光科学 1
第2回

東京理科大学先進工学部 マテリアル創成工学科
曽我 公平

第1回のまとめ

- 光とは**電磁波**であり、かつ**量子**であるものである。
- 電磁波において
  - 電場と磁場は常に**直交**する
  - 電場と磁場は進行方向に垂直な面内にのみに存在する**横波**である
  - 電磁波の進行する速さは、誘電率εと透磁率μで

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

と表される。

第1回の課題

【課題１】
次の語句の科学的な意味について式や記号を用いずに1行以内の日本語で説明しなさい。
「光」：

「波」：

「電場」：

「電荷」：

「対称」：

第1回の課題

【課題１】の解
「光」:
光とは**電磁波**であり、かつ**量子**であるものである。
「波」:
周期的対称性をもつものや現象を「波」という。
「電場」:
電場とは電荷に力を及ぼすものである。
「電荷」:
電荷とは電場の発生源である。
「対称」:
ある操作の前後で**見分けがつかない**ことを「対称」であるという。

第1回の課題

【課題２】

(1) マクスウェルの方程式から電流密度$\boldsymbol{J}=0$ のとき、次の式が成り立つことを示しなさい。

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\varepsilon\mu\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}\quad(**)$$

(2) $(**)$式を用いて、z方向に進行する電磁波の電場のz方向成分がゼロになることを示しなさい。

第1回の課題

【課題２】の解

(1) マクスウェルの方程式

$$\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho,\qquad \boldsymbol{D}=\epsilon\boldsymbol{E}\qquad(1)$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0,\qquad \boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}\qquad(2)$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\qquad(3)$$

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}+\boldsymbol{J}\qquad(4)$$

において、(4)で$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{0}$とすることにより、

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}$$

が得られる。ここに(1)および(2)の第2式を用いると、

$$\nabla\times\frac{\boldsymbol{B}}{\mu}=\frac{\partial}{\partial t}\varepsilon\boldsymbol{E}$$

したがって

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\varepsilon\mu\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}\quad(**)$$

【課題２】の解

(2) 式 (**) の左辺は

$$\nabla\times\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial z}\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}B_x\\ B_y\\ B_z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial z}\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}B_{x0}\cos(kz-\omega t+\phi)\\ B_{y0}\cos(kz-\omega t+\phi)\\ B_{z0}\cos(kz-\omega t+\phi)\end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix}\frac{\partial}{\partial y}B_{z0}\cos(kz-\omega t+\phi)-\frac{\partial}{\partial z}B_{y0}\cos(kz-\omega t+\phi)\\ \frac{\partial}{\partial z}B_{x0}\cos(kz-\omega t+\phi)-\frac{\partial}{\partial x}B_{z0}\cos(kz-\omega t+\phi)\\ \frac{\partial}{\partial x}B_{y0}\cos(kz-\omega t+\phi)-\frac{\partial}{\partial y}B_{y0}\cos(kz-\omega t+\phi)\end{pmatrix}$$

【課題２】の解

$$=\begin{pmatrix}kB_{y0}\sin(kz-\omega t+\phi)\\ -kB_{x0}\sin(kz-\omega t+\phi)\\ 0\end{pmatrix}$$

$$(**)\text{の右辺}=\varepsilon\mu\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix}E_{x0}\cos(kz-\omega t+\phi')\\ E_{y0}\cos(kz-\omega t+\phi')\\ E_{z0}\cos(kz-\omega t+\phi')\end{pmatrix}$$

$$=\varepsilon\mu\omega\begin{pmatrix}E_{x0}\sin(kz-\omega t+\phi')\\ E_{y0}\sin(kz-\omega t+\phi')\\ E_{z0}\sin(kz-\omega t+\phi')\end{pmatrix}$$

cos微分 → −sin
$-\omega t$の微分→ $-\omega$

したがって、

$$B_{y0}=\frac{\omega}{k}\varepsilon\mu E_{x0}$$

$$E_{y0}=-\frac{\omega}{k}\varepsilon\mu B_{x0}$$

$0=\varepsilon\mu\omega E_{z0}$→電場のz方向成分はゼロ

$$E_{x0}=-\frac{\omega}{k}B_{y0}$$

$$E_{y0}=\frac{\omega}{k}B_{x0}$$

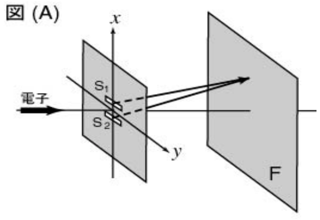
電場と磁場は進行方向に垂直な面内にのみに存在する**横波**である
電磁波の進行する速さは、誘電率εと透磁率μで

