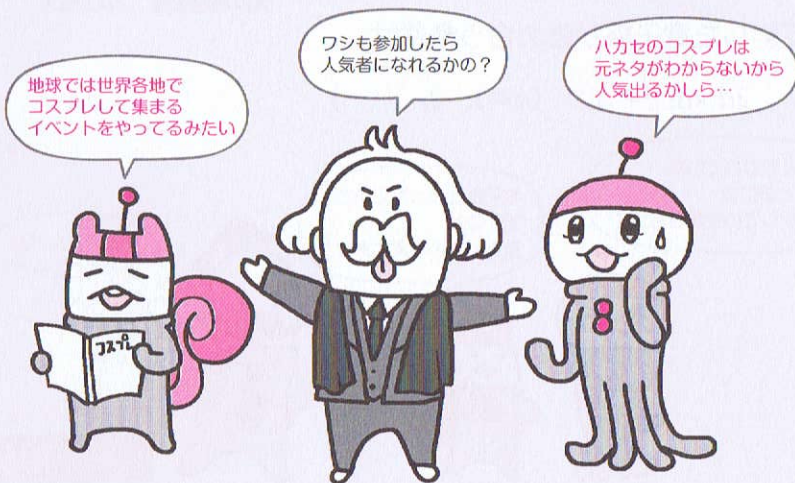




理解できたものに、 チェックをつけよう。

- 光電効果がどんな現象かを理解し、「光の振動数がある値より小さいと電子は飛び出さない」、「飛び出した電子の運動エネルギーの最大値は、光の振動数によって決まる」、「光を強くすると飛び出す電子の数が増える」という3つの性質の理由を、光量子仮説から説明できる。
- 光電効果の実験におけるグラフの2つのポイント（電圧が高いと電流はそれ以上増えない、阻止電圧は不変）を理解した。
- 光子の運動量の式 $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ を覚えた。
- 物質波の波長の式 $\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{mv}$ を覚えた。
- ブラッグ反射の条件 $2d \sin \theta = n\lambda$ を、2つの光の経路差を考えて導ける。



Chapter

12

光の粒子性，電子の波動性

- 12-1 光電効果
- 12-2 光量子仮説
- 12-3 コンプトン効果
- 12-4 物質波
- 12-5 ブラッグ反射

12

光の粒子性,
電子の波動性

はじめに

Chapter 12～14では原子物理の話をしていきます。

ここまで説明してきた力学・波動・電磁気・熱の4分野は1900年頃までには法則の確立された、古典的な物理学です。そしてChapter 12～14で学ぶ原子物理は、20世紀以降の新しい物理学といえます。

原子物理では“光”、“電子”、“原子”の3つを中心的に扱っていきます。それぞれの特徴を理解しましょうね。

Chapter 12では「光の粒子性、電子の波動性」という話をしていきます。

光は干渉や回折をするので“波”として考えられてきました。

(『宇宙一わかりやすい高校物理(力学・波動)』でも光を波として扱いましたね)

しかし、光を“波”だと考えると、説明できない事態が発見されました。

そして、光を“粒(粒子)”として考える仮説が登場したのです。

今までの常識をひっくり返す、新発見ですね。

この仮説を唱えたのが、有名なアインシュタインです。

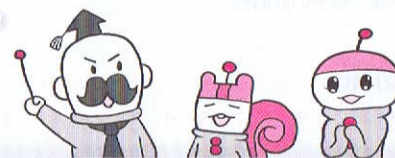
アインシュタイン以降、物理の常識は劇的に変化することになりました。

今、あなたが常識だと思っていることも、100年後には常識ではなくなってしまうかもしれませんね。

この章で勉強すること

光電効果、コンプトン効果といった、光に関する重要な現象を、粒子性、波動性という見かたに立ちながら説明していきます。

宇宙一
わかりやすい
ハカセの
Introduction



1900年までの
古典的な物理学

力学, 波動,
電磁気, 熱

1900年以降の
新しい物理学

原子物理

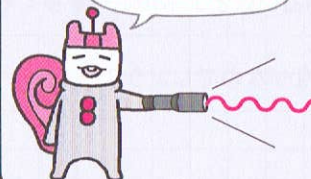
新しいものは
大好きよ

古いものも
大事じゃがな



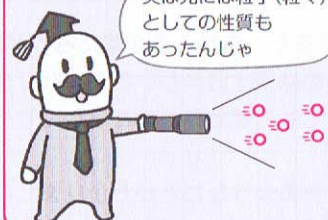
光の波動性

「光は波だ」って
教えられてきたよね



光の粒子性

実は光には粒子(粒々)
としての性質も
あったんじゃ



常識をひっくり返す
発見をしたのが
アインシュタインよ



アルベルト・アインシュタイン
(1879～1955)

これは
ハカセじゃないか!



