

ひらめき☆ときめきサイエンス 2018

未知の光の正体を探れ！

半導体検出器を利用した分光器の製作

2018年7月29日(日)

高エネルギー加速器研究機構 名前 _____



Unravelling the mysteries of
matter, life and the universe.



目次:

| | | |
|-----|-------------------------|----|
| 第1章 | この世界はどのようにできているのか | 1 |
| 1.1 | 哲学者の探求 | 1 |
| 1.2 | アトムから原子へ | 2 |
| 1.3 | 原子よりも小さいものの存在 | 2 |
| 1.4 | 物質の最小単位・素粒子 | 3 |
| 1.5 | 宇宙と素粒子の関係 | 4 |
| 1.6 | この世界がどのようにできているかを知るためには | 5 |
| 1.7 | 最先端の研究 | 6 |
| 第2章 | 素粒子を「見る」 | 8 |
| 2.1 | 検出器 | 8 |
| 2.2 | 読み出し回路 | 13 |
| 第3章 | 分光 | 15 |
| 3.1 | 分光とは～エネルギーで「光を分ける」～ | 15 |
| 3.2 | コラム：粒子だけど、波？～量子の世界から～ | 17 |
| 第4章 | 電子回路 | 20 |
| 4.1 | 電子回路のパーツと回路記号 | 20 |
| 4.2 | 回路図の読み方 | 26 |

第1章

この世界はどのようにできているのか

この世界はどのようにできているのか。人類ははるか昔からこの疑問を抱き、その答えを追い求めてきました。これまでに、「世界はどうできているのか」という万物の根源に関する疑問に対して、大きく分けて2つの方法で調べられてきました。1つは物質を細かく調べるという方法で、もう1つは、物質が集まったより大きなものを調べる、つまり、身近な世界から、地球、太陽系、そして宇宙へと、より大きなものを調べるという方法です。

それを追求してきた人類の歴史を簡単に振り返りながら、現在の研究についてお話しします。

1.1 哲学者の探求

はるか昔から、人類は万物の根源が何であるかを問い続けてきました。最初の哲学者とよばれるタレス（紀元前 624 年ごろ-紀元前 546 年ごろ）はそれは「水である」と考えました。すべてのものは水から生まれ、また水へと還っていくのだと考えたのです。現在の科学から見れば、「万物の根源が水である」という考えは突飛なものに思いますが、神話によらない具体的な「もの」として発想に着目した初めての例になります。

ほかの哲学者の考えで有名なものには、エンペドクレス（紀元前 490 年ごろ-紀元前 430 年ごろ）による、物質は「火・水・土・空気」の組み合わせでできているという「四元素説」、ピタゴラス（紀元前 582 年ごろ-紀元前 496 年ごろ）による、世界のすべては数で表現できるとする考えの「万物は数である」というものがありました。古代ギリシャでは、このように万物の根源が何であるのかという議論が盛んに行われていました。

これら多数の説において、デモクリトス（紀元前 460 年ごろ-紀元前 370 年ごろ）は、物質は「アトム」というこれ以上分割できない最小単位からできているとする「原子論」を唱えました。すべての物質は、アトムの運動と結合によって成り立つと考えたのです。この考えは現代科学における原子の描像と非常に近いものだったといえます。

1.2 アトムから原子へ

それから 2000 年ほどの間、万物の根源に関する学問はほとんど進展しませんでした。しかし、18 世紀にイギリスの科学者ドルトン（1766 年-1844 年）が「(ドルトンの) 原子論」を唱えたことで急速に発展しました。その原子論とは、「すべての元素は原子とよばれる最小の粒子でできており、化学反応は原子と原子の組み合わせが変化するだけで、新しい原子を生成したり、原子を消滅させたりすることはない」というものです。

その後、多くの科学者がドルトンの原子論の不完全な部分や間違っている部分を補完や修正しながら、原子論を完成させていきました。この時代に原子論に貢献した科学者には、ラボアジエ（1743 年-1794 年）、アボガドロ（1776 年-1856 年）、ゲー・リュサック（1778 年-1850 年）、ブラウン（1773 年-1858 年）らがいます。各人の活躍についてはここでは割愛しますが、いずれの人も現在の教科書に名を残すほど立派な業績を上げ、現代科学の基礎を作ったといえます。

1.3 原子よりも小さいものの存在

ドルトンの原子論によると、「原子」とは最小の粒子であり、それ以上分割できないものだと考えられていました。しかしながら、研究を進めていくにつれて、原子の中にはさらに小さい何かがあることがわかってきました。

1897 年、トムソン（1856 年-1940 年）は真空中の放電について研究している際、原子の中に電子があることを発見しました。その後、1911 年にはラザフォード（1871 年-1937 年）は、原子の中に原子核があることを発見しました。さらに原子核は陽子と中性子からできていることもわかり、原子の中の構造が明らかになりました（図 1.1）。

このあたりまでが約 100 年前までにわかった知識です。中学校で扱う範囲では、陽子と中性子と電子を知っておけば十分です。身の周りの化学反応は、原子（核）と電子のくっつき具合で説明がつきます。それでも、万物の根源に迫りたいという人類の願望はまだまだ続きます。

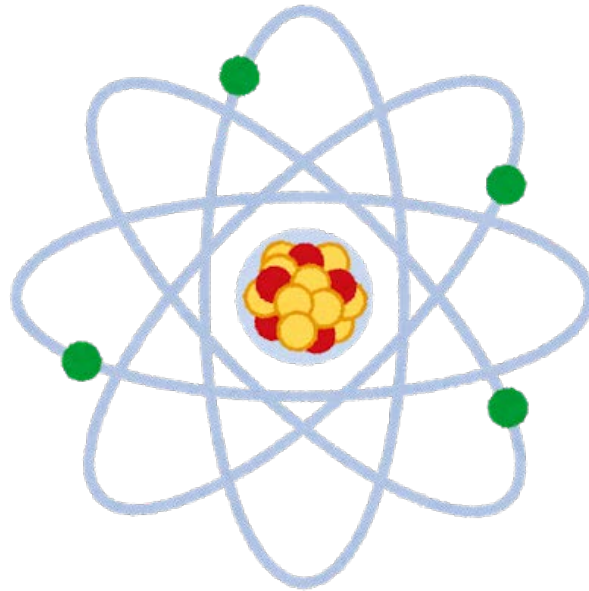


図 1.1 原子の模式図 中央に、陽子と中性子からなる原子核があり、その周りを電子が回っています。この絵では誇張して描いてありますが、実際の原子核の大きさは原子の1万分の1程度です。

1.4 物質の最小単位・素粒子

現在の科学では、物質を構成する最小単位が、原子ではなく、クォークやレプトンに代表される「素粒子」であることがわかってきました。素粒子は全部で17種類存在します(図1.2)。この17種類という数は今後増える可能性もあります。

この素粒子について探求する学問を素粒子物理学とよび、現在も日進月歩で発展している学問領域です。



図 1.2 現在分かっている17種類の素粒子一覧。これらの素粒子で成り立つ理論を標準模型とよびます。

1.5 宇宙と素粒子の関係

最初に述べたように、万物の根源に関する疑問に対して、より大きなものを調べる研究があります。その行き着く先が「宇宙」です。宇宙の研究は多岐にわたっていますが、大きな研究の一つに「宇宙のはじまり」があります。

宇宙のはじまりには、「ビッグバン」とよばれる大爆発が 138 億年前に起きたと考えられています。この爆発が起きた当時、宇宙は高温・高圧な「高いエネルギー」の状態です。素粒子が単体でバラバラに存在している世界でした（図 1.3）。時間が経過して宇宙の温度が下がるにつれ、素粒子同士がくっつきはじめ、原子核や原子が形成されていき、さらに長い年月が経つことで、現在の宇宙ができあがりました。この過程で、たくさんの種類の粒子が変化したと考えられます（今回は説明しきれないのでだいぶ省略しましたが、元素合成や、そのあとの星の進化過程もとてもおもしろい研究分野です）。

