

物性論2C,3C

光物性: 光と物質の相互作用の研究
(物質の光励起状態)

参考書

櫛田孝司

光物性物理学

小林浩一

光の物理

ロッシ

光学

江馬一弘

光物理学の基礎

齋木・戸田

光物性入門

Yu&Cardona

Fundamentals of Semiconductors(邦訳あり)

工藤恵栄

光物性基礎

事典的

Loudon

光の量子論 第2版 量子光学・非線形光学

霜田光一

レーザー物理入門

服部利明

非線形光学入門

P.A.Cox

固体の電子構造と化学

群論入門 例えば

中崎昌雄

分子の対称と群論

予定

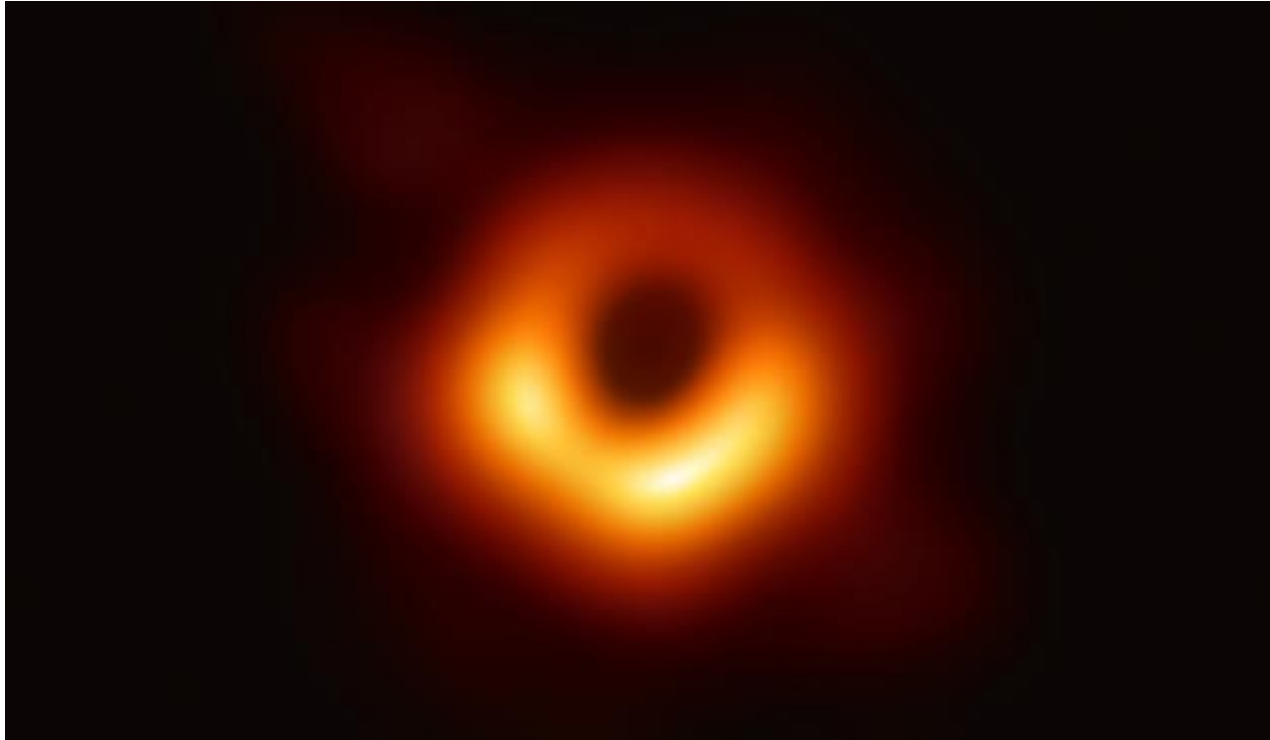
物性論2C

1. ガイダンス、分光スペクトルの単位
2. 複素屈折率と吸収・反射、誘電率の分散の古典論
3. 分極と感受率、振動子強度、屈折率の原因(分極によってなぜ光速は遅くなる?)
4. 静的・光学的誘電率、ポラリトンと群速度、金属反射
5. 応答関数と分散、K-Kの関係式
6. 誘電率の分散の量子論(半古典論)
7. 誘導吸収・放出、自然放出、レーザー
8. 到達度評価試験

物性論3C

1. 分子の電子状態と光学遷移
2. 分子軌道法、多原子分子(1準位同種原子)
3. 結晶の電子状態と光学遷移、2準位異種2原子分子の周期配列
4. バンド間遷移の選択則、吸収係数
5. 分子構造と吸収スペクトル
6. 電子格子相互作用、蛍光と燐光
7. 赤外吸収とラマン散乱 非線形光学

史上初、ブラックホールの撮影に成功 — 地球サイズの電波望遠鏡で、楕円銀河 M87に潜む巨大ブラックホールに迫る



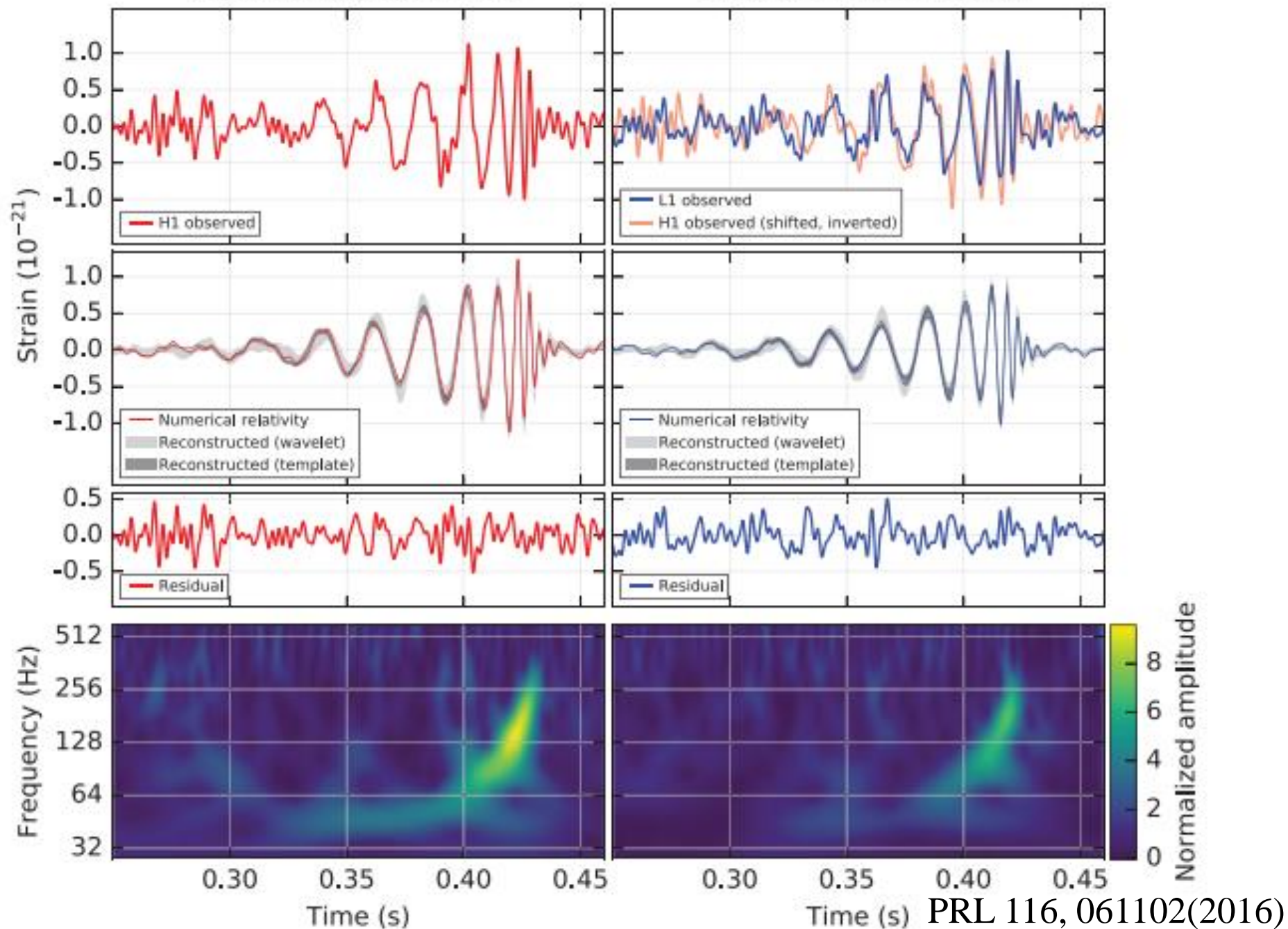
波長1.3mm
の電波

2019年4月

APEX(チリ)、アルマ望遠鏡(チリ)、IRAM30m望遠鏡(スペイン)、
ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡(米国ハワイ)、
アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡(メキシコ)、
サブミリ波干渉計(米国ハワイ)、サブミリ波望遠鏡(米国アリゾナ)、
南極点望遠鏡(南極)

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



The initial black hole masses are
 $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$,
and the final black hole mass is
 $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$,
with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated
in gravitational waves.

2016年2月

$h=10^{-21}$ の時空の歪みを検出するとは

地球-太陽間の距離

約1億5000万キロメートル $\doteq 10^{11}$ m

に対し、

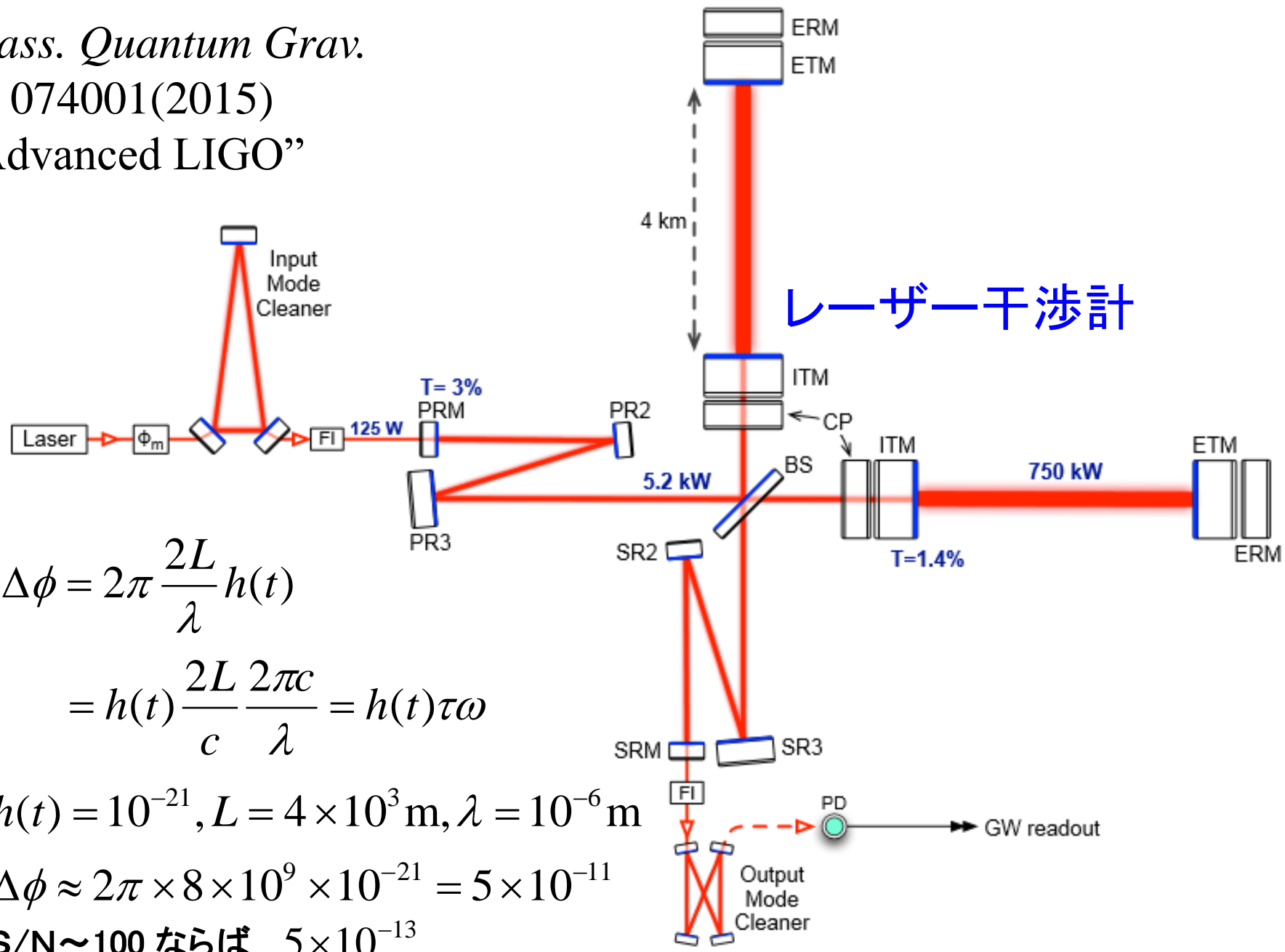
水素原子の直径 10^{-10} m = 0.1 nm

の変位を検出

Wavelength of visible light 10^{-6} m

Atomic diameter 10^{-10} m

Nuclear diameter 10^{-15} m



レーザー干渉計

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{2L}{\lambda} h(t)$$

$$= h(t) \frac{2L}{c} \frac{2\pi c}{\lambda} = h(t) \tau \omega$$

$$h(t) = 10^{-21}, L = 4 \times 10^3 \text{ m}, \lambda = 10^{-6} \text{ m}$$

$$\Delta\phi \approx 2\pi \times 8 \times 10^9 \times 10^{-21} = 5 \times 10^{-11}$$

S/N ~ 100 ならば 5×10^{-13}

LIGO

- 目的
 - Initial LIGO: 基本技術の実証、可能なら重力波検出
 - Advanced LIGO: 重力波の初検出
- 現状: Initial LIGOからAdvanced LIGOへの改造中
- 総予算: 約1,000億円 (Advanced LIGOを含む)
- LIGO Scientific Collaboration
 - 研究機関: 約100
 - 研究者: 約1,000名
- NSFの強力なサポート

重力波検出の原理と世界各国の検出器
by 川村静児

$$\begin{array}{l} \text{LIGO} \\ 1000\text{億円} \end{array} = 50000 \times \begin{array}{l} \text{徳永研干涉計} \\ 200\text{万円} \end{array}$$

質問(光と物質の相互作用)

なぜ吸収、屈折、反射、散乱が起こるのか？

空が青く、雲が白いのはなぜ？

透明な物質が1より大きい屈折率を持つのはなぜ？

なぜ色により屈折率に違いが出るのか？

1より大きい屈折率でなぜ光速は真空中よりも遅くなる？

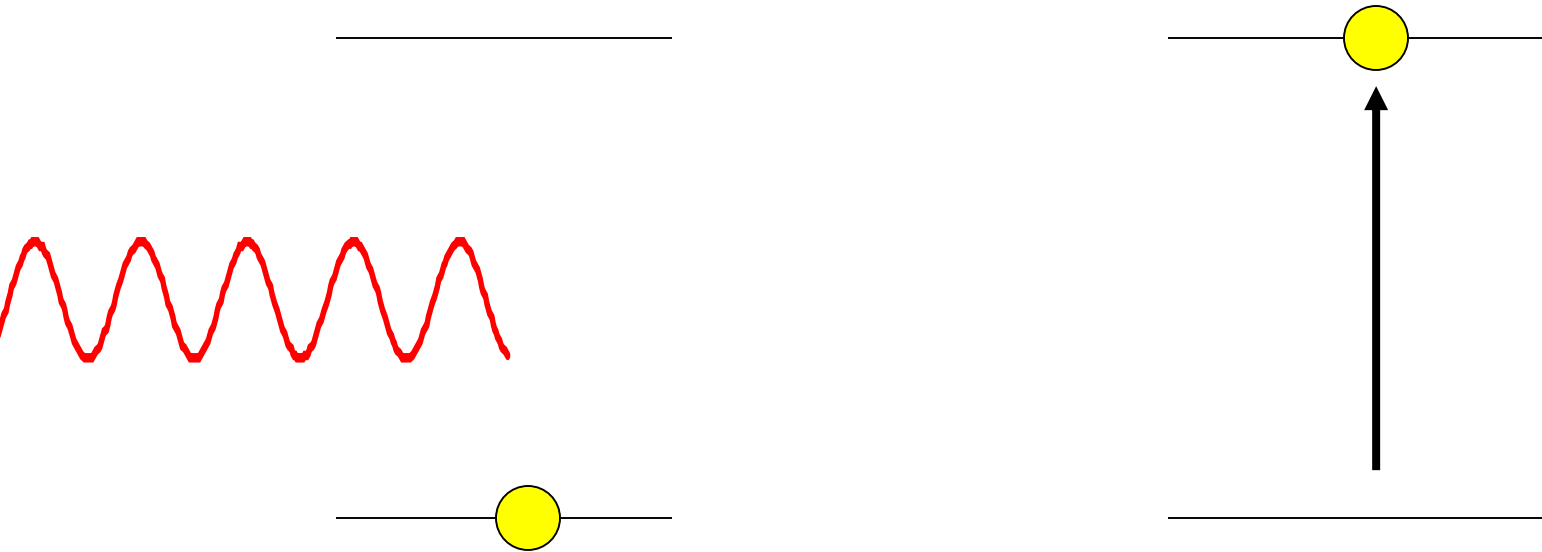
量子力学では光子の吸収により電子が基底状態から励起状態へ不連続に遷移する。古典的には電磁波が物質中の電子を振動させることにより電磁波の吸収が起こる。この2つの描像の関係は？

二酸化炭素、水蒸気が温室効果ガスなのはなぜ？

レーザー光はどのように発生する？なぜ普通の発光と違うのか？

(なぜ光通信が大容量データ通信に有利なのか？)

量子力学では



これは何を意味する？ 何が保存？

古典的には光は電磁波

電磁波と物質の相互作用は？

光と物質の相互作用

光磁場の効果は？ 小さい

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$$

$$\mathbf{E}, \mathbf{B} \propto e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad \mathbf{B} = \frac{k}{\omega} \mathbf{E} \approx \frac{E}{c}$$

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\text{第1項 } q\mathbf{E} \quad \text{第2項 } q\frac{\mathbf{v}}{c} \mathbf{E}$$

質問(光と物質の相互作用)

吸収の強さは何で決まる？

分子構造から分子の吸収スペクトルを予測できるか？

関連:半導体の伝導帯、価電子帯の波動関数はどうなっている？

特定の原子、分子を並べて結晶を作ると、結晶のバンド構造にもとの原子・分子の軌道(波動関数)の性質がどのように反映されるか

植物が緑なのはなぜ？

光学顕微鏡の空間分解能が光の波長で制限されるのはなぜだろうか？
光を使った回折限界を超える超解像とは？

近接場光とは何か？近接場光を使った超解像とは？

光を止めることができる？これはどういう性質の光なのだろうか？

光と物質の線形相互作用

吸収

植物の緑

反射

金属光沢

全反射

宝石の輝き

屈折

蜃気楼

分散

虹

散乱

青い空、白い雲

レーザー、ラマン散乱

回折

タマムシ・モルフォ蝶の羽の色

干渉

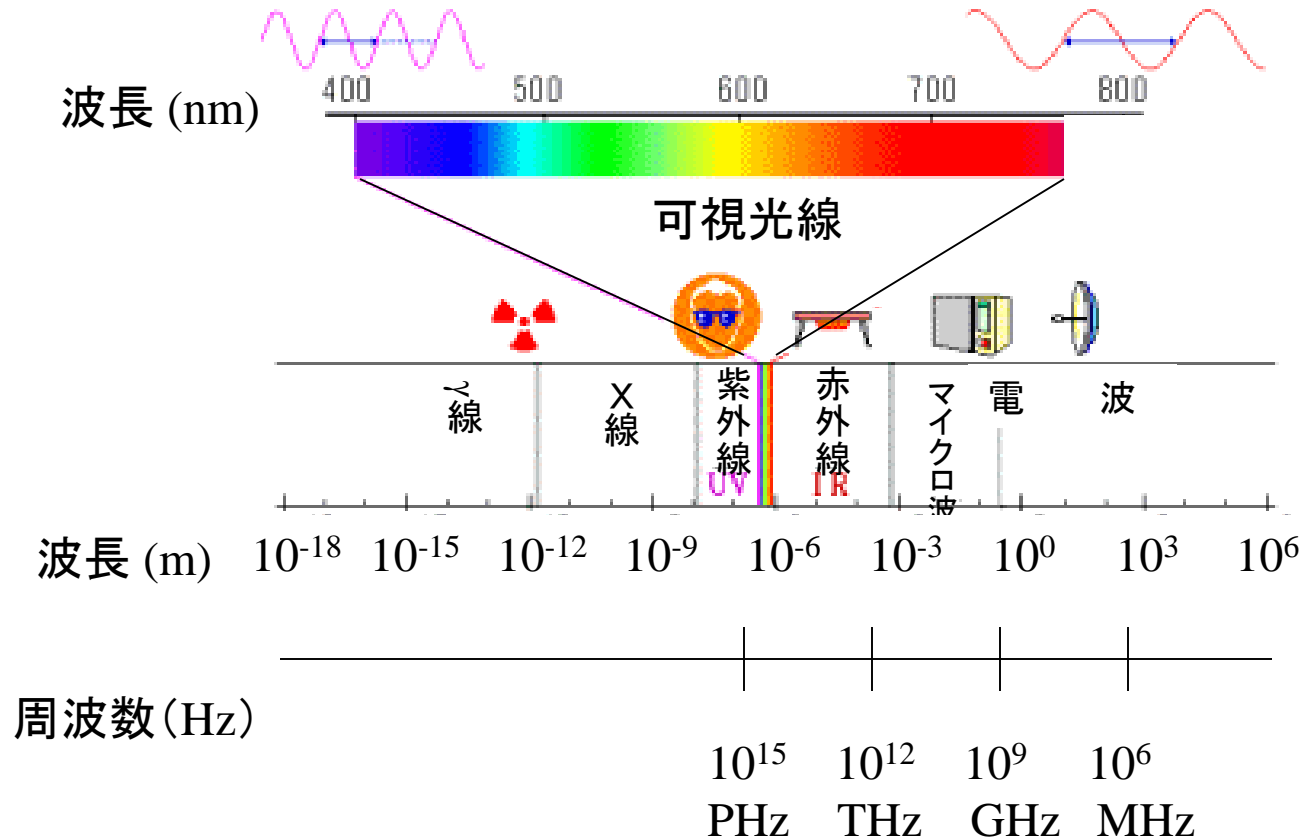
虹色のシャボン玉

発光

蛍の光

蛍光、燐光

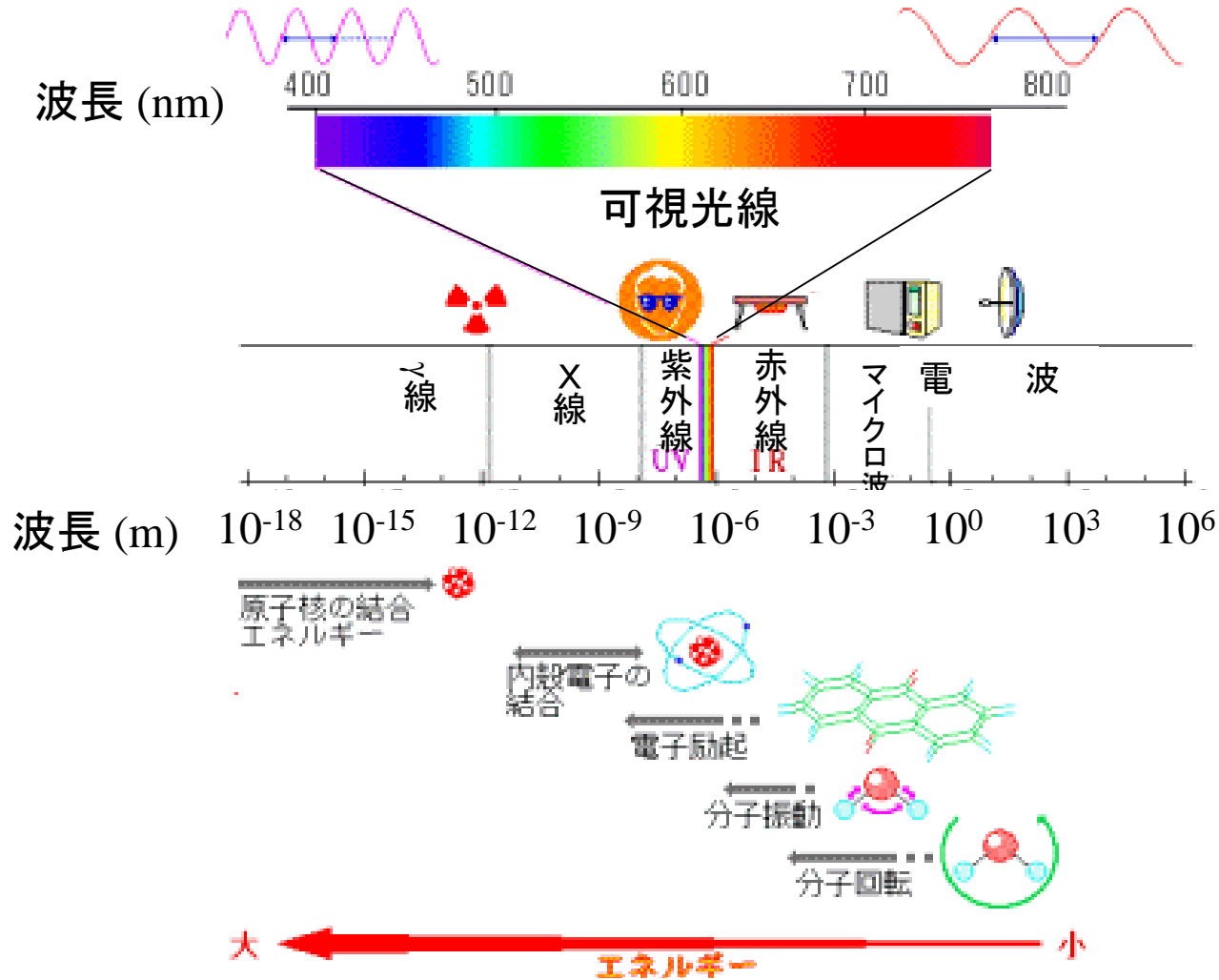
電磁波（光）の波長とエネルギー



$$10^{-6}\text{m} = 1\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

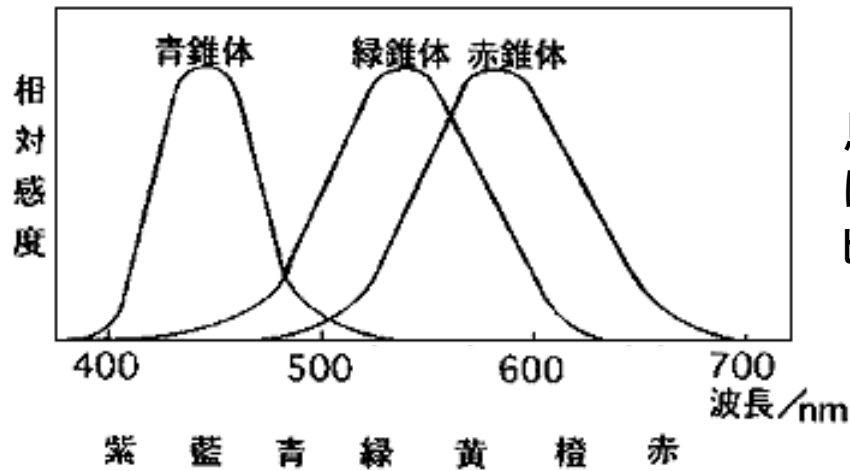
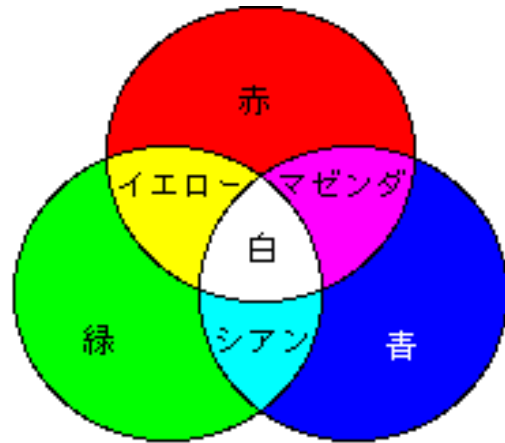
電磁波（光）の波長とエネルギー



$$10^{-6}\text{m} = 1\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

光の三原色



鳥類,トカゲ,魚 4タイプの視物質 4色型色覚
ほとんどの哺乳類 2種類の視物質
ヒトを含めた霊長類の一部 例外的に3色型色覚

光の自由度とコヒーレンス

強度、振幅、光子数

周波数、位相

運動量(縦運動量)

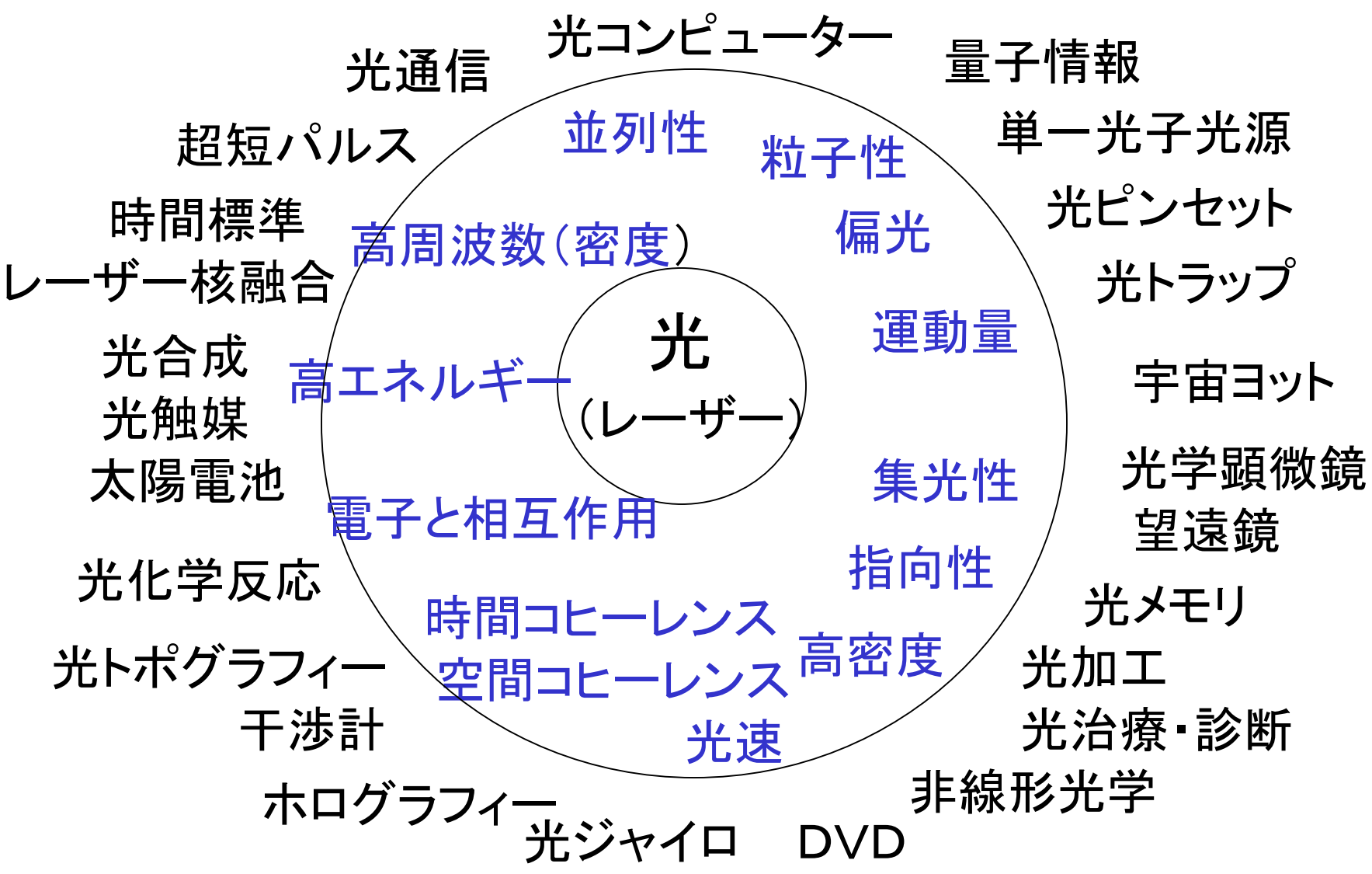
角運動量(軌道角運動量、横運動量)

偏光(スピン角運動量)

電場、磁場

極端コヒーレンス 時間、周波数、空間、波数ベクトル

光の性質



光の利用

情報 視覚 照明 光通信 光メモリ 量子情報処理

エネルギー 光合成 太陽電池 光触媒

運動量 光ピンセット 光冷却 宇宙ヨット

計測手段 分光測定 ニュートリノ検出 光トポグラフィー

20世紀は電子(electronics)の時代



21世紀は光(photonics)の時代

実際は opto-electronics の時代

電子工学の土台の上に、光の本格的利用が始まっている

通信

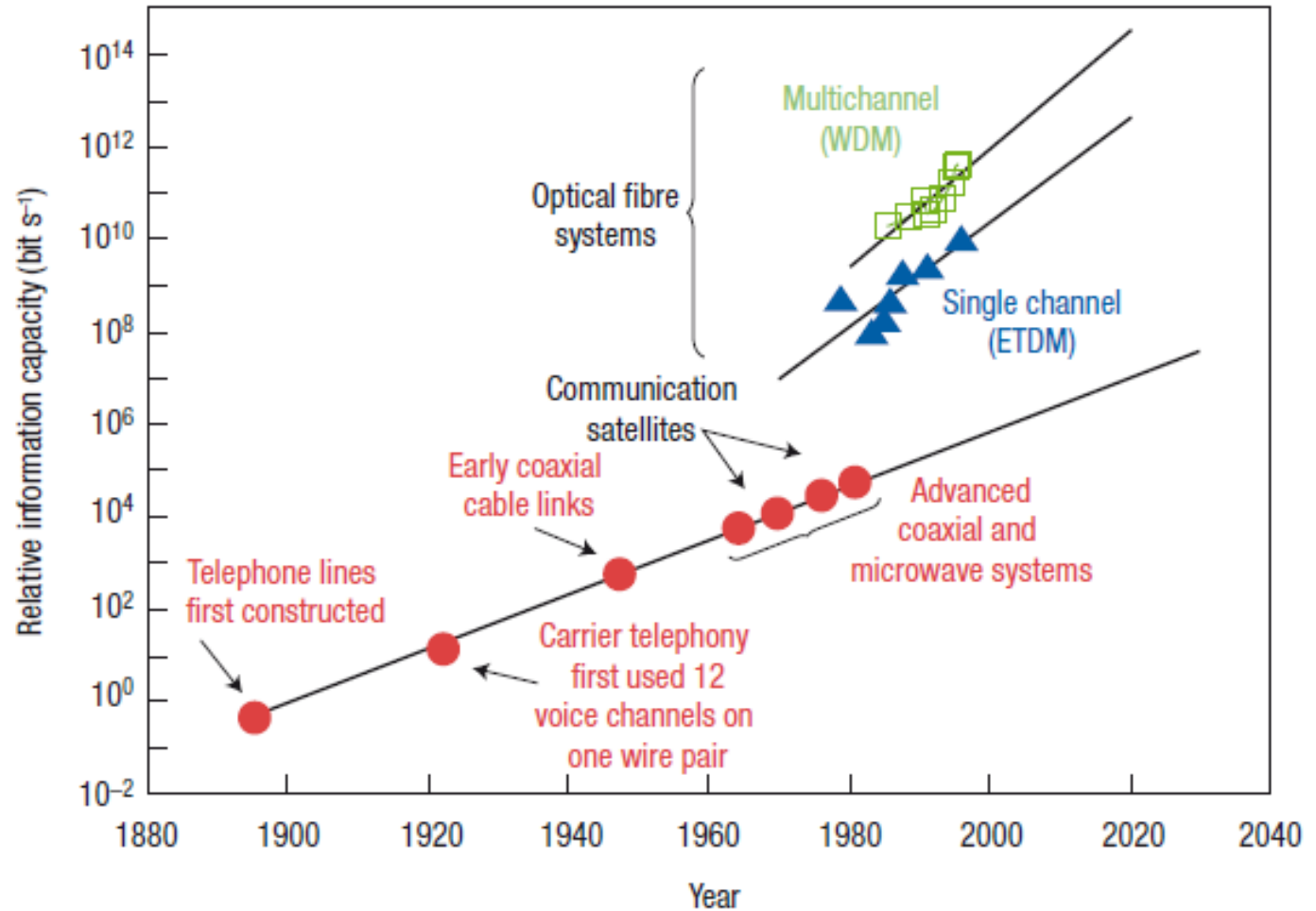
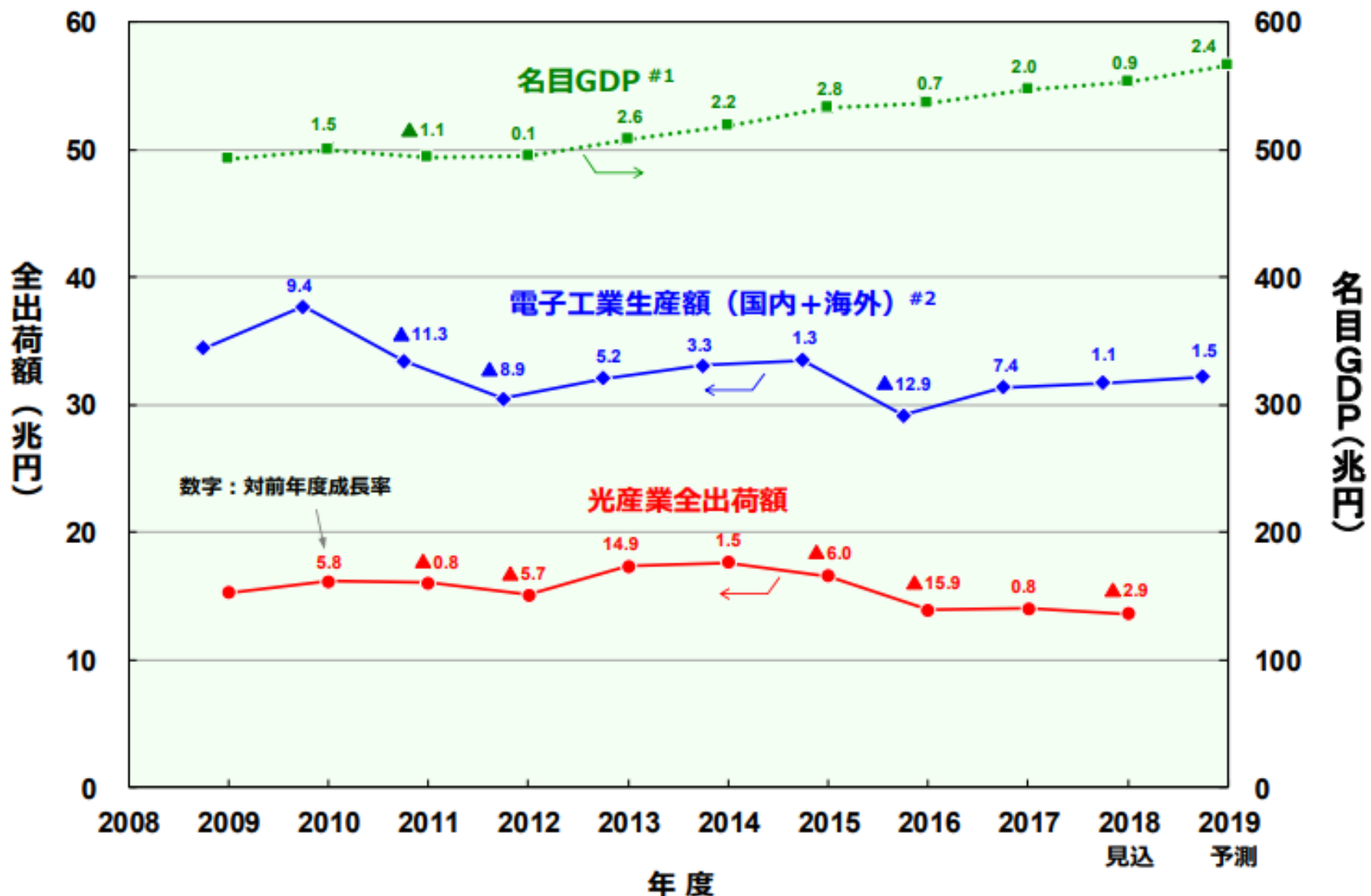


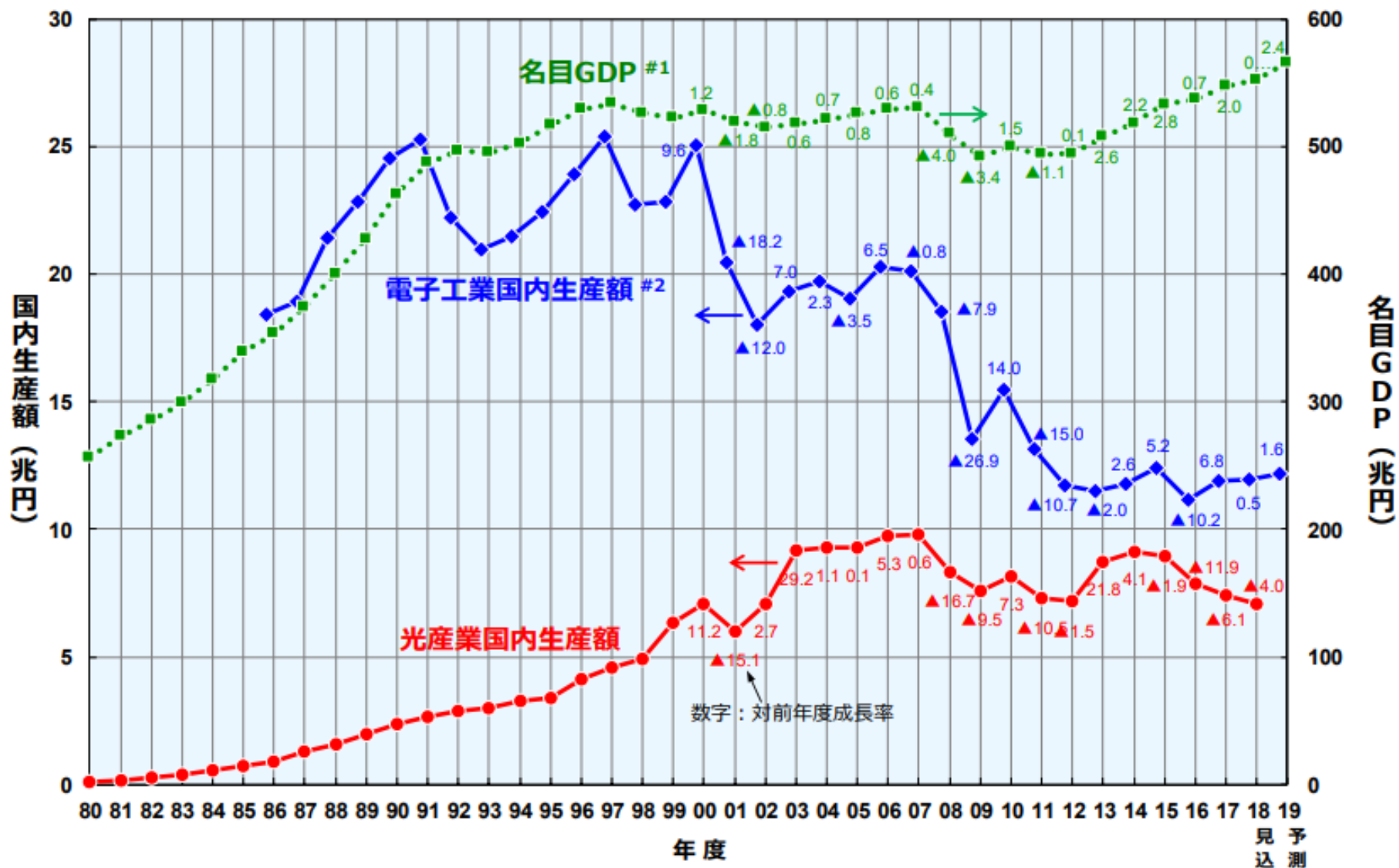
Figure 1 Trend in the information-carrying capacity of a single line (wire or optical fibre) with time and technology. (WDM: wavelength-division multiplexing; ETDM: electronic time-division multiplexing). Reproduced with permission from Kimerling, L. C. *Opt. Photon. News* 9, 19 (1998). Copyright (1998) OSA.



#1 内閣府：2017年度国民経済計算年次推計／平成31年度経済見通し（2019年1月28日閣議決定）

#2 JEITA：電子情報産業の世界生産見通し、2018年12月

図1 光産業全出荷額、名目GDP、電子工業国内生産額+海外生産額の推移



#1 内閣府：2017年度国民経済計算年次推計／平成31年度経済見通し（2019年1月28日閣議決定）
 #2 JEITA：電子情報産業の世界生産見通し、2018年12月

図5 光産業国内生産額、名目GDP及び電子工業国内生産額の推移

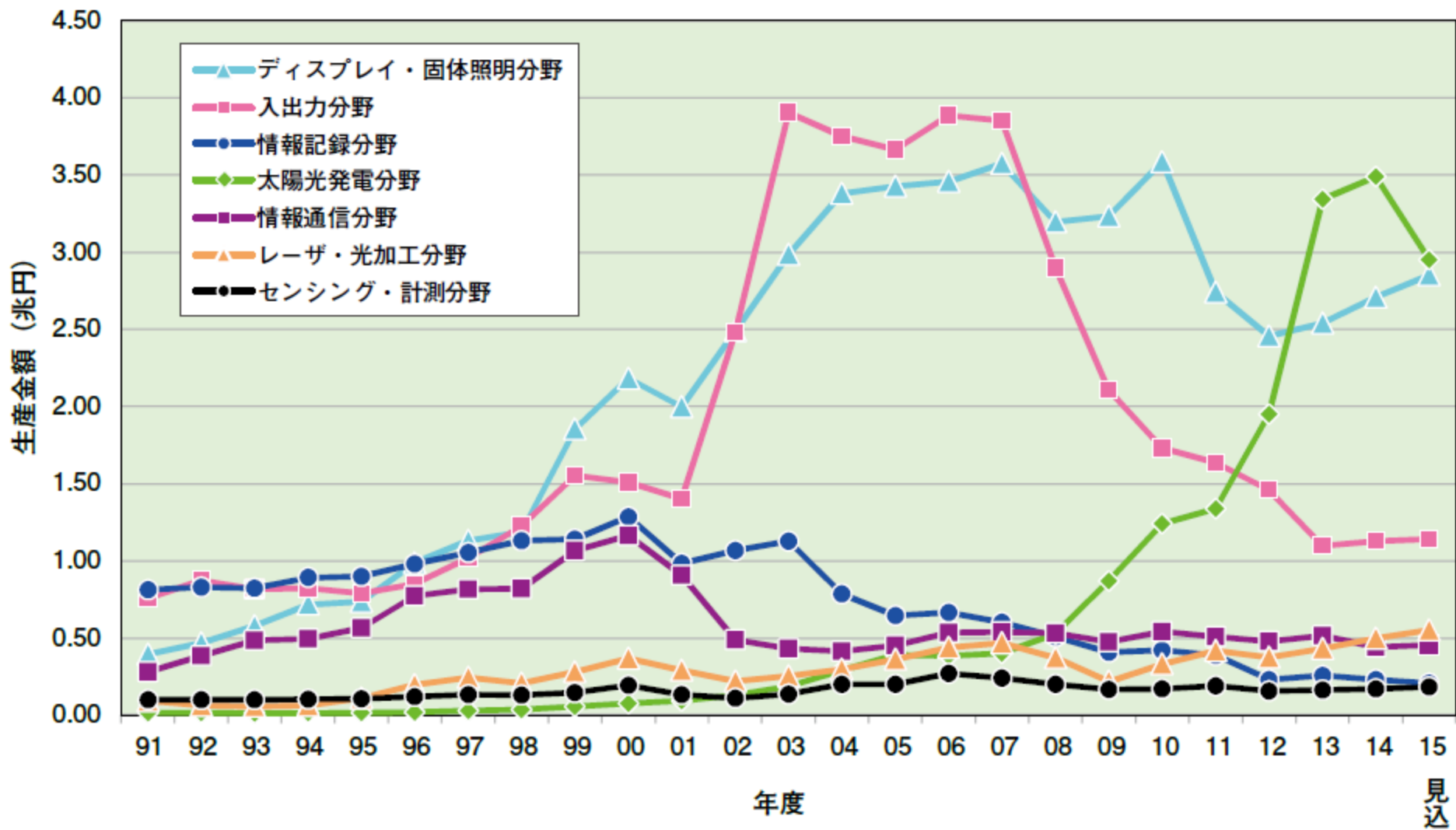


図6 国内生産額の分野別推移

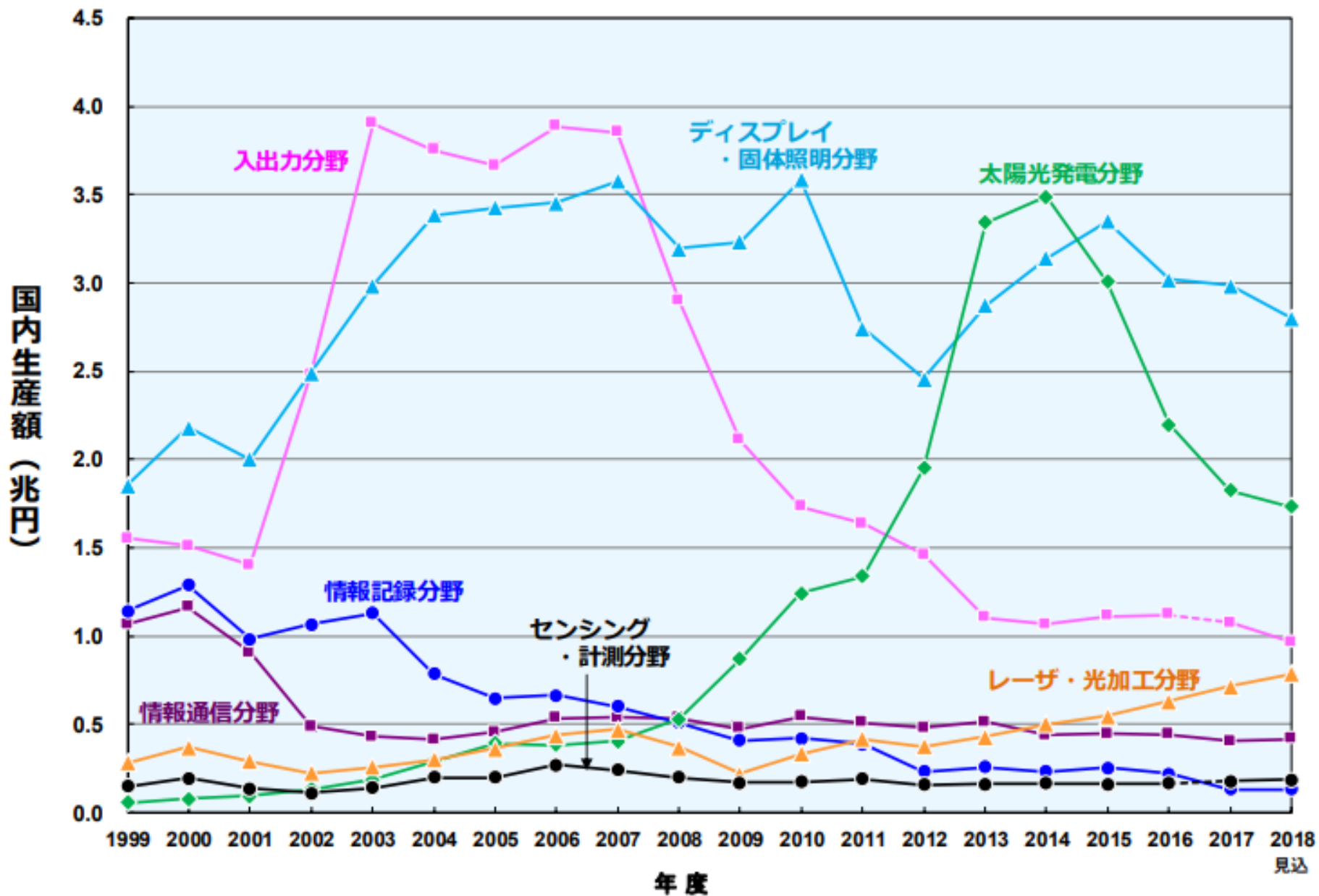


図6 光産業国内生産額の分野別推移

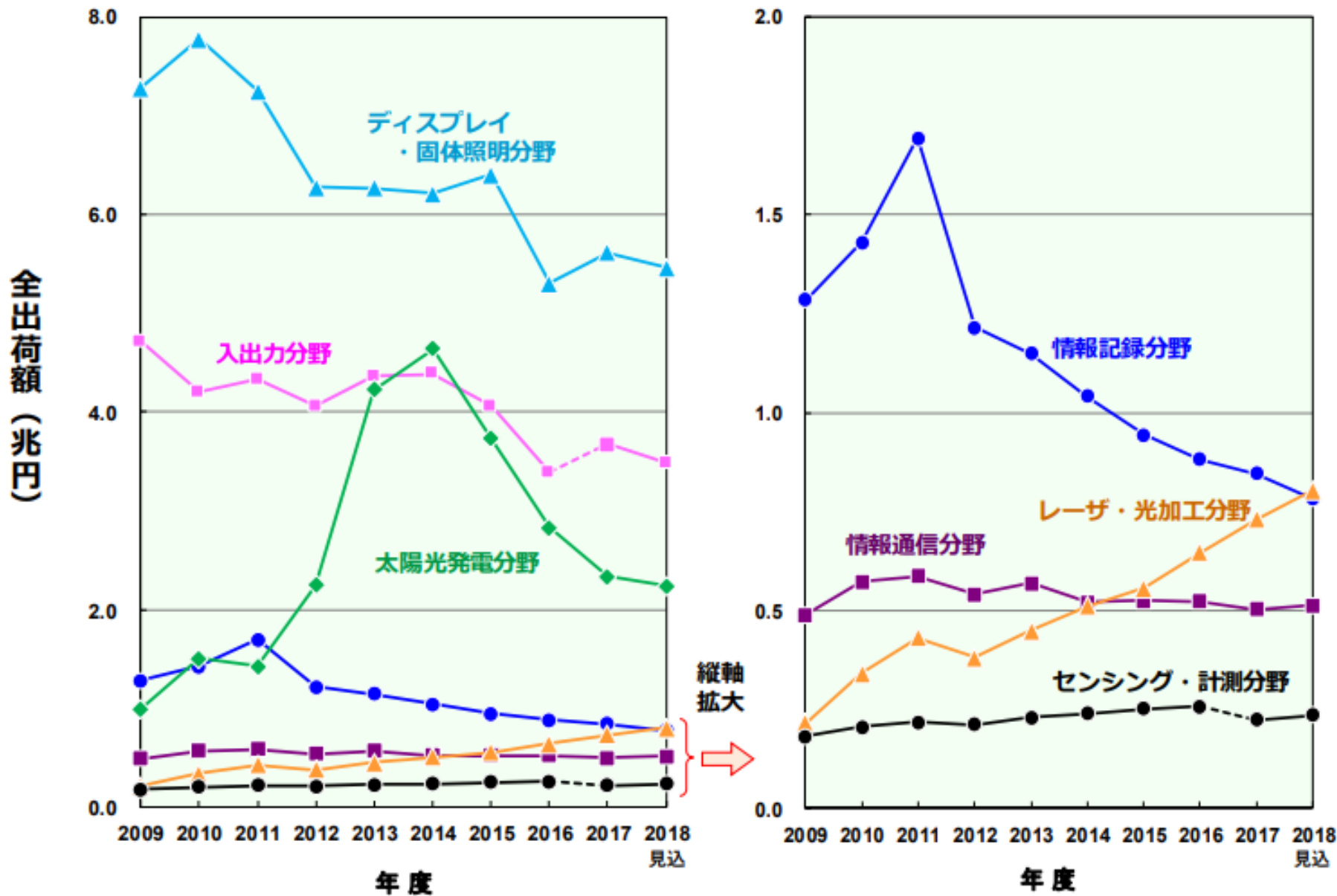


図2 光産業全出荷額の分野別推移

Introduction

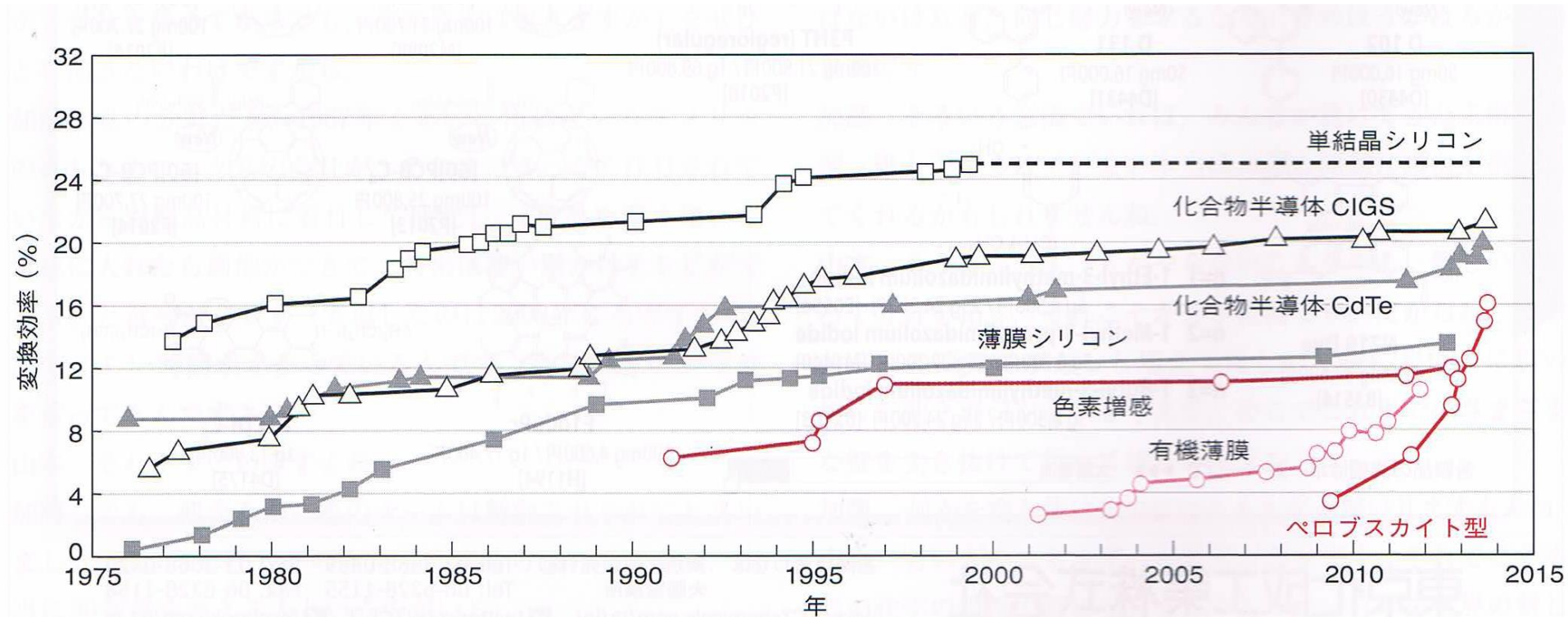
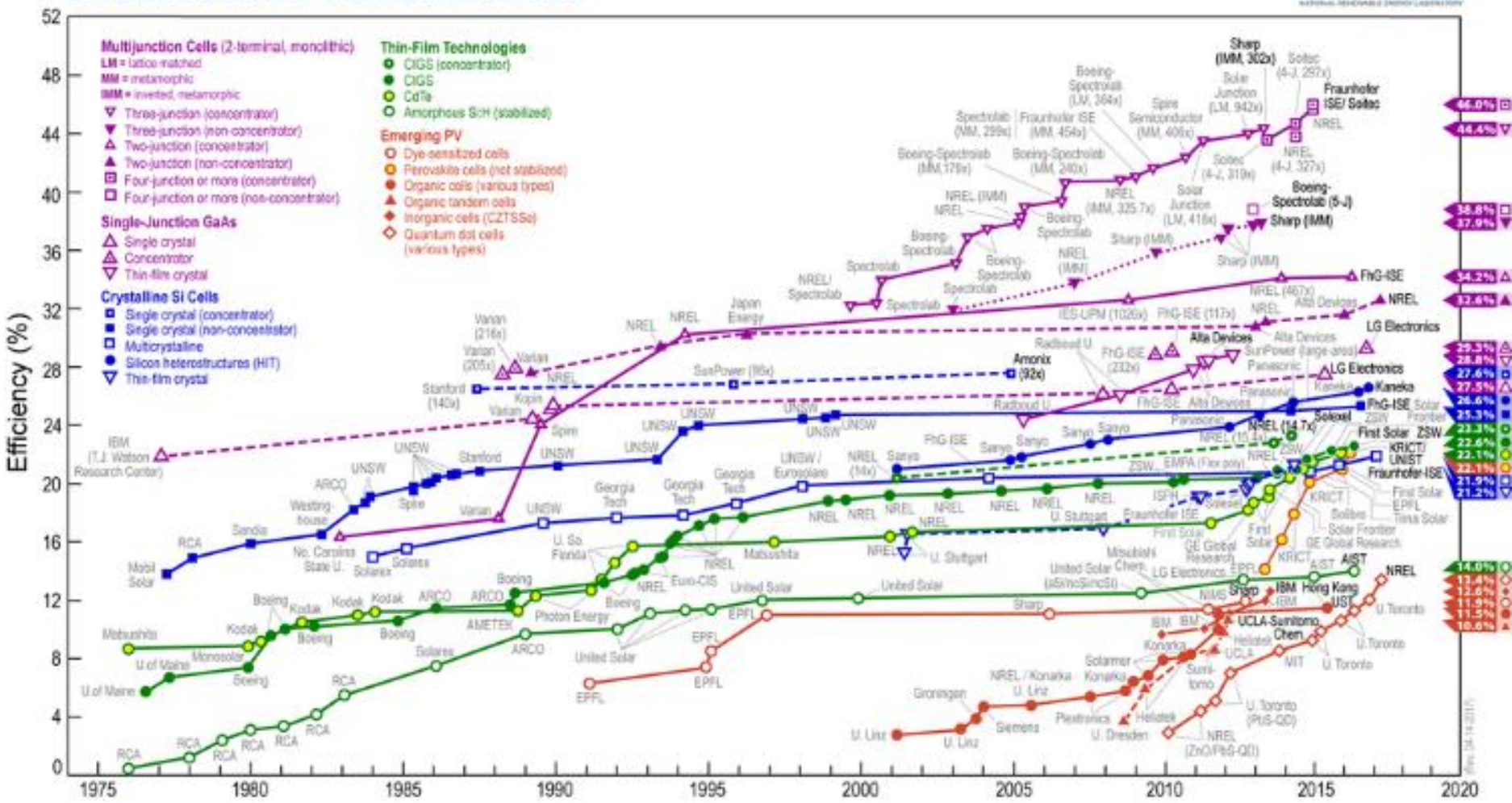


図1 各種太陽電池のエネルギー変換効率の変遷 (Science, 342, 795 (2013) を参考に作成)

各種太陽電池のエネルギー変換効率の変遷

Best Research-Cell Efficiencies

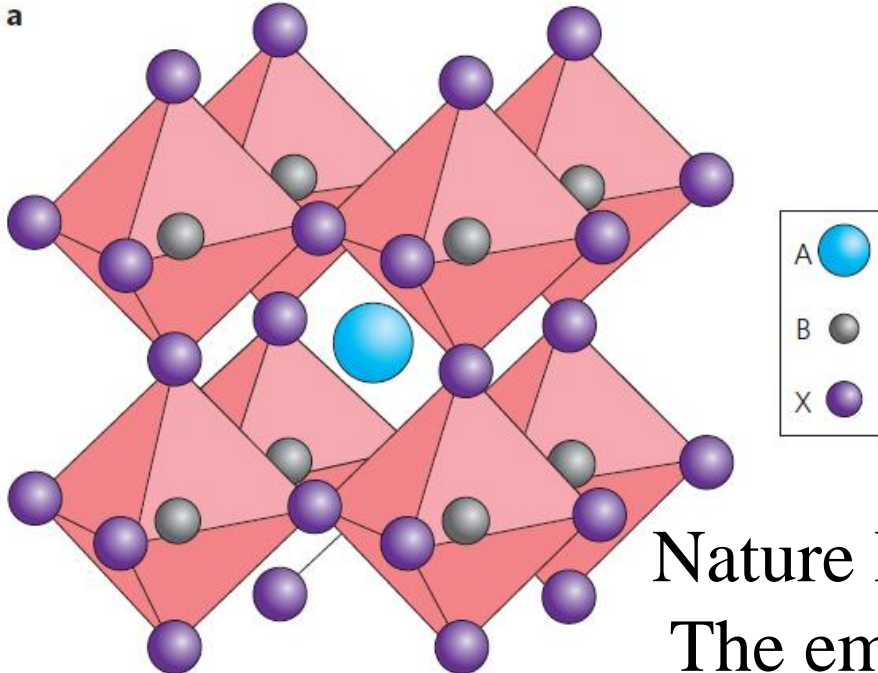


© NREL 2017

Introduction

ペロブスカイト太陽電池のカギとなる特性

- ・簡単な製造方法、コストの低さ
- ・高い光吸収
- ・再結合率の低さ
- ・耐久性



X: 陰イオン (F, Cl, Br, I)
A: 陽イオン (CH_3NH_3^+ など)
B: 陽イオン (Pb)

Nature Photon. 8, 506 (2014)

The emergence of perovskite solar cells

Introduction


結晶の安定でとりやすい構造は、

- ・許容係数 (tolerance factor) t
 - ・八面体係数 (octahedral factor) μ
- によって決まる。

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2}(R_B + R_X)} \quad \mu = \frac{R_B}{R_X}$$

R はそれぞれのイオン半径

ペロブスカイトでは、 $X = \text{F, Cl, Br, I}$


$$\left\{ \begin{array}{l} 0.81 < t < 1.11 \\ 0.44 < \mu < 0.90 \end{array} \right.$$

Introduction

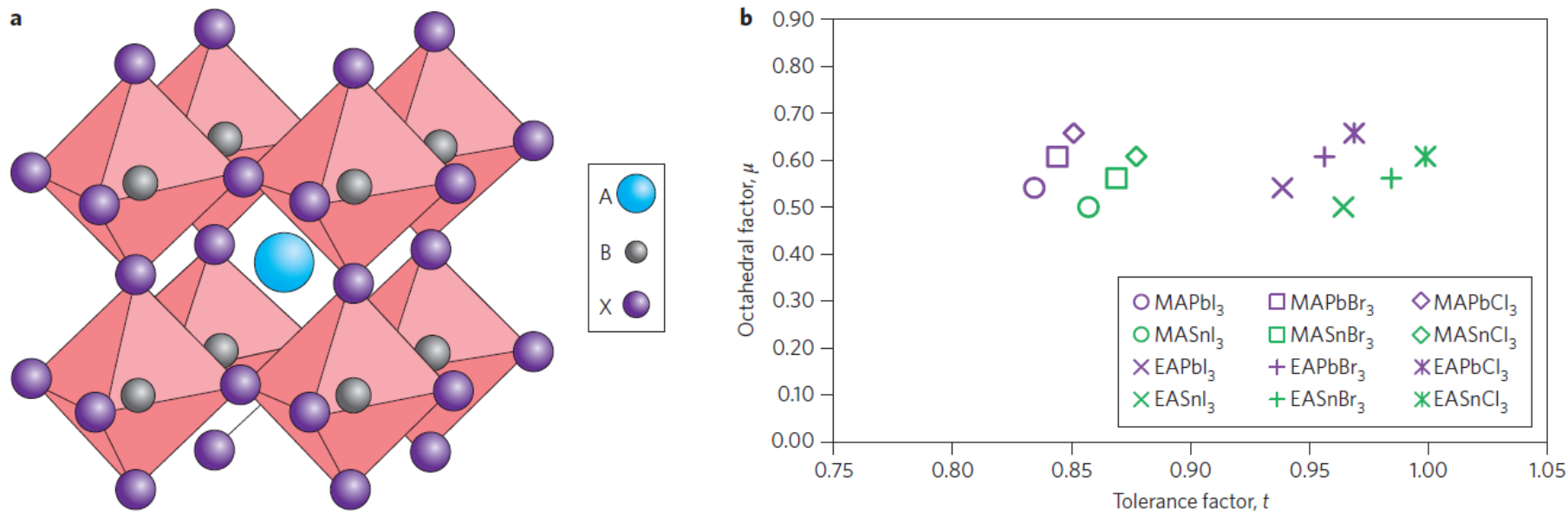


Figure 1 | Perovskite crystal structure and associated tolerance and octahedral factors. **a**, Cubic perovskite crystal structure. For photovoltaically interesting perovskites, the large cation A is usually the methylammonium ion (CH_3NH_3), the small cation B is Pb and the anion X is a halogen ion (usually I, but both Cl and Br are also of interest). For $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, the cubic phase forms only at temperatures above 330 K due to a low t factor (0.83). **b**, Calculated t and μ factors for 12 halide perovskites. The corresponding formamidinium ($\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2$) based halides are expected to have intermediate values between those of the methylammonium (MA) and ethylammonium (EA; $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_3$) compounds shown.

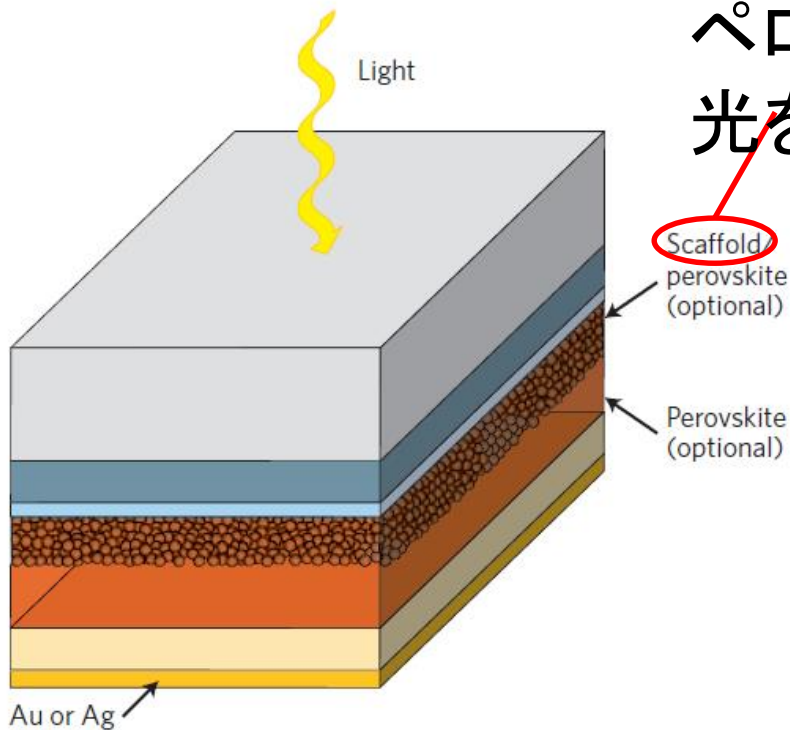
A: methylammonium、ethylammonium、formamidinium

X: ハロゲン B: Pb、Sn

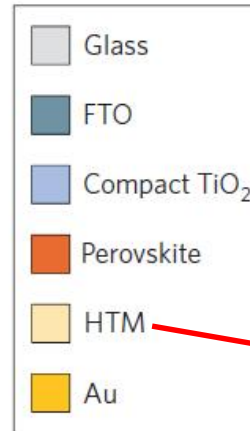
典型的なペロブスカイトは $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ 、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$

Notable achievements to date



ペロブスカイト層の足場として、
光を吸収する表面積を広くする



電子輸送、FTOの
荒れを抑える

ホール輸送

Notable achievements to date

初め、有機無機ペロブスカイトは薄膜トランジスタや発光ダイオードの研究が盛んだった(Mitzi)

宮坂	2009	3.8% $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$
Park	2011	6.5% ナノ粒子構造の TiO_2 表面処理 を行うことにより実現
Gratzel	2011	Spiro-MeOTAD (個体のホール輸送層を用いた) 今まではヨウ素を含む電解液)

Notable achievements to date

Snaith	2012	10.9% ①ハロゲンを混合させた。 ②ナノ多孔性酸化チタンで表面を覆った。 ③増感剤を用いる必要がなく、足場を排除した。
Seok		12.3% ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$) Brが10%未満だと初期効率がいい 20%以上と高湿度でも安定性がある
Gratzel		14.1% Sequential deposit法 (perovskite層に用いる $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ を二段階に分けて成膜)

Notable achievements to date

Snaith	2013	15.4% ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$) porous TiO_2 など多孔 質金属酸化物層なし
Seok	2013末	16.2% ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$) Br(10~15%)
Seok	2014	19.3%
NREL	2014	20.1%

Commercialization challenges

- ・生産コストや変換効率などでさらに優位に立つ必要
- ・鉛の存在依存が不利になってしまう可能性

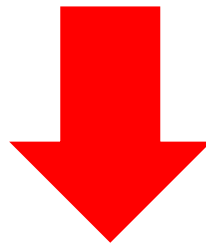
ライバル: CdTeの低い生産コストと薄膜技術
2.5時間で作る
US\$0.54/W
13.4%の平均変換効率

ペロブスカイトは間違いなくCdTeより簡単に加工することができるので、安定した効率と、単位面積当たりの製造コストに影響をあたえず、ワットあたりのコストを低下させることができれば、ペロブスカイトが商業的に実現可能となる。

Commercialization challenges

- ・鉛の存在依存が不利になってしまう可能性

CdTeとペロブスカイトは環境に有害な重金属に依存しているという共通の欠点をもっている。



Cd、Pbの化合物は、有害物質の基準に基づいているものの、異なる溶解度をもっているの
で処分する際に影響をあたえるかもしれない。

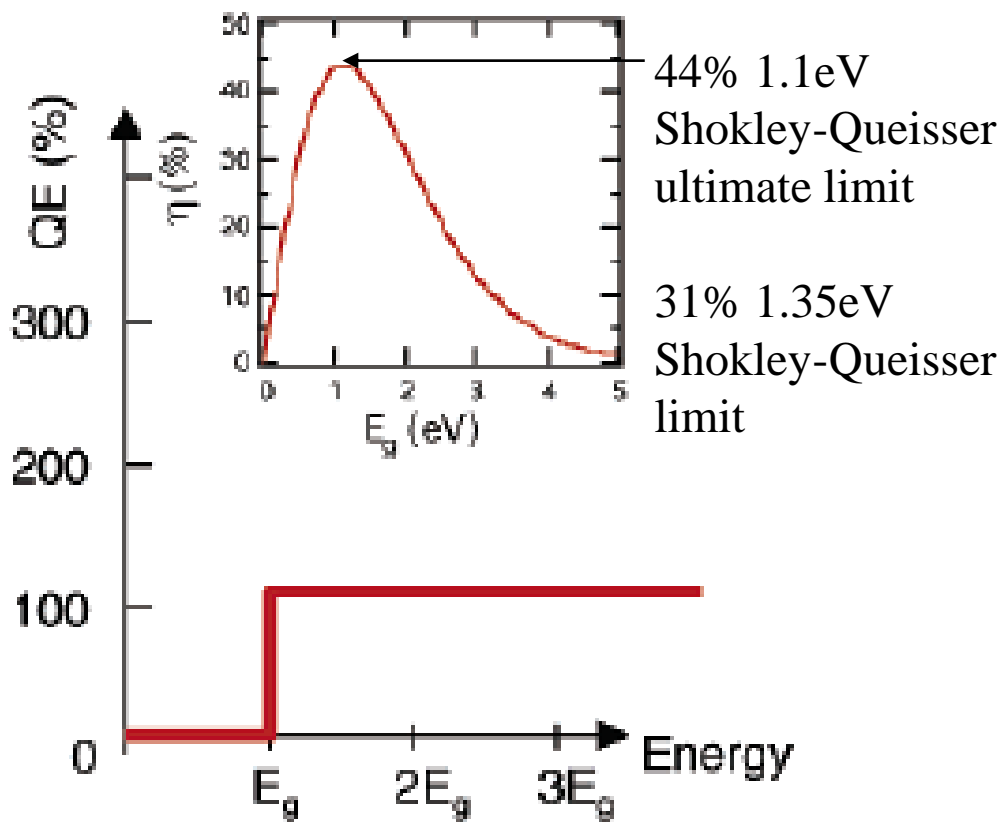
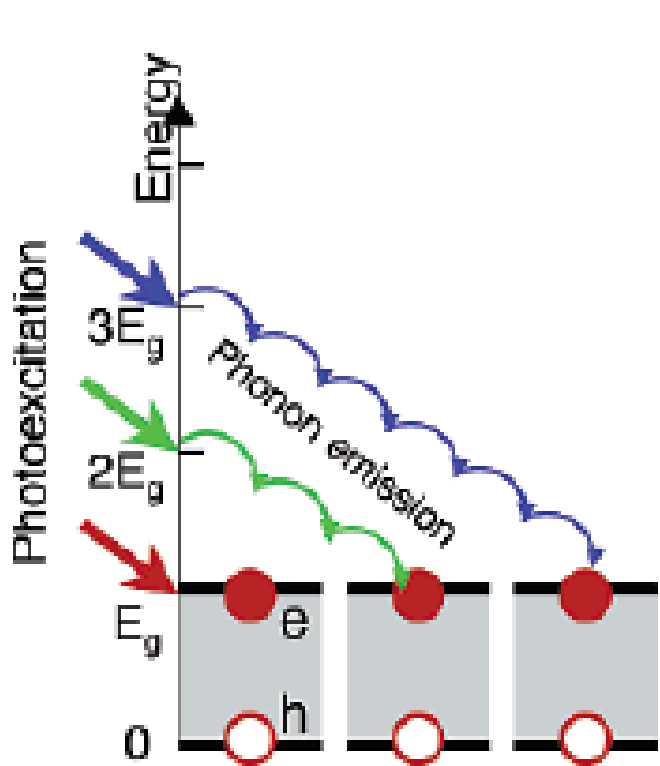
Summary and future prospects

- 効率改善に加え、材料特性と最適なデザインの理解もどんどん進んでいく。
- 既存のものよりも優位な点は、高性能デバイスの製造が簡単になる材料特性があること。また多様性からより高性能なタンデム型太陽電池を形成するため他の電池の技術と直接統合することが可能となる。
- 現在の市場では、鉛の毒性は大きな障害とはなっていない。似た性質で非毒性の物質の研究も進められている。
- おそらく今後数年間で、ペロブスカイト型太陽光発電製品をどのように商業化するか、複数の試みが行われること。

半導体(太陽電池)の 太陽エネルギー変換効率の最大値

バンドギャップ E_g の半導体

仮定: E_g より大きいエネルギーの光子を吸収し、 E_g の起電力を生む



クロロフィル吸収端 $660\text{nm}=1.88\text{eV}$ しかし緑($\sim 2.3\text{eV}$)を吸収しない

S-Q limitを破る太陽電池

- ①集光セル
 - ②多接合セル
 - ③ホットキャリアセル
 - ④中間バンドセル
 - ⑤マルチエキシトンセル
- } 量子ドット超格子の利用

例：多接合タンデム型太陽電池

2接合 非集光 $E_g=1.58\text{eV}, 0.94\text{eV}$ 45.4%

最大集光 $E_g=1.44\text{eV}, 0.70\text{eV}$ 59.9%

3接合 $E_g=1.76\text{eV}, 1.18\text{eV}, 0.66\text{eV}$ (Ge)

非集光50.3% 最大集光66.4%

喜多隆 太陽電池のエネルギー変換効率

接合数制限なし 理論限界 集光時 86.8%

M.A. Green *Third Generation Photovoltaics* (2003)

$$\text{Carnot Limit } \eta = \frac{T_s - T_c}{T_s} = \frac{6000 - 300}{6000} = 0.95 \quad 95\%$$

消費電力1.10半導体開発

日立・富士通などと共同で

日立製作所や富士通、NECなど電機大手が、現在の10分の1の消費電力で動く次世代半導体の共同開発に乗り出す。製品を小型化し、電力の消費量を減らしながら、やりとりできるデータの量は大幅に増える。2019年度の実用化を目標としている。クラウドサービスを提供するデータセンターやパソコンなどに使うことを想定している。

また、高速で省電力になるため、パソコン並みの処理速度を持つCPU（中央演算処理装置）をスマートフォン（高機能携帯電話）に載せることも可能になる。電池の持ちが2倍になるスマートフォンも実現できるといふ。

なければならぬ。理
高速で信号を送るこ
は、配線の間隔は
までしか狭くできな
れる。
日立などは、デジ

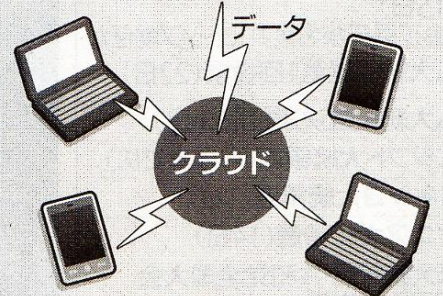
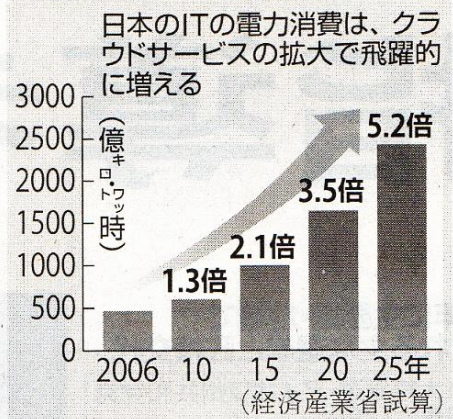
2012年1月1日 読売新聞朝刊

光配線活用、データ増

実用化されれば、データセンターに使われるサーバーの消費電力を約3割削減できる。熱の発生を抑えることもできるため、空調設備向けの電力も削減でき

半導体は小型化と省電力化を目指した競争が続いているが、小型化するためには、回路の基板上に張り巡らされている配線を狭くし

光半導体を使った省エネイメージ



光半導体の使用でスマートフォンが高性能化

PCも高性能化

世界最高性能の半導体光変調器を開発

—従来比で光損失を10分の1に低減、変換効率5倍を達成—

2017年7月25日

ことにより、その後、電力消費の急増が予想されるサーバ等の電子機器の消費電力を大幅に削減します。

世界最高伝送密度の光送受信技術と高速省電力の光変調伝送技術を開発

—サーバーの処理速度の大幅な改善に大きく貢献—

2017年9月19日



消費電力：1/10
実装面積：1/100
配線密度：10倍

シリコンを発光させたい 木村、一色 (2007) 「シリコン発光デバイス」

- (1) バルクシリコンのバンド構造変化—直接ギャップ実現
- (2) 非発光再結合中心の低減あるいは回避—間接ギャップでの高効率発光実現
- (3) シリコンナノクリスタルなどの量子サイズシリコン—励起子発光による高効率化
- (4) Erドープシリコン— $1.5\mu\text{m}$ 帯の発光および増幅
- (5) Si基板上的 III-V 化合物半導体 LD
- (6) 高 Q 値の光共振器内への組み込み—発光遷移速度の促進
- (7) SiGe システムの導入—ひずみ導入, 超格子構造

最近30年の革新技术

光-物質相互作用による光(物質)の制御

微小共振器ポラリトン

フォトニック結晶(ファイバー)

電磁誘起透明化

回折限界を超える

近接場分光

二光子顕微鏡 メタマテリアル

STED (Stimul. Emission Depletion) 顕微鏡

負の屈折率 超レンズ 透明マント

プラズモニクス 光誘起相転移

ボーズ・アインシュタイン凝縮

レーザー冷却、光トラップ、光格子

Optomechanics、トラクター(牽引)ビーム

シリコンレーザー、セラミックレーザー

太陽光励起レーザー、X線レーザー

マイクロチップレーザー、ナノレーザー

ファイバーレーザー、光流体(Optofluidics)

量子情報

スクイーズド光

量子コンピュータ

量子テレポーテーション

量子もつれ光子対

単一光子光源

光の新しい自由度

光の軌道角運動量

ベクトルビーム

補償光学

Opto Genetics

2次元分光

超短パルス技術

高次高調波

コヒーレント制御

光周波数標準 光コム

レーザー光による分子操作

テラヘルツパルス



アト秒パルス

レーザー航跡場加速

高エネルギー、素粒子物理

ブラックホール

2019 卒研ゼミ用論文 > 500報

- 1D-2D
- BEC
- CNT
- diamond
- femto atto
- imaging
- LED
- NLO
- OAM
- optical modulator
- others
- photon
- photosynthesis
- PT symmetry
- review
- single photon
- spin
- thermal
- water
- active matter
- bio
- comb
- entangle
- fiber
- Janus
- light induced force
- non-Hermitian
- optical clock
- OPTICAL REFRIGERATION
- perovskite
- photonic circuit
- plasmon
- quantum information
- Si
- solar cell
- superconductor
- THz
- algae
- biophotonics
- detector sensor
- EO
- highlights
- laser
- metamaterial
- non-reciprocal
- optical memory
- optomechanics
- phonon
- photonic crystal
- polariton
- resonator
- single molecule
- spectroscopy
- superresolution
- topological
-  A quantum-dot spin qubit with c...
-  A quantum-dot spin qubit with c...

<https://physics.aps.org/>

アメリカ物理学会

spotlighting exceptional research

Subject Area

Optics (523) Photonics (57) Optoelectronics (25)

Atomic and Molecular Physics (467)

Materials Science (360)

Particles and Fields (352)

Astrophysics (273)

Biological Physics (267)

Quantum Information (266)

Quantum Physics (248)

Fluid Dynamics (241)

2019.9.17 本日

2018 ノーベル物理学賞

アシュキン

光ピンセットの開発と生体システムへの応用

ムルー(モーロー)、ストリックランド

高出力・超短パルスレーザーの生成方法

今後

光触媒 マルチフェロイックス(巨大電気磁気効果)

光格子時計 ペロブスカイト太陽電池

量子テレポーテーション

負の屈折率・メタマテリアル THz電磁波 アト秒パルス

} (日本人)

ノーベル物理学賞

2017 **ワイス,バリッシュ,ソーン** LIGO検出器および重力波観測

2014 **赤崎勇 天野浩 中村修二** 青色発光ダイオードの発明

(化学賞)2014 **ベツィツヒ、ヘル、モーナー**

超高解像度蛍光顕微鏡の開発

2012 **アロシュ、ワインランド** 光子／イオンの状態を操り、測る
実験手法(量子コンピュータの基礎)

2009 **カオ** 光ファイバー(の低損失化) (西澤潤一)
ボイル、スミス CCDの発明

2005 **グラウバー** 光の**コヒーレンス**の量子理論 (高橋秀俊)
ホール、ヘンシュ 光周波数コム技術を含むレーザー
ーを用いた精密分光

- 2001 コーネル、ケターレ、ワイマン 希薄なアルカリ原子
ガスでのボーズアインシュタイン凝縮の実現
- 2000 アルフォーロフ、クレーマー 光エレクトロニクスに利用
(キルビー) される半導体ヘテロ構造の開発 (林 巖雄)
(化学賞) 1999 ズベイル 化学反応の遷移状態をめぐる
フェムト秒分光
- 1997 チュー、コーエン タヌジ、フィリップス
レーザーを用いて原子を極低温に冷却する技術
- 1989 デーメルト、パウル、ラムゼー 高精度原子分光法
- 1986 ルスカ 電子顕微鏡
ビーニツヒ、ローラー 走査型トンネル電子顕微鏡
- 1981 ブレンベルゲン、シャーロウ レーザー分光学
シーグバーン 高分解能光電子分光法
- 1971 ガボール ホログラフィーの発明

1966 カスレ 原子内のヘルツ波共鳴の光学的方法

1964 タウンズ、バソフ、プロホロフ メーザー、レーザーの発明

1958 チェレンコフ、タム、フランク チェレンコフ効果

1955 クッシュ 電子の磁気モーメントの研究

ラム 水素の微細構造のマイクロ波による測定

1953 ゼルニケ 位相差顕微鏡

1952 ブロッホ 核磁気共鳴吸収による原子核の

パーセル 磁気モーメントの測定

1944 ラビ 共鳴法による原子核の磁気モーメントの測定

1930 ラマン ラマン効果の発見

(化学賞) 1925 ジグモンディ コロイド溶液の研究
限外顕微鏡

1922 ボーア 原子の構造とその放射に関する研究

1921 アインシュタイン 光電効果の法則の発見

1919 シュタルク 陽極線のドップラー効果および
シュタルク効果の発見

1911 ウィーン 熱放射に関する法則の発見

1909 マルコーニ、ブラウン 無線電信の発達に対する貢献

1908 リップマン 光の干渉を利用した天然色写真

1907 マイケルソン 干渉計の考案とそれによる分光學

1902 ローレンツ、ゼーマン 放射に対する磁場の影響の研究

1901 レントゲン X線の発見

他にも

X線回折、コンプトン効果、X線分光学
エネルギー量子

シュタルク効果(分光学)

電波天文学、宇宙背景放射、X線天文学

2002 ニュートリノ天文学

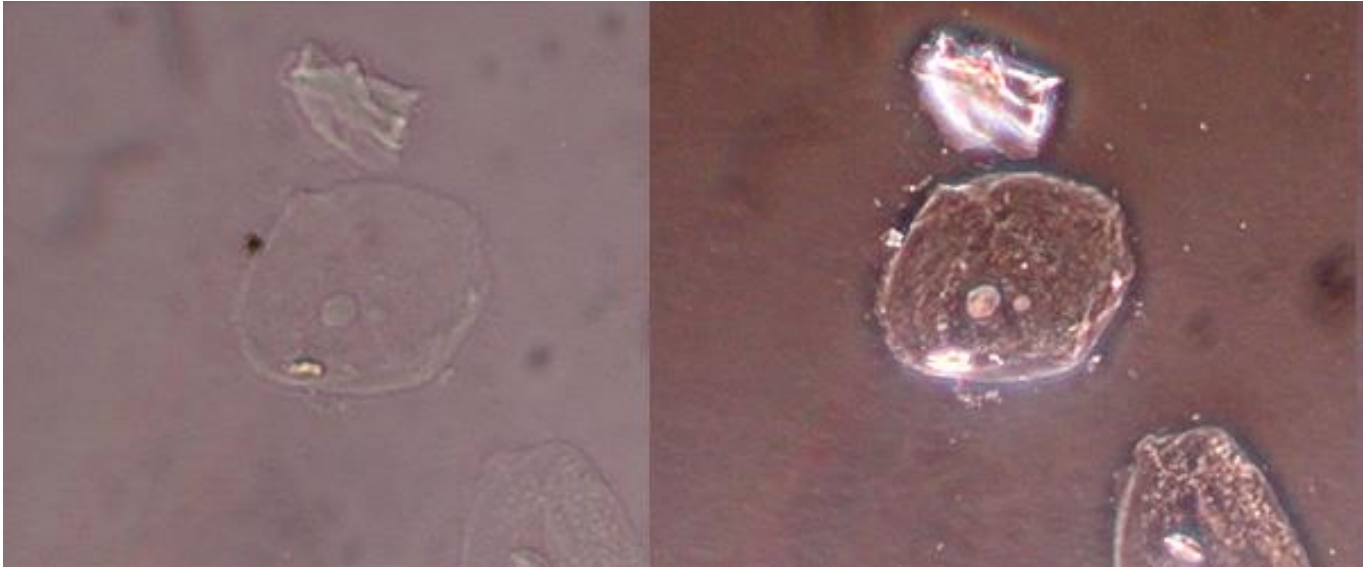
小柴昌俊

2015 ニュートリノ振動

梶田隆章

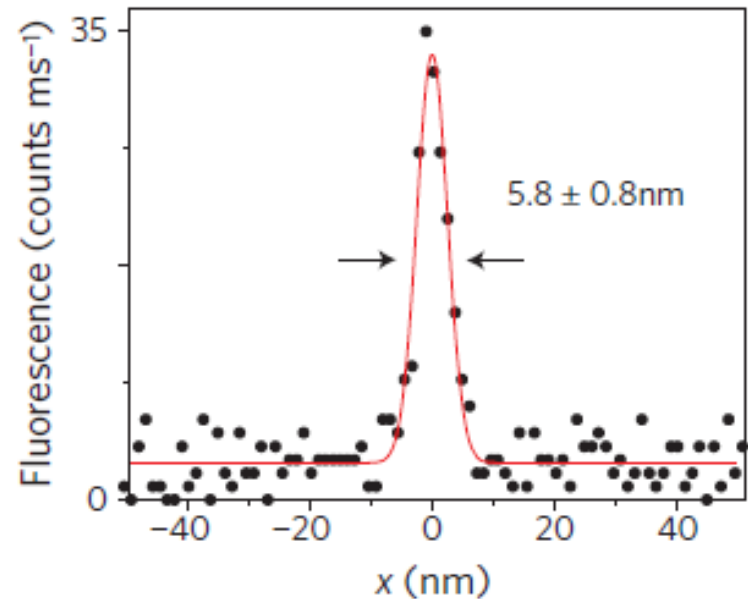
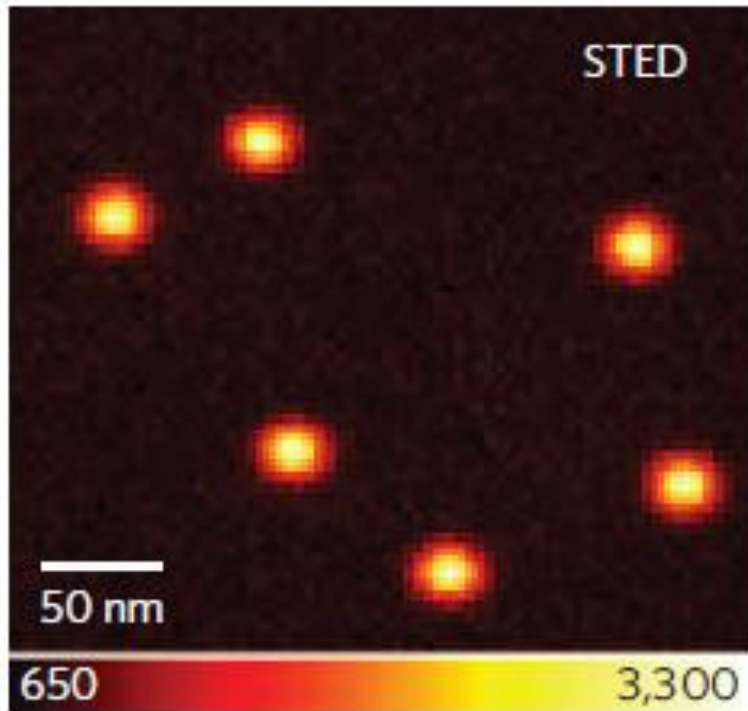
カミオカンデ、スーパーカミオカンデ
光で検出 (Cherenkov放射を利用)

位相差顯微鏡



回折限界を超える光学顕微鏡

Stimulated Emission Depletion Microscopy reveals nitrogen-vacancy centers in diamond.



