

Fizika života

ili

Fizika u biologiji i otkud ona tamo?

Antonio Šiber

24. travnja 2011. godine

„Pogledajte naše današnje posjednike položaja, ugleda pa i učenosti. Što oni rade? Učenjak je uhvaćen u klopku učenosti, čovjek na položaju i od ugleda položajem i ugledom, a bogataš svojim bogatstvom. Oni pate zbog toga; umjesto da su u mogućnosti da to upotrijebe, oni su time opterećeni. Budući da uz to čvrsto prijanjaju, nikad ga ne mogu odbaciti. Oni nisu drugo doli njegovi čuvari. Ostaviti sve, odbaciti sve, pravi je put da se sve skupi i da se sve posjeduje. Za takva čovjeka posjedi, kakvi god bili, nisu prepreka. On ih može upotrijebiti, i oni postaju izvorima slave i vrline.“

[Zen-budistički opat Amakuki (1878. - ?) prema V. Devide, Japanska haiku poezija i njen kulturnopovijesni okvir, Zagrebačka naklada, Zagreb, 2003]

Čudno me ljudi gledaju kad im kažem da se bavim virusima ili da me zanima kako radi imuni sustav kukaca i biljaka. Nije da me čudno gledaju zato što su područja mog interesa neobična nego zato jer je neobično da mene *kao fizičara* takvo nešto zanima. Pa eto... dijelom i da se objasnim takvima, a dijelom i zato što mislim da mogu u tom procesu i nešto kreativno reći nastaje ovaj tekst. U njemu želim objasniti kakva je uloga fizike i fizičara u biologiji i opisu živih sustava.

Smatram da interes čovjeka za prirodu mora biti neopterećen njegovim školovanjem, tj. ja se za prirodu ne interesiram prije svega *kao fizičar* nego *kao znatiželjno ljudsko biće*. Budući da je priroda zanimljiva na mnogo „fronti“, jasno je da me *kao čovjeka* mnogo toga zanima. No, ipak, ja kao fizičar pokušavam na ta pitanja odgovoriti koristeći fizikalni pristup i tehniku koju sam naučio na studiju i u svojem dosadašnjem djelovanju. U tome nema ničega naopakog ili kontradiktornog, prije svega zato jer je ono što danas smatramo fizikom po mom mišljenju najbolji okvir za spoznaju svijeta. U redu, to govorim kao fizičar i kao čovjek koji se u tome dobro snalazim pa je moguće da sam malo pristran, ali svatko tko me poznaje zna da simpatiziram razne oblike kreativne ljudske djelatnosti pa će i shvatiti da je moja

pristranost mnogo manja nego što bi se moglo učiniti nekome tko zna samo to da sam fizičar. Stoga ću vam pokušati obrazložiti, što je moguće nepristranije, razloge za moj stav o superiornosti fizikalnog pogleda na svijet i o važnosti fizike u opisu života.

Kad kažem „fizika“, ljudi odmah pomisle na nešto kruto, na čelik i na beton, na elektrane, na nuklearne bombe, na svemirska putovanja, sve snažno i ubojito, sve sami heavy metal. I točno je to. Fizika je zbilja znanost koja stoji iza građevine, strojarstva, elektrotehnike, astronautike... Kad građevinac proračunava stabilnost zgrade koristi fiziku, premda možda ni sam nije toga svjestan jer gleda u znanje destilirano u neakvim tablicama. U njegovom slučaju radi se pretežno o statici i fizici koja opisuje elastičnost i izdržljivost materijala pod opterećenjem. Kad strojar projektira nekakav stroj, opet će razmišljati o tvrdoći i elastičnosti materijala, o trenju, o deformacijama pri velikim kutnim brzinama i slično. Opet se naravno radi o fizici. O elektrotehničaru skoro da i nije potrebno govoriti jer svatko zna (baš...) da se iz Maxwellovih jednadžbi može izvesti sve što jednom sposobnom elektrotehničaru treba, od Faradayevog zakona indukcije do Ohmovog zakona. Naravno, fizičari iz Maxwellovih jednadžbi mogu izvesti još svašta, ali obrazlaganje svega toga odvelo bi me daleko od teme.

