生駒経済論叢　第13巻第2号　2015年11月

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！――

森　　川　　　　　　亮

概要　十九世紀後半から二十世紀初頭にかけて続々と発見されたミクロ粒子は，量子論の誕生にとって極めて重要な契機であった。量子は，黒体放射現象の中に懐胎され，ミクロの現象へと適応されることで量子論として理論化されることになるからである。

本論は，まず，陰極線の研究から説き起こし，それが種々の放射線を発見することへと繋がったことを概観する。そして，こうした研究が「崩壊する原子」という概念を出現させるに至り，原子概念をも変革していった過程を示す。すなわちこれは，現代的な原子概念の誕生の歴史でもある。つまり，広く述べれば，本論は，現代物理科学が抱く物質観とそれに基づく世界観の原点の探求と考察を提示するものである。

キーワード　陰極線，放射線，X線，電子，放射能，原子核崩壊（放射性崩壊）
原稿受理日　2015年9月15日

Abstract　Microscopic particles were discovered in the period from the ending times of the 19th century to the beginning times of the 20th century are the very important moments for the birth of the quantum theory.　The notion of quantum was born in black-body radiation and applied to the microscopic phenomena.　Since, the notion of the quantum had been polished historically during the process of the applications to microscopic particles phenomena.

We will consider the research process of the cathode rays first.　This lead to the discoveries of the various radio rays.　Furthermore, these researches lead to the revolutionary notion of the self-splitting atom. This is the history of the birth of the notion of the modern atom.　This article shows this thought and the historical research process of the origin of the modern physics material view and the basis for the world-picture.

Key words　Cathode ray, Radio-ray, X-ray, Electron, Radioactivity, Radioactive decay

—は　じ　め　に—

黒体放射（空洞放射）理論の完成と光量子の出現は，いわば量子論の直接的なオリジンである。ところが，一方で，この理論の発展にはもう一つの重要な道筋がある。それが，電子やα線，β線，そしてＸ線といった，それまで未知であった数々の放射線（放射粒子）の発見である。これらは，当初，直接的に量子概念の出現に寄与したのではない。そういう意味では確かに傍流である。しかしながら，量子の概念を拡大させ具体的な現象へと適応してゆく中で，これらの現象は歴史的に極めて重要な意義を持つ。

十九世紀の終焉にあたって相次いで発見されたこれらの現象は，いずれもが古典物理学では説明不可能な現象であり，量子力学的にしか説明のつかないものであった。また，これらの現象は，ミクロ領域への直接的な入り口でもあり，現代の素粒子物理学への直接的な入り口でもある。

量子論は，大雑把に述べて，黒体放射（空洞放射）の現象の中に懐胎され，それが原子構造などのミクロの現象へと適応されることで物理学理論としての洗練を遂げたのである。先取りして述べれば，これらの謎や現象が量子という仮説に出会い，やがて量子力学誕生の契機となってゆくのである。そのような理論の特徴を考慮すると，この時期，十九世紀後半から二十世紀初頭（特に世紀の変わり目の数年間）に相次いだ未知の放射線の発見等々を一通り概観しておくことは，量子論の歴史にとってはまことにもって必須なことなのである。

１：陰極線研究小史

電気と称されるものに人類が始めて遭遇したのは，おそらくは摩擦による静電気の現象であろう（いや，間違いなくそうであろう）[1]。雷も現在の知識では電気の現象なのだが，これが電気現象であることが判明するのは，フランクリンと彼の息子が行ったとされる凧による実験（1752）[2] によってであった。それからようやく1800年になって人類は安定的に

⑴　プラトンの対話編「ティマイオス」の中に記載されている琥珀の引力が最初のものである。その後，石炭を圧縮して作られた「黒玉」をこすって静電気を起こすものや，樹脂とガラスをこすり合わせる場合など様々な事例が知られていた。なお，現代でもまだどの物質とどの物質をこすり合わせるとどちらが正に帯電し，どちらが負に帯電するのか，ということについては経験的に分かっているだけである。

⑵　ベンジャミン・フランクリン（Benjamin Franklin, 1706〜1790）はアメリカのボストン生まれ↗

得られる電源であるボルタ電池⑶ を得るに至ったのである。しかしながら，この段階ではまだ電気は現象にすぎず，それが何物であるのか，つまり，その現象の背後にどのような機構，あるいは現実的な（あえて述べれば実体的と言いうるであろう）存在物があるのか，ということについてはまったく謎のままであった。

電気（電気現象）についての知見は，ここまでゆっくりと進展して経験知の蓄積を続けてきた。しかし，電池の発明からわずか97年で（1897），電気の担い手としての電子が発見されることになる。量子は，ドイツの急速な，しかしながらいくらか遅れて参入した産業化の中にその出自を有しているが，電気については，もっと世界的である。ヨーロッパ全体を捲きこんだ（最初は西ヨーロッパに，そしてやがてアメリカに至る）急速な産業化が電気の実用化にとって決定的に重要な契機となったのであった。電池の発明からわずか8年後にアーク放電⑷ が発見され，それまでのガス灯⑸ に代わりアーク灯が実用化されるに至る。しかしそのアーク灯もエジソン⑹ の白熱電球の発明（1879）に取って代わられる。

↘の実業家，科学者，政治家，外交官など多彩な顔を持つ人物である。

10歳で正規の学校教育を終えており，基本的に独学独歩の人であった。フィラデルフィアにアメリカ初の図書館を設立し（1731年），ペンシルベニア大学の創設者（1751年）としても知られる。現在，アメリカの100ドル紙幣の肖像画となっており，アメリカ建国の父の一人と目されている。1790年，84歳で死去した彼の葬儀は国葬となった。

1752年，フランクリンは息子と共に，金属棒を取り付けた凧を雨雲の中へ上げて落雷させ，その電荷をライデン瓶へ移す実験に成功した。これによって雷が地上の電気現象と同じであることが示された。また，避雷針の発明者としても知られる。

ところで，フランクリンの有名な凧の実験であるが，最近，この実験がそもそも行われた証拠がないという事実が指摘されている。当初，この実験が報告されたのは，フランクリンが出版していた「ペンシルベニア・ガゼット」という新聞においてであったが，まず，この中でフランクリンは自分がこれを行ったとは一言も書いていないのである。また，凧の実験についてもあまりにも曖昧な記述ばかりであり，これをもとにして追試などできそうもない。これに対して，明確にこの実験を行ったのはフランスのジャック・ド・ロマである（1753）—（M. R. P.,“Lettre au P. R. J. sur une Experience Electrique”, 18 October 1753, in Memoires pour l'Histoire des Sciences et des Beaux Arts（Paris: Briasson, 1753), 2969～76; M de Romas,“Mémoire”, 393～407)。—アルベルト・A・マルティネス，「科学神話の虚実 ニュートンのりんご，アインシュタインの神」，青土社（2015)，159～169頁。

⑶ 1800年，ボルタ（アレッサンドロ・ジュゼッペ・アントニオ・アナスタージオ・ボルタ, Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, 1745～1827, はイタリアの自然哲学者，物理学者，ボルタ電池の発明で知られる）は，ガルバーニ電池を改良して起電力 1.1V の電解溶液を用いた電池を発明した。

⑷ 1808年，イギリスの化学者ハンフリー・デービー（Sir Humphry Davy 1st Baronet, 1778～1829）によって発見された。アーク放電とは，陰極と陽極の間がイオン化されたプラズマから成る放電のこと（もちろん，この当時にはプラズマなどという概念はない）。デービーは，200個ものボルタ電池を用いてこの現象を生ぜしめた。なお，ロシアでは，1802年にペドロフという物理学者がこの現象を得ていたという（筆者は，この方面には詳しくないので伝聞だけを記載しておく）。

デービーは，正規の大学教育を受けておらず，科学者に直接師事することで自然科学の知識と実験方法を習得していった人物である。1819年にはサーの称号を得て，1820年には王立協会の会長職に就任した。1813年，塩化窒素の実験中に目を負傷し，視力の低下を招き，そのために助手として雇ったのがファラディー（以下の脚注⒁を参照のこと）である。

⑸ 1792年，イギリス人（スコットランド人），ウィリアム・マードック（William Murdoch, 1754～1839）によって発明された。

⑹ トーマス・アルバ・エジソン（Thomas Alva Edison, 1847～1931）はオハイオ州ミラン生まれ↗

さらにまた，エジソンの白熱電球はそのまま残ったが，エジソンが開発し普及に努めた直流電流は，科学技術の伝説的巨人ニコラ・テスラ⑺ の発明した交流電流によってただちに取って代わられることになるのであった⑻。かくして，電気による諸々の現象は，単なる現象であることから一気に，まさに目まぐるしいまでの近代化によって長足の進歩を遂げることで実用化されてゆくのである。あたかも，機が熟したかのごとくに電気は（そして広義の電気現象は），現代科学の奔流のごとく都市という都市を，そして闇から闇を光で満たし，さらには，あらゆる作業を電化せしめ，文字通り一気に人類の生活を一変させて

↘のアメリカの発明家・実業家。白熱電球，蓄音機，活動写真，などの発明で知られる，文字通り立志伝中の人物である。

本論に特に関連する項目としては，テスラとの電流戦争が挙げられる（以下の脚注⑻を参照のこと）。

⑺　ニコラ・テスラ（Nikola Tesla, 1856～1943）は現在のクロアチア出身の発明家・電気技術者・科学者。主にアメリカで活躍した。グラーツのポリテクニーク，プラハ大学などで数学，物理学などを学ぶ。ただし，公式にはグラーツポリテクニーク中退である（プラハ大学では，1879年の夏期聴講生として学んだのみである（新戸雅章,「発明超人ニコラ・テスラ」，ちくま文庫（1997），91頁）。その後，最初にブダペストの電話局（エジソンの技術供与による），次にパリのコンチネンタル・エジソン社を経てニューヨークのエジソン社本社へ勤務し，エジソンと邂逅する（後に訣別）。

交流電源によるナイアガラ瀑布発電所の開発，無線電信（マルコーニの発明とされているが，テスラによる特許の方が早かったのは事実である），オートマトン（自動人形＝ロボット），空中放電（いわゆるテスラコイルの研究），テスラタービン，世界システム，殺人光線……，などなど，様々な偉業と伝説に包まれた人物であり，その全貌は単純で単眼的な視点では見えてこない（時にオカルト的なベールとオーラに包まれてすらいる）。

幼少の頃より神童と称されたが，少年期から青年期にかけて様々な精神的疾患，身体的疾患に見舞われたことでも知られる。伝えられている事実だけを拾ってゆくと，一部で統合失調症的であり，一部でてんかん発作のようにも思われ，判然としない。また，極度の潔癖症であり，スコトフェリアであった（以下の脚注⑼を参照のこと）。しかしながら，非社交的な人物ではなく，ニューヨーク社交界の貴公子であり，当代きってのエンターティナーであった。

テスラの精神病理学的な症状については，「テスラ自伝―わが発明と生涯―（新戸雅章 訳），テスラ研究所（2009，第二版）」，159頁」によると，潔癖症，強迫性障害，丸い物へのコンプレックス，女性のアクセサリーに対する恐怖症，女性の髪に触れられない，樟脳の匂いに対する過敏症，視覚と臭覚のように二つ以上の感覚が錯綜する共感覚，独語癖，等々であり，生涯に何度か（特に若い時期に），幻覚や幻聴，幻臭などを含む強烈な幻覚にとらわれる時期を体験している。

晩年は，そのあまりにも未来的なビジョンが充分に受け容れられず孤独であった。発表媒体が，主に SF 雑誌のみとなってしまったことも誤解の一因となり，その偉大な功績にもかかわらず「オカルト信者の絶好の玩具」にされてしまった（長瀬唯，「交流発電の父の没落」―「科学史の事件簿」，朝日新聞社（1995），257～258頁）。生涯独身であった。1943年１月７日，孤独のうちに定宿としていたニューヨークのウォルドーフーアストリア・ホテルで死去した。

