

熊本大学大学院博士前期課程マテリアル工学専攻

応用量子物性学講義大要

黒田 規 敬

オプトエレクトロニクス材料の光物性を中心として

オプトエレクトロニクス材料の機能を
固体電子の量子プロセスにまで遡って理解する

「オプトエレクトロニクス」

||

光に対する物質電子の応答機能を利用したデバイス工学

講義の構成

第1章 オプトエレクトロニクスの背景

第2章 光科学の物理的基礎

第3章 光デバイス (LED, LD)

第4章 物質電子の光機能 (高調波発生器, CCD, Solar Cell)
– 太陽電池の現状と展望–

第5章 光の誘電理論

第6章 物質の電子構造と光学特性

第7章 磁気光効果 (光アイソレータ, スピントロニクス)

第8章 フォトクロミズム (イメージングプレート)

第9章 いろいろなレーザ

第10章 結び –固体中の光学素励起のデバイス化における諸問題–

第1章 オプトエレクトロニクスの背景

暮らしの中のいろいろな光利用機器

蛍光灯，各種ランプ，レーザー，発光ダイオード(LED)

TV，液晶・有機 ELディスプレイ(カーナビ・TV，パソコンモニター，
腕時計，携帯電話，プロジェクター etc.)

写真フィルム，デジタルカメラ，CD・DVD，ウォークマン

コピー機，FAX，バーコードリーダー(スーパーやコンビニ)

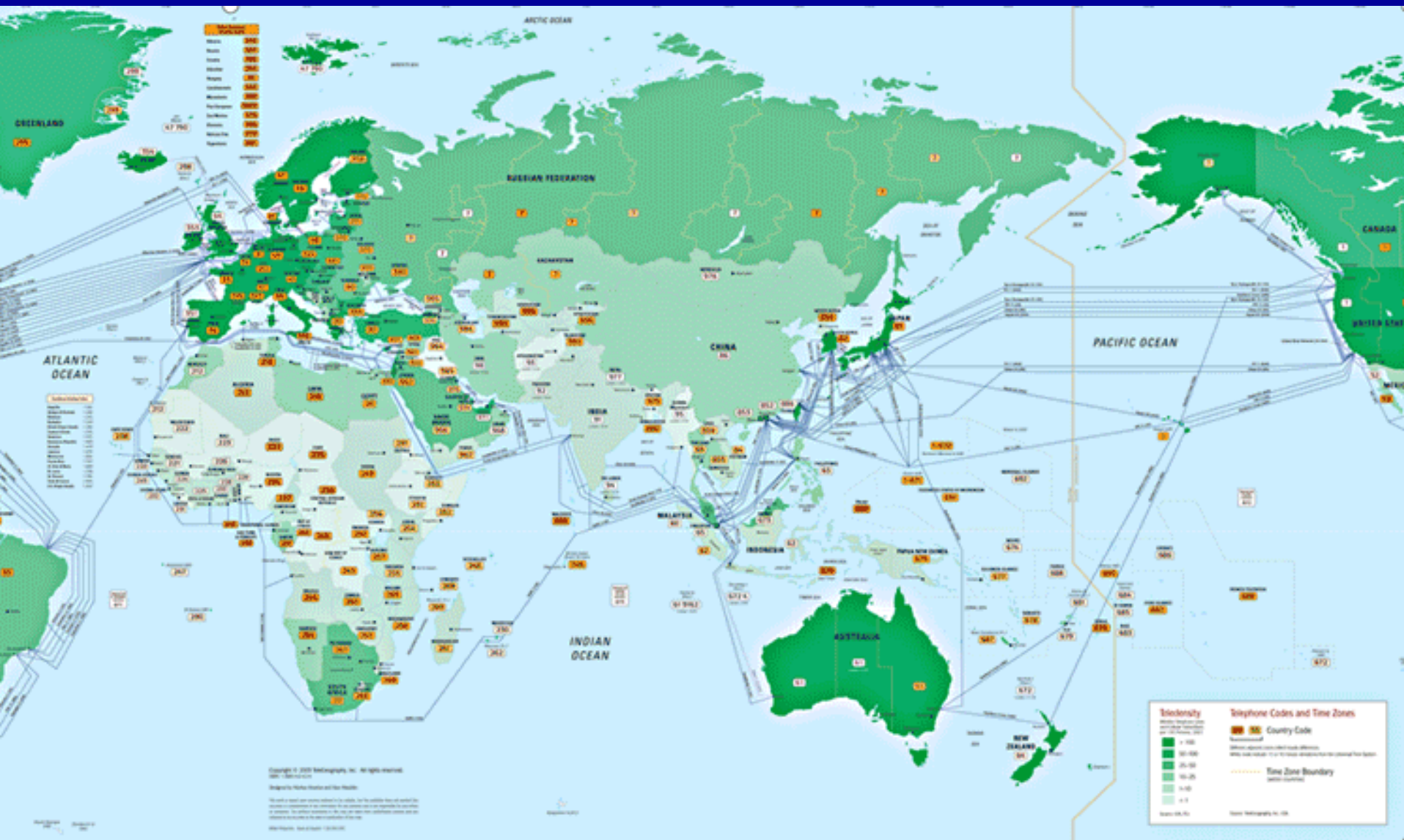
インターネット，太陽電池

電子レンジ(マイクロ波オーブン)

ガンマ線検知器，X線イメージングプレート

etc.

現在の大陸間海底光ケーブル・ネットワーク



原始の光源と白熱灯



核融合



火



ジュール熱

どのようにして光は創られるか?

光 ⇔ 物質電子

電子が光を媒介にしてエネルギーを変える
とき光が吸収・放出される

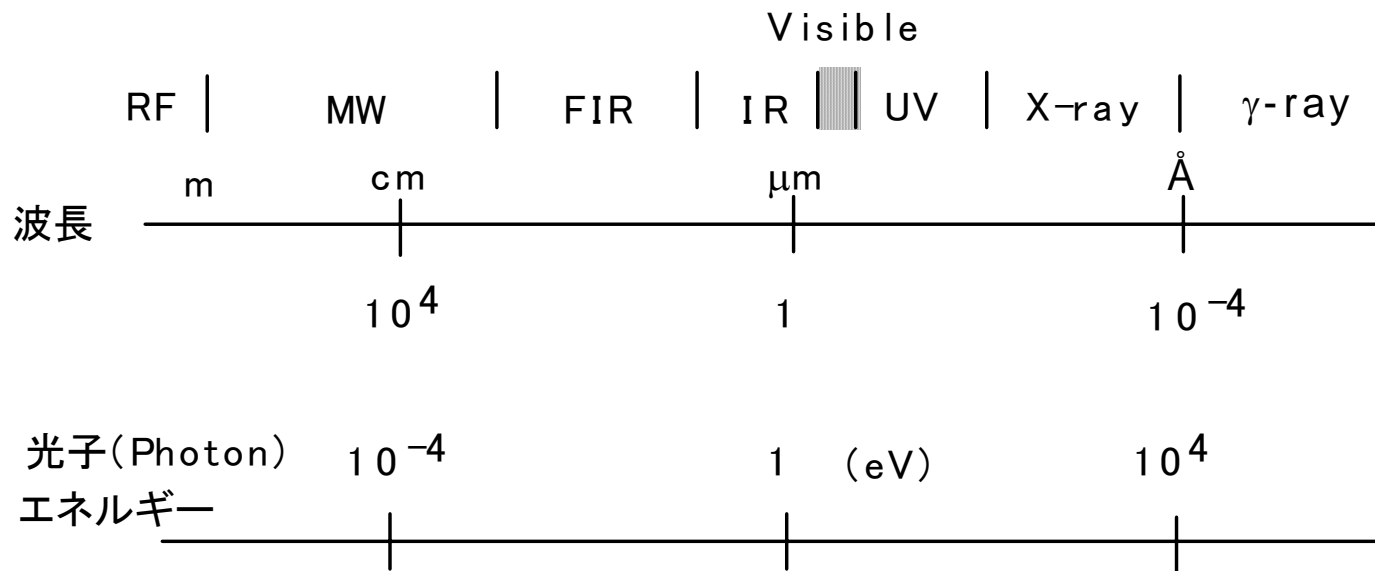
遠赤外線からガンマ線まで

光と電子のかかわり合いを扱う

科学・技術

= **オプトエレクトロニクス** (Optoelectronics)

光 = 電磁波



オプトエレクトロニクスの主舞台 = Near Infrared (NIR)

~ Near Ultraviolet (NUV)

光の研究によるノーベル物理学賞

- 1901 W. C. Röntgen X線の発見
- 1902 H. A. Lorentz, P. Zeeman 放射に対する磁場の影響
- 1907 A. A. Michelson 干渉計の考案と分光学およびメートル原器
- 1908 G. Lippmann 光の干渉を利用した天然色写真
- 1911 W. Wien 熱放射法則の発見
- 1914 M. von Laue 結晶によるX線回折現象の発見
- 1915 W.H.Bragg, W. L. Bragg X線による結晶構造解析
- 1917 C.G. Barkla 元素の特性X線の発見
- 1921 A. Einstein 光電効果の法則の発見
- 1922 N. Bohr 原子の構造とその放射
- 1923 R. A. Millikan 電気素量および光電効果
- 1924 M. Siegbahn X線分光学

- 1930 C. V. Raman 光の散乱によるラマン効果の発見
- 1953 F. Zernike 位相差顕微鏡の発明
- 1955 W.E. Lamb 水素スペクトルの微細構造に関する発見
- 1958 P. A. Cherenkov, I. E. Tamm, I. M. Frank
チェレンコフ効果の発見
- 1961 R. Mössbauer γ 線によるメスバウアー効果の発見
- 1964 C. H. Townes, N. G. Basov, A. M. Prokhorov
レーザー, レーザーの発明と量子エレクトロニクスの開発
- 1966 A. Kastler 光ポンピング法の発見と開発
- 1971 D. Gabor ホログラフィーの発明
- 1974 M. Ryle, A. Hewish 電波天文学の先駆的研究
- 1978 A. A. Penzias, R. W. Wilson 宇宙のマイクロ波背景放射の発見
- 1981 N. Bloembergen, A. L. Schawlow レーザー分光学
- 1989 N. F. Ramsey, H. G. Dehmelt, W. Paul
高精度原子分光法の開発
- 1997 S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips
レーザーを用いて原子を極低温に冷却する技術の開発
- 2005 R. J. Glauber 光のコヒーレンシーの量子論への貢献
J. L. Hall, T. W. Hansch レーザを使った超精密計測技術の開発

計27件 過去107年間のノーベル物理学賞の1/4

ノーベル化学賞

1915 R. Willstätter 植物色素物質

1961 M. Calvin 植物の光合成

1988 J. Deisenhofer, R. Huber, H. Michel
光合成中心タンパク質複合体の構造決定

その他の画期的進歩

1960 ルビーレーザー, He-Ne レーザーの実用化

1970 半導体レーザー (ヘテロジャンクション, ベル研林巖ら)

低損失石英光ファイバーの発明 (Corning社Kapronら)



遠距離大容量高速通信
インターネット

オプトエレクトロニクスの始まり

1879年 エジソンが白熱電灯を発明
人類が”自分の”の光を初めて手に入れた



”自分の” = 強さ, 色を自由にコントロール

近代科学と技術の夜明け

第2章 光科学の物理的基礎

マックス・プランク (Max Planck, 1858-1947)

1900年 黒体放射(空洞放射, 熱輻射)のエネルギー分布法則を
発見

「プランクの放射法則」

この発見に基づいて, **量子仮説** (=振動数 ν の光のエネルギー
は一定量 $h\nu$ の整数倍ずつの塊をなしている.)

「エネルギー量子」

を理論的に提唱  量子論の発端

h : プランクの定数 6.62×10^{-27} erg sec.

1918年ノーベル物理学賞

量子論による物理学への寄与

プランクの考え方

$E = nh\nu$, $n = 0, 1, 2 \dots$ ならば, ボルツマン分布則より,

E の平均値は

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_0^{\infty} nh\nu e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}}}{\sum_0^{\infty} e^{-\frac{nh\nu}{k_B T}}} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

エネルギーが E の状態の
存在確率は

$$e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

に比例する.

となる. ここで 光の塊の平均サイズを $\langle n \rangle$ として

$\langle E \rangle = \langle n \rangle h\nu$ と考えると

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

(これはボース・アインシュタイン分布関数と同じ.)

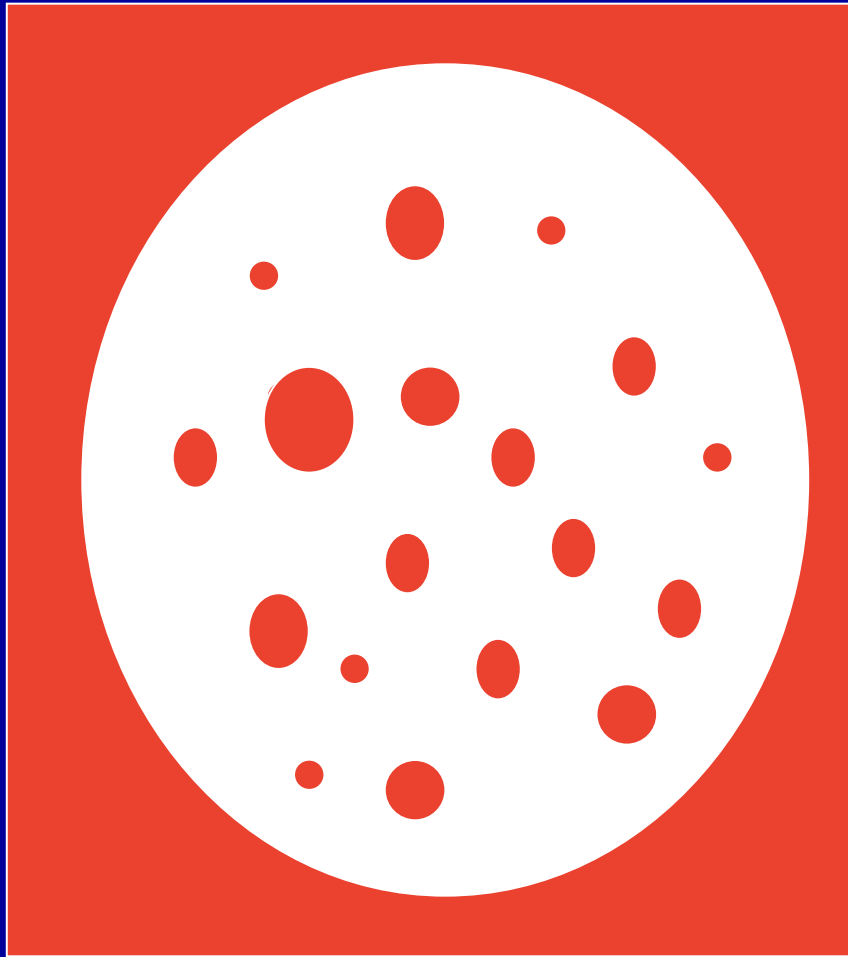
黒田著「現代技術の物理学」を参照のこと.

プランクのエネルギー量子仮説

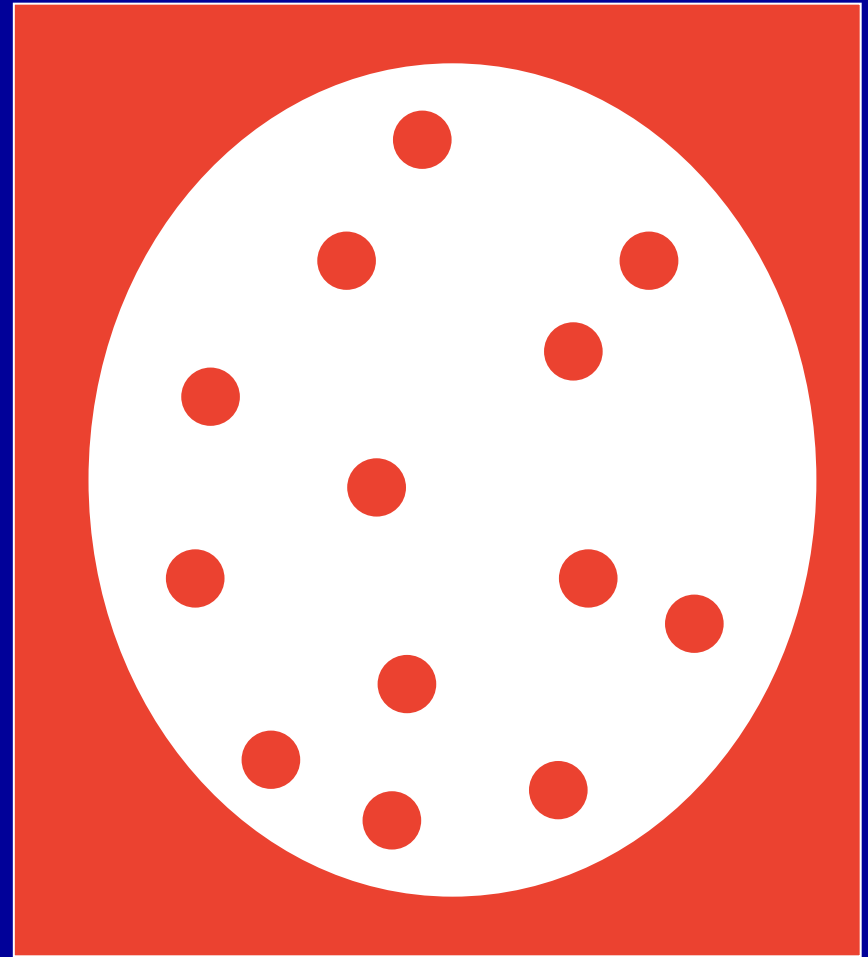
温度 T の空洞中の光の塊



光の塊の平均描像



光の塊の大きさが n



光の塊の平均サイズ $\langle n \rangle$

プランクの放射法則

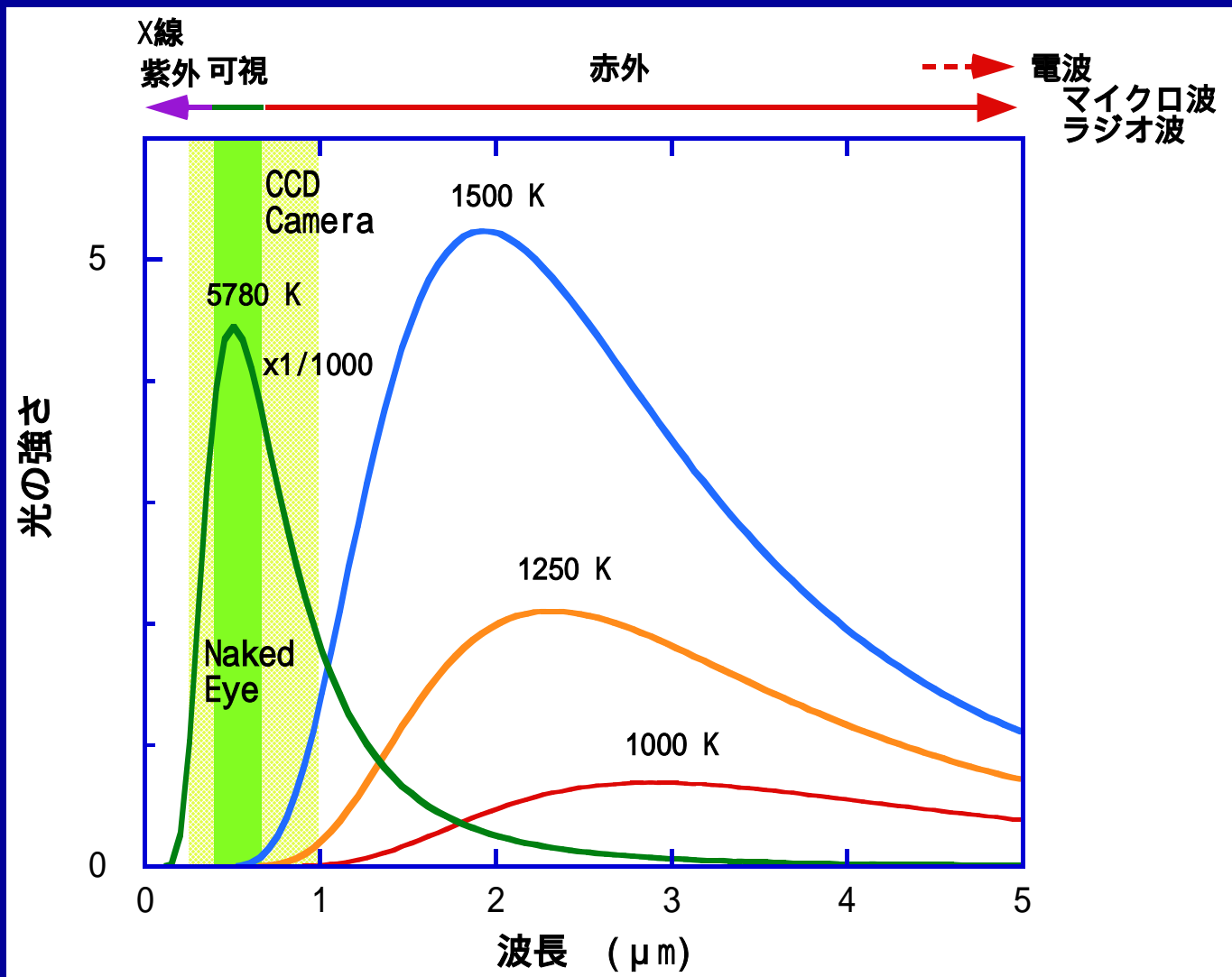
絶対温度 T で放射平衡にある **黒体** から放射される光=電磁波のうち，振動数(波長)が ν と $\nu+d\nu$ (λ と $\lambda+d\lambda$) の間にある放射エネルギー密度を ρ_ν (ρ_λ) とすれば ρ_ν (ρ_λ) は，

$$\rho_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

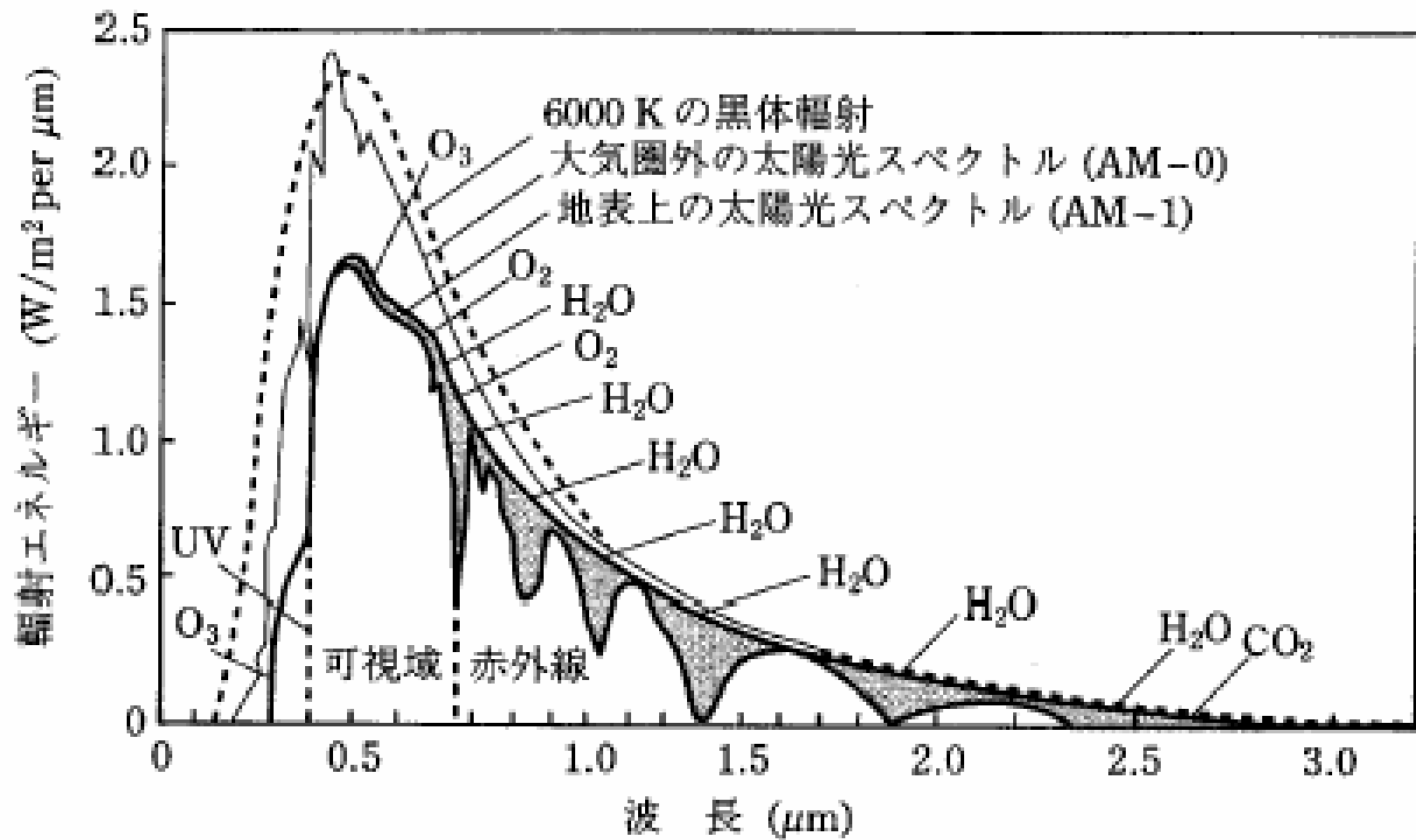
$$\rho_\lambda = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

で与えられることを実験的に発見．ただし， k_B はボルツマン定数

黒体放射スペクトル



太陽
有効温度 5780 K
ピーク波長
~0.5 μm



太陽光スペクトル

エネルギー量子(光量子)をワット (W) で測れば？

波長 500 nm の光(緑色) $h\nu = 2.5 \text{ eV} = 4 \times 10^{-19} \text{ J}$

このエネルギーが1秒間当り1度の割合で放射されるとき、光の強さは

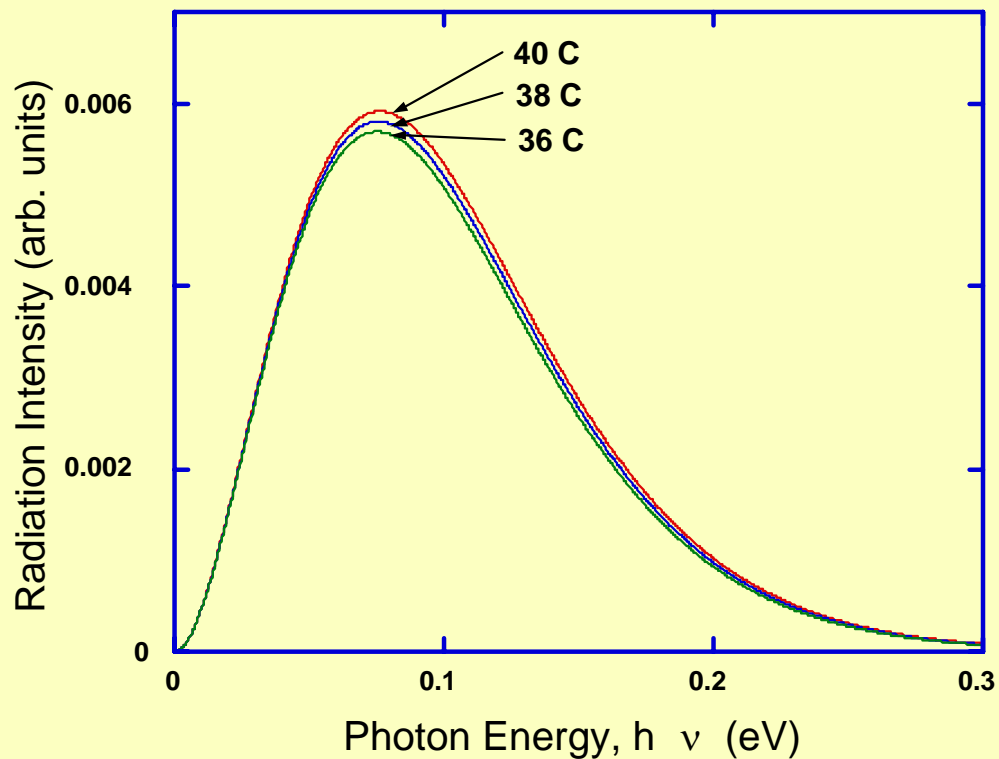
$$4 \times 10^{-19} \text{ W}$$

熊本市の人口の体重を地球の質量と比べれば

地球の質量 = $6 \times 10^{24} \text{ kg}$

$50 \text{ kg} \times 70 \text{ 万人} = 3.5 \times 10^7 \text{ kg} = 6 \times 10^{-18} \times \text{地球質量}$

体温での輻射スペクトル



1 秒体温計ではこの僅かな輻射エネルギーの違いをThermopile(熱電堆)で検知している

温度 T の物体からの輻射強度

Planck の輻射則

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} n_B, \quad n_B = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

$$\frac{h\nu}{k_B T} = x \text{ とおくと } \nu = \frac{k_B T}{h} x, \quad d\nu = \frac{k_B T}{h} dx, \quad \rho(x) = \left(\frac{8\pi k_B^3 T^3}{c^3 h^2}\right) \frac{1}{e^x - 1}$$

だから

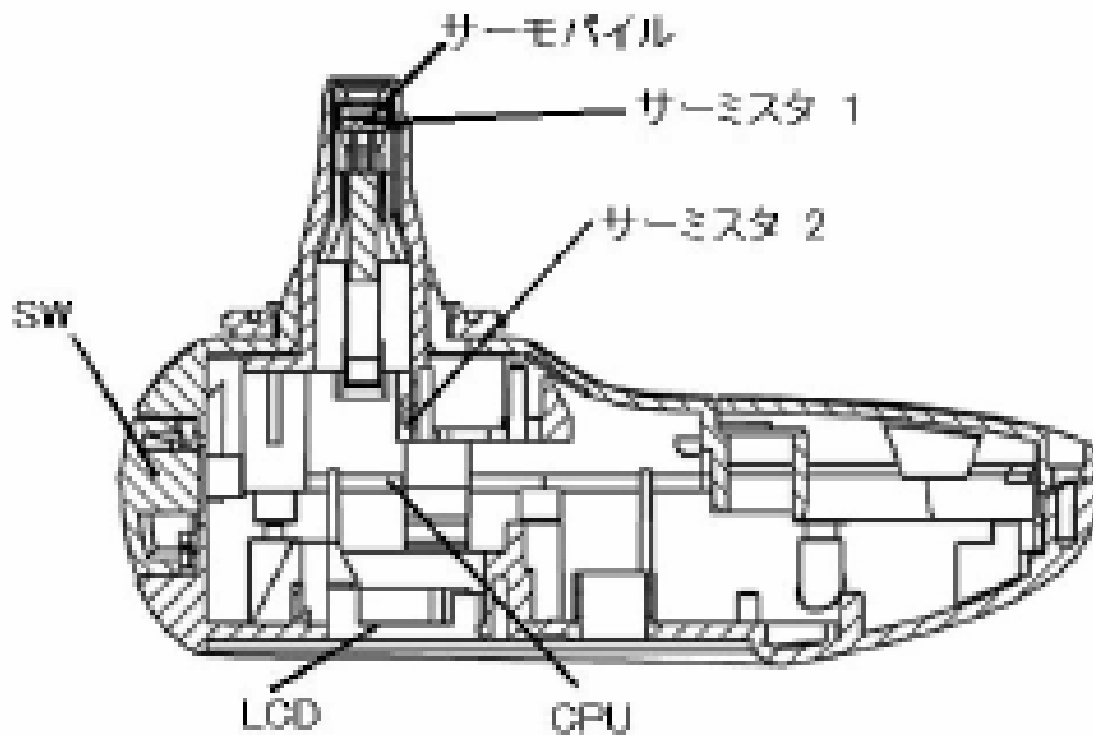
$$P = \int_0^\infty \rho(\nu) d\nu = \frac{8\pi k_B^4 T^4}{c^3 h^3} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \left(\frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 h^3}\right) T^4 = CT^4$$

これを **Stephan-Boltzmann の法則** という

真空中なら厳密に正しいが、空気中では赤外吸収があるので積分が温度に依存し、いく分 T^4 則からずれる。



耳式体温計の構造



液晶ディスプレイ

アインシュタインとボーア : 光の本質と物質の光応答

アインシュタイン(Albert Einstein)の光量子仮説と光電効果

振動数 ν の光はエネルギー $h\nu$ の粒子, すなわち光子(光量子Photon)として物質に吸収, あるいは放出される. $h\nu$ が 1 個の光量子である.

1905年発表 . 1921 年ノーベル物理学賞

ボーア(Niels Bohr)の振動数条件

原子が光を放出, 吸収するのは, 電子の定常状態の一つ(エネルギー E_n)から別の定常状態(エネルギー E_m)に遷移するときであって, その光の振動数は

$$h\nu_{mn} = |E_m - E_n|$$

で決まる. ここで n, m は量子数を表す.

1922年ノーベル物理学賞

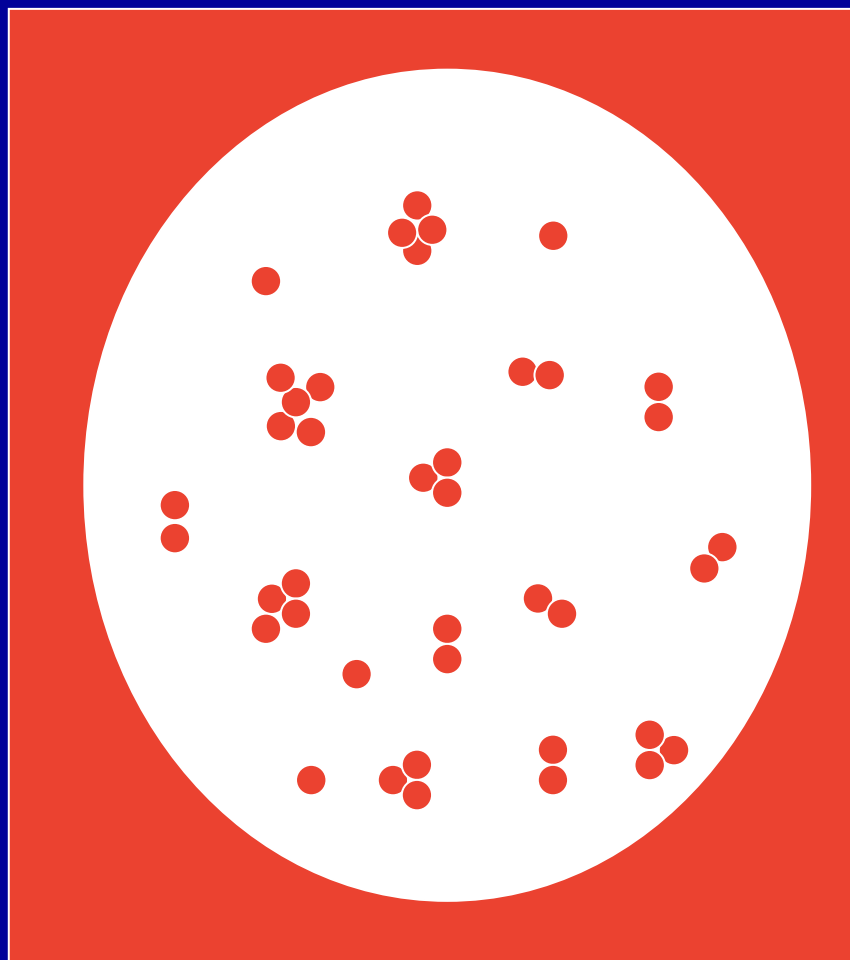
光の科学の量子力学的基礎が確立

アインシュタインの光量子仮説

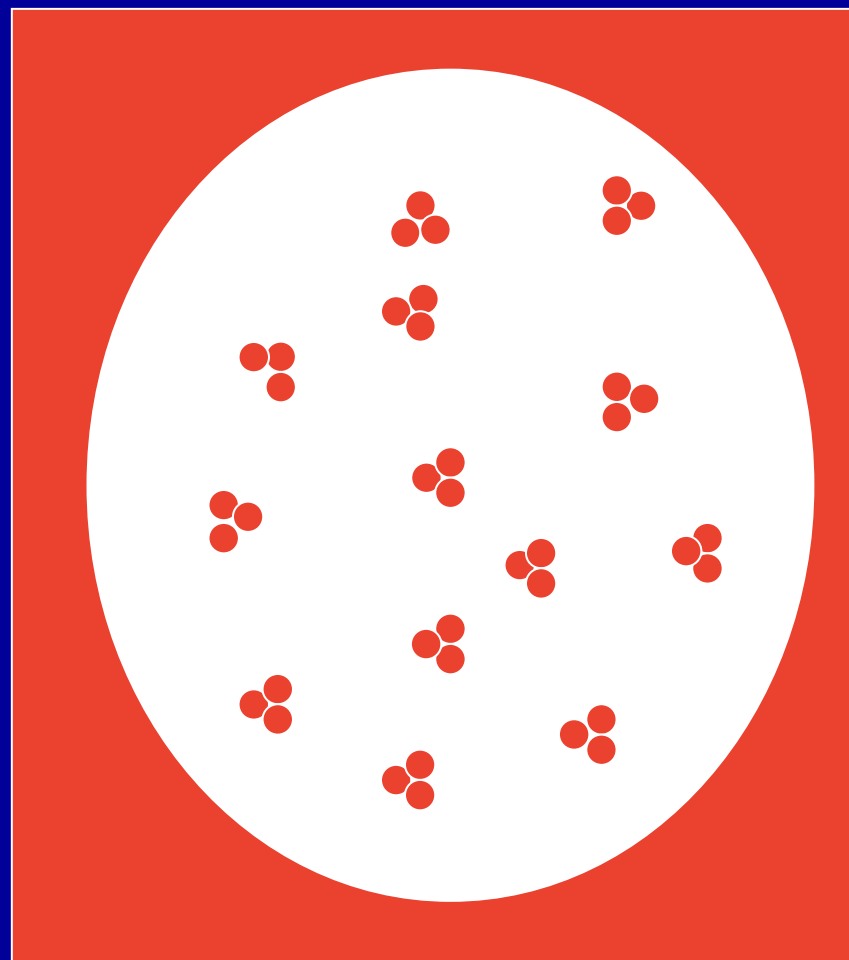
温度 T の空洞中の光量子



光量子の平均描像



各光線の光量子の個数が n



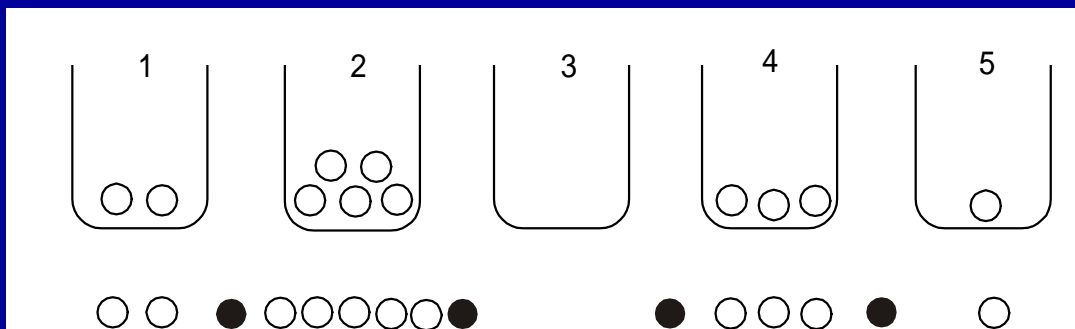
光線の光量子の平均個数 $\langle n \rangle$

アインシュタインの光量子仮説の考え方

黒田著「現代技術の物理学」を参照のこと。

玉入れ問題

N 個の籠に総数 M 個の玉をランダムに配分する



配分のしかたの数

$$W = \frac{(M + N - 1)!}{M!(N - 1)!}$$

光への応用

N : 光線の数, M : 光量子の総数, W : 熱力学的重率

内部エネルギー

$$U = (n_B + \frac{1}{2})Nh\nu, \quad n_B N = M$$

ボルツマンの原理

$$S = k_B \ln W$$

クラウジウスの式

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{dS}{(Nh\nu)dn_B}$$



N, M はどちらも限りなく大きい数

$$n_B = \frac{1}{\frac{h\nu}{e^{k_B T}} - 1}$$

フェルミ統計・フェルミ分布の考え方

電子は、パウリの排他律により、1つの状態に↑スピンと↓スピンの電子がそれぞれ、最大1個入ることができる。

★ ミクロには異なるがマクロには同じとみなせるエネルギーの状態が1つの物体中に無数にあり、電子も無数に存在する。電子がこの状態を占める確率はいくらか？

玉入れ問題に置き換え



N 個の籠から任意に M 個選び、その中に↑スピンの電子を1個ずつ入れる。同じことを↓スピンの電子についても行う。

$$W = W_{\uparrow}W_{\downarrow} = ({}_N C_M)^2 = \left(\frac{N!}{M!(N-M)!}\right)^2$$

$$U = U_{\uparrow} + U_{\downarrow} = 2M(E - \zeta) \quad E: \text{エネルギー準位}, \zeta: \text{フェルミエネルギー}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{dS}{2(E - \zeta)dM}$$



N, M はどちらも限りなく大きい数

フェルミ分布関数

$$\frac{M}{N} = f = \frac{1}{e^{\frac{E - \zeta}{k_B T}} + 1}$$

レポート課題

[1] n_B と f を導出せよ.

[2] 黒体輻射スペクトル

$$\rho(\lambda) = \frac{A}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

(λ : 波長, A : 定数, c : 真空中の光速)

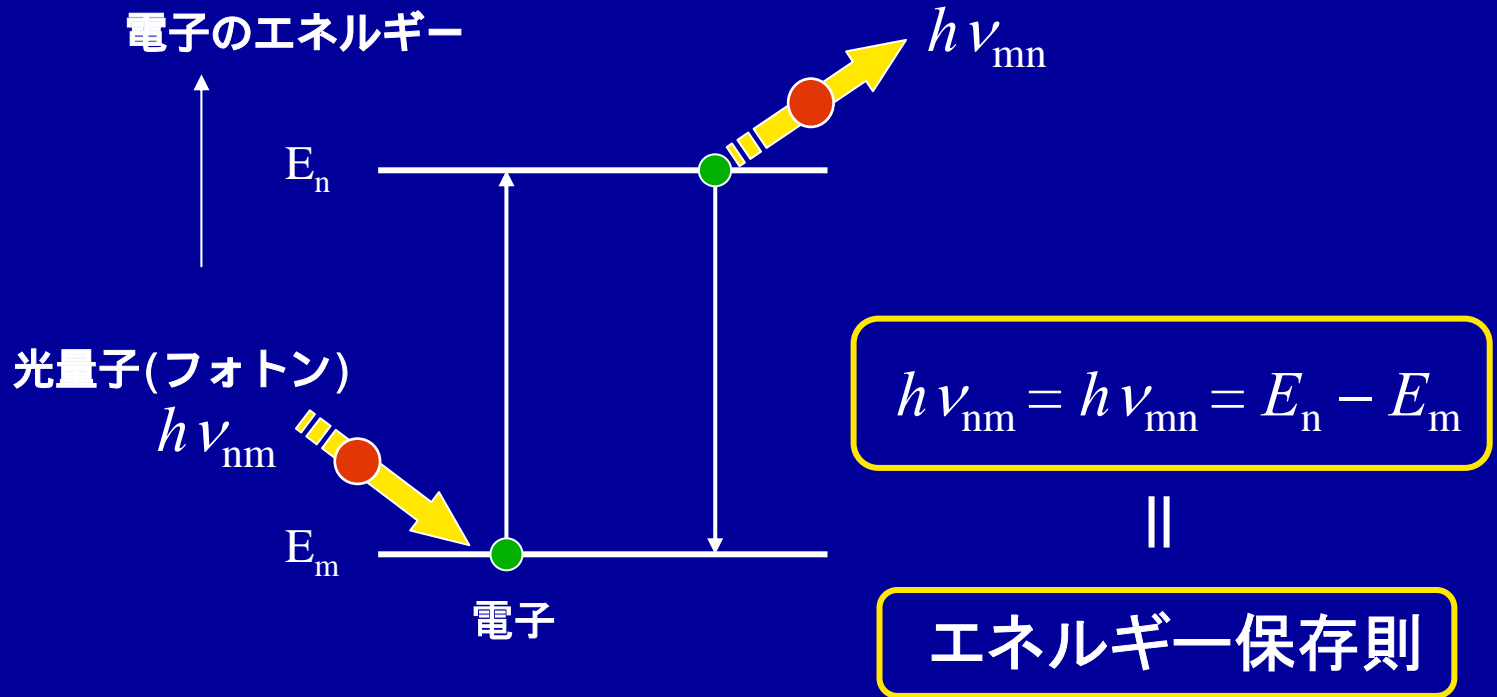
を $T = 1500 \text{ K}$ と 5780 K について計算し, 比較せよ.