16nm空間分解能

超解像蛍光顕微鏡

2014年ノーベル化学賞

- 可視光の光を使って、光の回折限界を超える空間分解能
- 局在化顕微鏡
- 誘導放出抑制顕微鏡
- 構造化照明顕微鏡 (Nobel賞対象ではない)

通常のレーザー顕微鏡はすべて**蛍光**を利用

生体試料は普通**非蛍光性**なので**蛍光ラベル**処理必要



米ハワード・ヒューズ
医学研究所
Dr. Eric Betzig



独マックスプランク研
究所
Dr. Stefan W. Hell



米スタンフォード大学
Dr. William E. Moerner

全員物理系

次の開発課題
蛍光ラベルなし、散乱や吸収での実現

研究成果展開事業 【先端計測分析技術・機器開発プログラム】

プログラムの概要	採択課題	開発成果DB	開発成果の活用・普及促進	公募案内	評価結果
----------	------	--------	--------------	------	------

先端計測HOME > 採択課題 > 平成28年度採択開発課題「最先端研究基盤領域」要素技術タイプ

Google



平成28年度採択開発課題(要素技術タイプ):9件



無標識・同時多色・3次元・超解像を実現する光熱変換顕微鏡のための調査研究

調査研究

チームリーダー 徳永 英司 東京理科大学 理学部第一部 教授

開発概要

細胞小器官を生きたまま測定することができ、また、集積回路やマイクロ・ナノマシンの熱拡散過程をイメージング可能な、広く生物や工業用に用いられる光学顕微鏡が求められている。本調査研究では、1分子レベルで高感度に検出可能な世界初の無標識・同時多色・3次元・超解像顕微鏡技術について検討する。

超解像の原理: 非線形光学効果

光源

白熱電球

黒体輻射

蛍光灯

蛍光体

LED

半導体

赤 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ AlGaInP

橙 GaAsP

2004.1.30

緑—紫 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

青色LED訴訟

紫外 ダイヤモンド 235nm

中村修二 x 日亜化学工業
発明の対価は200億円

レーザー

誘導放出

$\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ (ルビー)

$\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ (サファイア) $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

ZnO (励起子)

蛍光体（固体中の局在中心）

CRT用蛍光体
Blue ZnS : Ag,Al
Green ZnS : Cu,Al
Red Y_2O_2S : Eu



ブラウン管

ランプ用蛍光体
Blue $(SrCaBaMg)_5(PO_4)_3Cl$:
Eu

Green $LaPO_4$: Ce,Tb
Red Y_2O_3 : Eu



蛍光灯

PDP用蛍光体
White $Ca_{10}(PO_4)_6FCl$: Sb,Mn
Blue $BaMgAl_{10}O_{17}$: Eu
Green Zn_2SiO_4 : Mn
Red $(Y,Gd)BO_3$: Eu



PDP

グリーンレーザーポインタ $Nd^{3+}:YVO_4$

白色LED Blue (InGaN LED)

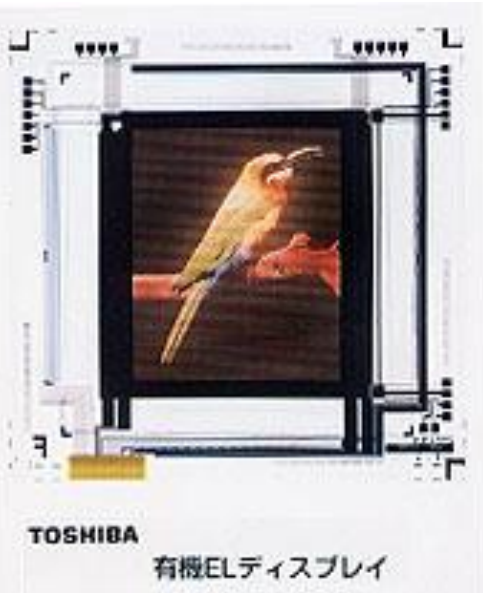
Green Ce^{2+}, Eu^{2+} 酸化物, SiAlON 蛍光体
Red

有機EL (Electro-Luminescence)

色素分子 燐光物質



有機EL照明



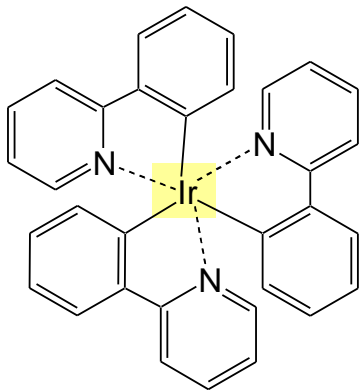
TOSHIBA
有機ELディスプレイ



flexible display



5インチの有機ELを搭載したPSP後継機



iPhone, Galaxy

LG

65インチ有機EL TV



光検出器

光電(子増倍)管	光電面 (Cs-I, Sb-Cs, Na-K-Sb-Cs) ニュートリノ検出
フォトダイオード 0.2–2 μ m	Si (可視), InGaAs(近赤外) CD、DVD、自販機、光通信
中赤外検出器 2–20 μ m	PbS, PbSe, InAs, InSb, HgCdTe
遠赤外検出器	p-Ge, n-GaAs
イメージセンサ (CCD, CMOS)	Si デジタルカメラ、コピー機

$$1 \text{ eV} = 11600 \text{ K} = 1240 \text{ nm}$$

$$1 \text{ PHz} \text{ (ペタヘルツ } 10^{15} \text{ Hz)} = 300 \text{ nm}$$

光記録

写真 AgBr微結晶 増感色素

CCD Si半導体

DVD 5GB 半導体レーザー 650nm

DVD-R 色素の分解

DVD-RW 結晶-非晶質相変化

ブルーレイ 50GB 405nm 18Gbit/in²

ホログラフィックメモリ

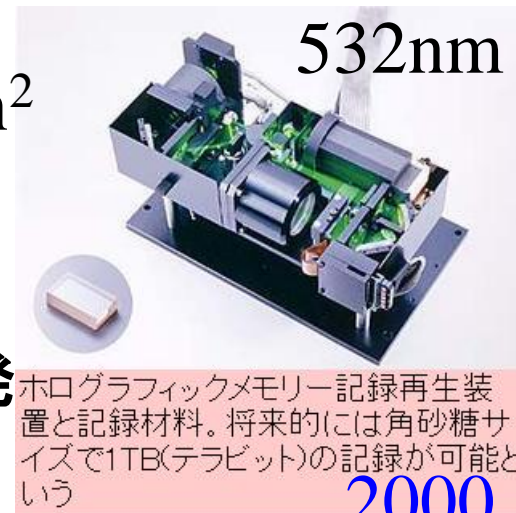
5インチディスクで2TBを達成 – 2015.11.5

東京理科大が大容量ホログラムメモリを開発

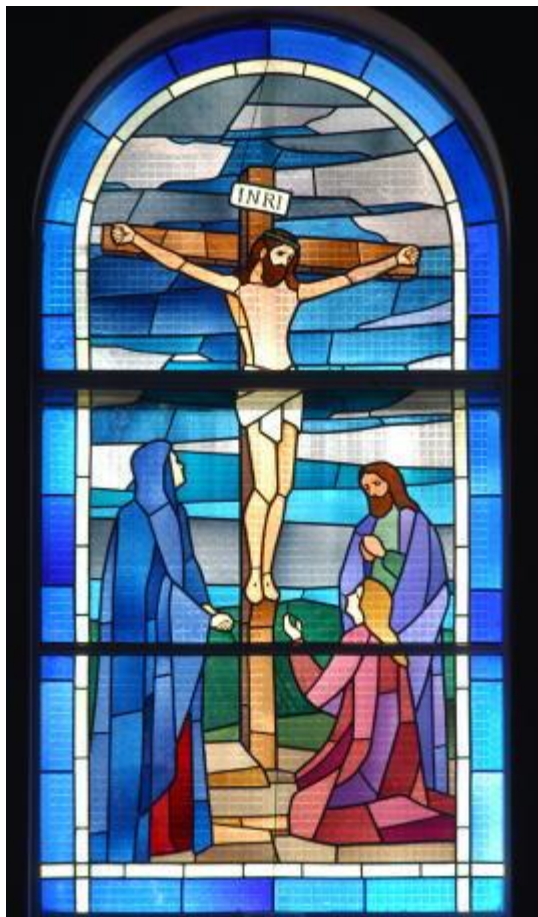
単一分子光メモリー

DVDの100万倍の記録密度 2002.12.19

1平方インチあたり1ペタビット

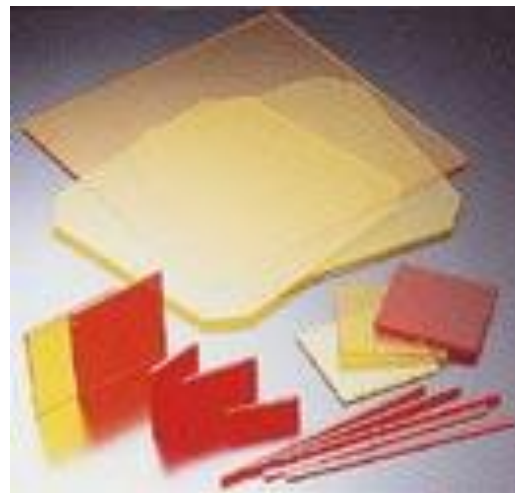


ステンドグラス

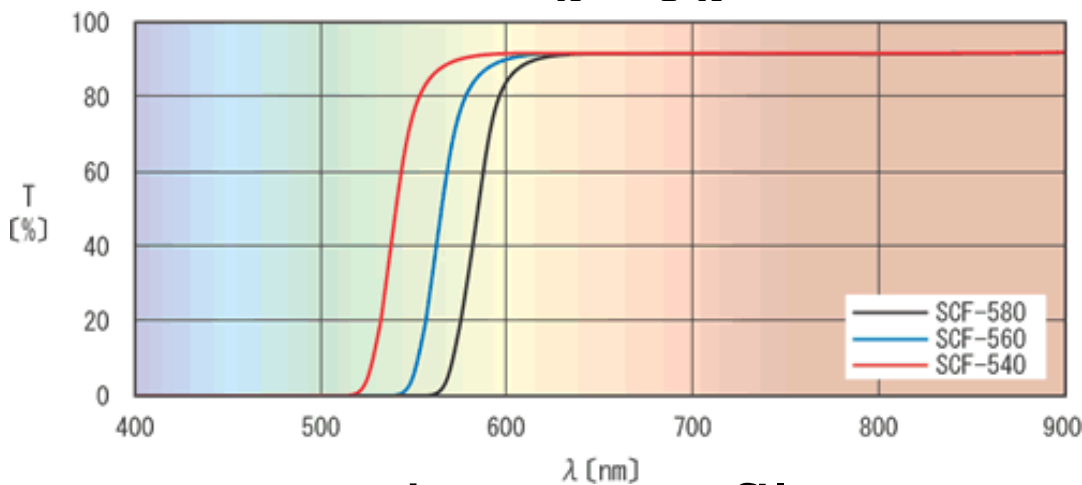


金属ナノ粒子
(表面プラズモン共鳴
局在プラズモン共鳴)

色ガラスフィルター



ガラス中 $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ 微粒子

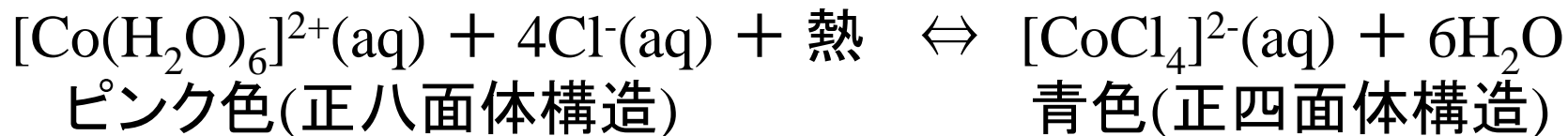


sharp cut filter

(量子サイズ効果とはいえない)

呈色反応

シリカゲル(乾燥剤)



リトマス試験紙

有機色素

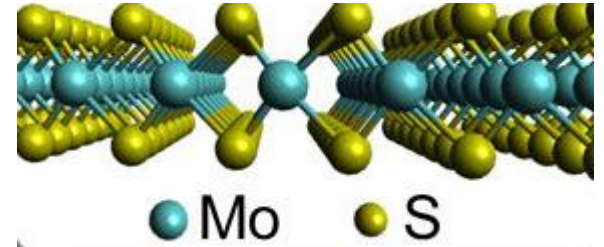
ヨウ素でんぷん反応

包接化合物

近年注目の新材料 の 光応用

原子層物質、2次元層状物質

Graphene



TaS₂ MoS₂ 遷移金属ダイカルコゲナイド

光変調器

広帯域光検出器

Nature 2011 A graphene-based broadband optical modulator

Sci. Adv. 2018 TaS₂

Ultrabroadband photosensitivity from visible to terahertz
at room temperature

電極界面の水のポッケルス効果 による巨大光変調

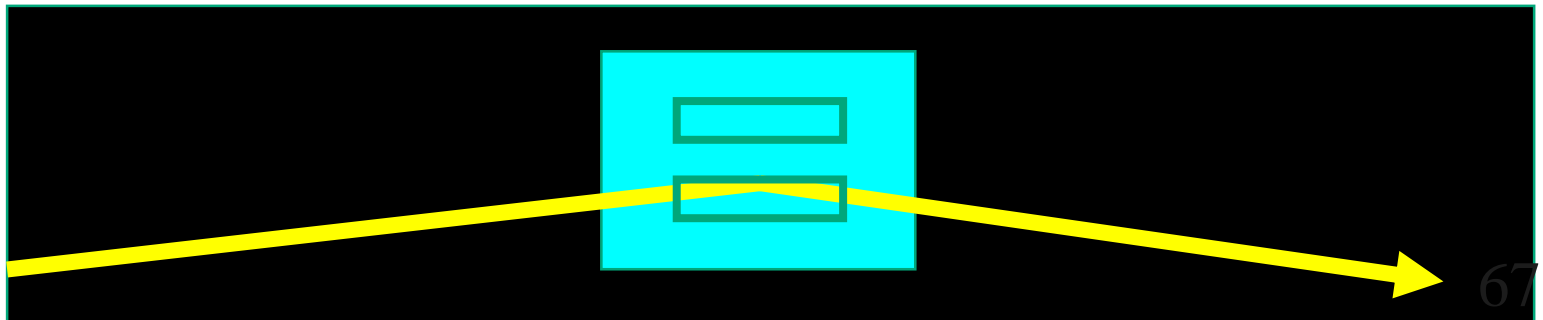
徳永英司

羽山大介 他

東理大理

$$\Delta n = n_1 F$$

印加電場に比例する屈折率変化



質問

量子力学では光子の吸収により電子が基底状態から励起状態へ不連続に遷移する。

古典的には電磁波が物質中の電子を振動させることにより電磁波の吸収が起こる。

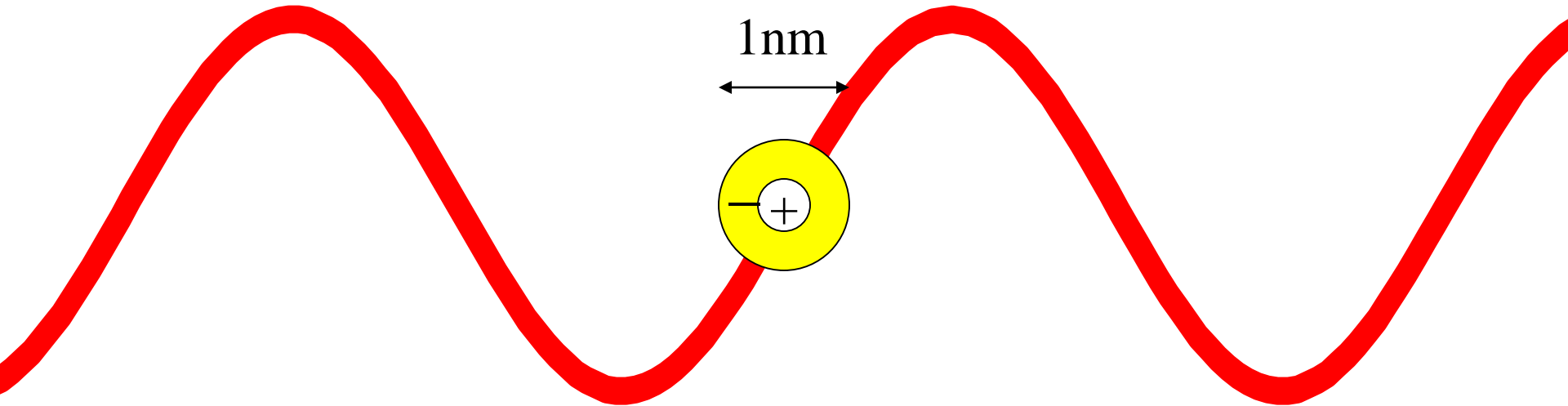
この2つの描像の関係は？

光と物質の相互作用

分極とは

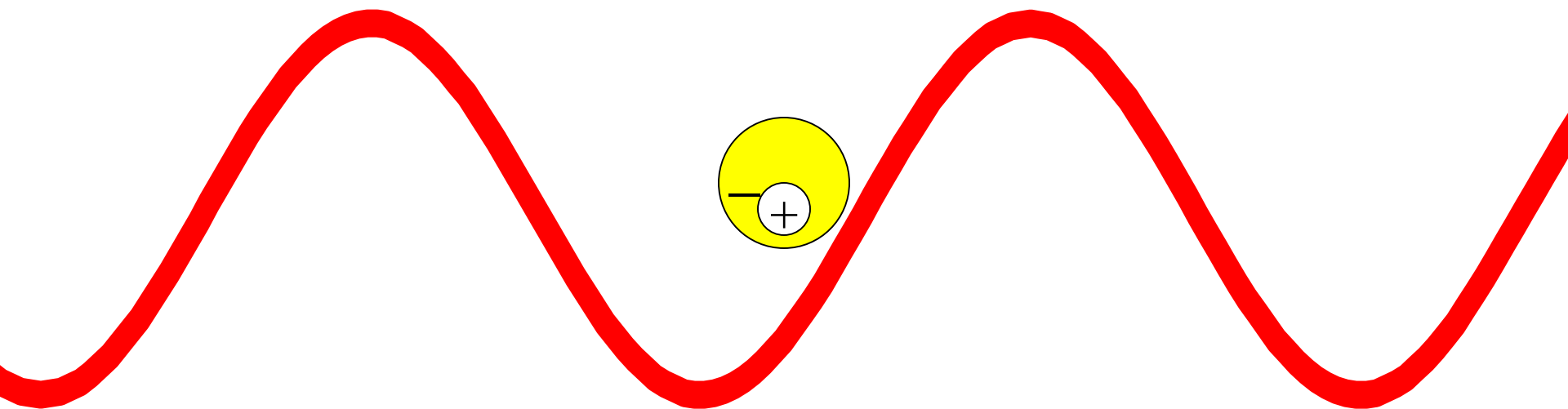
分極

400~700nm

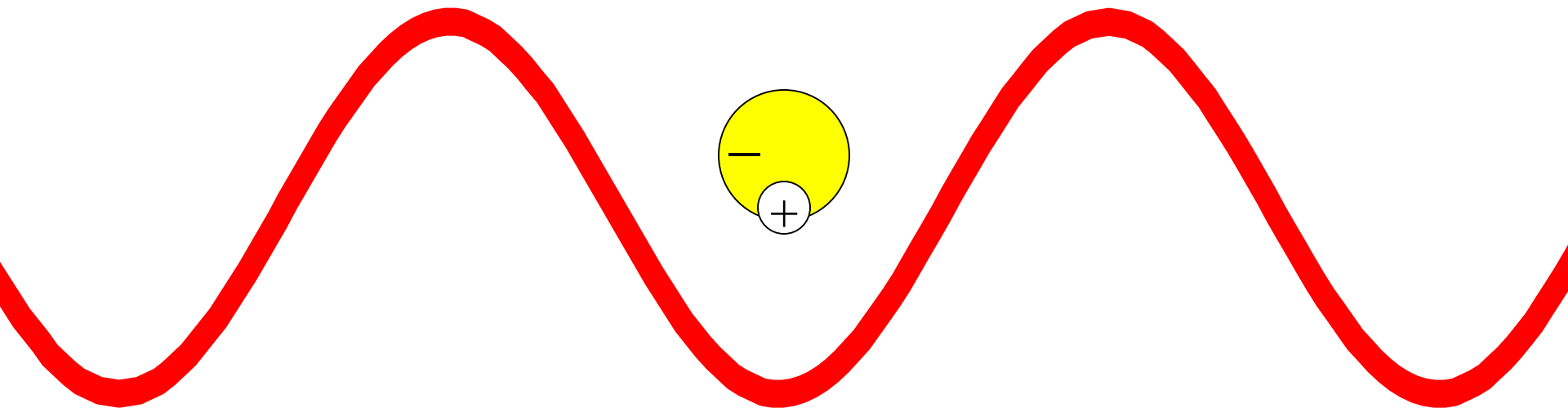


分子は一様な電場を感じる
光電場によって電気双極子が誘起される

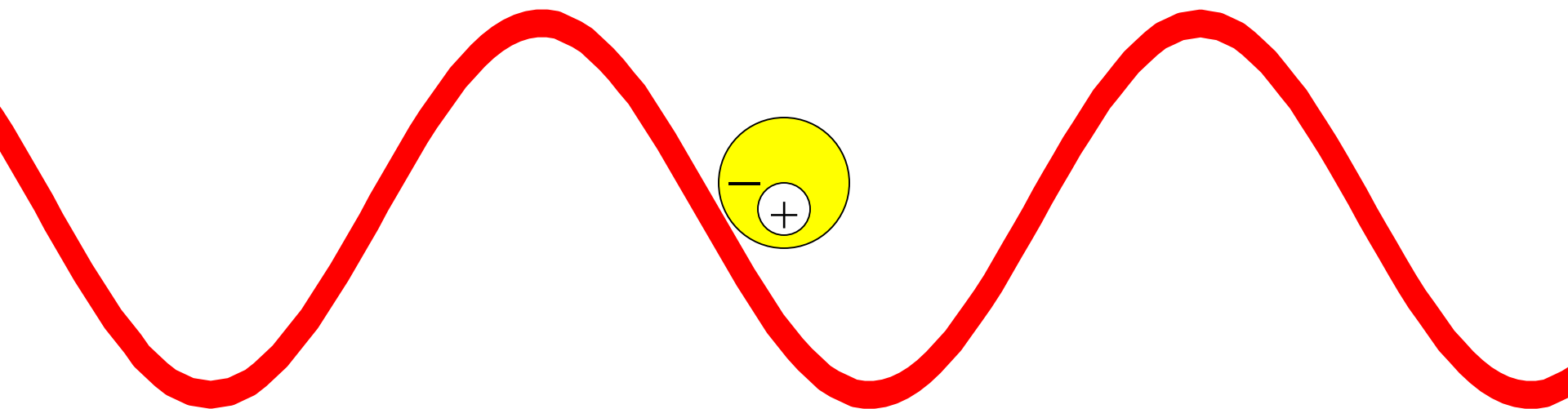
分極



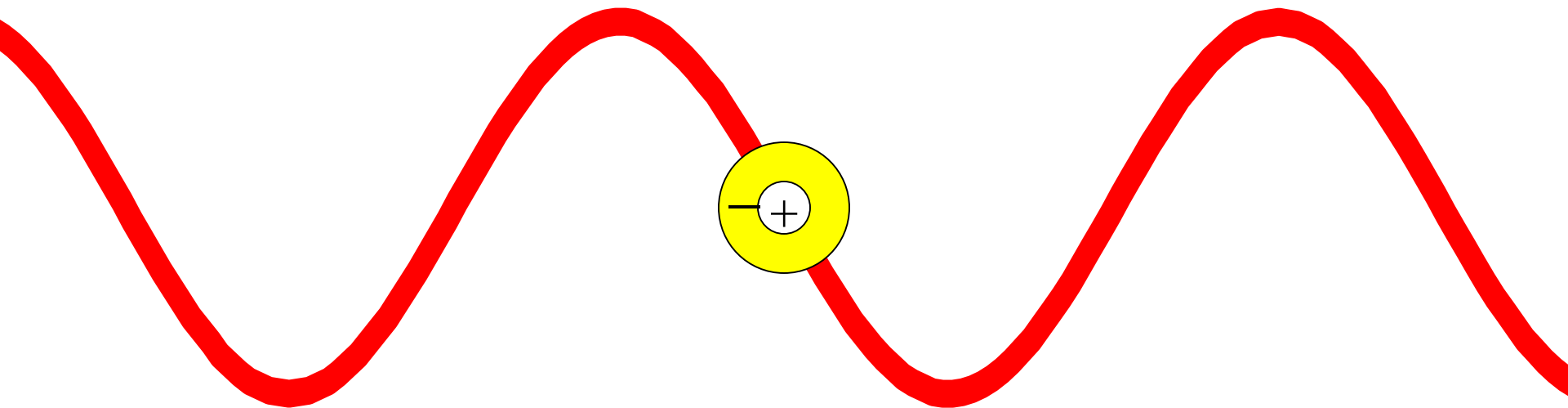
分極



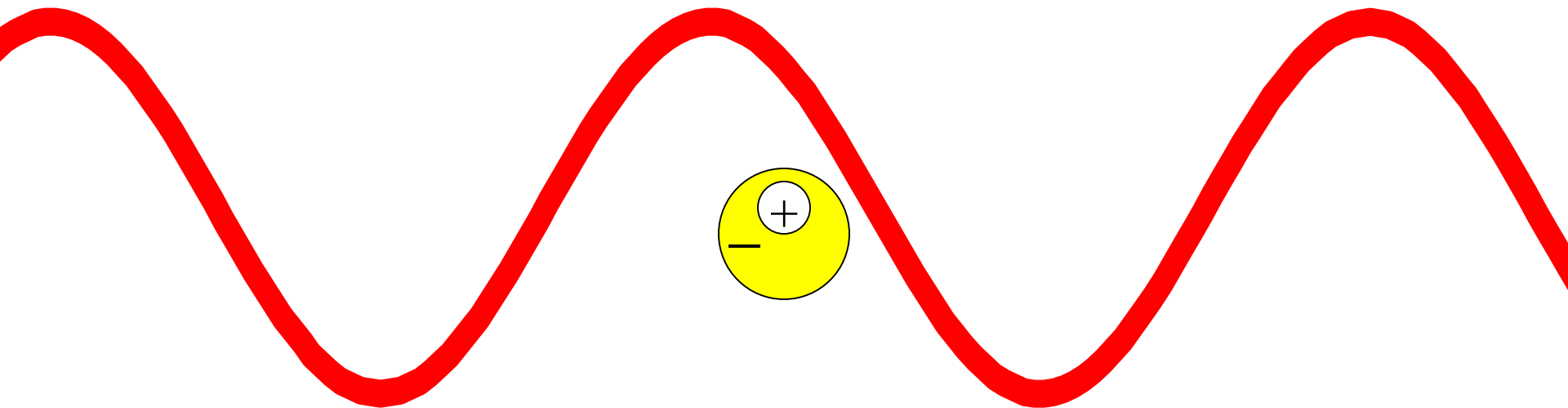
分極



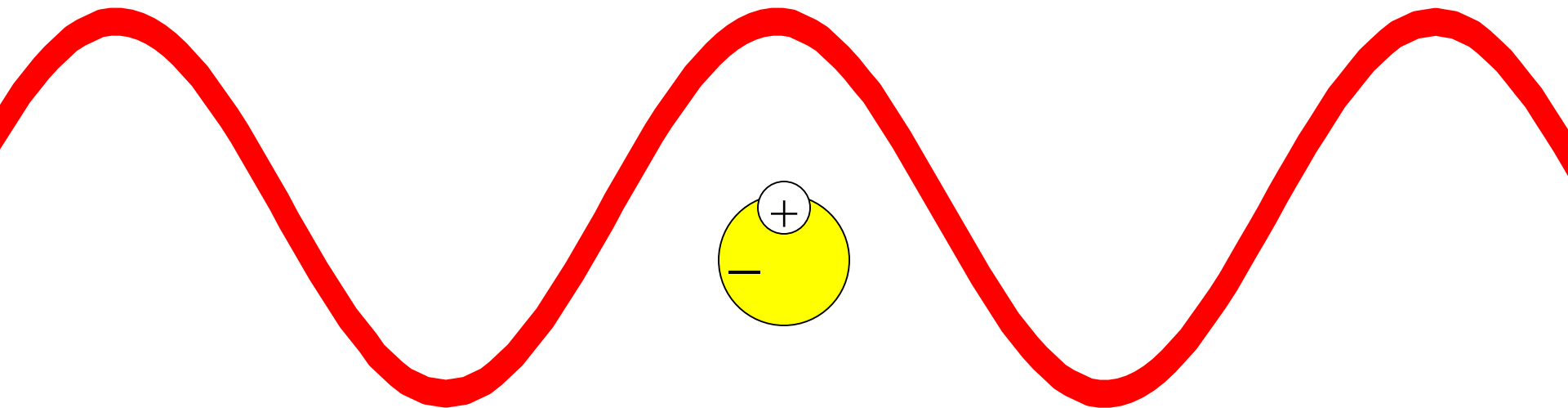
分極



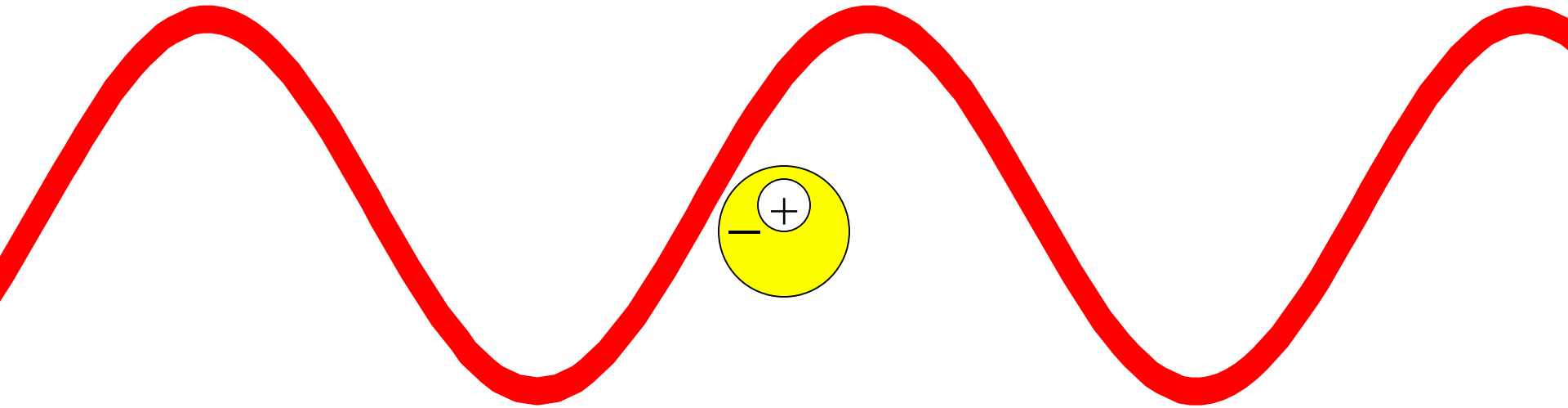
分極



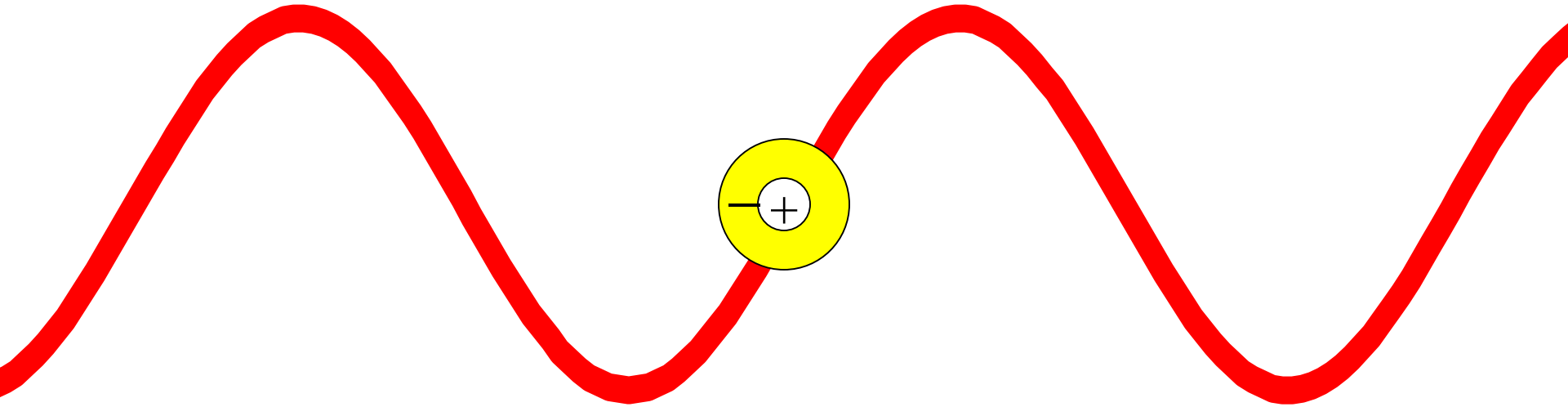
分極



分極



分極



光電場と分極との関係

分極 $P = \varepsilon_0 \chi E$ 線形相互作用

$$\begin{aligned} P &= \varepsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(2)} E + \chi^{(3)} E^2 \cdots) E \\ &= \varepsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 \cdots) \end{aligned}$$

非線形相互作用、非線形光学効果

光磁場の効果は？

光磁場の効果は小さい

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}$$

$$\mathbf{E}, \mathbf{B} \propto e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad \mathbf{B} = \frac{k}{\omega} \mathbf{E} \approx \frac{E}{c}$$

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\text{第1項 } qE \quad \text{第2項 } q \frac{v}{c} E$$

光と物質の相互作用の古典モデル

固有周波数 ω_0 のバネでつながれた質量 m の電荷 q
(ローレンツモデル、電気双極子＝調和振動子)

$$m\left(\frac{d^2}{dt^2}x + \Gamma_0 \frac{d}{dt}x + \omega_0^2 x\right) = qE$$
$$= qE_0 e^{-i\omega t}$$

$$x = x_0 e^{-i\omega t}$$

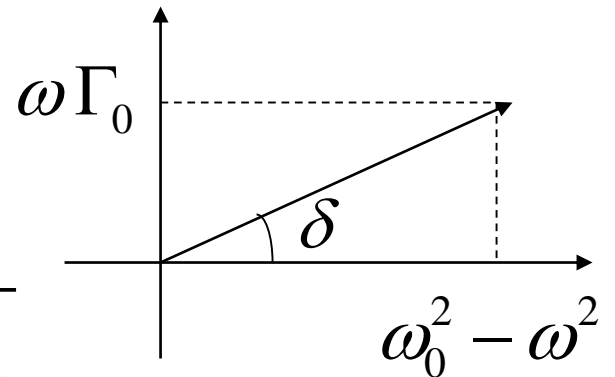
$$x_0 = \frac{q/m}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_0} E_0 = \xi(\omega) E_0$$

$$= \frac{q/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\Gamma_0^2}} e^{i\delta(\omega)} E_0 = |\xi(\omega)| e^{i\delta(\omega)} E_0$$

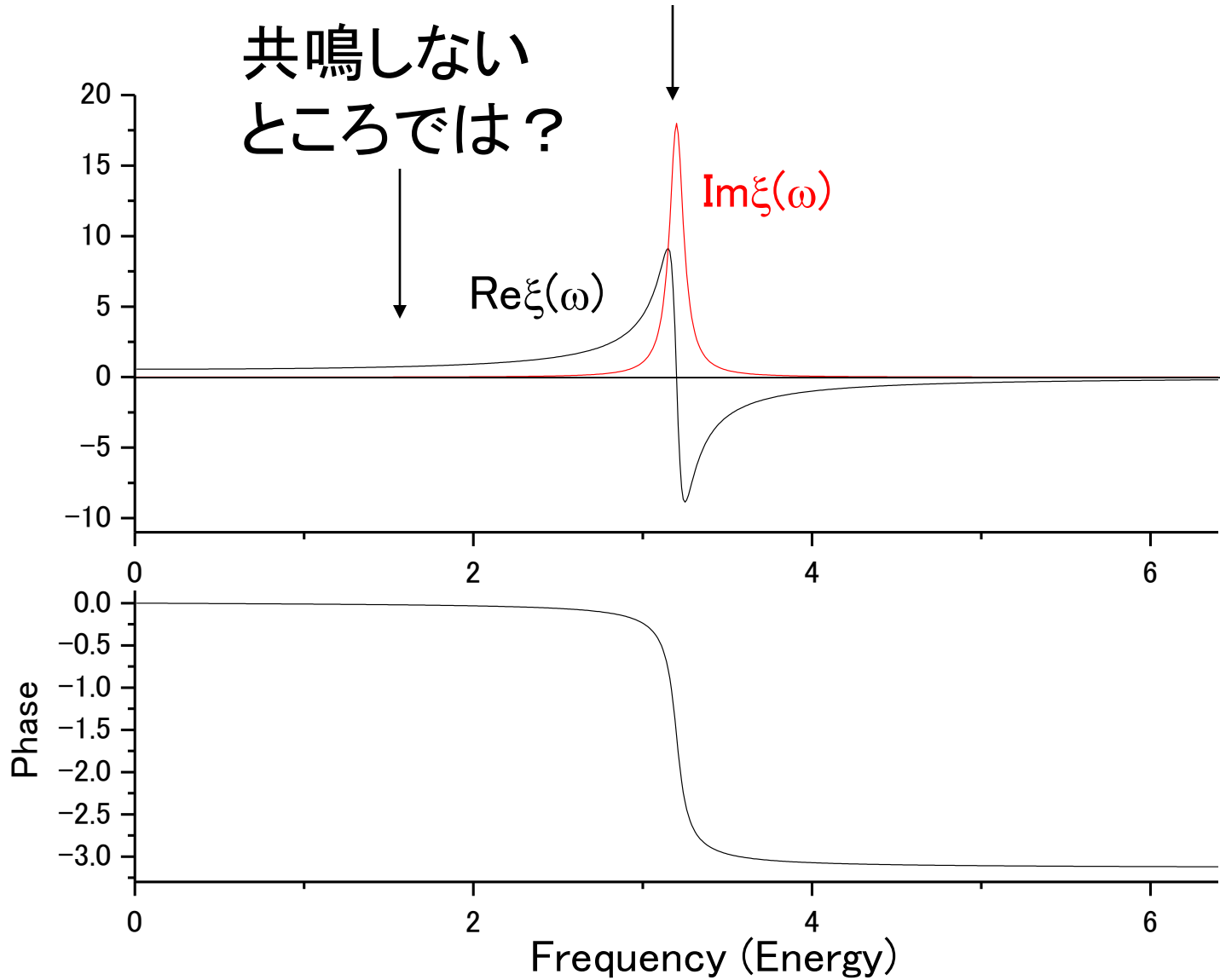
$$p = qx = qx_0 e^{-i\omega t} = q|\xi(\omega)| E_0 e^{-i(\omega t - \delta(\omega))}$$

$$P = \frac{N_0}{V} p = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E \quad \text{マクロな分極}$$

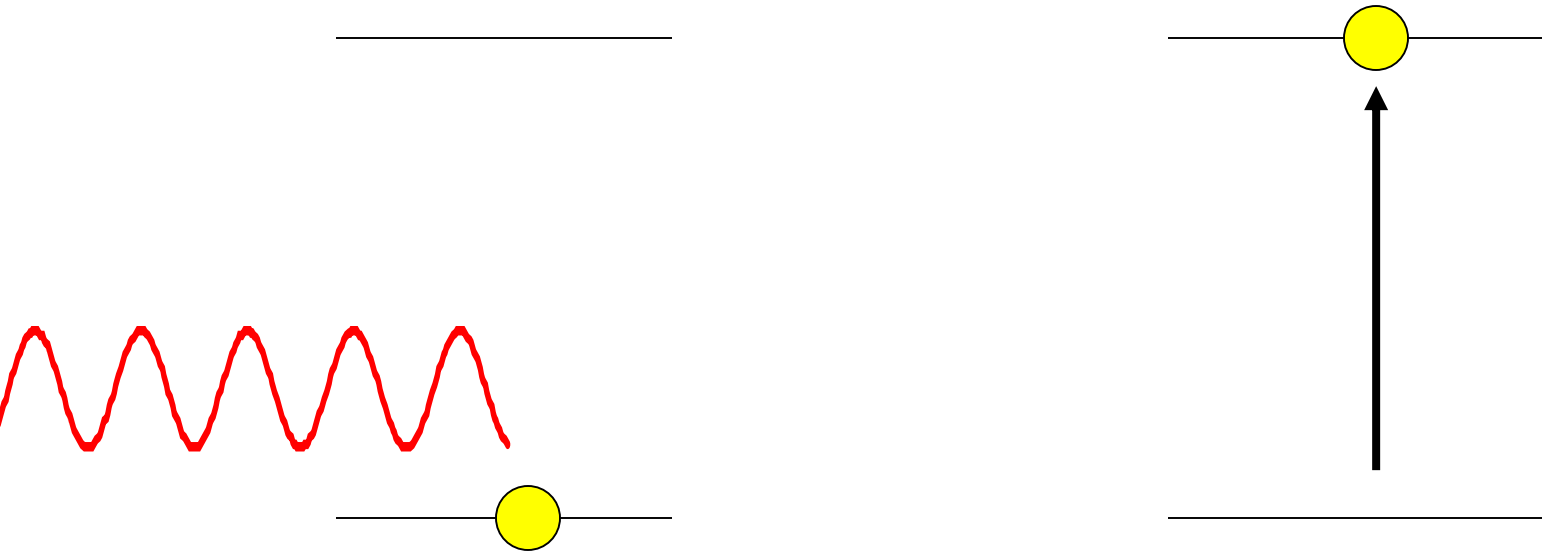
$$\chi^{(1)}(\omega) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{N_0 q^2}{V m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_0}$$



共鳴周波数では吸収が起こる



量子力学では

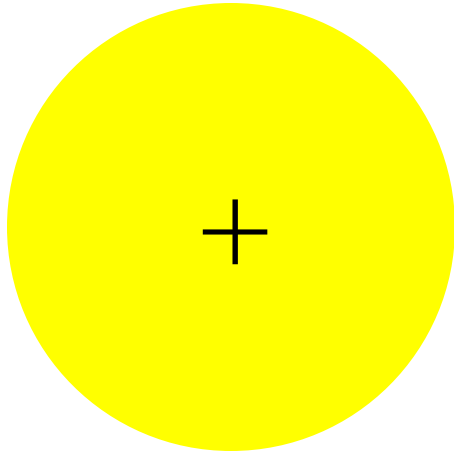


不連続な遷移

古典的な調和振動子モデルと整合しているのか？

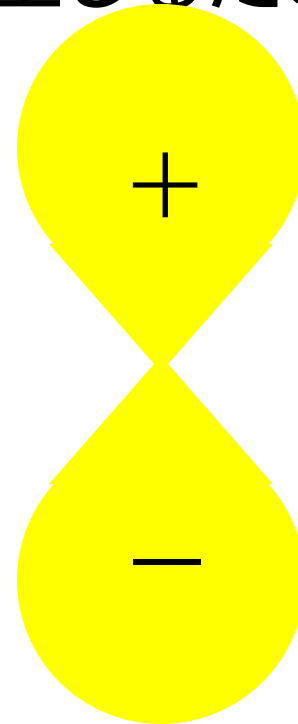
分極の量子論による説明

電荷の偏り(電気双極子)を生じるためには



$$S(\mathbf{r}) e^{-i\omega_S t}$$

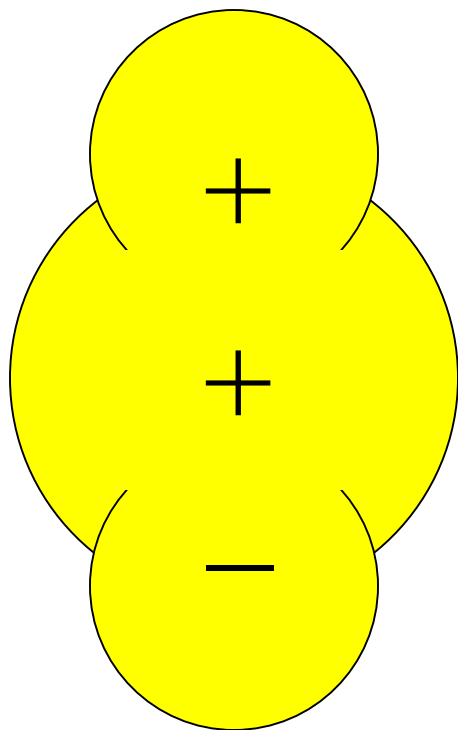
基底状態電子波動関数
偶関数



$$P(\mathbf{r}) e^{-i\omega_P t}$$

励起状態電子波動関数
奇関数

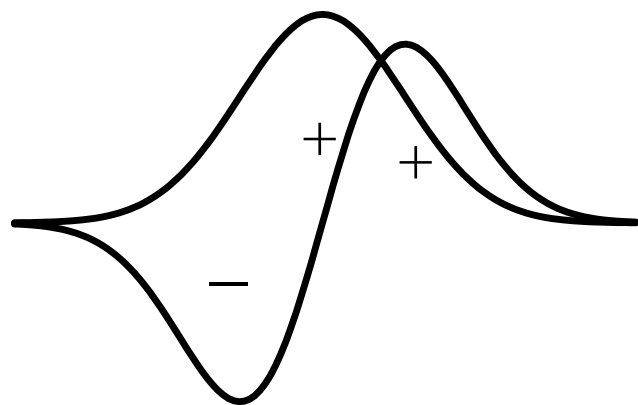
波動関数の重ね合わせ状態を作る



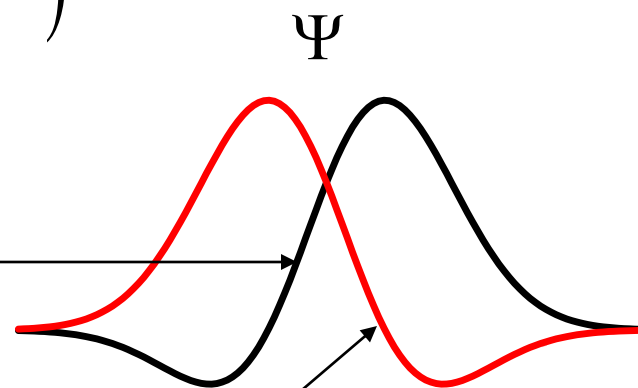
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(S(\mathbf{r}) e^{-i\omega_S t} + P(\mathbf{r}) e^{-i\omega_P t} \right)$$

$$\int dr |\Psi|^2 = 1 \quad \text{規格化}$$

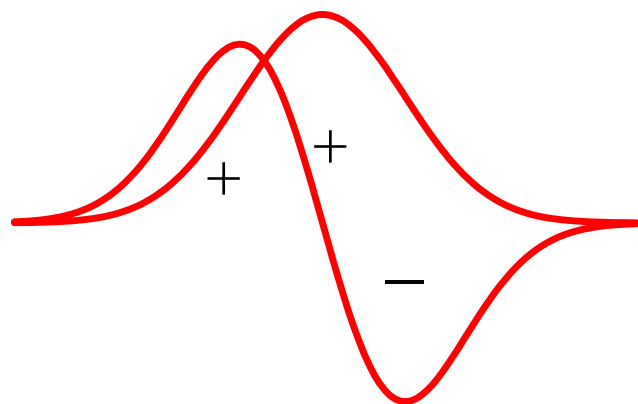
$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-i\omega_S t} \left(S(\mathbf{r}) + P(\mathbf{r}) e^{-i(\omega_P - \omega_S)t} \right)$$



$$(\omega_P - \omega_S)t = 0$$

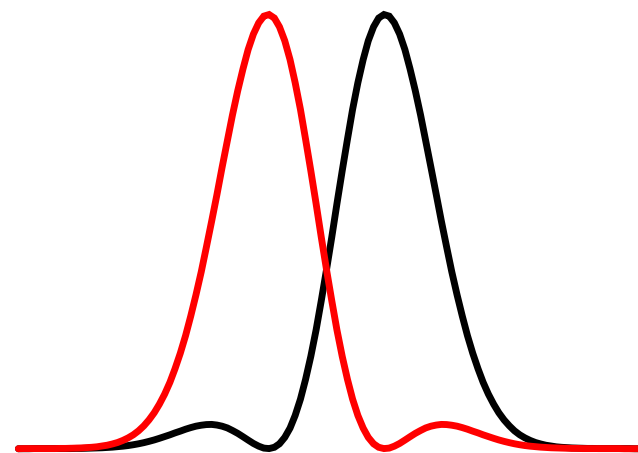


Ψ



$$(\omega_P - \omega_S)t = \pi$$

$|\Psi|^2$ 電子の存在確率



$\omega_P - \omega_S$ で周期的に変化する分極の発生

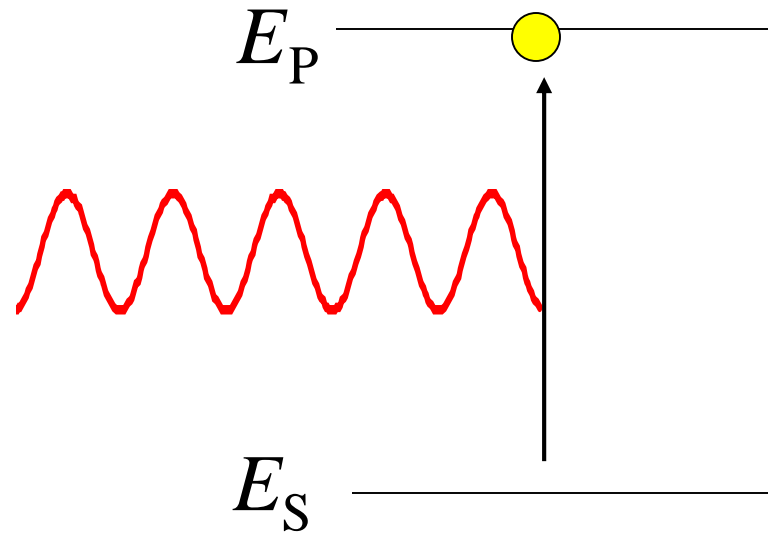
共鳴

光の周波数 $\omega = \omega_P - \omega_S$ (共鳴条件) のとき、最も振幅の大きい分極が誘起される

(電子が励起状態に存在する確率が最も高くなる)

$$\hbar\omega = \hbar\omega_P - \hbar\omega_S$$

$$E = E_P - E_S$$



光学遷移

非共鳴 $\omega \ll \omega_p - \omega_s$ では

$$\frac{1}{\sqrt{1+C^2}} \left(\psi_{\text{gr}}(\mathbf{r}, t) + C \psi_{\text{ex}}(\mathbf{r}, t) \right) \quad |C| \ll 1$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+C^2}} \left(S(\mathbf{r}) e^{-i\omega_s t} + CP(\mathbf{r}) e^{-i\omega_p t} \right)$$

基底状態に励起状態がわずかに重なり、分極が発生

$$\frac{1}{\sqrt{1+C^2}} \cong 1, \quad C = C(t) \quad \text{分極の周波数は } \omega$$

エネルギーを保存していないように見えるが？

遷移確率

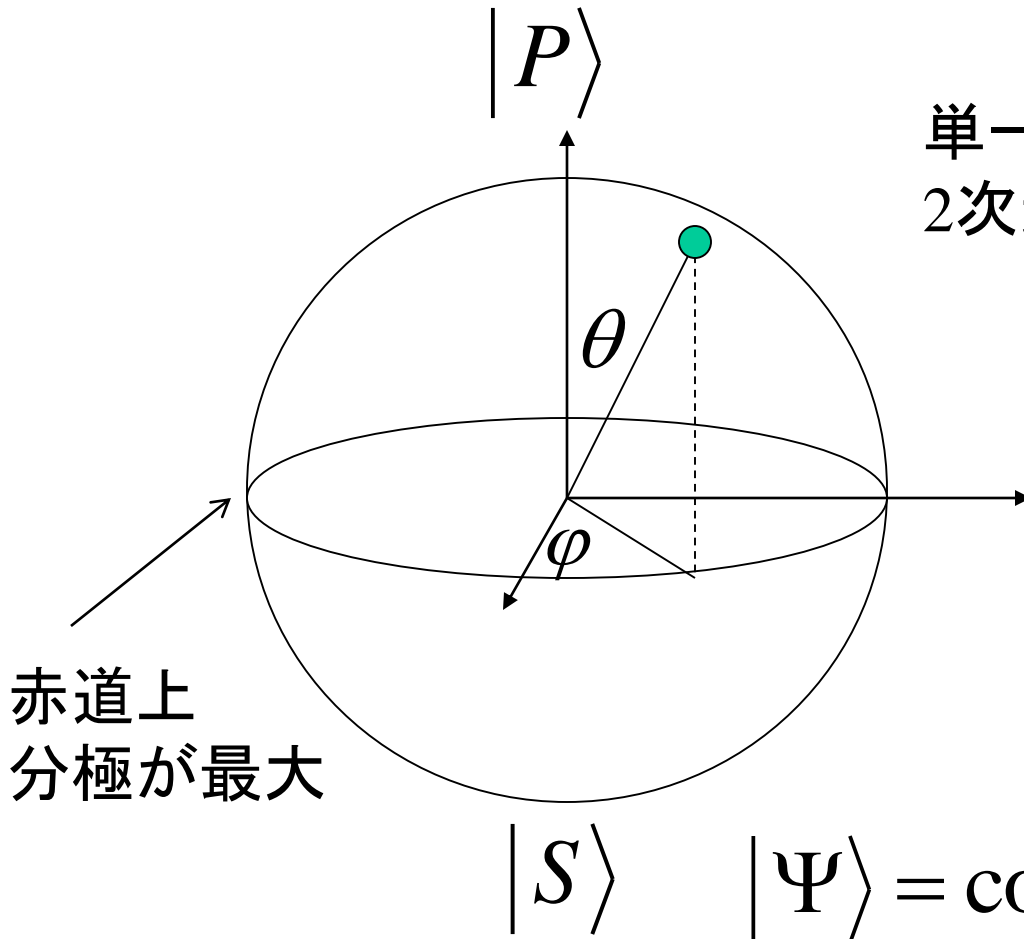
$$\begin{aligned} \text{遷移確率} \\ \text{(振動子強度)} &\propto \left| \int dx P^*(x) x S(x) \right|^2 \\ &= \left| \langle P | x | S \rangle \right|^2 = \left| \text{遷移双極子モーメント} \right|^2 \end{aligned}$$

x : 光電場の方向 (光との電気双極子相互作用)

2つの準位間で光学遷移が起こるためには
波動関数の対称性 (parity) 偶 \longleftrightarrow 奇

量子ビットと分極

単一量子ビットのBloch球表示
2次元球面上の点

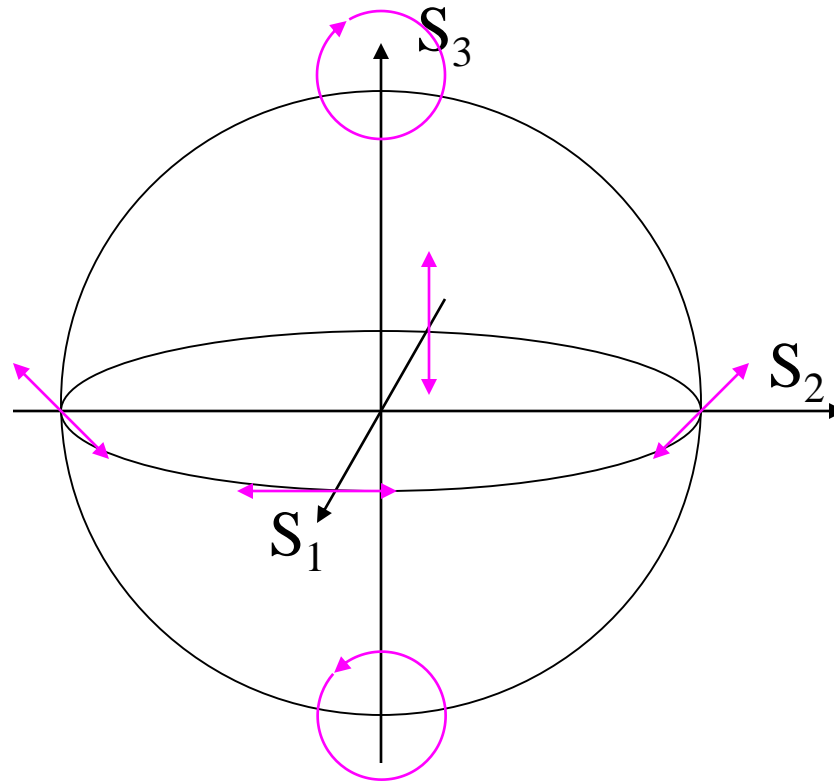


Poincare球と同じ自由度

$$|\Psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2} |P\rangle + e^{i\varphi} \sin\frac{\theta}{2} |S\rangle$$

ポアンカレ球

光の任意の偏光状態を記述

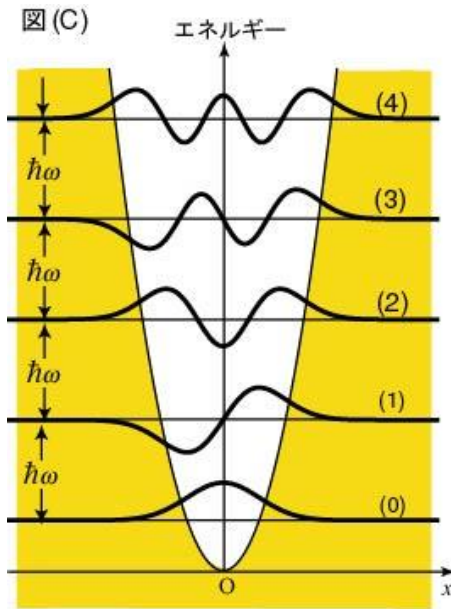


$$|P\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|R\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|L\rangle$$

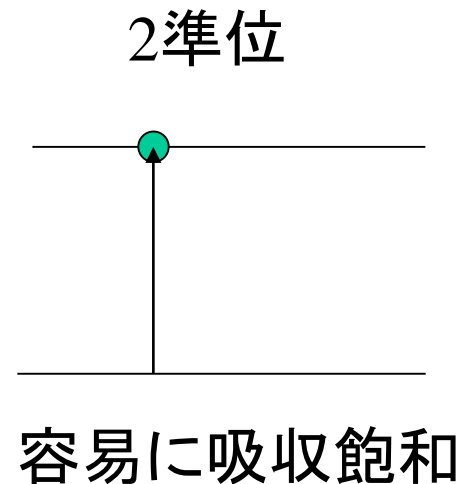
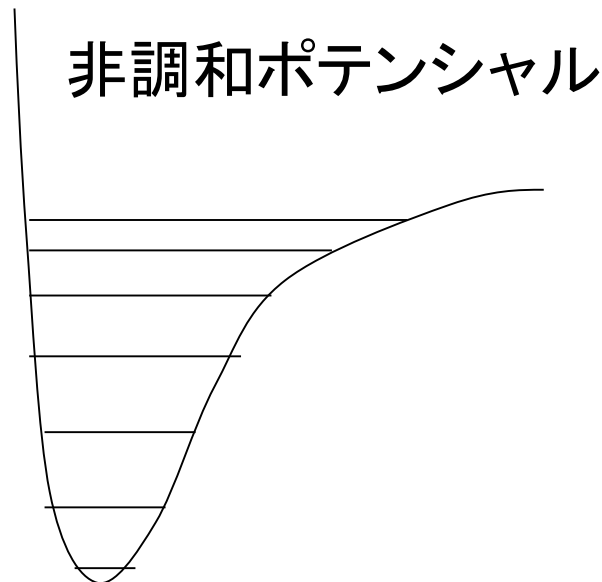
調和振動子モデルと2準位系の違い

調和振動子では、非線形性はでてこない
分極Pは光電場Eに比例
非線形性を扱うには？

2準位系は本質的に非線形



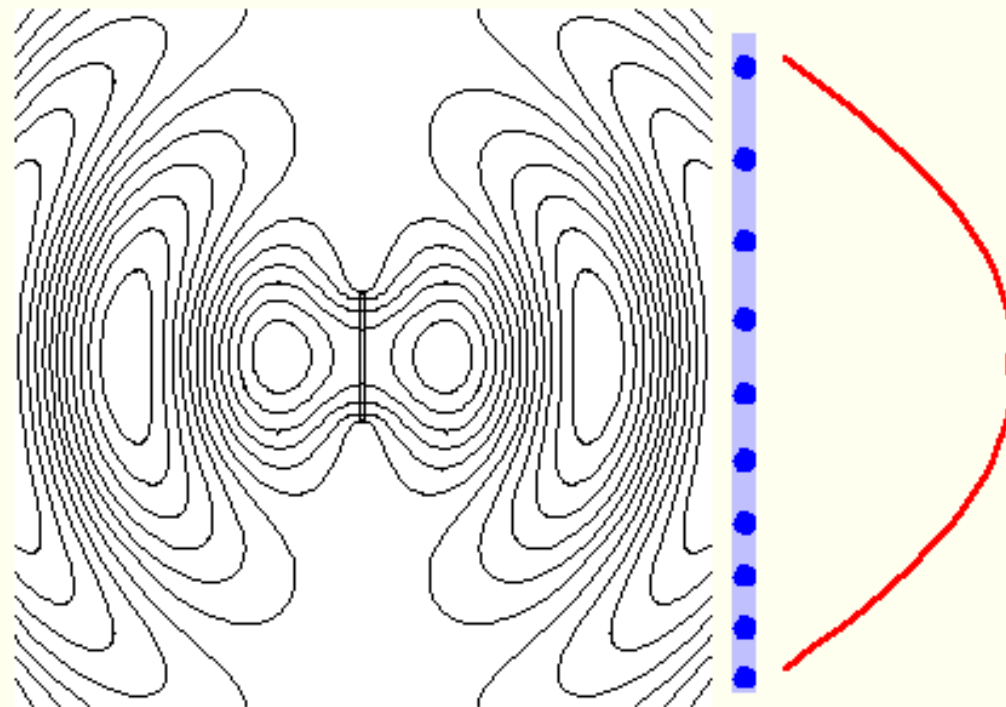
太い実曲線が波動関数
(0): 基底状態
(1)(2)(3)....: 励起状態



ダイポールアンテナ

半波長ダイポールアンテナから電気力線のアニメーション

$2.5\lambda \times 2.5\lambda$ の範囲を描画



<http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/halfdip/halfdip-j.html>

光通信

インコヒーレント光通信 振幅を利用 (AM 現在技術)

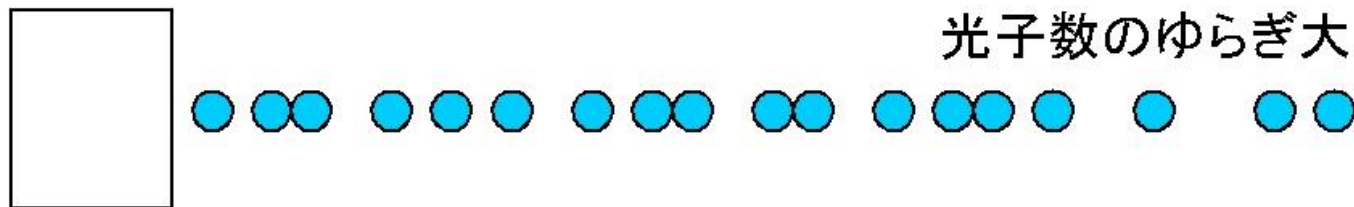
コヒーレント光通信 位相を利用 (FM)
光ソリトン通信 光ソリトンを利用

量子通信 光の量子性を利用

たとえば

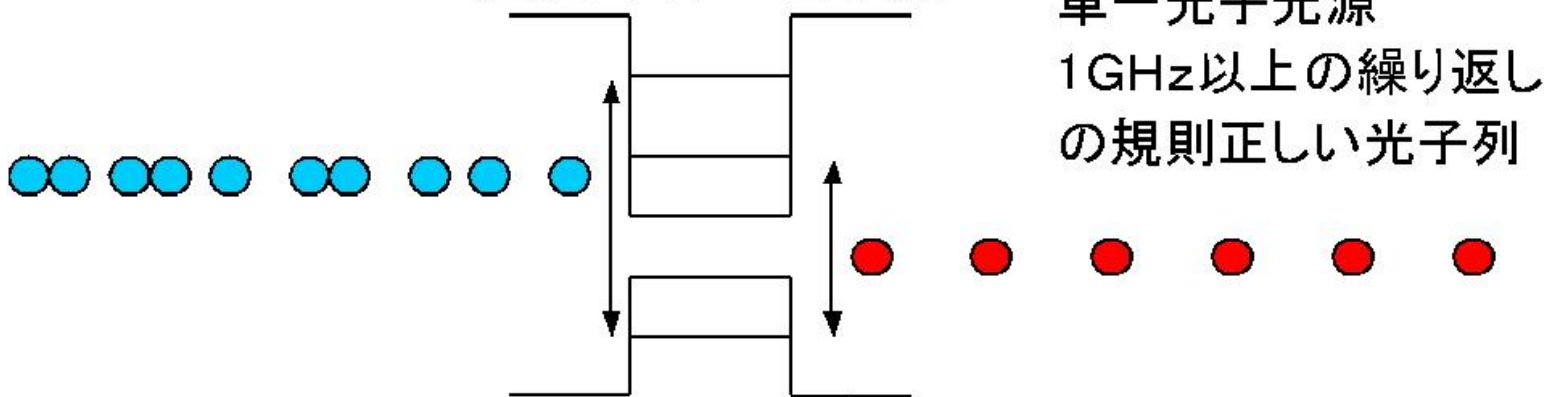
単一光子光源

通常の光源 (レーザーも含む)



非古典光源

単色レーザーで共鳴励起された単一量子点

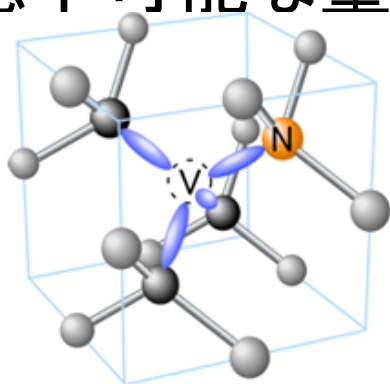


単一分子でも可能

量子通信・量子コンピュータへの応用

ダイヤモンドLEDで光子を1個ずつ室温で電氣的に発生させることに世界で初めて成功

— 盗聴不可能な量子暗号通信に向けて加速 —



12/04/16 大阪大 産総研

図1 ダイヤモンド中のNV中心（窒素-空孔複合体）

Nは窒素原子でダイヤモンド格子中の炭素原子の置換位置に入っている。Vは炭素原子が抜けた空孔（V）である。

ピンク色の原因

NV⁰から
575nm発光
(ゼロフォノン線)

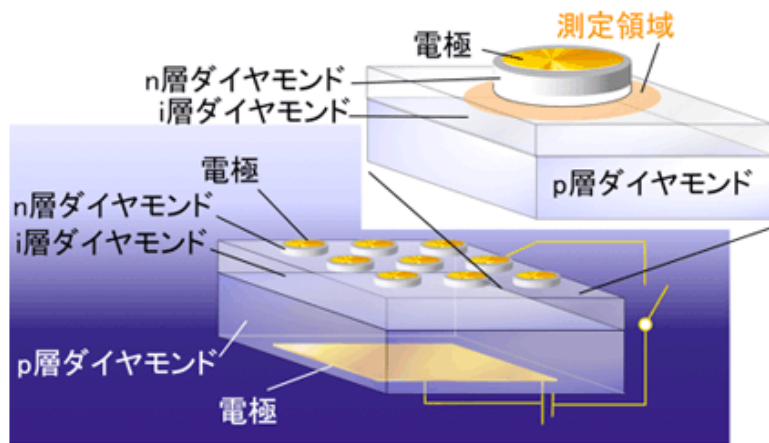


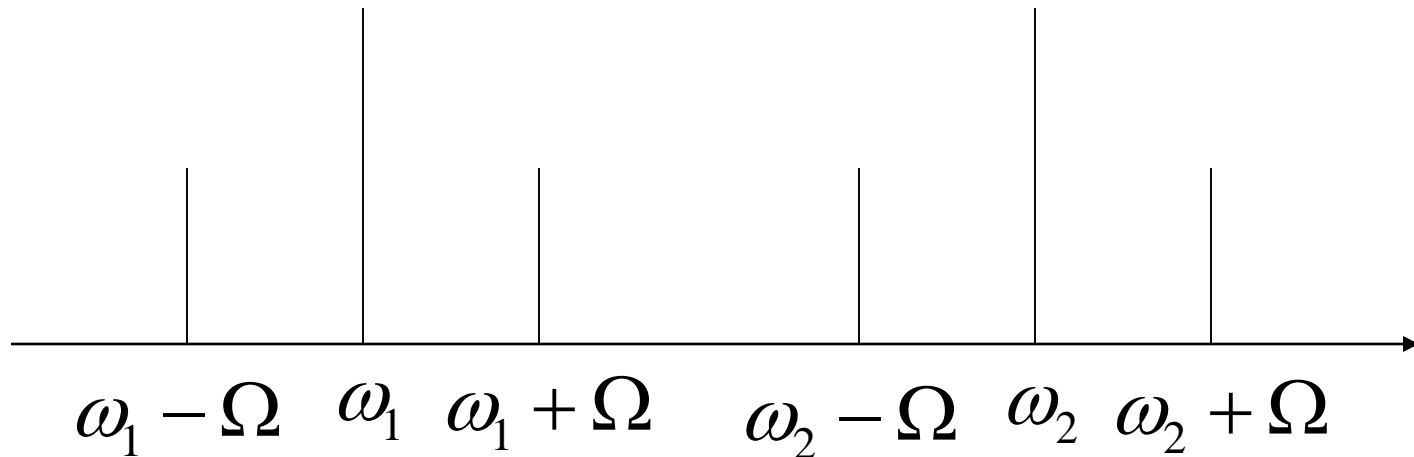
図2 電流注入型単一光子発生素子の概略図

高品質ダイヤモンド（i層）を、リンをドーブしたn層とホウ素をドーブしたp層で挟んだp-i-n形ダイオード構造を用いた。i層の単一NV中心からの発光を共焦点顕微鏡により観測している。

光(電磁波)に情報を乗せる

$(1 + A \cos \Omega t) \cos \omega t$ 振幅変調

$$\begin{aligned} \cos \Omega t \cdot \cos \omega t &= \frac{e^{i\Omega t} + e^{-i\Omega t}}{2} \cdot \frac{e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}}{2} \\ &= \frac{1}{4} (e^{i(\omega+\Omega)t} + e^{-i(\omega+\Omega)t} + e^{i(\omega-\Omega)t} + e^{-i(\omega-\Omega)t}) \end{aligned}$$



通信速度 bps (bits per second)

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$|\Delta \nu| = \frac{c}{\lambda^2} |\Delta \lambda|$$

波長が短いほど波長当たりの周波数密度が高い

携帯電話 極超短波 0.3GHz~3GHz GHzで変調できない<Gbps

光通信 850nm, 1310nm, 1550nm ~300THz

$\lambda = 1\mu\text{m}$ で、 $\Delta\lambda = 1\text{nm}$ のとき $\Delta\nu = 300\text{GHz}$

1GHz= 10^9 Hz 30cm

1THz= 10^{12} Hz 0.3mm

1PHz= 10^{15} Hz 300nm

光と物質の非線形相互作用

分極 $P = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 \dots)$

二倍波発生 $\omega \rightarrow 2\omega$

光整流

三倍波発生 $\omega \rightarrow 3\omega$

四光波混合

二光子吸収

吸収飽和

自己収束

フotonエコー



赤外レーザダイオード $\sim 800\text{nm}$

Nd³⁺:YVO₄レーザ 1064nm

非線形結晶KTiOPO₄ 532nm

光-光相互作用 光-電子相互作用

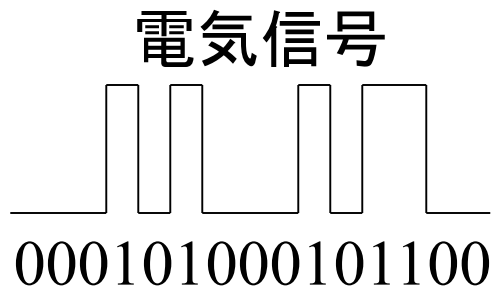
光エレクトロニクスデバイスに不可欠

非線形光学効果

光が物質に入射することによって光電場に**比例**した分極が誘起される
ところが・・・入射光強度が強いと比例からはずれ**非線形性**が現れる

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad \longrightarrow \quad \vec{P} = \epsilon_0 [\chi^{(1)} + \chi^{(2)} \vec{E} + \chi^{(3)} \vec{E}^2 + \cdot \cdot \cdot] \vec{E}$$

これらの非線形項が原因で、電場を印加すると物質の**吸収係数**や**屈折率**が変化する



連続光

電気光学
結晶

光は～500THzなので100THz
(100Tbps)の変調信号を運べる

非線形光学効果がなければ光
同士は相互作用しない(並列
性)

光を相互作用させ、光-光変換し
て電気信号の介在をなくせば、
光の高速性(高周波数密度)が
生かされる $\chi^{(3)}$

電気信号→光信号 変換

$\chi^{(2)}$

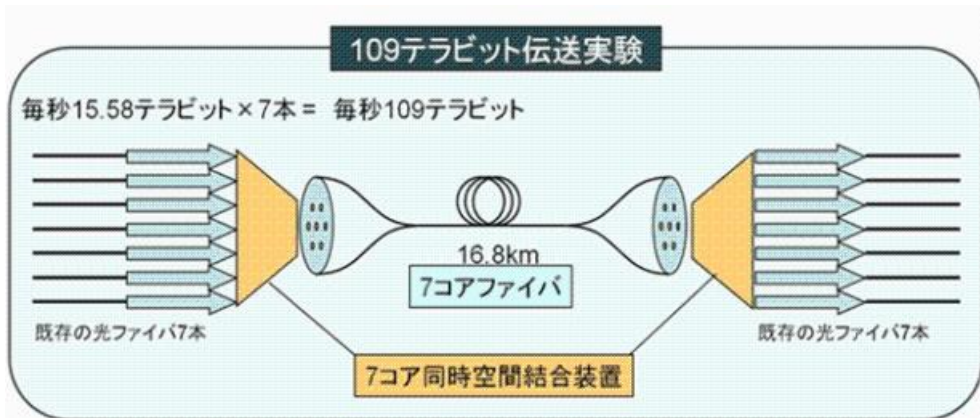
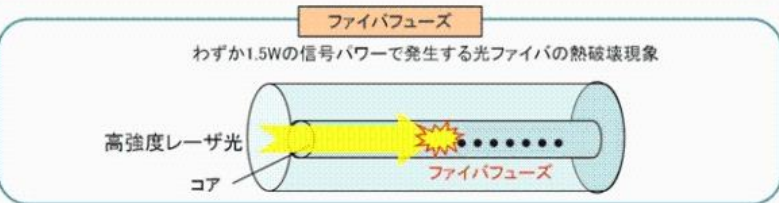
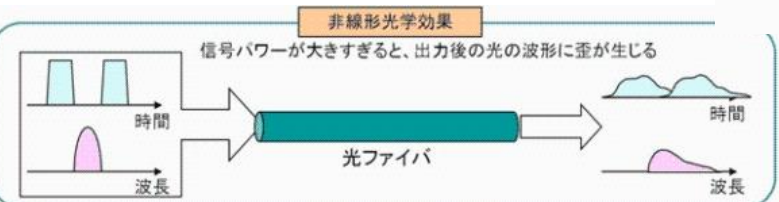
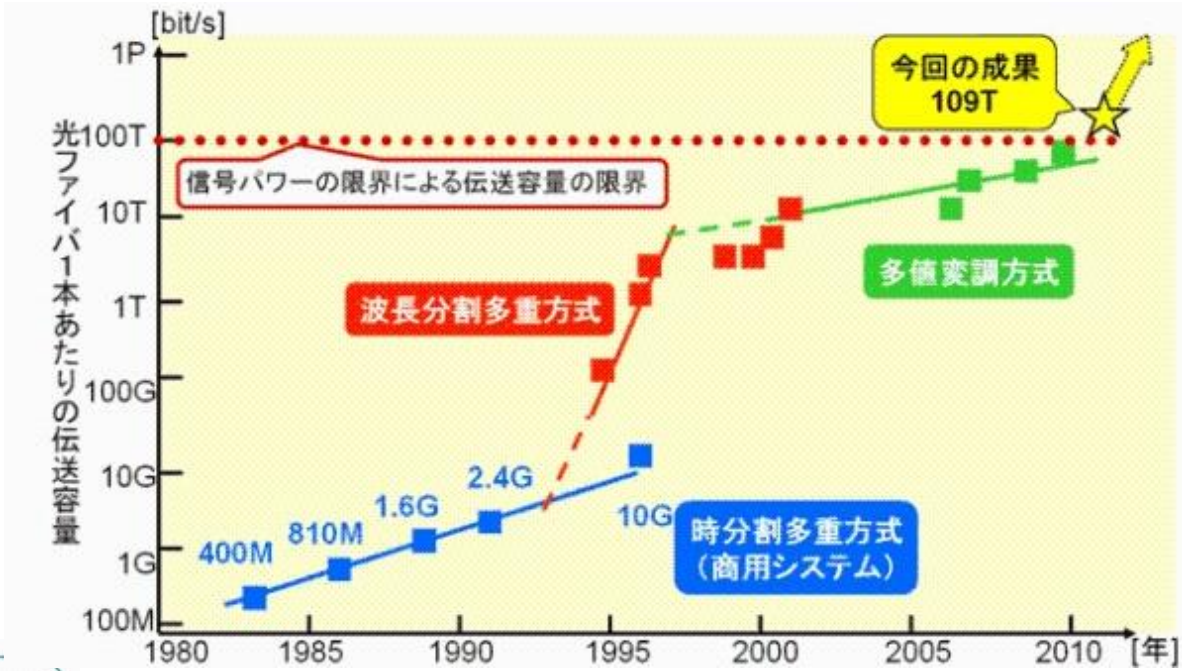
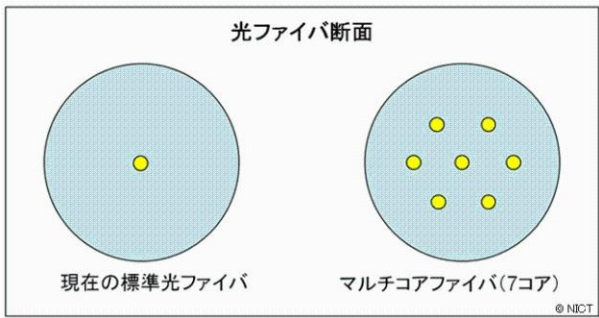
光ファイバ1本で世界最大容量69Tbps 伝送に成功

NTT 2010年3月25日

電磁気学3 ガイダンス 参照

光ファイバ1本の伝送容量109Tbpsの世界記録を樹立

情報通信研究機構(NICT) 2011年3月10日

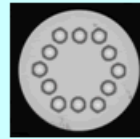


1Pbps、50kmの世界最大容量光伝送に成功 ～光ファイバ1本でハイビジョン映画 約5000本分を 1秒で伝送可能に～

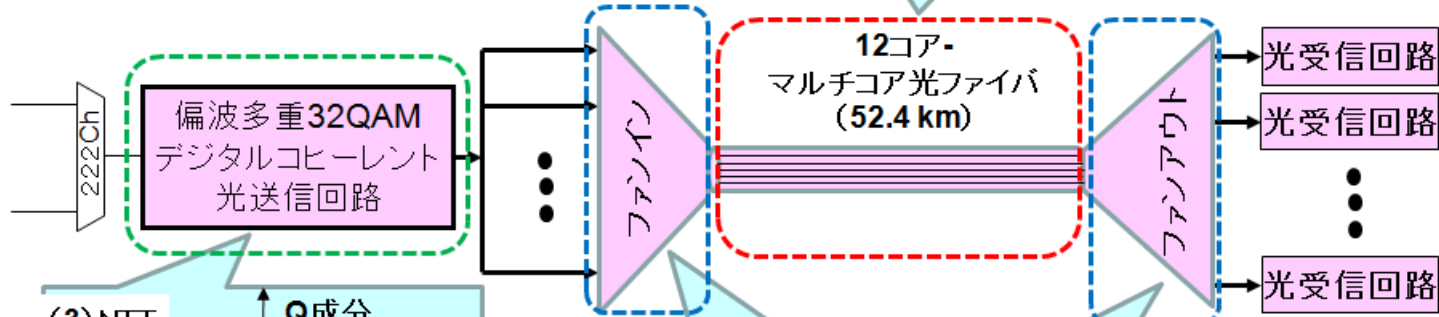
NTT、フジクラ、北大、デンマーク工科大 2012年9月20日

デンマーク工科大学(盛岡教授)
: 空間多重の提唱・拡張性

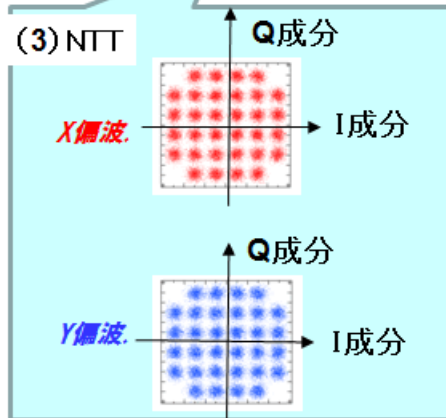
(1) NTT・フジクラ・北大



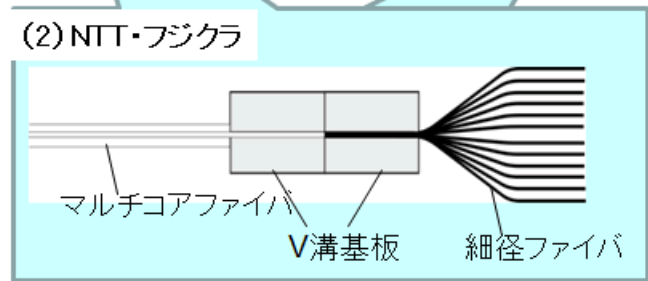
12コアファイバー



(3) NTT



(2) NTT・フジクラ



容量距離積「1エクサ」突破に成功、世界最大

容量の光ファイバ伝送実験

2013年9月25日

KDDI研と古河電工は、大洋横断光ファイバ伝送において、世界最大となる**毎秒140テラビット**の超大容量信号を約**7300km**伝送することに成功したことを発表した。この距離は、東京ーブリスベン間、ニューヨークーローマ間の距離に相当する。

毎秒140テラビットは、ハイビジョン映像2時間分を、1秒で700本分転送可能な速度となる。また、この実験において、伝送容量と伝送距離の積で示す**伝送性能指数「容量距離積」**が、世界で初めて、**1エクサ (Exa :1京の100倍、10の18乗)ビット**を突破したという。毎秒100テラビットを超える大容量伝送実験が、「マルチコアファイバ」を用いて実施されているが、伝送システムの性能指数である「容量距離積」は、毎秒0.7エクサビット・キロメートル程度までしか実現できていなかった。

コア間の信号の干渉を十分に抑えることで長距離中継伝送を可能とする7コア光ファイバと7コア光増幅器を共同開発。さらに、新たな信号処理技術を導入し、従来と比較して伝送効率を2倍に向上することに成功。この成果は、**商用化されている毎秒100ギガビット波長多重伝送システム**(伝送容量約毎秒9テラビット、伝送距離約1,500km)と比較すると、**伝送容量では約15倍、容量距離積では約70倍向上**。

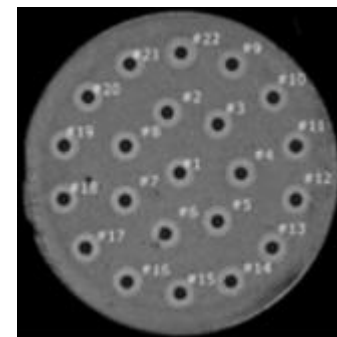
光ファイバの最大伝送容量の世界記録を更新、

2.15ペタビット毎秒を達成

2015年10月1日

NICT(情報通信研究機構)は、住友電工、RAM Photonics, LLCと共同で、従来世界記録であった光ファイバ1本あたりの伝送容量を2倍以上に更新し、**2.15ペタビット毎秒**の光信号の送受信実験に成功。光ファイバ1本あたりの伝送容量を拡大する次世代技術として、新型光ファイバが世界的に研究されている中、今回、品質が均一で長距離伝送に好適な同種コア型のシングルモード22コアファイバと波長多重光を一括で生成可能な**高精度光コム光源**を用いて、30km伝送を実証。

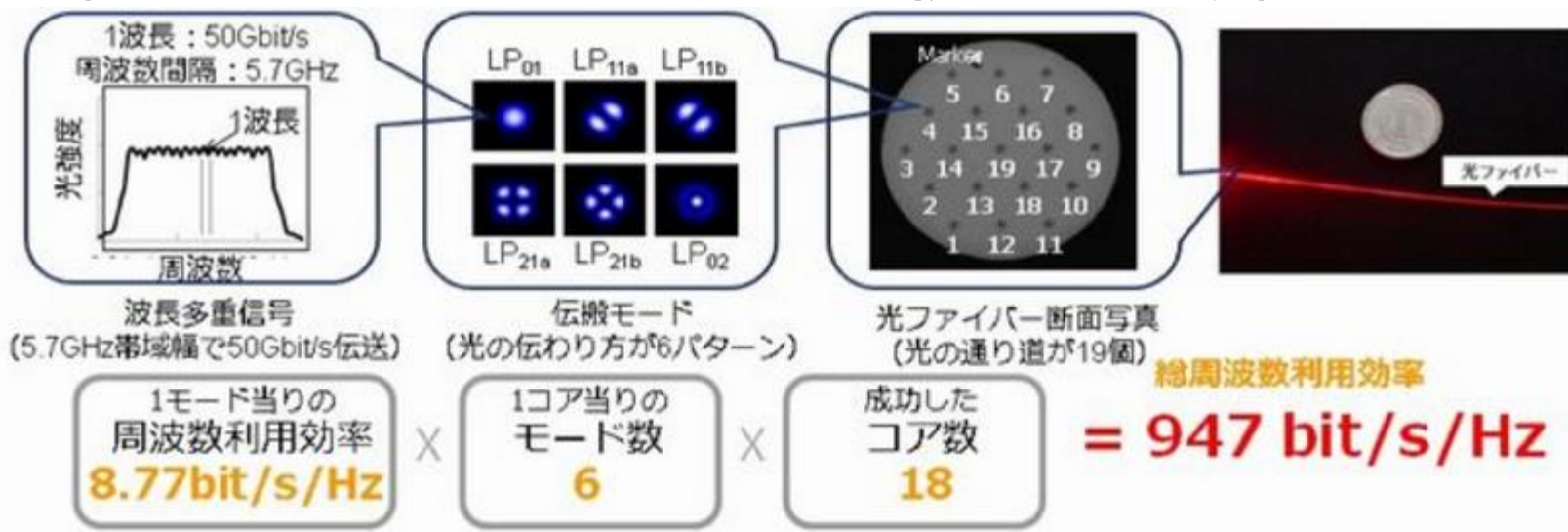
光伝送システムでの利用が期待されている高精度光コム光源を採用した今回の実験により、将来の大規模デジタルコヒーレント光ネットワーク実現の可能性。なお、本論文は、第41回欧州光通信国際会議(ECOC2015)にて高い評価を得て、最優秀ホットトピック論文として採択。



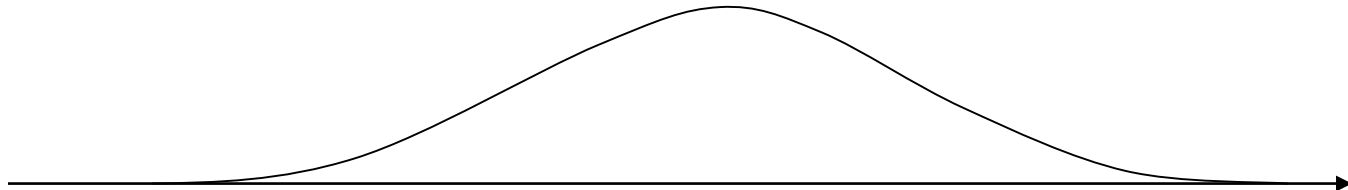
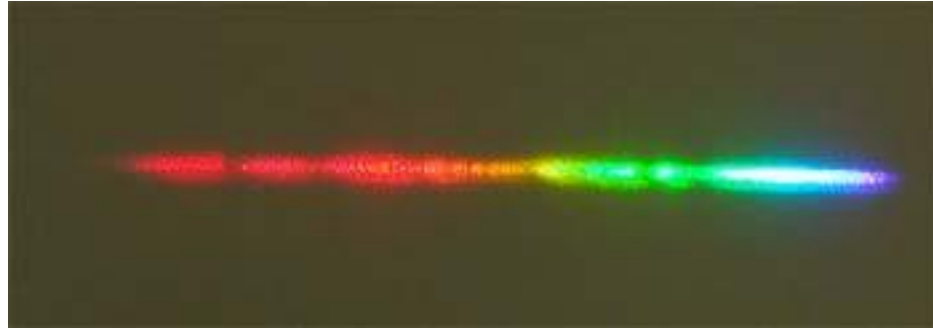
世界最高周波数利用効率を達成した光ファイバーの伝送容量拡大技術の実証に成功

2016年10月14日

株式会社KDDI 総合研究所は、光ファイバー通信の伝送容量を拡大するために必要となる周波数利用効率を著しく向上する技術を開発し、周波数利用効率947bit/s/Hzという、これまでの記録を2倍に更新する伝送実験に成功。これは、4Gモバイル通信で用いられているLTEの約60倍の周波数利用効率。5G時代には、無線技術だけでなく、それを支えるネットワーク技術や光ファイバー伝送技術の革新も不可欠。この技術は、より低遅延で高速な5G以降のモバイル通信システムを支え、“新しい体験・サービス”を提供するキー技術として期待。



超短パルスの自己位相変調による 白色光発生



周波数

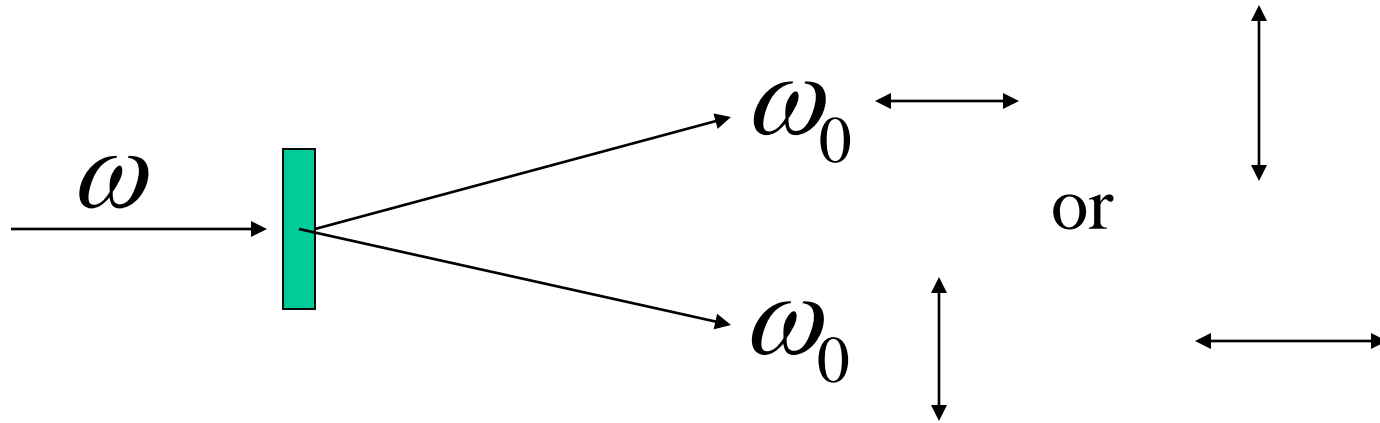
$$E(t) = F(t) \exp[-i(\omega t - kx)]$$

$$k = nk_0, \quad n = n_0 + n_2 |E(t)|^2$$

$$\omega t - kx = \omega t - (n_0 + n_2 |E(t)|^2) k_0 x$$

$$\text{瞬時周波数} \quad \omega - n_2 k_0 x \frac{d}{dt} |E(t)|^2$$

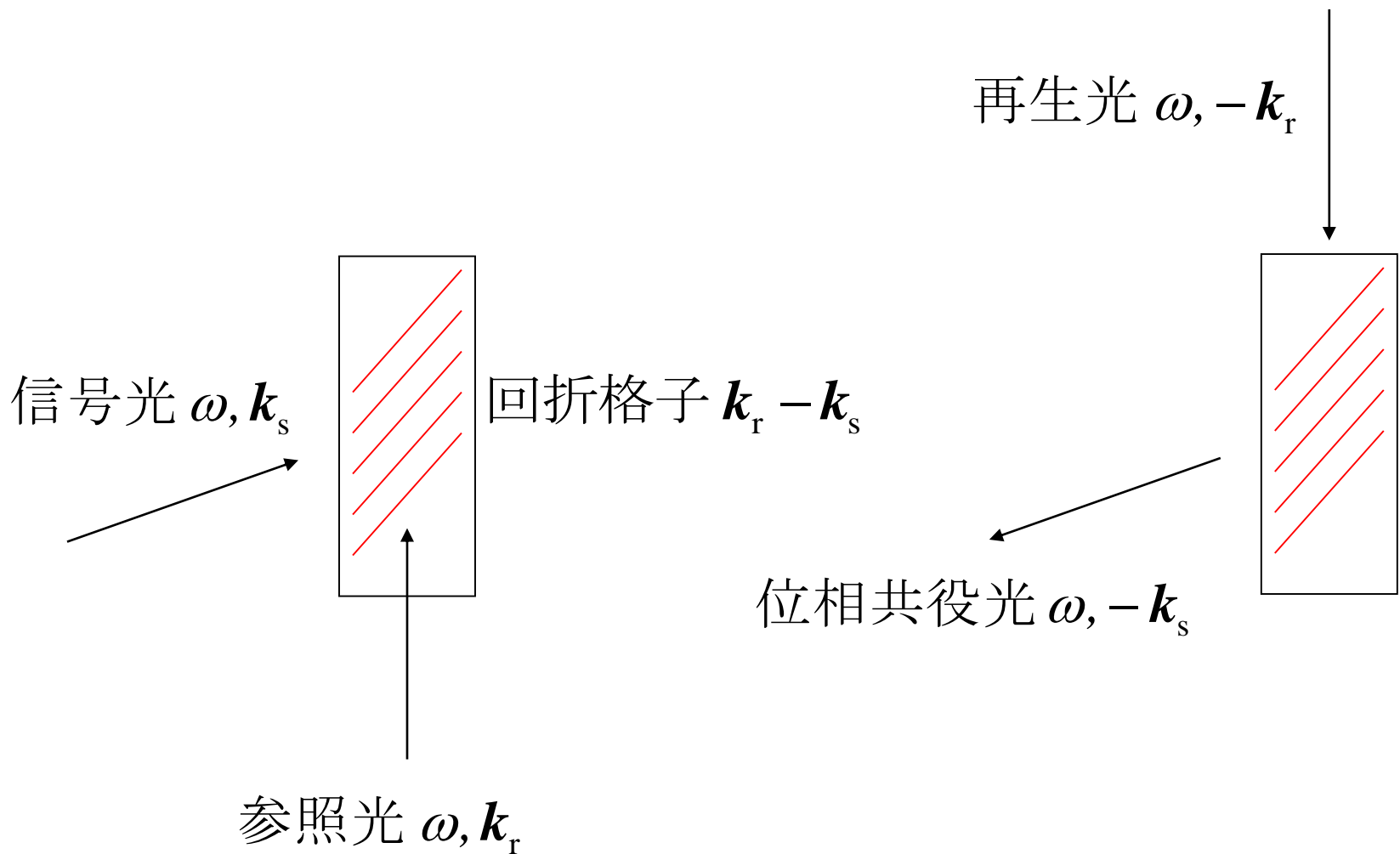
Entangled photon pair



parametric down conversion $\omega \rightarrow \omega_0 + \omega_0$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\leftrightarrow\rangle |\updownarrow\rangle + |\updownarrow\rangle |\leftrightarrow\rangle \right)$$

四光波混合による位相共役波

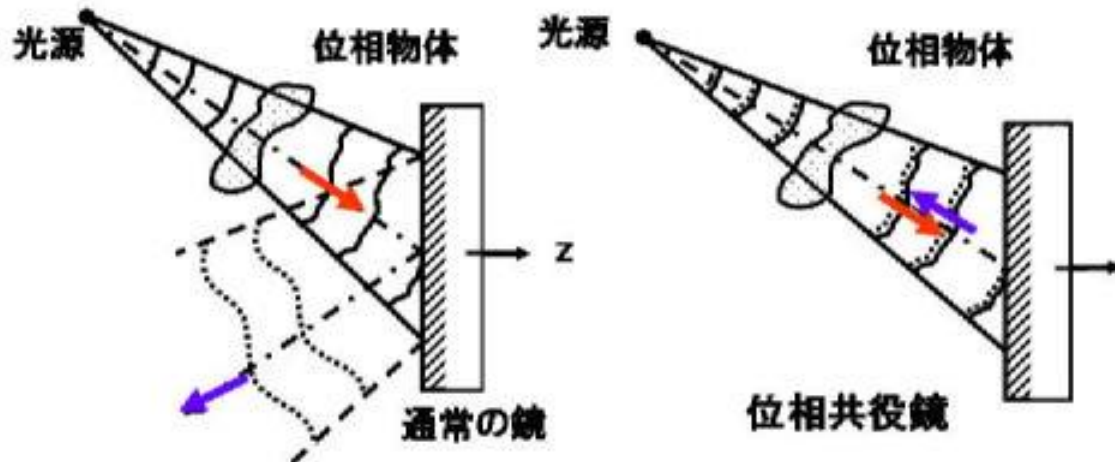


$$E_s = E_{s0} e^{i(\omega t - \mathbf{k}_s \mathbf{r}) + i\phi}$$

$$E_r = E_{r0} e^{i(\omega t - \mathbf{k}_r \mathbf{r})}$$

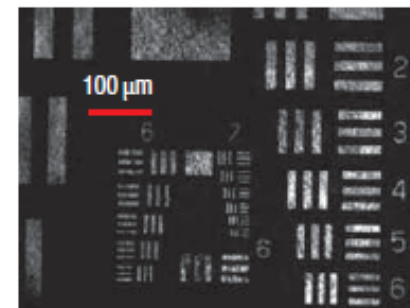
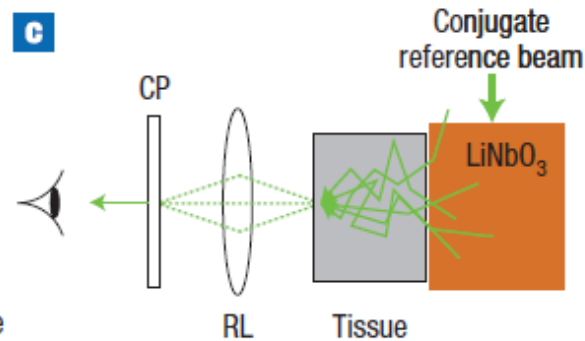
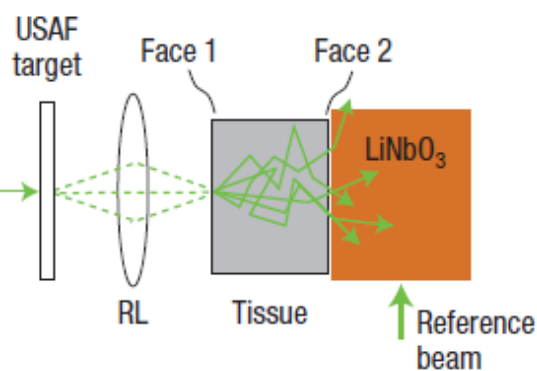
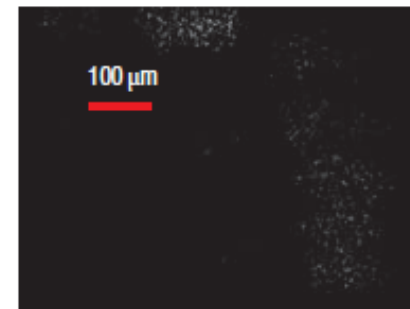
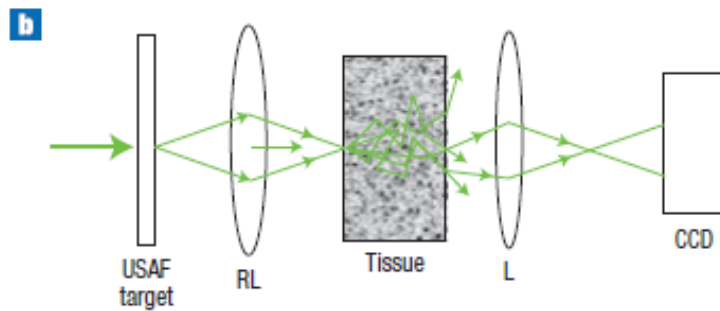
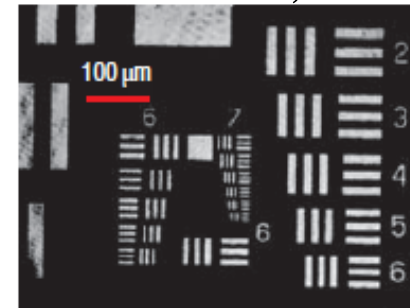
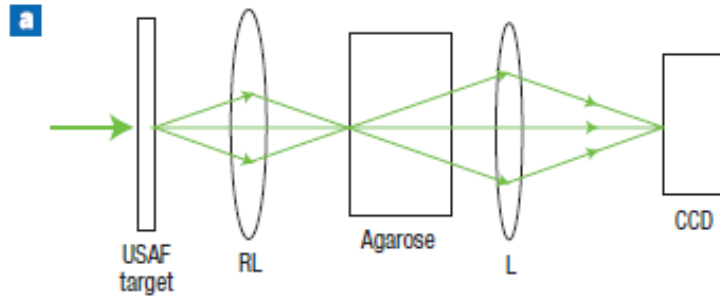
$$E_r' = E_{r0}' e^{i(\omega t + \mathbf{k}_r \mathbf{r})}$$

$$E_p \propto \chi^{(3)} E_r' E_s^* E_r = \chi^{(3)} E_{r0}' E_{s0}^* E_{r0} e^{i(\omega t + \mathbf{k}_s \mathbf{r}) - i\phi}$$



位相共役光による生体試料での濁りの抑制

Nature Photon.
2, 110(2008)



光

現代物理 光は 波 と 粒子 の二重性を持つ
電磁波 光子

光のエネルギーの最小単位
(1個の光子のエネルギー)

$$E = h\nu$$

h : $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ プランク定数

ν : 振動数

$$\nu = 6 \times 10^{14} \text{ Hz} @ 500 \text{ nm}$$

光子のエネルギー $4 \times 10^{-19} \text{ J} @ 500 \text{ nm}$

光子1個の明るさとは？

1cm²あたり光子数

10μm × 10μm

快晴の日の地上

10¹⁸ /秒

10¹² /秒

満月の夜

10¹² /秒

10⁶ /秒

星明かりの下

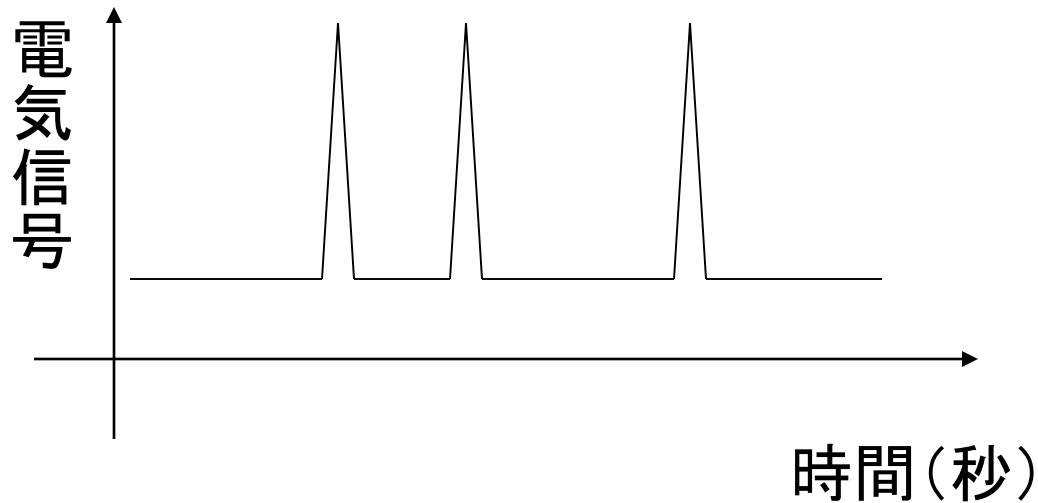
10⁹ /秒

10³ /秒

光が粒子(=光子)である証拠

レーザー光を減光すると、1秒間に
数個の光子しか来ない状態にできる

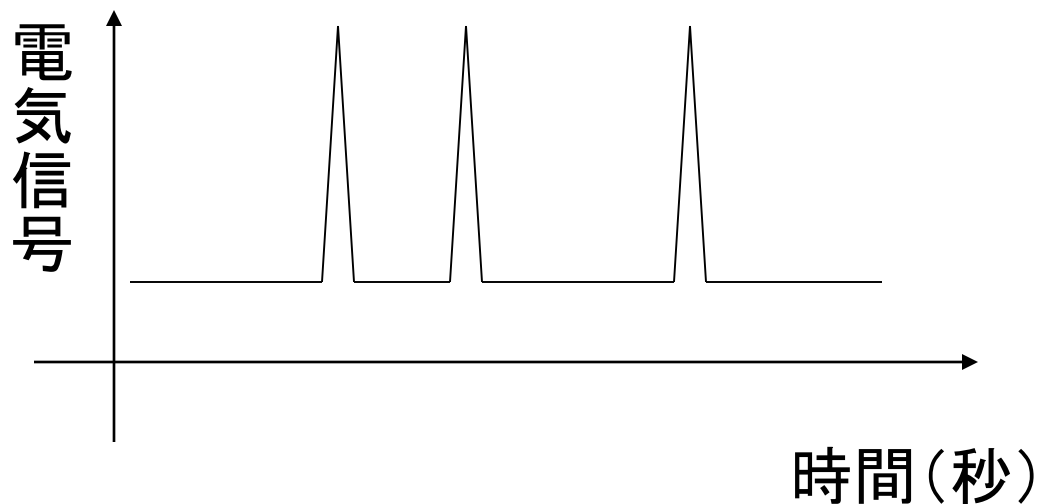
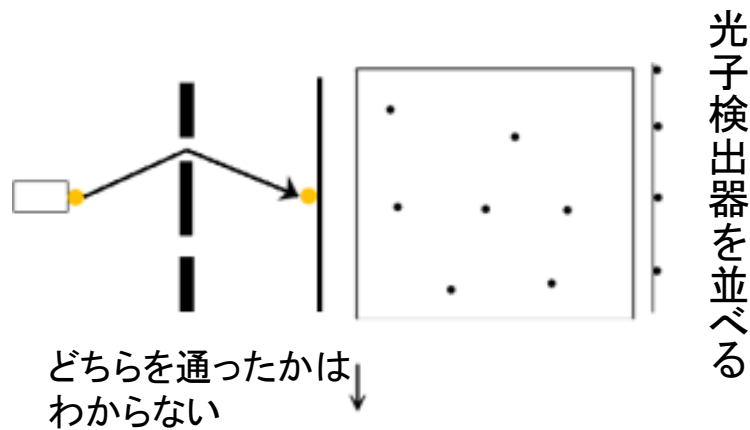
光子数は光子検出器でカウントできる



