研究科附属  
光量子科学研究センター 五神研究室

小西 邦昭

# Outline

---

- I. 光とは
- II. 光の量子 - 光子
- III. レーザー
- IV. 光を閉じこめる

# 光とは



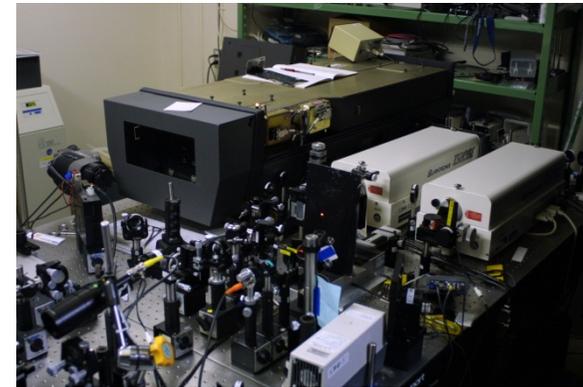
太陽



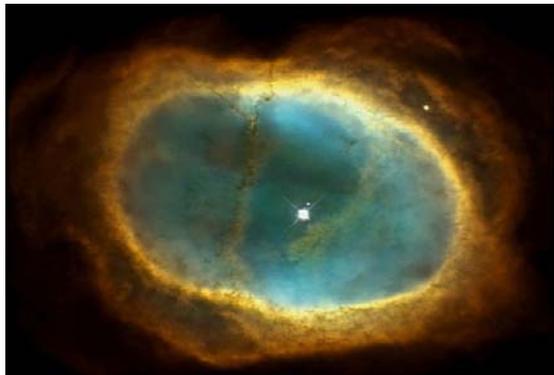
虹: 山梨大学 堀 裕和氏 撮影



発光ダイオードの信号



レーザー実験装置



8の字星雲



光ファイバー



液晶テレビ

# 光の速度

---

- ヒトの歩く速さ                      1 m/秒                      4 km/時
- 自 転 車                              5 m/秒                      18 km/時
- 新 幹 線                              75 m/秒                      250 km/時
- ジェット旅客機                      330 m/秒                      1,200 km/時
- 音                                      340 m/秒                      1,250 km/時
- スペースシャトル7,700 m/秒                      27,700 km/時  
    (注：ミッションにより異なる)
- 光                                      30万 km/秒                      10億8000万 km/時

# 光の科学史

古代ギリシャ： 太陽光の集光によるの採火 オリンピックの聖火  
測地・測量

17世紀： 最小作用の原理による屈折現象の説明（フェルマー）  
望遠鏡（ガリレイ、ケプラー、ニュートン）

光の波動説（1678年ホイヘンス）

「光は粒子であって、  
それがエーテルを振動させる」  
（1671年 ニュートン）



ホイヘンス

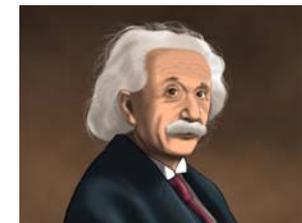


ニュートン

18世紀後半： 光学の進歩（ヤング、フレネル）「光の回折」  
偏光現象  
光は横波

19世紀： 電磁気学の進歩  
ファラデーの電磁誘導の法則（1831）  
マックスウェル 電磁方程式（1864） 光は電磁波  
ヘルツの実験（電磁波の確認 1889）

20世紀： アインシュタイン 特殊相対性理論（1905）  
電磁気学との統一 光量子仮説  
光の速度は運動系によらず一定

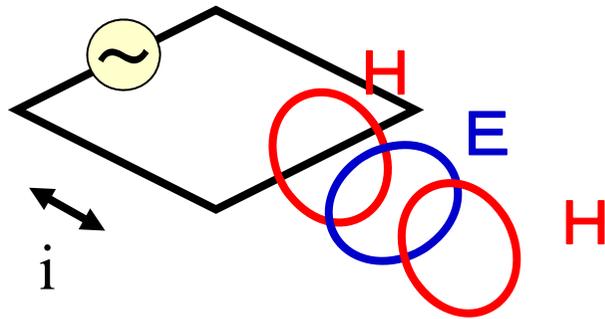


アインシュタイン

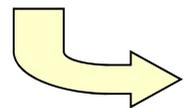
# 電磁波



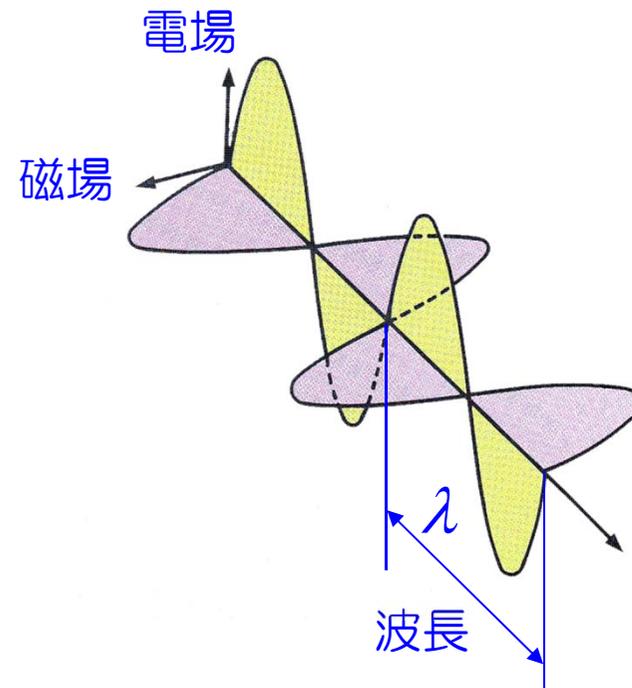
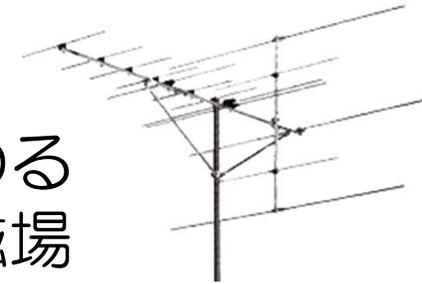
電磁誘導と電磁波放射



加速度運動する荷電粒子  
(イオン、電子)

 電磁波放射

電波  
真空中を伝わる  
変動する電磁場



# 光と電磁波

10<sup>-11</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>-9</sup> 10<sup>-8</sup> 10<sup>-7</sup> 10<sup>-6</sup> 10<sup>-5</sup> 10<sup>-4</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>1</sup> 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>5</sup> 10<sup>6</sup> 波長mm

宇宙線	γ線	X線	紫外線	可視光	赤外線	マイクロ波	UHF波	VHF波	短中波	長波
-----	----	----	-----	-----	-----	-------	------	------	-----	----

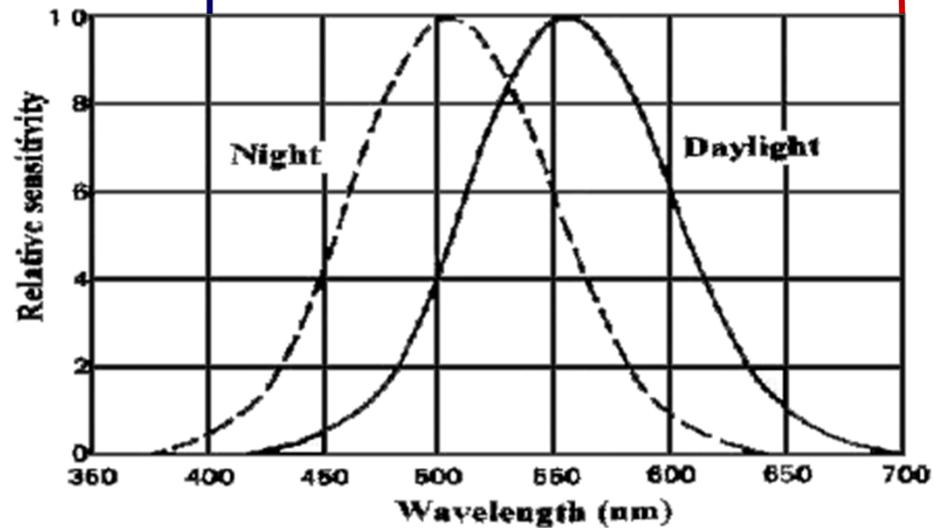
電波

単位の換算：

$$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ mm} \\ = 10^{-8} \text{ cm} \\ 400 \text{ nm} = 4 \times 10^{-4} \text{ mm}$$



人間の目の感度



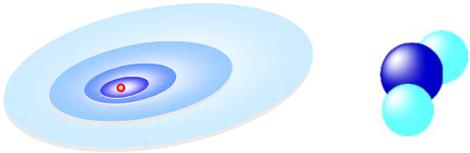
# 光と物質

10<sup>-11</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>-9</sup> 10<sup>-8</sup> 10<sup>-7</sup> 10<sup>-6</sup> 10<sup>-5</sup> 10<sup>-4</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>1</sup> 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>5</sup> 10<sup>6</sup> 波長mm

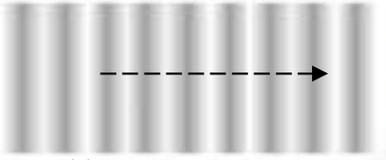
宇宙線	γ線	X線	紫外線	可視光	赤外線	マイクロ波	UHF波	VHF波	短中波	長波
-----	----	----	-----	-----	-----	-------	------	------	-----	----

