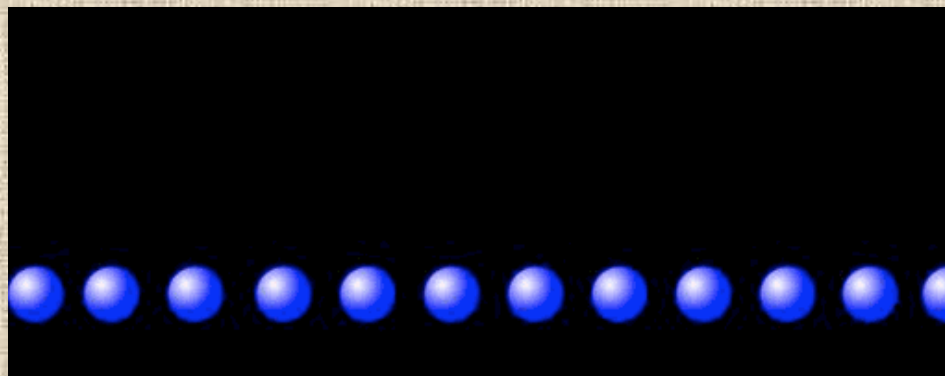


光で物質をあやつる

京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 教授

田中耕一郎



内容

1. 光とは何か
2. 光で物質をみる
3. 光で物質をあやつる
4. まとめ

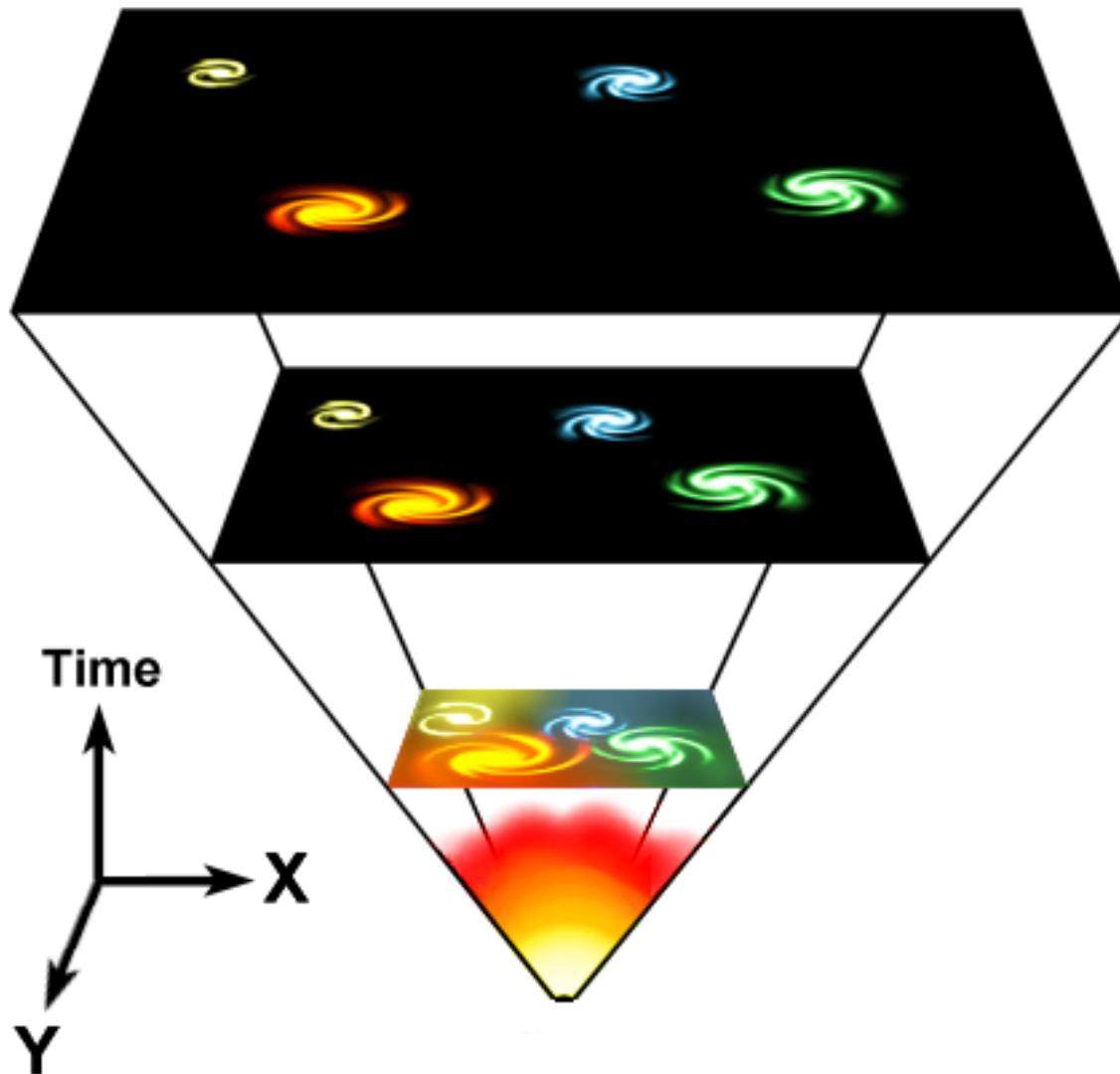


Genesis

Bible, Chapter 1

- 1:1 At the first God made the heaven and the earth.
And the earth was waste and without form; and it was
- 1:2 dark on the face of the deep: and the Spirit of God was
moving on the face of the waters.
- 1:3 **And God said, Let there be light: and there was light.**
- 1:4 And God, looking on the light, saw that it was good: and
God made a division between the light and the dark,
- 1:5 Naming the light, Day, and the dark, Night. And there
was evening and there was morning, the first day.

Big Bang Universe



光の性質

ルネサンス以降

■ 粒子説

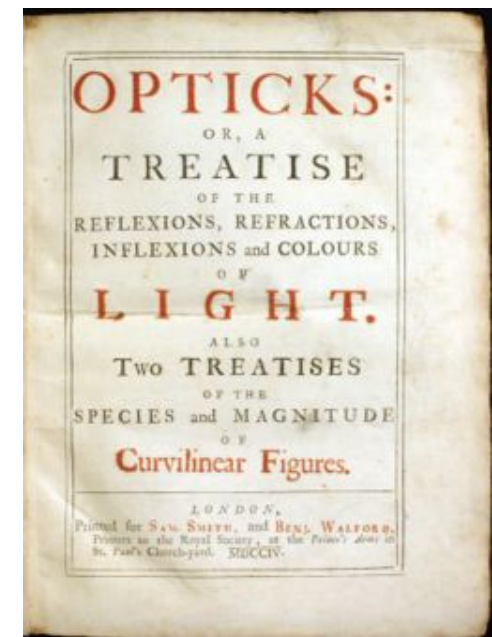
- Pierre Gassendi (1592–1655)
- Isaac Newton (1642–1727)
‘Optics’

光は直進する

光は障害物を避けてまわりこむ

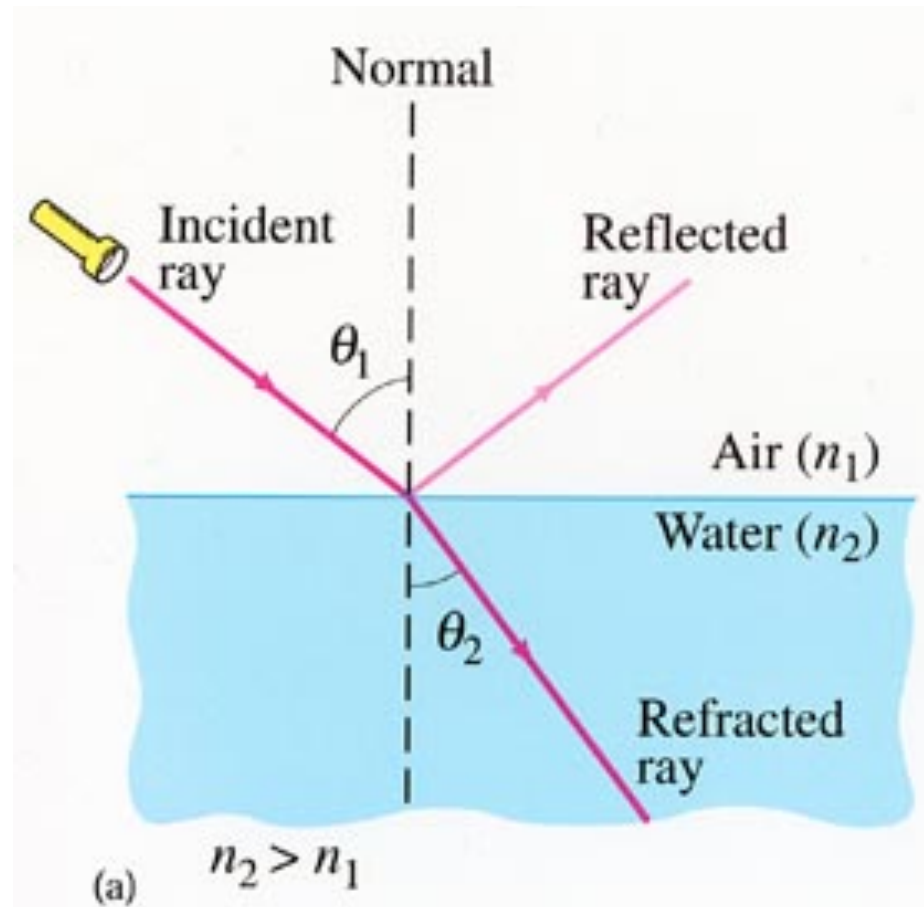
光の反射現象は説明できたが、屈折現象は「濃い物質に光が入射するときは重力の引力で加速される」とまちがった説明をした。

18世紀いっぱいこの考え方が続く



光の性質

屈折の法則 スネルの法則 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



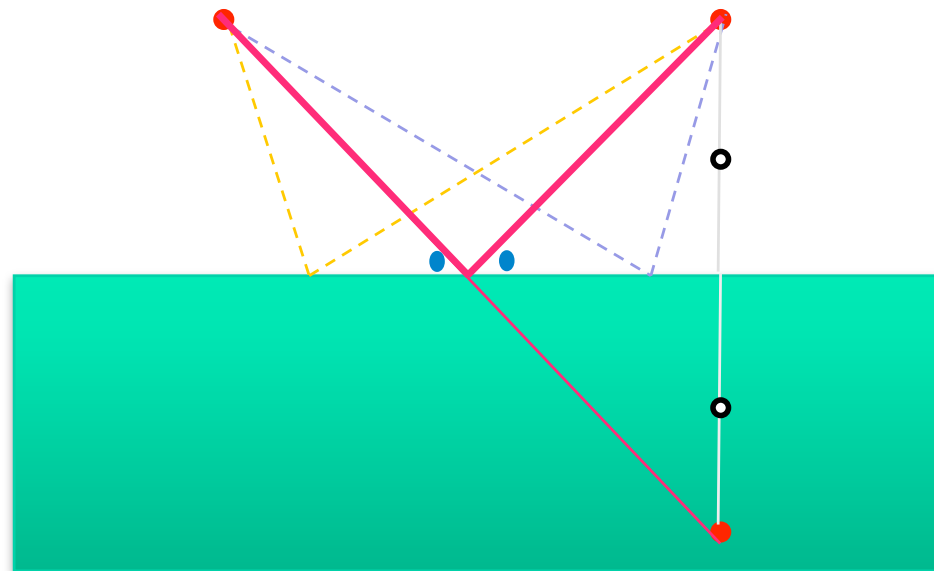
光の性質

粒子としての光

屈折の法則 スネルの法則

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

最小時間の原理 反射の場合
(フェルマーの原理)

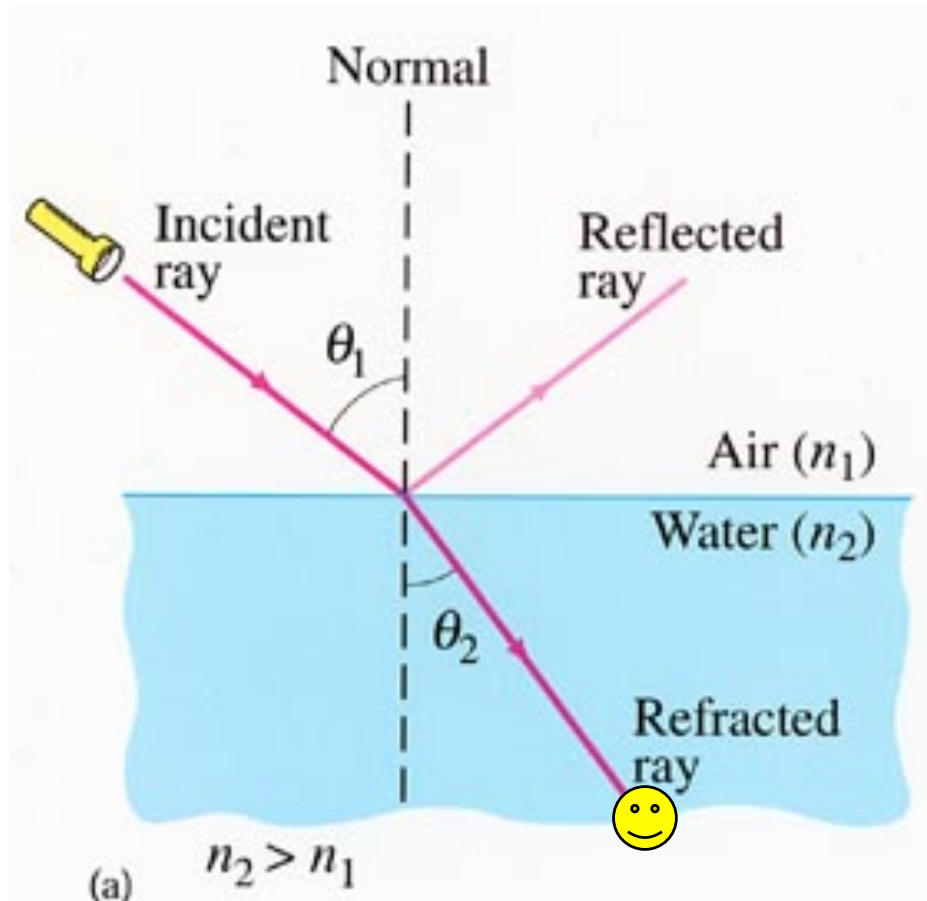


光の性質

最小時間の原理
(フェルマーの原理)

