

電子工学03

藤田 一寿

津山工業高等専門学校情報工学科 講師

電気通信大学先進理工学科 協力研究員

粒子性と波動性

光とは

- ▶ 電磁波の一種

- ▶ 電場と磁場の波

$$f(x) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)$$

- ▶ 波を表すための指標

- ▶ 波長 λ (ラムダ)

$$\lambda = vT \text{ [m] m k s A}$$

- ▶ 周期 T [s]

- ▶ 速さ v [m/s]

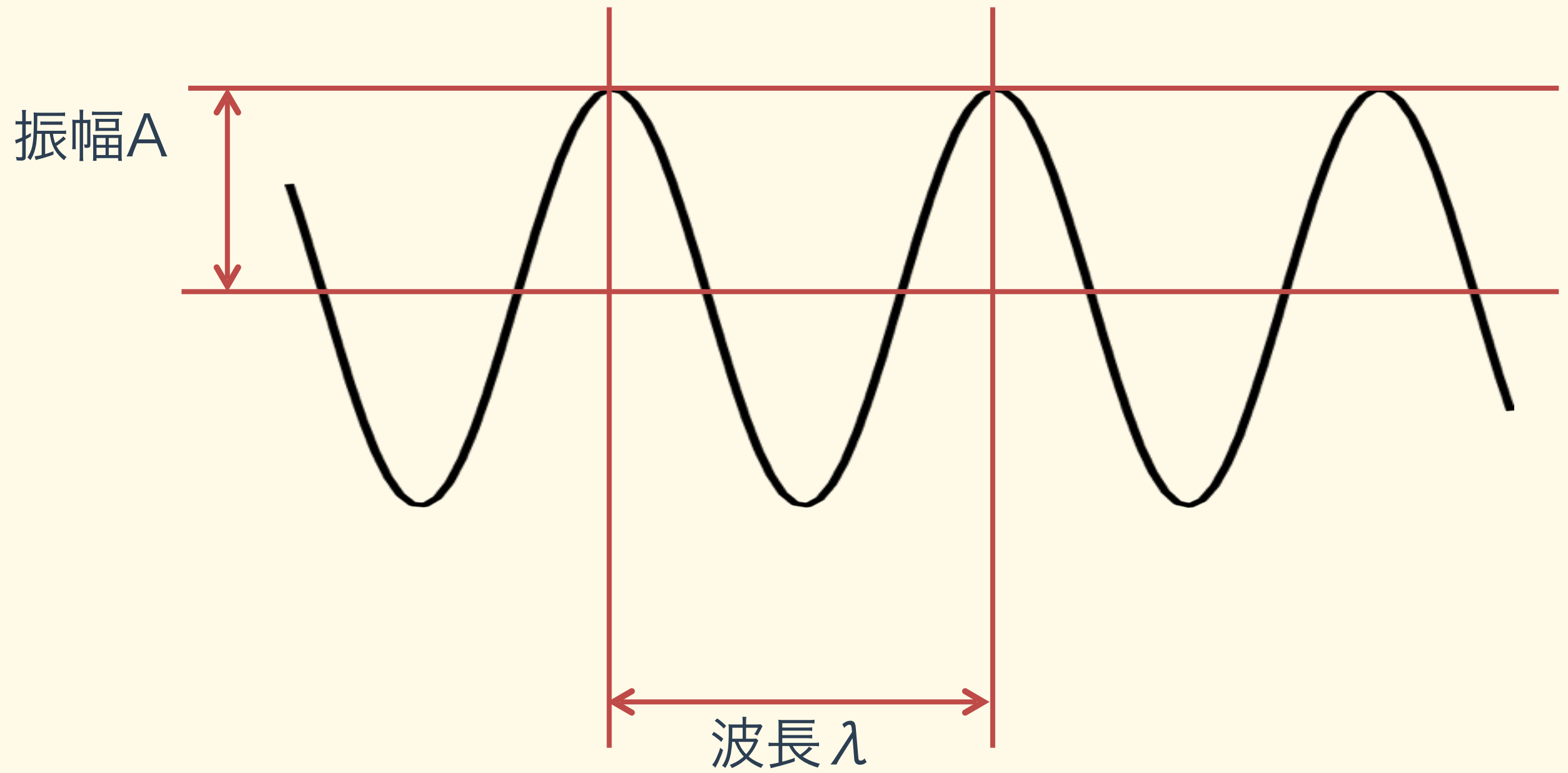
- ▶ 振動数(周波数) ν (ニユー)

