



O trzęsieniach ziemi, pożarach i korkach ulicznych

Maria Massalska-Arodź

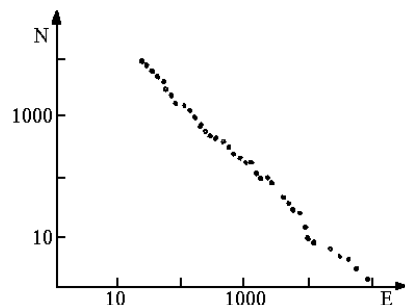
Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie

1. Wstęp

Fizyka oraz inne nauki przyrodnicze nagromadziły ogromną wiedzę szczegółową o własnościach i zachowaniu się różnych układów fizycznych od tak małych, jak jądra atomowe, aż po tak ogromne, jak galaktyki. Można zauważyć, że podstawowe prawa fizyki, które z sukcesem tłumaczą sekrety natury, mają prostą formę. Nie jest łatwo dostrzec zgodność pomiędzy tą prostotą praw fizyki a faktem, że otacza nas świat bardzo złożony i niezwykle zróżnicowany. Pomimo znajomości praw natury trudno jest odpowiedzieć na pytanie, jak powstawały np. złożone molekuly, żywe istoty na Ziemi czy tak skomplikowany obiekt, jak mózg. Nie umiemy wyjaśnić takiej różnorodności poprzez proste zsumowanie naszej szczegółowej wiedzy na temat poszczególnych atomów (tj. ich ruchów i wzajemnych oddziaływań), z których te wszystkie obiekty są zbudowane. Również takie zjawiska, jak trzęsienia ziemi, nagłe zanikanie gatunków biologicznych czy wybuchy konfliktów społecznych i politycznych, o jakich uczymy się na lekcjach historii, wymykają się opisowi za pomocą nagromadzonej wiedzy i zebranych praw. Powodem tego jest fakt, że przywykliśmy do myślenia, że wielkość skutku musi być proporcjonalna do wielkości przyczyny. Tymczasem wymienione powyżej zjawiska są gwałtowne i pojawiają się również bez wyraźnych, dostatecznie – jakby się wydawało – silnych przyczyn.

2. Trzęsienia ziemi

Dla przykładu przeanalizujmy zatem, co wiadomo na temat trzęsień ziemi. W stanie Missouri (USA) w rejonie New Madrid od ponad 170 lat zbierane są dane dotyczące drgań skorupy ziemskiej. Uzyskane informacje o liczbie trzęsień N , podczas których wyzwalana jest różna energia E , są przedstawione na rysunku 1. w skali logarytmicznej, czyli jako $\log N$ w funkcji $\log E$. Używamy tu skali logarytmicznej, aby przedstawić na jednym wykresie liczby różniące się o wiele rzędów wielkości, gdyż skorupa ziemską wyzwala energię zarówno w postaci małych, jak i dużych trzęsień. Jak wiadomo, $\log 10 = 1$, $\log 100 = 2$, $\log 1000 = 3$ itd. Jak widać, wykres jest linią prostą o stałym nachyleniu, co wskazuje na potęgową zależność $N(E) \sim E^{-b}$ z wykładnikiem $b = 1,5$. Okazuje się, że jest on taki sam również dla innych obszarów zagrożonych trzęsieniami ziemi. Liniowa zależność typu log-log obejmuje wiele rzędów wielkości energii i pozwala wnioskować, że **zarówno małe trzęsienia, jak i te katastrofalne, mają ten sam mechanizm**. Z zaobserwowanej zależności wynika, że gdy na rok przypadnie jedno trzęsienie ziemi o energii równej 100 jednostkom, wówczas powinniśmy oczekiwać 1000 trzęsień ziemi o energii równej jednej jednostce.



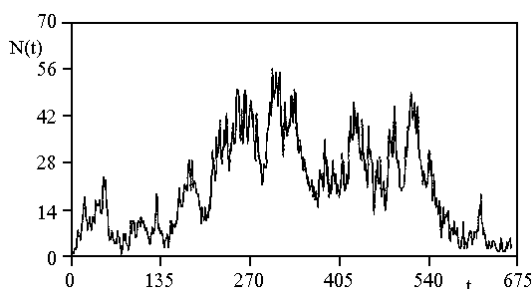
Rys. 1. Zależność $\log N$ od $\log E$, gdzie N jest liczbą trzęsień ziemi, które wyzwalają energię równą E . Dane pochodzą z obserwacji zbieranych od 170 lat w rejonie New Madrid w stanie Missouri (USA)