電波

原子・分子



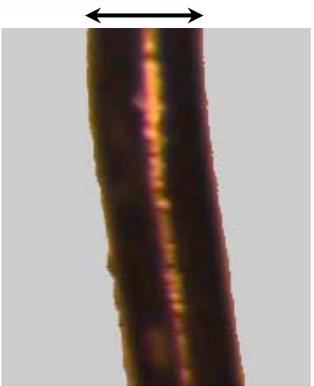
~1 Å = 10<sup>-10</sup>m



λ  
0.5μm=500nm

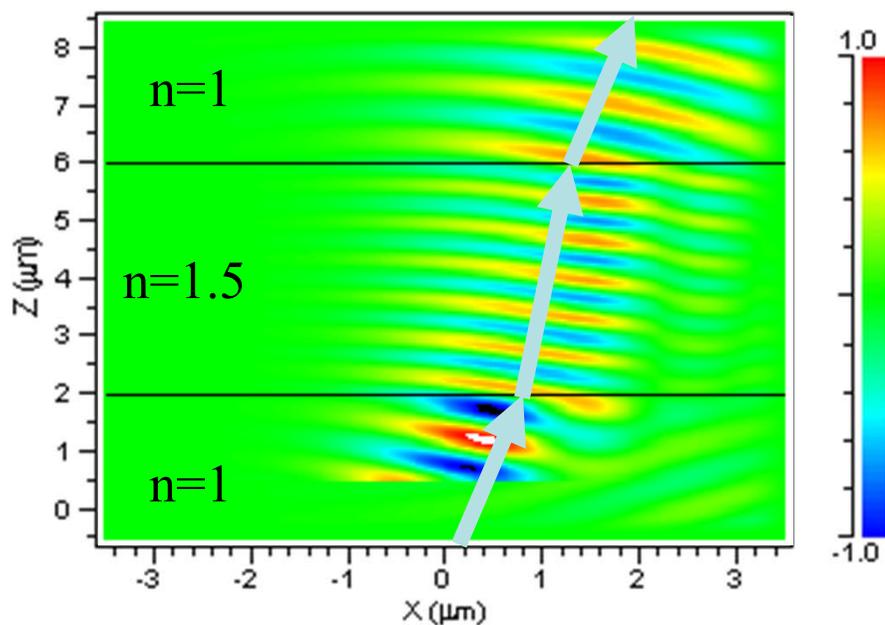
髪の毛

0.1mm=100μm

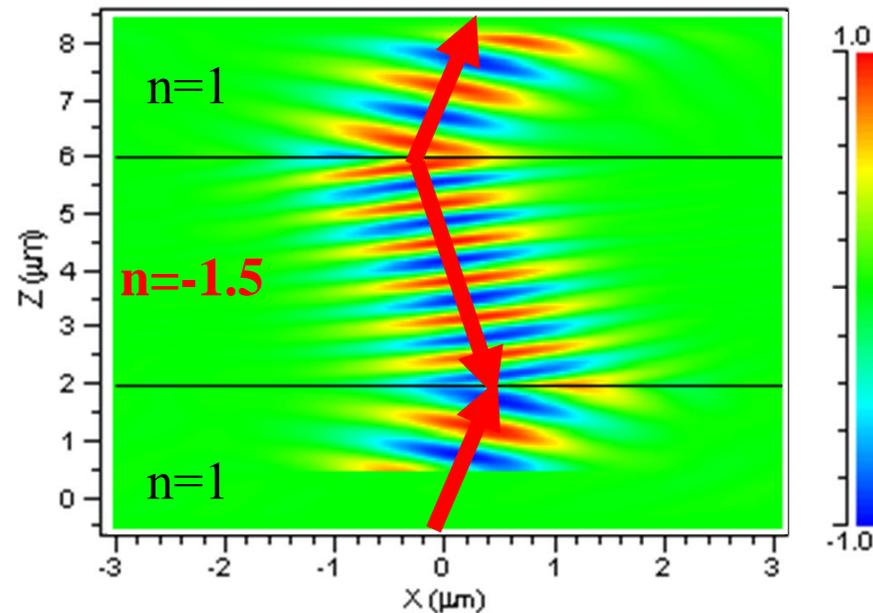


# 光と物質

通常の屈折



負の屈折



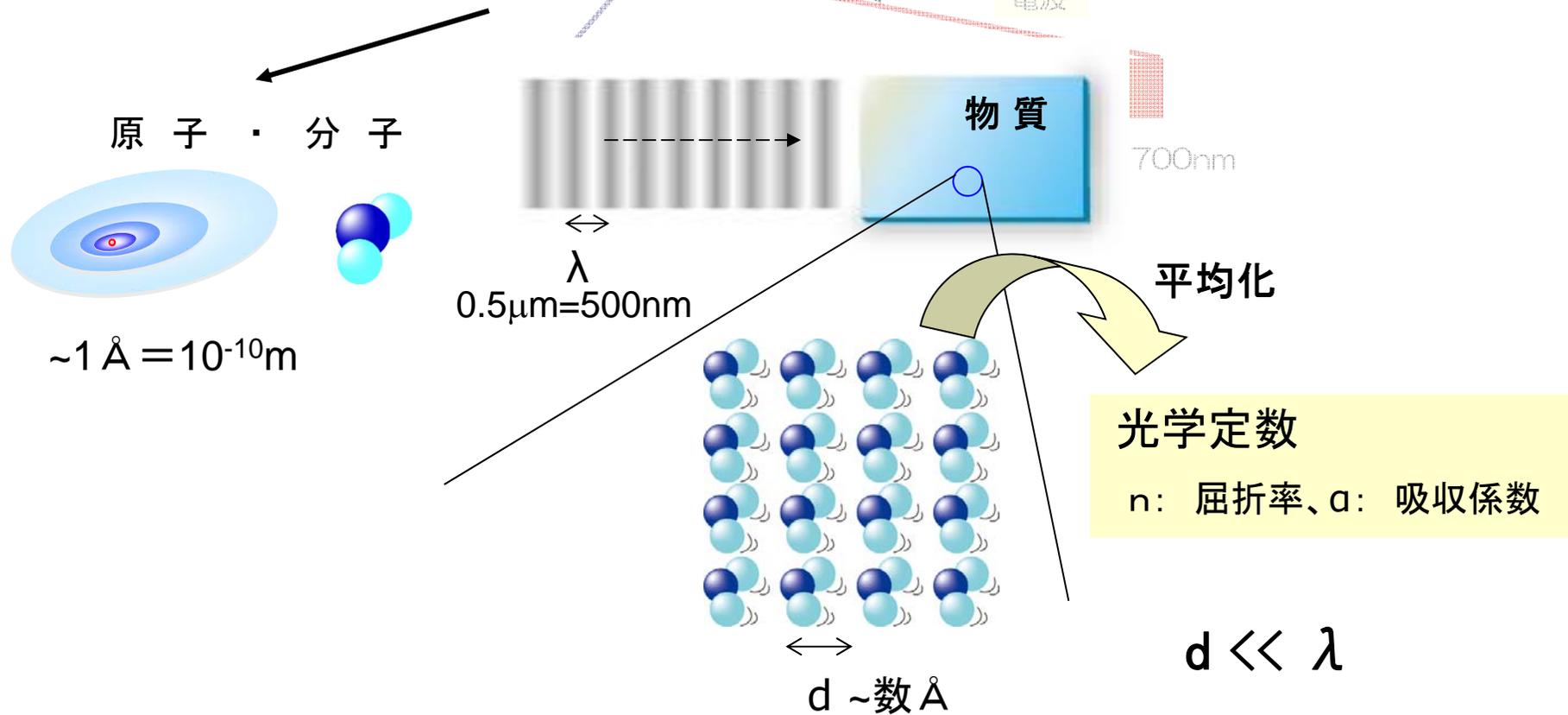
入射波長:  $1\mu\text{m}$

電場の向きは画面に垂直

# 光と物質

10<sup>-11</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>-9</sup> 10<sup>-8</sup> 10<sup>-7</sup> 10<sup>-6</sup> 10<sup>-5</sup> 10<sup>-4</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>1</sup> 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>5</sup> 10<sup>6</sup> 波長mm

宇宙線	γ線	X線	紫外線	可視光	赤外線	マイクロ波	UHF波	VHF波	短中波	長波
-----	----	----	-----	-----	-----	-------	------	------	-----	----



# 光と物質

10<sup>-11</sup> 10<sup>-10</sup> 10<sup>-9</sup> 10<sup>-8</sup> 10<sup>-7</sup> 10<sup>-6</sup> 10<sup>-5</sup> 10<sup>-4</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>1</sup> 10<sup>2</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>4</sup> 10<sup>5</sup> 10<sup>6</sup> 波長mm

宇宙線	γ線	X線	紫外線	可視光	赤外線	マイクロ波	UHF波	VHF波	短中波	長波
-----	----	----	-----	-----	-----	-------	------	------	-----	----

原子・分子

~1 Å = 10<sup>-10</sup>m

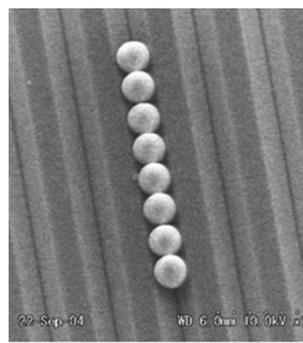
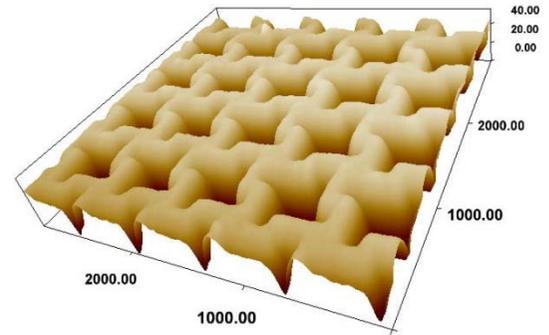
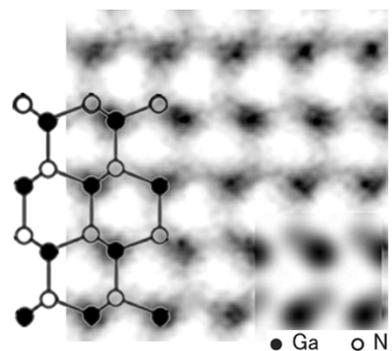
電波

λ

0.5μm=500nm

人工光材料

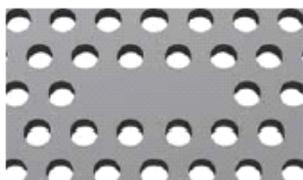
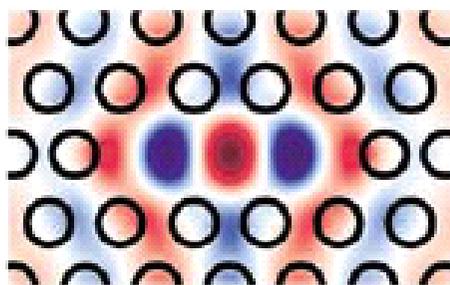
n: 屈折率  
a: 吸収係数



微小球 5μm

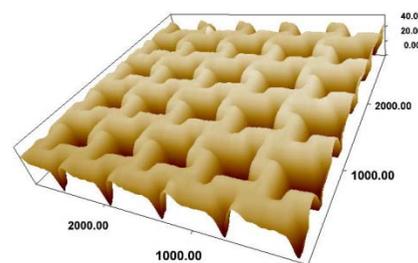
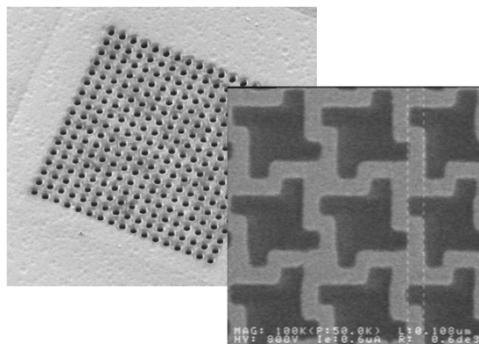
# 人工物質による光の制御

フォトニック結晶



光閉じこめ  
スローライト

プラズモニック結晶



人工キラル格子

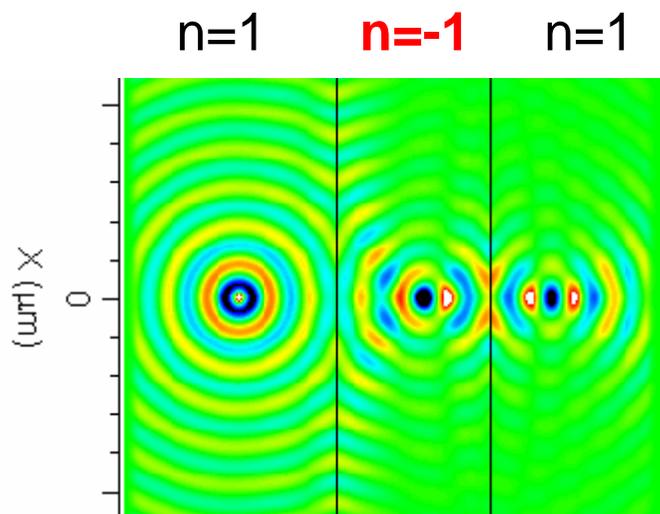
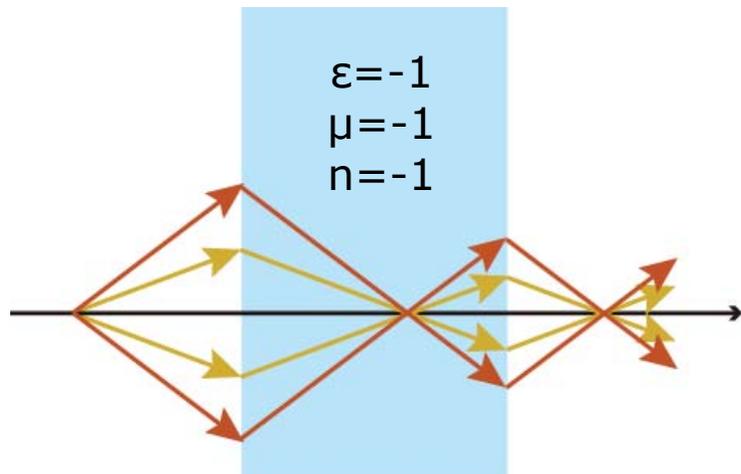
メタマテリアル



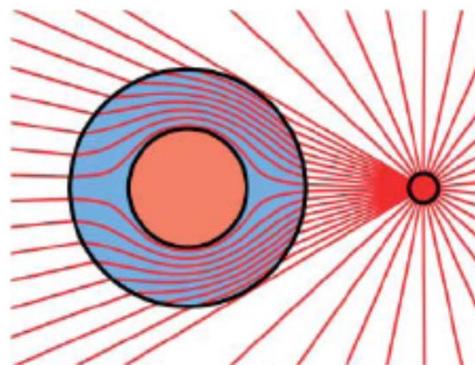
負の屈折  
スーパーレンズ

# メタマテリアルの応用

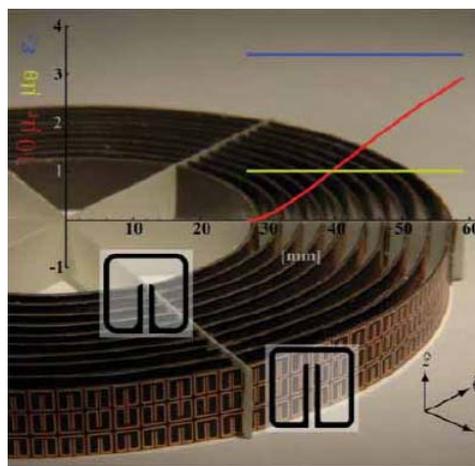
パーフェクトレンズ



透明マント(Cloaking)の概念図



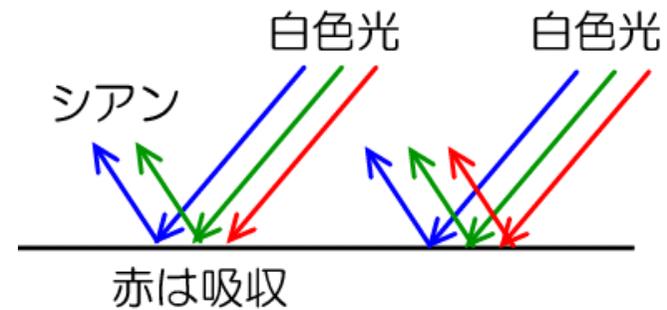
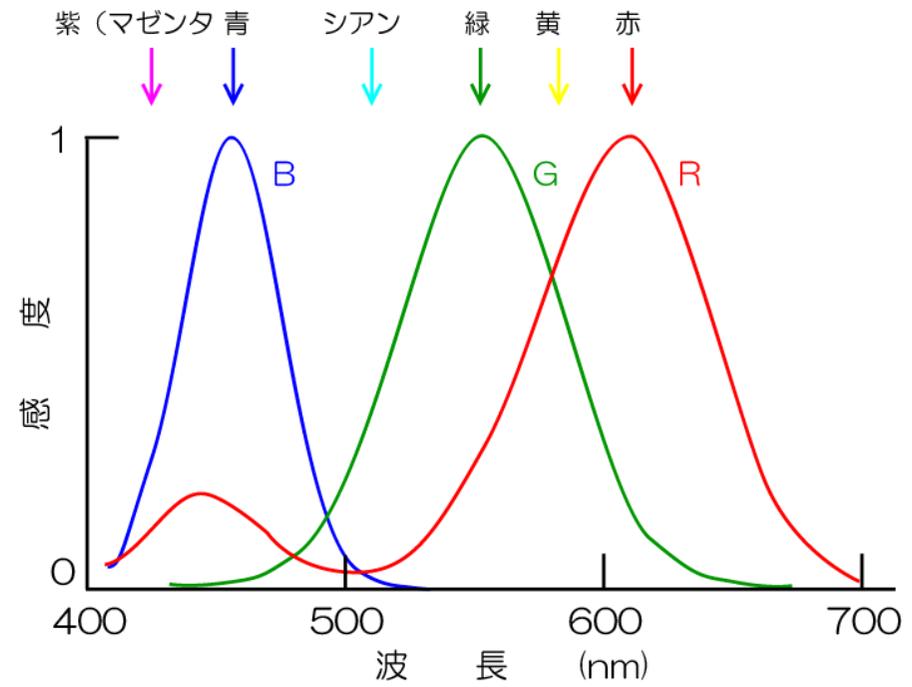
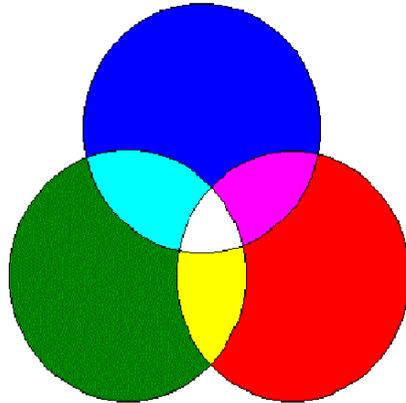
J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, Science **312**, 1780 (2006).