⑻　テスラの伝記を書いたマーガレット・チェニーの記述によれば，エジソンの白熱電球は，交流でも直流でも使える柔軟性を有していたが，発明者であるエジソンは交流でも直流でも，という柔軟性はなく，あくまでも直流に固執した（マーガレット・チェニー，「テスラ 発明王エジソンを超えた偉才」，鈴木豊雄 訳，工作舎（1997），46頁― Margaret Cheney, Tesla: Man Out of Time, Prentice-Hall（1981））。（エジソンは，直流電流のための設備投資を大々的にしてしまっており，引くに引けなかった，というのが大きな一因とされている。）

エジソンの直流に対して，テスラの交流という両者の一連の攻防は，いわゆる「電流戦争」として歴史に刻まれることとなった。しかし，電流としての優位性は，完全に交流にあり，エジソンが敗北するのはほとんど時間の問題であったとされる。直流は，発電機を 3.2km ごとに設置する必要があるのに対して，交流は，数百km の遠方から大規模発電所で発電した電気を送電することができる。直流から交流への短期間での切り替えは，電気の大量消費時代（言い替えれば，エネルギーの大量消費時代）の幕開けでもあったのである。

いったのであった⑼。

なお，こうした電化の過程は，例えばイギリスにあっては，ヴィクトリア朝の最盛期から末期に相当する時期である。電気の興隆は，旧世界から新世界へと世界を変貌させる過程そのものでもあったのである。

閑話休題。さて，陰極線と真空放電についての歴史である。

電子の発見にとって重要だったのが真空の製作とその真空中で生じる放電現象の研究であった（もちろん，白熱電球の技術的改良にも真空技術は要であった）。真空の発見は，ガリレイ⑽の弟子トリチェリ⑾の功績とされている。トリチェリは，1643年，ガラス管（現在の試験管のようなもの）の一端を閉じたものを水銀溜に浸して水銀で満たし，開かれた一端を水銀溜に浸しながらこれを立てるとガラス管の上部（閉じた側）に水銀のない部分，すなわち真空が現れることを発見した。トリチェリは，これを大気圧の作用であると結論し，この現象を利用することでトリチェリの水銀気圧計が作られるようになった。その後，1675年になって，ピカール⑿は，この水銀気圧計を振ると真空部分に発光現象が

⑼　しかしながら，その反作用として人類は闇を喪失したのである，ということは科学史の裏面として，あるいは文化史の重要なモメントとしていくらでも強調すべきであろう。例えば，広義の精神分析は，闇の喪失がもたらしたものである，と述べることも可能であろう。なんとなれば，闇の喪失は，人間の深層心理に住まう，いわば物の怪（モノノケ）の住み処を奪い去ったからである。言い替えれば，光によって闇は圧迫されて抑圧されることとなったのである。ところが，他ならぬ精神分析のパラドキシカルな特徴は，闇の喪失が己の出自と契機であるにもかかわらず，他ならぬその闇のただ中に沈み込んだ深層（あるいは真相と書くべきであろうか）を光でもって照らし出そうとするところにある。かくして，精神分析はいつまでも精神分析的であらざるをえないのである。

本論に即したところでは，例えば，テスラの日常は，極めて示唆的である。テスラは自ら発明した交流電流のシステムによって都市から闇を駆逐してゆくのだが，自らは病的な「スコトフィリア（暗闇愛好症）」そのものであったという。テスラは，正午きっかりに事務所に着くと，すぐに窓のブラインドをすべて降ろしてしまうのであった（新戸雅章，「テスラ 発明的想像力の謎」，工学社（2002），47頁）。われわれはこの極端な意味深長とも取れるテスラの内と外との非対称性をどう解釈すべきなのだろうか。

あるいはまた，「遠野物語」の序文で「願わくはこれを語りて平地人を戦慄せしめよ」と述べた柳田国男は，彼の地に平地ではもはや駆逐されてしまった闇を見いだし，その闇のただ中にこそ瑞穂の国の原型を，つまりは豊穣なる文化の深みを見いだしたのではなかったか……。

ひとまずは，かかる光と闇の相克こそ量子概念の根底に垣間見える二重性の根源なのかもしれない，とここでは述べるに留めておく。

⑽　ガリレオ・ガリレイ（Galileo Galilei, 1564～1642）はイタリアの物理学者・天文学者（自然哲学者）。ピサ大学に学び，パドヴァ大学教授となる。振り子の等時性の発見や，ピサの斜塔から重りを落下させる実験など，様々な業績と伝説に彩られた人物。もっとも有名なのは，地動説裁判である。ニュートンやコペルニクス，ケプラーと共に第一次科学革命の中心人物の一人である。注釈の必要のないほどの有名人である。

⑾　エバンジェリスタ・トリチェリ（Evangelista Torricelle, 1608～1647）はイタリアの物理学者（自然哲学者）。ガリレイの弟子としても知られる。10メートルより深い井戸から水をくみ上げることができないという事実から真空を発見し，それを大気圧によるものと結論した。圧力の単位 Torr はトリチェリにちなむ。

⑿　ジャン・ピカール（Jean Picard, 1620～1682）はフランスの天文学者。コレージュ・ド・フランスの天文学教授。本格的な三角測量を行い，その結果から地球の半径を 6,372km と見積もった↗

見られることを発見した。これが真空放電の最初の報告である。この現象を，摩擦によって発生した電気が放出されたもの，すなわち放電現象として説明したのが，ホークスビー⒀で1709年のことである。

以上が，真空放電の前史とでもいうべきもので，以後，百年をかけてさらにポンプの性能が高められ，この真空に陰極から電気を放電するより高度な実験的研究へとつながってゆく。陰極線の研究史は技術史そのものでもある。

また，この現象に真空が不可欠であったことも極めて意味深長である。近代科学は（現代の科学は，と述べるべきであろうが……），理想的で純粋な，言い替えれば特殊な条件下における現象から法則性を導き出してくる。例えば，まったく摩擦のない状態であったり，あるいは理想気体であったり，文字通りに真空であったりである。だが，実際にそのようなものが現実世界に存在しているわけではない。そのようなものは現実世界に何か対応する対象があるわけではなく，こうした理想化と純粋化は，まさしく頭の中だけで，つまりは思考によってのみ為されるものであった。ところが，真空の実現とその技術の進展は，かかる理想化を頭の中から実験室での現実的な現象にすることに成功したのである。この事実は，とりわけ強調しておくべき事実である。以後，科学の進展は，技術の進展によって支えられることとなる。すなわち，理論的予測にすぎなかった現象を技術的に実現可能とすることで理論を実証し，かかる技術がまた新たなる理論的予測を可能とするようになってゆくのである。

さて，ここで百年ほどを一気に飛び越えよう。

1833年，ファラデーは，「電気についての実験的研究⒁」において空気を薄くしていくこ

↘(実際には 6,357km である)。

⒀　フランシス・ホークスビー（Francis Haukesbee, 1687〜1763）はイギリスの物理学者。真空ポンプの改良を行い，ガラス管の中の空気を大気圧の60分の１にまで低下させて放電した。ホークスビーは，電気的な反発力を最初に観測した人物としても知られ1906年に英国学士院（The Royal Society）へ報告している。また，水が空気よりもおおよそ885倍ほど重いことなどを測定した。（参考：Christopher Baker 編，Absolutism and the scientific revolution, 1600–1720: a biographical dictionary, 2002, Greenwood Press）

⒁　M. Faraday, Experimental researches in electricity, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 123 (1833), pp.23〜54.

マイケル・ファラデー（Michael Faraday, 1791〜1867）はイギリスの物理学者，化学者。師のデービーはグラマースクールで学んだ経験があるが，ファラデーの場合は，正規の学校教育を受けておらず，14歳の時に製本屋に奉公に行き，そこで働いた７年間に書物をむさぼり読んだという独学の人である。電気についての研究で広く知られており，あらためて説明するまでもない人物である。数々の重要な業績の中で最も有名なのが電磁誘導の発見である。また，有名な著書として「ロウソクの科学」がある。

とで（つまり真空度を増してゆくことで）発光現象が起こりやすくなることを報告している。次いで，プリュッカー⒂が1856年に放電管（ガイスラー管）の近くに磁石を持ってゆくと，放電が振れること（グローの位置が動くこと）を報告して，この放電が荷電性の何物かであることが示唆されたのである。ただし，この段階では，仮に，陰極から荷電性の何物かが出ていたとしても，それがどのように陽極にたどり着くのか，などなど，結局のところ数ある謎のほとんどは何一つ解明されなかった。たわみやすい針金に電流を通してこれに磁石を近づけると放電で示されたのと同じようにこの針金が湾曲する。しかし両者の決定的な違いは，放電管の場合，陽極の位置を変化させても現象にほとんど違いが生じないことである。放電は極と極を結ぶように生じるわけではない。放電は陽極の位置に関係なくガラス管の中に放たれているように見える。これではガラス管の中に，何か荷電性のものが滞留してしまうのではないか，と思われたが，数々の実験と経験則はこれがありえそうにないことを示していた。

その後，1869年になってヒットルフ⒃が陰極の前に物を置くとその陰が映ることを発見し，これによって，何物かは分からないが何かが陰極から出ているということが確実視されるようになったのである。この結果を受けてゴールドシュタイン⒄は，さらに詳細な追試を行い，この現象が陰極から流れ出ている放射線によることを確認し，この放射線を「陰極線」と命名した。これが1876年のことである⒅。また，この間に，バーレイ⒆は，ブ

⒂　ユリウス・プリュッカー（Julius Plücker, 1801～1868）はドイツの数学者，および物理学者。ボン大学教授。彼は，ガイスラーによって作られた高性能の真空ガラス管を用いて放電実験を行い，ガラス管からほぼ完全に空気を抜いてしまうと管のほとんどの部分で発光しなくなることを発見している。ただし，陰極の近くだけに緑色の発光（負グロー）が見られる。

ガイスラー（ヨハン・ハインリッヒ・ウィルヘルム・ガイスラー，Johann Heinrich Wilhelm Geißler, 1814～1879）は，ドイツの物理学者，ガラス細工の職人でいわゆる水銀真空ポンプによるガイスラー管の発明者。理化学機器の製造所をボンで経営し，数々の高性能の温度計や圧力計を製造した。1868年以降は，ボン大学で教鞭を執った。

⒃　ヨハン・ウィルヘルム・ヒットルフ（Johann Wilhelm Hittorf, 1824～1914）はドイツの物理学者，化学者。ボンに生まれ，ボン大学で学び（自然科学および数学）ボン大学の教授になった。後にミュンスター大学の教授も歴任。ガイスラーとの真空放電の研究以外には，電解液中のイオンについての研究が有名である。

真空放電に用いる，いわゆるヒットルフ管は，彼のこの分野の研究に因んで呼ばれる（脚注㉑を参照のこと）。

⒄　オイゲン・ゴールドシュタイン（Eugen Goldstein, 1850～1930）はドイツの物理学者。ドイツのグライヴィッツ（Gleiwitz），現ポーランドのグリヴィチツェ（Gliwice），に生まれ，ヴロツワフ大学（現ポーランド）やベルリンのヘルムホルツの元で学んだ後，ポツダム天文台の天体物理学部門部長を務めた。陽子の発見の功績者でもある。

⒅　E. Goldstein, Vorläufige Mittheilungen über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen, Monatsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1876, pp.279～295.

