

# 2010物理学序論

## 6. 波のふるまい

2010.6.25, 7.2  
(2011.5.25改訂)

教科書: アドバンスング物理

---

# GSC2017

2017.11.26

## 光とは何か？

## 光とフーリエ変換

教科書: しっかり学べる基礎物理学

担当: 徳永英司

# 光とは何か？

この謎の解明に挑む = 物理学の歴史

# 光学

光とは何か？光速はいくらか？

精密な物理学として最も古い歴史

幾何光学

波動光学(干渉・回折)

電磁気学

光＝電磁波

量子力学、特殊相対性理論 を生む原動力

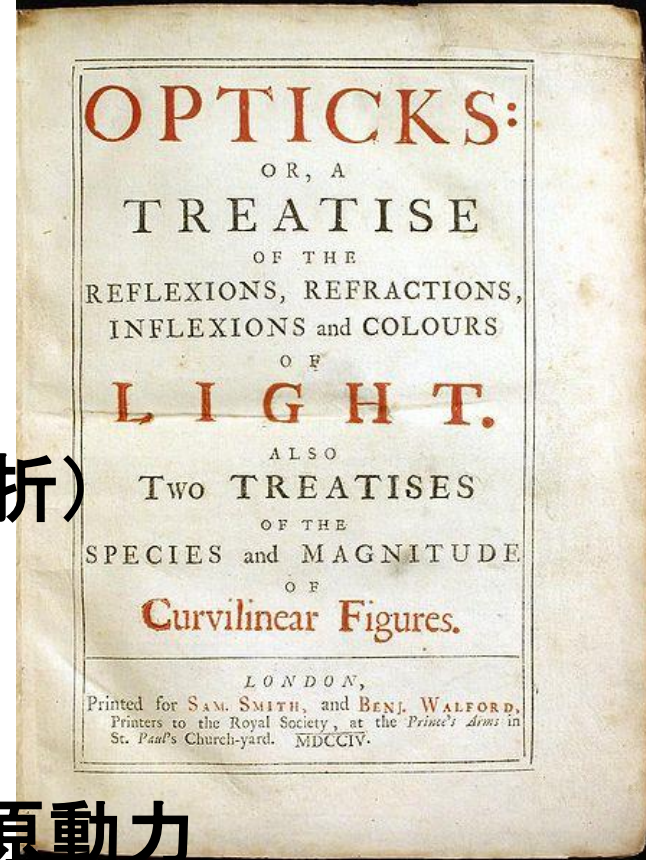
光＝光子

レーザーの発明

非線形光学

量子光学

日進月歩

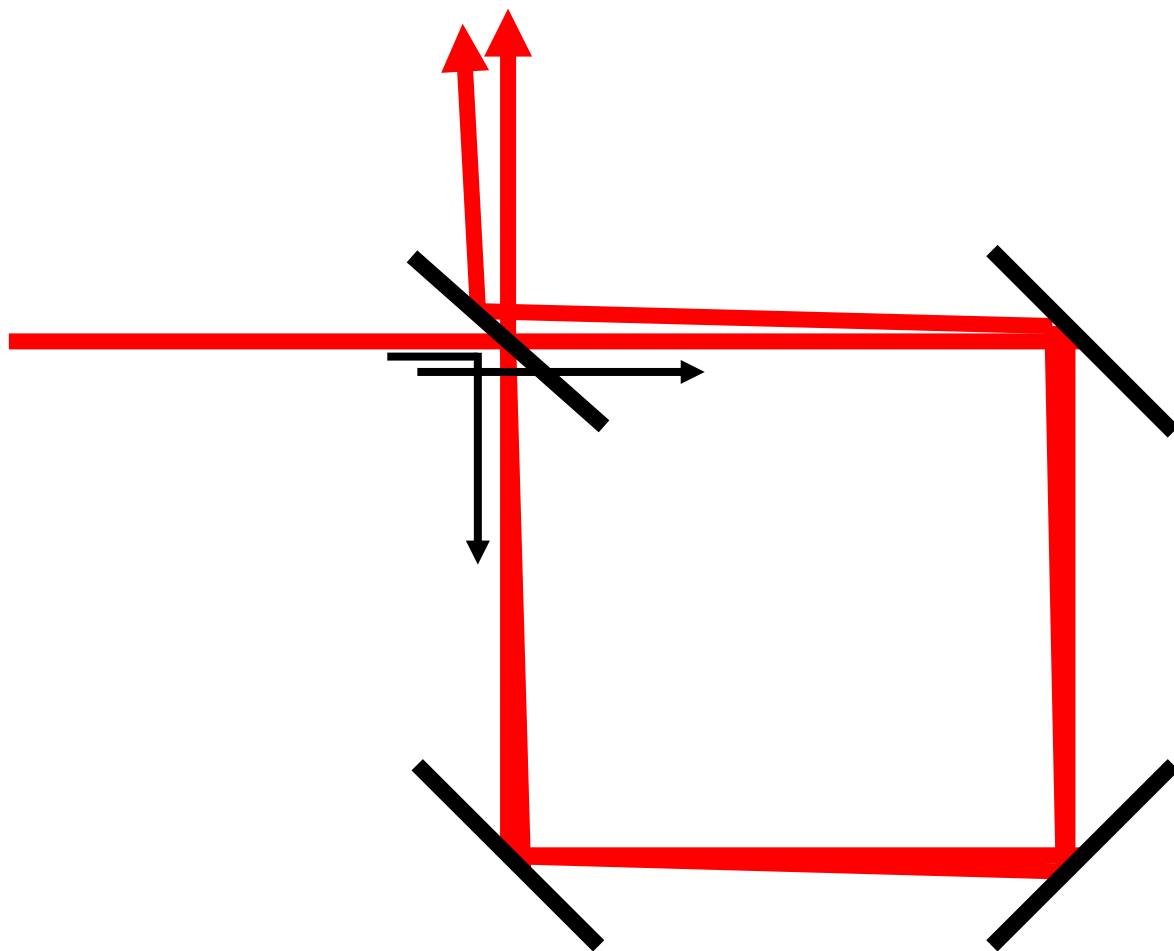


ニュートン  
光学 1704

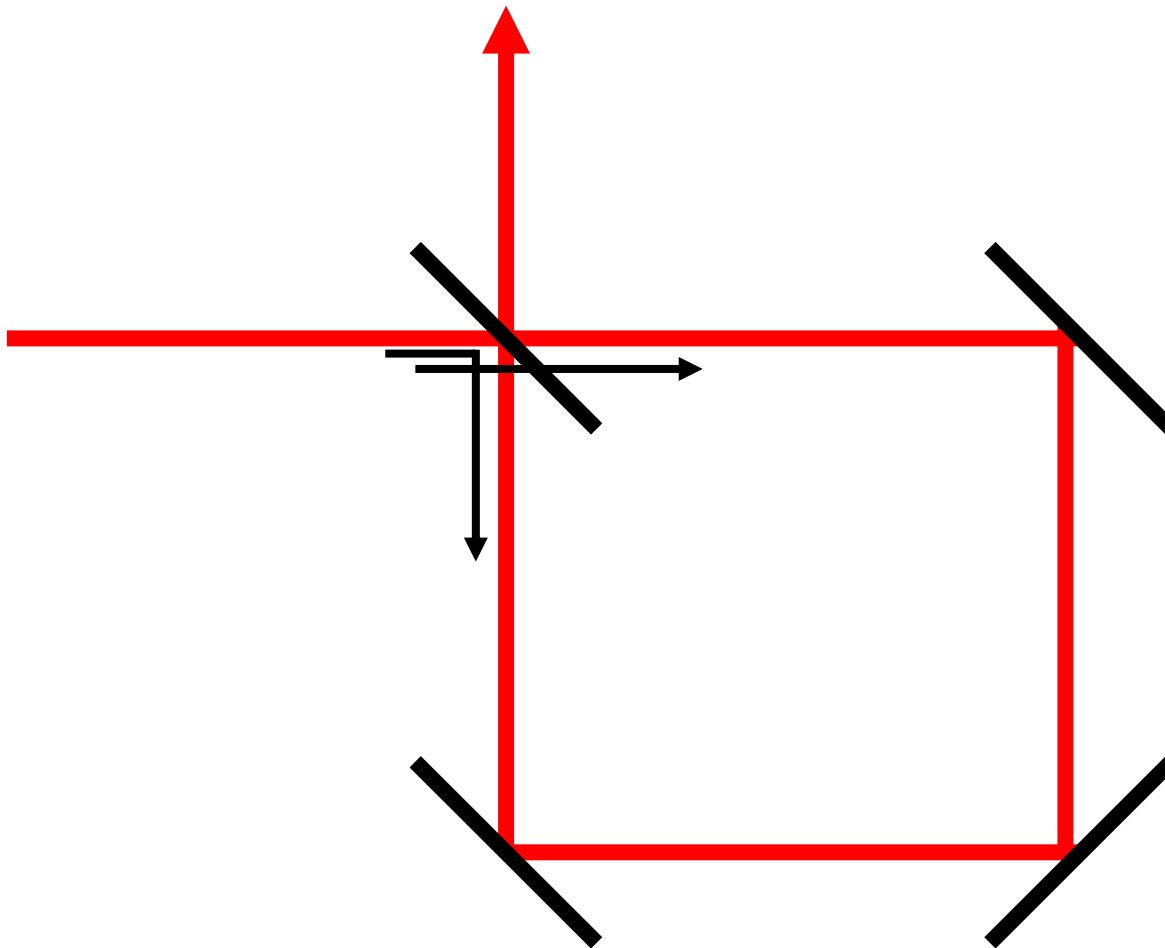
$$1 + 1 = ?$$



# Sagnac 干涉計



# Sagnac 干涉計



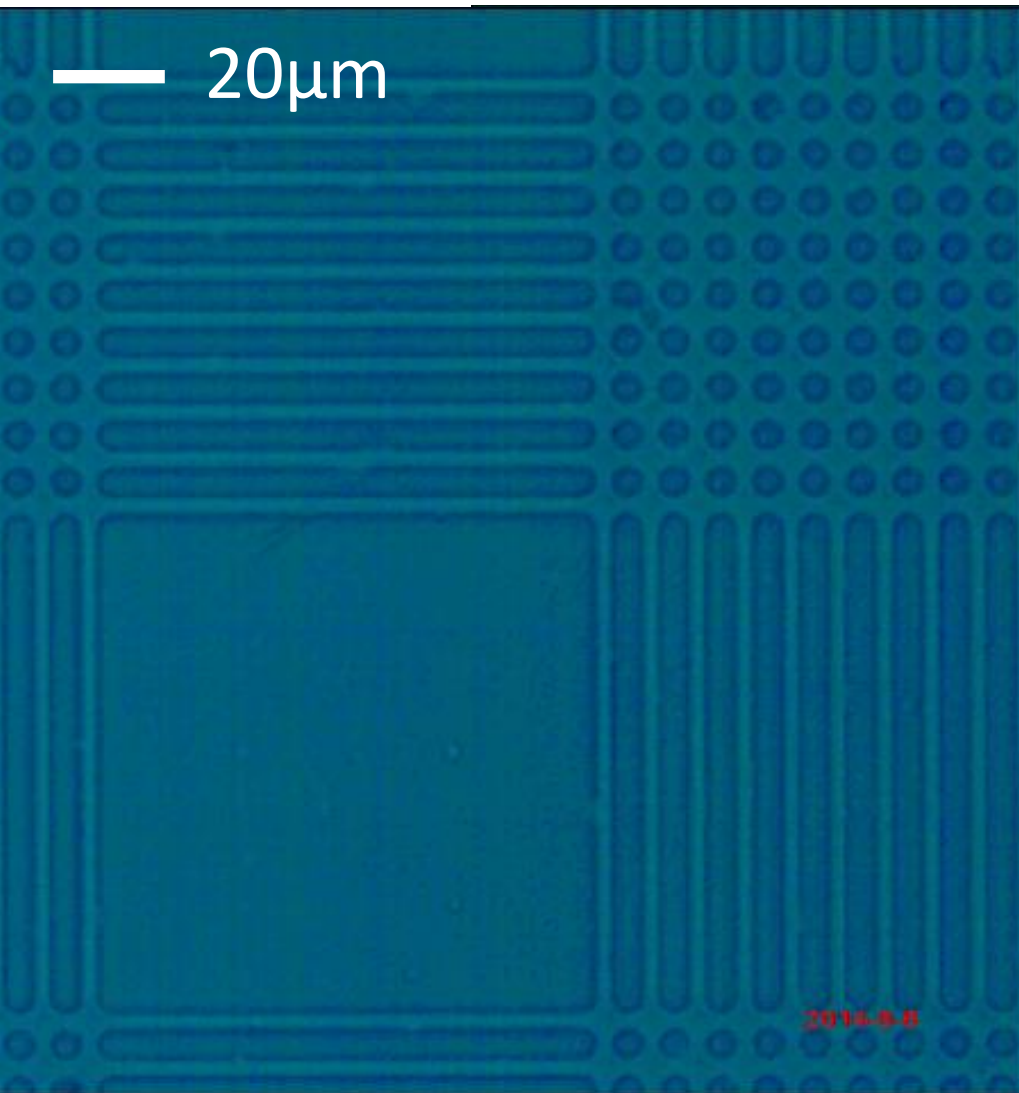
$$1 + 1 = 0 !$$

なぜ？

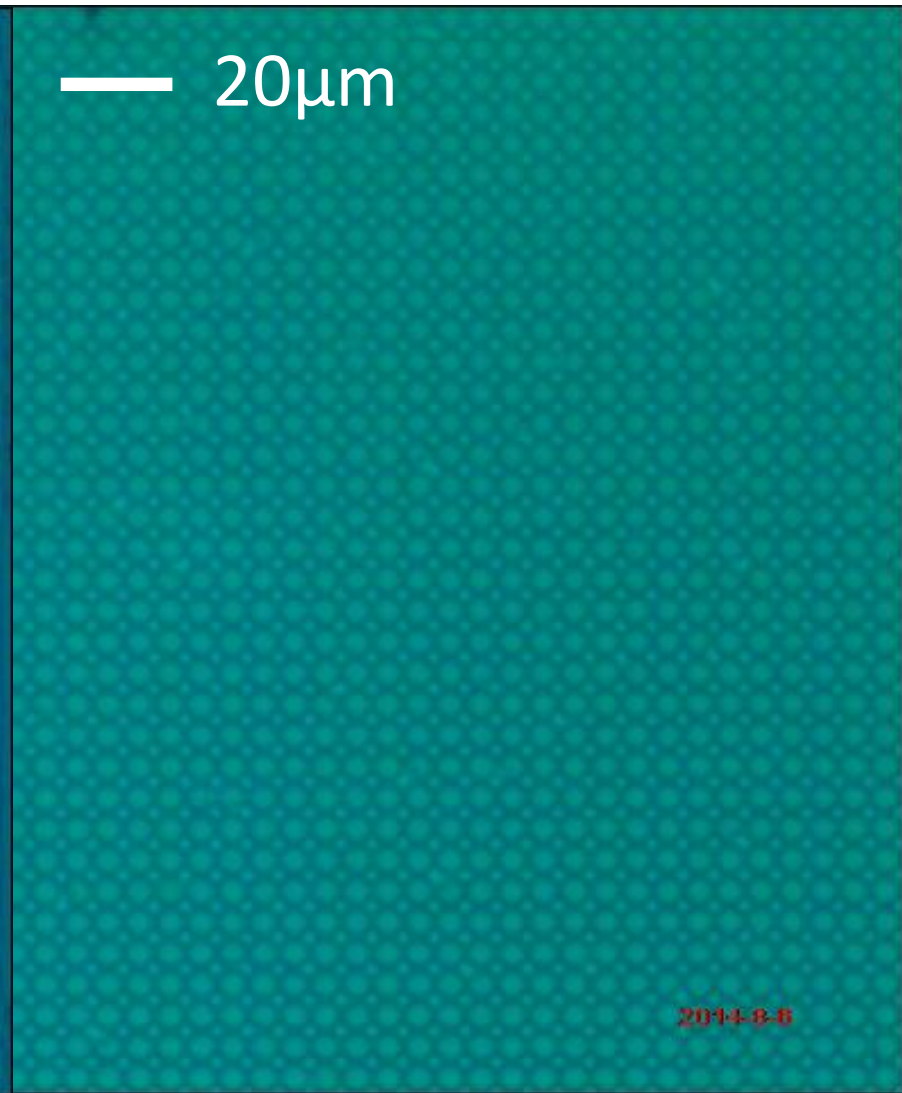
0.1 mm

4

— 20 $\mu$ m



— 20 $\mu$ m



0.1 mm

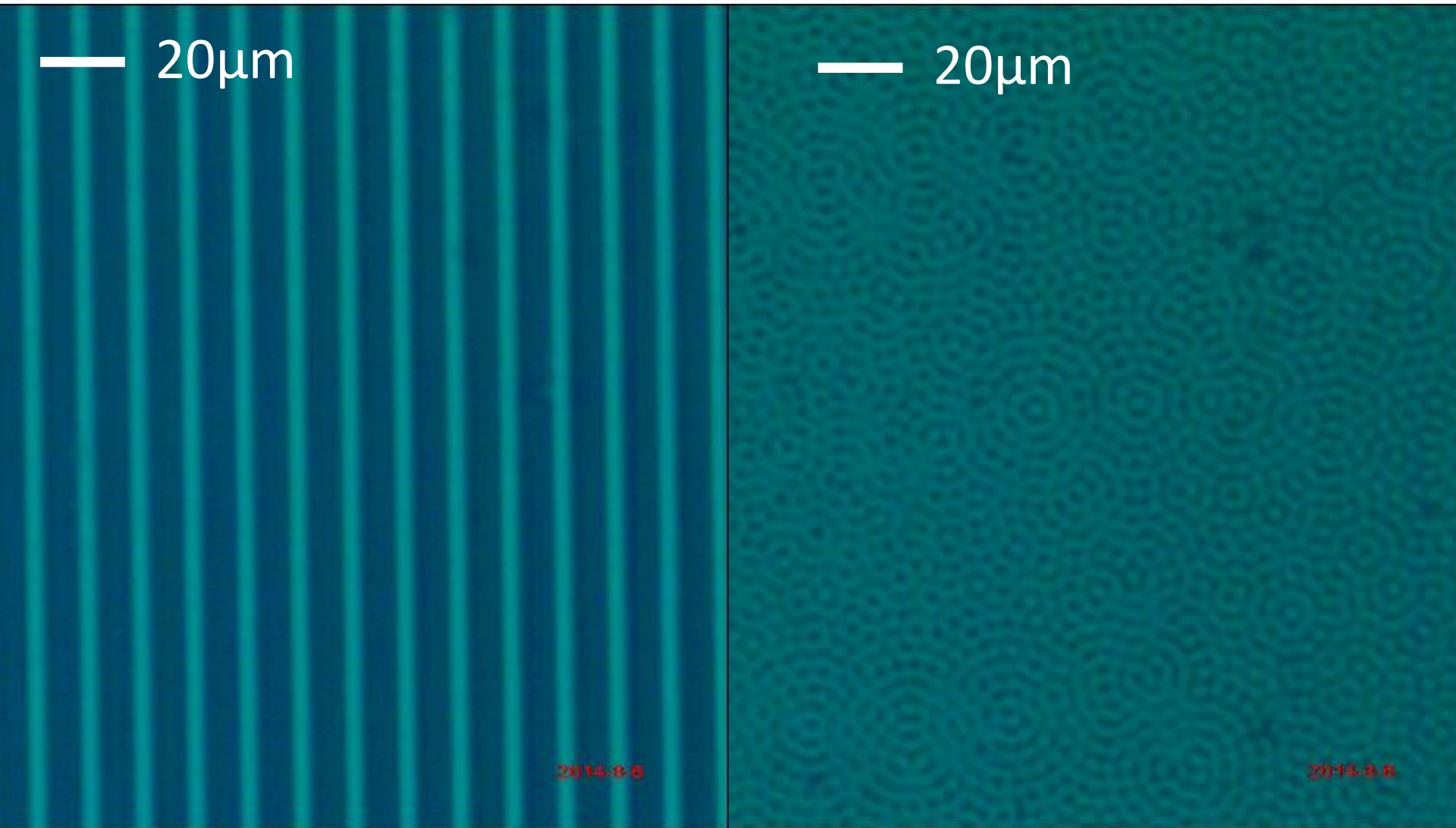
2

— 20μm

— 20μm

2014-8-8

2014-8-8



0.1 mm

1

— 20μm

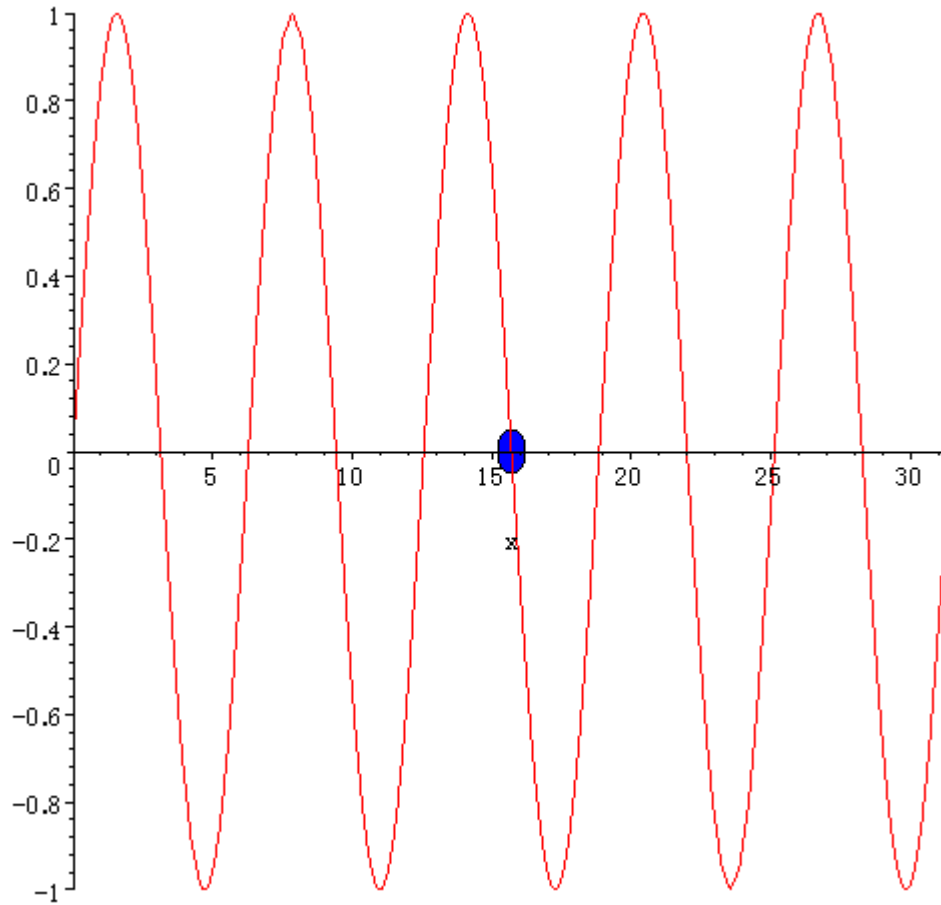
— 20μm

200μm

2014-8-8

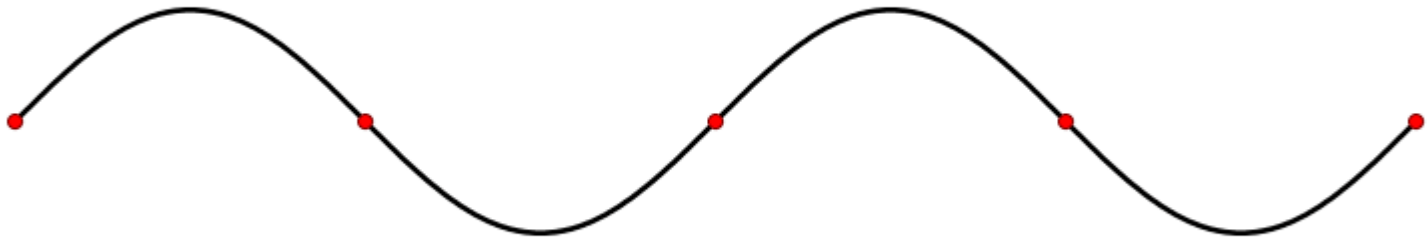


# 光とは 波 である



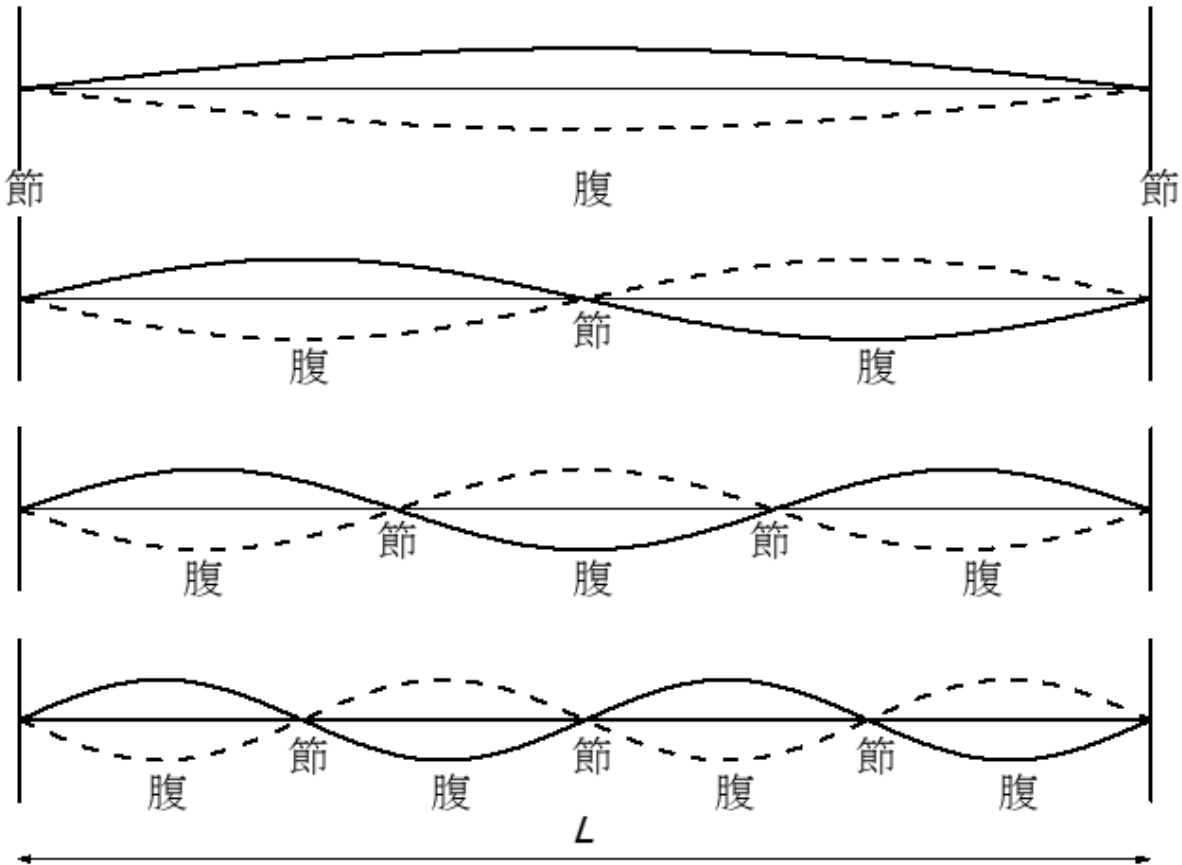
空間分布パターンが伝播する現象  
典型的には 振動 の伝播

大きく振動する場所(腹)  
振動しない場所(節)  
が発生  
なぜ？





固有振動のうち  $n=1$  のものを **基本振動**、 $n=2,3,\dots$  のものを **倍振動** (2倍振動、3倍振動、 $\dots$ ) という。基本振動によって生じる音を **基本音**、倍振動による音を **倍音** (2倍音、3倍音、 $\dots$ ) という。



$$\lambda_1 = \frac{2L}{1} = 2L \quad f_1 = \frac{V}{2L}$$

$$\lambda_2 = \frac{2L}{2} = L \quad f_2 = \frac{V}{L}$$

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3} \quad f_3 = \frac{3V}{2L}$$

$$\lambda_4 = \frac{2L}{4} = \frac{L}{2} \quad f_4 = \frac{2V}{L}$$

# 波の種類

水波

音波(疎密波)

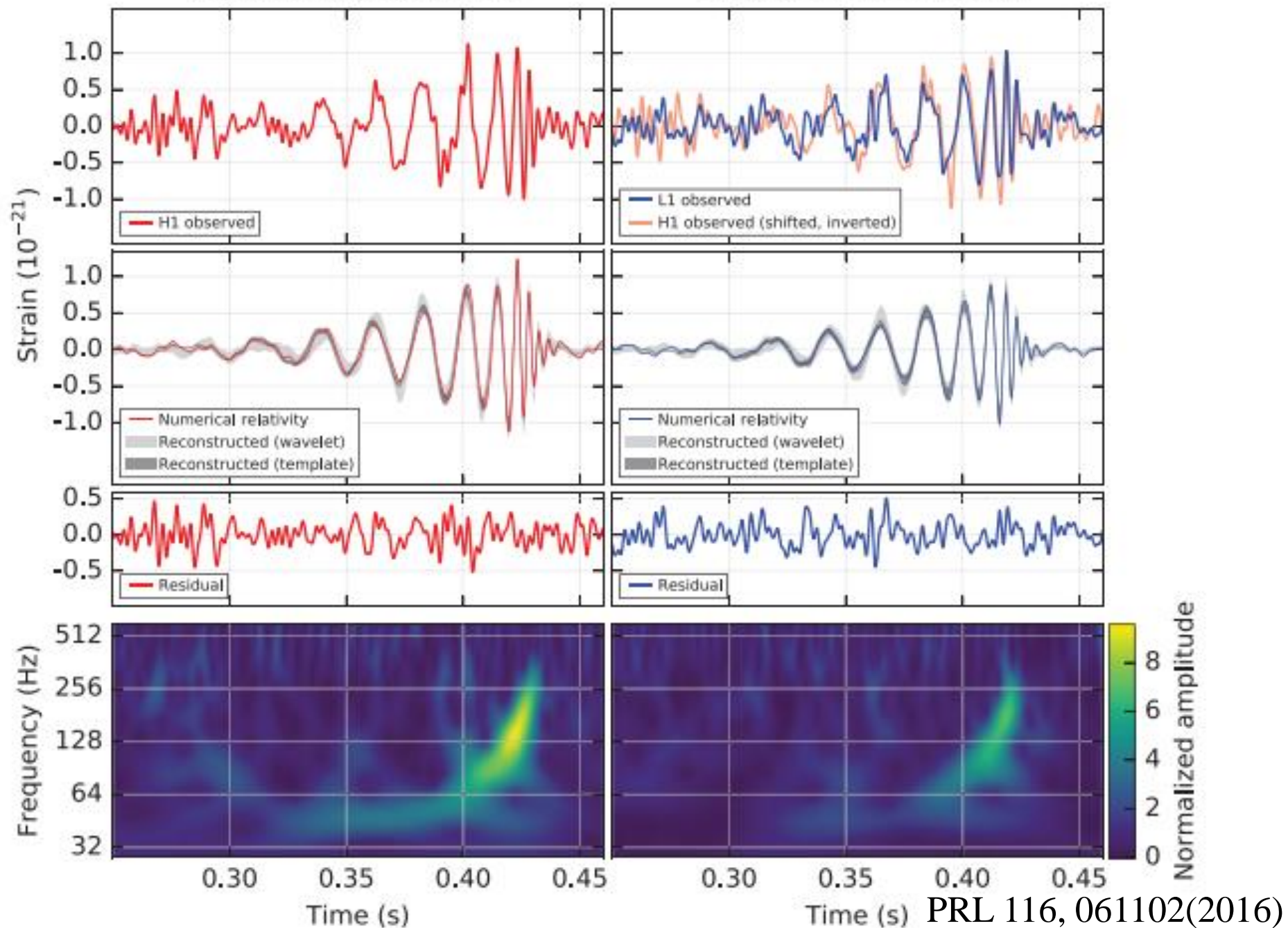
地震波(弾性波)

光波(電磁波)

重力波(時空の歪みの波)

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.

$h=10^{-21}$ 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

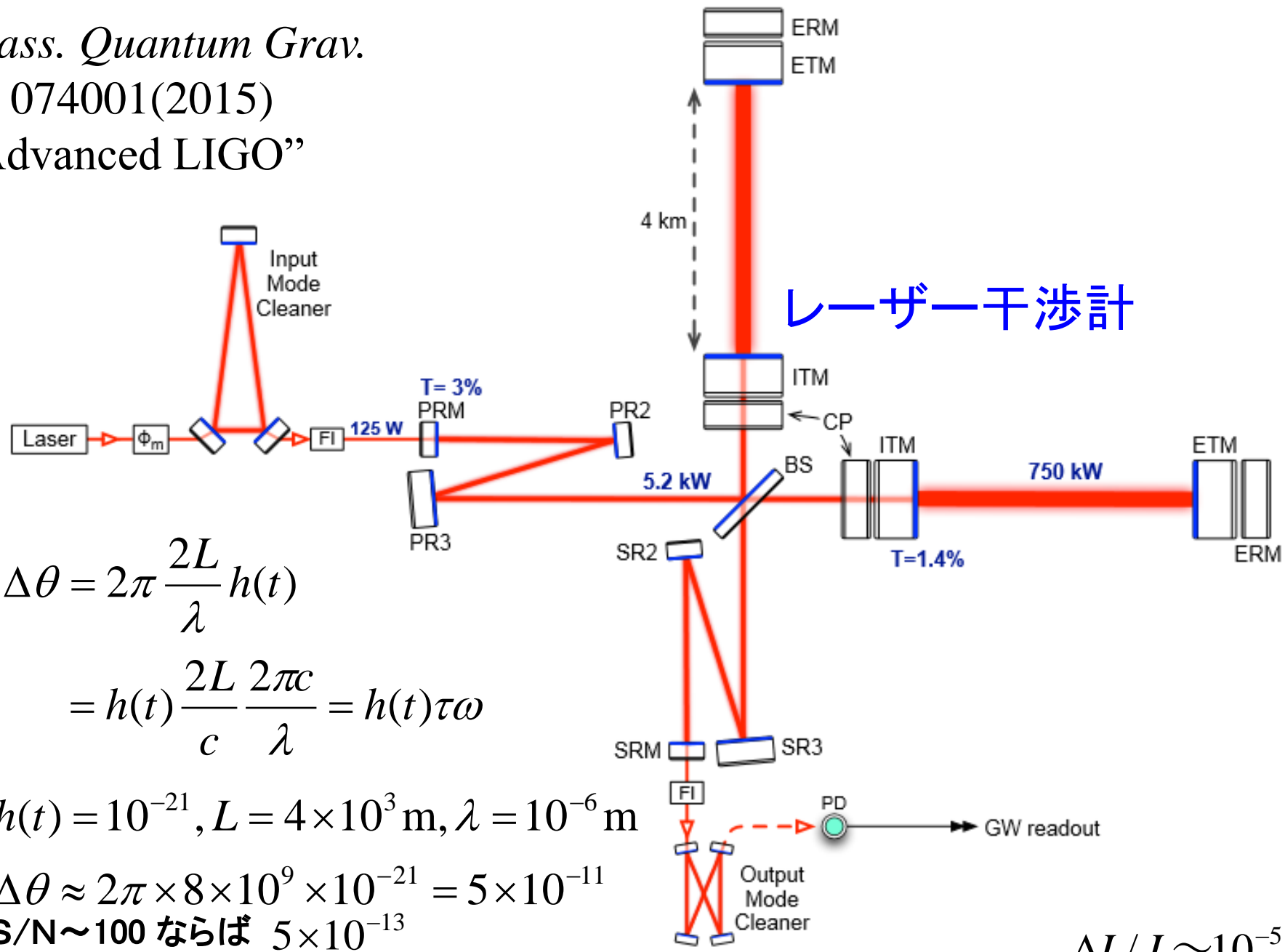
Nuclear diameter  $10^{-15}$  m

どうやって検出したか？

Class. Quantum Grav.

32 074001(2015)

“Advanced LIGO”



レーザー干渉計

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

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

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

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

S/N ~ 100 ならば  $5 \times 10^{-13}$

$\Delta I / I \sim 10^{-5}$

徳永研 Sagnac干渉計光熱偏向分光法  $\Delta\phi \sim 5 \times 10^{-11}$  (S/N ~ 1の検出限界)

# LIGO

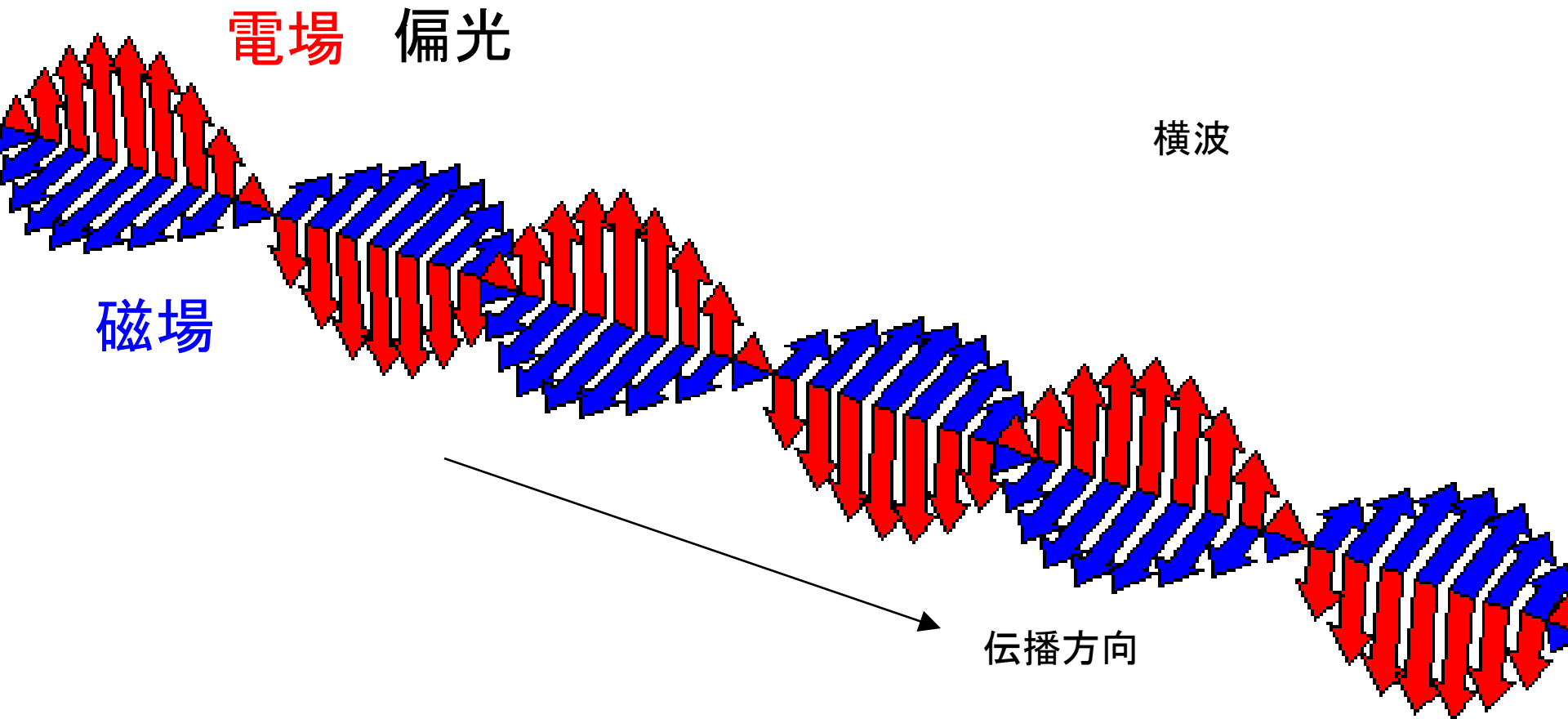
- 目的
    - Initial LIGO: 基本技術の実証、可能なら重力波検出
    - Advanced LIGO: 重力波の初検出
  - Initial LIGOからAdvanced LIGOへの改造
  - 総予算: 約1,000億円 (Advanced LIGOを含む)
  - LIGO Scientific Collaboration
    - 研究機関: 約100
    - 研究者: 約1,000名
  - NSFの強力なサポート
- 重力波検出の原理と世界各国の検出器  
by 川村静児

LIGO

徳永研干渉計

$$1000\text{億円} = 50000 \times 200\text{万円}$$

# 光は電磁波である





# 電磁波の波長

γ線 X線 紫外線 可視光 赤外線 電波



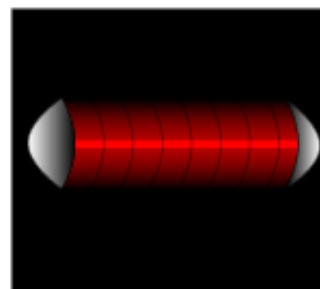
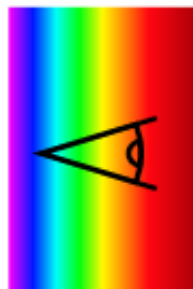
0.01nm



1nm

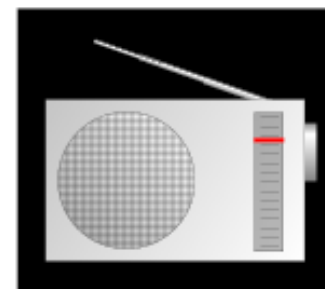


100nm



1μm

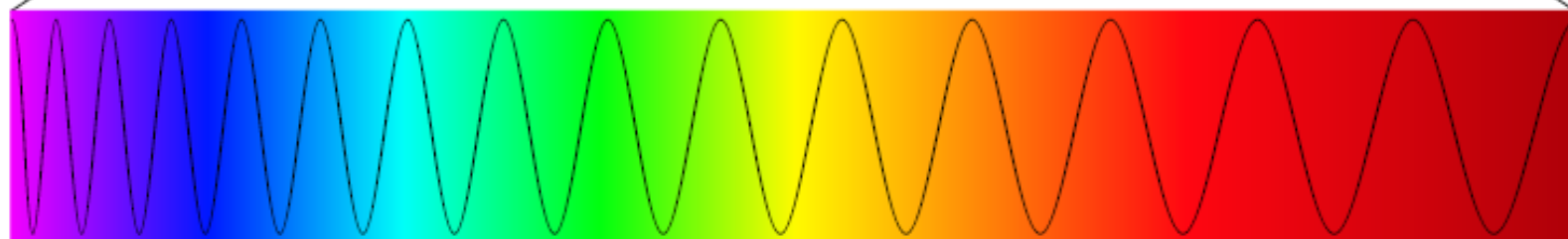
1m  
m



1m

1km

電子レンジ 2.45GHz 12.2cm  
携帯電話 2.1GHz  
1.5GHz  
0.8GHz 37.5cm

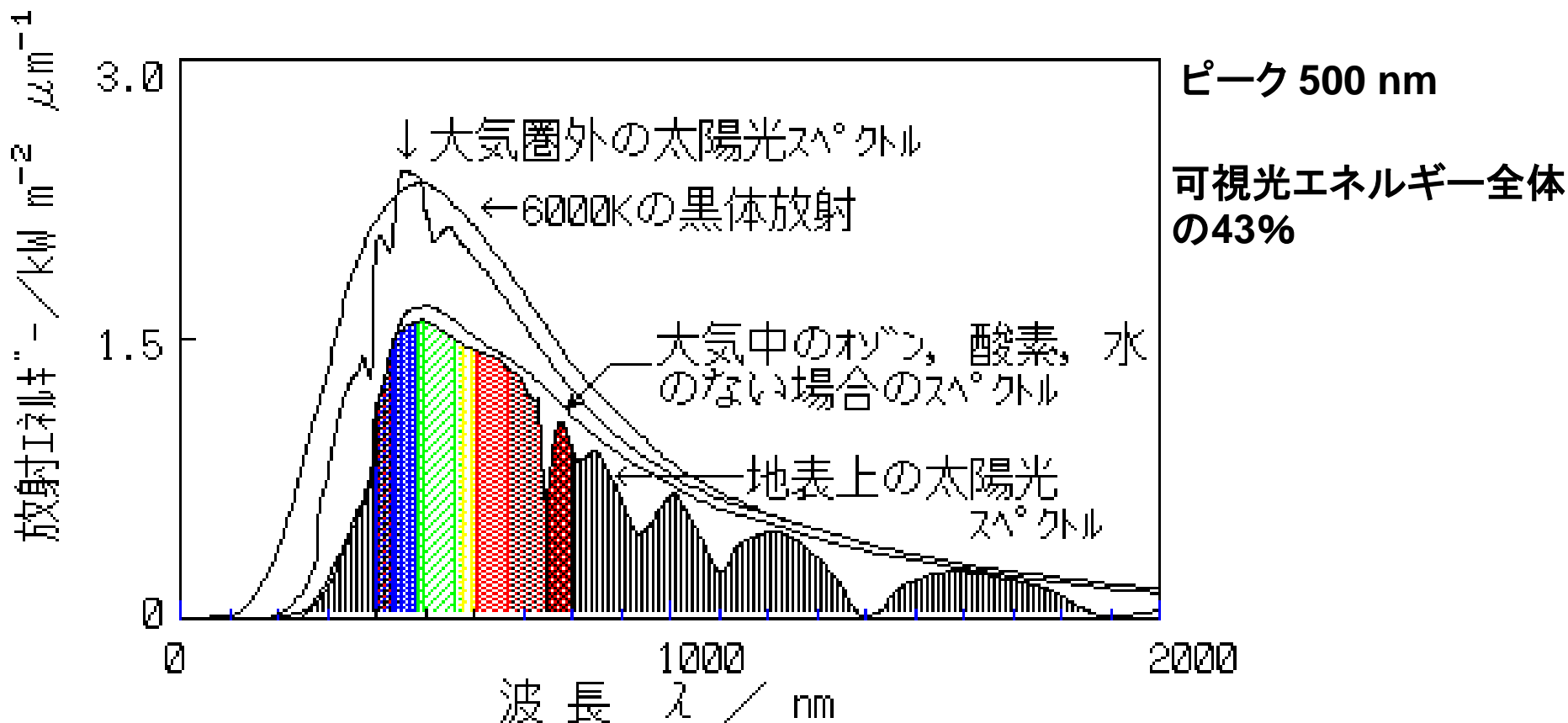


400 nm

800 nm

なぜ電磁波の狭いエネルギー範囲  
400 nmから800 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)

# 質問(光、光と物質)

光はどのように伝搬するか？

光はどのように生まれ、消えるのか？

なぜ吸収、反射、屈折、回折が起こるのか？

光子とは何か？

光が粒子である証拠？光子1個の明るさとは？

レーザー光とは？普通の発光と何が違う？

空が青く、雲が白いのはなぜ？

# 質問

透明な物質が1より大きい屈折率を持つのはなぜ？  
なぜ光の色(波長)により屈折率に違いが出るのか？

ホイヘンスの原理:なぜ後退波が存在しないか？

通信・放送の原理は？

なぜ光通信が大容量データ通信に有利なのか？

光学顕微鏡の空間分解能とは？

光の波長で制限されるのはなぜ？

光を使った回折限界を超える超解像とは？

# 質問

光はなぜ三原色？

可視光の波長が400～800nmなのはなぜ？

植物が緑なのはなぜ？

二酸化炭素、水蒸気が温室効果ガスなのはなぜ？  
(酸素・窒素は温室効果ガスでない)

# 質問

電磁波の放射に必要な条件はなにか？それはなぜなのか？根本原理を問う

物質の光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？

なぜ磁場というものが存在するのか？ 点磁荷がないのに。点電荷しかない世界なら電場だけでよいのではないか？

そもそもなぜ電磁場というものがこの世に存在するのだろう

# 質問

ホログラフィーと写真の違いは何か？

2次元のホログラムから3次元像が再生される？

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？

負の屈折率とは何だろうか？

透明マントはどうすれば実現できるだろう

光の一方通行はどうすれば実現できる？



光を  
光で  
光で  
光で  
光を  
光を  
光で  
光で  
光で  
光で  
光で  
光で  
光で  
光で  
光で

# 光の利用

情報

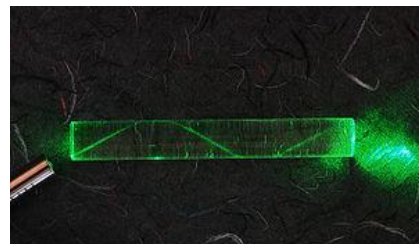
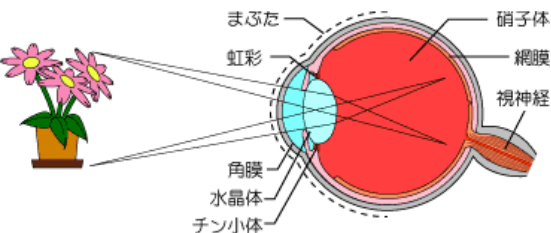
視覚

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

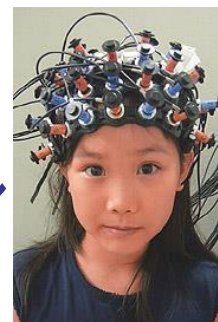
光触媒

力(運動量)

光ピンセット

光冷却

ソーラーセイル



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

# 無尽蔵の太陽エネルギー

太陽光エネルギー	地球表面	$3.0 \times 10^{24}$ J/year
人類のエネルギー消費量		$3.0 \times 10^{20}$ J/year
地球上の光合成量		$3.0 \times 10^{21}$ 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  $1366 \text{ W/m}^2$

× 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  $1.2 \times 10^{13} \text{ W}$ .

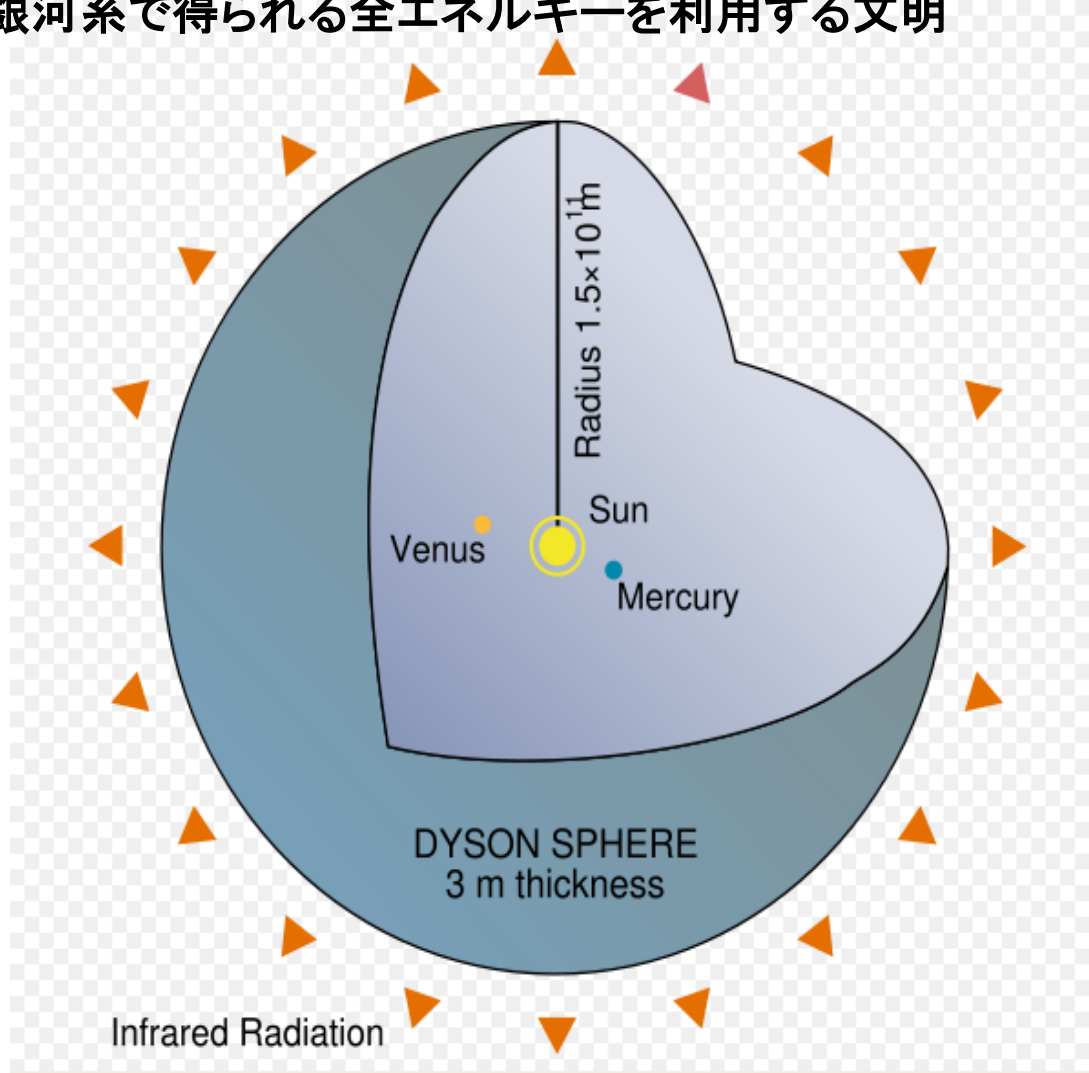
$3.8 \times 10^{20} \text{ J/year}$

# ダイソン球

## 宇宙文明の段階

カルダシェフ

- タイプI 一つの惑星上で得られる全エネルギーを利用する文明
- タイプII 一つの恒星系で得られる全エネルギーを利用する文明
- タイプIII 一つの銀河系で得られる全エネルギーを利用する文明



# 人類の文明の現在と将来

地球に降り注ぐ太陽光エネルギーの  
 $1/10^3 \sim 10^4$ のエネルギーを利用

タイプ0.7文明          カール・セーガン

現在のペースの経済成長が続けば

タイプIまでに100～200年

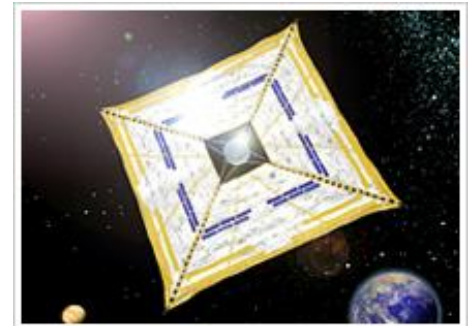
タイプIIまでに1000～5000年

タイプIIIまでに10万～100万年

# ソーラーセイル実証機イカロス

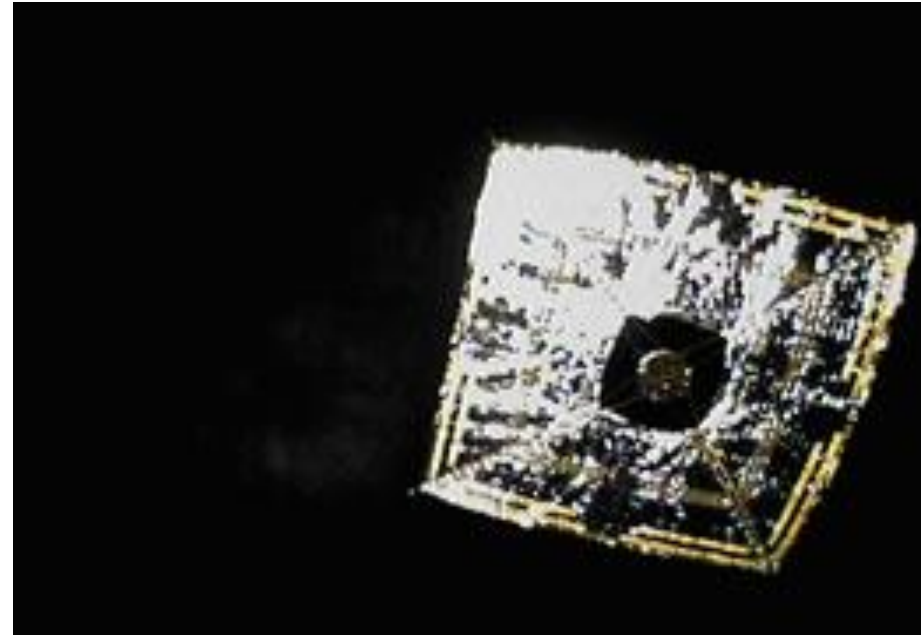
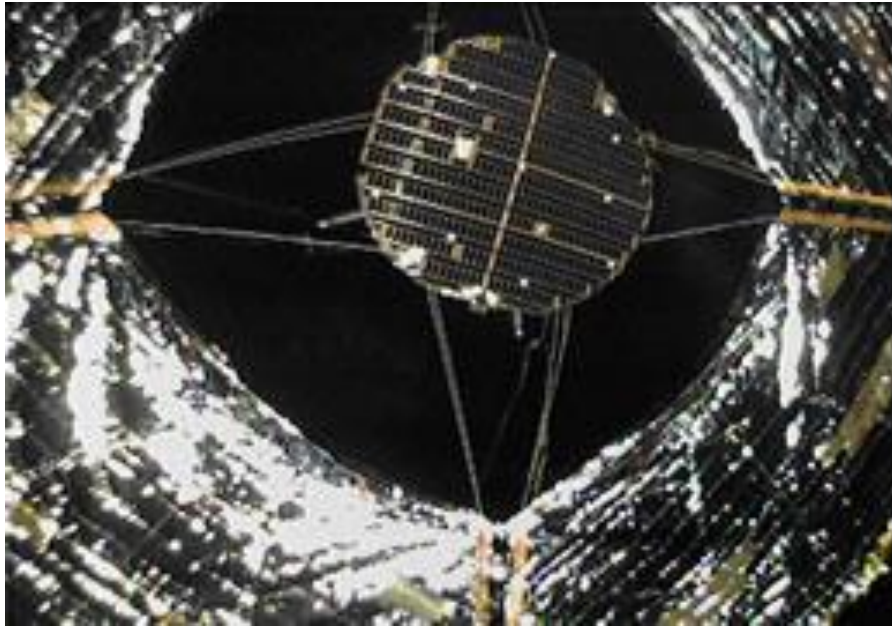
宇宙航空開発機構(JAXA)は、2010年度に種子島宇宙センターから、小型ソーラ電力セイル実証機「IKAROS(イカロス)」を金星探査機「あかつき(PLANET-C)」と相乗りでH-IIAロケットにより打ち上げる予定です。

「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

# 分光測定

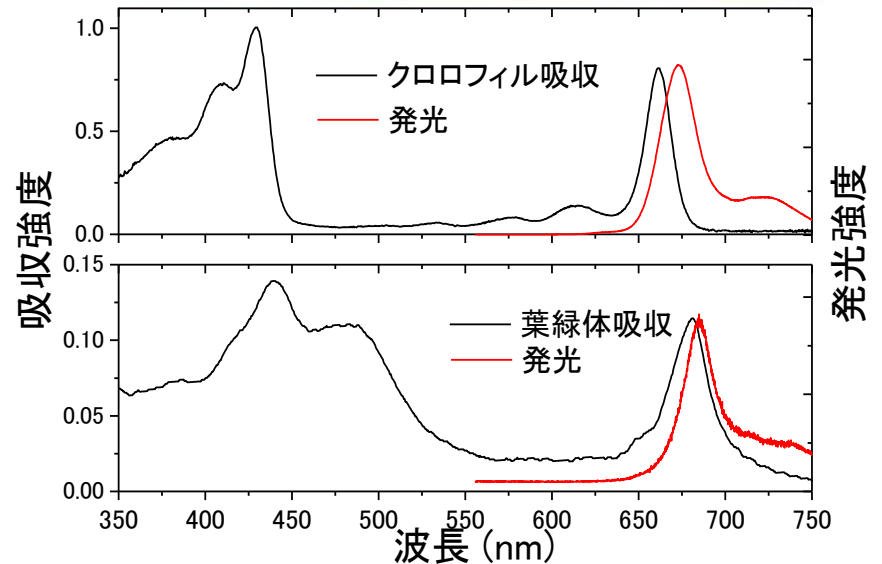
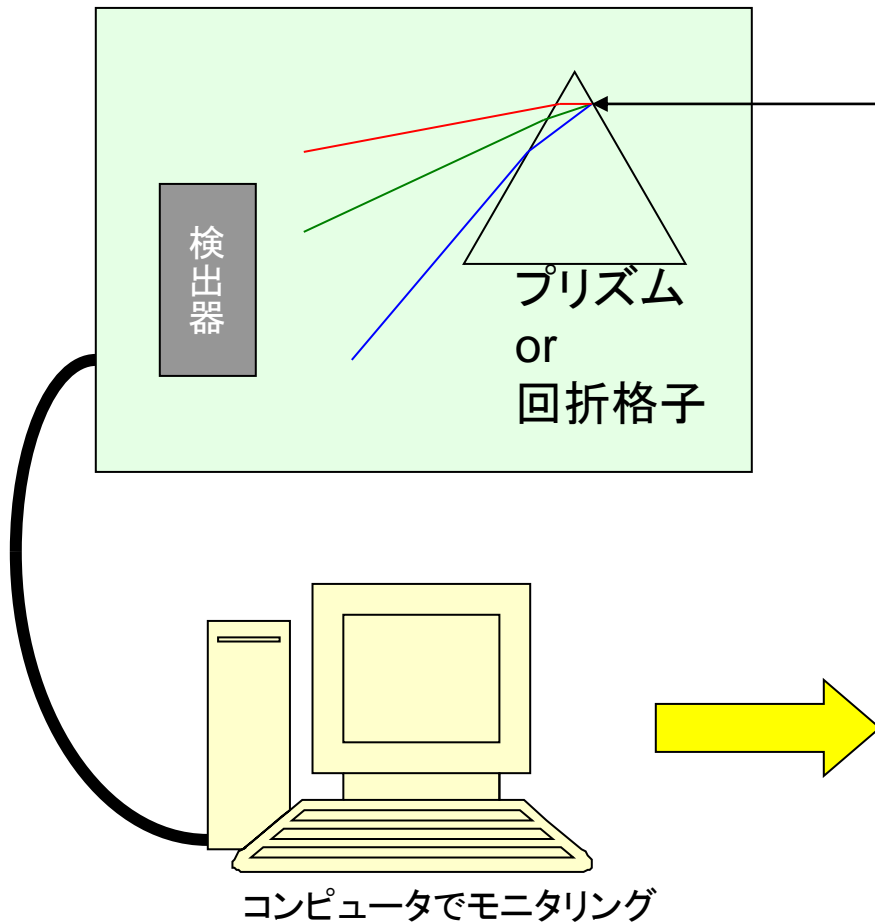
時間 周波数

光波のスペクトル分解

$$f(t) \Rightarrow F(\omega)$$

時間波形を周波数スペクトルに

フーリエ変換



$$c = f\lambda \quad \text{光速} = \text{振動数} \times \text{波長}$$



# 最近20数年の革新技術

光-物質相互作用による光(物質)の制御

光の新しい自由度

微小共振器ポラリトン

量子情報

光の軌道角運動量

フォトニック結晶(ファイバー)

スクイズド光

ベクトルビーム

電磁誘起透明化

量子コンピュータ

補償光学

回折限界を超える

量子テレポーテーション

Opto Genetics

近接場分光

量子もつれ光子対

2次元分光

二光子顕微鏡

単一光子光源

STED (Stimul. Emission Depletion) 顕微鏡 超短パルス技術

負の屈折率 超レンズ 透明マント

高次高調波

プラズモニクス 光誘起相転移

コヒーレント制御

ボーズ・アインシュタイン凝縮

光周波数標準 光コム

レーザー冷却、光トラップ、光格子

レーザー光による分子操作

Optomechanics、トラクター(牽引)ビーム

テラヘルツパルス

シリコンレーザー、セラミックレーザー

アト秒パルス

太陽光励起レーザー、X線レーザー

レーザー航跡場加速

マイクロチップレーザー、ナノレーザー

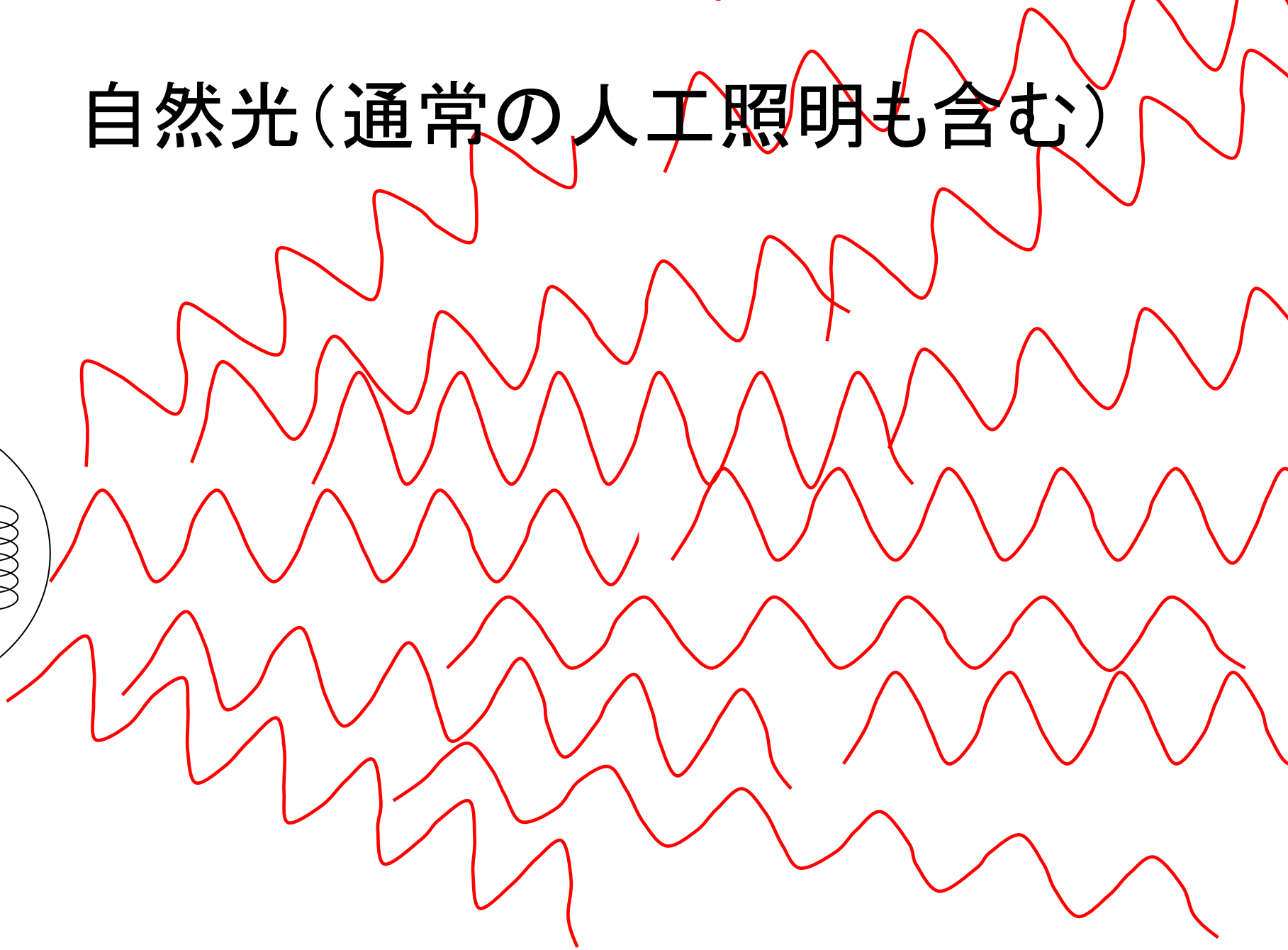
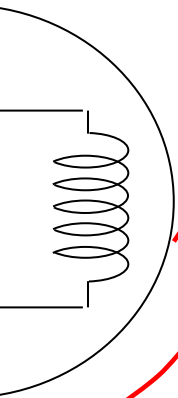
高エネルギー、素粒子物理