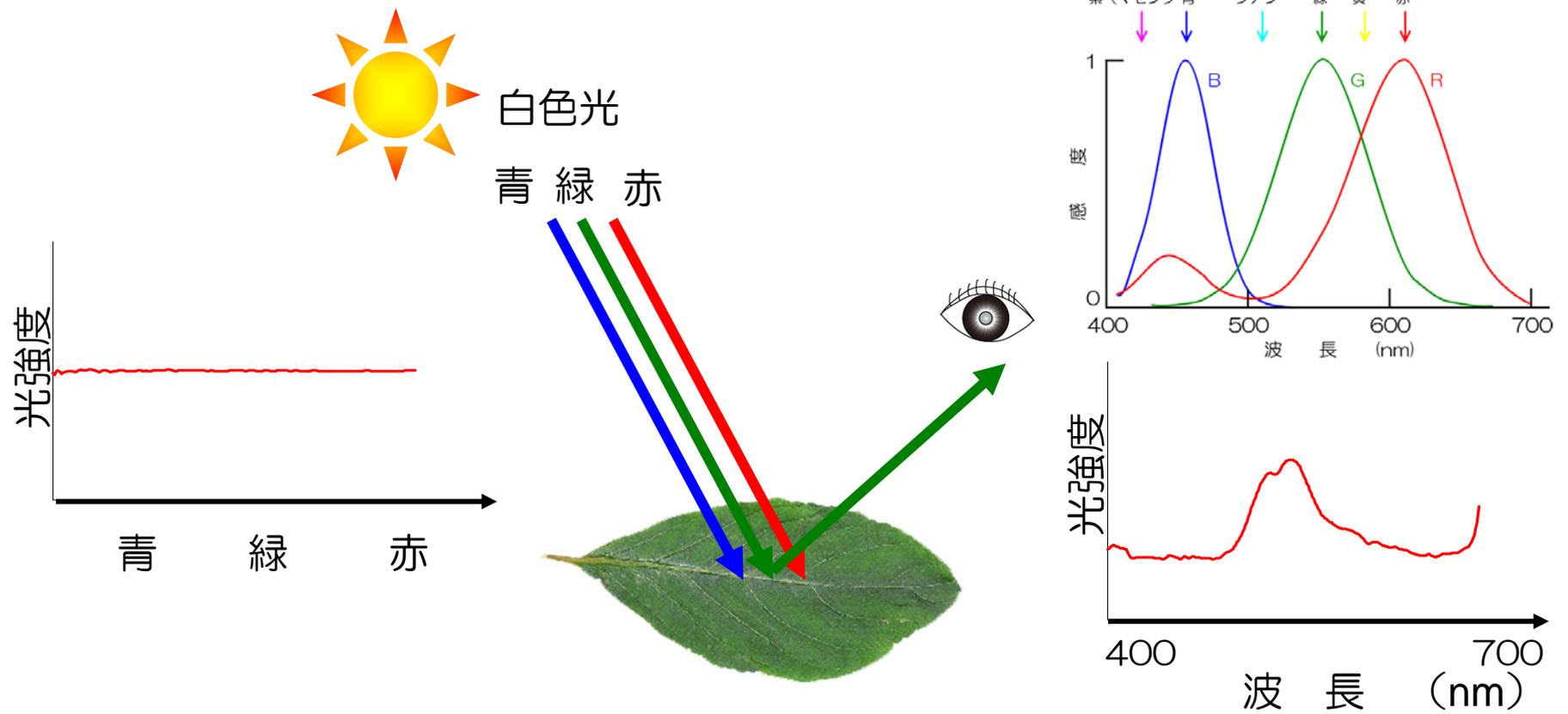
D. Schurig et. al. Science **314** 977 (2006)

# 色と光

光の3原色



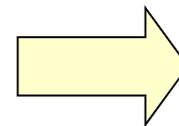
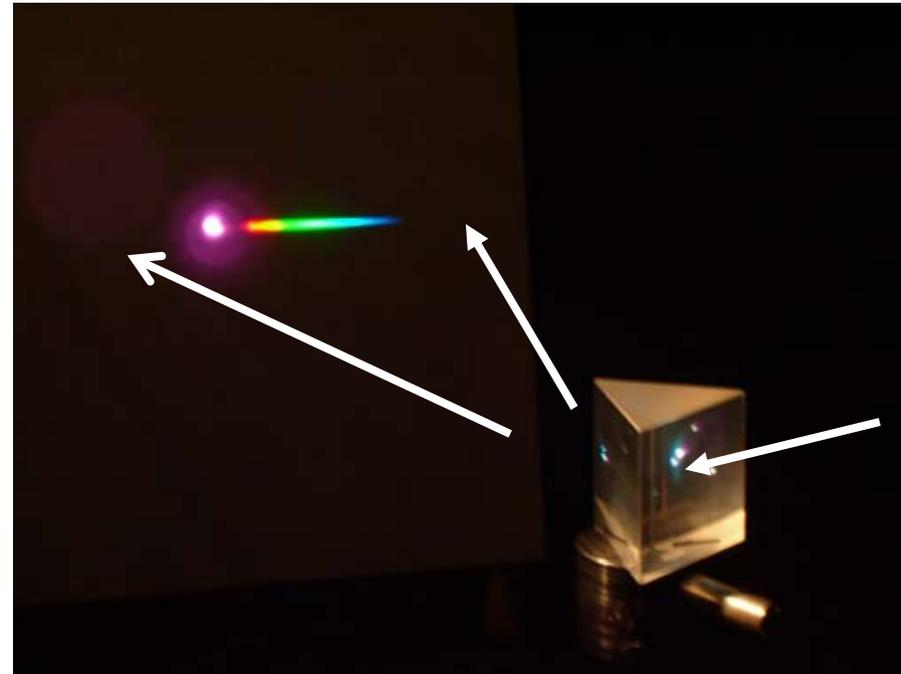
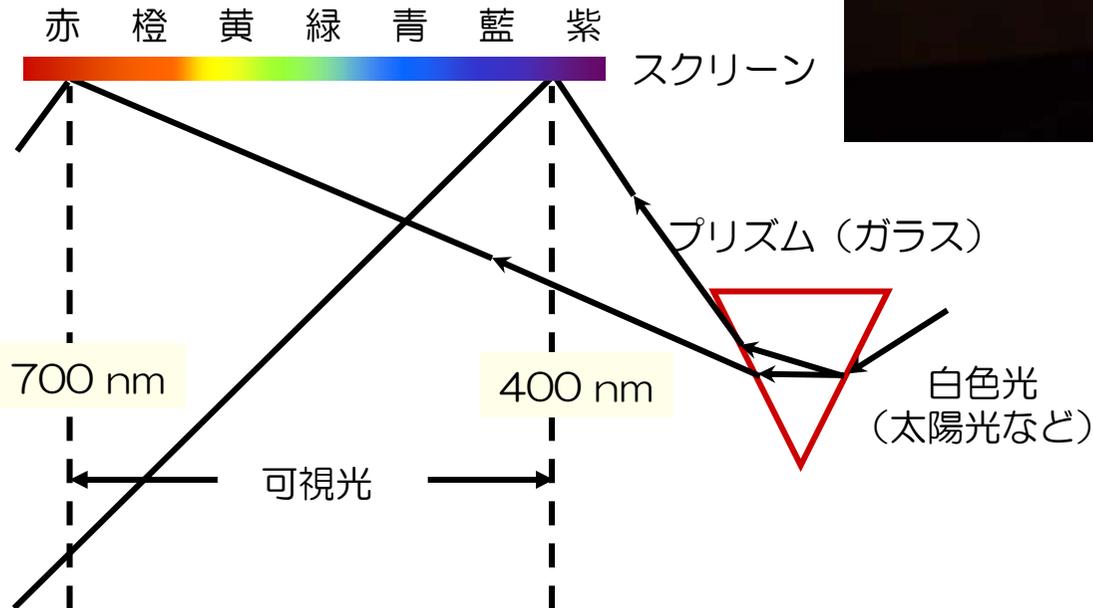
# 葉っぱは何故緑に見えるのか？



# 分光スペクトル

## ●プリズム分光のしくみ

シリカガラスの屈折率  
1.46961@404.7nm  
1.45542@694.3nm



分散現象

# Outline

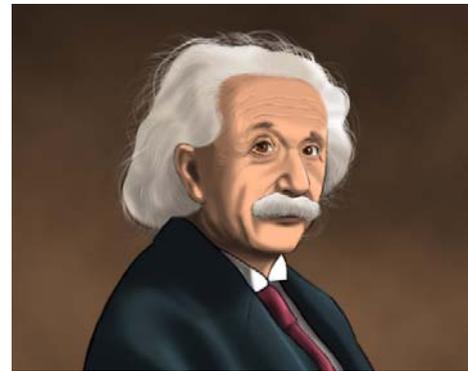
---

- I. 光とは
- II. 光の量子 - 光子
- III. レーザー
- IV. 光を閉じこめる

# 光子 (Photon)

$$\begin{aligned} \text{エネルギー} & E = h\nu \\ \text{運動量} & p = \frac{h\nu}{c} \end{aligned}$$

アインシュタイン  
光量子仮説 (1905)



可視光 ( $400 \text{ nm} \sim 750 \text{ nm}$ )

$$h\nu \quad (1.5 \text{ eV} \sim 3 \text{ eV})$$

熱エネルギー  $\sim k_B T$

$k_B$ : ボルツマン定数 ( $8.61735 \times 10^{-5} \text{ eV} / \text{K}$ )

常温  $300 \text{ K}$   $k_B T \sim 26 \text{ meV}$

可視光光子は超高温  
光は安定なものを変化させる  
(光化学反応)

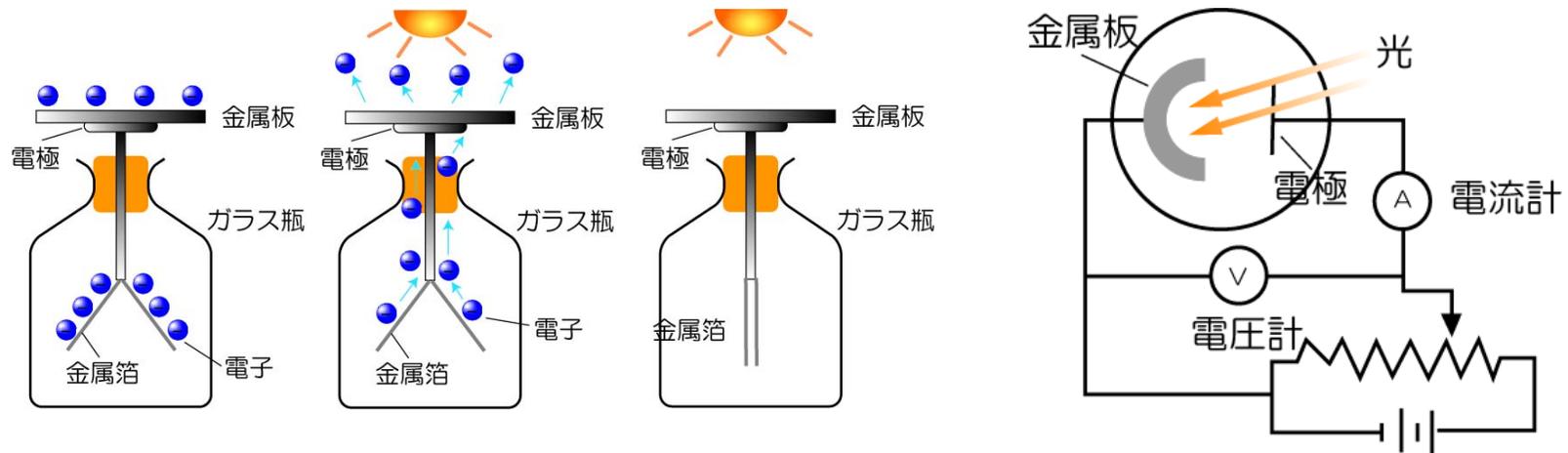
量子性が本質的に重要

$$(1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

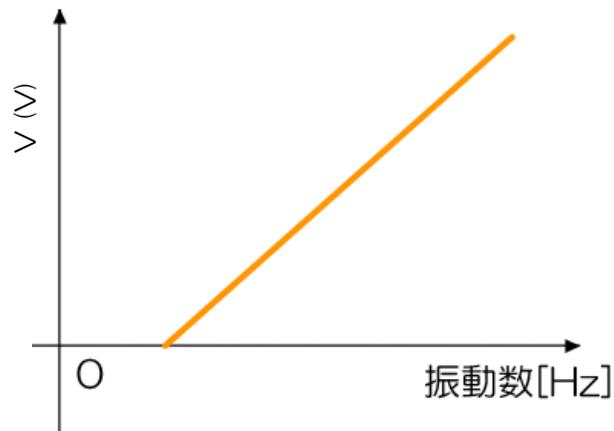
$35000 \text{ K}$

# 光の量子性を示す現象

## ● 光電効果



最低の電圧 (V) と振動数 (Hz)



