

ひらめき☆ときめきサイエンス2021

未知の**光**の正体を探れ！

— 半導体検出器を利用した分**光**器の作成 —

ひらめき☆ときめきサイエンス

2021

未知の光の正体を探れ！

2021年11月17日

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	加速器実験	9
2.1	粒子を衝突させる	9
2.2	検出器	10
2.3	読み出し回路	15
第3章	分光	17
3.1	分光とは～エネルギーで「光を分ける」～	17
3.2	コラム：粒子だけど、波？～量子の世界から～	20
第4章	電子回路	23
4.1	電子回路のパーツと回路記号	23
4.2	回路図の読み方	29
第5章	テキスト編集委員	33

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」とした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。

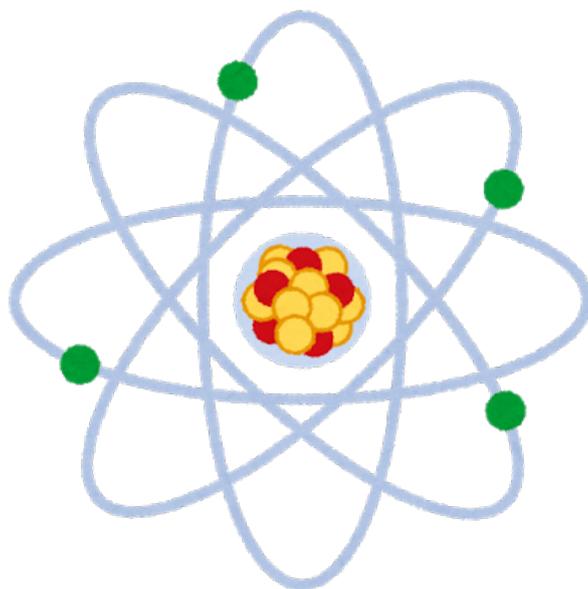


図 1.1 原子の模式図。中央に、陽子と中性子からなる原子核があり、その周りを電子が回っています。この絵では誇張して描いてありますが、実際の原子核の大きさは原子の1万分の1程度です。

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などの「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。

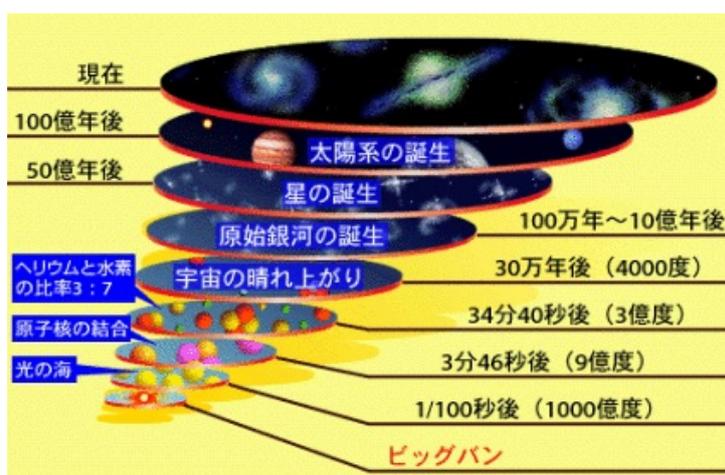


図 1.3 ビッグバン理論に基づく宇宙の進化。(画像提供：宇宙航空研究開発機構 (JAXA) http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/big_bang.html)

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。

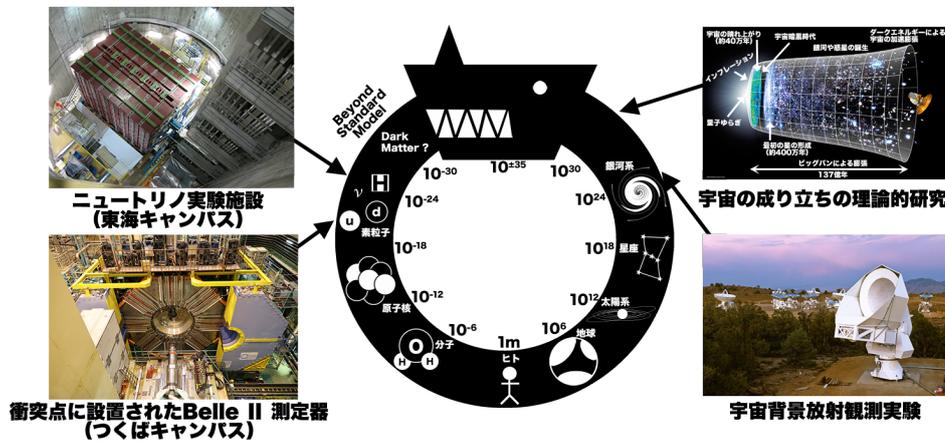


図 1.4 宇宙と素粒子の関係を表したウロボロスの竜。竜の体表には、大きさとそのシンボルとなるイラスト。外側には KEK で行っている研究内容を写真で示しています。