[3] 黒体輻射のスペクトルの変数を振動数 ν に変えると

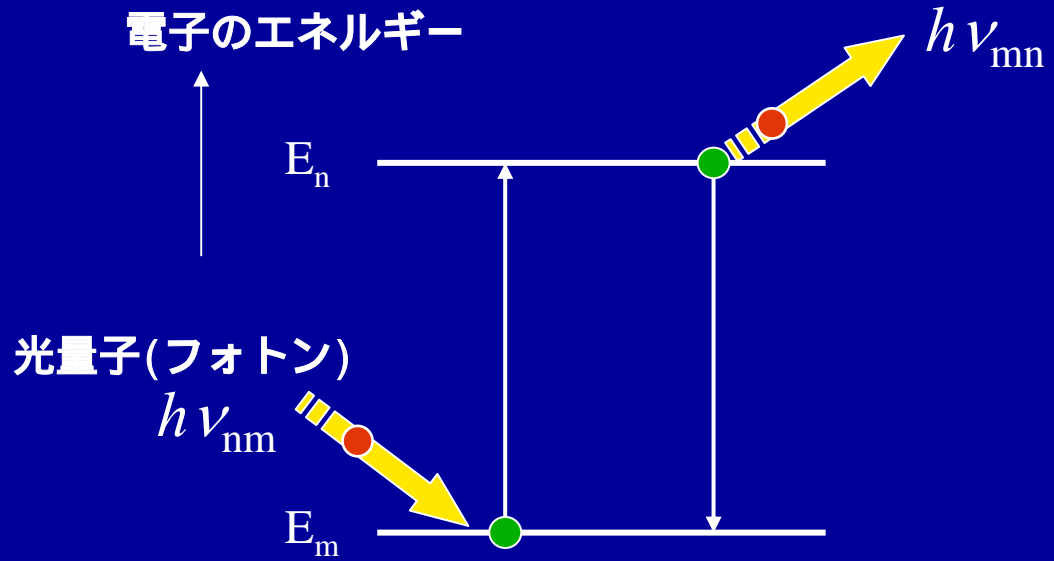
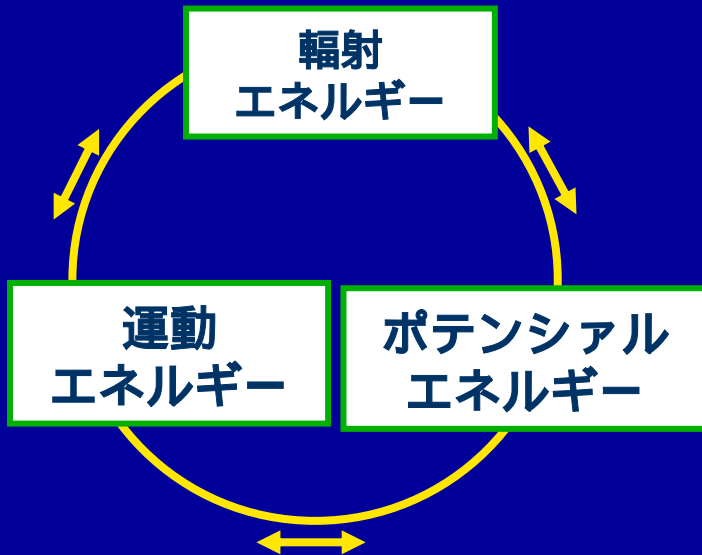
$$\rho(\nu) = \frac{A' \nu^3}{e^{h\nu/(k_B T)} - 1} \quad (A': \text{定数})$$

となることを示せ.

ボーアの振動数条件



原子や分子に捕まった電子のエネルギー



電子の相互作用を媒介にしてエネルギーの相互変換が起こる

運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの総和がとびとびの値を持つ=量子化

スペクトル分光法による光科学の発展

ボーアの振動数条件



光科学の重要性の認識



スペクトル分光法の発展を促進

とびとびのエネルギーを観測するには光のスペクトル分光法が最も直接的で、确实。

1896年 Pieter Zeeman **ゼーマン効果** を発見(1902年ノーベル物理学賞)

イオンのスペクトルが**磁場**により分裂する。

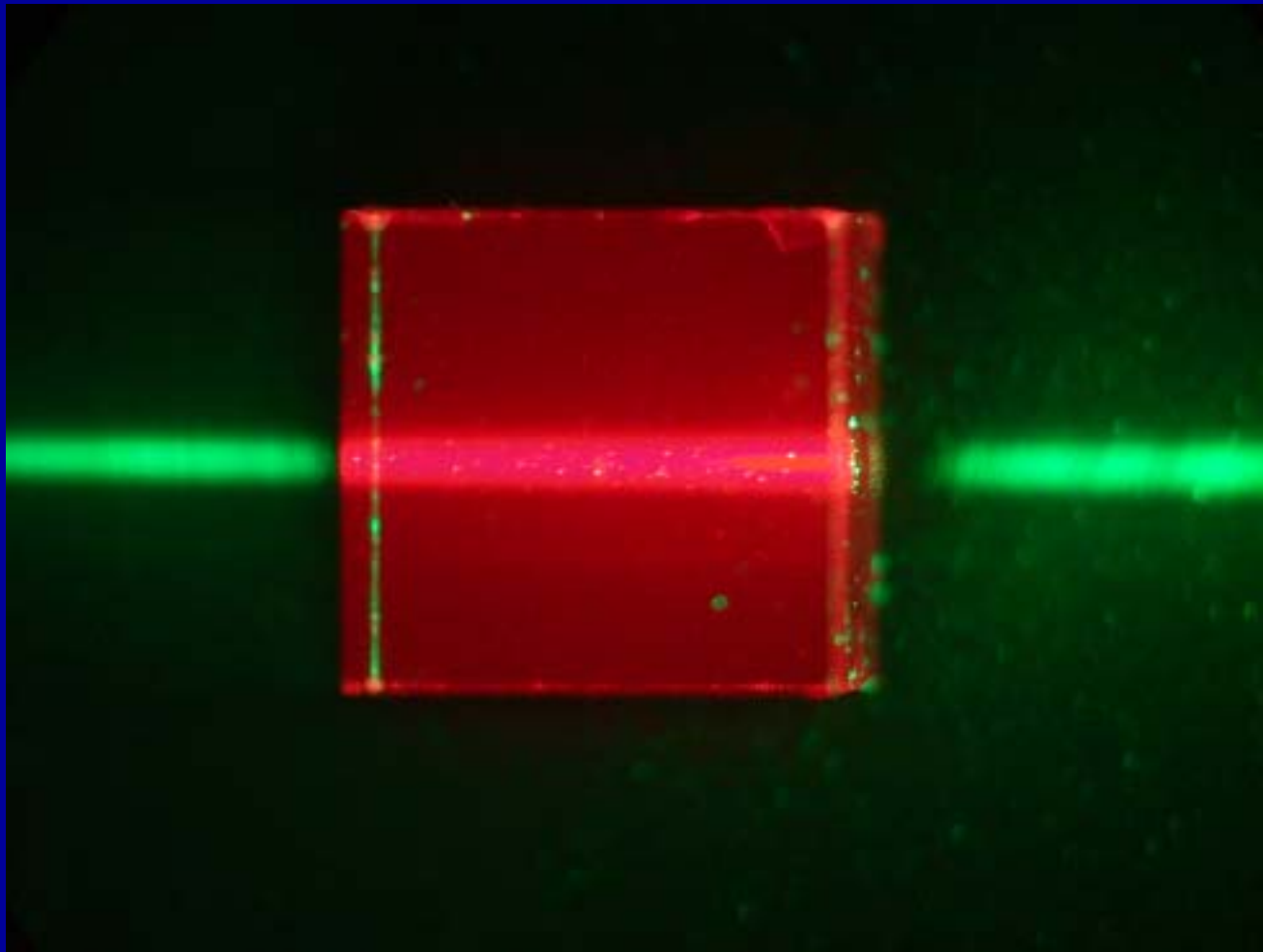
今日の**材料物性学**にとっても最も重要な学理の一つ

1908年 Hale 分光スペクトルのゼーマン分裂の観測により、**太陽の黒点**における強い**磁場**(数千ガウス)を発見

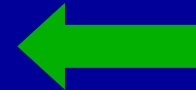


天体物理学 が飛躍的に発展

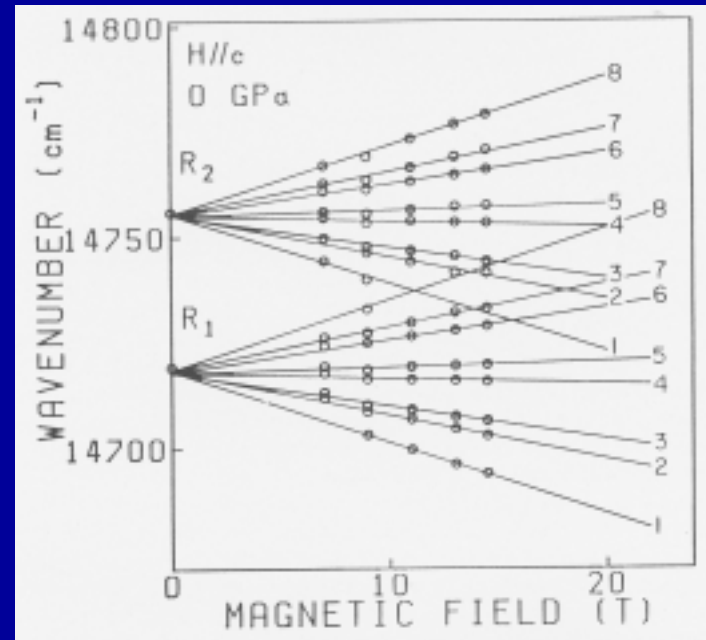
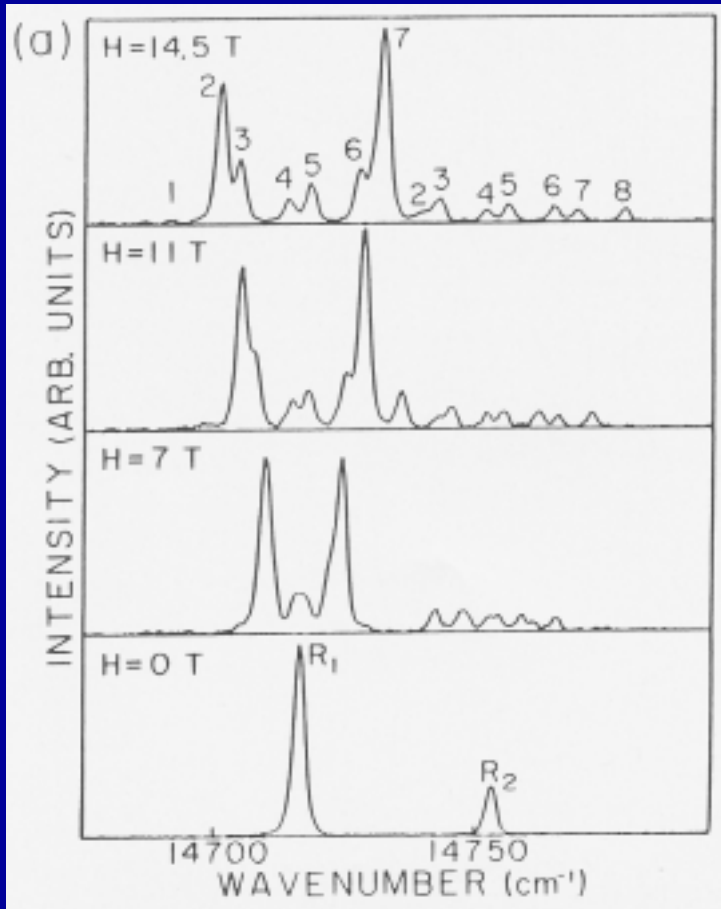
アレキサンドライトのレーザーフォトルミネッセンス



Ar イオン・レーザー
波長 514.5 nm



アレキサンドライトのゼーマン効果



$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad [\text{J}], \quad 1 \text{ [J]} = 6.24 \times 10^{16} \text{ [eV]}$$

$$\text{波数(wavenumber)} = \frac{1}{\lambda} \quad [\text{cm}^{-1}]$$

アレキサンドライト($\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$) の R 線レーザーフォトルミネッセンス
 スペクトルのゼーマン分裂 (Kuroda et al., 1989)

光応答の強さ：フェルミのゴールデン・ルール

光に対する物質(電子, 原子)の **応答の強さ** は何で決まるか?

E. Fermi (1938年ノーベル物理学賞, 熱中性子による原子核反応の発見)

単位時間(1秒間)当りの 光学遷移確率

光学遷移 Optical Transition
光を吸収・放出して電子が状態
(エネルギー)を変えること.

$$W_{nm} = \frac{(2\pi)^2}{h} |\langle n | e\mathbf{E}(\nu) \cdot \mathbf{r} | m \rangle|^2 \delta(h\nu - E_{nm})$$

$\langle n | e\mathbf{E}(\nu) \cdot \mathbf{r} | m \rangle$ は光と電子との相互作用の強さを表す量子力学的表式

第3章 光デバイス

ショックレイ、エサキ：半導体デバイスの発展

1950 年以降

半導体をはじめとする，固体物質の結晶性と組成の制御技術が飛躍的に進歩

- W. Shockley, J. Bardeen, W. H. Brattain

半導体の**トランジスター**効果の発見 (1956年ノーベル物理学賞)

- 固体物理学(物性学)の隆盛

半導体，**固体レーザー材料**，**液晶**

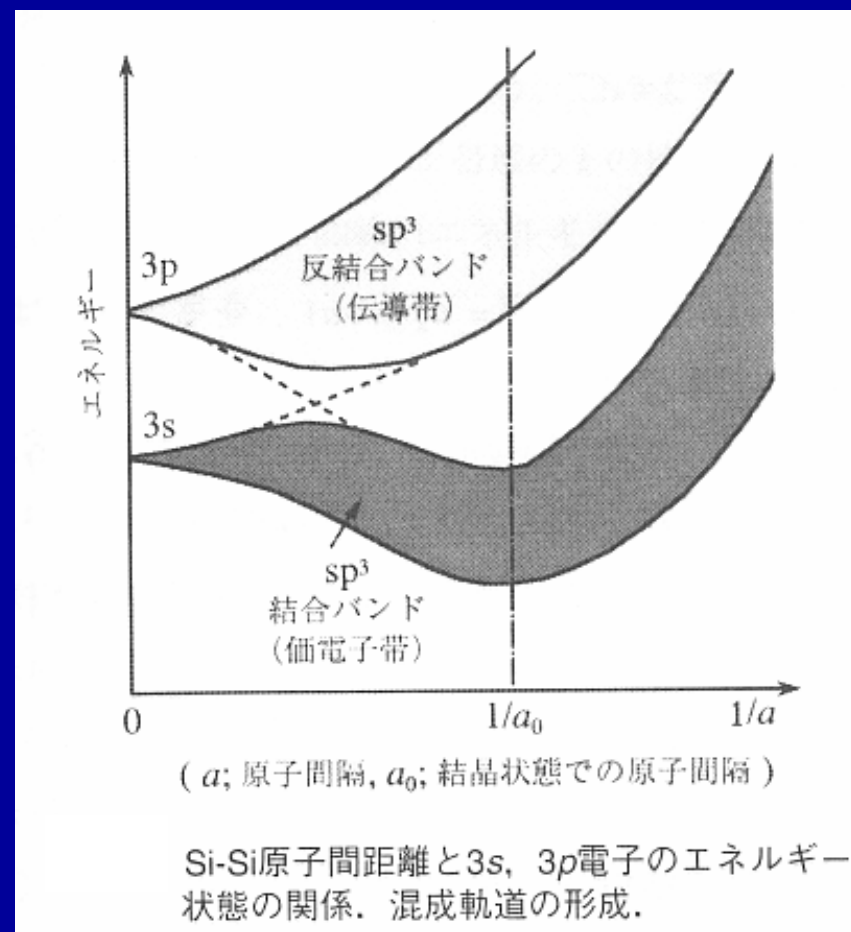
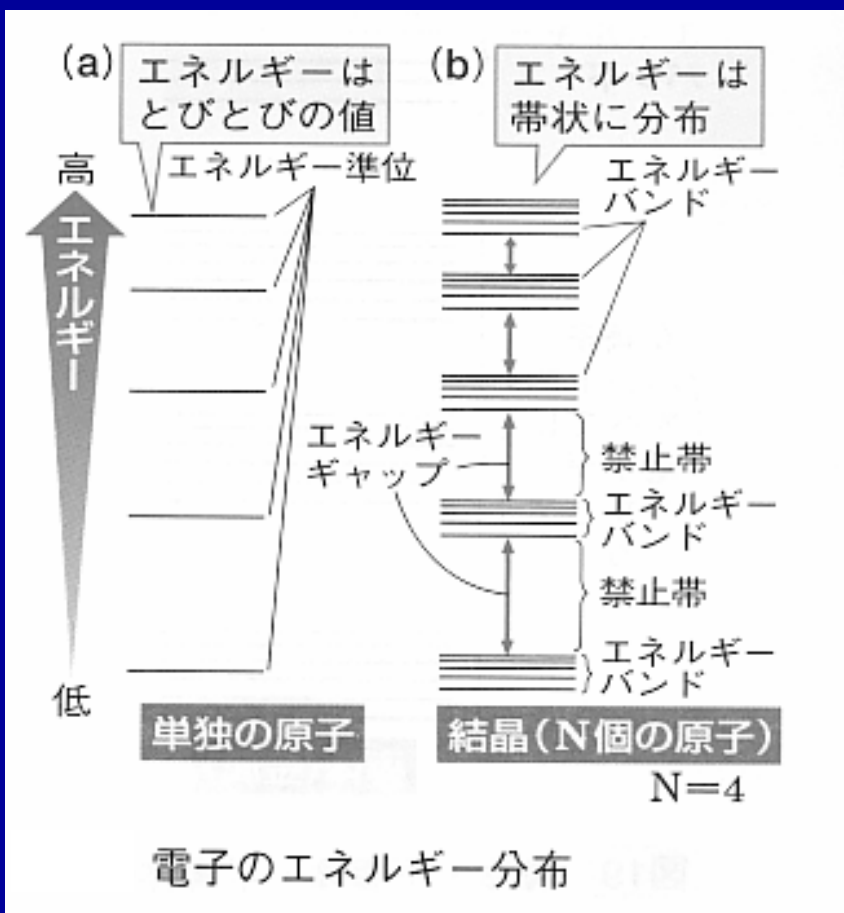
などにおける発色，自然発光，誘導放射，非線形光学などの電子プロセスとメカニズムについての物性研究の蓄積

- MBE, CVDなどの材料技術の進歩

特に L. Esaki (IBM, 1973年ノーベル物理学賞) らによる

MBE(Molecular Beam Epitaxy)法の発明と**人工超格子**の創成の寄与が大きい

結晶における電子帯の形成

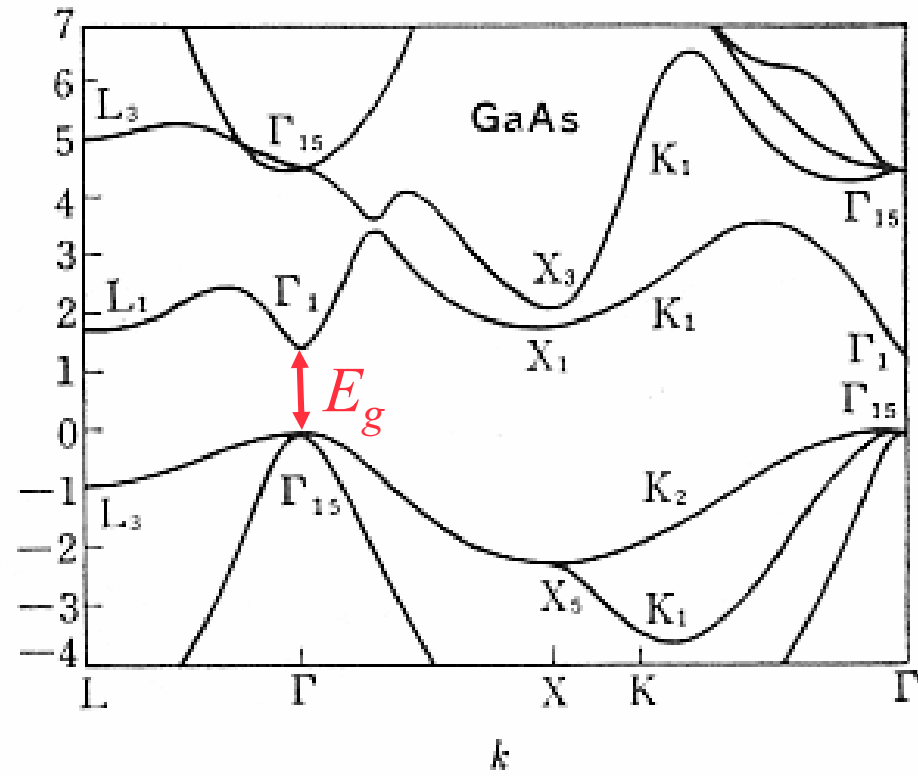
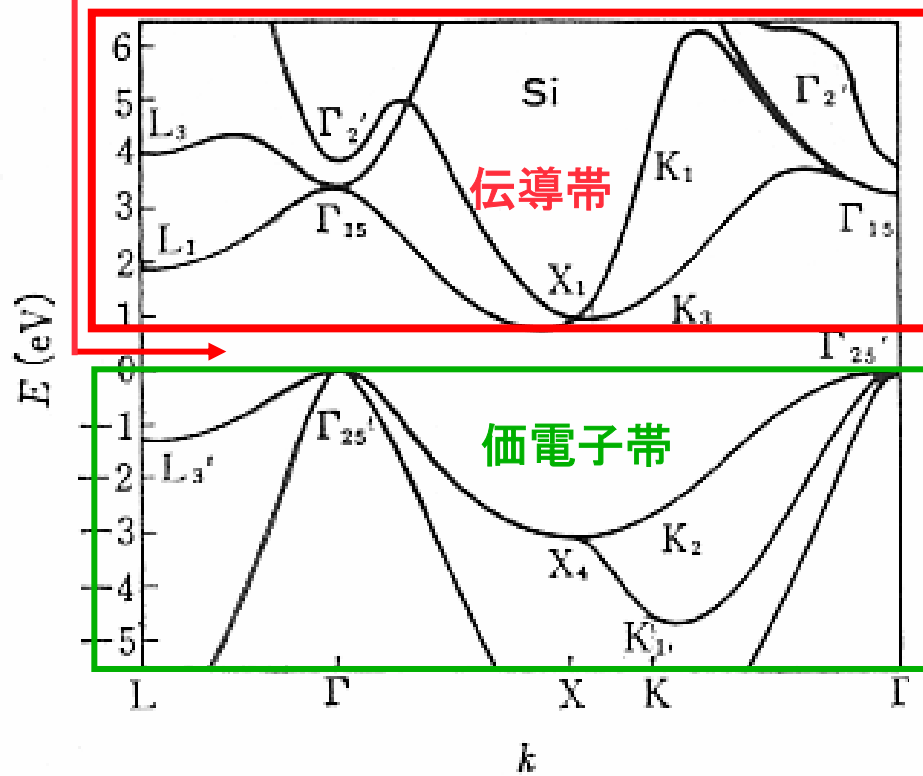


近角聰信, 三浦登「理解しやすい物理I・II」
(文永堂)より.

齊藤博他「入門固体物性」(共立出版)より.

固体，特に半導体，のバンド理論の発展と確立

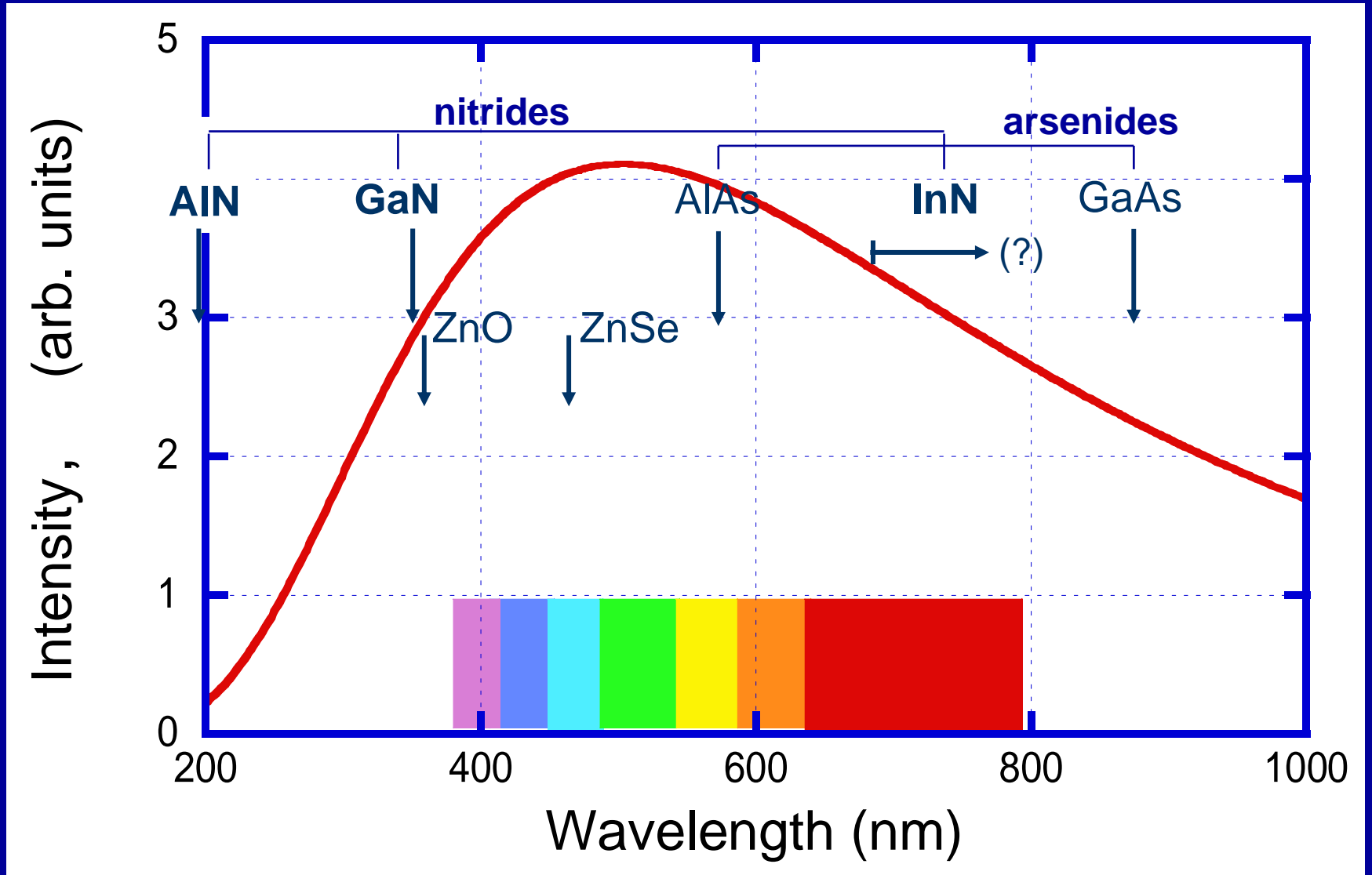
エネルギー
ギャップ



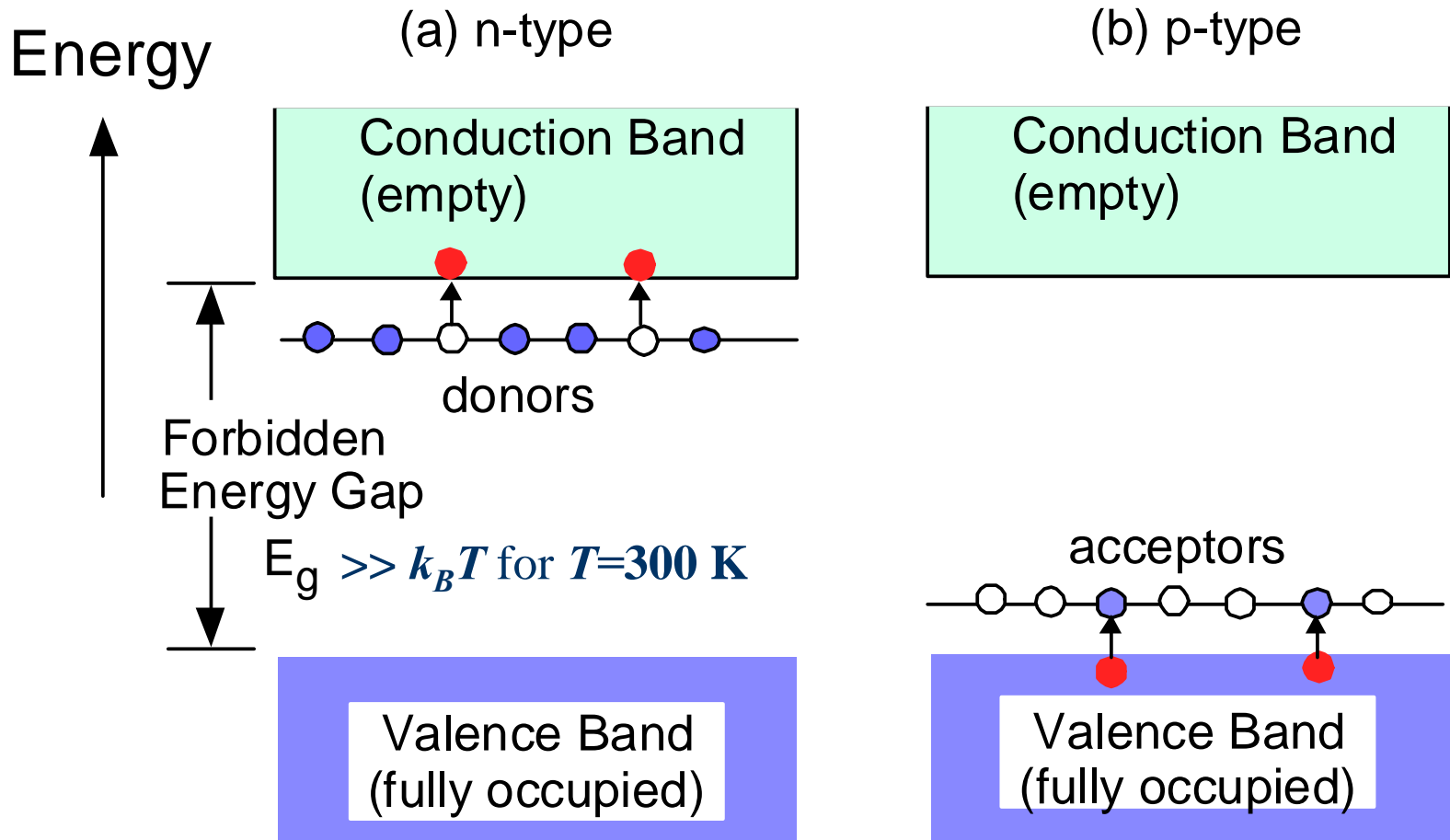
Si の価電子帯の電子 : $3s^2 3p^2$

いろいろな半導体のエネルギーギャップ

(光の波長でスケールしたもの)

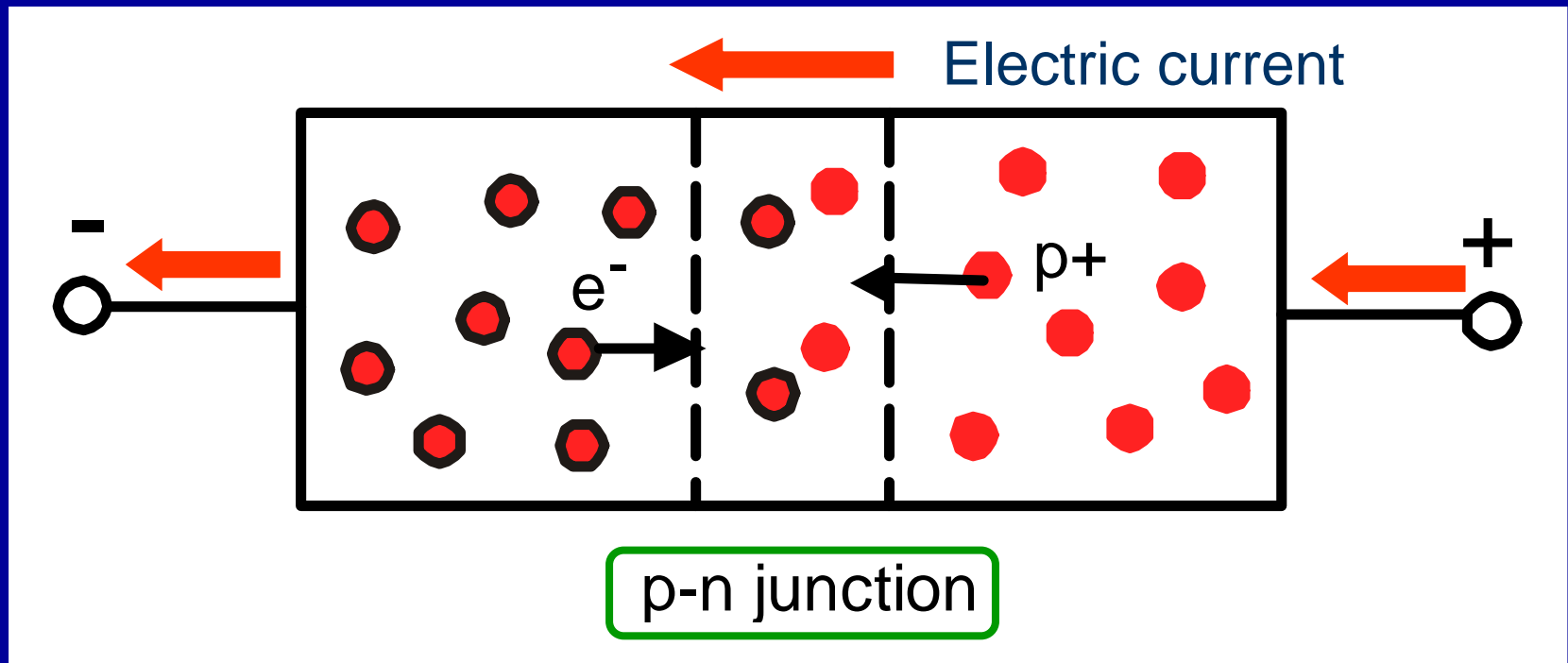


半導体の電子構造



● : thermally produced conduction electrons or holes

p-n接合からの光放射

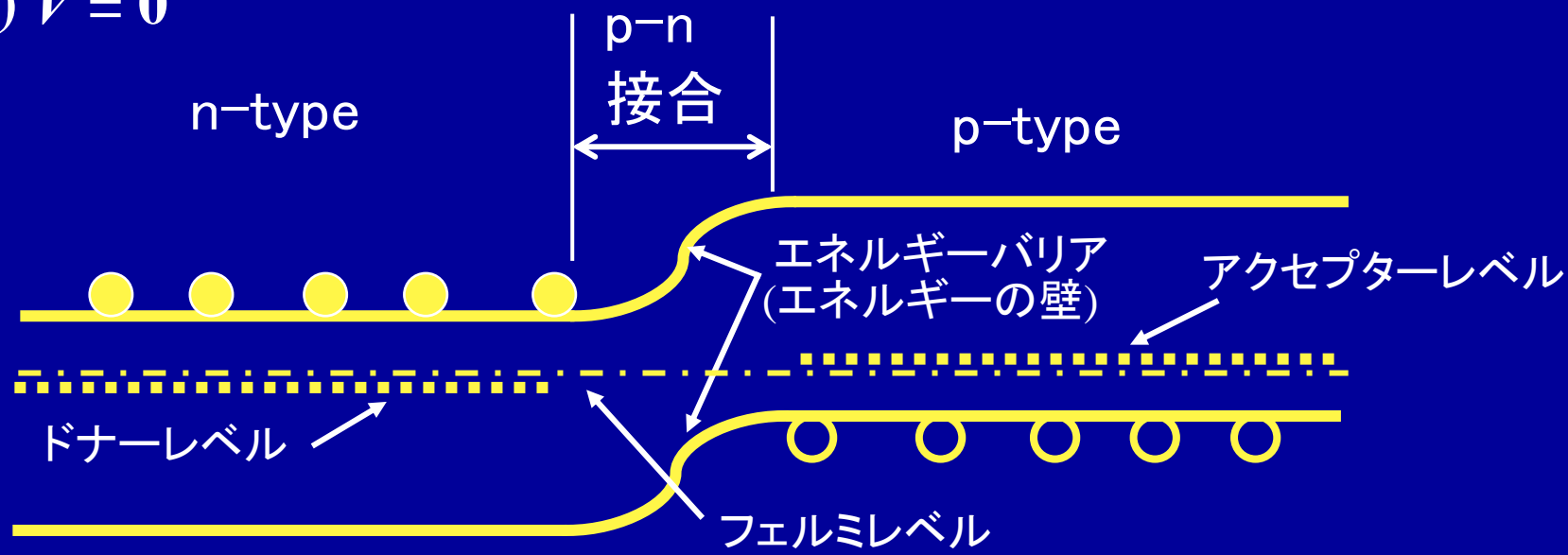


電子と正孔がp-n接合に入ると

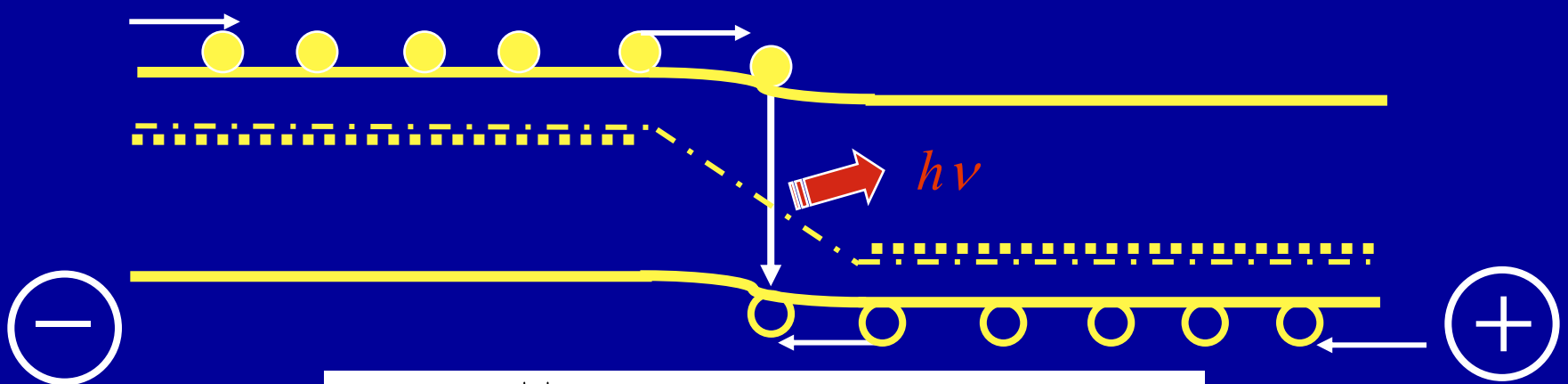


$\nu = c/\lambda$ だから光の波長は $\lambda \approx hc/E_g$

(a) $V = 0$

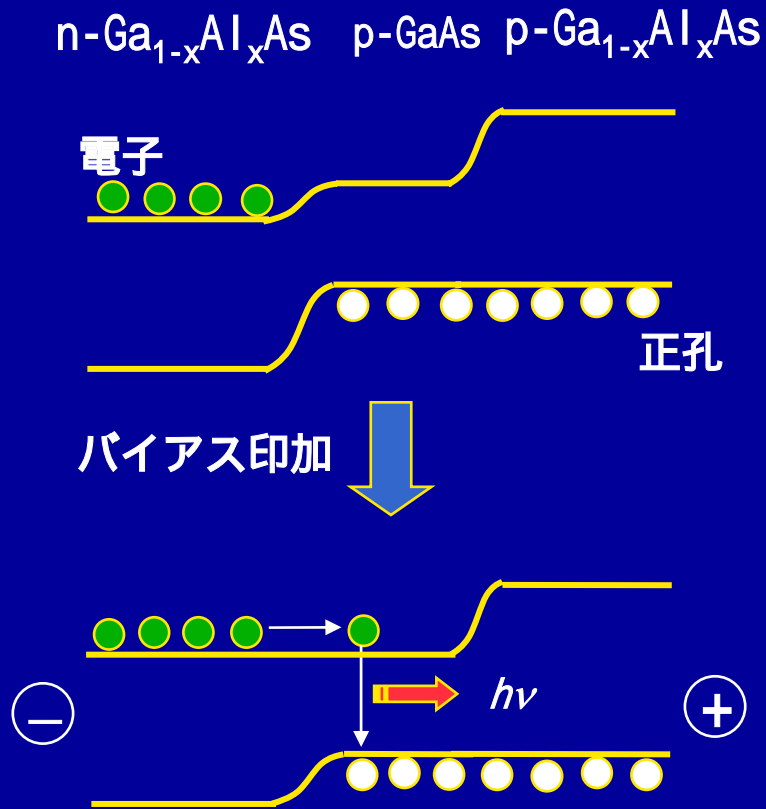


(b) $V > 0$: 順方向バイアス

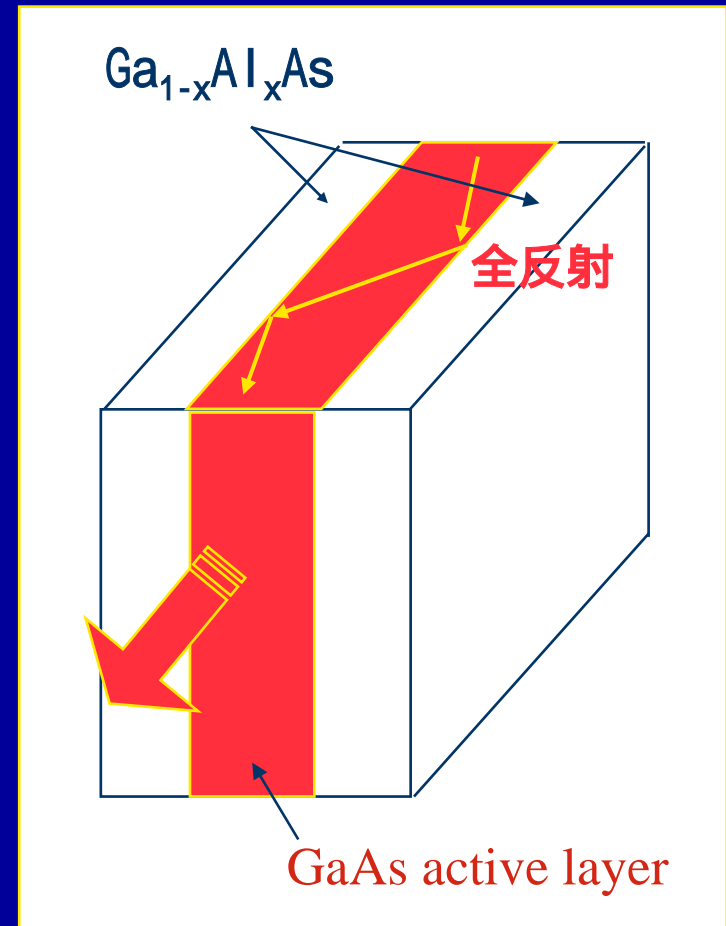


$$I = I_{s0} \left(e^{\frac{|e|V}{kT}} - 1 \right), \quad I_{s0} = \text{飽和電流(定数)}$$