- 光電子放出が起こる光の振動数の条件

$$h\nu \geq h\nu_{\min} = W$$

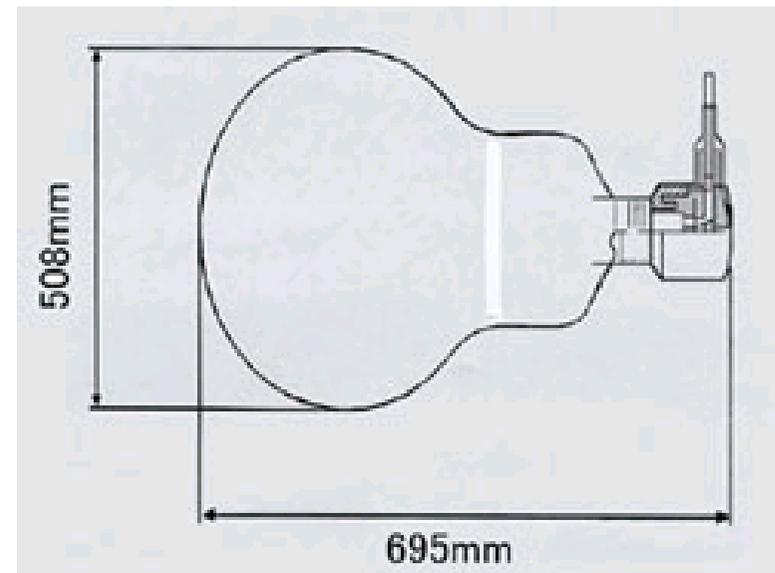
$W$  : 仕事関数

- 光電子の運動エネルギー

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - W$$

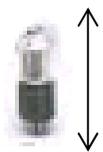
# 光子をとらえる

- フォトマルチプライヤー（光電子増倍管）



## 小柴昌俊先生 2002年ノーベル物理学賞受賞

スーパーカミオカンデ用光電子増倍管は、浜松ホトニクス株式会社製R3600-5で、管の大きさ・性能とも世界最高のものです。

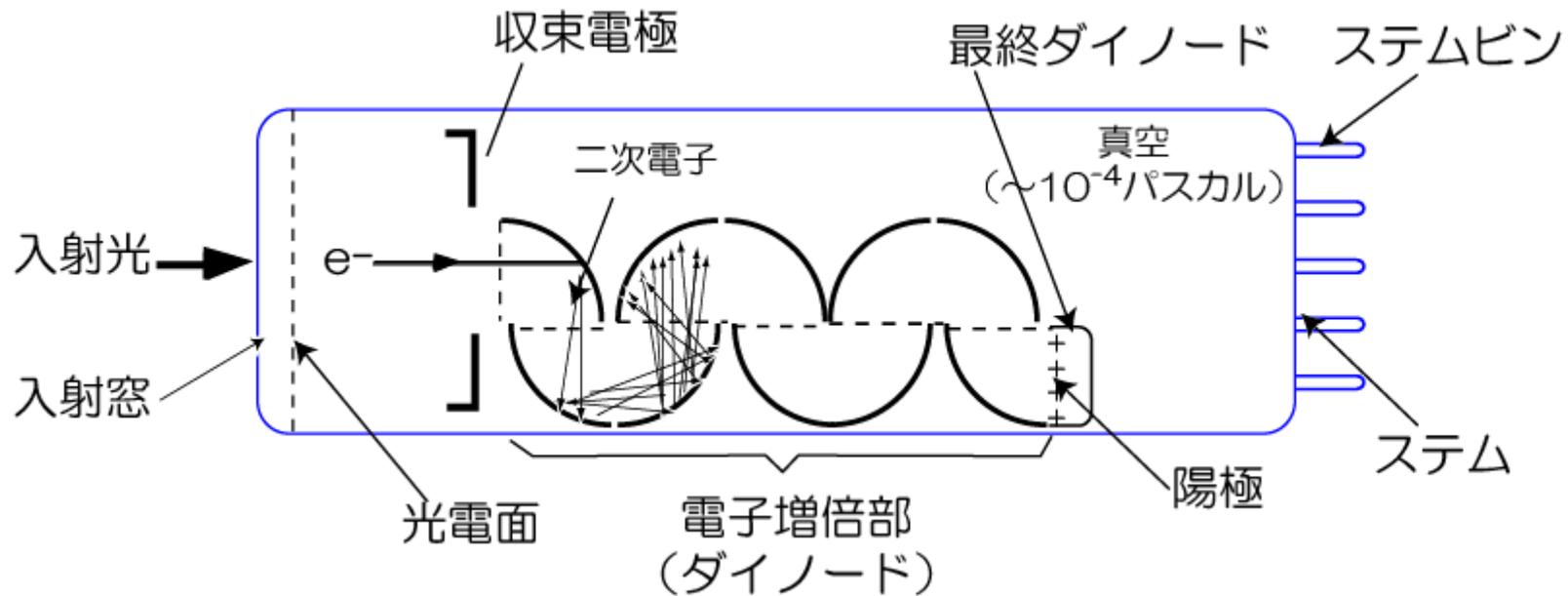


50mm

← 通常の光学実験で使用するフォトマルチプライヤー  
：浜松ホトニクス

# 光子をとらえる

## ● フォトマルチプライヤー（光電子増倍管）の原理



光電面で発生した電子は加速されて電子増倍部（ダイノード）に衝突し、ダイノードから（加速で得たエネルギーを使って）数個の電子を放出する。

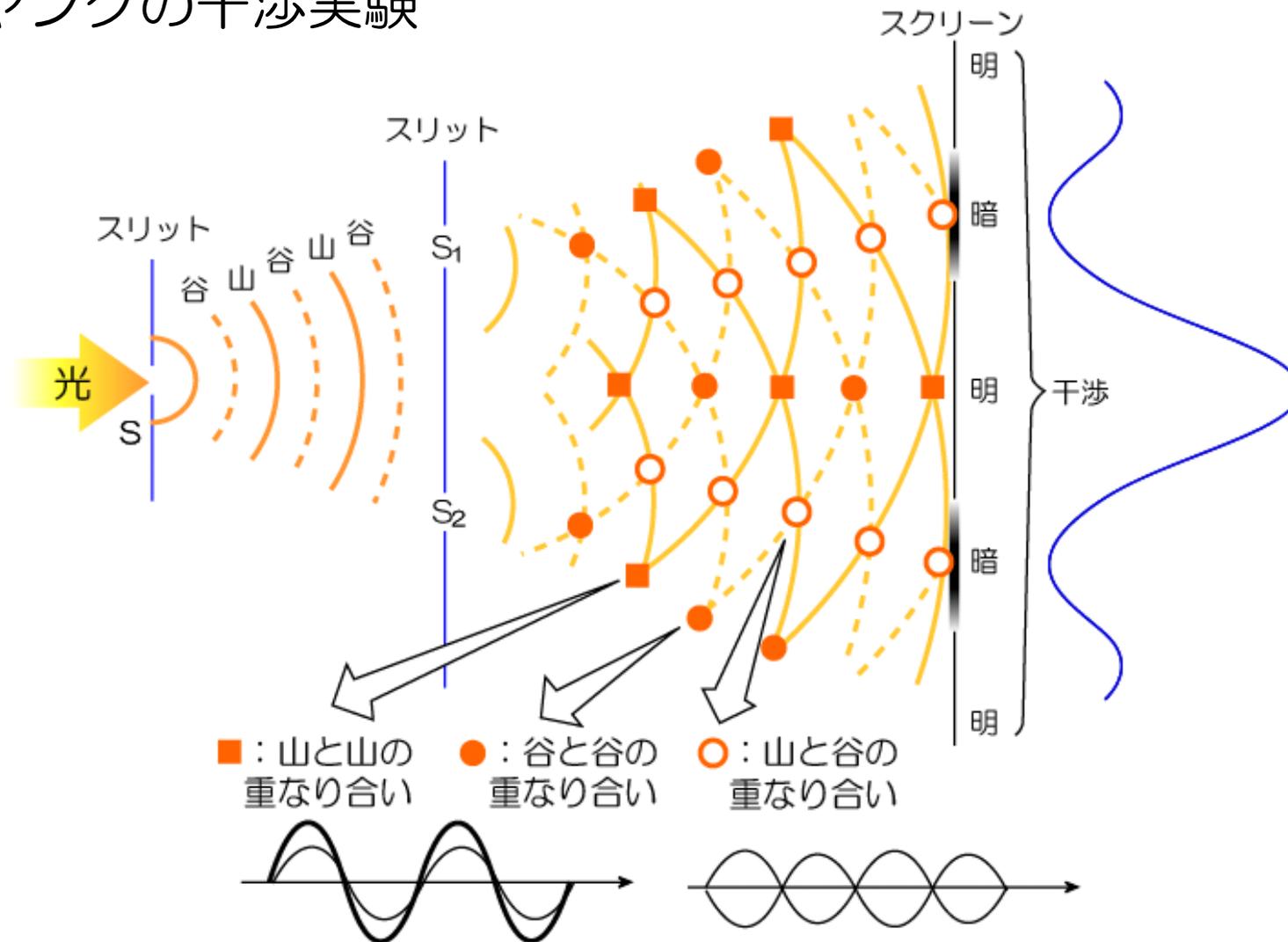
（この飛び出した電子を2次電子と呼ぶ。）

これを繰り返す事によって、電子の数がねずみ算的に増幅される。

これを最後に、陽極から出力抵抗を通して検出する。

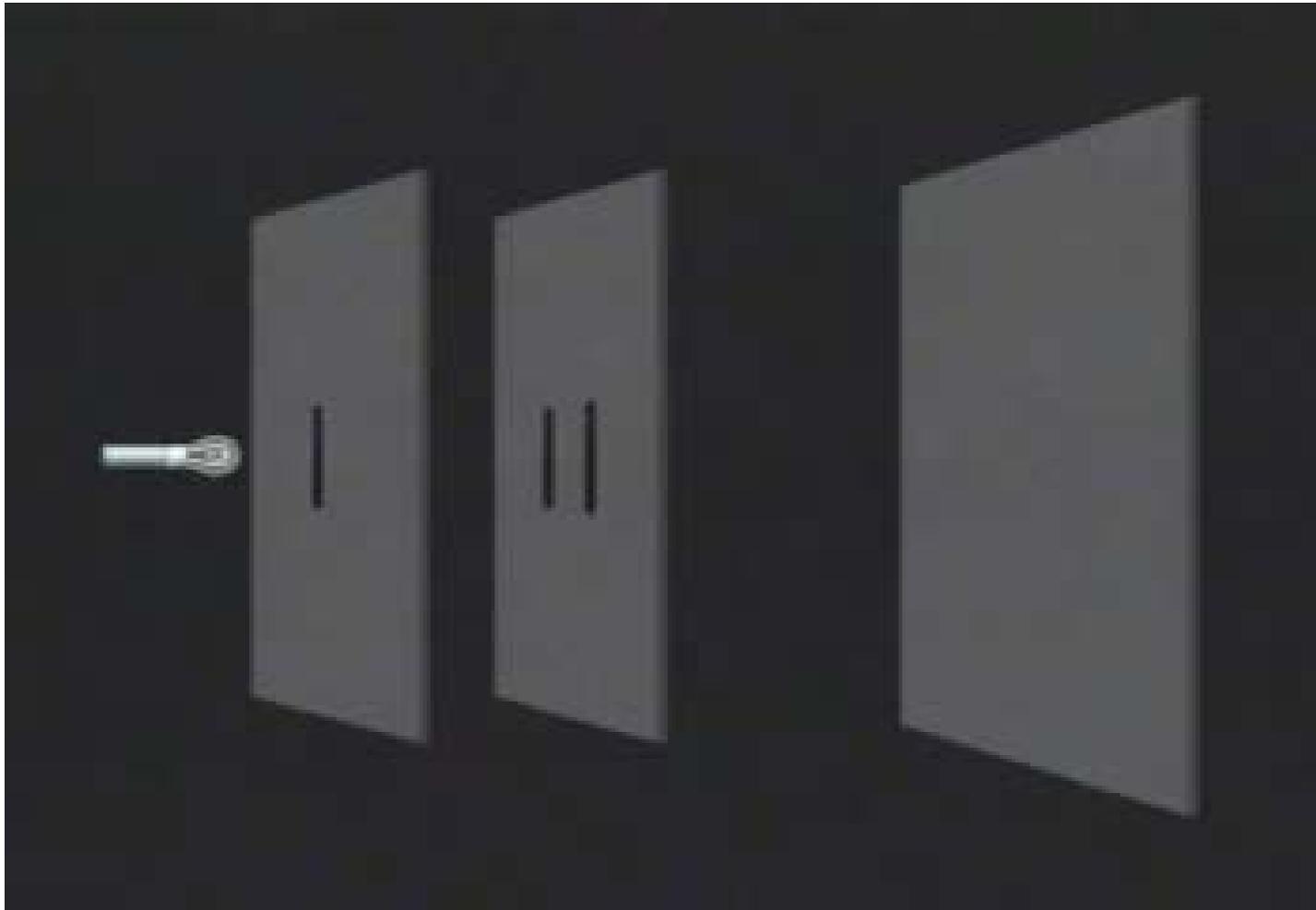
# 光の波動性

## ● ヤングの干渉実験



# 光は波か粒か：光子の干渉

---



# 光子の干渉

---



浜松フォトニクス

# Outline

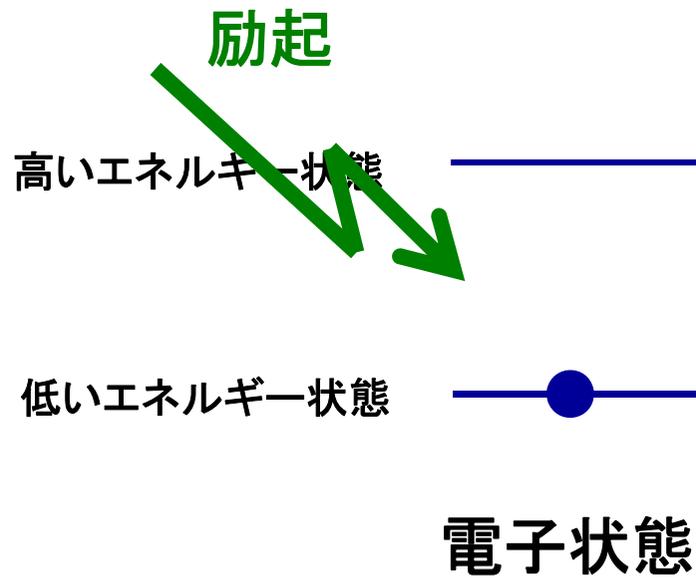
---

- I. 光とは
- II. 光の量子 - 光子
- III. レーザー
- IV. 光を閉じこめる