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。

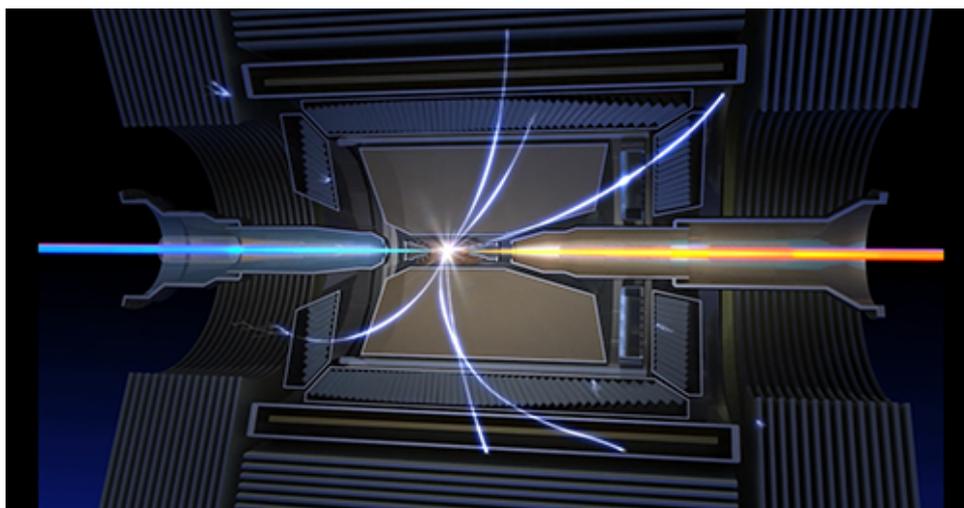


図 1.5 加速された粒子の衝突のイメージ（Belle II 実験）（画像提供：KEK Belle II グループ）

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たはずに違いありません。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』と互いにうつりかわる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 加速器実験

1章で紹介したように、物理学者は「加速器」とよばれる大型の実験装置を用いて研究しています。加速器実験はとても大きな実験ですが、そこで行っていることは大きく分けると2つになります。1つは粒子を加速して衝突させること、もう1つは粒子が衝突した直後に何が起きているかをよく調べることです。

この章では、KEK で取り組んでいる研究を例に、加速器を用いた実験の概要を説明します。

2.1 粒子を衝突させる

KEK で取り組んでいる Belle II 実験（ベル・ツーじっけん）で使う SuperKEKB 加速器は 図 2.1 のような直線と円を組み合わせた構造をしています。

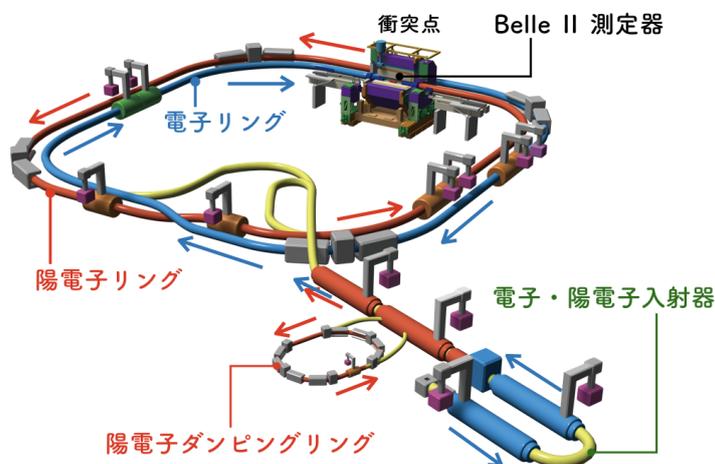


図 2.1 SuperKEKB 加速器の全体図。

実験の手順は次のようになります。

手順 1：加速する粒子のペアを用意する

私たちが「静電気」などで感じる電気の正体で、マイナスの電気を帯びている「電子」と、電子と質量は同じであるものの、プラスの電気を帯びた「陽電子」という粒

子を用意します。図 2.1 の「電子・陽電子入射器」と書かれた装置で、これらの粒子を作ります。

手順 2：粒子を加速する

電子や陽電子はともに電気を帯びているので、電気の力を使って加速することができます。手順 1 で述べた「電子・陽電子入射器」にある「加速管」と呼ばれる装置、及び 図 2.1 の「電子リング」「陽電子リング」と書かれた装置の直線部分にある「加速空洞」と呼ばれる装置で加速します。

