

Andrzej Koleżyński

## Emergencja w fizyce ciała stałego: nowa moda czy konieczność?

Istnieją dwa podstawowe, wzajemnie sprzeczne, impulsy ludzkiego umysłu – jeden, by upraszczać rzeczy do ich istotnych składowych, oraz drugi – aby patrząc przez pryzmat elementów składowych, widzieć dalej idące konsekwencje.

Od dawna trwa wynikający stąd spór w nauce, dotyczący możliwości wyjaśniania otaczającego nas świata przy pomocy podejścia redukcyjnego, polegającego na rozkładzie złożonego problemu na prostsze składowe i opisanie jego własności poprzez własności elementów składowych.

Pojęcie własności emergentnych, czy też szerzej emergencji, zostało po raz pierwszy użyte w naukach biologicznych, celem umysłownienia prostego zdawałoby się faktu, oczywistego dla biologów, a prawie zupełnie niedostrzeganego, lub nie przyjmowanego do wiadomości przez fizyków: w świecie ożywionym istnieją własności organizmów złożonych, których nie można wyjaśnić przy pomocy ich redukcji do praw fizycznych. Podczas powstawania struktur złożonych, pojawiają się nowe własności, zupełnie nieprzewidywalne z własności elementów składowych - swoista wartość dodana. Innymi słowy, nie mamy do czynienia z procesem liniowym, gdzie poprzez proste sumowanie dochodzimy do końcowego wyniku, lecz raczej z procesem (procesami) nieliniowym, gdzie - jak pisał już Arystoteles<sup>1</sup> - „całość to więcej niż suma części”.

Przez długi czas pojęcia te funkcjonowały głównie w biologii i stopniowo były coraz powszechniej uznawane za prawdziwie opisujące problem, choć nie brakowało też naukowców wychowanych

---

<sup>1</sup> Arystoteles, *Metafizyka*, opr. K. Leśniak, BKF, PWN, Warszawa 1983.

w paradygmacie redukcjonizmu, którzy uważali, że niemożność wyjaśnienia danych własności struktur przyrody ożywionej w gruncie rzeczy nie wynika z wadliwości podejścia redukcyjnego, lecz z niewłaściwego opisu własności elementów składowych albo (biorąc pod uwagę stopień złożoności problemu) niewystarczających mocy obliczeniowych by problem rozwiązać dokładnie.

Z czasem pojawiało się jednak coraz więcej głosów, że również w fizyce - dyscyplinie, w której podejście redukcyjne odniosło niewyobrażalne wręcz sukcesy, istnieją problemy, których to podejście rozwiązać nie pozwala.

Po raz pierwszy, w latach 60-70 XX wieku, w pracach I. Prigogine'a<sup>2</sup> i w sławnym eseju P.W. Andersona<sup>3</sup> *More is different* pojawiło się swoiste przesłanie, które można streścić następująco: nauki fizyczne mówią nam, że całość, będąca czymś więcej niż sumą części, nie jest po prostu użyteczną koncepcją, a rzeczywistym zjawiskiem fizycznym. Natura jest rządzona nie tylko przez reguły świata mikroskopowego, ale również przez potężne i ogólne zasady organizacji.

Większość z nas tak przyzwyczaiła się do występowania różnych stanów materii i przejść fazowych pomiędzy nimi (parowania, kondensacji, krystalizacji, topnienia, itp.), że zwykle całkowicie bezrefleksyjnie ten stan rzeczy akceptuje. Szkolna edukacja, naznaczona paradygmatem redukcyjnego podejścia do analizy problemu, w połączeniu z bardzo dużą skutecznością teorii fizycznych w objaśnianiu zjawisk fizycznych, prowadzi do przekonania, że w zasadzie w otaczającym nas makroskopowym świecie przyrody nieożywionej, nie ma specjalnych tajemnic, a jeśli czegoś nie wiemy, to zwykle wskutek braku możliwości obliczeniowych, finansowych lub po prostu ze względu na małą wartość poznawczą nierozwiązanego problemu, a nie dlatego, że mamy do czynienia ze skutkiem wystę-

---

<sup>2</sup> Prigogine, I., *Thermodynamics of Irreversible Processes*, Second Edition, Wiley 1961; *Structure, Dissipation and Life. Theoretical Physics and Biology*, Versailles 1967; North-Holland Publ. Company, Amsterdam 1969.

