

EKSPERIMENTI S OPTIČKOM PINCETOM

Branimir Lukić¹

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švicarska

Dualna priroda svjetlosti kao vala i kao roja čestica omogućuje pomicanje materije svjetlošću. Možda najimpresivnija pojava mehaničkog pokretanja materije zračenjem jesu kometi, gdje Sunčev vjetar otpuhuje plin koji se nalazi neposredno uz kometovu jezgru. Međutim, materija se također može pokretati svjetlom na mnogo manjoj skali, koristeći optičku pincetu. Snažno fokusirana laserska zraka može pokretati objekte promjera od 5 nm do desetaka μm silama do 100 pN i rezolucijom sve do 100 aN. Zbog malih sila i rada u vodi, ova eksperimentalna tehnika našla je veliku primjenu u biofizici i fizici koloidnih čestica u zadnjih petnaestak godina.

U ovom predavanju pokazat ćemo princip rada optičke pincete te njezino korištenje za proučavanje prelaska čestice iz režima balističkog gibanja u Brownovo na malim vremenskim skalama.

Optička pinceta

Kada svjetlost prelazi iz jednog medija u drugi, dolazi do loma svjetlosti. Lom svjetlosti bit će to veći što se indeksi loma dvaju medija više razlikuju. Ako stavimo staklenu kuglicu u tekućinu, svjetlost će se lomiti prema istom principu (slika 1b). Za objašnjenje kako svjetlost može zarobiti staklenu kuglicu, moramo uključiti nešto kvantne mehanike. Svjetlost se može reprezentirati na dva načina: kao val te kao tok čestica – fotona. Lom svjetlosti može se tada objasniti kao promjena količine gibanja fotona Δp na granici sredstava. Promotrimo sliku 1b. Foton koji se kreće putanjom a na ulasku u kuglicu mijenja količinu gibanja. Kako je sila jednaka promjeni količine gibanja $F_S = \Delta p / \Delta t$, jasno je da je kuglica djelovala silom na foton. Prema trećem Newtonovu zakonu, i foton je djelovao na kuglicu silom istog iznosa, a suprotna smjera F_a . Isto tako, foton na putanji b djeluje na kuglicu silom F_b . Zbroj tih sila $F = F_a + F_b$ gurat će kuglicu prema natrag. Kad se kuglica približi leći, sila F promijeni predznak i gura kuglicu prema naprijed.

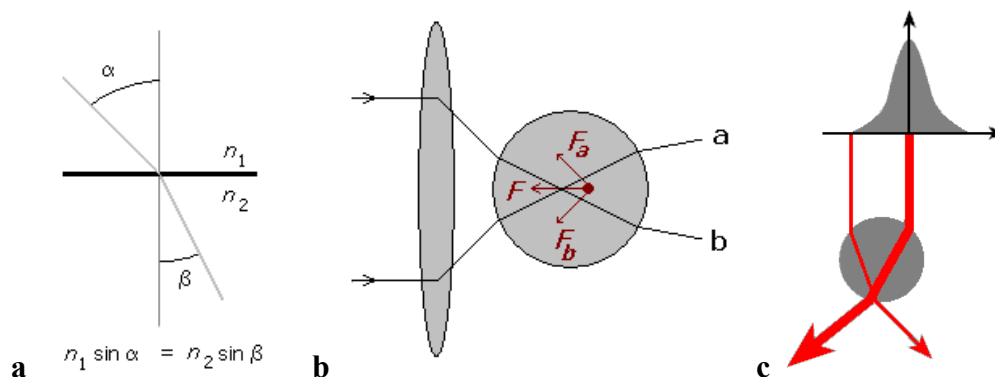
To objašnjava kako se kuglica zarobi u smjeru kretanja snopa fotona. Optička pinceta pak zarobljava kuglicu u sva tri smjera u prostoru. To se postiže nejednoliko oblikovanim snopovima (slika 1c). Ako se kuglica nađe lijevo od centra snopa, lom svjetlosti bit će veći zdesna nego s lijeva, i rezultat je sila koja pokazuje prema udesno. Ukupni efekt svih sila bit će kuglica zarobljena u prostoru reda veličine 100 nm x 100 nm x 100 nm.