ハヤシ・パニツシュ のダブルヘテロ接合半導体レーザー (1970)



電子と正孔が活性層に閉じ込められる



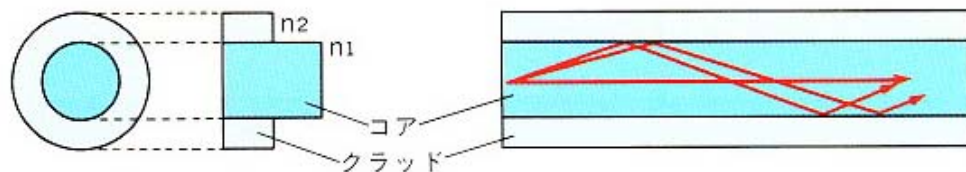
光も活性層に閉じ込められる

石英光ファイバは、石英を素材とする非常に透明度の高いガラスファイバで、コアと呼ばれる中央部の屈折率の高い部分 n_1 と、クラッドと呼ばれる周辺部の屈折率の低い部分 n_2 から構成されています。

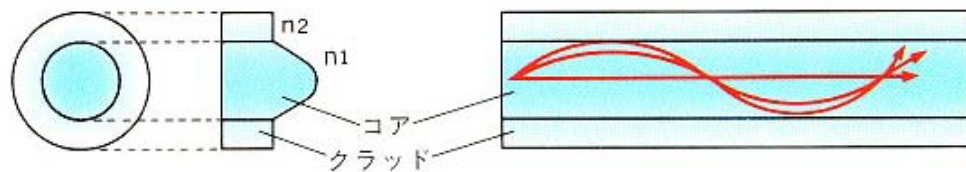
光はコアとクラッドの境界で全反射しながら進むので、光ファイバの内部にとじ込められて低損失に伝送されることになります。

種類

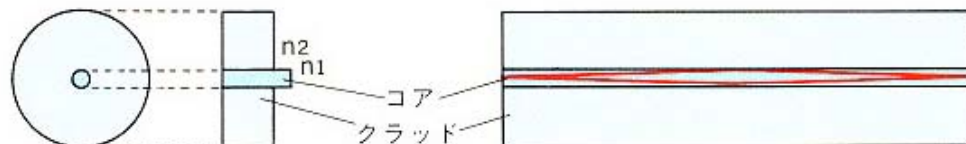
ステップインデックス形
マルチモードファイバ(SI)



グレーデッドインデックス形
マルチモードファイバ(GI)



ステップインデックス形
シングルモードファイバ(SM)

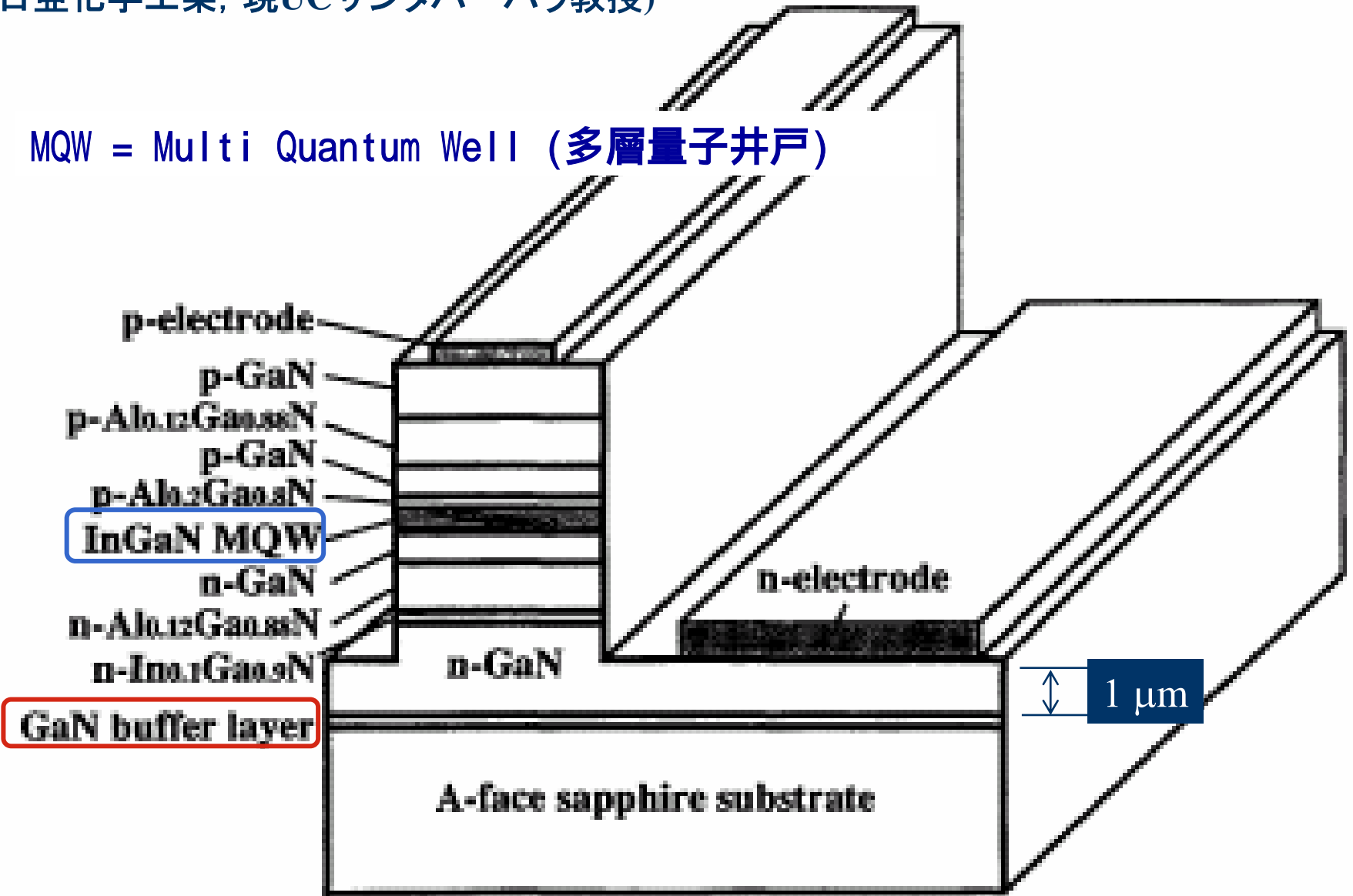


レポート課題

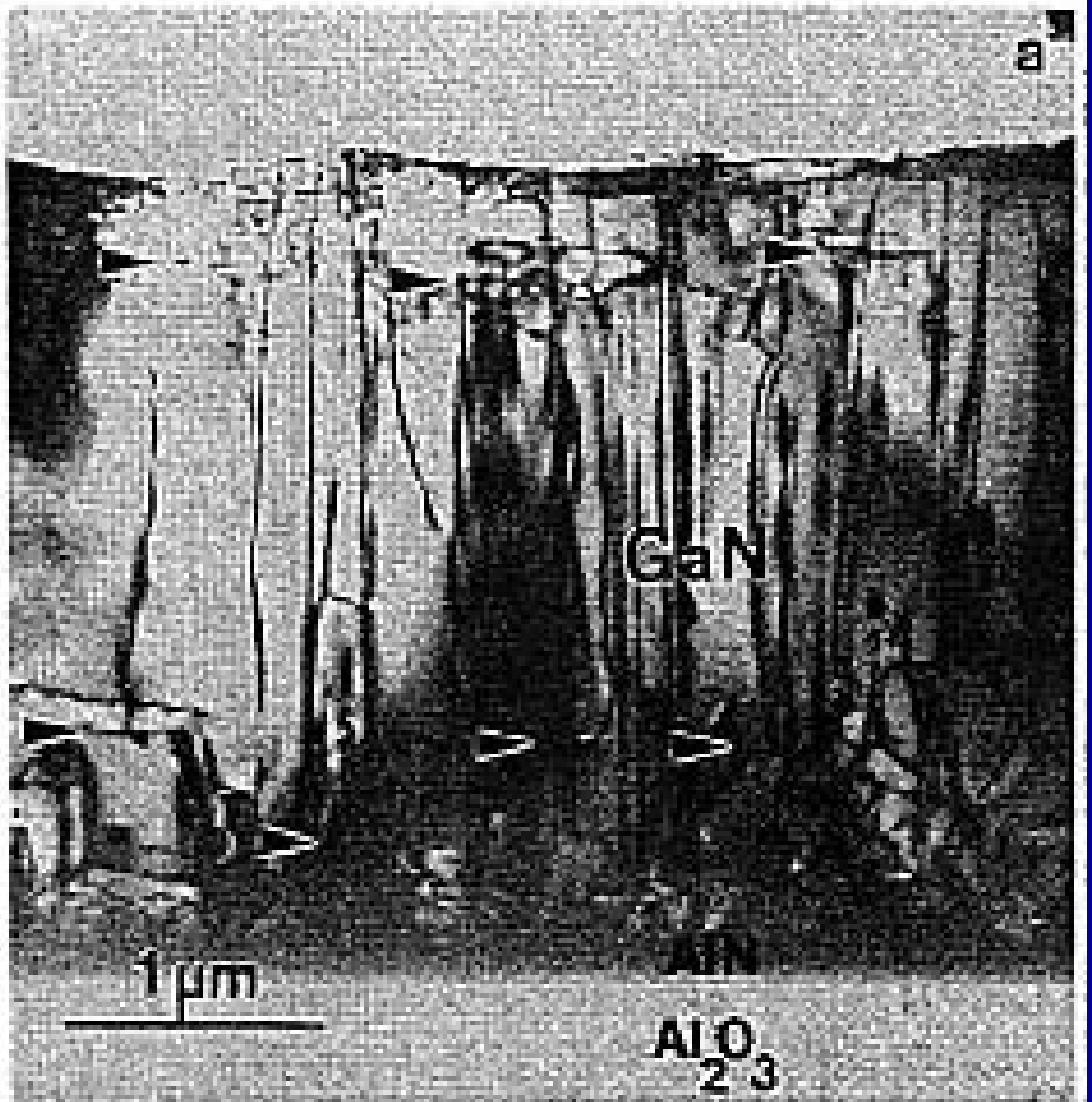
- [1] 2つの物質の境界面で光の全反射が起こる理由を説明せよ.

中村修二さんがMOCVD法で創った青色LD (Jpn. J. Appl. Phys. 1996)
(日亜化学工業, 現UCサンタバーバラ教授)

MQW = Multi Quantum Well (多層量子井戸)



初期のGaN
堆積結晶膜



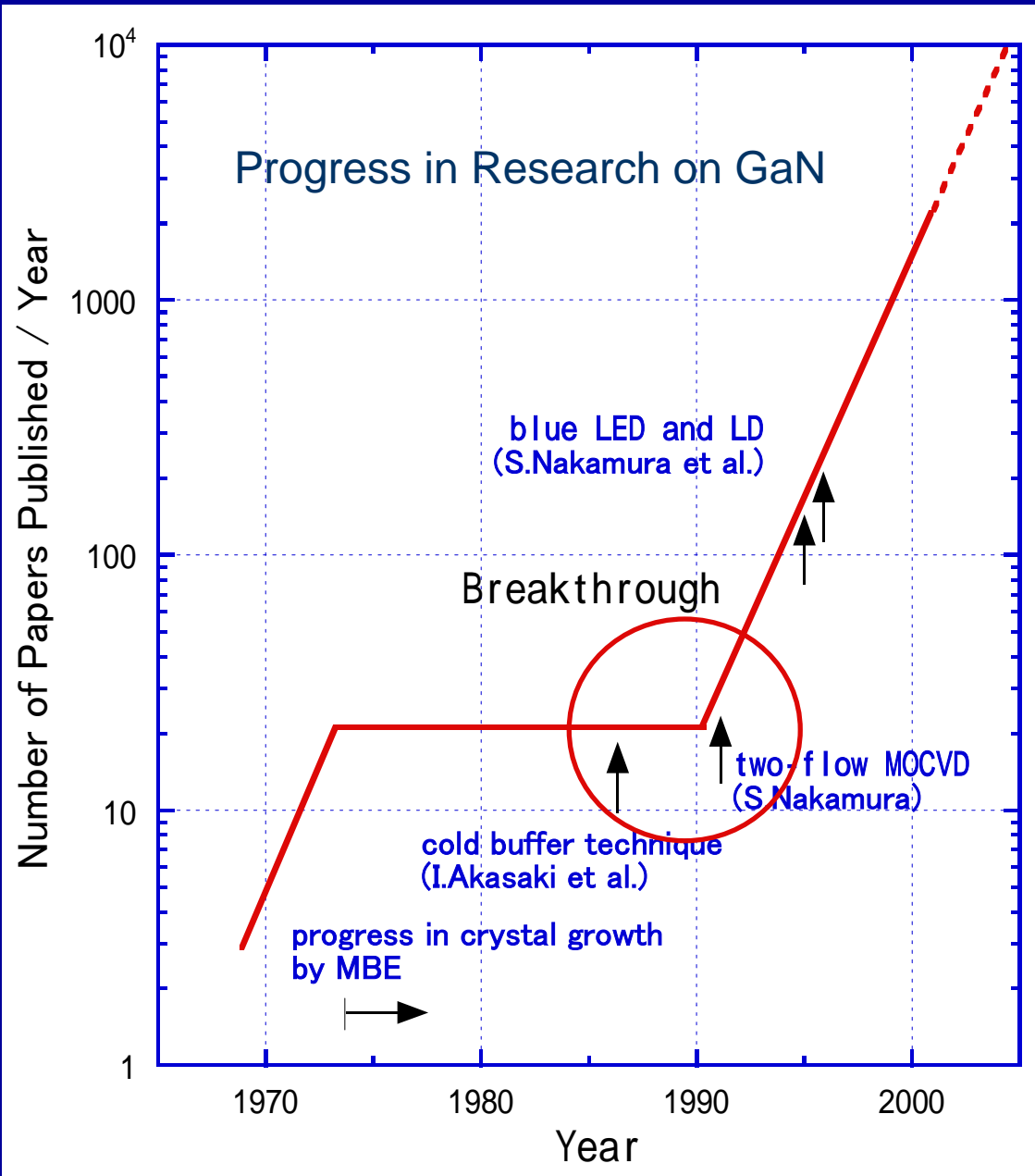
現在のGaNの MOCVD膜



20KV  1μm
X10,000

GaN の LED, LD の開発の歴史

- I. Akasaki (Nagoya Univ.)
(赤崎 勇)
 - ☀ cold-buffer technique, 1986
 - ☀ p-GaN crystal, 1989
- S. Nakamura (Nichia)
(中村修二)
 - ☀ developed two-flow MOCVD method, 1991
(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)
 - ☀ good n-GaN crystal
 - ☀ first commercial LD, 1996



after I. Akasaki, Oyo Buturi, 73, 1060 (2004)

year

オプトエレクトロニクスの推進

暮らしに役立つオプトエレクトロニクスを推進するために必要な条件

(1) 新しい電子・光プロセスの発見と学理の解明

= 物性学

固体電子構造、高次電子プロセス、線形・非線形光学 etc.

(2) デバイス化のための方法の開発・創案と物質制御技術の発展

= 材料工学

ハヤシ、パニッシュの液相エピタキシー
エサキ、スタイルスの分子線エピタキシー
アカサキの低温バッファ層
光IC、光ファイバー etc.

いろいろな固体光デバイス

光放射	LED, LD etc.
光発電	太陽電池
光伝送、受信	光ファイバー, 誘電体導波路, Photodiode, CCD camera, イメージングプレート
光変調	Electro-optic Modulator, Acousto-optic Modulator
光デバイス	光IC, 光増幅器
Display	液晶, Electrochromic, LED, GaN青色LED, <u>有機EL</u>

携帯電話機
TV (2007)

第4章 物質電子の光機能

光に対する電子の応答 : 光と電子の相互作用

一次過程 Primary Processes

線形応答 Linear Responses

出力光の強度が物質固有の係数で入力光の強度に比例するもの。

吸収 Absorption

反射 Reflection

偏光回転 Polarization-Rotation (Ellipsometry)

自然旋光、**ファラデー回転**、**カー回転**

散乱、回折 Scattering (Diffraction)

準弾性散乱、**ラマン散乱**、**ブリルアン散乱**ラマン-ナス回折 etc.

非線形応答 Nonlinear Responses

出力光の強度が入力光の強度に比例しない。
同時に、出力光の波長が入力光に依存して変わる。

高調波発生 Harmonic Generation

$$\omega_{\text{out}} = n\omega_{\text{in}}, \quad n = 2, 3, \dots$$

$$I_{\text{out}} \propto I_{\text{in}}^n$$

多光子吸収 Multiphoton Absorption

$$\omega_{\text{absorption}} = n\omega_{\text{in}}, \quad n = 2, 3, \dots$$

$$I_{\text{absorption}} \propto I_{\text{in}}^n$$

光(波)混合 Optical Mixing

$$\omega_{\text{out}} = \omega_{\text{in}(1)} \pm \omega_{\text{in}(2)} \pm \dots$$

$$I_{\text{out}} \propto I_{\text{in}(1)} I_{\text{in}(2)} \dots$$

パラメトリック増幅 Parametric Amplification

$$\omega_{\text{out}} = \omega_{\text{in}(1)}, \quad \omega_{\text{in}(1)} \pm \omega_{\text{in}(2)} : \text{idler}$$

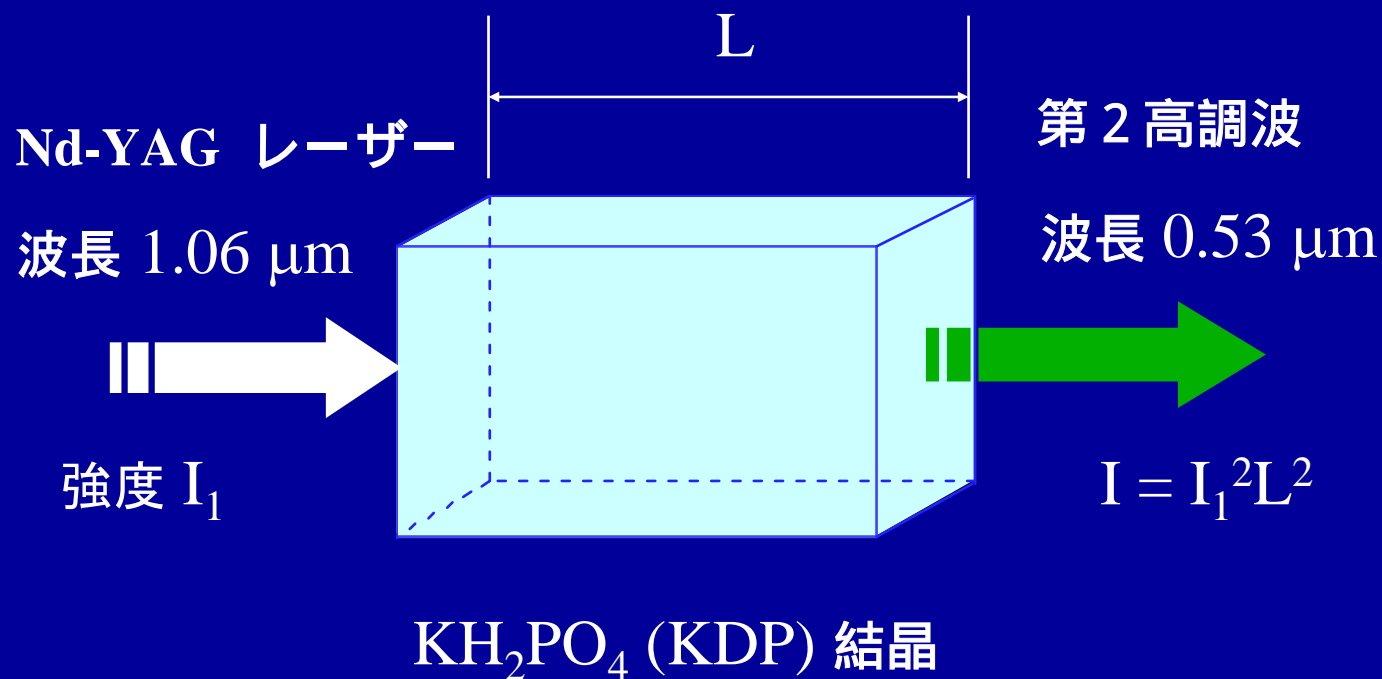
$$I_{\text{out}(1)} \propto I_{\text{in}(1)} I_{\text{in}(2)}^n, \quad n > 1$$

誘導放射、散乱 Stimulated Emission, Scattering

$$\omega_{\text{out}} = \omega_{\text{in}}$$

$$I_{\text{out}} \propto I_{\text{in}}^n, \quad n > 1$$

第2高調波発生 Second Harmonic Generation (SHG)



分極と分極波

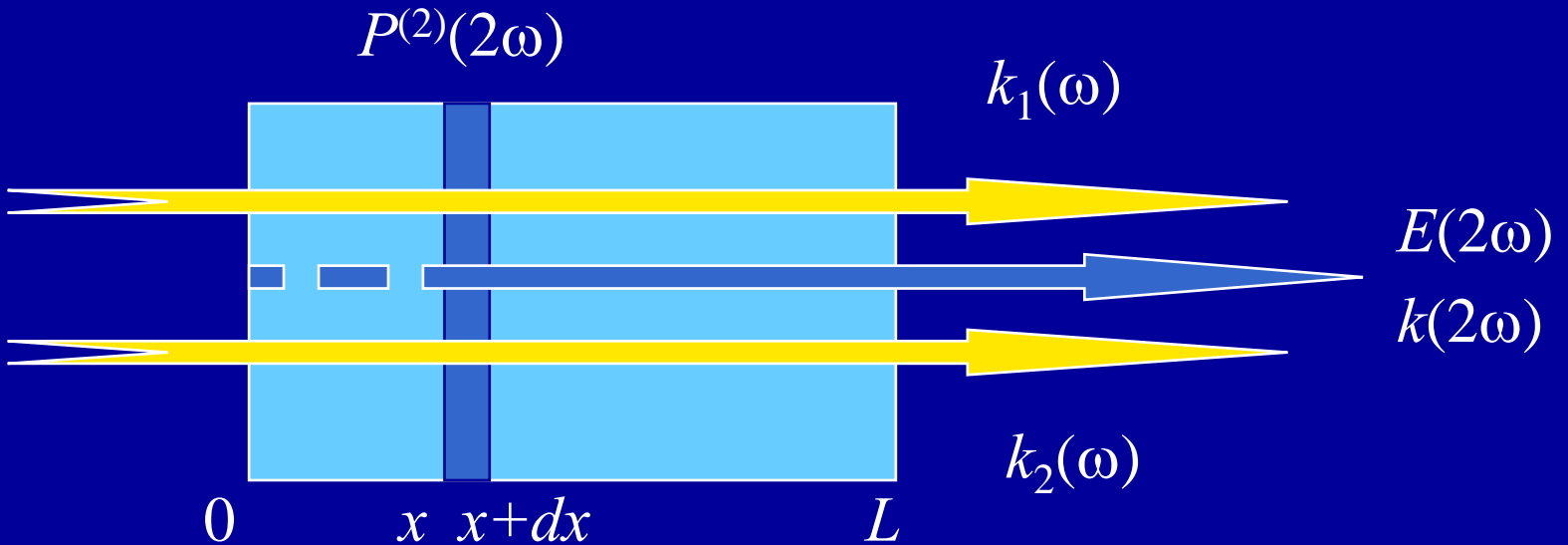
$$P_i = \sum_j \alpha_{ij}^{(1)} E_j + \sum_{j,k} \alpha_{ijk}^{(2)} E_j E_k + \sum_{j,k,l} \alpha_{ijkl}^{(3)} E_j E_k E_l + \dots$$

2次の非線形分極波

$$P_i^{(2)}(2\omega) = \sum_{j,k=x,y,z} \alpha_{ijk}^{(2)} E_{0j} E_{0k} e^{i(k_1 r + k_2 r - 2\omega t)}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} n(\omega) = \left(\frac{\omega}{c}\right) n(\omega) \quad n: \text{屈折率}, c: \text{真空中の光速}$$

2倍波の電界強度 $E(2\omega)$: $P^{(2)}(2\omega)$ より発生



ビームの断面積を S として,

$$\begin{aligned}
 E(2\omega)_{x=L} &= S \int_0^L P^{(2)}(2\omega) dx e^{i k(2\omega)(L-x)} \\
 &= S \alpha^{(2)} E_{0j} E_{0k} e^{i k(2\omega)L} \int_0^L e^{i [k_1(\omega) + k_2(\omega) - k(2\omega)] x} dx
 \end{aligned}$$

2倍波の強さ : Power

$$I(2\omega) = \alpha^2 I^2(\omega) L^2 \frac{\sin^2[\{k_1(\omega) + k_2(\omega) - k(2\omega)\}L/2]}{[\{k_1(\omega) + k_2(\omega) - k(2\omega)\}L/2]^2}$$

屈折率整合条件(index matching)

$$n_1(\omega) + n_2(\omega) = 2n(2\omega)$$

このとき

$$I(2\omega) = \alpha^2 I^2(\omega) L^2$$

等方性物質

異方性のない透明な物質では一般に

$$\varepsilon(\omega) = n(\omega)^2 = \varepsilon_n + \frac{\omega_p^2}{\omega_G^2 - \omega^2}$$

だから

$$n(2\omega) > n(\omega)$$

ゆえに、屈折率整合条件を満たさない。

異方的な結晶

常光線

光学軸と光の方向が作る面に垂直な偏光

$$n'^2 = n_o^2$$

異常光線

光学軸と光の方向が作る面内に偏光

$$\frac{1}{n''^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}$$

θ は光学軸と光の方向の角度

$n_o \neq n_e$ なので異常光線の屈折率 n'' は楕円面となる

基本波と高調波の屈折率楕円体

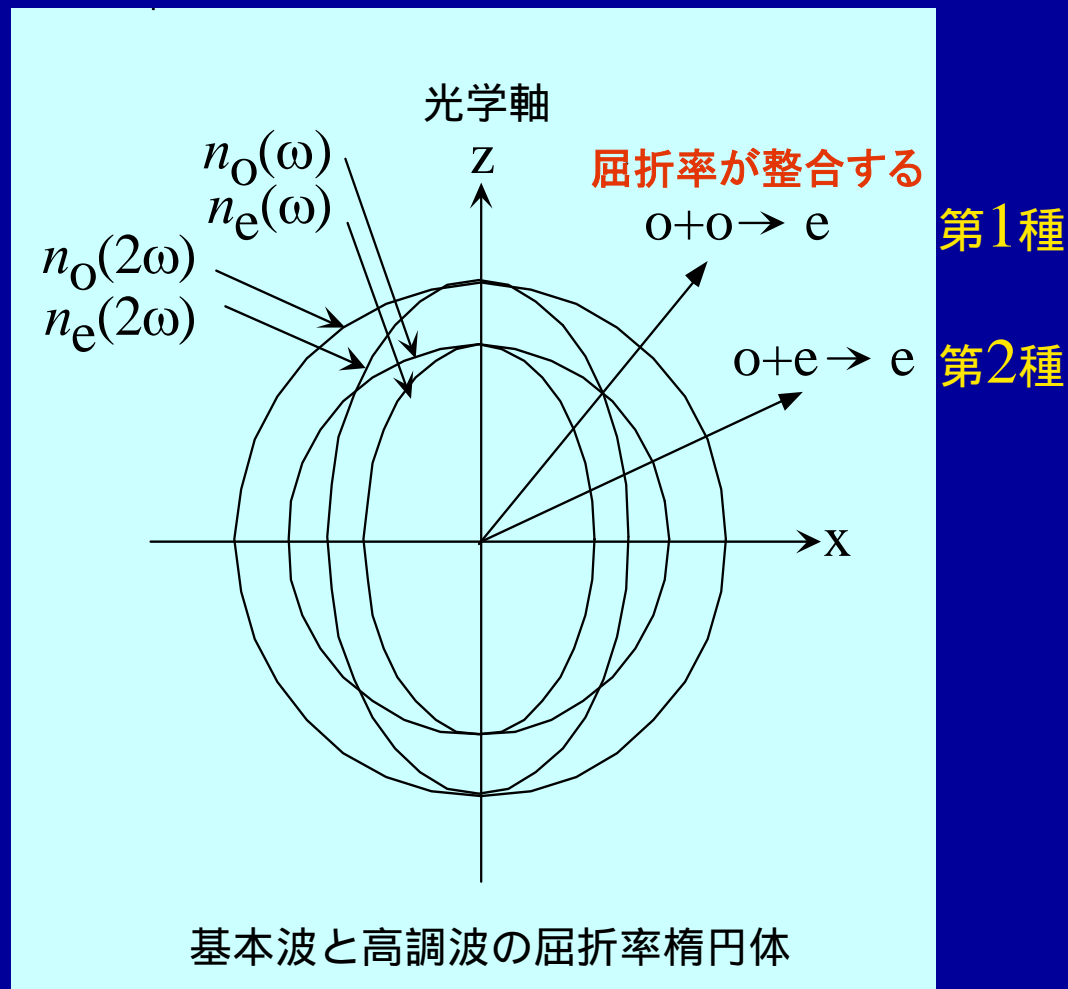


波長	1.06 μ	0.53 μ
n_o	1.494	1.512
n_e	1.461	1.470

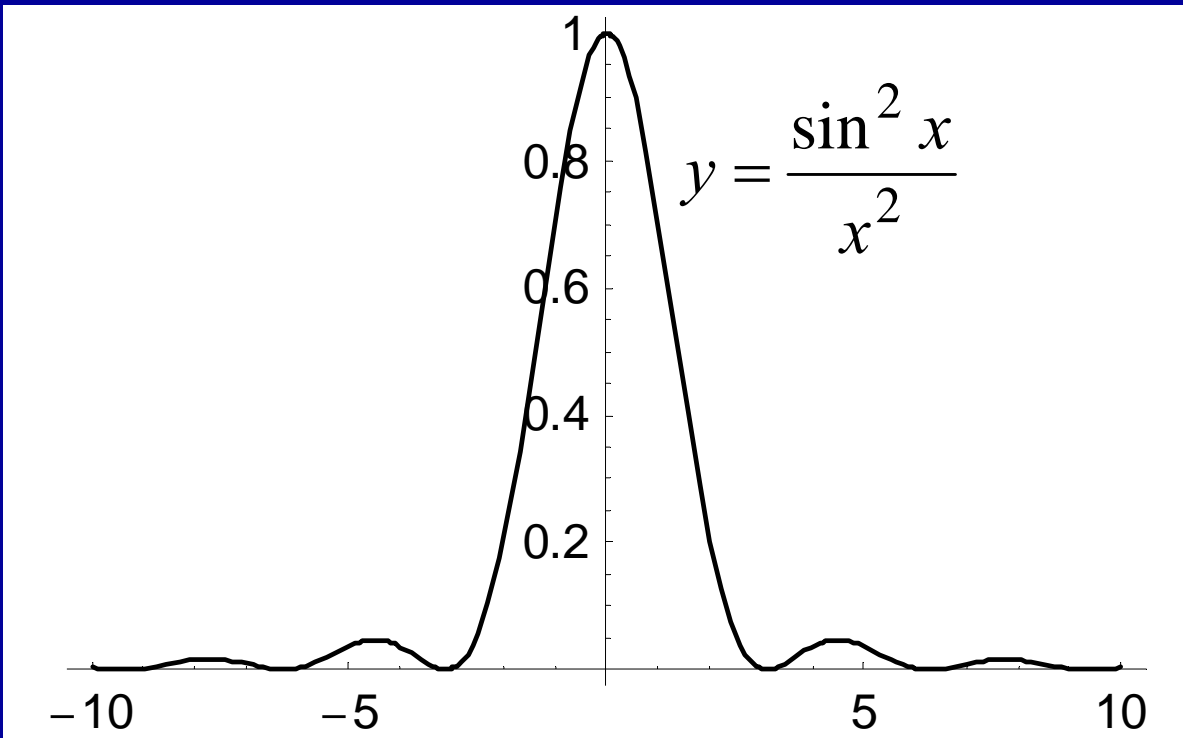
屈折率整合角

第 1 種 40° 18'

第 2 種 56° 00'



$$x = [n_1(\omega) + n_2(\omega) - 2n(2\omega)] \left(\frac{L\pi}{\lambda(\omega)} \right)$$



$$\lambda(\omega) = 1.06 \times 10^{-4} \text{ cm},$$

$$L = 1 \text{ cm},$$

$$|x| < \pi/2$$

$$n_1(\omega) + n_2(\omega) - 2n(2\omega) = \Delta n$$

として

$$\delta|\Delta n| < 0.5 \times 10^{-4}$$

$$\Delta n \sim 0.08 \text{ for } 90^\circ$$

屈折率整合の
許容誤差



$$\delta\theta \approx \frac{\delta|\Delta n|}{\Delta n} \times 90^\circ = \frac{0.5 \times 10^{-4}}{0.8 \times 10^{-1}} \times 90^\circ \approx 0.1^\circ$$

結晶を微小回転させて整合を得る

二次過程 Secondary Processes

始状態または終状態がエネルギーまたは運動量の緩和を起こしているときの光学過程。

またはそれらの逐次過程

Luminescence (photo-, cathode-, electro-, thermo-, tribo- etc.),
(摩擦-)

Photochromism, Photoreflexion, etc.

[始状態] - 光、電界、熱 → [励起状態] → [緩和励起状態] - 光 → [終状態]

Electro Luminescence (EL) = 電流で少数キャリアを注入 → 半導体のLED, LD

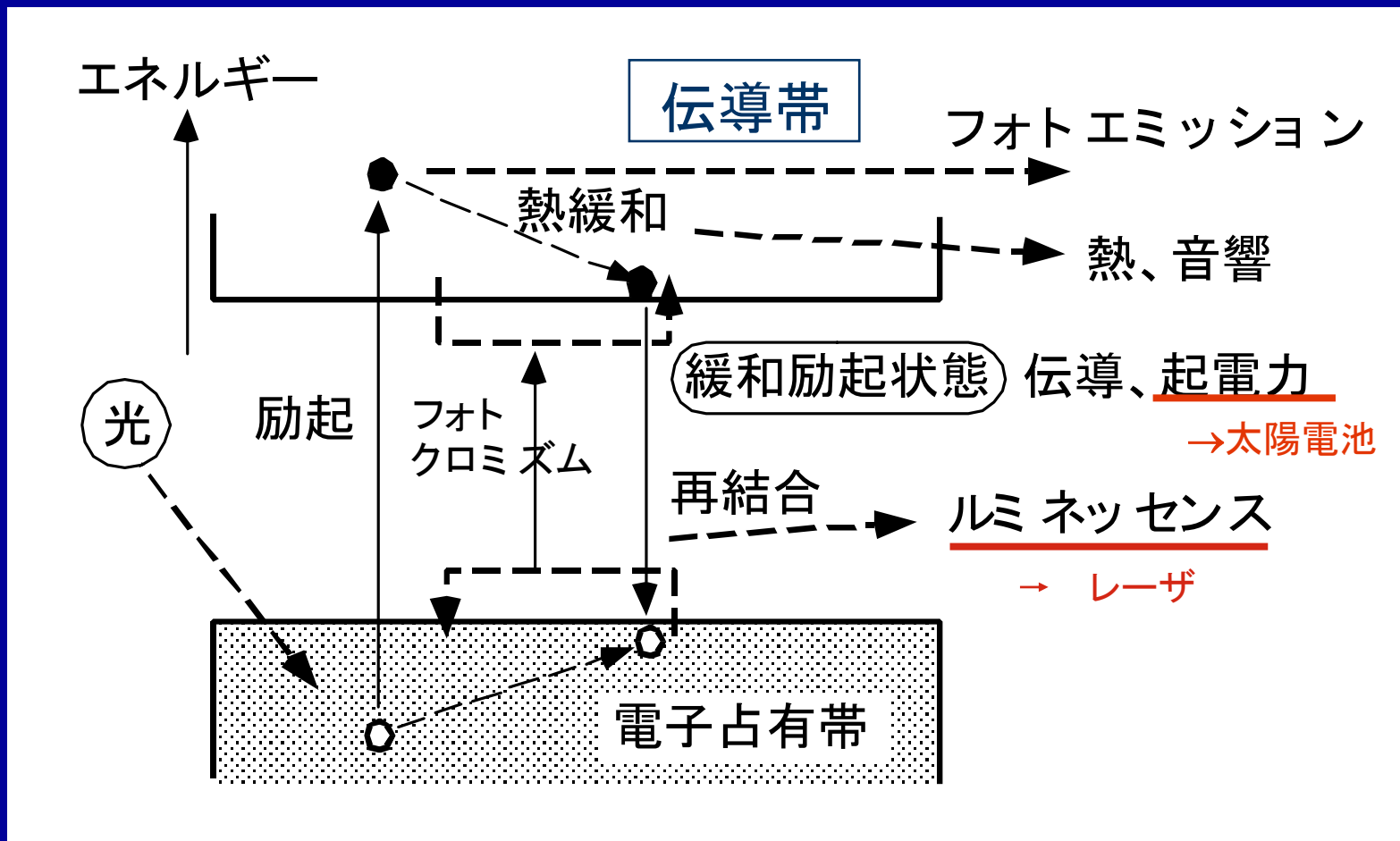
Photoemission, Photoconduction, Photovoltaic

Photoacoustic, Photocalorimetric effect, etc.

