Transmutacja materii: od marzeń alchemików do fizyki jądrowej i odpowiedzialności chemicznej w świetle książki The Age of Alchemy autorstwa Kit Chapman.

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Artykuł analizuje ewolucję pojęcia transmutacji, ukazując przejście od alchemicznych fantazji do twardych dowodów fizyki jądrowej. Autor wyjaśnia, że o ile klasyczna chemia opiera się na reorganizacji elektronów, o tyle prawdziwa zmiana pierwiastka zachodzi w jądrze atomowym poprzez zmianę liczby protonów. Przywołując prace Becquerela, Curie oraz Rutherforda i Soddy'ego, tekst opisuje mechanizmy rozpadu alfa i beta oraz odkrycie izotopów. Tekst podkreśla historyczny zwrot, w którym termin „transmutacja” odzyskał naukowe znaczenie, definiując tożsamość pierwiastka nie jako stałą niezmienną, lecz jako wynik stabilności jądra atomowego. To przejście z poziomu makroskopowego na poziom subatomowy pozwoliło nauce zrealizować dawne marzenia alchemików w sposób mierzalny i przewidywalny.

The article analyzes the evolution of the concept of transmutation, showing the transition from alchemical fantasies to the hard evidence of nuclear physics. The author explains that while classical chemistry is based on the reorganization of electrons, a true change of element occurs in the atomic nucleus through a change in the number of protons. Citing the works of Becquerel, Curie, as well as Rutherford and Soddy, the text describes the mechanisms of alpha and beta decay and the discovery of isotopes. The text emphasizes the historical turn in which the term "transmutation" regained scientific meaning, defining an element's identity not as a constant invariant, but as a result of atomic nucleus stability. This transition from the macroscopic to the

subatomic level allowed science to realize the ancient dreams of alchemists in a measurable and predictable way.

Artykuł analizuje ewolucję ludzkiej relacji z materią, śledząc drogę od mistycznej alchemii po współczesną fizykę jądrową i chemię środowiskową. Autor stawia tezę, że choć nauka zrealizowała odwieczne marzenie o transmutacji pierwiastków, czyniąc to poprzez precyzyjną manipulację jądrem atomowym, całkowicie zmieniła charakter tego sukcesu. Zamiast poszukiwania metafizycznej doskonałości i mitycznego kamienia filozoficznego, otrzymaliśmy funkcjonalny pluralizm materiałów oraz rygorystyczne systemy pomiarowe. Kluczowym przesunięciem jest jednak przejście od fascynacji samą możliwością technologiczną do konieczności zarządzania globalnymi konsekwencjami tej sprawczości. Tekst dowodzi, że współczesna potęga nad materią – od syntezy pierwiastków superciężkich po energetykę jądrową – nie jest jedynie triumfem intelektualnym, lecz przede wszystkim wyzwaniem etycznym. Ostatecznie, panowanie nad strukturą atomu wymusza na ludzkości budowę systemowej odpowiedzialności za cykl życia substancji i ich wpływ na biosferę, zamieniając alchemiczny sekret w publiczną infrastrukturę bezpieczeństwa.

SŁOWA KLUCZOWE

transmutacja materii | fizyka jądrowa | rozpad alfa i beta | liczba atomowa | izotopy | nukleosynteza gwiazdowa | zielona chemia | energia wiązania na nukleon | bariera elektrostatyczna | struktura powłok jądrowych | wyspa stabilności | bilans masy-energii | ekonomia atomowa syntezy | łańcuchy inferencji | odpowiedzialność poznawcza

Fizyka jądrowa jako realizacja marzenia o transmutacji

Transmutacja odzyskana przez naukę: promieniotwórczość, jądro atomowe i spełnione marzenie alchemików

U schyłku XIX wieku chemia znajdowała się w sytuacji, która zaledwie kilka dekad wcześniej wydałaby się paradoksalna. Prawo okresowe Mendelejewa porządkowało pierwiastki jako względnie stabilne jednostki materii, chemia analityczna coraz skuteczniej ustalała ich skład i własności, a rozwój atomizmu utwierdzał w przekonaniu, że reakcje chemiczne polegają przede wszystkim na przegrupowaniu trwałych atomów. Wydawało się zatem, że nowoczesna nauka ostatecznie odrzuciła jeden z najbardziej uporczywych projektów alchemii: możliwość przechodzenia jednego pierwiastka w drugi. Autor książki trafnie sytuuje w tym miejscu historyczny zwrot, przywołując badania Rutherforda i Soddy'ego oraz odzyskanie terminu „transmutacja" w zupełnie nowym, jądrowym znaczeniu. Odkrycie promieniotwórczości dokonało jednak czegoś więcej niż tylko poszerzenie katalogu niezwykłych właściwości materii – zmieniło samo pojęcie pierwiastka. W klasycznej chemii pierwiastek był jednostką trwałą: można było tworzyć jego związki, rozkładać je, utleniać, redukować, topić, destylować czy rozpuszczać, lecz w reakcjach chemicznych jego elementarna tożsamość pozostawała zachowana.

Badania Henriego Becquerela nad solami uranu, a następnie prace Marii Skłodowskiej-Curie i Pierre'a Curie nad substancjami promieniotwórczymi ujawniły procesy, które nie mieściły się w tej logice. Atom przestał być postrzegany jako niezmienna jednostka chemicznego rachunku. Emitował energię i cząstki, a jego własności mogły ulegać zmianie bez udziału tradycyjnego reagentu chemicznego, płomienia czy elektrolizy.

Dla historii idei była to rewolucja o niezwykłej głębi. Alchemia przez stulecia zakładała, że metal może dojrzewać, oczyszczać się lub zmieniać w inną substancję dzięki odpowiednio przeprowadzonej operacji. Chemia XVIII i XIX wieku zasadniczo odrzuciła tę koncepcję, uznając elementarną tożsamość za trwałą w zakresie reakcji chemicznych. Fizyka przełomu wieków odkryła jednak, że trwałość ta jest tylko trwałością względną. Pierwiastki rzeczywiście mogą przechodzić jeden w drugi, tyle że mechanizm tego procesu nie tkwi w poziomie jakości makroskopowych ani w organizacji elektronów walencyjnych, lecz w jądrze atomowym. Współczesne rozróżnienie jest tutaj zasadnicze.

Reakcja chemiczna reorganizuje przede wszystkim rozkład elektronów oraz sposób tworzenia wiązań między atomami. Reakcja jądrowa lub spontaniczny rozpad promieniotwórczy zmienia natomiast strukturę samego jądra. To właśnie ono determinuje liczbę protonów, a tym samym liczbę atomową i tożsamość pierwiastka. Autor książki ujmuje ten kontrast bardzo wyraźnie: „prawdziwa transmutacja" wymaga zmiany liczby protonów i dlatego wykracza poza klasyczną chemię redoks. Alchemiczny problem okazał się więc problemem fizyki jądrowej, choć przez dwa tysiąclecia próbowano rozwiązać go narzędziami chemicznymi. Promieniotwórczość ujawniła przy tym, że nie wszystkie jądra posiadają taką samą stabilność. Niektóre izotopy są trwałe w skali

ludzkiej obserwacji, inne rozpadają się w ułamkach sekundy, a jeszcze inne mają okresy półtrwania liczone w milionach czy miliardach lat.

Fizyczna definicja transmutacji jako zmiana liczby protonów

Rozpad alfa zmienia liczbę protonów w jądrze o dwa, a liczbę masową o cztery, gdyż emitowane jest jądro helu złożone z dwóch protonów i dwóch neutronów. W rozpadzie beta dochodzi do przemiany neutronu w proton lub procesu odwrotnego – zależnie od rodzaju rozpadu – czemu towarzyszy emisja odpowiednich cząstek. W rezultacie liczba atomowa może ulec zmianie o jeden. To, co dla dawnego alchemika stanowiło metafizyczną możliwość „przejścia" jednego metalu w drugi, dla fizyki jądrowej staje się sekwencją ściśle określonych przemian wynikających z właściwości jąder. Ernest Rutherford i Frederick Soddy należeli do badaczy, którzy na początku XX wieku zrozumieli, że promieniotwórczość nie jest wyłącznie emisją energii przez niezmienioną substancję; w trakcie rozpadu powstawał nowy pierwiastek. Właśnie w tym kontekście historycznym słowo „transmutacja", przez pokolenia obciążone skojarzeniem z alchemicznym oszustwem lub fantazją, zaczęło odzyskiwać pełne znaczenie naukowe. Autor książki przywołuje popularną anegdotę o ostrożności Rutherforda wobec samego terminu, co dobrze oddaje ryzyko reputacyjne towarzyszące jego ponownemu użyciu. Nawet jeśli późniejsze barwne wersje dialogu nie powinny być traktowane jak stenogram laboratoryjny, sens epoki pozostaje czytelny: wypowiedzieć „transmutacja" na początku XX wieku znaczyło dotknąć słowa, które nowoczesna nauka długo próbowała pozostawić po drugiej stronie granicy oddzielającej ją od alchemii.

Soddy odegrał dodatkowo kluczową rolę w rozwoju pojęcia izotopów. Odkrycie, że atomy tego samego pierwiastka mogą posiadać różne masy przy zachowaniu tej samej liczby atomowej, rozwiązało szereg problemów komplikujących wcześniej klasyfikację pierwiastków. Z chemicznego punktu widzenia izotopy danego pierwiastka zachowują się bardzo podobnie, ponieważ posiadają tę samą liczbę protonów i – w atomach obojętnych – tę samą liczbę elektronów, a więc zasadniczo tę samą konfigurację elektronową. Różnią się natomiast liczbą neutronów w jądrze, a przez to masą oraz często stabilnością jądrową. Dopiero to rozróżnienie pozwala w pełni zrozumieć, dlaczego masa atomowa nie mogła być ostatecznym numerem porządkującym układ okresowy. Znaczenie tej zmiany dla chemii było ogromne. Mendelejew dostrzegł okresowość bez znajomości jądra; Moseley powiązał ją z liczbą atomową; teoria izotopów wyjaśniła natomiast, dlaczego jeden pierwiastek może występować w kilku wariantach masowych. Tożsamość pierwiastka została dzięki temu oddzielona od jego masy.

