

2.2 原子構造

ドルトンの原子論は、原子が構造を持つとするデモクリトスの考えについて何も言っていません。今日では、私たちは原子が構造を持つことを知っており、原子がどのように、そして、どうして繋がって分子になるのか考える上での重要な知識です。原子がかぎホックのように繋がっているというデモクリトスの考えには賛成しないけれども、原子の構造を知ると、どう元素が振る舞うか巧く理解できるという彼の基本的な概念は、正しいものになります。次の数節では科学者がどのように現在の原子の構造の理解にまでたどり着いたかを示します。

電気

電気が、原子構造の理論が導かれた色々な実験の中で関係しています。電荷はまず古代エジプト人によって観察、記録されました。エジプト人は、琥珀を羊毛や絹で擦ると、琥珀が小さなものを引き寄せることを知っていました。同じことは、空気の乾いた日に髪を櫛で解くと観察でき、髪の毛が櫛に引き寄せられます。稲妻やドアの取っ手を触った時に感じた衝撃は電荷がある一方から他方へ移る時に起こります。二つの型の電荷が、アメリカの政治家で発明家の Benjamin Franklin(1706-1790)の時代に発見されました。彼はそれらを正(+)と負(-)と名付けました、なぜなら、それらは反対のように見え、互いは中和するからです。検電器を使った実験(Fig. 2.2)が示すように、同じ電荷は反発し、異なる電荷は互いに引き合います。フランクリンは電荷は保存されると結論しました：もし負電荷がどこかに現れると、同じ大きさの正電荷が他のどこかに現れます。物質が別のもので擦られると電荷が生まれるということは摩擦することが正と負の電荷を分けることを意味します。明らかに正と負の電荷は物質に関係しています—恐らく原子と。

Fig. 2.2 検電器が電荷を示します。(a) 電気的な影響がないと、薄片は真っ直ぐ垂れ下がっています。(b) 毛皮で擦ったゴムの棒が検電器の球に触れました。(棒を少し離してから、この写真が撮られました。)棒に貯まった電荷が検電器に流れ、可動片が固定片から離れました。この観察結果に対する理由は、同じ電荷が両片に流れたことにあります。同じ電荷は反発するので、両片が互いに反発します。

放射能

1896年フランスの物理学者 Henri Becquerel(1852-1908)は、ウランウ鉱石が放射線を出し、写真乾板を感光させることを発見しました。たとえ黒い紙で覆って、乾板が光線に曝されるのを防いでも感光しました。1898年 Marie Curie(1867-1934)と共同研究者は、ポロニウムとラジウムを単離し、これらもまた同じ種類の放射線を出しました、そして1899年彼女は放射性物質の原子が異常な放射線を出して崩壊すると提案しました。彼女は、この現象を**放射能(radioactivity)**と名付けました。約25種の元素が放射性として、これまで見つけれられています。

放射性元素は三種類の放射線を出します：アルファ(α)、ベータ(β)、ガンマ(γ)線です。これらは電極板の間を通すと Fig. 2.3 のように違った振る舞いをします。アルファ線とベータ線は偏向させられますが、ガンマ線は真っ直ぐ進みます。これは α と β 線は荷電板で引き付けられたり、弾かれたりするから荷電粒子です。 α 粒子は β 粒子の電荷(-1)の2倍の電荷(+2)持ち、 α 粒子の偏向も小さいので、 α 粒子は β 粒子よりも重いに違いありません。 γ 線は、検知できるような電荷や質量がなく、光線のように振る舞います。

Fig. 2.3 放射性元素からのアルファ、ベータ、ガンマ線は電極板の間を通過すると分かります。正に帯電したアルファ粒子は陰極板に引きつけられ、負のベータ粒子は陽極板に引きつけられます。(重い方のアルファ粒子がベータ粒子よりも偏りが小さいことに注目して下さい。ガンマ線は電荷を持たず、極板の間を偏らないで通過します。

原子が崩壊するとするキューリーの提案は、原子は分割できないとするドルトンの考えに矛盾し、ドルトン理論の拡張を必要とします。原子が分解するなら、原子より小さな何かがあるはずですが；すなわち原子の構造は原子より小さい粒子を含まねばなりません。

電子

化合物の溶液に電流を流すと**電気分解(electrolysis)**と呼ばれる手法—金属上への金や銀の鍍金や、塩化ナトリウムから塩素を製造するような化学反応を起こすことが出来ます。1833年英国の科学者 Michael Faraday(1791-1867)は同じ電流が違った量の、種類の異なる金属を沈積させること、及び、その量がそれ

ら元素の原子の相対質量に関係していることを示しました。そのような実験は、原子が元素の基本的な粒子であると同じように、電流にも基本的な粒子があると解釈されました。この電流の“アトム”に**電子(electron)**という名前が付けられました。