Nešto manji broj neprofesionalaca zna i da se sva kemija može svesti na fiziku. Neki kemičari će se tome usprotiviti, ali moram reći da ne govorim to zato da bilo koga potcjenjujem nego zato što to iskreno mislim. Uostalom, ovo moje mišljenje nije nimalo originalno i osim što ga dijele skoro svi fizičari, dijeli ga i dobar postotak kemičara. Naime, teorija elektronske strukture i stabilnosti molekula je primijenjena kvantna fizika. Objašnjenje brzina kemijskih reakcija može se dobiti iz kombinacije informacija o elektronskoj strukturi reaktanata i produkata te nešto malo elementarne termodinamike. Radi se opet o primjeni fizike.

Ono što sam postigao prethodnim paragrafom, osim što sam uvrijedio određeni broj kolega kemičara (tj. fizičara), je da sam uspio pomaknuti fiziku u nešto drukčiji kontekst. Pomaknuo sam je sa astronomskih i metarskih skala i ukazao na njenu važnost na skalama milijarditih dijelova metra – nanometra. Osim toga, sad uz riječ „fizika“ možete povezati i epruvete koje se dime, tekućine koje u kontaktu mijenjaju boju, ali i atome i molekule. To je važna promjena konteksta i nije nimalo trivijalna, pogotovo što su neki fizikalni velikani, npr. Ernst Mach, cijele svoje živote nijekali postojanje atoma. Upravo zato što atomi i molekule postoje, kemija, koja se pretežno bavi molekularnim transformacijama *jest* fizika.

Jedan mogući put od spoznaje da je kemija fizika do prihvaćanja da fizika ima važnu ulogu i u biologiji, što je zamisao koju pokušavam razraditi u ovom tekstu, otvara se nakon uočavanja da su (deoksi)ribonukleinska kiselina i proteini molekule. Ove molekule su karakteristične za sav život, a budući da se radi o *molekulama* one pripadaju u domenu interesa kemije, dakle fizike. I zbilja je to točno. Kemičari bi ove molekule nazvali vjerojatno polimerima, a riječi koje ja koristim za njihov opis su biopolimeri i polielektroliti, čime želim naglasiti da su ove molekule u otopini nabijene.

Ipak, gore skicirani put je većim dijelom posve nevažan za ono o čemu ja želim govoriti u ovom tekstu. Sama činjenica da se živa tvar sastoji od molekula, jednako kao i neživa tvar te da tako pripada u domenu fizike i nije pretjerano inspirativna, a pogotovo nije originalna, premda je točna. U stvari, naglasak na molekule kad se govori o životu prisutan je u biologiji i bez uplitanja fizike. Moglo bi se reći da je ideja da će razumijevanje molekula dovesti na kraju i do razumijevanja života ili barem nekih bolesti jedna od dogmi molekularne biologije. Kad se govori o genima, o informacijama, o defektnim proteinima, govori se o izgledu i sastavu DNA molekula i proteina. No, da li su te informacije zbilja sve što nam je potrebno da potpuno razumijemo biologiju? Ja mislim da nisu.

Da razumijemo biologiju i život potrebno nam je mnogo više. Zadržat ću se malo za početak na činjenici da danas pojam *biologija* gotovo svima u stvari znači *molekularna biologija*. Posljedica je to promjene naglaska i težišta interesa u biologiji u zadnjih šezdesetak godina i spektakularnog otkrića Watsona i Cricka o strukturi DNA molekule kao nositelju informacije o životu.

Biologija je prije otkrića DNA molekula i proteina bila znatno drukčija znanost. Laiku naravno najprije pada na pamet Charles Darwin i njegova teorija o postanku vrsta tj. o evoluciji životnih formi. Darwin nije mislio o molekulama niti je to ni mogao u svoje vrijeme, premda će današnji proponenti molekularne biologije reći da je ono što je Darwinu nedostajalo da zaokruži svoju teoriju bilo upravo materijalno utemeljenje informacije o životu tj. postojanje gena odn. DNA molekula. Darwina i njegove suvremenike interesirali su prije svega oblici, boje i navike života te prilagođenost životnih formi okolini.