Oczywiście trzęsienia ziemi występują tam, gdzie płyty tektoniczne naciskają na siebie lub ślizgają się po sobie. Jednak nie ma potrzeby dopatrywania się specjalnych powodów uzasadniających występowanie dużych kataklizmów. Nie ma też jakiegoś typowego, średniego trzęsienia Ziemi. Gdy tak jest, mówimy, że **układ charakteryzuje brak skali. To, z jak wielkim zdarzeniem mamy do czynienia, zależy od tego, jaka była wcześniejsza historia całej skorupy ziemskiej, gdyż jej poszczególne elementy silnie na siebie oddziałują. Ziemia jest przykładem układu złożonego, o którym będzie mowa poniżej.**

3. Model organizowania się układu złożonego do stanu krytycznego

Pokażę teraz najprostszy model, który pozwala prześledzić, jak pod wpływem zaburzenia zachowuje się układ złożony. Spróbujmy przeprowadzić doświadczenie polegające na sypaniu pryzmy piasku na platformie w dobrze zdefiniowany sposób, tj. jedno ziarenko na jednostkę czasu. Początkowo ziarna padają obok siebie, potem powstaje następna warstwa i stopniowo kolejne ziarenka zatrzymują się tam, gdzie upadną, jeżeli tylko uda im się uzyskać stabilne położenie. W przeciwnym razie mogą się ześlizgnąć do innego miejsca albo wywołać lawinę, czyli ześlizgiwanie się sąsiednich ziaren, a te następnych, tworząc hierarchiczny ciąg zdarzeń podobny do reakcji łańcuchowej. Lawinki są niewielkie i stopniowo narasta wysokość i nachylenie pryzmy. Równocześnie część ziarenek ześlizguje się poza platformę. Pomimo dalszego sypania piasku kąt nachylenia i wysokość pryzmy ustalają się. Właśnie od tego momentu każde dodanie nawet jednego ziarenka może wywołać lawinę dowolnej wielkości, gdyż w każdym momencie średnie prawdopodobieństwo tego, że ziarno się zatrzyma, jest takie samo, jak i tego, że zaczną się poruszać kolejne ziarna. A więc o tym, co się zdarzy, decyduje miejsce, do którego spadnie ziarno. To, jaka będzie odpowiedź układu na upadek tego pierwszego ziarna, zależy od całej historii układu. Równocześnie okazuje się, że rozkład wielkości lawin będzie zawsze stały: najwięcej będzie zdarzeń (lawin) małych, ale dopuszczone są również zdarzenia katastrofalne. Wszystko może się zdarzyć pod

wpływem jednego spadającego ziarenka. Gdy tak jest, mówimy, że **układ organizuje się sam do stanu krytycznego, który charakteryzuje brak określonej skali** dla powstających w nim lawin zarówno jeśli chodzi o ich wielkość, jak i czas trwania. Liczba ziaren N uczestniczących w kolejnych lawinach zmienia się w czasie t w sposób przypadkowy, co pokazuje rysunek 2.



Rys. 2. Liczba ziaren N , które biorą udział w lawinach wywoływanych, gdy pryzma piasku jest zaburzana

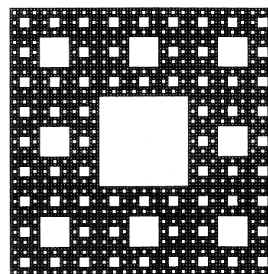
Przy modelowaniu trzęsień ziemi za pomocą wielu połączonych sprężynkami bloczków, które ślizgają się po nieruchomej płycie, można zarejestrować podobny przebieg $N(t)$, notując liczbę tych, które pod wpływem nacisku zewnętrznego zaczynają się poruszać. Równocześnie w prosty matematyczny sposób można tę złożoną krzywą $N(t)$ przedstawić w formie liniowej za pomocą tzw. widma mocy $M(\nu) = |\hat{N}(t) \exp(-2\pi\nu t)|^2$ (Delta 6, 1995). Niezależnie od szczegółów przebiegu $N(t)$ na wykresie $\log M$ ($\log \nu$) będzie prosta o nachyleniu -1 . Oznacza to, że zawsze taka nieregularna krzywa $N(t)$ jest złożeniem wielkiej liczby M sinusoid o niskiej częstotliwości ν i stopniowo coraz mniejszej liczby tych o wyższej częstotliwości. Jest to ilustracją faktu, że **nie ma specjalnego, oddzielnego mechanizmu katastrofalnych zdarzeń**.