光子による干渉実験

レーザー光を減光すると、1秒間に数個の光子しか来ない状態にできる

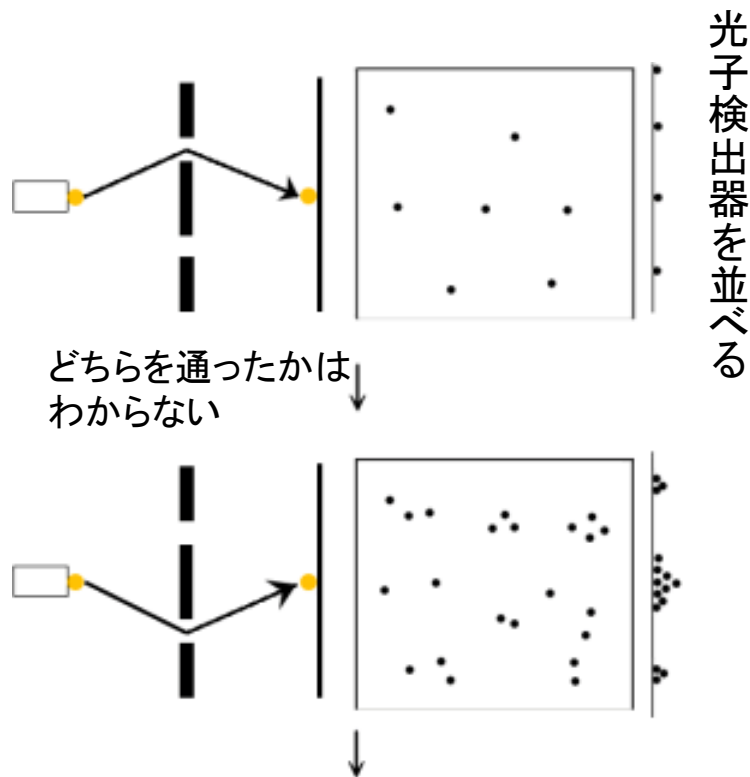
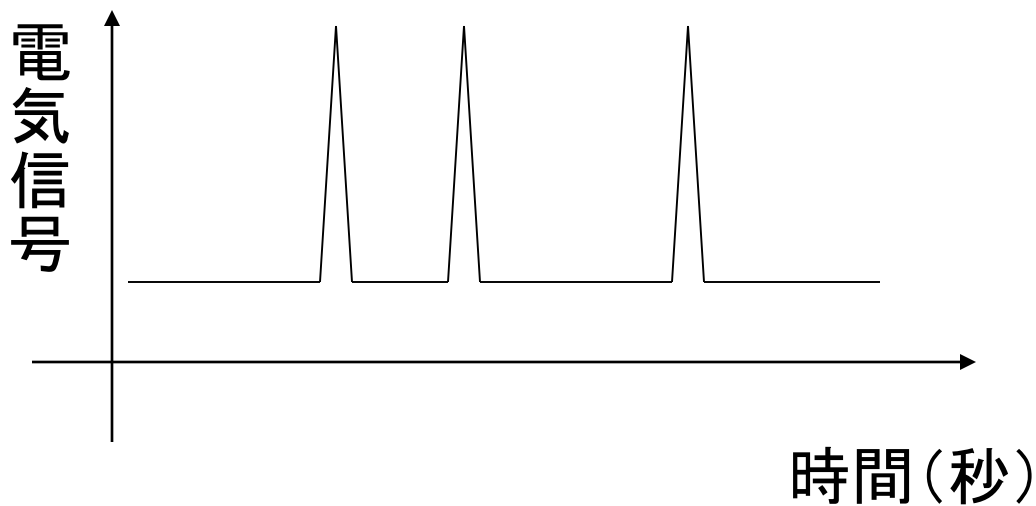
光子は(擬似)光子検出器でカウントできる



光子による干渉実験

レーザー光を減光すると、1秒間に数個の光子しか来ない状態にできる

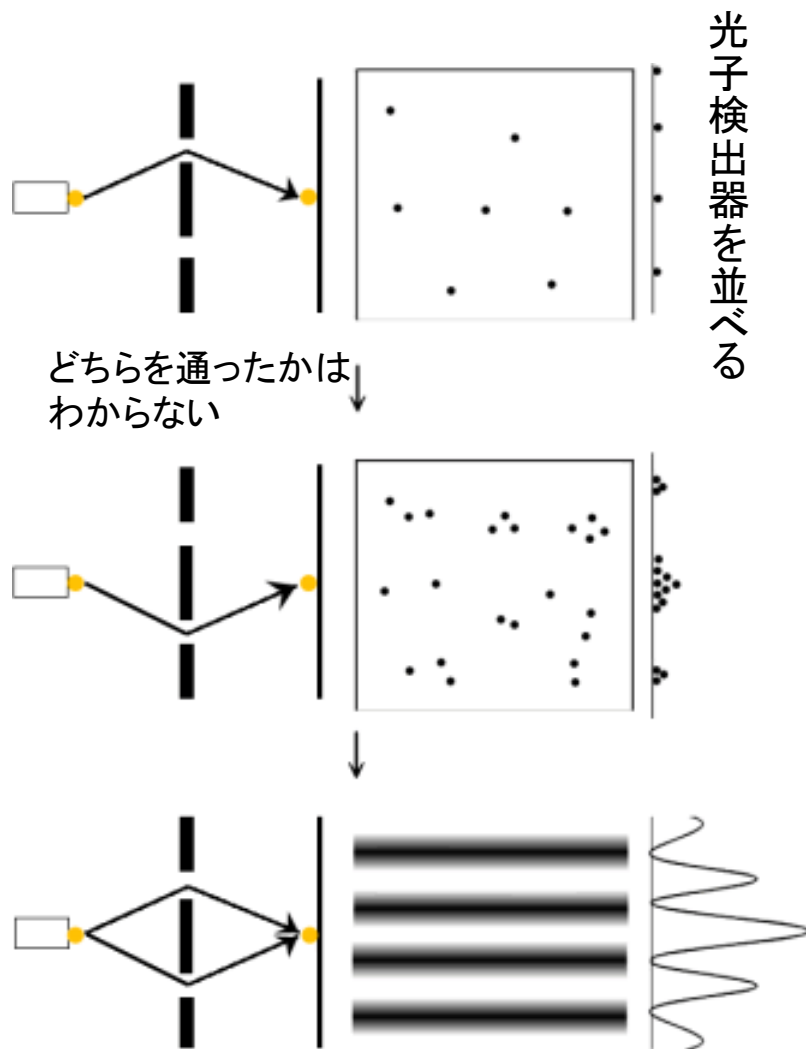
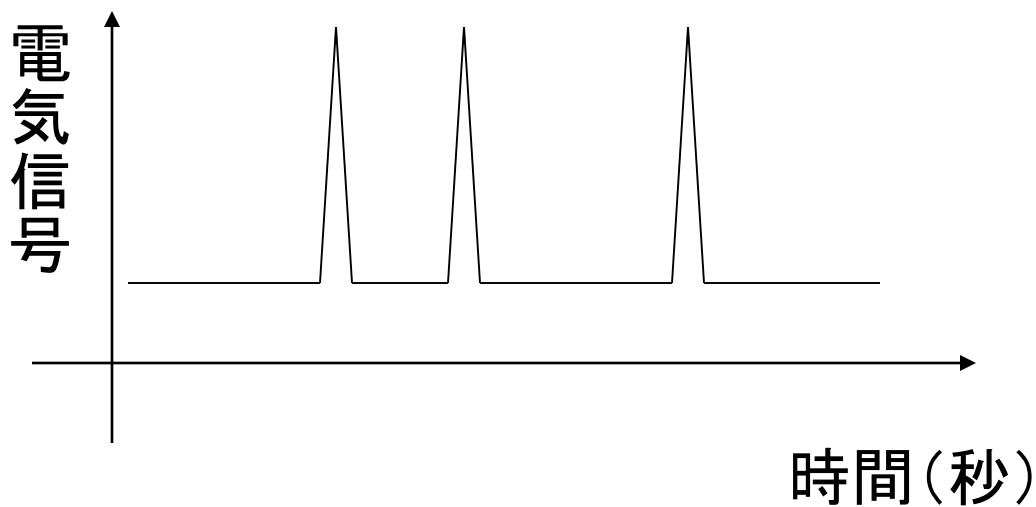
光子は(擬似)光子検出器でカウントできる



光子による干渉実験

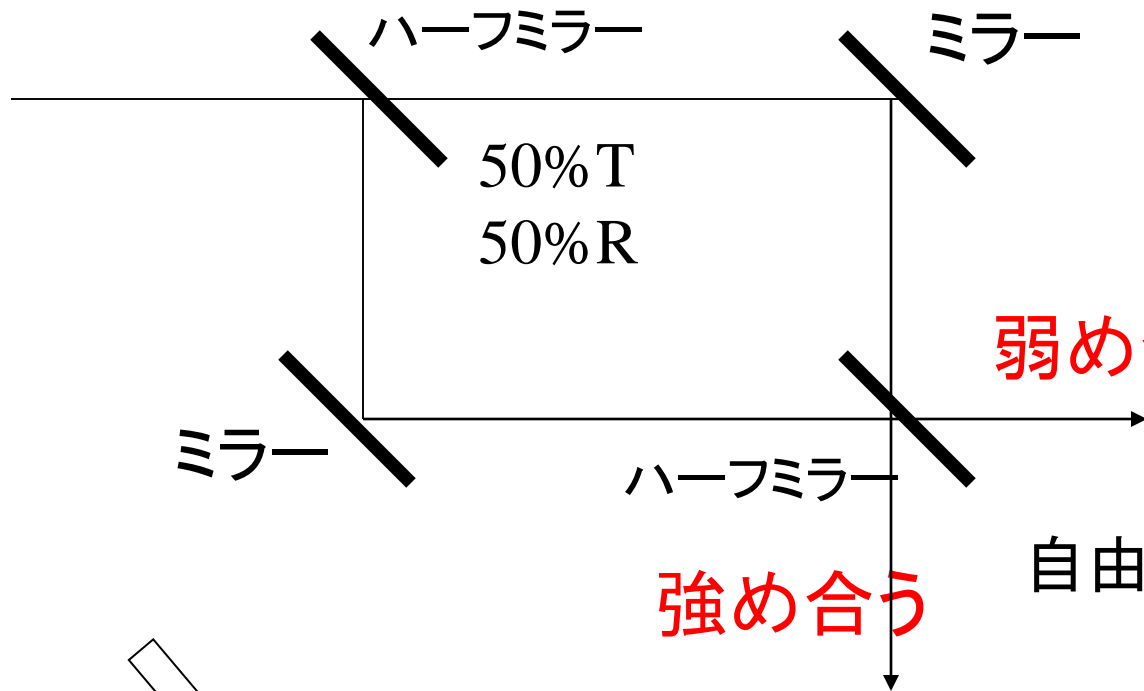
レーザー光を減光すると、1秒間に数個の光子しか来ない状態にできる

光子は(擬似)光子検出器でカウントできる

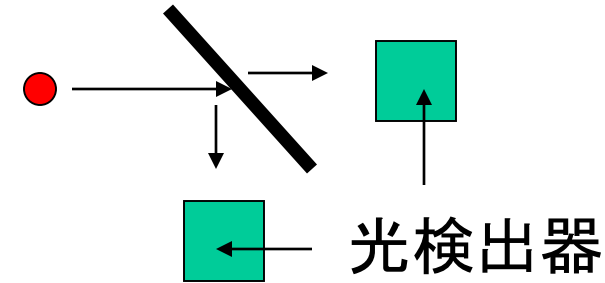


光子1個が、自分自身と干渉

マッハツェンダー干渉計



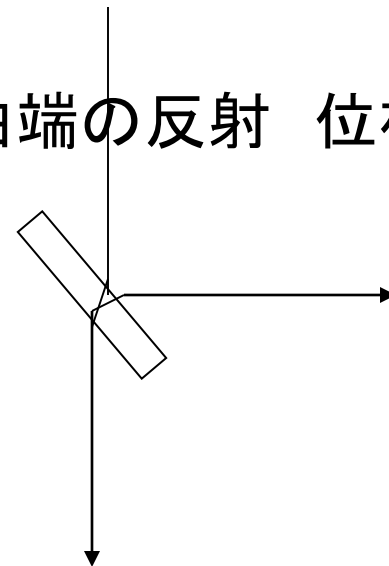
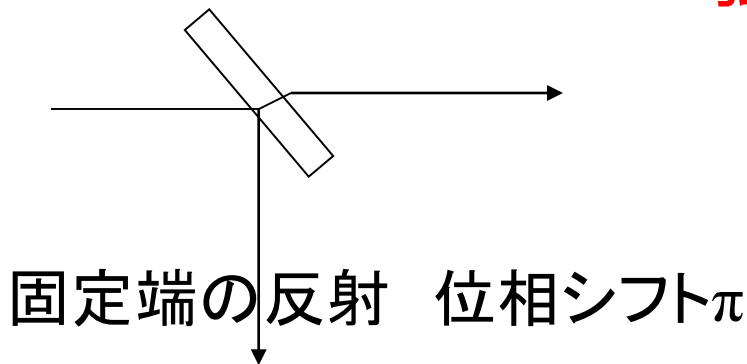
単一光子だとどちらに行くかは確率的



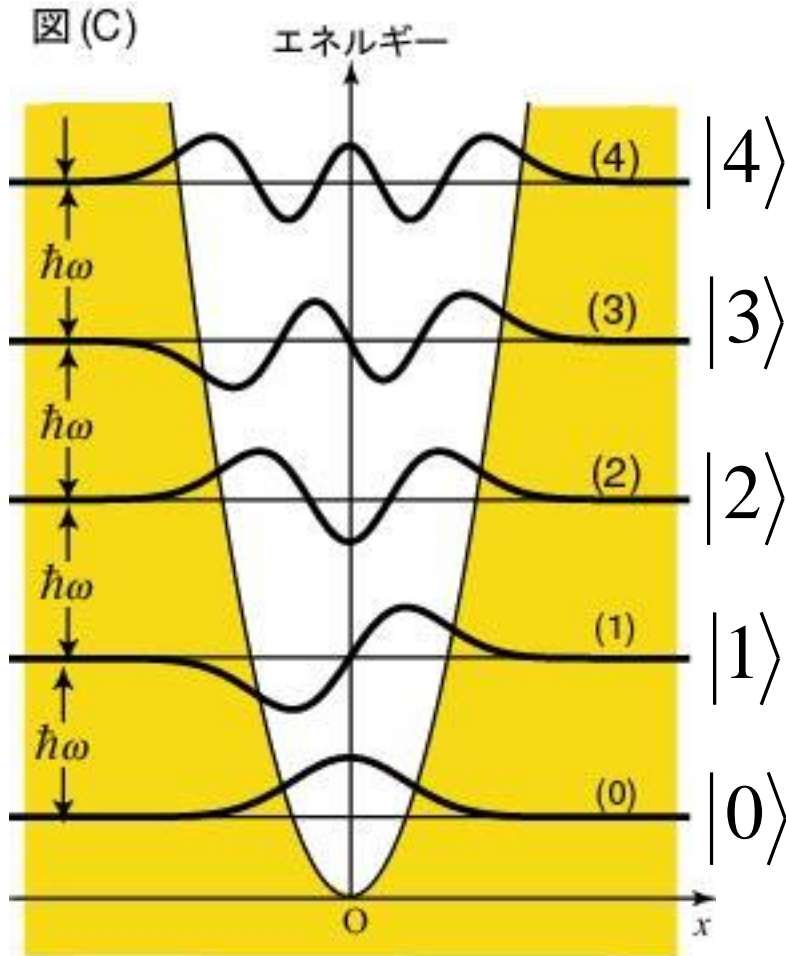
弱め合う(位相差 π)

強め合う

自由端の反射 位相シフトなし



レーザー光の統計的性質



コヒーレント状態

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{1}{2}|\alpha|^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

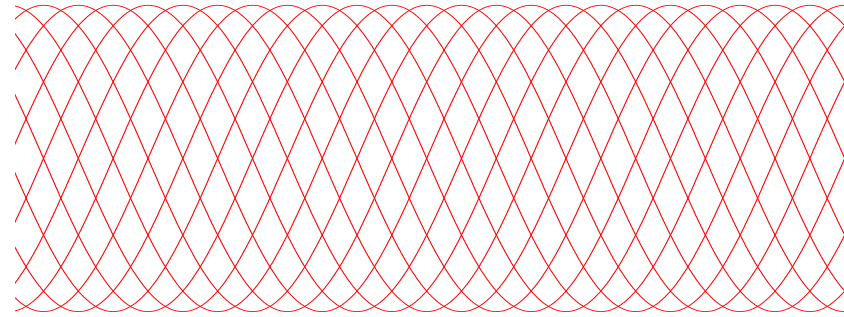
太い実曲線が波動関数

(0) : 基底状態

(1) (2) (3) ... : 励起状態

n 光子状態 $|n\rangle$

光子数が確定 位相が不確定



光学的顕微鏡の空間分解能 $\propto \lambda$

1個の光子の波長 $\lambda = \frac{h}{P}$

n 光子状態の波長 $\lambda_n = \frac{h}{nP} = \frac{\lambda}{n}$

古典的な光の回折限界を超え、空間分解能が n 倍

コヒーレント状態を測定して n 光子状態を観測する確率

$$P(n) = e^{-|\alpha|^2} \frac{\alpha^{2n}}{n!} \quad \text{Poisson分布}$$

$$\text{平均光子数 } \bar{n} = |\alpha|^2$$

$$\text{光子数ゆらぎ(分散)} \quad \sigma_n^2 = \bar{n}$$

白熱光源 SuperPoisson光 光子数ゆらぎがPoisson分布より大
光のbunching

非古典光 SubPoisson光 光子数ゆらぎがPoisson分布より小
光のantibunching

光の量子性

(光を波と考えたのでは説明不能)

多光子干渉

$$I^{(2)}(\tau) = \left\langle E(t)E^*(t)E(t+\tau)E^*(t+\tau) \right\rangle$$
$$= \left\langle I(t)I(t+\tau) \right\rangle$$

二光子干渉 強度干渉 2次の干渉(相関)
→ 多光子干渉に一般化

レーザー光と白熱ランプ光の違い

$I^{(1)}(\tau)$ では現れず、 $I^{(2)}(\tau)$ で初めて現れる

白熱光でも狭帯域フィルターを通して線幅を細くすれば
時間コヒーレンスはいくらでもよくなる

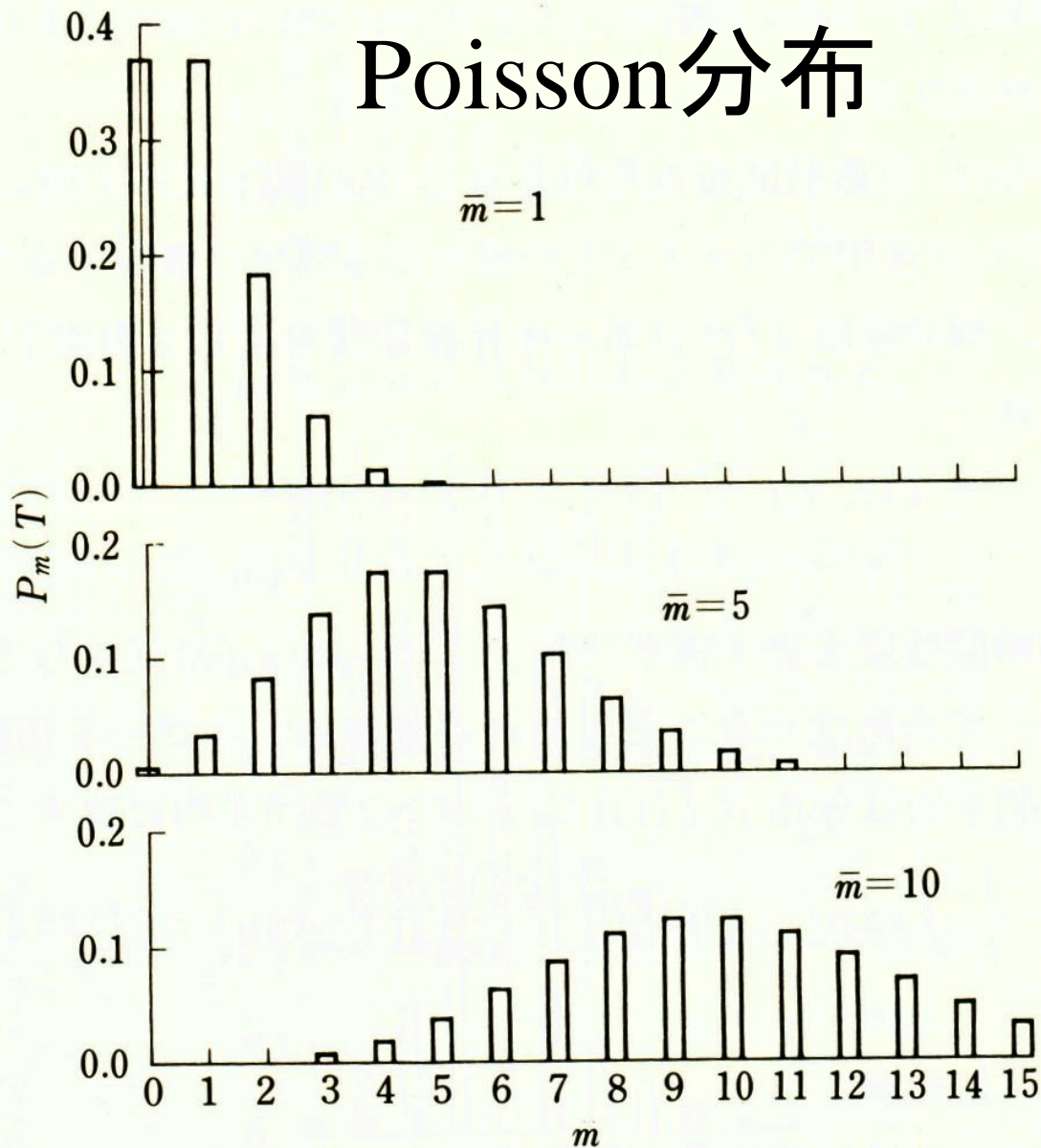
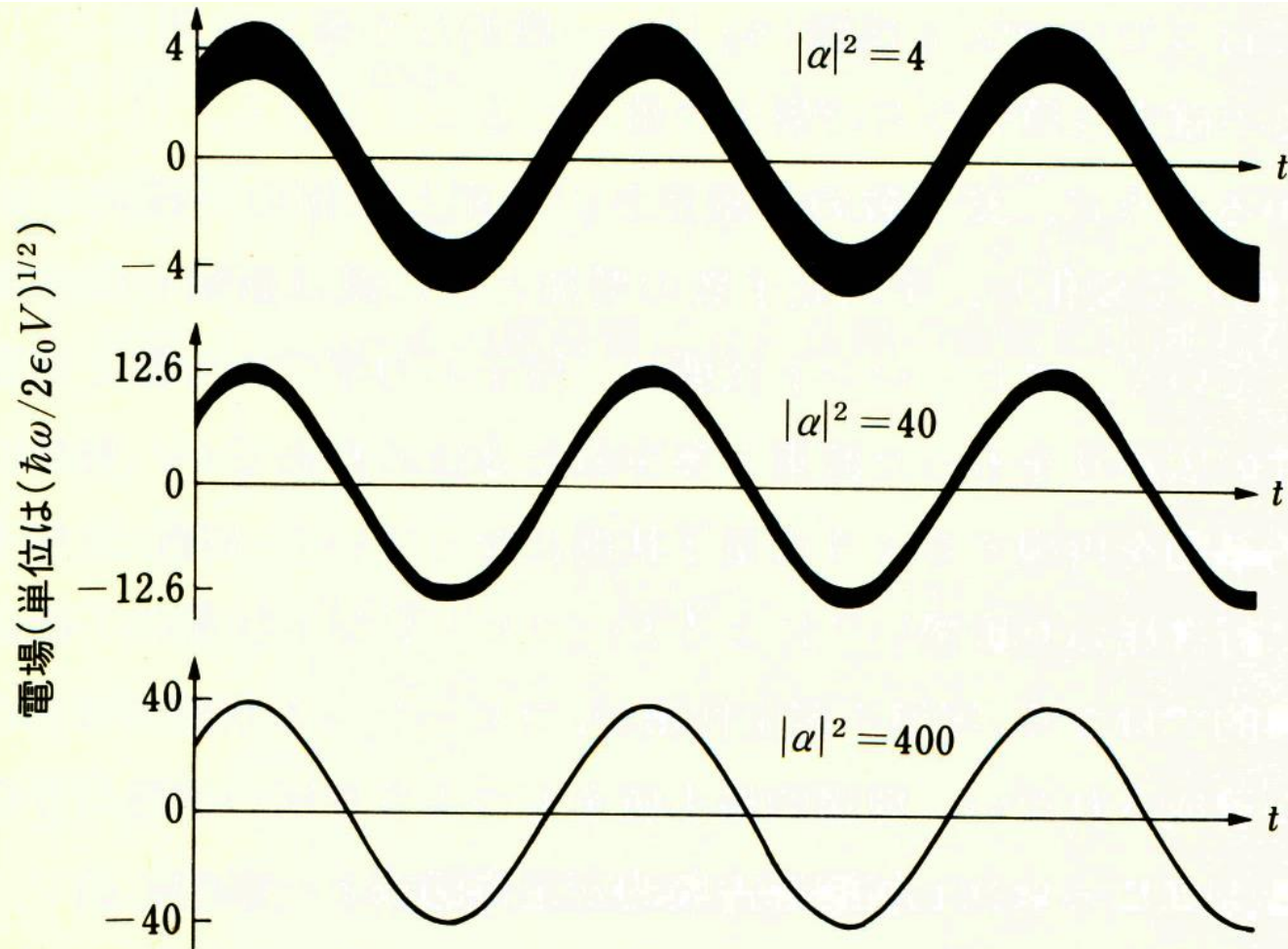


図 6・6 一定強度の光ビームに対する Poisson 型の光子計数分布. \bar{m} の値は期間 T の間に計数される平均光子数である.

コヒーレント状態 ≡ 古典的電磁波

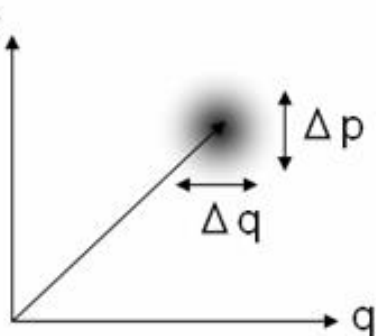


光子数と位相の最小不確定状態 $\Delta n \Delta \phi \geq \frac{1}{2}$

スクイーズド状態

最小不確定状態

$$\Delta p \Delta q = \frac{\hbar}{2}$$



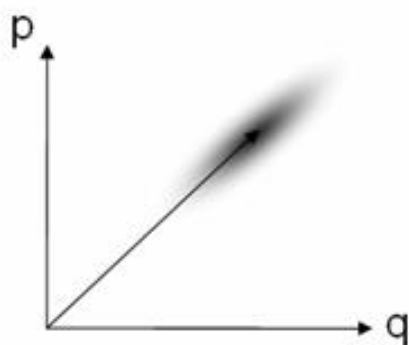
Coherent state



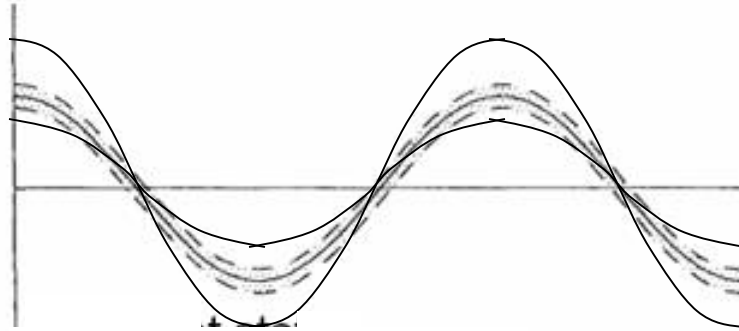
Coherent state

$$\Delta p_s = e^r \Delta p$$

$$\Delta q_s = e^{-r} \Delta q$$

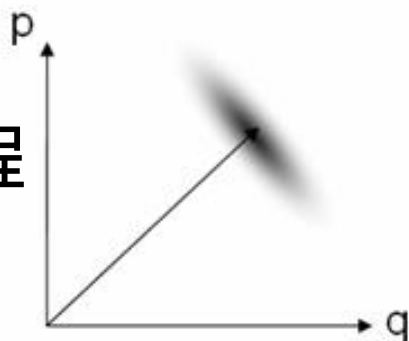


Phase squeezed state

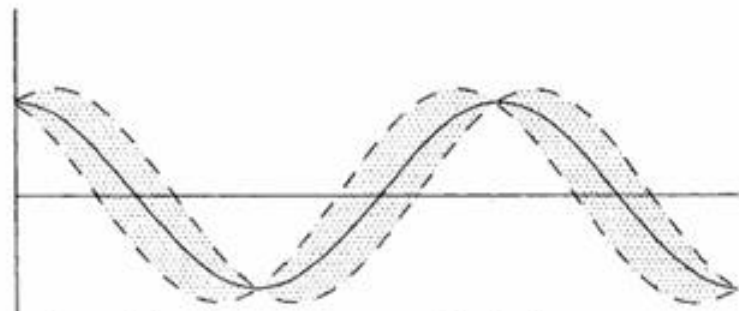


Phase squeezed state

$$\Delta p_s \Delta q_s = \frac{\hbar}{2}$$



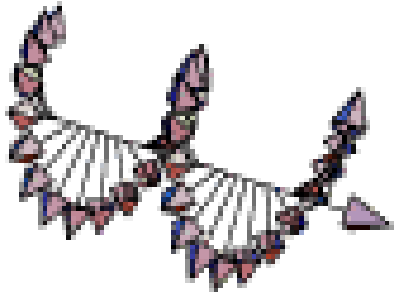
Amplitude squeezed state



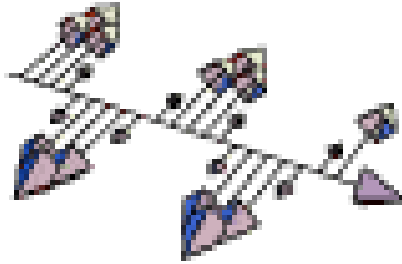
Amplitude squeezed state

非線形光学過程
で発生可能

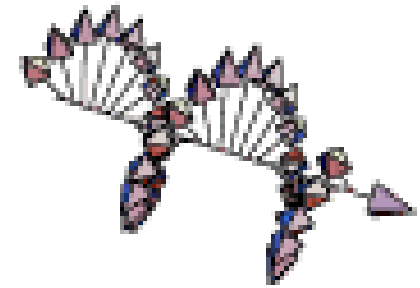
偏光＝光のスピンの角運動量



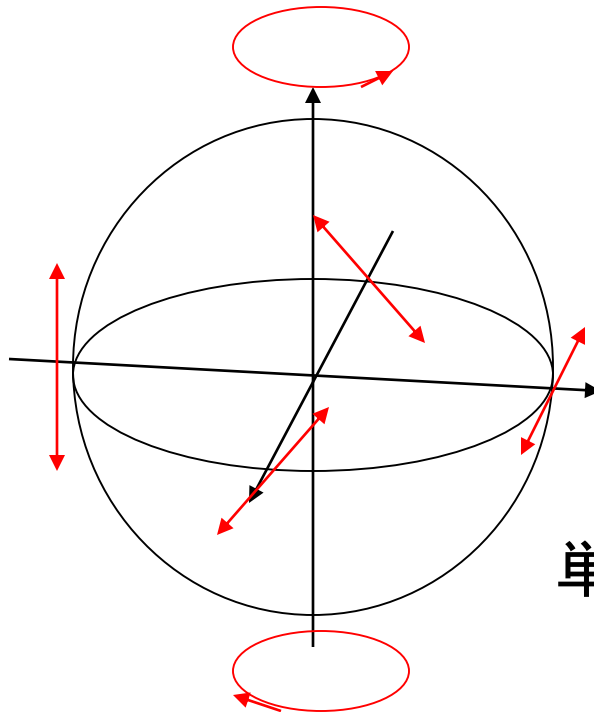
右回り円偏光 $S=-1$



直線偏光 $S=0$



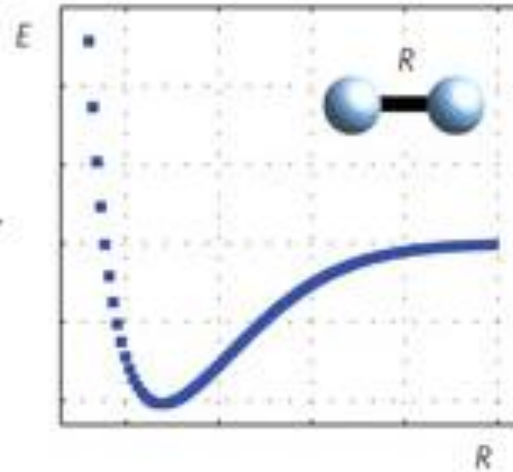
左回り円偏光 $S=+1$



Poincare球

単一光子は1qubitの情報を担える

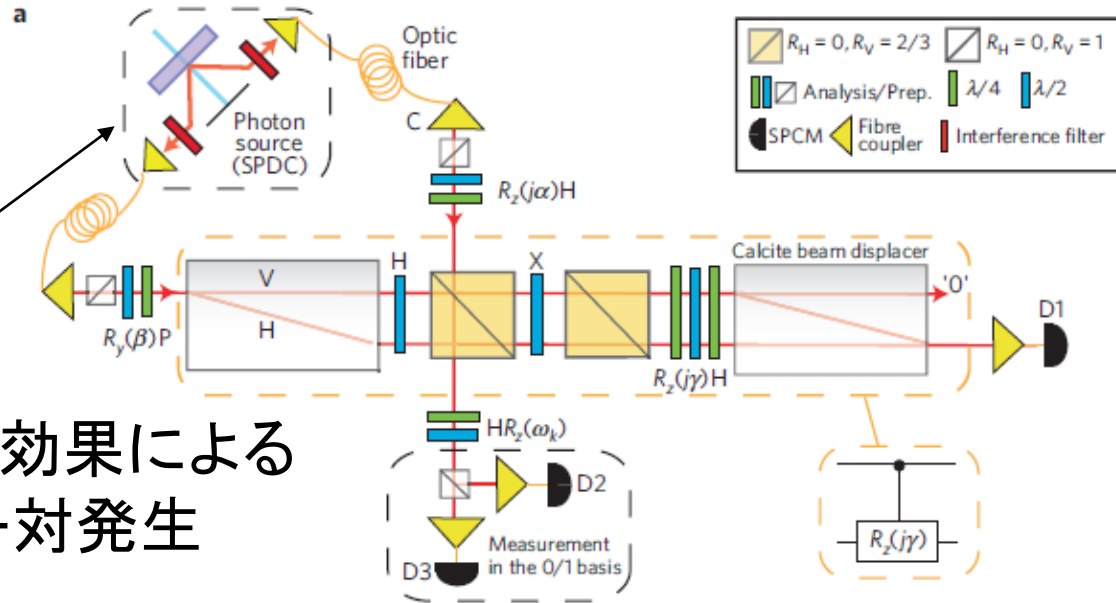
Quantum Chemistry on a photonic quantum computer



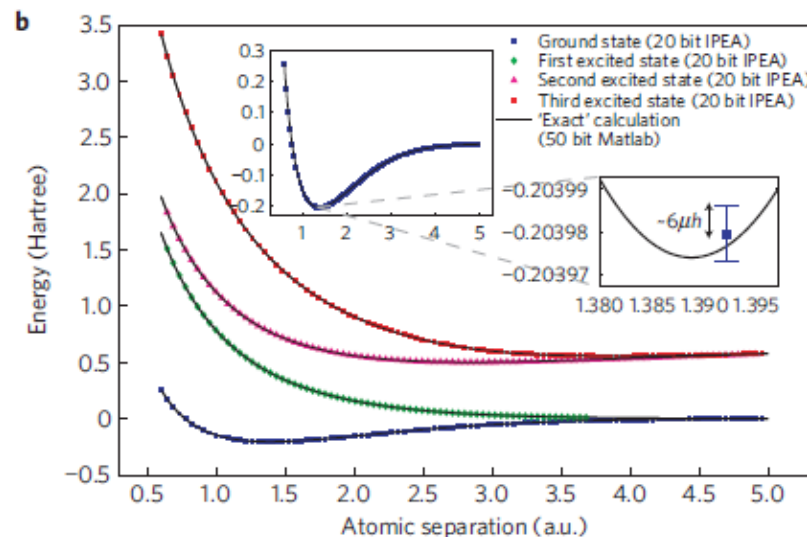
Precise calculations of molecular properties from 1st-principles set great problems for large systems because their conventional computational cost increases exponentially with size. Quantum computing offers an alternative, and here the H₂ potential energy curve is calculated using the latest photonic quantum computer technology.

Nature Chem. 2, 106 (2010).

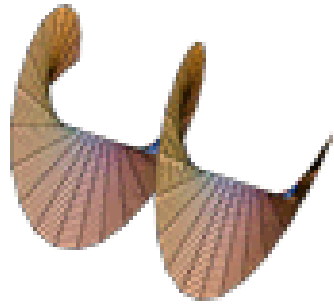
Quantum Chemistry on a photonic quantum computer



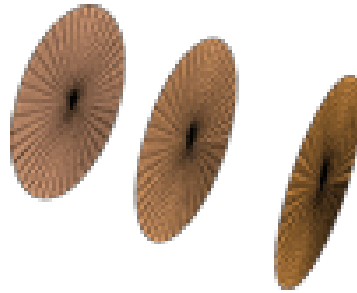
2次非線形光学効果による
もつれ合い光子対発生



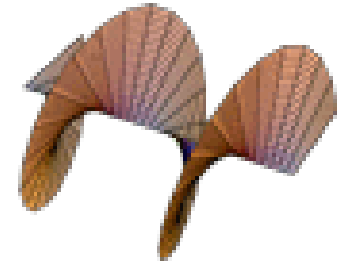
光の軌道角運動量



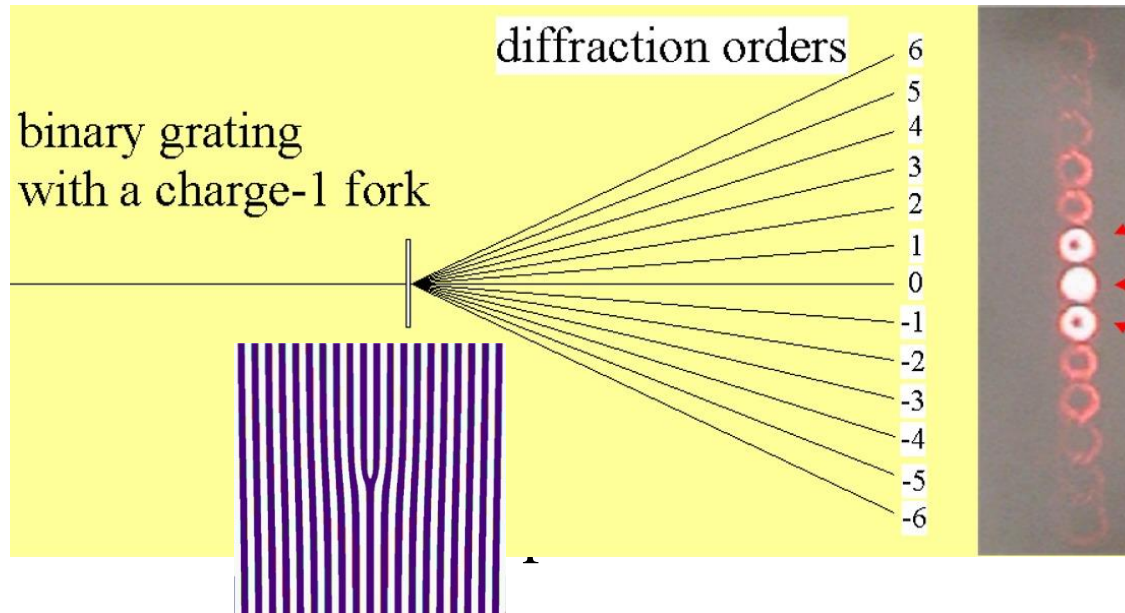
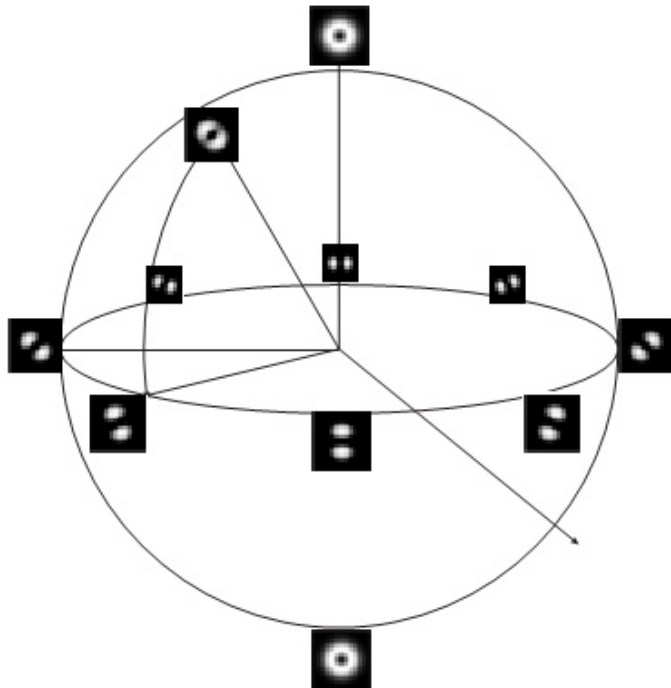
$L = -1$



$L = 0$

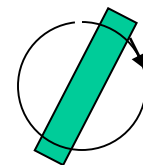


$L = +1$



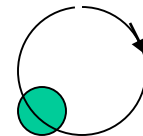
円偏光

物質を重心の回りに自転

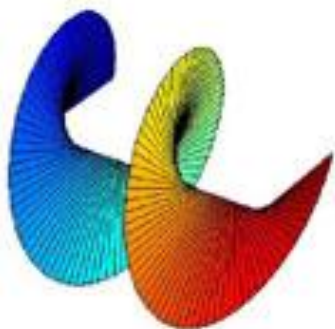


軌道角運動量を持つ光

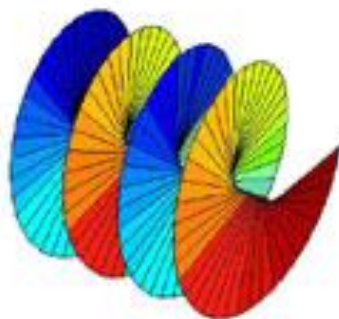
物質を公転させる



L=1



L=2



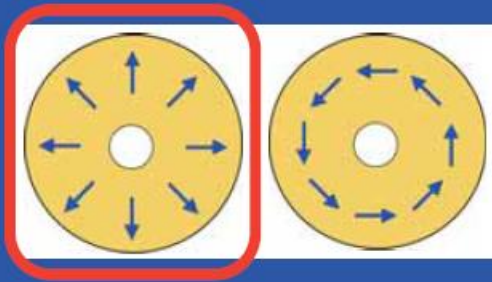
1つの光子で1, 2, ..., N 個の軌道角運動量状態 quN it

ベクトルビーム

ビーム断面に偏光の分布がある

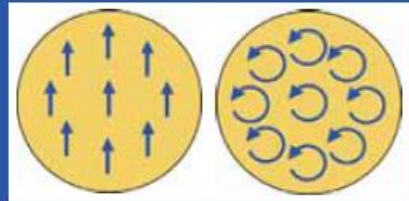
径偏光ビーム、方位偏光ビーム

軸対称偏光モード
ビーム断面内で空間依存

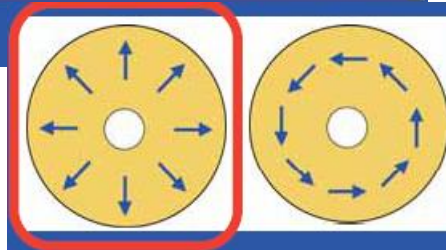


径偏光 方位角偏光

通常のレーザーモード
(ビーム断面内で一様)



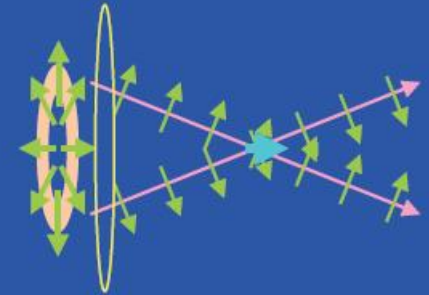
直線偏光 円偏光



偏光特異点
光強度...0

↓
ドーナツ状のビーム

- 焦点付近で縦電場
- 小さなスポットサイズ



→
高空間分解分光
材料加工
荷電粒子加速
プラズマ物理

北大、千葉大 森田、岡、丹田、尾松
光渦・偏光渦レーザーの開発と
レーザー加工への応用 より

励起子

結晶中の集团的素励起の一つ

結晶内をコヒーレントに伝播する電子的励起エネルギー
(励起波、電子的分極波)

最大の特徴: 振動子強度が狭いエネルギー範囲に集中
鋭い吸収ピークを与える

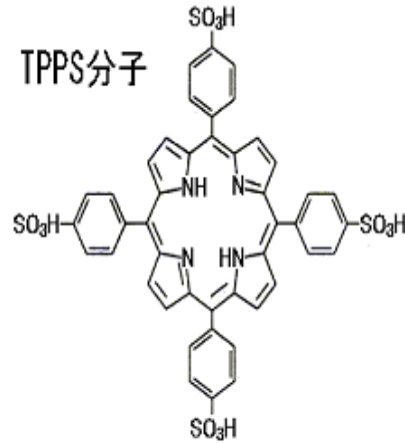
= 光との相互作用が大きい

巨大な非線形光学効果の期待

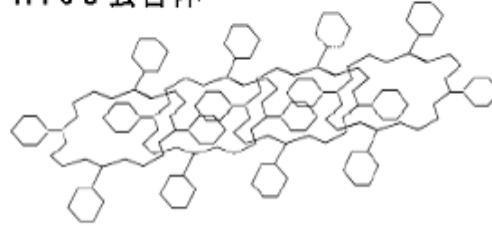
低次元ナノ構造で状態をコントロール

ポルフィリンJ会合体の巨大な電気光学効果

徳永研



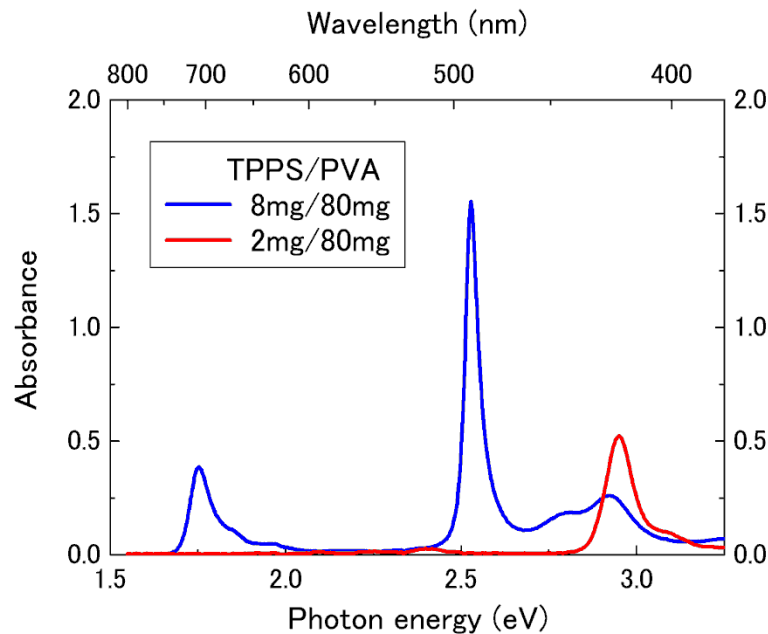
TPPS J会合体



TPPS分子とJ会合体の形態

クロロフィル類似分子

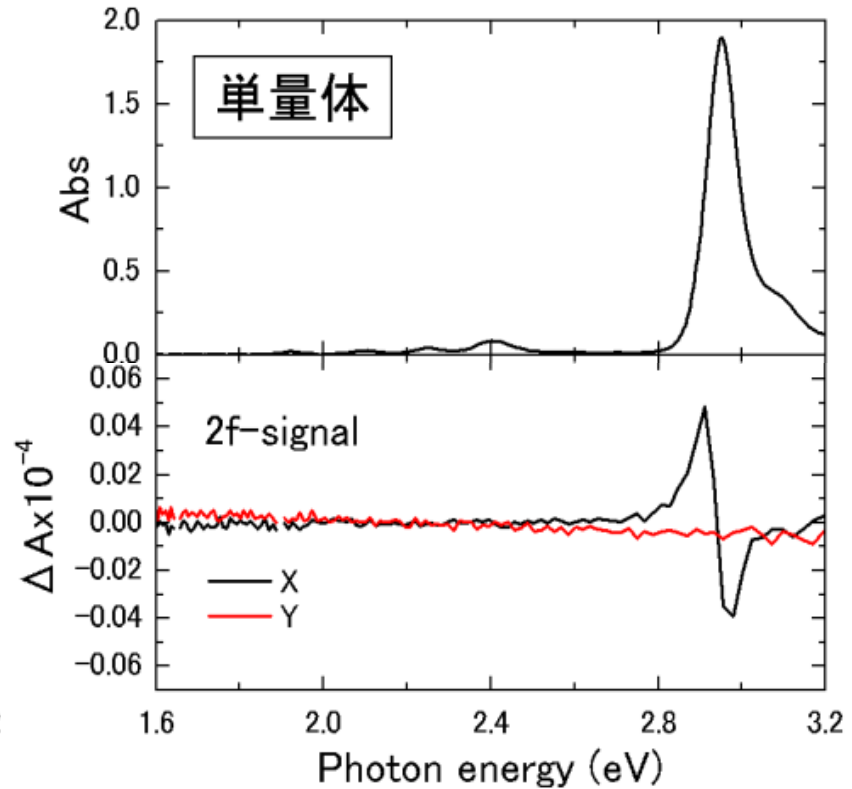
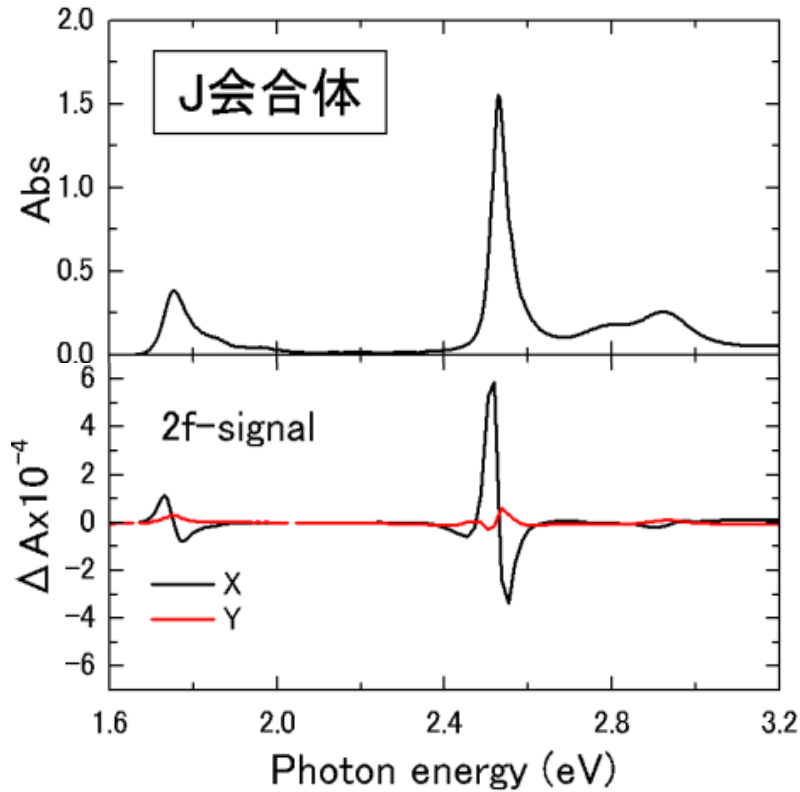
葉緑体ではクロロフィルの会合が太陽光の効率的な捕集に役立つ



TPPS吸収スペクトル濃度依存性

高濃度で吸収帯が低エネルギーシフト
→ J会合体(フレンケル励起子)を形成

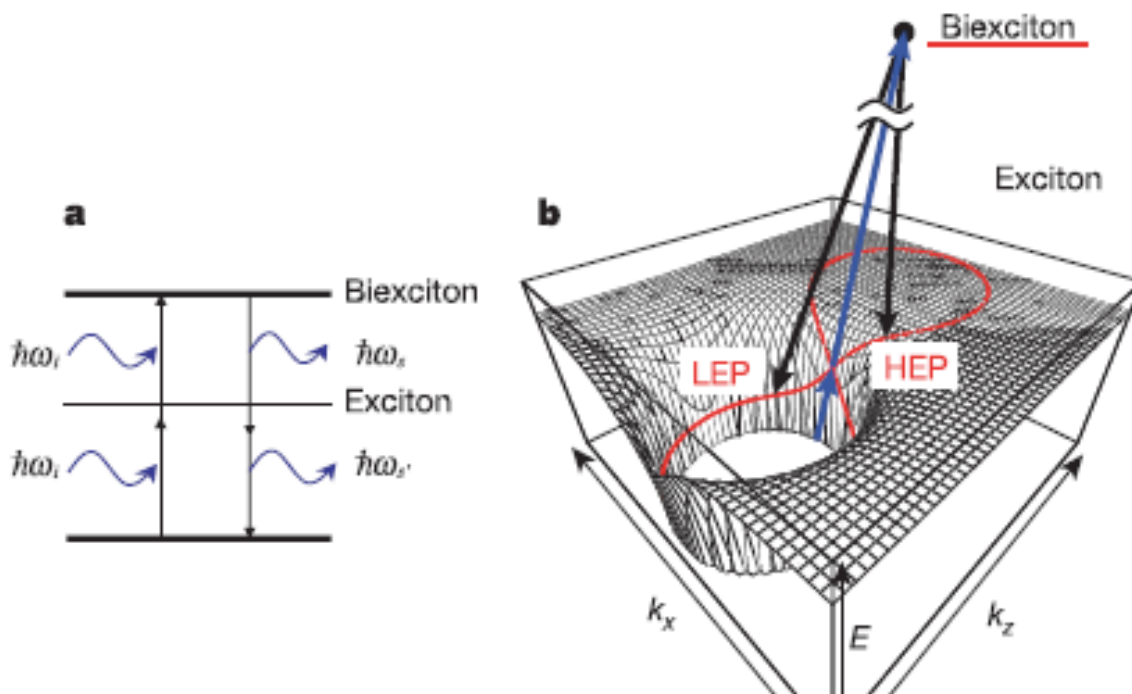
励起子非線形光学効果(電気光学効果) 電場変調吸収変化スペクトル



会合体は単量体と比べて
電場による吸収変化が ~ 100 倍に増大することを発見

このことから会合体の構造や電子励起状態の詳細がわかる

バルク半導体励起子分子からの entangled photon pairの発生



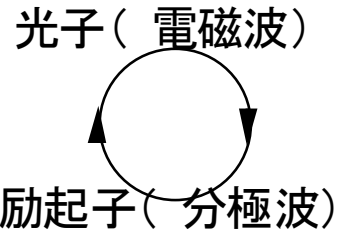
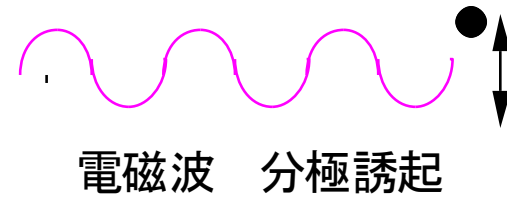
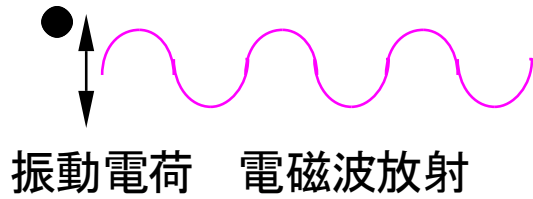
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\leftrightarrow\rangle|\leftrightarrow\rangle + |\updownarrow\rangle|\updownarrow\rangle \right)$$

Nature 431, 167(2004)

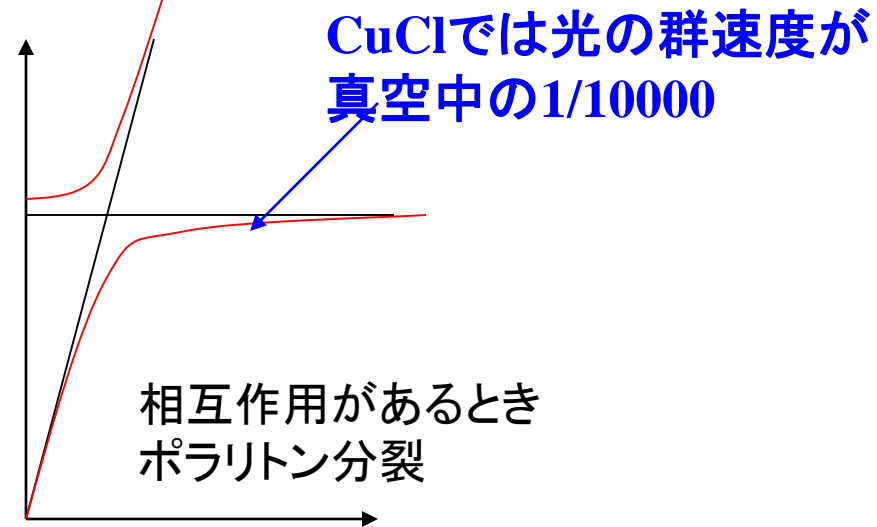
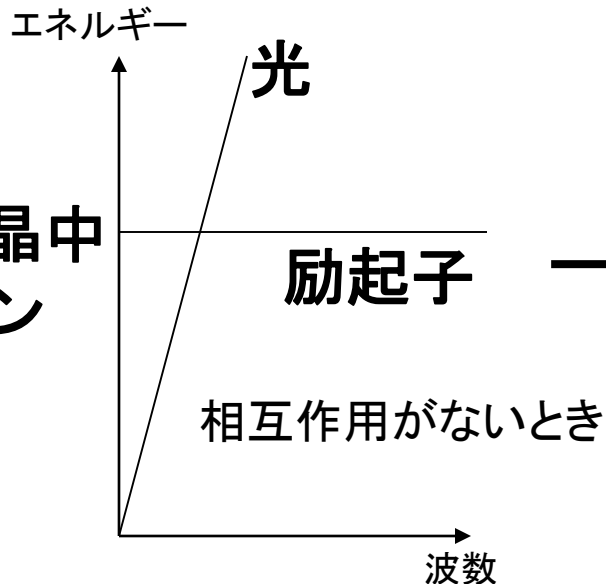
東北大 枝松圭一

励起子ポラリトン

光子(電磁波)と励起子(励起波)の連成波



連成振動

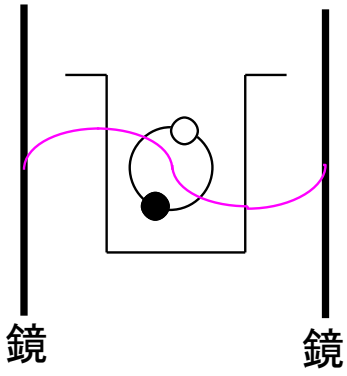


微小共振器ポラリトン

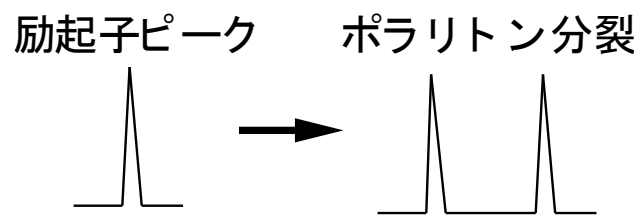
人工的に作ったポラリトン

東大 荒川泰彦

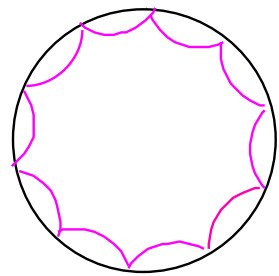
例



量子井戸(量子点)と光共振器
微小共振器ポラリトン

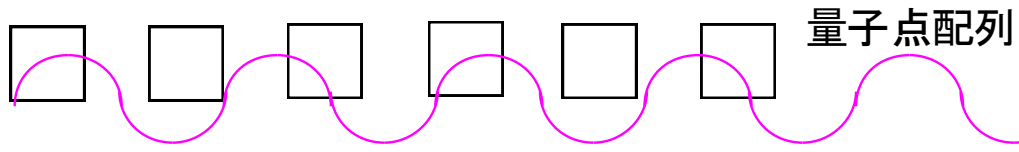


**光共振器でfeedbackして
光と励起子の相互作用
時間を長くする=強める**



半導体微小球での光の閉じ込めモード

**半導体量子点 励起子1個
の生成で非線形効果が起こる**



量子点配列

**共振器で励起子生成確率を
強めれば、光子1個の非線形
光学効果**

バルク結晶 無限体積
同じモード(波数)の光子と励起子が結合

励起子ポラリトンの
ボーズ・アインシュタイン凝縮
Nature 443,409(2006)

ボーズ-アインシュタイン凝縮 (BEC) や超流動、超伝導などのような量子凝縮相への相転移は、純粹な量子効果が巨視的スケールで表れることから、長く研究者の興味をそそってきた。例えばBECは、よく知られているように、200nK以下の温度でRb原子の希薄気体において実証されている。BECが起こる固体系を見いだすために多数の研究が行われているが、有望な候補となる系が半導体微小共振器である。この場合、光子がその中に閉じ込められて電子励起と強く結合し、その結果、励起子ポラリトンが生成する。このような**ボソン型準粒子**はRb原子の 10^9 分の1の軽さで、そのため理論的には、標準的な低温でBECが起こることが**可能**である。本論文では、ポラリトンのBECを確かに示す証拠が得られた、さまざまな実験結果について詳しく述べる。

$$T_{\text{BEC}} = \frac{h^2}{2\pi m k_B} \times \left(\frac{N}{\zeta(3/2) V} \right)^{2/3}$$

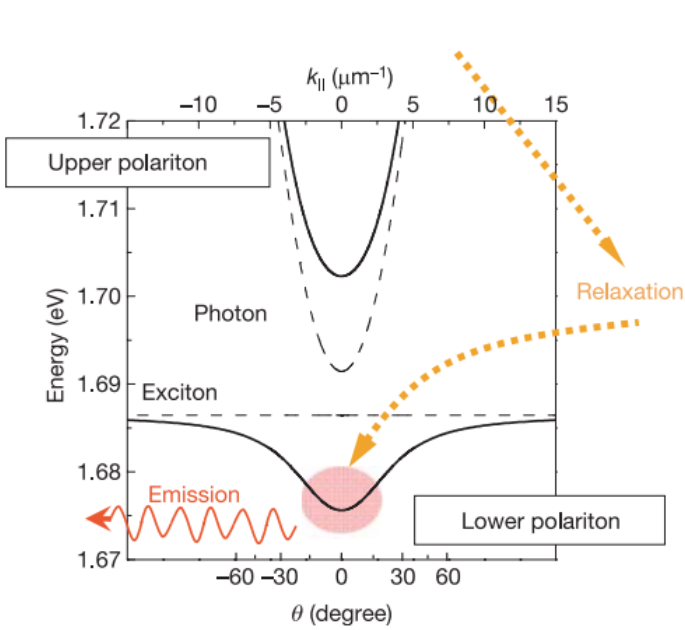


Figure 1 | Microcavity diagram and energy dispersion. a, A mi

Nature 443,409(2006)

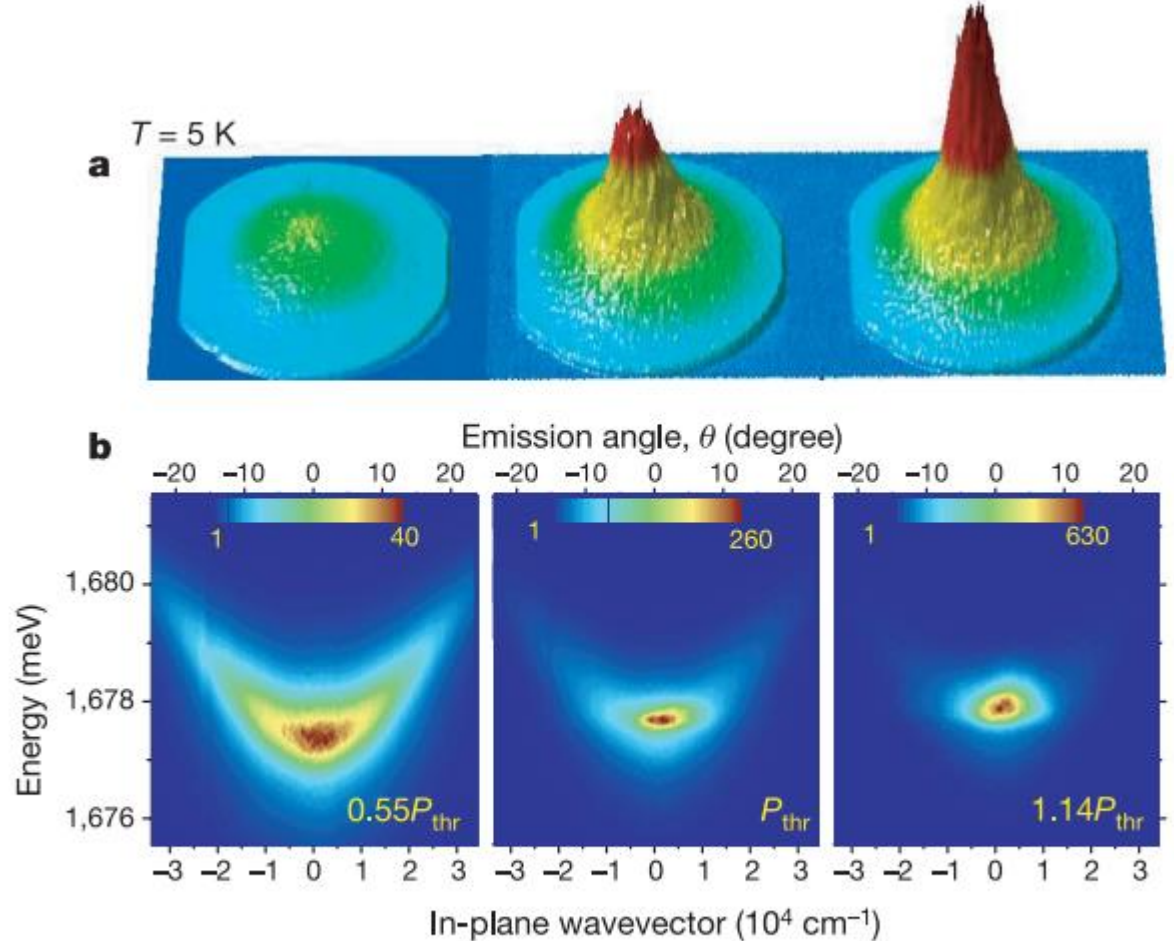
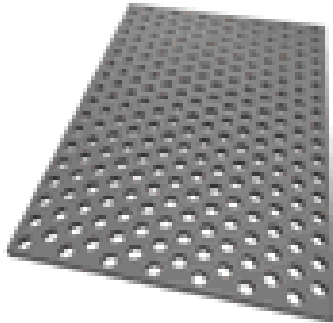


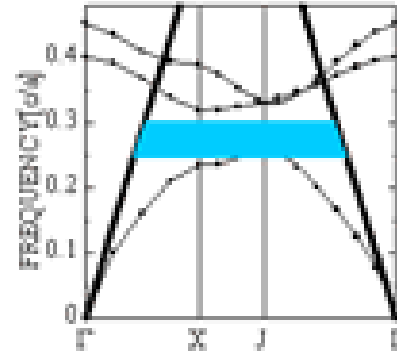
Figure 2 | Far-field emission measured at 5 K for three excitation

臨界密度を超えたところで、19Kの熱平衡状態にあるポラリトンが、基底状態が極めて多数占有された状態へと成長し、時間コヒーレンスが高くなり、長距離の空間コヒーレンスと直線偏光が増大することが観察された。これらはいずれも、巨視的な量子相が自発的に生成することを示している。→ ポラリトンレーザー

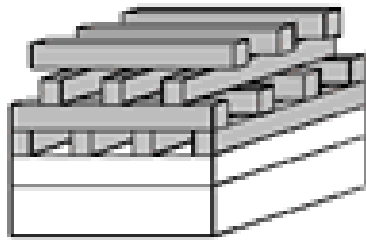
光の能動的制御：フォトニック結晶



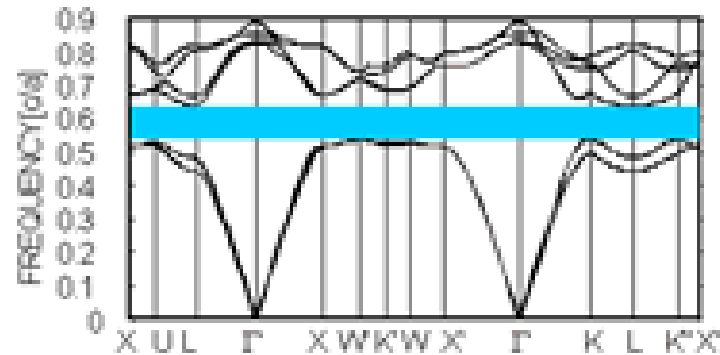
2D Photonic Crystal



Partial Bandgap



3D Photonic Crystal

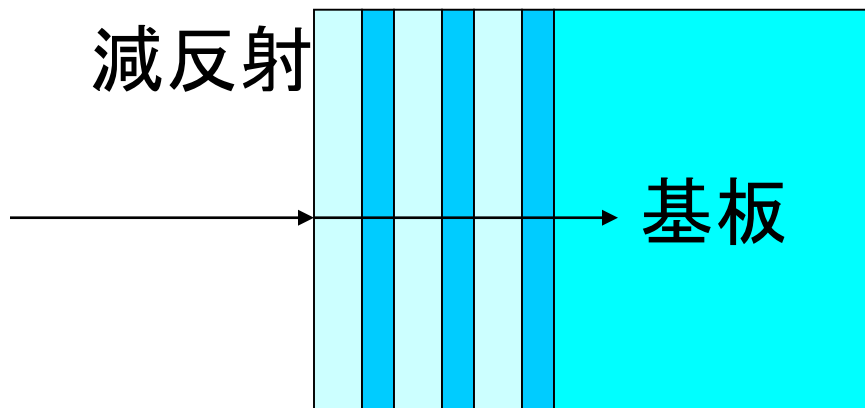
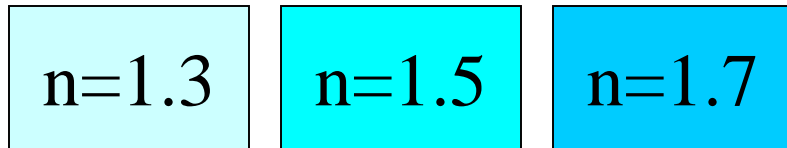


Complete Bandgap

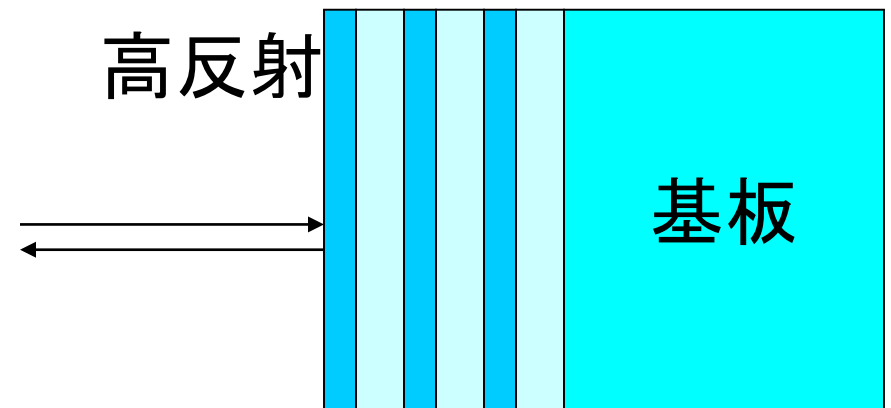
透明物質(誘電体)に光の波長スケールの周期構造を作ることにより
光の禁制帯 (photonic bandgap) ができる

1次元フォトニック結晶＝誘電体多層膜

n=1



$R \sim 0\%$

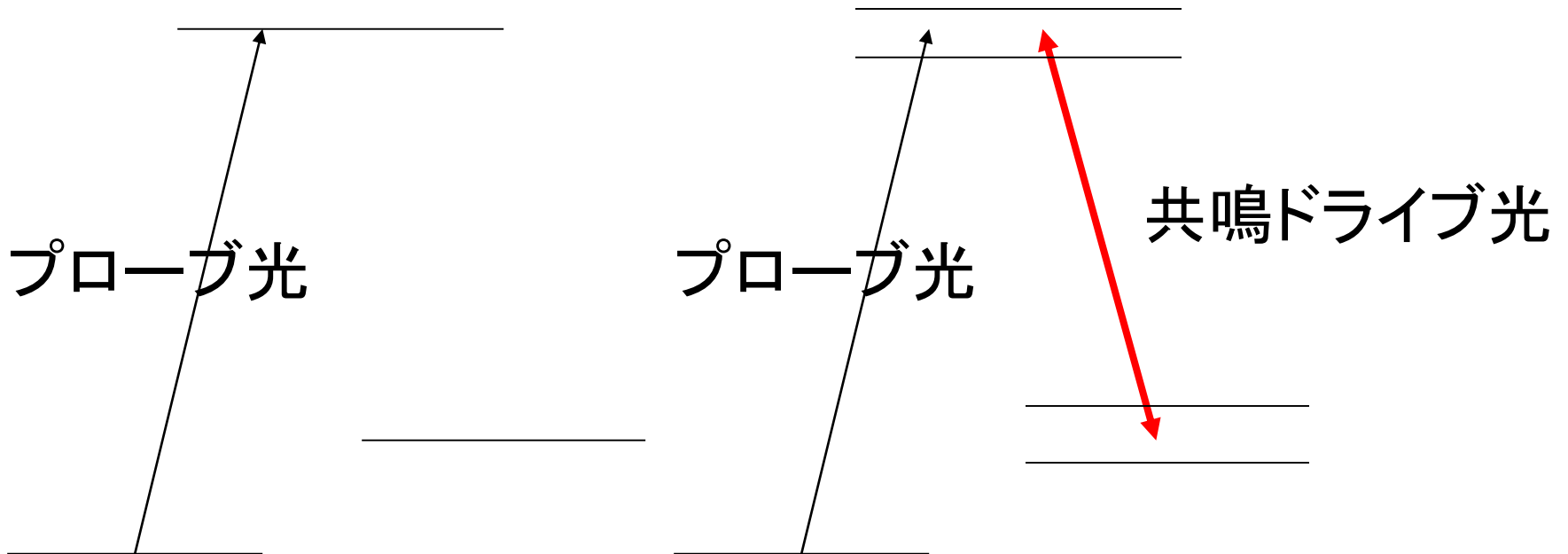


$R \sim 100\%$

各層の厚さ L : $nL = \lambda/4$

電磁誘起透明化

3準位系



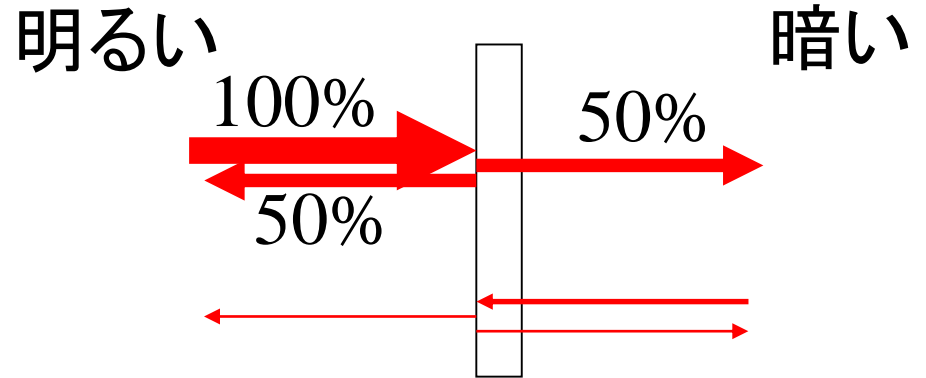
プローブ光が吸収線に共鳴していても、
共鳴ドライブ光が存在すると完全に透過

光凍結 (dark state polariton)、反転分布のないレーザー

入射の向きによって透過率が違う？

マジックミラー

ハーフミラー 50%透過
50%反射

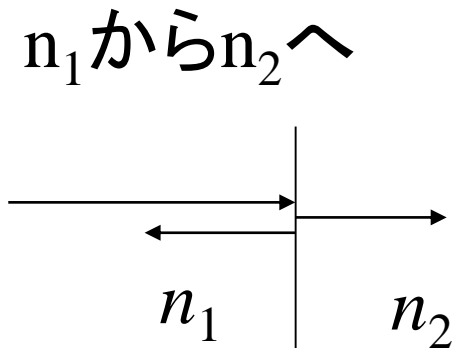


振幅反射率 $r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$

振幅透過率 $t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$

エネルギー反射率 $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$

エネルギー透過率 $T = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}$

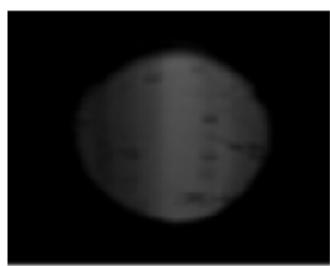


n_2 から n_1 も同じ

入射の向きによって透過率が違う？

光学の相反定理: (PQ間にどんな媒質があっても)
P点で p 方向の単位電気双極子が振動するとき
Q点に生じる電場の q 方向の成分の振幅と位相は、
Q点で q 方向の単位電気双極子が振動するとき
P点に生じる電場の p 方向の成分の振幅と位相に等しい

空間反転・時間反転の対称性がともない物質
方向二色性 光の進む向きによって透過率が異なる



真のマジックミラー
(どちらも明るくてよい)

0.1 mm CuB_2O_4 882 nm

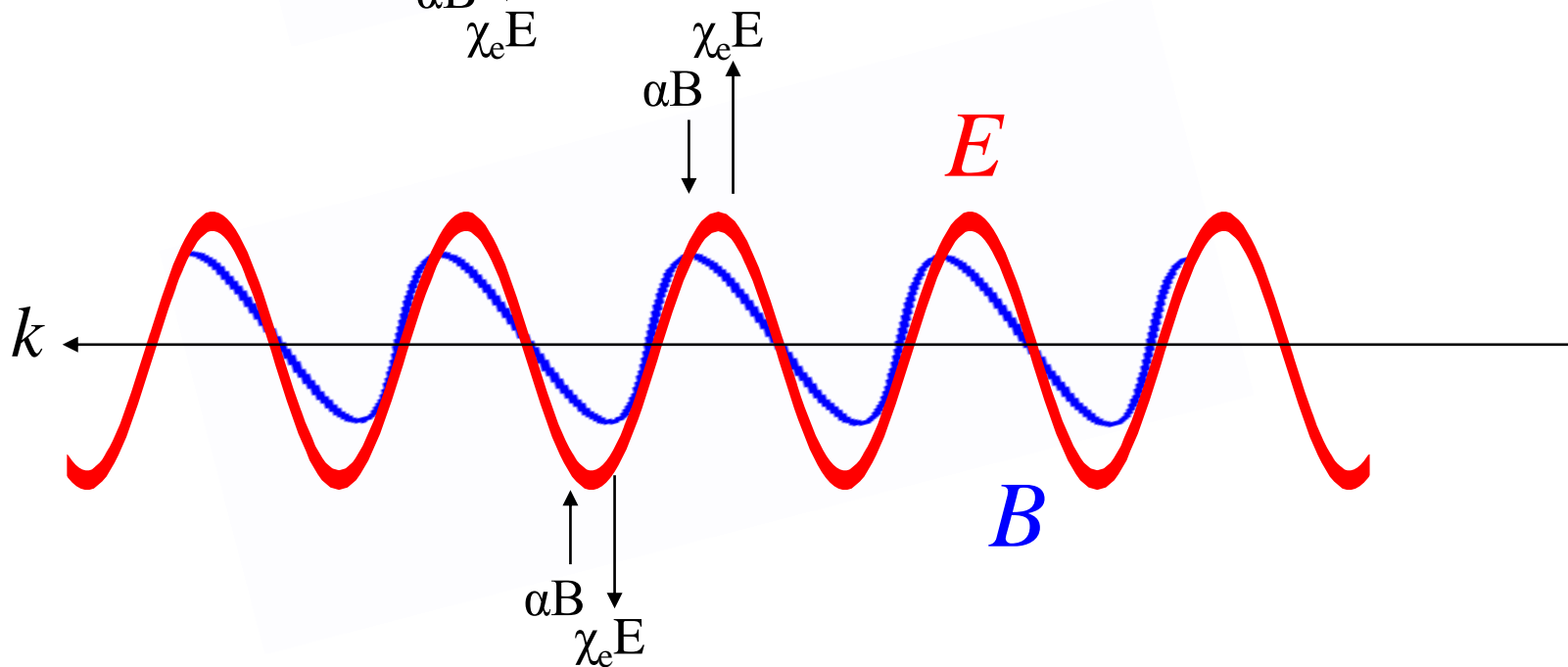
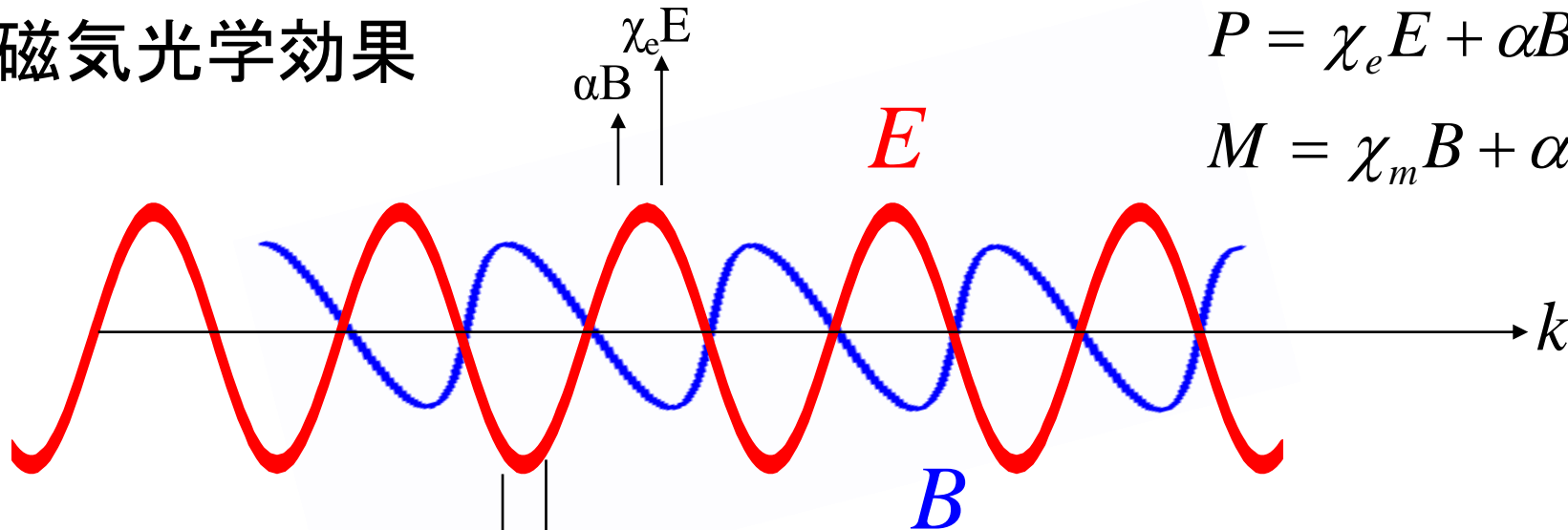
東北大 有馬孝尚 J.Phys.Soc.Jpn 77,013705 (2008)

方向複屈折や方向二色性のメカニズム

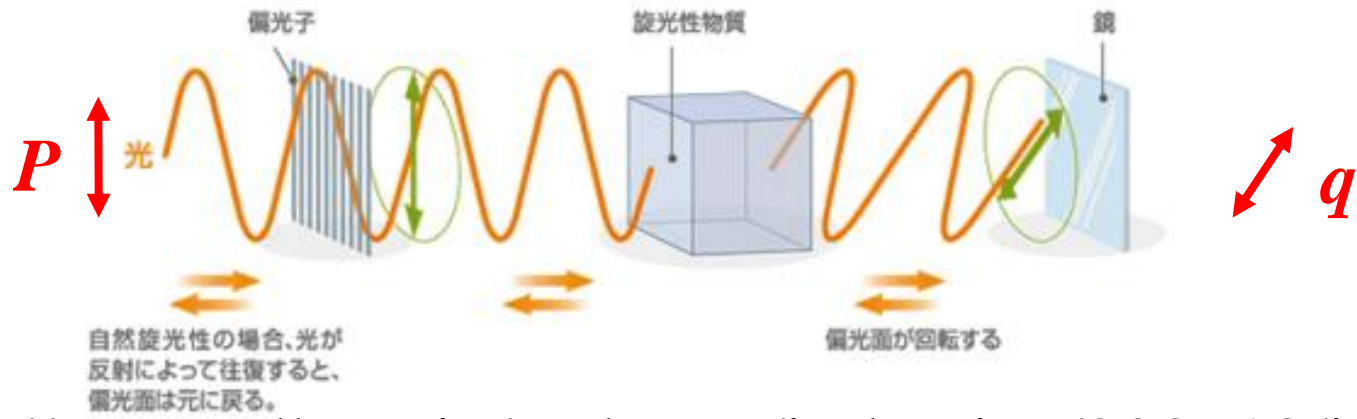
電気磁気光学効果

$$P = \chi_e E + \alpha B$$

$$M = \chi_m B + \alpha^T E$$

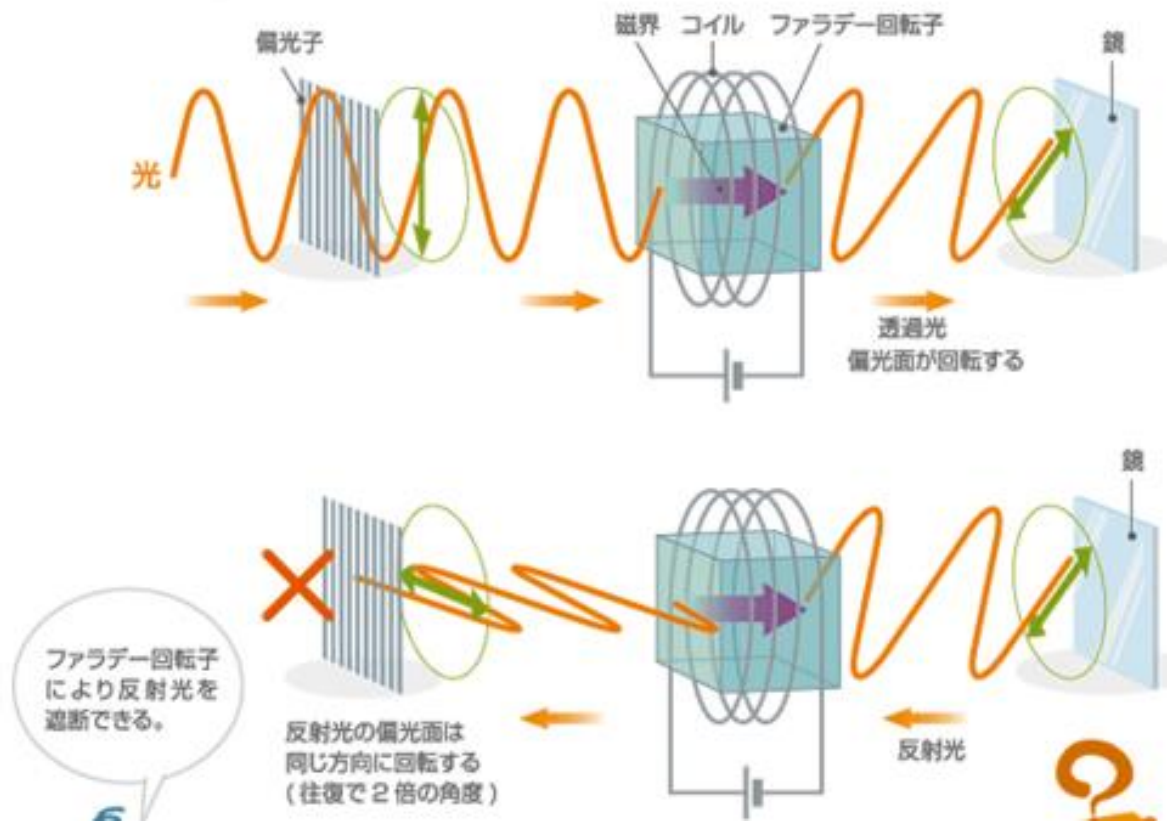


自然旋光性

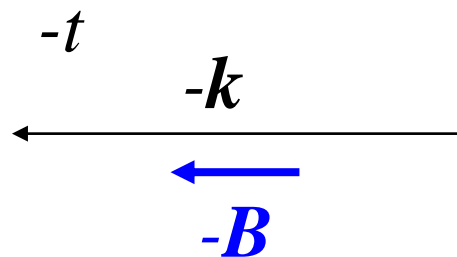
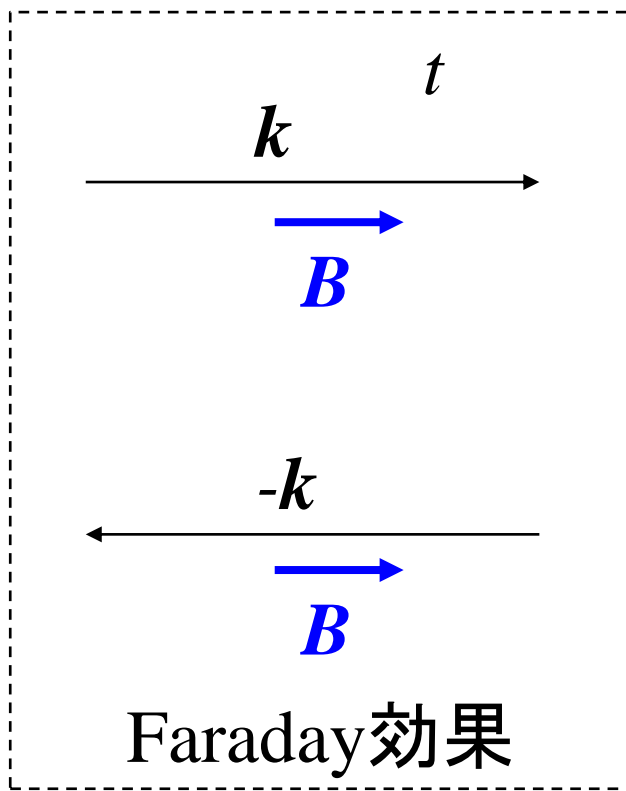
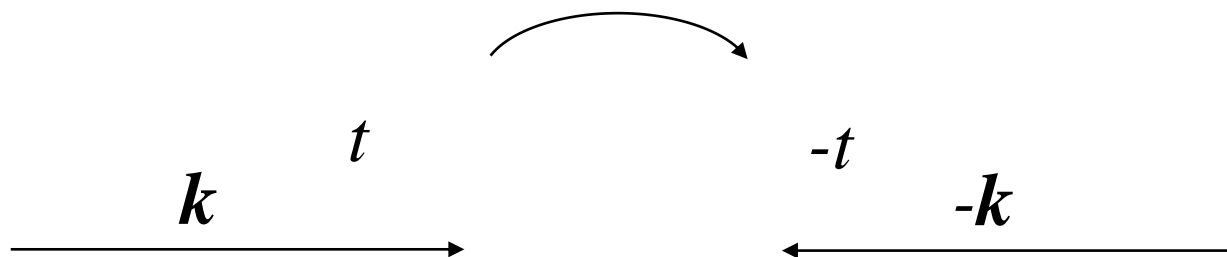


<http://www.tdk.co.jp/techmag/inductive/200710/index2.htm>

ファラデー効果



時間反轉



Si マイクロフォトニクス

Si micro electrooptic modulator

Si 光-光スイッチ

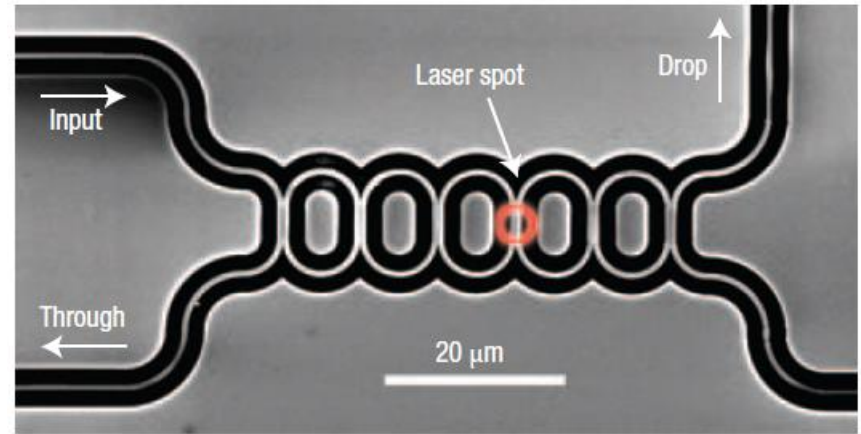
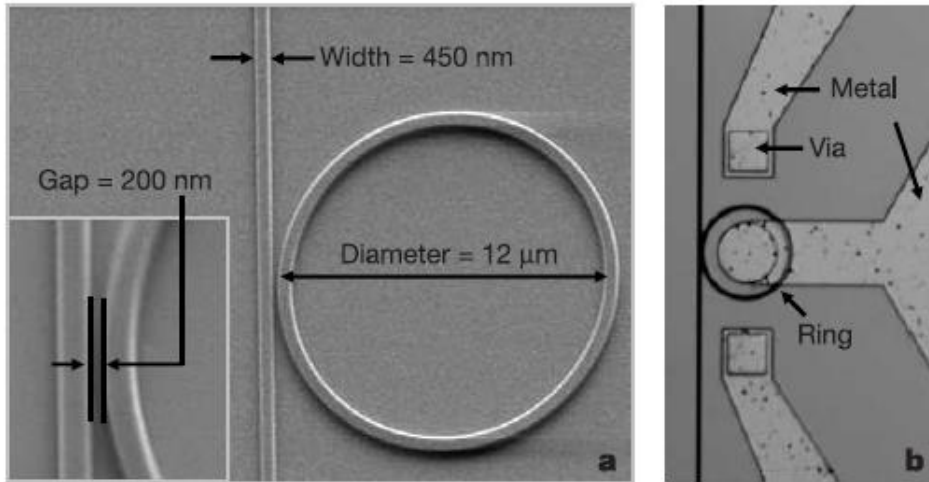


Figure 2 | SEM and microscope images of the fabricated device. **a**, Top-view SEM image of the ring coupled to the waveguide with a close-up view of the coupling region. **b**, Top-view microscope image of the ring resonator after the metal contacts are formed. The metal contact on the central p-doped region of the ring goes over the ring with a 1- μm -thick silicon dioxide layer between the metal and the ring.

光励起でキャリア注入

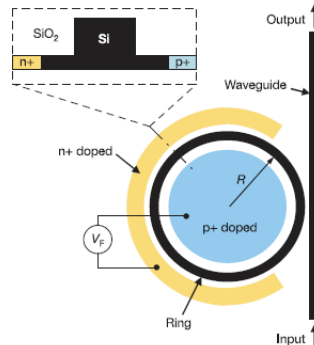
Nature Photon. 2, 242 (2008)

バイアス制御で

e,h注入、屈折率変化

リング共振器との共鳴変化

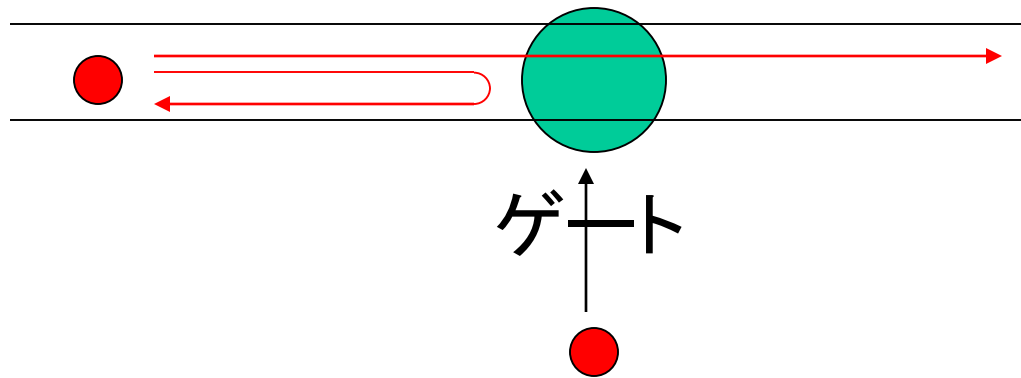
Nature 435, 325(2005)



光回路から光子回路へ

光子1個で起こす非線形光学効果

単一光子トランジスタ(理論) \Leftrightarrow 単一電子トランジスタ(実現)



1個の光子の有無で光子が透過するか反射するかを制御

Ultrafast all-optical switching by single photons

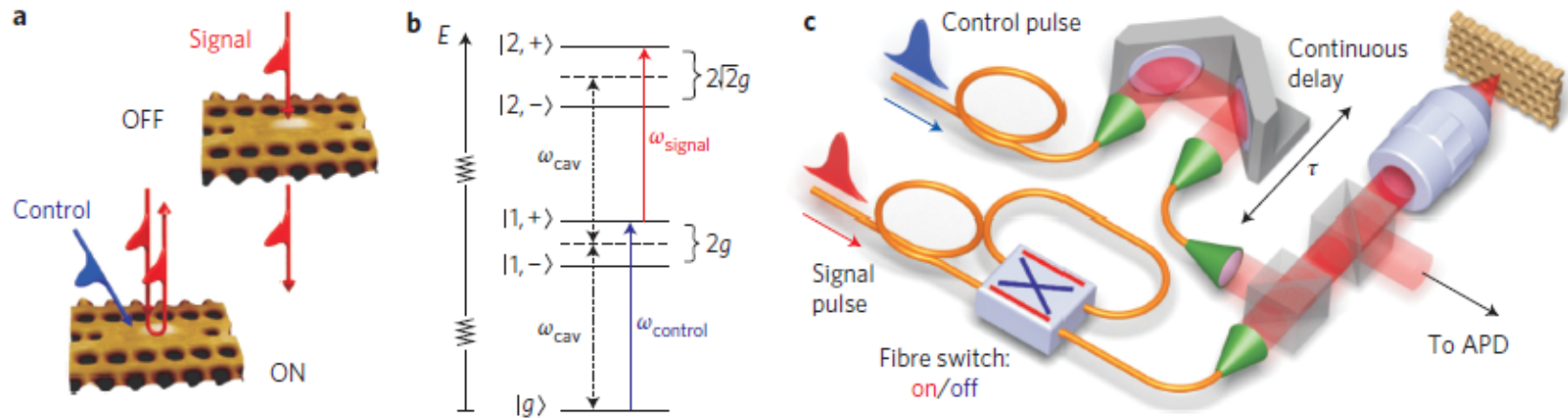
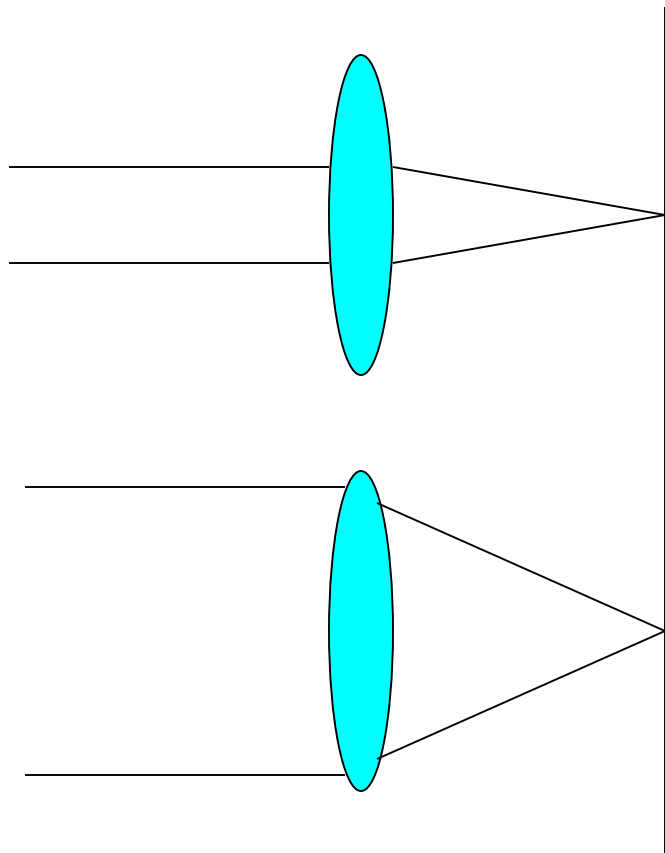


Figure 1 | A single-photon all-optical switch. **a**, A single control photon incident on the QD-cavity device determines whether a signal photon of different colour is scattered. **b**, Energy-level diagram of the strongly coupled QD-cavity system up to the second manifold of the anharmonic Jaynes-Cummings ladder. A single control photon on the upper polariton transition (UP) to the first manifold ($|g\rangle \rightarrow |1, +\rangle$) changes the scattering rate of a second signal photon resonant with a transition from the first to the second manifold ($|1, +\rangle \rightarrow |2, +\rangle$). **c**, Set-up for the demonstration of ultrafast single-photon switch operation. The relative delay between signal and control pulses is adjusted by a continuous delay stage. In addition, a discrete delay line, corresponding to a time delay of ~ 5 ns, can be added to the path of the signal pulse using a fibre switch. The photons back-scattered from the QD-cavity system are detected by an avalanche photodiode (APD) in single-photon counting mode.

