



Unravelling the mysteries of
matter, life and the universe.



KAKENHI
日本学術振興会



ひらめき☆ときめきサイエンス 2017 「未知の光の正体を探れ！」

バージョン 1.0

上野一樹、高橋将太、藤井祐樹、三原智
安田浩昌、海浦雪子、西村秋哉

2017 年 07 月 18 日

目次:

第 1 章	宇宙を「知る」	1
第 2 章	宇宙を「創る」	3
2.1	宇宙のはじまりと加速器	4
2.2	エネルギーと質量	4
2.3	加速器と素粒子物理学	6
第 3 章	素粒子を「視る」	8
3.1	検出器	9
3.2	読み出し回路	12
第 4 章	分光	14
4.1	分光とは	14
第 5 章	電子回路	19
5.1	電子回路のパーツと回路記号	19
5.2	回路図の読み方	25

第 1 章

宇宙を「知る」

みなさんは、地球、太陽系、銀河などすべてを含む自然界がどのようにして作られているのかを考えてみたことはありますか？

この疑問は、はるか昔から人類が抱く根源的なナゾのひとつです。古代ギリシャのエンペドクレス*1 は「火、水、土、空気」を素にする「四元素説」を提案したり、デモクリトス*2 は「アトム」とよばれる分割不可能なモノ（科学的には「物質」と呼びます）単位を素にする「原子論」を提案したりしました。

19 世紀に入ってから人類は「科学」という道具を飛躍的にパワーアップさせます。以降、様々な技術の発展を伴った実験による検証で、自然界の物質の構成が断片的に分かってきました。その成果として、万物を構成する最小の構成要素が「素粒子」であることが明らかになってきました。つまり、「宇宙は素粒子からできている」ことが分かってきたのです。

さて「素粒子」とは一体なんなののでしょうか？ヒトには約 37 兆個の細胞あり、細胞は複数のタンパク質の集まりです。さらにタンパク質はアミノ酸の塊で、アミノ酸は分子からできています。このように物質をどんどん細かく調べていくと、分子 → 原子 → 原子核と電子 → 陽子と中性子 → … のように分解でき、その突き当たりが素粒子です。

さて、ではこの自然界をすべて包み込むもっとも大きな「宇宙」はいったいどうなっているのでしょうか？図 1.1 はギリシャ神話の「ウロボロスの竜」をモチーフに、宇宙と素粒子の関係を表現したものです。ウロボロスの竜は自分の尻尾をくわえて環になった竜で、宇宙の完全性を表しています。このように、もっとも大きな「宇宙」ともっとも小さな「素粒子」が実は密接に関係していることが、最近の研究でわかってきました。詳しくは次章で説明します。

*1 紀元前 490 年頃—紀元前 430 年頃の哲学者

*2 紀元前 460 年頃—紀元前 370 年頃の哲学者

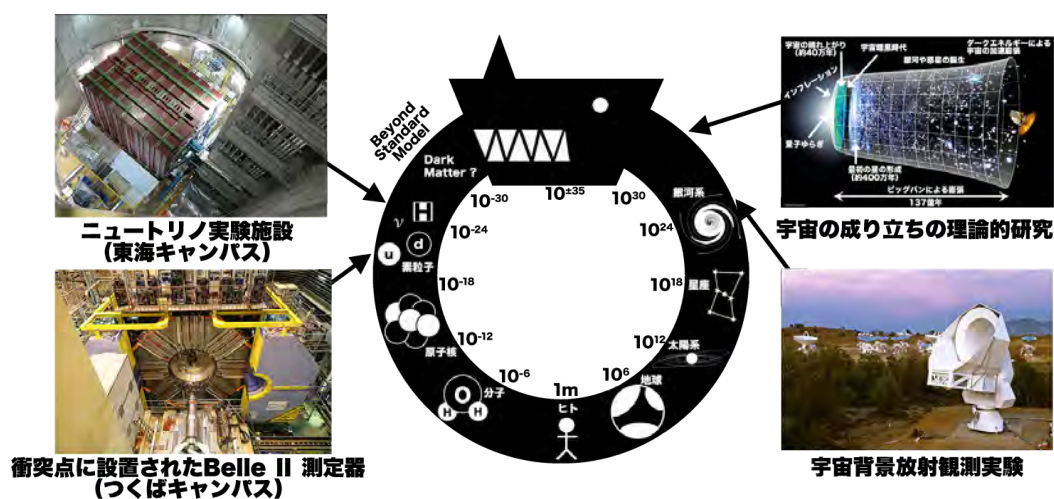


図 1.1 宇宙と素粒子の関係を表したウロボロスの竜。竜の体表には、大きさとそのシンボルとなるイラスト。外側には KEK で行っている研究内容を写真で示しています。

第2章

宇宙を「創る」



図 2.1 宇宙の3大研究方法

さて、物理学者たちは、この宇宙とそこに潜む真理をどのような方法で研究しているのでしょうか？

宇宙に関して人類がわかっていることはほんのわずかです。そのため、研究者たちは様々な側面から研究を進めています。

研究方法は大きく3つに分けることができます。図 2.1 を見てください。1つ目は望遠鏡などを使って「宇宙を『観る』」方法。これは国立天文台などに代表される研究方法であり、人類が古くから親しんでいる方法でもあります。2つ目はロケットを使って「宇宙に『行く』」方法。これは JAXA（宇宙航空研究開発機構）などに代表される研究方法であり、宇宙