<sup>3</sup> Anderson P.W., „More is different”, *Science*, 177(4047) (1972), 393-396.

powania zupełnie innych, jakościowo różnych praw w przyrodzie, i stąd zjawiskiem niemożliwym do wyjaśnienia przy pomocy obecnie istniejących teorii fizycznych. Ten stan rzeczy wydaje się powoli docierać do świadomości naukowców, o czym świadczy coraz większa ilość publikacji, opracowań i książek, poświęconych tematyce własności emergentnych.

Można podać bardzo wiele przykładów zjawisk i własności emergentnych, występujących w przyrodzie nieożywionej: istnienie faz jako takich, przemiany fazowe, własności sprężyste, optyczne, ferroelektryczne, itp. Oprócz tych typowych, powszechnie wokół nas spotykanych zjawisk emergentnych, istnieją również bardziej osobliwe, np. występujące w bardzo niskich temperaturach zjawiska nadprzewodnictwa, czy nadciekłości.

Każdy taki kolektywny stan materii jest jednoznacznie identyfikowalny poprzez jedno, lub więcej zachowań (własności), które są dokładne dla dużych skupisk materii, a niedokładne lub nieistniejące dla małych. Ponieważ zachowanie takie jest ściśle określone, to nie może zmieniać się w sposób ciągły, podczas zmiany zewnętrznych warunków, takich jak ciśnienie czy temperatura, ale może zmienić się wyłącznie w sposób nieciągły w postaci przejścia fazowego. Jednoznacznym znakiem zjawiska kolektywnego jest więc ostre przejście fazowe, będące wszakże tylko skutkiem występowania zjawisk kolektywnych.

W fizyce materii skondensowanej występuje szereg zachowań emergentnych, już nie tak dla nas naturalnych, ze względu na swoje kwantowe źródło. Zachowania te domagają się od nas wyjaśnienia, gdyż metody redukcyjnego wyjaśniania zawodzą całkowicie – można za ich pomocą coś wyjaśnić *ex post*, ale nie da się tego przewidzieć *a priori*. Mowa tu o takich efektach, jak kwantowy całkowity i cząstkowy efekt Halla, nadprzewodnictwo, nadciekłość, efekty Meissnera i Josephsona, powstawanie i rozchodzenie się dźwięku w kryształach, kwazicząstki (fonony, eniony, dziury w półprzewodnikach) itp.

Jako efekt występowania zachowań emergentnych można traktować również fundamentalne stałe fizyczne, np. prędkość światła, stałą Rydberga, stałą Josephsona, ładunek elektronu itp<sup>4</sup>. Wartości tych stałych zostały eksperymentalnie zmierzone z wielką (często do kilkunastu miejsc po przecinku) precyzją. Mamy tu do czynienia ze swoistym dualnym spojrzeniem na te wielkości – z jednej strony traktujemy je jako niezależne, obiektywnie istniejące „stałe fundamentalne”, nie pytając skąd się wzięły i dlaczego mają akurat takie wartości, a z drugiej jako wielkości, których stałość jest efektem zachodzących zjawisk kolektywnych, zgodnie z zasadą organizacji i być może w przyszłości uda nam się poznać prawa prowadzące do ich zaistnienia w takiej właśnie postaci. Przykładowo, stała Plancka  $h$ , fundamentalna stała w opisie mikroświata, czy ładunek elektronu  $e$ , mimo, że są wielkościami związanymi z podejściem wysoce redukcjonistycznym, najdokładniej wyznaczane są przy wykorzystaniu zjawisk kolektywnych, jako kombinacja stałych Josephsona i von Klitzinga – stałych, które można zmierzyć korzystając z urządzenia do chłodzenia układu do bardzo niskich temperatur i woltomierza<sup>5</sup>. Fakt ten, gdy został stwierdzony po raz pierwszy, stanowił ogromne zaskoczenie dla naukowców, ponieważ próbki, dla których prowadzono pomiary stałych Josephsona i von Klitzinga były wysoce niedoskonałe<sup>6</sup>. Chemiczne zanieczyszczenia, defekty atomowe, granice międzyziarnowe i powierzchnie o różnej morfologii występowały w dużej ilości i defekty te powinny były uniemożliwić pomiary z tak dużą precyzją. Fakt, że tak się nie stało, wskazuje na istnienie fundamentalnej zasady samoorganizacji, prowadzącej do nieistotności w/w niedoskonałości próbek dla wystąpienia badanych własności – efektu Josephsona, czy kwantowego efektu Halla.