宇宙ができたときを調べるにはどうすればいいのでしょうか？宇宙ができたときは、たくさんの「素粒子がバラバラに存在」していた「高いエネルギー」の状態だと考えられています。その状態を再現し、そこで起こる現象を観察すればいいのです。これは素粒子の研究でなされていることです。つまり、素粒子の研究は、宇宙の最初を知ることにもつながるのです。

これまでの数々の研究によって、広大な宇宙と、極微な素粒子の世界は、実は密接に結びついていることがわかっています。

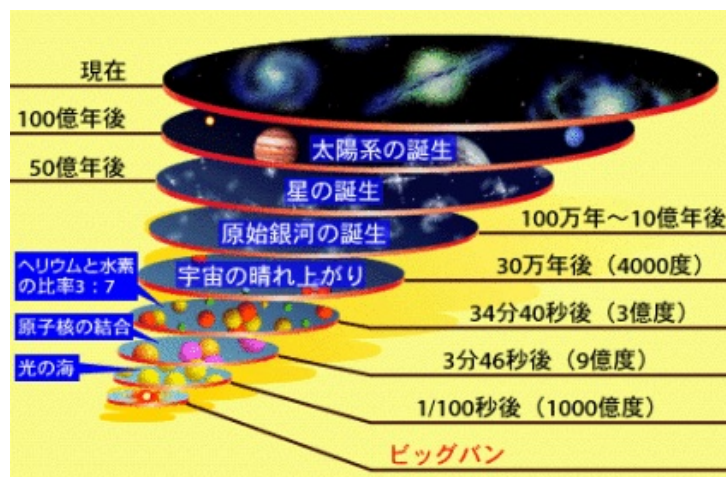


図 1.3 ビッグバン理論に基づく宇宙の進化（画像提供：宇宙航空研究開発機構（JAXA）

http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/big_bang.html

このような宇宙と素粒子の関係の例えの一つに、ウロボロスの竜があります。（図 1.4）は、宇宙というこの世界で最も大きいものから徐々に小さなものへと研究の対象を移していくと、最後には素粒子に行き着き、それが実は宇宙を理解するための鍵となっていることを表しています。

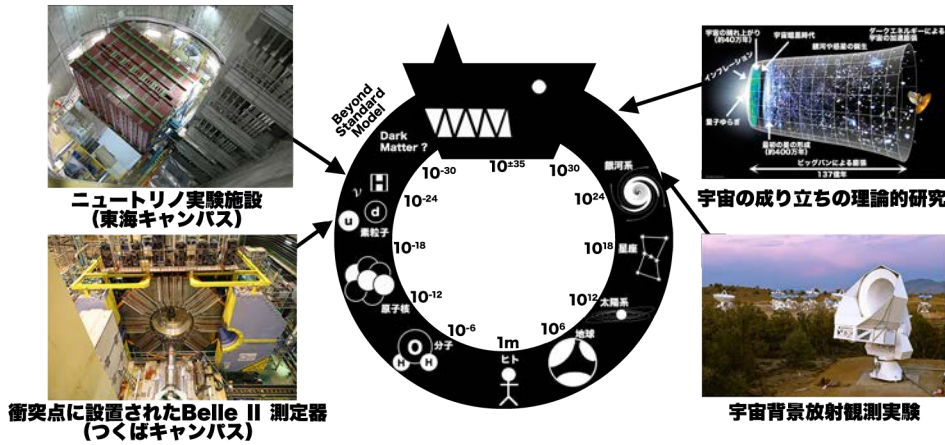


図 1.4 宇宙と素粒子の関係を表現したウロボロスの竜。竜の体表には、大きさとそのシンボルとなるイラスト。外側には KEK で行っている研究内容を写真で示しています。

1.6 この世界がどのようにできているかを知るためには

さて、前の節までで、「世界が何でできているのか」について、人類がどう考えてきたかを話してきました。次に、「この世界がどのようにできているかを知るためには」について話していきたいと思います。

前の節で宇宙と素粒子のつながりについて話しました。このつながりがあることから、宇宙の初期の高いエネルギー状態を作り出すことができれば、素粒子について知ることができます。宇宙の初期の状態を作り出すにはどうすればよいのでしょうか？ ヒントは「エネルギー」にあります。詳しくはコラムに書きましたが、エネルギーとは、他の物体に力を与えることができる能力を意味します。例えば、野球のボールを缶に向かって投げることをイメージしてください。遅いボールよりも速いボールを投げた方が缶をより強く遠くに飛ばすことができます。このように、加速器によって速度が速くなった粒子は、他の物体に与える力が大きいので、高いエネルギーを持つといえます。

素粒子を作り出すために「加速器」とよばれる大型の実験装置を使います。この加速器は粒子を加速することで粒子に「エネルギー」を与える装置です。

宇宙ができたときにはたくさんの素粒子が非常に高速に飛び交っている、高いエネルギー状態であるといえます。これまでの研究により、高いエネルギーの粒子を衝突させると、粒子の数が増えたり、未知の粒子が発生したりするなど、さまざまな不思議な現象が見つかりました。特に、未知の粒子や現象が発生した場合は、宇宙のはじまりの謎を解明するヒントになります。

現在では、このようにして加速器を使い素粒子を生み出し、その性質などを調べることで「この世界が何でできているのか」を知ろうとしています。

1.7 最先端の研究

現在、世界で最高のエネルギーまで素粒子を加速できる加速器は、スイスとフランスをまたぐ LHC（大型ハドロン衝突型加速器）とよばれる加速器です。ここでは日夜、世界屈指の研究者が新粒子や新現象の発見を目指して研究を行っています。もちろん、多くの日本人研究者も活躍しています。

一方で、この日本でも加速器を使った実験が数多くあります。その中でも、茨城県の KEK や J-PARC（大強度陽子加速器施設）では、世界最高性能の加速器を使ったトップレベルの実験をしています。物理学者たちは、これらの装置を使って宇宙のはじまりに近い状態を「創り出す」ことで宇宙誕生の謎を解明することを目指し、研究や開発を行っています。