屈折の場合

海難救助の問題



$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

屈折の法則 スネルの法則

フェルマーの原理は質点の古典力学の 基本原理と同じ形をしている

粒子としての光

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

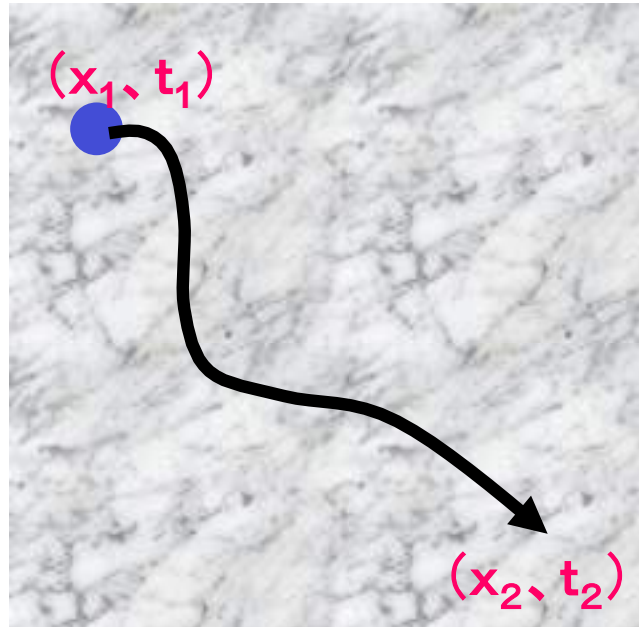
最小時間の原理
(フェルマーの原理)



質点の古典力学

$$m\alpha = F$$

最小作用の原理



$$L = \frac{1}{2}mv^2 - U$$

作用 $S = \int_{t_1}^{t_2} L dt$

光の性質

■ 波動説

- Hooke (1635–1703)
- Huygens (1629–1695)
‘Treatise on Light’

光の干渉、屈折
「光はエーテルという媒質中を
伝わる波」
物質中では光波の進む速度
が変化することで屈折を説明



出所 http://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens

光の性質

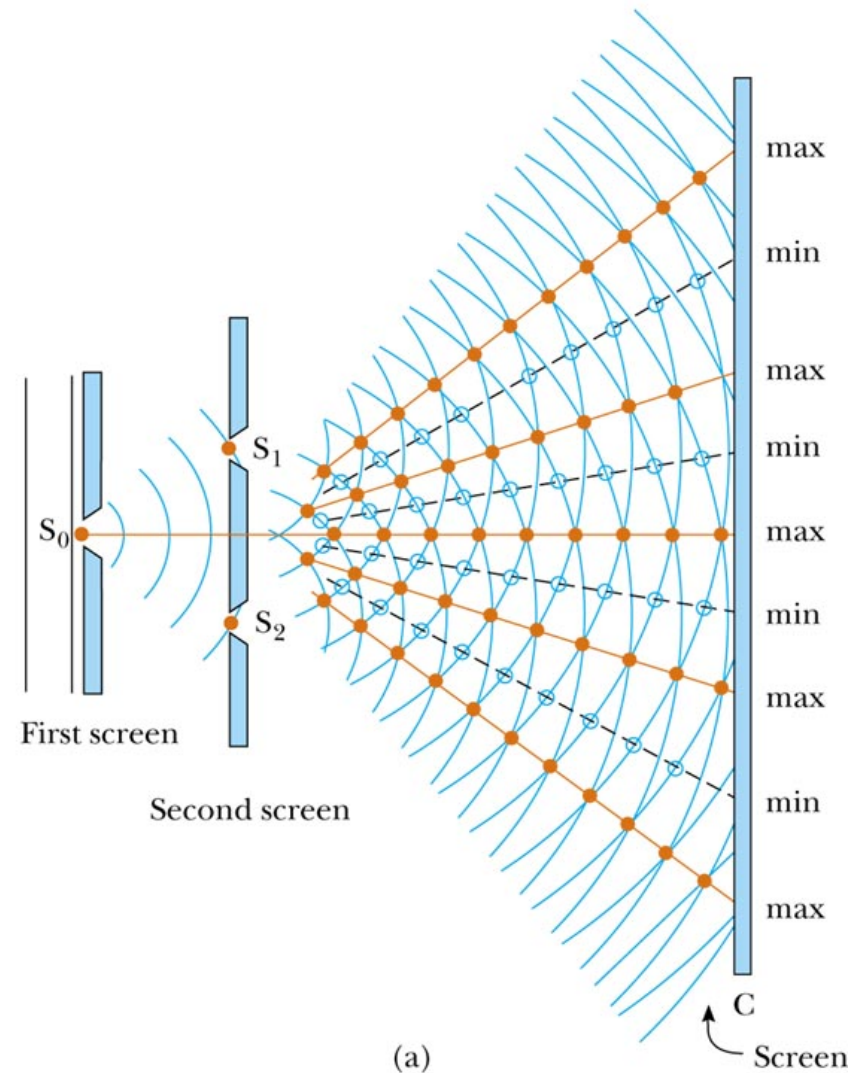
19世紀にはいると波動説が優位になった

- 干渉
 - Thomas Young(1773–1829) のダブルスリットの
実験
- 回折
 - Fraunhofer (遠いところでの回折)
 - Augustin Fresnel (1788–1827) (偏光依存性)
- 電磁波
 - Maxwell (1831–1879)

光の性質

Young's Double Slit Experiment

- 細いスリット S_1 and S_2 が波源となる。
- 2つの波源からの波はもともと位相がそろっている。



光の性質

19世紀にはいると波動説が優位になった

- 干渉

- Thomas Young(1773–1829)

- ダブルスリットの実験、 波長

- 回折

- Fraunhofer (遠いところでの回折)

- Augustin Fresnel (1788–1827) (偏光依存性)

- 電磁波

- **Maxwell (1831–1879)**

電磁場を記述するMaxwell方程式は 光学をも記述できる

ファラデーの電磁誘導の法則

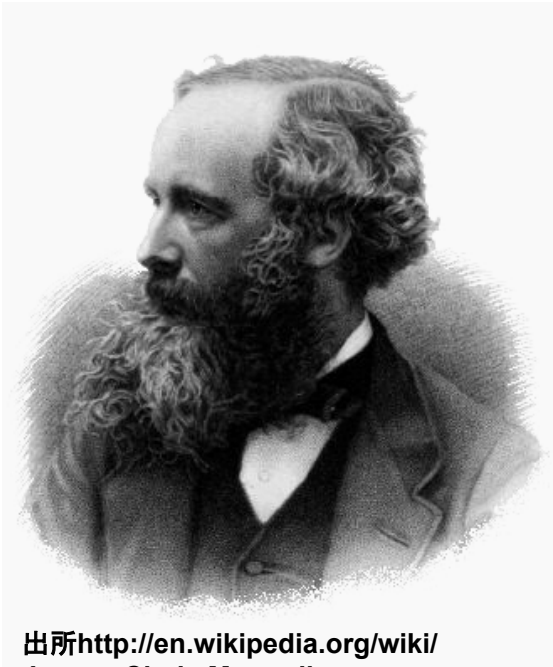
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

ガウスの法則

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{B} = \varepsilon\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mathbf{j}$$

アンペールの法則

電場 \mathbf{E} や磁場 \mathbf{B} が電流や電荷から生成される
電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} が互いに相手を作り出す



出所http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

真空中のMaxwell方程式



出所http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

電流や電荷がなくても
電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} が互いに
相手を作り出し、自律的に
振動する。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

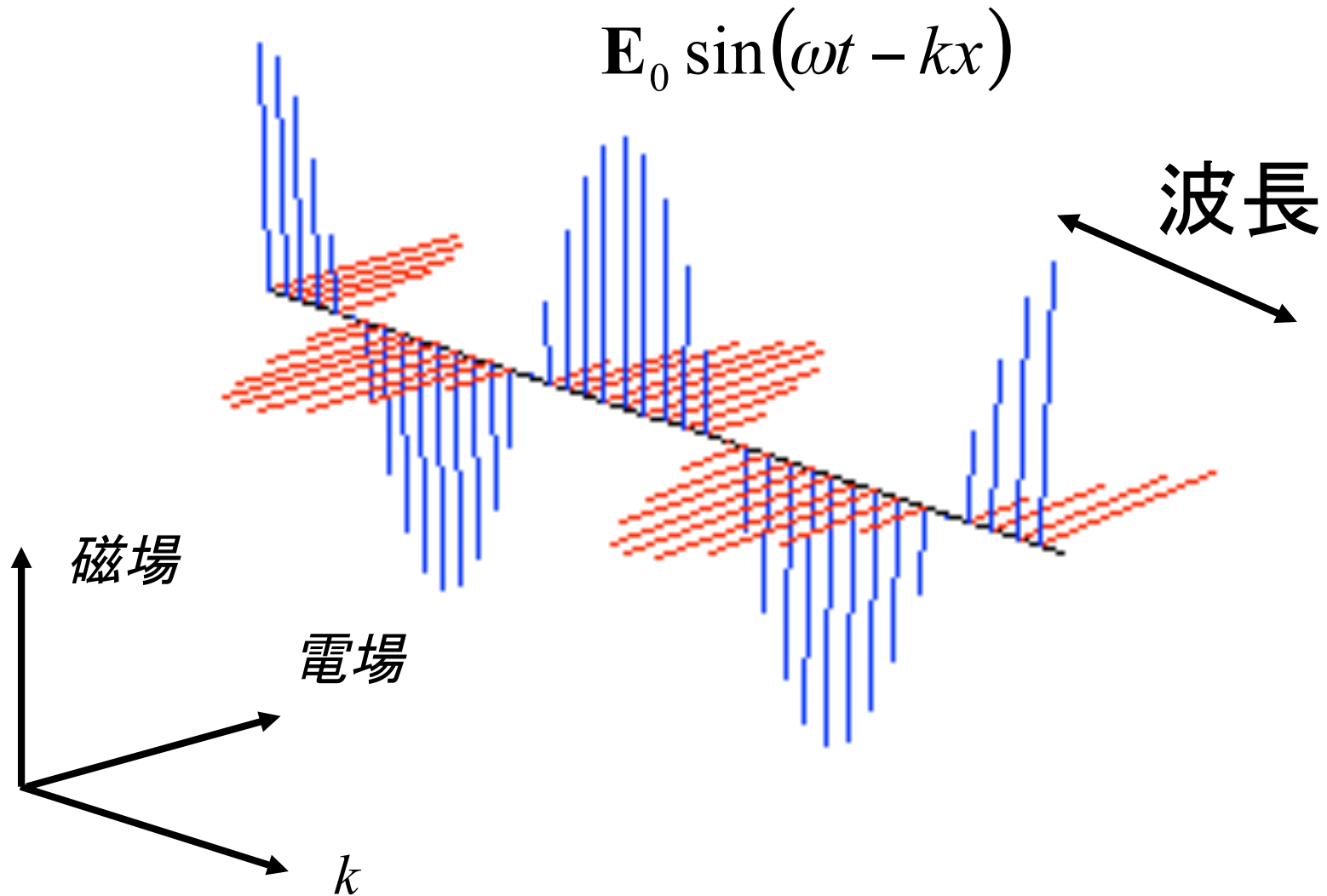


$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

波動方程式

電磁波 = 光

$$E_0 \sin(\omega t - kx)$$



And God Said

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{free}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

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

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_{free} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

and *then* there was
light.

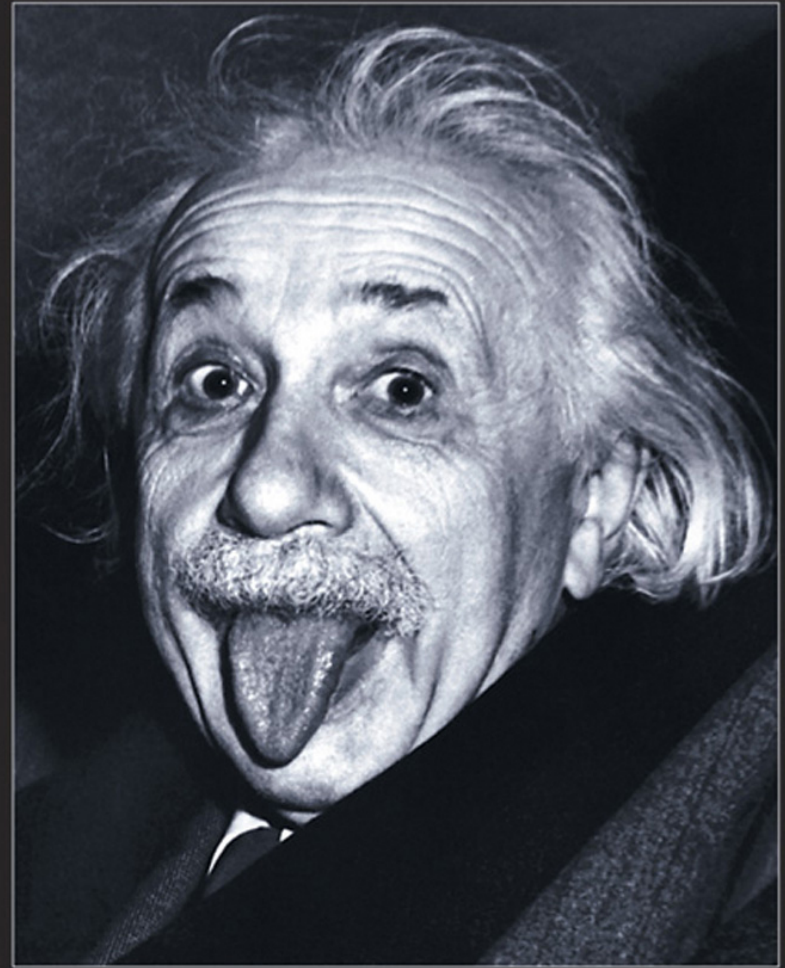


1905年 奇跡の年

アインシュタインの3つの偉大な研究が発表された年

1. 特殊相対性理論
2. ブラウン運動
3. 光量子仮説

ALBERT EINSTEIN

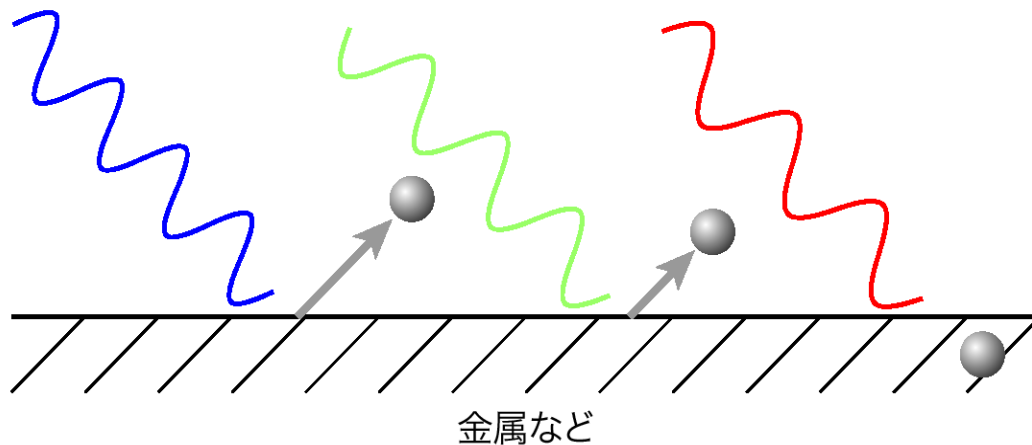


"He who joyfully marches to music in rank and file has already earned my contempt. He has been given a large brain by mistake, since for him the spinal cord would suffice. This disgrace to civilisation should be done away with at once. Heroism at command, senseless brutality, deplorable love-of-country stance, how violently I hate all this, how despicable and ignoble war is; I would rather be torn to shreds than be a part of so base an action! It is my conviction that killing under the cloak of war is nothing but an act of murder."



