Jak przemawiają do (bio)fizyka drzewa?

Adam Gadomski, Instytut Matematyki i Fizyki,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
Al. Kaliskiego 7/421, 85-796 Bydgoszcz; agad@utp.edu.pl

Drzewa rosnące w lesie bądź w parku czy też na skwerze ulicznym, bądź po prostu przy drodze, a także te wolnostojące, mogą przemówić do wyobraźni fizyka.
Może się tak stać zarówno w przypadku obserwowania pojedynczego drzewa dowolnego gatunku, wraz z możliwymi do zauważenia szczegółami jego budowy zewnętrznej, jak i gdy przyglądać się drzewom w grupie, np. w lesie czy też w parku.
Jak wyglądać może taka poparta fizycznym myśleniem gra skojarzeń na żywym ciele przyrody, starano się pokazać w sposób przystępny za pomocą dwóch krótkich opisów. Pierwszy z nich dotyczy pojedynczego drzewa i pewnych szczegółów jego budowy, Fot. 1. Drugi z nich wiąże się z grupą drzew, a głównie z (nie)porządkiem ich rozmieszczenia w przestrzeni oraz z (nie)zajętością przez nie dostępnego im obszaru, na którym rosną, Fot. 2.

I. Pojedyncze drzewo.

Pojedyncze drzewo („osobnik dorosły") rośnie sobie czasami nawet dłużej niż obserwujący je człowiek żyje. Bywa, że lubimy na nie spoglądać, zazwyczaj nie zdając sobie sprawy – dlaczego? Z pewnością zawodowy stolarz może mieć inne skojarzenie patrząc na drzewo jako materiał produkcyjny. Ale fizyk – ten to może raczej mieć wpierw skojarzenie z prawem grawitacji Isaaca Newtona i spadaniem swobodnym ciał. To skojarzenie jednak pasuje bardziej do drzew owocowych i zawiera w tle przykład z jabłkiem sir Isaaca, i idące za tym natychmiastowe skojarzenie, że ciało cięższe tj. ziemia przyciąga to lżejsze, a więc jabłko. Przykład ten banalny można rozciągać na każdą sytuację, w której coś z obserwowanego drzewa się odrywa by potem spaść, a to szyszka (gdy np. iglaste), a to gałąź, gdy uschnie bądź złamie się pod wpływem własnego ciężaru – inny przykład na realne funkcjonowanie tego samego powszechnie znanego prawa.
Można jednak na to samo drzewo spojrzeć inaczej. Np., zapytać się czy jest ono bardzo rozgałęzione czy też raczej umiarkowanie bądź nieznacznie, np. jak przedstawione na Fot. 2 brzozy. Rozgałęzienie – jako efekt - jest interesujące samo przez się, bo zawiera pewien (rekurencyjny) porządek generowania gałęzi na drzewie, przypisany temu efektowi. Ponadto, stanowi ono *passus* (takie ciekawe przejście) pomiędzy formą liniową, jak forma brzeziny na Fot. 2, a formą splątaną bądź usieciowaną – tak jak latami nie zrywana pajęczyna w opuszczonym domostwie bądź nie odwiedzanej piwnicy; bądź też – do pewnego stopnia – jak zielone drzewa i nierzadko kolorowe krzewy w ogrodzie księżnej Diany w Hyde Parku, Fot. 2 (prawa strona).
Powróćmy jednak do porządku gałęzi na Fot. 1 (lewa strona) i spróbujmy ponumerować poszczególne z nich za pomocą indeksu n. Przypadek $n=0$ niechaj odpowiada $N=1$ pniowi wierzby z Fot. 1. Dla $n=1$ wyraźnie widzimy, na poziomie wysokości płotu z prawej strony obrazka, pierwsze rozgałęzienie w kształcie znanej niektórym z nas z dzieciństwa procy, tj. $N=2$ gałęzi. Następnie skierujmy wzrok nieco wyżej w prawo (przypadek iteracji $n=2$) – zauważymy $N=3$ gałęzie bądź ich fragmenty – tak może napisać ktoś kto nie jest specjalistą z zakresu biologii drzew – aż do kolejnego rozgałęziania się wierzby, pominiętego w dalszym opisie. Oczywiście, nie sposób pominąć tego, że drzewo ma korzenie, które także rozgałęziają się – ich system znajduje się pod powierzchnią ziemi i dlatego oznaczmy ten fakt jako