を直接調べる方法です。種子島からのロケット打ち上げや国際宇宙ステーションとの交信をテレビ中継で見たことがある方も多いのではないのでしょうか？3つ目は加速器を使って「宇宙を『創る』」方法。これは KEK（高エネルギー加速器研究機構）などに代表される「加速器」を使った研究方法です。

この章では「加速器を使って宇宙を『創る』」とはどういうことなのか？について説明します。

2.1 宇宙のはじまりと加速器

みなさんは「ビッグバン」という言葉を聞いたことはありませんか？この宇宙は不変ではなく、いまから 138 億年前の「ビッグバン」とよばれる大爆発からはじまったと考えられています（図 2.2）。この時の宇宙は超高温な状態で、素粒子がうじゃうじゃしている世界だったそうです。このうじゃうじゃしている素粒子の世界を詳しく調べると宇宙誕生時の様子とその後の発展が理解できるはずですが、ウロボロスの竜の「頭」を追いかけていると「尻尾」にたどりついた、というわけです。

「超高温」というのは言い換えると、「ちょーエネルギーが高い」ということ。つまり、人類が「ちょーエネルギーが高い」状態を作ることができれば、人工的にビッグバンに近い超高温状態を再現することができます。「宇宙を『創る』」というのは「宇宙のはじまりを人工的に再現する」ということです。そして、これを可能にする装置を「加速器」とよびます。（残念ながら、人類が実際に人工的ビッグバンを引き起こせるようなエネルギーに到達するには、さらなる科学技術の発展が必要です。それには、まだまだ時間はかかりそうです・・・）

さて、ここからは加速器について説明します。加速器というのはその名のとおり、粒子を「加速する」装置です。

粒子を加速することでエネルギーを与え、標的の物質や他の粒子と衝突させることで、大きなエネルギーが生じます。そのエネルギーから新しい粒子が現れ、未知の粒子や現象を探る手がかりになります。

2.2 エネルギーと質量

宇宙のはじまりは「ちょーエネルギーが高い」状態だったので、現在の自然界にはほとんど存在しない素粒子が存在していたはずですが、つまり、そのような素粒子を調べることができれば宇宙のはじまりの謎を解明することにつながるはずですが、では、どうやってそんな今は存在しないはずの「素粒子」を調べればいいのか？

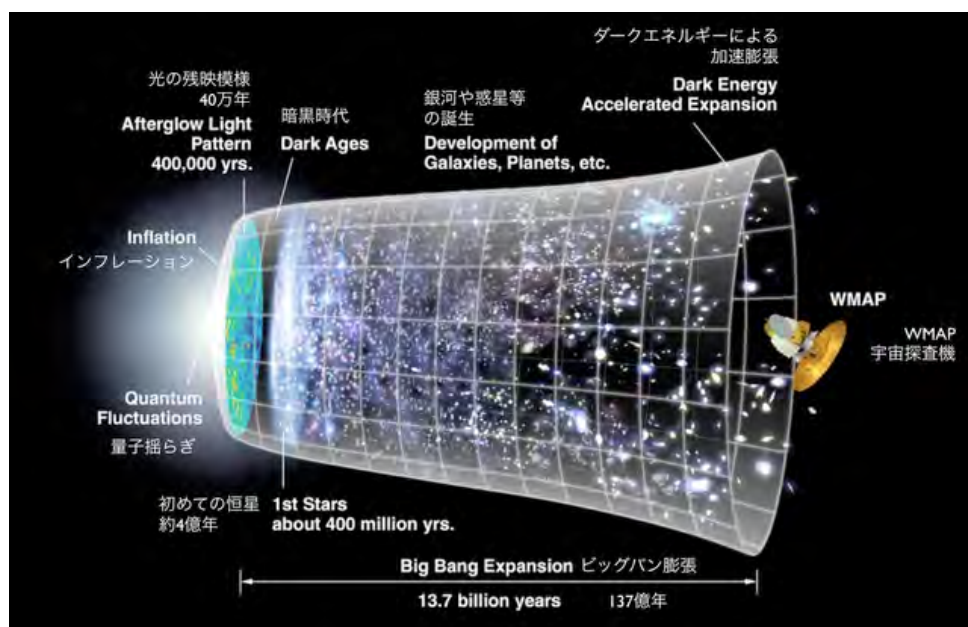


図 2.2 インフレーション理論に基づく宇宙の成り立ち (出典: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inflation_Universe.png)

キーワードは「エネルギー」です。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です。私たちの感じる世界では、エネルギーというと、発電所など大きい施設を思い浮かべるかもしれません。しかし、アインシュタインの相対性理論によると、エネルギーと質量には密接な関係があることがわかりました (図 2.3)。

