

Wprowadzenie

Pojęcie atomu jest podstawowym pojęciem we współczesnym naukowym rozumieniu świata. Znakomity fizyk **Richard P. Feynman** zastanawiał się kiedyś, że „gdyby poprzez jakiś kataklizm byłaby zniszczona cała wiedza naukowa, i tylko jedno twierdzenie mogłoby ocaleć dla przyszłych pokoleń, to które zdanie zawierałoby najwięcej informacji w kilku słowach? W moim przekonaniu byłoby to zdanie formułujące hipotezę (lub rzeczywistość- jeśli wolicie tak to nazwać) atomistyczną, że: *„wszystko składa się z atomów – małych cząstek, będących w nieustannym ruchu, przyciągających się nawzajem, jeżeli są blisko siebie lub też odpychających się, gdy je zbyt ściśnięć”* (Feynman i in. 1963, 1-3). Ten cytat jest z kilku powodów istotny w odniesieniu do prezentowanego tu historycznego tła: Z jednej strony, Feynman mocno podkreśla, jak ważne dla współczesnej nauki jest pojęcie atomowej struktury materii. Ale pośrednio podnosi on inną kwestię, istotną przy rozważaniu genezy koncepcji atomowej: Feynman we wstępie do swego pierwszego wykładu, wypowiadając zdanie o „hipotezie atomowej (albo o rzeczywistości atomowej – jak wolisz to nazwać)”, jednocześnie uznaje, ale i poddaje w wątpliwość samo istnienie atomu. Mówi: „Należy zatem zadać pytanie, czy istnienie atomu jest hipotezą czy też faktem? Jeśli faktem, to jakie są granice poznania atomu, poza którymi zaczyna się już hipoteza.” [p. tłum.] Feynman rozstrzygnięcie tego zagadnienia pozostawia czytelnikowi, co wydaje się być skrajną formą relatywizmu, a co można ewentualnie wytłumaczyć patrząc na dzień publikacji: wykłady Feynmana pochodzą z początku 1960 roku, jednak wydaje się wątpliwym, aby w tamtym czasie mogły występować różne podejścia do zagadnienia istnienia atomu w epistemologii. To zdanie (Feynmana) wydaje się być nieco irytujące z naszego punktu widzenia, a poza tym demonstruje ono jak dalece wiedza o istocie nauki została rozwinięta w ostatnich czasach.

[Feynman nigdy nie wątpił w realność atomów. Sam był autorem elektrodynamiki kwantowej, teorii rządzącej światem atomów i cząstek elementarnych. Sformułowanie „hipoteza albo rzeczywistość – nazwij to jak chcesz”, jest pewną figurą retoryczną, użytą w trakcie wykładu przez Feynmana, świadczącą jedynie o pewnej bezceremonialności autora. *Uwaga tłumacza*]

Na zakończenie warto zwrócić uwagę na fakt, że powstawaniu modelu atomowego na przestrzeni wieków, od starożytności aż po czasy współczesne, towarzyszyło formowanie się pojęcia pierwiastka chemicznego. Aspekt ten mógłby być uwzględniany w programach edukacyjnych. W tym opracowaniu historyczny rozwój pojęcia pierwiastka chemicznego nie będzie omawiany, lecz traktowany domyślnie jako już istniejący.

Starożytne poglądy na strukturę materii

Zagadnienie budowy materii było rozważane już przez starożytnych Greków; ich dorobek naukowy dotarł do Europy w pierwszych wiekach naszej ery.¹ W ich poglądach pojawiło się pojęcie pierwotnej substancji, tworzącej wszystkie pozostałe substancje, jednak nie była ona synonimem najprostszej teorii atomowej, gdyż jej istnienie nie było uwarunkowane żadną teorią

korpuskularną. Do filozofów starożytnej Grecji, którzy stworzyli lub rozwinięli określone koncepcje dotyczące struktury materii należą: Tales z Miletu, Anaksymenes, Heraklit i Empedokles. Około 450 roku przed Chrystusem **Demokryt** i Leukkipos wprowadzili nową ideę – koncepcję atomu. Oboje postulowali, że świat materialny jest zbudowany z bardzo drobnych i niepodzielnych cząstek. Różnorodność materii miała być uwarunkowana różnorodnością rodzajów atomów – każdy rodzaj atomów miał mieć właściwy sobie kształt i wielkość. Demokryt głosił, że atomy są w ciągłym ruchu, a ich ruch odbywa się w pustej przestrzeni. Ruch atomów sprawia, że pomiędzy

¹Istnieją dowody, że modele świata materialnego istniały także w kulturze indiańskiej jak i w babilońskiej, lecz nie odegrały one żadnej roli w kształtowaniu się teorii atomowej w nauce europejskiej, stąd nie będą one omawiane w tym opracowaniu.

nimi zachodzą zderzenia. Atomy mogą też łączyć się ze sobą, tworząc w ten sposób nowe substancje, jednak połączenia między atomami nie są trwałe i atomy mogą rozdzielać się na nowo.

Koncepcje Leukkiposa i Demokryta nie zostały zaakceptowane przez ich współczesnych z dwóch powodów. Pierwszym z nich był bezkompromisowy materializm ich filozofii atomistycznej. Atomiści, wyjaśniając odczucia zmysłowe i proces myślenia jako rezultat ruchu określonych atomów (atomów duszy – przyp. tłum), stawiali wyzwanie możliwościom ludzkiego rozumienia. Atomizm zdawał się nie uznawać wartości duchowych, a takie wartości jak przyjaźń, odwaga, szacunek nie mogły być zredukowane do „zbiorowiska atomów”. Ponadto, atomiści uznawali rozważania o celowości świata, prowadzone na gruncie czy to religijnym czy materialistycznym, jako nienaukowe. Drugim czynnikiem utrudniającym akceptację filozofii atomistycznej był sam charakter atomistycznej koncepcji, jako pomysłu ‘ad hoc’, nie weryfikowalnego empirycznie (Loose 2001, 25).