4. Własności układów zmierzających do stanu krytycznego

Obserwacje z różnych dziedzin nauki pokazują, że jest dość sporo układów, które zachowują się tak jak pryzma piasku, czyli zmierzają same do stanu krytycznego. Ich cechą charakterystyczną jest brak określonej skali. Rozkład wielkości lawin (czyli liczba lawin w funkcji ich wielkości), a także rozkład czasu trwania lawin (czyli liczba lawin w funkcji czasu ich trwania), są dobrze opisane funkcjami potęgowymi x^{-b} o wykładnikach b przekraczających 1. Dla lawin, podobnie jak dla trzęsień ziemi, obowiązuje reguła, że im silniejsze zdarzenie, tym rzadziej występuje. Okazuje się, że zachowanie to jest typowe dla układów zbudowanych z wielu elementów o różnej wielkości, które mają na siebie wzajemnie silny wpływ. Układy matematyczne, których elementy mają różne rozmiary, a rozkład przestrzenny dużych elementów przypomina rozkład mniejszych elementów w mniejszej skali,

można za Mandelbrotem¹ określić mianem **fraktali** (szczegółowo można o tym przeczytać w *Fotonie* 41, 1996).

Jeden z nich to dywan Sierpińskiego (rys. 3), gdzie białe kwadraty mają różne wymiary i zaciemniona figura jest pusta jak gąbka z dziurami różnej wielkości. Okazuje się, że masa M takiej gąbki (czyli liczba jej pełnych fragmentów) rośnie z promieniem r obiektu jak $M \sim r^D$, gdzie D jest wymiarem fraktalnym. Jest on liczbą niecałkowitą mniejszą od 2 dla obiektu płaskiego i od 3 dla obiektu przestrzennego. Fraktale mogą być również układami o nieuporządkowanym rozkładzie elementów, co przybliża ich budowę do obiektów obserwowanych w przyrodzie.



Rys. 3. Dywan Sierpińskiego o wymiarze fraktalowym $D = 1,57$

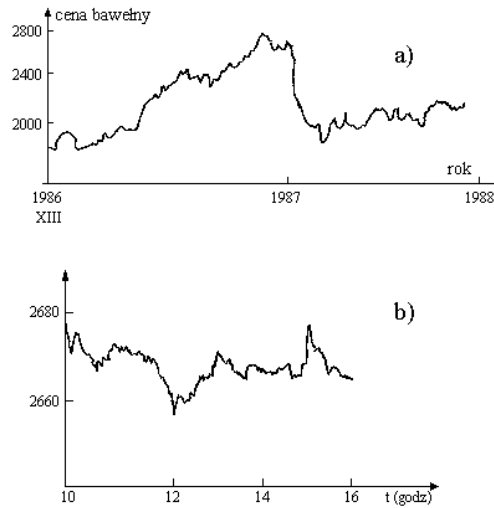
Przykładem fraktalnej krzywej o wymiarze pomiędzy 1 a 2 jest linia, jaką tworzy wybrzeże Norwegii, gdzie duże fiordy mają coraz mniejsze i mniejsze odgałęzienia (rys. 4).



Rys. 4. Fraktalowa linia wybrzeża Norwegii

Wahania cen na giełdzie również nie mają charakterystycznej skali. Zarówno rejestrowane w odstępach miesięcznych, jak i godzinnych dają nieregularną krzywą o podobnym charakterze (B. Mandelbrot – rys. 5).

¹ Fraktalem nazwał on „kształt złożony z części podobnych w pewien sposób do całości” (P. Pierański).



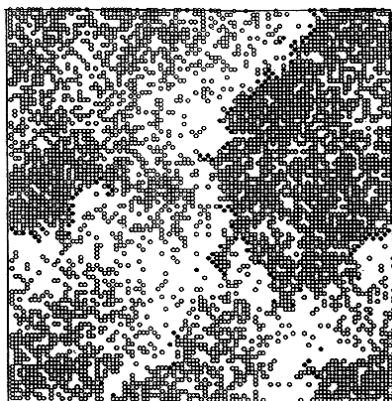
Rys. 5. Cena bawełny rejestrowana w funkcji czasu: a) czas mierzony w latach, b) czas mierzony w godzinach

Giełda gromadzi ogromną liczbę inwestorów reprezentujących powiązane ze sobą przedsiębiorstwa różnej wielkości. Mamy zatem do czynienia z bardzo złożonym układem i można oczekiwać, że pod wpływem zaburzenia będzie on sam zmierzał do stanu krytycznego. Jeśli tak, to każde wahanie dowolnego z parametrów ekonomicznych może być przyczyną zmian katastrofalnych (typu „czarnego poniedziałku” na giełdzie londyńskiej czy krachu na giełdzie nowojorskiej 29.X. 1929) lub jedynie drobnych drgań w cenie akcji. W danym momencie prawdopodobieństwo wystąpienia każdej z możliwości jest takie samo, ale statystyczne regularności obserwowane dla trzęsień ziemi i lawin tu również obowiązują. Możemy być pewni, że prawdziwe kataklizmy zdarzają się bardzo rzadko, ale nie są do przewidzenia!

