

Wojciech Sady

Dlaczego odkrycie promieni X przez Roentgena było naukowe?

Po pierwszych obserwacjach, dokonanych 8 listopada 1895 r., Wilhelm Conrad Roentgen przez siedem tygodni prawie nie opuszczał swego laboratorium. W ciągu tego czasu przeprowadził dziesiątki, a może setki eksperymentów. Użyte rezultaty przedstawił 28 grudnia 1895 r. sekretarzowi Würzburger Physikalischen-Medicinischen Gesellschaft w artykule *Über eine neue Art von Strahlen Erste Mitteilung*. Już w styczniu w „Nature” (t. 53, s. 274) ukazał się angielski przekład, *On a New Kind of Rays*; do tego czasu w najważniejszych laboratoriach Europy zdołano powtórzyć opisane tam eksperymenty i zapoczątkowano dalsze badania nad nowym, fascynującym zjawiskiem. Pięć lat później Roentgen otrzymał pierwszą w historii Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki – a jedynym po temu powodem był wspomniany artykuł. Niezależnie od rewolucyjności samego odkrycia był to znakomity tekst *naukowy*. Chciałbym poniżej wyjaśnić, na czym polegała jego *naukowość* – a tym samym sformułować *kryterium demarkacji* między nauką a nie- lub pseudonauką.

Pytanie o kryterium demarkacji zostało podniesione do rangi centralnego problemu filozofii nauki przez Karla Poppera (*Logik der Forschung*, 1934). Według niego, aby być (dobrym) naukowcem, Roentgen powinien: (1) sformułować „śmiałą” (ogólną, ścisłą i prostą) hipotezę teoretyczną; (2) wydedukować z tej hipotezy i wiedzy towarzyszącej „surowe” przewidywania, czyli zdania obserwacyjne, których prawdziwość byłaby w świetle samej wiedzy towarzyszącej mało prawdopodobna; (3) porównać te zdania obserwacyjne z wynikami doświadczeń; i ewentualnie (4), gdyby porównanie wypadło negatywnie, hipotezę odrzucić.

Kiedy czyta się artykuł Roentgena, jest oczywiste, że jego postępowanie badawcze nie spełniało Popperowskiego kryterium naukowości. Wprawdzie w ostatnim paragrafie (17) pojawia się hipoteza teoretyczna: promienie X są podłużnymi falami w eterze (numery w nawiasach odsyłają do kolejnych paragrafów *On a New Kind of Rays*). Została jednak tak sformułowana, że nie wynikały z niej,

w koniunkcji z wiedzą towarzyszącą, żadne nowe przewidywania. Nie znajdujemy w artykule deklaracji autora (której Popper się domagał), w jakich warunkach uznałby on swoją hipotezę za obaloną. I żadnych prób obalenia hipotezy. Hipoteza okazała się zresztą fałszywa – fizycy wkrótce uznali, że promienie X są falami poprzecznymi, a w dziesięć lat potem Einstein ogłosił, że eteru nie ma. Tak czy inaczej pełni ona w tekście analizowanego artykułu rolę marginalną i w niczym nie zmienia jego oceny: jest to znakomity artykuł naukowy, a nie by na naukowości nie stracił, gdyby usunąć jego dwa ostatnie akapity.

Kryterium Poppera po ukazaniu się *Struktury rewolucji naukowych* Thomasa Kuhna (1962) zostało powszechnie uznane za nieadekwatne. Wkrótce potem Imre Lakatos w *Falsyfikacji i metodologii naukowych programów badawczych* (1970) zaproponował nowe kryterium demarkacji, zarówno wykorzystujące historyczne ustalenia Kuhna, jak i nawiązujące do tez Popperowskiego krytycyzmu. Zdaniem Kuhna odkrycie Roentgena zapoczątkowało lokalną rewolucję naukową: spowodowało, że pewna wspólnota badaczy musiała zmienić interpretację niektórych wyników doświadczalnych wcześniej uznanych za ustalone, że nastąpiła zmiana znaczeń terminów, a członkowie wspólnoty w pewnym trudnym do wyrażenia sensie zaczęli żyć w innym świecie. Jeśli Kuhn ma rację, to z punktu widzenia metodologii Lakatosa praca Roentgena zapoczątkowała nowy (lokalny) program badawczy. Pierwsze sformułowanie nowego programu nie może być ocenione jako naukowe bądź nienaukowe, metodologicznej ocenie podlegają dopiero jego dalsze dzieje: to, czy w trakcie swego rozwoju pozwala on dedukować nowe – w stosunku do anomalii doświadczalnych, na jakie natrafił – przewidywania (jest postępowy teoretycznie) i czy przynajmniej część nowych przewidywań zostaje empirycznie potwierdzona (jest postępowy empirycznie).

W ciągu siedmiu tygodni badań, zrelacjonowanych w *On a New Kind of Rays*, nie dokonał się ani postęp teoretyczny, ani empiryczny w sensie Lakatosa. A jednak każdy fizyk stwierdzi, że w artykule nie znajdujemy jedynie „nieopierzonej” pierwszej wersji programu badawczego, niepodlegającej ocenie metodologicznej, ale że mamy do czynienia ze znakomitym osiągnięciem o charakterze naukowym. Kryterium Lakatosa jest zatem w tym przypadku bezużyteczne.