光量子仮説

光にはある決まったエネルギーの単位の粒のような性質がある



光電効果

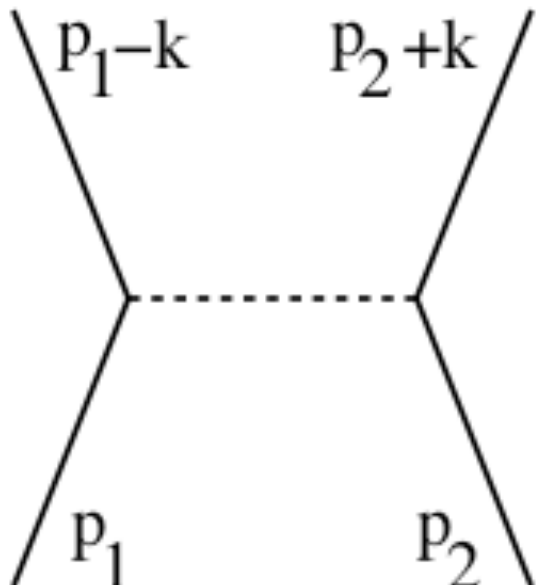
金属に波長の短い光を当てると電子が飛び出してくる現象

この現象は光が波であるすると説明できない。アインシュタインは光には粒子のような性質もあるという「光量子仮説」を提案し、何百年にも渡る「光は波か粒子か」という論争に決着をつけた。

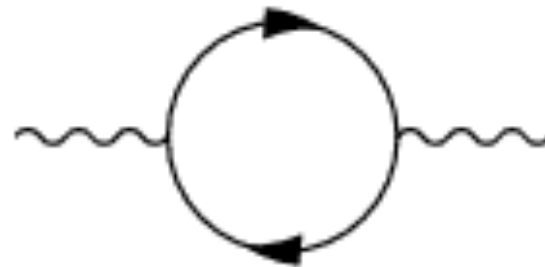
アインシュタインはこの光量子仮説に関する業績によって1921年にノーベル賞を受賞

