

放射性崩壊について

=Q & A ・ その 1 =

KENZOU

2011年9月17日

- アリス：こんにちわ、Kさん、お元気ですか～。
- K氏：Oh！アリスー、こんにちわ。まだまだ残暑が厳しいねえ。先日は仲秋の名月で、6年ぶりに満月だったそうだけど、秋の月は何か凜としたものを感じさせるね。
- アリス：そうね、秋の澄んだ夜空に浮かぶ月をじっと眺めているというもなかなかいいものね。。ところで、今日はお月さんの話をしに来たのじゃなくて、この前の『放射性崩壊について』のお話の中のラザフォードの α 線散乱実験のことで価電子の性質に関するなどを改めて詳しくお伺いしたいと思って来たの。
- K氏：そうなんだ。それじゃラザフォードが α 線散乱実験を行った前後の状況なども合わせて少し詳しい話をしよう。それと価電子の性質のことは分子を形成するプロセスのことから見るとわかりやすいと思うので、その線に沿って話をしてみようか。
- アリス：よろしくお願いします。楽しみだわ。

1 ラザフォードの α 線散乱実験

1.1 α 線について

- K氏：よく知っていると思うけど、 α 線というのは α 粒子の高速な流れ¹で、 α 粒子の実体は質量数4のヘリウム原子核⁴Heのことだね。 α 粒子は電子の質量の約7000倍と非常に重い粒子だから、電子とぶつかっても軽い電子を蹴散らかして真っ直ぐ進んでいく。
- アリス：たとえば軽いピンポン玉がたくさん集まっているところにパチンコの玉を転がすとピンポン玉は方々に飛ばされるけどパチンコの玉は真っ直ぐ進むわね。そのようなイメージね。
- K氏：そうだね。鉛や金、アルミ²などの薄い金属箔に α 線を照射すると大半の α 粒子は金属箔を素通りするんだね。これは α 粒子は重くて早く走る粒子なので、大きな運動エネルギー $\left(= \frac{1}{2}mv^2, m: \alpha$ 粒子の質量、 v : 速度 $\right)$ を持っている。だから、金属箔の中で電子と多数回の衝突を繰り返したとしても、それらをものともせずに α 粒子はグングンと進んでいく。仮にも進行方向と逆行するような後方への跳ね返り(後方散乱)は考えられないし、具体的にその確率を計算してもゼロになるんだね。ピンポン玉といくら衝突してもパチンコ玉が後方散乱されるようなことはないだろう。。しかし、この見通しをひっくり返してしまう事件(?)が起きるんだね。ごくまれに金属箔に跳ね返される α 粒子が観測されたんだ。これが有名な α 線散乱実験³というものなんだね。当時ラザフォードの助手をしていたガイガー⁴とマースデンにその実験をやらせていたんだけど、ラザフォードはこの“事件”を聞いて吃驚仰天、「これは、それまでの私の生涯で起きた事件の中で、最も信じられないものでした。もし、みなさんが、一枚のティッシュペーパーめがけて15インチ砲弾を打ち込んだところ、それがはね返ってきてみなさんに当たったとしたら、それを信じられるでしょうか。私にはこれと同じくらい信じられないことでした」と後に回想記に書いている。

¹ α 線の速度は15,300Km/秒

² 鉛(Pb)、鉄(Fe)、アルミ(Al)の原子番号はそれぞれ82、26、13。

³ この実験ではラジウム²²⁶Raの α 崩壊に伴って放出される α 線を使った。 ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$ 線, Rn: ラドン