Równie bezużyteczne – choć nie będę tego z braku miejsca uzasadniał – są kryteria Larry Laudana, zarówno te z *Progress and Its Problems* (1977), jak i te z *Science and Values* (1984). Innych zaś znaczących kryteriów demarkacji w ciągu ostatnich stu lat nie sformułowano.

Kilka lat temu Paul Hoyningen-Huene w *Die Systematizität der Wissenschaft* (2001) wystąpił z ledwo zarysowaną propozycją nowego kryterium: o naukowym charakterze badań decyduje ich systematyczność. Nie będę bliżej analizował jego uwag, zamiast tego, przyjmując naczelne hasło jako źródło inspiracji, postaram się – już na własną odpowiedzialność – powiedzieć, na czym naukowa systema-

tyczność polega przede wszystkim, a w szczególności: jak się miała w przypadku badań Roentgena.

Twardy Rdzeń Systematyczności

Zacznę od uwag o charakterze ogólnym. Według przyjętego poglądu wyjaśnianie lub przewidywanie zjawisk ma polegać na tym, że z koniunkcji praw i warunków dodatkowych logicznie wynikają zdania opisujące – w terminach używanej teorii – owe zjawiska. W fizyce wynikanie ma charakter matematyczny raczej niż logiczny. Jednak nawet jeśli matematyka nie jest redukowalna do logiki, to wynikanie matematyczne ma tę samą, co logiczne własność: gwarantuje prawdziwość przesłanek przy prawdziwości wniosku. Matematyka ma natomiast nader ważną w praktyce naukowej cechę, której brak systemom logicznym (przynajmniej tym klasycznym): pozwala na dokonywanie obliczeń, rozwiązywanie równań (co właśnie nazywam wynikaniem matematycznym) w sposób *przybliżony*. Takie przybliżone obliczenia są w fizyce codziennością. Tylko w bardzo nielicznych, najprostszych przypadkach potrafimy podać ściśle rozwiązania równań. Są to w dodatku przypadki wyidealizowane (typu „opór powietrza i tarcie pomijamy”), dla których brak dokładnych odniesień w przyrodzie. Pamiętając o tym, można logikę wyjaśniania lub przewidywania przedstawić następująco:

$$P_1 \& P_2 \& \dots \& W_1 \& W_2 \& \dots \Rightarrow O,$$

gdzie $\Rightarrow$ symbolizuje wynikanie logiczne bądź matematyczne.

A teraz wygłoszę twierdzenie dla dalszego ciągu wywodów kluczowe. Naukowcy nie dokonują obserwacji lub eksperymentów izolowanych. Każda prawie obserwacja lub eksperyment dokonywane są w otoczeniu innych obserwacji lub eksperymentów. Łączy je nie tylko to, że do ich wyjaśniania/przewidywania używa się wciąż *tych samych praw*, ale także to, że *warunki dodatkowe* powtarzają się w różnych eksplanansach. Można to zapisać w postaci schematu (S):

$$P_1 \& P_2 \& \dots \& W_1 \& W_2 \& W_3 \& W_4 \& W_5 \Rightarrow O_1$$

$$P_1 \& P_2 \& \dots \& W_1 \& W_2 \& W_3 \& W_6 \& W_7 \& W_8 \Rightarrow O_1$$

$$P_1 \& P_2 \& \dots \& W_1 \& W_2 \& W_6 \& W_6 \& W_9 \Rightarrow O_1$$

$$P_1 \& P_2 \& \dots \& W_2 \& W_3 \& W_6 \& W_9 \& W_{11} \Rightarrow O_1$$

itd.

Oznacza to, mówiąc potocznie, że naukowcy badają liczne zjawiska, w których występują – jak sądzą – te same obiekty lub obiekty tego samego rodzaju, zachodzą (prawie) takie same reakcje, działają tego samego rodzaju siły itd. A tych badanych zjawisk – co właśnie decyduje o naukowym charakterze całego przedsięwzięcia – są dziesiątki, setki, tysiące.

W trakcie badań stwierdza się, że pewne warunki dodatkowe występują w powtarzających się grupach. Np. temu, że dane ciało ma ciężar właściwy A, towarzyszy to, że topi się w temperaturze B, a elektryczny opór właściwy wynosi C.

W ten sposób – jako powtarzalne zbiory własności – odkrywa się substancje, np. pierwiastki chemiczne czy cząstki elementarne.

Jeśli w trakcie kolejnego eksperymentu stwierdzamy np., że uzyskany metal ma (w temperaturze pokojowej, przy ciśnieniu 1 atm. itd.) gęstość $11,35 \text{ g/cm}^3$, to rozpoznajemy go – na podstawie eksperymentów wcześniejszych – jako ołów i od razu oczekujemy np. – o ile to jest istotne dla eksperymentu właśnie prowadzonego – że stopi się w temperaturze $327,5^\circ\text{C}$. Takie rozumowanie – przez analogię – jest zawodne, ale bez niego nie dałoby się prowadzić badań. Stwierdzenie zaś, że w danym przypadku oczekiwanie nie spełniło się, wiedzie często do ważnych odkryć. Np. stwierdziwszy, że domniemy ołów stopił się w innej niż oczekiwana temperaturze, odkrywamy, że istnieje inny jeszcze metal o tym samym (w granicach błędów pomiarowych) jak ołów ciężarze właściwym lub że jakiś czynnik, w nieznanym wcześniej sposób, wpływa na temperaturę topnienia metali itd.