A kad govorimo o prilagođenosti života okolini, govorimo o (uglavnom klasičnoj) fizici. Lako je ovo ilustrirati i Darwinovim razmišljanjima, ali su za jednog fizičara svakako zanimljivija razmišljanja još jednog velikog biologa – D'Arcyja Thompsona. Thompsonova knjiga „*On growth and form*“ (O rastu i obliku) [1] posve je natopljena primjenama fizikalnih principa na djelovanje, pokret, ali i oblik organizama. Kako je Thompson poznat po prekrasnom (a po meni i malo pretjerano naglašeno eruditskom) stilu, citiram jedan od njegovih iskaza u originalu, a onda navodim i njegov prijevod:

„In an organism, great or small, it is not merely the nature of the motions of the living substance which we must interpret in terms of force (according to kinetics), but also the conformation of the organism itself, whose permanence or equilibrium is explained by the interaction or balance of forces, as described in statics.“

„U organizmu, velikom ili malom, nije samo priroda gibanja žive tvari ona koju moramo interpretirati u terminima sile (u skladu s kinetikom), nego je to i konformacija organizma samog, čija se trajnost ili ravnoteža objašnjava međudjelovanjem ili uravnoteženošću sila, kako se to opisuje u statici.“

Thompson kaže da se i gibanje i oblik (konformacija) organizma može objasniti uvođenjem koncepta fizikalne sile. Danas bismo vjerojatno govorili o energijama, ali je i njegov iskaz sasvim jasan. Thompson se npr. pita zašto krvne žile imaju određeni sastav, elastičnost te kakva je topologija njihovog grananja i kakve to sve veze ima s hidrodinamikom:

„Many problems of hydrodynamical kind arise in connection with the flow of blood through the blood-vessels; and while these are of primary importance to physiologist they interest the morphologist in so far as they bear on question of structure and form. As an example of such mechanical problems we may take the conditions which go to determine the manner of branching of an artery, or the angle at which its branches are given off.“

„Mnogi problemi hidrodinamičke vrste pojavljuju se u vezi s protokom krvi kroz krvne žile; i dok su oni od glavne važnosti fiziologu, oni zanimaju i morfologa utoliko koliko se tiču pitanja strukture i oblika. Kao primjer takvih mehaničkih problema mogli bismo razmatrati uvjete koji određuju načine grananja arterije, ili kut pod kojim se pojavljuju njeni ogranci.“

Ovdje Thompson kaže da je za dobar krvožilni sustav organizma važno da je protok fluida kroz njega nesmetan, te da ga silna grananja žila ne ograničavaju. U suštini, krvožilni sustav organizma je dobro rješenje hidrodinamičkih jednadžbi tj. morao je nastati udovoljavajući uvjetima fizike toka fluida (hidrodinamike). Ne mora se samo krvožilni sustav svojom konstrukcijom i oblikom pokoravati zakonima fizike, odličan primjer je npr. i kostur koji mora biti dobro statički i dinamički stabilan. Dovoljno je zamisliti dugi vrat žirafe i uvjete koje to postavlja na konstrukciju njenog kostura koji mora biti i statički pouzdan, ali i dovoljno pokretan. A onda zamislite klokana. Thompson, naravno, raspravlja i o tome.

Primjere gdje se organizmi ili dijelovi organizama moraju ustrojiti prema krutim fizikalnim zakonitostima mogao bih nabrajati u cijeloj jednoj knjizi, ali budući da ju je Thompson već napisao, neću više. S obzirom da organizmi evoluiraju, možemo zaključiti da *fizikalna ograničenja postavljaju stroge uvjete na izgled i strukturu organizma*. To znači da neke aspekte postojećih vrsta *nikad nećemo moći razumjeti studirajući njihovu DNA molekulu nego tek kad uočimo fizikalne razloge za nastanak određenih struktura i oblika u tim organizmima*. Osim toga, teško mi je zamisliti da ćemo u DNA molekuli moći pročitati da li je organizam o kojemu se radi možda kockast, a može preživjeti jedino loveći sitniji plivajući plijen. Naravno da bi to predstavljalo hidrodinamičku katastrofu za taj organizam i sigurno izumiranje, ali ja jednostavno ne vjerujem da ćemo to ikad moći pročitati u njegovoj DNA molekuli. Mislim da se na ovoj točki moj zaključak počinje razlikovati od dominantne dogme molekularne biologije. Najtvrdi zastupnici ove dogme tvrdit će da je *apsolutno sve* zapisano u DNA molekuli organizma samo mi to nismo, barem u ovom trenutku, sposobni razumjeti. Ali čak i da je ova njihova dogma točna, i čak i da možemo zamisliti savršeni „interpreter“ DNA

molekule koji iz redoslijeda baza dešifriraju cijeli organizam (vidi sliku 1), čak i tada ne bismo razumjeli zašto je taj organizam upravo takav ako ipak ne znamo nešto o fizikalnim ograničenjima u kojima organizam živi (npr. živi li u uvjetima visokog tlaka na velikim dubinama ili mora li brzo plivati da bi se prehranio i slično).



