Einstein 1905:

praca o ruchach Browna

Bogdan Cichocki
IFT UW

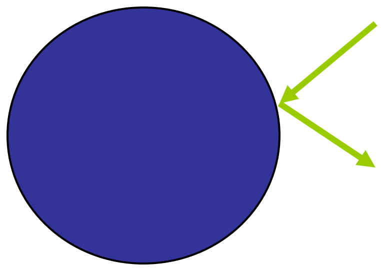
IPPT 7.12.05

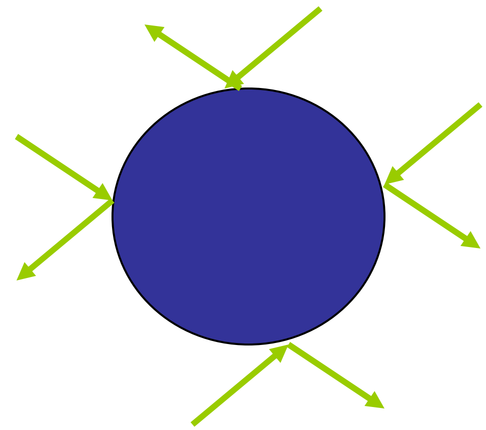
R. Brown (1827)

- obserwuje nieregularne ruchy cząstek (*a~1μm i mniej*) zawieszonych w cieczy

- po wnikliwych badaniach dochodzi do wniosku, że cząstki poruszają się „same z siebie”

Naegeli (1879)





efekt jednego zderzenia:

$\Delta v \sim 10^{-9}$ m/s

cząstka nie poruszy się !!

10^{20} zderzeń z różnych stron w ciągu sekundy

Problem prędkości:

dla cząstki o średnicy 1μm obserwowane przesunięcia : ***~1μm w ciągu 1s***

zasada ekwipartycji energii: ***v ~ 1cm / s***

11 maja 1905 r redakcja Ann. d. Phys. otrzymuje pracę A. Einsteina:

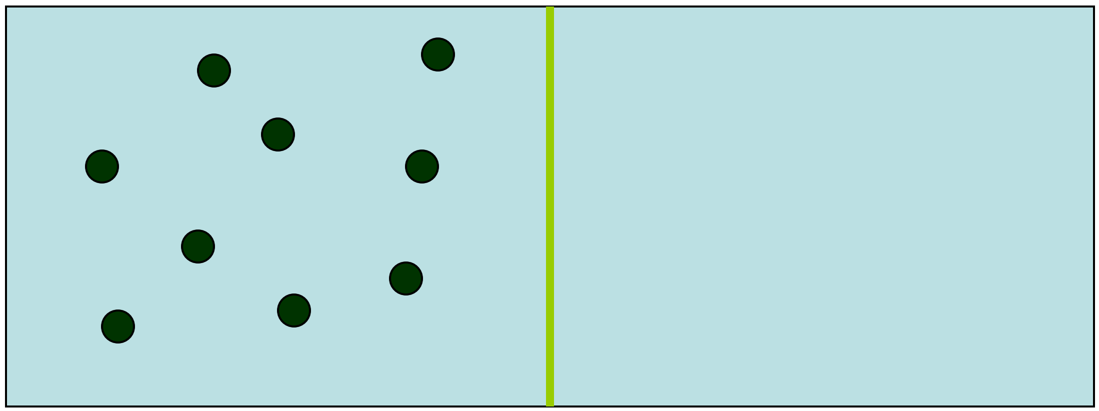
„O ruchu cząstek zawieszonych w cieczach w spoczynku, wynikającym z molekularno-kinetycznej teorii ciepła”

Drugie zdanie tej pracy:

„Niewykluczone, że omawiane tu ruchy są identyczne z tak zwanymi molekularnymi ruchami Browna, ale dostępne mi dane na ich temat są tak nieprecyzyjne, iż nie mogłem w tej sprawie sformułować opinii.”

Zjawisko ciśnienia osmotycznego:

takie samo dla zawiesin jak dla roztworów !

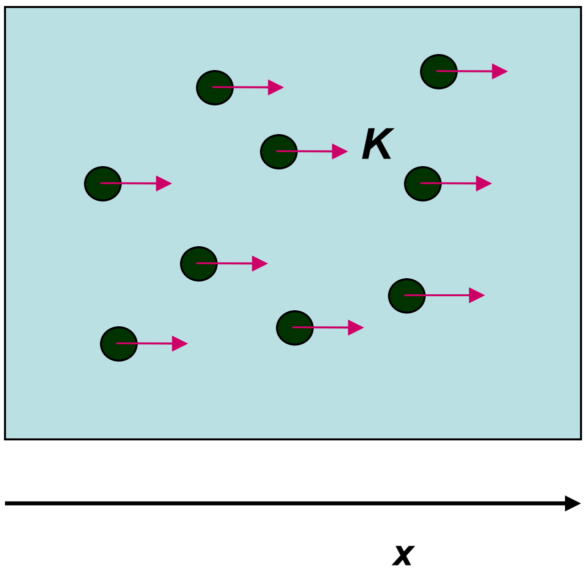


$$p = \frac{RT}{N_A} n$$

wzór Van't Hoffa

- ***ciała zawiesiny wykonują nieregularne ruchy spowodowane ruchem molekuł cieczy***
- ***ruchy te generują ciśnienie osmotyczne zawiesiny***

