



理解できたものに、 チェックをつけよう。

- 原子は高温になると、とびとびの波長の光(輝線スペクトル)を出す。
- 電子は1周の距離が波長の整数倍のレーンが好きで、そこでは電磁波を出さない。この状態を定常状態という。
- 量子条件 $2\pi r = n \frac{h}{mv}$ の意味を理解した。
- 電子が違うレーンに移るときには、光子1個がレーンのエネルギー準位の差に相当するエネルギーを受け渡す。
- 振動数条件 $h\nu = E_n - E_m$ の意味を理解した。
- 第 n レーンの半径を導ける。
- 第 n レーンのエネルギー準位を導ける。
- 水素原子から放出される光のスペクトルの式を導ける。
- 連続 X 線と特性 X 線の発生する仕組みの違いを理解した。

最後の Chapter の
前に腹ごしらえよ!



Chapter

13

原子の構造

- 13-1 原子核
- 13-2 原子のスペクトル
- 13-3 ボーアの理論
- 13-4 X線

13

原子の構造

はじめに

Chapter 12では、光や電子についての話をしましたが、Chapter 13では原子に目を向けていきたいと思います。

しかし、光や電子も登場しますので、Chapter 12で学んだ内容も活用しますよ。

「原子の中心には原子核があり、その周りを電子が回っている」という、原子の構造に関する認識は、今では高校の化学や物理で当然のように教わります。

しかし、その構造に確証が得られるまでには、「いろいろな仮説が立てられては、仮説の問題点が明らかになる」ということが繰り返されてきました。

そこで思い切った理論を提唱し、原子に関する研究を大きく前進させたのがボーアです。

1913年にボーアが提唱したボーアの量子条件、振動数条件は、それまでの原子に関する疑問をうまく解消するものであり、その後の原子の構造の解明に大きく役立ったのです。

では、原子の構造について歴史を学びながら見ていきましょう。

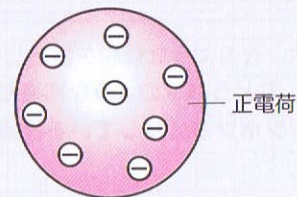
この章で勉強すること

原子核の構造と、原子から出る光と電子の関係について勉強します。
それらを踏まえて、ボーアが提唱した理論を解説していきます。
最後にX線についても扱います。

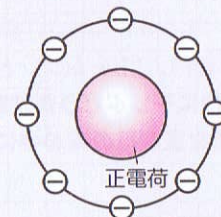
宇宙—
わかりやすい
ハカセの
Introduction



いろいろな原子モデルが考えられてきた…



ぶどうパンのようなモデル



土星のようなモデル

しかし、どのモデルも不完全であった…



そこにボーアという学者が現れ、画期的な理論を発表！



ボーアさん
グッジョブ！



どんな理論かは
見てのお楽しみじゃ



物理学の
歴史も学べるわよ



13-1 原子核

ココをおさえよう！

ラザフォードは、金箔に α 粒子をぶつける実験により、原子核を発見した。

今から100年程前、J.J.トムソンという学者は、次のような仮説を提唱しました。
「原子は、生地に干しぶどうが詰まっている、ぶどうパンのような構造だ！」
つまり、一様な正電荷の球の中に、電子がポツポツと分布している構造を考えたのです。

それに対して、長岡半太郎という学者は、次のような仮説を提唱しました。
「電子は、土星の輪のように、正の電荷をもつ球の周りを回っている！」
こちらは、今の原子のモデルに近い構造になっていますね。

ラザフォードという学者は、 α 粒子(正の電荷をもちます)という粒子を使った実験を指揮し、これらのモデルのどちらが正しいのかを確かめようとしてきました。
 α 粒子を金箔に当て、その散乱の度合いを調べたところ、
金原子の中心部付近を通過する α 粒子だけが、大きく散乱したとわかったのです。