光子 — 電磁力を介在するボーズ粒子

QED 量子電気力学 (朝永、ファインマン、シュウィンガー)
ファインマンダイアグラム



One-particle exchange
光子交換



Vacuum polarization
真空偏極

内容

1. 光とは何か
2. 光で物質をみる
3. 光で物質をあやつる
4. まとめ

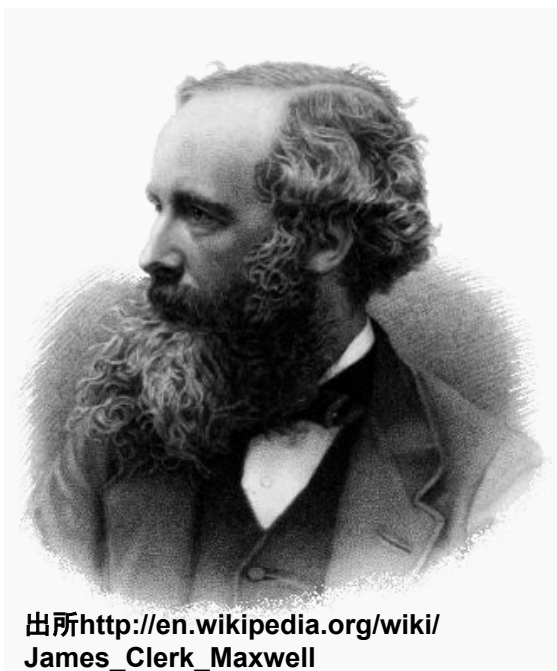
2. 光で物質をみる

光吸収や発光スペクトルから物質の情報を読み取る

特別な波長の光をもちいて物質を可視化する

構造ゆらぎに特有な光現象

物質中の光

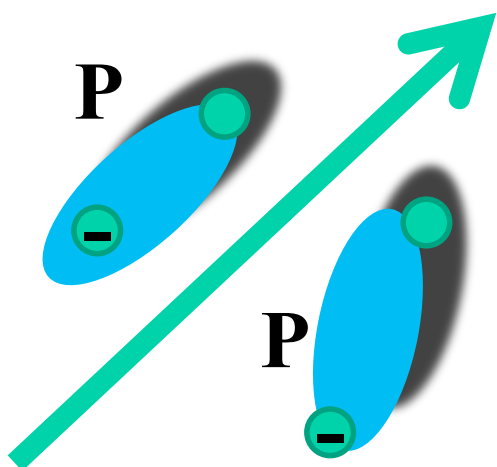


$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})$$



$$\mathbf{E}_0 \sin \omega t$$



分極の生成
共鳴現象
光速の変化

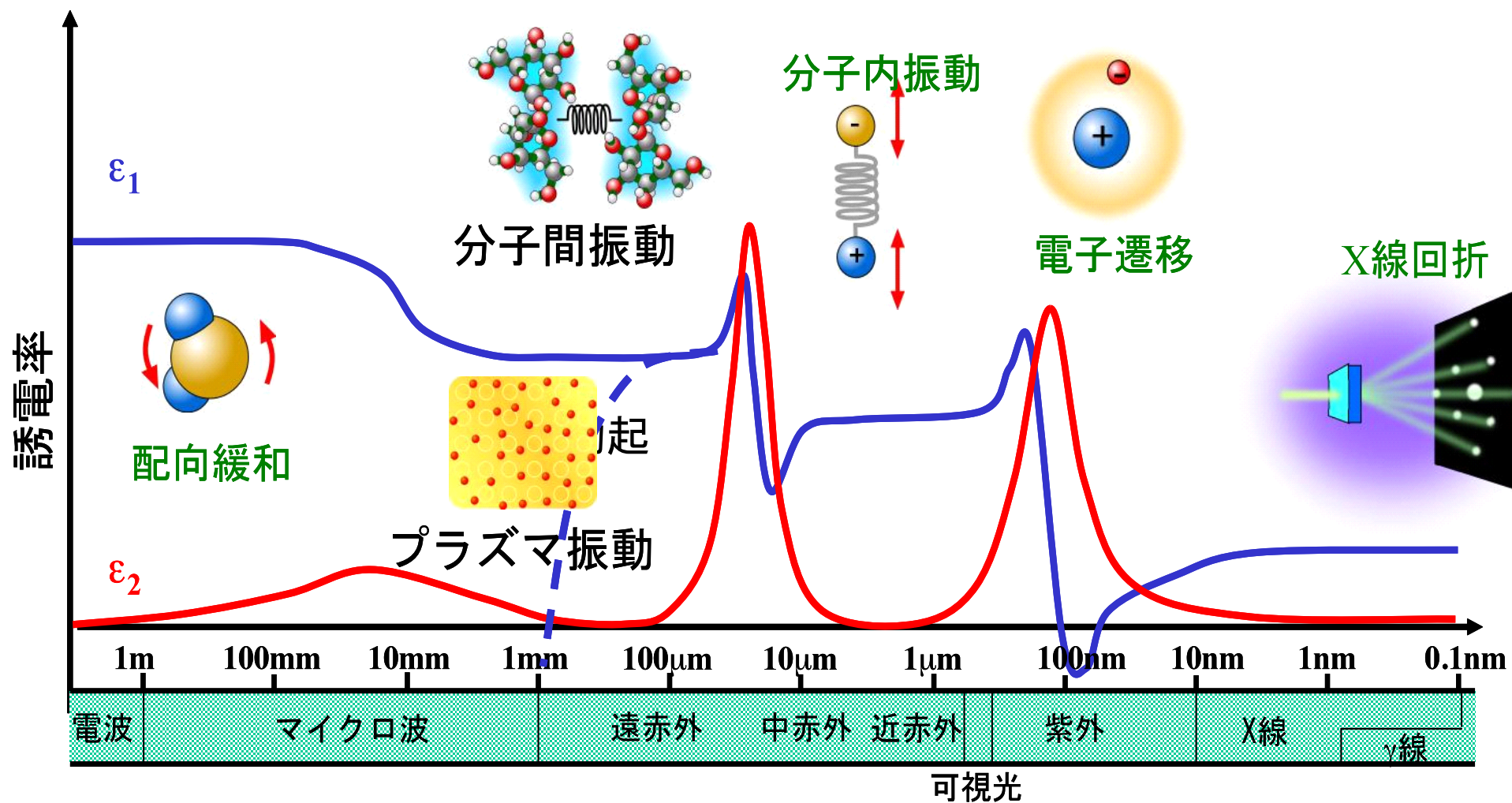


物質中の光



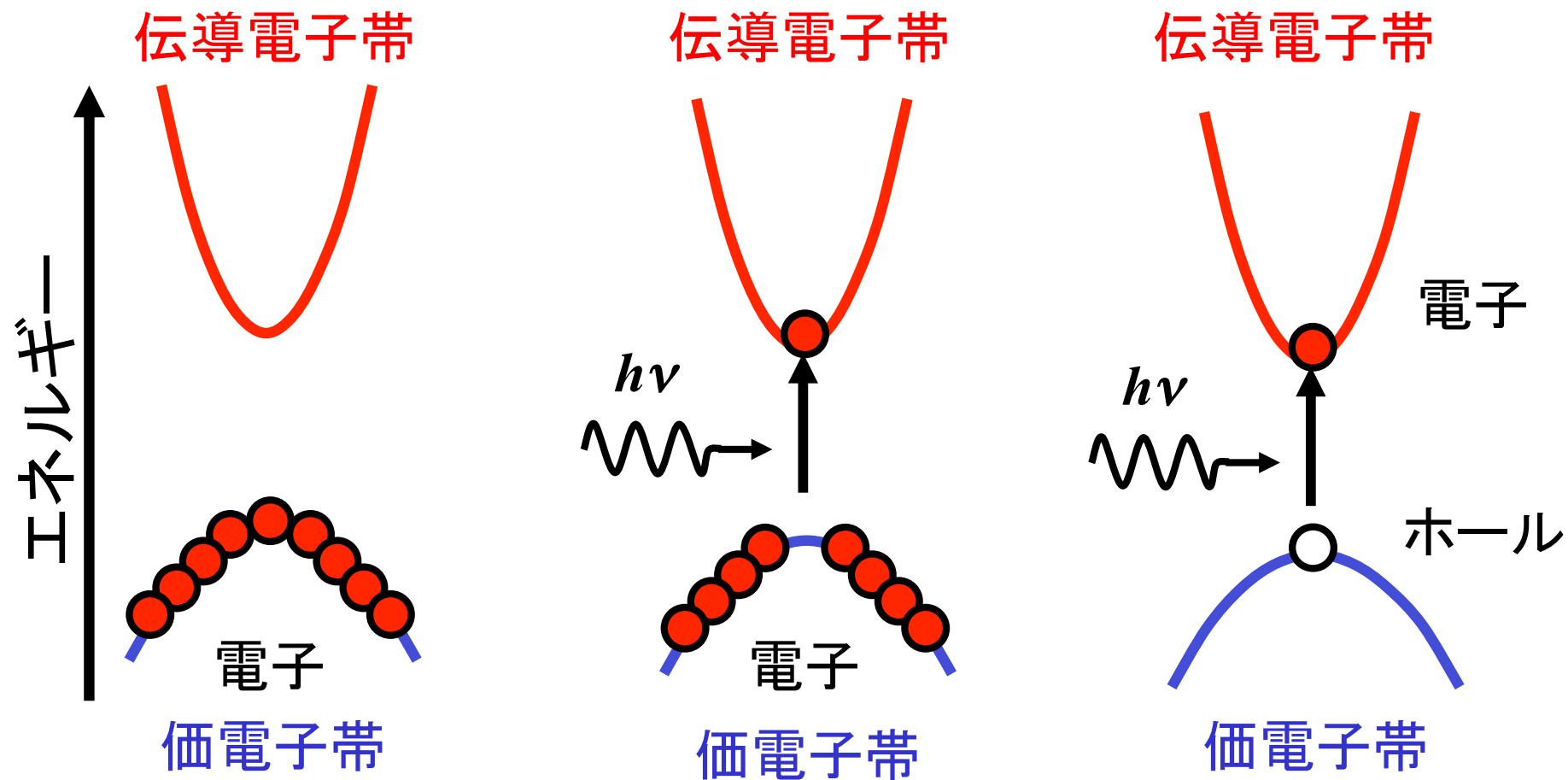
超低速
の光

光(電磁波)と物質との共鳴

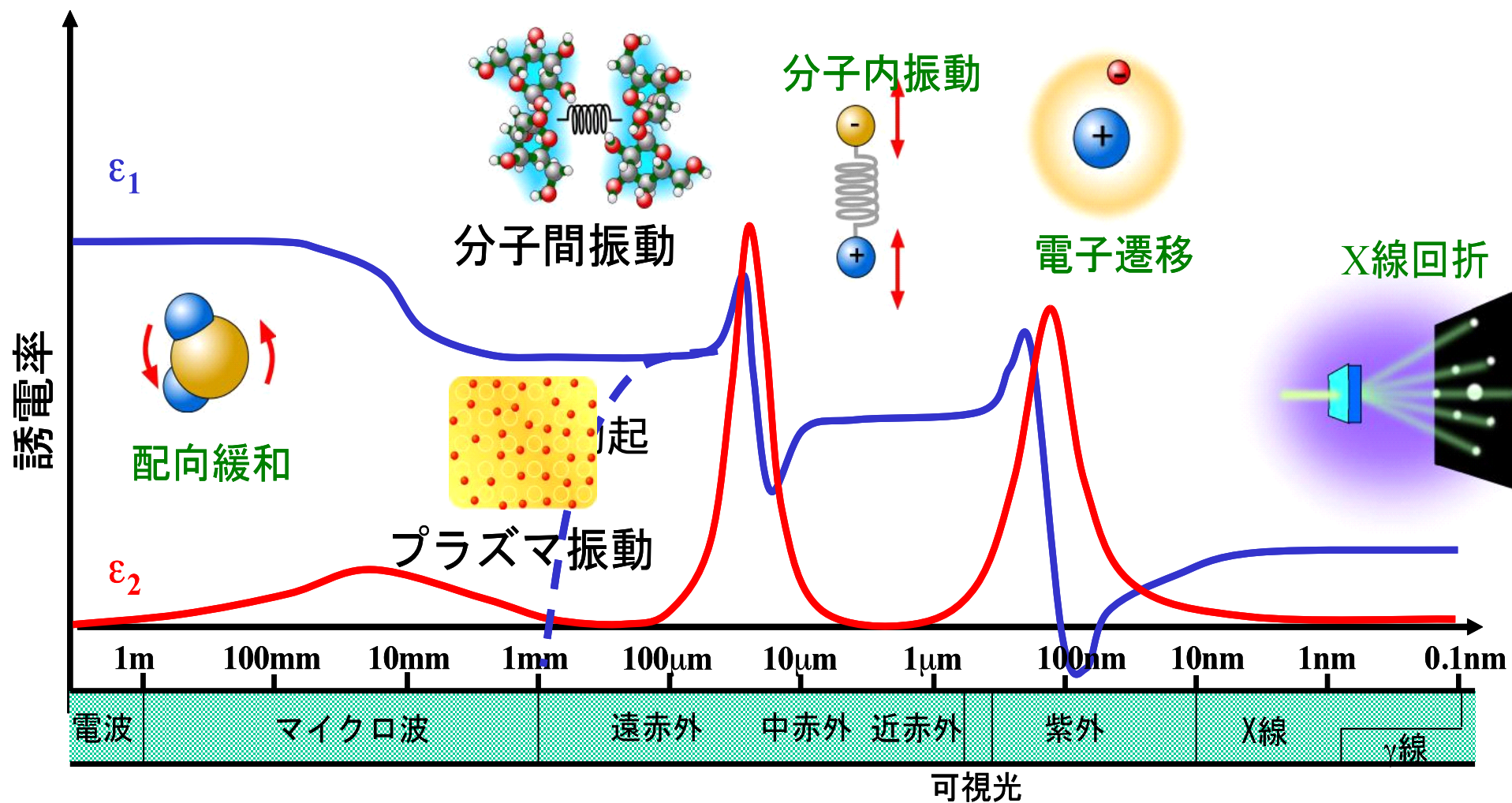


半導体は最も効率よく光を生成する材料の一つ

半導体の光物性

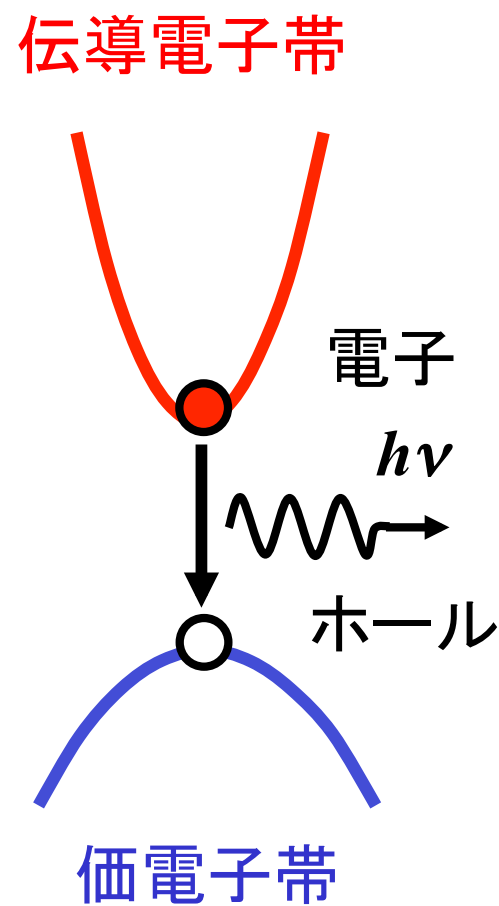
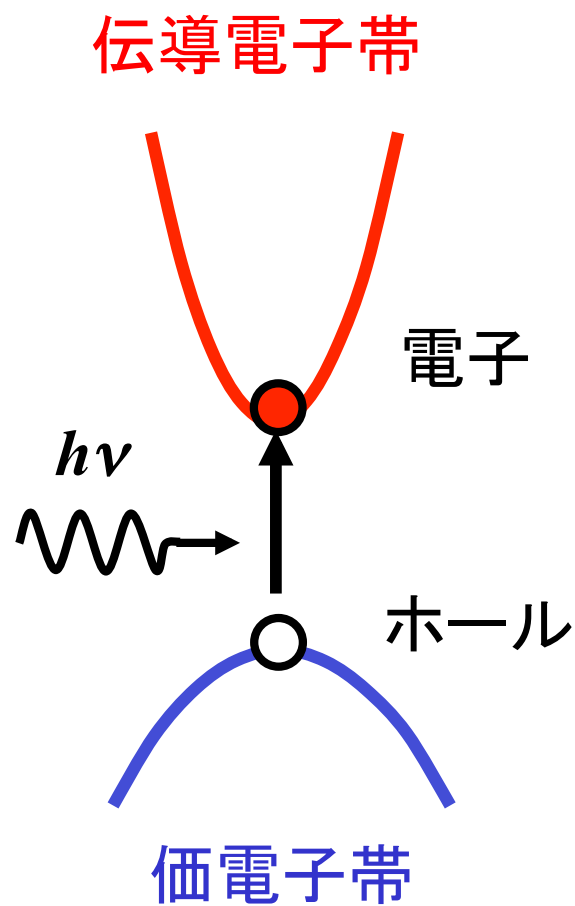


光(電磁波)と物質との共鳴

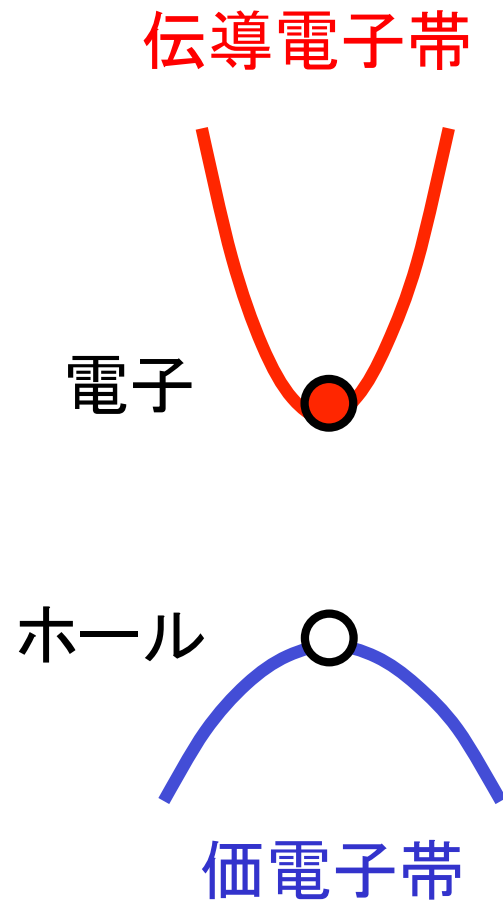


半導体は最も効率よく光を生成する材料の一つ

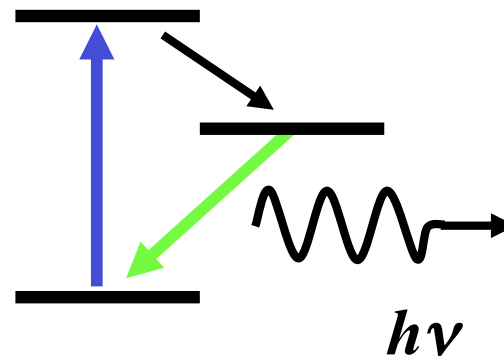
吸収と発光



蛍光体



蛍光は半導体や絶縁体に希土類や遷移金属を添加した際に得られる中間準位から生じる



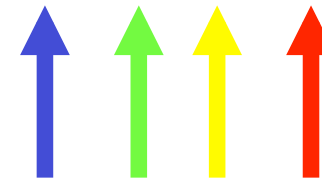
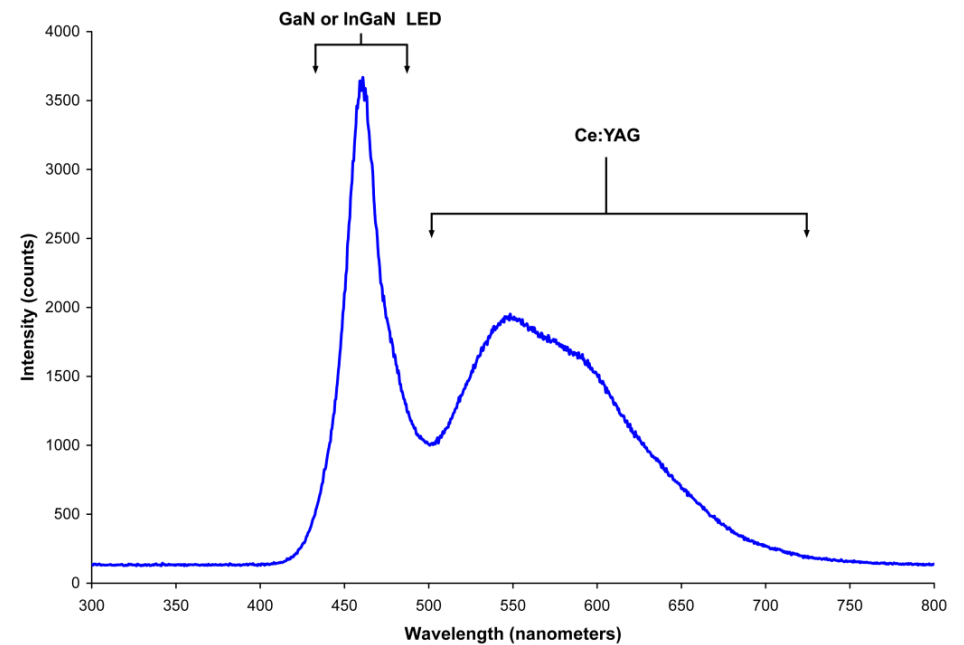
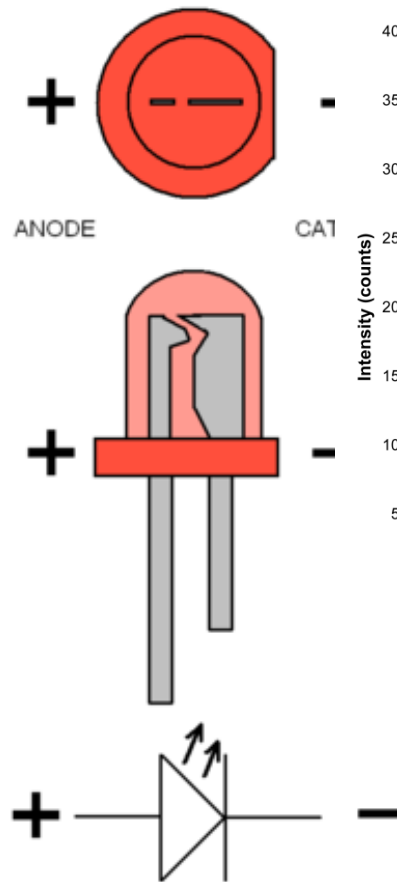
例：蓄光材料

$\text{SrAlO}_4:\text{Dy}:\text{Eu}$

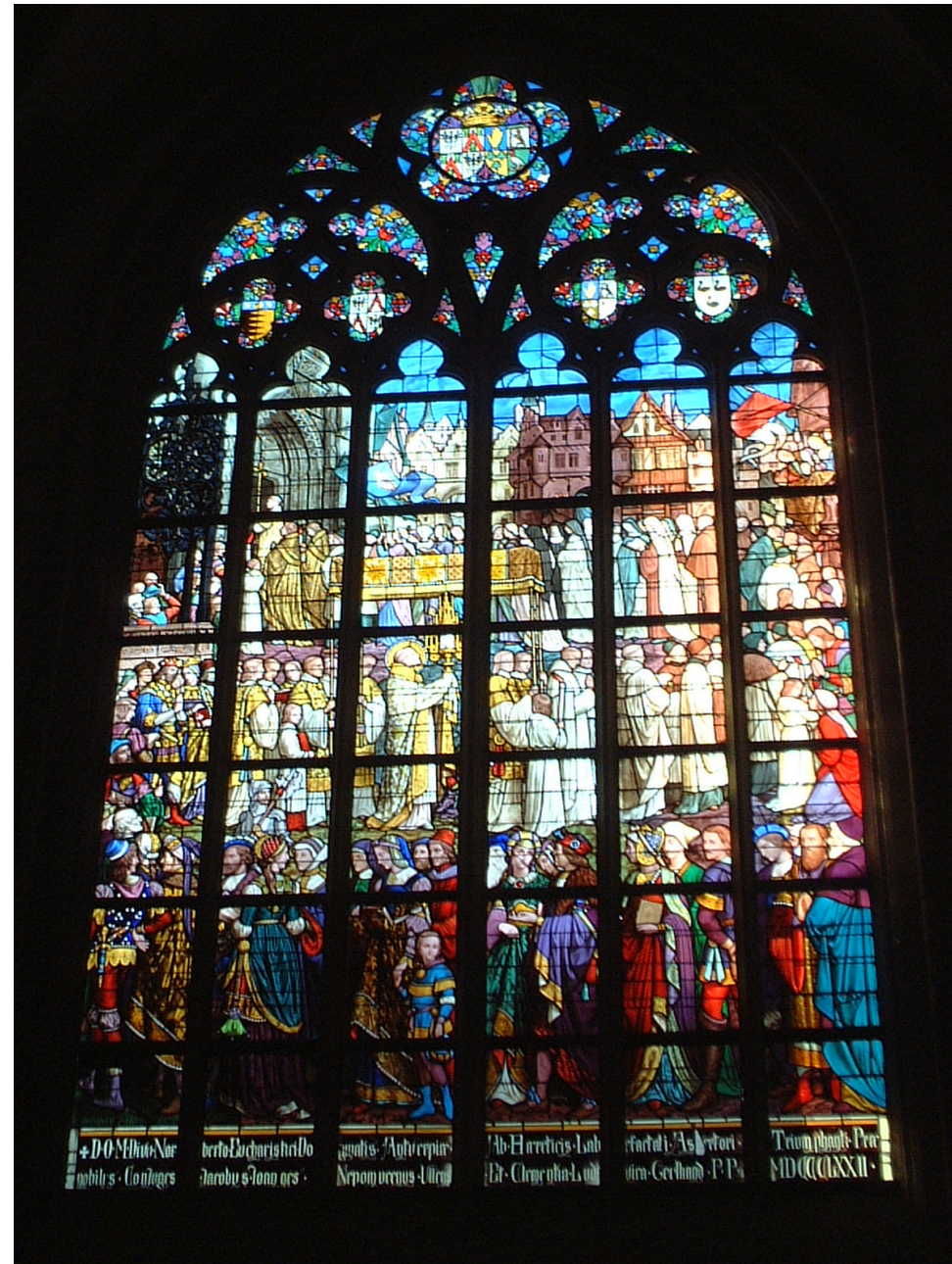
半導体は最も効率よく光を生成する材料の一つ

白色LED (Light Emitting Diode)