アトムがもっと小さな粒子である証拠は、両端に電極として金属片が封入された真空に近いガラス管を用いた実験から得られました(Fig. 2.4)。電極に十分な高電圧をかけると陰極線と呼ばれる粒子のビームが、負に帯電した電極(陰極)から正の電極(陽極)へ向かって流れます。陰極線は直線的に進み、鋭い影を投げかけ、気体やケイ光性物質を輝かせ、金属の的を加熱して赤熱状態にし、磁場によって偏向させられて、正に帯電した極板に引きつけられます。陰極線がケイ光性のスクリーンに当たると一連の小さな閃光が放出されます。

Fig. 2.4 電場(上)および磁場(下)による陰極線の偏向。外部電場が作用すると、陰極線は正極に偏ります。磁場が作用すると、陰極線は正常な直線から曲線経路に偏ります。二つの事例では、その曲がり方は陰極線の粒子の質量と速度および電場あるいは磁場の大きさに関係します。

このように陰極線は負に帯電した粒子で、その一つ一つがケイ光性スクリーンに当たると閃光を発します。良く知られているように、テレビの画面やコンピューターの CRT 画面の画像形成に電極板による陰極線の偏向が利用されています。ネオンやケイ光も陰極線に関係しています。

1897年 Sir Joseph John Thomson(1856-1940)は特別にデザインした陰極線管で、陰極線のビームに電場と磁場を同時に作用させました。磁場の効果と電場の効果の釣り合わせ、電気および磁気の基本則を用いて、トムソンはビームの粒子について質量対電荷の比を算出しました。しかし電荷や質量をそれぞれ単独に決めることは出来ませんでした。陰極線が負に帯電した粒子のビームであるとする事実に基づいて、トムソンはそれらがファラデーの実験に関係した電子と同じであると考えました。陰極管中で 20 種の金属および数種の気体についての実験で同じ電荷対質量の比を得ました。これらの結果は、電子があらゆる物質に存在し、恐らく全ての元素の原子にあることを示唆しました。

Fig. 2.5 電子の電荷：質量比を測定するトムソンの実験。電子のビーム(陰極線)は電場や磁場を通り抜けま
す。実験は電場がビームを一方に偏るように、そして磁場はビームがそれとは反対の方向に偏るように手配
されました。電場、磁場の効果の均衡から電子の電荷と質量の比が決められます。

暫く経って、やっとなアメリカの物理学者 Robert Andrews Millikan(1868-1953)が電子の電荷を測定し、その質量が計算できるようになりました。Fig. 2.6 に、彼の装置を模式的に示しました。小さな油滴を噴霧器で箱に散布します。油滴は空気中で徐々に納まり、そこで X 線に曝して、電子を空気中の油滴分子に移動させます。ミリカンは小さな望遠鏡を用いて個々の油滴を観測しました。油滴のある上下の部分の電荷を調節して、油滴を上方に引き上げる静電引力と、油滴を下方に向けさせる重力と釣り合わせました。力学式から、ミリカンは油滴の電荷を計算しました。油滴により違った電荷を待っていました、しかし、ミリカンはそれぞれが同じ小さな電荷の整数倍であることを見つけました。その最小の値は $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ でした(C はクーロンを表す、電荷の SI 単位; 付録の D)。ミリカンはこれが電荷の基本的な単位、電子の電荷と考えました。電子の電荷対質量の比が分かっているので、電子の質量は計算出来ます。現在、受け入れられている電子の値は 9.109389×10^{-28} で、そして電荷として受け入れられている値は $-1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$ です。基本粒子の性質について述べる場合、常に電子上の電荷を -1 の値として電荷を表します。

Fig. 2.6 ミリカンの油滴実験。細かい油滴の霧を箱の中に入れます。箱の中の気体分子を X 線のビームによ
ってイオン化します(電子と正イオンに分かれます)。電子が油滴に付着し、油滴は 1 つの電子、2 つの電子...
を持ちます。これらの負に帯電した油滴は電極板の間を重力により落下します。注意深く極板の電圧を調整
すると、重力が上部の正に帯電した極板の引力と釣り合わせることが出来ます。これらの力の解析から電子
の電荷の値を導くことが出来る。

別の実験で、陰極線が放射性元素から発する β 粒子と同じ性質を持つことが示され、電子が物質の基本的な粒子である証拠が更に得られました。

陽子(Protons)

正の基本粒子についての最初の実験的証拠は、陽極線の研究から得られ、それは穿孔陰極板を用いた特種な陰極管で観測されました(Fig. 2.7)。陰極管に高電圧をかけると陰極線は観測されます。しかし、穿孔陰極

の反対側では、違った種類の線が観測されます。これらの線は負に帯電した極板に引き寄せられるので、正に帯電した粒子でなければなりません。

Fig. 2.7 穴のあいた陰極の陰極線管。電子は気体分子と衝突し、正のイオンを作り、それが負の陰極に引きつけられます。正のイオンのいくつかは穴を取り抜けて、陽極線を形成します。陰極線のように、陽極線(力ナル線)は電場や磁場で偏ります、しかし正電荷を帯電した粒子はずっと重いので、作用する電場や磁場に対してそれ程偏向しません。