これにより、ラザフォードは、次のような結論を出しました。

「原子の直径の10000分の1以下の中心部分に、正電荷が集中しておる！」

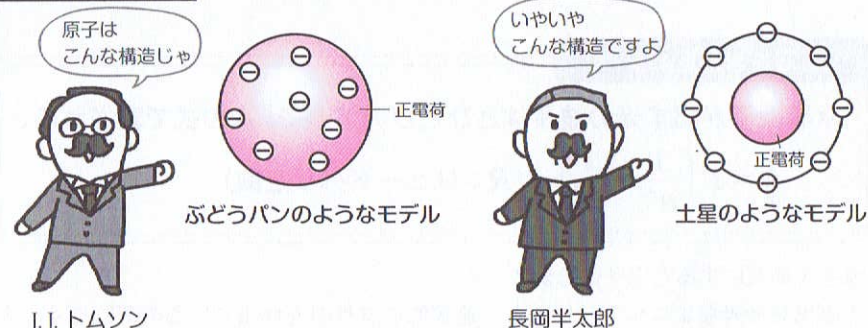
これが、**原子核**と名づけられたのです。

このような経緯で、**原子の真ん中に原子核があり、その周りを電子が回る**、という**ラザフォードの原子模型**というモデルが提唱されました。

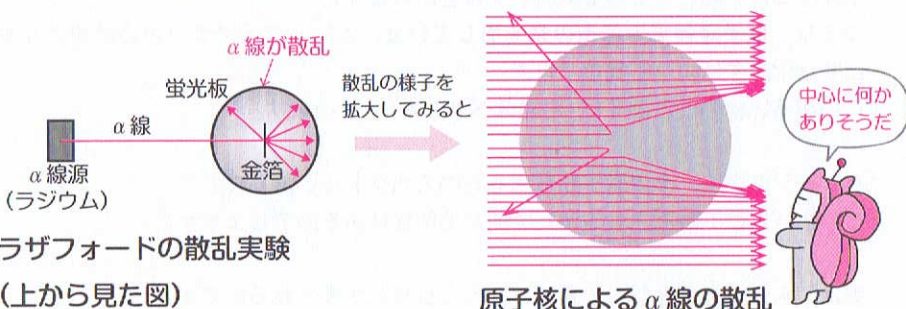
これで原子の構造は判明した、といってしまうのはちょっと早いです。

実はこのラザフォードのモデルには欠点があったのですが、そのお話はp.432でしますね。

原子の構造



ラザフォードは金箔に α 粒子を当てる実験をした。



原子の直径の10000分の1以下の中心部に原子核がある！



導き出した答えは



しかし、このモデルにも欠点があった(その話は p.432 で)

13-2 原子のスペクトル

ココをおさえよう!

水素原子が出す光の波長はとびとびの波長で、次の式で表される。

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (R: \text{リュードベリ定数})$$

原子を高温にすると光を發します。

その光を分光器によって分けると、連続的な波長の光が出ているのではなく、とびとびの波長の光が出ていることがわかりました(分光された光を波長別などに順序をつけて表したものをスペクトルといいます)。

つまり、**原子は特定の波長の光を出している**、ということです(どの波長の光を出すかは原子によって異なります)。

この明るい線のことは**輝線(輝線スペクトル)**といいます。

右ページの図に、水素原子から出る光のスペクトルがあります。このとびとびで観測される波長に何か法則性はあるのでしょうか。

実は、水素のとびとびの波長は、次のような式で表されるのです。

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n' = 1, 2, 3, \dots \quad n = n'+1, n'+2, n'+3, \dots)$$

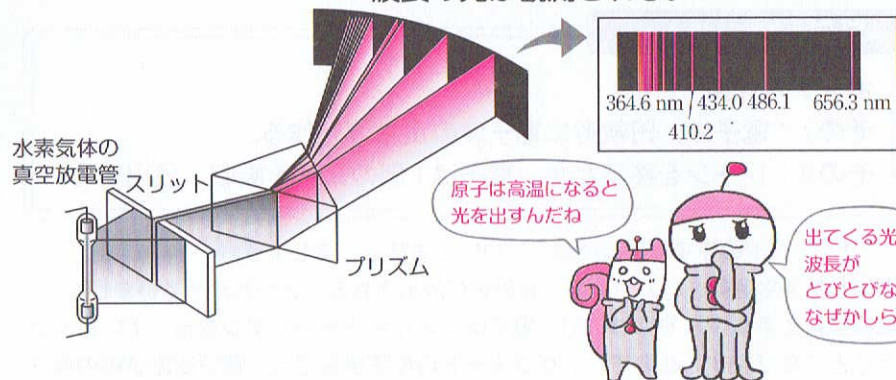
式中のRは**リュードベリ定数**と呼ばれ、 $1.097 \times 10^7 [1/m]$ です。

この式を發見するにあたり、**ライマン**、**バルマー**、**パッシェン**という人たちが活躍しました。

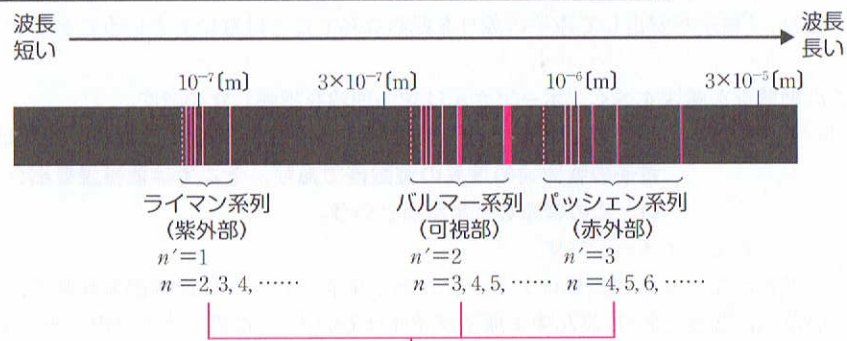
水素原子が發する光の輝線のうち、ライマンは、紫外線の輝線(式で $n'=1$ に相当し、**ライマン系列**という)を發見、バルマーは、可視光の輝線(式で $n'=2$ に相当し、**バルマー系列**という)を發見、パッシェンは、赤外線線の輝線(式で $n'=3$ に相当し、**パッシェン系列**という)を發見したのです。