---

<sup>4</sup> Laughlin R., *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down*, Basic Books, New York 2005.

<sup>5</sup> Okun, L. B., „Fundamental units: physics and metrology”, arXiv:physics/0310069v1, 15 Oct 2003.

<sup>6</sup> Laughlin R., *A Different Universe ...*, *op. cit.*

Podobnie, można by przypuszczać, że ładunek elementarny, wielkość uważana za niepodzielną, elementarną i addytywną, jest przykładem skrajnie redukcjonistycznie funkcjonującej wielkości fizycznej. Okazało się jednak, że ma on paradoksalnie sens tylko w kontekście kolektywnym (np. próżni, modyfikującej ładunek w taki sam sposób, jak modyfikuje długość fali cząstek – jest to przykład tzw. symetrii cechowania).

Powyższy przykład wskazuje na własność przyrody, powszechnie spotykaną, a dość często niedocenianą należycie. Własność ta, nazywana stabilnością strukturalną (Thom<sup>7</sup>, Heller<sup>8</sup>), może być uznana za przykład działania zasady organizacji, gdzie kolektywne oddziaływania między elementami składowymi układu prowadzą do różnicowania opisujących go czynników, na istotne i nieistotne. Typowym przykładem są przejścia fazowe: powyżej określonego stopnia złożoności układu, przy którym pojawiają się własności kolektywne, nie ma znaczenia dalsze jego powiększanie (np. wzrost wielkości kryształu), skład atmosfery, w której przejście zachodzi (jednakże np. dla kryształów niestechiometrycznych skład atmosfery jest często bardzo ważny i silnie wpływa na ich własności). Czynnikiem istotnie wpływającymi na zachowanie układu, są natomiast skład chemiczny, ciśnienie, czy temperatura. Innym, prostym przykładem, są uniwersalne własności uporządkowania ciał stałych, niewrażliwość sztywności materiału na zaburzenia położeń atomów itp. Własności elastyczne ciał stałych, opisane prawem Hooke'a, ukrywają przed nami istnienie i rodzaj atomów, ponieważ są konsekwencją uporządkowania i będą jakościowo identyczne, jeśli zastąpimy jeden rodzaj atomów innym. To samo dotyczy każdego innego prawa przyrody. Natura sama z siebie (poprzez prawa niewrażliwe na destabilizujące zewnętrzne zakłócenia) zapewnia

---

<sup>7</sup> Thom R., *Structural Stability and Morphogenesis*, Addison Wesley Publishing Company; wyd. 2, popr. 1989.

<sup>8</sup> Heller M., *Początek jest wszędzie. Nowa hipoteza pochodzenia Wszechświata*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2002.