Ponadto istniała w tamtym czasie konkurencyjna teoria, teoria czterech pierwiastków (żywiółów), która całą istniejącą materię i jej własności tłumaczyła oddziaływaniem czterech elementów: Wody, Powietrza, Ognia i Ziemi.² Zwolennikiem tej teorii był słynny filozof grecki, **Arystoteles**, który ją też rozwinął, dodawszy do niej element piąty – eter, substancję która wypełnia przestrzeń między ciałami niebieskimi. Arystoteles uważał, że pusta przestrzeń nie może istnieć, gdyż natura odczuwa obawę przed pustką (horror vacui). Arystoteles wyrażał też pogląd, że wszystko w przyrodzie jest intencjonalne (celowe), dlatego nie ma w niej miejsca na zbędne działania. Każdy obiekt ma swoje naturalne położenie i jeśli jest z tego położenia przesunięty, to próbuje on do tego położenia powrócić. W konsekwencji, Arystoteles wyjaśniał obserwowane procesy z ich zasad. Z kolei atomiści nie byli w stanie przeciwstawić rozumowaniu Arystotelesa jakiegось innego

znaczącego wyjaśnienia zjawisk świata, co więcej – zakładali istnienie cząstek, których nikt nie mógł zobaczyć – co było głównym zarzutem Arystotelesa wobec teorii atomowej. Arystoteles nie akceptował też idei pustej przestrzeni; absurdalnym dla niego zdawał się też bezustanny ruch atomów w tej przestrzeni. W sumie był on przeciwny koncepcji atomowej jako sprzecznej z jego podstawowymi przekonaniem. Poglądy filozoficzne Arystotelesa w decydującej mierze wpłynęły na odrzucenie teorii atomistycznej Leukkiposa i Demokryta.

Oryginalne dzieła Leukkiposa i Demokryta zaginęły i były znane jedynie z opracowań krytycznych, natomiast prace Arystotelesa zachowały się i zostały rozpropagowane w kulturze islamskiej, aby w czasach nowożytnych powrócić do Europy i do kultury chrześcijańskiej. W okresie scholastycznym, Arystotelesowskie widzenie świata było dominujące, tym bardziej, że okazało się ono zgodne z wizją świata odczytywaną z Biblii. Jednak astronomowie i nieco później filozofowie przyrody dochodzili do innego rozumienia zjawisk przyrody – w konsekwencji autorytet Arystotelesa był coraz bardziej kwestionowany w wiekach XVII i XVIII – i pod koniec tego okresu pojawił się oświeceniowy filozof przyrody, który miał dokonać znaczących odkryć w dziedzinie praw i natury materii. W tym okresie pojawiły się pewne eksperymenty oraz nowe przemyślenia, które wzmocniły antyczną hipotezę atomową. Szczególnie ważnym był pokaz istnienia próżni³. Innej argumentacji dostarczało rozważanie zjawiska spalania niewielkiej ilości kadzidła, którego zapach wyczuwa się następnie w całym pomieszczeniu. Jak małe muszą być cząstki kadzidła pokazywało wyliczenie – aby cząstki te wypełniły całe pomieszczenie, to objętość małej porcji kadzidła powinna być podzielona na przynajmniej 750 000 000 części (zob. Beer & Pricha 1997). Jednak na podstawie tych prostych obliczeń trudno było cokolwiek powiedzieć o istnieniu atomów oraz przewidzieć ich

²Należy rozumieć, że elementy te nie były tym co nazywamy obecnie ziemią, ogniem, powietrzem i wodą, ale pewnymi podstawowymi elementami (patrz także tło historyczne rozwoju układu okresowego pierwiastków).

³ O pewnych kontrowersjach dotyczących istnienia próżni i o związanych z tym implikacjach filozoficznych patrz Shapin & Schaffer 1989

właściwości. Nowe ustalenia przyniósł dopiero początek XIX wieku.

Strukturyzacja materii: Dalton

Przyglądając się rozwojowi współczesnej nauki, dostrzegamy postać **Johna Daltona**, który, jak wiele na to wskazuje, był pierwszym uczonym, który zapoczątkował współczesną koncepcję atomową. Dalton był chemikiem, który przejął po **Lavoisier** i następnie rozwinął, nowe podejście do zagadnień chemii.

Podejście Lavoisier'a polegało na ilościowej analizie składników reakcji, co pozwoliło mu sformułować pierwsze ważne prawo nowoczesnej chemii – prawo zachowania masy. Lavoisier w *Opuscules physiques et chimiques* (1774) napisał, że w swych badaniach „stosował nie tylko przyrządy i metody pomiarowe fizyki eksperymentalnej, ale także reguły precyzji i obliczeń, które charakteryzują tę dziedzinę nauki” (Nye 1993, 35). Tym co uczyniło chemię Lavoisier'a różną od jej dotychczasowego oblicza, była też inna notacja reakcji chemicznych, która pozwoliła na stosowanie opisu ilościowego i interpretację prostych substancji jako pierwiastków. Co ciekawe, Lavoisier szukając właściwego wyjaśnienia pojęcia pierwiastka, doszedł do stwierdzenia, że słowo to może też oznaczać atomy, z których zbudowana jest materia, jednak zaraz dodawał, że o ich istnieniu niczego więcej powiedzieć nie można (Lavoisier 1794, xxiii). Jednakże, Lavoisier używa pojęcia „atomu”, mimo iż nie optuje za teorią atomową. Ponadto, jego określenie pierwiastka jest istotne dla wprowadzenia założeń teorii atomistycznej.