n や n' が何なのかは、p.434以降でわかりますので、もう少し待ってくださいね。ここでは「原子が(高温になると)光を出す」、「出された光は特定の波長である」ということをおさえておけば大丈夫ですよ。

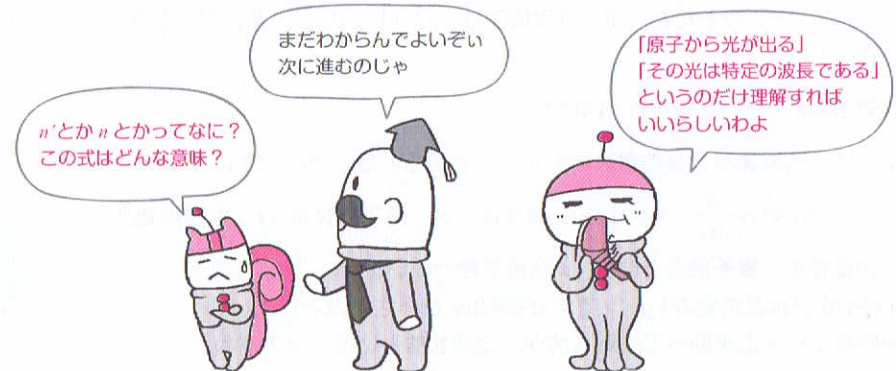
原子のスペクトル …原子を高温にすると、とびとびの波長の光が観測される。



水素原子のスペクトルと、波長の満たす法則



$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (R \text{ はリュードベリ定数})$$



13-3 ボーアの理論

ココをおさえよう!

ボーアの理論

- その1: 電子は、円軌道に電子波の定常波を作る。
- その2: レーンを移るとき、電子は1個の光子を吸収・放出する。

「ラザフォードの原子模型の欠点」についてお話ししましょう。
 電子が加速度運動をしていると、電磁波が放出されることがわかっていました。電磁波はエネルギーをもつので、電子はエネルギーを少しずつ放出しているということになります。なので、ラザフォードの原子模型では「電子は原子核の周りを回るうちにエネルギーが少なくなって、原子核に引き寄せられてしまう」と考えられていました。
 つまり、「電子が安定して原子の周りを回るなんてことはない」ということです。

この問題点を解決すべく、ボーアさんは次の理論を提唱したのです。
 ボーアの理論①: 電子の波としての性質を考える。電子が回る円軌道の円周は、電子の物質波の波長の整数倍であり、そこでは電磁波を出さない。この状態を**定常状態**という。

つまり、こんなイメージです。
 少し変わった、陸上競技場のトラックがあります。レーンに直線部分がなく、きれいな円になっており、真ん中に原子核が座っています。このトラックのレーンを、電子はクルクルと回るので、電子はこう言うのです。

「ボクは特別なレーンが大好き。だから、そのレーンの上でしか回らないよ。」
 「そのレーンは、1周の距離が、ボクの物質波の波長の整数倍なのさ!」
 「そのレーンの上だと、ボクは電磁波は出さないから、エネルギーが減らないんだ!」

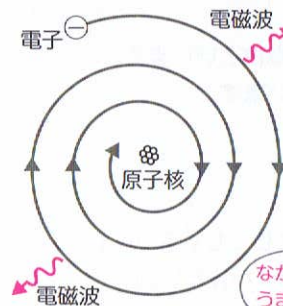
物質波は $\lambda = \frac{h}{mv}$ でしたね (p.420)。

よって「物質波の波長の整数倍のレーンを回る」は、次のように表せます。

$$2\pi r = n \frac{h}{mv} \quad (r: \text{レーンの半径} \quad m: \text{電子の質量} \quad v: \text{電子の速さ})$$

この条件を、**量子条件**といい、 n を**量子数**といいます。
 n が小さいほど内側のレーンです(円周 $2\pi r$ が小さいので)。
 特別なレーン上を回っている状態が、定常状態ということですね。

ラザフォードの原子模型の欠点



電子は電磁波を出し、エネルギーを放出する。

↓
 原子核に引き寄せられてしまうので×!