Koniecznym warunkiem naukowości badań jest przeprowadzanie tak wielu różnych – ale zachodzących na siebie w scharakteryzowany przed chwilą sposób – obserwacji i eksperymentów, jak to tylko możliwe (również ze względów czasowych i finansowych). Oto trzy konieczne warunki naukowości:

- (1) Należy ten sam zbiór praw stosować w teoretycznej analizie różnych zjawisk.
- (2) W różnych zastosowaniach tego zbioru praw powinny pojawiać się, w powtarzających się konfiguracjach, te same warunki dodatkowe.
- (3) Przy doborze warunków dodatkowych uwzględniać należy całą wiedzę na temat domniemyanych składników badanego układu, jaką zgromadzono dotąd na podstawie wszystkich zastosowań użytego zbioru praw uznanych za udane. Ogólna zasada brzmi: jeśli nic nie wiadomo o tym, aby w szczególnych warunkach doświadczalnych własność teoretyczna (tzn. nieobserwowalna bezpośrednio), przypisana danemu obiektowi czy rodzajowi obiektów, ulegała zmianom, należy temu obiektowi czy rodzajowi obiektów przypisać ową własność identyczną jak ta zmierzona w innych eksperymentach.

Procedury badawcze sterowane warunkami (1), (2) i (3) są – jak wszystko w nauce – zawodne.

Nie znamy z góry zakresu udanych zastosowań danego zbioru praw. Przystępując do badań, nie wiemy, czy dane zjawisko da się przewidzieć/wyjaśnić za pomocą tego zbioru. Ale nie ma innego sposobu, by to stwierdzić, niż uparcie próbować.

Nie ma niezawodnych metod rozpoznawania, czy w danym przypadku mamy do czynienia z obiektami tymi samymi lub tego samego rodzaju, co badane wcześniej. Może nam się np. wydawać, że w nowo badanej reakcji wydzielił się ten sam gaz, co w pewnych reakcjach już przebadanych, ale możemy się mylić. Często jednak nie ma innego sposobu, by stwierdzić, czy jest to ten sam gaz, niż założyć, że jest, przy zachowaniu gotowości do zmodyfikowania tego założenia, gdyby „coś wyszło nie tak”.

Nawet jeśli obiekty lub rodzaje obiektów rozpoznamy prawidłowo, to nie wiadomo z góry, czy w swoistych warunkach doświadczalnych obiekty te nie zmienią w nieprzewidywalny sposób tych własności, jakie miały w innych warunkach. Gaz, który nie przewodził elektryczności, może pod wpływem pewnego promieniowania – o czym jeszcze nie wiemy – stać się przewodzący. Substancja umieszczona w polu magnetycznym lub poddana silnemu naciskowi może – niespodzianie – stopić się w innej temperaturze niż ta, jaką ustalono w „normalnych” okolicznościach. Często procedury badawcze, wiodące do odkrycia tego typu wpływów, zapoczątkowane zostają przez stwierdzenie, że „coś wyszło nie tak, jak wyjść miało” przy założeniu, że dana własność nie uległa w zmienionych okolicznościach zmianie.

Spełnienie warunku (3) jest tak trudne, że rozwój nauki jest możliwy jedynie dzięki zaawansowanemu podziałowi pracy. Eksperymentator np. ufa, że przyrząd pomiarowy pochodzący z renomowanej firmy będzie funkcjonował zgodnie z oczekiwaniem, że substancje pochodzące od rzetelnych wytwórców będą miały oczekiwany stopień czystości itd. A ktoś, kto chce wykonać np. styk elektryczny, należycie funkcjonujący w danych warunkach, szuka rady u tych, którzy w trakcie wieloletniej pracy zyskali bogate doświadczenie w tym zakresie.

W celu uniknięcia nieporozumień warto podkreślić jedną rzecz. Popper jako naukową lub nienaukową chciał oceniać teorię, rozumianą jako zbiór praw (bardzo) ogólnych. Lakatos i Laudan jednostkę oceny metodologicznej bardzo rozszerzyli. Ten pierwszy twierdził, że ocenie podlega jedynie ciąg teorii o wspólnej heurystyce, czyli program badawczy. Dla tego drugiego jednostkę ocen miała stanowić tradycja badawcza, a w *Science and Values* ciąg kompleksów składających się z teorii, metodologii i aksjologii poznawczej. Moim zdaniem jako naukową lub nienaukową określa się konkretną pracę badawczą – choć przy ocenie uwzględnia się stosunek analizowanych badań doświadczalnych i dociekań teoretycznych do całej wiedzy naukowej dotychczas nagromadzonej. (W gruncie rzeczy można powyższe rozważania rozumieć jako próbę skodyfikowania zasad pisania recenzji artykułów nadsyłanych do czasopism specjalistycznych).

Jeśli o teorii chodzi, to powiem po prostu, że *teoria jest naukowa, jeśli ma naukowe zastosowania*.