5. Model pożaru lasu

Badanie zachowania układów złożonych z wielu elementów, które silnie oddziałują pomiędzy sobą, można prowadzić na tzw. automatach komórkowych. Wybrałam dla Państwa taki, który składa się z 256×256 elementów i pokazuje, jak rozwija się pożar lasu. Można nim również tłumaczyć sposób rozprzestrzeniania się epidemii. Oto model. Komórki mogą znajdować się w różnych stanach oznaczanych przez 0, 1 lub 2. Jeżeli przyjmiemy, że jest to model płonącego lasu, to wówczas 0 oznacza brak drzewa, 1 – drzewo, a 2 – drzewo płonące. Reguły ewolucji układu w czasie są tak dobrane, że w niektórych komórkach w stanie 0 pojawiają się stany 1, a ich liczba powoli rośnie. Stan 1 przechodzi w stan 2, czyli następuje zapalenie drzewa, jeśli tylko sąsiednia komórka jest w stanie 2. Niech na początku

obserwacji rozkład stanów 0, 1 i 2 będzie zupełnie przypadkowy. Rysunek 6 pokazuje stan końcowy. Widać, że drzewa rosnące całkiem przypadkowo rosną teraz w skupiskach, czyli klastrach, a drzewa płonące tworzą obiekt fraktalny o wymiarze bliskim 1. Układ osiągnął stan krytyczny. Ponadto jeśli wzrost drzew ze stałym tempem potraktujemy jako dostarczenie energii na sposób jednorodny, pojawienie się klastrów drzew jako gromadzenie czy magazynowanie energii, a płonące drzewa jako rozpraszanie energii, to oba te procesy odbywają się na obiekcie o wymiarze mniejszym niż wymiar przestrzeni, w której prowadzimy rozważania. Można więc przypuszczać, że np. dodanie jednego płonącego drzewa spowoduje równie dobrze gwałtowny rozwój pożaru, jak i jego przytłumienie. Może też pozostawić układ w takim stanie, w jakim był. Program demonstrujący prosty model pożaru lasu można odszukać pod adresem www.ifj.edu.pl/~krawczyk/pozar.html

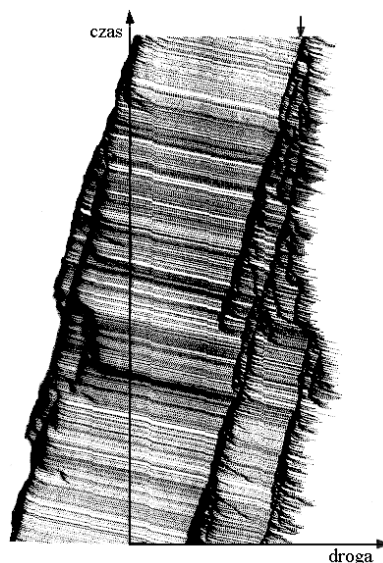


Rys. 6. Rozkład drzew rosnących i płonących w modelu ilustrującym pożar lasu. Czarne kółka oznaczają stan 2, czyli drzewo płonące, puste kółka – stan 1, czyli drzewo rosnące, zaś brak kółka, czyli stan 0, to puste miejsce bez drzewa

6. Korki uliczne

Przejdę teraz do omówienia zachowania się układu składającego się z uczestników ruchu drogowego. Ruch dużej liczby aut na dużej rozgałęzionej drodze można też opisywać jako układ złożony. (Jest on wyraźnie układem otwartym, bo liczba uczestników ruchu ulicznego ciągle się zmienia.) Nieodłącznym doświadczeniem podróży są pojawiające się często większe lub mniejsze zagęszczenia pojazdów, czyli tzw. korki uliczne. Powszechne jest przekonanie, że gdyby udało się je wyeliminować, wówczas efektywność przemieszczania się aut byłaby większa. Zastanówmy się, czy rzeczywiście tak jest, obserwując zachowanie się aut w modelu komputerowym. Niech prędkość auta będzie liczbą całkowitą z zakresu 0–5 i oznacza, ile wielokrotności długości auta przejedzie ono w następnym kroku. Gdy dane auto jedzie zbyt szybko, musi zwolnić, aby uniknąć zderzenia z innym, zaś tempo przyspieszania jest większe niż tempo zwalniania pojazdu. Model pokazuje, że