手順 3：粒子の飛ぶ方向を制御する

加速器の形に沿って粒子を飛ばすために、その方向をきちんと制御する必要があります。また、最後の一箇所きちんと粒子が飛んでくるように調整することも大切です。そのような制御をするために電磁石を利用して強力な磁場を加えます。

手順 4：粒子を衝突させる

電子リングと陽電子リングで加速したそれぞれの粒子を「衝突点」とよばれる、決められた場所で衝突させます。

KEK の研究では、このようにして光速近くまで加速させた粒子同士を衝突させ、そこでどんな反応が起きているのかを調べています。

2.2 検出器

日常のある出来事に関して、私たちが詳しく知りたいとき、写真や動画に記録して調べることがあると思います。加速器の実験でも同じように「検出器」と呼ばれる装置を用いて、衝突したときに起こることを記録して調べます。ここでは、素粒子の検出器について紹介します。

KEK の Belle II 実験は 1 周 3km の SuperKEKB 加速器で加速した 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子の衝突を 図 2.2 のような装置で「視ます」。

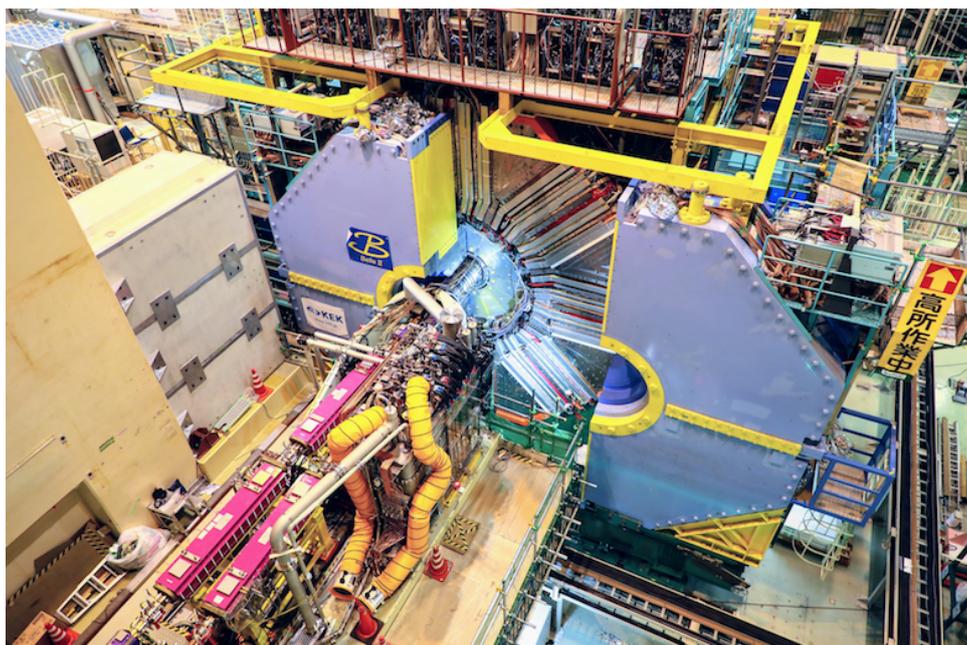


図 2.2 Belle II 測定器。

2.2.1 Belle II 測定器の構造

Belle II 測定器は 図 2.3 に示したように 7 種類の検出器の組み合わせでできています。電子と陽電子を衝突させて飛び出てくる粒子を、ほとんど逃がすことなく捕らえることができます。

衝突して飛び出てくる粒子を二次粒子と呼びます。研究者は、この二次粒子を調べているのですが、その寿命¹⁾ はとても短いのです。例えば B 中間子の場合、0.0000000000001 秒（小数点の後 12 個の 0 がある）しか寿命がありません。

そのため B 中間子の飛跡はわずか数百ミクロン²⁾ しかなく、B 中間子を直接視ることは不可能です。だから、測定器では、二次粒子がさらに変化して現れる粒子を調べることで、B 中間子のことを再現します。ここまで話すと測定器がやっていることの難しさはたぶん伝わったと思います。

