

# Fluktuacje wokół nas

## Dziedzictwo Mariana Smoluchowskiego

P. F. Góra

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ

4 września 2017

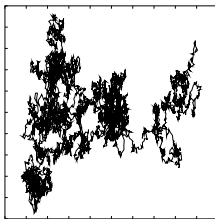




Marian Smoluchowski, 1872-1917



Robert Brown (1773-1858)



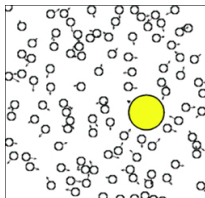
trajektoria cząsteczki brownowskiej



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



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



Dlaczego zderzenia “z lewej” i “z prawej” się nie znoszą?  
Smoluchowski: znoszą się *statystycznie*, ale występują **fluktuacje** wokół średniej.

Mark Kac: „Smoluchowski zapewne nie zdawał sobie sprawy, iż zaczął pisać nowy rozdział fizyki statystycznej, dziś znany jako procesy stochastyczne. [...] Nowość i oryginalność podejścia Smoluchowskiego leży w jego odważnym zastąpieniu niemożliwie trudnego [...] problemu dynamicznego [...] względnie prostym procesem stochastycznym.”

# Twierdzenie fluktuacyjno-dyssypacyjne, FDT

Na cząstkę działa siła losowa  $\xi(t)$ .

$$2\gamma k_B T = \int_{-\infty}^{\infty} \langle \xi(0)\xi(s) \rangle ds$$

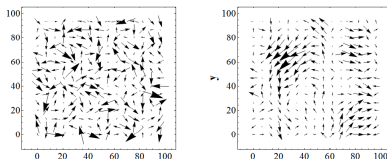
przy założeniu, że czas autokorelacji siły losowej jest o wiele mniejszy, niż czas działania siły tarcia. Fluktuacje *termiczne*. Nie ma fluktuacji bez dyssypacji.

Smoluchowski: Fluktuacje w makroskopowym (bardzo dużym, ale skończonym) układzie fizycznym w stanie równowagi termicznej mają charakter gaussowski, a ich czas korelacji wynosi zero (delta-skorelowane) — biały szum.

# Łamanie FDT

Gazy, zwkłe ciecze w warunkach normalnych — biały szum. A gdzie indziej?

- Układy “z pamięcią” (korelacje czasowe) — uogólnione FDT, z jądrem pamięci.
- Układy szkliste — łamanie FDT, hierarchia współczynników tarcia dla różnych skal czasowych.
- Układy z *przestrzennymi* korelacjami szumu



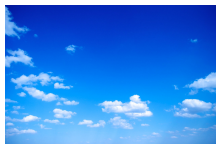
Przestrzennie zależny współczynnik tarcia — osobiwość  
odpowiada za przejście szkliste?

M.Majka, P.F.Góra, Phys. Rev. E **94**, 042110 (2016); M.Majka, P.F.Góra, J. Phys. A: Math. Theor. **50**, 054004 (2017).

# Dyfuzja anomalna

W (uogólnionym) błędzeniu przypadkowym  $\langle x^2 \rangle \sim t^\alpha$   
 układy biologiczne, dalekie od równowagi, dla których równowaga jest  
 nieokreślona

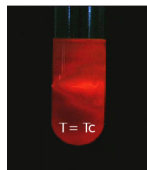
$0 < \alpha < 1$	$\alpha = 1$	$\alpha > 1$
subdyfuzja	dyfuzja	superdyfuzja
<ul style="list-style-type: none"> <li>● półprzewodniki amorficzne</li> <li>● układy porowate i perkolujące, geometrie fraktalne</li> <li>● układy biologiczne</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● transport turbulentny</li> <li>● kolektywny transport na powierzchniach</li> <li>● ruch bakterii</li> <li>● zjawiska ekonomiczne</li> </ul>



Błękit nieba: Rozpraszanie światła na fluktuacjach gęstości, maksimum dla światła niebieskiego.



