

«Квант» для младших школьников



ソ連科学誌・クヴァントから

やさしい物理学

36

小島 英夫 (静岡大学) 訳

1. 雷と避雷針 A. キコイン (クヴァント 1991, No. 1, 35-37pp)

雷は、非常にしばしば観察される大気現象である。地球上のどこかで、毎秒100個くらいの雷が起きている。場所によっては(中央アメリカやインドネシアでは)、雷が非常に規則的に起こるので、人々は次に会う機会をこんな言葉で話す：“雷の後で会いましょう。”

雷はまた、その効果においてだけでなく、人々に与える影響からも、その稲妻や巨大な雷鳴と切り放す訳にいかない。そして、それは安全無害なわけでもない。ロシア語の“脅す”、“威嚇する”、“恐るべき”などの言葉が、雷から派生した言葉である事には、十分な意味がある。雷は、人々に、森に、電気器具に、通信回線に、少なからぬ危害を与えることがある。

では、雷とは一体なんだろうか？

雷は、大気中の巨大な火花放電であり、その放電は帯電した雲同志の間で、あるいは帯電した雲と地球の間で起こる。放電路の長さは数キロメートルにも達する。その電流の量は1万アンペアに、そこでの気体の温度は数千度にも達する。したがって、その気体は非常に高温、高圧になる。そのような放電が起こるためには、電位差は非常に大きく(雲と地球の間では)10億ボルトに、電場強度は1メートルあたり百万ボルトにも達する。

雷放電の経路に障害物、木や建物など、があったとすると、高い圧力は力学的にそれらを破壊し、高い温度はそれらを焼き滅ぼすだろう。人類が知った最初の火は、雷によって木に点火されたものであるのかもしれない。プロメチウスの神話の天から火を盗む話は、根拠の無いものではない。

どのようにしたら、これらの危険を克服できるのか？ どのように除去できるのだろうか？ 雷からの被害を防ぐ最初のアイデアは、アメリカの科学者ベンジャミン・フランクリンによって、すでに18世紀の半ばに提出された。また、彼は稲妻の本性が電気であることを明らかにした。そのアイデアは、現在も使われており、導体の針の性質を使うのである。

導体の針 導体を帯電させると、電荷はその表面に分布することは良く知られている。導体の形が球か球殻であると、電荷は表面に一様に分布する、つまり表面の単位面積に存在する電荷量は一定である。あるいは、電荷の表面密度は至る所同じである、とも言われる。これは、球面の曲率がすべての点で同じである、つまり曲面が平面からずれる度合いがどこでも同じである、ことに関係している。

任意の形の曲面では、各点の曲率は場所によって異なる。すると、導体の内部の電場がゼロになるように電荷は表面上に不均一に分布することは明らかである。そのためには、〈狭い場所〉では電荷の表面密度が大きくなる必要がある。これが、導体表面の曲率の大きい部分で電場強度が大きい理由である。

表面に突起があると、そこでは曲率が最も大きい。したがって、そこでは表面電荷密度が最大で、針の先端では電場強度は特に大きい。それが雷避けの装置である、避雷針に使われる。

避雷針 避雷針は金属の棒で、一端は地面にしっかりと接続され(よくアースされ)、他端は鋭く尖

った針状になっている。この棒と地球とが巨大な導体で、避雷針の先端はその導体の上の突起である。

この簡単な装置が、どのような作用を持っているのだろうか？

避雷針の近くに雷雲がある場合を考えよう。例えば、雷雲の電荷が正であるとする。すると、雲の作る電場は地球と避雷針からなる導体の電荷を分離させ、避雷針には負の電荷が現れる。避雷針の先端の電荷密度は非常に大きくなるので、その周りには非常に強い電場ができる。

大気中には、つねに少数の(1cm<sup>3</sup>当たり数百個の)、正あるいは負に帯電した粒子、イオンや自由電子が存在する。空気は良い絶縁体なので、ふつうそれらは混じり合わない。しかし、避雷針の先端の強い電場の中では、イオンと電子は大きなエネルギーを得て空気の中性分子と衝突し、それをイオン化する。そのようにして生じた新しい電子とイオンはまた電場で加速され、次々に荷電粒子の対を生み出し、荷電粒子の数はなだれをなし

て増加する。このようにして、空気は導体になる。

良く知られているように、導体の中には静電場は存在しない。避雷針の周りの空気中でも電場は弱められ、火花放電が起こる確率は低くなる。つまり、負の電荷を持った粒子は正に帯電した雲に引き寄せられ、それを部分的にせよ中和することになる。また、放電が起こったとしても、避雷針は放電の〈迂回路〉となって、周りのものに対する被害を避けることができる。

