



量子論の歴史—原子の物理学へ —前期量子論へのプレリュード—

森 川 亮

概要 本論では、原子の線スペクトルを包括的に理解しようとする試みが古典的な原子モデルの構築へと至り、それが徐々に量子の概念を取り入れようとする過程を論じる（もちろん、この試みは失敗する）。この過程は前期量子論へのプレリュードとも呼ぶべき前段階であり、ここに古典力学の枠内で到達できる最高の到達点が顕現されている。しかし、同時にその困難も顕現されており、その困難さが、原子の物理学という観点からもまた件の不連続性に帰着するということが浮かび上がってくる。

本論は、この不連続性という困難が、いかにして原子モデルの中から出現し、それがどのようにして量子論（前期量子論）の出現を準備したかを明確化するものである。

キーワード 線スペクトル, 原子モデル, プラム・プディングモデル（無核型原子模型）,
土星型モデル（有核型原子模型）

原稿受理日 2016年5月10日

Abstract We will discuss a process of the classical atomic model that tries to adapt to the notion of quantum in this article. These trials will absolutely fail. This is the process to create the inclusive understanding about the spectral line of the atom. This process can be referred to as the prelude to the old quantum theory. This prelude process is the highest reachable point of the classical mechanical theory of physics. However, we are able to see some manifestations of difficulty that are recognized in the aforesaid discontinuity.

We will see how the discontinuity turns up from the atomic model based on the classical theory in this article. This process is able to clarify the appearance of the old quantum theory.

Key words Spectral line, Atomic model, Plum pudding model (non atomic nucleus type model), Saturnian model (atomic nucleus type model)

—は じ め に—

前論「量子論の歴史——未知の放射線⁽¹⁾」の冒頭でも述べたように、一つの理論の形成は一直線に為されるわけではない。ましてや量子論という高度に発達し広範な適応範囲を有する理論ともなればこの形成過程は複雑でありかつ複線的である。かくして、前論では二十世紀の最初の十年あたりまで時間を進めることができたが、ここでまたしても十九世紀の後半へと時間を戻してから始めなければならない。

本論では、量子論が原子構造論へと至る道程の直前—特に、ラザフォードによる有核型の原子モデルに至るまでを詳述し、その到達点とそこに立ち現れた困難を明確化することに主眼をおくこととする。

1：線スペクトルについての研究

量子論の直接的な出自である黒体放射の現象では、高温に熱せられた物体の発するスペクトルが問題となった。そして、この放射がそれを発する物質によらず同一となることがキルヒホッフによって示されたことで理論的な探究が始まり、喧々囂々、紆余曲折の末にプランクによって量子という概念が生み出されたのであった。そして、その量子を、アインシュタインはただの抽象的で概念的な仮想物としてではなく、光子という現実的な実体として捉える道筋を示したのである。——これが、黒体放射現象から得られた量子の前論までの概念的到達点であった。

一方、常温やそれほど高温でない場合には物質によって発せられる光に違いがあることが経験的に知られていた⁽²⁾。やがて、ブンゼンとキルヒホッフによる分光学の法則が確立

(1) 森川亮,「量子論の歴史——未知の放射線——我, 不可思議で、驚嘆すべき放射線を補足せり!」, (生駒経済論叢 13(2), 2015).

(2) 例えば, 18世紀中頃にはアルコールランプの炎の中にカリウムミョウバン, 塩, 硝石などを落とすと, 異なる色が輝くことが知られていた。——武谷三男,「量子力学の形成と論理 I」(1972), 66頁より。

なお, 同書の同頁の人名 Wallastone は Wollaston, ウォラーストーン (William Hyde Wollaston, 1766~1828) の間違いである (同書にはすべてこのように書かれており, 印刷ミスでも誤植でもないためにあえて指摘しておく)。

ウォラーストーンは1766年, イギリスのノーフォークに生まれの物理学者である。ケンブリッジで教育を受け, 1793年に医学の学位を受けた。その同年, ロイヤル・ソサエティの研究員に選出されて, 私設の実験室を開設している。その後, 1820年にはロイヤル・ソサエティの会長を務めた。ウォラーストーンは, 特に, 太陽光スペクトルのフラウンホーファー線の中に暗線があることを発見したことで知られる (A method of examining refractive and dispersive powers, by

されたことで、ある物質が発する特定の輝線の存在は（ある物質が特定の波長を発するということは）、それに対応する元素の存在を裏付けることとなった^③。しかしながら、これら特定の波長しか放射しない線スペクトルは、個々の物質によって異なっていることもあって、その包括的な理解にはまったく至ってはいなかった。——結論を先取りしてしまえば、この物質によって異なる線スペクトルの研究が原子の存在のほぼ揺るぎない確実性を人々に確信させ、原子構造論へとつながり、やがて明確で包括的な解答、つまり、理論的な一貫性を有する認識を得るに至るのである。

ところで、のっけからいきなり余談ではあるが、量子が高温の連続スペクトルから誕生し、原子構造が線スペクトルから誕生し、相対性理論が光速度不変の原理から誕生したことを考えると、筆者はまことに不思議な想いに駆られることを禁じ得ない。現代物理学は、例外なく光の考究にその出自を有する、と述べても過言ではないからである。いささか曖昧な言い方ではあるが、この一致に筆者は、Let there be light！（光あれ！）というキリスト教との根源的疎通性を感じずにはいられない。筆者の浅学では、それは「何か根源的なもの」と述べるに留めざるを得ないのだが、この文明の根源における相似性、あるいは連続性（いや、一貫性と述べるべきか）、については是非とも強く指摘しておきたい。

さて、閑話休題……。

十九世紀に入って、特にブンゼンとキルヒホッフによる分光学上の決定的な進歩があった後、各元素とスペクトル線との対応が次々に為されてゆき、分光学を用いた化学分析が一気に進展した。線スペクトル（のパターン）は個々の元素のいわば指紋のごときものとなったのである。だが、それは、いまだ元素と線スペクトルとの単なる対照表であつたにすぎない。つまりは、「偉大なる経験則の集合体」とでも言うべき体系であつて、これらを統べる理論的認識には至っていなかったのである。

一方で、この頃（十九世紀後半から二十世紀への変わり目のあたり）になると、原子なるものの存在がより信憑性を帯び始め、その構造がそれなりに現実的で実体のあるものとして想像し得るようになってきていた。その結果、この頃の物理学者は、ちょうど音が振

\prismatic reflection, Philosophical Transactions of the Royal Society, 92: 1802, pp.365-380, 特に p378 を参照のこと。1828年、ロンドンで死去した。—Jagdish Mehra Helmut Rechenberg, The Historical Development of Quantum Theory, Vol. 1, Springer, 1982, p156, 脚注214も参照のこと。

③ 森川亮「量子論の歴史——その概念発展史と哲学的含意——黒体放射からプランクの量子仮説まで」（近畿大学商経学叢, 62(1), 2015), 第2節を参照のこと。

動の結果であるのと同じように、光も原子に固有の何らかの実体（さらに言えば、原子の内部に存在すると目される何か）が振動することに由来するものと考えようになっていた⁽⁴⁾。この類推が正しければ、分光学が原子や分子の内部構造に迫る強力な道具となり得るはずである。

そうした見通しが浸透しつつあった1885年、バルマー⁽⁵⁾は、水素の線スペクトルについて、その可視光領域に現れる波長 $H_\alpha = 656.28nm$, $H_\beta = 486.13nm$, $H_\gamma = 434.05nm$, $H_\delta = 410.17nm$ が、

$$\lambda = \frac{n^2}{n^2 - 4} f$$

という関係にあることに気が付いた（あらためて脚注(5)を参照のこと）。これを今日ではバルマー系列と呼ぶことはよく知られている（量子力学の専門的な教科書よりも高校の物理の教科書の記述の方が分かり易く書かれていることが多い）。ただし f は、 $f = 364.56 nm$ で、これについてバルマーは、

(4) こうした考え方を最高度に研ぎ澄ましたものがローレンツの電子論であると言えよう（前論「未知の放射線（本論の脚注(1)に同じ）」第2節を参照のこと）。

(5) ヨハン・ヤコブ・バルマー（Johann Jakob Balmer, 1825～1898）はスイスの数学者および物理学者。カールスルーエ大学、ベルリン大学、バーゼル大学などで学び、バーゼルの女子校の教師となった。またバーゼル大学の私講師も務めた。

セグレによると（Emilio Segrè, From X-rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries, Dover, (1980), 「X線からクオークまで20世紀の物理学者達」, 久保他訳, みすず書房, (1983), 160頁）, 「いくぶん数秘学家めいたところのある人」とのことだが、これと似通った（裏付ける）エピソードであり、バルマーがこの公式にのめり込むきっかけについてヤンマー（McGraw-Hill, 1966）」に記載されている。それによると、バルマーは数字に興味を持っており、動物の数だとかピラミッドの階段の数だとかに興味を持っていた。しかし最近はネタ切れしていると友人の物理学者や化学者に話したところその友人が水素の線スペクトルを解いてくれと彼に一連の数字を示したという。それからバルマーの数字との格闘が始まったのであった。——86頁（原書 p65）の注19。

なお、私見ではあるが、これは、こうした数字の法則性を引っ張り出してくる人物にありがちなことのように思われる。——もちろん、この私見は彼の業績や人格を貶めるものではないことを最初に記しておかなければならないが……（それは彼が数字間の関連性だけでなく物理的な統一性を明確に見据えていた（本文を参照のこと）ことからも明らかである）。

しかし、それにしても、よくこんな複雑な関係を引っ張り出してきたものだなあ、というのが大方の印象ではないだろうか。

なお、ここにも量子論の発展史にしばしば見られる認識の特徴的なパターンがある。理論やその物理的な機構は分からないが、さしあたってこういう数式になる、という具合にまずは単純な数的認識（数式的な認識）が先行する場合である。その意味するところはまさしく後から判明してくるのである。あるいは、その意味するところを後から解釈的に付与するのである。プランクの放射公式などはその典型であるが、もっと広く量子論の解釈というより哲学的な視点からでもこうした解釈の後付けは首肯されるのである——これらは本研究の全体を通して明らかにしてゆく計画である。

この数を水素の基本数と名付けることができよう。そしてまた、他の元素に対して、これに相当した基本数が得られるべきだとするならば、相当する原子量とこれらの基本数との間に一定のまた何らかのある関数で表される関係が存在することを予想することができるであろう。

と述べている。そしてまた、

他のどんな物質よりも水素は、物質構造とその諸性質に関する知識を得るための新しい道を開くよう運命づけられていると私には思える。

というヤンマーが述べるところのいささか予言的な（後になってみれば非常に正しい）言辞を述べるのであった。

さらに、他の元素については、

水素に成立する公式は一般的な公式の特殊な場合で、これは特殊な条件に対して水素の線の公式に移りゆくものであろう。

とこれまた極めて正しい見通しを述べるのである。

だが、バルマーは、一般公式も水素以外についてもこうした公式を見つけだすことはできなかった。ただし彼は、最初の報告論文でそれまで確認されていなかった5番目の線の存在を予言し（実際には発表以前に発見されていたがバルマーは知らなかった）、同年の第二報告において、自身の公式が当時判明していた12本の線すべてにあてはまることを報告している。⁽⁶⁾

この発見はただちに大反響を巻き起こし、ヨーロッパ各地でスペクトル線の公式を見つけ出す試みが活発化した。そして、バルマーの仕事から5年後の1890年、リュードベリ⁽⁷⁾

(6) 以上は、以下の二編の論文である。

J. J. Balmer, Notizüber die Spektrallinien des Wasserstoffs, 「水素のスペクトル線に関する覚書」, Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel 7 (1885) pp.548~560.

および、

Zweite Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoffs, 「水素のスペクトル線に関する第2の覚書」, Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel 7 (1885) pp.750~752.