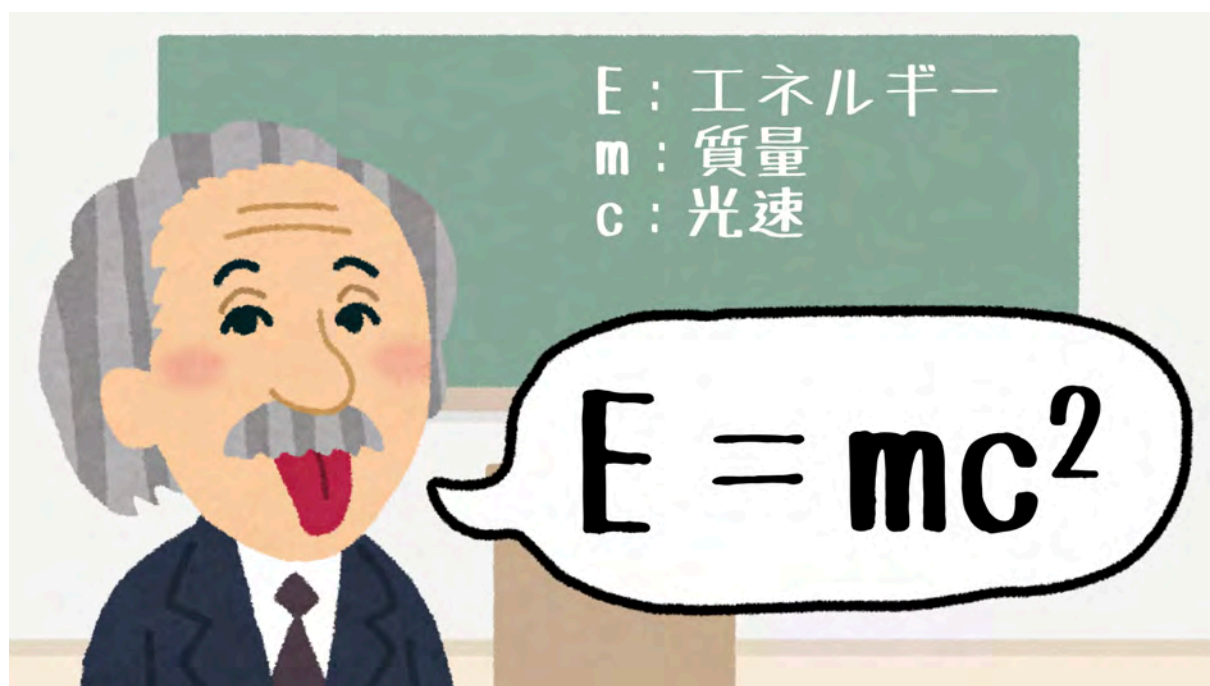


図 2.3 エネルギーと質量の関係式 (とアインシュタイン)

その関係によると、(静止している) 粒子の重さ (=質量) とエネルギーは同じものであ

ることが出来ます。したがって素粒子を作り出すには高いエネルギーがあればいいのです。そこで、「加速器」という装置を使って高いエネルギーを生み出すことで、今はほとんど存在しない「素粒子」を作り出します。

2.3 加速器と素粒子物理学

現在、世界で最高のエネルギーを持つ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の発見を目指して研究を行っています。もちろん、数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、世界でもトップレベルの加速器を使った実験をしています。私たちは、これらの装置を使って宇宙のはじまりを「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。

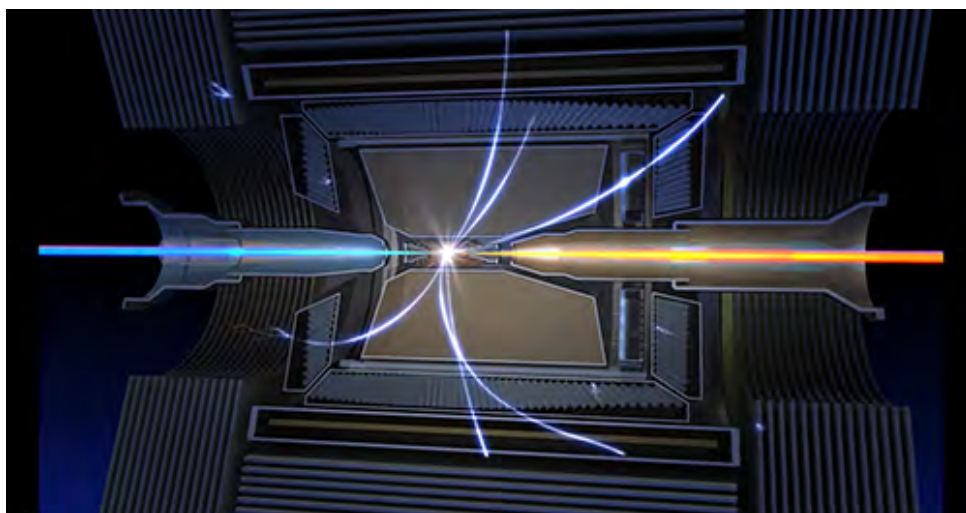


図 2.4 加速された粒子の衝突のイメージ（Belle II 実験）（画像提供：KEK Belle II グループ）

コラム 「SuperKEKB 加速器」

みなさんは「Belle 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行われた実験です。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」が全くと言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」だけが生き残る過程が必要です。これを説明したのが小林・益川の「CP 対称性の破れ」とよばれる理論でした。これを証明するためには、「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」とよばれるものを使って性質の違いを証明しました。結果的に、これらの功績は 2008 年の小林・益川のノーベル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、今まさに実験を行おうとしています。

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事ができます。完成すれば世界一の衝突回数を実現でき、今までに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。

第3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。素粒子実験の黎明期には 図 3.1 のように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より重い粒子を探すため、加速器を用いて高いエネルギーで粒子をぶつけることで新しく粒子を作り出し、図 3.2 のような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。

