

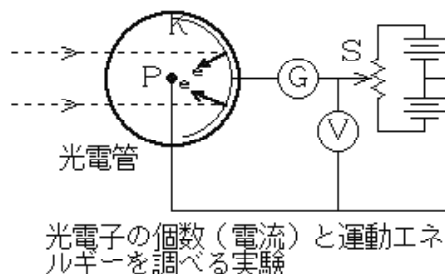
# 18. ミクロの世界

《a》光電効果と光量子説 (教科書 II P.228 ~ 233、問題集 P.246 ~ 251)

## 光電効果

金属に可視光線や紫外線を当てるとその表面から電子が飛び出す現象を光電効果といい、その電子を光電子と呼ぶ。

光のエネルギーを吸収して十分な運動エネルギーを得た電子が、原子核からの引力を振り切って飛び出す現象である。



P が K に対して正電位するとき

P が K に対して負電位するとき

光を波動と考えるとそのエネルギーは光波の振幅  $A$  の二乗と、振動数  $\nu$  の二乗に比例する。振動数が小さくても(赤い光)振幅を大きく(明るく)すればエネルギーを大きくできる。しかし、実験では振動数  $\nu_0$  がある値以下だと、光をどんなに強くしても光電効果はおこらない。このことは光の波動説にとっては不都合である。

## 光電効果の式

右のグラフで表される実験結果を式に表す。

光電効果の式

$$K_0 =$$

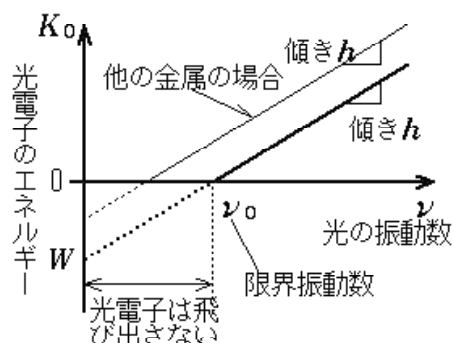
$K_0$  : 光電子の最大運動エネルギー

$W$  : 金属固有の仕事関数

プランク定数

$$h = \quad [\text{Js}]$$

$h$  は物質によらない基本的な物理定数である。



## 光量子説 (1900 Planck、1905 Einstein)

光はエネルギーを持った粒子(光子、光量子、photon)としてもふるまう。光子一個のエネルギーは光波の振動数  $\nu$  に比例し、光の強さは光子の個数に比例する。

光子一個が持つエネルギー

$$E =$$

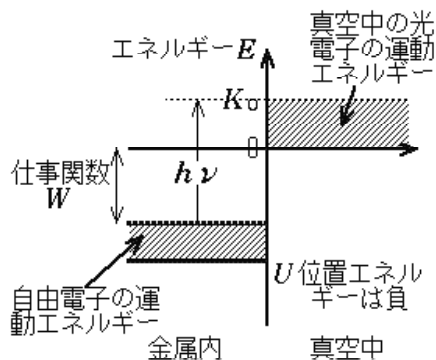
$h$  : プランク定数

## 光電効果の光量子説による説明

1 個の光子が金属内の 1 電子に衝突して吸収され、そのエネルギーのすべてを電子に与える。

電子が金属イオンからの引力を振り切るには最低でも  $W$  のエネルギーが必要。

$h$  が  $W$  より小さいと、光子の数を増しても光電効果は起こらない。 $h$  が  $W$  より大きければ、光子の数は少なくても光電効果は起こる。



【問】セシウムの仕事関数は  $1.9\text{eV}$  (電子ボルト:  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ ) である。光電効果を起こす光の限界振動数と限界波長を求めよ。光速  $c = 3.0 \times 10^8\text{m/s}$ 。

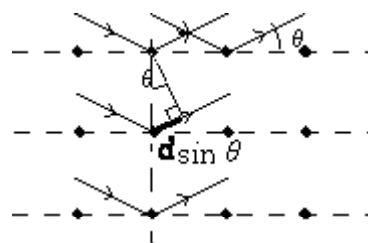
《b》波動性と粒子性 (教科書 P.214 ~ 215、234 ~ 242、問題集 P.246 ~ 251)

## ブラッグ反射

結晶格子による X 線の反射パターンは波の干渉の結果として説明できる。

ブラッグの干渉条件

$d$ : 原子面の間隔、  $\lambda$ : X 線の波長



この実験の結論: X 線は極めて短波長の**波動**(電磁波)である。

## 連続 X 線の最短波長の存在

一定エネルギーの電子を当てた物質から放射される X 線の波長には下限がある。

電圧  $V$  で加速された電子(電荷  $e$ )がもつ運動エネルギーがすべて X 線の光子のエネルギー  $h$  に変わったと考えると

X 線の最短波長

この実験の結論: X 線はエネルギーを持った**粒子**(光子)である。

## コンプトン効果

光子が運動量をもつと考えると、X 線と電子の相互作用は、粒子同士の衝突と同じく、エネルギーと運動量の保存法則を満たす。

この実験の結論: X 線はエネルギーと運動量を持った**粒子**(光子)である。

## 光の二重性

X線や光などは**波動**（電磁波）の性質を示すと同時に、エネルギーと運動量を持つ**粒子**（光子）としてもふるまい、**波動と粒子の二重性**を示す。

光子のエネルギー

$$E =$$

$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{Js}$  : プランク定数

光子の運動量

$$p =$$

波の基本式  $c =$  も成り立つ

(1905 Einstein)

【問】波長 400nm の紫の光の光子が持つ運動量はいくらか。それは電子（質量  $9 \times 10^{-31} \text{kg}$ ）がどのぐらいの速さで運動しているときの運動量に相当するか。

## 物質波の理論 (1923 de Broglie)

仮説

波動と粒子の二重性はすべての素粒子にもそなわっているのではないだろうか。

電子などの素粒子にも波動としての性質が見出されるはずである。

|          | 光（電磁波） | 電子（素粒子）     |
|----------|--------|-------------|
| 粒子としての性質 |        |             |
| エネルギー    | $E =$  | $E =$       |
| 運動量      | $p =$  | $p =$       |
| 波長       | $=$    | $\lambda =$ |
| 波動としての性質 |        |             |

プランク定数  $h$  が二重性の橋渡しをしていることに注目しよう。

電子波の実在は電子線回折の実験(1927)で確かめられた。波動性は一般の物質粒子にもそなわっており、**物質波**とよばれる。その波長をド・ブロイ波長という。

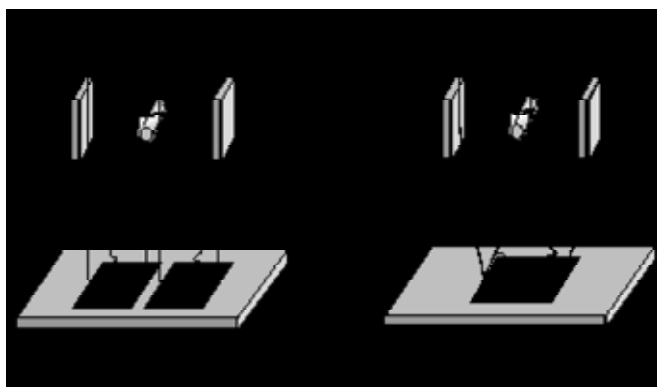
波動性と粒子性は共に実験事実である以上、既成の概念は捨てて二重性として認めなければならない。二重性を奇妙に感じるのは「波動」「粒子」のマクロなイメージをそのままミクロの世界まで延長して考えるからである。それらのイメージは理解を助けるためにある側面を強調したものにすぎない

【問】「茶筒は丸いか四角いか」という問いには何と答えればよいか。

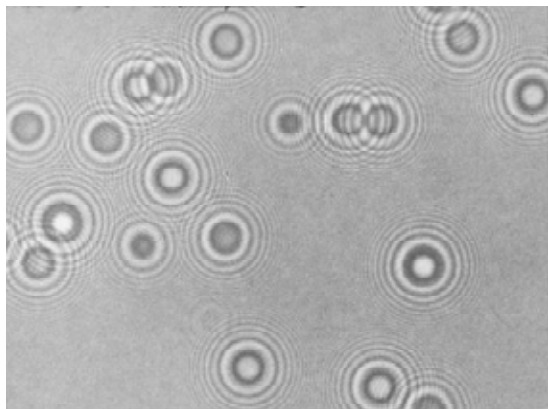
【問】電圧  $V$  で加速された電子(質量  $m$ 、電荷  $-e$ )の電子波の波長  $\lambda$  はいくらか。 $V = 2 \times 10^3 \text{V}$ 、 $m = 9 \times 10^{-31} \text{kg}$ 、 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  として数値も求めてみよ。

**発展** 電子の波動性を示す実験(日立基礎研究所: 外村彰氏らのグループ)

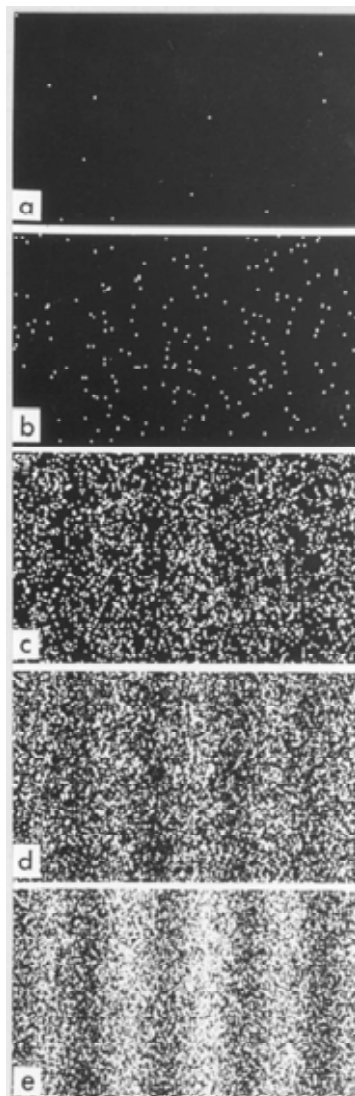
精密な電子顕微鏡で「電子波の平面波」を作り出し、電子線バイプリズムという装置で屈折させる。下方の検出器で電子は粒子として検出されるが、その分布は干渉縞を示す。



左下の写真は薄い膜にあいた小さな穴によって電子波が干渉して生じた、同心円状の干渉縞である。

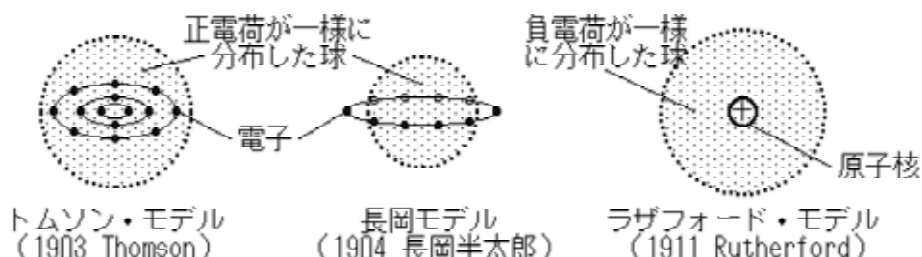


日立基礎研の  
Web ページから



《c》原子の構造 (教科書 P.209 ~ 213、243 ~ 249、問題集 P.252 ~ 257)

原子モデル



ラザフォードは 線 (高速の  $\text{He}^{2+}$ ) を金箔に照射する実験で原子核を発見した。

力学的に安定で、原子の規則正しいスペクトルをうまく説明できるモデルはなかなか得られなかった。

原子と原子核

|     | 半径 | 質量 |
|-----|----|----|
| 原子  |    |    |
| 原子核 |    |    |

【問】仮に原子を半径 10m の球にたとえると原子核の大きさはどのくらいになるか。

【問】炭素原子核の質量は  $2 \times 10^{-26} \text{kg}$  である。この原子核を半径  $3 \times 10^{-15} \text{m}$  の球と考えて、その密度を求めよ。もし、これと同じ密度の一円玉 (半径 1 cm、厚さ 1 mm) があつたらどれほどの質量になるか。

ボーアの理論 (1913 Bohr)

原子は原子核とその周りを軌道運動する電子からなり、次の二つの条件を満たす。

**量子条件** 原子核のまわりを回る電子は次の条件を満たすとびとびのエネルギー状態 (エネルギー準位) だけをとる。これを **定常状態** と呼ぶ。

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

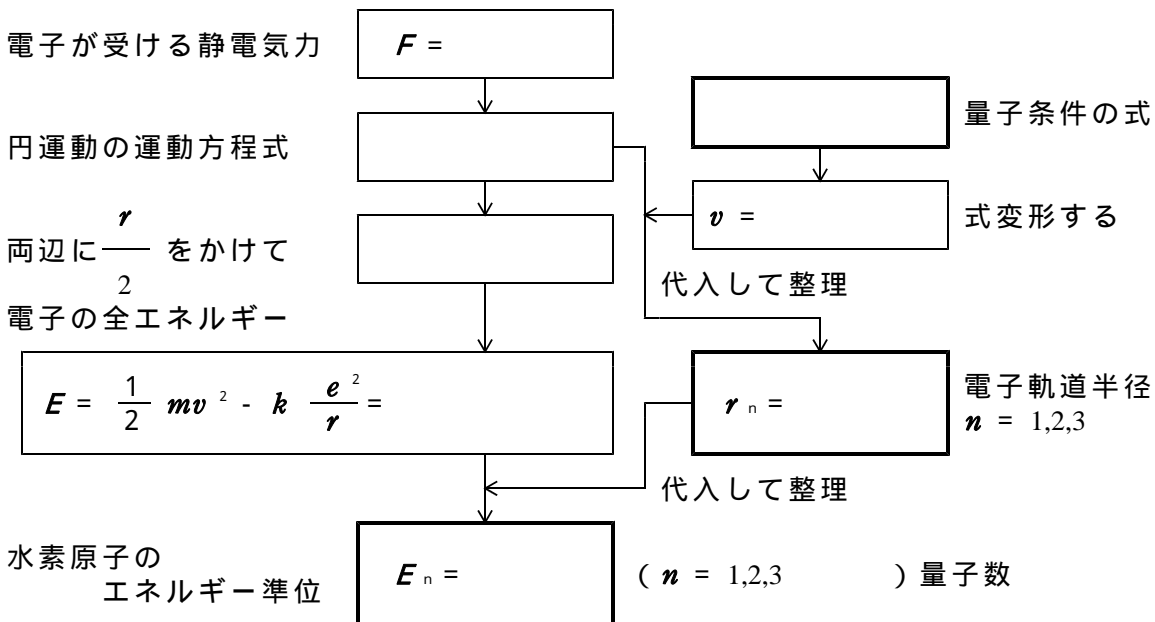
**振動数条件** 電子は一つの定常状態から他の定常状態へ移るときにのみ、そのエネルギー差に相当する **光子** (電磁波) を放出または吸収する。

2つのエネルギー準位  $E_m < E_n$             エネルギー保存則  
 放出 / 吸収される光の振動数

【問】ボーアの量子条件を電子波のド・ブローイ波長  $\lambda$  を用いて表し、その意味を考えよ。

## 水素原子のエネルギー準位

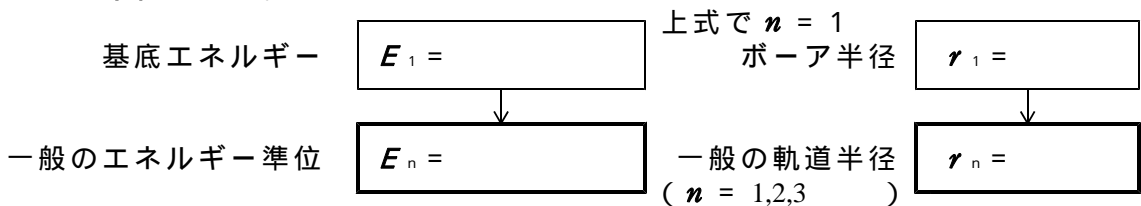
水素原子は電荷  $+e$  の原子核と、電荷  $-e$  の1個の電子から成る。電子は運動の法則とボーアの条件を満たしながら半径  $r$  の円軌道上を等速円運動するものとする。電子の質量を  $m$ 、クーロンの法則の比例定数を  $k$  とする。



原子は量子数  $n$  に応じたとびとびの値のエネルギーしか持つことができない

## 水素原子の基底状態

原子はエネルギーを放出して最低のエネルギー状態をとろうとする傾向がある。 $n = 1$  の状態がこれにあたり、**基底状態**という。基底状態の水素原子の半径を**ボーア半径**と呼ぶ。



【問】水素原子の基底状態は

$$E_1 = -21.8 \times 10^{-19} \text{ J} = -13.6 \text{ eV}$$

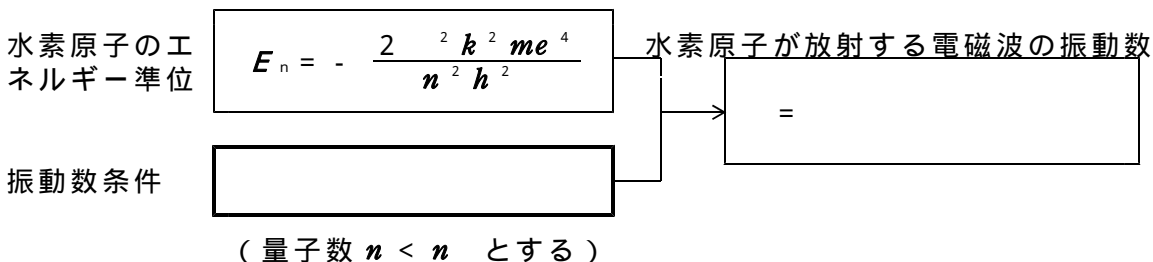
$$r_1 = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$$

である。これをもとに右表の空欄の各数値を求めよ。

|        | $n$ | エネルギー準位 $E_n$ | 軌道半径 $r_n$                       |
|--------|-----|---------------|----------------------------------|
| 基底状態   | 1   | - 13.6eV      | $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ |
| 第一励起状態 | 2   |               |                                  |
| 第二励起状態 | 3   |               |                                  |

## 水素原子のスペクトル

励起状態にある原子は電磁波（光）を放射してより低いエネルギー状態に移る。このときに出る光の振動数は振動数条件に支配される。



【問】19世紀末からの研究で水素原子のスペクトルは光の波長を  $\lambda$  とするとき、

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

というスペクトル公式に従うことが知られていた。この式をボーア理論の立場から証明し、定数  $R$  を求めよ。

【問】水素原子が  $n = 4$  のエネルギー準位から  $n = 3, 2, 1$  の準位へ移るときに放射する光の波長はそれぞれいくらか。また、それらは赤外、可視、紫外のいずれの領域に属するか。リュードベリ定数  $R = 1.1 \times 10^7 [1/m]$  とする。

## 一般の原子の構造

原子番号  $Z =$  中性原子のもつ電子数 = 原子核内の陽子数

どの原子もとびとびのエネルギー準位をもっている。

どの原子のスペクトルも元素に固有の線スペクトル（特定の振動数）になる。

それぞれの軌道を同時に占めることのできる電子の個数には軌道ごとに制限があり、基底状態では中心に近い軌道から順に席が埋められる。電子殻

原子の化学的性質は主に最外殻電子によって支配される。周期律

《d》原子核 (教科書 P.252 ~ 274、問題集 P.258 ~ 266)

原子核の構成

核子  $\left\{ \begin{array}{l} \text{陽子 } p : \text{電荷 } + e、\text{質量 } m_p = 1.6726231 \times 10^{-27}\text{kg} \\ \text{中性子 } n : \text{電荷 } 0、\text{質量 } m_n = 1.6749286 \times 10^{-27}\text{kg} \text{ (1932 Chadwick)} \end{array} \right.$

原子番号  $Z$  :  質量数  $A$  :

原子の化学的性質はほとんど最外殻電子によって決まるので、原子のもつ電子数、すなわち原子番号  $Z$  が分類上重要である。 $Z$  が同じで質量数  $A$  が異なる(つまり中性子数だけが異なる)原子核を**同位核**、同位核をもつ原子を**同位体** isotope という。

天然元素は同位体の混合物で、その割合を**存在比**という。



【問】 を陽子、 を中性子とみて、図の原子核の核種記号を書け。



原子質量単位 : 炭素  $^{12}\text{C}$  の原子 1 個の質量の  $1/12$ 。  $1 \text{ u} = 1.6605402 \times 10^{-27}\text{kg}$

原子量 : 原子質量単位で表した各元素ごとの原子の質量の重みつき平均値。

質量欠損 (結合エネルギー)

右のように原子核の質量は、構成要素の核子の質量を合わせたものより小さい。核子が結合して原子核を作るとエネルギーを放出してより安定な状態となり、エネルギーの減少が質量に反映したと考えられる。

$$\begin{array}{r} \text{陽子の質量 } m_p = 1.00728 [\text{u}] \\ \text{中性子の質量 } m_n = 1.00867 [\text{u}] \\ \hline 2m_p + 2m_n = 4.03190 [\text{u}] \\ -) \text{ } ^4\text{He の質量} = 4.00150 [\text{u}] \\ \hline \text{質量欠損 } 0.03040 [\text{u}] \end{array}$$

質量とエネルギーの等価性 (1905 Einstein 特殊相対論)

$$E = \text{  }$$

光速度  $m$  : 質量 [kg]、 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$

質量もエネルギーの一形態で、上式を用いて質量をエネルギーに換算できる。

【問】  $1 \text{ u}$  は何 J のエネルギーに相当するか。また何 eV か。  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

【問】 ヘリウムの結合エネルギーは 1 核子あたり何 eV か。上記の質量欠損から求めよ。



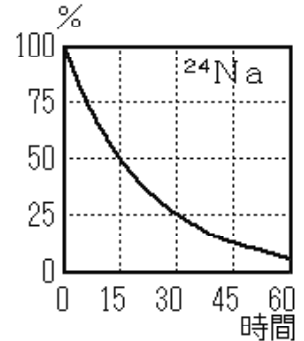
**放射性崩壊**：原子核（放射性元素）が放射線を出してエネルギーを失う

| 放射線 | 構成要素 | 電荷 | 透過性 | 電離作用 | 放出過程 | 原子核の変換 |   |
|-----|------|----|-----|------|------|--------|---|
| 線   |      |    |     |      |      | Z      | A |
| 線   |      |    |     |      |      | Z      | A |
| 線   |      |    |     |      |      |        |   |