さらに、武谷三男, 前提書, 73~75頁。および、マックス・ヤンマー, 前提書, 81頁(原書p65)もそれぞれ参照のこと。

(7) ヨハネス・リュードベリ (Johannes Rydberg, 1854~1919) はスウェーデンの物理学者。 Lund 大学で数学を学び、同校の数学の講師となったが、後に物理学へと転じ、同校の物理学教授となった。

は、他の原子のスペクトルを詳細に調べて周期律表の1～3族までは、波長の逆数、すなわち振動数を取ることで、

$$n = n_0 - \frac{N_0}{(m + \mu)^2} \quad (m \text{ は正の整数})$$

という関係があることを見出した^⑧。ここで、 N_0 はリュードベリ定数で、以下の(今日の)表記方では R と表記される。また、 n_0 は系列端の振動数、 μ は系列に特有の定数である。

さらに詳細に実験的研究を進めたリュードベリは、この系列端にもまた規則性があった、と $n_0 = N_0 / (m' + \mu')^2$ 書けることに気が付いた。すなわち、

$$n = \frac{N_0}{(m_1 + \mu_1)^2} - \frac{N_0}{(m_2 + \mu_2)^2}$$

と書けることを見出した。すると、バルマー系列は、 $n = (N_0/2^2) - (N_0/m^2)$ であり、つまり、今日よく見る表記法だと (N_0 を R として)、

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

(ただし $n = m + 1$, および R はリュードベリ定数で、 $R = 109677.691 \text{ cm}^{-1}$)

での $n = 2$ の場合であることが判明した。かくして、バルマーの最初の見通し通りに、 $\dot{\nu}$ 素の線に移りゆくような公式が得られたのであった(ただし c は光速、 ν は振動数)。

以後、紫外線、赤外線領域についてバルマーのものも含めて(命名されたものとしては)以下の6つの系列が見ついている(括弧内は発見年と光の領域)。

$n = 1, m = 2, 3, 4, \dots$: ライマン系列 (1906年) (遠紫外線領域)

$n = 2, m = 3, 4, 5, \dots$: バルマー系列 (1885年) (紫外可視光領域)

⑧ J. R. Rydberg, Recherches sur la constitution des spectra d'émission des éléments chimiques, Kungliga Vetenskaps Akademiens Handlingar, 23, 11 (1890) p155.

これ以外は以下である。

J. R. Rydberg, On the structure of the line-spectra of the chemical elements, Philosophical Magazine 29 (1890) pp.331~337.

Sur la constitution des spectres linéaires des éléments chimiques, Comptes Rendus 110 (1890) pp.394~397.

Ueber den Bau der Linienspektren der chemischen Grundstoffe, Aeitschrift fur Physikalische Chemie 5 (1890) pp.227~232.

$n=3, m=4, 5, 6, \dots$: パッシェン系列 (1908年) (赤外線領域)

$n=4, m=5, 6, 7, \dots$: ブラケット系列 (1922年) (近赤外線領域)

$n=5, m=6, 7, 8, \dots$: プント系列 (1924年) (遠赤外線領域)

$n=6, m=7, 8, 9, \dots$: ハンプリース系列 (1953年) (遠赤外線領域)

もっとも、繰り返しになるが、これらが理論的に導出されるのは、ボーア⁽⁹⁾によって原子に量子論が適応された後のことである（また、重ねて繰り返すが、ハンプリース系列までが名前が付いているだけでそれ以外にも線は存在する）。ただし、リュードベリの公式の注目すべきポイントは、振動数が、整数を含む二つの項の差によって表されているということで、さらに、彼はこれを「スペクトル項」と命名していることである。これはすなわち、リッツ⁽¹⁰⁾による結合則 (1908)⁽¹¹⁾ の嚆矢である（後にこれを「リュードベリ＝リッツの結合則」と称するようになる）。このリュードベリが述べるところの「スペクトル項」の差になっているより原理原則的な理由は、最終的に、ボーアの量子飛翔（クオンタム・ジャンプ）というアイデアとなって結実することになる。——この詳細については次稿でさらに詳しく扱うことになる。

なお、リッツの結合則とは、必ず二つのスペクトル線の組み合わせによって放射される光の振動数（波長）が決まることである（さらに正確に言えば、二つのスペクトル線の差によって決まる）。古典物理学の場合は、単純に振動数を整数倍する波長が得られるはずであるが、この段階ですでにそのようになってはいないことは重要である。量子力学では、放射される光が二つのエネルギー差によって決定される。リッツの結合則はまさしくこれを表しており、それは量子論的にしか説明がつかないものである。

ここまでで今ひとたび確認しておきたいことは（脚注(5)にも述べたことであるが）、より初歩的で単純な数的認識（数式的認識）が包括的で理論的な認識に先行する場合が多い、ということである。しかし、こうした事情は、なにも量子論の発展史だけに見られる特徴ではない。ケプラーの法則の後にニュートンによる理論化が成され、ファラデーの法則

(9) ニールス・ボーア (Niels Bohr) は、次稿以降を参照のこと。

(10) ヴォルター・リッツ (Walter Ritz, 1878~1909) はスイス生まれの物理学者。チューリッヒ、及びゲッティンゲンで学んだが、1900年に結核を患い9年後に早世した。1908年に出した「リッツの結合則」で知られる（次の脚注、および直下の本文を参照のこと）。

(11) Walther Ritz, Magnetische Atomfelder und Serienspektren, 「磁気原子場と系列スペクトル」, Annalen der Physik, [4], 25 (1908) p660~696. (邦訳: 物理学古典論文叢書 10) および, Walther Ritz, On a new law of series spectra, Astrophysical Journal 23 (1908) pp.237~243.

の後にマクスウェルによる理論化が成されたのであった。いずれもこの逆にはならなかった。(例外の代表を探してみると、どうしてもアインシュタインの相対論ということになるであろう。もちろん、これはこれで前段階はあるのだがここでは深入りを避けたい。)

こうした認識のあり方、あるいはもっと簡単な言葉を用いるとすると、思考の傾向性でも述べるべきものの背後にあるものは、一切を包摂する神の概念でありプラトンのイデアの概念であり、つまりは普遍性である。すなわち、諸々の現れである現象の背後には、それをそのように現象せしめた究極の第一原理であるところの普遍的なるものがある、という思考(この場合は自然観・世界観と述べるべきであろう)であって、例えば、哲学の認識論にあっては、カントの物自体はまさしくこれに相当する。そしてこれらは結局のところ、われわれの認識の射程範囲からは永遠に、そして原理的に切り離されている。言い換えれば、それらは認識の彼岸に仮想される、存在するかもしれない、しかしながらすべてを駆動する究極的なるものでしかない。しかしながら、近代科学の近代科学たる所以、西洋近代思想の西洋近代思想たる所以と根幹は、もっぱらこの一点に収斂するのである。いかに高度に理論化された物理学理論であってもその根幹には、こうした論理以前の信念とも呼ぶべき世界観が存するということである。

2：二つの原子モデル——無核型と有核型

通常、古典物理学的には光の放出は荷電粒子の振動(周期的な運動)による(これは、前節で述べたように、光が原子に固有の、つまりは原子内機構に由来する何らかの振動の結果と考えていた物理学上の理由である)。一方で、原子がそれぞれの指紋のように固有の光を放射しているのであれば、少なくとも原子内部においてなんらかの荷電粒子が運動状態にあると考えざるを得ない。こうした状況下において、トムソンによる電子の発見がなされた。また、ゼーマン効果を理論的に説明したローレンツの電子論は、電子が原子の構成物の一つであることを決定的に物語ってもいた。そしてまた、放射線の研究から得られた様々な知見もあった。こうした様々な知見の蓄積から、二十世紀に入ると原子の構造についてより具体的に論究することが可能になってきて、まさに機が熟してきた段階にあったのである。

そもそも原子とは、「それ以上は分割不可能なもの」という意味を持つ。しかし、そうした語義に反してほとんど確実になってきたのは、原子の内部には電子が存在するという

ことで、この電子がマイナスの電荷を有するのだから、電氣的に中性である原子はこの電子の電荷を打ち消すプラスの電荷をその部分のうちのどこかに持っていなければならないということであった（もちろん、現代の視点を有するわれわれは、その部分が原子核であることを知っているが、この頃にはまだその担い手が何であるかは判明していなかった）。また、電子の質量が非常に軽いために電子以外の何かは原子の質量を担っている可能性も推測し得るものであった（しかしながら、以下で見ると、トムソンは自身の原子モデルを提案するにあたって、原子の質量を電子に委ねてしまっているが……）。そしてさらにはまた、放射性崩壊についての知見も原子が内部構造を有すると考えるには十分な理由となってきた。——すなわち、原子は、分割不可能なものなどではなく、なんらかの複合体であり、部分を有するという認識である。

こうした中で、1904年、二つの原子モデルが発表された。一つはトムソンによるもので、もう一つが長岡⁽²⁾によるものである⁽³⁾。これらは、それぞれ無核型モデルと有核型モデルの代表でもある。——なお、脚注にも記したが、口頭発表がそれぞれ1903年であって、論文として公表されたのが1904年である（本論の脚注⁽³⁾を参照のこと）。

(1) トムソンのモデル——無核型モデル

トムソンのモデルは、ブドウパン型、あるいはプラム・プディング型と言われる。

(2) 長岡半太郎（1865～1950）は日本の物理学者。長崎県大村市出身（旧大村藩に生まれる。ちなみに明治は1868年からである）。1893～1896年、ボルツマンの元に留学し、帰国後、東京帝国大学教授となった。その後、大阪帝国大学総長、貴族院議員、日本学術振興会理事長、帝国学士院院長などを務めた。1937年には文化勲章を受章している。1939年に湯川秀樹のノーベル賞をスウェーデンアカデミーに推薦している。主な研究分野と業績は、本文中の原子モデル以外には、ニッケルの磁歪、ソレノイドのインダクタンスを求める係数（長岡係数）の決定、地磁気の測定、地球物理学や地震の研究などがある。

長岡は、名実共に日本の物理学を作り上げ国際化したと述べても過言ではない人物である。長岡の弟子には、KS鋼など鉄の研究で知られる本多光太郎、日本の原子物理学の父、仁科芳雄、また当時、国民的に人気の高かった物理学者である寺田寅彦などがいる。

長岡半太郎（およびその周辺と同時期の日本の物理学研究）については、以下の文献に詳しい。板倉聖宣、木村東作、八木江里「長岡半太郎伝」（朝日新聞社 1973）、板倉聖宣「長岡半太郎」（朝日新聞社 1976）。また、新資料の紹介について、岡本拓司、大迫正弘、鈴木一義、デーナ A. フライバーガー「長岡半太郎の新資料について」、(国立科学博物館研究報告 E 類：理工学, 第29巻, 2006) がある。——新資料によると、1925年にケンブリッジ大学から贈られた名誉学位の通知書とその時のガウンと帽子が発見されたとのことである。

(3) 実際に世に問われた年時は、トムソンが1903年5月のイェール大学での講義 (Silliman Lecture)、「電気と物質」において。長岡が1903年12月5日の東京数学物理学会での口頭発表「すべくとる線ト放射線ヲ表示スベキ原子内分子ノ運動」である。論文として公表されたのはどちらも1904年で奇しくも両者共に Philosophical Magazine [6], 7 においてである。

トムソン：原子の構造について、On the Structure of the Atom, Philosophical Magazine [6], 7, pp.237～265（邦訳：物理学古典論文叢書 10）

長岡：線および帯スペクトルと放射能現象を示す粒子系の運動, Kinetics of a system of Particles illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity, Philosophical Magazine [6], 7, pp.445～455（邦訳：物理学古典論文叢書 10）

このモデルの特徴は、原子核が想定されておらず、負の電荷を持つ電子と電氣的にキャンセルする正の電荷が原子の全体に分布してその中に電子が散らばっているという形状である（もちろん、この時点で原子核はまだ発見されていない）。この形状が、プラムの果実がプディングの中に散らばっている様に似ていることから上記のように呼ばれた（日本ではプラム・プディングというお菓子が一般的ではなかったためにブドウパンと呼ばれることになった）。——なお、トムソンはここで筆者が電子と記しているものをコーパスル (corpuscle)⁽⁴⁾ と称しているが、わずらわしくかつ紛らわしいので以下ではこれを「電子」と今日的な翻訳を施して記すこととする。