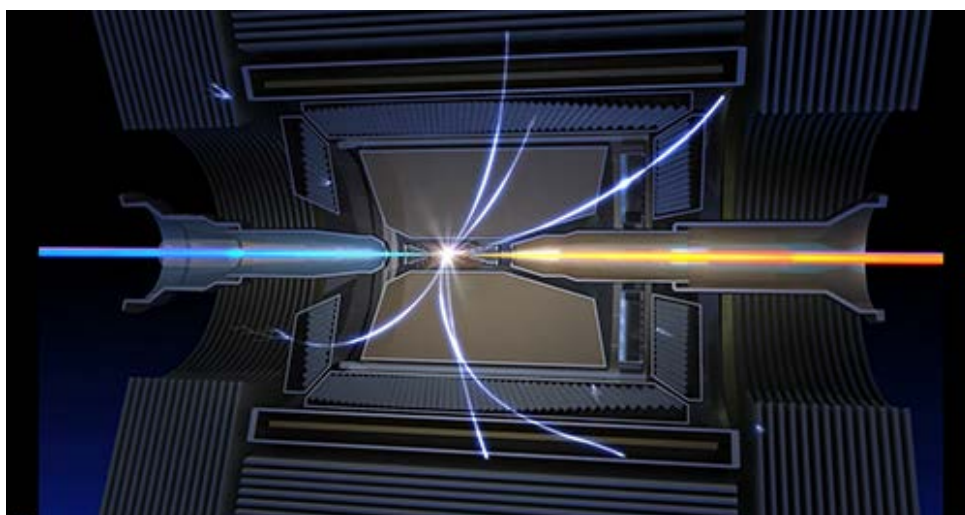


図 1.5 加速された粒子の衝突のイメージ（Belle II 実験）（画像提供：KEK Belle II グループ）

コラム「SuperKEKB 加速器」

みなさんは「Belle（ベル）実験」という名前を聞いたことがあるでしょうか？これは KEK、まさにみなさんが実習を受ける場所で 1998 年から 2010 年まで行われていた実験です。私たちの世界には「物質」が存在します。宇宙が誕生したばかりの頃には、物質と反対の性質を持つ「反物質」も同じ量だけ存在していたはずだということがわかりました。しかし、我々の世界の周りには「反物質」が全くといっていいほど存在していません。このような状況になるには、現在の宇宙に至るまでに「物質」と「反物質」が異なった振る舞いをしていなくてはなりません。これを説明したのが、小林・益川両博士が提唱した「CP 対称性の破れ」とよばれる理論でした。これを実証するためには、「B 中間子」とその反粒子である「反 B 中間子」を大量に作り出し、それらの性質の違いを確かめる必要がありました。そこで、研究者は「KEKB 加速器」と「Belle 検出器」を使って実験を行い、2001 年に小林・益川理論で予言されたとおりの性質の違いを発見しました。これらの功績は 2008 年の小林・

益川のノーベル物理学賞受賞へとつながったのです。

こうして、一つの人類の謎が解けた一方、Belle 実験の成果はまた新しい謎を生み出しました。その謎を解決するためには、より大量の粒子を作り出し、より精度の良い実験を行う必要があります。そのために私たちは「SuperKEKB 加速器」と「Belle II 検出器」を開発し、今まさにこの KEK つくばキャンパスにて実験を進めています。

SuperKEKB は電子と陽電子を衝突させる加速器であり、KEKB 加速器の 40 倍も多くの電子・陽電子を衝突させることができます。完成すれば世界一の衝突回数を実現でき、今までよりも多くの粒子を生成できると期待されます。一方、より多くの粒子が生成されるとそれらを「認識する」ことも難しくなります。それを解決するために改良を行ったのが「Belle II」検出器です。

これら世界でトップレベルの装置を使うことで、宇宙誕生の謎を解明することが本実験の目的になります。

コラム「エネルギー」

エネルギーとは、より速く物体が動いているほど大きくなる『運動エネルギー』と互いにつながりあうことができるものとして考えます。

中学校では「位置エネルギー」を習います。これは物体を落下させると落ちていく途中でだんだん速くなるので、運動エネルギーが増えていきますが、その運動エネルギーの元になるものとして考えられているものです。また、電気をモーターに流すとモーターが回転し、車などを動かすような場合を考えれば、運動エネルギーに変化するので、電気も「エネルギー」として考えることができます。他にもいろいろな研究によって、熱や質量なども、エネルギーとして考えることができるとわかっています。「高温」や「高圧」を「高いエネルギー」としたのは、それだけ大きなエネルギーがあると考えられるからです。

第 2 章

素粒子を「見る」

未知の素粒子を「見る」(検出する)ためには、その素粒子による信号を私たちが目で見える形に変換する必要があります。そのための装置の総称を「検出器」といいます。素粒子実験の初期には [図 2.1](#) のように、机の上に置けるような小さな実験装置を使い、実際に人間の目で見て素粒子を測っていました。しかし、現代の素粒子実験では未知の粒子を探したり重い粒子の性質を調べたりするため、加速器を用いて高いエネルギーで粒子を衝突させることで新しく粒子を作り出しています。そして、実際 [図 2.2](#) のような、高さ約 25 m、長さ約 44 m、重さ約 7000 トンの巨大な装置で大型の複合検出器を使って、大量に作り出された粒子の中から新たな素粒子や現象を探しています。現代の素粒子実験において、素粒子を見るための装置である検出器の存在は、未知の粒子や現象の発見とは切っても切り離せない関係にあります。

検出器は、大きく分けて二つの部分から構成されます。実際に素粒子が反応を起こす部分と、その反応を人間の目やコンピュータで判別できる形に変換するための読み出し部分です。

2.1 検出器

素粒子(以下、粒子)を検出するための検出器は大きく分けて 3 通りに分類されます^{*2}。この章ではそれぞれの検出器の仕組みや役割について大雑把に説明します。

^{*1} ヒッグス粒子は長年その存在が予言されており 2012 年、LHC で行なわれている ATLAS 実験、CMS 実験によって、ついに発見され、ノーベル賞の受賞につながりました。興味がある方はこちらも調べてみてください。

^{*2} 特に半導体については本実習で使うので読んでおいて下さい。他の検出器については興味のある方だけで良いです。

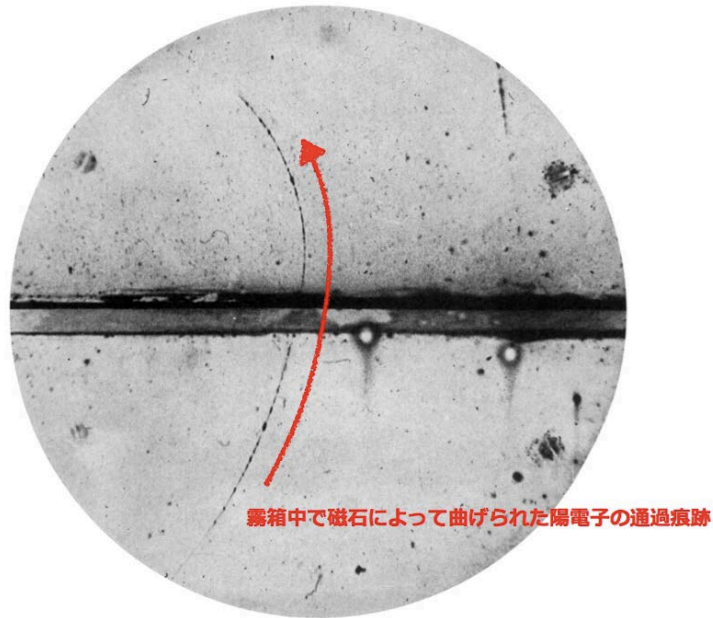


図 2.1 「霧箱」という検出器を使って当時見つかっていなかった「陽電子」という新しい素粒子が発見された。(出典：<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PositronDiscovery.jpg>、一部改変)

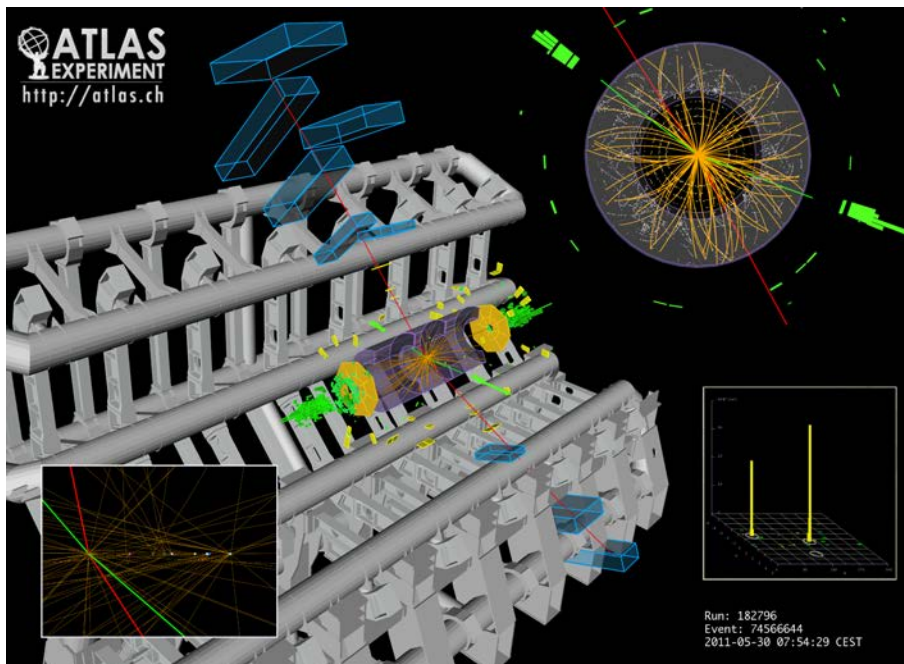


図 2.2 CERN にある LHC 加速器を使って ATLAS 実験によって発見されたヒッグス粒子^{*1}の候補イベント。大量のデータの中から複合実験装置を駆使してヒッグス粒子と見られるイベントを探している。(写真提供 CERN アトラス実験グループ)

