

# 光の実験 光の粒子性の検証

科学への誘いセミナー

河野能知

お茶の水女子大学 理学部物理学科\*

2014.12.21

## 1 物理の研究

物理学の目的は、自然界の様々な現象について故そのような現象が起こるのか、どのような法則に従っているのかを解明することである。

高校で習うニュートンの運動の法則というのは、身の回りで起こる「物体の運動」という側面に着目して、物体に働く力とそれによって物体が得る加速度の間に法則性があるということを表している。これによって、与えられた状況で物体がどのような軌跡を描いて運動するかを記述することができる。しかし、運動の法則は「物体の運動」という側面のみ着目した際に成り立つ法則である。そもそも何故物体の間に力が働くのか、物体が壊れずに形を保っていらられるのか、材質によって硬さが違うのは何故かという側面については説明されていない。また、普通運動というと暗黙のうちに空気中での運動を想定してしまうが、液体や固体の中でも「物体」は運動するのかというとニュートンの法則だけで、これらの運動を理解するのは難しくなる。液体中では空気中より抵抗が大きく、また重力に加えて浮力の影響も無視できないため、運動の法則だけでなくこれらの要素を正確に理解することがより重要になってくる。固体中の運動というと想像しにくいですが、金属中で電子は自由に運動することができ、マクロには電流という観測可能な効果として現れるのである。

これらはニュートンの運動の法則を否定するものではないが、実際に身の回りで起こっている現象を理解しようとするとき、運動という側面だけでなく様々な側面を理解する必要があり、それぞれが物理としての研究対象になり得ることを示している。これでは、それぞれの側面ごとに別々の法則があるようであるが、物理のもう一つの方向性はこれらの一見別々の法則に見えるものを関連付けたり、より基本的な概念に基づいて統一的に理解するというものである。

大学の物理学科で行っている講義や研究も、このような立場に基づくものである。高校で習う力学、電磁気学、熱力学、波動、光等の内容をさらに基礎から展開して、より広い現象を扱っている。

---

\*kono.takanori@ocha.ac.jp

## 2 素粒子物理の研究

### 2.1 自然界の最も基本的な構成要素の探求

全ての物質は原子からできているというのは、既に一般常識になった感がある。原子は約100種類あり、原子番号によって識別できる。原子番号  $Z$  の原子には中心に電荷  $+Ze$  を持った原子核があり、その周りに  $Z$  個の電子が回っている。電子1個の電荷はちょうど  $-e$  であり、原子全体で見れば電氣的に中性である。原子核はさらに細かく分解でき、中に  $Z$  個の陽子（電荷  $+e$ ）と  $N$  個の中性子（電荷ゼロ）と呼ばれる粒子から成り立っている。中性子数  $N$  は概ね  $Z$  に等しいが原子番号が大きくなるに従い、安定な原子核では  $N > Z$  となっている。図1のような描像である。

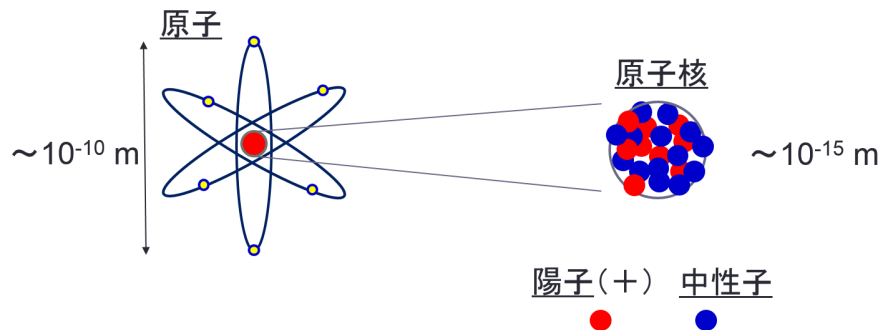


図1: 原子の構造。中心にある原子核の周りを電子が複数回っている。原子核はさらに陽子と中性子から構成されている。

固体は原子が多数くっついた状態、気体は原子が少数くっついた分子の集合である。液体はその中間のようなものである。

このような理解で良いが、細かいことを考え始めるといくつか疑問が生じる。

- 粒子同士にはどのように力が働いているのか。
- 電子と原子核では大きさや質量に何故大きな違いがあるのか
- 陽子と中性子は全体で正電荷が集まった状態なのに、何故反発し合わないのか
- 図1では、空っぽの空間が大きくなっているが、そこには何も存在しないのか

