



ら始まったと思われ、足の爪先から踵までの長さに由来する 1Foot や 10Feet などの単位が米国や英国では使用されています。海の深さを測るときに現在でも漁師や釣り人などの間で用いられる 1 尋（ひろ、語源はひろげ?）は人が両手を左右へ広げた時の指先から指先までの長さに相当する単位ですし、競馬の優勝馬と 2 着の馬の差は 1 馬身とか半馬身と表現していました。このように物差しを用いて長さを測る方法は比較法による定量分析ですから、その物指しは信頼性が高く正確でなければなりません。その上、面積は縦と横の長さを測れば求められますし、体積は 3 方向の長さを測れば求められますから、長さは日常生活に最も密接に関わる重要な物理量です。ガリバーの足の長さを 1Foot とすると、小人の国の生活に適した長さの単位ではありませんから種々の問題が持ち上がることでしょう。

織田信長や武田信玄や北条早雲などの戦国大名は、長さと体積と貨幣の基準を決めて、不満の残らないように農民から年貢を徴収して強力な軍隊を維持し、それぞれの領国を統治していたようです。天下統一をした豊臣秀吉は平均的な身長をもとに長さ 191cm を 1 間とし、1 回の食事で食べる米の量をもとに当時京都で用いられていた 1 升を体積の基準に全国的に統一して、耕作面積と米の正確な収穫量を把握する太閤検地を行いました。太閤検地の時代の日本では多くの人と同じような体付きをし、米を食べ似たような生活習慣を持っていましたから、度量衡も身長に合わせて長さを決め、1 回に食べる米の量から体積を決めました。このような領国の統治の傾向はスペインからロシアまで多くの国が割拠していたヨーロッパでも見られましたが、北ヨーロッパと南ヨーロッパでは人種が大きく異なり平均身長にも大きな差があります。農業で生活する気候の温暖な地域と狩猟や牧畜で生活する地域では主食の食べ物も異なり生活習慣が当然異なりますから、度量衡の基準となるものも統一することが困難になります。Napoléon のヨーロッパ大陸制覇を切っ掛けにした通商や交易の国際化に伴い、ヨーロッパ大陸に統一的な度量衡の基準としてメートル法が生まれてきました。

種々の人種や習慣や生活環境に関わらず、メートル法では日常生活の基本となる水と地球の大きさを重さと長さの基準に採用しました。しかし、実際の地球の大きさを測ることは容易ではありませんから、子午線上の北極から赤道までの長さを 10000km と定義し、 $1000\text{cm}^3$  を 1L としてその体積の水の質量を 1kg と定義しました。19 世紀に生まれたメートル法は徐々に世界各国で採用されるようになり、日本も 1885 年にメートル法を採用しましたが、古くから用いられてきた尺貫法が一般生活では広く用いられていました。1951 年に尺貫法の使用禁止令により漸く日常生活もほぼメートル法に移行しました。長さや重さなどの 1 次元的な単位は簡単な割り算や掛け算で比較的容易に換算できますが、面積や風速などの 2 次元以上の単位は 2 度以上の掛け算や割り算をしなければなりませんから、換算が難しく感覚的に捉え難いために、現在でも土地の売買などでは坪や反などの面積の単位が残っています。

世界中の多くの国はメートル法を採用していますが、最も世界に影響力を持つ米国では未だに長さや重さや体積の単位にヤードポンド法を温度に華氏を採用しています。船乗りはノット(kt)を、気象庁は m/s を、米国は mph (1 時間当たりのマイル数)を風速の単位として

用いています。1気圧(atm)が $1\text{kg}/\text{cm}^2$ に近いために、1970年代に日本ではガスのボンベの圧力の単位に $\text{kg}/\text{cm}^2$ を用いていたが、米国ではpsi ( $\text{lb}/\text{in}^2$ )を研究室でも使用していました。1ポンド(lb)が0.45359237 kg、1インチ(in)が2.54cmですから、psiは3回の算術計算をしなければ $\text{kg}/\text{cm}^2$ に変換できず非常に混乱した覚えがあります。また、温度の単位の摂氏( $^{\circ}\text{C}$ )に $273.15^{\circ}\text{C}$ だけ足し算すれば絶対温度(K)に変換できますから通常不便を感じませんが、華氏( $^{\circ}\text{F}$ )から摂氏には非常に計算し難い関係があります。温度を華氏で、風速をmphで表していますから、米国では天気予報の放送は感覚的に理解できません。自然科学の研究や教育で用いられている単位はメートル法に統一されていますから、本書でもメートル法を断りもなく採用しています。著者は古い時代に教育を受けましたからジュールよりカロリーの方が直観的に捉えやすいので、時代錯誤を承知の上で本書でもカロリーを採用させてもらっていますが、もしジュールをお好みであれば恐縮ですがカロリー数を4.18605倍して下さい。

このように重さや長さや面積や体積が基準になって日常生活のあらゆることが動いていますし、砲丸投げやマラソンや重量挙げなどのオリンピックの競技種目が長さや重さや時間を競っていますから、これらの物理量を正確に量ることとともに時間的にも地域的にも全世界的に比較できる共通な単位が必要になります。しかし、技術の進歩や知識の蓄積により、物理量の測定値の精度が向上してゆきますから、メートル原器を基準にした1mの長さが光の波長を基準にした1mの長さに変更されたように、単位も測定法も常に変化を続けていますし、その持つ意味合いも変化してゆきます。物質の性質や変化に関わる数を調べて、隠れるように存在している興味深い合理性や自然の摂理などを考えてゆくときに、誤差を含めて信頼できる数を統一的な単位で関連させねばならないと思います。

## 原子の種類

春秋戦国時代の中国では万物が木と火と金と水の4つの独立した元素とそれらを中心に繋ぐ土の元素でできているとする五行思想が考えられていました。人間の身体は肝臓、心臓、脾臓、肺臓、腎臓の5臓が働いて機能し、穀物は麻と麦と稲と黍と大豆の五穀からなると考えていました。うなぎを食べる習慣のある夏と秋を結ぶ土用を含めて、季節は春夏秋冬の四季とその間を結ぶ土用からなると考えていました。また、動物の代表は龍と孔雀と虎と武と麒麟の五獣(五龍)が考えられていたようです。当然、青と朱〔赤〕と白と黒と黄の5色の組み合わせで地上のすべての色ができていると考えられていました。この五行思想が古く日本に伝搬しましたから、現在でも多くの習慣や言葉が日本の中に残っています。例えば、色と季節が結びついた青春、白秋、朱夏、玄冬などの言葉が残っていますし、色と動物が結びついた青龍、白虎、朱雀、玄武、麒麟(黄麟)は高松塚古墳の壁画に描かれ、平城京の入り口の朱雀門や幕末会津で討ち死にした白虎隊や火山岩の一種の玄武岩に名が残っています。同じように大相撲の土俵の上には青房(実際は緑房)と赤房と白房と黒房が下げられています。

ギリシャの哲学者達が火と水と土と空気の 4 つの元素が離散集合して万物が成り立ち変化すると体系化した四大元素説は五行思想との対比から四行思想とも呼べるものでした。目にできる万物は液体と固体でしたから、血や水や油などの液体を水に、石や木や草などの固体を土に、風や臭いや煙などの気体を空気に結び付け、それらの状態変化で生じる熱や光を火に対応させて体系化していました。欧州を中心にこの思想の上に発展してきましたから、現代の自然科学にはこの四行思想が色濃く残っています。

地球上に存在する約 70 種類の金属はすべて銀白色を呈していますが、例外的に銅と金はそれぞれ赤銅色と黄金色を呈します。その上、金と銀は地球上の存在量が少なく、鑄び難く永遠に輝きを保つ金属で、装飾品としての魅力を持っているために、古くから貴重品として権力の象徴や貨幣の基準になってきました。金が他の金属と比較して圧倒的に高価で取引されてきましたから、黄金色の金属を廉価に入手する方法が古くから求められ、錬金術の主な命題でした。赤色の銅に銀色の亜鉛を多量に加えて熔融しますと真鍮 (Brass) あるいは黄銅と呼ばれる黄色の合金になり、銅と亜鉛の本来の色合いは残っていません。特に、銅 (80%未満) と亜鉛 (5~40%) の真鍮は金に似た黄金色をしていますから装飾品としても価値を持っていますが、亜鉛と銅の価格から考えますと金の 0.2% の材料費しか要しません。そのため「貧者の黄金」と呼ばれて、まさに金を生む錬金術師の極意であったと思われる。このように金儲けのもとになる錬金術の基本が種々の物質を純粋に分けたり混ぜたりし、煮たり焼いたり溶かしたりして変化させる技術でしたから、種々の物質から価値のあるものを作り出す技術や知識が次第に蓄積されてきました。

欧州文明の中心がギリシャからローマへ移り、さらに欧州全域へ広がってゆくに連れて、ギリシャに生まれた四行思想も欧州全域に広がり、錬金術の技術と結びついて次第に自然科学に発展してゆきました。四行思想の中で物質の素と考えられていた水と土と空気を突き詰めてゆくうちに、元素が集合した分子やイオンの考えに発展し、現在では万物が非常に多くの分子やイオンの集合によりできているという考えを自然科学の基礎にしています。他方、四行思想の中の火は状態変化で生じる熱や光を考えていましたから、火の概念が離散集合の際に生じるエネルギー変化や熱力学に発展しました。このように、万物はすべて元素の離散集合したものとする自然科学の基本の考え方は、この四行思想から発展してきたものと思われる。

集合する仕方が異なれば水と氷のように同じ分子が集合した物質でも非常に異なる性質を示しますから、分子の集合の仕方により物質はそれぞれ個性のある性質や機能を示します。しかも、この物質の性質や機能が組み合わされて、万物は複雑な性質や機能をかもし出しています。このように物質の、そして万物のもとになる分子やイオンは種々の原子が強い力で結び付いて形作られています。それらの原子の結び付きの違いにより異なる性質や機能を示す 5000 万種類以上の分子やイオンが現在までに調べられています。その結果、膨大な種類の分子やイオンを構成している原子は自然界にはわずかに 90 種類しか存在していないことが分かってきました。しかも、これらの原子は中性子と陽子と電子の 3 種の粒子が極

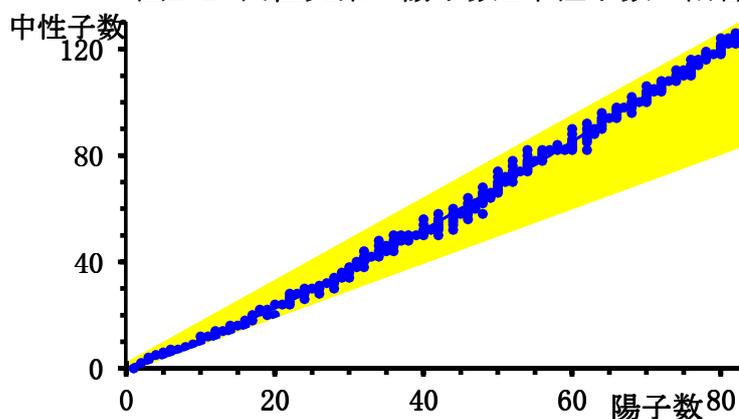
めて大きなエネルギーで結び付けられてできています。これらの関係をまとめますと中性子と陽子と電子の3種の粒子が集合して地球上の万物が作り出されており、その3種の粒子の集合の仕方により万物の性質や機能が発現していると考えられますから、現代の自然科学の考え方は三行思想と表現することも出来るように思います。

