

Fluktuacje. Skalowania. Ergodyczność

Co istotnego zdarzyło się w ostatnim półwieczu w fizyce statystycznej? Było parę nagród Nobla (Lars Onsager, Ilija Romanowicz Prigogine, Kenneth G. Wilson), ale żadna z nich z osobna nie doprowadziła do jakiejś rewolucji, nie było żadnego wielkiego odkrycia, które wpłynęłoby na nasz obraz świata – jak np. wykrycie promieniowania relikowego (Wielki Wybuch!), odkrycie struktury nukleonów lub roli DNA – albo zmieniłoby nasze codzienne życie, jak chociażby pojawienie się laserów, komputerów, telefonów komórkowych. Natomiast z perspektywy ponad pół wieku (całego mojego życia naukowego) widać coś innego: ewolucyjną zmianę paradygmatu fizyki statystycznej, którą symbolizują hasła wymienione w tytule, zmianę związaną z wejściem na nowe pola badań i spowodowaną częściowo zainteresowaniem fizyków dziedzinami sąsiednimi – kinetyką chemiczną, biologią, a nawet ekonomią. To przejście od teorii równowagowych do kinetyki, od struktur statycznych do dynamicznych (dyssypatywnych), od badania równań stanu do teorii procesów stochastycznych – teoria ciała stałego (materii skondensowanej), to dziś już odrębna dziedzina. A także przejście od opisu w kategoriach teorii grup, równania Boltzmana, rozkładów Bosego, Fermiego, do dzisiejszego opisu zjawisk w kategoriach symetrii, fluktuacji, skalowania i nieergodyczności.

Symetrie. Są obecne w naszej refleksji o świecie od zawsze („już Platon...”), stanowią obecnie podstawę całej fizyki teoretycznej¹, zatem nie będę o ich roli tutaj pisał.

Fluktuacje. Też są znane od dawna – na stałe wprowadził je do fizyki Marian Smoluchowski ponad sto lat temu, lecz wówczas, poza istotną rolą, jaką ich obserwacja odegrała w ugruntowaniu „hipotezy atomistycznej”, ich rola w opisie układów makro była znikoma, były to raczej ciekawostki: niebieski kolor nieba, opalescencja krytyczna. Dopiero dziś, gdy zajmujemy się coraz mniejszymi układami wielu ciał, aż po skalę nano w układach molekularnych (albo np. plazmą kwarkowo-gluonową), i to układami zmieniającymi się w czasie i oddziałującymi z innymi takimi układami („z otoczeniem”), widzimy, że wszechobecność fluktuacji („szumów”) wpływa w sposób istotny na badane zjawiska. Okazało się choćby, że szумы mogą odgrywać rolę konstruktywną: stabilizować powstające nowe struktury², ułatwiać zachodzenie różnych procesów (np. przyspieszać reakcje chemiczne), nawet w pewnych warunkach ułatwiać detekcję sygnałów! (zjawisko rezonansu stochastycznego). Dziś już nie można sobie wyobrazić jakiegokolwiek zaawansowanego opisu statystycznego (nie tylko w fizyce, również np. w ekonomii) nie uwzględniającego wpływu szumów.

Skalowania. Zaczęło od pewnego dogmatu fizyki teoretycznej, który mówi, że teoria musi być *piękna*. Jeśli nie jest piękna, to nie może poprawnie opisywać rzeczywistości, nie jest *prawdziwa*. Na czym miałyby polegać owo piękno teorii fizycznej, wszak sformułowanej w języku matematyki? Jedną z miar może być *porządność* formalizmu. Przez długi czas uważano np., że porządne są tylko funkcje analityczne, oraz że, gdy nie można funkcji rozwinąć w szereg potęgowy, to nie jest ona wystarczająco porządna, by mogła opisywać struktury lub zjawiska fizyczne (to kryterium nie jest jedyne, ale było uważane za bardzo istotne). Pogląd ten był tak silnie zakorzeniony, że przez wiele lat nie zauważano

pewnych faktów empirycznych, i to faktów całkowicie makroskopowych.