⒆　クロムウェル・バーレイ（Cromwell Fleetwood Varley, 1828～1883）はイギリスの物理学者，Electric and International Telegraph Company その他の電気通信技師。心霊研究に多大な興味を持ち，その方面から電気の研究，通信の研究へと入っていった人物。

リュッカーによって確認されていた陰極線の振れを再確認している（1871)。

なお，この時期にもっともこの現象を系統だって研究したのがクルックス管で有名なクルックス，後のウィリアム卿[20]である。後年，陰極線と言えばクルックス，というほど有名になった。クルックスの実験は，それまでの陰極線の現象をほとんどすべてにわたって網羅的に行ったもので，ヒットルフによって見いだされた陰極線の影も追試を行ったクルックスの実験のほうが有名になってしまったほどである（よりクルックスの実験がより劇的であったためであろうと思われる。例えば，回転子に陰極線を当てて回転させる実験はクルックスによる)[21]。またレーナルトも系統だった研究を行っており，彼は，陰極線がアルミ箔を透過することを利用してこれをガラス管の外に取り出して研究し，その正体を追求している。その研究の結果としてレーナルトは，原子が構造を持つことを確信するに至り，原子構造の提唱を行うこととなるのであった[22]（本論の次稿を参照のこと)。

しかしながら，十九世紀末の段階において，陰極線の正体は謎であり，ここでも粒子説と波動説が互いに譲らずに論争の的となっていたのである。主に，ドイツ系の研究者が波動説を唱え，イギリス系の研究者が粒子説を唱えていた。

こうした状況下で，1895年になってフランスのペラン[23]が陰極線を磁石で曲げてファラ

⒇　ウィリアム・クルックス（Sir William Crookes, 1832～1919）はイギリスの物理学者，化学者。主に陰極線の研究で知られる。また，タリウムの発見も彼による。1875年に陰極線の研究のなかでいわゆるクルックス管を発明した。1897年にナイトの称号を受けウィリアム卿となる。1870年代から心霊研究にも傾倒してゆく。―バーレイといい，クルックスといい，有名無名にかかわらず，この当時のイギリスでは心霊主義がかつてないほどの流行を見せている（イギリスだけでなく，世界的な傾向でもある)。この当時のイギリスの心霊主義については，拙論「量子論の歴史――未知なる放射線，その発見ラッシュの裏面史」(生駒経済論叢 13(2), 2015)」の第２節を参照のこと。

㉑　ちなみに，ヒットルフ管とは初期のクルックス管のことでもある（第３節の「Ｘ線の発見」を参照のこと)。

㉒　レーナルト（拙論，「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)」の脚注⑻を参照のこと）の業績は，彼のナチスへの過度な協力によって今日，消されてしまっている感がある（あるいは意図的に触れないようにしているのであろう)。あくまでも筆者の印象ではあるが，彼の物理学上の業績について述べている文献は非常に少ないように思われる。例えば，セグレ（エミリオ・セグレ，Emilio Gino Segre, (1905～1989) はイタリア人実験物理学者，ローマ大学で物理学を学び，ローマ大学助教授，パレルモ大学教授を経て，1938年からカリフォルニア大学教授を務める。フェルミと共に中性子反応の実験を行い，1959年，オーウェン・チェンバレン（Owen Chamberlain, 1920～2006, はアメリカ人物理学者）と共にノーベル物理学賞を受賞した）の「Ｘ線からクオークまで」(みすず書房, 1983）ではレーナルトに関する記述は皆無に等しい。セグレほどの人物がレーナルトについてだけ知識が欠如しているとは思われない。こうした傾向はセグレだけでなく，非常に強くまた顕著であるように思われる。

レーナルトは，陰極線の研究からディナミッド（Dynamid）なる核を持つ独特の原子モデルを提唱（1903）している。詳細は，本論の続編にて展開する。

㉓　ジャン・バプティスト・ペラン（Jean Baptiste Perrin, 1870～1942）はフランスの物理学者。パリの高等師範学校（エコール・ノルマル）で学び，後に同校の教授となる。1926年，物質の不連続的構造についての研究（沈殿平衡の発見）でノーベル物理学賞を受賞。政治の世界にも進出し（レオン・ブルーム内閣の科学研究担当国務次官となる)，晩年は急進的な左翼運動を展開した。ドイツ占領下のフランスを逃れてアメリカに渡り，ニューヨークで死去した。

デー箱（集電器）に誘導し，負の電荷を与える（言い替えれば負の電荷を箱の中に集める）ことに成功した。これは，陰極線が波動のようなものではなく，粒子的な何物かであることを強く示唆しているように思われ，ペランは陰極線が負の荷電粒子であると結論した。このペランの実験が後押しとなって，陰極線が負の電荷を持った粒子である可能性が極めて濃厚になってきたのである。

ところで，陰極線を波動と見なすか，粒子と見なすかの差異についてである。もちろん，単純なカテゴライズは危険なのではあるが，おおよそ，以下のような自然観が反映していると言えるであろう。すなわち，これを波動と見なすのは，その現象の背後に何らの仮想的実体を借定しない，言い替えれば観察した事実（現象）に非常に忠実な立場である。これに対して粒子と見なすのは，観察した事実（現象）をそのようなものならしめる実体をその背後に仮想する立場である。前者がロマンティシズムに対応し，後者がリアリズムに対応することは言うまでもない[24]。

陰極線が何らかの粒子である可能性が濃厚になってきたことで，この研究分野においては現象の背後に実体を見いだそう，あるいは何らかの存在を仮想するというリアリズム的思考が，あくまで比較すると，ではあるが優勢になってゆくことになる。実際に，原子核の発見やその崩壊といった現代物理学にとって決定的とも言える金字塔的な結果は，この流れを汲む研究者によってなされることとなるのである。その代表が，ラザフォードとその共同研究者であるソディであり，あるいはその一世代前の研究者であるトムソンであったと言えよう[25]。

2：電 子 の 発 見

⑴　ローレンツの電子論とゼーマン効果

ペランの結論―陰極線は負の荷電粒子である，をさらに後押しする研究報告がオランダのライデンからもたらされたのはペランの実験から1年後のことであった。

1896年，ゼーマン[26] は，後にゼーマン効果と呼ばれるようになる現象―磁場中に置かれ

---

[24]　ロマンティシズムとリアリズムについてのさらなる詳細については，以下の拙論二点を参照のこと。
　「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）
　「量子論の歴史――未知なる放射線，その発見ラッシュの裏面史」，（生駒経済論叢 13(2)，2015）

[25]　それぞれ本論の脚注[37]，[71]，[74]を参照のこと。

[26]　ピーター・ゼーマン（Pieter Zeeman, 1865～1943）はオランダの物理学者。1902年，ゼーマン↗

たナトリウムのＤ線と呼ばれる二つのスペクトル線が多重線に分裂すること，さらにその周波数の広がりが磁場の強さに比例することを発見した(27)。この現象をローレンツ(28)はラーモア(29)の荷電粒子と振動数の理論に従って計算し，荷電粒子の質量と電荷の比 m/e を決定したのである。―これは，本節の後半において，ゼーマンの第一論文（アムステルダム・アカデミーに提出したもの）を検討する中で具体的に提示する。

ローレンツのこの理論的達成は，電子の実在性をいっそう高めることとなった。ローレンツは，その著書「電子論」の中で，現象の奥底にある機構―すなわち電子（ローレンツは，「可秤量物体に莫大な数だけ含まれている荷電粒子」という述べ方もしている）を仮説的に設定することで，電気的，光学的現象をすべて説明しようとするものである，と述べている(30)。言い替えれば，ローレンツは，原子が構造を有するものであると明確な想定（仮想）をなして理論的な計算を行い，上記の比を導出したのである。

ローレンツ電子論は，古典物理学の範疇のみで書かれているにもかかわらず，非常に現代的である。ゼーマン効果については，スペクトル線が三つに分離する現象を，現象の背後にある互いに異なった三つの運動様式に帰着させて説明する（ということは，原子内部にはそのような運動を為す内部構造がある，ということであり，それが電子である，とい

↘効果の研究でノーベル物理学賞をローレンツと共同受賞した。ライデン大学で極低温研究で有名なオンネス（ヘイケ・カメリング・オンネス，Heike Kamerlingh Onnes, 1853～1926, オランダの物理学者で超電導の発見など極低温の研究で有名。1913年，ノーベル物理学賞を受賞）に学び，後にローレンツ（以下の脚注(28)を参照のこと）の助手となった。その後，アムステルダム大学教授となる。

(27)　ゼーマン効果は，1896年に発見されて，翌年に相次いでゼーマン本人によって論文として報告されている。以下の３つがその主要なものである。これらの結果をゼーマンは，まず，1896年10月31日にアムステルダム・アカデミーに報告している。

Pieter Zeeman, On the Influence of Magnetism on the Nature of the Light emitted by a Substance,「物質によって放射される光の性質に及ぼす磁気の影響について」, Philosophical Magazine,(5), 43（1897）pp.226～239,（邦訳：物理学古典論文叢書８）

Doubles and Triples in the Spectrum Produced by External Magnetic Forces Ⅰ&Ⅱ,「外部磁気力によって生じるスペクトル線の２重線と３重線Ⅰ&Ⅱ」, Philosophical Magazine,(5), 44（1897）pp.55～60,（邦訳：物理学古典論文叢書８）

The Effect of Magnetization on the Nature of Light Emitted by a Substance, Nature, 55（1897）, p347～.

(28)　ヘンドリック・アントン・ローレンツ（Hendrik Antoon Lorentz, 1853～1928）はオランダの物理学者。ライデン大学に学び，1878年に母校の教授となった（なんと24歳の時！）。数多の業績に彩られているが，もっとも有名なのが，本論で述べた電子論と，アインシュタインの相対性理論を基礎づけることとなるローレンツ変換である。その他，磁場中を運動する荷電粒子にかかる力―ローレンツ力などなど，枚挙に暇がない。1902年，ゼーマンと共にノーベル物理学賞を受賞した。

(29)　ジョセフ・ラーモア（Joseph Larmor, 1857～1942）はアイルランドの物理学者，数学者。1903年，ケンブリッジ大学ルーカス教授。磁場中の電子の歳差運動などの研究で知られる。

(30)　H. A. Lorentz, The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat（1909）,（元は1906年にローレンツがコロンビア大学で行った一連の講義である）。引用箇所は，邦訳版，「ローレンツ電子論」訳 広重徹（1973）東海大学出版会の８～９頁である（以下もこの邦訳版の頁数を記す）。

う論理展開が可能なのである)。磁場がかかっていない時にはこれら異なった三つの運動様式は重なり合ってしまっていて現象としてその違いを顕示しないが（いわゆる縮退状態にあってその違いを現さないが)，外部磁場が強くなるとこの差異が露わになってくる。それがスペクトル線の分離となって現れるのである。(31)

かくして，ゼーマン効果が前期量子論，ひいては量子論の理論構築に与えた影響はとりわけ大きいと言わざるを得ない。なお，ゼーマン効果と異常ゼーマン効果（両者を総称してゼーマン効果と述べる場合がほとんどである）の違いについて簡単に述べておくと，ゼーマン効果は，基本的にエネルギー順位が磁場中で 3 本に分離する現象で，異常ゼーマン効果は，それ以上の数に分離する現象のことである。異常ゼーマン効果は，スピン概念が整理されてから理論的な説明がなされることとなった（ということはもちろん，正確な説明は量子力学が完成されてからである)。このような意味においてもゼーマン効果が果たした役割は大きいと言えるのである。ゾンマーフェルトは，1916年の段階で以下のように述べている。「現在の理論の状況では，ゼーマン効果の量子論的な取り扱いはローレンツの理論が行ったものと同じでそれ以上のものを与えない。それは，正常な 3 重線を説明することは可能だが，現状ではより複雑なゼーマン分裂を説明することはできないのである」(32)

ともあれ，ゼーマンによる現象の発見によるいきさつと，ローレンツによるその理論的説明を詳細に見てゆこう。

前述のごとく，1896年，ゼーマンは，磁場中に置かれたナトリウムのD線が多重線に分裂することを発見し，これが電子の存在を側面から補強して担保する形となったのであった。

---

(31) 前提書「ローレンツ電子論」の以下の記述がキーポイントである（123頁)。
Zeeman 効果の説明のために必要な仮定は，まったく計算なしに見出すことができる。そのために，磁場のなかにおかれたため，はじめのスペクトル線のかわりに三重のスペクトル線を示している光源を考えよう。この三重線の成分は疑いもなく，輻射を出している粒子の内部で進行している三つの運動様式にもとづくもので，これらの様式はたがいに異なっていなければならない。そうでなければ，それらの振動数は同一のはずだからである。いま場の強さを減少させてゆけば，成分はたがいに接近するが，それらがもはや区別できないくらいになっても，運動の三つの様式は存在することをやめないであろう。ただ強い場のなかにあったときよりも，たがいの振動数の差が少なくなるだけである。ひきつづき場を弱めてゆくと，最後に，場は全くないが，それでも運動の三様式が存在するという場合に達することができる。それらはなおおたがいに異なっているけれども，その振動数は等しくなってしまっている。

(32) A. Sommerfeld, Zur theorie des Zeeman-Effekt der Wasserstofflinien, mit einem Anhang uber den Stark-Effekt, Physikalischen Zeitshrift, 17,（1916), pp.491～507.