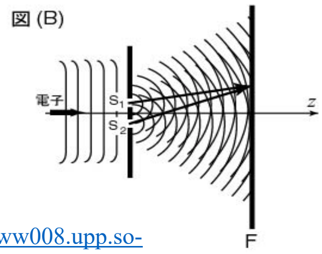
$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

１－２．光子：量子としての光

- **量子**：
  エネルギー・電気量などある種の物理量がある単位量の整数倍として表される場合、その単位量を量子と言う。
- **粒子**の性質と**波**の性質を併せ持つ

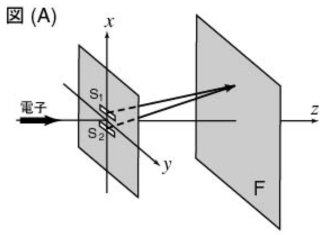
量子の粒子性と波動性

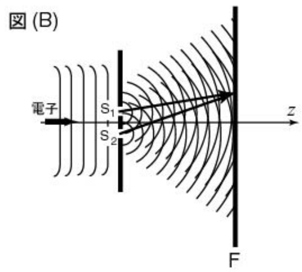


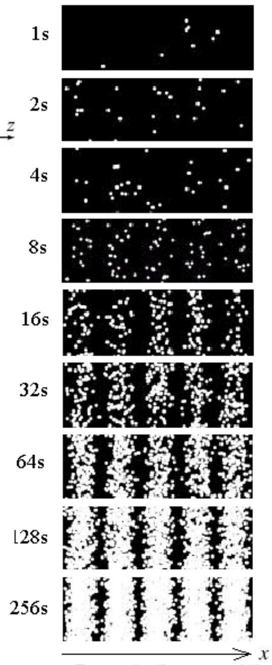


古典粒子はまっすぐ中心を
抜けようとすると、
壁にぶつかるので
スクリーンの中心には
到達しないはず

http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/ryoshiron.html

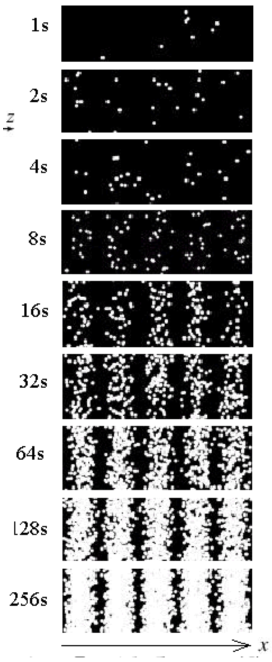






パソコン上での 電子による２重スリットの実験

http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/ryoshiron.html



- スクリーンの中心にも量子は到達する
- 数が少ないと量子の像はでたらめに現れる
- 数が多くなると波動性による干渉が見える

光子　こうし　photon

- 古典力学において粒子の運動の特徴を示すパラメーター
  - 運動エネルギー　$\varepsilon = \frac{1}{2}mv^2$
  - 運動量　$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$
- 光の量子＝光子（こうし）photon
- 光子の質量は？？
- 光子の質量は**ゼロ**である。
  - なぜならば光子は電磁波、すなわち電**場**と磁**場**の波だから。
  - 「量子」を扱う力学　→　量子力学

量子力学において
量子の運動の特徴を示すパラメーター

- 「粒子」の性質と「波」の性質を繋ぐパラメーター
  - 進行波のパラメーター：
波長λ [nm]、速さc [m/s]、振動数ν [s^{-1} = Hz]
  - 進行波の一般的な性質： $c = \nu\lambda$
  - 波数：$\bar{\nu} = \frac{|\boldsymbol{k}|}{2\pi} = \frac{1}{\lambda}$
- 量子の運動の特徴を示すパラメーター
  - 運動エネルギー　$\varepsilon = h\nu$
  - 運動量　$\boldsymbol{p} = h\boldsymbol{k}$
- 分光学では一般に　$\bar{\nu}$の単位は [cm^{-1}]
  - *reciprocal centimeters, inverse centimeters*