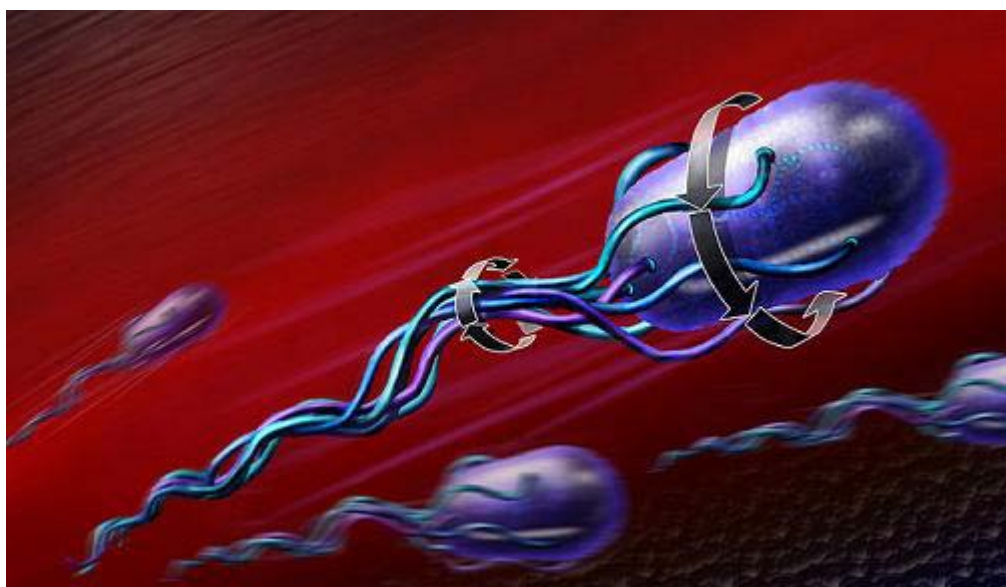
Slika 1: „Interpreter“ – zamišljeni stroj koji iz redoslijeda baza u DNA molekuli može konstruirati organizam (tj. njegov potpuni izgled) iz kojeg ta molekula dolazi.

Fizika je za objašnjenje strukture organizma važna na svakom koraku, a ja sam do sad navodio uglavnom fizikalne uvjetovanosti na vidljivoj, makroskopskoj skali. No, fizika je važna i na atomskim skalama u organizmu. Tek kad razumijemo elastičnost kompozitnih slojastih materijala možemo razumjeti *zašto* je sedef školjke građen od izmjeničnih slojeva molekula proteina (hitin, lustrin i proteini slični onima iz svile) i kalcijevog karbonata (u formi aragonita). Ovdje se fizika počinje pojavljivati na vrlo netrivijalan način. Naime, elastičnost i tvrdoća sedefa školjke važna je na makroskopskim skalama, na skalama dužine školjke. Ali, ova se svojstva materijala realiziraju njegovim posebnim mikroskopskim, atomskim uređenjem te proizvodnjom posebnih molekula (proteina) čija formula (dio DNA molekule, gen) mora biti zapisana u DNA molekuli školjke. Mogli bismo reći da se makroskopski fizikalni uvjet na svojstva materijala školjke „utisnuo“ u njenu DNA informaciju. Tek kad budemo razumjeli elastičnost kompozitnih materijala, razumjet ćemo i taj dio DNA informacije organizma.

Da ukratko sumiram nekoliko prethodnih teza: Biološki sustavi imaju strukturu i oblik, potrebna im je energija za gibanje u kojemu moraju očuvati svoj integritet, oni svojim oblikom i dinamikom moraju udovoljiti nizu fizikalnih zahtjeva. Ovi zahtjevi postavljaju se na skali veličine samog organizma, no budući da se struktura organizma izgrađuje molekularno te da fizikalna svojstva materijala ovise o njihovom molekularnom sastavu, *evolucijske prilagodbe fizikalnim zakonitostima morale bi se moći vidjeti u genima*, tj. u dijelovima DNA koja kodira proteine. Naravno, razumijevanje fizikalne uloge određene strukture te utjecaja koji na tu ulogu ima njen specifični molekularni sastav (proteinski + anorganski) je težak problem za koji su jedino fizičari dovoljno pripremljeni.

