

# 物理 授業プリント⑭

<原子物理 第2章 原子・原子核・素粒子>

○原子核の発見

20世紀初頭の原子モデル

・J.J.トムソンのモデル

正電荷が原子全体に分布していて、電子はぶどうパンのぶどうのように散在している。

電子の質量 \_\_\_\_\_ 原子の質量 であることから、  
原子の大部分は正電荷で占められていると考えられた。

・長岡半太郎のモデル

中心に正電荷があり、電子はその周りを回っている。

電気力が \_\_\_\_\_ となって電子が円運動していると理解できる（太陽の周りを回る惑星と類似）。



ラザフォードの実験（1911）

$\alpha$  粒子（=He 原子核）を薄い金箔に当てた。

→ ほとんどの  $\alpha$  粒子は金箔を通過するが、ごく一部の  $\alpha$  粒子は大角度散乱した。

原子中の正電荷が、原子の中心のごく \_\_\_\_\_ エリアに集中していることが分かった。



原子は

・原子核（原子の直径の \_\_\_\_\_ 分の 1 以下の大きさ）  
が中心にある。

・電子が原子核の周りを回っている

のような構造をしていることが分かった。

(練習) 金箔に当たった  $\alpha$  粒子のうち、金の原子核に最も近づくのは、 $180^\circ$  に散乱される場合である。その場合には、 $\alpha$  粒子はいったん静止したあとに  $180^\circ$  方向にはね返される。 $\alpha$  粒子 (電気量  $2e$ 、 $e$  は電気素量) の初めの運動エネルギーを  $K$ 、金の原子核の電気量を  $Ze$  ( $Z$  は原子番号)、真空中のクーロンの法則の比例定数を  $k_0$  とし、 $\alpha$  粒子は金の原子核に比べて十分に軽く、散乱されるときに金の原子核は動かないものとする、 $\alpha$  粒子と金の原子核が最も近づいたときの距離 (最近距離)  $r$  はいくらか。ただし、初めの  $\alpha$  粒子は金の原子核から十分に離れた無限遠点にいたものとする。また、電気力による位置エネルギーは無限遠点を基準とし、そこでは 0 とみなすものとする。

また、 $K = 8.8 \times 10^{-13}$  J、 $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C、 $k_0 = 9.0 \times 10^9$  N $\cdot$ m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>、 $Z = 79$  としたときの  $r$  を求めよ。

○ラザフォードの原子モデルの難点

ラザフォードの原子モデルには、2つの難点があった。

- ① 円運動する電子は電磁波を発するため、エネルギーを \_\_\_\_\_ 原子核に落ち込む（合体する）はずである。  
しかし、実際にはそのようなことは起こらない。
- ② 電子が原子核に落ち込むときに放出する光（電磁波）のエネルギーは \_\_\_\_\_ に変化するので、放出する光の波長も \_\_\_\_\_ に変化するはずである。  
しかし、実際には \_\_\_\_\_ の波長の光しか放出されない。

高エネルギー状態の気体が光を発する場合（例：ナトリウムランプ、水銀灯）、特定の波長の光だけが放出される（線スペクトル）。



水素の場合、

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\begin{cases} n' = 1, 2, 3, \dots \\ n = n'+1, n'+2, n'+3, \dots \\ R: \text{リュードベリ定数} \end{cases}$$

を満たす波長  $\lambda$  の光だけが放出される。

- $n' = 1$  : ライマン系列 ( \_\_\_\_\_ )
- $n' = 2$  : バルマー系列 ( \_\_\_\_\_ )
- $n' = 3$  : パッシェン系列 ( \_\_\_\_\_ )