なかなかうまくいかないね

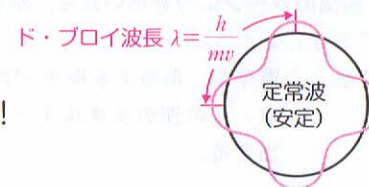
恋愛と一緒にだ

リスにセリフとられた...

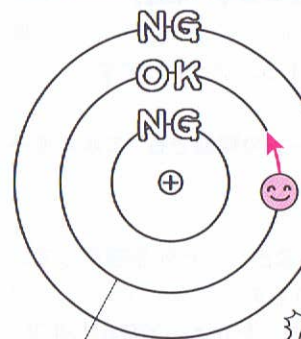
ここでボーアの理論が登場

- ① 電子を $\lambda = \frac{h}{mv}$ (ド・ブローイ波長)の波と考える。

軌道の円周の長さが、波長 λ の整数倍ならば、電子は電磁波を出さない!



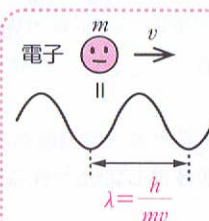
$$2\pi r = n\lambda \quad (\text{上図では} n=4)$$



このレーンは好きだけど他のレーンだと電磁波が出ちゃうからイヤ!

変なこだわり...

$2\pi r = n\lambda \left(\lambda = \frac{h}{mv} \right)$
 を満たすレーン



電子には波としての性質もあつたじゃろ!(p.420)

各レーンにおける電子のエネルギーの値を**エネルギー準位**といいます。
エネルギー準位は、外側のレーンのほうが高くなっています。

さらに、電子はこんなことも言っています。

「別のレーンに移りたいときもあるよね。」

「でも、レーンを移ると、ボクがもつエネルギーも変わっちゃう……」

「内側のレーンに移るには、エネルギーを放出しなきゃいけない。」

「外側のレーンに移るには、エネルギーをもらわなきゃいけない。」

「どうしたらいいんだろう……」

たしかに、レーンを移動するとなると、エネルギーのやり取りが必要ですね。

そこに、光子が現れて言いました。

「ボクは $h\nu$ のエネルギーをもっているから、ボクを利用しなよ」

「ボクを吸収すれば外側のレーンに行けるよ」

「逆に、内側のレーンに行きたいなら、ボクを放出すればいい」

ボーアはこれをこのように表しました。

ボーアの理論②：電子が、あるエネルギー準位から別のエネルギー準位に移るとき、その差のエネルギーをもつ光子を1個だけ吸収、または放出する。

つまり、第 n' レーンから、第 n レーンに移動するとき ($n' < n$)、電子は

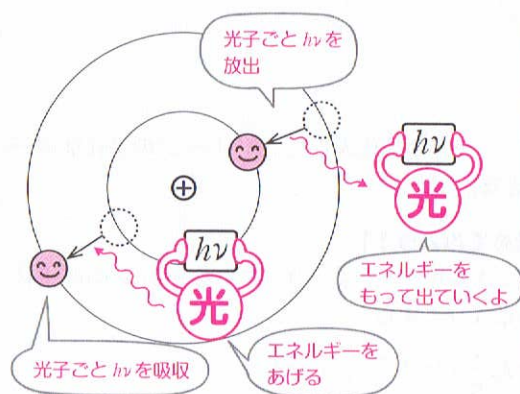
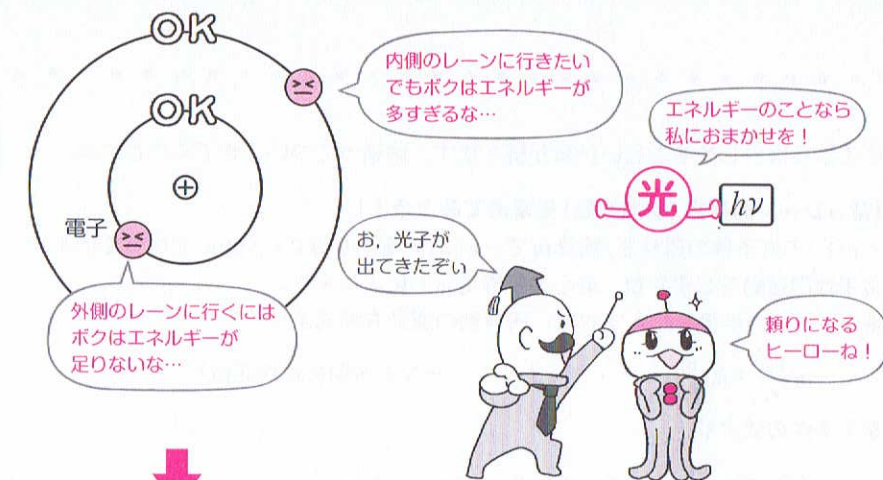
$$h\nu = E_n - E_{n'} \quad (E_n: \text{第 } n \text{ レーンにいる電子のエネルギー準位}) \quad \dots\dots ①$$