色分布

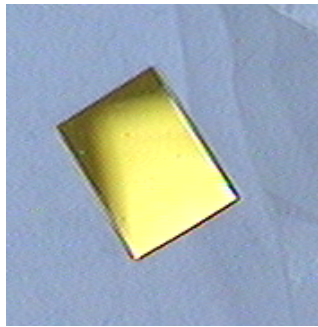


ステンドグラスの赤色はどこから来た？

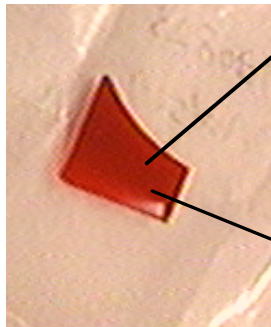


金のナノ粒子を光スペクトルで見る

Gold Nanoparticles in SiO₂



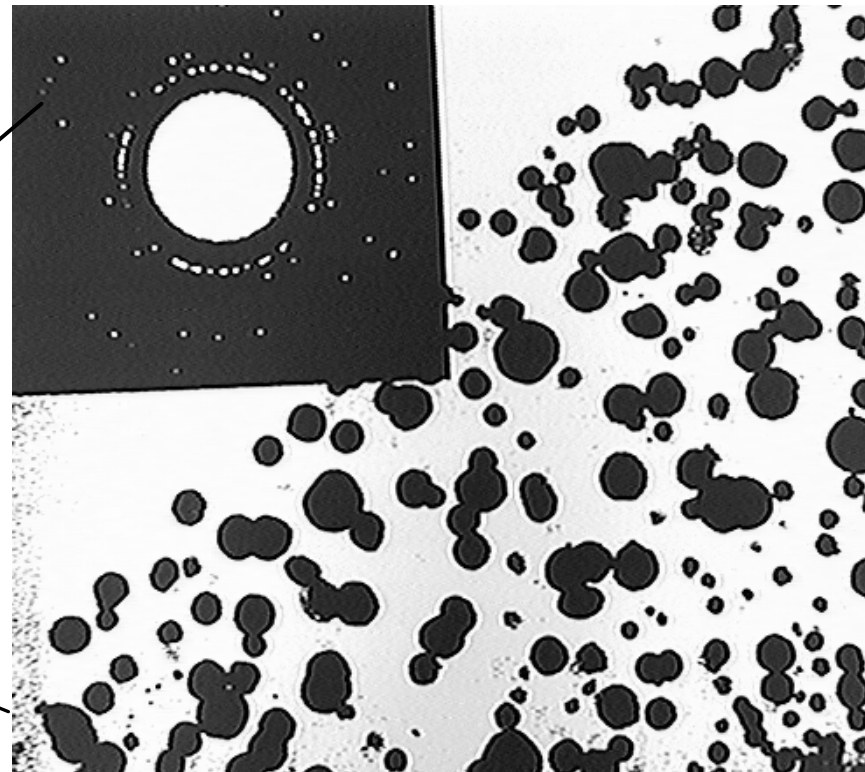
Gold Film



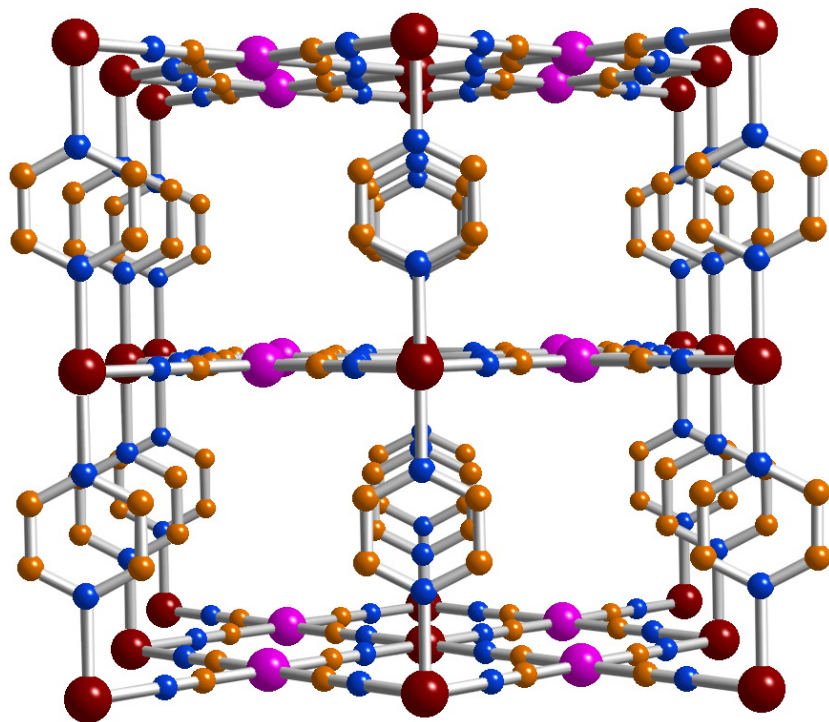
Gold Nanoparticles

Cross sectional TEM image

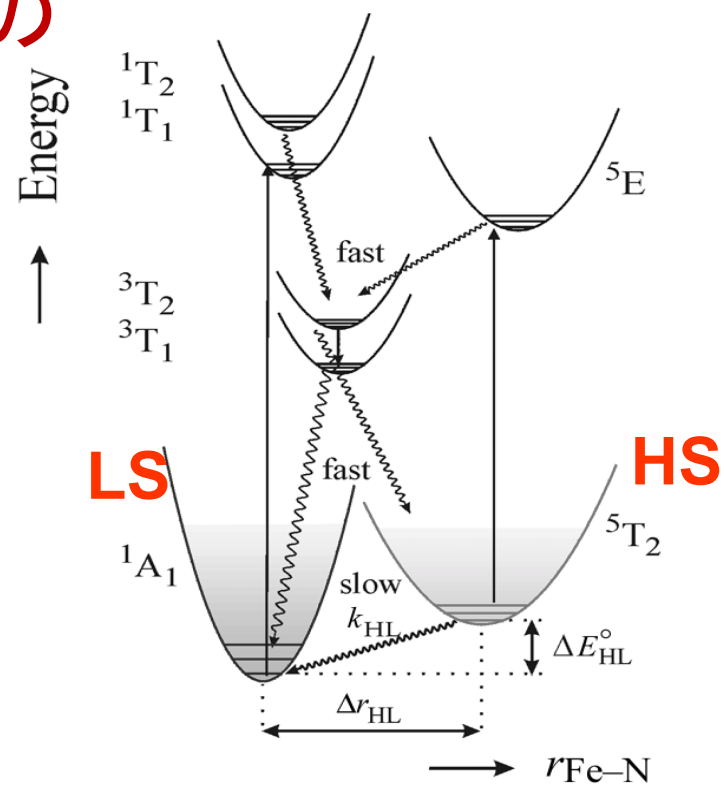
Average diameter : 7 nm



鉄スピנקロスオーバー錯体の 構造変化にともなう色変化

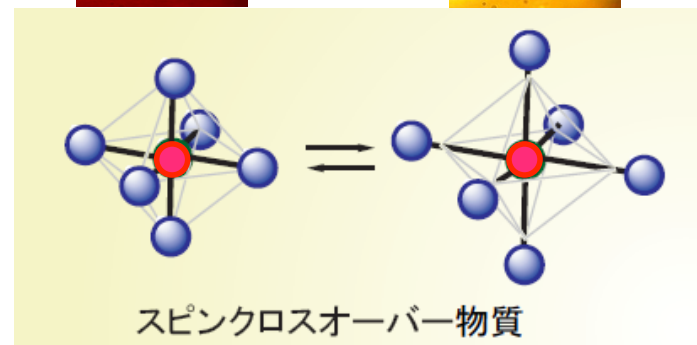
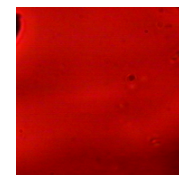


Fe(pyrazine)[Pt(CN)₄]

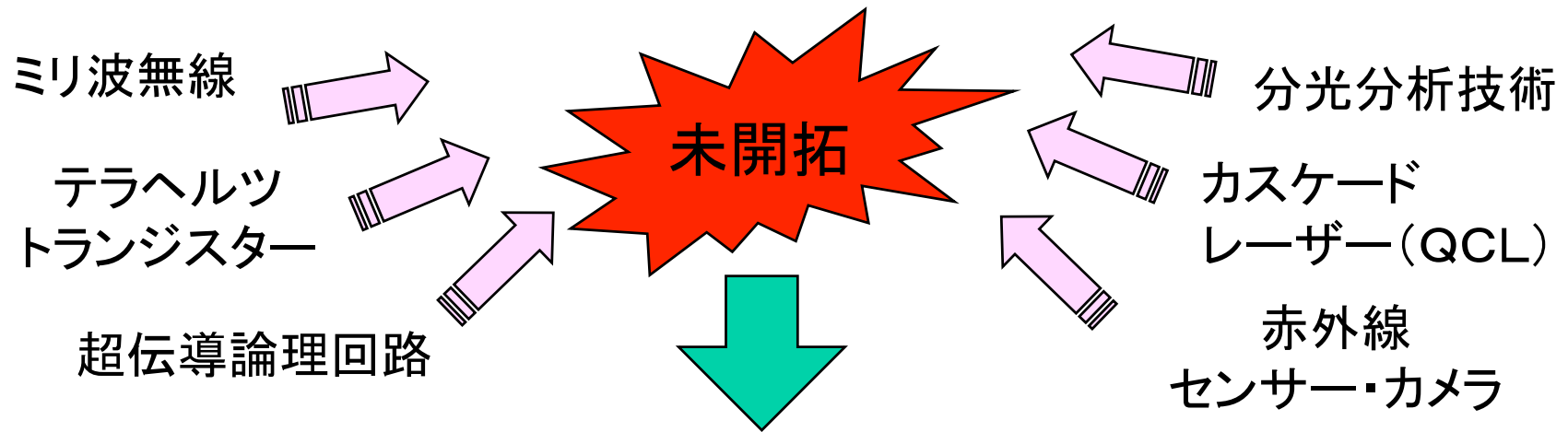
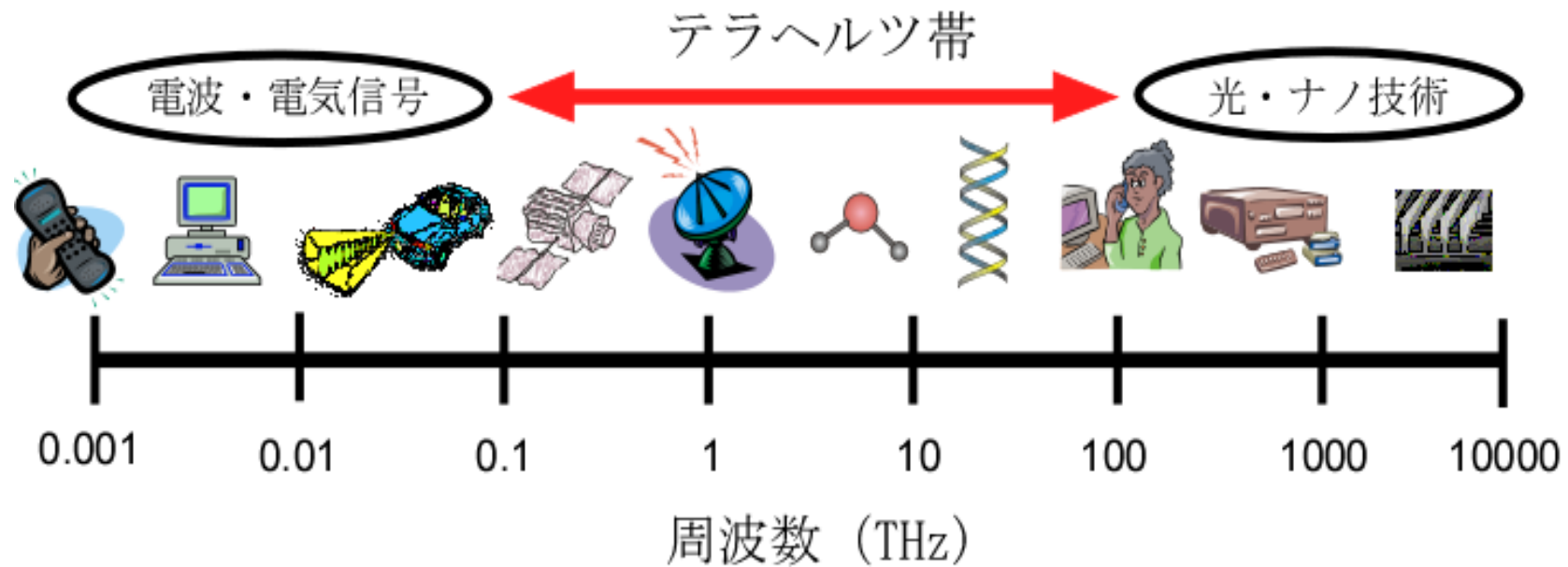