**稲妻と雷鳴** そう言う訳で、雷放電は気体中の巨大な放電なのである。良く知られているように、電流は見る事も、聞くこともできない。では、稲妻や雷鳴のような、凄じい現象はどのように説明できるのだろうか？

一つずつ考える事にしよう。放電路(その幅は数cmに達する)に沿って生じたイオンと電子は互いに引合い、結合して空気の中性分子になる。この過程を再結合という。この再結合に際して、光が放射される(稲妻の閃光である)。

雷鳴もその際に生ずる。放電の際に、放電路に沿った気体の圧力は非常に高くなる。その圧力が急速に下がると強い衝撃波が生じ、それが雷鳴として聞こえる。雷の轟は、音が雲と他の物体の間で、何回も反響することによって生ずると考えられる。

このようにして、稲妻と雷鳴は雷放電の結果として生ずる。危険なのは放電その物であり、それ自体は見る事も、聞く事もできないことは、既に述べたとおりである。ついでに言うておくと、時間をかけて説明した放電の過程は、実際には一瞬に、千分の1秒位の間に起こるのである。

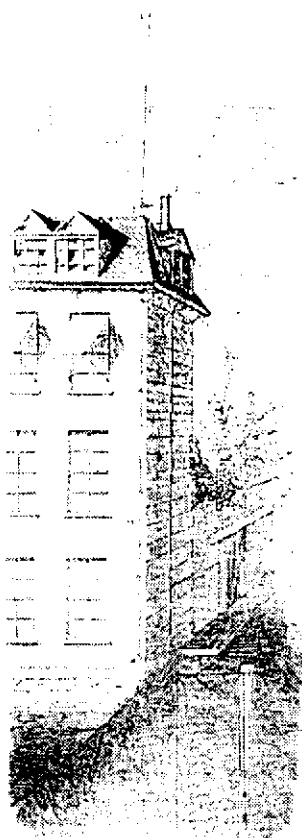


図1 アメリカ合衆国の政府は避雷針についてのフランクリンのアイデアを最も熱心に支持した。既に1782年に、フィラデルフィアでは1300軒のうち400軒以上に避雷針が立てられていた。

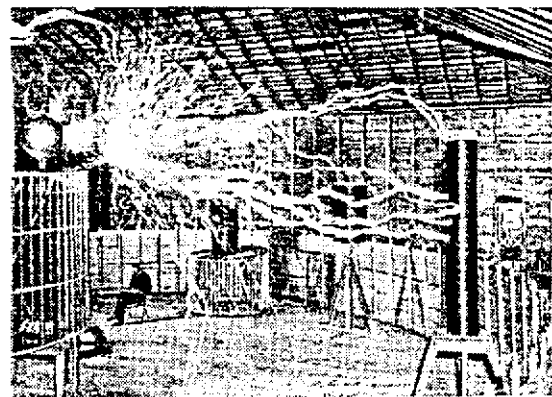


図2 N. テスラ (クロアチア生まれのアメリカの科学者) がコロラドの実験室で作った、長さ約4mの人工的な稲妻。

避雷鳴針？、避雷妻針？、避雷針？ 我々は、雷を避ける装置を避雷針と呼んできた。この装置は長い間、西欧で避雷鳴針と呼ばれてきた。それはその後、避雷妻針と呼ばれ、現在もそう呼ばれることがある。しかし上に述べた事から、雷鳴も、

稲妻も〈防ぐ〉ことはできず、それらは雷放電の結果でしかない。雷を防ぐには、雷放電を避けるべきなので、〈避雷針〉は正確にその性格を表していると言える。

## 2. 周期表の限界を越えて A. キコイン (クヴァント 1991, No. 1. 38-44pp)

D. I. メンデレーフは、2年前に彼が発見した、化学元素の周期的系列を1871年に表の形にして発表した。最初の周期律表には、現在我々が見慣れている罫線の格子はなく、各元素には原子の相対的な質量(当時は原子重量と呼ばれた)が書込まれていた。また、表には原子番号もなく、元素の数も60を僅かに越す程度であったが、まだ発見されていない元素の位置は最初から空欄になっていた。