重要な要点

- 運動エネルギー　$\varepsilon = h\nu$
- 運動量　$\boldsymbol{p} = h\boldsymbol{k}$

- **波長λはエネルギーと反比例**
- **振動数νや波数$\bar{\nu}$はエネルギーと比例**

プランク定数

$$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

振動数 ν ：一秒間にν回

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

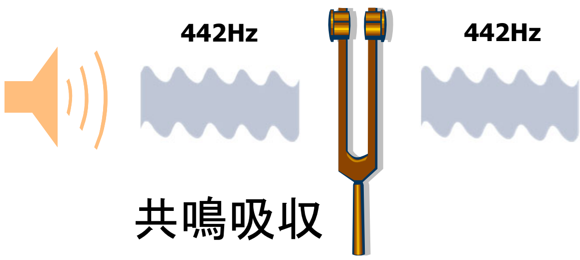
周波数（角振動数）$\omega = 2\pi\nu$：一秒間に2πをν回

三角関数の中(位相空間)で使われる

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

１－３．物質による光吸収と発光

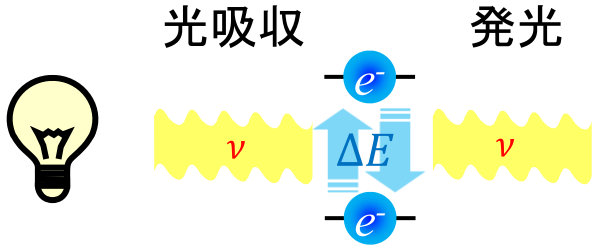
- 共鳴吸収



固有振動数442Hzの音叉

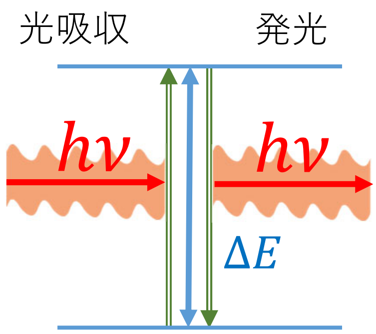
音叉を使った共鳴（共振）の実験 https://youtu.be/s9nUOYcA4P8