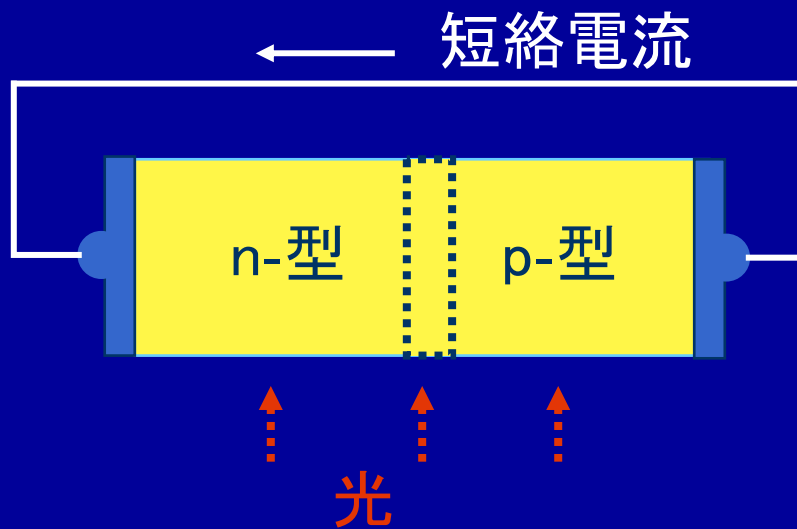
[始状態] - 光 → [励起状態] → [緩和励起状態]

→ 電子放出、伝導、起電力、音、熱の発生

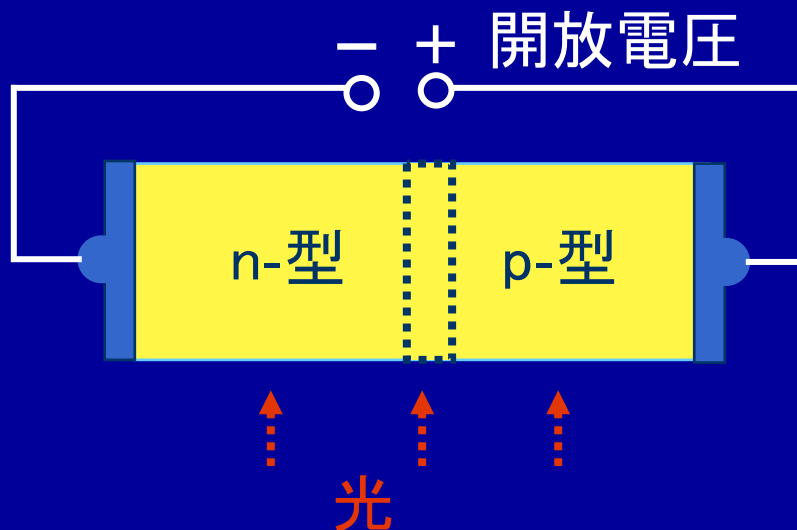
固体の中のいろいろな二次電子プロセス



太陽電池 Solar Cell (Solar Battery)



p-n 接合に光を当てると、p側からn側に電流が流れる



p-n 接合を開放しているときは、p側を+、n側を-とする電圧が発生する

半導体のp-n接合を使ったデバイス

(1) トランジスタ

(2) 整流ダイオード

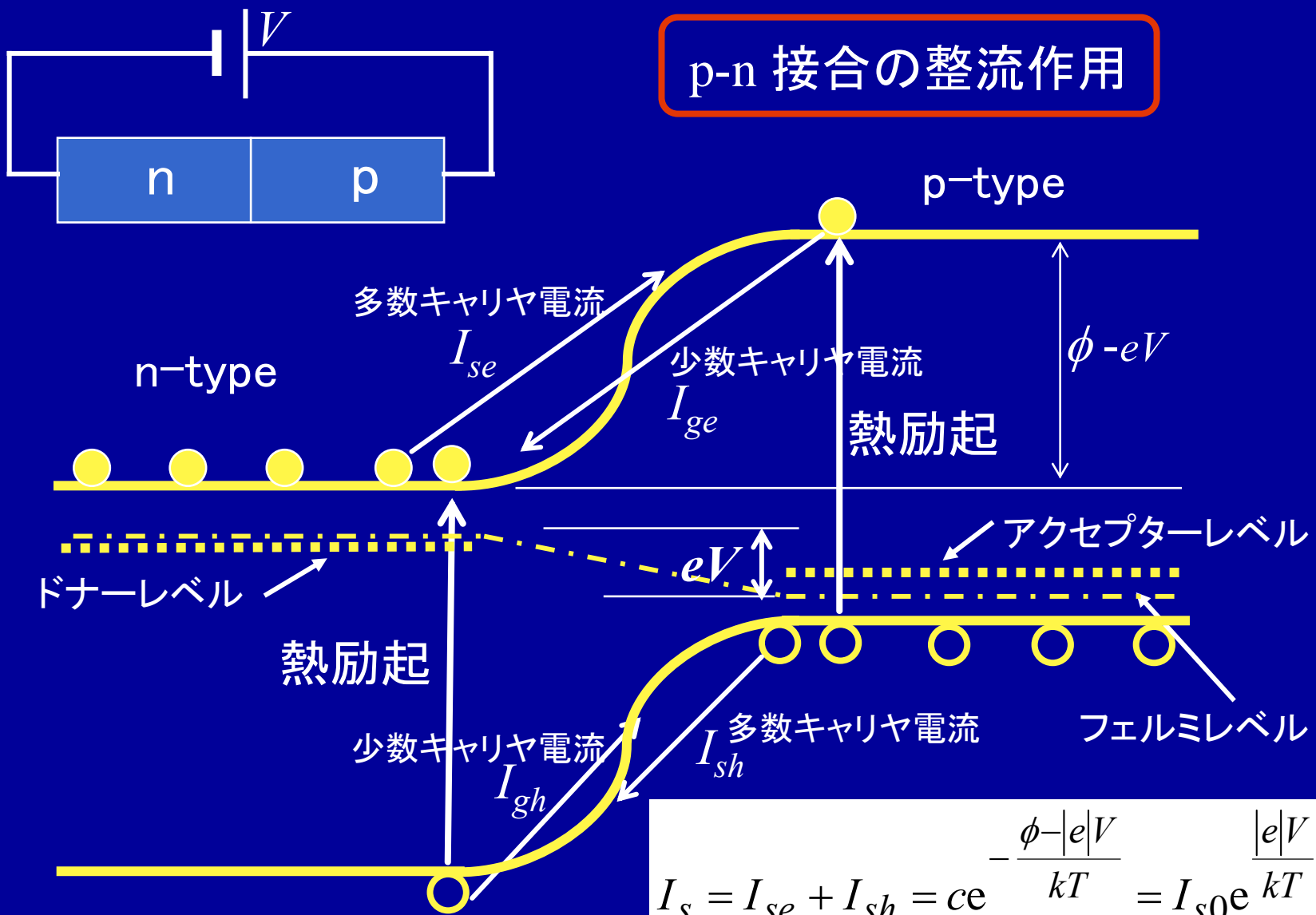
(3) トンネルダイオード

L. Esaki (1973年ノーベル物理学賞)

(4) 太陽電池

(5) LED, LD

p-n 接合の整流作用



$$I_s = I_{se} + I_{sh} = ce^{-\frac{\phi - |eV|}{kT}} = I_{s0} e^{\frac{|eV|}{kT}},$$

$$I_g = I_{ge} + I_{gh} = -I_{s0}$$

正味の電流 $I = I_s + I_g = I_{s0} (e^{\frac{|eV|}{kT}} - 1)$

飽和電流

逆電圧をかけると

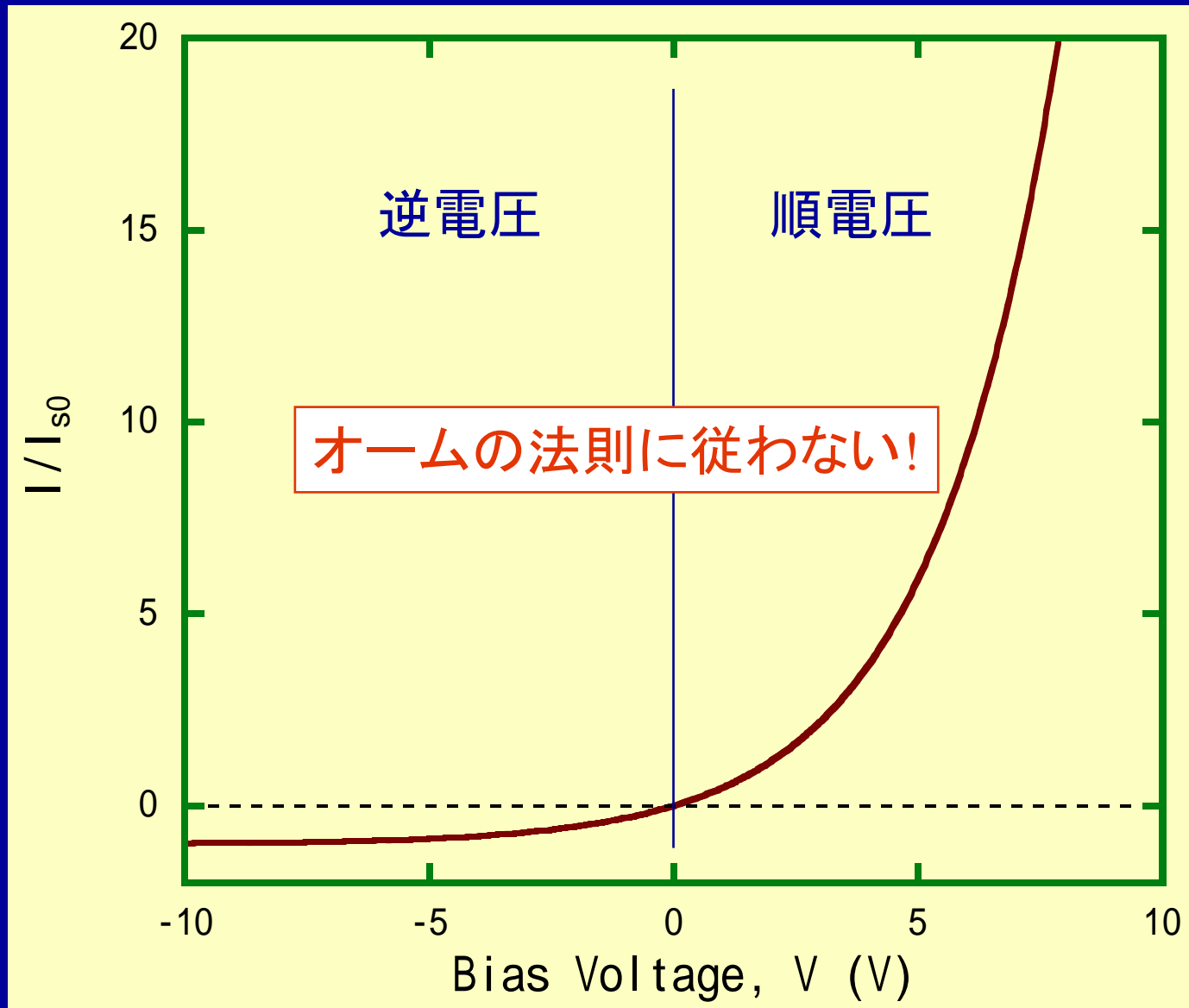
$$V \rightarrow -\infty \text{ で } I \rightarrow -I_{s0} = I_g$$

ジャンクションでの少数キャリアの拡散電流が飽和電流を与える.

$$I_g = |e| \left(\frac{D_n n}{L_n} + \frac{D_p p}{L_p} \right)$$

D は拡散係数, L は平均自由行程 $\sqrt{D\tau}$,
 n, p は少数キャリア密度

$I-V$ 特性



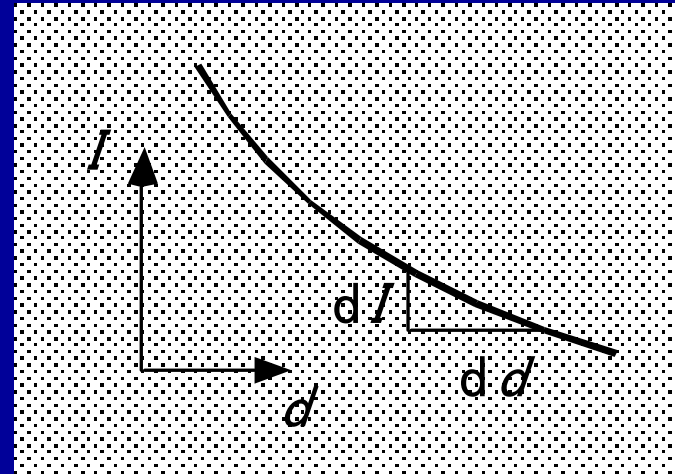


半導体による光の吸収

単位時間・単位面積当たり入射する光量子の数を I とする

ランベルトの法則 (Lambert's law)

$$\frac{dI}{dd} = -\alpha I, \quad \therefore I = I_0 e^{-\alpha d}$$

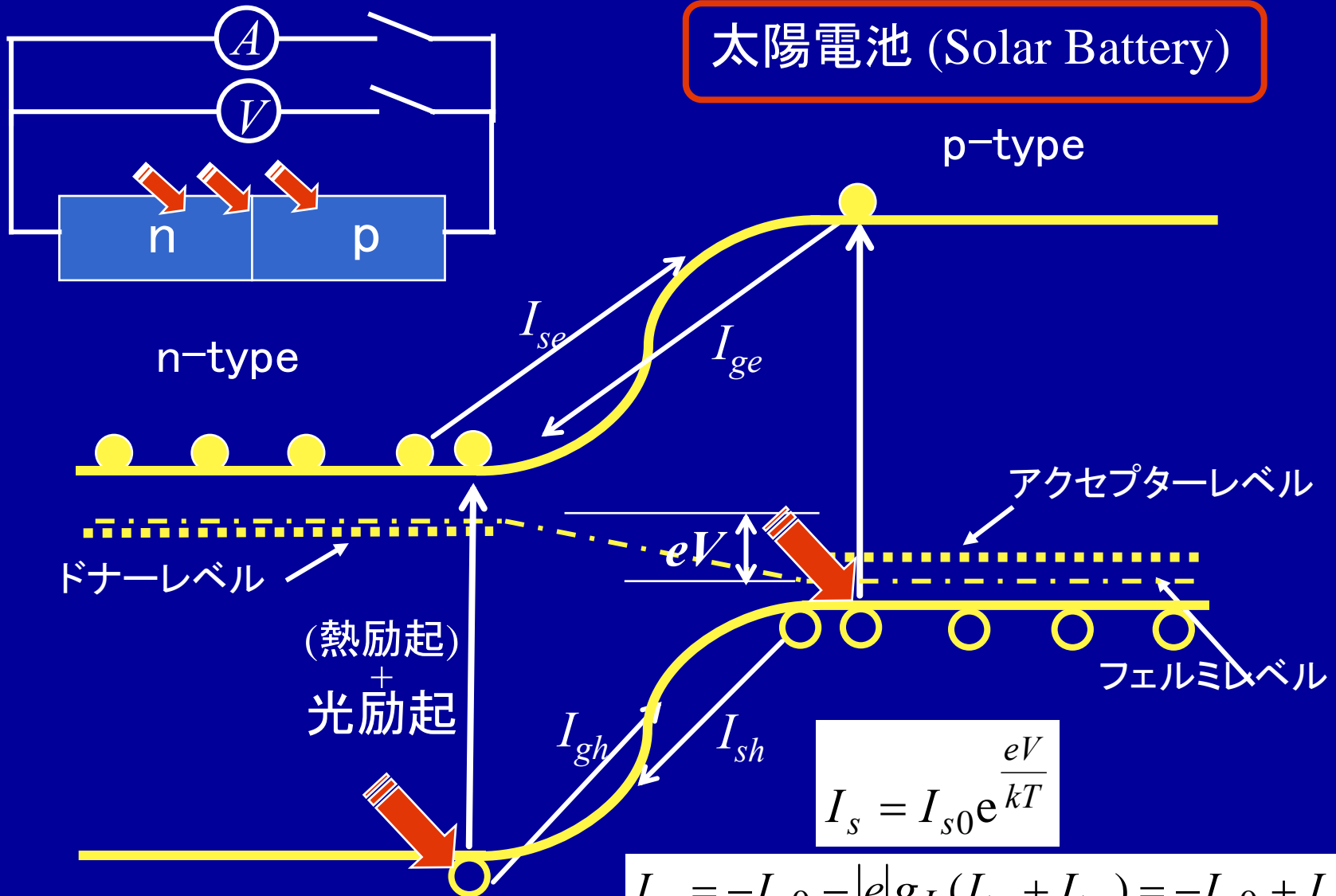


光吸収が価電子帯から伝導帯への電子遷移によって起こるとき

$$g_L(d) = \alpha I(d) \quad [\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}]$$

の速度で電子-正孔対が生成される

太陽電池 (Solar Battery)



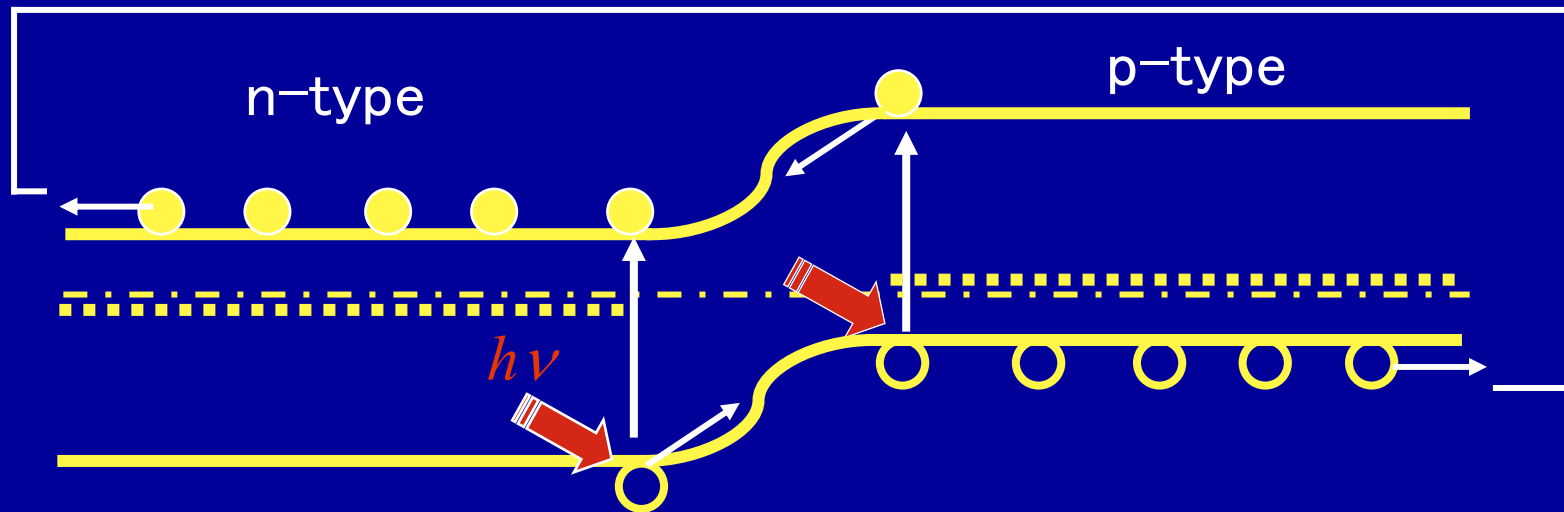
$$I_s = I_{s0} e^{\frac{eV}{kT}}$$

$$I_g = -I_{s0} - |e|g_L(L_n + L_p) = -I_{s0} + I_{gL}$$

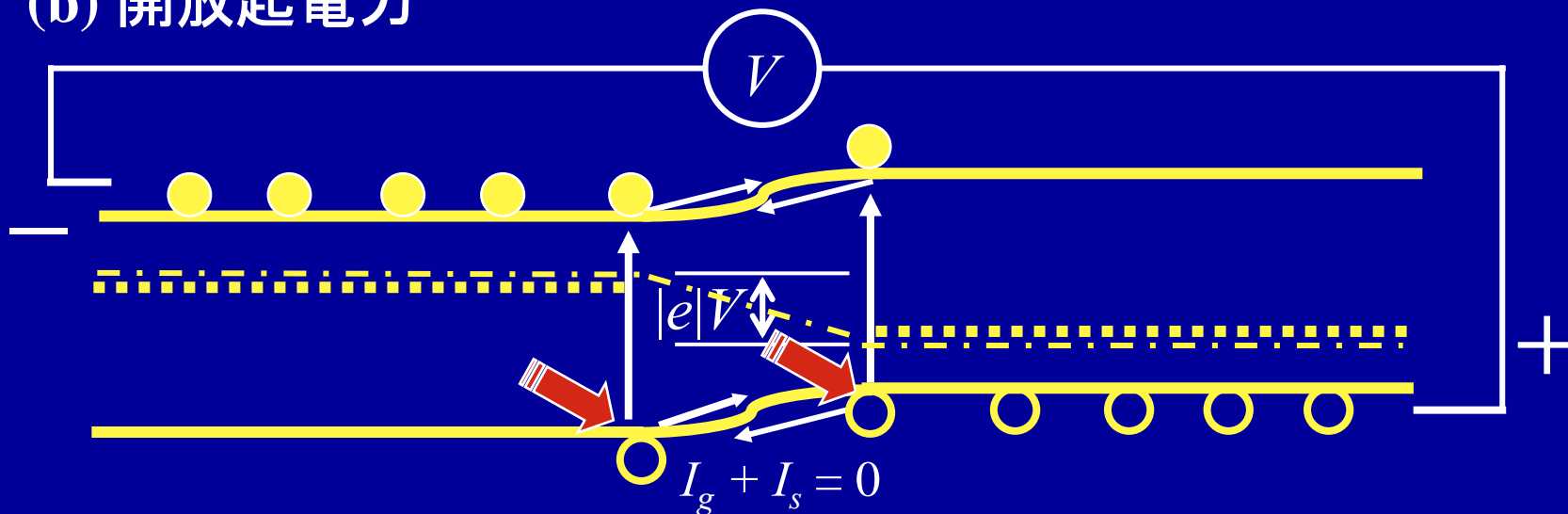
g_L は単位時間・単位体積当り生成される電子-正孔対の数

(a) 短絡電流

光電流 = $I_{gL} \propto$ 光強度



(b) 開放起電力



(a) 短絡電流

$$V=0 \text{ だから } I_s = I_{s0}$$

$$\text{正味の電流 } I = I_g + I_s = I_{gL} = -|e|g_L(L_n + L_p) = \text{光電流}$$

(b) 開放電圧：pタイプ側が+

$$\text{電流を流さないなので, 正味の電流 } I = I_g + I_s = 0$$

$$\therefore I_g + I_s = I_{gL} + I_{s0} \left(e^{\frac{|e|V_L}{kT}} - 1 \right) = 0$$

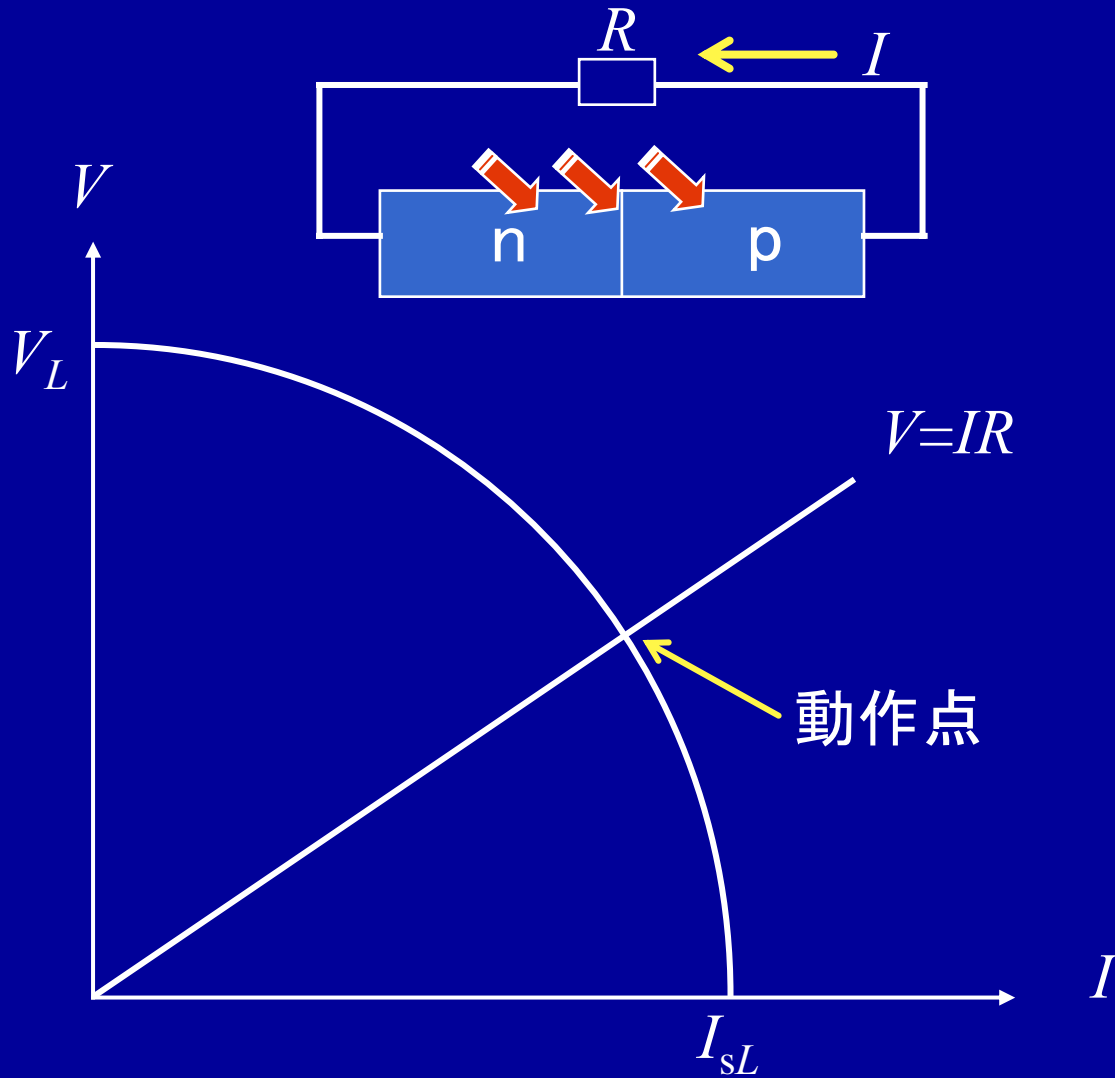
$$\therefore \text{光起電力} = V_L = \frac{kT}{|e|} \ln \left(\frac{I_{gL}}{I_{s0}} + 1 \right)$$

光を強くして I_{gL} を大きくしても, $|e|V_L$ は E_g よりも大きくなならない
 E_g が大きい程 V_L が大きい, 長波長の光が透けてしまう

最適の E_g の理論値は1.4 eV

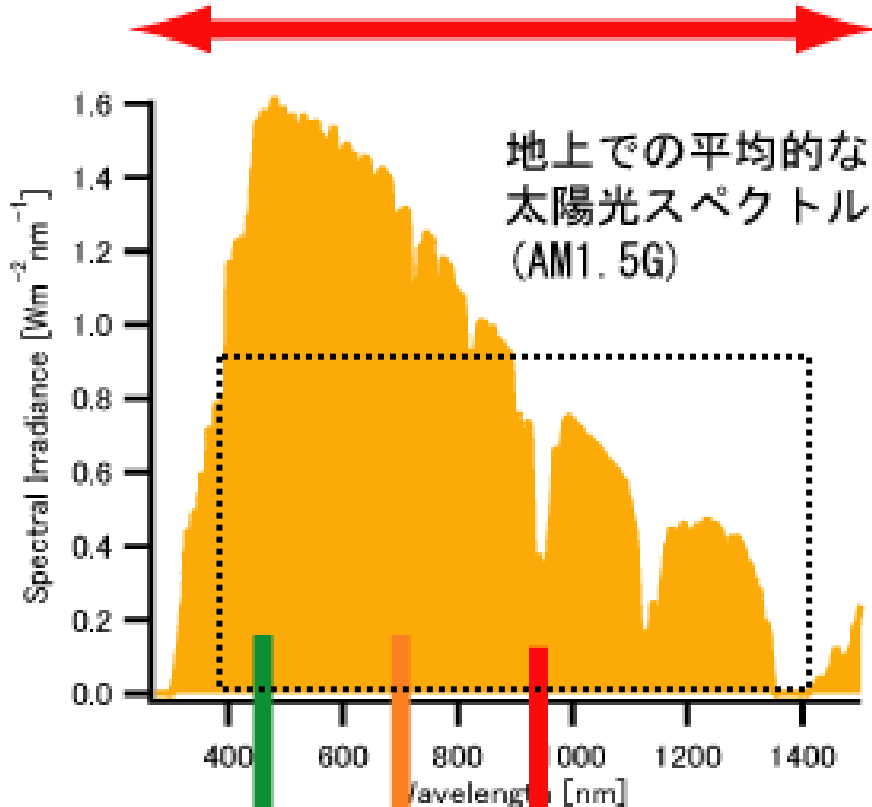
このとき太陽光エネルギーの利用効率(理論値)は30 %

電気抵抗 R の負荷をかけると

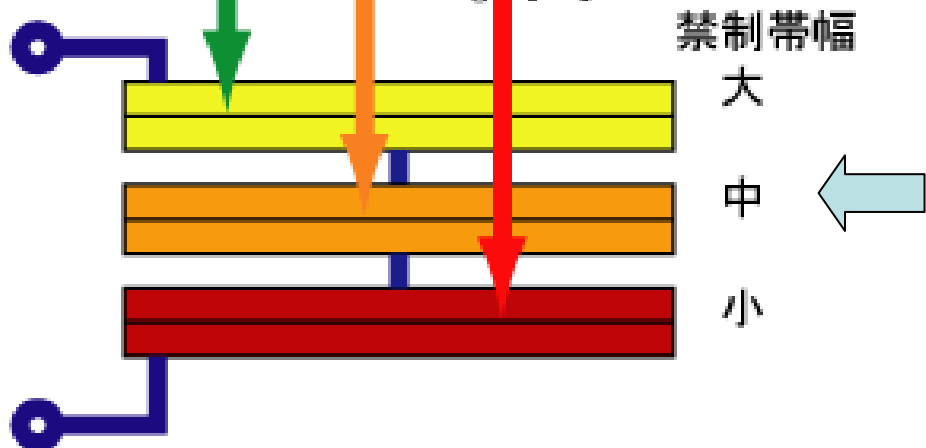


短波長
高エネルギー

長波長
低エネルギー



赤道直下・快晴時・正午の
太陽光の総輻射エネルギー
 $\approx 900 \text{ Wm}^{-2}$



エネルギーギャップの異
なった材料のセルをタン
デム構造にして太陽光を
有効に使う

熊本大学で太陽電池を使うと

敷地面積 北地区 $1.70 \times 10^5 \text{ m}^2$
南地区 $1.15 \times 10^5 \text{ m}^2$

夏至の正午快晴時に、量子(変換)効率が 15 % の太陽電池で
上空全域を覆って発電できる電力

北地区 23 MW
南地区 16 MW

cf. 現在の南地区の電力契約量 = 2.8 MW

日本政府=2030年に国内全電力の10%を太陽電池発電にすることを目標

⇒ 南地区で $0.28 \text{ MW} = 16 \text{ MW}$ の 1.8 % !

大学は電力消費密度がかなり高いが、それにしても、敷設面積率と天候・季節による日照量変化を考えれば、10%を太陽電池で賅うには大幅に量子効率を高めることが必要.

レポート課題

- [1] 図67から図72までで示した太陽電池の動作原理を，図の順を追って説明せよ．
図に示した式も自分でフォローすること．

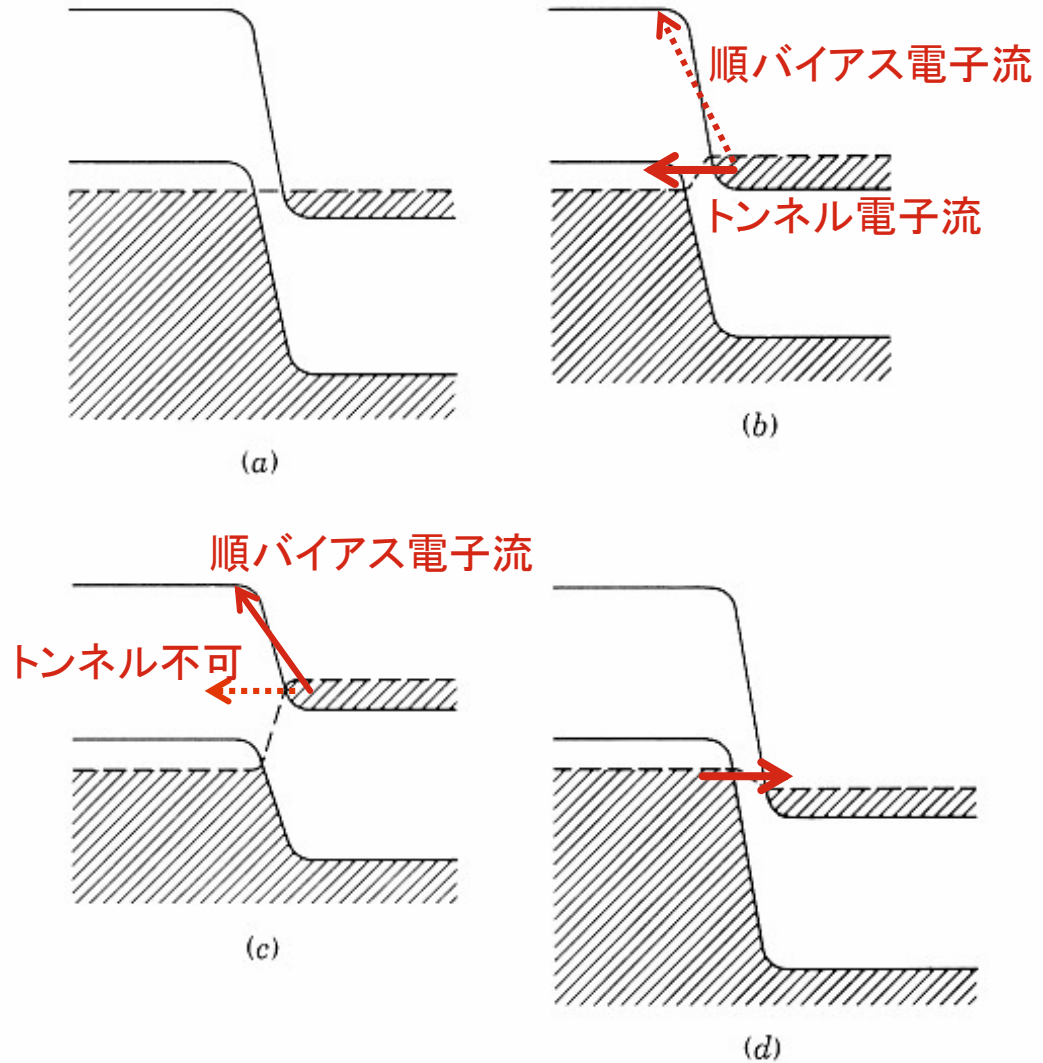
トンネルダイオード

nタイプ側の伝導帯とpタイプ側の価電子帯が接合部を隔てて交差する程に高密度にドーピングして作ったダイオード

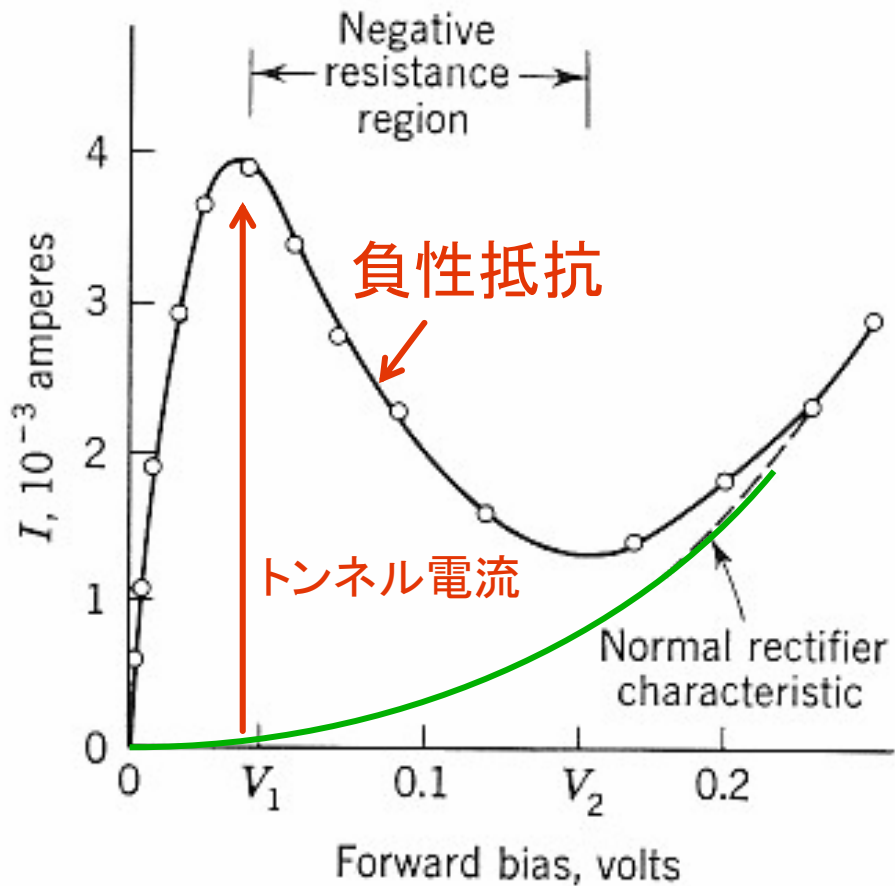
トンネリング

エネルギーのごく近い状態が空間的に接近すると、電子または原子が2つの位置の間を跳び移るようになること

重要な量子現象の1つ



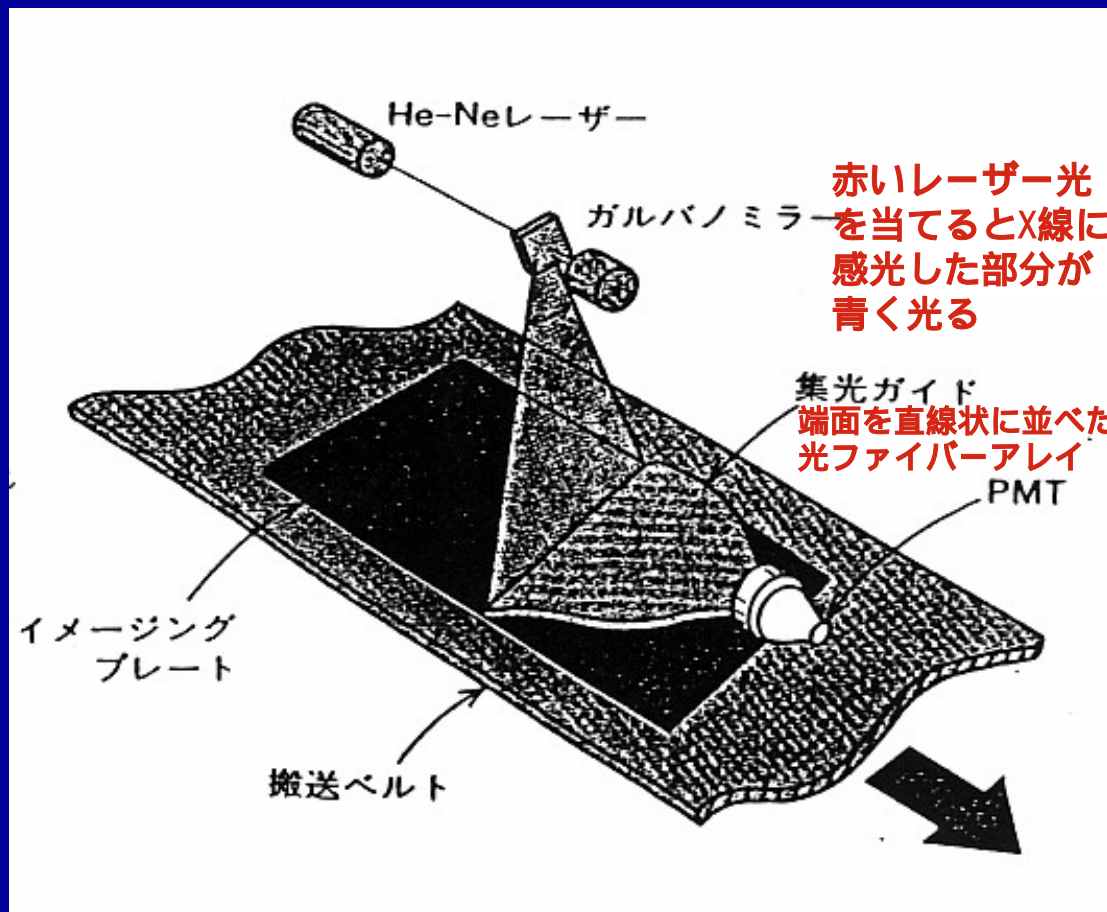
Energy bands and Fermi level in a tunnel diode. (a) Equilibrium; (b) small forward voltage; (c) larger forward voltage, preventing tunneling; (d) reverse bias, allowing tunneling in opposite direction.



Current-voltage characteristic of a tunnel diode. (From L. V. Azaroff and J. J. Brophy, "Electronic Processes in Materials," p. 285, McGraw-Hill Book Company, New York, 1963.)

光でイメージを記録する I イメージングプレートによるX線写真 富士フィルムの発明

その他に
放射能分布解析
(オートラジオグラフィ)
電子顕微鏡画像撮影など



画像読み取り法

歯のX線透過像

(熊本市 としのり歯科医院提供)

イメージングプレートの動作原理

素材 = BaFBr : Eu²⁺

感光

☆ Baの内殻準位がX線を吸収して伝導帯と価電子帯に電子と正孔を増倍して作り出す。

☆ F⁺が電子を捕獲してFになり，Eu²⁺が正孔を捕獲してEu³⁺になる。

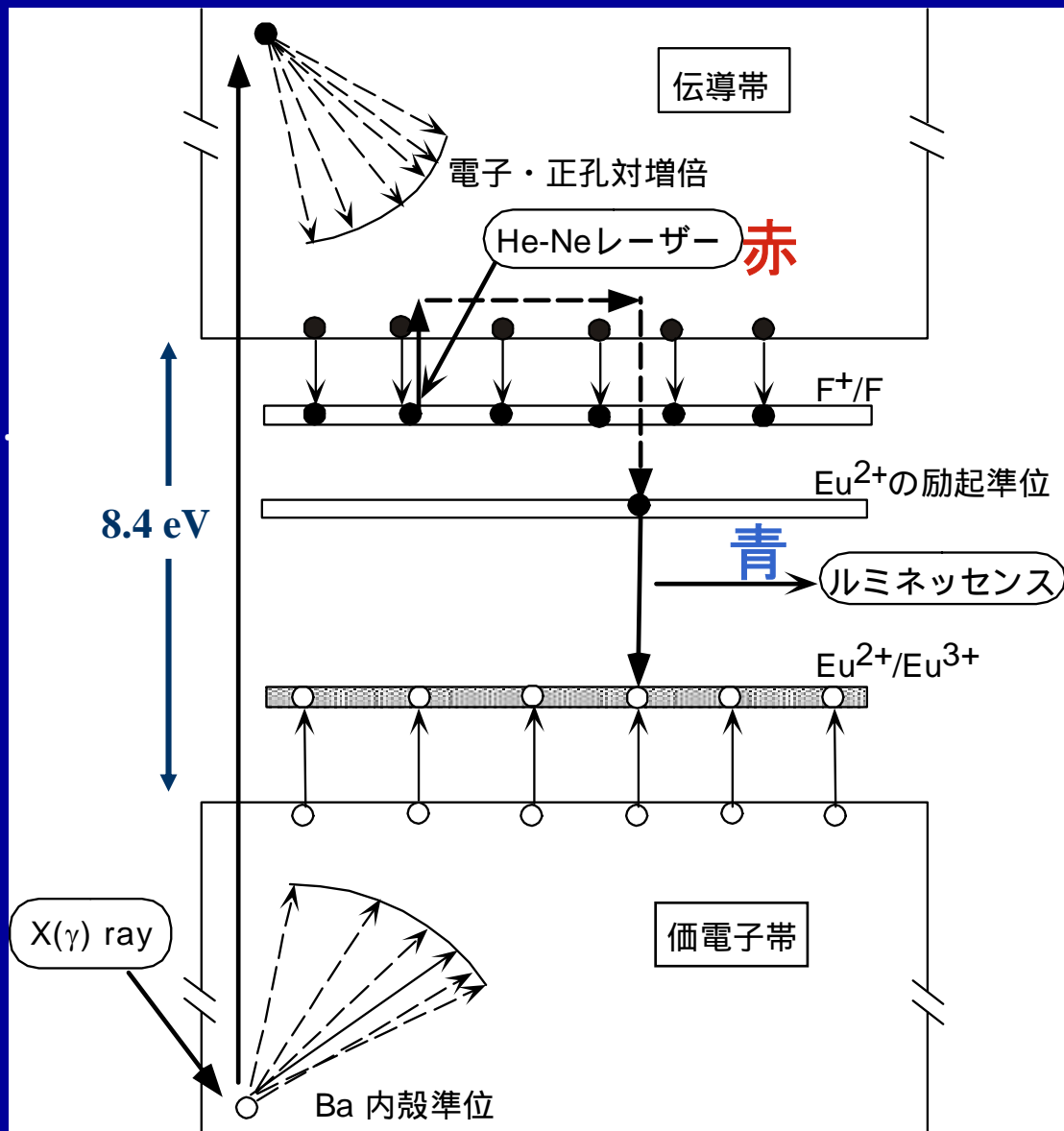
☆ FとEu³⁺は室温で大変安定。

現像

☆ He-Neレーザーにより，Fに捕獲された電子が伝導帯に解放される。

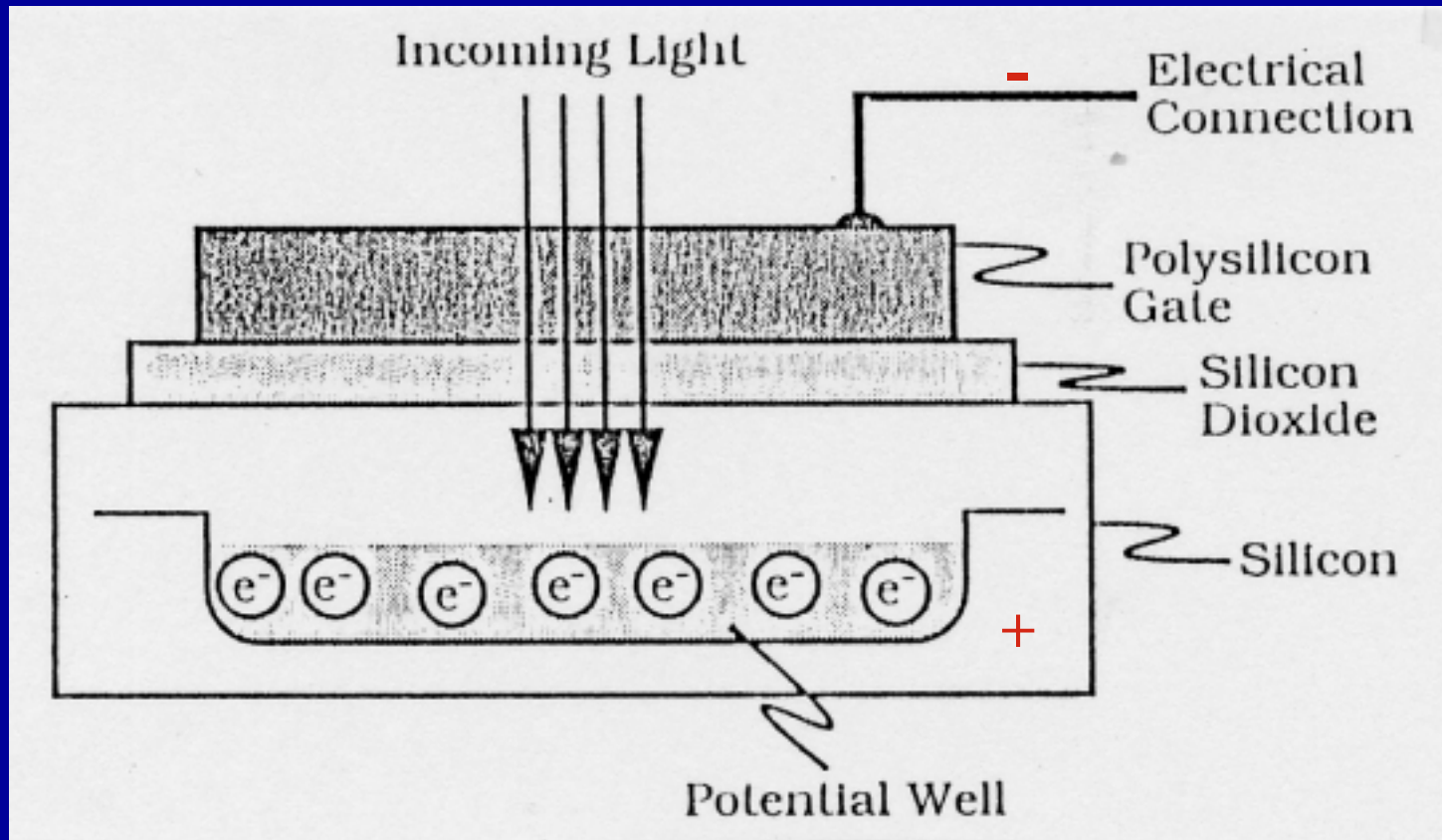
☆ Eu³⁺が電子を捕獲してEu²⁺の励起状態になった後，青色光を放射してEu²⁺の基底状態に戻る。