$$\nu = 1/T \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

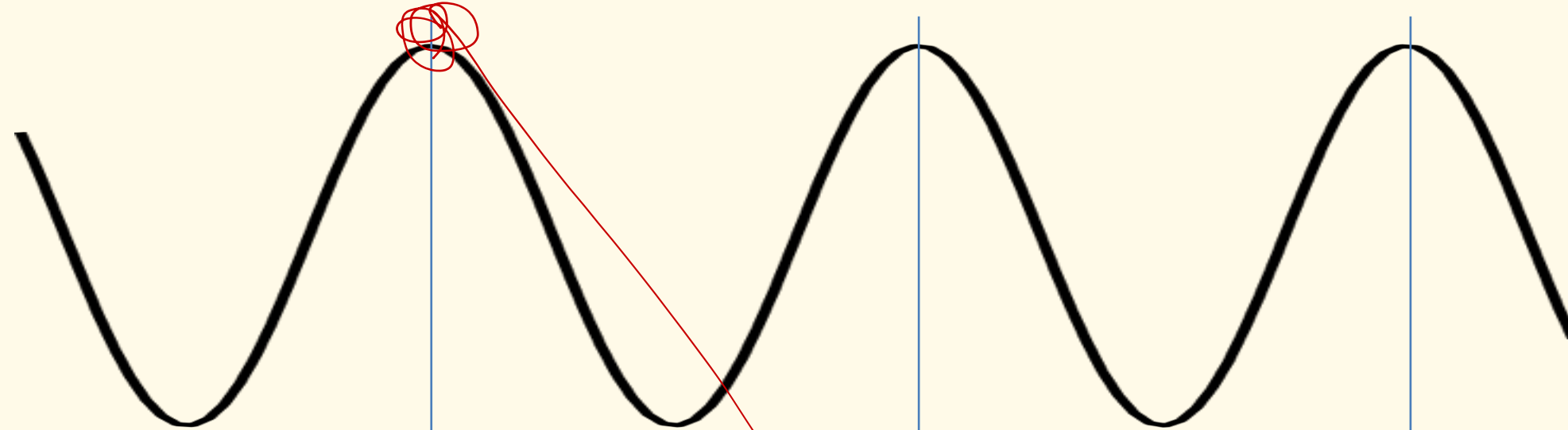
- ▶ 振幅 A

λとνの関係は？

波

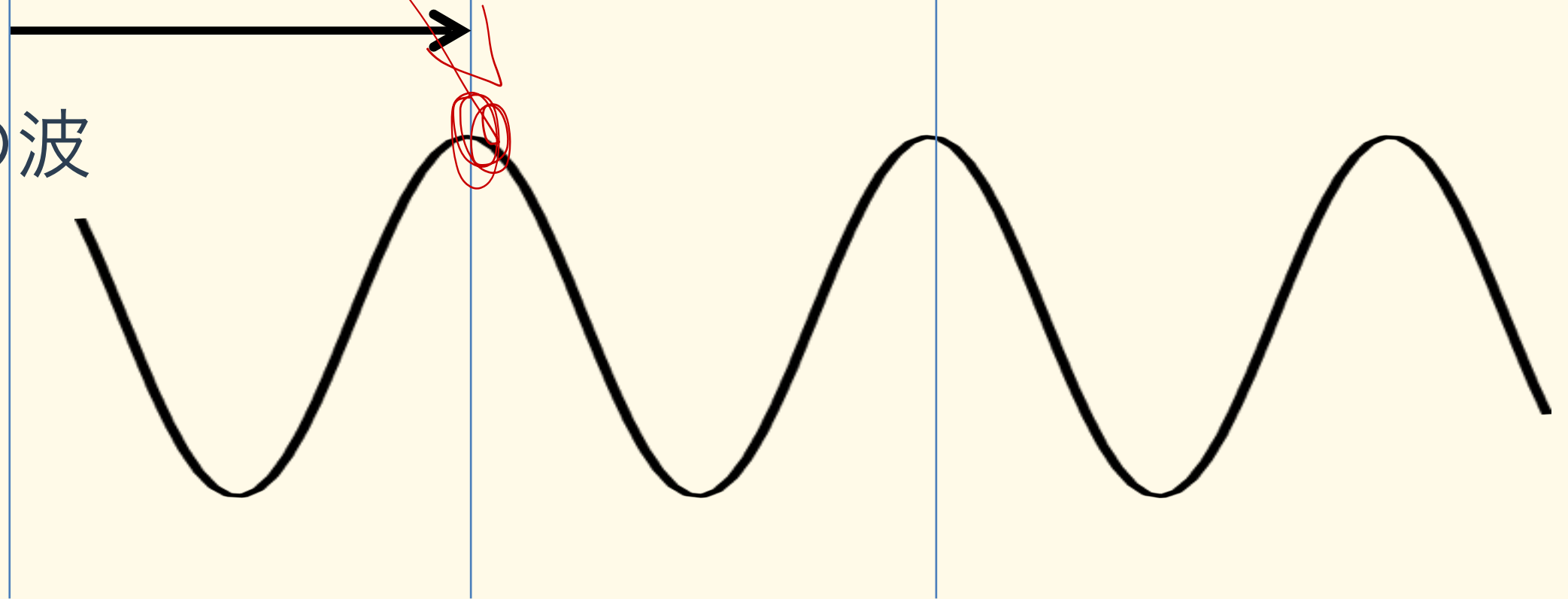


t=0の時の波



波長 λ

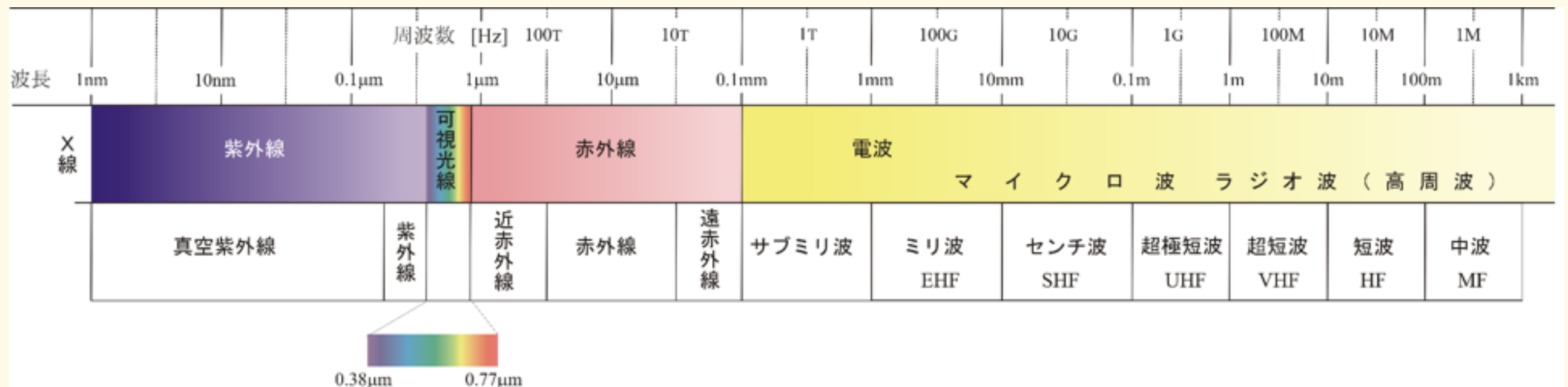
