

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



光の性質

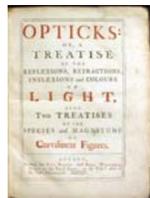
粒子説

- 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。



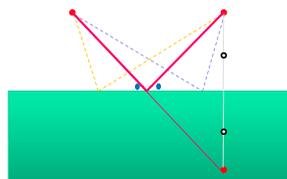
18世紀いっぱいこの考え方が続く

光の性質

粒子としての光

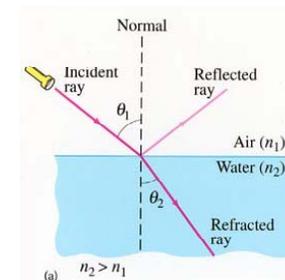
屈折の法則 スネルの法則 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

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 屈折の場合 海難救助の問題
(フェルマーの原理)



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

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則と同じ形をしている

粒子としての光

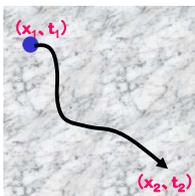
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

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



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

$$\text{克服} \text{ 功 } S = \int_{t_1}^{t_2} L dt$$

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



光の性質

19世紀にはい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)

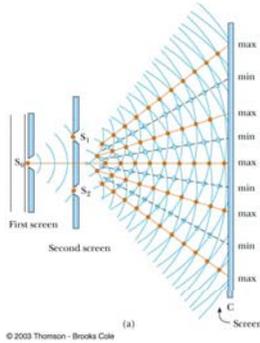
電磁波

- Maxwell (1831-1879)

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。



© 2003 Thomson - Brooks Cole

真空中のMaxwell方程式



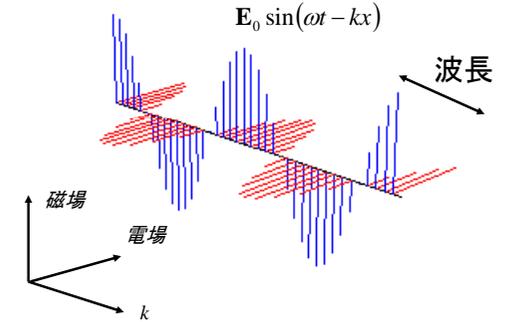
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

電流や電荷がなくても
電場Eと磁場Bが互いに
相手を作り出し、自立的に
振動する。

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

波動方程式

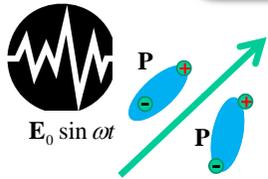
電磁波=光



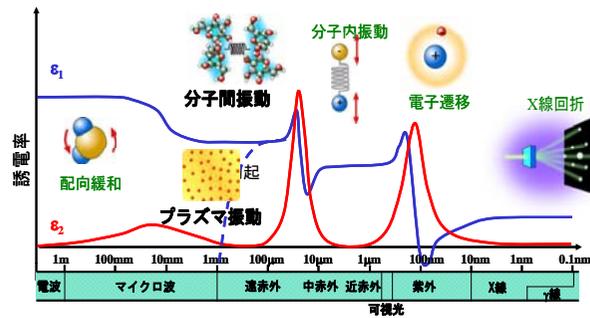
物質中の光



$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) \end{aligned}$$



光（電磁波）と物質との共鳴



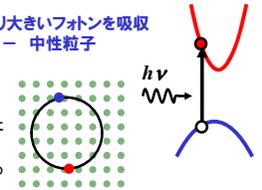
Kyoto University 2006

半導体の光スペクトル

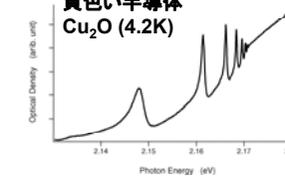
基本的にはバンドギャップのエネルギーより大きいフォトンを吸収
バンドギャップの下に励起子構造が出現 - 中性粒子

Wannier-Mott 励起子

- 電子とホールがクーロン力で結合した複合粒子
- 水素原子やボジトロニウムとにている



黄色い半導体
 Cu_2O (4.2K)



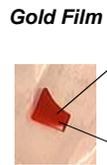
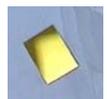
リドベルグエネルギー

$$Ry = \frac{e^4 m}{2\epsilon^2 \hbar^2}$$

- $Ry = 4.2 \text{ meV}$ (GaAs exciton)
- 213 meV (CuCl exciton)
- 13.6 eV (hydrogen atom)

金のナノ粒子を光スペクトルで見る

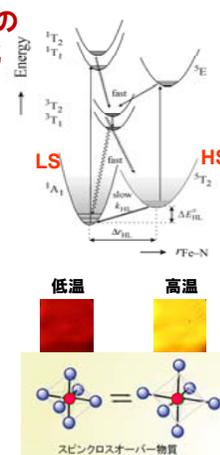
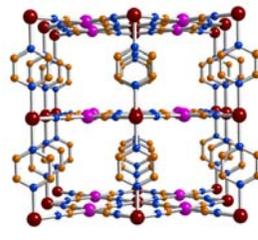
Gold Nanoparticles in SiO_2