光吸収と発光

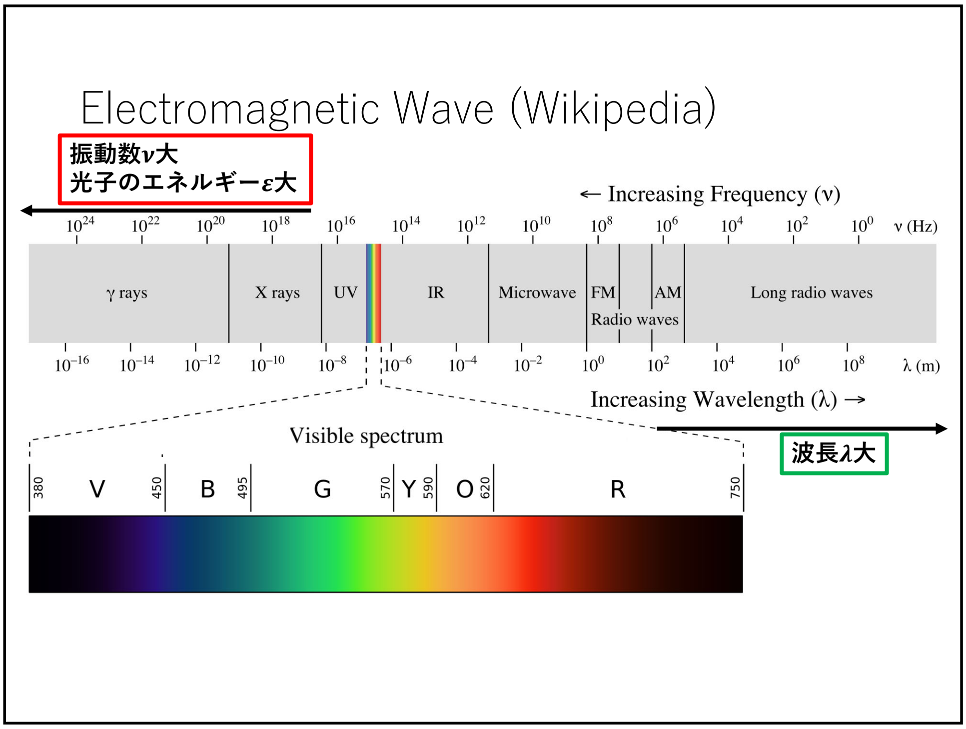


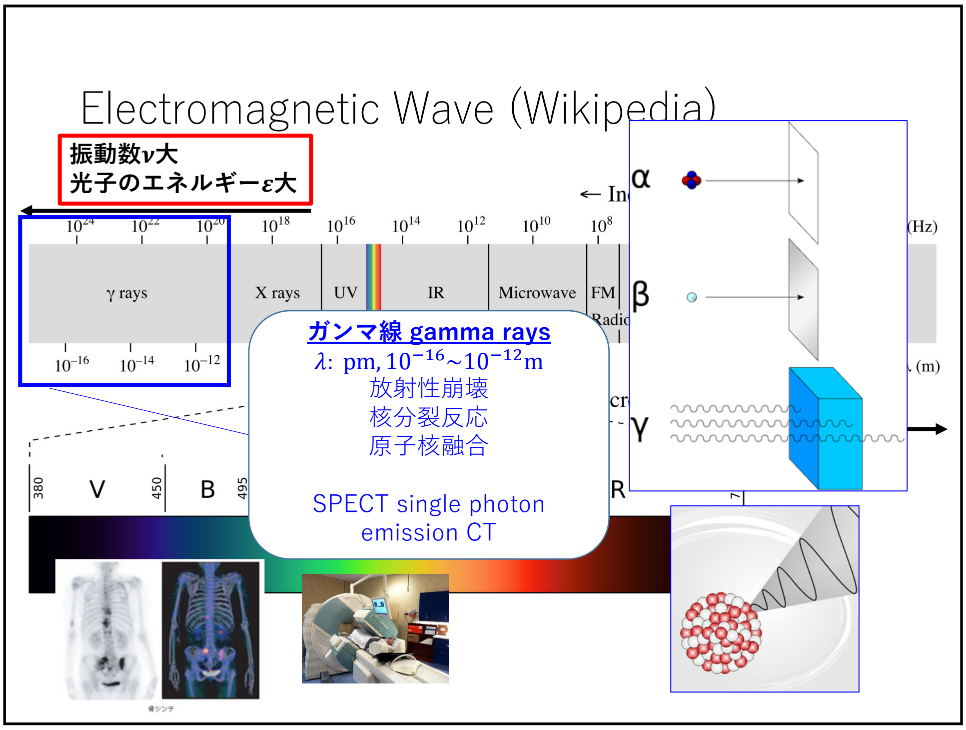
系の固有振動数ν

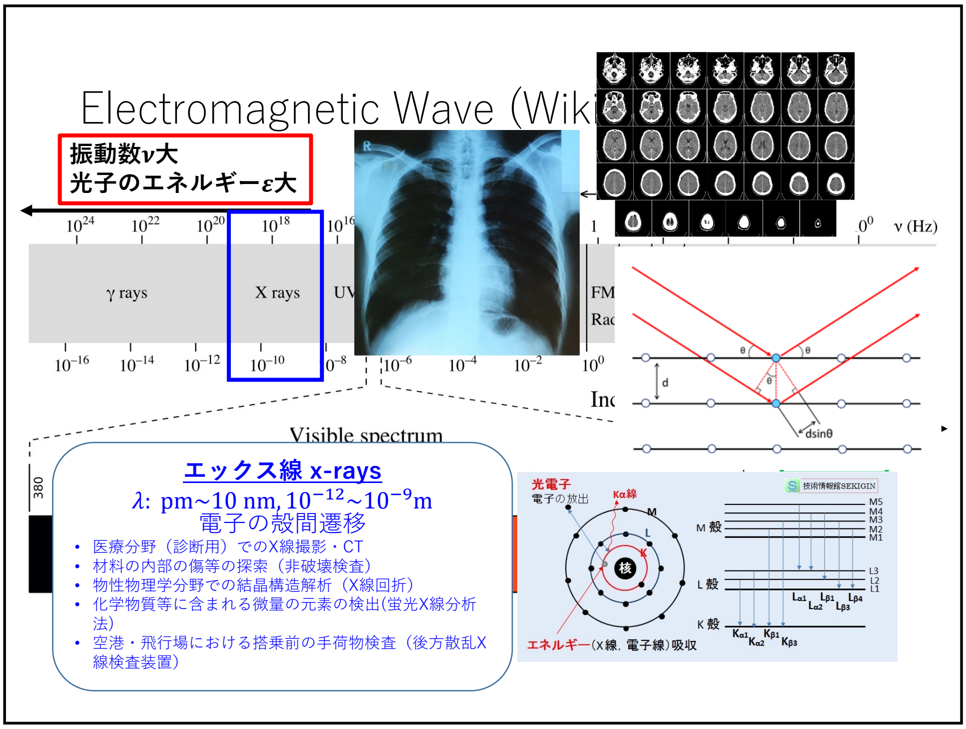
共鳴吸収の条件

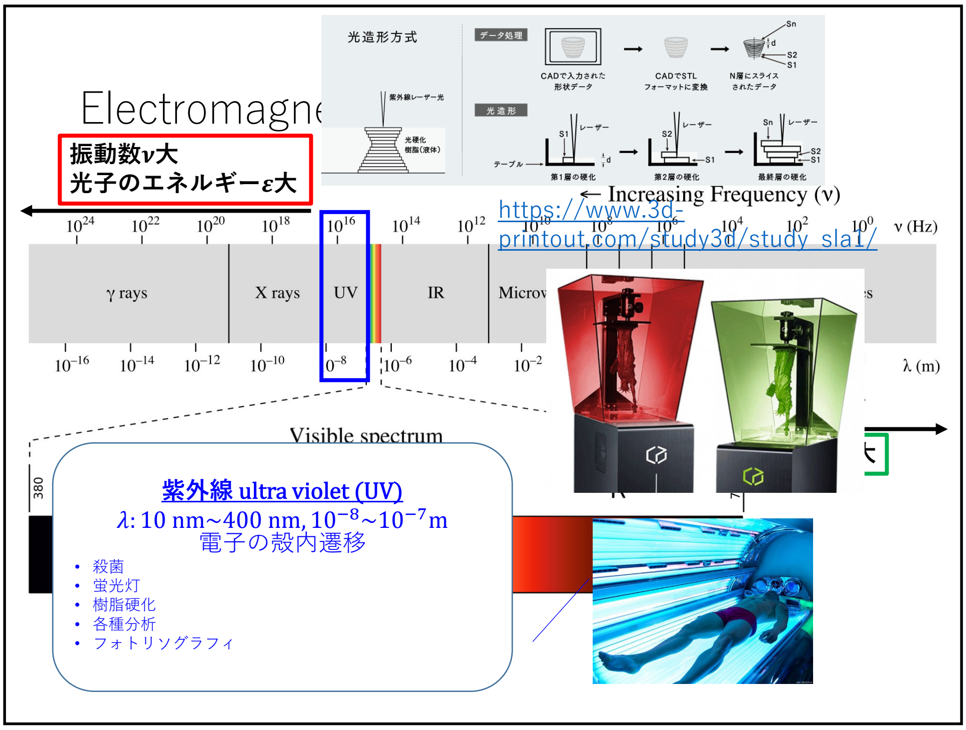


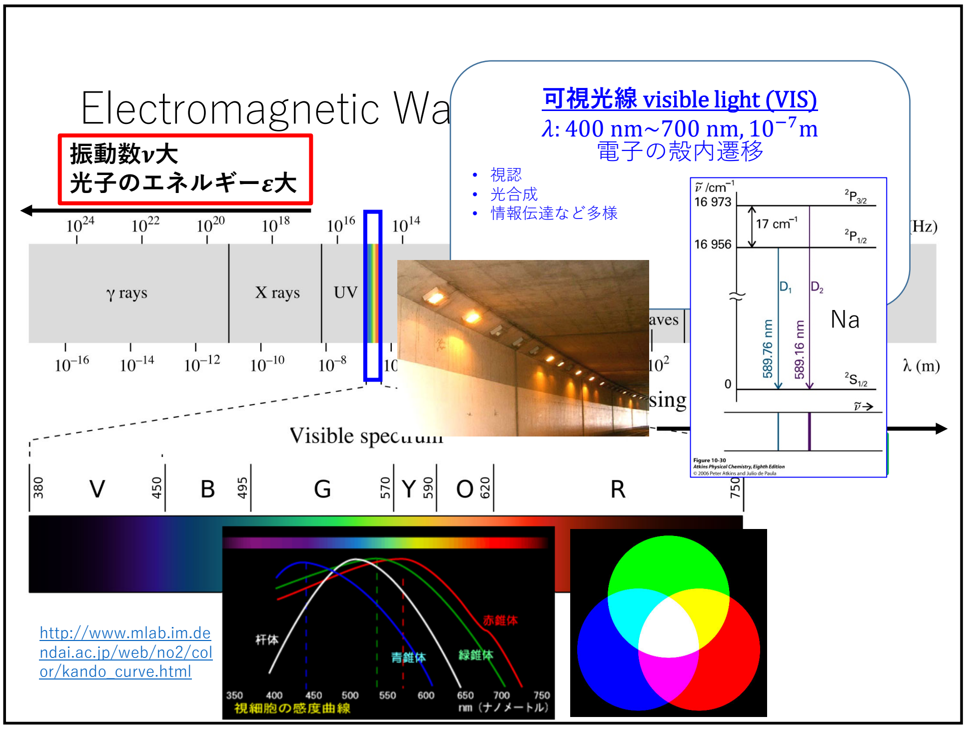
$$\boxed{\Delta E = h\nu}$$

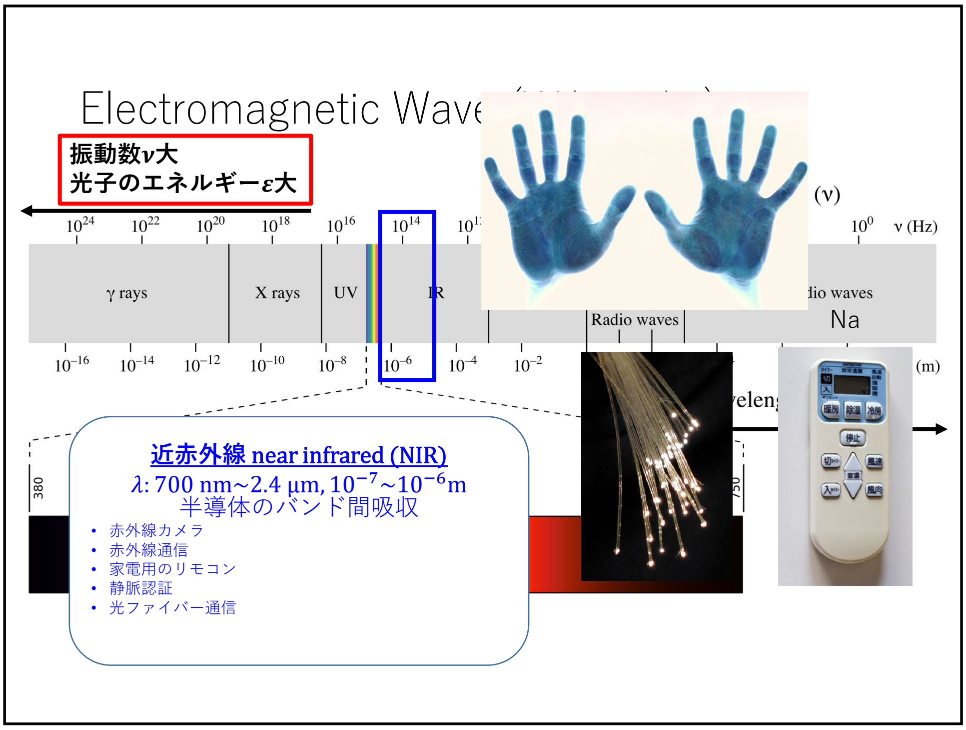

Electromagnetic Wave (Wikipedia)
振動数ν大
光子のエネルギーε大
← Increasing Frequency (ν)
10^{24} 10^{22} 10^{20} 10^{18} 10^{16} 10^{14} 10^{12} 10^{10} 10^{8} 10^{6} 10^{4} 10^{2} 10^{0} ν (Hz)
