

レントゲンによる X 線の発見とその科学史的背景¹

大井万紀人

専修大学自然科学研究所²

要 旨 1895 年に X 線を発見したレントゲンは第一回ノーベル物理学賞を受賞しているにもかかわらず、発見までの経緯やその評価に関して誤った記述が蔓延している。この状況は、レントゲンが自伝を残さなかったばかりでなく、研究ノートなどの書類が死去と同時に焼却されて残っていない [1] ことにも起因しているが、これに加え、他の研究者の妬みに由来する誹謗中傷に満ちた不正確な文書、あるいは X 線発見によって有名になったゆえの一般の人々による根拠のない噂話やその類の文書によって、レントゲン本人の正しい生き様やその業績の内容は相当程度に歪められてしまったことも原因にあげられる。この論文では、2 年間におよぶ文献調査を基に、レントゲンの業績ならびに X 線発見に至った実験の内容をできる限り正確に記述することを試みる。

1. 緒言

1895 年の冬、レントゲン (W. Röntgen, 1845-1923, 独) は X 線を発見した。人類が初めて見つけた「放射線」であり、その発見は科学者のみならず、一般の人々にも即座にそして驚きをもって受け入れられた。原子の実在が 2000 年以上の年月をかけてようやく認知されたことに比較すると、X 線の発見は対照的な経緯をたどったといえる。

原子の実在を人類が認めた科学史を語るとき、数千年に渡る長い歴史が展開されるのが通常である¹。一方で、放射線の発見に関しては、「人類は 19 世紀末までその存在に気づかなかったが、陰極線の研究を行っていた“平凡な物理学者”によって偶然発見されたのが X 線である」といった程度の簡単な記述が下されて終わることが多い。

X 線発見の経緯について、もう少し詳細に知りたいと思ってレントゲン自身やその業績について調べようとする、関連する文献や書籍がなかなか見つからずに苦労する人が多いだろう（筆者も苦労した一人）。明らかにファラデーやキュリー夫妻に比べるとその量は圧倒的に少ない。インターネット上でもその状況は変わらない。そもそも、レントゲンがどんな実験を行なって X 線を発見したのかよくわからないのである。以上のように、最初のノーベル賞受賞者としてはレントゲンに関する文献は異様に少なく、またあったとしても彼の物理学者としての能力を過小評価する文書が目

¹ The discovery of the X-ray by Röntgen and its background from a science-history perspective

² Makito Oi, Institute of Natural Sciences, Senshu University

³ すなわち、古代ギリシアのレウキッポスやその弟子デモクリトスによる「原子（アトモス=分割不能）」の概念から始まり、ドルトンやブリーストリー、ラボアジェらによる近代の化学反応研究の発展に伴う原子仮説への発展、さらにボルツマンの統計力学の基礎となった原子論の登場とマッハらによるそれへの批判、そしてアインシュタインやベランらによるブラウン運動の研究による原子の実在の確証へと続く。

立つのは奇異な感じであった。このことは、ファラデーの真空放電の論文 [2] を以前書いた時に感じていたことであるが、その後見つけた青柳の著書 [3] にその理由が 2 つ書かれていた。

そのひとつはナチスドイツにおける科学部門の最高顧問だったレナート (P. Lenard, 1862-1920, オーストリア-ハンガリー帝国、独) のレントゲンに対する嫉妬に起因するという説である。レナートはその立場を利用してレントゲンの地位や名声を失墜させるような否定的な書面や文書を部下に大量に書かせたのだという (いわゆるネガティブキャンペーン相当するだろう)。これを鵜呑みにした当時の人々および後世の歴史研究者や伝記作家は、レントゲンに関する興味を失ってしまい真剣に取り組まなかったのではないかという説である。もう一つは、20 世紀初頭にアメリカ合衆国の放射線学会の医師たちによる「いい加減な記述」が広まったことにより、多くの人がレントゲンの能力を過小評価してしまった可能性である。当時の放射線医師たちがその記述の原典としたのが、「T.S. ミドルトン」という今となっては「無名の人物」の逸話であるが、その内容は虚構に満ちていて (例えば、レントゲンは真空ポンプ装置の性能を上回る驚異的な肺活量を持ち、それが X 線発見の決めてとなったそうである)、ポピュラーサイエンスのあり方を考える上で非常に興味深い。

これらのことは、一般大衆に科学が広く受け入れられることの長所と短所を考える上で考察する価値があるし、人間として負の側面ももつ科学者たちの行動を考える上でも興味深い。この論文では X 線の発見という科学史の出来事を通して、以上のような側面を探求し、科学的発見の経緯を正しく記録することの難しさについて考察したい。

2. レントゲンの物理学者として評価

1901 年に第一回ノーベル物理学賞を単独で受賞したのがレントゲンであるから、当時の科学界において、レントゲンの業績や能力が高く評価されていたのは当然のことであろう。なかでも 1888 年に発表された、静電場中に置かれた誘電体が力学的に運動する際に物体表面に生じる電流とそれに伴う磁場の発生に関する論文 [4] は高い評価を受けた。ドイツ語圏の物理学者はこの研究のことをよく知っているようで、たとえばゾンマーフェルト (A. Sommerfeld, 1868-1951) の電磁気学の教科書 [5] ではこの現象を「レントゲン電流」と呼んで詳しく解説している。レントゲン電流の研究はローレンツ力の研究に関わったもので、当時の電磁気学の最先端のテーマである²。

またこの論文の付録では、論文で使った装置を応用して、地球の回転運動による「エーテル流」の効果が磁場を発生させるかどうか測定した結果についても報告があり、否定的な結果を得たことが示されている。これは前年の 1887 に行われたマイケルソンモーレーの実験と類似している。マイケルソンモーレーの実験結果は相対性理論の基本原則である光速不変の原理へ繋がる重要な研究

² ローレンツ力が定式化されたのは 1892 年である。

で、1907年にマイケルソンはノーベル賞を受賞している。このように、レントゲンは電磁気学の深い理解を持ち、相対性理論へ繋がる先端的な研究テーマに取り組む優秀な物理学者だったことがわかる³。

