

Wojciech Sady

## **Odkrywanie elektronu a pytanie o naturę badań naukowych**

### **WSTĘP. PRZECIWIW FILOZOFII NAUKI OGRANICZONEJ DO KONTEKSTU UZASADNIANIA**

W latach 30. XX w. filozofię nauki zdominował pogląd, który lakonicznie wyraził Karl Popper: „(...) praca naukowca polega na formułowaniu i sprawdzaniu teorii”. I dalej:

(...) stadium początkowe, akt powzięcia pomysłu czy wymyślenia teorii, ani nie wymaga analizy logicznej, ani się takiej analizie nie poddaje. (...) zadanie logiki wiedzy (...) polega jedynie na badaniu metod stosowanych w trakcie systematycznego sprawdzania, jakiemu poddać trzeba każdą nową koncepcję, jeżeli mamy ją poważnie wziąć pod uwagę (Popper 1934, §2).

Popperowi wtórowali Rudolf Carnap, Hans Reichenbach (zob. zwł. 1938, § 1), Carl G. Hempel (zob. np. 1966, rozdz. 2) i inni przedstawiciele empiryzmu logicznego i nurtów pokrewnych.

Teorii dostarcza wyobraźnia twórcza, która niejako tworzy coś z niczego, a jej funkcjonowanie, które można ewentualnie poddać badaniom psychologicznym, nie jest interesujące dla epistemologa. Epistemologia jest teorią *wiedzy*, a nie dowolnych przekonań. Tym zaś, co spośród dostępnych przekonań pozwala nam wybrać te, które zasługują na to szlachetne miano, są procedury *sprawdzania*. Te procedury wykorzystują to, co dane rozumowi, czyli prawa logiki (same w sobie puste poznawczo, ale gwarantujące prawdziwość wniosków przy prawdziwości przesłanek), oraz to, co dane zmysłom, czyli fakty doświadczalne (które, aby wejść do systemu wiedzy, muszą zostać odpowiednio opisane w zdaniach).

Jak wiadomo, wszystkie propozycje schematów doświadczalnego sprawdzania teorii, jakie zaproponowano w ciągu ostatnich osiemdziesięciu lat, zawiodły. Nie udało

się Carnapowi (1952) i innym zbudować logiki indukcyjnego potwierdzania hipotez i teorii przez dane doświadczalne. Nie wytrzymały krytyk schematy falsyfikowania teorii proponowane przez Poppera. Nie powiodła się podjęta przez Imre Lakatosa (1970) próba sformułowania uniwersalnych kryteriów pozwalających ocenić modyfikacje, jakim w obliczu anomalii doświadczalnych poddawane są teorie. A na wywiedzione z tej serii niepowodzeń — i wiodące na granice absurdu — przez Paula Feyerabenda (1975) hasło *wszystko wolno* metodolodzy doświadczalnego sprawdzania hipotez nie udzielili zadowalającej odpowiedzi. W ciągu ostatnich czterdziestu lat — co trzeba szczególnie podkreślić — nie pojawiły się żadne ważne propozycje racjonalnych rekonstrukcji procesów doświadczalnego sprawdzania hipotez, teorii czy programów badawczych.

Najwyższa pora, aby zakwestionować wyjściowe założenie, iż praca naukowca polega na — niepodlegającym regułom racjonalności — wymyślaniu teorii, a następnie na jej — zgodnym z uniwersalnymi kryteriami, decydującymi o naukowym charakterze całego przedsięwzięcia — doświadczalnym sprawdzaniu. Iluzoryczność obrazu, w ramach którego poruszała się większość filozofów nauki w ciągu ostatnich 80 lat, mają ukazać omówione poniżej historie badań prowadzących do odkrycia elektronu, opatrzone metodologicznymi komentarzami. Tu i ówdzie będę używał terminologii zaczerpniętej z teorii kolektywów myślowych i stylów myślowych Ludwika Flecka (1935).

## 1. PIERWSZE BADANIA NAD PROMIENIAMI KATODOWYMI

W latach 40. XVII w. Evangelista Torricelli zbudował barometr rtęciowy, w którym nad słupem rtęci uzyskiwano to, co według arystotelesowskiego stylu myślenia istnieć nie mogło: próżnię. Około 1650 r. Otto Guericke, Robert Boyle i Robert Hooke zaczęli budować pompy próżniowe. W 1675 r. Jean Picard zauważył, że w opróżnionej z powietrza części potrząśniętego barometru rtęciowego pojawia się niekiedy słabe światło. W 1705 r. Francis Hauksbee zauważył świecenie powstające, gdy krople rtęci ocierały się o siebie w szklanym zbiorniku, z którego, na ile się dało, usunięto powietrze. Ponieważ świecenie przypominało iskry pojawiające się w trakcie elektryzacji przez tarcie, uczony podjął badania nad zjawiskami elektrycznymi i stwierdził m.in. że zasięg iskry elektrycznej rośnie wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia powietrza wypełniającego przestrzeń między elektrodami. Obserwował też purpurowe świecenie resztkowego gazu w szklanym zbiorniku pocieranym z zewnątrz. W 1748 r. Watson opisał świecenie resztkowego gazu wewnątrz szklanej rury, na końcach której znajdowały się elektrody podłączone do pracującej maszyny elektrycznej. Były to jednak prace prowadzone przez pojedynczych badaczy, w sposób niesystematyczny — i jako takie zaliczę je do prehistorii badań. *Systematycznego* — a zatem naukowego (zob. Sady 2001 i 2004) — charakteru nabrały te badania po 1820 r.

W 1821 r. Humphry Davy badał, jak łuk elektryczny wydłuża się wraz ze zmniejszaniem ciśnienia gazu w przestrzeni między elektrodami; zaobserwował też, że jego przebieg zmienia się w obecności magnezu. Pewne ilościowe zależności dotyczące napięcia inicjującego wyładowanie w zależności od ciśnienia określił w 1834 r. William S. Harris. W tym samym czasie Martin Van Marum stwierdził, że barwy wyładowań iskrowych przy ciśnieniu atmosferycznym są różne dla różnych gazów.

W 1838 r. Michael Faraday użył szklanego naczynia podłączonego do pompy próżniowej, w którym znajdowały się anoda i katoda. Przy odpowiednim napięciu i odległości między elektrodami z anody wydobywała się świecąca miotłeczka, której barwa i kształt zależały od rodzaju gazu wypełniającego naczynie. Po obniżeniu ciśnienia do ok. 10 mm Hg miotłeczka stopniowo znikła, a gaz między katodą a anodą zaczął świecić, w przypadku powietrza na różowo. Gdy ciśnienie obniżono jeszcze bardziej, na katodzie pojawiła się fioletowa poświata, oddzielona od różowej „ciemnią Faradaya”.

W 1852 r. prawnik i miłośnik nauk, William R. Grove, ogłosił, że przy odpowiednio niskim ciśnieniu różowa poświata wewnątrz rury próżniowej rozpada się na regularnie rozmieszczone, wygięte dyski, zwrócone wklęsłymi stronami w stronę anody.

Nowe możliwości eksperymentalne pojawiły się, gdy pracujący w Bonn szklarz i mechanik Johann H. W. Geissler zaczął produkować znakomitej jakości rurki próżniowe o różnych kształtach z zatopionymi w nich elektrodami (wcześniej elektrody wprowadzano przez zakorkowane otwory, co utrudniało uzyskiwanie niskich ciśnień). A w 1855 r. skonstruował pompę, w której jako tłoka użył słupa rtęci w szklanej rurce. Pierwsze takie pompy pozwalały uzyskiwać ciśnienia rzędu 1 mm Hg. W latach 1836-37, wykorzystując odkryte przez Faradaya zjawisko indukcji elektromagnetycznej, irlandzki ksiądz i nauczyciel fizyki, Nicholas J. Callan i amerykański lekarz i naukowiec-amator Charles G. Page, skonstruowali niezależnie pierwsze cewki indukcyjne, pozwalające uzyskiwać wysokie impulsowe napięcia. Dojrzałą postacią nadał im w latach 50. XIX w. Heinrich D. Rühmkorff.

Korzystając z nowego oprzyrządowania, w 1857 r. badania nad wyładowaniami elektrycznymi w rozrzedzonych gazach podjął na uniwersytecie w Bonn Julius Plücker. Używał próżniowych rurek długich na ok. 25 cm, o średnicy 1 cm, zakończonych bańkami zawierającymi elektrody. Okazało się, że w miarę obniżania ciśnienia fioletowa poświata przy katodzie wydłuża się, wydłuża się też ciemnia Faradaya, spychając różową poświatę w stronę anody. Podobnie jak Davy w przypadku łuku elektrycznego, Plücker umieścił po obu stronach rury bieguny podkowiastego magnezu i zaobserwował, iż świecenie ulega zakrzywieniu. Porównując to z doskonale znanymi obrazami opiłków żelaznych rozsypanych na kartce nad magnezem, zauważał, że świecenie

zachowuje się dokładnie tak, jakby składało się z małych magnesików szczipionych przyciągającymi się biegunami (...) lub, co na jedno wychodzi, niczym prąd elektryczny skręcony w nieskończenie cienką spiralę (1858, cyt. za Dahl 1997, § 3.3).

To ostatnie stwierdzenie świadczy o tym, że wiedział, iż płynący w cewce prąd wywołuje efekty takie jak magnes, ale nie pomyślał o tym, aby potraktować świecenie niczym prąd płynący z natury prosto, a zakrzywiający się pod wpływem sił magnetycznych. Cytowana wypowiedź świadczy o niezrozumieniu teorii Ampere'a — ale na usprawiedliwienie trzeba dodać, że elektrodynamika była wówczas w powijakach.

Kontynuując eksperymenty przez dłuższy czas, Plücker odkrył, że jeśli elektroda wykonana jest z platyny, to po pewnym czasie szkło w jej pobliżu pokrywa się cienką warstwą tego metalu — i na tej podstawie przypuścił, iż obserwowane zjawisko polega na świeceniu cząstek platyny odrywanych od katody. Dokonał też odkrycia, które miało okazać się decydujące: szkło w pobliżu anody świeci zielonkawo, a rozkład świecenia zmienia się, gdy w pobliżu poruszamy magnesem.

Podczas gdy w Niemczech eksperymentatorzy pracowali już w tym okresie w uniwersytetach i instytutach badawczych, w Anglii byli to głównie bogaci miłośnicy nauk, prowadzący eksperymenty za własne pieniądze w laboratoriach domowych. Pod koniec lat 50. XIX w. badania nad świeceniem rozrzedzonych gazów prowadził handlarz winem, John P. Gassiot, który również obserwował zakrzywienie poświaty w obecności magnesu. Gassiot stwierdził m.in., że jeśli połączymy dwie rury próżniowe szeregowo, a jedno wyładowanie zostanie zakrzywione przez magnes, to wyładowania w obu rurach znikają.

Potem, zarówno w Niemczech, jak i w Anglii, w badaniach nad tym zjawiskiem nastąpiła dziesięcioletnia przerwa. Barwne światło, wydobywające się z rurek Geisslera o rozmaitych kształtach i wypełnionych różnymi gazami, stało się w tym okresie popularnym obiektem pokazów publicznych, nie budziło jednak szczególnego zainteresowania naukowców. Dlaczego?

### Komentarz metodologiczny I

Gdy spoglądamy z dzisiejszej perspektywy na tę historię, jest dość jasne, że fizyka jako całość do kontynuowania tych badań nie dojrzała: brakowało zarówno narzędzi teoretycznych, jak i wiedzy o własnościach obiektów tworzących układy eksperymentalne, niezbędnych po temu, aby z badań nad świeceniem rozrzedzonych gazów i szkielek wyprowadzić jakieś ważne wnioski.

Chociaż ok. 1785 r. Coulomb, ustalając eksperymentalnie prawa określające wartości sił działających między ciałami naelektryzowanymi i między biegunami magnesów włączył *niektóre* ze zjawisk elektrycznych i magnetycznych do zakresu zastosowań mechaniki klasycznej, to badania wspomniane powyżej nie miały z mechaniką żadnego prawie związku. Prowadzono je bez udziału hipotez wyjaśniających badane zjawiska — nie było bowiem teoretycznych narzędzi, które by pozwalały hipotezy formułować. Dalej będę twierdził, że jeśli brak odpowiedniej wiedzy teoretycznej, to o ile hipotezy w ogóle się pojawiają — jak wspomniana hipoteza Plückera o łańcuchu małych magnesików — nie odgrywają w badaniach istotnej roli.

Jak jednak te stwierdzenia pogodzić z tezą o *teoretycznym obciążeniu obserwacji*, której w żadnym razie nie chciałbym negować? Odpowiadam, że trzeba tezę zachować, ale pozbyć się Popperowskiego złudzenia, jakoby (dobra) teoria miała być zbiorem twierdzeń (bardzo) ogólnych. Od początków badań nad elektrycznością i nad magnetyzmem krok po kroku dowiadywano się, że w takich a takich warunkach zwykle, a przynajmniej niekiedy, to a to się dzieje. Stopniowo precyzowano owo „takich a takich” i „to a to”, ucząc się wytwarzać sytuacje eksperymentalne dające wyniki powtarzalne. Nieodłącznie spleciony był z tym rozwój języka pozwalającego badane zjawiska opisywać. To zaś łączyło się z rozwojem zdolności do wyodrębniania z otoczenia postaci, do których odnosiły się poszczególne słowa. Takiej zdolności nabywa się w praktyce badawczej i dlatego nikt poza fachowcem nie jest w stanie, obserwując przebieg eksperymentu, opisać go w sposób, który inni fachowcy w danej dziedzinie w danym czasie uznają za poprawny i użyteczny.

Tworzona krok po kroku wiedza miała charakter systemowy nie dlatego — jak głosi kolejny wpływowy mit metodologiczny — że należały do niej twierdzenia ogólne, z których, w koniunkcji z warunkami początkowymi, wynikały (uteoretyzowane) zdania obserwacyjne. Miała charakter systemowy dlatego, że zakresy poszczególnych twierdzeń zachodziły na siebie: liczne twierdzenia opisywały te same obiekty lub rodzaje obiektów, umieszczone w otoczeniu innych obiektów, opisanych — jako występujące w jeszcze innych sytuacjach — w innych twierdzeniach itd. Kierowano się przy tym zasadą obowiązującą w każdej racjonalnej działalności poznawczej: *Jeśli na podstawie przeprowadzonych eksperymentów przypiszemy danemu obiektowi czy rodzajowi obiektów pewną własność, to — o ile nie wiemy nic o tym, iż w innych warunkach własność ta się zmienia — należy przypisać mu ją w innych sytuacjach*. Taka sieć krzyżujących się twierdzeń tworzy, na tym etapie rozwoju badań, *system wiedzy* w danej dziedzinie.