ファイバーレーザー、光流体(Optofluidics)

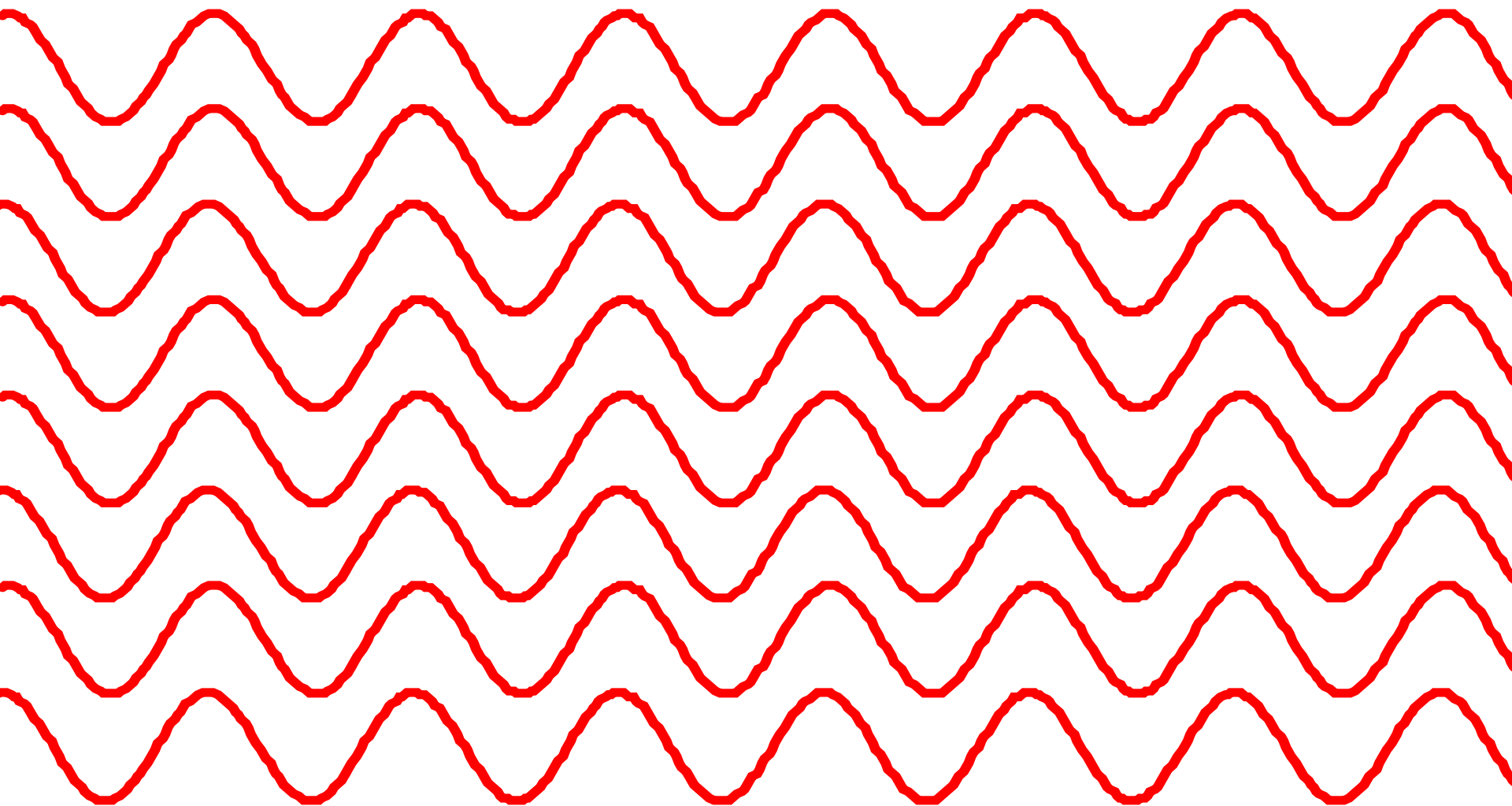
ブラックホール

人類が作り出した夢の光 レーザー

自然光(通常の人工照明も含む)



# レーザー光



# 人類が作り出した夢の光 レーザー

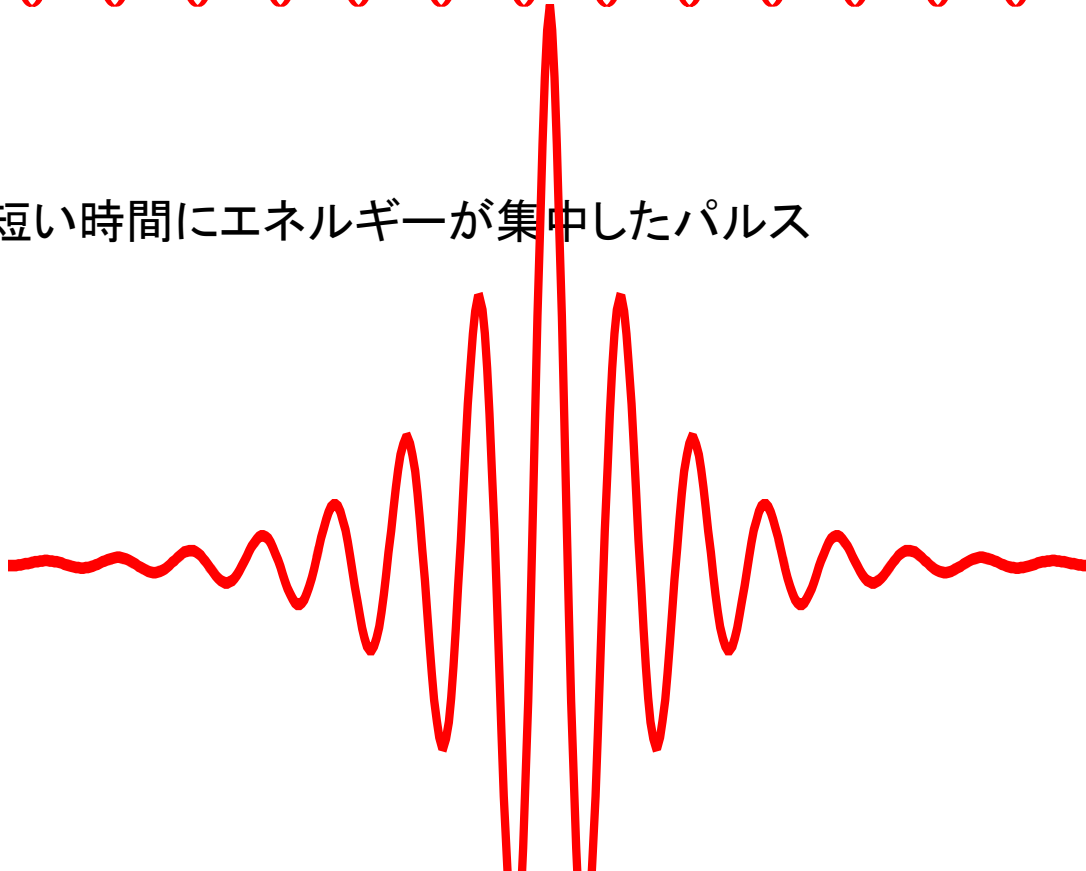
$\omega$

エネルギーが特定の周波数(波長)に集中

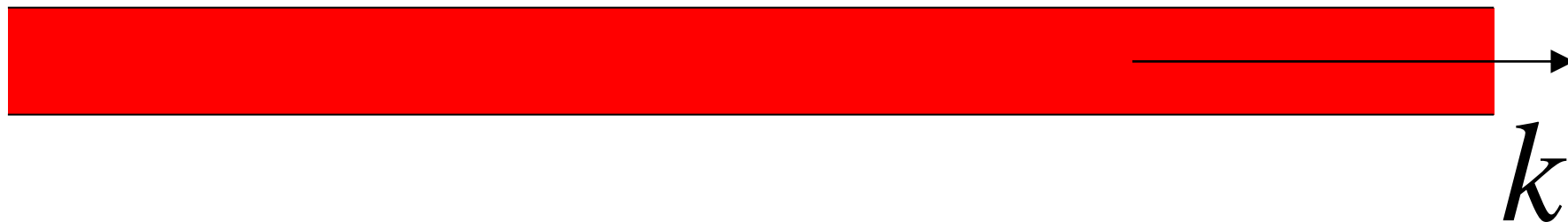


非常に短い時間にエネルギーが集中したパルス

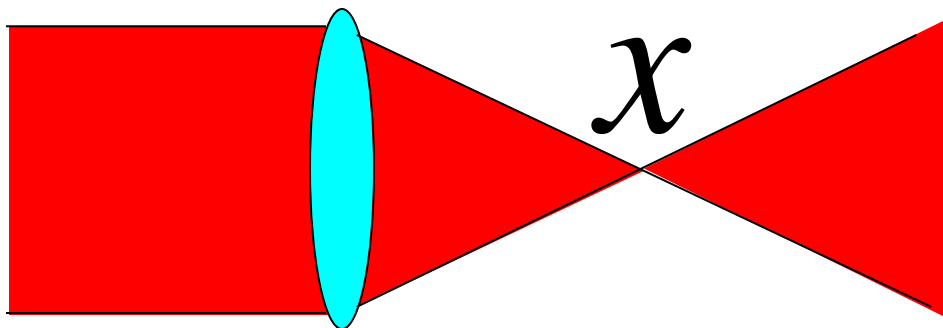
$t$



一定の方向( $k$ )にエネルギーが集中(いつまでも広がらないで進む)



狭い空間に集光(エネルギーを集中)することができる



特定の $\omega, t, k, x$  にエネルギーを集中できる

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

$$\sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

角周波数 $\omega = \frac{2\pi}{T}$     波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

# 光を理解するために

光はどのように空間を伝わっていくのか？

光はどのように生まれて、消えるのか？  
(光は物質とどのように相互作用するか)



# 光を理解するために

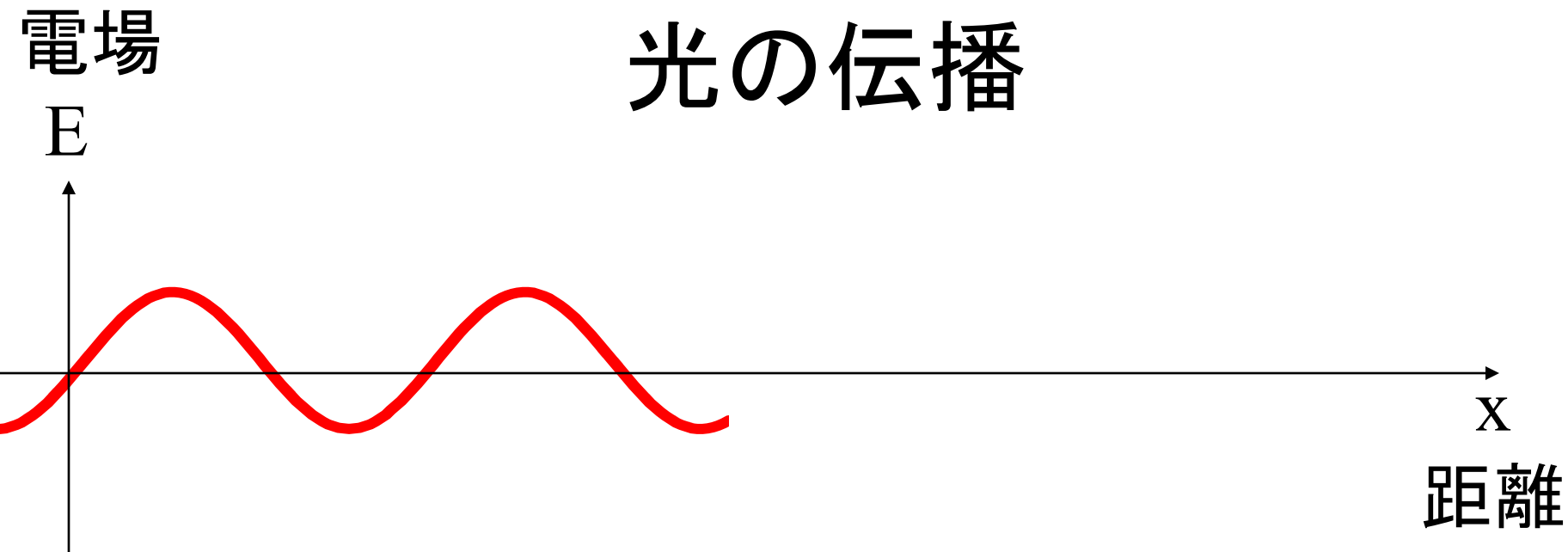
光はどのように空間を伝わっていくのか？

光はどのように生まれて、消えるのか？  
(光は物質とどのように相互作用するか)

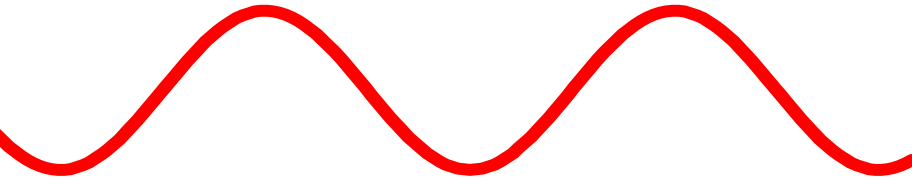
# 光の伝播

p.98-101, 110

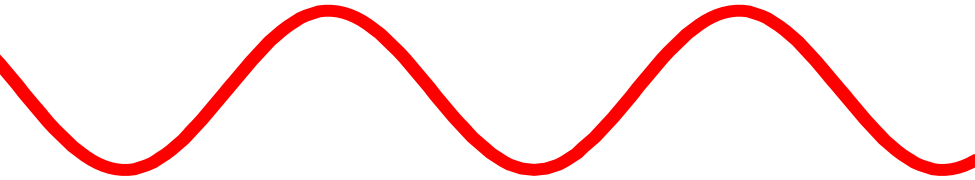
# 光の伝播



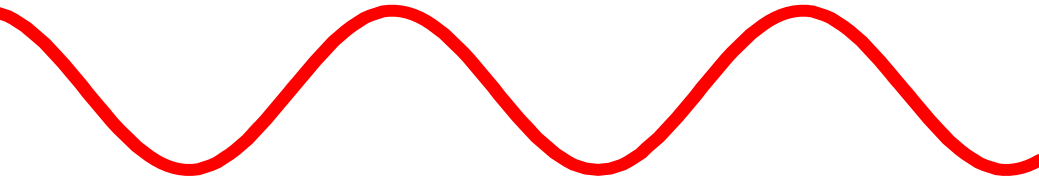
# 光の伝播



# 光の伝播



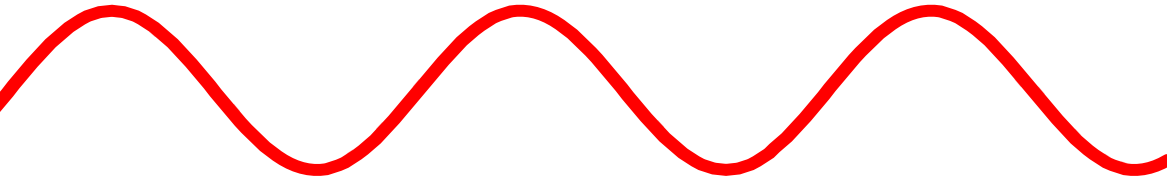
# 光の伝播



# 光の伝播

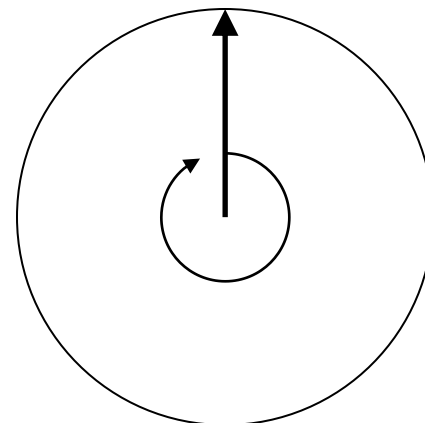
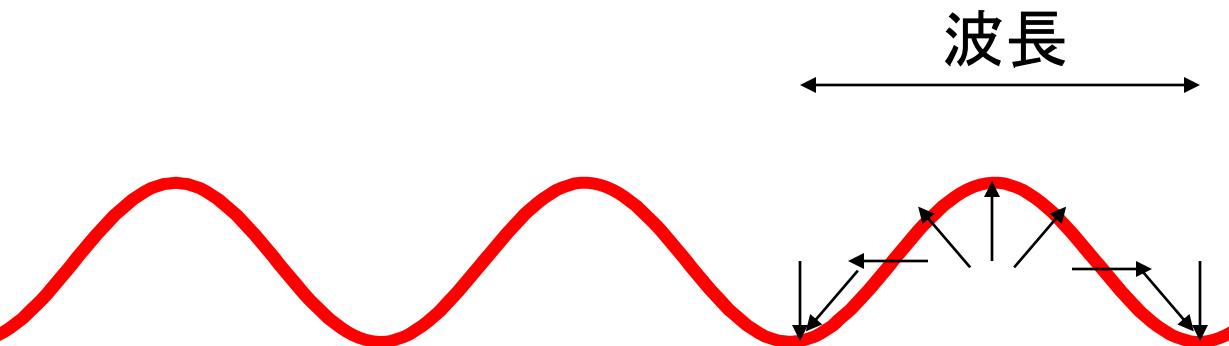


# 光の伝播



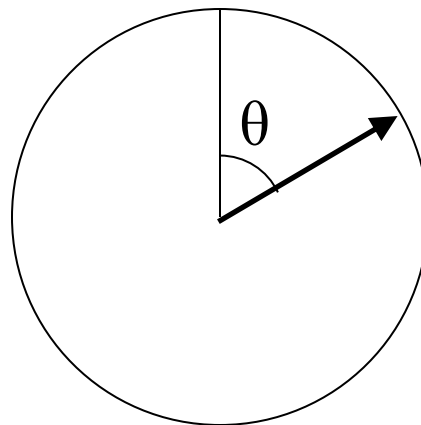


# 光の伝播



波が1波長(1周期)すすむと  
矢印が1回転

矢印がどの角度にあるかを  
“位相”と呼ぶ



# 位相とは？（国語辞典）

周期的に繰り返す現象の1周期のうち、ある特定の局面

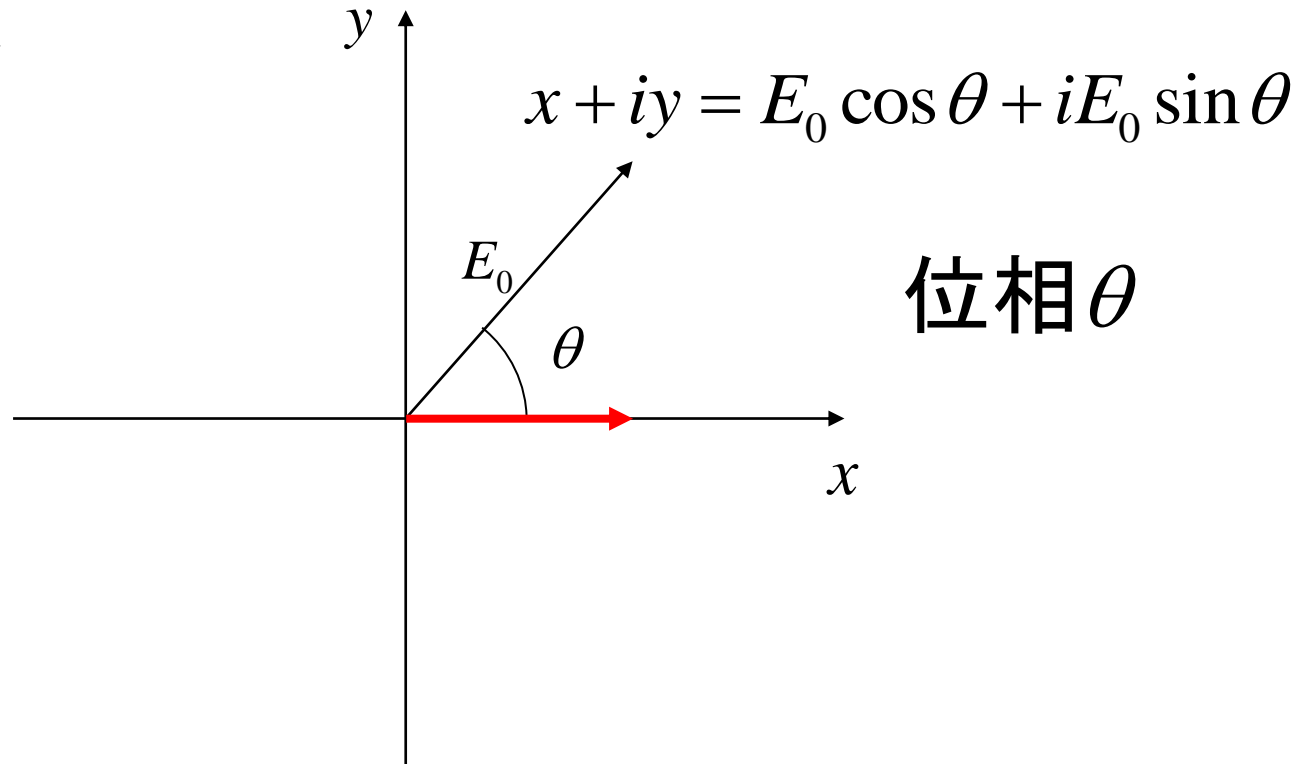
周期関数における変数の値

# 波の振幅の複素表示

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

観測されるのはこの実部

$$\text{Re } E = E_0 \cos \omega t$$



# 波の波数（はすう、wave number）

$$E = E_0 \cos \theta$$

空間周波数とも呼ばれる

$$= E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right) = E_0 \cos(\omega t - kx)$$

$$= E_0 \cos\left(2\pi f t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

$$= E_0 \cos\left[2\pi\left(ft - \frac{x}{\lambda}\right)\right]$$

$$= E_0 \cos\left[2\pi f\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$$

$$= E_0 \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$$

$$\text{波数 } k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$$

$v = c$  光速 のとき

$$\omega = kc$$

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

# 可視光の波数

$$\lambda = 500\text{nm}$$

$$\frac{k}{2\pi} = \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{1}{500\text{nm}}$$

$$= \frac{1}{500 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$= \frac{1}{500 \times 10^{-7} \text{ cm}}$$

$$= 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$$

1cmあたり20000個の波を持つ(20000波長)

# 物質中と真空中の波数の間の関係

真空中の光速  $c$

物質中の光速  $v = c/n$

$n$ : 屈折率

物質中の波数  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = n \frac{\omega}{c}$

真空中の波数  $k_0 = \frac{\omega}{c}$       真空中の波長  $\lambda_0 = \frac{2\pi}{\omega} c$

$\therefore k = nk_0 \quad (\lambda = \frac{\lambda_0}{n})$

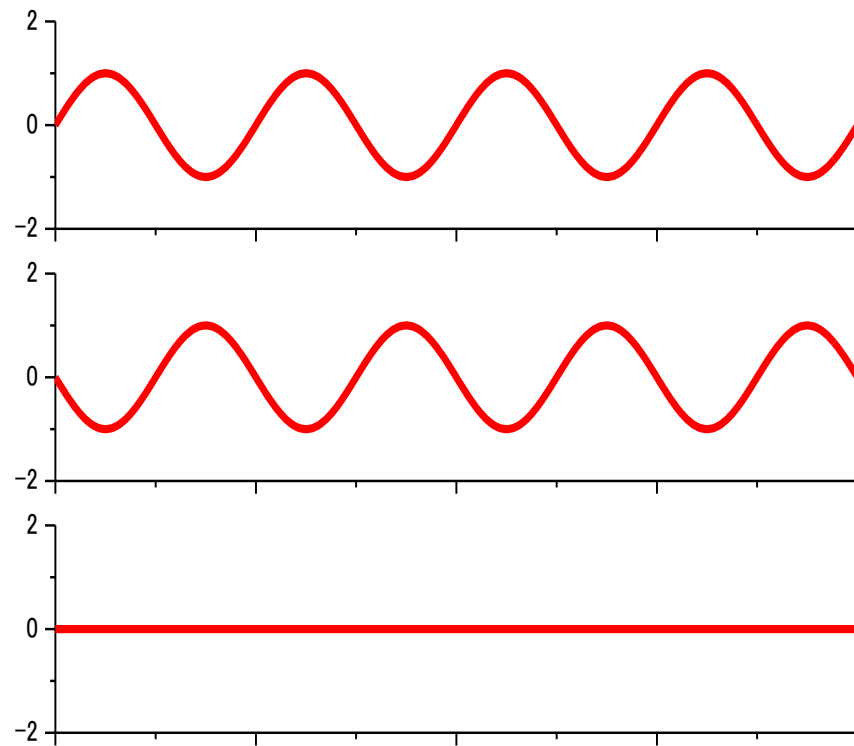
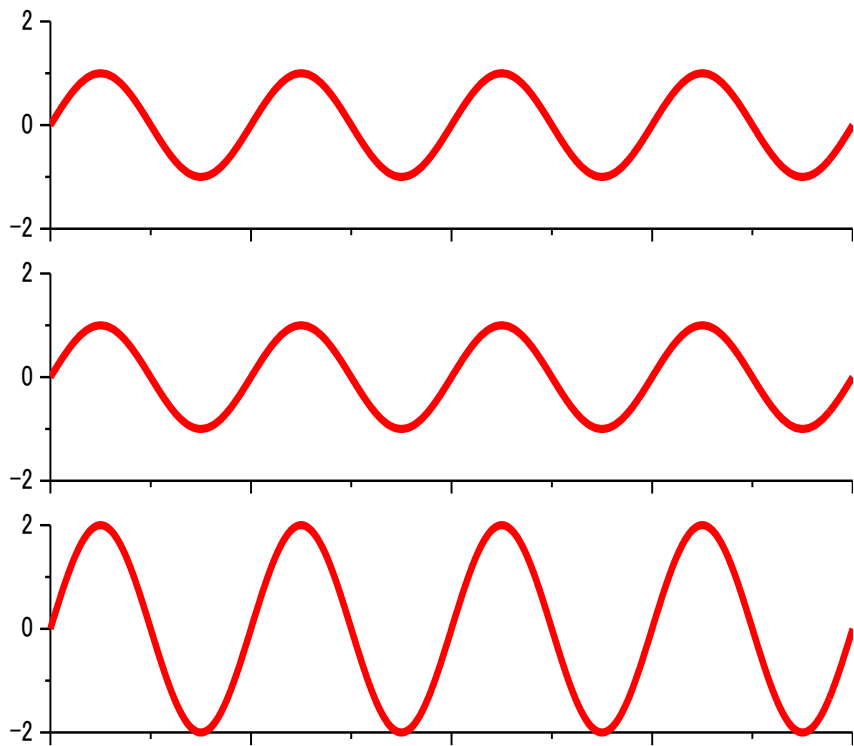
# 光の干渉

教科書p.104, 108,132-139

# 波の干渉

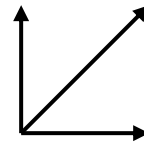
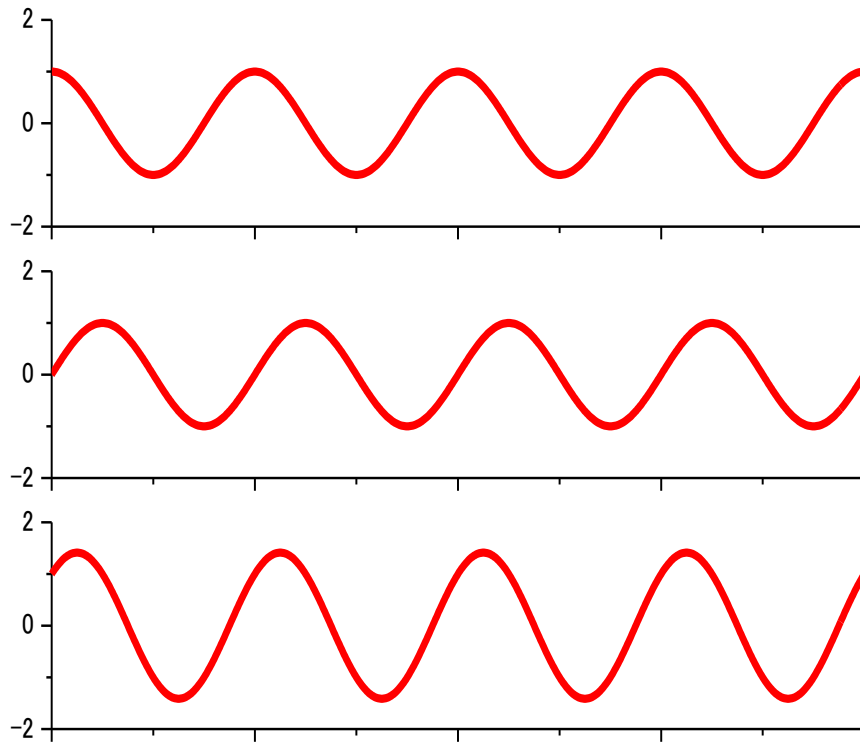
↑ ↑  
同位相で強め合う

↑ ↓  
逆位相で弱め合う





# 波の干渉



90度位相差

$$1 + 1 = 0 !$$

離れているとき  $(+1)^2 = 1$        $(-1)^2 = 1$

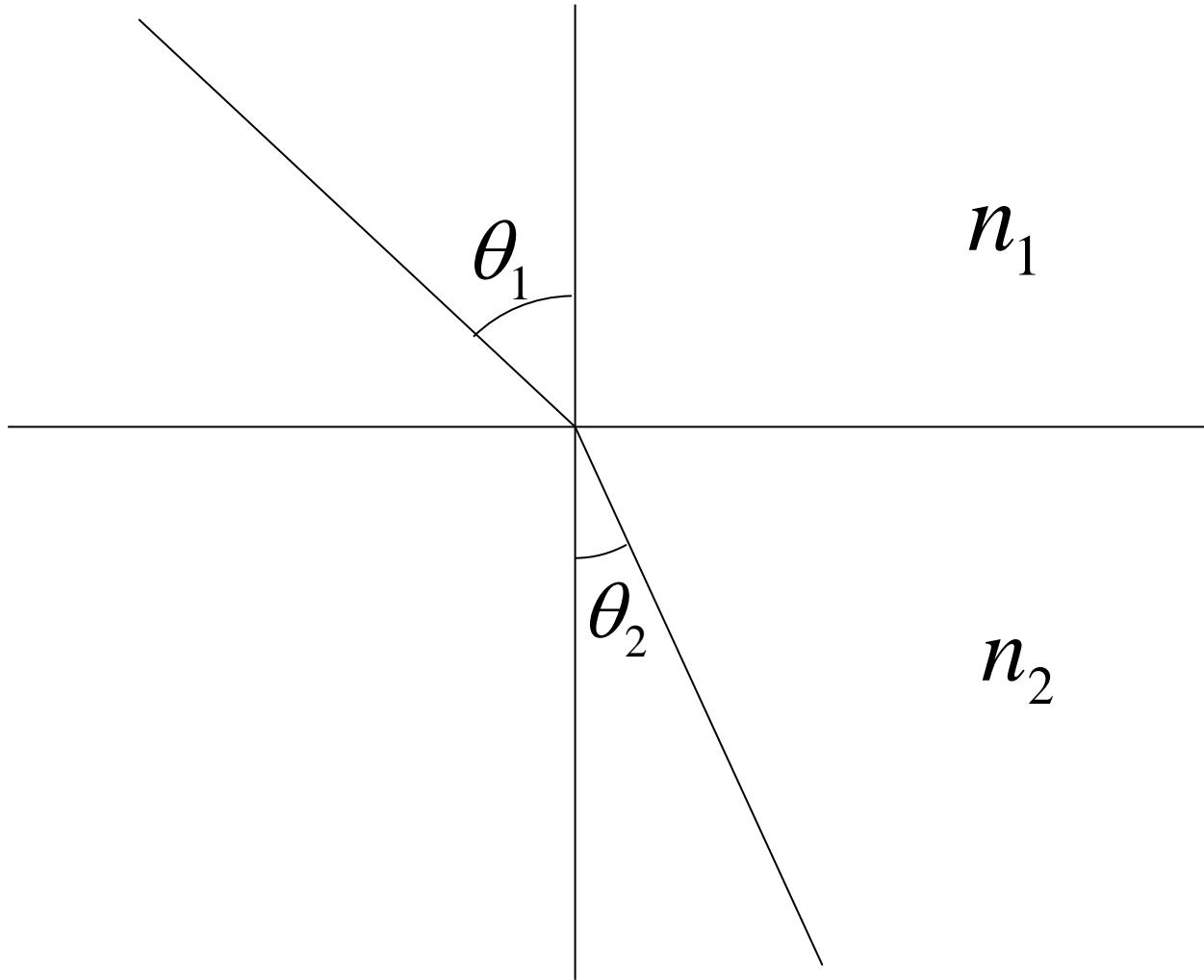
重ねたとき  $(+1-1)^2 = 0$

# 光の屈折

教科書p.111, 123,131

# 屈折の法則

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



# 光を波として ホイヘンスの原理で理解できる

教科書p.108-111

物質の屈折率を $n$ として、物質中の光速 $v=c/n$ ならば

なぜ透明物質に屈折率の違いがあるのか？屈折率の起源は？  
なぜ光の速度が遅くなるのか？

光の回折

回折格子

教科書p.109,134

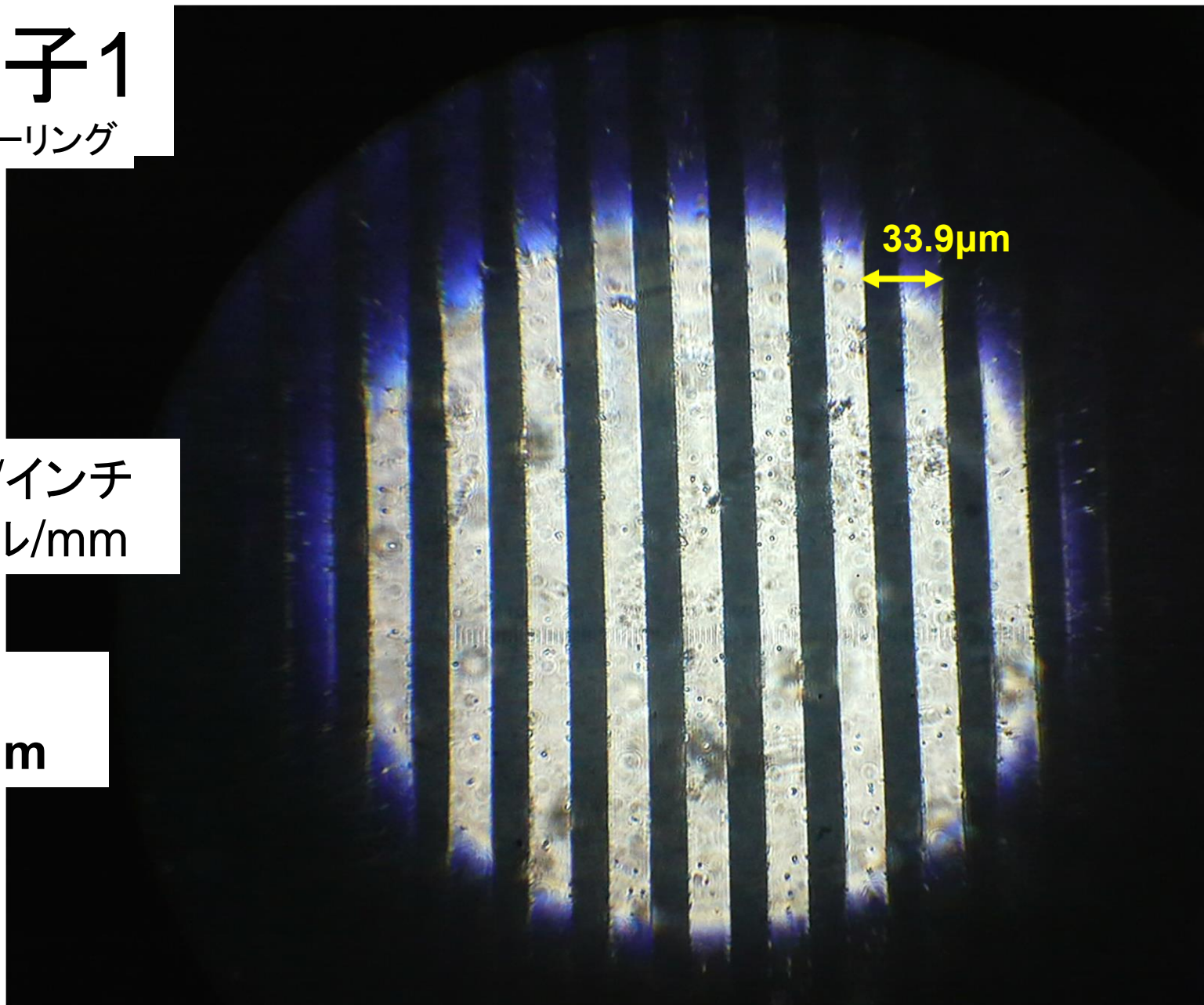
# 回折格子1

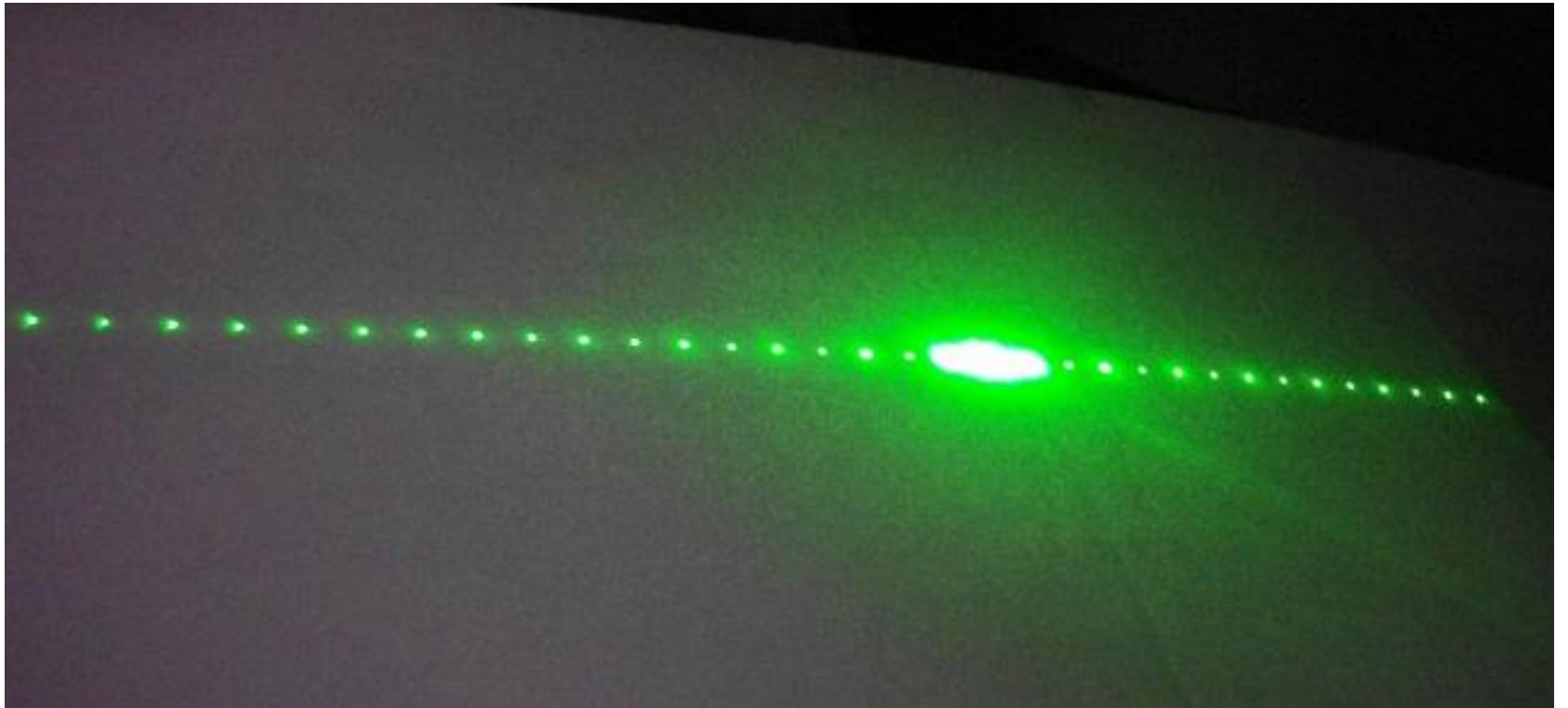
ロンキールーリング

750サイクル/インチ  
29.52サイクル/mm

1周期  
33.9 $\mu$ m

33.9 $\mu$ m

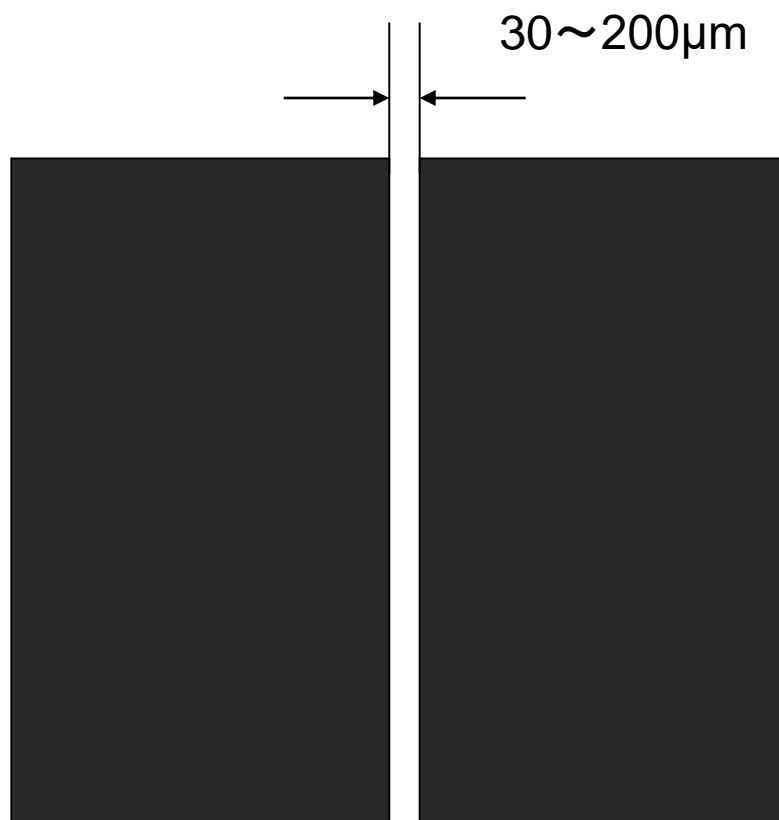






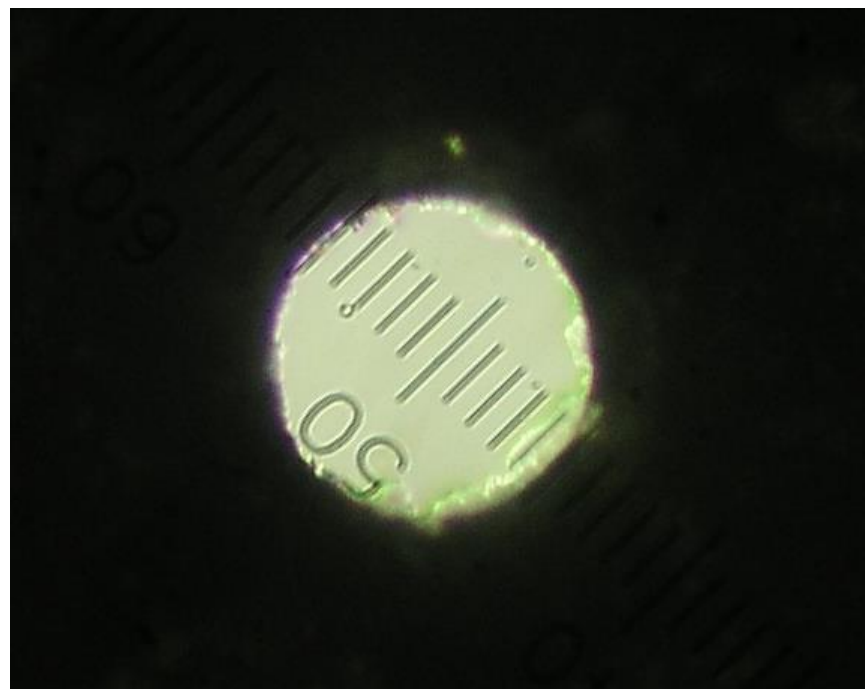
光を小さな隙間、穴に通すと  
どうなるか？

# 可変スリットからの 回折



# 円形開口からの 回折

直径 $200\mu\text{m}$ のピンホール



光を小さな隙間、穴に通すと  
どうなるか？

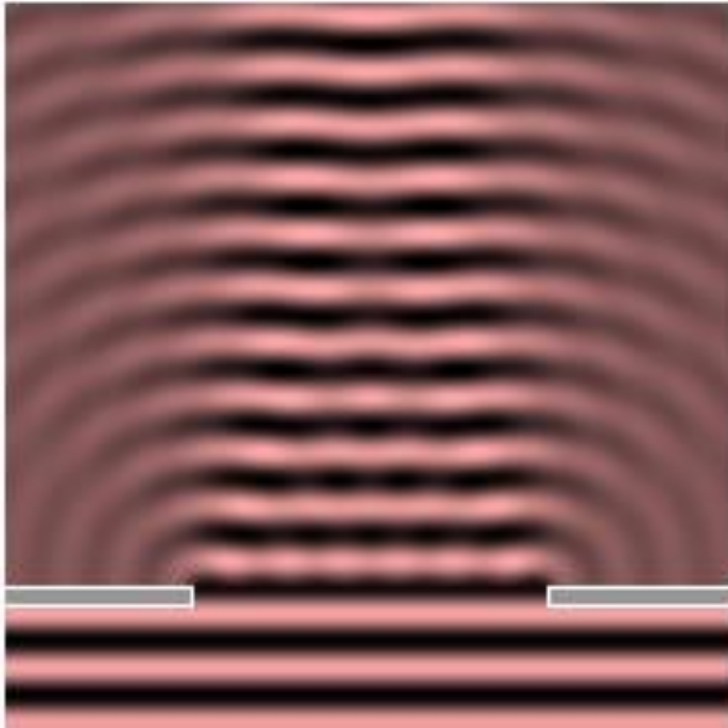
隙間がせまい

(穴が小さい)ほど、

細くなる

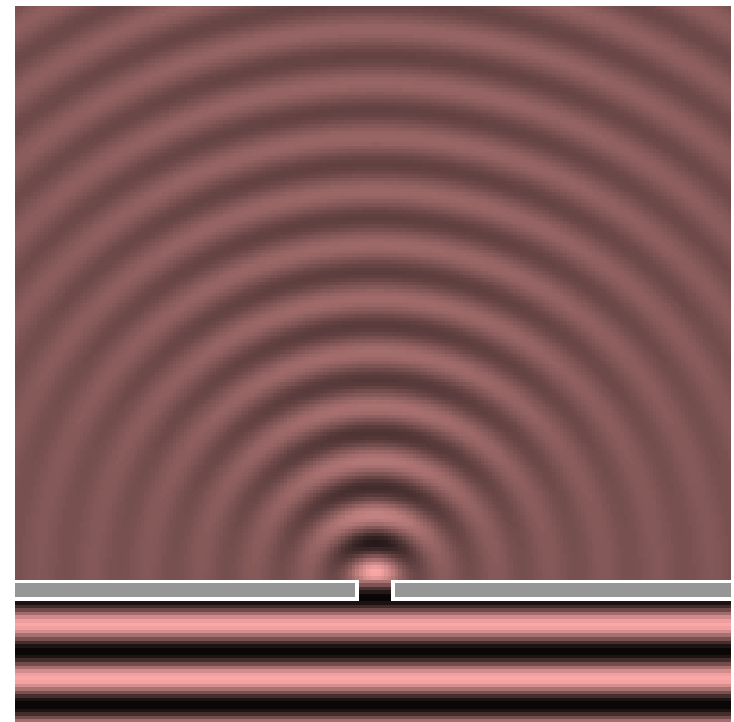
なぜ狭いほど広がるのか  
繰り返しパターンはなぜ生じる  
のか？

# 波の回折



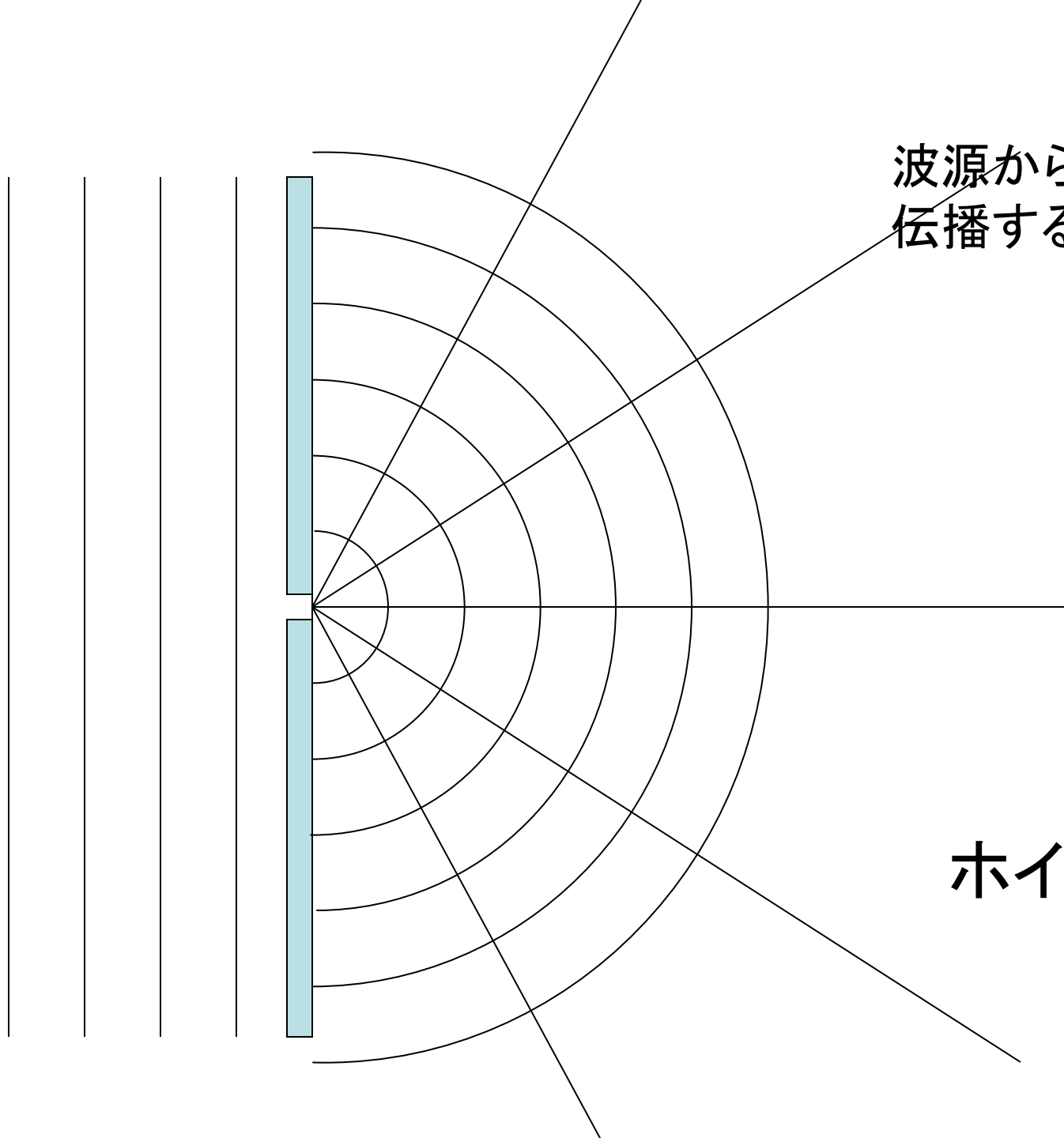
波長より十分大きい開口  
直進性

粒子的振る舞い



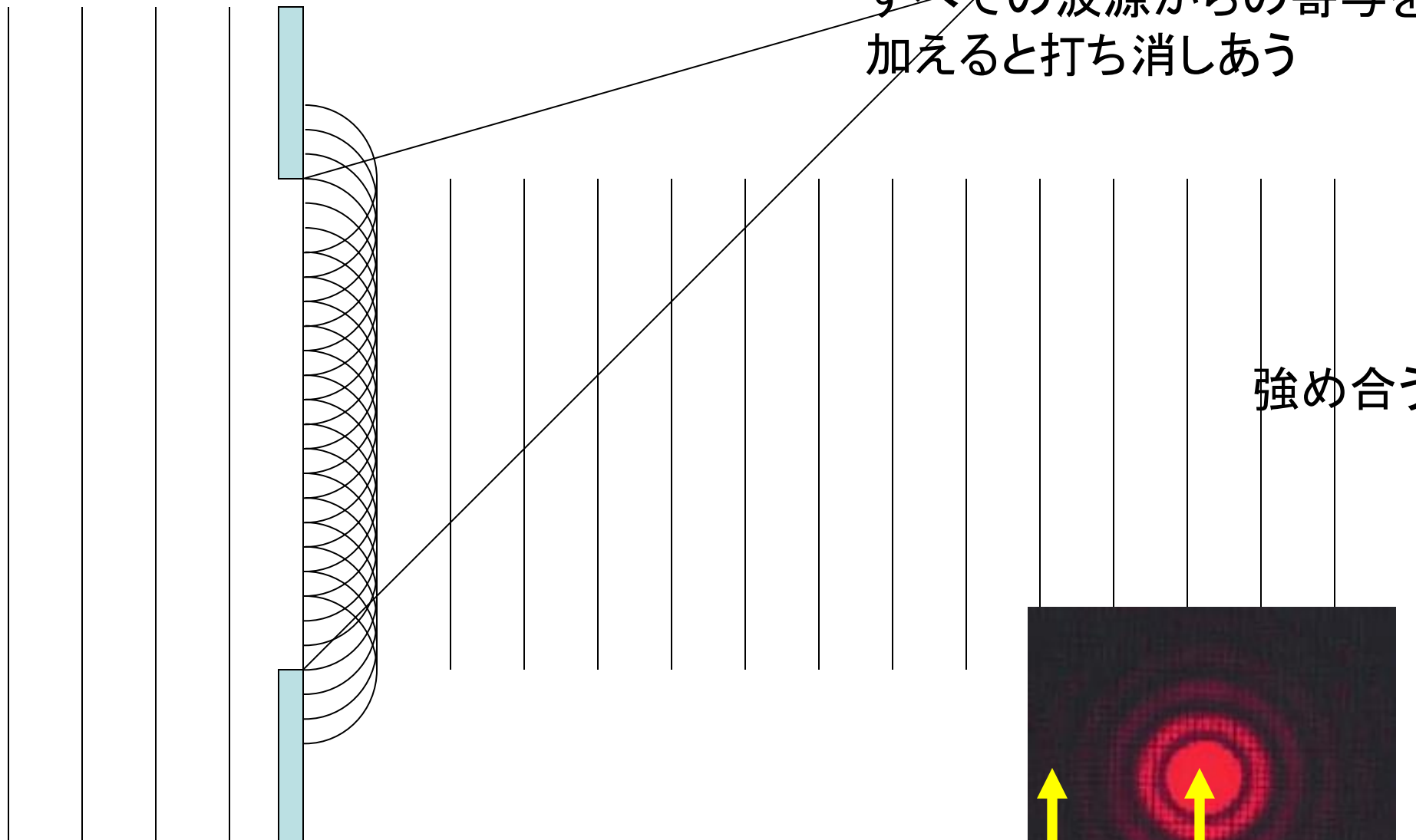
波長程度の開口  
回折

波動的振る舞い



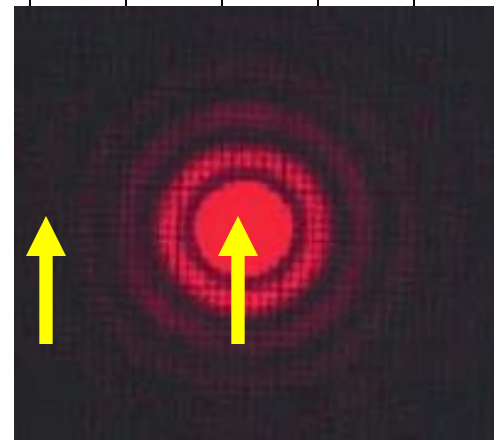
波源からすべての方向に  
伝播する

ホイヘンスの原理

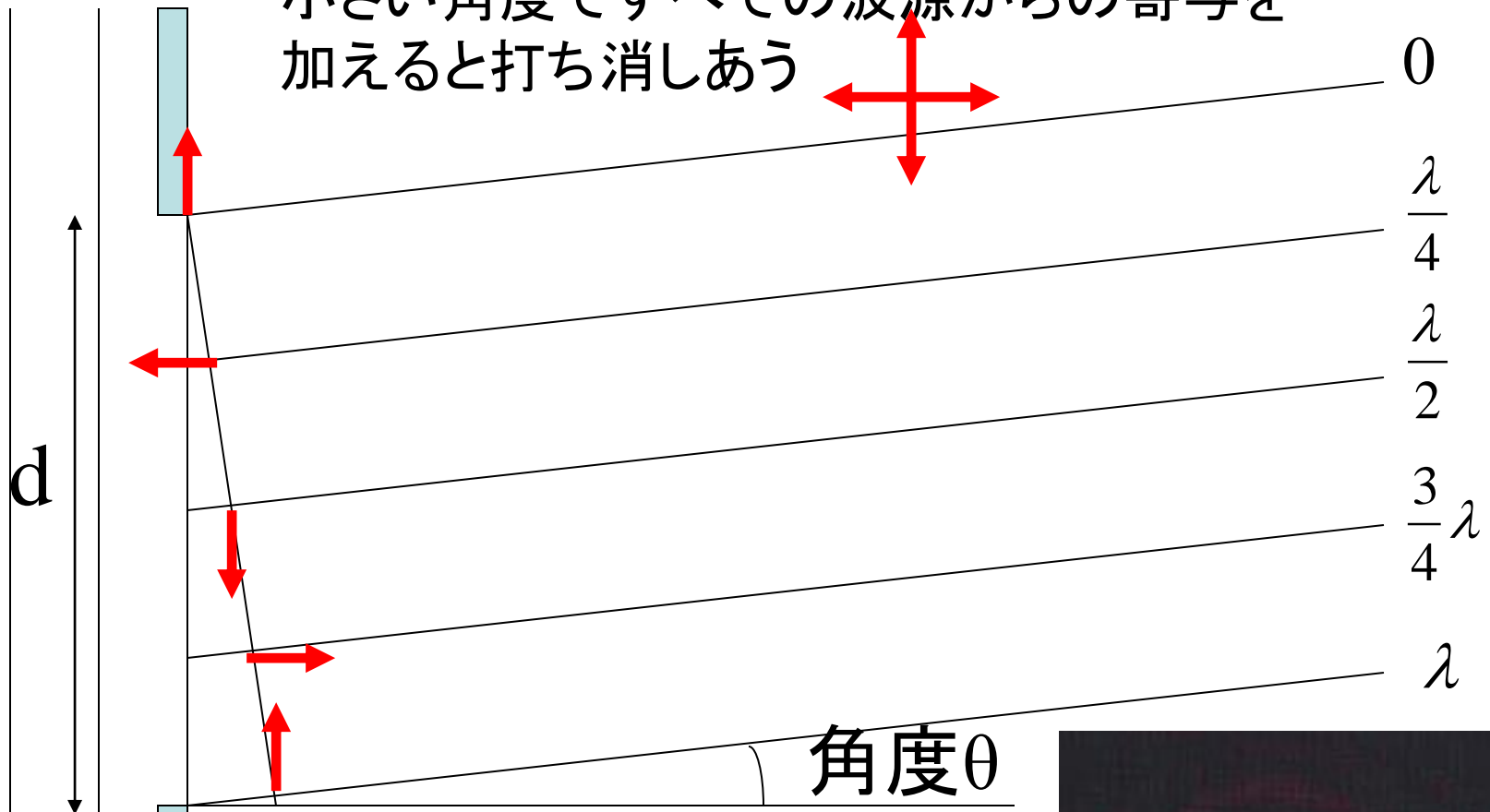


すべての波源からの寄与を  
加えると打ち消しあう

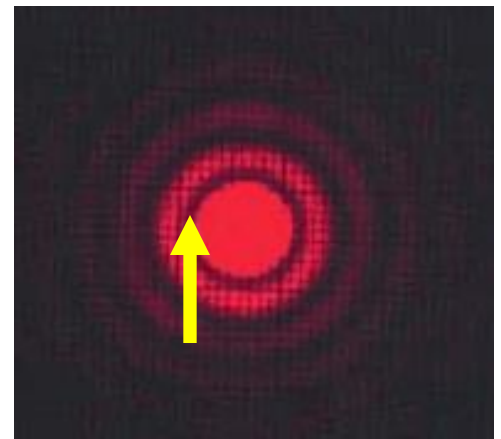
強め合う



小さい角度ですべての波源からの寄与を  
加えると打ち消しあう

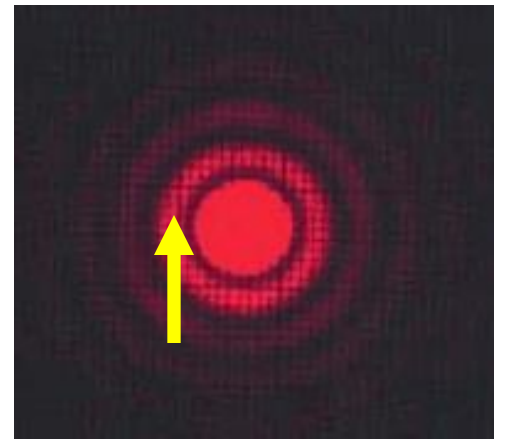
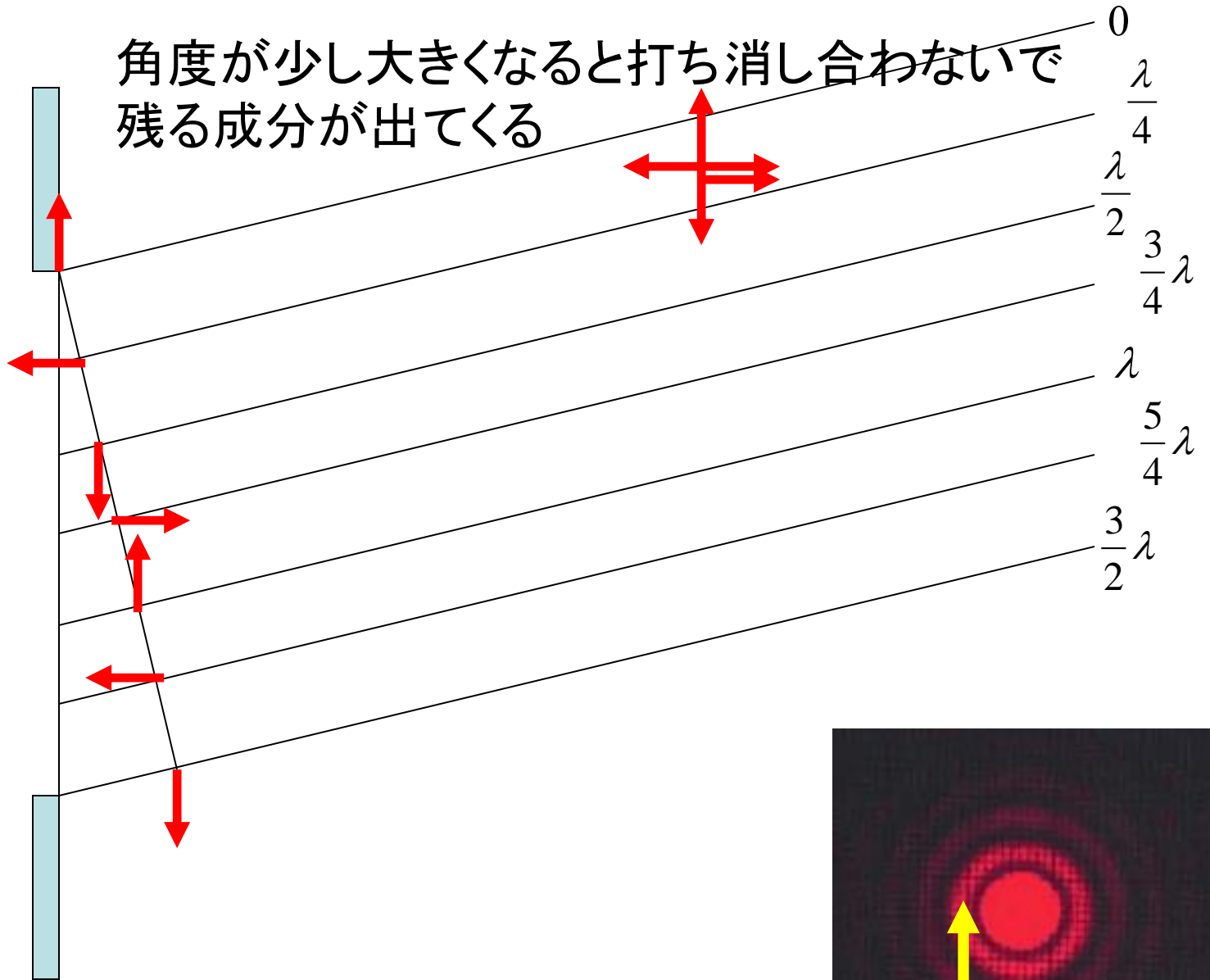