チューリッヒ工科大学で学生だったレントゲンの能力を見出し、卒業と共に助手に採用したクント (August Kundt, 1839-1894) は、レントゲンとともに音響学や光学の研究を行った。この研究を通して若いレントゲンの才能はベルリン大学の重鎮ヘルムホルツの耳に届いていた [1]。実は、レントゲン電流の研究の重要性をいち早く理解し、その研究成果を論文発表することを勧めていたのがヘルムホルツであった。また、ヘルムホルツはレントゲンをドイツ最古の名門大学であるギーセン大学の物理主任にも推薦していて、これによりレントゲンの経歴は確かなものになった⁴。レントゲンの評価は当時の物理学会では「第一級」であったことは間違いない。

ノーベル賞受賞に関しても、「平凡な物理学者による偶然の発見」だったとしたら受賞はならなかっただろう。長年に渡る卓越した物理研究と能力を認めた周囲の物理学者たちは、レントゲンによるX線の発見を「ついに大物を釣り上げたか」という感覚で見ていたのではないだろうか？⁵

しかし、現在容易に手に入れることができる文献や文書を見ると、その評価は必ずしも高くない。たとえば、最近放映された英国 BBC のドキュメンタリー番組“The Story of Science”の内容を元に書かれた書籍（の訳本 [6]）には「ヴィルヘルム・レントゲンという、自分の全盛期はもう過ぎてしまったと考えていた 50 歳になる平凡な物理学者だった」と書かれている。1959年にノーベル物理学賞を受賞したセグレ (E. Segre, 1905-1985, イタリア) ですらレントゲンの記述は似たような感じで、あたかも金鉱脈を偶然見つけた無学だが幸運な山師のような描写がされている [7]。

“レントゲンは.... 中略....1875年に、ドイツの小さな大学の物理学教授に任命され⁶、こうして良い、といっても特別優れているわけではない物理学者として順当な学問生活に

³ レントゲン電流の本質である動く電荷と電流そして磁場の研究はローレンツ力のみならず、相対性理論の基礎とも関連している。電荷が静止しているように見える静止系 O に対し、等速直線運動で移動する慣性系 O' を考えたとき、 O' から見た電荷は電流のように見える。したがってビオサバルの法則によって磁場が発生するはずであるが、静止系 O では当然ながら磁場は存在しない。観測者によって物理状況が異なり矛盾が生じるというこの有名な問題は特殊相対性理論によって説明される。レントゲン電流の現象はまさに動く電荷と磁場の関係を調べたもので、相対性理論の根幹に関わる重要な問題を研究したものといえる。

⁴ レントゲンの師クントはヘルムホルツの死去によって空席となったベルリン物理研究所の所長となっている。また、レントゲンはギーセンを去って、ヴュルツブルグ大学の学長に就任する際には、ヘルムホルツの一番弟子だったヘルツにギーセンでの後任を推薦した。ヘルツはボン大学の方を好んだため、この話は破談となった。後に、ボン大学でヘルツはレナートを助手に雇う。

⁵ Patton によると [1]、ノーベル賞選考委員会は、第一回ノーベル物理学賞はレナートとレントゲンの共同受賞とすべきである、と議決したにもかかわらず、スウェーデン科学アカデミーの判断によって議決は覆され、レントゲンの単独受賞となった。この理由は明らかになっていない。

⁶ おそらくホッペンハイム大学のことだと思われるが、この大学はシュツットガルトにあり、伝統的に農学や自然科学で知られている。現代においてもドイツのトップレベルの大学である。ちなみにシュツットガルトにはメルセデスベンツとポルシェの本社があり、工業と商業の盛んな街である。また、レントゲンが最初に職を得たのは、1875年ではなく、その前年であり、ストラスブール大学の講師になっている。ストラスブール大学は現在フランスの名門大学である。

入ったのである。(中略)彼は次々にいくつかの大学を移り,1888 年の秋にヴュルツブルグ大学の教授の職についた⁷。ここは最高水準の大学とは言えない⁸にしても,なかなかよい大学であった。1895 年 11 月の初めまでに,レントゲンは 48 編の論文を書いているが,これらは今では忘れられてしまった。しかし第 49 番目に,彼は黄金を掘り当てることになったのである。”

緒言でも述べたように,アメリカにおけるレントゲンについての間違った認識は北米を中心とした英語圏に広まっている可能性が高く,手に入れやすい文献やネット情報だけでもとづいて安易に伝記や随筆を書いた科学者やジャーナリストたちが,レントゲンについての誤解を再生産している可能性がある⁹。

レントゲンについての正しい記述がなされた最初の伝記¹⁰は 1931 年に出版されたグラッサー (O. Glasser, 1895-1964, 独, 後に米へ移民) の著書である [11]。ドイツ語の原著は 1934 年に英語に翻訳された。グラッサーはドイツ生まれであり,ドイツのフリーベルグ大学で物理の博士号を取得した後,アメリカに渡り医療物理の研究に従事した。特に,X 線の線量測定器の開発で知られている。これらの業績により,クリーブランド医療財団の生物物理部門の主任教授の地位に就いて,長い間活躍した [12]。X 線測定器の研究の傍ら,レントゲンの業績や為人が正しく世の中に伝わっていないことを不満に感じていた彼はドイツ語と英語に堪能なことを生かし,独米両国で出版された資料を徹底的に集め,その内容を分析し,本にまとめたのである。

グラッサーの本が出版されるまでの間,レントゲンに関する誤解や誤認に基づく事実無根の内容を含んだ様々な文書が大量に出回ってしまった結果,現在でもその影響が残っているのである。グラッサーの著作に基づかずに書かれたレントゲンの記述は,更なる誤解をいまだに生み出し続けていて,その代表が先に引用した BBC のドキュメンタリーであろう。グラッサーの伝記やその他の正確な科学史的分析に基づく考察を行う前に,1920 年代よりも前のアメリカでレントゲンに対する誤った認識がどうして広まったか見てみたい。その主な分析はグラッサーの小論文 [8] および青柳の著書 [3] に記されている。

1923 年にレントゲンが死去した際,アメリカでも追悼講演会が開催された。主催したのは北米放

⁷ これも不正確である。正確には単なる教授ではなく学長である。

⁸ ヴュルツブルグ大学はフランクフルトから 50km ほどの場所にあって,15 世紀創立の名門校である。セグレのいう「最高水準の大学とはいえない」この大学は今までに 14 人のノーベル賞受賞者を輩出している(物理学では量子力学の初期の発展に貢献した Wien や Stark, 最近では整数量子ホール効果の研究で知られる Von Klitzing がいる)。参考までに,日本人のノーベル賞受賞は全体で 23 人であり,その中でもっとも比率の高い東京大学の出身者ですら 11 人しかいない(文学賞と平和賞を除くと 9 人である)から,セグレの基準では東京大学は最高水準の大学とは呼べないことになる。