Jak zobaczymy w § 3, każdy badacz zaczynał od powtórzenia eksperymentów, jakich dokonali jego poprzednicy, po czym mniej lub bardziej modyfikował badany układ. A według jakich zasad modyfikował? Otóż zmieniał to, co się dało, korzystając z wiedzy o substancjach, z jakich zbudowany jest świat i o możliwych oddziaływaniach między obiektami. Rury do wyładowań wypełniano różnymi gazami (bo od końca XVIII w. znano i umiano wytwarzać różne gazy), robiono rury z rozmaitych rodzajów szkielek (bo takimi rodzajami dysponowano), elektrody zaś z wszelkich dostępnych metali (jw.), elektrodom nadawano różne kształty i wielkości, różnych kształtów i wielkości były też rury próżniowe, korzystano z impulsowych prądów dostarczanych przez cewki indukcyjne i z prądów stałych wytwarzanych przez szeregowo połączone ogniwa itd. Zmieniano napięcia, odległości między elektrodami, ciśnienia, później również temperaturę elektrod. Starano się badać promienie katodowe w warunkach analogicznych do tych, w jakich badano wcześniej wyładowania iskrowe, prądy elektryczne, a także światło widziane, podczerwień i nadfiolet.

Niemniej około 1870 r. badania nad wyładowaniami elektrycznymi w rozrzedzonych gazach weszły w fazę teoretyczną — i zaczęły nimi kierować m.in. przyjęte

prawa, a wyobrażenia naukowców zaczęła obracać się w obrębie wspólnotowo wytworzonego obrazu świata. Trzeba krótko ten obraz naszkicować.

## 2. OBRAZ ŚWIATA FIZYKÓW II POŁOWY XIX W.

*Prawa fizyki* wiążą ze sobą wartości zmiennych. Rodzaje zmiennych, w prawach występujących, określają pewien *obraz świata*. Nie jest to świat zjawisk, tego, co dostępne naszym zmysłom. Jest to świat teoretycznych obiektów, których obecność ma wyjaśniać, dlaczego zjawiska są takie, jakie są.

Zmienne same w sobie mają charakter abstrakcyjny. W miarę konstruowania kolejnych udanych zastosowań teorii ten formalny szkielet stopniowo przyobleka się w ciało: konkretne wartości, jakie przypisywane są zespołom zmiennych, mówią nam, z jakich obiektów czy rodzajów obiektów faktycznie zbudowany jest świat.

Panująca niepodzielnie w fizyce XIX w. mechanika klasyczna została pierwotnie sformułowana w wyniku analizy ruchów planetarnych. Po 1687 r., gdy Isaac Newton ogłosił *Philosophiae naturalis principia mathematica*, ukształtował się obraz świata zbudowanego z obdarzonych masami ciał, rozmieszczonych w trójwymiarowej euklidesowej przestrzeni oraz jednostajnie i wszędzie jednakowo płynącym czasie, oddziałujących na siebie siłami. Ponieważ ani Newton, ani żaden z jego następców, nie zdołał zbudować mechanicznego modelu wyjaśniającego przekazywanie sił grawitacyjnych, to w końcu przyzwyczajono się traktować je jako działające na odległość. (Wprawdzie jeszcze w 1784 r. G. L. LeSage ogłosił hipotezę korpuskuł pozaświatowych, mającą mechanicznie wyjaśnić działanie grawitacji, jednak — podobnie jak wszelkie tego typu hipotezy — nie odegrała ona roli w rozwoju fizyki.)

W ciągu następnych stu lat dodano do tego obrazu świata ładunki elektryczne i ładunki magnetyczne, czemu towarzyszyły prawa określające wartości elektrycznych i magnetycznych sił. (Prawa te — wywiedzione z wyników eksperymentów i praw mechaniki — obowiązywały niezależnie od rozpowszechnionych wówczas spekulacji na temat ilości płynów elektrycznych i magnetycznych, uwiezienia płynów magnetycznych w mikroskopijnych komórkach itd.) W 1820 Hans Ørsted i André-Marie Ampère odkryli siły działające między prądami elektrycznymi i magnesami oraz między prądami. W 1831 Michael Faraday odkrył zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Prowadziło to wszystko — w świetle zasad mechaniki i założenia, że siły działają na odległość — do wniosku, że nie istnieją ładunki magnetyczne — zjawiska magnetyczne to rezultaty ruchów elektryczności — siły zaś między ciałami naelektryzowanymi zależą nie tylko od odległości, ale też od prędkości i przyspieszeń ich wzajemnych ruchów. Wzór na wartości tych sił wyprowadził z wyników eksperymentów Wilhelm Weber w 1846 r.

Badania nad zjawiskami cieplnymi, prowadzone w sposób coraz bardziej systematyczny od lat 30. XVIII w., w latach 40. XIX w. doprowadziły Juliusa R. Mayera i innych do sformułowania zasady zachowania energii, wiążącej bilansy cieplne

z mechanicznymi energiami potencjalną i kinetyczną. Zainspirowało to dwa kolejne wielkie odkrycia.

W latach 50. XIX w. August Krönig, Rudolf Clausius i James Clerk Maxwell sformułowali korpuskularno-kinetyczne modele gazów, wedle których temperatura jest proporcjonalna do średniej energii kinetycznej korpuskuł. W ten sposób w fizycznym obrazie świata pojawiły się atomy (wprowadzone pół wieku wcześniej do obrazu chemicznego przez Daltona). Badania nad gazami, a także nad reakcjami chemicznymi, zjawiskiem elektrolizy i innymi pozwoliły, krok po kroku, określić masy i rozmiary atomów.

Prawa Webera nie udało się pogodzić z zasadą zachowania energii mechanicznej i dlatego Maxwell podjął próbę sformułowania teorii oddziaływań elektromagnetycznych jako zachodzących przez kontakt: wypełnił przestrzeń eterem, który miał podlegać prawom mechaniki, a zarazem przekazywać znane z doświadczenia siły między ciałami naelektryzowanymi. Ostatecznie mechanicznego modelu eteru zbudować nie zdołał, ale w trakcie tych prób uzyskał szereg równań różniczkowych, które ogłosił w latach 1855-1862 w postaci rozproszonej, a w 1864 jako uporządkowany układ. Niespodziewanie w 1862 r. stwierdził, że mają one rozwiązania falowe, a przedstawiane przez te rozwiązania poprzeczne fale elektromagnetyczne rozchodzą się z prędkościami — obliczonymi na podstawie wyników pomiarów elektro- i magnetostatycznych — równymi prędkości światła. Tak więc światło jest poprzeczną falą elektromagnetyczną — a faktycznie, jak sądził Maxwell i jego następcy, poprzeczną falą w wypełniającym całą przestrzeń eterze (coś takiego twierdził w 1816 r. Augustin Fresnel, który nie miał jeszcze powodu, by wiązać zjawiska optyczne z elektromagnetycznymi).

Początkowo elektrodynamika Maxwella nie zyskała powszechnego uznania. (Inne eterowe teorie sformułowali Wilhelm G. Hankel w latach 1865-67, a w 1871 r. Eric Edlund.) Jeszcze w 1884 r. Edmund Hoppe w przeglądowej *Geschichte der Elektrizität* o teorii Maxwella nawet nie wspomniał (Wróblewski 2006, §13.3). Ale wkrótce stosunek fizyków do niej zaczął się zmieniać. W 1885 r. Oliver Heaviside nadał równaniom Maxwella poręczną — i uderzającą swym pięknem — formę matematyczną. W 1887 r. Heinrich Hertz na ich podstawie wytworzył i odebrał fale radiowe. W rezultacie grupa zasadnicza kolektywu myślowego fizyków podniosła Maxwellowską elektrodynamikę do rangi teorii obowiązującej, istnienie zaś eteru elektromagnetycznego uznano za dowiedzione.

Powstanie termodynamiki statystycznej i elektrodynamiki Maxwella doprowadziło do ukształtowania się obrazu świata, który zbudowany był z eteru i ułożonych w nim atomów. Atomy posiadały masy, a niekiedy zyskiwały też ładunki elektryczne. Eterowi przypisywano gęstość masy zerową lub bardzo niewielką. Eter był ośrodkiem przekazującym oddziaływanie między atomami, ale powstające — wskutek drgań naelektryzowanych cząstek — w nim fale istniały po oderwaniu od źródeł samodzielnie. Zarówno atomy, jak i eter miały podlegać prawom mechaniki — tyle

że mechaniczna budowa eteru, a także mechanizm oddziaływania z nim atomów, pozostawały zagadką.

### 3. SYSTEMATYCZNE BADANIA NAD PROMIENIAMI KATODOWYMI A TOWARZYSZĄCE IM HIPOTEZY

Badania nad wyładowaniami elektrycznymi w rozrzedzonych gazach podjął w 1868 r. uczeń Plückera, Johann W. Hittorf. W międzyczasie udoskonalono pompę próżniową Geisslera, co pozwoliło na osiągnięcie ciśnień poniżej 1 mm Hg. Hittorf w 1869 r. stwierdził, że wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia świecenie otulające katodę gwałtownie się wydłuża, a szkło fluoryzuje coraz jaśniej. Najważniejsze okazało się odkrycie, że jeśli między katodą o niewielkich rozmiarach a szkłem umieścimy przedmiot, to na fluoryzującym szkłe rury do wyładowań powstaje jego cień. Te obserwacje wykazywały — ponad wszelką rozsądną wątpliwość — że to coś, co wydobywa się z katody i pobudza szkło do świecenia, rozchodzi się po liniach prostych.

Cromwell F. Varley, który z pewnymi modyfikacjami powtórzył eksperymenty Plückera dotyczące odchylenia promieni przez magnesy, stwierdził w 1871 r., że ich wyniki wskazują, iż *składają się one z cząstek materii naelektryzowanych ujemnie*.

W 1876 r. Eugen Goldstein na uniwersytecie w Berlinie powtórzył eksperymenty Hittorfa, używając katody o sporych rozmiarach. Analiza cieni rzucanych przez umieszczone w rurze przedmioty prowadziła do wniosku, że promienie pobudzające szkło do fluorescencji emitowane są prostopadle do powierzchni katody (w odróżnieniu od światła, które emitowane jest przez świecące powierzchnie we wszystkich kierunkach). Goldstein wykazał też, że dostępne badaniom własności promieni nie zależą od materiału, z jakiego wykonana jest katoda. Nazwał je *Kathodenstrahlen*, czyli „promienie katodowe”.

William Crookes w 1879 r. podjął, we współpracy ze znakomitym szklarzem i konstruktorem Charlesem H. Gillinghamem, badania nad promieniami katodowymi. Zmodyfikowane przez nich rury próżniowe, w których osiągnięto ciśnienia ok.  $3 \times 10^{-3}$  mm Hg, powszechnie zaczęto nazywać „rurami Crookesa”. W miarę obniżania ciśnienia fioletowa (w przypadku powietrza) poświata nie tylko wydłużała się, spychając ciemnię Faradaya w stronę anody, ale dzieliła się na dwie części, z których jedna przylegała do katody, oddzielone „ciemnią Crookesa”. Wreszcie gaz przestawał świecić i już tylko szkło fluoryzowało, w zależności od jego rodzaju na zielono, zielonożółto lub niebiesko.

Podczas gdy przy wyższych ciśnieniach świecenie gazu rozciągało się między katodą a anodą, to sytuując anodę z boku, uczony wykazał, że przy bardzo niskim ciśnieniu promienie emitowane przez katodę — prostopadle do jej powierzchni — biegną dalej po liniach prostych. Ulepszył też badania nad odchyleniem promieni katodowych przez magnesy, umieszczając we wnętrzu rury nie tylko skałę, ale też,



wzdłuż biegu promieni, ekran z miki, który fluoryzując, umożliwił śledzenie ich przebiegu na całej długości.

Crookes umieścił na drodze promieni katodowych delikatne koło łopatkowe, częściowo przesłonięte aluminiowym ekranem. Wykazał, że gdy promienie padają na łopatki po jednej stronie osi obrotu, koło zaczyna wirować — a zatem promienie przekazują mu pęd. (Błądność tego wniosku wykazał dopiero w 1903 r. J. J. Thomson.) W innym eksperymencie uczony użył katody wklęsłej, umieszczonej tak, aby promienie ogniskowały się na ścianie rury. Dotykając tego miejsca w trakcie eksperymentu, sparzył się i tym samym wykazał — w świetle zasady Mayera — że promienie przenoszą energię.

Wyniki badań pobudziły Crookesa do spekulacji. W pracy z 1879 r. czytamy o tym, że zjawiska elektryczne w rurach próżniowych odsłaniają przed nami czwarty stan materii, „gdzie prawdziwa być może korpuskularna teoria światła i gdzie światło nie zawsze porusza się po liniach prostych” (cyt. za Dahl 1997, § 4.2). W trakcie wykładu wygłoszonego w tym samym roku mówił o pograniczu, „gdzie Materia i Siła zdają się zlewać w jedno” i gdzie w przyszłości znajdują rozwiązanie największe problemy naukowe. Czytając takie uwagi trzeba pamiętać, że Crookes nie był typowym przedstawicielem kolektywu myślowego fizyków swego czasu: nie miał formalnego wykształcenia w matematyce i fizyce, a równoległe z pracą naukową prowadził badania w zakresie parapsychologii.

Crookes pisał też „zwyczajniej” — zgodnie z obiegowym wówczas stylem myślenia — że przy zetknięciu z powierzchnią katody cząsteczki resztkowego gazu zyskują ujemny ładunek elektryczny, po czym zostają gwałtownie odepchnięte. Strumień tych szybko poruszających się cząsteczek spycha pozostałe cząsteczki w stronę katody, tak że do zderzeń dochodzi dopiero na granicy ciemni — a w rezultacie pojawia się świecenie.

Wywody, które mogły przekonać ich autora niewycwiczonego w stosowaniu zasad fizyki teoretycznej, szybko natrafiły na krytykę. Peter W. Tait w 1880 r. z modelu Crookesa wywnioskował, że skoro światło jest emitowane przez poruszające się cząsteczki, to powinno się obserwować dopplerowskie przesunięcie widma, widoczne jeśli porówna się spektrum uzyskane przy obserwacji promieni pod kątem prostym do kierunku ich ruchu i w kierunkach równoległych. Żadnego takiego efektu nie zaobserwował. Oczywiście wynikało stąd jedynie, że przesunięcie dopplerowskie jest mniejsze od osiągalnych błędów pomiarowych. W tym samym roku Goldstein na podstawie wyników podobnych eksperymentów obliczył, że w takim razie prędkość świecącego strumienia cząstek musiałaby być mniejsza od ok. 20 km/s.

Goldstein sformułował, korzystając z kinetycznej teorii gazów i zgromadzonej wiedzy na temat liczby Avogadro oraz średnic atomów, silny argument przeciw hipotezie o korpuskularnej naturze promieni katodowych. Obliczył mianowicie, że przy ciśnieniu ok.  $10^{-2}$  mm Hg średnia droga swobodna cząsteczek gazu wynosi ok. 6 mm. Tymczasem najdłuższe stosowane wówczas rury do wyładowań miały długości sięgające 90 cm, a promienie katodowe poruszały się w nich po liniach prostych.

Tak więc, wnioskował niemiecki uczonec, nie mogą one być strumieniem naelektryzowanych ujemnie cząstek. W gazach po liniach prostych rozchodzi się światło, a zatem promienie te, przez analogię, powinny być *jakimiś falami w wypełniającej przestrzeń eterze*.

