

## 2 はじめに

20 世紀初頭になると、人々は古典物理学が完璧ではないことに気が始めました。1900 年に、ケルビン卿は「熱と光の動力学理論の 19 世紀の雲」と題したスピーチを行い、いくつかの問題がある現象を指摘しました。その頃、いくつかの重要な科学的発見が行われました（エネルギーの量子化、波粒二重性など）、これらの発見は量子力学の発展に必要な重要な情報を提供しました。この章では、これらのトピックの一部をカバーします。

### 2.1 ブラックボディ放射

1900 年ごろ、ブラックボディによって放射される放射の量を、周波数 ( $\nu$ ) の関数として予測するために古典物理学を使用します。

$$d\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \underbrace{k_B T}_{\text{平均エネルギー}} d\nu \dots \textcircled{1}$$

↑  
与えられた周波数  $\nu$ 、平均エネルギーに関連する量<sup>2</sup>  
↓  
温度  $T$

放射エネルギー密度（単位体積当たり）

①は図 1 の赤い線を予測します。

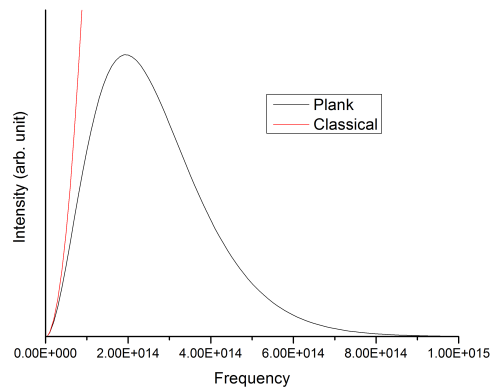


Figure 2: Black Body Radiation

言い換えれば、この古典物理学に基づくモデルは、すべての物体が高い周波数の光（紫外線以上）を放射すると予測します。この教科書を読んでいるあなたがまだ生きていることから、あなたは自分自身に納得させることができます。つまり、古典物理学はブラックボディ放射を正しく説明できないのです。

<sup>2</sup> これはこの教科書の第 2 部で説明されています

古典的なモデルの失敗は「紫外線カタストロフ」と呼ばれています。この問題への Planck の解決策は量子化でした。

$$\int f(x)dx \rightarrow \sum_i f(x_i)$$

↑                    ↑

Classical      量子化

統計力学の結果を使用します（第 2 部から）

$$\int E f_r(E) dE \rightarrow \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

||  
 $k_B T$

したがって、① は次のようになります。

$$d\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} d\nu \dots \textcircled{1}'$$

宿題：① と ①'（スプレッドシートを使用して）を使って図 1 を作成してください。ヒント：積分は累積分布のためのものであり、被積分関数は分布のためのものです。したがって、公式をそのまま使用してください。

Planck によれば、有害なガンマ線に襲われる可能性は低くなります。これは、物理化学を学びたい読者にとって良いニュースです。さらに、この公式は実験結果を正しく予測します。