Let's
study!!!

12-1 光電効果

ココをおさえよう!

金属板に光を当てると電子が飛び出す現象を光電効果という。

金属板に光を当てると、その表面から電子が飛び出すことがあります。金属板の外へ電子が飛び出すにはエネルギーが必要ですから、**光が電子にエネルギーを与えた**のですね。この現象を**光電効果**といい、飛び出した電子のことを**光電子**といいます。

波は振幅が大きいほうがエネルギーが大きくなります(感覚的にわかりますね)。明るい光は暗い光よりも振幅が大きいため、エネルギーが大きいのです。

しかし、光電効果の実験では次のようなことが判明しました。「赤い光はどんなに明るくしても光電効果が起こらないが、紫の光は暗くても光電効果が起こる」

光を“波”と考え、赤だろうが紫だろうが、明るいほどエネルギーを多くもつはずなので、この結果はおかしいことになります。

紫の光は、暗くても光電効果が起こるなんて……なぜなのでしょう？

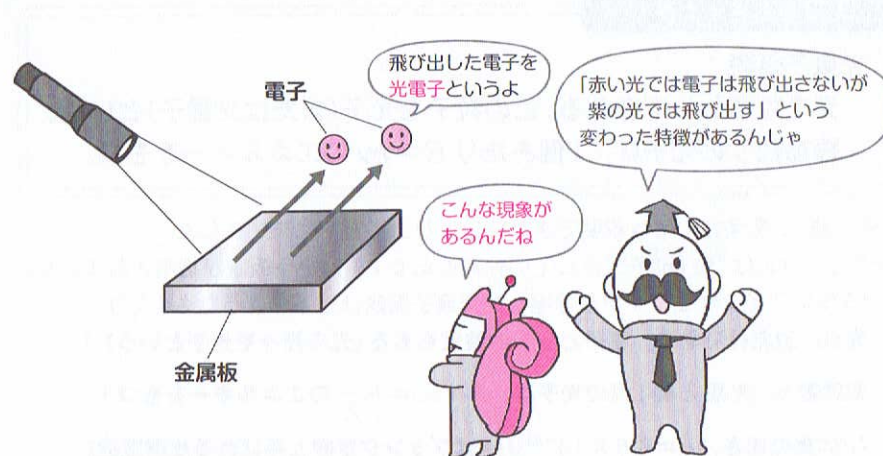
もっと調べると次のようなことがわかりました。

- ① **当てる光の振動数が、ある振動数より小さいと、電子はまったく飛び出さない。しかし、それよりも少しでも大きいと、電子は瞬時に飛び出していく!**
(電子が飛び出す境となる振動数は**限界振動数**という)
- ② **飛び出した電子の、運動エネルギーの最大値は、当てた光の振動数によって決まる!**
- ③ **光電効果を起こす振動数の光の場合は、光を強くする(より明るくする)と、飛び出す電子の数が増える!**

電子が飛び出すかどうかは、光の振動数が大きな要因となり、振動数が小さいと、明るくても、長い時間照射しても、電子は飛び出さないのです。

どうやら「光が“波”としての性質しかもっていない」と考えていると、光電効果の理由は解明できそうにありません。

光電効果 …金属板に光を当てると、金属板から電子が飛び出す現象。



光電効果についてわかったこと

- ① 当てる光の振動数が、ある値(**限界振動数**)より小さいと、電子は飛び出さない。
- ② 金属板から飛び出した電子の運動エネルギーの最大値は、当てた光の振動数によって決まる。
- ③ 光電効果を起こす振動数の光の場合は、光を強くする(明るくする)と、飛び出す電子の数が増える。

光を波と考え、振動数ではなく、振幅がエネルギーに関係するはずだわ



だから、光電効果はそれまでの常識では解明できない現象だったんじゃない



12-2 光量子仮説

ココをおさえよう!