Atom węgla-12, węgla-13 i węgla-14 pozostaje węglem, ponieważ każde z tych jąder zawiera sześć protonów. Z punktu widzenia filozofii przyrody jest to niezwykle precyzyjne rozstrzygnięcie problemu tożsamości materialnej: materia może zmieniać masę izotopową, stan energetyczny i konfigurację elektronową, a jednak pozostawać tym samym pierwiastkiem, dopóki nie zmieni się liczba protonów. W takim ujęciu alchemiczna transmutacja przestaje być pojęciem mglistym. Aby przemienić pierwiastek A w pierwiastek B, trzeba zmienić jego liczbę atomową. Sama zmiana liczby neutronów prowadzi do powstania innego izotopu, lecz nie nowego pierwiastka. Zmiana elektronów tworzy jon, ale nadal nie nowy pierwiastek. Zmiana rozmieszczenia atomów tworzy nową cząsteczkę lub fazę materiałową, lecz zachowuje tożsamość jąder. To rozwarstwienie poziomów przemiany stanowi jedno z najważniejszych osiągnięć dojrzałej nauki o materii, ponieważ pozwala precyzyjnie odpowiedzieć na pytanie, które dawniej rozpatrywano w jednym, jakościowym języku „zmiany substancji". Kolejny krok nastąpił wtedy, gdy transmutacja przestała być wyłącznie spontanicznym procesem radioaktywnym, a stała się procesem wywoływanym przez człowieka.

Od transmutacji Rutherforda do potęgi rozszczepienia jądra

W 1919 roku Rutherford wykazał, że bombardowanie azotu cząstkami alfa może prowadzić do powstawania tlenu oraz emisji protonu. Była to pierwsza powszechnie uznana sztucznie wywołana przemiana jądrowa. Człowiek przestał być jedynie obserwatorem transmutacji zachodzących samorzutnie w przyrodzie – nauczył się ją inicjować. W wymiarze historycznym był to moment niemal ironicznego triumfu alchemicznej ambicji: po wielu stuleciach ludzkość rzeczywiście opanowała sztukę zmiany jednego pierwiastka w drugi. Różnica między alchemią a fizyką jądrową nie polegała zatem na tym, że pierwsza wierzyła w przemianę, a druga jej zaprzeczała.

Różnica ta tkwiła w jakości mechanizmu, kontroli eksperymentalnej, mierzalności energii i precyzyjnej identyfikacji produktów. W fizyce jądrowej transmutacja przestała być szeroką kategorią transformacji jakościowej; została zdefiniowana przez konkretną zmianę składu jądra, bilans liczby nukleonów, ładunku, energii oraz pędu. Proces ten można opisać równaniem reakcji jądrowej i obliczyć energetyczne warunki jego zajścia.

Właśnie ta możliwość formalizacji oddziela naukę od dawnego programu alchemicznego znacznie silniej niż sam przedmiot marzenia. Obraz ten pogłębiło odkrycie neutronu przez Jamesa Chadwicka w 1932 roku. Jądro przestało być rozumiane jako struktura, którą można wyjaśnić wyłącznie protonami i hipotetycznym równoważeniem ładunku przez elektrony. Neutron

wprowadził drugi główny składnik jądra – obojętny elektrycznie, lecz o masie zbliżonej do masy protonu. Pozwoliło to na pełniejsze zrozumienie izotopów oraz procesów jądrowych.

Neutron okazał się niezwykle skutecznym narzędziem wywoływania reakcji, gdyż brak ładunku elektrycznego pozwala mu zbliżyć się do dodatnio naładowanego jądra bez konieczności pokonywania bariery elektrostatycznej w takim stopniu, jak ma to miejsce w przypadku cząstek dodatnich. To właśnie fizyka neutronów doprowadziła do jednego z najbardziej brzemiennych w skutki odkryć XX wieku – rozszczepienia jądra uranu. Otto Hahn i Fritz Strassmann uzyskali w eksperymentach produkty wskazujące na rozpad ciężkiego jądra, natomiast Lise Meitner i Otto Frisch przedstawili właściwą interpretację fizyczną tego procesu. Ciężkie jądro może zostać podzielone na mniejsze fragmenty, a podczas tej przemiany uwalniana jest ogromna ilość energii wynikająca z różnic w energii wiązania na nukleon. W tym miejscu chemia, fizyka i polityka zostały połączone z brutalną intensywnością: transmutacja materii stała się podstawą energetyki jądrowej i broni atomowej.

Historia ta dowodzi, że opanowanie głębszego poziomu materii nie prowadzi automatycznie do postępu moralnego. Alchemiczne wyobrażenie kamienia filozoficznego łączyło władzę nad materią z bogactwem i nieśmiertelnością; fizyka jądrowa dała człowiekowi panowanie nad energią jądra, lecz jednocześnie stworzyła możliwość przemysłowej destrukcji na skalę wcześniej niewyobrażalną.

Rozdźwięk między możliwością techniczną a racjonalnością ekonomiczną

Możliwość technologiczna i wartość normatywna należą do różnych porządków. Nauka odpowiada na pytanie, co można zrobić i w jaki sposób; nie dostarcza jednak samej w sobie odpowiedzi na pytanie, co powinno zostać zrobione. Na tym tle próby wytwarzania złota nabierają szczególnie paradoksalnego sensu. Autor książki przywołuje postać Glenna T. Seaborga oraz późniejsze przemiany ołowiu prowadzące do jąder złota jako naukowe spełnienie alchemicznego celu. Historyczny sens tej informacji jest trafny: w XX wieku rzeczywiście stało się możliwe otrzymywanie atomów złota poprzez reakcje jądrowe odpowiednio dobranych jąder. Nie jest to jednak chemiczna konwersja jednej sztabki w drugą. Powstają zaledwie śladowe ilości atomów, często z udziałem niestabilnych izotopów lub w warunkach wymagających ogromnej energii i aparatury akceleratorowej, co generuje koszty wielokrotnie przekraczające wartość produktu. Możliwość produkcji złota pozwala precyzyjnie dostrzec różnicę między wykonalnością fizyczną a racjonalnością ekonomiczną. Dla alchemika złoto miało znaczenie właśnie dlatego, że było rzadkie i cenne. Gdyby istniała tania metoda jego nieograniczonej produkcji, sam sukces technologiczny

podważyłby ekonomiczny cel przedsięwzięcia: zwiększona podaż zmniejszyłaby rzadkość, a tym samym wartość kruszcu. Jeszcze bardziej przewrotna jest rzeczywistość XX i XXI wieku: proces jest możliwy, lecz tak kosztowny, że produkt staje się ekonomicznie nieatrakcyjny. Człowiek zdobył zdolność, o której śnili adepci, ale zrobił to w formie, która unieważnia ich biznesowy rachunek. Ekonomista rozpoznałby tu rozdzielenie wartości użytkowej i rynkowej od kosztu krańcowego produkcji.

Fizyk stwierdzi, że możliwe jest uzyskanie jądra o Z = 79 z innego jądra poprzez odpowiednią zmianę liczby protonów i neutronów. Chemik doda, że otrzymane atomy po uzyskaniu stabilnej konfiguracji elektronowej będą chemicznie złotem. Ekonomista natomiast zapyta, czy energia, urządzenia, czas pracy, infrastruktura i wydajność procesu uzasadniają produkcję. Odpowiedź brzmi: nie.

Transmutacja może być triumfem nauki i jednocześnie porażką przedsiębiorstwa. Właśnie dlatego spełnienie marzenia alchemicznego ma strukturę dialektyczną. Alchemicy mylili się co do metody, ale nie co do fizycznej możliwości zasadniczej przemiany pierwiastków. Nowoczesna chemia miała rację, wykazując, że reakcje chemiczne nie dokonują takiej zmiany, lecz nie oznaczało to, że pierwiastki są absolutnie niezmienne. Fizyka jądrowa wskazała trzecią drogę: transmutacja jest realna, lecz zachodzi na poziomie materii całkowicie innym niż ten dostępny klasycznej alchemii.

Historycznie nie jest to proste zwycięstwo jednej strony dawnego sporu, lecz przebudowanie samego pytania. Alchemicy intuicyjnie przeczuwali aspekt, którego nie mogli formalnie wyrazić: że materia i energia są ze sobą głęboko związane. W procesach jądrowych niewielka różnica masy odpowiada bardzo dużej energii zgodnie z relacją $E=mc^2$. Nie oznacza to, że „materia zamienia się w energię” w potocznym sensie całkowitego znikania substancji; poprawniej jest powiedzieć, że masa jest jednym z przejawów energii układu, a bilans procesów jądrowych musi uwzględniać relację między masą spoczynkową składników, energią wiązania i energią kinetyczną produktów. To kolejny poziom korekty klasycznego obrazu Lavoisiera, który – przy całej swojej genialności – nie mógł znać relatywistycznego związku masy i energii. Nawet tutaj jednak prawo zachowania nie zostaje obalone, lecz uogólnione. W klasycznej chemii bilansujemy masę, ponieważ zmiany równoważnej masy związane z energią chemiczną są skrajnie małe. W fizyce jądrowej trzeba natomiast operować pełnym bilansem masy-energii.

