

## **Emergentność jako fundamentalna cecha opisu Przyrody, czyli pojawienie się nowych cech jakościowych na następnych etapach złożoności**

*Józef Spalek  
Instytut Fizyki UJ*

Jako student i doktorant często się zastanawiałem, czytając czy ucząc się nowego materiału, jak twórca jakiejś niebanalnej koncepcji fizycznej wpadł na nią? Moje zdziwienie czy niezrozumienie materiału było szczególnie silne, gdy koncepcja nie mieściła się w kontekście danej dziedziny. Zrozumienie dogłębne otoczki oryginalnego pomysłu naukowego jest także bardzo pożyteczne przy jego objaśnianiu studentom czy uczniom. Na przykład, jak uzasadnić, że układ wielocząstkowy w zadanych warunkach (np. równowagi termicznej) nagle spontanicznie zmienia swój stan, czy w ogóle symetrię wewnętrzną? Dlaczego gaz skrapla się w ściśle określonej temperaturze, a nie następuje stopniowe spowolnienie atomów przy obniżaniu temperatury, jakby to wynikało z elementarnej zasady ekwipartycji energii, że na każdy stopień swobody przypada energia szumu termicznego proporcjonalnego do temperatury  $T$ ? Oczywiście, zasadniczą rolę odgrywa tu oddziaływanie pomiędzy cząstkami, ale gwałtownej zmiany fazy układu nie da się zrozumieć wyłącznie na podstawie praw mechaniki. Wystąpienie gwałtownego przejścia fazowego (topnienia) jest więc *cechą emergentną* układu. Oczywiście zjawisko skroplenia da się zrozumieć poprzez wprowadzenie opisu termodynamicznego (np. zgadniętego równania van der Waalsa), ale w przypadku spontanicznej zmiany symetrii w kwantowych układach wielocząstkowych już nie jest to takie łatwe.

Te i podobne pytania zrozumiałem poprzez uzmysłowienie sobie tej cechy naszego opisu zwanej *emergentnością zjawisk i praw Przyrody*. Polega ona na tym, iż uważamy, że oprócz praw matematycznych, takich jak równania ruchu czy opis poprzez równania stanu, mamy jeszcze zasadnicze założenia jakościowe, które są równie ważne, jak prawa ilościowe, a czasami nawet ważniejsze. Te założenia są nie tylko dopełnieniem naszego opisu ilościowego, ale są wręcz nieodzowne dla stworzenia kompletnego obrazu czy kompletnej teorii. Można powiedzieć, że koncepcja atomu czy cząstek elementarnych jest pierwotną cechą emergentną Przyrody. Po przejściu do układu złożonego z bardzo dużej liczby cząstek pojawia się koncepcja spontanicznie złamanej symetrii i przejścia fazowego jako wystąpienia w takim praktycznie nieskończonym układzie istotnych osobliwości wielkości fizycznych, takich jak ciepło właściwe czy nawet moduł ściśliwości (w przypadku cieczy w pobliżu tzw. punktu krytycznego).



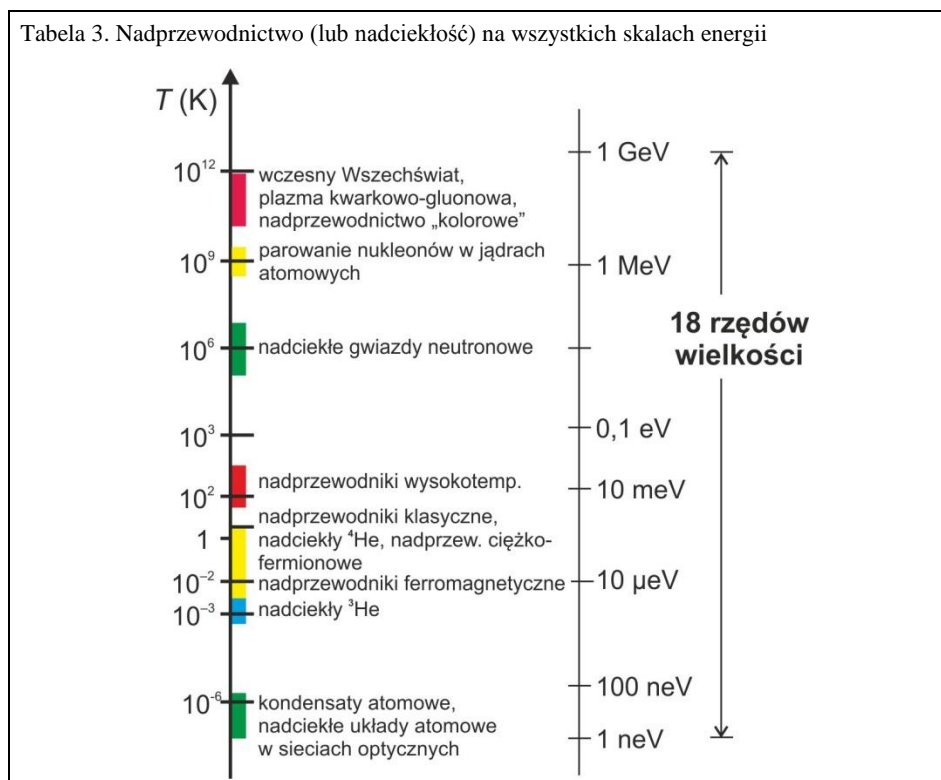
W tabeli 2 wyszczególniłem przykładowe teorie fizyczne (po prawej) oraz ich emergentne zasady (po lewej), na których zbudowana jest taka teoria ilościowa (matematyczna). Wyszczególnienie tych zasad emergentnych objaśnia nam tylko tyle, że nie da się w ramach danej teorii odpowiedzieć na pytanie, co się za tymi zasadami (założeniami) kryje; można je zwykle jedynie uzasadnić jako wyabstrahowane prawdy z faktów doświadczalnych. Jednym z koronnych takich przykładów jest równanie Newtona  $F = ma$ , które jest genialnym zgadnięciem Newtona. To naprawdę nie jest Prawo Przyrody w sensie matematycznym, gdyż zawiera dwie niewiadome:  $F$  oraz  $m$ . Tylko przyspieszenie jest zdefiniowane czysto matematycznie jako druga pochodna położenia po czasie. Oczywiście nie błądzimy, gdyż do tej relacji dokładamy przepis, jak doświadczalnie wyznaczyć przede wszystkim  $F$ , a  $m$  jest wtedy uniwersalnym współczynnikiem proporcjonalności o dogłębnym znaczeniu masy. Późniejszy formalizm Lagrange’a i Hamiltonian postawiły prawa Newtona na bardziej formalnej bazie.

