

小島 英夫 (静岡大学) 訳

1. アルファ粒子とラザフォードの実験 M. Y. ディギロフ (1989, No. 3, pp. 49-52)

1903年の秋に、32歳の物理学教授 A. ラザフォードはヨーロッパからカナダに向けて船出した。彼は自分にとっては何物にも代えがたい荷物である、30グラムのラジウム塩を携えていた。

ニューヨークの税関の役人は鉛の箱に関心を持った——当時ラジウムの輸入に関する法律は未だ無かった。これは宝石なのか、それとも化学薬品なのか？ 税金を課すべきなのか、そしてどのくらい？ 役人はいつでも、どこでも同じで、税関職員は奇妙な荷物を上官に引き渡した。しかし審査官もまた、いつでも、どこでも同じである。報告書が作られ、役人はその中で上官に述べている：ラザフォード博士は彼の宝物を手放すことをきっぱりと拒絶した。博士はその箱を無傷で(つまりその物質を使わずに)合州国内を通過することを誓約しただけで済み、アメリカの役人は関税問題の解決をカナダの役人の肩に背負わせてしまった。この数ミリグラムのラジウムのお陰で、物理学における多くの目覚ましい発見が為されるという事になったのかもしれない。

学校の物理教育では、ラザフォードの名前が原子の惑星モデルに関連して教えられる。しかし彼は、物理学の発展に取ってそれより重要性が劣るわけではない多くの研究業績の著者でもある。ラザフォードの名前に結びついている特に重要な業績には、アルファ線の性質についての実験がある。その中のいくつかについて述べよう。

実験 1. 二枚の亜鉛の板を、水平に少し離して、一方が他方の上になるように配置する。電池の接地した電極に一方の板を、接地した検流計に他方をつなぐ。下の板にラジウム塩を薄くばらまく。ラジウムからの放射線が空気中にイオンを発生

させ、空気は絶縁性を失い、電流が流れることが観測される。

ラジウム塩を薄い金属箔で覆うと、放射線の一部は吸収され、電流は約1/2倍に弱まった。二枚の金属箔を入れると、電流は1/6倍に弱まり、三枚の箔では1/11倍になった。さらに枚数を増やすと、電流は滑らかに減少し続ける(指数法則にしたがって)と思われるだろう。しかし不思議なことに、実験はその予想を支持しなかった——5枚目からは、實際上電流は減少しなかった。

これは、空気のイオン化が少なくとも二つの原因で起こることを示すように見える。あるいは、放射線が二つの異なる種類からなる、と言ってもよい：一方の放射線は強いイオン化能力を持つが金属によく吸収され、他方は空気をイオン化する能力は弱いが大きな透過能力を持つ。ラザフォードは第一の放射線をアルファ線と、第二のをベータ線と名付けた。今度は、これらの放射線の性質を調べることが研究者の課題となった。

ベータ線が自由電子の流れであることは、間もなく容易に明らかになった。電場と磁場の中でのベータ線の振舞は、いつでも電子のそれと全く同じことが分かった。

アルファ線に関しては、磁場中の軌道のずれは長い間観測にかからなかった。ついに1908年にラザフォードは実験に成功し、アルファ線が正に帯電した、高速で運動している粒子からなることを示した。

次の問題は、アルファ粒子の電荷量を決定することだった。

実験 2. 一個のアルファ粒子の電荷を決定するために、一個のラジウム片から一定の時間内に放

射されるすべての放射線の全電荷と、その時間内に放射されるアルファ粒子の数とを実験的に決定した。もっとも難しかったのは、個々の粒子を記録することだった。1908年に、ラザフォードはガイガーと協力して、アルファ粒子のイオン化作用を利用した特別なアルファ線計数法を發明し、特別な装置を開発していた(現在ガイガー計数管と呼ばれている)。

長さ60cmの真鍮の円筒の中に、希薄な空気が入っている。円筒の軸に沿って、細い針金が張ってある。針金は電池の一方の極に、円筒は他方の極につながれ、約1000Vの電圧がその間にかけてられていて、すぐにでもその間に放電が起こるようになっている。円筒に入ったアルファ粒子は空気をイオン化し、そこで生じたイオンは衝突により約2000個のイオンを作り、装置を流れる電流は著しく増大する。