I jeszcze uwaga. W tradycji popperowskiej metodologiczna ocena teorii (programu badawczego itd.) opiera się jedynie na analizie sposobu, w jaki zwerbalizowana teoria może zostać lub została doświadczalnie sprawdzona. Natomiast proces dochodzenia do teorii miał być dla oceny jej statusu obojętny. Przyjmowano najczęściej, że teorie są wytworami nieanalizowalnej środkami logiki wyobraźni twórczej. Ja natomiast twierdzę, że aby hipoteza lub teoria zasługiwała na miano naukowej, powinna zostać sformułowana – tak jeśli chodzi o przebieg badań doświadczalnych, jak i towarzyszących im dociekań teoretycznych – zgodnie z re-

gułami ponadczasowej i ponadteoretycznej metody naukowej. Oczywiście, poniżej uczyniono jedynie pierwszy krok w stronę kodyfikacji tej metody.

Zarys sytuacji, w której Roentgen przystąpił do badań

Pierwsze badania wyładowań elektrycznych w rozrzedzonych gazach prowadzono już na początku XVIII w. Ich postęp był warunkowany uzyskiwaniem z jednej strony coraz wyższych próżni, z drugiej zaś coraz wyższych napięć. Zwieńczeniem prowadzonych od dziesięcioleci badań były eksperymenty Faradaya z 1838 r. Na przeciwnych końcach szklanej rury umieszczał on metalowe elektrody, do których przykładął wysokie napięcie. Przy dostatecznie niskim ciśnieniu resztkowy gaz między katodą a anodą świecił, barwa światła zależała jedynie od rodzaju użytego gazu (była różowa w przypadku powietrza). Gdy ciśnienie spadało do ok. 1 mm Hg od strony katody (czyli elektrody ujemnej), pojawiała się świecenie fioletowe, oddzielone od różowego ciemnym obszarem, nazwanym ciemnią Faradaya.

Dalszy postęp badań stał się możliwy, gdy Geissler w połowie lat pięćdziesiątych XIX w. udoskonalił pompy próżniowe – używając jako tłoka słupa rtęci – co pozwoliło na uzyskanie ciśnień sporo poniżej 1 mm Hg. W tym samym czasie Rümkhorf udoskonalił używane od lat 30. XIX w. cewki indukcyjne, co pozwoliło na uzyskiwanie nieosiągalnych wcześniej napięć. Korzystając z nowych przyrządów, Plücker w 1858 r. odkrył, że w miarę spadku ciśnienia świecenie od strony katody wydłuża się, podobnie jak ciemnia Faradaya, a „wypychane” przez nie świecenie różowe rozpada się na szereg jasnych dysków ustawionych prostopadłe do kierunku łączącego elektrody. Zauważył też – co dla nas najważniejsze – że szkło, z którego zrobiona jest rura, również zaczyna świecić. (W eksperymentach Plückera świeciło zielonkawo. Później stwierdzono, że kolor świecenia zależy od rodzaju szkła). Uczeń Plückera, Hittorf, stwierdził w 1869 r., że jeśli między katodą a szkłem umieścić jakiś przedmiot, na szkle powstanie jego cień – a zatem szkło jest pobudzane do świecenia przez coś, co wydobywa się z katody i rozchodzi po liniach prostych. Nazwano to coś promieniami katodowymi. W tym czasie znano dwa rodzaje procesów o takich własnościach: strumienie cząstek i fale. Według panującej falowej teorii światła miało być ono – a także znane od początku XIX w. podczerwień i nadfiolet – falami w eterze. Zgodnie z tym jedni fizycy, zwłaszcza niemieccy, próbowali zbudować falową teorię promieni katodowych; inni, w tym większość uczonych angielskich, uważali, że promienie katodowe są strumieniami cząstek.

Różne eksperymenty z promieniami katodowymi prowadzili m.in. w Niemczech Goldstein (od 1876) i Hertz (od 1882), w Anglii Crookes (od 1879) i Schuster (od 1884). Pracowali przy ciśnieniach rzędu 0,01 mm Hg, gdy świecenie gazu znikało (wcześniej obszar świecący na fioletowo przedzielała „ciemnia Crooke-

sa”, która stopniowo wydłużała się na całą rurę), a świeciło jedynie szkło, na które padały promienie. Te eksperymenty spełniały warunki naukowości określone powyżej: używano w nich rur próżniowych o różnych konstrukcjach, jednak te konstrukcje „zachodziły” na siebie (np. z tego samego metalu wykonywano elektrody o różnych kształtach lub elektrody o identycznym kształcie wykonywano z różnych metali; różne były kształty rur próżniowych i różnie rozmieszczano w nich elektrody, ale robiono też konstrukcje pośrednie; rozmieszczano wewnątrz rur ekrany, raz w taki sposób, a raz w inny, ale przejścia między sposobami ich rozmieszczenia były ciągłe; raz w tym samym otoczeniu używano magnesów, a raz elektromagnesów, raz cewek Rümkhofa, a raz stosów voltaicznych itd.), a różnych eksperymentów z użyciem tych samych częściowo przyrządów, i to w przeróżnych konfiguracjach, wykonywano setki¹.