Zarobljena kuglica ponašat će se kao masa pričvršćena na oprugu. Sila koju kuglica osjeća F bit će proporcionalna pomaku iz centra zamke x :

$$F = -kx \quad (1)$$

gdje je k konstanta zamke i ekvivalentna je konstanti opruge. Potencijalna energija kuglice će,

¹ branimir.lukic@epfl.ch

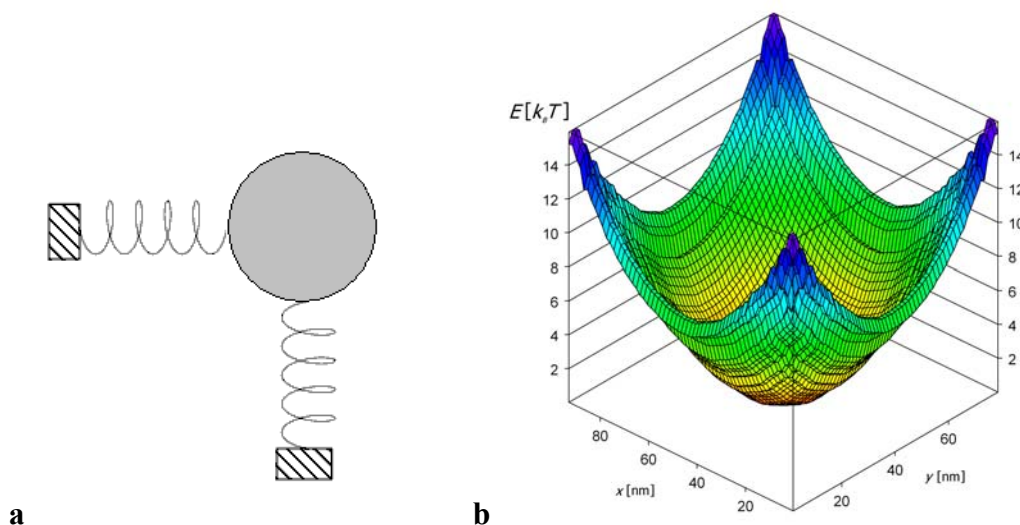


Slika 1 **a** Lom svjetlosti, **b** Dvije laserske zrake fokusirane lećom lome se na kuglici te rezultiraju silom F . **c** Laserski snop je neuniforman pa su sile koje dolaze na kuglicu slijeva i zdesna različite. Razlika sila gurat će kuglicu udesno. [Slika (c) je preuzeta iz K. Dholakia *et al.* Optical tweezers: the next generation. *Physics World*, October 2002]

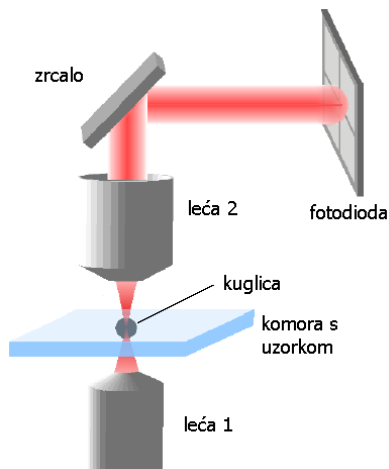
kao u slučaju opruge, biti tada jednaka:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 \quad (2)$$

U ovom je trenutku bitno primijetiti da se kuglica ponaša na ovaj način u sva tri smjera, tj. kao kuglica koja se nalazi u uglu kutije privezana za stijenke trima oprugama. Ukupna potencijalna energija kuglice bit će tada zbroj energija u sva tri smjera. Na slici 2 je prikazana kuglica pričvršćena na dvije opruge te njezina potencijalna energija.



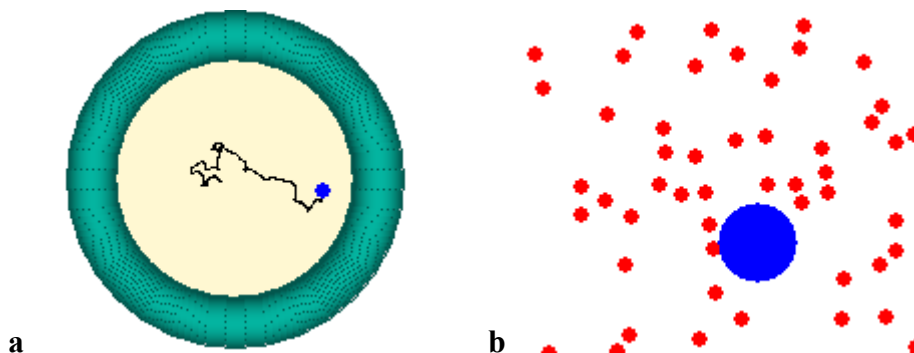
Slika 2 **a** Kuglica pričvršćena na dvije opruge, **b** Potencijalna energija kuglice zarobljene u zamci u ovisnosti o dva prostorna smjera. Takav profil imala bi i kuglica vezana za dvije opruge kao u (a). Potencijalna energija jednaka je $E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} ky^2$



