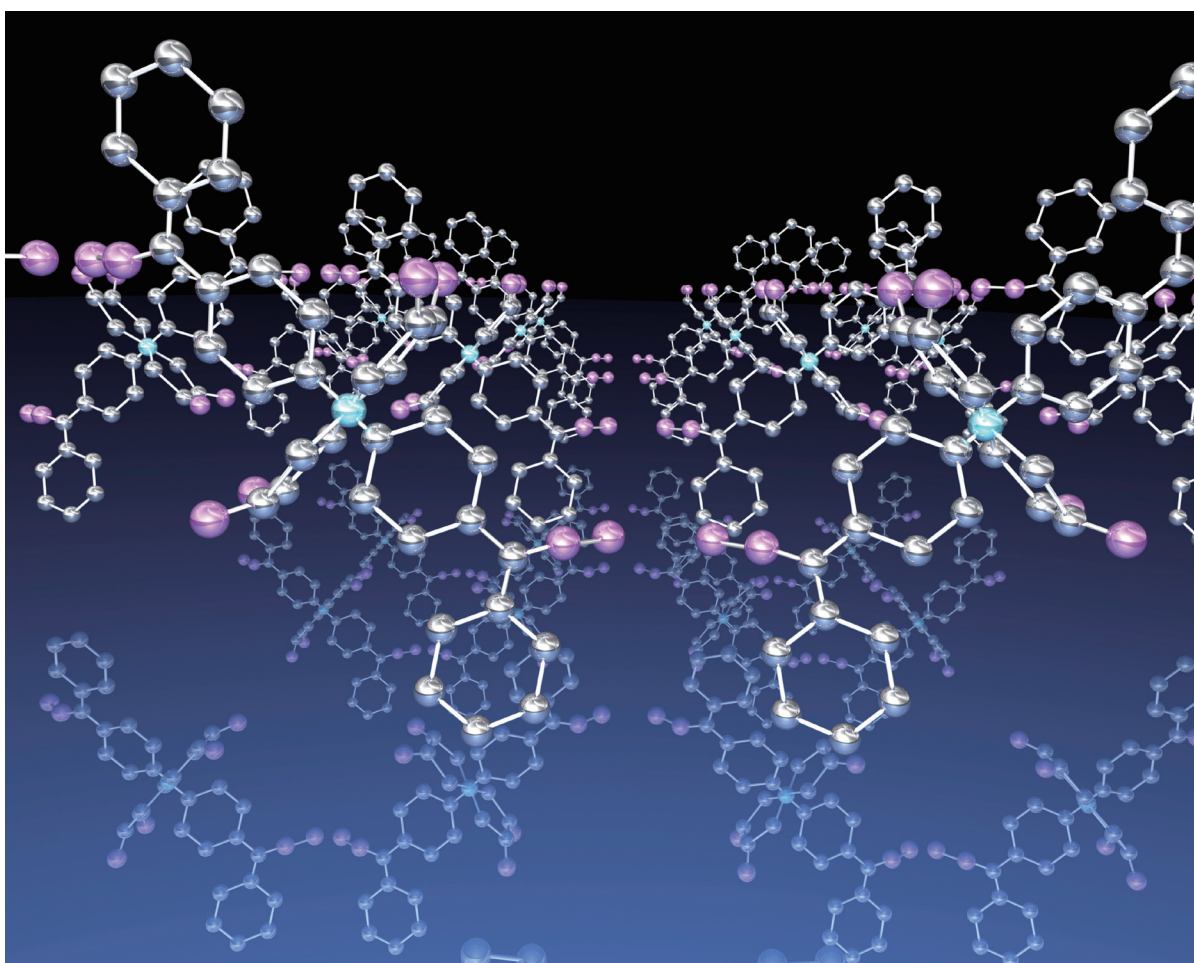


## 第9章 原子とボーアの原子モデル

原子の考え方は今では当たり前に見えるのですが、20世紀以前には単なる仮説でしかありませんでした。この原子レベルでの現象の説明にはニュートンの考え方からの脱却が必要となっていました。今回は、原子と原子のモデルから量子論的な考え方がなぜ必要になっていったのかを見ていきましょう。



## 化学とは？

私たち人類は、身の回りにある物質について考え、それを様座七形で利用してきました。炎を操ることができるようになると、様々な物質を作るすべを学んできました。たとえば、粘土を火の中で固めて、陶器を作り始めたのは紀元前5000年頃のことです。紀元前1200年頃までには、溶鉱炉で高温の炎を作り出せるようになると、鉄鉱石から鉄を作り出せるようになっていました。この技術がにより、様々な器具や武器が大量に作られ、それが古代ギリシャ、エジプトや中国の文明の繁栄に寄与したと言えるでしょう。

紀元前、ギリシャに様々な哲学者が現れました。中でも、アリストテレスが、物質は火、土、水、空気からなるとする説を唱えました。もちろん現在ではこうした考えは間違いであることがわかっています。しかし、重要なのは、物質は何か共通のものからできているに違いないとする還元主義的な考え方を初めて持ち出したことです。つまり、古代ギリシャ時代以前には、物質は何かからできているかという問いかけ時代が存在しなかったのです。アリストテレスの考え方は直感的でわかりやすいので多くの人々に受け入れられていました。この頃のこうした主張は、論理と理由付けに頼ったものでした。

## 錬金術

アリストテレスの考え方に従えば、どんな物質でも条件さえ整えれば他の物質に変換できるはずですが、銅などから金を作ることも可能に思えるのです。このことにより錬金術が生まれました。アリストテレスの時代から17世紀まで、錬金術師は様々なことを試みましたが、すべて失敗しました。かのアイザックニュートンも錬金術について盛んに研究しました。重力についての法則を見つけたニュートンにとっても、物質の間に働く力については理解できなかったのです。しかし、錬金術師達の試みは、単なる失敗ではなく、化学物質の様々な反応について知ることができたのです。