Drogę dla współczesnej teorii atomistycznej uutorowało jeszcze jedno odkrycie przypadające na koniec XVIII wieku – prawo stałego składu [prawo Proust'a – przyp. tłum.], które stwierdza, że większość związków chemicznych powstaje w wyniku reakcji ściśle określonych proporcji mas substancji tworzących ten związek. Wkrótce Dalton odkrył, że są pewne reakcje chemiczne, w których te same substancje mogą dać różne związki chemiczne (np. reakcja tlenu z miedzią prowadzi do powstania dwóch różnych związków chemicznych, podobnie ma się rzecz w przypadku reakcji tlenu z węglem, itd..). Okazało się, produkt

końcowy zależał od ilości substancji początkowych wchodzących w reakcję ze sobą. Dalton zauważył tutaj pewną regularność: otóż stosunek mas pierwiastka A, który reagując z tą samą ilością pierwiastka B, dawał dwa różne związki chemiczne, wyrażał się ilorazem małych liczb całkowitych. Odkryta przez Daltona prawidłowość została nazwana prawem wielokrotnych proporcji. Prawo to, wraz z prawem stałego składu dały podstawy stechiometrii chemicznej.

Nie był to jedyny wniosek, który Dalton wyciągnął ze swoich doświadczeń: W wykładzie wygłoszonym w Royal Institute w Londynie⁴, zaproponował następujące postulaty, które obecnie stanowią podstawę współczesnej atomowej teorii materii:

*Cała materia jest zbudowana z atomów,
Atomy nie powstają ani nie ulegają zniszczeniu,
Wszystkie atomy tego samego pierwiastka są identyczne,
Każdy pierwiastek ma właściwy sobie typ atomów,
Reakcje chemiczne mają miejsce wtedy, kiedy atomy
zmieniają swoje wzajemne przyporządkowanie,
Związki chemiczne są zbudowane z atomów
pierwiastków składowych.⁵*

Podane przez Daltona pojęcie atomu różni się od pojęcia Lavoisier'a. Atom w rozumieniu Daltona jest obiektem policzalnym, ma określoną masę itp., natomiast koncepcja Lavoisier'a jest bardziej ukierunkowana na własności chemiczne atomów, które są co prawda istotne, ale z niej nie wynika, czy odnosi się ona do rzeczywistych cząstek.

Koncepcja atomowa pozwoliła Daltonowi uzasadnić prawa stechiometrii. Prawo stałego składu wynikało z założenia, że wszystkie atomy danego pierwiastka są identyczne, a przebieg reakcji jest uwarunkowany przegrupowywaniem się atomów. Z kolei prawo stałych proporcji mogło być interpretowane jako rezultat różnych ułożeń (wzajemnych przyporządkowań) atomów, co skutkowało tworzeniem się różnych związków chemicznych.

Tak sądząc, wiedza dotycząca chemicznej analizy jakościowej została oparta na pierwszym

⁴ Wg Clarke (1803) pierwsza prezentacja miała miejsce w Manchester Philosophical Society

⁵ <http://www.rsc.org/chemsoc/timeline/pages/1803.html>, April 18, 2012

paradygmacie Kuhn'a (i z tego względu można uważać, że to osiągnięcie zwróciło chemię stechiometryczną w kierunku nauk w sensie Kuhn'a).

Postulaty Daltona spotkały się z krańcowo odmiennymi reakcjami środowiska uczonych: część z nich zaakceptowała je natychmiast, jednak większość - odrzuciła. Poważną trudność sprawiała założenie, iż każdy pierwiastek jest uformowany przez właściwe jemu atomy, co na początku XIX wieku oznaczało, że powinno istnieć około trzydziestu różnych rodzajów atomów, a ich liczba wraz z odkrywaniem nowych pierwiastków wciąż wzrastała. Tak więc zamiast uproszczenia opisu świata materialnego, teoria Daltona czyniła go bardziej skomplikowanym.

Pomimo krytycznego podejścia do samej teorii atomowej, prawa stechiometrii [które w teorii atomowej znajdowały proste wyjaśnienie – przyp. tłum.] były powszechnie stosowane przez chemików; niektórzy z nich używali liczb ułamkowych do wyrażenia stosunku mas, dając w ten sposób wyraz swojemu przekonaniu, że nie ma niepodzielnych cząstek. To nie był tylko opór przed akceptacją nowinki naukowej, ponieważ jeszcze sześćdziesiąt lat później, zastrzeżenia wobec teorii atomowej wyraził Prezes Towarzystwa Chemicznego Williamson w przemówieniu z 1869 roku: „... chociaż wszyscy chemicy posługują się teorią atomową, to jednak znaczna ich część spogląda na nią z nieufnością, a niektórzy – z wyraźną antypatią” (cyt. Tilden & Glasstone 1926, 227). Jeszcze na początku XX wieku wielu znanych fizyków i chemików odrzucało teorię atomową – wrócimy później do tej kwestii. Pomimo licznych zastrzeżeń dotyczących istnienia atomu, stał się on, zwłaszcza dla chemików, jednostką wykorzystywaną przez nich do analizy reakcji chemicznych. Jednakże, nie był on traktowany jako obiekt realny (ani w sensie empirycznym, ani w sensie opisu teoretycznego), lecz jako pewne użyteczne narzędzie analizy, co nie miało nic wspólnego z ówczesnym rozumieniem materii (Görs 1999).