⁴ 放射線測定装置・ガイガー計数管で有名

- アリス：1900年初頭ではまだ原子の構造がどういうものか分かっていなかったのね。

1.2 原子の構造と α 線散乱実験

1.2.1 原子の構造

- K氏：そうだね。それまで原子はそれ以上は分割できないもの⁵と考えられていたんだけど、1897年、ラザフォードの師匠である英国の物理学者 J.J トムソンは陰極線⁶の特性をいろいろ調べている過程で、原子にはマイナスの電荷を持つ電子という粒子が含まれているということを見つけたんだ。原子は電荷を持たない電氣的に中性なわけだから、原子の中には電子のマイナス電荷と釣りあうだけのプラスの電荷がなければならない。このようなことからトムソンは「なんらかのプラスの電荷の一様な海の中にマイナス電荷の電子が散りばめられている」という原子モデルを提案したんだね。これが前回の話⁷にでてきた「プラム・プディングモデル」と呼ばれる原子模型だ。スイカを2つに割ると赤い果肉の中に種がいっぱい散らばっているだろう、スイカの“種”を電子に例えるとイメージしやすいと思う。このモデルでは、原子の中央に芯に当たるものがないんだね。
- アリス：う～ん、西瓜のようなイメージねえ～。。今でこそ、原子は中心にプラスの電荷を持つ原子核とそれを取り巻くマイナスの電荷をもつ電子からできているということが常識となっているけど、100年余り前の当時は暗中模索状態で苦戦・苦闘していたのね。
- K氏：そうだね、教科書に1行あっさりと書かれている事柄も、そこに至るまでには人類英知の大きな苦闘が秘められているんだね。ところで、前回の話で触れたように、西瓜のようなトムソンの原子模型（以下、トムソン原子と呼ぶことにする）に対して長岡半太郎による土星モデル、これはプラスの電荷を持つ原子核のまわりをマイナスの電荷を持つ電子が回っているという、太陽系に似た原子モデルが提出されたんだね。原子の本当の姿は“スイカ”か“土星”か。。？そういう状況の中で例の α 線散乱実験が行われたわけなんだ。

1.2.2 α 線散乱実験

- K氏：放射性元素の研究をしていたラザフォードは、ガイガーと共同して α 線の電荷量を測定し、既に、粒子はプラスの電荷を持ったヘリウム・イオンの粒子であることをよく知っていた。そこで金属箔の原子がトムソン原子でできているとして α 線を金属箔に照射した場合の進路を計算してみたんだね。その結果、散乱角 θ が 1° 以内の小さな範囲の散乱は起こるけど、それ以上の大きな角度での散乱は起こらないことがわかった分かった。しかし、実験結果は。。

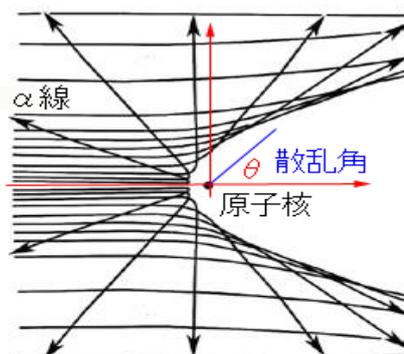


図 1: α 線散乱実験

- アリス：何かわくわくするような展開ね。。

⁵ 原子は英語で Atom (アトム) と書くが、これはギリシャ語の「分割できないもの」という言葉からきている。

⁶ 真空中の電子の流れ。電子線ともいう。

⁷ 「放射性崩壊について」(2011.8.7)

- K氏：うん、実験結果は先ほども言ったように 90° 以上の散乱角で跳ね返ってくる α 粒子が存在することが分かった。ラザフォードは回想録に書いているように天地も砕けんばかりにビックリしたんだろうねえ。一体どういう事だ！そこには何か大きな秘密が隠されている。それを暴きたいと知的興奮も沸騰状態に達した（これはこっちの勝手な想像だけ）。そこでラザフォードは散乱角 θ が 90° 以上となる大きな散乱は1回の衝突で引き起こされると想定して、そのためには原子の中心に極めて強い電場⁸が存在すると考えた。この考えをもとに、実験結果を説明できる理論計算⁹に取り組む。具体的に計算を進めるにあたって次のような仮定をおいたんだね。