przypadek $n=-1$, przy czym potraktujmy ten system jako pojedynczą całość, tj. $N=1$ tak jak dla pnia.
Czy z tak zaproponowanego zliczania nie udało się nam otrzymać pierwszych wyrazów tzw. ciągu Fibonacciego [1], znanego już matematykom od XIII wieku. Mianowicie, zestawiając we właściwym porządku powyższe liczby (gałęzi) N: $N(n=-1)=1$; $N(n=0)=1$; $N(n=1)=2$ oraz $N(n=2)=3$ otrzymujemy na dwóch pierwszych miejscach dwa pierwsze wyrazy tego ciągu rekurencyjnego to jest jego generatory. Wartość ich wynosi w obu przypadkach jeden. Następny wyraz jest już następstwem zespolenia tych dwóch generujących, tzn. gdy je do siebie dodać: $1+1=2$, a kolejny powstaje, gdy dodać do siebie trzeci i czwarty w kolejności: $1+2=3$; można przewidzieć, wg tego samego rekurencyjnego rozumowania, iż jego następca będzie mieć wartość $2+3=5$, a potem $3+5=8$, itd., czego już nie zobaczymy na Fot. 1.
Chodzi jednak o pewną zasadę, która nieczęsto powtarza się idealnie w utworach naturalnych, takich jak drzewa, ale zawsze można się jej doszukać i to nie tylko dla początkowych iteracji. W jakim celu prowadzić takie poszukiwania? Może choćby w celu poszukiwania idealnego, rzeklibyśmy nawet, idealnie krystalicznego, porządku? Najlepiej określonej morfologii takiej właśnie dendrytowej (drzewiastej/rozgałęzionej) struktury? Z pewnością, ma ona coś wspólnego z poszukiwaniem właściwych proporcji w tych liczbowych stosunkach, a i również z takim podziałem długości w myśl zasady, że stosunek całości do większej części, wynikającej z podziału (x) ma się dokładnie tak, jak stosunek tej większej do mniejszej: na poszczególnych gałęziach, a (kontrolnie) wpierw na sobie samym, w pozycji wyprostowanej, z pępkiem jako punktem podziału, możemy to sprawdzić. Są to kanony tzw. *divina proportio* (boskiej, tj. idealnej proporcji [1]), niezwykle trudno osiągalne w rzeczywistości, a obecne w idealnym świecie Fibonacciego jako rozwiązania równania kwadratowego $x*x + x -1=0$, tu przy założeniu, że nasza całość ma długość równą jeden. Są - te idealne matematyczne kanony- przefiltrowane niejako przez realny świat zewnętrzny oddziaływania określonego gatunku drzewa, jako ***biosystemu***, z otoczeniem poprzez wykształcony system korzenno-gałęziowy. Mamy wówczas do czynienia z takim otwartym termodynamicznie [2-4], i adaptującym się do otoczenia, układem wymieniającym z nim materię i energię (głównie cieplną) – ten fakt niewątpliwie musi kształtować jego morfologię, taki – powiedzielibyśmy, sezonowy wygląd zewnętrzny, gdyż ta energia cieplna podlega różnej, acz cyklicznej wymianie, w zależności od pory roku.
Na drzewach i ich korze pasożytują (lub też istnieją symbiotycznie, tj. przy obopólnych korzyściach) kolonie mchów i porostów, co stanowi kolejny przykład tego oddziaływania z otoczeniem. Są one, por. Fot. 1 (prawa strona), ciekawe same przez się również. Dlaczego? Przypominają takie „fronty inwazyjne”, spotykane przy obserwacji współistniejących faz, np. ciekłej i stałej, np. procesie krystalizacji z roztworu. Ich długoletnia ekspansja po usianej bruzdami i „zwiniętej jako całość” w powierzchnię walcową korze drzewa charakteryzuje się ciekawą, rzeklibyśmy, linią bądź powierzchnią międzyfazową, o dosyć karkołomnym reliefie, przypominającym bardziej meandryczne (mówimy czasami: fraktalne [4]) wybrzeże Wielkiej Brytanii, aniżeli jakąś dobrze zdefiniowaną linie graniczną, oddzielającą korę czystą (jeszcze nietkniętą mchem czy porostem) od tej już porosłej mchem, a więc – rzeklibyśmy obrazowo – zarażonej. „Zawieszone w czasie”, bo kształtujące się na ogół przez wiele lat podobieństwo do rozdzielających się frontów krystalizującego się bądź po prostu separującego się od siebie samego materiału czy też substancji wydaje się być tutaj oczywiste.