Moramo se ipak upitati gdje prestaje ta „makroskopska skala“ te ne djeluju li zahtjevi na prilagodbe organizma fizikalnim ograničenjima i na manjim skalama, na primjer na skali stanica (nekoliko mikrometara)? Stanica jest mali organizam i jednako kao i veliki organizam postoje uvjeti na njenu pokretljivost, elastičnost i izdržljivost. Evo što Charles W. Wolgemuth (fizičar) kaže o tome [2]:

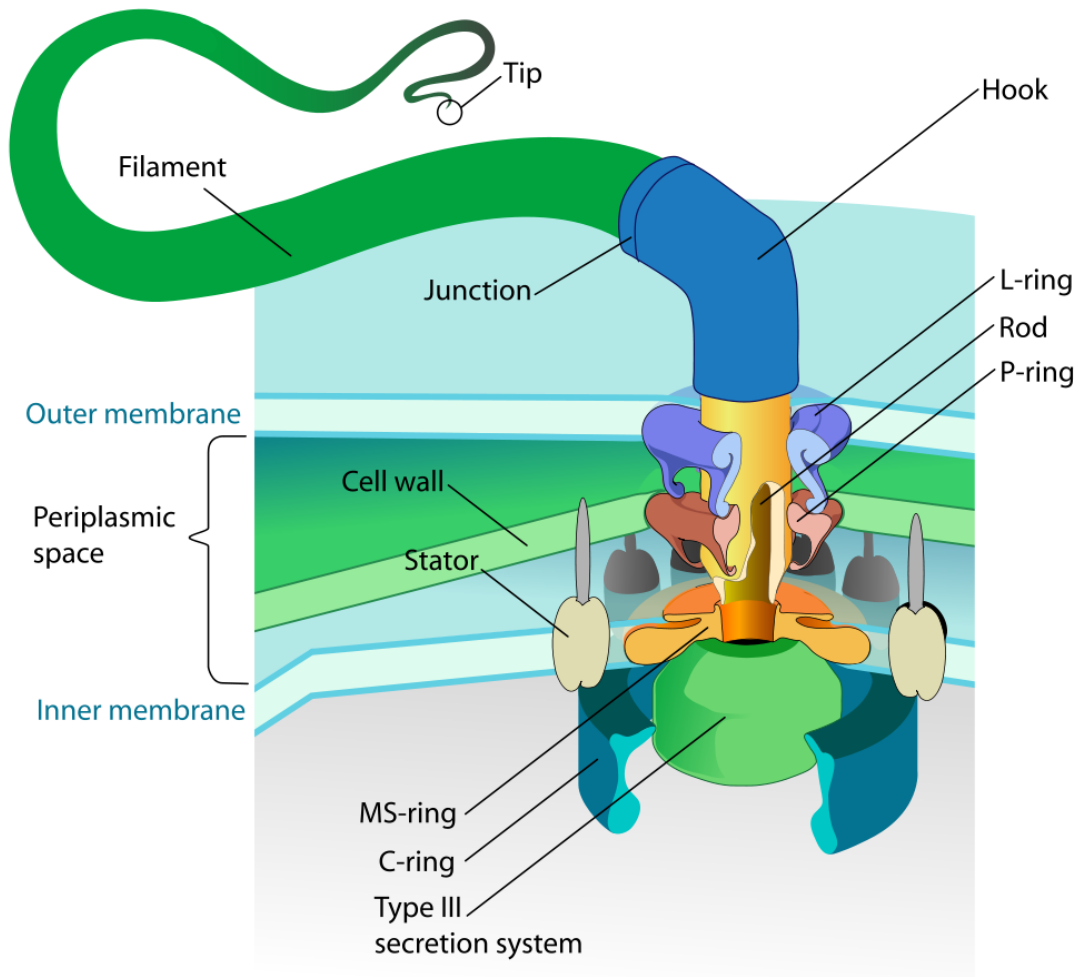
„Mnoge životinjske stanice, uključujući i metastatske stanice raka, bijele krvne stanice, i stanice kože koje pomažu u cijeljenju rana, pužu. Pokazano je da je ovaj proces zahtijeva polimerizaciju filamentskog aktina na čelu stanice, adheziju za bliski okoliš, i kontraktilni mehanizam koji proizvodi silu potrebnu da se ostatak stanice povuče prema naprijed. Fizičari su stvorili, a i dalje stvaraju informativne opise sva tri od ovih procesa.“



Slika 2: Model djelovanja flagela kod Escherichie coli (National Science Museum)