Niemiecki fizyk Hermann von Helmholtz wsparł w 1881 r. obóz „korpuskularny”. W tym samym roku George J. Stoney z teorii atomistycznej i praw elektrolizy Faradaya wywnioskował, że z każdym atomem związany jest elementarny ładunek elektryczny, przemnożony przez wartościowość chemiczną danego pierwiastka. (Ściśle ze wspomnianych przesłanek wynikało jedynie, że jest tak *średnio* rzecz biorąc.) Znając ładunek potrzebny do wydzielenia danej ilości wodoru, a także przybliżoną wartość liczby Avogadro, Stoney oszacował, że ładunek elementarny wynosi ok.  $10^{-20}$  C (po przeliczeniu na dzisiejsze jednostki). Jego praca przeszła prawie niezauważona.

### Komentarz metodologiczny II

Jak widzieliśmy, od ok. 1870 r. badaniom nad promieniami katodowymi towarzyszyły hipotezy dotyczące natury promieni, a w zamierzeniu wyjaśniające wyniki eksperymentów. Hipotez tych nie da się jednak traktować jako czystych tworów wyobraźni, a ich powstania jako niepodlegającego racjonalnym rekonstrukcjom — i to postaram się teraz objaśnić.

Co, zgodnie z naszkicowanym powyżej obrazem świata, znajdowało się we wnętrzu rury próżniowej? Znajdowały się tam atomy resztkowego gazu (których przy ciśnieniach rzędu 0,1 mm Hg miało być ok.  $10^{15}$  w  $\text{cm}^3$ ) i eter. Atomy, w świetle badań nad elektrolizą, mogły ulegać jonizacji — a wtedy, zgodnie z prawami elektrodynamiki, byłyby odpychane bądź przyciągane przez odpowiednie elektrody. W eterze mogły powstawać fale. Na inne obiekty w fizycznym obrazie świata II połowy XIX w. nie było miejsca. Jeśli więc stwierdzono, że coś porusza się od katody po liniach prostych, a padając na szkło, pobudza je do świecenia, to wynikało stąd, że są to strumienie naelektryzowanych cząstek lub fale w eterze. Ale z założeń czynnych panującego stylu myślowego, twierdzeń pochodzących z jego innych udanych zastosowań i wyników eksperymentów nad promieniami katodowymi nie wynikało, czy są to cząstki, czy fale.

W sytuacji, gdy z danego zbioru przesłanek wynika, że któreś ze zdań  $p$ ,  $q$ ,  $r$ , ... jest prawdziwe, ale nie wynika które, generowane jest pytanie w sensie logiki erotetycznej Andrzeja Wiśniewskiego (1995): które z danego zbioru zdań jest prawdziwe? Na takie pytanie można nie odpowiadać i czekać, aż skądś pojawią się przesłanki, które je rozstrzygną. Ale można też przyjąć którąś z możliwych odpowiedzi i wyciągać z niej oraz z reszty posiadanej wiedzy wnioski, że w takich a takich okolicznościach — jakich jeszcze nie badano — nastąpi to a to. Porównanie tych wniosków z wynikami eksperymentów pozwala potwierdzić lub podważyć daną odpowiedź.

*Twierdzą, że w nauce racjonalnie jest formułować hipotezy, gdy są one odpowiedziami na pytania generowane przez już posiadaną wiedzę. To kryterium pozwoli odróżnić hipotezy naukowe od hipotez ad hoc.* Na te drugie w nauce w zasadzie nie ma miejsca, a choć formułują je niekiedy znakomici skądinąd naukowcy, to do rozwoju wiedzy nie wnoszą one nic lub prawie nic. Wobec tego zarówno ci, którzy twierdzili, że promienie katodowe są strumieniami cząstek, jak i zwolennicy hipotezy falowej, byli racjonalni. A raczej byłiby w pełni racjonalni, gdyby nie deformujący wpływ ze strony kręgów egzoterycznych — i o tym trzeba poczynić choćby krótką wzmiankę.

Badania nad promieniami katodowymi prowadzili w pierwszym rzędzie fizycy niemieccy i angielscy. Gdy czyta się ich prace, uderza fakt, że pierwsi niemal jednomyślnie opowiadali się za hipotezą falową, natomiast drudzy za korpuskularną. Przy żywej wymianie myśli między obiema grupami nie da się tego wyjaśnić wpływami w obrębie samych kręgów ezoterycznych. Koniec XIX w. to okres, gdy w Niemczech i w Anglii narastały nastroje nacjonalistyczne. Uczni z tych krajów znajdowali się pod silną presją społeczną, która sprawiała, że sami spostrzegali naukowe spory jako rywalizację między narodami. Parę dziesiątków lat później tego typu presje owocowały wezwaniami do stworzenia fizyki aryjskiej (do czego nawoływał jeden z bohaterów naszej historii), która wyprze z fizyki wpływy żydowskości, lub do zbudowania nauki proletariackiej opozycyjnej w stosunku do (pseudo)nauki burżuazyjnej. Prowadziło to zwykle na poznawcze manowce, których symbolem jest „sukces”, jaki w Związku Radzieckim w latach 30. XX w. odniosła teoria stadialnego rozwoju roślin Trofima Łysenki lub teoretyczna bezpłodność germańskich krytyków idei relatywistycznych. W przypadku badań nad promieniami katodowymi takich degenerujących skutków wpływów zewnętrznych na przebieg badań eksperymentalnych i dociekań teoretycznych nie widać. Wybitne umysły, jak zobaczymy, poddawały się w końcu werdyktowi logiki i doświadczenia, również wtedy, gdy uderzało to w ich ambicje czy ideały.

#### 4. STRUMIENIE NAELEKTRYZOWANYCH CZĄSTEK CZY FALE W ETERZE?

Między hipotezami korpuskularną a falową — choć dla obu było miejsce w kolektywnie wypracowanym obrazie świata — zachodziła w owym czasie asymetria. Podczas gdy pierwsza prowadziła do jakościowych przynajmniej przewidywań, druga pozostawała nieokreślona. Dlatego zwolennicy hipotezy falowej koncentrowali się na krytyce hipotezy korpuskularnej, planując zgodnie z nią eksperymenty i pokazując, że niektóre z oczekiwanych efektów się nie pojawiają. W 1882 r. w Berlinie szereg takich eksperymentów przeprowadził Heinrich Hertz.

Gdyby świecenie wywoływały poruszające się cząstki, powinno ono wykazywać pulsacje. Hertz wytworzył w związku z tym wiązkę promieni katodowych, używając stosu dającego stałe napięcie, a następnie obserwował świecenie przy użyciu szybko

wirujących zwierciadeł. (Była to metoda powszechnie wówczas stosowana do obserwacji szybkich ruchów.) Skonstruował też układy elektryczne, pozwalające wykryć niewielkie i bardzo szybkie zmiany płynącego przez rurę próżniową prądu. Wyniki eksperymentów świadczyły o tym, że jeśli jakieś pulsacje występują, to mają częstotliwość znacznie większą niż milion drgań na sekundę.

W kolejnej serii eksperymentów Hertz użył do wytworzenia promieni prostopadłościennego zbiornika, grubego na ok. 1 cm., którego górną i dolną ściankę stanowiły płyty szklane o wymiarach 12 na 12 cm. Katoda i anoda, o płaskich powierzchniach, znajdowały się w pobliżu krawędzi prostopadłych do siebie. Promienie katodowe, emitowane prostopadle do powierzchni katody, rozchodziły się dalej — o czym świadczyło świecenie resztkowego gazu — po liniach prostych. Obserwując drgania igły magnetycznej zawieszanej nad urządzeniem, Hertz wyznaczył linie prądu biegnącego między katodą a anodą i stwierdził, że w niektórych miejscach są one prawie prostopadle do kierunku promieni katodowych, w innych obserwujemy świecenie, choć brak tam efektów wskazujących na przepływ prądu. „Wynika stąd, że promienie katodowe nie mają nic wspólnego z drogą prądu” (Hertz 1883, cyt. za Anderson 1964, § 2.6). Wniosek ten wzmacniały kolejne eksperymenty, w których specjalnie ekranowana rura do wyładowań umieszczona była końcem, na którym promienie pobudzały szkło do świecenia, w metalowym cylindrze podłączonym do niezwykle czułego elektrometru. Znowu nie udało się wykryć ładunku, który (rzekomo) przenoszą promienie.

Gdyby promienie katodowe były strumieniem cząstek, to ich odchylenie w polu magnetycznym świadczyłoby o tym, że są naelektryzowane ujemnie. Ale w takim razie powinny się też odchyłać w polu elektrycznym. Hertz umieścił wewnątrz rury Crookesa, nad i pod drogą promieni, metalowe paski, połączone z biegunami baterii. Przy napięciu ok. 20 woltów odchylenia promieni nie zaobserwował. Przy napięciu ok. 500 wolt między paskami nastąpiło wyładowanie, które usunął, włączając w obwód duży opór — i znowu stwierdził, że siły elektryczne nie zmieniają w widoczny sposób biegu promieni. Na podstawie zmierzonego zakrzywienia ich w polu magnetycznym obliczył, stosując prawa elektrodynamiki, że aby odchylenie w polu elektrycznym mieściło się w granicach błędów doświadczalnych, prędkość ruchu (rzekomych) cząsteczek musiałaby być większa niż  $1,1 \times 10^8$  m/s, co wydało mu się wielkością absurdalnie dużą. Na tej podstawie, stosując regułę wnioskowania „ $p$  lub  $q$ , nie  $p$ , a zatem  $q$ ”, Hertz stwierdzał: „Promienie katodowe są elektrycznie obojętne i spośród wszystkich zjawisk zjawisko to jest najbliższe światłu” (tamże).

Promienie światła wprawdzie nie zakrzywiają się w polu magnetycznym, jednak Faraday odkrył, że takie pole potrafi obrócić płaszczyznę polaryzacji światła przechodzącego przez ośrodek przezroczysty. Być może w tym przypadku zachodzi jakiś efekt podobny, a jeszcze nieznanany: „Zakrzywienie promieni katodowych przez magnes ma najwięcej wspólnego z obrotem płaszczyzny polaryzacji światła w polu magnetycznym” (tamże).

Żaden wynik pojedynczego eksperymentu, a nawet grupy eksperymentów powiązanych ze sobą, nie przesądza o zasadności hipotezy. Arthur Schuster, niemiecki Żyd pracujący w Cavendish Laboratory w Cambridge, w 1884 r. ogłosił pracę na temat wyładowań elektrycznych w rozrzedzonych gazach. Przez analogię z popularnymi wyjaśnieniami zjawiska elektrolizy uznał, że promienie katodowe są strumieniami jonów, na które rozpadają się cząstki gazów. Katoda przechwytuje jony dodatnie, a gwałtownie odpycha ujemne. Brak przesunięcia dopplerowskiego tłumaczył tym, że źródłem świecenia nie są poruszające się jony, ale bombardowane przez nie cząstki resztkowych gazów. Skoncentrował się na zjawisku odchylenia promieni w polu magnetycznym, którego linie sił były prostopadłe do kierunku ruchu domniemanych korpuskuł. Prawa elektrodynamiki i mechaniki prowadziły do równania:

$$(1) \quad evH = mv^2/r,$$

gdzie  $e$  — ładunek jonu,  $m$  — jego masa,  $v$  — prędkość ruchu,  $r$  — promień toru promieni w polu magnetycznym o natężeniu  $H$ . Na podstawie zasady zachowania energii:

$$(2) \quad mv^2/2 = eV,$$

gdzie  $V$  — różnica potencjałów w rejonie, w którym jony nabierają prędkości. Z (1) i (2) wynikało:

$$(3) \quad e/m = 2V/H^2r^2.$$

Gdyby Schuster na tej podstawie zauważył, że daje to wartość stosunku ładunku do masy o trzy rzędy wielkości większą niż ta znana dla jonów elektrolitycznych, być może dziś uchodziłby za (współ)odkrywcę elektronu.

W 1886 r. Goldstein przeprowadził kolejną serię eksperymentów mających odpowiedzieć na kłopotliwe pytanie, dlaczego w trakcie wyładowań w rozrzedzonych gazach domniemane jony wędrują tylko w jedną stronę. Przecież w jakoby bliźniaczym zjawisku elektrolizy substancje wydzielane są jednocześnie na obu elektrodach. Umieścił w związku z tym anodę na jednym końcu rury próżniowej, a katodę wykonał w postaci płytki przegradzającej rurę w połowie jej długości. W katodzie wywiercone zostały otwory o średnicach ok. 1 mm. Po wypompowaniu gazu i włączeniu napięcia Goldstein zaobserwował w przeciwległej do anody części rury świecące prążki wydobywające się z otworów w katodzie. Nazwał je *Kanalstrahlen*, czyli „promieniami kanalikowymi”. Ich barwa w większym stopniu niż w przypadku promieni katodowych zależała od rodzaju resztkowego gazu w rurze, a pole magnetyczne dość silne na to, by zmienić bieg promieni katodowych, nie zakrzywiało torów nowo odkrytych promieni.

W latach 1886-88 Hertz przeprowadził serię eksperymentów, w trakcie których, kierowany równaniami Maxwella i badaniami nad rozładowaniem butelki lejdejskiej przeprowadzonymi przez Bernarda W. Feddersena w 1862 r. (w ich trakcie obserwowano iskry za pomocą szybko wirującego zwierciadła), wytworzył i odebrał fale radiowe, a także zbadał ich podstawowe własności. To odkrycie przyniosło mu wiel-

ką sławę, a samo nie pozostało bez wpływu na rozważania dotyczące natury promieni katodowych.

Jeszcze istotniejsze dla tych rozważań okazało się odkrycie dokonane przy okazji. Najpierw Hertz zauważył, że iskra w obwodzie odbierającym fale wydłuża się, gdy jest on wystawiony na światło iskier z obwodu nadajnika. Dalsze eksperymenty przekonały go, że efekt ten, nazwany wkrótce „fotolektrycznym”, wywołwany jest przez padające na powierzchnię metalu promienie nadfioletowe.

Wkrótce stwierdzono, że nieco wcześniej Schuster i Svante Arrhenius opisali zjawiska związane z efektem fotolektrycznym — w przeciwieństwie do Hertza jednak nie podjęli nad nimi *systematycznych* badań i ich odkrycia przeszły niezauważone, również przez samych „odkrywców”.

Rychło systematyczne badania nad efektem fotolektrycznym podjęli inni. Eilhard Wiedemann i H. Ebert stwierdzili, że promienie nadfioletowe działają na elektrodę ujemną, a nie na dodatnią. Wilhelm Hallwachs, a niezależnie Augusto Righi, odkryli, że padający nadfiolet szybko rozładowuje płytkę cynkową naelektryzowaną ujemnie, nie rozładowuje natomiast płytki naelektryzowanej dodatnio. Aleksander Stoletov użył dwóch elektrod, między które przykładał niewielkie napięcie, tę ujemną naświetlał ultrafioletem — i mierzył natężenie przepływającego prądu. Stwierdził m.in., że jest ono największe, jeśli jako katody użyjemy metali zajmujących najbardziej elektrododatnie miejsce w szeregu woltaicznym, takich jak ołów, aluminium czy cynk. W 1888 r. René-Prospier Blondlot i Ernest A. Bichat odkryli, iż ujemna elektryzacja płytki cynkowej dokonuje się szybciej, a uzyskiwany maksymalny potencjał rośnie, jeśli na oświetlaną ultrafioletem płytkę dmuchamy strumieniem powietrza.