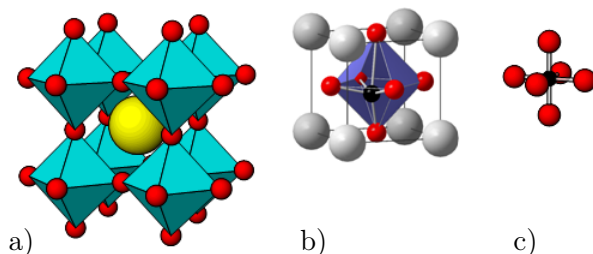
układom ochronę, stabilność i powtarzalność, umożliwiając nam tym samym jakiegokolwiek sensowne poznanie.

Przedstawione krótkie omówienie zjawisk emergentnych w fizyce pokazuje, że emergencja jest czymś powszechnie spotykanym wokół nas, pozostając zarazem wyzwaniem dla naukowców próbujących zrozumieć, jak z prostych zachowań, opartych na elementarnych oddziaływaniach, mogą powstawać złożone, kolektywne zachowania oraz dlaczego natura wydaje się tworzyć hierarchię poziomów takich własności. Nie daje nam jednak odpowiedzi na postawione w tytule pytanie – czy podejście emergentne jest następnym niezbędnym krokiem w rozwoju teorii fizycznych otaczającego nas świata, czy też jest to tylko chwilowa moda, a podejście redukcyjne pozostanie wystarczającym do opisu przyrody. Spróbujmy więc zastanowić się nad odpowiedzią na postawione pytanie, rozpatrując modelowy niejako, praktyczny problem teoretyczny, pozostający wciąż bez jednoznacznego rozwiązania. W fizyce ciała stałego, w opisie własności materii, zależnie od typu własności opisywanych, przechodzimy od skali makro (np. własności sprężyste, optyczne, magnetyczne kryształów), poprzez pojęcia charakteryzujące wiązania chemiczne (opisywane np. dwucentrowymi krzywymi potencjału elektrostatycznego – klasycznym przykładem takiego potencjału jest krzywa Morse’a, punktami krytycznymi gęstości elektronowej, lub bardziej jakościowo przy pomocy elektroujemności atomów), własności atomowe (orbitale, struktura elektronowa atomów) do własności rdzeni atomowych.

Własności różnych poziomów opisujemy korzystając z przybliżonych metod, opartych na mechanice kwantowej i równaniu Schrödingera, lub coraz częściej na teorii funkcjonału gęstości i równaniach Kohna-Shama, albo też – szczególnie w przypadku własności makroskopowych – stosujemy półempiryczne zależności, w których brak bezpośredniego odwołania do własności atomowych.

Rozpatrzmy teraz praktyczny przykład – kryształów o strukturze typu perowskitu, powszechnie wykorzystywanych w inżynierii

materiałowej, jako materiały dla elektroniki o bardzo dobrych własnościach dielektrycznych. Ze względu na zastosowania i własności, kryształy te są intensywnie badane w poszukiwaniu nowych materiałów o poprawionych, coraz lepiej dostosowanych do potrzeb przemysłu własnościach. Stąd znajomość związków ich budowy wewnętrznej z własnościami – zarówno na poziomie atomowym jak i mikrostruktury – jest niezwykle ważna. Typowym przykładem materiału o budowie perowskitu jest kryształ tytanianu baru<sup>9</sup>  $\text{BaTiO}_3$ , którego budowę przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1: Kryształ  $\text{BaTiO}_3$  o strukturze perowskitu a) oktaedry utworzone przez atomy tlenu z kationem Ti w środku, połączone narożami (kation Ba znajduje się w lukach pomiędzy oktaedrami); b) komórka elementarna fazy kubicznej, o najwyższej symetrii – kationy Ba w narożach sześcianu, kation Ti w środku, a atomy tlenu na środkach ścian; c) oktaedr  $\text{TiO}_6$ .