Już Plücker zauważył, że jeśli do rury próżniowej zbliżymy magnes, to promienie katodowe odchylają się. Działo się to – w świetle elektrodynamiki Maxwella – tak, jak gdyby były one strumieniem cząstek naelektryzowanych ujemnie. Skoro tak, to powinny też odchylać się w polu elektrycznym – czego jednak, mimo podejmowanych przez całe lata wysiłków, nie stwierdzono. Inna anomalia, przed którą stała teoria korpuskularna, była następująca. Liczne – zachodzące na siebie – eksperymenty pozwoliły w ciągu XIX wieku ustalić (z dobrym, jak dzisiaj powiemy, przybliżeniem) średnicę atomów, a także ich liczbę w jednym molu pierwiastka. Panująca korpuskularno-kinetyczna teoria gazów pozwalała na tej podstawie obliczyć średnią drogę swobodną cząstek w resztkowym gazie wypełniającym rurę do wyładowań. Wynosiła ona, przy ciśnieniu 0,01 mm Hg, ok. 6 mm – a tymczasem promienie katodowe przebywały bez odchylenia co najmniej kilkadziesiąt centymetrów. Hertz wykazał wreszcie, że wiązka promieni katodowych przechodzi, ulegając niewielkiemu rozmyciu, przez cienkie folie metalowe.

Kontynuując doświadczenia Hertza, jego uczeń Lenard od 1893 r. badał promienie katodowe wychodzące przez cienkie folie z rury do wyładowań w otaczające ją powietrze. Seria eksperymentów, w których używał tych samych przyrządów, które wcześniej umieszczano wewnątrz rury, pozwoliła mu wykazać, że za folią mamy do czynienia z tymi samymi promieniami. Używając ekranów fluorescencyjnych – które świeciły pod wpływem padających na nie zarówno promieni nadfioletowych, jak i promieni katodowych – stwierdził, że choć wiązka promieni katodowych w powietrzu szybko się rozprasza, to przebywają one w powietrzu kilka centymetrów.

¹ Znakomity przegląd znaleźć można w J.J. Thomson, *Recent Researches in Electricity and Magnetism*, Clarendon Press 1893, s. 53–207. Najlepsza dziś monografia to Per F. Dahl, *Flash of the Cathode Rays*, IOP Publishing 1997. Na polski przetłumaczono jedynie dobrą książkę popularnonaukową: D.L. Anderson, *Odkrycie elektronu*, PWN 1971.

W ten sposób dotarliśmy do Roentgena, który w listopadzie 1895 r. zmontował układ eksperymentalny w celu powtórzenia – w nieco zmienionych warunkach – eksperymentów Lenarda.

Pierwsze obserwacje

Roentgen zmontował układ eksperymentalny standardowy: funkcjonowanie wszystkich jego składników było, pod interesującymi w tego typu badaniach względami, dobrze znane. Duża cewka Rümkhofa, której jeden obwód (wyposażony w przerywacz) podłączony był w standardowy sposób do źródła stałego napięcia, dostarczała na stykach drugiego obwodu bardzo wysokiego, impulsowego napięcia. Napięcie to przykładano do elektrod znajdujących się w rurze próżniowej. Roentgen używał rur różnej konstrukcji, wzorowanych na rurach Hittorfa, Crookesa i Lenarda. W szklanych ściankach niektórych rur naprzeciw katody znajdowało się okienko, zamknięte cienką folią metalową, przez którą promienie katodowe miały wydostawać się na zewnątrz. Rozpoczął serię badań pod koniec października 1895 r., a 8 listopada zauważył coś niezwykłego.

Zdaje się, że gdy dokonał pierwszych obserwacji wiodących do odkrycia promieni X, używał akurat rury Crookesa – ale to jest akurat obojętne dla celów racjonalnej rekonstrukcji jego dociekań. Do obserwacji rozchodzenia się promieni w powietrzu miał służyć ekran fluorescencyjny, pokryty platynocjankiem baru. Aby zaś lepiej widzieć jego świecenie, Roentgen nie tylko szczelnie zasłonił okna, ale zakrył rurę próżniową – która sama po włączeniu napięcia świeciła – czarną teksturą. Nagle spostrzegł, że przy włączonym napięciu ekran fluorescencyjny świeci również wtedy, gdy znajduje się o wiele dalej od rury do wyładowań, niż wynosi w powietrzu zasięg promieni katodowych. „Fluorescencja jest nadal widoczna w odległości dwóch metrów” [1]².

Właściwie Roentgen nie zauważył niczego nowego. O tym, że ekran fluorescencyjny, umieszczony wewnątrz rury próżniowej, zasłonięty przed wiązką promieni katodowych wychodzących z elektrody ujemnej, a zwrócony w stronę anody, na którą promienie padały, świeci, pisał Goldstein już w 1880 r. Ten tekst czytali zapewne wszyscy zainteresowani tematem – lecz ani Goldstein, ani żaden inny fizyk (a wielu należało do światowej elity) nie przywiązał do tych obserwacji należytej wagi. Dlaczego? Goldstein sądził, że promienie katodowe mają naturę falową i po prostu, niczym światło od lustra, odbijają się od metalowej powierzchni, na którą padają – a tak „wyjaśnione” zjawisko przestawało być interesujące.

W wielu laboratoriach wiedziano w tym czasie, że podczas wykonywania doświadczeń z promieniami katodowymi nie należy trzymać w pobliżu niewywoła-

² Liczby w nawiasach kwadratowych odsyłają do numerowanych części artykułu Roentgena.

nych płyt fotograficznych – gdyż ulegają zaczernieniu. Przestrzegano tego, ale nie podejmowano w związku w tym dalszych badań.