低温

高温

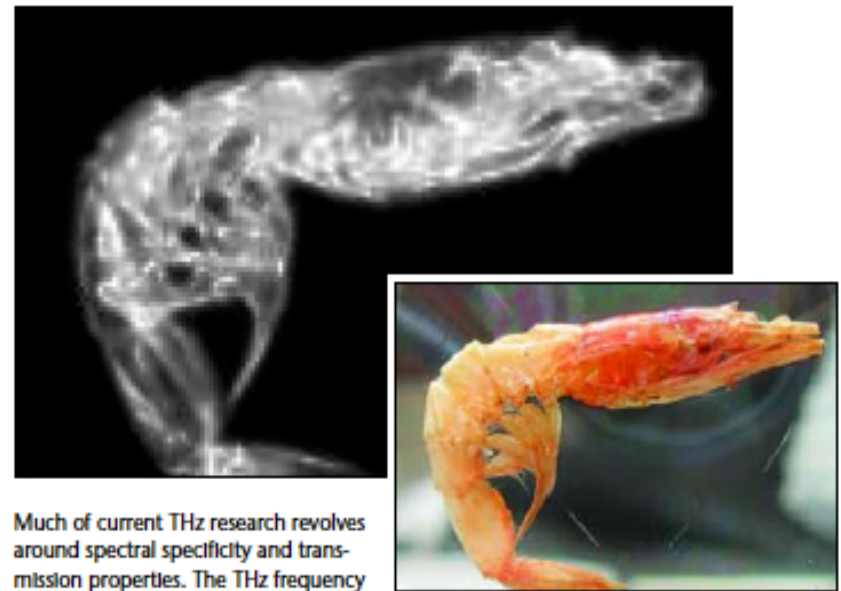
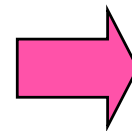
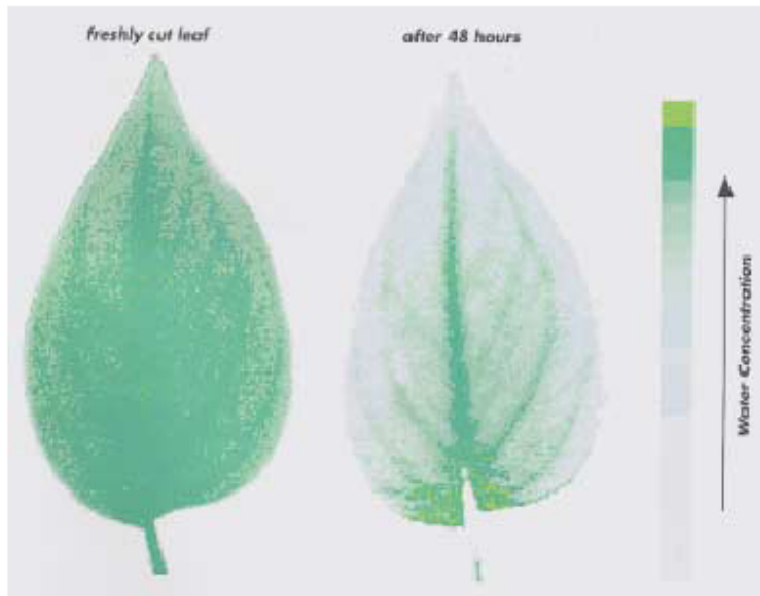
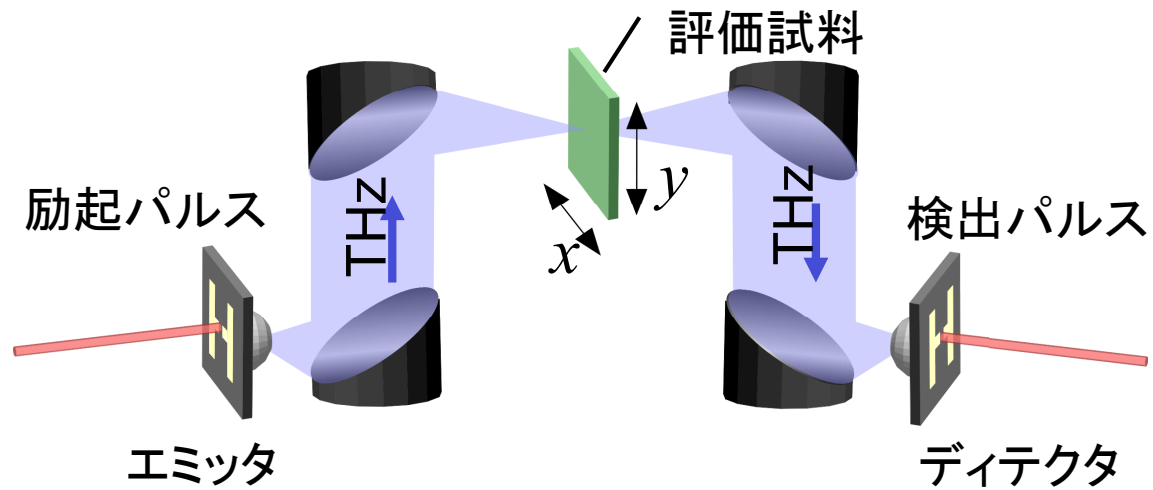


テラヘルツ電磁波領域



THzセンシング・テラヘルツ情報通信・テラヘルツエレクトロニクス

分光イメージング



テラヘルツ電磁波による可視化



光は波長程度のサイズの
物体に強く散乱される

例： 牛乳、雲、相転移現象

実験をやってみよう
2成分液体の相転移

混合液体の相転移

ヘキサン:メタノール = 5:1



2相分離境界

低温相 — 二相分離液体



高温相 — 単一混合液体

臨界たんぱく光

光散乱は密度ゆらぎの良い観測手段



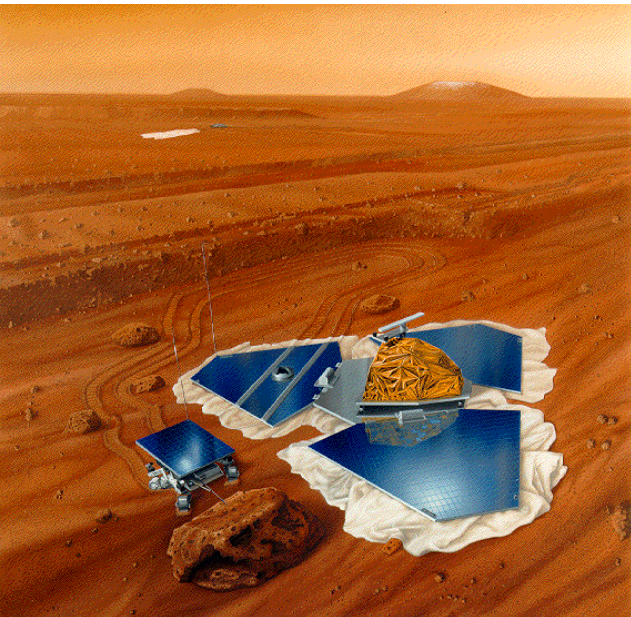
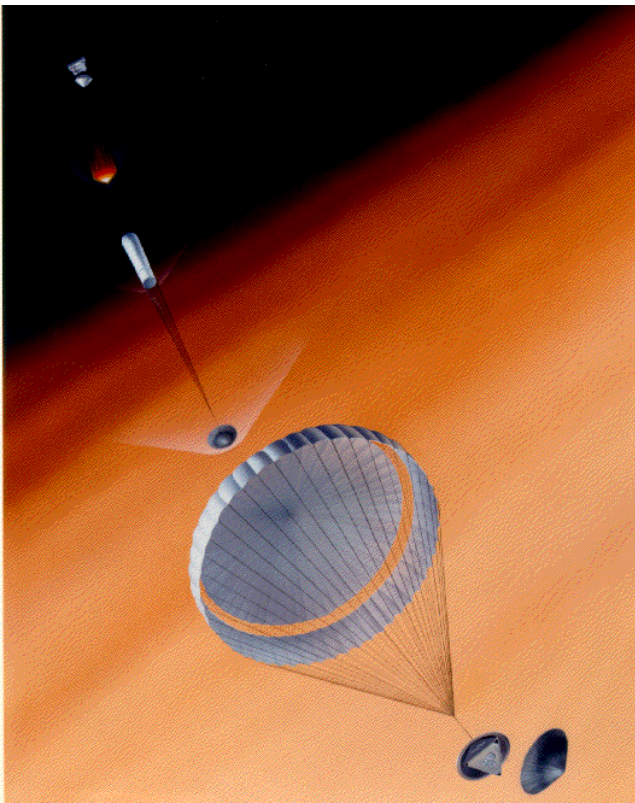
相転移温度より
十分高温