1) ここで言う寿命は、私たちが一般的に用いる意味とは少し違います。「粒子の寿命が尽きる」=「他の粒子に変化する」というような意味で用いられます。

2) 1 ミクロンは長さの単位で、1 マイクロメートルともよび、1 ミリメートルのさらに 1000 分の 1。

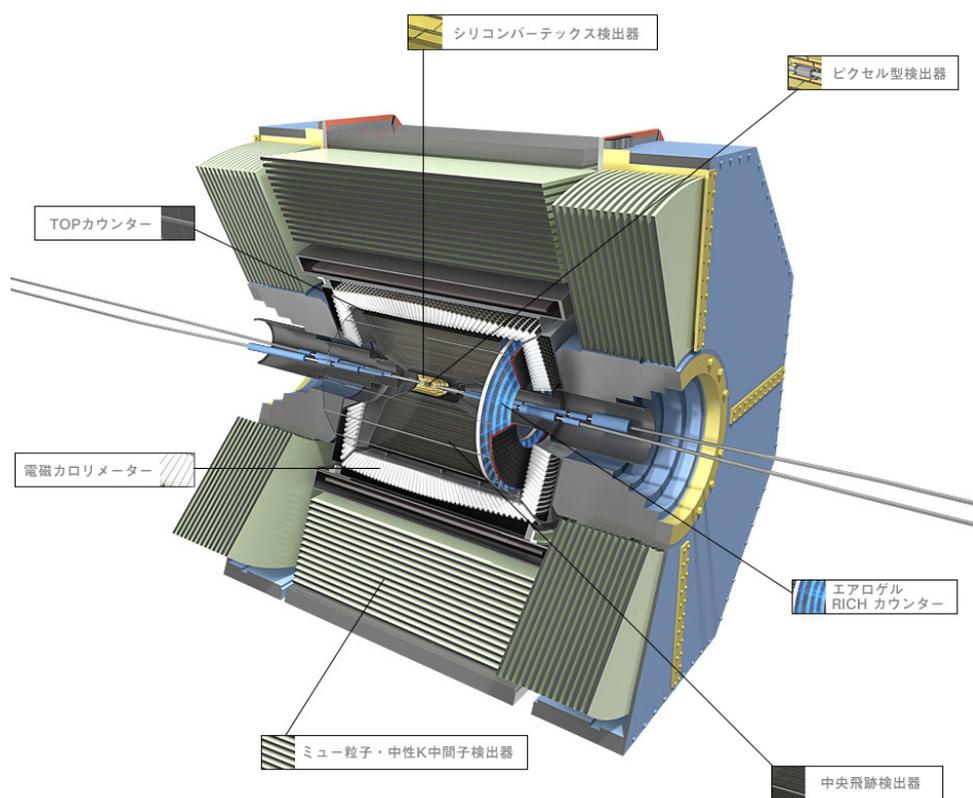


図 2.3 Belle II 測定器の構成。(Rey.Hori/KEK)

2.2.2 半導体崩壊点検出器

最内層にあるのは、崩壊点を検出するための半導体検出器（図2.4）です。半導体検出器は高性能な半導体センサーを使って、粒子の飛跡を再現することができます。ここまでではイメージしにくいかもしれませんが、実は、半導体検出器は私たちのスマホ、デジカメで搭載されるレンズと全く同じ技術のものです。つまり、我々研究者はデジタルカメラの技術（CMOS や、CCD など）を用い、素粒子の写真を撮れるようなデジタルカメラを作ったのです。

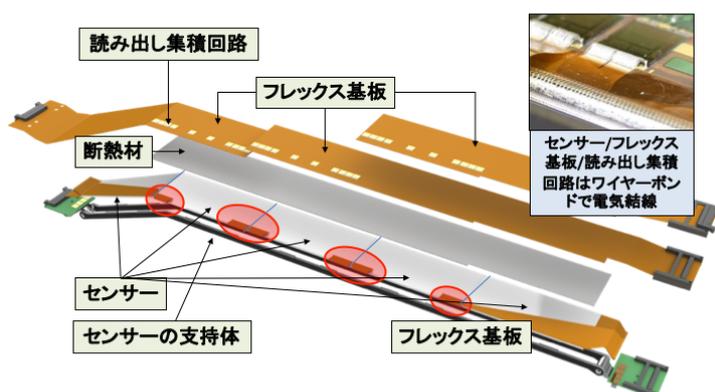


図 2.4 Belle II の半導体ストリップ型検出器。

2.2.3 中央飛跡検出器（CDC）

半導体検出器の外側にあるのは、中央飛跡検出器です。これを以降「CDC」と呼びます。

CDC の役割は「荷電粒子の運動量の測定（図 2.5）」「粒子識別」「トリガー信号生成」の3つがあります。

「荷電粒子の運動量の測定」：荷電粒子とは、電子のように電気を帯びた粒子のことです。CDC では荷電粒子の飛跡を記録し、運動量を測定してくれます。運動量は粒子の性質を知る上でとても重要な物理量です。