トムソンは、「一様に正に荷電した球の内部に多数の負に荷電した粒子が閉じこめられているという見解をとる」と述べている。ただし、閉じこめられている粒子は、ランダムに閉じこめられているのではなく、リング上に規則正しく等角度間隔で配列されていると仮定されている。そしてこの粒子系の安定について研究し、粒子が（ということは粒子が配列されているリングが）ある一定の値より大きい角速度で回転する場合に安定することを数学的に示す。さらに、そのリングの運動、つまりは電子の環状運動によって原子のスペクトルを説明しようと試みたのであった⁽⁵⁾（リングは一つではなく複数仮定されている）。

また、注目すべきは、このリング上に配置された電子の数が原子の周期律表と関連があることを示そうと試みていることである。この試みは正しい結果を導出しなかったし、各リング上にあると仮定された電子の数は実際よりも大幅に多いものであった。しかし、この発想がまったく正しい方向を向いていることは明らかである。例えば、トムソンは、このリングを内側から番号を付けて、 n_1, n_2, n_3, \dots としているのも、今日的な（量子力学による）電子の s, p, d, f 軌道を彷彿とさせる。

以下は、トムソンの原論文（1904）にある電子数による周期表である。

まずは、電子数を60から5ずつの間隔で減らしたものを。

(4) 森川亮、「量子論の歴史——未知の放射線——我、不可思議で、驚嘆すべき放射線を捕捉せり！」（生駒経済論叢 13(2), 2015), 第2節の記述を参照のこと。

(5) この試みは、1903年に出された「円軌道を描く粒子（電子）系の磁氣的性質」（邦訳：物理学古典論文叢書 10), J. J. Thomson, The Magnetic Properties of Systems of corpuscles describing Circular Orbits, Philosophical Magazine, [6], 6, pp.173~193. 及び、1903年の著書, Electricity and Matter において為されている。——また、武谷、前提書, 189頁も参照のこと。

全電子数	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
n_1	20	19	18	17	16	16	15	13	12	10	8	5
n_2	16	16	15	14	13	12	10	9	7	5	2	
n_3	13	12	11	10	8	6	5	3	1			
n_4	8	7	5	4	3	1						
n_5	3	1	1									

次に外側のリングの電子数が20個のもの。

全電子数	59	60	61	62	63	64	65	66	67
n_1	20	20	20	20	20	20	20	20	20
n_2	16	16	16	17	17	17	17	17	17
n_3	13	13	13	13	13	13	14	14	15
n_4	8	8	9	9	10	10	10	10	10
n_5	2	3	3	3	3	4	4	5	5

さらにトムソンは考察を続け、放射性元素については、リングがある角速度以上で回転することで安定するのであるから、この臨界以下になると不安定化して粒子が破裂するに等しいことが生じるだろうと論じている。リングの回転速度が落ちる機構は、電子の運動によって放射としてエネルギーが消費される結果である。大変にゆっくりとした過程ではあるが、とトムソンは断りつつも、それらの速度はゆっくりと徐々に減少してゆき、充分に長い期間後には臨界点に達するであろう、と述べる。そしてラジウムの場合のように原子を構成する一部分を飛び出させることとなって、これが種々観察されている放射粒子であると解釈するのである。

以上、まことに見事な考察である。おそらく、この当時の実験結果と理論の到達点からすると、ほとんど最大限に首尾一貫した解釈であろうと思われる。

なお、電子の数がこのように極端に多くなっているのは、トムソンが原子の質量のほとんどを電子に担わせたことによる。未知の物体（粒子）を仮定してそれに質量の一部を担わせるという手法をトムソンはとっていないのである。また、正の電荷についてはその正体が分からないことからその実体的な性質についてトムソンは多くを述べてはいない。すなわち、彼は、未知なる物についてはできるだけ言及しない、あるいはそうした実体をできるだけ仮想しないという態度を徹底して貫いたのである。いわば、正の電荷については

この段階では完全にブラックボックス状態であり、まさしく雲のような、あるいは言い方を変えれば霧の向こうにある何かであった。やがて、この霧や雲が具体化してラザフォードの有核型原子モデルとなってゆくのである（以下の第4節参照のこと）。

さて、このトムソンのプラム・プディングモデルのアイデアについてそのオリジンを辿ってみると、非常に興味深い前段階があることが分かる。そこで、以下に、この前段階でのアイデアを簡単にサマライズして思考の発展過程を跡づけておく。

最初の原子モデルについての考察は、トムソンが電子の電荷を測定した1897年の論文⁽¹⁶⁾の後半（313～314頁）に見られる。ここで彼は、原子構造について考察し、どうすれば同種の粒子（つまり同じ電荷の粒子である電子）をある一定の領域内で平衡させて配置させることができるかについて論じている。粒子の数が増えると必然的に方程式の数が増加し、数学的な処理はほとんど絶望的に困難になってしまう（しかしながら、ただちに付言しておくが、それは原理的な困難ではなく、あくまでも計算の困難さであるのだが……）。そこで彼は、マイヤー⁽¹⁷⁾による1878年の水面に浮く「浮動磁石の実験」について言及し、この簡単なモデルが洞察を与えてくれる、と論じている。

マイヤーは、磁化させた複数の針をコルクに刺して水に浮かべ、上から磁石で磁場をかけると磁化した針がどういう配列で安定するのかを調べた。それによると、針が5個までなら正多角形の頂点に針が浮いて安定化するが、6個の場合は、中央に1つと残りの5つが正五角形を作って安定化し、8個なら2つが内部で6つが外部で正六角形となり……、というように環状に配置される。さらに針が増加すれば、例えば、「1個の磁石が中央にあり、それから6個の環、それから10個の環、そして外側に12個の環」……、というように針の増加に伴って環が増えて配列されてゆく⁽¹⁸⁾。1897年の論文でトムソンは、この磁石の配列の系を原子モデルと見なせば、周期表に近いものを得られる可能性を論じている。

これは非常に示唆に富むアナロジーである。なぜならば、マイヤーの磁石針は運動してはいないが、これを回転させて水を正の荷電体に、磁石針を電子に置き換えれば上記して

(16) J. J. Thomson, Cathode Rays, Philosophical Magazine, 44 (1897)

(17) アルフレッド・マーシャル・マイヤー (Alfred Marshall Mayer, 1836～1897) はアメリカの物理学者。本文に記した浮遊磁石の研究で知られる。彼の幾何学的に配列される浮遊磁石の研究は、その後、分子配列などのアナロジーとしても利用された。1865年、ペンシルベニア大学の物理学および化学の教授となった。

ちなみに、彼の浮遊磁石についての実験は、単純で簡単でありながら自然の秩序を如実に示し、非常に教育効果の高いものと筆者は考える。教育関係者、学生諸君には是非とも試みて欲しい実験である。

(18) マイヤーが見いだした配置は本論の Appendix 5 に載せておく。

きたトムソンの原子モデルそのものとなるからである。

これを受ける形でケルビンは、トムソンがマイヤーの浮動磁石との類推で論じた概念を1902年にモデル化している。これは、アイデアとしてはトムソンのプラム・プディングモデルと同様で、広がりを持った正の電荷の中に負の電子を置くものである。人によってはこれをスイカ型モデルと呼ぶ。ケルビンのモデルは、静的な平衡状態のみを扱ったもので、電子が運動を行う場合に決定的な弱点があった⁽¹⁹⁾。トムソンは、こうした前段階での試みを統合し、いわば止揚するように1904年の論文⁽²⁰⁾でリングの回転によって安定する条件を導き出したのである（もちろん、古典論の枠内にあつては、これによって、運動する場合にモデルが決定的に不安定になる、という弱点を克服することなどできないのだが……）。つまりトムソンのモデルにはこれだけの系譜があつたのである。

(2) 長岡のモデル——有核型モデル

長岡のモデルは、土星型モデルとして知られているもので、中心に重い質量の核があつて、その周りを電子が周回している、というものである。周回している電子は、ランダムに配列されるのではなく規則的に等間隔（等角度）で配列されている。通常、ほとんどの現代人が原子のイメージとして思い描くものは、基本的には、この長岡のモデルである（物理学者はこれとは若干ながら異なったイメージを思い描くはずである）。ただし、繰り返しになるが、1904年当時にはこの中心核であるところの原子核はまだ発見されていない。

長岡は、スペクトル線を定性的に説明することを目標として自身の原子モデルを構築した。これは、トムソンが、主に原子の周期律表を説明するために原子構造を考察したことと大きく異なっている。（この違いが後々重要になってくる。）

長岡のアイデアの大元は、マクスウェルが論じた土星の環の運動の安定性についてであつた（つまりこのモデルの通称通りというわけである）。土星の環は、大質量の土星に万有引力の法則に従って、つまり距離の逆二乗則に従うように引きつけられつつ回転運動を行っている—つまり、その回転による遠心力と万有引力が釣り合っているという古典的な力学モデルである。さらに、その環の中にあつて土星を廻っている物体（小衛星）同士もお互いに万有引力の法則に従う力同士で引き合っている。長岡は、マクスウェルのこの計算を、中心に正の電荷を持った核があつて、これが距離の逆二乗に比例して電子を電氣的に引きつけ、電子同士は互いに距離の逆二乗に比例して反発しあっているモデルへと発

(19) ケルビンのモデルについては、例えば武谷の前提書143～158頁中段までに詳しい。

(20) 本論の脚注(13)に記した論文のこと。

展させたのである。長岡は次のように述べている。

この系は Maxwell の土星模型に比べて、互いに引き合う衛星の代わりに、互いに反発しあう粒子をもっているという点が異なっている。ここに提案されている模型の場合、最終的に近似的には、上の衛星を負の電子に、さらに中心の粒子を陽電荷粒子に、それぞれ置き換えた場合と等しいと考えられる。

すなわち、長岡は、数学的にこのマクスウェルによる土星系の運動方程式を上記の置き換えによって原子のそれへと移してみたのであった。ただし、これらは、長岡自身も述べるように、ideal atom——つまり仮想的な原子としてのまさに言葉通りの「モデル」であって、それを元にして、あるいは言い方を換えれば、いわばこれを叩き台として議論して漸次、真の原子構造へと迫っていこうとするものである²¹⁾。

このモデルで長岡は、スペクトル線、ゼーマン効果、そして放射能について論じる。

スペクトル線については、系の安定性を論じることで、リングに与えられた擾乱による振動によって放射が生じることを示し、これがシアン²²⁾の帯スペクトルと一致することを示す。

ところが、この系は準安定 (quasi-stable) であって、擾乱が大きくなるとリングが崩壊してしまう。計算によると系の質量が大きいほどこの擾乱が大きくなり、リングはより壊れやすくなる。(より正確には、長岡は、中心核の電荷を十分に大きく取ることによって系を安定化させようとしている。) 長岡は、系のこの準安定な性質を放射能の説明として解釈する。すなわち、擾乱の増加によってリングが崩壊して、これによって電子が飛び出し、同時に運動量保存則に従って核も崩壊してしまい、これが α 線や β 線となって飛び出してくると論じているのである。

ゼーマン効果については、リングに垂直な方向に磁場がかかった場合に振動数が二つに分岐することを示している。²³⁾

²¹⁾ 武谷は、この長岡の姿勢について非常に高く評価している (前提書220頁)。これには、筆者もまったく同感である。

²²⁾ 長岡モデル全般については以下の文献がもっとも詳しい。

E. Yagi, On Nagaoka's Saturnian Atomic Model (1903), Japanese Studies in the History of Science, No. 3 (1964)

長岡のモデルは、ただちに反応を引き起こした。なかでもショット²³による反論は「長岡—ショットの論争」として歴史に刻まれることとなった（この論争の骨子については本論の Appendix 3 を参照のこと）。

ところで、この長岡のモデルについてはトムソンのそのような明確に概念的な前段階と研究の連続的な系譜を見つけ出すことができない（もっともマクスウェルのそれ以外は、という但し書きが付くのだが）。確かに、有核型モデルとしては、レーナルト²⁴のダイナミッド (Dynamid) やペラン²⁵による太陽系型のモデルが長岡の発表よりも前に公表されてはいる²⁶。そして、長岡はこれをおそらく十二分に知っていたであろうことも当たり前のように推測される（いや、間違いなく知っていた！）。しかし、これらは長岡のモデルとは直接の関係、つまりはケルビンからトムソンへと至ったような濃厚な継続性を感じ取れないのである。そのような意味において、長岡はいかなる系譜にも分類できず、あるいは属さずにまったく単独のかつ孤立した形でこのモデルを世に問うたのである。