# 自然放出

---

## ● 自然放出



# 自然放出

---

## ● 自然放出

高いエネルギー状態



光



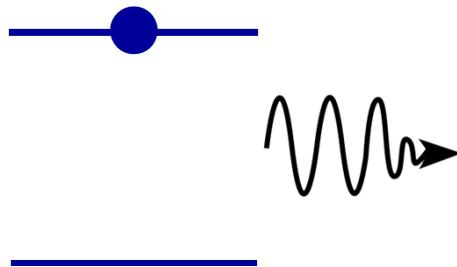
低いエネルギー状態



電子状態

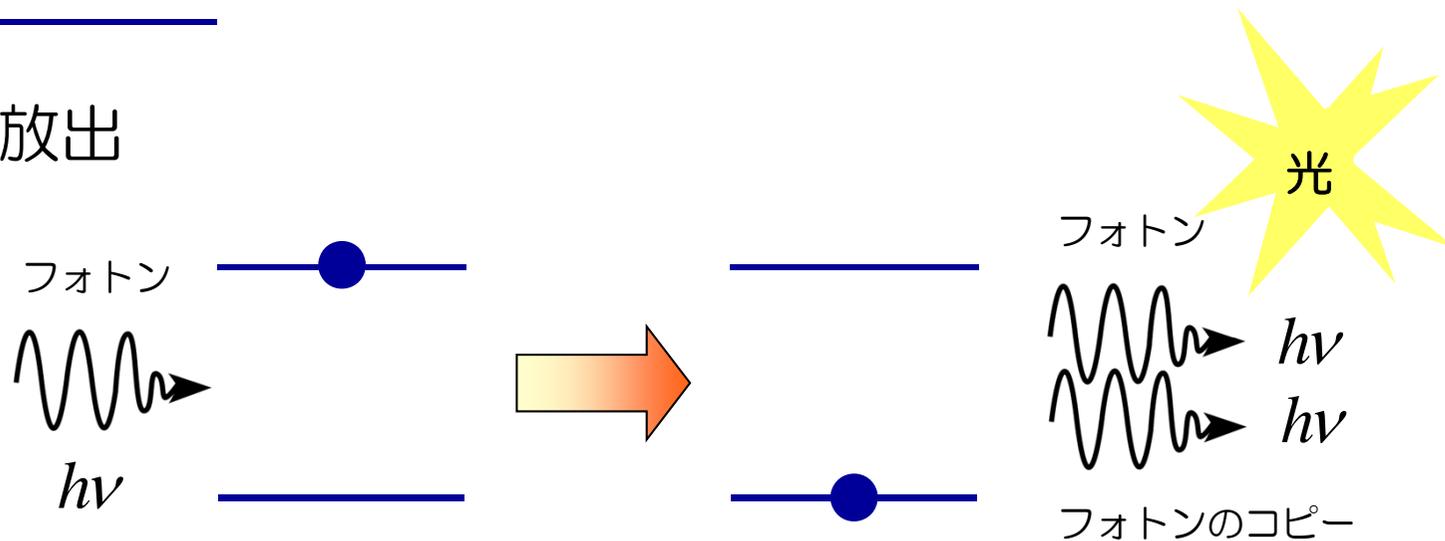
# 自然放出と誘導放出

## ● 自然放出

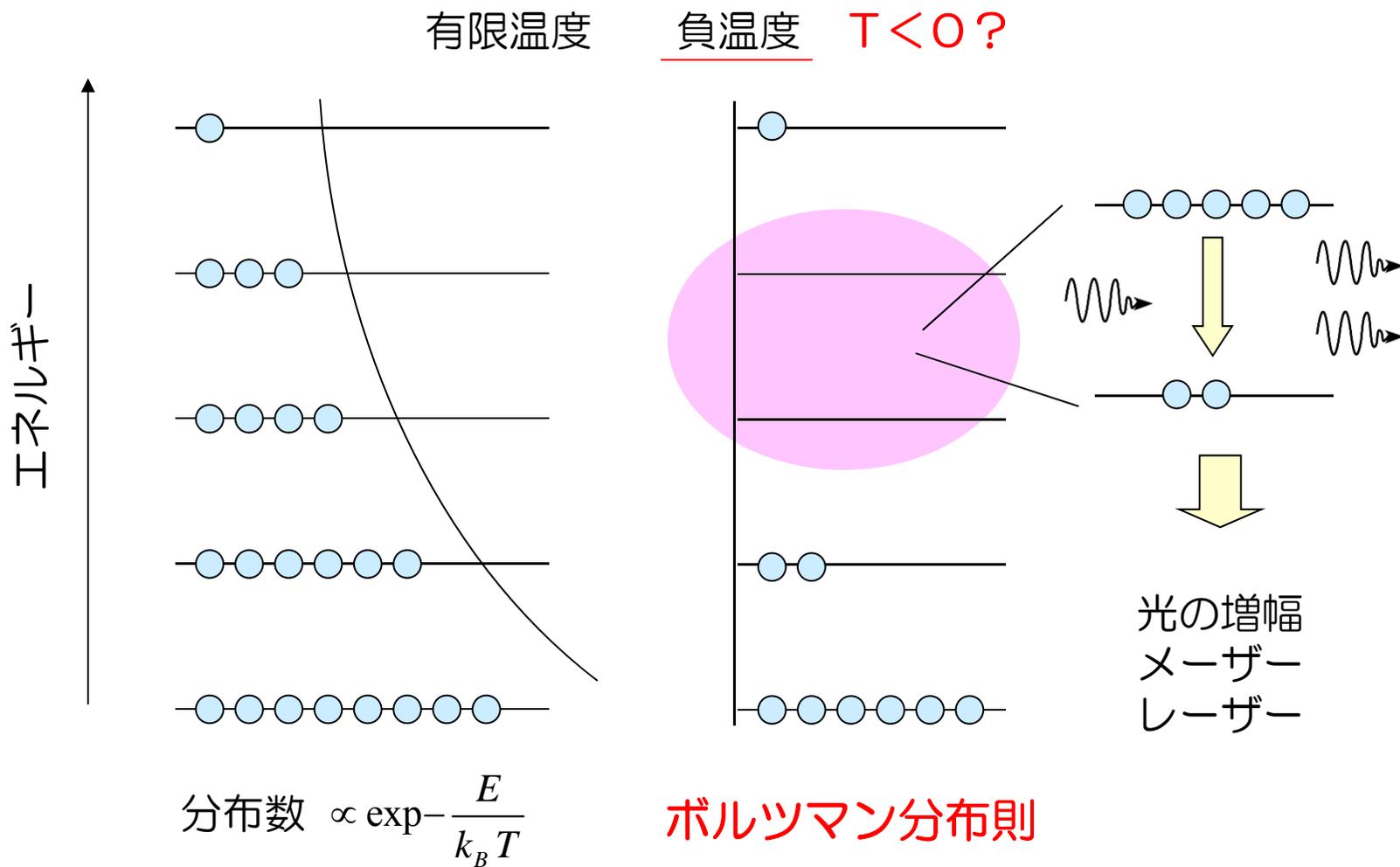


励起状態にある電子は自然に下の状態におちる。  
確率は原子それぞれによって決まっている。

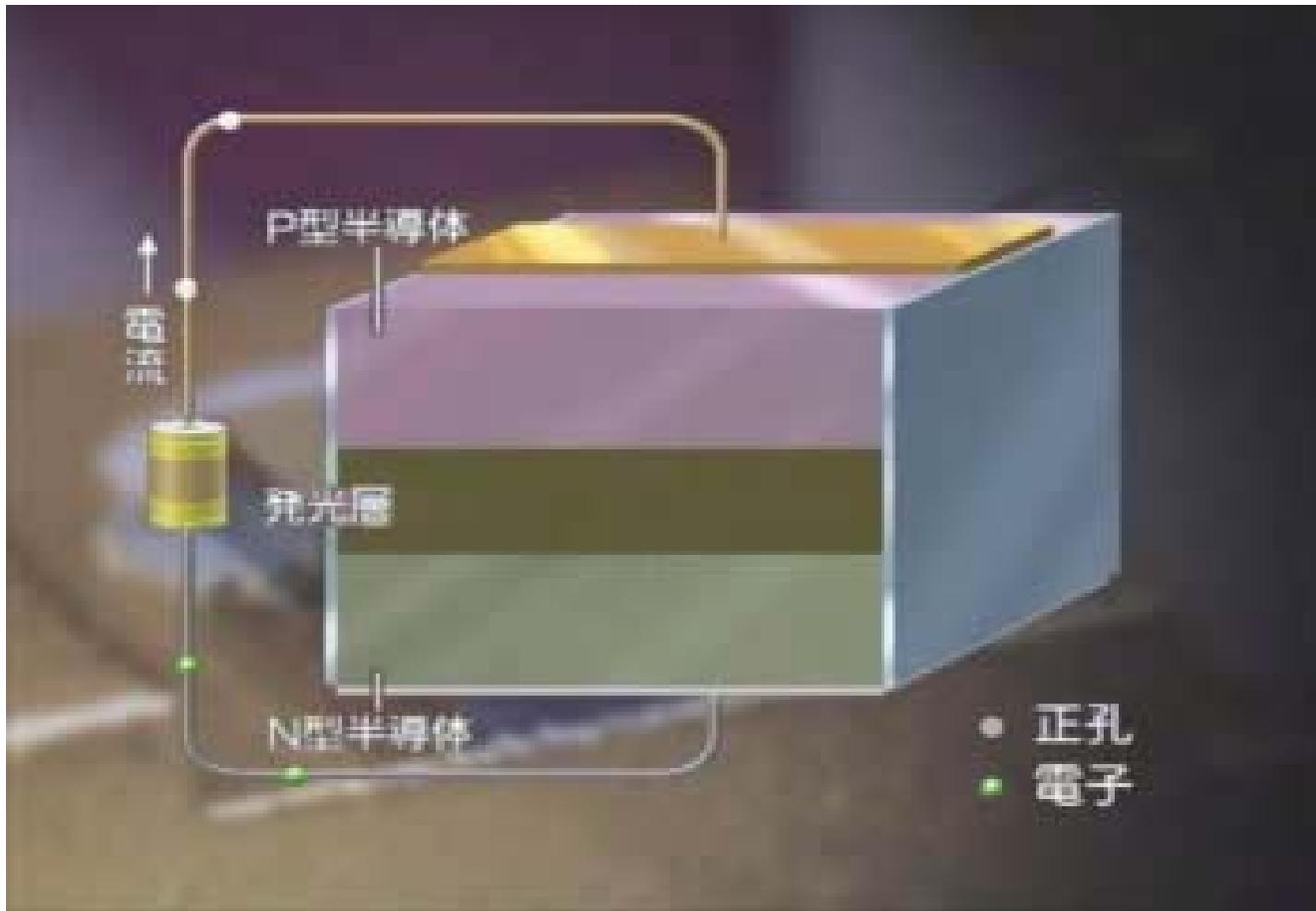
## ● 誘導放出



# 反転分布と負温度状態



# レーザー

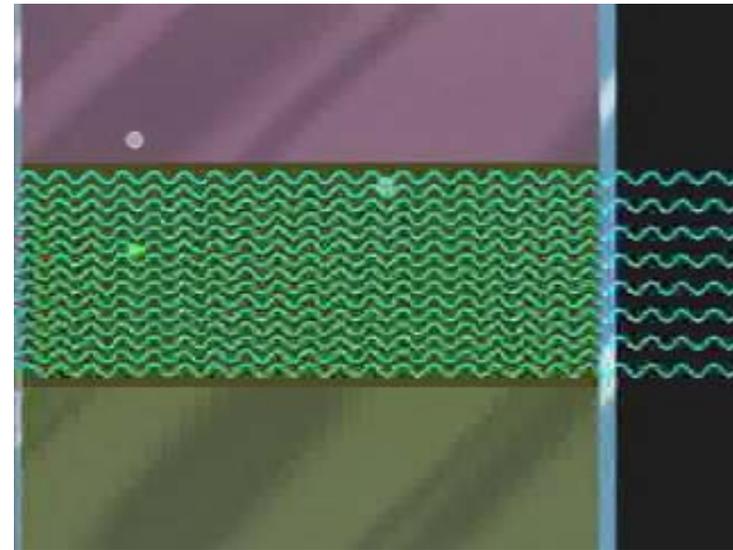
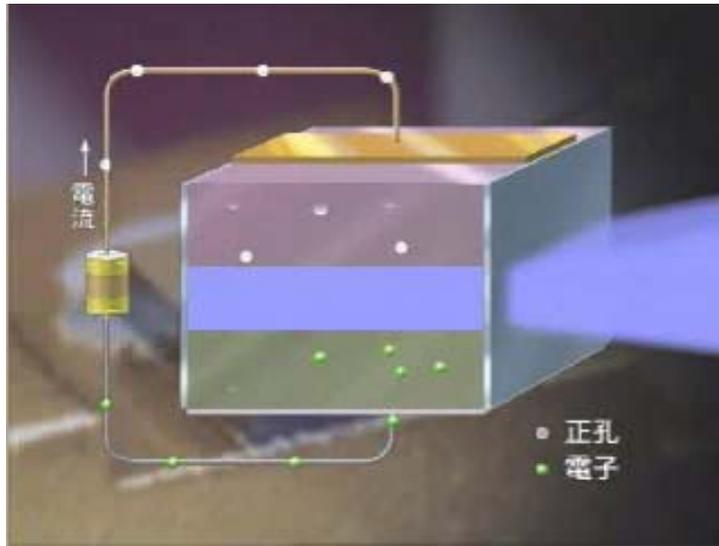


# レーザー

---



# レーザー (1960: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)



## レーザー光

- 広がらない → 望遠鏡
- 強い → レーザー核融合
- 周波数をそろえる → 原子時計
- 時間 → 極超短パルス  $10^{-14}$ 秒  
(化学反応をスローモーションで見る)
- 距離を測る → 天文学

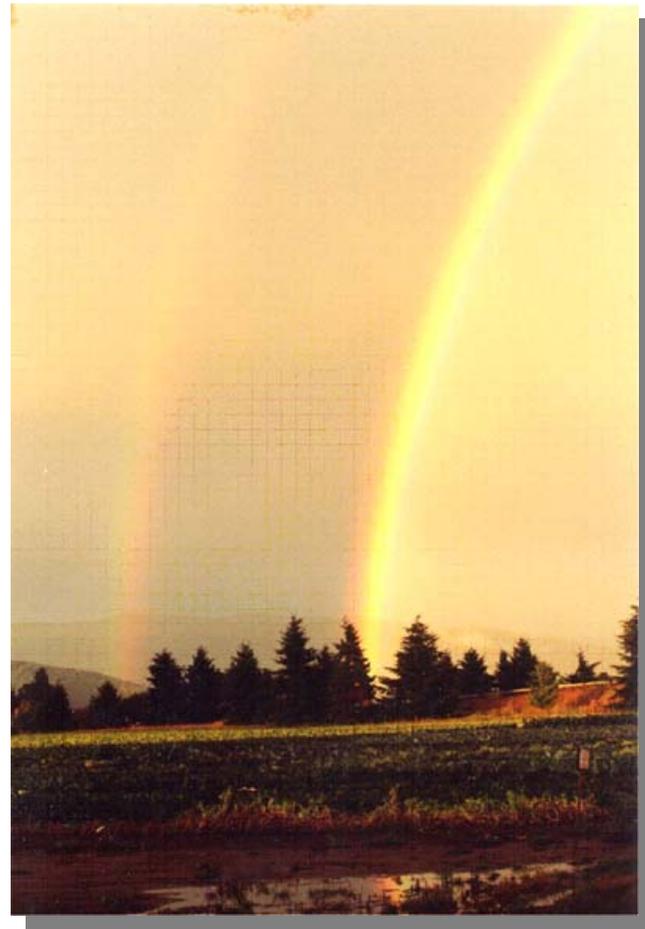
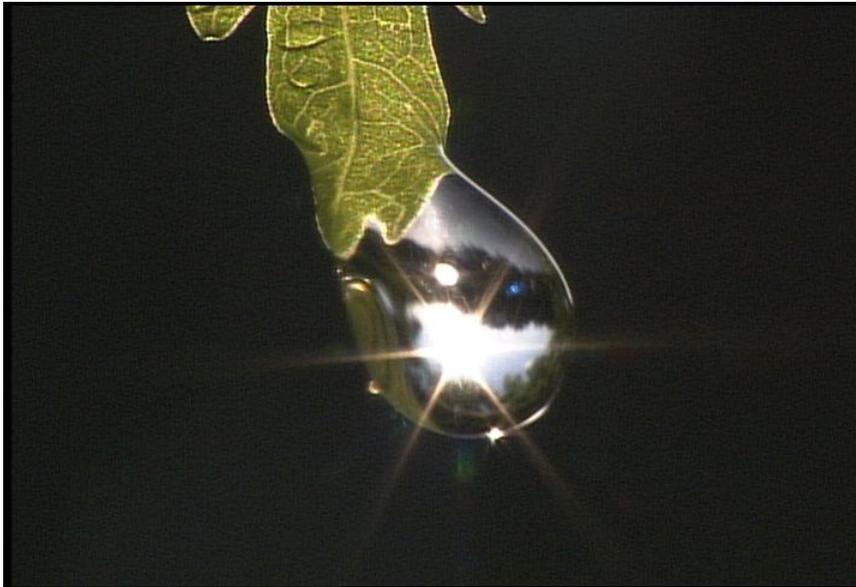
# Outline

---

- I. 光とは
- II. 光の量子 - 光子
- III. レーザー
- IV. 光を閉じこめる

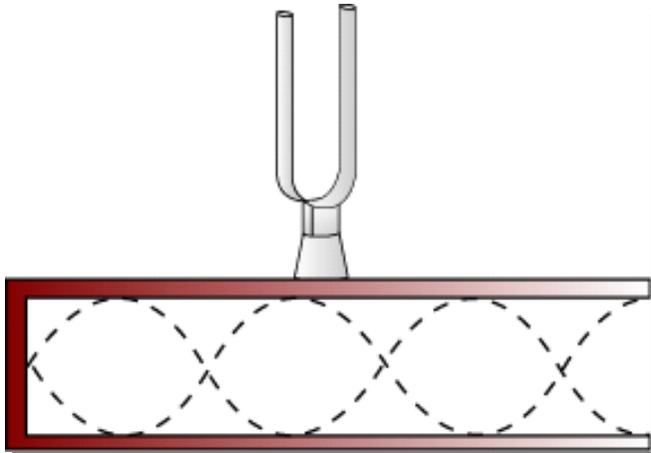
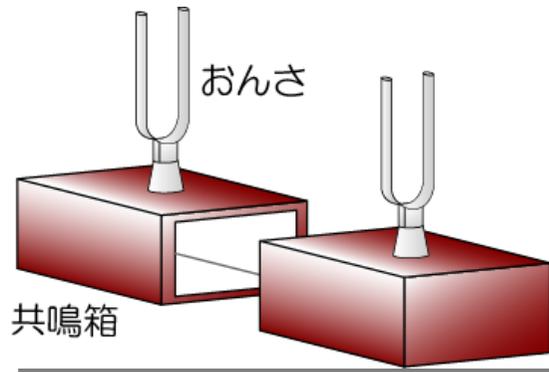
# 微小球の光学