ゼーマンの発見の原点は，ファラデーの着想による。ファラデーは，すべての自然力は本質的に一つである，という自らの自然観から，光学的現象と磁気的現象の間にも密接な関連があるものと確信していた。この確信を確かめるために，1862年，ファラデーは，ガスバーナーの焔を用いてナトリウムやリチウムなどの塩を熱して発光させ，それを電磁石の極で挟み込み発光のスペクトルに変化があるか否かを調べた。しかし，結果は否定的なもので，スペクトル線にはなんの変化も見られなかった。これについてマクスウェルは，1870年にファラデーのこの実験について「強力な磁石を作用させても焔のスペクトル線に何らの変化も検出できなかった」(33) と述べて，こうした可能性を否定している。

ところが，1890年代の半ばにはもっぱらカー効果(34) について実験を繰り返していたゼーマンは，マクスウェルのこうした記述に惹きつけられ「もし Faraday のような人が上述の関係の可能性を考えていたのならば，現在の優れた分光学の助けをかりて再び実験してみるのも，恐らくは無駄ではないであろう」(35) と考えた。こうして，ゼーマンは，２本のＤ線が磁場によってその幅を広げることを発見したのであった。また，設定を改良して行ってみると，磁場の方向と観測する方向も関連しており，その角度に応じてスペクトル線が二重になったり三重になったりすることも発見した。

この結果をゼーマンは，ただちにローレンツに伝えた。ローレンツは，この現象を原子内にあると推測される荷電粒子（後にこれが電子であると判明することは，前述の通りである）の挙動の結果として以下のように理論的に説明したのであった。すなわち，ｚ軸に平行な磁場 H の中で，e を正に帯電した電荷として m をその質量とする。すると，

$$\left.\begin{aligned} m\frac{d^2x}{dt^2} &= -k^2x + eH\frac{dy}{dt} \\ m\frac{d^2y}{dt^2} &= -k^2y + eH\frac{dx}{dt} \end{aligned}\right\}$$

(33)　J. C. Maxwell, The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Cambridge University Press,（1890）Vol.2, p790.

(34)　カー効果は，1875年，スコットランド出身の物理学者・数学者であるジョン・カー（John Kerr, 1824～1907）によって発見された。カーは，最初は牧師になろうと志して神学校を卒業したが，その後，伝道から離れて物理学と数学の研究に没頭するようになった。

カー効果には，以下の二種類が知られている。光学的カー効果と磁気光学的カー公開である。光学的カー効果とは，ある物質に電場を作用させると，屈折率が電場の２乗に比例する複屈折を生じること。磁気光学的カー効果は，直線偏光を磁化した物質の表面に当てると，反射光が楕円偏光を来すこと，である。

(35)　P. Zeeman, 脚注(27)に同じ。

なる運動方程式を得る。これより，H がゼロの場合とそうでない場合の T 周期を導出すると，前者が，

$$T=\frac{2\pi\sqrt{m}}{k}$$

となり，後者が（近似的に），

$$T'=\frac{2\pi\sqrt{m}}{k}\left(1\pm\frac{eH}{2k\sqrt{m}}\right)$$

となる。すなわち，$\pm\frac{eH}{2k\sqrt{m}}$ という周期の違いだけ線がずれるのである。ここで，すでにお気づきのことと思うが，ゼーマンは，荷電粒子の正負を逆転させてしまっている。これは，引き続いて出された Philosophical Magazine 誌の論文において訂正されている[36]。ゼーマンは，最初の論文で，これを正のイオンが云々，と論じているが，正確に，そしてゼーマンの言葉を引き継ぐ形で修正して述べるのであれば，負のイオンが云々，となって，これがすなわち電子であることは言を俟たない。ゼーマンの最初の原論文に忠実に記しておくと，ゼーマンは，周期の変化の比を，

$$\frac{eH}{2k\sqrt{m}}=\frac{e}{m}\cdot\frac{HT}{4\pi}$$

と第一次近似として導出してここから m/e を概算した。

このゼーマン効果については，スピン導入の箇所で再度触れることとなる。詳細は先に譲るのであるが，ゼーマン効果は，実験的な側面からスピン概念の誕生を促し，原子の内部構造へと歩を進めるいわばアリアドネの糸のごとき役割を果たすこととなる。いわば，ローレンツ電子論は，そしてその具体的適応例としてのゼーマン効果の説明は，古典物理学とその理論予測の最高到達点と言えるのである。

⑵　トムソンによる方法

一方，これとは別の方法でトムソン[37] は1897年に m/e を特定した[38]。トムソンの方法は，

⑶⑹　脚注⑵⑺を参照のこと。

⑶⑺　ジョセフ・ジョン・トムソン（Sir Joseph John Thomson, 1856～1940）はマンチェスター生↗

陰極線が磁場によって曲げられる距離から算出するものであった。上記のゼーマン効果からの算出が理論的ならば，こちらは純粋に実験的である。

ある電流によって運ばれる電荷の総量は，電荷を e，荷電粒子の数を N とすると $Q=Ne$ である。また，発生した熱量 W はこれらの荷電粒子の総運動量に等しいはずだから，$\frac{1}{2}Nmv^2=W$ である。さらに，磁場が陰極線を曲げる時は（箇所では），$\frac{mv}{e}=H\rho$（ρ は曲率半径，H は磁場である）である。よって，荷電粒子の質量と電荷の比は，

$$\frac{m}{e}=\frac{QH^2\rho^2}{2W}$$

となる。

トムソンは，三つの管に分けて空気，水素，炭酸ガスの測定を行っており，これらの比の値の平均値は，$0.49\times10^{-11}\ kg/C$ である。現在の測定値である $0.5687^{-11}\ kg/C$ との差は，９％弱であり，当時の実験装置の精度からするとまずまずであると言えよう。彼は，測定値について，その値のオーダーが水素イオンの値（当時知られていたこの値の最小値）と比べて 10^{-3} も小さなオーダーになっていることを考察し，これは m が小さいことによるのか，e が大きいことによるのか（あるいはその逆か）と問い，陰極線の粒子は非常に軽いと考えれば，1894年のレーナルトの「陰極線は気体の中では普通の原子や分子より数千倍遠くまで進むことができる」[39] という報告を説明できる，と述べる。レーナルトは，先に述べたようにガラス管の外部に取り出した陰極線が分子運動論から導かれる平均距離の数千倍も長く直進することを見出していたのである。こうしてトムソンは，陰極線粒子を普通の化学的原子ではなく，分解された（トムソンの原論文に忠実な言い方ならば，「陰極付

↘まれのイギリスの物理学者。電子の発見者と目される。1870年にオウエンス・カレッジ（後のマンチェスター大学）に入学し工学，数学，物理学，化学を学んだ。その後，物理学を集中的に学ぶようになり1876年，トリニティ・カレッジの給費性としてケンブリッジに移った。

1884年，ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所教授（所長）。1906年，気体の電気伝導に関する研究でノーベル物理学賞を受賞。1908年にはナイトに叙せられ1912年にはメリット勲章を受ける。キャベンディッシュ研究所を率いて数々の業績を挙げたイギリスの指導的物理学者である。教育者としても優れ，数多くの優秀な弟子を育てたことでも知られる。

なお，1937年にノーベル物理学賞を受賞したジョージ・トムソン（George Paget Thomson, 1892～1975, ロンドン大学インペリアル・カレッジ教授）は彼の息子である（拙論，「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)」の脚注(9)参照)。

(38) J. J. Thomson, Cathode Rays, Philosophical Magazine 44 (1897) p293,（邦訳：物理学古典論文叢書８）

また，1906年のトムソンのノーベル賞講演，Carriers of negative electricity も参照。

(39) P. Lenard, Ueber Kathodenstrahlen in Gasen von atmospharischem Druck und im aussersten Vacuum, Annalen der Physik, 287, 2 (1894) pp.225～267.

近の極めて強い電場によって分解されてしまった」）原初的な原子（これをトムソンは微粒子コーパスル corpuscle と呼ぶ）である微粒子なのだ，と結論する[40]。

なお，電子（electron）なる呼称は，ジョージ・ストーニーが電荷の単位として導入し(1891)[41]，それが徐々に科学者の間で使われるようになってゆき，やがて定着していったものである。すなわち，電荷の単位として導入された「電子」は，しかしながら，やがて現実的な粒子として実体化してゆくという過程を経た。電子は，単位が実体化した事例なのである。

⑶　水滴，あるいは油滴の実験からミリカンの実験まで

その後，トムソンの率いるキャベンディッシュ研究所において水滴の落下速度を用いて電子の電荷測定が何度か試みられた。その結果，1897年にタウンゼント[42]によってイオンを用いて行われたもので，正イオンについては0.9×10^{-19}クーロン，負イオンについては1.0×10^{-19}クーロンという値を得る（両者の違いは実験誤差とされた)。1898年にはトムソンによって2.0×10^{-19}クーロン。同じくトムソンによって1901年に1.1×10^{-19}クーロン。1903年にはウィルソン[43]によって1.03×10^{-19}クーロンが得られている。結果は，オーダーは揃っているがバラバラである。しかし，ここへ来て電子の存在は決定的となったのであった。

さらにその後，1911年にミリカンがこれらの実験を改良し，油滴で行った測定によると電子の電荷は1.592×10^{-19}クーロンであった[44]。なお，現在の正確な値は1.6021892×10^{-19}クーロンである。

⑽　この記述は先取りである。トムソンがこの記述を行っているのは，1904年の論文の中であり，この段階では，こうした記述はなされていないことを付記しておく。なお，詳細は次稿にて考察する。

⑾　George Stoney, On the Cause of Double Lines and of Equidistant Satellites in the Spectra of Gases, Transactions of the Royal Dublin Society, 4（1891), pp.563～608.
　ジョージ・ジョンストン・ストーニー（George Johnstone Stoney, 1826～1911）は，アイルランド出身の物理学者。ダブリン大学のトリニティ・カレッジで物理学，数学を学び，1852年から1857年までアイルランド国立大学ゴールウェイ・カレッジの物理学教授を務めたが，以後はアカデミックポストに就くことなく独自の研究を進めた。電子（electron）というタームを初めて使用した人物として知られる。1911年，ロンドン，ノティングヒルの自宅で死去。

⑿　ジョン・シーリー・エドワード・タウンゼント（Sir John Sealy Edward Townsend, 1868～1957）はアイルランド出身の物理学者。気体の電気伝導やイオンの研究に携わった。1900年，オックスフォード大学教授となる。1941年にはナイトに叙せられた。

⒀　チャールズ・トムソン・リーズ・ウィルソン（Charles Thomson Rees Wilson, 1869～1959）はスコットランド出身の物理学者。主に，荷電粒子の軌跡を捉えるウィルソン霧箱の考案で知られる。1927年，霧箱の発明でノーベル物理学賞を受賞。1925年から1935年までケンブリッジ大学ジャクソン記念自然哲学教授を務めた。

⒁　R. Millikan, The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Low, Phys. Rev., XXXII（1911), p349.