光量子仮説

- ・光を粒子として考える。この粒子を光子(または光量子)という。
- ・振動数 ν の光子は、1個あたり $E = h\nu$ のエネルギーをもつ。

“光=波”と考えたのでは説明できないことが出てきてしまいました。そこで「光には“粒(粒子)”としての性質もある!」という仮説が提唱されました。1905年にアインシュタインが提唱した**光量子仮説**は以下のようなものです。

- ・光は、波だけでなく、粒子としての性質もある(光の粒々を**光子**という)!
 - ・振動数 ν 、波長 λ の1個の光子は、 $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$ のエネルギーをもつ!
- (c は光の速さ、 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·sは**プランク定数**と呼ばれる比例定数)
- ・照射する光の光子と、金属板中の電子は、1対1で対応する!

ν (ニュー)は光の振動数 [1/s] を表す文字です。

すでにみなさんが振動数の文字として使い慣れた f [1/s]と同じと思ってください。

光量子仮説を使えば、光電効果をとってもエレガントに説明することができます。**光子1個が電子1個に出会い、もっているエネルギーを受け渡す**と考えますよ。

12-1で紹介した光電効果の3つの特徴を、光量子仮説で説明してみましょう。

① 当てる光の振動数がある振動数より小さいと電子は飛び出さない。

エネルギー $h\nu$ をもった1つの光子が、金属板表面にいる1つの電子と出会いました。光子はエネルギー $h\nu$ を、まるまる電子に受け渡すのですが、電子は「ボクが外に飛び出すには、最低でも W のエネルギーが必要さ」と言うのです。 W 以上のエネルギーをもたない光子は、電子を飛び出させることができません。つまり

- ・ $h\nu < W$ のとき: 電子は飛び出さない!
- ・ $h\nu \geq W$ のとき: ただちに電子は飛び出す!

電子が飛び出すために必要な、最低限のエネルギー W は**仕事関数**と呼ばれます。また、ギリギリで電子が飛び出すことができたとき、すなわち $h\nu_0 = W$ のときの

光子の振動数 $\nu_0 = \frac{W}{h}$ が、**限界振動数**になるのです。

限界振動数より振動数が小さい光を照射しても、光子のエネルギーが足りないのので、電子は飛び出せないのですね。

光量子仮説

- ・光は波だけでなく、粒子としての性質もある(光子)。
- ・振動数 ν 、波長 λ の光の光子のもつエネルギーは

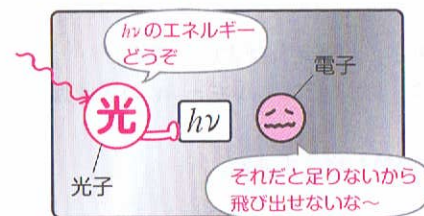
$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad \left(\begin{array}{l} h: \text{プランク定数 } 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \\ c: \text{光速 } 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \end{array} \right)$$

- ・照射する光の光子と、金属板中の電子は、1対1で対応する。



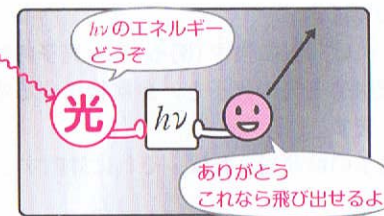
① 「当てる光の振動数が、ある値(限界振動数)より小さいと電子は飛び出さない」について

[光の振動数が小さいとき]



$h\nu < W$

[光の振動数が大きいとき]



$h\nu \geq W$



② 飛び出した電子の運動エネルギーの最大値は、光の振動数によって決まる。

1つの光子が1つの電子に会い、エネルギー $h\nu$ を渡します。

電子はもらった $h\nu$ のエネルギーのうち、金属板から飛び出すために W を消費します。

残った分のエネルギー ($h\nu - W$) は、飛び出た電子(光電子)の運動エネルギーとなります。

したがって、電子の最大の運動エネルギーとの間には、次の関係が成り立ちます。

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - W$$

なぜ「最大の運動エネルギー」というたし書きなのでしょうか？

実は、 W は「金属表面にいる電子が飛び出すのに必要なエネルギー」なのです。

金属の奥深くにいる電子となると、金属から飛び出すのに W より大きなエネルギーが必要になってしまいます。

表面にいる電子は最も少ないエネルギー W で飛び出せるので、飛び出した電子の中で最大の運動エネルギーをもつのです。

③ 光電効果を起こす振動数の光の場合、光を強くする(より明るくする)と、飛び出す電子の数が増える！

振動数が小さく、 $h\nu$ が小さい光の場合、いくら明るくしても電子は飛び出しませんが、振動数が大きく、 $h\nu$ が大きい光の場合、明るくすれば飛び出す電子の数が増えます。