「粒子識別」：加速器実験において、粒子の種類はたくさんあります（電子、中間子、バリオンなど）。CDC はどの粒子なのかを教えてくれます。

「トリガー信号生成」：加速器実験では多くの信号が得られますが、われわれがほしいものはそのうちのごく一部しかありません。CDC は、ほしい信号をたくさんの信号の中から選び出してくれます。

CDCで測定した飛跡と運動量・電荷の関係

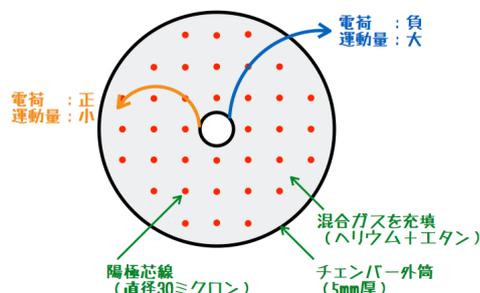


図 2.5 CDC による粒子の飛跡測定。

2.2.4 TOP

『TOP』(図 2.6) は Belle II 測定器で検出される素粒子の識別に使われる検出器の名前で、「Time Of Propagation (伝達時間)」の略です。粒子が石英(二酸化ケイ素の結晶)を通過するときにチェレンコフ光⁴⁾が生じます。これを、端に設置した光検出器³⁾で、その到達位置と時間を測定します。この情報を用いて素粒子の種類を識別します。

2.2.5 カロリーメータ

『カロリーメータ』は粒子のエネルギーを測定する検出器で、ヨウ化セシウムの結晶からできています。この結晶は粒子が入射したときに、そのエネルギーに比例した量のシンチレーション光という光を放出します。この光の量を測ることで、粒子のエネルギーを知ることができます。この装置で行われるように、粒子のエネルギーを知る装置を作成することが、今回の実習の内容になります。

- 4) チェレンコフ光：真空における光速はどの粒子よりも速いが、物質中において光が進む速度は遅くなり、場合によって別の粒子に追い抜かれます。荷電粒子が物質中の光速を超えて通過すると光を放出します。この光をチェレンコフ光と呼びます。
- 3) 光検出器：半導体検出器の一種。半導体特有の構造を使い、微弱な光(わずか1個の光子)を電子回路で扱えるまで増幅する装置です。



図 2.6 TOP 外観

2.3 読み出し回路

実際に検出器を使う上で、なくてはならない「読み出し回路」について簡単に説明します。

現代の素粒子実験で使われている検出器は、素粒子の痕跡を電気信号として出力します。その電気信号を読み出してコンピューターで扱える形に変換するのが「読み出し回路」の役割です。読み出し回路で処理された信号はデータとして記録されます。こうして蓄積されたデータをコンピューターで解析することで、研究者が知りたい情報を取り出すことができます。

最先端の加速器実験では、限られた時間でなるべく多くのデータを集めるため、できるだけ高い頻度で粒子を衝突させます。こうした実験で使われる大型検出器は、たくさんの検出器を組み合わせたもので、個々の検出器が電気信号を出力します。つまり、検出器からは様々な電気信号が、とても短い間隔でやってきます。それらを適切に処理するためには、市販のものではなく、検出器専用の電子回路を独自に開発する必要があります（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。

物理実験において重要な役割を果たす電子回路ですが、実は家電製品や車など私たちの日常にあるあらゆるものに使用されています。この電子回路は、主に半導体と呼ばれる物質を用いたパーツを組み合わせることで作られます。電子回路の設計図である回路図のルールを覚えれば、実際に素粒子実験に用いられる電子回路も作る

ことができるのです！



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」ということなのでしょうね。しかし、分けるとはどういうことなのでしょう？あなたは周りに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も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