Slika 3 Shema optičke pincete. [Ljubaznošću Sylvie Jeney]

Shema optičke pincete nalazi se na slici 3. Sastoji se od lasera, dviju leća te fotodiode. Prva leća koristi se za fokusiranje laserske zrake, što je potrebno za uspješno zarobljavanje kuglice. Druga leća koristi se za skupljanje zraka iz fokusa i projekciju na fotodiodu. Fotodioda bilježi interferenciju laserske zrake i zrake raspršene na kuglici koja daje informaciju o položaju kuglice u tri dimenzije. Pomoću fotodiode položaj kuglice može se mjeriti na prostornoj skali do nanometra te na vremenskoj skali do mikrosekunde.

No, da bi kuglica slijedila položaj zamke, potrebno joj je dati i neku kinetičku energiju - nju dobiva iz Brownova gibanja. Ne zaboravimo da se kuglica nalazi u tekućini te da je molekule tekućine neprestano udaraju iz svih smjerova. Kako su udarci nasumični, rezultat je *Brownovo gibanje*, gdje se kuglica giba poput "pijana mornara" (slika 4). Zarobljena kuglica onda bi se gibala kao pijani mornar u velikoj rupi. Iz jednadžbe (1) vidljivo je da konstanta zamke određuje



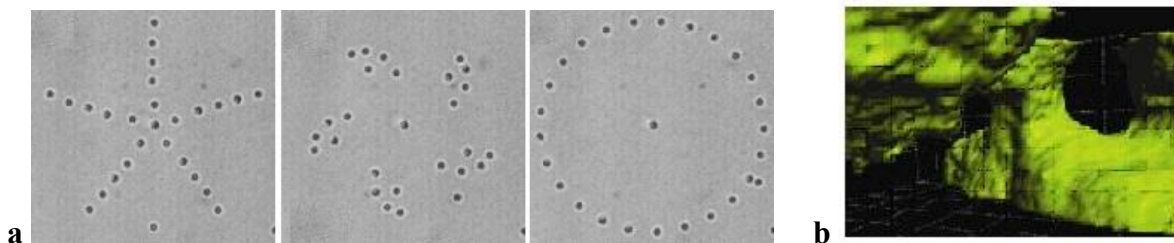
Slika 4 a Pogled na Brownovo gibanje kroz mikroskop. **b** Mikroskopsko objašnjenje Brownova gibanja: molekule vode nasumično udaraju kuglicu koja se onda i giba nasumično kao u (a). Ovo je skica Java appleta koji cijeli možete pogledati na:

http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Applets/brownian/brownian.html

"čvrstoću" zamke. Tj., što je veći k , to se kuglica teže miče, ili je potpuno nepomična (rupa je za našeg mornara veoma duboka i uska). Pomičući položaj zamke, kuglicu možemo premještati po volji, kao što običnom pincetom pomičemo malene predmete. Ime "optička pinceta" dolazi od prvih studija koje su koristile čvrste zamke, odnosno veliki k za hvatanje i pomicanje objekata, dok se danas koriste i slabije zamke (mali k) za mjerenje viskoznosti ili malih sila.

Svoju primjenu, optička pinceta je našla npr. u istraživanju molekularnih motora koji služe za transport tvari u stanici, elastičnosti proteina i DNA, difuziji proteina u membrani stanice, te istraživanju sustava koloidnih čestica. Također, moguće je uhvatiti velik broj čestica u polja optičkih pinceti (Slika 5a).

Dva eksperimenta se odmah vežu na Brownovo gibanje. Ako dopustimo čestici dovoljno vremena, ona će zbog Brownova gibanja istražiti cijeli slobodni prostor oko sebe. Ako se nalazi u optičkoj zamci, gibanje nije slobodno, ali još uvijek može istražiti prostor oko sebe. To se može iskoristiti za tzv. *fotografiranje termalnim šumom*. Kuglica se postavi u unutrašnjost poroznog materijala, prati se njezino gibanje i bilježi se u kojem dijelu uzorka se vidi Brownovo gibanje. Na Slici 5b prikazana je unutrašnjost mreže polimera i vide se šupljine u polimeru. Žutim je prikazan volumen gdje kuglica nije imala pristupa zbog prisutnosti polimera. U ovom slučaju se pod "termalnim šumom" podrazumijevaju nasumični udarci molekula o česticu čiji intenzitet ovisi o temperaturi (prosječna kinetička energija čestica idealnog plina je proporcionalna temperaturi).