Atom zostaje zaakceptowany

Podczas gdy chemicy zaakceptowali atom tylko jako użyteczną hipotezę, fizycy zaczęli traktować go jako obiekt realny, co pozwoliło im wyjaśniać z powodzeniem szereg zjawisk. W ustanowieniu atomu fizycznego ważną rolę odegrał rozwój termodynamiki, a w szczególności teoria kinetyczna materii, w której ramach atom odgrywa kluczową rolę (atomy w ruchu reprezentują ciepło). Ścisłe: ruch atomów reprezentuje energię wewnętrzną układu, której makroskopową miarą jest temperatura bezwzględna, natomiast ciepło oznacza „przepływ” energii wewnętrznej od ciała o wyższej temperaturze, do ciała o temperaturze niższej – przyp. tłum.] Jednak realność atomu poddana została ostrej krytyce, w szczególności w niemiecko-języcznej społeczności akademickiej, przez uczonych takiej miary jak Ernst Mach, Wilhelm Ostwald czy Georg Helm⁶. Kontrowersje pomiędzy tymi badaczami a zwolennikami interpretacji statystycznej (przede wszystkim z **Boltzmannem**) nie były tylko oparte na przesłankach fizycznych, ale zawierały głębokie kwestie filozoficzne. Kluczowym było pytanie czy pojedyncze atomy mogą być dostrzeżone, lub też – czy istnieje dowód na istnienie pojedynczych atomów?

Na początku XX wieku wydawało się, że teoria atomowa jest obalona, a Boltzmann został reliktem z XIX wieku. Postać rzeczy uległa raptownej zmianie kiedy Planck ogłosił swoją teorię promieniowania [1900, przyp. tłum.] i jednocześnie w tym samym czasie Einstein i Smoluchowski opublikowali swoją teorię ruchów Browna [1905/1906, przyp. tłum.].

Odkrycie ruchów Browna jest przypisywane szkockiemu botanikowi **Robertowi Brownowi**, który we wczesnych latach XIX wieku [1827, przyp. tłum.] zauważył pod mikroskopem, że pyłki kwiatowe lub cząstki kurzu, kiedy są zanurzone w cieczy, wykonują bezładny, nieuporządkowany

⁶Również Max Planck (choć z innych powodów) początkowo krytykował atomizm, dopóki nie zaakceptował go, dzięki statystycznej interpretacji Boltzmann, zobacz Müller (2008). Krytyka atomizmu nie ograniczała się tylko do społeczności mówiącej po niemiecku, gdyż przeciwnikiem atomizmu był także Poincare, francuski fizyk i matematyk.

ruch. Znamioną cechą tego ruchu było to, że nigdy nie ustaje, nawet wtedy, gdy poruszające się cząstki nie należą do świata ożywionego. Przez prawie osiemdziesiąt lat od odkrycia ruchów Browna, pomimo wielokrotnych prób wyjaśnienia tego zjawiska, pytanie o przyczynę nieustannego ruchu cząstek zawieszonych pozostawało bez odpowiedzi. Dopiero w latach 1905 – 1906 **Albert Einstein i Marian Smoluchowski**, przedstawili, niezależnie od siebie, matematyczną analizę ruchów Browna. Obydwaj badacze wyjaśnili, że ruch cząstek zawieszonych może być spowodowany ruchem cząsteczek wody wskutek ich energii kinetycznej; w ten sposób ruch brownowski okazywał się pierwszym efektem makroskopowym, który mógł być wyjaśniony w oparciu o założenie istnienia małych cząstek, dostarczając w ten sposób argumentów na rzecz teorii kinetycznej a w konsekwencji – teorii atomowej. Prace Smoluchowskiego i Einsteina zapoczątkowały powrót teorii atomistycznej do łask u wielu z jej dotychczasowych przeciwników, w tym przede wszystkim u Wilhelma Ostwalda i Ernsta Macha. W ciągu kilku lat stosunek świata naukowego do teorii atomistycznej zmienił się radykalnie, od całkowitego odrzucenia do niemal zupełnej akceptacji. Ludwig Boltzmann, wielki orędownik teorii atomistycznej, nie doczekał tego momentu – zmarł śmiercią tragiczną we wrześniu 1906 roku.

W tym miejscu jednakże wypadałoby podkreślić szczególny wkład Polaka - Marina Smoluchowskiego (1872 – 1917) w rozwój nowoczesnej atomistycznej teorii materii. Uczony ten już u progu swojej drogi naukowej, jako temat swojej rozprawy habilitacyjnej, wybrał zagadnienie skoku temperaturowego w rozrzedzonym gazie w pobliżu ścianek naczynia, przeprowadzając matematyczną analizę tego zjawiska w oparciu o założenia teorii kinetyczno-molekularnej materii. Uczynił to w czasie (1897-98), kiedy teoria kinetyczno-molekularna była w odwrocie. Pracę Smoluchowskiego docenił natychmiast Ludwig Boltzmann, który w przedmowie do swego dzieła „Wykłady z teorii gazów” (1898) zacytował jej wyniki, jako potwierdzenie słuszności teorii kinetyczno-molekularnej materii. Około roku 1900 Smoluchowski zajął się zagadnieniem

ruchów Browna. Wiadomo o tym na podstawie korespondencji pomiędzy nim a Feliksem Exnerem, autorem publikacji dotyczącej ruchów Browna, któremu jednak nie udało się wyjaśnić tego zjawiska. W roku 1903 Marian Smoluchowski miał już gotowy wynik. W pracy tej wyjaśnił, iż ruchy Browna są wywołane fluktuacjami prędkości cząsteczek środowiska otaczających cząstkę zawieszoną. Jako niezwykle rzetelny uczony wstrzymywał się jednak z ogłoszeniem swego wyniku, nie mając potwierdzających go wiarygodnych danych doświadczalnych. W roku 1905 Einstein opublikował pracę na temat ruchu cieplnego cząstek zawieszonych, podając w niej wzór na średni kwadrat przesunięcia x^2 cząstki w funkcji czasu. Smoluchowski rozpoznał w nim swój wcześniej uzyskany wynik. Ponieważ Einstein doszedł do swojego rezultatu posługując się prawami fizyki statystycznej, bez wnikania w rzeczywisty mechanizm zjawiska, Smoluchowski w 1906 r. zdecydował się na opublikowanie swojej pracy, pragnąc w ten sposób podkreślić, że do wyjaśnienia badanego zjawiska można dojść na drodze elementarnej, posługując się założeniami kinetyczno-molekularnej teorii materii.

