

○X線

X線を発見したのは_____ (1895年)。

X線の性質

- ・蛍光物質を光らせる。
- ・電界や磁界で曲げられない。(⇔陰極線)
- ・電離作用(原子をイオンにする)がある。
- ・可視光よりも透過性が_____。

X線の発生方法：高速の_____を金属へ衝突させる



連続X線と固有X線が発生する。

・連続X線の発生仕組み

高速の電子が金属へ衝突すると、急激に曲げられたり減速したり停止したりする。

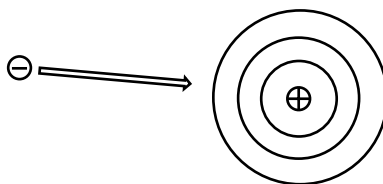
→ 電子は、失う_____をX線として放出する。

・固有X線の発生仕組み

高速の電子が金属へ衝突し、金属原子中の電子をはじき飛ばす。

→ 金属原子中のより外側の軌道にある電子が、はじき飛ばされた部分を穴埋めするように落ち込む。

→ 落ち込んだ電子が失うエネルギーが、X線として放出される。



※ 電子（電荷 $-e$ ）が電圧 V で加速されて金属へ衝突するとする。
そして、この電子の運動エネルギーがすべて X 線（1 個の X 線の光子）になったとする。

発生する X 線の光子の振動数を ν_0 、プランク定数を h とすると

$$=$$

という関係が成り立ち、ここから発生する X 線の振動数の最大値 ν_0 が

$$\nu_0 =$$

と求められる。

振動数が最大するとき、波長は _____ となる。

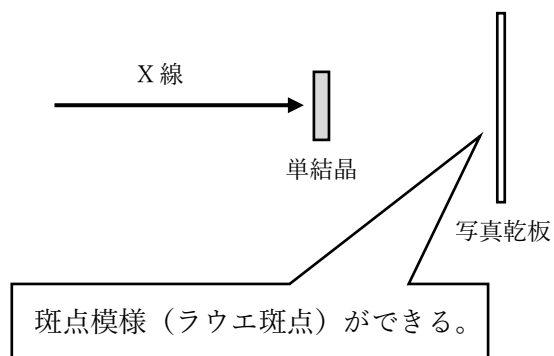
… 発生する X 線の最短波長 $\lambda_0 =$ _____

※ 実際には、電子の運動エネルギーの 100 % が X 線のエネルギーにならないことが多いので、振動数が ν_0 より小さい（波長が λ_0 より長い）X 線も発生する。

（練習）電子の加速電圧を 30 kV にしたとき、発生する X 線の最短波長を求めよ。電気素量を 1.6×10^{-19} C、真空中の光の速さを 3.0×10^8 m/s、プランク定数を 6.6×10^{-34} J·s とする。

○X線の波動性

ラウエは、結晶に X 線を照射すると斑点ができることを発見した（1912 年）。

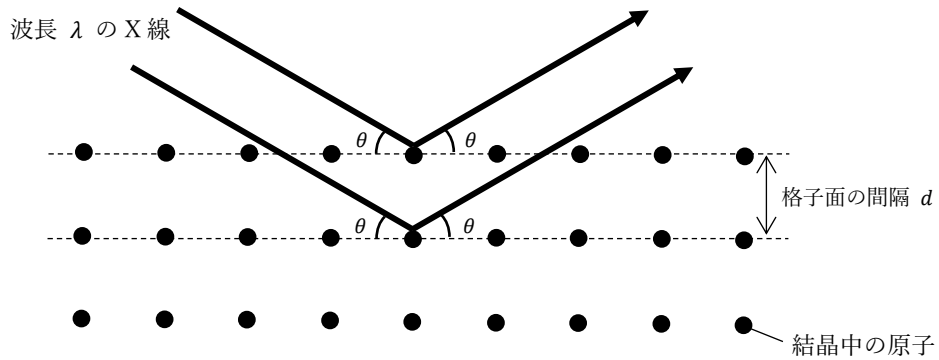


単結晶が _____ と同じ役割をすることで、X 線が斑点（干渉縞）を作ると考えられる。

… X 線 = _____ であることが分かった。

X 線の波長 _____ 可視光の波長 _____ なので、
X 線の干渉縞を（可視光に使う）回折格子で作ることはできない。
結晶中の原子の間隔 _____ 回折格子の格子定数（溝と溝の間隔）
なので、結晶を使えば X 線の干渉縞を作ることができる。