t=Tの時の波



周期T秒後、波は波長ほど進んだと考えられるので、
波の速さは $v = \lambda / T$

電磁波の種類

電磁波は波長によって呼び方と性質が変わる



光: 380nm-770nm

光の波動性

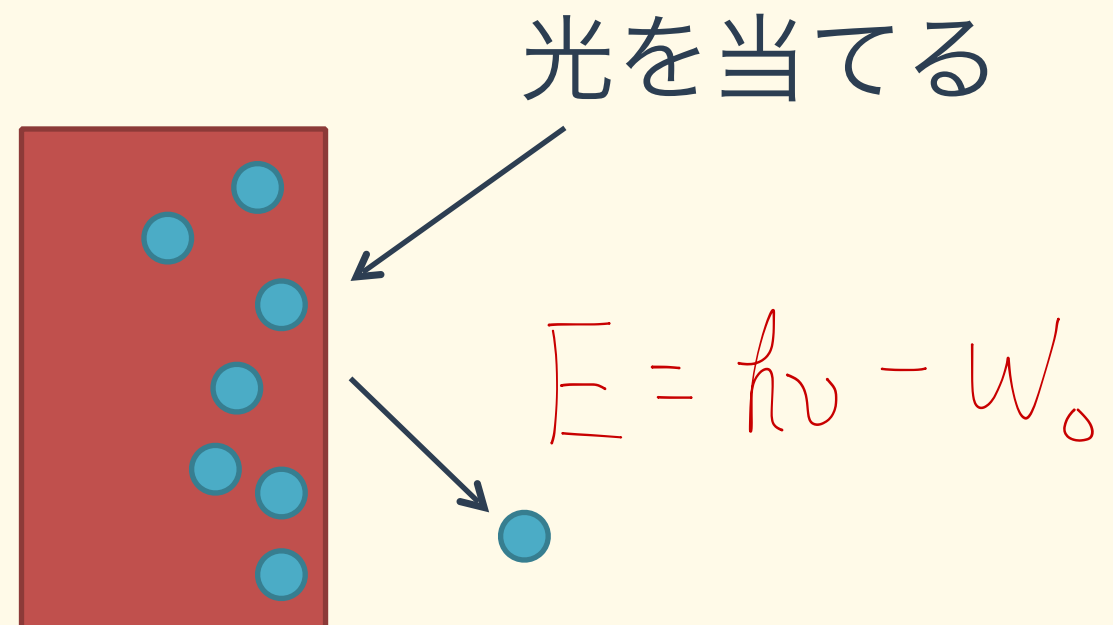
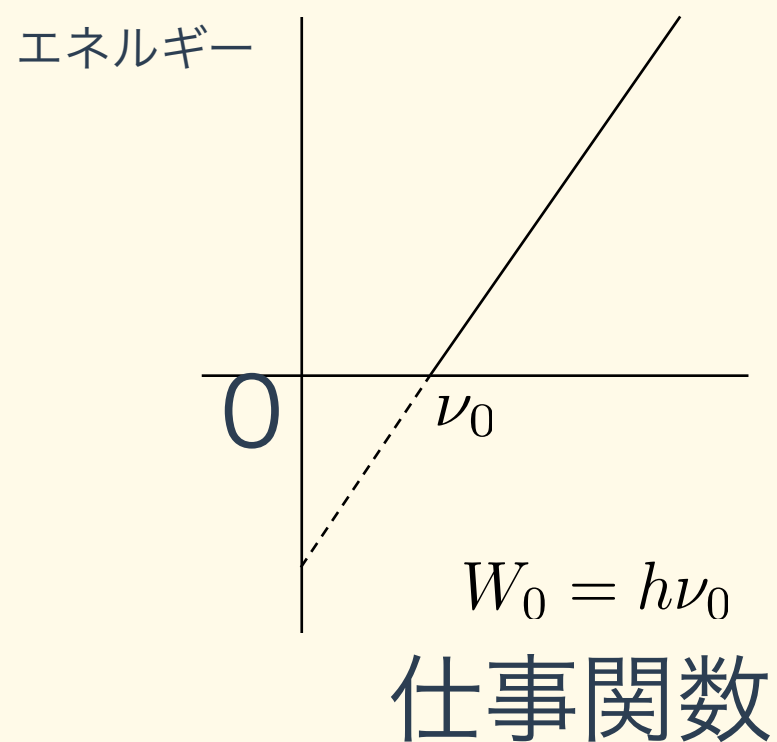
- ▶ 光は波である (17世紀　ホイヘンス)
- ▶ 1801年ヤングの干渉実験により光が波であることが証明される
- ▶ 1865年マックスウェル方程式から電磁波が導出される。
- ▶ 1888年ヘルツが実験的に電磁波を証明

光の粒子性

- ▶ 光は粒子である(17世紀 ニュートン)
- ▶ 1887年 ヘルツにより光電効果が発見される
- ▶ 1905年 アインシュタインにより光量子仮説により光電効果の理論的に説明される
- ▶ 光を粒子と考えると光電効果が説明できる。