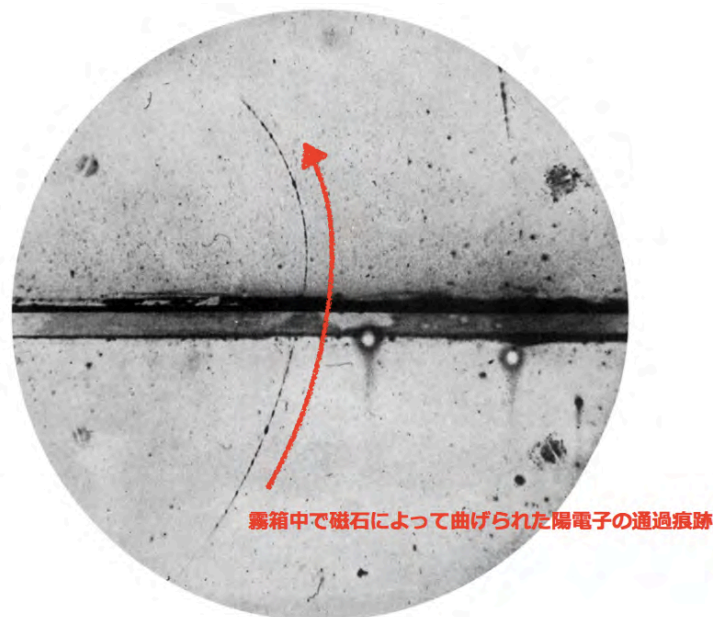


図 3.1 「霧箱」という検出器を使って当時見つかっていなかった「陽電子」という新しい素粒子が発見された。(出典：<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PositronDiscovery.jpg>、一部改変)

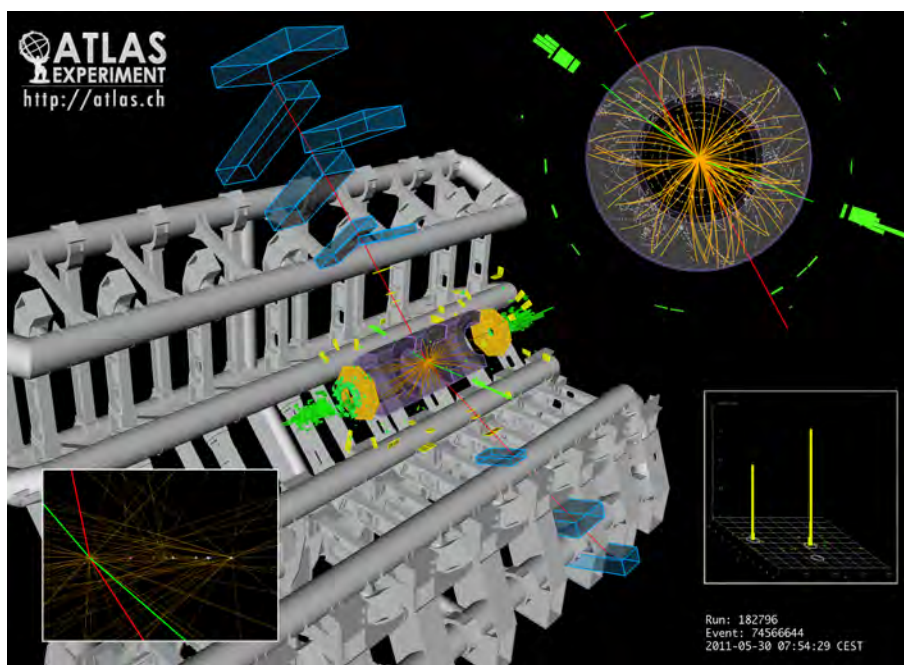


図 3.2 CERN にある LHC 加速器を使って ATLAS 実験によって発見されたヒッグス粒子^{*1} の候補イベント。大量のデータの中から複合実験装置を駆使してヒッグス粒子と見られるイベントを探している。(写真提供 CERN アトラス実験グループ)

検出器は、主に大きく分けて二つのパートに分かれており、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す部分とによって構成されます。

3.1 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) シンチレータ+光センサー

特定の物質中では粒子が内部でエネルギーを失うと、そのエネルギー量に比例した強さの光が発生します（図 3.3 参照）。この性質を利用して、未知の粒子が持つエネルギー情報や粒子が通過した時間を測ることができ、このような性質をもつ物質を「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

^{*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。

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ります。

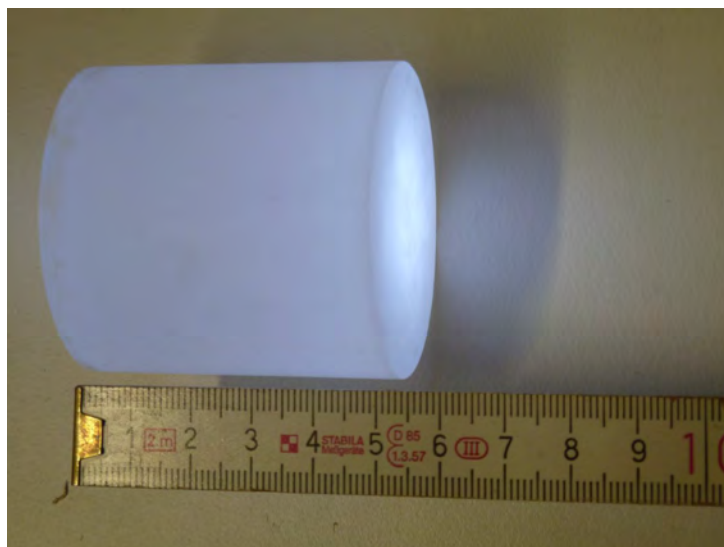


図 3.3 シンチレータの一種である CsI (Tl) 結晶が発光する様子 (出典: Photo by My-Name(A1000), CC BY-SA 3.0, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kristall-CsI\(Tl\)_mit_Skala.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kristall-CsI(Tl)_mit_Skala.jpg))

(2) ガス検出器

ガス検出器では粒子が内部でエネルギーを失い、電子とイオンのペアを作ります。通常は検出器内部に高いプラス電圧をかけることで、マイナスの性質を持った電子を集めて電気信号として読みだします (図 3.4)。固体か液体のシンチレータに比べガス検出器は気体のため、粒子が内部で失うエネルギーはとっても小さくなります。そのため、ガス検出器は主に粒子のエネルギー損失を抑えつつ、粒子が通過した位置を測りたいときに用いられます。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。

