



# Gibanje delcev

na molekularni ravni

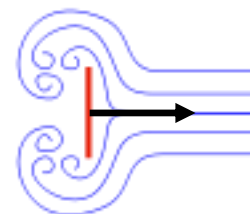


# Kaj določa način “plavanja”?

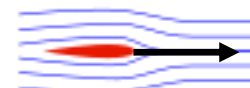
- **Upor**, ki ga čuti “plavalec”:

- zaradi vztrajnosti tekočine, ki jo odriva pred seboj
- zaradi viskoznosti tekočine, (vlečenje slojev tekočine, ki se prilepijo na površino)

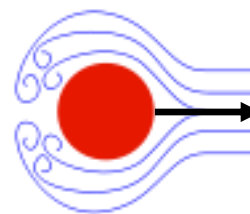
$$\propto \rho R^2 v^2$$



$$\propto \eta R v$$

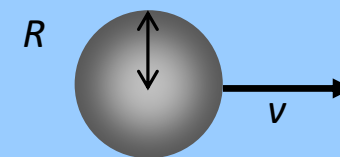


- Katera sila je pomembnejša?



$\rho$  - gostota tekočine

$\eta$  - koef. viskoznosti

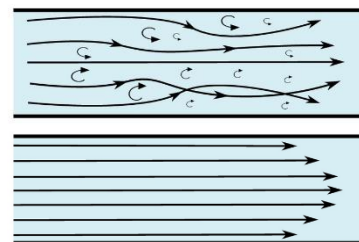


# Kaj določa način “plavanja”?

- Odloča razmerje obeh sil (Reynoldsovo število  $Re$ ):

$$\frac{\text{upor zaradi vztrajnosti tekočine}}{\text{upor zaradi viskoznosti tekočine}} \propto \frac{\rho R^2 v^2}{\eta R v} = \boxed{\frac{\rho R v}{\eta} = Re}$$

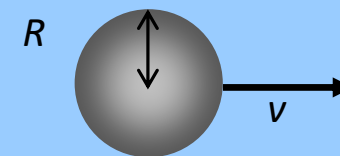
$Re$	prevladuje	upor	tok
$> 1000$	vztrajnost	$\propto v^2$	vrtnčenje, turbulenten
$< 1$	viskoznost	$\propto v$	brez vrtincev, laminaren



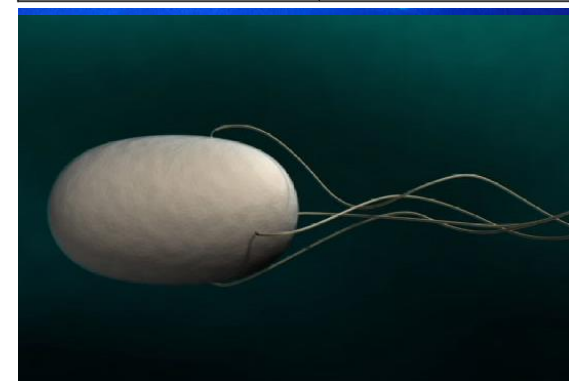
- V: V katerem režimu plavamo ljudje in v katerem bakterije?
- V: Na kolikšni poti se bakterija ustavi, ko se preneha poganjati?
- Molekule in bakterije ne poznajo vztrajnosti!  
→ Način plavanja mora biti drugačen

$\rho$  - gostota tekočine

$\eta$  - koef. viskoznosti



Substance	$\eta$ (Pa.s)
Air	$10^{-5}$
Water	$10^{-3}$
Ethyl alcohol	$1.2 \times 10^{-3}$
Mercury	$1.5 \times 10^{-3}$
Ethylene glycol	$20 \times 10^{-3}$
Olive oil	0.1
100% Glycerol	1.5
Honey	10
Corn syrup	100
Bitumen	$10^8$
Molten glass	$10^{12}$