光の量子化 半導体量子点 フォトニック結晶
 ポラリトン Rabi振動 共振器量子電磁力学

光学顕微鏡の空間分解能(回折限界) どちらがスポット径が小さい？



空間コヒーレンスの良い単色レーザー光
(理想的平面波)
ビーム径が異なる

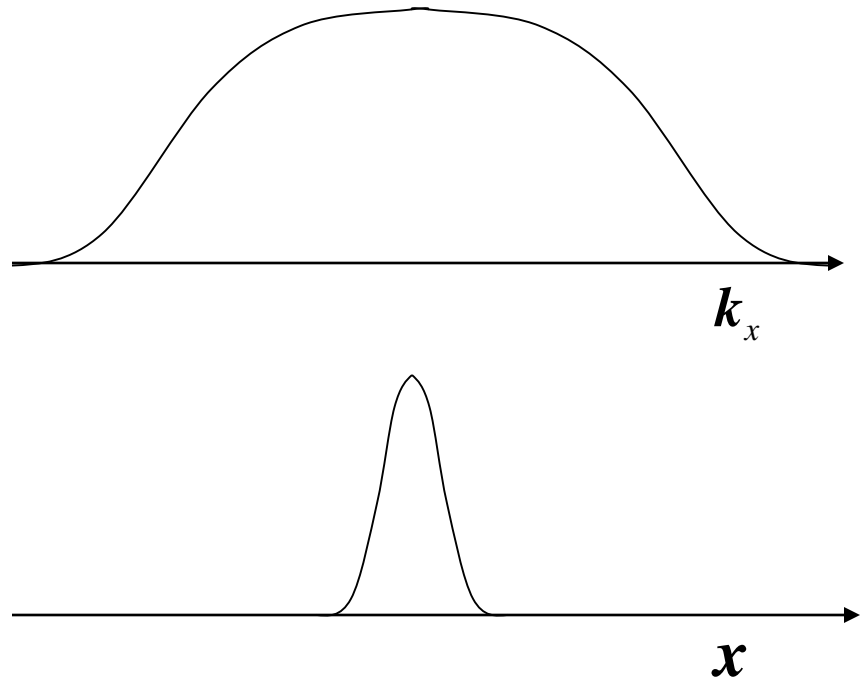
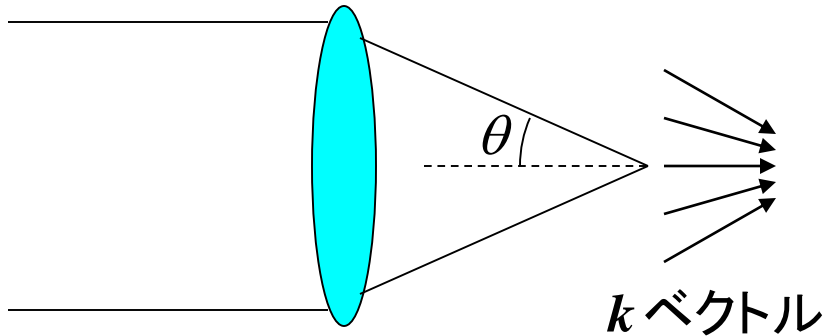
同じ焦点距離、
収差のない理想的レンズ
(顕微鏡対物レンズ)

空間分解能

レンズの分解能は λ とNAで決まる

$n \sin \theta$: NA (numerical aperture, 開口数)

$$\text{resolution} = A \frac{\lambda}{n \sin \theta} \quad A \approx 1$$

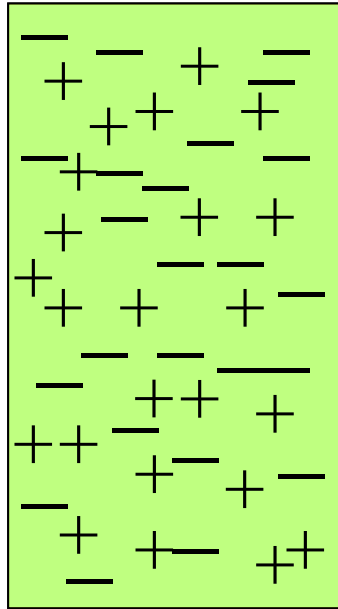


ステンドグラス



金属ナノ粒子
(表面プラズモン共鳴
局在プラズモン共鳴)

プラズモニクス

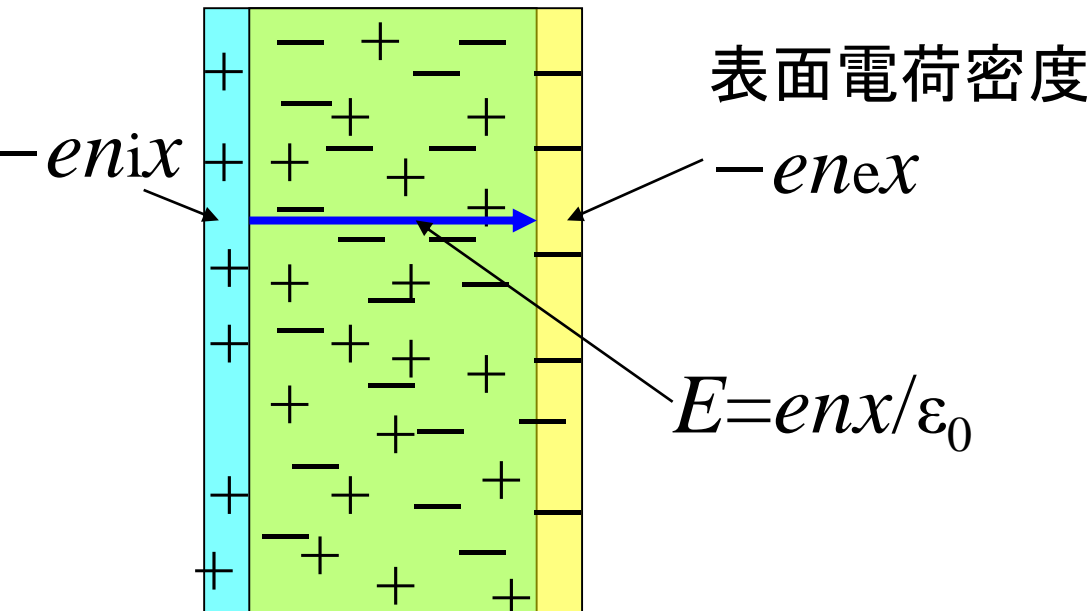


- 電子 n_e :密度

+ 正イオン n_i

中性 $n_e = n_i = n$

x
→



表面電荷密度

$-enex$

$E = enx / \epsilon_0$

電子気体の運動方程式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -eE$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{e^2 n_e}{m \epsilon_0} x$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_P^2 x = 0$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m}} : \text{プラズマ周波数}$$

プラズマ振動 縦波

プラズモニクス

電子気体の運動方程式 (金属のドルーデモデル)

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -eE \quad E = E_0 e^{-i\omega t} \quad x = x_0 e^{-i\omega t}$$

$$-\omega^2 x = -\frac{e}{m} E \quad x = \frac{e}{m\omega^2} E \quad P = -nex = -\frac{ne^2}{m\omega^2} E$$

$$\varepsilon E = \varepsilon_0 E + P \quad \varepsilon E = \varepsilon_0 E - \frac{ne^2}{m\omega^2} E \quad \varepsilon = \varepsilon_0 - \frac{ne^2}{m\omega^2}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2}$$

$$P = \frac{N_0}{V} p = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E \quad \text{ローレンツモデル}$$

$$\chi^{(1)}(\omega) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{N_0 q^2}{V m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_0}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 \chi^{(1)} \quad \text{で } \omega_0 = 0, \Gamma_0 = 0$$

プラズモニクス

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2}$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m}} : \text{プラズマ周波数}$$

$\omega < \omega_P$ $\varepsilon < 0$ 屈折率 $n = i\kappa$ 純虚数

電磁波は金属中に入り込めず表面で反射

$\varepsilon\mu < 0$ のとき、伝搬できない

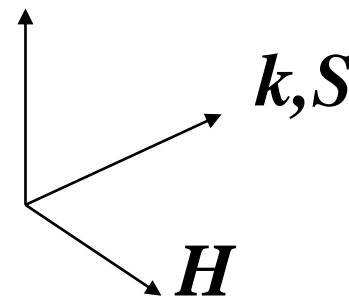
$$\mathbf{E}, \mathbf{H} \propto e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})}, \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu \mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \varepsilon \mathbf{E}$$

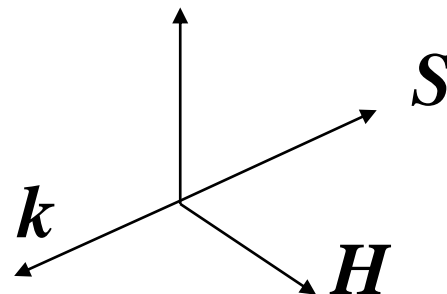
$$\varepsilon > 0, \mu > 0$$

\mathbf{E} 右手系 (正の屈折率)



$$\varepsilon < 0, \mu < 0$$

\mathbf{E} 左手系 (負の屈折率)



プラズモニクス

横波である電磁波は

縦波であるバルクのプラズマ振動(プラズモン)

とカップルできない(励起できない)

しかし、金属表面でTM波が表面プラズモンとカップルできる

表面プラズモン $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_M \epsilon_D}{\epsilon_M + \epsilon_D}}$

if $\epsilon_M + \epsilon_D = 0$ 表面プラズモン共鳴 $\omega_{SP} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 + \epsilon_D}} \omega_P$ for $\frac{\epsilon_M}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2}$

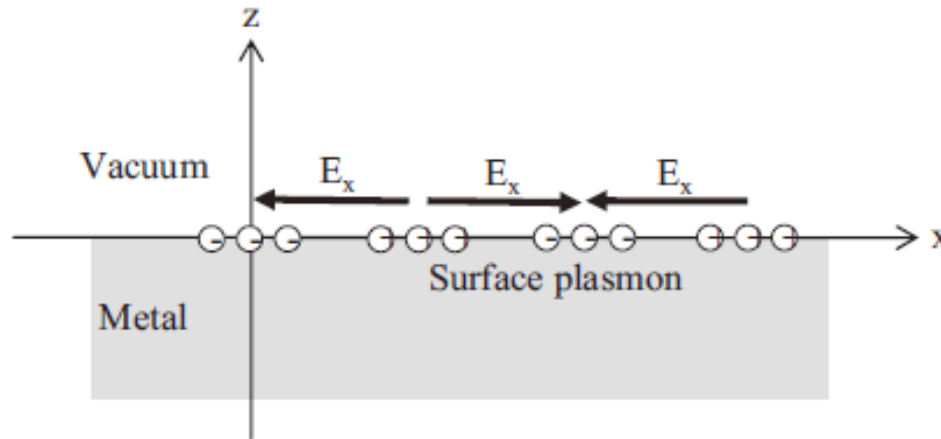


図3 表面電荷の集団振動(表面プラズモン).

プラズモニクス

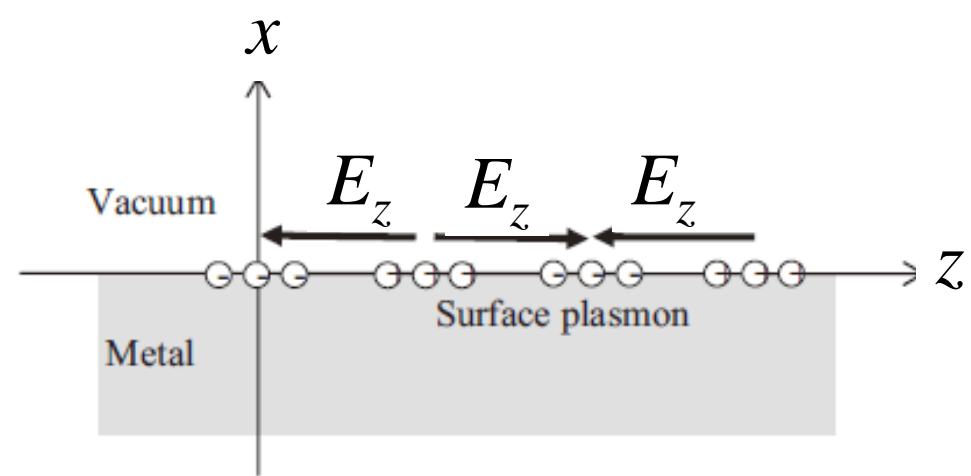
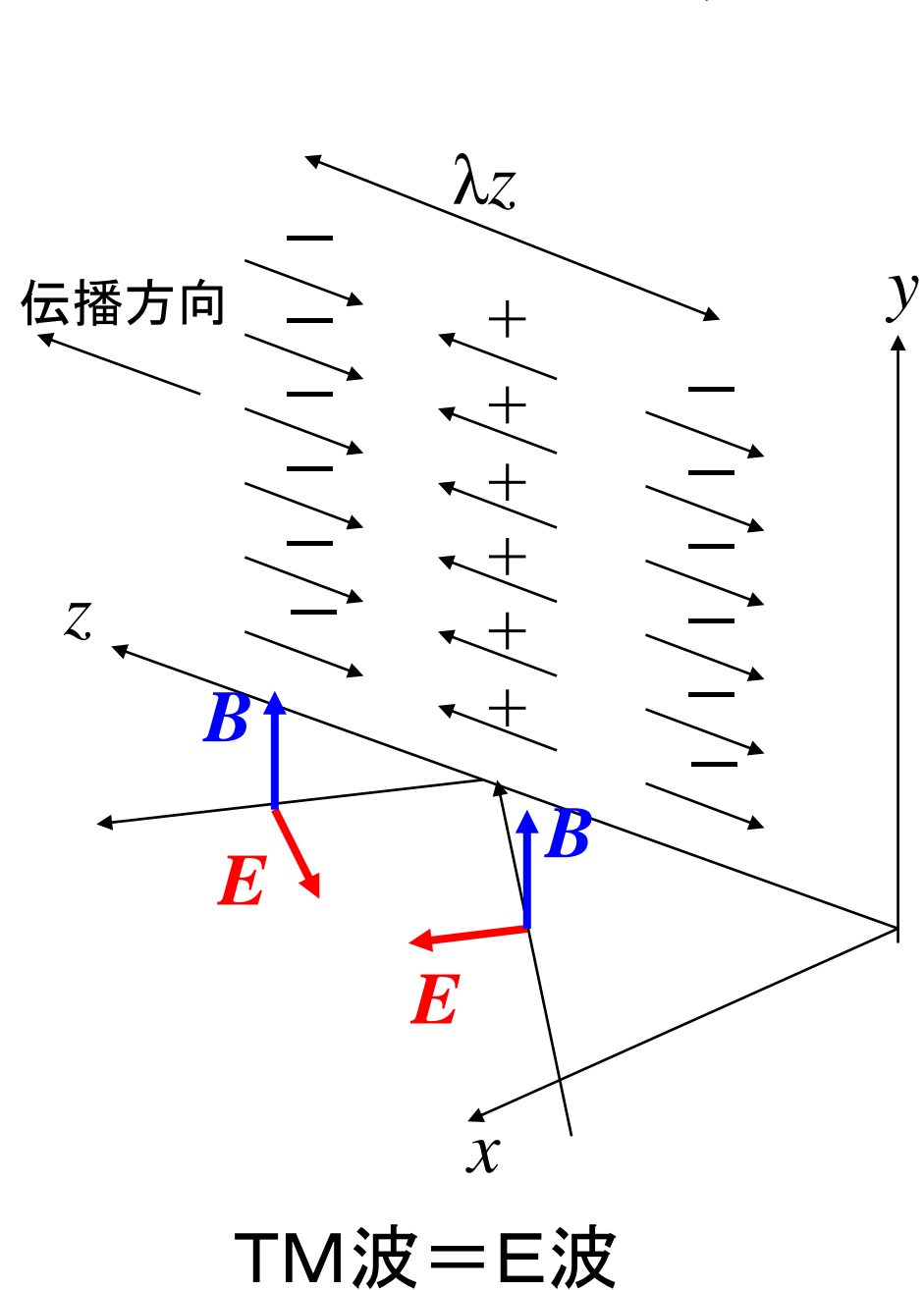
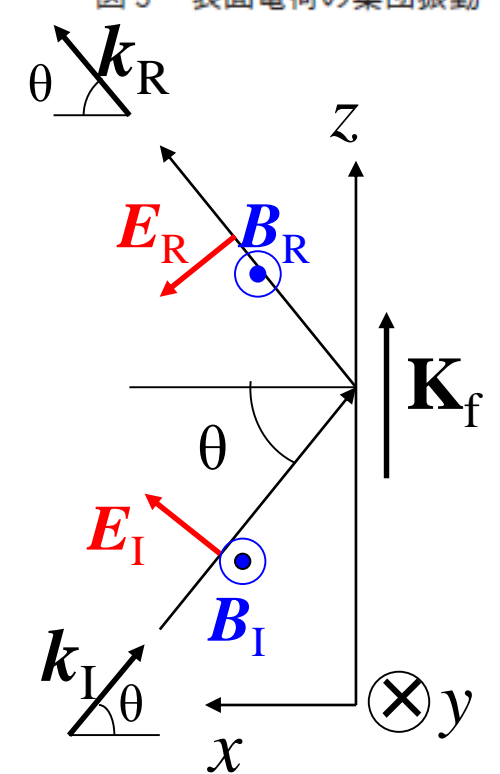
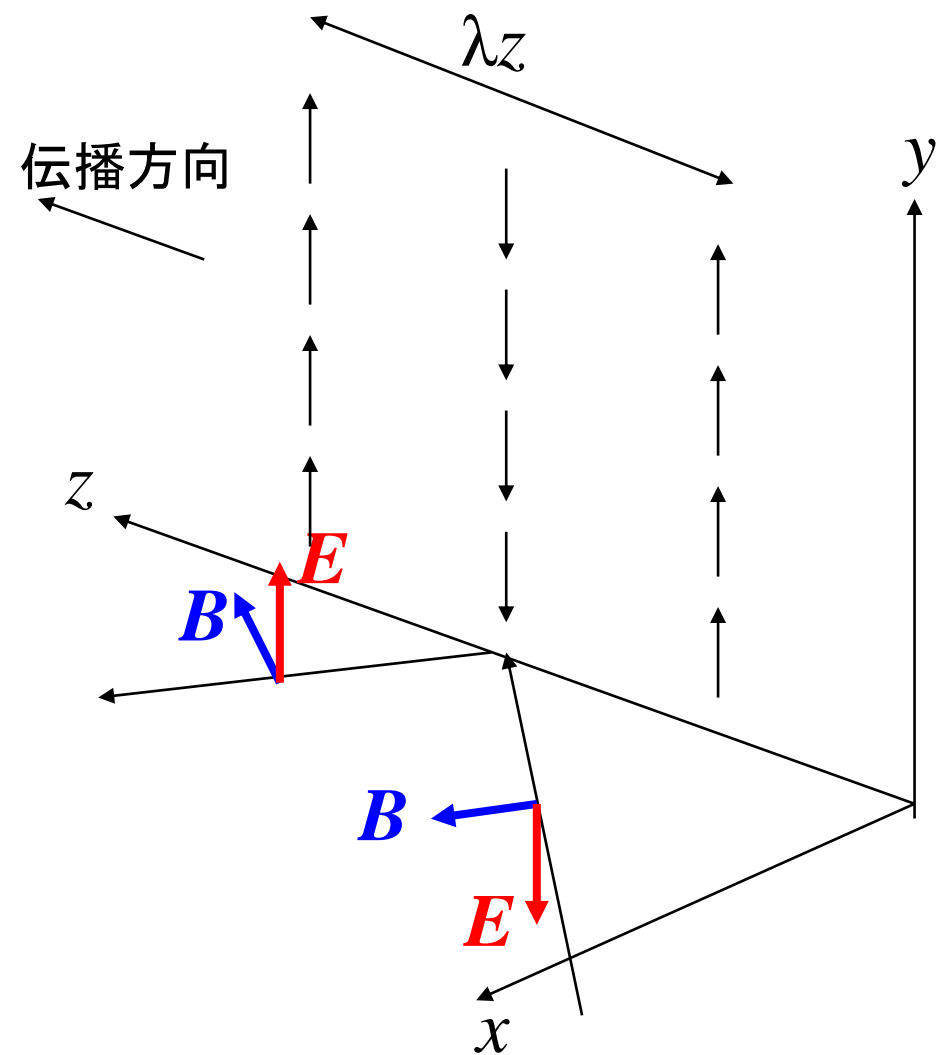


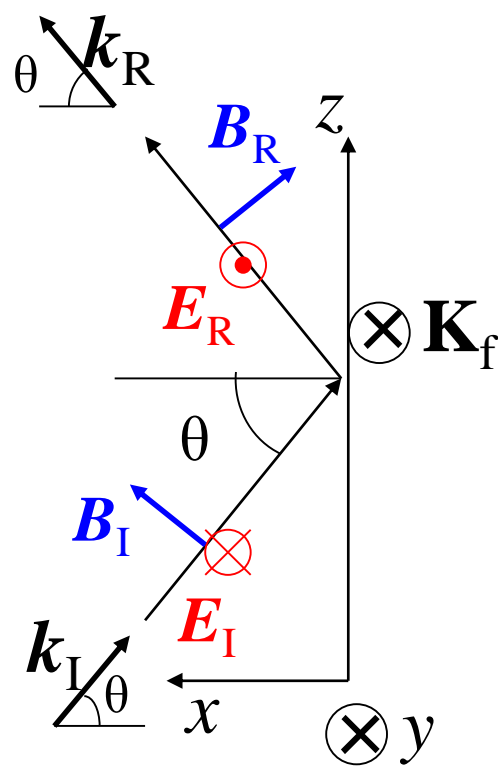
図3 表面電荷の集団振動 (表面プラズモン).



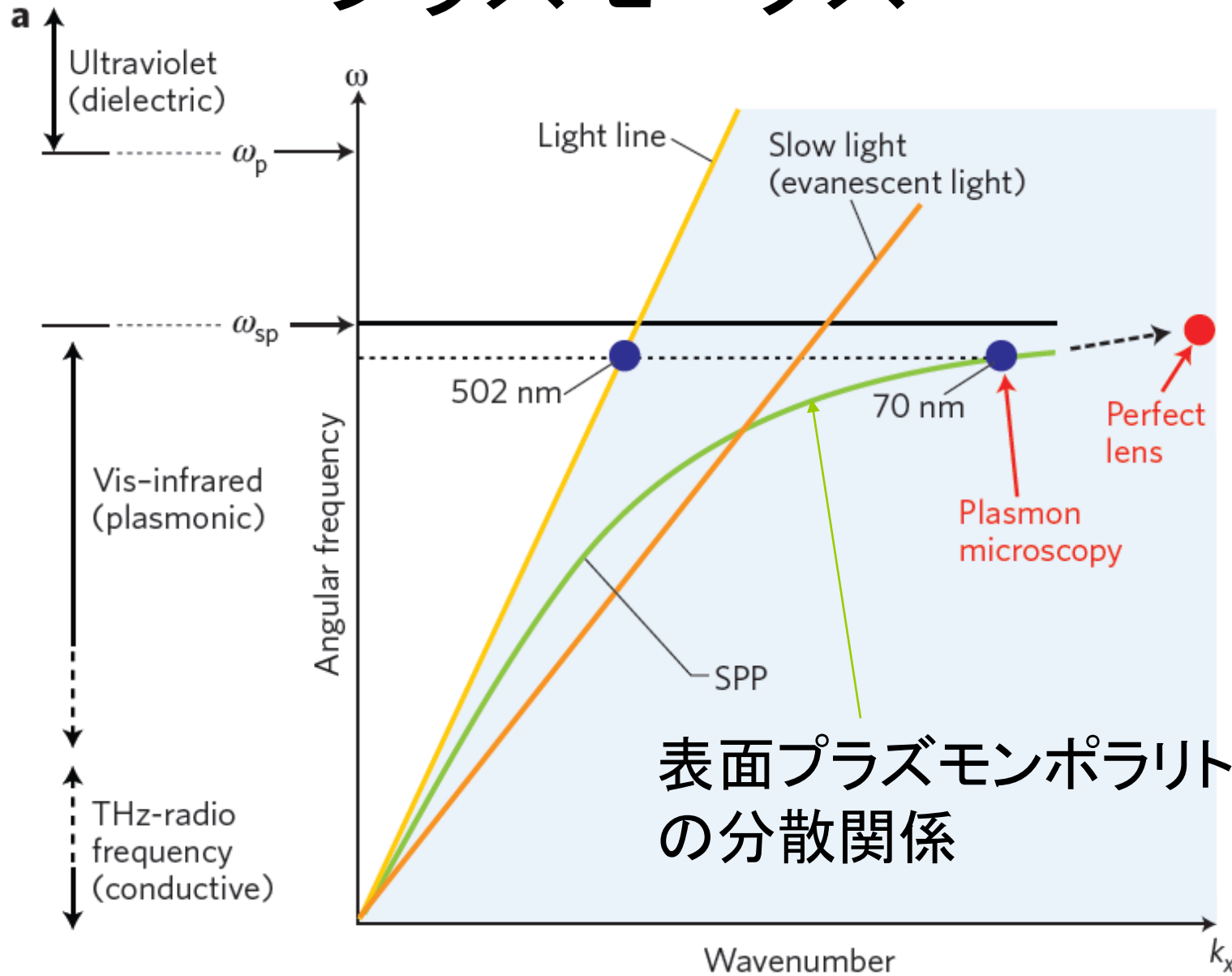
プラズモニクス



TE波 = H波



プラズモニクス

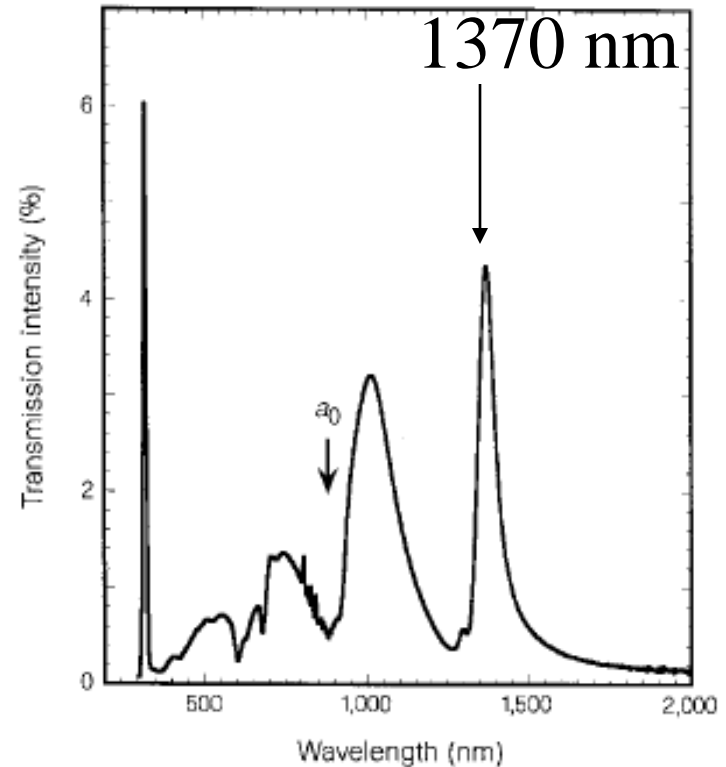
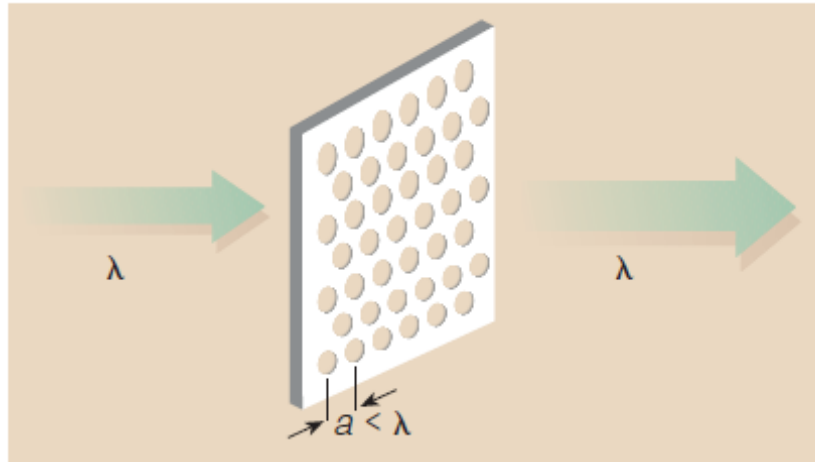


表面プラズモンポラリトンの分散関係

プラズモニクス

光の異常透過

Nature 391, 667(1998)



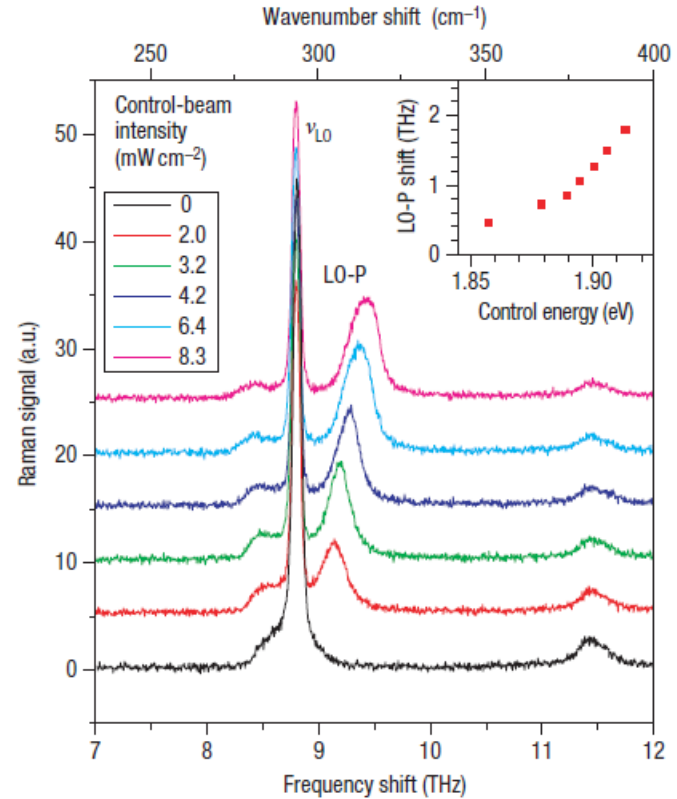
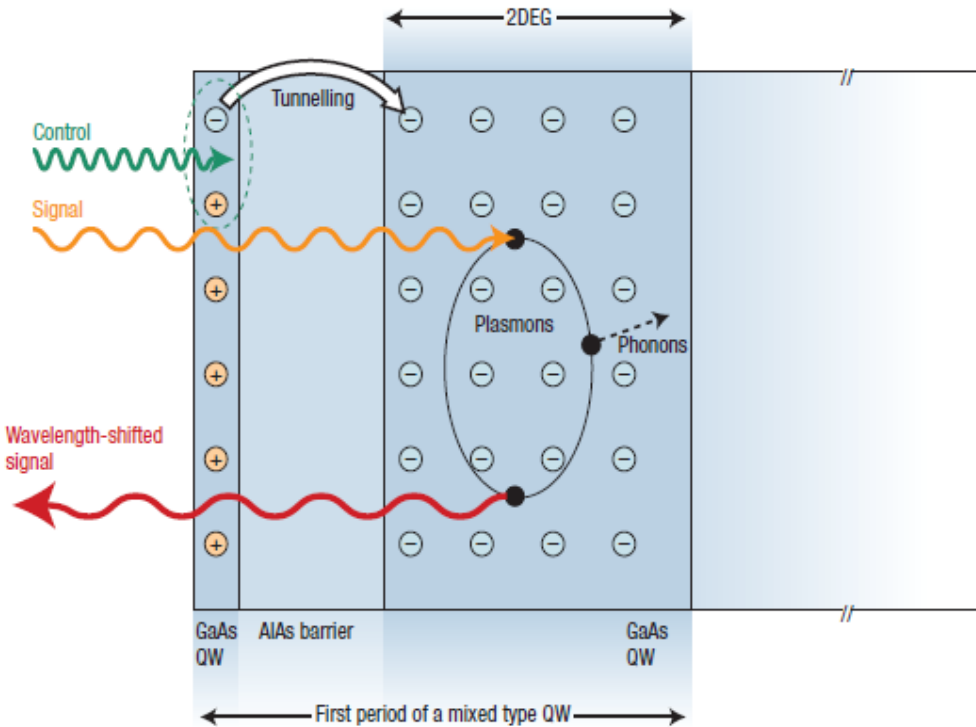
Ag板 厚さ200 nm
ナノ小孔直径 150 nm
周期 900 nm

選択的透過: 1370 nm では孔と板の幾何学的面積比から計算される透過率の2倍以上

光とプラズモンのカップリング = 表面プラズモンポラリトン

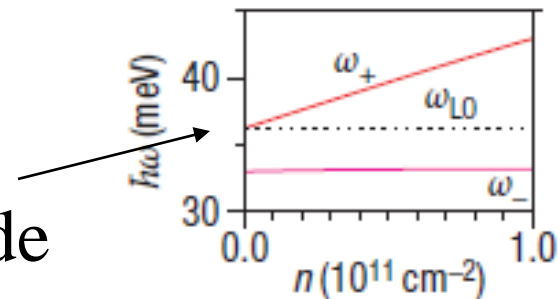
プラズモニクス

All optical wavelength shifter



数 μ Wのコントロール光で
~10THzのシフト

Coupled plasmon-phonon mode



Nature Photon. 1, 701 (2007)

参考：波長多重通信における波長変換

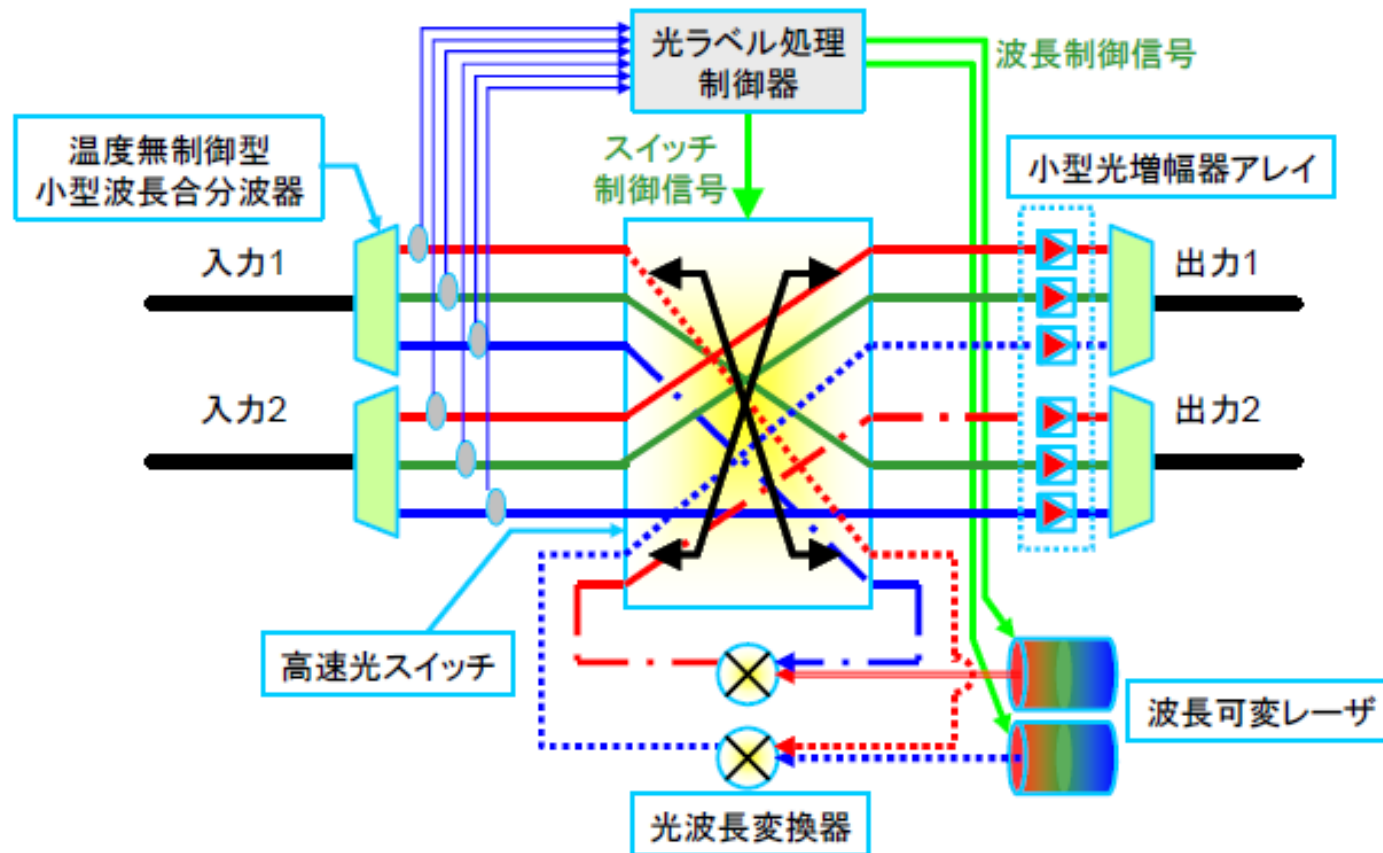


図 1 高速光スイッチングノード装置の構成概略図

Plasmonic Photon Sorter

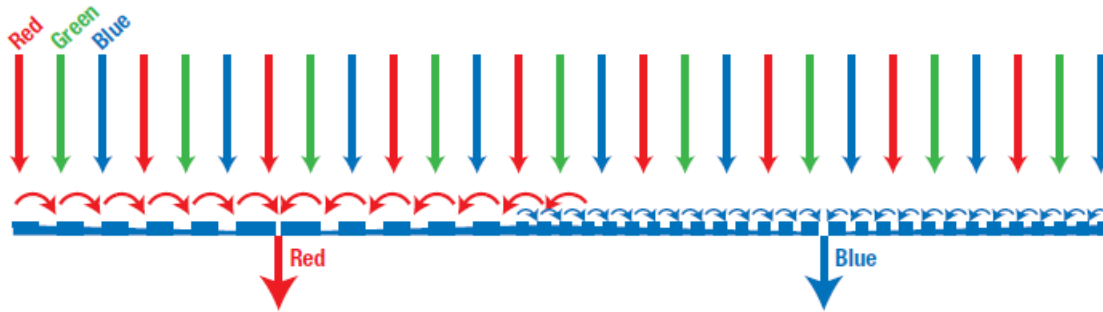
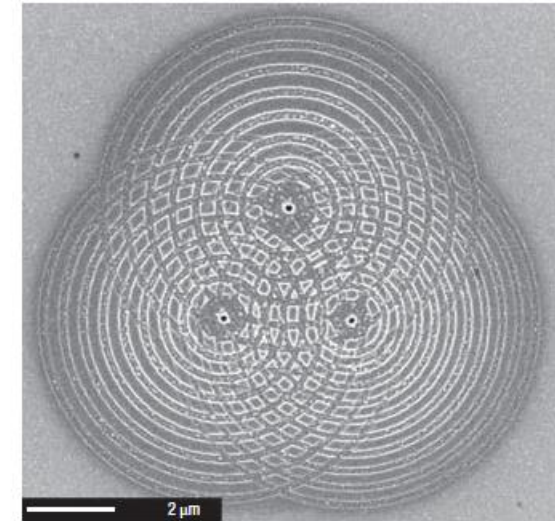
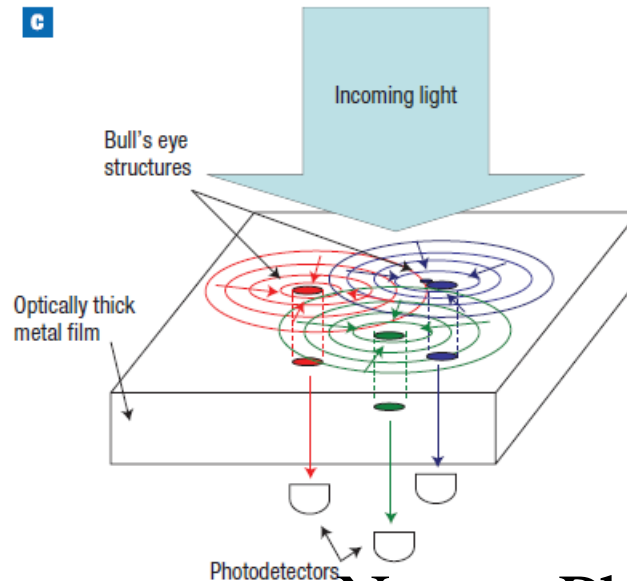


Figure 1 Plasmonic colour sorting. Surface plasmons sort colours for transmission through a nanohole.

C



Nature Photon. 2, 161 (2008)

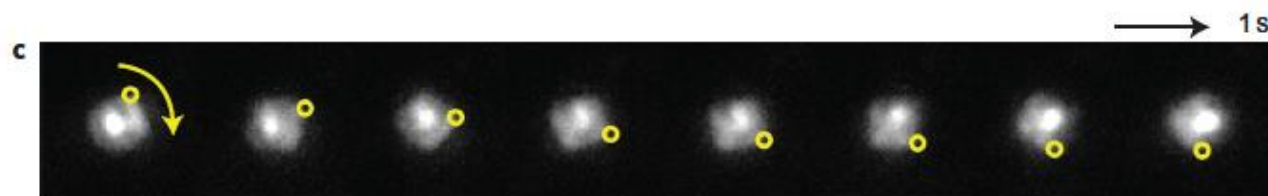
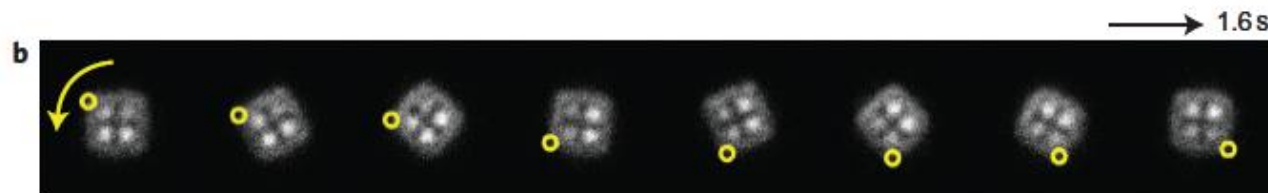
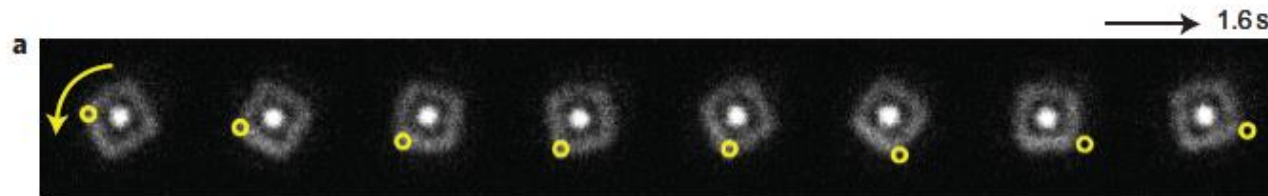
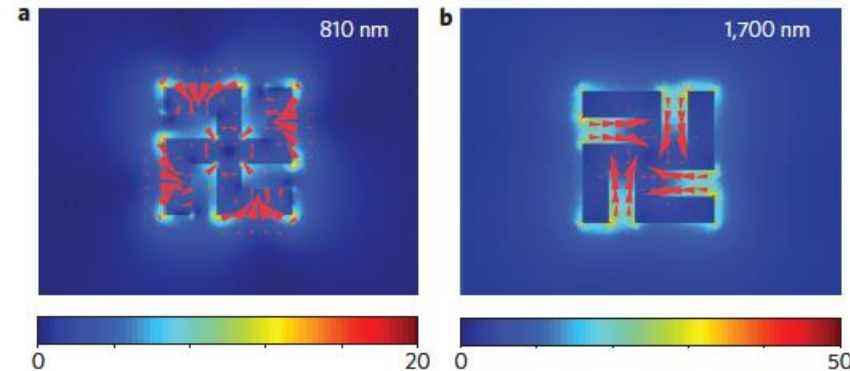
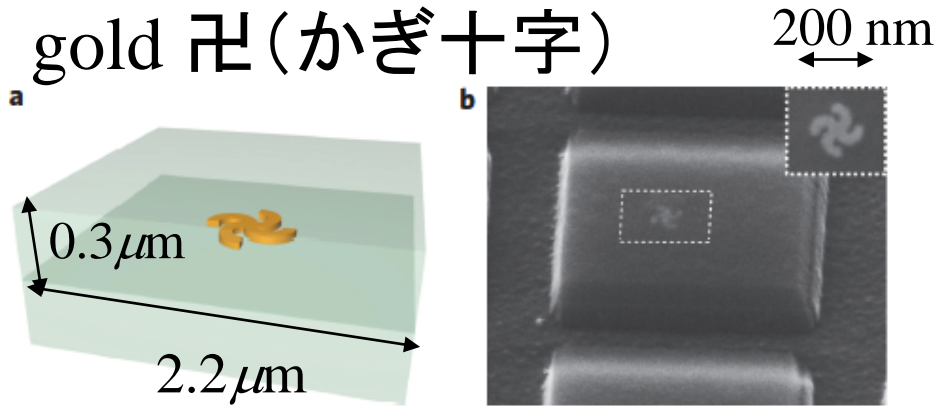
プラズモニックモーター

Nature Nano.5,570(2010)

直線偏光の光の照射で回転力

照射光波長

電場分布とPoynting vector

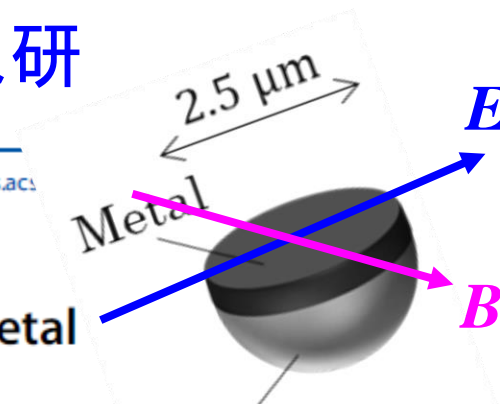


相沢創 2015卒研成果

ヤヌス粒子 = 双面粒子

特許願2016-071706 2016.3.31 原田 (積水化成品工業) 徳永 相沢(卒研生) 瀬戸

徳永研



LANGMUIR

Cite This: Langmuir 2017, 33, 14684–14690

pubs.acs

2017

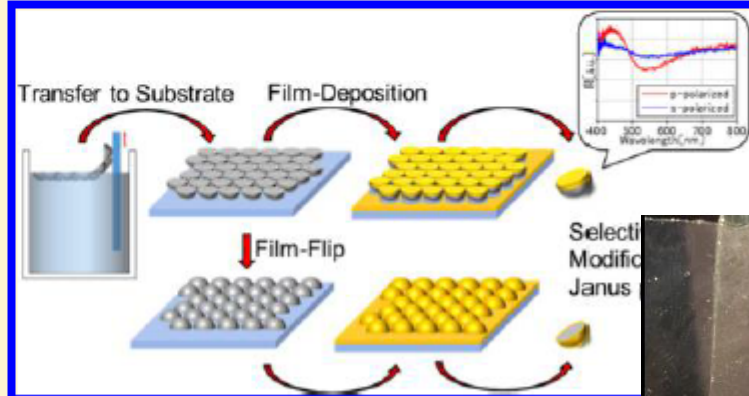
Orientation Control of Hemispherical Janus Particles and Metal Coating on the Selective Surface To Excite Surface Plasmon Polaritons in the Micro-Kretschmann Geometry

銀コート半球

世界初の半球プラズモニックヤヌス粒子

So Aiza
Departme

ABSTRACT: Asymmetric-shaped particles (the Janus particle) are difficult to be arranged in a uniform orientation on a solid substrate. This difficulty prevents further modification of the selective surface of the particles for fabrication of the Janus particles with anisotropy of the shape and surface. We successfully arranged hemispherical particles in a uniform orientation at the air–water interface. The particles were arranged on the solid substrate in a uniform orientation by transferring the particle film onto the substrate. This arrangement enabled the fabrication of the Janus particles with anisotropy of the shape and surface by selective deposition of a film on either the equatorial plane or the spherical surface. Additionally, we demonstrated the function of the microscopic Kretschmann geometry for excitation of the surface plasmon polaritons of a thin metal film on the plane of a single hemispherical particle.



電場と磁場で半球の方位を自在にコントロール



1年の始めのJanuaryは、ローマ神話で「事の始まりと終わり」を司る神Janus

銀コート半球ヤヌス

表面プラズモン共鳴示す半球ヤヌス粒子

理科大が作製 特異性解明成功

東京理科大学理学部の徳永英司教授研究室チームと積水化成品工業の研究グループは、世界で初めて半球ポリマー微粒子の赤道面に金属製膜した「ヤヌス粒子」を作製し、その特異な光・電場・磁場応答を明らかにすることに成功した。

同研究室では、マイクロマシン的一种としてヤヌス粒子に光照射したり電場を印加したりして動かす研究に刺激を受け、クラミドモナス（単細胞緑藻）の走光性と同研究室で最近開始している表面プラズモンの研究から発想して、半

球透明微粒子の赤道面に金属成膜できれば半球面側から光照射してプラズモン共鳴により光に向かってくる粒子（microswimmer）が作れるのではないかと考えたのが始まりである。一方で積水化成品工業でも半球粒子（これ以外にも様々な形状の粒子を作製している）の応用法を探していることから、半球粒子の提供を受けて共同研究を開始することになった。

ヤヌス粒子とは、その名称が2つの顔を持ったローマ神に由来する、2つ以上の異なる物理・化学的性質をもつ表面・形状で構成さ

れる粒子のこと。この赤道面にのみ金属製膜した半球粒子は、空気-水界面で半球粒子を同じ向きに配向させて並べる汎用性の高い簡便な技術の開発により実現した。

研究により、直径2.5μmの金属コート半球ヤヌス粒子は、球面側からの光照射で金属の種類によって異なる共鳴波長をもつ表面プラズモン共鳴を示すこと、高反射率をもつ銀を製膜して電場で反射・透過をスイッチできるシャッターとして機能すること、強磁性体のニッケルを製膜して電場・磁場で水中の粒子の向きを完全にコントロールできることが明らかになった。

今後、まだ予備的にしか確認で

きていない走光性を確実な実果として確認したいとしている。ヤヌス粒子が赤道面をレーザーに向けているときは、レーザー離れ（輻射圧で）、球面を向いているときはレーザーに向かうプラズモン共鳴吸収による熱泳（で）運動をする可能性がある。永教授は「ニッケルなどの強金属製膜半球粒子で、磁場とをかけて向きを制御して、光したり引いたり、横に動かしたりすることができれば面白い。り、電場・磁場・光を組み合わせて運動の向きを自在に制御でmicroswimmerになることを期待しています」という。

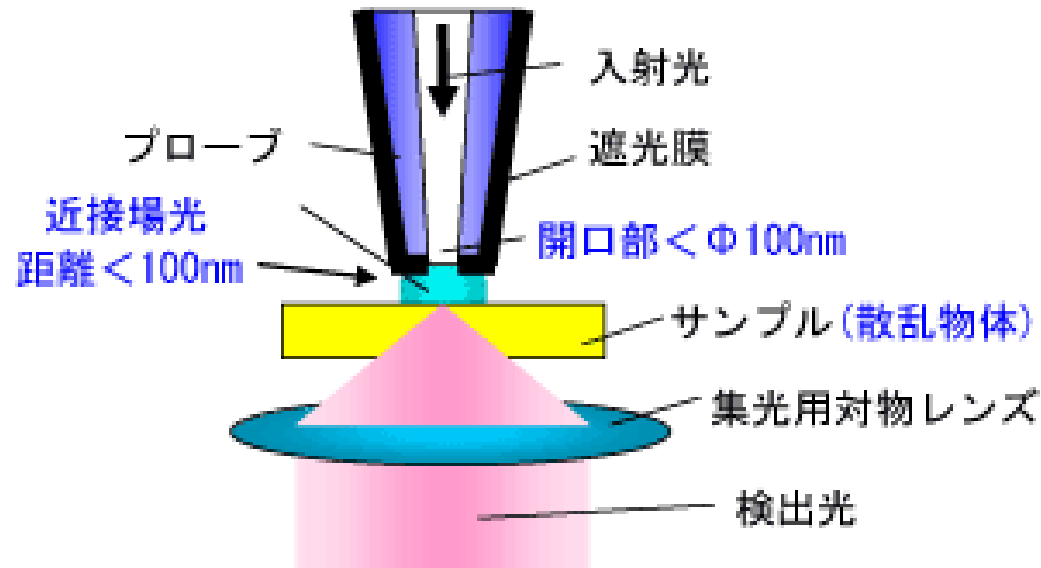
ほかに、適切な周波数、振

回折限界を超える

走査型近接場光学顕微鏡(フォトントンネル顕微鏡)
(Scanning Near field Optical Microscope)

数10nmの開口、距離を通して試料に光を照射。
近接場光(エバネッセント光)が試料によって散乱される。

イルミネーションモード



東工大
大津元一ら

光の伝搬方向 z

$$k^2 (= \omega^2 / c^2) = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$$

伝搬光による2次元結像 xy 面内波数 $k_{//}$ 伝搬光 $k_z > 0$

$$k_{//} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \sqrt{k^2 - k_z^2} \leq k$$

空間分解能 $> 2\pi / k = \lambda$ ($\Delta x \Delta k_x > 2\pi$)

非伝搬光 (近接場光、エバネッセント光) k_z : 虚数 $k_z^2 < 0$

$$k_{//} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \sqrt{k^2 - k_z^2} > k \quad \text{回折限界を超える}$$

電磁波の輻射の理論

任意の時間変化する電荷分布による電磁場（観測試料）

輻射場（伝搬光） 十分遠方で $\propto 1/r$ エネルギー $\propto 1/r^2$

近接場（非伝搬光） $1/r^2$ $1/r^3$ など

高い空間周波数 k を持つが
試料の近傍のみ

メタマテリアル 負の屈折率

屈折率

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} = \epsilon^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{1}{2}}$$

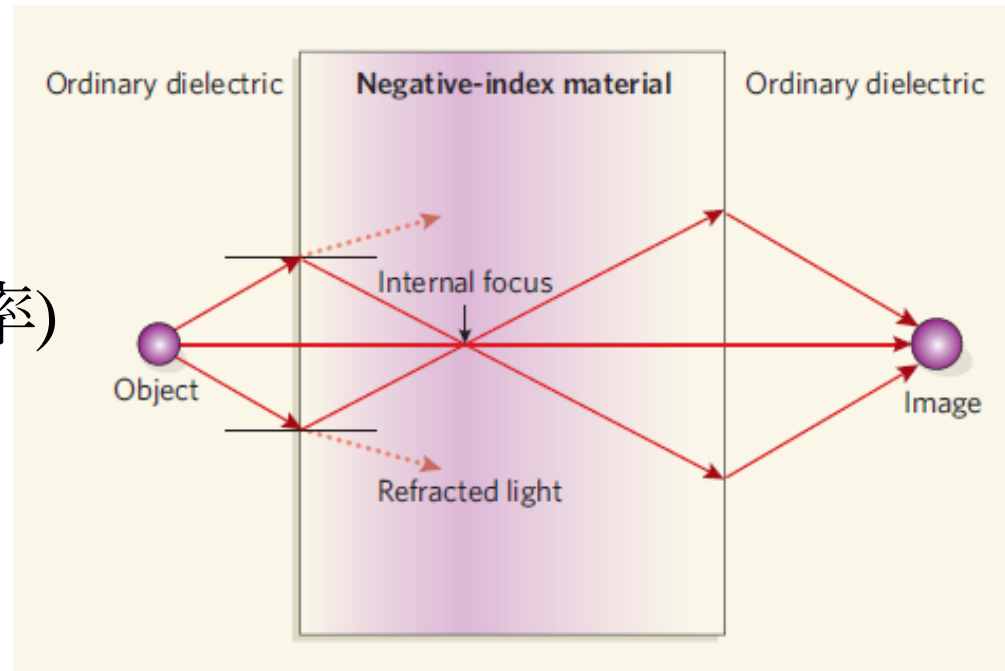
ϵ, μ (比誘電率、比透磁率)

金属

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} < 0 \quad \text{for } \omega < \omega_p$$

ω_p プラズマ周波数

ϵ も μ も負のとき、 n は負になる。



回折限界を超える

$n = -1$ の物質 エバネッセント光の振幅を回復できる
PRL 85, 3966 (2000)

表面プラズモンと関係あり

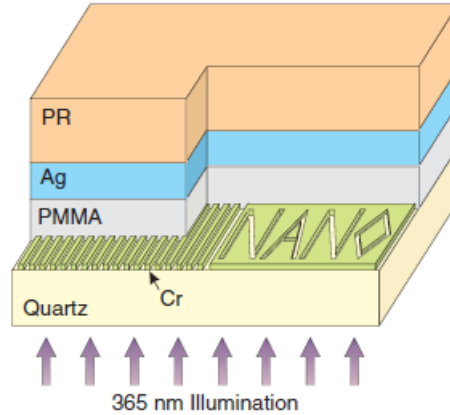
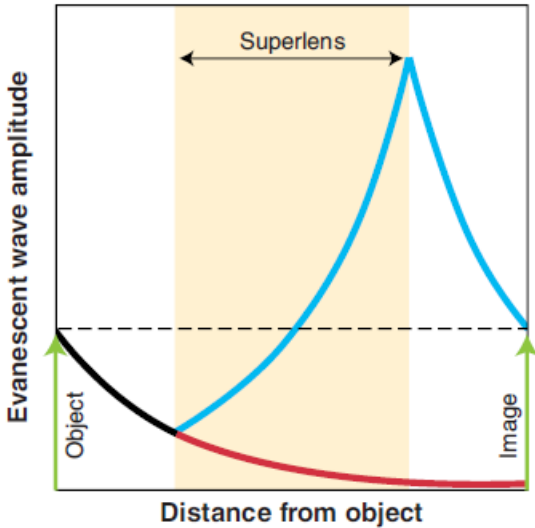
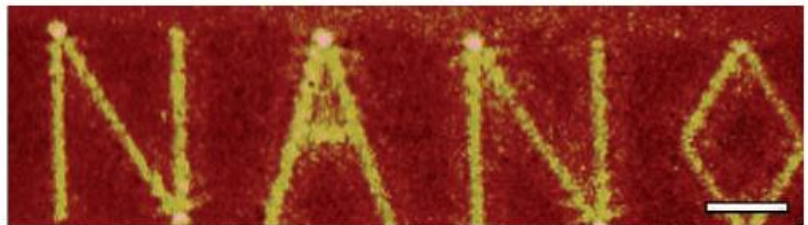


Fig. 1. Optical superlensing experiment. The embedded objects are inscribed onto the 50-nm-thick chrome (Cr); at left is an array of 60-nm-wide slots of 120 nm pitch, separated from the 35-nm-thick silver film by a 40-nm PMMA spacer layer. The image of the object is recorded by the photoresist on the other side of the silver superlens.

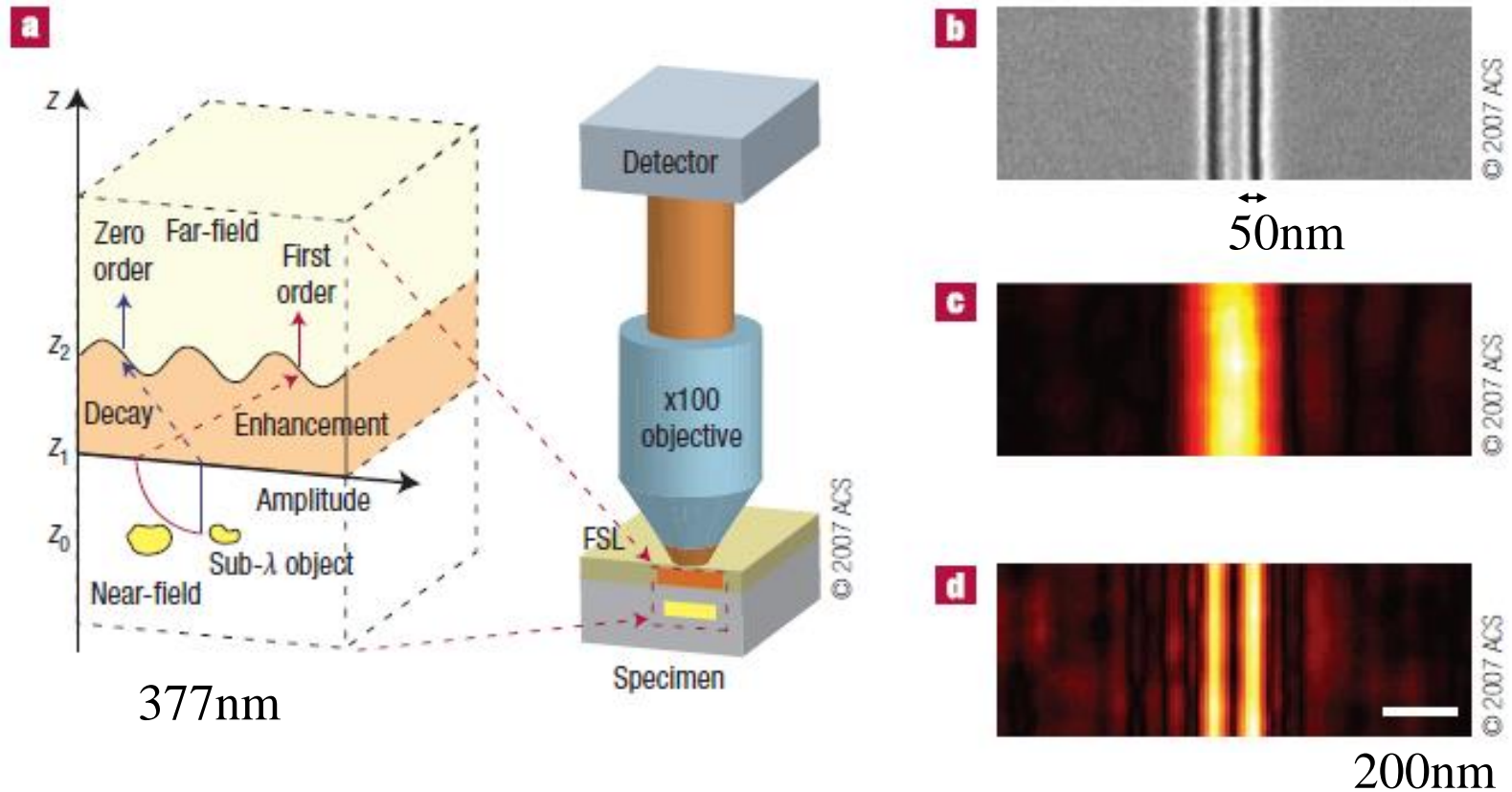
using. Fang *et al.* show that evanescent wave refocusing can be used to create the optical image (center) of a lithographically written object (top) with subwavelength resolution. Without the lens, the image resolution is much lower (bottom). Scale bar, 2 μm .



2 μm

Science 308, 534 (2005)

Far-field superlens



Nano Lett. 7, 403(2007)

光学隠蔽 (透明マント)

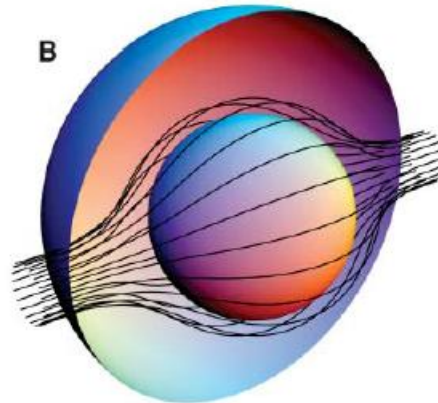
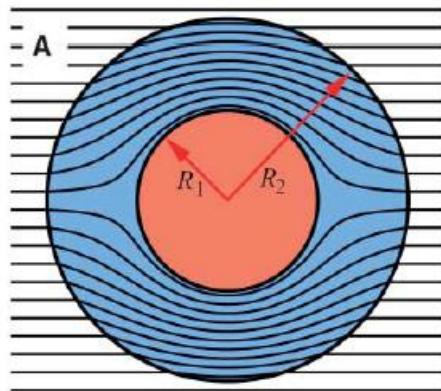


Fig. 2. A ray-tracing program has been used to calculate ray trajectories in the cloak, assuming that $R_2 \gg \lambda$. The rays essentially follow the Poynting vector. (A) A two-dimensional (2D) cross section of rays striking our system, diverted within the annulus of cloaking material contained within $R_1 < r < R_2$ to emerge on the far side undeviated from their original course. (B) A 3D view of the same process.

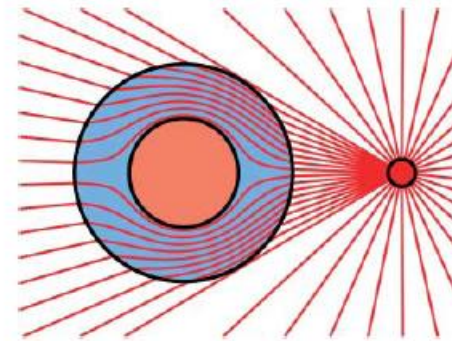


Fig. 3. A point charge located near the cloaked sphere. We assume that $R_2 \ll \lambda$, the near-field limit, and plot the electric displacement field. The field is excluded from the cloaked region, but emerges from the cloaking sphere undisturbed. We plot field lines closer together near the sphere to emphasize the screening effect.

どのように負の屈折率を実現するか？

2009徳永研 卒研発表PPより

1206089 福田 圭介

1206064 高松 利寛

Split-Ring Resonator (SRR)

- Split-Ring Resonator (SRR) のマイクロ波に対する応答について調べ、マイクロ波の狭い空間での増強と可視光での負の屈折率の実現を目指す

SRRとは・・・

- マイクロ波に対して共鳴し、特定の周波数のマイクロ波を吸収する
- 写真のSRRの大きさは2cm×2cmの基板に直径約1cmの金属のリング
マイクロ波の波長(約10cm)に対して1/10程度の大きさ



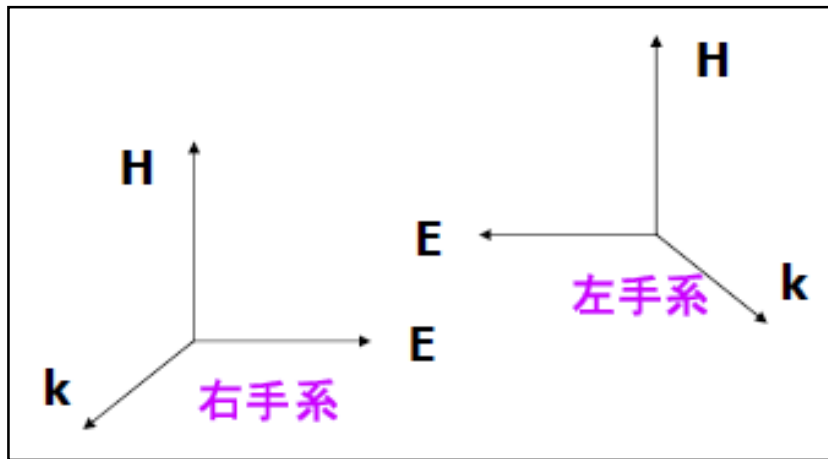
SRRは負の屈折率をもつ構造に使われている

背景

負の屈折率物質(negative refractive index materials : NIM)の特徴

- ・電場 E , 磁場 H , 波数ベクトル k の向きが逆(左手系)になる

左手系物質(Left handed materials : LHM)とも呼ばれる



参考文献 [1]

- ・光の屈折の方向が逆になる



参考文献 [2]

背景 負の屈折率物質について

負の屈折率を持つ物質

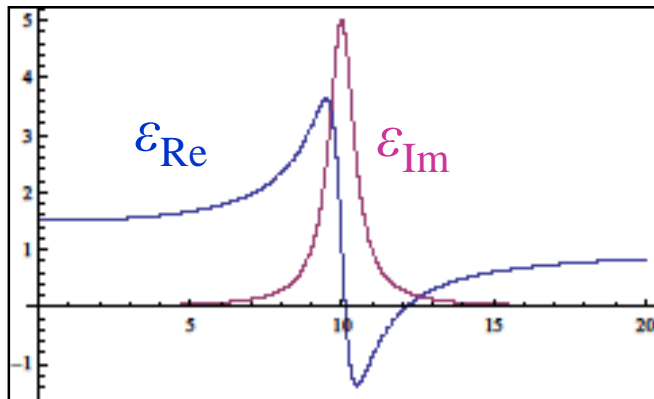
誘電率 ϵ と透磁率 μ が負でなければならない

屈折率

$$n = \sqrt{\epsilon} \sqrt{\mu}$$

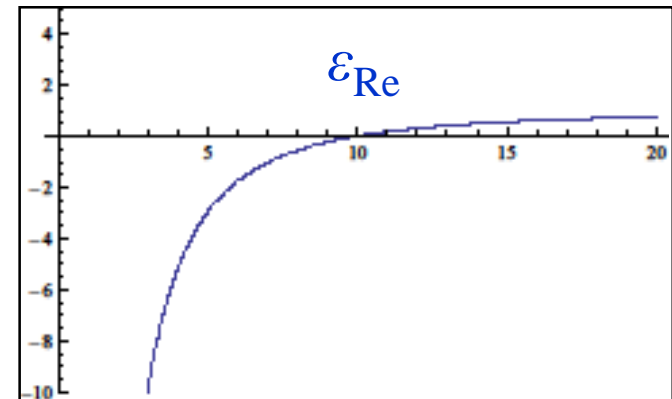
誘電率 ϵ

・普通の物質(誘電体)は正



ローレンツ・モデル

・金属は可視領域で負



ドルーデ・モデル

透磁率 μ

・ほとんどの物質(磁性体以外)では 1

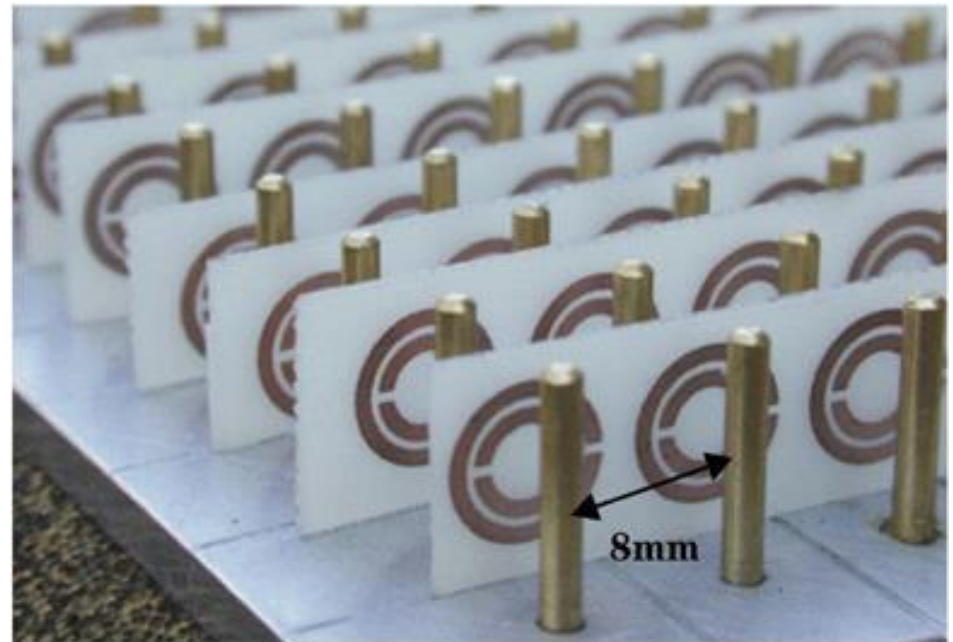
自然界には負の誘電率 ϵ をもつ物質はあるが、負の透磁率 μ をもつ物質はほとんど存在しない

背景 負の屈折率物質について

マイクロ波領域に対して負の誘電率・透磁率をもつ構造を作ることが出来る

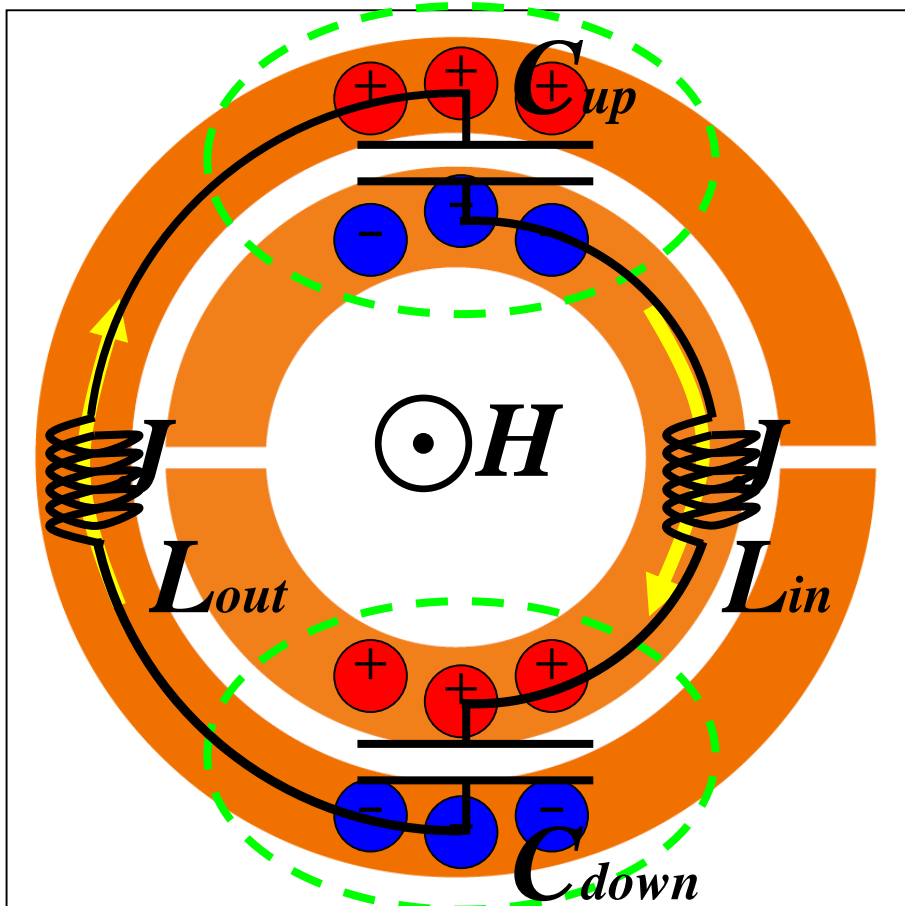
- ・ 誘電率が負 金属ワイヤー (Pendry 1996)
- ・ 透磁率が負 SRR (Pendry 1999)

これら二つの構造を組み合わせることで、負の屈折率をもつ構造が作られた
(Smith 2000, Shelby 2001)



背景 SRRについて

SRRの動作原理

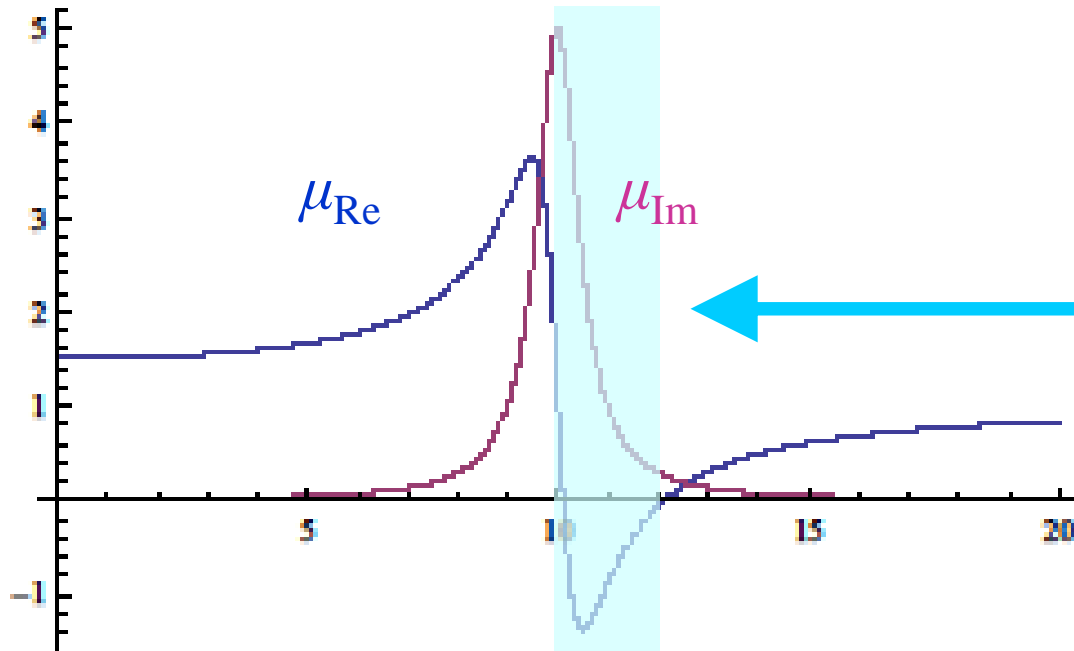


- ① SRRに垂直に磁場 H が入射
- ② 磁場によって電流 J が流れる
- ③ リングの分割(split)によって電荷がリングの上下にたまる
- ④ 外側のリングと内側のリングの間 → コンデンサー C
- ⑤ リング状の構造 → コイル L
- ⑤ SRRはLC共振回路としてふるまう
- ⑥ 共振周波数 f と同じ周波数の磁場に共鳴する

$$\text{LC共振回路の共振周波数 } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

背景 SRRについて

- ① SRRに磁場が垂直に入射
- ② SRRが共鳴し、共鳴周波数の電磁波を吸収
- ③ 磁場の振動に対して応答が生じる
- ④ 透磁率の虚部 μ_{Im} が共鳴周波数付近で増加
- ⑤ クラマース・クロニツヒの関係から透磁率の実部 μ_{Re} も大きく変化



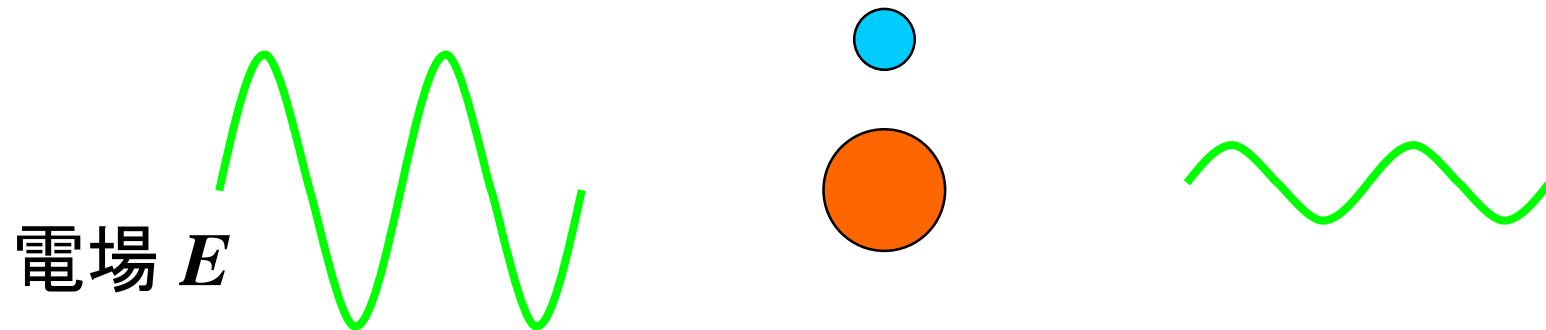
この領域で透磁率が負になっている

背景 SRRについて

SRRがマイクロ波の磁場に対してLC共振することで応答



物質中の電子が電場に対して応答していることと同じ



SRRはマイクロ波からみれば一つの”原子”である

原子一つの光学応答を自由自在に制御できる

光学ナノアンテナ

単一分子からの
発光強度、空間分布を
アンテナで変化させる

同様にナノアンテナで
回折限界よりも
小さなスケールに光を集光

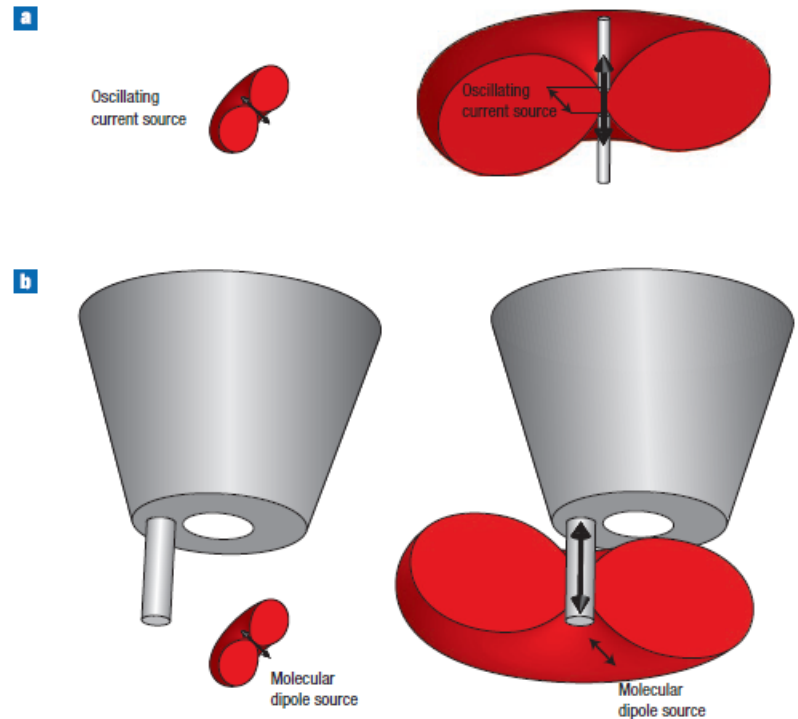


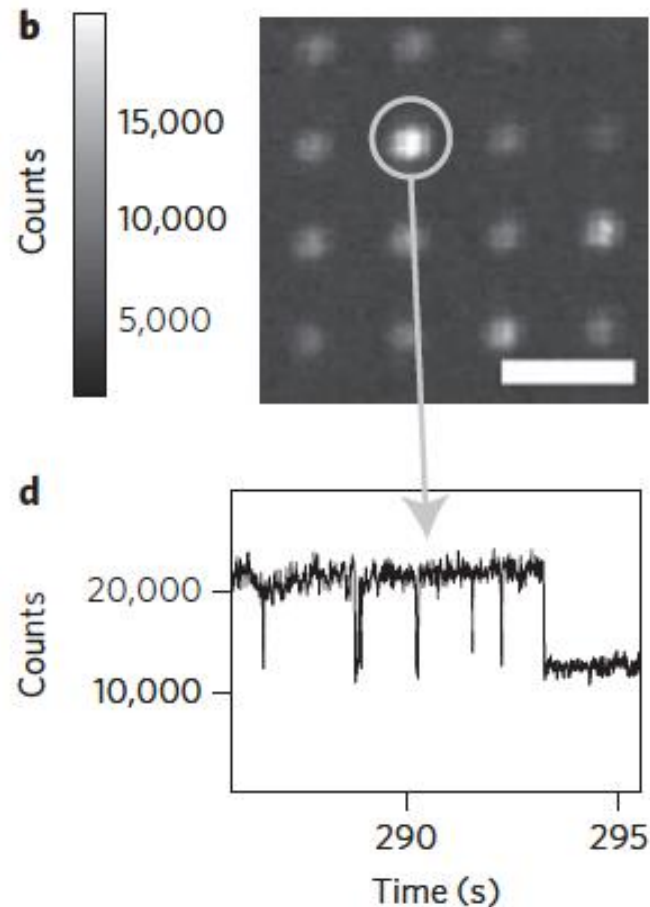
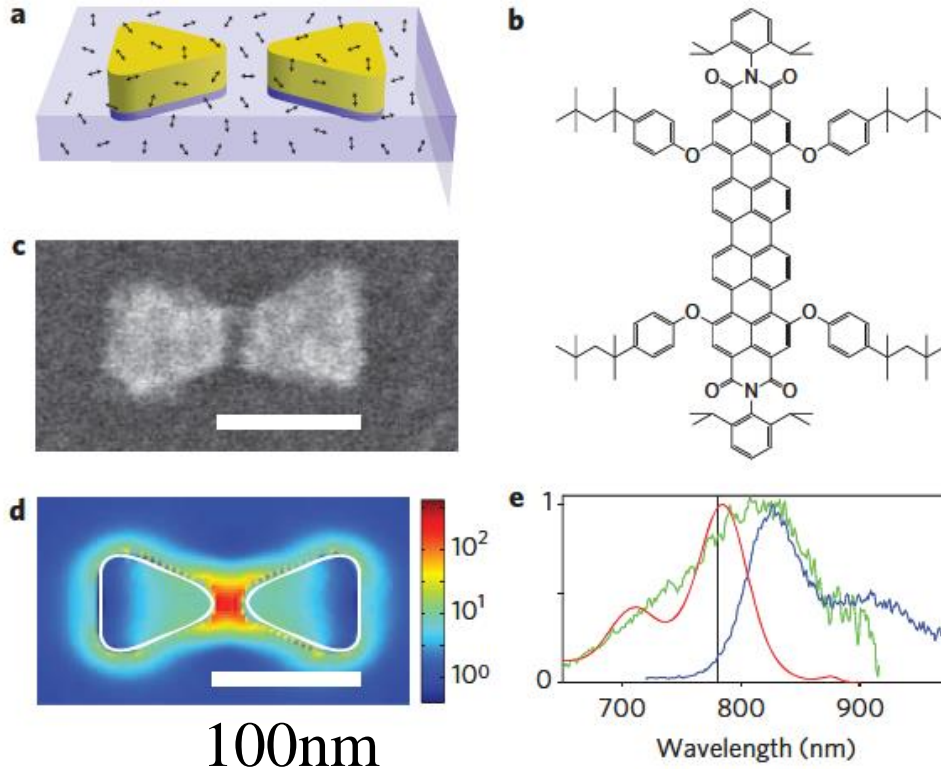
Figure 1 Antennas amplifying and redirecting emission. **a**, An oscillating point source (left) is not an efficient radiator, but when that current source is wired to a half-wavelength antenna (right), emission from the coupled system is amplified and redirected into the dipolar mode of the antenna. **b**, Likewise, the emission from a single fluorescent molecule (left) can be amplified and redirected by coupling to the optical antenna at the tip of a near-field probe (right). Note that by coupling the molecule to a highly directional antenna, the coupled system acquires the directionality of the antenna.

Nature Photon. 2, 230 (2008)

光学ナノアンテナ

単一分子の発光を>1000倍に増強

表面プラズモンと関係あり

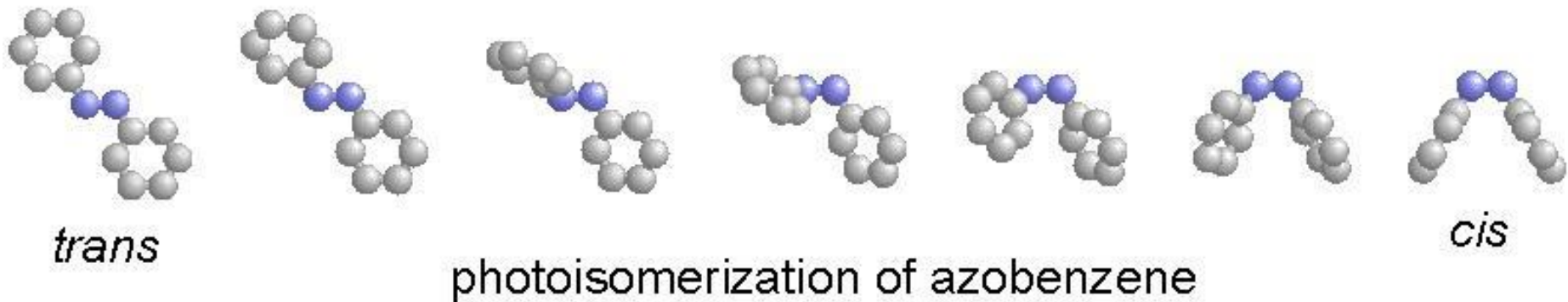


Nature Photon. 3,654(2009)

アゾベンゼンの光異性化

フォトクロミック光スイッチ分子

photoexcitation (UV)



440nm照射で cis \rightarrow trans

可逆変化

エネルギー

電子格子相互作用 大

電子格子相互作用 小

電子励起状態

格子ポテンシャル

電子格子相互
作用の大きさ

吸収

発光

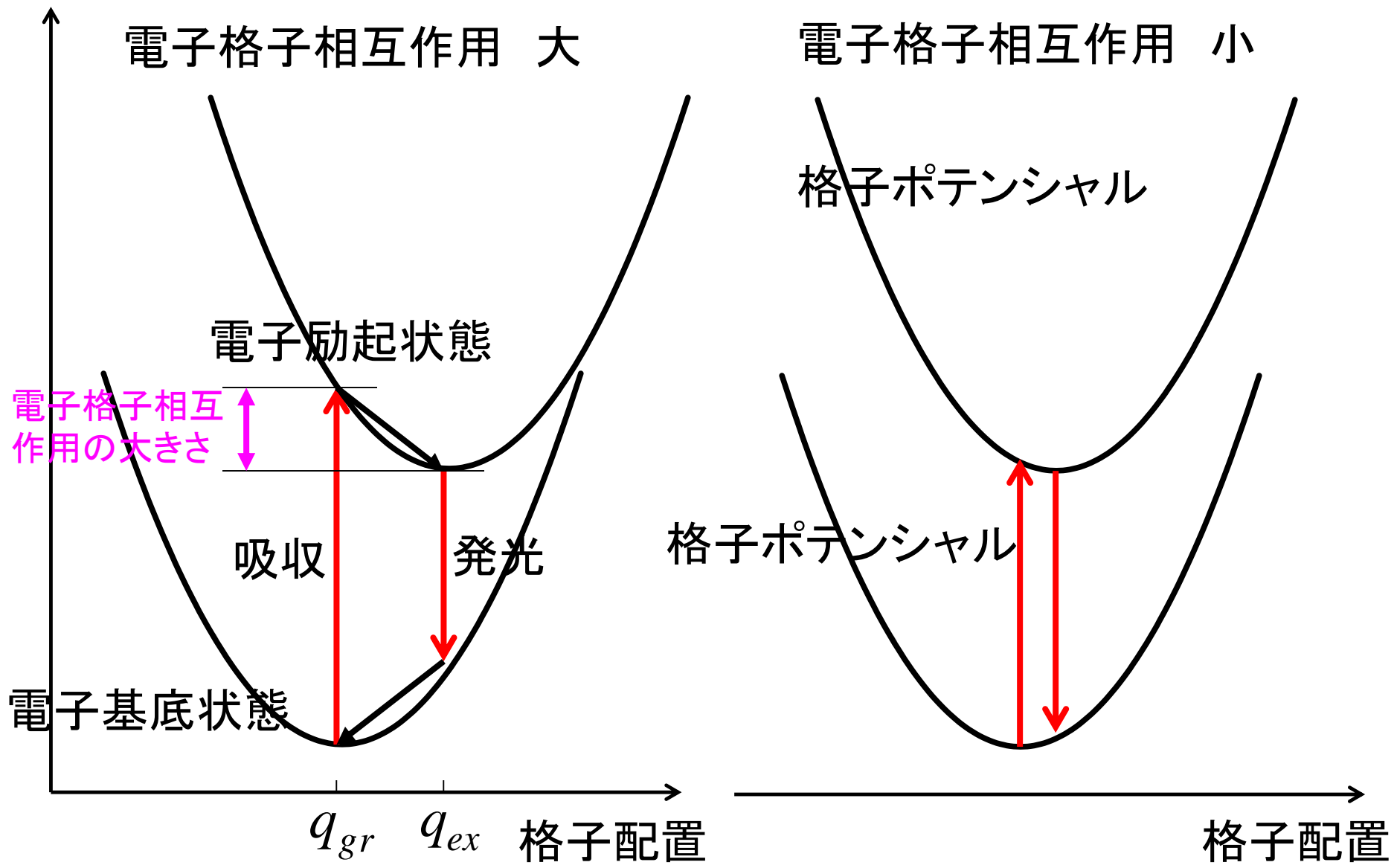
格子ポテンシャル

電子基底状態

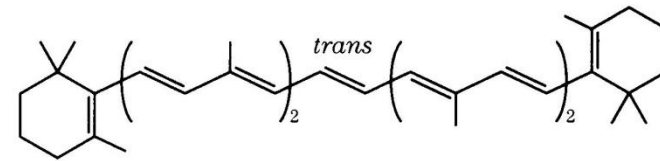
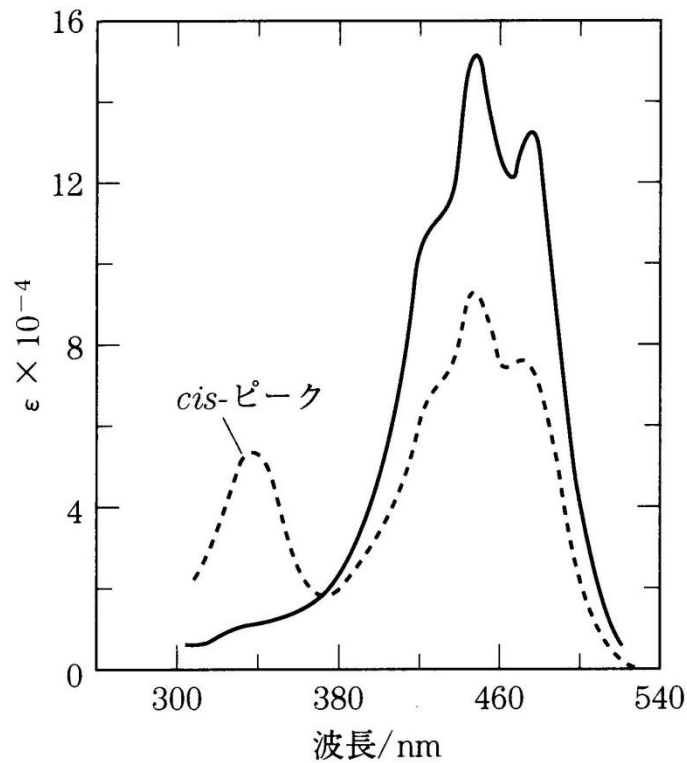
q_{gr} q_{ex}

格子配置

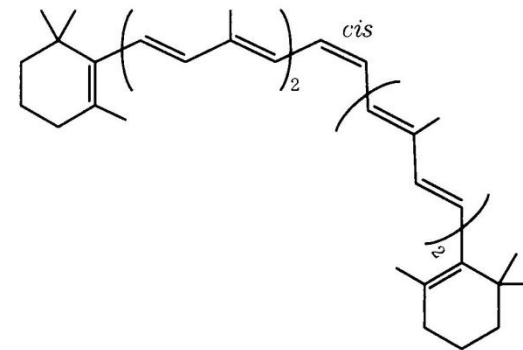
格子配置



異性化による吸収スペクトル変化



(3-1 a)



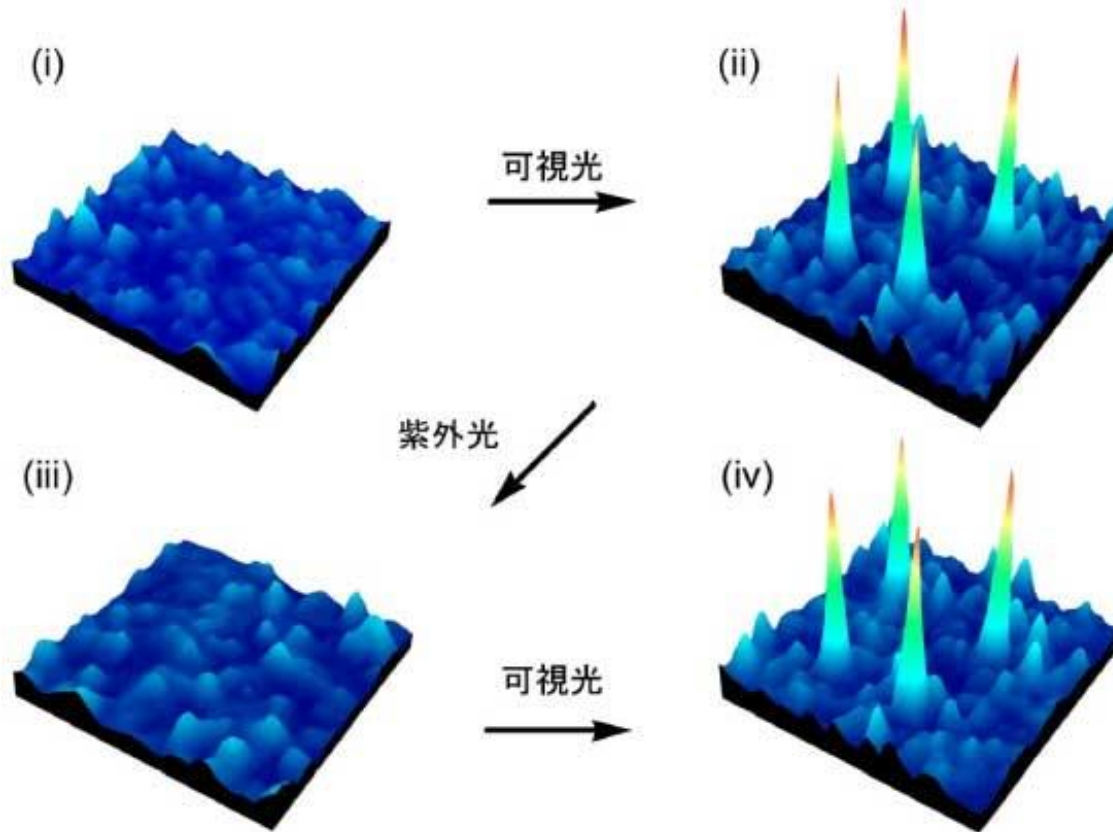
(3-1 b)

β -カロチン

単一分子光メモリー

DVDの100万倍の記録密度 2002.12.19

ジアリールエテン（フォトクロミック分子）



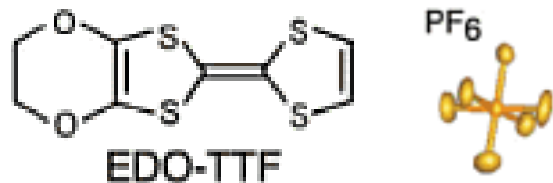
光子1つの情報が分子1つに
構造変化(蛍光性のある/なし)として蓄えられる

九州大
入江 正浩

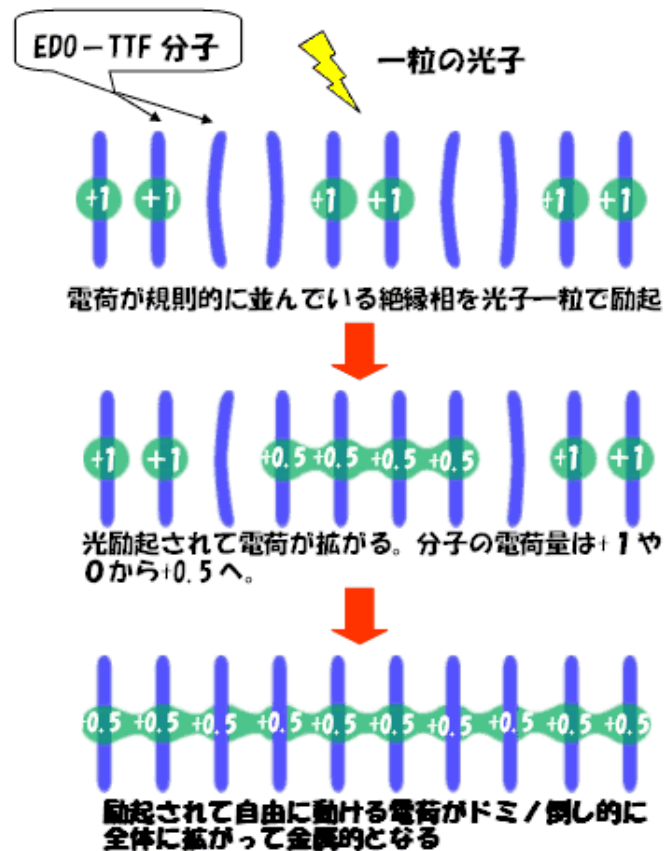
光誘起相転移

(EDO-TTF)₂PF₆ 結晶に光を照射すると0.2 ps (5THz)で絶縁体から金属に変化(反射率が50%以上変化)

1個の光子によって、
約500分子の変化が誘起



光-光スイッチ



Science (2005)
東工大 腰原伸也

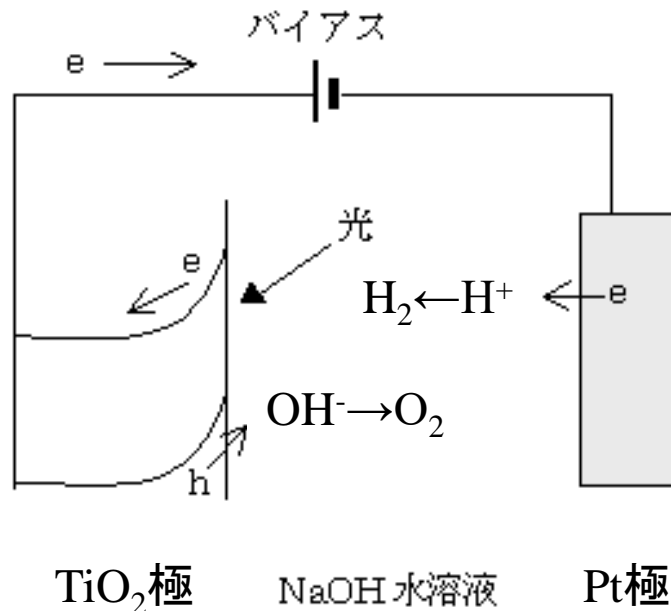
光触媒

光のエネルギーを使って働く触媒

触媒: 自らは変化せずに化学反応を促進するもの

酸化チタン(TiO_2)光触媒

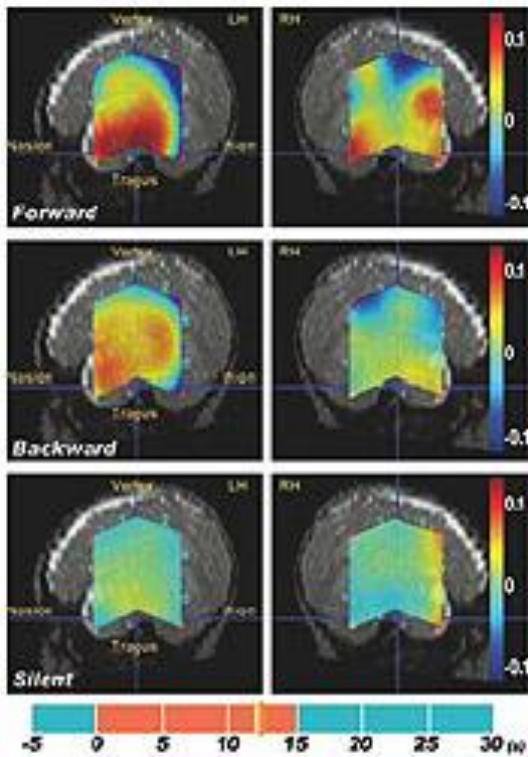
水の光分解
汚れない壁
曇らない鏡



SrTiO_3 ではバイアス不要

東大 藤嶋昭

光トポグラフィー 脳科学



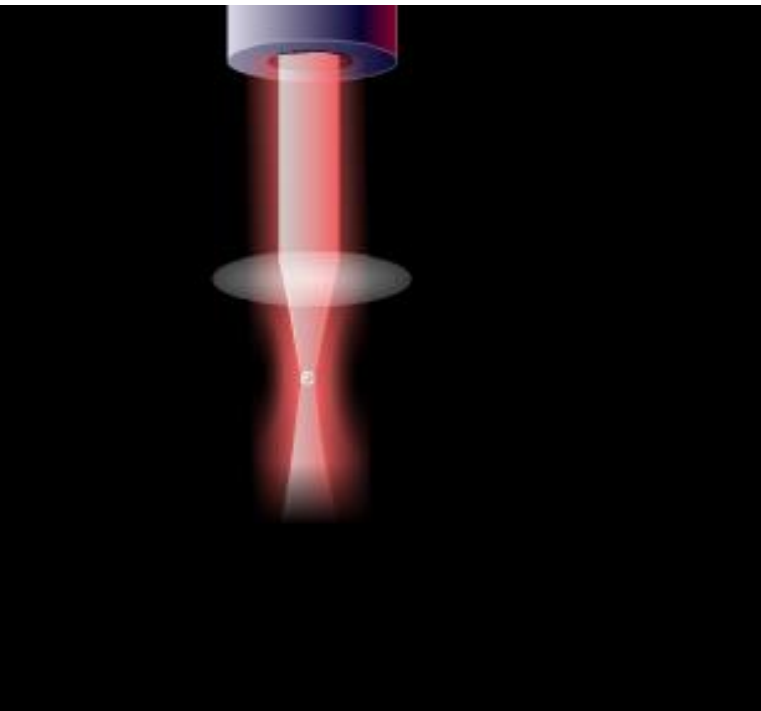
日立製作所
小泉英明

発光部より750nm、850nm、810nmの3つの近赤外線が頭蓋骨を
経路して脳内に投射される。酸化ヘモグロビン(OxyHb)は750nmに、
還元ヘモグロビン(DeoxyHb)は850nmに反応し、810nmはOxyHbと
DeoxyHbのクロスポイントとして反応するので、受光部で検出される。

光の圧力

光ピンセット

2004.9.22



言葉 筆 余斤 及川 12 版 (科学 (34))

太陽光の圧力つかめ!