1. 原子の持つプラス電荷の大きさは「電子の電荷量 \times 原子番号程度」の大きさである。
2. 原子の持つプラス電荷は1点に集中していて、強い電場が存在する。
3. α 粒子を散乱させるターゲットの質量は α 粒子と同程度かそれ以上の重さを持つ。

特に3の仮定は α 粒子より十分重いターゲットでないと α 粒子を弾き返すことはできないだろう。そして、計算を進めた結果、見事に実験結果を説明することができたんだ。つまり、原子内のプラス電荷はトムソン原子のように原子全体に広がっているのではなく、かなり狭い範囲に塊っており¹⁰、電子はその塊の回りを取り巻いているというモデルで記述できる。つまり、原子モデルは長岡の土星モデルで表されるということが判明したわけだ。原子の大きさに比べて原子核の大きさは格段に小さいから、大半の α 粒子は原子核から離れたところを素通りする。しかし、数は圧倒的に少ないけど、原子核のほんの近くを通る α 粒子は原子核で大きく散乱されるということになるわけだね。この原子モデルを長岡博士の功績を取り入れて長岡・ラザフォードの原子モデル¹¹と呼ばれるようになったんだ。

- アリス：なるほどねえ ~、 α 線散乱実験で α 粒子を跳ね返す小さな塊の実体というのはプラスの電荷を持つ原子核で、 α 粒子との間で働くクーロン斥力により散乱されるということが分かったのね。ところで α 粒子は電子の電荷量を e とする¹²と大きさ $2e$ のプラスの電荷をもつ粒子ね。鉛や鉄、アルミなど金属箔の原子核は α 粒子よりもっと大きいプラスの電荷を持っているわ。原子番号の大きい金属ほど α 粒子をよく散乱させるということになるのかしら。
- K氏：その通り。計算によれば、ある特定の角度 θ 方向に散乱される α 粒子の数は中心の塊（原子核）の電荷量の2乗に比例することが導かれるが、これは標的となる金属箔の種類をいろいろ変えてやった実験結果とよく一致する。この辺りの状況を下図に示そう。左図と右図では原子核の電荷量が異なり、右の原子核は左の20倍の電荷量を持つとしてシミュレーションした結果なんだ。沢山の α 粒子が後方散乱している様子が分かるよね。また、左に比べてちょっと遠方（最近接距離¹³が大きい）で散乱されることもわかるね。この最近接距離は原子核の概略の大きさ（半径）を示しているんだ。原子番号の大きい原子（原子核の電荷量が多い）はサイズも大きいということがこの図より感覚的に分かるよね。

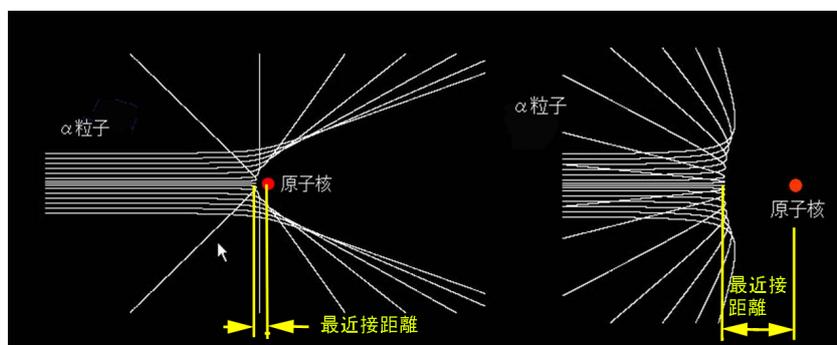


図 2: 原子核の電荷量の違いによる α 粒子の散乱状況

⁸ 電場とはなにか？ 詳しいことは『社会人のための楽しい物理入門』の「電磁気学」の章を参照されたい。電場を E とするとその中に電荷 q を置いた場合、電荷は qE の力を受ける。