## 2.2 光電効果

古典物理学では、光を伝播する電磁波として扱います。

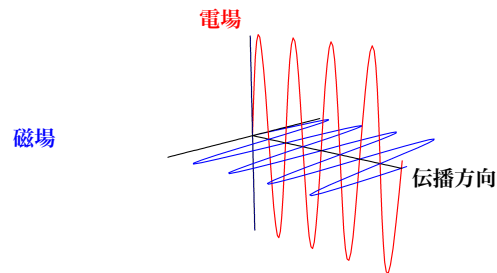


Figure 3: 電磁波

この概念に基づいて、次の実験が行われました。

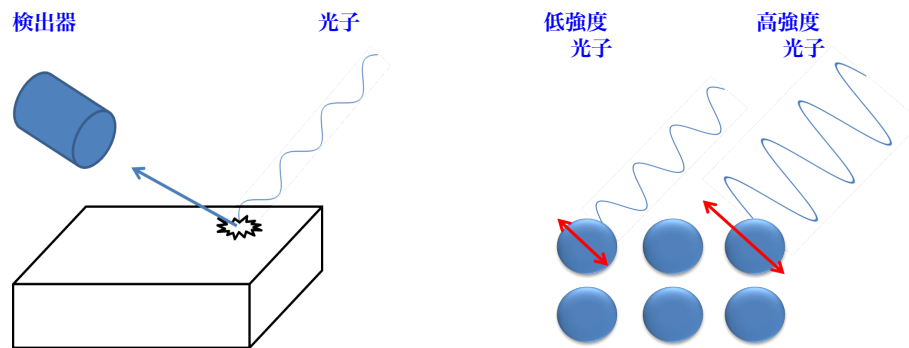


Figure 4: 光電効果

予測

周波数を変えずに高い強度の光 (波) を当てる → よりエネルギーッシュな  $e^-$  が生成 →  $e^-$  の運動エネルギーが高い

結果

周波数を変えずに高い強度の光 (波) を当てる → 同じ運動エネルギーを持つ  $e^-$  ⇒ ⇐

周波数の短い光 (波) を当てた場合は大きな運動エネルギーを持つ  $e^-$  が放出される事を観測する。

### アインシュタインの解決策

各光子は周波数に比例したエネルギーを持っています  $E = h\nu$

↑  
光 粒子

⇓

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \phi$$

↑  
表面から  $e^-$  を取り除くのに必要な最小エネルギー  
 $\phi$  は表面に依存し、通常は仕事関数と呼ばれます。

この実験は、光が波のような性質と粒子のような性質を同時に持っていることを示しています。

## 2.3 水素の線スペクトル

20 世紀初頭、炎分析がサンプル内の元素の種類を特定するために使用されました。ただし、当時の科学者は炎分析がどのように機能するかを知りませんでした。

<< あなたはこれらを一般化学 I で見たことがあります。>>

実験結果を使用して、科学者たちは線スペクトルに合った式を考案しました。

$$\begin{array}{ll} \text{バルマー} & \nu = 109,680\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)cm^{-1} \\ \text{ライマン} & \nu = 109,680\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right)cm^{-1} \\ \text{パッシェン} & \nu = 109,680\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right)cm^{-1} \end{array}$$

↓ 一般化

$$\nu = \frac{1}{\lambda} = 109,680\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)cm^{-1}$$

↖ ライドバーグ  
公式

## 2.4 ボーアの原子模型（水素）

ボーアの原子模型では、電子（ $e^{-1}$ ）が太陽系に似た円軌道を描いて陽子の周りを公転します。

$e^{-1}$  には 2 種類の力が働きます：引力（ $\oplus \ominus$ ）  
および  
遠心力

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

Einstein

光は波と粒子の  
両方として  
分類できます

=>

de Broglie

全ての物は波と粒子の  
両方として  
分類できます  
 $\lambda = \frac{h}{mv}$

=>

Bohr

電子は波でもあるため、  
円周は  $\lambda$  の整数倍  
でなければなりません。

$$2\pi r = n\lambda$$

$\Downarrow$

$$m_e v r = \frac{nh}{2\pi}$$

$\Downarrow$

$$r = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e e^2}$$

&

$$E_n = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

HW

Derive these ->

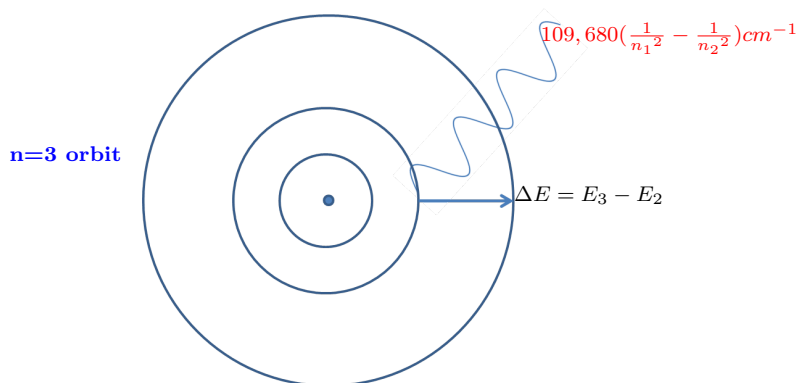


Figure 5: ボーア模型

## 2.5 不確定性原理

1920 年ごろ、ハイゼンベルクは次のように示しました。

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

不確定性原理の基本的な概念はフーリエ変換と密接に関連しています。証明は付録にあります。後で異なる視点から再度取り上げます。