Stanice također imaju „kostur“, doduše mnogo dinamičniji od našeg kostura, građen od nekoliko vrsta gradbenih proteina koji se sastavljaju u vrpčaste i cjevaste strukture – kosti. Dinamika ovih struktura važna je kod diobe stanice te kod njenog pokretanja. Kad već govorimo o stanicama koje se pokreću, ne možemo ne spomenuti bakterije. Bakterije se

pokreću rotirajući proteinske „vijke“ (vidi sliku 2), flagele. Flagele su građene od devet slijepljenih parova „proteinskih cijevi“ građenih od proteina tubulina. Iz same strukture flagele vidi se da pojedini proteini koji izgrađuju flagelu moraju biti posebnog oblika tako da bi se njihovim slaganjem mogla načiniti vijčasta struktura flagele. Nadalje, vidi se i da na skali mikrometara postoje fizikalni uvjeti kojima stanice moraju udovoljavati – flagela je „brodski vijak/propeler“ koji je „izmisllila“ evolucija.



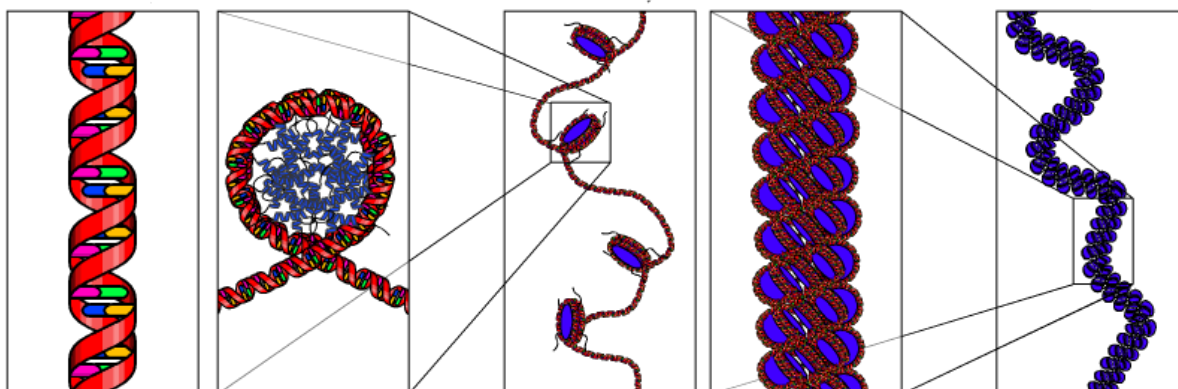
Slika 3: Shematski prikaz flagele s naglaskom na proteinsku strukturu motora u staničnoj stijenci na koji je flagela zakačena (Wikimedia Commons)

Kad govorimo o „propeleru“, moramo govoriti i o „motoru“ koji ga pokreće. Što pokreće flagelu tj. bakteriju? U stanicama se energija dobija iz kemijskih reakcija, pretvaranjem jednih molekula u druge pri čemu se oslobađa energija. Molekule adenozin-trifosfata (ATP) pohranjuju kemijsku energiju u stvojoj elektronskoj strukturi, donekle slično kao eksplozivi – kad je potrebno, njihova se napeta kemijska struktura relaksira preraspodjelom atoma (hidrolizom), oslobađajući pri tome energiju. Upravo sam definirao još jedno područje na kojem fizičari imaju i te kako što tražiti, no da se vratim na problem pokretanja flagele: Nije dovoljno znati da u stanici postoje molekule koje služe kao gorivo, koje izgaraju. Da bi se njihova energija mogla korisno uporabiti, nužno je da postoje *strukture*

čijim se pokretanjem energija izgaranja ATP molekule može usmjeriti u rad. Drugim riječima, da pokrenete automobil nije vam dovoljan benzin, morat ćete benzin izgarati u kontroliranim uvjetima i u za to konstruiranim mehaničkim strukturama – motorima. Sad smo na području strojarstva, no i bakterije su dijelom tamo. Naime, flagele su zakačene na proteinske motore u stanici koji svojom strukturom tj. rasporedom i kemijom proteina koji ih sačinjavaju omogućuju kontroliranu kemijsku pretvorbu ATP molekule što rezultira rotacijom flagele. Na slici 3 prikazana je shema tog proteinskog motora. Danas se zna kako taj motor radi, a zanimljivo je i da se za opis proteinskih struktura koriste termini stator i rotator koji su bliži strojaru nego biologu.

