

O ruchach Browna i demonie Maxwella

P. F. Góra

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ

3 listopada 2016



Odkrycie ruchów Browna



Robert Brown
(1773–1858)
botanik szkocki

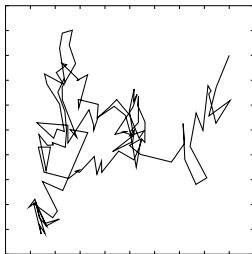
While examining the form of these particles immersed in water, I observed many of them very evidently in motion. . . These motions were such as to satisfy me, after frequently repeated observations, that they arose neither from currents in the fluid, nor from its gradual evaporation [konwekcja], but belonged to the particle itself.

Brown nie był pierwszy — już przed nim obserwowano mikroskopowe ruchy cząsteczek organicznych, ale przypisywano je jakiejś **sile życiowej**.

Brown obserwował ruchy żywych pyłków, obumarłych pyłków i zawiesiny nieorganicznej.

Dziwny charakter ruchów Browna

- Ruch bardzo nieregularny
- Trajektoria w różnych skalach czasowych wygląda podobnie

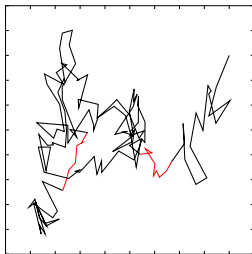


- Trajektoria nie zależy od historii

Próby opisu w języku prędkości zawiodły.

Dziwny charakter ruchów Browna

- Ruch bardzo nieregularny
- Trajektoria w różnych skalach czasowych wygląda podobnie

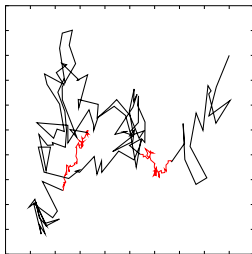


- Trajektoria nie zależy od historii

Próby opisu w języku prędkości zawiodły.

Dziwny charakter ruchów Browna

- Ruch bardzo nieregularny
- Trajektoria w różnych skalach czasowych wygląda podobnie

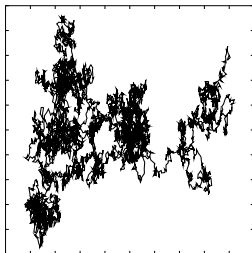


- Trajektoria nie zależy od historii

Próby opisu w języku prędkości zawiodły.

Dziwny charakter ruchów Browna

- Ruch bardzo nieregularny
- Trajektoria w różnych skalach czasowych wygląda podobnie



- Trajektoria nie zależy od historii

Próby opisu w języku prędkości zawiodły.

Dwie prace, które wszystko wyjaśniły



Albert Einstein
(1879–1955)

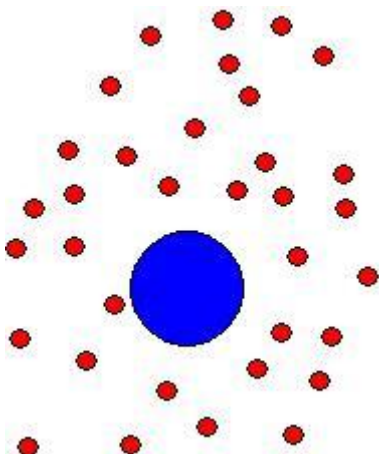
A. Einstein, *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, Ann. Phys. 17, 549–560 (1905).



Marian
Smoluchowski
(1872–1917)

M. von Smoluchowski, *Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen*, Ann. Phys. 21, 756–780 (1906).

Szum protezą niewiedzy



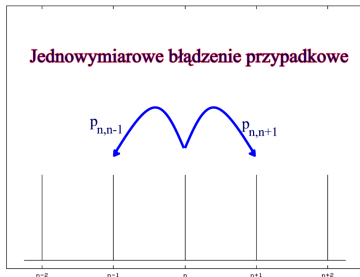
Dla układu makroskopowego $\sim 10^{23}$ równań ruchu — niemożliwe do rozwiązania.

Proces stochastyczny (szum) protezą naszej niewiedzy.