Eksperymentalne potwierdzenie słuszności wzoru Einsteina-Smoluchowskiego przyniosły ostatecznie prace Jeana Perrina w latach 1908 – 1909, przyczyniając się do tryumfu teorii kinetyczno-molekularnej materii.

Marian Smoluchowski swą pracą na temat ruchów Browna oraz kolejnymi pracami, m.in. poświęconymi zjawisku opalescencji (co pozwoliło ostatecznie wyjaśnić problem błękitu nieba) zapoczątkował rozwój nowego działu fizyki – teorii procesów stochastycznych (przypadkowych, losowych).

Atom ujawnia swoją wewnętrzną budowę

Jeszcze przed pracami Einsteina i Smoluchowskiego, które doprowadziły do powszechnego konsensusu w kwestii atomowej struktury materii, miały miejsce odkrycia, które podważały postulat niepodzielności atomu. Chodzi o pracę **Faradaya**, datowaną na rok 1830, w której odkrył on, że podczas elektrolizy (przepływu prądu przez elektrolit), określona ilość ładunku elektrycznego, uwalnia z elektrody

określoną ilość pierwiastka ($m=kit$). Niestety ten wynik nie zrodził pytania o atomową naturę materii. Aż do początku wieku XX nie było jasnym, czy elektryczność ma strukturę atomową oraz jaka jest przyczyna ścisłej relacji między ładunkiem a uwalnianą masą. Ten problem został rozstrzygnięty z chwilą odkrycia i wyznaczenia ładunku elementarnego przez Milikana w 1911 roku, za co Milikan został uhonorowany nagrodą Nobla w 1920 roku.

Kolejne doświadczenia, które kwestionowały niepodzielny charakter atomów, pojawiły się przy końcu XIX wieku. W latach 60' XIX wieku Bunsen stwierdził, że widmo światła emitowanego z substancji [poddanej na przykład działaniu wysokiej temperatury, poprzez umieszczenie jej w płomieniu palnika – przyp. tłum.] jest bardzo charakterystyczne i zawiera tylko określone długości fal. To odkrycie zaowocowało powstaniem nowej metody badawczej – analizy spektralnej – służącej do identyfikacji pierwiastków. Dzięki niej w ciągu kilku następnich lat liczba nowo odkrytych pierwiastków znacząco wzrosła. Analiza spektralna została też wykorzystana do badania promieni katodowych i ich oddziaływania z gazem w rurze do wyładowań. W takim postępowaniu doświadczalnicy upatrywali szansę odkrycia reguł rządzących budową materii (Müller 2004).

Wśród badaczy na tym polu należy wymienić **J. J. Thomsona**, który ustalił, że promienie katodowe stanowi strumień cząstek naładowanych [ujemnie – przyp. tłum.] o masie równej około 1/1000 masy atomu wodoru⁷. Badając odchylenie toru promieni katodowych w polu magnetycznym wyznaczył stosunek masy do ładunku cząstki. Na materiał katody Thomson stosował różne metale i za każdym razem stwierdzał podobne właściwości cząstek „katodowych”. Zrodziło to przypuszczenie, że cząstki te muszą być podstawowym składnikiem materii (chodzi o elektron, ujemnie naładowaną cząstkę

elementarną, którego odkrycie przypisuje się Thomsonowi, przyp. tłum.). Pojawił się wówczas problem stabilności materii zawierającej w sobie lekkie, ujemnie naładowane cząstki. Thomson znalazł w końcu następujące rozwiązanie: „Zakładamy, że atom zbudowany jest z pewnej liczby cząstek [elektronów], poruszających wewnątrz sfery naładowanej jednorodnie ładunkiem dodatnim...” (Thomson 1904, 255)⁸. [Był to model “ciasta z rodzynkami” – przyp. tłum.] Oznaczało to, że atom nie jest już niepodzielny i posiada swoją wewnętrzną strukturę.

Wkrótce okazało się, że konieczna będzie modyfikacja modelu Thomsona, uzasadniona wynikami uzyskanymi w trakcie badań nad promieniotwórczością, nową dziedziną fizyki, która wyłoniła się na początku XX wieku. Jednym z naukowców, który swoją karierę naukową związał z tym nowym zjawiskiem był **Ernest Rutherford**, fizyk pochodzący z Nowej Zelandii (w roku 1908 otrzymał nagrodę Nobla z chemii za badanie naturalnego rozpadu promieniotwórczego i za odkrycie cząstek alfa i beta emitowanych w trakcie tego rozpadu). W Laboratorium Cavendisha (Cambridge) jego dwóch asystentów – **Marsden i Geiger** – przeprowadzili eksperyment rozpraszania cząstek alfa na folii wykonanej z metalu (w późniejszym czasie stosowali folię ze złota, gdyż możliwe było przygotowanie jej niezwykle cienkiej) (Geiger & Marsden 1909). Rutherford szukał potwierdzenia wyników rozpraszania wykonanych wcześniej z użyciem warstwy miki. Eksperyment powtórzono, a jego wynik był bardziej niż irytujący: Geiger i Marsden zaobserwowali, że, co prawda, zdecydowana większość cząstek alfa przechodzi przez folię metalową, przy czym część z nich zmienia kierunek biegu, jednak kilka z nich ulega odbiciu wstecz. Wynik ten dla Rutherforda był tak zaskakujący, że pozwolił on sobie na następujące porównanie „jak gdyby po wystrzeleniu piętnasto-calowej kuli w kierunku serwetki, kula ta odbiła się od niej i trafiła z powrotem w strzelca”. (Heilbron 1981, 264f.) Rutherford na podstawie zachowania się cząstek alfa wyliczył, że atom

⁷ Warto zauważyć, że jego syn George Pagot Thomson w tym czasie został nagrodzony Nagrodą Nobla za pracę dotyczącą dyfrakcji elektronów. Można powiedzieć, że J.J. Thomson zdobył Nagrodę Nobla za pokazanie, że electron jest cząstką, natomiast jego syn został uhonorowany za pokazanie, że elektron ma również falowy charakter.