Zaś J.J. Thomson – któremu na podstawie badań nad promieniami katodowymi z 1897 r. przyznaje się miano odkrywcy elektronu – wspomniał w artykule z 1894 r. o tym, że szkło niemieckie znajdujące się w odległości kilku stóp od rury do wyładowań fosforyzuje, gdy w rurze wytwarzane są promienie katodowe. On też dalszych badań związanych z tą obserwacją nie podjął.

Zaslugą Roentgena jest więc – i o naukowym charakterze jego pracy decyduje – nie to, że zauważył świecenie, ale to, że podjął nad nim dalsze badania. A właściwie to – o czym za chwilę – w jaki sposób je przeprowadził.

Pytanie generowane przez wyniki pierwszych obserwacji

Dlaczego Roentgen zwrócił uwagę na to, co inni ignorowali? Jeśli ktoś upiera się, że jego odkrycie było skutkiem szczęśliwego zbiegu okoliczności, to trzeba pamiętać, że przypadek sprzyja wyłącznie umysłom przygotowanym. Co więc zdecydowało, że Roentgen był przygotowany, a inni nie?

Moim zdaniem zdecydowało to, iż Roentgen pracował nad powtórzeniem eksperymentów Lenarda – a zatem miał w świeżej pamięci jego ustalenie, że w powietrzu atmosferycznym promienie katodowe nikną po przebyciu paru centymetrów. Ponieważ warunki eksperymentalne były bardzo podobne do tych z badań Lenarda, to zgodnie z warunkiem naukowości (3) Roentgen powinien przyjąć – i faktycznie to uczynił – że to nie promienie katodowe docierają do świecącego ekranu. Thomson mógł sobie jeszcze wyobrazić, że promienie katodowe wydostają się z rury próżniowej przez szkło, przebywają metr lub dwa w powietrzu i pobudzają ekran fluorescencyjny do świecenia (lub zaczerniają zamknięte w pudełku płyty fotograficzne), Roentgen już nie. Widzimy tu jak na dłoni rolę powiązań między badaniami, którą starałem się przedstawić w schemacie (S). Najważniejsze dalsze powiązania były następujące.

W 1895 r. znano kilka rodzajów promieniowania. Były to: światło, promienie podczerwone i nadfioletowe (jedne i drugie odkryte na początku XIX w.), fale radiowe (odkryte przez Hertza w 1887), promienie katodowe. Na tym się lista urywała. O czterech pierwszych rodzajach promieniowania sądzono wówczas powszechnie, że są falami elektromagnetycznymi – co, przy panującym wówczas obrazie świata, oznaczało, że są (poprzecznymi) falami w eterze. Natura promieni katodowych, jak już powiedziano, pozostawała nieznana.

Znano cały szereg własności tych promieni. Wiedzano m.in. – co szczególnie istotne dla pierwszych faz badań Roentgena – że różne materiały są w różnym stopniu przezroczyste dla różnych rodzajów promieniowania. Np. zwykłe szkło jest przezroczyste dla światła, ale nie przepuszcza nadfioletu, a nieprzezroczyste dla światła kamień czy drewno w niewielkim tylko stopniu pochłaniają fale

radiowe. Wiedzano też, że fale elektromagnetyczne od niektórych substancji się odbijają, a przechodząc z jednego ośrodka do drugiego, ulegają załamaniu. O innych znanych własnościach promieniowania będzie mowa poniżej.

Roentgen wiedział, że ekran pokryty platynocyjankiem baru świeci pod wpływem promieni nadfioletowych i katodowych. Nieznane były przypadki, aby taki ekran świecił np. pod wpływem jakichś chemicznych wyziewów czy bliskości źródeł wysokiego napięcia. Röntgen mógł więc zasadnie przyjąć, że na ekran pada jakieś promieniowanie. W tej sytuacji generowane było pytanie, w sensie logiki pytań Andrzeja Wiśniewskiego: „Czy przyczyną świecenia ekranu jest padanie na niego (a) promieni nadfioletowych, (b) promieni katodowych, (c) promieni nowego rodzaju?”³.

Dwie pierwsze odpowiedzi dało się wyeliminować natychmiast. Postępując w standardowy sposób – zmieniając położenie ekranu i obserwując zmianę jasności świecenia – Roentgen szybko stwierdził, że promieniowanie rozchodzi się z punktu, na który padają promienie katodowe, przy czym przechodzi przez tekturę, nieprzezroczystą dla nadfioletu. A zatem nie jest to nadfiolet. Na podstawie badań Lenarda Roentgen wiedział, że promienie katodowe nikną w powietrzu po przebyciu paru centymetrów, a tymczasem ekran świecił nawet w odległości 2 metrów od punktu powstawania promieni. A zatem nie są to promienie katodowe. Pozostawała trzecia możliwa odpowiedź: są to promienie nowego rodzaju, czyli promienie X.

Systematyczne badania nad naturą promieni X i ich logika

Teraz Roentgen przystąpił do systematycznych badań nad naturą promieni X.

Z Popperowskiego punktu widzenia, nie dysponując żadną teorią nowego zjawiska, Roentgen mógł postępować albo po omacku, albo kierowany jakąś nieanalizowaną środkami logiki intuicją. Tymczasem, jak łatwo stwierdzić, przeprowadzał swoje badania w sposób planowy – a także systematyczny. Co pozwalało mu planować badania?