個々の粒子を円筒内に入れるために、ラジウム片は長さ4.5mmの狭いガラスの窓を持つ円筒の他端に置かれ、ラジウムから種々の方向へ放射されたアルファ粒子の一部だけが円筒内に入るようにした。

記録された粒子の数で通過した電気量を割って、ラザフォードは一個のアルファ粒子の電荷を求めた。

ほぼ同じ時期の1909年に、ラザフォードは、実験的に明らかにしたその性質から、アルファ粒子が2価に帯電したヘリウム原子であることを結論した。かれはその実験をロイズと協力して行った。

実験3. 多量の放射性ラドンの気体をガラス管Aに入れる(図1)。そのガラスは十分薄く、アル

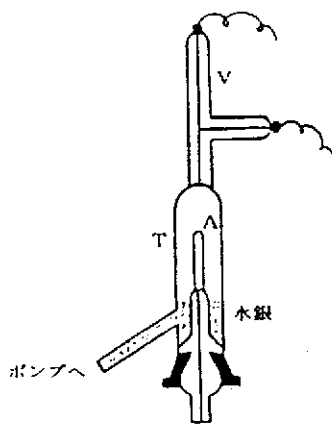


図1

ファ粒子の大部分は自由にそれを通過できる。このガラス管はもっと太いガラス管Tの中に置かれ、その上部には電極をつけた小さな真空管Vが付いている。真空にした管Tに下から水銀を導入し、管Aの下部に達しない点で止める。管Tに蓄えられたアルファ粒子は気体となっている。水銀の表面を持ち上げるとこの気体は圧縮され、その一部は真空管Vに入る。そこで生じた気体放電によって、その気体のスペクトル成分を研究することができる。面白いことに、たった二日の実験で最初の結果が得られた：ヘリウムの黄色い(最も強い)スペクトル線が生じた。6日経った時には、ヘリウムのすべてのスペクトル線が生じていた。

最後に、磁場中のアルファ粒子の軌道のずれについての実験から、その質量が決められた。

実験4. その閃光(シンチレーション)からアルファ粒子の軌跡を研究するために、ウィルソンの霧箱を、強い磁場の中に置いた。アルファ粒子の円軌道の半径は、粒子の質量と速さの積に比例し、その電荷に反比例するので、既知の量を使ってアルファ粒子の質量を計算出来る。その結果は 6.62×10^{-24} gであった。

かくてラザフォードと彼の教え子達の実験によって、アルファ粒子の電荷と質量とその性質が分かった。さらに、物理学者は原子自体を研究するための、強力で全く新しい実験装置を持つことになった。ラザフォードは、アルファ粒子をつかった原子探査の実験によって、まず原子の構造についてのイメージを描くことが出来た。

ラザフォードの先生であるJ.J.トムソンは、1882年に次のような原子モデルを提唱した：原子は干しぶどうを散りばめたプリンのようなもので、干しぶどうに相当するのは電子、練り粉に相当するのは一様な正電荷の原子空間である。このモデルの長所は、原子が中性であることとその大きさを十分満足できるように決められることである。しかし、物理学の定理(アーンショウの定理)が存在し、それによれば静止した電荷の系は、不安定である。さらに、原子の全領域を塗りつぶす正電荷の球は、理解しがたいものだった。

アルファ粒子を原子に衝突させることにより、原子の構造を明らかにすることができた。

実験5. 対象となる物質の薄い板にアルファ粒子を照射し、その散乱方向を研究した。図2には、ア

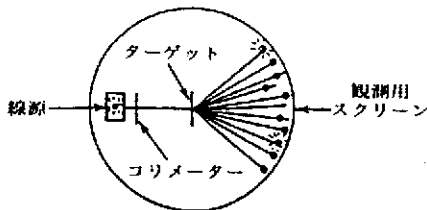


図 2

ルファ粒子の散乱実験の原理図を示した。放射性物質から放射された照射粒子は、照準器(コリメーター)を通して細いビームになり、ターゲットの金の薄膜に当たる。閃光物質を塗ったスクリーンを使って、アルファ粒子の散乱を調べる。多くの粒子の散乱角は小さく、 1° の程度だったが、いくらかの粒子は大きな角度で散乱され、反対方向(散乱角 180°)へ散乱される粒子さえあった。