万物を構成する物質は約90種の元素で構成されていますが、それらの元素は電子と中性子と陽子の3種の粒子が組み合わせられて出来ています。中性子は電氣的に中性で、陽子と電子それぞれ正と負の互いに相反する電荷を帯びています。原子の中心には陽子と中性子が緊密に強く結びついて原子核を構成していますが、その周囲に陽子の正電荷を打ち消すように同じ数の電子が分布しています。次節で取り上げますが、電子と比較して陽子と中性子の質量が格段に大きいため原子の質量はこの2種類の粒子の数にほぼ比例しますから、陽子数と中性子数の和を質量数と呼び原子の質量をおおよそ意味しています。そのため、中性子の数の異なる元素はいろいろとありますが、同じ陽子の数を持つ原子は電子の数も同じになりますから、これを互いに同位元素と呼んで非常に良く似た性質を示します。化学者は陽子数の異なる原子にアルファベットの1~2文字を元素記号としてそれぞれ割り当て、質量数をその記号の左に上付きの数字で示して同位元素を含めたすべての原子を構成する中性子と陽子と電子の3種の粒子の組み合わせまで表すようにしています。例えば、水素の同位元素の中で高い割合で存在する水素原子は陽子と電子が1つずつで中性子を含んでいませんから ${}^1\text{H}$ と表すことができますし、ヘリウム原子( ${}^4\text{He}$ )は陽子2と中性子2と電子2、炭素原子( ${}^{12}\text{C}$ )は陽子6と中性子6と電子6で出来ています。

陽子や中性子を研究対象とする素粒子物理学は化学の知識しか持たない著者にとっては遠くかけ離れた領域ですから、その本質はほとんど理解できませんが、陽子と中性子に関する特徴的な2つの挙動を示す現象だけは理解しています。第1の挙動は中性子が電子を放出して陽子になり、陽子が電子を受け取って中性子になる可逆的な変化です。この中性子と陽子の間の可逆的な変化には極めて大きなエネルギーを要しますから、温和な環境の地球上ではほとんど進行しませんが、不安定な原子核の中では中性子から陽子への変化がまれに進行します。これに対して非常に過激な環境の太陽内部では、非常に大きなエネルギーを放出しながら、陽子から中性子への変化が進行しています。

水素以外の原子の原子核には複数の陽子が含まれていますが、非常に近い距離で存在するそれらの陽子はそれぞれ正電荷を帯びていますから非常に強い静電的斥力が当然働きます。これらの静電的斥力に打ち勝って陽子と中性子

図2-2 同位元素の陽子数と中性子数の割合



が原子核を構成していますから、陽子と中性子の間は非常に強い力で結び付いていると考えることができます。陽子と中性子の数の種々の組み合わせにより異なる同位元素が無限に考えられますが、陽子の数が 84 以上の元素では静電的斥力が強くなり陽子と中性子を結び付ける力が相対的に弱くなりますから、その原子核が不安定になり、徐々に壊れてゆきます。例えば、2004 年に理化学研究所で合成されたニホニウム ( $^{278}\text{Nh}$ ) は 113 の陽子を含む元素ですから、非常に不安定で自然界には存在できず人工的に合成しても 20 ミリ秒(半減期 2ms) でほとんど消滅してしまいます。また、自然界に存在する元素の陽子と中性子の数の割合は図 2-2 の黄色で示す 1~1.5 の範囲で一定しており、陽子に対して中性子の割合がこの範囲から大きく外れた同位元素も不安定で壊れてしまいますから自然界には存在できません。

このように陽子と中性子は非常に大きな力で緊密に結び付いていますが、原子核が一度壊れて分解するときには、壊れた破片と共に今まで陽子と中性子を結び付けていた大きな力がエネルギーとして放出されます。これらの壊れた破片やエネルギーは放射能と呼ばれ、その原子核の分解の仕方は主に  $\alpha$  壊変と  $\beta$  壊変と  $\gamma$  壊変と核分裂の 4 種類の型に分類することが出来ます。 $\alpha$  壊変は高いエネルギーを持つヘリウム原子 ( $^4\text{He}$ ) が破片となって放出される変化ですが、このとき原子核の中の 2 個の中性子と共に陽子が 2 個減りますから、ウラン ( $^{238}\text{U}$ ) からトリウム ( $^{234}\text{Th}$ ) への壊変のように陽子が 2 個減り原子の種類も変わりますが同時に質量数も 4 減少します。 $\beta$  壊変は不安定な原子核が持つ大きなエネルギーを活性化自由エネルギーとして受けて、中性子が陽子に変化する時に発生する電子を放射しますから、中性子が 1 個減り陽子が 1 個増えます。結果としてトリウム ( $^{234}\text{Th}$ ) からプロトアクチニウム ( $^{234}\text{Pa}$ ) へのように陽子の数が 1 増えて原子の種類が変わりますが質量数は変化しません。 $\gamma$  壊変は原子核の中に残った歪みや余分のエネルギーを波長の極めて短い電磁波として放射する変化で、陽子の数も中性子の数も変化しませんから、原子の種類も質量数も変わりません。核分裂は地球上では自発的には全く起こらない変化ですが、高いエネルギーを持つ中性子が衝突する時に原子核がバラバラに小さな破片の原子や陽子や中性子に壊れる変化で、大きなエネルギーを同時に放射能として放出します。万物を構成する物質は約 90 種の元素で構成されていますが、それらの元素は陽子と中性子の結び付いた原子核が中心に座り、その周囲に電子が広く分布しています。その原子核は中性子と陽子の間に働く極めて大きな力で結び付いて集合していますから、この中心に据わる原子核の分解する時には極めて大きなエネルギーの放射を伴います。

このようにギリシャに生まれた四行思想が種々の変遷を経て、現在では中性子と陽子と電子の 3 種の粒子が結び付けられて元素を構成し、これら 3 種の粒子の構成の違いによる約 90 種の元素が集合して分子やイオンを構成し、さらに分子やイオンが複雑に集合することにより万物の性質や機能が発現していると考えられるようになりました。しかも、それぞれ対応するエネルギーにより各段階の離散集合がなされていると考えられています。これらの関係をまとめますと、現代の自然科学の考え方は、地球上の万物が中性子と陽子と電子の 3 種の

粒子の集合の仕方により作り出されていますから、三行思想と表現することも出来るように思います。

## 原子の寸法

浜辺に押し寄せる波も電磁波も、波の山と山、谷と谷が同調するときには波は強められ、山と谷が同調するときには波は弱め合いますが、この現象を波の干渉現象と呼んでいます。特に波長の同じ2つの波が同調するときには強く干渉現象が現れ、強い波になったり波が消えたりします。物質の結晶は多くの原子が分子固有の原子間距離を保ちながらさらに構成する分子が整列していますから、結晶に含まれるすべての原子は0.1~10nmの間隔で整列しています。これらの原子は周囲を電子が取り巻いていますから、電磁波がこれらの電子に当たりますとそれぞれ反射します。図2-3に示すように、面をなして層状に整列した原子に電磁波を照射しますと、第1面で反射する電磁波と比較して第2面で反射する電磁波は赤色で示した光路だけ長くなりますから、電磁波の振動がずれて互いに干渉します。電磁波の波長を $\lambda$ 、原子の整列している面の間隔を $d$ 、その面に対する入射角と反射角を $\theta$ 、任意の自然数を $n$ としますと、赤色で示す光路の長さが式2-1の左辺で見積られますから波長の整数倍になる条件を満たすときには電磁波が強くなる干渉現象を示します。

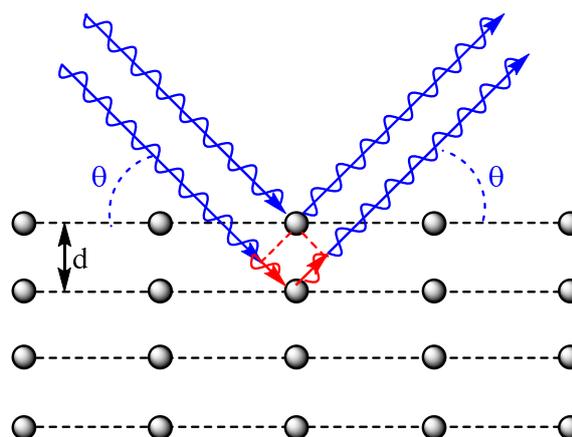


図2-3 X線回折の模式図

電磁波の波長を $\lambda$ 、原子の整列している面の間隔を $d$ 、その面に対する入射角と反射角を $\theta$ 、任意の自然数を $n$ としますと、赤色で示す光路の長さが式2-1の左辺で見積られますから波長の整数倍になる条件を満たすときには電磁波が強くなる干渉現象を示します。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{式 2-1}$$

結晶に含まれるすべての原子は0.1~10nmの間隔で整列していますから、0.1~10nmの波長領域をもつX線がこの干渉現象を引き起こす電磁波と考えられ、Laueは一定の波長を持つX線を結晶に照射して、Laue斑点と呼ばれるX線の強く干渉する方向を写真乾板上に測定しました。結晶を構成している原子の種々の組み合わせにより多くの層状の面が存在しますから、非常に多くのLaue斑点が観測できますが、特に多くの電子が周囲を包み込んでいる大きな原子では強い強度のLaue斑点を生じます。このように結晶に対して入射X線の角度と斑点の角度の測定から、原子の整列している面の角度と間隔が求められます。X線の波長 $\lambda$ が一定の測定条件において、各 $\theta$ に対して $d$ と $n$ を種々仮定しながら多くの斑点について矛盾のない解を算術で計算する気の遠くなるような作業により、結晶中の原子の整列の仕方が逆算できます。X線構造解析法と呼ばれるこの方法は原子が整列する結晶であれば、

温度や圧力や溶媒などの外的な要素の影響を受けることなく、原子の配列や原子間距離や原子の種類などが 3 次元的に求められます。

Van der Waals は結晶中では原子や分子が接するように最も密に整列した状態と仮定して、結晶の X 線構造解析などにより隣接しながら結合していない原子の間の距離を求めてそれぞれの原子の半径の和としました。種々の原子の組み合わせによりこの簡単な算術の計算で得られる半径は van der Waals 半径と呼ばれ、原子核を取り巻くように電子の運動している周囲の部分を含めた原子の大きさを見積もることができます。このようにして見積もられている種々の原子の van der Waals 半径を表 2-1 に纏めました。

原子核は静電荷を帯びた陽子と電荷を持たない中性子が緊密に寄り集まって原子の中心に座っていると考えることができますから、負電荷を持った電子を原子に衝突させますと原子核との間に静電的引力が働き電子の行路が曲げられます。この電子散乱の現象を利用しますと、原子の質量数を  $W$ 、比例定数  $r_0$  を  $1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$  とするとき種々の原子における原子核の半径  $r$  には式 2-2 の関係が認められます。水素の同位元素の中で高い割合で存在する  $^1\text{H}$  は陽子が 1 つで中性子を含んでいませんから、式 2-2 で計算される  $r$  は陽子の半径を意味ししかも質量数が 1 ですから、比例定数  $r_0$  は陽子の半径を意味していると考えられます。また、原子核を球と近似するとこの半径から原子核の体積が式 2-3 で計算できますから、比例定数  $r_0$  は陽子の半径と中性子の半径の平均値を意味していると考えられます。このことから、陽子と中性子のそれぞれの半径はほぼ等しく  $1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$  と見積もることができます。

$$r = r_0 \sqrt[3]{W} \quad \text{式 2-2}$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 W \quad \text{式 2-3}$$