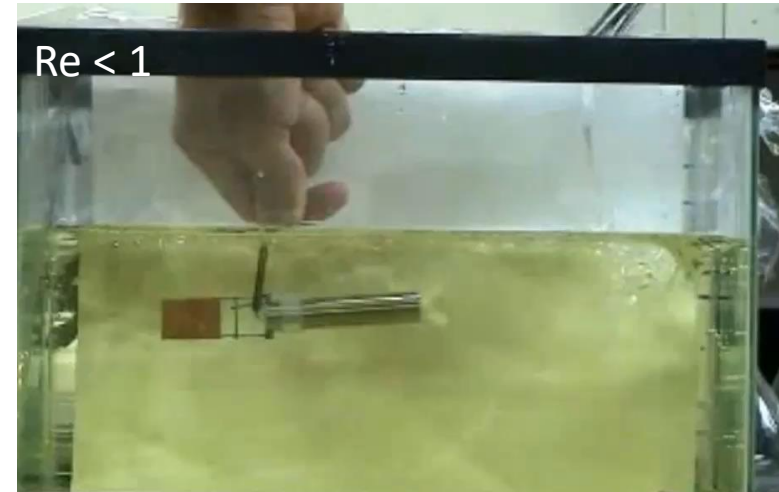


# Kaj določa način “plavanja”?

voda



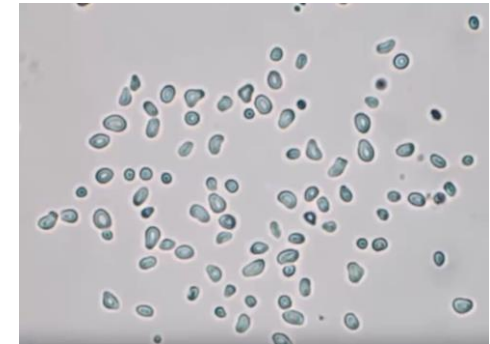
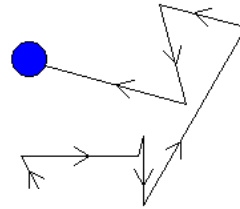
koruzni sirup





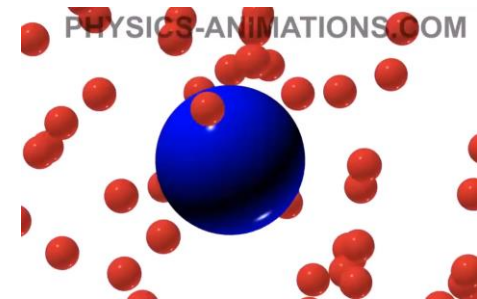
# Kaj poganja gibanje molekul?

- Brownovo gibanje / difuzija



<https://youtu.be/R5t-oA796to>

- Difuzija je posledica trkov med molekulami/delci s termično kinetično energijo ( $\sim k_B T$ )



<https://youtu.be/6VdMp46ZIL8>

- Entropija poganja sistem v smeri večjega števila možnih stanj (mešanje)

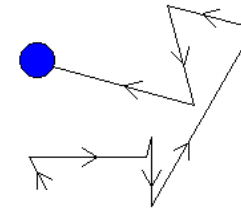


# Kako hitra je difuzija?

- Brownovo gibanje:

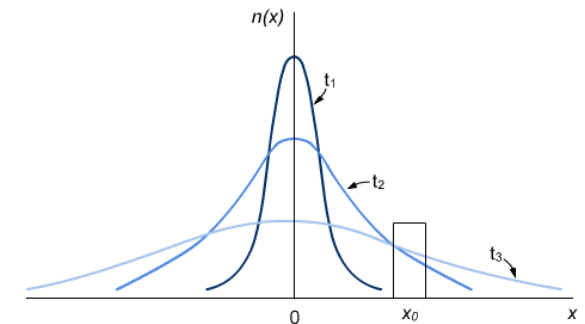
- Enako verjeten premik v vse smeri
- Povprečna razdalja, do koder pridejo delci  
 $D$  ... koeficient difuzije  
 $t$  ... čas  
 $n$  ... število dimenzij prostora: 1,2,3