Tabela 2. Aspekty jakościowe *versus* ilościowe opisu fizycznego – przykłady

JAKOŚCIOWE		ILOŚCIOWE
Symetria układu	↔	Grupy symetrii i ich reprezentacje
Spontaniczne złamanie symetrii	↔	Parametr uporządkowania Teoria Landaua i zjawiska krytyczne
Dualizm falowo-korpuskularny Nierozróżnialność cząstek	↔	Równanie dynamiczne (falowe), rozkład Fermiego-Diraca i Bosego-Einsteina
Uniwersalność zjawisk	↔	Teoria skalowania Równania globalne (np. Einsteina)

Ilustracją uniwersalności koncepcji emergentnych jest pojęcie nadprzewodnictwa (lub nadciekłości) występujące na wszystkich skalach energii, jak to przedstawiono w tabeli 3. Zauważmy, że tylko to jedno pojęcie wzięte z fizyki materii skondensowanej ma wpływ na inne dziedziny (plazma kwarkowo-gluonowa, nadciekłość gwiazd neutronowych czy zimnych atomów). Dlatego też filozofia emergentności uczy nas także pokory w nazywaniu fundamentalną tylko jednej, ważnej, ale bardzo wąskiej dziedziny fizyki.

Takie *emergentne* pojmowanie złożonych („niewytłumaczonych”) pojęć Praw Przyrody ma się dobrze, jeśli pytamy tylko o to, jak się dany układ zachowuje. W żadnym przypadku nie jest bezsensownym zapytać, dlaczego akurat takie? To, co chcę powiedzieć, to że odpowiedź na pytania „dlaczego?” nie mieści się już w schemacie założonej teorii czy podstaw tej dyscypliny naukowej. Potrzebna jest wtedy nowa teoria obejmująca szerszy zakres zjawisk.



Na koniec dwie uwagi zasadnicze o *emergentności Przyrody*. Nasz mózg jest najbardziej złożonym układem w Przyrodzie. Przez mózg stało się wszystko, co wiemy o świecie i o sobie samych. Czy zauważyliście, że w zasadniczej większości badań fizycznych zakładamy, że mózg czy obserwator jest naczelnym sędzią naszego widzenia świata? Ale to nie wszystko. Bo na przykład, jeśli chcemy poznać istotę procesów myślowych stanowiących podstawę całej naszej wiedzy, to w tym przypadku układ poznaje sam siebie i mówi o sobie. A przecież układ nie zbada sam siebie w sposób zupełny, bo chociażby nie zbuduje języka bogatszego aniżeli ten, z którego sam się składa! Czy mózg zatem to układ emergentny najwyższego rzędu? Jest to pytanie najpewniej niemożliwe do odpowiedzenia przez nas samych o nas samych. W każdym razie, jest rzeczą naprawdę fantastyczną, że mimo tych ograniczeń potrafimy nie tylko coś powiedzieć o świecie, ale także budować wspaniałe teorie czy konstrukcje doświadczone przybliżające nam świat.

Dlaczego to potrafimy? Oto jest pytanie.

P.S. Dla Czytelnika zainteresowanego głębiej tą tematyką polecam mój artykuł: *Emergentność w Prawach Przyrody i Hierarchiczna Struktura Nauki*, „Postępy Fizyki”, t. 63, z. 1, s. 8–18 (2012).