年毎に、周期律表は変化した。各元素の〈住い〉の格子が作られ、さらにその中に通りの住宅番号や会社の書類番号のような、元素の順番を示す番号がそれに付けられた。

周期律とその表は化学や物理学で広く利用されたが、元素の周期的性質の起源は不明で、表の意味も分からなかった。状況は40年あまり後に初めて変わった。

1911年に E. ラザフォードが、原子は正に帯電した核とその周りの電子の雲とから出来ている事を実験的に示した。一方、オランダの法律家(!?) ファン・デル・ブルック Van der Brook は、原子核の電荷が元素の順番を示す番号に等し

いことを明らかにした。

1913年に N. ボーアは、量子論に基づく、原子の構造についての新しい理論を提唱した。それは、周期律表の中の元素の性質の起源を最終的に説明することに成功した。この理論を使うと、モーザリの法則から経験的に元素の順番を示す番号の値を決定することが出来る。この番号は、現在〈順番〉を省略して、単に原子番号と呼ばれている。

1932年に、原子核の構造が明らかになった：原子核は正に帯電した粒子である陽子と電氣的に中性な粒子である中性子とからなり、中性子の質量は陽子の質量とほぼ等しい。したがって、元素の原子番号(かつての順番を示す数)は原子核の中の陽子の数であり、またそれはその原子の周りの電子雲の中の電子の数に等しい。

その当時、メンデレーフの周期律表には既に、水素からウランまでの92個の格子があった。尤も、その内の4個は未だ空欄だった。その4個の元素は地殻の中にも、水中にも、大気中にも見つからなかった。実際には、自然は気前が良くて、表の多くの格子は、1個の原子の〈住い〉ではなく、同じ化学元素の、多くの同位体の〈住い〉であり、88や92ではなく、もっと多くの原子が存在するのだった。ところで、化学元素はメンデレーフの周期律表の限界を越えて、最初の元素より左や最後の元素より右にも存在するだろうか？



図1 D. I. メンデレーフ(1834-1907)(中央)、ロシアの化学者。マンチェスター(イギリス)を訪問した際の写真。

周期律表の最初から左へ 既に1920年にラザフォードは、原子番号が0の元素が存在するかも知れないと言っている。そして1932年に中性子が発見され、周期律表のゼロ番目の格子の〈住人〉は彼であることがはっきりした。現在、周期律表には中性子を入れたゼロ番目は書いてないが、中性子は原子番号0の化学元素である。

表の左への拡張は終わり、ゼロから左へは行けないように見える。

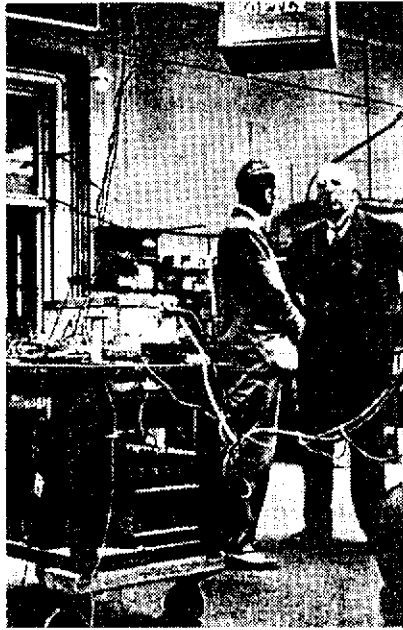
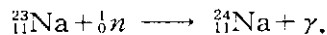


図2 E. ラザフォード (1871-1937). ニュージーランド生まれのイギリスの科学者。ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所の所長時代。

周期律表の最後から右へ 中性子が発見され、最初の中性子源が作られると、それは中性子を種々の物質に照射し、その際に起こる核反応を研究することに使われた。

例えば、次のような型の反応が起こされた：



この反応は中性子の放射捕獲、すなわち、ナトリウムの原子核が中性子を〈捕獲〉し、ガンマ線量子を放射する反応と呼ばれる。しかし、同位体  ${}_{11}^{23}\text{Na}$  は放射性を持ち、 $T \sim 14$  時間の半減期で、ベータ線 (電子  $e^-$ ) を放射して崩壊する：



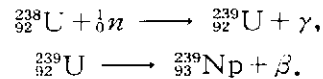
こうして、中性子を照射した結果、ナトリウムがその右隣のマグネシウムに変換される。同様な反応が非常に多くの元素で起こる。フェルミはそれをヒントにして、当時のメンデレーフの周期律表の最後の元素であったウランに中性子を照射するという、うまい方法を考えた。中性子は、ウランをその右隣の、天然には存在しない原子番号93の元素に変換させるだろうか？フェルミと彼の同僚はその実験を行い、慎重な言回しでその可能性を示したが、〈超ウラン〉元素を実際に得る事には成功しなかった。後に、彼等の実験で一つだけではなく、少なくとも二種の超ウラン元素が得られていた事がわかった。