## ラボアジエによる元素の考え方

物質や化学反応についての基本的な考え方を提唱したのが、アントニー・ラボアジエ（1743-1794）です。ラボアジエは、同じ性質を持つ単一の物質を**元素**と名付けました。そして、複数の元素からなる物質を**化合物**と呼んだのです。たとえば、水素は元素であり、水は水素と酸素からなる、化合物です。このような物質の判定には、実験が欠かせません。このラボアジエが行った再現可能な実験からなる物質の解析こそ現代サイエンスの定義にかなうものです。そのため、ラボアジエは、「現代化学の父」と呼ばれています。



アントニー・ラボアジエと彼の妻  
マリー・ラボアジエ

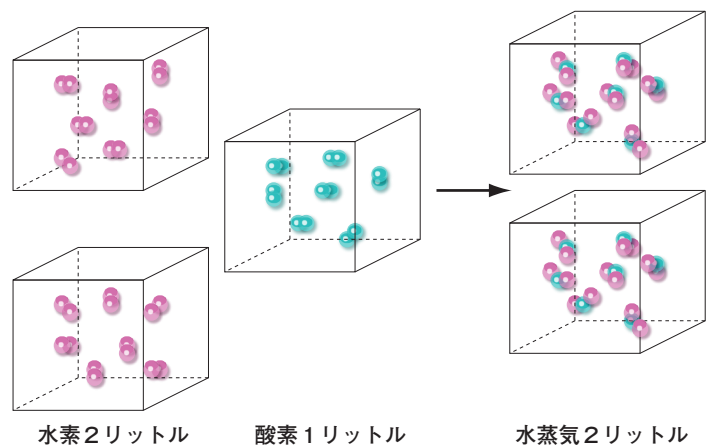
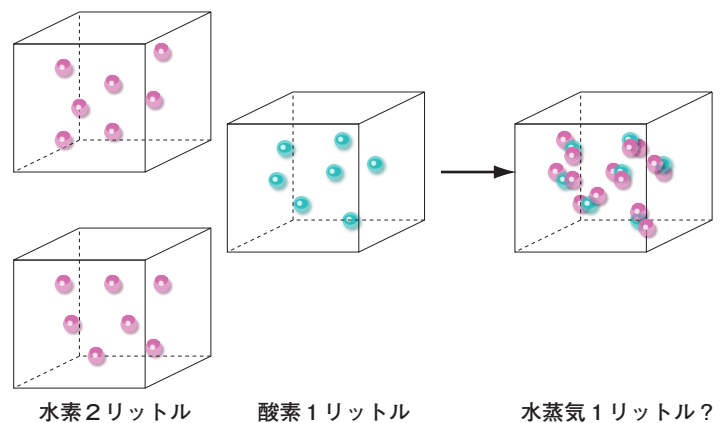
## サイエンスにおける、原子の考え方

古代ギリシャ時代に、アリストテレスの考え方とは別に、およそ直感的でない考え方があらわれました。それは、物質を細かくしていくと、それ以上細かくできない物体でできているというものです。デモクリトス（460-370B.C）は、これを「切れない」という意味のギリシャ語 *a tomos* から *atom*、**原子**と名付けたのです。デモクリトスの原子説によると、物質の質量や色などの性質は、原子の質量や色の性質によるものであるのです。しかし、ここでも運動の法則と同じ運命がまっています。アリストテレスの名声のため、原子説はその後 2000 年にもわたって現れませんでした。

原子の考え方を近代サイエンスに持ち込んだのはジョン・ダルトン（1766-1844）です。それぞれの元素は、独立した微粒子、原子からなると仮定しました。また、その原子は、化学反応においては生成されたり、破壊されたりしないものとします。原子同士が結合したものを**分子**と呼びます。この仮説は、次のような現象を説明します。

## 化学反応の性質と分子の仮説

2リットルの水素と、1リットルの酸素は反応して2リットルの水蒸気になります。同じ温度の元で、同じだけの体積を占めるものは同じだけの体積を占めるものとする、これは、水素と酸素は2対1の割合で結合していることを表しています。しかも、もし水素と酸素が単体であったとするなら、図のように1リットルの水しかできません。このため、水素や酸素が2つの原子からなる分子、2原子分子であるとすると、水が2リットルできることが説明できます。一般に、化合物の反応も、一定の割合で起こります。たとえば、12グラムの炭素は、16グラムの酸素と反応し、24グラムの酸化炭素となります。そして、化学反応においては、それぞれの化合物の反応などが一定の割合で起こることが原子の導入により説明ができるのです。