γ rays
X rays
UV
IR
Microwave
FM
AM
Radio waves
Long radio waves
10^{-16} 10^{-14} 10^{-12} 10^{-10} 10^{-8} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^{0} 10^{2} 10^{4} 10^{6} 10^{8} λ (m)
Increasing Wavelength (λ) →
Visible spectrum
波長λ大
380 V 450 B 495 G 570 Y 590 O 620 R 750


Electromagnetic Wave (Wikipedia)
振動数ν大
光子のエネルギーε大
10^{24} 10^{22} 10^{20} 10^{18} 10^{16} 10^{14} 10^{12} 10^{10} 10^{8}
γ rays
X rays
UV
IR
Microwave
FM
10^{-16} 10^{-14} 10^{-12}
ガンマ線 gamma rays
λ: pm, 10^{-16}~10^{-12}m
放射性崩壊
核分裂反応
原子核融合
SPECT single photon emission CT
α
β
γ
380 V 450 B 495 R


Electromagnetic Wave (Wiki
振動数ν大
光子のエネルギーε大
γ rays
X rays
UV
FM
Rad
ν (Hz)
Visible spectrum
380
エックス線 x-rays
λ: pm~10 nm, 10⁻¹²~10⁻⁹m
電子の殻間遷移
医療分野（診断用）でのX線撮影・CT
材料の内部の傷等の探索（非破壊検査）
物性物理学分野での結晶構造解析（X線回折）
化学物質等に含まれる微量の元素の検出(蛍光X線分析法)
空港・飛行場における搭乗前の手荷物検査（後方散乱X線検査装置）
dsinθ
光電子
電子の放出
Kα線
核
エネルギー(X線, 電子線)吸収
M 殻
L 殻
K 殻
技術情報館SEKIGIN