身の回りにはある光は、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⁾。

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。

1) 白色の光は全ての色の可視光が混ざった光です。

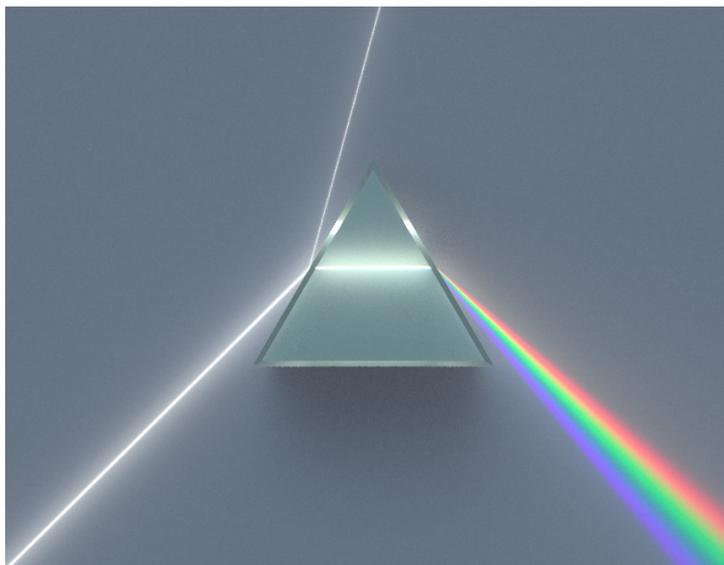


図 3.2 プリズムの例 (出典: Photo by Spigget, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_Prism_Illustration_by_Spigget.jpg)

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

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。

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。

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、ともかく、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。

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、

$$c = \nu\lambda$$

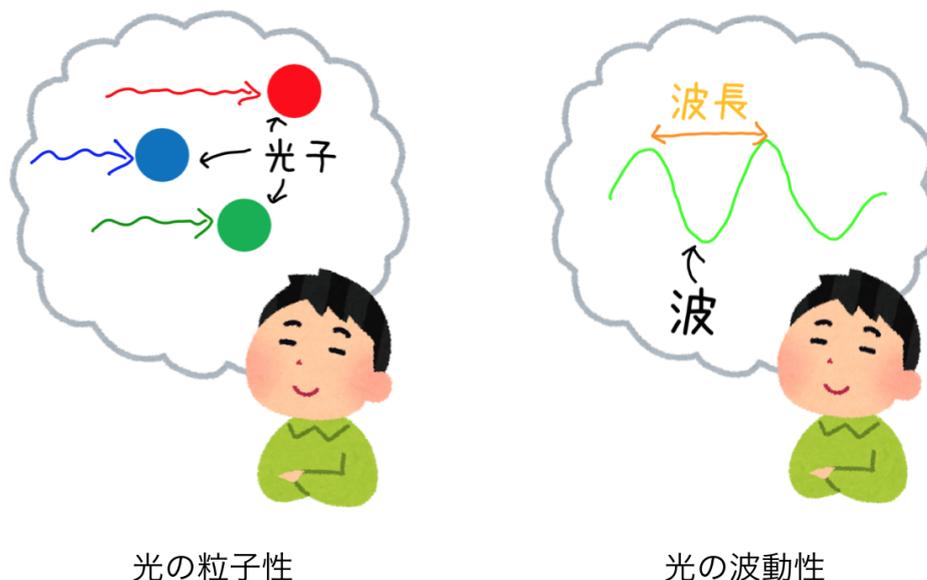


図 3.4 粒子と波動の二重性

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）

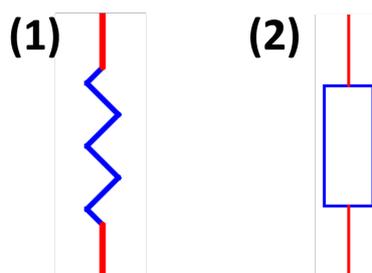


図 4.2 抵抗器の回路記号（(1) は古い描き方、(2) は新しい描き方。本プログラムでは (1) を使用します。）

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>)

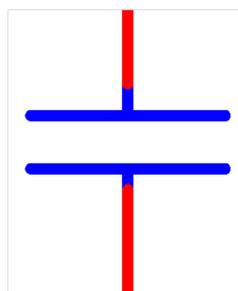


図 4.4 コンデンサの回路記号

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)。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。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。また、青色の LED 開発に携わった3人の日本人研究者が2014年にノーベル物理学賞を受賞しています。



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

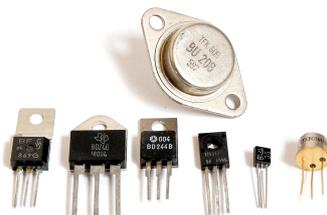


図 4.7 トランジスタ。(出典:<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistors-white.jpg>)