(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 (キャリア) が流れやすい 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。それらの半導体を組み合わせることで、様々な用途に応じた

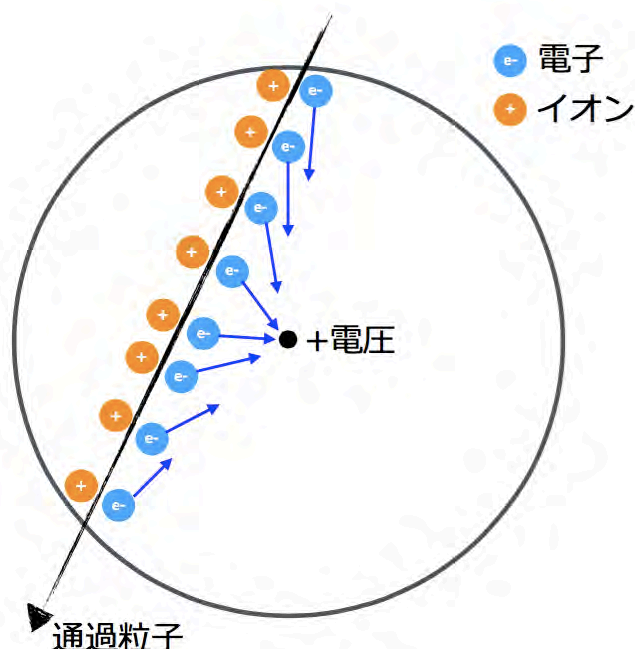


図 3.4 ガス検出器の基本的な動作原理

検出器や回路が作られています。例えば 図 3.5 のように P 型半導体と N 型半導体を組み合わせた半導体は、決まった方向にしか電流が流れない“ダイオード” (PN 接合半導体) とよばれる回路として利用できます。さらに、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^{*3}、図 3.6 のように P 型と N 型の間には「空乏層」とよばれる、電圧はかかっているにもかかわらず電流が流れないような特別な領域ができます。この空乏層を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、そのペアが電圧によって引っ張られてその時だけ電流が流れます。この性質を利用すると、ガス検出器と同じように粒子が通過したり吸収されたときの信号を電気信号として読み出すことができます。

半導体検出器は、1 ピクセルあたりの読み出し面積を 1mm より 1,000 倍も小さい 1 ミクロン以下の精度で加工できるため、非常に小型の検出器として利用できます。半導体は固体ですが、とても薄く作ることが可能なため、ガス検出器と同じように粒子を止めずに位置を測ることができます。また、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使用されています^{*4}。

^{*3} 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。

^{*4} 今回実習で使う検出器も半導体光センサーの一種です。

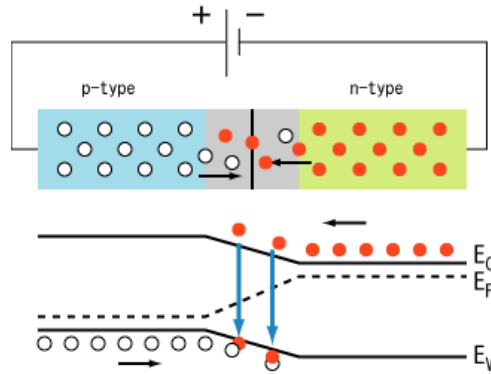


図 3.5 順方向に電圧をかけた PN 接合型のダイオード (出典: Photo by S-Kei, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-Diode-ForwardBias.PNG>)

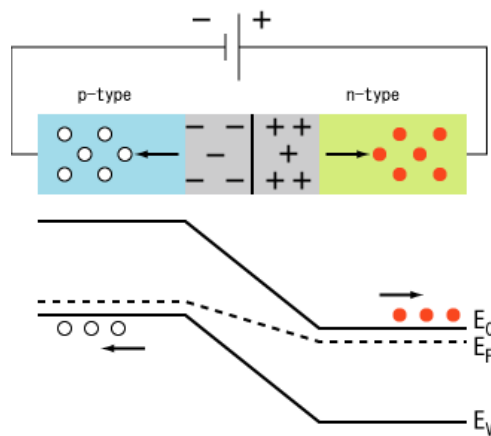


図 3.6 逆方向に電圧をかけた PN 接合型のダイオード (出典: Photo by S-Kei, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-Diode-ReverseBias.PNG>)

3.2 読み出し回路

検出器の後半のパート、「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(つまり読み出せるように)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、回路回路と言ってますが、そもそも「回路」とはどのようなものでしょうか。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*5。電子回路は、

*5 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

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、様々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様々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 3.7）。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。



図 3.7 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。

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、様々な流儀があり、他の区別方法をとることもあるようです。

第 4 章

分光

3 章までに述べたように、素粒子実験では検出器や電子回路などを駆使して様々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。

この様々な情報のうち、最も重要なものの一つとしてエネルギーがあげられていました。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言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色々ありますが、その中でも比較的身近に体感できる「分光」という方法があります。今回のプログラムでは、この分光に焦点をあて、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さわりの部分をまとめましたので、参考にしてください。

4.1 分光とは

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、分けるってどういうことなのでしょう？あなたは周りにある光を分けることができますか？実は、「エネルギー」がこの「分ける」ことの重要なキーワードとなっています。