⁹ このあたりの詳しいことは HP の「力学・振動」のコーナーの「質点系と剛体の運動方程式」のレポートで触れているので、興味があれば一読ください。

¹⁰ 原子核というネーミングは近代物理学の父といわれるニールス・ボーアによってつけられた。

¹¹ 中心に原子核を持つので有核原子モデルとも呼ばれる。

¹² これを電気素量と呼ぶ。

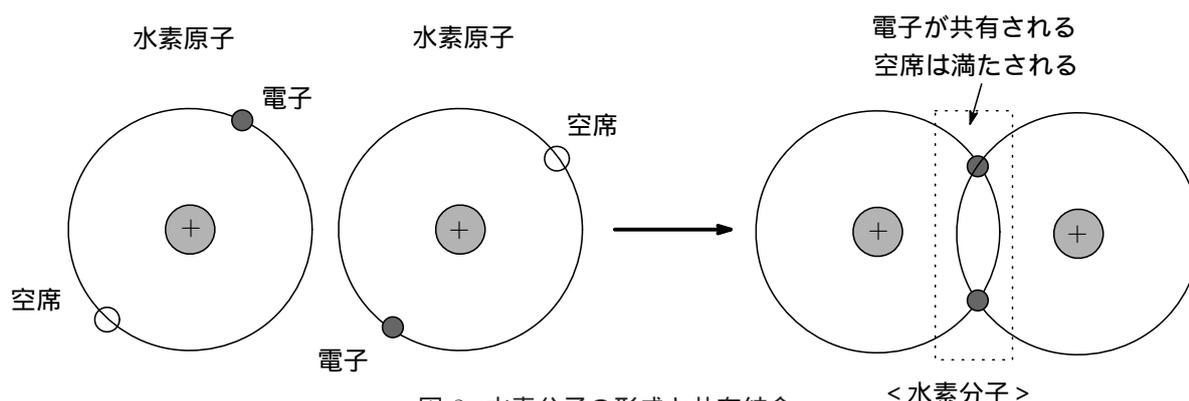
¹³ α 粒子が原子核と正面衝突する場合に、原子核に最も近づく距離のことを最近接距離と呼んでいる。

- アリス：そうね、原子番号の大きい原子核は遠方で α 粒子を散乱するものね。
- K氏：ところで、長岡・ラザフォードの原子モデルにもいろいろ欠陥があることが間をおかずに判明した。しかし、この辺りのお話はまた別の機会に譲るとして、ここではこれ以上立ち入らないでおこう。
- アリス：そうね、大いに興味はあるけど、今はスルーしておくわ。
- K氏：(ホッとした顔で) そうだね。それじゃ、次の話題、価電子の話へと進めていこうか。
- アリス：よろしくをお願いします。

2 価電子の性質

2.1 共有結合

- K氏：アリスが先ほど、『価電子の話は椅子取りゲームのようで面白かった。満席でないとは落ち着けない電子は余った椅子に座ってくれる相手を見つけようと活発になるというわけかな?』と twitter (?) していたね。
- アリス：アラ失礼ね！ 別に twitter していたわけではなく、発声しながら考えを整理していたの。
- K氏：失礼しました(笑い)。しかし、いいところを突いているよ。「相手を見つけようと活発になる」というのが分子の形成につながっていくんだ。ところで分子とは??ということだが、分子というのは「2つ以上の原子から構成される電荷的に中性な物質を指す」と定義される。原子には原子量があったように、分子にも1分子の質量を表す分子量がある。これは分子を構成する原子の原子量を足し合わせたものだ。さて、具体的に水素分子を見ていこう。水素原子はK殻に1個の価電子が入っていた。K殻には2個の価電子が入れるので、1個空席であればどうしても不安定だね。2つの水素原子がたまたま出くわすと、互いに相手の価電子を自分の空席に引き込もうとする。この引き込みの結果、安定な水素分子が生まれるというわけだ。この結合は価電子を共有することで形成されているので共有結合と呼んでいるんだね。