これは「光の強さ(明るさ) = 光子の数の多さ」と考えればよいのです。

照射する光の光子と、金属板にいる電子は、1対1でエネルギー $h\nu$ の受け渡しをします。

光子の数が増えれば、それに対応する電子の数も増えますね。

$h\nu$ が小さい光子がどんなにたくさん訪れても、対応する電子は1個も飛び出しませんが、 $h\nu$ が大きい光子がたくさん訪れれば、それだけ対応する電子の数も増えるので、飛び出す電子の数も増えるということですね。

② 「飛び出した電子の運動エネルギーの最大値は当てた光の振動数によって決まる」について

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - W$$

飛び出した電子の中で最大の運動エネルギー

1次関数
 $y = ax + b$ の形

$\frac{1}{2}mv_{\max}^2$ は ν によって決まる



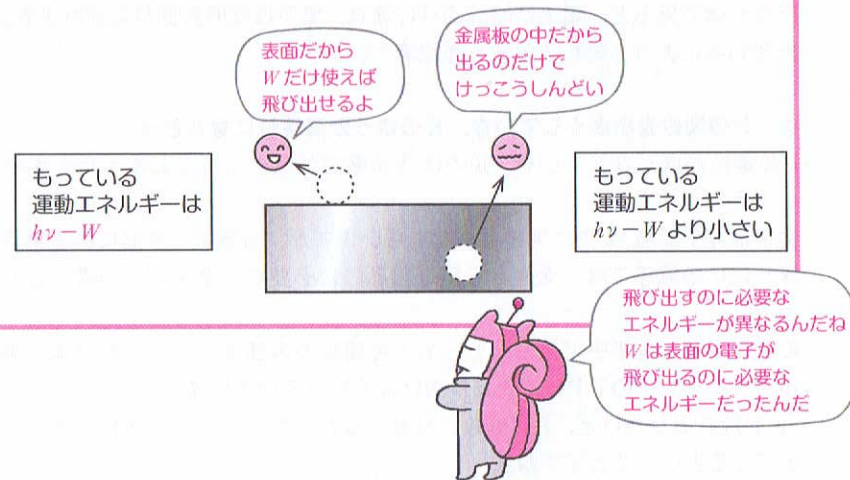
質問

なぜ「最大の運動エネルギー」なのか？

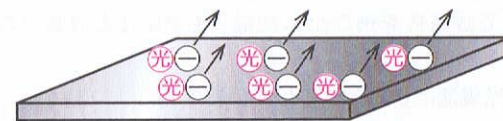


答え

W は、「金属板の表面にいる電子」が飛び出すのに必要なエネルギーだから。



③ 「光電効果を起こす振動数の光の場合、光を強くすると、飛び出す電子の数が増える」について
光の強さ(明るさ) = 光子の数と考える！



1対1対応だから光子が増えれば飛び出す電子も増えるわね

ここで、光電効果に関する実験を紹介しましょう。

右ページの図のように、金属板Kと細い金属棒Pを、Kに対するPの電位を調節する装置と電流計でできた回路につなぎます。

金属板Kに光を当てると、光電効果が起こり、電子はPめがけて飛び出します。装置を使ってK-P間の電位差を変えながら、電子の様子の変化を観察しましょう。

① PのほうがKよりも、高電位するとき

電子は負の電荷ですので、電位が低いところから高いところへは、簡単に移動できます。

光子からエネルギーをもらってKを飛び出した電子は、「余裕でPまで着けちゃうぜ〜」と、みんなPへたどり着くことができます。

回路全体で見ると、電流は時計回りに流れ、電子は反時計回りに流れます。

光電効果によって流れる電流を**光電流**といいます。

② Pの電位を小さくしていき、Kのほうが高電位になると…

Pの電位が低くなっていき、Kのほうが電位が高くなってしまったときを考えましょう。

電子は光子から $h\nu$ のエネルギーをもらいますが、金属板の表面にいる電子と内部深くにいる電子では、金属から飛び出するのに必要なエネルギーが異なるのでしたね (p.412)。