原子の中には原子核と電子が存在していると考えられていますが、原子を構成している陽子も中性子も大きさと質量が測定されていますから、著者も感覚として極限まで小さな物質と捉えることができます。しかし、電子は内部構造のない点と考えられ、これまでに高エネルギーの電子の衝突実験などで電子に大きさがある兆候が見つかっていませんし、電子を大きさのない素粒子として扱っても矛盾のない理論もほぼ完成しているようです。永年にわたって物質を扱ってきた著者にとっては、電子や光が大きさを持たない粒子とする考えは理解のできない極限の世界のようです。

周囲を取り巻くように電子の運動している外側部領域の半径との比較のために、種々の原子の中心部を占める原子核の半径も表 2-1 に纏めました。これら 2 種の半径の計算結果からそれらの割合も並べて掲げましたが、表に掲げたこれらの半径の割合の平均値から、中心部に存在している原子核が原子の体積に対して  $1.1 \times 10^{-12} \%$  に過ぎない非常に小さな存在であることを算術の計算は示しています。この体積比が東京ドームのグラウンドにある直径 5mm の小石の大きさに相当する例えから、想像を絶するような原子の横顔が見えてきます。

表 2-1 原子の半径と質量

原子	半径(m)			質量(kg)		
	原子核	電子軌道	比	原子核	電子	比
H	1.20x10 <sup>-15</sup>	1.20x10 <sup>-10</sup>	100000	1.67x10 <sup>-27</sup>	9.11x10 <sup>-31</sup>	1836
He	1.90x10 <sup>-15</sup>	1.40x10 <sup>-10</sup>	73495	6.70x10 <sup>-27</sup>	1.82x10 <sup>-30</sup>	3675
Li	2.30x10 <sup>-15</sup>	1.82x10 <sup>-10</sup>	79285	1.17x10 <sup>-26</sup>	2.73x10 <sup>-30</sup>	4288
C	2.75x10 <sup>-15</sup>	1.70x10 <sup>-10</sup>	61879	2.01x10 <sup>-26</sup>	5.47x10 <sup>-30</sup>	3675
N	2.89x10 <sup>-15</sup>	1.50x10 <sup>-10</sup>	51864	2.34x10 <sup>-26</sup>	6.38x10 <sup>-30</sup>	3675
O	3.02x10 <sup>-15</sup>	1.40x10 <sup>-10</sup>	46299	2.68x10 <sup>-26</sup>	7.29x10 <sup>-30</sup>	3675
F	3.20x10 <sup>-15</sup>	1.35x10 <sup>-10</sup>	42160	3.18x10 <sup>-26</sup>	8.20x10 <sup>-30</sup>	3879
Ne	3.26x10 <sup>-15</sup>	1.59x10 <sup>-10</sup>	48813	3.35x10 <sup>-26</sup>	9.11x10 <sup>-30</sup>	3675
Na	3.41x10 <sup>-15</sup>	2.27x10 <sup>-10</sup>	66517	3.85x10 <sup>-26</sup>	1.00x10 <sup>-29</sup>	3842
Mg	3.46x10 <sup>-15</sup>	1.73x10 <sup>-10</sup>	49980	4.02x10 <sup>-26</sup>	1.09x10 <sup>-29</sup>	3675
Si	3.64x10 <sup>-15</sup>	2.10x10 <sup>-10</sup>	57630	4.69x10 <sup>-26</sup>	1.28x10 <sup>-29</sup>	3675
P	3.77x10 <sup>-15</sup>	1.90x10 <sup>-10</sup>	50402	5.19x10 <sup>-26</sup>	1.37x10 <sup>-29</sup>	3797
S	3.85x10 <sup>-15</sup>	1.85x10 <sup>-10</sup>	48064	5.52x10 <sup>-26</sup>	1.46x10 <sup>-29</sup>	3790
Cl	3.93x10 <sup>-15</sup>	1.80x10 <sup>-10</sup>	45857	5.86x10 <sup>-26</sup>	1.55x10 <sup>-29</sup>	3783
Ar	4.10x10 <sup>-15</sup>	1.91x10 <sup>-10</sup>	46541	6.70x10 <sup>-26</sup>	1.64x10 <sup>-29</sup>	4083
K	4.07x10 <sup>-15</sup>	2.75x10 <sup>-10</sup>	67577	6.53x10 <sup>-26</sup>	1.73x10 <sup>-29</sup>	3772
Ni	4.65x10 <sup>-15</sup>	1.63x10 <sup>-10</sup>	35091	9.71x10 <sup>-26</sup>	2.55x10 <sup>-29</sup>	3806
Cu	4.77x10 <sup>-15</sup>	1.40x10 <sup>-10</sup>	29320	1.05x10 <sup>-25</sup>	2.64x10 <sup>-29</sup>	3992
Zn	4.80x10 <sup>-15</sup>	1.39x10 <sup>-10</sup>	28958	1.07x10 <sup>-25</sup>	2.73x10 <sup>-29</sup>	3920
As	5.06x10 <sup>-15</sup>	2.00x10 <sup>-10</sup>	39521	1.26x10 <sup>-25</sup>	3.01x10 <sup>-29</sup>	4176
Br	5.15x10 <sup>-15</sup>	1.95x10 <sup>-10</sup>	37871	1.32x10 <sup>-25</sup>	3.19x10 <sup>-29</sup>	4148
Kr	5.26x10 <sup>-15</sup>	2.01x10 <sup>-10</sup>	38246	1.41x10 <sup>-25</sup>	3.28x10 <sup>-29</sup>	4288
Pd	5.68x10 <sup>-15</sup>	1.63x10 <sup>-10</sup>	28701	1.77x10 <sup>-25</sup>	4.19x10 <sup>-29</sup>	4234
Ag	5.70x10 <sup>-15</sup>	1.72x10 <sup>-10</sup>	30192	1.79x10 <sup>-25</sup>	4.28x10 <sup>-29</sup>	4183
Sn	5.92x10 <sup>-15</sup>	2.17x10 <sup>-10</sup>	36662	2.01x10 <sup>-25</sup>	4.55x10 <sup>-29</sup>	4410
I	6.03x10 <sup>-15</sup>	2.15x10 <sup>-10</sup>	35644	2.13x10 <sup>-25</sup>	4.83x10 <sup>-29</sup>	4403
Pt	6.96x10 <sup>-15</sup>	1.75x10 <sup>-10</sup>	25148	3.26x10 <sup>-25</sup>	7.11x10 <sup>-29</sup>	4594
Au	6.98x10 <sup>-15</sup>	1.66x10 <sup>-10</sup>	23774	3.30x10 <sup>-25</sup>	7.20x10 <sup>-29</sup>	4583
Hg	7.04x10 <sup>-15</sup>	1.55x10 <sup>-10</sup>	22014	3.38x10 <sup>-25</sup>	7.29x10 <sup>-29</sup>	4640
Pb	7.11x10 <sup>-15</sup>	2.02x10 <sup>-10</sup>	28411	3.48x10 <sup>-25</sup>	7.47x10 <sup>-29</sup>	4661
U	7.44x10 <sup>-15</sup>	1.86x10 <sup>-10</sup>	25011	3.98x10 <sup>-25</sup>	8.38x10 <sup>-29</sup>	4754

## 原子の重さ

19世紀はじめに水素や炭の燃焼や塩素と水素の反応などの気体の関与する反応から、Gay-Lussac は「気体の反応物と生成物の体積の比は、簡単な整数比で表される」という化学の基本となる法則を見出しました。さらに、Boyle や Charles によって、種類に関わらず物質質量  $n$  の気体の体積  $V$  は絶対温度  $T$ 、圧力  $p$  において式 2-4 に示す状態方程式の関係で法則化されました。この関係から同じ圧力と温度において同じ体積の気体の物質の質量が一定の比例関係にあり、酸素を 16 とすると多くの元素の比が整数で割り切れて小さな余りしか残りませんから原子量概念が確立しました。その後、塩素の原子量が約 35.5 と端数になることなどから同位元素の原子量を考慮に入れて、中性子 6 個を持つ炭素の同位元素  $^{12}\text{C}$  の原子量を基準値 12 としました。しかし、種々の元素の原子量は炭素の原子量に対する比率に過ぎませんから、実用的に秤で量ることもできず不便でしたので、物質の分子量の数字に g (グラム) をつけた質量に含まれる物質質量を 1mol (モル) として当初は定義されました。これにより式 2-4 の比例定数  $R$  が理想気体の気体定数と呼ばれ  $0.0820574 \text{ L atm/molK}$  と算術で計算されます。言い換えれば、**モルは 12g の  $^{12}\text{C}$  (質量数 12 の炭素原子) の中に存在する原子の数と等しい数の原子や分子の物質質量と定義されています。** ちなみに炭素には  $^{12}\text{C}$  の他に  $^{13}\text{C}$  と  $^{14}\text{C}$  の同位元素が存在しますから、天然に存在する炭素の原子量は 12.011 と測定されています。

$$pV = nRT \quad \text{式 2-4}$$

この関係に基きますと大気中に存在する窒素と酸素と二酸化炭素の分子量がそれぞれ 28.01348 と 31.9988 と 44.0098 ですから、1mol の窒素と酸素と二酸化炭素の重量はそれぞれ 28.01348g と 31.9988g と 44.0098g ですが、 $0^\circ\text{C}$  ( $273.152519 \text{ K}$ )、 $1\text{atm}$  の下でのこれら 3 種の気体の体積は等しく  $22.41383\text{L}$  で、温度が  $100^\circ\text{C}$  ( $373.152519 \text{ K}$ ) に上昇しますと体積が  $30.6192\text{L}$  に膨張します。天然に存在する水の分子量は 18.01528 ですから、 $18.01528\text{g}$  の水の体積は約  $18\text{mL}$  に過ぎませんが、 $100^\circ\text{C}$ 、 $1\text{atm}$  の下で完全に気化した水蒸気の体積も窒素や酸素や二酸化炭素と同じように  $30.6192\text{L}$  まで膨張します。さらに、 $22.4\text{L}$  の水素と  $11.2\text{L}$  の酸素を反応させますと  $9\text{g}$  の水が生成する変化や、密閉した器の中で木炭を完全燃焼させても中の圧力が全く変化しないことから、Proust 等は関与する全ての物質の質量を mol 単位で表しますと物質がある一定の整数比で反応する関係を定比例の法則にまとめました。

Avogadro は原子量や分子量の概念に基いて「気体の種類に関わらず同じ体積中には同じ数の気体分子が含まれる」という仮説を唱えました。この仮説に基づき、Loschmidt は水に不溶性の乳香と呼ばれる樹脂の一定の大きさの細粒を水に懸濁して、その浮力と重力の平衡状態から  $0^\circ\text{C}$ 、1 気圧の  $1\text{cm}^3$  の体積中に含まれる気体分子の数を  $2.6869 \times 10^{19}$  個と見積もりました。モルの概念は日常生活に適応した物質質量ですし、化学反応を理解する上で極めて便利のため、この Loschmidt 数として見積もられた  $0^\circ\text{C}$ 、1 気圧の  $1\text{cm}^3$  の体積中に含まれる気

体分子の数から、1mol の物質に含まれる分子の数に算術で計算して Avogadro 定数と呼ばれる最も基本的な物理定数が導き出されました。

前節で説明した X 線構造解析法により、比較的大きな結晶の物質を構成する個々の分子の占める体積が求められ、併せて天秤などを用いて結晶全体の体積と質量が正確に測定できます。この結果から結晶中の分子の数が算術で計算できますから、その分子の分子量と結晶の質量を基に Avogadro 定数も精度高く計算できます。この他種々の測定法により、現在では Avogadro 定数は  $6.02214129 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$  と国際的な科学技術データ委員会で決定されています。水蒸気 22.4L や水 18.0g や砂糖 342.3g や食塩 58.5g は 1mol に相当しますから、それぞれ  $6.02 \times 10^{23}$  個の分子を含んでいることを意味します。