ところで安定な水素分子を引きちぎって2つの水素原子に引き離すには相当なエネルギーが要ることになるね。このエネルギーを結合エネルギーと呼んでいるんだ。

- アリス：なるほど、譲り合って奪い合う。。その結果双方が Happy! になる。この Happy 度が結合エネルギーということかしら。
- K氏：まっ、そういうことだね。え〜っと、それじゃもう少し複雑な酸素分子の場合を見てみよう。酸素原子はK殻に2個、L殻に6個の価電子が詰まっている。L殻は8個まで価電子が入れるので、2個の空席があるわけだ。何とかこの2個の空席を埋めて楽になりたい。。例によって酸素原子同士が出くわすとどうなるか、互いに相手の2個の価電子を自分の空席に引き込もうとする。この辺りの状況は次のようになるわけだ。

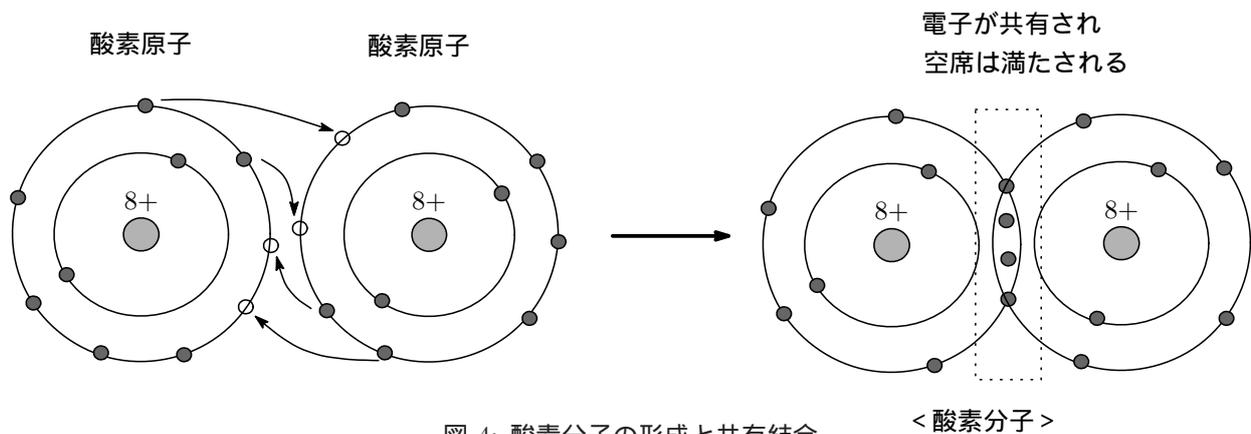


図 4: 酸素分子の形成と共有結合

互いに相手から 2 個の価電子を受け取って自分の L 殻の空席を埋めて安定化する。これが酸素分子の成り立ちだ。

さて、今までは同種の原子からできた分子だったけど、異種の原子からできている、例えば水 (H_2O) 分子を取り上げてみよう。水素原子と酸素原子の価電子だけを図示すると次のようになる。酸素原子は 2 つの水素原子と共有結合するんだね。