Fot. 1. Wierzba z jej kilkoma rozgałęzieniami (lewo) oraz jej porosła mchem kora (prawo).

II. Zbiorowisko drzew i krzewów.

Efekt frontu inwazyjnego mchu z kory wierzby (Fot. 1, prawo), a także sama, usiana bruzdami bądź „mikrokanionami" kora jako taka, stanowią – jak im się dobrze przyjrzeć - przykłady złożonych układów usieciowanych, jak np. kauczuk bądź układ żelujący (galaretka) znane w fizyce fazy skondensowanej „miękkiej" bądź fizykochemii polimerów jako tzw. układy ***perkolacyjne*** [2], stanowiące zewnętrzną ekspresję ciągłych przemian fazowych, tzn. bez udziału utajonego ciepła tej przemiany (odwrotnie niż przy np. przemianie wody w lód bądź parę wodną), a ze zmianą charakteru symetrii fazy, z możliwym przejściem od fazy rozproszonej/niepołączonej do jej skupionego i zamkniętego w sieć odpowiednika.
Istnieją intuicyjnie akceptowalne parametry porządku oraz parametry kontrolne takiej przemiany. W przejściu fazowym ciągłym typu para-ferromagnetyk parametrem porządku jest w sposób naturalny magnetyzacja, stanowiąca liczbę najmniejszych magnesików, czyli spinów, w jednostce objętości fazy; parametrem kontrolnym jest temperatura wyżej wymienionego przejścia, zwana temperaturą Curie [2].
W przemianach, z manifestującą się wyraźnie własnością sieciowania, całkowite prawdopodobieństwo sieciowania, bądź specyficznie – żelowania, stanowi parametr porządku, ozn. P, natomiast parametrem kontrolnym jest prawdopodobieństwo wystąpienia (kreacji) wiązania chemicznego, p, proporcjonalne do energii aktywacji termicznej tego efektu, a więc zależne od temperatury. W tzw. temperaturowym punkcie żelu obserwujemy wówczas przemianę zolu (niejednorodnej, rozproszonej fazy lepkiej, z niedostateczną liczbą wiązań) w elastyczną fazę żelu, np. naszą ulubioną owocową galaretkę. Widać zatem z przeprowadzonych rozważań, że rachunek prawdopodobieństwa dla wymienionych jako przykłady układów o charakterze lepko-sprężystym [2-3], oraz właściwe jego użycie, odgrywają w opisie zjawiska pierwszoplanową rolę. Analiza matematyczna własności funkcji $P(p)$ oraz jej rzetelne dopasowanie do danych doświadczalnych stają się wówczas nieodzowne, a wyznaczenie wartości krytycznej parametru kontrolnego π staje się pożądane; wówczas funkcja $P(p)$ w punkcie $p= \pi$ posiada nieciągłość, świadcząca o tym, że układ znalazł się w reżimie krytycznym przemiany i że za chwilę zmieni swoją postać fazową, najpewniej w wyniku innego efektu o naturze probabilistycznej, np. fluktuacji krytycznej [2-

4], skutkującej w przypadkowym wygenerowaniu wiązania – akurat ostatniego brakującego ogniwa sieci. Spostrzeżenie to świadczy o dynamicznym charakterze przemiany i jej postępie, na ogół nie obserwowalnym natychmiastowo, a w określonym przedziale czasu.