Tytanian baru był pierwszym z całej klasy materiałem o interesujących dla elektroniki własnościach, dlatego istnieje bardzo wiele wyników badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych tego kryształu. Wciąż jednak pozostaje nierozwiązany do końca problem źródeł ferroelektrycznego przejścia fazowego w tytanianie baru – już stosunkowo niewielka zmiana składu, zamiana części atomów baru np. atomami ołowiu, powoduje likwidację tego przej-

<sup>9</sup>Koleżyński A., Tkacz-Śmiech K., „From molecular picture to the band structure of cubic and tetragonal barium titanate”, *Ferroelectrics*, 314 (2005), 123-134.

ścia – materiał przestaje wykazywać własności ferroelektryczne<sup>10</sup>. Rozwiązanie tego problemu jest niezmiernie ważne ze względów praktycznych, pozwoli bowiem na znacznie bardziej efektywne poszukiwanie materiałów o optymalnym z punktu widzenia własności składzie chemicznym.

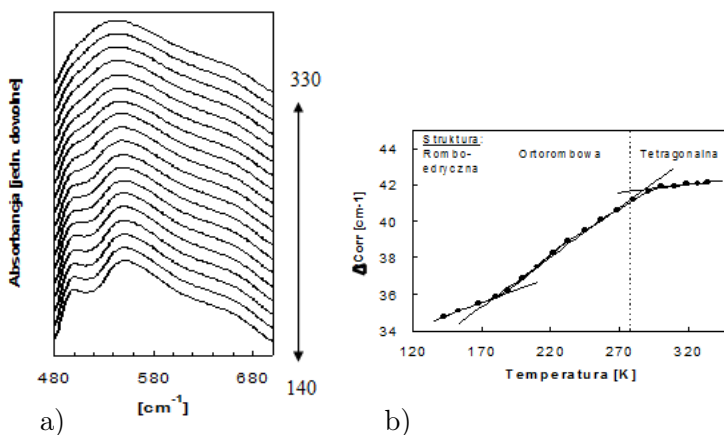
Obecnie dominują dwa wyjaśnienia procesu przejścia fazowego w tytanianie baru, od struktury regularnej (paraelektrycznej), do struktury tetragonalnej (ferroelektrycznej). Pierwsze zakłada stopniową zmianę położeń atomowych wraz z obniżaniem temperatury i przebudowę struktury prowadzącą do pojawienia się momentu dipolowego i własności ferroelektrycznych. Drugie natomiast zakłada, że mamy do czynienia z przejściem fazowym typu porządek-nieporządek, w którym stabilną strukturą jest struktura o najniższej symetrii (trygonalna), a pozostałe struktury (ortorombowa, tetragonalna i kubiczna) są skutkiem zmian uporządkowania komórek elementarnych o symetrii tetragonalnej tak, że wypadkowa struktura krystalograficzna wykazuje wyższą symetrię, aż do całkowitego nieuporządkowania pojedynczych komórek elementarnych, objawiającego się wypadkową symetrią kubiczną. Istnieje szereg eksperymentów, dostarczających argumenty dla obu wyjaśnień tego zjawiska, przez co wciąż nie jest możliwe jednoznaczne stwierdzenie jego prawdziwej natury. Metody redukcyjne w tym przypadku zawodzą, w związku z czym podejmuje się próby znalezienia innych, bardziej efektywnych w tym przypadku metod, umożliwiających rozwiązanie tego problemu. Naturalnymi kandydatami są jak łatwo przewidzieć różnorodne metody, oparte na podejściu nieredukcyjnym. Przykładowo, spektroskopowe badania w podczerwieni, wykonane dla różnych temperatur pokazują stopniowy zanik rozszczepienia  $A_1-E$  (charakterystycznego dla struktury tetragonalnej) i pojawienie się drgania  $F_{1u}$ , charakterystycznego dla struktury kubicznej. Takie zachowanie układu można wytłumaczyć zarówno przy pomocy przejścia fazowego z przemieszczeniem,

---

<sup>10</sup>Tkacz-Śmiech K., Koleżyński A., Ptak W.S., „Crystal-chemical aspects of phase transitions in barium titanate”, *Solid State Comm.*, 127 (2003), 557.



jak też typu porządek – nieporządek. Zastosowanie statystycznej metody autokorelacji do analizy tych widm, skłania jednak zdecydowanie do drugiego wyjaśnienia, nie dając wszakże całkowitego potwierdzenia<sup>11</sup>. Na rys. 3 widać wyraźną zmianę nachylenia krzywej, w okolicach temperatur odpowiadających przejściom fazowym.