(1) シンチレータ+光センサー

例えば水中に石を投げ入れると、この石は水中で減速しますよね。これはつまり、水中で石の運動エネルギーが失われていることに対応します。粒子も特定の物質中を通過すると、その内部でエネルギーを失います。ではその失ったエネルギーはどこに消えたかという点、実は特定の物質内ではそのエネルギーが光として変換されることがあります（図 2.3 参照）。このように、エネルギーを光として出す物質を利用すれば、未知の粒子が持つエネルギー情報や通過した時間を測ることができます。この性質をもつ物質を「シンチレータ」とよびます。このシンチレータに、光を読み出すためのセンサー（光センサー）を取り付けることで、内部の粒子反応を“電気”という私たちが扱いやすい信号に変換することができます。光センサーとしては、ノーベル賞も受賞したカミオカンデに使われている光電子増倍管という特殊な装置や、私たちが普段利用しているスマートフォンにもたくさん使われている半導体を応用したものがああります。



図 2.3 シンチレータの一種である CsI (Tl) 結晶が発光する様子（出典：Photo by My-Name(A1000), CC BY-SA 3.0, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kristall-CsI\(Tl\)_mit_Skala.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kristall-CsI(Tl)_mit_Skala.jpg)）

(2) ガス検出器

先ほど物質中を通過すると粒子はエネルギーを失うと説明しましたが、実はこれは空気中（ガス中）でも起こり得ます。粒子が特定のガス中を通過すると内部でエネルギーを失い、中のガスを電氣的にプラスとマイナスのパーツに分解します。つまり、イオン（+）と電子（-）のペアを作ります。この特性を利用して、粒子を検出しようと考えられた装置がガス検出器です。通常はガス検出器の内部に、高いプラス電圧をかけます。こうすることにより、マイナスの性質を持った電子はプラス側に引き寄せられて電気信号として読み出すことができます（図 2.4）。この電気信号の情報から、粒子が通過した位置や時間を知ること

ができ、粒子の発見に至るのです。ガス検出器の他の特徴として、固体または液体のシンチレータと違い、気体を扱うため、粒子が内部で失うエネルギーは非常に小さい、といった点が挙げられます。そのため、ガス検出器は粒子のエネルギー損失を抑えつつ、粒子の飛跡を知りたいときに多々用いられます。また、ガイガー＝ミュラー計数管という比較的安く、自作も可能な放射線検出器として使われることもあります。

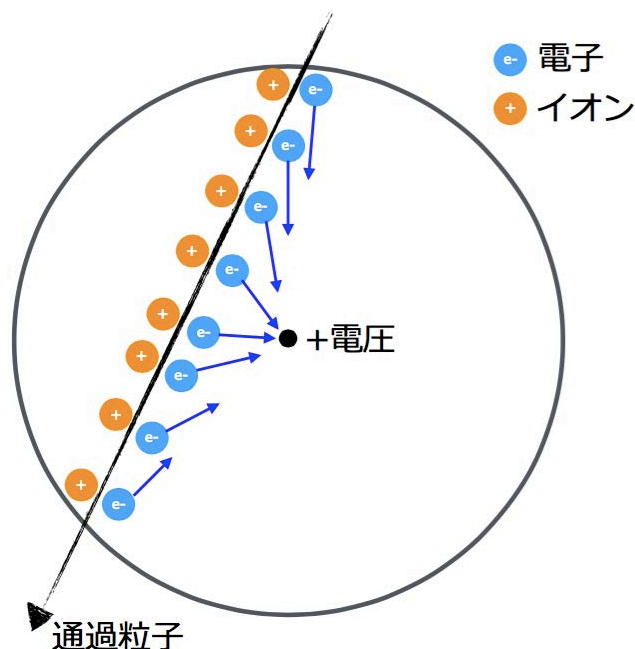


図 2.4 ガス検出器の基本的な動作原理

(3) 半導体検出器

近年、金属などの電気を通す物質（導体）と電気を通さない物質（絶縁体）の中間的な性質を示す「半導体」を応用した検出器が増えてきました。半導体は上でも述べたように私たちに身近なスマートフォンやコンピューターの内部でもたくさん使われています。

半導体に不純物を混ぜることでマイナスの性質をもった自由電子が移動しやすい N 型半導体と、電子が抜けて、プラスの性質をもった欠陥（ホール）が移動しやすい P 型半導体を作ることができます。^{*3} それらの半導体を組み合わせることで、さまざまな用途に応じた検出器や回路素子が作られています。例えば 図 2.5 のように P 型半導体と N 型半導体を組み合わせると、接合部ではそれぞれの半導体の持つキャリア（電子とホール）が打ち消しあい、「空乏層」とよばれる、キャリアが立ち入ることのできない特殊な領域が生まれます。すると、キャリアを持たない空乏層は電気を通さないため、空乏層を打ち消す方向に電圧をかけたとときにのみ半導体に電気が流れることとなります。この PN 接合半導体は、一方向にしか

^{*3} 電子、ホールが電気を運ぶ「キャリア」の役割を果たすために半導体は導電性を持ちます。このキャリアの数が導体に比べて少ないために「半導体」とよばれるのです。

電流を流さない「ダイオード」という回路素子として利用されています。一方、このPN接合半導体に逆方向の電圧をかけると、P型半導体中のホールは負（-）電極側に、N型半導体中のキャリアは正（+）電極側に引き寄せられ*4、図2.6のように空乏層が拡大します。空乏層には電圧がかかっているにもかかわらず、粒子が通過したり光が吸収されたりすると、そのエネルギーによって電子とホールのペアが作り出されるので、電圧によってそれぞれが正、負電極へ引っ張られていくことで一瞬だけ電流が流れます。この性質を利用して、ガス検出器と同じように粒子が通過したり光が吸収されたことを電気信号として読み出すのが半導体検出器です。

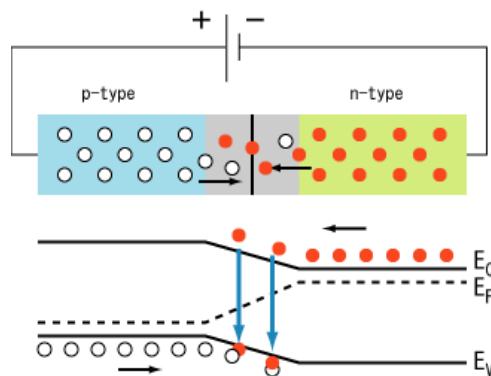


図 2.5 順方向に電圧をかけたPN接合型のダイオード（出典：Photo by S-Kei, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-Diode-ForwardBias.PNG>）

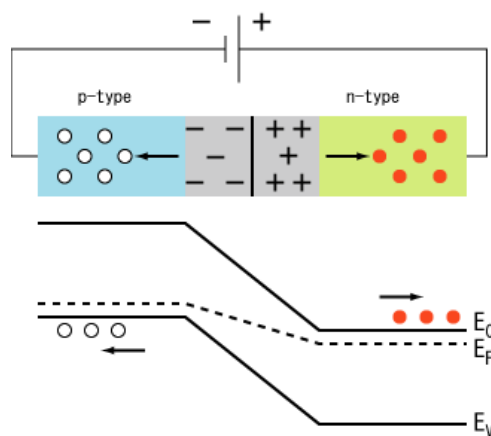


図 2.6 逆方向に電圧をかけたPN接合型のダイオード（出典：Photo by S-Kei, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-Diode-ReverseBias.PNG>）