Od zmysłowej obserwacji do łańcuchów inferencji

Mechanizm rozwoju wiedzy okazuje się kumulacyjny i korekcyjny zarazem: teoria późniejsza wyjaśnia, dlaczego wcześniejsza sprawdzała się w swoim zakresie, a jednocześnie wskazuje, gdzie

przestaje być dokładna. Podobną strukturę ma sama tabela okresowa w epoce fizyki jądrowej. Mendelejew konstruował system przede wszystkim dla pierwiastków występujących naturalnie lub możliwych do wyizolowania z dostępnych materiałów. XX wiek rozszerzył tabelę o pierwiastki syntetyczne, których jądra wytworzono w reakcjach jądrowych. Technet, promet, pierwiastki transuranowe oraz kolejne elementy superciężkie ujawniły, że układ okresowy nie jest wyłącznie katalogiem zastanego świata. Stał się również mapą przestrzeni materii, której fragmenty człowiek potrafi konstruować. Współczesny fizyk jądrowy i chemik pierwiastków superciężkich wykonują czynność, która byłaby dla alchemika niemal niewyobrażalnym spełnieniem jego programu: tworzą jądra pierwiastków, które w zwykłych warunkach nie występują na Ziemi w trwałych, makroskopowych ilościach.

Różnica polega na rygorze przewidywania i identyfikacji. Nowy pierwiastek nie zostaje uznany dlatego, że próbka przybrała niezwykłą barwę. Jego istnienie jest rekonstruowane z łańcuchów rozpadu, energii emitowanych cząstek, czasów życia oraz zgodności danych z oczekiwaniami fizyki jądrowej. Tutaj szczególnie wyraźnie widać, jak bardzo zmieniło się pojęcie obserwacji. Dawny alchemik patrzył na tygiel i widział zmianę barwy, stan skupienia, osad albo metaliczny połysk. Współczesny badacz superciężkich jąder często nie „widzi” nowego pierwiastka w żadnym potocznym sensie. Może otrzymać kilka atomów istniejących przez ułamki sekund i rozpoznać je wyłącznie poprzez produkty rozpadu. Obserwacja naukowa została więc oderwana od bezpośredniego świadectwa zmysłów i stała się wnioskowaniem z sygnałów aparatury. To niezwykle istotne epistemologicznie. Nauka nie stała się bardziej wiarygodna dlatego, że uczyniła wszystko widzialnym gołym okiem, lecz dlatego, że nauczyła się budować łańcuchy inferencji, w których każdy etap może być kontrolowany.

Detektor rejestruje energię i czas zdarzenia; teoria jądrowa wiąże je z określonym typem rozpadu; kolejne zdarzenia tworzą charakterystyczny łańcuch; niezależne zespoły próbują rezultat odtworzyć. Nie trzeba bezpośrednio widzieć atomu oganessonu, aby posiadać naukowe podstawy twierdzenia o jego wytworzeniu. Wraz z pierwiastkami superciężkimi powrócił wątek przypominający alchemiczne marzenia o stabilności. Fizycy przewidują obszary zwiększonej stabilności niektórych bardzo ciężkich jąder, popularnie określane jako „wyspa stabilności”. Nie chodzi oczywiście o nieśmiertelną materię, lecz o możliwość istnienia izotopów o czasach życia wyraźnie dłuższych niż sąsiednie jądra dzięki strukturze powłok jądrowych. Jest to przykład tego, jak dawne pragnienie znalezienia szczególnego stanu doskonałości materii zostaje zastąpione precyzyjnym pytaniem o konfigurację protonów i neutronów minimalizującą energetyczną niestabilność jądra.

Od mitycznego katalizatora do infrastruktury i funkcjonalnego pluralizmu

Ta historia pozwala spojrzeć na kamień filozoficzny z innej perspektywy. Z dzisiejszego punktu widzenia nie istnieje uniwersalna substancja zdolna katalizować dowolną transmutację metali. Istnieją natomiast urządzenia i procesy realizujące funkcję, którą dawniej przypisywano mitycznemu katalizatorowi: reaktory jądrowe i akceleratory cząstek potrafią zmieniać skład jąder. Współczesnym "kamieniem filozoficznym" nie jest zatem materiał, lecz infrastruktura – kombinacja teorii, energii, aparatury, detektorów i matematyki. To zmiana w samym rozumieniu potęgi technologicznej.

Alchemia często lokalizowała niezwykłą sprawczość w szczególnej substancji: eliksirze, proszku projekcyjnym czy kamieniu filozoficznym. Nauka nowoczesna sytuuje ją znacznie częściej w systemie wiedzy i urządzeń. Nie potrzebujemy jednego cudownego materiału, jeśli potrafimy kontrolować energię, pola, wiązki cząstek, ciśnienie, temperaturę oraz strukturę reagentów. Moc przestaje być ukryta w tajemniczym przedmiocie; zostaje rozproszona pomiędzy teorią, procedurą i technologią. Przemiana ta ma także wymiar polityczny. Dworski alchemik mógł prowadzić eksperymenty z pomocą kilku asystentów i patrona.

Fizyka jądrowa wymagała natomiast infrastruktury państwowej: reaktorów, akceleratorów, kopalń uranu, laboratoriów, systemów bezpieczeństwa i ogromnych budżetów. Produkcja wiedzy o najgłębszym poziomie materii stała się przykładem **big science**. Wiedza, która niegdyś była tajemnicą jednostki, została zinstytucjonalizowana w organizacjach zatrudniających setki lub tysiące specjalistów. Władza nad materią uległa przez to kolejnemu przekształceniu. Alchemiczny sekret mógł zwiększać znaczenie pojedynczego adepta wobec księcia; fizyka jądrowa zwiększyła znaczenie całych państw. Kontrola technologii rozszczepienia i wzbogacania materiałów rozszczepialnych stała się elementem geopolitycznej potęgi. Dawne połączenie alchemii z żądzą władzy, obecne w temacie omawianej książki, nie zniknęło – zmieniła się jedynie skala. Materia nadal pozostaje narzędziem politycznym, lecz zamiast obietnicy królewskiego złota pojawiła się infrastruktura zdolna przekształcić równowagę sił między mocarstwami.

Jednocześnie energia jądrowa ukazała pozytywny wymiar tej samej wiedzy. Reakcje jądrowe znalazły zastosowanie w energetyce, medycynie nuklearnej, diagnostyce, terapii nowotworów, datowaniu materiałów, analizie śladowej oraz badaniach struktury materii. Izotopy promieniotwórcze stały się znacznikami umożliwiającymi śledzenie procesów biologicznych i chemicznych. Transmutacja, która przez stulecia była marzeniem o złocie, stała się narzędziem służącym badaniu metabolizmu czy niszczeniu komórek nowotworowych. Tak dokonuje się jedna z

najgłębszych zmian aksjologicznych w historii alchemii: wartość transformacji materii zostaje oddzielona od wartości wytworzonego kruszcu. Najcenniejszym produktem reakcji jądrowej nie musi być materiał drogi rynkowo, lecz izotop diagnostyczny o krótkim okresie półtrwania, którego wartość wynika właśnie z kontrolowanej nietrwałości. Alchemiczna idea doskonałości często utożsamiała wartość ze stabilnością; medycyna nuklearna pokazuje sytuację odwrotną – to przewidywalny rozpad może stanowić pożądaną funkcję. Jest to jedna z wielkich intelektualnych lekcji chemii i fizyki materiałów. Nie istnieje absolutna hierarchia substancji, w której złoto byłoby z natury "doskonalsze" od żelaza, węgla czy technetu.

Wartość materiału zależy od problemu, który chcemy rozwiązać. Miedź może być cenniejsza od złota tam, gdzie decydują właściwości przewodzące i koszt; krzem stał się fundamentem mikroelektroniki; lit ma kluczowe znaczenie dla technologii elektrochemicznych; radioizotop o czasie życia liczonym w minutach bywa idealnym narzędziem diagnostycznym właśnie dlatego, że szybko zanika. Nowoczesna nauka zastąpiła więc alchemiczną hierarchię doskonałości funkcjonalnym pluralizmem materiałów. Nie pyta już, który metal jest metafizycznie najdoskonalszy, lecz jakie własności są potrzebne w danym zastosowaniu i z jakiej struktury materialnej one wynikają. Ta zmiana jest istotniejsza niż sam fakt porzucenia kamienia filozoficznego, ponieważ oznacza odejście od normatywnej ontologii substancji na rzecz analizy relacji między strukturą a funkcją. Z tej perspektywy złoto przestaje być zwieńczeniem drabiny bytów, a staje się jednym ze 118 obecnie nazwanych pierwiastków o określonej liczbie atomowej i charakterystycznych własnościach fizykochemicznych. Jego odporność na utlenianie czy kowalność czynią go niezwykle użytecznym, ale nie czynią "doskonalszym" w sensie naukowym. W tablicy okresowej nie istnieje kolumna świętości ani rząd metafizycznej doskonałości.

Istnieją za to układy elektronowe, energie jonizacji, elektroujemności i szeregi reaktywności. Jednocześnie układ okresowy oraz fizyka jądrowa ujawniły coś, co być może przewyższa wyobraźnię alchemiczną: materia nie jest przypadkowym zbiorem substancji, lecz hierarchicznym systemem regularności. Z właściwości oddziaływań elementarnych wyłania się struktura jąder; z niej i mechaniki kwantowej elektronów – atomy; z ich konfiguracji powstają właściwości chemiczne; z organizacji atomów – cząsteczki; a z układów molekularnych – życie. Nie znaleziono jednego kamienia filozoficznego, lecz coś bardziej zdumiewającego: warstwową architekturę natury.

Nauka jako precyzyjne przepisanie alchemicznego marzenia

Właśnie dlatego triumf nauki nad alchemią nie powinien być przedstawiany jako zwycięstwo trzeźwości nad fantazją. Był raczej zwycięstwem lepszej fantazji - wyobraźni kontrolowanej przez pomiar. Rutherford musiał wyobrazić sobie jądro, którego nie widział. Soddy musiał zaakceptować przemianę pierwiastków, której wcześniejsza chemia nie dopuszczała. Chadwick musiał uznać istnienie neutralnej cząstki w jądrze. Fizycy jądrowi projektują dziś struktury istniejące przez ułamki sekundy.