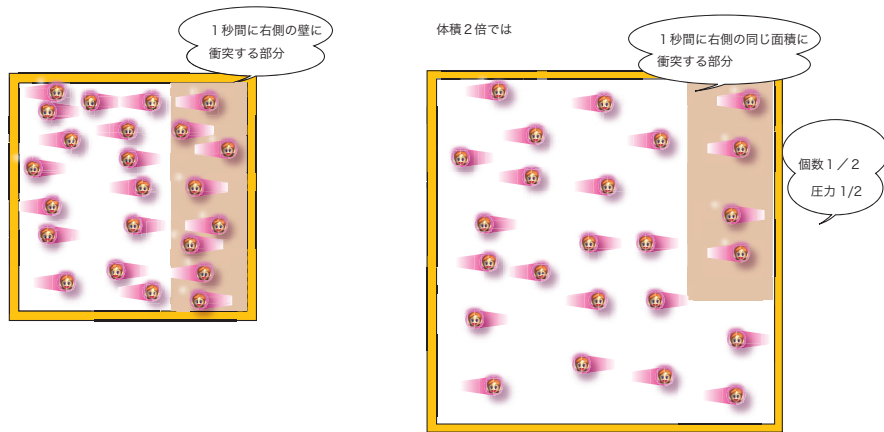
水素と酸素の反応の説明  
分子を登場させるしか説明がつかない



## 気体の性質と原子

気体は、温度が上がると膨張しようとして圧力が上がります。このような性質は、原子論から説明することができます。

たとえば、図のように体積が2倍になると、密度が半分になり、単位時間あたりに同じ面積では壁に衝突する分子の数は半分になり



原子の存在を仮定すれば気体の圧力と体積の性質は簡単に説明できる。

ます。このため、単位面積あたりに壁を推す力、圧力は半分になります。このため、原子を認めると同じ温度では圧力と体積とは反比例することを自然に導くことができます。

様々な分子が熱平衡状態にあるとき、分子の重さに関係なく、平均運動エネルギーはほぼ等しくなります。分子の平均運動エネルギーに比例しており、これはいかなる物質でも変わりません。そのため、気体では、同じ温度において同じ圧力であれば中に含まれる分子の数は、分子によらずほぼ一定になります。また、温度が高くなると膨張するなどの性質も原子の立場から説明できるのです。

## ブラウン運動

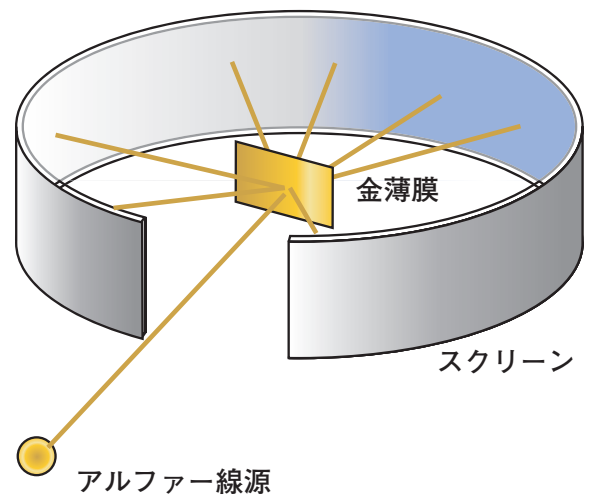
水の中に落ちた花粉の粒を観測すると、まるで生きているように乱雑に運動しているのがわかります。このような、微粒子の運動を**ブラウン運動**と言います。アルベルト・アインシュタインは、このブラウン運動は、花粉の粒に水の分子が衝突していると考えて、ブラウン運動の性質を数学的に説明しました。花粉に熱により乱雑に運動している水の分子が衝突することにより、花粉の粒もまた乱雑に運動するようになるというのです。

## 19世紀のサイエンスと原子仮説

以上のような原子の存在の説明は、間接的なものです。つまり、原子の存在を仮定して、そこから起こる現象を見ているわけで、原子自身を観測していません。このようなとき、原子説以外の説明が不可能であることを証明することは逆に困難です。それは、考えられる限りの仮説をつくしてもまだ気づかない仮説があるかもしれないからです。20世紀の初頭まで、原子の存在が単なる仮説として存在し、これをサイエンスと呼べたかどうかについては、意見が分かれるところです。もちろん、以下のように現在では直接的に原子を見ることができます。しかし、原子説に限らず、サイエンスの中で、新しい概念が、現在でも直接的な観測ではなく、間接的な状況しかないものも存在することがあったのです。そしてそれを考える上でも、19世紀までの原子説は有益な教訓となっているのかもしれない。

## ラザフォードの原子模型

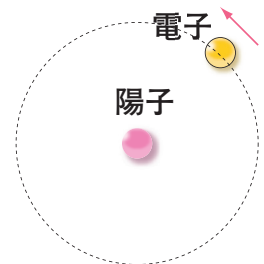
20世紀初頭まで原子の存在は仮説のままでした。しかし、ラザフォードは、プラスの電荷を持つヘリウムの原子核（アルファ線）を金の薄膜に向かって照射すると、そのほとんどは金の薄膜を突き抜けます。しかし、千回に一回ほどの割合で、ヘリウムが非常に大きく散乱されることを見つけました。正の電荷のアルファ粒子をこのように大きく反発する力を与えるためには、クーロンの法則により、重い正の電荷に非常に近づいた場合の大きな反発力により散乱されると考えるのが自然でした。



彼は、小さな正の電荷の部分を**核子**と呼びました。正の電荷の実際にそのモデルによって計算した散乱の仕方と、実験とは一致

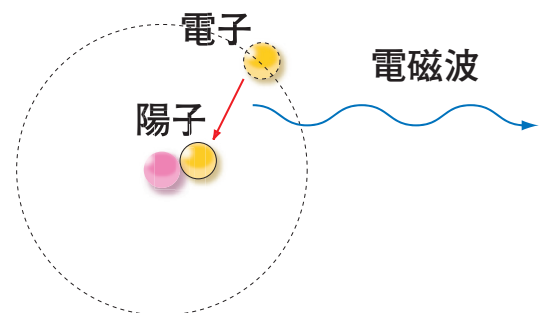
ラザフォードの実験により原子の存在は初めて確かめられた

したのです。この小さな核子に近づかない限り、アルファ粒子は素通りしてしまいます。千回に一回くらいの割合で、アルファ粒子は原子核の近くをとおり、それが大きく散乱されるのです。つまり、これは非常に小さな正の電荷を持つ原子核の周りを電子が運動していて原子を構成しているという直接的な証拠となりました。この同様のモデルは、日本の長岡半太郎も提唱していたものです。ただし、長岡半太郎は実験的な裏付けはなく、原子の一つの可能性として提唱しました。このラザフォードの結果によって史上初めて人類は原子を直接見たことになったのです。