otwarta sieć ruchu ulicznego, gdzie poszczególni użytkownicy drogi wpływają na decyzje innych, organizuje się sama do stanu krytycznego. Gdy nieznacznie zaburzymy taki układ, np. poprzez obniżenie prędkości jednego auta z wartości 5 do 4 (co pokazane jest w prawym górnym rogu rysunku 7), wówczas pojawiają się na obrazie korki różnej wielkości, co widać w formie zagęszczenia kropek, które oznaczają położenie auta w każdej chwili. Mają one hierarchiczną strukturę, tj. w dużych korkach są małe itd. Aby wytworzyć duży korek uliczny, wcale nie trzeba żadnego dużego zaburzenia w postaci np. wypadku drogowego. Niespodzianką jest, że korki przemieszczają się w przeciwnym kierunku niż samochody. Zawsze więc w takim układzie poruszających się pojazdów można wydostać się z danego korka, ale najprawdopodobniej trafimy na następny. Ciekawe było doświadczenie przeprowadzone w Japonii. Otóż mierzono czas, jaki auta jadące autostradą spędzały pod bardzo szerokim wiaduktem. Uzyskano nieregularną krzywą przedstawiającą liczbę aut w funkcji czasu podobną do krzywej $N(t)$ na rysunku 2.



Rys. 7. Tworzenie się korków ulicznych. Kropki oznaczają położenie auta. Powstawanie zagęszczeń aut rozpoczyna zmiana prędkości jednego auta z wartości 5 na 4, co jest pokazane w prawym górnym rogu rysunku za pomocą strzałki

Gdyby auta jechały niezależnie od siebie, to otrzymalibyśmy zapewne dzwonołą krzywą symetryczną wokół najbardziej typowego czasu, z jakim przejechałoby pod wiadukiem najwięcej aut. Byliby oczywiście „maruderzy”, którzy spędziliby tam dłuższy czas, oraz „sprinterzy”, którzy pokonaliby odcinek pod wiadukiem w rekordowo krótkim czasie. Krzywa byłaby najprawdopodobniej gładka. Nieregularna krzywa zarejestrowana przez Japończyków pokazuje, jak istotne jest, że samochody poruszają się w towarzystwie innych i że mają bardzo różną historię podróży. Jest to krzywa charakterystyczna dla układu w stanie krytycznym, bardzo podobna do ewolucji liczby ziaren w lawinach po drobnym zaburzeniu i do przebiegu trzęsienia ziemi na modelowym układzie.

7. Zakończenie

Naszą wiedzę na temat ewolucji układów złożonych pod wpływem zaburzenia można podsumować następująco:

a) Małe zaburzenie może wywołać ciąg zdarzeń dowolnej wielkości, trwający dowolnie długo. To, jak silna będzie odpowiedź układu na zaburzenie, zależy od jego wcześniejszej historii.

b) Układ zmierza do stanu krytycznego **sam**, czyli bez dobierania specjalnych wartości parametrów zewnętrznych.

c) Wszystkie modele charakteryzuje potęgowa zależność własności fizycznych od zmiennych czasowych i przestrzennych. Modele pokazują mechanizm powstawania struktur w stanie krytycznym. Mają one fraktalne własności, czyli nie mają typowej skali czasu, długości czy energii.

Literatura:

- [1] Per Bak, *Self-organized criticality*, Physica **A163**, 1990, str. 403.
- [2] Per Bak i Kan Chen, *Self-organized criticality*, Scientific American, January 1991, str.46.
- [3] Per Bak, *How Nature Works. The Science of Self-organized Criticality*, Copernicus, New York 1997.
- [4] M. Schroeder, *Fractals, Chaos, Power Laws*, Freedmann, New York 1991, str. 9, 123.
- [5] P. Pierański, *Fraktale, od geometrii do sztuki*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1992, str. 53.
- [6] B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, Freedman, New York 1983.



Czy można obserwować dyfrakcję światła na firance?

Stanisław Bednarek

Instytut Fizyki Uniwersytetu Łódzkiego

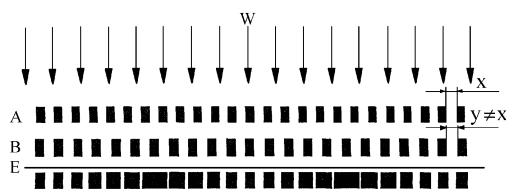
Zjawisko, które zostanie tutaj opisane, niewątpliwie najłatwiej można zaobserwować właśnie na firance. Wystarczy spojrzeć na firankę o drobnych oczkach, tworzącą draperie, czyli zachodzące na siebie fałdy, i zawieszoną przed oknem, przez które przechodzi światło. Zauważymy wówczas szereg jasnych i ciemnych prążków występujących na przemian. Ich kształty są zwykle łagodne i nieregularne. Zmieniając kierunek obserwacji, stwierdzamy, że kształty tych prążków również ulegają zmianom. Obserwowane zjawisko to **mora**. Jego nazwa pochodzi od arabskiego słowa *muchajjar* oznaczającego tkaninę, na powierzchni której można zobaczyć miejsca występowania ciemnych i jasnych prążków. W języku niemieckim tkanina taka nazywa się *Mohr*. Wziąwszy pod uwagę, że *h* nie jest w tym słowie wymawiana i uwzględniając występującą w języku polskim odmianę wyrazów, otrzymuje się nazwę *mora*.