ところで，ここまで電子の発見について三つの行程を観てきたが，いささか後味の悪い後日談を載せておこう。1982年６月号のフィジクス・トゥディ誌に，死後に公開するようにと友人に託した当時ミリカンの大学院生であったフレッチャー（Harvey Fletcher, 1884〜1981）の手記が掲載された。その内容は衝撃的で，一部で騒動を引き起こした。フレッチャーは，ミリカンの油滴の実験を行ったのは自分だと暴露したのである。フレッチャーは，当然ながら共著の論文として発表されるもの，と思っていたが，ミリカンが勝手に単独で発表してしまった，というのである。この手記はかなり信憑性が高いと思われる(45)。—まことに後味が悪いがこれも歴史である……。

さて最後に，もう一つ，上記してきた電子発見の歴史（単純化された歴史）にちょっとした疑問符を付けておく必要がある。電子発見のおおかたの流れは上述のごとくであるが，ここ三十年ほど，こうした流れが極度に単純化されたものにすぎず，トムソンは電子の発見者ではない，という説が語られるようになってきたのである。正確に述べれば，トムソンのみが電子の発見者ではない，ということなのであるが，これはもっともな話しである。

実際には，こう述べるのがもっとも公平である——すなわち，電子発見の過程は，1870年代あたりから続く複数の物理学者による共同作業であり，トムソンだけに電子発見の栄誉を冠するのは間違いである。それは，陰極線の実体が何物であるかということが判明してくる過程そのものである。そして，この過程において，複数の物理学者が，トムソンより前に電子の存在を示唆あるいは述べており，上述してきた電荷比を計測してすらいる。つまり，「トムソンが電子を発見した」というのは，いわば，事実に極めて近い単純化された神話であって，後世の人間が過去を理解・納得するための方策のようなものである。前述したマルティネスによると，こうした狭くて単純化された歴史を広めてしまったのは，トムソンの弟子による，とのことである(46)。事実は，トムソンの試みを含めた複数の物理学者による複数の試みが電子を徐々に実体的な粒子として認識させてゆき，やがて，それが共通認識として確立されるに至った，ということである。

---

(45)　筆者の個人的な見解および印象であるが，おそらくフレッチャーの述べていることは真実であろう。この手記を彼が自らの死後に公開したことが何よりの証拠のように思われる（ただの騒動屋ならもっと早く公開しただろう）。また，こうしたことは現在進行形であちこちの大学で今も生じている。
　科学は，決して純粋な知の探求という面ばかりではない。それどころか，名誉と金銭による動機付けが年々著しくなってきている。それは科学や広くは学問や知の社会的意義・意味の喪失と裏腹であり，意義の欠如による（要するに，単に金銭的な意味付けしか持たなくなることによる）空虚さの顕著な現れであると言える。

(46)　脚注(2)の文献に同じ：同書，213〜214頁。

3：X 線 の 発 見

陰極線の研究が電子の発見という劇的な成果を得ようとしていたちょうど同じ頃，物理学のみならず，おそらくは二十世紀の科学，つまりはその後の百年を象徴するような大発見が成された。レントゲンによる透過放射線――Ｘ線の発見である。

本節の主人公レントゲン（ヴィルヘルム・コンラート・レントゲン：Wilhelm Conrad Röntgen, 1845～1923）は1845年，ドイツのラインランドはレンネップという町に生まれた。ドイツ人だと思われがちであるが，戸籍上はオランダ人であることはあまり知られていないようである。ユトレヒト工科大学，チューリッヒ工科大学で学んだ後，ホーエンハイムの農業大学など様々な大学での教職を経てヴュルツブルグ大学の教授となった。1894年には同大学の学長に選出されている。

さて，それは1895年11月８日の夕方であった。レントゲンは，自身の実験室で陰極線の研究中に机の上に置いた白金シアン化バリウムを塗った蛍光紙が光っているのを発見したのである。操作していたヒットルフ管（初期のクルックス管）は黒い厚紙で被われており，外からの光も完全に遮蔽していたはずであった。つまりどこからも光は差し込んでいないはずであった。疑わしきは，この放電管以外には考えられなかった。この放電管から眼には見えない放射線が蛍光紙に射していて，薬剤と反応したとしか考えられない。この現象に驚いた彼は，その後，八週間にわたる極めて詳細な調査研究を行った。その結果，この放射線がこれまでの陰極線とは違って磁場の影響をまったく受けないことを発見し，そしてなによりも，この未知の放射線が驚くべき透過性を持つことを発見するに至ってさらに驚愕した。

まず彼はこの蛍光紙を裏返しにしてみた。つまり，白金シアン化バリウムが塗られていない面に未知の放射線（と覚しきもの）を当ててみた。しかし蛍光紙はやはり光っていた。遠ざけても光っている。その後，彼は様々な物をこの放射線（と覚しきもの）にかざしてみた結果，「1000頁の装幀をした本」も「厚い木」もこの放射線は透過してしまい影を作らないことを発見する。そして，15mm のアルミニウム板は作用をかなり弱めるがやはり放射線は透過していること，硬質ゴムは完全に透過すること，鉛は透過しないこと，などなどを確かめてゆく。そして手をかざしてみると，「手のかすかに暗い影の中に手の骨のもっと暗い影がみえる」ことを発見したのであった。

1895年12月28日，レントゲンはこの現象を報じる論文をヴュルツブルグ物理医学協会へ投稿した(47)。この論文は異例中の異例としてただちに公表され，翌1896年１月には驚愕すべき大ニュースとなって世界中に文字通りの一大騒動を捲き起こした。一般大衆は大いにその想像力を刺激され，レントゲンの透過線は学術誌や高級紙だけでなく大衆紙や通俗雑誌にまで様々に報じられた(48)。報じられた内容―つまりは透過放射線の内容は常識的には信じがたいものであった。しかし，レントゲンの妻アンナが被写体となった，透けてしまい指輪と骨だけが映った手の写真はこれが事実であり否定しようがないことを雄弁に物語っていた。（図-１：アンナの手の写真）

〈図-１〉

レントゲンは，この未知の放射線を報じる論文「新しい型の放射線について」の第一報で「未知」であることからこれを数学の未知数Xのごとく，「エックス線」と称している。そして，この未知の放射線を推測と断りつつも「エーテル内の縦振動に帰せられるべきではないのか？」と述べてこの論文を締めくくっている。もちろんこの推測は間違っている。X線の正体が分かり，それが未知なるものでなくなるまでにはさらに16年という歳月を要する(49)。しかし，レントゲンのこの発見は，これ以外にも未知の放射線が存在する可能性を物理学者に（そして世界全体に）広く知らしめることとなったのである。

---

(47)　W. C. Röntgen, Ueber eine neue Art von Strahlen Ⅰ&Ⅱ,「新しい型の放射線についてⅠ&Ⅱ」, Annalen der Physik, 64,（1898）, pp.1～11, & pp.12～17.（邦訳：物理学古典論文叢書７）

(48)　日本では，当時，ドイツに留学中であった長岡半太郎（後述）からの情報で，レントゲンによるX線の概要が即座に東京大学に伝えられた。追って届いた長岡の通信文は３月25日発行の「東洋学芸誌」の雑報欄に「レントゲン氏 エキス放散線」として掲載されている。また，長岡からの一報を受け，1896年の２月から３月にかけて，長岡の師である帝国大学理科大学教授の山川健次郎と第一高等学校教授の水野敏之丞がいち早く追試実験に成功して，水野が科学雑誌に発表している。その後の５月に水野は，山口鋭之助と共に「れんとげん投影写真帖」（丸善，1896）を発刊するに至った。もちろんこれは社会的な騒動ではないが，面白いところでは，アメリカのトレントンで「劇場におけるX線オペラグラスの使用禁止条例」が２月９日に可決している。これなどは，まさしく騒動といった感じである。

　ところで，山川健次郎は日本の物理学の源流のような人物である。略歴を記しておく。　↗

ちなみに，レントゲンがＸ線の正体をエーテルの振動（広くはその挙動と書くべきであろうが）ではないか，と考えたのにはそれなりに当時にあっての妥当性があった。トムソンの息子であるG.P. トムソンは，「陰極線によってＸ線が直接生み出されるので，Ｘ線の発見が陰極線の研究を大いに刺激したのは，むしろ当然である。当時の一般的な意見としては，Ｘ線は何かエーテルの擾乱であって，昔から絶えず議論の対象になりながらついに発見されなかった圧縮波か，あるいはまた非常に短波長の普通の横波であるか，さらにはまたストークスが言い出したように，エーテルの横波の鋭いパルスであって，むちの一打ちで出てくる激しい音のようなものであるとされた」(50) と記している。

さて，本節の主人公レントゲンの話しに戻ろう。

1901年，レントゲンは，この未知の放射線の発見によって第一回のノーベル物理学賞を受賞した。またその前年1900年には，ヴュルツブルグ大学からミュンヘン大学の実験物理学の主任教授となって栄転した。

骨が透けて写った写真を見てただちに思われたことは，医療への応用であった。実際，レントゲンの発表からわずか数週間後には医療への応用が試みられている(51)。そして今日，レントゲンと言えば胸部Ｘ線写真のことを指し，レントゲンが人の名前であることを知らない人すらいる。それほどにこの発見はレントゲンの人生を，そしてなによりも社会を，そして世界を変えたのであった。

↘ 山川は，1854年（嘉永７年），会津生まれの会津藩士である。白虎隊として会津戦争も経験している。1871年（明治４年）に国費留学生としてアメリカのイエール大学に留学し1875年に物理学の学位を得る。帰国後は1879年に東京帝国大学理科大学の教授となった。東京大学初の理学博士である。東京帝国大学，京都帝国大学，九州帝国大学の総長などを歴任した。1931年，死去。（なお，1871年に官費留学生としてアメリカに渡った５人の女子留学生の一人である大山捨松（旧姓山川，1860～1919）は山川の実の妹である。）

九州大学の「山川健次郎初代総長パンフ」の23頁には，東大，一高，三高と京都の島津製作所の共同作業（三校は教授の村岡範為馳）が競争でＸ線の再現実験をした当時の様子が紹介されている。なお，村岡は，1878年に留学してレントゲンから直接学んでいる。

長岡半太郎：土星型原子モデルの提唱などで知られる日本の物理学者。1865年，長崎県大村市に生まれる（当時の大村藩。大村藩士長岡治三郎の長男として生まれる）。1882年に東京大学（後の1886年に帝国大学，後の東京帝国大学）に進学する。1890年に帝国大学助教授，1896年同教授となる。その間，1893年から1896年までボルツマンの元に留学している。1931年５月には大阪帝国大学の初代総長を務めている（1934年６月までの３年間）。1950年，東京にて死去。本多光太郎（1870～1954），寺田寅彦（1878～1935），石原純（1881～1947），仁科芳雄（1890～1951）など多くの弟子を育てたことでも知られる。

(49) それは，今日では，陰極線によってたたき出された内側の電子の軌道へ外側の電子が落ちる時に放出する光であることが分かっている。

(50) ジョージ・Ｐ・トムソン，前提書，70頁。

(51) レントゲンの発表からわずか３年後の1898年，ドイツのジーメンス社（日本名はシーメンス社）が世界で初めて医療用のＸ線撮影装置を開発している。また，日本では，1909年，島津製作所が国産機，「ダイアナ号」と「ニューオーロラ号」の開発に成功している。（現在は島津製作所創業記念館に展示されている。）