$d \sin\theta = \lambda$   $\theta \ll 1$  のとき  
ビームの広がりが角  $\theta \sim \lambda/d$





角度が少し大きくなると打ち消し合わな  
残る成分が出てくる



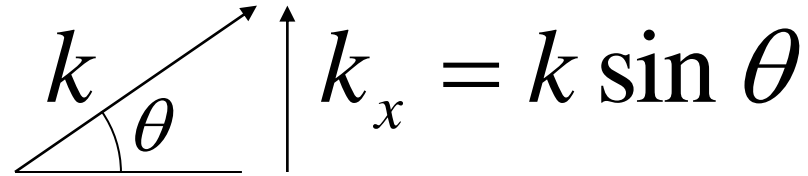
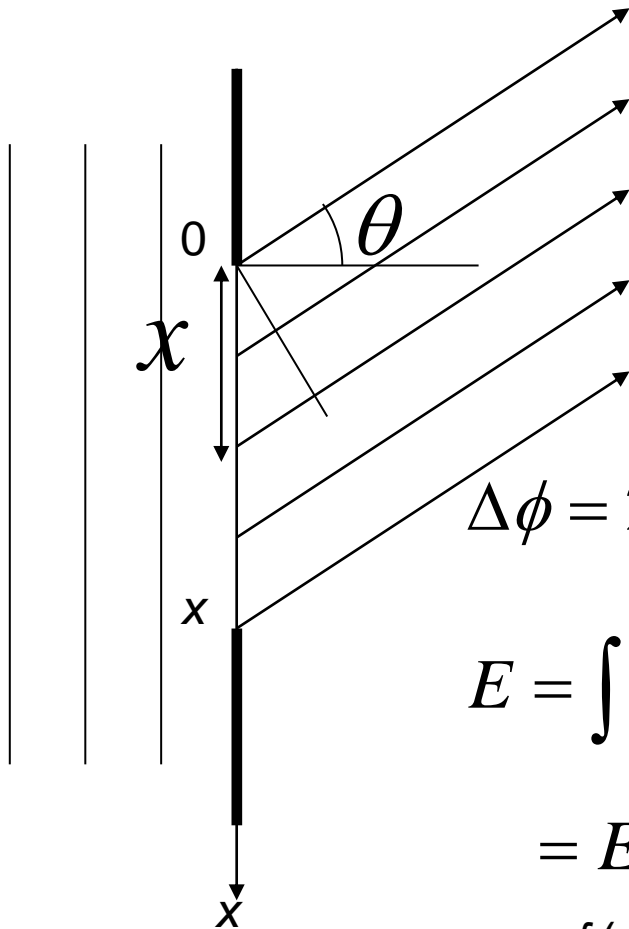
# 開口パターンと回折パターンの間 には一定の数学的関係

$$\begin{array}{ccc} & \text{フーリエ変換} & \\ F(x, y) & \leftrightarrow & F(k_x, k_y) \\ \text{実空間} & & \text{波数空間} \end{array}$$

現代科学において  
未知の結晶やたんぱく質の構造解明  
に必須のツール

X線回折

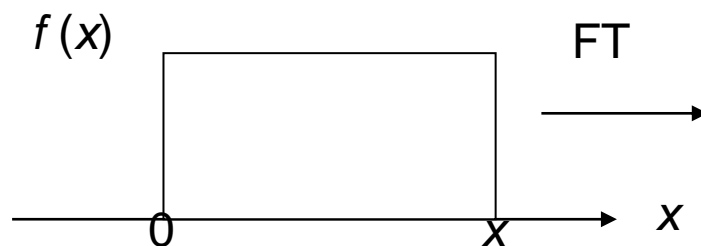
# 回折とフーリエ変換



$$\Delta\phi = 2\pi \frac{x \sin \theta}{\lambda} = k \sin \theta \cdot x = k_x x \quad dE = E_0 e^{i\Delta\phi} dx$$

$$E = \int dE = E_0 \int_0^x e^{i\Delta\phi} dx = E_0 \int_0^x e^{ik_x x} dx$$

$$= E_0 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{ik_x x} dx = E_0 F(k_x)$$

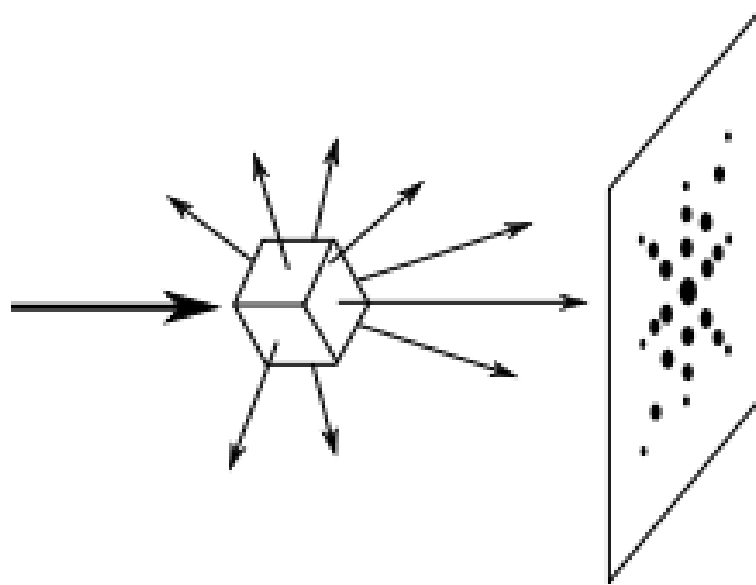


FT

$$x e^{ik_x x/2} \frac{\sin(k_x x/2)}{k_x x/2}$$

# X線回折

3年実験



X線を結晶に照射すると、ブラッグの法則を満たした方向にのみX線が回折され、結晶構造を反映したパターンが生じる。

回折パターンから結晶構造を推定する

可視光でなくX線を使う理由は？

結晶の格子間隔はどのくらいだろうか？

ホログラフィーとの違いは？

構造因子とは？

X線回折の位相問題とは？

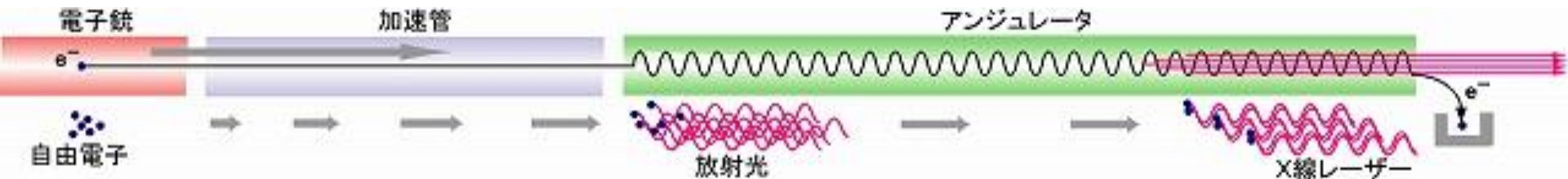
# 夢の光源

## 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



軌道放射光  
Super Photon  
ring 8GeV





「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(1.2 Å)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 2012A期の採択課題決定

2011年7月13日

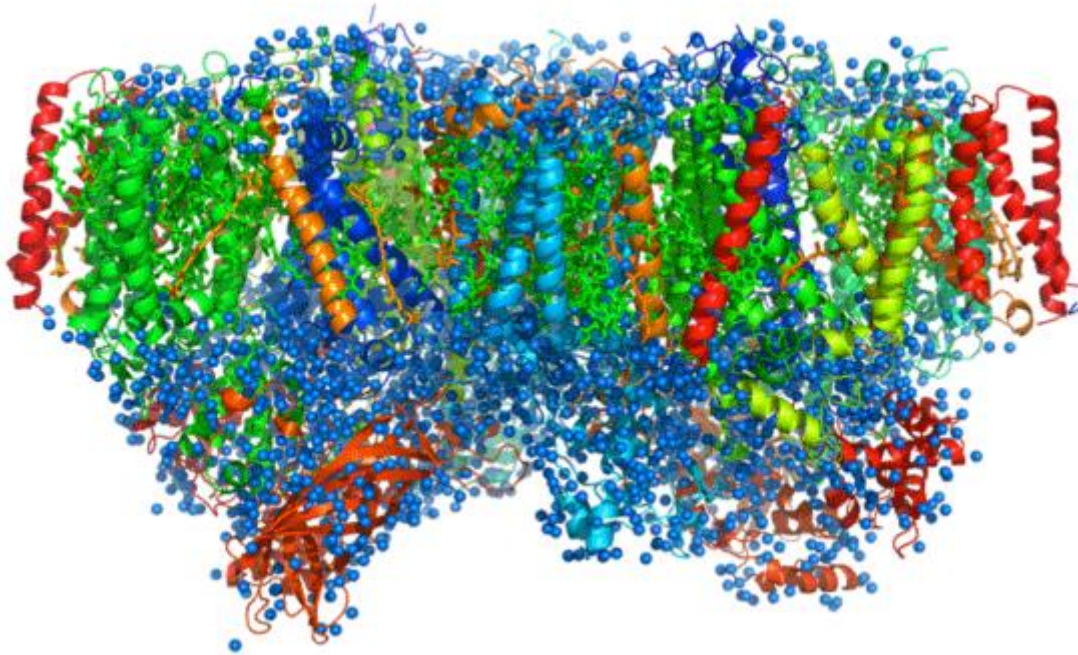
0.8 Å の波長のXFELの発振に成功

世界最短波長のレーザー光



# 光合成による水分解反応を触媒する光化学系II複合体の構造を1.95 Å分解能で解明

2014年11月25日  
岡山大学  
理化学研究所



Suga et al.,  
Nature, 2015

フェムト秒X線レーザーによる光化学系IIの1.95 Å分解能における本来の構造  
**光化学系II複合体の構造。~10nm**  
19個のタンパク質からなる単量体が2つ集まって二量体構造を取っており、真ん中に対称軸がある。青色のボールは水分子を表す。



★ The Physical Society of Japan ★

2015年度 日本物理学会 公開講座

# 結晶と粒子線回折 ー ブラッグ反射100年

2015年11月7日(土)  
12:50 - 16:35

東京大学 本郷キャンパス小柴ホール

対象 ● 高校生、大学生、(小学校・中学校・高等学校等の) 理科教員、一般  
参加費・定員 ● 参加費無料、定員170名(申込先着順)

2014年はラウエ、2015年はブラッグ親子のノーベル賞受賞から100年目にあたります。X線及び電子は高校の教科書にも教材として取り上げられ、その波としての性質は物理学において最も重要な概念の一つです。最先端の研究では、X線及び電子に中性子、陽電子も加え、結晶構造からポリマーやタンパク質等の構造解析まで、幅広い研究が行われています。

生体高分子のX線結晶構造解析 - 分子構造から生体機能へ -  
電子回折法・電子顕微鏡法の基礎とその現代への応用  
全反射高速陽電子回折法による結晶表面の構造決定  
中性子線で切り拓く物質科学の最先端



X線回折  
(高校3年物理)

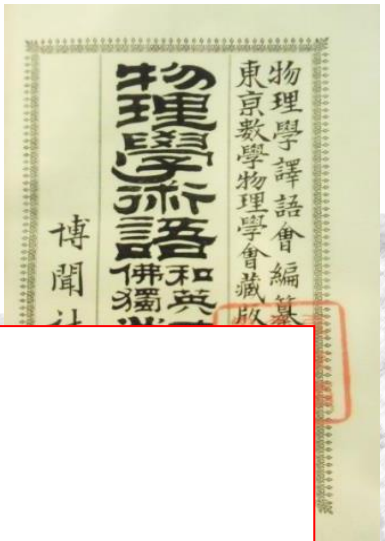
坊ちゃんが  
東京物理学校を卒業  
した頃  
物理学の最先端

現在 学生実験  
(大学3年生)

# 物理学科の歴史的歩み

創立136年

1881年 東京物理講習所として設立  
日本初の私立理学学校であり、  
日本では、東大（1877年）の次に物理教育を  
開始した



東大と並ぶ日本最古の物理学科  
初めて日本語で物理教育  
日本の物理学の曙を支え、理学の普及に貢献

1883年 初めて日本語で物理教育

1888年 日本の物理学の曙を支え、理学の普及に貢献

1893年 日本語初の物理学教科書を刊行



1949年 学制改革により東京理科大学となり、  
理学部一部物理学科が設置される



# 2017年度日本物理学会公開講座

## 物理で探る 生物の謎

場 所

東京大学 本郷キャンパス  
伊藤謝恩ホール

参加費  
無料  
※要申込

先着  
350  
名

11/4<sup>土</sup>  
13:00~16:45

### プログラム

1. 「分子動力学シミュレーションで探るタンパク質の形と動き」  
奥村久士 (分子科学研究所理論・計算分子科学研究領域 准教授)
2. 「ニューロンの電気的特性」  
宮川博義 (東京薬科大学生命科学部 名誉教授)
3. 「生物の模様がでけるしくみ」  
近藤 滋 (大阪大学大学院生命機能研究科 教授)

### 問い合わせ先

日本物理学会事務局 公開講座担当  
〒113-0034 東京都文京区湯島 2-31-22 湯島アーバンビル 5F  
TEL 03-3816-6201 FAX 03-3816-6208  
e-mail : kouza@jps.or.jp  
<http://www.jps.or.jp/public/koukai/koukai-2017-11-04.php>

アクセス

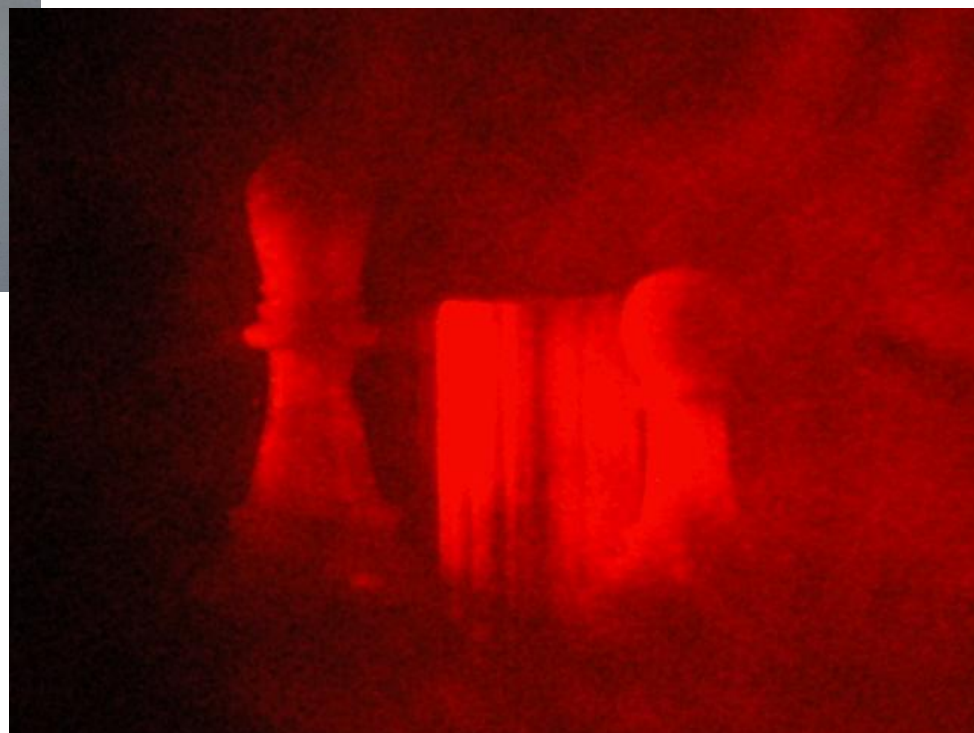
# ホログラフィー

3年実験

ホログラフィーを作成することで、  
レーザー光の位相、コヒーレンス、  
干渉について理解する。

→レーザー光の特徴と他の光との違い

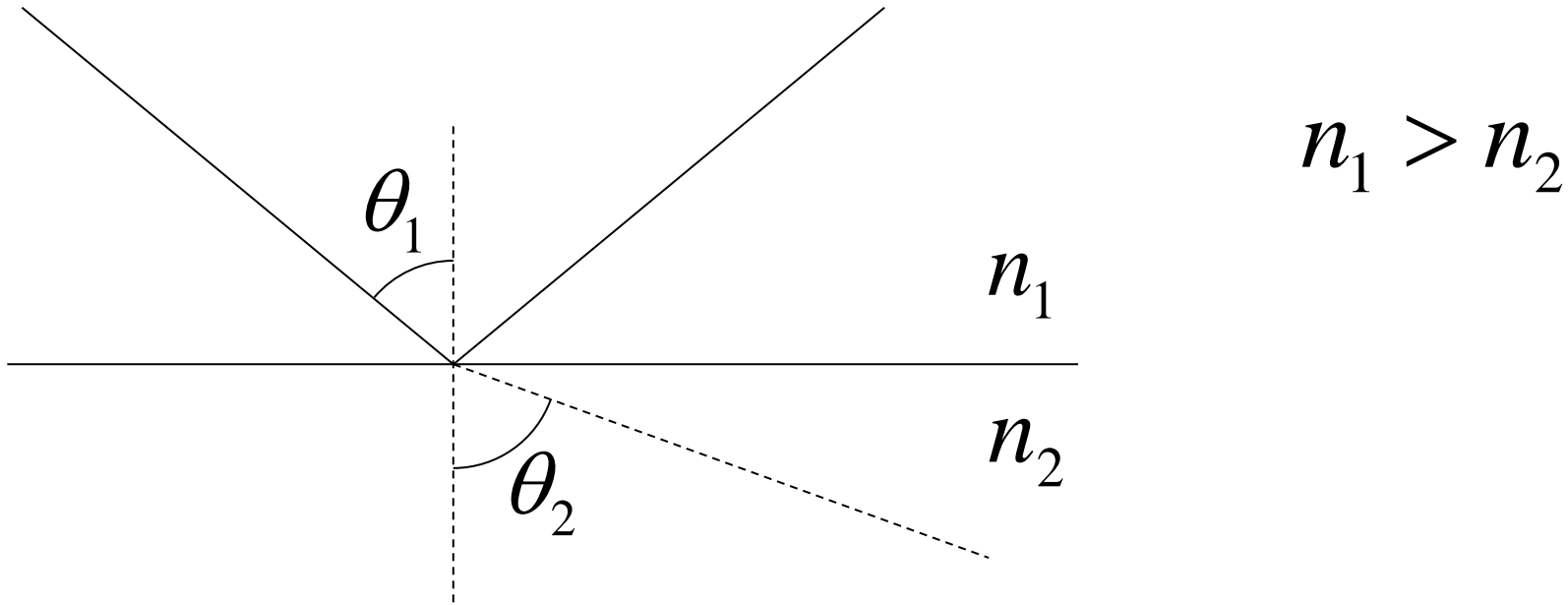
→ホログラフィーとは



光学実験系の調整技術の会得  
乾板現像技術

# 光の屈折について

# 全反射とは？



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

$\theta_1$ が  $\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 > 1$  を満たすとき

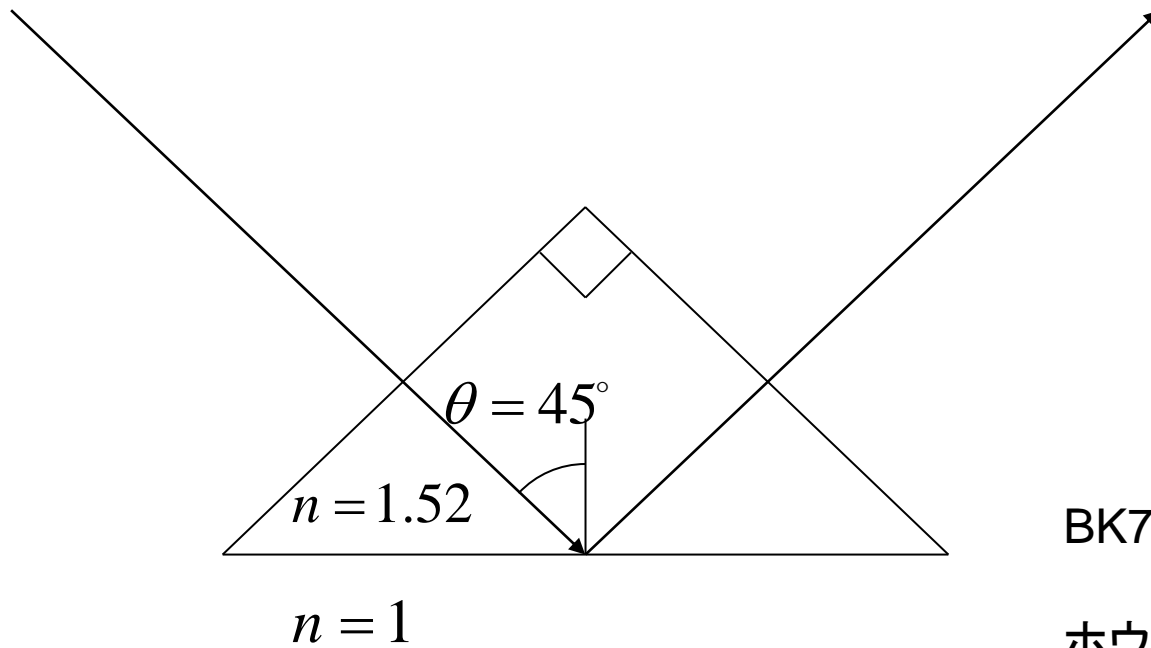
常に  $1 \geq \sin \theta_2$  なので、

等式を満たす  $\theta_2$  が存在しない

= 全反射

$$\sin \theta_1 > \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_1} \quad (n_2 = 1 \text{ のとき})$$

# 全反射

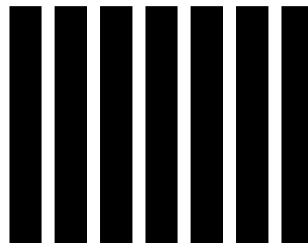
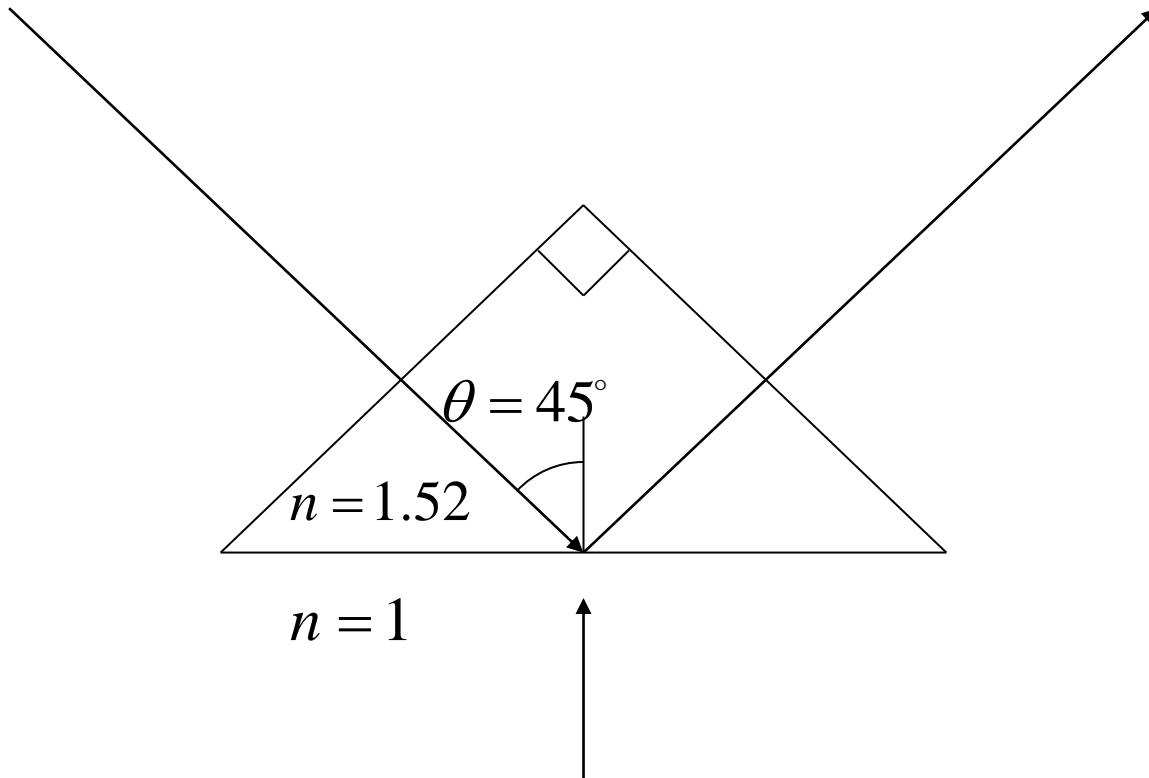


BK7ガラス直角プリズム

ホウケイ酸クラウンガラス



# 全反射



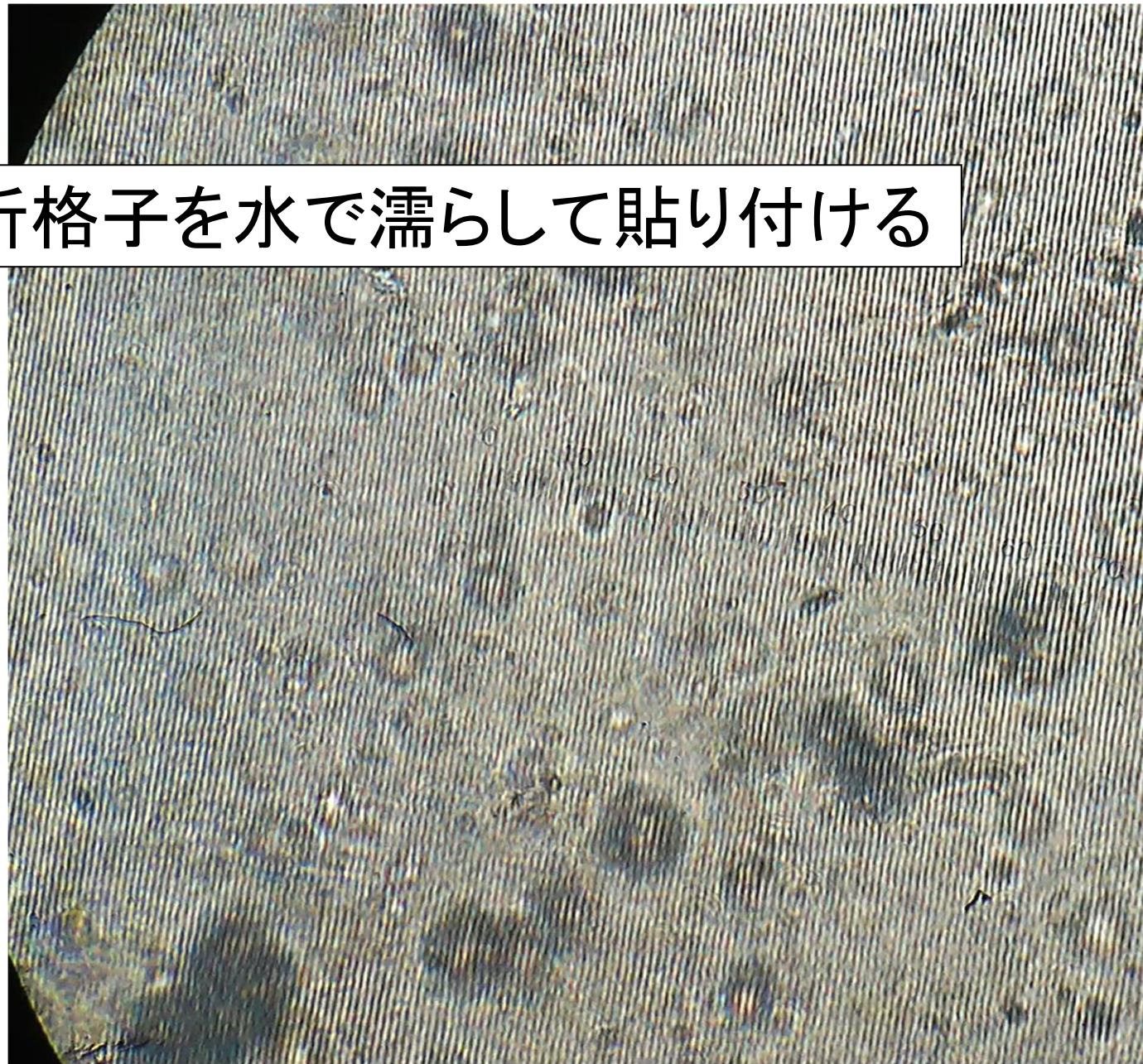
全反射しているガラス表面を  
左図のように塗り、透明な面積を  
減らすとどうなるか？

# 回折格子2

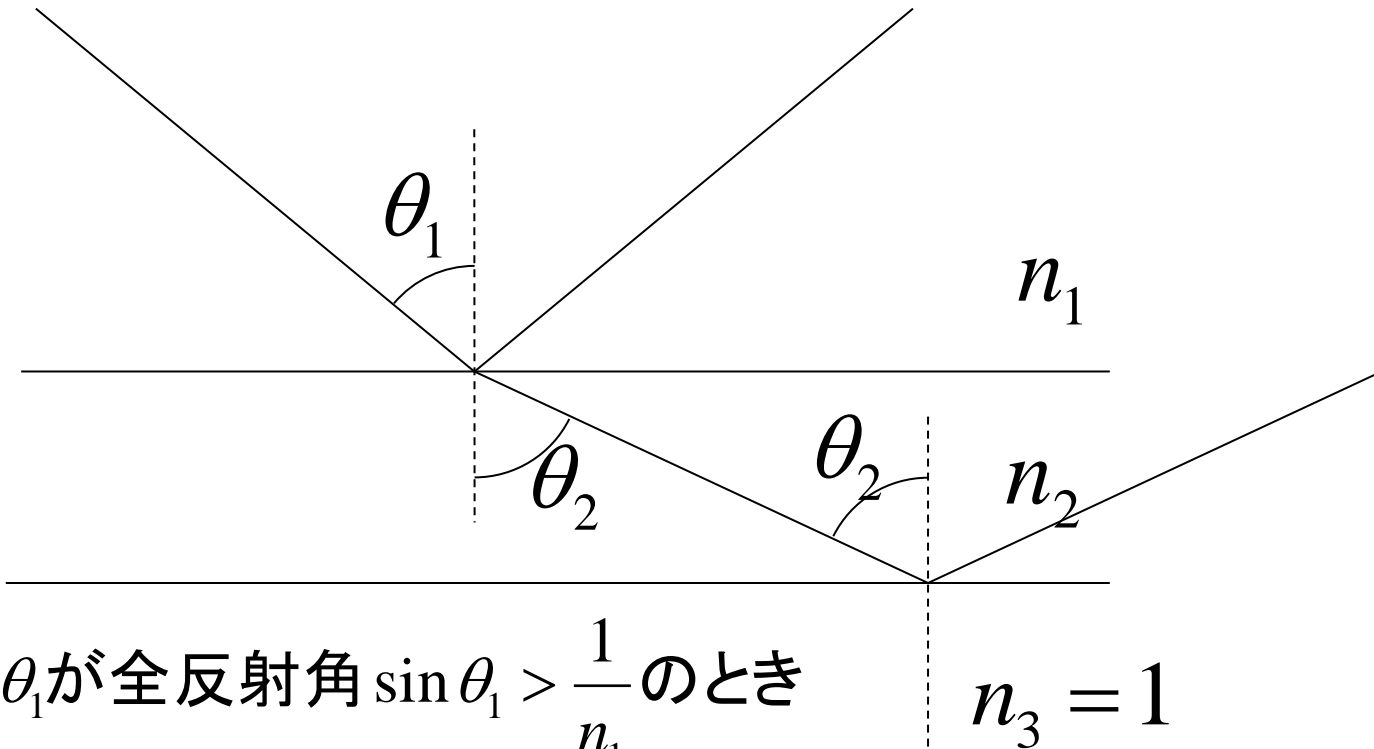
フィルム回折格子を水で濡らして貼り付ける

1000サイクル/mm

1周期 1  $\mu\text{m}$



# 全反射



$\theta_1$ が全反射角  $\sin \theta_1 > \frac{1}{n_1}$  のとき

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 > 1$$

$$\sin \theta_2 > \frac{1}{n_2}$$

$\theta_2$ も全反射角

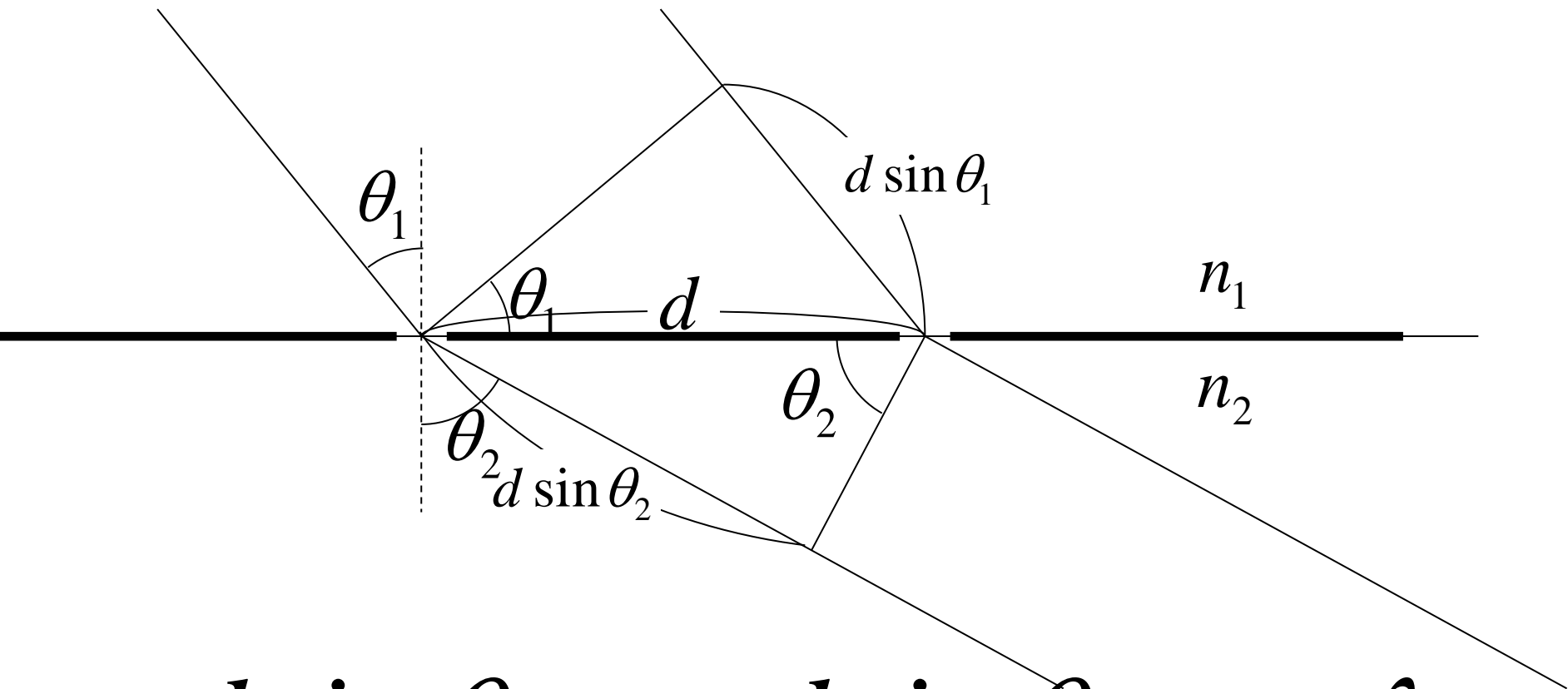
図は

$$n_1 > n_2 > n_3 = 1$$

の場合

界面に薄膜層が加わっても  
全反射条件を満たす

# 回折格子による回折条件



$$n_1 d \sin \theta_1 - n_2 d \sin \theta_2 = m \lambda$$

$$d(n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2) = m\lambda$$

$$n_1 = 1.52, n_2 = 1, d = 1000\text{nm}, \theta_1 = 45^\circ, \lambda = 532\text{nm}$$

$$1000\left(\frac{1.52}{1.414} - \sin \theta_2\right) = 532m$$

$$m = 0 \quad \sin \theta_2 = 1.075 \quad \theta_2 = \text{解なし}$$

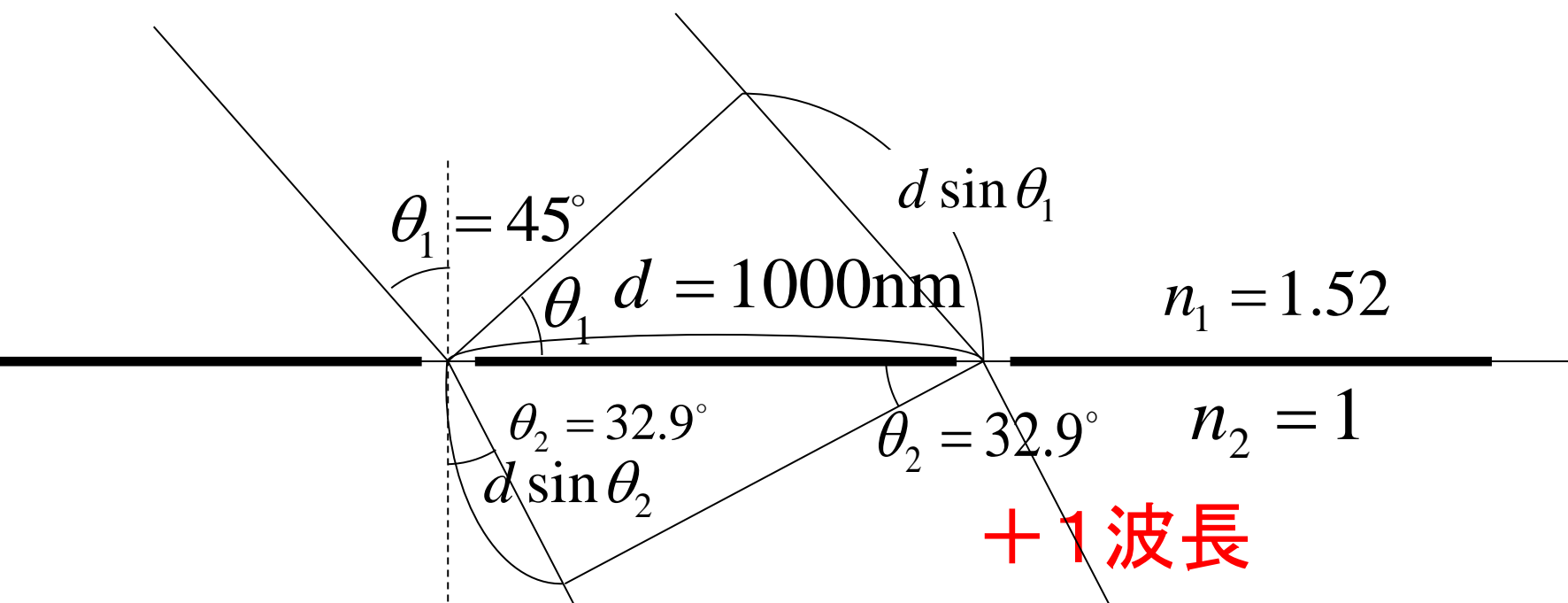
$$m = 1 \quad \sin \theta_2 = 0.543 \quad \theta_2 = 32.9^\circ$$

$$m = 2 \quad \sin \theta_2 = -0.011 \quad \theta_2 = 0.63^\circ$$

$$m = 3 \quad \sin \theta_2 = -0.521 \quad \theta_2 = -31.4^\circ$$

$$m = 4 \quad \sin \theta_2 = -1.053 \quad \theta_2 = \text{解なし}$$

$m = 1$  のとき

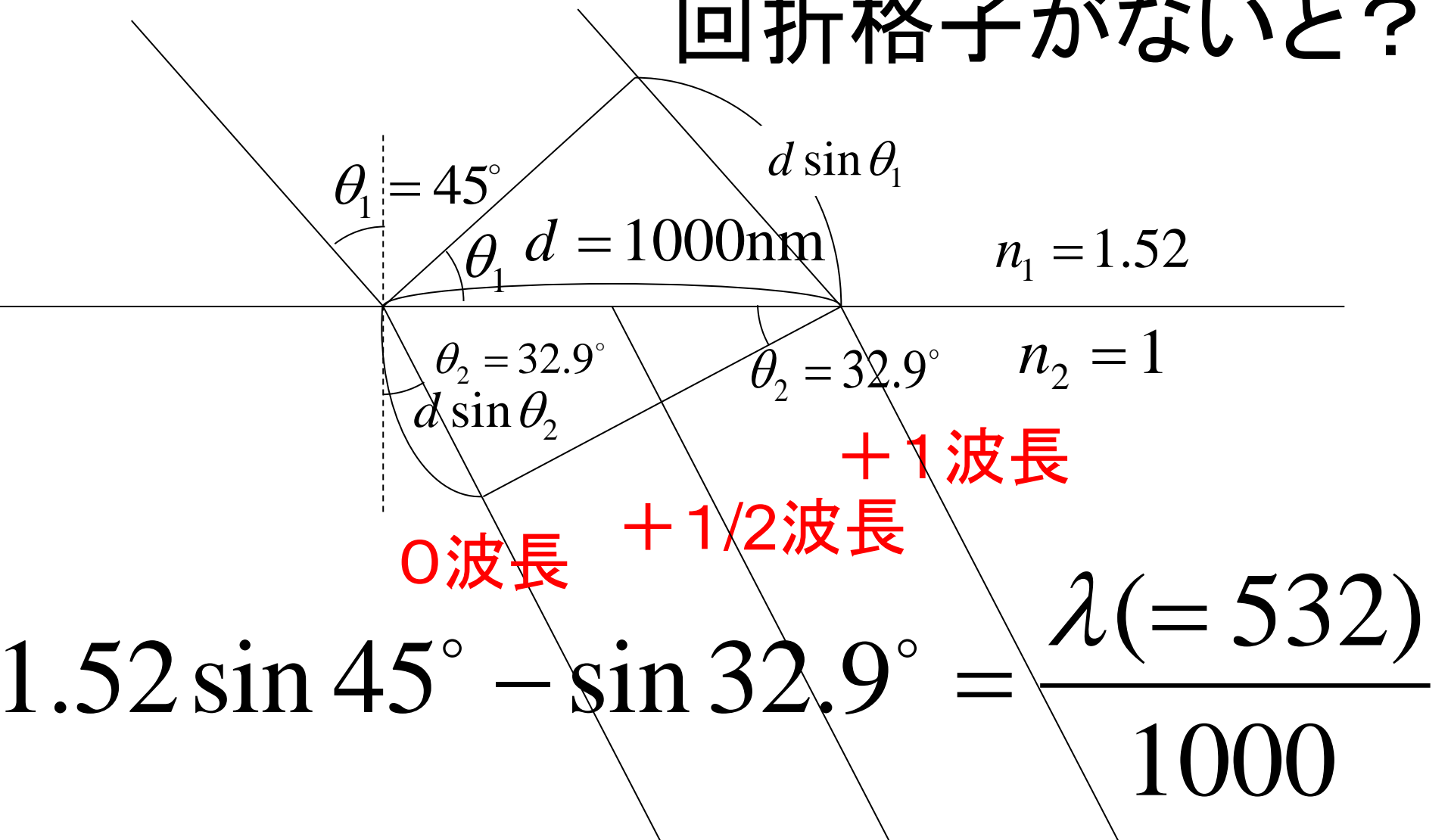


**0 波長**

$$1.52 \sin 45^\circ - \sin 32.9^\circ = \frac{\lambda (= 532)}{1000}$$

$m = 1$  のとき

回折格子がないと？



$$1.52 \sin 45^\circ - \sin 32.9^\circ = \frac{\lambda (= 532)}{1000}$$

$d$  を小さくしていくと何が起こるだろうか？

$$d(n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2) = m\lambda$$

$$n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2 = m \frac{\lambda}{d} \rightarrow \infty \quad (d \rightarrow 0)$$

$m = 0$ しか解がない

$\therefore n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$   $\lambda$ を大きくしても同じ

Snellの法則に帰着



# 光の伝播 まとめ

光は自分自身と干渉して、強め合う方向に進む

推薦図書

ファインマン:

光と物質のふしぎな理論 私の量子電磁力学

# ファインマン

## 光と物質のふしぎな理論

### 私の量子電磁力学

10桁もの高い精度で実験データを再現し、もっとも完成度の高い物理理論といわれる量子電磁力学を、素人向きに平易に解説した驚くべき本。なじみのある光の干渉から自然に量子力学で重要な概念である複素振幅の干渉を説明し、ファインマンダイアグラムまで至る。使っている数学といえばベクトルの足し算だけで、わかり易く図解しており、数学の苦手な一般聴衆が無理なく理解できるように配慮しながら、ごまかしなしに誠実に解説している。ちなみに、朝永博士はこの分野の業績でファインマンらとノーベル賞を共同受賞している。量子力学を一通り学んだ人が読んでも、啓発され理解を深められる書だと思います。

# 光、電気、磁気の法則を支配する基本方程式

## Maxwell 方程式

$$\left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) A^\mu = -\mu_0 J^\mu$$

$$A^\mu = \left( V/c, A_x, A_y, A_z \right) \quad \text{4次元ポテンシャル}$$

$$J^\mu = \left( c\rho, J_x, J_y, J_z \right) \quad \text{4次元電流密度}$$

古典電磁気学

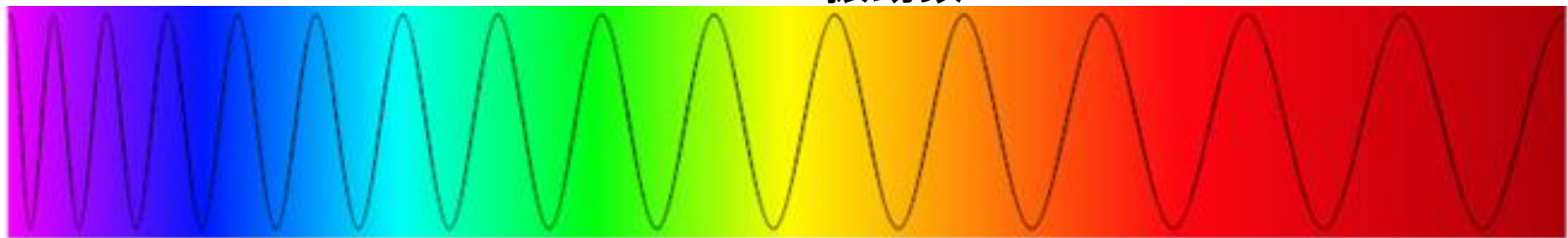
# 光は粒子である

現代物理 光は **波** と **粒子** の二重性を持つ  
**電磁波** **光子**

光  
(1)

赤い光	波長が長い	エネルギーが低い
緑		
青い光	波長が短い	エネルギーが高い

・ 振動数



400 nm

700 nm

# 不思議なこと

光は波（電磁波）と粒子（光子）の二重性を持つ

光子：質量ゼロの素粒子

光は真空中を $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ で進む

（1秒間に地球を7.5周できる速さ）

光速度 $c$ で走っている光子は歳をとらない

（もし、宇宙誕生以来消えないで真空中を走り続けた光子がいたとしたら、その光子の年齢は0歳！）

アインシュタインの相対性理論

光が波である証拠？

光が粒子である証拠？

# 光子1個の明るさとは？

1cm<sup>2</sup>あたり光子数

10μm × 10μm

快晴の日の地上

10<sup>18</sup> /秒

10<sup>12</sup> /秒

満月の夜

10<sup>12</sup> /秒

10<sup>6</sup> /秒

星明かりの下

10<sup>9</sup> /秒

10<sup>3</sup> /秒

# 素粒子

Fermion

$\gamma$	u	c	t
g	d	s	b
W	e	$\mu$	$\tau$
Z	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

Quark

Boson

Lepton

**H** Higgs Boson

宇宙で最も多い素粒子は？



# 宇宙で最も多い素粒子＝光子

太陽が50億年で放出してきた光子数  $>10^{62}$ 個

太陽質量がすべて水素原子の静止質量による  
としたときの 陽子数(電子数)  $10^{57}$ 個

宇宙のバリオン－光子数比  $\frac{n_b}{n_\gamma} \sim 10^{-10}$

$n_b$  : バリオン数密度

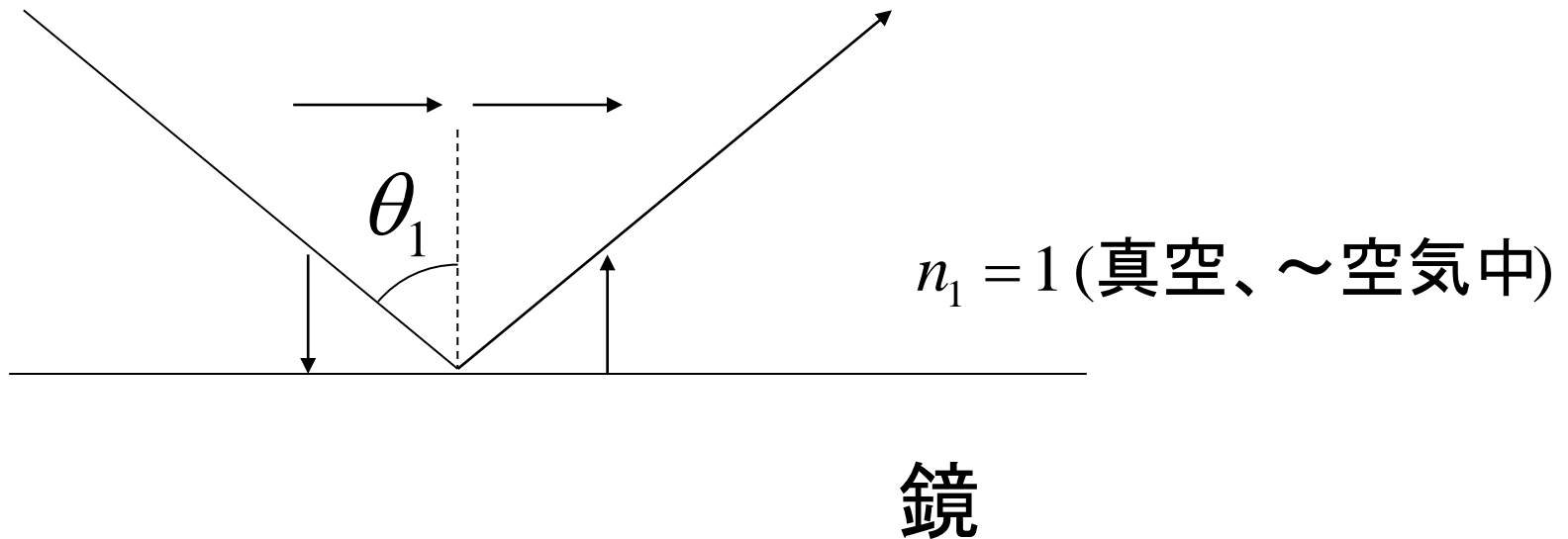
$n_\gamma$  : 光子の数密度

# 光の屈折について

光の粒子性から説明できないか？

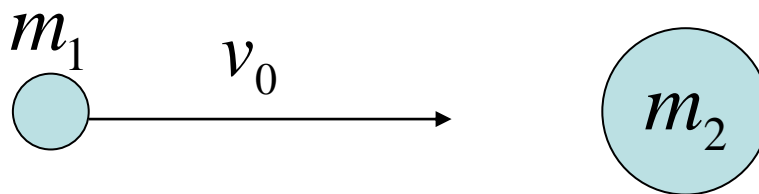
# 光の反射

粒子の反射(界面と平行な運動量が保存)と同じ



界面に垂直な運動量は反転(保存しない)

# 注意



右の粒子間の弾性衝突で、

$m_2 \rightarrow \infty$  (壁)に相当

$m_1$ の粒子のみに注目すると  
 $m_2$ の存在で空間の一様性  
(並進対称性)がなくなり、  
運動量が保存しないと見なせる。

反射・屈折のとき、  
界面に平行な方向では空間が一様  
なので、運動量保存

弾性衝突

運動量保存

$$m_1 v_0 = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

エネルギー保存

$$\frac{1}{2} m_1 v_0^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

$$v_2 = \frac{m_1}{m_2} (v_0 - v_1)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_0^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{m_1}{m_2}\right)^2 (v_0 - v_1)^2$$

$$v_0^2 - v_1^2 = \frac{m_1}{m_2} (v_0 - v_1)^2$$

$$m_2 (v_0 + v_1) = m_1 (v_0 - v_1)$$

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_0 \quad v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_0$$

$$m_2 \rightarrow \infty \quad v_1 = -v_0 \quad v_2 = 0$$

# 光は圧力を持つ(輻射圧)

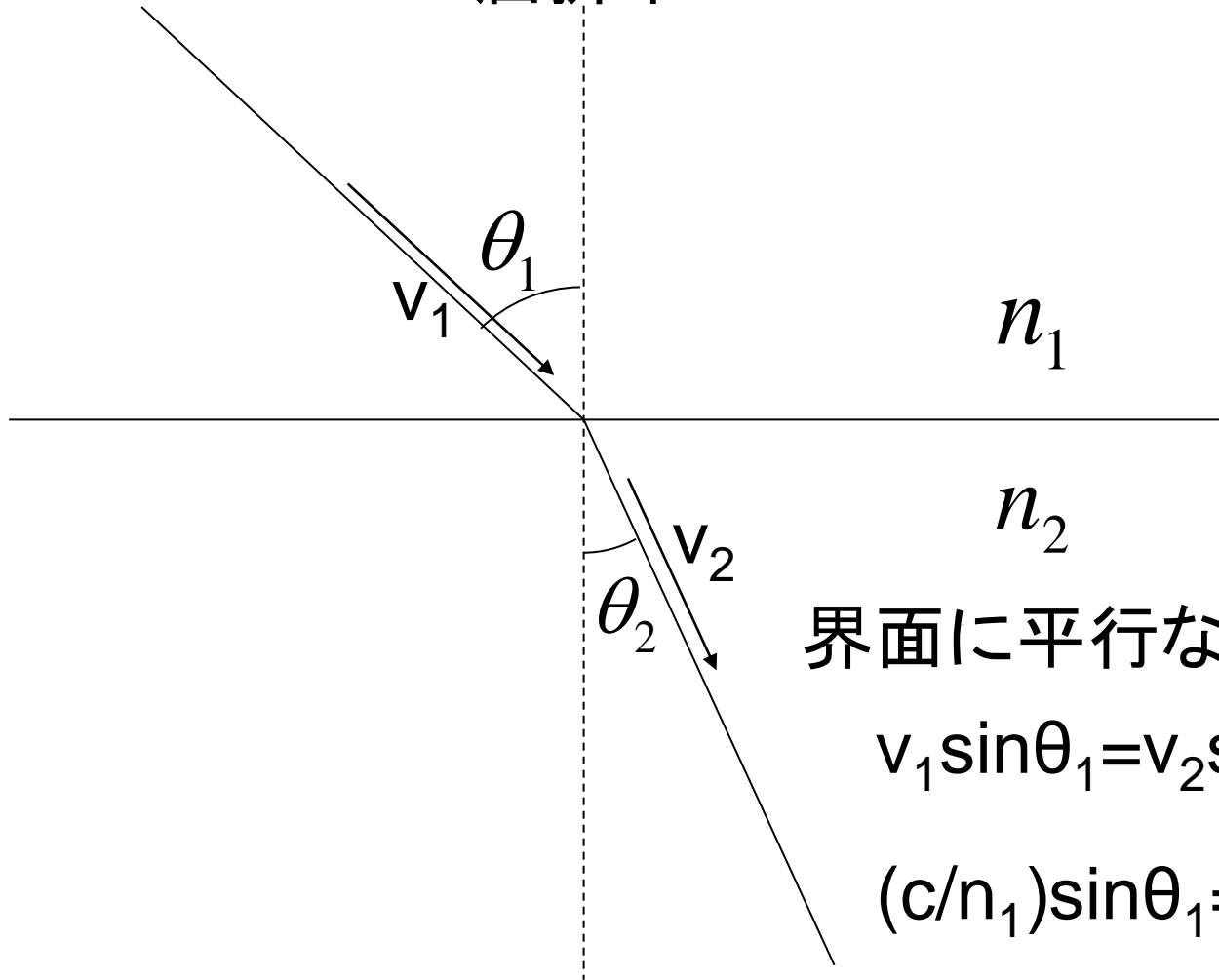
運動量が変化する ( $\Delta p$ ) とき、

反作用として  $-\frac{\Delta p}{\Delta t}$  の力を及ぼす

これが光の圧力となる

# 光の運動量？

光の運動量  $\propto$  光の速度  $v$  ならば  
 $v=c/n$   $n$ :屈折率



界面に平行な運動量が保存

$$v_1 \sin \theta_1 = v_2 \sin \theta_2$$

$$(c/n_1) \sin \theta_1 = (c/n_2) \sin \theta_2$$

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

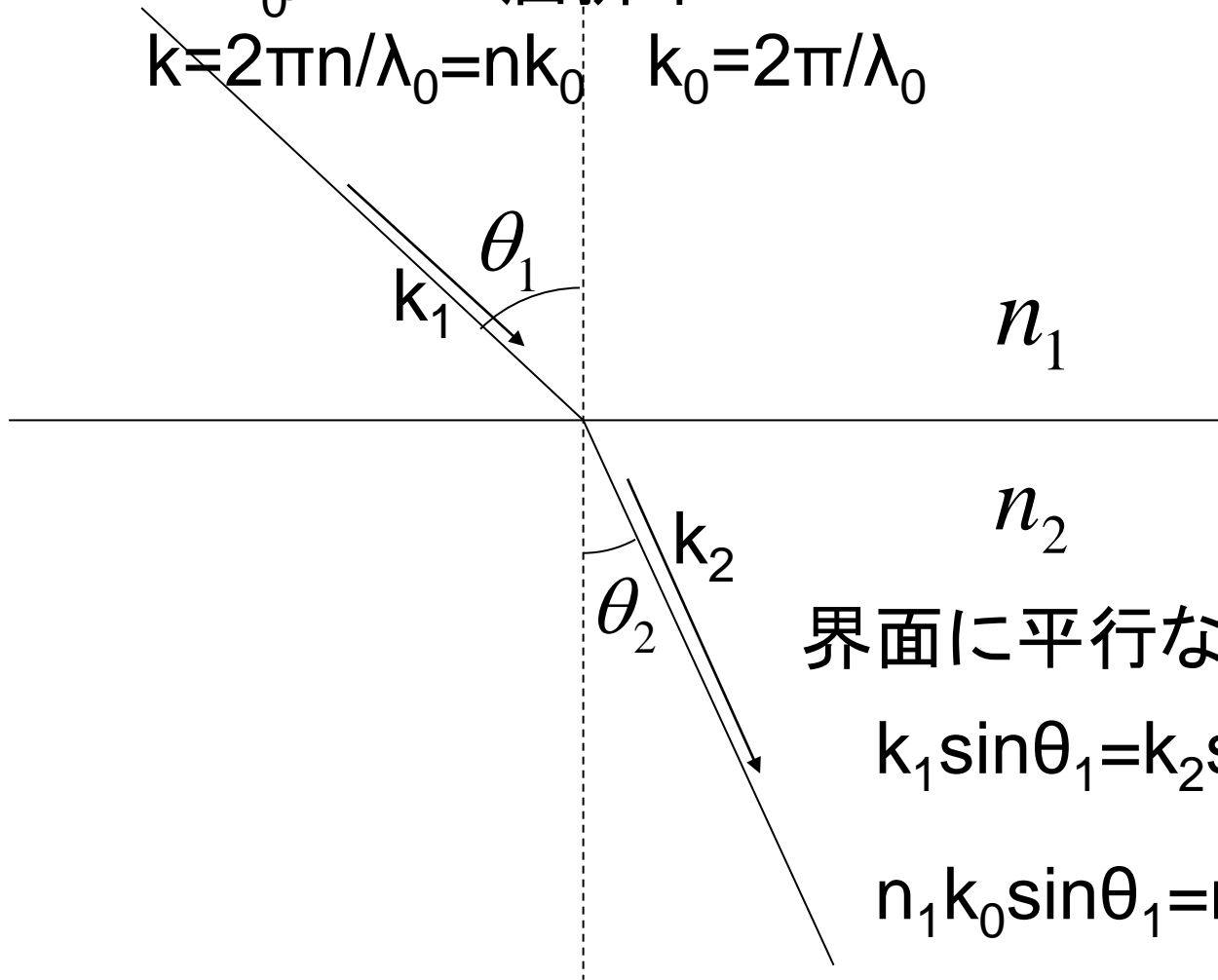
光の運動量  $\propto$  光の速度  $v$  とすると、  
屈折の法則を説明できない

# 光の運動量？

光の運動量  $\propto$  光の波数  $k=2\pi/\lambda$  ならば

$\lambda=\lambda_0/n$   $n$ :屈折率

$k=2\pi n/\lambda_0=nk_0$   $k_0=2\pi/\lambda_0$



界面に平行な運動量が保存

$$k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 k_0 \sin \theta_1 = n_2 k_0 \sin \theta_2$$

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



# 光子のエネルギーと運動量

$$\text{エネルギー } E = hf = \frac{h}{2\pi} 2\pi f = \hbar\omega$$

$$\text{運動量 } p = \hbar k \quad (\text{運動量の単位})$$

$$\hbar[\text{J}\cdot\text{s}]$$

$$\hbar k[\text{J}\cdot\text{s}/\text{m}] = [\text{kg m}^2/(\text{s}\cdot\text{m})] = [\text{kg m/s}]$$