W pierwszej chwili wydawać by się mogło, że *mora* to wynik dyfrakcji i interferencji światła na nitkach tkaniny, czyli efekt podobny jak w przypadku siatki dyfrakcyjnej. Ta hipoteza nie jest jednak prawdziwa. Rozmiary oczek firanki lub grubości nitek tkaniny są zbyt duże w porównaniu z długością fali światła, zatem dyfrakcja i interferencja światła w tym przypadku nie zachodzą. Natomiast można

obserwować interferencję, korzystając np. z cienkiego jedwabnego szalika². Zjawisko mory możemy z powodzeniem obserwować, gdy oczka firanki mają rozmiary nawet 3–5 mm, natomiast długość fali światła widzialnego wynosi w przybliżeniu od 0,38 μm , (światło niebieskie) do 0,76 μm (światło czerwone). Długości fali światła są więc około 10 000 razy mniejsze od rozmiarów oczek. Jak wiadomo, efekty dyfrakcyjno-interferencyjne są istotne wtedy, gdy przeszkody, na które napotyka fala, mają rozmiary zbliżone do jej długości. Dla porównania podamy, że maksymalna odległość między sąsiednimi szczelinami siatek dyfrakcyjnych, znajdujących się w szkolnych pracowniach fizycznych, wynosi około 5 μm .

Jest jeszcze jeden argument świadczący o tym, że mora powstaje inaczej niż układ prążków tworzonych przez siatkę dyfrakcyjną. Jeżeli popatrzymy uważnie przez taką siatkę, gdy pada na nią światło białe, wysyłane np. przez Słońce lub żarówkę, to zauważymy, że wytwarzane prążki są barwne. Każdy prążek, podobnie jak tęcza, składa się z szeregu barwnych pasków – od niebieskiego do czerwonego – które nie wykazują ostrych granic i płynnie przechodzą jeden w drugi. Dzieje się tak, ponieważ siatka dyfrakcyjna ugina światło białe, dając prążki w postaci widma ciągłego. Tego efektu nie obserwujemy w przypadku mory. Z przeprowadzonych rozważań wynika więc, że na postawione w tytule pytanie należy odpowiedzieć negatywnie.

Żeby wyjaśnić zjawisko mory, weźmy pod uwagę dwa szeregi A i B równoległych, nieprzezroczystych prętów o takiej samej grubości (rys. 1). W szeregu A odległości między prętami są jednakowe i wynoszą x . Pręty w szeregu B też znajdują się w jednakowych odległościach od siebie wynoszących y , ale $y \neq x$. Różnica między y i x jest jednak niewielka. Nałożmy te szeregi na siebie i rzućmy na nie równoległą wiązkę światła W . Zobaczmy, jaki obraz utworzy ta wiązka po przejściu przez oba szeregi prętów na ekranie E. Okazuje się, że na ekranie powstaną rozmieszczone na przemian jasne i ciemne obszary w postaci prążków. Szerokość tych prążków i odległość między nimi jest inna niż grubość prętów i ich odległość w obu szeregach. Otrzymany na ekranie układ prążków to właśnie najprostszyp>



Rys. 1. Sposób tworzenia się prążków mory

W przeprowadzonych rozważaniach nie mówiliśmy zupełnie o dyfrakcji światła padającego na pręty. Nie było takiej potrzeby, ponieważ mora jest efektem, po-

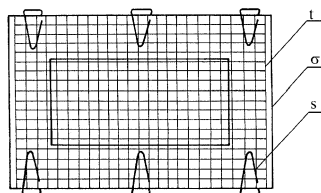
² Mamy tu do czynienia z nakładaniem się mikrostruktur nici szalika, co prowadzi do powstania efektów interferencyjnych.

legającym na sumowaniu się natężeń światła przechodzącego przez nałożone na siebie „okresowe” figury geometryczne mało różniące się rozmiarem, kształtem lub położeniem (lub od nich odbitego). Morę można również obserwować, na przykład na dwóch szeregach równoległych prętów lub na dwóch identycznych kratkach, jeżeli osie tych figur będą tworzyły pewien niewielki kąt albo figury te zostaną umieszczone na lekko pofalowanych powierzchniach. Sytuacja zbliżona do tych ostatnich przypadków zachodzi właśnie podczas tworzenia się mory na firance. Rozpatrywane wcześniej szeregi nieprzezroczystych prętów można zastąpić płaskimi zwierciadłami w kształcie równoległych pasków. Jeżeli na taki układ rzucimy równoległą wiązkę światła, to promienie odbite również utworzą morę.