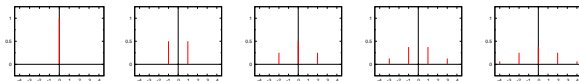
Mechanizm mikroskopowy

- Ruch wywołany jest zderzeniami z cząsteczkami rozpuszczalnika — ruchy Browna są obserwowalną manifestacją ruchów cieplnych
- Pomiędzy każdymi kolejnymi zarejestrowanymi położeniami nastąpiło *bardzo wiele* zderzeń elementarnych
- Proces zderzeń można (w dobrym przybliżeniu) opisywać jako ciągły w czasie
- Trajektorie nie są różniczkowalne w żadnym punkcie
- Heurystyczne wyprowadzenie równania dyfuzji
- Związek pomiędzy lepkością (oporami ruchu) a zaburzeniami stochastycznymi (twierdzenie fluktuacyjno-dysypacyjne)

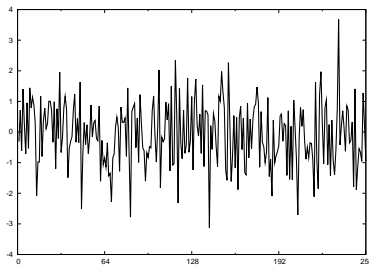
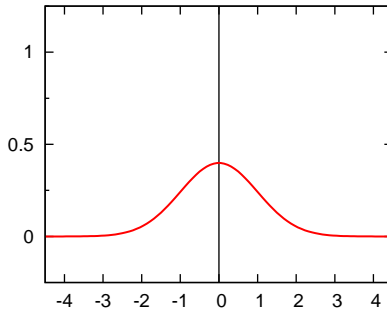
Najprostszy model



Zwykła dyfuzja: Układ skacze z jednakowym prawdopodobieństwem w lewo lub w prawo z ustalonym krokiem czasowym (co każde cyknięcie zegara)



Biały szum gaussowski



Procesy stochastyczne dzisiaj

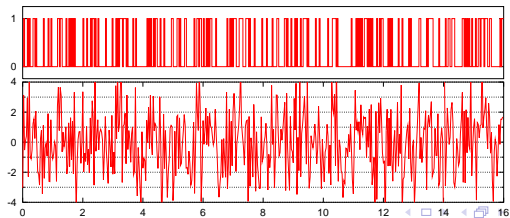
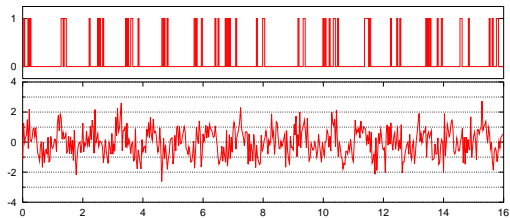
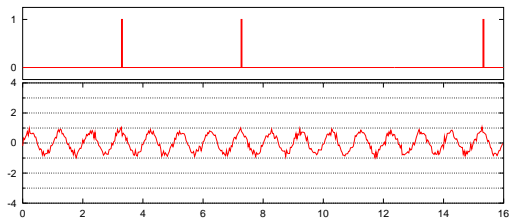
- Teoria procesów stochastycznych ważnym działem matematyki.
- Metoda Monte Carlo: Procesy stochastyczne jako narzędzie modelowania zjawisk
 - ▶ fizycznych i chemicznych,
 - ▶ technicznych,
 - ▶ biologicznych i ekologicznych,
 - ▶ społecznych i ekonomicznych.
- Nie w pełni poznana jest rola, charakter i pochodzenie fluktuacji nierównowagowych.
- W wielu zastosowaniach praktycznych szum *przeszkadza* — jak pozbyć się szkodliwego wpływu szumów?
- Szumy mogą dawać także efekty konstruktywne i prowadzić do zjawisk paradoksalnych!

Przykład — detekcja sygnału podprogowego

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) + \sigma \xi(t), |A| < 1$$

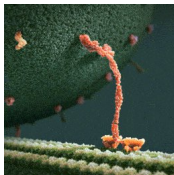
$$y(t) = \begin{cases} 1 & x(t) \geq 1 \\ 0 & x(t) < 1 \end{cases}$$

Wykrycie takiego sygnału jest możliwe dzięki **rezonansowi stochastycznemu**.