⁹ ユダヤ人だったセグレは第二次大戦のときアメリカに亡命し,マンハッタン計画にも参加している。また,BBC のドキュメンタリーの製作者たちは人気のある科学番組(例えば Walking with Dinosaurs など)を作った優秀な方々ではあるが,科学研究に直接携わったことのない文系中心のジャーナリストたちであった。

¹⁰ レントゲンの同僚であり友人だったゼンダー (L.Zehnder,1854-1849, 独) が 1930 年に書いた伝記があるようだが,おそらくドイツ語で書かれている上に広く読まれなかったため現在入手が困難である。

射線学会だった。この講演会の内容は学術雑誌にも掲載され、アメリカにおける、後のレントゲン科学史研究の主要な資料となった [9]。ところが、この文献に書かれている内容はほとんどが「デタラメ」で、不正確であった。レントゲンの性格や発見の経緯、物理学者としての能力などに関する誤った認識はこの文献ですで見られる。グラッサーや青柳の研究によれば、この誤った記述の根拠となったのが、1908年に一般向けの科学雑誌に発表された記事であった [10]。この記事を書いたバーンズ氏は今でいう「科学ジャーナリスト」だと思われ、その記事の内容も、「レントゲンの下で研究していた」と主張する「T.S. ミドルトン」なる人物から聞いた話をもとにした伝聞であった。シカゴで開業医を営んでいたというミドルトン氏は「レントゲンは市販の真空ポンプ装置の性能に満足せず、鍛え上げた自らの肺の力を使って高い真空状態を作り上げ、これがX線発見への成功の鍵となった」などという逸話を披露したり、レントゲンがX線を発見したビュルツブルグ大学にミドルトン氏は「医学生」として4年間留学し、レントゲンの指導下で研究を行なったという説明を提示した。レントゲンは物理学者であり、X線の発見は陰極線の解明という物理学の研究過程で成し遂げられたので、その医学への応用はレントゲン本人にしてみれば副次的なものであった。よくよく考えると、医学生が助手として陰極線の実験に従事するのはありえない話である。おそらく20世紀に入り、レントゲンの業績やX線の医学への応用が広まるにつれ、一般人の中にはレントゲンを医学研究者と誤解する人が増えてきたのではないだろうか。北米放射線学会は、まんまと「素人」に騙されてしまったのである。

1930年代に出版されたグラッサーの伝記により、レントゲンについての正確な記述が可能になったとはいえ、トムソン (J.J. Thomson, 1856-1940, 英国) による1897年の電子の発見によって陰極線自体の研究が廃れてしまったことや、陰極線の実験自体の複雑さのために20世紀の科学史家たちは不正確な記述を繰り返してしまった。

一方、ドイツではレントゲンに個人的な恨みを抱くレナートやその学派による誹謗中傷によって、レントゲンに対する興味を人々は失っていったらしい。この側面については後述する。

3. X線発見の経緯

既に述べたように、X線を発見した時、レントゲンは陰極線の研究を行っていた。陰極線とは、現代物理学の観点から見れば電子ビームのことであり、陰極線の研究を通して人類は「電子」という素粒子の存在に気づき、その流れが電流であることを知ったのである。

陰極線の研究はファラデー (M. Faraday, 1791-1867, 英) の真空放電の研究に端を発し、19世紀の半ばに、高真空下のガラス管に封入された電極間に飛ぶ、目に見えない光線として、クルックス (W. Crookes, 1832-1919, 英) やヒットルフ (J.W. Hittorf, 1824-1914, 独) らによって発見された。X線が発見される経緯を知るには陰極線研究の歴史を押さえておく必要がある。まずは、X線が発見される直前までの陰極線研究の状況についてまとめておこう。

1836 年頃、ファラデーは真空放電が赤や紫の派手な火花（アーク放電）を発することを発見すると同時に、陰極板の近傍は発光せず「暗黒部」となっていることに気づいた（ファラデー暗黒部）。真空ポンプの性能が上がるにつれ、ガラス管内の真空の度合いが向上し、それに応じて放電の様相が変化することが判明していく。1860 年代に、クルックスは真空度の上昇に伴い、ファラデーの暗黒部が次第に伸びていくことに気づき、大気圧の 100 万分の 1 にまで減圧すると、ついに暗黒部がガラス管全体に広がるのを確認した。このときガラス管内に発生していた火花放電に伴う発光は消滅したが、陽極の裏側のガラス管部分に緑色の蛍光発光を生じることを発見した（現代物理の観点から見れば、この蛍光発光は陰極線がガラスを構成する原子（酸素と珪素）を励起した結果生じる発光である）。この蛍光発光の存在は X 線を発見する際に重要な役割を果たす。1869 年、ヒットルフは、陰極と陽極の間に障害物を置くと、蛍光発光する部分に障害物の形が影となって浮かび上がることから、陰極から陽極に向かって目に見えない光線が飛んでいることを突き止めた。ゴールドシュタイン (E.Goldstein, 1850-1930, 独) はこの光線を陰極線と名付けた。

1870 年代以降、陰極線の本質についての研究は少しずつ進んではいたが停滞気味であった。クルックスを代表とする英国の物理学者は、陰極線は物質、すなわち原子に似た荷電粒子の流れと考えていたが、ヘルツ (H.R.Hertz, 1857-1894, 独) を代表とするドイツの物理学者は電磁波のような波動現象だと考えていた。特に、ヘルツは紫外線との類似性、特に紫外線が水晶を透過する性質に着目して研究を進めていた [13]。これには理由があった。