ブラッグ父子は、散乱（反射）される X 線が強め合うための条件を求めた。



上のような方向に反射される X 線が干渉して強め合う条件は

と表すことができる。

逆に、波長 λ が分かっている X 線を使って
結晶構造（格子面の間隔 d ）を求めることもできる。

(練習) 結晶によって X 線回折が起こるということは、X 線の波長が格子面の間隔 d と同じ程度に短いということである。 $d = 2.8 \times 10^{-10}$ m のとき、X 線の波長がいくら以下なら強い反射 X 線が得られるか。

○X線の粒子性

コンプトン効果：X線が物質によって散乱されるときに、波長が伸びる現象
(1923年発見)



X線 = 波動 とすると、コンプトン効果が起こる理由は説明できない。



X線 = _____ とすれば、コンプトン効果が起こる理由を説明できる。

光子の	{	エネルギー E = _____
		運動量 p = _____ = _____



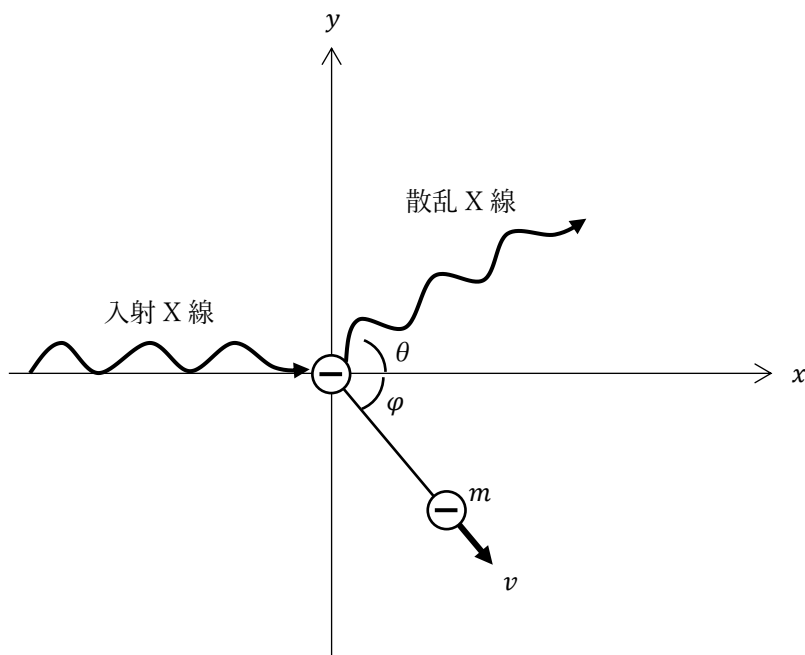
X線の光子が衝突すると、エネルギー E および運動量 p が小さくなるため、振動数 ν が _____ なる (波長 λ が _____ なる) と理解できる。

(練習) 図のように、波長 λ の入射 X 線が、静止している質量 m の電子 (自由電子) に衝突し、X 線の入射方向に対して θ の方向に X 線が散乱され、 φ の方向に速さ v で電子がはね飛ばされたとする。真空中での光の速さを c 、プランク定数を h として、散乱された X 線の波長 λ' が次式で表されることを示せ。

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

θ が大きくなるほど、 λ' は _____ なる。

ただし、この場合、 $\lambda' \doteq \lambda$ で、 $\frac{\lambda'}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda'} \doteq 2$ の近似が成り立つものとする。



○物質波

ド・ブロイ：波動である光や X 線は、粒子でもあることが分かった。



粒子は、波動でもあるのではないかと考えた (1924 年)。

この波 = _____ (=ド・ブロイ波)

物質波の波長 $\lambda =$ _____ = _____

光子の運動量 $p =$ _____ から求められる形と一致する。



その後に、電子が _____ や _____ をすることが確認された
ことで (1927~1928 年)、電子が波動の性質を持つことが明らかになった。



さらに、電子に限らず (陽子、中性子、原子など) すべての粒子に
波動の性質があることが明らかになった。

※ 物質波の波長はものすごく短いので日常レベルで検知することは
できないが、電子を結晶 (原子間隔が非常に小さい) に当てることで
回折、干渉することが確認できる。

(練習) 電圧 V で加速された電子 (質量 m 、電気量 $-e$) の物質波の波長 λ を、プランク定数を h として求めよ。また、電子の質量を 9.1×10^{-31} kg、電気素量を 1.6×10^{-19} C、プランク定数を 6.6×10^{-34} J·s として、電子の加速電圧が 1.0×10^{-4} V のときの λ の値を求めよ。

○粒子と波動の二重性

ここまでの整理

- ・光や X 線は波動であるが、粒子でもある。
- ・電子などの粒子は、波動でもある。

全てのものは、両方の性質を持つ：粒子と波動の二重性

○不確定性原理

ミクロな粒子の位置と運動量を同時に確定することはできない。
(ハイゼンベルクの不確定性原理)