光電効果

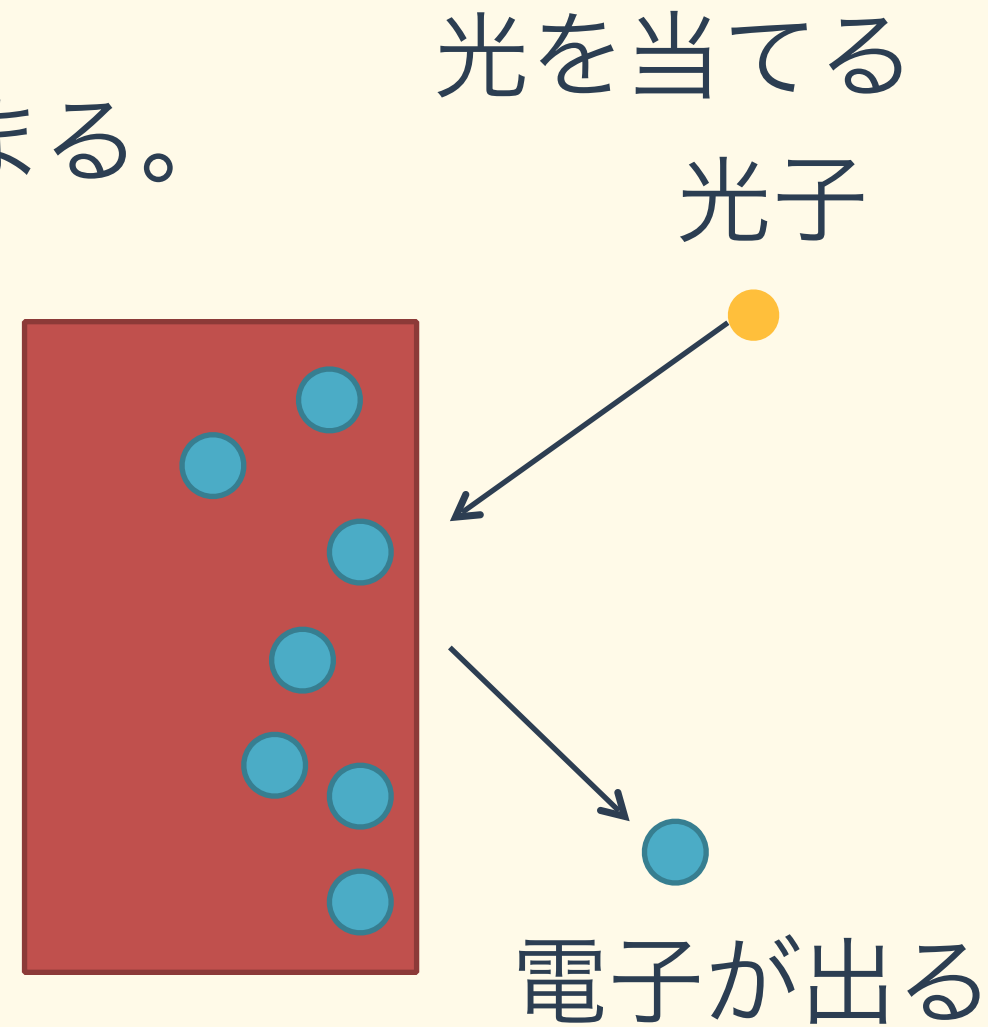
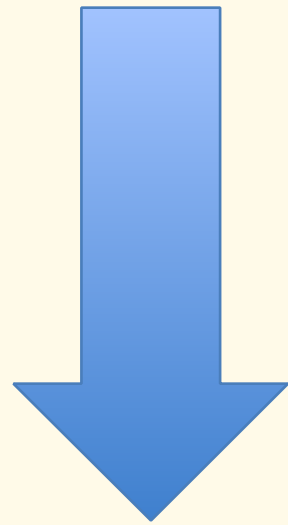
- ▶ 電子が出るかどうかは光の振動数に依存
 - ▶ 光の強さに依存しない
 - ▶ ある振動数以下の光だと、どんな強い光でも電子は出ない。
 - ▶ ある振動数以上の光だと、どんな弱い光でも電子は出る。
- ▶ 飛び出る電子の数は光の強さに比例



もし光が波なら

- ▶ 強い光は波が大きいということなので、電子をより動かすことができる。よって、電子が放出されても良いのでは？
- ▶ 弱い光は波が小さいということなので、電子をあまり動かすことができない。よって、電子を放出されないのでは？