Różnica względem alchemii nie polega na braku odwagi spekulacyjnej, lecz na stworzeniu systemu, który potrafi bezlitośnie selekcjonować spekulacje. Alchemia odegrała w tej historii rolę nie dlatego, że jej teorie były poprawne, lecz ponieważ przez stulecia podtrzymywała pytanie o plastyczność materii i kształtowała kulturę praktycznej manipulacji substancjami. Chemia nowożytna nauczyła się te manipulacje ważyć i klasyfikować. Atomizm nadał im dyskretną strukturę, elektrochemia ujawniła znaczenie ładunku i elektronów, a układ okresowy wykazał systemowość pierwiastków. Fizyka jądrowa dotarła wreszcie do miejsca, w którym pierwiastek rzeczywiście może przestać być sobą.

Alchemicy byli zatem zarazem daleko od prawdy i zadziwiająco blisko właściwego pytania. Myśleli, że można przekształcać metale, nie wiedząc, że wymaga to zmiany struktury jądra. Podejrzewali jedność materii, lecz nie znali wspólnej budowy atomowej. Pragnęli uniwersalnej zasady przemiany, nie mogąc przewidzieć praw zachowania, oddziaływań jądrowych, energii wiązania ani kwantowej struktury materii. W historii nauki zdarza się jednak, że błędna odpowiedź zawiera pytanie wystarczająco głębokie, by przeżyć całe epoki. Prawdziwe zwycięstwo nowoczesności polegało więc nie na wyśmianiu alchemicznego marzenia, lecz na jego precyzyjnym przepisaniu.

Pytanie „Czy ołów może stać się złotem?” zostało przeformułowane: jakie reakcje jądrowe mogą przekształcić jądra o liczbie atomowej 82 w jądra o liczbie atomowej 79, jakie izotopy powstaną, jaka będzie ich stabilność, jaki jest przekrój czynny procesu, jaka energia jest wymagana, jakie będą produkty uboczne i ile będzie kosztowało otrzymanie jednostki produktu? W jednym zdaniu zawarto całą różnicę między marzeniem a nauką: nauka nie zabrała człowiekowi marzenia o transmutacji; zmusiła marzenie do podania mechanizmu, bilansu i ceny.

Właśnie ta cena otwiera kolejny etap opowieści. Kiedy wiedza o materii zaczęła umożliwiać realne przekształcanie świata na skalę przemysłową, problem chemii przestał być wyłącznie kwestią poznania, a stał się problemem odpowiedzialności. Pigment może pięknie barwić ścianę i

jednocześnie zatruwać ludzi arsenem. Metal może budować maszynę i kumulować się w organizmie. Substancja może leczyć przy jednej dawce i zabijać przy innej. Energia jądrowa może zasilać miasta albo je niszczyć.

Chemia, która spełniła część dawnych marzeń o panowaniu nad materią, będzie musiała nauczyć się czegoś, czego alchemia nie potrafiła systematycznie zbudować: nauki o konsekwencjach własnej skuteczności. Jeśli historię alchemii można odczytać jako dzieje ludzkiego pragnienia skutecznego oddziaływania na materię, to historia chemii nowoczesnej wprowadza problem, którego wcześniejsze pokolenia nie potrafiły sformułować z dostateczną precyzją: co dzieje się wtedy, gdy technologia rzeczywiście zaczyna działać bardzo dobrze, lecz człowiek nie rozumie jeszcze wszystkich konsekwencji jej działania?

Pytanie to nie jest etycznym dodatkiem doklejonym do zakończonej historii odkryć; należy do samego rdzenia rozwoju chemii. W wielu dziedzinach cywilizacja nauczyła się wytwarzać i rozpowszechniać substancje wcześniej, niż mierzyć ich toksyczność, trwałość środowiskową, bioakumulację czy konsekwencje ekspozycji zawodowej. Autor książki przywołuje tu wymowne przykłady takiej asymetrii: związki arsenu używane jako pigmenty, azbest ceniony za odporność cieplną czy metale ciężkie obecne w rzemiośle i medycynie.

Dzieje chemii można zatem czytać jako historię trzech następujących po sobie kompetencji. Pierwszą było osiągnięcie skutku: odkrycie, że substancja barwi, konserwuje lub leczy. Drugą stanowiło rozpoznanie mechanizmu: zrozumienie, dlaczego substancja działa i z czym reaguje. Trzecia, historycznie najpóźniejsza, polega na systemowym przewidywaniu skutków ubocznych i odległych konsekwencji stosowania technologii. Można znać technicznie skuteczny pigment, nie wiedząc, jak jego składniki oddziałują na organizm; można znać doskonały materiał izolacyjny, nie rozumiejąc kancerogennego znaczenia jego włókien. W tym miejscu nauka o materii zaczyna wymagać nauki o ekspozycji.

Rozdźwięk między funkcjonalnością materiału a jego bezpieczeństwem

Autor książki przywołuje zieleń arsenową związaną z Carlem Wilhelmem Scheelem jako przykład barwnika otwierającego problem toksyczności syntetycznych produktów. W perspektywie historycznej XIX wiek przyniósł cały świat intensywnie barwionych pigmentów, których atrakcyjność wizualna wyprzedzała kulturę bezpieczeństwa chemicznego. Zieleń Scheelego — miedziowo-arsenowy pigment wprowadzony pod koniec XVIII wieku — oraz późniejsza zieleń

szwajnfurcka należały do barwników cenionych za intensywność i wykorzystywanych w tkaninach, tapetach, farbach oraz przedmiotach codziennego użytku. Problem polegał na tym, że chemiczna skuteczność pigmentu była zarazem jego toksyczną właściwością: arsen nie przestawał oddziaływać biologicznie tylko dlatego, że został włączony do towaru estetycznego. To przykład niezwykle ważnego przesunięcia pojęciowego.

Dla producenta podstawową własnością barwnika jest kolor, światłotrwałość, koszt i możliwość związania z podłożem. Dla toksykologa ten sam materiał posiada inne relewantne cechy: formę chemiczną arsenu, dostępność biologiczną, możliwość uwalniania pyłu, drogę ekspozycji i dawkę. Jedna substancja nie ma zatem jednego "znaczenia" — zależy ono od relacji z określonym układem.

Pigment może być technicznie dobry i biologicznie niebezpieczny. To rozróżnienie stanowi fundament nowoczesnej oceny ryzyka, ponieważ oddziela funkcjonalność materiału od bezpieczeństwa jego użycia. Historia arsenu pokazuje zarazem, jak zawodna bywa prosta opozycja między "naturalnym" a "sztucznym". Arsen występuje naturalnie w skorupie ziemskiej, lecz jego pochodzenie w żadnym stopniu nie gwarantuje bezpieczeństwa. Podobnie rtęć, ołów, kadm czy związki niklu występują w środowisku naturalnym, a mimo to określone formy i dawki prowadzą do poważnych skutków biologicznych. Nowoczesna toksykologia musiała więc wykroczyć poza kulturowe intuicje, w których "naturalne" kojarzono z łagodnością, a "chemiczne" z zagrożeniem. Z perspektywy naukowej wszystkie substancje są chemiczne; o bezpieczeństwie decydują ich właściwości, ekspozycja oraz kontekst biologiczny. Ten sam problem dotyczy azbestu, którego niezwykłą odporność na ogień autor książki ilustruje legendami o niepalnych tkaninach. Mineralogicznie azbest nie jest jedną substancją, lecz nazwą grupy naturalnych minerałów krzemianowych tworzących włókniste struktury.

Ich wysoka odporność cieplna i właściwości izolacyjne uczyniły z nich przez stulecia materiał fascynujący, a w epoce industrialnej — niezwykle użyteczny gospodarczo. Ta sama włóknistość, która dawała przewagę techniczną, okazała się jednak źródłem ryzyka zdrowotnego: respirabilne włókna mogą docierać głęboko do układu oddechowego i pozostawać w tkankach, prowadząc m.in. do włóknienia oraz nowotworów. W przypadku azbestu doskonale widać opóźnienie pomiędzy odkryciem użyteczności a rozpoznaniem kosztu biologicznego. Własność materialna jest natychmiast widoczna: tkanina albo płyta nie pali się w warunkach, w których zwykłe włókno organiczne ulega zniszczeniu.

Skutek zdrowotny może ujawnić się dopiero po dziesięcioleciach. Epistemologia bezpieczeństwa musi więc radzić sobie z asymetrią czasu. Technologia zostaje nagrodzona za korzyść obserwowaną dzisiaj, podczas gdy koszt może zostać ujawniony po wielu latach, często obciążając inne osoby niż te, które odnosiły korzyść ekonomiczną.

Od analizy substancji do biografii materii i cyklu życia

Problem czasowego oddzielenia przyczyny od skutku jest jednym z najtrudniejszych zagadnień w toksykologii i epidemiologii środowiskowej. Ostre zatrucie stosunkowo łatwo powiązać z ekspozycją, gdyż efekt następuje szybko po kontakcie. Znacznie trudniejsze stają się przypadki chorób o długiej latencji, przewlekłego narażenia na niewielkie dawki czy wieloczynnikowych skutków biologicznych. Wymagają one nie anegdoty pojedynczego pacjenta, lecz danych populacyjnych, porównania grup, rekonstrukcji ekspozycji, modeli dawka-odpowiedź oraz kontroli czynników zakłócających. Narodziny nowoczesnej chemii bezpieczeństwa wymusiły zatem połączenie chemii z medycyną, statystyką i epidemiologią, co stanowi jakościowo nowy etap interdyscyplinarności.