大きな帆を張り、ヨットのようには宇宙空間を進む。SF小説に描かれた夢の宇宙探査機の実現に向けて日本の計画が動き出した。八月には高度百五十・メートルで帆を開くロケット実験に成功し、来年には気球を使った実験も試みられる。木星を目指し出航する日を目指し研究が進められている。

(窪田 恭子)

ヨットは帆に風を受けて海面を滑る。「ソーラーセイル」と呼ばれる宇宙ヨットは太陽光の圧力を使って宇宙を航行する。

太陽光の圧力とはこうだ。光は非常に小さな運動量を持つ光子と呼ばれる粒子の束だ。光子の動きは地球上では風の動きや重力に比べてあまりに小さいため私たちに感じられない。

しかし、真空、無重力の宇宙では太陽光の光子の圧力によって人工衛星の姿勢が乱されるほど。すい星の尾には太陽が噴出する高速のプラズマに吹き流された青いカスと、光の圧力で飛ばされたりの尾があるが、光圧のほうが千倍近くも強い。

太陽光をヨットの推進力にしようという考えは、一九二〇年代にロシアの科学者が提案した。地球付近で一平方メートルあたり一秒間に一京個も衝突する太陽光の光子は無尽蔵の「燃料」だ。一九七七年には作家の

アーサー・C・クラークが宇宙ヨットレースをテーマにしたSF小説「太陽からの風」を発表している。

だが、SFならまだしも実用化へのハードルは高かった。光の推進力は百に四方の帆を広げて、一円五十枚に動く重なり程度。だから帆や探査機自体が重いと役に立たない。高温でしかも放射線にさらされる宇宙空間の過酷な環境に耐えられ、薄く軽い帆が必要だったが、理想の材料はなかなか見つからなかった。

そんな中、日本で宇宙ヨットの研究を進めている宇

宇宙ヨット「帆の実験成功

宇宙研究開発機構は「ポリイミド」という高分子フィルムに着目した。ポリイミドは300度以上の熱に耐えられ、放射線や紫外線にも強い。

同機構では光の反射率を上げるため、片面にアルミを吹き付け、毛髪の大さの十分の一程度の七・五ミクロンという薄さにして帆の材料にした。

同機構の横田力男・主任研究員は「ポリイミドは携帯電話やパソコンの電子基板として多用されており、

分野 活用 宇宙 課題 さ六 に分 巨大 に積 に折 開か 傘 せて 法な みの

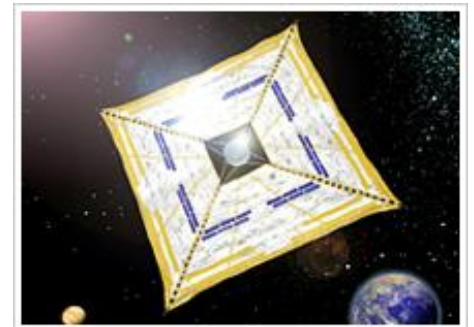
木星に向かうソーラーセイルのイメージ

サイエンス

ソーラーセイル実証機イカロス

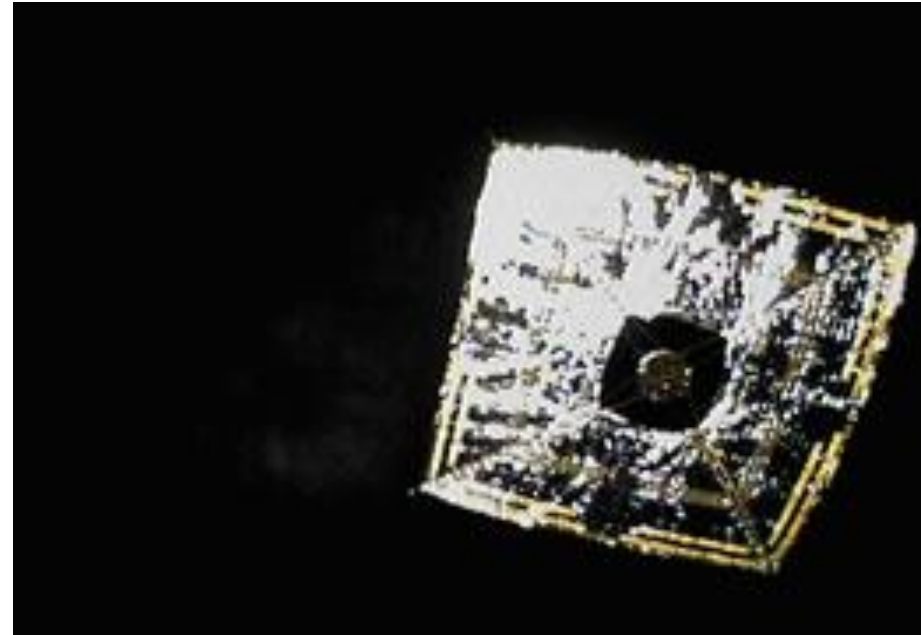
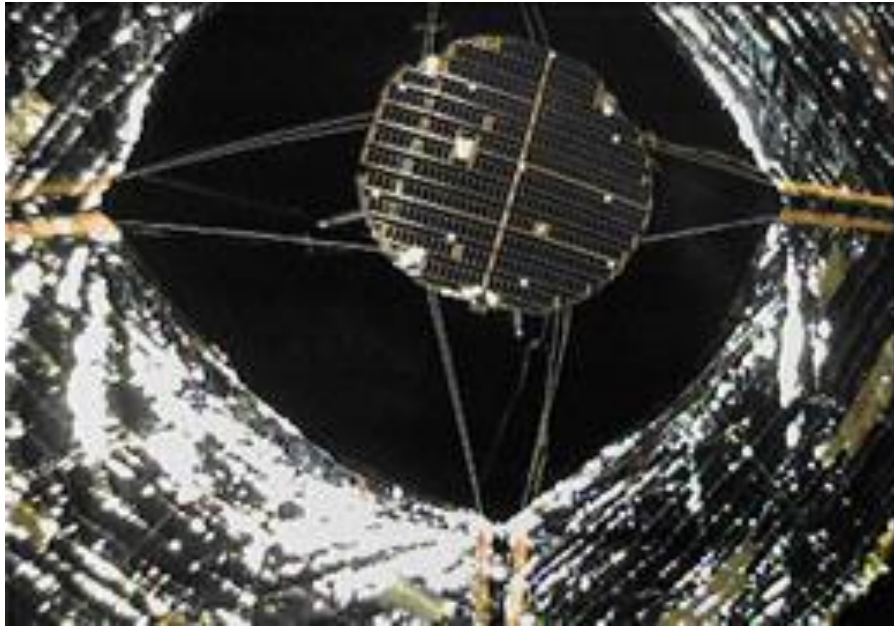
宇宙航空開発機構(JAXA)は、2010年度に種子島宇宙センターから、小型ソーラ電力セイル実証機「IKAROS(イカロス)」を金星探査機「あかつき(PLANET-C)」と相乗りでH-IIAロケットにより打ち上げる予定です。

「イカロス」は、「一辺約14.1mの大きな帆でヨットのように太陽の光を受けて、太陽系を航行する」宇宙船です。「イカロスキャンペーン」では、全世界の人々から応募いただいたお名前とメッセージをアルミプレートやDVDに収録し、「イカロス」に載せ、金星軌道に向かって宇宙の大海に旅立つというものです。また、「イカロス」と同じく2010年末に打ち上げ予定である米国惑星協会の「Light Sail-1(ライトセイル1号)」について、相互にミッション応援キャンペーンを実施します。



打ち上げ成功 2010年5月21日

ソーラーセイルの展開成功 6月10日



2010年12月、金星のそばを通り過ぎる

太陽光を帆に受けることによる加速や減速、軌道制御など、予定していたすべての任務に成功

IKAROS-blog

08/31 00:34 : 今日のIKAROS(8/29)

-Daily Report-Aug. 29, 2013

「IKAROSは、幸い冬眠モードを繰り返しつつも、まだまだ太陽光圧加速を続けています。現在太陽光圧によって加速した総量は秒速400m。すなわち、時速1440km分の加速を燃料無しで達成したことになります。」

「IKAROS は地球から見て太陽の向こう側に近い所において...
太陽距離: 0.86AU」

光ピンセット

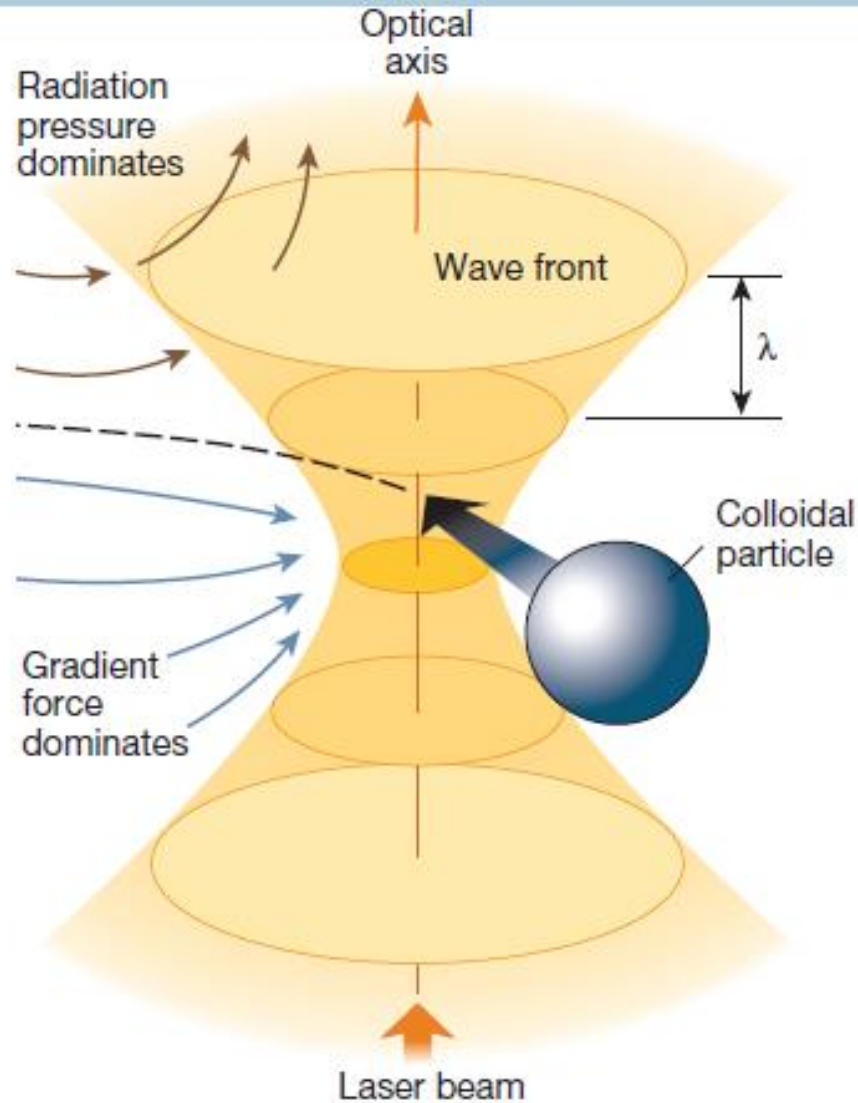
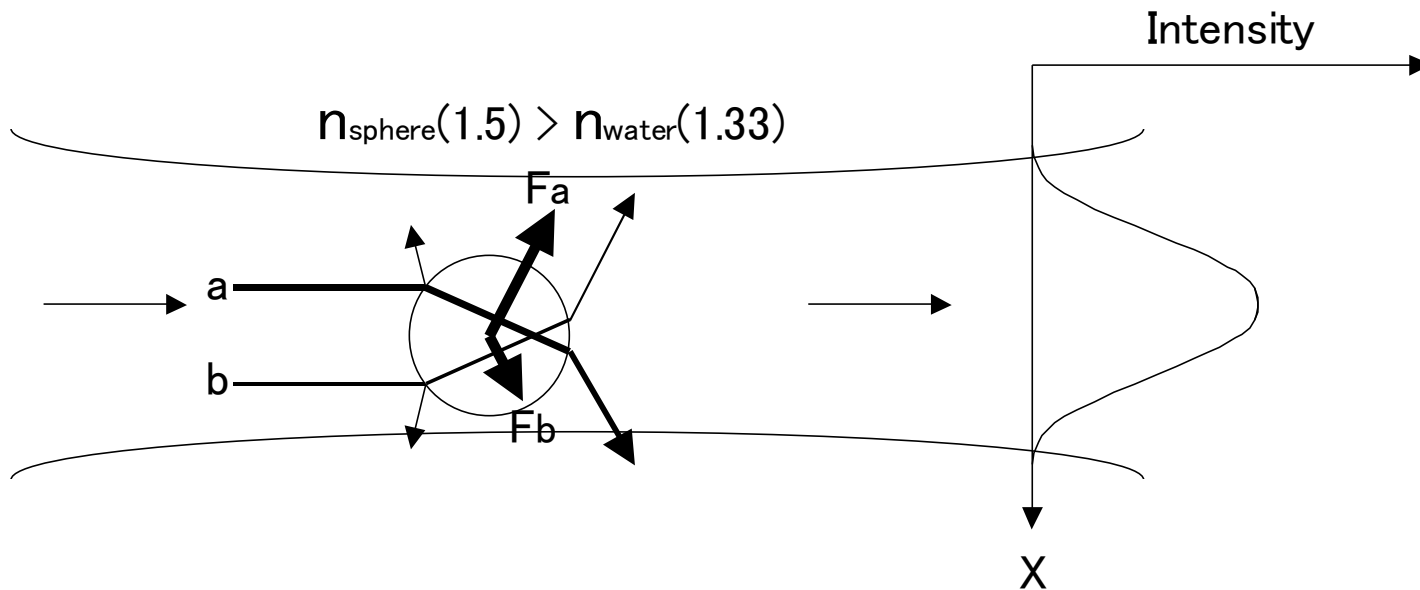


Figure 1 Optical tweezers use a strongly focused beam of light to trap objects. Intensity gradients in the converging beam draw small objects, such as a colloidal particle, toward the focus, whereas the radiation pressure of the beam tends to blow them down the optical axis. Under conditions where the gradient force dominates, a particle can be trapped, in three dimensions, near the focal point.

光の輻射圧による微小球のトラップと推進



r : ポリマー球の半径 $10\mu\text{m} \approx$ 集光径

η : 水の粘性 $10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ P : レーザーパワー 60mW

$$F_{rad} = F_{\eta} \quad F_{rad} \approx \frac{I}{c} \times \pi r^2 = \frac{P}{\pi r^2 c} \times \pi r^2 = \frac{P}{c} \quad F_{\eta} = 6\pi\eta r v \text{ (Stokes's law)}$$

終端速度 $1\text{mm}/\text{s}$

白川正之 2014卒研

フジサンケイビジネスアイ
大学発 日本 人と技術
2017年7月

2017.4.28

科学新聞

FBI

大学発 日本 人と技術

徳永研

日本を支える研究活動と技術開発

■光誘起力による高効率分子 会合体生成とその測定法開発

想されるよりも4けたも
大きな生成効率で起こっ
ていることも突き止め
た。この観測は、分子の

東京理科大

光誘起力によって室温の水中の1ナノメートルのサイズの分子を集合させ、平衡状態では存在しない会合数や分子配置の分子会合体を生成、観測することに理学部第一部物理学科の徳永英司教授 と電気通信大学・東京理科大学の小林孝嘉客員教授の研究グループが成功した。しかもこの応答が、室温の激しい分子の熱運動の大きさに対して、知られている公式に従って計算できる光の圧力による効果から予

会合状態の変化を吸収スペクトルの変化で追跡する方法で初めて可能になったという。

この研究成果は、世界で初めて光誘起力が平衡状態に向けて結晶化を加速するだけの役割でなく、平衡状態で存在できない結晶状態を作成することに使えることを実証。この観測方法を使えば、室温の溶媒中で未知の分子やイオンの集合状態を観測することにより、結晶化のメカニズムの解明や新しい分子会合状態の作成に貢献できると考えられている。

高効率分子会合体を生成
理科大が測定法開発



2018年のノーベル物理学賞 A.Ashkin 96歳
光ピンセットの開発とその生体応用

光ピンセット:

光の輻射圧の作用(勾配力)によりマイクロオーダーのサイズの微粒子を光の集光点にトラップする技術

しかし

光ピンセットでは**ナノメートルオーダーの分子を室温の水中で安定にトラップすることはできない**
分子の安定な捕捉は挑戦的課題

真空中で原子をトラップするには**極低温が必要**

10^{-6}K



室温300K

光誘起力による高効率分子会合体生成

光勾配力ポテンシャル ($\alpha E^2/2$)

≪≪ 室温の分子の熱運動のエネルギー ($k_B T$)

勾配力ポテンシャルが熱エネルギーの

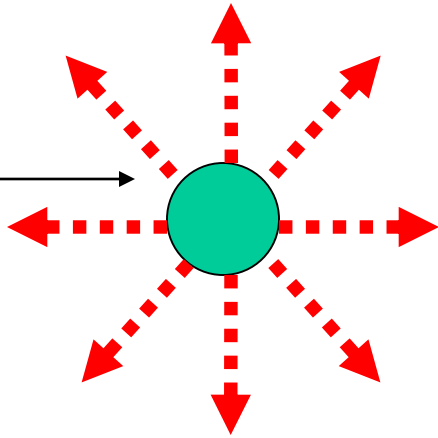
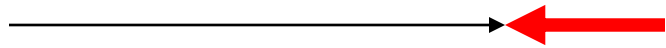
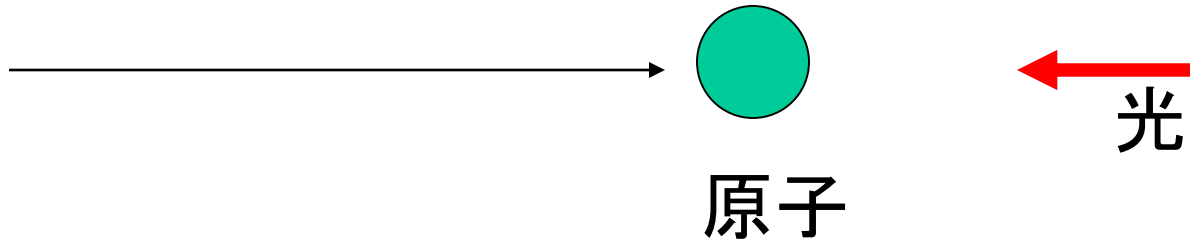
$10^{-7} \sim 10^{-8}$ 倍なのに

10^{-3} の吸光度変化を観測

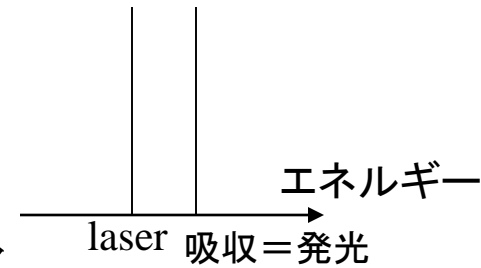
予想よりも 10000 ~ 100000 倍高効率な分子会合

レーザー冷却

レーザーのエネルギーを原子の吸収エネルギーに合わせる



自然放出は等方的
平均して運動量の変化なし



実際は原子はドップラーシフトした光エネルギーを見るので、
レーザーはドップラーシフト分、共鳴より低エネルギーにしておく

トラクター(牽引)ビーム

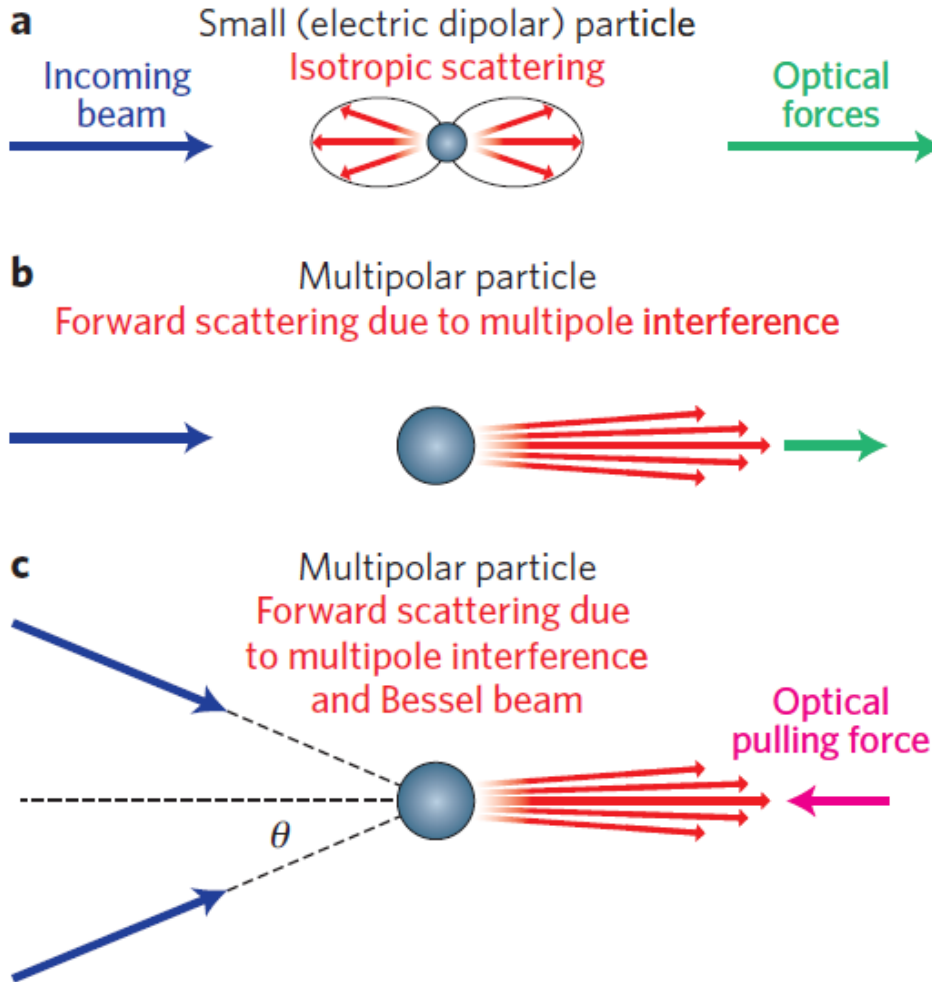


Figure 1 | Scattering and forces acting on small dipolar and multipolar particles. **a**, For small dipolar particles, scattering is isotropic. There is a net force on the particle in the forwards direction — the same direction of the incoming beam — due to the conservation of total momentum. **b**, Interference between multipolar fields in multipolar particles can strongly focus the scattering in the forwards direction when in the presence of a highly collimated beam (a plane wave). Owing to momentum conservation, the total forwards force reduces. **c**, As the angle between the beams increases, the traditional radiation force goes to zero with the cosine of the angle θ , whereas the contribution to the force coming from the strongly focused forwards scattering remains finite. Above a given angle, there is an optical pulling force that acts against the photon stream.

トラクター(牽引)ビーム

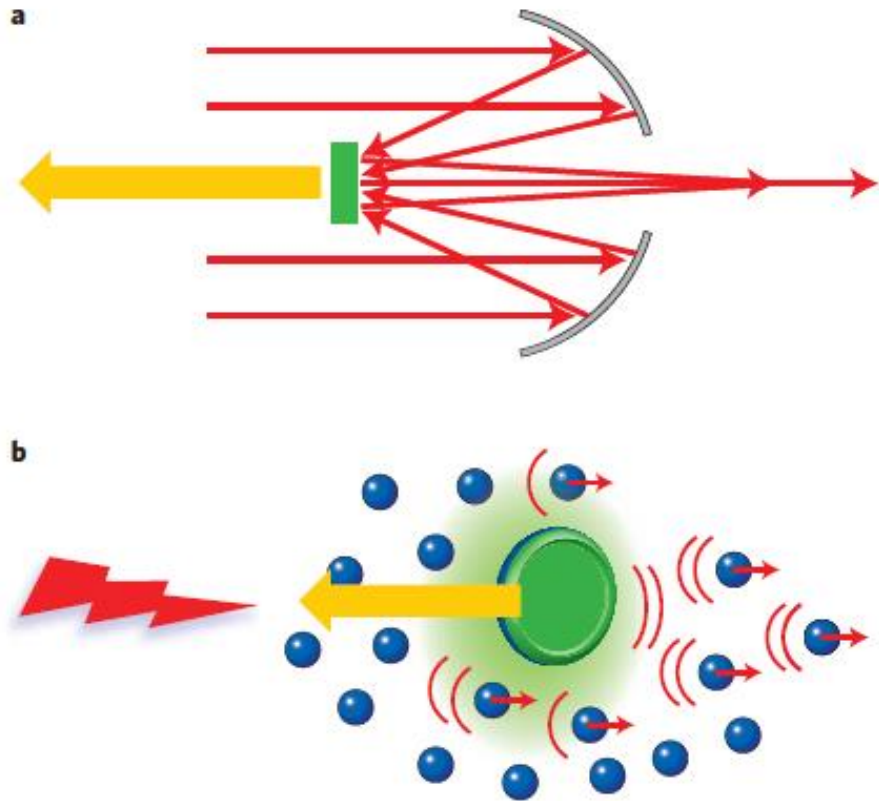


Figure 3 | Tailoring interactions with other objects. **a**, Conventional telescope. Although the ‘total’ mechanical action of the light on the system is a pushing force, the effect on the secondary mirror is readily seen to be a pulling force. **b**, Microscopic equivalent of **a**. When a plane wave illuminates a set of particles, the total force acting on the system’s centre of mass is along the beam. However, it is possible to create a force on some of the particles that acts in a direction opposite to that of the beam propagation.

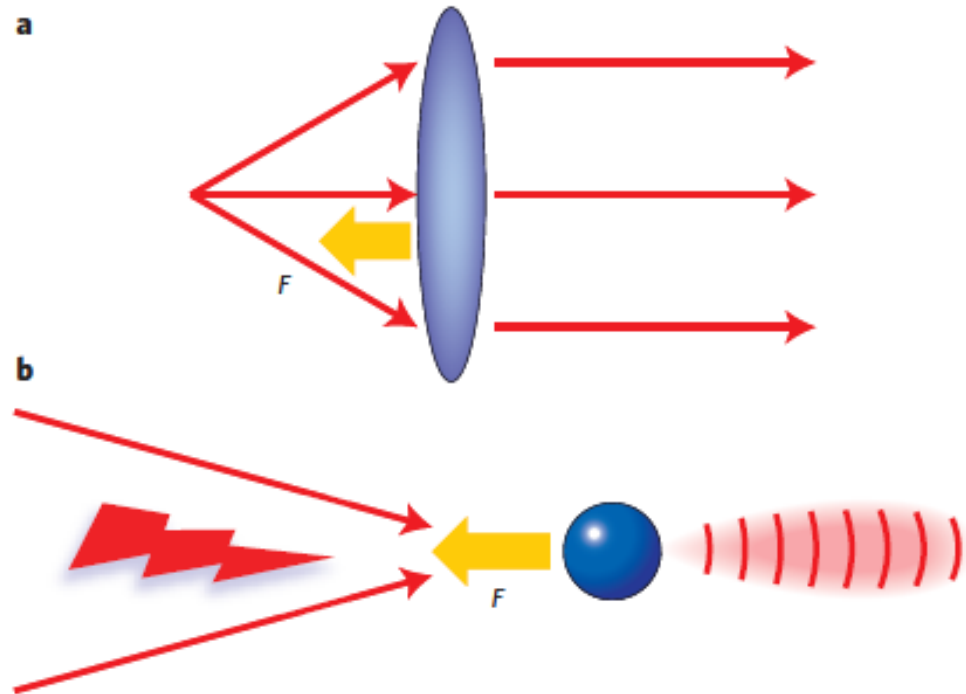
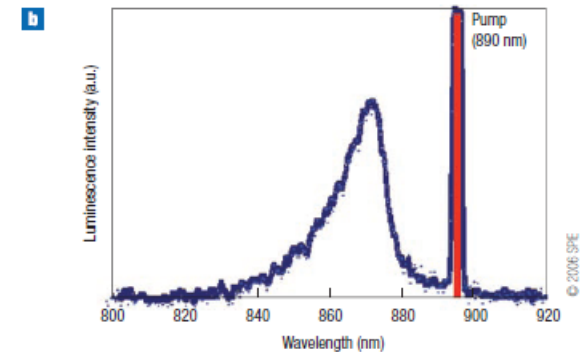
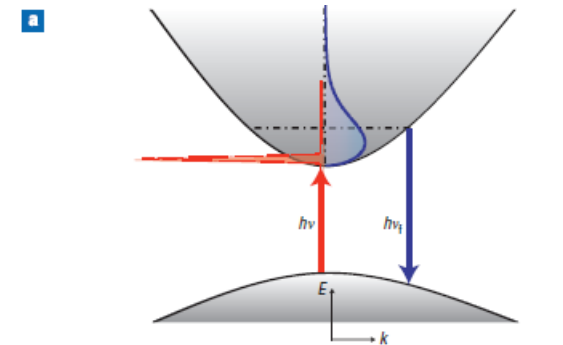
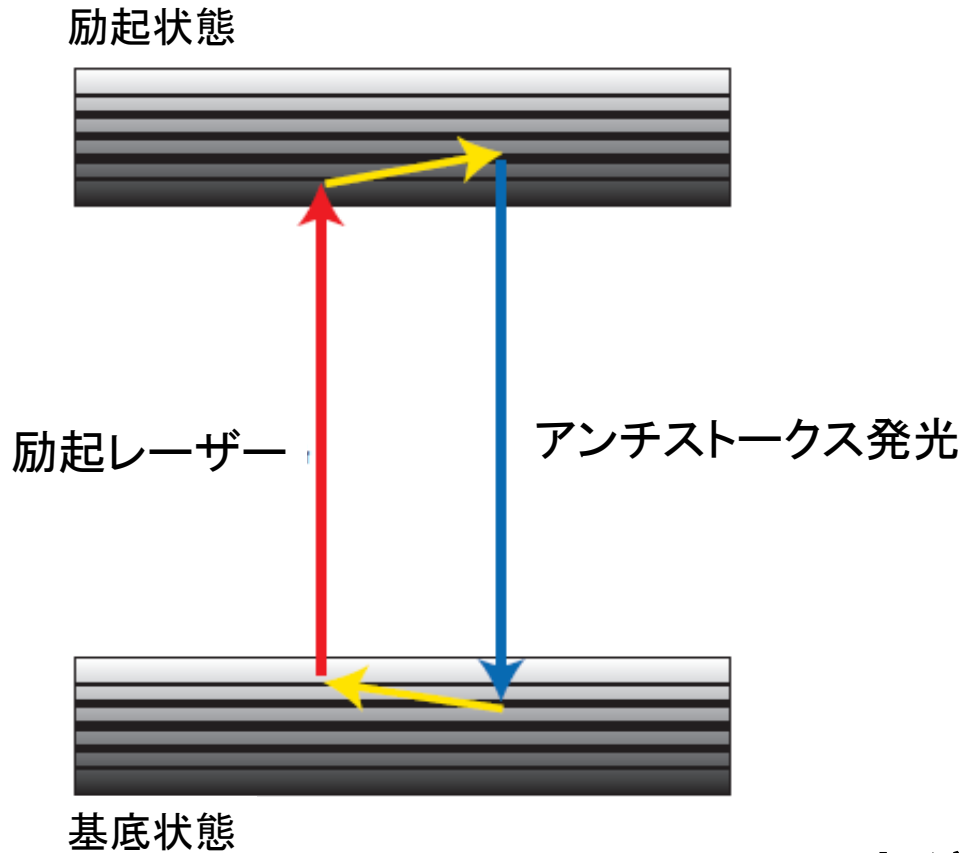


Figure 4 | Tailoring the properties of the object. **a**, Ordinary optical elements, such as lenses and prisms, can be designed to enhance the forwards scattering such that the electromagnetic momentum of the incident beam is less than that of the emergent beam. **b**, Analogously, small subwavelength particles can be designed to scatter strongly forwards in such a way that the overall optical force points in a direction opposite to that of the incident beam.

光で固体を冷やせるか？

冷媒なし、可動部なしの静かな全固体冷却装置



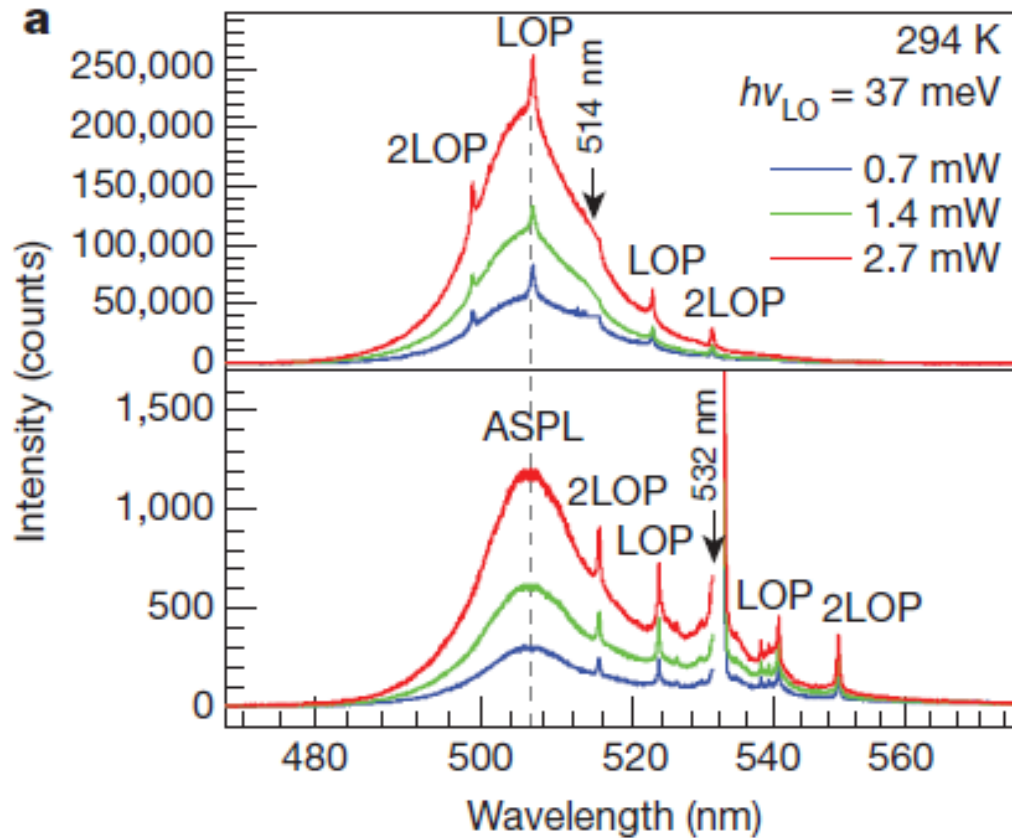
希土類ドーピング結晶で155K
まで冷却(2009)
理論的には100K可能

半導体のアンチストークス発光
だが冷却は実現していない
理論的には10K可能

半導体で実現

Nature 493, 504(2013)

CdSナノベルト



40K冷却

20K冷却

レーザー冷却 原子のボーズ・アインシュタイン凝縮

原子のボーズ凝縮体 = コヒーレントな原子波
原子波レーザー

マイクロ波技術 メーザー 精密分光 NMR

が

1960以降の レーザー、量子光学 の発展に貢献

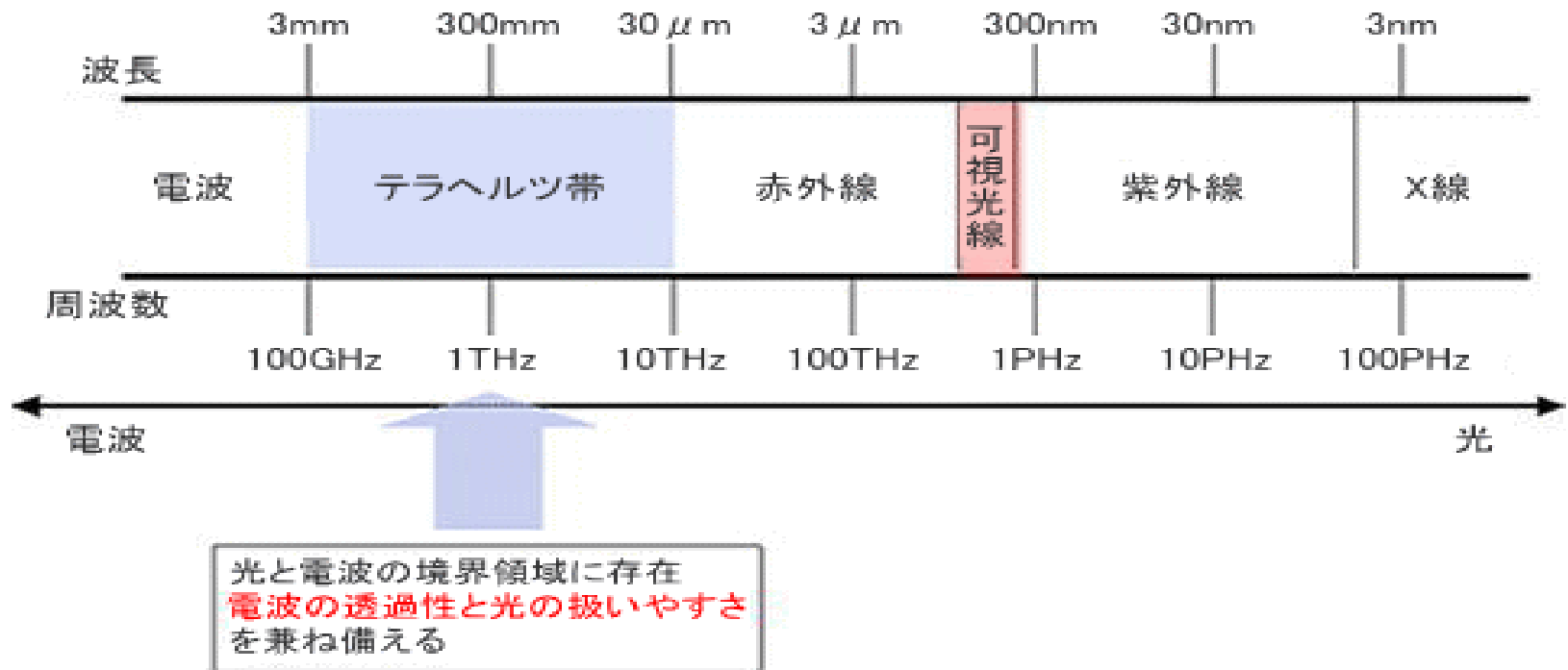
したように

レーザー技術、非線形光学、量子光学

が

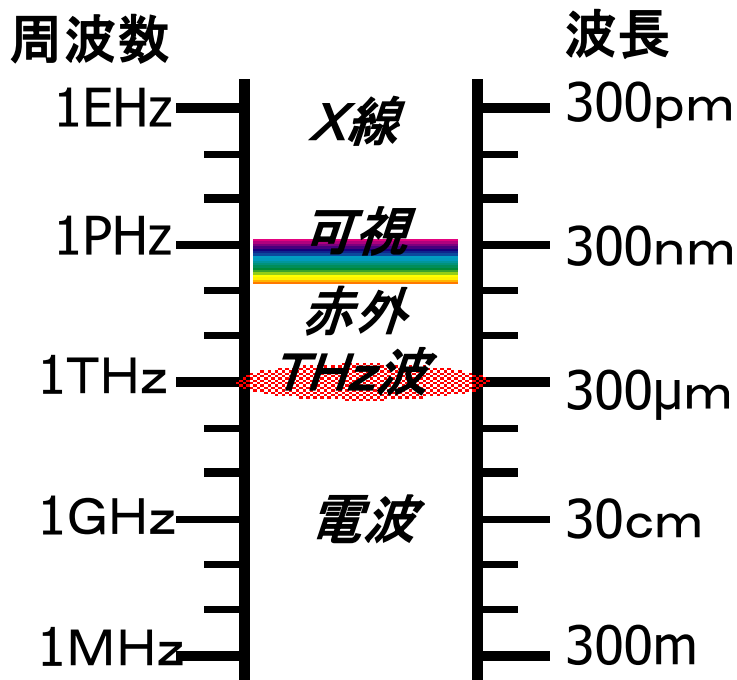
1995以降の 原子波光学 の発展に

THz電磁波(～遠赤外線)



エネルギー領域: 結晶フォノン、分子間振動、分子の回転、水素結合

磁場下の半導体表面からのTHz波の発生

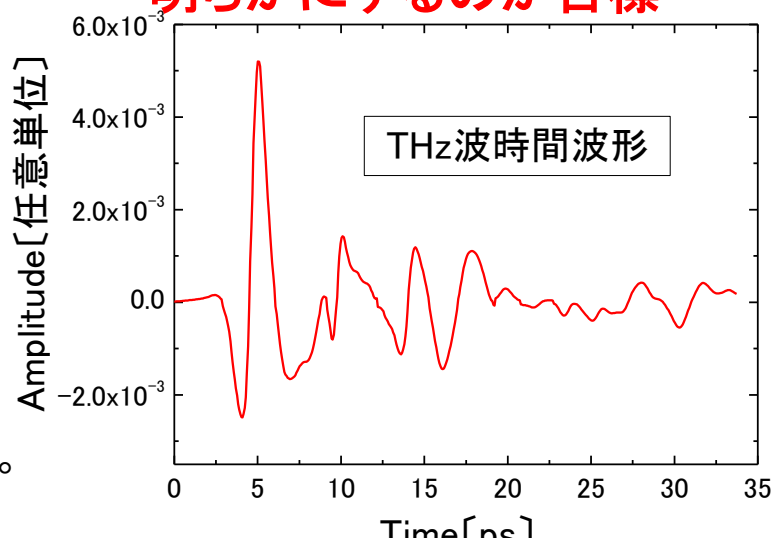


可視光と電波の間の周波数領域の未開拓の電磁波。フェムト秒レーザー技術により発生・検出法が開発され、注目されている。分光やイメージングで新しい展開。

応用研究の充実に向け
て...

高強度 & 広帯域のTHz光源
の開発が重要！！

そのためにTHz波の発生機構を
明らかにするのが目標



試料台と
電磁石



半導体(InAs)にfs秒光パルスを入射させ、THz波を発生させている。InAsに比較的強い磁場を印加するとTHz波の放射強度が増強することが分かっている。

THz波による イメージング

テラ(10^{12})ヘルツ波

周波数0.3THzから10THzの電磁波
フェムト秒パルスを使い固体中の
非線形効果で発生

封筒内に隠された禁止薬物
のテラヘルツ分光イメージング
と分光スペクトル

非破壊測定 人体に無害

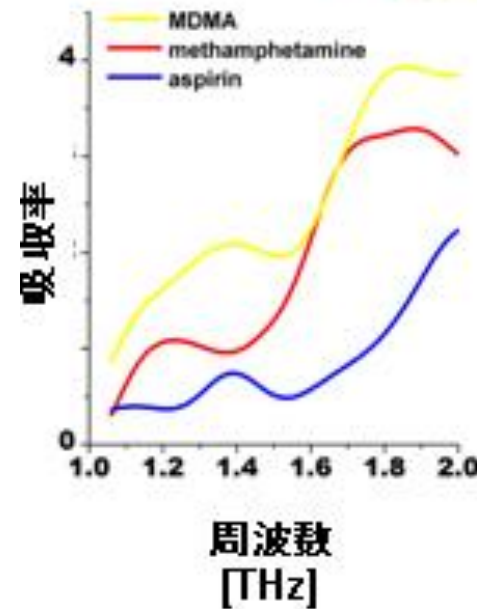
$$1\text{THz} = 300\mu\text{m}$$

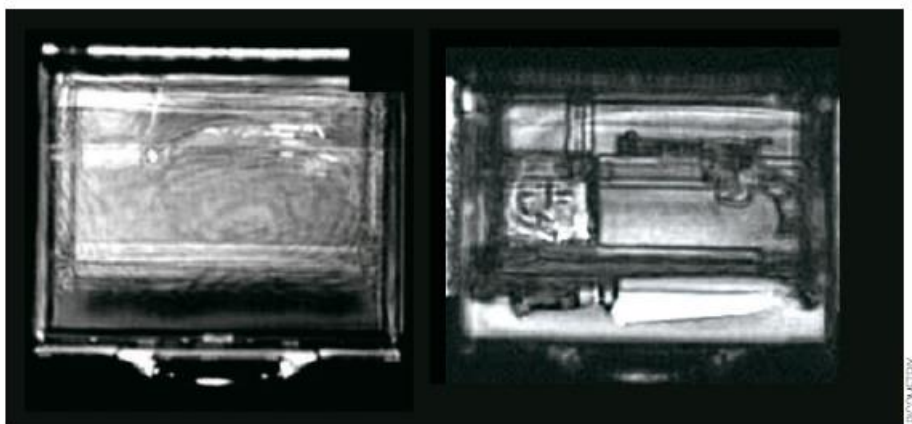


MDMA
(麻薬)

アスピリン

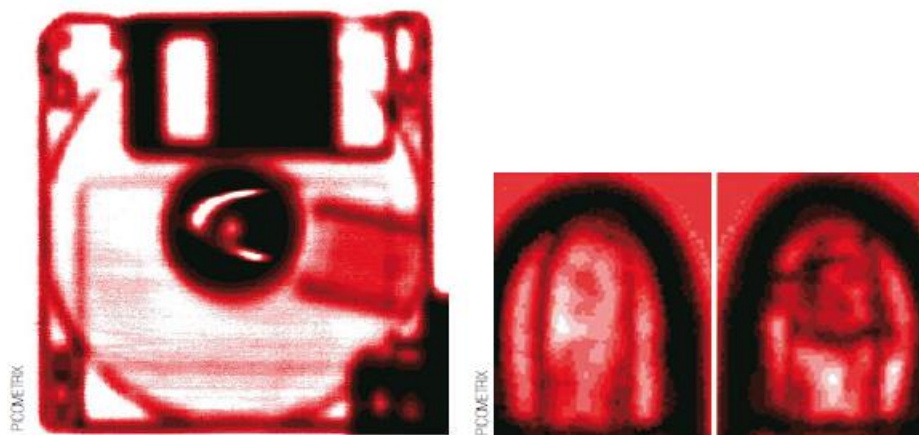
メタンフェタミン
(覚せい剤)





かばんの中

Terahertz imaging makes it possible to image objects that are hidden beneath clothes or inside bags and shoes, for example. This capability is making the technology of great interest for applications in homeland security.



フロッピーディスク

A terahertz image of floppy disk, taken by the QA1000 terahertz-imaging system from the US firm Picometrix. The technology is proving useful in quality assurance applications for detecting flaws in objects that are hard to spot by other imaging means.

全身透視スキャナー

後方散乱X線検査装置

or

ミリ波スキャナー

2007-2008以降 高強度THzパルス発生可能に
電場 $> 1\text{MV/cm}$

THzパルスを励起光源として使う新展開

Optofluidics (光流体工学)

微小流体工学(マイクロ化学チップなど)と光学の組み合わせ

液体コアー液体クラッド導波路(L-L waveguide)

液体の流速や圧力を変えて連続的に光学特性をコントロール

光流体色素レーザー

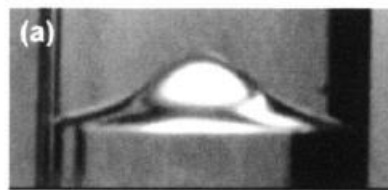
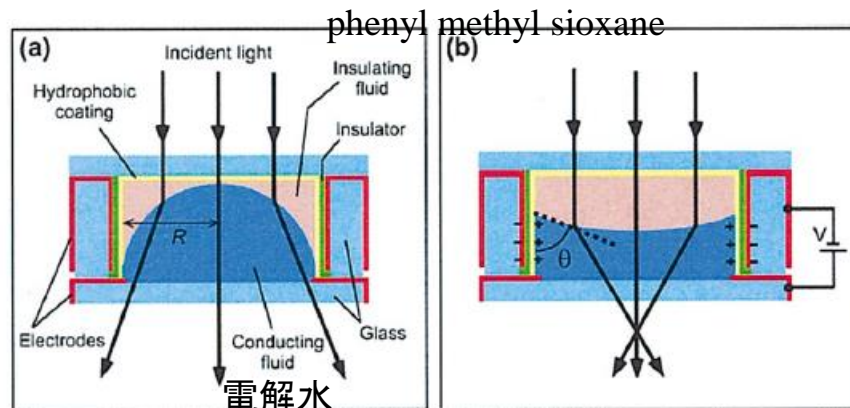
光流体分子センサー

光流体スイッチ

オンチップの高解像度顕微鏡

流体光学顕微鏡

(Optofluidic Microscopy: OFM)



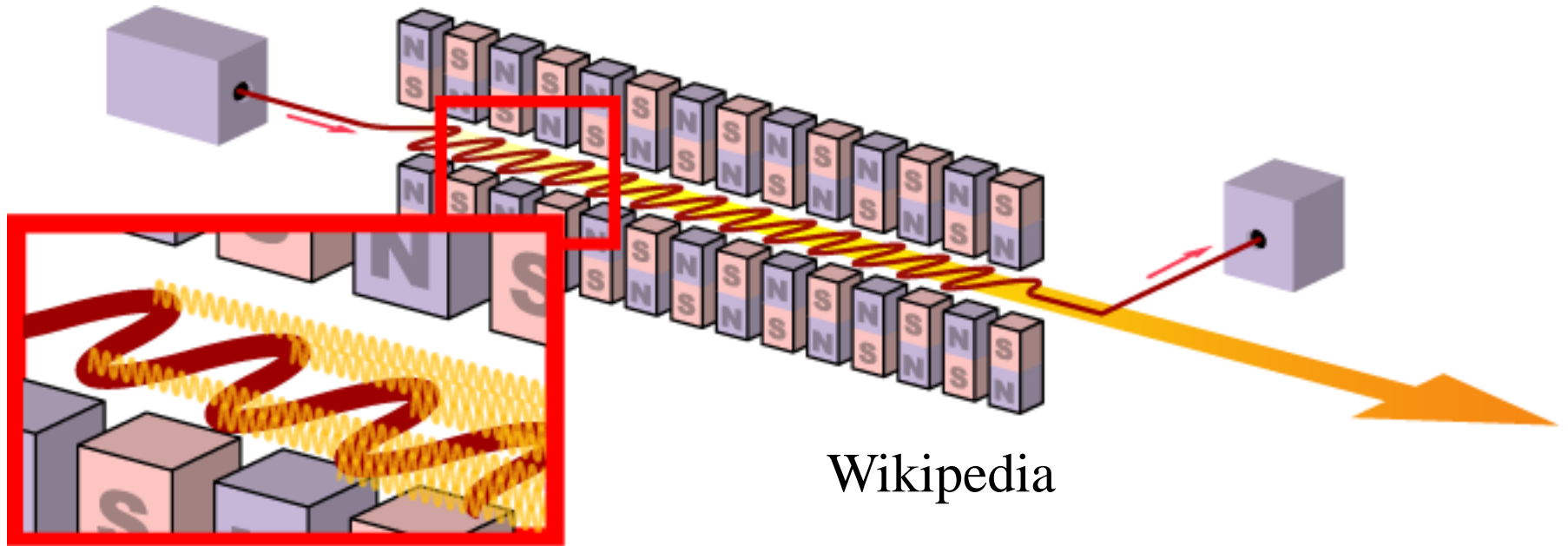
液体レンズ

APL85,
1128(2004)

自由電子レーザー

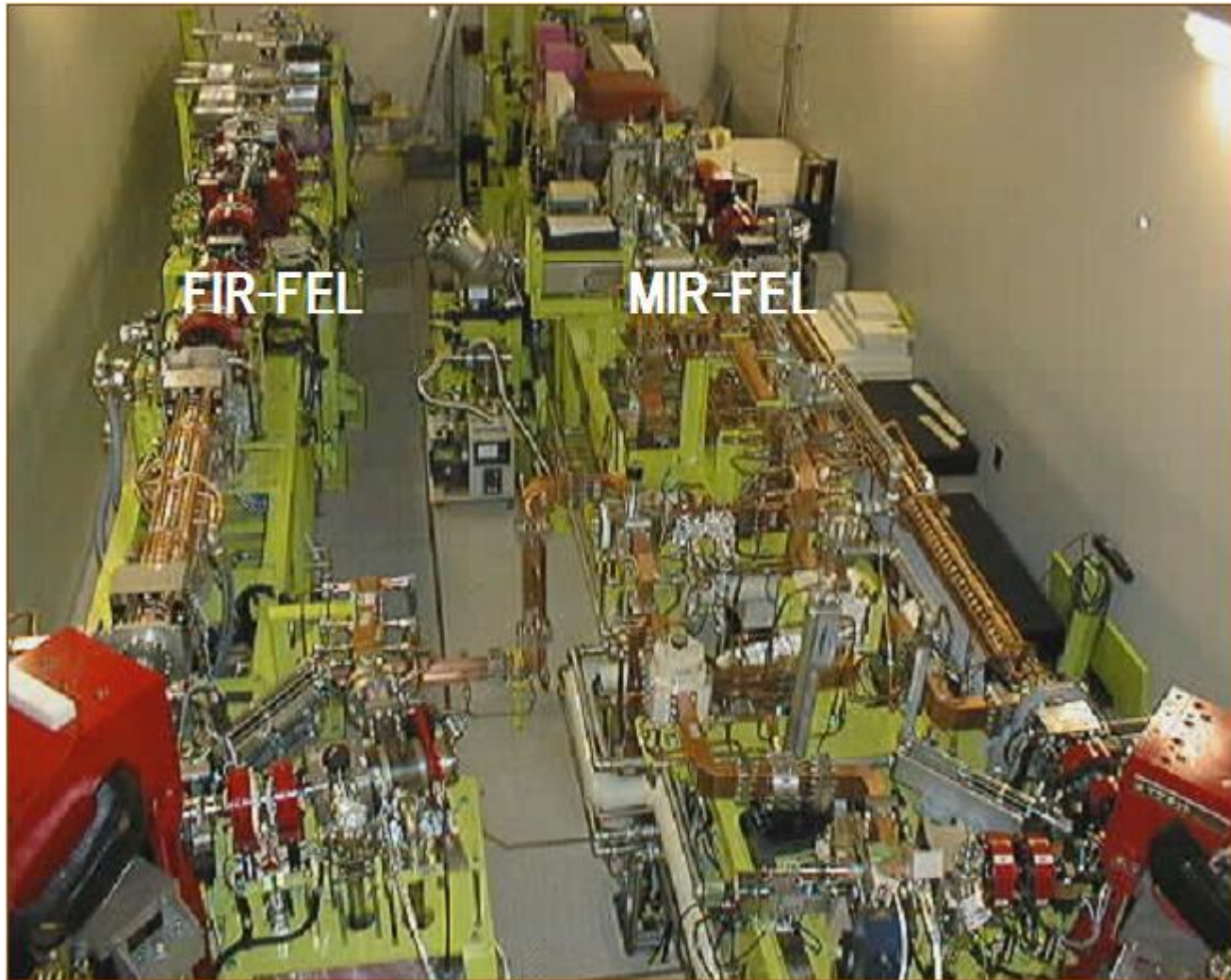
自由電子のビームと電磁場との共鳴的な相互作用によって
コヒーレント光を発生させる方式のレーザー

媒質によって発する光の波長が決まる一般のレーザーと異なり、
磁場・電子エネルギーを変えることによって波長可変という特徴
を持ち、軟X線、紫外線、可視光線、遠赤外線まで幅広い波長の
光を取り出せる



シンクロトロン放射光

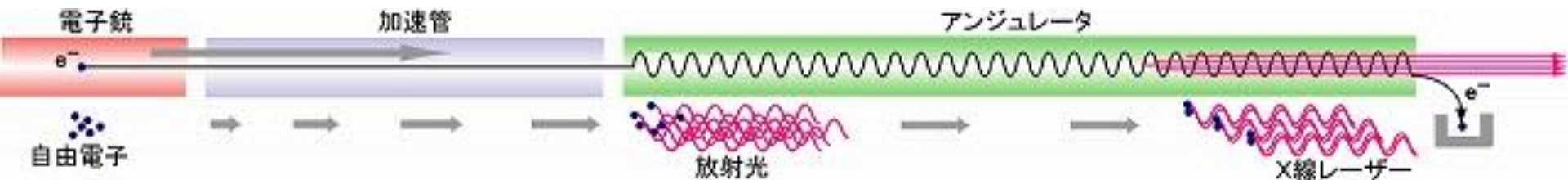
理科大FEL



MIR(中赤外)-FEL が稼動 4~16 μm 75THz~19THz

夢のレーザー X線自由電子レーザー

X線自由電子レーザー計画 日本(理研)、米国、EU



「夢の光」をついに実現 - X線自由電子レーザー施設 SACLA (サクラ) がX線レーザーの発振に成功 -



祝 SACLA 発振

平成18年から国家基幹技術として整備を進めてきたX線自由電子レーザー施設SACLAにて、
平成23年6月7日16時10分 にレーザー発振を確認いたしました。
皆様の今までの応援に感謝し、今後もご期待に沿えるよう一同頑張っております。

- 世界最短波長(1.2Å)となるX線レーザーの発振に成功
- ビーム運転開始からわずか3カ月という短期間での達成
- 2011年度内に供用運転を開始

2011年7月13日

0.8Åの波長のXFELの発振に成功
世界最短波長のレーザー光

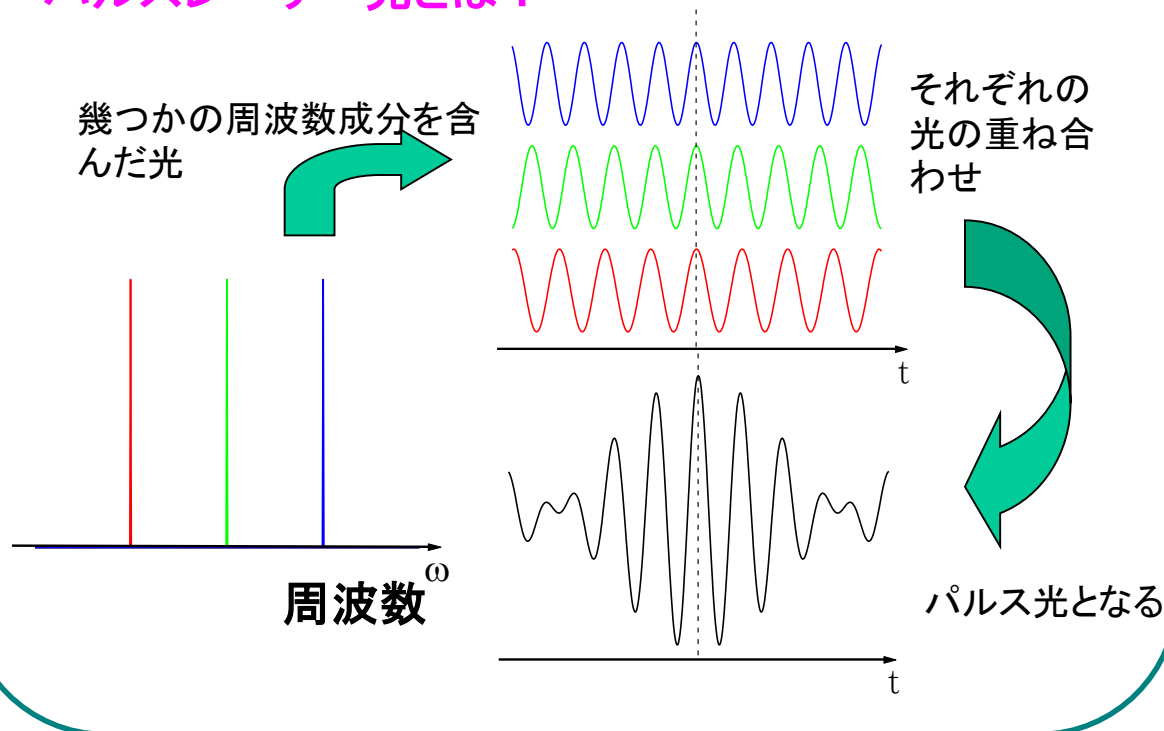


フェムト秒パルス

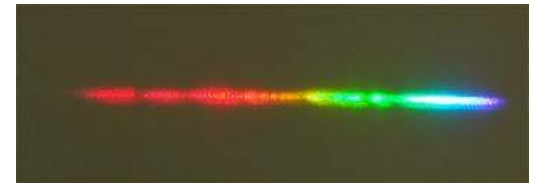
可視光パルスでは**世界最短のサブ5fs**の超短パルス

1フェムト秒(1fs)・・・ 10^{-15} s

パルスレーザー光とは？



広帯域の可視光を用いて、パルスを作る。



時間軸では、2,3周期の振動しかパルスの中に含まない。

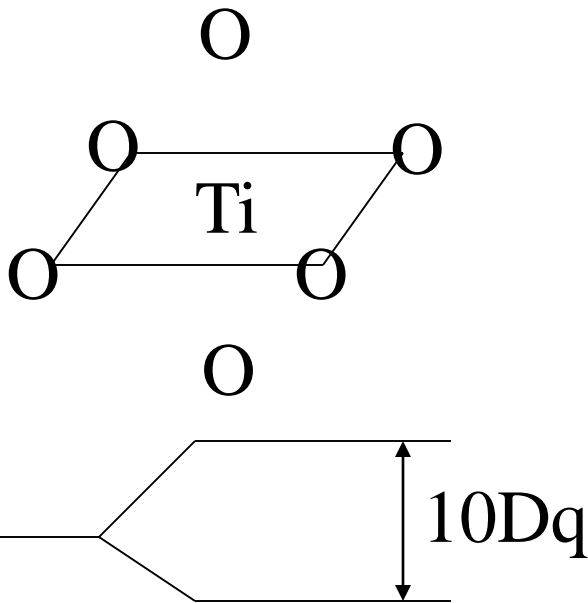
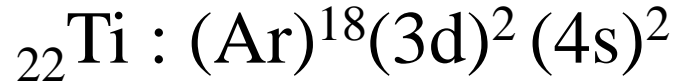


可視光パルスでは**世界最短**である**サブ5fs**の超短パルスを実現！

東大 小林孝嘉

固体フェムト秒パルスレーザー (1990年代~)

Ti³⁺ doped sapphire (Al₂O₃) 結晶



八面体結晶場による
d軌道の分裂

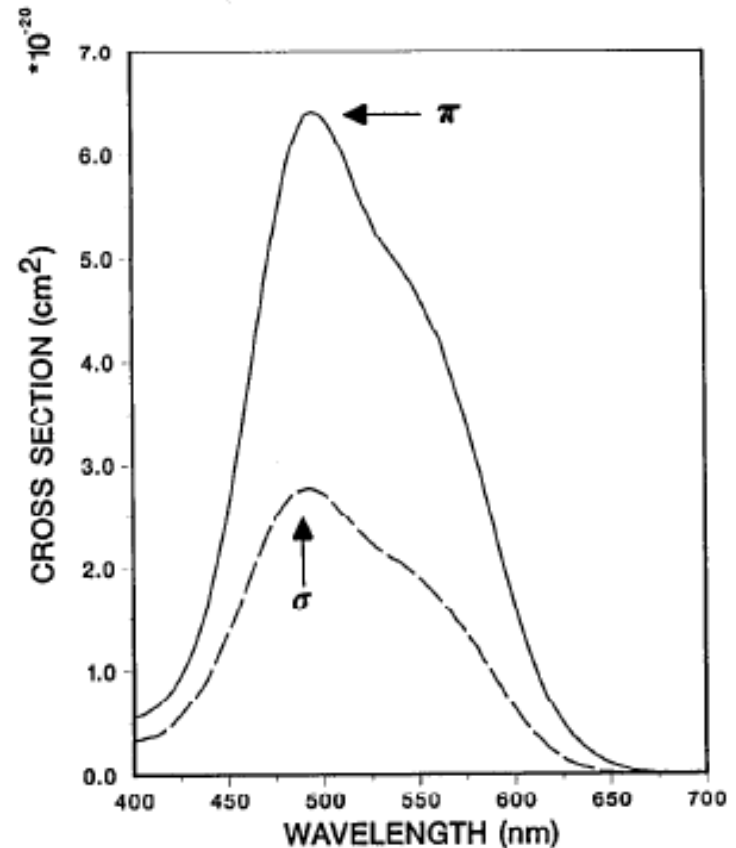
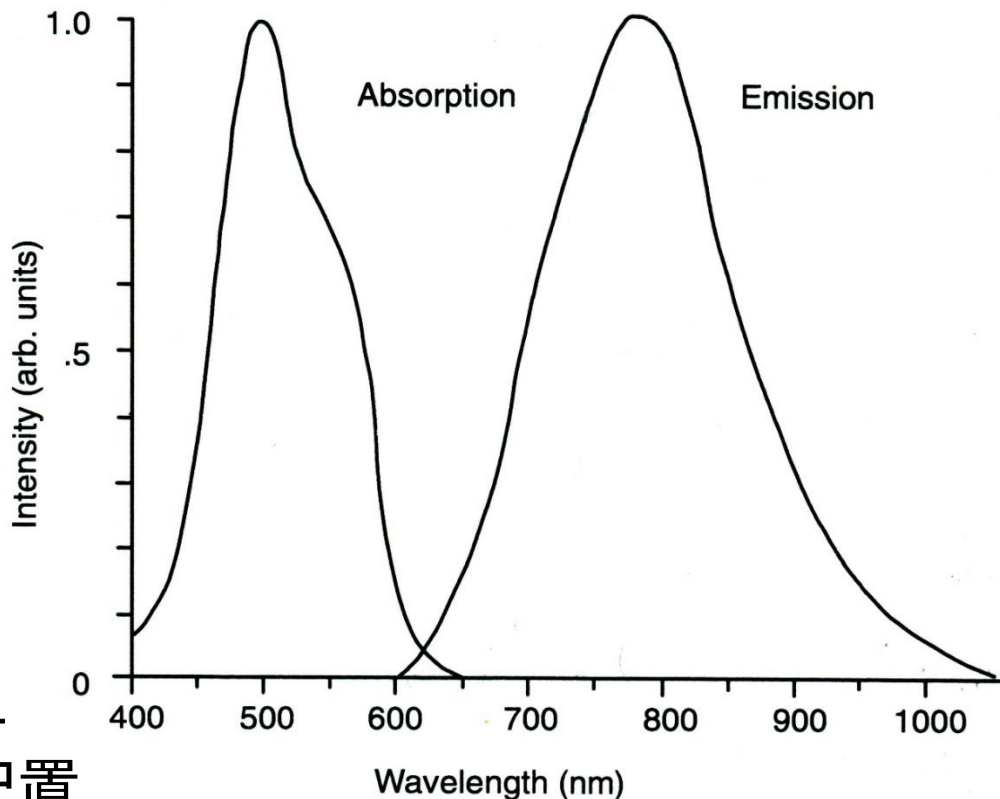
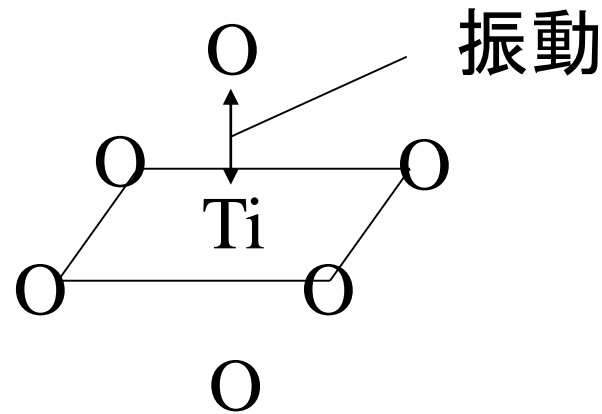
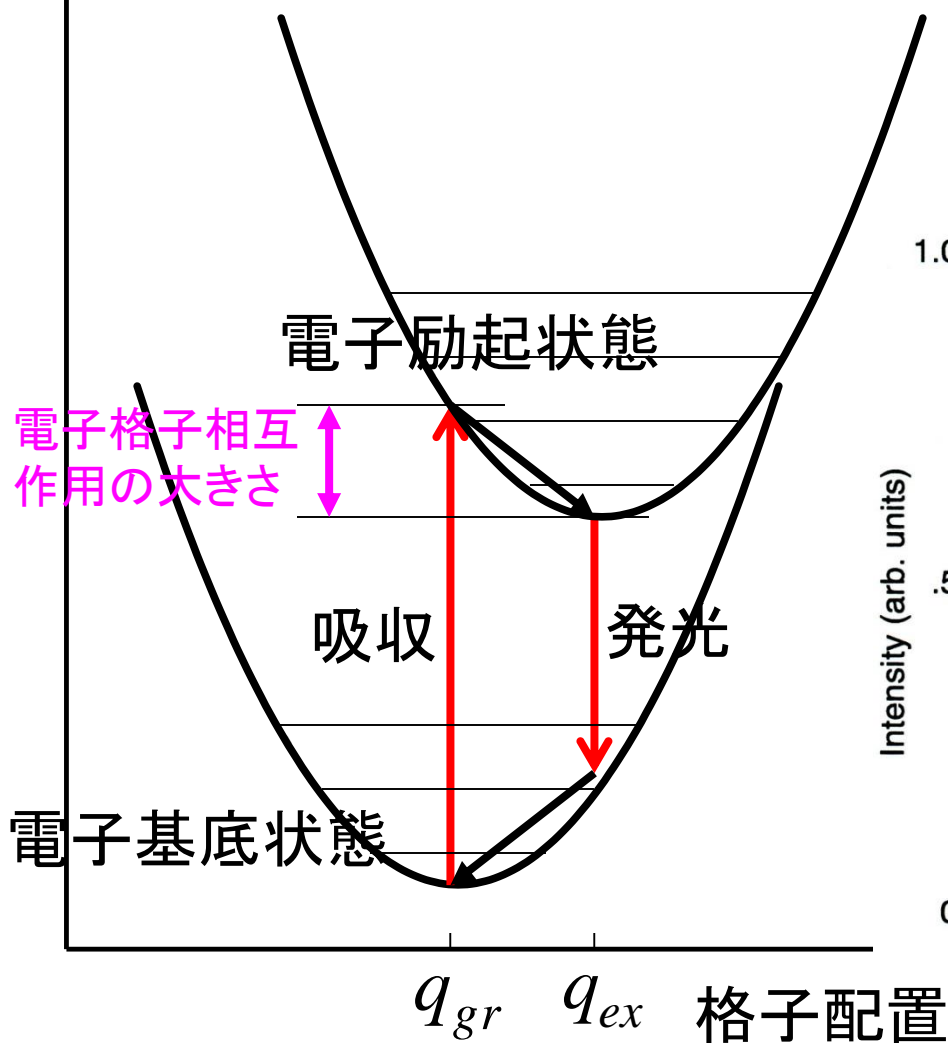


Fig. 1. Polarized absorption cross sections for the ${}^2T_2 \rightarrow {}^2E$ transition in Ti:Al₂O₃. Baseline was arbitrarily set to zero for both polarizations at 700 nm.

固体フェムト秒パルスレーザー (1990年代~)

エネルギー

電子格子相互作用 大

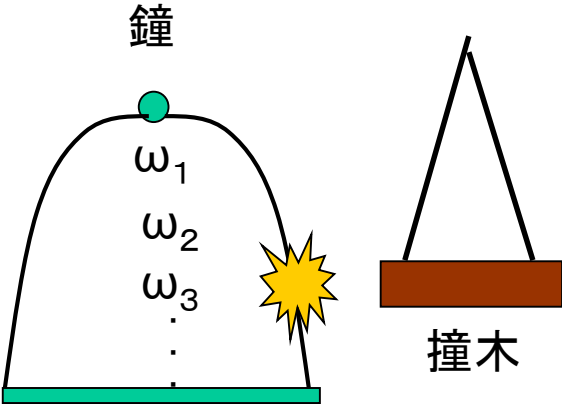


650~1100 nmレーザー発振可能

フェムト秒実時間振動分光の原理

電子励起共鳴効果

鐘

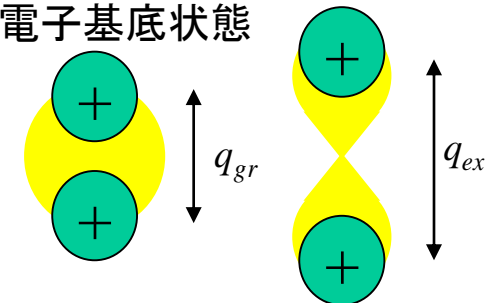


撞木

鐘を撞木でつくると、衝撃を与えた時間の逆数の周波数以下の周波数の振動がすべて同時に励振される(衝撃を与えた時間よりも長い周期を持つ振動がすべて)

電子格子相互作用

電子励起状態



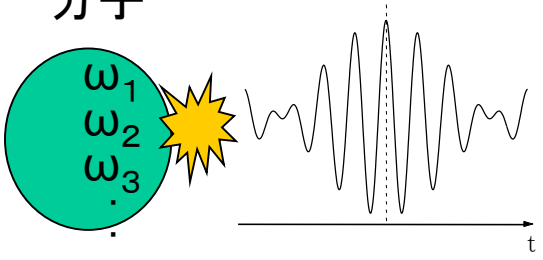
電子基底状態

原子核間距離は平衡位置

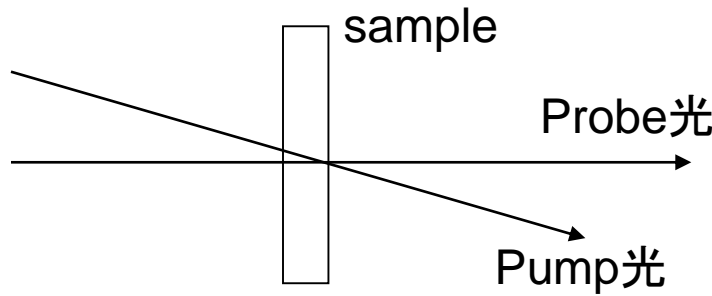
原子核の新しい平衡位置

可視光による電子励起で電子分布が変化して構造が変化(振動が誘起)する。この原理により可視光で分子構造をコントロール可能

分子



分子にパルス光を与えると、パルス光を与えた時間の逆数の周波数以下の周波数の振動がすべて同時に励振される



試料にpumpパルス光をあて、励振させ、そのtフェムト秒後にprobeパルス光を透過させて、吸収変化を測定する。振動が差吸収変化の遅延時間(pumpパルス光とprobeパルス光の時間差)に依存して現れる。

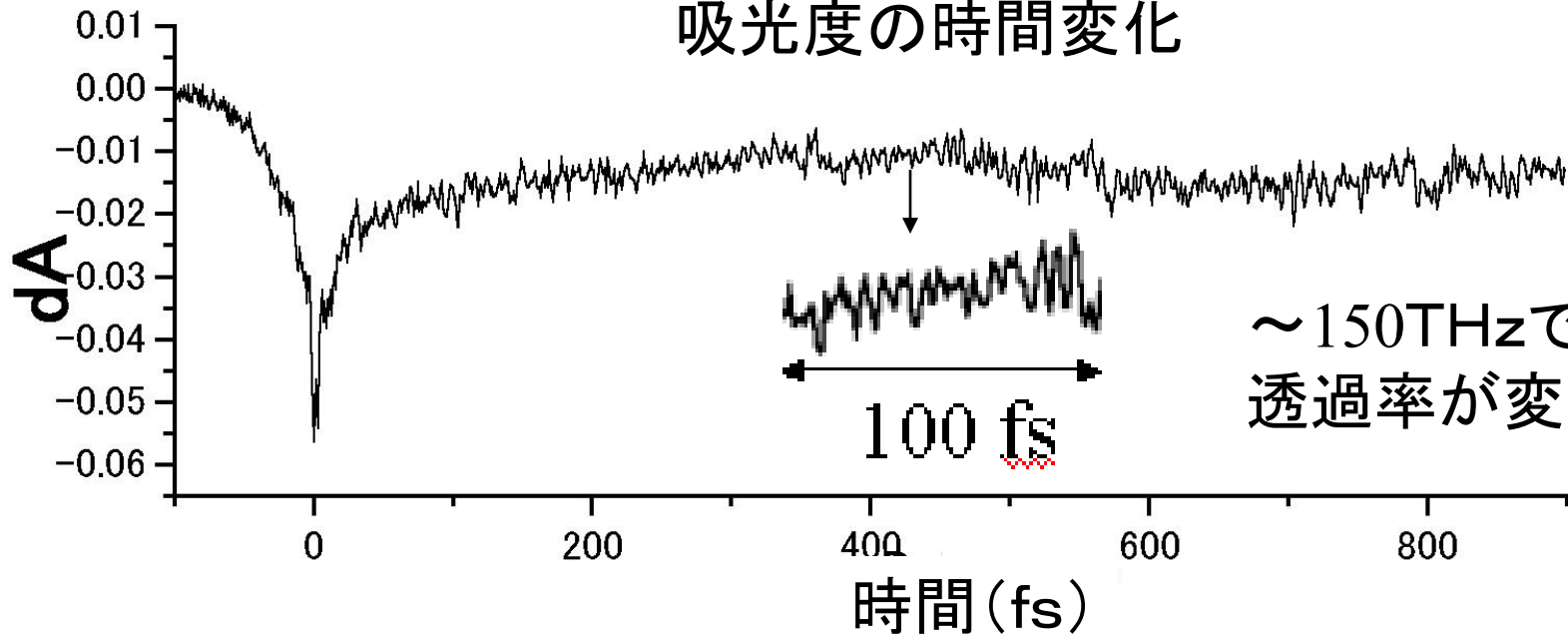
電子励起に伴う格子変形を完全(振幅、位相)に追跡できる

カーボンナノチューブの光誘起格子振動

光励起 = 電子励起 \longrightarrow 格子振動・格子変形
(吸収・屈折率変化) \longleftarrow (1THz~100THz)
電子格子相互作用で
相互に誘起

カーボンナノチューブ

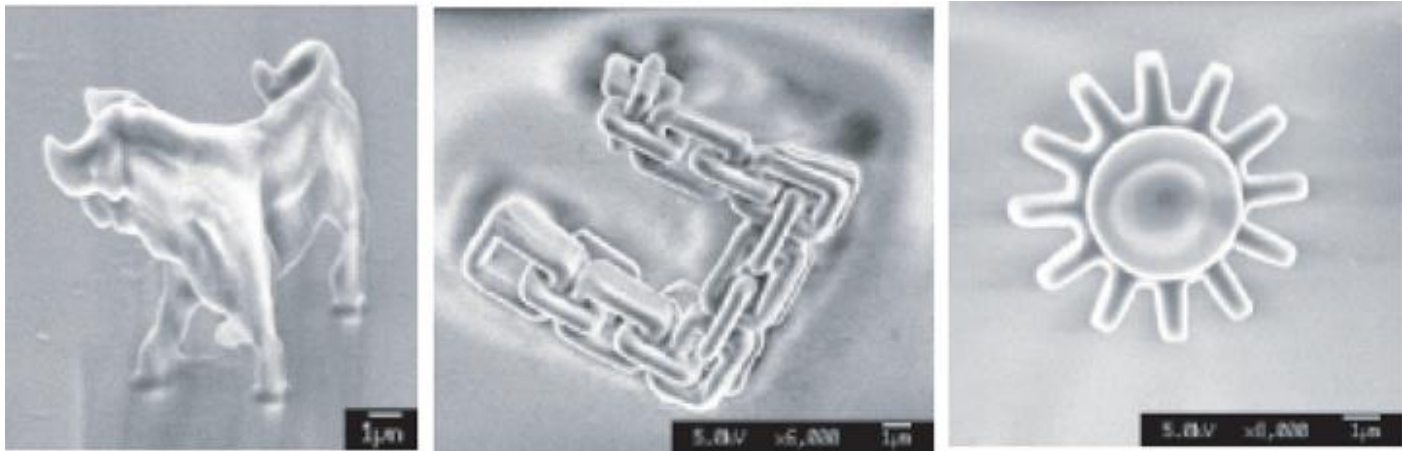
4fsパルス励起後の 572 nm での
吸光度の時間変化



将来、ナノ分子デバイスで光回路を作り、100THzの信号を
操作する技術につながる？

フェムト秒レーザー多光子加工

体長 $8\mu\text{m}$ 、高さ $5\mu\text{m}$



2光子過程によって作製されたミクロの彫刻

(a)牛 (b)チェーン (c)歯車

石英ガラスにCD並みの容量のデータを記録する技術を開発、数億年のデータ保存を実現

2012年9月24日

日立製作所と京都大学

データの記録にはフェムト秒レーザーを使用し、再生には光学顕微鏡を利用。1千度で2時間加熱しても耐える。CDを超える40MB/平方インチの記録密度。

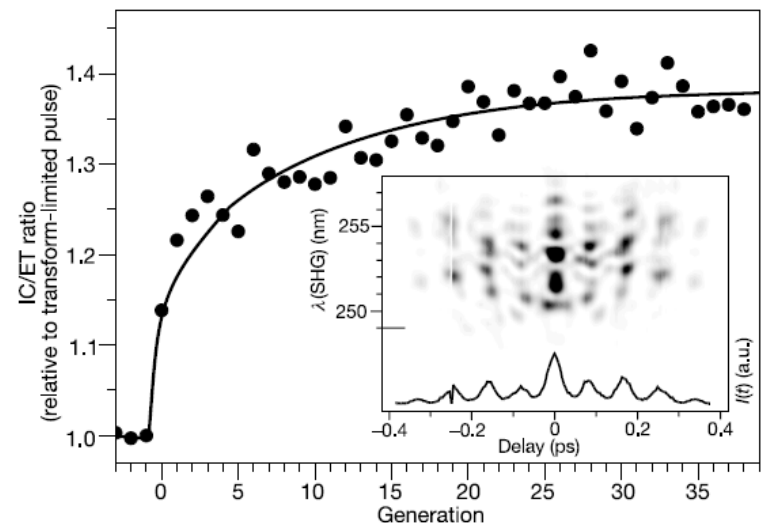
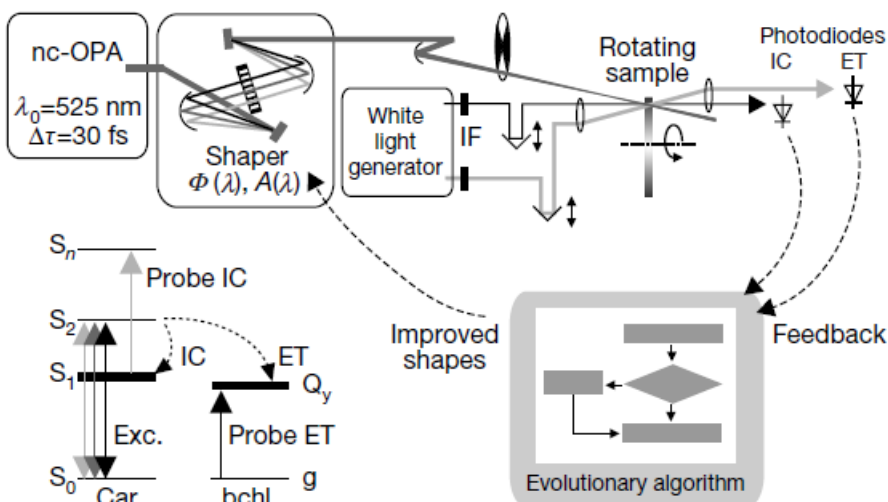
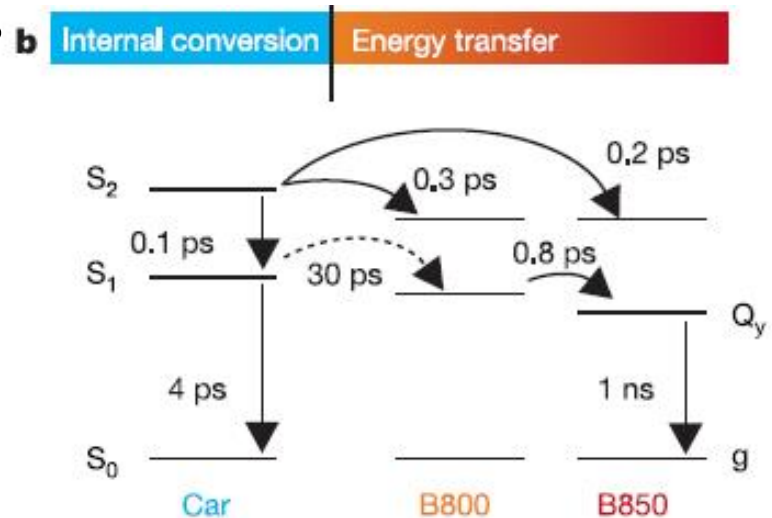
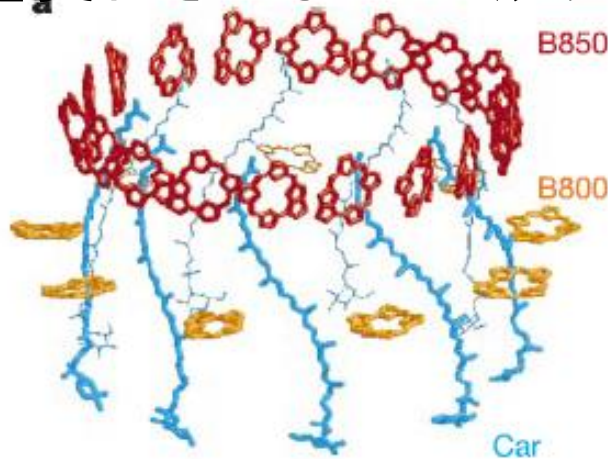


左から、記録パターン、光学顕微鏡で撮影したドット像、輪郭強調処理後のドット像

コヒーレント制御

Nature 417,533(2002)

紅色光合成細菌 *Rhodospseudomonas acidophila* の集光アンテナ複合体 LH2 において、フィードバック最適化コヒーレント制御を行った。適切に波形制御された光パルスによって、複合体の分子間のエネルギー移動の分岐比率を変化させることに成功。



フェムト秒レーザー技術 大出力レーザーパルス

10^{15}W

高強度場 $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$

$E \sim 10^{14}\text{V}/\text{m}$

分子内電場 $10^{11} \sim 10^{12}\text{V}/\text{m}$

高エネルギーレーザー科学

レーザー核融合

レーザー加速器

宇宙物理

分子内、原子内電場

水素原子

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad r = 0.53\text{\AA}, q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$E = 9.0 \times 10^9 \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right] \times \frac{1.6 \times 10^{-19}}{(0.53 \times 10^{-10})^2} \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right]$$

$$= \frac{9.0 \times 1.6}{0.53^2} \times 10^{10} \text{N/C}$$

$$= 5.1 \times 10^{11} \text{N/C} = 5.1 \times 10^{11} \text{V/m}$$

超短パルスの電場

最も普及している市販のフェムト秒増幅パルス

1 mJ, 100 fs, 1 kHz のとき、 10^{10} W

0.1 × 0.1 mm² に集光

$$10^{18} [\text{W/m}^2] = 10^{14} [\text{W/cm}^2] = \epsilon_0 E^2 c / 2$$

$$I = \epsilon_0 E^2 c / 2 [\text{W/m}^2]$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

$$E \sim 3 \times 10^{10} \text{ V/m}$$

分子内電場 $10^{11} \sim 10^{12}$ V/m

実験室で模擬ブラックホール

高出力レーザーで実現ー大阪大 2009年10月19日 [時事通信](#)

高出力のレーザーを使い、ブラックホール周辺で観測されている現象を実験室で発生させることに、大阪大などの国際共同研究チームが成功した。天文学の新たな研究手段として活用できるという(英科学誌ネイチャー・フィジックスの電子版)

阪大レーザーエネルギー学研究センターの藤岡慎介助教は「ブラックホール周辺の環境を地上につくり出すことができた。高出力レーザーを使うことで、将来はブラックホールそのものをつくれる可能性が出てきた」と話している。

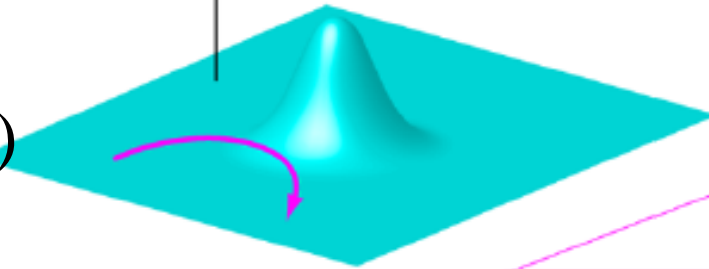
実験は阪大の大型レーザー「激光XII号」で実施。直径約2メートルの真空状態の容器の中で、直径0.5ミリのプラスチックに高出力のレーザーを照射し圧縮、ブラックホール周辺で観測される「光電離プラズマ」を発生させた。ここから放射されたX線は、天体観測で得たデータに近いという。

超短パルスレーザーfilamentからの Hawking輻射

PRL105,
203901(2010)

Analog
gravity

δn



$$kT = \hbar\alpha/2\pi c$$
$$\alpha = -(c/\delta n)\partial\delta n/\partial r$$

非線形屈折率変化

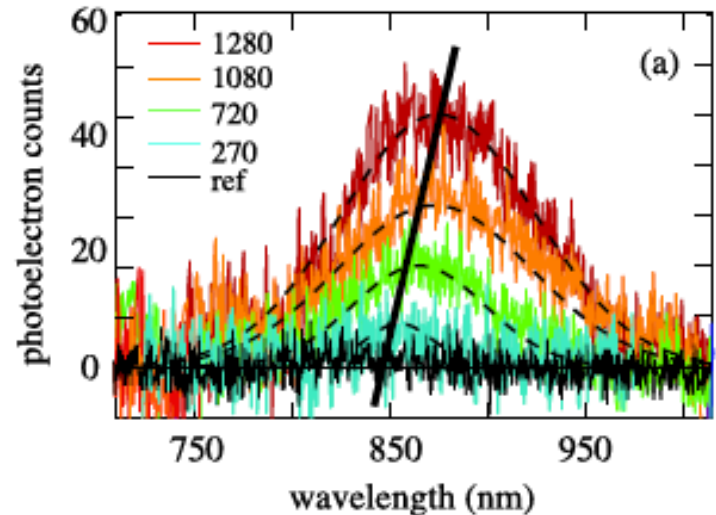
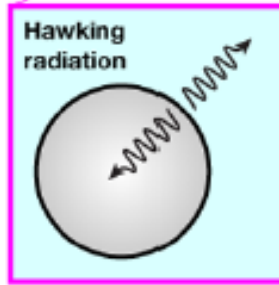
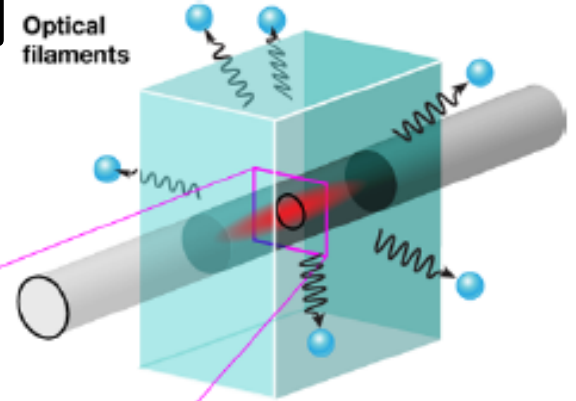
$$n = n_0 + n_2 I$$

模擬的 重力ポテンシャル

屈折率上昇による光速度減少

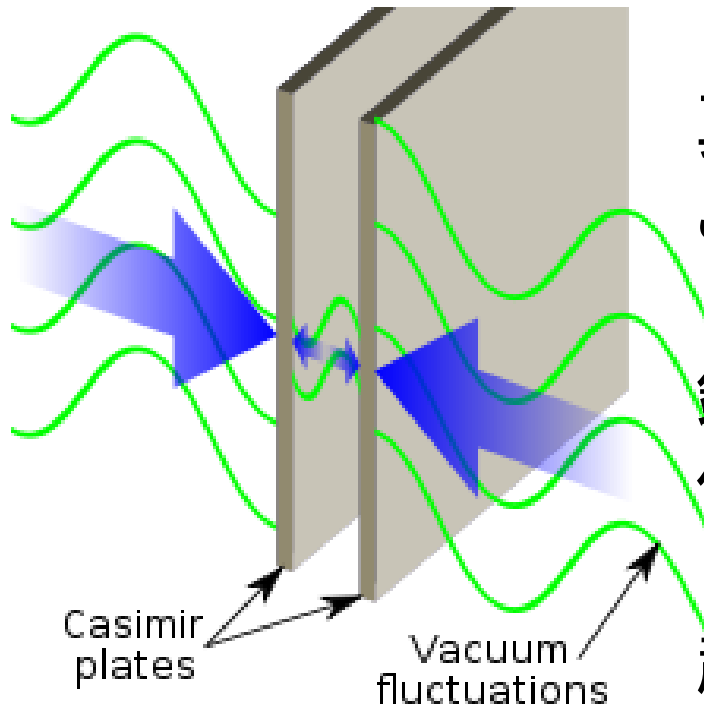
事象の地平面の形成

Optical
filaments



Shaking photons out of the vacuum

動的カシミール効果 Nature 479, 376 (2011)



真空:粒子が生成と消滅を繰り返す
ごく短い時間しか存在しない仮想粒子

鏡を光速に近い速さで動かせば
仮想光子が実光子に

超伝導回路を利用してこの原理により
マイクロ波の光子を発生

鏡(完全導体)による電磁波の反射:

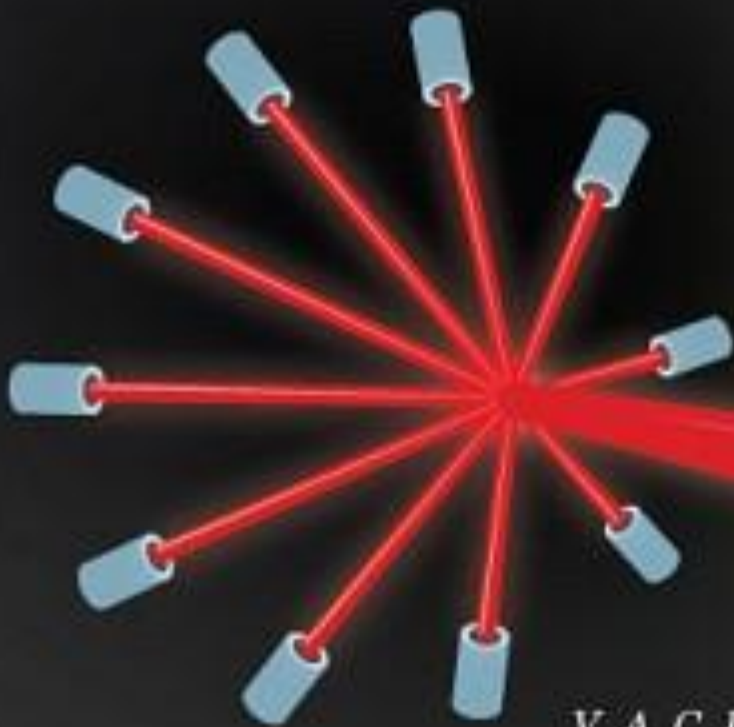
界面で電場が節、磁場が腹の境界条件:鏡の表面に遮蔽電流
真空のゆらぎによって生成される遮蔽電流が加速して電磁放射

高エネルギー物理学

真空中での非線形光学効果

by Richard Gray

World's most powerful laser will pull apart vacuum of space



1 Ten lasers combine to make super laser

2 Ghost particles normally annihilate each other too quickly to be detected —



3 Laser creates intense electrical field that pulls ghost particles apart so they stay in existence long enough to be detected

Schwinger limit

Wiki

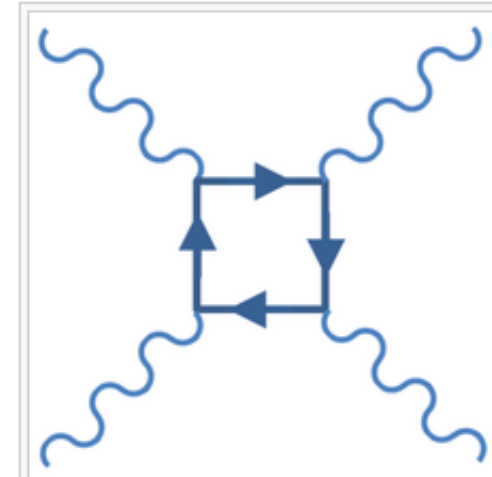
From Wikipedia, the free encyclopedia


In [quantum electrodynamics](#) (QED), the **Schwinger limit** is a scale above which the [electromagnetic field](#) is expected to become [nonlinear](#). The limit was first derived in one of QED's earliest theoretical successes by [Fritz Sauter](#) in 1931^[1] and discussed further by [Werner Heisenberg](#) and his student Hans Euler.^[2] The limit, however, is commonly named in the literature^[3] for [Julian Schwinger](#), who derived the leading nonlinear corrections to the fields and calculated the production rate of electron-positron pairs in a strong electric field.^[4] The limit is typically reported as a maximum [electric field](#) before nonlinearity for the vacuum of

$$E_S = \frac{m_e^2 c^3}{q_e \hbar} \simeq 1.3 \times 10^{18} \text{ V/m,}$$

where m_e is the mass of the [electron](#), c is the [speed of light](#) in vacuum, q_e is the [elementary charge](#), and \hbar is the reduced [Planck constant](#).

In a vacuum, the classical [Maxwell's equations](#) are perfectly [linear differential equations](#). This implies – by the [superposition principle](#) – that the sum of any two solutions to Maxwell's equations is yet another solution to Maxwell's equations. For example, two beams of light pointed toward each other should simply add together their electric fields and pass right through each other. Thus Maxwell's equations predict the impossibility of any but trivial [elastic](#) photon-photon scattering. In QED, however, non-elastic photon-photon scattering becomes possible when the combined energy is large enough to create [virtual electron-positron pairs](#) spontaneously, illustrated by the [Feynman diagram](#) in the figure on the right.