これまでの素粒子物理の研究で、陽子や中性子を構成するさらに小さい素粒子（クォーク）の存在やニュートリノと呼ばれる粒子が発見されている。ミクロな世界でのみ作用する強い核力、弱い核力という相互作用が存在することが分かっている。さらに、小さな世界では新たな粒子や相互作用があるのではないかと、現在も研究が行われている。

## 2.2 量子力学

ミクロな世界では、ニュートン力学で記述するような質点の運動という描像は最早成り立たないことが分かっている。原子や電子、原子核といったものは粒子的な性質を持つが、同時に波動な振る舞いも見せる。

素粒子を粒子性と波動性を合わせ持った存在として扱う理論的な枠組みが量子力学である。量子力学によると、逆に光のような波動的な性質をもつものも細かく分解していくと粒子的な性質を持つことになる<sup>1</sup>。

粒子的な性質というのは、固有の質量やエネルギー ( $E$ )、運動量 ( $\vec{p}$ ) といった量を持ち、一つ、二つと数えられるものであるということである。一方、波動的な性質というのは空間的に広がって存在して波の回折や干渉のような現象を引き起こすことである。波動としての振動数 ( $\nu$ ) と波長 ( $\lambda$ ) は粒子としてのエネルギー、運動量と以下のような関係がある。

$$\begin{aligned} E &= h\nu \\ |\vec{p}| &= \frac{h}{\lambda} \end{aligned}$$

## 3 微弱光の観測と光の粒子性の検証 (実験)

### 3.1 概略

量子力学によれば、ミクロな世界では物質を構成する粒子も光のように波の性質を持つものも同等に扱え、共に粒子性と波動性の両方を持っていると考えられている。光の波動性については、光の回折、屈折や干渉という現象を通じて馴染みがあると思う。ここでは、LEDを用いて非常に弱い光を作り観測することで光の粒子性を検証してみることにする。

### 3.2 LED を点滅させる

LED 駆動回路にファンクション・ジェネレーターから適当な周波数の波形を入力して LED が点滅することを確認する。点滅の様子を目で確認できるように、周波数は数 1 ~ 10 Hz に設定する。

LED の発光量は、LED に流れる電流に比例する。この実験で用いる回路では外部から電圧値を設定して、それに比例した電流を LED に流すようになっている。LED の特性から電流は最大 20 mA までとする。外部から与える電圧  $V_{in}$  V と LED に流れる電流  $I_{LED}$  mA は