Kを飛び出した電子のうち、もともと金属板の内部深くにいたものは、運動エネルギーが小さいのでPまでたどり着けなくなっていきます。

「Kを飛び出したけど、Pにはたどり着けなかった…」というかわいそうな電子が出てくるということです。

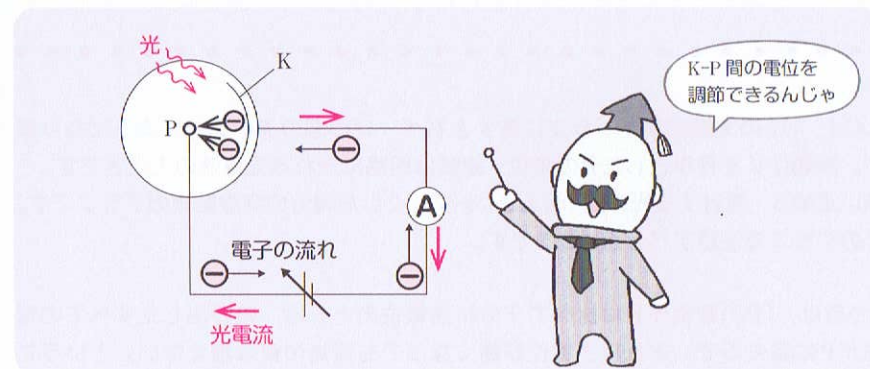
このような理由で、流れる電子が減るので、回路に流れる光電流も小さくなっていきます。

③ さらにKに対するPの電位を小さくしていくと…

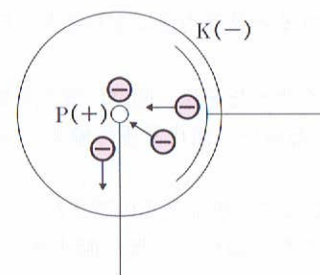
さらにPの電位を小さくしていくと、「Pに到達するのは絶対ムリだ〜!」と、最も運動エネルギーを多くもって金属板を飛び出した電子もPにたどり着けなくなってしまいます。

そうすると回路に流れる電流、光電流は0になってしまいますね。

この光電流が流れなくなる電圧を、**阻止電圧**といいます。

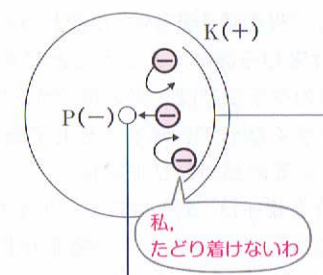


① KよりもPのほうが高電位



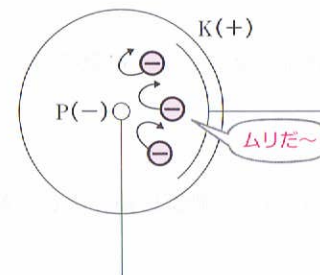
負電荷の電子は
K→Pに力を受けるので
簡単に到達できる

② PよりもKのほうが高電位になると…



Pへたどり着けない
電子が出てくる

③ さらにKに対するPの電位を小さくすると…



電子がたどり着けなくなる

電子は電位の低いところ
には行きにくいから
Kのほうが高電位だと
Pにたどり着けないんだね

電子がたどり着けなくなったとき
つまり、光電流が流れなくなった
ときの電圧を阻止電圧というわよ

p.414, 415の実験結果をグラフに表すと右ページの図の赤い実線のようになります。横軸はKを基準としたPの電位, 縦軸は回路に流れる光電流の大きさです。赤い点線は, 照射する光の量(明るさ)を少なくした場合の実験結果のグラフです。このグラフで注目すべき点は2つです。

1つ目は, 「Pの電位がKに比べて十分に高電位の場合は, 飛び出したすべての電子がPに届くので, それ以上電位が高くなっていても電流の量は増えない」ということです。そのため, グラフの右のほうは平らになっていますね。

2つ目は, 「光の量(明るさ)が変わった場合, 流れる光電流の量は変わるが, 阻止電圧 V_0 は変わらない」ということです。

右ページのグラフでは, 光の量(明るさ)が小さくなった場合, 回路に流れる電流の量も小さくなっています。そして電流が0になる電圧, 阻止電圧の値 V_0 は同じになっているのがわかりますね。

光(光子)と電子は1対1対応で, 光子が $h\nu$ のエネルギーを与えるのですから, 最も運動エネルギーの大きい電子がPに届かなくなる電位, つまり阻止電圧は, 光の量とは関係ないのですよ。