半導体検出器は、1ピクセルあたりの読み出し面積を1ミクロン(0.001mm)以下の精度で加工できるため、非常に高精細な検出器として利用されます。また、固体である半導体は気体に比べると高密度ですが、数十ミクロンの薄さに加工することで、ガス検出器と同じよう

*4 磁石のS極、N極と同じように、プラス性質を持つホールはマイナスに、マイナス性質を持つキャリアはプラスに引き寄せられます。

に粒子を止めずに位置を測ることができます。これらの特性を活かして、微小なエネルギーの測定、粒子の通過位置や時間の測定に用いられるほか、光を電気信号に変換するセンサーとしても利用されています^{*5}。

2.2 読み出し回路

検出器の後半部分、「読み出し回路」について簡単に説明します。素粒子は検出器の中で相互作用を起こし、多くの場合その相互作用により得られた信号は電気信号に変換されます。その電気信号を私たちが扱えるように（つまり信号を読み出して記録できるように）するためには、「読み出し回路」として「電子回路」が利用されます。

さて、回路回路と言っていますが、そもそも「回路」とはどういうものでしょうか。回路とは、電流や物質などが通る道すじのことを表し、基本的には輪っかのように閉じています。まさに読んで字のごとくです。一般的には、大抵「回路」と言うと、電流を扱ったものを指すのですが、特にこれをしっかりと区別するために電気回路や電子回路といった用語を使います。より専門的になると、さらに電気回路と電子回路にも区別がありますが、大雑把に言うと、半導体とよばれるパーツを利用している場合は電子回路とよびます^{*6}。電子回路は、こうしたパーツをケーブルや配線によってつなぎ、電流を流せるようにうまく組み合わせることで、さまざまな機能を利用することができます。

さて、この電子回路ですが、一般的にはどんなところで使われているのでしょうか？実は、私たちの身の回りでかなり使われています。テレビや冷蔵庫のような家電から、車や飛行機といった乗り物まで、あらゆるものに使用されており、おそらくこれまでに電子回路の恩恵を受けてない人はほぼいないでしょう。冒頭でも述べたように、素粒子の検出をはじめとする物理実験においてもさまざまな場面で利用されます。しかし、素粒子実験を例にすると、私たちの目では直接見えないようなものを捉えるためには、それに特化した独自の検出器、そしてその信号を私たちにも見えるようにするための独自の電子回路が必要となってきます。その辺に売っているものは基本的に利用できないので、一から開発を行います（例：[図 2.7](#)）。そういう意味でも、物理実験研究者にとって電子回路とは切っても切れないような関係にあるのです。

^{*5} 今回実習で使う検出器も半導体光センサーの一種です。

^{*6} 専門用語を用いると、受動素子とよばれる電気を他のエネルギーに変えたり、増幅したりしないパーツのみから構成される回路を電気回路、それに加えて能動素子とよばれるパーツ（基本的には半導体から成り、エネルギーに変えたり電気を増幅したりする）も使われているものを電子回路といいます。ただし、さまざまな流儀があり、他の区別方法をとることもあるようです。



図 2.7 最先端の素粒子実験で使用するための電子回路の例。COMET 実験という J-PARC で行われる実験のために開発が進められています。

第3章

分光

2章までで紹介したように、素粒子実験では検出器や電子回路などを駆使してさまざまな情報を得ることで、素粒子の性質から、行く果ては宇宙の起源まで探ろうとしています。

このさまざまな情報のうち、最も重要なものの一つがエネルギーです。このエネルギーをいかに精度良く測定できるかが、実験の成功の鍵をにぎっているといっても過言ではありません。エネルギーを測定する方法は多々ありますが、その中でも比較的身近に体感できる方法として「分光」が挙げられます。

今回のプログラムでは、実際に検出器・電子回路を作り、分光の体験をしてもらいます。より詳しいことについては、当日講義を受けたり実際に装置を触ってみたりしながら体感してください。

この章と次の章でプログラムに関係する分光の簡単な紹介と電子回路の資料について基本的な部分をまとめましたので、参考にしてください。

3.1 分光とは～エネルギーで「光を分ける」～

分光とは何でしょうか？漢字から想像するに、「光を分ける」ということのようにですね。しかし、分けるとはどういうことなのでしょう？あなたは周りがある光を分けることができますか？

分光の紹介の前に、そもそも光とはどういうものかについて簡単に触れておきます。身の回りを見わたすと、太陽だったり電灯だったり、明るさを感じることでできるものがありますが、まさにこれらは「光」です。

人間の目に感じとられるものが「光」です。専門的には「可視光」とよばれます。現代の

物理学では、光も実は素粒子の一つ“光子”であることがわかっています。同じ光子という素粒子でも、持っているエネルギーの大きさによって、性質がさまざまに変化します。

例えば、携帯電話などから出ている電波や、日焼けの原因になる紫外線、電子レンジなどで使われているマイクロ波もその正体は光子で、目には見えないけれど、広い意味では“光”なのです（図 3.1）。のちに述べるような理由で、光子という素粒子は普段は「電磁波」というよばれ方をします。



図 3.1 電磁波の例

身の回りには、さまざまなエネルギーの光子が混ざっています。その光子をエネルギーごとに分けることが「分光」となります。

「エネルギーごとに分ける」というと難しく感じるかもしれませんが、ですが、実はとても身近な話です。雨上がりの晴れた空に虹がかかっているのを見たことはありますか？また、プリズム（図 3.2）って見たことはありますか？これらは白色の光をエネルギーごとに分けています*1。

*1 白色の光は全ての色の可視光が混ざった光です。

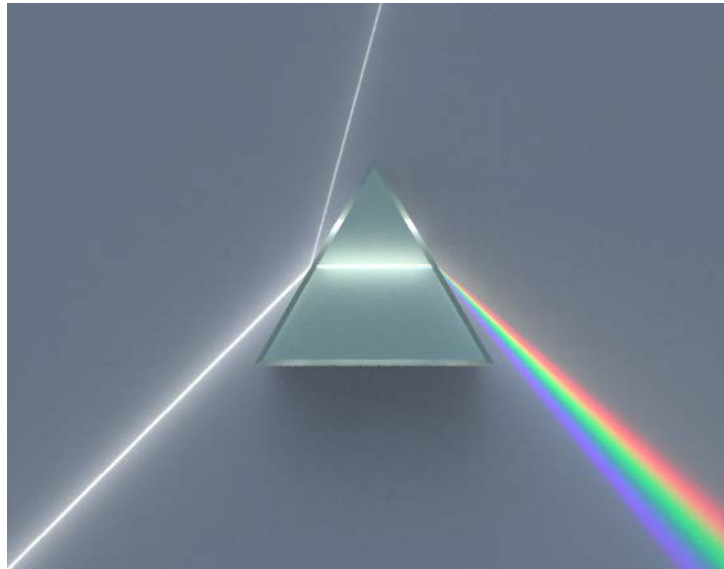


図 3.2 プリズムの例 (出典: Photo by Spigget, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration_by_Spigget.jpg)

出てきた光がさまざまな色にみえますが、これは、エネルギーが違う光は異なる色に見えるという、光とそれを見る人間の目の性質によって起こります。

こうして光は、エネルギーにより、図 3.3 のように分類できることがわかりました。エネルギーが約 1.59 eV～約 3.26 eV^{*2} のとき、光は可視光とよばれ、上でも述べたように人間の目で認識されるものになります。エネルギーが約 1.59 eV より小さい光は赤外線、さらに小さいと電波となります。逆に約 3.26 eV 以上の光は紫外線とよばれ、さらに高いエネルギーでは X 線、ガンマ線となります。