のエネルギーをもつ光子を吸収するんですね。逆に第 n レーンから第 n' レーンに移動するときは、①式のエネルギーをもつ光子を放出するというわけです。

この条件を、**振動数条件**といいます。どれだけ遠いレーンの移動でも、エネルギーの受け渡しに使われる光子は1個です。

原子の内部でこのレーンの移動が行われているときに放出された光を観測していたのが、p.430でお話した原子のスペクトルだったのです。

電子が軌道の移り変わりをするとき、余分なエネルギーを光として放出します。軌道がとびとびなので観測される光の波長はとびとびになるんですね。



ボーアの理論②

電子がある軌道から別の軌道へ移るとき、そのエネルギー準位の差のエネルギーをもつ光子を1個だけ吸収または放出する。

$$h\nu = E_n - E_{n'}$$

(この式を**振動数条件**という)

エネルギー準位の差の分のエネルギーをもつ光しか放出されないからとびとびの波長の光しか観測されなかったんだ!

実は…

原子のスペクトル (p.430) はこの放出された光子によるもの!!

ここからは少しややこしい計算が続きます。頑張ってついてきてくださいね。

【第 n レーンの半径 (軌道半径) を求めてみよう！】

$+e$ [C] の原子核の周りを、質量 m で $-e$ [C] の電子が速さ v_n [m/s] で回っています。

電子は円運動をしますが、向心力は静電気力によります。

第 n レーンの半径を r_n とすれば、円運動の運動方程式より

$$m \frac{v_n^2}{r_n} = k_0 \frac{e^2}{r_n^2} \quad \dots\dots ① \quad (k_0: \text{クローンの法則の比例定数})$$

量子条件の式より

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv_n} \iff v_n = n \frac{h}{2\pi m r_n} \quad \dots\dots ②$$

①式に②式を代入して整理すれば

$$r_n = \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \frac{n^2}{k_0 m e^2} \quad \dots\dots ③$$

これが、第 n レーンの半径となります。 $n=1$ を代入した、第1レーンの半径は**ボーア半径**と呼ばれることも覚えておきましょう。

【第 n レーンのエネルギー準位を求めてみよう！】

第 n レーンにある電子のもつ位置エネルギー U_n は、中心にある $+e$ [C] の原子核の作る電位を V_n とすると次のようになりますね。

$$U_n = (-e) \times V_n = (-e) \times k_0 \frac{e}{r_n} = -k_0 \frac{e^2}{r_n} \quad \dots\dots ④$$

電子のエネルギーは、「運動エネルギー+位置エネルギー」ですので、

第 n レーンの電子のエネルギーを E_n とすれば

$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 + \left(-k_0 \frac{e^2}{r_n} \right) = \frac{k_0 e^2}{2r_n} + \left(-k_0 \frac{e^2}{r_n} \right) = -\frac{k_0 e^2}{2r_n} \quad \dots\dots ⑤$$

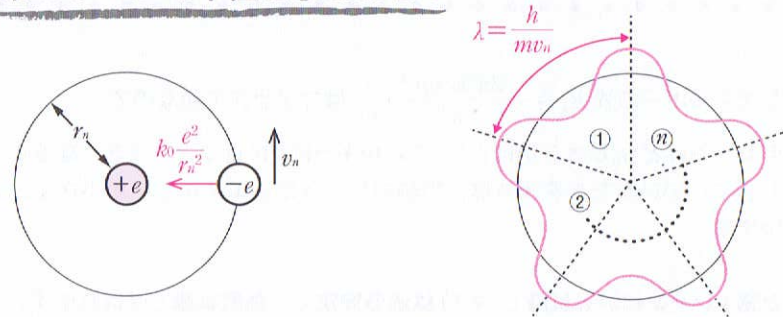
(①式の両辺に $\frac{r_n}{2}$ を掛けた式 $\frac{1}{2} m v_n^2 = \frac{k_0 e^2}{2r_n}$ を用いました。)

⑤式に③式を代入して整理すると

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad \dots\dots ⑥$$

これが、第 n レーンのエネルギー準位となります。

・第 n レーンの半径を求めよう！



円運動の運動方程式より

$$m \frac{v_n^2}{r_n} = k_0 \frac{e^2}{r_n^2}$$

量子条件より

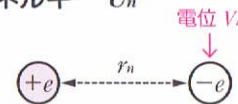
$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv_n}$$

円周 nλ

$$r_n = \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \frac{n^2}{k_0 m e^2} \quad (n=1 \text{ のときをボーア半径という})$$