Alchemik pytał, co stanie się z substancją w piecu. Toksykolog pyta, co stanie się z organizmem po kontakcie z produktem reakcji. Epidemiolog bada, czy częstość choroby rośnie w narażonej populacji. Chemik analityczny sprawdza, jaka ilość substancji znalazła się w powietrzu, wodzie lub tkance, a fizjolog analizuje mechanizm uszkodzenia komórki. Prawnik i regulator muszą następnie rozstrzygnąć, jaki poziom ekspozycji jest dopuszczalny i jak rozdzielić odpowiedzialność.

Wiedza o materii przechodzi w ten sposób z poziomu laboratorium do całego systemu instytucjonalnego. Dzieje alchemii przygotowały grunt pod ten problem w sposób niezamierzony; poszukiwacze eliksirów i lekarze stosujący preparaty mineralne wielokrotnie doświadczali, że substancja silnie oddziałująca na organizm może równocześnie leczyć i szkodzić. Paracelsowska intuicja zależności skutku od dawki była zatem jednym z pierwszych kroków ku rozróżnieniu samej substancji od ekspozycji. Autor książki nadaje tej zasadzie centralne miejsce w historii przejścia od iatrochemii do toksykologii.

Nowoczesna wiedza poszła jednak znacznie dalej: kluczowa jest nie tylko wielkość pojedynczej dawki, lecz także czas narażenia, częstość, droga kontaktu, sposób metabolizowania związku, kumulacja oraz indywidualna podatność organizmu. Ołów stanowi tutaj przypadek niemal modelowy. Jego plastyczność, niska temperatura topnienia, odporność na korozję i łatwość obróbki czyniły go niezwykle użytecznym materiałem przez tysiąclecia – od rur i naczyń, przez pigmenty i kosmetyki, aż po akumulatory, farby i dodatki do paliw w epoce przemysłowej. Jednocześnie ołów nie pełni żadnej znanej korzystnej funkcji biologicznej u człowieka, natomiast może niszczyć układ nerwowy, krwiotwórczy oraz nerki. Szczególna podatność rozwijającego się układu nerwowego dzieci czyni problem ekspozycji jeszcze poważniejszym.

W historii ołowiu ukryty jest ważny paradoks technologiczny: materiał może być doskonały mechanicznie dla konkretnego zadania i jednocześnie nieodpowiedni dla otoczenia biologicznego.

Inżynieria i toksykologia optymalizują bowiem inne funkcje celu. Jeśli projektant uwzględnia jedynie trwałość, formowalność i koszt, może stworzyć rozwiązanie świetne technicznie, lecz szkodliwe zdrowotnie. Dopiero kultura projektowania systemowego wymaga jednoczesnego uwzględniania całego cyklu życia materiału: pozyskania surowca, produkcji, użytkowania, emisji, recyklingu i odpadu. To przesunięcie od substancji do cyklu życia substancji jest jednym z największych osiągnięć współczesnego myślenia chemicznego.

Dawna receptura kończyła się w chwili otrzymania pożądanego produktu. Nowoczesna ocena materiału musi pytać również o to, co dzieje się później: czy produkt uwalnia składniki? Jak ulega degradacji? Co powstaje przy spalaniu? Czy związek gromadzi się w tkankach i czy produkt rozpadu jest bardziej toksyczny niż substancja początkowa? Jak zachowuje się odpad po dziesięciu, stu czy tysiącu lat? Chemia zaczyna tym samym obejmować nie tylko reakcję, ale biografię materii. Właśnie ten sposób myślenia ukazuje intelektualną różnicę między chemią klasyczną a środowiskową.

W laboratoryjnej kolbie można kontrolować temperaturę, pH, ilość reagentów i czas reakcji. W środowisku substancja trafia do układu otwartego, w którym styka się z wodą, powietrzem, osadami, mikroorganizmami, światłem i setkami innych związków. Może ulegać fotolizie, hydrolizie, utlenieniu, redukcji, adsorpcji, transportowi i bioakumulacji. Produkt wprowadzony do środowiska nie zachowuje się więc jak obiekt odłożony na półkę – staje się uczestnikiem sieci przemian.

Można w tym miejscu dostrzec interesujący powrót do jednej z intuicji alchemii. Alchemicy myśleli o materii procesualnie: substancja dojrzewała, zmieniała się i przechodziła przez kolejne stadia. Nowoczesna chemia środowiskowa również traktuje substancję jako uczestnika sekwencji transformacji, choć bez metafizycznej kategorii doskonalenia. Molekuła emitowana przez fabrykę może zostać utleniona w atmosferze, przekształcona fotochemicznie, zdeponowana na glebie, zaadsorbowana przez materię organiczną i włączona do łańcucha troficznego. Różnica polega na tym, że każdy etap można dziś opisać mechanizmem, szybkością reakcji i bilansem masy.

Rewolucja przemysłowa zwielokrotniła znaczenie tego problemu, zmieniając przede wszystkim skalę. Alchemik mógł zatruć siebie, patrona albo najbliższe otoczenie; fabryka chemiczna może zmienić skład powietrza, rzeki lub gleby na obszarze zamieszkiwanym przez tysiące ludzi. Zagrożenie nie musi zatem wynikać z pojawienia się całkowicie nowej substancji, lecz może być rezultatem produkowania znanej substancji w ilości o kilka rzędów wielkości większej niż wcześniej. Toksyczność i wpływ środowiskowy są funkcją nie tylko jakości chemicznej, ale również skali przepływów materialnych. Ten punkt ma kluczowe znaczenie ekonomiczne.

Ekonomiczne koszty i emergentna natura chemii przemysłowej

Produkcja przemysłowa opiera się na korzyściach skali – wraz z rozwojem procesu jednostkowy koszt wytwarzania spada, co zwiększa dostępność produktu. Jednocześnie jednak tania produkcja często wiąże się ze wzrostem emisji i ilości odpadów. Rynek wycenia sam produkt, lecz nie zawsze uwzględnia szkody powstałe w wyniku jego wytworzenia lub użycia; ekonomia określa takie zjawiska mianem efektów zewnętrznych. Rozwój chemii przemysłowej wymusił zatem stworzenie mechanizmów instytucjonalnych, które próbują włączyć koszty zdrowotne i środowiskowe do rachunku przedsiębiorstwa poprzez standardy emisji, normy bezpieczeństwa pracy, obowiązki informacyjne czy odpowiedzialność za odpady.

Historia barwników syntetycznych obrazuje zarówno potęgę, jak i niejednoznaczność chemizacji przemysłu. XIX-wieczny postęp w chemii organicznej pozwolił na produkcję barwników o niespotykanej dotąd intensywności i różnorodności. Sektor ten stał się później jednym z głównych motorów rozwoju zaawansowanej syntezy organicznej, laboratoriów przemysłowych oraz farmacji. Poszukiwanie doskonalszych kolorów doprowadziło pośrednio do wypracowania kompetencji niezbędnych przy projektowaniu leków. Przykład ten jest istotny, gdyż ukazuje emergentny charakter technologii: gałąź przemysłu rozwijana dla potrzeb tekstylnych potrafi wytworzyć aparat poznawczy wykorzystany później w medycynie. Chemia przemysłowa zmieniła również samą relację między odkryciem a zastosowaniem. W świecie alchemii oba te procesy zazwyczaj jednoczyła jedna osoba – adept odkrywał recepturę i sam próbował ją wykorzystać.

Od rozproszonej odpowiedzialności do systemowej kontroli nad materią

W XIX i XX wieku nastąpił głęboki podział pracy między laboratorium akademickim, zakładowym, inżynierią procesu, produkcją, kontrolą jakości, toksykologią a regulacjami. Substancja mogła zostać odkryta przez jedną osobę, wydajnie zsyntetyzowana przez drugą i wytwarzana masowo przez trzecią instytucję, podczas gdy zagrożenia ujawnili epidemiolodzy dopiero dekady później. Odpowiedzialność stała się tym samym rozproszona, co rodzi poważny problem normatywny. Jeśli szkodliwy rezultat jest efektem działania całego systemu, nie zawsze można wskazać jednego „winnego chemika”. Projektant reagenta, właściciel fabryki, organ regulacyjny, konsument i pracodawca dysponują różną wiedzą oraz różnym zakresem kontroli. Nowoczesna etyka technologii musi zatem uwzględniać odpowiedzialność instytucjonalną, a nie wyłącznie indywidualną.

Jest to ogromna różnica wobec moralnego obrazu alchemika-oszusta, którego można było ukarać za konkretną fałszywą obietnicę. Dobrym przykładem tego problemu jest historia toksycznych ekspozycji zawodowych. Autor książki, opisując dawnych hutników, garbarzy i rzemieślników, przypomina, że chemia przez tysiąclecia była wiedzą ludzi pracujących fizycznie w otoczeniu intensywnych zapachów, dymów, pyłów i żrących materiałów. Nowoczesność zmieniła przede wszystkim stężenie, czas i skalę takiej ekspozycji.

Pracownik przemysłowy mógł przez wiele godzin dziennie wdychać pył tego samego materiału albo powtarzać tę samą operację przez dziesięciolecia. Wobec tego powstała potrzeba systematycznej higieny pracy oraz norm dopuszczalnej ekspozycji. Chemia pracy stała się nauką o granicach praktycznej użyteczności substancji. Nie wystarczy wiedzieć, że proces produkcyjny jest technologicznie możliwy; trzeba określić warunki, w których człowiek może go wykonywać bez nieakceptowalnego ryzyka. Wymaga to wentylacji, hermetyzacji, środków ochrony osobistej, monitoringu stężeń, procedur awaryjnych i substytucji niebezpiecznych materiałów.