Ktoś obdarzony dobrą pamięcią może przypomnieć sobie w tym momencie, że do niektórych podręczników fizyki bywają dołączane dwa kawałki kalki z wydrukowanymi na nich współśrodkowymi pierścieniami. Po nałożeniu ich na siebie obserwuje się obraz do złudzenia przypominający interferencję fal wysyłanych przez dwa źródła punktowe. Trzeba jednak pamiętać, że jest to tylko model zjawiska interferencji, w którym wykorzystano właśnie efekt mory. Jak wiadomo z metodologii i historii nauki, żadnego modelu nie można utożsamiać z samym zjawiskiem i wyciągać z wyników modelowania zbyt daleko idących wniosków.

Rozważania zapoczątkowane dla układu prętów moglibyśmy kontynuować, nadając im bardziej ilościowy charakter. W efekcie otrzymalibyśmy wzory opisujące zależność między szerokością prążków i ich położeniem. Wydaje się jednak, że bardziej atrakcyjnym zajęciem, przynajmniej dla uczniów, będą eksperymenty polegające na obserwacji mory wytwarzanej przez różne układy figur. Obserwacje te mogą również dostarczyć wielu wrażeń natury estetycznej, o które trudniej byłoby podczas analizy wyprowadzonych wzorów.

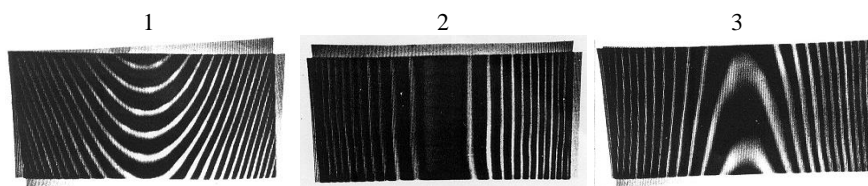
Nasze eksperymenty możemy rozpocząć od sprawdzenia działania opisanego układu równoległych, nieprzezroczystych prętów. W tym celu posłużymy się dwoma kawałkami kalki technicznej lub papieru częściowo przepuszczającego światło. Na pierwszym kawałku kalki rysujemy szereg złożony z 20–30 równoległych, całkowicie zacernionych pasków o szerokości 5 mm, oddalonych od siebie także o 5 mm. Długość pasków powinna wynosić 3–5 cm. Na drugim kawałku rysujemy podobny szereg pasków, ale o szerokości 4,5 mm. Odległość między paskami pozostawiamy bez zmiany. Oba szeregi pasków nakładamy równoległe jeden na drugi i patrzymy przez nie w kierunku źródła światła. Przesuwamy paski względem siebie, a także skręcamy je o niewielki kąt i badamy wpływ tych zmian na powstającą morę.



Rys. 2. Jedna z siatek do obserwacji zjawiska mory

Do badania mory możemy również wykorzystać kawałki firanki, gazy lub innej rzadkiej tkaniny t , naciągnięte na okienku o rozmiarach kilku centymetrów σ , wyciętym z tektury, i przypięte do niego spinaczami biurowymi s (rys. 2). Odległość między nitkami tworzącymi oczka siatki łatwo jest w tym przypadku regulować przez zmianę naprężenia tkaniny. Do obserwacji mory bardzo dobrze nadają się także kawałki metalowej siatki o rozmiarach oczek od kilku milimetrów do ułamka milimetra. W najprostszym przypadku możemy posłużyć się sitkami używanymi w gospodarstwie domowym, które nakładamy tak, żeby ich oczka znajdowały się blisko siebie.