・第 n レーンの電子のもつエネルギー (エネルギー準位) E_n を求めよう！

位置エネルギー U_n



$$U_n = (-e) \times V_n = (-e) \times k_0 \frac{e}{r_n} = -k_0 \frac{e^2}{r_n}$$



$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 + U_n$$

$$= \frac{k_0 e^2}{2r_n} + \left(-k_0 \frac{e^2}{r_n} \right)$$

$$= -\frac{k_0 e^2}{2r_n}$$

$$= -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$



求めたエネルギーの式 $E_n = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ はマイナスの値なので

外側のレーンほど (n が大きいほど)、エネルギーは0に近づき、大きくなるのがわかります。いかたを変えれば、内側のレーンほどエネルギーが小さく、安定しています。

電子が第1レーンにいる状態 ($n=1$) は最も安定で、**基底状態**と呼ばれます。電子が、**外側のレーンに移動する(よりエネルギーが高い状態に移る)ことを、励起**といい、第2レーン以降 ($n \geq 2$) の状態を、**励起状態**といいます。

電子は、なるべく安定した状態になりたいので、「内側のレーンに移動したい!」と思っています。なので、励起状態にある電子は、光子を放出しようとするわけです。そこで放出された光子が、スペクトルとなって現れるのです。

さて、p.430で紹介した水素原子から出る波長の式を実際に導出してみましょう。

振動数条件より

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = E_n - E_{n'} \quad \dots\dots ⑦$$

⑦式に、⑥式のエネルギー準位を代入すると

$$h \frac{c}{\lambda} = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

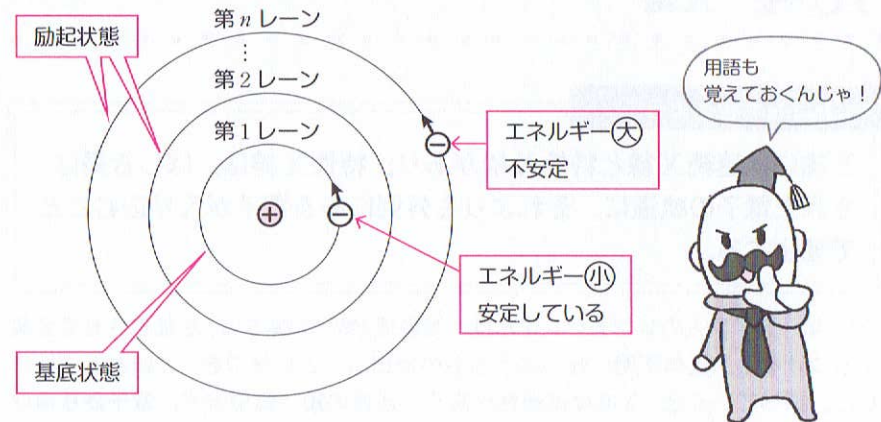
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^3 c} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \dots\dots ⑧$$

⑧式のうち、定数部分をリュードベリ定数 R とおく、すなわち

$$R = \frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^3 c} \quad \dots\dots ⑨$$

とすれば、⑧式はp.430の式と同じ形になりますね。このように、ボーアの理論を使えば、水素原子に関する現象が説明できます。

さて、ここまでで原子の構造や、原子核の周りを回る電子の軌道の満たす条件などをお話ししてきました。p.430 ~ 439の話の流れを理解して、面倒でも自分で式変形などをやってみましょう。別冊の問題も自力で解けるようにしておいてくださいね。



・ p.430の原子のスペクトルの式を導出しよう!

振動数条件より

$$h \frac{c}{\lambda} = E_n - E_{n'}$$

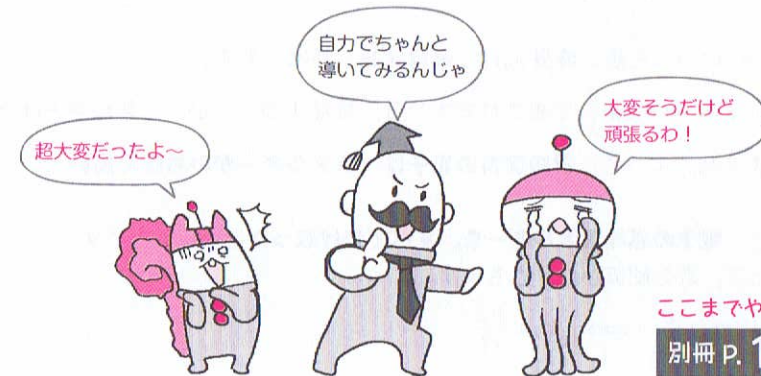
エネルギー準位の式(p.436)より

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$E_{n'} = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n'^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k_0^2 m e^4}{h^3 c} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

R (リュードベリ定数)



ここまでやったら
別冊 p. 107へ

13-4 X線

ココをおさえよう!