実験結果を解析して、ラザフォードは次の結論を得た：アルファ粒子の強い偏倚(へんい、かたより)は、大質量(原子の核)に付随した極めて強い電場が原子内にあるときにだけ起こりうる。ラザフォードはさらにアルファ粒子の散乱の定量的理論を作り、散乱角に対する粒子の分布を決定した。それに関連した次の事実は興味深い。

アルファ粒子が物質を透過する際の確率過程を詳しく理解するために、世界中にその名を知られた、ノーベル賞授賞者(1908年)のラザフォードは、一人の学生として講義を聞くことを希望した。彼は著名なマンチェスター大学の数学者ラムに頼んで、確率論の講義を聞き、すべての演習にも加わった。同時代人の一人は書いている：それは見慣れない光景だった。世界的な名士が、若者の間に

2. ラザフォードの実験と放射性現象

ラザフォードの実験(本誌前論文参照)は、2重に放射性現象に関係している。一方でその実験は、重い元素の原子に照射するために放射性物質から放射された高速のアルファ粒子を用いている。放射性はこうして実験のための“道具”を提供した。他方でラザフォードの実験の結果は、原子の惑星モデルの発明に導き、それまで全く不可解だった放射性現象そのものを説明することが可能となった。

ラザフォードの実験によって、任意の元素の原子は、正電荷を持った、大きさが原子の数方から数

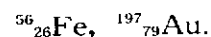
重々しく座って、課せられた演習問題を解くためにノートの上に屈み込んでいた。

1913年に、ラザフォードの協同研究者がアルファ粒子の散乱を記述するラザフォードの公式を検証した：同じ時間内に種々の角度に散乱される粒子を数え、公式を確かめた。これは無条件に原子の有核モデルの正しさを示した。静止した電荷の系は安定な平衡状態には成りえないから、ラザフォードは原子の静止モデルを見捨て、原子内の電子は核の周りを、曲った軌道を描いて運動していると提案した。しかしそうすると、電子は加速度運動をせざるを得ず、古典電磁気学によって電磁波を放射し、その結果エネルギーを失うことになる。とどのつまり、電子は核と衝突せざるを得ない。

この矛盾からの出口は、ニールス・ボーアによって見出された。しかしそれは、また別の物語である。そしてラザフォードの実験は？ 今となつては、それは物理学の歴史にとってだけ意味が有るのだろうか？ ほぼ60年たつて、すでに1970年代であるが(1990年代の今でも)アルファ粒子で物質を探查するラザフォードの方法は結晶構造の研究に、種々の不純物の分布の決定に、そして組成の確定などに、実験室で用いられている。今それは逆ラザフォード散乱法と呼ばれる。アルファ粒子の線源にはラジウムの小片の代わりに、より大きなエネルギーと粒子密度を生み出す強力な加速器が用いられる。しかしその原型は、ラジウム塩の入った鉛の小函で、読者が覚えているように、ラザフォード博士がアメリカの税関で、断固として手放すのを断ったものである。

1. K. ベルキン(1985, No. 4, pp. 20-22)

十万倍も小さい(原子核)と、電子雲を形作る負に帯電した(電子)とから出来ていることが分かった。さらに、電子の電荷を単位として表した核の電荷は、メンデレーエフの周期律表におけるその元素の原子番号に等しい。核の表記法では、その電荷は元素記号の下付き添え字として書かれる。原子番号で表される。原子単位で測った質量(質量数)は上付き添え字で表される。例えば、鉄と金の原子核は、この記号でそれぞれ次のように表される：



放射性——核現象。放射線(アルファ、ベータお

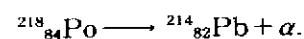
よびガンマ線)の放射に関係する過程は、原子のどの部分で起こるのだろうか——核でか電子雲でか？