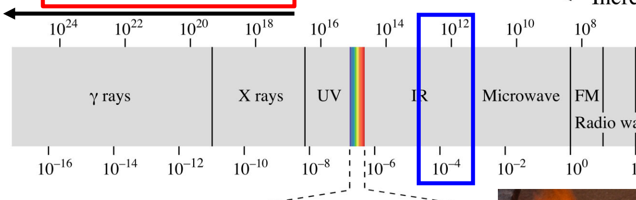

Electromagne
振動数ν大
光子のエネルギーε大
光造形方式
データ処理
CADで入力された形状データ
CADでSTLフォーマットに変換
N層にスライスされたデータ
光造形
紫外線レーザー光
光硬化樹脂(液体)
テーブル
第1層の硬化
第2層の硬化
最終層の硬化
← Increasing Frequency (ν)
https://www.3d-printout.com/study3d/study_sla1/
γ rays
X rays
UV
IR
Microv
ν (Hz)
λ (m)
Visible spectrum
380
紫外線 ultra violet (UV)
λ: 10 nm~400 nm, 10⁻⁸~10⁻⁷m
電子の殻内遷移
殺菌
蛍光灯
樹脂硬化
各種分析
フォトリソグラフィ

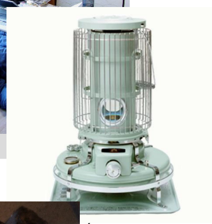

Electromagnetic Wa
振動数ν大
光子のエネルギーε大
γ rays
X rays
UV
Visible spectrum
V
B
G
Y
O
R
380
450
495
570
590
620
750
http://www.mlab.im.dendai.ac.jp/web/no2/color/kando_curve.html
杆体
青錐体
緑錐体
赤錐体
視細胞の感度曲線
nm（ナノメートル）
可視光線 visible light (VIS)
λ: 400 nm~700 nm, 10−7m
電子の殻内遷移
視認
光合成
情報伝達など多様
17 cm−1
589.76 nm
589.16 nm
Na


Electromagnetic Wave
振動数ν大
光子のエネルギーε大
γ rays
X rays
UV
IR
Radio waves
Na
近赤外線 near infrared (NIR)
λ: 700 nm~2.4 μm, 10−7~10−6m
半導体のバンド間吸収
赤外線カメラ
赤外線通信
家電用のリモコン
静脈認証
光ファイバー通信

Electromagnetic Wave (Wikipedia)

振動数ν大
光子のエネルギーε大



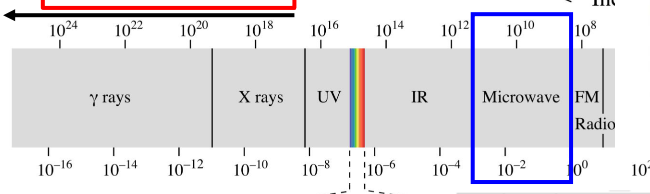


中赤外線、遠赤外線
mid/far infrared (MIR/FIR)
λ: 2.4 μm~100 μm, 10^{-6}~10^{-4}m
分子内振動

- 分子の同定や構造解析
- 輻射加熱

Electromagnetic Wave (Wikipedia)