---

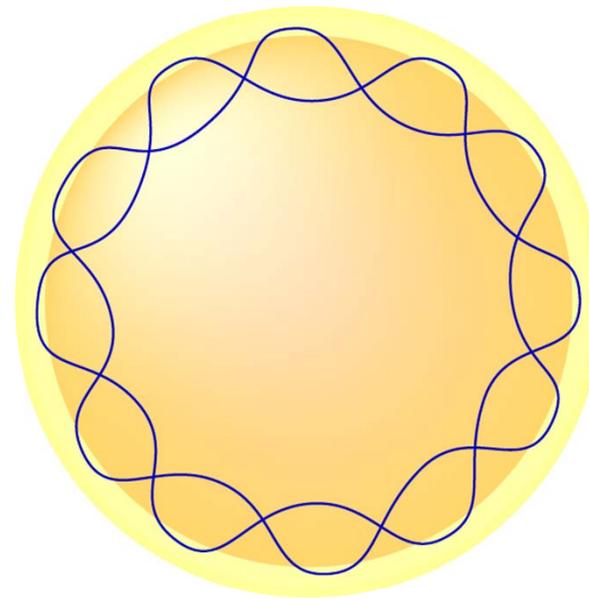


# 音波の共鳴

## ● おんさの共鳴

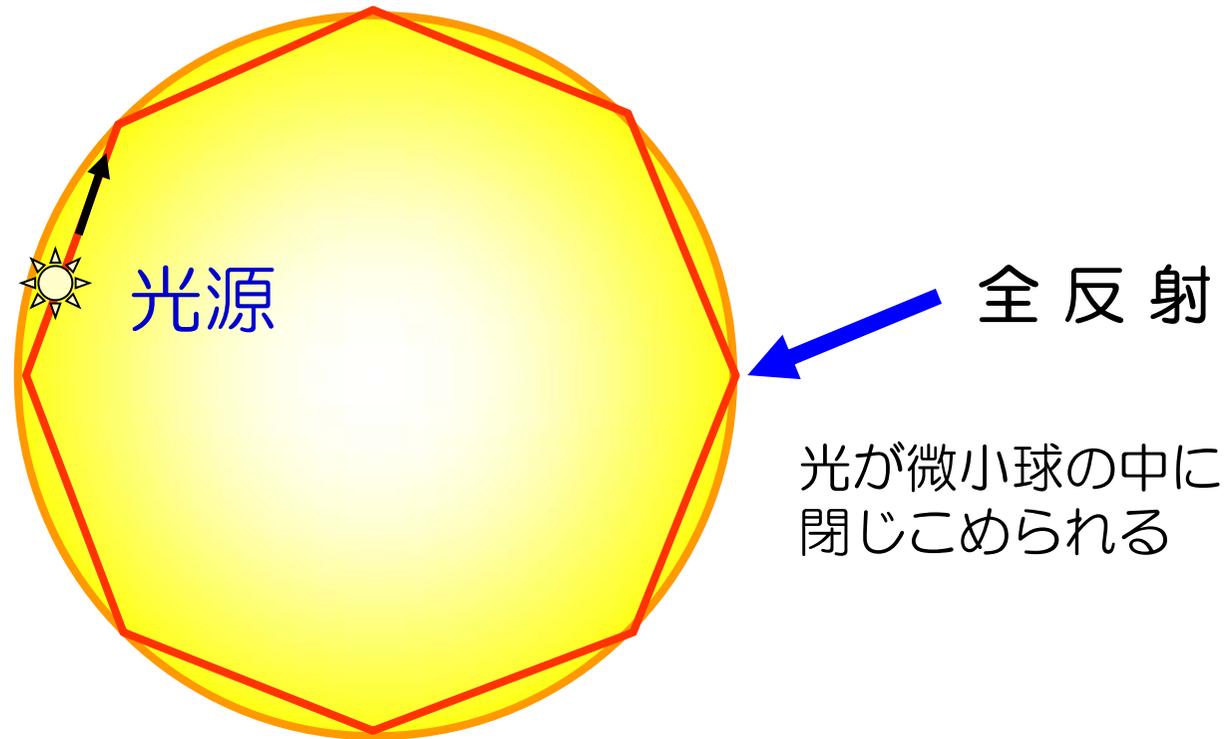


囁きの回廊  
Whispering Gallery



# 光のWhispering Gallery

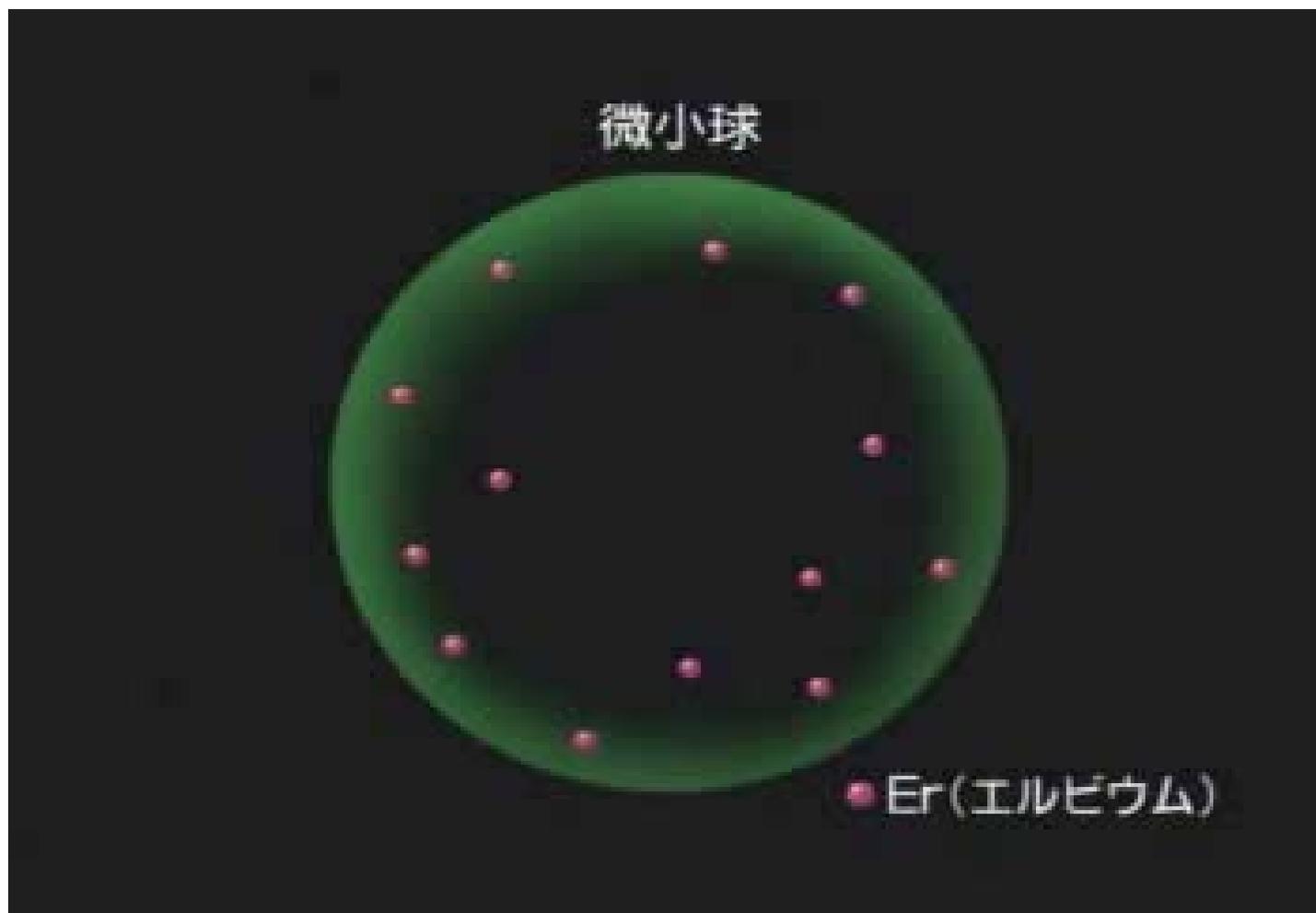
---



音波（波長1メートル）ささやきの回廊（直径30メートル）  
光（波長0.5マイクロン）微小球（直径数マイクロン）

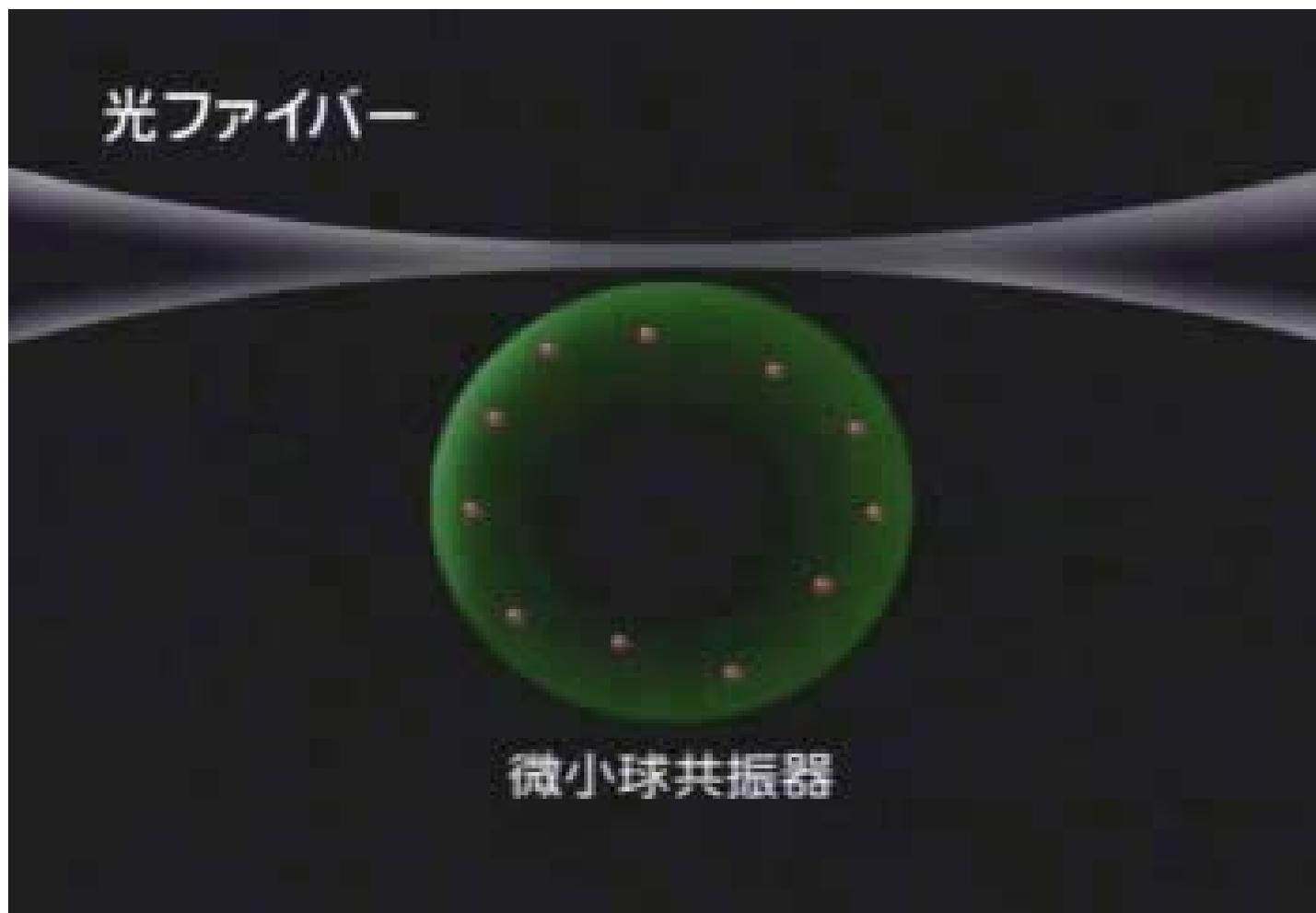
# 微小球に光を閉じ込める

---

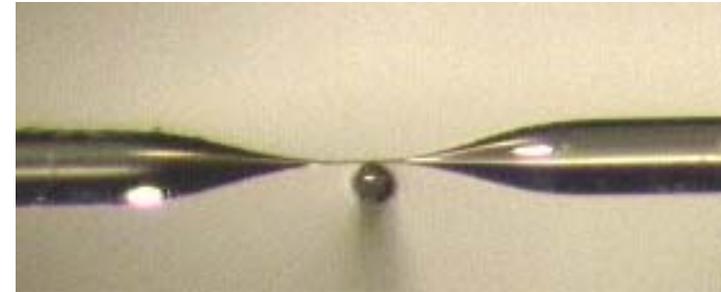
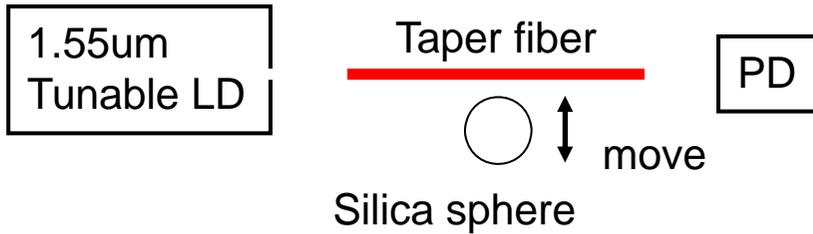