- V: Koliko časa potrebuje molekula kisika za difuzijo preko celice ali organizma? ( $D = 2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )
- Difuzija je na dolge razdalje zelo počasna!



$$\langle x \rangle = 0$$

$$\langle x^2 \rangle = 2nDt$$



čas

# Kaj določa hitrost difuzije?

- Hitrost difuzije (difuzijski koeficient  $D$ ) je odvisna od

- termične energije delcev
- velikosti in oblike delcev
- viskoznosti tekočine

$$D \propto \frac{k_B T}{\eta R}$$

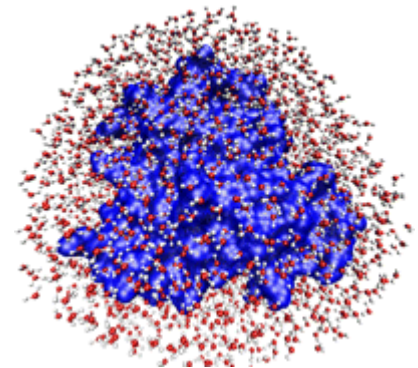
- Bistvena je **efektivna velikost delcev** skupaj s hidratacijskim plaščem („hidrodinamski radij“)

- Za kroglaste molekule:

$$R \propto V^{1/3} \propto M^{1/3}$$

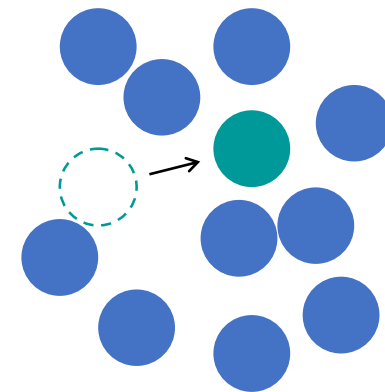
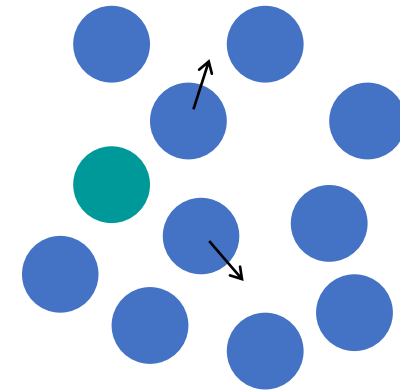
→  $D$  se z  $M$  spreminja počasi!

$$D \propto M^{-1/3}$$



# Difuzija majhnih molekul

- Viskoznost je makroskopski parameter, zato ni primeren za opis gibanja molekul, primerljivih z velikostjo molekul topila ( $m_1 < 100$  Da)!
- Tako majhni delci iščejo prazen prostor, ki se naključno pojavi med molekulami topila („wait-and-hop“)





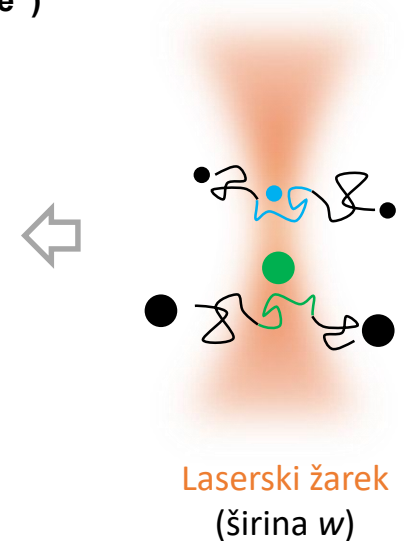
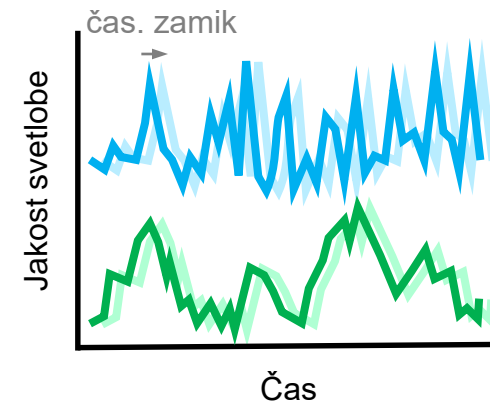
Kako lahko *izmerimo* hitrost difuzije molekul  
oz. delcev v raztopini ali celici?