Moja argumentacije prirodno se nastavlja: Ne samo da fizikalni zakoni na *makroskopskim skalama* uzrokuju poseban, evoluiran i prilagođen oblik proteina, nego i pojedinačni proteini, na skalama od nekoliko nanometara imaju funkcije koje se mogu shvatiti tek nakon razumijevanja fizikalnog mehanizma u koji je protein uključen. Na primjeru flagele možemo reći da iz samog proteinskog koda nikad ne bismo mogli zaključiti da ta šifra (gen) opisuje stator motora flagele. Nabranje „mehaničkih“, „električnih“, „elastičnih“, „dinamičkih“ uloga za koje se danas zna da ih proteini obavljaju moglo bi se produžiti na mnogo stranica. Želim još jednom naglasiti i *da je pojedinačni protein struktura koja mora udovoljavati fizikalnim zakonitostima na nanometarskim skalama, zakonitostima koje određuju i ograničavaju njegovu (evolucijsku) funkciju*. Zakonitosti na koje mislim često nemaju nikakve veze s kemijom.

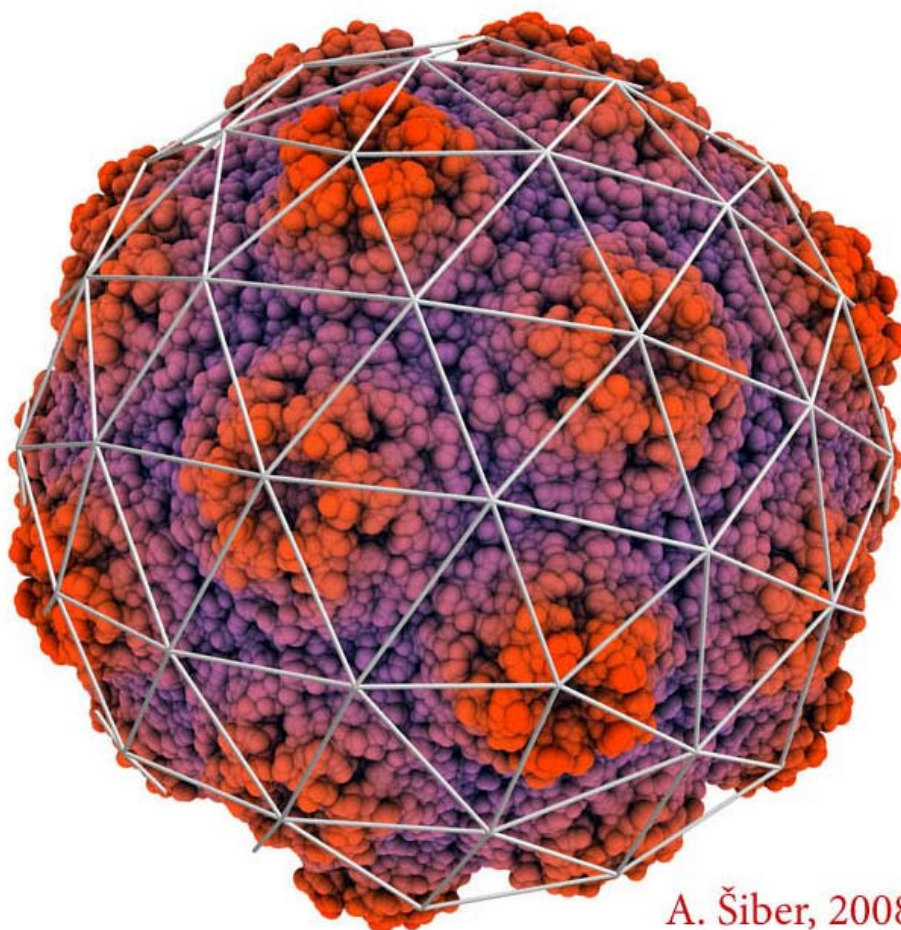
Znate li da je ukupna dužina DNA koja je sadržana u svakoj ljudskoj stanici oko 3 metra? Tri metra koja se moraju potrpiti u stanicu od nekoliko mikrometara i to samo u njenu jezgru! Način na koji se postiže takvo efikasno „zipanje“ DNA molekule je putem posebnih proteina (histona) koji imaju oblik diskova (prikazani plavom bojom na slici 4) oko kojih se DNA namata, a na većim skalama se takvi omotani diskovi pakiraju jedan pored drugog (vidi sliku 4)



Slika 4: Struktura „komprimirane“ DNA u kromosomima (kromatin). Plavom bojom prikazani su proteini (histonski oktameri), a crvenom DNA molekula (Wikimedia Commons).