- 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。

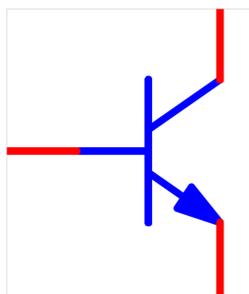


図 4.8 トランジスタの回路記号。¹⁾

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。

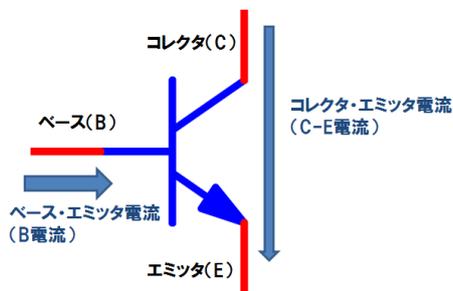


図 4.9 トランジスタの各部の名前。

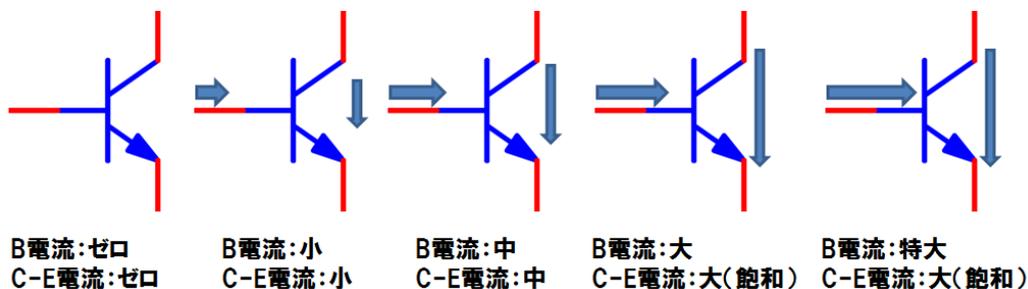


図 4.10 トランジスタのスイッチ機能。

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せん。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、そのパーツの足に依りて、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。

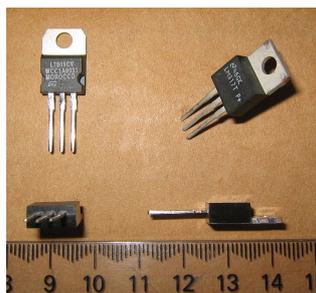


図 4.11 レギュレータ。（出典：Photo by John Dalton, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TO-220_Package_Four_Different_Projections.jpg）



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。

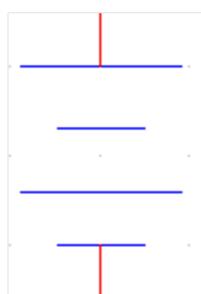


図 4.13 電池の回路記号。

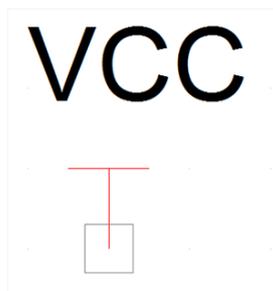


図 4.14 電源の回路記号。

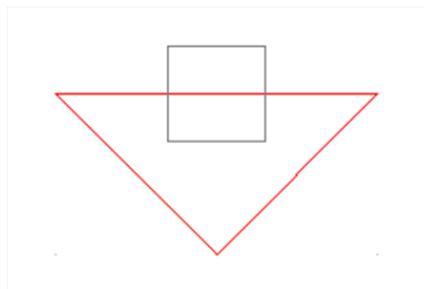


図 4.15 グラウンドの回路記号。

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になります。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