管の各気体は正に帯電した粒子に関して、異なる電荷対質量比を示します(どんな気体でも同じの陰極線とは異なる)。水素ガスを用いると、最大の電荷対質量比が得られ、これは水素が最小の質量の正の粒子を供給することを示唆します。この粒子が原子構造の正に帯電した基本粒子であると考えられ、後に Ernest Rutherford が陽子(プロトン)(proton)と名付けました(ギリシャ語で第一のものの意味)。

陽子の質量は実験より 1.672623×10^{-24} g となります。陽子の電荷は、電子と大きさは同じで、符号が逆の+1 です。

中性子(Neutrons)

原子は普通、電荷を持たないので、その陽子と電子の数は等しくなります。大抵の原子は、陽子と電子だけで予想するよりも大きな質量を持ち、原子に電荷のない粒子の存在を示唆します。この3番目の粒子は電荷を持たないために、通常の粒子を探索する方法が使えません。しかし、陽子の発見の数年後、1932年に英国の物理学者 James Chadwick(1894-1974)が巧妙な実験を工夫して、期待する中性の粒子を作り出し、それらを水素イオンに当て、パラフィンから観測可能な種として見つけました。この基本粒子は中性子と呼ばれ、電荷を持たず、陽子とほぼ同じ質量 $1.6749286 \times 10^{-24}$ g です。

原子の核

トムソン(J.J. Thomson)は、原子が正に帯電した物質の様な球で、その中で数千の電子が共平面環を回っていると想像しました。しかし何個の電子がこの球の中で回っているのか?一つの答えを見つけようとして、トムソンと彼の学生は電子のビームを非常に薄い金属箔に当てました。彼らは理論を立て、ビームが箔を通過するとビームの電子が原子中で非常に沢山の電子と出くわし、負電荷が反発すると思えました。衝突毎にその直線の経路からの少しの偏向が観測される筈で、正味の偏向が原子中の電子の数に関係すると思えました。トムソンは実際に偏向を観測しました。しかし、それは期待したよりもずっと小さな偏向でした。そこで、かれらは電子数の評価を改めなければならず、それは彼らの原子のモデルではありませんでした。

1910年頃、Ernest Rutherford(1871-1937)はトムソンのモデルをもう少し検討しようとしてしました。ラザフォードは、それ以前に α 線がヘリウム原子と同じ質量の、正に帯電した粒子から成ることを発見していました。もしトムソンの原子モデルが正しければ、そのような大きくて重い粒子のビームが非常に薄い金属箔の原子の中を通過する際、ビームはほんの少し偏ると考えました。ラザフォードの共同研究者 Hans Geiger と若い学生 Ernst Marsden は、Fig. 2.8 に図式化された装置を組み立て、 α 粒子を箔に当てた時に何が起こるか観察しました。大抵は殆ど真っ直ぐ通過しました。しかしガイガーとマースデンは極僅かの α 粒子は大きな角度で偏り、いくつかは殆ど真っ直ぐ戻ってきたのに驚きました!ラザフォードは後にこの意外な結果を次のように述懐しています。“それは一枚の紙に向けて15インチの[大砲]の弾を放つと、それが戻ってきて、砲手に当たったと信じるようなことでした。”

Fig. 2.8 ラザフォードの実験。正に帯電したアルファ粒子のビームを薄い金箔に当てました。硫化亜鉛で被覆した発光スクリーンを用いて、箔を通り抜けたり、偏向されたりした粒子を検出しました。大部分の粒子は真っ直ぐ通り抜けました。いくつかは幾分か偏った、そして僅かだが反対に戻って来るものもありました。(円形のスクリーンは簡単のために示しています;実際はもっと小さな、可動性のスクリーンが用いられたことに注意して下さい)

これを説明する唯一の方法は、トムソンのモデルを捨てて、全ての正電荷および原子の質量の大部分は、非常に小さな容積の中に集中していると結論することでした。ラザフォードはこの原子の小さな芯を核(nucleus)と名付けました(Fig. 2.9)。電子は原子の空間の残りの部分を占めています。それらの結果から、ラザフォード、ガイガー、マースデンは金の核の正電荷が 100 ± 20 の範囲にあり、そして核は約 10^{-13} cm の半径であると計算しました。これは核が原子よりも約 100,000 倍も小さいことを示します。

Fig. 2.9 ガイガーとマースデンによってなされた実験結果に対するラザフォードの解釈

ここで記した実験は3種の主な原子の構成成分：陽子、電子、中性子によって解釈されます。原子の核、又は芯が質量の大部分と正の電荷を占め；その半径は原子そのものよりも約100,000倍小さくなっています。陽子と中性子が核を作っています。負に帯電した電子は原子の体積の大部分を占めますが、質量には殆ど寄与しません。原子は正味の電荷を持たないので、核の外側にある電子の数は核の内側のプロトンの数に等しくなければなりません。

化学者にとって、電子は原子の最も重要な部分です。それは電子が他の原子と接触する最初の部分であるからです。電子は原子の化学的な組み合わせを大きく支配しています。20世紀の初期の実験は、負の電子が原子核の外側の空間を占めることは明確にしましたが、その配置についてはラザフォードやその時代の他の物理学者にとって全く未知のものでした。この配置は今では知られており、8章の主題でもあります。

練習問題 2.2 原子を記述する