W 1889 r. w Heidelbergu serię eksperymentów dotyczącą efektu fotolektrycznego przeprowadzili Philipp Lenard i Max Wolf. Po nieudanych próbach wykrycia drobinek metalu wyrzucanych przez promienie nadfioletowe stwierdzili wreszcie, za pomocą bardzo czułego elektrometru, że pod wpływem promieni z powierzchni metalu wydobywają się ujemnie naelektryzowane promienie, które zakrzywiane są w polu magnetycznym. Wniosek, że mamy tu do czynienia z promieniami tej samej natury, co promienie katodowe, wydawał się nieunikniony. Lenard zaczął pod wpływem tych doświadczeń podejrzewać, że promienie katodowe są strumieniami naelektryzowanych cząstek — a zatem, że rację mają fizycy angielscy. Chyba, aby nie opowiedzieć się po stronie konkurentów, zataił uzyskane wyniki i ogłosił je dopiero w tekście wspomnianym w §8.

W 1890 r. Schuster przedstawił wreszcie liczbowe oszacowanie wartości  $e/m$  dla cząstek promieni katodowych. Z (2) otrzymał, jako górną granicę, ok.  $1,1 \times 10^{10}$  C/kg, co później poprawił na  $3,5 \times 10^{10}$  C/kg. Ponieważ należało oczekiwać, że wskutek zderzeń cząstki tracą energię, przyjął, że nie mogą one zostać spowolnione poniżej średniej prędkości ruchu cieplnego atomów resztkowego gazu, czyli ok. 1 km/s. Dawało to, jako dolną granicę, ok.  $10^7$  C/kg. Na podstawie badań nad elektrolizą przyjmowano wówczas, że stosunek ładunku do masy jonu atomu wodoru wynosi ok.  $10^8$  C/kg. Schuster stwierdził w związku z tym, że zjawiska obserwowane w ru-

rze Crookesa są wywołane ruchem jonów, na jakie siły elektryczne rozrywają cząsteczki. Przyznawał, że nie wie, czy rozpad następuje na katodzie, czy również w pewnej od niej odległości, ani czy ujemne jony są głównym nośnikiem prądu w obrębie ciemni Crookesa.

W 1891 r. Stoney, który dziesięć lat wcześniej sformułował ideę elementarnego ładunku elektrycznego i oszacował jego wartość, nadał mu miano „elektron”.

W tym czasie Hertz podał jeszcze mocniejsze argumenty przeciw hipotezie, iż promienie katodowe są strumieniem korpuskuł. Stwierdził mianowicie doświadczalnie, że mogą one przenikać przez cienkie warstwy metali (choć nie przechodzą np. przez płytkę z miki). Najcieńsze folie metalowe, jakie wtedy uzyskiwano, miały, jak wiadomo, kilka tysięcy warstw gęsto upakowanych atomów — i przypuszczenie, że jon może przedostać się na drugą stronę, nie zmieniając prawie kierunku ruchu, wydawało się absurdalne. Tymczasem światło przenika przez szereg materiałów po liniach prostych, przez inne materiały przenikają fale radiowe — co uprawdopodobniało hipotezę, że promienie katodowe są *jakimiś* falami w eterze.

Joseph J. Thomson podjął w Cambridge badania nad promieniami katodowymi aby, jak wspominał po latach,

(...) sprawdzić pogląd, że przechodzenie elektryczności przez gazy może być analogiczne do tego przez ciecze, gdzie elektryczność jest przenoszona przez naelektryzowane cząstki zwane jonami” (1936, cyt. za Dahl 1997, § 6.2).

W 1894 r. badał szybkość rozchodzenia się poświat wydobywających się zarówno z anody, jak i z katody, używając rur do wyładowań w rozrzedzonych gazach o długościach rzędu 10 m i szybko wirujących zwierciadeł. Po wielu nieudanych próbach otrzymał wreszcie dla promieni katodowych wartość ok. 200 km/s. Pokrywała się ona z teoretycznie obliczoną — na podstawie prawa zachowania energii i wartości  $e/m$  znanej z badań nad elektrolizą — prędkością, z jaką przy użytym napięciu poruszałyby się zjonizowany atom wodoru.

Tymczasem Julius Elster i Hans Geitel badali wpływ polaryzacji światła na efekt fotoelektryczny. Dało to początek badaniom, które przez szereg lat przynosiły sprzeczne wyniki i w omawianych w tym rozdziale debatach odegrały marginalną rolę.

Badania Hertza, przerwane przez chorobę i śmierć w wieku 36 lat, podjął w 1894 jego asystent, Philipp Lenard (który w latach 30. XX w. tropił w pismach Hertza degenerujące ślady żydowskości). Wcześniej już próbował stwierdzić, bez powodzenia, czy promienie katodowe przenikają przez ściankę rury Crookesa wykonaną z kwarcu. Teraz niewielki otwór w ściance rury do wyładowań, wykonany naprzeciw katody, zatkał aluminiową folią. Po wypompowaniu gazu i włączeniu napięcia mógł stwierdzić, za pomocą ekranu fluorescencyjnego, iż promienie katodowe nie tylko przenikają przez warstwę metalu, ale także w powietrzu pod ciśnieniem 1 atmosfery rozchodzą się na odległość co najmniej 8 cm. Kształt obserwowanego świecenia świadczył o tym, że są one mocno rozpraszane, mniej więcej tak jak światło w mleku. Na tej podstawie wnioskował:

Liczne zawieszony w mleku cząstki tłuszczu czynią je mętnym dla światła. Z drugiej strony czyste powietrze nie zawiera nic poza cząsteczkami gazów w nim zawartych, zawieszonych w eterze. Te cząsteczki są niezwykle małe, 10 000 razy mniejsze niż drobinki tłuszczu, o wiele za małe by indywidualnie oddziaływać na światło. Ale, jak widzimy, każda z nich powstrzymuje promienie katodowe. Tak więc te promienie muszą być niesłychanie drobne, tak drobne, że cząsteczkowa struktura materii, tak mikroskopijna w porównaniu z bardzo drobnymi falami świetlnymi, w porównaniu z nimi nabiera wyrazistości (Lenard 1894, cyt. za Dahl 1997, § 5.2).

To nie była hipoteza, ale twierdzenie wynikające z hipotezy falowej, w koniunkcji z resztą posiadanej wiedzy, przy interpretacji wyników eksperymentów. Nieokreślona dotąd hipoteza zaczęła zyskiwać treść. Lenard stwierdził też, że droga, jaką przebywają w gazach promienie katodowe, zależy jedynie od gęstości gazu, a nie od innych jego charakterystyk.

Gdy Jean Baptiste Perrin kończył studia, w ezoterycznych kręgach fizyków francuskich trwała debata na temat istnienia atomów. Pracując nad doktoratem, podjął badania nad promieniami katodowymi, wydawało mu się bowiem, że prace Crookesa i Thomsona otwierają możliwość dotarcia do tych elementarnych składników materii. Kierunek odchylenia wiązki promieni w polu magnetycznym świadczył, jak już wiemy, o tym, że jeśli są one strumieniami atomów, to mają ujemny ładunek elektryczny. Zasada systematyczności badań nakazywała przeprowadzenie eksperymentu innego rodzaju, który prowadziłby do identycznego wniosku — i tego dokonał w 1895 r. młody francuski uczone. W rurze do wyładowań naprzeciwko katody umieścił metalowy, uziemiony cylinder funkcjonujący jako anoda, a w jego wnętrzu drugi cylinder, izolowany od pierwszego, połączony z elektrometrem. W ściankach obu cylindrów zwróconych ku katodzie znajdowały się małe otwory, przez które promienie katodowe mogły wpadać do ich wnętrza. Okazało się, że po wypompowaniu gazu i włączeniu napięcia cylinder wewnętrzny elektryzuje się ujemnie. Gdy do rury zbliżono magnes, tak że odchylane promienie nie trafiały w otwory, elektryzacja ustała.

Było to, warto zauważyć, powtórzenie nieudanego eksperymentu Hertza, z tą różnicą, że kolektor ładunku znajdował się nie na zewnątrz, ale wewnątrz rury Crookesa. Trzeba też nadmienić, iż układ eksperymentalny był, zważywszy na argumenty Hertza, wadliwy: uczone niemiecki nie twierdził przecież, że powstawaniu promieni katodowych nie towarzyszy przepływ prądu, argumentował natomiast, że oba zjawiska są odmiennej natury. Patrząc na układ Perrina, stwierdziłby, że elektryzacja wewnętrznego cylindra następuje, gdyż jednocześnie wpadają do niego promienie katodowe i strumień jonów. Niemniej te wyniki eksperymentalne wywarły pewne wrażenie, a przede wszystkim wskazały jedną ze ścieżek do dalszych badań.

## 5. WZMIANKA O DWÓCH WIELKICH ODKRYCIACH

Pod koniec października 1895 r. Wilhelm Röntgen zestawiał układ eksperymentalny składający się z rury do wyładowań i zasilającej ją cewki Rühmkorffa, a wszystko po to, aby powtórzyć eksperymenty Lenarda nad przenikaniem promieni katodowych



przez cienkie folie metalowe. Zamierzał m.in. badać rozchodzenie się promieni katodowych w powietrzu, wiedząc, że maksymalny ich zasięg jest rzędu kilku centymetrów. Po kilku, a może kilkunastu dniach badań 8 listopada po wygaszeniu światła i włączeniu prądu zauważył, że papierowy ekran pokryty platynocjankiem baru, umieszczony w odległości ok. 2 metrów od rury świeci. Przez następne siedem tygodni prawie nie opuszczał laboratorium, a 28 grudnia 1895 r. zakomunikował o odkryciu „promieni X”.

Doniesienie kończyło charakterystyczne pytanie, w którym odzwierciedlał się ówczesny stan fizyki teoretycznej:

Od dawna wiadomo, że poza poprzecznymi drganiami, które wyjaśniają zjawiska świetlne, jest możliwe, iż w eterze istnieją też drgania podłużne, a według poglądu pewnych fizyków istnieć one muszą. Przypisać trzeba, że kwestia ich istnienia nie została jeszcze jasno rozstrzygnięta, a ich własności nie zostały doświadczalnie ustalone. Czy nowych promieni nie należy przypisać podłużnym falom w eterze? (§17)

Aby to pytanie właściwie zrozumieć, trzeba wiedzieć o pęknięciu, jakie istniało wówczas w fizycznym obrazie świata. Budowano go wokół praw mechaniki Newtona, ale stopniowo przebudowywano zgodnie z równaniami elektrodynamiki Maxwella. Wszyscy zgodnie uważali światło za fale w eterze. Badania nad zjawiskiem polaryzacji przywiodły Fresnela w 1816 r. do wniosku, że światło jest zawsze falą poprzeczną. Ale zgodnie z prawami mechaniki w ośrodkach, w których mogą powstawać fale poprzeczne, mogą też powstawać fale podłużne. Aby te drugie wyeliminować, uciekano się do hipotez, iż eter jest całkowicie nieściśliwy (Fresnel 1816), że ma ujemny współczynnik sprężystości na ściskanie i na ucisk reaguje dalszym skurczem (Cauchy 1839), że reaguje sprężystością tylko na skręcenia (MacCullagh 1839). Były to hipotezy albo trudne z pewnych względów do przyjęcia, albo rażące dziwactwami, dlatego eksperymentatorzy z uporem szukali fal podłużnych. Kolejno podczerwień, nadfiolet, a wreszcie fale radiowe okazały się poprzeczne. Hipoteza Röntgena wydaje się swoistym wyrazem tęsknoty za falami podłużnymi — choć brak potwierdzających ją wyników doświadczeń kazał mu dodać: „przedstawiona hipoteza nadal wymaga solidniejszych podstaw”.

Jako rozwiązanie równań Maxwella otrzymuje się funkcje opisujące rozchodzenie się elektromagnetycznych fal poprzecznych — a nigdy podłużnych. Ale jako pierwszy równania Maxwella za podstawowe uznał w 1905 r. Albert Einstein. Mechanicyści fal podłużnych szukali do samego końca, póki kolejne pokolenie badaczy nie porzuciło mechaniki klasycznej na rzecz teorii względności.

Promienie X natychmiast stały się przedmiotem intensywnych badań: w ciągu 1896 r. ukazało się około 1000 książek i artykułów im poświęconych, co szczególnie uderza, jeśli się wie, że w tym okresie ezoteryczny krąg kolektywu myślowego fizyków liczył na całej Ziemi około 1200 członków.

W lutym 1896 r. wielkiego odkrycia dokonał, zainspirowany przez doniesienie Röntgena, Henri A. Becquerel. Dowiedziawszy się, że promienie X powstają w miej-

scu, gdzie szkło pod wpływem padających promieni katodowych fluoryzuje, chciał sprawdzić, czy emitowane są one też przez ciała fosforyzujące. (Fluorescencję od fosforescencji różni czas trwania świecenia po ustaniu bodźca.) Po pierwszych nieudanych próbach użył soli uranowych, które wystawił na działanie promieni słonecznych, a następnie umieścił na płycie fotograficznej owiniętej szczelnie czarnym papierem. Po wywołaniu stwierdził, że płyta jest zaczerniona, a w miejscu, gdzie między solami a płytą leżała moneta znajduje się jej jasny zarys. Czekąca go jednak niespodzianka. W ostatnich dniach lutego w Paryżu niebo było zachmurzone, wskutek czego sole nie zostały naświetlone — a mimo to płyta fotograficzna, na której leżały, uległa zaczernieniu. Dało to początek serii badań z użyciem różnych substancji, w wyniku których okazało się, iż źródłem promieni podobnych do promieni X nie jest fosforescencja, ale zawarty w solach uran. Na początku maja Becquerel doniósł, że związki uranu przechowywane w ciemności przez dwa miesiące zaczerniają płyty fotograficzne mniej więcej tak, jak te świeżo poddane działaniu promieni słonecznych. A zatem źródłem promieni jest sam uran, a nie coś, co na niego działa. Wkrótce Becquerel oznajmił, że udało mu się uzyskać odbicie i załamanie promieni „uranowych”.