Cross sectional TEM image
Average diameter : 7 nm



鉄スピノクロソオーバー錯体の 構造変化にともなう色変化

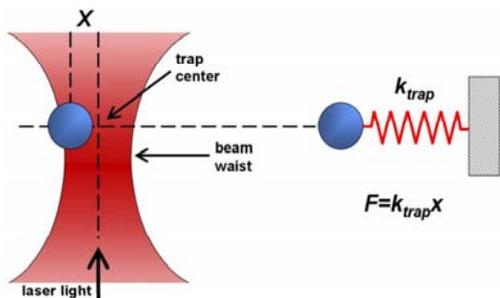


臨界たんぱく光

光散乱は密度ゆらぎの良い観測手段

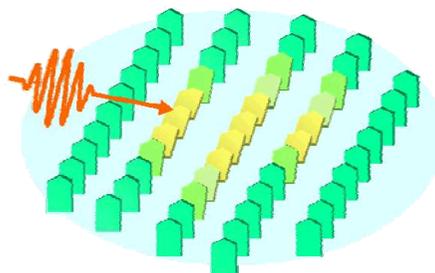


観測から制御へ
光ピンセットの原理



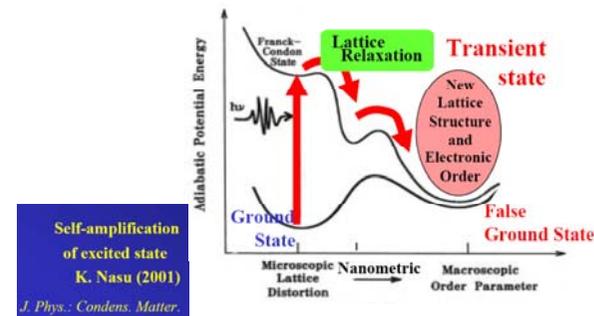
光誘起相転移

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 エネルギー効率が
高い (もともと物質のもっている非線形性を利用する)

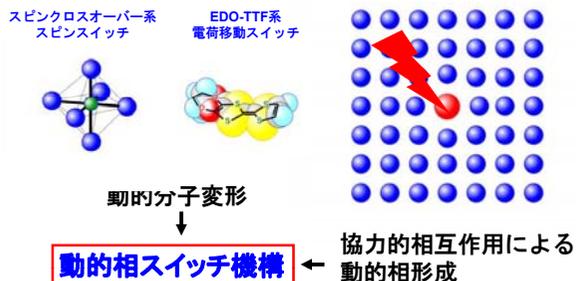


光誘起相転移

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



光照射による動的相スイッチ機構

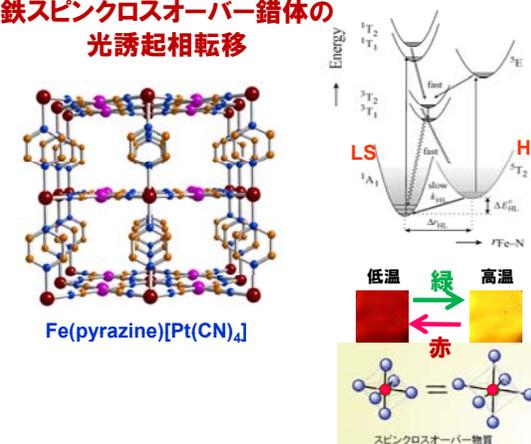


動的変化の物理メカニズムの解明、全体を理解
する現象論の構築は成されていない。

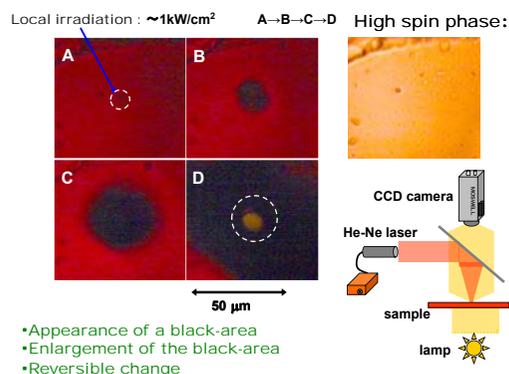
光誘起相転移が光誘起構造変化と異なる点

- ✓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
- フォトンの量子 (可視光)
- ~ 1 eV
- 10000Kに対応する揺らぎの生成

鉄スピントロニクスオーバー錯体の
光誘起相転移



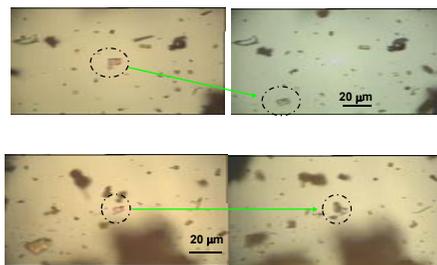
局所励起の時間発展



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

鉄スピントロニク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
1.3%にもおよぶ体積変化は結晶を飛ばす



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