$$I_{LED} [\text{mA}] = \frac{3V_{in} [\text{mV}]}{200 [\Omega]}$$

の関係にある。したがって、設定する電圧の最大値は 1200 mV 以下にする。

矩形波、sin 波等様々な波形を入力して、波形と点滅の様子 (周期や強度) が一致することを確認する。

---

<sup>1</sup>詳しい話は大学で学んで下さい。

### 3.3 測定の準備

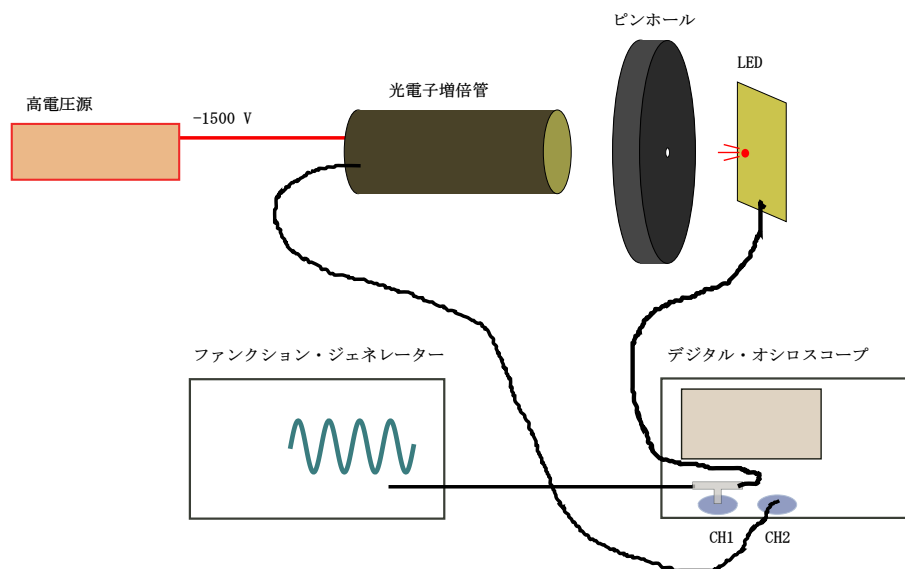


図 2: 測定のセットアップ。ファンクション・ジェネレーターから任意の波形の電圧を LED 回路に入力して LED から光をピンホールを通して光電子増倍管で測定する。入力波形と出力をデジタル・オシロスコープで観測する。

図 2 のように、LED 回路、ピンホール、光電子増倍管を光軸が合うように配置してファンクション・ジェネレーター、オシロスコープ及び高圧電源と接続する。光電子増倍管に余計な光が入射しないように、全体を暗箱に入れる。LED に電圧を入力して、それに応じて光電子増倍管からの出力が得られることを確認する。

ファンクション・ジェネレーターで時間変化する電圧値を生成して LED 回路に入力する。この入力波形と光電子増倍管からの出力を同時にデジタル・オシロスコープで観測する。デジタル・オシロスコープの画面に表示される波形は、横軸が時間、縦軸が電圧値である。時間及び電圧の波形が見やすくなるようにスケールは調整する。

### 3.4 LED 回路に入力する電圧と光量の関係

LED に入力する電圧と発光量の関係を測定する。回路の設計上は、これらは比例関係にあるはずである。発光量の測定は、光電子増倍管からの出力電圧を確認して行う。

発光量が多い時には、光電子増倍管からの出力は入力電圧の波形を反映しているはずである。しかし、光量が少なくなると出力は間欠的なスパイクとなって観測される。入力電圧を連続的に変化させているにも関わらず、出力が間欠的になることをどのように解釈できるか考える。



|       |        |
|-------|--------|
| 波形    | Ramp   |
| 周波数   | 10 kHz |
| 振幅    | 20 mV  |
| オフセット | -8 mV  |

表 1: 光子数の計数のための入力波形の設定。

- 取得したデータを元にヒストグラムを作るとどのような分布が得られるか。
- この結果をどう解釈したら良いだろうか。

## A 実験器具、測定装置

### A.1 ダイオード

#### A.1.1 半導体と $pn$ 接合

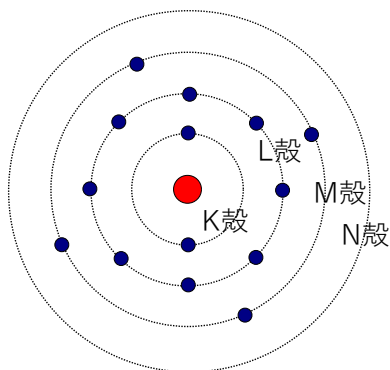


図 3: 電子の原子軌道の模式図。

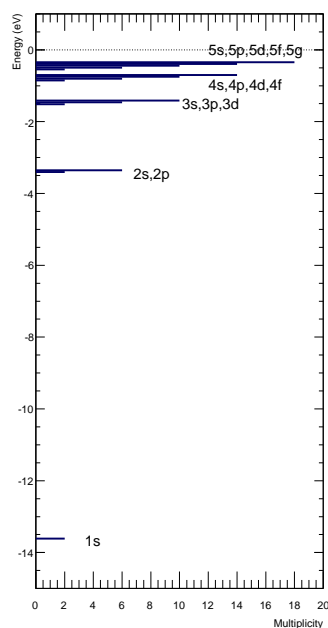


図 4: 水素原子中の電子のエネルギー準位。実際の多電子原子では電子相関のためもっと複雑になる。

シリコンは4価の原子であり、通常4つの価電子が価電子帯を完全に占めており、伝導電子帯には熱ゆらぎのために、少数の電子が存在するだけである。このような状況では電子の

|       | [0:10] | [10:20] | [20:30] | [30:40] | [40:50] | [50:60] | [60:70] | [70:80] |
|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 2 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 3 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 4 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 5 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 6 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 7 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 8 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 9 回目  |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 10 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 11 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 12 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 13 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 14 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 15 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 16 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 17 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 18 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 19 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 20 回目 |        |         |         |         |         |         |         |         |
| 合計    |        |         |         |         |         |         |         |         |