Równowagowy rozkład molekuł roztworu w polu stałej siły *K*:

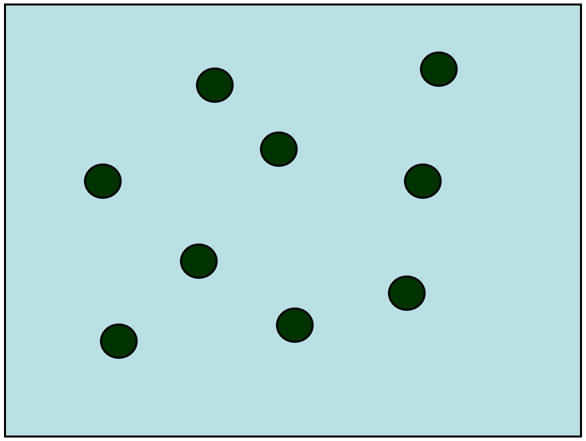


• wzór barometryczny dla koncentracji *n(x)*

$$Kn - \frac{RT}{N_A}\frac{dn}{dx} = 0$$

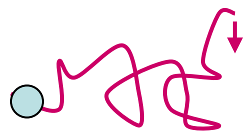
• przepływ molekuł na skutek działania siły *K* (prawo Stokesa!) jest zrównoważony przez strumień związany z procesem dyfuzji

$$\frac{K}{6\pi\eta a}n - D\frac{dn}{dx} = 0$$



współczynnik dyfuzji $\rightarrow$ $$D = \frac{R}{N_A} \frac{T}{6\pi\eta a}$$

współczynnik lepkości

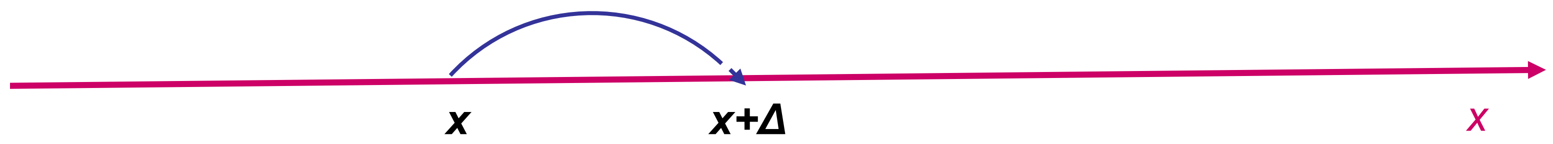


Wniosek Einsteina:

nieuporządkowane ruchy cząstek zawieszonych w cieczy $\Leftrightarrow$ makroskopowa dyfuzja

Następnie,

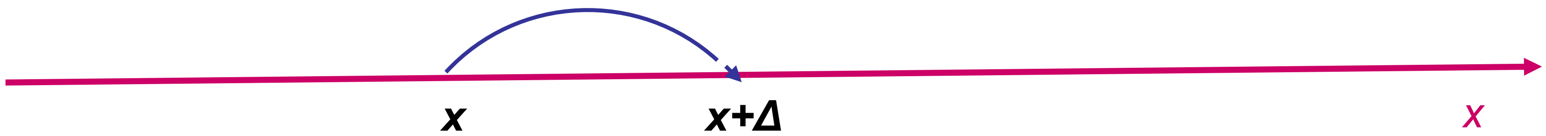
aby opisać te ruchy wykorzystuje rachunek prawdopodobieństwa, proces dyfuzji traktuje jako „proces stochastyczny”



$f(x,t)dx$ - *liczba cząstek w elemencie dx w chwili t*

$\varphi(\Delta)d\Delta$ - *prawdopodobieństwo, że w czasie τ przesunięcie cząstki leży w przedziale od Δ do Δ+dΔ*

$$\varphi(\Delta) = \varphi(-\Delta), \qquad \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\Delta)d\Delta = 1$$



$$f(x,t+\tau)=\int f(x+\Delta,t)\varphi(\Delta)d\Delta$$

„...możemy łatwo obliczyć...” **!!**

proces Markowa

rozwinięcie w potęgach τ i Δ

$$\frac{\partial f}{\partial t} = D\,\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$$

- równanie dyfuzji

$$f(x,t) = \frac{n}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

- *rozkład koncentracji cząstek,*

ale także

- *rozkład prawdopodobieństwa znalezienia pojedynczej cząstki w punkcie x w chwili t (o ile pominiemy n) jeżeli w chwili t=0 cząstka znajdowała w x=0*

$$< (\Delta x)^2 > = 2Dt$$

przesunięcie cząstki w czasie t

W ostatniej części pracy A.E. wylicza, że w wodzie o temperaturze 17°C cząstka o średnicy 1μm (!!) przesunie się:

- w ciągu sekundy średnio o 0.8μm !
- w ciągu minuty średnio o 6μm

poziom makroskopowy

opis makroskopowy

\+

fluktuacje

Einstein

poziom mezoskopowy

ruchy Browna

częściowe

uśrednienie

Smoluchowski

poziom mikroskopowy

M. Smoluchowski,

„O nieregularnościach w rozkładzie cząstek gazu i wpływie ich na entropię i równanie stanu”

Praca ogłoszona w księdze pamiątkowej dla uczczenia 60-lecia urodzin L. Botzmanna (Boltzmann-Festschrift, 1904)