Avogadro 定数は物質 1mol の中に存在する原子や分子の数であり、1mol の  $^{12}\text{C}$  が 12g の質量を持つことから  $^{12}\text{C}$  の 1 個の原子の質量は  $1.993 \times 10^{-26} \text{kg}$  と算術で計算できます。また、 $^{12}\text{C}$  は 6 個ずつの陽子と中性子と電子で構成されていますから、12g の  $^{12}\text{C}$  の中には陽子と中性子と電子がそれぞれ Avogadro 定数の 6 倍個ずつ存在すると考えることができます。他の元素あるいは分子についても同じように算術で計算できますから、陽子と中性子と電子の質量をそれぞれ  $1.67262158 \times 10^{-27} \text{kg}$  と  $1.67492716 \times 10^{-27} \text{kg}$  と  $9.1093897 \times 10^{-31} \text{kg}$  と連立方程式を使えば見積もることができます。前節で式 2-3 の比例定数  $r_0$  が陽子の半径を意味し、しかも中性子の半径もほぼ等しく見積もることができましたが、この陽子と中性子の質量の計算結果は陽子と中性子の密度もほぼ等しいことを意味しています。このように質量の小さな電子に対して、中性子は 1839 倍の質量を持ち、陽子は中性子とほぼ同じ 1836 倍の質量を持っています。この電子との比較により、陽子と中性子の質量が格段に大きいために原子の質量はこの 2 種類の粒子の数にほぼ比例しますから、陽子数と中性子数の和を質量数と呼び原子の質量と近似しています。

中性子を持たない  $^1\text{H}$  を除く表 2-1 に掲げた種々の原子に関して、原子の半径に対する原子核の半径の大きさの平均値は 0.00268% で、原子の質量に対する原子核の質量の大きさの平均値は 99.976% と計算されます。この体積比は原子を東京ドームに例えると原子核は直径 5mm の小石の大きさに相当し、その小さな小石に原子のほぼすべての質量が集中している想像を絶するような原子の横顔が見えてきます。

## 原子の密度

密度(比重)はかなりよく物質の質感を表す尺度ですが、質量と体積から簡単な算術の計算により求められます。密度(比重)は一定の体積が持つ質量ですから、質量を体積で割った値で算出されますが、固体や液体の物質の密度は g/mL を単位として表します。例えば、綿や発泡スチレンは手いっぱいの高高いものでも簡単に持ち上げられますが、水や石油はかなり重く感じますし、石の塊や鉄はずっしり重くて持ち上げられないと始めから諦めますし、金塊は掌に載る程度の大きさでも容易には持ち上がりません。前節までに原子と原子核の半径と質量が求められましたので、それらの密度を計算してみましょう。

陽子と中性子と電子の質量はそれぞれ  $1.67262158 \times 10^{-27}$  kg と  $1.67492716 \times 10^{-27}$  kg と  $9.1093897 \times 10^{-31}$  kg ですから、種々の原子を構成している陽子と中性子と電子の数から容易に原子の質量が求められます。他方、原子の体積が van der Waals 半径  $r_{vw}$  から計算されますから、陽子の数を  $Z$ 、質量数を  $W$  としますと原子の密度  $D$  は式 2-5 で簡単な算術で算出できます。種々の原子について求めた密度を表 2-2 に纏めました。陽子と中性子の数が多くなるにつれて密度の大きくなる傾向がみられ、表 2-2 に掲げた原子についてその密度の平均値は  $7.51 \text{ g/mL}$  と計算されます。メートル法の体積も質量も水を基準にしますから水の密度は  $1.00 \text{ g/mL}$  で、水に入れても浮き上がる材木や石油やポリエチレンや氷の密度は  $1 \text{ g/mL}$  以下を示します。金属の中にはカリウムやナトリウムなどのように密度が  $1 \text{ g/mL}$  以下のものから、金や銀や白金や水銀や鉛など  $10 \text{ g/mL}$  を超すものまであり、生活に密接に関連する銅や鉄も約  $8 \text{ g/mL}$  で原子とほぼ同じ密度を持っています。アルミニウムやケイ素やリンや硫黄の密度は  $2\sim 3 \text{ g/mL}$  ですし、花崗岩や堆積岩や水晶や方解石などの鉱物やそれらを原料とするガラスやコンクリートの密度も  $2\sim 3 \text{ g/mL}$  を示していますから、それぞれの原子は石や砂や金属のような質感を持っていると思われます。

前節で見てきたように原子核の体積が原子の体積に対して無視できるほどに小さいために、同じように原子核を取り巻くように電子の運動している周囲の部分の密度は式 2-6 で簡単に計算できます。種々の原子について原子核を取り巻くように電子の運動している周囲の部分の密度も表 2-2 に纏めました。原子の密度と同じように陽子の数が多くなるにつれて密度の大きくなる傾向がみられます。式 2-4 により  $1 \text{ mol}$  当たりの気体の体積は種類の如何にかかわらず同じですから気体の密度は分子量に比例しますので、便宜的に空気を基準にしてしばしば表されますが、 $0^\circ\text{C}$   $1 \text{ atm}$  の条件を付して固体や液体と同じように  $\text{g/mL}$  を単位で表すこともあります。身の回りに存在する水素やヘリウムや窒素や酸素や塩素やアルゴンや空気の気体の  $0^\circ\text{C}$   $1 \text{ atm}$  における密度はそれぞれ  $8.98 \times 10^{-5} \text{ g/mL}$ ,  $1.79 \times 10^{-4} \text{ g/mL}$ ,  $1.250 \times 10^{-3} \text{ g/mL}$ ,  $1.429 \times 10^{-3} \text{ g/mL}$ ,  $3.21 \times 10^{-3} \text{ g/mL}$ ,  $1.784 \times 10^{-3} \text{ g/mL}$ ,  $1.29 \times 10^{-3} \text{ g/mL}$  と報告されています。表 2-2 に掲げた原子について原子核を取り巻くように電子の運動している周囲の部分の密度の平均値は  $1.62 \times 10^{-3} \text{ g/mL}$  と計算されますから、多くの原子の周囲の部分は地球上の大気と同じような質感を持っていると思われます。

$$D = \frac{3000 \times [(1.67262158 + 0.0009109) \times 10^{-27} Z + 1.67492716 \times 10^{-27} (W - Z)]}{4\pi r_{vw}^3} \quad \text{式 2-5}$$

$$D = \frac{3000 \times 9.1093897 \times 10^{-31} Z}{4\pi r_{vw}^3} \quad \text{式 2-6}$$

$$D = \frac{3000 \times [1.67262158 \times 10^{-27} Z + 1.67492716 \times 10^{-27} (W - Z)]}{(1.2 \times 10^{-15})^3 \times 4\pi W} \quad \text{式 2-7}$$

$$D = \frac{3000 \times 1.67377437 \times 10^{-27} W}{(1.2 \times 10^{-15})^3 \times 4\pi W} = 2.31 \times 10^{14} \quad \text{式 2-8}$$

原子核の体積は式 2-3 で表されますから、密度は式 2-7 で簡単に計算できますが、陽子と中性子の質量はほぼ等しいためにそれらの平均値を原子核を構成する粒子の質量とすれば式 2-8 になり原子の種類にかかわらず一定の  $2.31 \times 10^{14} \text{g/mL}$  と見なすことができます。身の回りの物質の中で密度の大きな金や銀や白金や水銀や鉛などでもわずかに  $10 \text{g/mL}$  を超す程度で、貴金属に属するイリジウムとオスミウムが最も大きな密度の  $22.5 \text{g/mL}$  と報告されています。余談ながらこのイリジウムは酸化に対する抵抗力が最も強い金属で熱した王水にもなかなか溶けませんが、Vickers 硬度と Brinell 硬度が大きいため加工し難く純粋な形での使用は困難です。白金とイリジウムを 90 : 10 の割合で混ぜた合金は耐食性と耐久性が高く加工も容易なために、万年筆のペン先や義歯などの最先端技術の分野では有用性の高い素材で、指輪などの宝飾品にも広く用いられています。この合金は化学的変質も機械的変形も起こり難い材質ですから、この優れた材質で 1879 年にパリの国際度量衡局にメートル原器とキログラム原器が作られました。このように身の回りにある液体や固体の物質の密度は  $0.1 \sim 25 \text{g/mL}$  の範囲にありますが、原子核の密度が  $2.31 \times 10^{14} \text{g/mL}$  ですから、原子核は途轍もないほどに大きな密度を持っていることになり、その質感を想像することは極めて困難なことと思われれます。

原子核は陽子と中性子が緊密に集合したものと考えられていますが、陽子同士の静電的な斥力が強く働きますから、陽子の数が 92 のウランよりも多くの陽子を持つ超ウラン元素では非常に不安定で短寿命

表 2-2 種々の原子の密度

原子	密度(g/mL)		
	原子	電子部	原子核
H	0.23	$1.26 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
He	0.58	$1.59 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Li	0.46	$1.08 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
C	0.98	$2.66 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
N	1.66	$4.51 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
O	2.33	$6.34 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
F	3.09	$7.96 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Ne	1.99	$5.41 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Na	0.79	$2.05 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Mg	1.85	$5.04 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Si	1.21	$3.29 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
P	1.81	$4.76 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
S	2.08	$5.50 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Cl	2.40	$6.34 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Ar	2.29	$5.62 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
K	0.75	$1.99 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Ni	5.35	$1.41 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Cu	9.18	$2.30 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Zn	9.53	$2.43 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
As	3.75	$8.97 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Br	4.26	$1.03 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Kr	4.13	$9.64 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{14}$
Pd	9.78	$2.31 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Ag	8.41	$2.01 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Sn	4.69	$1.06 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
I	5.11	$1.16 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Pt	14.54	$3.17 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Au	17.21	$3.76 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Hg	21.68	$4.67 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
Pb	10.09	$2.16 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$
U	14.78	$3.11 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{14}$

で分解してしまいます。しかし、陽子なくしては原子核として中性子を集合させる引力を示しませんが、中性子は電荷を持っていませんから互いに斥力も持ちません。外的に重力などの大きな影響力が働くときには中性子も集合することがあり、宇宙には中性子星と呼ばれる中性子だけの集合した天体が知られています。中性子星は中性子だけでできた原子核と考えることができ、正の電荷を持つ陽子を含んでいませんから、周囲を取り巻くように運動している電子も含まれません。式 2-8 から  $2.31 \times 10^{14} \text{g/mL}$  と考えられる原子核の密度と同じように、中性子星は大きさが極めて小さいにもかかわらず大きな質量を持っていると考えられています。ちなみに、地球と太陽の密度はそれぞれ  $5.52 \text{g/mL}$  と  $1.41 \text{g/mL}$  と報告されていますが、もし地球の質量を持つ中性子星が存在するとすれば、その大きさは現在の最大のタンカーで 4 艘分あるいは東京ドーム約 21 個分程度の体積に過ぎないと考えることができます。宇宙を支配している万有引力は重力に比例し距離に反比例する関係を持っていますから、中性子星の周辺では物質に対して非常に大きな引力を示すことになり、周囲の全ての物質を取り込んでしまう非常に特殊な天体と考えられています。

これらの平均値を基にしますと、原子の体積の  $1.4 \times 10^{-12} \%$  に過ぎない非常に小さな中心部に約 99.98% の質量が集中しています。この体積比と原子核の周辺部の密度を考慮しますと、東京ドームに空気のような質感で電子が動き回っており、そのグラウンドの中に直径 5mm の小石に相当する大きさの原子核が位置しています。原子の密度が岩石と同じくらいですから、この直径 5mm の小石の重さが岩石をぎっちり詰めた東京ドームの重さに匹敵すると算術で計算でき、想像を絶するような原子の横顔が見えてきます。