ちなみに、この単独性は、いかようにも解釈可能ではあろう。しかしながら、さしあたって事実だけを述べておくと、一つにはそれだけ当時の日本が世界と（ヨーロッパと）隔絶していたということ。そしてもう一つは、その隔絶にもかかわらず独自の成果をあげた長岡の偉大さである。いや……、ひょっとすると、そうした隔絶があったからこそまったく独自のアイデアを創出し得たのかもしれない、ということである。時としてそうした継続性は人間の発想をそれとは意識させることなく限定させる可能性があるからである²⁷。

²³ ジョージ・アドルフ・ショット (George Adolphus Schott, 1868~1937) はイギリスの数学者、物理学者。光速に近い速度で運動する荷電粒子の放射理論で知られる。イギリスのウェールズ大学アバリスツイス (University College of Wales, Aberystwyth) の教授、応用数学科主任、および副学長を歴任した。

²⁴ フィリップ・レーナルト：森川亮「量子論の歴史——アインシュタインによる光量子の実体化について」(生駒経済論叢 13(1), 2015) の註⑧、および、森川亮「量子論の歴史——未知の放射線——我、不可思議で、驚嘆すべき放射線を捕捉せり！」(生駒経済論叢 13(2), 2015) の脚注②を参照のこと。

²⁵ ジャン・ペラン：上と同じく、森川亮「量子論の歴史——未知の放射線——我、不可思議で、驚嘆すべき放射線を捕捉せり！」(生駒経済論叢 13(2), 2015) の脚注③を参照のこと。

²⁶ 本論の次節を参照のこと。

²⁷ こうした記述をすると直ちに、「いや、学術誌は当時の日本にもちゃんと届いていた」、あるいは「長岡はボルツマンの弟子でもあって、西洋科学の伝統を身につけている」、だから「隔絶されているというのは言い過ぎである」、という反論がただちに予想されるのだが、それでもやはり「隔絶されていた」というのはある程度までは事実であろう。それは物的にも距離的にも文化的にも、そして科学の伝統としても、である。筆者は、長岡の業績は（本文にも書いたが）、こうした隔絶性にもその一因があるのではないかと想像している。そしてまた、いかなる系譜とも接続することなく突如として出現する様は、いくらか天才じみているとも言える。

われわれはこうした典型例をこれまでに少なくとも二つ知っている。一つはニュートンの万有引力の定式化であり、もう一つがアインシュタインの光量子と相対性理論である。ニュートンはベストの大流行を避けて故郷ウールズソープに引きこもっていたときに万有引力の定式化を為し

もちろん、ここに筆者はいかなる価値判断も介入させていないことをただちに記しておかねばならない。ただし、時として科学の進展は不連続的に生じることもまた事実である。(かかる不連続については本研究の続編に譲らざるを得ない。)

なお、長岡のモデルについては次々節で述べるラザフォードのモデルとの関連をどう見るかについて、1960年代の前半から70年前後に日本国内で深刻な論争があった。これについては本論の Appendix を参照のこと。

以上、最も代表的で重要な二つのモデルを見てきたが、これらの違いはまずは形態的な相違であるが、その意図するところも顕著に異なっていた。

トムソンは、原子の構造についてより興味が向いており、スペクトルについては(論じてはいるが)副次的なレベルに留まっている。むしろ、原子構造を仮定することで、原子の周期表—言い替えればその化学的性質を説明しようという動機が優勢である。

一方、長岡は、原子の周期性には言及しておらず、もっぱらスペクトルを定性的に説明することに主眼を置いている。長岡の仕事は、原子構造を探る、という動機から為されたものではなく、じつは長岡にとって、こちらが二次的なものであったと言えよう。これは、前述したショットとの論争につながるポイントであって、ショットはより原子構造的な観点から長岡を批判するのだが、長岡が原子モデルとして提示した描像はそういう観点から構築されたものではなかったのである。——詳細は本論の Appendix 3 にゆずる。

いずれにせよ(本節の最初に述べたことの繰り返しになるが)、この時期になって原子モデルをまさに一つのモデルとして提示する動きが出てきたのは、様々な知見—電子の発見や原子の崩壊、そして原子のスペクトルといったものが誘因となっており、そのうち、トムソンは電子の発見と原子の崩壊という放射線の研究に触発され、長岡は原子のスペク

トしている。アインシュタインは、特許局の役人であり、基本的に一人であった。これらに共通することは、それがいくらかそれまでの流れとは切れていて、突然、ボン、と出現したような感がある、ということである。

ちなみに、長岡は、小学校時代に落第を経験している。その時のことを当の長岡本人は、以下のように語っている。「小学校のことは御免こうむるナ。ほくは小学校では落第したんだ。小学校で落第したというヒトはそんなにいないけれども、ほくはやったね。……別に欠席をしたわけじゃないけれども、何をやっているかさっぱりわからない。化学なんと言うものはその時分はほとんどなかった。……中略……何が悪かったのか知らんが、とにかく落第したことは事実だ。いたずらはほとんどしなかったし……。何しろ遅鈍だったんだナ。——いや、小学校のことは御免こうむる(「長岡半太郎隨筆集・原子時代の曙」, 朝日新聞社, 1951年)」

おそらくこうした考察は科学史の範疇では十分には扱いきれない。もっと広く視野をとった文明論や文化論とも通じる課題・問題であると同時に、彼ら個人のパーソナリティについての分析が必要だからだ。しかし、上記のエピソードは、いかにも天才の(しかも精神分析学の対象となりうるタイプの)典型例のように思われる。

トルについての分光学的研究により多く触発されて原子をモデル化したのである。

3：その他の原子モデル

ここでは、上記の長岡モデルの箇所に触れたレーナルトとペランの原子モデルについて簡単に紹介しておこうと思う。

ペランのモデルは、形態としては、単純に中心に核が存在しているということから、長岡や後述するラザフォードのモデルに先んじた有核型のモデルである。一方、レーナルトのモデルについては、ラザフォードのモデルの端緒となった実験（次節にて後述）と極めて酷似した現象を説明するために考案されたモデルで、これもまた有核型と大別されるものである。

次にいくらか時代を進めて、トムソンのモデルを元にしたハース²⁸⁾の水素原子のモデル（初めて量子の概念を適応したモデル）とニコルソン²⁹⁾によるモデルについて簡単に説明しておこうと思う。これらは、間違っただけではあるが、量子の概念を初めて原子モデルに適応しようとしたものであり、量子論の歴史にとっての意義は大きい。

さて、まずは、ペランの太陽系モデルからである³⁰⁾。

1901年、ペランは、陰極線の本性についての考察から核が中心にあってその周りを電子（ペランはトムソンの用語コーパスルを用いているが）が周回している原子モデルを提案した。ただしペランのモデルは、アイデアの提示のみであって電子の運動を数学的に解析したものではなく、原子の安定性などについてもまったく言及されていない。彼のモデルは、原子が太陽系のような形状をしており、一番外側にある電子が放出されて陰極線になる、というものである。ペランは次のように述べている。

²⁸⁾ アーサー・エリック・ハース（Arthur Erich Haas, 1884～1941）はオーストリア生まれの物理学者。ウィーン大学、ライプツヒヒ大学、ロンドン大学の教授を経て1936年にアメリカのノートルダム大学の教授となった。

ハースのモデルは、量子論を始めて水素原子に適応しようとしたもので、リュードベリ定数を質量とプランク定数で表した最初の試みであった（結局のところ数因子が間違っていた）。詳細は本節の当該箇所を参照のこと。

²⁹⁾ ジョン・ウィリアム・ニコルソン（John William Nicholson, 1881～1955）はイギリスの天体物理学者、数学者。星雲のスペクトル中にある未知の線を未知の物質ネブリウム（Nebulium）であるという説を唱え、長岡の原子モデルに従って自身の原子モデルを構築し、これを証明したと発表した（詳細は本節の当該箇所を参照のこと）。また、これ以外には、プランクの作用量子を原子に適応する試みで知られる（これも本節の当該箇所を参照のこと）。

³⁰⁾ J. Perrin, La structure nucléo-planétaire des atomes, 「原子の核-惑星構造」, Oeuvre scientifiques 15 (1901) pp.449～461. (邦訳：物理学古典論文叢書 10)

原子の中心から最も離れた粒子は、——惑星の一つである海王星のように——中心の正電荷（太陽）の回りを回転するさいに、原子のその他の（残りの）部分の電氣的な引力によって十分強力には保持されないであろう。

つまり、一番外側の電子は十分に原子に拘束されておらず簡単に（すなわち、ちょっとした擾乱で）この拘束から逃れて飛び出してしまうだろう、というわけである。

次に、レーナルトのモデルであるディナミッドについてである³¹⁾。

1903年、レーナルトは陰極線の研究からディナミッドなる概念を導入して原子構造を論じた。レーナルトは、アルミ箔を透過させることで陰極線をガラス管から外に取り出して照射させることに成功し、陰極線が大気中を伝搬する様子を調べている。それによると、陰極線は、分子運動論から予想されるよりもはるかに長い直進性を示した。陰極線は、分子運動論からの理論的な予想よりも数千倍の距離をもるともせず直進してからようやく拡散し始め、そして大気中に吸収されたのであった。

大気中に取り出された陰極線は、大気を構成している分子とさんざん衝突しているはずである。しかし、レーナルトが見た陰極線の直進性は、陰極線を形成する粒子がこうした衝突によって分子にぶつかってもその分子が障害になっていない（障害にはなっていないさうだ）、という事実である。そこで彼は、電氣的に中性な電気双極子である彼がディナミッドと命名した核が中心にあって、その周りに正負同量の電荷が取り巻いている原子モデルを考案した。繰り返すが、核であるところのディナミッドは、電気双極子である。

このモデルによると、原子の中は隙間だらけで空虚であり、この隙間を陰極線の粒子が通過するのである。言い換えれば、レーナルトは、原子をそのような形態に仮設することで陰極線の驚くべき直進性を理論的に説明したのである。レーナルトは、次のように印象的な著述をしている。すなわち、「1立方メートルの白金塊が占める体積は、1立方ミリメートル、すなわち全体の10億分の1にも満たないディナミッドを除けば、全くの空っぽである³²⁾」と。すなわち、レーナルトは、原子が隙間だらけであることを最初に示した人物なのである。

今日のわれわれは、このモデルが間違っており、ディナミッドなどという中心核が存在

³¹⁾ P. Lenard, Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit, 「さまざまな速度の陰極線の吸収について」, Annalen der Physik 12 (1903) pp.714~744. (邦訳: 物理学古典論文叢書9)

³²⁾ P. Lenard, 脚注³¹⁾に同じ。

しないことを知っている。しかし、確かに原子が隙間だらけであったこと、そして、この結論を陰極線の並外れた直進性から得たことなどを鑑みると、レーナルトの卓越した洞察力と考察力に驚かざるを得ない。それは、次説で述べるラザフォードによる原子核の発見とあまりにも瓜二つである。しかも、陰極線の直進距離からこのディナミッドの半径をレーナルトはおおよそ $r < 0.3 \times 10^{-11} \text{cm}$ と見積もるのである。——ちなみに、実際にラザフォードによって見積もられた原子核のオーダーは 10^{-12}cm 程度であった。実に、驚くほどの精密さで一致しているのである。

ナチスへの協力で今日ではあまり語られることのないレーナルトではあるが（ほとんどその存在すら抹殺されたかのような扱いであろう）、彼の自然科学上の功績が偉大であることはまったくもって否定しえない事実である。

次に、量子の概念を原子モデルに取り入れようとした二つの試みについて詳述しておこう。これらは、以下でも幾々言及するが、ボーアの原子モデルへ至る過渡的な理論の状態という側面からも大いに評価されるべきものであることを最初に述べておきたい。