第一に、フェルミが期待したように、反応(\*)



図3 E. フェルミ (1901-1954). イタリア生まれのアメリカの物理学者。原子炉を最初に作った。

とそっくりの反応が起こる：



${}_{92}^{239}\text{U}$  の半減期は、たったの2.3分である。新たに得られた元素ネプツニウム Np もベータ放射性を持ち、その半減期は  $T \sim 2.3$  日で、原子番号94の、プルトニウムと名付けられた新しい元素に変換する：

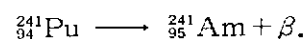


このようにして、最初の2種類の超ウラン元素である Np と Pu が〈発見された〉。〈発見〉という言葉に括弧を付けたのは、実際にはそれが発見ではなく、創造だからである。発見は、既にあるがまだ見つかっていないものにたいしてのみ可能である。しかし、新しい元素については、それを創造する可能性が発見されたのである。

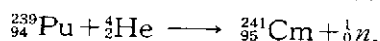
それに引続いて、ネプツニウムの10種以上の同位体が〈用意された〉。そのうちで最も安定な同位元素は  ${}_{93}^{237}\text{Np}$  で、半減期は約2.2百万年である。これが地上に留ると、放射性同位元素族の〈父核〉となり、その最終生成核は  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$  である。プルトニウムの多くの同位元素も作られる。そのうちの一つである  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  は実用上で大きな意味がある。これは  ${}_{92}^{238}\text{U}$  とともに、核分裂炉の燃料として使われる。

さらに、次のような超ウラン元素が、次々に作られた。

**95番元素—アメリシウム Am** この元素は原子炉の中で〈自動的に〉作られた：プルトニウムの同位体の一つがベータ崩壊すると、アメリシウムになる：

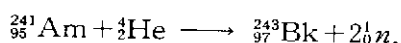


**96 番元素—キュリーウム Cm** この元素は、最初  $^{239}\text{Pu}$  に高エネルギーのアルファ粒子を照射する事によって起こる、次の反応で得られた：



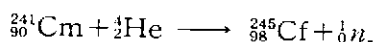
キュリーウムには、さらに10個の同位体がある。その内、最も安定なのは  $^{249}\text{Cm}$  で、半減期は1600万年である。

**97 番元素—バークリウム Bk** この元素を作るためには、アメリシウムの同位元素にアルファ粒子を照射する：



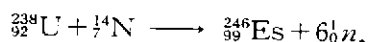
このバークリウムの同位元素の半減期は4.5時間であるが、もっと寿命の長い同位元素もある。例えば、 $^{247}\text{Bk}$  の半減期は  $T=7000$  年である。

**98 番元素—カリフォルニウム Cf** この元素は、キュリーウムにアルファ粒子を照射することによって、バークリウムと殆ど同時に〈発見〉された：

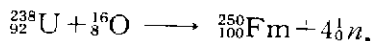


この元素にも半減期のかなり長い同位体が存在する。それは  $^{251}\text{Cf}$  で、その半減期は  $T=800$  年である。

**99 番元素—アインシュタインウム Es** この元素を作るには軽いアルファ粒子ではなく、もっと重い元素のイオン、窒素イオンを100MeVにして照射する必要があった：



**100 番元素—フェルミウム Fm** この元素はアインシュタインウムと同様に得られたが、180MeV に加速した酸素イオンが使われた：



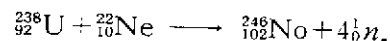
**101 番元素—メンデレビウム Md** この元素は次のようにして得られた：



この元素の最も安定な同位元素は、半減期5時間の  $^{258}\text{Md}$  である。

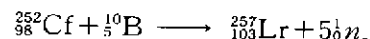
**102 番元素—ノーベリウム No** 上に列挙した超ウラン元素は主に G. シーボルクをリーダーとす

るアメリカの科学者によって合成された。102番元素は、初めてロシアのアカデミー会員 G. N. フリョロフのグループの物理学者達によって作られた。ノーベリウムは  $^{238}\text{U}$  に、加速されたネオンのイオンを照射することによって得られた：