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。

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。

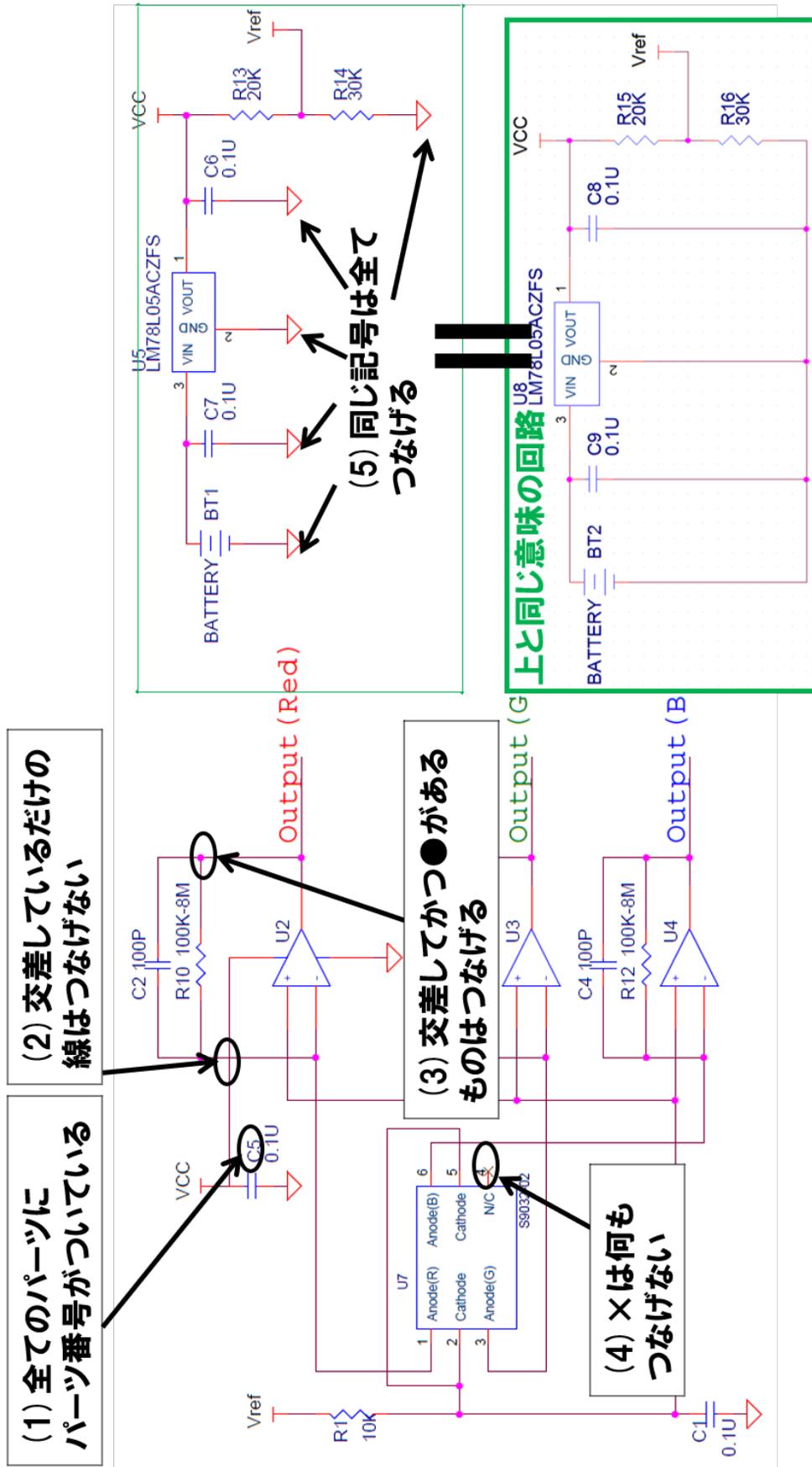


図 4.16 回路図の例と読み方。

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そうですが、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。

第5章 テキスト編集委員

発行年月 2021年11月

最終更新日時 2021年11月17日

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) [2017 - 2021]
- 高橋 将太 (KEK 広報室) [2017 - 2021]
- 三原 智 (KEK 素核研) [2017 - 2021]
- 坂下 健 (KEK 素核研) [2017 - 2021]
- 海浦 雪子 (KEK) [2017 - 2021]
- 西村 秋哉 (KEK) [2017 - 2021]
- 有留 翔一 (東京大学) [2021]
- 西森 早紀子 (総合研究大学院大学) [2021]
- 安田 浩昌 (東京大学) [2017 - 2019]
- 森 雄一郎 (東京大学) [2018 - 2019]
- 青木 優美 (総合研究大学院大学) [2018 - 2019]
- 太田 早紀 (大阪大学) [2018 - 2019]
- 石川 力 (総合研究大学院大学) [2018 - 2019]
- 松本 祥 (総合研究大学院大学) [2018 - 2019]
- 李 韜瀚 (東北大学 / KEK) [2019]
- 谷川 輝 (東京大学) [2018]
- 瀬川 優子 (総合研究大学院大学) [2018]

- 松田 悠悟 (大阪大学) [2018]
- 藤井 祐樹 (Monash 大学) [2017]