Kemičari i biolozi tražili bi neke, kako oni to zovu „specifične“ interakcije između proteina i DNA koje vode do namatanja DNA, tj. tražili bi neke molekularne sekvence na proteinima i na DNA molekuli koje posebno snažno međudjeluju. No, u očima fizičara, DNA molekula je vrlo negativno nabijena u otopini, a histonski oktameri vrlo pozitivno pa među njima očito postoji jaka *elektrostatska* (dakle nespecifična) interakcija. Elektrostatske interakcije su u „živoj tvari“ vrlo važne. Nije slučajno što su organizmi „zasoljeni“ odn. što njihovi stanični i izvanstanični prostori sadrže velike koncentracije otopljene soli tj. pozitivnih i negativnih iona. Ovi ioni igraju bitnu ulogu u regulaciji (elektrostatskih) interakcija između DNA i proteina.

Za praktički sve procese karakteristične za život nužno je da DNA i proteini međudjeluju što zahtijeva precizno pozicioniranje proteina tj. dovođenje ovih sustava u točne međusobne odnose. Ovi se aspekti funkcije organizma neće moći objasniti bez fizike (elektrostatika, teorija elastičnosti, hidrodinamika i slično, a čak možda i kvantna mehanika).



Slika 5: Virus mozaičnog žutila repe. Vide se proteini koji čuvaju virusnu RNA molekulu koja je unutar proteinskog omotača. Ovaj virus ima izraženu i lako uočljivu ikozaedarsku simetriju.

I na kraju želim navesti neke primjere iz svog istraživanja. Kao fizičar, moram reći da me život impresionira. Impresionira me preciznost s kojom se život odvija i ponavlja tj. preciznost regulacije molekularnih mehanizama života. Ja sam za početak svoje studije života

odabrao sustav koji se vjerojatno ni ne može nazvati „pravim“ životom, ali je na korak do „pravog života“ – virus. U zadnjih šest godina istraživanja postalo mi je sasvim jasno da je fizičarsko znanje koje imam važno za opis virusa, a nije to postalo jasno samo meni, moje kolege su već skovali ime za područje kojim se bavimo – *fizikalna virologija* [3,4]. Naravno, za nas su virusi sasvim legitimni fizikalni sustavi i mi ih ne promatramo prvenstveno kao uzročnike bolesti nego kao strukture čija forma i funkcija bitno ovisi o fizikalnim zakonitostima. Vidi se to odmah iz njihove izražene simetrije (slika 5).

Stanice su identificirane kao pozornica gdje započinje većina bolesti modernog doba. Ima li fizici tamo mjesta ili je fizika tamo potisnuta tako da slijedi prvenstveno biokemijsku uvjetovanost stanice? Ja se stalno uvjeravam u sve veću važnost fizike za razumijevanje stanice i života. Kad ja gledam virus, bakteriju i stanicu raka pitam se možemo li napadom na njihov *fizički* integritet (stabilnost membrane npr.) riješiti problem bolesti? Ovo su prilično novi načini razmišljanja o bolestima i načinima njihovog mogućeg rješavanja i sasvim je moguće da će nas dovesti do novih lijekova. Kad sam na samom početku ovog teksta rekao da me zanima kako radi imuni sustav kukaca, rekao sam to zato što sam u molekulama njihovih imunih sustava (tzv. antimikrobnim peptidima) prepoznao fizikalne načine djelovanja. Prepoznao sam u njima male „bombe“ koje se zbog svog naboja vezuju na bakterijsku membranu, ali je, upravo zbog svog naboja kojeg donose sve više i više, tako i trgau. Tu se po mom mišljenju radi o elektrostatskoj nestabilnosti bakterijske membrane.

Fizika, osim što je očigledno jako korisna, donosi i novu vrstu razumijevanja u biologiju, oslonjenu bitno na matematiku i jasno, modelno razmišljanje. To će biti važno i za traženje odgovora na vrlo fundamentalna pitanja kakvo je „*Kako je život uopće nastao?*“.

Literatura:

- [1] D'Arcy Wentworth Thompson, *On growth and form*, Cambridge University Press, 1945.
- [2] Charles W. Wolgemuth, *Does cell biology need physicists?*, Physics **4**, 4 (2011).
- [3] W. H. Hoos, R. Bruinsma, and G. J. L. Wuite, *Physical virology*, Nature Physics **6**, 733 (2010).
- [4] Pristutnost fizičara u istraživanju virusa ima prilično dugu povijest. Vidi npr. Ernest C. Pollard, *The Physics of Viruses*, Academic Press Inc., New York, 1953.