さて、まず、ハースのモデルについてである⁶³。

1910年、ハースは、ウィーン科学アカデミーに「Planck の輻射法則の電気力学的な意義および電気素量と水素原子の大きさに関する新しい決定について」と題する（いささか長いタイトルの）論文を発表した。この中で彼は、論文のタイトルからも容易に推察されるように、量子を水素原子のモデルに適応した。ところが彼が依拠した水素原子のモデルはトムソンのそれであったため、後年、あまり顧みられることがなくなってしまった。しかし、彼の試みは量子を始めて原子に適応したものとして意義がある（仮に物理学的な意義が無くなったとしても、少なくとも歴史的意義は大きい）。

ハースはまず、トムソンの原子モデルにおいて正電荷の球の表面を電子が廻っている時にエネルギーが最大になることを示す。ハースの言葉をそのまま使えば「原子模型によって表現されている共鳴子の全エネルギーもまた最大をもたねばならず、それは、振動する電子が球の半径（トムソンの原子モデルにおいて正電荷が分布する最大半径＝つまり原子の大きさ：

⁶³ A. E. Haas, Über die elektrodynamische Bedeutung des Planck'schen Strahlungsgesetzes und über eine neue Bestimmung des elektrischen Elementarquantums und der Dimensionen des Wasserstoffatoms, 「Planck の輻射法則の電気力学的な意義および電気素量と水素原子の大きさに関する新しい決定について」, Sitzungsberichte der Kais. Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-Naturwissenschaftlicher Klasse, 119 (1910) pp.119~144. (邦訳：物理学古典論文叢書 10)

筆者による補筆)の円を描くときに達せられることがわかる⁶⁴⁾』ということである。そして、

バルマーの公式 $\lambda = \frac{n^2}{n^2 - 4} f$ より $n \rightarrow \infty$ の時の波長を λ_∞ とすると、最大エネルギーは

$h\nu_\infty$ となることを導き、さらに、クーロン力と向心力が釣り合うことから $\nu_\infty = \frac{4\pi^2 m e^4}{h^3}$

を導出した(ここで m は電子の質量、 e は電荷、 h はプランク定数である)。これは、現在の正しい理論からは定数が $1/2$ 異なっているだけである。そして、リュードベリ定数については正しい値と定数が $1/4$ だけ異なっている。

ハースの目論みは、論文のタイトルからも伺えるように、原子の大きさを理論に内在化させる試みであったと述べることができる。すなわち、より直接的に言い換えればプランク定数 h を理論に内在化させる試みであった。本論の第5節で詳述するように、電子の電荷と質量の二つだけを普遍定数としていたのでは原子の大きさは出てこない。そこで、今一つ必要なものがおそらくは作用量子、すなわちプランク定数であろうことは、漠然とではあるがこの時代を代表する大方の物理学者に感得されていたのであった。ハースは、この考え方に従い果敢にもプランク定数を原子の大きさの方から導き出そうと試みたのである。つまり、ハースは、原子の大きさの方がより基礎的であると考えたのであった。

こうしたハースの着想と試みは、次稿で述べるボーアによる原子モデル(前期量子論の確立)にも影響を与えることとなるのである。

次にニコルソンのモデルについてである⁶⁵⁾。

ニコルソンは、長岡の方法に従って、有核型の原子モデルを作り上げ、それをを用いて星雲と太陽コロナに見られた謎のスペクトル線を仮想的な元素ネブリウム⁶⁶⁾の存在によるものであると説明した(もちろんネブリウムは存在しておらず、これが正しく説明されたのは1927年になってからで、高度にイオン化した酸素と窒素の禁止線であることが判明した)。この原子モデルは、まさに原子構造の理論的説明を試みたものであった(ということは、

⁶⁴⁾ A. E. Hass, 同上文献の p124, 邦訳版では123頁。

⁶⁵⁾ ニコルソンのモデルについては、マックス・ヤンマーの前提書, 90~91頁(原書 p72~73), 広重, 西尾による「ボーアの原子構造論の起源」(科学史研究, No.71 (1964) 97~108頁, 広重徹科学史論文集2, 7~27頁, みすず書房に再録), Russel McCormmach, The atomic theory of John William Nicholson, Archive for the History of Exact Sciences 3: (1966), pp.160~184, が非常に詳しい。

ニコルソンの原論文は以下である。

J. W. Nicholson, The spectrum of neblium, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 72 (1912), pp.49~64. および, On the new nebulium line at λ 4353, 同上, p693.

後慈恵ではあるが、必然的に失敗する運命にあった)。例えばニコルソンは、4個の電子を有する原子については、その4個の電子が4単位分の正電荷を有する核の周りを周回するものであると主張している。そしてその核は電子半径よりも小さく、しかしながら原子の質量のほとんどを担っており、総電子数とキャンセルする正電荷を有するものとされた。すなわち、ニコルソンは、長岡のモデルがイデアルなもの（長岡の言葉で言うところのもの）であるのに対して、これを、実際の原子の構造を説明する現実的でありアルなものとして提示しようと試みたのである。

また、ニコルソンは、系のエネルギーと電子リングの回転の振動数との比がプランク定数の整数倍で与えられる、という仮説からスペクトル線の振動数と作用量子を関連づけようとした。すなわち、言い換えれば、ニコルソンの試みは、初めて量子論を原子モデルに適用しようとしたものだったのである。だが彼は、線スペクトルの振動数を力学的な振動と同一視しており、これでは放射の経験則であるリッツの結合則を説明することはできない。つまりは、放射が二つの項の差として表されるような、今日的に言えば量子的となるようなことはないのである。また彼は、バルマーやリュードベリの法則を導くこともできなかった。そして、それ以外にも、ニコルソンは自身のモデルの安定性についても論じてはいない。おそらくは、不安定になってしまうことがあまりにも明らかだったためにとりたてて論じることを避けたのであろう、と予測される（あるいは、とりたてて論じてみても、目新しい提案ができないことは明らかであったためであろう）。そしてまた、ここへきて大方の物理学者は、決定的な何か足りない、という直感をほとんど共有しつつある時期にさしかかったいたのである。要するには、古典物理学の限界なのであった。

ただし、このニコルソンの試みもまたボーアに直接的で非常に強い影響を与えることとなる。1913年の論文³⁰でボーアは、彼の研究に幾度となく言及しつつ自らの理論を展開していくことになるのであった。

ちなみに、「原子核 (nucleus)」という言葉が最初に用いたのはニコルソンであったと言われている。

4：原子核の発見とラザフォードの原子モデル

レントゲンによるX線の発見もそうであったが、世紀の大発見は、往々にして異常な現

³⁰ N. Bohr, On the Constitution of Atoms and Molecules. Philosophical Magazine. Series 6, 26 (151), 1913, pp1~25.

詳細は次節以降で詳述する。

象（もちろん、その当時の理論や常識から観て）が確認されることから生じる。後に原子核発見へと導くこととなる現象もそうであった。それは1909年に起こった。

1907年にマギル大学からマンチェスター大学へと移ってきていたラザフォードの元には、この頃、研究員としてガイガー³⁷⁾が、そして決定的実験を行うことになる大学院生マースデン³⁸⁾がいた。ラザフォードの回想によると、ある日、ガイガーが「マースデンに簡単な実験を始めさせてみましょう」とラザフォードに提案してきたという。そこでラザフォードは、金属箔にアルファ粒子を照射させて大きな角度へ散乱されることがあるか調べさせてみよう、とガイガーに述べたというのである。だが、彼は、こんなことが生じるとは考えてもいなかった（ラザフォードは、単に、マースデンへの教育指導の一環として行おうとしたのである）。彼は、

アルファ粒子は、非常に速く走る重い粒子で、大きなエネルギーを持っていたし、そのような粒子が小さな衝突を数多くくりかえして後方へ散乱されてくる確率は、きわめて小さいことが分かっていた³⁹⁾。

と述べている。ところが、まったくもって驚いたことにマースデンの結果はラザフォードの予想を完全に裏切り、何個かのアルファ粒子が鋭い角度で後方へと跳ね返されてくることを示したのであった。一もちろんほとんどのアルファ粒子は素通りしてしまっていたが、中には150°もの鋭角に跳ね返されたものがあったのである⁴⁰⁾。ラザフォードは、後年、自身の最後となる講演⁴¹⁾で次のように語っている、「……ガイガーがひどく興奮してやってきて、『わずかなアルファ粒子が逆向きに戻ってくるのを見つけた……』と言ったことを

37) ヨハン・ハンス・ウィルヘルム・ガイガー (Johann Hans Wilhelm Geiger, 1882~1945) はドイツの物理学者。マンチェスター大学のラザフォードの元で研究を行った後、1912年にベルリンの国立物理・工学研究所 (PTB) で研究リーダーとなり、1925年にキール大学教授となった。放射線の計測器であるいわゆるガイガーカウンター (ガイガー=ミュラー計測器) は彼の業績に因んだ通称である。

38) アーネスト・マースデン (Sir Ernst Marsden, 1889~1970) はニュージーランドの物理学者。1915年、ラザフォードの推挙によってニュージーランドのヴィクトリア大学 (Victoria University of Wellington) の物理学教授となる。1958年にはイギリスより貴族に列せられた。

39) E. N. da Costa Andrade, Rutherford and the Nature of the Atom, (1964). 「エドワード・N・ダ・C・アンドレード, 三輪光雄 訳, 「ラザフォード 20世紀の錬金術師」, (河出書房出版, 1967), 146頁~」より。また、同様の内容は、スティーブン・ワインバーグ, 「電子と原子核の発見」(1986), 本間三郎 訳, 152頁にもある。

40) H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the α -Particles, 「 α 粒子の拡散反射について」, Proceedings of the Royal Society of London, A.82 (1909) pp.495~500 (邦訳: 物理学古典論文叢書9)

41) 1936年, ヘンリー・シジウィック記念講演にて。なお、これを元に、ラザフォードは、「The Newer Alchemy.; Based on The Henry Sidgwick Memorial Lecture Delivered at Newnham College Cambridge November 1936., Cambridge University Press, (1937)」を著している。

思い出す。これは私の一生のうちで最も腑に落ちないでき事であった。これは15インチ砲弾を薄紙に向けて発射したら、跳ね返ってきてぶつかったというほどの不思議な話であった⁽⁴²⁾と述べている。

こんなことは、トムソンが仮定したようないわば雲のように正電荷が原子の領域全体にわたって薄く分布している状態では生じない。電荷が原子の大きさ全域にわたっていわば広く薄く分布している状態ではアルファ粒子は少し進路を曲げられるだけである。これを解決するには、全電荷が中心の非常に狭い微少な領域に一点集中的に集まっていると考えなくてはならない。そうすれば、この核に非常に接近したアルファ粒子だけが大きく散乱され、それ以外は素通りするという結果を説明できるはずである。

1911年、ラザフォードは理論的にこのことを示し、中心に電荷 Ne が集中しており、その半径が 10^{-12} cm 程度のオーダーでなければならないことを示したのであった⁽⁴³⁾。ここで、 N は原子内電子の数であり、 e は電子の電荷である⁽⁴⁴⁾。

こうして、ラザフォードは中心に重い原子の核のようなもの（すなわち原子核）があってその周りを電子が周回している、という原子モデルを確立するに至ったのである。もっとも、本節ですぐに述べるが、ラザフォードはこの段階では原子核というタームを用いてはいない。ラザフォードは、原子構造としてこの計算結果を公表したのではなく、専ら散乱理論として公表したのであった。

なお、この原子モデルの形態だけを眺めるとそれは一目瞭然で長岡のモデルそのものである。明らかにトムソンのモデルでないことは確かである。この点について様々に論争が生じたのであるが、その詳細は本論の Appendix にゆずることとしよう。

しかし、ここで、重要な一点について簡潔に記しておきたい。それは、原子モデルについては、その形態を（形態のみを）過度に重視する傾向にあるが、基本的に長岡のモデルは、欧州の物理学の知的伝統の外にある、ということである。ラザフォードによるほとんど決定的といえる実験も、トムソンからの系譜にある。トムソンは、正の電荷を担っていると目される実体が判然としなかったがために、それを実体なき幽霊場のごとく一定の広い領域に分布させてみた。ラザフォードの1911年の報告は、この幽霊場の実体を特定する