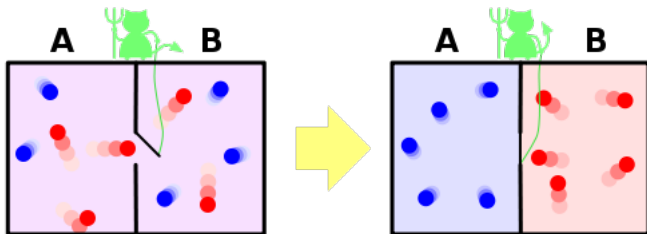


Rekin ma zmysł elektryczny, pozwalający wykryć i zlokalizować fokę po biciu jej serca. Zmysł ten działa na zasadzie *rezonansu stochastycznego*.



Kinezyzna transportuje białko wzdłuż mikrotubuli. Jej "nogi" trafiają we właściwe miejsca dzięki *rezonansowi stochastycznemu*.

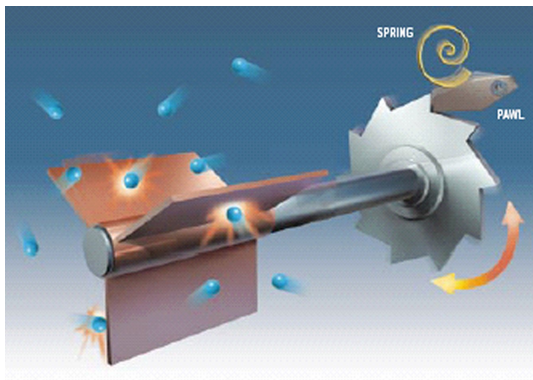
Demon Maxwella



Czy demon Maxwella, po wyeliminowaniu (zminimalizowaniu) tarcia itp, narusza II zasadę termodynamiki?

Nie, gdyż demon, aby działać, musi **usuwać informację** o obserwowanych cząstkach (zasada Landauera).

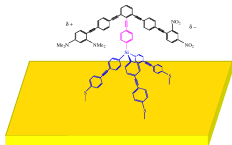
Zębatka brownowska: Inne przedstawienie demona Maxwella



Smoluchowski, Feynman, Magnasco, Parrondo, Jarzynski. . .

Motory molekularne

- Nanotechnologia i biotechnologia opierają się na możliwości kontrolowania i *wytwarzania* niezwykle małych mechanizmów.



- Marzenie: Zbudujmy nanoroboty, które będą naprawiać mikrouszkodzenia w ludzkim ciele “od wewnątrz”.
- Wielu marzycieli i projektantów zapomina, iż na poziomie molekularnym fluktuacje termiczne odgrywają ogromną rolę.
- Na poziomie molekularnym siłę fluktuacji można porównać do siły huraganu na poziomie makro.



Motory molekularne (c.d.)

A jednak natura jakoś sobie z tym radzi...

Bardzo dobrym modelem działania wielu naturalnych motorów molekularnych są zębatki brownowskie!

Np. kinezy, pompy molekularne itp.

Motory molekularne (c.d.)

A jednak natura jakoś sobie z tym radzi. . .

Bardzo dobrym modelem działania wielu naturalnych motorów molekularnych są zębatki brownowskie!

Np. kinezyiny, pompy molekularne itp.

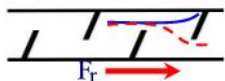
R. Dean Astumian, *Making Molecules Into Motors*, Sci. Am., July 2001, 51
Pracę motoru molekularnego można porównać do wpychania samochodu pod górę w czasie huraganu, bez użycia silnika

- 1 Samochód ma koła zablokowane cegłą, którą mocno dociskamy do podłoża
- 2 Czekamy aż wiatr popchnie samochód pod górę
- 3 Szybko przesuwamy cegłę
- 4 *GOTO 1*

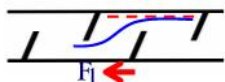
Ujemna ruchliwość

Co jest potrzebne do zrealizowania ujemnej ruchliwości?

- “Pułapki” na cząstki (\rightarrow asymetria)
- Dyfuzja (\rightarrow ruchy Browna)



Duża siła działa w prawo — większość cząsteczek nie zdąży dyfuzyjnie uciec do wyjścia — zostają uwięzione



Przełączamy siłę — słabsza siła działa w lewo — większość cząsteczek zdoła uciec na lewo

Niewielkie zmiany w parametrach cząsteczek (masa, lepkość) mogą spowodować, iż niektóre będą wykazywać ruchliwość dodatnią, inne ujemną — orzechy brazylijskie!