A Feynman diagram (*box diagram*) for  photon-photon scattering; one photon scatters from the transient [vacuum charge fluctuations](#) of the other

J. Schwinger, "On Gauge Invariance and Vacuum Polarization",
Phys. Rev. **82**, 664 (1951).

フェムト秒からアト秒へ

10^{-15} s

10^{-18} s

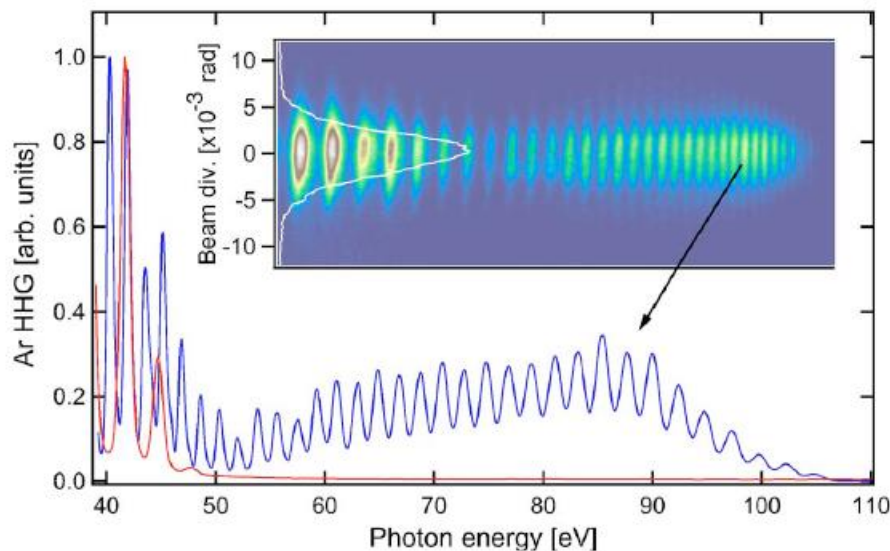
可視光からX線へ

希ガス中で高次高調波パルス発生

APL93, 041111(2008)

>100th harmonics

奇数次のみ



アト秒時間分解X線ホログラフイー

結晶格子の高速の構造変化の3次元イメージ

光周波数標準、光学時計

現在の時間の国際標準 セシウム原子時計で定義(1967)
9.2GHz(9192631770Hz)のマイクロ波遷移(超微細準位間)

1秒の定義 セシウム133 原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移
に対応する放射の9 192 631 770 周期の継続時間(1967)

マイクロ波の代わりに光を使えば 時間の測定精度は5桁向上
光の周波数は 数百THz

光の周波数をマイクロ波の周波数へ変換する技術が確立、
イオンや中性原子の光学遷移を周波数標準とすることが可能に

2004.3.19 可視光周波数域で1オクターブ以上に渡る“光コム”生成
(規則的に並んだ櫛の歯のようなスペクトルを持った光)
フェムト秒レーザーの応用 10^{-19} の高い精度で周波数を決定

長さ(1m)の定義

地球の子午線の赤道から北極までの長さの1000万分の1
実際の測量に基づいてメートル原器 (1889)

クリプトン86原子のスペクトル線の波長を用いて定義(1960)

真空中の光の速さをを用いた定義(1983)

1秒の 299 792 458分の1の時間に光が真空中を伝わる行程の長さ
光の速さ=定義値299 792 458 m/s

長さの国家標準 「協定世界時に同期した光周波数コム装置」 (2009)

実際の1 mを測定するために、レーザ光の波長を「長さのものさし」として使う。

$$\lambda[\text{m}] = \frac{c[\text{m/s}]}{f[1/\text{s}]}$$

光コムは

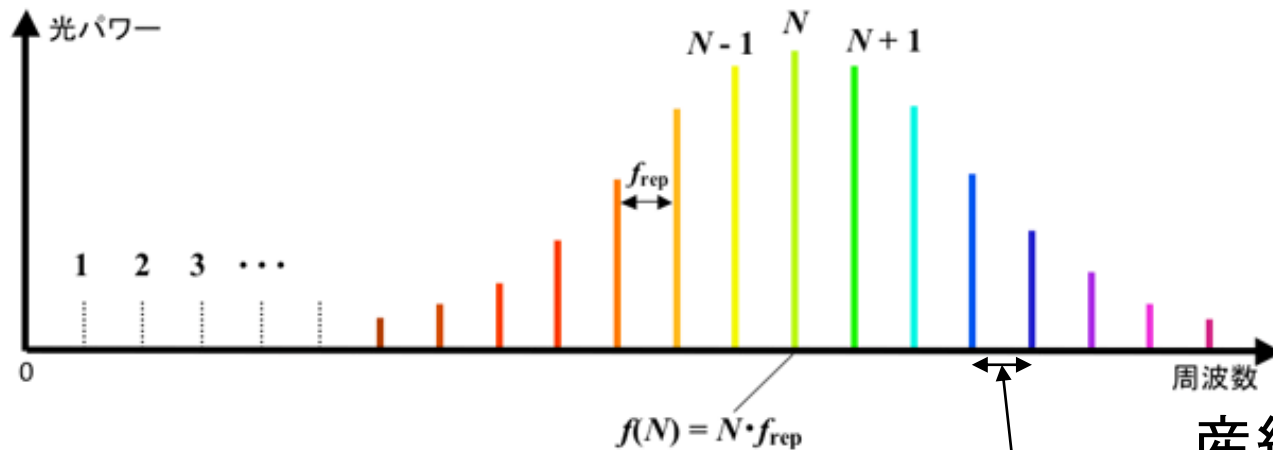
時間の定義に従い正確な光周波数を発生できる「光周波数のものさし」

この装置により正確なレーザ光の波長＝「長さのものさし」を決定

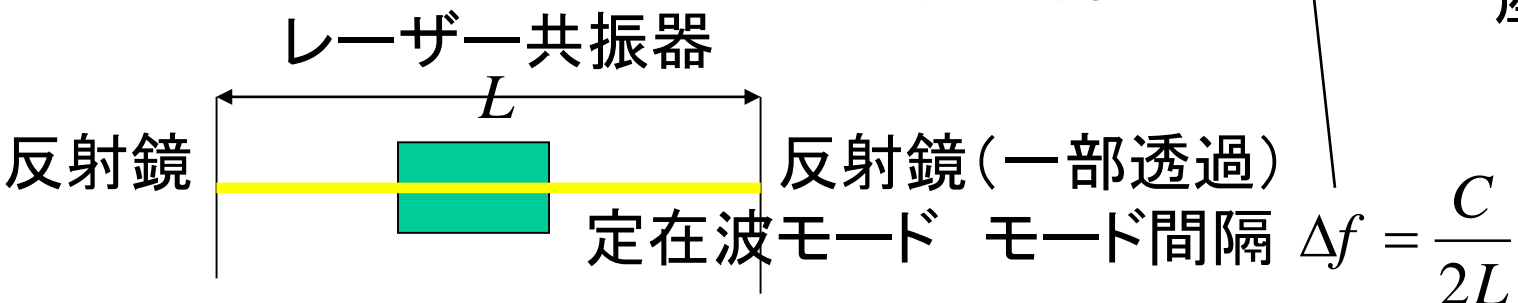
光周波数コム

◆光周波数コム

モード同期レーザーと呼ばれる超短光パルスレーザーから出力される、広帯域かつ楕状のスペクトルを持つ光のこと。モード同期レーザーが発生する超短光パルス列は、光周波数コムの模式図にあるように、繰り返し周波数(f_{rep})で決まる間隔を持った細いスペクトル成分(モード)を持つ。このスペクトルの形状がくし(comb)に似ていることから「光周波数コム(comb)」と呼ばれる。繰り返し周波数 f_{rep} を、協定世界時に同期すれば、光周波数コムを「光周波数のものさし」として用いることができる。[\[参照元へ戻る\]](#)

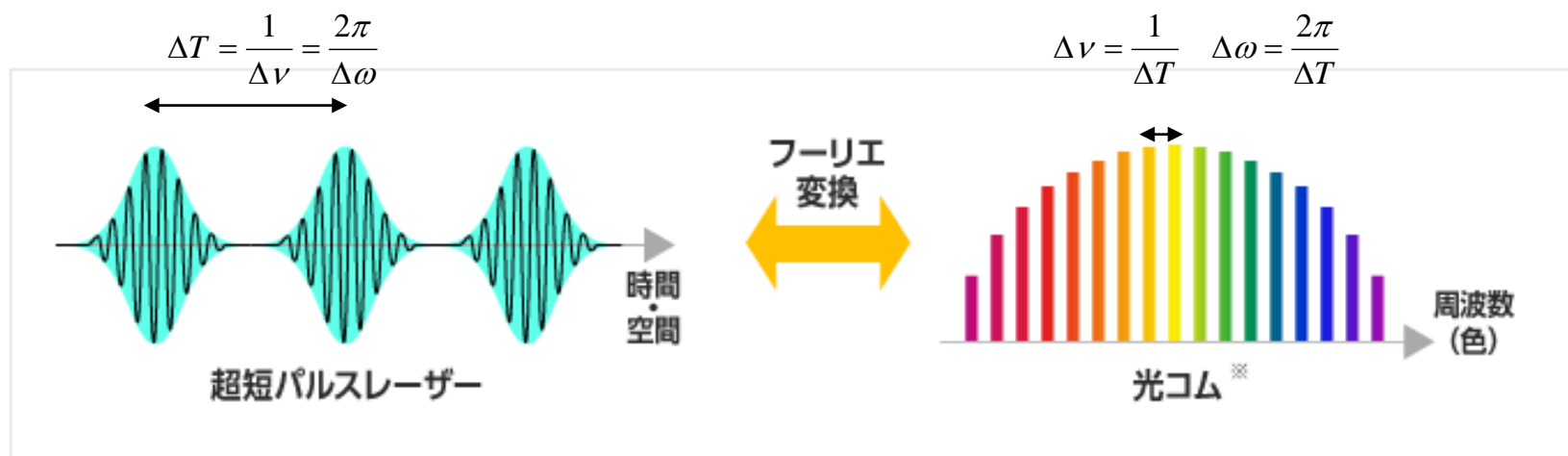


産総研HPより





知的光シンセサイザ技術の研究



美濃島研究室では、超短パルスレーザーと光コムの時間・空間・周波数（色）軸特性を使い尽くして、光を自在に操作する「知的光シンセサイザ」の研究を行い、多次元情報の超精密計測・制御技術の高度実現を目指します。

※コムは櫛のこと。「光のものさし」と呼ばれる櫛状に整列する超精密な光。

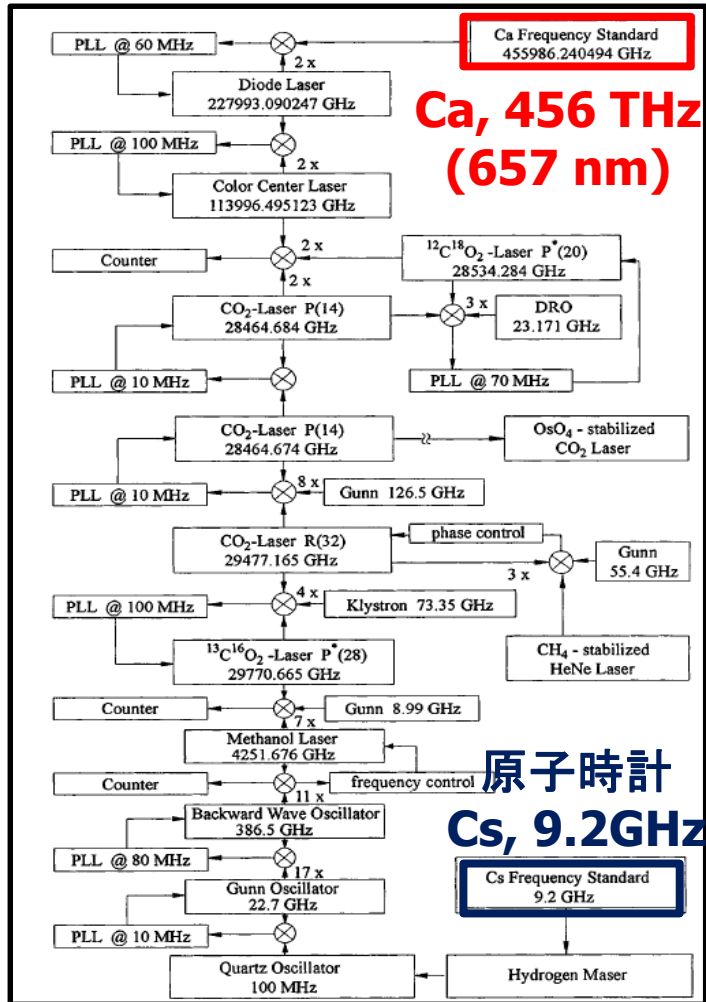


“光コム”は光の世界のイノベーション

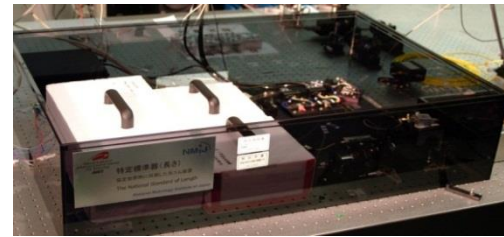
何台もの“連続波レーザー”が必要。
1測定が国家プロジェクト

「メートルの定義の実現」
レーザーの光周波数”絶対”測定が必要

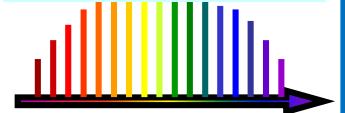
光周波数は大きすぎる&1色ではだめ



“光コム”技術: 1台で任意波長。
大学院生の実験



光コム:
究極の物差し



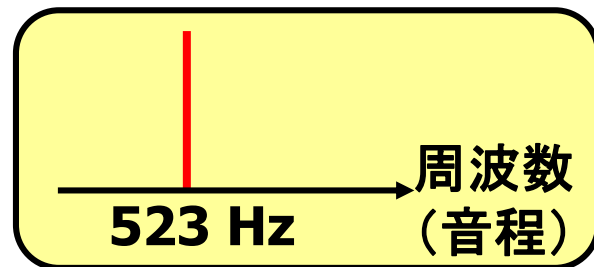
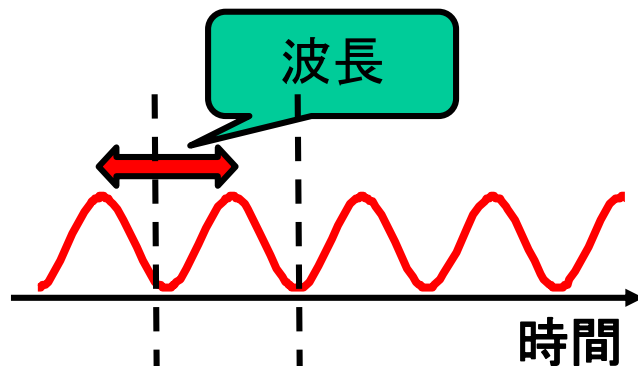
“光の世界のイノベーション”

参考文献:
産総研ブックス「きちんとわかる計量標準」白日社
by Minoshima

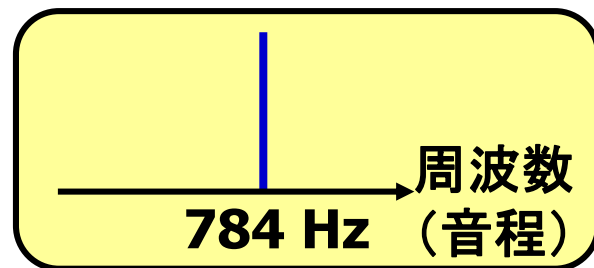
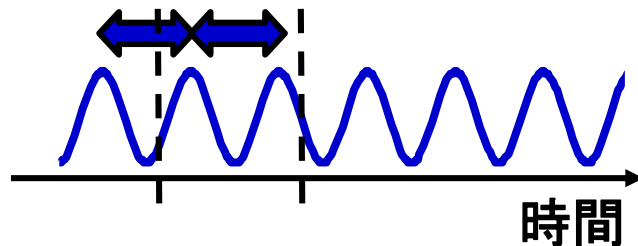
超短パルスレーザーとは？ : 「周波数軸」

音の波(振動)

再生 「ド」
第1の周波数の波

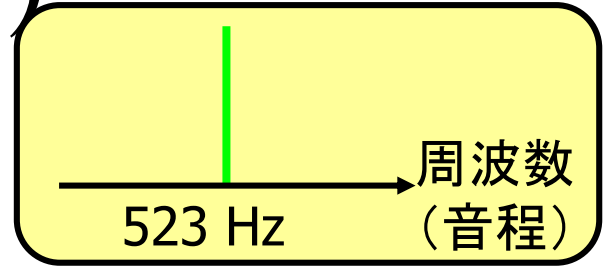
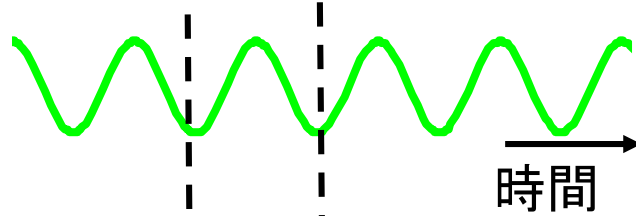


再生 「ソ」
第2の周波数の波

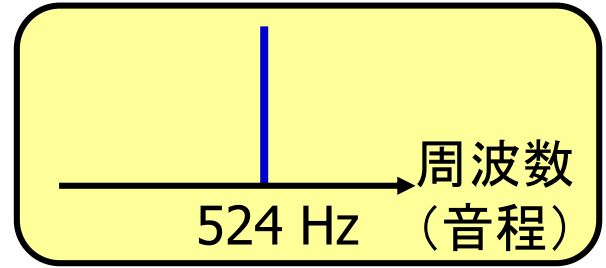
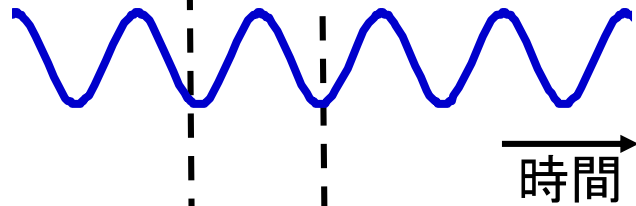


音の波(振動)

再生
第1の周波数の波
523 Hz

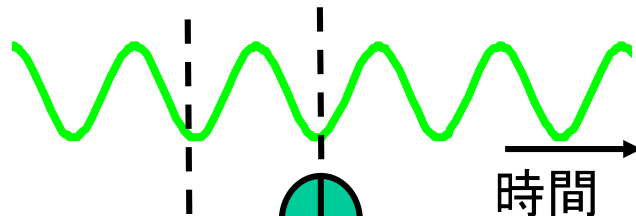


再生
第2の周波数の波
524 Hz

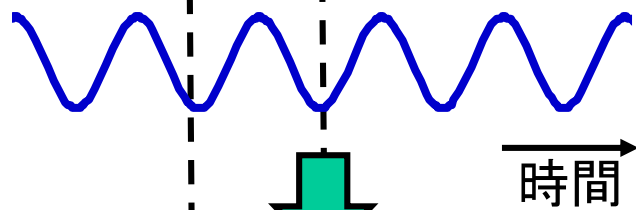


音の波(振動)

第1の周波数の波
523 Hz



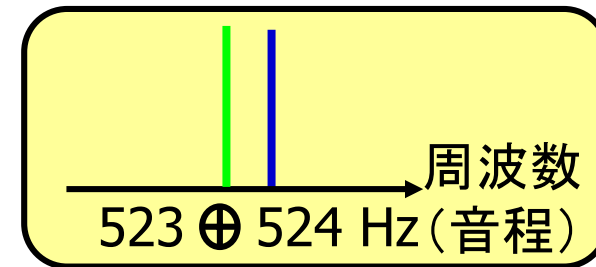
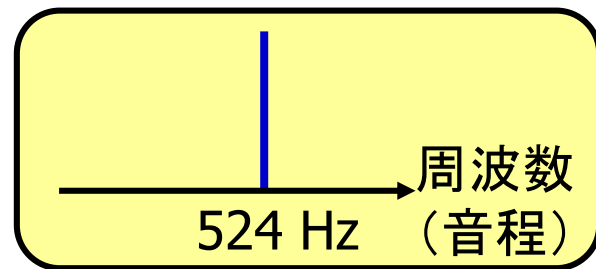
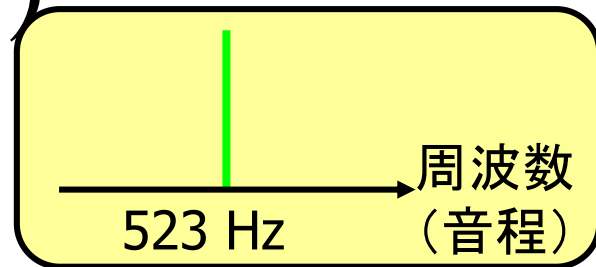
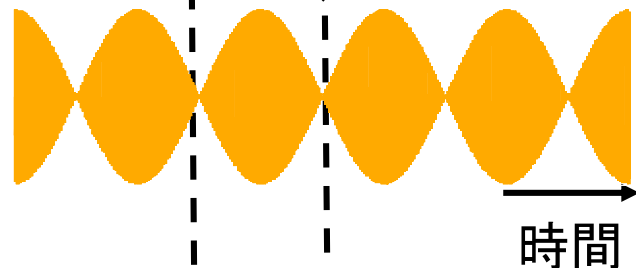
第2の周波数の波
524 Hz



再生

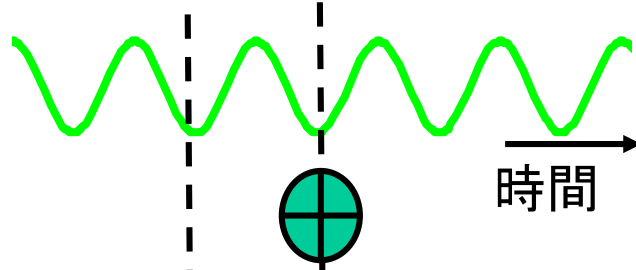


2つの重ね合わせ
 $523 \oplus 524$ Hz

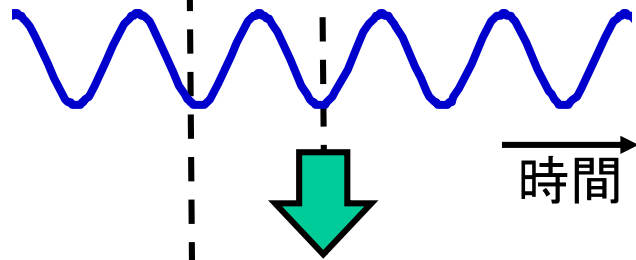


音の波(振動)

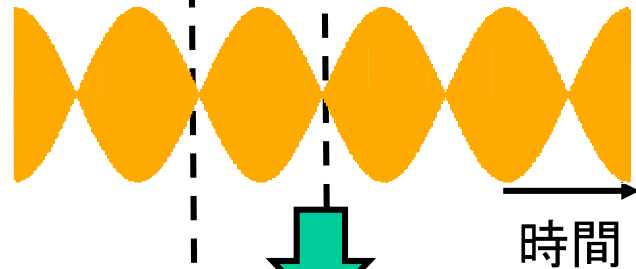
第1の周波数の波
523 Hz



第2の周波数の波
524 Hz



2つの重ね合わせ
 $523 \oplus 524$ Hz

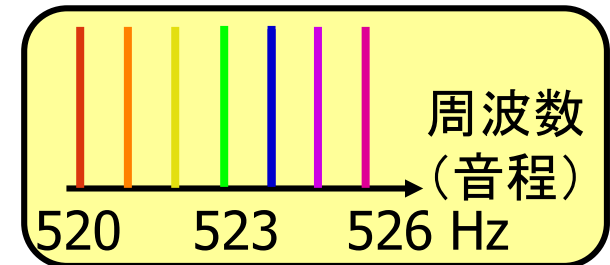
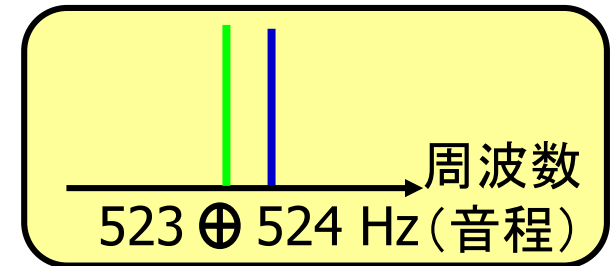
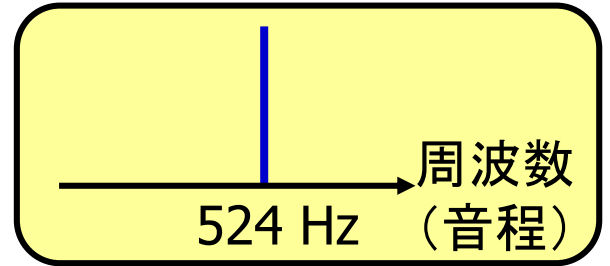
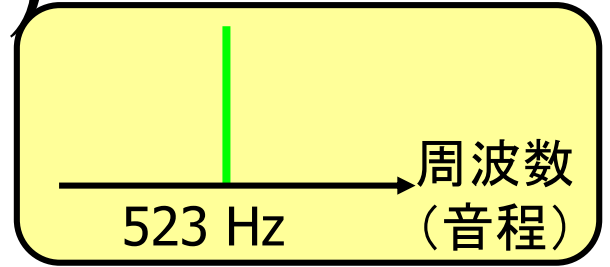
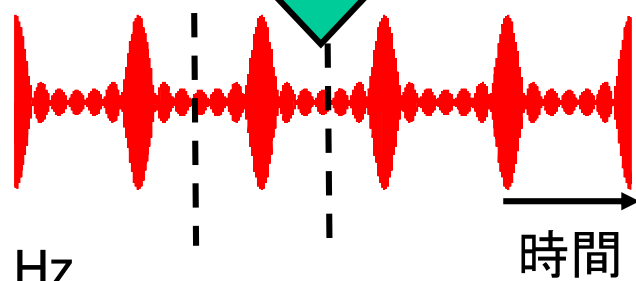


再生

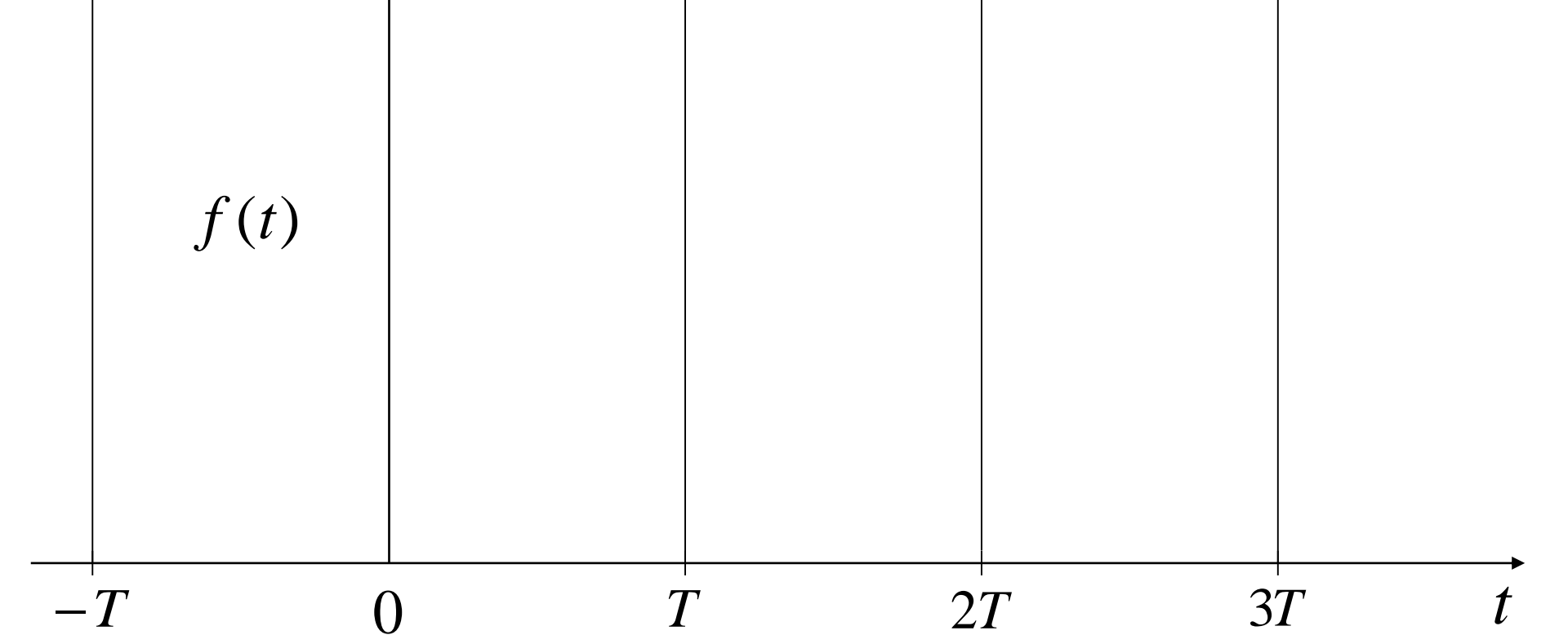


7つの重ね合わせ

$520 \oplus \dots \oplus 523 \dots \oplus 526$ Hz



by Minoshima



$f(t)$

$-T$

0

T

$2T$

$3T$

t

$$F(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) e^{-i\omega t} dt = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-i\omega mT} = \frac{2\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi}{T}n\right)$$

たたみこみ積分

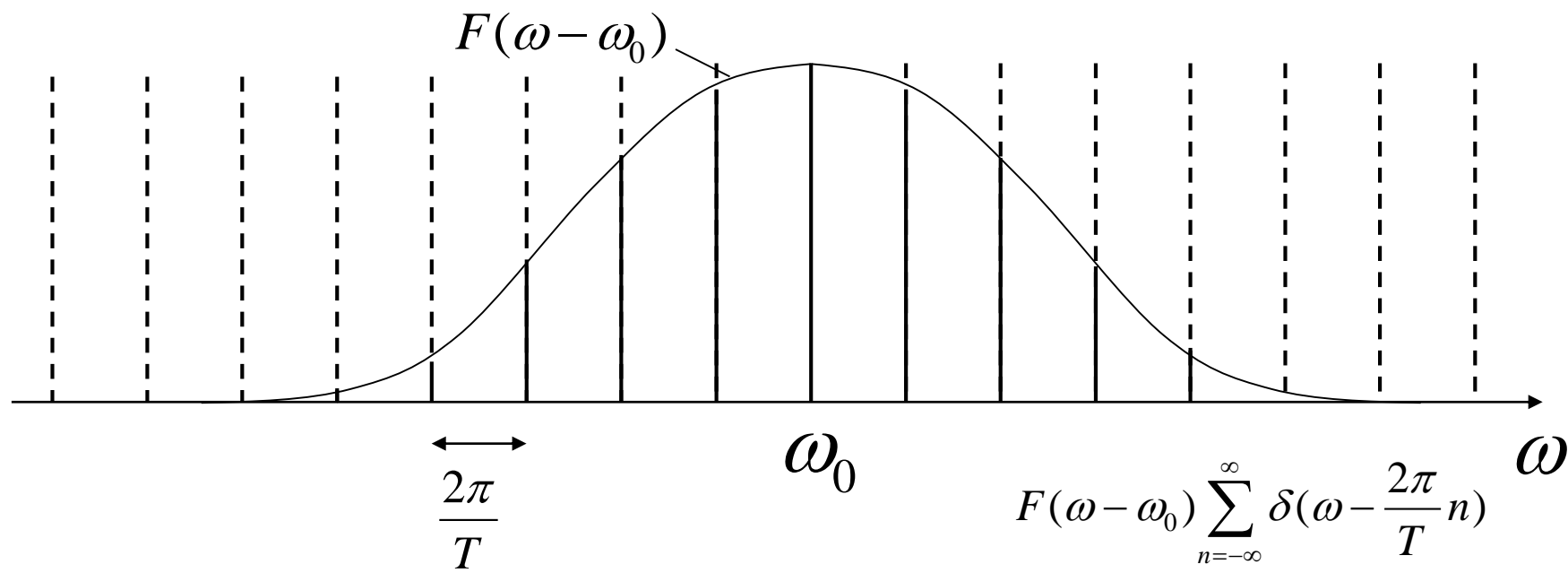
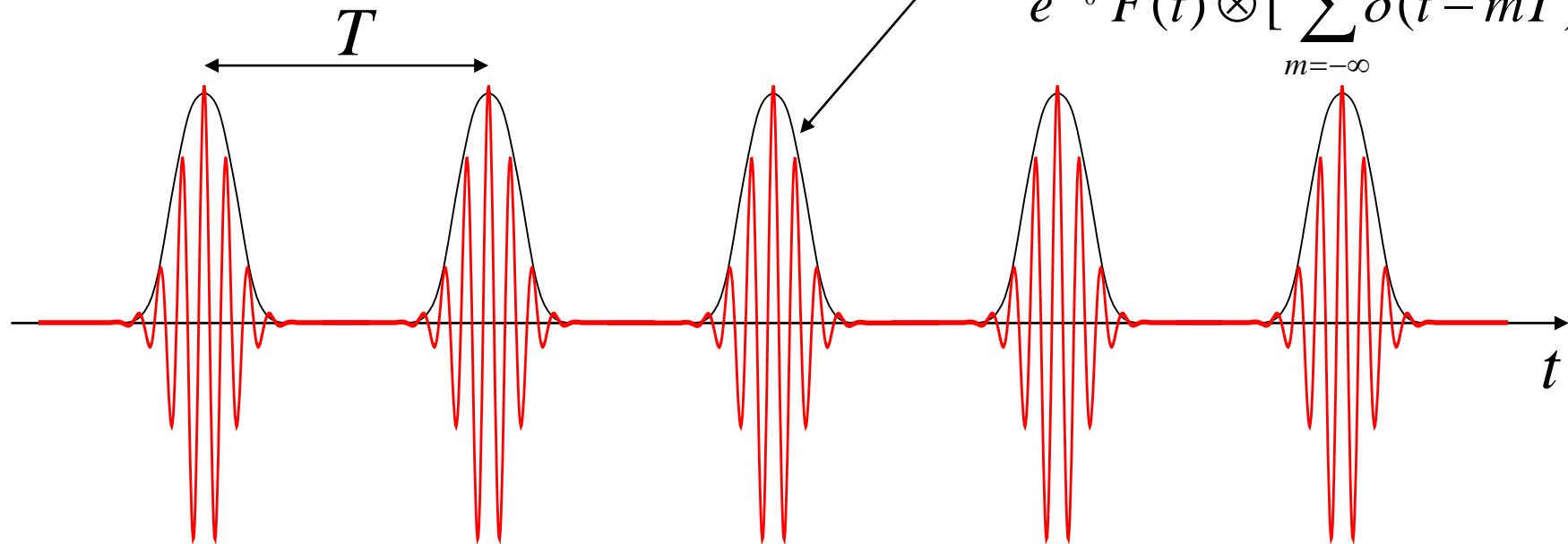
$$f(x) \otimes g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x')g(x-x')dx'$$

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} [f(x) \otimes g(x)]e^{-ikx} dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x')g(x-x')dx' \right] e^{-ikx} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x')g(x-x')e^{-ikx'-ik(x-x')} dx' dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x')e^{-ikx'} dx' \int_{-\infty}^{\infty} g(x-x')e^{-ik(x-x')} dx \\ &= f(k) \int_{-\infty}^{\infty} g(X)e^{-ikX} dX \quad X = x-x' \quad dX = dx \\ &= f(k)g(k)\end{aligned}$$

$$f(x) \otimes g(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(k)g(k)e^{ikx} dk$$

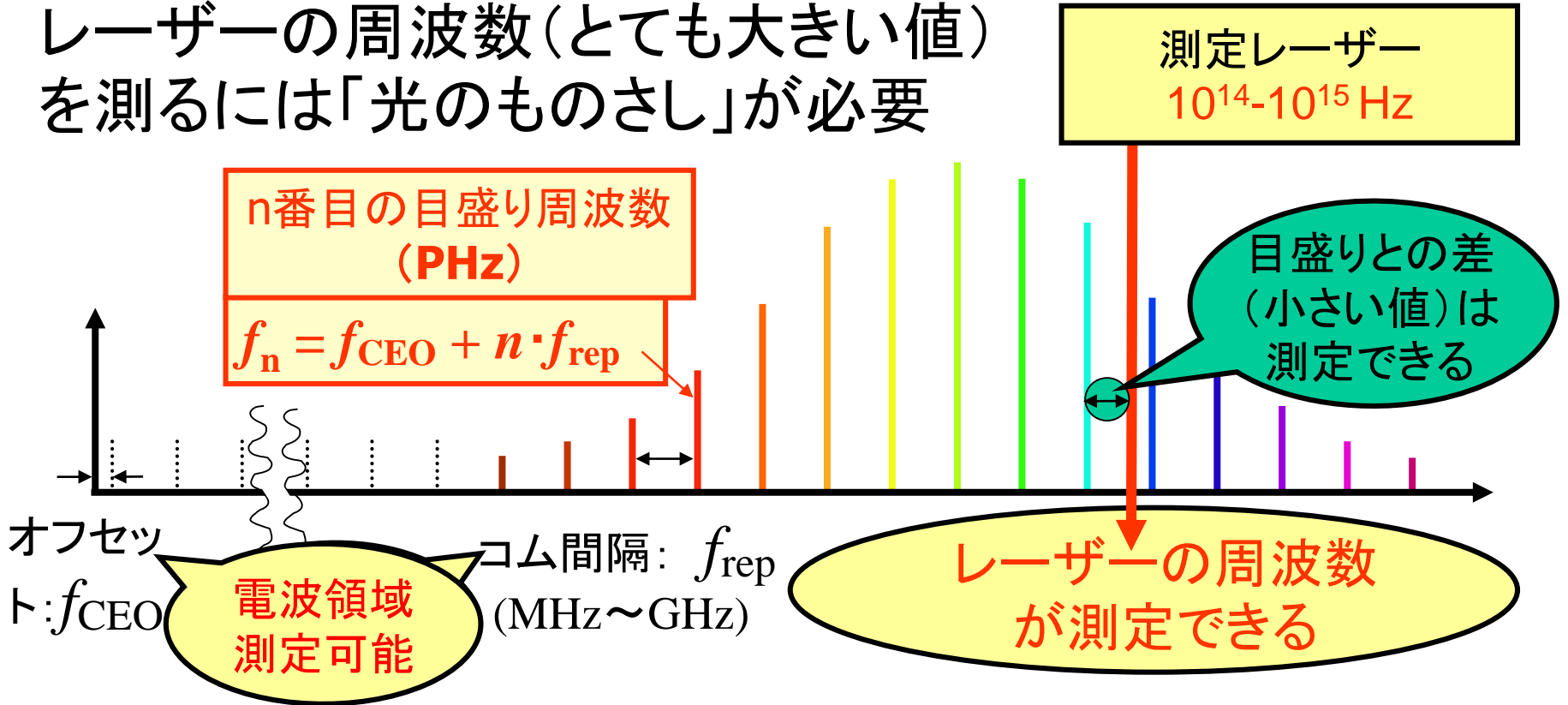
$$\frac{1}{2\pi} \int F(\omega - \omega_0) e^{i\omega t} d\omega = e^{i\omega_0 t} \frac{1}{2\pi} \int F(\omega - \omega_0) e^{i(\omega - \omega_0)t} d\omega = e^{i\omega_0 t} F(t)$$

$$e^{i\omega_0 t} F(t) \otimes \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) \right]$$



光コムは「光のものさし」

- レーザーの周波数(とても大きい値)を測るには「光のものさし」が必要



1999年に初めて実現。20世紀中には3カ国のみ。独、米、**日**

2005年ノーベル物理学賞 T.W. Hänsch (独), J.L. Hall (米)

Hydrogen Spectroscopy

High Precision Measurements
for Fundamental Physics

1S-2S

1S-3S

1S-2S Spectroscopy

Team

Research

Publications

Positions

1S-3S Spectroscopy

Team

Contact

Hänsch Group Home

Welcome to the hydrogen spectroscopy project

We are part of Prof. T.W. Hänsch's Group and located at the Max-Planck-Institute of Quantum Optics in Garching near Munich, Germany.

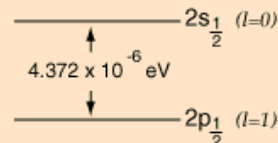
Precision spectroscopy of atomic hydrogen has motivated advances in nonlinear laser spectroscopy and optical frequency metrology over more than three decades, including the laser frequency comb technique highlighted in the citation for the 2005 Nobel Prize in physics. Past spectroscopic measurements of the ultraviolet 1S-2S two-photon resonance in hydrogen and deuterium in our laboratory have led to new tests of quantum electrodynamic theory, and they have yielded accurate values of the Rydberg constant, the rms charge radius of the proton, and the structure radius of the deuteron. In addition, our measurements were among the first laboratory experiments to set stringent limits to possible slow variations of fundamental constants.

<http://www.mpq.mpg.de/~abeyer/hydrogen/index.php/H1s2s/1s2s>

The Lamb Shift (輻射補正)

According to the hydrogen Shrodinger equation solution, the [energy levels](#) of the hydrogen electron should depend only on the [principal quantum number \$n\$](#) . In 1951, Willis Lamb discovered that this was not so – that the $2p(1/2)$ state is slightly lower than the $2s(1/2)$ state resulting in a slight shift of the corresponding spectral line (the Lamb shift).

It might seem that such a tiny effect would be deemed insignificant, but in this case that shift probed the depths of our understanding of electromagnetic theory.



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/lamb.html>

ノーベル化学賞（光合成、生体エネルギー装置）

- 2008 下村、チャルフィー、チエン 緑色蛍光蛋白質の発見と応用
-
- 1997 ボイヤー、ウォーカー、スコー ATP分解・合成酵素の研究
- 1988 ダイゼンホーファー、フーバー、ミヒエル
光合成反応中心をなす蛋白質複合体の3次元構造の決定
- 1978 ミッチェル 生体膜におけるエネルギー変換の研究
- 1961 カルヴィン 植物における光合成の研究
- 1938 クーン カロチノイド類およびビタミン類についての研究
- 1937 ハース 炭水化物とビタミンCの構造に関する諸研究
カラー カロテノイド類、フラビン類およびビタミンA、
ビタミンB2の構造に関する諸研究
- 1930 フィッシャー ヘミンとクロロフィルの構造に関する
諸研究特にヘミンの合成
- 1915 ウィルシュテッター
植物色素物質特にクロロフィルについての研究

太陽エネルギー

地球表面への供給量 3.0×10^{24} J/year

人類のエネルギー消費量 3.0×10^{20} J/year

地球上の光合成量 3.0×10^{21} J/year

全化石資源量 地球表面への供給量の10日分

太陽定数 1366 W/m^2

× 地球断面積 = 地球が受け取るエネルギー $1.74 \times 10^{17} \text{ W}$

$= 5.49 \times 10^{24} \text{ J/year}$

太陽の放出するエネルギー この22億倍

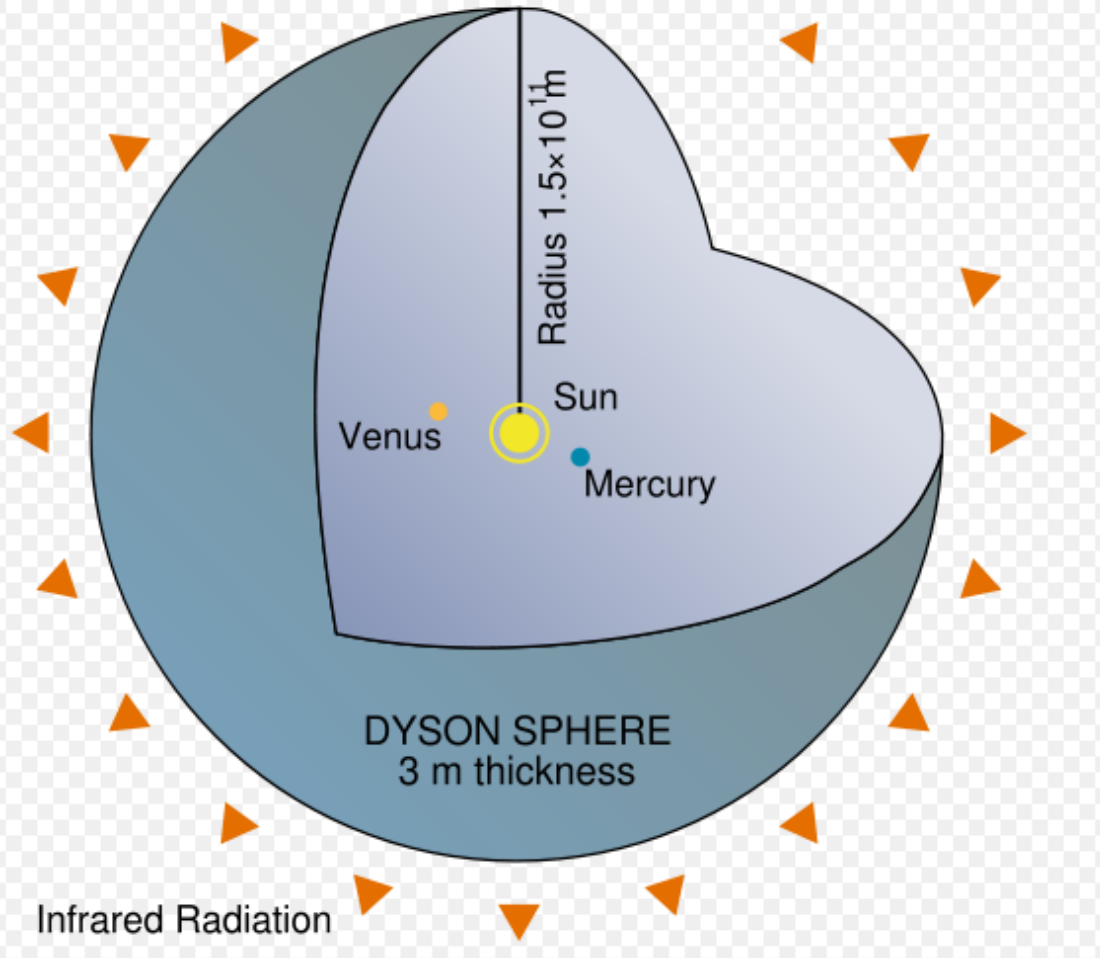
The total energy consumption of humanity in 1998 was $1.2 \times 10^{13} \text{ W}$.

$3.8 \times 10^{20} \text{ J/year}$

ダイソン球

宇宙文明の段階

- 第一段階 一つの惑星上で得られる全エネルギーを利用する文明
- 第二段階 一つの恒星系で得られる全エネルギーを利用する文明
- 第三段階 一つの銀河系で得られる全エネルギーを利用する文明



地球上のエントロピー

エントロピーは増大する

生物が生きている

地球が恒常的な環境を保つ

光合成

エントロピー一定



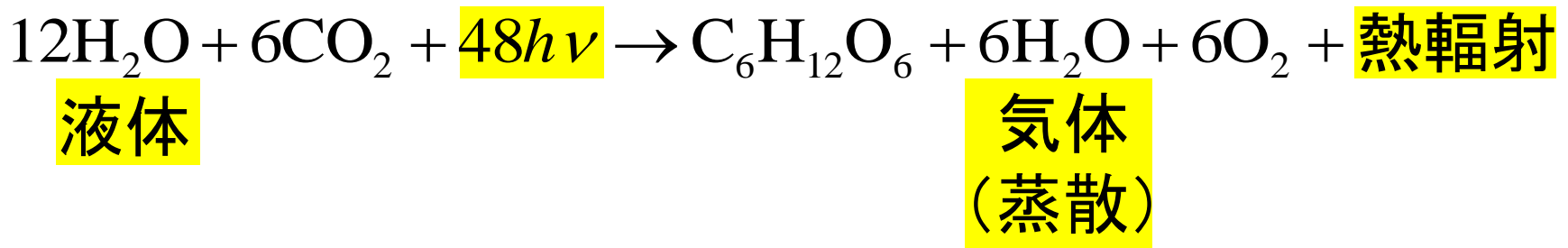
エントロピー大

エントロピー小

地球上のエントロピー

孤立系のエントロピーは増大する

生物が生きている 呼吸
地球が恒常的な環境を保つ 食事・給水 → 排出・放熱
光合成 太陽光 → 赤外輻射



$h\nu \rightarrow h\nu_i + h\nu_j + h\nu_k + \dots$
可視光 遠赤外光
エントロピー小 エントロピー大

地球温暖化

温室効果とは？

酸素、窒素でなく、
二酸化炭素、水蒸気が温室効果ガスなのはなぜ？

水蒸気のほうがより強い温室効果ガスといわれる
のはなぜ？

ウィーンの変位則

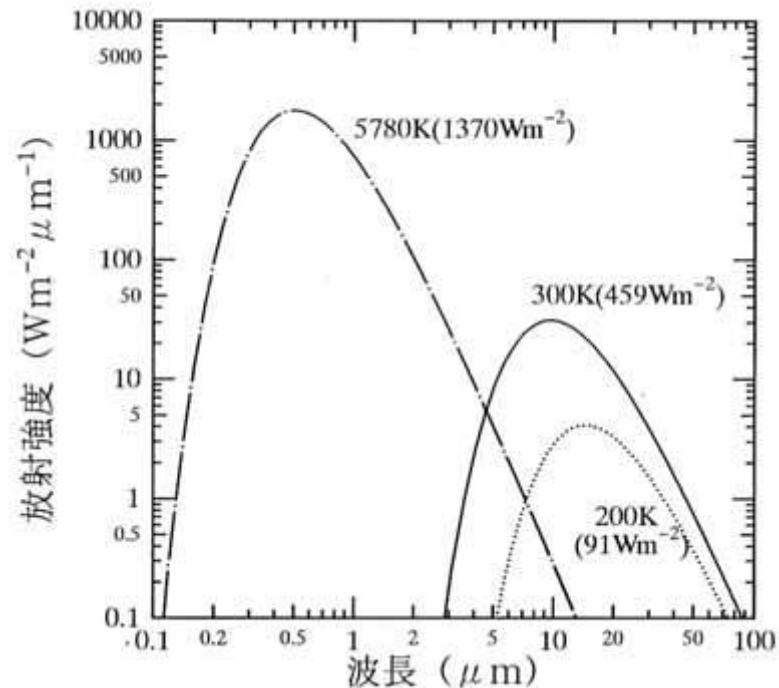
$$\lambda_{\max} [\mu\text{m}] = \frac{2898}{T[\text{K}]}$$

$T=5780\text{K}$ $\lambda \sim 500 \text{ nm}$ 緑色

$T=300\text{K}$ $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$

1光子が20光子に分裂 エントロピー増大

黒体放射のスペクトル
温度のみで決まる



シュテファン・ボルツマンの法則

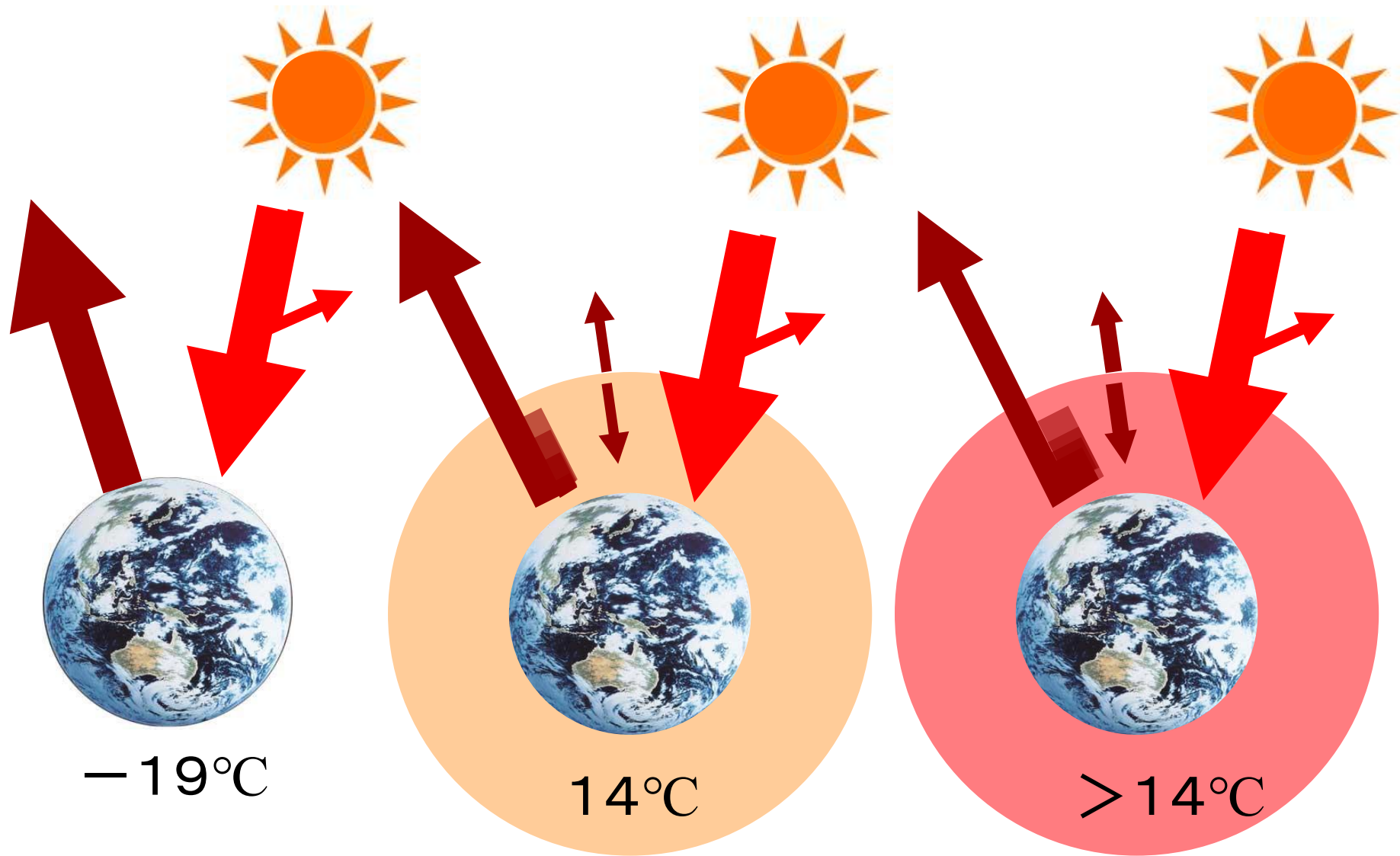
黒体輻射量（輻射強度）

$$I = \sigma T^4$$

$$\sigma : 5.67 \times 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$$

地球を300Kの黒体と見なせば、
地球からの全放射量が求まる

温室効果



参考：江守正多 地球温暖化の予測は「正しい」か？ より

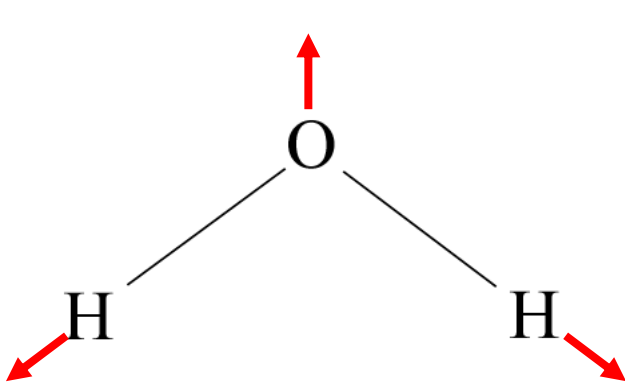
赤外吸収の強さ $\propto \left(\frac{\partial P}{\partial Q_i} \right)^2$

P : 分子の双極子モーメント

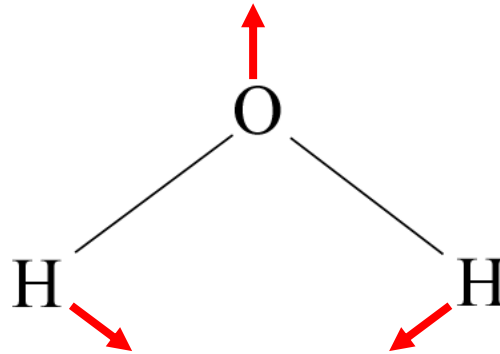
Q_i : 基準座標

水蒸気の基準振動

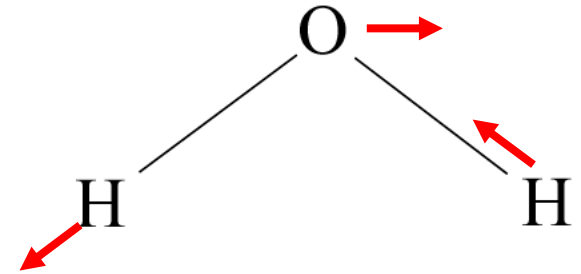
水分子は永久双極子を持つ。すべての振動モードが光と相互作用
赤外吸収、輻射



対称伸縮振動
 ν_1 3652cm^{-1}



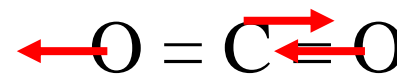
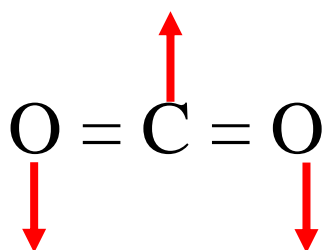
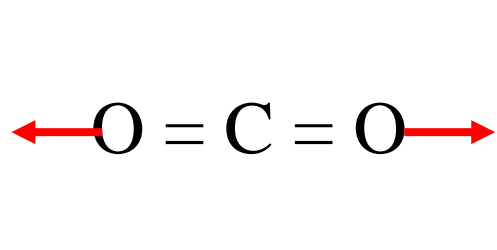
変角振動
 ν_2 1592cm^{-1}



逆対称伸縮振動
 ν_3 3756cm^{-1}

二酸化炭素の基準振動

CO₂は振動基底状態では双極子モーメントを持たない



対称伸縮振動

ν_1 1340cm⁻¹

変角振動

ν_2 666cm⁻¹

逆対称伸縮振動

ν_3 2350cm⁻¹

電気双極子モーメント
は生じない

電気双極子モーメント
を生じる 赤外吸収・輻射

窒素、酸素分子の基準振動

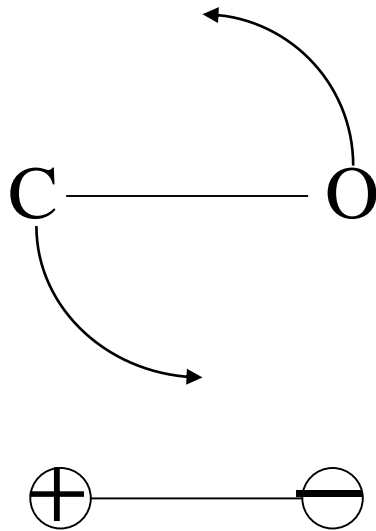


対称伸縮振動のみ

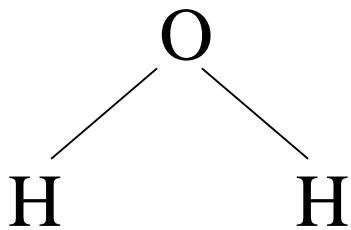
ν_1 cm^{-1}

電気双極子モーメント
は生じない

回転による光学遷移(遠赤外吸収)

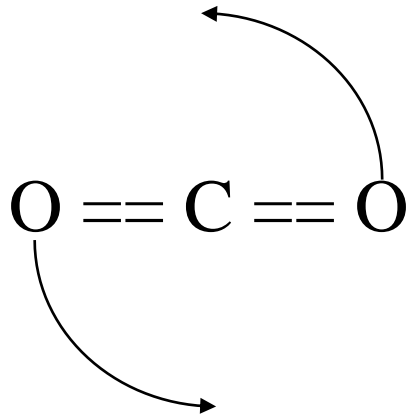


異核二原子分子
回転すると双極子モーメントが振動
(電磁波を放射する=吸収する)

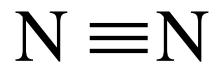
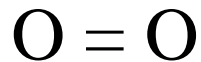


水分子
回転によっても赤外吸収

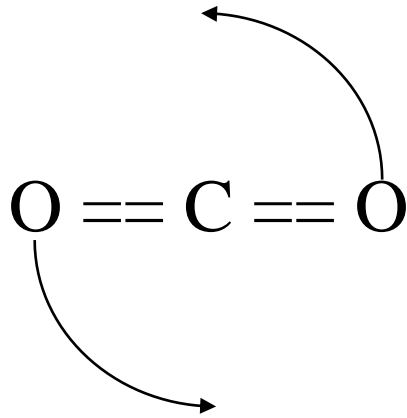
回転による光学遷移



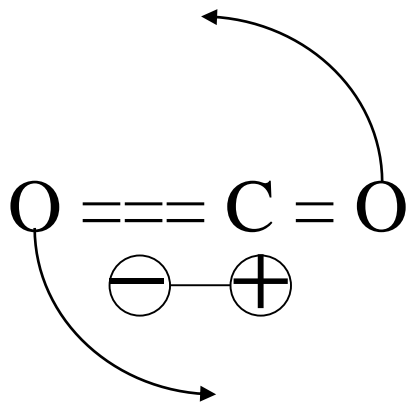
回転しても双極子モーメントの振動は生じない
(電磁波を放射しない=吸収しない)



回転による光学遷移

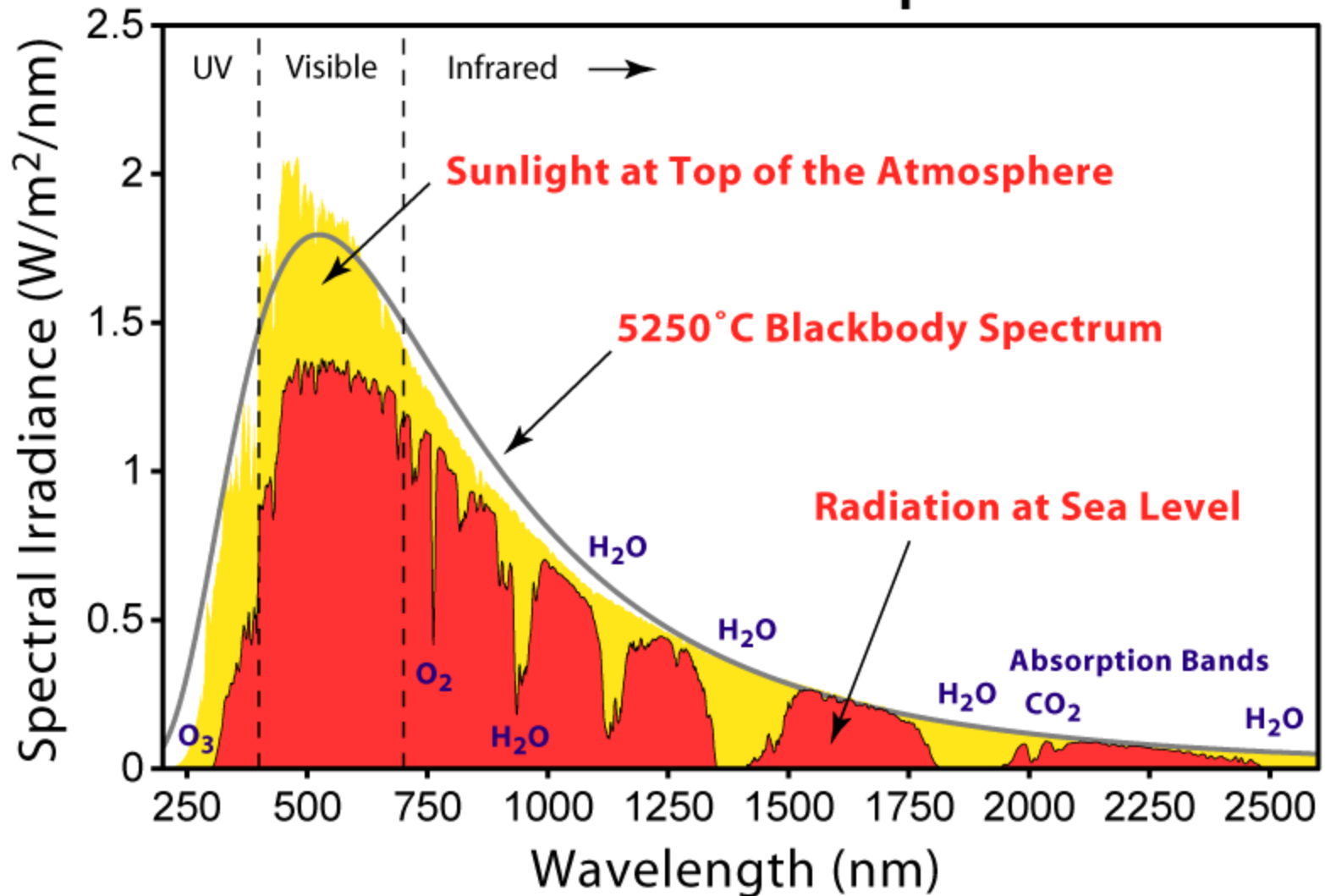


回転しても双極子モーメントの振動は生じない
(電磁波を放射しない=吸収しない)

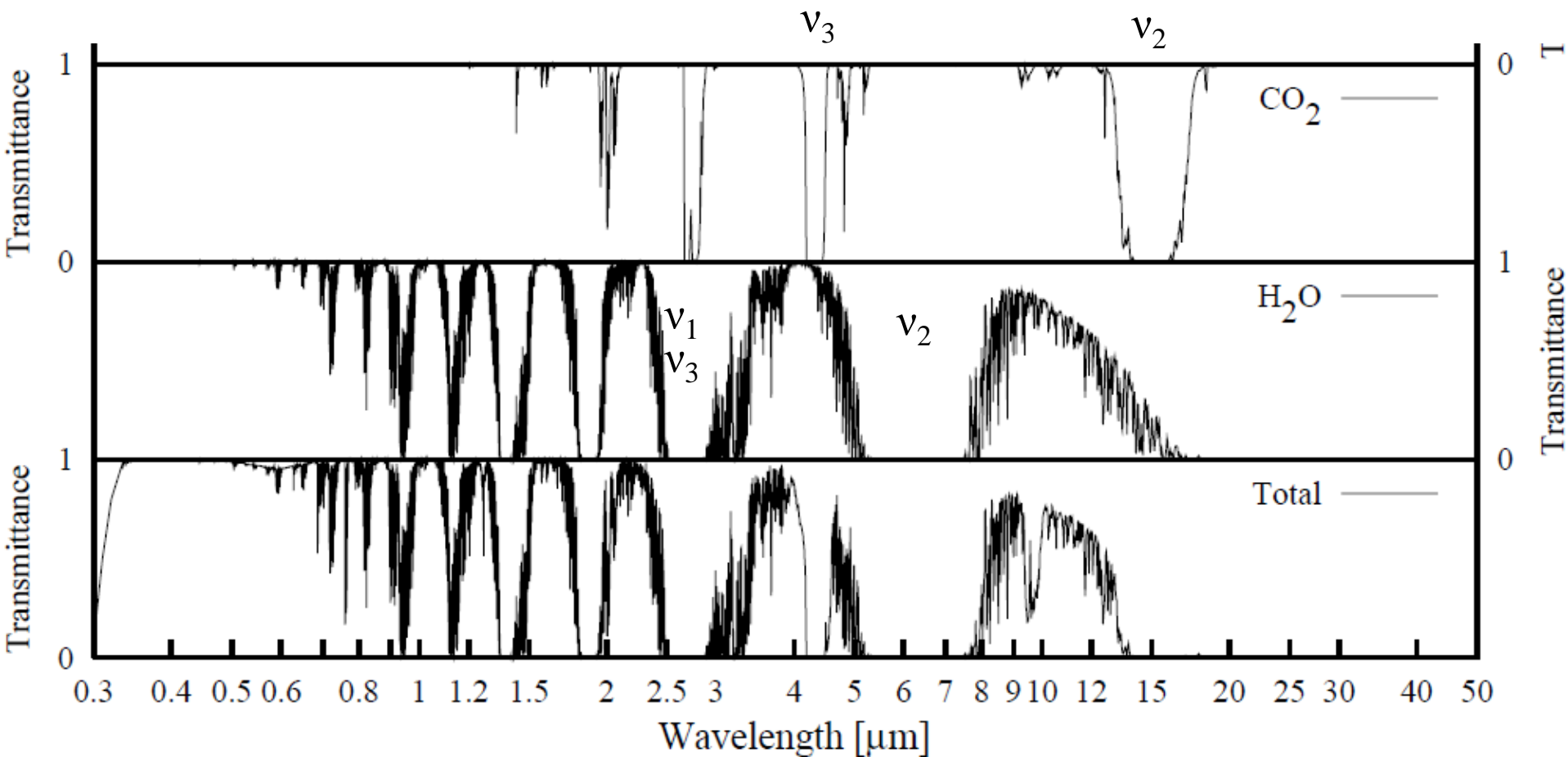


振動しながら回転して初めて、
双極子モーメントが振動

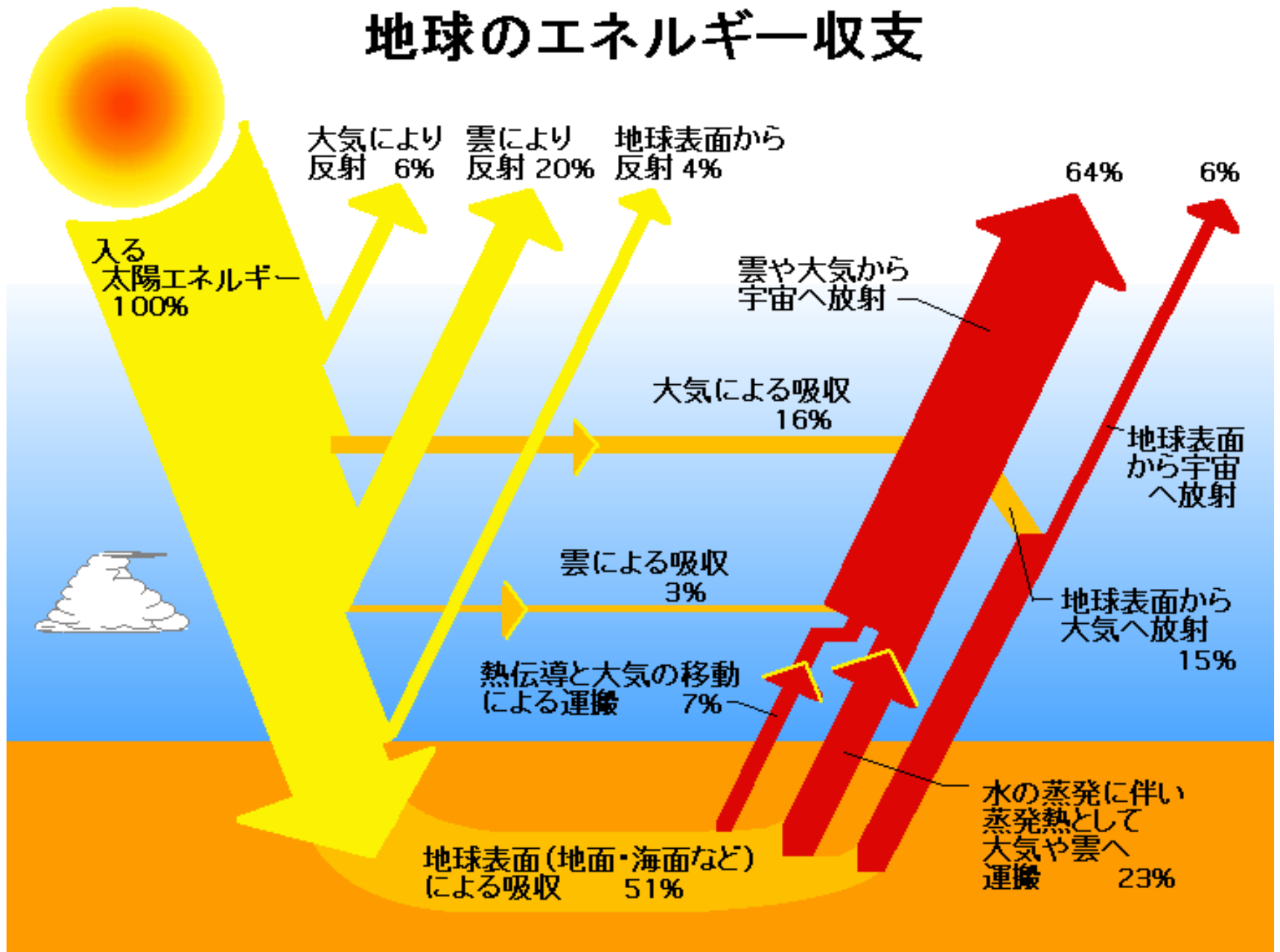
Solar Radiation Spectrum



大気中の二酸化炭素と水の透過率



地球のエネルギー収支



太陽光はエントロピーの低いエネルギー

$$\frac{Q}{T_{\text{Sun}}} \ll \frac{Q}{T_{\text{Earth}}} \quad T_{\text{Sun}} = 6000\text{K} \quad T_{\text{Earth}} = 300\text{K}$$

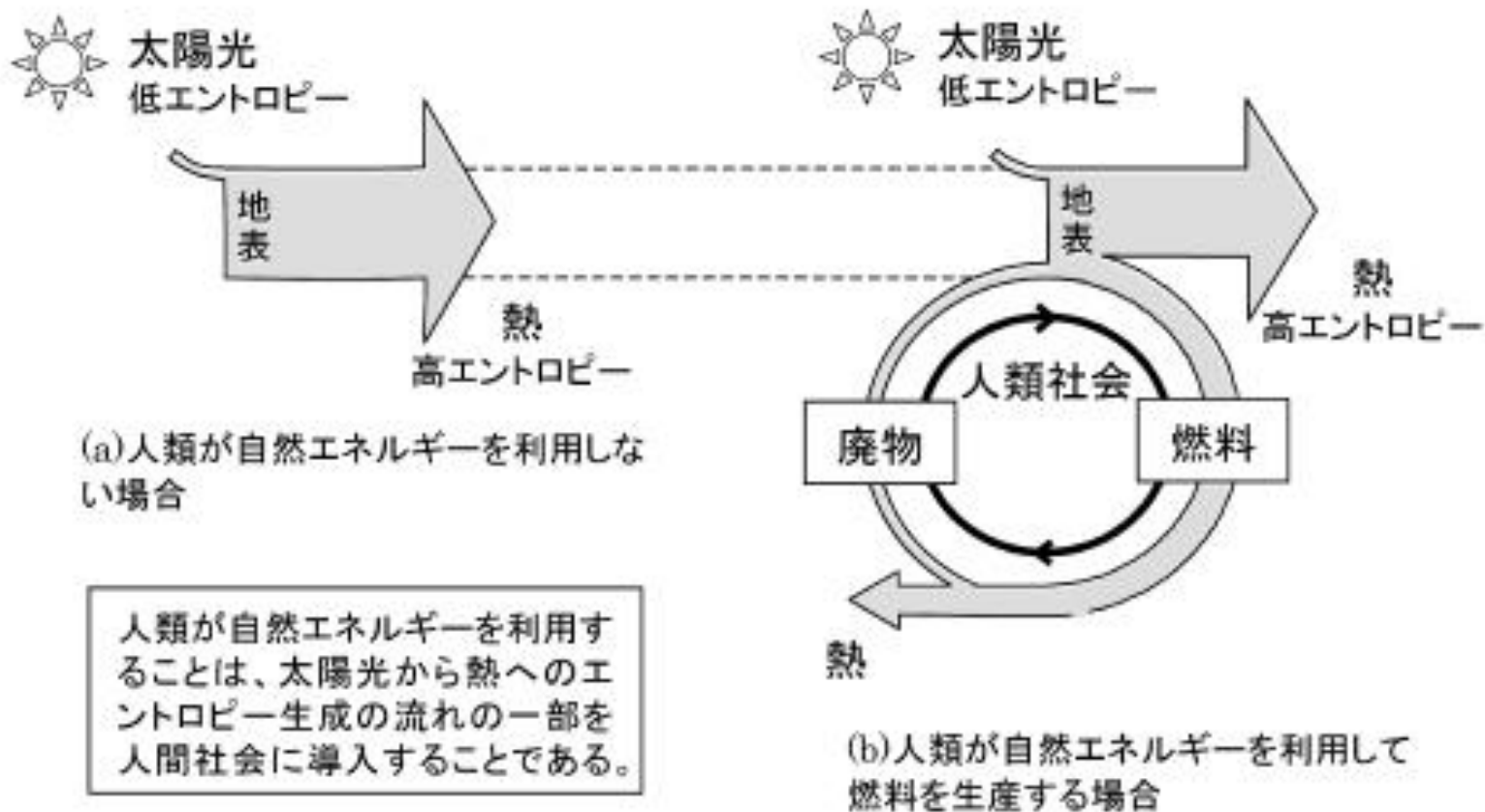
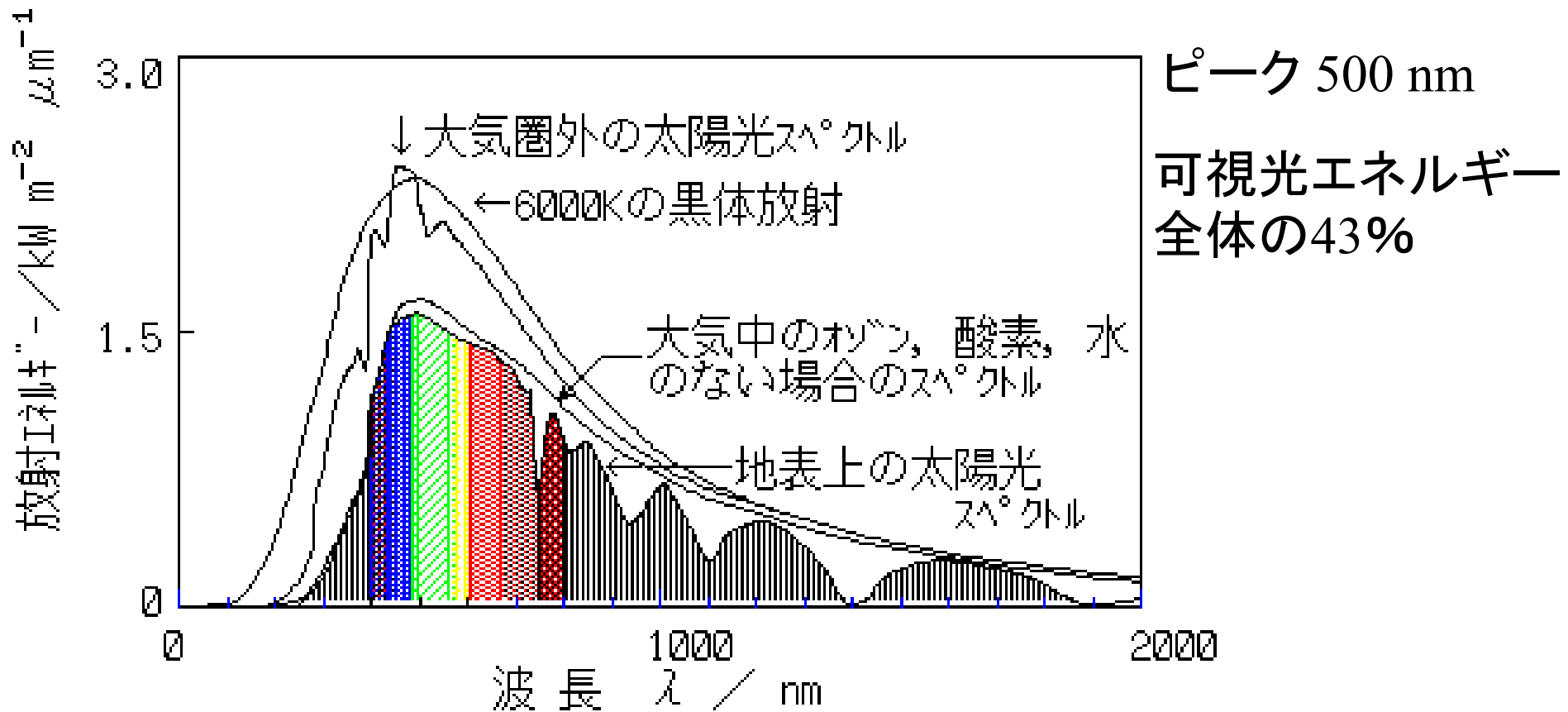


図2 太陽光から熱への変換にともなう全エントロピーの流れの模式図

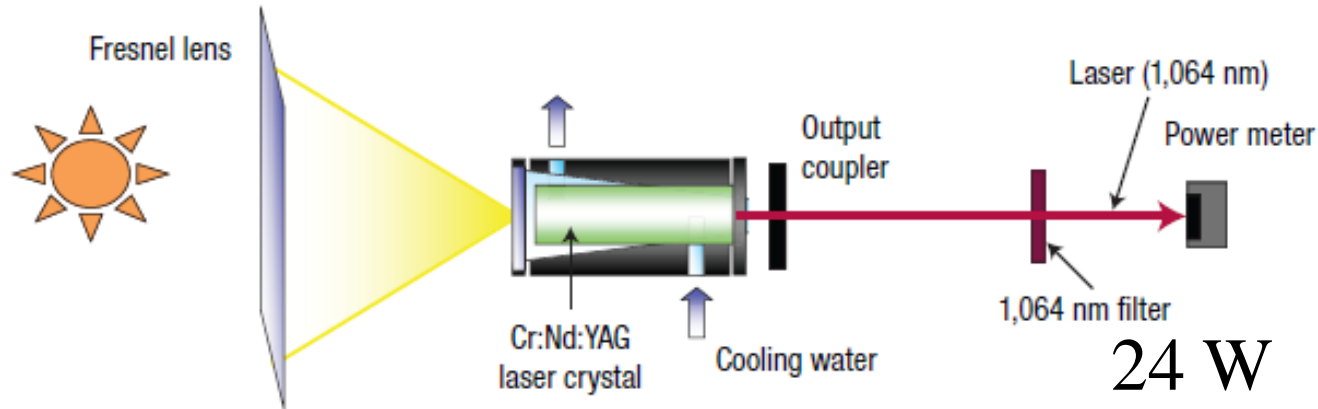
なぜ電磁波の狭いエネルギー範囲
400 nmから700 nmが可視光か？

太陽光のスペクトル



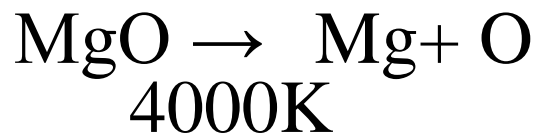
地上のすべてのエネルギーの元(原子力、地熱、潮汐力を除く)

太陽光励起レーザー



24 W
スロープ効率12.5%

Figure 2 A schematic of the solar-powered laser design. A high-performance 1.3-m² Fresnel lens collects the light and a highly efficient, broad-absorption-band chromium-doped Nd:YAG ceramic laser gain medium enables most of the Sun's wide spectrum to be captured.

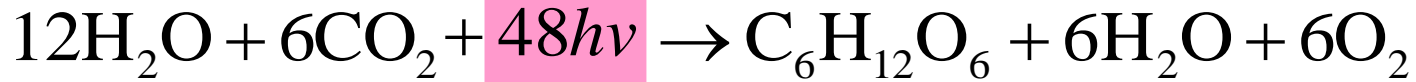


東工大 矢部孝



Figure 1 The test-bed centre at Chitose airport in Hokkaido.

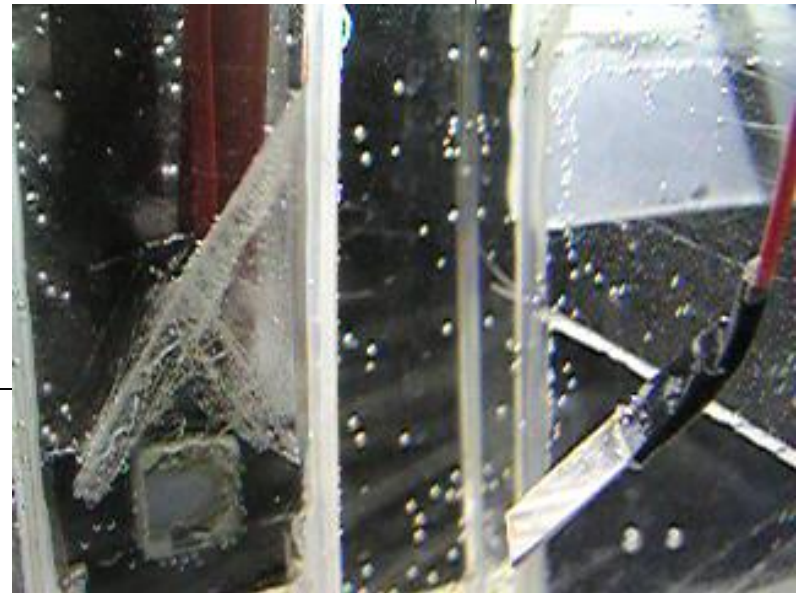
光合成：単一光子を利用するナノ分子デバイス



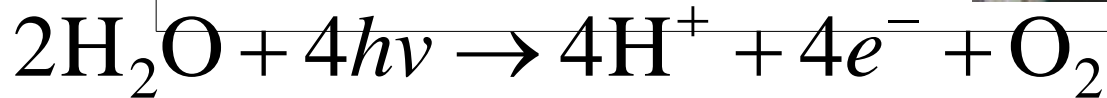
光子変換効率100% エネルギー変換効率34% at 1.8eV

人工光合成(可視光による水の光分解)
光子変換効率(量子効率) < 3%

酸化チタン-白金



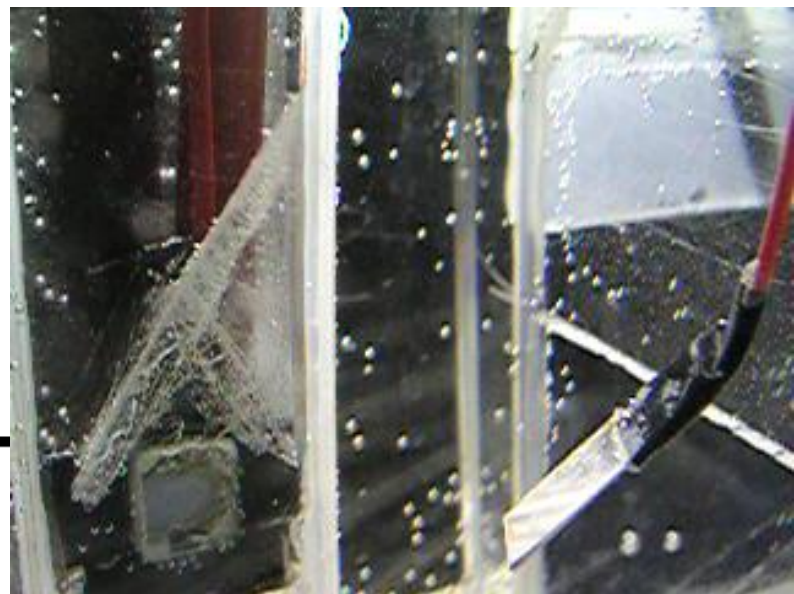
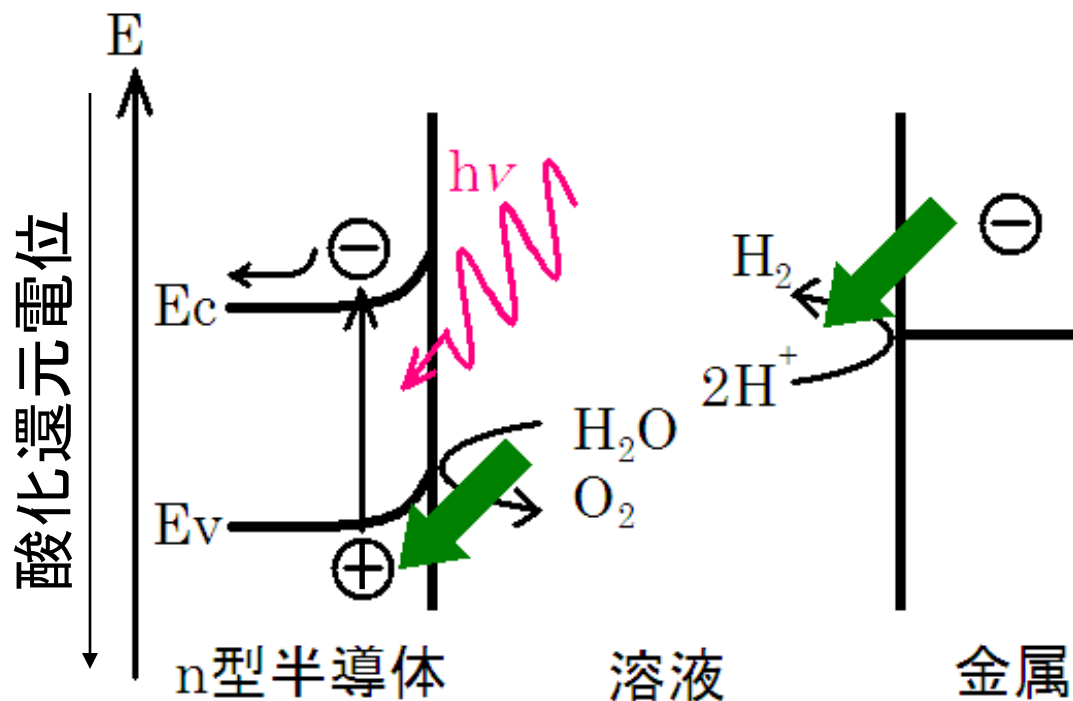
光合成初期過程(光化学系II)



酵素(hydrogenase, $\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{H}^+$)により水素発生可能

人工光合成 半導体光触媒による水の光分解

量子効率 < 2~3%



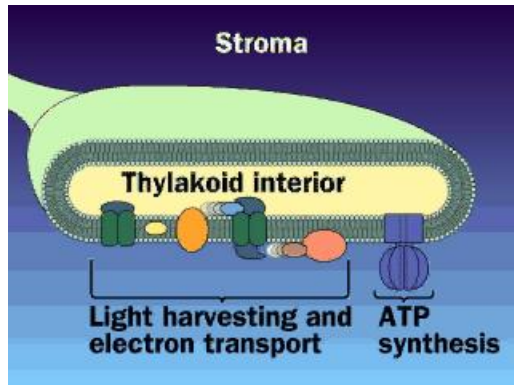
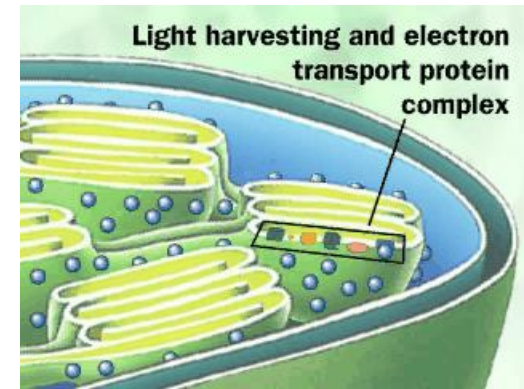
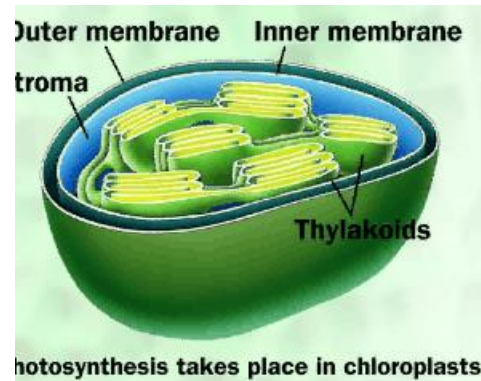
酸化チタン-白金

半導体表面の空間電荷層の電位勾配により電荷分離

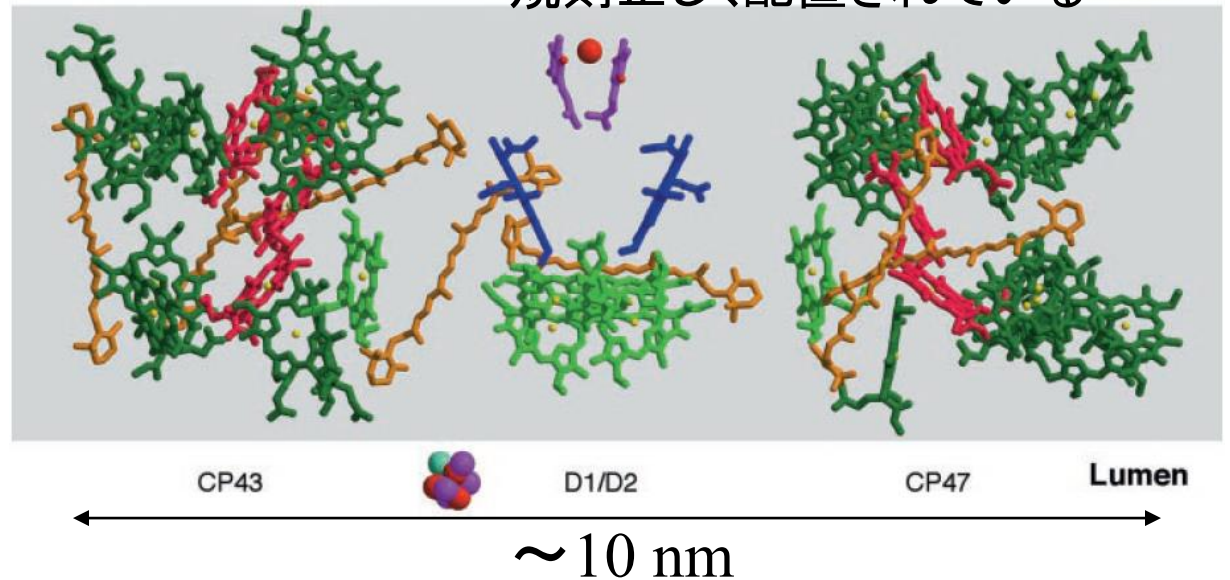
光合成



植物細胞中の葉緑体



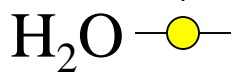
A 光化学系II 蛋白質立体構造の中に色素が規則正しく配置されている Stroma



真空

イオン化エネルギー $12.6 \text{ eV} = 98 \text{ nm}$

電子エネルギー

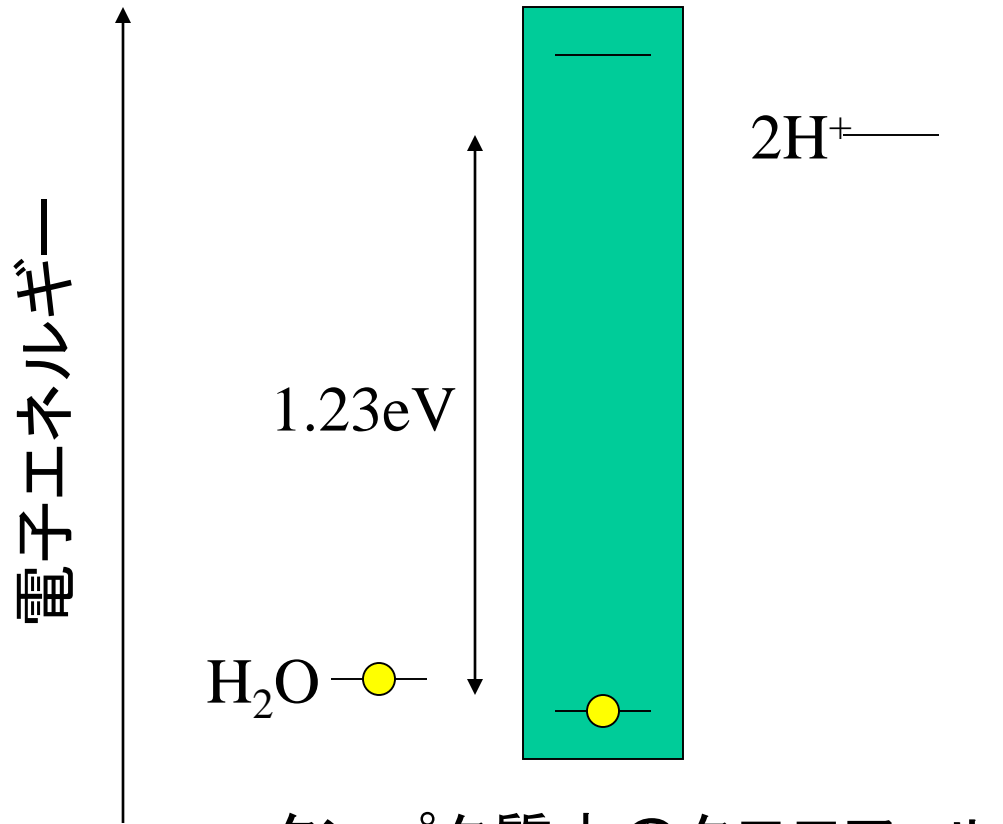


水は非常に安定な分子
水の電子は安定(エネルギーが低い)

可視光の光を吸収しない(電子を励起できない)
ので光で水から電子を引き抜くのは困難

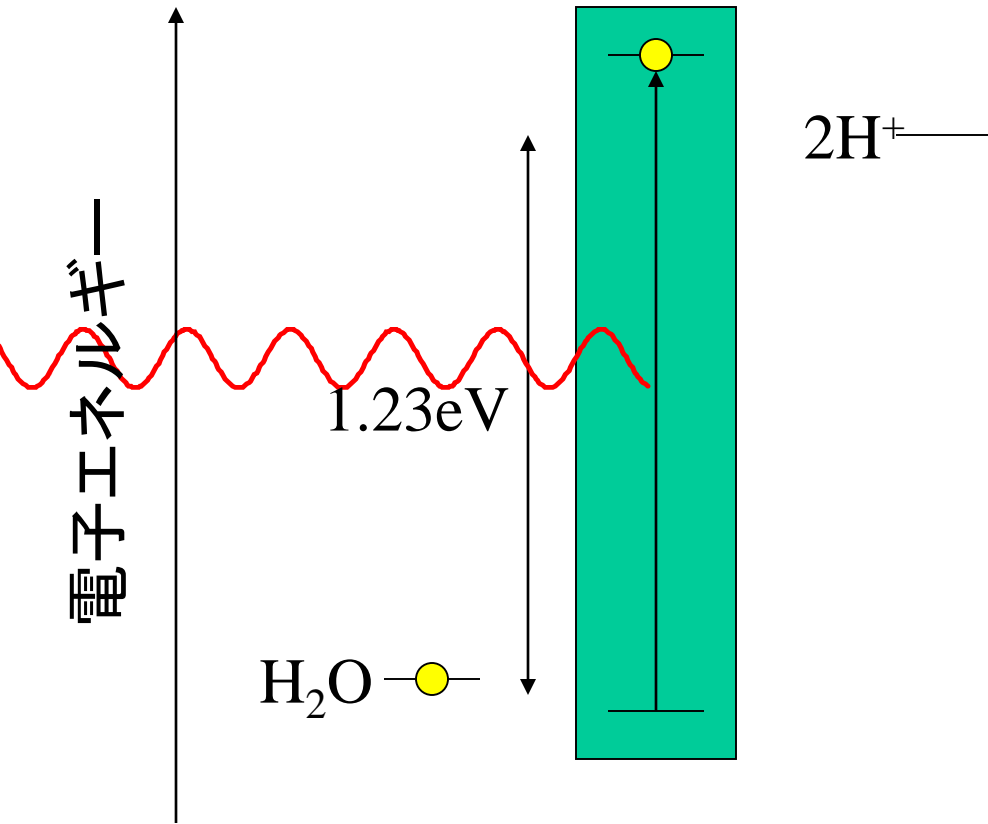
そこで **光増感剤**

光増感剤

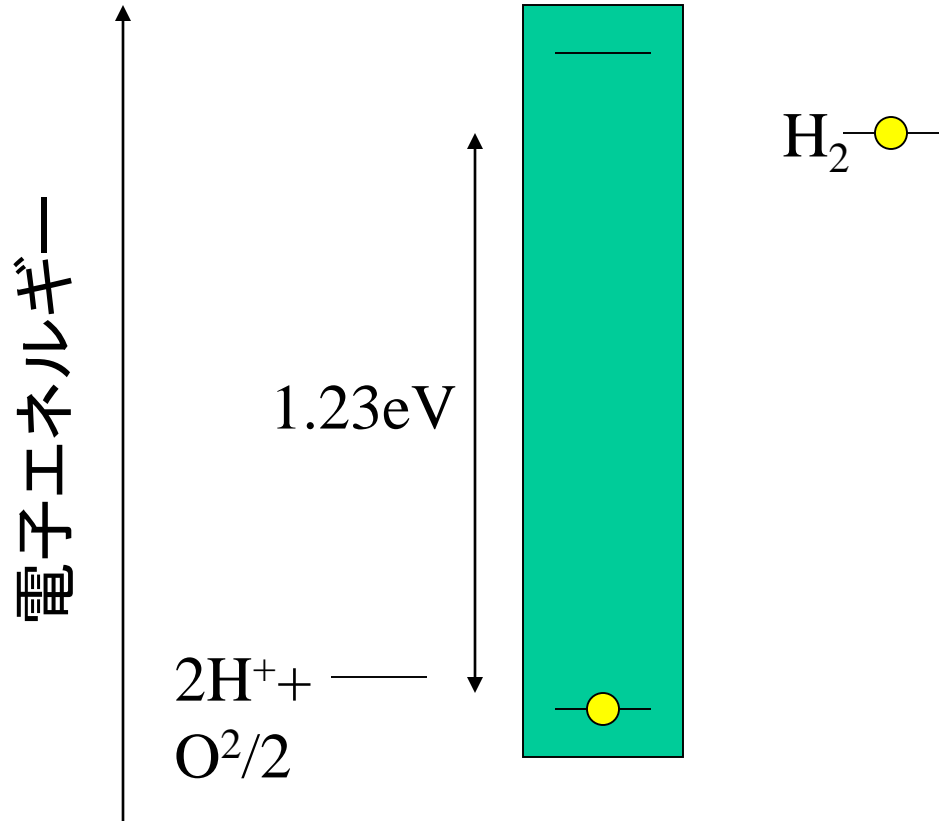


タンパク質中のクロロフィル
半導体 (SrTiO₃)