Rys. 2: a) Widma w podczerwieni kryształu  $\text{BaTiO}_3$  dla temperatur 140-330K; b) analiza widm metodą autokorelacji

Nie wdając się w szczegóły techniczne metody, wystarczy powiedzieć, że metoda ta opiera się na statystycznej analizie widma jako całości, a wynikiem jej zastosowania do pojedynczego widma jest pojedyncza wartość liczbową,  $\Delta\text{Corr}$  (odpowiadająca jednemu punktowi na wykresie 2b), jednoznacznie powiązana ze stopniem nieuporządkowania struktury krystalicznej. Jest to więc metoda nieredukcyjna, odwołująca się do wypadkowych własności globalnych kryształu. Jak widać nieuporządkowanie rośnie wraz z temperaturą, a szybkość tego wzrostu zmienia się w pobliżu temperatur

<sup>11</sup>Tkacz-Śmiech K., Koleżyński A., Jastrzębski W., „Phase transitions in  $\text{BaTiO}_3$  from IR autocorrelation spectrum”, *Ferroelectrics*, 315 (2005), 73-81.

odpowiadających kolejnym przejściom fazowym do struktur o wyższej symetrii (zmiana nachylenia krzywych na wykresie).

Inną, nieredukcyjną metodą analizy własności kryształu jest topologiczna analiza gęstości elektronowej<sup>12</sup>. Całkowita gęstość elektronowa stanu podstawowego w kryształach i jej rozkład, zgodnie z twierdzeniem Hohenberga-Kohna, charakteryzuje wszystkie własności kryształu. Można ją wyliczyć za pomocą metod kwantowych, ale, co niesłychanie ważne, jest ona również mierzalna eksperymentalnie, co pozwala na weryfikację wyników obliczeń. Główna idea tej teorii opiera się na twierdzeniu mówiącym, że w celu otrzymania dobrze zdefiniowanych, odrębnych obszarów, które można przypisać do poszczególnych rdzeni atomowych i w ten sposób utożsamiać z atomami w kryształach, obszary te należy wydzielić za pomocą powierzchni, dla których gradient skalarnej gęstości elektronowej, pomnożony przez wektor normalny do powierzchni jest równy zeru ( $\nabla\rho \cdot \mathbf{n} = 0$ ), gdzie  $\mathbf{n}$  – wektor normalny do powierzchni, dla każdego punktu na powierzchni granicznej obszaru.

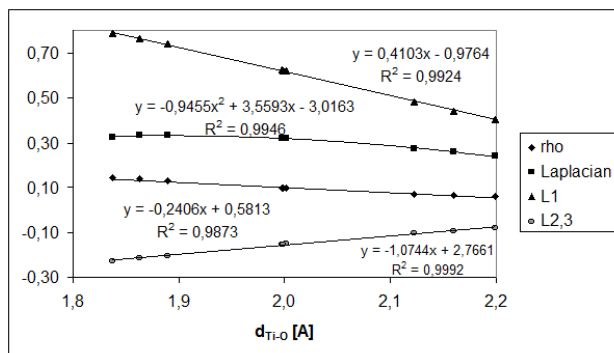
W wyniku takiego podziału przestrzeni fizycznej otrzymujemy wektorowe pole gradientu gęstości elektronowej  $\nabla\rho$ , w którym każda linia pola ma swój początek i koniec w jednym z punktów krytycznych, dla których spełniony jest warunek  $\nabla\rho = 0$ . W przestrzeni trójwymiarowej możliwe są następujące cztery rodzaje punktów krytycznych: maksima, minima oraz punkty siodłowe pierwszego i drugiego rodzaju:

- (3,-3) maksima w położeniach rdzeni atomowych
- (3,-1) punkt dla wiązania atomowego (ang. bond critical point – BCP)
- (3,+1) punkt dla pierścienia (ang. ring critical point)
- (3+3) minimum (ang. cage critical point)

---

<sup>12</sup>Koleżyński A., „Topologia gęstości elektronowej, a charakter wiązań chemicznych w krystalicznych ciałach stałych”, *Ceramika*, 91 (2005), 109-116.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki analizy topologicznej gęstości elektronowej w kryształach tytanianu baru i obliczone wartości macierzy Hessa i gęstości elektronowej dla punktów krytycznych wiązań BCP.



Rys. 3: Wykres zależności gęstości  $\rho(\mathbf{r})$ , laplasjanu  $\nabla^2\rho(\mathbf{r})$  oraz jego składowych w punkcie BCP od długości wiązań Ti-O w kryształach BaTiO<sub>3</sub> (fazy o strukturze regularnej, tetraedrycznej, ortorombowej i trygonalnej).

Łatwo zauważyć, że istnieje bardzo silna, prawie funkcyjna zależność pomiędzy odległościami między atomami, a wielkościami charakteryzującymi punkty krytyczne wiązań. Analogicznie silna zależność dotyczy również np. modułu sprężystości objętościowej i składowych tensora naprężeń, czy charakteru wiązań chemicznych w kryształach, co pozwala stwierdzić, że analiza własności topologicznych gęstości elektronowej w kryształach może być skutecznym narzędziem w wyjaśnianiu wielu zjawisk i własności makroskopowych krystalicznych ciał stałych.

Przedstawione powyżej przykłady pokazują, że tam gdzie metody redukcyjne nie dają jednoznacznej odpowiedzi (rodzaj przejścia fazowego, charakter wiązań, itp.), pomocne mogą być metody nieredukcyjne (w tym dwie zaprezentowane powyżej). Warto dodać, że metody nieredukcyjne są bardzo często stosowane i zwykle (szczególnie np. w inżynierii materiałowej, gdzie mamy do czy-

nienia ze złożonymi tworzywami i kompozytami) dostarczają nam bardzo wielu istotnych dla nas – jakościowych i ilościowych – informacji, trudnych lub niemożliwych obecnie do uzyskania za pomocą metod redukcyjnych.

Czy więc emergencja i metody nieredukcyjne to chwilowa moda albo swego rodzaju tymczasowe metody zastępcze, czy też jest to jednak konieczność, wynikająca z niezadowalającego charakteru metod redukcyjnych?

W fizyce i chemii ciała stałego i ogólnie w inżynierii materiałowej istnieje ogromna liczba układów, charakteryzujących się emergentnymi własnościami fizykochemicznymi, których wyjaśnienie za pomocą metod redukcyjnych jest czasem możliwe, ale niestety rutynowe przewidywanie *a priori* własności takich układów (niezmiernie ważna sprawa ze względu na projektowanie nowych technologii) jest wciąż odległym (czy w ogóle osiągalnym?) celem prac fizyków i chemików, zajmujących się własnościami faz skondensowanych. Metody obliczeniowe *ab initio* pozwalają w wielu przypadkach „odtworzyć” eksperymentalną charakterystykę badanych związków – nie dają jednak jasnej, jednoznacznej odpowiedzi, dlaczego mamy do czynienia akurat z takimi właśnie własnościami. Można przypuszczać, że potrzeby inżynierów dotyczące zaawansowanych materiałów, tzw. materiałów funkcjonalnych, wymuszą na naukowcach w najbliższej przyszłości konieczność głębszej analizy problemu emergencji w fazie skondensowanej i w ten sposób przybliżą ten cel – możliwość projektowania nowoczesnych materiałów do najróżniejszych dedykowanych zastosowań w technice.