## 古典的原子モデルの困難

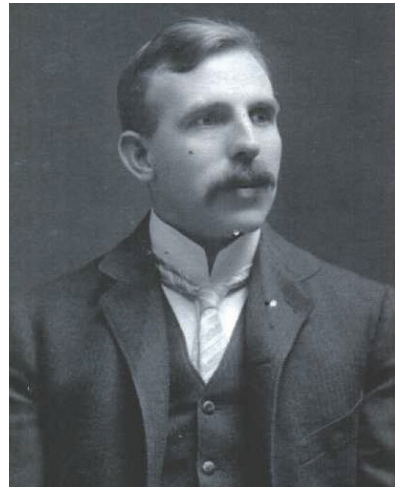
ラザフォードの原子モデルでは原子核のまわりを電子が回っています。しかし、電磁気学によると次のような困難が現れます。円運動している電子は、電子の速度の方向が変わるので、加速度を持っています。すると、電磁気学により加速している電子は電磁波を放射することになります。したがって、電子は電磁波を放射し原子核に落ち込んでしまうことになるのです。つまり、通常の見方では、原子モデルは破綻してしまいます。



ラザフォードのモデルでは、円運動で加速（進行方向を変える）している電子は電磁波を放出してエネルギーを失い原子核に落下してしまう

## アーネスト・ラザフォード (1871-1937)

ラザフォードは、ニュージーランドの南の島ネルソンという町で生まれました。地元の大学を卒業した彼は、ロンドンの奨学金に応募しました。奨学金は次点になりましたが、幸運にも1位の人が辞退したおかげでイギリスで勉強できることになりました。この知らせが届いたとき、ラザフォードは田舎町の自分の家の畑でジャガイモを掘っていましたが、このとき「これが生涯で最後の芋掘りだ」と言ったそうです。彼はその後ケンブリッジ大学に入り、研究を始め、レントゲンの発見に刺激されて放射線の研究を始めます。ラザフォードはアルファ線とベータ線の名前の名付け親です。1895年にその頃の物理研究の世界での中心地ケンブリッジを後にして、カナダのモントリオールにある大学に赴任します。そこで、行い精力的な研究を行った後、イギリスにもどります。アルファ線がヘリウムの原子核であることを示す実験を行い、1908年にノーベル化学賞を受賞しました。その後原子核の存在を示すラザフォード散乱実験を行います。これにより、太陽系模型型の原子模型を確立しました。また、アルファ線を原子にあてて、原子核を変えろという現代版錬金術を実証しました。彼は、絶えず鼻歌を歌っているようで陽気で、たぐいまれな研究者ではありましたが、講義は決して優れたものとは言えませんでした。すぐに話が脱線して自分の気に入る話をしてしまいがちでした。授業中に、黒板でゼロとなるはずの積分計算がゼロではなくなり、この積分の  $dx$  が無限に小さいのでゼロになるんだと大まじめで言ったそうです。良い研究者と良い教育者は別だという典型的な人です。



## 光放射の問題とその解決法は？

19世紀末頃には、ほとんどの基本的な問題はニュートンの力学と、マックスウェルの電磁気学によって完全に説明できるものでした。ただ、熱力学の分野では、光の放射の問題は未解決のままでした。物質はその温度によって光を放出することは学びましたね。この放射を理論的に導き出すことには次のような困難がありました。

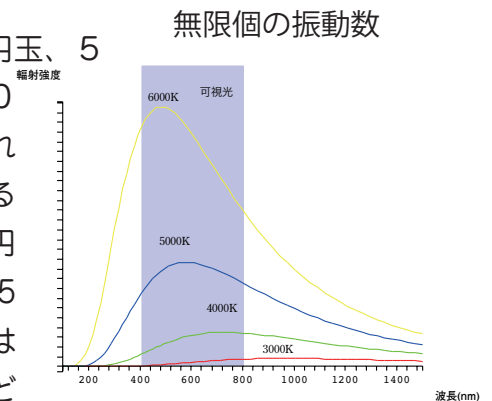
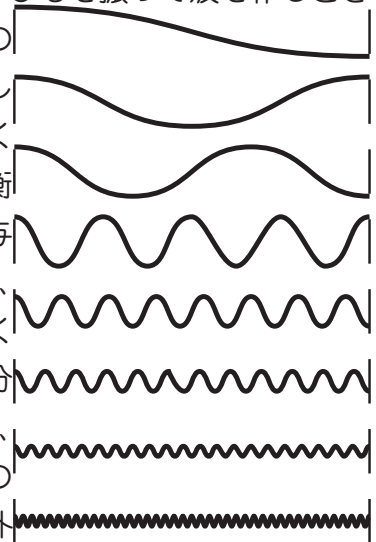
光は電磁波です。そのため、様々な周波数の光があります。ひもを振って波を作るときには、一生懸命素早く振らないと高い周波数が生まれませんので、高い周波数の波ほどエネルギーが高いと思いがちです。しかし、高い周波数と言っても、振幅を非常に小さくすればいくらでもエネルギーを小さくできます。熱力学によると、熱平衡状態では、様々な振動数の波すべてに同じ運動エネルギーが与えられましたね。しかし、高い周波数が無限にありますので、無限個のものに同じ運動エネルギーを分配して温度は限りなく低くなっていってしまうはずですが、つまり、無数の自由度に分配されてしまうと、光の波の平均運動エネルギーはゼロとなり、温度が上がらないのです。これが熱放射の問題です。振動数の大きな、紫外線へのエネルギーの分配から起こることから紫外カタストロフィーとも呼ばれます。