光増感剤



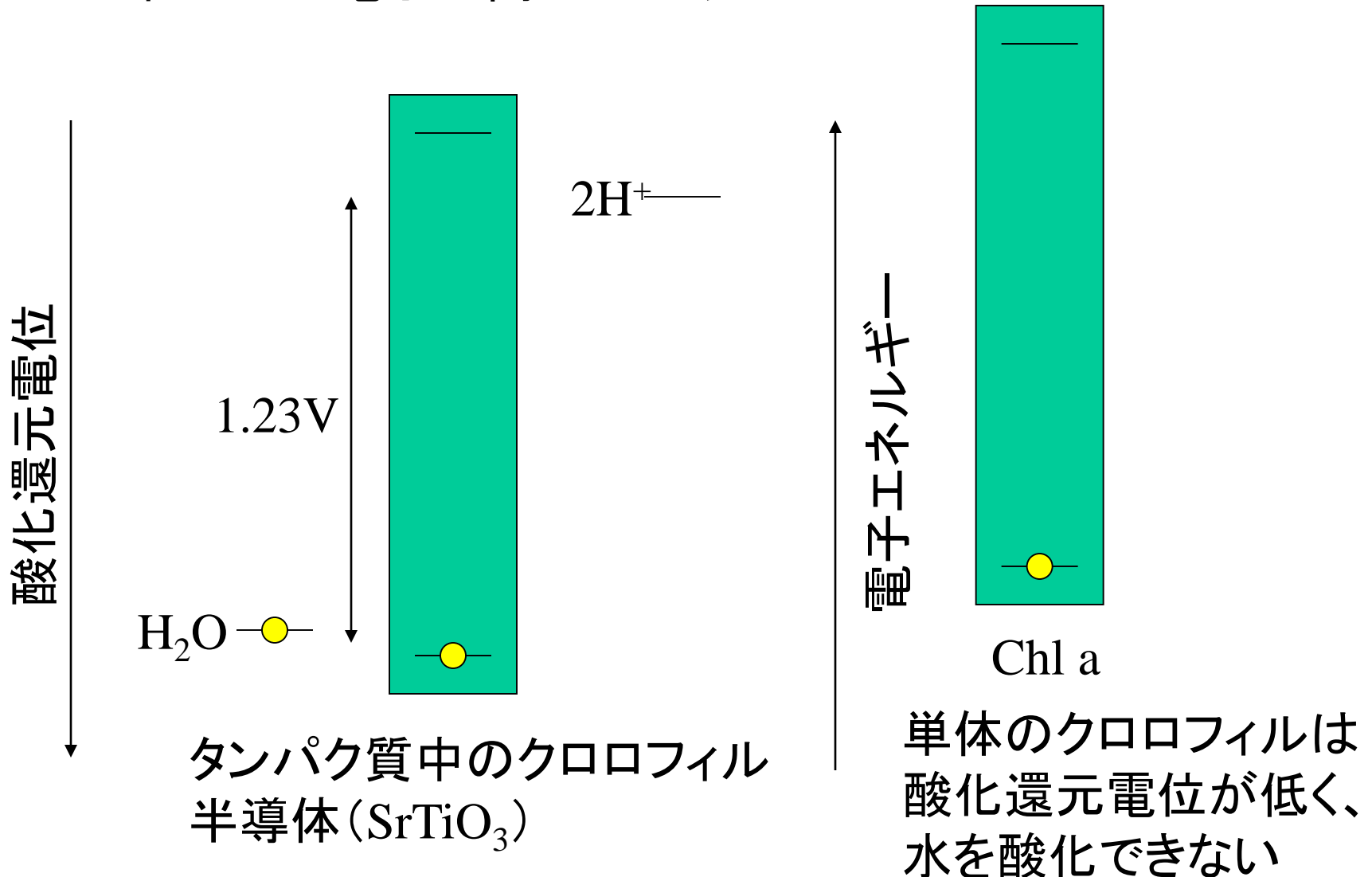
光増感剤



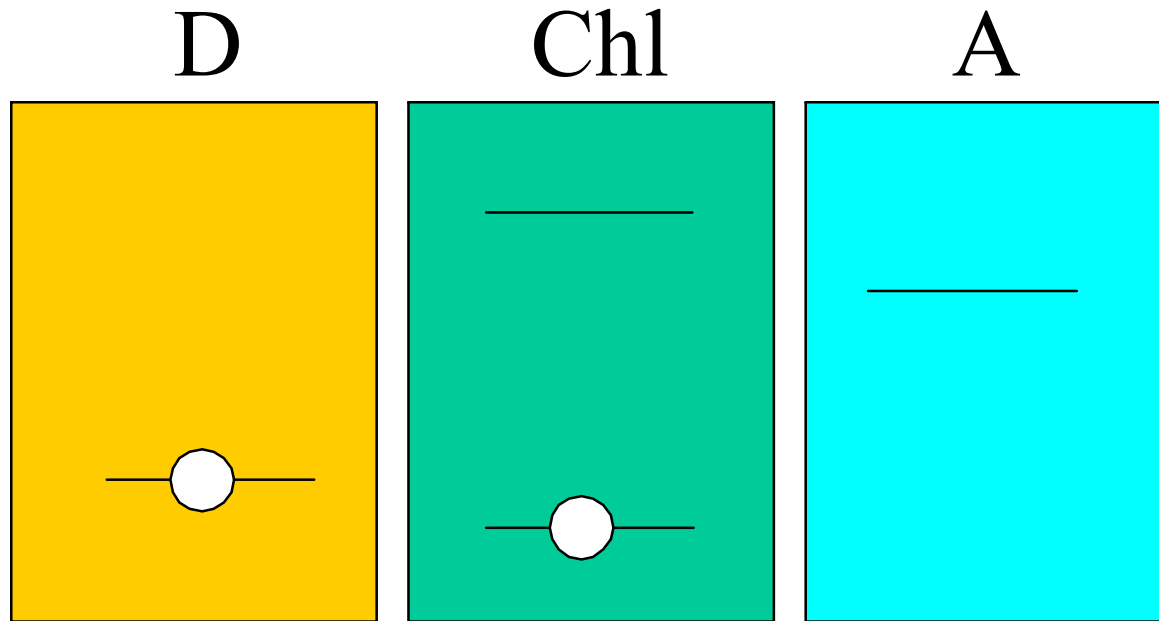
酸化還元電位

高いほど電子を引き抜きにくい
低いほど電子が高エネルギー

電子がより安定

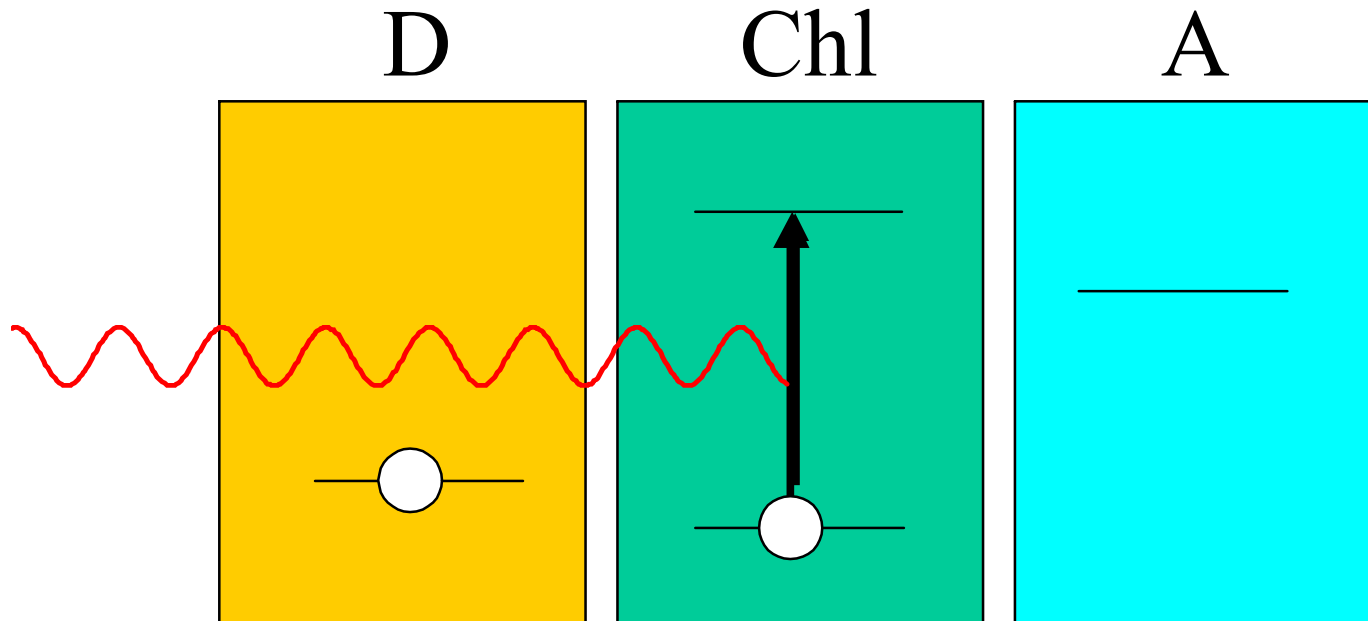


光合成のしくみ 電荷分離



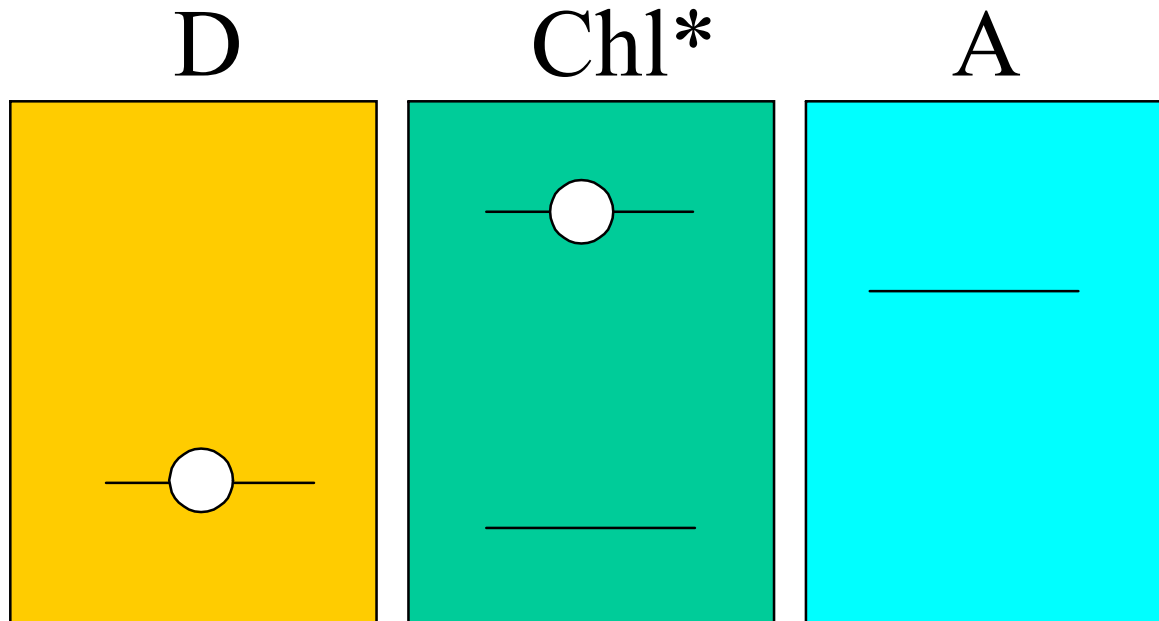
反応中心(RC)

光合成のしくみ 電荷分離



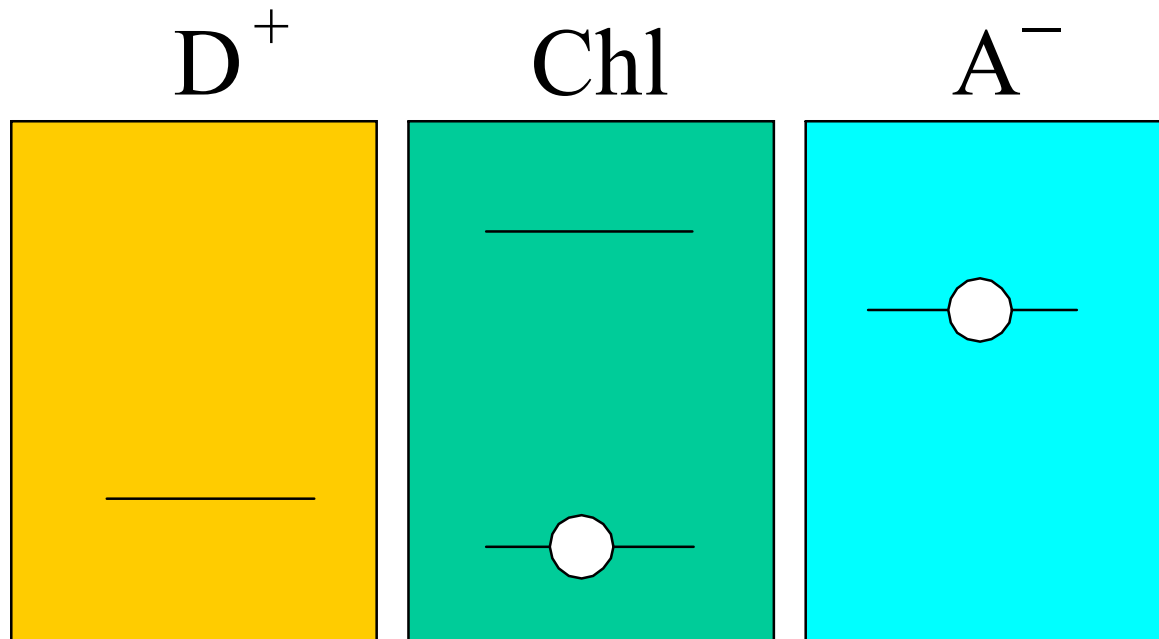
反応中心(RC)

光合成のしくみ 電荷分離



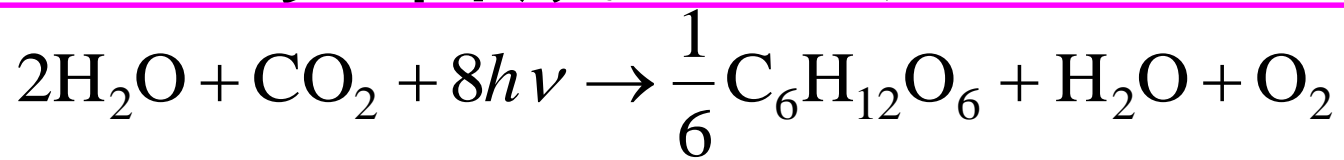
反応中心(RC)

光合成のしくみ 電荷分離

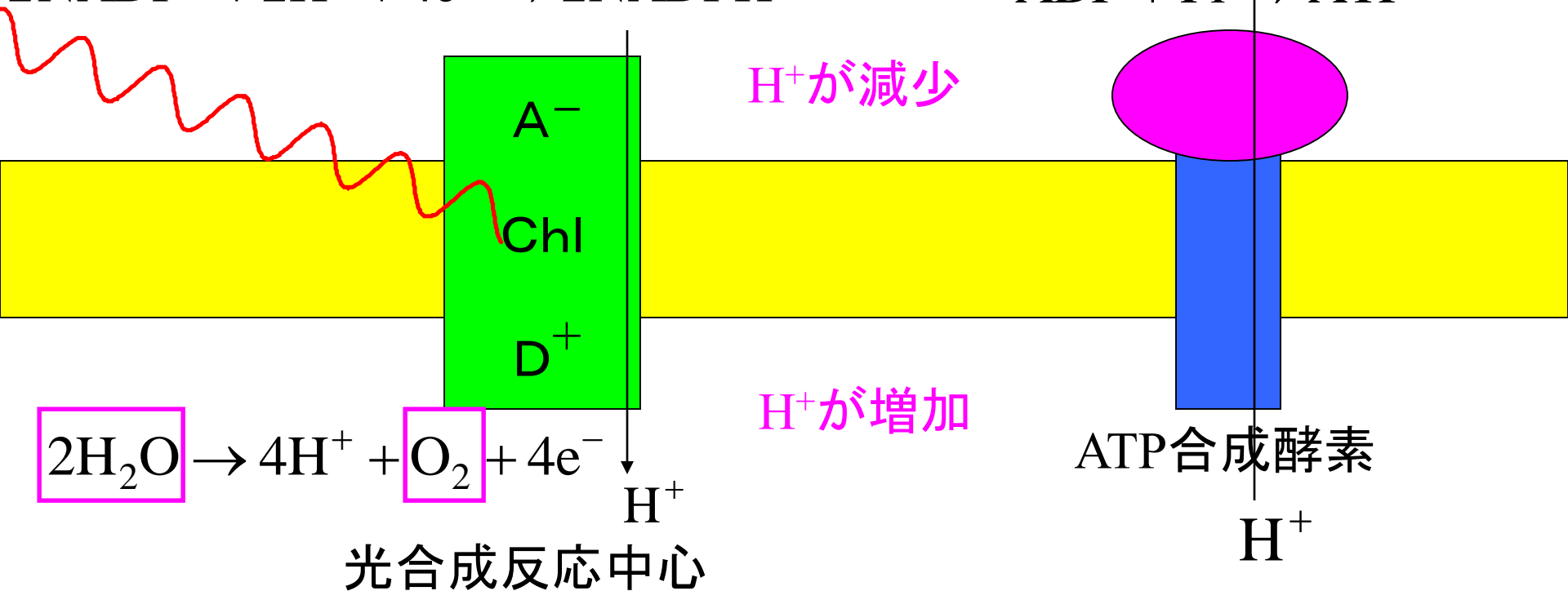
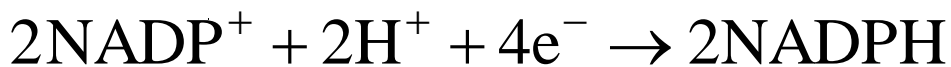


反応中心(RC)

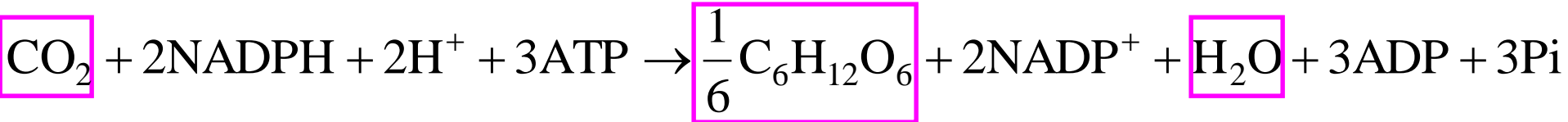
光合成のしくみ



明反応



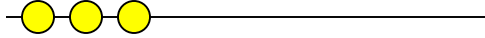
暗反応



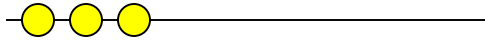
なぜ高い量子効率が実現できるのか？

量子効率

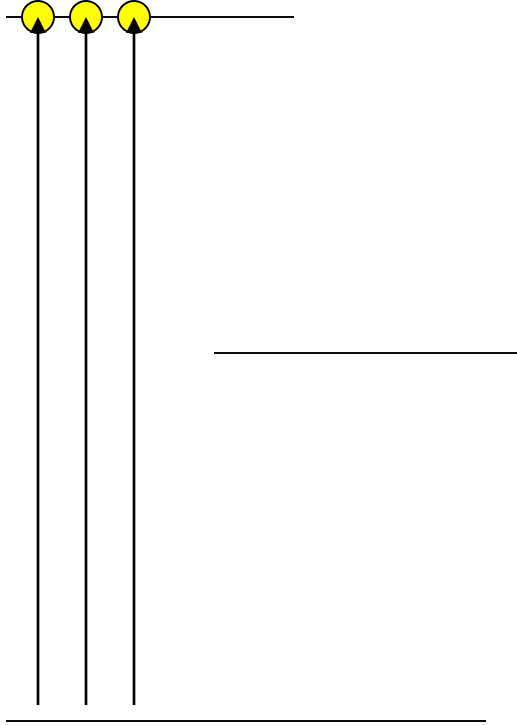




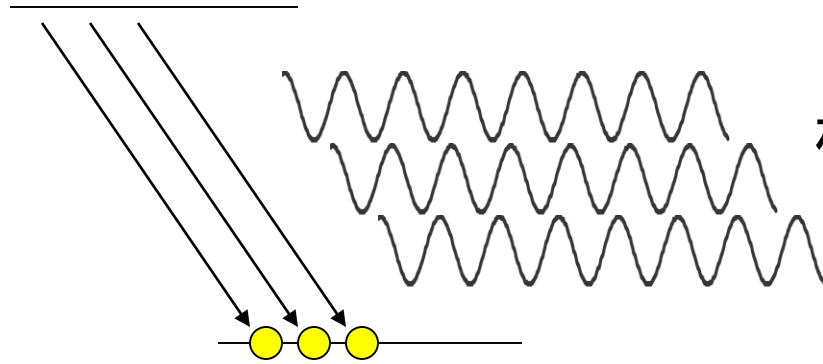
量子效率



量子效率

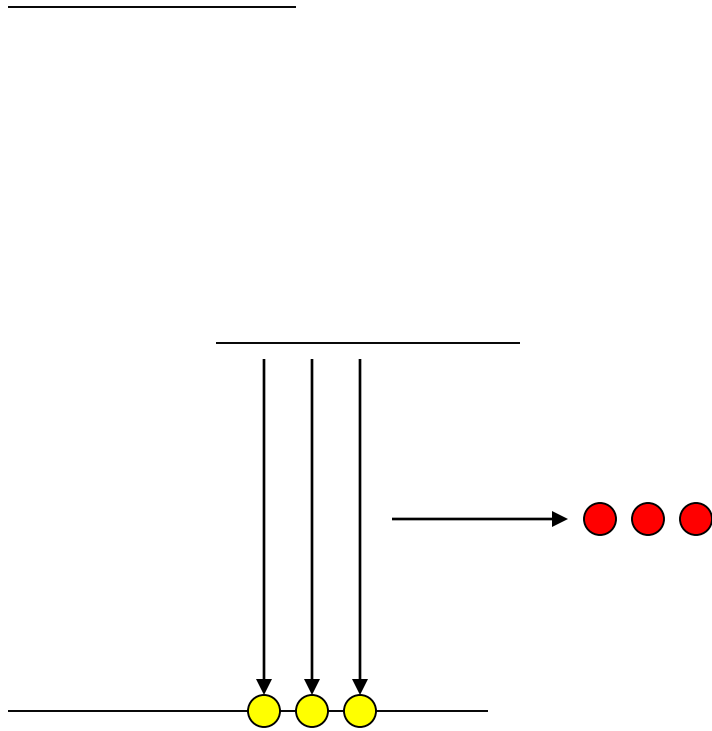


量子効率



格子振動のエネルギー
(無輻射緩和)

量子効率

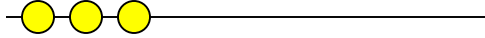


$$\text{発光量子効率} = \frac{\text{出射光子数}}{\text{入射光子数}} = 100\%$$

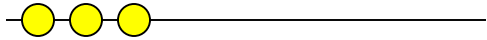
$$\text{発光エネルギー効率} = \frac{\text{出射光子エネルギー}}{\text{入射光子エネルギー}} = 50\%$$

量子効率

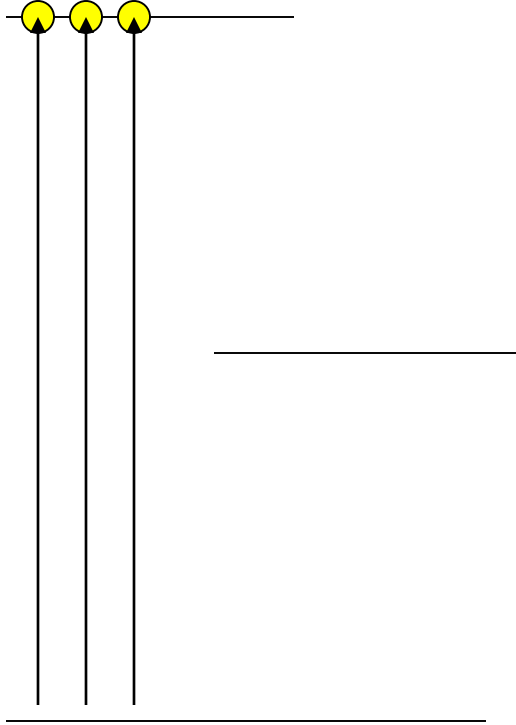




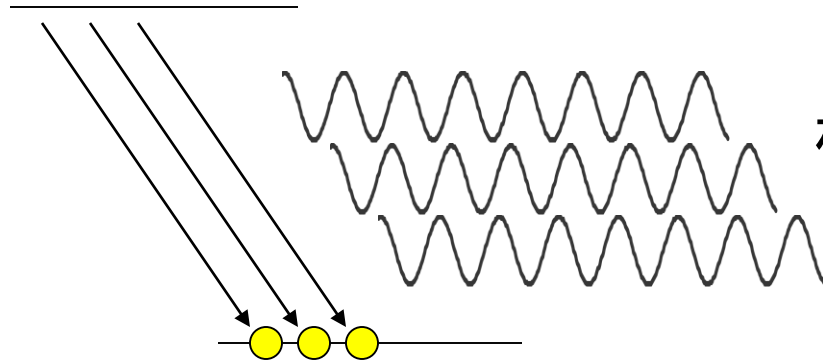
量子效率



量子效率

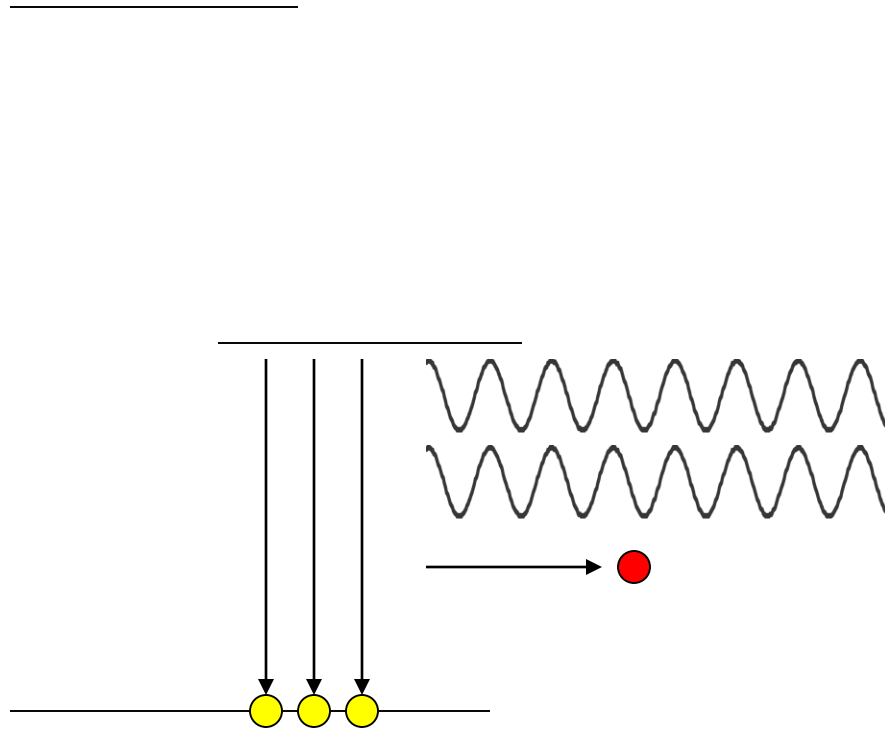


量子効率



格子振動のエネルギー
(無輻射緩和)

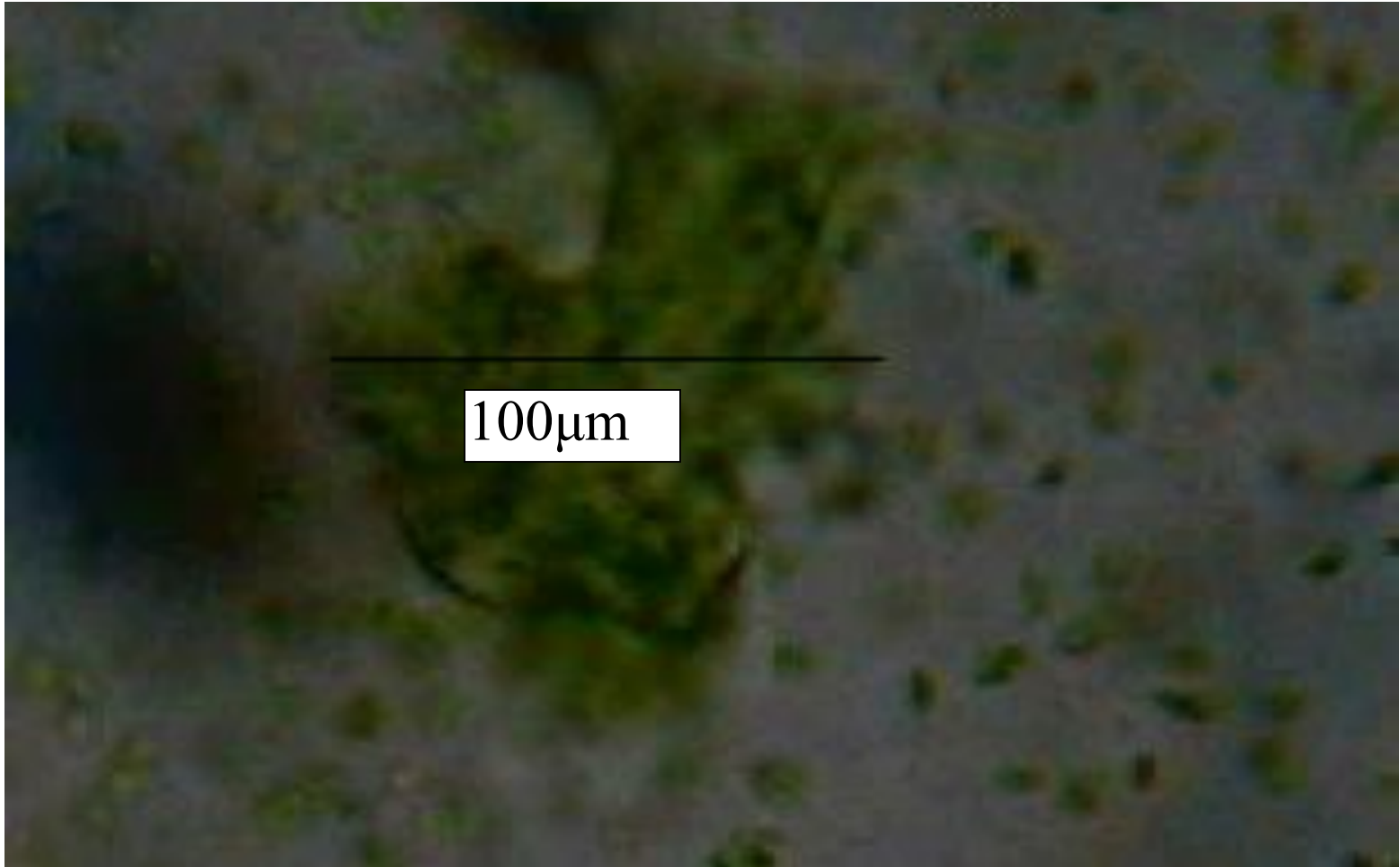
量子効率



$$\text{発光量子効率} = \frac{\text{出射光子数}}{\text{入射光子数}} = 33\%$$

$$\text{発光エネルギー効率} = \frac{\text{出射光子エネルギー}}{\text{入射光子エネルギー}} = 17\%$$

ほうれん草から抽出した葉緑体

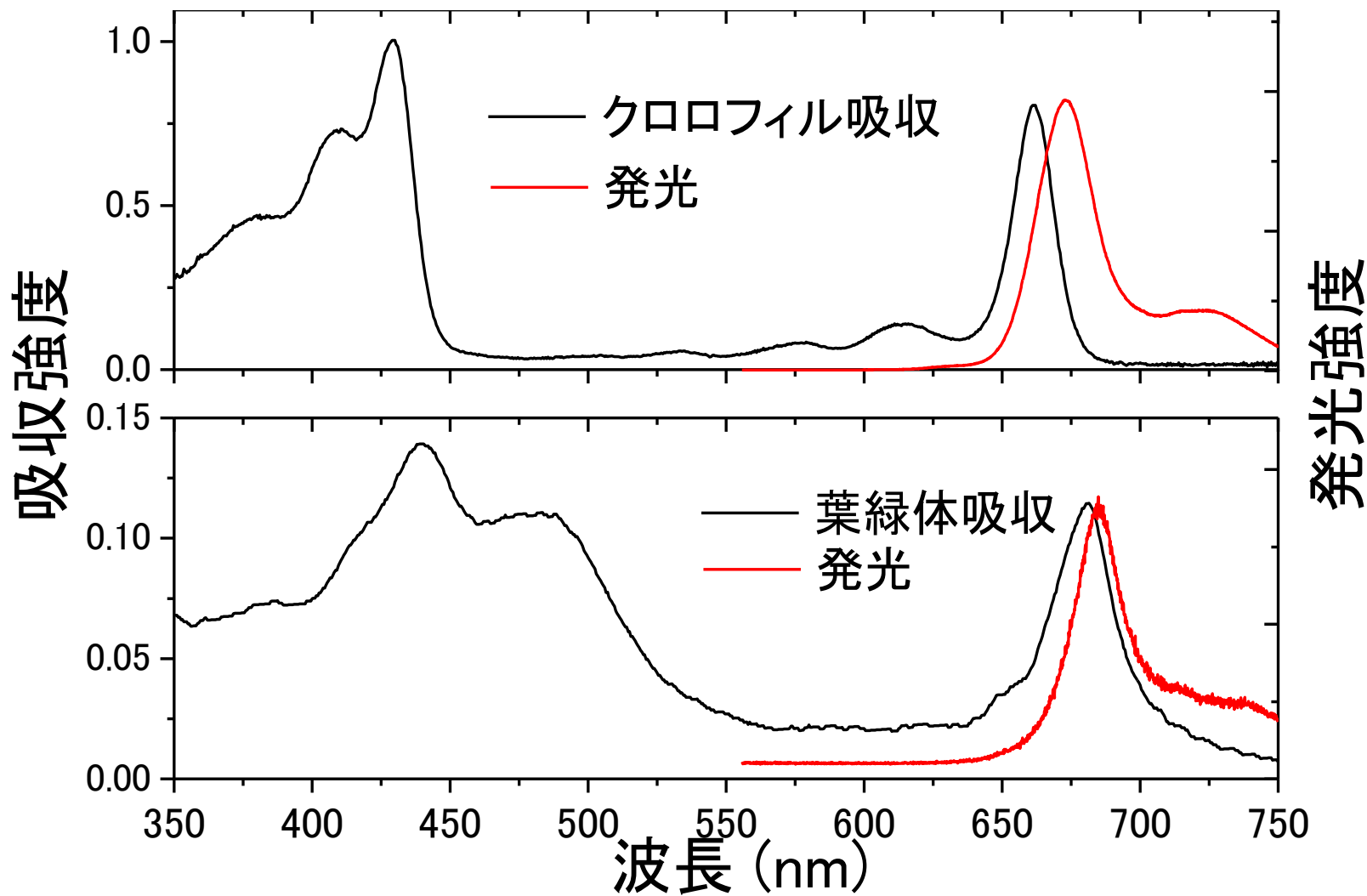


葉緑体の発光

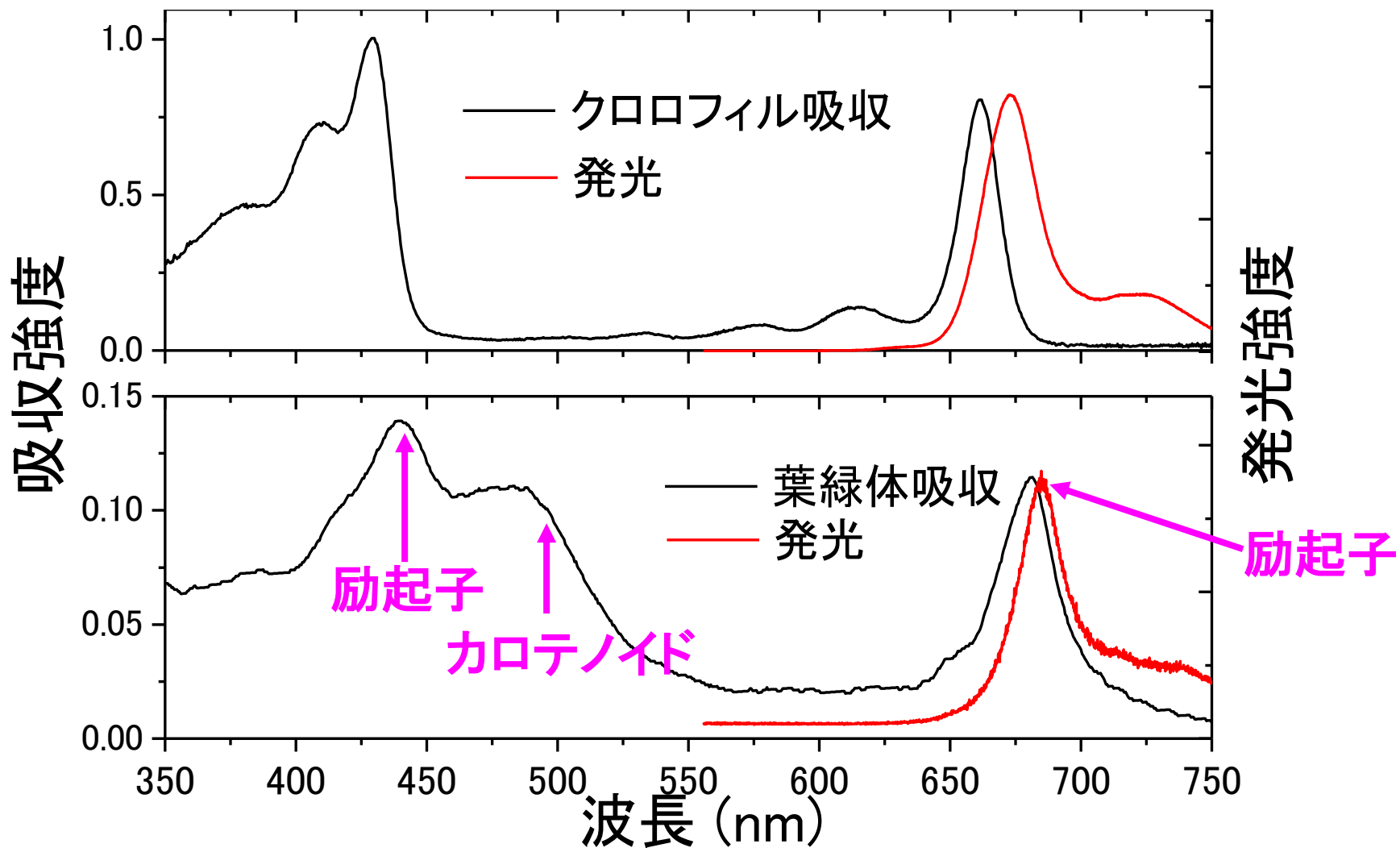


50μm

クロロフィルと葉緑体の分光測定



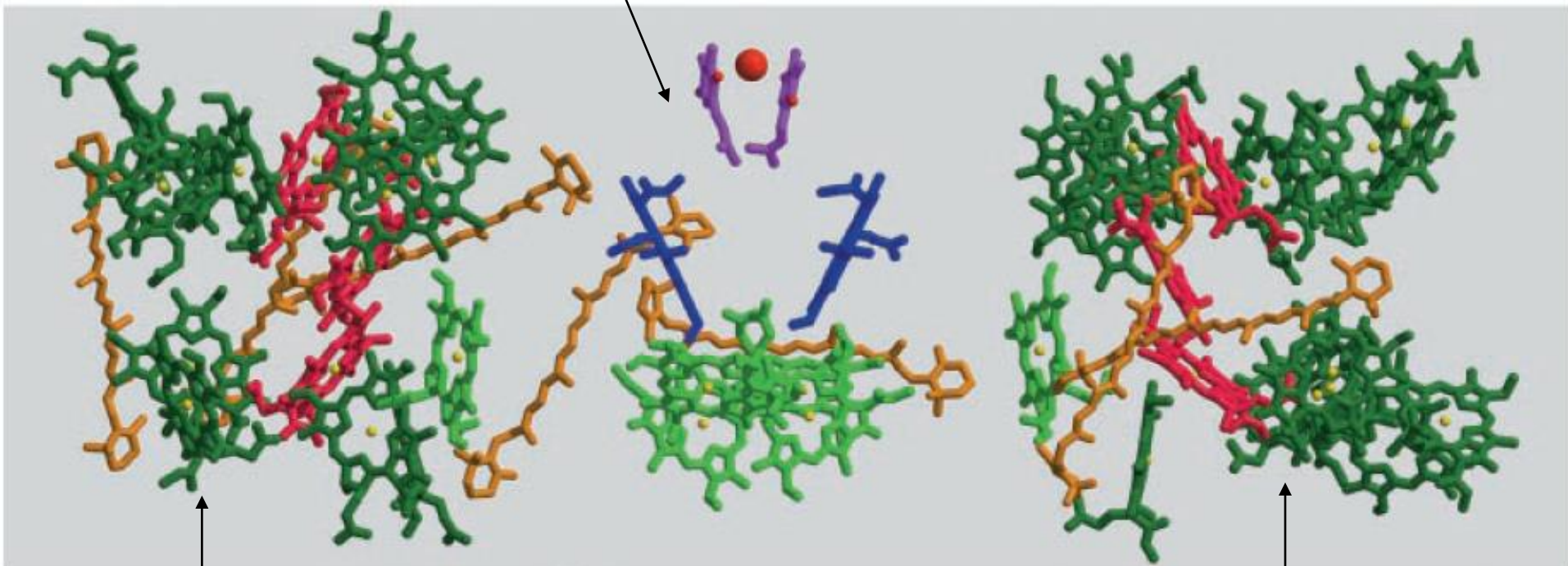
クロロフィルと葉緑体の分光測定



光化学系II (Photosystem II)

反応中心(RC)

Stroma



CP43

D1/D2

CP47

Lumen

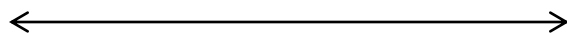
クロロフィル会合体
(アンテナ系)

マンガンクラスター(水を分解)

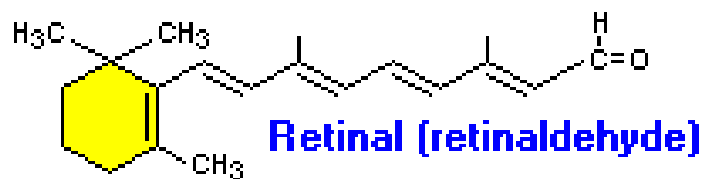
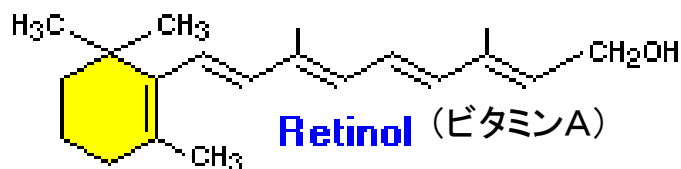
クロロフィル会合体
(アンテナ系)

カロテノイド

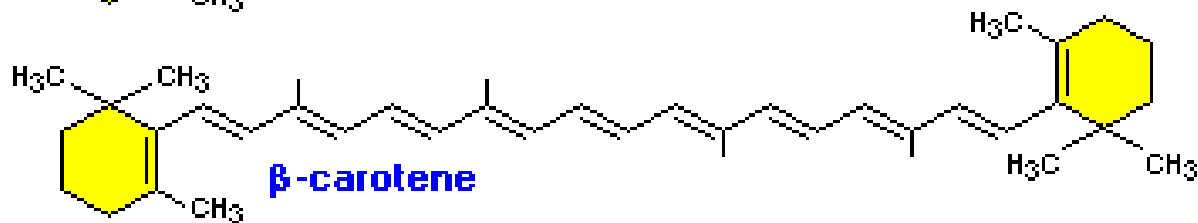
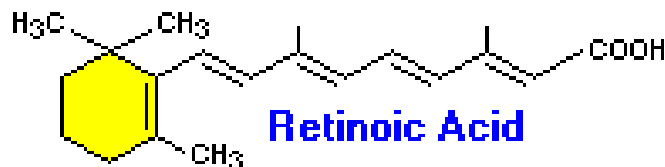
~10Å



1nm=10⁻⁹m=10Å

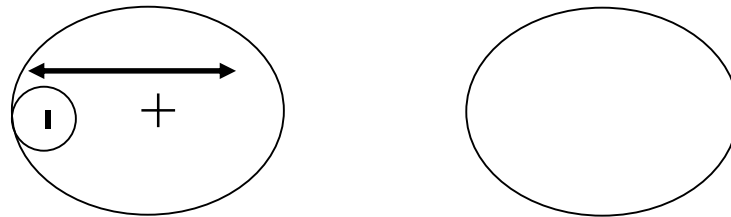


レチナール



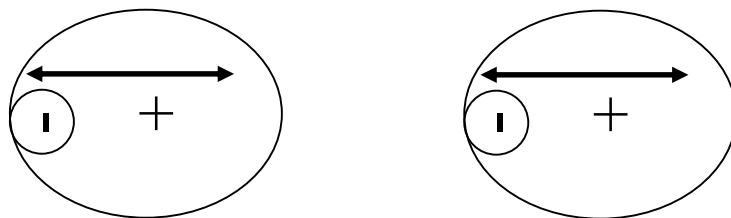
“励起子”の説明

分子が近接しているとき



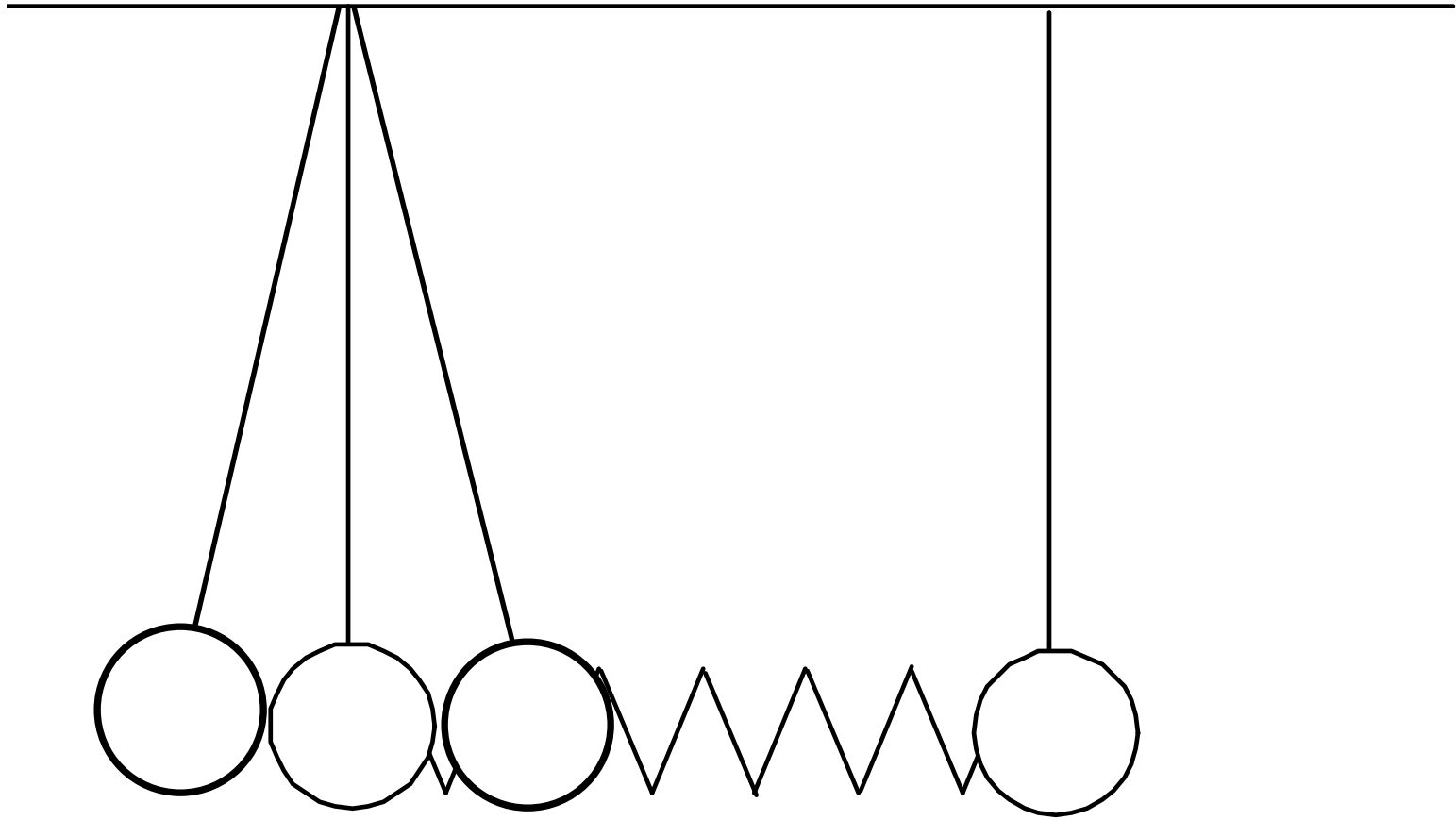
分子の中で
電子が振動

分子が近接しているとき

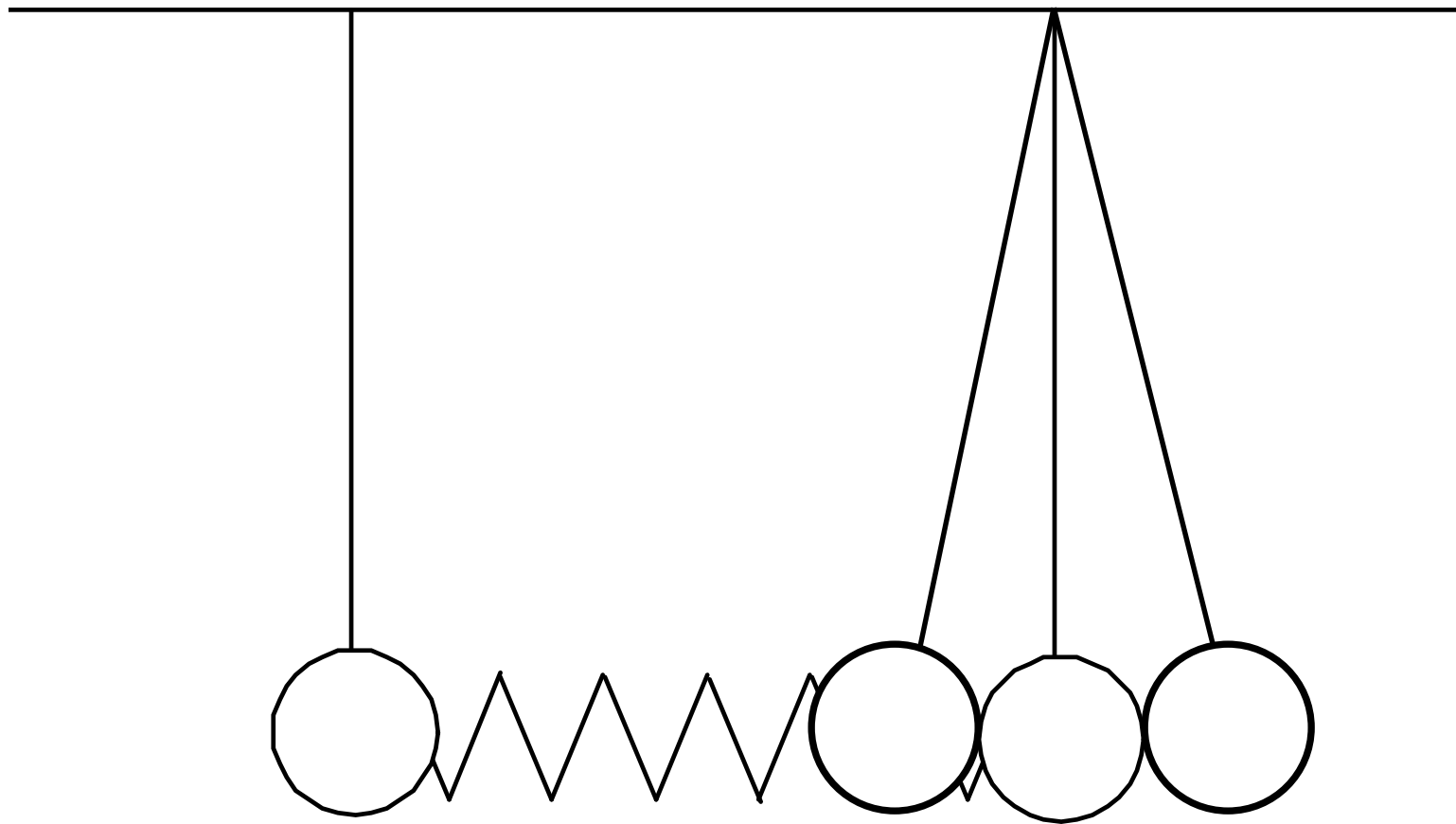


分子の中で
電子が振動

共鳴エネルギー移動

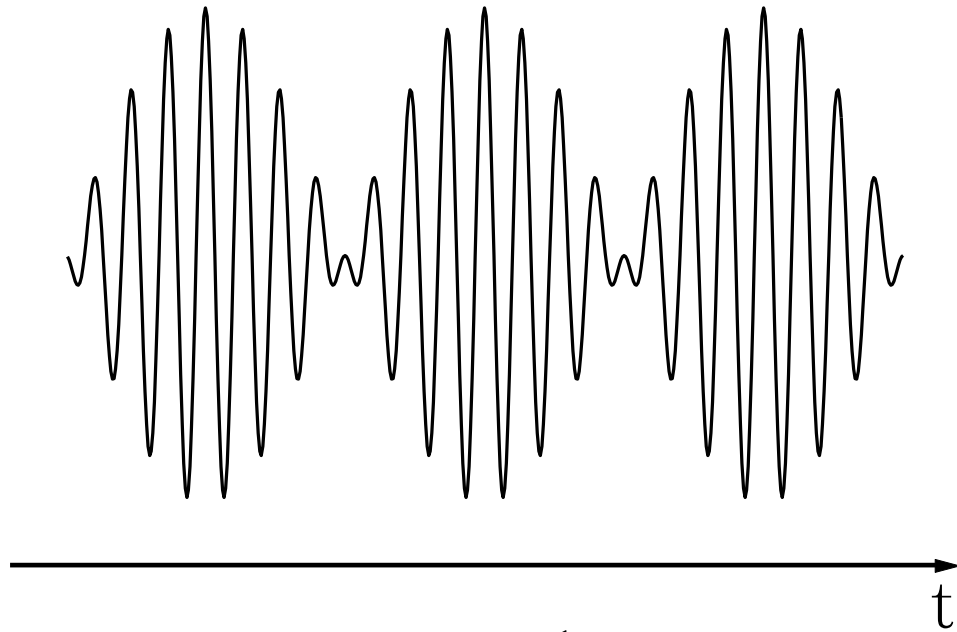


共鳴エネルギー移動



エネルギーの分裂

固有周波数 ω の2つの振動子が結合すると



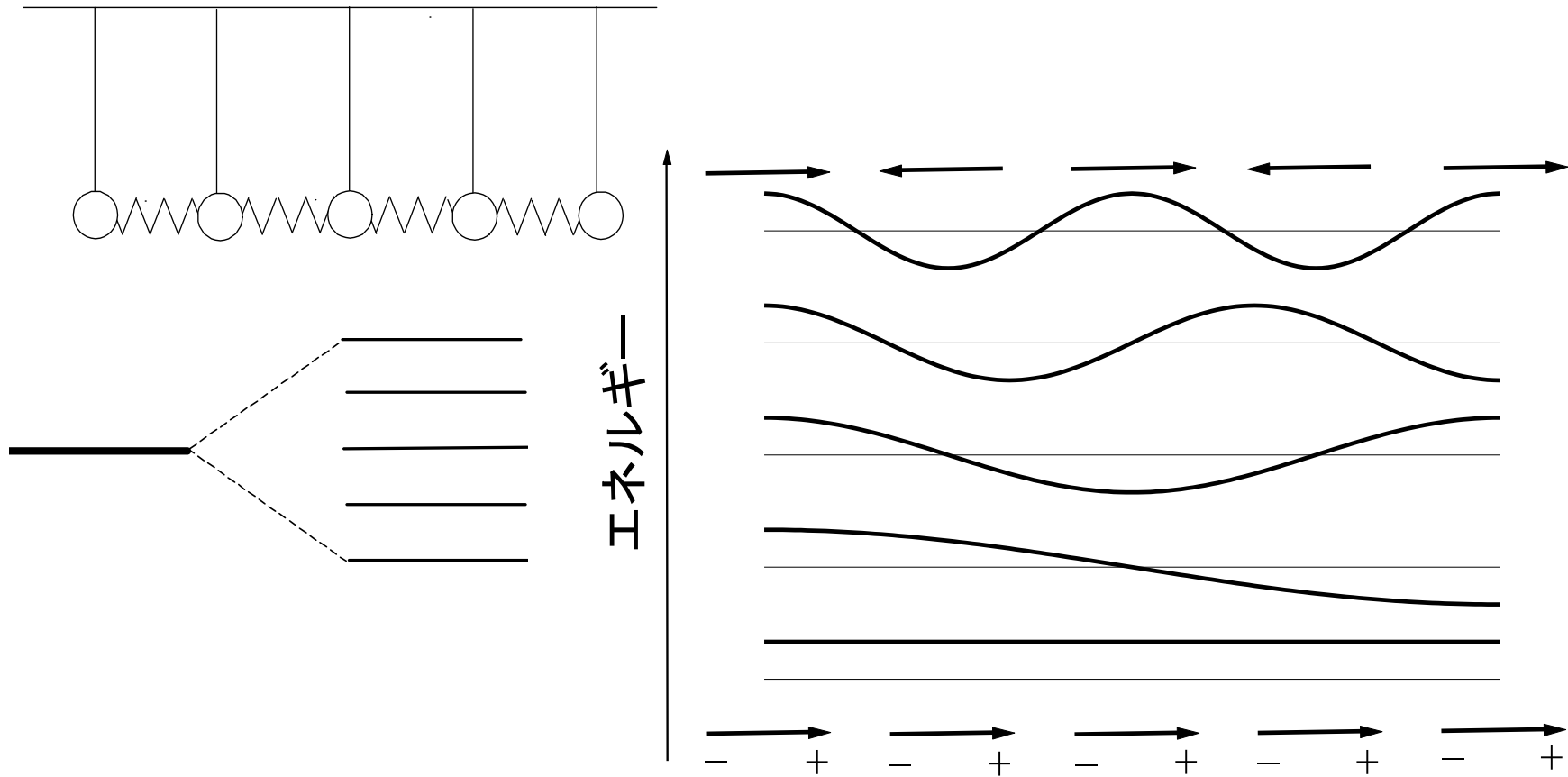
$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$\hbar\omega$ ———— $\hbar(\omega + \Omega)$
 $\hbar(\omega - \Omega)$

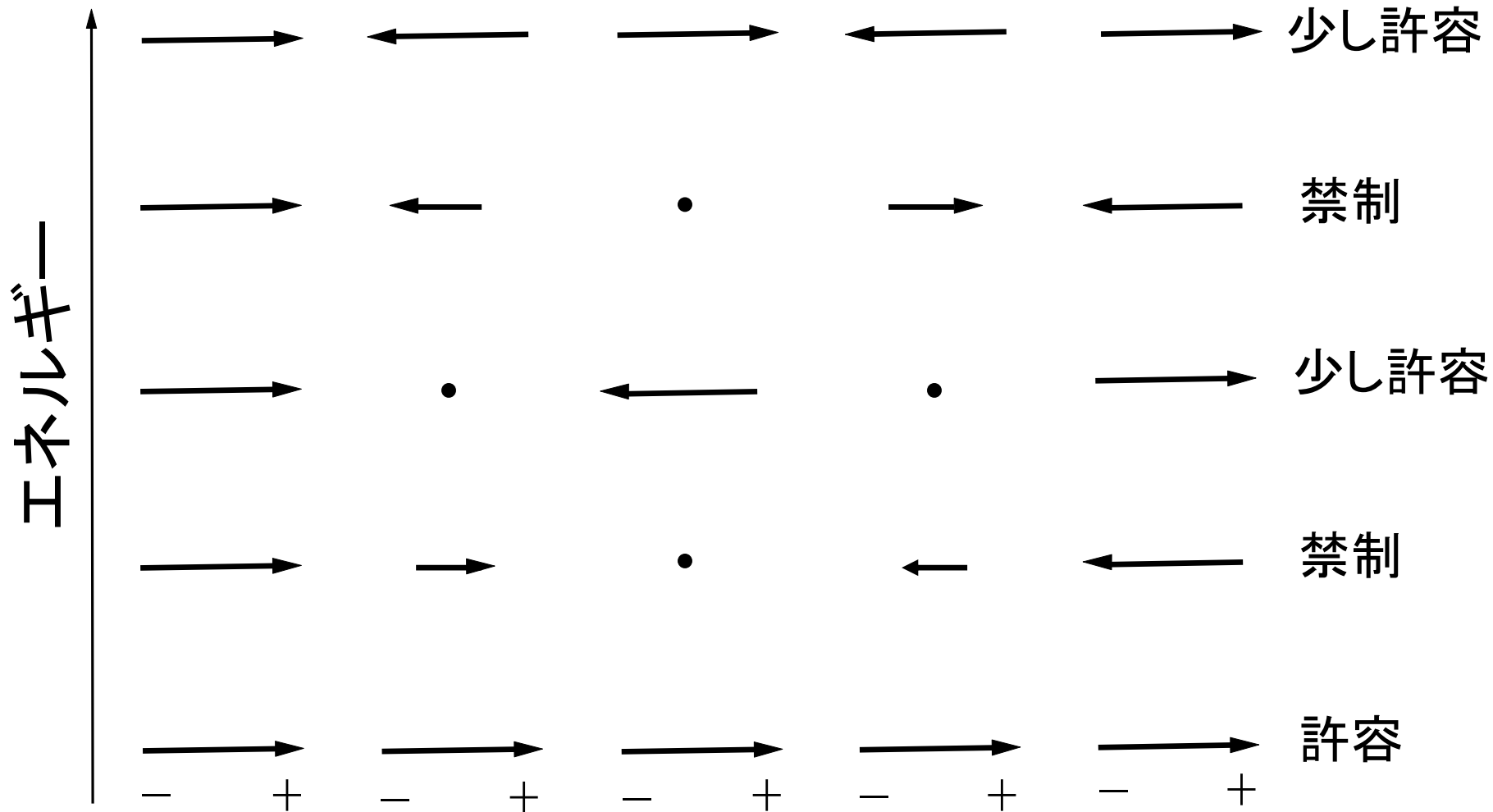
$$\cos \Omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} [\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t]$$

Ω : 相互作用が大きいほど大

分子間の共鳴エネルギー移動 = 励起子



基底状態から励起子への光学遷移



光との電気双極子相互作用があるのは一部を除き最低励起状態のみ
 大きな双極子モーメント → 単量体と比べて遷移強度の増大

励起子光学遷移



遷移双極子モーメント 5倍に見えるが...

波動関数の規格化が必要

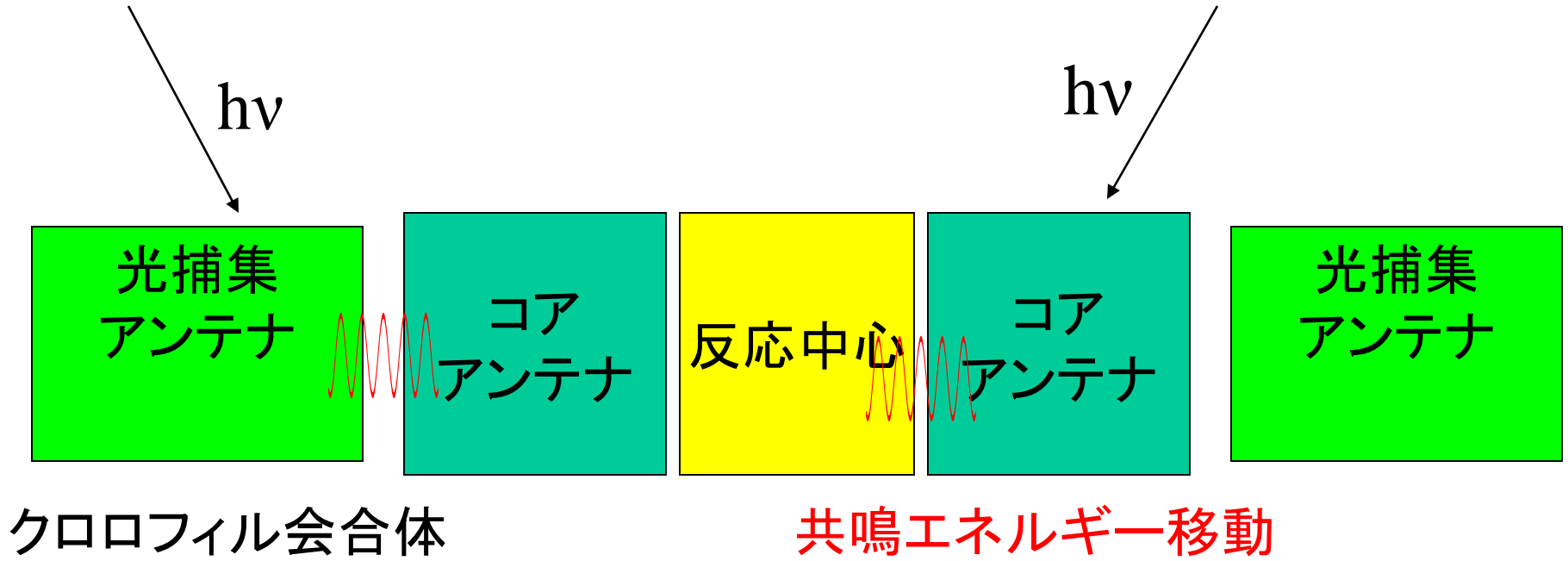
$$\frac{1}{\sqrt{5}} \left(\text{--->} \quad \text{--->} \quad \text{--->} \quad \text{--->} \quad \text{--->} \right)$$

遷移双極子モーメントは $\sqrt{5}$ 倍

遷移強度 \propto |遷移双極子モーメント|² は5倍

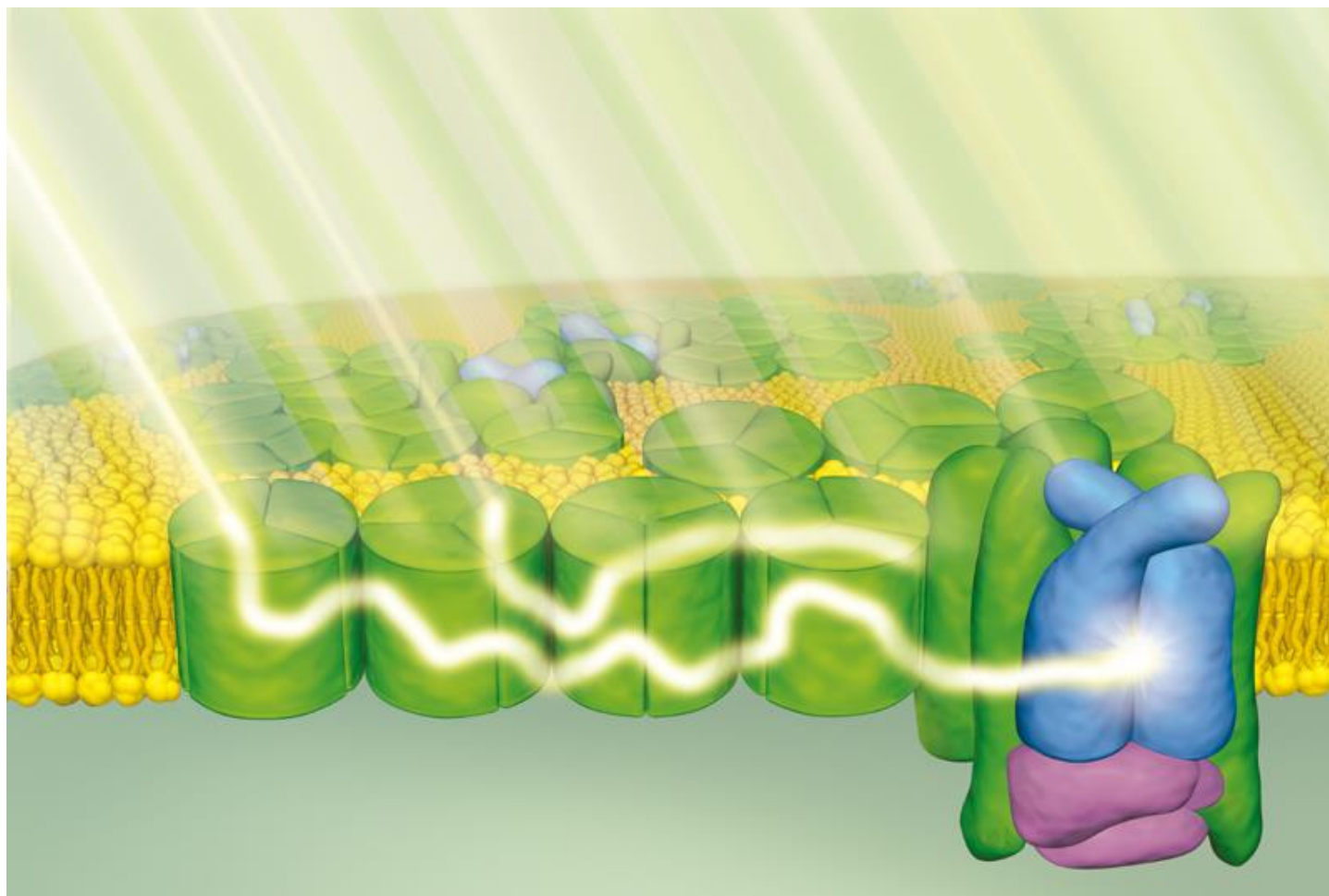
N個の分子配列による励起子 遷移強度はN倍に増大

光捕集アンテナ



エネルギー移動の量子効率 $\sim 100\%$

“励起子”がエネルギー移動を担う



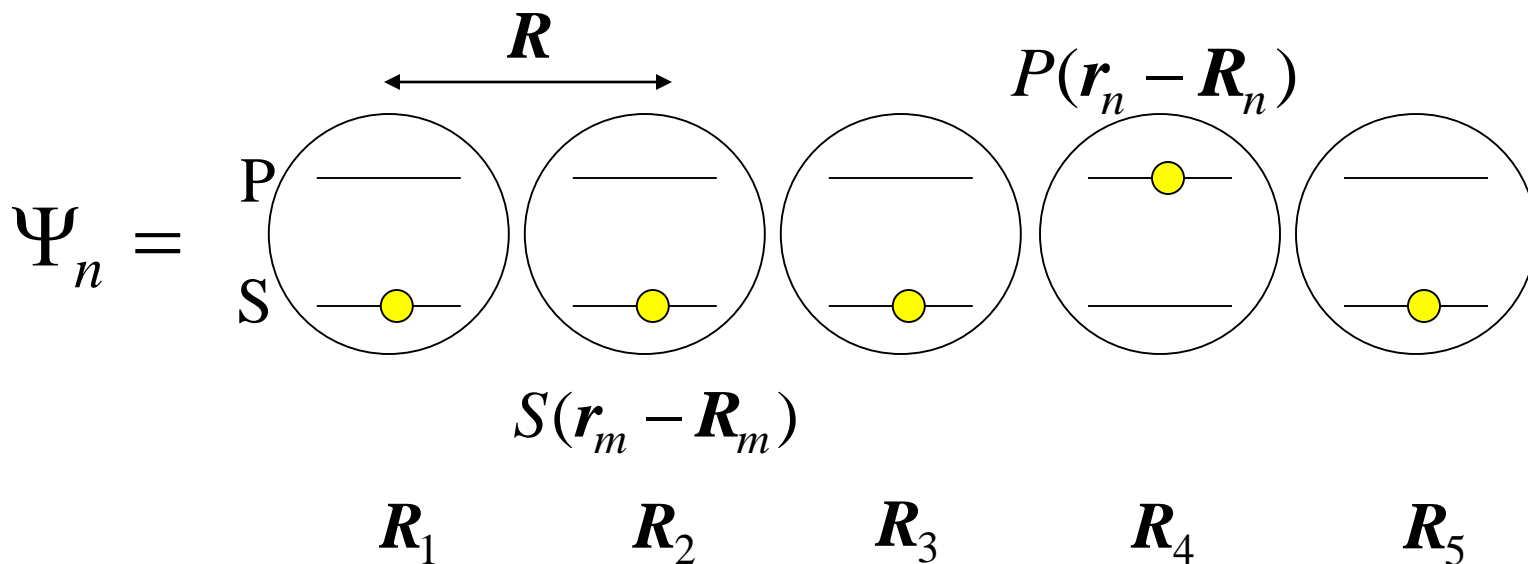
ニュートン 2008.4

Frenkel励起子

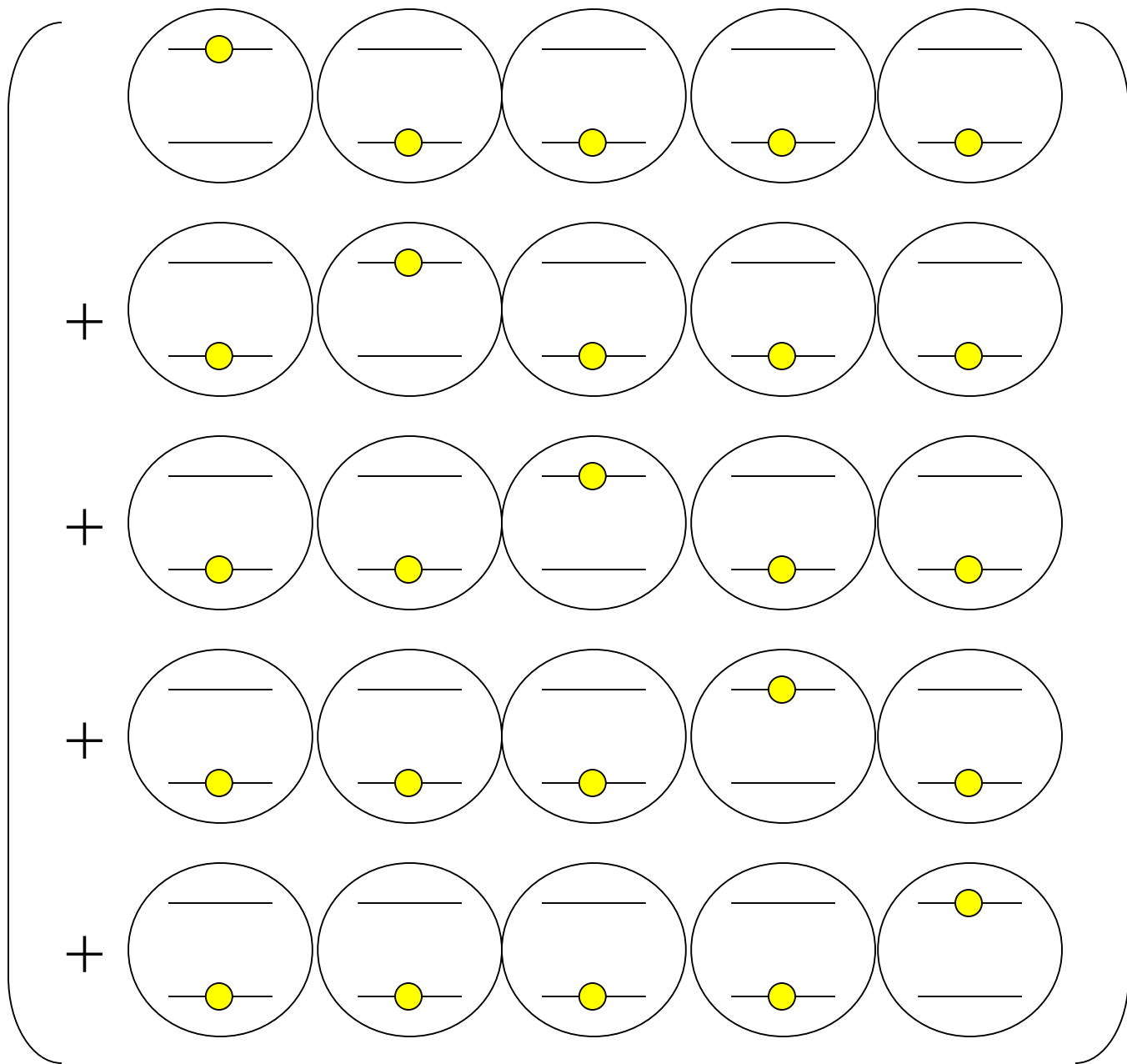
N 個の分子の配列 励起子波動関数

$$\Psi_K = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n \exp(iKR_n) \Psi_n$$

$$\Psi_n = P(\mathbf{r}_n - \mathbf{R}_n) \prod_{m \neq n} S(\mathbf{r}_m - \mathbf{R}_m)$$

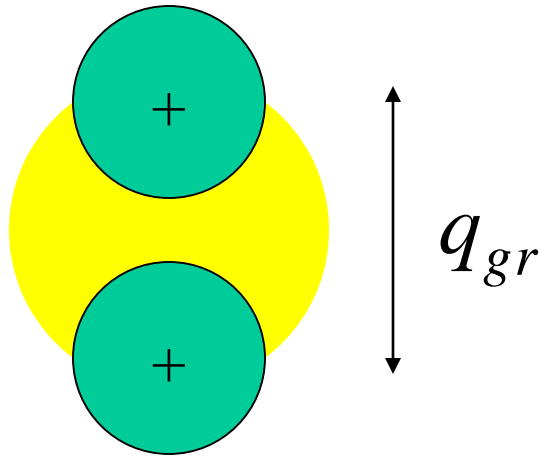


$$\Psi_{\mathbf{K}=0} = \frac{1}{\sqrt{5}}$$



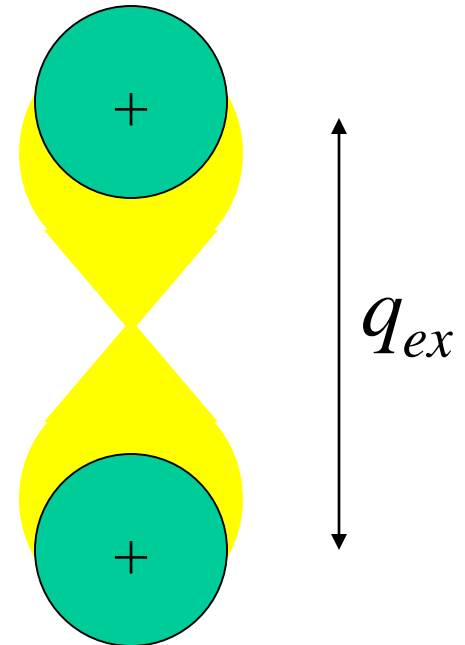
電子格子相互作用

電子基底状態



原子核間距離は平衡位置

電子励起状態



原子核の新しい平衡位置

エネルギー

電子格子相互作用 大

電子格子相互作用 小

電子励起状態

格子ポテンシャル

電子格子相互
作用の大きさ

吸収

発光

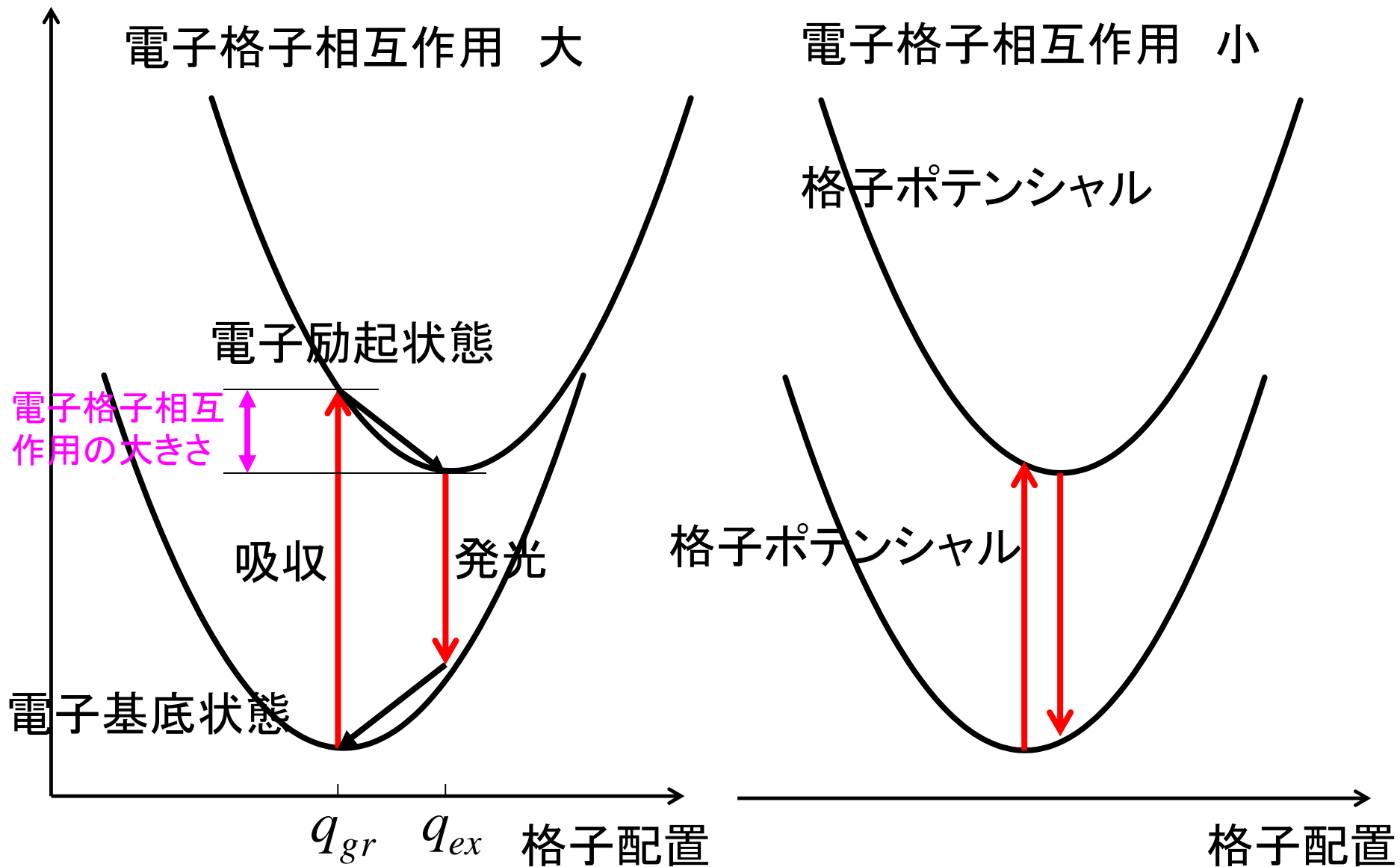
格子ポテンシャル

電子基底状態

q_{gr} q_{ex}

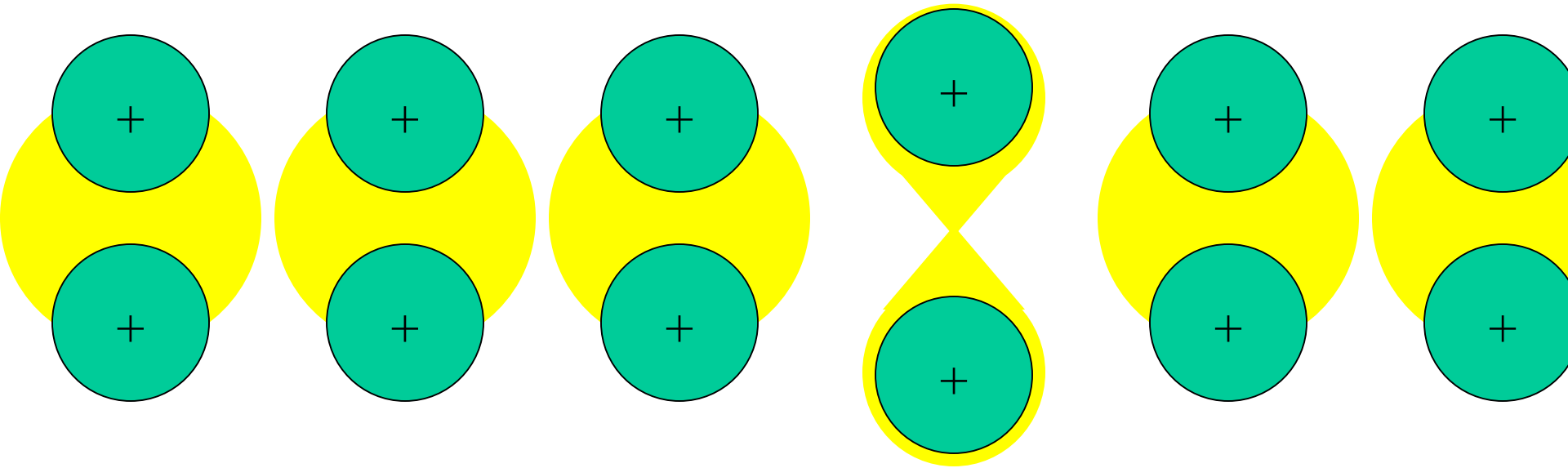
格子配置

格子配置



励起子格子相互作用

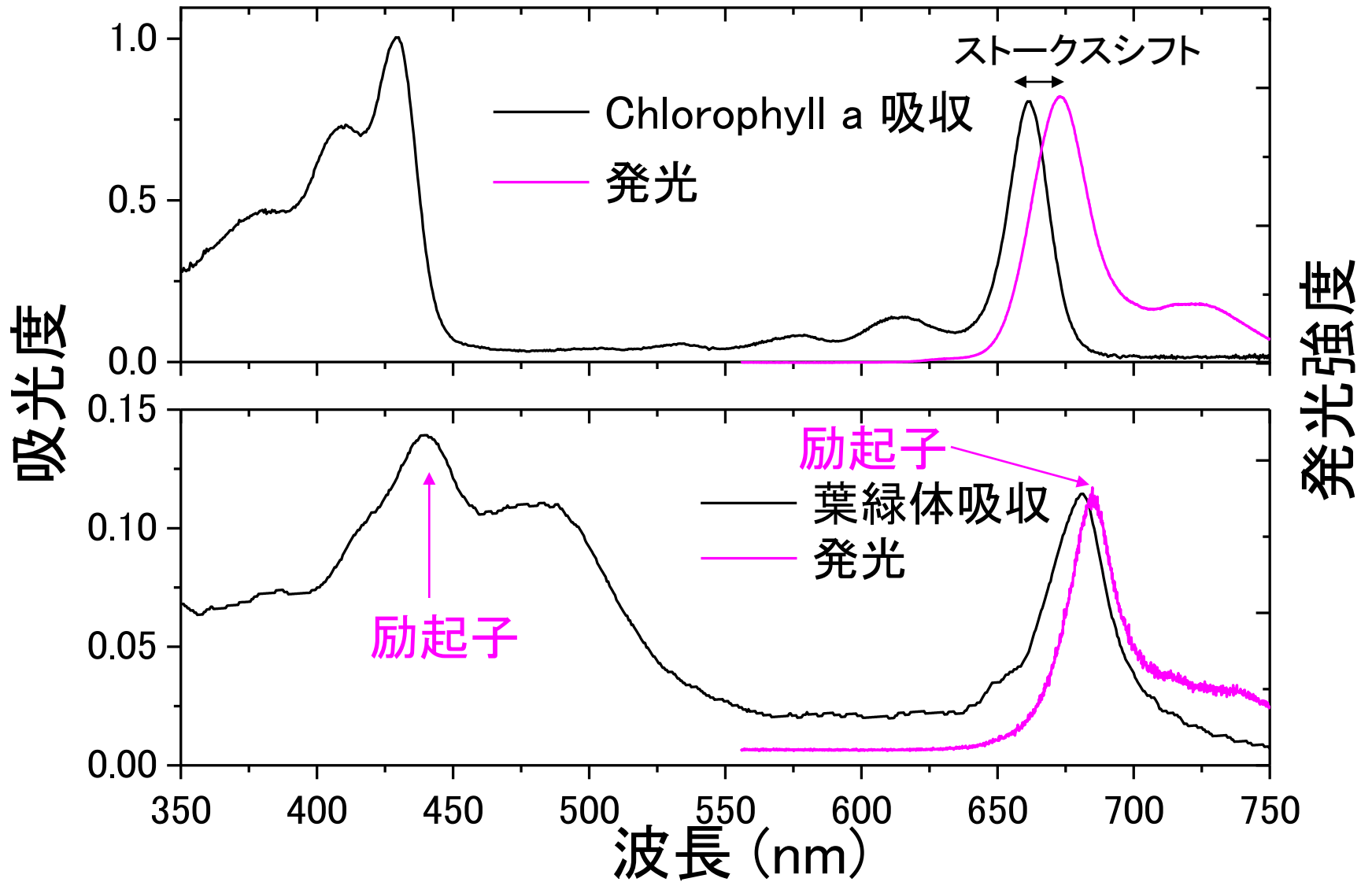
Frenkel励起子: 単量体にくらべ分子内振動との相互作用は $\frac{1}{N}$



励起状態が N 分子にわたって非局在化

各分子との相互作用時間は $\frac{1}{N}$

クロロフィルと葉緑体のストークスシフト



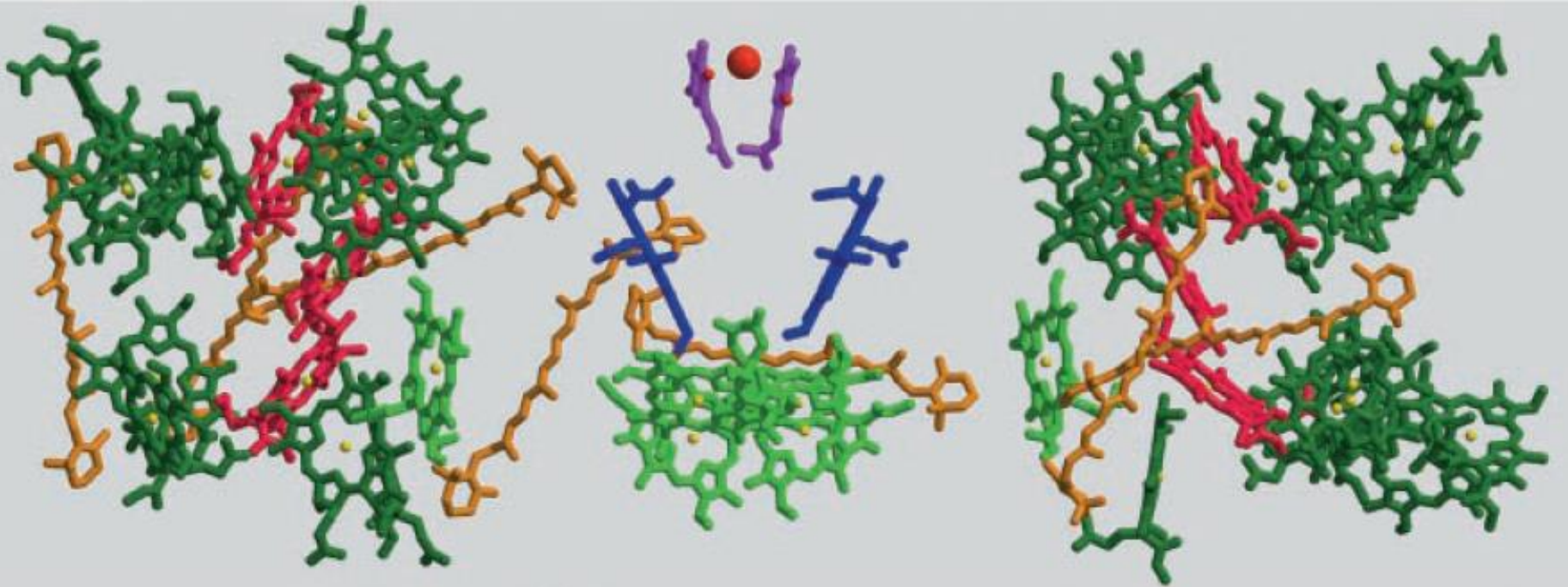
励起子ピークのほうがストークスシフトが小さい

光化学系II (Photosystem II)

コアアンテナ系

反応中心

コアアンテナ系 Stroma



CP43



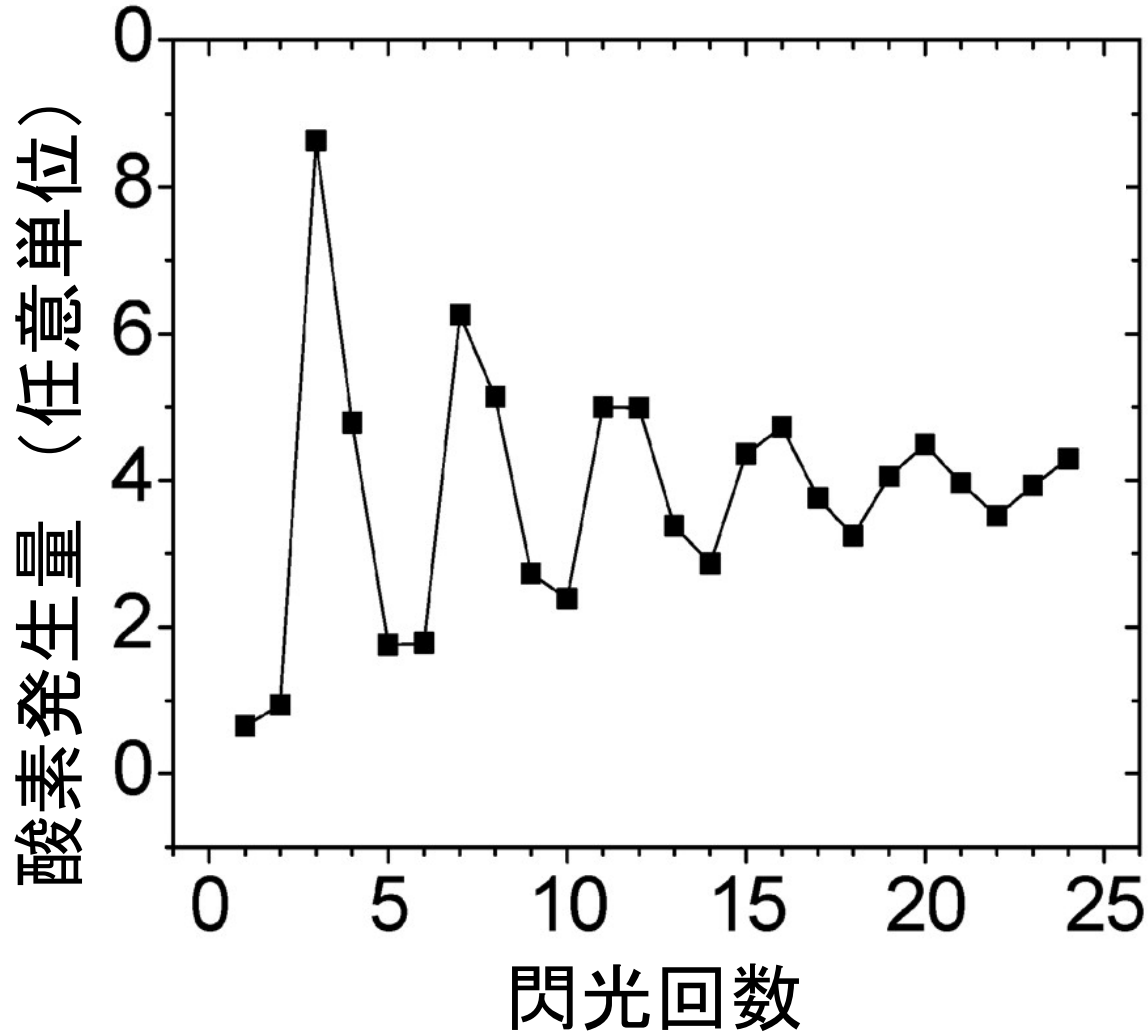
D1/D2

CP47

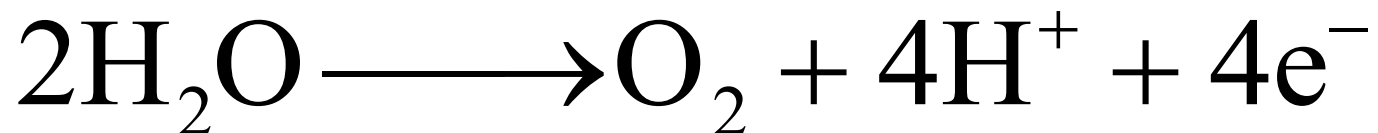
Lumen

酸素発生センター
(マンガン錯体)
水を分解

4閃光ごとの酸素発生



水分解による酸素発生過程は複雑

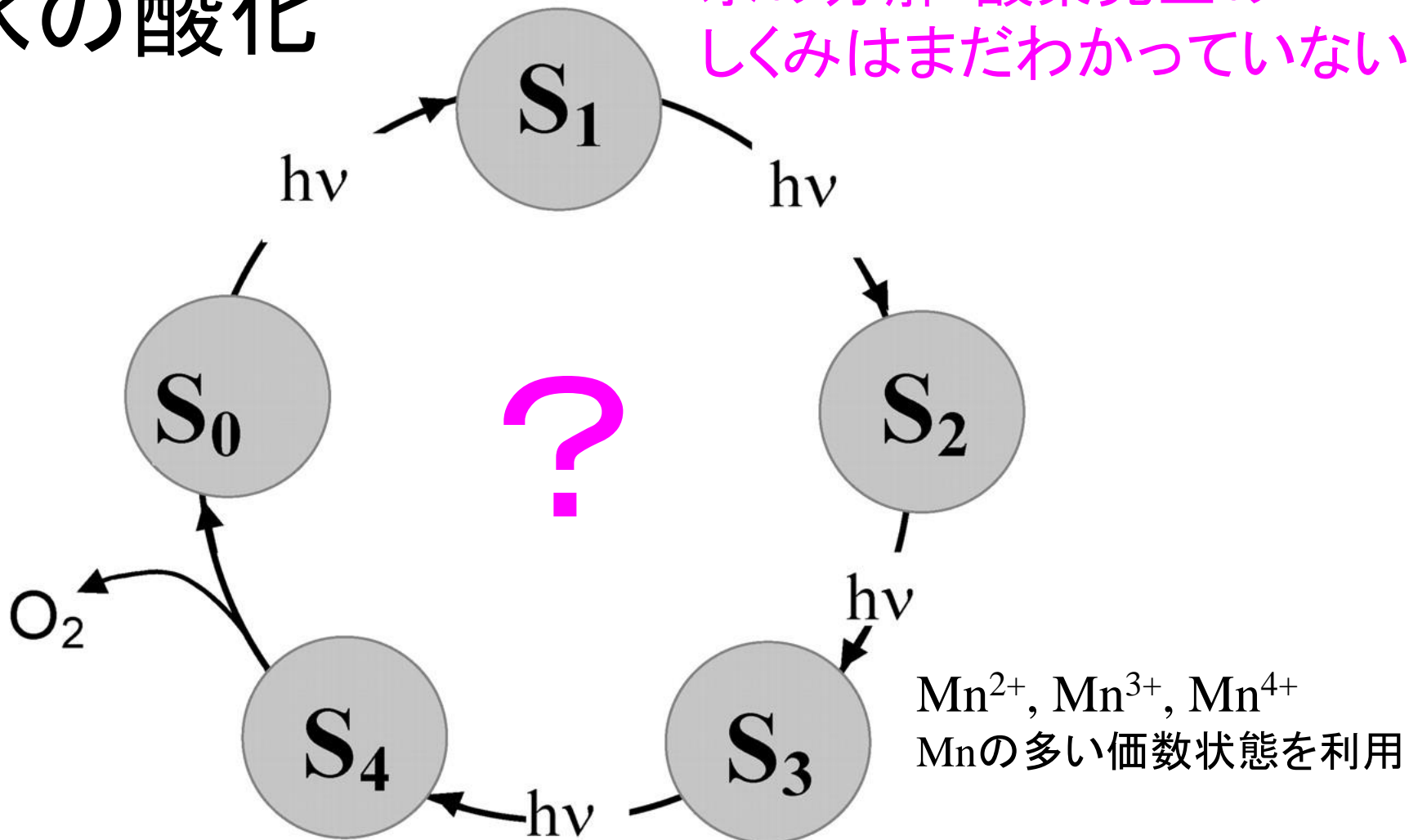


水から酸素を発生する過程は複雑で効率が低い
2分子の H_2O から4つの e^- を抜き出し、
4つの H^+ を放出しながら、
O原子を十分近接させて O_2 として結合

人工光合成の効率が低い要因

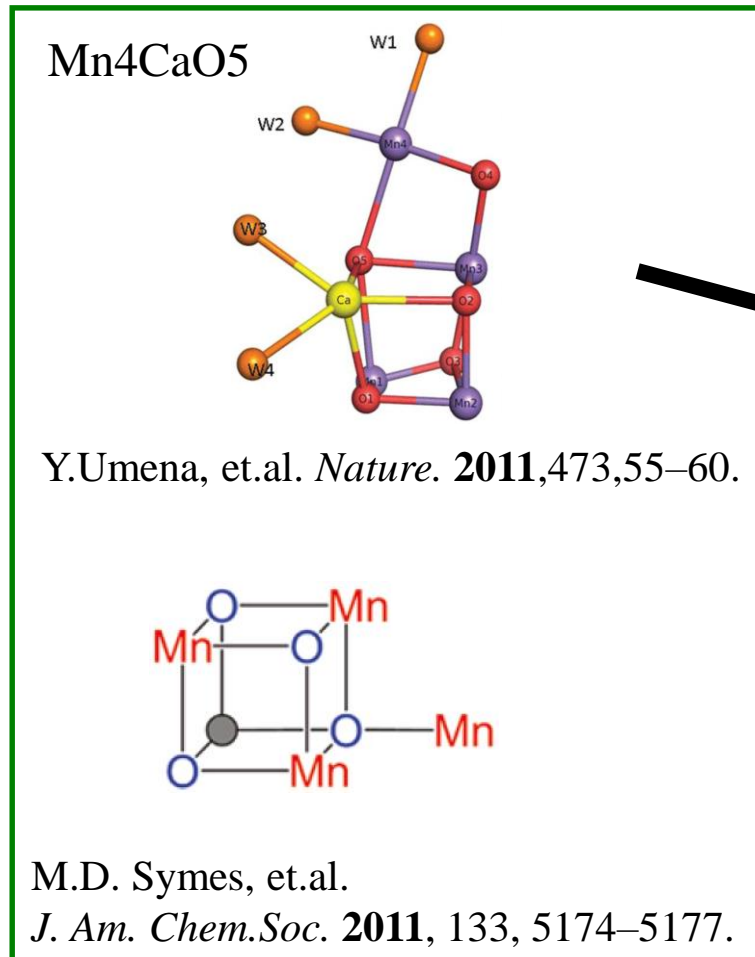
水の酸化

水の分解・酸素発生のしくみはまだわかっていない

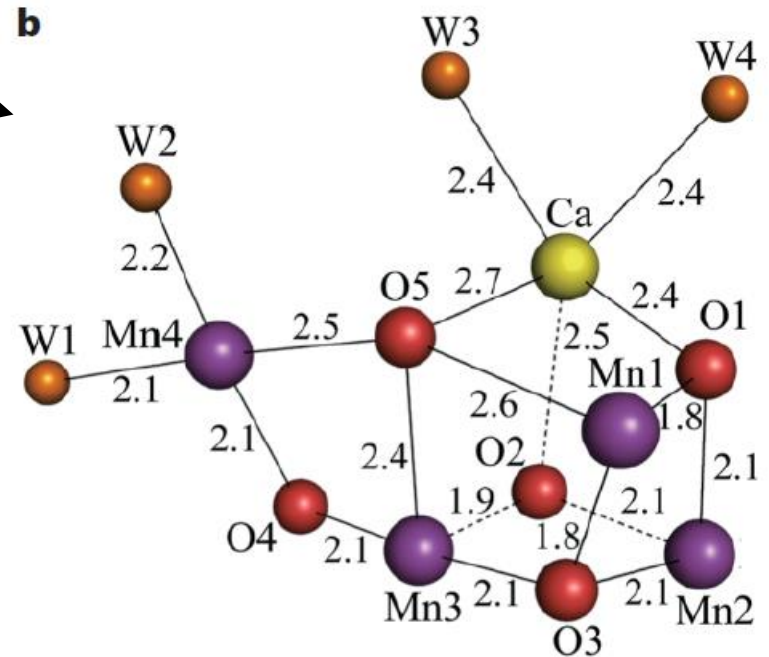


Mnクラスターの構造

X線回折による構造解析



SPring-8の放射光による
X線結晶構造解析で
水分子の配置を含めた
構造が初めて明らかになった



沈建仁、神谷信夫

SACLA(X線自由電子レーザー)を用いた光励起状態の研究へ

光合成による太陽光エネルギー変換

太陽光発電の課題—導入コスト(発電コスト)
エネルギーの貯蔵



バイオマス、藻類による光水素発生・炭化水素生産
(化学エネルギー)