⁸ Fizyk japoński, Nagaoka doszedł do podobnego wniosku jeden rok wcześniej.

zawiera bardzo małe, dodatnio naładowane jądro, w którym skoncentrowana jest niemal cała masa atomu, natomiast większość przestrzeni w atomie jest pusta, za wyjątkiem elektronów, które poruszają się w niej gdziekolwiek.

Atom może się zmieniać

Jak już wspomniano, Rutherford stał się sławny dzięki badaniom promieniotwórczości, jednak nie był pierwszym, który te badania zapoczątkował. Badaczem, który jako pierwszy zaobserwował zjawisko promieniotwórczości, był francuski fizyk **Henri Becquerel**, którego odkrycie zapoczątkowało nowy kierunek badań fizycznych. Jednak początkowo radioaktywność traktowana była przez Becquerela i innych badaczy jako kuriozum, niewarte poważnych badań naukowych. Dopiero badania przeprowadzone przez dwoje młodych uczonych **Marię Skłodowską, Polkę i Piotra Curie**, Francuza, wykazały doniosłość odkrycia Becquerela: stwierdzili oni, że w badanych minerałach zawierających uran występuje jeszcze inny pierwiastek promieniotwórczy, o silniejszej radiacji niż czysty uran.

Po długich i żmudnych eksperymentach udało się im wyodrębnić z rudy uranowej dwa nowe pierwiastki polon i rad. W szczególności ważnym dla badań okazał się rad, który był pierwiastkiem o dużej aktywności i wysyłał różnego rodzaju promieniowanie. Wkrótce okazało się, że wiele innych pierwiastków posiada zdolność emitowania takiego promieniowania. Odkryto też rzecz zadziwiającą – przekształcenie się jednego pierwiastka w drugi podczas rozpadu promieniotwórczego alfa lub beta. Z tym odkryciem związana jest pewna anegdota, przypisywana Rutherfordowi: „**Rutherford i Soddy** stwierdzili, że radioaktywny tor, atom po atomie, zamienia się w promieniotwórczy rad. W pewnej chwili, po namyśle, Soddy’emu wyrwało się „Rutherford, to jest transmutacja!” (przeobrażenie!) . ‘Przez wzgląd na Mike’a’ odpowiedział jego towarzysz, ‘nie nazywaj tego transmutacją. Oni zażądają naszych głów, jak od alchemików” (Weart 1988, 5f.).

Badania prowadzone przez małżeństwo Curie pozwoliły ustalić, że promieniowanie danej substancji jest właściwością określonego pierwiastka wchodzącego w jej skład, ponadto cechą charakterystyczną każdego pierwiastka promieniotwórczego jest rodzaj i intensywność wysyłanego promieniowania (na przykład uran wysyła inny rodzaj promieniowania niż polon lub rad). Z ich doświadczeń wynikało też, że aktywność promieniotwórcza próbek maleje z upływem czasu, co scharakteryzowano tak zwanym okresem półrozpadu (pół zaniku), oznaczającym upływ czasu po którym natężenie wysyłanego promieniowania spada do połowy początkowej wartości.

Prawo zaniku promieniotwórczego stwarzało początkowo pewne trudności interpretacyjne; najpierw sądzono, że czas półrozpadu odnosi się do pojedynczego atomu, tym bardziej, że aktowi emisji określonego rodzaju promieniowania towarzyszy (zazwyczaj) przemiana atomu danego pierwiastka w atom innego pierwiastka, jednak w końcu okazało się, że prawo to funkcjonuje poprawnie w odniesieniu do dużego zbioru atomów. Innymi słowy prawo zaniku (lub rozpadu promieniotwórczego) jest prawem statystycznym i określa prawdopodobieństwo rozpadu atomu (teraz wiemy, że jądra atomowego) danego pierwiastka i towarzyszącej temu emisji promieniowania; dlatego nie możemy przewidzieć zachowania się indywidualnego atomu w danej chwili czasu, natomiast przewidywania odnośnie dużego zbioru atomów (np. ok. 10¹⁸) okazują się jak najbardziej poprawne.

Analiza składu promieniowania emitowanego z ciał radioaktywnych wykazała istnienie trzech różnych rodzajów promieniowania (promieniowanie korpuskularne alfa i beta oraz promieniowanie elektromagnetyczne gamma – przyp. tłum.). Pewną niespodziankę sprawiło promieniowanie alfa, gdyż okazało się, że składa się ono z jąder helu, pierwiastka wykrywanego wtedy tylko na słońcu (metodami spektroskopowymi), natomiast na Ziemi jeszcze nieodkrytego. Obecność w promieniowaniu ciał promieniotwórczych dodatnich cząstek alfa i ujemnych cząstek beta świadczyła o złożoności budowy wewnętrznej atomu.

Atomy fizyczne i atomy chemiczne

Określenie właściwości różnych promieni emitowanych przez ciała promieniotwórcze okazało się niezwykle ważne dla poznania wewnętrznej budowy atomu. W pierwszej kolejności wyznaczono masę i ładunek cząstek wchodzących w skład promieniowania. Przepuszczając wiązkę promieni przez obszar jednorodnego pola magnetycznego o ściśle określonym natężeniu, w kierunku prostopadłym do linii sił pola, uzyskiwano zakrzywienie toru biegu tych promieni: z odchylenia toru cząstek wyznaczano stosunek ładunku do masy cząstki.