「電流が流れない=金属表面にあった最も運動エネルギーが高い電子が, Pに届いたとたんに止まってしまった」と考えましょう。

そうすると, 以下の式が成り立ちます。

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_0 \quad (e: \text{電子の電気量の大きさ} \quad m: \text{電子の質量})$$

飛び出した瞬間の運動エネルギーが, すべて位置エネルギーに変わったということです。

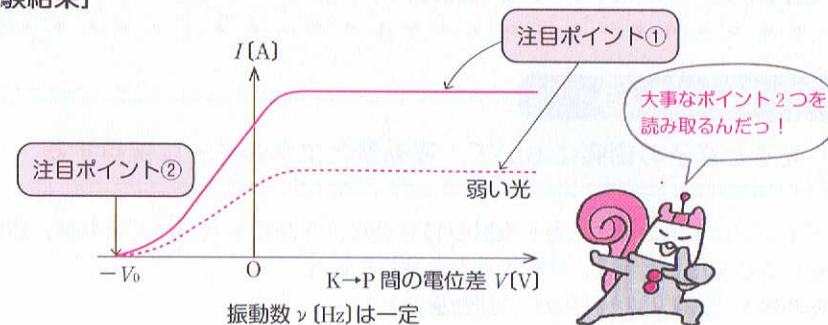
照射した光の振動数を ν , 金属板Kの仕事関数を W とすると次の式が成り立ちます。

$$h\nu - W = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_0$$

また, 電流は「1秒間に通過する電気量」でしたから, 「1秒間に飛び出した電子の数」を n とすれば, 次の関係も成り立ちます。

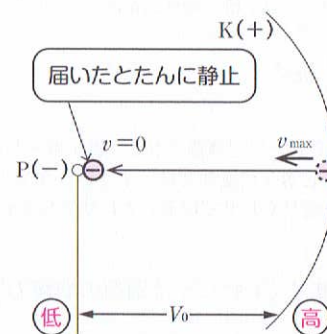
$$I = en \quad \text{つまり} \quad n = \frac{I}{e}$$

【実験結果】



- ① Kに対してPが十分に高電位の場合はすべての電子がPに届くので電流はそれ以上増えない。
- ② 光の量(明るさ)が変わると, 流れる光電流の値は変わるが, 阻止電圧 V_0 は変わらない。

⇒ 光子と電子は1対1。光の量が変わると光子の数が変わるので電流の量は変わるが, 1個の光子が1個の電子に与えるエネルギー $h\nu$ は同じなので, 阻止電圧 V_0 も同じ。



$h\nu - W$ の運動エネルギーをもった e (C)の電子が V_0 の電位差を進んだら止まったということじゃ

別冊も大事よ

$$(h\nu - W) = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_0$$

ここまでやったら
別冊 p.99へ

12-3 コンプトン効果

ココをおさえよう!

光子と電子の衝突において、運動量とエネルギーは保存する。

アインシュタインは、光量子仮説の11年後に「光が粒子(粒々)であれば、運動量ももつはずだ」と考え、次のことを主張しました。

振動数 ν 、波長 λ の光子のもつ運動量 p は

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (c \text{ は光速})$$

エネルギー $h\nu$ を、光の速さ c で割ると運動量になるということです。

(質量 m 、速さ v の物体のもつ運動エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$ 、運動量は mv ですから、

単位の次元は同じになりますね)

その考えが正しいと実験で証明したのがコンプトンです。

コンプトンは物質に X 線(波)を当てると、**散乱した X 線の波長が、元の X 線の波長よりも長くなる現象**を発見し、この現象は**コンプトン効果**と名づけられました。

X 線の光子が、物体中の電子にぶつかり、光子と電子が別々の方向に飛び散ったと考えます。力学と同じように、運動量の保存を考えると

$$\text{入射方向の運動量保存: } \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi \quad \dots\dots ①$$

$$\text{入射方向と垂直な方向の運動量保存: } 0 = \frac{h}{\lambda} \sin \theta - mv \sin \phi \quad \dots\dots ②$$

$$\text{また、エネルギー保存より } \frac{h}{\lambda} c = \frac{h}{\lambda'} c + \frac{1}{2}mv^2 \quad \dots\dots ③$$

補足 力学でやる、物体どうしの衝突では、熱や音として消費されるエネルギーがあるので、エネルギー保存は成り立ちません。光子と電子の衝突では、そういったエネルギーの損失がないとみなしてエネルギー保存を成り立たせていることに注意しましょう。