= 輝尽発光

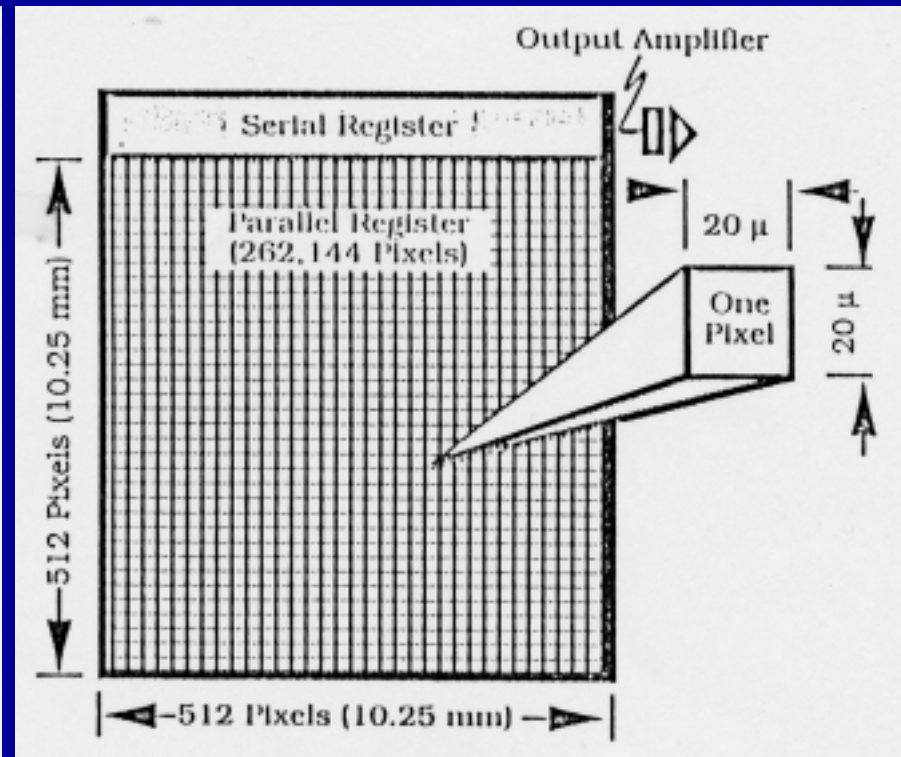
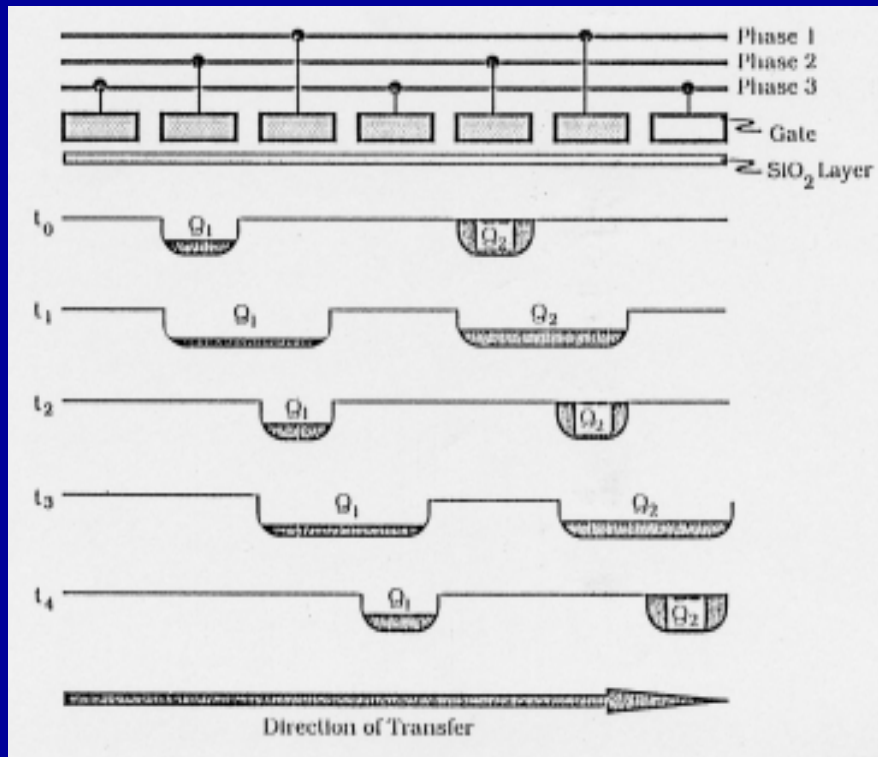


光でイメージを記録する II : CCD カメラ

CCD = Charge Coupled Device



CCD の動作原理





(熊本市 としのり歯科医院提供)

電子状態の違いによる光学プロセスの分類

1. 非共鳴遷移

透明固体における

屈折、反射、光散乱、高調波発生

金属電子(自由電子プラズマ)による

吸収、反射

など

2. 共鳴遷移

半導体やイオン結晶の離散エネルギー帯による

吸収、反射、ルミネッセンス、光散乱(ラマン散乱, プリルアン散乱)

Photoemission

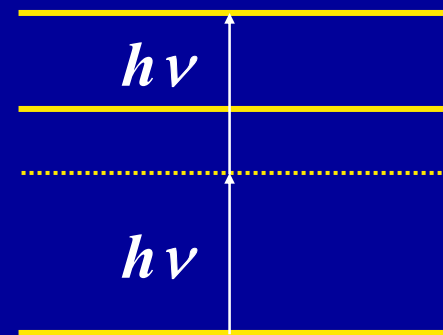
など

3. 非共鳴遷移+共鳴遷移

多光子吸収

多音子光散乱

など



2光子吸収

光学応答の特徴

1. 光の電磁場による摂動 ($-eE(\omega t) \cdot r$) により、一個の光子が電子の固有状態間の混合を引き起こす。

→ いろいろな線形、非線形光学応答を誘起。

2. 光子エネルギー(波長)、偏光選択則、応答強度、回転角が始状態と終状態の性質(固有エネルギー、スピン、電子軌道、対称性、揺らぎ etc.)を直接反映する。

3. 種々の手法を組み合わせることにより、様々な環境下での電子物性を非破壊・非接触的に調べることができる。

第5章 光の誘電理論

光と電子の相互作用の誘電理論

誘電率、屈折率 n として現われる

= 定数(波長、偏光、進行方向に依存) : 線形過程

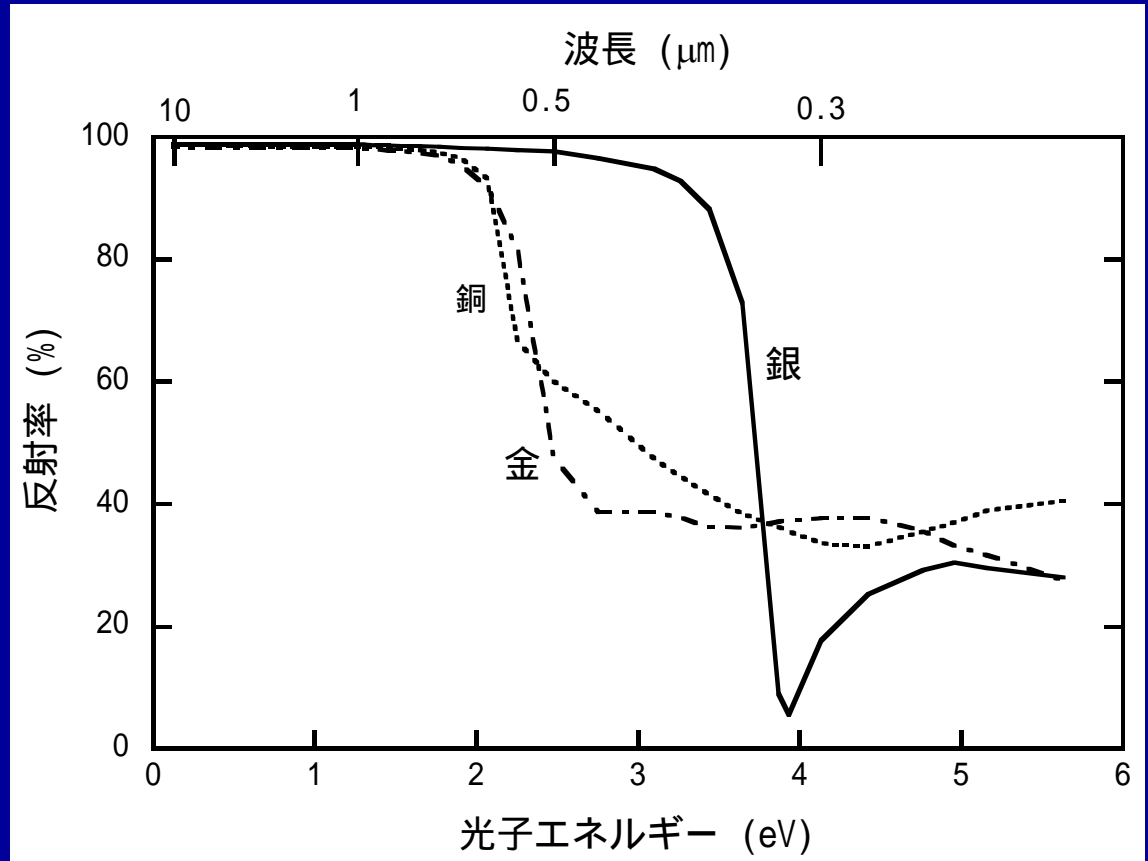
\propto 光の強度 n : 非線形過程

Example : 金属表面
による反射



★ 強い反射の原因は何か?

★ なぜ、或る波長で急激に
反射が低下するのか?

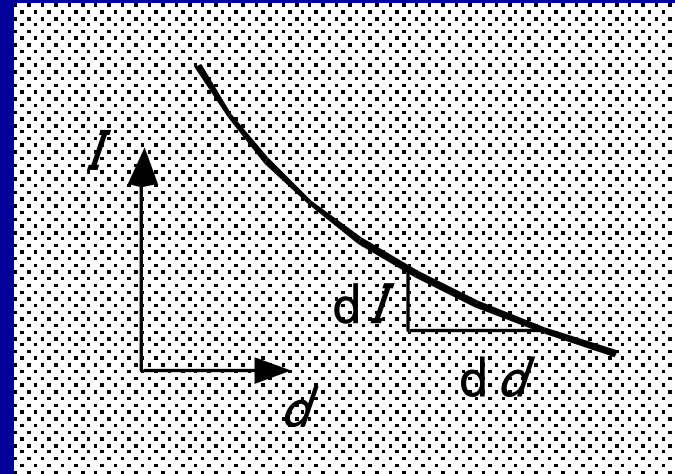


物質による光の吸収

ランベルトの法則 (Lambert's law)

$$\frac{dI}{dd} = -\alpha I, \quad \therefore I = I_0 e^{-\alpha d}$$

α は吸収係数 [cm^{-1}]



濃度 c の溶液では

$$I = I_0 e^{-\beta c}$$

ベールの法則 (Beer's law)

$$I = I_0 e^{-\gamma c d}$$

Lambert-Beer's law

比誘電率 ε

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \equiv n^2 = (n + i\kappa)^2$$

$$\varepsilon_1 = n^2 - \kappa^2, \quad \varepsilon_2 = 2n\kappa$$

D : 電気変位または電束密度

n : 複素屈折率

エネルギー反射率 R
(reflectivity)

$$I_{\text{ref}} = RI_{\text{incident}}$$

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}} \right|^2 = \frac{(1 - n)^2 + \kappa^2}{(1 + n)^2 + \kappa^2}$$

光吸収

$$I(d) = I_{\text{incident}} e^{-\alpha d}$$

吸収係数

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$$

λ : 真空中の光の波長

κ : 消衰係数 (extinction coefficient)

光吸収係数と透過度

物質中の
電場ベクトル

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_0 e^{i(kd - \omega t)} = \mathbf{E}_0 e^{i\{(n+i\kappa)k_0 d - \omega t\}} \\ &= \mathbf{E}_0 e^{i(nk_0 d - \omega t)} e^{-\kappa k_0 d}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \end{aligned}$$

$$\therefore |\mathbf{E}|^2 = |\mathbf{E}_0|^2 e^{-2\kappa k_0 d}$$

$$\therefore \alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda_0}$$

k_0 : 真空中の光の
波動ベクトル

$$n k_0 = \frac{2\pi}{(\lambda_0 / n)}$$

物質中の光の
波動ベクトル

平行平板での
光の透過度

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}}$$

物質中では光の波長が
 $1/n$ に縮まる。

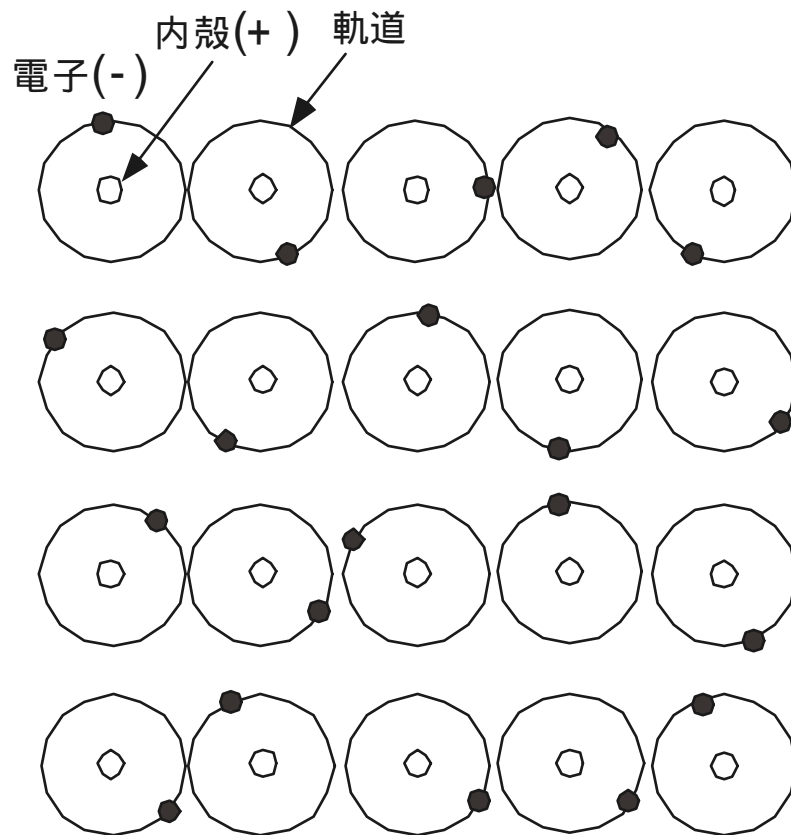
第6章 物質の電子構造と光学特性

結晶内電子と単振動子 **モデル**

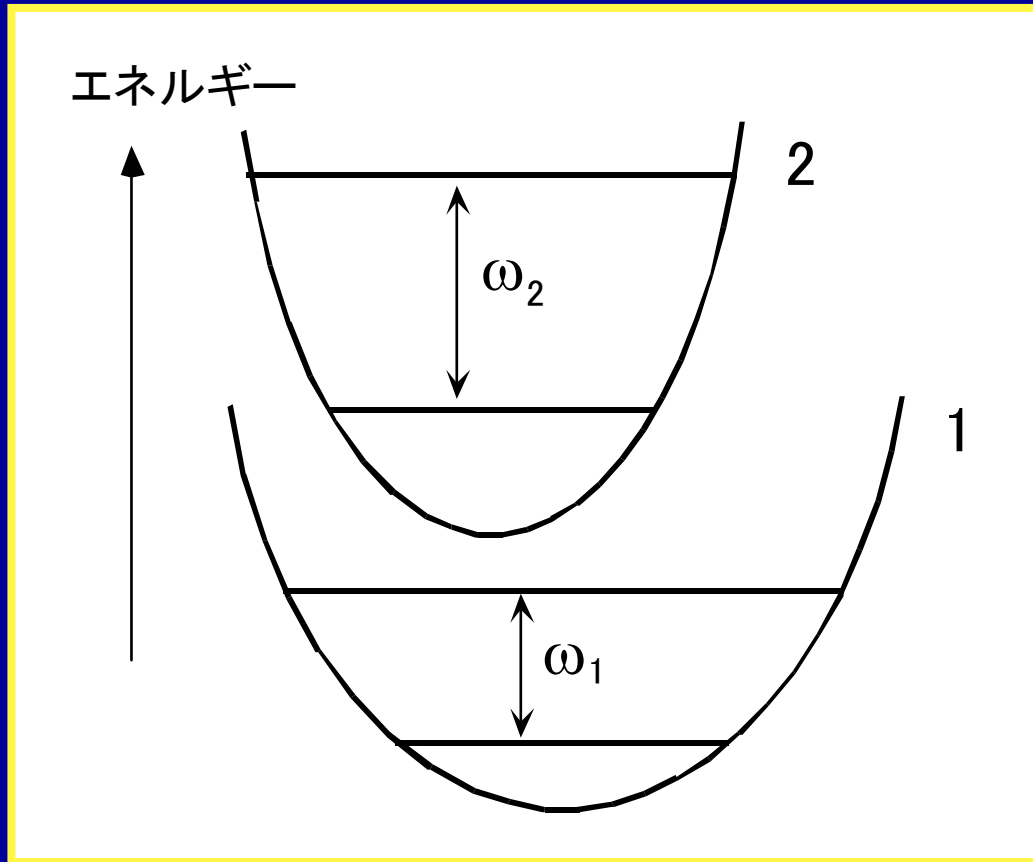
電子は各原子の軌道の上を角周波数 ω_0 で動いている。

角周波数 ω_0 は離散エネルギー準位毎に異なる。

電子は隣り合うunit cellの同じ軌道(準位)間で移動することができる。

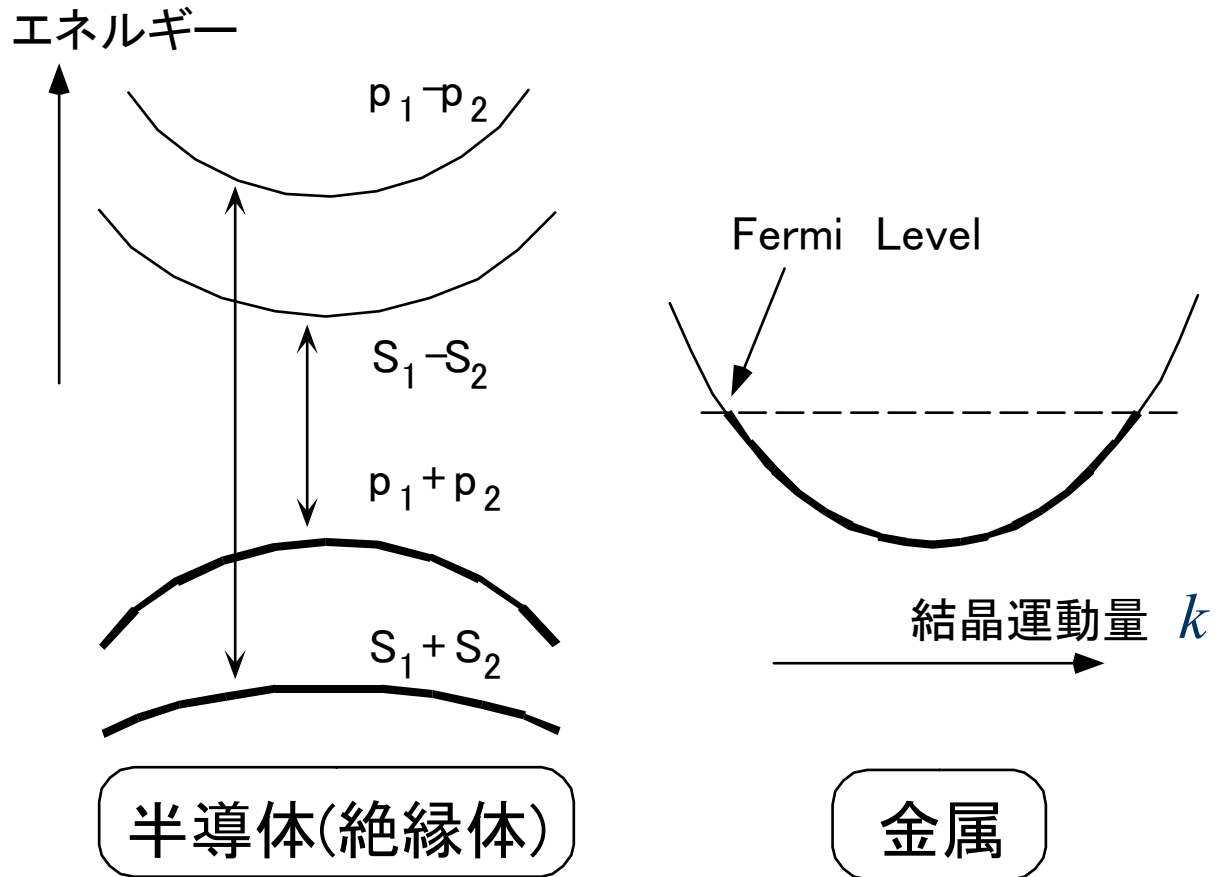


離散電子準位間の光学遷移の振動子モデル



金属では $\omega_1, \omega_2, \dots \rightarrow 0$

半導体と金属の電子構造



振動子モデルによる電子誘電率

電子の変位(u)に対する運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + \omega_0^2 \mathbf{u} + \nu \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{e}{m} \mathbf{E}$$

ω_0 は固有角振動数
 ν はダンピング定数

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E} e^{-i\omega t}, \quad \mathbf{u}(t) = \mathbf{u} e^{-i\omega t}$$

$$\mathbf{u} = \frac{e}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\nu\omega} \mathbf{E}$$

固有振動数 ω_0 の電子の密度を N とし, ここで考えている電子以外の電子および原子またはイオンによる分極率を χ_n とすると, 全分極は

$$\mathbf{P} = Ne\mathbf{u} + \chi_n \mathbf{E} = \left(\chi_n + \frac{Ne^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\nu\omega} \right) \mathbf{E}$$

$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \equiv \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$, ただし ε_0 は真空の誘電率 であるから、

$$\begin{aligned}
\varepsilon &= \varepsilon_n + \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\nu\omega} \\
&= \varepsilon_n \left[1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_n \varepsilon_0 m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\nu\omega} \right] \\
&= \varepsilon_n \left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\nu\omega} \right]
\end{aligned}$$

ここで、

$$\varepsilon_n = 1 + \frac{\chi_n}{\varepsilon_0}, \quad \omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\varepsilon_n \varepsilon_0 m}$$

ω_p を プラズマ(Plasma)振動数 と云い、 $\varepsilon_n \omega_p^2$ を 振動子強度 と云う。

光学誘電率と直流誘電率

$$\begin{aligned}\varepsilon(\omega) &= \varepsilon_n \left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\nu\omega} \right] \\ &= \varepsilon_n \left[1 - \frac{\omega_L^2 - \omega_T^2}{\omega^2 - \omega_T^2 + i\nu\omega} \right]\end{aligned}$$

$\nu \rightarrow 0$ で

$$\frac{\omega_L^2}{\omega_T^2} = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon_n}$$

リデイン-サックス-テラーの関係式
(Lyddane-Sachs-Teller relationship)

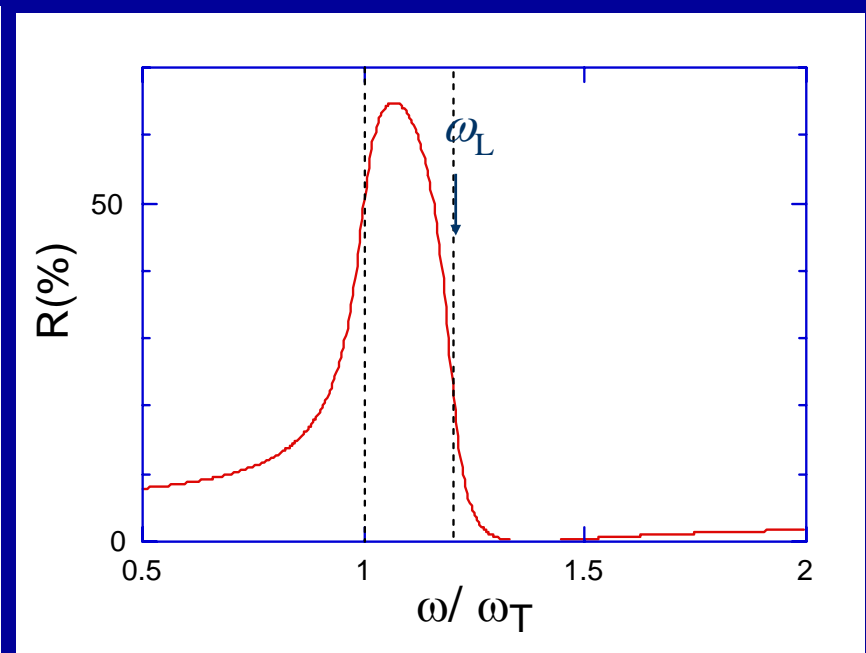
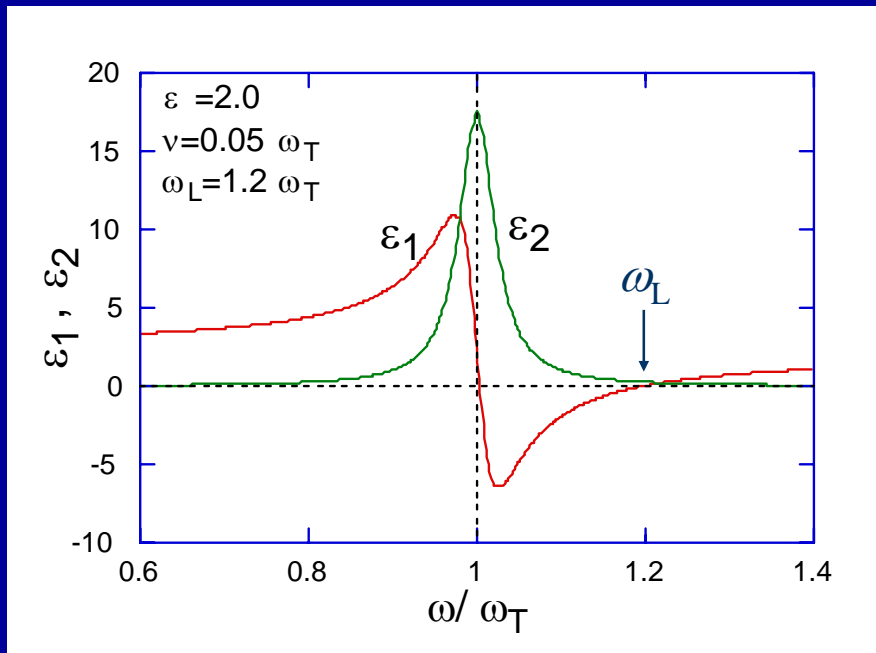
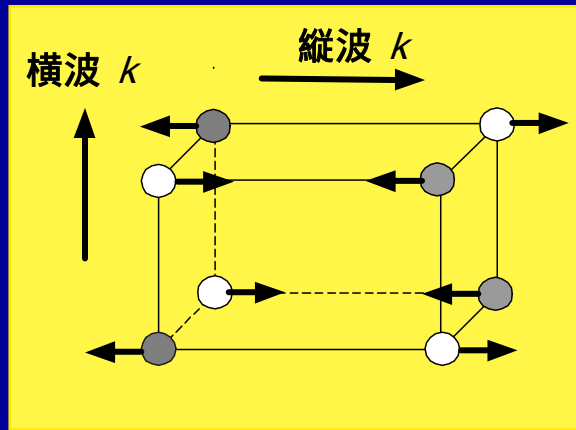
$\varepsilon(0)$ と ε_n はしばしば、それぞれ、 ε_0 、 ε_∞ と書かれるので、 ε_0 を真空の誘電率と混同しないこと。

横波 (ω_T) , 縦波 (ω_L) との共鳴で、

$$\varepsilon(\omega_T) \rightarrow \infty \text{ and } \varepsilon(\omega_L) \rightarrow 0 \text{ as } \nu \rightarrow 0$$

振動子モデルの $\varepsilon_1, \varepsilon_2, R$

例：
格子振動



分散関係とポラリトン(Polariton)

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \varepsilon(\omega)$$

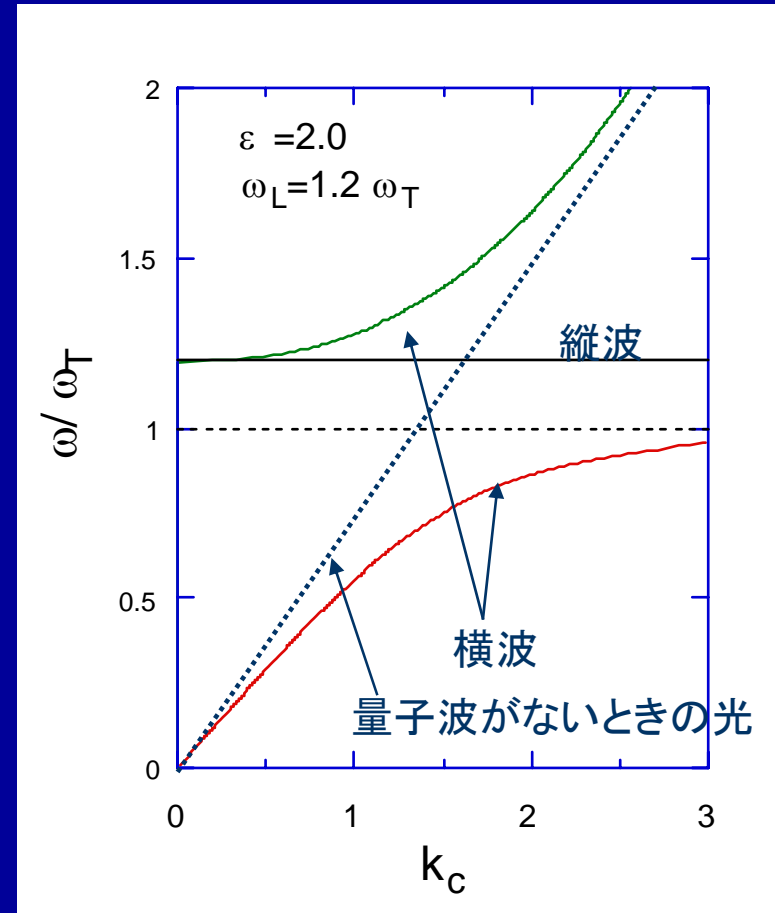
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

波動ベクトル

$$p = \frac{h}{2\pi} k$$

粒子(結晶内の量子)の
運動量

k との関係で表した $\omega(k)$ を
分散関係とよぶ。

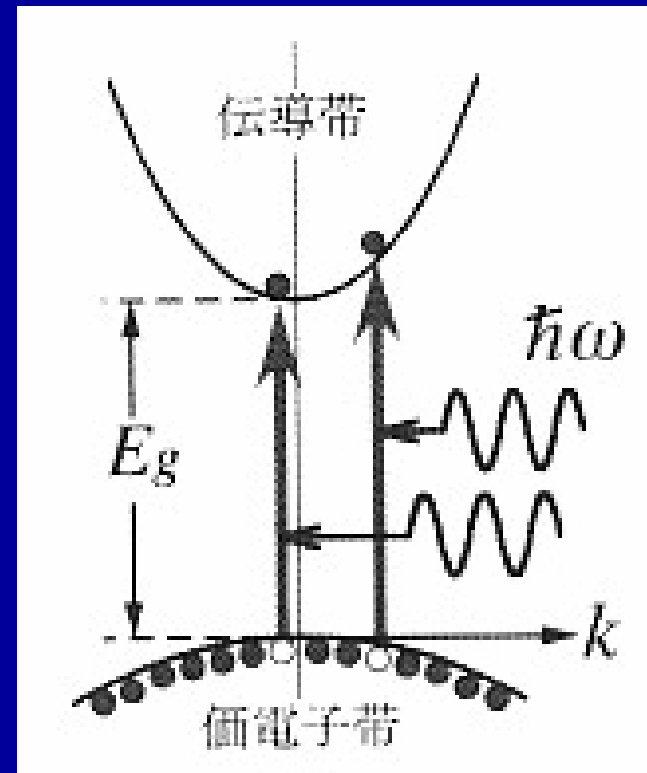


$\omega \sim \omega_T, \omega_L$ の領域では光と量子波がカップルしている。
この状態をポラリトンという。

離散準位による光学遷移の例

- (a) cyclotron resonance (サイクロトロン共鳴)
- (b) lattice vibration (格子振動)
- (c) band-to-band (帯間遷移), exciton (励起子 = 電子と正孔の結合体)
- (d) impurity-to-band (不純物準位)

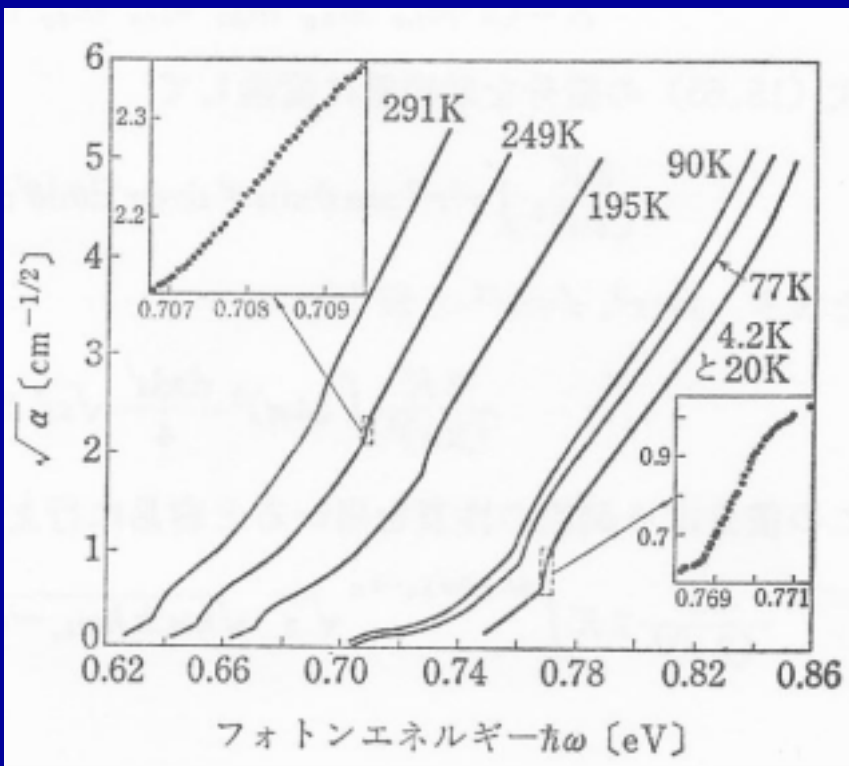
- ★ 帯間遷移では高・低のエネルギーの電子の状態が分散を持っているので、離散遷移が連続につながって、幅広い遷移帯(バンド)として現れる。
- ★ 低温でエキシトン(励起子)による構造が現れる。



Ge のバンド間遷移による光吸収スペクトル

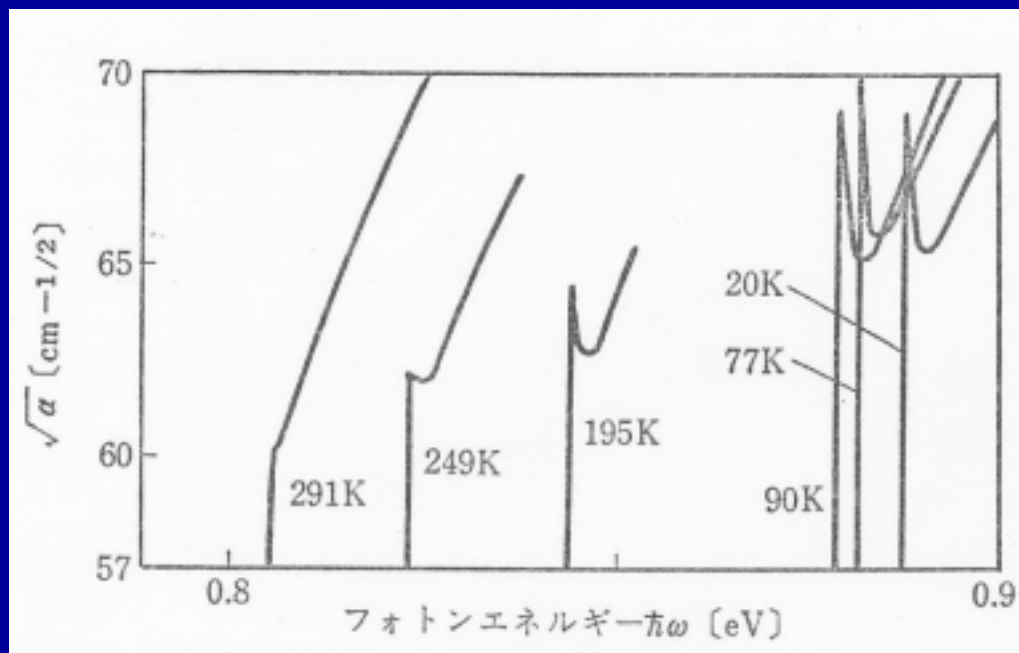
間接エネルギーギャップ

Γ 点価電子帯 \rightarrow L点伝導帯



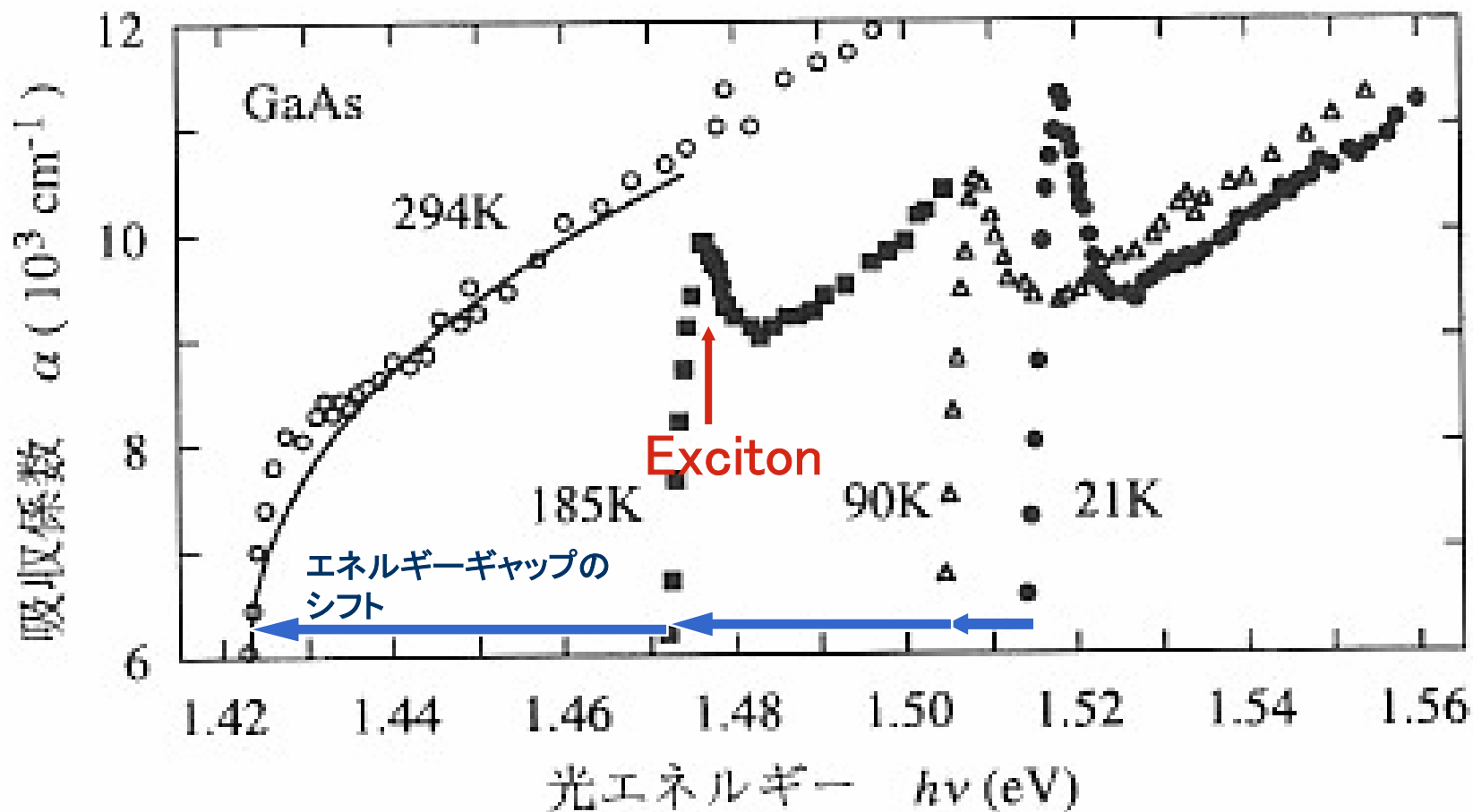
直接エネルギーギャップ

Γ 点価電子帯 \rightarrow Γ 点伝導帯



浜口千尋「固体物性下」(丸善)より.

- ★ 間接遷移と直接遷移で α の値がおおよそ2桁異なる .
- ★ 温度が上がるとエネルギーギャップが減少する .