Taki wniosek wydaje się być tym bardziej uprawniony, że fizycy i chemicy coraz więcej uwagi poświęcają zagadnieniom dotyczącym nieliniowych układów złożonych, w stanach stacjonarnych, dalekich od równowagi termodynamicznej, często na granicy tzw. samoorganizowanej krytyczności<sup>13</sup> (ang. SOC – self-organized

---

<sup>13</sup>Bak P., *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Copernicus, New York 1996.

criticality), spełniającym prawa potęgowe typu  $1/f^{14}$ , charakterystyczne dla układów emergentnych. Co więcej, pojawia się szereg propozycji matematycznego opisu własności takich układów, dzięki czemu następuje – wprawdzie wolny, ale konsekwentny – proces przechodzenia od opisów jakościowych do opisów ilościowych takich układów. Dodatkowo badania te bardzo mocno sugerują silnie nieredukcjonistyczny charakter odpowiednich praw i własności takich układów, dostarczając kolejnego argumentu przeciwko aplikowalności metod redukcyjnych do analizy własności układów złożonych, powszechnie występujących w przyrodzie zarówno nieożywionej, jak i ożywionej<sup>15</sup>.

A zatem, jaka powinna być odpowiedź na postawione w tytule pytanie? Osobiście jestem głęboko przekonany, że badanie własności emergentnych fazy skondensowanej, poprzez stosowanie metod nieredukcyjnych, włączając w to również wiele w chwili obecnej nieznanych, nie jest tylko chwilową modą, ale *koniecznym, następnym krokiem* w rozwoju teorii i metod badań w fizykochemii fazy skondensowanej.

## Bibliografia

1. Anderson P.W, „More is different”, *Science*, 177(4047) (1972), 393-396.
2. Arystoteles, *Metafizyka*, opr. K. Leśniak, BKF, PWN, Warszawa 1983.

---

<sup>14</sup> Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., „Self-organized criticality: an explanation of  $1/f$  noise”, *Phys. Rev. Letters*, 59 (1987), 381-384.

<sup>15</sup> Kauffman S., *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press 1995.

3. Bak P., *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Copernicus, New York 1996.
4. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., „Self-organized criticality: an explanation of 1 /f noise”, *Phys. Rev. Letters*, 59 (1987), 381-384.
5. Heller M., *Początek jest wszędzie. Nowa hipoteza pochodzenia Wszechświata*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2002.
6. Kauffman S., *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press 1995.
7. Koleżyński A., „Topologia gęstości elektronowej, a charakter wiązań chemicznych w krystalicznych ciałach stałych”, *Ceramika*, 91 (2005), 109-116.
8. Koleżyński A., Tkacz-Śmiech K., „From molecular picture to the band structure of cubic and tetragonal barium titanate”, *Ferroelectrics*, 314 (2005), 123-134.
9. Laughlin R., *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down*, Basic Books, New York, 2005.
10. Okun, L. B., „Fundamental units: physics and metrology”, arXiv:physics/0310069v1, 15 Oct 2003.
11. Prigogine, I., *Thermodynamics of Irreversible Processes* Second Edition, Wiley 1961.
12. Prigogine, I., *Structure, Dissipation and Life. Theoretical Physics and Biology*, Versailles 1967; North-Holland Publ. Company, Amsterdam 1969.
13. Thom R., *Structural Stability and Morphogenesis*, Addison Wesley Publishing Company; wyd. 2, popr. 1989.

14. Tkacz-Śmiech K., Koleżyński A., Jastrzębski W., „Phase transitions in BaTiO<sub>3</sub> from IR autocorrelation Spectrum”, *Ferroelectrics*, 315 (2005), 73-81.
15. Tkacz-Śmiech K., Koleżyński A., Ptak W.S., „Crystal-chemical aspects of phase transitions in barium titanate”, *Solid State Comm.*, 127 (2003), 557.