これは次のようなアイデアで解決できます。今、1円玉、5円玉、10円玉、500円玉、1000円札、5000円札、10000円札がたくさんあったとします。それぞれの種類だけで、5000円でそろえてみます。すると、1円玉では5000個で5千円になりますね。5円だめでは1000個です。同様に、1000円札では5枚、5000円札では1枚となり10000円札では5000円にすることができませんね。また、1円など細かいと5001円などとすることも可能ですので非常に連続的なお金を用意することができます。

光の放射の問題はこれと同じように解決されました。プランクは、この問題の解決のためエネルギーにはその振動数に比例した最小の光の量子があると考えました。これによると光は

$$\text{エネルギー} = \text{プランク定数} \times \text{振動数}$$

という量子の集まりで出来ています。これを**光の量子仮説**と言います。この光の量子を**光子**と言います。これによると振動数が大きいほど、量子のエネルギーが大きくなります。そのため、振動数の大きい電磁波には、基本のエネルギーが大きいため等しく分配できなくなるのです。このため、振動数の大きな電磁波にはエネルギーの分配は非常に少なくなり、有限個の振動数でエネルギーを分配するのと同じような効果となります。この量子仮説に基づきプランクは、光の放射の強度を理論的に定量的に再現することに成功したのです。



波長ごとの放射強度

波長の短い電磁波は放射されにくくなっている



## マックス プランク (1858-1947)

マックスプランクはドイツのキールで生まれました。プランクは非常に秀才ですが、音楽家としても卓越していたため、研究者になるか音楽家になるかで随分まよったそうです。結局プランクは研究者になる道を選び、大学ではベルリンの大学に行こうと思いましたが、そこでキルヒホッフやヘルムホルツという大先生の講義に出ましたが、学生たちの眠気を誘うような講義であったり、話の脈絡がわからなくなったりするような講義がたびたびでした。良い研究者は良い教育者とは限らないのは、日本に限らずどこの国でも同じなんですね。熱力学や電磁気学の分野はそのころ急速に発展しており、そこで、熱力学の研究をしミュンヘン大学で学位を取りました。熱その後、キールの大学に赴任していましたが、1889年にベルリン大学に赴任します。その頃、物理学ではそれまでの古典的な考えでほとんどの現象が説明できていました。その例外的な一つであるのが熱放射の問題でした。彼はこの基本的な問題に対して6年もの長きにわたって取り組みます。この熱放射の分布に関して1900年に外挿する式をまず見つけます。そして、それに解釈を与えてみました。すると、光は連続的にエネルギーを持てるものではなく、光の量子というものが必要となったのです。そのような考え方はそれまでの常識とかけ離れていました。1918年にノーベル賞を受賞しています。



ある物理学者がプランクにいったいどのようにして量子論のような信じがたいものを作ったのかと聞いたら、プランクは「それは絶望的とも言える行為だった。6年間ともいうもの、私は黒体放射の理論と格闘していた。これが本質的な問題であることは解っていたし、答えもわかっていた。そこで私は何を犠牲にしてもこの理論的な説明を見つけ出さなければいけなかったのだ。ただし、犯すべからざる熱力学の2つの法則だけはそのままにしてね。」と言ったそうです。

## 温度と色の関係は？

熱放射のところで見ましたが、物体は温度が上昇するほど波長の短い光を多数放出するようになります。このため、3000Kで赤い色だった放射は、7000Kでは青みを帯びてきます。これは、熱によって分子の振動が激しくなるとエネルギーの大きな波長の短い光子を放出する割合が増加するためです。

一番多く放出される光の振動数は、プランクの仮説によりエネルギーに比例し、そのため、一番多く放出される光の振動数は絶対温度に比例するのです。

電磁波の章で見ましたが、光の振動数と波長とは反比例しますので、絶対温度が2倍になると放出される中心的な光の波長は2分の1となります。



## 粒子も波？

電磁波は、波としての性質だけでなく、粒子としての性質を持っていました。これにより逆に、すべての粒子が波としての性質を持つことが示唆されます。ドブロイは、光の場合に成り立つプランクの関係式、

$$\text{エネルギー} = \text{プランク定数} \times \text{振動数}$$

に加えて

$$\text{質量} \times \text{速さ} = \text{プランク定数} \div \text{波長}$$

の関係を提唱しました。このようにして決まる粒子の波長を粒子の**ドブロイ波長**と言います。

実際に電子に対して、このドブロイ波長程度の間隔のスリットを用意して、電子を通過させます。すると、一つ一つの電子はスクリーンにまばらに衝突しますが、たくさんの電子を集めると、干渉縞が確認できるのです。

この電子の波長は光の数千分の一です。通常の光学顕微鏡では、光の波長程度の大きさのものは、光の回折などがおこってしまい、見ることはできません。それに対して、電子を光の代わりにす

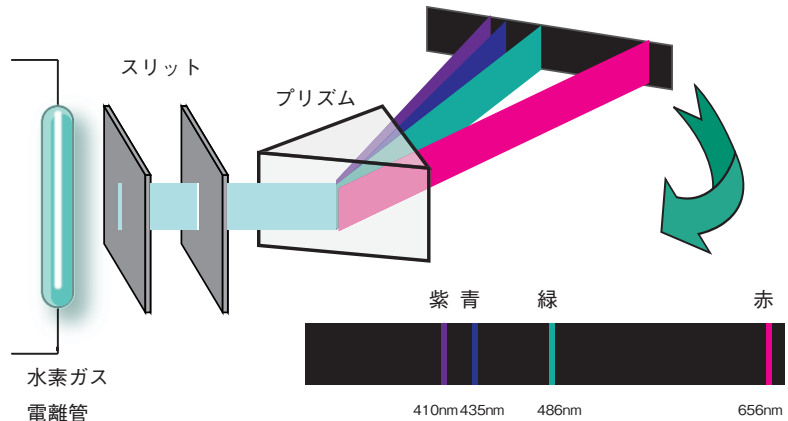


電子でも干渉が起こる

れば、さらに細かい物質を見ることができるのです。この原理を利用しているのが**電子顕微鏡**です。これについては、第10章で詳しく見てみましょう。

## 原子の放出スペクトル

原子は元素や分子によって色が異なります。これは、物質の光の吸収によるものであることは前章で学びましたね。このような吸収または放出は原子によって特定の波長の光を放出されます。