## 原子と太陽系の比較

前節で調べたように自然界に存在する元素は陽子と中性子の数の割合が 1~1.5 の範囲で一定ですし、陽子の数と同じ数の電子を持っていますから、原子の質量に対する電子の質量の割合は 0.0217~0.0272% と見積もることができます。しかも陽子と中性子は非常に小さな体積の原子核に集中しています。

革新的な酸と塩基の概念を築いた Lewis や質量分析計を発明した Thomson や  $\alpha$  線や  $\beta$  線などの放射線を発見した Rutherford などが原子の構造について種々の説を考えましたが、原子と原子核の大きさと質量の割合が太陽とその周囲を周回している惑星の大きさと質量の割合と類似していることに着目して、Bohr は原子が太陽系に類似した構造を持つと説明しまし

表 2-3 太陽系と酸素原子の比較

		太陽系	酸素原子
半径	中心部 (m)	$7.0 \times 10^8$	$3.02 \times 10^{-15}$
	外側部 (m)	$4.5 \times 10^{12}$	$1.40 \times 10^{-10}$
	中心部/外側部	$1.6 \times 10^{-4}$	$2.15 \times 10^{-5}$
質量	中心部 (kg)	$2.0 \times 10^{30}$	$2.7 \times 10^{-26}$
	外側部 (kg)	$2.7 \times 10^{27}$	$7.3 \times 10^{-30}$
	中心部/外側部	740	3680
外側部の軌道の形状		円盤状	球状
中心部と外側部の間の力		万有引力	静電引力

た。太陽系においては中心に座る太陽が圧倒的な質量を持っており、その周囲に非常に大きな半径の軌道を惑星が周回していますが、中性子を持たない  $^1\text{H}$  を除く表 2-1 に掲げた種々の原子の平均値から、原子の体積の  $1.4 \times 10^{-12}$  % に過ぎない非常に小さな中心部に約 99.98% の質量が集中していることが見えてきます。

そこで、8 つの惑星を持つ太陽系と比較するために、周囲に 8 個の電子を持つ酸素原子の半径や質量や形状を表 2-3 に掲げておきます。太陽系の半径に対して太陽の半径は約 0.016% ですが、太陽の質量に比べて 0.1~0.00002% 程度の質量を持つ 8 個の惑星がほぼ同一の平面の軌道上を周回していますから、惑星の総質量に対して太陽は約 740 倍の質量を持っています。これに対して、8 個の電子が分布している酸素原子の半径に対して原子核は約 0.0022% の半径の球状の空間に 3680 倍の質量が集中しています。太陽系と同じように、原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が 7 倍も遠くまで広く分布していますが、太陽への質量の偏りに比べて酸素の原子核の質量は 5 倍も大きく偏っています。

太陽系では太陽と惑星の間には万有引力が働いて惑星は太陽に結び付けられていますから、太陽系の天体の運動は Newton の力学で合理的に説明できます。これに対して、Bohr は原子核の持つ正電荷と電子の持つ負電荷の間に働く静電的な引力で原子核に電子が結び付けられている原子模型を考えました。Coulomb によると距離  $r_{ij}$  離れて電荷  $Q_i$  と  $Q_j$  を持つ  $i$  と  $j$  の 2 個の粒子間に働く静電的なエネルギー  $E_{ij}$  は真空中の誘電率を  $\epsilon_0$  とするとき式 2-9 で示すことができますから、これらの粒子は電荷が大きく距離が近いほど強く引き合ってエネルギー的に安定化します。Bohr の原子模型で周回している電子がこの関係式で表されるエネルギーを持っているとすれば、原子核に近い軌道の電子ほど強く結び付けられて安定化します。しかし、原子は非常に小さくその中に存在する電子は極めて高速で運動していますから、Newton や Coulomb の確立した古典力学では合理的に解釈することができませんでした。その後、Schrödinger や Einstein よって確立された量子力学により、原子核の周囲に存在する電子の挙動が式 2-10 に示す半径  $r_n$  の軌道に式 2-11 に示すエネルギー  $E_n$  を持って原子核に捉われていると合理的に説明されました。ただし、 $h$  は Planck の定数、 $m$  は電子の質量、 $e$  は電子の電荷を意味する定数ですし、 $z$  と  $n$  はそれぞれ原子核に含まれる陽子の数と電子が動き回っている軌道の主量子数ですが、これらの変数は正の整数ですから、軌道半径  $r_n$  もエネルギー  $E_n$  も不連続に段階的に変化します。

$$E_{ij} = -\frac{Q_i Q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad \text{式 2-9}$$

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \cdot \frac{n^2}{z} \quad \text{式 2-10}$$

$$E_n = -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{z^2}{n^2} \quad \text{式 2-11}$$

この量子力学による原子模型によれば、電子が動き回っている軌道の半径  $r_n$  とエネルギー  $E_n$  は式 2-10 と式 2-11 で表されますから、主量子数  $n$  の小さな順に不連続に段階的に原子核に近い半径の小さな内側の軌道から 7 段階におおよそ順番に詰まっていきます。ここで原子に属する電子が入ることの出来る軌道の数は主量子数の 2 乗となり、主量子数 1 から順に 1、4、9、16、25、36 となります。駄菓子屋で売っている変わり玉のように層状に重なった原子の各軌道に 2 個ずつの電子が入るとその軌道は充足し安定します。そのため、主量子数 1 から 2、8、18、32、50、72 個の電子が入れるだけの許容量を持っています。しかし、最も外側の主量子数の軌道に分布する最外殻電子が主量子数 1 では 2 個、それ以外では 8 個まで入ると主量子数が 1 増加して次の外側の軌道に電子は順次詰まってゆきます。

主量子数が 1 と 2 の場合にはそれぞれの軌道が電子で充足されてから主量子数が 1 増加して次の軌道に電子は順次詰まってゆきますが、主量子数が 3 以上では、軌道が電子で完全には充足されないままに主量子数が 1 増加して外側の軌道に電子は詰まってゆきますから、内側に電子の充足されていない軌道が隙間の空くように残ってしまいます。主量子数が 1 増加した外殻の軌道に 2 個の電子が入ってから、隙間を埋めるように内殻の軌道に順次電子が充足されてゆきます。このように内殻の軌道に電子が充足してゆく一連の元素を遷移金属元素と呼び、元素の性質が互いに類似します。このことから、最外殻電子の数は 1~8 までしかありませんし、元素の性質も大まかには 8 種類しかありません。このような元素の性質と陽子の数との間に見られる規則性を Менделёв (メンデレーフ) は周期表にまとめました。しかし、遷移金属元素の性質にも個性がありますから、これらの元素は一括してしまうことが不適当と思われました。そのために、現在では化学の研究に表 2-4 に示すような周期表が使われおり、陽子数、元素記号および最も外側に分布する電子の数を示しておきます。ここでは典型金属を淡赤色、遷移金属元素を褐色、非金属元素を黄色、希ガス元素を緑色であらわしました。ランタニド金属元素を赤褐色、アクチニド金属元素を赤色であらわしました。

このように Bohr は太陽系を念頭に原子模型を考えましたが、原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が地球を取り巻く大気のように広く分布しています。地球の大気が対流圏や成層圏やオゾン層や熱圏など球状の層になって重なっているように、電子が量子力学に支配されて運動していますから、その主量子数と陽子の数で規定される半径を持つ球と考えられ変わり玉の飴のように球状の軌道が層状に重なっています。主量子数 1 の軌道上に最外殻電子を持つ水素やヘリウムは最も小さな球であり、陽子数が多く主量子数 7 の軌道上に最外殻電子を持つウラン原子はトリウム原子などとともに最も大きな球の形をしています。原子の形と大きさは最外殻電子が運動する軌道の形で、太陽系惑星よりはるかに大きな相対半径の軌道を電子が運動していますが原子核は太陽よりもはるかに大きな相対質量を持っていますから、太陽系とはかなり異なる横顔を持っていると考えられます。大きさの比率は大いに違いますが、地球を取り巻く大気のような密度で成層圏やオゾン層のように球状の層が重なるように原子核の周囲に電子が運動しています。

表 2-4 周期表

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1																	2 He 2
2	3 Li 1	4 Be 2											5 B 3	6 C 4	7 N 5	8 O 6	9 F 7	10 Ne 8
3	11 Na 1	12 Mg 2											13 Al 3	14 Si 4	15 P 5	16 S 6	17 Cl 7	18 Ar 8
4	19 K 1	20 Ca 2	21 Sc 2	22 Ti 2	23 V 2	24 Cr 1	25 Mn 2	26 Fe 2	27 Co 2	28 Ni 2	29 Cu 1	30 Zn 2	31 Ga 3	32 Ge 4	33 As 5	34 Se 6	35 Br 7	36 Kr 8
5	37 Rb 1	38 Sr 2	39 Y 2	40 Zr 2	41 Nb 1	42 Mo 1	43 Tc 2	44 Ru 1	45 Rh 1	46 Pd 2	47 Ag 1	48 Cd 2	49 In 3	50 Sn 4	51 Sb 5	52 Te 6	53 I 7	54 Xe 8
6	55 Cs 1	56 Ba 2	*1	72 Hf 2	73 Ta 2	74 W 2	75 Re 2	76 Os 2	77 Ir 2	78 Pt 1	79 Au 1	80 Hg 2	81 Tl 3	82 Pb 4	83 Bi 5	84 Po 6	85 At 7	86 Rn 8
7	87 Fr 1	88 Ra 2	*2	104 Rf 2	105 Db 2	106 Sg 2	107 Bh 2	108 Hs 2	109 Mt 2	110 Ds 2	111 Rg 2	112 Cn 2	113 Nh 3	114 Fl 4	115 Mc 5	116 Lv 6	117 Ts 7	118 Og 8

*1	57 La 2	58 Ce 2	59 Pr 2	60 Nd 2	61 Pm 2	62 Sm 2	63 Eu 2	64 Gd 2	65 Tb 2	66 Dy 2	67 Ho 2	68 Er 2	69 Tm 2	70 Yb 2	71 Lu 2
*2	89 Ac 2	90 Th 2	91 Pa 2	92 U 2	93 Np 2	94 Pu 2	95 Am 2	96 Cm 2	97 Bk 2	98 Cf 2	99 Es 2	100 Fm 2	101 Md 2	102 No 2	103 Lr 2

陽子数
元素記号
外殻電子数

## 原子の色変わり

原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が地球を取り巻く大気のように広く分布しています。地球の大気が対流圏や成層圏やオゾン層や熱圏など球状の層になって重なっているように、電子が量子力学に支配されて運動していますから、式 2-10 に従ってその主量子数  $n$  と陽子の数  $Z$  で規定される半径を持つ球状の軌道が変わり玉の飴のように層状に重なっていると考えられています。主量子数は量子力学的には原子核からの半径に相当するものですから、原子に属する電子は式 2-11 で定義されるエネルギーを持って主量子数の小さな順に不連続に段階的に原子核に近い内側の軌道から 7 段階におおよそ順番に詰まっていきます。しかも、電子が入ることの出来る軌道の数主量子数の 2 乗となり、それらの各軌道に 2 個ずつの電子の入ること軌道は充足し安定します。当然、原子核に近い軌道には電子が充足していますが、外側には電子の入りうる主量子数の大きな軌道が存在します。