(42) E. N. da Costa Andrade, 前提書, 「ラザフォード 20世紀の錬金術師」, 146~147頁。およびセグレの前提書「X線からクオークまで」(1983), 138頁。

(43) ただし、計算の段階では電荷は正・負のいずれかを決定はしておらず、 $\pm Ne$ と書いている。

(44) 以上のいわゆるラザフォードの原子モデルについては、

Ernest Rutherford, The Scattering of α and β particles by Matter and the Structure of the Atom, 「物質による α 粒子と β 粒子の散乱と原子の構造」, Philosophical Magazine, Series 6, 21 (1911) pp.669~688. (邦訳: 物理学古典論文叢書9)

ものであり、いわば、トムソンがよく分からぬものとして広く空間に分布させていたものを特定して一点集中させる結果となったのである。従って、トムソンとラザフォードのモデルの方が長岡とラザフォードのそれよりもずっと親近性があると言えるのである。(さらなる詳細は Appendix を参照のこと。)

以上、ラザフォードによる歴史的に極めて重要な実験について述べてきたが、ラザフォードのこの仕事は、発表当初、その革命的な内容にもかかわらず反応らしい反応はほとんどなかった。ラザフォード本人も当初はさして重要なこととは考えていなかったようで、この論文発表の18ヶ月後の1913年に出版された「放射性物質とその放射線⁴⁵⁾」においても原子核という言葉は一切使用されておらず、ただ中心電荷 (central charge) という言葉が使われているだけである。上にも述べたが、ラザフォードの主な (当初の) 関心は、散乱現象の理論化 (理論的解析) であって、原子構造に関しては二次的なものだったのである。また、明らかに、この段階でラザフォードは原子構造については、絶対的な確信を抱いてはいなかったのである。—なお、この中心電荷という言葉からもラザフォードの理解が「原子の核」というイメージではなく、トムソンが抱いたような電荷がより高密度に狭い中心領域に凝集した、といったものであったことが推測できる⁴⁶⁾。

ラザフォードの有核型の原子モデルの重要性が理解されてそれが現実的なモデルとして確定されるのは、まさしくジワジワと徐々に3年をかけてのことであった。まず、ラザフォードの論文を受けて1ヶ月後にドイツの在野の物理学者ブロークが核の電荷量が原子番号と結びつけられるのではないかと示唆を行い⁴⁷⁾、1913年には周期系についてさらに包括的な議論を行った⁴⁸⁾。そして、それをモーズリーが特性X線の研究によって確定させるに至る—すなわち、元素の周期律を確立するに至る⁴⁹⁾。さらに、同じく1913年、ガイ

45) Ernest Rutherford, *Radioactive substances and their radiations*, Cambridge University Press, 1913.

46) E. N. da Costa Andrade, 脚注39)と同じ。

47) A. van den Broek, *The Number of Possible Elements and Mendeleff's "Cubic" Periodic System*. *Nature* 87 (2177), 1911

アントニウス・バン・デン・ブローク (Antonius van den Broek, 1870~1926) は、ドイツの物理学者 (ただし本業は弁護士である)。ライデン大学、ソルボンヌ大学などで法律を学び、ウィーン大学、ベルリン大学などでは経済数学を学んだという異色の (そして異能の) 人物である。

物理学への貢献は、本文にもあるように、モーズリーの周期表への示唆を与えたことで、本業の弁護士業よりもこちらの方で後生に知られるようになった。

48) A. van den Broek, *Die Radioelemente, das periodische System und die Konstitution der Atome*, 「放射性元素, 周期系, および原子の構成」, *Physikalische Zeitschrift*, 14, (1913) PP. 32~41. (邦訳: 物理学古典論文集9)

49) H. G. J. Moseley, *The High-frequency Spectra of the Elements*, 「諸元素の高振動数スペクトル および同II部」, *Philosophical Magazine*, Series 6, 26, (1913) pp.1024~1034; & 27, (1914) pp. 703~713. (邦訳: 物理学古典論文集9) ↗

ガーとマースデンが行った α 粒子の散乱実験⁵⁰⁾のデータがラザフォードの公式と見事なまでの一致を見せるに至って、ラザフォードのモデルは原子モデルとしてほとんど決定的となったのである。いくらか表現を替えてみれば、現実的存在となったのである。ラザフォード本人が、今日、原子の有核型モデルとして知られる原子の形態を明確かつ確定的に述べたのは、こうした一連の研究結果によってそれが間違いなく確実視されはじめた1914年になってからであった⁵¹⁾。

5：困難と古典物理学の限界

上記してきたように原子は中心に原子核があり、その周りを電子が周回しているというモデルに落ち着いた（厳密かつ正確に述べれば落ち着きつつあった、というべきであろうが……）。そして、原子核はその周りを周回するすべての電子の電荷を打ち消すだけの正の電荷を持っている。しかし、相変わらず、いや、それにもかかわらず、根本的で深刻な難問は残されたままであった。本節ではこの難問について具体的に考察し、それが基本的には黒体放射の困難と同じであることを確認することにする。

まず、これら二つのモデルに内在する決定的な難点は、それだけでは原子の大きさが決定できない、ということである。これらのモデルは構造定数として電子の質量とその電荷を有する。しかしながら、これらだけではそもそも長さのディメンションが出てこないのである。これは、何か根本的で重要なファクターが欠落していることを暗示するに十分で

ㄨ ヘンリー・グウィン・ジェフリーズ・モーズリー (Henry Gwyn Jeffreys Moseley, 1887~1915) は、イギリスの物理学者。原子の周期律を完全に科学的に立証したことで知られる。オックスフォード大学で物理学を学び、1910年にマンチェスターのラザフォードの元で研究をスタートさせている。1914年にはオックスフォードに戻り、研究に従事していたが、1915年、第一次大戦に参戦しガリポリの戦いで戦死した。生きていれば、間違いなくノーベル賞受賞者となった人物であったと言われる。

モーズリーのこの実験は、原子の周期律についての決定的な研究となった。当該の論文には、二つの表とともに、それぞれ原子番号が付された元素が掲載してある。この論文の注目すべき点は、表の所々で番号が飛んでいることで（計4つが飛んでいる）、この空位が後に理論通りに発見されたことである。（発見の順番は、72番のハフニウム、次が75番のレニウム、次に43番のテクネシウム、最後に47番のプロメシウムであった。）

モーズリーの結果は、ラザフォードの原子核の電荷が、元素の化学的特性を説明するものだけというものであり、すなわち、有核原子モデルの揺るぎない確証となったのであった。

なお、周期表については、次々稿において再度詳述する予定である。

⁵⁰⁾ H. Geiger & E. Marsden, The Laws of Deflexion of α Particles through Large Angles, Philosophical Magazine. Series 6, 25, (1913), pp.604~623

⁵¹⁾ Ernest Rutherford, The Structure of the atom, 「原子の構造」, Philosophical Magazine, Series 6, 27, (1914), pp.288~198, (邦訳：物理学古典論文集9)

あり、当時の物理学者の多くは、このファクターがおそらく作用量子、つまりはプランク定数であろうと漠然と感じていたのもあった⁶²⁾。ここまでの段階で、プランク定数はどこにも繋がらず、いわば孤立しており、いずれ科学上の有機的繋がりの中へと組み込まれるべきものであると考えられていたのである。

もっとも、それ以上に、明らかな欠陥はさらに直接的な形で顕示されていた。いかに、原子核が発見され、原子モデルが今日的な形態になったとしてもその理論的基盤はこの時代にあっては古典物理学であり、必然的に壁にぶち当たらざるを得ない運命にあったのである。ラザフォードは、1911年の段階で原子の安定性については何も述べていない。それは、彼が、そうした試みが根本的な困難に直面するとそもそも十二分に理解していたからである。そしてまたその困難は、ラザフォードと長岡のモデルだけではなく、トムソンのモデルにもまったく同様の困難なのである⁶³⁾。なお、ラザフォードが安定性について述べるのは、1914年の論文⁶⁴⁾の最後でボーアの1913年の仕事に言及した箇所でのことであり、この詳細は次稿以降に譲らざるを得ない。

とにかく、これらのモデルの核心は、電子が回転運動をしていることにある。それは、光の放射のためには是非とも必要な要件ではあったが、この回転運動の為に原子が不安定化してしまうことを避けることがまったくできない。これが何をどうしても突き当たる困難である。—前記したように、トムソンは、この不安定性を放射の原因としたほどであった。

電磁気学によると、電子のような荷電粒子は加速度運動によって放射を行う。周知のごとく、円運動は加速度運動の一種である。その運動の結果として電子は光の放射を行い、放射によってエネルギーを喪失してゆく。そしてこの放射は連続的に行われるために放射される光が一種類、あるいは二種類のみであるようなスペクトル線を描くことは理論的に不可能である。

今、中心力に引きつけられて半径 r の軌道を円運動している荷電粒子があったとしよう。すると、この粒子は、円運動の故に（加速度運動の故に）光を放射する。するとエネル

⁶²⁾ こうした試み、すなわち、モデルにプランク定数を組み込む試みの一つが本論の Appendix で挙げるハースのものである（Appendix 1 を参照のこと）。

⁶³⁾ トムソンのモデルには一定の安定性はあるが、それでもなお、トムソンの言葉を用いれば、放射によって「大変ゆっくりと」エネルギーが減少してゆくのである（本論の第2節(1)を参照のこと）。

⁶⁴⁾ E. Rutherford, 脚注⁴⁸⁾と同じ。——ここでラザフォードは「Bohr は原子の「核」理論にもとづいて原子を構成していくことの困難に注目し、外部電子の安定な配置は古典力学では導くことができないことを示している」と述べている。

ギーを失い、次の瞬間には失ったエネルギーに相当するだけ円軌道の半径を少し小さくせざるを得ないだろう。つまり、次の瞬間に、この粒子は半径 r よりも少しだけ小さい半径 r' の円軌道を運動することになる。がしかし、これも加速度運動なのであるから、粒子はまたしてもエネルギー \mathcal{E}' を失いさらに半径を小さくせざるを得ない。……こうしたことが連続的に生じて、この粒子は結果的に原子核に落ち込んでしまい最終的にはエネルギーを喪失して光を放射しなくなるはずである。以上の過程は連続的に生じる。理論的には、電

子の速度を \mathbf{v} 、 c を光速、 e を電荷とすると、単位時間毎に $S = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} |\dot{\mathbf{v}}|^2$ のエネルギーを失

うことになる。すなわち、連続的にこうしたことが生じるということは、粒子がエネルギーを連続的に失ってゆくことを意味しており、結局は、クラッチが生じて電子が原子核に落ち込んでしまう。またこれは、原子が断続的に連続的な波長を持つ光を放射し続けることを意味する。すると、観測されるスペクトルは連続スペクトルとなるはずであり、実際に観測されるスペクトルが線となること（放射される光が数種類しかないということ）とは著しく異なった結果を与えることとなる。

連続的なスペクトル（帯状のスペクトル）ではなく線スペクトルを得るためには、電子が同一の半径上を同一の加速度で運動し続けなくてはならない。それには、放射して喪失したはずのエネルギーがどこかから常に、半永久的に補給されていなくてはならない。しかし、こんなことが可能ならば永久機関^㉞が可能だということになってしまう。かくして、いかにラザフォードのモデルであろうとも、根本的な困難に直面せざるを得ないのである。また、繰り返しになるが、これはラザフォードのモデルであろうともトムソンでも長岡でも原理的にはまったく同じ困難である。

㉞ 物理学を専門的に学んでいない読者の便宜のために解説を付しておく。

熱力学が教えるところでは、あらゆるサイクル（エンジンのことで物理的な仕事をする機関のことを指す）は物理学的に効率の上限を持っていて、これを越えた高効率のサイクルを作ることはできない。

今、高熱源 T_h から低熱源 T_l へと熱を移すことで外部に仕事をするサイクルがあったとする（ここで T は温度である）。この場合、仕事の最高効率は $\eta = \frac{T_h - T_l}{T_h}$ で与えられる。つまり効率は