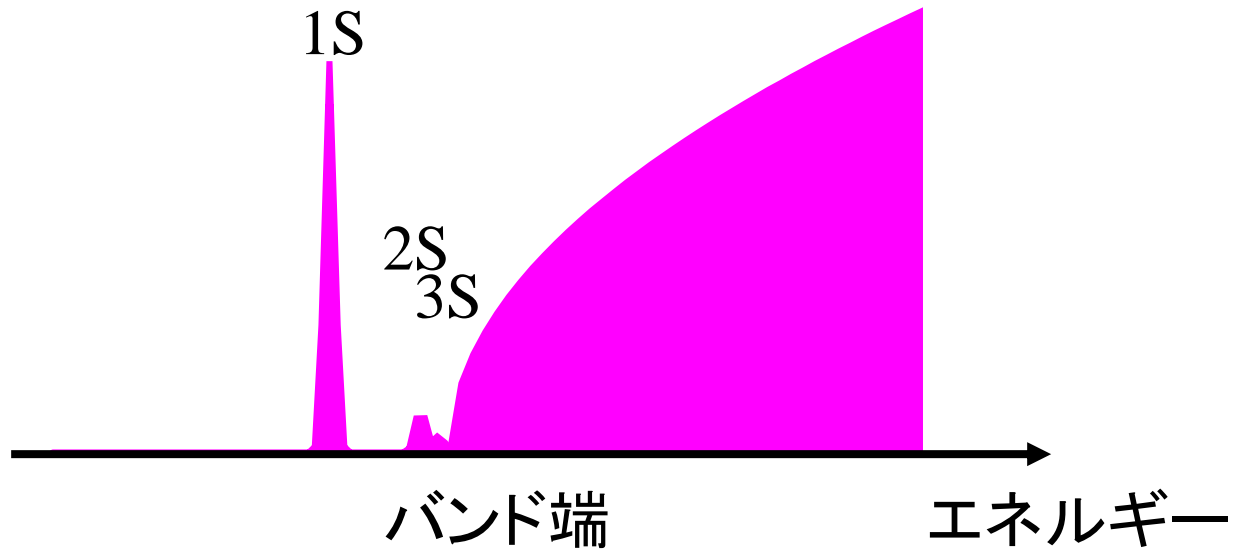
究極の量子効率・エネルギー効率

植物は自ら作り出すエネルギーで生合成して増殖する

材料(C,H,O,N)は無限・希少金属を含まない・有害廃棄物なし

Wannier励起子

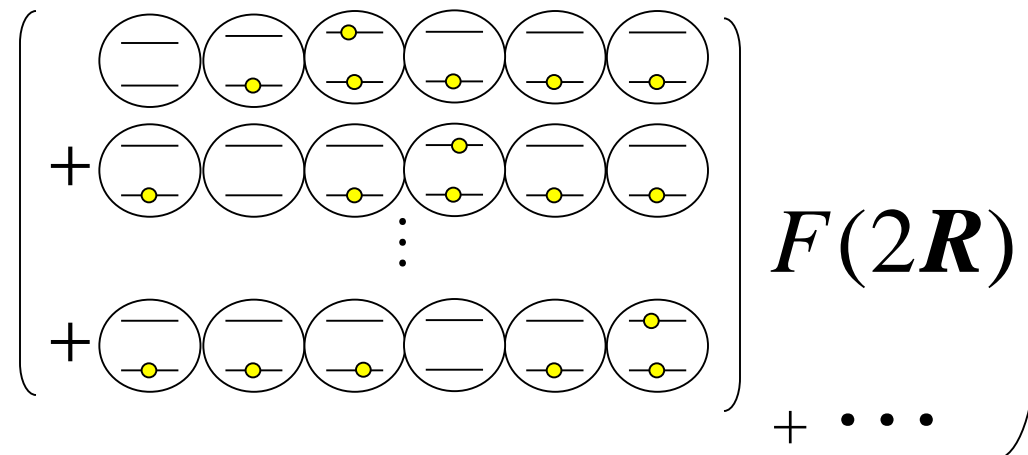
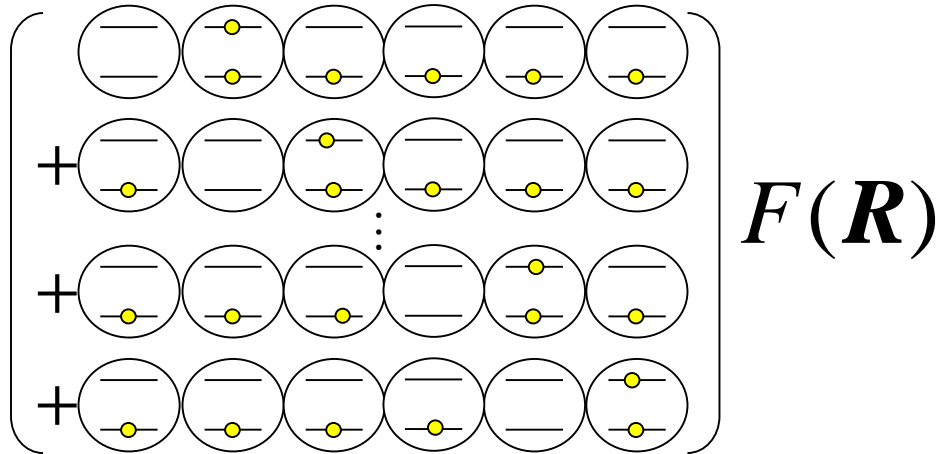
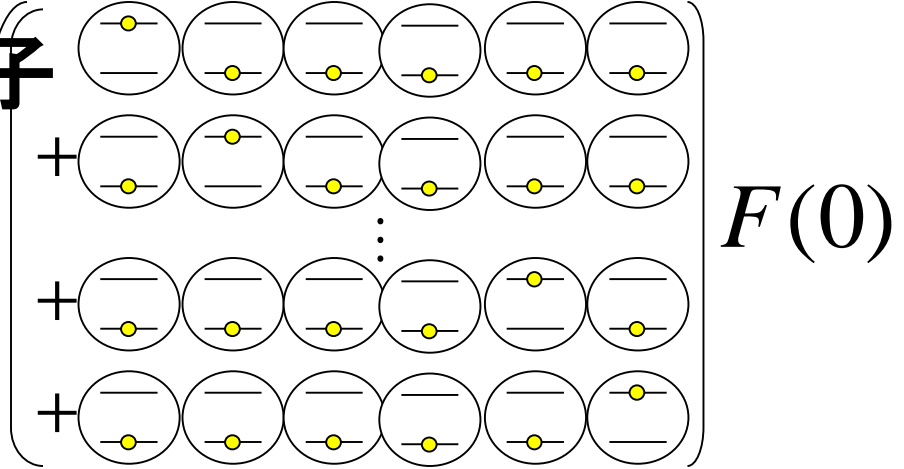
半導体の吸収スペクトル



電子と正孔の束縛状態
水素原子様の波動関数、エネルギー

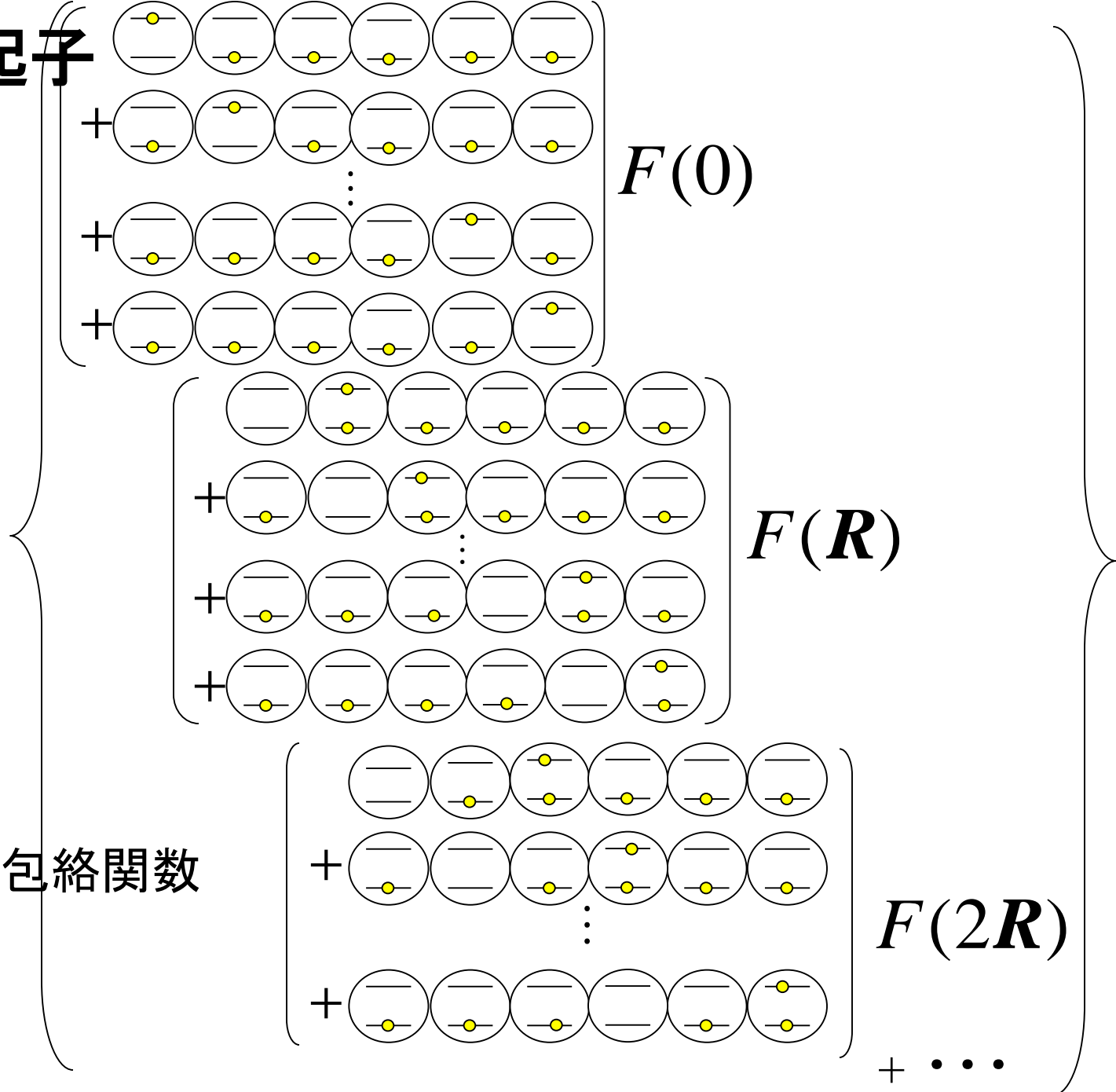
Wannier 励起子

$$\Psi_{K=0} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$



$$\sum_{\mathbf{R}} |F(\mathbf{R})|^2 = 1$$

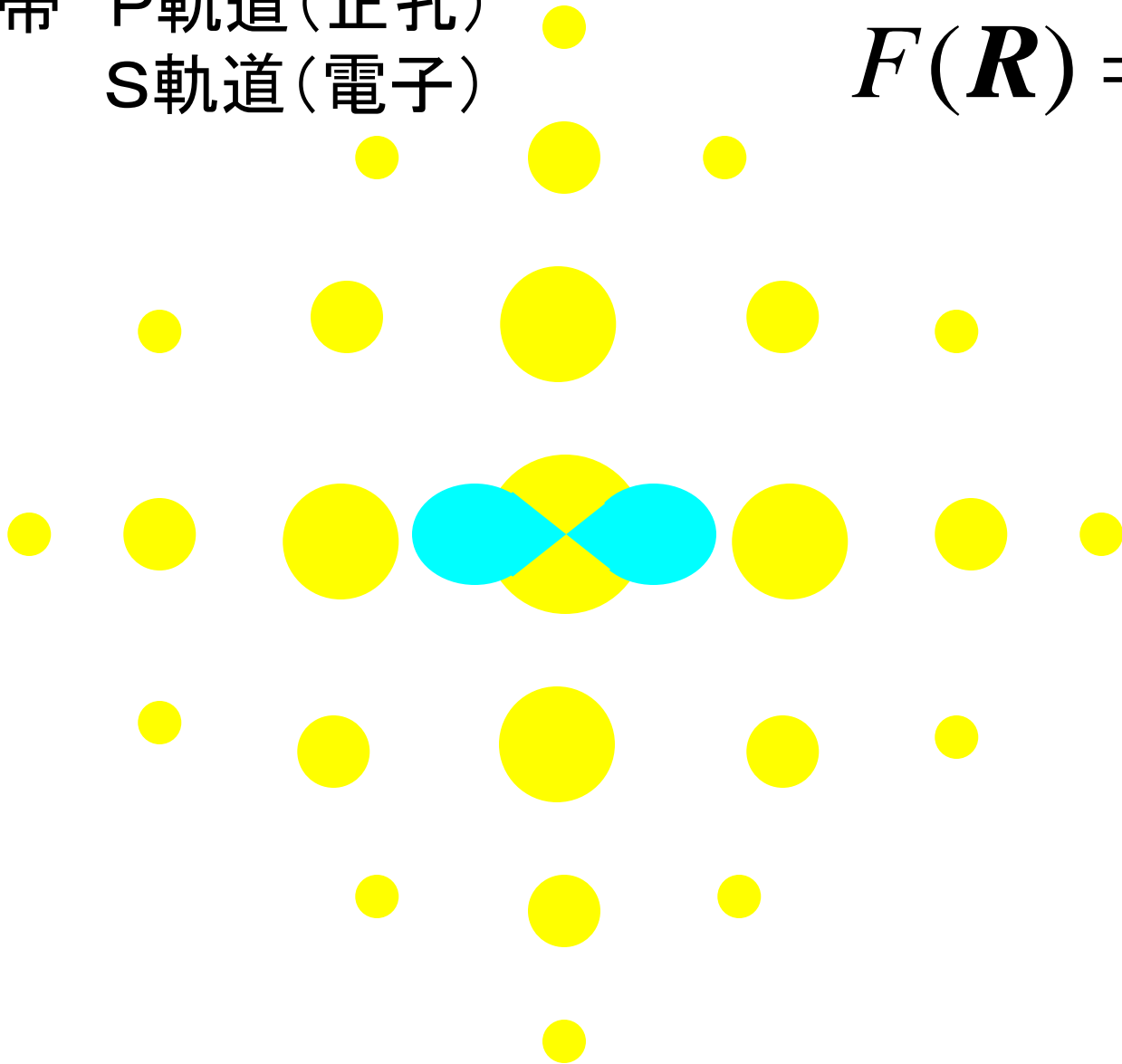
$F(\mathbf{R})$: 励起子包絡関数



Wannier励起子の空間的イメージ

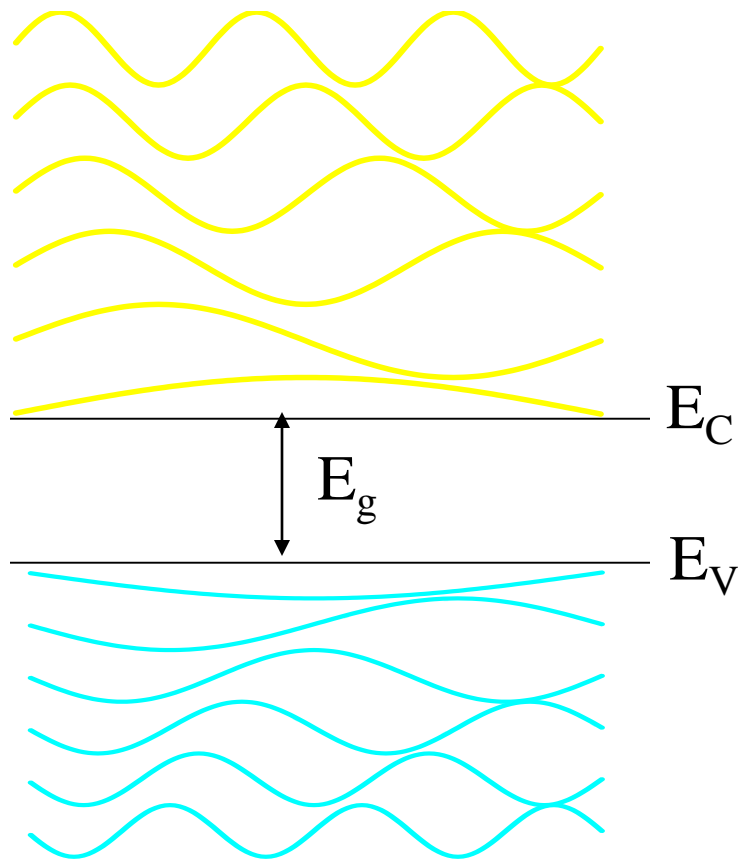
価電子帯 P軌道(正孔)
伝導帯 S軌道(電子)

$$F(\mathbf{R}) = \Phi_{1S}$$

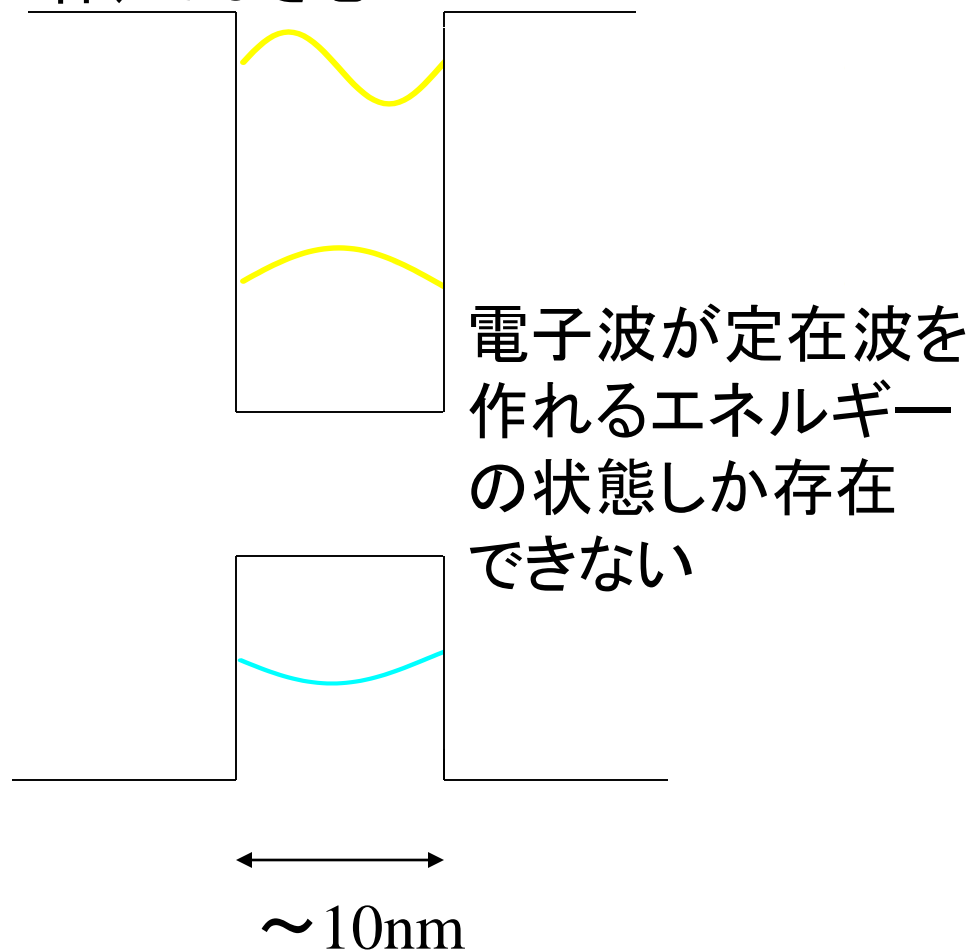


ナノメートルサイズの半導体

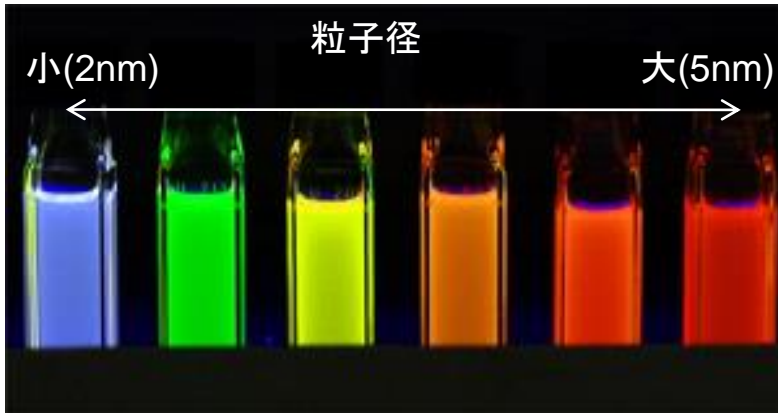
バルク半導体



ナノメートルサイズの半導体をより大きな E_g の半導体(絶縁体)ではさむ



CdSe量子ドット

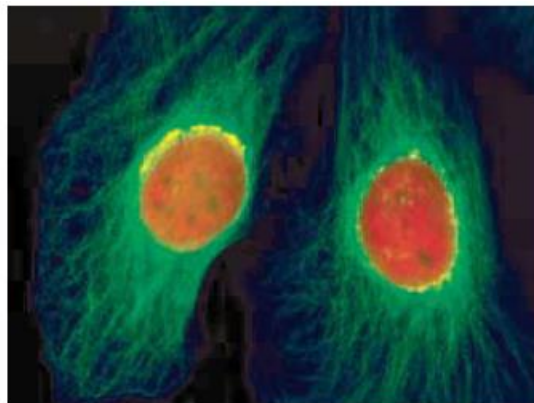


粒子径の違うCdSe量子ドットの発光

※産業技術総合研究所ウェブページ
「蛍光性ナノ粒子で微量タンパク質の高感度検出を可能に」
より引用

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20060216/pr20060216.html

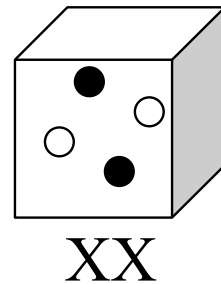
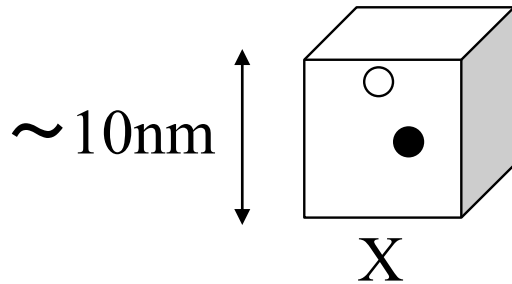
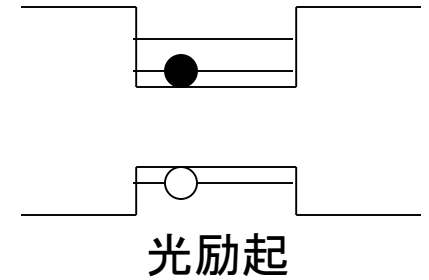
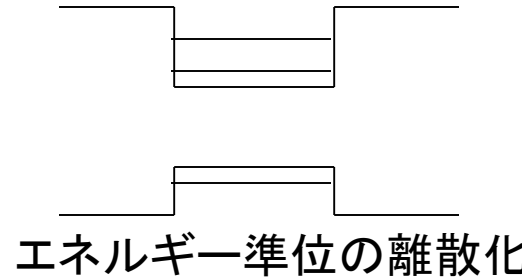
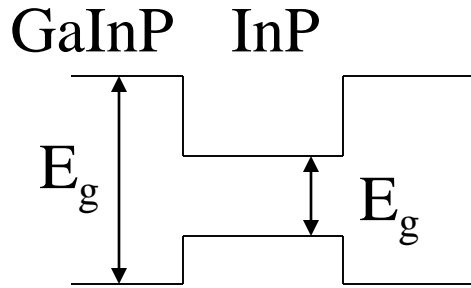
バイオイメーjingへの応用（蛍光色素の代替）



HeLa細胞

Qdot®日本語パンフレット

ナノメートルサイズの半導体



半導体量子点 (Quantum Dot, QD)

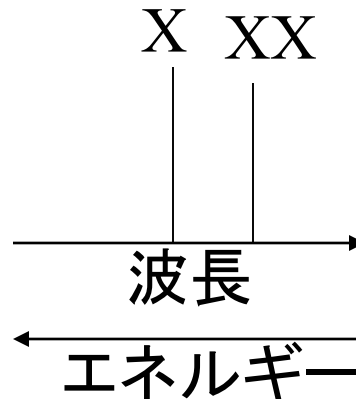
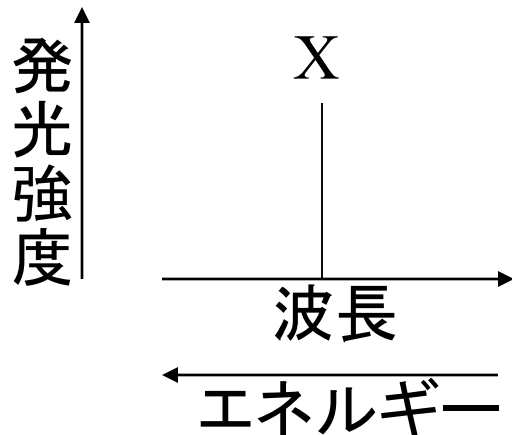
狭い空間のため、電子正孔対はクーロン力で束縛 励起子X

量子点中の励起子の応用

低閾値レーザー

単一光子光源

量子コンピューター



1270-1310nm 通信用 量子ドットレーザ DFB / FP

- 良好な温度特性
- 10Gbps までの直接変調
- TO-56 CAN パッケージ

[詳しく見る >](#)
[テレコム](#)
[データコム](#)
[インター
コネクト](#)
[ホーム](#)
[会社概要](#)
[製品情報](#)
[アプリケーション](#)
[テクノロジー](#)
[販売パートナー](#)
[サポート](#)
[プレスリリース](#)
[ダウンロード](#)

WELCOME to QD Laser

量子ドットレーザ技術の先駆者としてスタートしたQDLレーザは、通信・民生・産業用の広い分野で高効率半導体レーザソリューションをお客様にお届けします。QDLレーザの製品には、精密制御された532nmから1064nm、1310nmまでのレーザ波長、高温動作と温度安定性、GaAs基板での低コスト量産性という他社にない特長があります。信頼性の高い当社製品をお使いいただくことによって、LAN/FTTH、光インタコネクト、材料加工、計測、ライフサイエンス、ファクトリーオートメーション、センサー、ディスプレイ等の多様なアプリケーション分野で、お客様はレーザを活用した新たな市場を開拓することが可能となります。

[カテゴリから選ぶ](#)
[製品一覧](#)

▶ 1270-1310nm 量子ドットレーザ



通信波長帯、半導体レーザの光出力特性の温度依存性を大幅に抑制

▶ 1300nm 高温度動作 量子ドットレーザ



100℃以上での動作に向けた温度耐性のある波長1300nm量子ドットFPレーザです。

NEWS

品質マネジメントの国際規格「ISO9001:2008」の認証取得

2012-02-14

高速変調可能な小型(0.5cc)黄緑色、橙色レーザモジュールを開発

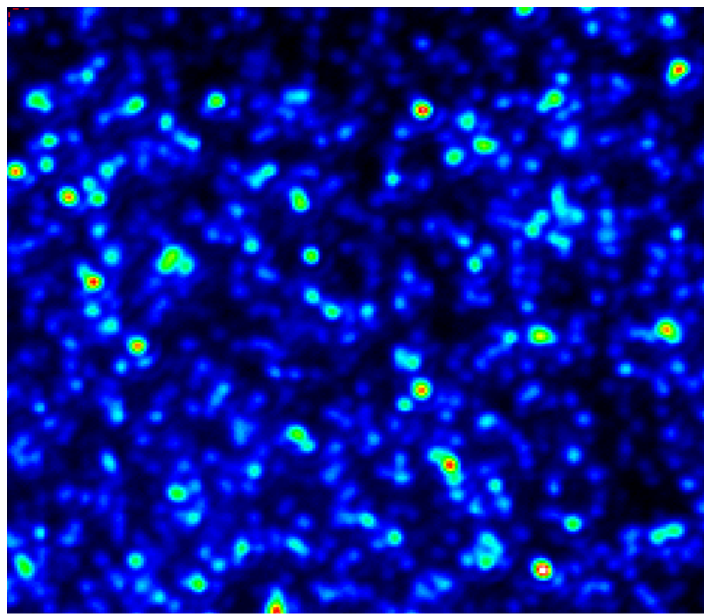
2012-01-23

最大出力100mW以上の小型で高速変調可能な波長532nm緑レーザモジュールを開発

2012-01-19

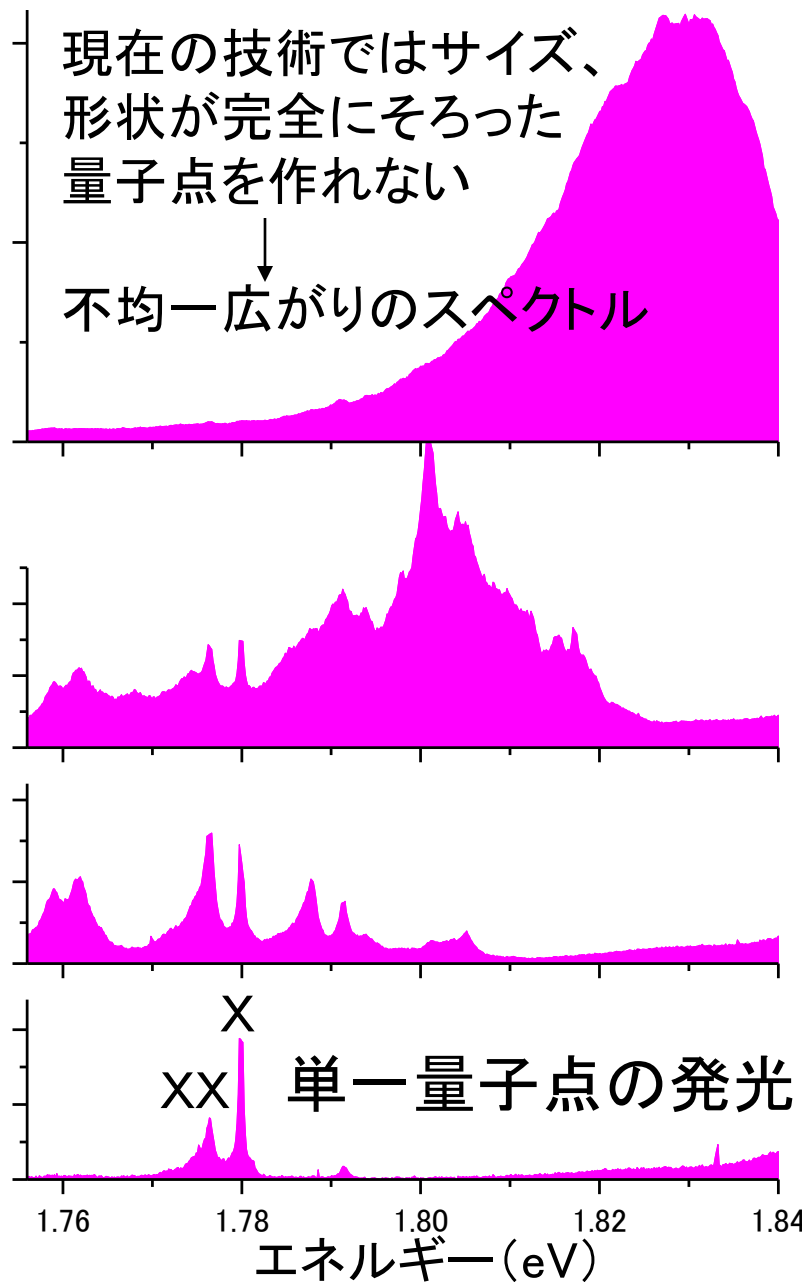
半導体量子点

1個/ μm^2 の密度の研究例
半導体量子点の
発光イメージと発光スペクトル



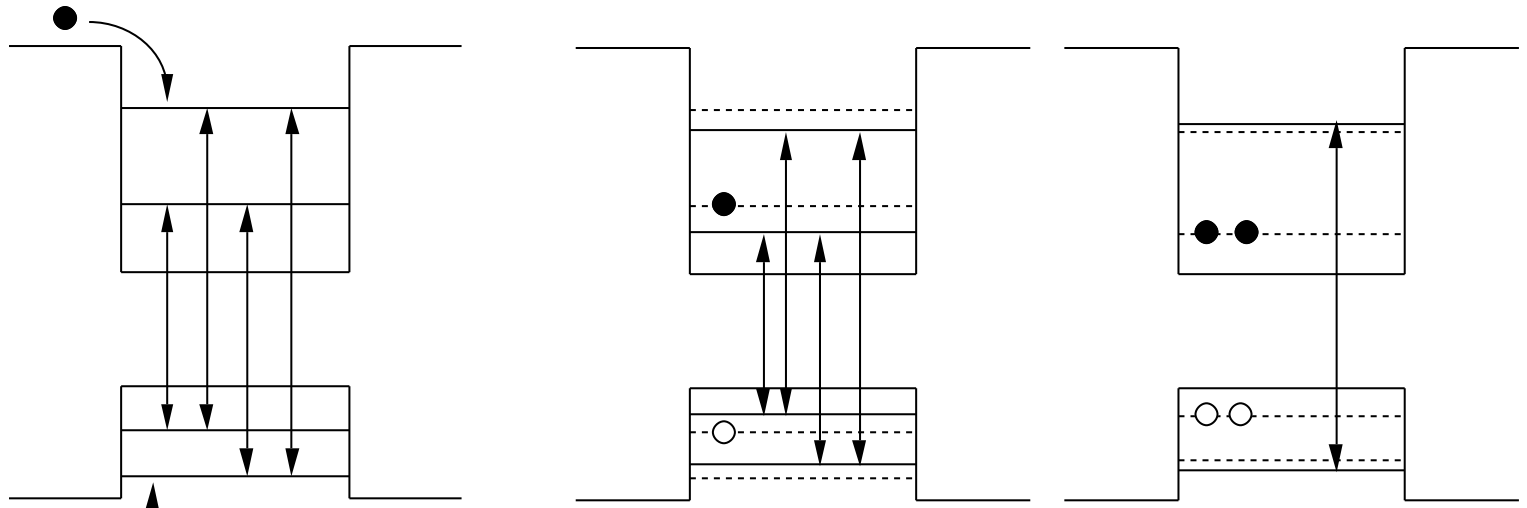
50 μm × 50 μm , 2K

発光強度(任意単位)

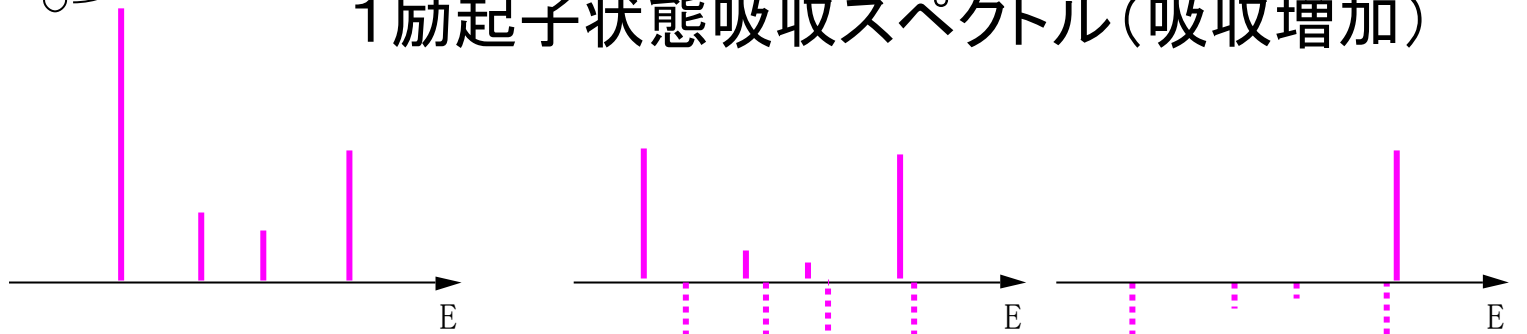


1つの励起子生成による非線形光学効果

1励起子の有無 → 強い電子相関によるレベルシフト



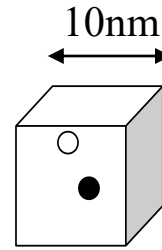
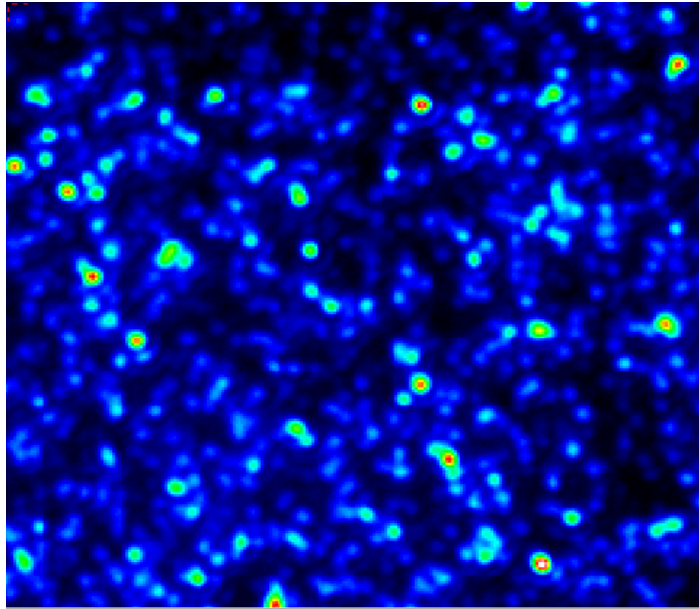
1励起子状態吸収スペクトル(吸収増加)



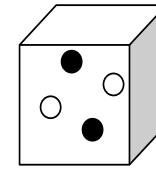
基底状態吸収スペクトル(吸収減少)

単一の半導体量子点の非線形吸収分光

50 μm \times 50 μm , 2K



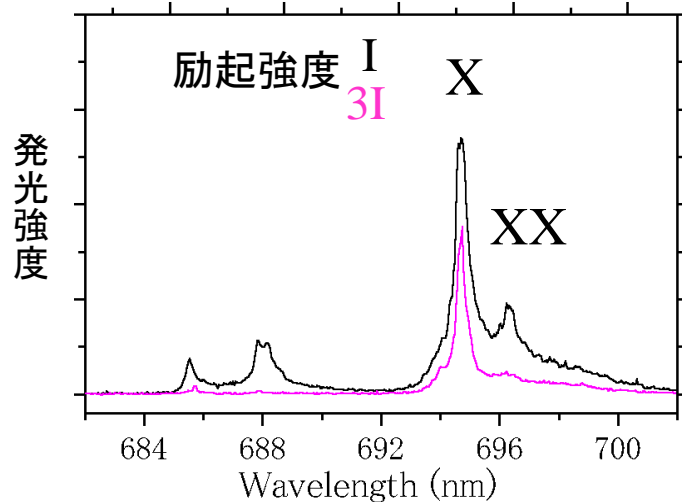
励起子X



励起子分子XX

電子と正孔のクーロン力による束縛状態

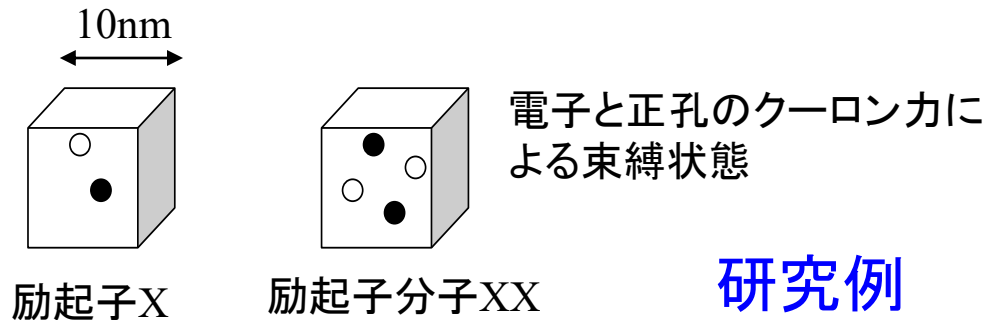
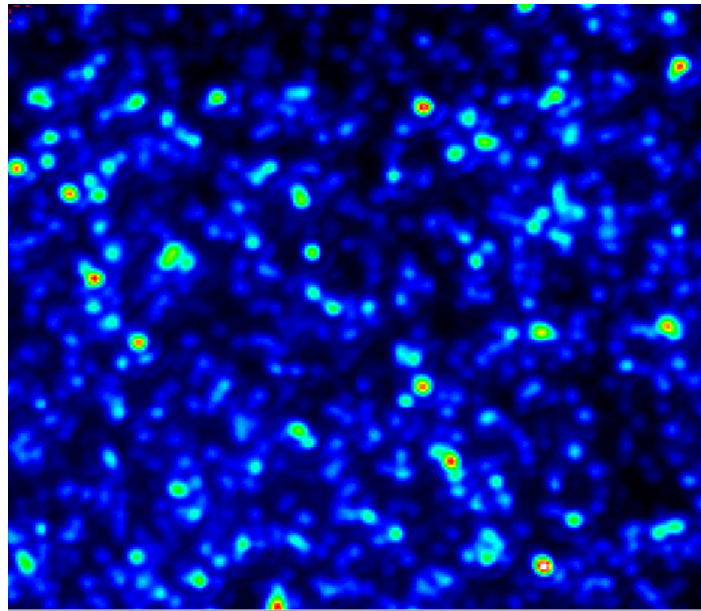
研究例



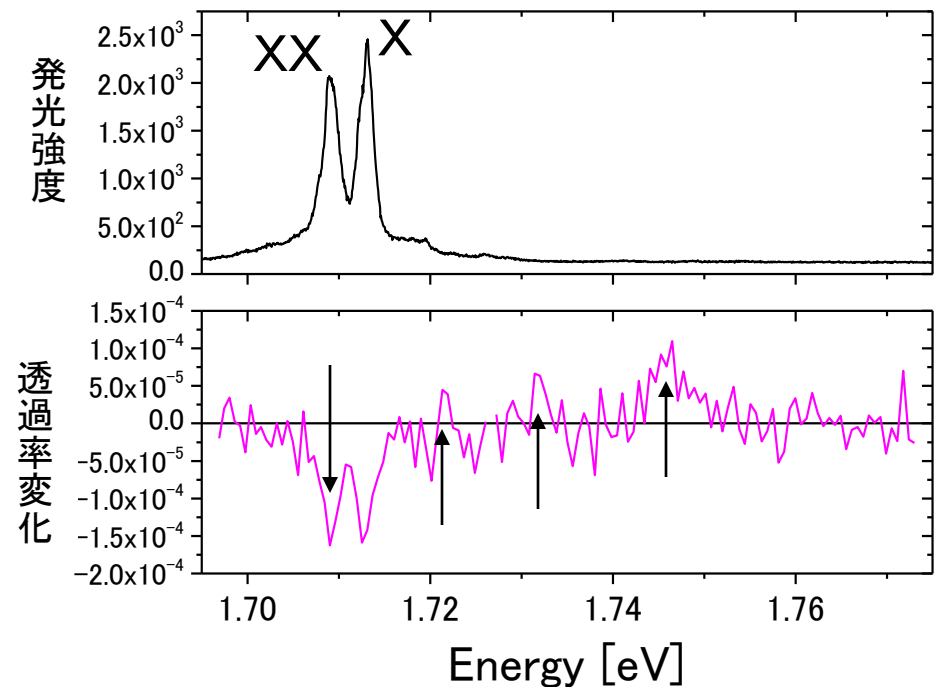
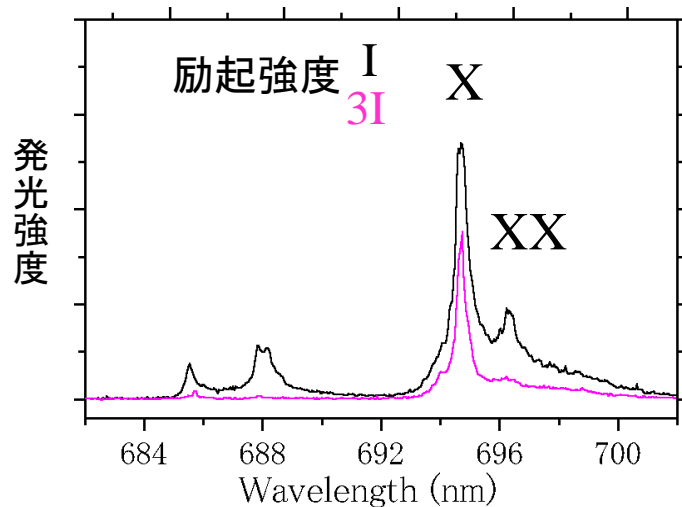
単一分子や単一量子点は、閉じ込め系での強い電子間相互作用により、1個の電子や1個の光子で電氣的・光学的性質を劇的に変化させることができるので、ナノ電子・光子デバイスとしての応用が期待されている。

単一の半導体量子点の非線形吸収分光

50 μm \times 50 μm , 2K

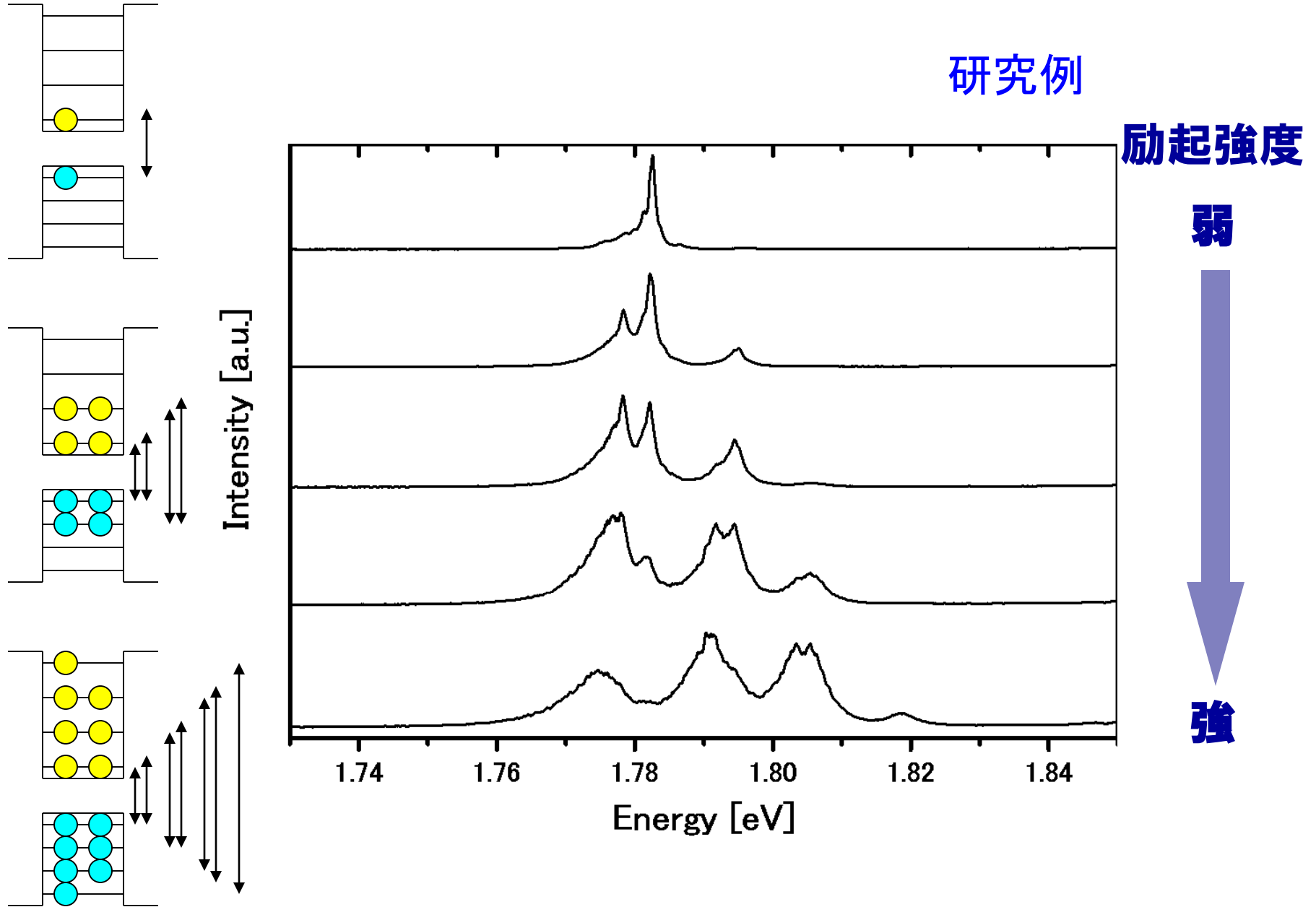


InP単一量子点に1個の励起子を光励起したときの吸収変化



單一量子点發光分光(多勵起子基底狀態)

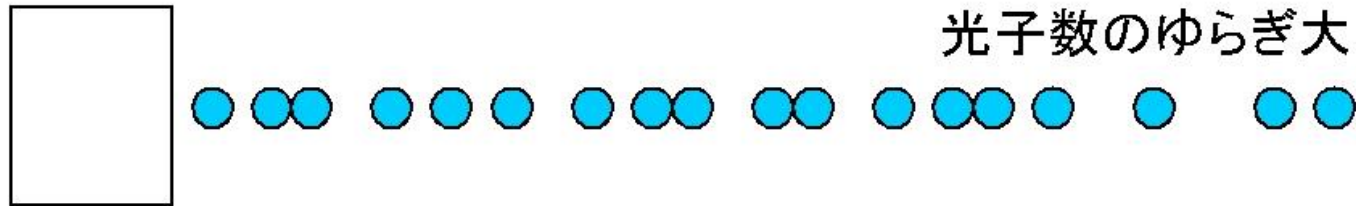
研究例



たとえば

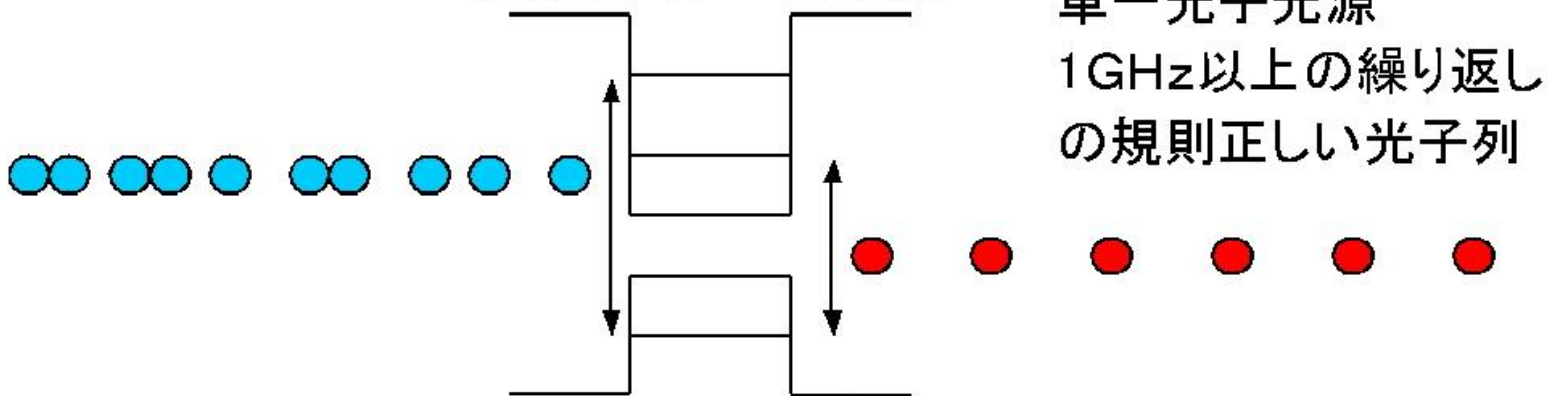
単一光子光源

通常の光源 (レーザーも含む)



非古典光源

単色レーザーで共鳴励起された単一量子点

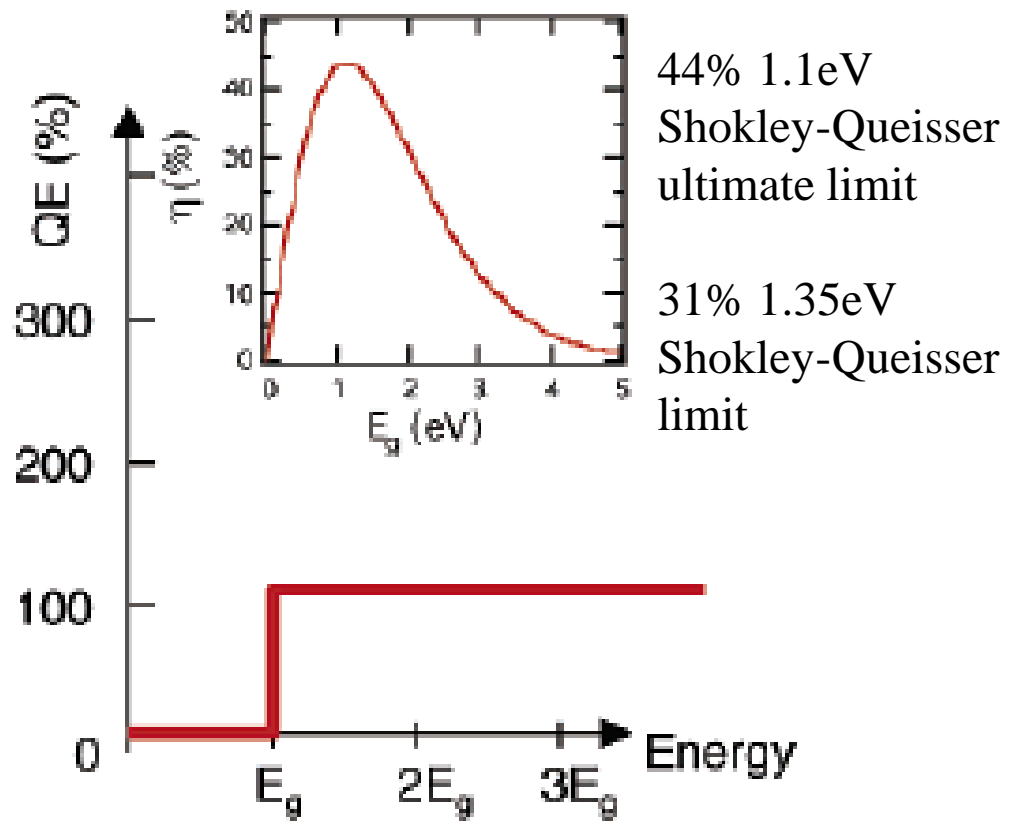
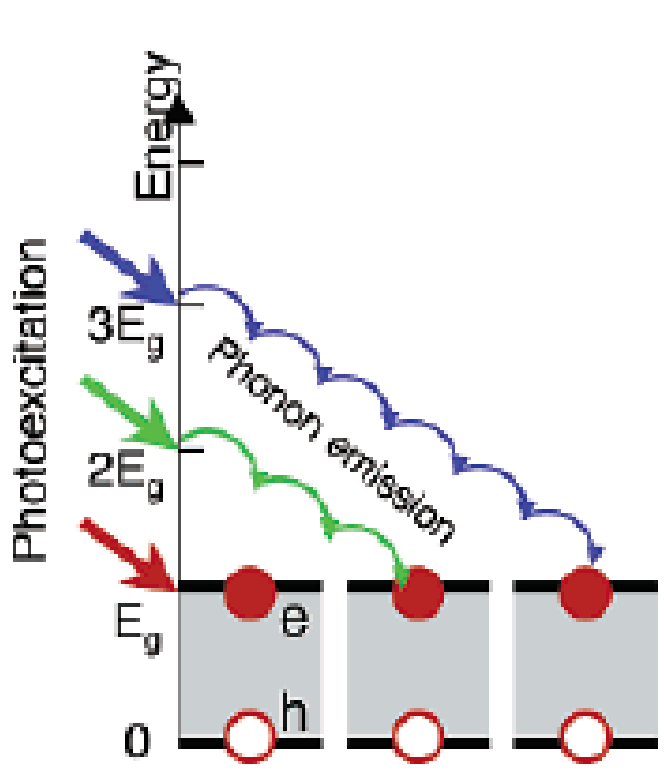


量子暗号・量子通信への応用

半導体(太陽電池)の 太陽エネルギー変換効率の最大値

バンドギャップ E_g の半導体

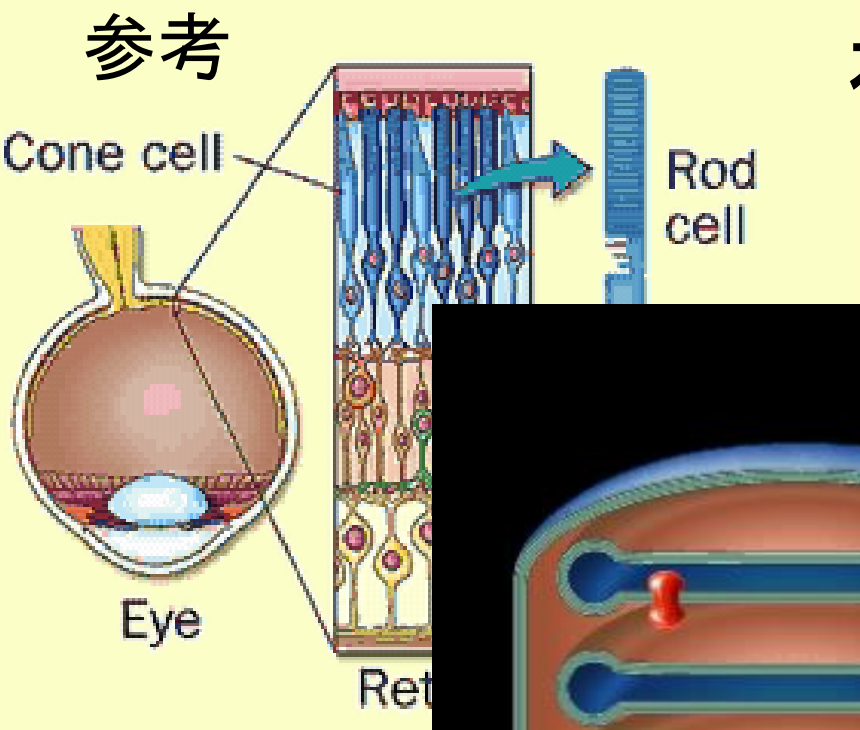
仮定: E_g より大きいエネルギーの光子を吸収し、 E_g の起電力を生む



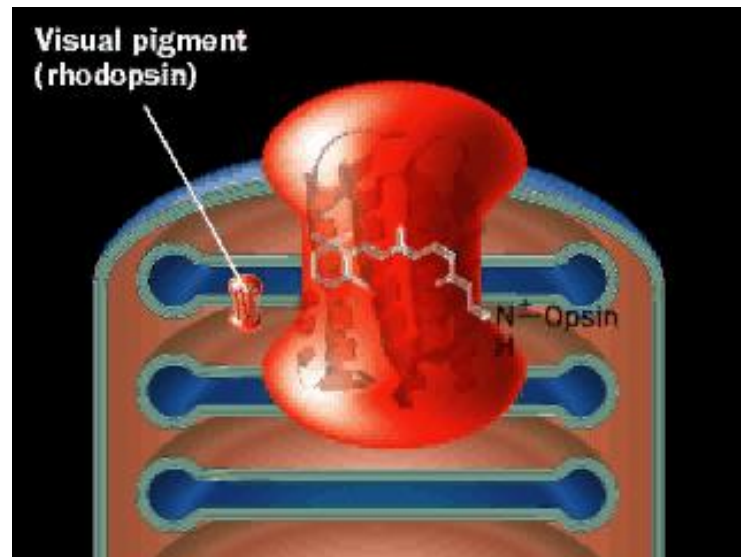
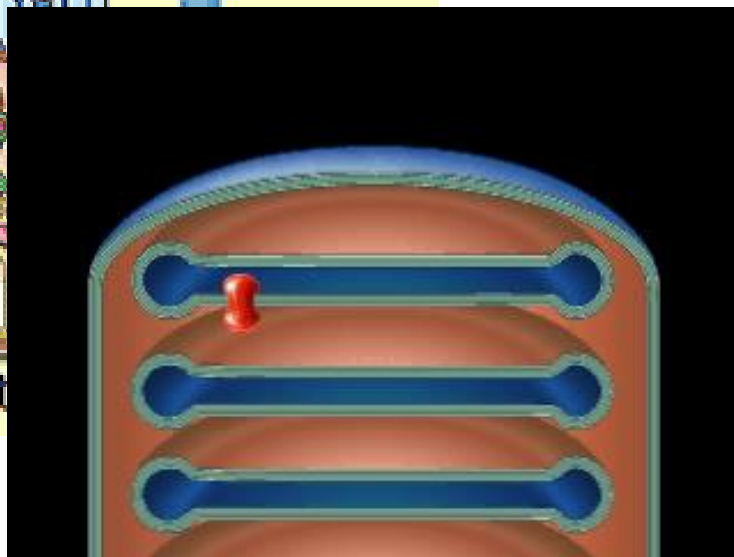
クロロフィル吸収端 $660\text{nm}=1.88\text{eV}$ しかし緑($\sim 2.3\text{eV}$)を吸収しない

光合成の吸収スペクトルは最適でない？

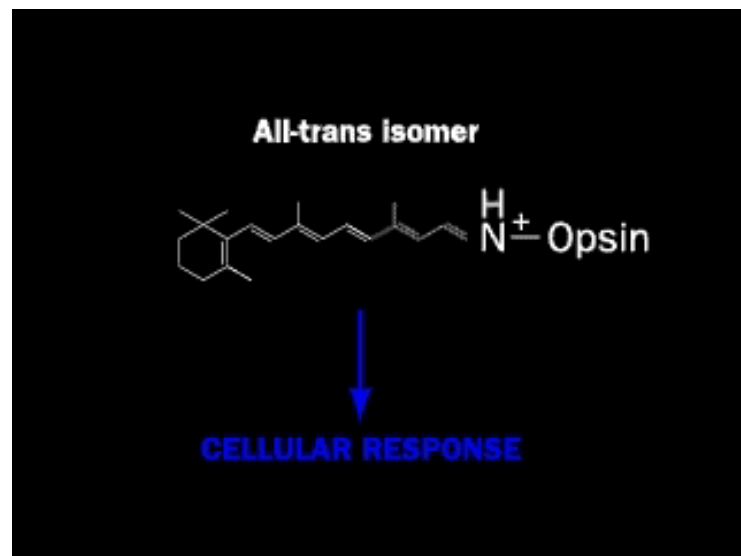
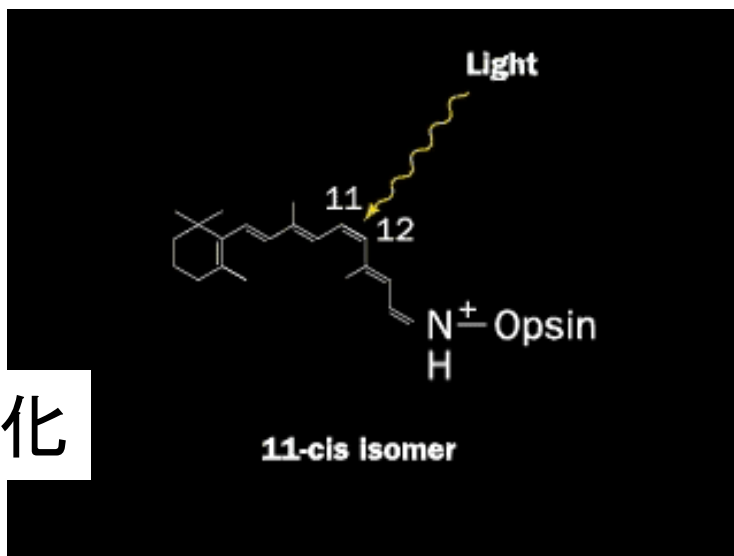
視覚



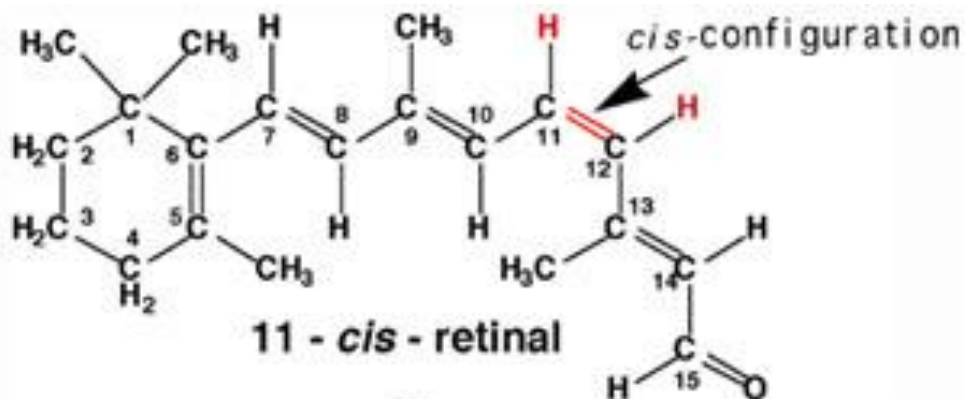
ロドプシン 蛋白質立体構造の中にレチナール分子



レチナール
cis-trans異性化



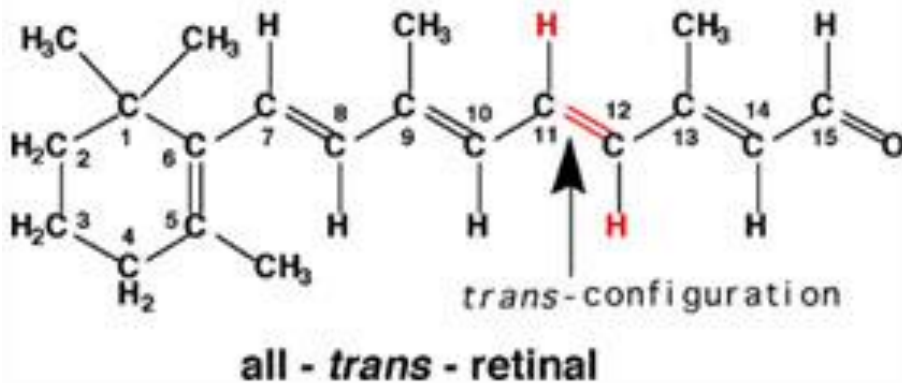
視覚の初期過程



Visible light

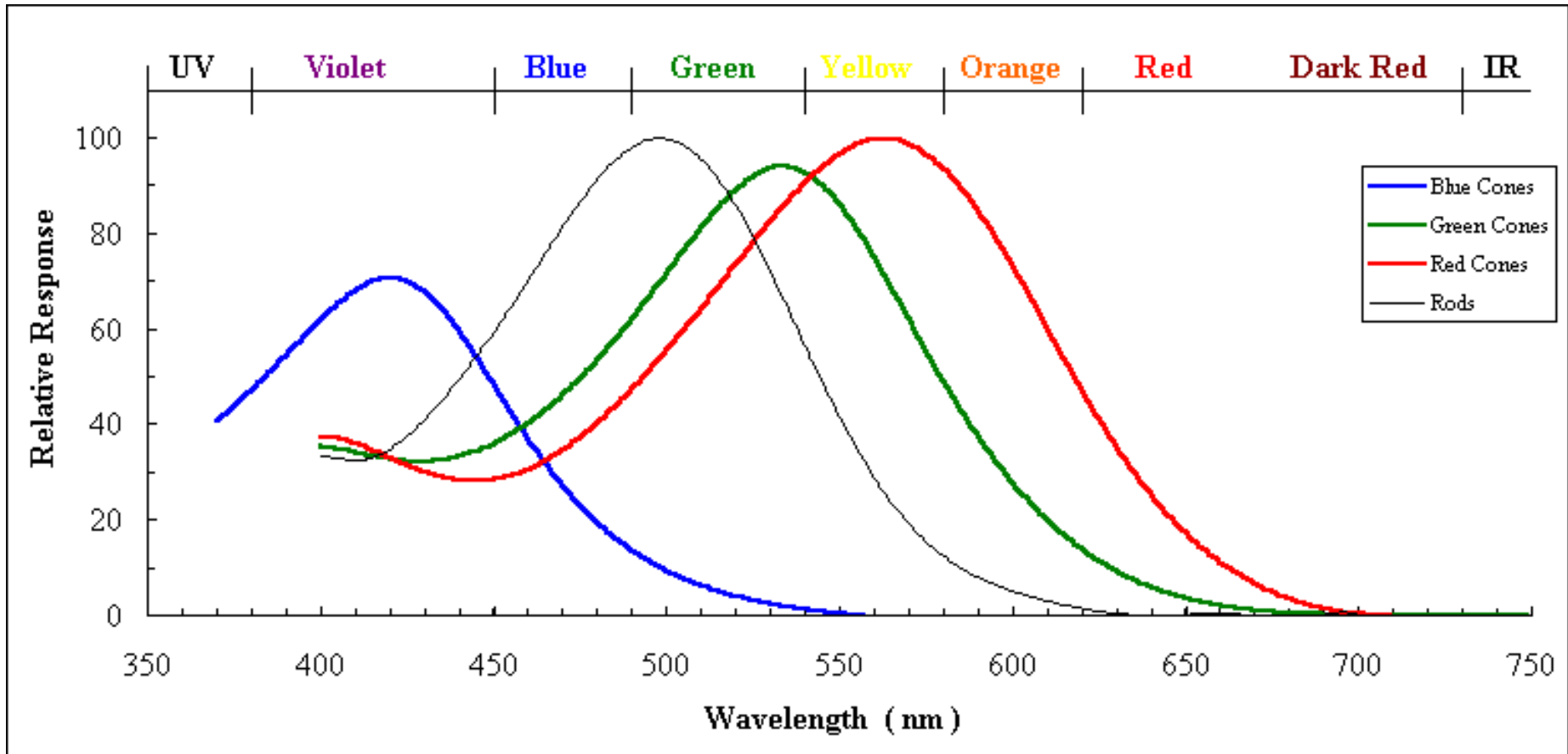


光を吸収して
シストランス異性化
~100fs



参考

視覚：棹体と錐体の吸収スペクトル



すべて11-シス型レチナールの吸収

周りの蛋白質の環境の違いにより吸収スペクトルが変化

すべての動物の視細胞にレチナール 魚 イカ 昆虫

蛋白質とのどのような相互作用がこの変化をもたらすのか？

参考

光検出器としての視物質

- 高感度 単一光子の吸収で信号
- 低雑音 暗所でロドプシンが異性化する
のは100年に1回
- 10桁のダイナミックレンジ 闇夜から昼間まで
 $10^0 - 10^{10}$
- 高い空間分解能 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ に1個
- 分光能力 1000万種類の色を見分ける
- 以上を室温で実現

半導体の眼CCD $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$

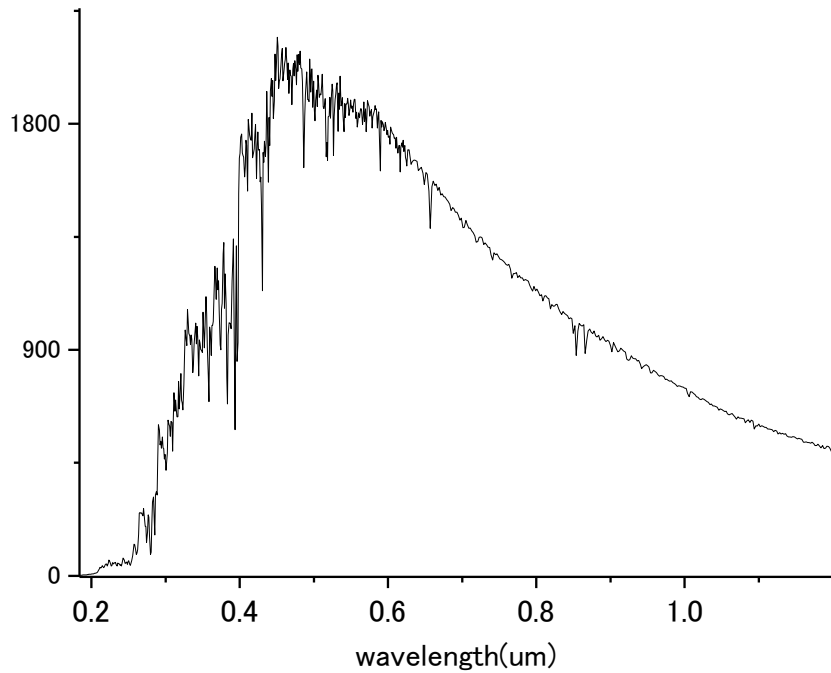
室温検出限界 1000-10000個の光子

ダイナミックレンジ 4桁以下

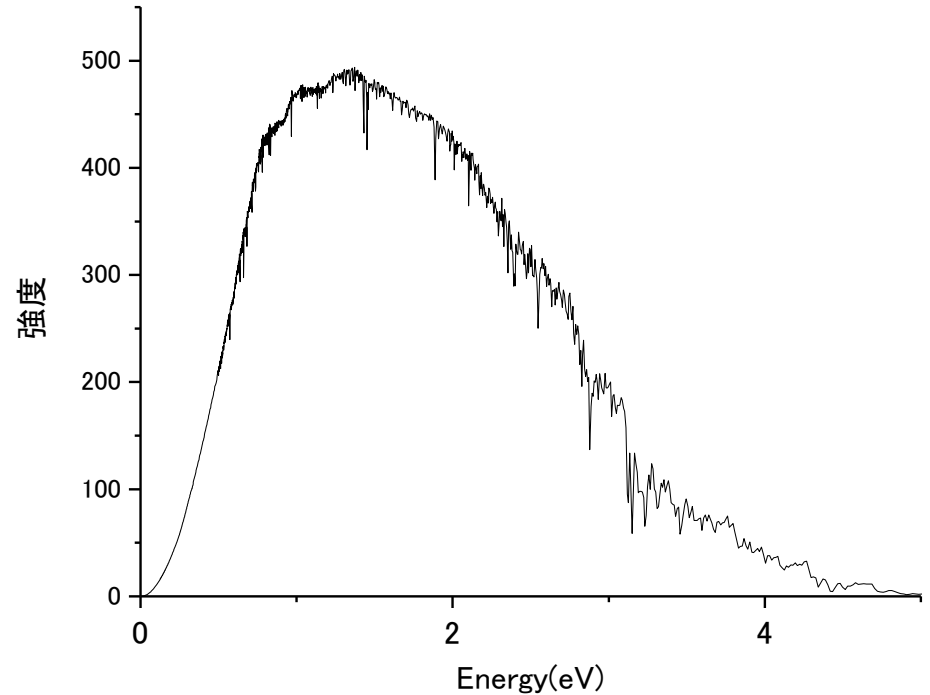
光合成の吸収スペクトルは最適でない？

- クロロフィルの吸収 類似の構造を持つ他の化合物と比べて強い ヘムの3倍以上
- カロチノイド(βカロチンなど、赤い色素)がクロロフィルの吸収を補う
- 海中の紅藻
水中の太陽光スペクトル(緑主体)に適応した色素を含む
- 過剰な光エネルギーは有害
- 単位波長当たりでなく、単位エネルギー当たりの吸収スペクトルでは....

太陽光スペクトル(大気の外)

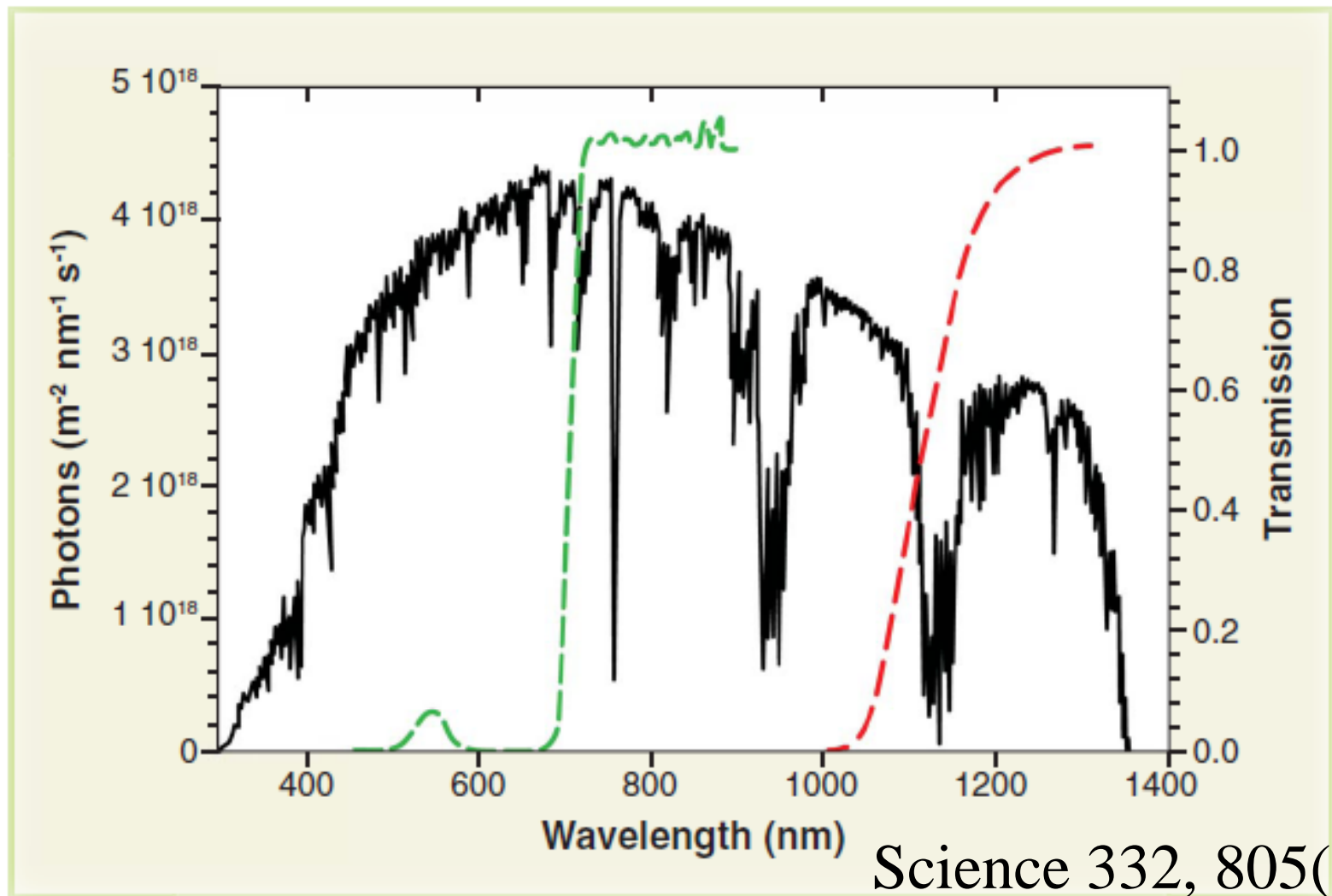


単位波長当たり



単位エネルギー当たり

光量子束密度 (photon flux density)

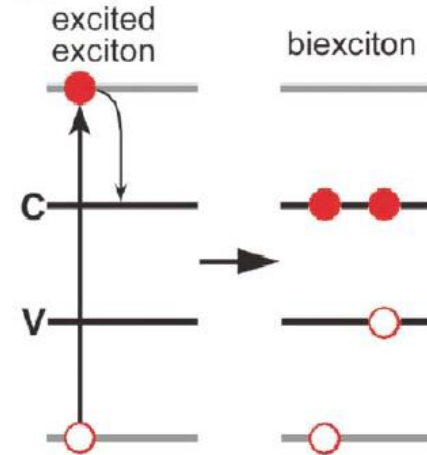


Science 332, 805(2011)

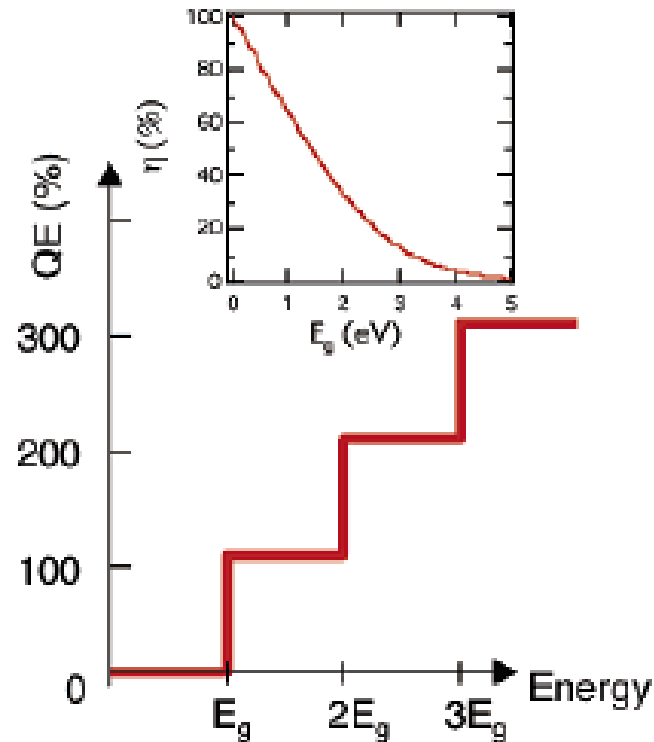
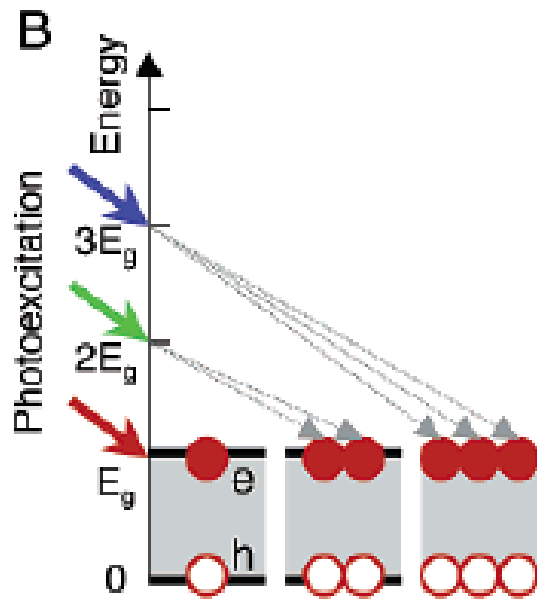
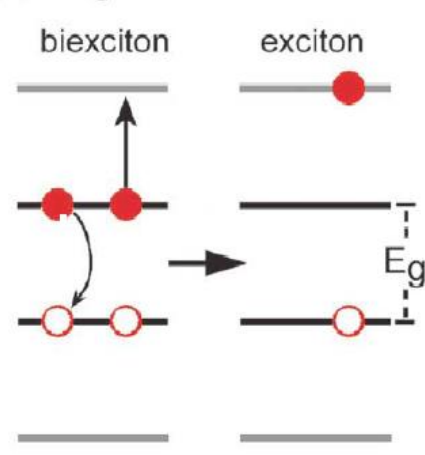
Fig. 1. The photon flux spectrum of solar radiation reaching Earth's surface (plotted in black) (66) and the transmission spectra of a natural photosynthetic organism, the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803 (green dot-dashed line) and of crystalline silicon [red dashed line, redrawn with permission from (67)]. The transmis-

1光子で複数の電子正孔対(多励起子)を生成すれば

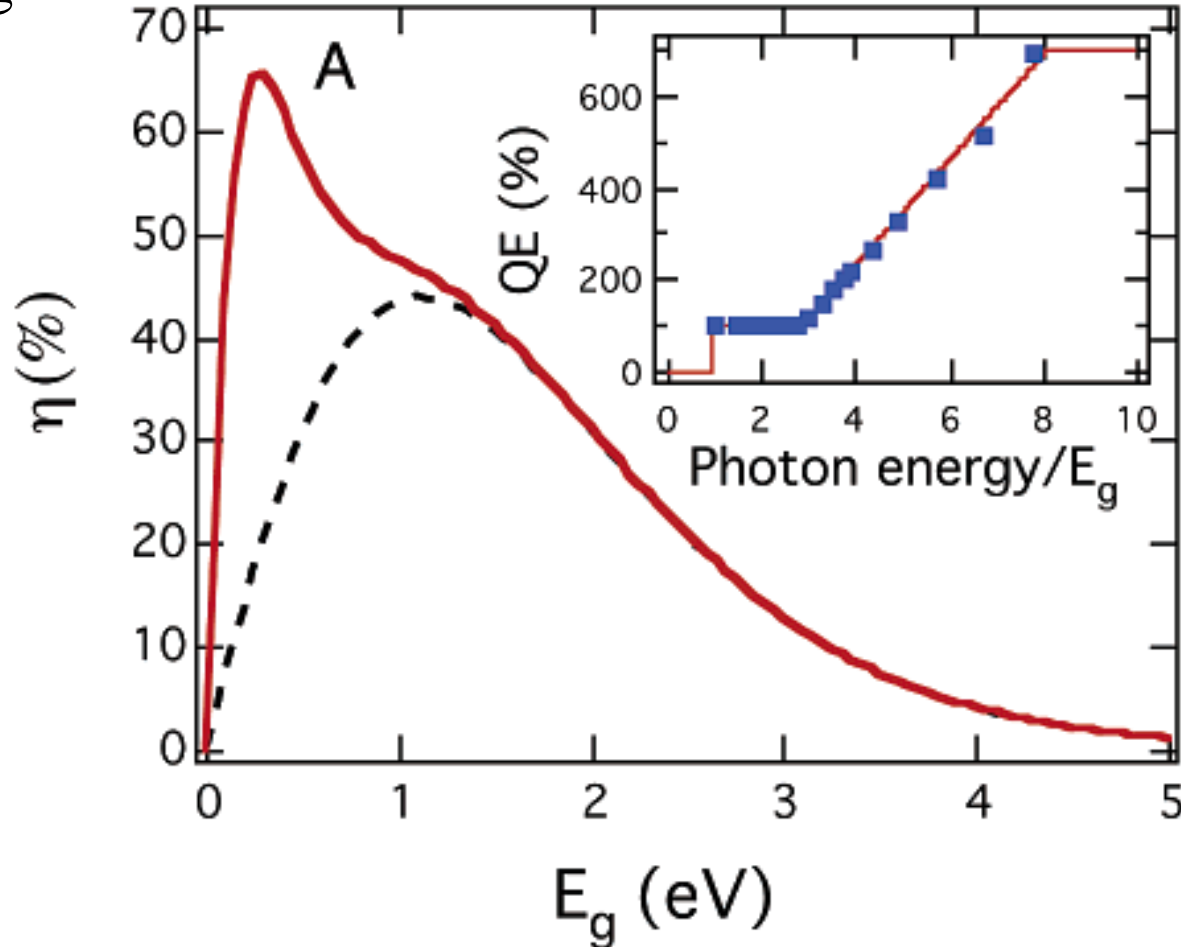
(a) Impact Ionization



(b) Auger Recombination



$E=8E_g$ の光子で7個の励起子を生成 in PbSeQD

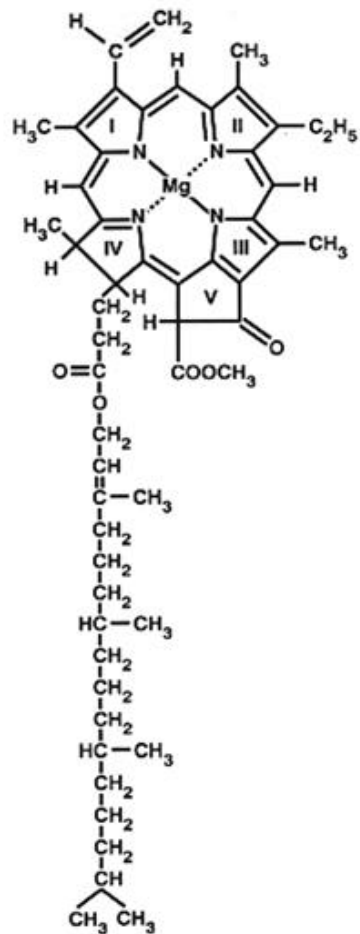


2007 Si量子点でも観測。量子点の外の局在中心にエネルギーを取り出すことにも成功。現在、PbSeでの7励起子/光子もの増倍は否定されている。現在、CNT, graphene, bulk Si 等においても多重励起子(キャリア増幅)生成が議論されている。

クロロフィルが吸収する青色の光子で2励起子を作れば

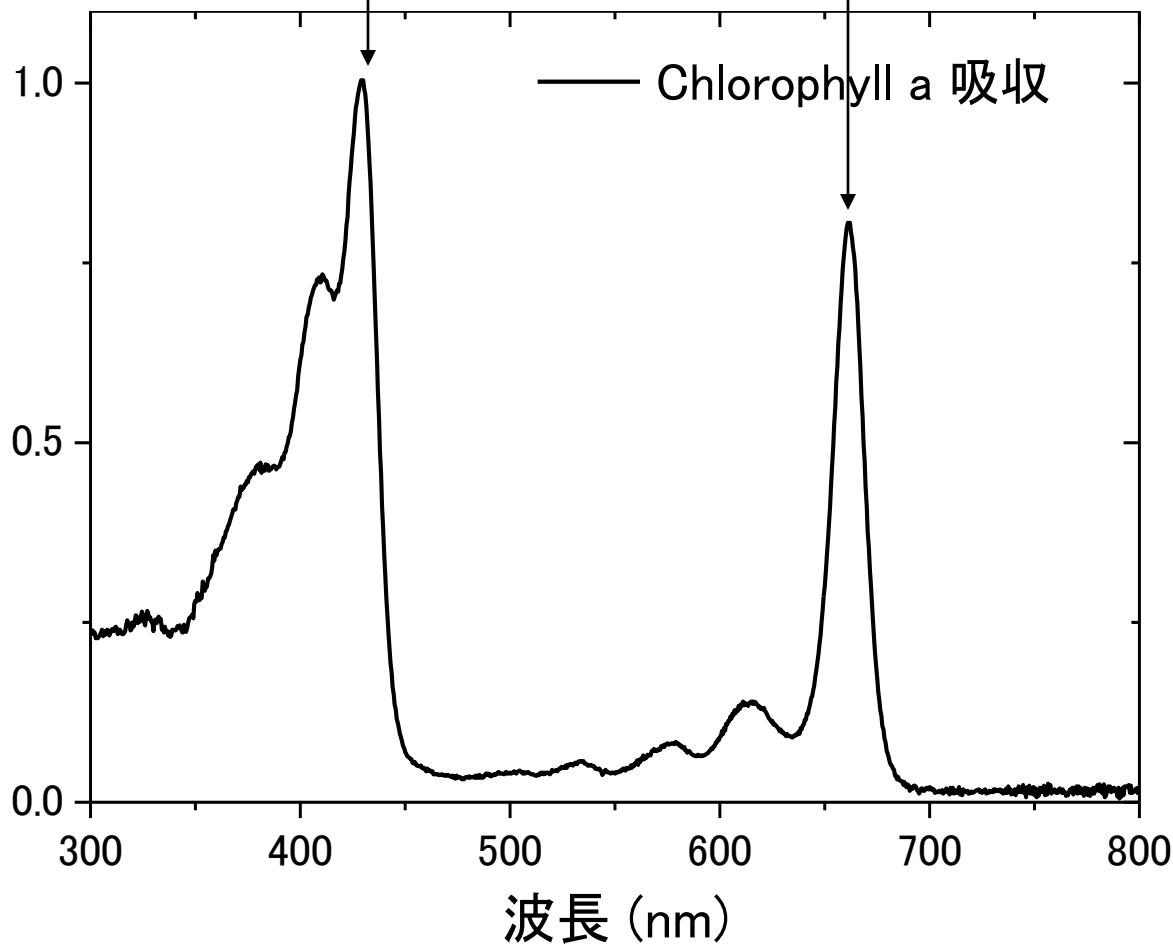
430nm=2.88eV

660nm=1.88eV



Chlorophyll a

吸光度

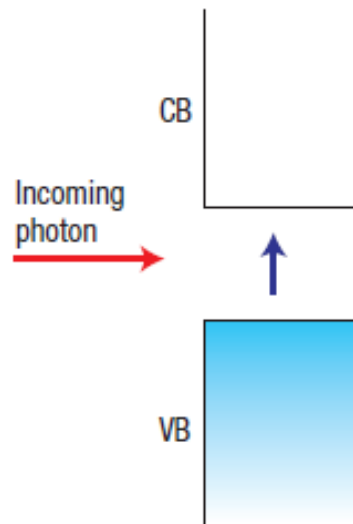


$2.88\text{eV} \div 2 = 1.44\text{eV}$

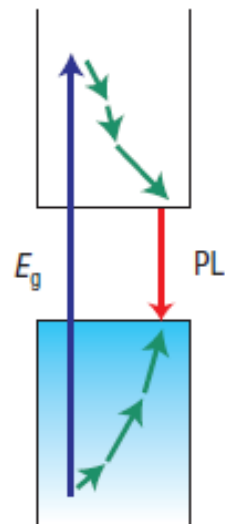
水を分解可能な電圧

さらに高効率に

a Photon not absorbed



b Excess energy lost to heat



c Two nanocrystals quantum cutting

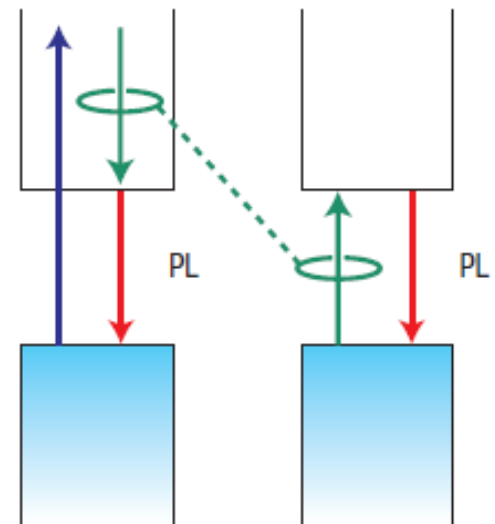


Figure 1 The absorption of a photon in a silicon nanocrystal excites an electron from the valence band (VB) to the conduction band (CB). **a**, Photons with energy less than the bandgap, E_g , are not absorbed. **b**, The excess energy from photons with more energy than the bandgap is lost as heat. **c**, The quantum-cutting process transfers some of this extra energy to a second nanocrystal, allowing it to be used to generate another photon by photoluminescence (PL).

遺伝子組み換えで光合成能力を3割増強

日本大グループ 2007年7月10日

現在の植物は太陽光からATPを作る際、植物に残っている電子伝達物質「プラストシアニン」しか利用していない。下等植物の「すしのり」が持つシトクロムの遺伝子をシロイヌナズナに導入して電子伝達分子を2種類にすると、通常のものより背丈、重量、葉の面積、根の長さなどが3割程度増えた。光合成の明反応能力を示すATPの量も約2倍に。

CO₂取り込む気孔を広げ、収量増へ

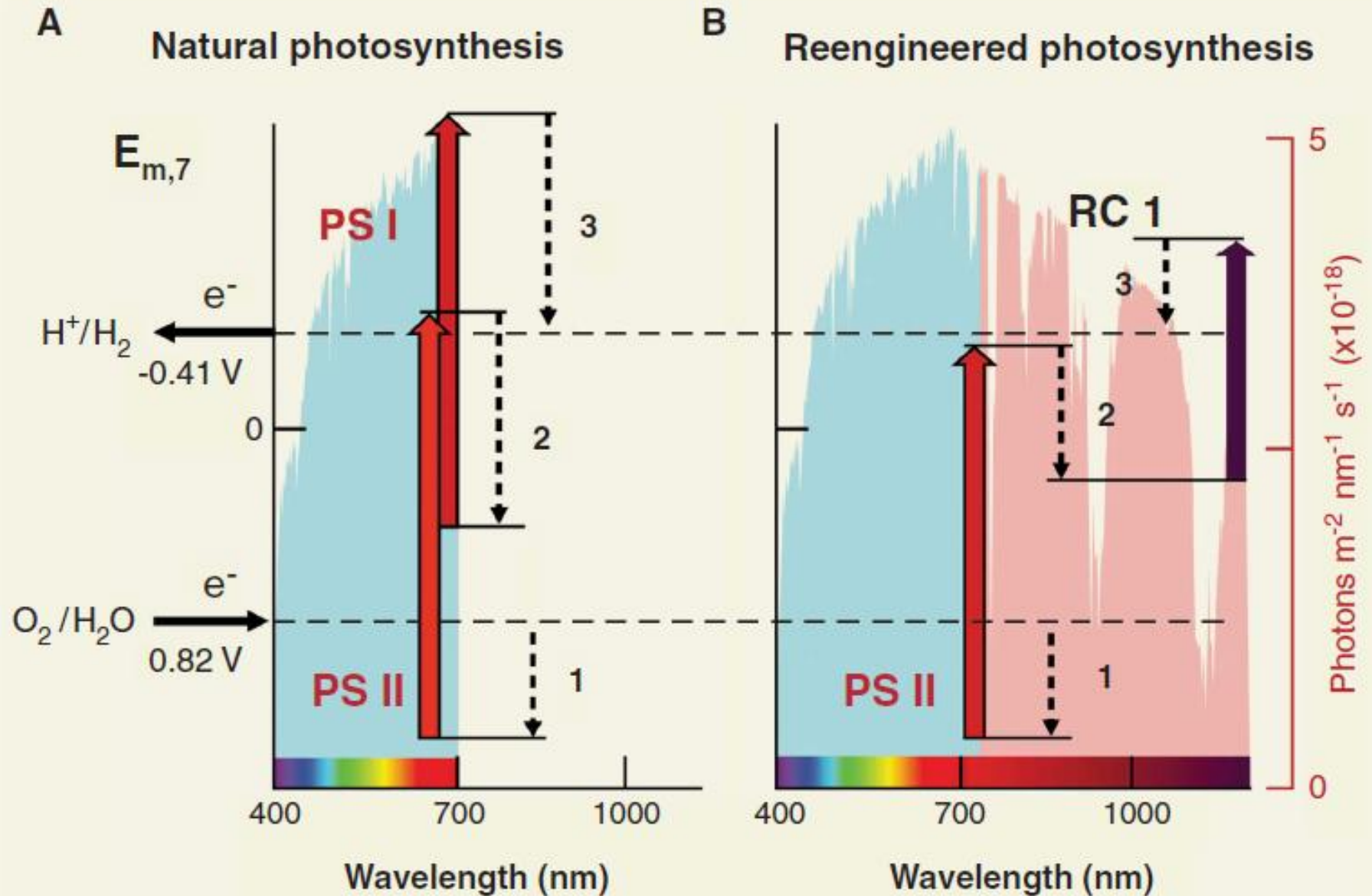
名古屋大グループ 2014年9月14日読売新聞

シロイヌナズナの気孔25%大きく開くようにするとCO₂を15%多く吸収、36-40%重く育った

学生の実験で大発見！ 植物工場を救う“幸運の光” 2016.6.13

植物の光合成には赤色と青色の光が使われている。SHIGYO法では、野菜に赤色の光のみを12時間、次に青色の光のみを12時間、交互に照射する。それにより、野菜は従来の植物工場で使われていた蛍光灯に比べて成長速度が大幅に向上する。

光合成の改良 (太陽光の利用効率を高める)



Science 332, 805(2011)

終わり

光電場の複素表示

直線偏光

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i(\omega t - kz + \phi)} = \mathbf{E}_0 e^{-i\phi} e^{-i(\omega t - kz)} = \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{-i(\omega t - kz)}$$

$$\mathbf{E} = \text{Re} \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{-i(\omega t - kz)} = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - kz + \phi)$$

ただし E に関する線形方程式のみ

$$\text{非線形方程式} \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} P_{\text{NL}} \quad (P_{\text{NL}} = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2)$$

$$\text{正: } E^2 = E_0^2 \cos^2(\omega t - kz) = \frac{1}{2} E_0^2 [1 + \cos 2(\omega t - kz)]$$

$$\text{誤: } E^2 = E_0^2 e^{-i2(\omega t - kz)} \quad \text{Re} = E_0^2 \cos 2(\omega t - kz)$$

光強度

光検出器 光のエネルギーを検出
光の振動数で変化する速い変化に追従できない
サイクル平均が測定される

$$\mathbf{E} = E_0 \cos(\omega t - kz) \quad \mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

$I \equiv |\bar{\mathbf{S}}|$ サイクル平均光強度

$$|\mathbf{S}| = E_0 H_0 \cos^2(\omega t - kz) = E_0 H_0 \frac{1 + \cos 2(\omega t - kz)}{2}$$

$$(\text{サイクル平均強度}) = \frac{E_0 H_0}{2} = \frac{E_0}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0 = \frac{1}{2} \epsilon_0 |E_0|^2 c \text{ [J/(m}^2 \cdot \text{s)]} \propto |E_0|^2$$

したがって複素表示 $E = E_0 e^{-i(\omega t - kz)}$ で表して $I \propto EE^*$ でよい

干渉縞の計算

$$E_1 = E_0 \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - \omega t)$$

$$E_2 = E_0 \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi)$$

$$(E_1 + E_2)^2 = E_0^2 \frac{1 + \cos 2(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - \omega t)}{2} + E_0^2 \frac{1 + \cos 2(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi)}{2} \\ + E_0^2 \{ \cos[(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x} - 2\omega t + \phi] + \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x} - \phi] \}$$

$$(\text{サイクル平均}) = E_0^2 + E_0^2 \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x} - \phi]$$

複素表示を使う方法

$$E_1 = E_0 e^{i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad E_2 = E_0 e^{i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi)}$$

$$|E_1 + E_2|^2 = (E_0 e^{i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - \omega t)} + E_0 e^{i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi)})(E_0 e^{-i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{x} - \omega t)} + E_0 e^{-i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{x} - \omega t + \phi)}) \\ = E_0^2 + E_0^2 + E_0^2 e^{i[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x} - \phi]} + E_0^2 e^{-i[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x} - \phi]} \\ = 2E_0^2 \{1 + \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{x} - \phi]\}$$