GaAsのバンド間電子遷移による光吸収スペクトル

金属電子の光応答

自由電子は束縛されていない。つまり $\omega_0 = 0$ 。

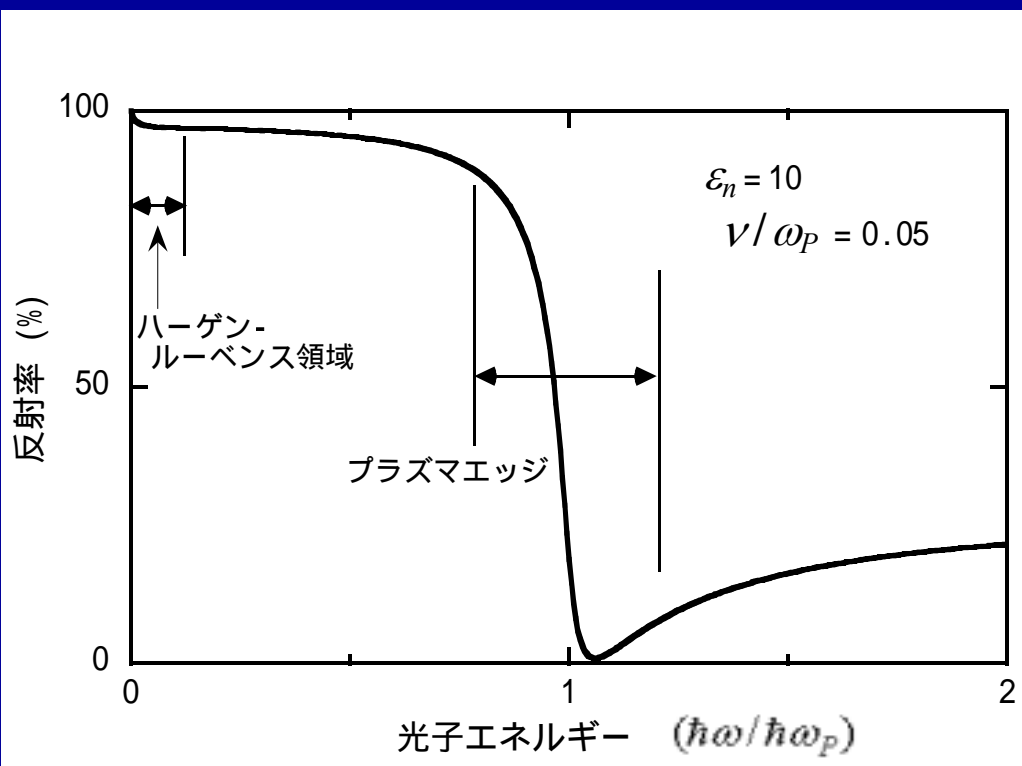
したがって

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\nu\omega} \right)$$

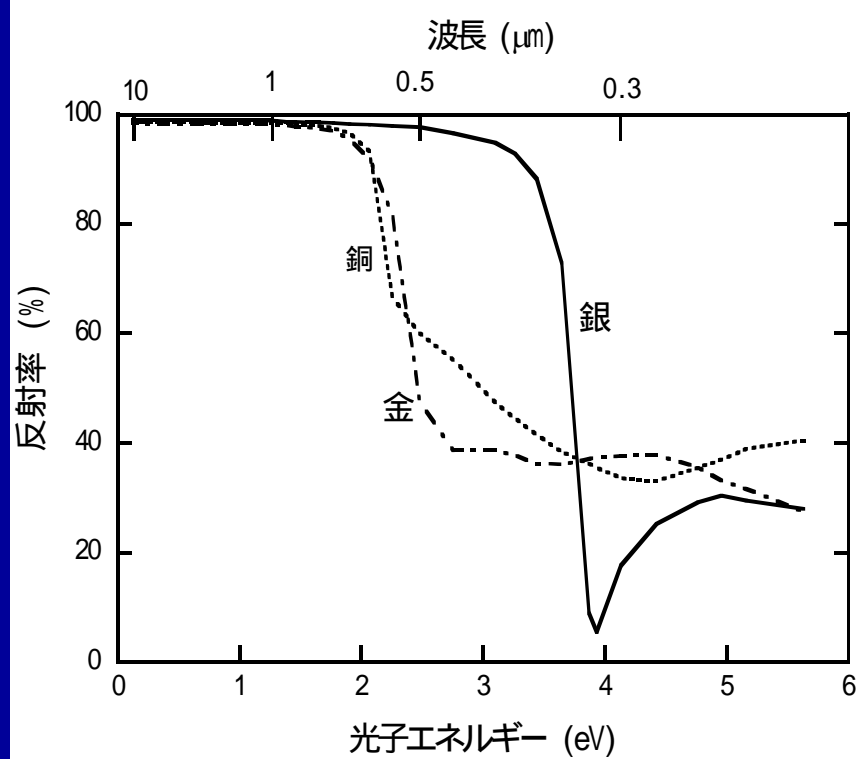
ドルーデ(Drude)の誘電率

プラズマ反射

Drudeモデル理論曲線



実験



振動子モデルでの電気伝導度

交流電界

$$E = E_0 e^{-i\omega t}$$

が加わると電子の強制振動が起こる

分極電流

$$J = \frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial E}{\partial t} = -i\omega \chi E = \sigma E$$

σ は電気伝導度,

$$\chi = \frac{\sigma}{-i\omega} = i \frac{\sigma}{\omega}$$

ここで

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

注目している
電子の電導度
バックグラウンドの電導度

$$\varepsilon = 1 + \frac{\chi}{\varepsilon_0}$$

$$\therefore \varepsilon = \varepsilon_n + i \frac{\sigma_p}{\varepsilon_0 \omega}$$

ε が複素数なので、 σ も複素数

ε も σ も ω に依存する

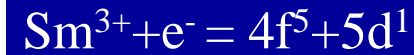
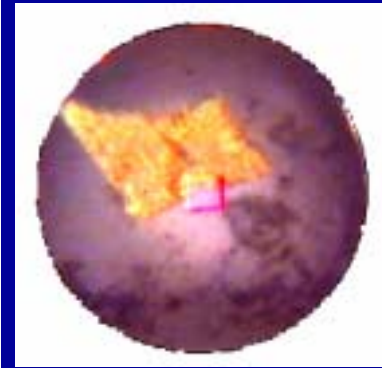
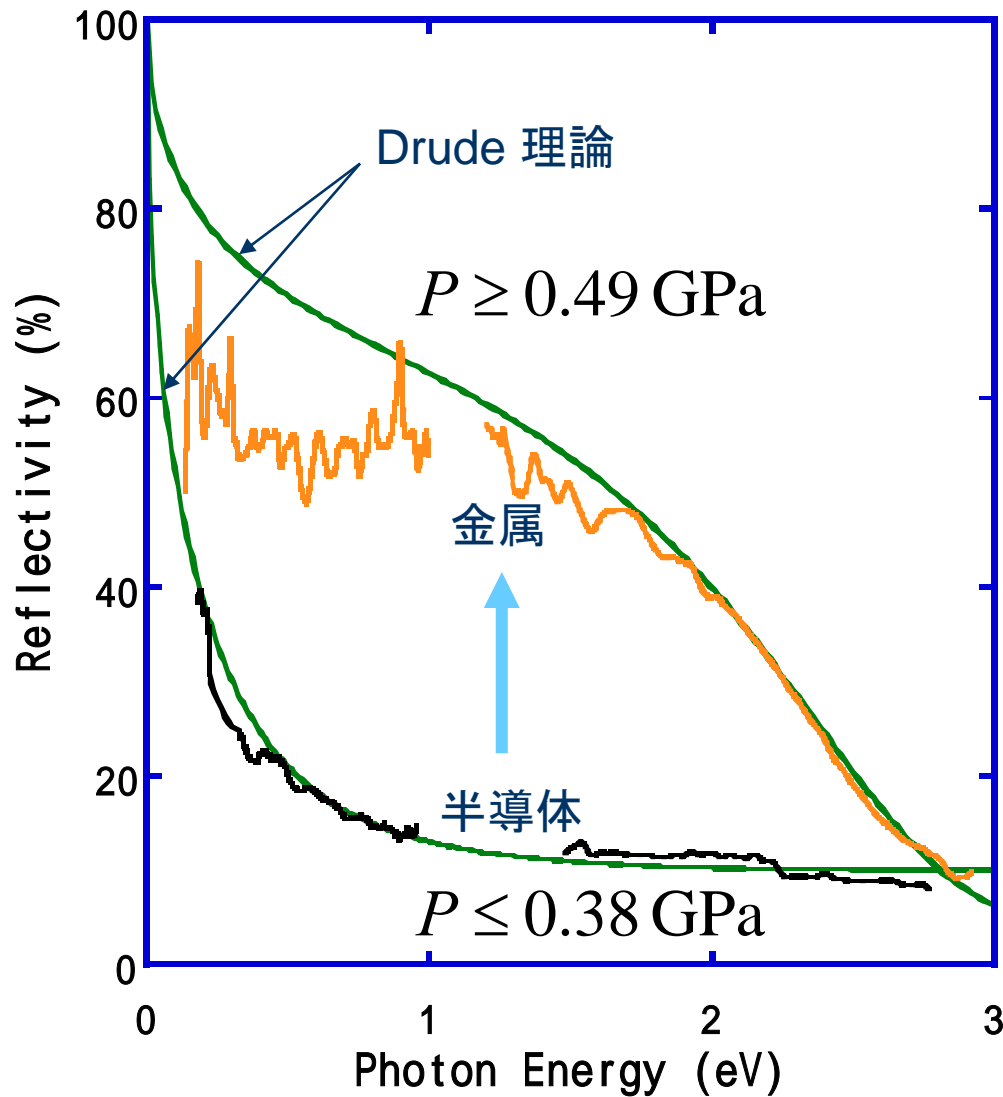
金属電子では

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n \omega_p^2}{\omega + i\nu} i$$

直流では

$$\sigma_p(0) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n \omega_p^2}{\nu}$$

Sm_{0.9}La_{0.1}S の圧力誘起半導体-金属相転移の光学観測



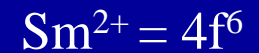
比抵抗(mΩcm)

直流測定 光

0.3 0.3



$P=0.5$ GPa



比抵抗(mΩcm)

直流測定 光

1.2 3.0

第7章 磁気光効果

偏光オプトエレクトロニクス

直線偏光面の回転を利用

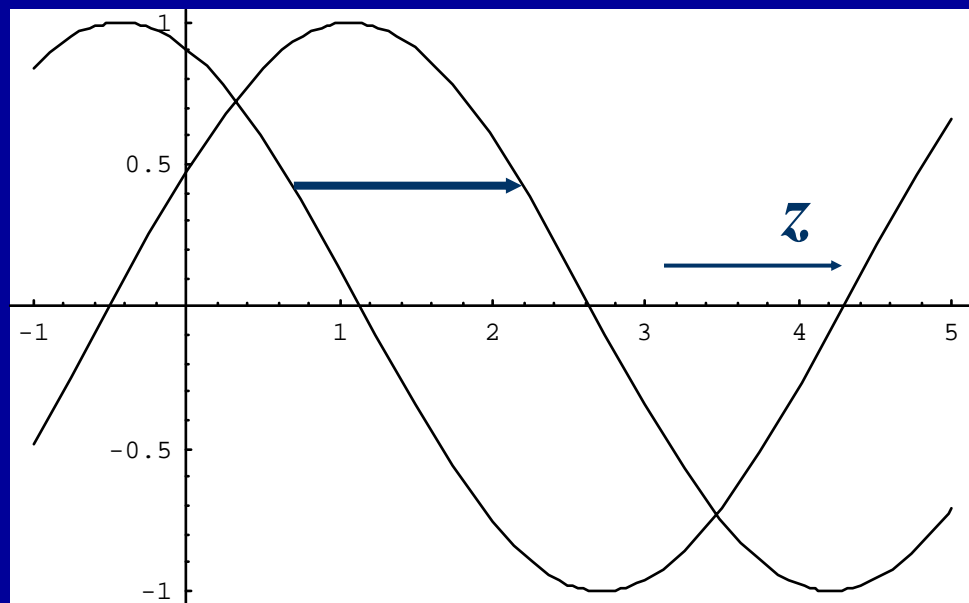


磁気光素子、MO ディスク

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

$$kz - \omega t = \varphi = \text{const.}$$

$$z = \frac{\omega}{k} t + \frac{\varphi}{k}$$



波は速度 ω/k で右に進む。

円偏光と直線偏光

円偏光平面波

時計の文字盤から観測者に向かって光が進行して来るとき、
時計の針の回転方向にEが時間的に回転する場合を
右回り円偏光

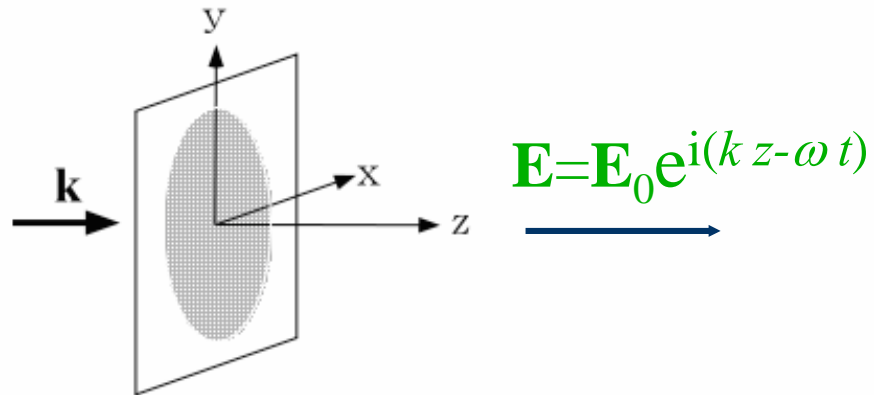
(right circular polarization: rcp)、その逆を

左回り円偏光

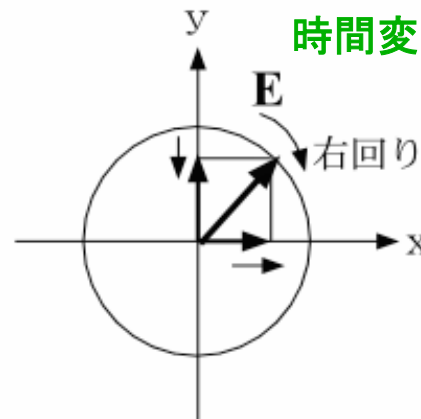
(left circular polarization: lcp) という。

E_x と E_y が同位相ならば

直線偏光

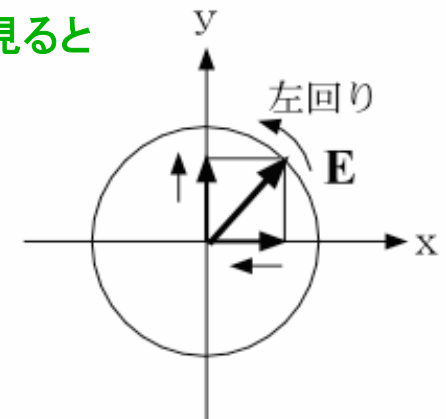


zを固定してEの実部の時間変化を見ると



E_y の位相が 90° 進んでいる。

$$\mathbf{E}_y / \mathbf{E}_x = -i$$



E_y の位相が 90° 遅れている。

$$\mathbf{E}_y / \mathbf{E}_x = i$$

複素円偏光と直線偏光

複素円偏光

$$\mathbf{E}_{rcp} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\mathbf{i} - i \mathbf{j}) e^{i(kz - \omega t)}$$

$$\mathbf{E}_{lcp} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\mathbf{i} + i \mathbf{j}) e^{i(kz - \omega t)}$$

直線偏光

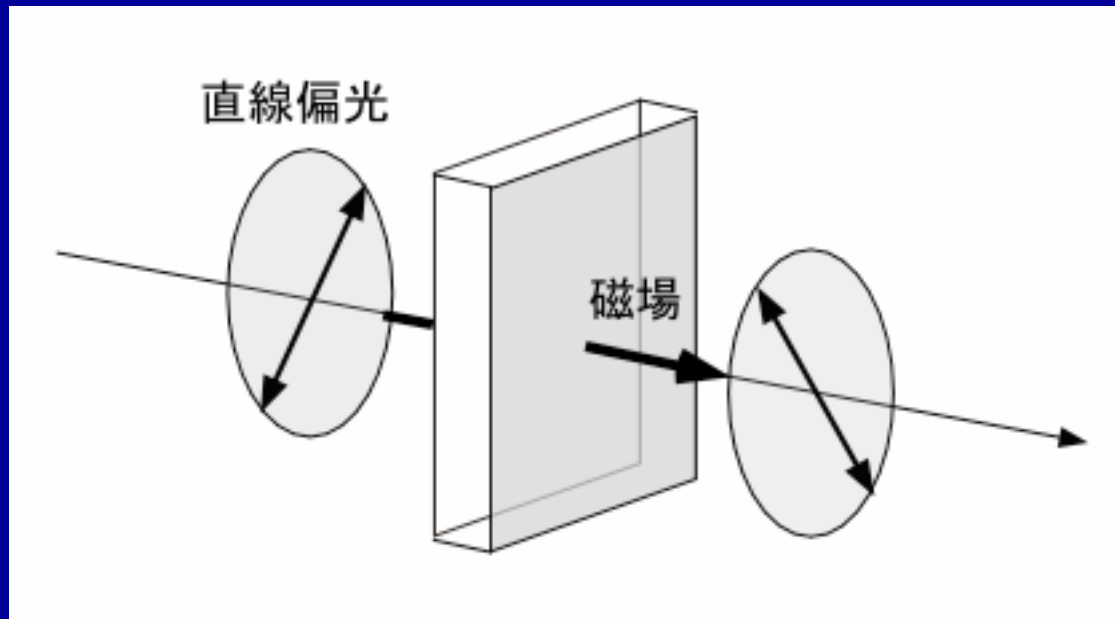
$$\mathbf{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\mathbf{E}_{rcp} + \mathbf{E}_{lcp}) : // \mathbf{x}$$

$$\mathbf{E} = \frac{i}{\sqrt{2}} (\mathbf{E}_{rcp} - \mathbf{E}_{lcp}) : // \mathbf{y}$$

ファラデー (Faraday) 回転

外部磁場中で磁場の方向から直線偏光平面波を入射すると透過波の偏光方向が変わる。

回転角 $\theta_F = VdH$ 、 V はベルデ (Verde) 定数、 d は試料の厚さ

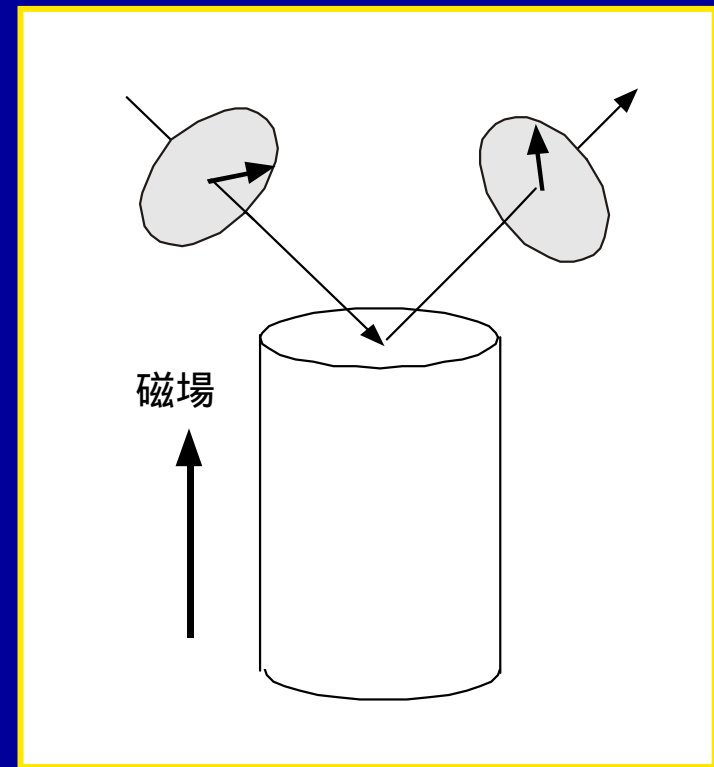


カー (Kerr) 回転

励磁した金属の表面に直線偏光波を入射すると反射波の偏光角が変化する。

J. Kerr (1877)

- 励磁の極性を反転すると逆回転
- 回転角は光の波長に強く依存



偏光回転の理論

1. ファラデー回転

$t = 0$, $z = 0$ で y 偏光($\mathbf{E} // y$)を入射

rcp を E_+ , lcp を E_- と書く

$$\mathbf{E}_+ = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(i, 1, 0), \quad \mathbf{E}_- = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(-i, 1, 0)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = \sqrt{2} E_0(010)$$

$t = 0$, $z = d$ では

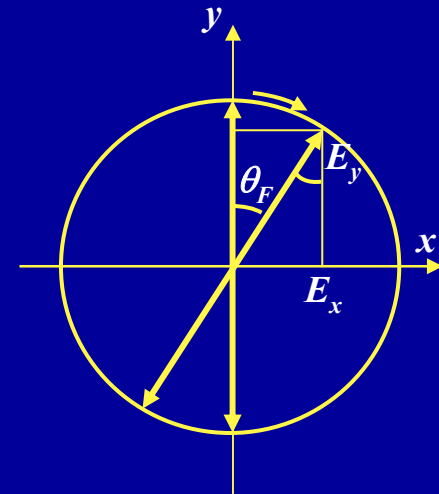
$$\mathbf{E}_+ = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i n_+ k d} (i, 1, 0), \quad \mathbf{E}_- = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{i n_- k d} (-i, 1, 0)$$

$$\mathbf{E}_x = (\mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-)_x = i \frac{E_0}{\sqrt{2}} (e^{i n_+ k d} - e^{i n_- k d})$$

$$\mathbf{E}_y = (\mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-)_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (e^{i n_+ k d} + e^{i n_- k d})$$

ファラデー回転角

$$\tan \theta_F = \frac{E_x}{E_y} \quad \therefore \theta_F = \frac{n_- - n_+}{2} k d$$



力一回転の理論

複素振幅反射率

$$r_{\pm} = \frac{n_{\pm} + i \kappa_{\pm} - 1}{n_{\pm} + i \kappa_{\pm} + 1} = \frac{n_{\pm}^2 + \kappa_{\pm}^2 - 1 + 2i \kappa_{\pm}}{(n_{\pm} + 1)^2 + \kappa_{\pm}^2} \equiv r_0 e^{i \psi_{\pm}}$$

$\mathbf{E} // y$ の光を入射 $\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- = \sqrt{2} E_0 (0 \ 1 \ 0)$

反射光

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_+ r_0 e^{i \psi_+} + \mathbf{E}_- r_0 e^{i \psi_-} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (i, 1, 0) r_0 e^{i \psi_+} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} (-i, 1, 0) r_0 e^{i \psi_-}$$

$$\mathbf{E}_{rx} = i \frac{E_0 r_0}{\sqrt{2}} (e^{i \psi_+} - e^{i \psi_-}), \quad \mathbf{E}_{ry} = \frac{E_0 r_0}{\sqrt{2}} (e^{i \psi_+} + e^{i \psi_-})$$

力一回転角

$$\tan \theta_K = \frac{E_{rx}}{E_{ry}} = \tan \frac{\psi_- - \psi_+}{2} \approx \frac{\kappa_- - \kappa_+}{n_{\pm}^2 + \kappa_{\pm}^2 - 1}$$

磁場の効果のまとめ

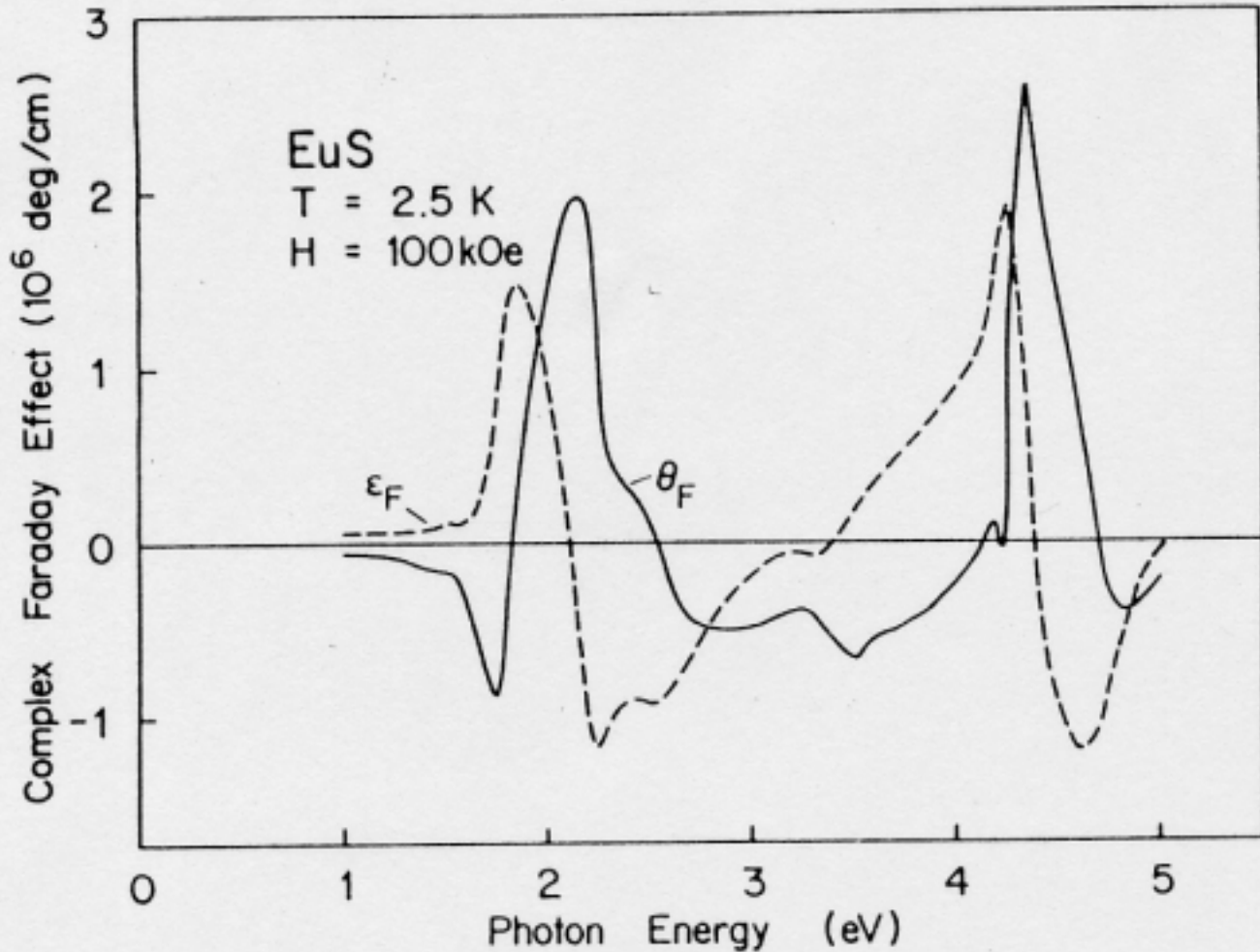
- 強磁性体や外部磁場の加わった常磁性物質ではrcp と lcp に対する複素屈折率に差が生じる
- 複素屈折率の差の実数部と虚数部がそれぞれ、ファラデー回転とカー回転を起こさせる
- この磁場効果は電子が磁場から受けるローレンツ力や、電子のスピンゼーマン効果に起因する

ファラデー回転は光の透過で観測するので、磁性半導体に適している
光ファイバー通信の光増幅器の光アイソレーターなど

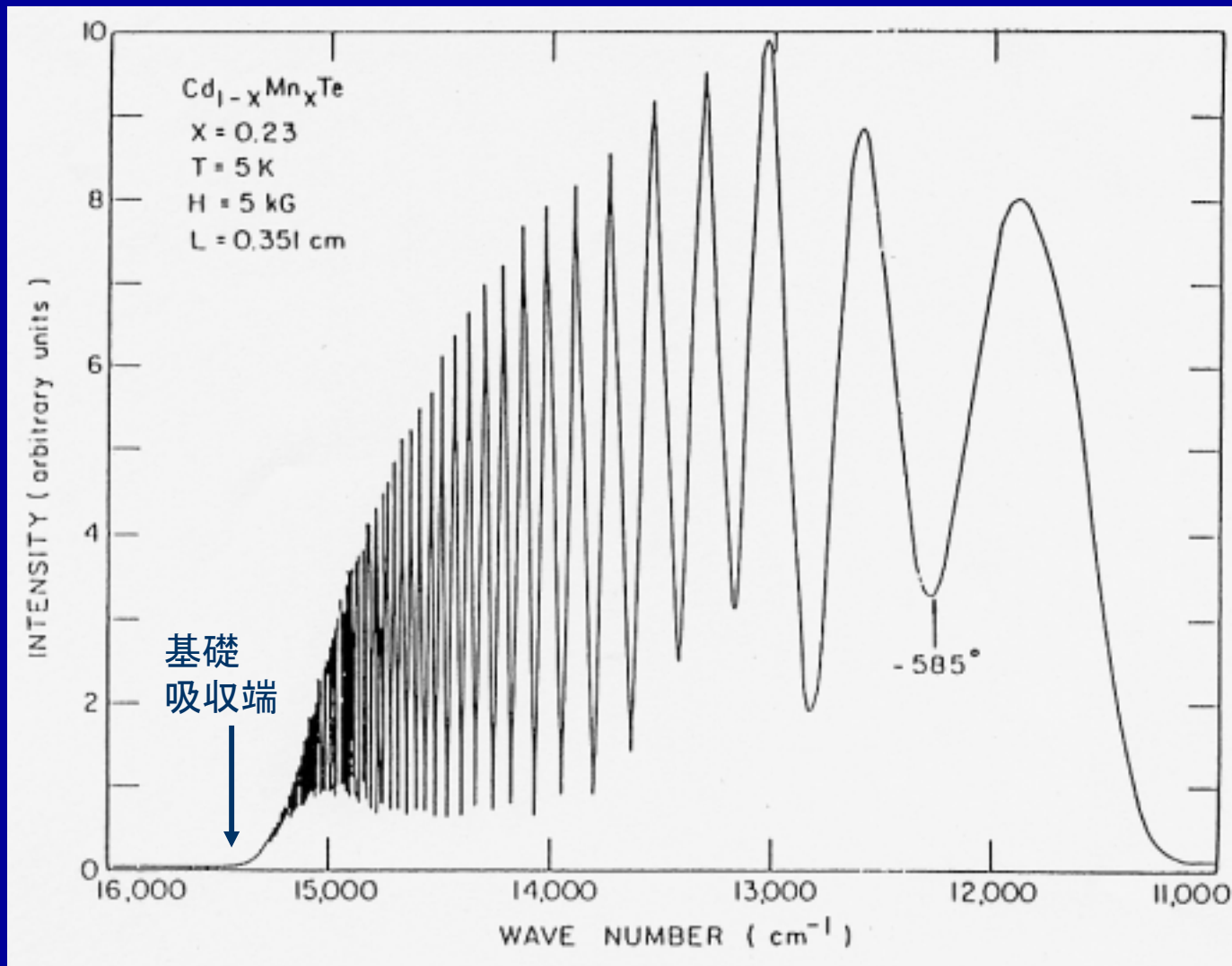
カー回転は光の反射で観測するので、磁性金属に適している
MO ディスクなど

EuS の偏光回転角スペクトル

磁性半導体

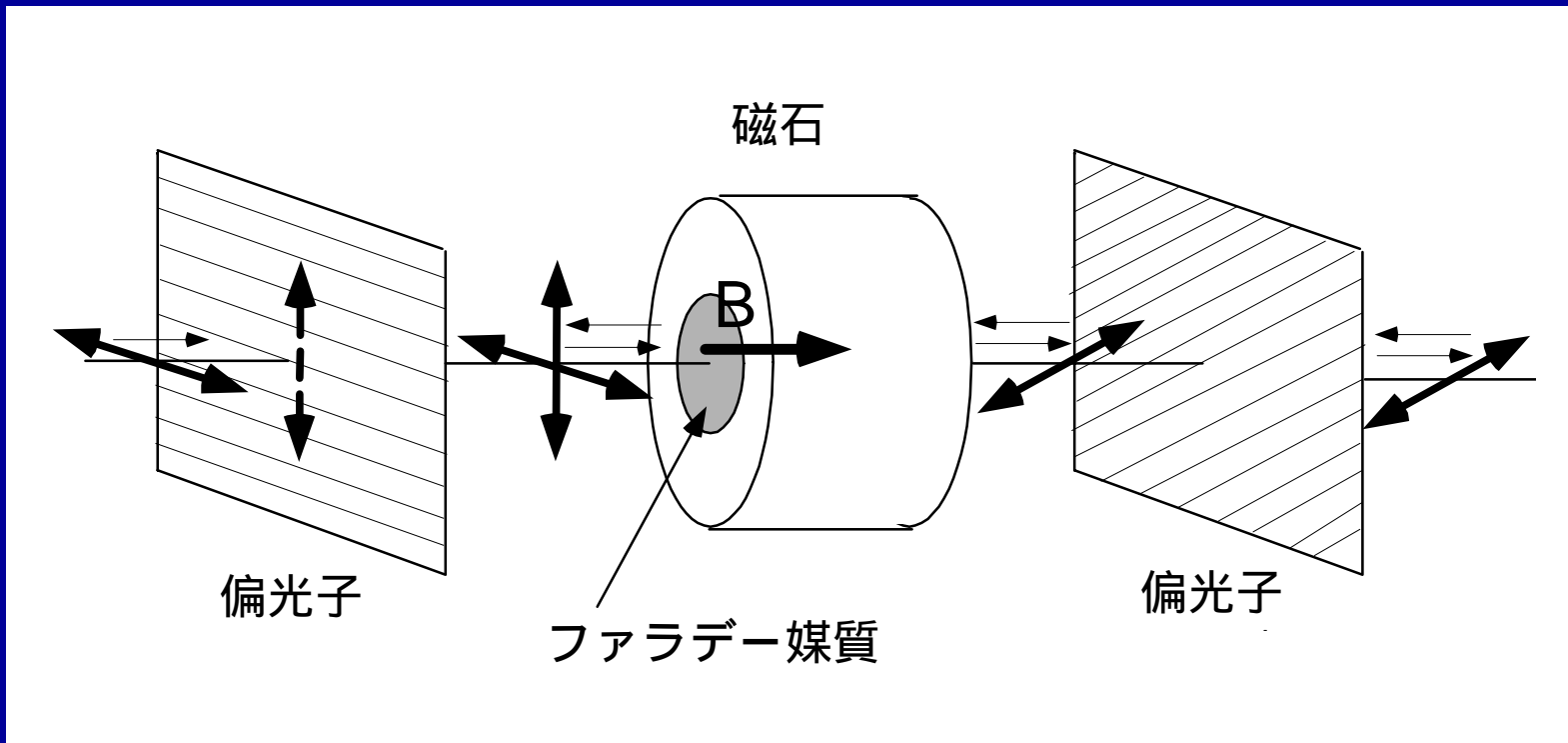


$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ のファラデー回転



電子-正孔対と Mn^{2+} との交換相互作用のために、光子エネルギーが基礎吸収端に近づくにつれて $n_+ - n_-$ の値が急激に増大する。

ファラデー効果の応用：光アイソレーター



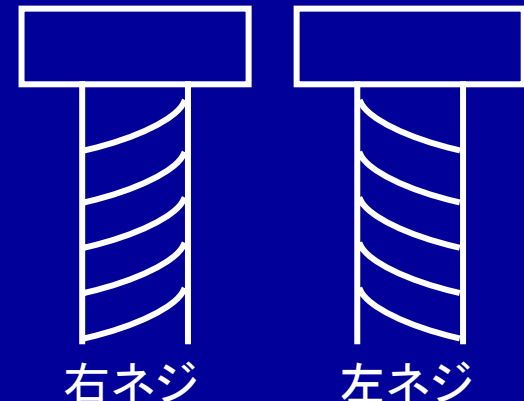
光通信において、半導体レーザーを光ファイバーと結合させるとき、レーザーとファイバーの間に置いて、ファイバーからの反射光がレーザーに戻らないようにする

自然旋光性

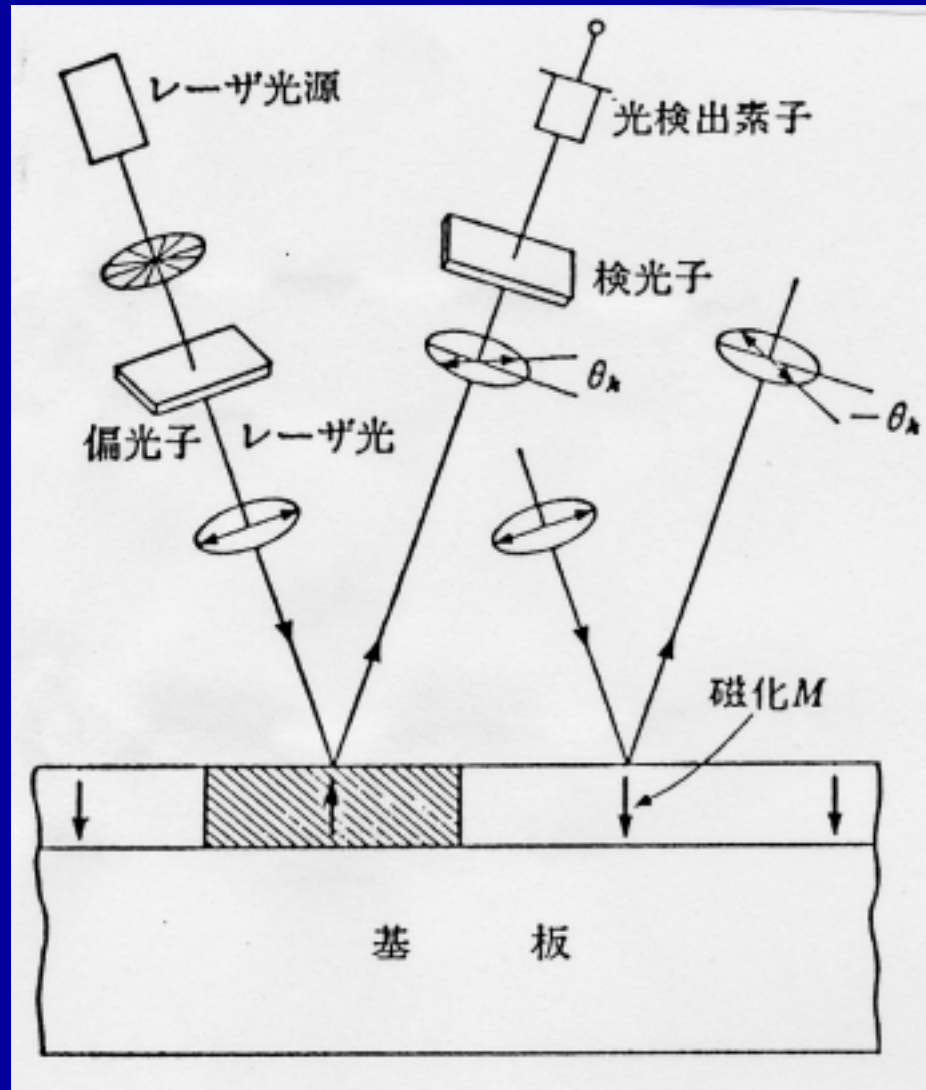
- 蔗糖や乳酸は異性体(構造式は同じであるが立体配置が異なる分子: isomer)があるために, 自然の旋光性(直線偏光の回転性=光学活性)を持つ.
- 従来キラル(chiral)な異性体(鏡像異性体)を区別して化学合成することが困難であったが, 名古屋大の野依良治が初めて成功した.

→ 2001年ノーベル化学賞

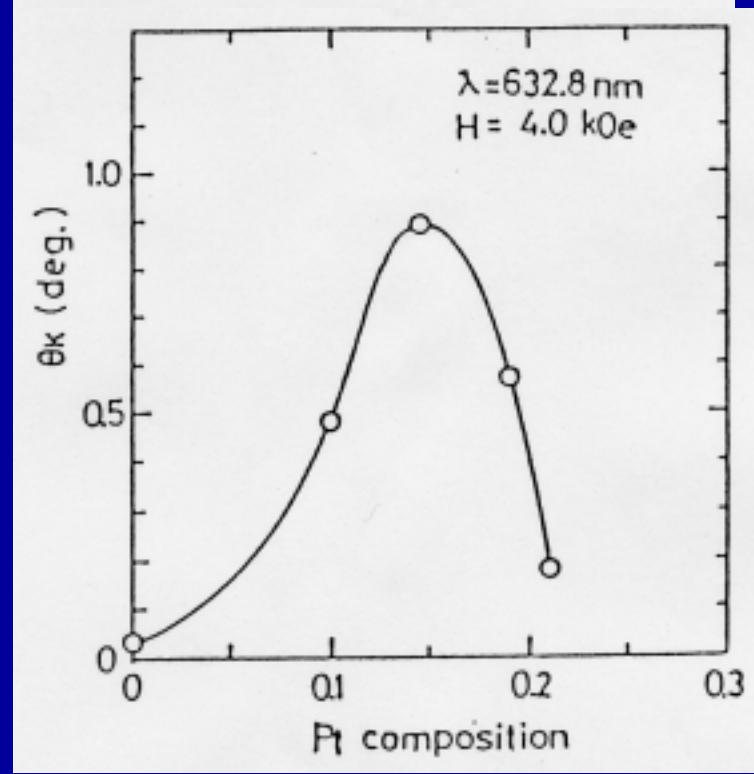
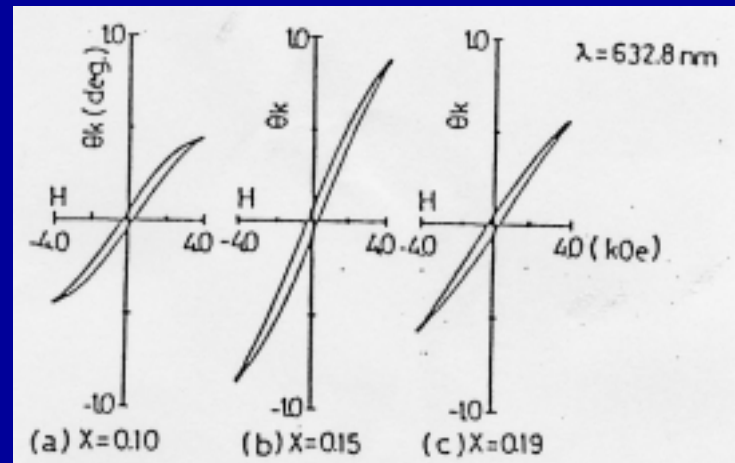
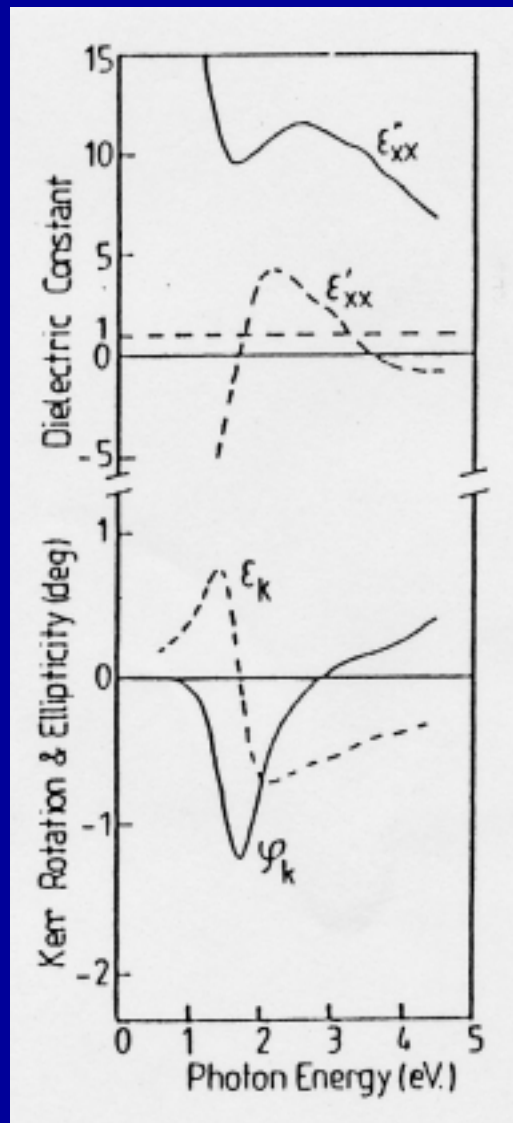
キラルな異性体同士をぴったりと重ね合すことができない



カー効果の応用：MO ディスク



$Pt_x(MnSb)_{1-x}$ 力-効果



レポート課題

- [1] くらしの中のChirality をもう少し詳しく検証せよ.