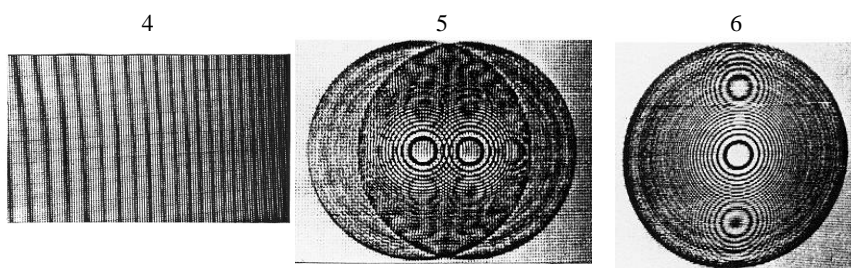
Dostęp do rzutnika pisma pozwoli nam uzyskać duże obrazy mory na ekranie i przeprowadzić pokazy tego zjawiska dla liczniejszej grupy osób przy użyciu niewielkiej liczby siatek. W tym celu wybieramy dwie siatki, układamy je na szybie grafoskopu i regulujemy ostrość, tak żeby na ekranie pojawiły się jak najwyraźniejsze prążki. Obrazy otrzymane na ekranie, dzięki ich znacznym rozmiarom i dużej jasności, możemy łatwo fotografować, używając popularnego aparatu fotograficznego zamocowanego na statywie ustawionym z tyłu grafoskopu. Właśnie w ten sposób wykonano fotografie mory zamieszczone w tym artykule. Mora przedstawiona na fot. 1 została otrzymana za pomocą kawałków dwóch lekko skręconych względem siebie metalowych siatek o podłużnych oczkach. Siatki takie stosowane są jako maski w kineskopach odbiorników telewizji kolorowej. Zmieniając powoli wzajemne usytuowanie siatek lub wyginając lekko jedną z nich, umożliwiamy obserwacje wpływu tych zmian na kształt prążków mory (por. fot. 1, 2, 3).



Fot. 1, 2, 3. Wybrane przykłady prążków mory

Szerokie możliwości badania mory zapewniają siatki wykonane na kalce technicznej lub przezroczystej folii, używanej do sporządzania kserokopii lub wydruków komputerowych. Bezpośrednie rysowanie siatek na tych materiałach przy użyciu pisaków lub tuszu kreślarskiego jest pracochłonne i nie zawsze daje dobre rezultaty. Znacznie skuteczniejszy sposób to narysowanie siatki za pomocą długopisu lub czarnego pisaka na prześwitującym papierze, pod który podłożono papier milimetrowy dla łatwego odmierzenia jednakowych odległości. Siatki takie mogą być złożone z różnych figur, np. kwadratów, prostokątów, trójkątów równobocznych czy sześciokątów foremnych. Warto też narysować układ współśrodkowych okręgów o stałej różnicy promieni oraz układ kropek, rozmieszczonych regularnie w wierzchołkach kwadratów lub trójkątów równobocznych, tworzących tzw. raster. Tym sposobem bardzo łatwo jest narysować siatki o rozmiarach 10–20 cm, w których odległość między liniami lub kropkami wynosi 2–5 mm.

Narysowane siatki kopiujemy na folii lub kalce technicznej, zmniejszając je kilkakrotnie. Dokonujemy tego za pomocą kserokopiarki lub skanera i drukarki współpracujących z komputerem. Jeżeli mamy dostęp do komputera z zainstalowanym edytorem graficznym, np. Corel Draw lub Paint, to odpowiednie siatki możemy narysować, posługując się tym edytorem, i wydrukować je bezpośrednio na folii lub kalce. Siatki do badania mory można również otrzymać w bardzo prosty sposób, wykonując na folii lub kalce technicznej kserokopie ze zmniejszeniem arkusza papieru milimetrowego. Za pomocą takich siatek uzyskane zostały obrazy mory przedstawione na przykład na fot. 4. Na fot. 5 i 6 zamieszczono natomiast mory powstające na złożonych rastrach, utworzonych ze współśrodkowych okręgów i kropek.



Fot. 4, 5, 6. Wybrane przykłady prążków mory

Na zakończenie warto dodać, że mory jest nie tylko interesującym zjawiskiem optycznym, przy wyjaśnianiu którego łatwo popełnić błąd, uważając je za wynik dyfrakcji i interferencji światła. Duża czułość kształtu prążków mory na zmiany położenia siatek i ich deformacje została wykorzystana przez inżynierów do precyzyjnych pomiarów odkształceń różnych części maszyn i elementów budowli. W typowym układzie do tego celu używa się dwóch siatek o nieprzezroczystych liniach, wykonanych, na przykład na kliszy fotograficznej lub płytkach szklanych. Odległość między sąsiednimi liniami siatek wynosi zwykle ok. 0,1 mm. Jedna z tych siatek zostaje zamocowana do badanego przedmiotu, a druga umieszczona naprzeciw pierwszej, na masywnej podstawie dobrze tłumiącej wstrząsy. Obie siatki są oświetlone. Jeżeli teraz badany element ulegnie odkształceniu lub przemieszczeniu, to wówczas nastąpi zmiana rozkładu prążków.

Efekt pokrywania się odpowiednich kresek noniuszy, stosowanych w dokładniejszych przyrządach pomiarowych, na przykład w suwmiarce i mikromierzu, także wykazuje podobieństwo do zjawiska mory. Osobom bardziej zainteresowanym sztuką niż techniką należy powiedzieć, że w kształtach abstrakcyjnych dzieł niektórych współczesnych artystów również można dostrzec inspiracje prążkami mory.