①~③から、次の波長に関する式が導かれます(くわしくは別冊の問題で)。

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

この式から、衝突後のほうが波長が長くなっていることがわかりますね。

光子のもつ運動量 p は

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

アインシュタイン

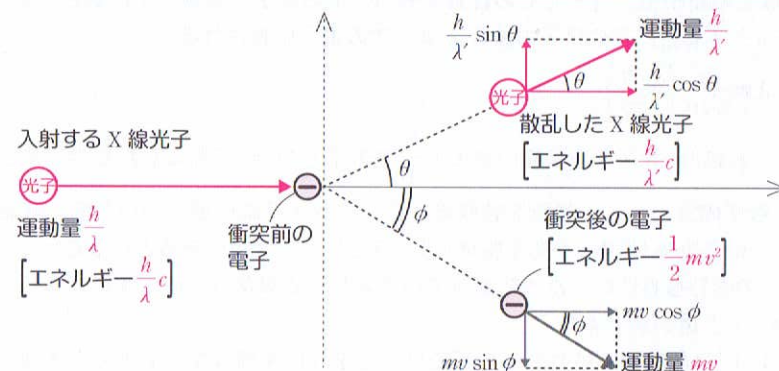
こうなるはずじゃ

またコスプレ

コンプトン効果

…物質に X 線(光)を当てると、散乱した X 線の波長が元の X 線の波長より長くなる現象。

物質中の電子との衝突で
X 線光子の運動量が変わったのが原因。



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

力学の衝突ではエネルギー保存は成立しないけどここでは成立すると考えるのよ

光子の運動量の表しかたは特殊だけど、考えかたは力学のとときと同じだよ

別冊で結果の導きかたを説明するぞい大事じゃから流れを覚えるんじゃ

ここまでやったら

別冊 p. 103へ

12-4 物質波

ココをおさえよう!

原子などの粒子も波としての性質をもち、その波長は以下のように表される。

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

波として考えられていた光は、粒子(粒々)としての性質もつとわかりました。この事実を知ったド・ブロイという学者は、次のようなアイデアをひらめきました。「もしかしたら、電子や原子などの粒子(粒々)として考えられているものも、波としての性質をもつのでは?」

このアイデアをもとに、ド・ブロイは次の仮説を立てました。「電子などの粒子も、波としての性質をもち、その粒子の質量を m 、速さを v 、運動量を p とすると、その粒子の波長 λ は、次のように表される。」

$$\lambda = \frac{h}{mv} \left(= \frac{h}{p} \right)$$

これは、p.418の光子の運動量の式 $p = \frac{h}{\lambda}$ を変形し「 $\lambda =$ 」の形にしたものです。

この、粒子の波としての性質を**物質波**、または**ド・ブロイ波**といいます。質量 m の動いている物体(速度 v がある物体)は、波としての性質もあるということです。「そんなの信じられない。だって走っている人だって車だって波には見えないじゃないか!」と思いますよね?

たしかに1924年に提唱されたこの仮説は、あまりに常識はずれで多くの人には信じませんでした。でも、そのわずか3年後には、実験により、この仮説は正しいことが判明したのです。(p.422でその実験については説明します)

例えば $h = 6.6 \times 10^{-34}$ なので、体重が66 kgの人が秒速1.0 m/sで歩いているとすると、その人の波長は

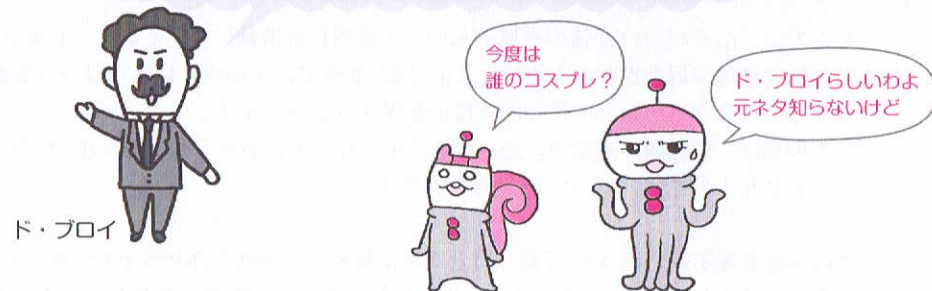
$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{66 \times 1.0} = 1.0 \times 10^{-35} \text{ [m]}$$

となります。こんな短い波長なので、私たちは確認できないのです。粒子が波としての性質をもちことが確認できるのは、極めてマイクロな電子などの世界だけで、私たちの生活レベルでは絶対に確認できないのです。

物質波

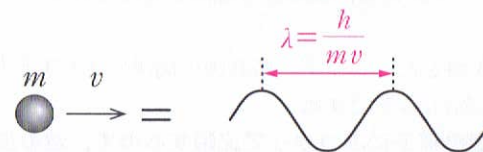
波として考えられていた光は、粒子としての性質ももっていた...