Każde z tych rozwiązań jest konsekwencją paracelsowskiego odkrycia, że kluczowe znaczenie ma ekspozycja – zasada ta została jednak przekształcona z indywidualnego dogmatu farmakologicznego w architekturę organizacji pracy. Równie ważna jest sama koncepcja ryzyka. Zagrożenie i ryzyko nie są synonimami: zagrożenie opisuje potencjalną zdolność czynnika do spowodowania szkody, natomiast ryzyko uwzględnia także prawdopodobieństwo i warunki ekspozycji. Silnie toksyczna substancja szczelnie zamknięta w kontrolowanym układzie może wiązać się z mniejszym rzeczywistym ryzykiem niż umiarkowanie szkodliwa substancja, na którą człowiek jest narażony stale i powszechnie. To rozróżnienie jest jednym z najważniejszych osiągnięć nowoczesnej kultury bezpieczeństwa, gdyż pozwala wyjść poza myślenie magiczne: samo istnienie „chemikaliów” nie przesądza o tym, czy sytuacja jest niebezpieczna. Takie podejście wymaga również odróżnienia dawki zewnętrznej od wewnętrznej. Ilość substancji w otoczeniu nie musi być równa ilości docierającej do narządu docelowego. Liczy się wchłanianie przez płuca, przewód pokarmowy lub skórę, transport w organizmie, metabolizm, magazynowanie oraz wydalanie. Niektóre związki są metabolizowane do form mniej toksycznych, inne przeciwnie – dopiero bioaktywacja metaboliczna tworzy reaktywny metabolit odpowiedzialny za szkodę. Toksykologia przekształciła więc prostą zasadę „dawka czyni truciznę” w wielopoziomową naukę o losie substancji w organizmie.

W tym miejscu dawne alchemiczne zainteresowanie „oczyszczaniem” substancji otrzymuje odległy, lecz interesujący kontrapunkt. Alchemik mógł zakładać, że wielokrotna destylacja albo kalcynacja usuwa niedoskonałości materiału i doprowadza go ku wyższej postaci. Współczesny chemik procesowy oczyszcza związek z zupełnie innego powodu: niewielka domieszka może zmienić

reaktywność, toksyczność, właściwości materiału albo przebieg dalszej syntezy. Oczyszczenie przestało być kategorią ontologicznej doskonałości i stało się problemem analitycznie mierzalnej czystości.

To przesunięcie widać również w farmacji. W dawnym leku naturalnym mogło znajdować się wiele substancji o różnej aktywności biologicznej, a ich proporcje zależały od odmiany rośliny, gleby, momentu zbioru czy sposobu ekstrakcji. Nowoczesna chemia leków dąży natomiast do identyfikacji konkretnej substancji czynnej, ustalenia jej struktury, dawki, metabolizmu i wpływu na receptor lub szlak biologiczny. Nie zawsze oznacza to przewagę substancji syntetycznej nad naturalną; oznacza przede wszystkim przewagę kontroli składu nad nieokreślonym materiałem.

Rozwój farmakologii jest tym samym jednym z najbardziej bezpośrednich potomków iatrochemii. Paracelsowski program leczenia określonej choroby określoną substancją został przekształcony przez chemię organiczną, fizjologię, biochemię i farmakologię molekularną w precyzyjniejszą ideę interakcji lek-cel biologiczny. Eliksir uniwersalny ustąpił tysiącom wyspecjalizowanych cząsteczek. Medycyna odrzuciła jedno z największych alchemicznych marzeń – panaceum – nie dlatego, że chemia jest mniej skuteczna, lecz ponieważ okazała się bardziej świadoma biologicznej różnorodności mechanizmów chorób. Ta sama transformacja dotyczy pojęcia trucizny. Arsen nie jest „złym metalem", podobnie jak tlen nie jest z natury „dobry" tylko dlatego, że umożliwia oddychanie. Nadmiar tlenu również może prowadzić do toksyczności, m.in. poprzez zaburzenia równowagi oksydacyjno-redukcyjnej i powstawanie reaktywnych form tlenu. Chemia nowoczesna odchodzi zatem od moralizowania substancji. Atomy nie posiadają intencji; cząsteczki nie są dobre ani złe. Ich oddziaływania mogą być korzystne albo szkodliwe w określonym kontekście biologicznym i technologicznym.

Od lokalnej technologii do globalnych konsekwencji systemu

Szczególnie istotne jest to w przypadku ognia, od którego rozpoczęliśmy całą historię. Autor książki przedstawia kontrolę nad ogniem jako jeden z fundamentów rozwoju cywilizacji, przywołując jednocześnie współczesne eksperymenty nad gaszeniem płomienia falami akustycznymi lub polem elektrycznym. Ogień sam w sobie nie jest ani błogosławieństwem, ani przekleństwem. To proces utleniania wyzwalający energię z szybkością zdolną podtrzymać reakcję. Ta sama reakcja umożliwiła gotowanie, ogrzewanie, rozwój metalurgii i przemysłu, ale stała się też źródłem pożarów, wojen i spalania ogromnych ilości paliw kopalnych. W długiej perspektywie historycznej spalanie okazało się jedną z najważniejszych dróg łączących chemię z geologią i klimatem. Węgiel,

ropa i gaz ziemny zawierają węgiel zakumulowany w procesach geologicznych w ogromnych skalach czasu. Industrialne spalanie przenosi go do atmosfery – między innymi w postaci dwutlenku węgla – w tempie nieporównywalnym z naturalnym rytmem jego magazynowania. Reakcja chemiczna, którą człowiek opanował tysiące lat temu, została przez skalę przemysłową przekształcona w proces geofizycznie istotny. Jest to jeden z najdobitniejszych przykładów różnicy między lokalną poprawnością technologii a globalną konsekwencją systemu.

Każdy pojedynczy silnik spalający paliwo może działać dokładnie zgodnie z projektem. Problem pojawia się w sumie miliardów takich procesów. Nie istnieje jedna wadliwa reakcja, którą należałoby naprawić; problemem jest skala strumienia materii i energii. Chemia środowiskowa oraz nauka o systemie Ziemi musiały zatem nauczyć się myśleć o konsekwencjach zagregowanych. Z punktu widzenia historii cywilizacji jest to sytuacja bez precedensu. Człowiek, który zaczynał jako zwierzę wykorzystujące lokalne ognisko, stał się gatunkiem zdolnym wpływać na globalne cykle biogeochemiczne. Stephen Pyne zaproponował kategorię "Pyrocenu" jako sposób myślenia o epoce, w której ludzkie zarządzanie ogniem i spalaniem staje się siłą kształtującą planetę; autor książki przywołuje ten motyw w refleksji nad ogniem. Nawet bez traktowania "Pyrocenu" jako formalnej jednostki stratygraficznej, metafora ta trafnie odsłania ciągłość między najstarszym narzędziem chemicznym człowieka a problemami współczesnej cywilizacji przemysłowej. W ten sposób największym sukcesem chemii stała się również jej największa próba odpowiedzialności.

Gdy reakcję przeprowadza jedna osoba w pojedynczym tyglu, konsekwencje są ograniczone. Gdy ta sama logika procesowa zostanie przeskalowana do milionów ton surowca, chemia staje się częścią geopolityki, ekologii, zdrowia publicznego i sprawiedliwości społecznej. Pojawia się pytanie: kto odnosi korzyści z produktu, a kto ponosi koszt emisji? Kto posiada wiedzę o ryzyku, kto decyduje o dopuszczalnym poziomie narażenia i czy przyszłe pokolenia powinny być uwzględniane w rachunku współczesnej korzyści? W tym miejscu historia chemii styka się z ekonomią instytucjonalną.

Problem zanieczyszczenia środowiska można analizować jako kwestię kosztu zewnętrznego: producent i konsument zawierają transakcję, lecz część kosztów zostaje przeniesiona na osobę trzecią, która nie uczestniczyła w umowie. Chemia dostarcza informacji o strumieniach substancji, toksykologia o skutkach biologicznych, ekonomia o bodźcach, a prawo o mechanizmach internalizacji tych kosztów.

Od kontroli konsekwencji do projektowania bezpiecznych systemów

Żadna z tych dyscyplin nie wystarcza samodzielnie. Właśnie dlatego dojrzała refleksja nad substancją staje się interdyscyplinarna nie z powodu intelektualnej mody, lecz z konieczności wyjaśniającej. Inny wymiar problemu ujawniła chemia polimerów. XX wiek nauczył człowieka projektować materiały o właściwościach niewystępujących w naturze w takiej konfiguracji: lekkie, trwałe, odporne chemicznie, łatwe do formowania i tanie. Tworzywa sztuczne są pod wieloma względami triumfem chemicznej racjonalności. Umożliwiły stworzenie sterylnego wyposażenia medycznego, izolacji elektrycznej, lekkich konstrukcji, konserwacji żywności, technologii komunikacyjnych oraz niezliczonych produktów codziennego użytku. Jednocześnie ta sama trwałość, która jest zaletą podczas eksploatacji, staje się problemem w momencie wyrzucenia produktu. Powraca więc zasadnicza reguła: **własność korzystna w jednej fazie życia materiału może być niekorzystna w innej**.

Odporność na biodegradację zwiększa trwałość produktu, ale jednocześnie przedłuża życie odpadu. Mała masa tworzywa obniża koszt transportu, lecz ułatwia rozprzestrzenianie się fragmentów w środowisku. Chemia materiałowa osiągnęła ogromną skuteczność w projektowaniu funkcji użytkowej; współczesna zielona chemia próbuje natomiast poszerzyć funkcję celu o energochłonność, toksyczność reagentów, możliwość recyklingu i los produktu po zakończeniu jego użytkowania. Zielona chemia stanowi z tego punktu widzenia interesujący etap historyczny, ponieważ przesuwa punkt ciężkości bezpieczeństwa w procesie projektowania. Klasyczny model często zakładał: najpierw opracować skuteczny produkt, a dopiero potem ograniczać szkody. Nowy ideał dąży do przewidywania ryzyka już na poziomie doboru substratów, reakcji i właściwości produktu. Jest to przejście od kontroli konsekwencji do projektowania systemów mniej niebezpiecznych. W najpełniejszej postaci oznacza ono dążenie do atomowej ekonomii syntezy, minimalizacji odpadów, stosowania bezpieczniejszych rozpuszczalników, redukcji energochłonności oraz projektowania produktów ulegających po użyciu kontrolowanej degradacji.