すなわち

$$\omega = k_0 c \quad 2\pi f = \frac{2\pi}{\lambda_0} c \quad f\lambda_0 = c$$

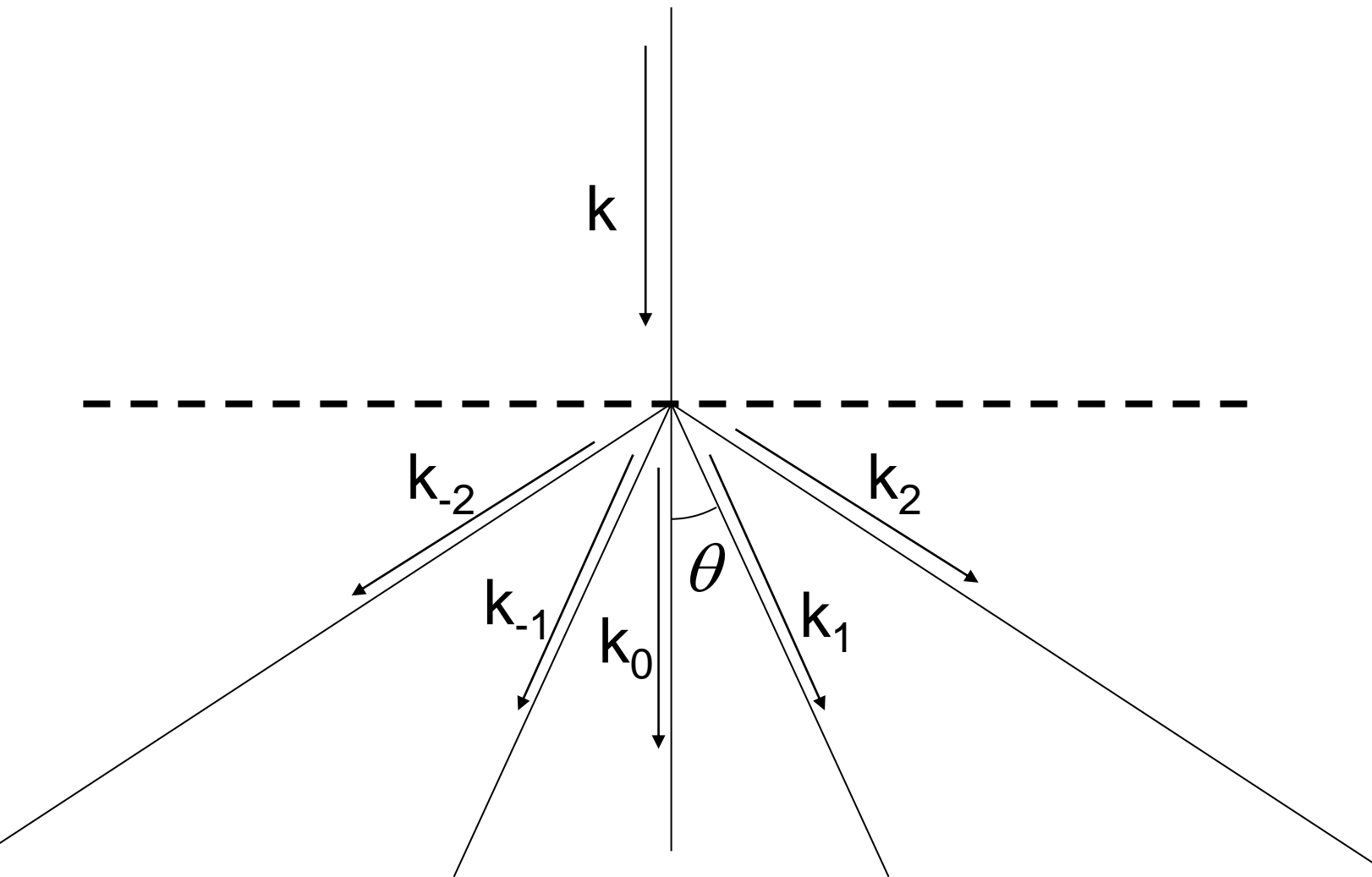
$$E = p_0 c \quad (\text{真空中})$$

$$\text{物質中では } f \frac{\lambda_0}{n} = \frac{c}{n} (= v) \quad 2\pi f = n \frac{2\pi}{\lambda_0} v \quad \omega = kv = nk_0 \frac{c}{n}$$

$$E = pv$$

$$p = n\hbar k_0 \quad \text{Minkowski運動量}$$

# 回折格子による回折は？ 運動量保存？



# 全反射の解釈

どんな角度で屈折しても  
入射光と屈折光の間で  
界面に平行な方向の運動量保存  
を満たせない

# もっと詳しく検討してみよう

$$d(n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2) = m\lambda$$

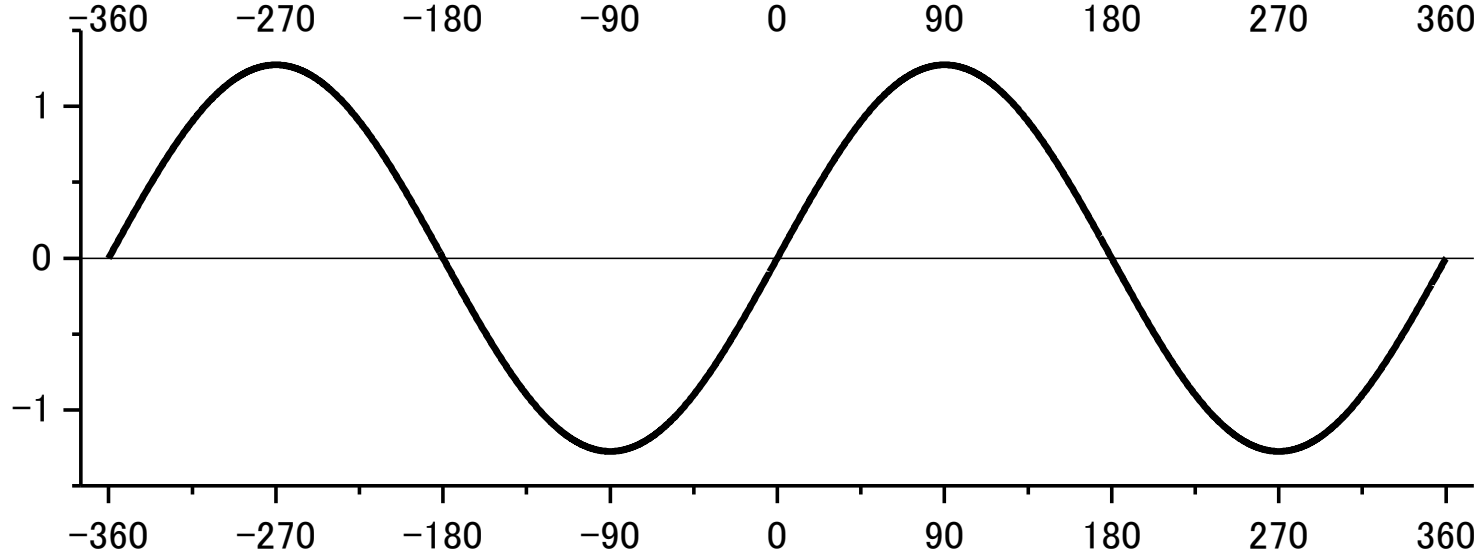
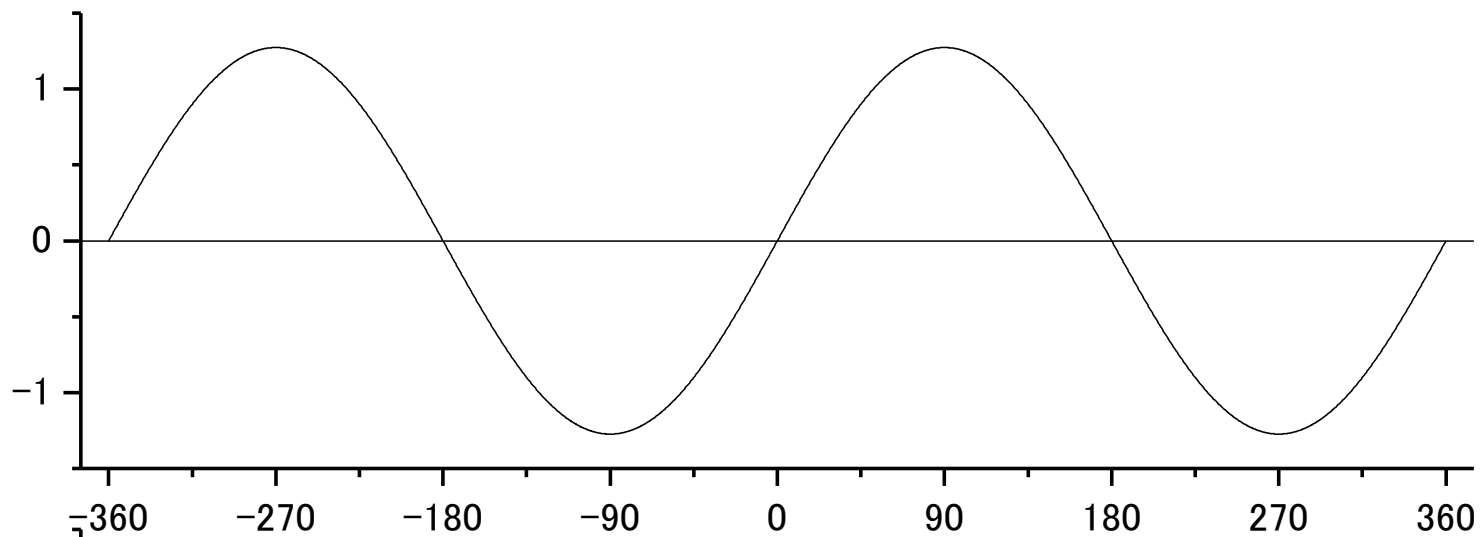
$$\frac{n_1}{\lambda} \sin \theta_1 - \frac{n_2}{\lambda} \sin \theta_2 = \frac{m}{d}$$

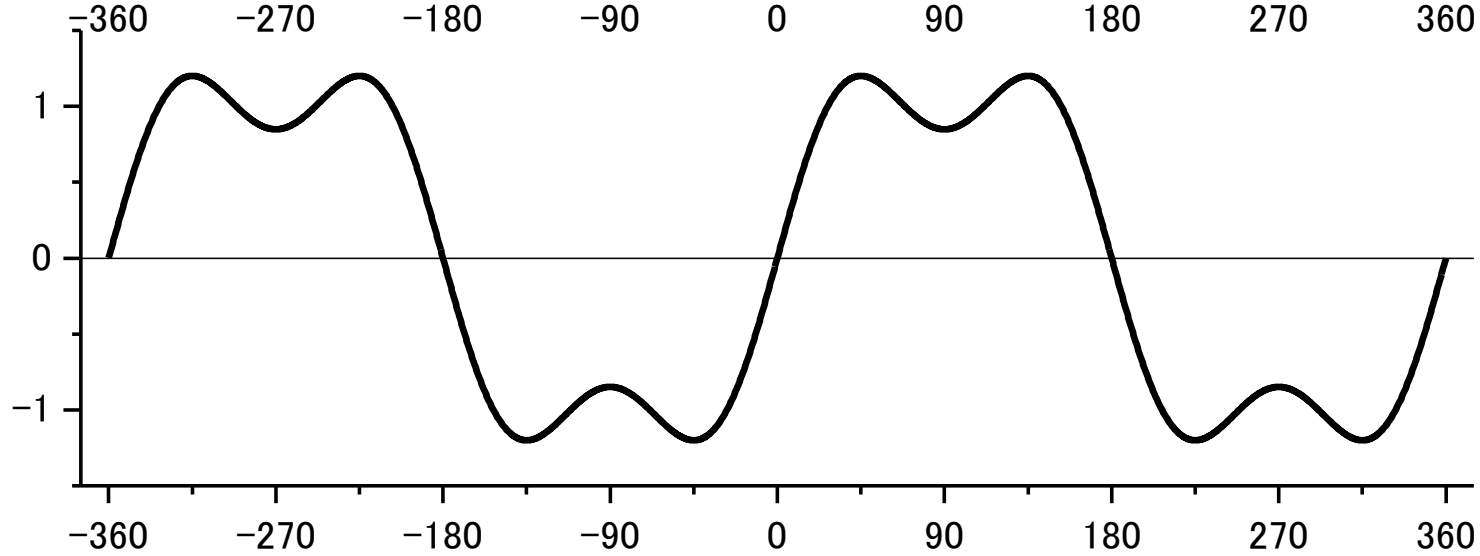
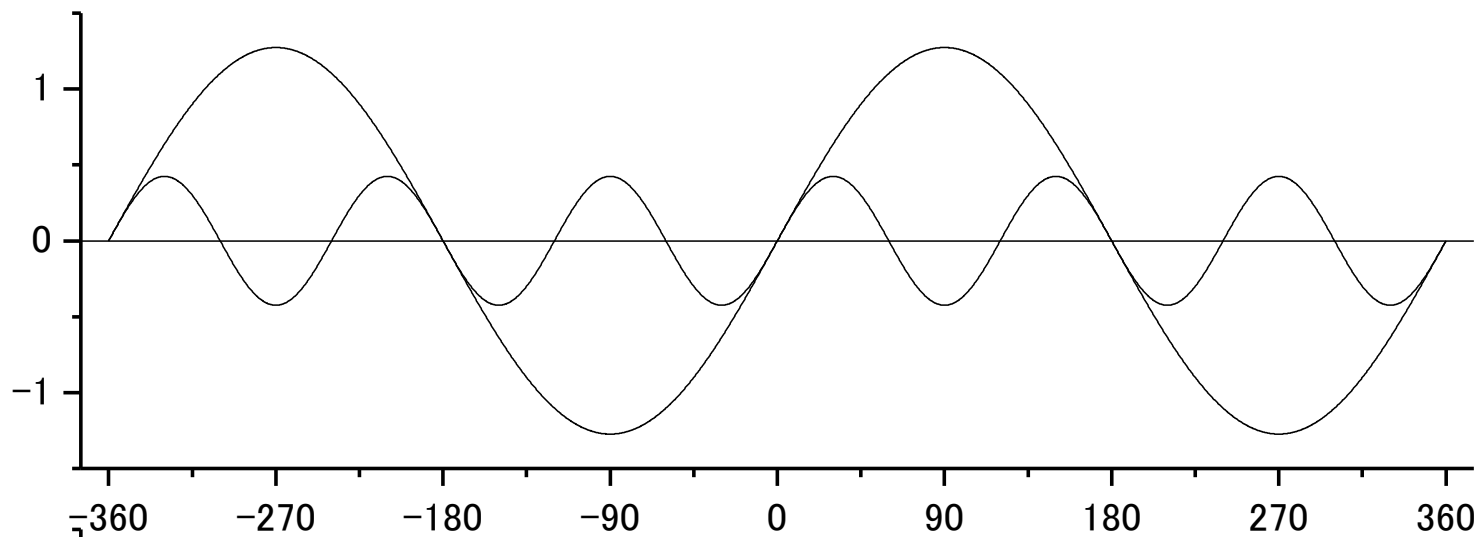
$$n_1 \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_1 - n_2 \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_2 = m \frac{2\pi}{d}$$

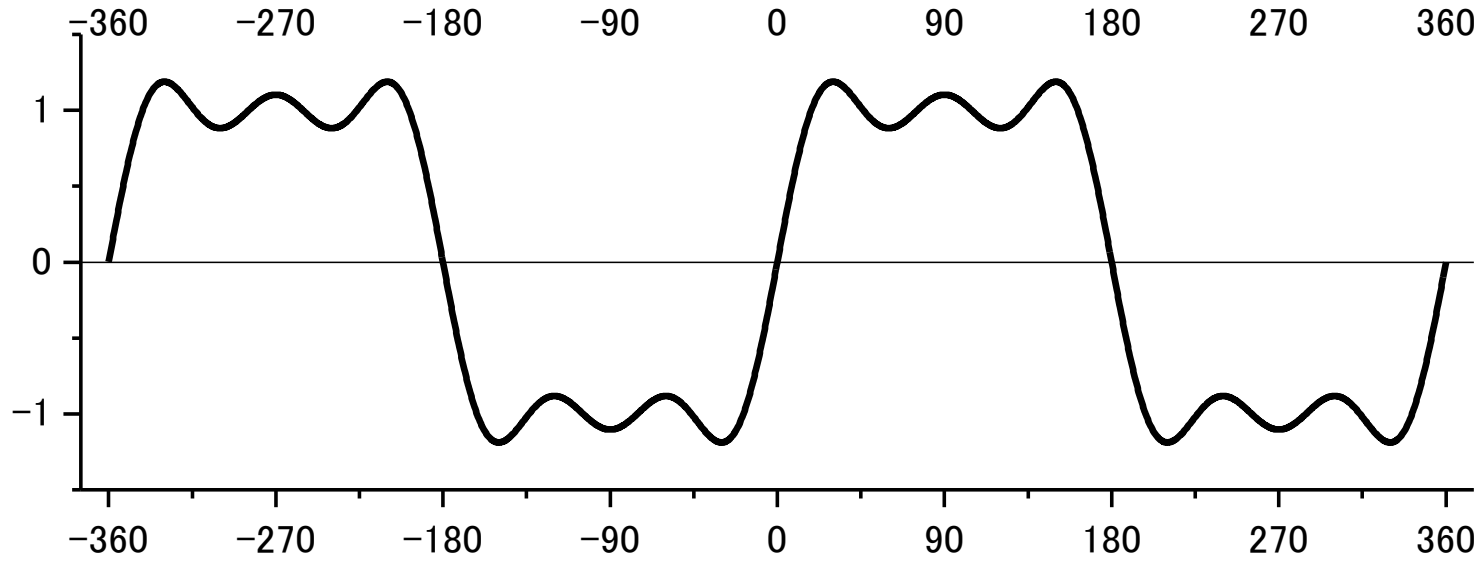
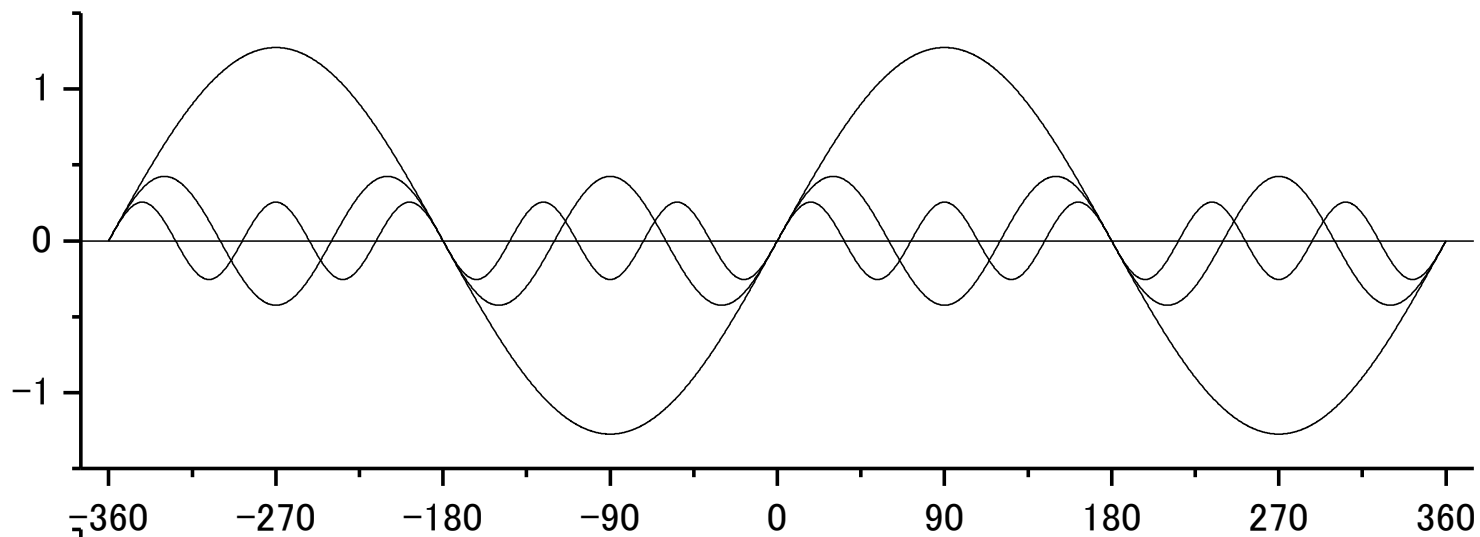
$$n_1 k \sin \theta_1 - n_2 k \sin \theta_2 = mk_d$$

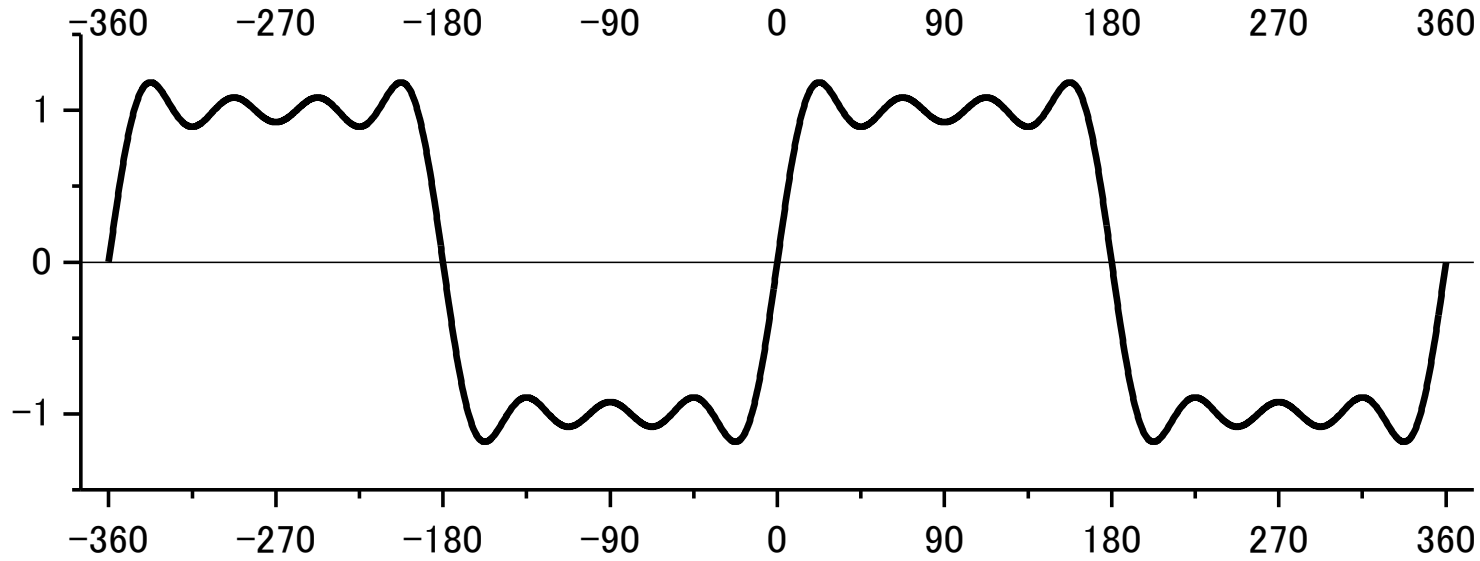
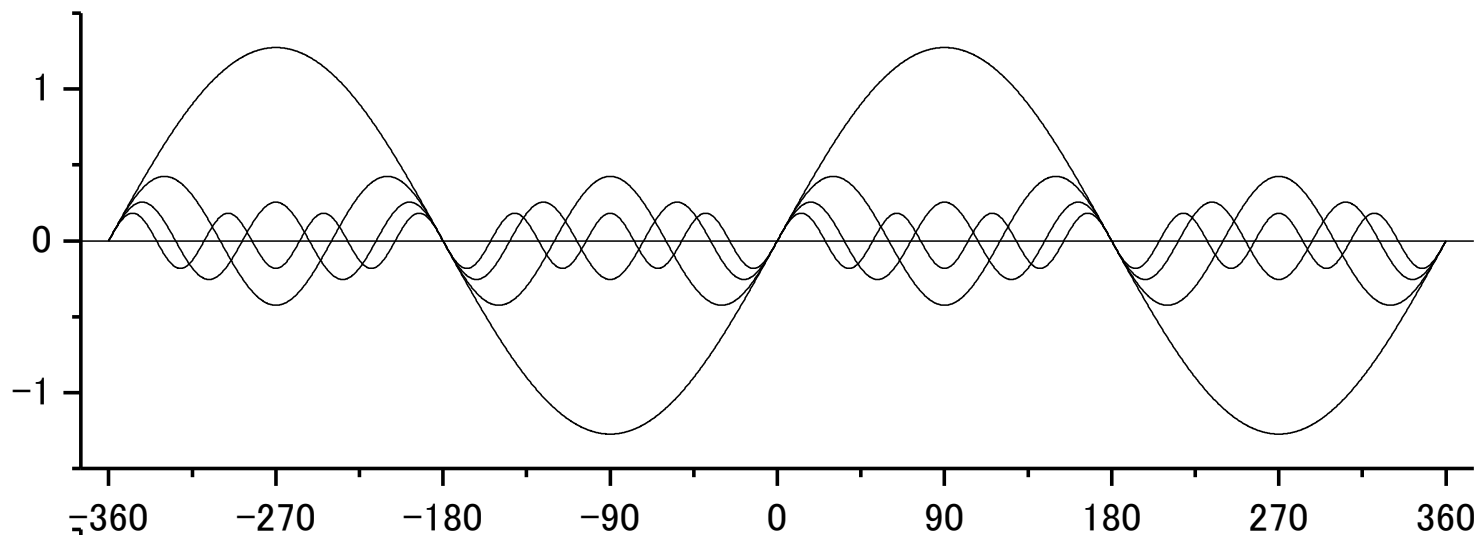
$$n_1 k \sin \theta_1 = n_2 k \sin \theta_2 + mk_d$$

波数の単位を持つ  $mk_d$  とは何か？

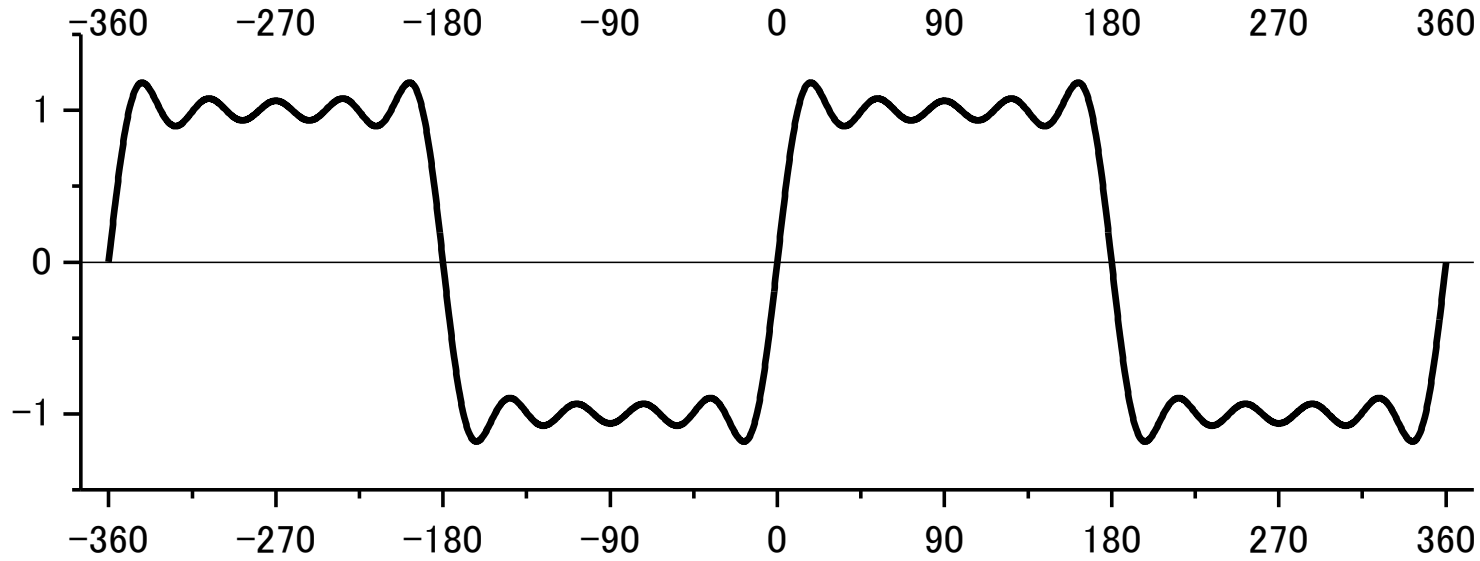
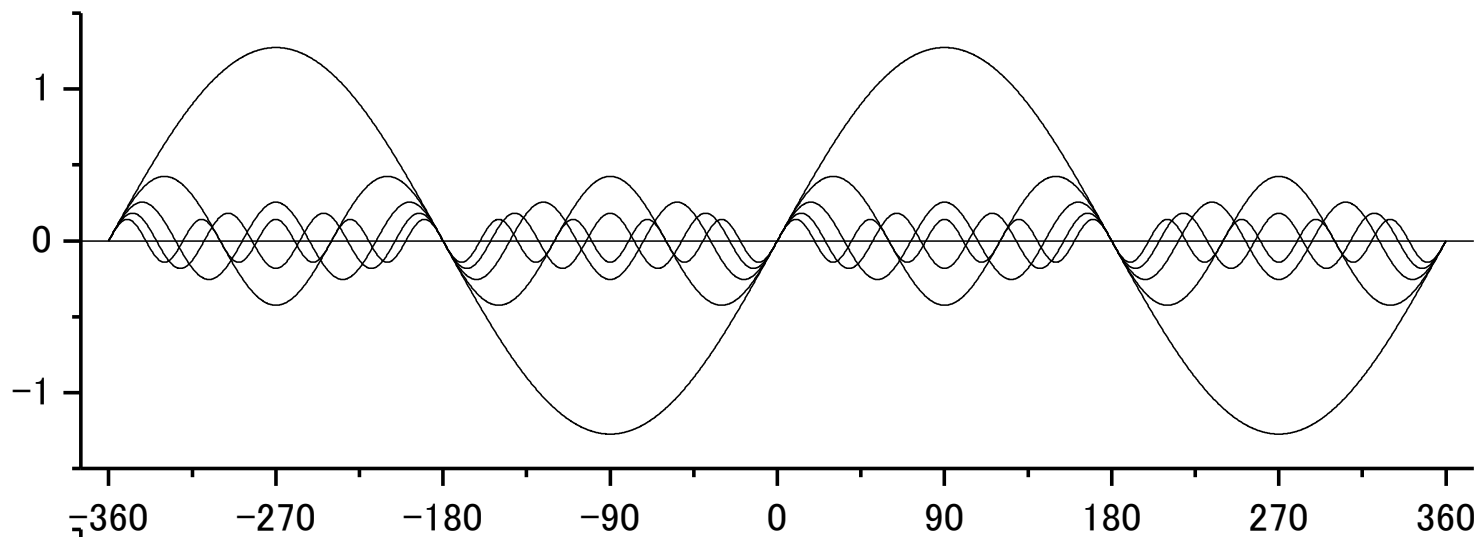


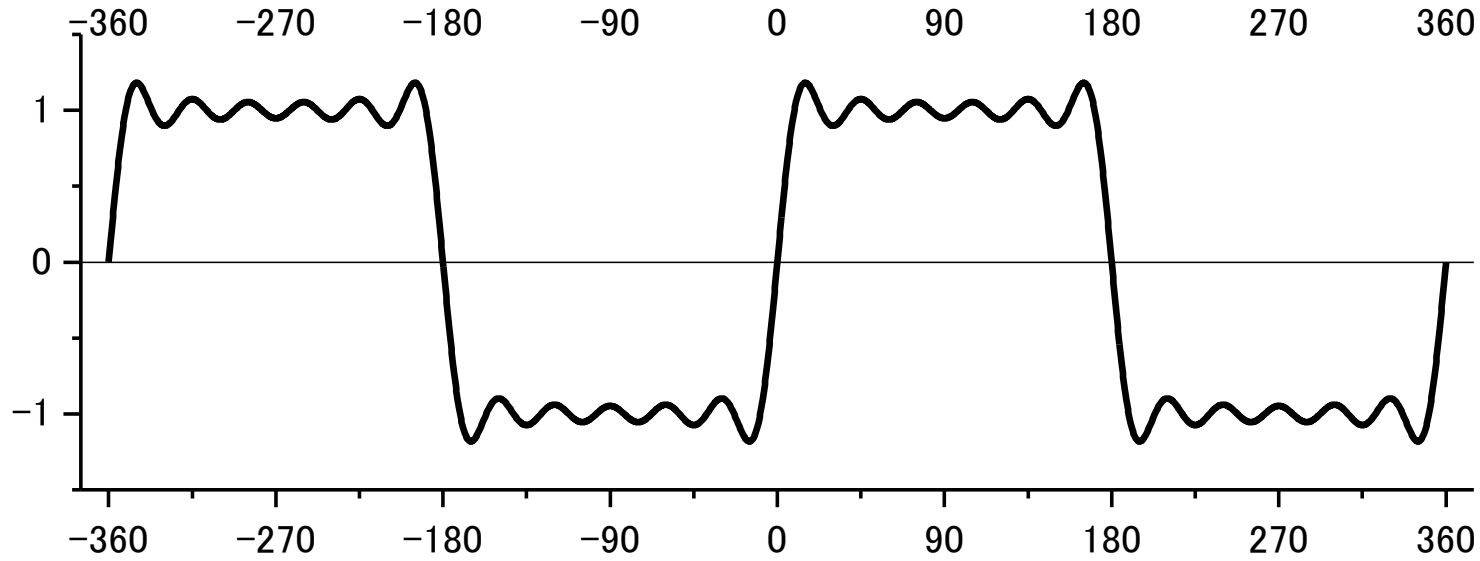
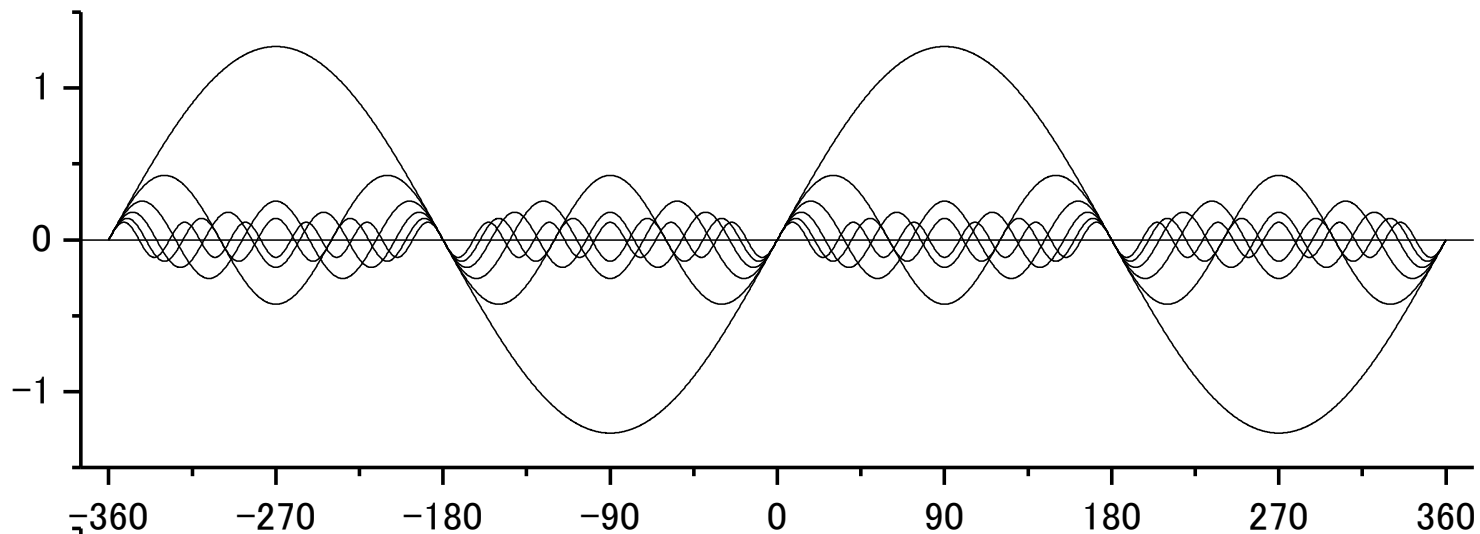


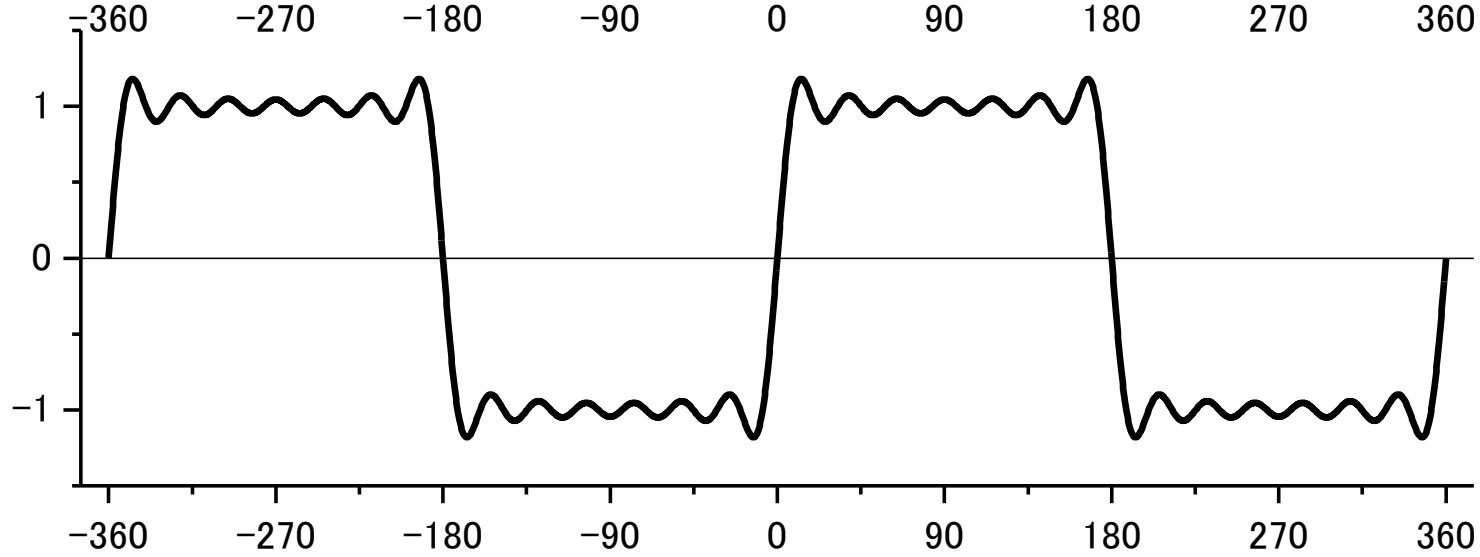
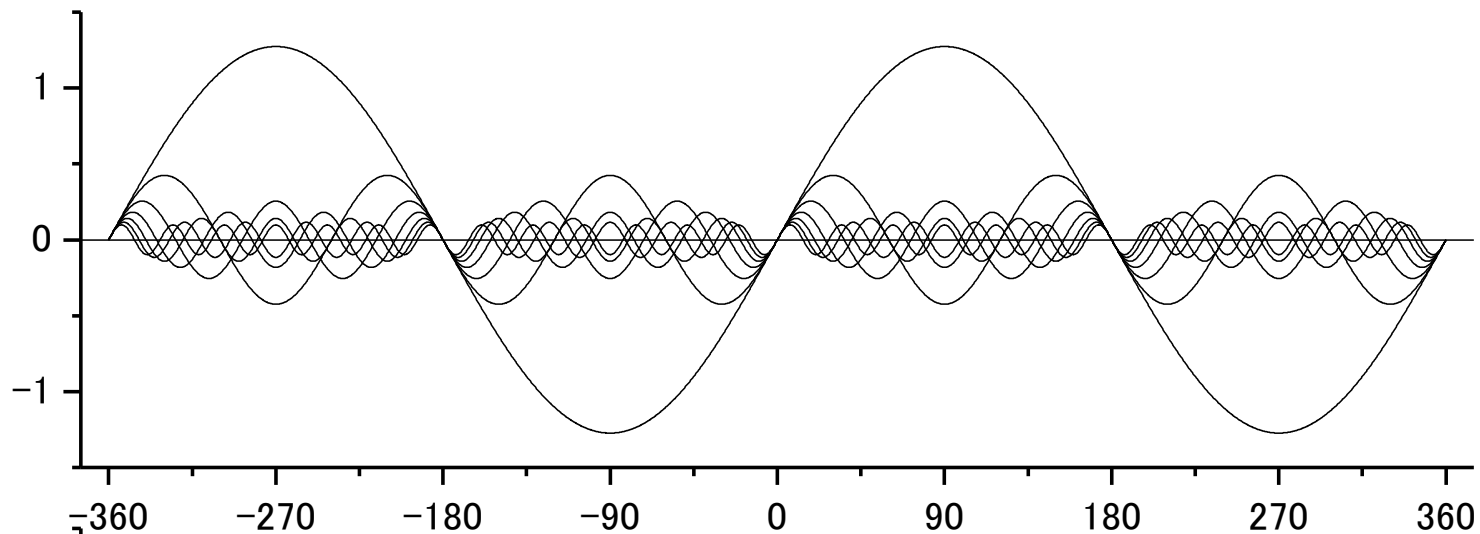


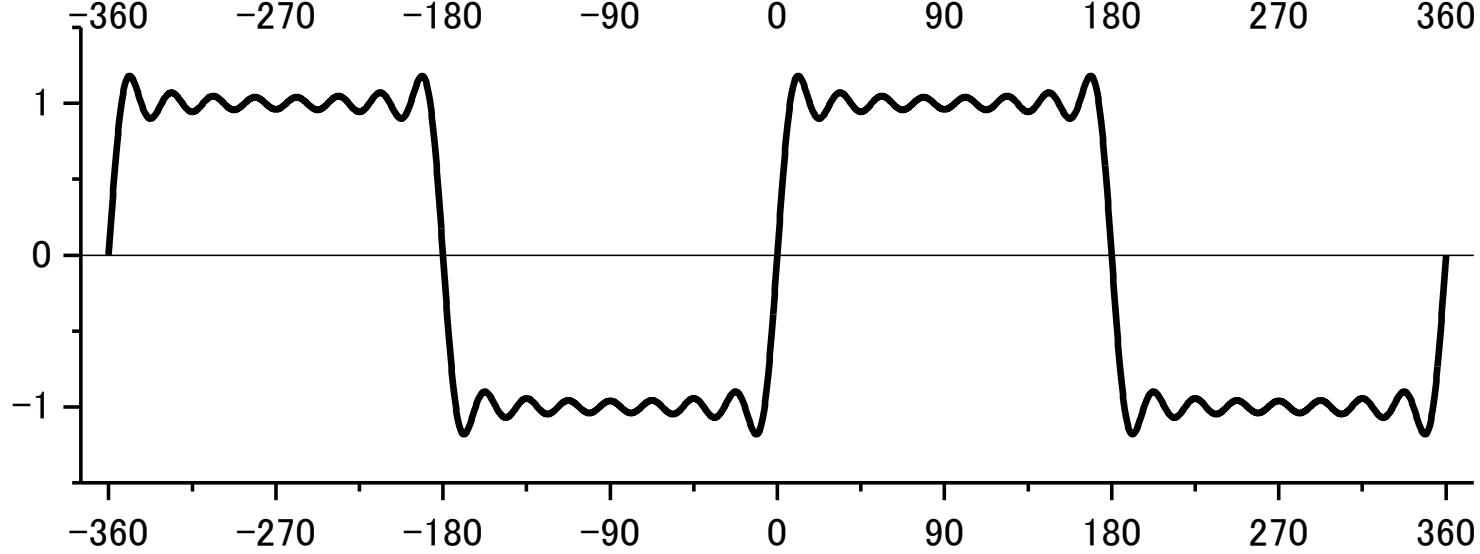
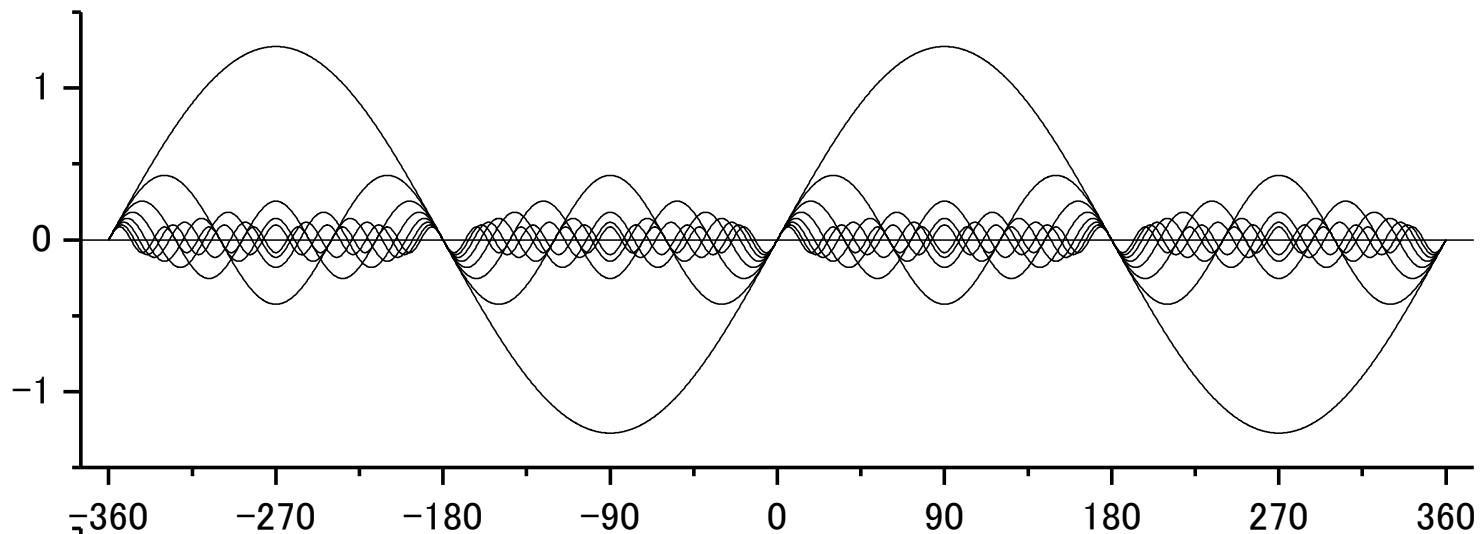


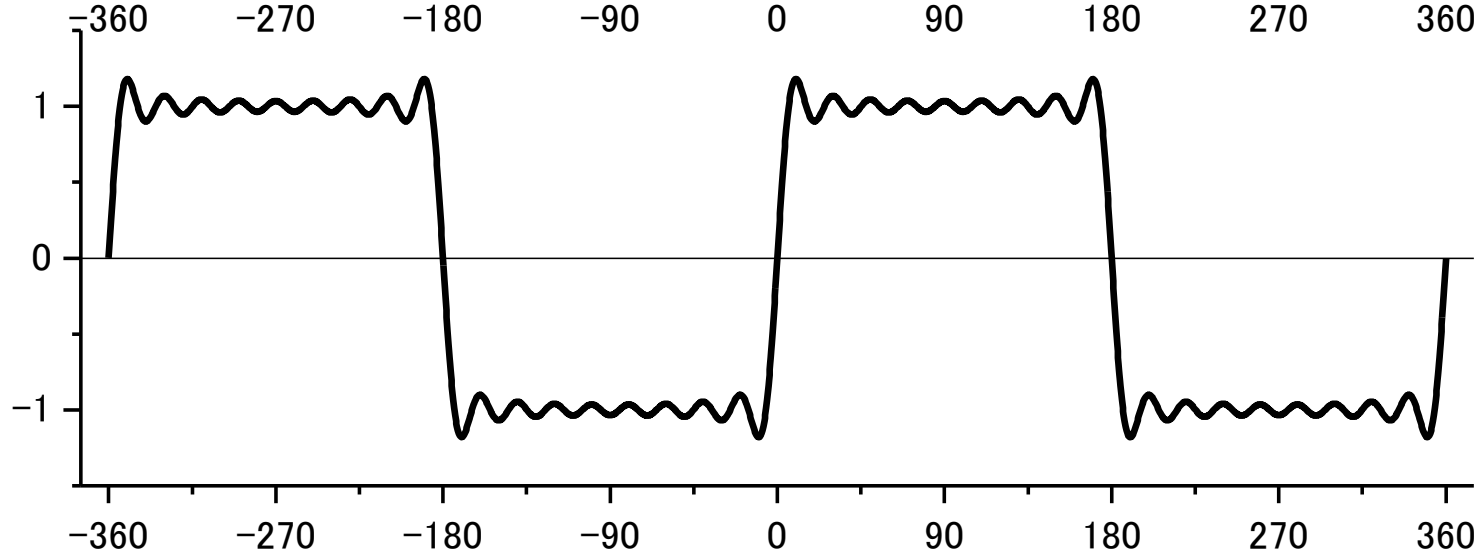
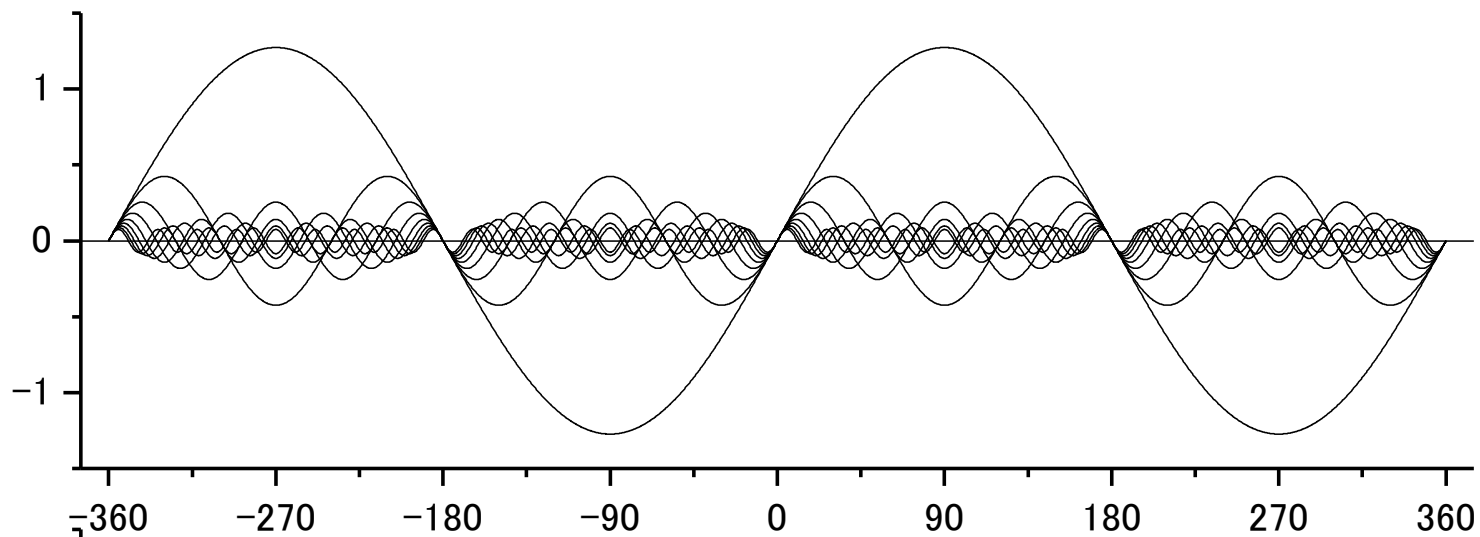


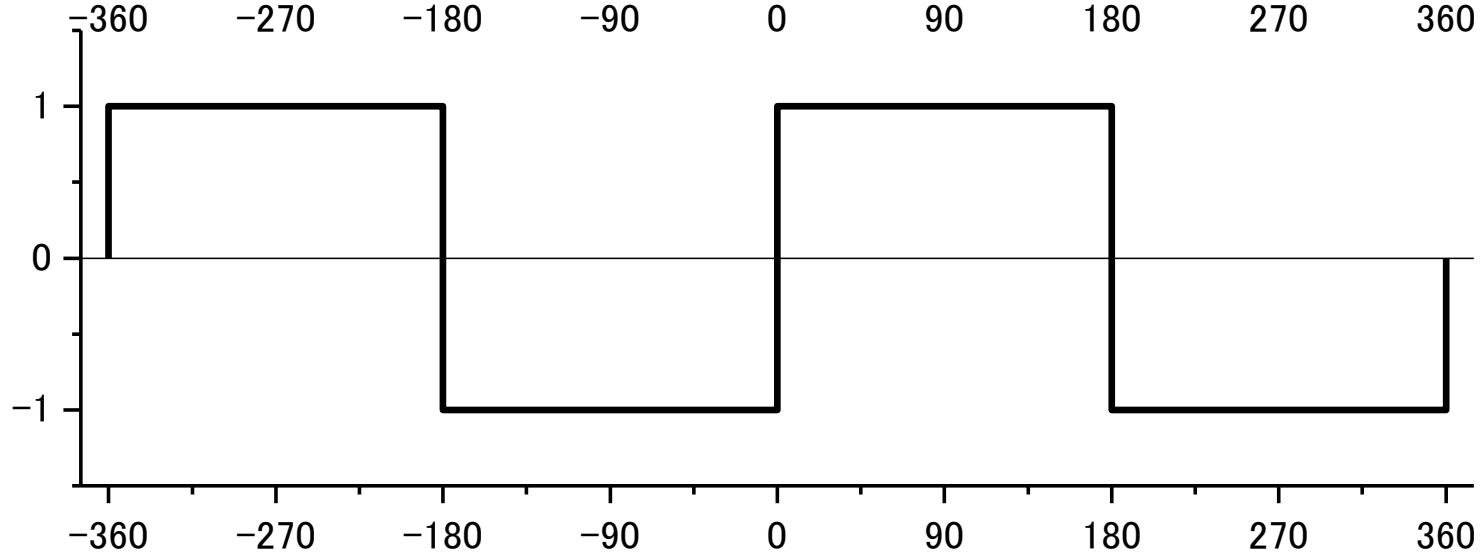
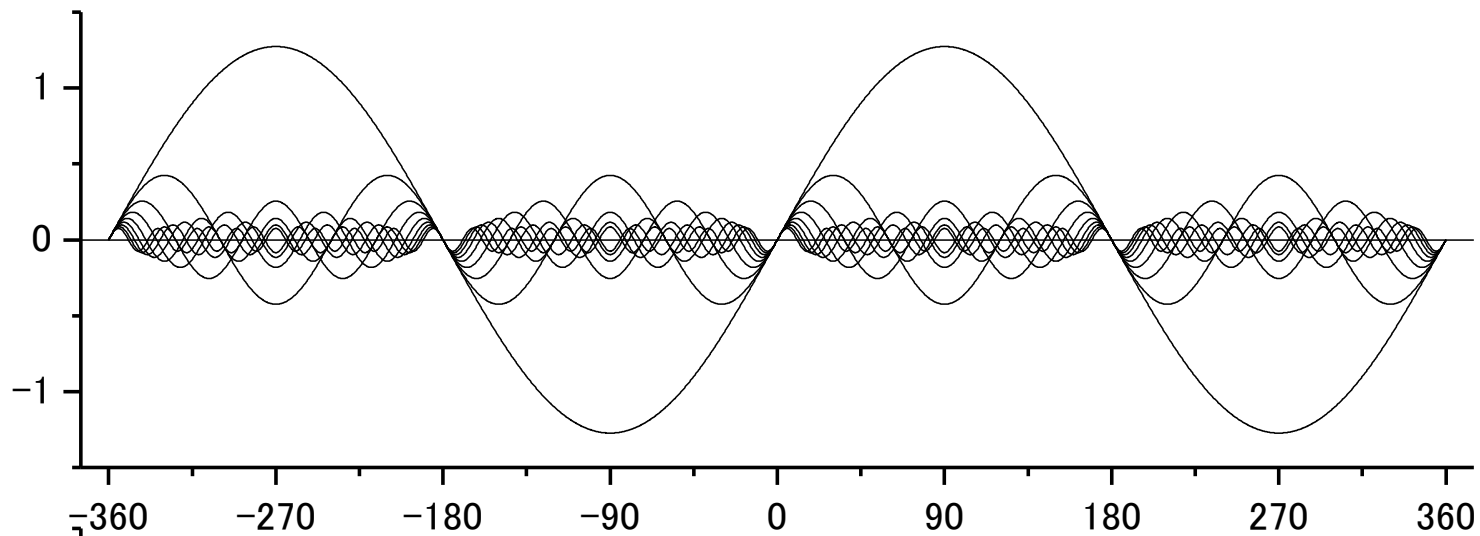




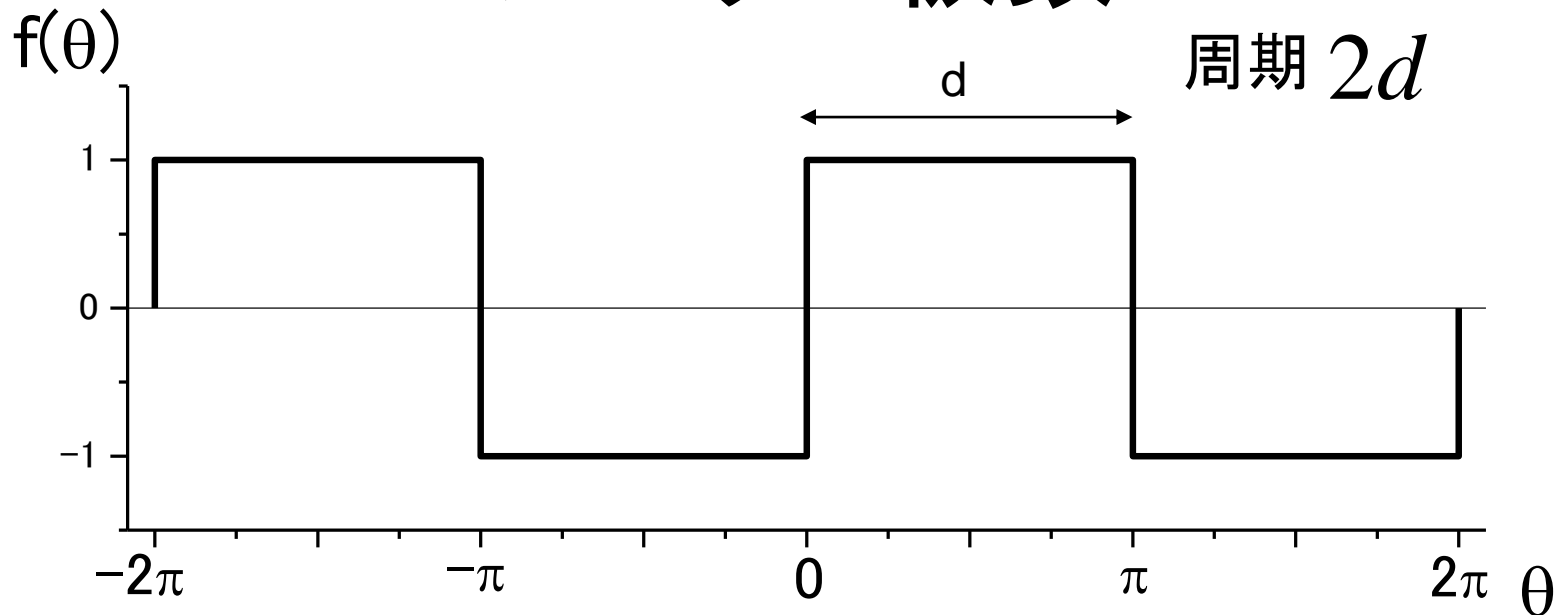








## フーリエ級数

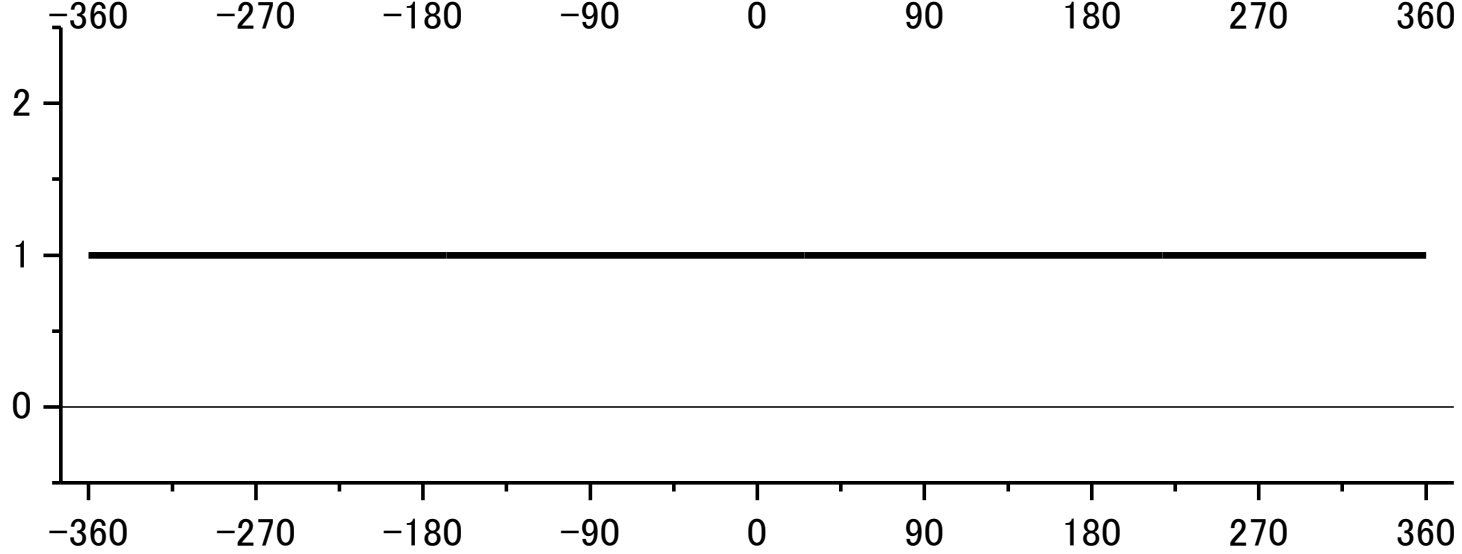
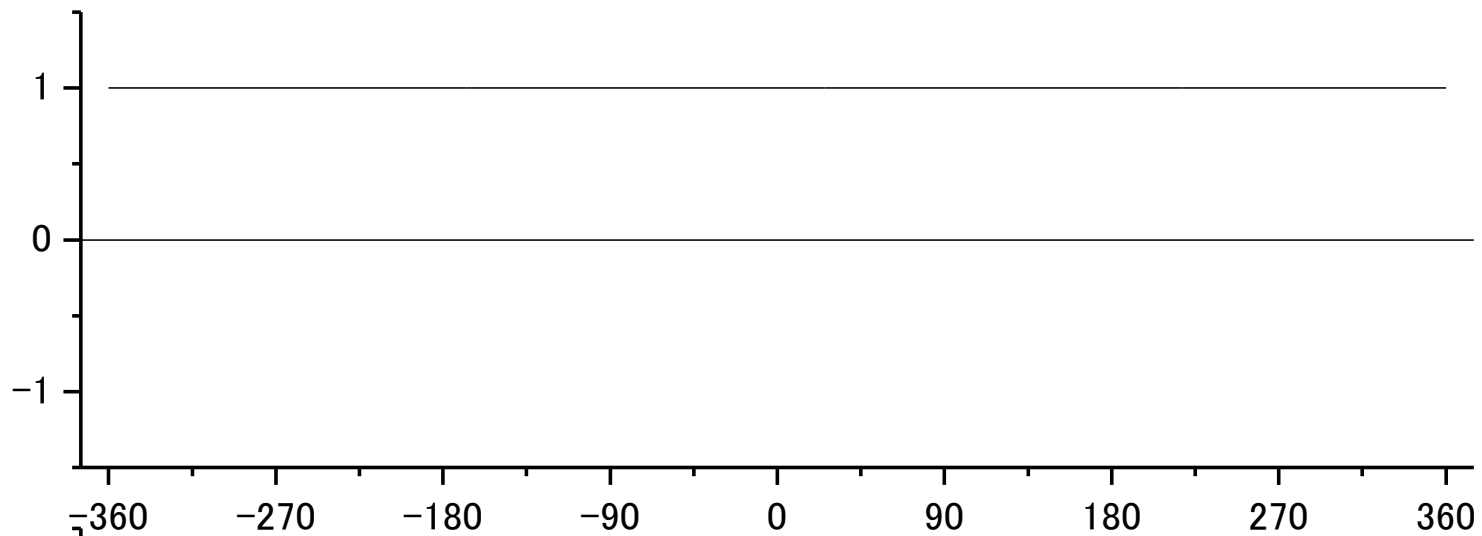


$$f(\theta) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \frac{1}{7} \sin 7\theta + \dots \right)$$

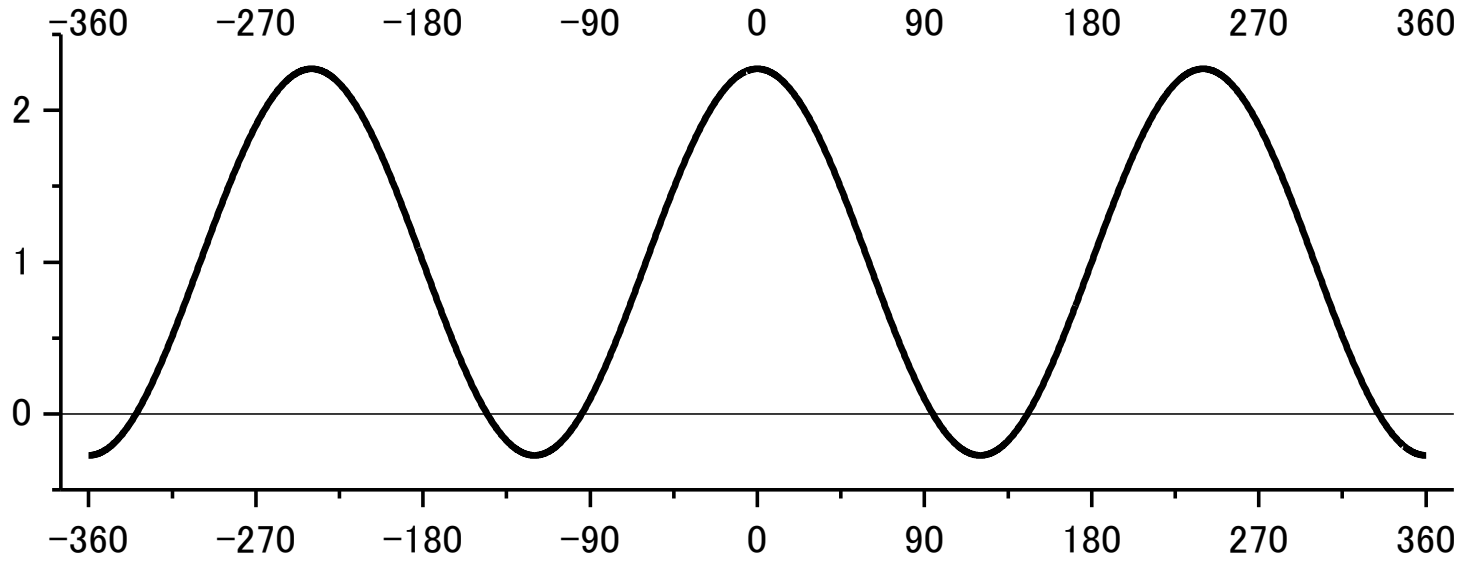
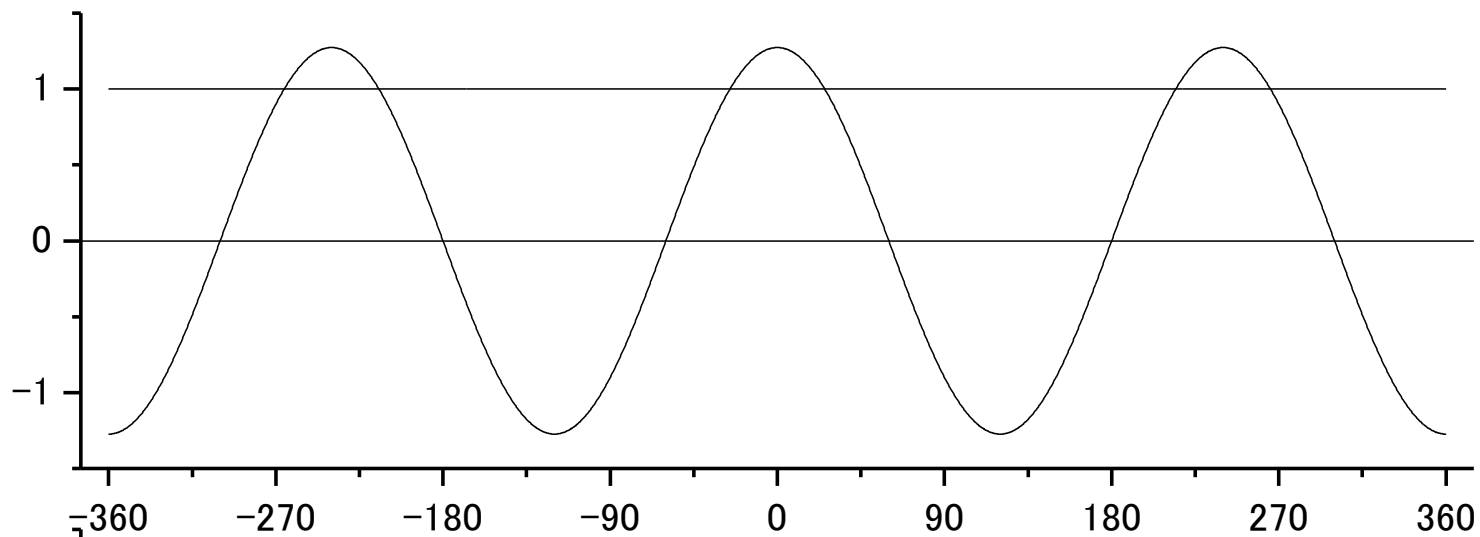
$$f\left(\theta = \frac{\pi}{d} x\right) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \frac{\pi}{d} x + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{\pi}{d} x + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{\pi}{d} x + \frac{1}{7} \sin 7 \frac{\pi}{d} x + \dots \right)$$