式 2-11 は式 2-12 に変形できますが  $n_1$  が  $n_2$  よりも小さい時には、主量子数  $n_1$  の軌道上の電子に式 2-12 に相当するエネルギーを与えますと、エネルギーを受け取った電子は主量子数  $n_2$  を持つ軌道上に励起して不安定化します。Einstein は光子（光子）と呼ばれる粒子が波の運動をしながら光エネルギーを伝播してゆくと仮定し、Plank の定数  $h$  を比例定数としその光子 1 個の持つエネルギーが式 2-13 のように電磁波の振動数  $\nu$  に対して比例することを導きました。電磁波の振動数は真空中では波長に反比例しますから、真空中の光速と波長をそれぞれ  $c$  および  $\lambda$  としますと式 2-13 が書き換えられ、電磁波の持つエネルギーが波長の短いほど大きいことも導かれます。この光エネルギーの関係を式 2-12 と組み合わせた式 2-14 で求められる波長  $\lambda$  の電磁波を照射すれば、主量子数  $n_1$  の軌道から主量子数  $n_2$  の軌道へ電子が励起すると思われれます。また、 $n_1$  が  $n_2$  よりも大きな場合、主量子数  $n_1$  の軌道上の不安定に励起された状態の電子が安定な主量子数  $n_2$  の軌道に戻りますが、そのとき式 2-14 に相当する波長の電磁波としてエネルギーを放出します。

$$E_n = \frac{me^4Z^2}{8\varepsilon_0^2h^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{式 2-12}$$

$$E = h\nu = \frac{ch}{\lambda} \quad \text{式 2-13}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2ch^3} \cdot Z^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R_\infty \cdot Z^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad \text{式 2-14}$$

Rydberg は  $m$  や  $e$  や  $h$  などの定数の項を一括して  $R_\infty$  とし、 $1.0973 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  の値を実験的に求めました。ここで、主量子数  $n_1$  も主量子数  $n_2$  も正の整数ですから、エネルギー  $E_n$  も波長  $\lambda$  も不連続な固有の値になると思われれます。安定な軌道上の電子に  $E_n$  よりも大きなエネルギーを与えても、 $E_n$  よりも小さなエネルギーを与えても、電子はエネルギーを受け取ることができず不安定な軌道上に励起することはありません。また、不安定な軌道に励起され

た電子が安定な軌道へ戻るときに、発生するエネルギー $E_n$  は不連続な固有の値を持っていますから、放出される電磁波の波長 $\lambda$ が不連続な固有の輝線スペクトルを示します。

主量子数が1の軌道に1個の電子を持っている水素原子に電磁波を照射しますと、電子が主量子数2、3、4の軌道へ励起して起こる吸収波長 $\lambda$ が式2-14によりそれぞれ計算されます。さらに、主量子数が2の軌道に励起した電子が主量子数3、4、5の軌道へさらに励起して起こる吸収波長もそれぞれ求めることができます。逆に水素原子において、主量子数2、3、4、5の軌道へ励起されている電子が主量子数1や2の軌道へ戻る時に発する電磁波の波長も計算されますので表2-5に掲げておきます。LymanとBalmerは水素ガスの存在する中で放電する水素放電管により、水素原子の持つ電子を高い主量子数の軌道に励起させ、主量子数1や2の軌道に戻る時に発する電磁波の波長を測定しましたので、比較のためにその値も合わせて表2-5に掲げておきます。水素原子は原子核の電荷が1の最も簡単な構造を持っていますから、表2-5で明らかのように実験値と計算値が良く一致しています。

表 2-5 水素原子の発光スペクトル (nm)

主量子数	主量子数1への変化		主量子数2への変化	
	計算値	実測地	計算値	実測地
2	121.51	121.6		
3	102.52	102.5	656.16	656.28
4	97.21	97.2	486.04	486.13
5	94.93	94.9	433.97	434.05
6	93.74	93.7	410.10	410.17
7	93.03	93.0	396.93	
8	92.58	92.6	388.83	

原子の高い主量子数の軌道に励起された電子が安定な軌道に戻る時にそれぞれの原子に特有のエネルギーを放出しますが、水素以外の原子では構造が複雑になるために、発生する電磁波の波長は必ずしも計算で求めることはできません。室温でも気体で存在するネオンの中に電極を装着し電圧をかけますと、水素放電管と同じようにネオンの電子は高い主量子数の軌道に励起されますが、即座にその軌道から安定な軌道に戻りますから、540~725nmの橙赤色の光を発光します。この放電管を用いますと容易に妖しげな光を発しますから、ネオンサインと呼ばれて歓楽街を飾っています。また、金属ナトリウムと水銀はそれぞれ883°Cと357°Cの沸点を持っていますから比較的容易に気体状態にすることができ、放電管に用いますと光を発光させることができます。金属ナトリウムでは590nmの橙黄色の波長の長い光を強く発光しますから、霧やスモッグの中でもよく透視するためナトリウムランプとして高速道路などの照明に用いています。また、水銀は254nmの紫外線を発光しますから殺菌灯として用いられるばかりでなく、短波長の光を長波長の光に変換する蛍光物質により蛍光灯として白色の照明器具に用いています。

電子を衝突させることばかりでなく高温に加熱することによっても種々の原子が励起されます。ナトリウム原子を炎の中で高温に加熱しても590nmの橙黄色の光を発光します

し、カリウム原子を加熱しますと 770nm の淡紫色の光を発光します。また、カルシウム原子や銅原子やバリウム原子はそれぞれ橙緑色や緑色や青緑色に発光しますから、炎色反応と呼んで物質中の元素の存在を調べることができます。さらに可視光線の領域ばかりでなく紫外線の領域まで精密に測定する発光分光分析法として物質中の正確な元素組成の分析に広く用いられています。表 2-6 には種々の原子の発する光の波長とその色調を掲げておきます。このように原子を高温に加熱しますと種々の色の光を発光しますから、このような原子を含む物質を火薬の中に混ぜ込み色鮮やかな花火として夏の宵を彩ります。

表 2-6 代表的な元素が強く発する紫外線と可視光線の波長と色調

元素		紫外線スペクトル (nm)	可視光スペクトル (nm)	色調
ヘリウム	He	389	588	黄色
リチウム	Li	323	460, 610, 671	赤紫色
窒素	N		410, 411	青紫色
ネオン	Ne		540, 585, 638, 640, 717, 725	橙赤色
ナトリウム	Na	330	569, 590, 820	橙黄色
マグネシウム	Mg	285, 333, 334, 383, 384	517, 518	黄緑色
アルミニウム	Al	257, 258, 308, 309, 394, 396		
アルゴン	Ar		697, 707, 750, 812	青色
カリウム	K	404, 405	766, 770	淡紫色
カルシウム	Ca	316	423, 443, 444, 445, 446	橙緑色
銅	Cu	237, 282, 296, 325, 337	459, 511, 515, 522	緑色
ガリウム	Ga	287, 294	403, 417	青色
ゲルマニウム	Ge	259, 265, 271, 276, 304, 327, 423	423	青色
砒素	As	229, 237, 246, 249, 278, 286, 290		淡紫色
クリプトン	Kr		557, 587	紫白色
ルビジウム	Rb		420, 422, 780, 795	赤紫色
ストロンチウム	Sr		431, 461, 483, 487, 496	紫色
キセノン	Xe	395	408, 450, 462, 467, 823, 828	紫白色
セシウム	Cs	456, 459	852, 894	青紫色
バリウム	Ba		543, 552, 554, 578	青緑色
水銀	Hg	254, 297, 302, 365, 366	405, 436, 546	青白色

物質に電子を衝突させることや高温に加熱することのほかに、式 2-14 で求められる波長  $\lambda$  の電磁波を照射すれば、主量子数  $n_1$  の軌道から不安定な主量子数  $n_2$  の軌道へ電子が励起すると思われます。不安定に励起された状態の電子は即座に式 2-14 に相当する波長の電磁波を放出して元の主量子数  $n_1$  の軌道に戻ります。しかし、このようにして励起した電

子のうちで少数の電子は構造変化や各種の分子運動などにエネルギーを消費してしまいますから、物質に与えられた電磁波のエネルギー総量よりも放出されるエネルギー総量は減少します。結果として、照射した電磁波の総量の大部分を回収しますから物質はほとんど電磁波を受け取らなかったように見えますが、各種のエネルギーとして消費されたエネルギーの減少量だけ物質が電磁波を吸収したことになります。このとき、主量子数  $n_1$  も主量子数  $n_2$  も正の整数ですから、吸収する波長  $\lambda$  も不連続な固有の値になります。また、各種のエネルギーとして消費される減少量は物質の構造や環境や状態により異なりますから、電磁波の総照射量に対して吸収した総量の割合が変化します。この割合を吸光係数と呼び物質の構造や環境や状態に固有の値を示しています。

例えば、金属ナトリウムを放電管に用いますと主量子数 3 の軌道上の外殻電子が主量子数 4 の軌道に励起しますから、元の状態に戻る時に 590nm の橙黄色の光を強く発光します。アンモニアを冷却しますと  $-33^{\circ}\text{C}$  で液化し液状のアンモニアになりますが、非常に特殊な条件ながらこの液体アンモニア中に金属ナトリウムは溶けて溶液になります。この金属ナトリウム溶液は 590nm の橙黄色の光を吸収しますから、その補色に相当する青紫色を呈しています。このように種々の原子は固有の吸光係数を持って固有の波長の電磁波を吸収しますから、幅広く連続した波長領域を持つ電磁波を物質に照射し、吸収する電磁波の波長と吸光度を測定することにより物質を構成している原子の種類や組成を調べることができます。この分析法は原子吸光分析法と呼び、200~800nm の波長領域を持つ紫外線と可視光線が主に用いられています。特に原子吸光分析法は存在する原子の量と吸光度の間には広い濃度範囲で比例関係が成り立ちますから、元素組成を正確に測定することができます。

原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が地球を取り巻く大気のような質感を持って広く分布しています。地球の大気が対流圏や成層圏やオゾン層や熱圏など球状の層になって重なっているように、電子が量子力学に支配されて運動していますから、式 2-11 に従ってその主量子数  $n$  と陽子の数  $Z$  で規定される半径を持つ球状の軌道が変わり玉の飴のように層状に重なるような秩序を持つと考えられています。大気中で空気がそよ風となって移動するように、原子核を取り巻くように運動している電子の秩序が外界とのエネルギーの遣り取りでわずかに変化するだけで、種々の原子により固有の波長を持つ光の吸光や発光などの原子の色の変化を引き起こします。

## 原子の性質

原子は質量の重い中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すようにその周囲に陽子と同じ数の軽い電子が地球を取り巻く大気のように広く分布しています。原子核の周囲に存在する電子の挙動は式 2-10 に示す半径  $r_n$  の軌道に式 2-11 に示すエネルギー  $E_n$  を持って原子核に捉われていますから、地球の大気が対流圏や成層圏やオゾン層や熱圏など球状の層になって重なっているように、その主量子数と陽子数で規定される