表 2: 各時間幅に波形に現れるスパイクの数の記録。

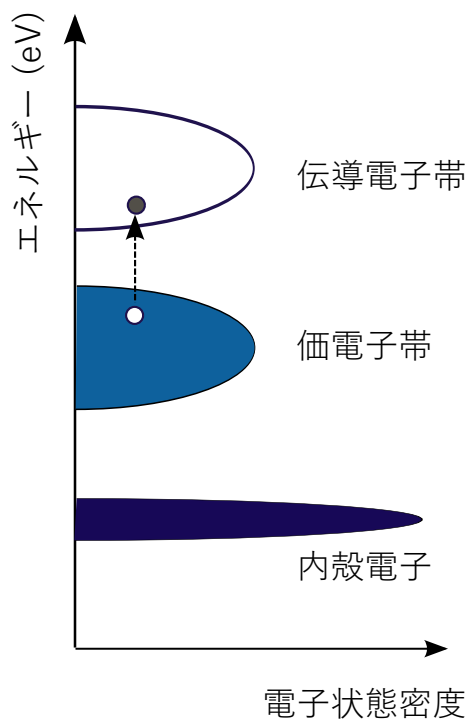


図 5: 半導体の電子状態。光エネルギーの吸収による伝導電子・ホール対の生成。

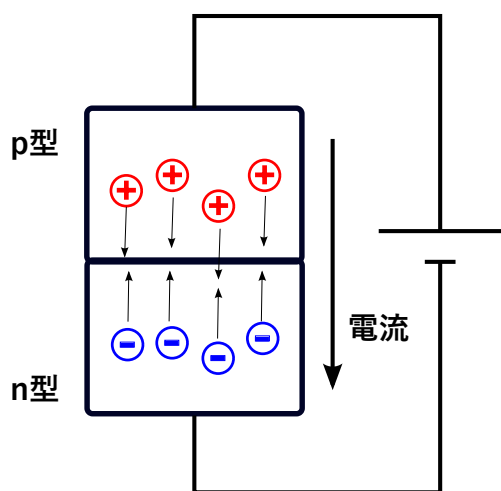


図 6:  $pn$  接合に順バイアスの電圧を掛けた状態。

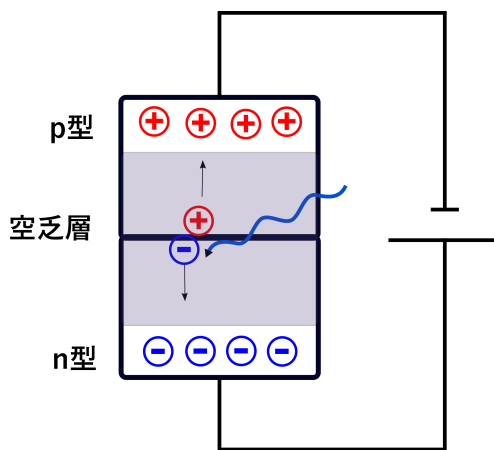


図 7:  $pn$  接合に逆バイアスの電圧を掛けた状態。



エネルギーは連続的に上昇することが不可能であるため、外部から電圧を掛けても電流が流れない状態である。シリコン結晶中に5価の原子を不純物として混入させると、原子当たり電子が1つ余るため、それらが伝導電子帯にいき、伝導体の一部に電子が存在するようになる。こうなると、外部電圧に応じて電子のエネルギーが自由に变化できるので、この場合余った電子が電流の担い手（キャリア）となる。このような物質を *n* 型半導体という。逆に、3価の不純物を混入させると、価電子帯の一部に電子が足りなくなる。このような場合、価電子帯にできた穴を「正の電荷を持った電子」（ホール）と解釈することで、ホールがキャリアとなり、このような物質を *p* 型半導体という。

*p* 型半導体と *n* 型半導体を接合したものをダイオードと呼ぶ。ダイオードに、*p* 型の方を+電位、*n* 型の方を-電位に保つと図6のように *p* 型半導体にいたホール及び *n* 型半導体に居た電子は互いに相手側に引き寄せられるため、ダイオードに電流が流れる。一方、電圧の向きを逆向きにした場合にはキャリアは互いに離れようとするため *pn* 接合部にはキャリアが存在しない空乏層と呼ばれる領域が生じる。