3.1 ヘルツによる電磁波と光電効果の実験

1879 年、ベルリン大学の博士課程にいたヘルツは指導教官のヘルムホルツから、マクスウェル (J.C.Maxwell, 1831-1879, 英) が数年前 (1873 年) 理論的に予言した電磁波 [14] の実在を確かめる実験を博士論文の題材とするよう教唆された。ヘルツはこの研究テーマは難しすぎると感じ、代わりに電磁誘導の分析をテーマにして博士号を取得したが、これ以来、ヘルツは長年に渡って電磁気学の研究に取り組むことになる。1886 年、ヘルツはライデン瓶に貯めた静電気をコイルに「流し込む」と、電磁誘導により二次コイルに発生した電圧は、断線した金属線の間火花を散らすほど強くなることに気づいた。この実験で、ヘルツはかつて博士号取得のためにヘルムホルツから提案された研究テーマ、すなわち電磁波の実在をどうやって証明すべきかという問題に対する答えを思いついたという。すなわち、電磁波の発信装置として、電磁誘導を利用した火花発生装置を利用するのである。金属線の間隙に火花を散らすほどの強い電磁場が空間に生成されれば、その波動は遠く離れた場所に伝搬して行き、そこに置かれた金属線の間隙（スパークギャップ）に再び火花を散らすことができるはずである。電磁波の検出に使うスパークギャップは現代科学の用語では双極子アンテナに対応する。これが史上初の無線電信の実験であり、ヘルツは「電磁波の発見者」という栄誉を

手中にした。

翌 1887 年、電磁波の受信装置に発生する火花放電をより明確に観察するために、ヘルツは装置全体を黒い箱の中にしまって実験を行うことにした。すると火花が弱くなることに気が付いた。箱から取り出し、次はガラス板を受信装置に被せてみたら、同様に火花が弱くなることが確認できた。一方で、ガラス板を外すと火花は長く発達した。面白いことに、ガラスの代わりに水晶の板を受信機に被せてみても火花は長く発達し、何も置かない場合と変わりがなかった。これらの実験を分析したヘルツは、火花の発達具合に差が生じるのは、送信機で生成された電磁波の成分のうち、紫外線がガラスや箱では吸収されてしまうのに対し、水晶では透過することに原因があることに気が付いた。この実験を一般化すると、2 枚の金属の板を離れた状態にし、その片方の金属に紫外線を照射すると火花放電が発生する、すなわち電流が金属板の間に流れることを意味している。これは光電効果に他ならない。電磁波の実在を確認したのと同じ装置を使ってヘルツは光電効果も発見してしまったのである。

このような経緯から、紫外線が水晶を透過する性質があることを知っていたヘルツは、陰極線が電磁波のような波動現象ならば、同じように水晶を透過するはずであり、陰極線の粒子説を唱えるクルックスら英国グループとの論争に決着を付けようとして実験を行っていたのであった。

3.2 レナートによる陰極線の実験

1888 年、ハイデルベルグ大学で博士号を取得したばかりのレナートは、紫外線と陰極線の類似性を調べたヘルツの実験の追試を始めることから陰極線の研究を開始した。1892 年からはボン大学に移り、ヘルツの助手として陰極線研究の最前線に立つ。ある日、レナートはヘルツの研究室に呼ばれ、当時ヘルツが見つけたばかりの新しい現象の実験を（ヘルツに代わって）さらに進めるように指示を受けた。ヘルツは他の仕事で忙しすぎて自身でこの実験を遂行することができなかったのだ。

1892 年にヘルツが見つけた新しい現象というのは、放電管の作成時にアルミ箔で覆われたウランガラスの薄片を仕込み、そこに陰極線が当たるようにしておくと、アルミ箔の裏側のウランガラスが発光するというものであった。光電効果の実験の経験に基づく陰極線の水晶透過性の確認はおそらく失敗し、金属箔に対する透過性へと研究の方向性が変わってきたのであろう¹¹。ウランガラスは陰極線の検出に利用しただけと思われる。筆者もウランガラスを使った実験をしたことがあるが、紫外線（ブラックライト）を当てると緑色に発光して綺麗である。陰極線がガラスに当たると同じ

¹¹ 陰極線は電子ビームに他ならないから、自由電子に富んだ金属薄膜に照射された場合、一次ビームが散乱したとしても、電子同士の衝突による二次ビームが発生して陰極線は金属薄膜を透過したように見えるだろう。一方、水晶は酸素原子 4 つと珪素原子 1 つが共有結合し SiO_4 構造が結晶構造を持った「 α 石英（あるいは低温型石英）」と呼ばれる鉱物であるから、陰極線を照射しても透過率は殆んどないはずである。

ような緑色の発光を生じるから、ヘルツは紫外線との類似性を探求するために、アルミ箔を透過する陰極線を検出し、陰極線が波動現象であることを示したかったのであろう。

陰極線の物質に対する透過性そのものに物理的な興味をもっていたヘルツに対し、レナートは陰極線の金属透過性を利用して、ガラス管の中に閉じ込められていた陰極線を外界に取り出すことに興味をもった。陰極線の物理的な性質の研究は外界に取り出した後で行えば良い、という立場であった。高い真空状態を保持するため、厚いガラスで作られた真空管の壁に陰極線を取り出すための穴(窓)を開ける必要があった。しかし、単なる穴では真空状態は壊されてしまうため、取出窓は陰極線を透過する物質で封しなければならなかった。ヘルツに倣い、当初は水晶を使っていたレナートだが、実験を繰り返し、特定の厚み(2.65 マイクロメートル)に調整すればアルミニウムの薄膜だけで封ができることを見出した。1894年、レナートは、後に「レナート管」と呼ばれることになる真空管を作成し、アルミニウム箔を透過して外界に飛び出す陰極線の生成に初めて成功したのであった(Fig.1 参照)。レナートの論文にはアルミ箔を透過した陰極線は空気中に2~3センチメートル侵入したことや、水晶を殆んど透過しないことが報告されている[15]。レナートはこの研究によりノーベル物理学賞を1905年に受賞している。

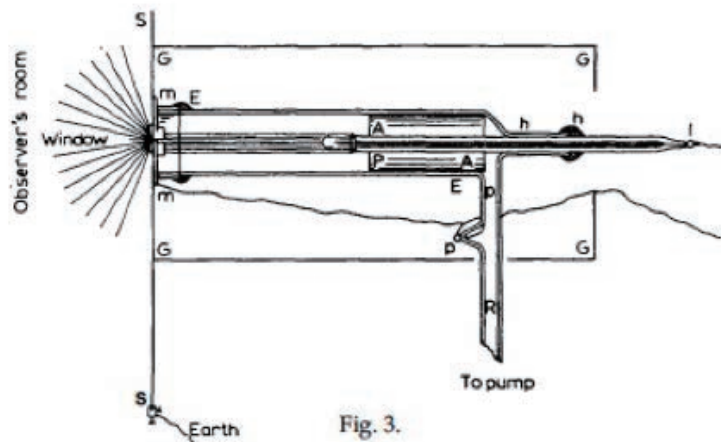


FIG. 1: レナート管の構造と外界へ取り出された陰極線のイメージ。出典：ノーベル賞受賞講演録より

多忙のため陰極線の研究をレナートに託したヘルツは、レナート管が完成した1894年に難病「多発血管炎性肉芽腫症」¹²に罹患し36歳で夭折した。電磁波の実在を確かめて無線通信の基礎を築き、量子力学発展の出発点となった光電効果を発見した上に¹³、陰極線の研究にも貢献したヘルツが