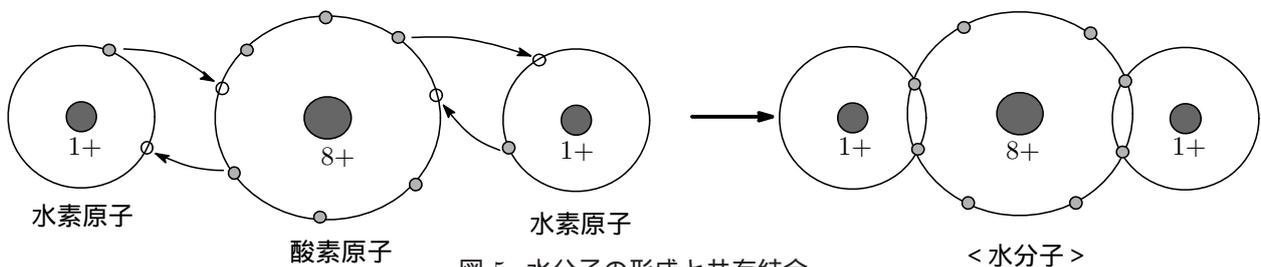


図 5: 水分子の形成と共有結合

2.1.1 原子価

- K氏：分子の形成プロセスをざっと見てきたわけだけど、ここで原子価について触れておこう。原子価というのは「ある原子が他の原子何個と結合しうるかを表す尺度」で、通常、水素原子の原子価を 1 価として、水素原子何個と結合するかによってその原子の原子価を定めるということになっている。また、原子価は原子が持つ手（結合手）の数という言い方もあるんだ。たとえば酸素原子の原子価は 2 だけど、結合手は 2 本と言い換えることができる。水素原子の原子価は 1 価で結合手は 1 本だ。水素原子と酸素原子の結合手が握手すれば次のようになる。共有結合を図示するとこういうことになるね。原子価というのは大事な概念だね。

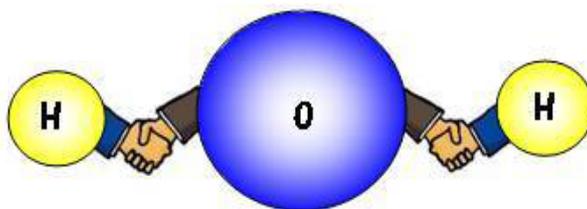


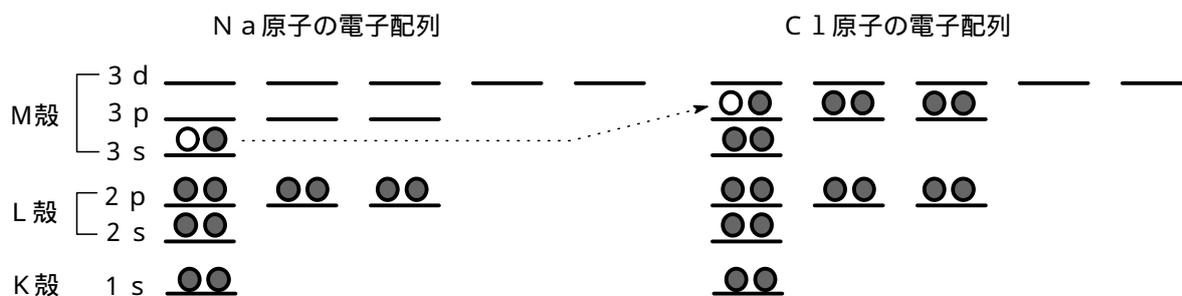
図 6: 水素、酸素の結合手

- アリス：なるほど、絵で描かれると分かりやすいわね。原子価は何個の水素原子と結合するか、その数ということだけど、 CO_2 のような場合、炭素は水素と結合していないわね。炭素の原子価はどのように考えればいいのかしら？
- K氏：そうだね、酸素原子の原子価は 2 で結合手が 2 本伸びているね。この酸素原子 2 個と炭素原子が Shake Hand（結合）するのだから炭素原子の手の数は $2 \times 2 = 4$ 本いることになるね。つまり、炭素原子の原子価は 4 となるわけなんだね。

- アリス：分かったわ。ところで原子価を価電子の数という観点から見ると。。。水素原子の空席は1、酸素原子の空席は2だったわね。つまり原子価というのはこの空席の数ということになるの？
- K氏：そうだね。満席にして楽になりたいという渴望(?)があるわけだね。
- アリス：そうね。ところでHeやNe、Arなどの原子は価電子の空席を持たないから原子価は0ということになるのね。
- K氏：うん。HeやArなどは1個の原子からなる分子と考えられるので単原子分子と呼んでいる。水素分子H₂や酸素分子O₂は2個の原子からできているから2原子分子、水H₂Oは3個の原子からできており、3個以上の原子からなる分子はまとめて多原子分子と呼んでいるんだね。
- アリス：高分子という言葉聞いたことがあるけど、これはどういうものなの？
- K氏：高分子というのは普通原子が1000個以上結合した巨大な分子のことを言っているね。タンパク質やDNA、RNAなどの核酸、脂質、糖類(セルロース、デンプンなど)、ゴムやプラスチックなどは高分子だ。
- アリス：そうなんだ。身の回りには高分子が多いのね。