すべてが核で起こることを理解するのは、容易である。まず第一に、放射線の一つ——アルファ粒子は、正に帯電した高速粒子の流れであり、そのような粒子は電子雲の中には存在しないことは明らかである。もう一つの放射線——ベータ線は電子からなり、電子雲から生ずることも原理的には有り得る。しかし、ベータ粒子のエネルギーは非常に大きく(百万電子ボルト $\text{MeV} = 10^6 \text{eV}$ にも達する)、電子雲がそのようなエネルギーを与えることは明らかに不可能である。例えば、それぞれの原子の電子雲が関与する化学反応において、原子一個あたりのエネルギーは 1eV 程度である。エックス線量子(電子雲から放射されるが)のエネルギーが、やっと千から一万電子ボルト ($10^3 \sim 10^4 \text{eV}$) に達する程度である。電子雲が〈自分の〉電子に百万電子ボルトものエネルギーを与えることは不可能である。

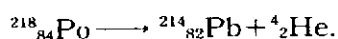
したがって、アルファおよびベータ粒子は原子核の中のなんらかの過程の結果として放射されるほかない。ガンマ線についても同じようなことが言える。

放射性変換 それゆえ、放射線は放射性元素の原子核から放射されることになる。核の電荷はメンデレーエフの周期律表の原子番号に等しい。すると電荷の保存則によって、なんらかの核が荷電粒子を放射したとき、核の電荷が変化しなければならぬことが分かる。すなわち、核は周期率表の違う位置にある他の元素の原子核に変換する。

すでに示したように、アルファ粒子は電荷が正で電子電荷の2倍、質量が原子質量単位の4倍である。したがって、アルファ粒子を放出した核は原子番号が始めより2単位小さく、質量が4単位小さい核に変換する。例えば、もし原子番号84、質量数218のポロニウム(放射性元素)がアルファ粒子を放出すると、原子番号82(これは鉛 Pb である)、質量数214の元素の原子核に変換する：

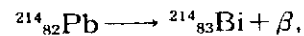


アルファ粒子はヘリウム原子核であるから、この過程は次のようにも書ける：

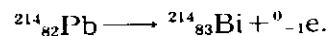


つまり、ポロニウムの核は二つの部分——鉛の核とヘリウムの核に〈崩壊する〉と言える。

原子核がベータ粒子を放出するときは事情が少し違う。このとき核電荷は減少する代りに1単位増加する。したがって、核は原子番号が始めより1単位大きい原子核に変換する。質量については、この変換でほとんど変化しない。なぜかという、電子質量は、どの原子核に較べても千倍以上小さいからである。例えば、放射性鉛 ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ は、ベータ粒子の放出により次のように崩壊する：