¹² この病気の原因は今でも不明らしいが、感染症が引き金となることが疑われている。

¹³ 光電効果は現在の太陽光パネルの基本原理でもある。また光電効果の物理的な説明は1905年にアインシュタインによって与えられた。

天寿を全うできたなら、1901年の第一回ノーベル物理学賞はレントゲンではなく、ヘルツに贈られていたかもしれない¹⁴。

3.3 レントゲンの実験

レントゲンがX線を発見したのは1895年11月初旬であるが、その前の年の5月から陰極線の本質についての研究を始めている[3]。1894年4月に発表されたばかりのレナート管による陰極線の外界へ取り出しについての最新の報告を読んだレントゲンは、物理学の最先端の研究テーマに間髪入れず挑戦したことがわかる。しかし、レントゲンが目指した当初の目標「陰極線の本質の解明」は、トムソンによって2年後の1897年に成し遂げられ、レントゲンはある意味競争に負けたことになるのだろう。もちろん、X線の発見によって当初の目標を達成する必要がなくなったとも言える。

グラッサーの伝記[11]によると、レントゲンが新しい研究を始めるときは、重要と思われる実験の追試や確定した結果についての再検証を丁寧に繰り返した後で、自らの実験に取り組むようにしていたという。したがって、陰極線の研究に取り組む決意をした際、レナートの実験結果を再現してみようと思ったのである。レントゲンは自分の実験装置は自作するという「古いタイプ」の研究者だったそうで[11]、おそらく最初はレナート管を自作しようとしたに違いない。しかし、すぐにその作成をあきらめ、助けを求めて2通の手紙を書くことにした。1通はレナート管そのものの調達に関係する手紙で、ミュラー社という放電管製造では当時よく知られたメーカーにレナート管を注文する手紙だった。2通目はレナート本人へ宛てた手紙で、アルミニウム箔を譲ってくれないか打診した手紙である。15歳以上年下のレナートからの返事は肯定的であり、実際アルミ箔のサンプルを幾つかもらうことができた¹⁵。また、ミュラー社からは数日後に新型のレナート管が届けられた。このようにして、1894年から1895年の前半にかけて、レントゲンはレナートの実験のみならず、ヒットルフやクルックスの実験も自らの手で追試し、その結果をひとつひとつ確かめていった。レントゲンの興味の中心は陰極線の本質の解明であり、そのためには強度の大きな陰極線を放電管の外に取り出す必要性があると考えていた。ところが、電圧を上げて陰極線の強度を増大し、より多くの陰極線を外界へ取り出そうとすると、アルミニウム箔が破損し真空状態が維持できなくなって

¹⁴ さらにいうと、現在マクスウェル方程式と呼ばれる電磁気学の基本方程式は、マクスウェルが書き下したのではなく、ヘルツによるものである。マクスウェルの原著に書かれた方程式は整理されたものではなく複雑な表式だった。本質を抜き出したヘルツの式によって数学的にも美しい形にまとめられたのである。ゾンマーフェルトらが述懐しているように、ヘルツの式を見て初めて電磁気学の本質が見えたと感じた物理学者は多かったようで、ボルツマンなどは「神が作った芸術品」と言ったそうである[16]。

¹⁵ いくらか作成や入手が困難だとしても見知らぬ研究者に実験用部品の貸与や譲渡を依頼するのは気が引けるし、そんな「あつかましい」ことをしたレントゲンの行動に眉を顰める人は多いのではないだろうか？このやりとりがどうして可能だったのかは、パットンの文書[1]にそのヒントが書かれていた。前述したように、レントゲン電流など電磁気学の研究で頭角を表したレントゲンの才能はベルリン大学のヘルムホルツの目に留まり、一流の物理学者としての地位が確定する。そのヘルムホルツの弟子の中で最優秀だったのがヘルツであったが、レントゲンは自分より年下のヘルツの才能を認め、深く尊敬していたようである。実際、ギーゼン大学の物理主任の地位をヘルツに譲ろうとしたこともある。そのヘルツの助手がレナートであった。したがって、レナートとレントゲンは全くの見知らぬ同士ではなかったと思われる。このとき、レナートはレントゲンのことを「同門の同士」とみなしていたと思われ、アルミニウム箔の譲渡も好意的に行われたのであろう。

しまった。またガラス管内の真空度を上げて、陰極線と空気分子の間の散乱を低減すれば、陰極線の強度を効率よく保持できると考えてはみたが、ここでもアルミニウム箔の破損が発生し実験はうまくいかなかったようである。大学の学長となったレントゲンは追試を一通りやり終え、大強度の陰極線取り出しの実験に失敗したところで陰極線の研究を中断した。しかし、この失敗をどのように乗り越えるべきか、ずっと思案していたのであろう。1895 年の 10 月のある日、その答えがレントゲンの脳裏に閃いたのである。

レントゲンが思いついたアイデアというのは、扱いの難しいレナート管をあきらめて、古いタイプの放電管（ヒットルフ/クルックス管¹⁶）に戻すことであった。ヒットルフ/クルックス管には「窓」はなく、真空を維持するための厚いガラスで陰陽の電極が覆われているだけである。ヒットルフが発見したように、陽電極の裏側のガラス部分には陰極線が当たって緑色の蛍光発光が生じるが、陰極線がそこを透過して外界に飛び出すようなことはなかった。それゆえに、アルミニウム箔の「窓」を備えたレナート管が考案されたのだった。レントゲンの実験では強度の強い陰極線を多量にレナート管から取り出そうとして、電圧を上げたり、真空度を高めたりしてみたが、アルミニウム箔が脆弱で、実験の足枷になった。しかし、古いタイプのヒットルフ/クルックス管ならば、分厚いガラスで覆われているから、少々電圧を上げても、真空度を高めたりしても破損する心配はない。では、ガラスが割れるほど思い切って電圧も真空度も上げてみたらどうだろう？もちろん実際にガラスが割れてしまうと実験は失敗してしまうが¹⁸、そのくらいの意気込みで従来の設定値を大幅に上回る電圧と真空度をヒットルフ管に適用してみたら、ガラスを突き抜けて陰極線が大量に透過してくるのではないだろうか？これがレントゲンに閃いたアイデアの概要である。