第8章 フォトクロミズム

新しい電子状態を光で作ります

★ 準安定な緩和励起状態の生成による光学変化 cf.イメージングプレート

透明なイオン結晶を紫外光で照射

M^+X^- 局所構造ひずみ = カラーセンター生成 \Rightarrow 着色

アモルファス半導体をレーザー照射

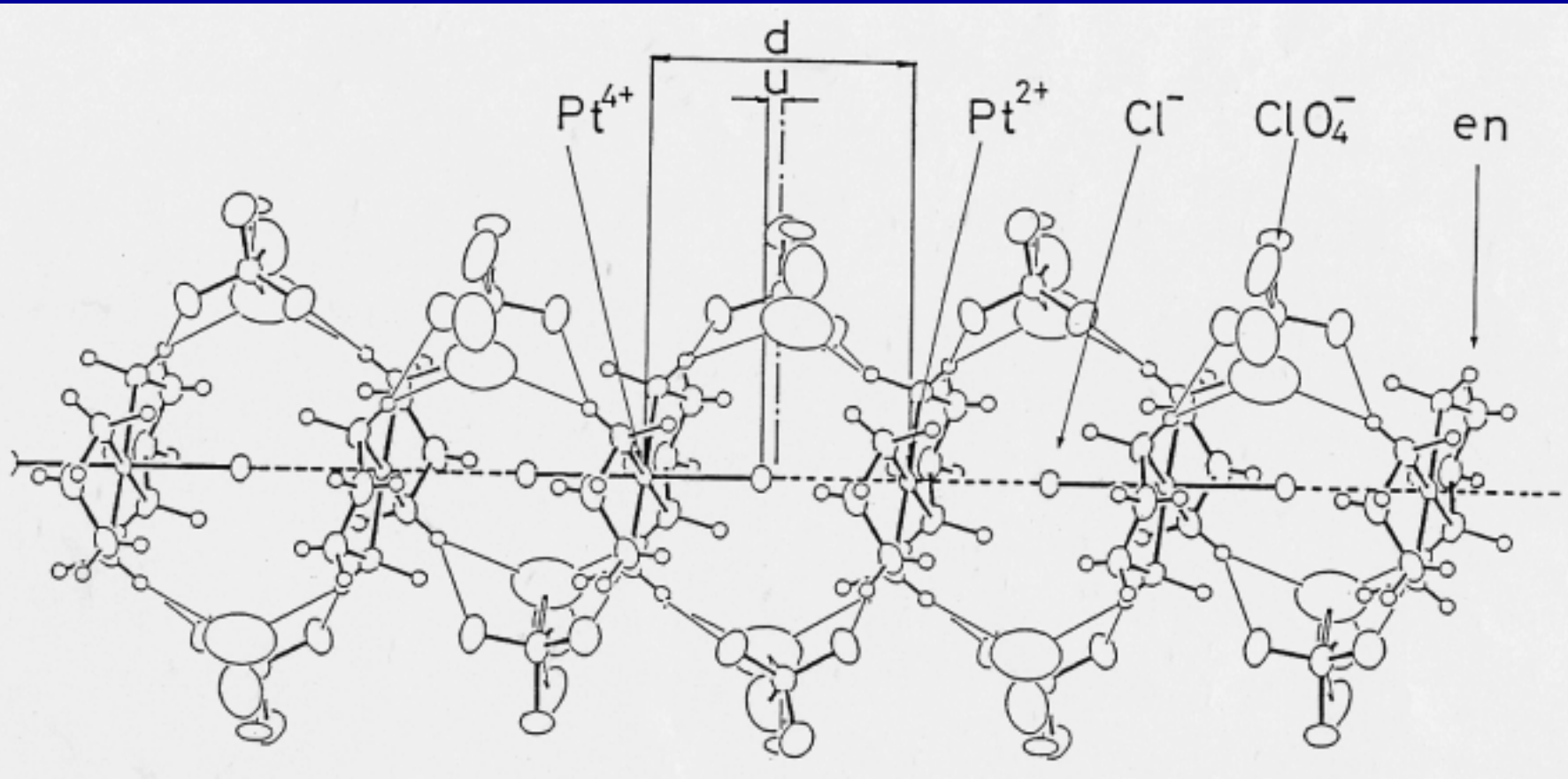
局所構造変化 \Rightarrow バンドギャップ減少, 黒化 Photo-darkening

1次元物質(高分子, 擬1次元白金錯体結晶 etc.)をレーザー照射

ソリトン, ポーラロン生成 \Rightarrow ミッドギャップ吸収・蛍光バンド
(soliton) (polaron)

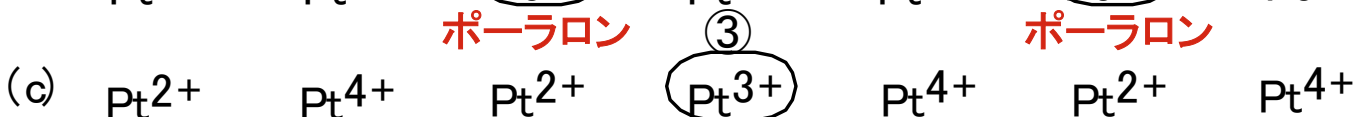
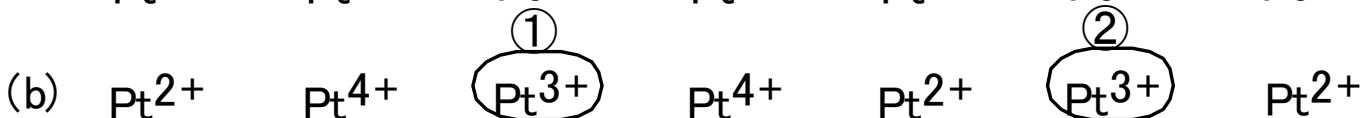
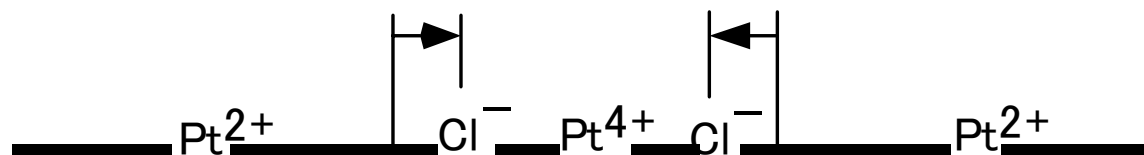
cf. 白川polyacetylene(2000年ノーベル化学賞)ではソリトンが高い導電性を出す
有機(高分子)EL材料(ppv etc.)ではポーラロンが光る
(polyparaphenylene vinylene)

擬一次元白金錯體 MX chain



PtCl 結晶のポーラロンとソリトン

Cl⁻の動き = Pt の価数と連動



ポーラロン

ポーラロン

ソリトン

価数配列の位相逆転

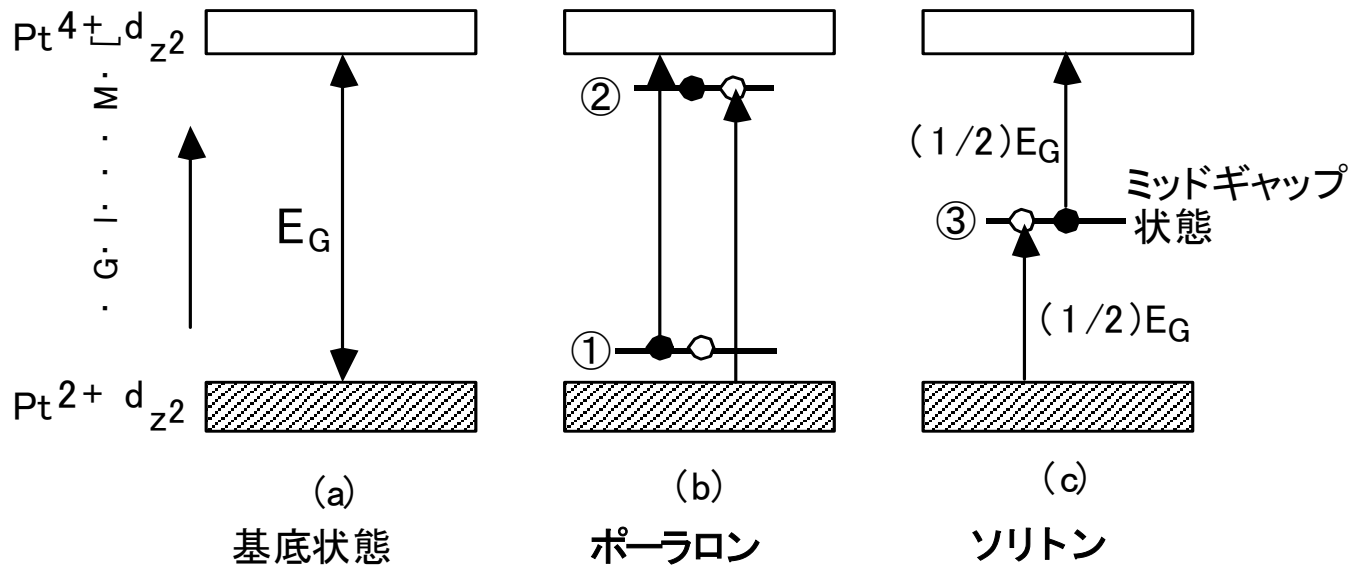
ソリトン = 合金の逆位相境界(anti-phase boundary)に相当。

合金では動かないが、PtCl では1次元性のために動くことができる。

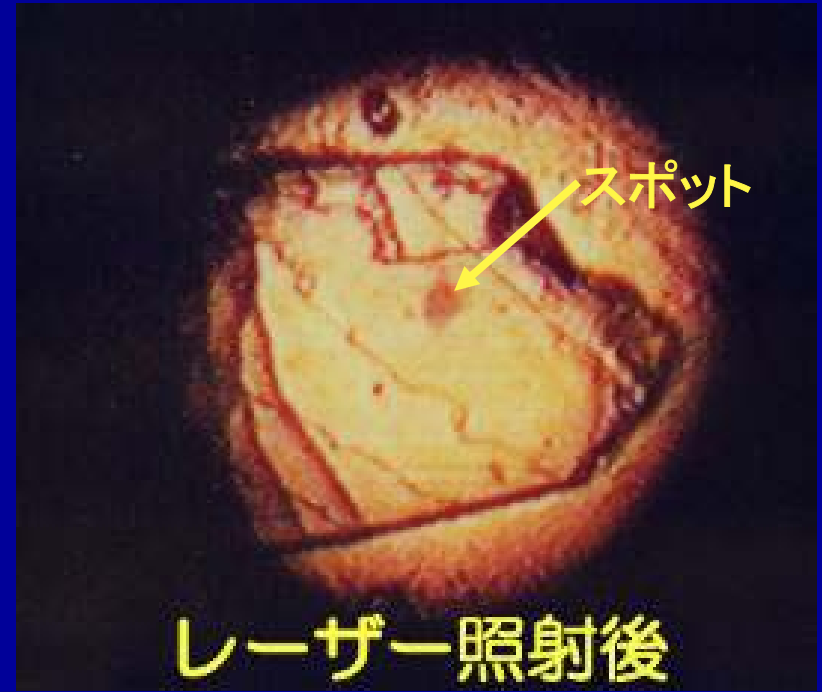
詳細は田端淑矩, 熊本大学生産システム科学専攻博士学位論文(平成14年9月): 熊本大学学術リポジトリ <http://hdl.handle.net/2298/8021> を参照。

白川ポリアセチレン(2001年ノーベル化学賞)の高い導電性もこのようなソリトンによる。

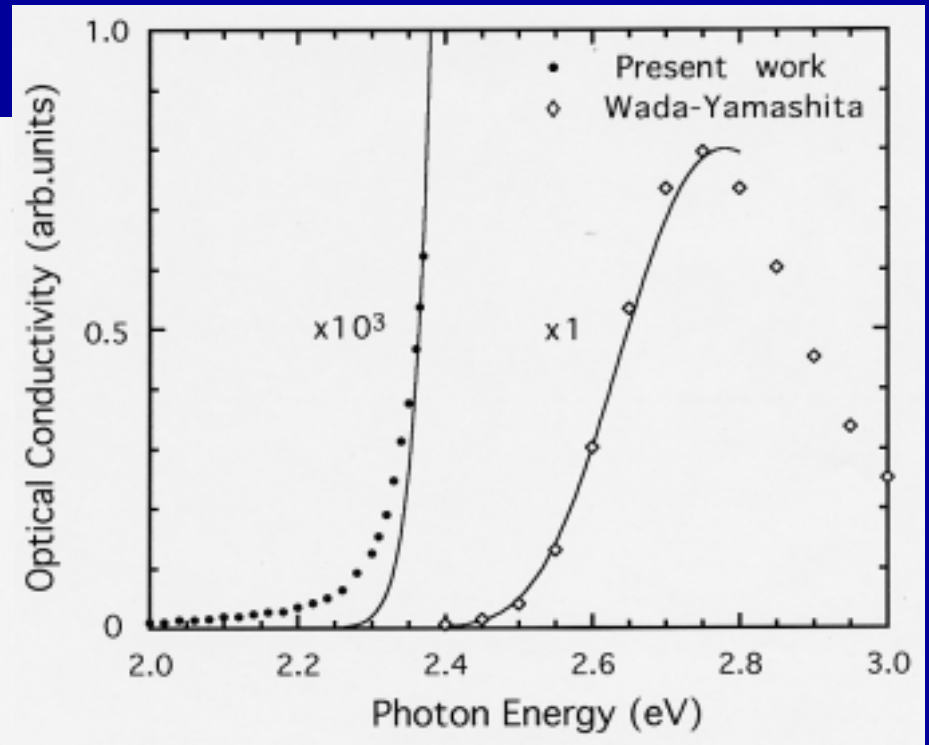
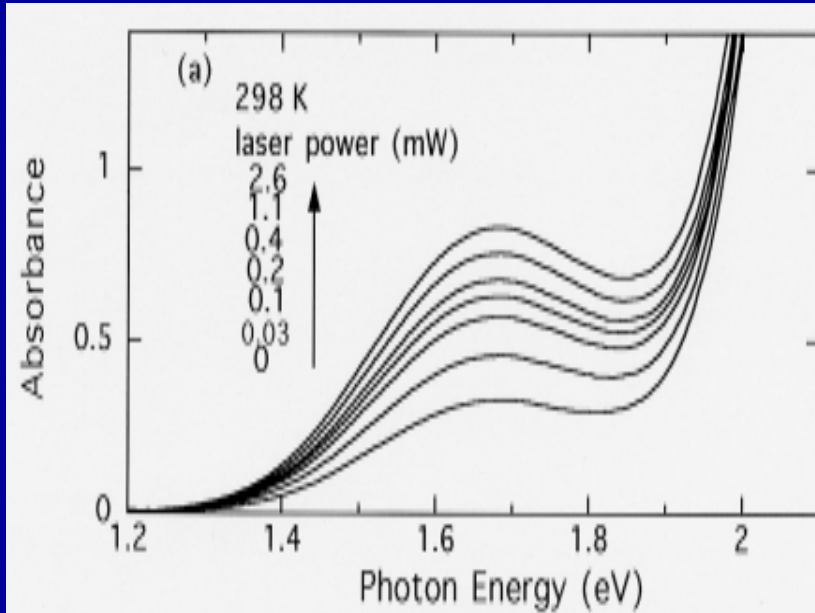
エネルギー準位と光学遷移



白金錯体のレーザ照射スポット



PtCl の光吸収スペクトル

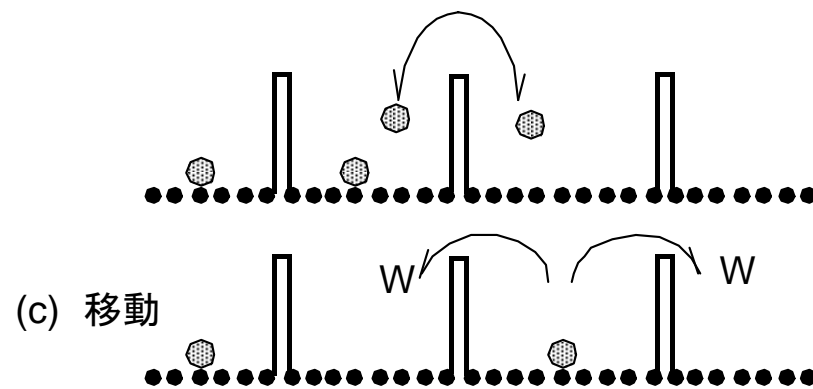
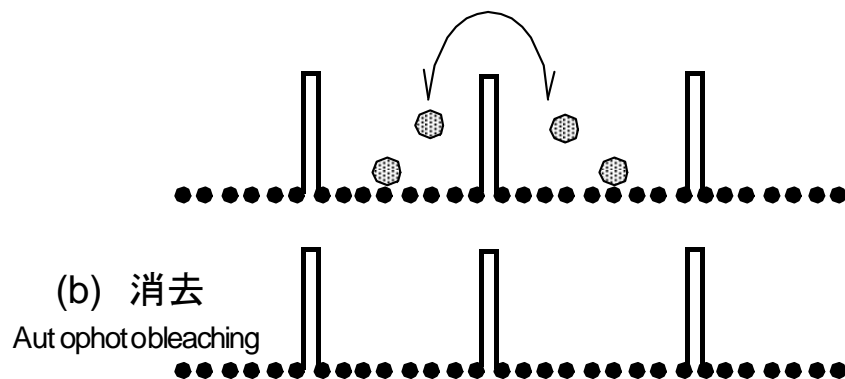
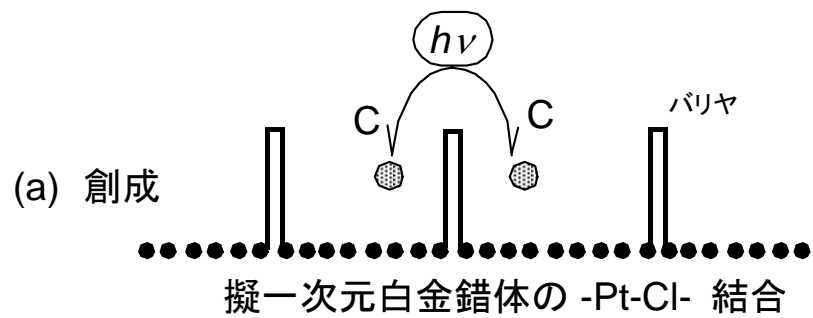


ソリトンのPhoto-kinetics

ソリトンはバリヤを挟んで、ペアで光生成される。

1個のセルに2個入ると直ちに対結合で消滅する。

各ソリトンは単位時間当たり一定の確率で隣のセルに跳び移る。



第9章 いろいろなレーザー

(1) ガスレーザー [アーク放電]

He-Ne、Ar、He-Cd、Kr etc.

CN、H₂O、CO、CO₂ etc.

N₂、エキシマー

近赤外~可視

連続発振

赤外~遠赤外

連続発振

紫外

パルス発振

(2) 半導体レーザー [電流注入]

GaAs, GaInN

近赤外~可視

連続、パルス

(3) 色素レーザー [レーザー・ポンピング]

ローダミン6G、クマリン102、etc.

近赤外~可視

連続、パルス

(4) 固体レーザー

[フラッシュランプ・ポンピング]

ルビー、Nd:YAG、アレキサンドライト

近赤外~可視

パルス

[レーザー・ポンピング]

Ti-サファイア

近赤外~可視

連続発振

(5) X線レーザー

光学利得

光子の分布関数 (Planck の輻射法則)

$$n_{\text{photon}}(\omega) = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

ボーズ分布

光吸収、光放射の電子遷移確率をそれぞれ W_{abs} 、 W_{em} とすると、
正味の光放射確率 $W(\omega)$ は

$$\begin{aligned} W(\omega) &= \{n_{\text{photon}}(\omega) + 1\} W_{\text{em}} - n_{\text{photon}}(\omega) W_{\text{abs}} \\ &= n_{\text{photon}}(\omega)(W_{\text{em}} - W_{\text{abs}}) \quad \text{誘導遷移} \\ &\quad + W_{\text{em}} \quad \text{自然放射} \end{aligned}$$

光学利得 (Gain) : $G(\omega) = W_{\text{em}} - W_{\text{abs}}$

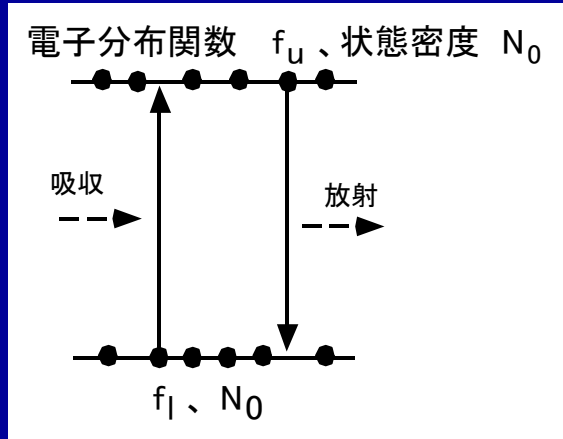
$W_{\text{em}} < W_{\text{abs}}$ のとき $G(\omega) < 0$ 吸収 = loss

$W_{\text{em}} > W_{\text{abs}}$ のとき $G(\omega) > 0$ 増幅 誘導放射が起こる

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation : LASER

光学利得のメカニズム

[1] 直接遷移過程 吸収と放射が互いに単純な逆プロセスの関係



電子1個の遷移確率を $X(\omega)$ とすると

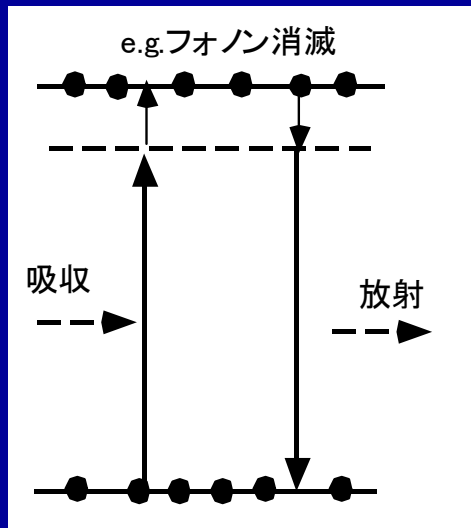
$$G(\omega) = \{f_u(1-f_l) - (1-f_u)f_l\}N_0 X(\omega) - \alpha_{\text{loss}}(\omega)$$

$$= (f_u - f_l)N_0 X(\omega) - \alpha_{\text{loss}}(\omega)$$

f_u must be $> f_l$ for $G(\omega) > 0$

分布反転 (Population Inversion)

[2] 間接遷移過程



吸収と放射の遷移確率 X が異なる

フォノン=格子振動波

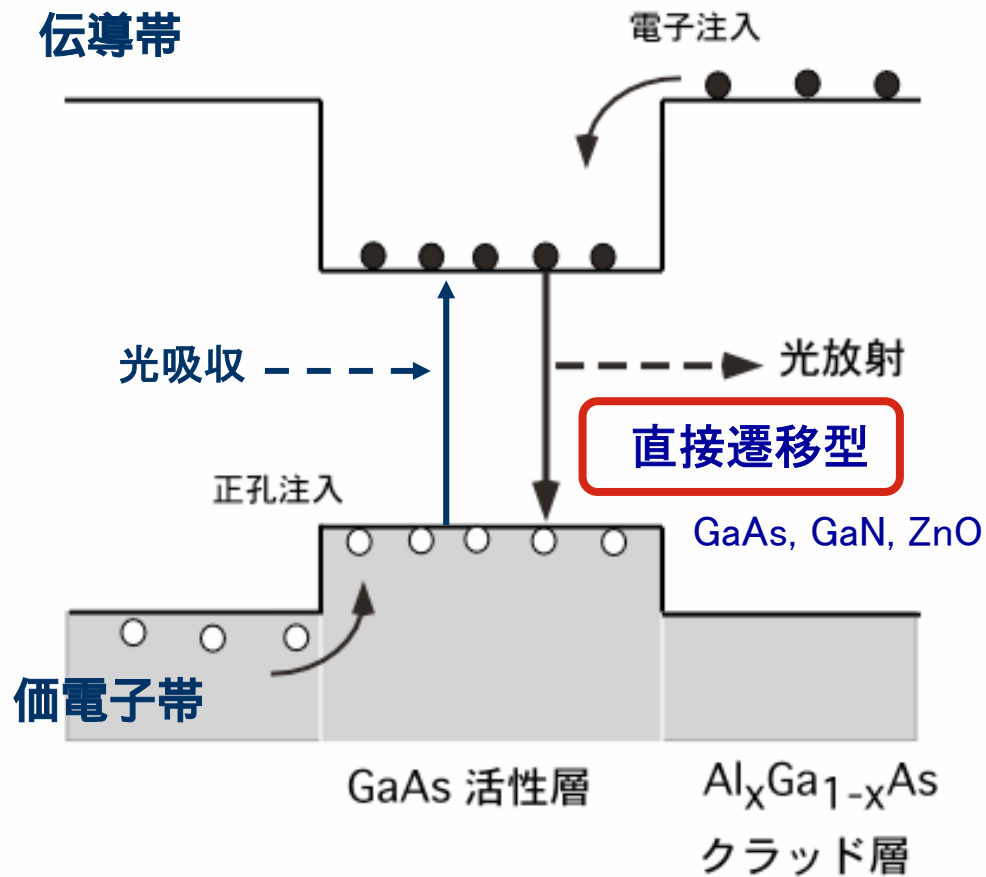
$X(-) = n_{\text{phonon}} X$: フォノン消滅 = フォノン1個を犠牲にして
フォトンで電子を創る

$X(+) = (n_{\text{phonon}} + 1) X$: フォノン生成 = 電子1個を使っ
てフォトンとフォノン1個を創る

$$G(\omega) = \{ \underline{f_u(1-f_l)} + (f_u - f_l)n_{\text{phonon}} \} N_0 X(\omega) - \alpha_{\text{loss}}(\omega)$$

分布反転がなくても $G(\omega) > 0$ の実現が可能

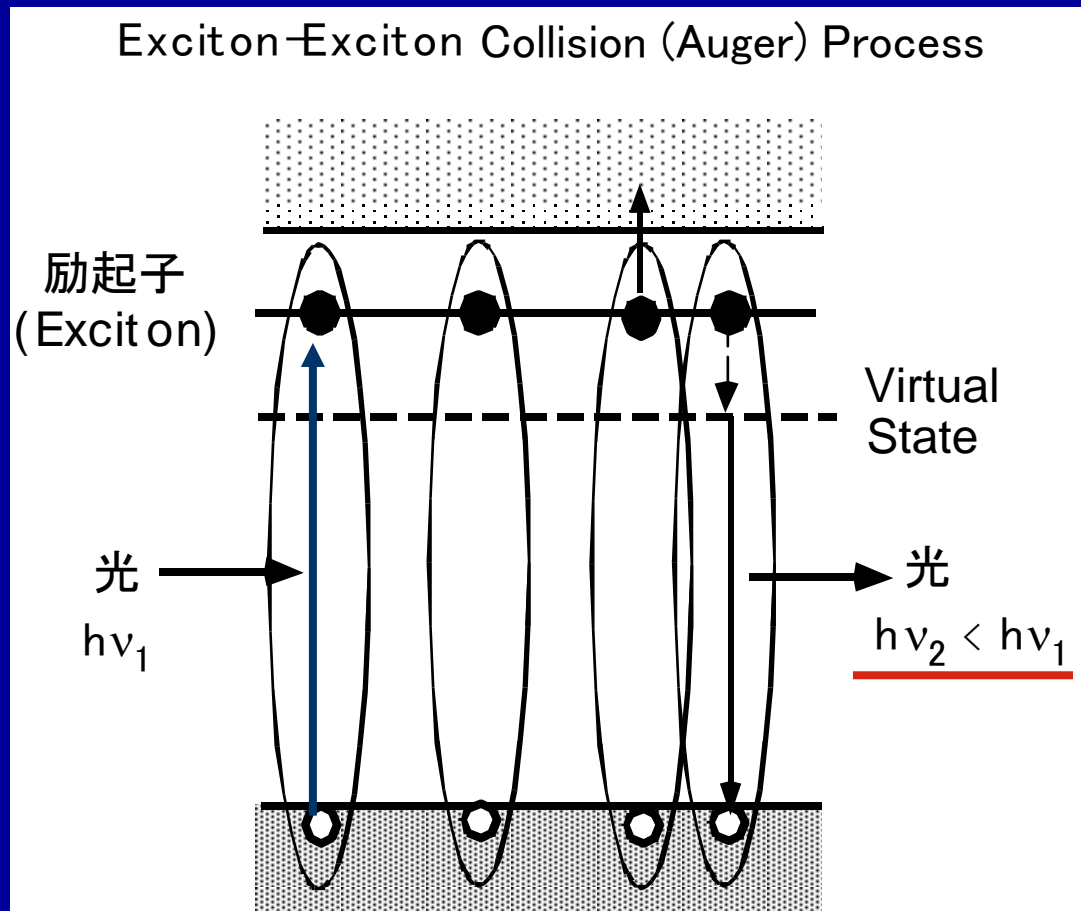
半導体量子井戸レーザー



間接遷移型の誘導放射

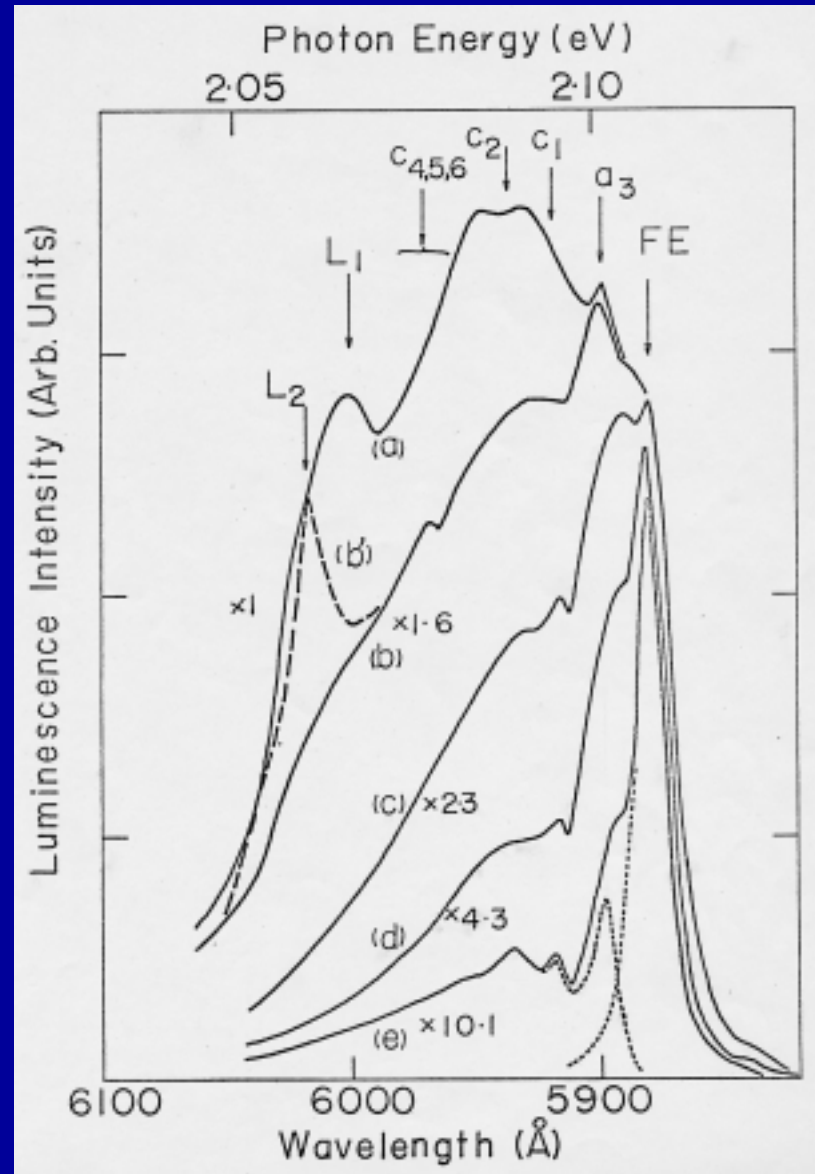
例：エキシトン・オージェプロセス

Exciton = 半導体やイオン結晶で
電子と正孔がクーロン引力で結合
した状態



エキシトン・オージェプロセス によるレーザ励起誘導放射

GaSeの場合 →



レーザポンプ誘導放射

超放射 (Superradiance)