Dopiero ścisłe rozwiązanie przez Onsagera dwuwymiarowego problemu Isinga, dokładne pomiary własności różnych układów w bezpośrednim otoczeniu punktów krytycznych i w końcu tzw. grupa renormalizacyjna Wilsona obaliły ten mit i doprowadziły najpierw do wprowadzenia tzw. nieklasycznych wykładników krytycznych, a następnie – obecnie – do powszechnego użycia formalizmu skalowania w bardzo wielu dziedzinach nie tylko fizyki. W skrócie: dziś wiemy, iż wiele zjawisk da się opisać (zgodnie z danymi empirycznymi) przez funkcje *samopodobne*, które zależą potęgowo od wartości zmiennych: $f(t) = f(t_0) + a(t-t_0)^\beta$, a wartości *wykładnika skalowania* β (nieklasycznego) mogą mieć dowolne wartości, podczas gdy „stara porządność” implikowała, iż wartości β powinny być albo małymi liczbami całkowitymi, albo ich odwrotnościami (prostymi ułamkami)³. W zjawiskach krytycznych skalowanie wynika wprost z obecności w obszarze krytycznym silnych fluktuacji we wszystkich skalach długości i czasu (eksperyment: opalescencja krytyczna, teoria: grupa renormalizacji Wilsona). Innym przykładem takiego zachowania może być np. anomalna dyfuzja⁴ w układach niejednorodnych (szkła), złożonych (choćby cytoplasma w żywej komórce) i silnie ograniczonych (ciasne układy nano).

Dlaczego jest to takie ważne? Wykrycie w układzie (procesie) skalowania nieklasycznego implikuje obecność tamże korelacji dalekozasięgowych, a więc faktu bardzo istotnego dla fizyki badanego zjawiska⁵. W wielu przypadkach skalowanie wynika z istnienia fluktuacji we wszystkich skalach fizycznych (z samopodobieństwa fluktuacji), co ma związek z procesami chaotycznymi i strukturami fraktalnymi.

Ergodyczność. Ostatnio okazało się, iż niektóre z procesów anomalnych nie spełniają hipotezy ergodycznej. W układach silnie nieuporządkowanych, o wysokim stopniu złożoności średnia po trajektorii nie jest równa średniej po zespole⁶ – naruszona jest tzw. *słaba ergodyczność* (choćby niekoniecznie *silna*, matematyczna⁷). A przeciw hipoteza ergodyczna jest uznawana za podstawę całej fizyki statystycznej...

Dla mnie najbardziej fascynujące w tym obrazie jest spostrzeżenie, że wszystkie nowości, które w ostatnich latach pojawiły się w obszarze fizyki statystycznej, wymienione w tytule fluktuacje („szумы”) – procesy chaotyczne, skalowania (samopodobieństwo – fraktale) i nieergodyczność, zaczynają tworzyć coraz bardziej spójny obraz fizyki układów złożonych, do których wszak należą i żywe komórki, żywe organizmy, a co więcej, że podobnie zachowują się i układy społeczne, jak choćby inwestorzy na giełdzie. Tylko – czy to jest jeszcze fizyka statystyczna?

ANDRZEJ FULIŃSKI

¹ Por. A. Białas, „PAUza Akademicka” 78, (22 IV 2010), str. 1.

² Powstawanie coraz to bardziej złożonych uporządkowanych układów jest wymuszane (sic!) przez Drugą Zasadę Termodynamiki, a ich struktura jest często wyznaczana przez charakter fluktuacji.

³ Pierwsze wynika z możliwości rozwijania w szeregi potęgowe naokoło dowolnego punktu, drugie – z istnienia tzw. transformacji Legendre’a.

⁴ W normalnej dyfuzji (w ruchu Browna) średnia wartość przebytej drogi skaluje się jak $t^{1/2}$, w dyfuzji anomalnej – jak t^α , $0 < \alpha < 1$ ($\alpha = 1$, to już ruch balistyczny).

⁵ I nie tylko fizyki: tak samo jest m. in. w ekonomii, np. w analizie wahań notowań giełdowych i w ogóle w badaniach każdego układu złożonego.

⁶ Dziś da się mierzyć trajektorie pojedynczych molekuł.

⁷ W sensie dostępności całej przestrzeni fazowej.