# Korelacijske spektroskopije

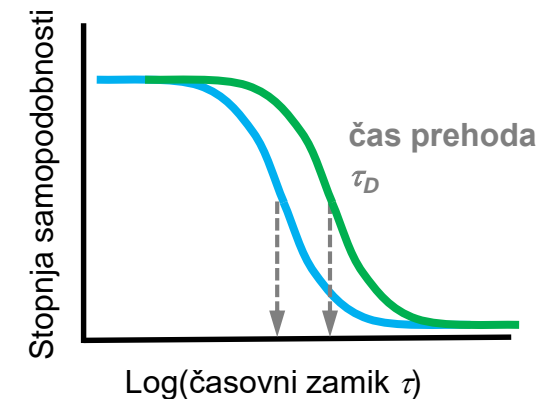
- Sipanje svetlobe:  
PCS = Photon Correlation Spectroscopy oz.  
DLS = Dynamic Light Scattering
- Fluorescenca:  
FCS = Fluorescence Correlation Spectroscopy
- Meritev  $D$  temelji na analizi trajanja fluktuacij intenzitete detektirane svetlobe
- Jakost sipanja je odvisna od kota in  $\propto R^6$   
→ Previdno pri interpretaciji porazdelitev velikosti v zmesi različnih delcev!



Časovni potek intenzitete ("time trace")



Avto-korelacijska funkcija

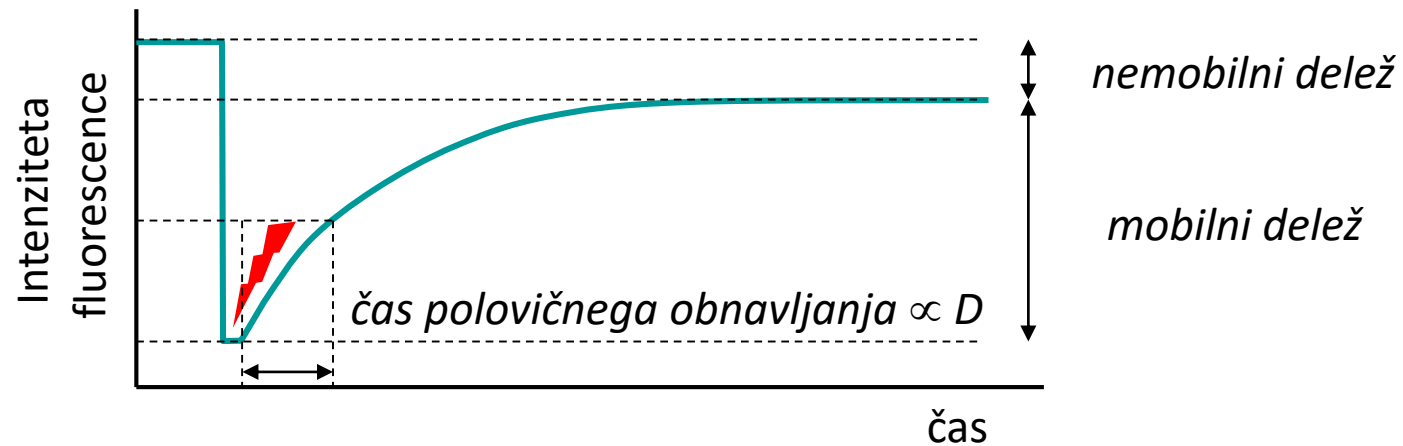
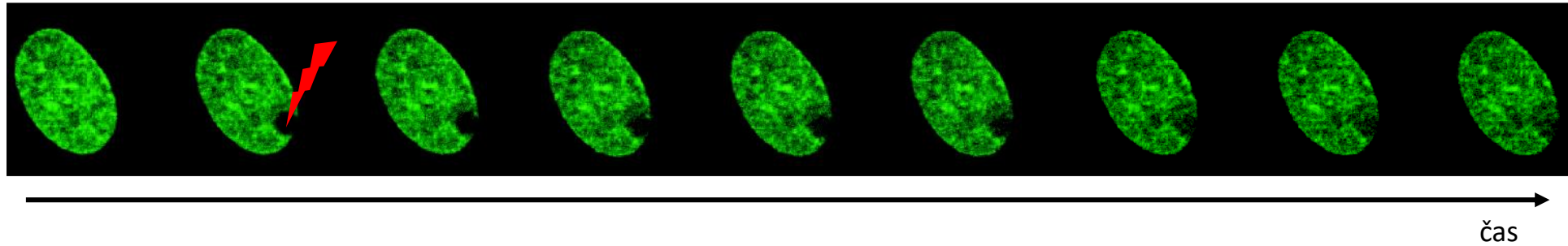