(練習) バルマー系列の最も長い波長と最も短い波長を求めよ。ただし、リュードベリ定数を  $1.1 \times 10^7 / \text{m}$  とする。

○ボーアの水素原子モデル

ラザフォードの原子モデルには見つかった2つの難点を、  
ボーアの原子モデルが解決した。

・量子条件：電子は特定の軌道にしか存在できない。

…「円周の長さ = 電子の \_\_\_\_\_ の整数倍」を満たす軌道  
(=定常状態)にしか、電子は存在できない。



量子条件を式で表すと： \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_

$r$  : 軌道半径     $m$  : 電子の質量     $v$  : 電子の速さ  
 $h$  : プランク定数     $n$  : 量子数 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

・振動数条件：電子が異なる軌道へ移るとき、光子1個を放出 or 吸収する。

… 電子がより高エネルギーの軌道へ移動するとき：光子を \_\_\_\_\_ する。

電子がより低エネルギーの軌道へ移動するとき：光子を \_\_\_\_\_ する。



\_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_

$\nu$  : (吸収 or 放出される) 光子の振動数     $h$  : プランク定数  
 $E$  : 高エネルギー軌道のエネルギー     $E'$  : 低エネルギー軌道のエネルギー

○定常状態の半径

電子（質量  $m$ 、電荷  $-e$ ）が速さ  $v$  で半径  $r$  の円軌道を円運動するとき、

運動方程式：  
 \_\_\_\_\_

$k$ ：クーロンの法則の比例定数

と書ける。これと、量子条件の式から  $v$  を消去して整理すると

$r =$   
 \_\_\_\_\_

$n$ ：量子数（ $n = 1, 2, 3, \dots$ ）

↓

電子の軌道半径  $r$  は \_\_\_\_\_ に比例することが分かる。

※  $n = 1$  とすると、 $r \doteq \frac{10^{-10}}{2} \text{ m}$ （ $\doteq$  水素原子の半径）

○定常状態の電子のエネルギー

半径  $r$  の円軌道を速さ  $v$  で円運動する電子（質量  $m$ 、電荷  $-e$ ）の

- ・電気力による位置エネルギー = \_\_\_\_\_
- ・運動エネルギー = \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_

円運動の運動方程式を使って変形



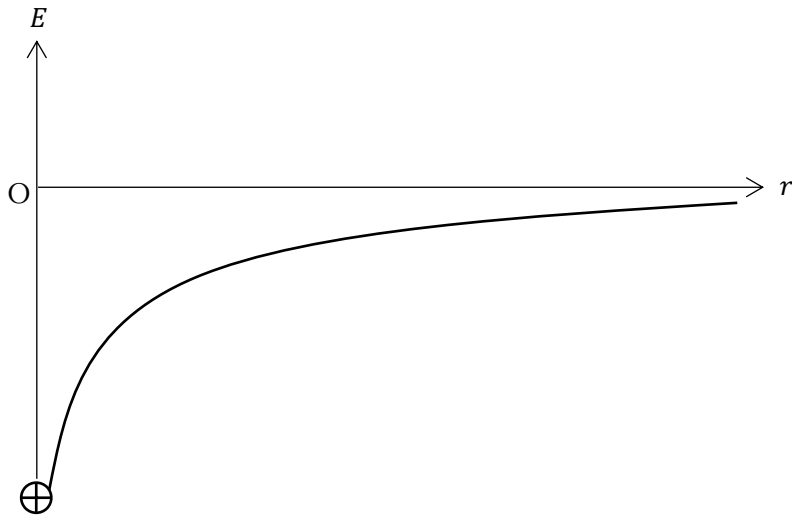
電子のエネルギー  $E =$  \_\_\_\_\_  $=$  \_\_\_\_\_