Roentgen, jak sądzę, nieustannie zadawał sobie – a w metaforycznym sensie zadawał przyrodzie – *pytania przez analogię*. Pytania takie mają postać następującą. Znamy obiekt, rodzaj obiektów czy proces *P*, charakteryzowany np. przez własności typu *a*, *b*, *c*, *d*. Odkrywamy obiekt, rodzaj obiektów czy proces *R* i stwierdzamy, że ma on własności typu *a* i *b*. Powstaje w takiej sytuacji pytanie, czy *R* posiada własności typu *c* i *d*?

W przypadku Roentgena pytanie brzmiało np. tak: Promienie X rozchodzą się w przestrzeni po liniach prostych, podobnie jak promienie świetlne, podcier-

³ Andrzej Wiśniewski, *The Posing of Questions: Logical Foundations of Erotetic Inferences*, Kluwer 1995.

wone, nadfioletowe i fale radiowe. Czy mają one również te własności, jakie dotąd przypisano wymienionym rodzajom promieniowania?

Roentgen uzyskiwał na te pytania odpowiedzi, przeprowadzając eksperymenty – jak to przedstawiał schemat (S) – za pomocą przyrządów o wypróbowanym w innych przypadkach działaniu i stosując standardowe procedury badawcze.

To, że promienie X rozchodzą się w powietrzu po liniach prostych, podobnie jak światło czy fale radiowe, Roentgen stwierdził na samym początku badań w standardowy sposób, umieszczając na drodze promieniowania przedmioty i obserwując rzucane przez nie cienie [14]. (W taki sposób wcześniej Hittorf stwierdził, że promienie katodowe rozchodzą się w próżni prostoliniowo, Lenard zaś odkrył, że w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym tę własność tracą).

Wiedzano w 1895, że różne materiały są w różnym stopniu przezroczyste dla znanych rodzajów promieniowania. Powstawało zatem pytanie przez analogię: czy i w jakim stopniu promienie X są pochłaniane przez różnego rodzaju substancje? Tu Roentgen w ciągu siedmiu tygodni badań przeprowadził dziesiątki, a może setki, pomiarów, znów używając wypróbowanych w innych przypadkach metod. Porównywał jasność świecenia ekranu fluorescencyjnego po przejściu promieni X przez różnej grubości warstwy różnych substancji. (Nie miał możliwości pomiaru wprost natężenia światła, ale tak dobierał grubości warstw dwóch substancji umieszczonych obok siebie, aby ekran świecił z tym samym natężeniem – a w tym przypadku oko ludzkie wychwytyuje różnice z dużą dokładnością). W każdym stadium rozwoju nauki przypisuje się substancjom pewną, skończoną rzecz jasna, listę własności. Roentgen używał substancji o rozmaitych własnościach: gazów, cieczy i ciał stałych, metali i niemetali, pierwiastków i związków chemicznych, przewodników i izolatorów elektryczności itd. (zob. lista w [2]). Zauważył, że współczynnik absorpcji promieni X w większości przypadków rośnie wraz ze wzrostem masy właściwej danej substancji, choć tej zależności nie opisuje żadna prosta formuła matematyczna (co widać z zestawienia w [5] grubości warstw platyny, ołowiu, cynku i aluminium o tej samej przenikalności z ich masami właściwymi), a poza tym niektóre substancje o podobnej gęstości pochłaniają promienie X w różnym stopniu [3]. Okazało się natomiast, że żadna inna, obok masy właściwej, ze znanych własności substancji nie wpływa w wykrywalny sposób na współczynnik absorpcji. Taki był *indukcyjny* wniosek z badań.

Wiedzano, że różne substancje są pobudzane do świecenia przez różne rodzaje promieniowania. Powstawało przez analogię pytanie: jakie jeszcze (poza platynocyjankiem baru) substancje fluoryzują pod wpływem promieni X? Badając pod tym względem szereg substancji (zapewne tych, które miał pod ręką), Roentgen stwierdził, że promienie X pobudzają do świecenia również siarczek wapnia, szkło uranowe, szpat islandzki, sól kamienną i wiele innych substancji [6]. Stwierdził też – znów odpowiadając na pytanie przez analogię wywołane wiedzą o wrażliwości płyt fotograficznych na światło widzialne i nadfiolet, a niewraż-

liwości na fale radiowe i podczerwień – że promienie X powodują zaczernienie płyt fotograficznych; wyniki uzyskane wcześniej pozwoliły mu udanie przewidzieć, że następuje to również wtedy, gdy promienie X padają na płyty przez obudowę światłoszczelnego pudełka, w którym są zamknięte.

Wspomniane badania nad prostoliniowością rozchodzenia się promieni X i nad współczynnikami absorpcji tych promieni przez różne materiały spletały się ze sobą. Rezultatem takiego splotu badań były dołączone do publikacji fotografie, które wywołały największą sensację: widać było na nich kości dłoni żony uczonego [14].

Wiedzano, że promienie podczerwone i promienie katodowe, padające na absorbujące je substancje, rozgrzewają je, podczas gdy (w granicach błędów doświadczalnych) nie czynią tego fale radiowe i nadfiolet. Powstawało przez analogię pytanie: czy podobne działanie wywierają promienie X? Wynik eksperymentów – zapewne z użyciem substancji różnego rodzaju – był (w granicach błędów doświadczalnych) negatywny [6].