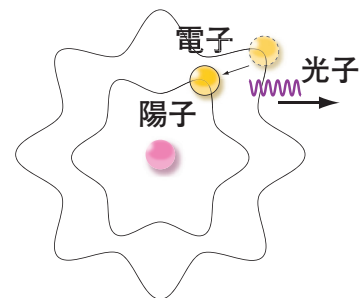
このように、原子によって光の抄出が異なることは、私たち

がものを燃やすときに色が異なることで経験していることです。また、物体によって色が異なるのも、太陽からの光の吸収が物質によって異なるからです。

原子によって吸収される**原子の線スペクトル**と言います。これはどのようにして起こるのでしょうか？

## ボーアの原子模型

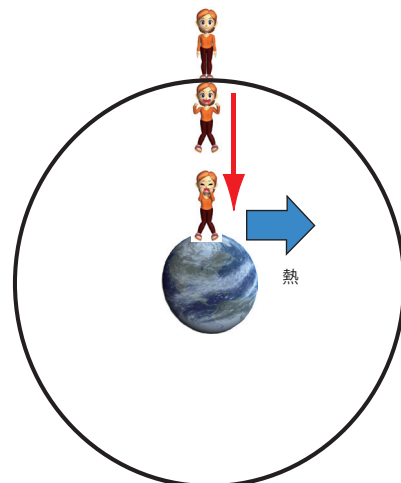
波動性があると、原子模型はどのようにかわるのか見てみましょう。電子は原子の周りを回るが波動なので閉じていなければなりません。また、ドブロイの関係により波長は運動量に反比例するので、波長が短いものは速度が大きく、エネルギーが大きくなります。そのため、電子のエネルギーは一周するまでに何回振動したかで決まったエネルギーとなります。このためエネルギーは、とびとびの値しかとれなくなるのです。これを**ボーアの原子模型**と言います。



一番エネルギーの低い状態を**基底状態**と言い、それより高い状態を**励起状態**と呼びます。また、とびとびのエネルギーを**エネルギーレベル**と言います。電子が基底状態から励起状態に移るとき、その差にあたるエネルギーを吸収する必要があります。光は量子で、エネルギーと振動数が比例するので、光を吸収するときには、特定の振動数の光のみを吸収することになります。また逆に放出するときも同様です。このようにしてボーアの原子モデルによって水素原子の線スペクトルが説明されました。

ボーアの原子模型のイメージがわからない人もいるかもしれませんが、原子を地球サイズにしたらどうなるのか見てみましょう。

地球から高いところに足場があり、そこから飛び降ります。すると、地球の引力により加速して運動エネルギーを得ますね。地球に着地したときこのエネルギーは熱となるわけです。熱は分子の細かい振動などですが、原子レベルでは陽子は重いので振動せずに光を放出してエネルギーを解放するのです。

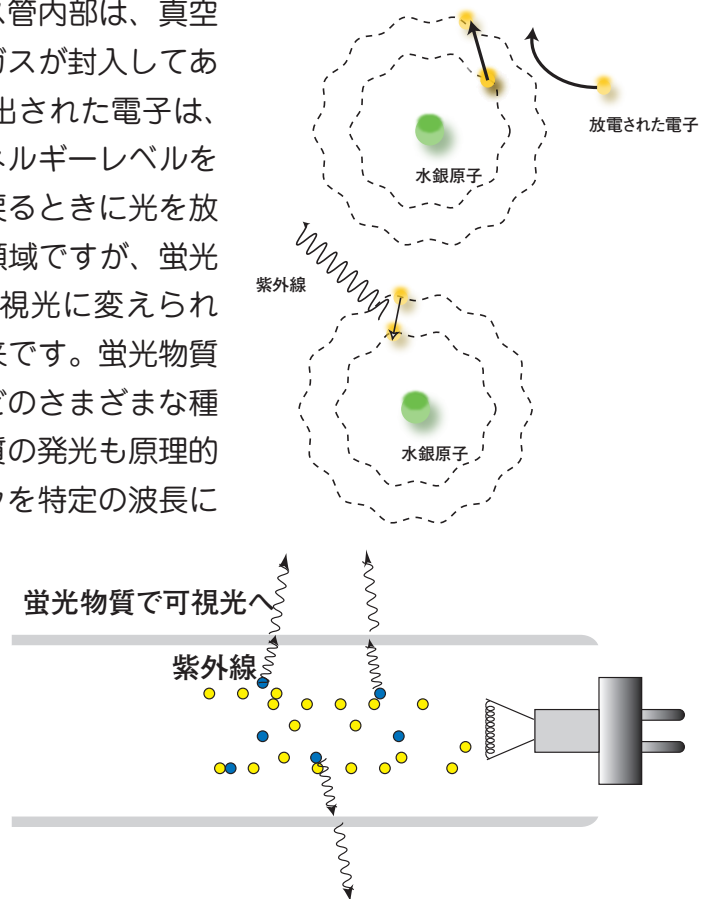


## 蛍光灯と省エネルギー

白熱電球は、タングステンフィラメントを電流により3000ケルビンくらいに加熱して放射により光を發します。しかし、エネルギーのうち約90パーセントは赤外線として發せられますので、發光効率は悪いものになります。実際にさわるとかなり熱いですね。これに対して、私たちが良く用いる蛍光灯はそれほど發熱しません。それでは、蛍光灯はどのようにして光を發しているのでしょうか？