## 6. WYŁANIANIE SIĘ NOWEJ POSTACI I POCZĄTKOWY OPÓR PRZED NIĄ

Hendrik A. Lorentz uzyskał doktorat w 1875 r. na podstawie pracy z optyki ujętej z punktu widzenia — wówczas niedocenianej — elektrodynamiki Maxwella. Otrzymał jedną z pierwszych w Europie katedr fizyki teoretycznej na uniwersytecie w Leiden, Holandia. Przez szereg kolejnych lat prowadził dociekania z zakresu korpuskularno-kinetycznej teorii ciepła. Wreszcie zaczął szukać pomostu między mechaniką a elektrodynamiką, czego owocem stała się teoria nazwana później „elektronową”. Atomy zawieszono w nieważkim eterze wypełniającym całą przestrzeń. Atomy i eter to odrębne substancje, kontakt między nimi zachodzi za pośrednictwem naelektryzowanych jonów (późniejszych „elektronów”). Ich obecność i ruchy wywołują w eterze procesy, których skutki opisywane są przez rozwiązania równań Maxwella. Zarys teorii opublikowany został w 1892 r., a w 1895 r. Lorentz ogłosił wzór na siłę, jaką na jony działa pole elektromagnetyczne:

$$(4) \quad \mathbf{F} = e\mathbf{E} + e\mathbf{v} \times \mathbf{H}.$$

Należy dodać, że podobną do Lorentzowskiej teorię „elektronową” ogłosił w latach 1894-95 pracujący w Cambridge Joseph Larmor. Zakładał on wówczas, że oddziałujące z eterem elektrony posiadają stosunek ładunku do masy najwyższy taki jak ten znany dla jonu wodoru.

Jeśli drgające jony są źródłem światła, to — jak wynikało z teorii elektronowej — umieszczenie świecącej substancji w polu magnetycznym powinno drgania mody-

fikować, a w rezultacie zmieniać częstotliwości emitowanych fal. Taki eksperyment próbował w Leiden wykonać Pieter Zeeman, początkowo bez rezultatu. Gdy uniwersytet nabył lustrzaną siatkę dyfrakcyjną Rowlanda, mającą ok. 600 linii/mm, Zeeman w sierpniu 1896 r. zaobserwował poszerzenie obu linii D pary sodu, rzędu 1/30 odległości między nimi.

Gdy tylko Lorentz otrzymał te wyniki, przeprowadził obliczenia na podstawie teorii elektronowej. W zależności od kierunku drgań jonu emitującego światło do kierunku pola magnetycznego linia widmowa powinna dzielić się na dwie lub trzy linie, a dwie skrajne powinny wykazywać przeciwne polaryzacje kołowe (co Zeeman wkrótce potwierdził eksperymentalnie). Różnica częstotliwości — przy obserwacji w kierunku prostopadłym do kierunku pola magnetycznego — między linią środkową a bocznymi powinna wynosić

$$(5) \quad \Delta\nu = eH/4\pi m.$$

Stąd, zmierzwszy wartości  $\Delta\nu$  i  $H$ , można było obliczyć wartość  $e/m$ . Okazała się równa ok.  $10^{11}$  C/kg. Wynik ten Zeeman ogłosił w listopadzie 1896 r. po flamandzku i po niemiecku, w lutym 1897 r. ukazał się w *Nature* przekład angielski. Co osobliwe, ani słowem nie wspomniał o tym, że uzyskana wartość jest ok. tysiąc razy większa niż ta znana dla jonu wodoru.

W styczniu 1897 r. Wiechert przedstawił wyniki eksperymentów z promieniami katodowymi. Korzystając z (1), (2) i (3), obliczył, że gdyby ładunek domniemanych cząstek był równy ładunkowi elementarnemu znanemu z badań nad elektrolizą, to ich masa musiałaby być od 2000 do 4000 razy mniejsza od masy atomu wodoru.

W lutym 1897 r. John S. E. Townsend ogłosił wyniki eksperymentów, których celem było ustalenie wartości ładunku elementarnego w rozumieniu Stoneya. Z badań Enrighta z 1890 r. wiedział, że gazy uwalniane w procesie elektrolizy bywają naelektryzowane. W zetknięciu z nasyconą parą wodną jony tlenu jako ośrodki kondensacji powodowały powstawanie mgły. Jej całkowity ładunek Townsend mierzył elektrometrem, a całkowitą masę ustalał przez przepuszczenie mgły przez substancję absorbującą, którą ważył przedtem i potem. Średnią wagę kropelek oceniał na podstawie prawa Stokesa i obserwowanej szybkości ich spadania pod wpływem siły grawitacji. Zakładając, iż na każdym jonie powstaje jedna kropla, krople w trakcie spadania nie parują i czyniąc jeszcze parę ryzykownych założeń, w prosty sposób obliczył, że na dodatni jon tlenu przypada  $0,93 \times 10^{-19}$  C, a na jon ujemny  $1,03 \times 10^{-19}$  C.

Równocześnie Thomson ogłosił, że odchylenie promieni katodowych w polu magnetycznym o danym natężeniu zależy od napięcia między katodą a anodą, a nie zależy od rodzaju resztkowego gazu.

W kwietniu 1897 r. Walter Kaufmann na podstawie wyników eksperymentów podobnych do tych przeprowadzonych parę miesięcy wcześniej przez Wiecherta wnioskował, iż „hipoteza o promieniach katodowych jako emitowanych cząstkach” jest błędna, gdyż prowadzi do absurdalnie dużej wartości stosunku  $e/m$ . Tym bardziej, dodawał, że gdyby promienie były strumieniami jonów, to musiałyby mieć

różny stosunek ładunku do masy w zależności od rodzaju resztkowego gazu w rurze, co byłoby niezgodne z wynikami eksperymentów.

### Komentarz metodologiczny III

Röntgen nie był pierwszym, który obserwował efekty związane z obecnością promieni X. Już w 1880 r. Eugen Goldstein donosił, że ekran fluorescencyjny umieszczony wewnątrz rury Crookesa, osłonięty przed wiązką promieni katodowych, a skierowany w stronę ścianki, na którą promienie padają, świeci. Jego artykuł ukazał się w języku zarówno niemieckim, jak i angielskim, czytany był zapewne przez wszystkich zainteresowanych naturą promieni katodowych, a jednak ani on, ani nikt inny przez następne kilkanaście lat nie podjął systematycznych badań, które by coś więcej na temat tego zjawiska powiedziały. W 1890 r. w Filadelfii Arthur W. Goodspeed i William N. Jennings fotografowali zjawiska elektryczne. Następnie dwie używane w eksperymentach monety położyli na naświetlonej właśnie, szczelnie opakowanej płycie fotograficznej, którą przypadkowo umieścili obok działającej rury Crookesa. Po wywołaniu okazało się, że płyta jest zaczerniana, a widnieją na niej zarysy monet. Jednak dalszych badań nad tym zjawiskiem nie podjęli. Parę lat później J. J. Thomson polecił asystentom, aby nie przechowywali płyt w szafce, na której prowadzono eksperymenty z rurami Crookesa — gdyż leżąc tam, ulegają zaczernieniu. Rok zaś przed pracami Röntgena donosił, że szkło niemieckie, znajdujące się w odległości około dwóch metrów od pracującej rury Crookesa, fluoryzuje. Czytając publikacje Lenarda na temat tych właśnie eksperymentów, które początkowo powtarzał Röntgen, łatwo dziś stwierdzić, że niektóre z opisanych w nich efektów były związane z obecnością promieni X. Wspomniano też powyżej, że Schuster i Arrhenius przed Hertzem obserwowali, a nawet opisali, zjawiska związane z efektem fotoelektrycznym — po czym temat porzucili.

Podobne postawy opisano powyżej, jeśli chodzi o obiekty teoretyczne, na które jeszcze nie było miejsca w naukowym obrazie świata. Gdy uzyskiwano niezwykle wielkie wartości stosunku ładunku do masy domniemanych cząstek promieni katodowych czy tych, których drgania stają się źródłami promieniowania, to albo je bagatelizowano, albo uznawano za powód odrzucenia hipotezy korpuskularnej.

Nasze widzenie świata nie polega na spostrzeganiu przestrzennych układów i czasowych następstw plam barwnych — czegoś, co mieliby tak samo spostrzegać wszyscy obserwatorzy o wystarczająco podobnie zbudowanym aparacie percepcyjnym. *Widzimy* — a jeśli ktoś woli tak mówić, *dostrzegamy* — to, cośmy się wcześniej nauczyli widzieć: wspólnotowo wypracowane postacie. Tam, gdzie laik dostrzeże chaotyczny układ błysków, wprawny obserwator pod koniec XIX w. widział promienie katodowe, ciemnie Faradaya i Crookesa, poszerzone linie spektralne itd. Nie dostrzegął natomiast promieni X.

Nie twierdę, rzecz jasna, że nie widział niczego. Gdy Goodspeed i Jennings przeczytali doniesienie Röntgena — w którym zamieszczone zostały fotografie uzyskane za pomocą promieni X, które po przejściu przez różne przedmioty padły na osłoniętą przed światłem płytę fotograficzną — zaraz przypomnieli sobie o zarysach monet na fotografii sprzed lat. Twierdę, że stało się tak nie dlatego, iż zrozumieli swój błąd, ale że w zestawieniu z fotografiami Röntgena i towarzyszącymi im opisaniami stare wspomnienia nagle nabrały nowego sensu. Tam, gdzie wcześniej widzieli zdjęcie przypadkowo zaczernione, ujrzeli ślady promieni X.

Spyta ktoś w tym miejscu, czy dzisiejszy fizyk widzi promienie X? Przecież, ktoś powie, są one niewidzialne, a my jedynie na podstawie tego, co widzimy, wnioskujemy o ich obecności. Na taki wywód odpowiem pytaniem: czy widzę pasącą się na łące krowę, czy raczej ruchome układy barwnych plam, a co najwyżej część powierzchni skóry zwierzęcia (która ma też drugą stronę, wnętrze itd.) — i dopiero na tej podstawie wnioskuję, że te plamy świadczą o obecności krowy? Otóż w zwykłych okolicznościach widzę krowę, natychmiast i bez żadnych wnioskowań. Tyle że gdybym wcześniej krów bądź podobnych zwierząt nie nauczył się widzieć, to bym *krowy* nie zobaczył. Nie znaczy to, że w moim umyśle nie pojawiałyby się te same plamy barwne co teraz — ale wtedy nie miałbym powodu, by na tych akurat plamach skoncentrować uwagę, by je opisać słowami itd. I podobnie w pewnych sytuacjach wyszkolony badacz dostrzega obecność promieni X natychmiast, bez żadnych wnioskowań. One pozostają niewidzialne dla laika, ale nie dla fachowca. Zdarzają się też okoliczności (przy słabym świetle, we mgle, ale też gdy w egzotycznym kraju widzę zwierzę jakoś podobne do krów, ale różne od tych, jakie dotąd oglądałem), w których powiedziałbym, że widzę coś i jedynie domyślam się, że mam do czynienia z krową. I analogicznie fizyk bywa w sytuacjach, w których jedynie domyśla się, że ma do czynienia z promieniami X.

Podobnie rzecz ma się z naszym myśleniem. Nie przychodzimy na świat ze zdolnością myślenia — zdolność ta kształtuje się stopniowo w procesie socjalizacji. Obcując z członkami danego kolektywu myślowego, przejmujemy wypracowany przez nich styl myślenia, wraz ze stowarzyszonym obrazem świata. W umyśle człowieka, który nie przeszedł przez kurs elektrodynamiki Maxwella, nie pojawią się myśli o polach elektrycznym czy o polu magnetycznym (podobnie jak ten, kto nie zgłębił podstaw hinduizmu bądź buddyzmu, nie myśli o swoim życiu w kategoriach prawa karmicznego). Natomiast wykształcony fizyk myśli o takich obiektach z łatwością; mało tego, myśli o doznawanych wrażeniach w kategoriach kryjących się za nimi pól. Nie myśli natomiast o tym, czego w nabytym obrazie świata nie ma. Jego myślenie zamknięte jest więc w pewnych granicach — które dla niego pozostają niewidzialne.

Kiedy Kaufman argumentował, że gdyby promienie katodowe były strumieniami korpuskuł, to stosunek ich ładunku do masy byłby różny dla różnych reszkowych gazów w rurze, to jego argumentacja była poprawna w odniesieniu do naukowego obrazu świata, jaki posiadał: obrazu atomów — obdarzonych masą, a czasem też ła-

dunkiem elektrycznym — rozmieszczonych w eterze. A gdy Zeeman ogłaszał wynioskowaną z praw mechaniki, elektrodynamiki i wyników eksperymentów wartość stosunku do masy korpuskuł emitujących promieniowanie i nie zwrócił uwagi na to, że stosunek ten jest niezwykle duży, to zachował się podobnie jak Thomson zakazujący trzymać płyty fotograficzne w pobliżu rury Crookesa. Jakiś wynik uzyskał, coś odnotował, ale nie pobudziło go to do dalszych myśli i badań.

Jeśli z pewnych powodów badania nad pewną grupą zjawisk są kontynuowane, taka sytuacja nie trwa długo. W końcu któryś z badaczy zwraca uwagę na niezwykle zjawisko czy na nieoczekiwany rezultat obliczeń teoretycznych. Nie dzieje się to jednak za sprawą izolowanego, genialnego umysłu. *To, co nowe, rodzi się pomiędzy umysłami.*

Röntgen, jak twierdzą (Sady 2004), zwrócił uwagę na zignorowane przez Thomsona świecenie ekranu i podjął na ten temat dalsze systematyczne badania — w wyniku których, stosując standardowe metody badawcze, odkrył promienie X — gdyż chciał powtórzyć eksperymenty Lenarda, badać akurat zasięg promieni katodowych w powietrzu, a od Lenarda wiedział, iż wynosi on kilka centymetrów.

Zaskakujący wynik obliczeń często bywa wytworem błędów eksperymentalnych. Aby eksperymenty dawały rezultaty *powtarzalne* i *wiarygodne*, trzeba je krok po kroku doskonalić, tropić i usuwać źródła błędów systematycznych, upraszczać badane układy, a jednocześnie rozwijać stosowane przy analizie danych modele teoretyczne. Opisane powyżej systematyczne badania nad promieniami katodowymi trwały czterdzieści lat nim nastąpił decydujący przełom, o którym będzie mowa za chwilę. (A badania nad widmem promieniowania cieplnego ciał czarnych, o których pisałem w (Sady 2010), trwały 13 lat zanim Heinrich Rubens uzyskał dane, które skłoniły Plancka — znów przy początkowym niedowierzaniu innych badaczy — do wprowadzenia poprawek do wzoru Wiena.) Gdy rozwój technik eksperymentalnych i narzędzi teoretycznych uwiarygodnia wreszcie uzyskiwane wyniki, a uzyskuje je wielu niezależnie pracujących badaczy, w końcu ktoś zwraca na nie uwagę — i zaczyna opracowywać zgodnie z zasadami przyswojonego stylu myślowego.

## 7. J. J. THOMSON ODKRYWA ELEKTRON

W kwietniu 1897 r. Thomson zmodyfikował eksperyment Perrina, umieszczając kolektor poza torem promieni katodowych nieodchylonych przez magnes. Żadnej elektryzacji nie zaobserwował. Gdy natomiast za pomocą magnesu skierował wiązkę promieni na otwory w cylindrach takich jak te użyte przez francuskiego doktoranta — co można było stwierdzić, obserwując ruch fluorescencyjnej plamki na szkle — wewnętrzny cylinder zyskał ładunek ujemny. Pokazuje to, jak podkreślił, iż „negatywna elektryzacja jest nierozdzielnie związana z promieniami katodowymi”.