必ず 1 以下である。効率が 1 であれば投入したエネルギーをすべて仕事に変換することができて一切のロスがないということになるが、こうしたサイクルは物理的に不可能なのだ。ここで記した永久機関とは、仕事の効率が 1 以上となるサイクルであり、エネルギーの供給なしで永久に仕事をするサイクルのことである。あるいは仕事をすることでエネルギーを生み出すサイクル（このサイクルの場合、仕事効率は 1 より大きい）のことである。

黒体放射の困難は、結局のところ、黒体が放射する光が連続的な波長（連続スペクトル）で放射されるという古典的な理論的前提によるものである。これらの連続波長を加算すると（数学的には積分すると）トータルエネルギーが無限大となってしまう、著しく事実と反する結果を与えたのであった。これは、レイリー＝ジーンズの法則が破綻する形で非常に象徴的に古典物理学の限界を顕現していた。また、エネルギー等分配則も黒体放射と同様に成り立たない。これが成り立っているのであれば、一つのスペクトルに RT のエネルギーが配分されるはずだから、スペクトル線が n 本あれば、トータルのエネルギーは（古典物理学的には）、 nRT とならなくてはならない。しかし、実際には、例えば水銀の場合では $\frac{3RT}{2}$ であり、古典物理学の予測とはまったく合致しないのであった。

黒体放射の問題の場合、こうした諸々の困難を理論的に回避して正しい結果を導いたのは、放射されている光が量子化された飛び飛びの値しか取らない、というプランクの仮説である。原子モデルが直面した困難も、結局はこの困難と同質のものである。黒体放射の場合は、黒体というマクロ物質が放射する光であるが、原子モデルの場合ではミクロの原子が放射する光、という違いがあるにすぎない。いや、マクロ物質であれ、ミクロの原子から構成されているのであってみれば結局のところ基本的に同じ困難である。かくして、原子に量子論を適応する、—いや、もはや適応せざるを得ない下地ができあがってきたのである。

もちろん、こうした本節での記述はいくらか後智慧的であり結果論的ではある。しかしながら、論理的には（あるいは歴史を振り返って精査してみると）こうして黒体放射の問題を解く過程で生み出された量子が必然的にミクロの原子へと適応されるに至ったと解釈可能であることは確かなことである。

次稿以降は、この量子がミクロへと適応されてゆく過程、すなわち、量子論が理論として明確に形を形成してゆき、前期量子論へと結実してゆく過程を見てゆくこととする。前記した表現を用いれば、それは、量子が原子論に適応されることで科学的な認識の網の目の中に取り込まれます現実と化してゆくことでもある。

— 〈Appendix〉 —

以下、本論に関連する事項を Appendix として挙げておく。ただし、第4節に詳述するマイヤーについては、本論で取り上げるべきか否かのボーダーラインであるが、ストーリーの煩雑化を避けるためにあえて本論から外したことを最初に付言しておく。

1：ラザフォード散乱

ここに、ラザフォード散乱⁵⁶（クーロン力による散乱）の簡単な解説を付けておく（物理学を学習する学部生程度の読者の便宜のためにも……）。

ラザフォード散乱は、力学的には中心力場の中を運動する物体の挙動と基本的に同じである。具体的には、万有引力中では、距離の逆二乗に比例する引力を受けて物体が運動するが、ラザフォードの計算は引力を斥力に変えただけである。

この実験で調べることは、散乱されてくる粒子が単位時間あたりに一定の角度の間に入る個数を調べることである。つまり、アルファ粒子が入射ビームとして、単位時間・単位面積当たり n 個の割合で入射された場合、散乱角度 $\theta + d\theta$ に入る個数を測定する。

以下、ラザフォードの原論文に掲載されていた図（図, Ap-1）と共に、より現代的な計算に直してリライトしておく。

まずはクーロン力場を運動する質量 m の粒子の一般論から。

力は、クーロン力で $f(r) = \frac{C}{r^2}$ ($C > 0$) である。これを、 $C = mk$ ($k > 0$) とすると、運動方程式は、

$$\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = \frac{k}{r^2}$$

であり、面積速度一定なので、 $r^2\dot{\varphi} = h$ とすると、 $\frac{du}{d\varphi} = \frac{dr}{d\varphi}\dot{\varphi} = \frac{dr}{d\varphi}\frac{h}{r^2}$ である。ここで、 $u = \frac{1}{r}$

とすると、 $\frac{du}{d\varphi} = \frac{d}{d\varphi}\left(\frac{1}{r}\right) = -\frac{1}{r^2}\frac{dr}{d\varphi}$ なので、 $\frac{dr}{dt} = -h\frac{du}{d\varphi}$ となる。つまり、 $\ddot{r} = -\frac{h^2}{r^2}\frac{d^2u}{d\varphi^2}$ となっ

て運動方程式は、

⁵⁶ E. Rutherford, 脚注⁴⁴参照のこと。

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u = -\frac{k}{h^2}$$

となる。したがって解は、

$$u = A \cos(\varphi - \varphi_0) - \frac{k}{h^2}$$

つまり、

$$r = \frac{l}{\varepsilon \cos \varphi - 1}$$

と双曲線となる。ただし、 $l = \frac{h^2}{k}$ 、エネルギーを E として $\varepsilon^2 = 1 + \frac{2h^2E}{mk^2} (> 1)$ である。

ここで、無限遠 $r \rightarrow \infty$ での速度を v_0 とすると、 $E = \frac{1}{2}mv_0^2$ 、 $h = pv_0$ なので、

$$\tan \Phi = \cot \frac{\theta}{2} = \frac{v_0^2 p}{k}$$

なる関係がある。ただし、 p は衝突パラメータである。——衝突パラメータとは、入射粒子が原子核によって軌道を曲げられないと仮定した場合でのその直線軌道と原子核の距離である（以下のラザフォードの原論文に掲載されていた図では、粒子の軌跡 PAP' を無限遠まで伸ばしてみた場合の PN との距離である。図中に手書きされている p でない。ここでは、現代の慣習に沿って衝突パラメータを p とした）。

次に、散乱断面積（ビームが $\theta + d\theta$ に散乱されてくる比） $d\Omega = \frac{dn}{n}$ については、衝突

パラメータが $p + dp$ の間にある粒子が角度 $\theta + d\theta$ に散乱されてくるとして、

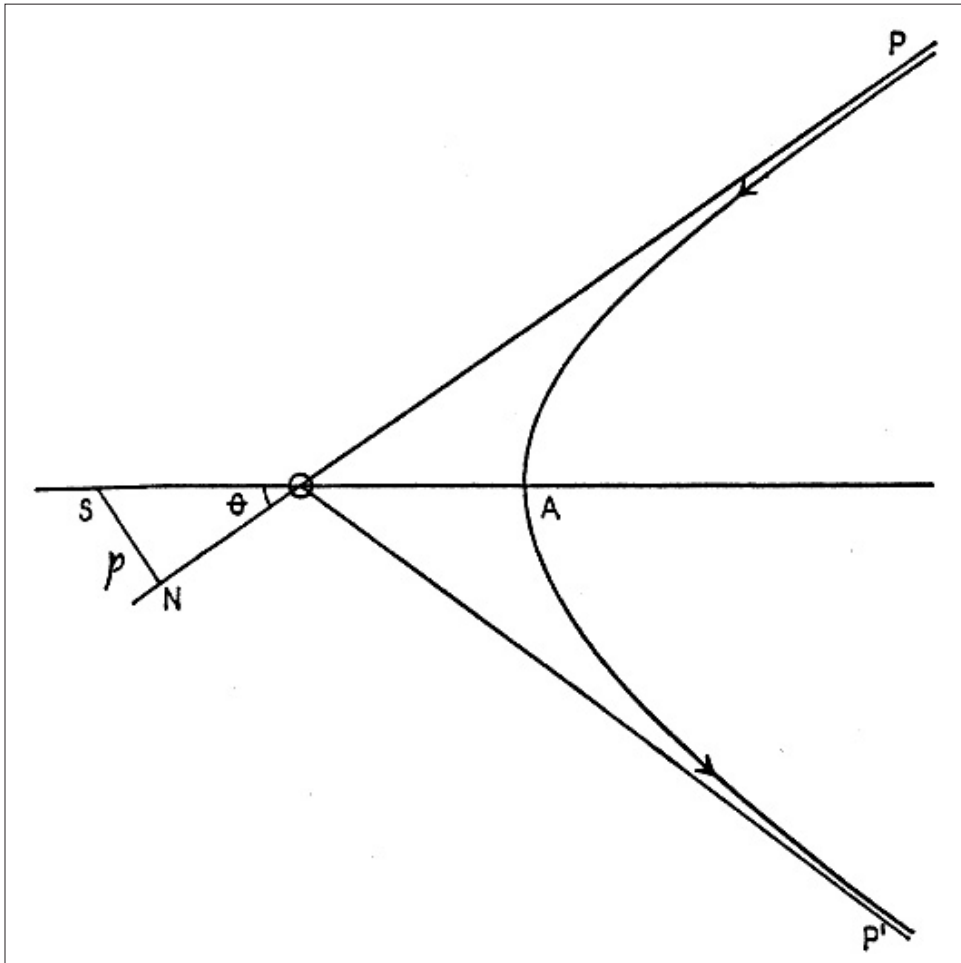
（微少領域の面積） \times （単位時間・単位面積あたりの個数）

がその個数となるはずなので、 $dn = 2\pi p dp \cdot n$ である。つまり、散乱断面積は、

$$d\Omega = \frac{dn}{n} = 2\pi p dp = 2\pi p \left| \frac{dp}{d\theta} \right| d\theta$$

となる。

なお、以下のラザフォードの原論文に掲載されている図の場合、 θ は PN と SA の鋭角である（図中にも記載してあるが、見えにくいのであえて……）。



〈図, Ap-1: ラザフォードの原論文に掲載されていた図〉

ちなみにこれが散乱断面積と呼ばれるのは、この比が文字通り面積のディメンションを持つからである（当たり前のことだが、学部生程度の読者の便宜のため云々、と書いた手前、一応、指摘しておく）。

2：長岡—ショット論争の骨子

長岡のモデルに対してショットが行った反論は、負電荷からなる電子によるリングの安

定性についてであった。ショットは、同様の問題をすでに5年前に研究しており、この系が不安定となってしまうために発表する価値がないと考えた、と述べている。実際、中心に重い正電荷の核があって、その周りを電子のリングが回転しているモデルをまともに計算すると系は非常に不安定となってしまう。

これに対する長岡の反論は、以下のようなものである。長岡は、

私の研究してきた力学系は、電氣的に中性なものではなく、中心の正電荷は、問題とする一番外側のリングの上の負電荷の総計に比べて非常に大きいものである。

と述べている。すなわち、長岡のモデルは、系全体を電氣的な中性に保つために必要な電子すべてについてのモデルではなく、中心にある正電荷の核を取り囲んでいる幾つかのリングのうち一番外側のリングについてだけを考えたものなのである。長岡はその他の電子についてはまったく言及していない。これについてさらに長岡は、

私の研究の主要な目的は、線および帯スペクトルの規則性を示すような小振動を論ずることであった。そのためには一つの仮説原子 (hypothetical atom) を考える必要があった。

と述べている。

結局、この論争の核心は、本文中でも述べたように、ショットがより原子構造論的な観点から批判しているのに対して、長岡はスペクトルなどの現象的な性質を定性的に説明するモデルを提示したにすぎない、という点にある。より噛み砕いて述べれば、長岡が「斯く斯く然々のように仮定するとスペクトルなどの現象が説明できるのではないか？」と述べているにもかかわらず、読み手が(ショットが)、「斯く斯く然々の原子構造はありえない」と言っているのである。あるいはもう少し補って述べれば、ショットは、そのようなモデルを提示するのであれば、少なくとも構造の安定性を理論的に説明しなくてはならないだろう、ということである。しかし、長岡にしてみれば、「その安定性についてはまだ分からないが、少なくともこのようなモデルを仮定(あるいは設定)すればスペクトルは説明できる可能性があるものであり、安定性については今後の展開を待たざるを得ない」と答えるであろう。すなわち、観点が若干、しかしながら非常に重要な点でずれているのである。長岡がこの点の誤解を解こうとしているのは上記に引用した箇所によく表れている。