**蛍光ランプ**は、内側に蛍光物質を塗ってあるガラス管の両側に、電極があります。ガラス管内部は、真空にした上に、少量の水銀とアルゴンガスが封入してあります。電圧がかかり、電極から放たされた電子は、水銀と衝突し、水銀の中の電子のエネルギーレベルを上げます。この電子がもとの状態に戻るときに光を放します。この光の波長は紫外線の領域ですが、蛍光ランプ内側の蛍光物質にあたって可視光に変えられるのです。これが蛍光灯の名前の由来です。蛍光物質の種類によって、昼白色、電球色などのさまざまな種類のランプができています。蛍光物質の發光も原理的には水銀と同じものですので、ピークを特定の波長に持つ發光となります。そのため、この全体の發光が自然に見えるように蛍光物質が選ばれています。このような發光のためその發光の効率は白熱電球と比べて5倍程度改善されます。

省エネルギーのためにも白熱電球の使用を控えて電球型蛍光灯にすることが奨励されています。



## 19世紀の暗黒物質 ヘリウム

ヘリウムは風船の中に入れてみることからもわかるとおり、非常にかたい物質です。また他の物質とは化学反応をしません。そのため、地中に含まれていることもなくまた大気中にも希な物質です。物質を識別するには、化学反応で調べるのが一つの方法ですが、この方法ではヘリウムは検出できないのです。

1868年に、フランスのピエール・ジャンサンは日食の分光器による観測をし、地上では見たこともないスペクトル線を発見しました。ギリシャ神話の太陽神、helios にちなんでヘリウム (helium) と名付けられました。しかも、地上ではどんな化合物を分離しても対応する元素は見つかりませんでした。そのため、宇宙にはあるが、地球には存在しない元素を仮定しなければならないという危惧が生まれました。つまり長い間ヘリウムは地上では見るできない物質だったわけです。

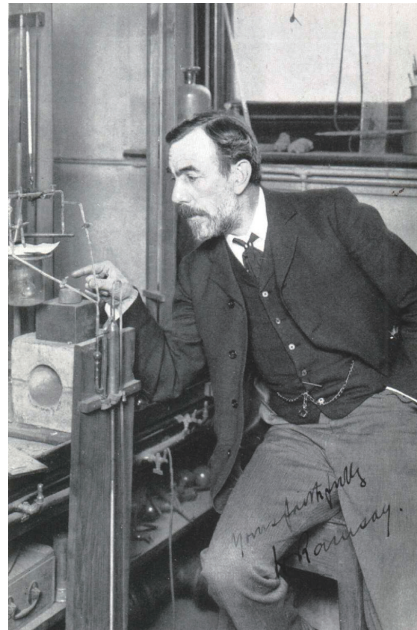
1895年ウイリアム・ラムゼー (1852 - 1916) は、ウラン鉱の中にヘリウムを発見します。ここに長年の懸案が解決されたわけです。

ちなみに、ラムゼーは、1898年、クリプトン、ネオン、キセノンを発見し、不活性ガスの属を一人で発見しました。1904年これらの功績に対してノーベル化学賞が贈られました。

次章でも登場するように、アルファ線がヘリウムの原子核であることが、ラザフォードらによって明らかにされていきます。

現在では、ヘリウムは天然ガスの中に1パーセント以上の相当量含まれていることがわかり、これを利用して大量に生産されています。それではこのヘリウムは地中でどのように発生したのでしょうか？それは、地球内部での放射性崩壊によりアルファ線が放出されたからです。地熱の主な要因は放射性崩壊であると言われています。

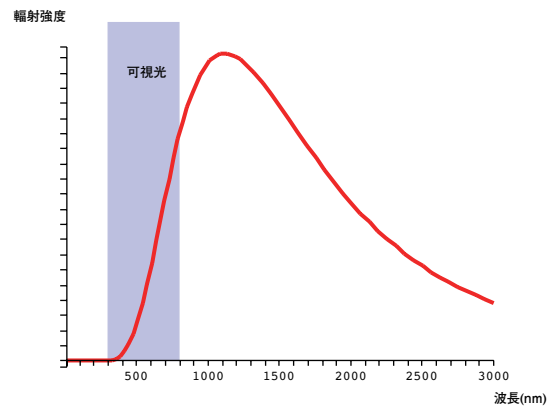
ヘリウムに似た現象は今も知られています。それは、銀河系には暗黒物質と呼ばれる物質が通常の物質の5倍以上あることが解っていながら、地上の実験では観測されていないのです。もしかしたら今後この暗黒物質が地上の実験で観測される日がやってくるかもしれません。



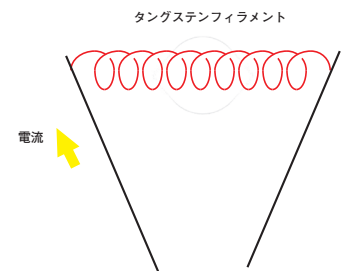


## 白熱電球のしくみ

白熱電球はどのように光を出しているのでしょうか？ガラスで密閉した容器（バルブ）の中央に抵抗の大きなフィラメント（通常はタングステン）があり、バルブ内にはフィラメント化学反応の起こらない不活性ガス（アルゴン、窒素など）が封入してあります。フィラメントに電流を流すと抵抗によるジュール熱で、500度程度に熱せられます。この熱による放射で、可視光では若干赤みを帯びた白熱光となり