Francis Aston zmodyfikował metodę odchylenia toru cząstki naładowanej w polu magnetycznym, do badania mas atomów, budując w tym celu tzw. spektrometr masowy. Dzięki jego badaniom okazało się, że atomy tego samego pierwiastka, czyli nieodróżnialne metodami chemicznymi, mogą różnić się między sobą masą. (Atomy tego samego pierwiastka różniące się masą nazywamy izotopami; istnienie izotopów przewidział już wcześniej Soddy, współpracownik Rutherforda). To pozwoliło wyjaśnić dlaczego pewne pierwiastki mają masę atomową nie będącą całkowitą wielokrotnością masy atomowej atomu wodoru; okazało się, że jest to średnia ważona mas atomów (izotopów) wchodzących w skład danego pierwiastka, przy czym masa atomowa izotopu jest z dobrym przybliżeniem wielokrotnością masy atomu wodoru.

Atomy mogą ulegać zmianom

Większość badań nad radioaktywnością skupiała się na analizie promieniowania, jednak część badaczy próbowało też dokonywać modyfikacji atomów. Eksperymenty te polegały na przepuszczaniu przez badaną substancję cząstek alfa, które odgrywały tu rolę pocisków bombardujących atomy tej substancji. Udało się wtedy zaobserwować pojawienie się atomów innego pierwiastka. Pierwszym, który zapoczątkował tego rodzaju eksperymenty był znowu **Rutherford**; przepuszczając cząstki alfa przez azot, stwierdził pojawienie się śladowych ilości tlenu i wodoru. Interpretacja Rutherforda była następująca: w momencie gdy jądro atomu azotu zaabsorbuje cząstkę alfa, wówczas natychmiast emituje ono jądro wodoru [a samo

staje się jądrem tlenu – przyp. tłum.]. Była to pierwsza udana próba modyfikacji jednego pierwiastka i utworzenia drugiego; wkrótce po tym przeprowadzono wiele kolejnych doświadczeń tego rodzaju. Należy w tym miejscu podkreślić, że dokonywane reakcje nie były traktowane przez badaczy jako reakcje rozszczepienia jądra (w obecnym rozumieniu tego słowa – przyp. tłum.), gdyż o takiej ewentualności jeszcze nie myślano.

Rutherford nazwał jądro wodoru protonem i wskazał, że jest on podstawowym składnikiem wszystkich jąder. Aby wyjaśnić stabilność jąder cięższych pierwiastków, zawierających więcej dodatnio naładowanych protonów, założył, że składnikiem jąder są także ujemne elektrony, które z częścią protonów tworzą neutralne pary, tworząc w ten sposób stabilny układ. To nie rozwiązywało jednak innych kwestii: pierwszą z nich stanowił fakt, że masy jąder nie stanowią całkowitej wielokrotności masy protonu, drugą zaś był zagadkowy mechanizm rozpadu beta.

Znaczącym dla dalszego poznania budowy jądra atomowego był eksperyment przeprowadzony przez **Irenę Joliot-Curie i jej męża Fryderyka**. Poddali oni beryl napromieniowaniu cząstkami alfa. W rezultacie zaobserwowali oni silne promieniowanie, uwalniające się z berylu, mające tę właściwość, że wybijało atomy wodoru z substancji bogatych w wodór, np. z parafiny. Ponieważ promieniowanie to nie niosło ze sobą żadnego ładunku elektrycznego, zostało ono zinterpretowane przez badaczy jako promieniowanie gamma. **James Chadwick**, współpracownik Rutherforda, zaintrygowany rezultatem państwa Joliot-Curie, powtórzył u siebie (w Laboratorium Cavendisha w Cambridge) ich doświadczenie.

Przeprowadziwszy dokładne pomiary energii i poddawszy je szczegółowej analizie doszedł do odkrycia, że to nowe i nieznanne promieniowanie jest strumieniem cząstek obojętnych elektrycznie o masie niemal równej masie protonu. Cząstki te nazwał neutronami. Odkrycie Chadwicka spotkało się z ogromnym zainteresowaniem świata naukowego. Neutron okazał się cząstką znakomicie tłumaczącą budowę jądra atomowego

– jako układu złożonego z protonów i neutronów, w równych w przybliżeniu ilościach.

Neutron okazał się też niezastąpionym narzędziem pracy fizyków zajmujących się badaniem jąder atomowych. Ze względu na jego neutralność elektryczną, neutron mógł łatwo wnikać do wnętrza jądra atomowego, nawet gdy posiadał niewielką prędkość. Okazało się, że w ten sposób można inicjować różnego rodzaju reakcje jądrowe lub też tworzyć jądra izotopów promieniotwórczych.

Jednym z kierunków badań z użyciem wiązek neutronów były poszukiwania nowych pierwiastków, dotychczas nie ujętych w Tablicy Układu Okresowego, o masie atomowej większej od masy atomowej „najcięższego” wtedy pierwiastka – uranu. Badania na tym polu prowadzili m.in.: małżeństwo Joliot-Curie w Paryżu, Enrico **Fermi** we Włoszech oraz **Otto Hahn** i **Fritz Strassmann** w Berlinie. Do historii przeszło doświadczenie Otto Hahna, który przez bombardowanie uranu neutronami otrzymywał bar – pierwiastek o masie znacznie mniejszej od masy atomowej uranu. Wyraźnie niezadowolony z otrzymanego rezultatu, Hahn listownie poprosił **Lizę Meitner** o jego wyjaśnienie. (Liza Meitner była wieloletnią współpracowniczką Hahna, jednak w roku 1938 wyemigrowała do Szwecji w obawie przed prześladowaniami antysemitycznymi w Niemczech, gdyż była pochodzenia żydowskiego). Liza Meitner początkowo uznała ten wynik jako niewiarygodny, jednak zastrzegła się, że w historii promieniotwórczości zdarzało się już tyle niespodzianek, że nie można całkowicie wykluczyć tego rezultatu. W celu uniknięcia pomyłki Hahn jeszcze raz sprawdził wynik swojego doświadczenia i uzyskał potwierdzenie poprzedniego wyniku, o czym ponownie powiadomił Lisę Meitner. Wówczas w odpowiedzi stwierdziła ona, że reakcja rozpadu, którą Hahn zaobserwował, jest z energetycznego punktu widzenia możliwa. W artykule, który ukazał się kilka miesięcy po publikacji Hahna, Liza Meitner wraz z Otto Frischem przedstawiła poszerzoną interpretację doświadczenia Hahna. Jego wynik określiła mianem rozszczepienia; posługując się modelem kropkowym jądra atomowego, proces rozszczepienia jądra uranu wytłumaczyła