Wiedzano, że światło, podczerwień, nadfiolet i fale radiowe załamują się na granicy dwóch ośrodków (co falowa teoria tłumaczyła, potwierdzonymi eksperymentalnie ok. 1850 r. przez Fizeau, różnicami prędkości rozchodzenia się promieni w tych ośrodkach). Powstawało przez analogię pytanie: czy promienie X załamują się podobnie jak fale elektromagnetyczne? Roentgen przeprowadził zatem serię badań, stosując standardowe metody, analogiczne do tych stosowanych niezliczoną ilość razy wcześniej. Używał pryzmatów z twardej gumy, różnych metali, pryzmatów ze ściankami z miki napełnionych wodą i dwusiarczkiem węgla, a także substancji sproszkowanych; jako detektory promieni stosował ekrany fluorescencyjne i płyty fotograficzne. Stwierdził, że w przypadku wody i dwusiarczku węgla nie obserwuje żadnej zmiany kierunku rozchodzenia się promieni, a w przypadku aluminium i twardej gumy współczynnik załamania, o ile w ogóle różni się od jedności, to jest nie większy niż 1,05. W przypadku zaś metali cięższych osłabienie sygnału było tak znaczne, że nie pozwalało na dokonanie wiarygodnych ustaleń. Podobnie negatywne wyniki dały eksperymenty z soczewkami wykonanymi ze szkła, twardej gumy i drewna [7].

Wiedzano, że fale elektromagnetyczne ulegają odbiciu od powierzchni rozdzielających substancje, w których rozchodzą się one z różnymi prędkościami (lub nie rozchodzą w ogóle). Powstawało przez analogię pytanie: czy promienie X również odbijają się od pewnych powierzchni? Wynik eksperymentów był znów negatywny [8].

Również negatywne były eksperymenty z kalcytem i kwarcem, mające stwierdzić, czy położenie płaszczyzn krystalicznych ma wpływ na przechodzenie promieni X przez daną substancję [9].

Wiedzano, że natężenie promieniowania elektromagnetycznego w ośrodku całkowicie dla niego przezroczystym maleje proporcjonalnie do kwadratu odle-

głości od źródła. Przez analogię powstawało pytanie, a właściwie dwa pytania uwikłane jedno w drugie: czy podobnie maleje natężenie promieni X i czy powietrze jest całkowicie dla tych promieni przezroczyste? Znow procedura eksperymentalna użyta przez Roentgena była całkowicie standardowa: mierzył za pomocą fotometru Webera natężenie światła emitowanego przez ekran fluorescencyjny w różnych odległościach od rury do wyładowań. (Do elektrod było przyłożone stale to samo impulsowe napięcie, a wcześniejsze eksperymenty pozwalały przyjąć, że w trakcie trwania pomiarów natężenie promieniowania nie malało np. na skutek „zuzywania się” szkła, na które padały promienie katodowe). Podwójny wniosek był taki, że „natężenia zmieniają się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości między ekranem a aparatem do wyładowań. I odpowiednio, powietrze absorbuje o wiele mniejszą część promieni X niż promieni katodowych” [10].

Wiedzano, że promienie katodowe odchylają się w polu magnetycznym. Przez analogię powstawało pytanie: czy promienie X ulegają w polu magnetycznym odchyleniu? Wynik badań eksperymentalnych, przy użyciu aparatury bardzo podobnej do tej stosowanej do badań nad promieniami katodowymi, był raz jeszcze negatywny [11].

Zwolennicy korpuskularnej teorii promieni katodowych oczekiwali, że będą się one odchyłać w polu elektrycznym. Do 1895 r. żadnego odchylenia nie udało się wykryć (po raz pierwszy uzyskał je J.J. Thomson w 1897). Niemniej jednak Roentgen przez analogię pytał: czy promienie X ulegają w polu elektrycznym odchyleniu? Wynik badań, przy użyciu standardowej aparatury, był negatywny, ale pod koniec grudnia 1895 niezupełnie jasny [16].

Przy okazji niejako Roentgen stwierdził, że jeśli na skutek obecności pola magnetycznego zmienia się miejsce, w którym promienie katodowe uderzają w szkło, są one emitowane z tego nowego miejsca, a stąd (indukcyjny) wniosek: „promienie X są wytwarzane przez promienie katodowe w szklanej ścianie aparatury do wyładowań” [12]. A czy tylko w szkłe? Roentgen umieścił na drodze promieni grubą na dwa milimetry płytkę aluminiową i wykazał, że w niej także powstają promienie X. Dalsze badania w tym zakresie zapowiadał [13].

Zakończenie

Dlaczego badania Roentgena zasługują na miano „naukowych”?

Spełnienie warunku (1) nie było w tym przypadku jawne, jako że Roentgen nigdzie wyraźnie nie stosuje ani praw mechaniki klasycznej, ani elektrodynamiki Maxwella. Niemniej były one *implicite* zakładane, choćby wtedy, gdy uczony odwoływał się do wyników udanych zastosowań tych praw przy wyjaśnianiu własności fal elektromagnetycznych, a także używanej do badań aparatury.

Warunek (2) był spełniony w sposób oczywisty. Roentgen wykonał dziesiątki eksperymentów, w których wciąż za pomocą tych samych przyrządów, rozmaicie