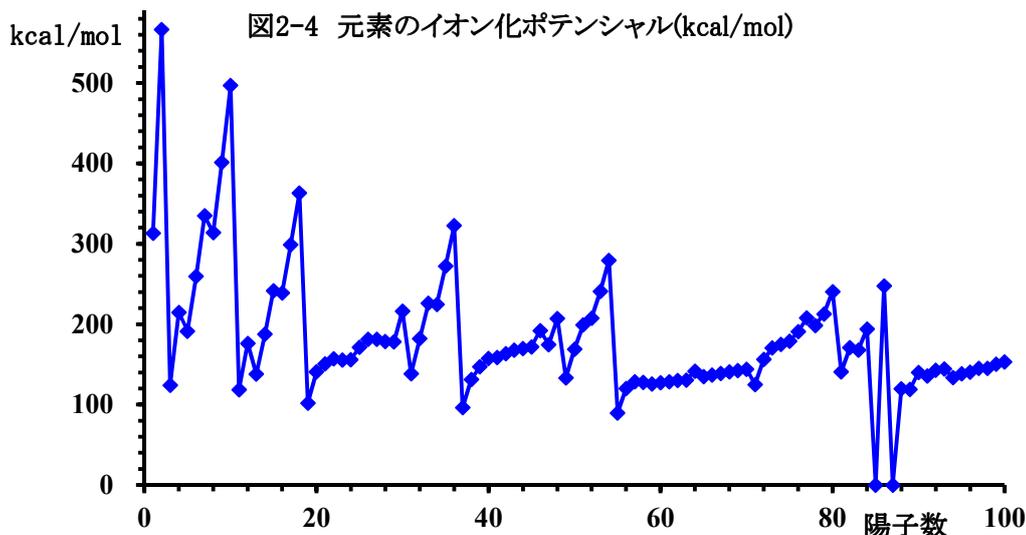
半径の球の軌道上を動いています。式 2-11 から明らかなように、主量子数  $n$  の小さな内側の軌道の電子は原子核に強く引き付けられており、主量子数  $n$  の大きな外側の軌道の電子は弱い力で結び付けられています。式 2-11 で近似されるエネルギーが供給されずと、負電荷を持つ電子が原子核の束縛から解放されて無限の彼方に飛散してゆきます。

表 2-7 種々の元素のイオン化ポテンシャル (kcal/mol)

元素	最外殻軌道		M→M <sup>+</sup>	M <sup>+</sup> →M <sup>2+</sup>	M <sup>2+</sup> →M <sup>3+</sup>	M <sup>3+</sup> →M <sup>4+</sup>
	主量子数	電子数				
H	1	1	319	0	0	0
He	1	2	577	1272	0	0
Li	2	1	127	1769	2863	0
Be	2	2	219	426	3597	5094
B	2	3	195	563	887	6063
C	2	4	265	570	1121	1508
N	2	5	342	692	1108	1727
O	2	6	320	821	1289	1809
F	2	7	409	813	1363	1994
Ne	2	8	507	958	1485	2281
Na	3	1	121	1106	1661	2326
Mg	3	2	180	352	1873	2558
Al	3	3	141	440	665	2804
Si	3	4	191	382	782	1056
P	3	5	258	465	706	1200
S	3	6	243	547	820	1106
Cl	3	7	306	557	932	1249
Ar	3	8	370	652	957	1433
K	4	1	102	744	1092	1433
Ca	4	2	144	278	1197	1637

この最も小さなエネルギーで最も外側の量子数の軌道に分布する最外殻電子が束縛から解放されますから、イオン化ポテンシャルと呼ばれるこのエネルギーにより電子が原子核から引き離されてしまい原子は陽イオンとして正電荷を帯びてきます。

種々の元素のイオン化ポテンシャルを表 2-7 および図 2-4 に掲げておきますが、この値が小さいほど元素は陽イオンに成り易いことを意味します。1 価の陽イオンからさらに電子を引き離して 2 価の陽イオンにするために要するイオン化ポテンシャルも表 2-7 に併せて掲げました。式 2-11 から明らかなように、主量子数が同じ元素では陽子数の小さな元素ほどクーロン力が小さくなりますが、この陽イオンになり易い傾向が図 2-4 にも現れています。表 2-7 に掲げた元素の中でアルカリ金属と呼ばれる Li と Na と K と Rb は最外殻電子を 1 個しか持たない元素で非常に小さなイオン化ポテンシャルを示し、最も陽イオンになり易いこ



とが分かります。Mg や Ca などのアルカリ土類金属は最外殻にある 2 つの電子は小さなイオン化ポテンシャルで 2 価陽イオンになりますが、大きなイオン化ポテンシャルを要しますから 3 価陽イオンには容易にはなりません。アルカリ金属とは反対に、同じ主量子数の元素の中で最も最外殻電子を多く持つ希ガス元素では陽子数が大きいために非常に大きなイオン化ポテンシャルを示し、陽イオンになり難いことが分かります。

元素から最外殻電子を引き離して陽イオンになるときはイオン化ポテンシャルを要しますから、逆に陽イオンが外から電子を受け取って元素に戻るときにはイオン化ポテンシャルに相当するエネルギーを発生します。同じように元素が外から電子を受け取りますと、陽子の数よりも電子の数が多くなりますから負電荷を持つ陰イオンになり、そのとき式 2-11 に相当する電子親和力と呼ばれるエネルギーを放出します。種々の元素の電子親和力を表 2-8 および図 2-5 に掲げて起きますが、この値が大きいほど放出するエネルギーが大きいので陰イオンになりやすい性質を持っています。式 2-11 から明らかなように、主量子数が小さな元素ほど発生するエネルギーが大きくなりますから、陰イオンになり易い傾向を示します。アルカリ金属は同じ主量子数を持つ元素の中では最も陽子の数が小さいので発生するエネルギーが小さく、陰イオンになり難い性質を示します。

表 2-8 元素の電子親和力(kcal/mol)

元素	電子親和力	元素	電子親和力
H	17.4	P	17.7
He	-12.2	S	48.0
Li	14.3	Cl	83.1
Be	-4.4	Ar	-8.4
B	5.5	K	11.5
C	29.4	Ca	-37.3
N	1.2	Ga	8.6
O	33.7	Ge	27.7
F	78.4	As	18.4
Ne	-6.9	Se	46.6
Na	12.7	Br	77.4
Mg	-4.6	Kr	-9.3
Al	11.9	Rb	11.0
Si	28.7	I	70.5

最外殻電子を7個持つFやClやBrやIなどのハロゲン元素は同じ主量子数を持つ元素のなかで陽子数が大きいために大きなエネルギーを放出しますから、陰イオンになりやすい性質を示します。8個の最外殻電子を持つ希ガス元素はその軌道に入れる電子の許容量

を満たしていますから、新たに外から電子を受け取る場合には主量子数が増加してしまい、電子親和力が負の値を示します。このことは希ガス元素が陰イオンになるためには逆にエネルギーを要しますから、ほとんど陰イオンにならないことを意味しています。

ある原子あるいはイオンを  $M^{n+}$ 、電子を  $e^-$ 、イオン化ポテンシャルを  $E_n$  とすると、原子と陽イオンの間の変化を  $n=0$  のときの図 2-6 で表すことができますし、 $n$  が正の整数のときには価数の異なる陽イオンの間の変化を表すことができます。電子親和力も本質的に式 2-11 で近似されるイオン化ポテンシャルと同じですから、さらに  $n = -1$  のときには原子と陰イオンの間の変化を表しますし、 $n$  が  $-1$  より小さいときには価数の異なる陰イオンの間の変化まで総括することができます。酸化反応は原子あるいはイオンから電子を放出する反応と定義されていますから、この一般式の左辺から右辺への変化で表すことができますし、酸化反応の逆反応の還元反応は原子あるいはイオンが電子を取り込む反応と定義されていますから、右辺から左辺への変化で表されます。



図2-6 酸化還元反応

原子を構成する電子は式 2-11 で近似されるようなエネルギーで原子核に結び付けられていますから、同じ主量子数を持つ元素では陽子数が小さく最外殻電子の数が少ない元素ではイオン化ポテンシャルも電子親和力も小さく、陽イオンになりやすい性質を示します。また、陽子数が大きく最外殻電子の数が多元素ではイオン化ポテンシャルも電子親和性も大きいので、陰イオンになりやすい性質を示します。さらに、希ガス元素ではイオン化ポテンシャルが極端に大きく、電子親和力が負の値を示しますから、陽イオンにも陰イオンにもなりません。まとめますと、元素のイオンへのなり易さは中心の原子核ではなく、主に周囲に広く分布する電子の状態に影響されますから、酸化され易さや還元され易さなどの原子やイオンの重要な化学的性質も原子核の周囲に分布する電子の状態に影響されます。特に最外殻電子

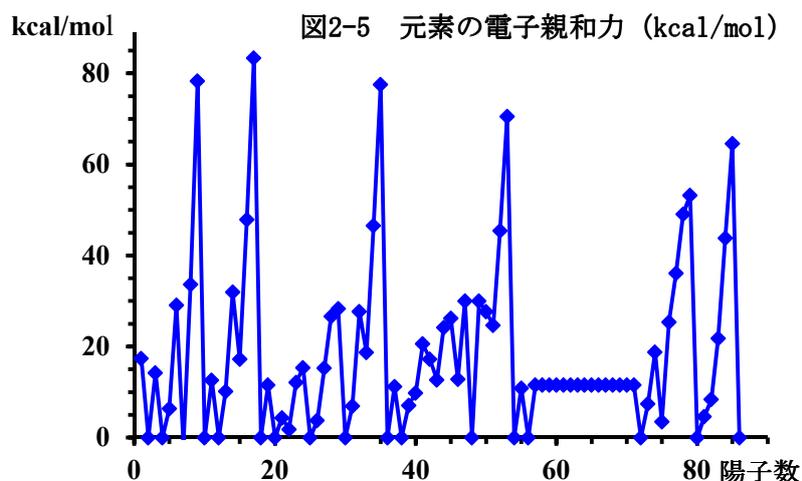


図2-5 元素の電子親和力 (kcal/mol)

の数が元素の性質を決定付けますから、Mjendjeljejev が見出した元素の性質と最外殻電子の数の相関性から導いた表 2-4 の周期表が合理的に説明できます。

現代の自然科学の考え方は、地球上の万物が中性子と陽子と電子の 3 種の粒子の集合した原子を基本にしていますから、三行思想と表現することも出来るように思います。この 3 種の粒子でできた原子は中性子と陽子が原子核となって中心に座り、原子核の正電荷を打ち消すように陽子と同じ数の電子がその周囲を取り囲むように広く分布しています。種々の定数を基に算術計算された陽子と中性子と電子の質量と体積から、周囲を取り囲んでいる電子と比較して原子核は圧倒的に重く想像できないほどに高い密度を持っています。地球の大気が対流圏や成層圏やオゾン層や熱圏など球状の層になって重なっているように、原子核を取り囲む電子も大気のような質感を持って球状の層になって広く分布しており、そよ風のようにその球状の層が乱されるだけで原子やイオンの色が変化します。電子が体積も質量も非常に小さいにもかかわらず、大気のような質感を持った部分からの電子の出入りの仕方により、元素のイオンへのなり易さや酸化や還元もし易さなどの原子やイオンの重要な化学的性質が変化します。空気が漏れたようなわずかな電子の状態の変化が原子の性質を決めていると考えると不思議でなりません。

## 原子の総数

前節までに原子の大きさや質量や密度などを考え、万物の基本単位とも考えることのできる原子の横顔を見てきました。しかも現実に手に取ることのできる物質を構成する分子の数を表す Avogadro 定数は著者にとって実感を持つことができない大きな数ですので、手元にある理科年表を繰りましたところ、地球の体積と地球の質量がそれぞれ  $10.8 \times 10^{23} \text{L}$  と  $59.74 \times 10^{23} \text{kg}$  と比較的近い数字で表されていました。80 日で世界一周ができるか否か賭け事になった時代とは違い、ジェット旅客機の進歩で地球が小さく感じられるようになった現代といっても、1 日 24 時間では 1 週の旅ができないほど地球は大きいと思いますから、Avogadro 定数が如何に大きな数か想像できます。