レントゲンは，おそらく幸運であったのだろう。これはほとんど疑いようがないことではある。この現象は，レントゲン以外の誰が発見してもまったくおかしくないほどに期は熟していたと言えるからである。

当時，すでに透過性の高い放射線の存在は陰極線の研究からそれなりに想像はし得たのである。そして，同様の現象は高度の真空を作り出すことのできる機器を有してさえいれば，レントゲンの実験室以外でも生じていた可能性は捨てきれない―いや，実際に生じていたのである。例えば，アンドレード(52) は，その著書において，「オックスフォードで研究していた物理学者フレデリック・スミスは，放電管付近の箱に写真乾板を入れておくと，かぶりが起こり易いことに早くから気がついていた。現在は，われわれはそれが放電管からのＸ線によるものであることを知っているが，そのとき彼は助手に，乾板をどこかほかに置くように命じただけだった。乾板のかぶりなどは彼の研究題目でもなく，興味もなかった」(53) と伝えている。また，1879年頃，クルックスは，放電管の近くに置いておいた写真乾板にかぶりがあることを見つけて怒り出し，業者に欠陥商品として送り返したという話しも伝わっている(54)。

さらに，大学のアカデミズム研究の外部でもこの現象は生じていた。ニコラ・テスラによる放電現象の研究である。テスラは，当時，こうした現象のもっとも近くにいた人物の

---

(52) エドワード・N・ダ・C・アンドレード（Edward Neville da Costa Andrade, 1887〜1971）は英国ロンドン生まれ（ポルトガル系ユダヤ人）の物理学者でラザフォード門下の高弟の一人。
1906年，19歳の時にロンドン大学ユニバーシティ・カレッジにおいて理学士の称号を得て卒業し，1910年には奨学金を得てハイデルベルグのレーナルトのもとで理学博士の学位を得た。その後，ケンブリッジのキャベンディッシュ研究所に１年間，そして古巣のユニバーシティ・カレッジで１年研究してからマンチェスターに移りラザフォード門下生となった。第一次世界大戦が勃発すると，砲兵隊に加わり，参戦している。戦後は，1928年，ユニバーシティ・カレッジのクワイン物理学教授となり，第二次大戦後は，1950年に王立科学研究所（Royal Institution）の所長を３年間勤め，その後はインペリアル・カレッジで研究を続けた。
1949年，英国学士院においてウィルキンス講演，1957年，ラザフォード講演を行い，学士院ヒュー・メダル，ホロウィック賞などを受けた。またフランスでも名声高く，レジョンドヌール勲章を受けている。

(53) E, Andrade, Rutherford and the Nature of the Atom, Doubleday and Company Inc, 1964, 引用は，邦訳，「ラザフォード 20世紀の錬金術師」，三輪光雄訳，河出書房新書，1967年，50〜51頁より。 ――「かぶり」とは，いわゆる写真の「色かぶり」のことで，この場合，写真乾板が（あるいは乾板の一部分が）通常よりも多く露光されてしまっていることを指している。
なお，アンドレードは，自らがユダヤ系であるからか，おそらくは意図的に記していないと思われるのだが，このレントゲンの発見とそれに続くレントゲンの世界的名声に一番の衝撃（そしておそらくは強烈な嫉妬）を受けた人物はおそらくレーナルトである。以後，レーナルトは，レントゲンの名前を見ることすらできなくなってしまった，と伝えられている。後年のレーナルトの極端に偏狭的で排他的な思考（いわゆるアーリア的物理学）は，この頃から徐々に芽生えてきた，とは巷間伝えられるところである。 ――拙論，「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)」の脚注(8)，および拙論「量子論の歴史――未知なる放射線，その発見ラッシュの裏面史（生駒経済論叢 13(2)，2015)」の第２節を参照のこと。

(54) 西尾成子，「こうして始まった20世紀の物理学」，掌華房（1997），22頁。

一人であり，レントゲンとほとんど同じ現象を同じ時期に観測していたとすら言われている。彼は，自らが開設したニューヨークの研究所で高圧放電の実験中にカメラの装置のネジの透過写真を撮影していたが，彼がこれに気が付いたのは，レントゲンがこの現象を公表した後であった。この写真は，レントゲンがＸ線の発表をする数週間前に研究所のガイスラー管の下で親友マーク・トウェイン[55]の写真を撮影した際に映ったもので，これが，アメリカで撮影された最初のＸ線写真と言われている[56]。

テスラという人物は，いくらか過剰なところのある人物であって，この未知の放射線を用いていささか過激な実験を数多く行っている。レントゲンの発見後に助手や自らが被写体となって，「一二メートル離れたＸ線装置で放射線を人間の頭部に四〇分間照射し，頭蓋骨写真を撮影」するなどを始めたのである。その際に（放射線を浴びている際に），テスラは間歇的に強烈な眠気に襲われ，放射線を浴びている間はなぜか時間が速く過ぎてゆくような感覚を味わったとも報告している（おそらく，これは，気が遠くなった，あるいは気を失いかけたのであろう）[57]。その後もテスラは，一連の高性能のガイスラー管による実験を推し進め，徐々にその危険性を認識するに至る。同じような実験を繰り返したエジソンにいたっては，助手を皮膚癌で喪うという悲劇にも見舞われている[58]。当然と言えば当然ではあるが，発見されたばかりのＸ線は，その危険性についてまではさすがに認識されてはいなかったのである。

ところで，当時，もっとも高電圧での放電実験を行うことができたのは，他ならぬテスラであったことはあまり知られていない。テスラは，いわば，科学技術の天才で「電気の魔術師」あるいは「ニューヨークの魔術師」とも称され，発明王エジソンの最大のライバ

---

(55) マーク・トウェイン（1835〜1910）はアメリカの作家・小説家。植字工，蒸気船の水先案内人，炭鉱労働者，新聞記者など様々な職を経験する。代表作に「金ぴか時代」，「トムソーヤの冒険」，「王子と乞食」，「人間とは何か」などがある。ニューヨーク社交界でテスラと親交を深めたことでも有名である。

(56) 新戸雅章，前提書（脚注(7)を参照のこと），218頁。

(57) 新戸雅章，「知られざる天才ニコラ・テスラ エジソンが恐れた発明家」，平凡社新書（2015），105頁。

(58) テスラは，1896年３月から一連の実験結果を「エレクトリカル・レビュー」に投稿している。その中で彼は，Ｘ線が何らかの物質の流れであることを確信するようになり，これを用いて化学物質を体内に送り込む可能性や放射線治療の可能性にも言及している（例えば，Ｘ線を浴びていると眠気や時間感覚の変調だけではなく，体内が暖かくなる，ということも述べており，これがきっかけで治療法の研究を進めることになるのであった）。ところが，おそらくは過剰に放射線を浴び続けたからであろう，テスラは，1897年の春先から数週間にわたって原因不明の体調不良（病気）に陥っている。また，Ｘ線を浴びた助手の皮膚がめくれてしまったり腫れ上がったり，変色したり，あるいは高熱を出したりした報告もなされている。同年の４月６日にニューヨーク科学アカデミーで行われた講演でも，テスラは，自分の観測結果を基にしたＸ線の危険性とその制御法（シールド法）についていち早く報告している。—新戸雅章，「テスラ 想像力の謎」，工学社（2002），161〜164頁より（脚注(9)の文献に同じ）。

ルであった⁽⁵⁹⁾。

いずれにせよ，スミス氏，クルックス卿，電気の魔術師テスラ……，そして，おそらくはさらに多くの他の人々がこの現象（そしてこの現象に付随する現象）をことごとく見逃してしまった。しかし，レントゲンはこれを見逃さず，この放射線の引き起こす不可思議な現象を詳細に観察したのであった。レントゲンの偉大さはまさしくこの一点に集約されているのである。

では，なぜレントゲンによる透過放射線の発見が「その後の百年を象徴する出来事」なのであろうか？　これは，今日の科学のあり方を思い浮かべてみれば分かる。これ以後，物理学は，そして科学は，ミクロに迫り，あるいは巨大な宇宙に眼を向けて，ミクロにあっては見えないものをあたかも透過し，透視するかのごとくに見ることで（あるいは観ることで），そしてまた，マクロにあっては決して見ることのできない遠方をあたかも引き寄せるかのごとくに見ることで（あるいは観ることで），今日のような巨大科学へと至ったからである。いや，かかる領野を観ようとする知的好奇心による導引が科学を今日のような巨大な姿へと至らしめたのである，と述べる方が適当なのではあろう。―さらにまた，付言しておくべきは，この影響は科学の世界だけに限られず，人間の世界認識一般にまで及ぶということである。Ｘ線の存在がはっきりと示唆したことは，見えないけれど存在しているものへの確信でもあったのである（例えばこうした確信が，神秘主義の興隆を後押しすることになるのである）。

ともあれ，それは人間の認識限界の絶え間なき拡大とその挑戦であって，先に述べた胸部Ｘ線写真への応用はその拡大が最初に実用化されたものである。そしてまた，極めて初歩的ではあるが，非常に象徴的な実用化の事例だったのである。

科学は顕微鏡と望遠鏡の科学であった，というのがこの百年間，つまりは二十世紀の科学であったのだ，と述べてもまったくもって過言ではないのである。そして，この傾向は二十一世紀になった今日にあっても，いましばらくは持続すると思われる。もちろんそれが今後われわれに，どのような認識論上のあるいは精神上かつ思想上の（そしてさらには宗教上の）変化をもたらすかは，まさしく未知である⁽⁶⁰⁾。

⁽⁵⁹⁾　メディアは，エジソンを彼の研究所がメンローパークにあったことからエジソンを「メンローパークの魔術師」と称した一方で，テスラを彼の研究所がニューヨークにあったことから「ニューヨークの魔術師」あるいは「電気の魔術師」と称したのであった。―新戸雅章，「テスラ 想像力の謎」，工学社（2002），10頁より（脚注⑼の文献に同じ）。

⁽⁶⁰⁾　ただし，幾人かの論者が述べるように，今日，人間の文明は明らかに停滞期・後退期にさしかかっており，やがて緩やかに科学の時代が終焉を迎えることはほとんど決定的であるように思わ↗

4：放射能の発見

この時期，つまり十九世紀後半から二十世紀の初頭，さらに限定すれば1900年を挟んだ数年の間，またしてもその後の百年間を決定づける重大な発見があった。ベクレル[61]による放射能の発見，そしてそれに続くキュリー夫妻[62]による放射性元素の系統的な研究である。これらの発見が極めて重大な出来事であったということは言を俟たない。これらの現象は，まさしく原子の時代の幕開けを期したのであった。

↘れる。―例えば，オルテガ「大衆の反乱（La rebelion de las masas, 1929）」を参照のこと（または，拙論「なぜ量子の歴史を紡ぐのか？―量子論の歴史，その序論として―（近畿大学商経学叢62(1)，2015)」を参照のこと）。

(61) アンリ・ベクレル（Henri Becquerel, 1852〜1908）はフランスの物理学者。パリに四代続いた学者の家系の三代目として生まれる（祖父，アントワーヌ・セザール・ベクレル，1788〜1878，は自然科学者。父，アレクサンドル・エドモン・ベクレル，1820〜1891，は物理学者，息子ジャン・ベクレル，1878〜1953，も物理学者。彼ら四代は，世襲的にパリ自然誌博物館の教授を務めた)。エコール・ポリテクニークに学び，同校の教授となった（自然誌博物館教授と兼務)。1903年，キュリー夫妻と共に放射能の研究でノーベル物理学賞を受賞した。なお，放射能の単位ベクレルは彼の業績に因んでつけられた。