Tutaj domyka się wielowiekowa droga od alchemika do inżyniera chemicznego. Alchemik pytał: jak otrzymać pożądaną substancję? Chemik klasyczny: jaki jest mechanizm reakcji i jej stechiometria? Inżynier procesu: jak wytwarzać produkt wydajnie i stabilnie na dużą skalę? Toksykolog: przy jakiej ekspozycji staje się on niebezpieczny? Chemik środowiskowy: co stanie się z nim po emisji? Zielona chemia dodaje jeszcze jedno pytanie: czy można **zaprojektować cały proces tak, aby problem w ogóle był mniejszy**? Ten rozwój pozwala lepiej zrozumieć, czym naprawdę różni się dojrzała

chemia od alchemii. Nie chodzi jedynie o poprawniejsze teorie atomu, lecz o radykalne rozszerzenie zakresu odpowiedzialności poznawczej.

Nie wystarcza już samo uzyskanie rezultatu. Trzeba zrozumieć mechanizm, zmierzyć wydajność, rozpoznać produkty uboczne, scharakteryzować ryzyko, ocenić wpływ środowiskowy i określić granice bezpiecznego zastosowania. Każdy z tych poziomów jest kolejnym sposobem ograniczania niewiedzy wokół naszej sprawczości. Należy jednak wystrzegać się łatwego moralnego triumfalizmu.

Od władzy nad materią do odpowiedzialności za sprawczość

Współczesna nauka nie dysponuje kompletną wiedzą o konsekwencjach stosowania wszystkich substancji, podobnie jak dawni chemicy nie znali pełni zagrożeń związanych ze związkami arsenu czy ołowiu. Rynek chemiczny obejmuje ogromną liczbę związków, mieszanin i materiałów, a pełne przebadanie wszystkich możliwych kombinacji ekspozycji jest praktycznie niemożliwe. Toksykologia operuje zatem w warunkach niepewności. Choć dysponuje modelami, testami, badaniami epidemiologicznymi i zasadą ostrożności, nie może dostarczyć absolutnej gwarancji bezpieczeństwa każdej technologii.

To ograniczenie ma wymiar filozoficzny. Alchemik często cierpiał na nadmiar pewności przy niedostatku danych. Współczesna kultura naukowa powinna dążyć do odwrotności: zwiększać ilość danych, pozostawiając jednak miejsce na niepewność tam, gdzie dowody nie pozwalają na rozstrzygnięcie. Dojrzała wiedza nie polega na deklarowaniu wszechwiedzy, lecz na rozróżnianiu między tym, co ustalono, tym, co prawdopodobne, tym, co pozostaje nieznane oraz tym, czego obecnymi metodami nie da się jeszcze wiarygodnie określić. Z tej perspektywy można ponownie spojrzeć na starożytną skargę dotyczącą jakości miedzi, którą autor książki przywołuje w tekście. Nanni, skarżący się Ea-nāṣirowi na materiał niskiej jakości, reprezentuje wczesną wersję problemu, który dojrzała chemia przekształciła w kontrolę jakości, certyfikację i analizę składu. Przez tysiąclecia zmieniły się instrumenty, lecz pozostało to samo zasadnicze pytanie o zaufanie społeczne: czy materiał, który otrzymuję, naprawdę posiada właściwości, które zostały mi obiecane? Nowoczesna chemia odpowiada na nie za pomocą spektroskopii, chromatografii, spektrometrii mas, analizy pierwiastkowej, dyfrakcji rentgenowskiej i całej rodziny metod instrumentalnych.

Sprzedawca nie powinien być już jedynym źródłem prawdy o towarze, gdyż skład można zbadać niezależnie. Rozwój chemii analitycznej jest zatem również rozwojem infrastruktury zaufania

gospodarczego. Właściwości materiału stają się w coraz większym stopniu weryfikowalne, niezależnie od deklaracji producenta. Spektrometria prowadzi nas zarazem do niezwykłego filozoficznego finału tej drogi. Człowiek nauczył się ustalać skład materii na podstawie jej oddziaływania ze światłem i promieniowaniem elektromagnetycznym. Fraunhofer, Bunsen, Kirchhoff i kolejne pokolenia badaczy odkryli, że pierwiastki pozostawiają charakterystyczne sygnatury widmowe. Dzięki temu identyfikacja chemiczna przestała wymagać wyłącznie bezpośredniego pobrania próbki – możemy ustalać skład odległych gwiazd, analizując światło docierające do Ziemi. Jest w tym pewna niezwykła ironia historyczna.

Astrologiczne i alchemiczne tradycje przez stulecia łączyły metale z planetami za pomocą systemu symbolicznych korespondencji: złoto ze Słońcem, srebro z Księżycem, żelazo z Marsem, rtęć z Merkurym. Nowoczesna spektroskopia odrzuciła ten system, tworząc coś znacznie bardziej niezwykłego: rzeczywistą możliwość ustalenia, jakie pierwiastki znajdują się w Słońcu i innych gwiazdach. Kosmos oraz materia ziemska zostały połączone nie astrologiczną analogią, lecz wspólnymi prawami fizyki atomowej. Co więcej, współczesna astrofizyka wyjaśniła pochodzenie samych pierwiastków. Wodór i większość helu wiążą się z wczesnym Wszechświatem; kolejne pierwiastki powstają w procesach nukleosyntezy gwiazdowej oraz w gwałtownych zdarzeniach, takich jak eksplozje supernowych czy zderzenia gwiazd neutronowych. Złoto, którego alchemicy poszukiwali w tyglu, nie jest więc tylko minerałem wydobywanym z ziemi – jego jądra są produktem ekstremalnych procesów kosmicznych. Ta wiedza zmienia filozoficzną perspektywę całej historii: alchemik chciał nauczyć się tego, co natura robi z metalami.

Współczesna fizyka dowiodła, że natura dokonuje transmutacji na niewyobrażalną skalę wewnątrz gwiazd. Pierwiastki układu okresowego nie są statycznym katalogiem wiecznych cegieł świata, lecz rezultatami historii kosmosu. Atom żelaza w ludzkiej krwi, wapnia w kości czy złota w biżuterii posiada historię starszą niż Ziemia. W ten sposób chemia powraca do pytania, które alchemia stawiała w języku metafory: jaka jest relacja między człowiekiem a kosmosem?

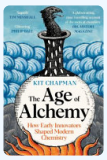
Odpowiedź nie wymaga hermetycznej maksymy „jak na górze, tak na dole” – wystarcza fizyka nukleosyntezy. Materia organizmu i materia gwiazd należą do jednego porządku przyrody, ponieważ w obu środowiskach obowiązują te same pierwiastki i prawa fizyczne. Kosmiczne pokrewieństwo człowieka nie jest figurą poetycką; jest konsekwencją historii materii. Tym samym długi proces – od alchemicznego „czernienia”, przez metalurgię, farmację, gazy, Lavoisiera, Daltona, elektrolizę, Mendelejewa i Moseleya, aż po fizykę jądrową – doprowadza do zmiany głębszej niż sama umiejętność przekształcania substancji. Człowiek nauczył się umieszczać własną materialność w historii Wszechświata. Materia przestała być wyłącznie przedmiotem manipulacji, a stała się nośnikiem historii. Największy paradoks pozostaje jednak nierozwiązany: im więcej wiemy

o materii, tym potężniej potrafimy ją zmieniać; im potężniej ją zmieniamy, tym większej wiedzy o konsekwencjach potrzebujemy. Nauka zwiększa więc jednocześnie sprawczość i zakres odpowiedzialności. Kamień filozoficzny miał być ostatecznym rozwiązaniem: jedną substancją dającą bogactwo i doskonałość. Chemia odkryła coś znacznie mniej komfortowego – nie istnieje pojedynczy sekret zwalniający człowieka z myślenia, a każda nowa zdolność technologiczna otwiera kolejny poziom pytań.

Historia alchemii wyrastała z pragnienia władzy nad materią. Historia dojrzałej chemii prowadzi ku konieczności nauczenia się władzy nad własną władzą nad materią. I dopiero na tym poziomie nauka o substancjach staje się zarazem nauką o granicach odpowiedzialnej sprawczości człowieka.

> Im głębiej przenikamy w strukturę materii i im potężniejsze narzędzia transmutacji w niej odnajdujemy, tym bardziej stajemy się zakładnikami własnej skuteczności. Prawdziwym wyzwaniem nie jest już pytanie o to, czy potrafimy zmienić ołów w złoto, lecz czy potrafimy okiełznać władzę nad materią, by nie stała się ona narzędziem naszej własnej destrukcji. Być może jedyną prawdziwą transmutacją, jakiej musimy dokonać, jest przemiana technologicznej pychy w dojrzałą odpowiedzialność za świat, który potrafimy dowolnie przebudować.

Inspiracje

[1] 

"The Age of Alchemy" Kit Chapman

Profile Books(GB) | ISBN: 9781805221166

Dr **Kit Chapman** jest brytyjskim dziennikarzem naukowym, autorem i historykiem nauki. Uzyskał tytuł magistra farmacji na Uniwersytecie w Bradford oraz doktorat z historii i filozofii nauki na Uniwersytecie w Sunderland. Chapman był wcześniej redaktorem działu komentarzy w czasopiśmie „Chemistry World", wydawanym przez Królewskie Towarzystwo Chemiczne, i publikował w takich prestiżowych publikacjach jak „Nature", „New Scientist" i „The Daily Telegraph". Obecnie wykłada na Uniwersytecie Falmouth, a jego badania i działalność komunikacyjna koncentrują się na historii chemii, fizyce jądrowej i rozwoju technologii. Chapman znany jest z przystępnych narracji na temat złożonych osiągnięć naukowych, jest autorem uznanych książek non-fiction o syntezie pierwiastków i inżynierii sportów motorowych.