Ponieważ ładunek na kolektorze rósł tylko do pewnego stopnia, Thomson wnioskował na tej podstawie — mając już za sobą prace na temat jonizacji gazów przez

promienie X — iż resztkowy gaz w rurze pod wpływem promieni jonizuje się i zaczyna przewodzić elektryczność. To utorowało drogę do usunięcia jednej z najpoważniejszych anomalii, przed jaką stała korpuskularna teoria promieni katodowych.

Poważne anomalie, przypomnijmy, były dwie. Po pierwsze, jeśli promienie są strumieniem cząstek, to z ich odchylenia w polu magnetycznym i praw elektrodynamiki wynika, że są naelektryzowane ujemnie. Ale wobec tego, powinny odchyłać się w polu elektrycznym — a tego efektu eksperymentalnie nie udało się uzyskać. Po drugie, domniemane cząstki przebywały w gazie po liniach prostych drogi tysiące razy dłuższe niż wynikające z korpuskularno-kinetycznej teorii ciepła, dla używanych ciśnień, średnie drogi swobodne między zderzeniami.

Również w kwietniu 1897 r. Thomson przedstawił pierwsze wyniki pomiarów stosunku ładunku do masy cząstek promieni katodowych. Zaprojektował eksperyment, używając równania (1) oraz praw zachowania ładunku i energii. Wąska wiązka promieni padała na niewielki kolektor z umieszczoną w nim termoparą. Termopara połączona była z galwanometrem, co pozwalało ustalić jej temperaturę, a kolektor z elektrometrem mierzącym jego ładunek. Padając na kolektor, promienie nagrzewały go (jak w eksperymentach Crookesa), a jednocześnie elektryzowały ujemnie (jak w eksperymentach Perrina). Zmierzony ładunek  $Q$ , jaki zyskiwał kolektor, zgodnie z hipotezą korpuskularną wynosi

$$(6) \quad Q = Ne,$$

gdzie  $N$  — liczba cząstek,  $e$  — ładunek każdej z nich. Wytworzone ciepło  $W$ , obliczone przez pomnożenie masy kolektora, jego ciepła właściwego i zmierzonej zmiany temperatury, jest równe przekazanej kolektorowi energii kinetycznej

$$(7) \quad W = Nmv^2/2,$$

gdzie  $m$  — masa cząstki,  $v$  — prędkość jej ruchu. Łącząc te równania, otrzymujemy

$$(8) \quad e/m = Qv^2/2W.$$

Prędkość ruchu cząstek jest nieznana, w związku z tym Thomson zaraz po pomiarze wydzielonego ciepła i ładunku włącza prąd w elektromagnesie obejmującym rurę do wyładowań i mierzy promień  $r$  okręgu, po jakim poruszają się promienie. Korzystając z (1), po prostych przekształceniach otrzymuje

$$(9) \quad e/m = 2W/QR^2H^2.$$

Wzór wyprowadzony został przy ryzykownych założeniach — z których Thomson zdawał sobie sprawę i traktował jako możliwe źródło niekontrolowanego błędu systematycznego — że uderzenia są niesprężyste, cały ładunek niesiony przez strumień zostaje przechwycony przez kolektor i nie jest tracony wskutek przewodnictwa gazu. Aby błędy możliwie ograniczyć, połączył — co podpowiadała mu posiadana wiedza — kolektor z kondensatorem o sporej pojemności, a czas trwania pomiaru zredukował do minimum. W ciągu ok. 1 s temperatura kolektora wzrosła o  $3,3^{\circ}\text{C}$ ,

a między okładkami kondensatora o pojemności 1,5  $\mu\text{F}$  pojawiło się napięcie 16 V. Po podstawieniu tych wartości do (9) otrzymujemy

$$e/m = 0.62 \times 10^{11} \text{ C/kg.}$$

Jest to wartość, jak zauważył Thomson, o trzy rzędy wielkości większa niż stosunek ładunku do masy zjonizowanego atomu wodoru, zgadza się natomiast znakomicie z wartością uzyskaną przez Zeemana i Lorentza.

Ten niezwykle duży stosunek ładunku do masy można tłumaczyć tym, że — w porównaniu z wartościami dla jonów atomowych — albo ładunek cząstek promieni jest ogromny, albo masa jest bardzo mała, albo jest kombinacją obu możliwości. Thomson wybrał drugie rozwiązanie, gdyż przemawiały za nim wyniki eksperymentów dotyczących średniej drogi swobodnej domniemanych cząstek. Mówił o tym 30 kwietnia 1897 r. podczas wykładu w Royal Institution w Londynie. A oto hipotetyczna rekonstrukcja jego rozumowań.

Z czynnych założeń korpuskularno-kinetycznej teorii gazów i danych zgromadzonych w jej ramach wynikało, że średnia droga swobodna cząstek powietrza przy ciśnieniu atmosferycznym jest rzędu  $10^{-8}$  cm. Tymczasem, jak ustalił Lenard, jasność fluorescencyjnego świecenia, wywołanego przez promienie, malała o połowę po przebyciu przez nie ok. 0,5 cm. Stąd dalej wynikało, że jeśli promienie katodowe są strumieniem cząstek, to „rozmiar tych nośników musi być niewielki w porównaniu z wymiarami zwykłych atomów i cząstek” (Thomson, cyt. za Dahl 1997, §9.2). Mało tego, przekrój czynny atomów gazu na zderzenia z cząstkami promieni katodowych też musi być o wiele mniejszy niż przekrój czynny na zderzenia między jednym atomem a drugim. Jedynym sposobem, aby to wyjaśnić w ramach stylu myślowego mechaniki klasycznej, było przyjęcie, że atomy mają we wnętrzu wiele pustego miejsca, tak że korpuskuły promieni mogą przelatywać przez nie na wylot.

Eksperymenty Zeemana świadczyły — w zestawieniu z obrazem przedstawiającym ciała jako zbudowane z atomów zawieszonych i poruszających się w eterze — o tym, że naelektryzowane korpuskuły o stosunku ładunku do masy rzędu  $10^{11}$  C/kg znajdują się we wnętrzach atomów i to ich ruchy są źródłem emitowanego przez atomy promieniowania. Wniosek taki był wzmacniany przez wyniki eksperymentów, z których wynikało, że jeśli promienie katodowe są strumieniami korpuskuł, to są to takie same korpuskuły niezależnie od materiału, z którego zbudowana jest katoda czy od rodzaju resztkowego gazu w rurze. Łącząc to wszystko, Thomson stwierdzał:

Prześledźmy konsekwencje założenia, że atomy pierwiastków są zespołami bardzo małych cząstek, podobnych do siebie; nazwiemy takie cząstki korpuskułami, tak że atomy zwykłych pierwiastków są zbudowane z korpuskuł i dziur, a dziury w nich przeważają. Załóżmy, że na katodzie niektóre molekuly gazu rozpadają się na te korpuskuły i że one, naelektryzowane ujemnie i poruszające się z wielką prędkością, tworzą promienie katodowe. Odległość, jaką te promienie przebędą nim stracą daną część swego pędu byłaby proporcjonalna do średniej drogi swobodnej tych korpuskuł. Zaś te korpuskuły zderzają się z innymi korpuskułami, a nie z molekułami jako całością; zakładamy, że mogą one przelatywać przez szczeliny w molekułach. Tak więc



średnia droga swobodna byłaby proporcjonalna do liczby tych korpuskuł; i dlatego, skoro każda korpuskuła ma tę samą masę, do masy jednostki objętości — czyli do gęstości substancji, niezależnie od natury chemicznej czy stanu fizycznego. Tak więc średnia droga swobodna, czyli współczynnik absorpcji, zależałaby wyłącznie od gęstości; a taki dokładny rezultat uzyskał Lenard (Thomson 30 kwietnia 1897, cyt. za Dahl 1997, §9.2).

W ten sposób po raz pierwszy zostało oznajmione, że istnieją cząstki materii znacznie mniejsze od atomów, a stanowiące ich składniki, oraz iż we wnętrzach atomów przeważa próżnia.

Już na początku 1897 r. Thomson wiedział — na podstawie wyników wcześniejszych prac nad przewodnictwem elektrycznym gazów wystawionych na działanie promieni zarówno X, jak i katodowych — dlaczego Hertz i inni nie zaobserwowali odchylenia promieni katodowych w polu elektrycznym: gaz pod wpływem promieni ulega jonizacji, po chwili jony dodatnie gromadzą się w pobliżu ujemnie naelektryzowanej z pary płyt mających wytworzyć pole elektryczne i na odwrót, następuje przepływ prądu między płytami — i pole (niemal) niknie.

Hertz, zważywszy na stan wiedzy na początku lat 90. XIX w., nie zrobił błędu, projektując układ eksperymentalny i interpretując uzyskane wyniki. *We wcześniejszych udanych zastosowaniach panującego stylu myślowego* między parą płyt odmiennie naelektryzowanych umieszczonych w gazie pod niskim ciśnieniem pojawiało się pole elektryczne i należało założyć — *skoro nic nie wiadano o tym, że miałoby być inaczej* — iż takie pole pojawia się też w trakcie badań prowadzonych z użyciem działającej rury Crookesa. Natomiast *z badań przeprowadzonych przez Thomsona w 1896 i na początku 1897 r. wynikało, że resztkowy gaz ulega pod wpływem promieni katodowych jonizacji — to zaś zmuszało do przeinterpretowania wyników wcześniejszych eksperymentów. I skłaniało do zaprojektowania eksperymentów nowych.*

Jeszcze w kwietniu Thomson przemieścił odchylające płyty ze środka długości rury w pobliże katody, w obszar ciemni Crookesa — gdzie przewodność gazu powinna być najmniejsza — i uzyskał odchylenie promieni w obu kierunkach, zgodnie z kierunkiem wytworzonego pola elektrycznego. Aby otrzymać wielkości mierzalne, rozpoczął żmudny, trwający parę dni, proces opróżniania rury Crookesa, z zastosowaniem absorbentów par rtęci, które wydzielają się z pompy próżniowej, tak aby ciśnienie resztkowego gazu osiągnęło wartość niższą niż kiedykolwiek przedtem. Miało to — zgodnie z ówczesnym stanem wiedzy — radykalnie zredukować przewodnictwo jonowe. Udało się.

7 sierpnia 1897 r. Thomson złożył do druku artykuł „Cathode Rays”. Zaczynał od prezentacji wyników opisanych już eksperymentów, w których mierzył ciepło i ładunek przekazane przez promienie, a następnie, przy tych samych warunkach pozostałych, odchylenie wiązki w polu magnetycznym. Użył trzech rur o odmiennych konstrukcjach, napełnionych powietrzem, wodorem i dwutlenkiem węgla; ciśnienie było obniżane tylko do chwili, gdy na szkle pojawiało się świecenie fluorescencyjne; katody były aluminiowe lub żelazne. Przedstawionych zostało łącznie 26 wyników pomiarów, obliczone wartości  $e/m$  wahały się między 1 a  $3,12 \times 10^{11}$  C/kg.

W drugiej serii eksperymentów Thomson użył rury, w której emitowane przez katodę promienie przechodziły przez anodę z niewielkim otworkiem, a następnie między płytkami metalowymi znajdującymi się nad i pod ich drogą, po obu zaś stronach rury umieszczone zostały cewki elektromagnesu. Po uzyskaniu niezwykle wysokiej próżni i włączeniu napięcia między płytkami plamka fluorescencyjna przemieszczała się w górę lub w dół — a zatem pole elektryczne odchyłało promienie. Następnie Thomson włączał prąd w elektromagnesie, regulując jego natężenie tak, aby plamka powróciła na miejsce dokładnie naprzeciw katody. W takim przypadku należało oczekiwać, że siły elektryczna i magnetyczna równoważą się, czyli

$$(10) \quad eE = evH,$$

gdzie  $E$  — natężenie pola elektrycznego, które łatwo było obliczyć znając napięcie i odległość między płytkami odchylającymi. Stąd oczywiście  $v = E/H$ . Następnie mierzona była krzywizna toru promieni w samym polu magnetycznym. Stosując (1) otrzymujemy

$$(11) \quad e/m = E/H^2r.$$

Otrzymane w siedmiu seriach pomiarowych, z użyciem rur wypełnionych początkowo powietrzem, wodorem i dwutlenkiem węgla, wartości  $e/m$  mieściły się między  $0,67 \times 10^{11}$  a  $0,91 \times 10^{11}$  C/kg.

Oczywiście pola elektryczne i magnetyczne nie były zupełnie jednorodne, zwłaszcza w pobliżu krawędzi płytek i cewek, co Thomson świadomie pomijał. Nie uwzględnił też w obliczeniach, że reszkowy gaz nadal ulegał jonizacji, co zmniejszało natężenie pola elektrycznego w stosunku do wartości obliczonej. Czynił też szereg innych przybliżeń.

Artykuł „Cathode Rays” zgodnie z zasadami naukowej systematyczności nie prezentował tylko wyników dwóch opisanych powyżej grup eksperymentów. Thomson przedstawił w nim ponadto wyniki badań nad przewodnictwem gazów, przez które przechodzą promienie katodowe, w zależności od ciśnienia i przyłożonego napięcia między płytkami. Inna grupa eksperymentów poświęcona była zjawisku odchylania promieni w samym polu magnetycznym, m.in. dzieleniu się wiązki na tzw. spektrum magnetyczne. Mamy wreszcie rozważania nad średnią drogą swobodną korpuskuł promieni w różnych ciałach, co prowadzi do prezentowanego już poglądu o ich niezwyklej małości i tezy o tym, że mamy tu do czynienia z

(...) materią w nowym stanie, stanie, w którym podział materii przeprowadzony został dalej niż w zwykłym stanie gazowym: stanie, w którym cała materia — tzn. materia uzyskana z różnych źródeł takich jak wodór, tlen itd. — jest jednego i tego samego rodzaju; ta materia jest substancją, z której zbudowane są wszystkie pierwiastki chemiczne (Thomson 1897).

W tym momencie proces odkrywania elektronu (Thomson przez szereg lat trwał przy określeniu „korpuskuła”) osiągnął punkt kulminacyjny. Część tej przypisano własności wywnioskowane z przyjętych praw, twierdzeń znanych na podstawie wcze-

śniejszych udanych zastosowań eklektycznego, mechaniczno-elektromagnetycznego stylu myślenia i wyników świeżo przeprowadzonych eksperymentów. Wywnioskowano też, na podstawie twierdzeń wywiedzionych z wyników różnych, ale powiązanych ze sobą badań, że elektrony wchodzą w skład atomów wszystkich pierwiastków.

#### Komentarz metodologiczny IV

Metodolodzy kontekstu uzasadniania chcieliby zapewne stwierdzić, że J. J. Thomson empirycznie potwierdził sformułowaną wcześniej hipotezę, iż promienie katodowe są strumieniami naelektryzowanych korpuskuł. A zatem znaczenie jego badań polega w istocie na tym, że zdołał eksperymentalnie uzyskać efekt wcześniej przewidziany teoretycznie. Opowiedziana teraz historia ma uświadomić, jak naiwne było takie pojmowanie natury badań naukowych.