Slika 5 a. 26 staklenih kuglica promjera 1 μm uhvaćenih u polja optičkih pinceta raznih oblika. **b** Slika unutrašnjosti polimera dobivena pomoću *fotografiranja termičkim šumom*. [Slike preuzete iz J.E. Curtis *et al.* Dynamic holographic optical tweezers *Optics Communications* **207** (2002) 169; C. Tischer *et al.* Three-dimensional thermal noise imaging *Applied Physics Letters* **79** (2001) 3878]

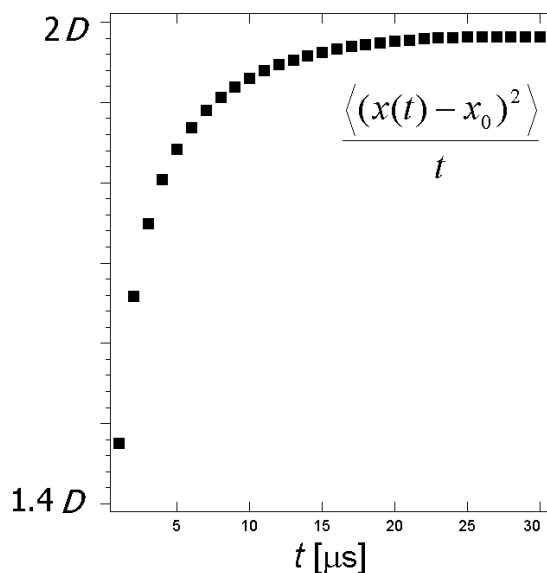
Brownovo gibanje usko je vezano uz pojam difuzije. Ako stavimo kap tinte u vodu, tinta će se kroz neko vrijeme jednoliko rasporediti kroz tekućinu što ćemo vidjeti kao jednaku boju tekućine u svim dijelovima volumena. Ako pogledamo поближе, molekula tinte se ponaša kao šetač kojeg molekule vode udaraju nasumično, pa će i molekula tinte slijediti krivulju gdje je smjer između svake dvije točke nasumičan. Rezultat je Brownovo gibanje prikazano na slici 4a. No, možemo se pitati koliko je brzo Brownovo gibanje? Veličina koja to opisuje je konstanta difuzije D . Veće čestice će imati i veću masu, pa će se nakon udara molekule vode gibati sporije, tj. konstanta difuzije je manja.

Ako promatramo položaj čestice $x(t)$ u odnosu na neki početni položaj x_0 , vrijedit će relacija

$$\langle (x(t) - x_0)^2 \rangle = 2Dt \quad (3)$$

tj. prosječan kvadrat pomaka čestice je proporcionalan vremenu, a $2D$ je konstanta proporcionalnosti. Zagrada " $\langle \rangle$ " znači da je kvadrat razlike položaja usrednjen kroz neki vremenski period. Što se događa na manjim vremenskim skalama? Kada u kuglicu udari samo jedna molekula vode, ona joj preda dio svoje količine gibanja (naravno, kuglica mora biti dovoljno malena da bi predana količina gibanja bila značajna). Kuglica će se gibati *balistički*, kao bilijska kugla koju udarimo štapom. Kuglica će ipak nakon nekog vremena usporiti zbog trenja s ostatkom tekućine, a udarat će je i ostale molekule vode. Ali, na vremenskim skalama koje su usporedive s vremenom usporavanja, broj udaraca je malen te se kuglica ne nalazi u režimu Brownova gibanja.

Ako kuglicu zarobimo pomoću optičke pincete, vidjet ćemo Brownovo gibanje ograničeno u prostoru od nekoliko stotina nanometara što odgovara veličini zamke. Ako koristimo jako slabu zamku, tj. jako malen k , potencijalna energija kuglice u zamki bit će jako sploštena. Na malim vremenskim skalama kuglica tada neće osjetiti prisutnost zamke i ponašat će se kao slobodna kuglica. Ako snimamo položaj kuglice promjera oko $1 \mu\text{m}$ s vremenskom rezolucijom od oko $1 \mu\text{s}$, vidjet ćemo da se kuglica ne ponaša prema jednadžbi (3), kao što je prikazano na slici 5. Za karakteristična vremena oko $1 \mu\text{s}$, konstanta difuzije D počinje ovisiti o vremenu, što pokazuje da se ne nalazimo u režimu Brownova gibanja.



Slika 6 Na velikim vremenskim skalama kuglica će biti u režimu Brownova gibanja (slika 4) i $\langle (x(t) - x_0)^2 \rangle / t = 2D$ prema jednadžbi (1). No na malim vremenskim skalama, $\langle (x(t) - x_0)^2 \rangle / t < 2D$, odnosno izlazimo iz Brownova režima, te difuzija kuglice više neće biti opisana konstantom difuzije D .