放電管の外に飛び出した陰極線の検出には蛍光物質を塗った板が用いられた。この目的のためにヘルツはウランガラスを使ったが、レナートはケトンと呼ばれる有機化合物やシアン化白金、そしてアルカリ土類金属と燐の化合物などを塗った板を用いた。一方、レントゲンは、レナートが使った物質の中からシアン化白金バリウムだけを選んで使用することにした。パットンによれば [1]、レナートはケトンを主に使ったらしい。ケトンは紫外線と陰極線にはよく蛍光を発生するが、X 線にはあ

¹⁶ 文献によってどんな放電管を使ったか記述が異なる。ノーベル委員会の文章¹⁷には「ガラス管」とだけある。アメリカ物理学会は「クルックス管」と言っている [20]。青柳の著書 [3] には「ヒットルフのガス放電管」とある。一方で、グラッサー [11]、パットン [1] そして wikipedia[21] には「ヒットルフ-クルックス管」と書いてある。また、レントゲン本人の最初の論文にはヒットルフ管、レナート管、クルックス管のなんでもよい、と一般的なことがらが書いてあるのみで、実際に自分がどの道具を使ったのか詳細な説明はない。また、レントゲンはノーベル受賞講演を辞退しているため、実験の詳細や発見の経緯を説明する講演録は残っていない。宮下 [22] の 1982 年の論文ではどの放電管を使ったか分析を行なっているらしいが、残念ながらこの文献を入手できなかった。半分諦めていたところ、レントゲンの 3 つ目の論文 [26] の最後に大きなヒントがあった。それによると、X 線の研究の初期、すなわち 1895 年 11 月初旬に強烈な X 線をヒットルフ管で発生させたとき、X 線の存在を視覚／刺激として感知できたと書かれている。ただ、目に刺激を感じたのはこの実験 1 回だけで、残りの実験において X 線を視覚に感じることはなかったという。その理由として、手持ちのヒットルフ管が全て破損してしまって、「別の放電管」を使わざるを得ない状況になったからだという記述がある。「別の放電管」というのが、クルックス管だと思われる。おそらく初期の実験において、高電圧高真空を限界値を試した実験においてはヒットルフ管のガラスですら損傷していたことが推測される。X 線の発見は「挑戦的な実験」によってもたらされたことが察せられる。

¹⁸ レントゲンは実際、ヒットルフ管を壊してしまい、残った「別の放電管」（おそらくクルックス管）で実験を続けた。

まり反応しないという。一方で、レントゲンが選んだシアン化白金バリウムは紫外線や陰極線のみならずX線にもよく蛍光を発光する性質をもっていた。これが運命の分かれ道だったのかもしれない。

また、ヒットルフ管やレナート管の陽極の後ろのガラスに陰極線がぶつかって発生する緑色の蛍光は、飛び出してくる陰極線の検出のためには邪魔な存在となるため、レナートは放電管を金属（主に亜鉛だったらしい）で遮蔽して実験したようである。ところが、レントゲンからの手紙の返事には「ダンボール紙を使用してみたらどうか」と書いたらしい。これは親切心からなのか、それとも実験が失敗するように願う悪意だったのかはわからない。結果として陰極線はダンボール紙を通過できないので、亜鉛よりも安価な材料で同等の実験が実施できたという意味では「役に立つ助言」になった。こうして、レントゲンはヒットルフ／クラックス管のガラス壁で発する緑色の蛍光が外に漏れ出すのを防ぐため、黒いダンボール紙で放電管を覆って実験を行うことになった。夕方から夜にかけて実験室の灯りを落とし、高真空状態で緑色蛍光のみならず、真空度が低い状態で発する派手なアーク放電やグロー放電ですら透過しないことを利用しながら蛍光遮蔽がうまくいっているか確かめることにしていた。

このようにして、レントゲンの実験はいつも緑色蛍光が透けて見えないようにダンボール紙で遮蔽し、その遮蔽具合を確認することから始まるようになった。この確認が終わったら、陽極の後ろ側でダンボール紙に細いスリットを開け、なるべく蛍光が漏れ出さないようにしながら陰極線を取り出し、それがどこまで飛び出すのか調べるため、シアン化白金バリウムを塗った蛍光版で検出を行ったのである。

実験を始めておよそ一ヶ月が経過した1885年の11月8日は金曜日であった。大学での講義や学長としての仕事を終えると、日の入りの早いヨーロッパの午後はすでに夕暮れであった。カーテンを閉め、灯りを落とし、いつものように放電管の緑色蛍光の遮蔽確認からレントゲンは実験を始めた。大強度の陰極線を外に取り出すため、レントゲンは放電管内の真空度を高め、電極間の電圧を上げていった。おそらくこの一ヶ月の実験により、どちらも相当高い値まで試していたはずである。遮蔽具合を確認するため、装置から1メートルちかく離れたところに置いてあったシアン化白金バリウムを塗布した蛍光版を取ろうと振り向いたレントゲンはそれが微かに光っていることに気づいた。装置の電源を落とすとこの光は瞬時に消え、電源を入れると瞬時に光った。いくら大強度の陰極線の取り出しに挑戦していたとしても、前日までの実験結果は放電管から数センチ程度のところまでだったに違いあるまい。したがって、電圧を徐々に上げた実験で陰極線が一気に1メートルもの遠方へ飛び出すことはまず考えられない。とはいえ、これが「新種の放射線」とであると断定するのは早すぎる。レントゲンはこの「新種の放射線の候補」をX線と呼んで、ここからクリスマスまでの7週間、夜の研究室に閉じこもって実験を繰り返すのである。