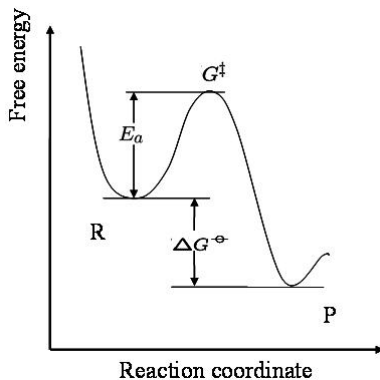
Opalescencja krytyczna: W przejściu fazowym fluktuacje rozbiegają się, rozpraszanie na wszystkich skalach długości.





# Teoria reakcji aktywowanych termicznie

H. A. Kramers, *Physica* **7**, 284 (1940)

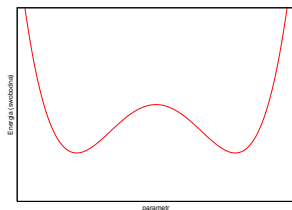


P. Hänggi, P. Talkner, and M. Borkovec, *Rev. Mod. Phys.* **62**, 251 (1990)

E. Pollak and P. Talkner, *Chaos* **15**, 026116 (2005)

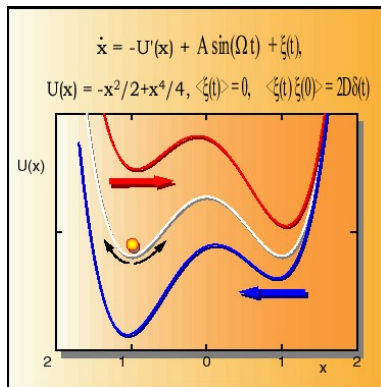
# Przejścia wywołane szumem

W. Horsthemke and R. Lefever *Noise-Induced Transitions. Theory and Applications in Physics, Chemistry, and Biology*, Springer, 1984.



- Przejścia do obszarów niedostępnych w inny sposób,
- Destabilizacja jednych punktów stałych, stabilizacja innych,
- Stabilizacja niestabilnych orbit,
- Podtrzymywanie sygnałów przez szum,
- Synchronizacja wywołana szumem
- i wiele innych.

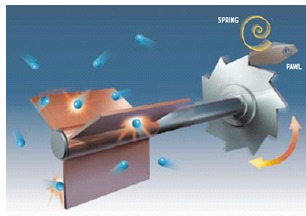
# Rezonans stochastyczny



Rezonans stochastyczny — szum może **wzmacniać** sygnał!

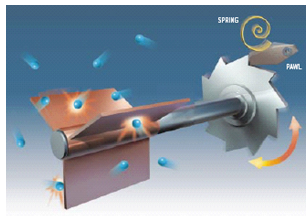
L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni, Rev. Mod. Phys. **70**, 223 (1998)

# Zębatka brownowska (Brownian ratchet)



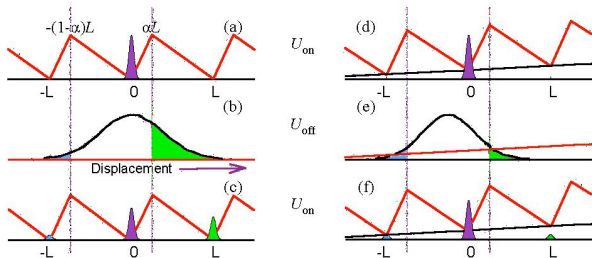
- Wariant demona Maxwella, wymyślony przez Smoluchowskiego i spopularyzowany przez Feynmana:
- Przypadkowy ruch cieplny zostaje zamieniony na ukierunkowany ruch zębatki

# Zębatka brownowska (Brownian ratchet)



- Wariant demona Maxwella, wymyślony przez Smoluchowskiego i spopularyzowany przez Feynmana:
  - Przypadkowy ruch cieplny zostaje zamieniony na ukierunkowany ruch zębatki
- 
- Sprężyna także fluktuuje, zwalniając zębatkę!
  - Urządzenie takie może wykonać dowolnie wielką pracę, ale...
  - ... ponieważ czas oczekiwania na odpowiednio wielką fluktuację gwałtownie rośnie, moc takiego urządzenia dąży do zera.