(62) ピエール・キュリー，マリー・キュリー夫妻，(夫ピエール，Pierre Curie, 1859〜1906, 妻マリー，Maria Sklodowska Curie, 1867〜1934）は共にフランスの物理学者，化学者。ただしマリーはポーランド出身である。1903年にベクレルと共にノーベル物理学賞受賞。

ピエール・キュリーは，パリに生まれ，パリ大学に学んだ。妻マリーとの共同研究を始める前は特に磁性の研究で知られていた。「キュリーの法則」(常磁性体においては，磁化が温度に反比例する法則)，「キュリー温度（点)」(強磁性から常磁性への転換温度）は磁性の研究による彼の業績である。1906年４月19日，ドフィーヌ通りで馬車にひかれて死亡。

彼は，エコール・ポリテクニークの出身ではなかったため，生涯，出世には恵まれず（また本人も途中から興味を無くしたことから)，薄給のまま研究を続けた。ピエールがパリ大学に教授として迎えられたのは1904年になってからであった。

マリー・キュリーは，ポーランドのワルシャワに生まれ，24歳の時にパリに出てパリ大学に学んだ。ピエールの死後，夫のパリ大学での職位を受け継ぎ，1906年パリ大学教授となった（パリ大学初の女性教授であった)。夫の死後も黙々と研究を続け，1911年には放射性元素（ラジウム，ポロニウム）の発見とその性質についての研究に対して二度目のノーベル賞（今度は化学賞）を受賞した。この受賞の間際，マスコミにランジュバン（ポール・ランジュバン，Paul Langevin, 1871〜1946, はフランスの物理学者，パリのエコール・ノルマルで学んだ後，ケンブリッジへ留学し，トムソンの薫陶を受ける。ソルボンヌ大学でピエールの指導で学位を得て，1904年，コレージュ・ド・フランス教授となる。主に，磁性体の研究で知られる。）との不倫をリークされて（1910)，マリーはマスコミから総バッシングされている。意気消沈していた彼女を励まして授賞式への出席を促したのはアインシュタインであった。なお，この不倫には諸説あるが（事実無根であるなど)，おそらくは事実である。当時，ランジュバンは夫人との仲がよろしくなく，後に離婚している。

マリーは，長年にわたる放射性元素の研究で晩年は健康が優れず，67歳で死去した。彼女の直筆の論文や料理の本といった日用品などなどは，現在でもまだ放射線を放射しており，これらの一部を閲覧するには防護服の着用が義務づけられている。

おそらくは史上もっとも有名な女性科学者であり，注釈の必要もないほど有名であることは言うまでも無い。

なお，キュリー夫妻の娘イレーヌ・ジュリオ＝キュリー（Irène Joliot-Curie, 1897〜1956）もその夫フレデリック・ジュリオ＝キュリー（Fréderic Joliot-Curie, 1900〜1958）と共に1935年に人工放射性元素の発見でノーベル化学賞を受賞している。

1896年１月20日，ポアンカレからパリの科学アカデミーでの会合でレントゲンの例の写真を見せられたベクレルは，その未知の放射線が，陰極の反対側の蛍光を発するあたりから出ているらしいことを聞いた[63]。それを聞いたベクレルは，ただちに（その翌日から）蛍光物質がＸ線を出しているか否かを調べ始めた。またポアンカレは，「充分に強い蛍光を発する物質は，その蛍光の原因が何であろうと必ず光と同時にレントゲンのＸ線を出すのか」という質問を同年１月30日の科学総合報告に提出している。ベクレルは，この問いに答えるように，２月24日のアカデミーにおいて，燐光物質（ベクレルが使用したものは，ウラン塩，硫酸ウラニルカリウム）が光を通さないはずの紙をすり抜けるような放射線を出している，という報告を行っている。

ベクレルが行った実験は，単純なもので，写真乾板を黒い厚紙で被っておき，その上に燐光物質を乗せ，全体を日光に晒すというものである。こうすれば，日光によって励起された燐光物質が写真乾板を感光させる放射線を出しているか否かが分かる。その第一報は，あたかもＸ線のようなものが放射されており，写真乾板に影を作る，というものであった。

ところが，実験を続ける中で，この作用がまったくの暗がりの中でも生じるということが分かった。これは，ベクレルの報告によれば，1896年２月26日と27日のパリ天気が悪かったことによる。ベクレルは述べている，

> これらの日には太陽はほんの断続的にしか現れなかったので，私は用意した実験をそのままにして，シャーシーをウラン塩の薄片をつけたまま引き出しの暗がりにもどした。次の日にも太陽はまだ現れなかったので，私は非常に弱い像を見出すことを予想して３月１日に写真乾板を現像した。ところが反対に，強度の強い影が現れた。[64]

すなわち，作用は暗がりの中でも進行していたのである。

そしてベクレルは，二ケ月後の報告で，

---

(63)　ガラス管の陰極の反対側のガラスには蛍光物質が塗ってあり（塗られていないものもあるが），ベクレルは蛍光物質が陰極線で励起されてＸ線を出したのであれば，クルックス管のような装置を使わなくても蛍光物質を励起しさえすれば，それが出すＸ線を捕まえることができると考えたのである。

(64)　H. Becquerel, Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents,「燐光体によって発せられる不可視放射について」，Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris, 122（1896）pp.501～503.

なお，これはベクレルの第二報であって，第一報は，短文の報告として Comptes Rendus の同じ号に Sur les radiations émises par phosphorescence,「燐光によって発せられる放射について」，Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris, 122（1896）pp.420～421. がある。（両者とも邦訳は物理学古典論文叢書７）

ウラン塩の放射は，その物質を光にさらすときばかりではなく暗がりに放置しておいても放出され，さらに，同じさまざまのウラン塩片は既知のあらゆる励起放射から遮断して二ヶ月以上たっても，ほとんど感知されるほど弱まらずに新しい放射を放出し続けた。[65]

と述べている。こうして，これまでに知られている燐光や蛍光[66]として発せられる光の放射には帰せられない何らかの不可視放射の存在が示唆され，ベクレルは，ウラン塩が，燐光性のものでもそうでないものでも，あるいは溶解性のものでも結晶であっても同じ結果を生じることから，この放射線がウラン元素から出ているらしいと結論している。また，彼は，この放射線が気体をイオン化して導体化し，電流を流すこともつきとめたのであった[67]。

この新しい放射線の研究を飛躍的に進めたのがピエールとマリー・キュリーの二人である。まずマリーが1898年にベクレルが発見したものと同様の放射線がトリウムからも出されていることを発見した。この研究の中で彼女は，極めて強い放射線を出す鉱物があることを述べ，ウランよりも放射能[68]の強い元素の存在を示唆する。そして同年７月には，ピッチブレンド[69]の中から新元素「ポロニウム」（後にマリーの故国ポーランドに因んで命名された）を分離し，「ピッチブレンドに含まれる新放射性物質について」[70]というマリーとピエールの共著論文としてコントランジュ（Comptes Rendus, de l'Academie des Sciences）へ報告するのである。

(65) H. Becquerel, Emission de radiations nouvelles par l'uranium metallique,「金属ウランからの新放射の放出」, Comptes Rendus, de l'Academie des Sciences, Paris 122（1896）pp.1086～1088.（邦訳：物理学古典論文叢書７）

(66) これまで燐光と蛍光をあまり区別しないで使用してきたが，基本的に蛍光物質は電磁波による励起がなくなれば光るのを止め，燐光物質は励起がなくなってもしばらく光を発し続ける物質のことを指す。非常に紛らわしいのだが，いずれも励起されて光を発するものである。これに対して，ベクレルの発見した現象は，励起がないにもかかわらずなんらかの放射線を出していたのである。

(67) これは，放射性元素から放射された粒子が気体の原子に衝突して気体の原子から電子をたたき出し，たたき出された電子が電流を担うことによる。―もちろん，この当時ではこの機構はまだ分かってはいない。

(68) 放射線を放射する能力，radioactivity, すなわち「放射能」はマリーの造語であり，1898年のマリーとピエールの共著論文「ピッチブレンドに含まれる新放射性物質について」（以下の脚注(70)）が初出である。

(69) ピッチブレンドとは，瀝青ウラン鉱のことで，ピッチ状の油脂光沢があることからこのように命名された。

(70) M. Curie et P. Curie, Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pechblende,「ピッチブレンドに含まれる新放射性物質について」, Comptes Rendus, de l'Académie des Sciences, Paris, 127（1898）pp.175～178.（邦訳：物理学古典論文叢書７）

その後も彼らの研究は，驚くほどの悪条件の中で百キロ単位の鉱石を人力で溶かして濃縮し，それを分離するという，まったくもって今日では考えられないようなおそろしく原始的な方法で継続された（なんとその総計は11トンにも及んでいる！　こんなものはもはや人間業ではないと言わざるを得ない！）。その結果として二人は，ラジウムとアクチニウムの発見を成すのであった。彼らは，この研究成果を1900年にパリで開催された第三回国際物理学会で発表している。そこで，彼らは，正確に，こうした放射線を放射する性質は，原子そのものの性質であると推定して結論している。もちろん，未だ，その性質たる内部機構は定かではなかった。しかし，こうして人々は（いささか仰々しいが，本当は，人類は，と言うべきであろう），その核心へと迫るべく不可思議な現象についての合理的な認識を着実に積み重ねていったのであった。

5：アルファとベータ，そしてガンマ

パリでキュリー夫妻がポロニウムとラジウムを発見したちょうどその頃，ケンブリッジのキャベンディッシュ研究所では，ラザフォード(71)がウランから二種類の放射線が出ていることを確認しており，これをアルファとベータ——α線とβ線，と呼んだ。1898年のことである。一連の研究で，ラザフォードは，アルファ線は透過性が低く，たった0.001ミリのアルミニウム箔をも透過できないことを見出し，これとは対照的にベータ線は透過性が高いことを見出していた。

さらに，二年後の1900年には，フランスのヴィラール(72)によって透過性が高く，電荷を持たない放射線が発見され，1903年にラザフォードがこれをガンマ線——γ線と名付けた。

これらのうち，ベータ線とガンマ線の正体は比較的早く判明した。ベータ線は1899年，ベクレルによって磁場で陰極線と同じ方向に曲がることが発見され，そのm/e比からこれが電子であることが判明した（ただしその速度は陰極線のそれよりもはるかに速かった）。

---

(71)　アーネスト・ラザフォード（Ernest Rutherford, 1871～1937）はニュージーランド生まれ（ネルソン近郊のブライトウォーター）のイギリスの物理学者。カンタベリー大学を卒業後，ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所へ留学しトムソン（本論の脚注(37)参照）の指導を受け，研究員となる。その後，カナダのマギル大学教授（新設されたマクドナルド物理学研究所）を経てイギリスに戻り，マンチェスター大学教授，キャベンディッシュ研究所所長となった。α線とβ線の発見（1898），放射性元素の崩壊（1902），金の薄膜にα線を照射して原子核の存在を示した実験，いわゆるラザフォード散乱（1911），ラザフォードの原子モデル（1911），など数々の業績で知られ，原子物理学の父と呼ばれる。1908年，放射能に関する研究でノーベル化学賞を受賞。1931年には男爵となり，1st Baron Rutherford of Nelson（初代ネルソンのラザフォード卿）となる。

(72)　ポール・ヴィラール（Paul Ulrich Villard, 1860～1934）はフランスの物理学者，化学者。1900年にγ線を発見した。

ガンマ線は，磁場によって曲げることができない放射線であったが，おそらくは波長の非常に短い光であろうと推測されていた（これが実験的に証明されるのは1914年である）。一方，アルファ線だけは正体不明のままであったが，1903年にラムゼー(73)とソディ(74)によってヘリウムがラジウム塩から作られることが見出された。そして，1908年11月(75)にはラザフォードとロイズ(76)によってラジウムから放射されたアルファ粒子のスペクトル分析によって，これがヘリウムであることが確認されたのであった(77)。