実験を繰り返すうちに判明したのは、X線は陰極線と異なり、透過能が非常に強いということ

あった。陰極線が透過できないガラスや水晶, ダンボール紙はもちろん, 厚い辞書や木材など様々なものに対する透過性を調べると, X 線はそのどれをも透過して後ろの蛍光板を光らせた。アルミニウムは 1.5 センチメートルの厚さにしても透過し, 1 ミリメートル程度の銅, 銀, 白金, 鉛などの金属も薄い板なら容易に透過した。(鉛は 1.5 ミリになると不透明になったが, その他の金属は透過を許した。) その他にもゴム, 液体の水, 雲母, 気体の水素, さまざまな物質について透過性を調べ上げた。これらの結果は陰極線では想像もつかないほどの強い透過性能を X 線がもっていることを示していた [3, 23]。

最大の驚きは, 様々な物質の透過性を調べようと標本を掴んでいる手に偶然 X 線が照射されたときに訪れた。自分の手の骨 (の影) が蛍光板に写ったのである。自分が見たものが信じられず, それから数日間というものと同じ実験をなんども繰り返した。頭が狂ったと言われそうで誰にも (特に同僚の物理学者には) 相談できなかったという。

親友の物理学者ゼンダーにも

誰にもこの研究のことは喋っていない。妻には、「レントゲンはずいに頭がおかしくなっ



FIG. 2: “Hand mit Ringer” (指輪をした手) と題されたレントゲンの妻バーサの手の X 線写真。レントゲンが論文と共に同封し, ケルビン卿など世界の有力物理学者に送った。妻バーサはこの写真を見たとき, “Ich habe meinen Tod gesehen! (I have seen my death!)” と叫んだという。[画像データ出典: wikipedia public domain]

たぞ」と言われそうなことを今研究している、とだけ伝えてある。

と手紙に書いただけだった。別の同僚の一人に「夜間にあれほど長時間、研究室に籠ってやっている実験は一体なんなのだ？」と問われたが、はっきりした返答をすることができなかった。レントゲンはX線が骨を映し出す現象の確認にかなりの時間を費やしたが、なかなか自分を納得させることができずに悩んでいた。

そんな中、レントゲンはレナートの実験のことを思い出した。レナートは陰極線の分布を検出する際に写真乾板を利用して記録していたのである。この方法を使えば「骨が写し出される」ことを記録でき、客観的な証明として論文で利用できると思ったのである。その夜の実験で手のX線写真を現像したとき、自分の骨が写った写真を見て安堵の吐息を漏らしたレントゲンの姿が想像できるようなのである。慎重なレントゲンはそれでもまだ不安に感じ、自分の妻をついに実験室に呼び寄せて彼女の手のX線写真を撮ったのである (Fig.2 参照)。

初めて自分以外の人間にX線で撮影した骨の写真を見せたレントゲンは、彼女が自分が見たものと同じものを見て、同じように驚愕しているのを確認した。自分だけが幻影を見ているわけではないとようやく納得したのであった。クリスマスはもう間近であった。レントゲンが実験をやめ、論文を書き始めたのがクリスマスの前だったか後だったかはわからないが、X線についての最初の論文が受理されたのは1895年12月28日であった。

4. レナートの攻撃

レナート管の考案や陰極線の研究の功績が認められ、レナートも1905年にノーベル物理学賞を受賞した。しかし、レナートを差し置いて最初にノーベル賞を受賞したレントゲンや光電効果の発見に関する優先権を巡って争ったトムソンに対し、レナートは憎悪の念を抱いた [3]。青柳の本には、1901年のレントゲンの受賞に対しては異議申し立てを行なったともある。

また、若きアインシュタインに光電効果の理論について先を越されたのは特に気に入らなかったようで、1922年にアインシュタインが光電効果の研究の功績によりノーベル物理学賞を受賞した際はノーベル委員会にまでもや異議を申し立てた上に、新聞にも投稿するなどしてアインシュタインの受賞に反対したほどである [3]。

アインシュタインへの攻撃が世論の同情を引かず無視されたと知った彼は、翌年から右翼の思想に傾き、ナチス党へ急速に接近していく。1930年にレナートは“Grosse Naturforscher”（自然科学における偉大な人々）という本を出版した [24]。この本に選ばれた科学者たちはすでに死去した人々のみであったが、1923年に逝去したレントゲンは含まれていない。時代順に書かれたこの本の最後を締めくくったのはハーゼノールというオーストリアの理論物理学者であるが、現代の物理学者にはあまり知られていない。これには理由がある。

1921 年, レナートは論文 [25] を書いて, アインシュタインが導出したというエネルギー E と質量 m に関する有名な式

$$E = mc^2 \quad (1)$$

はハーゼノールがアインシュタインに先駆けて発表しており, アインシュタインの業績ではないと主張していた。ただし, 上の式で c は光速を表す。ラウエ (M. von Laue, 1879-1960, 独) によってこの主張は即座に否定されたいが, レナートがこの主張をした理由は明らかであった。アインシュタインの評価を下げてかっただけであった。1930 年の著書の最後にハーゼノールを持ってきたのは, 「アインシュタインは偉大な科学者と呼ばれる資格はない」と宣言したかったからで, ハーゼノールが本当に「偉大」だったかどうかはなぞレナートにはどうでもよかったのであろう。

1933 年, ついにレナートはヒトラーに手紙を書いて忠誠を尽くすことを誓い, 科学政策において助言を行いたいと申し出た。ヒトラーは, レナートを科学部門の最高責任者に任命しこれに応えた。レナートはアインシュタインに対する攻撃を通じてユダヤ人科学者を誹謗し, 彼らをドイツの科学界から追放した。アインシュタインがアメリカ合衆国に亡命したのは 1933 年の初頭である。

レナートはユダヤ人を攻撃したが, おそらくそれはユダヤ人を本当に憎んでいたわけではなく, むしろユダヤ人だったアインシュタインを憎んでいたからだったと思われる。というのも, レナートが尊敬するヘルツはユダヤ人の血を引いていたからである。レナートの著書「自然科学における偉大な人々」のハーゼノールの 1 つ前 (つまり最後から 2 番目) の科学者としてヘルツの業績が詳細に記録されていて, レナートがヘルツを尊敬していたことがわかる¹⁹。

レナートが最高責任者の間にナチスドイツはレントゲンに関する誹謗中傷文書もたくさん書いた。レナートは口頭でレントゲンの評価を低く述べたが文書には残さなかったという [3]。レントゲンのことを心の底では認めていたのかもしれない。しかし, レナートが登用した若い科学者たちはレナートに忖度したらしく, レントゲンのことを情け容赦なく攻撃し, その評価を貶めるような記事もたくさん書いた。特に, レントゲンと同じビュルツブルグ大学の教授だったシュタルク (J. Stark, 1874-1957, 独) による誹謗中傷は酷かったという。