1966 年に Cameron が見積もった宇宙に存在する元素の割合 (mol 比) を表 2-9 に抜粋しましたが、最も多い元素は水素で次に多いヘリウムと合わせて 99%以上に達し、それ以外の 90 種類の元素は合計 1%にも届きません。この値に原子量を掛け合わせた質量比も併せて表 2-9 に掲げました。この質量比の合計 1.26 は全宇宙の全ての原子の平均原子量に相当しますから、表 2-3 に掲げた太陽系の質量と平均原子量から太陽系を構成する全ての原子が  $1.59 \times 10^{33} \text{mol}$  と簡単な算術計算で算出されます。この値に Avogadro 定数を掛け合わせますと、太陽系を構成する全ての原子の数が  $9.57 \times 10^{56}$  個と計算されます。さらに、地球からは太陽のような天体が約  $2 \times 10^{11}$  個確認されていますから、 $1.91 \times 10^{68}$  個の原子が地球で確認しうる全宇宙に存在していると概算できます。

このように途轍もなく大きな数字に対して中国と西欧ではかなり異なる考え方を持っているようです。西欧では ten、hundred、thousand と 1000 まで単位があり、10000 は 1000

の10倍で ten thousand と繰り返しになります。1000の1000倍は Million ( $1000^2=10^6$ ) という単位で表していますが、この Million は、ラテン語で1000を意味する「mille」の末尾が「one」と語形変化した「millione」が語源とされていたようで1000の1000倍と考えられていたのではないのでしょうか。その Million の1000倍は1000を2回1000倍するという意味でラテン語の2を意味する Bi を付けた Billion ( $1000^3=10^9$ ) という単位で表しています。さらにその1000倍、そのまた1000倍というように数字が大きくなるにつれて、ラテン語の3回、4回、5回…を意味する Tri、Quadri、Quinti…を付けて Trillion ( $1000^4=10^{12}$ )、Quadrillion ( $1000^5=10^{15}$ )、Quintillion ( $1000^6=10^{18}$ ) の単位としています。このように基本単位を1000としていますから、大きな数を表記するときに3桁ごとにカンマ(,)をつけて読みやすくしています。この数の様式は  $1000^{n+1}$  の形の指数関数ですから、無限に大きな数も表すことができますが、その数は無名数で哲学的な意味を持ちません。表 2-10 には  $10^{63}$  までの大きな数を掲げましたが、その接頭語となるラテン語の数詞を赤字で示しておきました。メートル法も西欧の文化を基礎に制定されたものですから、表現は異なりますがその数の様式は極めて類似しています。

これに対して中国は全ての物事に文字を作り、それに個々に意味を持たせてゆく文化を持っていますから、十、百、千、万に続いて、100000は10000の10倍で十万と繰り返しになります。万の10000倍を億に、億の10000倍を兆というように10000倍ごとに個々の単位が作られています。この中国の数の様式では基本単位を10000としていますから、大きな数を表記するときに4桁ごとにカンマ(,)をつけて読みやすくしています。この様式では4桁ごとに単位を作らなければなりませんから、無限に大きな数を表すことはできませんが、意味のある文字を当て嵌めることができます。 $10^{64}$ は考えることができないほど大きな数ですから不可思議という単位が作られ、 $10^{68}$ ではもはや数えることができないほど大きな数ですから無量大数という単位が作られました。

最小単位とも思える原子が種々様々に集合してできた物質で我々を取り巻く全宇宙は構成されていますが、地球で確認しうる全宇宙に存在している全原子数が  $1.91 \times 10^{68}$  個と概算できますから、中国の数の様式では1.91 無量大数個と表現できます。認識できる限りの

表 2-9 全宇宙の原子存在比

原子	原子量	mol 比	質量比
H	1.008	0.922190	0.929512
He	4.003	0.074928	0.299907
O	15.999	0.000836	0.013371
C	12.011	0.000478	0.005746
N	14.007	0.000086	0.001211
Ne	20.180	0.000084	0.001686
Mg	24.305	0.000030	0.000733
Si	28.086	0.000029	0.000809
Fe	55.847	0.000024	0.001355
S	32.066	0.000017	0.000554
Ar	39.948	0.000007	0.000276
Al	26.982	0.000003	0.000069
Ca	40.078	0.000002	0.000084
Ni	58.693	0.000001	0.000075
合計		0.998717	1.255454

表 2-10 中国と西欧の数字の違い

中国の数		西欧の数	メートル法接頭語	
万	$10^4$			
	$10^6$	Million	メガ(mega)	ギリシャ語の大きい
億	$10^8$			
	$10^9$	Billion	ギガ(giga)	ギリシャ語の巨人
兆	$10^{12}$	Trillion	テラ(tera)	ギリシャ語の怪物
	$10^{15}$	Quadrillion	ペタ(peta)	ギリシャ語の 5
京(けい)	$10^{16}$			
	$10^{18}$	Quintillion	エクサ(exa)	ギリシャ語の 6
垓(がい)	$10^{20}$			
	$10^{21}$	Sextillion	ゼタ(zetta)	イタリア語の 7
穉(じょ)	$10^{24}$	Septillion	ヨタ(yotta)	イタリア語の 8
	$10^{27}$	Octillion		
穰(じょう)	$10^{28}$			
	$10^{30}$	Nonillion		
溝(こう)	$10^{32}$			
	$10^{33}$	Decillion		
澗(かん)	$10^{36}$	Undecillion		
	$10^{39}$	Duodecillion		
正(せい)	$10^{40}$			
	$10^{42}$	Tredecillion		
載(さい)	$10^{44}$			
	$10^{45}$	Quattuordecillion		
極(きょく)	$10^{48}$	Quindecillion		
	$10^{51}$	Sextdecillion		
恒河沙(ごうがしゃ)	$10^{52}$			
	$10^{54}$	Septyndecillion		
阿僧祇(あそうぎ)	$10^{56}$			
	$10^{57}$	Octodecillion		
那由他(なゆた)	$10^{60}$	Novemdecillion		
	$10^{63}$	Vigintillion		
不可思議(ふかしぎ)	$10^{64}$			
無量大数(むりょうたいすう)	$10^{68}$			

宇宙を構成する物質を最小単位の原子で見た時の数より大きな数は現実的にも哲学的にも意味のないものと中国の哲学では考えられたようで、無量大数より大きな単位は用意されていません。数は無限と思われませんが古代中国の思想では有限のようで、その外にあるものは意味を持たないようです。大きな数とは対照的に小さな数についても同じように考えることに意味があるように思いますので割合を表す数も表 2-11 に纏めておきましたが、西欧と中国では思想的、哲学的に大いに異なります。西欧では分数で表すことが多く、最もよく使われている% (per cent) は日本語では百分率といい 100 を意味する cent と「対する」を意味する per に由来していますから、分母を 100 とした時の分子の値で表します。例えば、本体価格 100 円の商品の消費税 8% は 8 円になります。また、‰ (permil) は 1000 に対する割合ですから、0.1% が 1‰ に相当します。さらに小さな割合を意味する ppm や ppb や ppt はそれぞれ part per million や part per billion や part per trillion の頭文字をとったもので分母を  $10^6$  や  $10^9$  や  $10^{12}$  とする時の分子の値を意味します。あまり実用的ではありませんが、この様式に従えば水 100g 中に 1 分子の砂糖を溶かした砂糖水の重量濃度は 91part per Septillion と表現することになります。西欧ではこのように意味を持たない無名数に対する割合で表していますから、無限に小さな数も表すことが出来ますが、全く哲学的意味を持たない無名数です。

これに対して、大きな数を表す数の様式と同じように中国の割合を表す数の様式は個々に意味を持った文字が用意されています。0.1 は 1 個の物を分けるという意味で 1 分、1% は 1 厘、0.001 は羽毛のように軽いという意味から 1 毛で表しています。しかし江戸時代に割という単位が分と混同して使われるようになり、現代の日本では 0.1、0.01、0.001、0.0001 をそれぞれ割、分、厘、毛と使われています。そのため、2001~2012 年までシアトルマリナーズで活躍したイチローは 7858 打数 2533 安打で打率が本来は 3 分 2 厘 2 毛 3 糸ですが、3 割 2 分 2 厘 3 毛と報道されています。

表 2-11 に示すように中国の数の様式ではさらに小さな数まで種々の単位が割合に対して用意されています。1 分子の物質を mol 単位で表現しますと Avogadro 定数の逆数となりますから、1.66 涅槃寂靜 ( $1.66 \times 10^{-24}$ ) mol と表されますので、水 100g 中に 1 分子の砂糖を溶かした砂糖水の濃度は 0.166 涅槃寂靜 ( $1.66 \times 10^{-25}$ ) mol/L となり、その重量%濃度は砂糖の分子量が 342.3 ですから  $9.1 \times 10^{-21}\%$  となり、9.1 阿摩羅 g/g と表されます。

この涅槃寂靜は煩悩のない悟りの世界がなにもなく静かで安らぎの世界を意味する仏教の言葉です。地球上の物質はすべて分子で構成される物質でできていますし、その物質に対する 1 個の分子の割合がほぼ 1 涅槃寂靜ですから、不純物が全く含まれない絶対的な純粋と考えることができます。これより小さな割合は純と不純の境目のない絶対的な純ですから、もはや純粋な物質と不純物の割合自体が意味を失い現実的に無用で、中国の数の様式で涅槃寂靜より小さな割合の単位の用意されていないことが肯けます。現在の測定機器の精度と感度ではこれらの元素の測定限界濃度が 0.01ppt ( $10^{-14}$ ) 程度ですが技術の進歩で多少の向上は期待できるものと思います。しかし、測定限界濃度を  $10^{-20}$  以下にすることは現実的に不可能と思われしますので、中国で古くから考えられていたように  $10^{-20}$  に対して何もないとい

表 2-11 中国と西欧の割合の違い

中国の数字		西欧の数字	メートル法接頭語	
分(ぶ)	$10^{-1}$		デシ(dec)	ラテン語の 0.1
厘(釐)(りん)	$10^{-2}$	percent(%)	センチ(centi)	ラテン語の 100
毛(毫)(もう)	$10^{-3}$	permil(‰)	ミリ(milli)	ラテン語の 1000
糸(絲)(し)	$10^{-4}$			
忽(こつ)	$10^{-5}$			
微(び)	$10^{-6}$	ppm, part per million	マイクロ(micro)	ギリシャ語の小さい
織(せん)	$10^{-7}$			
沙(しゃ)	$10^{-8}$			
塵(じん)	$10^{-9}$	ppb, part per billion	ナノ(nano)	ギリシャ語の小人
埃(あい)	$10^{-10}$			
渺(びょう)	$10^{-11}$			
漠(ぼく)	$10^{-12}$	ppt, part per trillion	ピコ(pico)	イタリア語の小さい
模糊(もこ)	$10^{-13}$			
逡巡(しゅんじゅん)	$10^{-14}$			
須臾(しゅゆ)	$10^{-15}$	ppq, part per quadrillion	フェムト(femto)	デンマーク語の 15
瞬息(しゅんそく)	$10^{-16}$			
彈指(だんし)	$10^{-17}$			
刹那(せつな)	$10^{-18}$	part per quintillion	アト(atto)	デンマーク語の 18
六徳(りっとく)	$10^{-19}$			
虚空(こくう)	$10^{-20}$			
清浄(しょうじょう)	$10^{-21}$	part per Sextillion	ゼプト(zepto)	ギリシャ語の 7
阿頼耶(あらや)	$10^{-22}$			
阿摩羅(あまら)	$10^{-23}$			
涅槃寂静(ねはんじゃくじょう)	$10^{-24}$	part per Septillion	ヨクト(yocto)	ギリシャ語の 8

う意味の虚空、 $10^{-21}$  に対して清く不純物のないという意味の清浄という単位で表わされ、中国の数の様式が哲学的に純と不純の境目を加味し、割合の概念の意味まで考えられているように思います。