しかしながら、1904年に長岡とトムソンのモデルが提示された時、長岡のモデルは懐疑的に見られたと言われている。ショットの反論は、こうした懐疑の核心を突くものでもあり、それなりに理があることも確かである。確かに、そのように仮定するとスペクトルを上手く説明できるかもしれないが、そもそもそんな原子構造はありえないではないか（だから意味がない）、と言われればそれまでであろう。

ところが、懐疑的に見られていたモデルがわずか7年後の1911年には非常に真実に近い形態であることが判明する。こうして、最終のおよび結果的に、古典物理学の範疇において行われたこの論争は、量子論という新しい理論によって止揚されることになったのであった。

人間の自然認識の変化の一つの過程として非常に興味深い一例と言えらるう。

3：武谷派と広重派の論争

長岡のモデルとラザフォードのモデルとの関連をどう見るかについて、1960年代前半から70年前後にかけて日本国内で深刻な論争があった。一方（広重派：主に広重徹と八木江里の科学史家）はラザフォードモデルの独自性を主張し、一方（武谷派：武谷三男と長崎正幸の物理学者）は長岡のプライオリティーを徹底して擁護した。

広重派は、様々な資料を持ち出してラザフォードモデルが長岡モデルをヒントとして為されたのではない、ということを実証しようと試みている。武谷派は人間が新しい認識を為すための一步を踏み出すことがいかに大変か、ということ述べてこうした広重派のやり方を「挙げ足取り」として痛切に批判している。

筆者は、少なくともこの領域では広重派のように膨大な資料をあさったわけではないが、どうもラザフォードのモデルは長岡モデルを元にしておりと言いはし難いという印象を持っている。ラザフォードのモデルは、トムソンのモデルにおいては原子全体に広がっていた正電荷が、様々な認識論上の経緯を経て必然的に中心部分に凝縮してきたかの印象が非常に強いのである。ただし、この印象を文献上で立証することはほとんど不可能であろう。（こんなことまではご丁寧にどこかに書いてなどいないし、そんなことをメモすることもないだろう。）しかし、少なくとも、ラザフォードは、最初に長岡のモデルを念頭においていたのではないだろうということは、このあたりの歴史をあさってみると分かってくる（実証を重んじる科学史家として広重派が躍起になったのはこの一点にあると想像される）⁶⁷。

⁶⁷ こうしたものは最終的には印象論にしかなり得ない。実証主義的に論証せんとしていかに資料を集めようとも全体的な流れから醸し出される「何物か」を根拠づけんとする為である場合が多

だが、どのように繕おうとも結果的に原子は長岡の仮定したような原子核を持っていた、というのが事実である（この点は、ラザフォードも1911年の論文で長岡モデルについて触れている通りである）。この点は大いに強調されるべきであり、プライオリティーは確実に長岡にある。これをラザフォードモデルと称することはできない。あるいは長岡＝ラザフォードモデル、と称するのがギリギリであろう。

結局、この論争は、科学史家と物理学者との論点のズレなのである。科学史家は、上記したような印象（おそらく科学史的には事実である）をなんとか資料的に（強引にでも）実証しようとする。しかし、物理学者的には（科学者としては）、それでもラザフォードのモデルは結局のところ長岡のモデルと同じ形態なのだからラザフォードがこれに関して二番手だ、というのである（そしてそれはまったくもって正しい！）。

いずれもその通りなのだが、この論争の詳細を四十年後に見た筆者にしてみれば、これがほとんど左翼同士の内ゲバにしか見えなかったことを正直に言わざるを得ない。特に、武谷派の口汚いののしりの言動は60年代から70年代によく見られた左翼の言動が非常に濃厚であって、まったくもって読むに堪えない。そして広重派のどことなく西洋かぶれした、スノッパ言動とやり口にも少なくとも筆者はあまり気分がよろしくなかったことを記しておこう。

いずれにせよ、上記したように、ラザフォードは長岡モデルとのつながりの中で自身のモデルを提示したのではなく、結果的に長岡モデルと同じものとなった、というのがやはり真相である。しかし、モデルのプライオリティーは間違いなく長岡にある。分かり易い基準を述べれば、このモデルでノーベル賞を授与するならば（そんなことはあり得ないのだが……）、長岡の単独受賞か長岡とラザフォードの二人同時受賞である。ラザフォードだけの単独受賞はありえない、という程度のことである。要するに、高々この程度の違いである、とあえて述べておきたい⁶⁸。

ゝいからである（いや、ほとんどがそうであろう）。もちろん何も知識がない場合はこうはならないが、そうであったとしても調べてゆくにつれてある像が焦点を結んでくる。そして一度そうした像を結んでしまえばどのようにしてもそこから自由になることは不可能である（仮に最初の印象や像を修正したとしても、それはある焦点から別の焦点へとずらした、ということにすぎない）。かくして、どれだけ資料を集めようとも決定打を見いだすことは非常に困難になる（仮に本人の「アイデアを踏襲した」といった類のメモ書きが発見されたとしても「あれは記憶違いだった」といったさらに後のメモ書きなどが出てこないとも限らないし、ここには現れていない別人からの影響というものを本人が受けている、ということが推察されるかもしれない、と……）。つまり究極的にはキリがないのであって、これこそが実証主義の限界そのものであり、結局のところ、どうしても最終的には主観的にならざるを得ないのである。

一部に、科学史は偽史の類いである、と言われるが、結局のところ歴史（歴史学）とは、現在の状況をいかに過去からの連続性として認識するか、というストーリーの取り方なのだということは強調しておいてしかるべきであろうと思われる。

⁶⁸ なお、原子モデルの研究でのノーベル賞は、正しいモデルを提示したボーアに対してだけ与え

この論争を筆者のように「高々この程度の違い」と言い切ってしまうことは、欧米の学会がアジア人の業績にとりわけ厳しい（かつて厳しかった）ということに怒り心頭の人には許せないだろうが、それこそが欧米的な価値観に絡め取られている証拠であろう。つまるところ、この論争も欧米的な価値基準の中で喧々囂々とやり合っていたにすぎないのではないか？ もちろんそうした論争がまったくの無意味だ、とまでは言わないが、いわば借り物の価値観の中で正邪を争っているかのごときであって、失望を禁じ得ない。

もっとも、筆者にそれに替わる価値を提示することができるか、と問われれば筆者は確かに现阶段では明確な答えを持ち合わせていない。しかし、筆者は既存の価値基準に極めて懐疑的である、ということだけは記しておきたいと思う。

4：マイヤーの浮動磁石とトムソンの電子配置

本文中でも述べた通り、マイヤーは水に浮かべた磁石（コルクに射した磁化した針）に上から中心磁場をかけて、磁石の配置が幾何学的になることを見出した。（この実験を実際に行うことはなかなか難しいのだが、教育的な意義は高いと思われる。なお、筆者も行って見たが、バランスをとることがすごく難しい！）⁶⁹

マイヤーが示したこの配置は以下である。

ゝられていることは、強調しておいてしかるべきであろう。——もちろんノーベル賞とはそういうものであるのだが……。しかし、もし、有核型であることを理由にノーベル賞ではなくとも、何らかの報奨を与えたとなると、後々まで喧々囂々たる非難と論議がわき起こった可能性がある。ラザフォードと長岡に与えたとしても、そもそも有核型の原子モデルを唱えたレーナルトはどうなるのか？ ベランは？ ……となって、なにやらしっくりこない。しかも全員が（徐々に真相に近づいているが）正解ではないとなれば、そもそもプライオリティーを云々するような類いのものでもないではないか、と思うのだがいかがであろうか？

いずれにせよ、おそらくは、この論争が再燃することはほとんどないであろうと思われる。これは、戦前の時代を生きた二世前前の学者達が繰り広げた日本のプライドとコンプレックスが複雑に、そして幾重にも重なった結果の論争であったように思われるのである。なお、ラザフォードの母国ニュージーランドや第二の祖国である英国では、ついでこうした論争は生じていないということを付記しておきたい。

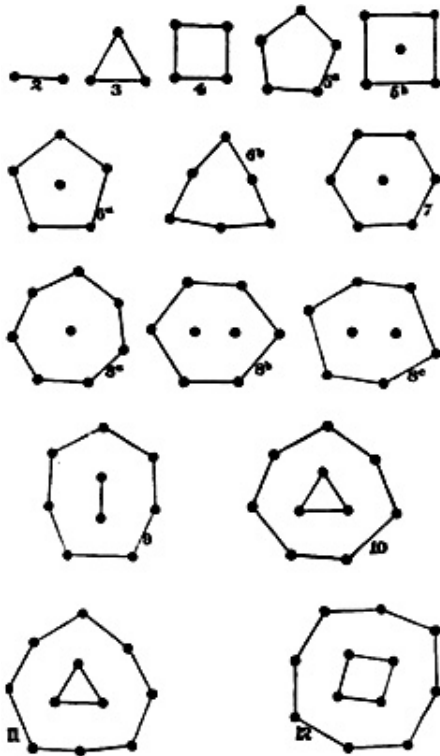
⁶⁹ 関係するマイヤーのオリジナル論文は以下の3点である。

(1) Experiments with Floating and Suspended Magnets, Illustrating the Action of Atomic Forces, the Molecular Structure of Matter, Allotropy, Isomerism, and the Kinetic Theory of Gases, *Scientific American*, supplement 5 [no. 129] (June 22, 1878) pp.2045~2047.

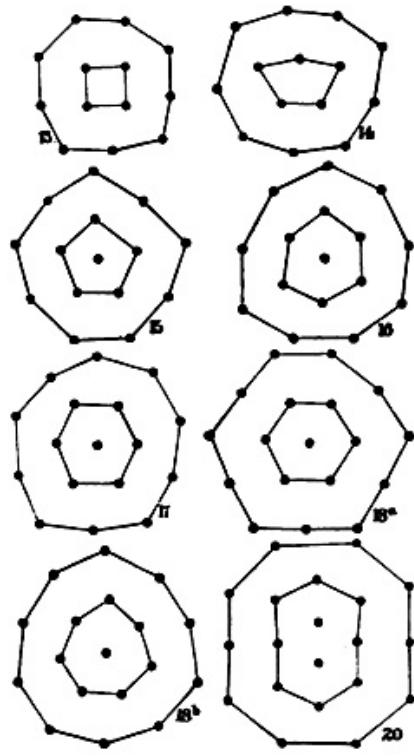
(2) A Note on Experiments with Floating Magnets; Showing the Motions and Arrangements in a Plane of Freely Moving Bodies, Acted on by Forces of Attraction and Repulsion; and Serving in the Study of the Directions and Motions of the Lines of Magnetic Force, *American Journal of Science*, 3rd ser., 15 (1878) pp.276~277, および同書 pp.477~478.

また、図は以下のものを用いた。

(3) On the Morphological Laws of the Configurations Formed by Magnets Floating Vertically and Subjected to the Attraction of a Superposed Magnet; with Notes on Some of the Phenomena in Molecular Structure Which These Experiments may Serve to Explain and Illustrate, *American Journal of Science*, 16 (1878) pp.247~256



〈図, Ap-2: 磁針が1~12の場合〉



〈図, Ap-3: 磁針が13~20の場合〉

これに対してトムソンは正電荷球の中に次のように電子を配置すると安定することを見出している。

まず、リング上に3つまでの電子ならばリングに垂直な方向の振動数が整数であれば安定する（言い替えば回転する必要はない）。ところが4つ以上になるとリングを回転させなくては安定しない。6つの場合はいかなる場合でも安定はせず、1つを中心に置くことで安定する。7つと8つの場合も同様で、それぞれ中心に2つと3つの電子を配置することで安定する。9つの場合は中心に2つ置くことで安定する。

もちろん、この配置はマイヤーのそれと同じではない。しかし明らかに、一見してその発想の疎通性を見出すことができる。これも人間の自然認識の発展変化の非常に興味深い一例と言えよう。