¹⁹ しかし, 早逝したヘルツを偲んで, 生誕地のハンブルグの市庁舎に設置された肖像画はナチスによって撤去された上, 迫害を恐れたヘルツの家族は 1930 年代に英国へ亡命することになった。レナートはこれに関して何も手を出さなかったということである。

5. 結論

「本来の研究目的を成就できず、たまたま見つけた謎の光線X線の発見により『棚から牡丹餅』的に有名になった、壮年期の普通の物理教授」という誤ったイメージを塗りつけられ、その「幸運」だけに人々の注目が集まり、レントゲンがどんな実験をしていたのか詳しい説明が書かれた文献が見つけにくい状態が発生してしまった。ドイツ国内におけるレナートのネガティブキャンペーンや北米における誤解なども、その状況に拍車をかけた。この状況はある意味現在も続いている。

また、グラッサーの伝記をはじめ、諸々の文献を読んだとしても、レントゲンが何をしていて、どのように幸運に恵まれたのかなかなかわかりにくい。陰極線の研究が完全に解決され下火になってしまった結果、研究の背景についての記憶が失われてしまったのも原因にあるだろう。筆者も当初はレナートの名前を聞いてもピンとこなかった上、ノーベル賞を受賞していることも知らなかった。ましてや受賞理由が陰極線を外界に取り出すためだけのデバイスの開発に過ぎないと知ったときは、ノーベル委員会の判断を不可解に感じたくらいである。その意味では、ヘルツとレナートの研究についての科学史を知ることは、レントゲンの業績を正しく理解する上で非常に重要であった。これを知ることで、レントゲンが何を指して実験をしていたかようやく理解できたのである。

レントゲンはノーベル賞受賞講演を断っている。これは彼の受賞に異議申し立てをしたレナートを思いやっていたのではないかと筆者は考える。レントゲンはX線の発見とその医学への応用に関して特許は取らず、万人にその使用を許した。ノーベル賞の賞金は全額ミュンヘン大学へ寄付した（受賞したとき、レントゲンはミュンヘン大学に移っていたが、研究をさせてくれた感謝としてミュンヘン大学のみへ寄付したものと思われる）。レナートやその取り巻きからの言われのない誹謗中傷には無言で耐えた。

少年期、詰問する教師に口を閉ざして友人のいたずらをかばったレントゲンは目をつけられ、退学を強制された。経歴に傷がついたのみならず、心にも深い傷を負ったはずである。ドイツ国内の大学へ進学する可能性を絶たれたレントゲンは苦勞してスイスのチューリッヒ工科大学に入学する。実は、ドイツ風の厳格な教育に馴染めなかったアインシュタインも少年期に教員と衝突し、ドイツの名門大学ではなく、チューリッヒ工科大学に入学している。レナートに憎まれたこの二人の天才は自由な学風に馴染み、平和を好む気質だったのであろう。それが天才ではなかったレナートの癪にひどく障ったのではないだろうか。

ただ一点筆者がレントゲンを責めたいのは、アインシュタインと違って、レントゲンはあまりにも無口過ぎたことである。彼に関する正しい科学史がなかなか完成しないのはその所為である。

参考文献

- [1] D. D. Patton, "A history of the radiological sciences", pp.31-46, Ed. R. Gagliardi, B. L. McClennan, Radiology Centennial Inc., American Roentgen Ray Soc. (1996)

- [2] 大井万紀人, 「ファラデーの真空放電実験の動機についての科学史的考察」 専修自然科学紀要 第 50 号 (平成 31 年 3 月)
- [3] 青柳泰司, 「レントゲンと X 線の発見」 恒星社厚生閣 (2000 年)
- [4] W. C. Röntgen, *Ann. Phys.*, **35**, p.264 (1888)
- [5] A.Sommerfeld, “Elektrodynamik” (1948); English translation, “Electrodynamics, Lectures on the theoretical physics”, Academic Press (1952)
- [6] マイケル・モーズリー, ジョン・リンチ (久芳清彦訳), 「科学は歴史をどう変えてきたか」 東京書籍 (2011 年)
- [7] エミリオ・セグレ, 「X 線からクォークまで」 みすず書房 (1982 年)
- [8] O. Glasser, *Am. J. Roentgenolgy and Rad. Therapy*, **25**, 437-450 (1931)
- [9] I. S. Hirsch, *Radiology*, **4**, pp.63-66,139-142,249-253 (1925)
- [10] E.E. Burns, *Popular Science Monthly*, **73**, pp. 554-556 (1908)
- [11] O. Glasser, “Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgen Strahlen”, Springer-Verlag (1931); English translation, “Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Röntgen rays”, Springfield (1934)
- [12] Encyclopedia of Cleveland History,
“Glasser, Otto”, <https://case.edu/ech/articles/g/glasser-otto>
- [13] ノーベル財団, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1905/lenard/biographical/>
- [14] J. C. Maxwell, “A treatise on electricity and magnetism” (1873)
- [15] P. Lenard, *Ann. Phy. Chem.*, **S1**, 225-267 (1894)
- [16] 砂川重信, 「電磁気学」, 岩波書店 (1977)
- [17] J. J. Thomson, *Electrician*, **3**, 672-674 (1894)
- [18] J. B. Perrin, *Comp. Rend. Acad. Sci.*, **121**, 1130-1134 (1895)
- [19] ノーベル財団, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/roentgen/facts/>
- [20] アメリカ物理学会 APS ニュース, <https://www.aps.org/publications/apsnews/200111/history.cfm>
- [21] Wikipedia [EN], https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Röntgen
- [22] 宮下晋吉, 科学史研究, **21**, pp.162-175 (1982)
- [23] W.C.Röntgen, *Sitzungs-Berichte Phy. med. Gesellsch.*, Würzburg, **28**, pp.132-141 (1895)
- [24] P. Lenard, “Grosse Naturforscher”, J.F. Lehmanns (1930); English translation, “Great men of Science”, G.Bell and sons (1933)
- [25] P.Lenard, *Ann. der Phys.*, **65**, pp.593-604 (1921)
- [26] W. C. Röntgen, *Ann. der Phys. und der Chem*, **64**, pp.21-40 (1898)