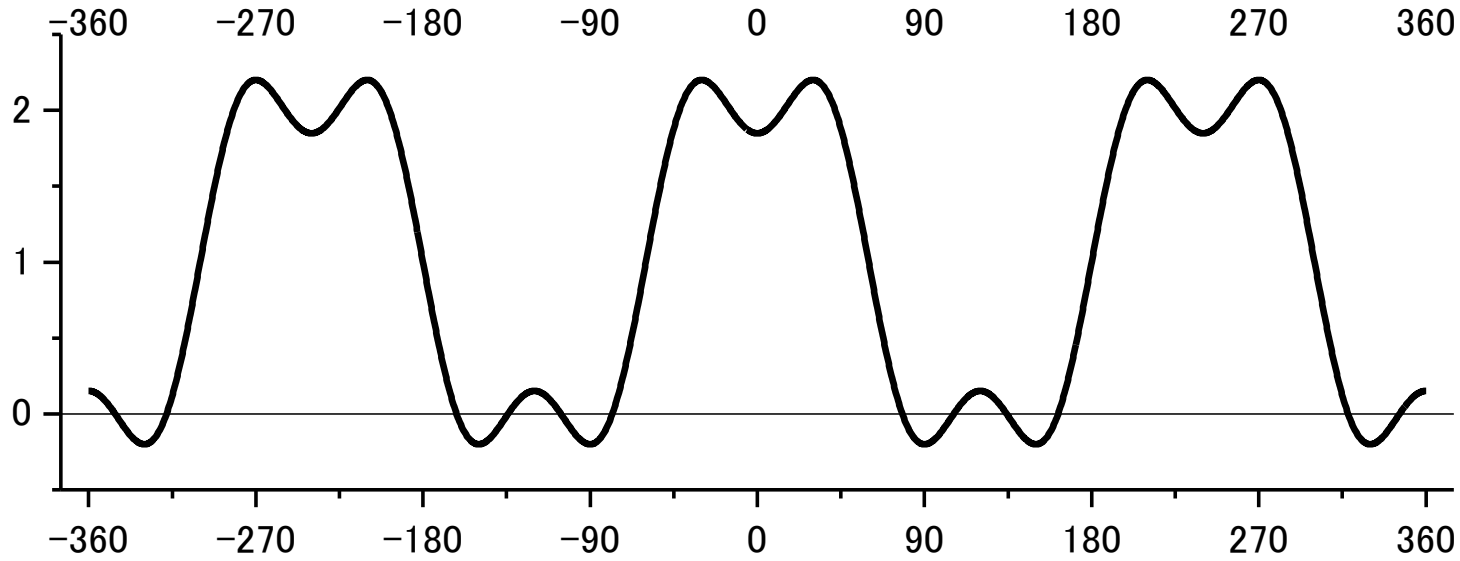
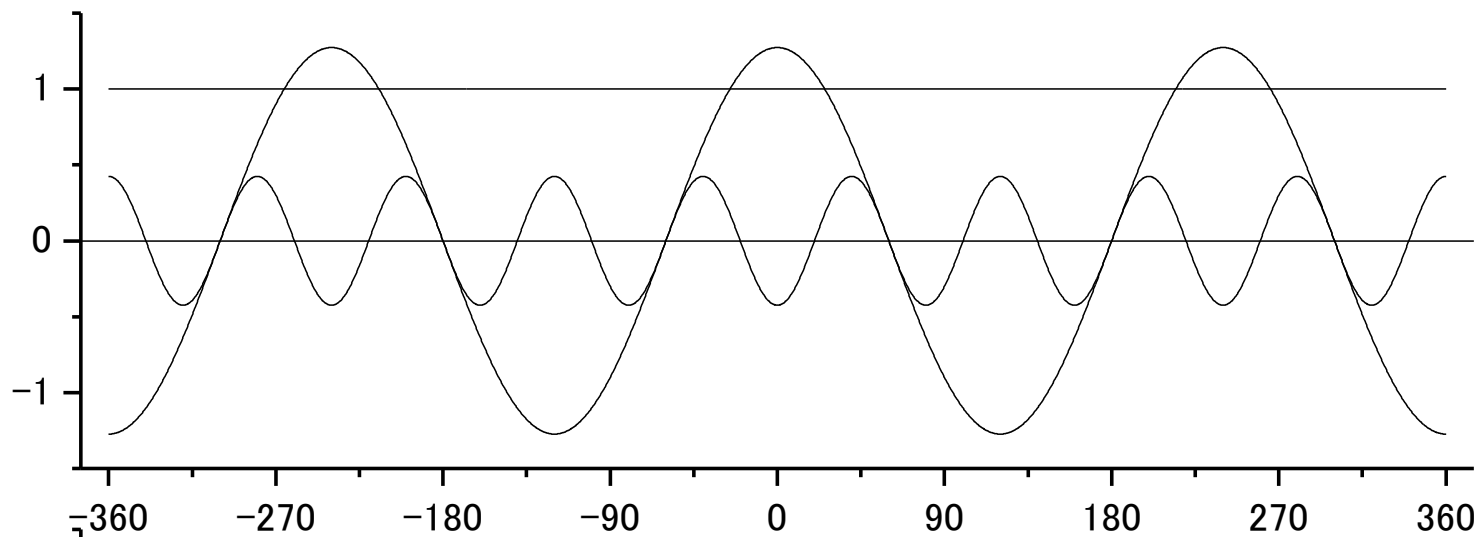
矩形関数は高い空間周波数成分  $k_n = n \frac{\pi}{d}$  を含む

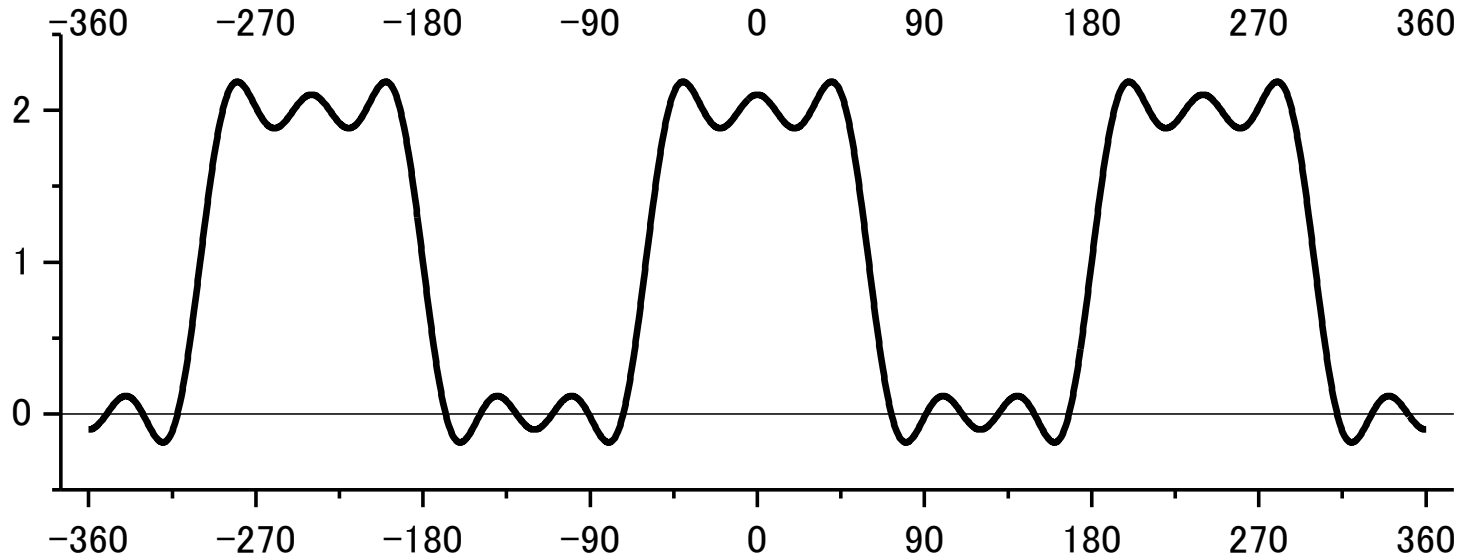
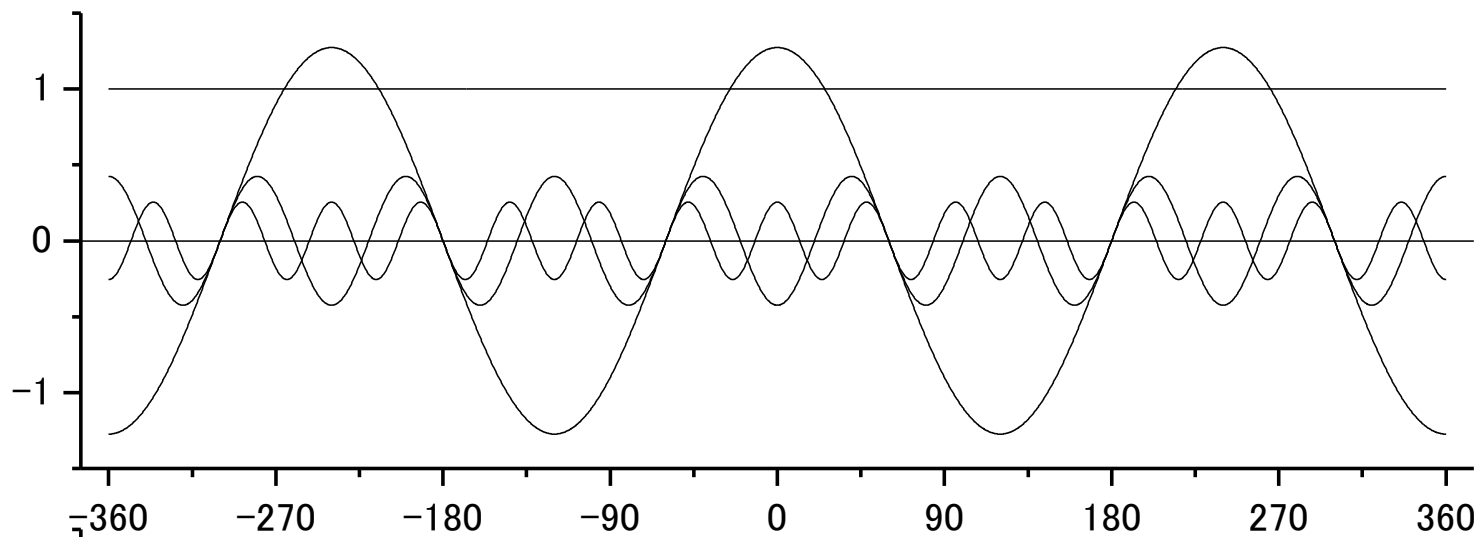
回折格子1のパターン  
sin関数で構成

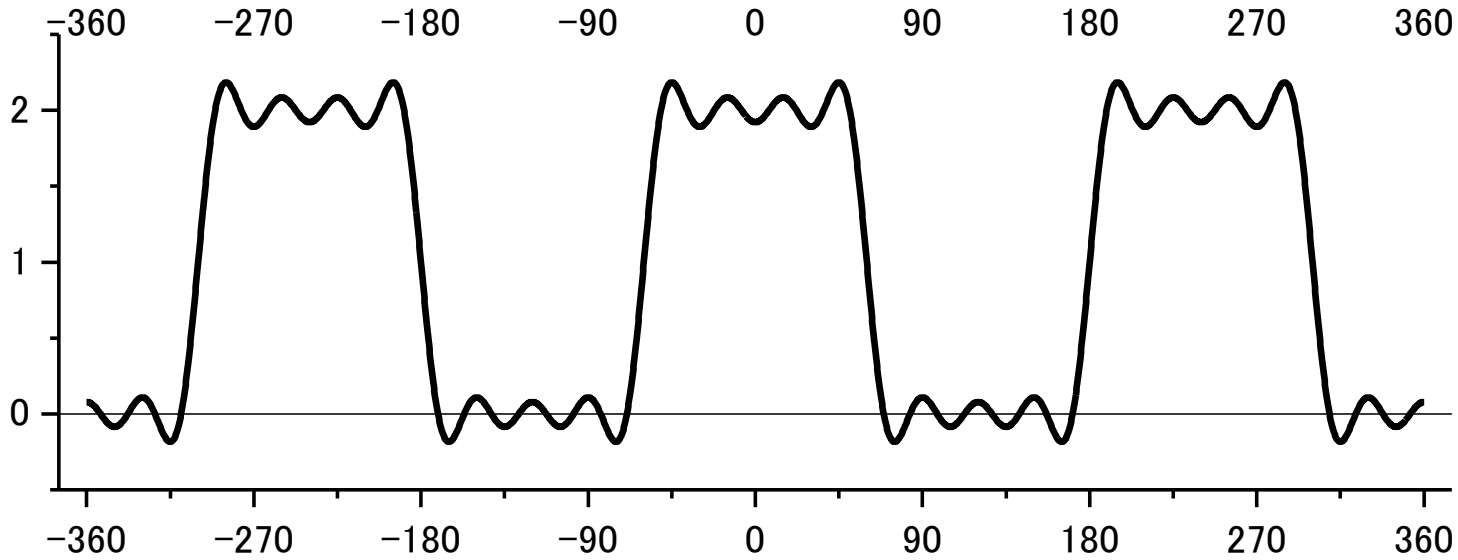
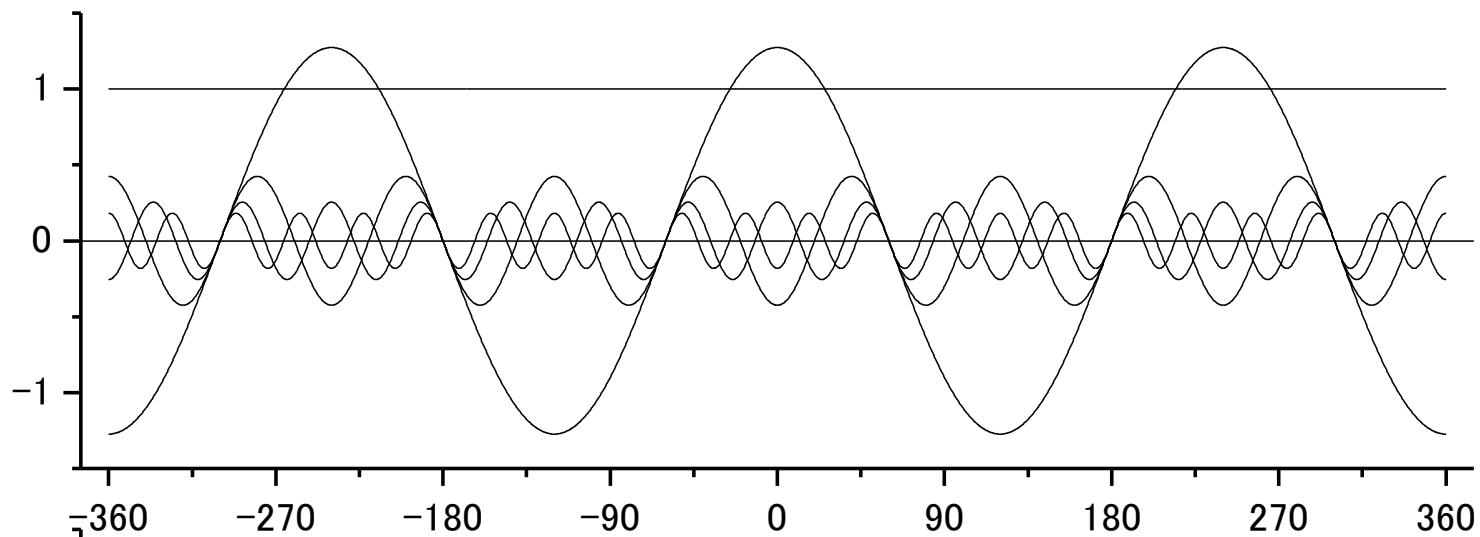


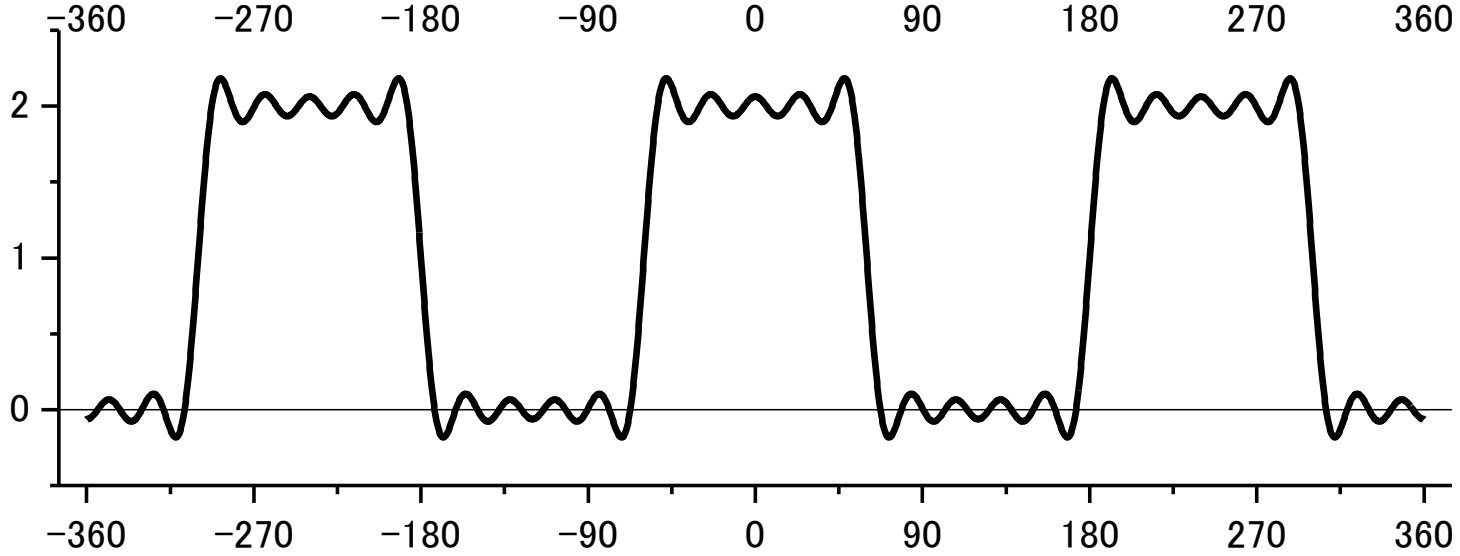
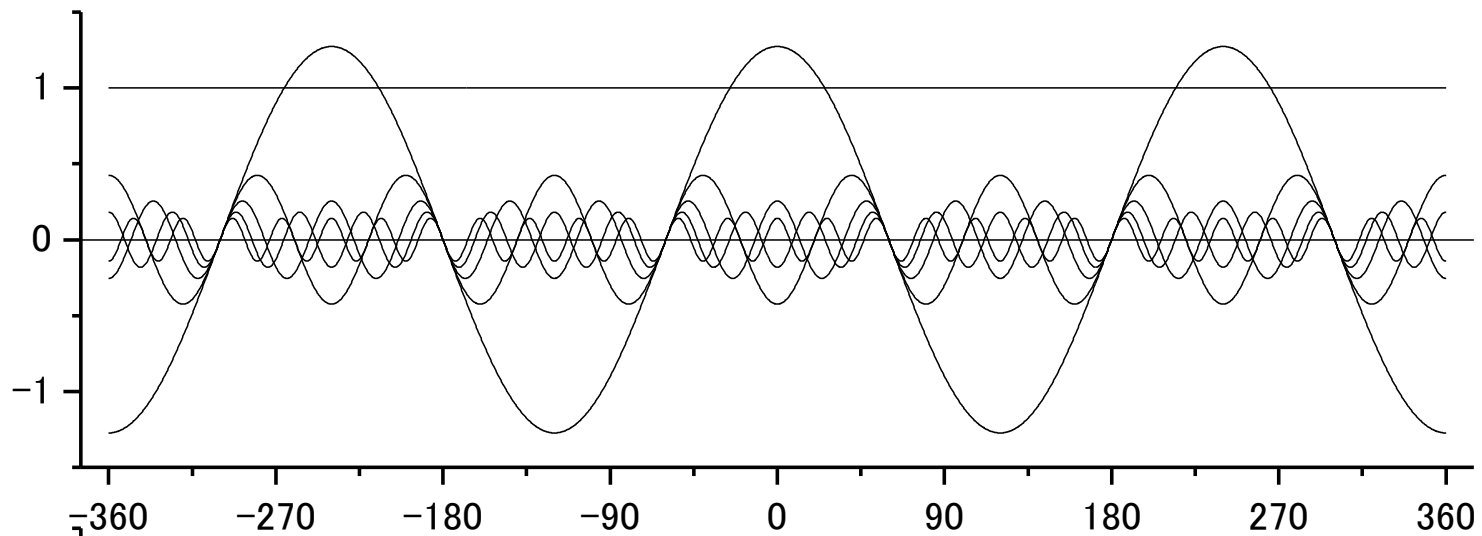


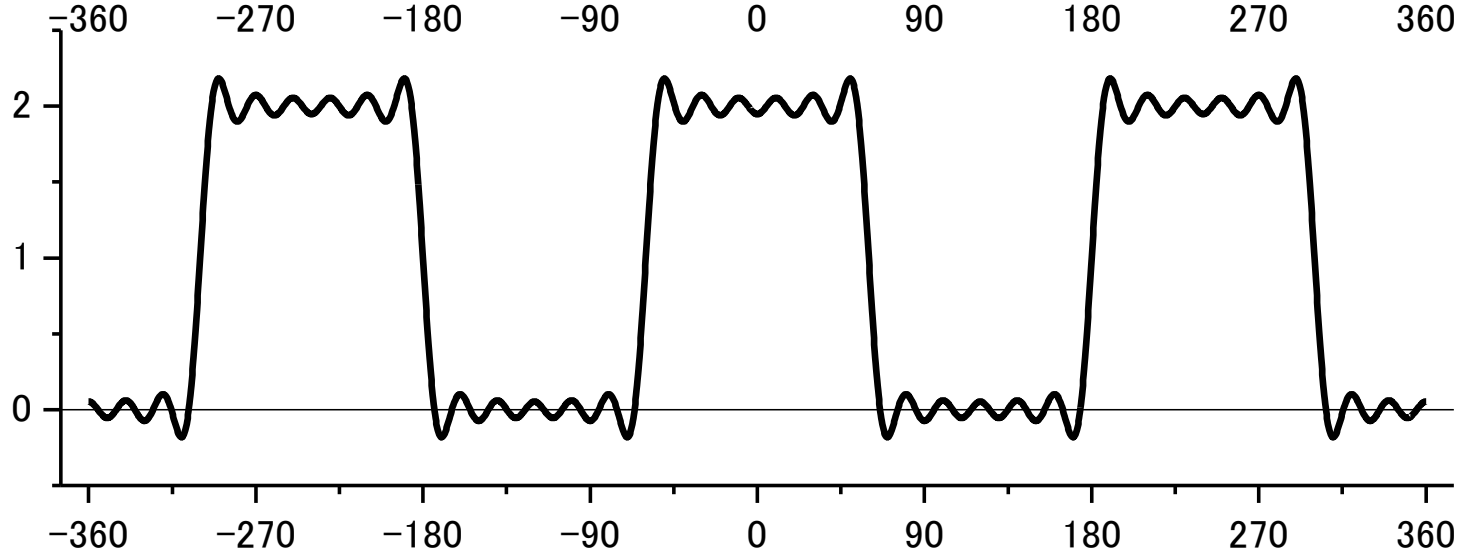
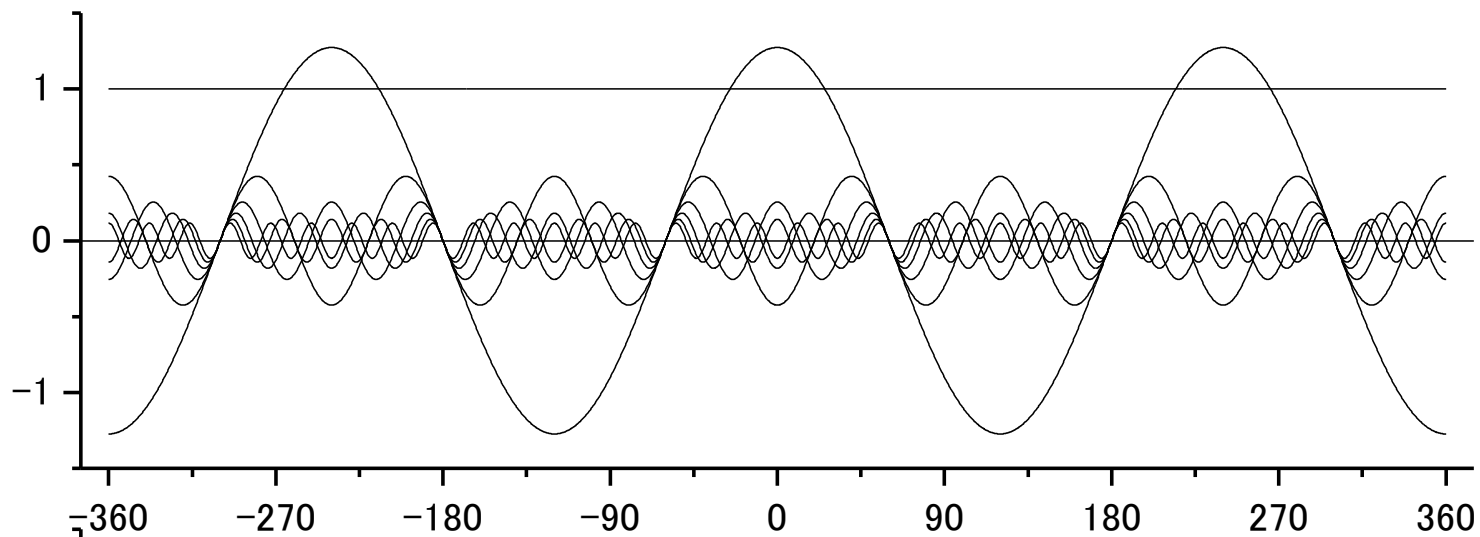


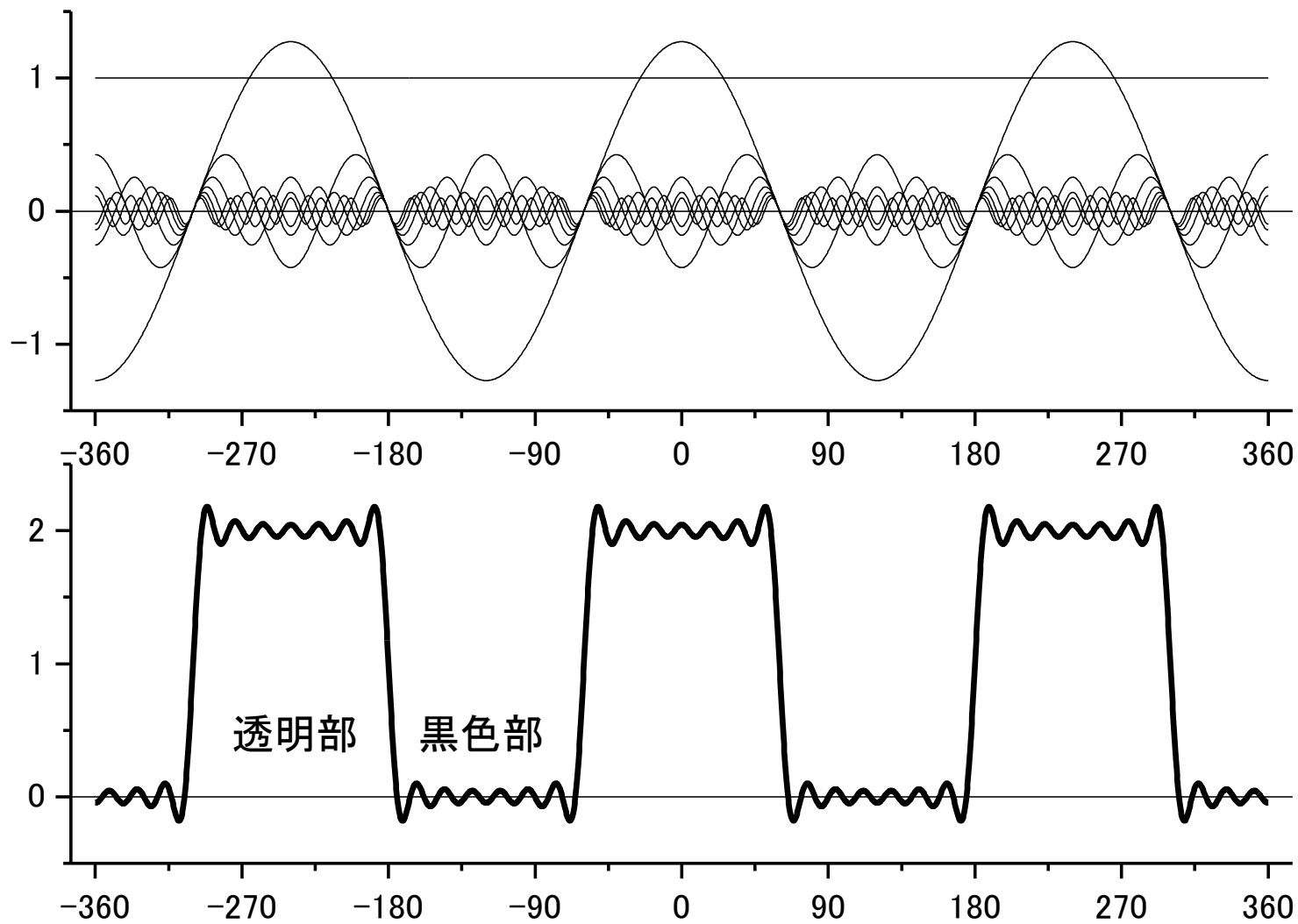












回折格子1のパターン (cos関数で構成)

$$f(\theta) = 1 + \frac{4}{\pi} \left( \cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \frac{1}{7} \cos 7\theta + \dots \right)$$

$$\theta = \frac{\pi}{d} x$$

$$f(\theta) = e^{i0x} + \frac{2}{\pi} \left[ \left( e^{i\frac{\pi}{d}x} + e^{-i\frac{\pi}{d}x} \right) - \frac{1}{3} \left( e^{i\frac{3\pi}{d}x} + e^{-i\frac{3\pi}{d}x} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \left( e^{i\frac{5\pi}{d}x} + e^{-i\frac{5\pi}{d}x} \right) - \frac{1}{7} \left( e^{i\frac{7\pi}{d}x} + e^{-i\frac{7\pi}{d}x} \right) + \dots \right]$$

周期  $2d$

$$k_{2d} = \frac{2\pi}{2d} = \frac{\pi}{d}$$

$$K = 0, \pm k_{2d}, \pm 3k_{2d}, \pm 5k_{2d}, \pm 7k_{2d}, \dots$$



# フーリエ級数

物理数学2

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{d} + b_n \sin \frac{n\pi x}{d} \right)$$

周期 $2d$

$$a_n = \frac{1}{d} \int_{-d}^d f(x) \cos \frac{n\pi x}{d} dx \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{d} \int_{-d}^d f(x) \sin \frac{n\pi x}{d} dx \quad n = 1, 2, \dots$$

# フーリエ変換

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

$$\begin{aligned} F(k) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x)(\cos kx - i \sin kx) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cos kx dx - i \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \sin kx dx = A(k) - iB(k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(k) - iB(k)](\cos kx + i \sin kx) dk \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(k) \cos kx + B(k) \sin kx] dk \\ &\quad + i \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(k) \sin kx - B(k) \cos kx] dk \end{aligned}$$

$f(x)$ が実関数ならば

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(k) \cos kx + B(k) \sin kx] dk$$

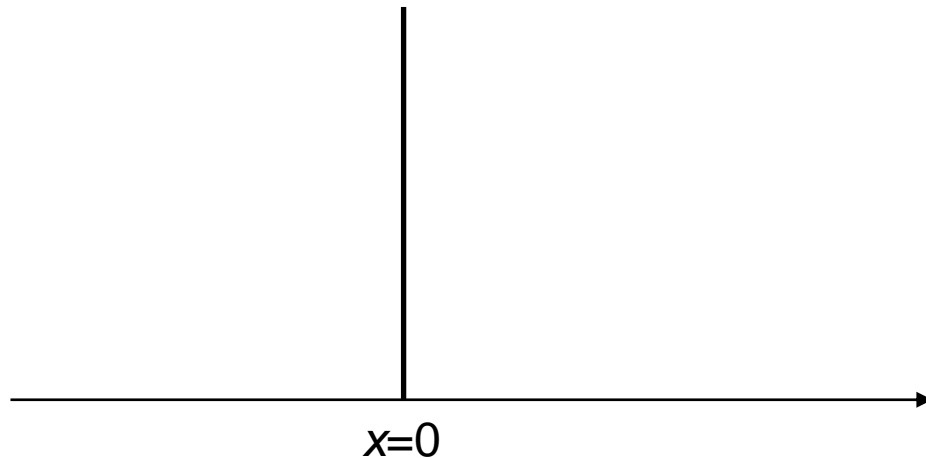
$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{d} + b_n \sin \frac{n\pi x}{d} \right) \quad \text{と比較せよ} \quad k_n = \frac{n\pi}{d}$$

# デルタ関数

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & (x \neq 0) \\ \infty & (x = 0) \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - a) dx = f(a)$$



# 回折格子による回折では、 回折格子から横方向運動量を受け取ると見なせる

周期 $d$ の回折格子

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd)$$

$$f(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - nd) e^{-ikx} dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-indk} = \frac{2\pi}{d} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(k - \frac{2\pi}{d}m\right)$$

$$k_d = \frac{2\pi}{d} \text{ とすると、} \delta(k - mk_d)$$

周期 $d$ の細かい開口の回折格子は、空間周波数 $mk_d$ の波より構成されている

$$d \sin \theta = m\lambda$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta = m \frac{2\pi}{d}$$

$$k \sin \theta = mk_d$$

# 回折格子から横方向運動量を受け取る

→ 回折格子を含めて運動量保存  
(入射光運動量 + 回折格子運動量 → 回折光運動量)

入射光と回折光の運動量のみ注目すると、  
回折格子の存在で横方向の一様性がない

→ 横方向運動量が保存されない とも見ることができる

$d$ を小さく( $\lambda$ を大きく)した場合、屈折の法則に帰着した  
どのように解釈できるだろうか？

# たたみこみ積分

物理数学2

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

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

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

# 回折格子3の回折像の フーリエ解析

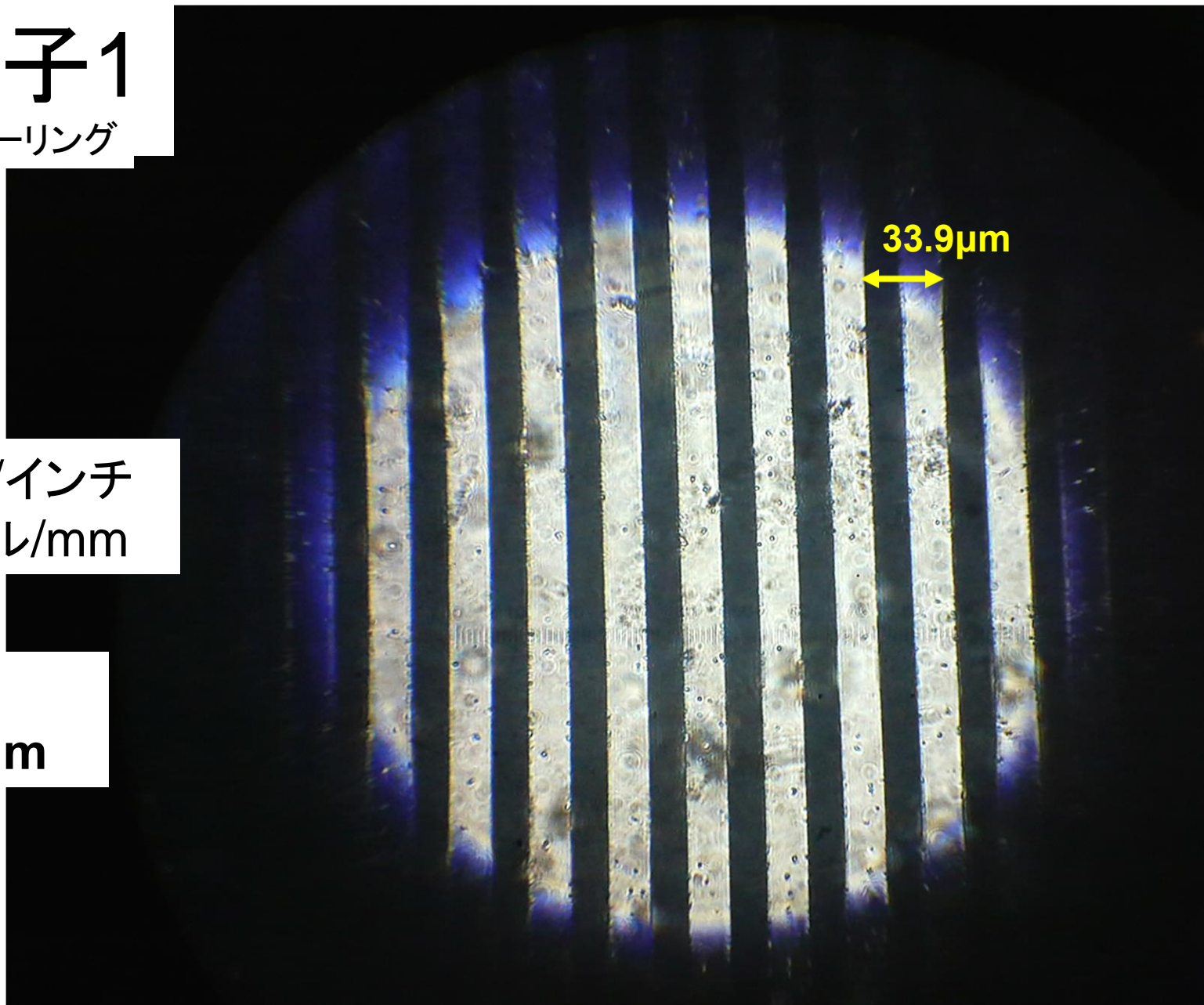
# 回折格子1

ロンキールーリング

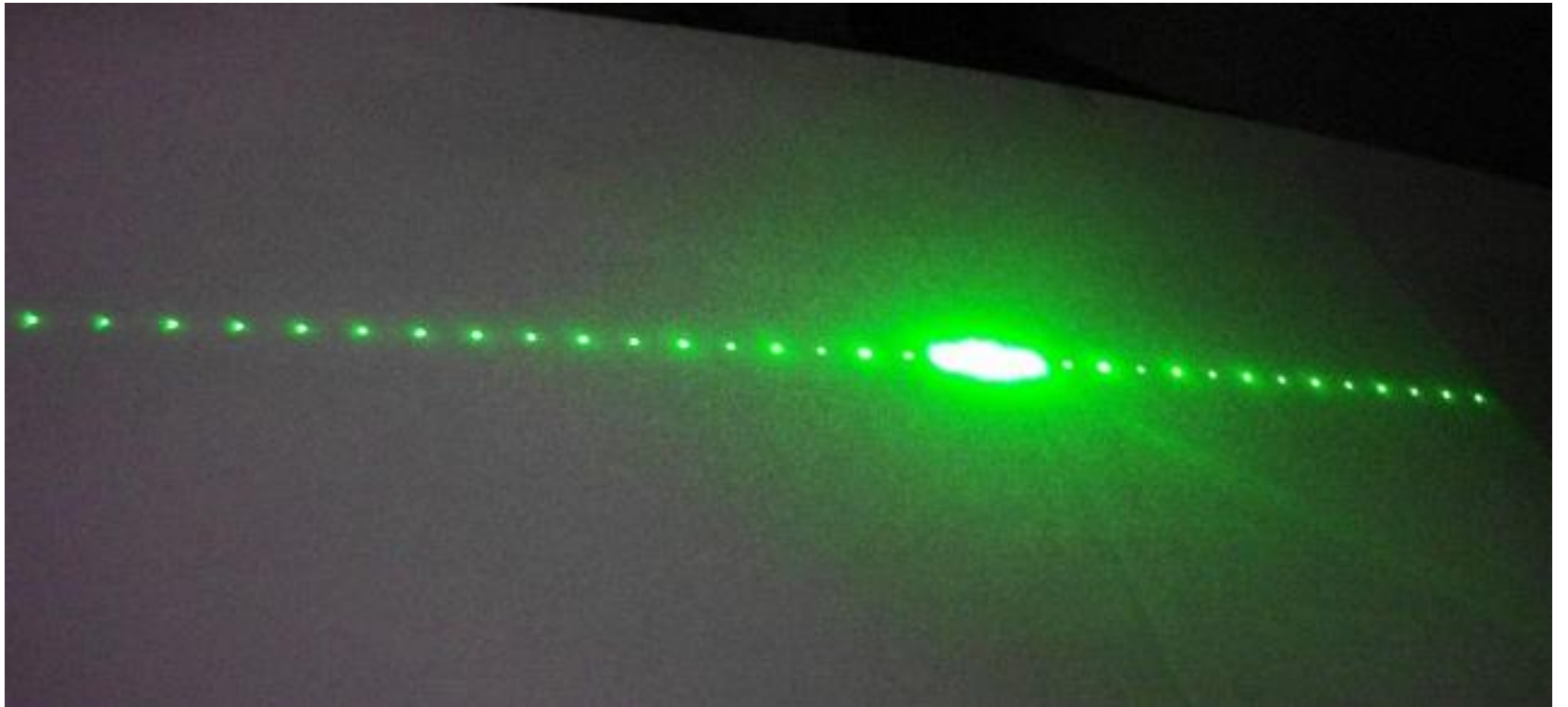
750サイクル/インチ  
29.52サイクル/mm

1周期  
33.9 $\mu$ m

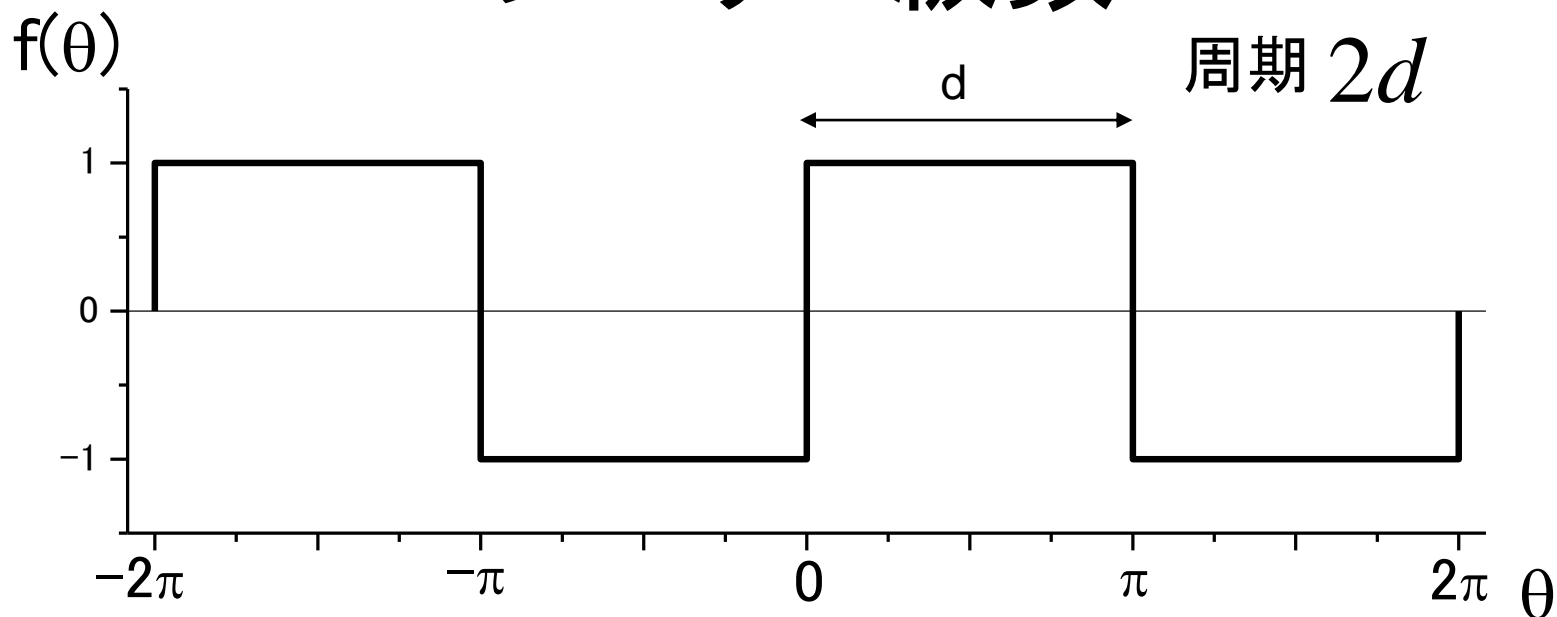
33.9 $\mu$ m







## フーリエ級数



$$f(\theta) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \frac{1}{7} \sin 7\theta + \dots \right)$$

$$f\left(\theta = \frac{\pi}{d} x\right) = \frac{4}{\pi} \left( \sin \frac{\pi}{d} x + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{\pi}{d} x + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{\pi}{d} x + \frac{1}{7} \sin 7 \frac{\pi}{d} x + \dots \right)$$

矩形関数は高い空間周波数成分  $k_n = n \frac{\pi}{d}$  を含む

# δ関数のフーリエ級数

$-d \leq x \leq d$ で定義された関数(この区間外では周期 $2d$ で繰り返す)

$$\begin{aligned}\delta(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{d} + b_n \sin \frac{n\pi x}{d} \right) \\ &= \frac{1}{2d} + \frac{1}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{d} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{d} + \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{d} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \cos \frac{n\pi x}{d} + i \sin \frac{n\pi x}{d} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i \frac{n\pi x}{d}} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2md)\end{aligned}$$

$$k_n = n \frac{\pi}{d} = n \frac{2\pi}{2d} \quad \Delta k = k_{n+1} - k_n = \frac{\pi}{d} \quad \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Delta k e^{ik_n x} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - m \frac{2\pi}{\Delta k}) \quad d \rightarrow \infty (\Delta k \rightarrow 0) \quad \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikx} = \delta(x)$$

∴ 周期 $2d$

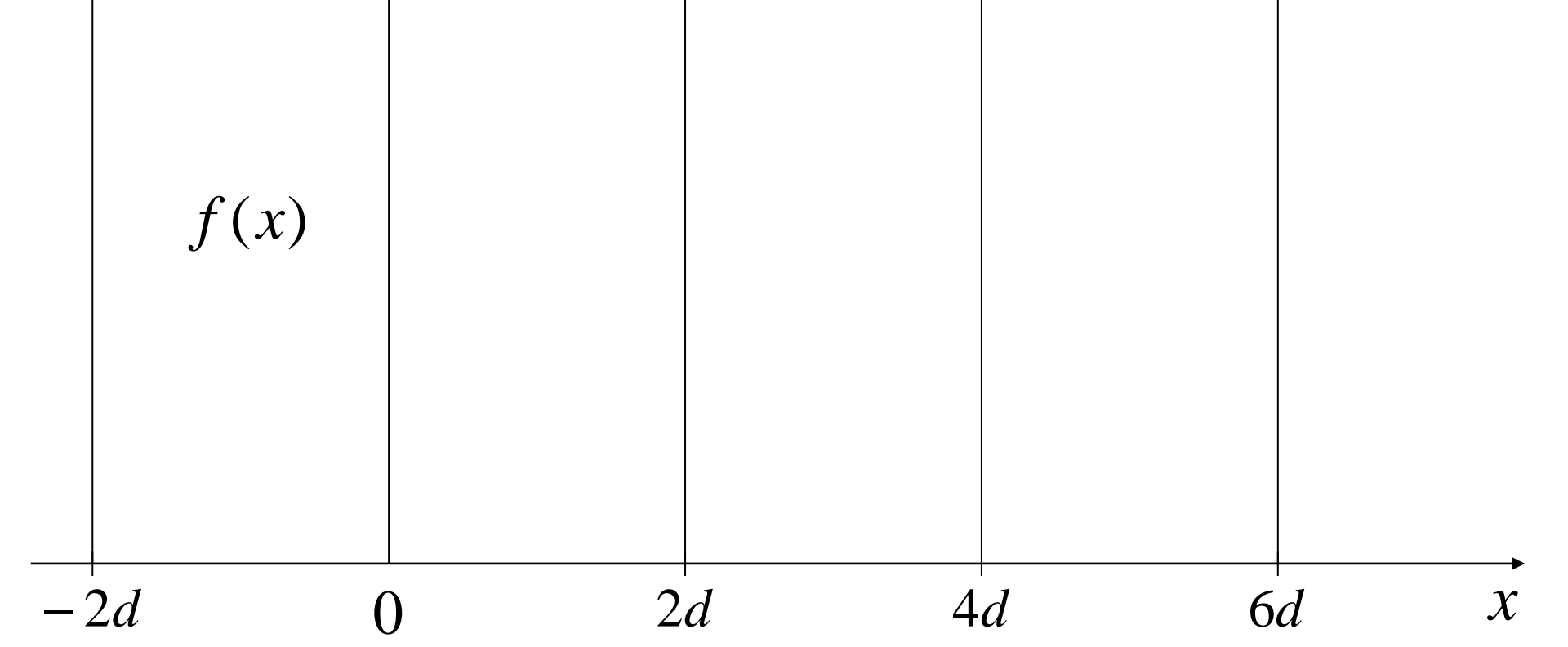
$$a_n = \frac{1}{d} \int_{-d}^d \delta(x) \cos \frac{n\pi x}{d} dx = \frac{1}{d} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{d} \int_{-d}^d \delta(x) \sin \frac{n\pi x}{d} dx = 0 \quad n = 1, 2, \dots$$

$$f(x) = \frac{1}{2d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i \frac{n\pi x}{d}} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2md) \text{で } x \rightarrow k, d \rightarrow \frac{\pi}{d} \text{ とする}$$

$$\frac{d}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{indk} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(k - \frac{2\pi m}{d})$$

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{2d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i \frac{n\pi x}{d}} \right) e^{-ikx} dx = \frac{\pi}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i(k - \frac{n\pi}{d})x} dx = \frac{\pi}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(k - \frac{n\pi}{d}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2md) \right] e^{-ikx} dx = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-ik2md}\end{aligned}$$



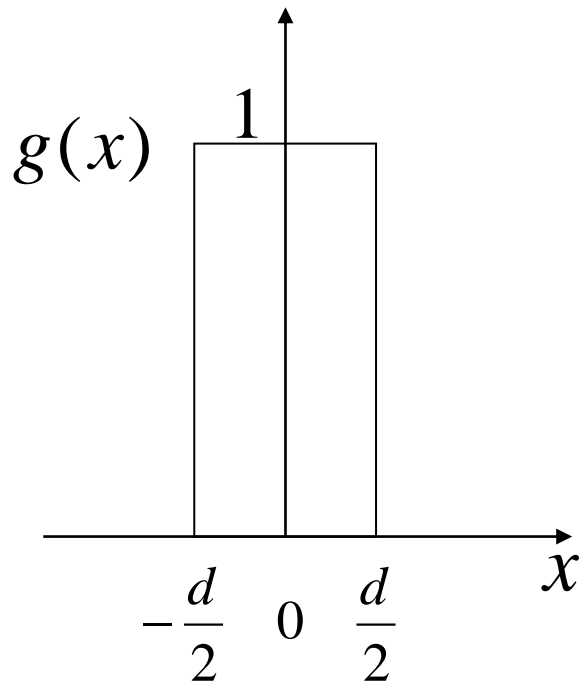
$f(x)$

$-2d$        $0$        $2d$        $4d$        $6d$        $x$

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - 2nd)$$

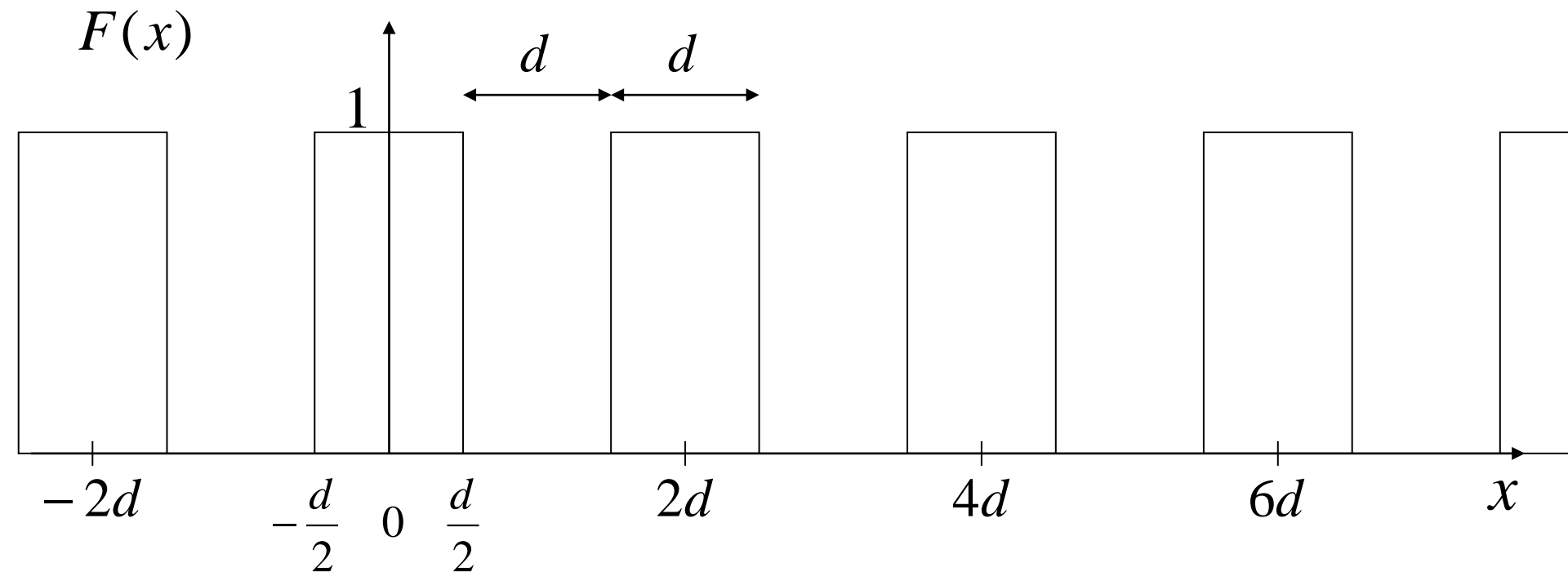
$$f(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - 2nd) e^{-ikx} dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i2ndk} = \frac{\pi}{d} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(k - \frac{\pi}{d}m\right)$$



$$g(k) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{-ikx} dx$$

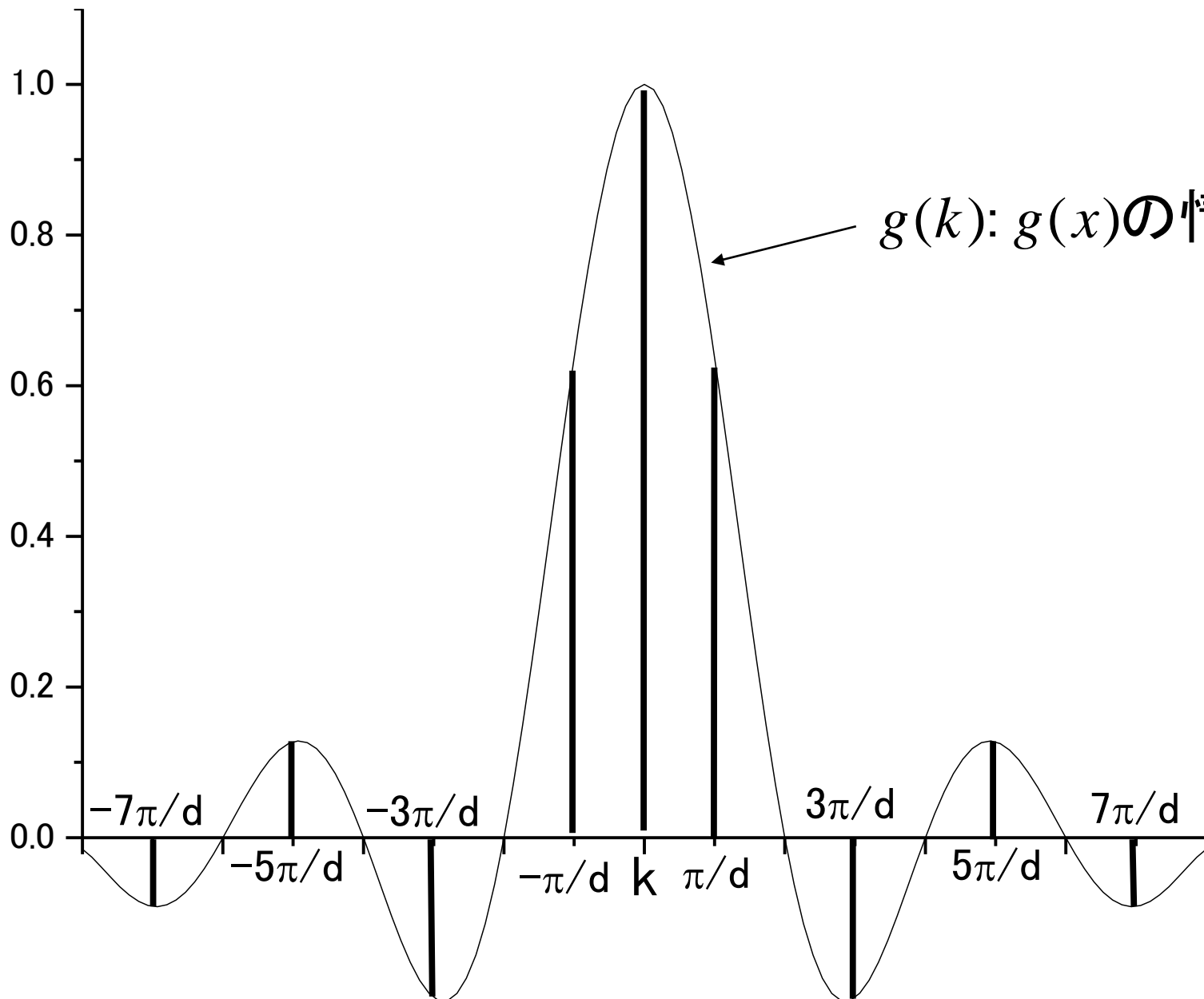
$$= \int_{-d/2}^{d/2} e^{-ikx} dx = \left[ \frac{e^{-ikx}}{-ik} \right]_{-d/2}^{d/2} = d \frac{e^{-ik \frac{d}{2}} - e^{ik \frac{d}{2}}}{-ikd} = d \frac{\sin \frac{kd}{2}}{\frac{kd}{2}}$$



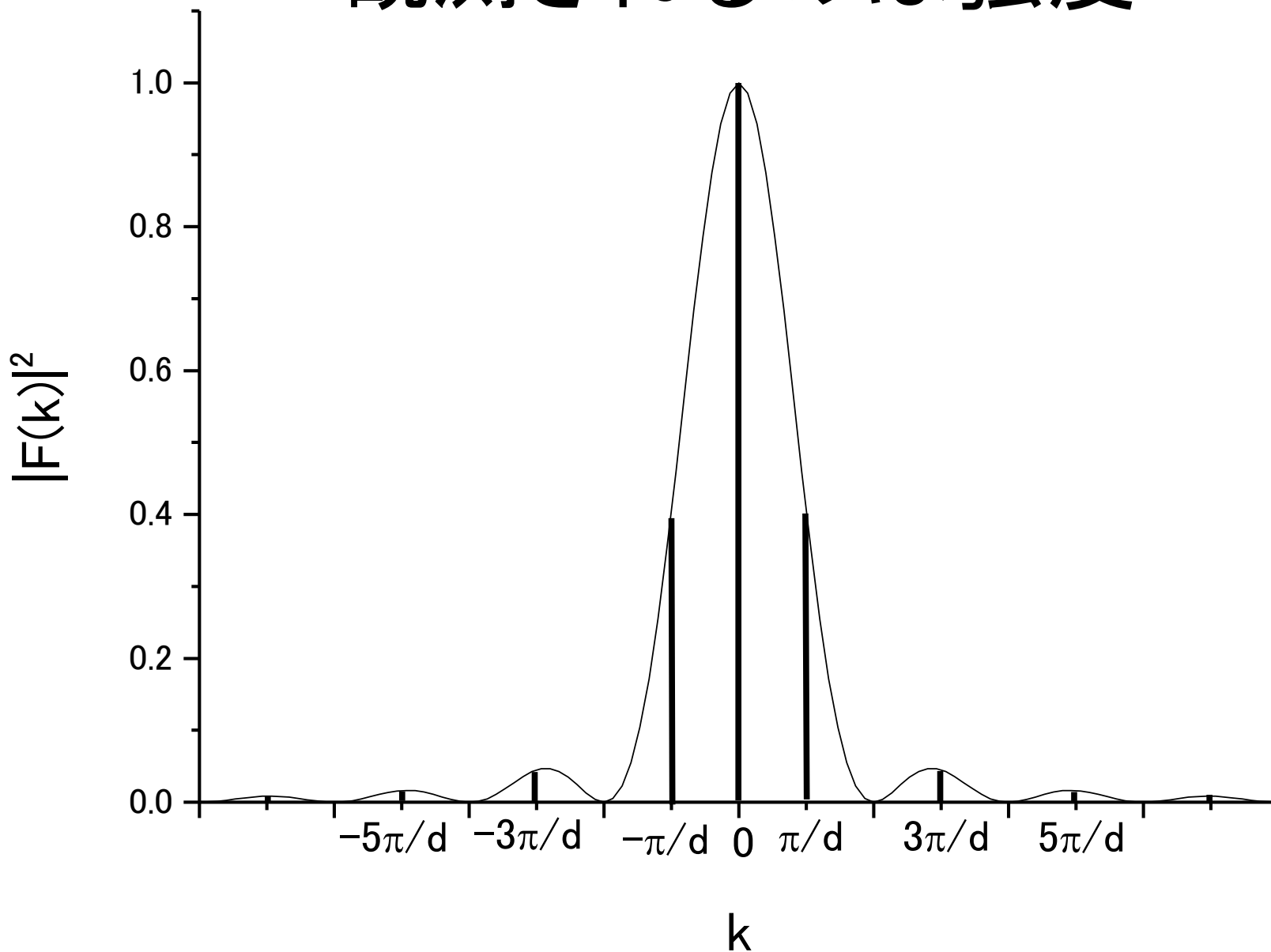
$$F(x) = f(x) \otimes g(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x') g(x - x') dx' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(x - 2nd)$$

$$F(k) = f(k) g(k) = \pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(k - \frac{\pi}{d} n) \frac{\sin \frac{kd}{2}}{\frac{kd}{2}} = \pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n}{2}}{\frac{\pi n}{2}} \delta(k - \frac{\pi}{d} n)$$

F(k) (規格化)