こうして，ミクロへと迫ってゆく様々な現象が十九世紀から二十世紀への境にかけて次々と発見され確認されていった。そして，そのいずれもが，原子の基本的な性質と不可分であり，密接に関係しているらしいと漠然と考えられていたのである。

ちょうどその頃，原子概念を根底から揺るがす，あるいはその概念変更を迫る，決定的な実験が進行中であった。原子の崩壊と変換である。

6：崩壊する原子，あるいは変換する原子

放射能と原子の性質について決定的に重要な発見は，原子が変換するらしい，という発見である。これは今日の言葉で述べれば「原子核の崩壊＝放射性崩壊」である。

この現象は，それとは充分に知られないまま1900年，クルックスによって確認されていた。クルックスは，ウラン塩の溶液を水酸化鉄で分離して沈澱させると放射能は沈殿物の方へいってしまいウランの方の放射能が弱まるが，しばらくすると（数日後）沈殿物の放射能が弱まりウランが放射能を回復するという事実を見出している。同様の現象は，ウラン以外の放射物質でも見られ，物質によって放射能の回復と喪失の時間が異なることまで

(73) ウィリアム・ラムゼー（William Ramsay, 1852〜1916）はイギリスの化学者。1898年，クリプトン，キセノン，ネオンを発見したことで知られる。ブリストルのユニバーシティ・カレッジ，およびロンドンのユニバーシティ・カレッジ（UCL）の教授を歴任した。1904年，ノーベル化学賞を受賞。

(74) フレデリック・ソディ（Frederick Soddy, 1877〜1956）はイギリスの化学者。オックスフォードのメルトンカレッジを卒業し，1900年，カナダのマギル大学でラザフォードの助手となった。アルファ崩壊，ベータ崩壊などを見出し，1921年，放射性物質についての研究でノーベル化学賞を受賞。1919年から退職する1936年までオックスフォードの化学教授を務めた。

(75) E. Rutherford and T. Royds, The Nature of the α particle from Radioactive Substances, 「放射性物質からのα粒子の本性」, Philosophical Magazine, (6), 17（1909）pp.281〜286.（邦訳：物理学古典論文叢書７）。—論文の公表は1909年だが，本文ではこの論文の末尾に記載されている脱稿日1908年11月を記載した。

(76) トーマス・ロイズ（Thomas Royds, 1880〜1955）はイギリスの物理学者。特に太陽物理学の研究に従事した。マンチェスター大学で学び，インドのコダイカナル太陽観測所で太陽スペクトルの研究を行った。

(77) これら一連の実験は，アルファ線の m/e を計測することで為された。

クルックスは見出している。

ラザフォードとソディは，こうした現象をさらに詳しく研究し，1902年，「放射能の原因と本性」(第一報と第二報の二編)[78]として現代的な解釈，すなわち，原子が変換したのであると解釈することで，文字通り，それまでの自然観に決定的な変貌を促すことになった。それによれば，放射能という現象は，一つの化学元素から別の化学元素への変換（変化）の過程で生じるものであり，その過程はアルファ粒子やベータ粒子を放出することによって生じる，というのである。彼らは，これを以下の実験結果から結論付ける。まず，使用する述語の意味について述べておこう。

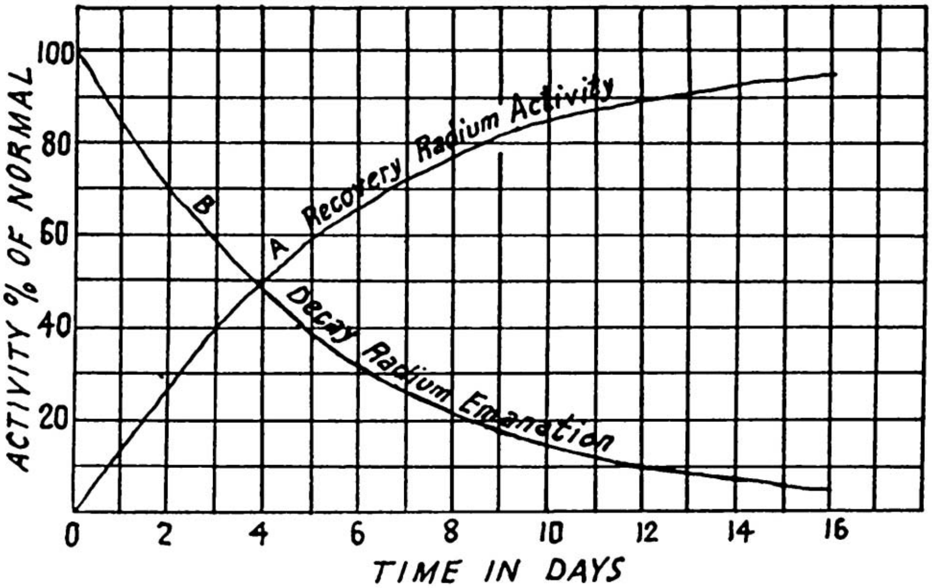
- トリウムＸ：トリウムから分離されたもの。
- トリウム・エマネーション：トリウムから出ていると思われる気体で，それをフラスコに集めたもの（エマネーションは，emanation で日本語文献では，エマナチオンとも表記される)。トリウムに空気を吹き付け，これをフラスコに集めると強い放射性を示す気体としてラザフォードが命名した。

すべて「トリウム」と記されていてどうにもややこしいのであるが，トリウムとトリウムＸはトリウム塩の溶液にアンモニアを加えて水酸化トリウムを沈澱させることで分離する。すなわち，溶液にはトリウムＸが残り，沈澱物にはトリウムが濃縮されて分離される。こうすると，トリウムからはトリウム・エマネーションの発生が無くなる。すなわち，分離されたトリウムには放射能の発生能の低下が見られる。ところが，しばらく時間が経過するとこの発生能が徐々に回復してきて，逆に分離精製したトリウムＸからの発生能は減衰する（これはクルックスが見出したことと同じである)。彼らはこれを，トリウムＸは，トリウムに含まれていた不純物ではなく，トリウムからの生成物であり，トリウム・エマネーションはトリウムＸから生成される，と解したのである。すなわち，ある化学元素か

---

(78) E. Rutherford & F. Soddy,
第一報：The Radioactivity of Thorium Compounds, Ⅰ: An Investigation of the Radioactive Emanation, Journal of the Chemical Society, 81（1902）pp.321～350.（1901年12月に投稿し，翌年１月16日に口頭発表。そして1902年に公刊された。）
第二報：The Radioactivity of Thorium Compounds, Ⅱ: The Cause and Nature of Radio-activity, Journal of the Chemical Society, 81（1902）pp.837～860.（1902年４月29日に投稿し，５月15日に口頭発表。そして同年に７月に公刊された。）
また，これらは，加筆修正され，以下の二報となって再び公刊された。
第一報：The Cause and Nature of Radioactivity, part Ⅰ, Philosophical Magazine, 4（1902）pp.370～396.
第二報：The Cause and Nature of Radioactivity, part Ⅱ,「放射能の原因と本性Ⅱ」, Philosophical Magazine, 4（1902）pp.569～585.（邦訳：物理学古典論文叢書７）

ら別の化学元素へアルファ線やベータ線を放出することによって変化するのであると。さらに，一連の研究の集大成たる翌年の論文「放射性変化」(1903)(79)では，この変化（崩壊）の生じる率を正確に算定し放射性変化の法則として定式化している(80)。（図-2参照）



〈図-2　一方の放射能が減退（増進）してゆくに伴って一方の放射能が増進（減退）してゆくことが見て取れる。1903年論文（脚注(79)）より。〉

以上を今日的な表現でまとめると以下のようになる。まず，トリウムXとはラジウム228（^{228}Ra）と224（^{224}Ra）の混成で（普通のラジウムは226），トリウム・エマネーションとはラドン220（^{220}Rn）のことである（普通のラドンは222）。つまり，彼らの実験においてトリウム（^{232}Th）は，以下のような変化（崩壊）の過程を辿ったのである。

$$^{232}Th \rightarrow {}^{228}Ra + {}^{224}Ra \rightarrow {}^{220}Rn$$

もちろん，崩壊過程で放出するのはアルファ粒子（アルファ線）―つまりはヘリウム原子

(79)　E. Rutherford & F. Soddy, Radioactive Change,「放射性変化」, Philosophical Magazine, 5（1903）pp.576～591.（邦訳：物理学古典論文叢書７）

(80)　今，N_t を時間 t の時点で変化せずに残っている粒子の数とすると，放射性元素の粒子の数 N は，微分方程式 $dN = -\lambda N_t dt$ に従うとする（λ は定数)。これはそのまま現代の標準的なテキストに載っている表記である。

（^4He，—ただし，正確にはヘリウム原子核だがこの時点では原子核は発見されていない）である。

これは極めて重大かつ革命的な内容である。原子は，そもそもその語源からして不変で分割不可能なものあり，崩壊するということは想定されていなかった。また，元素がこのようにして生成されるということは，ほとんど錬金術的でもあった。しかしながらラザフォードとソディの発見は，原子が分割不可能なものではなく，分割可能であること，したがって，なんらかの下部構造を有することがほぼ確実なのであって（ということは，さらにより根源的な存在物があるということでもある），その結果としてさらに，かかる下部構造を統べる下部機構（いってみればなんらかの力学的機構）が存在するということを強く示唆することとなった。

かくして，かかる下部構造を統一的に理解し，出自を異にする黒体放射と熱統計との関係から仮想された量子を架橋して俯瞰する理論としての量子論（まずは前期量子論）の出現のお膳立てがなされたのであった——いや，言い換えれば，新理論は，こうした一見バラバラに見える個々の現象を俯瞰的に統べるようなものでなければならない，あるいは，もっと積極的に，俯瞰的に統べるようなものであるはずである，と考えられるようになってきたのであった[81]。

7：結語，あるいは続編への続きとして……

「未知—Unknown」という語を理論的な一貫性を有する説明がなされていない現象と広く解してみれば，本論で述べた放射線とその周辺に生じる現象の数々は，この時点ではまさしく未知であった。すなわち，種々雑多な現象についての充分な認識（理論化という形態の認識）には至ってはおらず，理論的な網の目に引っかかっていない。十分な認識に至るということは，既存の理論の網の目に接続可能な形で理論化することである，あるいはそうなることである。

科学の，ひいては数理物理科学の世界認識に対する威力は，一見するとまったく異なっ

---

(81)　本節（第6節）の作成には，特に以下の文献も適宜参考にした。
　1）T・J・トレン，「自壊する原子 ラザフォードとソディの共同研究」，島原健三 訳，三共出版（1982）. Thaddeus, J, Trenn, The Self-Splitting Atom, A History of the Rutherford-Soddy Collaboration（1977）, Taylor & Francis Ltd., London.
　2）J・ローランド，「ラザフォード—原子の開拓者—」，中村誠太郎，他 訳，鱒書房（1956），John Rowland, Ernest Rutherford, Atom Pioneer, E. Tuttle Co.,（1955）.

た諸現象に対して，理論的包摂を為すことで世界を一貫したパースペクティブのもとで理解可能にすることにある。理論的包摂を為すということは（新しい理論によって包摂するということは），同時に，新規な現象をそれまでの既存の世界へとその理論でもって接続することでもある。こうして出現した新しいパースペクティブが新しい世界観，新しい世界像を提示することとなる――なお，ここで述べる世界観（世界像）とは，認識論的な因果の連鎖のことであり，何を原因とし何を結果とみなすか，についての体系から演繹される世界についての認識のことである。

　ともあれ，かくして，新しい世界像（世界観）たるところの量子の理論の出現は，数々の未知の現象が発見されることで，徐々にその期が熟しつつあったのである――かく述べることで本論の結語とするものである。