X線には連続X線と特性X線があり、特性X線は、はじき飛ばされた電子の軌道に、それよりも外側にある電子が入り込むことで発生する。

1895年、ドイツ人のレントゲンさんは、陰極線(電子の集まり)を加速させて金属にぶつけると、正体不明の光のようなものが出ることに気づき、X線と名づけました。調べていくと、X線は透過性が高く、波長の短い電磁波で、**電子から飛び出している**とわかりました。

ここではX線を粒子と考えて、**電子からX線光子という粒が飛び出ると**考えましょう。

発生したX線の強さと、波長の関係のグラフが、右ページにあります。「X線の強さ」は「X線の明るさ」であり「X線光子の数」とっておいてください。どの波長のX線光子が、どれくらい発生したかを表すグラフということですね。

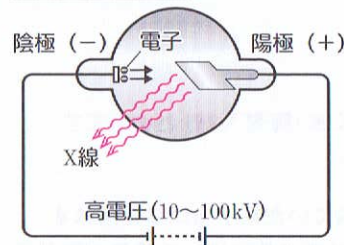
グラフの中で、滑らかな部分を**連続X線**といいます。加速された電子が金属内に入ると、電子の速度が変化し、運動エネルギーが減少します。その運動エネルギーの減少分が、X線という電磁波として放出されるのです。**電子の運動エネルギーの一部、またはすべてをX線光子が受け取る**と考えてもいいでしょう(X線光子が受け取らなかった分のエネルギーは、金属原子の熱運動に使われます)。

グラフ中のいちばん短い波長 λ_0 は、**最短波長** と呼ばれます。光子のエネルギーは $h\frac{c}{\lambda}$ で表されますから、波長 λ が小さいとエネルギーは大きくなりますね。よって、**最短波長の光子は、エネルギーがいちばん高い**ということです。

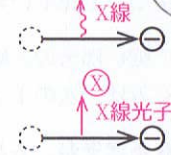
このとき、**電子の運動エネルギーを、すべて受け取った**ということです。したがって、次の関係が成り立ちます。

$$eV = h\frac{c}{\lambda_0} \iff \lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

X線とは



調べると



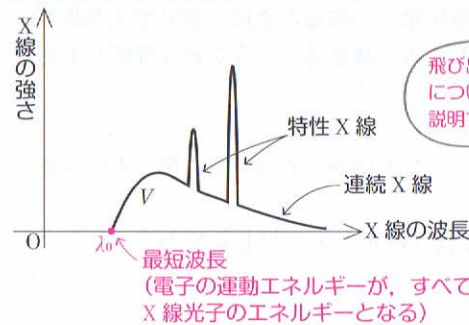
X線の粒子としての性質を考えてX線光子が電子から飛び出ると思えばよいぞい



電子を金属にぶつけると出てくる正体不明の光のようなものをX線と名づけた

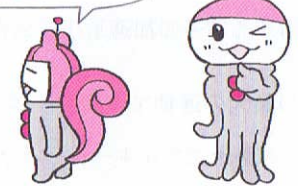
X線は透過力の強い電磁波で、電子から出ているとわかった

連続X線と最短波長

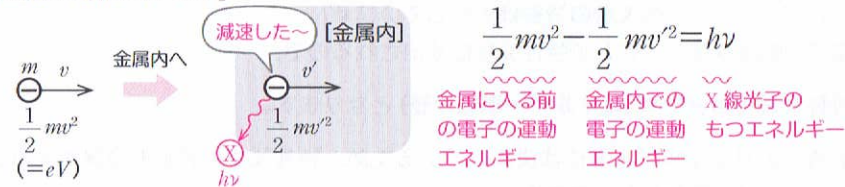


飛び出ている特性X線については、次ページで説明するよ

連続X線と最短波長については、下を見てね



【連続X線のしくみ】



最短波長では、電子の運動エネルギーがすべてX線光子のエネルギーになるので

$$eV = h\nu = h\frac{c}{\lambda_0} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

もう少しX線のグラフについて見ていきましょう。

グラフの中で飛び抜けて強い部分のX線を、**特性X線(固有X線)**といいます。特性X線が発生するしくみは、次のようなものです。

- ① 加速されて入ってきた電子が、もともと金属内にいた電子をはじき飛ばす。
- ② はじき飛ばされた電子の軌道に、それよりも外側の軌道にいる電子が割り込む。
- ③ エネルギー準位の差をもったX線光子が飛び出す。