相転移温度近傍



火星の夕焼け

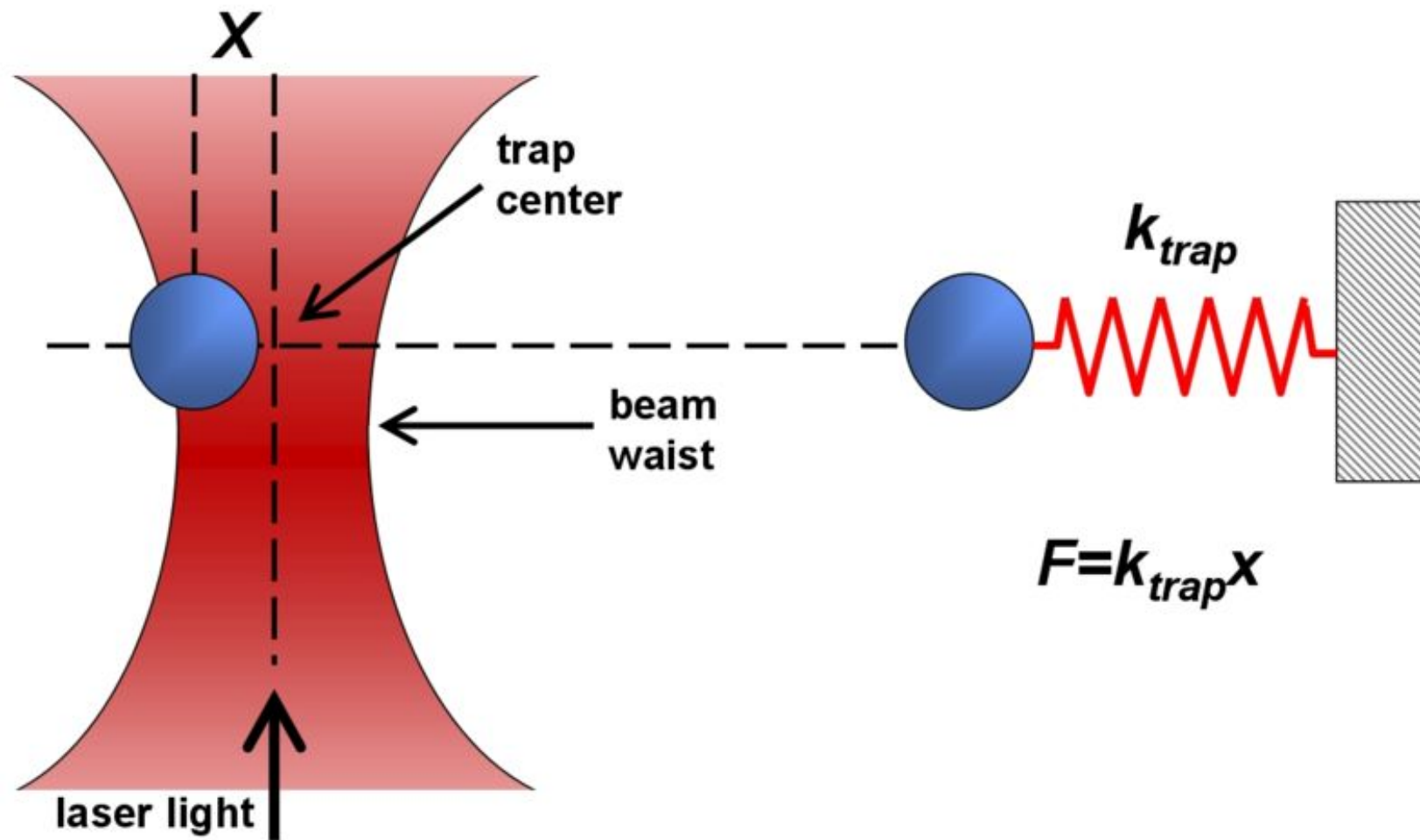


NASA MARS PATHFINDER

内容

1. 光とは何か
2. 光で物質をみる
3. 光で物質をあやつる
4. まとめ

観測から制御へ 光ピンセットの原理



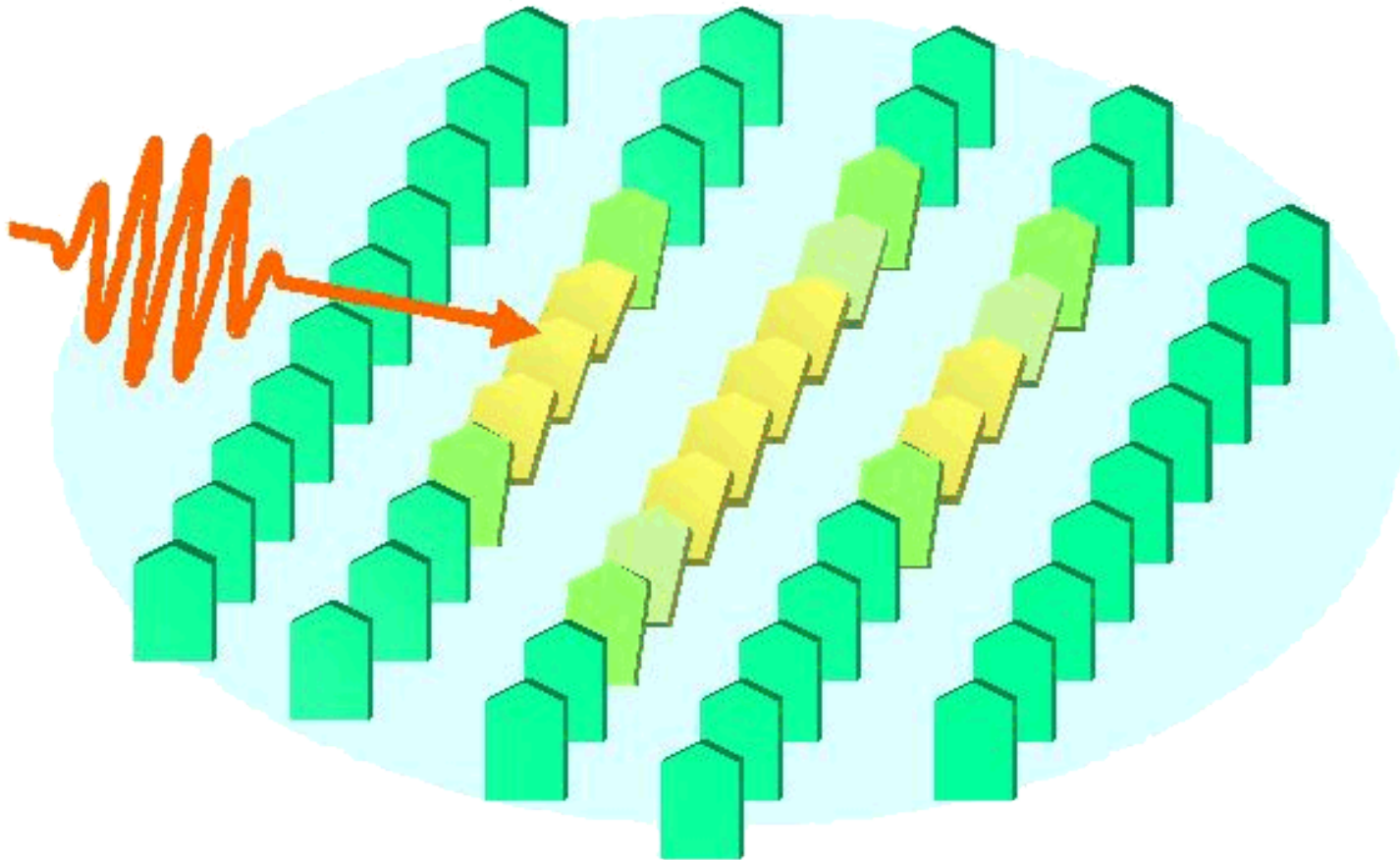
HOT Tetris



<http://www.nat.vu.nl/~joost/tetris/>

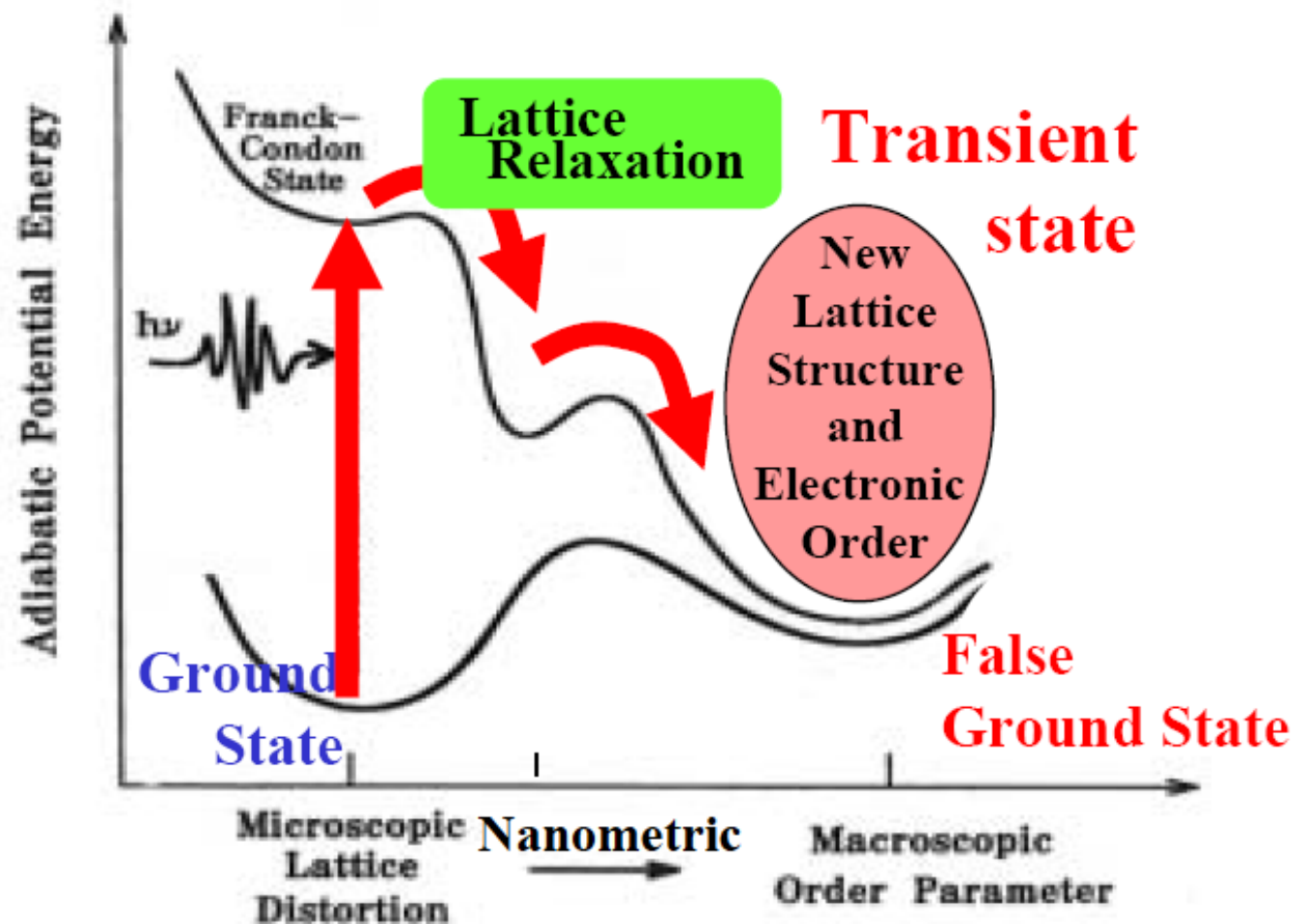
光誘起相転移

協力的相互作用を利用して将棋倒しのように
変化を誘起する
(もともと物質のもっている非線形性を利用する)



光誘起相転移

光照射により電子励起状態が生成され、それをきっかけとしてマクロな物性が変化する現象



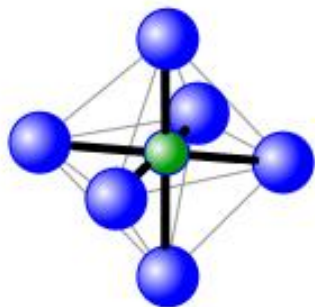
Self-amplification
of excited state

K. Nasu (2001)

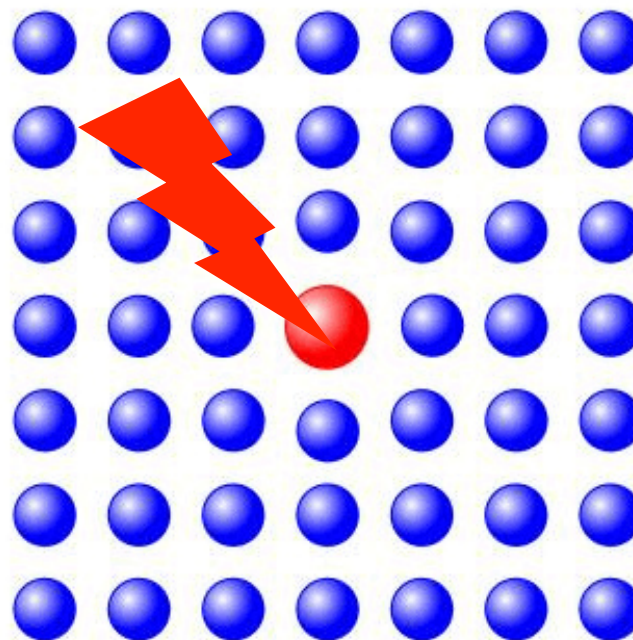
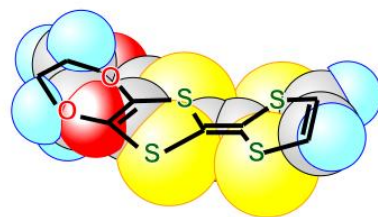
J. Phys.: Condens. Matter.

光照射による動的相スイッチ機構

スピントロニクス系
スピンスイッチ



EDO-TTF系
電荷移動スイッチ



動的分子変形



動的相スイッチ機構

協力的相互作用による
動的相形成



動的変化の物理メカニズムの解明、全体を理解する現象論の構築は成されていない。

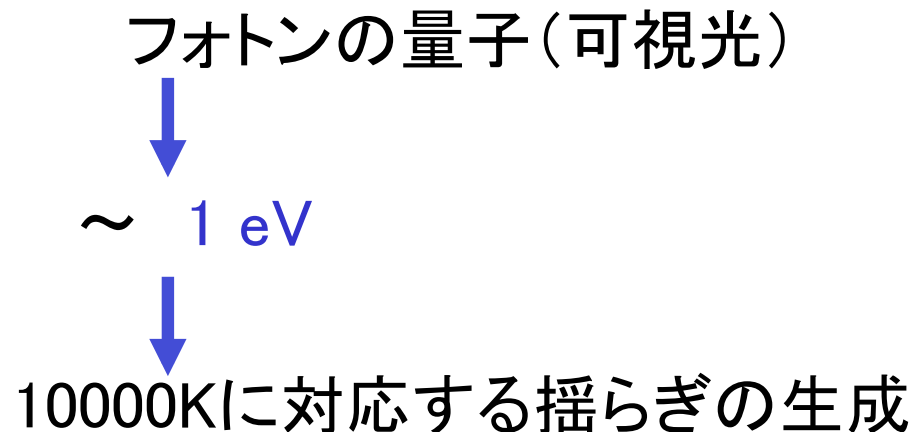
光誘起相転移が光誘起構造変化と異なる点

✓マクロな秩序形成

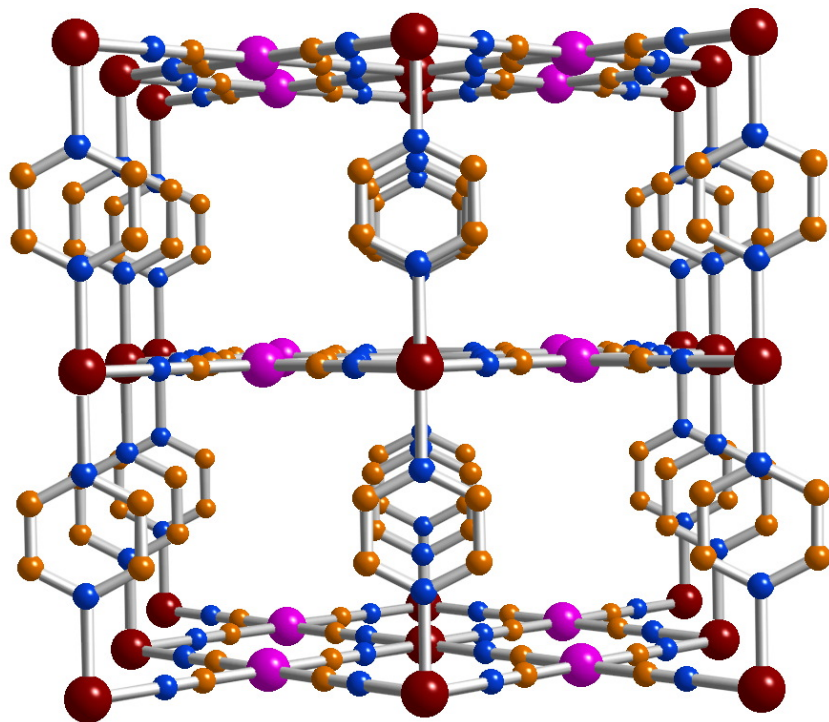
協力的な相互作用

✓熱的な相転移では現れない秩序の形成の可能性

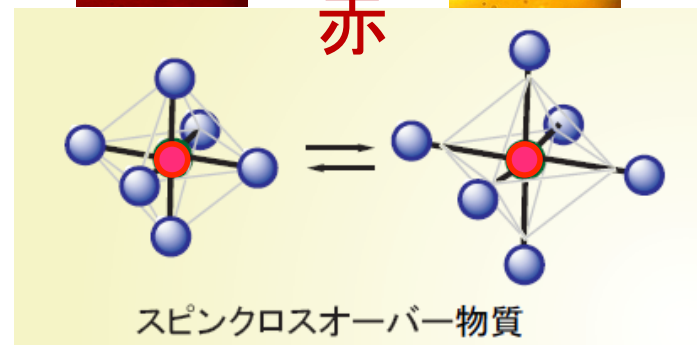
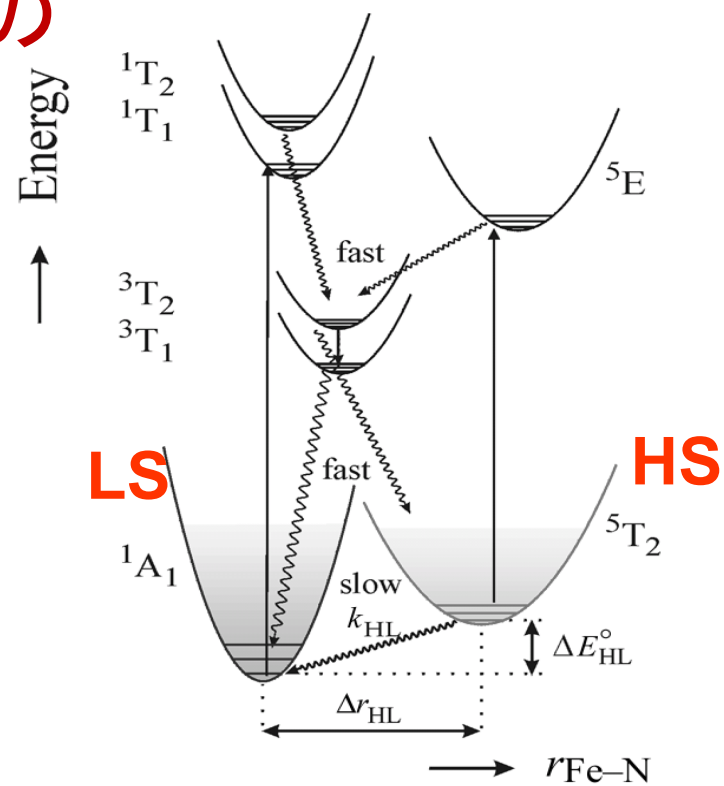
隠れた対称性の破れ



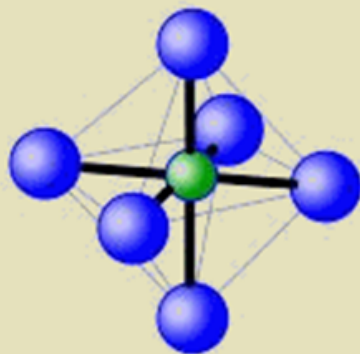
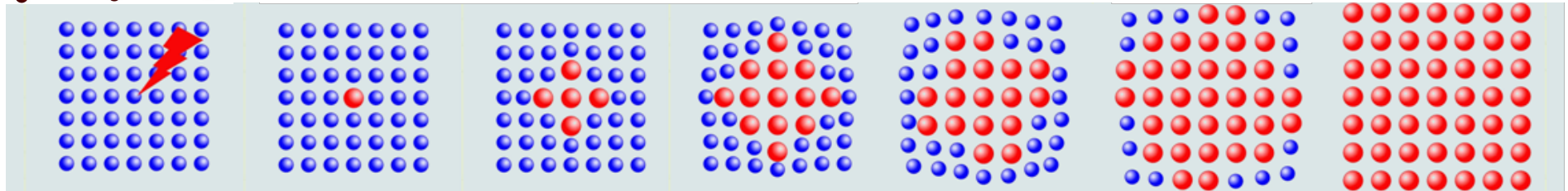
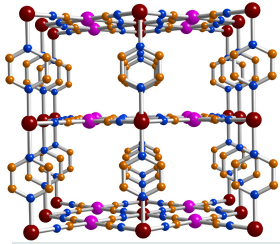
鉄スピנקロスオーバー錯体の 光誘起相転移