2.2 イオン結合

- K氏：さて、共有結合の話をしたから、次にイオン結合の話しよう。イオン結合で代表的なものは塩化ナトリウムNaCl(いわゆる塩)なので、これを例にとって話を進めよう。Na原子は原子番号が11で電子の数は11個。電子配列¹⁴はK殻に2個、L殻に8個の電子で満席になっているが、次のM殻には2個で満席のs軌道に1個だけ入っている。つまり、s軌道には1個の空席がある。空席を埋めるべく1個の電子を引き込めばいいんだけど、逆にこの1個の電子を放り出すことで空席をゼロとすることもできる(K殻、L殻は満席)。次にCl(塩素)原子は原子番号が17で17個の電子を持っている。電子配列はK殻2個、L殻8個で満席、次のM殻は7個だった。M殻のs軌道に2個、p軌道に5個入っているわけだ。ところでp軌道は6個で満席になるんだが、1個空席がある。この空席を埋めると安定化するわけだね。このようなNa原子とCl原子が出会うとどうなるか。Cl原子のほうはNa原子の価電子1個を引き抜いて満席・閉殻になろうとするし、Na原子のほうは価電子を1個引き抜かれて満席・閉殻となったほうが都合がよい。双方の交渉は1個の価電子のやり取りで無事成立する。



- アリス：なるほど。
- K氏：交渉が成立するとNa原子は1個電子がなくなったわけだから全体としてプラスの電荷を帯びる。一方、Cl原子のほうは1個電子が増えたので全体としてマイナスの電荷を帯びる。プラスに帯電したNa

¹⁴ 電子軌道に電子が収まる場合、一つの電子軌道に入る電子は2個までであるというパウリの排他原理に従う。

原子とマイナスに帯電した Cl 原子の間にはクーロン引力が働き、双方は互いに引き合うことになる。これがイオン結合なんだ。

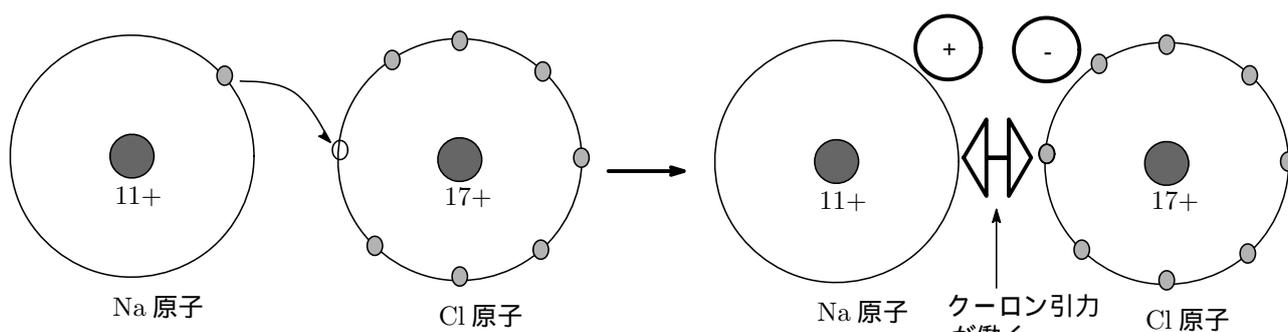


図 7: NaCl のイオン結合 (価電子だけを示している)