粒子には波としての性質もあるのでは?



質量 m 、速さが v の粒子は、波としての性質をもち波長を λ とすると

$$\lambda = \frac{h}{mv} \left(= \frac{h}{p} \right)$$



ここまでやったら

別冊 P. 105

12-5 ブラッグ反射

ココをおさえよう!

結晶に入射する光線は, $2d \sin \theta = n\lambda$ を満たすときに強め合う。

ここでは「粒子(粒々)が波の性質ももつ」と証明した実験についてお話しします。結晶など構造に規則性のある物質にX線(波)を当て, その後ろにスクリーンを設置すると, スクリーン上に規則的な模様が浮かび上がります。この模様は, 結晶内に規則的に並ぶ原子にぶつかって, 散乱したX線(波)が干渉して生じたものです。“干渉”は波の性質ですね。

この実験を電子線で行うと, X線(波)と同様に規則的な模様が浮かび上がりました。電子という“粒子(粒々)”の集まりである電子線が, “波”特有の性質である干渉を起こしたことで, 「電子などの粒子が波の性質ももつ」と証明されたのです。

実験についてくわしく見ていきましょう。

右ページの図に, 結晶中の原子にぶつかり, 反射する電子線の様子が描かれています。

電子線が波として干渉を起こし, 強め合う条件を考えてみましょう。

電子線が角度 θ で入射したとします。結晶面の間隔を d とすると, **隣り合う電子線との経路の差は, $2d \sin \theta$** です。

電子線は, 同じ種類の原子にぶつかって反射するので, 波の反転は考えなくてOKです。

「経路の差=波長の整数倍」であれば, 波は強め合いますね。

したがって, 結晶に入射した電子線が強め合うのは次の条件のときです。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

この条件を, **ブラッグ反射の条件**といいます。

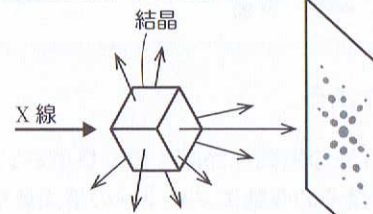
12-1 ~ 12-3では光の“粒子(粒々)”としての性質, 12-4, 12-5では電子の“波”としての性質を説明してきました。

常識がひっくり返されていくおもしろさを感じてもらえたでしょうか?

ひとつひとつの公式は, しっかり覚えて使えるようにしてくださいね。

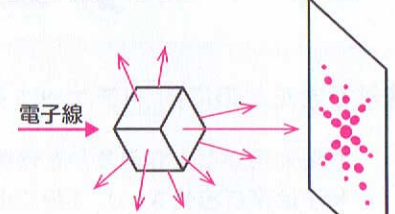
電子(粒子)の波動性の証明

【X線(波)の場合】



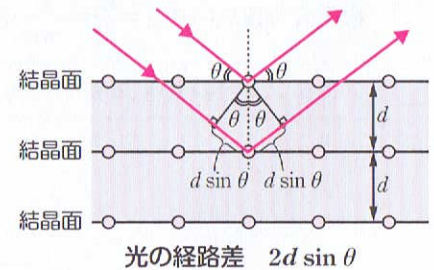
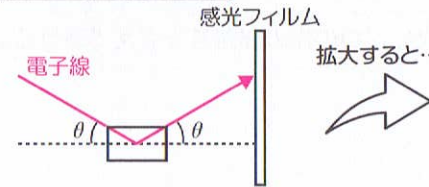
X線は波じゃから干渉をしたんじゃな

【電子線の場合】



粒子と思われていた電子の集団の電子線が干渉を起こした! 電子には“波”としての性質もあるってことじゃ

ブラッグ反射



反射した電子線が強め合う条件は

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n=1, 2, \dots)$$

波だと思われていた光やX線には粒子としての性質もあって

粒子だと思われていた電子には波としての性質もあって

常識がどんどんひっくり返されていったんじゃ



ここまでやったら別冊 P. 106へ