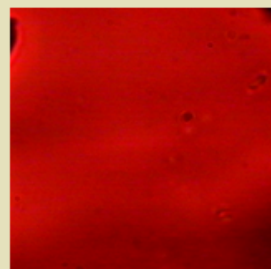
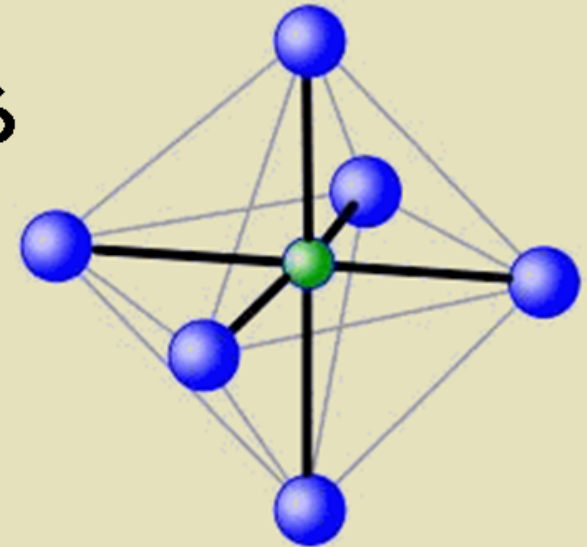
Fe(pyrazine)[Pt(CN)4]



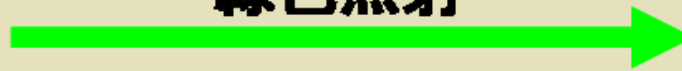
鉄スピントクロスオーバー錯体の 光誘起相転移



光によって精密制御される
協力的な秩序形成



緑色照射



赤色照射

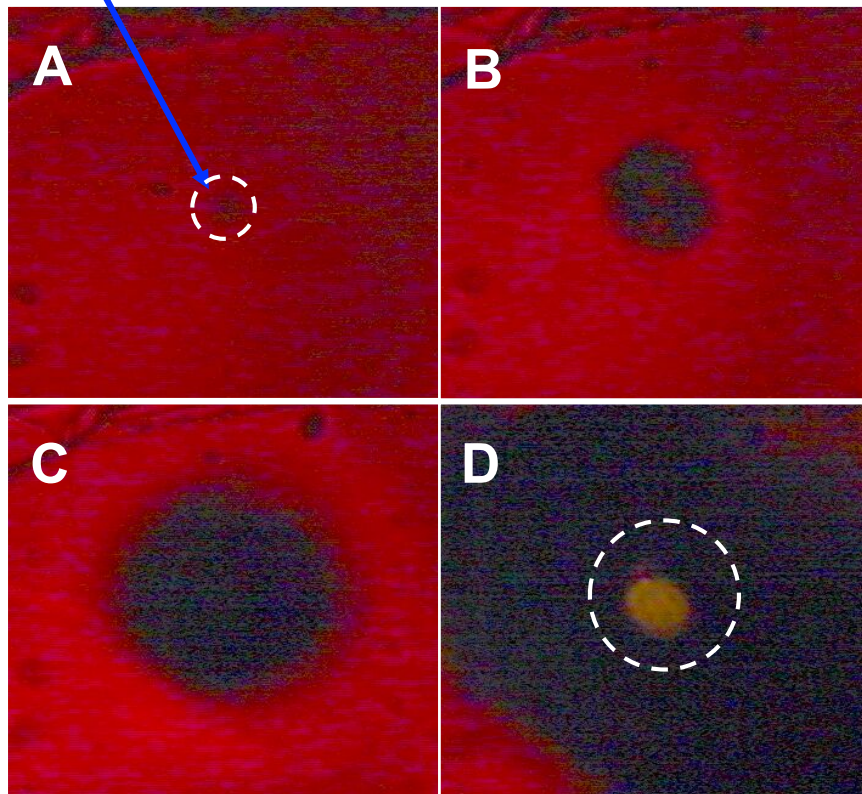


局所励起の時間発展

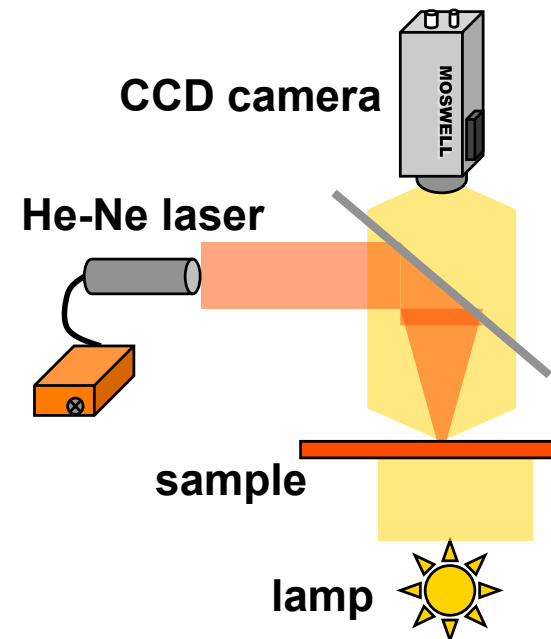
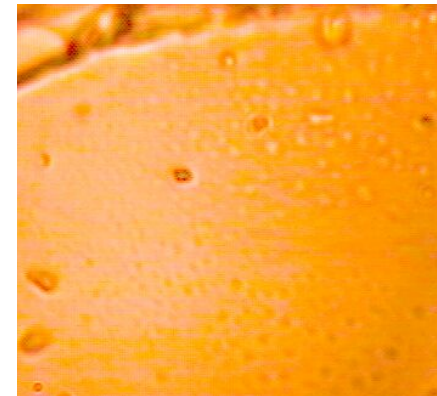
Local irradiation : $\sim 1\text{kW}/\text{cm}^2$

A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D

High spin phase:



50 μm

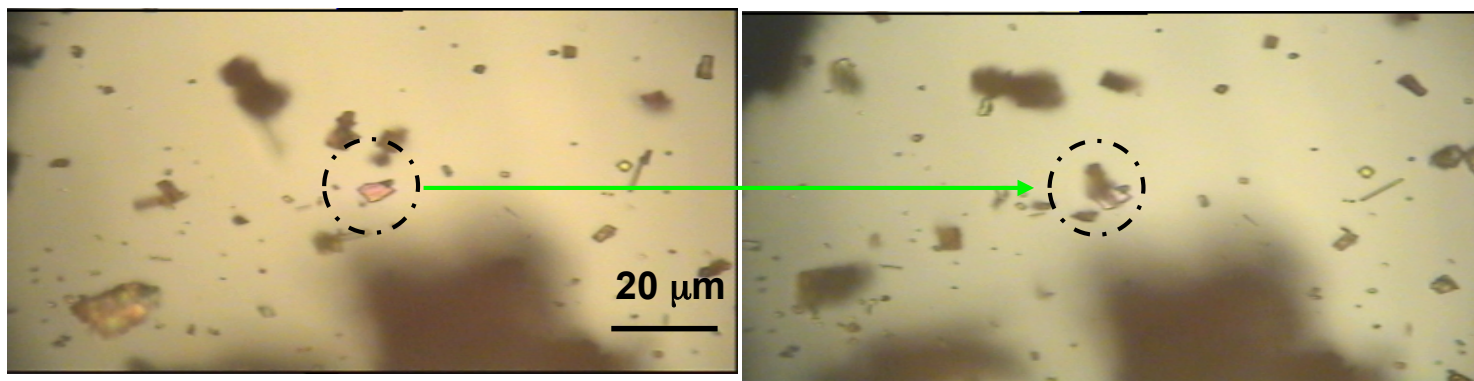
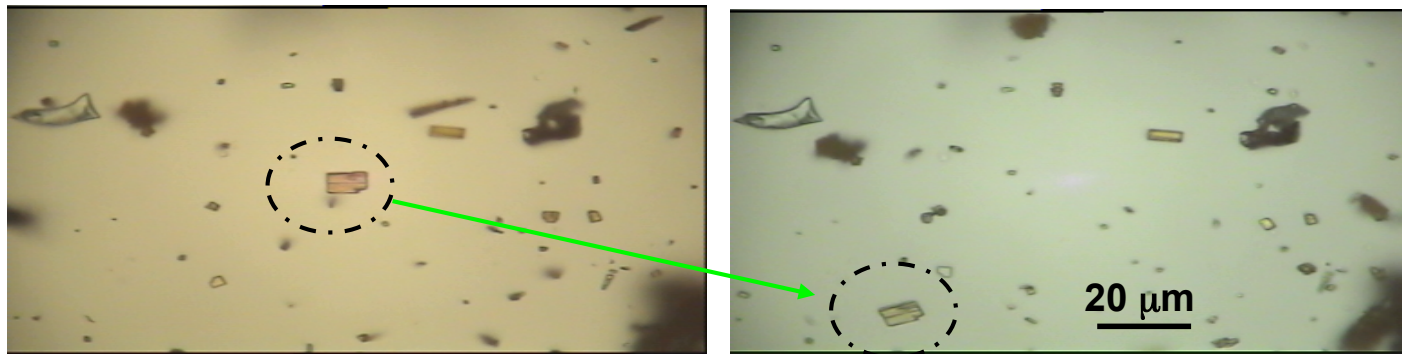


- Appearance of a black-area
- Enlargement of the black-area
- Reversible change

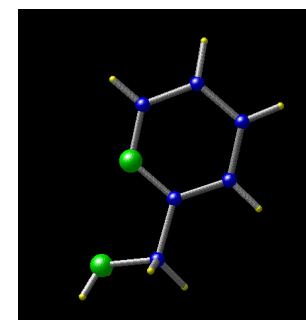
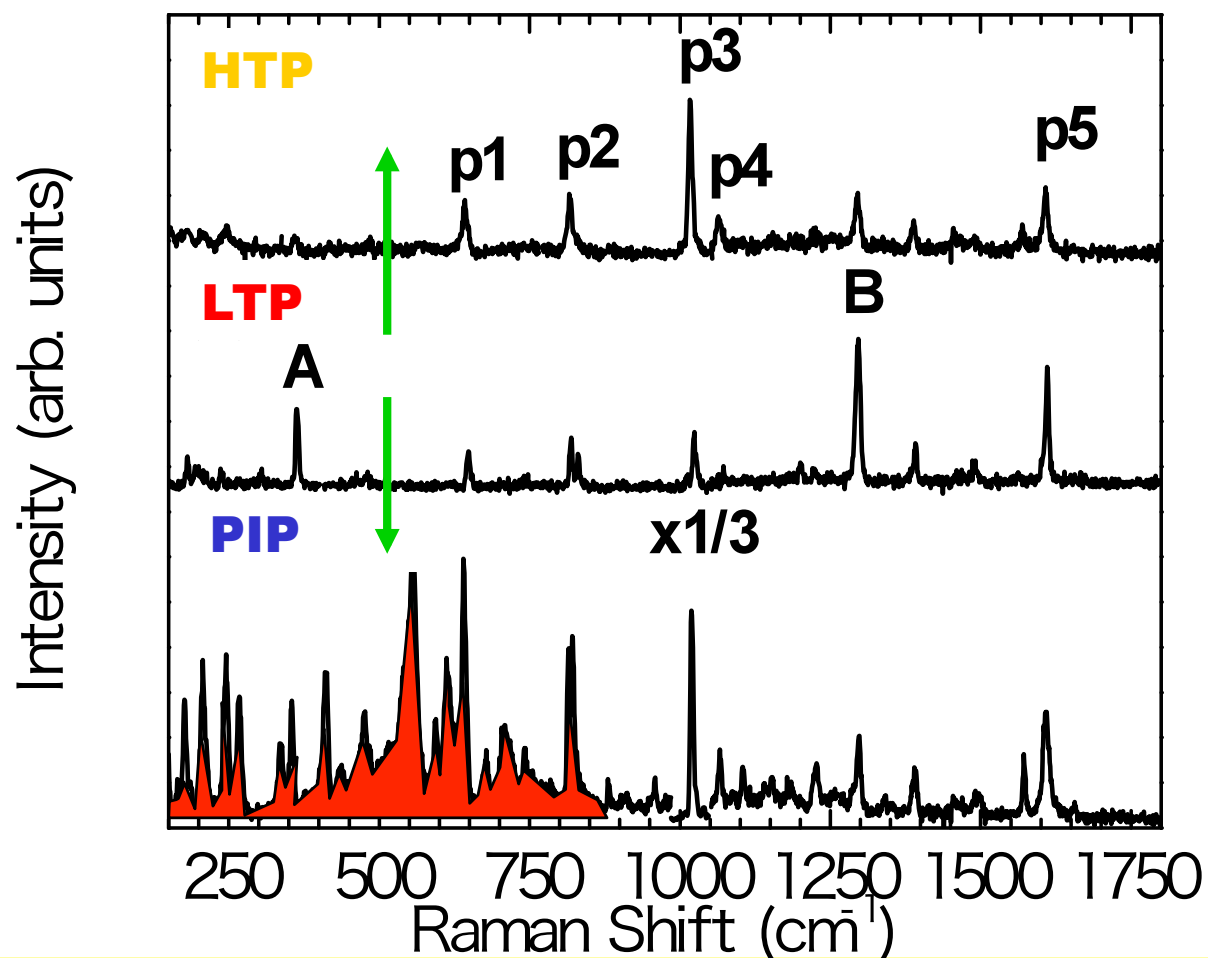
鉄スピנקロスオーバー錯体の光誘起相転移

1 shot パルス光による相転移誘起

13%にもおよぶ体積変化は結晶を飛ばす



Raman spectra of $[\text{Fe}(2\text{-pic})_3]\text{Cl}_2\text{EtOH}$



T. Tayagaki and K. Tanaka,
Phys. Rev. Lett. 86 (2001)
2886.

光でつくった相 (PIP) は高温相 (HTP) や低温相 (LTP) と異なる振動スペクトルを持つことがわかった。
新しい状態の生成！！

まとめ

1. 光は電磁気力を伝える基本粒子
2. 光と物質の共鳴により物質がよくわかる
3. 光で物質をあやつることが可能
4. まだチャレンジすべきことが多数ある