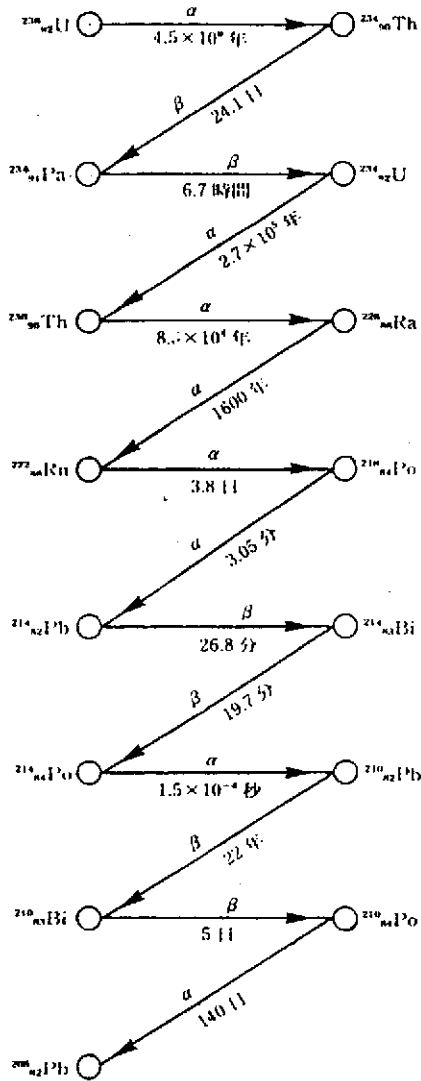
あるいは



これらすべての変換は、両辺における下付き、および上付き添え字の和が互いに等しいように起こる。**放射性原子核** もし放射線が一つの原子核の他の原子核への変換を伴うものならば、当然次のような疑問が生ずる：なぜ放射性物質は今まで存在しているのか？ もし例えば、ラジウム(原子番号88)がアルファ粒子を放出して原子番号86の原子核に変換するなら、ラジウムが現在も地表に存在しているのは何故だろうか？ ラジウムはそれ自身なにかの崩壊生成物で、それがラジウムに変換したに違いないと考えられる。

現在まで地上に放射性元素があることは、結局地球の寿命の間に消え去ることの無かった、非常にゆっくりと崩壊する放射性元素が存在することを意味する。その元素はそれ自身とそれが変換してできた元素〈娘核〉、およびそれが崩壊して出来たその〈娘核〉などなどの〈親核〉である。

物理学者は、そのようにゆっくりと崩壊する元素が実際に存在することを明らかにした。そのうちの一つは、原子番号92、質量数238のウランである。この原子核は、図に示した、一つの放射性元素系列(家族)の親である。この系列の崩壊を示す線の上に放射線粒子を、下には半減期、すなわち放射性核の数が最初の半分になる時間を記した。ウランは14回の引続く崩壊によって、最後に質量数206の鉛になる。これは安定で(放射性でなく)質量数214および210の鉛とは違う。



同位体 ここに示した放射性系列は、異なる質量数を持つ化学元素の存在を示している。したがって、 $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{210}_{82}\text{Pb}$, $^{206}_{82}\text{Pb}$ は、いずれも鉛の原子核であり、同じ電荷を持っている。すなわち、メンデレーエフの周期律表で同じ場所にある。このように、質量数の異なる原子核が同じ電荷をもつとき、それは同位体と呼ばれる。化学元素としては、それらは全く同じである。しかしその核の性質、たとえば放射性は、まったく異なる。

ここで考察した崩壊系列には、鉛の同位体だけでなく、ウラン、トリウム、ポロニウム、ビスマスなどの同位体も含まれている。一般に、核が一回のアルファ変換と2回のベータ変換を引き続いて行くと、結果は必然的にもとの元素の同位体になる。

(訳 こじま ひでお)

最小二乗法の歴史

安藤洋美著

A 5 判 / 定価3,605円

最小二乗法は、実験データの処理をはじめ統計学にいたるまでの広範な分野で、実践的に活用されてきたジャンルである。自然科学ばかりでなく、社会科学の分野においても、必須の教科である。

にもかかわらず、理論的な体系化が十分でなくて、どろどろした感じが否めない。一般に気持ちよく理解できたという満足感が得にくい話題である。

本書は、数学史自体としての価値というまでもないが、さらに最小二乗法の理解を側面からバックアップする役目をも果たす。ガウスを中心に、ルジャンドル、ラプラスなどの具体的な資料を掲げている。

問題として作成された人工例でなく、実際の生きた数値例を伴った資料による具体的な理論史である。理論の発展史をフォローすることは、数学の学習過程にもおおいに貢献する。

実験データの処理に苦闘する学生諸子から、数学史に関心をもつ方々まで、広い読者層を想定しています。

目次

1. 前史
2. 18世紀前半の観測誤差論
3. 18世紀後半の観測誤差論
4. 18世紀大数学者たちの研究
5. ルジャンドル
6. アドレイン
7. ガウスの『天体運動論』出版まで
8. ガウスの先取権の主張
9. ラプラスの最小二乗法
10. ラプラスの推定論
11. 理論と実際の比較
12. ガウスの貢献
13. 正規分布の付加的証明
14. 根源誤差の仮定
- 補遺 1. ド・モルガンと最小二乗法
- 補遺 2. ベルトランと最小二乗法

現代数学社