振動数ν大
光子のエネルギーε大

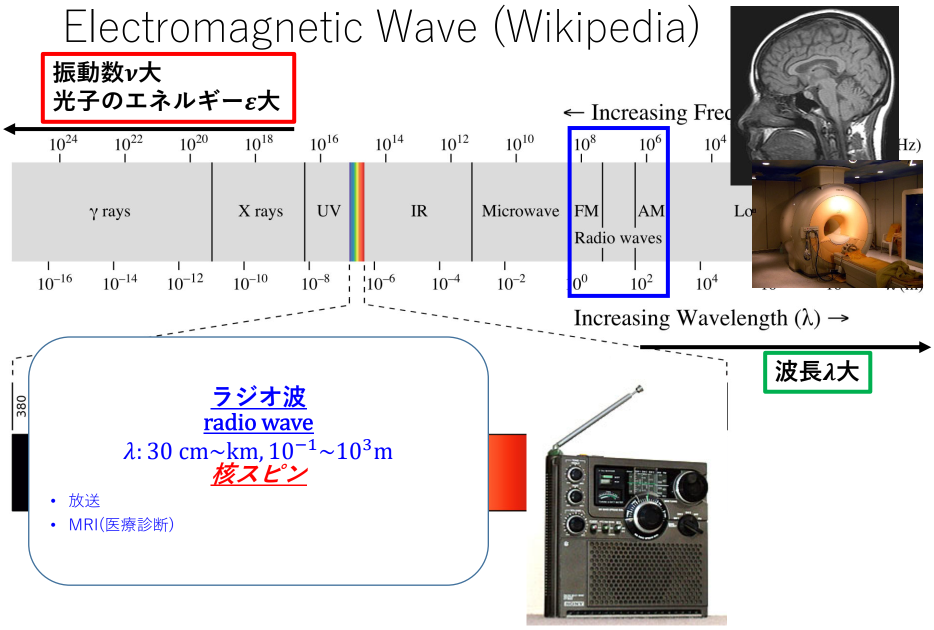


名称	帯域 (GHz)	用途
Iバンド	- 0.2	
Gバンド	0.2 - 0.25	軍用航空無線
Pバンド	0.25 - 0.5	移動体通信・アナログコードレス電話・特定小電力無線・アマチュア無線
Lバンド	0.5 - 1.5	テレビ放送・携帯電話・インマルサット衛星電話・800MHz帯・対空捜索レーダー・アマチュア無線
Sバンド	2 - 4	固定無線・移動体向けデジタル衛星放送・ISMバンド（電子レンジ・無線LAN・ワイドスター衛星電話・アマチュア無線など）・航海レーダー・対空捜索レーダー
Cバンド	4 - 8	通信衛星・固定無線・無線アクセス・水上捜索レーダー・対空捜索レーダー
Xバンド	8 - 12	軍事衛星・気象衛星・地球観測衛星・航海レーダー・水上捜索レーダー・対空捜索レーダー・射撃管制用レーダー・アマチュア無線
Kuバンド	12 - 18	衛星テレビ放送・通信衛星
Kバンド	18 - 26	通信衛星
Kaバンド	26 - 40	通信衛星・移動体通信(5G)
Vバンド	40 - 75	レーダー・通信衛星
Wバンド	75 - 111	電波天文学

マイクロ波
microwave
λ: 100 μm~30 cm, 10^{-4}~10^{-2}m
分子の回転、*電子スピン*

- 電子レンジ
- 通信

Electromagnetic Wave (Wikipedia)



様々な電磁波とその吸収

電磁波の名称	波長	吸収を起こす系	振動数 s^{-1} = Hz	エネルギー J
X線、γ線	pm~nm 10^{-12}~10^{-9}m	原子核 電子の殻間遷移	$10^{17\sim20}$	$10^{-16\sim-13}$
紫外線	数nm~400 nm 10^{-9}~10^{-7}m	電子の殻内遷移	$10^{15\sim17}$	$10^{-18\sim-16}$
可視光線	400~700 nm 10^{-7}m	電子の殻内遷移	10^{15}	10^{-18}
近赤外線	700~2000 nm 10^{-7}~10^{-6}m	半導体の バンド間吸収	10^{14}~10^{15}	10^{-19}~10^{-18}
中赤外線、遠赤外線	2~100 μm 10^{-6}~10^{-4}m	分子内 振動	10^{12}~10^{14}	10^{-21}~10^{-19}
マイクロ波	100 μm~30 cm 10^{-4}~10^{-1}m	分子の回転、 電子スピン	10^{9}~10^{12}	10^{-18}~10^{-21}
ラジオ波	30 cm~ 10^{3}m~	核スピン	~10^{9}	~10^{-21}

第2回のまとめ

- 量子
  - 運動エネルギー $\varepsilon = h\nu$
  - 運動量 $\boldsymbol{p} = h\boldsymbol{k}$
  - プランク定数

  $h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$ $\hbar = \dfrac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$
- 共鳴吸収の条件
  - $\Delta E = h\nu$
- 様々な電磁波とその用途

第2回の課題

【課題１】

100 Wの663 nmの光から一秒間に放出される光子の数は何個か計算し、さらに1モルの水にこれを照射したとき、1秒間に水分子が光子を受け取る確率を検討しなさい。ただし、プランク定数は$6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$とする。

【課題２】

594 kHzのAMラジオ、80.0 MHzのFMラジオ、800 MHzの携帯電話、1.70 GHzの携帯電話について、それぞれの波長を光速を3.00×10^{8} m/sとして求めることにより、影響を受けやすい障害物の大きさを推定しなさい。