rozpadem kropli na mniejsze fragmenty, spowodowanym uderzeniem przez obiekt o odpowiedniej energii [czyli uderzeniem neutronu – przyp. tłum.]. [Liza Meitner oszacowała też ilość energii wyzwalającej się w procesie rozszczepienia na ok. 200 MeV na atom uranu < tj. ok. 80 megadżuli na gram substancji> – przyp. tłum.]

Wkrótce okazało się, że wynik doświadczenia Hahna był prawidłowy – naukowcy potwierdzili, że reakcji tej towarzyszy wydzielenie olbrzymiej ilości energii oraz emisja kilku neutronów, które mogą spowodować rozszczepienie kolejnych jąder uranu i zapoczątkować reakcję łańcuchową.

Pliki audio zawierające wypowiedzi bohaterów powyższego opracowania, takich jak Thomson, Rutherford, Hahn i in. można znaleźć pod adresem:

<http://www.aip.org/history/mod/fission/fission1/01.html>

Jestem wdzięczny D. Metz z Uniwersytetu w Winnipeg za staranną korektę powyższego opracowania i za komentarze do jego poprzedniej wersji.

Literatura:

- Berr, F., & Pricha, W. (1997). *Atommodelle* (3. Auflage ed.). München: Deutsches Museum.
- Blackmore, J. (1995). *Ludwig Boltzmann: His Later Life and Philosophy, 1900-1906. The philosopher*. Dordrecht: Kluwer.
- Curie M. (1911). *Radium and the new concepts in chemistry*. Nobel Lecture, December, 11,1911, Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1967) (<http://www.nobelprize.org>)
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1963). *The Feynman lectures on physics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- Geiger, H., & Marsden, E. (1909). On a Diffuse Reflection of the α -Particles. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(557), 495-500.
- Görs, B. (1999). *Chemischer Atomismus: Anwendung, Veränderung, Alternativen im deutschsprachigen Raum in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts*. Berlin: ERS.
- Heidelberger, M. (1993). *Die innere Seite der Natur : Gustav Theodor Fechners wissenschaftlich-philosophische Weltauffassung*. Frankfurt am Main: Klostermann.
- Heilbron, J. L. (1981). *Historical studies in the theory of atomic structure*. New York: Arno Press.
- Holton, G. J. (1978). *The scientific imagination : case studies*. Cambridge [Eng.]; New York: Cambridge University Press.

- Lavoisier, A. L. (1794). *Elements of Chemistry*. Transl. by Kerr, 4th ed., Edinburgh: William Creech.
- Losee, J. (2001). *A historical introduction to the philosophy of science*. Oxford [England]; New York: Oxford University Press.
- Morgenweck-Lambrinos, V., & Trömel, M. (2001). Wissenschaft und Legende: eine Nachbetrachtung zu Lise Meitner, Otto Hahn und die Kernspaltung: eine Legende aus unseren Tagen. *NTM*, 9, 29--40.
- Mould, R. F. (1998). "The discovery of radium in 1898 by Maria Skłodowska-Curie (1867–1934) and Pierre Curie (1859–1906) with commentary on their life and times". *The British Journal of Radiology* 71 (852): 1229–54.
- Müller, F. (2004). *Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert*. Berlin: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik.
- Müller, I. (2008). Ein Leben für die Thermodynamik. Vom Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zum Planckschen Wirkungsquantum. In: *Physik Journal* 7/3, 39-45.
- Nye, M. J. (1993). *From chemical philosophy to theoretical chemistry : dynamics of matter and dynamics of disciplines, 1800-1950*. Berkeley u.a.: Univ. of California Press.
- Rife, P. (1992). *Lise Meitner: –Ein Leben für die Wissenschaft*. Hildesheim: Claasen.
- Rutherford E. (1911) *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*, *Philosophical Magazine*, Volume 21, pp. 669-688. (<http://www.chemteam.info/Chem-History/Rutherford-1911/Rutherford-1911.html>).
- Shapin, S., & Schaffer, S. (1989). *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life* (1st Paperback Edition ed.). Princeton: UP.
- Sichau, C. (2005). *Atomphysik : historische und fachliche Materialien zur Unterrichtsvorbereitung*. Oldenburg: Didakt. Zentrum (diz).
- Simonyi, K. (1995). *Kulturgeschichte der Physik: von den Anfängen bis 1990* (2. Aufl. ed.). Thun, Frankfurt/Main: Deutsch.
- Thomson, J.J. (1904). "On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure". In: *Philosophical Magazine* 6 Volume 7, Issue 39, 237-265
- Tilden, W. A., & Glasstone, S. (1926). *Chemical discovery and invention in the twentieth century*. London: Routledge.
- Weart, S. R. (1988). *Nuclear fear : a history of images*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.

Tło historyczne: Atomy zostało napisane przez prof. Petera Heeringa, przy wsparciu Komisji Europejskiej (projekt nr 518094-LLP-1-2011-1-GR-COMENIUS-CMP) i Uniwersytetu we Flensburgu, Niemcy. Publikacja odzwierciedla jedynie poglądy autorów i Komisja Europejska nie może być odpowiedzialna za jakiegokolwiek wykorzystanie oparte na informacjach w niej zawartych.