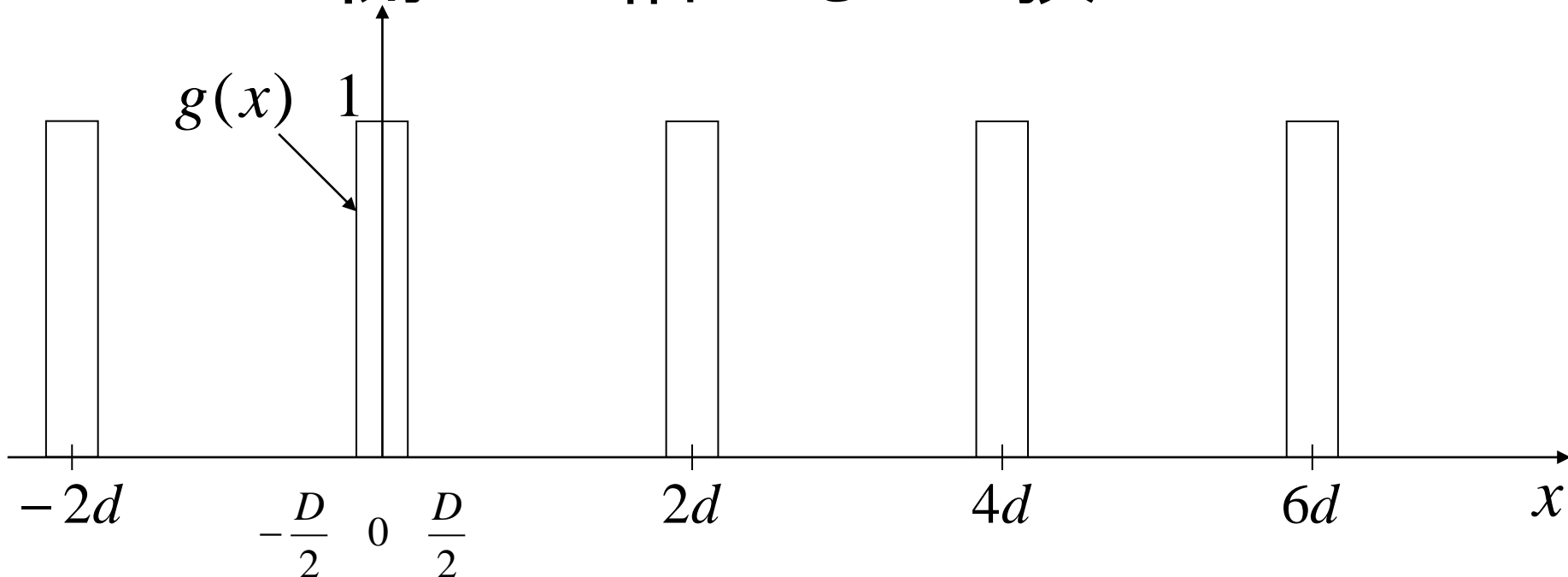


# 観測されるのは強度



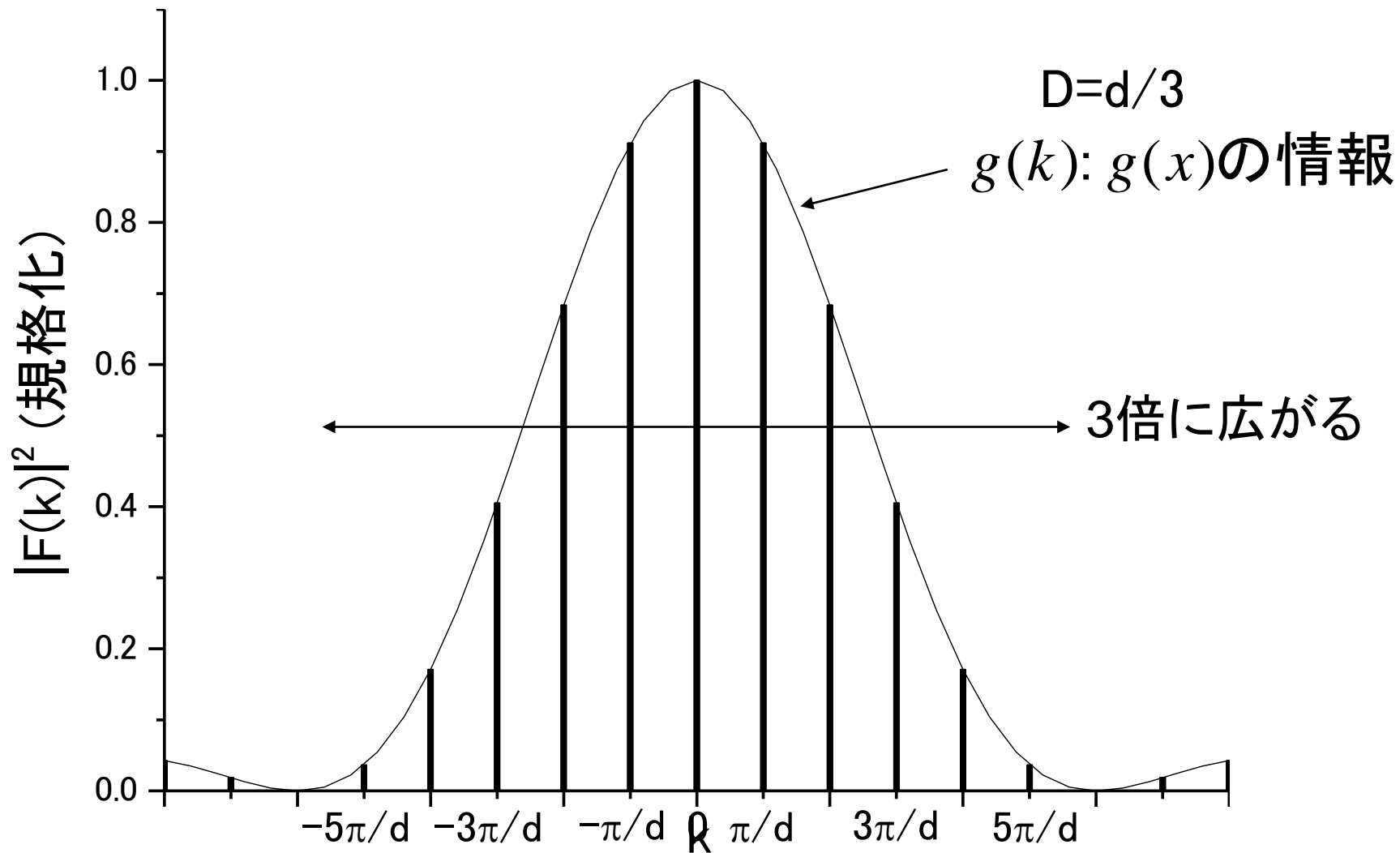


# 開口の幅がもっと狭いと



$$F(x) = f(x) \otimes g(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x') g(x - x') dx' = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(x - 2nd)$$

$$F(k) = f(k) g(k) = \pi \frac{D}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(k - \frac{\pi}{d} n) \frac{\sin \frac{kD}{2}}{\frac{kD}{2}} = \pi \frac{D}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n D}{2d}}{\frac{\pi n D}{2d}} \delta(k - \frac{\pi}{d} n)$$



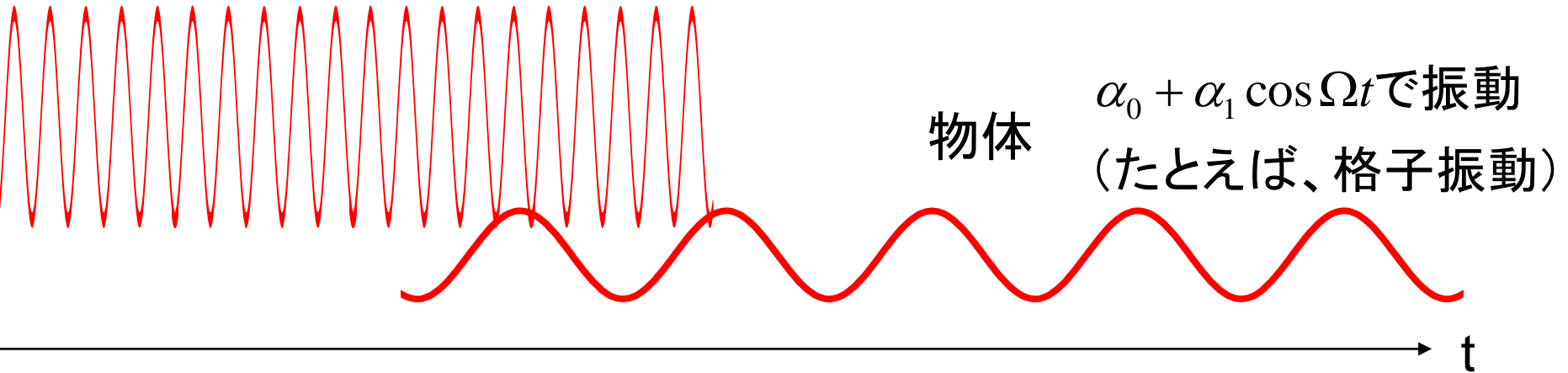
反射、屈折、回折のとき、  
周波数 $\omega$ はなぜ変化しない？

光子のエネルギー保存  
(時間の一様性から)

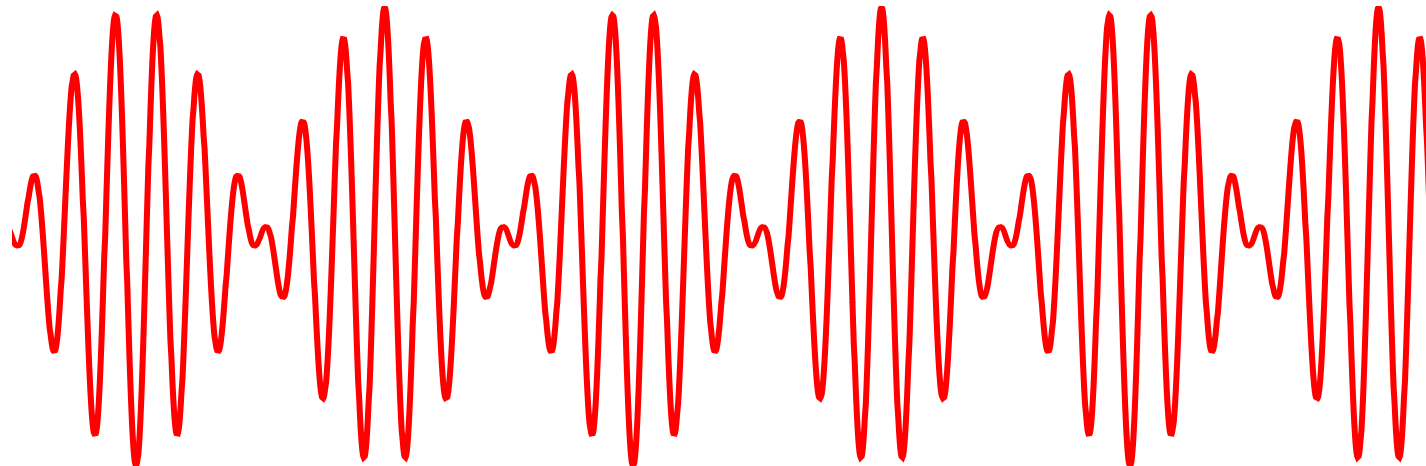
$\omega$ が変化する場合を見れば、  
 $\omega$ が変化しない理由がわかる

# 媒質が時間変化していたら

入射光  $E \cos \omega t$



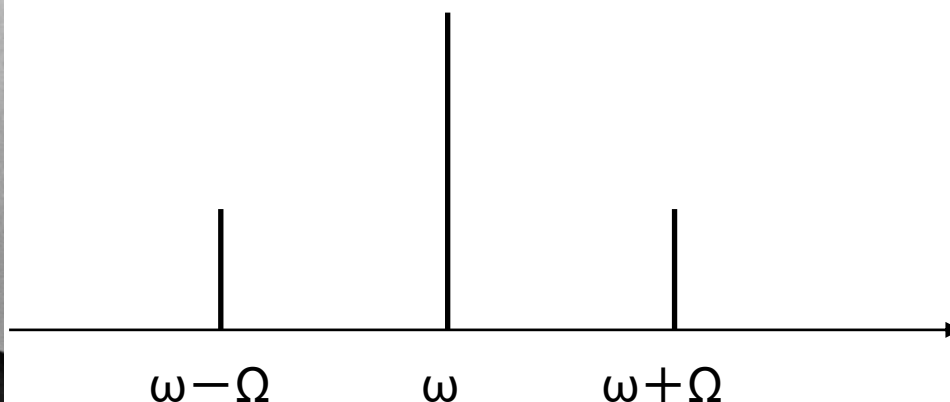
出射光



$$E \cos \omega t (\alpha_0 + \alpha_1 \cos \Omega t)$$

$$= \frac{E}{2} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) \left[ \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2} (e^{i\Omega t} + e^{-i\Omega t}) \right]$$

$$= \frac{E}{2} \left[ \alpha_0 (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) + \frac{\alpha_1}{2} (e^{i(\omega+\Omega)t} + e^{-i(\omega+\Omega)t} + e^{i(\omega-\Omega)t} + e^{-i(\omega-\Omega)t}) \right]$$



ラマン散乱

入射光と散乱光のみに注目すると、  
時間の一様性が満たされない  
→エネルギーが保存されない

あるいは

媒質も含めて考えると、  
格子振動のエネルギーを受け取って  
前後の全エネルギーは保存される

# 光を理解するために

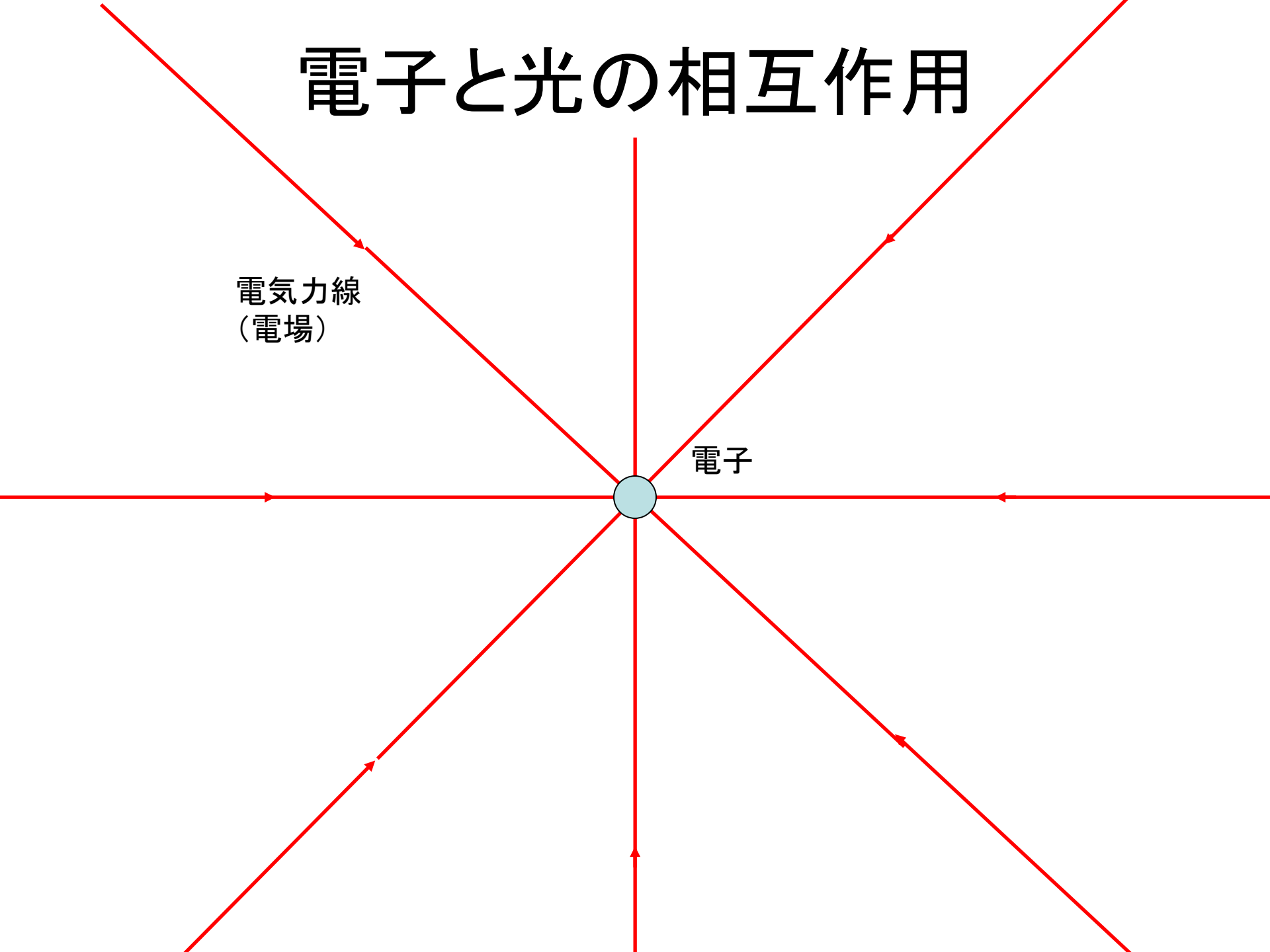
光はどのように空間を伝わっていくのか？

光はどのように生まれて、消えるのか？  
(光は物質とどのように相互作用するか)

# 電子と光の相互作用

電気力線  
(電場)

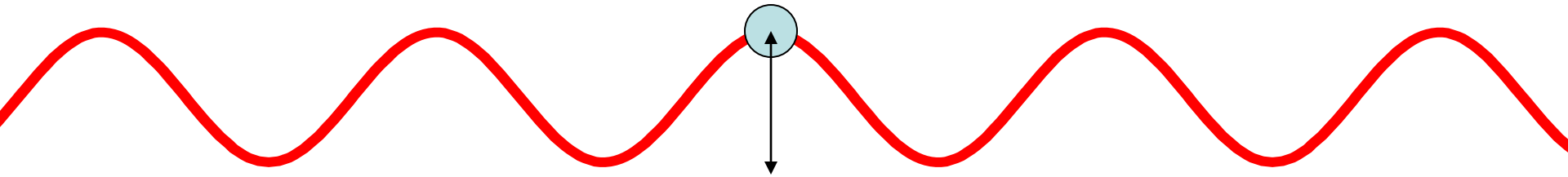
電子





# 電子が加速度運動すると 電磁波が放出される

電子の振動(分極)  $\Leftrightarrow$  電磁波



単振動

位置

$$x = \sin \omega t$$

速度

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cos \omega t$$

加速度

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 \sin \omega t$$

$\omega (= 2\pi c / \lambda)$  が大きいほど放出電磁波の強度大きい

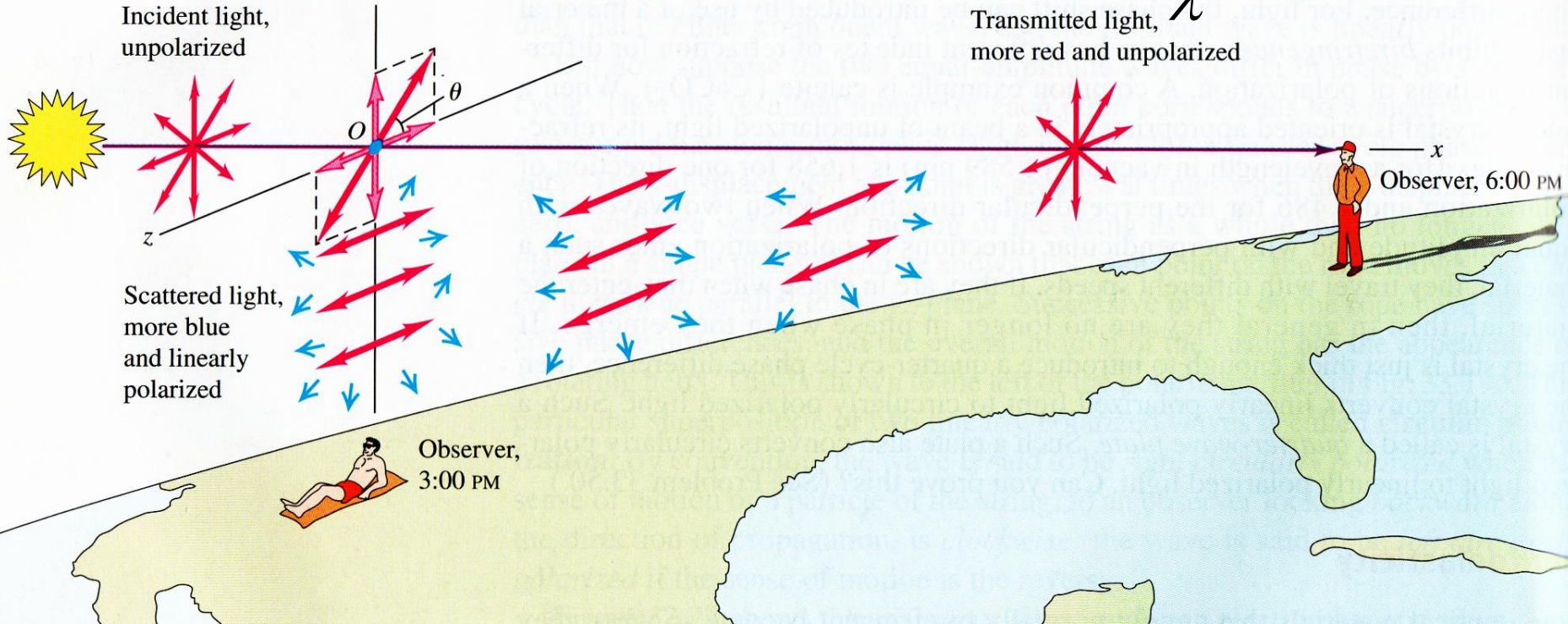
# 太陽光の散乱

入射電磁波  $E = E_0 \cos \omega t$

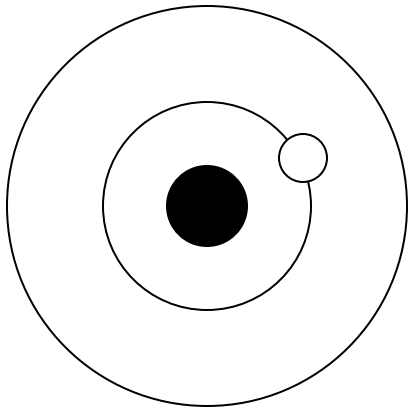
電子が変位 = 分極  $p = qx \propto qE_0 \cos \omega t$

散乱電磁波  $E_s \propto \frac{d^2 p}{dt^2} \propto a = \omega^2 \cos \omega t$

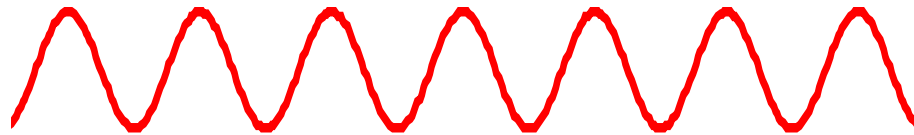
散乱電磁波の強度  $\propto E_s^2 \propto \omega^4 \propto \frac{1}{\lambda^4}$



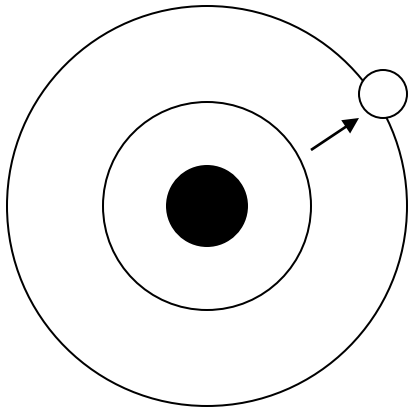
# 光子と電子の相互作用 (エネルギー交換)



電子の基底状態



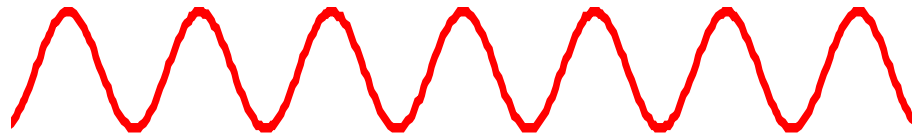
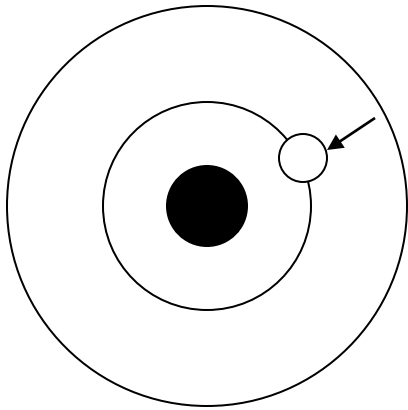
# 光子と電子の相互作用 (エネルギー交換)



光による電子の励起(吸収)

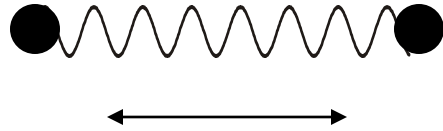
# 光子と電子の相互作用 (エネルギー交換)

光の周波数に共鳴するアンテナ

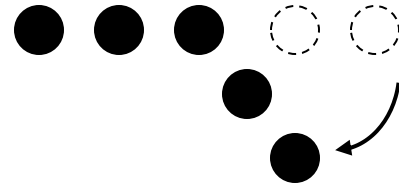


電子の基底状態への遷移(発光)

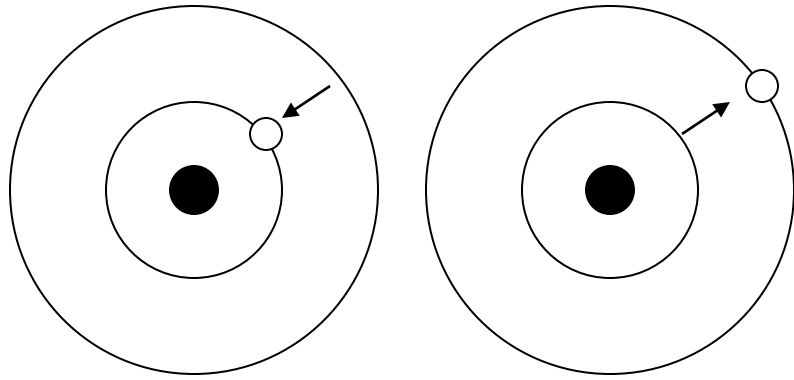
# 光励起エネルギーの他の変換過程



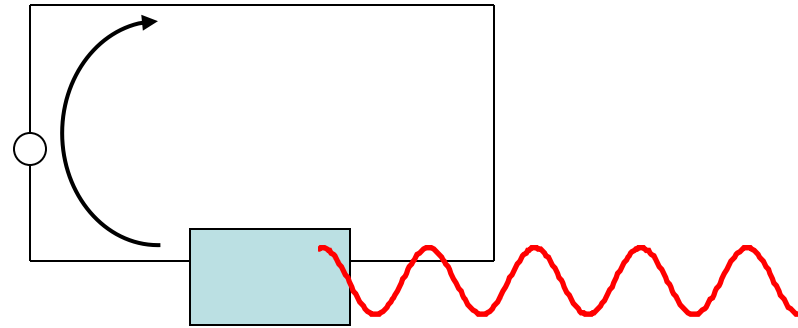
分子振動エネルギー 熱



分子構造変化 視覚



電子励起エネルギー移動 光合成



光起電力(光電流) 太陽電池

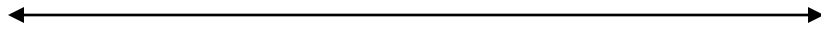
光 → 分子の化学結合エネルギー 光合成

# 光と物質の相互作用

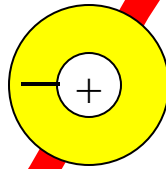
分極とは

# 分極

400~700nm



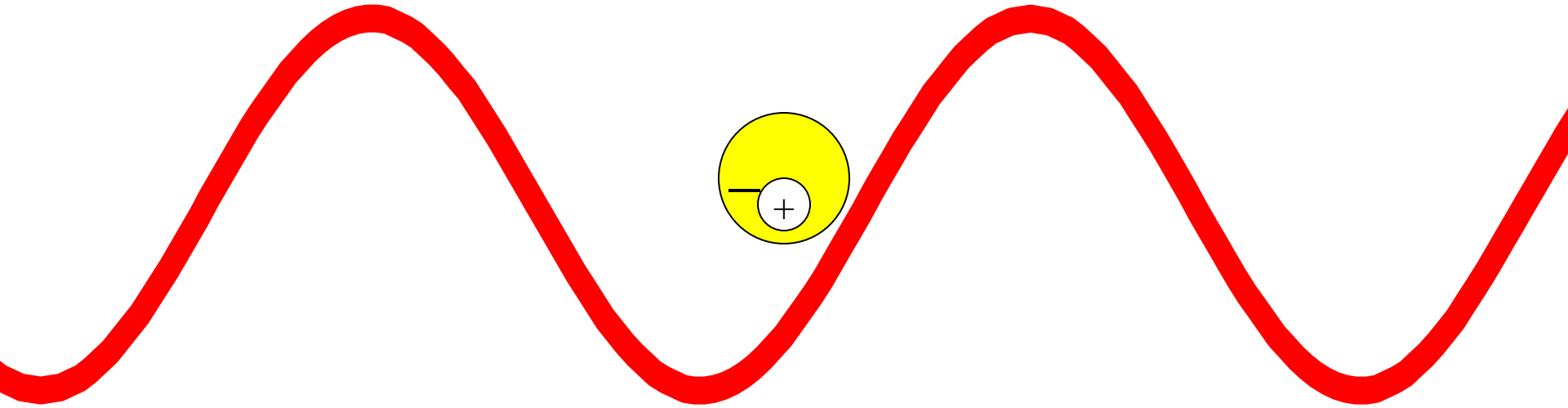
1nm



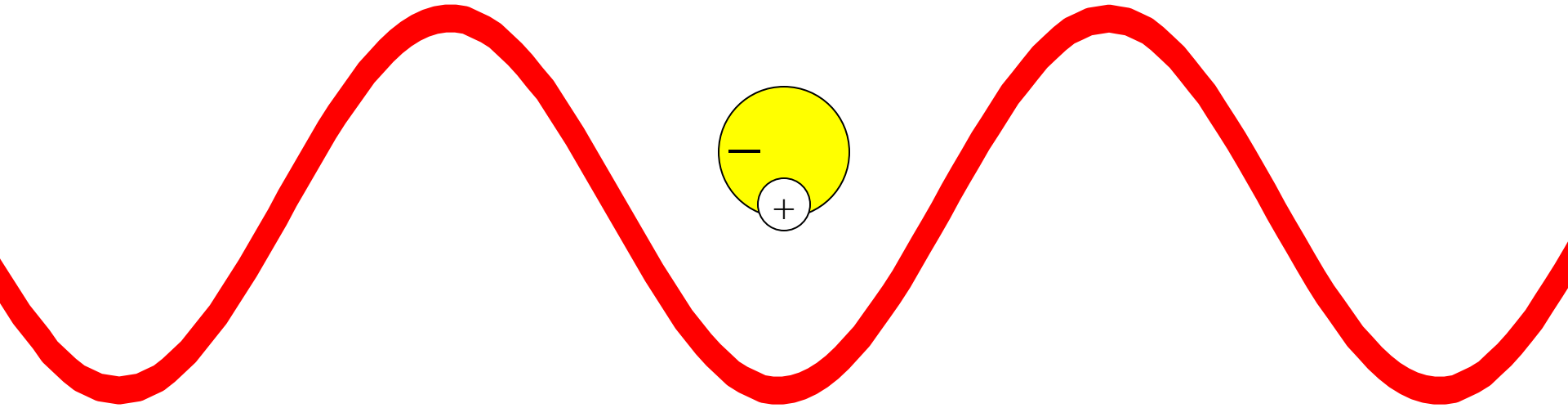
分子は一様な電場を感じる  
光電場によって電気双極子が誘起される



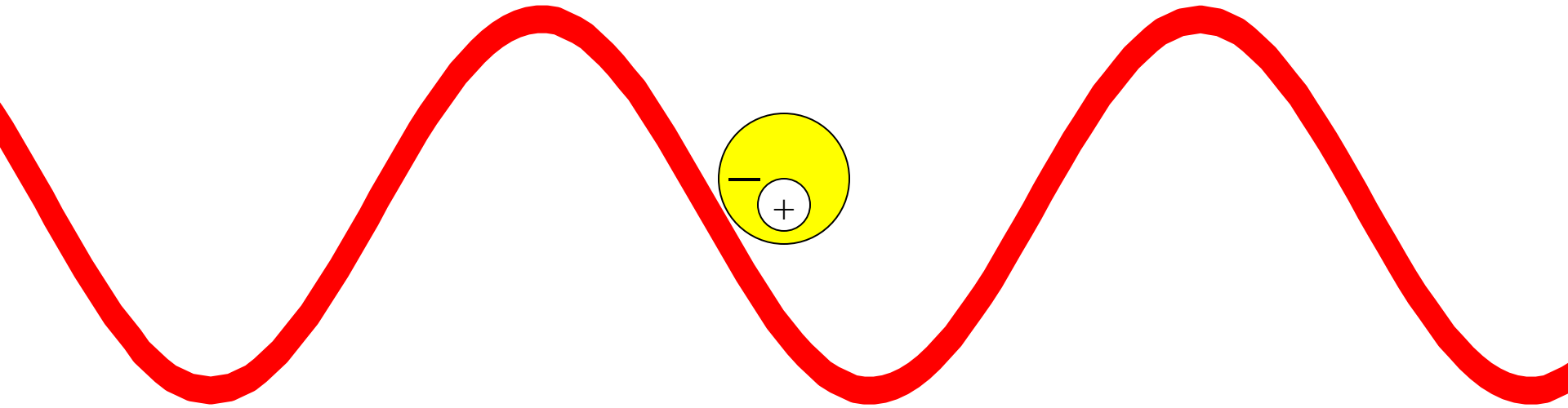
# 分極



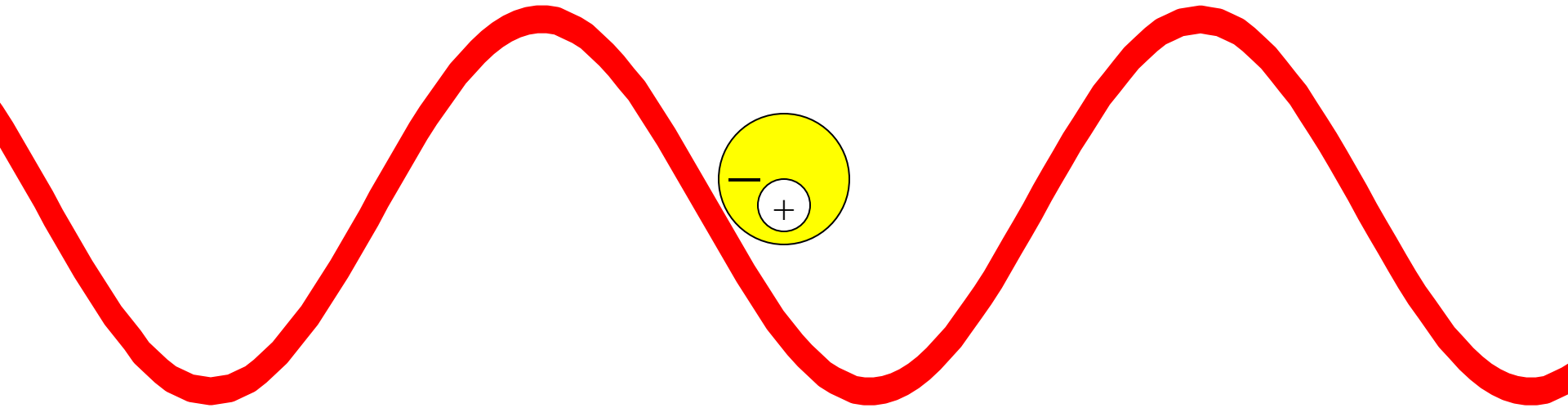
# 分極



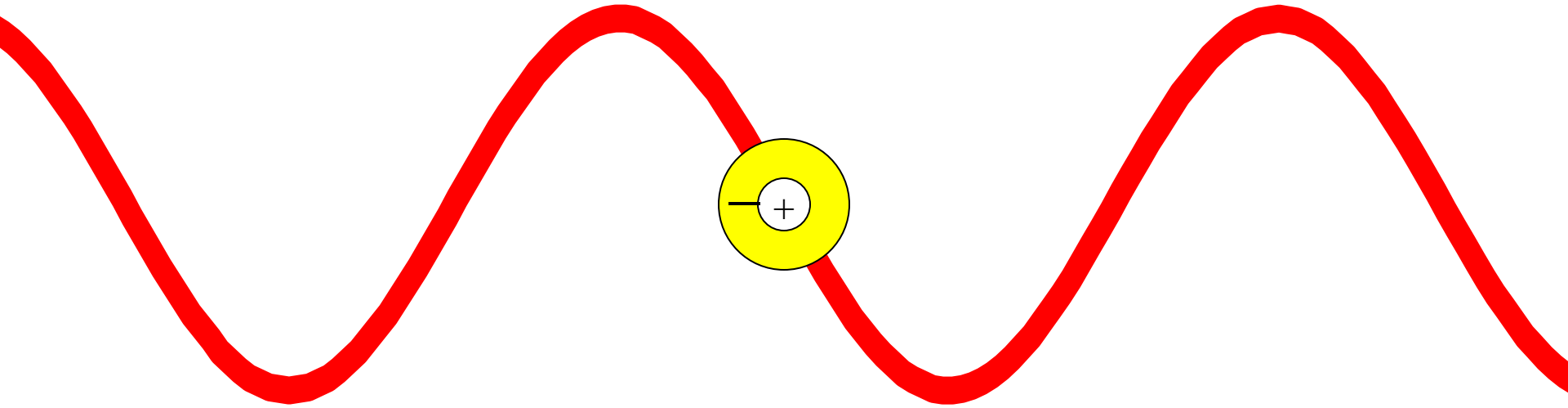
# 分極



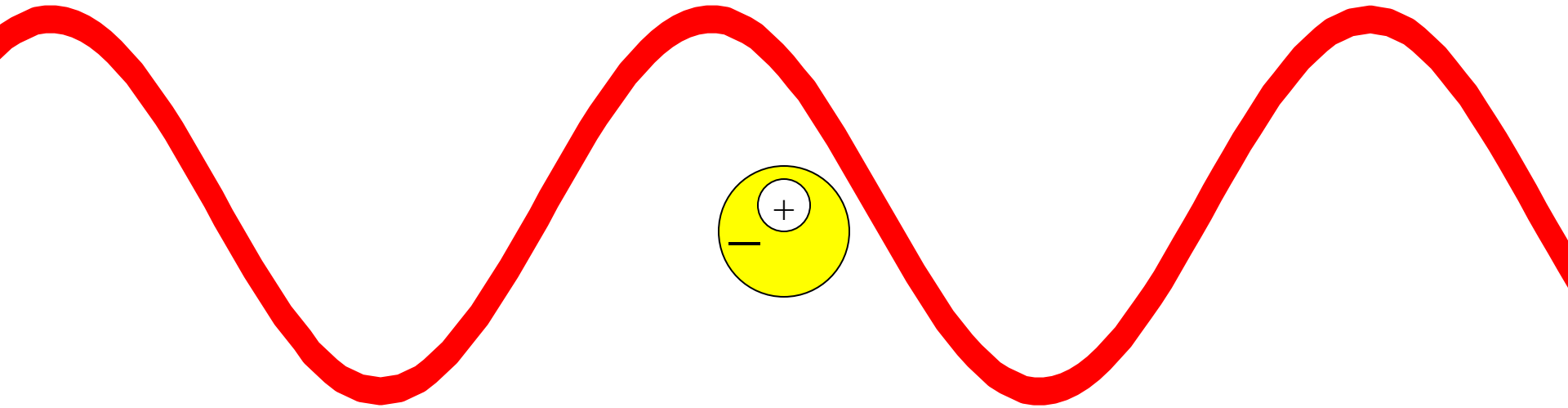
# 分極



# 分極

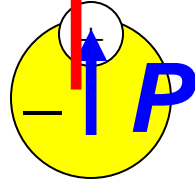


# 分極

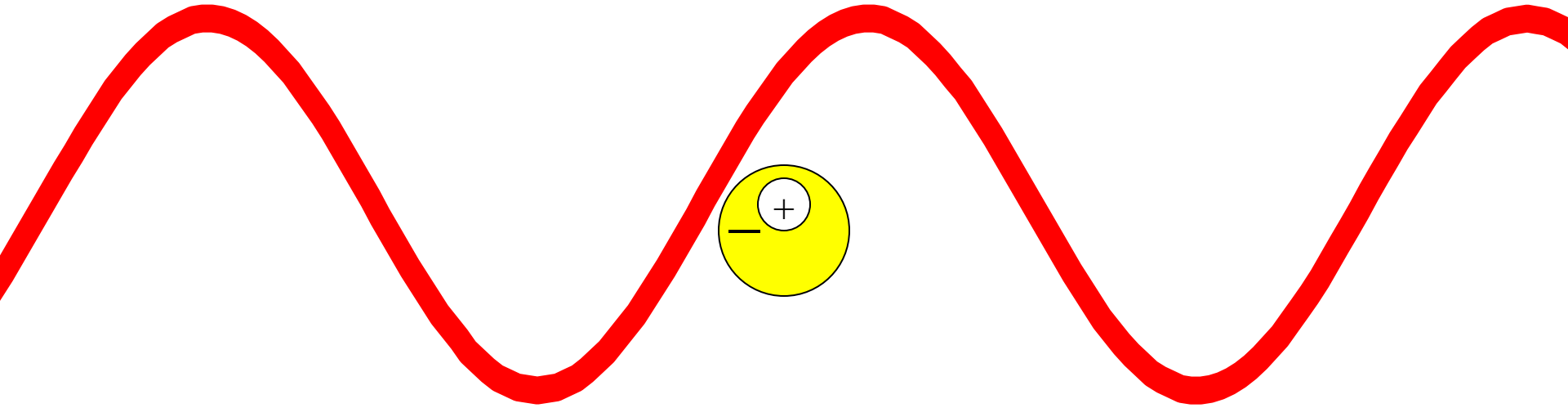


分極

$E$

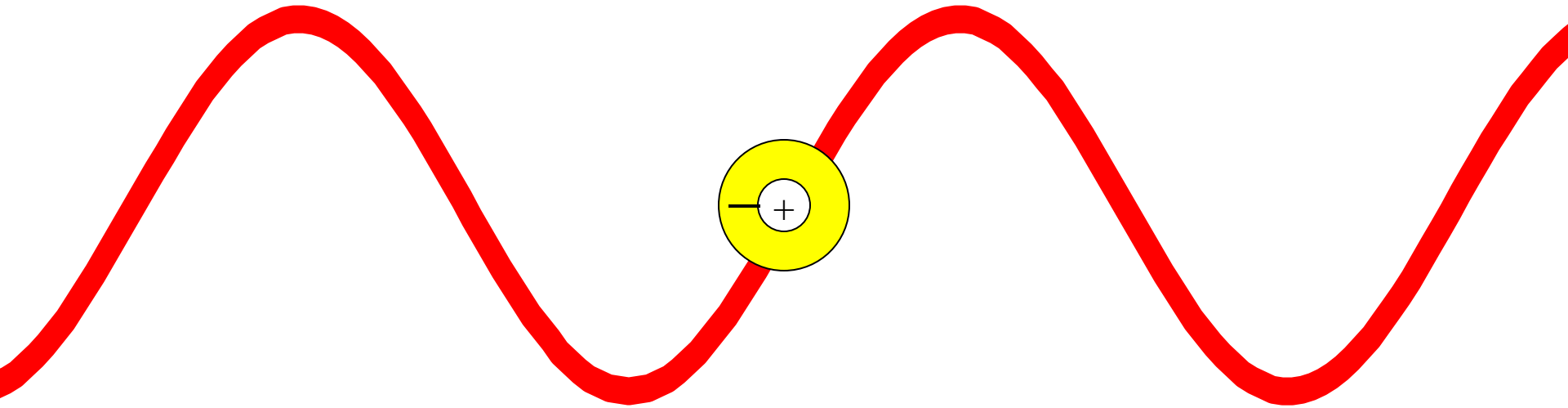


# 分極





# 分極



# 非線形光学効果

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

$P$ : 電気分極

$E$ : 電場

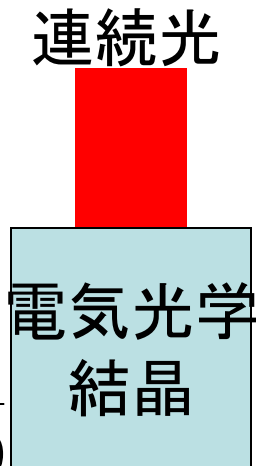
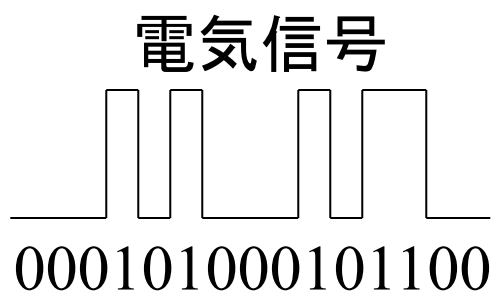
$\chi^{(n)}$ : 電気感受率(光学的感受率)

# 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

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

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



光は $\sim 500\text{THz}$ なので $100\text{THz}$  ( $100\text{Tbps}$ )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)

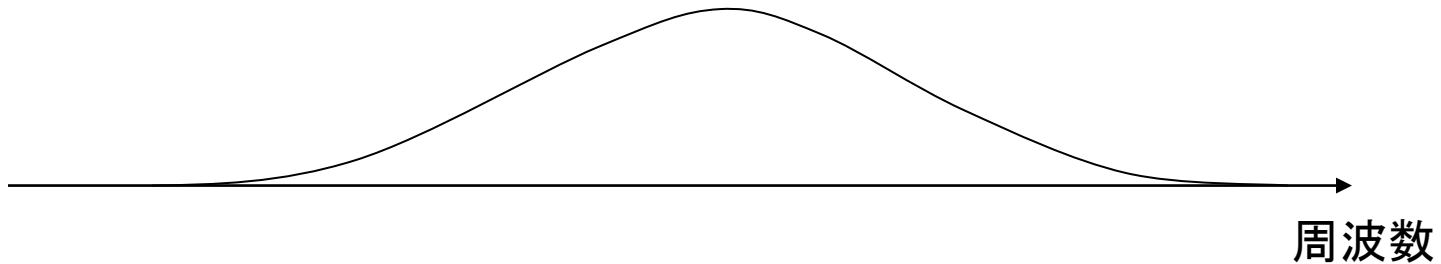
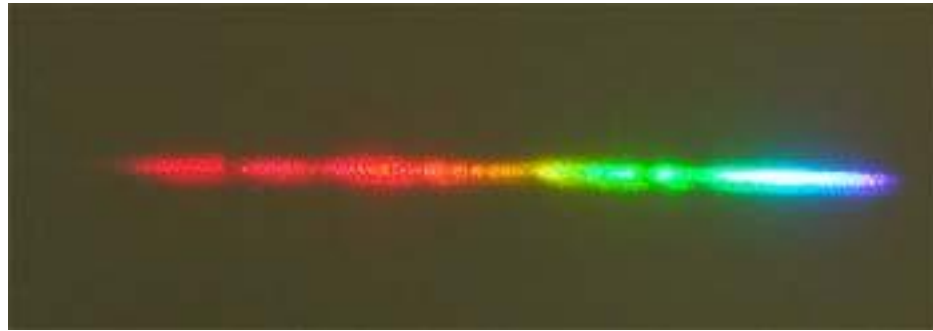
光を相互作用させ、光-光変換して電気信号の介在をなくせば、光の高速性(高周波数密度)が活かされる

$\chi^{(3)}$

$\chi^{(2)}$

電気信号 $\rightarrow$ 光信号 変換

# 超短パルスの自己位相変調による 白色光発生



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

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

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

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

終わり

一部物理学科  
徳永研究室  
研究紹介

2017.11.19学祭ポスター発表会

# 研究目標 と 成果

- [1] 光で細胞内の活動を手に取るように見たい (光の回折限界を超えて蛍光標識なしに可視光、遠視野で50nm以下の構造を見たい)  
超解像光熱イメージング 無走査吸収分光イメージング  $A(x,y,\lambda)$
- [2] 光励起による熱発生・散逸の過程の時空間計測法の開発  
Sagnac干渉計光熱偏向分光法による熱緩和スペクトル測定
- [3] 光で分子や原子の集合状態を制御したい  
光誘起力によって室温の水中の1 nmサイズの分子を集合させ、平衡状態では存在しない結晶を生成
- [4] 光を自由自在に操作したい  
電場で光を曲げる 水の電場による巨大な屈折率変化の発見  
熱線から可視光を産み出す 光の上方変換 光子20個をエネルギー20倍の光子1個に
- [5] 有機(C,H,O,N)ナノテクノロジーを追究する  
有機ナノ構造 J会合体の巨大な電気光学効果の発見
- [6] 太陽光から高効率に利用可能エネルギーを取り出したい  
太陽、水、空気、植物(藻類)から水素発生 クラミドモナス
- [7] 光で駆動するナノマシンを作りたい
- [8] 新分光計測法の開発
- [9] その他

# [1]医学を物理学にするための生細胞の超解像観測技術の開発

光で細胞内の活動を手に取るように見たい (光の回折限界を超えて蛍光標識なしに可視光、遠視野で50nm以下の構造を見たい)

現代医学：経験の学問

病気の原因を物理法則に還元し治療法を物理学から演繹できない。  
iPS細胞、ゲノム編集 生物学的知識・経験により発見 物理学の貢献なし

理由：物理学が生命活動を解明できていないため。その前提となる  
生きている細胞内の活動を超解像で観測する技術が未熟

21世紀はマイクロ・ナノマシンの時代

実現している人工のマイクロ・ナノマシンの能力は限定的  
体積わずか $1\ \mu\text{m}^3$ の大腸菌が万能の化学工場

生命 ← 断崖絶壁が横たわる → 人工マシン

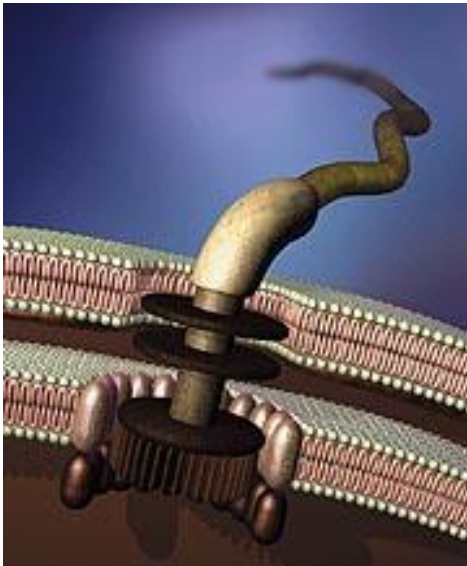
高機能のナノマシン製作には、太古の昔からそれを実現している生物に学ぶ必要＝生命活動の最小単位である細胞の物理学的な理解が不可欠。



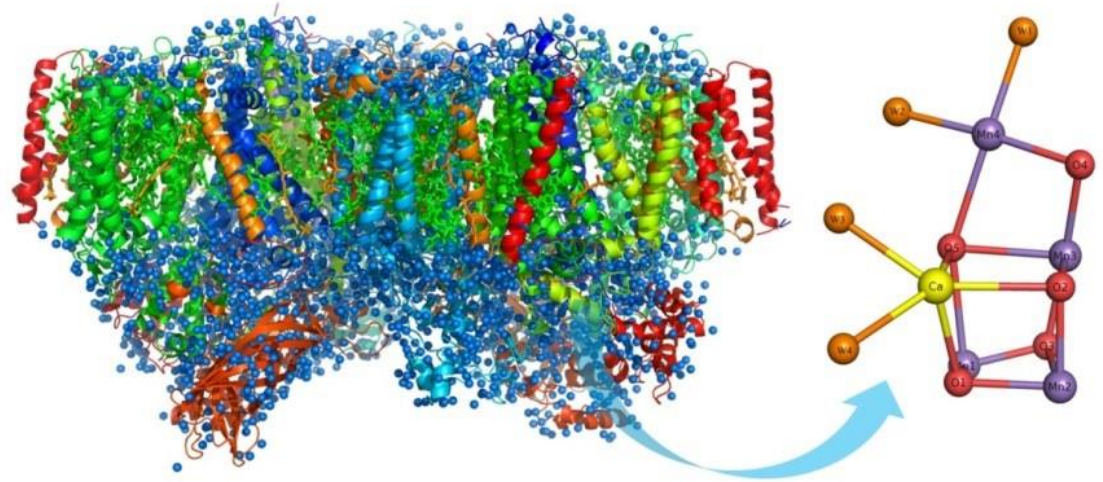
# 実現したときの未来

生きている細胞の物理的性質を十分な分解能で時間・空間分解して観測し、細胞のナノテクノロジー、細胞内分子間相互作用の物理学的理解が確立すれば、物理学が医学に貢献できるようになる。生物の力を借りないで人工細胞＝生物＝を作り出せるようになり、万能ナノマシンの時代を実現でき、iPS細胞・ゲノム編集に匹敵する技術革新を日々生み出せるようになる。

個別の蛋白質の構造・機能の物理学的研究(以下の構造はX線回折や電子顕微鏡で観測して解明)は前進しているが、生きたままの活動をこの分解能で観測できない



細菌鞭毛モーターのCG図  
(米ディスカヴァリー研究所)



光化学系II複合体(PSII)の構造と  
水分解触媒である $Mn_4CaO_5$ クラスターの構造

<http://www.riis.okayama-u.ac.jp/research/core2/>

## [2] エネルギーの熱緩和・散逸過程の計測と制御による高度エネルギー利用 光合成(光-化学)、太陽電池(光-電気)、発光素子(電気-光)、動力機械(力学-電気・化学)、電子回路を含むナノ構造体の熱発生・散逸の過程の時空間計測法の開発

太陽エネルギーは地球のすべての生命活動の母(化石燃料を含め)植物の光合成がほとんどすべての生命を支えるしかし 植物の太陽エネルギーの利用効率は高くない。

その電子構造に由来する吸収スペクトルは、青色光を吸収できるがそのエネルギーのまま利用できず、無輻射緩和により赤色光とのエネルギー差分を熱散逸で失う。

半導体太陽電池も、バンドギャップエネルギー( $E_g$ )よりも大きいエネルギーの光子を利用できるが $E_g$ との差は熱エネルギーとして失う。

地球規模の膨大なエネルギー損失

制御して最小化 発生する熱エネルギーを再利用

マイクロ・ナノマシンの高効率・高速動作のために、摩擦と熱散逸過程のメカニズムを物理的に解明し制御することが必要

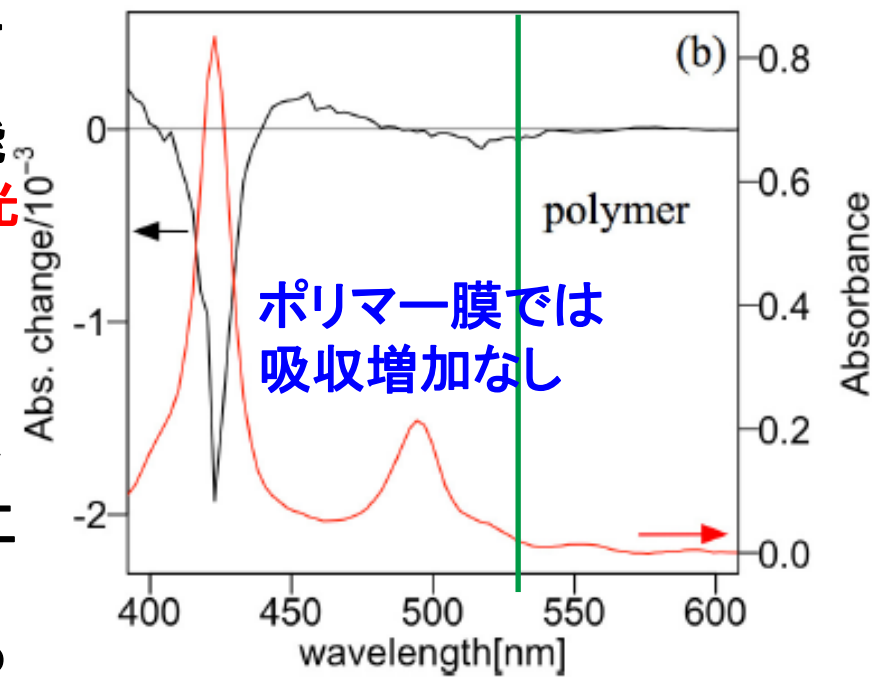
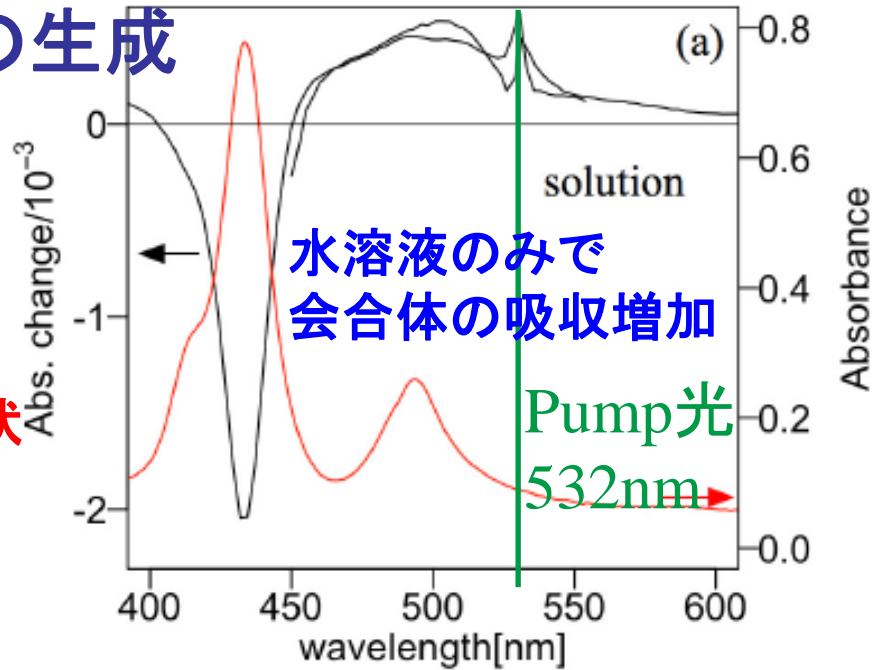
光合成、太陽電池、発光素子のエネルギー効率の改善により、  
エネルギー問題・地球温暖化問題の解決

# [3]光誘起力による非平衡結晶の生成

光の輻射圧(勾配力)で分子を集合させる

2017年4月28日の科学新聞、  
2017年7月のフジサンケイビジネスアイ  
「大学発 日本人と技術」

研究グループは光誘起力によって室温の水  
中の1 nm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。しかもこの応答は、室温の激  
しい分子の熱運動の大きさに対して、光の圧  
力による効果から予想されるよりも4桁も大  
きな生成効率で起こっていることがわかった。こ  
の観測は、分子の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。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  
とで、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る



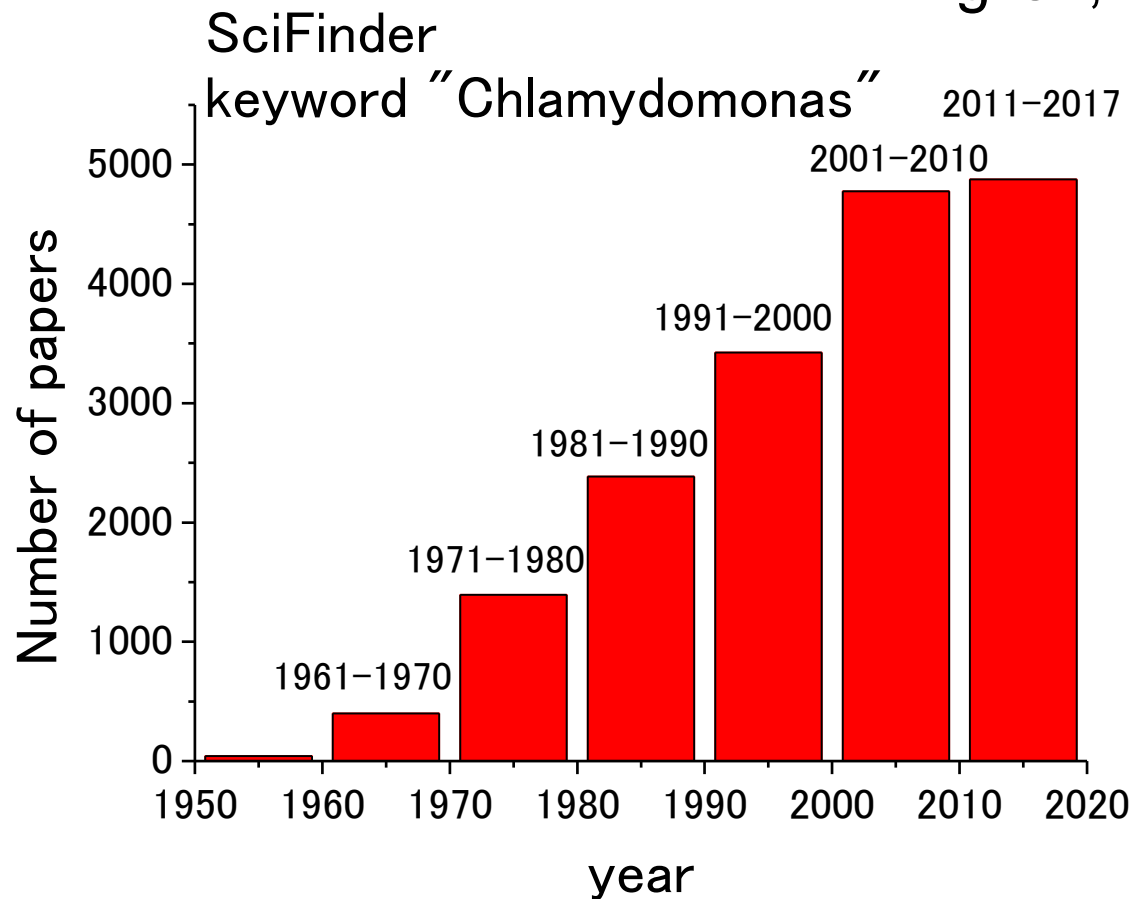
2017.2.1 @211

# 徳永研究室 卒研ガイダンス

光物性: 光と物質の相互作用の研究

# Chlamydomonas

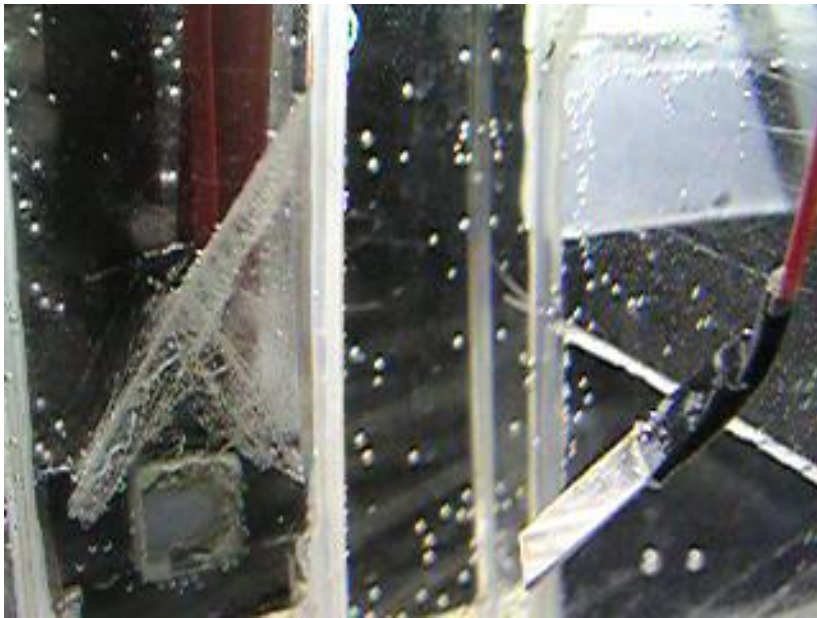
English, Journal に限定





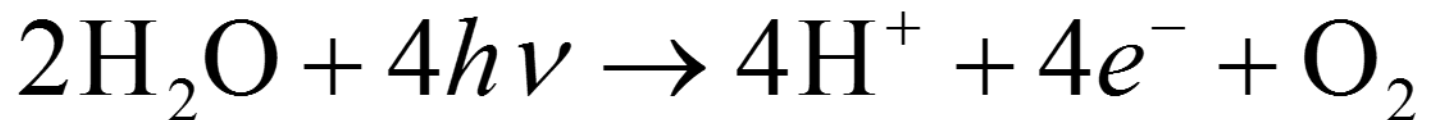
# 光をエネルギーに

2004卒研  
酸化チタン-白金



光水素発生 (=人工光合成)

光合成

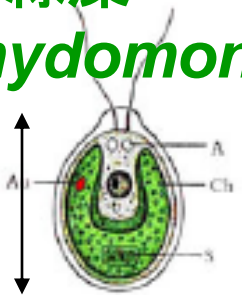


# 単細胞緑藻

## *Chlamydomonas*

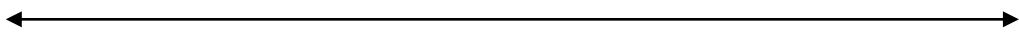
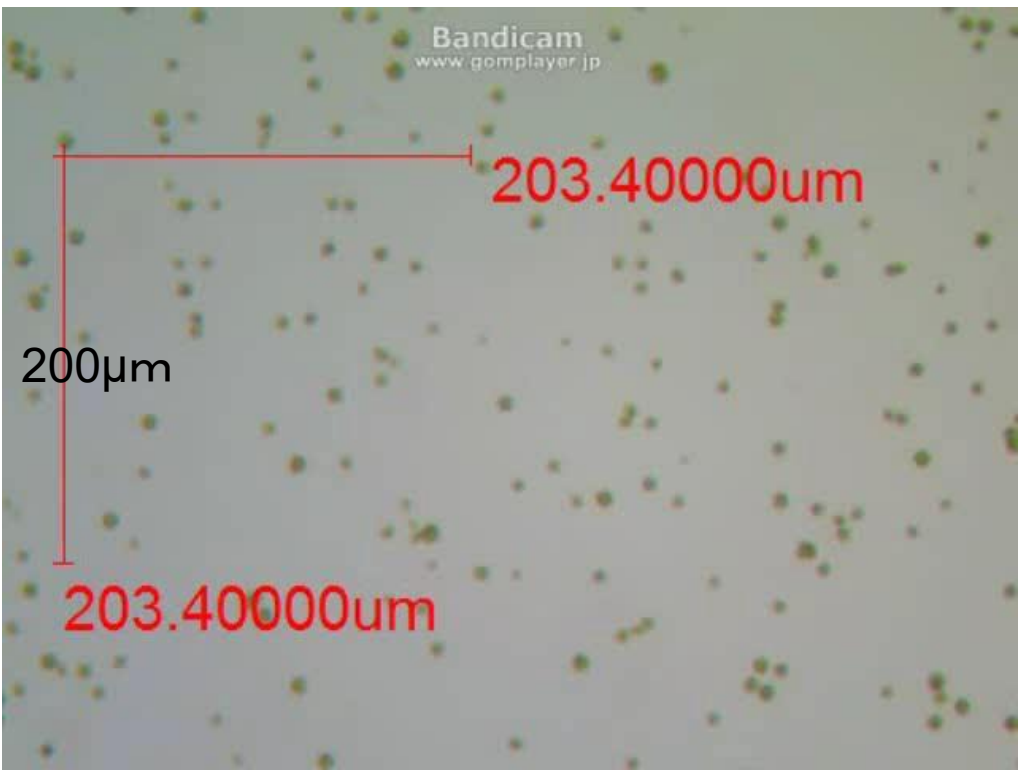
### 2006卒研 緑藻の光水素発生