Ani Zeeman nie sprawdzał przewidywań wynikających z teorii Lorentza, ani Thomson nie sprawdzał przewidywań wynikających z praw mechaniki, elektrodynamiki i hipotezy korpuskularnej. Żadne *ilościowe* przewidywania z teorii nie wynikały, bo nie wiadano, jaki jest stosunek ładunku do masy domniemanych korpuskuł emitujących promieniowanie czy emitowanych przez katodę w rurze Crookesa. Owszem, były pewne przewidywania *jakościowe*, niemniej gdy pierwsze eksperymenty w obu przypadkach przewidywań nie potwierdziły, nie było to powodem do uznania teorii za sfalsyfikowaną. Trzeba było dopiero *odkryć*, co spowodowało brak poszukiwanego efektu. W przypadku Zeemana odkrycie było trywialne: gdy otrzymał lepszą siatkę dyfrakcyjną efekt wystąpił i okazało się, iż wcześniej rozdzielczość aparatury była zbyt mała (że tak było dało się stwierdzić dopiero po odkryciu, jaki jest stosunek ładunku do masy cząstek emitujących promienie). W przypadku Thomsona niezbędne odkrycia były o wiele ciekawsze. Przełomowe było stwierdzenie, że resztowy gaz w rurze pod wpływem promieni katodowych ulega jonizacji. Stwierdzenie to, podkreślmy, nie było wytworem wyobraźni twórczej, ale wynikiem analizy rezultatów systematycznie prowadzonych eksperymentów dokonanej zgodnie z zasadami panującego stylu myślowego.

Tak więc ani Zeeman, ani Thomson nie byli *sprawdzaczami*. Byli *odkrywcami*. Do odkryć prowadziła ich nie genialna intuicja, ale wcześniejsze znakomite opanowanie kolektywnie wypracowanego obrazu świata oraz technik eksperymentalnych. Wynikami ich badań było nie sprawdzenie *starych* hipotez, a — poprzez użycie zastanej wiedzy w analizie danych — dodanie do systemu teoretycznego *nowych* twierdzeń.

Obaj uczeni byli zastępowalni. Gdyby któryś z nich nie dokonał swego odkrycia, to — zważywszy na ówczesny stan kolektywnie wytworzonej wiedzy fizycznej — trudno sobie wyobrazić, iż wkrótce nie dokonałby go ktoś inny, kto uzyskałby identyczne rezultaty. Jakże naiwne jest wobec tego mówienie o niepodległej racjonalnej rekonstrukcji wyobraźni twórczej jako źródle hipotez teoretycznych. Normalnie to, co nazywamy wytworem wyobraźni, ma charakter indywidualny — a wyniki badań

naukowych, choć zwykle łączone z nazwiskami odkrywców, mają charakter wybitnie bezosobowy. W nauce właściwym odkrywcą jest zawsze nie wyposażony w intuicję twórczą badacz, ale systematycznie przez dziesięciolecia pracujący kolektyw myślowy. (Podobne intuicje wyrażała Elżbieta Pietruska-Madej w pojęciu „sytuacji odkryciogennej”, zob. jej 1990, zwł. rozdz. V.)

Członkowie kolektywu planowali kolejne eksperymenty, a z wiedzy zastanej i ich wyników wyprowadzali teoretyczne wnioski, kierując się dwiema zasadami o charakterze ponadczasowym. Po pierwsze, przyjmowali, że *różne badane układy podlegają tym samym prawom*. Po drugie, iż *jeśli ze zgromadzonej wiedzy nie wynikało, że zmiana sytuacji eksperymentalnej wpłynie na daną własność badanego obiektu, to własność, jaką przypisano mu na podstawie wcześniejszych udanych zastosowań przyjętej teorii, należy mu przypisać w trakcie badań kolejnych*.

Ta ostatnia zasada, jak wszystkie w ogóle zasady badań naukowych, jest zawodna — co ilustruje wspomniany powyżej przypadek Hertza. Ale jedynie trzymanie się tej zawodnej zasady umożliwiło w końcu odkrycie, że w danym przypadku w nowej sytuacji eksperymentalnej zaszła jednak zmiana pewnej własności. Odkrycia tego dokonał J. J. Thomson piętnaście lat później, ono zaś radykalnie zmieniło interpretację wyników uzyskanych wcześniej i umożliwiło zbudowanie układu, w którym pole elektryczne między elektrodami faktycznie się pojawiło, a oczekiwany efekt wystąpił.

I jeszcze jedna uwaga. „Cathode Rays”, podobnie jak „On the New Kind of Rays” Röntgena, kończą spekulacje, do jakich zgromadzona już wiedza nie upoważniała. J. J. Thomson spekulował na temat warunków stabilności różnych konfiguracji elektronów wewnątrz atomu, sięgając do wyników eksperymentów Alfreda M. Mayera, w których nad naczyniem z wodą i pływającymi w niej identycznymi igłami magnetycznymi, skierowanymi pionowo tymi samymi biegunami w górę, znajdował się biegun elektromagnesu. (Po włączeniu prądu 3 igły ustawiały się w wierzchołkach trójkąta równobocznego, 4 tworzyły kwadrat, 5 pięciokąt foremny, 6 dzieliło się na jedną ustawioną wprost pod elektromagnesem otoczoną pięciokątem zbudowanym z pozostałych, a np. 15 na igłę centralną otoczoną kolejno pięciobokiem i dziewięciobokiem.) Thomson miał nadzieję na znalezienie przez analogię stabilnych rozkładów elektronów w atomach różnych pierwiastków, a tym samym wyjaśnienie okresowych zmian ich własności chemicznych.

## 8. BADANIA NAD ELEKTRONEM W LATACH 1897-1902

Choć standardowo lokuje się odkrycie elektronu w 1897 r., to, jak widzieliśmy, nastąpiła wtedy jedynie kulminacja procesu badawczego, który trwał nieprzerwanie przez 40 lat, a w tym czasie dokonywał się stały postęp, zarówno eksperymentalny, jak i teoretyczny. Mało tego, w 1897 r. proces odkrywania elektronu się nie skończył. Nadal nie znano jego masy i ładunku, nie wiadomo, gdzie występuje i w jakich ilościach, jakie funkcje pełni itd. Oczywiście nie wiadomo też, jakie jeszcze własności

zostaną elektronowi przypisane w przyszłości ani jakim prawom przyrody on podlega. Przyjrzyjmy się kolejnym fazom tych badań — co pozwoli uzmysłwić sobie, że odkrywanie naukowe jest procesem ciągłym, który nie byłby tym, czym jest, bez swej przeszłości, ale i bez przyszłości.

W ciągu 1897 r. w wielu ośrodkach prowadzono intensywne badania nad efektem Zeemana. Zwiększając natężenie pola magnetycznego, stopniowo eliminując drgania aparatury, zmniejszając wielkość źródła światła, używając szkieł powiększających itd. uzyskiwano coraz doskonalsze obrazy dla różnych świecących substancji. W Groningen Zeeman zaobserwował już nie tylko poszerzenie linii, ale także jej podział zarówno na dublety, jak i tryplety, takie jak przewidywał Lorentz, a na tej podstawie poprawił wartość  $e/m$  na  $1,6 \times 10^{11}$  C/kg.

W Dublinie Thomas Preston uzyskał pierwsze fotografie dubletów i trypletów, najpierw dla fioletowej linii kadmu. A w grudniu 1897 r. ogłosił, że linie sodu rozpadają się na kwadruplety i sekstety, podobnie jak niektóre linie kadmu i wapnia. Podobne obrazy w Paryżu uzyskał parę tygodni później Marie A. Cornu. Kwadruplety i inne zespoły linii w widmie żelaza zaobserwowali Becquerel i Henri A. Deslandres, a w widmach różnych pierwiastków pracujący w Stanach Zjednoczonych Albert A. Michelson. W ten sposób odkryto „anomalny efekt Zeemana”.

W 1898 r. Thomson powtórzył w udoskonalonej wersji wspomniane eksperymenty Townsenda. Trzy lata wcześniej Charles T. R. Wilson zbudował komorę pęcherzykową, w której ciśnienie gazu zmienia się tak, aby zawarta w nim para wodna stawała się okresowo przesycona, co powoduje powstawanie kropelek wody na znajdujących się w gazie jonach. Thomson jonizował gaz w komorze Wilsona za pomocą promieni X, a następnie obserwował opadanie chmury kropelek pod wpływem siły grawitacji. Korzystając m.in. z prawa Stokesa i zakładając, że jedna kropelka powstaje na jednym jonie (warunki były tak dobrane, aby kondensacja następowała tylko na jonach ujemnych), otrzymywał wartości ładunku elementarnego mieszczące się w przedziale od  $1,7 \times 10^{-19}$  C do  $2,7 \times 10^{-19}$  C.

Systematyczne badania nad efektem fotoelektrycznym prowadzili w tym czasie Elster i Geitel, a w Cambridge John Zeleny i młody przybysz z Nowej Zelandii, Ernest Rutherford. Korzystając z wyników ich prac, Thomson badał zależność natężenia prądu, przepływającego między płytką metalową naświetlaną ultrafioletem a siatką drucianą o dodatnim potencjale, od natężenia pola magnetycznego, którego linie biegnęły równoległe do płytki. Uzyskał  $e/m \approx 0,73 \times 10^{11}$  C/kg. Następnie użył fotoelektronów jako ośrodków kondensacji pary wodnej i w omawiany już powyżej sposób wyznaczył wartość  $e \approx 2,3 \times 10^{-19}$  C.

Thomson mierzył też stosunek  $e/m$  ujemnie naelektryzowanych cząstek, które — co odkrył Thomas Edison — są emitowane przez rozżarzone do białości metale i znów otrzymał wartość podobną jak w przypadkach korpuskuł promieni katodowych i fotoelektronów. Trudno było powstrzymać się od wniosku, że w tych trzech grupach zjawisk mamy do czynienia z identycznymi korpuskułami. Te wyniki Thomson przedstawił we wrześniu 1899 r. wraz z tezą, że jonizacja polega na usu-

waniu z lub dodawaniu do atomu ujemnie naelektryzowanych korpuskuł o masach rzędu  $1,4 \times 10^{-3}$  masy atomu wodoru. Wystąpienie to, jak wspominał, zyskało mu wielu zwolenników.

Po wspomnianym powyżej odkryciu Becquerela zaczęto, zrazu bez większego powodzenia i zbaczając często na błędne ścieżki, poszukiwać innych niż uran substancji promieniotwórczych. Gerhardt Schmidt i Maria Skłodowska-Curie niezależnie wykazali, że podobne jak uran promienie emituje tor. Curie ustaliła eksperymentalnie, że aktywność związków uranu jest proporcjonalna do procentowej zawartości tego pierwiastka. Wiedzano jednak, że aktywność blendy smolistej jest parokrotnie większa niż by to wynikało z zawartości uranu. Maria domyśliła się, iż blenda zawiera jakiś pierwiastek o wiele silniej promieniotwórczy niż uran. Jej mąż, Pierre Curie, przyłączył się do badań. W lipcu 1898 r. ogłosili odkrycie polonu, a w grudniu radu. Oba pierwiastki były tysiące razy bardziej aktywne od uranu.

Dysponując tak wydajnym źródłem promieni, Elster i Geitel w swym domowym laboratorium w Wolfenbüttel podjęli — zgodnie z zasadami systematyczności badań — próbę odchylenia ich wiązki w polu magnetycznym. Nie uzyskali wyraźnego efektu, co mogło sugerować, że z radu wydobywa się coś o naturze pokrewnej promieniom X. Pod koniec 1899 r. w Wiedniu, dysponując o wiele silniejszym elektromagnesem, Stefan Meyer i Egon R. von Schweidler powtórzyli ich eksperymenty, uzyskując odchylenie — i stwierdzili, że emitowane przez rad promienie zachowują się analogicznie do promieni katodowych. Równocześnie Friedrich Giesel zdołał odchylić promienie emitowane przez polon. Pierwsze wyniki uzyskiwane przez pięciu wymienionych uczonych były często niezgodne, z uwagi — jak to dziś wiemy — na obecność w próbkach różnych radioaktywnych zanieczyszczeń. (Np. okazało się, że promienie odchylone przez Giesela pochodziły nie z polonu, ale z dodatku izotopu bizmutu.) Zaczęto krok po kroku sporządzać wielką układankę, a w rezultacie tabele stopniowo zapełniano dziesiątkami izotopów radioaktywnych.

W 1899 r. do badań z wykorzystaniem polonu i radu włączył się sam Becquerel. Rychło przyznał, że w 1896 r. popełnił błąd, ogłaszając, iż promienie emitowane przez uran ulegają odbiciu i załamaniu. Jak stwierdził, promienie wysyłane przez polon nie ulegają odchyleniu w polu magnetycznym, a te wydobywające się z radu są dwojakiego rodzaju: jedne, bardziej przenikliwe i odchylające się podobnie jak promienie katodowe, i drugie, znacznie mniej przenikliwe, których w polu magnetycznym zakrzywić się nie daje.

Równoległe do badań nad promieniotwórczością włączył się przebywający wówczas w Montrealu Rutherford. Promienie emitowane przez uran i tor nazwał  $\alpha$  (te łatwo absorbowalne) i  $\beta$  (te przenikliwe i odchylalne w polu magnetycznym). Rychło stwierdził też, iż z toru wydobywają się ponadto radioaktywne gazy, których aktywność zanika eksponentalnie z upływem czasu. (Gdy zaczął na tej podstawie głosić, że atomy pierwiastków radioaktywnych spontanicznie rozpadają się na atomy mniejsze, jego koledzy z McGill University apelowali, by odłożył publikację na później i nie narażał uczelni na kompromitację.)

W październiku 1899 r. Philip Lenard ogłosił wreszcie wyniki swych badań nad efektem fotoelektrycznym. Przyspieszając wybijane z metalu przez promienie ultrafioletowe korpuskuły w polu elektrycznym, następnie odchylając je w polu magnetycznym i korzystając z (4), uzyskał wartość  $e/m$  równą  $1,15 \times 10^{11}$  C/kg. Zauważył, że dla korpuskuł promieni katodowych uzyskano  $0,64 \times 10^{11}$  C/kg, niemniej zbieżność co do rzędu wielkości, wzięwszy pod uwagę spodziewane błędy pomiarowe, sprawiła, że Lenard zaczął przyznawać — skoro batalia o naturę promieni katodowych została już przez uczonych niemieckich przegrana — iż w obu przypadkach mamy do czynienia z ruchem tych samych korpuskuł.

W tym czasie Ernst Dorn uzyskał odchylenie promieni  $\beta$  w polu elektrycznym. Wiosną 1900 r. Becquerel odchylił promienie  $\beta$  w polach magnetycznym i elektrycznym. Na podstawie uzyskanych wyników obliczył, że stosunek  $e/m$  ich cząstek jest rzędu  $10^{11}$  C/kg. Obliczenia wykazywały, że poruszają się z prędkością przekraczającą połowę prędkości światła — co wyjaśniało, dlaczego są przenikliwsze niż korpuskuły promieni katodowych.