*Dr **Kit Chapman** is a British science journalist, author, and historian of science. He earned a master's degree in pharmacy from the University of Bradford and a PhD in the history and philosophy of science from the University of Sunderland. Chapman formerly served as the comment editor for Chemistry World, published by the Royal Society of Chemistry, and has contributed to major outlets such as Nature, New Scientist, and The Daily Telegraph. Currently a lecturer at Falmouth University, his research and communication work focus on the history of chemistry, nuclear physics, and technological development. Chapman is known for accessible narratives on complex scientific advancements, authoring acclaimed non-fiction books on element synthesis and motorsport engineering.*

Falmouth University

Literatura uzupełniająca

Książki

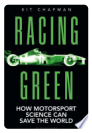
Książki autora i dzieła przywołane w tekście:



[1] **"Superheavy"**

Kit Chapman

2019 | Bloomsbury Publishing | ISBN: 9781472953919



[2] "Racing Green"

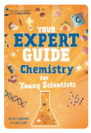
Kit Chapman

2022 | Bloomsbury Publishing | ISBN: 9781472982186

[3] "Die Zeit Der Alchemisten"

Kit Chapman

2026 | ISBN: 9783351042950



[4] "Your Expert Guide: Chemistry for Young Scientists"

Dr Chapman, Kit Chapman

2026 | Wayland | ISBN: 9781526327383



[5] "Chemistry for Young Scientists"

Dr Kit Chapman

2025 | Hachette UK | ISBN: 9781526327376



[6] "The Periodic Table for Kids"

Dr Kit Chapman

2025 | Hachette UK | ISBN: 9781526327345

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



[7] "Notice sur les travaux scientifiques de Pierre Curie"

Pierre Curie



[8] "Radio-activity"

Ernest Rutherford

2004 | Courier Corporation | ISBN: 9780486495859

[9] "Pioneer Research on the Atom. Rutherford and Soddy ... The Life Story of Frederick Soddy. [With Plates, Including Portraits.]."

Muriel Howorth, Ernest Rutherford, Frederick Soddy

1958



[10] "Atomic Transmutation"

Frederick Soddy, Muriel Howorth

1953



[11] **"Science and Life"**

Frederick Soddy

1920



[12] **"Radiations From Radioactive Substances"**

Ernest Rutherford, James Chadwick, C D Ellis

2026 | Tradd Street Press | ISBN: 9781025937977



[13] **"Applied Radiochemistry"**

Otto Hahn

[14] **"Elements of the Universe"**

Glenn T. Seaborg



[15] **"Modern Alchemy"**

Mark Morrisson

2007 | Oxford University Press | ISBN: 9780190294496



[16] **"The Newer Alchemy"**

Ernest Rutherford

1937

Artykuły naukowe

Prace autorów przywoływanych w tekście:

[1] **"Sur une nouvelle substance fortement radioactive, contenue dans la pechblende"**

Pierre Curie

1898

Źródło

[2] **"Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu'elles emettent"**

Pierre Curie, Marie Curie, Société française de physique, Congrès international de physique

1900 | Gauthier-Villars eBooks | DOI: 10.5479/sil.322777.39088000898254

Źródło

[3] "On Symmetry in Physical Phenomena, Symmetry of an Electric Field and of a Magnetic Field"

Pierre Curie, Andrzej Ziółkowski

2024 | Studia Historiae Scientiarum | DOI: 10.4467/2543702xshs.24.002.19575

Źródło

[4] "LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom"

E. Rutherford

1911 | The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science | DOI: 10.1080/14786440508637080

Źródło

[5] "Radiations from Radioactive Substances"

E. Rutherford, James Chadwick, Charles Drummond Ellis, M. L. Pool

1952 | American Journal of Physics | DOI: 10.1119/1.1933285

Źródło

[6] "An electrical method of counting the number of α-particles from radio-active substances"

E. Rutherford, Hans Geiger

1908 | Proceedings of the Royal Society of London Series A Containing Papers of a Mathematical and Physical Character | DOI: 10.1098/rspa.1908.0065

Źródło

[7] "The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom"

E. Rutherford

2011 | The Philosophical Magazine A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics | DOI: 10.1080/14786435.2011.617037

Źródło

[8] "XLI. The cause and nature of radioactivity .—Part I"

E. Rutherford, Frederick Soddy

1902 | The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science | DOI: 10.1080/14786440209462856

Źródło

[9] "LX. Radioactive Change"

E. Rutherford, Frederick Soddy

1903 | The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science | DOI: 10.1080/14786440309462960

Źródło

[10] "LXXXIV.—The radioactivity of thorium compounds. II. The cause and nature of radioactivity"

E. Rutherford, Frederick Soddy

1902 | Journal of the Chemical Society Transactions | DOI: 10.1039/ct9028100837

Źródło

[11] "A Nuclear Photo-effect: Disintegration of the Diplon by -Rays"

James Chadwick, M. Goldhaber

1934 | Nature | DOI: 10.1038/134237a0

Źródło

[12] "The nuclear photoelectric effect"

James Chadwick, M. Goldhaber

1935 | Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences | DOI: 10.1098/rspa.1935.0162

Źródło

[13] "Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction"

Lise Meitner, Otto Robert Frisch

1939 | Nature | DOI: 10.1038/143239a0

Źródło

[14] "Products of the Fission of the Uranium Nucleus"

Lise Meitner, Otto Robert Frisch

1939 | Nature | DOI: 10.1038/143471a0

Źródło

[15] "Fission and Nuclear Shell Model"

Lise Meitner

1950 | Nature | DOI: 10.1038/165561a0

Źródło

[16] **"Progress in Nuclear Physics"**

Otto Robert Frisch, Kamal K. Seth

1958 | Physics Today | DOI: 10.1063/1.3062696

Źródło

[17] **"Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment"**

Otto Robert Frisch

1939 | Nature | DOI: 10.1038/143276a0

Źródło

[18] **"The Chemistry of the Actinide Elements"**

Joseph J Katz, Glenn T. Seaborg, Lester R. Morss

1986 | Springer eBooks | DOI: 10.1007/978-94-009-3155-8

Źródło

[19] **"Nuclear systematics of the heavy elements—II Lifetimes for alpha, beta and spontaneous fission decay"**

V. E. Viola, Glenn T. Seaborg

1966 | Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry | DOI: 10.1016/0022-1902(66)80412-8

Źródło

[20] **"The nuclear properties of the heavy elements"**

Earl K. Hyde, Glenn T. Seaborg, Isadore Perlman

1964 | CERN Document Server (European Organization for Nuclear Research)

Źródło

[21] **"Nuclear Transformations in the New High Energy Ranges"**

GLENN T. SEABORG

1994 | World Scientific Series in 20th Century Chemistry | DOI: 10.1142/9789812795953_0085

Źródło

[22] **"Chemical observations and experiments on air and fire"**

Carl Wilhelm Scheele, Torbern Bergman, Richard Kirwan, Joseph Priestley

1973 | Hispana

Źródło

[23] "Carl Wilhelm Scheele : his work and life"

Carl Wilhelm Scheele, Uno Boklund

1968

Źródło

[24] "The chemical essays of Charles-William Scheele. Translated from the transactions of the Academy of Sciences at Stockholm, with additions"

Carl Wilhelm Scheele

1901 | Scott, Greenwood eBooks | DOI: 10.5962/bhl.title.18670

Źródło

[25] "Mémoires de chymie. Premiere partie : tirés des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Stockholm"

Carl Wilhelm Scheele

1785 | Hispana

Źródło

[26] "Between Two Fires"

Stephen J. Pyne

2015 | University of Arizona Press eBooks | DOI: 10.2307/j.ctt183gxsr

Źródło

[27] "Life in the Pyrocene"

Stephen Pyne

2024 | Scientific American | DOI: 10.1038/scientificamerican0524-22

Źródło

Artykuły naukowe autora:

[28] "SUPERHEAVY"

Kit Chapman

2019 | Bloomsbury Sigma eBooks | DOI: 10.5040/9781472974754

Źródło

[29] "The transuranic elements and the island of stability"

Kit Chapman

2020 | Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences | DOI: 10.1098/rsta.2019.0535

Źródło

[30] "The oganesson odyssey"

Kit Chapman

2018 | Nature Chemistry | DOI: 10.1038/s41557-018-0098-4

Źródło

[31] "The first synthetic element"

Kit Chapman

2019 | Nature | DOI: 10.1038/d41586-019-00236-4

Źródło

[32] "Ei-ichi Negishi (1935–2021)"

Kit Chapman

2021 | Nature | DOI: 10.1038/d41586-021-01828-9

Źródło

[33] "Die Zeit der Alchemisten wie die moderne Chemie erfunden wurde"

Kit Chapman, Hans-Peter Remmler, Aufbau-Verlag

2026

Źródło

[34] "Alchemy: discredited pseudoscience or chemistry's worthy ancestor?"

Kit Chapman

2025 | Nature | DOI: 10.1038/d41586-025-03309-9

Źródło

[35] "The beams at the edge of physics"

Kit Chapman

2021 | Physics World | DOI: 10.1088/2058-7058/34/02/28

Źródło

[36] "Element Discovery and the Birth of the Atomic Age"

Kit Chapman

2021 | Perspectives on the history of chemistry | DOI: 10.1007/978-3-030-67910-1_13

Źródło

[37] "Elements of the Future"

Kit Chapman

2019 | Chemistry International | DOI: 10.1515/ci-2019-0406

Źródło

Treść tworzy Fundacja Dobre Państwo.
Redaguje i publikuje APA ONE, autorski system redakcyjny Fundacji oparty na AI.
APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: 40205685-120f-49f0-b1bc-412d4993c846