分光の紹介の前に、そもそも光とはどういうものな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、太陽だったり電気だったり、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。このように、人間の目を刺激して明るさを感じさせるものを光とよび、専門的には、可視光とよべれます。ただ、科学の発展により実は光は電磁波とよばれるものの一種であるということがわかっています。例えば、携帯電話などから出ている電波や、太陽から出ている紫外線、電子レンジなどで使われているマイクロ波は電

磁波の一種で、つまりこれらも“光”なのです（図 4.1）。



図 4.1 電磁波の例

少し専門的になってしまいますが、電磁波というのは、電場と磁場の変化により空間を伝わる波のことです。何が何やらわからないかもしれませんが、ここでは「波」ということが重要なので、他は忘れてください。そんなわけで、光は波としてふるまうことがわかっています。

光は波ということで、その光によって波長という量（特徴）を持ちます（図 4.2）。普段、信号機や電化製品など、様々な色の光を目にすることがあると思いますが、実はこの色の違いは、波長の違いによるものなのです。ということは、逆にこの波長を使うと・・・そうです、光を分けることができます。つまり、波長によって光を分けることが「分光」なのです。

雨上がりの晴れた空に虹がかかっているのを見たことがありますか？また、プリズム（図 4.3）って見たことがありますか？まさにこれらは分光です。白色の光を色ごとに（波長ごとに）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 4.2 光の波動性

これにて一件落着、といたいところですが、キーワードの「エネルギー」が出てきていませんね。ここから、もう一歩進んだ分光について紹介します。

光とは上記のとおり波だということがわかっていたのですが、さらに科学の発展により量子力学という理論が出てきました。それによると、光は粒子としてふるまうことがわかったのです（光子とよびます）（図 4.4）。非常に不思議なのですが、光は波と粒子の両方の性質をあわせもちます。実際に、これまでの様々な実験により、両方の性質が確かめられています。ここでは細かいことまでは触れませんが、非常におもしろい部分です。興味のある方はぜひ調べてみてください。

さて、分光とエネルギーの関係についてですが、もう一息です。ここから少しだけ数式が出てきます。光の波（波動性）と粒子（粒子性）の両方の性質を考えると、おもしろいことがわかります。光の波動性から、

$$c = \nu\lambda$$

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 は光（波）

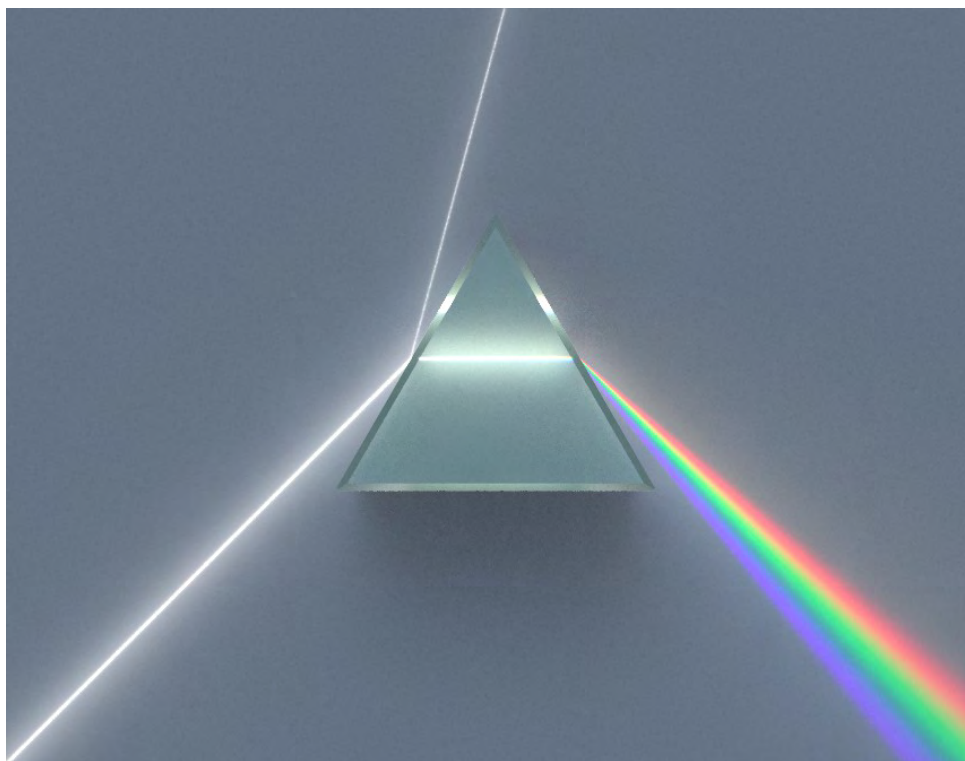


図 4.3 プリズムの例 (出典: Photo by Spigget, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration_by_Spigget.jpg)

の波長です。一方、光の粒子性から、

$$E = h\nu$$

という式が得られることがわかっています。E は光のエネルギー、h はプランク定数という特別な数です。これらの式を二つあわせると、

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

と導かれます。この式から、光のエネルギーは波長と反比例するということがわかります。つまり、波長がわかれば光のエネルギーを知ることができるのです。逆に、エネルギーによって光を分けることも当然考えられます。そうです、これが一歩進んだ分光です。

こうして光は、波長やエネルギーの違いにより、色だけでなく、図 4.5 のように分類することがわかりました。波長が 380nm~780nm^{*2} の光は可視光とよばれ、上でも述べたように人間の目が認識できる光です。波長が 780nm より長い光は赤外線とよばれ、さらに長いと電波となります。逆に 380nm より短い光は紫外線とよばれ、さらに短くなると X 線やガンマ線となります。エネルギーの情報を知ることによって、このような細かい分類もできるようになりました。さらに分光にエネルギーの情報を使うことで、より光の細かい性質なども調べることができるのです。