- 光の強さは光の粒子(光子)の数で決まる。
- 光子自体が振動数に応じたエネルギーを持つ



- 弱い光でも振動数が高ければ、電子が飛び出る。
 - 弱い光は光子の数が少ない。しかし、光子が高いエネルギーを持っていれば、電子は飛び出る。
- 強い光でも振動数が低ければ、電子は飛び出ない。
 - 強い光は光子の数が多。しかし、光子が弱いエネルギーしか持っていなければ、電子は飛び出さない。

光の二重性

- ▶ 光は波としての性質と粒子としての性質の2つの性質を持つ
- ▶ 粒子性
 - ▶ つぶつぶがあるのではなく、数えられるということ

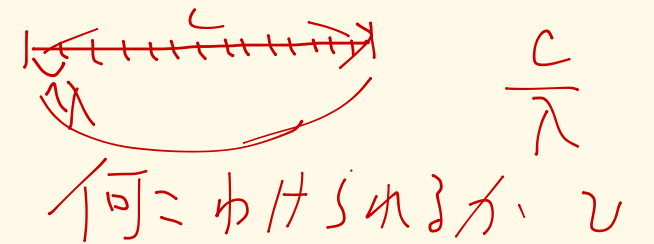
アインシュタインの奇跡の年

- ▶ 1905年アインシュタインが物理学上重要な論文を複数発表
 - ▶ ブラウン運動
 - ▶ 分子の大きさの計算、統計力学、確率過程
 - ▶ 光電効果
 - ▶ 光の粒子性、量子論
 - ▶ 特殊相対性理論
 - ▶ 光、エネルギー、質量、時間

問題

- 波長 $4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の単色光を仕事関数 2.0eV の金属に当てた時、出てくる電子の最大エネルギーを求めよ。

$$E = h\nu - W_0 = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_0$$
$$= 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3.00 \times 10^8}{4.0 \times 10^{-7}} - 2.0 \times 1.6 \times 10^{-19}$$



電子の波動性

- ▶ 光が波動性と粒子性を同時に持つなら、電子などの粒子も波動性をもってもよいのではないか
- ▶ ルイ・ド・ブロイ(1923年)
 - ▶ フランスの名門貴族
 - ▶ 兄モーリスは実験物理学者
 - ▶ 博士論文で提唱
 - ▶ アインシュタインによりド・ブロイの説が広まる
 - ▶ 量子力学の基礎
 - ▶ 1925年–1927年G.P.トムソンにより電子線の回折実験で波動性を確認
 - ▶ 1929年ノーベル賞



アインシュタイン・ド・ブロイの関係式

物質の持つエネルギー

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2}$$

光子は $m=0$ なので

$$p = h/\lambda$$

$$\lambda = h/p$$

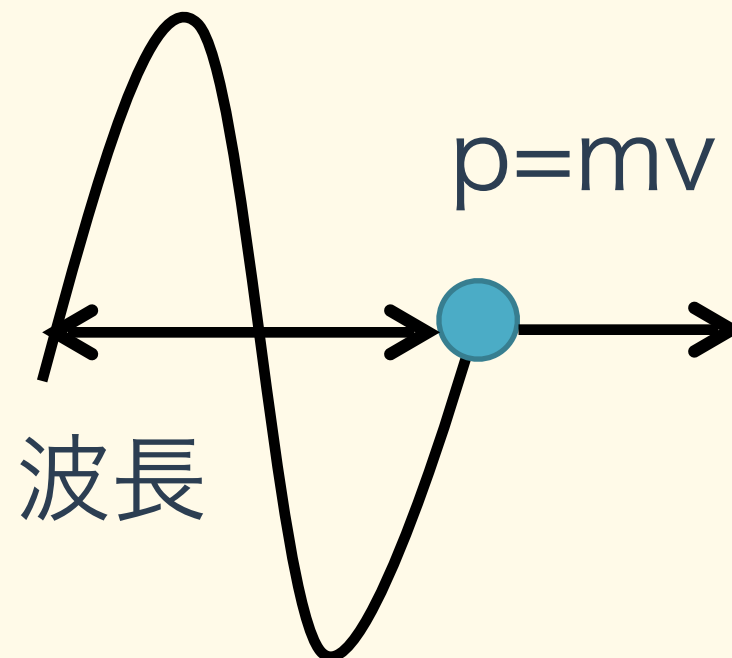
$$E = cp = h\nu \quad \text{アインシュタイン・ド・ブロイの関係式}$$