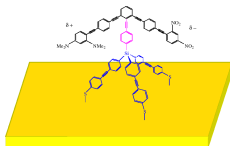
Jeśli “wyprostujemy” zębatkę, dostaniemy potencjał okresowy, bez symetrii zwierciadlanej — M. O. Magnasco, Phys. Rev. Lett. **71**, 1477 (1993) — którym możemy kołysać lub periodycznie włączać go i wyłączać.



- Swobodna dyfuzja przy wyłączonym potencjale
- Dzięki asymetrii potencjału, więcej cząstek zostaje przerzuconych “do przodu” niż “do tyłu”
- Działa nawet przy pewnym nachyleniu w “złą” stronę

# Motory molekularne

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



- Marzenie: Zbudujemy 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.)

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*



## Motory molekularne (c.d.)

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*

A jednak natura jakoś sobie z tym radzi...

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

Np. kinezyiny, pompy molekularne itp.

# Motory molekularne (c.d.)

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*

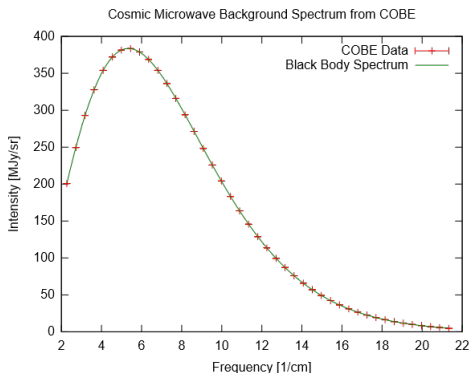
A jednak natura jakoś sobie z tym radzi...

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

Np. kinezyiny, pompy molekularne itp.

Jean-Pierre Sauvage, Sir J. Fraser Stoddard, Bernard L. Feringa — Nagroda Nobla z chemii, 2016, *for the design and synthesis of molecular machines*.

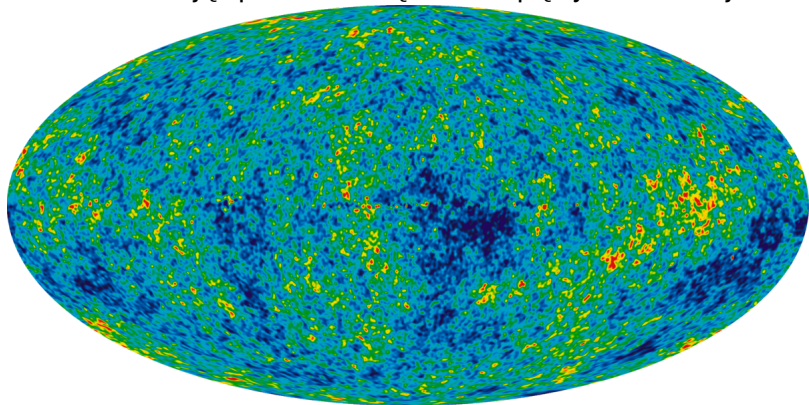
Cosmic Background Explorer (1989-1993)  
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (2001-2010)  
Planck (2009-2013)



Najdoskonalsze widmo promieniowania ciała doskonale czarnego dostępne eksperymentalnie; fluktuacje rzędu  $10^{-5}$

John C. Mather, George F. Smoot — Nagroda Nobla 2006

Obserwując przestrzenną anizotropię tych fluktuacji



otrzymujemy mapę młodego Wszechświata!

Świat bez fluktuacji  
byłby ładny, gładki, wyrównany. . .



ale płaski i nieciekawy.

Świat z fluktuacjami  
jest groźniejszy i trudniejszy do zrozumienia



ale znacznie ciekawszy!