ちなみに Na^+ を 1 価の陽イオン (カチオン)、 Cl^- を 1 価の陰イオン (アニオン) と呼んでいる。イオンの価数というのは原子がイオンになるときに、放出したり、受け取ったりした電子の数のことだ。共有結合のところで結合エネルギーを説明したけど、イオン結合の場合は、原子から電子を引き抜いて陽イオンにするのに必要なエネルギーをイオン化エネルギー、特に、電子 1 個を引き抜くのに必要なエネルギーを第一イオン化エネルギーと呼んでいるね。このエネルギーが小さいほど陽イオンになりやすいわけだ。逆に、1 個電子を受け取って楽になった分のエネルギーは放出されるわけだけど、このエネルギーを電子親和力と呼んでいる。電子親和力が大きい原子ほど陰イオンになりやすいわけだね。

- アリス：なるほどねえ～。ところでイオン結合で強く結合しているお塩を水に入れるとすぐバラバラになるというか、水に溶けるじゃない。これはどうしてなの？
- K 氏：グっふぉ～ん!! う～ん鋭いところに気がつくね。ちょっと復習になるんだけど、クーロン引力を式で表すとどうなるか。真空中で距離 r 離れた異符号の電荷 q_1 と q_2 の間に引き合う力の大きさを F と書くと

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

で表された。 ϵ_0 は真空の誘電率と呼ばれる定数¹⁵で極めて小さい値なんだ。この誘電率がアリスの疑問を解いてくれる。というのは塩を水の中に入れた場合のクーロン力は真空の誘電率の代わりに水の誘電率に置き換えてやればよい。水の誘電率は真空の誘電率の 80 倍もあるんだね。ということは、水の中ではクーロン引力は非常に小さくなってしまい、Na イオンと Cl イオンは互いに引き合う力が $1/80 = 0.0125$ 倍とうんと弱くなってバラバラになってしまう。これが塩が水に溶けるということなんだね。

- アリス：そうなんだ。誘電率というのが曲者なわけね。
- K 氏：e～っと (声が裏返っている)、価電子を放り出したり、受け取ったりして陽イオンや陰イオンになったりするんだけど、その辺りの状況を整理しておくとな次のようになる。

価電子の数	性質	イオンの種類	例
1	価電子を 1 個捨てたい	1 価の陽イオン	Na^+ , NH_4^+
2	価電子を 2 個捨てたい	2 価の陽イオン	Mg^{2+} , Ca^{2+}
3	価電子を 3 個捨てたい	3 価の陽イオン	Al^{3+} , Fe^{3+}
4	最外殻に電子を 4 個欲しい	4 価の陽イオン・陰イオン	NH_4^+ , $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$
5	最外殻に電子を 3 個欲しい	3 価の陰イオン	PO_4^{3-}
6	最外殻に電子を 2 個欲しい	2 価の陰イオン	O^{2-} , SO_4^{2-}
7	最外殻に電子を 1 個欲しい	1 価の陰イオン	Cl^- , OH^-
0	安定している	なりにくい	Ne, Ar

¹⁵ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$

ところで、今までお話ししてきた共有結合やイオン結合以外に、金属結合とか、結合の種類も単結合、2重結合、3重結合といったものがあり、またイオンも NH_4^+ とか OH^- といった多原子イオンなどがある。これらのお話はまた別の機会に譲るとして、以上で本日のお話は終わるけど、なにか質問はあるかな？

- アリス：お疲れ様でした。ありがとうございました。いろいろ興味は尽きないけど、ともかく本論の放射性崩壊についてある程度理解の目処がつけいたら、また改めていろいろ質問をもってお邪魔することにするわ。その際はよろしくお願いします。
- K氏：了解、いつでもOKだよ。アリスに質問をぶつけられるとこちらもネジリ鉢巻の勉強になるからね。残暑が厳しいようだけど、身体には十分注意してまた元気な顔を見せて頂戴。
- アリス：はい、きょうは、ありがとう。それじゃさようなら。

History *****

- 2011.09.18 「イオン結合」のパートを少し補充。