この元素のすべての同位体は半減期が短く、1秒から3分である。

**103 番元素—ローレンシウム Lr** この元素は、カリフォルニウムに高速のホウ素イオンを照射することによって得られた：



今までに得られたローレンシウムの同位体の半減期は、すべて数秒の程度である。

**104 番元素—クルチャトビウム Ku** この元素を合成するには、高速のネオンのイオンをプルトニウムに照射した：



その後、クルチャトビウムの他の同位元素も合成されたが、それらの半減期は非常に短い。

さらに原子番号の大きな、107番までの元素の合成が続けられた。それらの元素は半減期が非常に短いので、作られたと同時に崩壊してしまうために、それを合成するのはますます困難になる。さらに、それらの超ウラン元素はアルファあるいはベータ崩壊するだけでなく、核分裂によっても崩壊してしまう。明らかに、超ウラン元素の分裂によっては、超ウラン元素は得られない。

これらのすべての事情が、メンデレーフの周期律表をさらに右へ拡張することの障害となる。しかし理論的には、寿命の長い、大きな原子番号を持つ元素（例えば、原子番号114、126の核）を作る可能性が指摘されている。その実証は、確かに興味がある。

再び〈左へ〉の拡張の問題を 中性子がゼロ番元素であることを明らかにしたとき、周期律表の左への拡張は不可能だと結論した。しかし、この問題を再考することが必要である。

問題は、良く知られた素粒子である、電子、陽子および中性子には反粒子と呼ばれるものが存

在することである。つまり、電子を粒子と考えると、その反粒子は陽電子で、電子とは電荷の符号だけが異なる。反陽子も発見されており、陽子とは電荷の符号だけが異なる。反中性子さえ発見されており、この粒子は中性子と同様に中性であるが、すべての点で〈反対〉である。同様にして、反陽子と反中性子とからできた反原子核や、反原子核と陽電子雲とからできた反原子も存在し得るだろう。すると、メンデレーフの周期律表での元素の原子番号は核の正電荷を表しているのだから、反元素はゼロ番元素の左に位置する筈である。

超ウラン元素は天然には存在しないのに、それを〈作る〉ことはできる。反元素も天然には存在しないが、原理的には〈作る〉ことができる。物質と反物質、原子と反原子、粒子と反粒子は平和に共存できないので、それを作る事が非常に困難な事は事実である。それらが隣接していると、消滅して、消えてしまう。しかし、跡形もなくではなくて、消滅に際して巨大なエネルギーを放出する。計算によれば、質量単位で言って、通常の核反応の際のエネルギー放出の約1000倍のエネルギーが放出される。〈物質—反物質〉の消滅が制御され、そのエネルギーが安全に利用できるようになる日が来ないと、断言できる人がいるだろうか？ 今のところ、これは全くの夢だが、今われわれが利用している多くの事柄が、かつては夢だったことを忘れてはならない。

(訳 こじま ひでお)

## 相関と回帰 多変量解析への第一歩

A. エドワード 著 岩淵千明 訳 A 5 2575円

最初に単回帰分析を直線の方程式の準備をしながら導入する。数学上の証明などは注に回して、むしろ数値例とイラストで概念を納得させる。複数の変数を同時に処理する事例を通して行列代数を準備し、その上で変数を増やしながらか、重回帰分析の解説に入っていく。いずれも単なるお話でなく、適切な数値例を利用し、しかし数学上の証明はできるだけ省略して概念が自然に納得できるように工夫されている。行列の使用は避けなくて、しかし行列を未学習の人にも分かるよう十分配慮されている。多変量解析の出発点ともなる回帰分析の入門書としても好適である。とくに行列の苦手な方には絶好である。

## 多変量解析の徹底研究

R.A. ジョンソン 著 西田俊夫 訳 A 5・700頁  
D.W. ウィッチャン 7800円

まず行列の初歩から説きはじめるが、解析学は使わず、線形代数の範囲で解説し、解説できないところは文献をあげて証明を委ねている。

応用については、各分野の実例を豊富に与えている。これらの実施例は応用の説明だけでなく、計算手法の説明にもうまく役立っている。また人為的な例でなく、大気汚染、疾病、選手の収入と球団の勝率といった興味深い例が多い。

豊富な数値例、練習問題を、YHPの28S、48SX、シャープのPC-E500の電卓でこまめにフォローすれば、実践的な知識をまちがいになく身につけられる。

## 統計の初歩

藤沢偉作 著 A 5 1545円

本書はこれだけは絶対に必要だという最低限の教材に局限した内容である。しかし選定された素材はしっかり身につくように具体的に、電卓などを利用して計算を実行しながら、背後にある数学的な理論が納得できるように、配慮されている。

現代数学社 〒606京都市左京区鹿ヶ谷西寺ノ前町1  
☎(075)751-0727 振替京都1-11144