軌道半径  $r$  を表す式を使って変形

※ 具体的な値を代入すると、

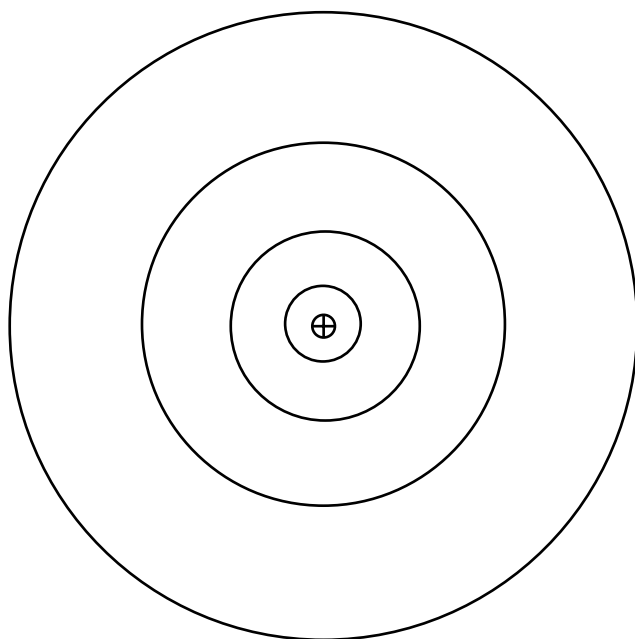
$$E = - \frac{2.18 \times 10^{-18}}{n^2} \text{ J} = - \frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$$

$n =$  \_\_\_\_\_ の軌道のエネルギーが最小である。



○水素原子のスペクトル

水素原子中の電子の軌道



電子が最も安定な状態になるのは、 $n = 1$  の軌道 (= \_\_\_\_\_ 状態)

… 普通は水素原子中の電子は基底状態にあるが、エネルギーを得て基底状態よりエネルギーの高い  $n \geq 2$  の軌道 (= \_\_\_\_\_ 状態) に移ることもある。

… 電子が励起状態から基底状態に戻るとき、光子 1 個を放出する。

電子が量子数  $n$  の軌道から  $n'$  の軌道へ移動するときに放出する光子のエネルギー  $h\nu$  は

$$h\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \quad \Downarrow$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda}$$



※  $\frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{ch^3}$  は \_\_\_\_\_ を表す。

… ここへ  $c$  や  $h$  などの各値を入れて求められる値は、観測から求められていたリュードベリ定数の値と一致した（ボーアの原子モデルが正しいことの裏付けとなった）。

※ 電子が  $n' = 1$  の軌道へ落ち込むときの放出される光： \_\_\_\_\_ 系列

電子が  $n' = 2$  の軌道へ落ち込むときの放出される光： \_\_\_\_\_ 系列

電子が  $n' = 3$  の軌道へ落ち込むときの放出される光： \_\_\_\_\_ 系列

### ○吸収スペクトル

光が気体を通過するとき、特定の波長の光が吸収される。

→ 特定の波長だけが \_\_\_\_\_ になったスペクトル（=吸収スペクトル）が観測される。

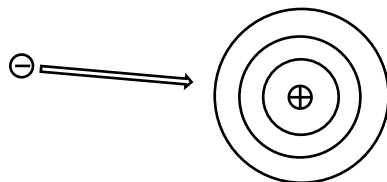
気体の原子中の電子が光子 1 個を吸収して \_\_\_\_\_ 状態に移る。  
このとき、特定の波長の光子だけを吸収する。

地上で太陽光を観測すると、いくつもの暗線（=フラウンホーファー線）が観測できる。

… \_\_\_\_\_ と \_\_\_\_\_ の大気によって吸収された波長が暗線となる。

○固有 X 線

金属に高速の電子を衝突させて X 線を発生させると、  
特定の波長の X 線（固有 X 線）が強く発生する。



高速の電子が、金属原子中の電子に衝突してはじき飛ばす。  
→ 空いた軌道ができるので、より外側の軌道にある電子がそこへ落ち込む。  
このときに固有 X 線を放出する。

固有 X 線の波長は、金属の種類によって異なる。

※ 古典物理学と量子力学の 3 つの違い（整理）

古典物理学（19 世紀まで）	量子力学（20 世紀）
光は _____ である。	光は波動であると同時に _____ でもある。
物質は _____ でできている。	物質は粒子であるが、 _____ としても振舞う。
エネルギーは _____ である。	エネルギーは連続量ではなく、 _____ の値しか取れない。