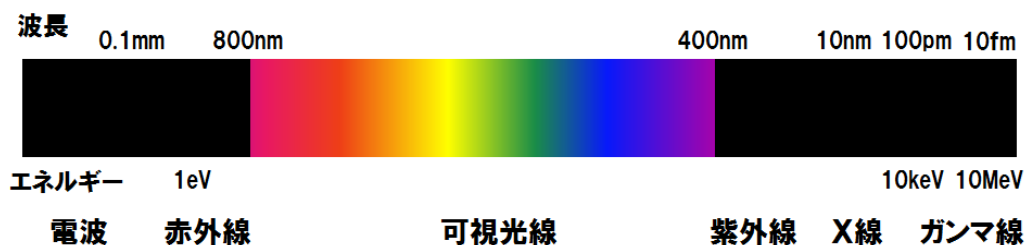


図 3.3 光の分類

3.2 コラム：粒子だけど、波？～量子の世界から～

※少し難しい内容なので、このコラムは飛ばしてもらっても構いません。

^{*2} eV はエレクトロンボルトといい、電子という素粒子 1 粒を 1 V の電圧で加速して得られるエネルギーを 1 eV 定義しています。日常ではあまり使いませんが、素粒子実験では非常に便利な単位です。

光とは何か？は長らく研究されてきました。ニュートン(1642~1727)は光は粒子だと考え、ホイヘンス(1629~1695)は波だと考えました。波なのか、粒子なのか、という議論は長い間、論争になり、その後の科学にさまざまな影響を与えました。

ところで物理の世界で「波」というと、何かの振動が離れた場所へ時間をかけて伝わっていく現象を指します。例えば音の場合は、空気の振動が音の発生源から空気中を伝わっています。波のことを調べるときには、よく一秒間に何回振動しているかを表す「振動数」と山同士、谷同士の距離を表す「波長」を調べます。

一方で「粒子」のことを調べるときには、これまでの章で述べてきたようなエネルギーや速度、質量などを調べます。

これまでの説明では、「光は素粒子である」として話をしていましたが、実のところ「粒子であると同時に波である」ということがわかっています。このようなことが判明するまでには、非常に長い年月と多くの研究の積み重ねがありました。それらを今回紹介するのは難しいのですが、とにかく、光とは「粒子であると同時に波」という性質を持っていて、現象や実験の種類によってどちらの振る舞いをするかが変化します。

不思議なことに、このような性質は光に限らず、どんな粒子にも見られることです。このことは「粒子と波動の二重性」とよばれ、20世紀のはじめまでに見つけられ、のちに「量子論」とよばれるたいへん重要な理論につながりました。

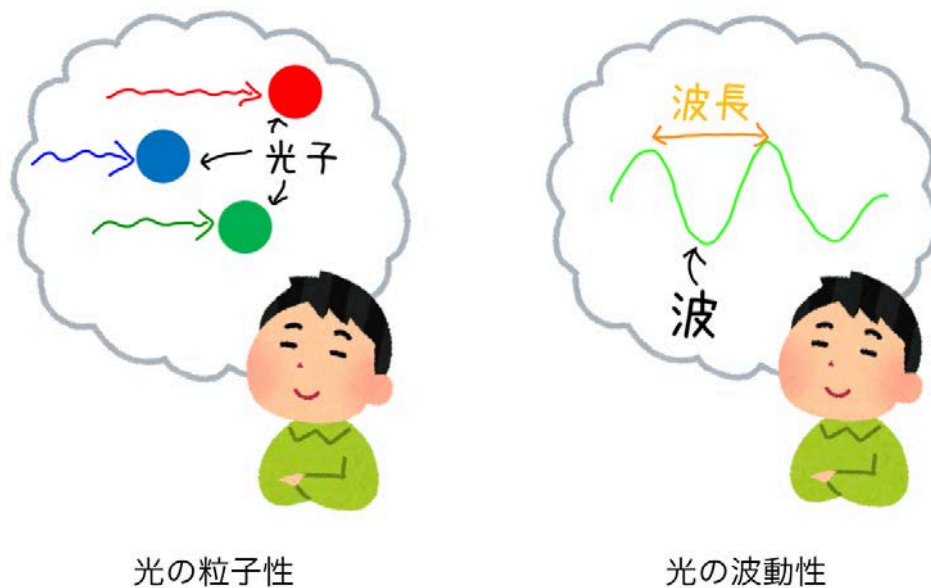


図 3.4 粒子と波動の二重性

この「粒子と波動の二重性」の研究の結果として、粒子としての性質と波としての性質の間には粒子として見たときのエネルギーを E 、波として見たときの振動数を ν (ニュー) と

して、

$$E = h\nu$$

という関係があることがわかっています。h はプランク定数という特別な数です。光の場合、さらに性質として、

$$c = \nu\lambda$$

という式が得られることがわかっています。c は光速、 ν は光（波）の振動数、 λ （ラムダ）は光（波）の波長です。この性質を使うと、

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

という結果を得ることができるので、エネルギーと波長は互いに反比例関係にあるといえます。

光の研究では、波としての性質の方が粒子としての性質よりも先に発見され、長い間、波としての性質を基本として研究が進みました。波としての光は、電場と磁場の変化が空間を伝わっていく「電磁波」であることがわかっています。この章の本題となる「分光」も、歴史的には波としての性質から研究が進められ、現代でも説明するときには通常は波としての考え方を uses。

しかし、現在では粒子としての光は「光子」とよばれ、素粒子の一つとして扱われるなど、粒子的な側面についても研究されています。

光子一粒ずつのエネルギーを考えることは、加速器で素粒子を扱う場合にもたいへん重要な意味があります。そのため、光子のエネルギーを測ったり、光子をエネルギーごとに分けて調べたりすることは、素粒子実験で非常に重要なものになっています。

通常とは異なる説明ですが、今回はあえて分光を「粒子」の立場から説明しました。

第 4 章

電子回路

この章では、本プログラムで使用する回路に必要なパーツ（回路素子）のことや、回路図の読み方について簡単に説明します。

4.1 電子回路のパーツと回路記号

ここでは、本プログラムで使用するパーツの簡単な説明を行います。

4.1.1 抵抗（器）

抵抗器は電気を流れにくくするパーツです（図 4.1、図 4.2）。抵抗の大きさが大きいほど流れにくく、小さいほど流れやすくなります。この大きさをうまく調整することで電気の流れる量を制限したり、電圧を分けたりすることに利用されます。抵抗の大きさの基本単位は Ω （オーム）です。通常は抵抗とよばれることが多いです。



図 4.1 抵抗器（出典：Photo by Afrank99, CC BY-SA 2.5, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3_Resistors.jpg）

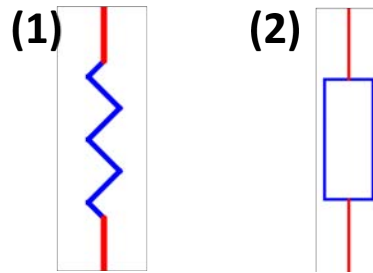


図 4.2 抵抗器の回路記号 ((1) は古い描き方、(2) は新しい描き方。本プログラムでは (1) を使用します。)

4.1.2 コンデンサ (キャパシタ)

コンデンサ (キャパシタ) は蓄電器ともよばれ、電気を蓄えたり放出したりするパーツです (図 4.3、図 4.4)。直流電流を通さないため絶縁に利用されたり、条件にもよりますが交流電流を通すことができるため、ノイズカットなどにも使われたりします。蓄えられる電気の量のことを静電容量といい、基本単位は F (ファラド) です。