Difuzijski koeficient

$$D \propto \frac{w^2}{\tau_D} \propto \frac{k_B T}{\eta R}$$

# Fluorescence Recovery After Photobleaching - FRAP

- “Obnavljanje fluorescence po fotobledenju”



Kako lahko različno gibljivost delcev (molekul)  
izkoristimo v laboratoriju?

# Centrifuga

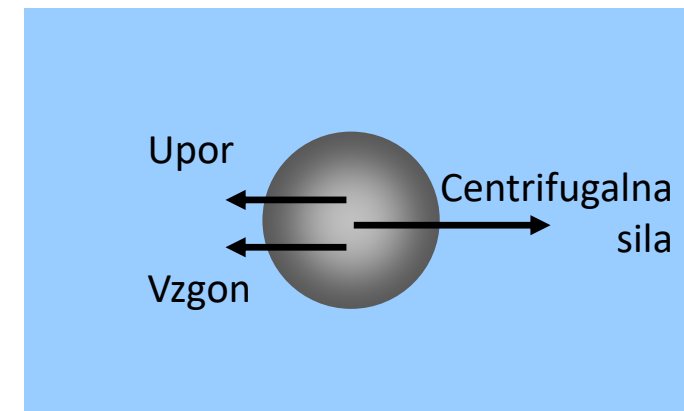
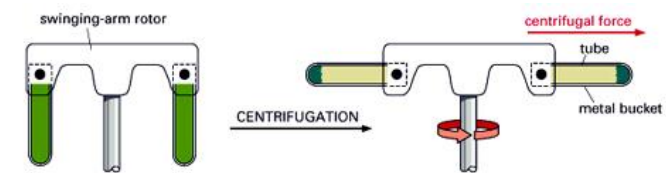
*Ločevanje delcev po gostoti:*

- V disperziji nenabitih delcev tekmujeta urejevalna sila (težnost) in termično gibanje  
→ stabilnost disperzije določa teža delcev

- Posedanje lahkih delcev v centrifugi pospešimo s “povečanjem njihove teže”, sorazmerno s kvadratom frekvence vrtenja ( $\omega^2$ )

- Hitrost posedanja  $\propto \frac{\text{centrif.}}{\text{upor}} \propto \frac{\omega^2 m'}{\eta R}$

( $m'$  - masa delca, zmanjšana za vzgon)