Elektron nieruchomy wytwarza wokół siebie pole elektryczne, ale gdy porusza się wytwarza też pole magnetyczne, którego natężenie rośnie z prędkością. Każdemu z pól, zgodnie z elektrodynamiką Maxwella, należy przypisać zarówno pęd, jak i energię. A zatem elektron w ruchu zachowywać się będzie względem działających na niego sił tak, jakby jego masa „rzeczywista” (spoczynkowa) wzrosła o pewną wartość „pozorną” (lub „elektromagnetyczną”). Wnioski takie wyprowadzili, przyjmując nieco odmienne założenia, w 1893 r. J. J. Thomson, a dwa lata później Lorentz. Pod wpływem lektury ich prac i doniesień o wielkiej prędkości promieni  $\beta$ , Kaufmann przeprowadził serię eksperymentów, w których odchylał promienie równocześnie w polach elektrycznym i magnetycznym skonfigurowanych tak, aby każdy punkt na krzywej, jaką promienie kreśliły na płycie fotograficznej, odpowiadał określonej prędkości i stosunkowi  $e/m$  korpuskuł. Na tej podstawie w 1901 r. ogłosił, że „pozorna” masa elektronu rośnie z prędkością. W następnym roku Max Abraham ogłosił pierwszą ilościową teorię wzrostu masy poruszającego się elektronu, opartą na ryzykownych hipotezach na temat jego kształtu i rozkładu ładunku. Inne wzory, przy innych założeniach na temat kształtu elektronu, uzyskał Alfred Bucherer.

W marcu 1902 r. Lenard przedstawił wyniki kolejnych eksperymentów związanych z efektem fotoelektrycznym. Promienie nadfioletowe wybijane były z katody i w rezultacie między katodą a uziemioną anodą płynął prąd. Wyniki pomiarów wskazywały, że natężenie tego prądu jest proporcjonalne do natężenia promieniowania. Natężenie prądu rosło też wraz ze wzrostem napięcia między elektrodami, ale po osiągnięciu przez anodę potencjału rzędu  $-10$  V rosnać przestawało. Wyjaśnienie było oczywiste: prawie wszystkie naelektryzowane ujemnie korpuskuły były przy takim napięciu przechwytywane przez anodę. Kolejny wynik był natomiast niezwykle. Prąd płynął nie tylko wtedy, gdy potencjał katody malał do zera, ale również gdy osiągał wartość rzędu  $+2$  V. Świadczyło to o tym, że korpuskuły wylatują z katody z pewną prędkością i pole elektryczne musi wykonać pracę, aby je zatrzymać. Oka-

zało się, że potencjał hamujący zależy nie od natężenia padającego ultrafioletu — a zatem od gęstości energii promieniowania — a jedynie od materiału, z którego wykonana jest katoda i od rodzaju źródła promieni. (Czego Lenard nie powiązał z częstotliwością padającego na katodę ultrafioletu.)

Lenard wyciągał stąd niemal nieunikniony w ramach panującego stylu myślenia wniosek, że ultrafiolet jedynie prowokuje wyrzucenie naelektryzowanej korpusty z wnętrza atomu i to macierzysty atom, a nie promieniowanie, dostarcza jej energii kinetycznej. Ani on, ani nikt inny nie był jeszcze w stanie skojarzyć dyskutowanej teraz własności efektu fotoelektrycznego ze wzorem, jaki rok wcześniej pojawił się w artykule Maxa Plancka „Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum” (zob. Sady 2010). Wzór ten zaś, wprowadzający kwanty do fizyki, miał wkrótce nadać badaniom nad elektronem nowy sens. W 1905 r. kwantowe idee Plancka (który wcale ich nie chciał) rozwinął Albert Einstein, a użył ich m.in. do wyjaśnienia energii fotoelektronów.

W tymże 1905 r. Einstein ogłosił podstawy szczególnej teorii względności, a m.in. wzór na wzrost masy poruszającego się ciała.

Gdzieś musimy tę opowieść przerwać, jeśli ten artykuł nie ma przeobrazić się w książkę. Wymieńmy jeszcze tylko parę najważniejszych epizodów.

W 1906 r. Thomson, na podstawie danych o rozpraszaniu światła, promieni X i  $\alpha$  w gazach obliczył, że całkowita liczba korpust w atomie równa się od 0,2 do 2 razy tyle, ile wynosi jego ciężar atomowy. W szczególności, stwierdzał, dla atomu wodoru liczba ta „nie może znacznie różnić się od jedności” (cyt. za Dahl 1997, §17.1).

Kaufmann, który stale doskonalił swój układ eksperymentalny, w tym samym roku ogłosił, że wyniki pomiarów potwierdzają teorię Abrahama wzrostu masy elektromagnetycznej elektronu w ruchu, przeczą natomiast teoriom Lorentza, Bucherera i Einsteina. (Później te wyniki zostały zakwestionowane i po latach zaakceptowano wzory Lorentza i Einsteina.)

W 1909 r. Robert A. Millikan udoskonalił metodę opadających naelektryzowanych kropeł Townsenda i z dużą dokładnością wyznaczył wartość ładunku elementarnego  $e \approx 1,59 \times 10^{-19}$  C (obecnie przyjmuje się  $e \approx 1,602 \times 10^{-19}$  C, natomiast  $e/m \approx 1,76 \times 10^{11}$  C/kg).

W tym samym roku Ernst Rutherford podjął badania nad rozpraszaniem cząstek  $\alpha$  na cienkich foliach metalowych. Z ich zaskakujących rezultatów wywnioskował — co ogłosił w 1911 r. — iż we wnętrzach atomów istnieją masywne centra o bardzo niewielkich rozmiarach i dużych ładunkach dodatnich lub ujemnych, jądra atomowe.

W 1913 r. Niels Bohr ogłosił swój model atomu, w którym elektrony podlegały zarówno prawom mechaniki klasycznej, łącznie z prawem Coulomba, jak i kwantowym prawem Plancka-Einsteina, ale już nie prawem elektrodynamiki Maxwella. (A jednak jeszcze dziesięć lat później Bohr odrzucał Einsteinowską ideę kwantów światła i upierał się, że światło jest falą elektromagnetyczną.)

W 1923 r. Louis de Broglie odwrócił rozumowanie Einsteina — i przedstawił hipotezę falowej natury elektronu. Ironia losu chciała, że jednym z fizyków, którzy ja-



ko pierwsi, kierując się hipotezą de Broglie'a, uzyskali w 1927 r. obrazy dyfrakcji strumienia elektronów, był syn J. J. Thomsona, George P. Thomson. W rezultacie ojciec w 1906 r. uzyskał nagrodę Nobla za eksperymentalne wykazanie, że promienie katodowe są strumieniem korpuskuł, syn zaś w 1937 r. dostał nagrodę Nobla za wykazanie, że są one wiązką fal.

### ZAKOŃCZENIE. NAUKA W KONTEKŚCIE BADANIA

Na zakończenie wróćmy do tematu, od którego ten artykuł się rozpoczął: do obrazu naukowców jako ludzi, którzy formułują (śmiało) hipotezy, następnie poddają je (surowym) sprawdzianom, a wreszcie podejmują — racjonalną — decyzję, które z hipotez zaakceptować, a które odrzucić.

Opowiedziane historie miały, po pierwsze, pokazać, jak niewiele prac badawczych można zakwalifikować jako procedury sprawdzania hipotez i teorii. Prawie wszystkie wymienione prace miały na celu dowiedzenie się czegoś *nowego*, a nie ustalenie, czy jakieś *stare* twierdzenia są prawdziwe czy fałszywe. Najbliższe Popperowskiej wizji nauki były prace Hertza z 1882 r., obmyślane tak, aby podważyć korpuskularną teorię promieni katodowych. Ale jakże różne były ich skutki od tych, jakie chcieliby dostrzegać falsyfikacjoniści! Sam Hertz wprawdzie twierdził na ich podstawie, że hipoteza korpuskularna jest fałszywa, jednak z perspektywy późniejszego rozwoju wydarzeń wszystkie jego argumenty okazały się błędne. A ich błędności nie ustalono w wyniku Popperowskiej decyzji metodologicznej, aby odpowiednich zdań bazowych ostatecznie nie zaakceptować. By wyjaśnić uzyskane przez Hertza „negatywne” rezultaty trzeba było kilkunastu lat wyłożonych badań, które krok po kroku doprowadziły do zbudowania teoretycznych modeli tego, co się w jego eksperymentach działo. Mało tego, część z uzyskanych przez Hertza wyników włączono do systemu wiedzy — tego, który budowany był na podstawie hipotezy korpuskularnej.

Ale przede wszystkim opowiedziałem dzieje odkrywania elektronu po to, by pokazać, iż nowe twierdzenia teoretyczne, włączane do systemu wiedzy, nie pojawiają się jako śmiałe hipotezy (w sensie Poppera). Te, które odegrały rolę w rozwoju wiedzy naukowej, *wywnioskowano* z zastanej wiedzy teoretycznej i z wyników nowych eksperymentów, a przynajmniej były one odpowiedziami na pytania generowane przez zastaną wiedzę i nowe wyniki. Ilekroć próbowano wyprzedzić swój czas — jak to było ze wspomnianymi hipotezami Röntgena, iż promienie X są falami podłużnymi, czy Thomsona o budowie atomu — trafiano przysłowiową kulą w płot. Po prostu szansa na trafienie, gdy nie ma dość danych mówiących, w którą stronę należy wystrzelić, jest znikoma.

Wróćmy do mitologii sprawdzania hipotez i teorii. W opowieściach ostatniego paragrafu wspomniano doświadczenia odkrycia, których nie udało się wyjaśnić w ramach fizyki klasycznej, zarówno tej opartej na mechanice Newtona, jak i tej wy-

rastającej z elektrodynamiki Maxwella. Należały do nich anomalny efekt Zeemana czy dane na temat zależności energii kinetycznej fotoelektronów tylko od częstotliwości wybijającego je promieniowania. Należały też do nich wszystkie bez wyjątku wyniki badań nad zjawiskami promieniotwórczości, a nawet — choć ten efekt został na podstawie fizyki klasycznej w jej eklektycznej postaci przewidziany — wzrost masy elektronu z prędkością. Żaden fizyk jednak nie traktował w pierwszych latach XX w. wspomnianych zjawisk jako falsyfikatorów mechaniki klasycznej w rozumieniu Poppera ani nawet jako anomalii w sensie Kuhna. Po prostu próbowano stosować klasyczną fizykę w badaniach, a gdy się nie udawało, próbowano znowu i znowu. A gdy na rynku idei pojawiły się idee kwantowe, to pojawili się też fizycy — zrazu stanowiący zdecydowaną mniejszość — którzy starali się je stosować do analizy wyników eksperymentów. I po prostu stwierdzono, że członkom kolektywu klasycznego się nie udawało, natomiast rodzący się kolektyw kwantowy odnosił sukcesy. Ale znów sukcesy nie tyle świadczyły o prawdziwości twierdzeń Plancka (1901), ile skutkowały jej stopniowym rozwijaniem — aż po 25 latach badań powstał system mechaniki kwantowej.

Artykuł powstał w ramach realizacji projektu badawczego własnego nr 1 H01A 009 29.

## BIBLIOGRAFIA

- Anderson, David L. (1964) *The Discovery of the Electron. The Development of the Atomic Concept of Electricity*, D. van Nostrand. Wyd. pol. *Odkrycie elektronu. Rozwój atomistycznej teorii elektryczności*, tłum. A. Blinowska, PWN 1971.
- Carnap, Rudolf (1952) *The Continuum of Inductive Methods*, Chicago UP.
- Dahl, Per F. (1997) *Flash of the Cathode Rays. A History of J. J. Thomson's Electron*, Institute of Physics Publishing.
- Einstein, Albert (1905) „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, *Annalen der Physik* 17, s. 132-148. Wyd. pol. „O heurystycznym punkcie widzenia w sprawie emisji i przemiany światła”, tłum. P. Amsterdamski, w: Albert Einstein, *5 prac, które zmieniły oblicze fizyki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego b.d.
- Feyerabend, Paul (1975) *Against Method. Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*, New Left Books.
- Fleck, Ludwik (1935) *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*, Bruno Schwabe und Co. Wyd. pol. *Powstanie i rozwój faktu naukowego. Wprowadzenie do nauki o stylu myślowym i kolektywie myślowym*, tłum. M. Tuskiewicz, Wydawnictwo Lubelskie 1986; przedruk w: Ludwik Fleck, *Psychosocjologia poznania naukowego*, Wydawnictwo UMCS 2006, s. 31-163.
- Hempel, Carl G. (1966) *Philosophy of Natural Science*, Prentice-Hall. Wyd. pol. *Filozofia nauk przyrodniczych*, tłum. B. Stanosz, Aletheia 2001.
- Kuhn, Thomas S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago UP. Wyd. pol. *Struktura rewolucji naukowych*, tłum. H. Ostromęcka, PWN 1968.
- Lakatos, Imre (1970) „Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes”, w: I. Lakatos, A. Musgrave (red.), *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge UP, s. 91-196.

- Wyd. pol. „Falsyfikacja a metodologia naukowych programów badawczych”, tłum. W. Sady, w: I. Lakatos, *Pisma z filozofii nauk empirycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN 1995, s. 3-169.
- Pietruska-Madej, Elżbieta (1990) *Odkrycie naukowe. Kontrowersje filozoficzne*, PWN.
- Planck, Max (1901) „Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum”, *Annalen der Physik* 4, s. 553-563.
- Poincaré, Henri (1902) *La science et l'hypothèse*, Paris. Wyd. pol. *Nauka i hipoteza*, tłum. L. Silberstein, J. Mortkowicz 1908.
- Popper, Karl (1934) *Logik der Forschung*, Springer Verlag. Wyd. pol. *Logika odkrycia naukowego*, tłum. U. Niklas, PWN 1977.
- Reichenbach, Hans (1938) *Experience and Prediction*, University of Chicago Press. Wyd. pol. §1, „Trzy zadania epistemologii”, tłum. W. Sady, *Studia Filozoficzne* nr 7-8, 1989, s. 205-212.
- Röntgen, Wilhelm (1996) „On the New Kind of Rays”, *Nature* January 23.
- Sady, Wojciech (1990) *Racjonalna rekonstrukcja odkryć naukowych*, Wydawnictwo UMCS.
- (2001) „Dlaczego kreacjonizm ‘naukowy’ nie jest naukowy i dlaczego nie prowadzi do teizmu?”, *Przegląd Filozoficzny — Nowa Seria* nr 1, s. 213-228.
- (2004) „Dlaczego odkrycie promieni X przez Roentgena było naukowe?”, *Przegląd Filozoficzny — Nowa Seria* nr 3, s. 7-20.
- (2010) „Jak Max Planck, mechanicyista, zdołał wprowadzić kwanty do fizyki?”, *Filozofia Nauki* nr 1, s. 91-120.
- Thomson, Joseph J. (1897) „Cathode Rays”, *Philosophical Magazine* 44, s. 296-314.
- Wiśniewski, Andrzej (1995) *The Posing of Questions: Logical Foundations of Erotetic Inferences*, Kluwer.
- Wróblewski, Andrzej Kajetan (2006) *Historia fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN.