

量子力学と原子のスペクトル

□ 目的

原子の輝線スペクトルより原子のエネルギー準位間のエネルギーを求める。

□ 実験用具

分光器、光源装置、光源 (放電管)、蛍光灯

□ 解説

原子は原子核と電子より構成されており、電子の運動状態と原子核に対する位置により原子の持つエネルギーが異なる。これ自体は驚くべきことでは無く、古典力学でも理解できる。古典力学的には電子は中心の原子核の回りを回っていると考えられる。原子はあたかも小さな太陽系である。そして、軌道が大きい程原子のエネルギーは高い。

このように考えると古典力学的原子像の一つの矛盾が明らかになる。軌道が小さい程エネルギーは低く、一番エネルギーが低いのは電子と原子核がくっついた状態ということになる。よって古典力学ではいずれは全て原子はひろがりを持たないつづれたものになってしまう。言い替えれば、大きさを持った原子は安定には存在しえない。これは明らかに現実と矛盾しており、古典力学の限界である。

量子力学では原子には最低エネルギー状態 (基底状態) が存在し、その状態では原子はオーダーとして 10^{-10} m 程度の大きさを持つ。これで安定な原子が存在することが説明され、理論的に求められた大きさは実在の原子の大きさと一致する。量子力学的な原子の一つの重要な特徴は、

原子がとる状態のエネルギーは離散的である

ということであり、このとることのできるエネルギー (エネルギー準位) は理論的に求められる。今回の実験では原子がとる状態のエネルギーが離散的であり、そしてそのエネルギーが理論的に求められたものと一致することを確かめる。

原子の状態はエネルギーの一番低い基底状態が安定状態であり、刺激を加えなければ自然にその状態に原子は落ち着く。逆に、エネルギーが高い状態 (励起状態) にある場合は、自然に、よりエネルギーの低い状態へと変化 (遷移) する。エネルギーの低い状態へと遷移した場合にはエネルギー保存則より、エネルギー差の分のエネルギーが原子より放出されなければならない。それが光 (量子力学的には光子) として放出された場合に可視光領域にあれば見ることができる (図 1 参照)。炎色反応、オーロラ、蛍光、実験「電子の電荷と質量の比」で観測される光、などはこの現象の例である。

放出された光の波長と原子の状態のエネルギー E_1, E_2 は光量子仮説を用いて以下のよ

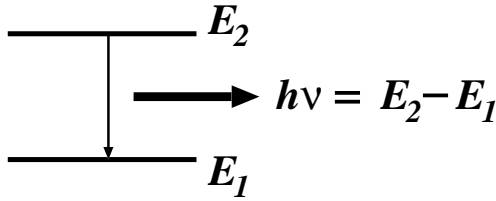


図 1 エネルギーの異なる状態間の遷移によって放出される光子。

うに関係付けられる。

$$E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{1}$$

ここで $h = 6.626 \times 10^{-34}$ [J·s] は Planck 定数、 ν は振動数、 $c = 2.998 \times 10^8$ [m/s] は真空中の光速、 λ は光の波長である。原子のエネルギー準位が離散的なことは原子の放出する光の波長が離散的であることに反映される。

本実験で使うナトリウム原子 (Na) の状態 (準位) とそのエネルギーを一部以下に示す。

準位	エネルギー [eV]
7D	4.860
6D	4.759
5D	4.592
6S	4.510
4D	4.283
5S	4.116
4S	3.191
3P	2.104
3S	0

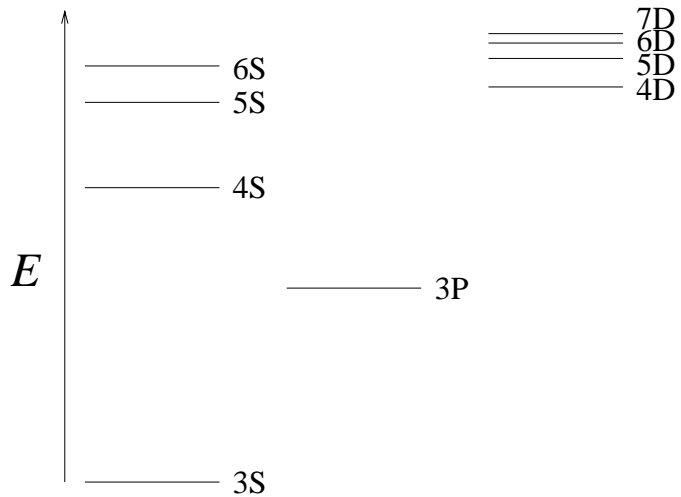


表 1 ナトリウム原子のエネルギー準位

この実験ではエネルギーの単位として eV(エレクトロン・ボルト、電子ボルト) を使うので簡単に説明する。eV は電子 1 個に対する電位差 1V 分のエネルギーであり、J (ジュール) に以下のように変換される。

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \tag{2}$$

原子中の電子の状態を変えるエネルギースケールは数 eV であるので、原子の物理を扱うには便利な単位である。化学反応は原子内の電子状態を変えることにより生じるので、こ

のエネルギースケールは化学反応のエネルギースケールでもある。これはたとえば電池の起電力が数 V であり、数 100V のものはないことにも反映されている。

元素のスペクトルが離散的であることは既に 19 世紀に知られており、その波長はいろいろな元素について測定されていた。しかし、これは本質的に量子力学的な現象であり、19 世紀には理解する術が無かった。量子力学が生まれたのは 20 世紀初頭であるからである。量子力学は確立するまでに 20 年間程度を要したが、早い段階で正しいと皆が思った理由は原子のスペクトルを定量的に説明できたからである。19 世紀に集められたデータは大きな役割を果たしたのである。

□ 実験方法

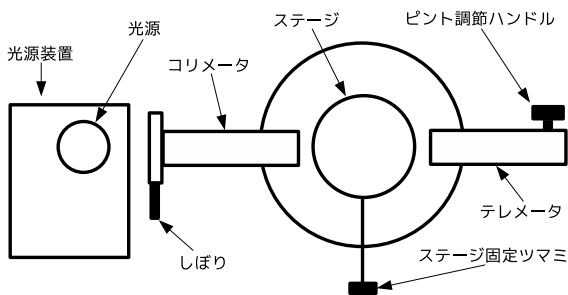


図 2 分光器と光源を上から見た図

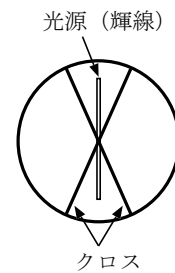


図 3 テレメータから覗いた図

- (1) 図 2 のように光源装置を分光器のコリメータ前に配置し、分光器のコリメータとテレメータが直線状に並ぶようにする。
- (2) 光源 (ナトリウム管) が光源装置にセットされていることを確認する。光源装置の電源プラグを入れてスイッチを ON にし、スタートボタンを 5 秒程度長押ししてナトリウム管を点灯する。ナトリウムのスペクトルが良く見えるようになるまでには時間がかかるので、早めに点灯させておくと良い。
- (3) デジタルカウンターが分光器に接続されていることを確認し、電源プラグを入れてスイッチを ON にする。
- (4) ステージがまだ固定されていないければ、ステージ上の回折格子 (グレーティング) がコリメータに垂直になるように分光台のステージ固定ツマミを用いて固定する。固定した後はステージを回転させないこと。
- (5) コリメータとテレメータの中心軸が一直線上に乗るようにテレメータを回転させ、光源がテレメータを通して見えることを確認する。光源が見えない場合はコリメータしぼりをゆるめてみる。光源が見えたら、光源がはっきりと見えるようにテレメータのピント調節ハンドルで焦点を合わせる。さらに、光源が細く見えるようにしぼりを調

整する (図 3 参照)。細すぎるとスペクトルが暗すぎて見づらく、逆に太すぎるとまぶしくなるので、適宜調整すること。

- (6) テレメータを覗いて図 3 のように光源がクロスの中心に来るようにテレメータを回転し、デジタルカウンタをリセットして 0 にする。ここがテレメータの中心となる。
- (7) 中心からテレメータを回転し、ナトリウム原子の離散的な虹のような光が見えることを確認する。一つ一つの光の線を輝線、輝線の集まりをスペクトルと呼ぶ。角度が大きくなるにつれ、同じ色の線 (スペクトル) の繰り返しになる。これを角度が小さい方から回折スペクトルの次数 $n = 1, 2, 3, \dots$ と呼ぶ。
- (8) 次の問に答える。

問

なぜ輝線は虹のようにつながっていないで分かれているのか？

- (9) 中心軸に一番近い次数 $n = 1$ のスペクトルについてそれぞれの輝線を一つ一つテレメータのクロスを中心に合わせ、角度を読み取り表に角度 α_1 として記入する (単位は度、分、秒である)。その際、自分でわかりやすいように輝線に名前を付けること (緑 1、G1、*etc.*)。輝線は最低でも 5 本は見えるはずである。
- (10) テレメータを中心に対して反対に回転し、先ほどと反対側の同じ次数のスペクトルの輝線の角度を測定し、 α_2 として記入する。測定が終わったら光源装置の電源を切る。
- (11) $\alpha_{1,2}$ について度の単位を以下の式のように 10 進法に変換して記入する。

$$X \text{ 度 } Y \text{ 分} = X + \frac{Y}{60} \text{ [度]}$$

例えば、5 度 11 分 30 秒 = 5 度 11.5 分 = 5.192 度である。

- (12) それぞれの輝線について回折角 α を $\alpha_{1,2}$ (10 進法) の平均 $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ として求める。
- (13) まず共通の定数 C_λ を下式を用いて計算しておき、それぞれの輝線について波長 λ を求める。

$$C_\lambda = d [\text{m}] \times \left(\frac{\pi}{180 [\text{度}]} \right), \quad \lambda = C_\lambda \times \alpha \quad (3)$$

ここで d は回折格子の間隔であり、グレーティングに記してある。

- (14) それぞれの輝線について、光子の持つエネルギーを光量子仮説 (1) 式より次のように求める。

$$\text{光子のエネルギー} \quad \Delta E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.240 \times 10^{-6} [\text{eV} \cdot \text{m}]}{\lambda} \quad (4)$$

- (15) 光子のエネルギーは (1) 式によるとナトリウム原子のエネルギー準位間の遷移と対応している。どの準位間の遷移が見つけれよ (エネルギー準位は表 1 に示してある)。
- (16) 光源として蛍光灯を設置する。蛍光灯のスペクトルを見て、ナトリウム原子のスペクトルと定性的に異なる点を述べよ。
- (17) 蛍光灯のスペクトル内に強い輝線が見えるはずである。明るいもの 3 本について角度 α_1 を測定し、波長を計算する。
- (18) 以下の水銀の輝線スペクトルの一部を参考にして、蛍光灯の輝線について考察せよ。

色	波長 [nm]
紫 1	404.66
紫 2	435.83
青	491.61
緑 1	546.08
緑 2	567.71
黄	579.07
橙	614.95

水銀原子の輝線スペクトル。原子の外側にある最も束縛の弱い 2 電子の状態の変化によって遷移が生じる。外側の 1 電子の状態が変化するナトリウム原子の場合に比べて 2 電子の状態が変化するため複雑になる。

□ 付録：回折格子における干渉現象

回折格子の原理は実験「光の干渉」のテーマである。ここではそれについて簡単にまとめる。格子間隔が d であるとき、格子で波長 λ の光が強めあう条件は以下の通りである。

$$d \sin \alpha = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

これは、格子の一本一本を透過する光が全て同位相で強め合う条件である (図 4 参照)。この式の持つ意味を考えてみよう。光が強め合う角度 α は波長 λ によって異なる。よって、角度によって違う波長の光が見えるのであり、これが実験で観測される輝線である。

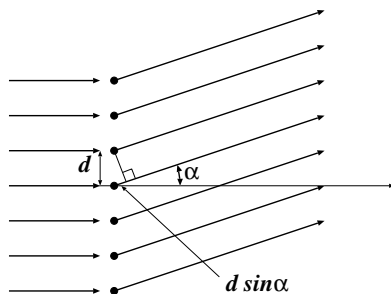


図 4 格子を透過する光とその光路の差

本実験では簡単のために $n = 1$ の場合を用いている。また、角度が小さい場合には $\sin \alpha \approx \alpha$ であるので、 $\sin \alpha$ を α で近似できる。たとえば、 $\sin \alpha$ と α の差は $\alpha = 10$ 度で割合として 0.5% 程度である。ただし、この式はラジアン表示で成り立つので、 $180 [\text{度}] = \pi [\text{ラジアン}]$ を用いて単位を変換する必要がある。よって (3) 式が強めあう条件として得られる。