# 微小球に光を閉じ込める

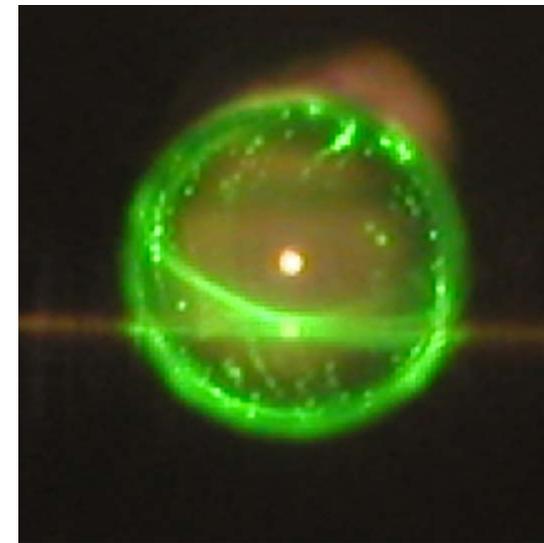
---



# 光ファイバーと微小球の結合



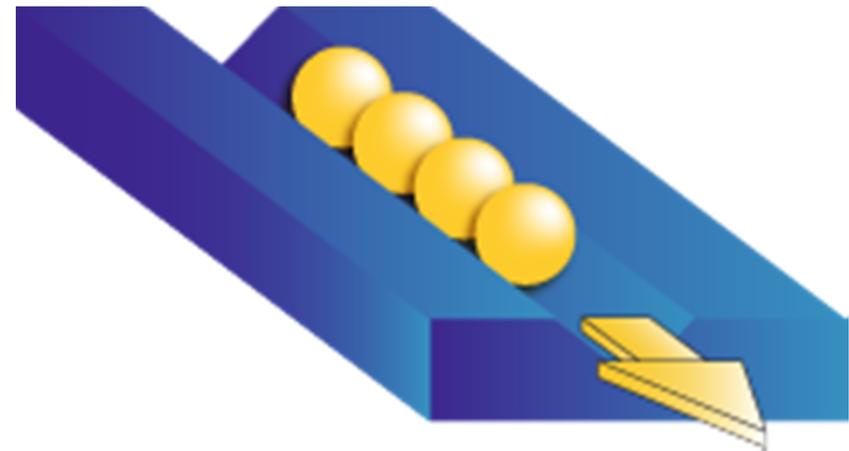
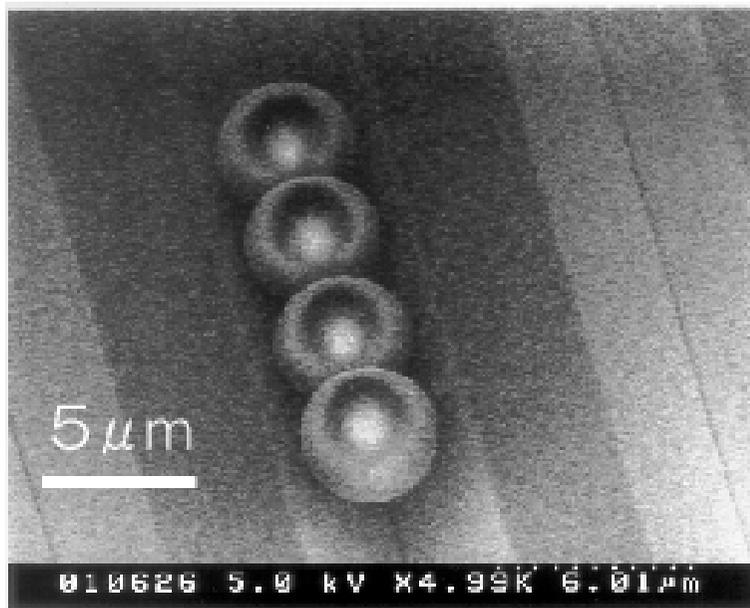
Taper fiber and 80micron-sphere



Fluorescence of Er-doped glass sphere

# フォトニック原子から フォトニックバンドへ

---



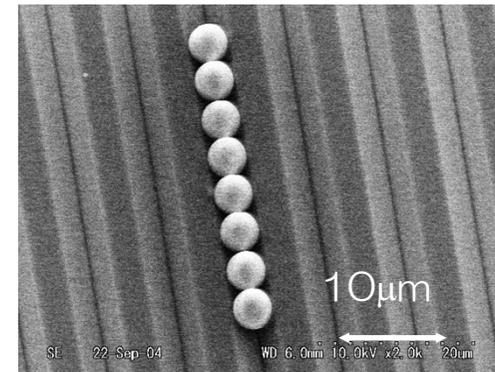
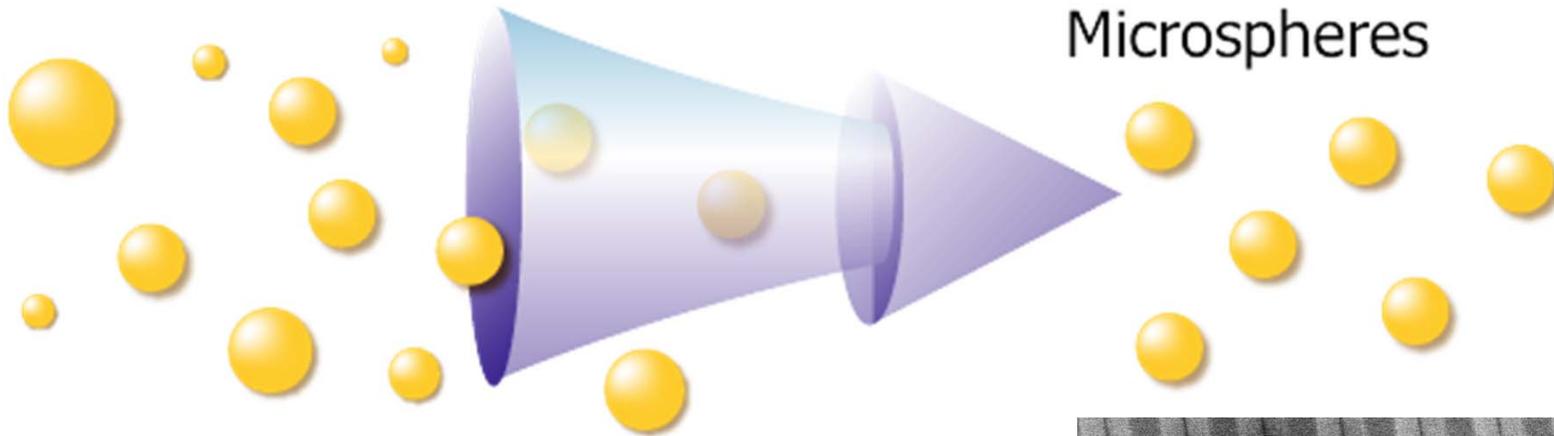
シリコンV溝上の連結微小球  
SEM image

# ナノスケールでサイズを揃えて並べる

直径5ミクロン程度のポリマーの微小球を分光学的な方法でサイズを評価し、サイズのばらつきを2ナノメートル以下に揃えた微小球を集める。

Variance of size; 1%

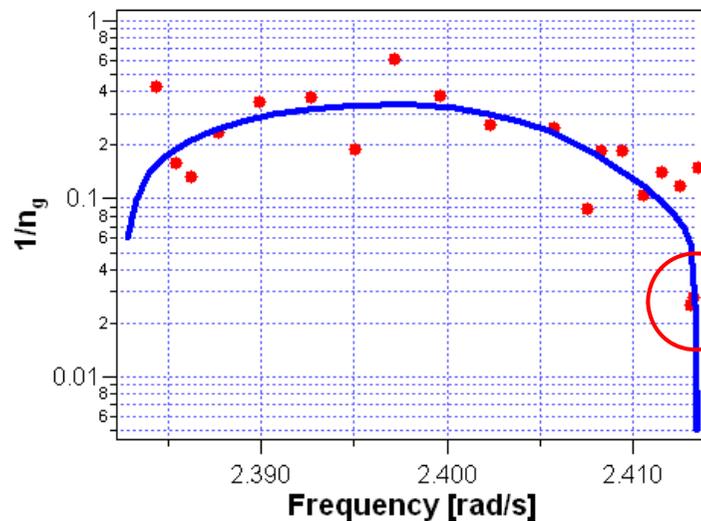
Super Monodisperse  
Microspheres



# 光のスピードをコントロールする



光は球の中で何周も回ってから次の球へ移る



伝わる速度 7500 km/秒

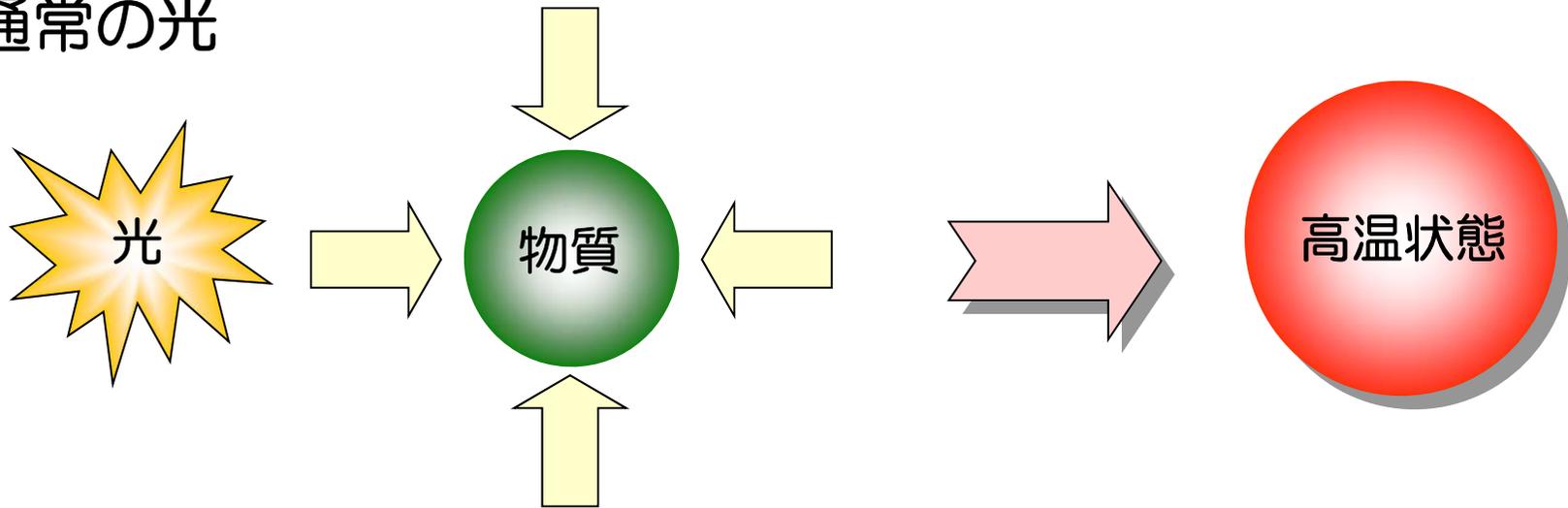
# まとめ

---

- 光とは粒子性と波動性の両方を持つ  
(光の量子 - 光子)
- レーザー…位相の揃った特殊な性質を持つ光
- 微小領域への閉じ込めなど、新しい光の制御方法が研究されている

# 光で物質を冷やす

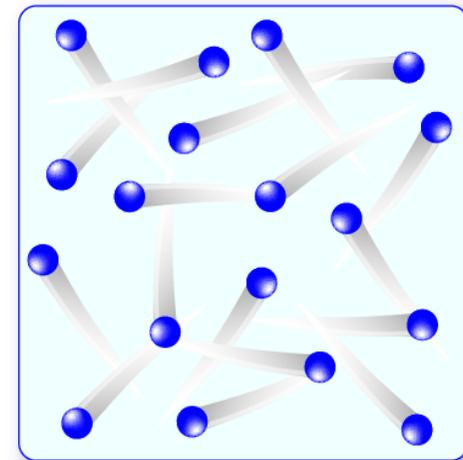
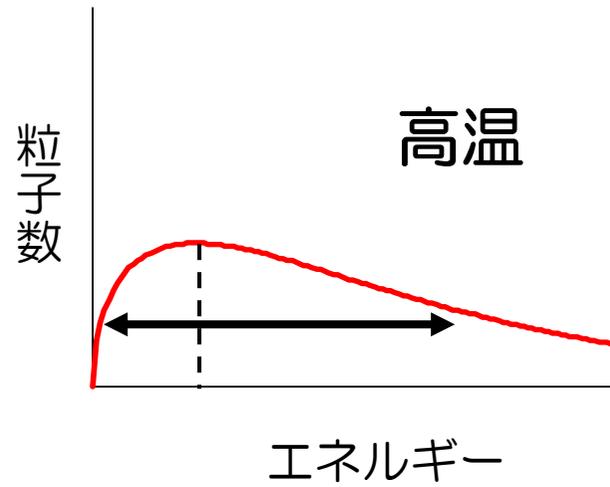
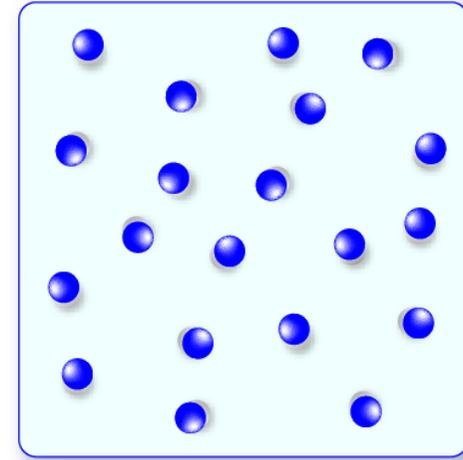
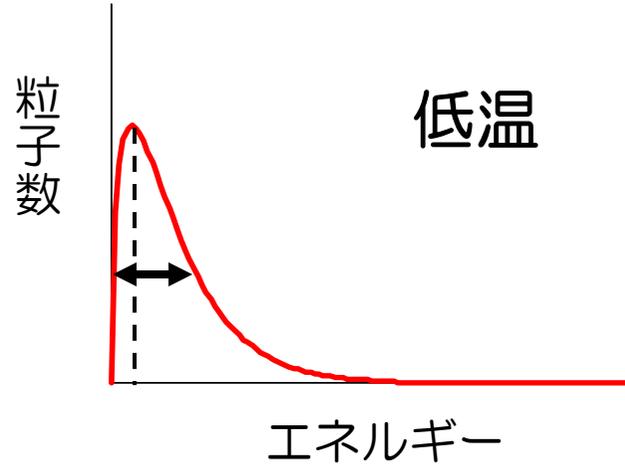
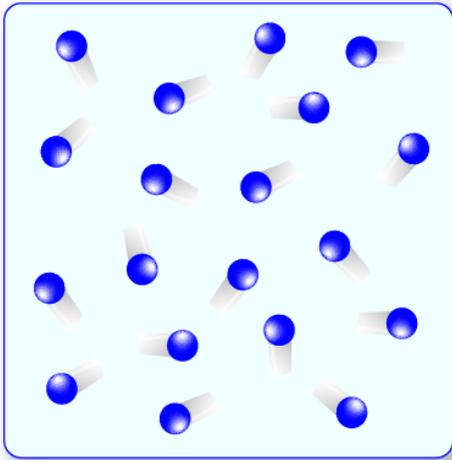
## ● 通常の光