### A.1.2 LED

発光ダイオード（LED）はダイオードの一種で、順電流を流した時に電子とホールぶつかって消滅する際にバンドギャップに相当するエネルギーを持った光を放出する素子である。

### A.1.3 光電子増倍管（Photomultiplier Tube, PMT）

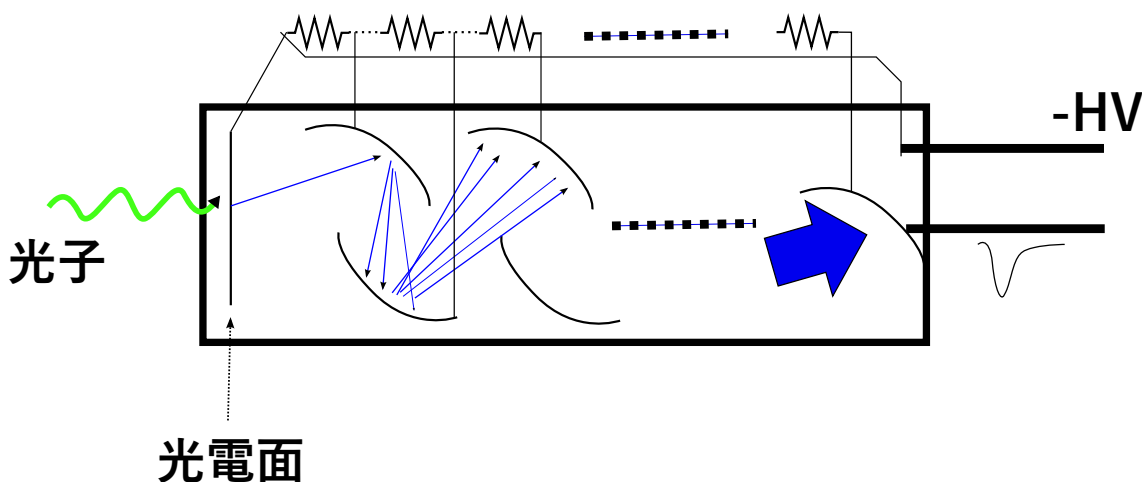


図 8: 光電子増倍管の仕組み。

フォトダイオードや APD よりも高感度な光センサーとして光電子増倍管（PMT）がある。PMT では入射した光がまず光電面に当たり、光電効果によって光子の持っていたエネルギーが物質中の電子に移り、電子が光電面から飛び出してくる。飛び出してきた電子を高

電圧によって加速すると、電極に衝突してさらに物質中から電子が生成される。このように2次的に生成された電子がさらに高電圧で加速され、衝突、電子生成という過程を繰り返す(約10段)ことで、最終的に電子数が約 $10^6$ 倍に増幅される。これらの電子が短時間( $\sim$  ns)の間に出力されるため、電流パルスとして検出される。この様子を模式的に示したものが図8である。

## A.2 ファンクション・ジェネレーター

電気回路の動作させたり、性能を調べたりする際には予め決まった波形を回路に入力することが良くある。ファンクション・ジェネレーターはそのために用いるもので、良く使う波形(正弦波、矩形波、パルス、ランプ波等)の信号を生成することができる。その際、周波数や振幅といった関数のパラメータを設定することができる。今回はLEDを点滅させるために、矩形波またはパルス波を用いる。

## A.3 オシロスコープ

オシロスコープは入力信号の電圧リアルタイムで表示するための装置で、検出器からの信号に限らず一般に電気回路の動作を確認するために必須の装置である。様々な時間スケールで起こる現象を観察できるように、オシロスコープの表示領域の縦・横(電圧・時間)軸のスケールは波形を見やすいように変更可能である。時間スケールはナノ秒から秒までと10桁近くに渡って変更することができる。また、複数の入力信号を同時に観察することができ、回路素子の振る舞いや入力と出力の関係などを確認するのに便利である。

## 参考文献

- [1] ド・ブロイ著、河野与一訳、物質と光、岩波文庫、1972
- [2] A. アインシュタイン著、内山龍雄訳、相対性理論、岩波文庫、1988