7~8μm



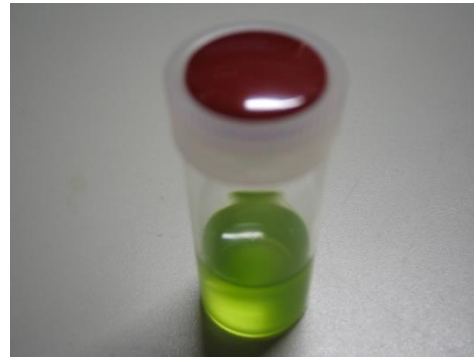
鞭毛を持ち活発に運動

フラスコ 600ml



0.5 mm

# クラミドモナスは何匹？



2 mL 培養液

クラミドモナス サイズ 7-8 $\mu$ m



微細藻は、単純な細胞であり、  
葉・莖・根などを必要としないため、  
光合成により、太陽エネルギーを  
糖分や油脂などのエネルギーに  
変換する生産性において  
とうもろこしや大豆に比べると  
はるかに高い生産性を示す。  
種類によっては、その生産性は  
数百倍にも達する。

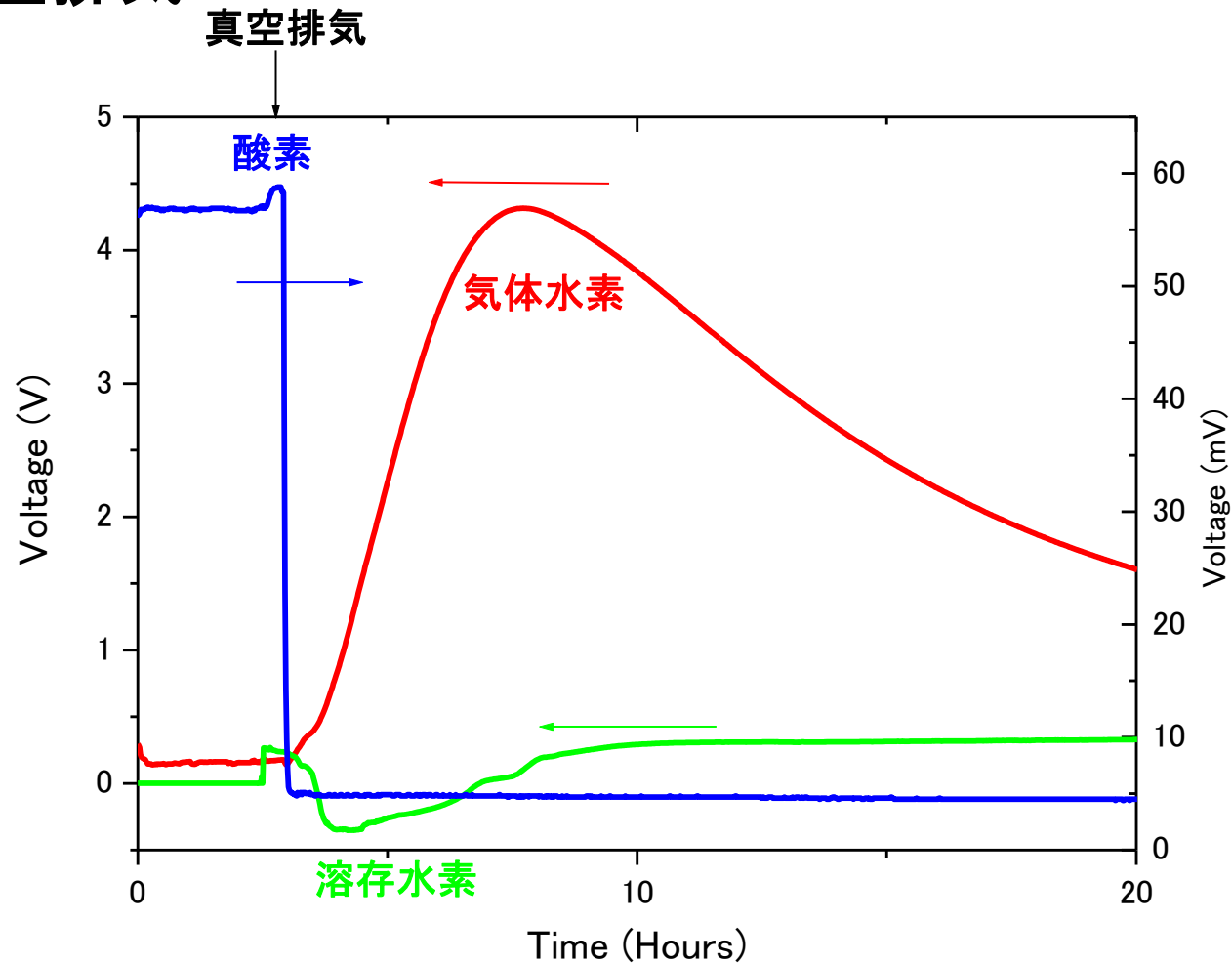
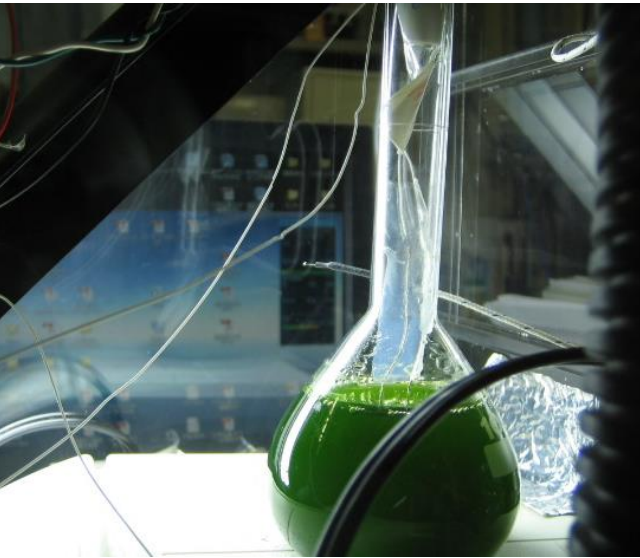
# バイオ燃料：米国で使用の化石燃料をすべて代替するのに必要な面積



大豆  
なたね  
とうもろこし  
さとうきび  
藻類

# 緑藻の真空排気による水素発生

培養フラスコごと真空デシケータに入れて光照射下で真空排気

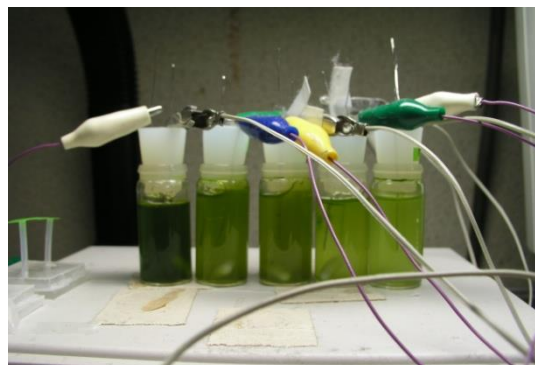


# 太陽光と水から高効率水素発生を目指す

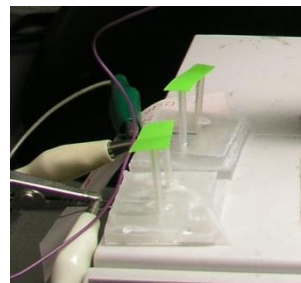


低コスト: 植物は自ら増殖、光を無駄なく利用  
安全、無負荷: 材料(C,H,O,N)は無限、無害

サンプル管 2mL



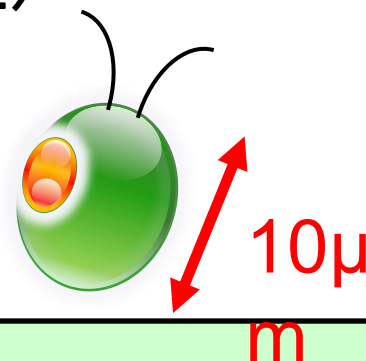
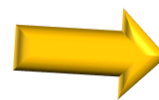
マイクロチップ 200 $\mu$ L



少量サンプルで多種類の環境を用意し、  
水素発生能を高める進化を促す  
そのための実験系の1/3000の  
ダウンサイジングに成功

# クラミド大運動会 (走光性)

φ800μm



**眼点は高度な光センサ**

光の方向・強度・波長に応じて  
最適な環境へと移動

**二本の鞭毛はパワフルな  
バイオマシン**

1秒で体長の10倍の距離を移動  
(人間が1秒でビル5階まで登る距離)

**競技1: シャトルラン**

**競技2: 周回マラソン** (※)

※反則クラミドを見つけよう(個性)





# マイクロ空間で定員オーバー

(単一細胞からの密度効果モニタリング)

$\phi 50\mu\text{m}$



- ・一細胞捕獲法
- ・モニタリングシステムの構築



- ・一細胞を生きたまま捕獲
- ・何世代にも渡って観察可能

- ・自由に遊泳
- ・分裂後バラバラに分離

- ・外に出ようと縁に集まる

- ・分裂しても分離しない
- ・運動は自転のみ

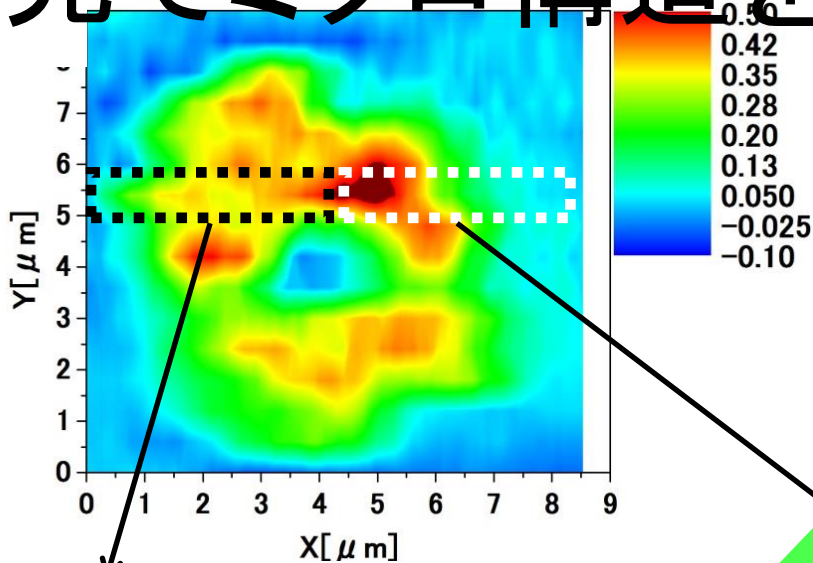
小  
細胞密度  
大



# 光でマイクロ構造を見る 生細胞の吸収分光

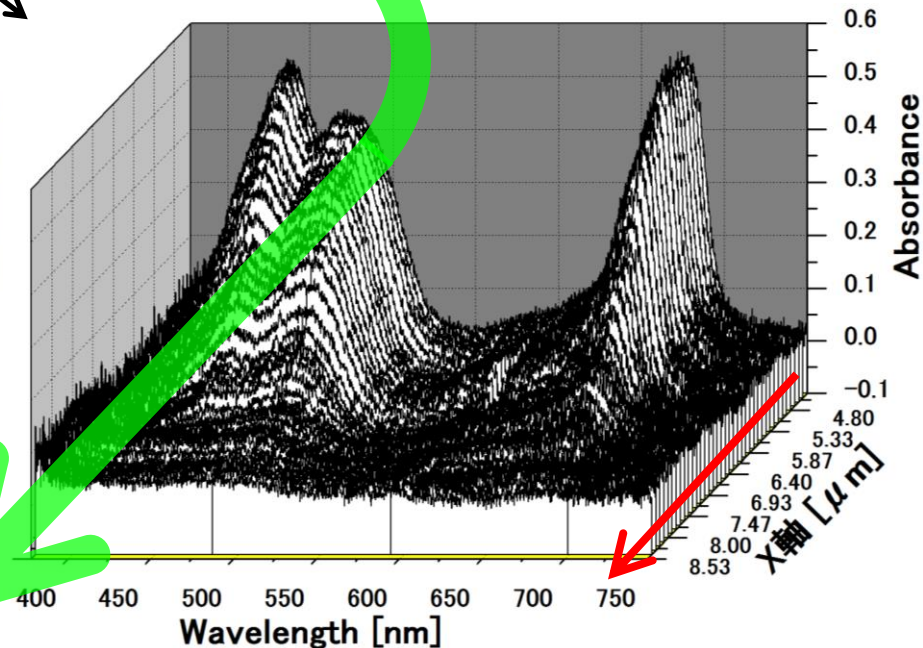
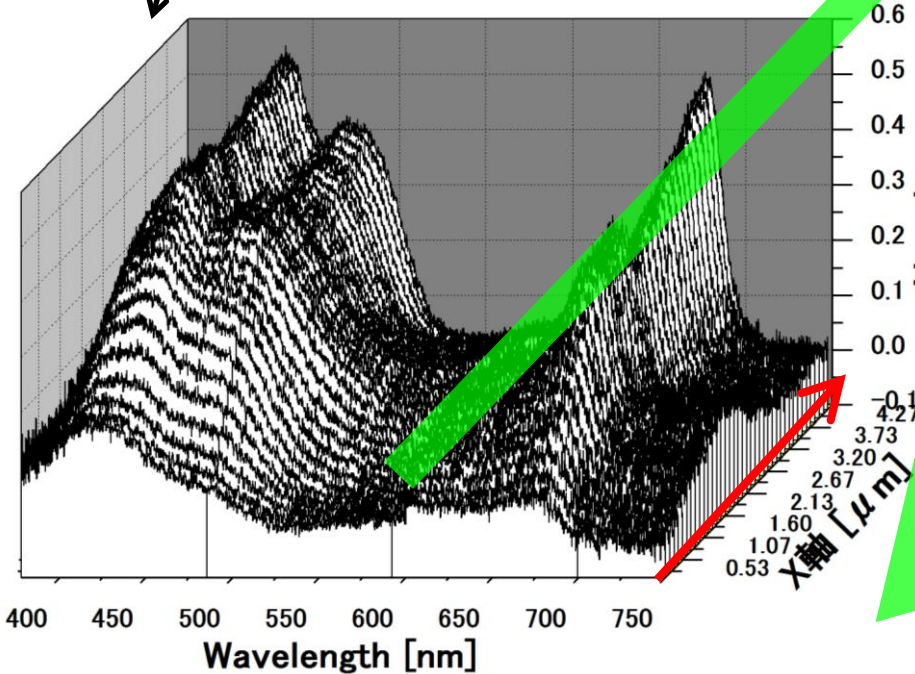
イメージング法の開発

$$A(x, y, \lambda = 680 \text{ nm})$$



全 $A(x, y, \lambda)$ の測定時間0.05秒

1μm空間分解能

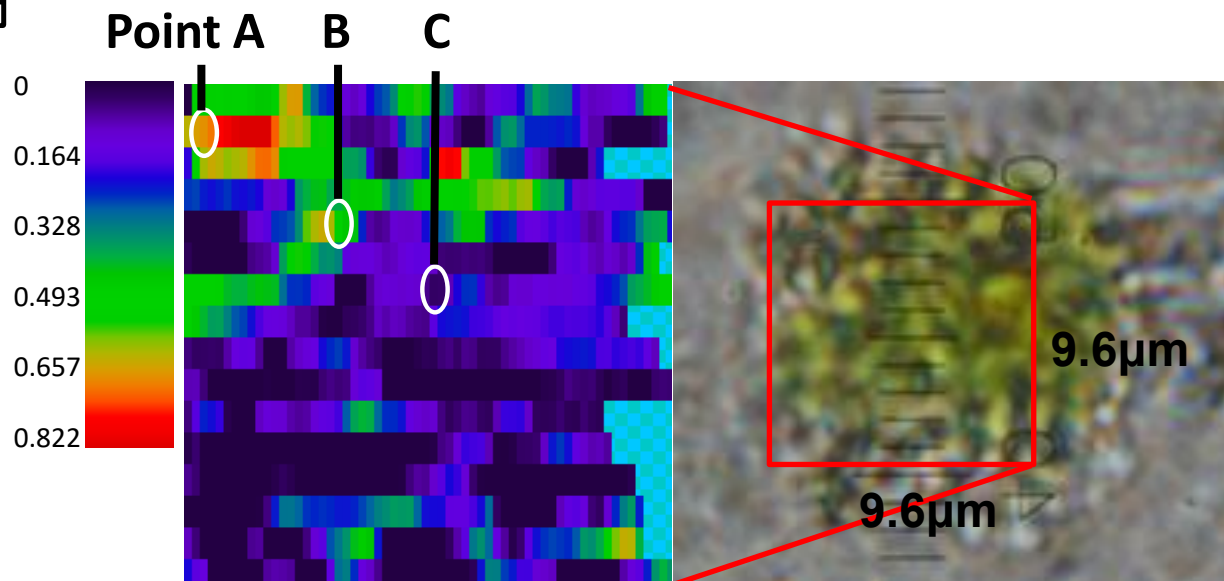
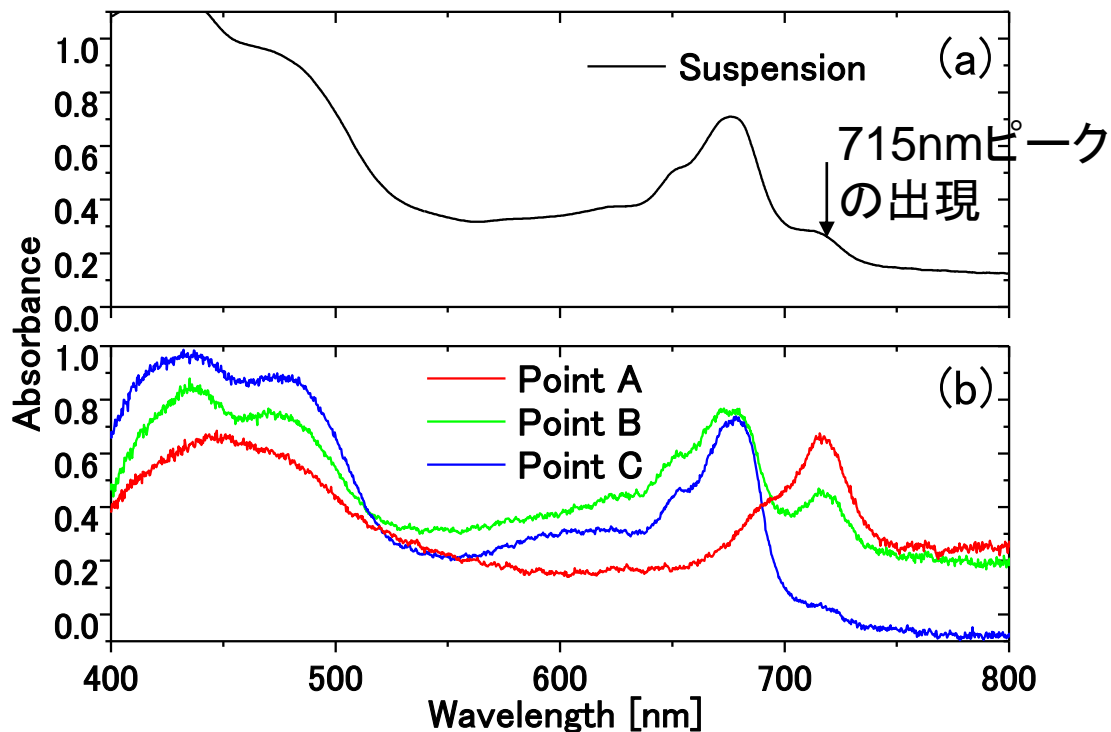


$$A(x, y = 5.4 \mu\text{m}, \lambda)$$

# 水素発生後の 特異な吸収変化

単一細胞吸収分光により  
正体が判明

細胞内で局所的に分布

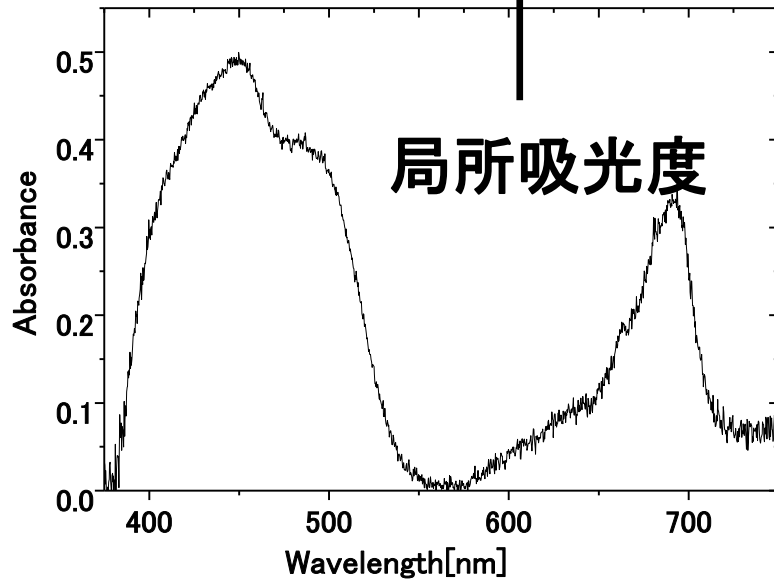
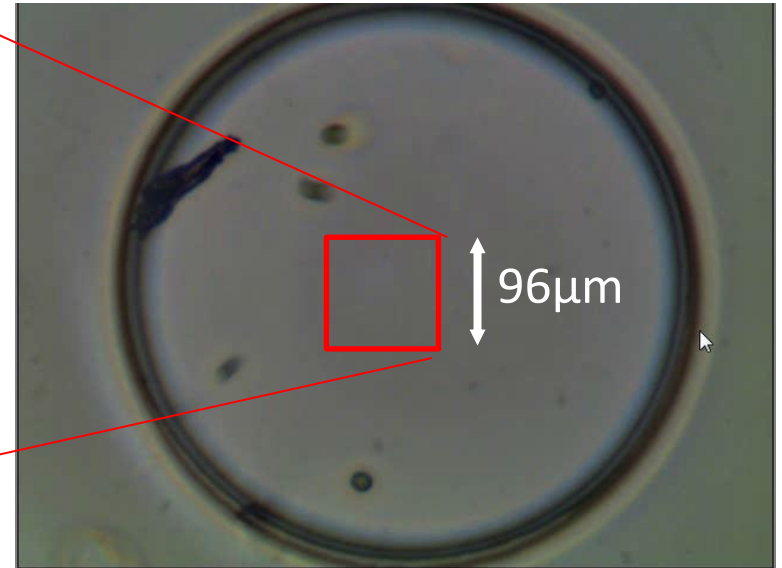
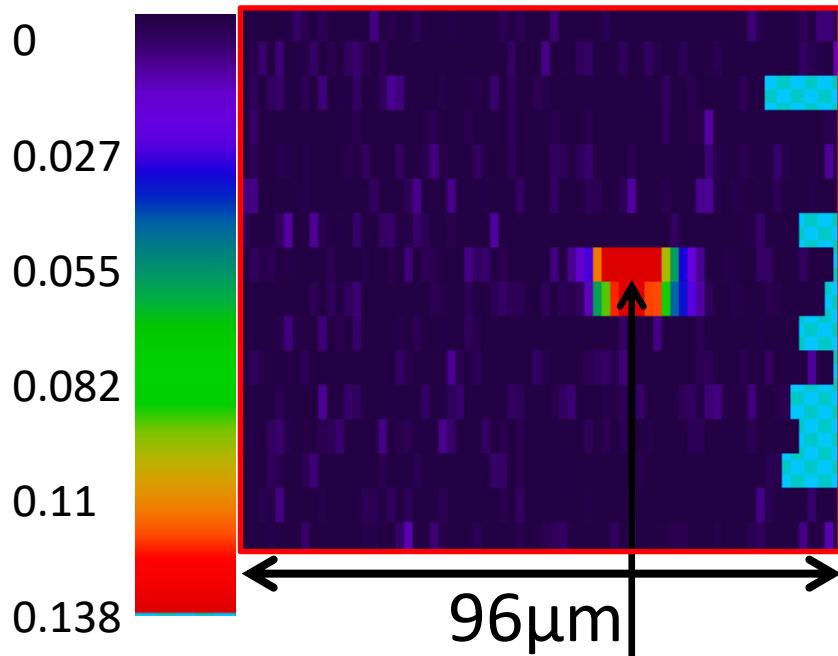


院生投稿論文の図



# 100 $\mu\text{m/s}$ で遊泳する細胞の吸光度イメージ

$A(\lambda=680\text{nm},x,y)$  取得時間0.05秒



400 $\mu\text{m}$ 直径のマイクロ井戸

# 生物物理学は 現代物理学の最後のフロンティア

2007以前の卒研案内より抜粋

生命は1個の電子・光子が1個の(巨大)分子と相互作用して機能する**ナノ分子デバイス**の宝庫です。何十段階もの過程が協調・統合して進行し、高い効率を実現しているので、**素過程は常温で100%に近い効率**で行われていなければなりません。つまり、近年目覚ましい進歩を遂げつつある**1電子・1光子を扱うナノ電子技術**や、**人工の化学合成技術**が**未だに遠く及ばない世界**を、生命は太古の昔から実現しています。

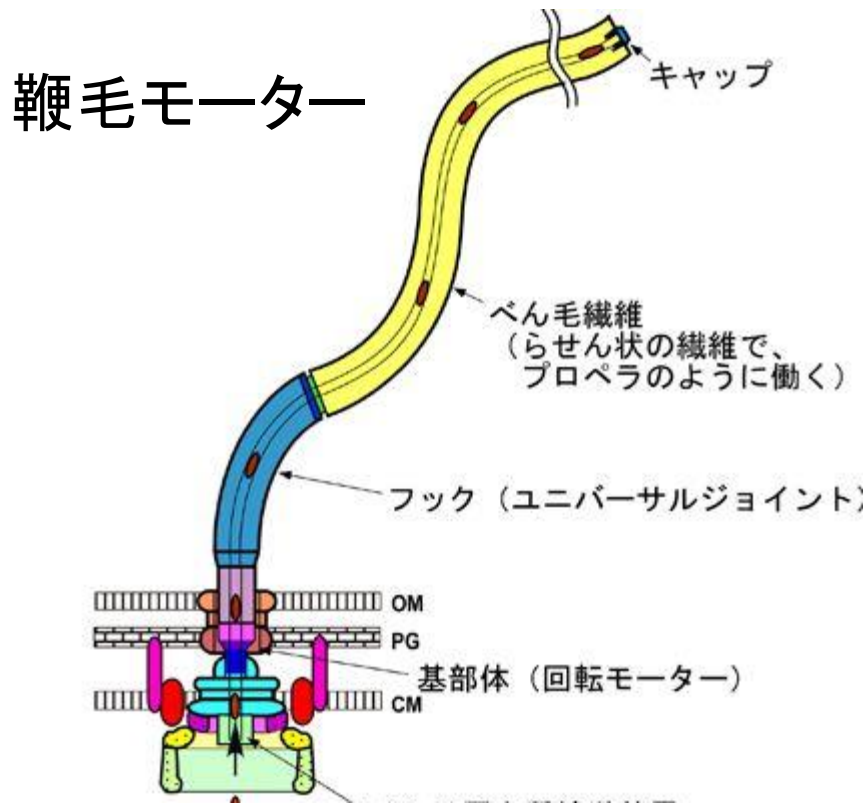
- ・アミノ酸の1次元配列によって自律的に規定されるタンパク質の3次元構造、
- ・**会合**したり脂質膜に埋め込まれたりして機能する酵素やイオンチャンネル、
- ・複数の価数状態をとる金属錯体の電子移動への利用、
- ・無数の酵素が協調して働く生合成、
- ・膜を介したプロトン移動と共役してATPを生成する～**10nmの分子モーター**であるATP合成酵素、
- ・生命が光を信号・エネルギーに利用する視覚・**光合成**、

どれを取っても驚異と謎に満ちています。これらに新しい分光法を開発してアプローチするのが将来の目標です。

# 超解像への挑戦

光で細胞内の活動を手に取るように見たい  
(光の回折限界を超えて 蛍光ラベルなしに  
可視光、遠視野で50nm以下の構造を見たい)

細胞の吸収分光イメージング  $A(x, y, \lambda)$  は  
その第1歩



# 将来のノーベル物理学賞？

物性論2C

## 超解像光学顕微鏡

(2014年 化学賞として実現)

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

構造化照明顕微鏡

誘導放出制御顕微鏡、飽和励起顕微鏡

全員 物理系

すべて発光を利用 蛍光ラベル

次の開発課題

蛍光ラベルなし、散乱や吸収での実現



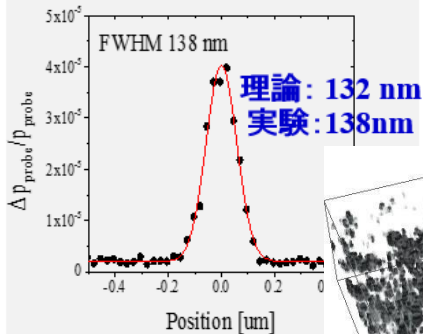
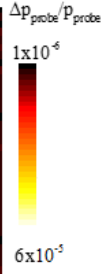
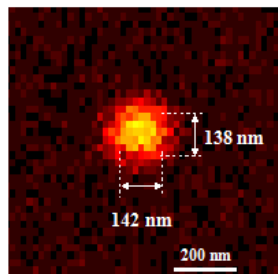
# 蛍光によらない超解像

電通大(小林研)との共同研究  
マウス悪性黒色腫瘍(メラニン色素)

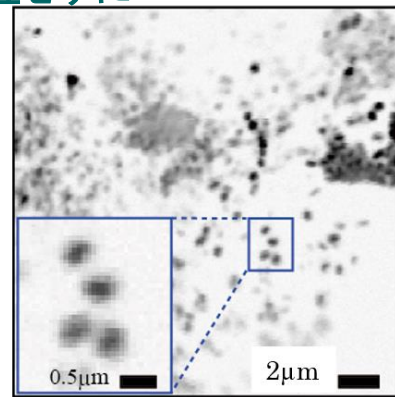
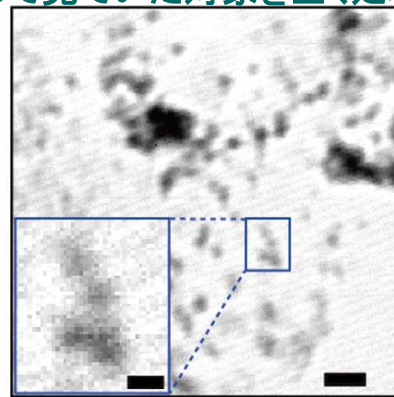
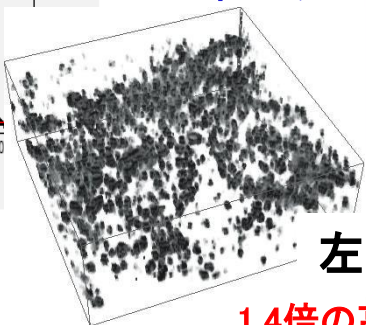
## 光熱顕微鏡の開発

超解像光熱イメージング

蛍光遺伝子導入不要  
電顕でスライスして見ていた対象を全く処理せずに  
3Dイメージング



3Dイメージ



20nm金ナノ粒子

Pump 488nm Probe 532nm NA=1.4

このときの従来法の回折限界194nm

$0.51 \times 532 / 1.4 = 194$

左: 従来の光学顕微鏡

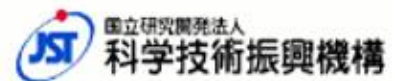
右: 光熱顕微鏡

1.4倍の高解像度(130nm)

3D像→高信頼性の診断

$20 \times 20 \times 10 \mu\text{m}^3$

【先端計測分析技術・機器開発プログラム】



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。

蛍光標識不要: 吸収を利用

超解像の原理: 非線形光学効果

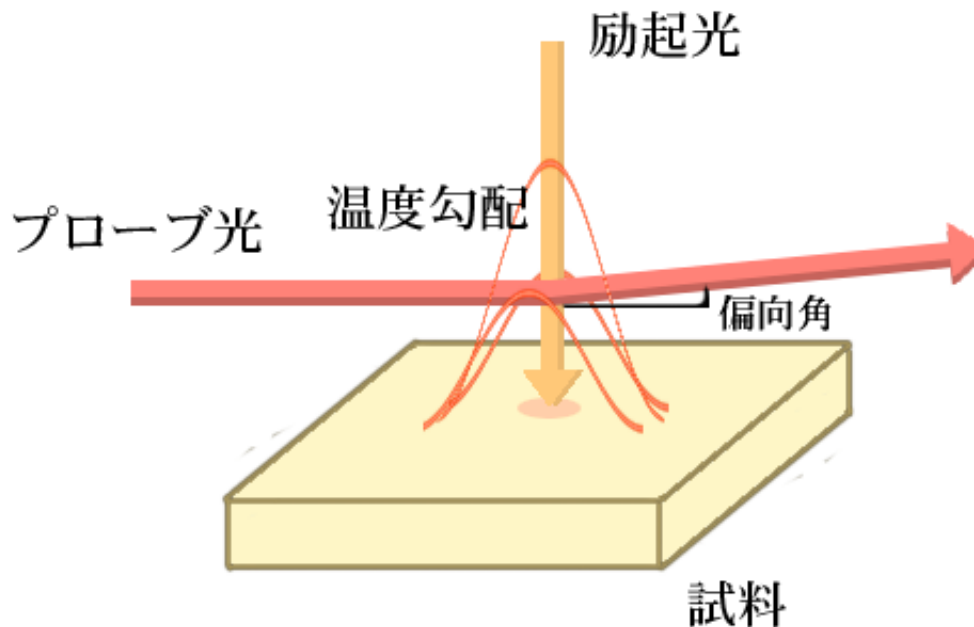
# Sagnac干渉計光熱偏向分光法の開発と熱緩和スペクトル

## 光熱偏向分光とは

光励起した物質が無輻射緩和で熱を発生。

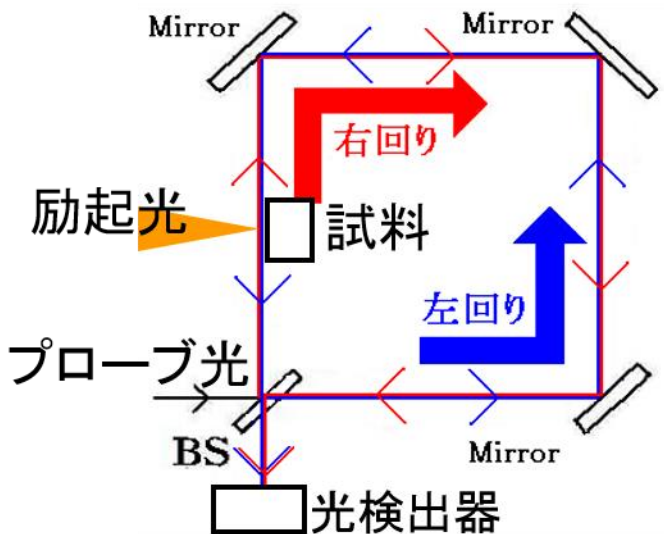
熱による温度勾配が屈折率勾配を生じ、通過プローブ光を偏向。

偏向角 vs 励起光波長 が吸収スペクトルに比例。  
(100% 熱に変換されると仮定すれば)

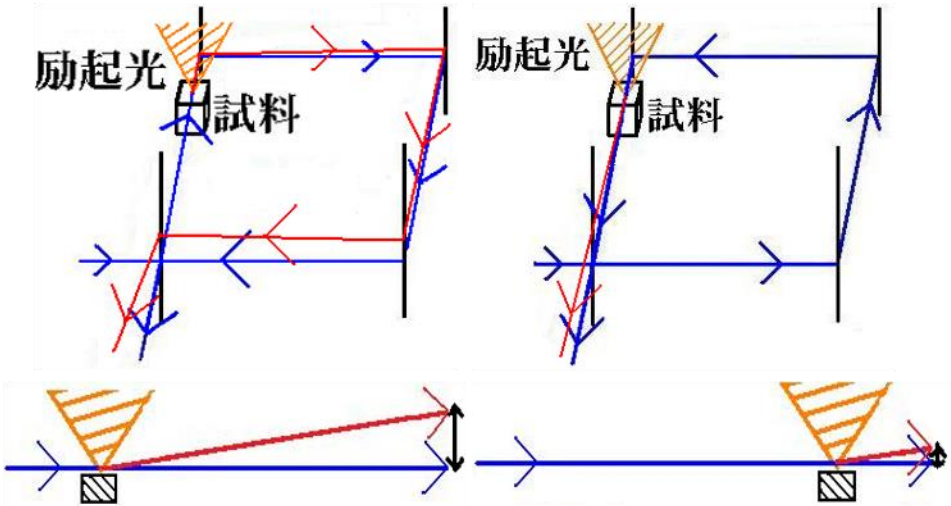


# Sagnac干渉計光熱偏向分光法の開発と熱緩和スペクトル

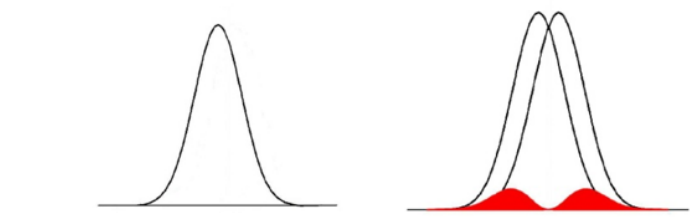
## Sagnac干渉計による新光熱偏向分光法



右回り: 固定端反射4回  
 左回り: 固定端反射3回



光熱偏向効果により、干渉位置でのプローブ光位置がずれる



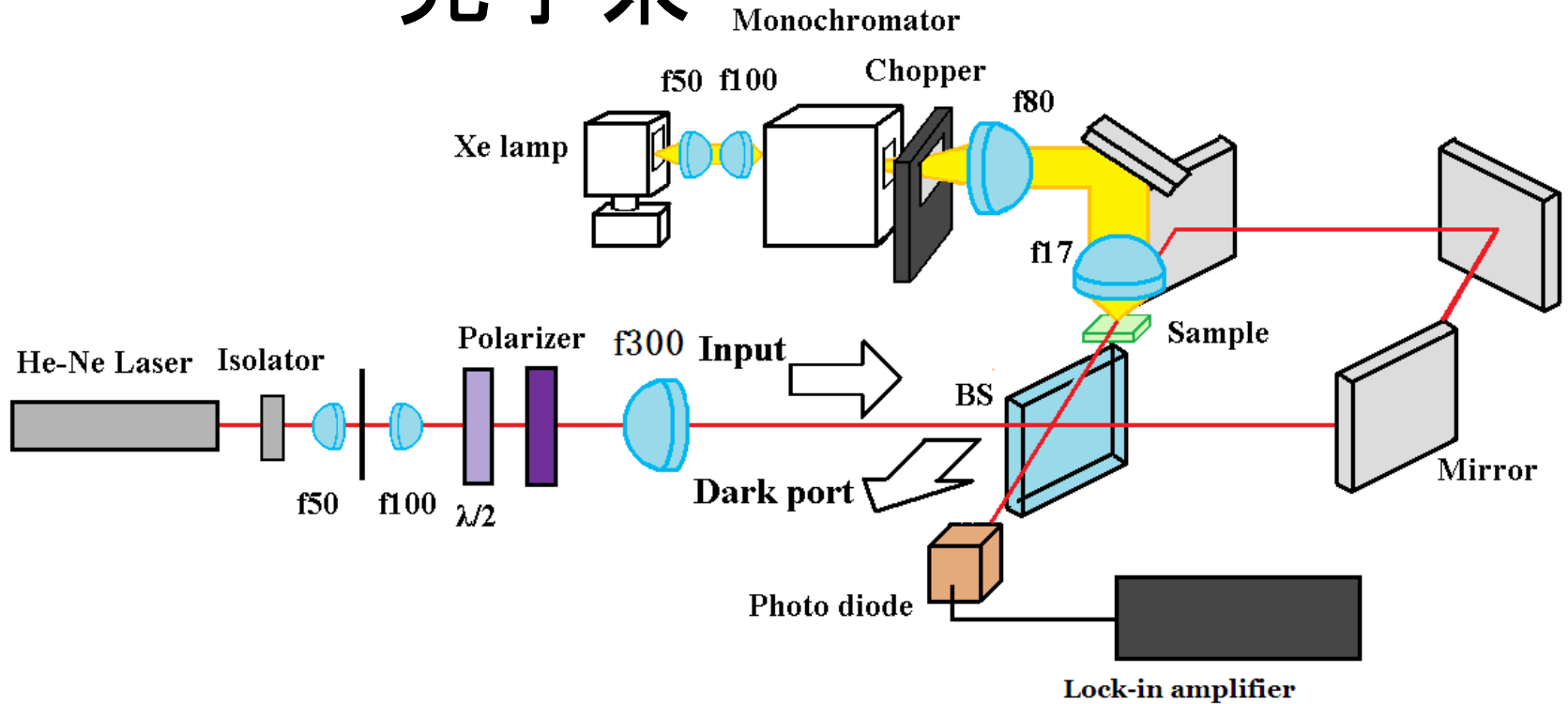
強度が同じで位相がπ異なり打ち消し合う

光熱偏向効果でビームがずれ検出光強度が変化

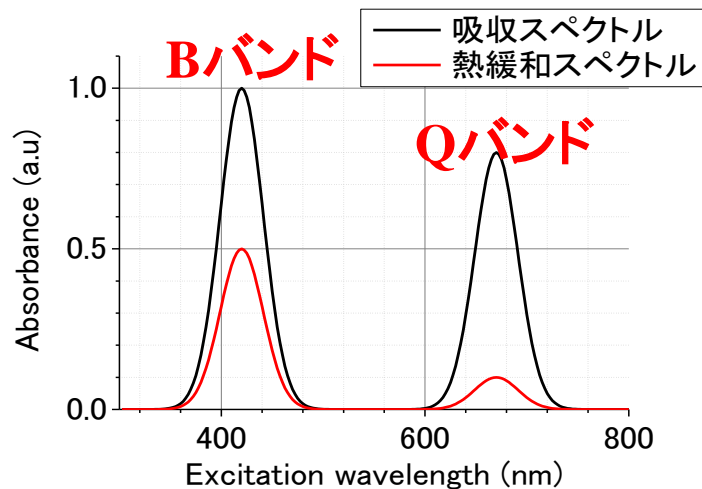
- ・ 共通光路で干渉が安定、光路を延ばせば光熱偏向信号のみを増幅
- ・ 分光白色ランプ励起で空気中の試料の光熱スペクトル測定可能に



# 光学系



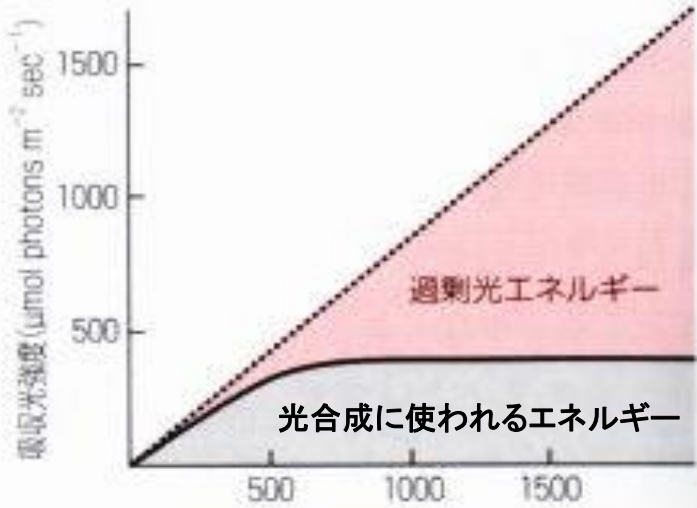
100%熱に変換されなければ  
 光熱スペクトル=熱緩和スペクトル  
 は吸収スペクトルと異なる  
 吸収スペクトルとの差異から  
 発光の量子効率や光合成の効率  
 などを測定できる



# 熱緩和スペクトルから光合成の効率がわかる

過剰光は有害 植物は過剰光励起エネルギーを熱放出

典型的な植物の吸収光子  
の光合成への利用量子効率

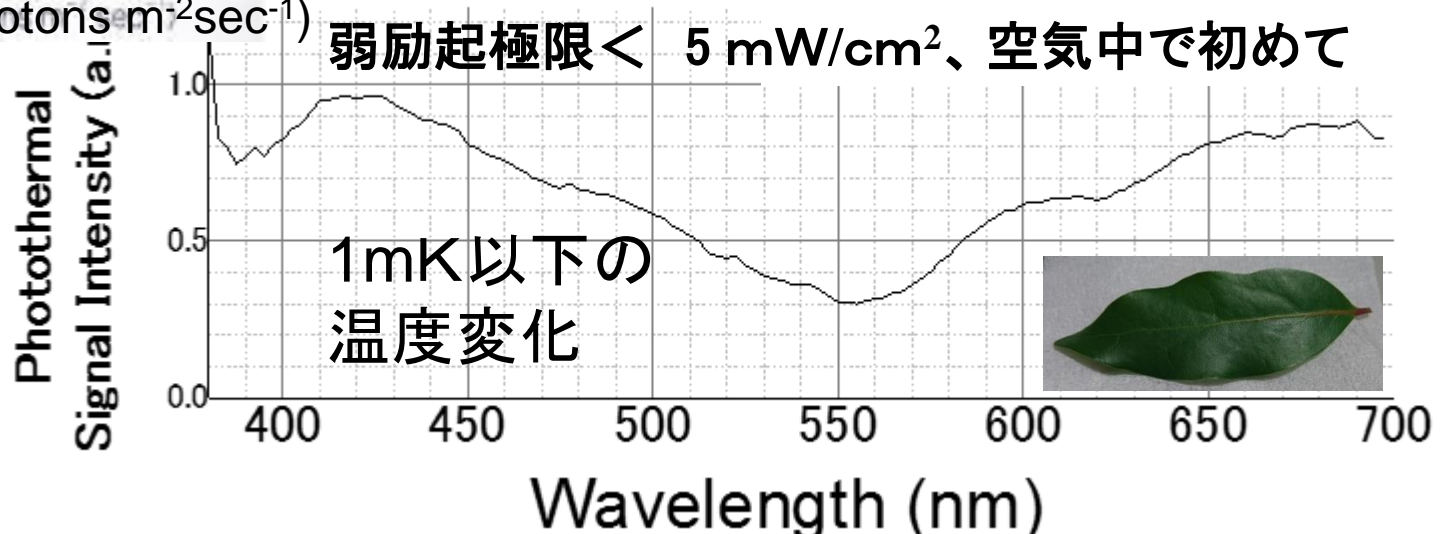


54W/m<sup>2</sup>@680nm 太陽定数1366W/m<sup>2</sup> 地表はこの80%  
500μmol photons m<sup>-2</sup>sec<sup>-1</sup>の光量子束密度で  
すでに過剰光を散逸させるメカニズムが働いている

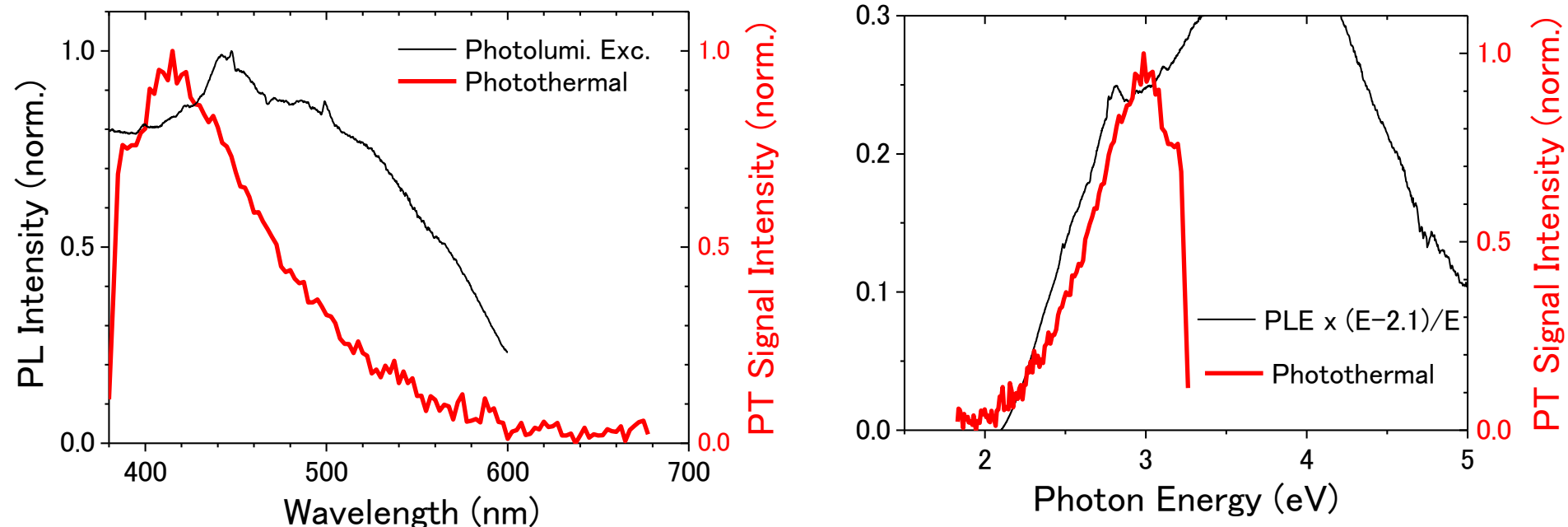
弱励起極限でのみ、  
光の光合成への利用量子効率→100%

## 生きた葉の熱緩和スペクトル

光強度(μmol photons m<sup>-2</sup>sec<sup>-1</sup>)



# 世界で初めて熱緩和スペクトルの測定に成功 (吸収スペクトルと異なる)



[左]白色LEDに使用される赤色蛍光体粉末CASN:Eu<sup>2+</sup>の  
発光励起スペクトル(=吸収スペクトル、黒線)と

Sagnac干渉計光熱偏向分光法で測定した光熱スペクトル(赤線)。

[右] 2.1eV以下の励起エネルギーはすべて発光に変わり、2.1eVを  
超える励起エネルギーだけが熱に変わるとして吸収スペクトルを変  
換するとほぼ光熱スペクトルに一致100%近い発光量子効率を実証  
光熱スペクトルが熱緩和スペクトルとして無輻射緩和効率(100%と  
の差をとれば発光効率)の定量的評価に使えることを実証。

# 非線形分光

# 非線形光学効果

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

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

光電場



# 非線形光学効果

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

光電場

内  
内が光電場のとき 二倍波発生 pump-probe分光  
パラメトリック効果 四光波混合



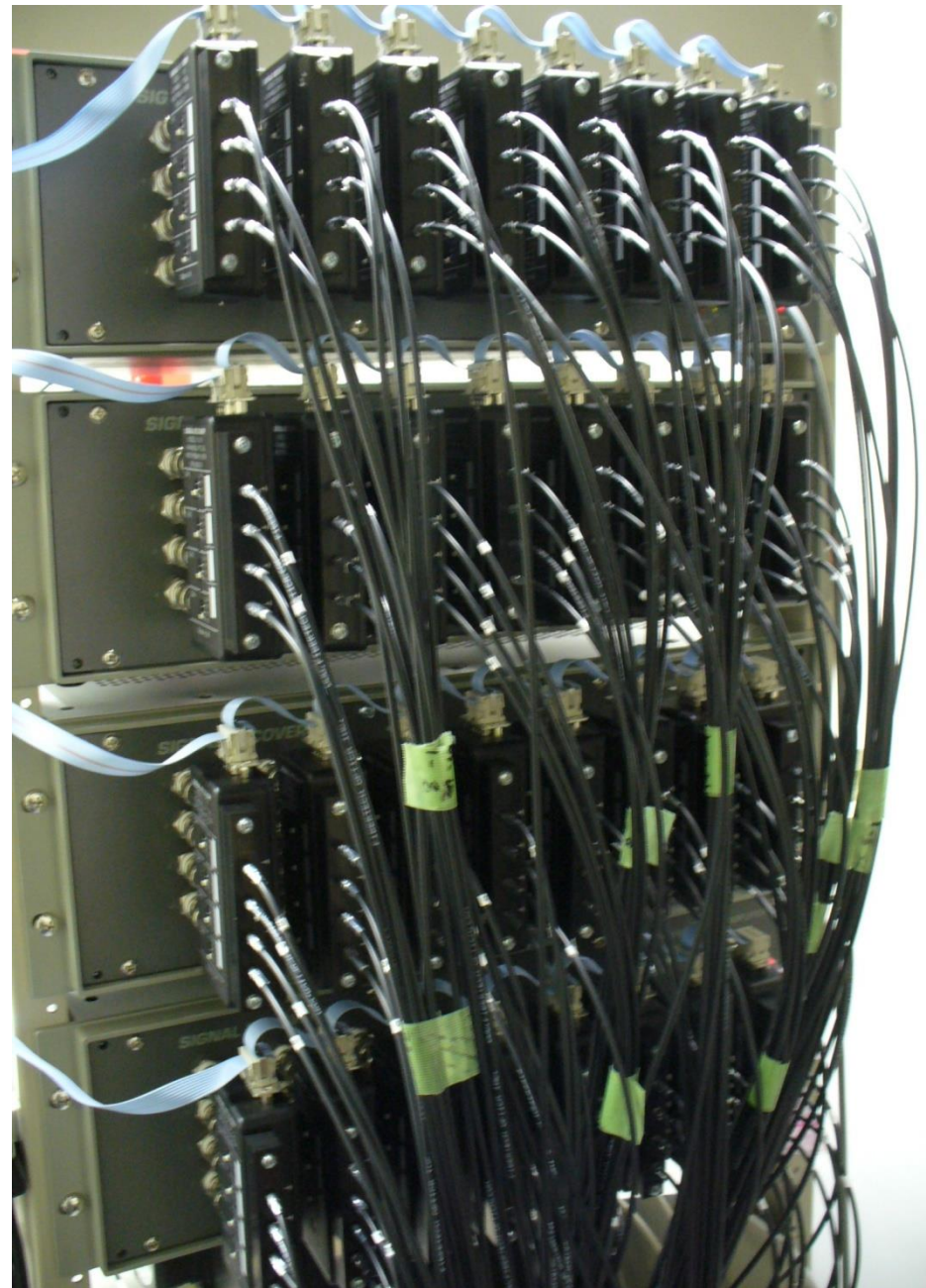
## 研究室を支えるオリジナル技術

# 世界初の多チャンネルロック インアンプを開発

外部刺激(光励起・電場印加)  
による透過光強度の微小変化  
( $10^{-6}$ )を測定

128台のロックインが並列稼動

透過率変化スペクトル  
シングルロックインで2時間  
の測定が1分で終了





# 電極界面の水のポッケルス効果を発見

## 2002年卒研

$$r_{33} = (2.5 \pm 0.6) \times 100 \text{ pm/V}$$

$$r_{13} = (2.0 \pm 0.3) \times 100 \text{ pm/V}$$

$$r_{13} \doteq n_1$$

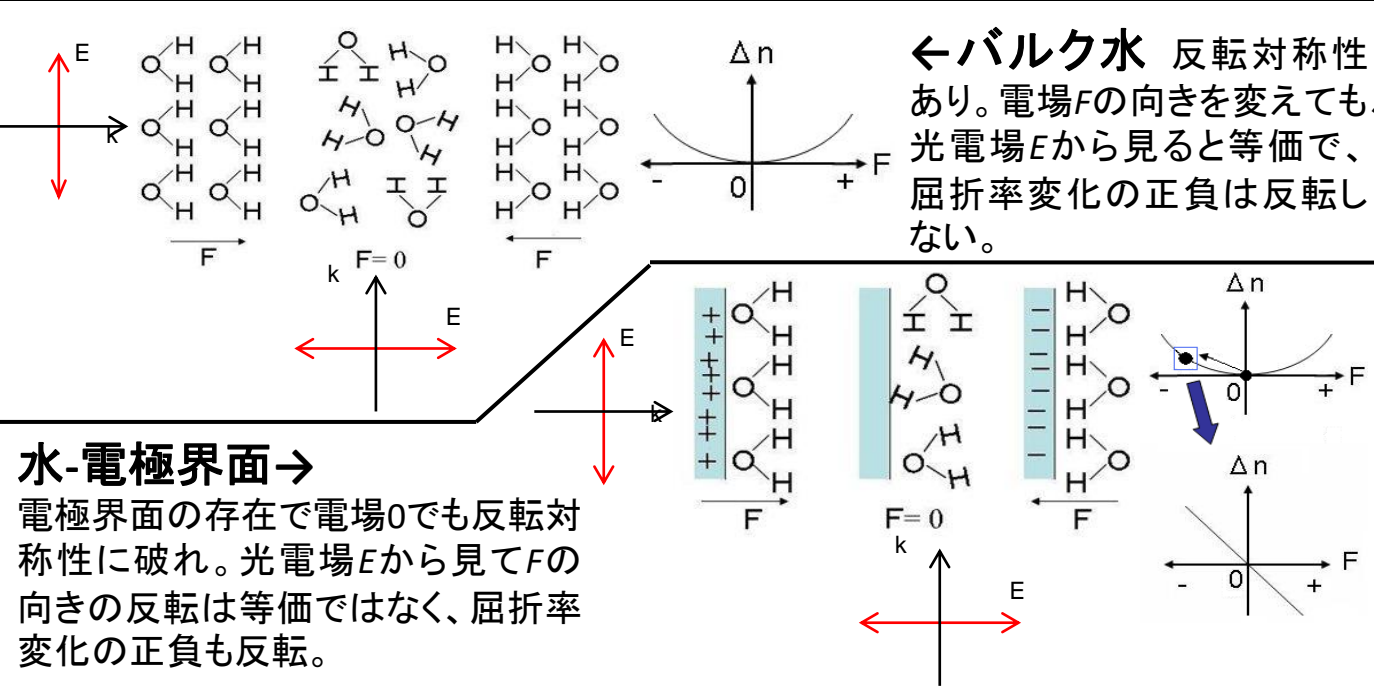
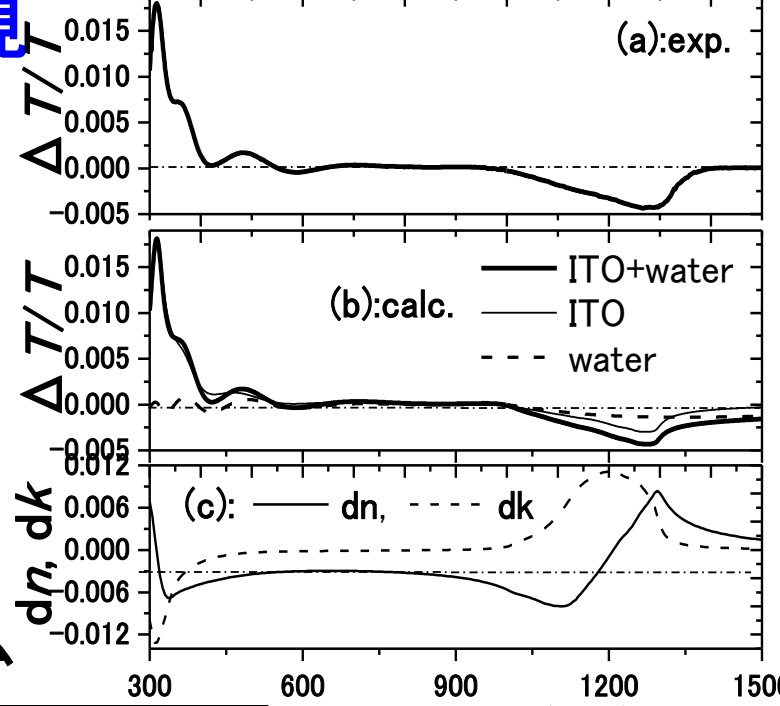
実用化 電気光学結晶  $\text{LiNbO}_3$  の係数と比べ

$$r_{33} = 30.9 \text{ pm/V}$$

$$r_{13} = 9.6 \text{ pm/V}$$

**10~20倍大きい巨大な電気光学効果!**

水のポッケルス効果 (電場に比例) のメカニズム

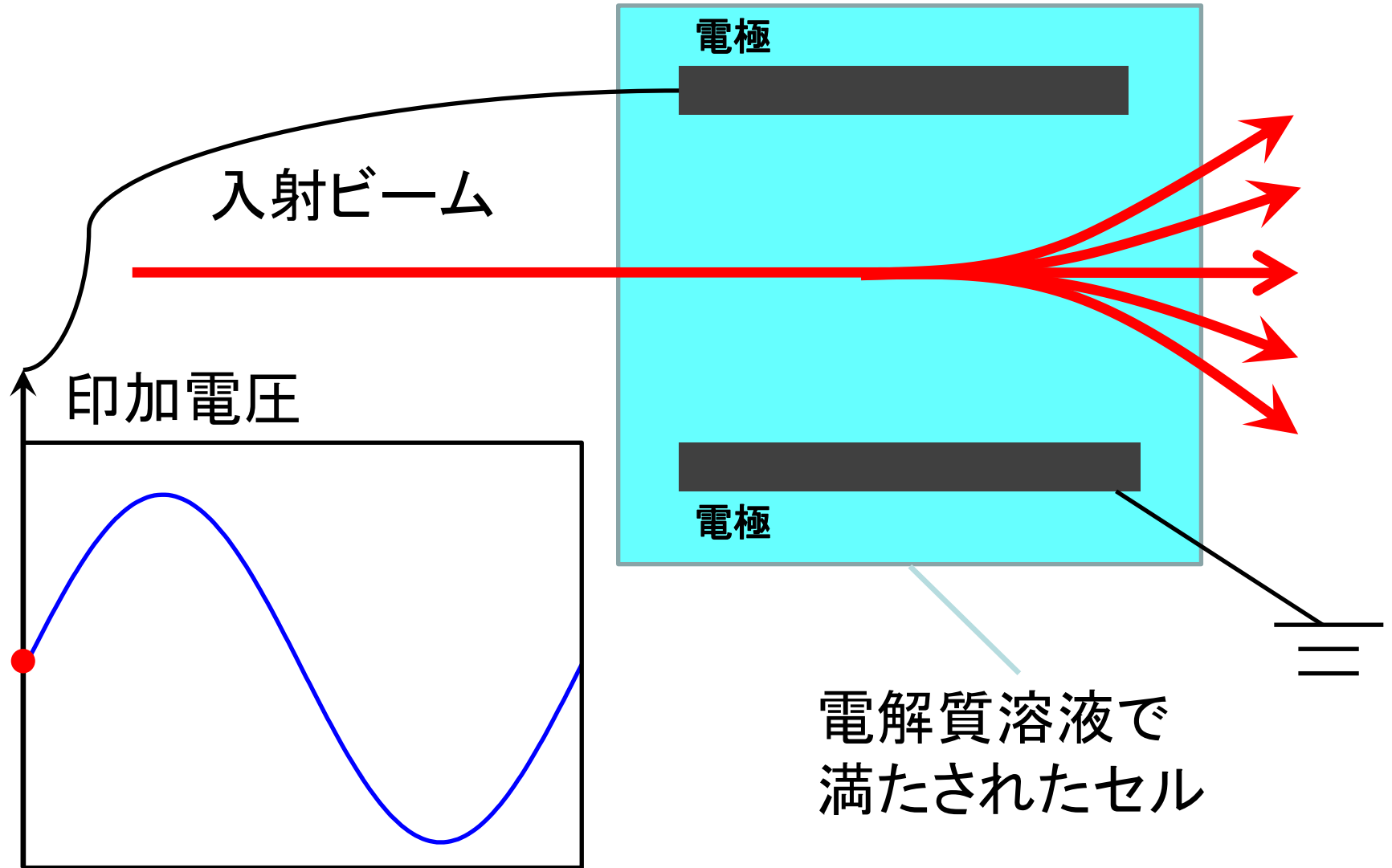


Wavelength (nm)