ます。温度が比較的低いので、放射の分布は赤外から可視光にひろがり、**放射の約70パーセントは、赤外放射や熱**として外部に出てしまい、可視光としては10パーセント程度しか利用できません。また、温度を上げるとタングステンの蒸発が速くなり、寿命が短くなります。バルブに封入した不活性ガスはフィラメントの蒸発を抑える働きをするが同時にフィラメントの熱を外に伝えてしまう働きをするのでフィラメントの形状をばねのようにして、不活性ガスとの接触をおさえています。

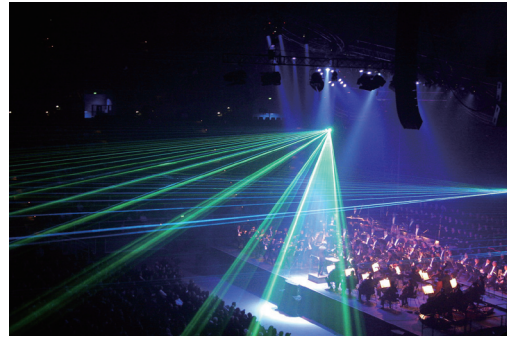


フィラメントが蒸発して断線すると不点灯と白熱電球は寿命を終えます。通常の白熱電球の寿命は1000時間くらいですが、最近ではもっと寿命の長いものがあります。しかし、いずれにせよ光となる効率が悪いので、電球型の蛍光灯に切り替えた方が得策でしょう。最近ではさらにLEDを用いたものが発売されています。この原理については、後の章で紹介しましょう。



# レーザー

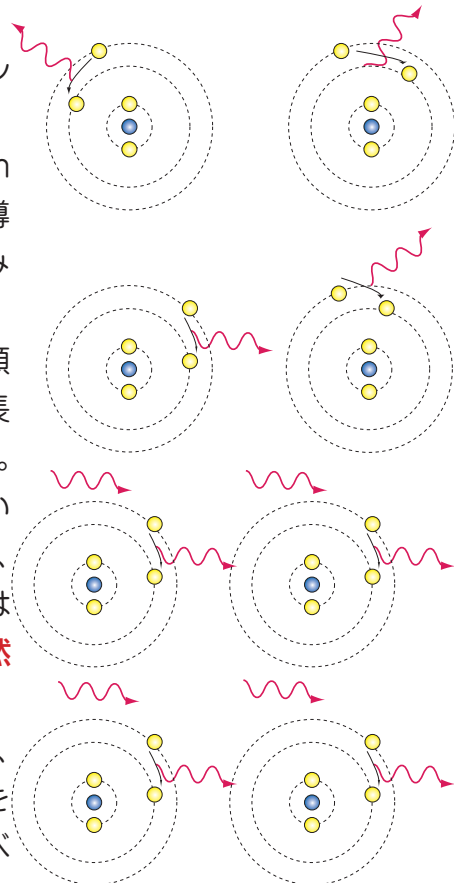
**レーザー**とは、波長が単一で、波がそろった光です。レーザーは様々な形で利用されています。身近な例としては、CDやDVDの読み取りや書き込みなどがレーザーで行われています。コンビニエンスストアやスーパーマーケットで、店員さんがバーコードを読み取るときにもレーザーが使われています。また、切断加工などの工業用や、レーザーメスなどの医療用にも用いられています。



このレーザーの仕組みを知るのにも、ボアのエネルギー順位の考え方が役に立ちます。

Laser は light amplification by stimulated emission of radiation の略で、日本語で言い表すと、放射の誘導放出による光の増幅となります。この用語を理解してみましょう。

以下ルビーレーザーを見てみます。ルビーは可視光領域では、エネルギー順位により、赤い光に相当する波長の光子を放出します。このため、ルビーは赤く見えます。このためには、外部からエネルギーが供給されないとはいけませんが、この電子の励起は、外からの光の吸収や、熱によって起こっています。この光の放出される方向は各原子によって様々な方向に放出されます。これを**自然放出**と言います。

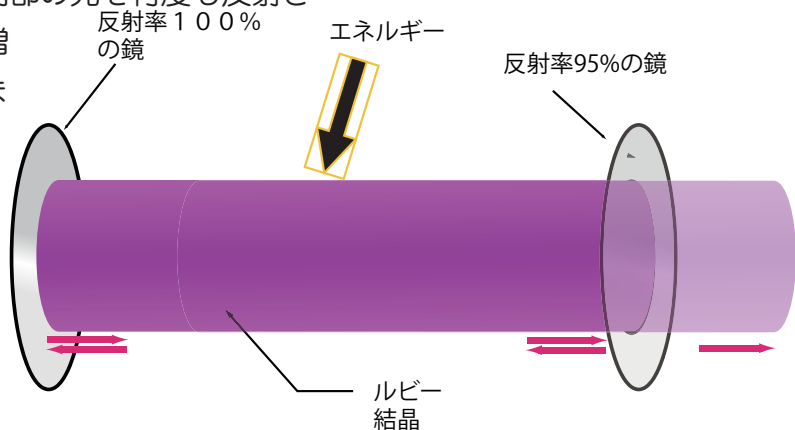


誘導放出

一方、光には外部からある方向の光子がやってくると、それと同じ方向の光を放出する傾向があります。これを**誘導放出**と言います。したがって、外部からの光がすべて同じ方向を向いていれば、誘導放出によってより多くの光が抄出されることになります。

レーザーでは、ルビー結晶内部の光を何度も反射させて結晶中を同じ方向の光を増幅させた後外部に放出させます。

外部と同じ光子を放出しようとする



ルビーレーザーの構造

## キーワード

元素、化合物、核子、ブラウン運動、ラザフォードの原子模型、原子の線スペクトル、光の量子仮説、光子、ボーアの原子模型、基底状態、励起状態、エネルギーレベル、蛍光ランプ、レーザー、自然放出、誘導放出、