放射性崩壊の式  $N =$     $N$ ：原子核の個数  
 $N_0$ ：もとの個数  
 $T$ ：半減期

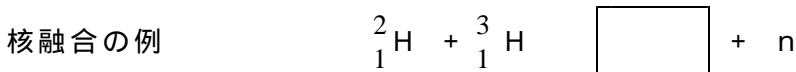
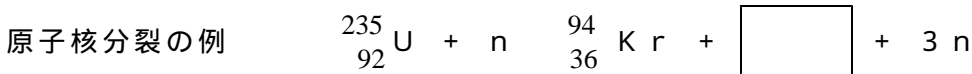
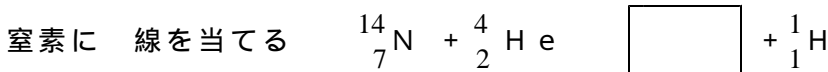
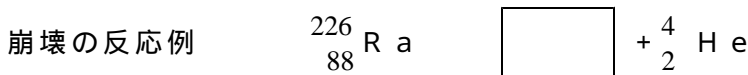
半減期  $T$ だけ時間が経つと、放射性原子核の半数が崩壊して他の元素に変わる。

【問】右図のナトリウム 24 の半減期は何時間か。90 時間経つと  $^{24}\text{Na}$  原子核の数ははじめの何分の一になるか。



**原子核反応式**：核の変換の様子を化学反応式にならって核種記号で表したもの。

反応の前後で電気量とエネルギー（質量）は保存する。  
 したがって、式の両辺で原子番号  $Z$  の和と質量数  $A$  の和は一致する。

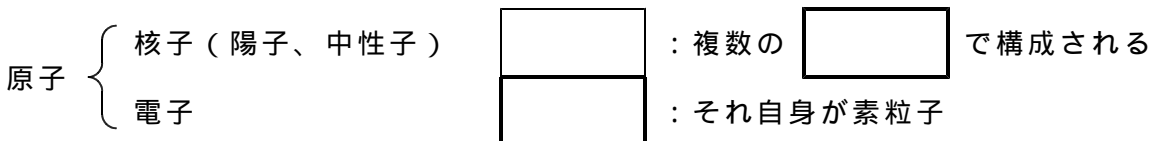


【問】原子核変換に伴って結合エネルギーの差に相当するエネルギーが放出される。教科書 P.265 図 12 の結合エネルギーのグラフを見て、核分裂でも核融合でも核エネルギーが取り出せる理由を考えよ。

《e》素粒子 (教科書 P.275 ~ 280、問題集 P.258 ~ 266)

ミクロの世界の階層

分類名



ハドロンの仲間には中間子 (メソン) も含まれる。  
 ハドロンのうち核子 (陽子、中性子) の仲間をバリオンと呼ぶことがある。

素粒子の分類 内部に構造を持たない粒子を素粒子と呼ぶ。

物質粒子 (標準模型)

| 分類名  | クォーク   |        | レプトン  |       |
|------|--------|--------|-------|-------|
| 電荷   | + 2e/3 | - 1e/3 | 0     | - e   |
| 第3世代 | t      | b      |       |       |
| 第2世代 | c      | s      | $\mu$ | $\mu$ |
| 第1世代 | u      | d      | e     | e     |

各粒子にはその反粒子が存在する。反粒子は電荷とスピンの逆符号である。

ハドロンの構成例  
 陽子  $p = (uud)$   
 中性子  $n = (udd)$   
 \*中間子 =  $(u\bar{d})$

クォークは単独では取り出せない粒子である。

基本的な力とゲージ粒子

素粒子の相互作用は**ゲージ粒子**の交換によるものと解釈できる。

| 力の種類 |      | 強さの比       | 到達距離         | 媒介するゲージ粒子              |
|------|------|------------|--------------|------------------------|
| 強い力  |      | 100        | $10^{-15}$ m | グルーオン                  |
| 電弱力  | 電磁気力 | 1          |              | 光子                     |
|      | 弱い力  | $10^{-3}$  | $10^{-17}$ m | ウィーク・ボゾン $W^+, W^-, Z$ |
| 重力   |      | $10^{-37}$ |              | 重力子 (グラビトン) 未発見        |

強い力は核子の結合を支配する。核エネルギーは強い力による位置エネルギーの差額である。弱い力は 崩壊などに関係する。

「標準理論」では電弱力と強い力が統合される。その先はまだ研究中。

質量を与える粒子 (ヒッグス粒子) の存在も予想されているが未発見。