*2 1nm (ナノメートル) は 1mm の 100 万倍小さな長さを表します。

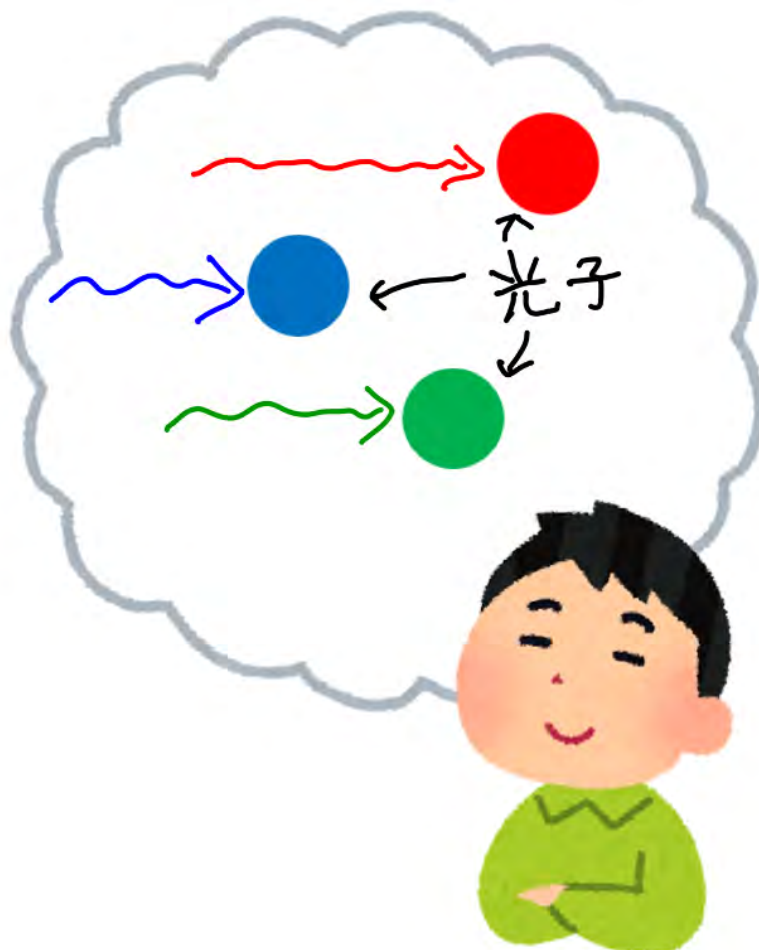


図 4.4 光の粒子性

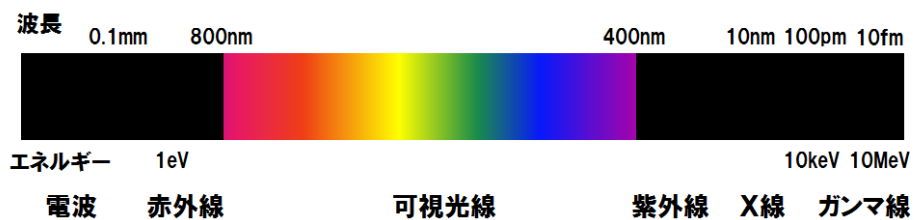


図 4.5 光の分類

第 5 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。

5.1 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。

5.1.1 抵抗（器）

抵抗器は電気を流れにくくするパーツです（図 5.1、図 5.2）。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 5.1 抵抗器（出典：Photo by Afrank99, CC BY-SA 2.5, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3_Resistors.jpg）



図 5.2 抵抗器の回路記号

5.1.2 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る電気を蓄えたり放出したりするパーツです (図 5.3、図 5.4)。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 5.3 コンデンサ (出典: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photo-SMDcapacitors.jpg>)

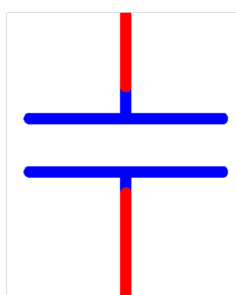


図 5.4 コンデンサの回路記号

5.1.3 LED (発光ダイオード)

LED はダイオードとよばれる電流を一定方向にしか流さないパーツの一種で、発光する半導体でできたパーツです (図 5.5、図 5.6)。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、長い方がプラス、短い方がマイナスです。



図 5.5 LED (出典: Photo by PiccoloNamek, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBG-LED.jpg>)



図 5.6 LED の回路記号

5.1.4 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 5.7、図 5.8)。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 5.7 図 8: トランジスタ (出典: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistors-white.jpg>)

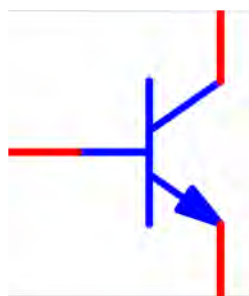


図 5.8 トランジスタの回路記号*1

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 5.9 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 5.10 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。

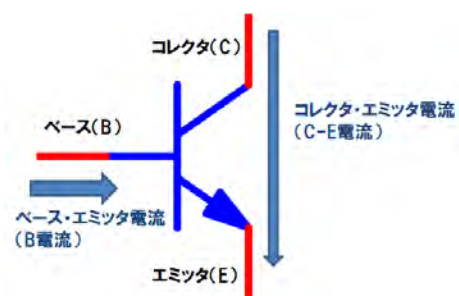


図 5.9 トランジスタの各部の名前

5.1.5 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 5.11、図 5.12)。このパーツもたくさんの種類がありますが、ここではそのうちの一つであり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、それぞれ入力、出力、グラウンド (後述) に対応します。基本的には、三端子レギュ