図 4.3 コンデンサ (出典 : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photo-SMDcapacitors.jpg>)

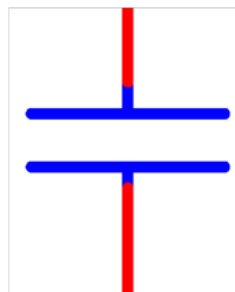


図 4.4 コンデンサの回路記号

4.1.3 LED (発光ダイオード)

LED はダイオードとよばれ、電流を一定方向にしか流さない特性を持ち、電圧をかけると発光する半導体でできています (図 4.5、図 4.6)。最近は蛍光灯の代わりや、信号機など

でも利用されている身近なパーツとしても知られています。基本的には2本足のパーツで、長い方をプラス側、短い方をマイナス側に接続します。



図 4.5 LED (出典 : Photo by PiccoloNamek, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBG-LED.jpg>)



図 4.6 LED の回路記号

4.1.4 トランジスタ

トランジスタは信号の増幅やスイッチ動作をさせられる半導体でできたパーツです (図 4.7、図 4.8)。電子回路パーツの代表ともいわれるもので、色々な電子回路で利用されています。種類もたくさんあり、回路の組み合わせ方によって様々な機能を作りだせるものです。トランジスタだけでテキスト 1 冊分 (以上?) のことが書けてしまうほど有能ですが、今回は最も簡単な一つの種類と機能について説明します。



図 4.7 トランジスタ (出典 : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistors-white.jpg>)

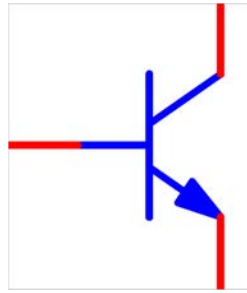


図 4.8 トランジスタの回路記号*1

ここで紹介するのは、バイポーラトランジスタという最も一般的なトランジスタです。通常、「トランジスタ」といえばこれを指します。N型とP型の半導体を接合することにより作られ、P型の両端をN型ではさんだNPN型とよばれるものがよく使われます。このトランジスタは、エミッタ(E)、ベース(B)、コレクタ(C)という3本の足を持ち、それぞれN、P、Nに対応しています。

トランジスタの機能の内、最もよく使われるものの一つがスイッチ動作です。図4.9のようにコレクタ・エミッタ間の電流(C-E電流)を、ベース・エミッタ間に流す電流(B電流)によってON/OFFできるというものです。もう少し細かくいうと、単純にON/OFFをするだけでなく、図4.10のようにB電流の流す量によって、飽和領域とよばれる状態まではある程度C-E電流の流す量も制御できます。

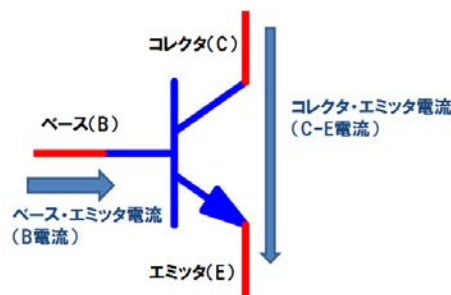


図 4.9 トランジスタの各部の名前

4.1.5 レギュレータ

レギュレータは、入力電圧が変化してもあらかじめ設定した一定の電圧を出力できるパーツです(図4.11、図4.12)。このパーツもたくさんの種類がありますが、ここではよく使われる三端子レギュレータを紹介します。その名のとおり3本の足を持ち、それぞれが入力、出力、グラウンド(後述)に対応しています。基本的には、三端子レギュレータとコンデン

*1 この記号はNPN型のバイポーラトランジスタを表していて、今回のプログラムでも使用するものです。トランジスタの種類によって記号も少し変わります。

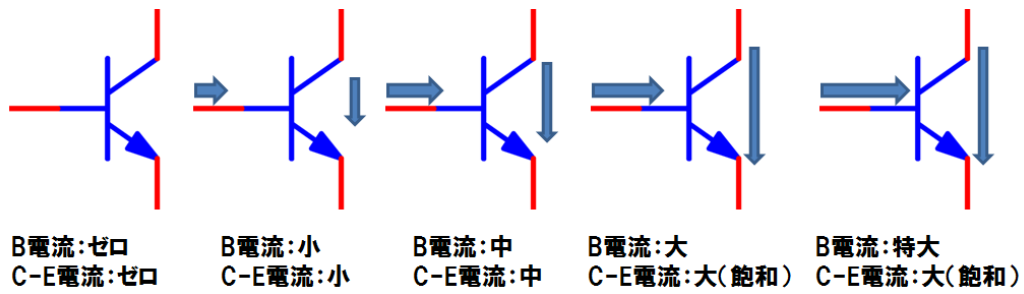


図 4.10 トランジスタのスイッチ機能

サを組み合わせることで安定した電圧出力を実現します。レギュレータの回路記号は、上記のほかのパーツと異なり特に決まっています。一般的には、図 4.13 のように四角形に線を 3 本付け加えたようなものとなっており、この線それぞれが足に対応します。その線の付近に対応する機能を記すことが多いです（この例では四角形の中に書いてあります）。ちなみに、一般的に特に回路記号の決まっていないパーツは、そのパーツの足に応じて、これと同様四角形に線をその足の数分付け加えたような形（シンボルとよびます）で表します。

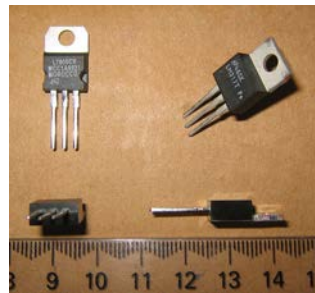


図 4.11 レギュレータ（出典：Photo by John Dalton, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TO-220_Package_Four_Different_Projections.jpg）

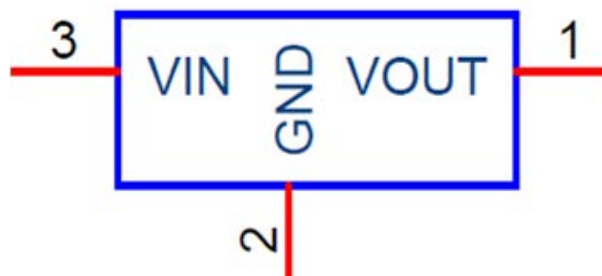


図 4.12 レギュレータの回路記号

4.1.6 その他

これまでに挙げたパーツに加え、パーツではありませんが重要なものをいくつか紹介します。

電池

電池はおそらく知っていると思いますが、化学反応や光などによるエネルギーを電気エネルギーに変えて電力を生み出すもので、電圧を与えてくれます。回路記号は図 4.13 のように描きます。

電源

電源はその名のとおり電力の源です。電池もその一つです。回路記号は図 4.14 のように描きますが、一つの回路図の中に複数描かれている場合は同じ電圧であることをあらわしています。

グラウンド（アース、接地）

グラウンドは電子回路において基準となる電圧です。普通は 0 V をあらわします。回路記号は図 4.15 のように描きます。

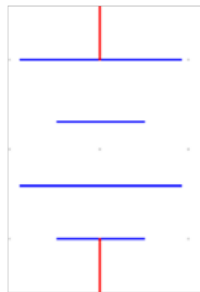


図 4.13 電池の回路記号

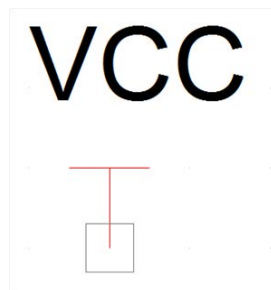


図 4.14 電源の回路記号

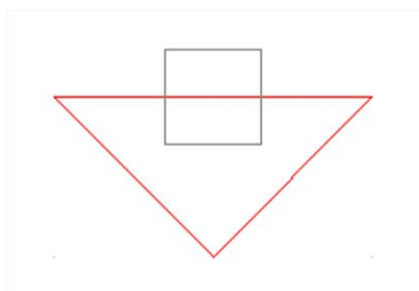


図 4.15 グラウンドの回路記号

4.2 回路図の読み方

最後に、回路図を「読む」ときに必要な最低限のルールを簡単にまとめておきます。図 4.16 に回路図の一例を挙げています。ここには上記で紹介したようなパーツ、電源、グラウンドに加え、それらをつなげるための線が描かれています。実際に回路を組み上げるときは、この線の部分にケーブルや配線などを使ってつなぐこととなります。回路図で線のつながっている部分は全てつなげる必要があります。その他、図 4.16 にもあるように、いくつか回路図特有の描き方について説明します。