$$p = h\nu/c$$
$$= h/\lambda$$

この式が物質にも成り立つとド・ブロイは考えた

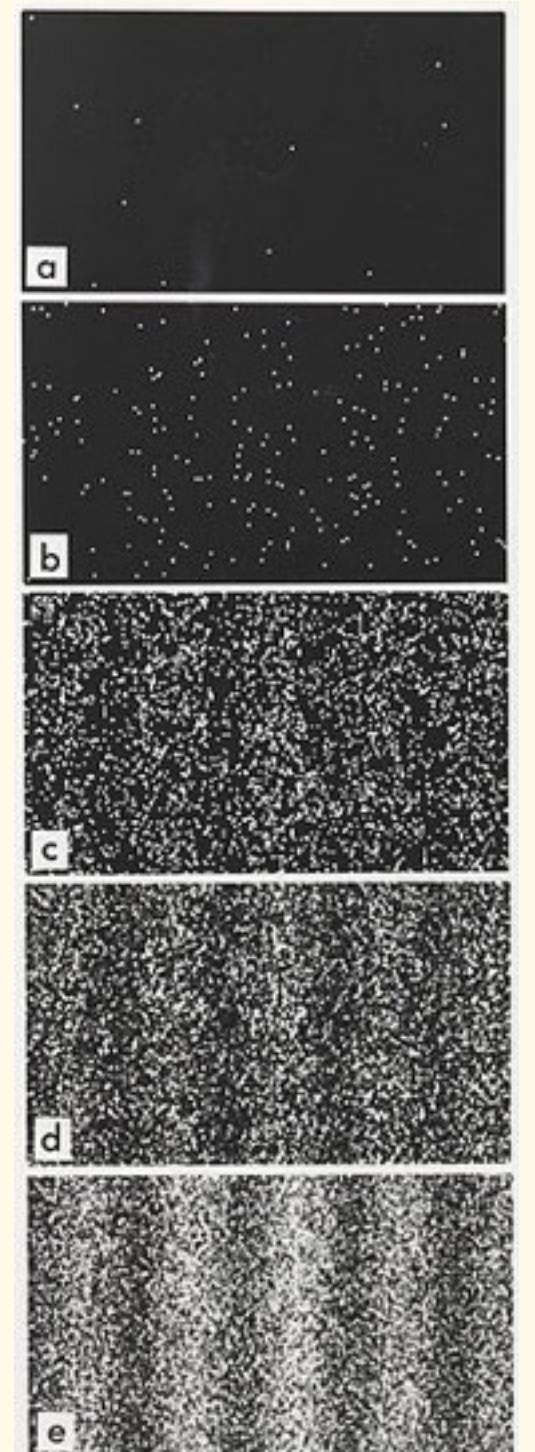
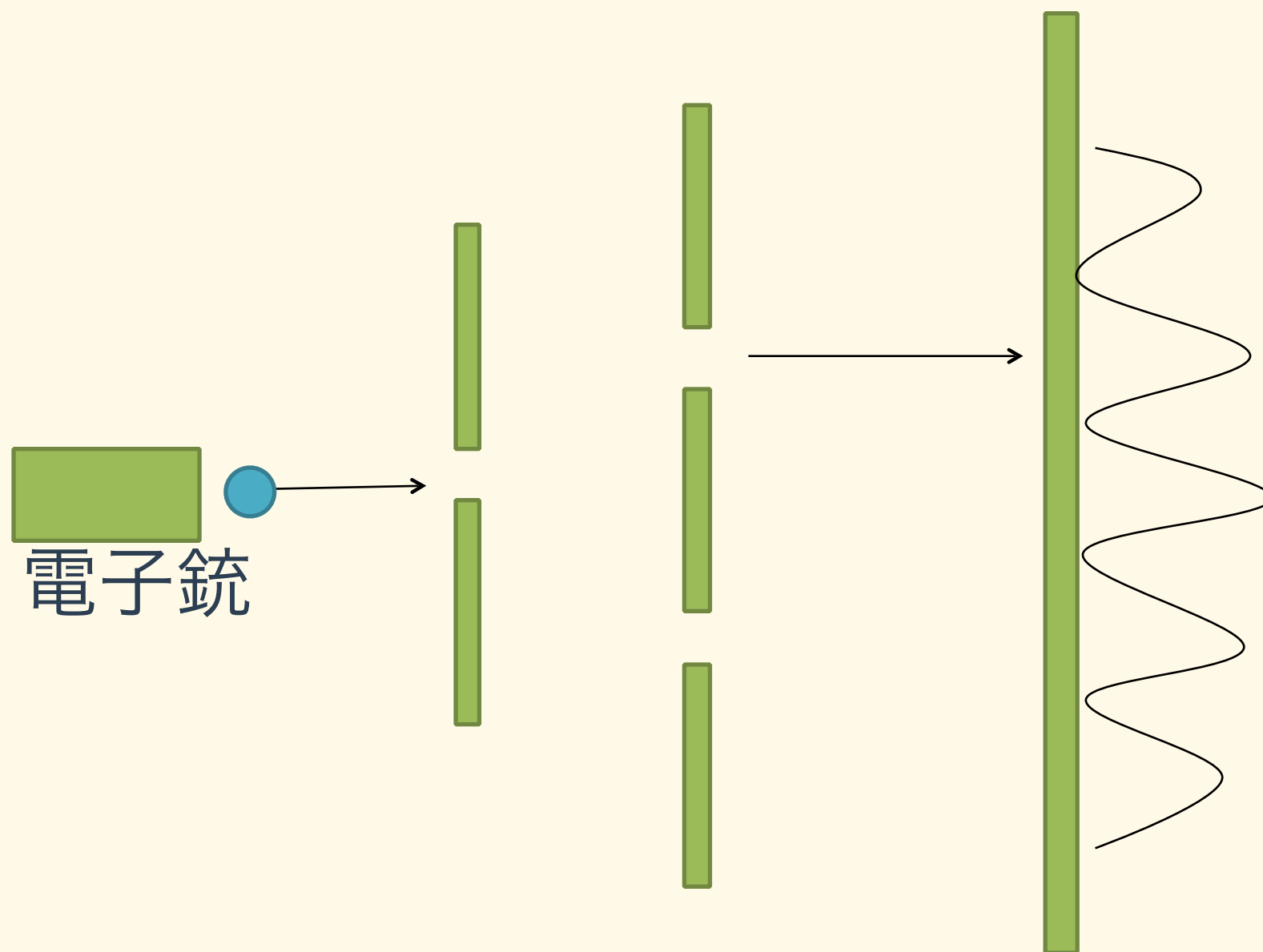
式の意味するところ