このとき“エネルギー準位の差=放出されたX線光子のエネルギー”が成立します。p.434で学んだボーアの理論②と同じですね。

連続X線の発生は、加速された電子の運動エネルギーの減少によるものですが、特性X線は、外側の軌道から内側の軌道に電子が移るときに、余分なエネルギーを放出することによるのです。発生するしくみが異なるということを理解しておきましょう。

金属に入射する電子の加速電圧を大きくしたものが、右ページの図の赤い点線のグラフです。

電子のもつ最大の運動エネルギーは eV_1 から eV_2 へと増加しますので、放出されるX線光子の最大エネルギー $h\frac{c}{\lambda}$ も大きくなります。

そのため最短波長 λ_2 は短くなっていますね($\lambda_2 < \lambda_1$)。

それに対して、特性X線の波長は変化していません。

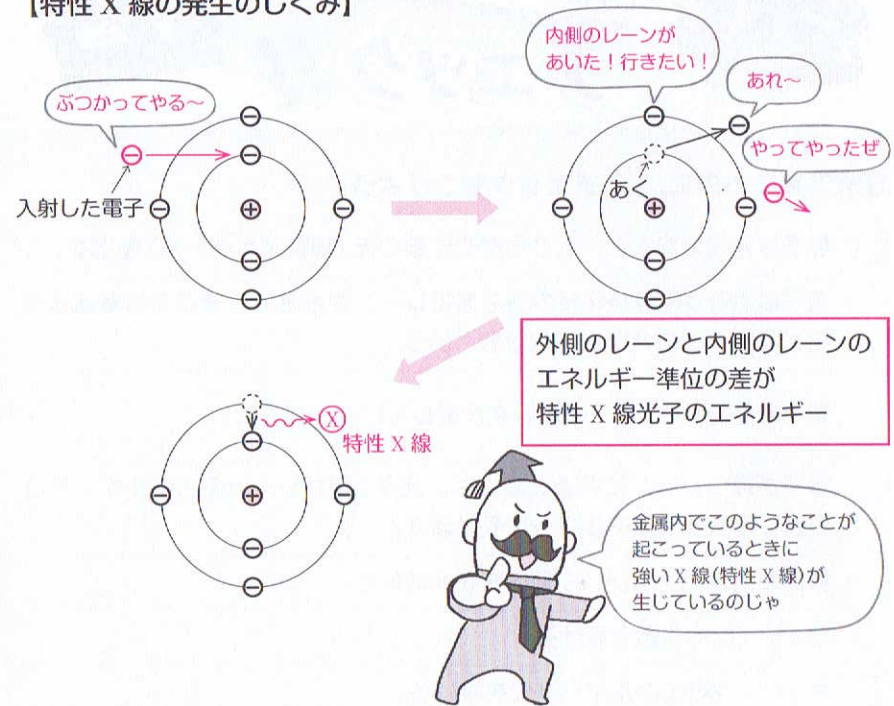
電子の軌道が変わることで特性X線は放出されるので、

特性X線では $h\frac{c}{\lambda} = (\text{エネルギー準位の差})$ となります。

金属によりエネルギー準位は決まっているため、特性X線の波長も金属により決まっており、変化しないのです。

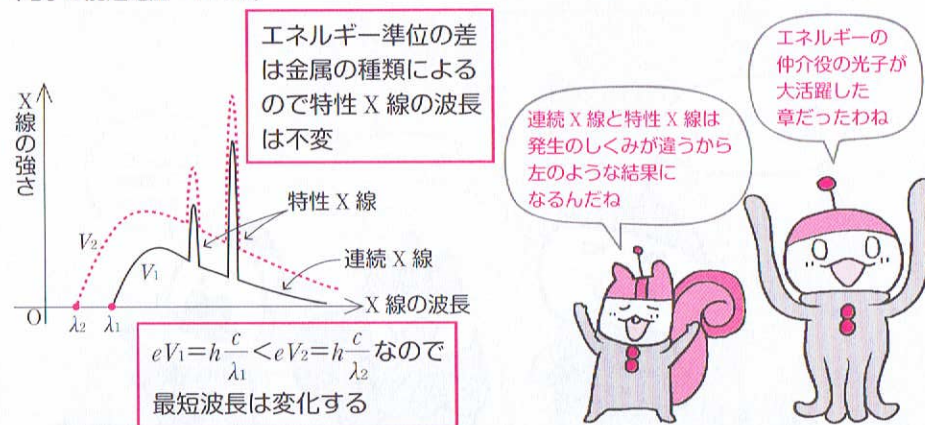
Chapter 13では原子の構造や、電子の軌道変化とその際に放出される光子について学びました。X線も原理は同じようなものなので、合わせて理解してください。

【特性X線の発生のしくみ】



【電子の加速電圧とX線のグラフ】

(電子の加速電圧 $V_1 < V_2$)



ここまでやったら
別冊 P. 111