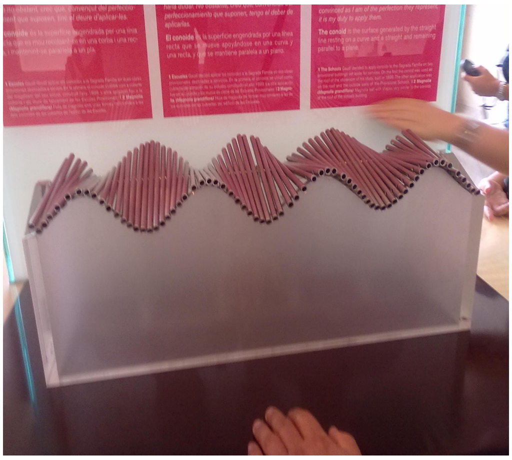
Patrząc na przykłady umieszczone na Fot. 2 wypada zauważyć, że określona własność inwazyjna bądź „epidemiczna", taka jak generowanie wiązania chemicznego w układzie żelującym, może rozprzestrzeniać się również „jak zaraza" w obu pokazanych na Fot. 2 drzewo- bądź krzewo-stanach (strona prawa). Taką własność można obrazowo opisać poprzez tzw. dylemat leśnika [4], sadzącego las, lub projektanta parku, a mianowicie, jak gęsto posadzić obok siebie drzewa i/lub krzewy by maksymalnie uodpornić układ na działanie zarazy, epidemii bądź, co ważne, przed skutkami niefortunnie zaprószonego w porze upałów ognia – rzecz może mało prawdopodobna w przypadku Fot. 2 (prawa strona), choć nie do końca, ponieważ globalne warunki ulegają ustawicznym i nie zawsze dobrze przewidywalnym zmianom, o czym może świadczyć stały w ostatnich 10 latach wzrost średnich temperatur w okresie letnim na Wyspach Brytyjskich. Gdy posadzimy drzewostan zbyt rzadko, zmarnujemy sporo, często drogiego terenu; gdy zaś posadzimy go zbyt gęsto, to możemy nie ustrzec się skutków epidemii bądź ogniowej katastrofy w przypadku, gdy $p > \pi$. Potrzebne więc staje się i tutaj – jako rozwiązanie dylematu – jakiś *modus vivendi*, który można osiągnąć przez wszechstronną i wnikliwą analizę problemu w języku (agro)fizyki statystycznej [4].

Ze względu na wyraźnie rozłączne rozmieszczenie brzóz w lesie na Fot. 2 (lewo) dajemy temu układowi większe szanse na przeżycie skutków katastrofy – pytanie tylko brzmi jakiej? Na pierwszy rzut oka mogłoby się wydawać, że chodzi tu o katastrofę ogniową (abstrahując od jej siły i kierunku), ale czy suchy dość las brzozowy z wysokimi bardzo drzewami nie zająłby się od ognia skuteczniej, aniżeli gęsty, acz mocno nasycony wodą ogród księżnej Diany? Należy przypuszczać, że tak. Ale, czy jeśli pomyślelibyśmy o rozprzestrzenianiu się w obu systemach np. pewnej odmiany pleśni, która jest bardzo higroskopijna, a więc wodochłonna jako swoisty biomateriał [3], to czy nie miałaby miejsce sytuacja odwrotna? Pomijając fakt opiekowania się ogrodem Diany przez wielu odpowiedzialnych pracowników Hyde Parku, z pewnością moglibyśmy doświadczyć dokładnie odwrotnej w stosunku do poprzedniej sytuacji.


Fot. 2. Liniowy porządek lasu brzozowego, przemieszanego gdzieniegdzie sosnami (lewo) oraz „skłębiony" i wzajemnie „pogmatwany", a więc nieliniowy w zamierzeniu projektanta, (nie)porządek części ogrodu księżnej Diany w Hyde Parku, kontrastujący z niskim metalowym płotkiem, o porządku ściśle liniowym bądź – zapożyczywszy nieco z terminologii ciekłokrystalicznej – **smek*tycznym*** [5], a także fragmentem alejki dla spacerowiczów, wysypanej obficie drobnoziarnistym grysem.