1. 全てのパーツにパーツ番号が付きます。図では 5 個目のコンデンサなので「C5」と描かれています。コンデンサや抵抗などのように個別に値をもつものは、その値も描かれます。図の C5 は $0.1 \mu\text{F}$ の容量をもつことを示しています*2。
2. 全ての線をつなげると上では書きましたが、図のように線が交差している場合はつなぎません。
3. 逆に、図のように交差している部分に小さな丸が付されている場合はつなぐようにします。
4. 図のようにシンボルから足が 6 つ出ていますが、実際は 5 つしかつなぐ必要のない場合があります。こういう場合、使わない足に×を記します。
5. 電源の説明部分でも同じような例を挙げましたが、同じ記号が使われている場合は全てつながっていると思ってください。

*2 流儀にもよりますが、 μ (マイクロ=0.000001) は U、p (ピコ=0.000000000001) は P、k (キロ=1000) は K、M (メガ=1000000) は M と描きます。

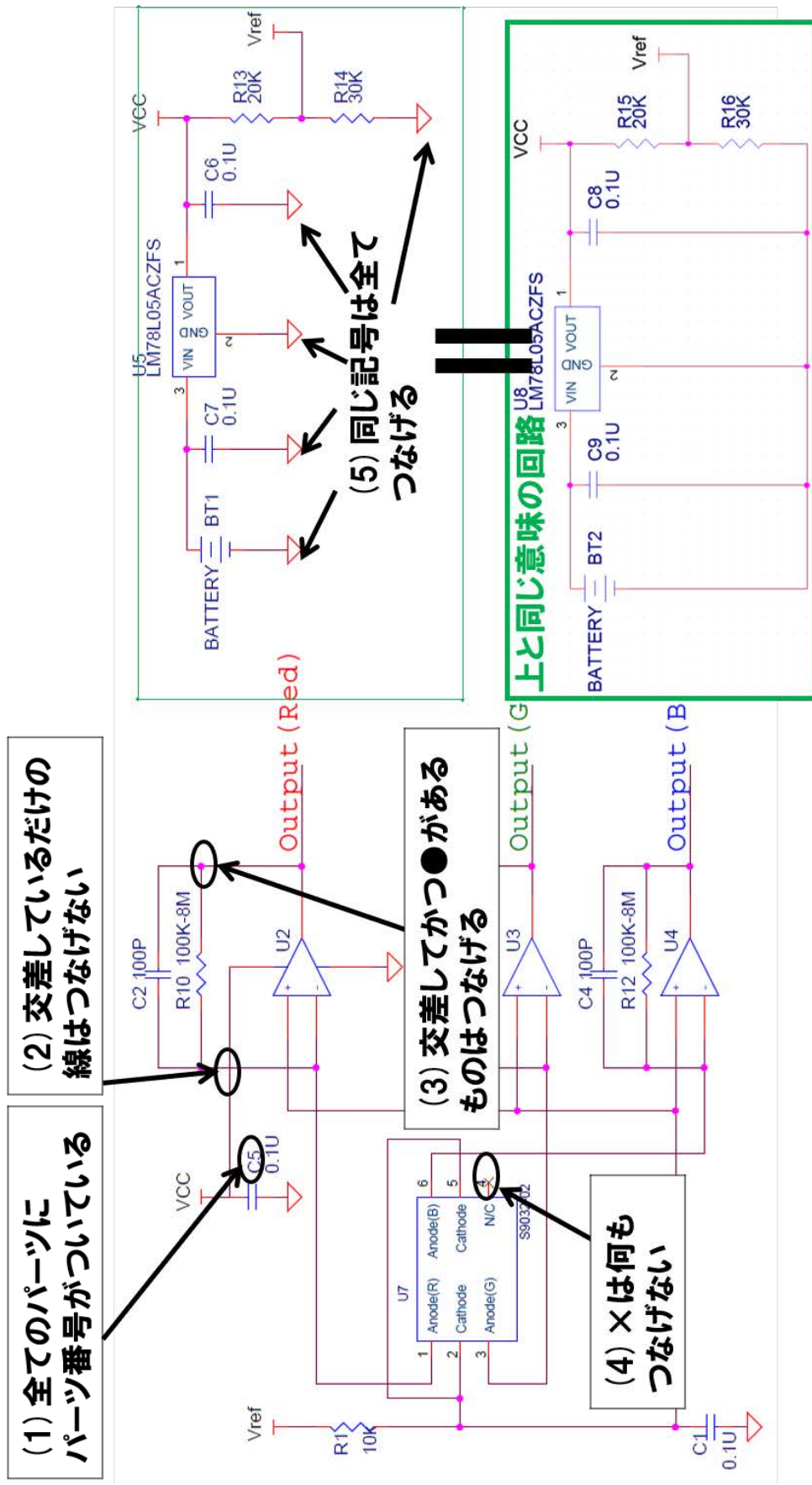


図 4.16 回路図の例と読み方

コラム「抵抗回路記号の今昔」

回路記号は JIS (ジス) という国により定められた標準ルールをもとに作られています。元々、抵抗の回路記号は、この JIS により 図 4.4 の (1) のように定められていました。しかし、少しでも記号を簡略化させようという国際的な基準に従い、1999 年に JIS により新たに 図 4.4 の (2) として改正されました^{*3}。そんなわけで、(2) が正しいはずだろうし、学校でもそのように習うと思います。ところが、実はこの JIS は法的な強制力はなく、以前からたびたび細かい変更もあったようなので、そもそも改正したことを知らない人がいたり、(1) のような昔の描き方を続ける人がいたりして、あまり守られていないようです。実際、専門的な現場でも、回路図を描くためのパソコンソフトに (1) だけ用意されていたり^{*4}、市販の回路パーツのマニュアルにのっている回路図に (1) が使用されていたりします。また、素粒子物理学実験で使用する電子回路の回路図でも (1) が主流で使われています。今後は (2) が主流になっていくだろうと思われませんが、こういった事情もあるため本プログラムでは (1) を採用しています。

^{*3} 抵抗以外にも色々改正されていますが、特によく使用されるパーツでかつ大きな変更のあった抵抗のみをここでは扱っています。

^{*4} 実は本テキストにのっている回路記号もパソコンソフトを用いて描かれているのですが、図 4.4 の (2) は用意されていなかったため、特別にこの記号の絵を用意しました。

ひらめき☆ときめきサイエンス「未知の光の正体を探れ!」テキスト編集委員

上野 一樹 (KEK 素核研)
高橋 将太 (KEK 広報室)
三原 智 (KEK 素核研)
坂下 健 (KEK 素核研)
海浦 雪子 (KEK)
西村 秋哉 (KEK)
安田 浩昌 (東京大学)
森 雄一郎 (東京大学)
谷川 輝 (東京大学)
青木 優美 (総合研究大学院大学)
瀬川 優子 (総合研究大学院大学)
松田 悠悟 (大阪大学)
太田 早紀 (大阪大学)
藤井 祐樹 (Monash 大学)

発行年月 2018 年 7 月

最終更新日時 2018 年 07 月 20 日