*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。

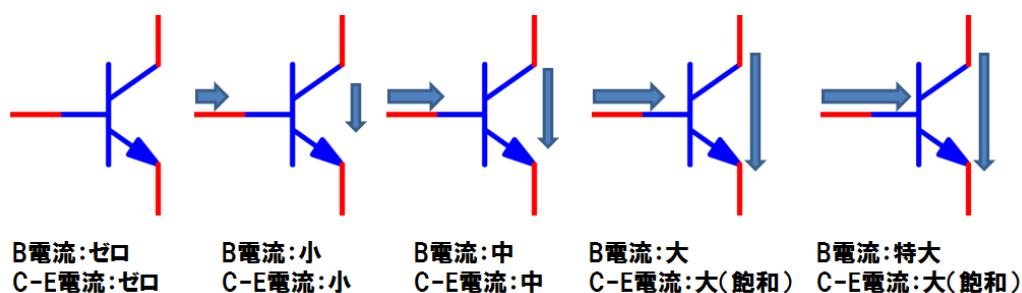


図 5.10 トランジスタのスイッチ機能

レギュレータとコンデン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 5.13 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）であらわします。

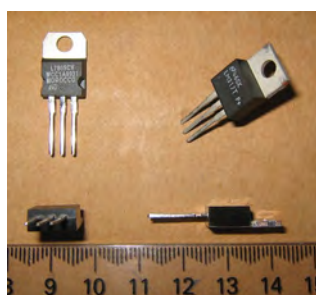


図 5.11 レギュレータ（出典：Photo by John Dalton, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TO-220_Package_Four_Different_Projections.jpg）

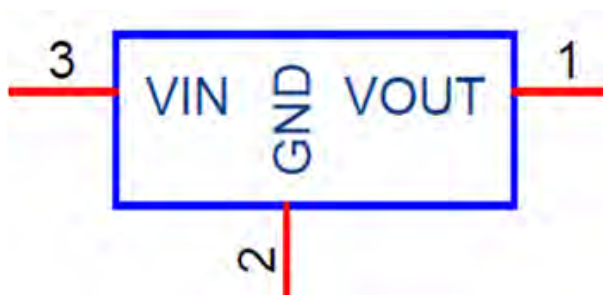


図 5.12 レギュレータの回路記号

5.1.6 その他

以上に挙げたパーツに加え、パーツではないです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 5.13 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 5.14 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 0V をあらわします。回路記号は図 5.15 のように描きます。

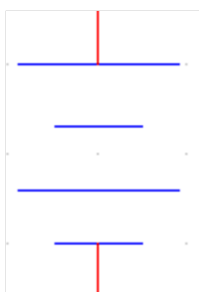


図 5.13 電池の回路記号

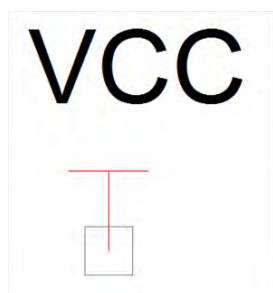


図 5.14 電源の回路記号

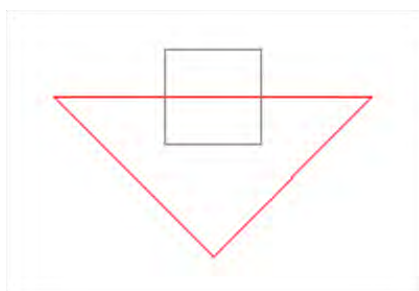


図 5.15 グラウンドの回路記号

5.2 回路図の読み方

最後に、回路図を「読む」際の必要最低限のルールを簡単にまとめておきます。図 5.16 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。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になります。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 5.16 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。

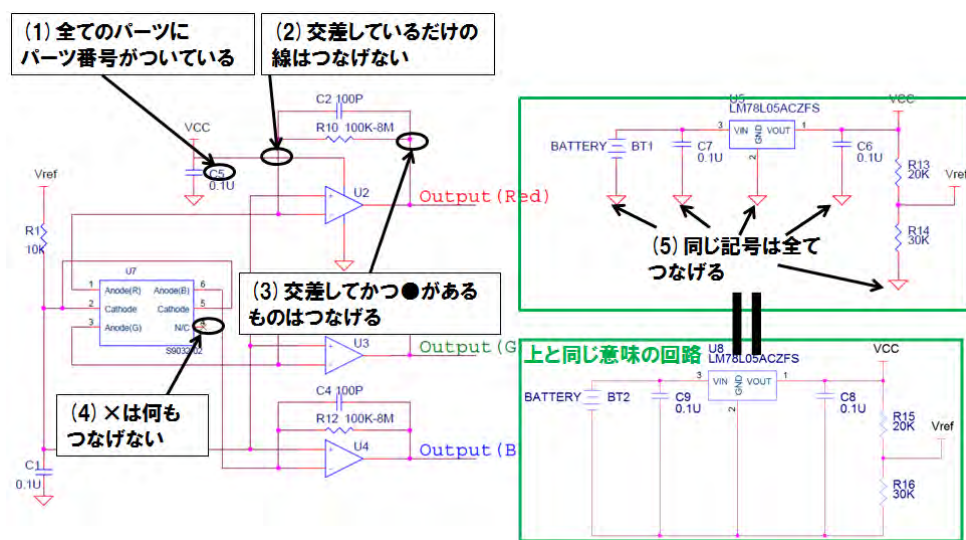


図 5.16 回路図の例と読み方