III. Refleksja końcowa.

Podsumowując, wydaje się właściwym zasugerowanie zarówno praktykom, jak i obecnym, a także przyszłym adeptom fizyki, pilne obserwowanie otaczającej nas przyrody i dokonywanie samodzielnych, albo też na użytek własny, prób jej opisu. Opis ten powinien odnosić się do istniejącego stanu wiedzy w zakresie poszczególnych dziedzin fizyki, czerpać z bogatego źródła analogii pomiędzy występującymi zjawiskami [4]. Powinien on także zawierać próby ich plastycznego przedstawienia, używania pojęć geometrii, w tym niekoniecznie tej zaproponowanej przez Euklidesa, ale również niektórych nie-euklidesowych, jak chociażby geometria fraktalna [4]. W efekcie opis ten powinien brać pod uwagę nieliniowości występujące w poszczególnych układach naturalnych i zwracać uwagę na trudności w ich opisie – używanie języka algebry [1], kombinatoryki oraz rachunku prawdopodobieństwa [4], a także przewidywać – co sugeruje początek rozdz. I, wychodzenie opisu poza równania Newtona i rachunek różniczkowy jako narzędzie matematyczne [2,4]. Użycie tego ostatniego, czyli pozostawanie w tzw. granicach fizyki klasycznej, wymaga używania funkcji różniczkowalnych. Nie wszystkie opisane procesy nieliniowe spełniają ten warunek – choćby np. trajektoria-ślad pyłku kwiatowego jest krzywą nigdzie różniczkowalną i nie da się jej otrzymać z równań Newtona. Należy włączyć tutaj probabilistykę poprzez nieskorelowaną w czasie (i przestrzeni) siłę losową i dodanie jej do prawej strony podstawowego równania Newtona – otrzymuje się wówczas równanie Langevina, opisujące równie dobrze, jak równanie probabilistyczne (dyfuzji) Einsteina, ruch błędny [4]. Ciekawym przykładem celowego zakłócenia liniowego porządku pomiędzy obiektami typu drzewa brzozowe z Fot. 2 (lewo) bądź metalowy płotek przy ogrodzie Lady D. jest makieta dachu domostwa katalońskiego zaproponowana w okresie ostatnich 15 lat twórczego życia przez architekta Antonio Gaudiego. Podobnie udane realizacje np. mebli (stolik do kawy bądź do siedzenia), oparte o geometryczną koncepcję konoidy [1], a wzorowane na utworach natury (choćby łupiny orzecha), zaprezentował w ubiegłym stuleciu amerykański architekt George Nakashima. Były one wystawiane m.in. w Smithsonian Museum w Nowym Yorku czy też w londyńskiej galerii Sotheby's. Zachowujące porządek rotacyjny cząsteczek ciekłe kryształy, przy pewnym zaniedbaniu właściwego kryształom porządku translacyjnego, stanowić mogą kolejny ciekawy przykład użytecznego wykorzystania swoistej wewnętrznej sprzeczności pomiędzy nieporządkiem strukturalnym właściwym dla cieczy, a porządkiem wynikającym z przyjmowania przez układ symetrii kryształu. A stąd już tylko mały krok do bliższego przyglądnięcia się błonom biologicznym (komórkowym), dynamicznym skupiskom biomolekuł („wielkich" cząsteczek tłuszczowych i białek [6]) oraz wody o grubości ok. dziesięciomiliardowej części metra, które zachowują podstawowy porządek ciekłokrystaliczny, np. nematyczny bądź cholesteryka [5].



Fot. 3. Słabo nieliniowy (z efektem pofalowania, ale z równolegle ułożonymi do siebie belkami dachu) porządek makiety dachu domostwa wg projektu Antonio Gaudiego, z wystawy w Sagrada Familia w Barcelonie, zawierający kierowane krzywe stożkowe, tzw. konoidy, por. *http://www.sagradafamilia.cat/sf-eng/docs_instit/geometria5.php*, stanowiący swoisty, zaczerpnięty przez zainspirowanego przez przyrodę człowieka, ***passus*** myślowy, pomiędzy liniowym porządkiem z Fot. 2, a słabą, tu: cykliczną bądź sinusoidalną, nieliniowością zewnętrznego obrysu makiety dachu. Nieliniowość ta stanowi z kolei co najwyżej bardzo odległą idealizację trudnego do naszkicowania frontu inwazyjnego (międzyfazowego) z Fot. 1 (prawo); por. [4].

LITERATURA:

[1] A.B. Empacher i Współaut., Mały Słownik Matematyczny. Wiedza Powszechna, Warszawa, 1975.

[2] R. Zallen, Fizyka Ciał Amorficznych, WN-PWN Warszawa, 1994, rozdz. 3-4.

[3] W. Przygocki, A. Włochowicz, Fizyka Polimerów, WN PWN, Warszawa, 2001.

[4] D. Stauffer, H.E. Stanley, Od Newtona do Mandelbrota. Fizyka Teoretyczna dla Nie-fizyków, WNT, Warszawa, 1995.

[5] R. Hołyst, Ciekłe Kryształy-Fantazja Natury, Delta 10 , 9 (1994).

[6] M. Cieplak, A. Sienkiewicz, Białka, Multimedialna Encyklopedia Fizyki Współczesnej, WN-PWN Warszawa, 2004.