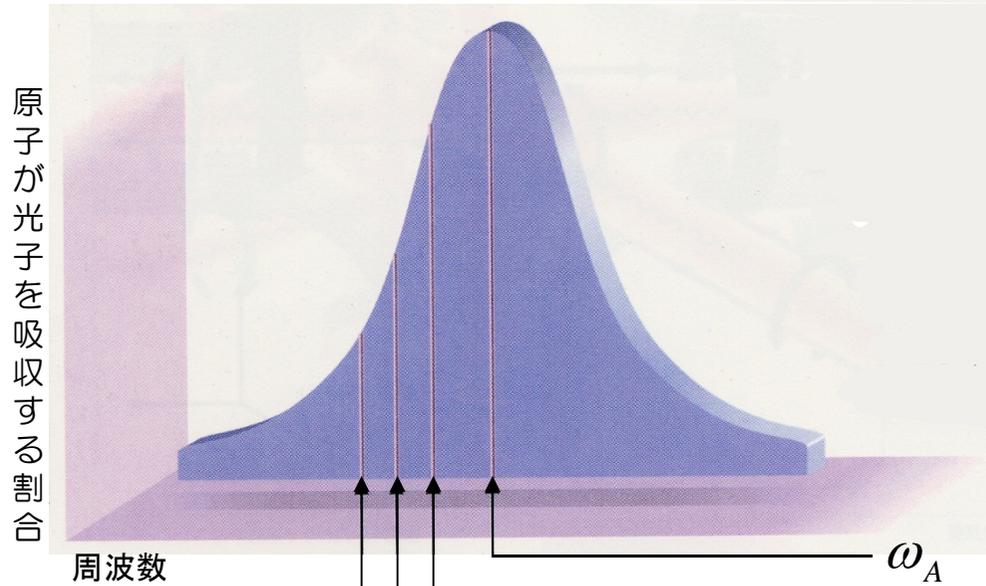
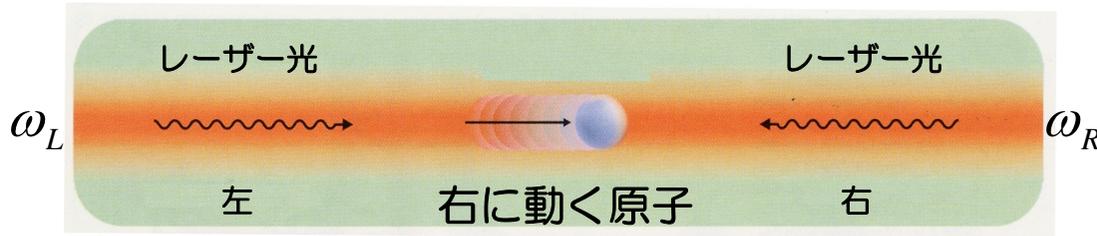
## ● 揃った光



# 温度とは



# ドップラー冷却

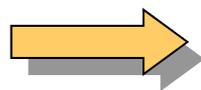


Doppler Shift:

$$\omega_{R,L} = \omega \pm 2\pi v / \lambda$$

$\omega_R$  は共鳴に近づくので  
 $\omega_L$  よりもよく吸収される

$\omega_L$  : 原子が感じる左からの光周波数  
 $\omega$  : レーザー周波数  
 $\omega_R$  : 原子が感じる右からの光周波数  
 $\omega_A$  : 原子の吸収の中心周波数



常に原子に対向する方向の光を吸収  
 原子は冷却される

摩擦力  
 $F = -\alpha v$

# 光による原子の運動制御

レーザー冷却・トラップ法の利用  
( '97 ノーベル物理学賞)

↓  
極低温 & 高密度

↓  
'95 Rb原子のボーズ凝縮  
( '2001 ノーベル物理学賞)

極低温の原子集団



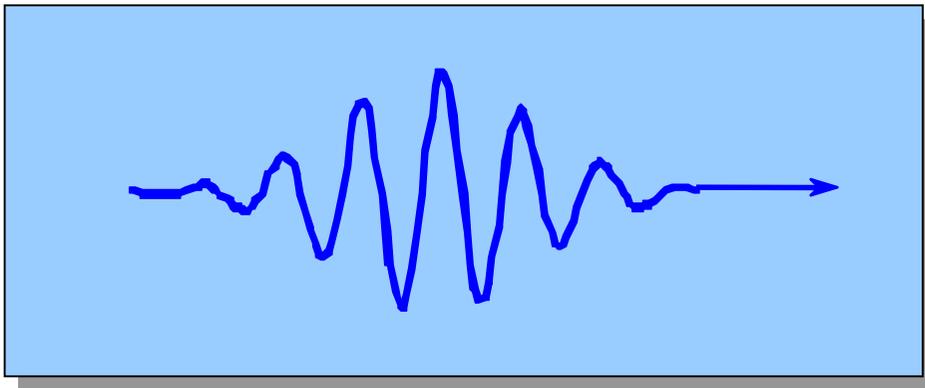
トラップされたCa原子

# 原子波

---

量子力学によれば物質は波動性と粒子性を持つ

ドブロイ波長  $\lambda_{DB} = \frac{h}{p}$



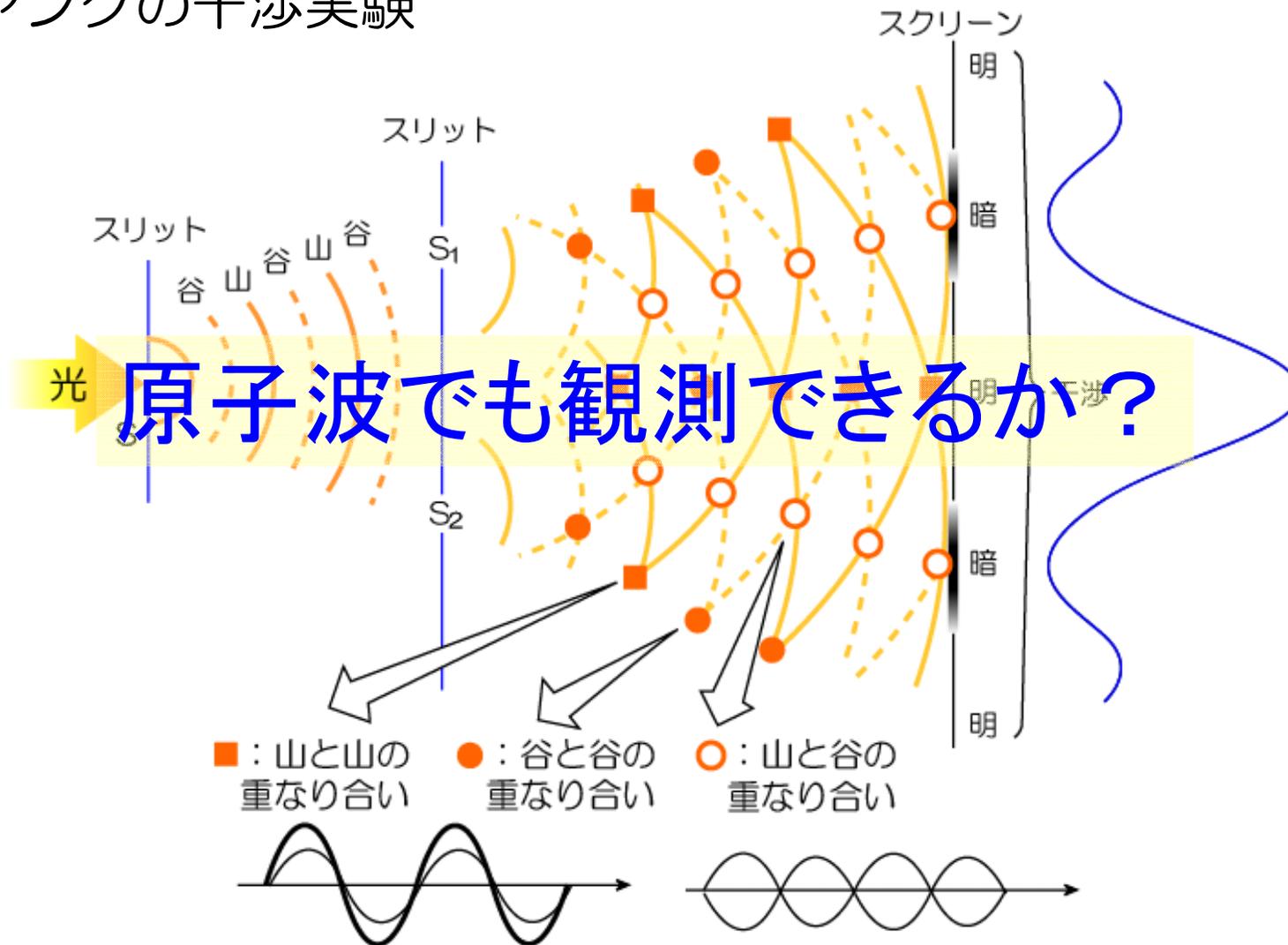
常温 ( $\sim 300K$ )

$$\lambda_{DB} \sim 16 \text{ pm (Rb)}$$

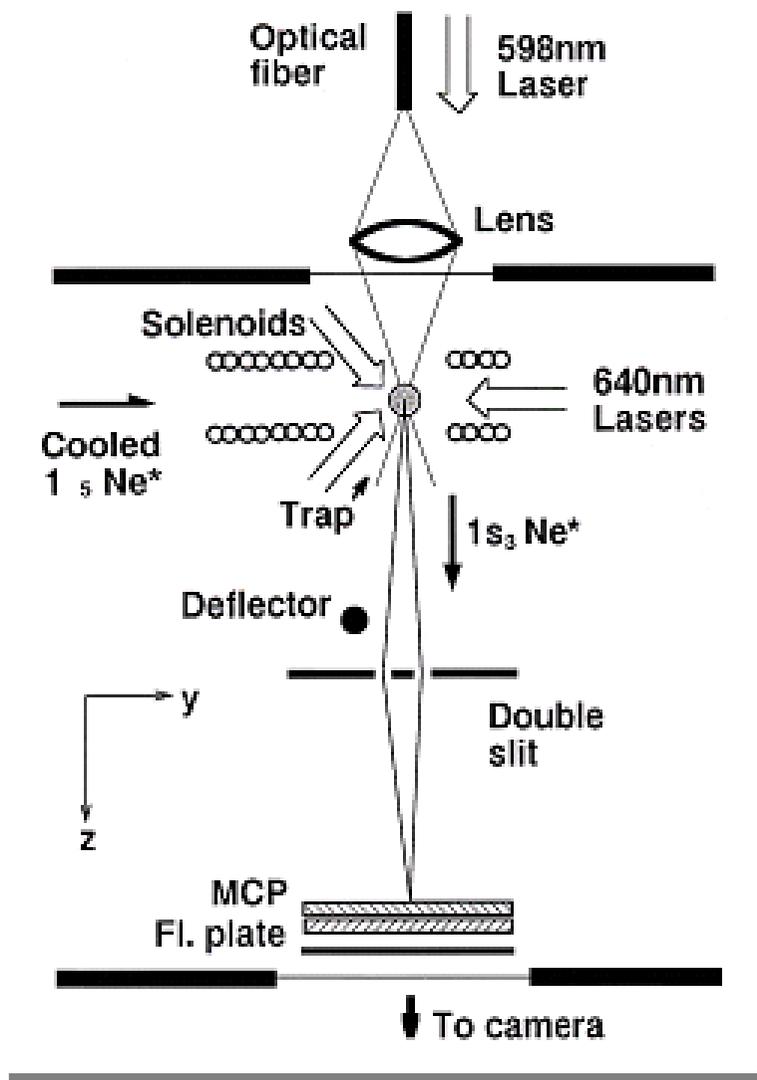
極低温に冷やすことが出来ると  $\lambda_{DB}$  がどんどん長くなる

# 光の波動性

## ● ヤングの干渉実験



# 原子波によるヤングのダブルスリットの実験

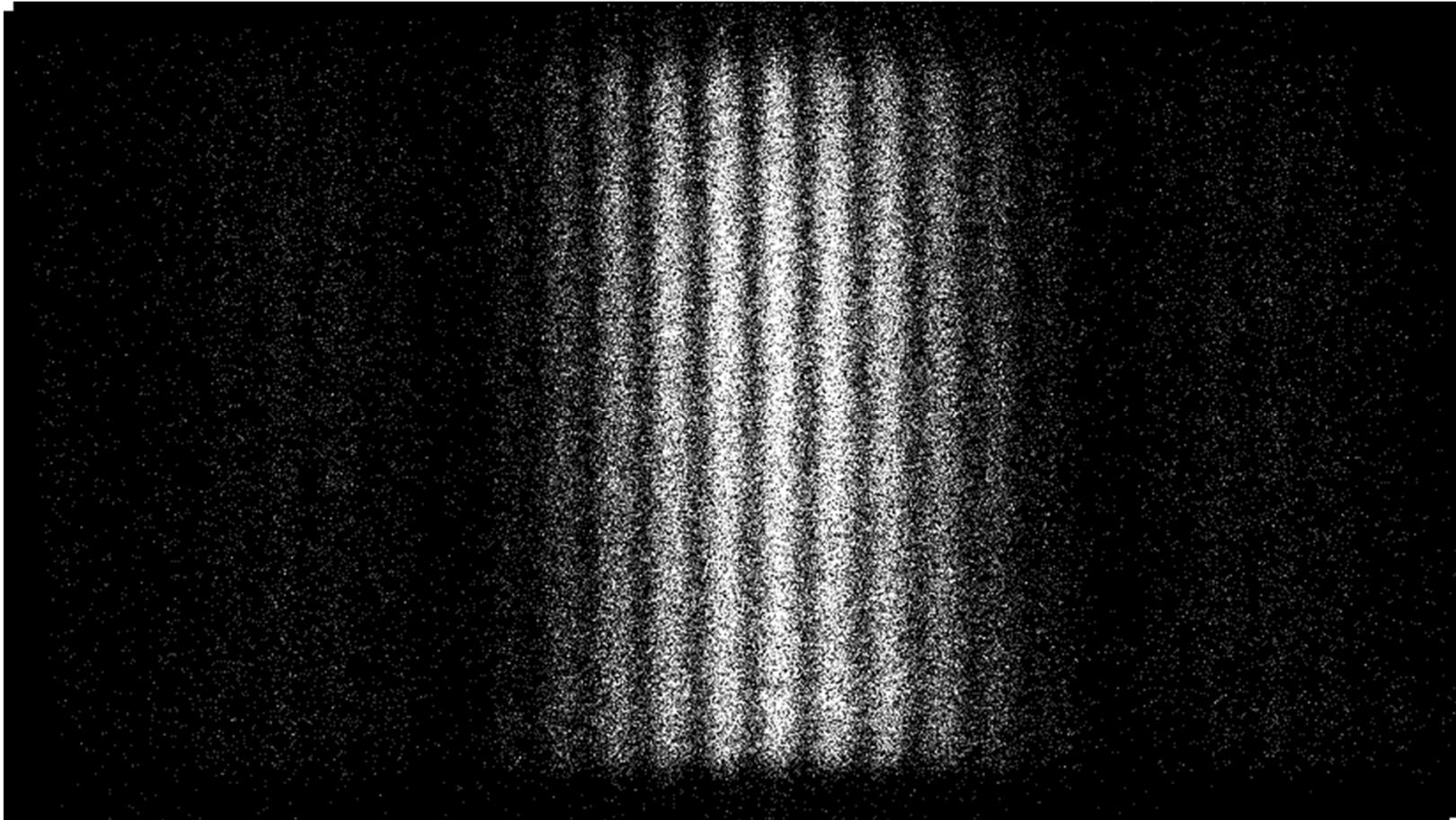


Ne trap

Na、熱的ドブroy波長=8nm  
となるときの温度 2.07mK

# 冷却Ne原子によるヤングの干渉

---



**100,000 atoms**

Double slit interference  
Ne\*(1s<sub>3</sub>) atoms  
de Broglie wavelength of Ne\* at the slit approx. 8nm  
approx. 60cm below the slit  
F.S. Oct. 19, 2003