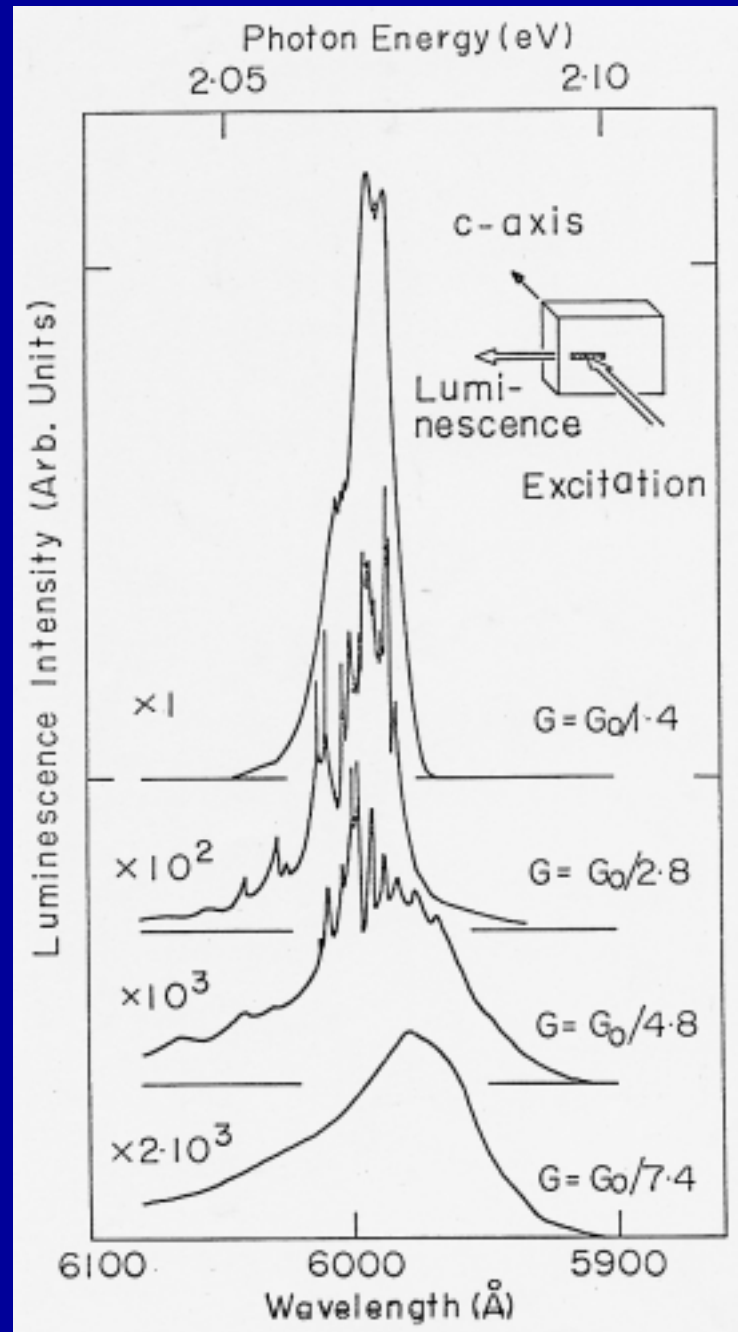
Variable Stripe Method

$$P = \frac{P_0}{g} (e^{gl} - 1)$$

P_0 = 単位長当りの自然放射率

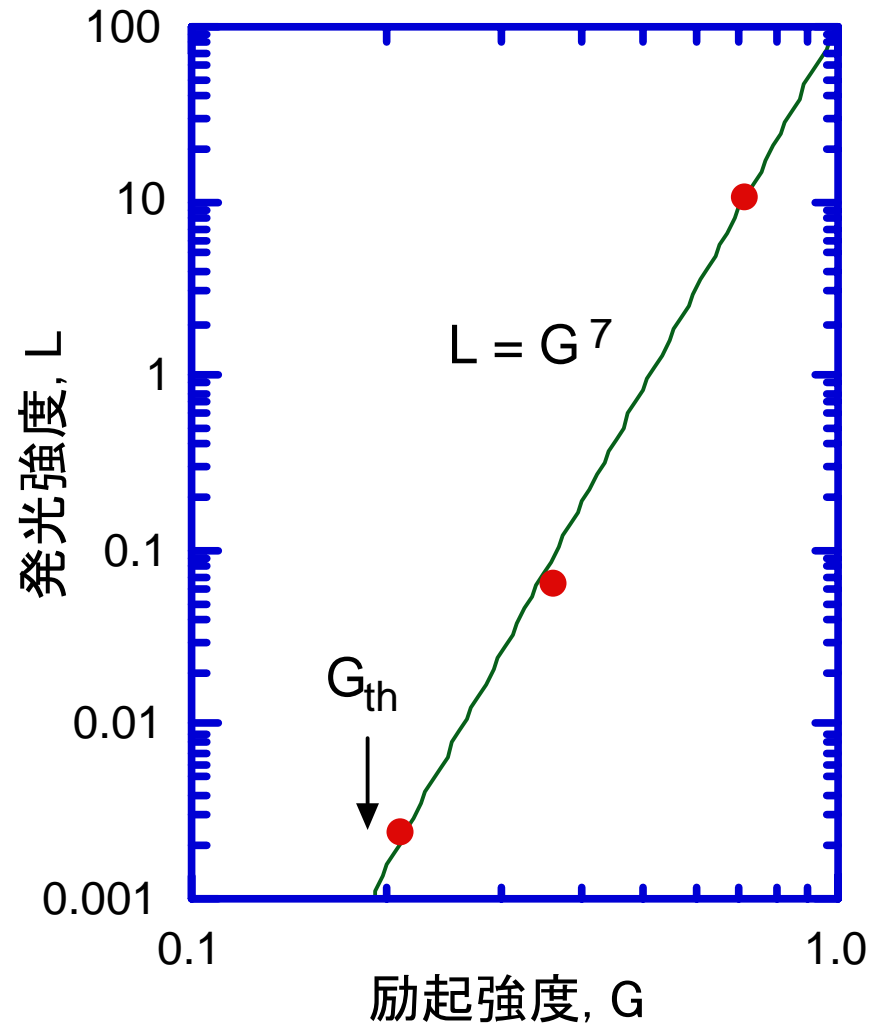
g = gain

l = ポンピング長



レーザポンプ強度依存性

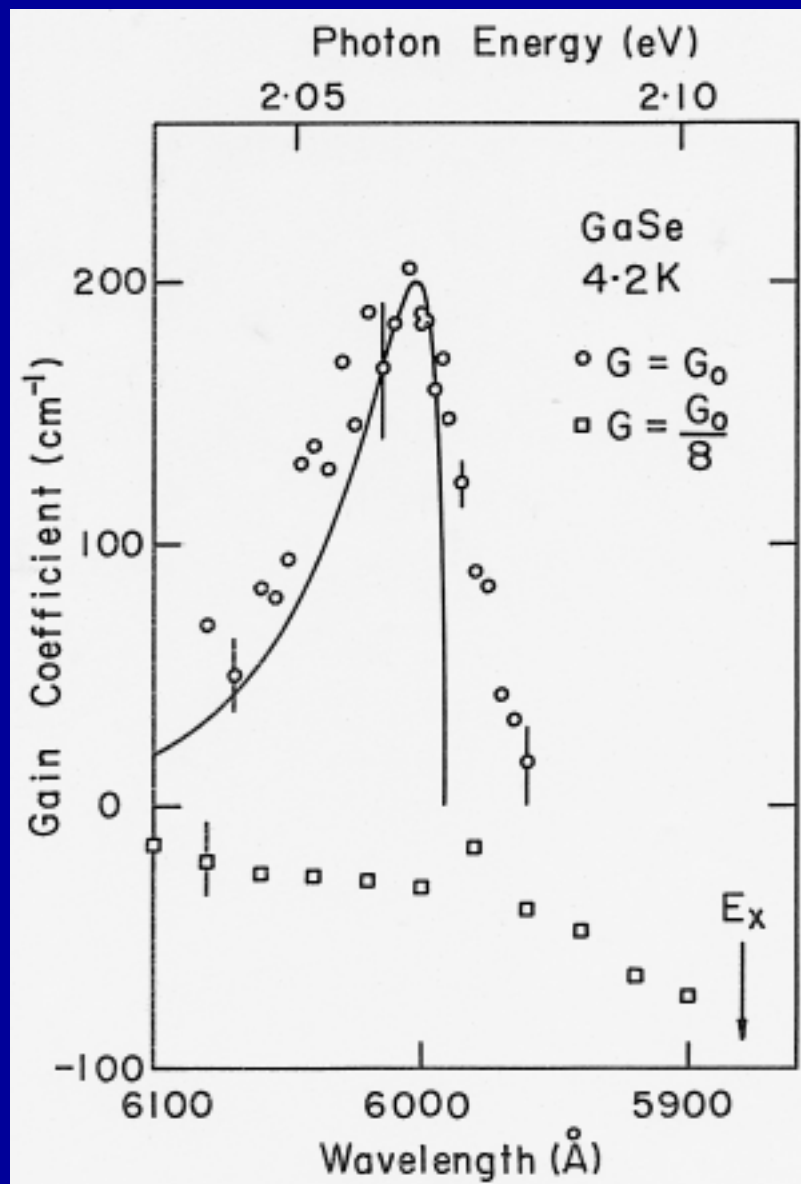
極度の非線形性
 $n = 7!$



利得 (Gain) スペクトル

$$P = \frac{P_0}{g} (e^{gl} - 1)$$

$$\therefore g = \frac{1}{l} \left(\ln \frac{dP}{dl} - \ln P_0 \right)$$



モード構造とレーザ発振

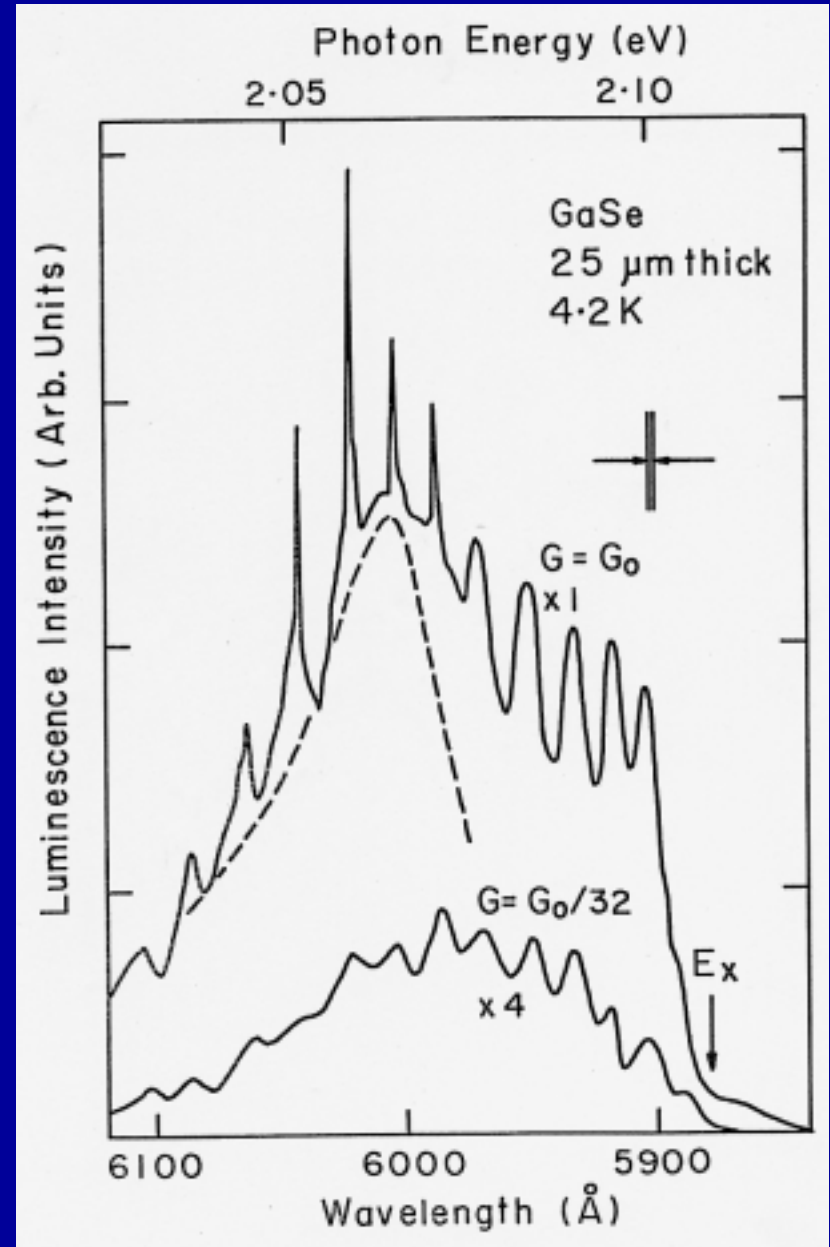
結晶を厚さ25mmに壁開



縦モードが現れる

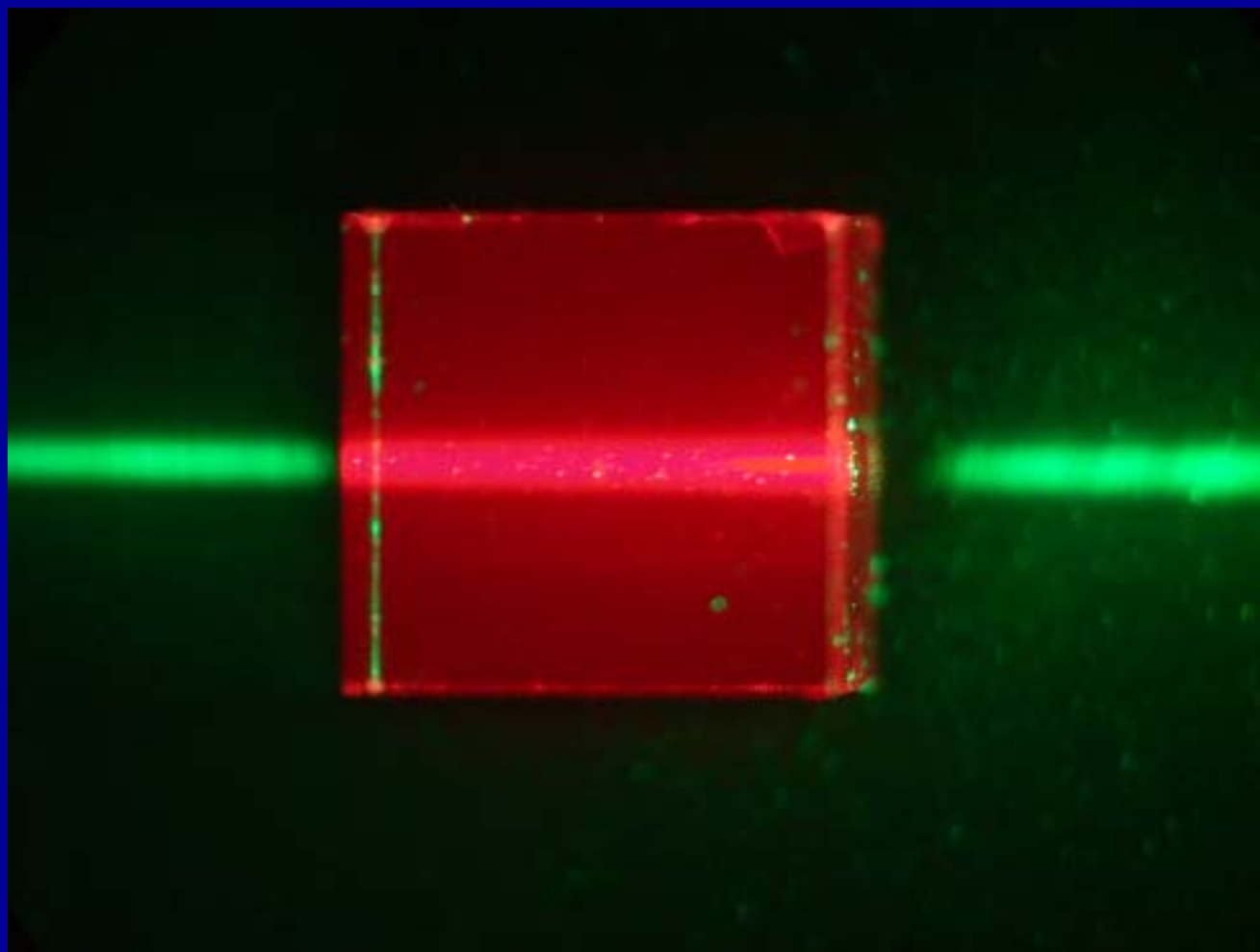
$$2 n d = m \lambda$$

n = 屈折率、 d = 試料の厚さ
 m = 正の整数、
 λ = 真空中の光の波長

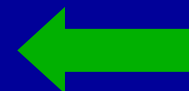


もう1つの間接遷移型誘導放射

アレキサンドライトのレーザーフォトルミネッセンス



Ar イオン・レーザー
波長 514.5 nm

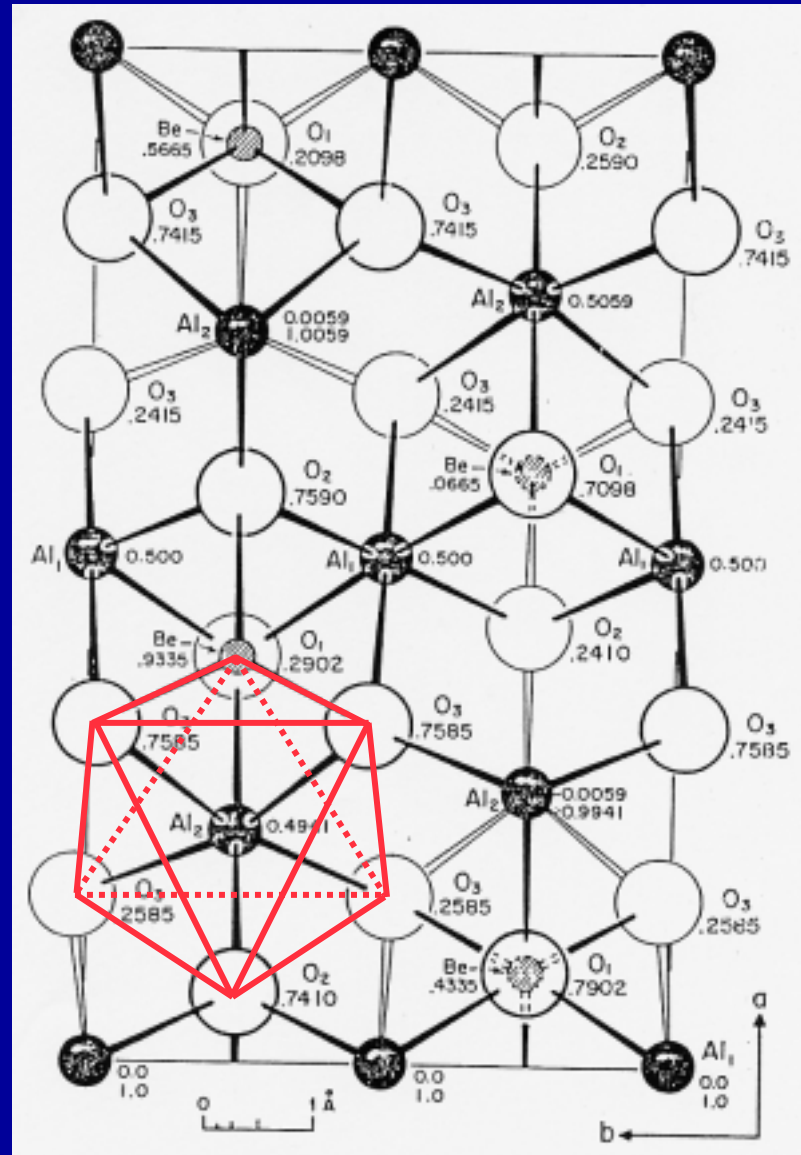


アレキサンドライト：結晶構造

クリソベリル
 $\text{BeAl}_2\text{O}_4 : \text{Cr}^{3+}$

Cr^{3+} は Al を置換している

Cr^{3+} は O^{2-} 八面体の中心にある



どの電子が光を放射しているか

物質 = 原子の集合

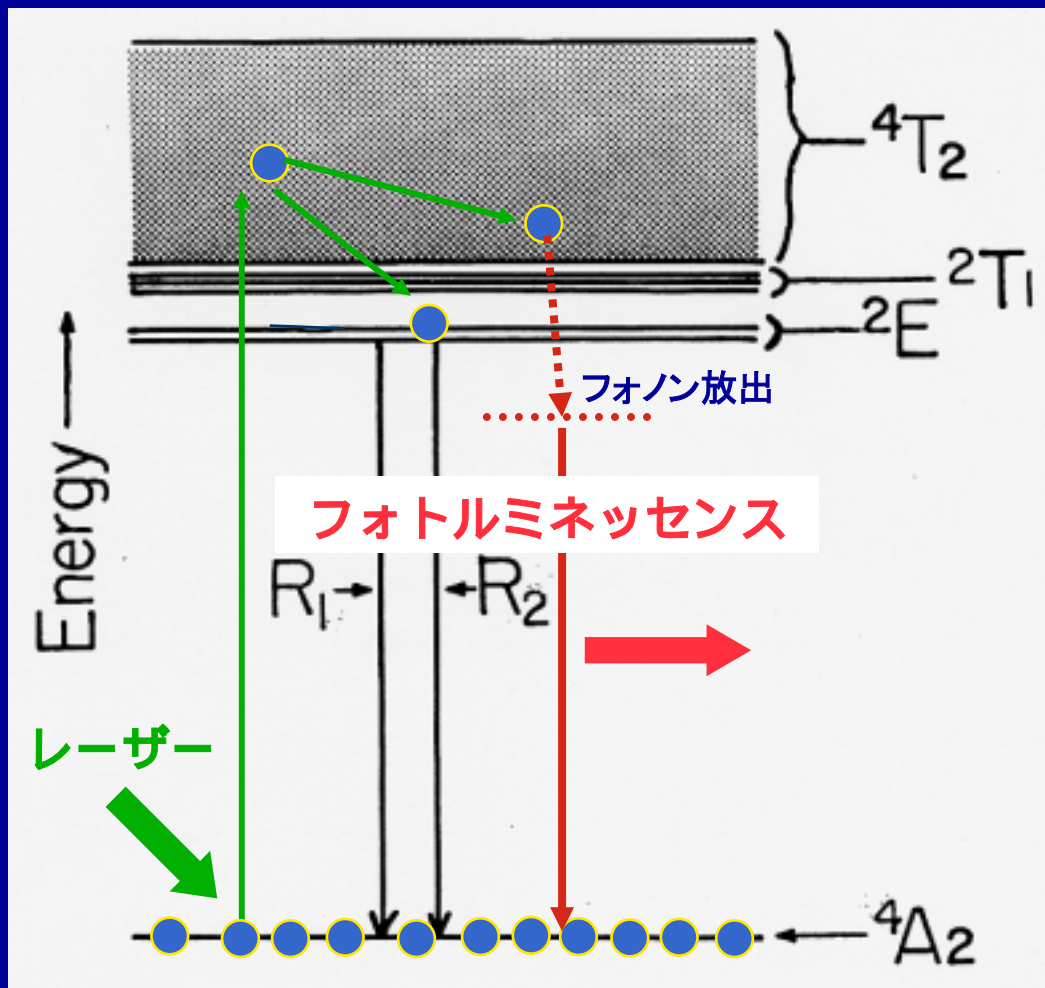
基底状態の中性原子が持つ電子

	n=1 K 1s	n=2 L 2s 2p
1H	1	
2He	2	
3Li	2	1
4Be	2	2
5B	2	2 1
6C	2	2 2
7N	2	2 3
8O	2	2 4
9F	2	2 5
10Ne	2	2 6

	n=1 K 1s	n=2 L 2s 2p	n=3 M 3s 3p 3d			n=4 N 4s 4p 4d 4f			
11Na	2	2 6	1						
12Mg	2	2 6	2						
13Al	2	2 6	2	1					
14Si	2	2 6	2	2					
15P	2	2 6	2	3					
16S	2	2 6	2	4					
17Cl	2	2 6	2	5					
18Ar	2	2 6	2	6					
19K	2	2 6	2	6			1		
20Ca	2	2 6	2	6			2		
21Sc	2	2 6	2	6	1		2		
22Ti	2	2 6	2	6	2		2		
23V	2	2 6	2	6	3		2		
24Cr	2	2 6	2	6	5		1		
25Mn	2	2 6	2	6	5		2		
26Fe	2	2 6	2	6	6		2		
27Co	2	2 6	2	6	7		2		
28Ni	2	2 6	2	6	8		2		
29Cu	2	2 6	2	6	10		1		

赤字は
外殻電子の
個数を表す

Cr³⁺イオンの d³ 電子のエネルギー準位と レーザーフォトルミネッセンスのメカニズム

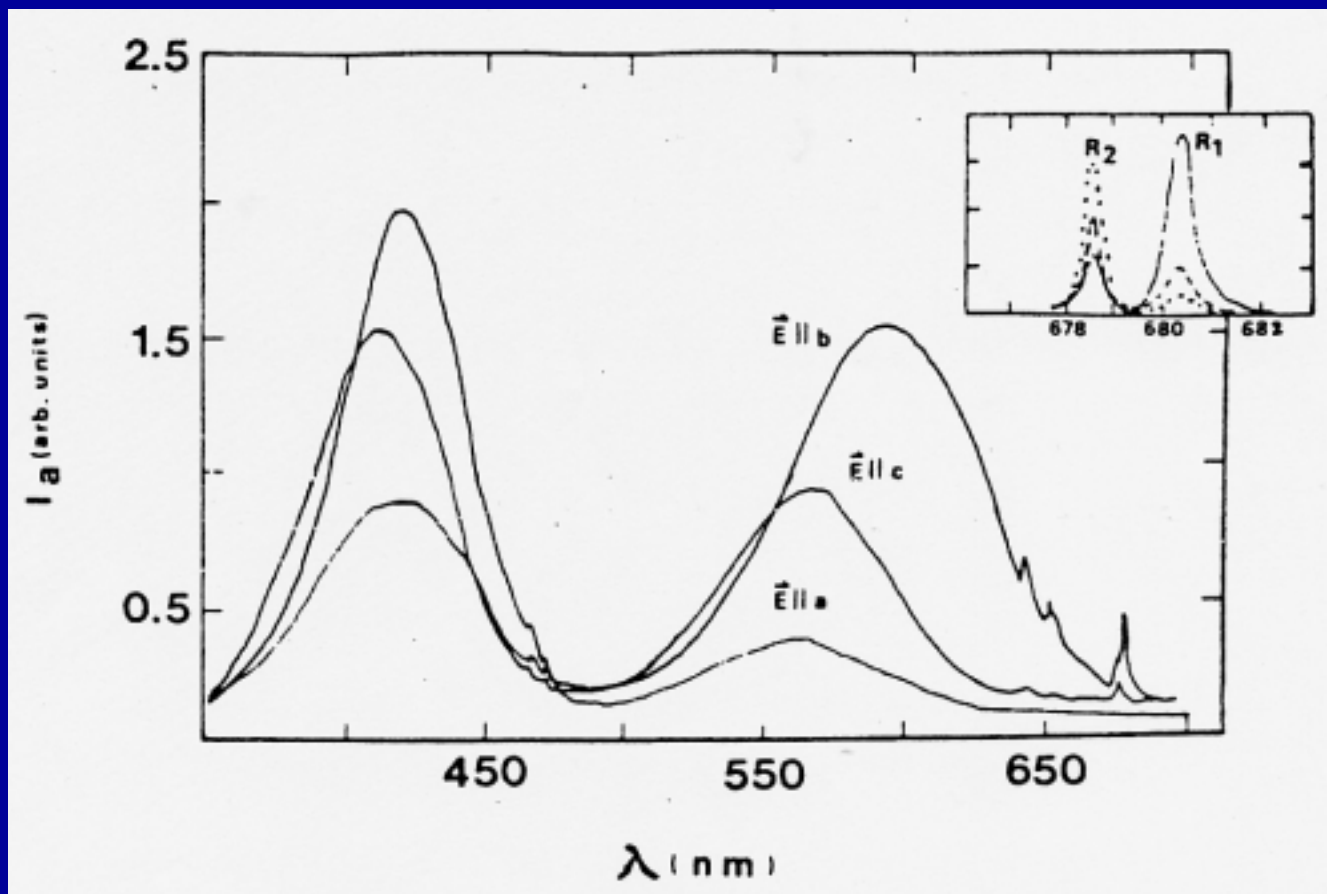


光 → 電子 → 光

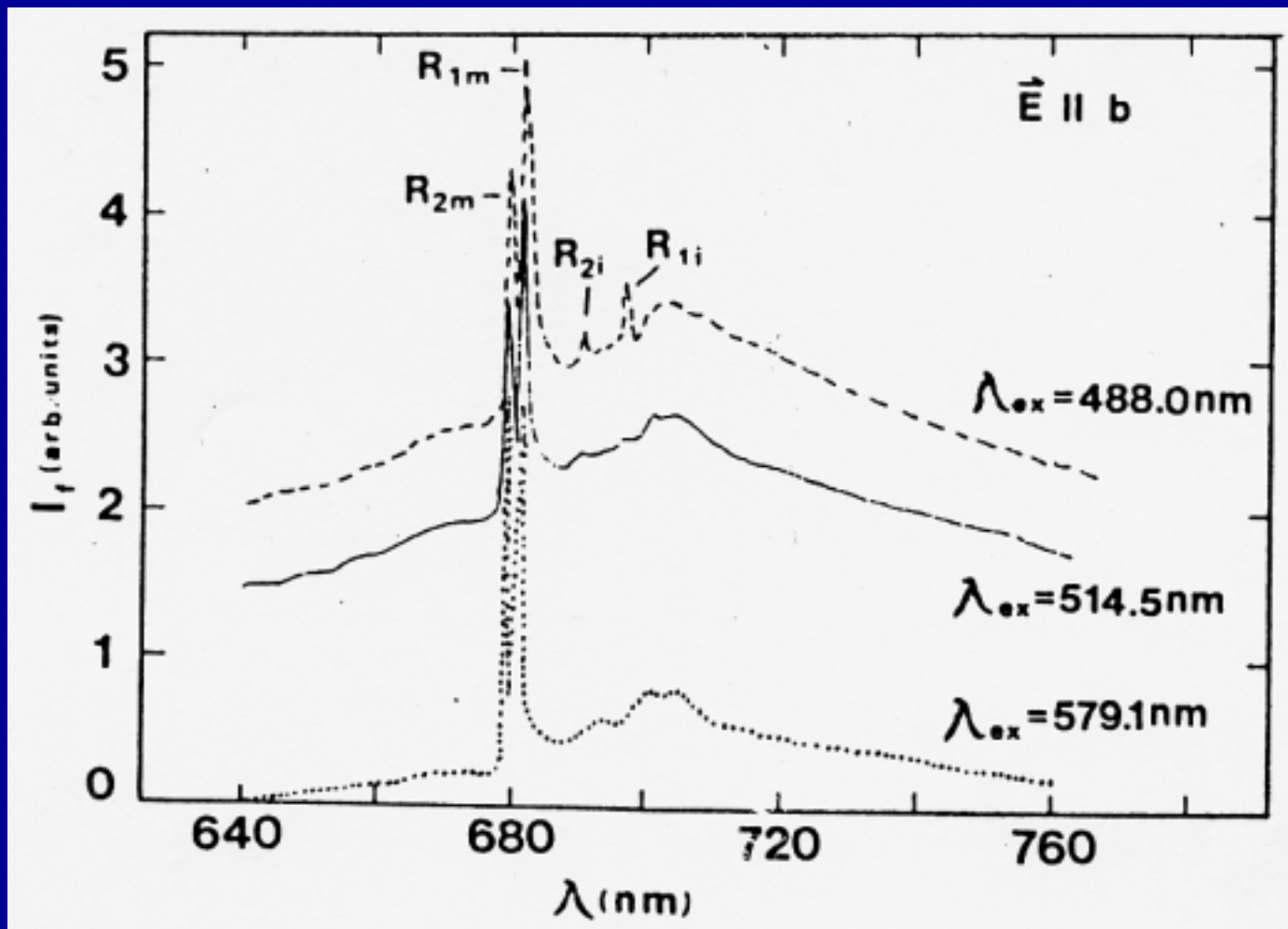
エネルギー変換

4T₂の電子帯が広がっている
のでフォノン放出のルミネッセンス
バンドも広がりを持つ。

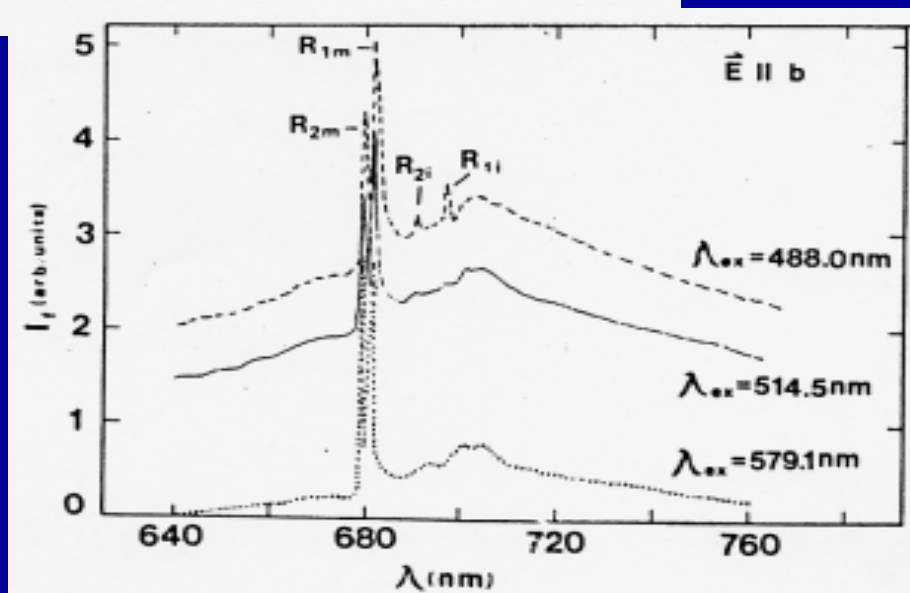
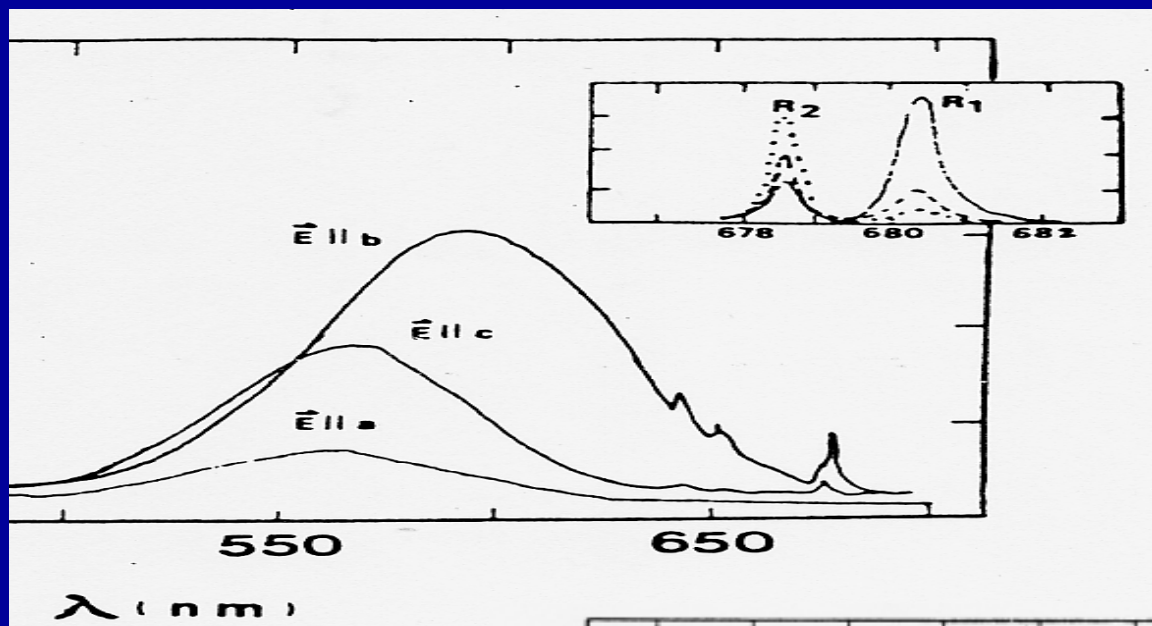
アレキサンドライトの光吸収スペクトル



アレキサンドライトのフォトルミネッセンス



吸収と発光のスペクトルの比較



利得(Gain)スペクトル

出力

$$P = P_0 e^{(g - \alpha)x}$$

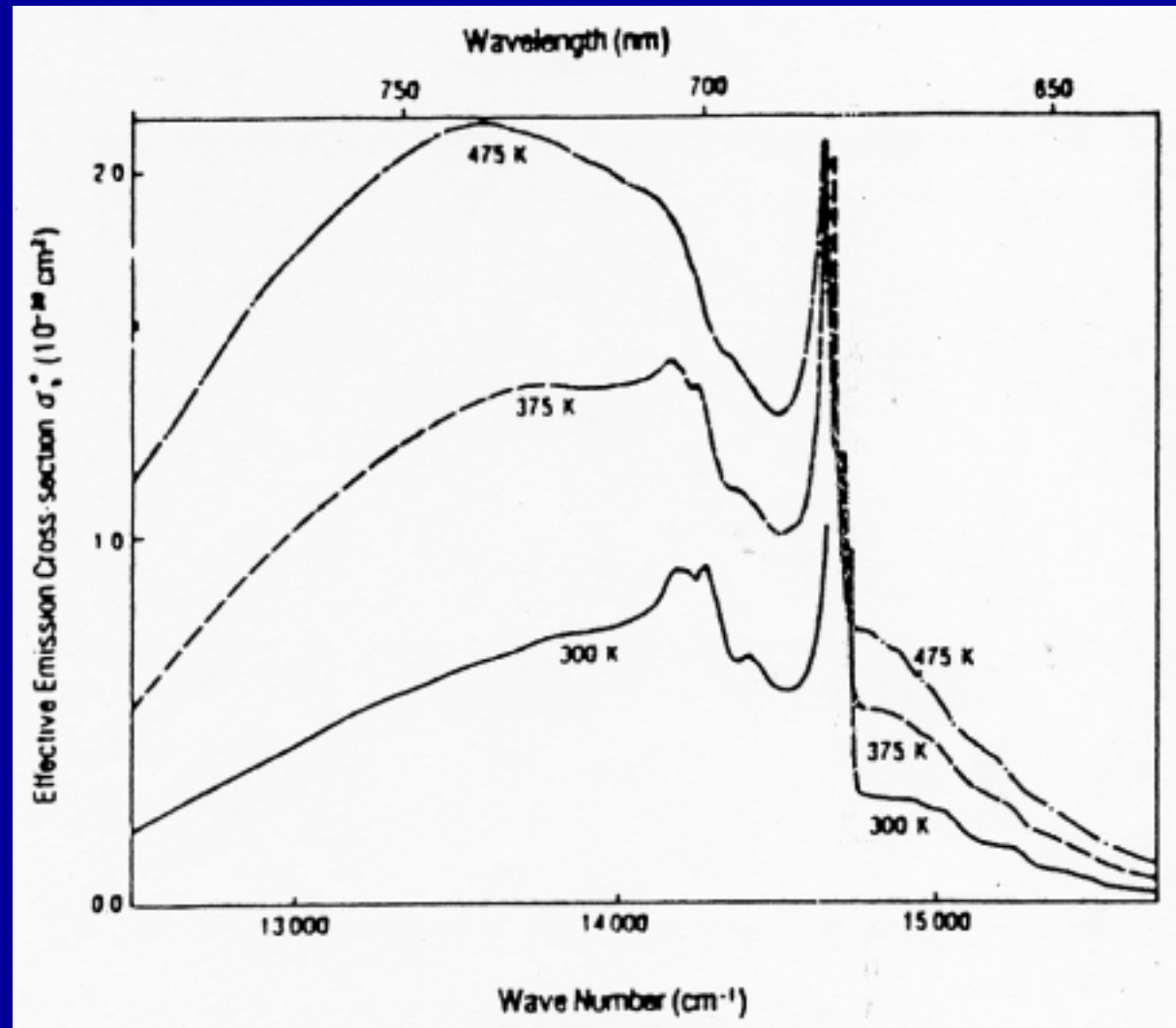
g : gain, α : loss

x : 光路長

共振器の光路長を
変えればレーザー発振
の波長を変えることが
できる。



波長可変固体レーザー
素子として初めて実用
化された。



第10章 結び

固体中の光学素励起のデバイス化における諸問題

書き込み

読み取り

消 去



どのようにするか

最小サイズは？

寿 命は？

制御性：電圧で動くか？

mobility (易動度)は大きいか小さいか。

コスト、歩止り、信頼性、経時変化

新規性(代替デバイスの有無)、社会的ニーズ

付録資料

1. 2005年1月開催「フotonクス国際会議」サーキュラー
2. 2008年4月9日 読売新聞記事
「革新的技術14分野を選定」
3. 2008年5月13日 日本経済新聞記事
谷川健一「私の履歴書：神は細部に宿り給う」
4. 人吉市球泉洞エジソン館
由来説明, エジソン手書き設計図
5. 2005年6月30日 読売新聞記事
「進む産学連携」費用対効果検証の必要性

資料 1.



2005年1月開催
フォトニクス国際会
議サーキュラー

Innovation doesn't happen in the dark




22-27 January 2005
San Jose, California USA

Conferences • Courses • Exhibition

spie.org/events/pw

Photronics West participants lead the way in the development and transfer of light-enabled technologies for biomedical optics, optoelectronics, lasers, and microfabrication. Share your ideas and energy with your colleagues at Photronics West 2005 and participate in the growing legacy.

Building a Better World with Light

 The International Society
for Optical Engineering

Tel: +1 360 676 3290 • spie@spie.org

革新的技術 14分野を選定

生活支援ロボットなど

政府の総合科学技術会議（議長・福田首相）の「革新的技術戦略」中間報告の内容が8日、明らかにされた。「知の一流国家」を目標に重点投資する革新的技術として14分野26項目を選定。その推進に、①研究者が所属組織の壁を越えて100人規模が機動的に結集

②先端医療などテーマに即した規制の特区的運用——などの仕組み作りを打ち出した。競争的研究資金の拡充や斬新なアイデアを重視した「大挑戦研究枠」の設定も明記した。5月をめど

に最終とりまとめを行う。

革新的技術の主な候補は以下の通り▽フラッシュメモリーの書き込み速度を現在の1000倍にする「スピントロニクス技術」▽発電コストを火力発電並みに抑えた「次世代太陽光発電技術」▽家事や福祉・介護を支援する「生活支援ロボット技術」▽マラリアを予防する「感染症ワクチン開発技術」▽小麦・大豆の収穫量を従来の2倍にする「主要作物環境耐性・多収化技術」▽ウナギ・マグロを卵から育てる「広域回遊魚類完全養殖技術」

明4月18日
夜7時30分
NHK 熊本の風
熊本の太陽電池
産業を特集

谷川健一 1921年熊本生れ。
民俗学、地名学の泰斗
毎日出版文化賞、芸術選奨文部大臣賞等受賞。

“神は細部に宿る”

“God is in the details.”

1800年頃ヨーロッパで言われ始め、
1900年頃我国に伝わる。

林氏の好きな言葉に、「神は細部に宿り給う」というのがある。細部を知らなければ、全体を知ったことにならない、というのが、知識や学問にたいする林氏の断固とした態度であった。それはほとんど文学者の確信に近かった。

平凡社へ

私が入社した平凡社では「世界大百科事典」を刊行、その編集長は林達夫氏であった。林氏についてはとりわけ思い出がある。

私の履歴書

谷川 健一
川がわ けいいち

あるとき、戦前版の「大百科事典」の販売記念の祝いの行事があった。私を招き社員会臨時は私も若かった。社員の三層の大広間で、琉球舞踊がながながと演ぜられるのに参加して、階下の部屋で同僚を招き、輪を作ってインターを各組しはじめた。平凡社に



イリス・ゴンの写真。

はまた労働組合はなく、そのような振舞いは軽蔑であり、かつ危険でもあったわけである。私はたまたま三階から階段を降りてくる林達夫氏の姿をみとめたので、林氏を引っぱって行って、合組の輪の中に入れた。林氏は輪の中心に立たされる格好になった。

林達夫氏を囲み革命歌

児童百科事典の文に感銘

がいて、ムラとしておぼえらる。林達夫氏が立っていた。林氏が私が強引に引っぱって、インターの輪の中に入れて、インターを各組して、私を「悪魔」と呼んだ。林氏は百科の編集長の席に座っている。社内にはあまりなく、社内に大きな字で書いておいた。親切きりぎりすのとき、や

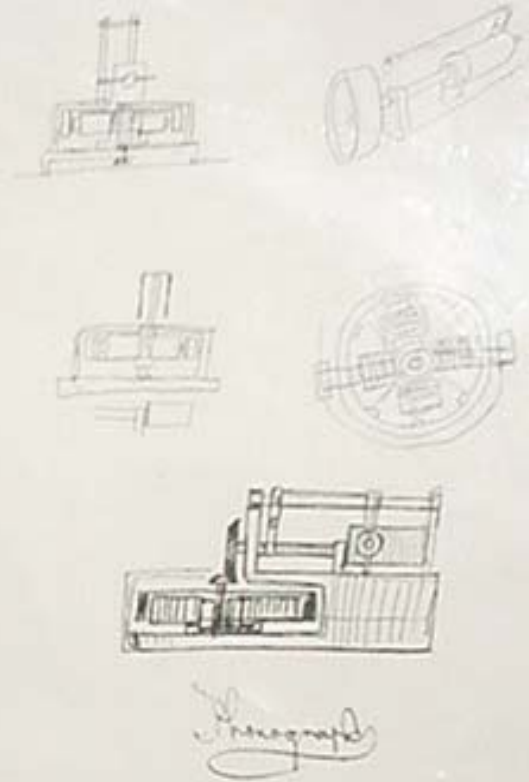
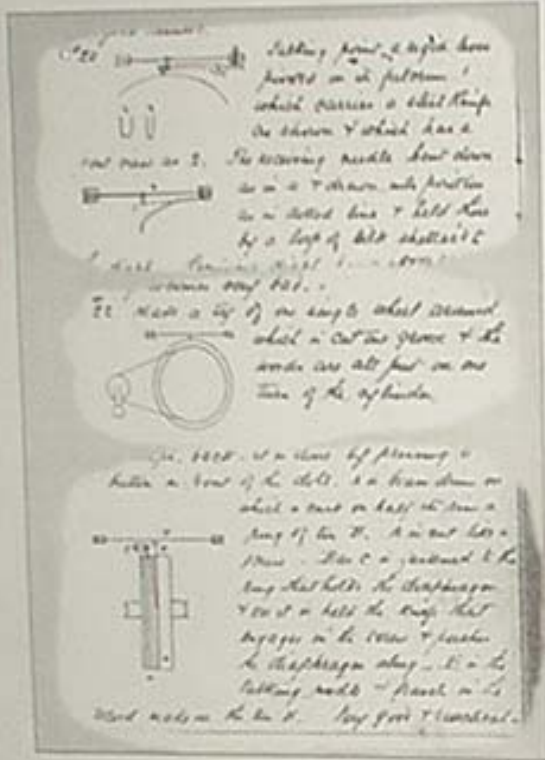


晩年の林達夫氏

い、というのが、知識や学問にたいする林氏の断固とした態度であった。それはほとんど文学者の確信に近かった。細部を知らなければ、全体を知ったことにならない、というのが、知識や学問にたいする林氏の断固とした態度であった。それはほとんど文学者の確信に近かった。



蓄音機発明の設計図



Sketches from Edison's Fort Myers Notebook of April 1886

資料 4-2. 球泉洞エジソン館の由来

ニューヨーク 科学歴史財団
The Foundation for the History of Science (New York)

拝啓 御公務いよいよ御業多のこと拝察申し上げます。

さて、幣財団は今般、下記の経緯、趣旨に基づいて『エジソン・ミュージアム』を熊本県球磨村に永久施設として開館いたしましたので、謹んでご挨拶並びにご報告を申し上げます。

記

1. 当『エジソン・ミュージアム』の由来

1910年（明治43年）当時、既に全世界に発明王の名を馳せ、人類社会に豊かな生活をもたらしたに続いていた「トーマス・アルバ・エジソン」の偉大な発明のすべてを永久に保存し、且つ、一般にも公開するため当時ニュージャージー州において電気事業を営んでいたデ・ラブレイン氏によってエジソンの作品を一並に集めた「ジョージ・N・デ・ラブレイン電気産業博物館」が開設をされ、以来56年間に亘って米国民に供されましたが、デ・ラブレイン氏の没後、縁あってロケットの糸川博士及び、神戸の事業家山本隆成氏等の努力に依り、昭和52年に前記「ジョージ・N・デ・ラブレイン電気産業博物館」の全てが日本に移り、その後、東京理科大学において、その管理と教材の活用を図る一方、中日新聞社他9新聞社の協力により国内各地の巡回展示を実施するなど活動を続け、その都度、開催地に於いて絶大な好評を博して参りましたが、何分巡回展示はその運営手段に問題も多く、且つ、展示品の損傷と経費を併う為、常設展示館の必要が望まれていました。縁あって順書のように球磨村に常設館を開館することになり、東京理科大学近代資料館に一部を預け、その大部分の3千数百点を搬入、『エジソン・ミュージアム』として、平成7年10月1日開館に至りました。

2. 『エジソン・ミュージアム』開館の報告

私達の日常の生活を今より30年前、そして更にその30年前へと振り返るとき否応なくそこに大きな変革を見ざるを得ず、そして、その大きな変革の中に科学文明の力を意識しないわけには参りません。ご承知の通りエジソンはその科学文明の世界の先達者であります。エジソンを知り、そのたゆみない努力、発明の過程に直接ふれるとき私達は恵まれた現在の生活に対し、深い感謝と共に強く心を突き動かす何かを感じないではいられません。

科学が、発明が私達人間社会にもたらす偉大な成果、そしてそれは更に現在から明日に向かって休むことなく続くのであります。

ご来館の皆様方に、また、将来ある青少年、児童の皆さんに対し、エジソンはもっと多くのことについて語りかけてくれるはずで、

当『エジソン・ミュージアム』はエジソンの精神を過去から現代、そして更に次の時代へと引き継ぐ使命と共に、科学と発明という永遠の課題に対する教育の場として開館をいたしました。

3. 球磨村に『エジソン・ミュージアム』を常設した経緯について

前項でも述べましたとおり、エジソンの巡回展示は中日新聞社他協力の功によって名古屋、札幌、仙台、新潟、浜松、金沢、神戸、山口、久留米、広島と展開し多大の反響を得ました。

これに力を得て、全国の公共体からの展示申し込みの中から思想を同じくする団体と最も相応しい場所を選定し、いずれは常設館として発定すべきと考慮していましたが、欧米の例を見てもこの種の教育的内容を目的とする展示館のロケーションには必ずとある種の制約があり、それは雑踏の都会を避けて閑静な場であるべき、ということでもあります。

球磨村森林組合が所管される森林館（この建物は熊本大学の木島教授が設計され、建築学会賞に輝いた七つのドームからなる建物）が浮かび、球磨村森林組合の永年の教育を含む哲学とも合致し、今般の開館の運びに至りました。

“エジソンが球磨村へ” この展開には驚きの声も聞かれますが、球磨川の清流、深い緑の山並み、澄み切った空気が、どれをとりましても「エジソン」の安住の地に極めて相応しい条件にあると言えます。

（エジソンが生まれたオハイオ州ミランの町も、後年数多くの発明品を次々に産み出した世界に冠たる研究所（現在は国立記念館）のあるウエスト・オレンジも、都会とはおおよそかけ離れた閑静なところにあります。）

大古・球磨地方は治厚部の工場開発から守られ、温泉・球磨川下り・霧洞湖・森林館・バイオ館・キャンプ場等が集中し、九州の各空港も整備され、アジアの玄関ともなり、道路網も充実し、またその昔仏教、キリスト教、鉄砲などもこの南九州から伝来しています。時と所を得て、今回の『エジソン・ミュージアム』の球磨村開館も、その歴史の一つの流れに沿ったものかと考えております。

敬 具

進む産学連携

費用対効果などに問題 国立大の意識改革も必要

大学の知的成果を生かして経済活性化をはかる。1998年以来、政府の高額取りで産学連携推進が本格的に進められてきた。成果を生む一方、問題も増えてきた。

解説部 知野直子

数字の上では、産学連携は過去最高を記録。産学に進入してい

る。国立大学でそれが著しい。文部科学省が22日に発表した集計によると、2004年度は国立大と企業との共同研究が約9400件になり、219億円の研究費が、企業から大学へ入った。特許出願件数は大幅に増え、約41500件に達した。経済産業省の調べでは、国立大発ベンチャーも約800社になった。

も浮き彫りになってきた。例えば国立大の2004年度の特許料収入は、約4億1600万円。このうち約3億6000万円が、赤崎勇・名古屋大名誉教授の青色発光ダイオード関連の収入だ。それ以外は、合わせても約5000万円に過ぎず、利益はまだ少ない。

特許は、出願さえすれば収入につながるわけではない。逆に税金がかかる。2004年度から3年間は、国立大の特許費用は無料措置がなされている。しかし本来は、出願などの費用がかかる。権利維持のお金も毎年払わねばならない。企業などがお金を払って使ってくれないと、大学の出費がかさむだけだ。しかし、国立大側にその意識は薄い。ある国立大教授は「特許を出せばすぐお金が入ると思っ

ている研究者が多い。市場価値を検討もせずに、何でも特許にしようとする」と指摘する。

「論文を書いていけばいい」という研究者に意識改革を迫った効果はあるが、出願件数だけでは、政府の掲げた目標には遠い。文科省も「出願件数での大学順位づけを公表したが、特許料収入なども含めた総合的な順位づけに変えたい」と話す。

大学発ベンチャーも経営の難しさを抱え、本来業務の教育への悪影響も指摘されている。

国立大の「伝統的体質」の改革も重要課題にのぼっている。経産省の調査では「対応が一本

化されておらず、人ごとで言うことが進む」など、大学への不満が出ている。特に、国家公務員時代の「お上意識」のままで、大学事務部門に対する批判が強い。企業との交渉が満足にできなくて文科省に頼り立ててみたり、「文科省の指導をおおいだ」として、相手方に強引に押しつけようとするなどの非常識な。商法、も自立つ。文科省も「財務、会計などの事務部門が国家公務員時代のひな型に固執し過ぎる」と問題視する。

政府は、国立大の潜在能力に期待し、予算を投入してきたが、その精査も必要だ。