- ▶ 運動量 p を持つ物体は、波長 h/p の波としての性質を持つ。
- ▶ 粒子は波である！？
- ▶ 物質波（ド・ブロイ波）



電子線のヤングの干渉実験

電子という物質が波の性質があるなら、ヤングの干渉実験を行えば、干渉波が現れるはず



問題

- 速さ1.5m/sで歩く質量60kg人のド・ブロイ波の波長を求めよ。

$$\lambda = h/p = h/mv = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{60 \times 1.5} = \frac{1.1}{1.5} \times 10^{-33} \text{ [m]}$$

$$h=6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

問題

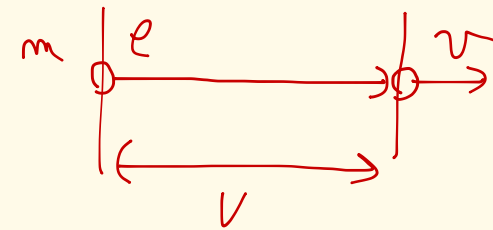
- 速さ103m/sで飛ぶ質量5gの弾丸のド・ブロイ波の波長を求めよ。

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{103 \times 5 \times 10^{-3}} \quad [\text{m}]$$

問題

- 電圧 V で加速された電子の物質波の波長を求めよ。
ただし電子の質量を m 、電荷を $-e$ とする。

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$



$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

問題

- ▶ $m=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 、 $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、
 $h=6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ とすると $V=1.5 \times 10^2 \text{ V}$ で加速された電子の物質波の波長は何mか。

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}} = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.5 \times 10^2}}$$

$$= \frac{6.6 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 1.6 \times 1.5} \times 10^{-24}} [\text{m}] \quad \text{原子の大きさ} \quad 1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$$

原子の大きさに対し無視できる大きさではない。

問題

- ▶ $m=9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 、 $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、 $h=6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ とすると $V=1.5 \times 10^2 \text{ V}$ で加速された電子の物質波の波長は何mか。