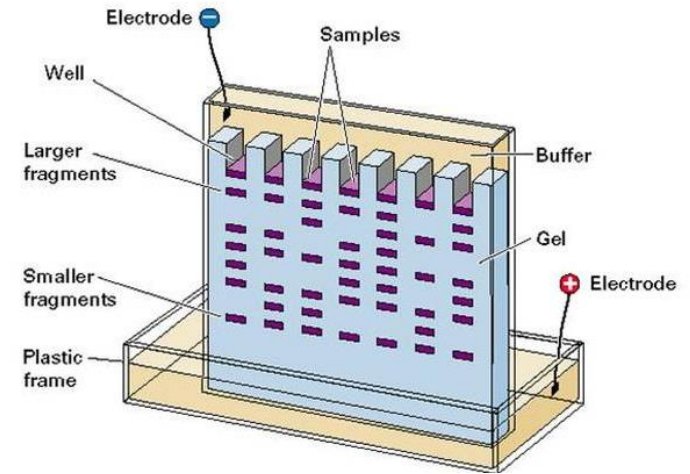


# Elektroforeza

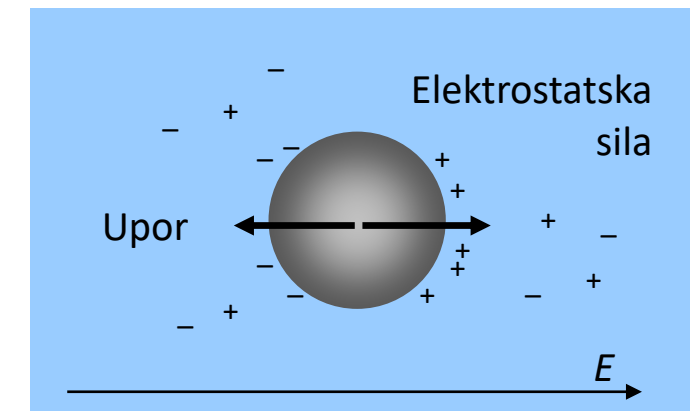
- Nabite delce lahko ločujemo tudi z električnim poljem -  $E$
- Hitrost potovanja odvisna od gibljivosti delcev -  $\mu$

$$\mu \propto \frac{\text{naboj}}{\text{upor}} \propto \frac{Ze_0}{\eta R}$$

- Izvedbe: gelska, kapilarna, 2D ef., izoelektrično fokusiranje ...



$Ze_0$  - naboj delcev

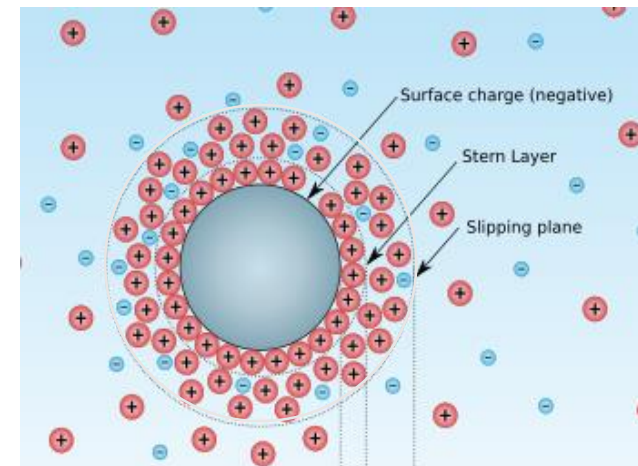


# Meritev $\zeta$ -potenciala

- $\zeta$ -potencial  $\propto$  efektivni naboj delca
- izmerimo elektroforetsko mobilnost  $\mu$ ,  
tj. hitrost ( $v$ ) v danem električnem polju ( $E$ ),  
iz nje nato izračunamo  $\zeta$

$$\mu = \frac{v}{E} \rightarrow \zeta \propto \mu$$

- merjenje hitrosti z „laskerskim radarjem“  
(Dopplerjev pojav)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Zeta\\_potential](https://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_potential)