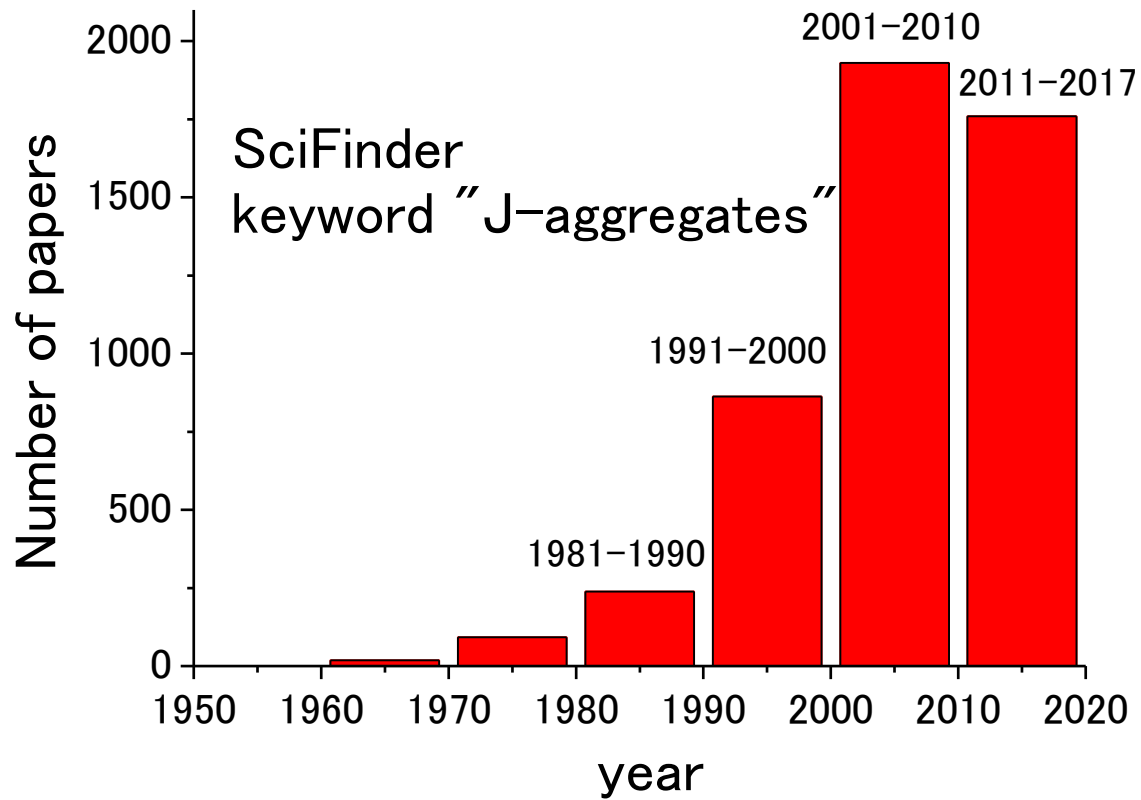
電解水(0.1M NaCl)中のITO電極に1Hz, 2Vの交流電圧を印加したときの透過率変 $\Delta T/T$ スペクトル(a)と計算結果(b)。 (c)で仮定したITOの複素屈折率変化だけでは実験結果を説明できず水の屈折率変化を実証。

# 2002卒研の発展

## バルク水の異常ポッケルス効果の発見(2012)



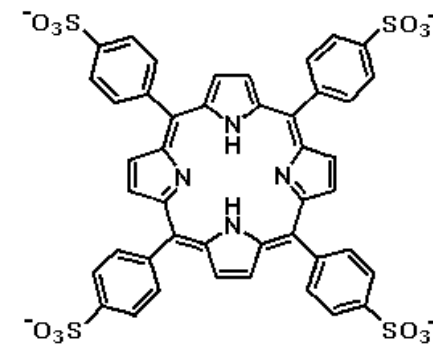
# J 会合体



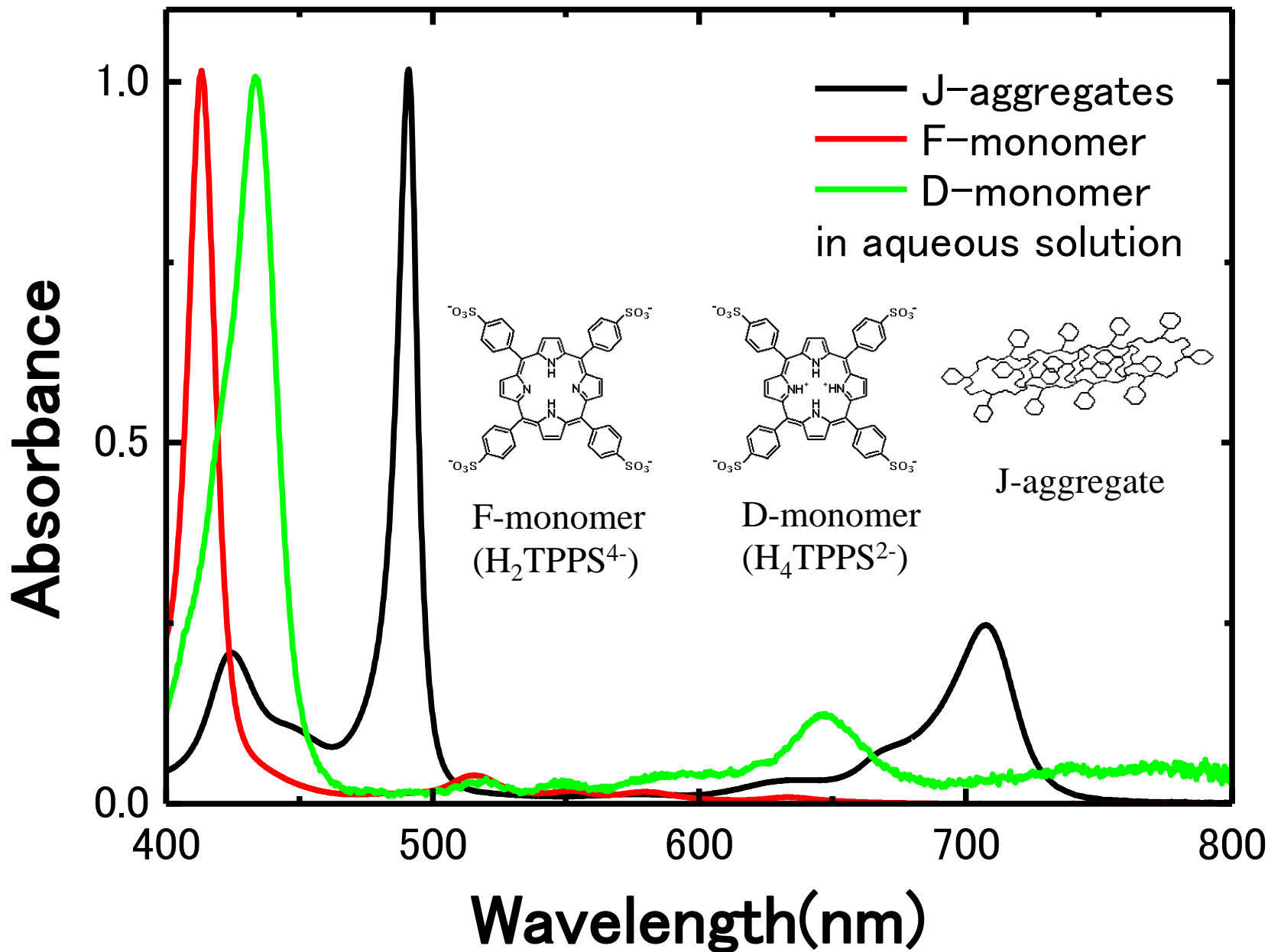
# 分子会合体の自己形成



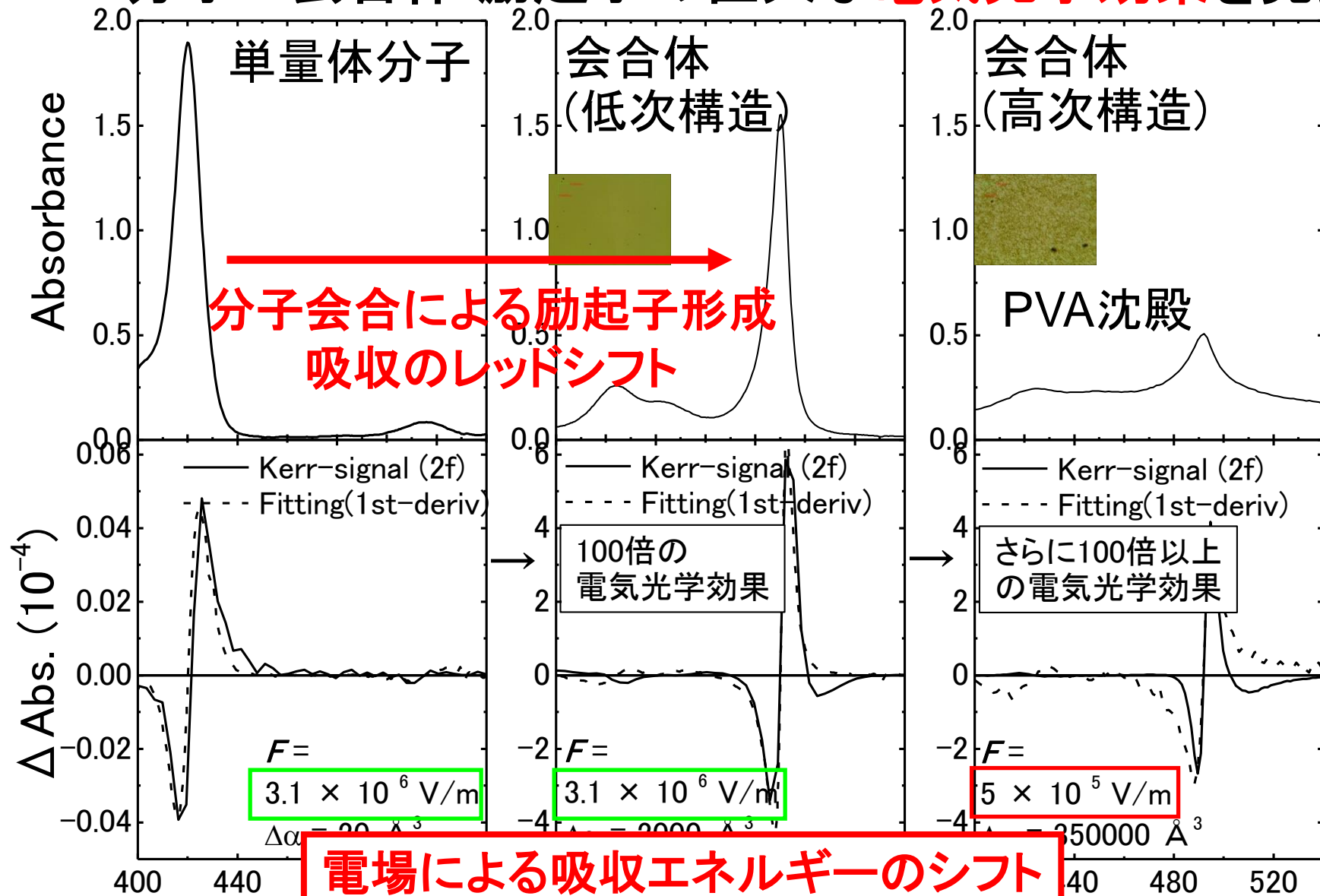
ポルフィリン分子 単量体(モノマー)溶液



# 分子会合体(結晶)の励起状態＝励起子

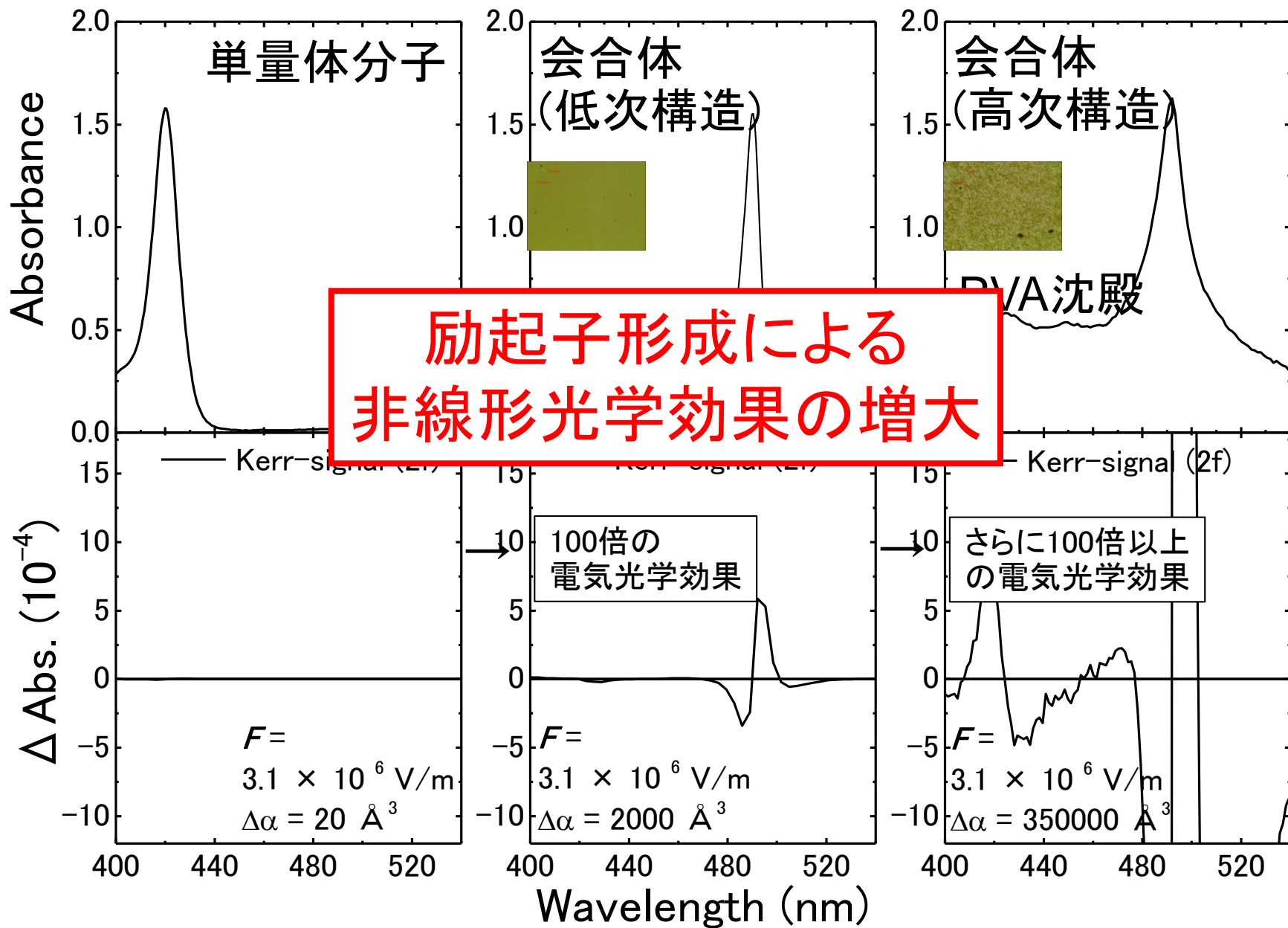


# TPPS分子 J会合体 励起子の巨大な電気光学効果を発見



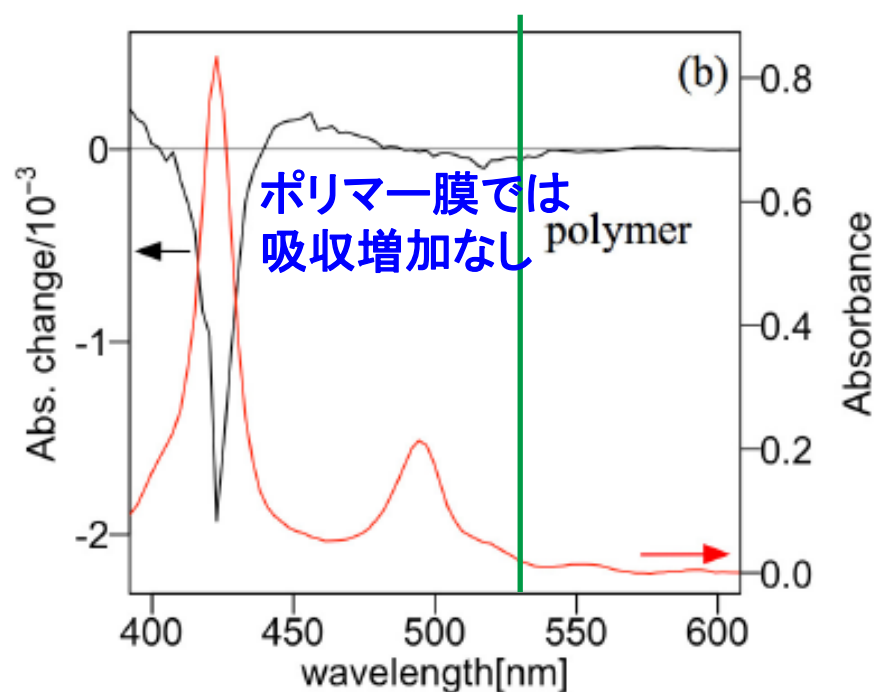
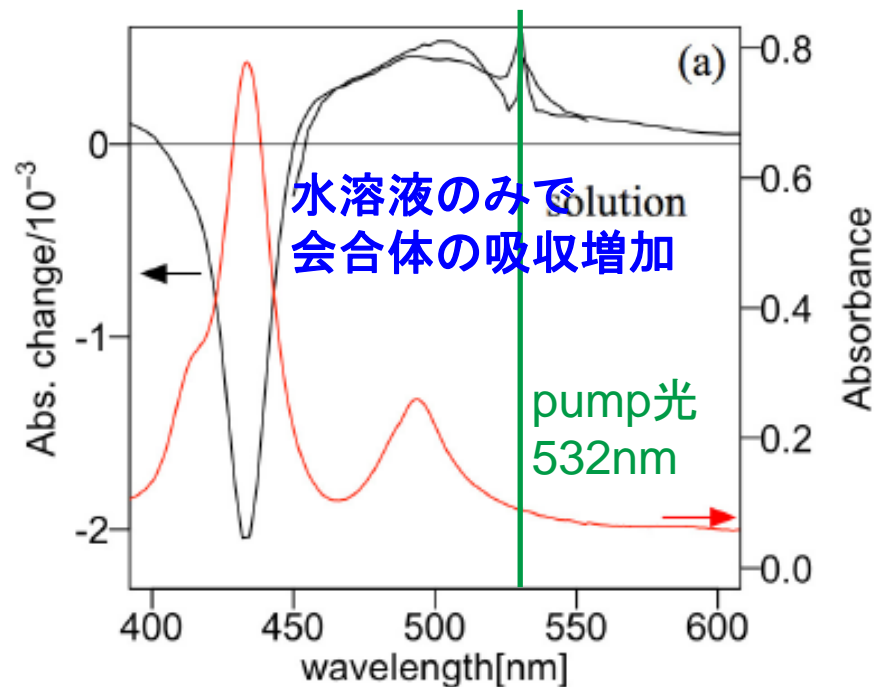
電場による吸収エネルギーのシフト  
量子力学 2次の摂動論  
Stark効果

# 吸収、印加電場が同じだとして、同じスケールで比較



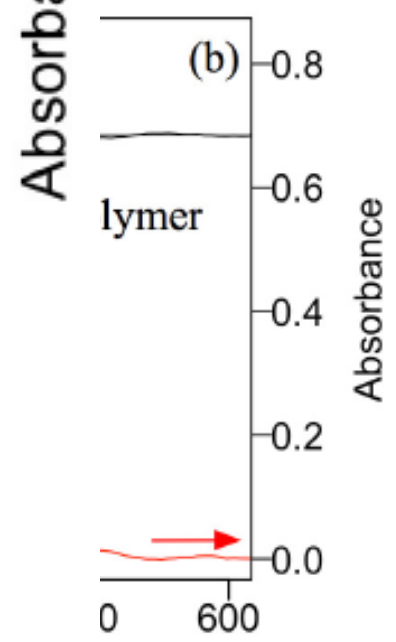
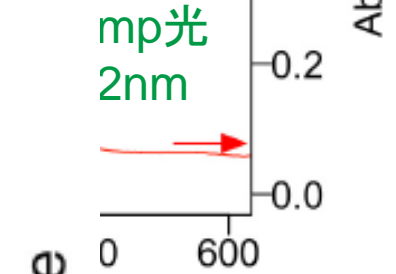
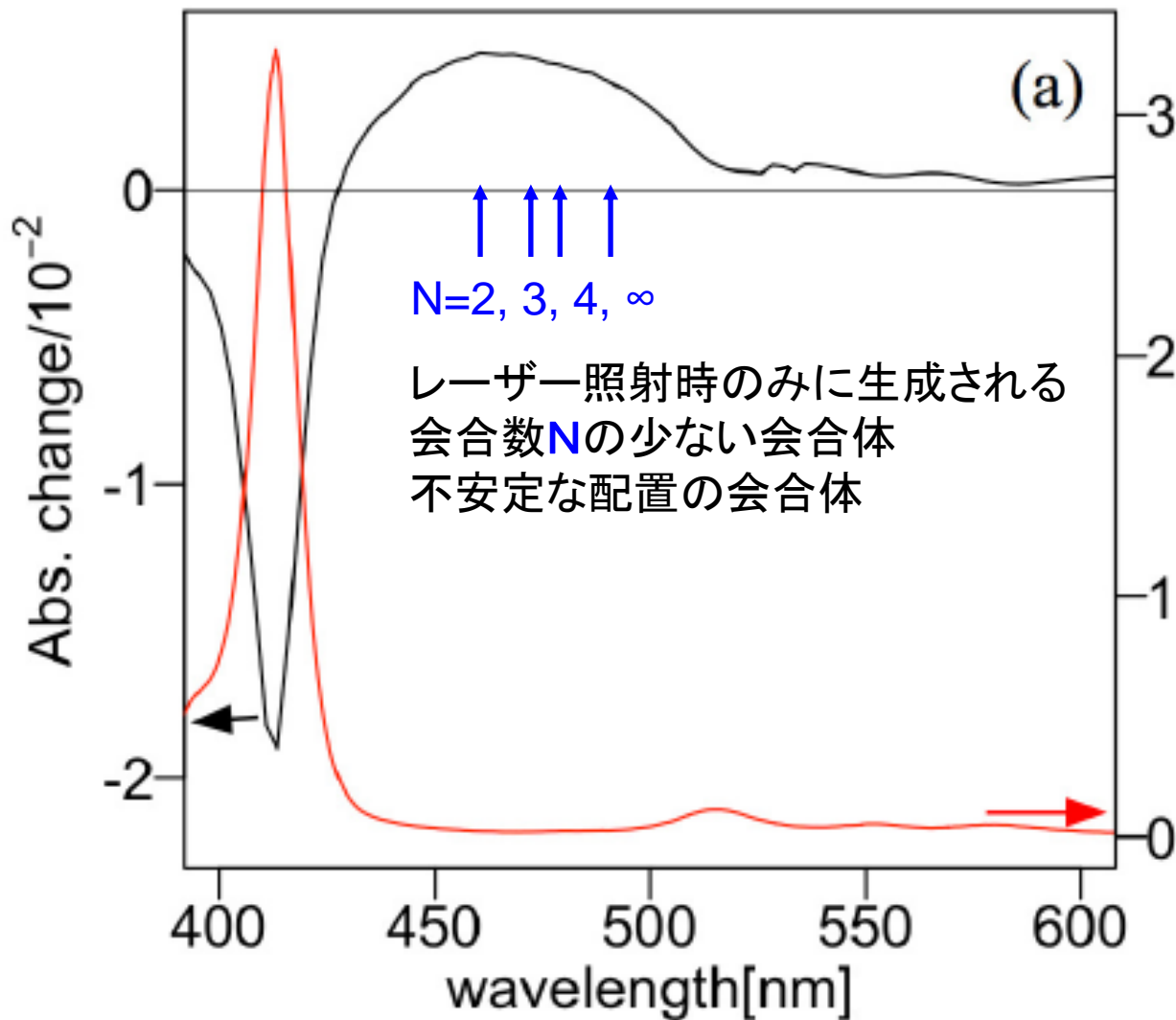
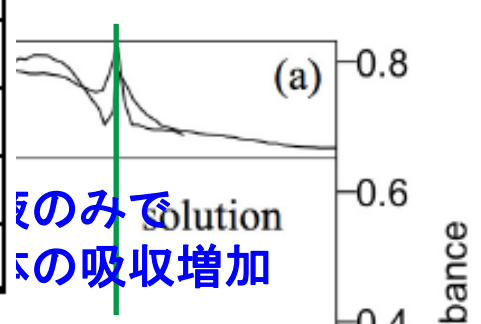
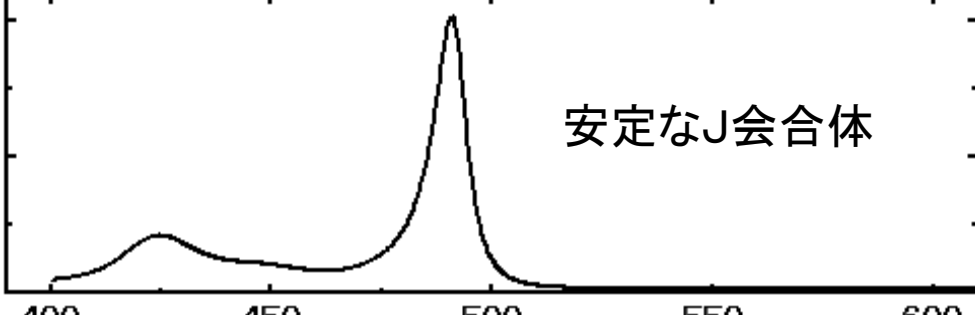
# Pump-Probe分光 2014卒

研 光の輻射圧(勾配力)  
で分子を集合させ、  
会合体を作る

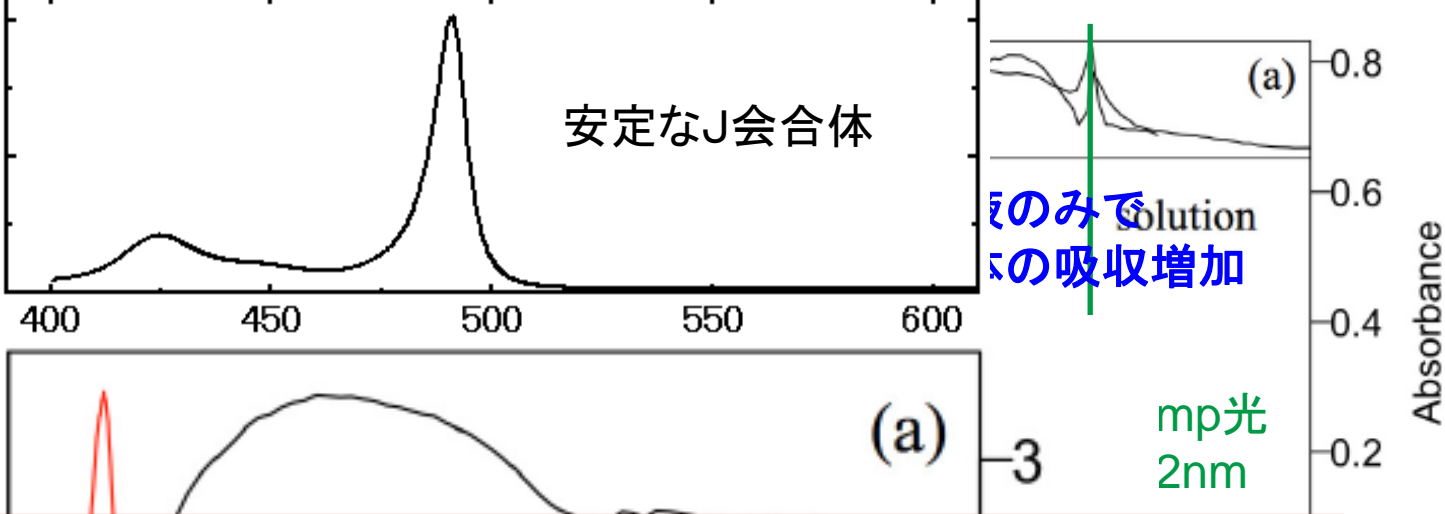




Pump-Probe  
 研 究  
 光の輻射  
 で分子を  
 会合



Pump-Probe  
 研 光の輻射  
 で分子を  
 会合



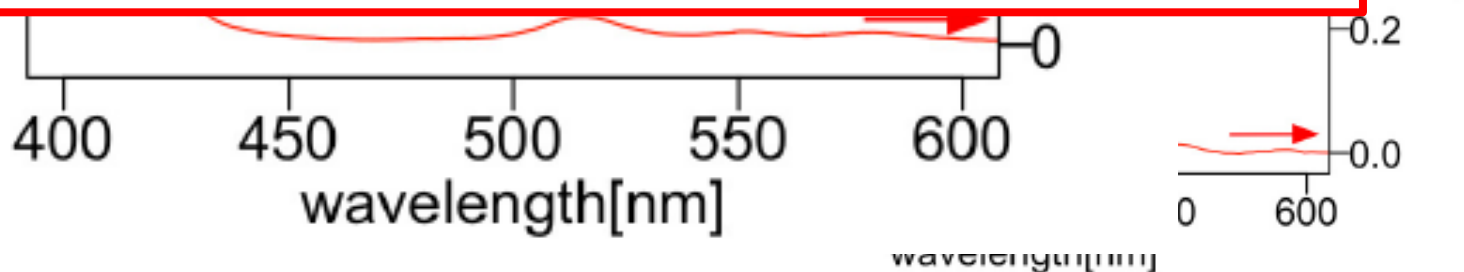
$$\frac{1}{2} \alpha E^2 \ll k_B T \quad \alpha : \text{分極率}$$

(勾配力ポテンシャル)  $\ll$  (分子の熱運動エネルギー)

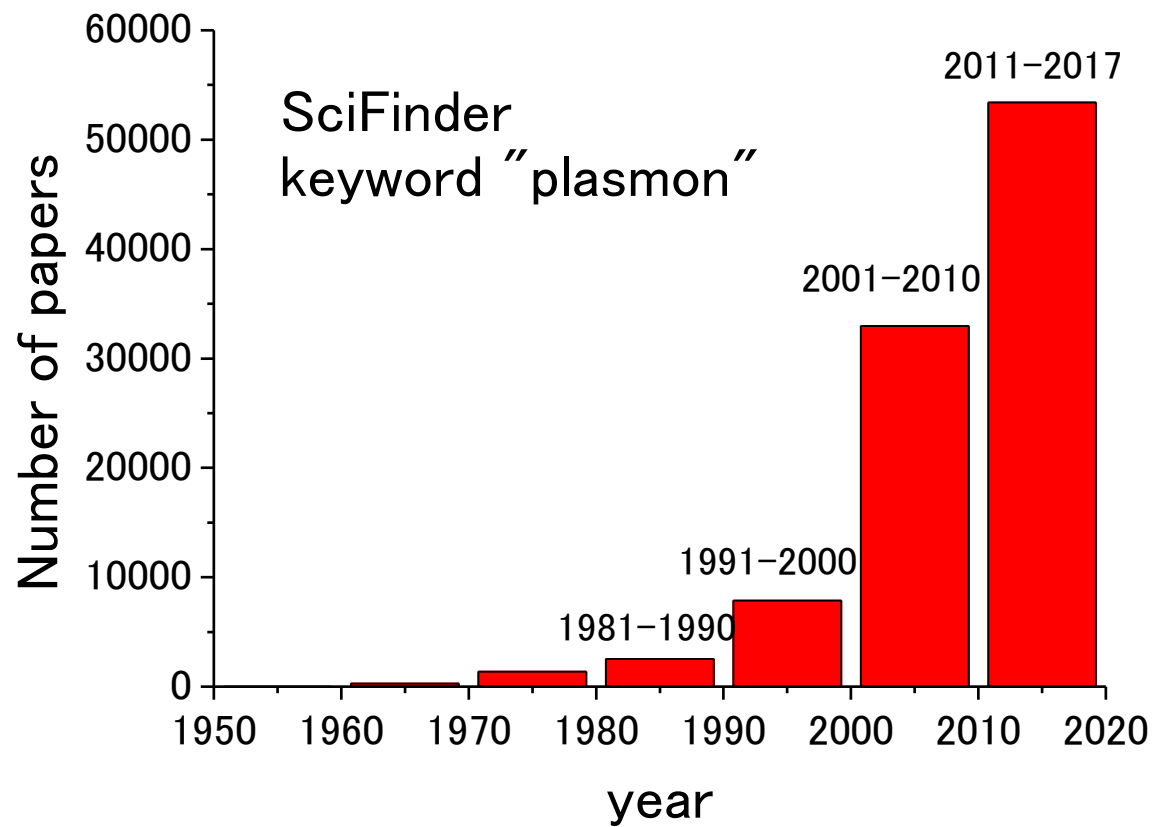
予想される吸収変化は  $10^{-7}$

観測した吸収変化は  $> 10^{-3}$

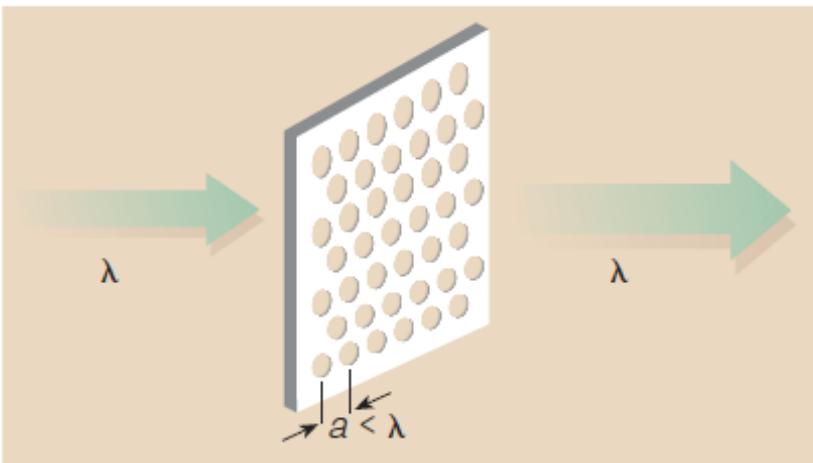
熱平衡状態では存在しない会合体を高効率に生成



# プラズモニクス

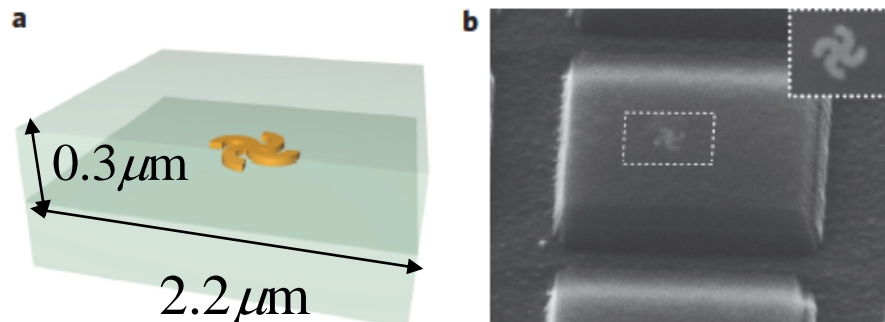


# 光の異常透過



gold 卍 (かぎ十字)

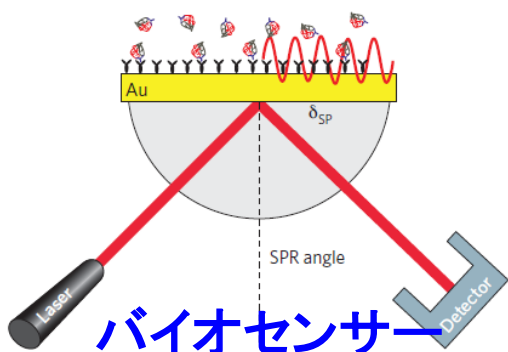
200 nm



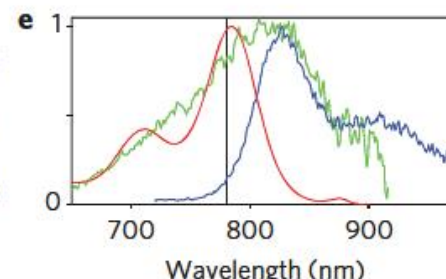
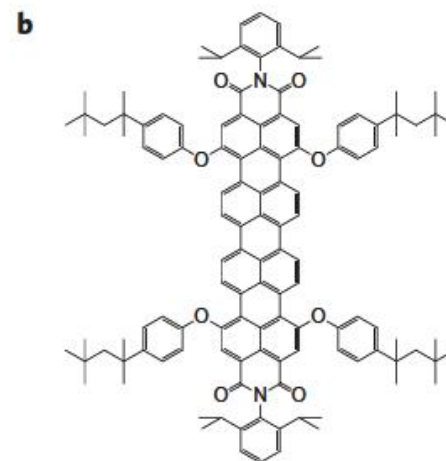
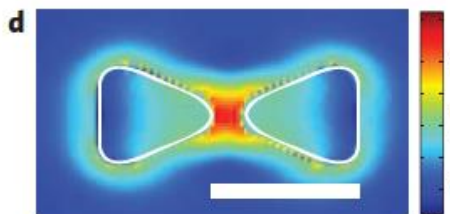
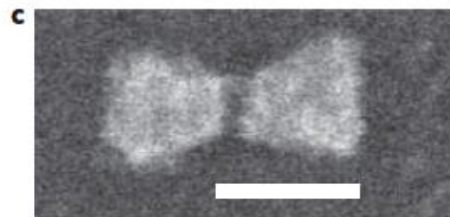
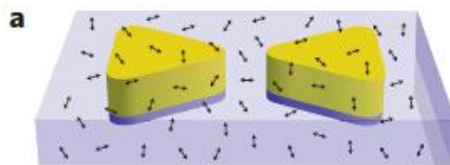
プラズモニックモーター  
直線偏光の光の照射で回転



ステンドグラス



プラズモンレーザー  
メタマテリアル  
ナノリソグラフィ  
.....

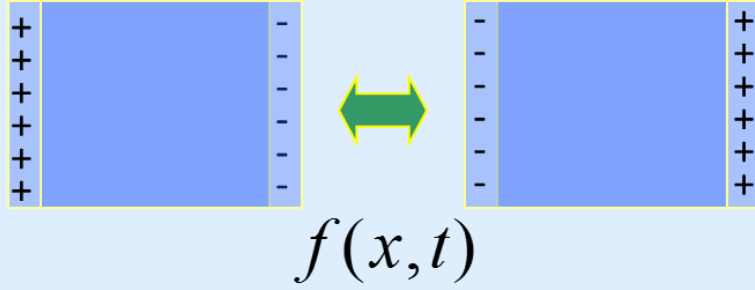


光学ナノアンテナ 単一分子の発光を>1000倍に増強

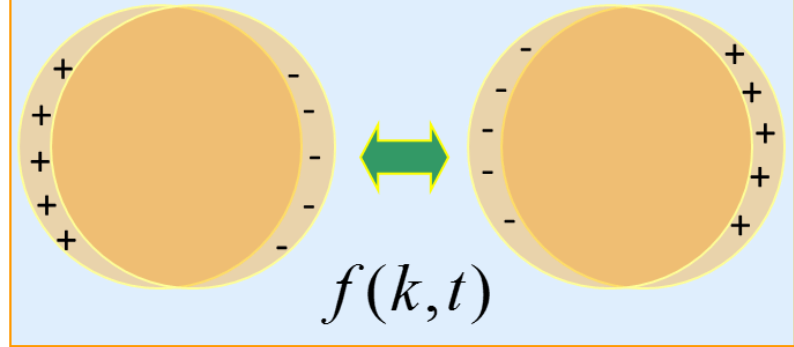
金属: 自由電子数 $\sim 10^{23}$ 個

→ 金属中や表面では超高密度の自由電子によるプラズマ振動が生じる(プラズモン)

• 実空間でのプラズマ振動



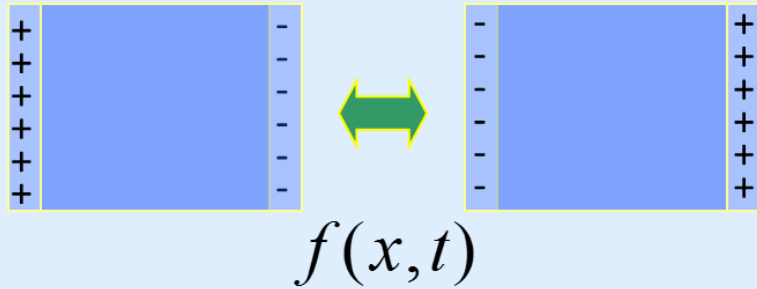
• 波数空間ではこれをどう表現する??



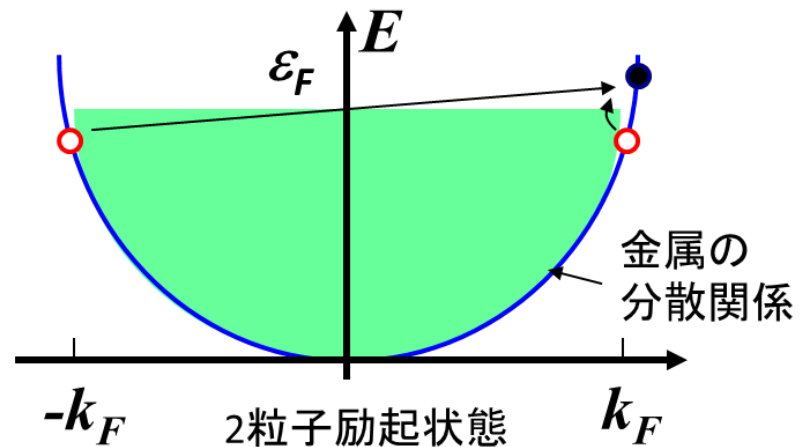
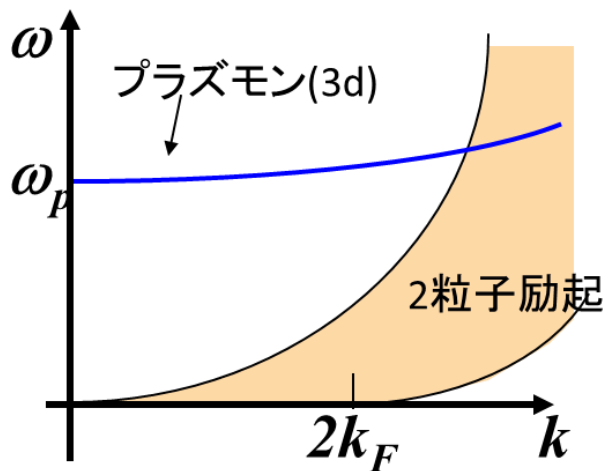
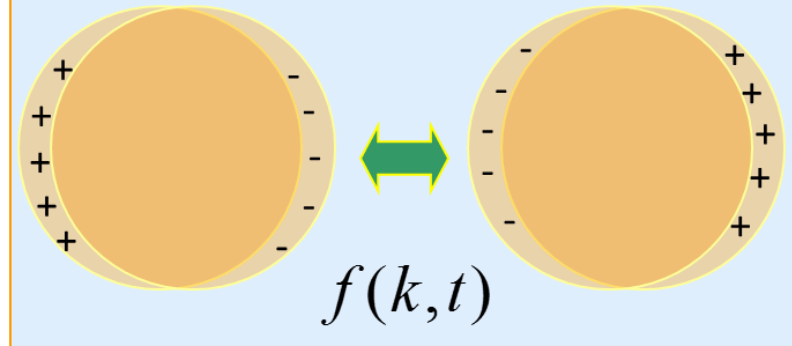
金属: 自由電子数 $\sim 10^{23}$ 個

→金属中や表面では超高密度の自由電子によるプラズマ振動が生じる(プラズモン)

•実空間でのプラズマ振動



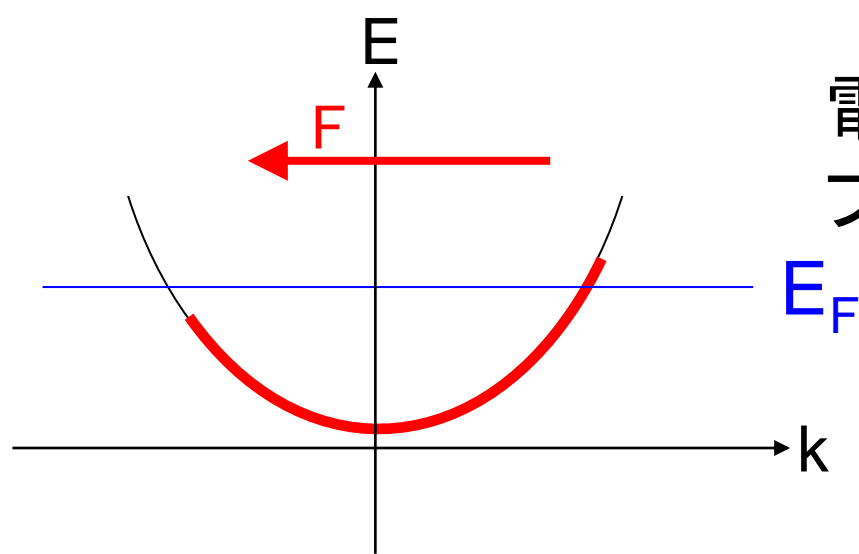
•波数空間ではこれをどう表現する??



- 2粒子励起状態 → **すぐに減衰**
- プラズモン励起状態 → 減衰はより緩やか。また、励起に必要なエネルギー**大**。

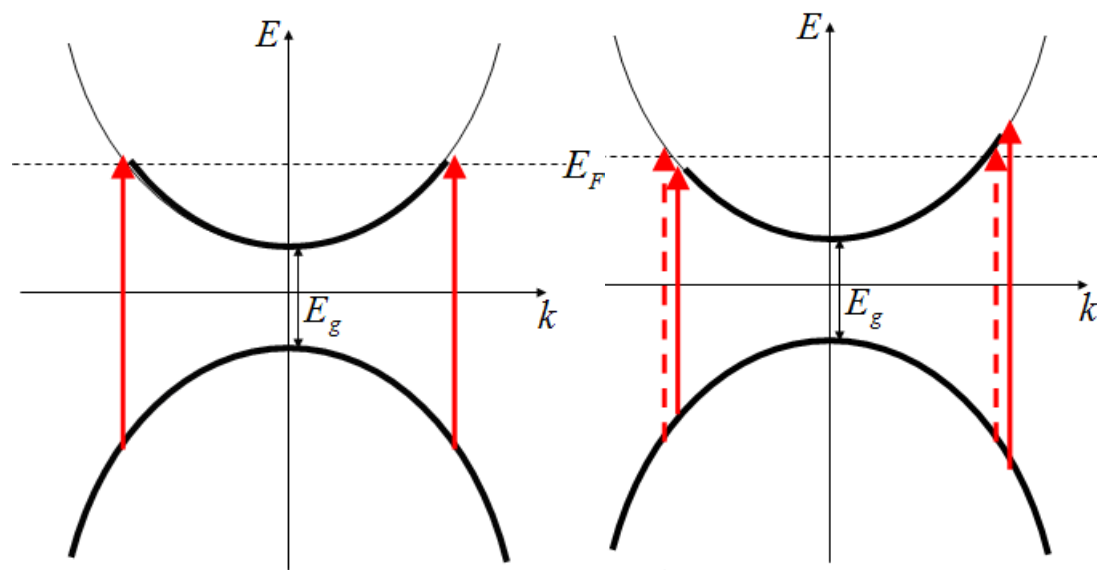
プラズモン波動関数は金属の分散曲線上(k空間)の電子・正孔でどのように構成されているか





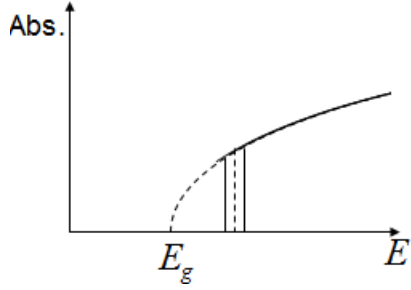
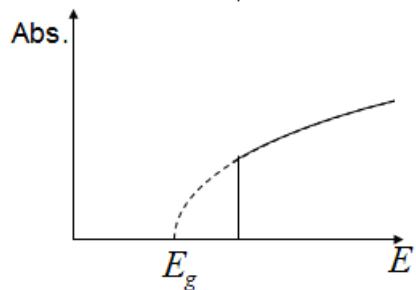
電気伝導

フェルミ面近傍の電子が担う



金属に電流を流すと  
フェルミ面がシフト→  
バンド間遷移が変化

表面プラズモンによる  
フェルミ面変調  $10^{15}$  Hz



周波数の低いフェルミ  
面変調(電流変調) 100  
Hz



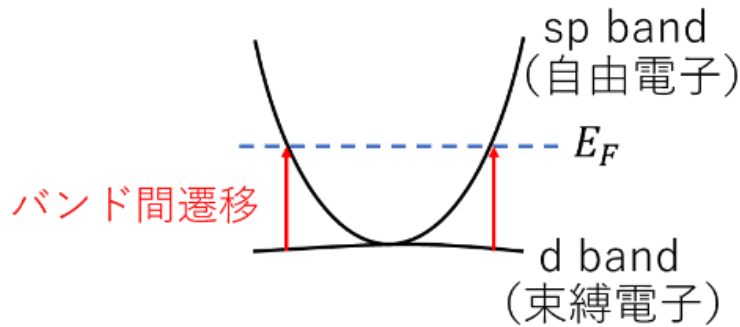


図3. 貴金属のd-spバンド間遷移

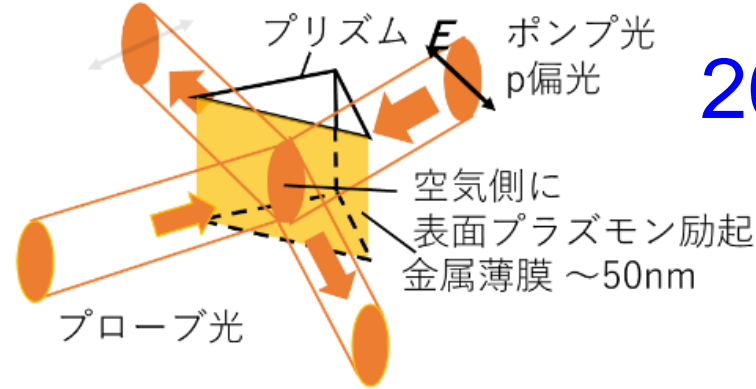
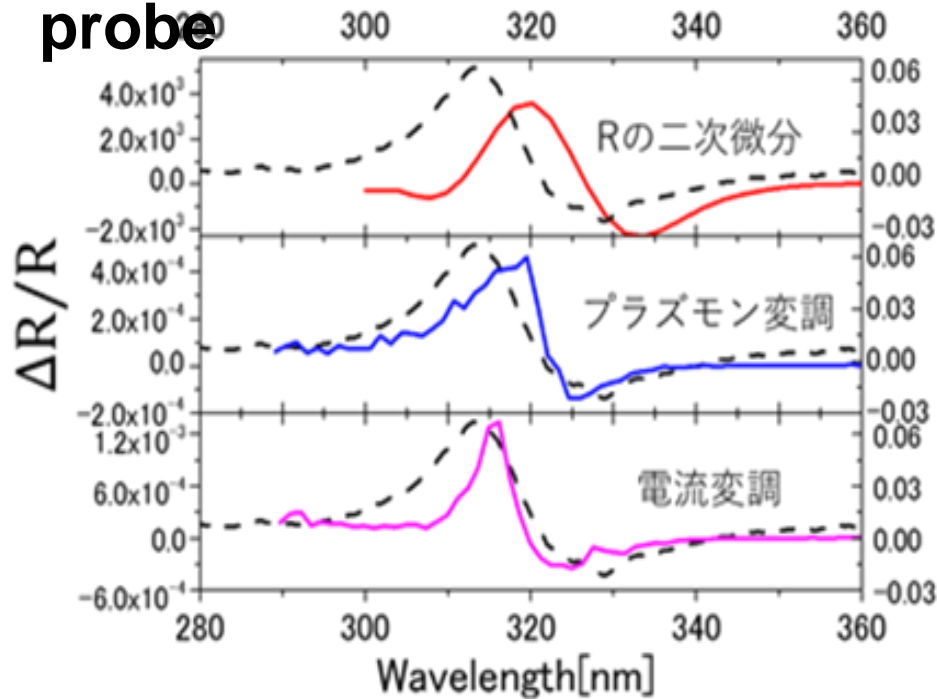


図4. ポンププローブ分光

408nm pump、定常白色光  
 probe



プラズモン変調  
 と  
 電流変調  
 温度差分  
 に明確な違い

現在のところ  
 これを説明できる  
 理論なし

図5. 銀のプラズモン、電流変調分光結果と  
 $\Delta T=50K$ の温度差分スペクトル (破線) の比較

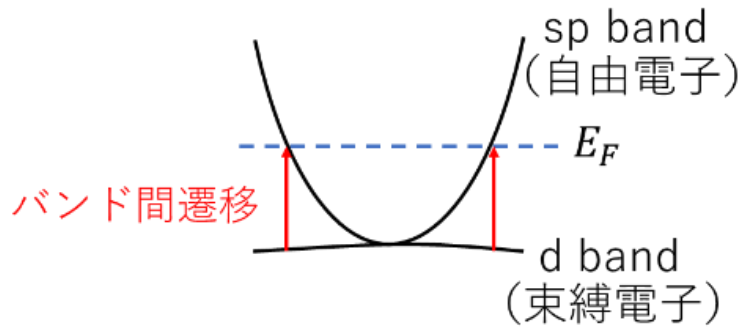


図3. 貴金属のd-spバンド間遷移

## 408nm pump、定常白色光 probe

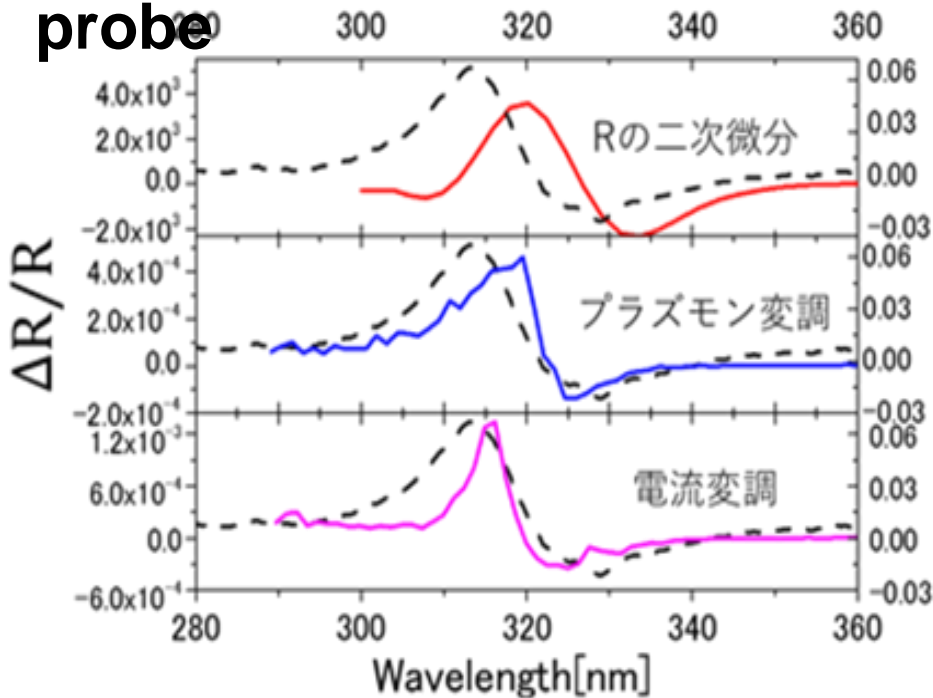


図5. 銀のプラズモン、電流変調分光結果と  $\Delta T=50K$  の温度差分スペクトル (破線) の比較

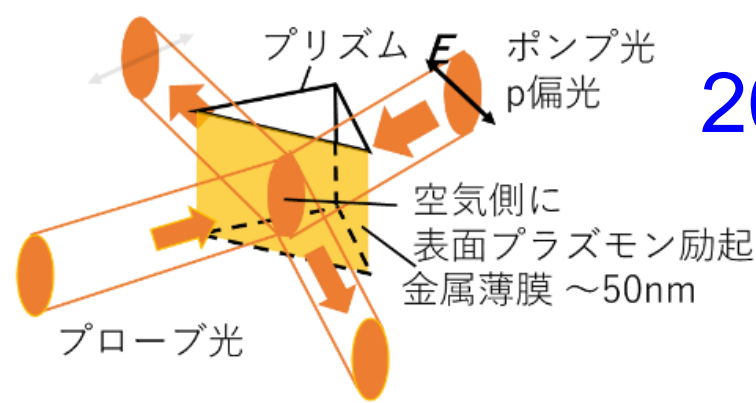
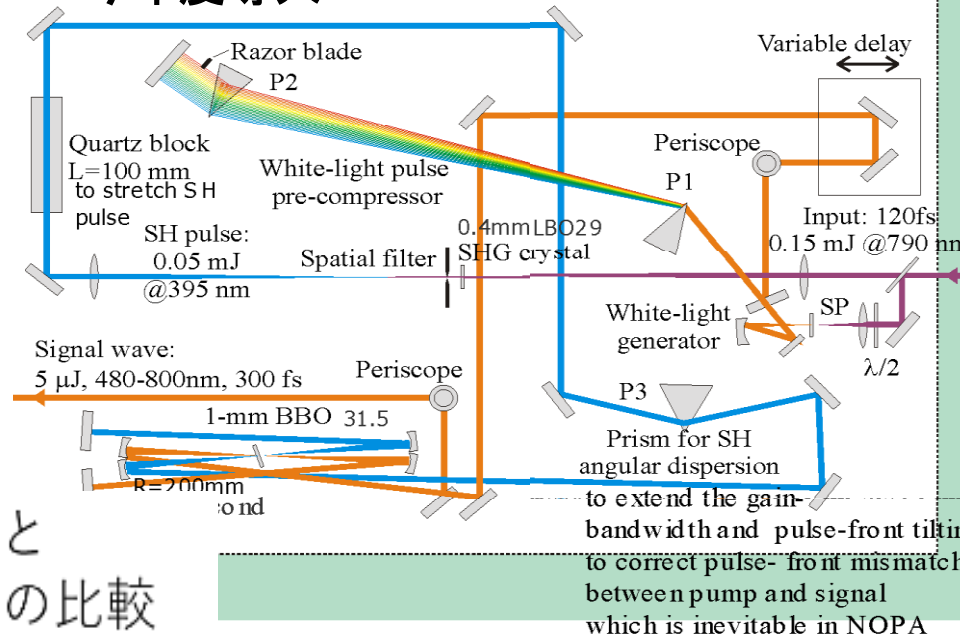


図4. ポンププローブ分光

プラズモンの寿命~10fs なので

世界最短可視光4fsパルス(NOPA)で  
 プラズモン空間内部波動関数の解明に挑む  
**Non-collinear Optical Parametric**

**Amplifier**  
 今年度導入



卒研で特許

# 光で操作できる微粒子、2015卒研

## 走光性ヤヌス粒子の開発

特許願2016-071706

2016.3.31 原田 (積水  
化成品工業) 徳永

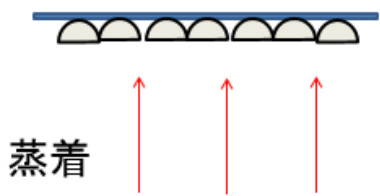
相沢 (卒研生) 瀬戸



走光性・・・光に反応して移動する性質

ヤヌス粒子・・・"異なる性質の表面"を持つ異方性微粒子 <sup>2つの顔を</sup>  
<sup>持つヤヌス神</sup>

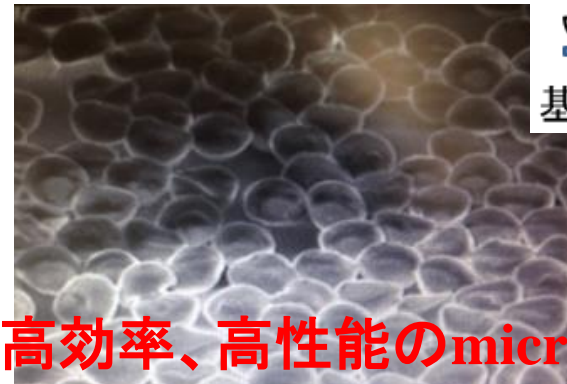
サイズ8 $\mu\text{m}$ のクラミドモナスは鞭毛運動により100  $\mu\text{m}/\text{s}$  (体長の10倍以上)で遊泳できるが、クラミドモナスにとって水はレイノルズ数が小さいため粘性の大きいどろどろの流体であり、わずかなエネルギーでこの運動性能を実現しているのは驚異的。現在のところ人工的に実現不可能。



向きを揃えて半球状微粒子を配列させ、銀などの金属を赤道面に蒸着する。

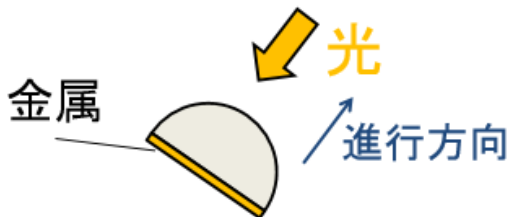
直径2.5  $\mu\text{m}$ の半球ポリマーを赤道面を上向きに配列させることに成功 (特許願)

SEMで傾斜60°で観察



基板 (スライドガラス)

表面プラズモン共鳴



吸収しない

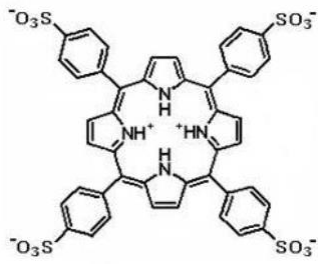
吸収  
→ 温まる  
→ 熱勾配が生じ動く

高効率、高性能のmicroswimmerが実現すれば、基礎物理学的に興味深いだけでなく、工業的、医療的に大きなインパクト

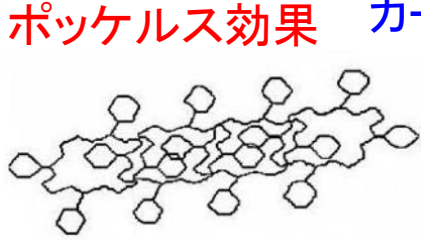
# 実時間非線形応答復元ロックインアンプの発明

$$P = \varepsilon_0 \left( \chi^{(1)} + \chi^{(2)} E_{elec} + \chi^{(3)} E_{elec}^2 + \dots \right) E_{light}$$

特許願 2016-38306  
2016.2.29 瀬戸、徳永  
庭瀬(卒研生)



D単量体

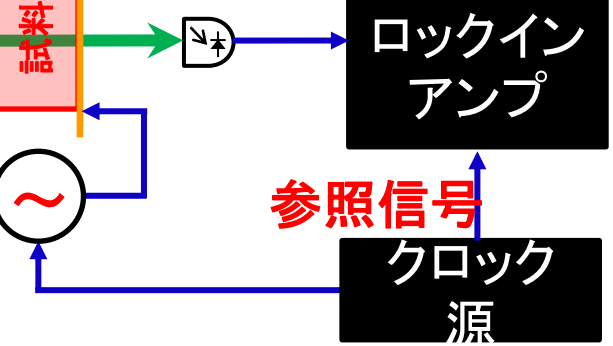


J会合体

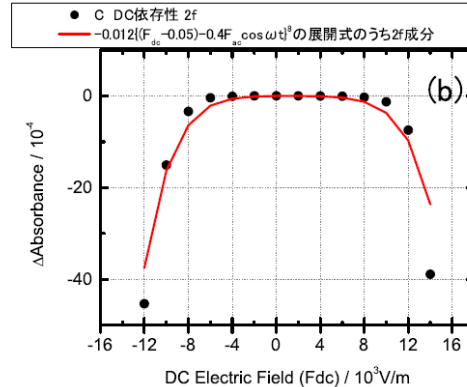
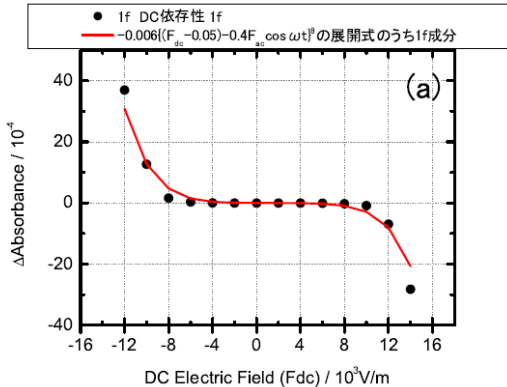
ポッケルス効果 カー効果

2015卒研

プローブ光



Tetraphenylporphyrin tetrasulfonic acid (TPPS)

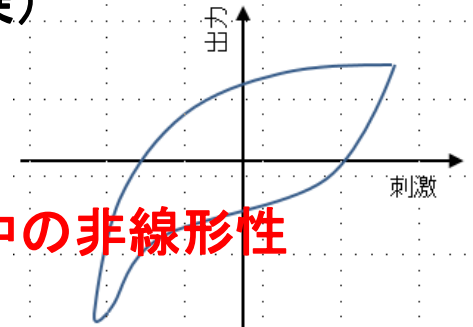


$$P^{(n)}(n\omega) = \chi^{(n)}(n\omega) E^n(\omega)$$

$$P^{(3)}(3\omega) = \chi^{(3)}(3\omega) E^3(\omega) \text{ 3次の非線形分極}$$

$$= \chi^{(3)}(3\omega) E_0^3 \left[ \frac{1}{4} \cos(3\omega t) + \frac{3}{4} \cos(\omega t) \right]$$

3倍波発生 吸収飽和



- 透過率の1f, 2f信号のDC電圧依存性がべき乗(少なくとも8乗)
- 従来ロックインアンプでは個別のnfの周波数の振幅と位相がわかるのみ 複雑な非線形を評価できない
- 透過率変化測定: 高ノイズ・高バックグラウンド繰り返し信号中の非線形性(ヒステリシスを含む)を評価したい

# 助教 瀬戸先生

感度を飛躍的に高めた  
画期的な光計測技術開発(中)

特許、論文 多数





# 卒研究生に望むこと

- 自主性を持って積極的に実験
- 提案を歓迎
- 考えて何もしないより、考える前にやってみよう
- 挑戦しての失敗はOK

募集人数　～10名

説明会　2月15日(水) 15:00-16:00　132教室

変更があり得るので直前にホームページで確認を

研究室見学はいつでもOKです（予約なしでも対応できるときはします、人数が多いほど助かります）

説明会後の研究室見学も歓迎