ALTERNATOR
Misliti znanost.

Arzenova bakterija, ki ni spremenila učbenikov

21. 8. 2025

Številka: 16/2025

Avtor:

- Matej Huš



Foto: Arne Hodalič

Eden najtrdnejših dokazov za to, da se je življenje na Zemlji razvilo enkrat samkrat, torej da imajo vsa živa bitja skupnega prednika (LUCA, angl. *last universal common ancestor*), je podobnost njihove biokemije. Poleg drugih podobnosti prav vsa živa bitja genski material zapisujejo z deoksiribonukleinsko kislino (DNK), katere kopijo imajo skoraj vse celice. DNK ima enako zgradbo v vseh kraljestvih živih bitij, zato je javnost pred petnajstimi leti močno presenetilo odkritje nenavadne bakterije. NASA je odkrila bakterijo, ki naj bi v DNK namesto fosforja uporabljala arzen. Revolucionarno odkritje je bilo takoj pod drobnogledom svetovne javnosti, ki je hitro izrazila močan dvom, a šele pred nekaj tedni je revija *Science* članek iz leta 2010 (https://doi.org/10.1126/science.1197258) tudi uradno umaknila.

Petnajst let je dolga doba in ves ta čas je v znanstveni literaturi formalno vztrajal omenjeni članek, ki je z današnjega zornega kota napačen. Čeprav je znanstvena skupnost več kot desetletje vedela za njegove pomanjkljivosti, je bil formalni umik pomemben korak. Ko je Newton pred tristo leti rekel, da je videl dlje, ker je stal na ramenih velikanov, je mislil na znanstveno literaturo. Znanost še danes temelji na zaupanju, da raziskovalci v svojih delih verodostojno opisujejo svoje eksperimente in rezultate, zato se naslednji rodovi zanašajo na objavljene članke. Običajno je, da poznejša odkritja revidirajo stara – tudi Newtonovo gravitacijsko teorijo je dopolnila Einsteinova relativnost, medtem ko na človeških razdaljah in velikostih prva še vedno dobro opisuje resničnost. Če pa argumentacijo svežega članka izpodbija že aktualno razumevanje sveta, je treba tak članek umakniti.

A ker se danes uspešnost raziskovalcev v veliki meri vrednoti s številom objavljenih člankov, njihovo citiranostjo in uglednostjo revij, se motivi raziskovalcev spreminjajo. Obenem postajajo revije vratarji njihovih karier, saj je objava v reviji *Science* pravzaprav samoizpolnjujoča se prerokba za svetlo prihodnost znanstvenika. Mnogokrat postane cilj objava sama,

za njeno citiranost in mesto objave pa je pomembna odmevnost zgodbe, torej tudi izjemnost. Arzenova bakterija je nazoren primer, kako se lahko izjemnost (hote ali nehote) tudi ponaredi.

Drugačna življenja

Emma Bovary je v Flaubertovi mojstrovini umrla zaradi zaužitja arzenika – arzen je namreč dovolj podoben v človeškem telesu potrebnim elementom, da moti normalno biokemijo v celicah. Popolnoma inertne kovine, kot je na primer titan, so za telesno biokemijo neopazne, arzen pa med drugim vpliva na delovanje encimov in z blokado sinteze NAD+ ter ATP, preprečuje proizvodnjo in porabo energije v celicah, povzroča oksidativni stres zaradi vzpodbujanja proizvodnje vodikovega peroksida v celicah in blokira delovanje mehanizmov za popravljanje poškodb DNK. Zato bi bilo odkritje oblike življenja, ki bi uporabljala arzen, toliko bolj izjemno.

Vse življenje na Zemlji temelji na ogljiku, a živa bitja potrebujejo v večjih količinah kar šest elementov (v manjših pa še precej drugih), ki jih vsebujejo vse celice in s tem tudi vse strukture. S kratico CHNOPS se zlahka spomnimo na ogljik, vodik, dušik, kisik, fosfor in žveplo. Fosfor, ki je v periodnem sistemu arzenov sosed periodo više, najdemo zlasti v DNK v fosfatnih skupinah, ki povezujejo sosednji molekuli sladkorja deoksiriboze, kar imenujemo fosfodiestrske povezave. Tudi v laični javnosti je široko znano dejstvo, da vijačnico DNK sestavljata dve verigi, informacijo na njiju pa zapisuje raznoliko zaporedje štirih osnovnih črk genske abecede, ki jih udejanjajo baze adenin, citozin, gvanin in timin. Te so čez verigi z vodikovimi vezmi povezane v para adenin-timin in citozin-gvanin. Iz splošne izobrazbe pa pogosto uide dejstvo, da so baze pripete vsaka na svojo molekulo sladkorja, ki se imenuje deoksiriboza. Te si sledijo v skorajda neskončnem zaporedju – človeški genom ima tri milijarde baznih parov –, ker so povezane s fosfodiestrskimi povezavami. Z drugimi besedami, deoksiriboze povezujejo fosfatne skupine, v katerih je osrednji atom seveda fosfor. Živa bitja brez fosforja ne morejo obstajati, česar se zaveda vsakdo, ki je kdaj kupil kakšno gnojilo.

Znanstvenofantastične romane često prežema tema biološkega življenja z drugačno kemijo. Že davnega leta 1934 je ameriški pisatelj Stanley Weinbaum v romanu *A Martian Odyssey* pisal o marsovskih živih bitjih, ki temeljijo na siliciju in ne ogljiku. Tudi v znanstvenih krogih so svojčas potekale razprave o tej možnosti, denimo v nagovoru (https://doi.org/10.1038/048463a0) za Britansko združenje za napredek znanosti, ki ga je leta 1893 imel britanski kemik James Emerson Reynolds. Kakor je silicij v periodnem sistemu neposredno pod ogljikom, je tudi arzen fosforjev spodnji sosed. Morda bi lahko namesto fosfodiestrskih vezi v neki tuji DNK obstajale arzenodiestrske vezi.

Arzenova bakterija

Zamisel, ki sega močno onstran znanstvene fantastike, je leta 2010 za kratek čas postala resničnost. Na novinarski konferenci 2. decembra 2010 je NASA samozaverovano predstavila izjemno odkritje. V jezeru Mono v Kaliforniji so odkrili bakterijo GFAJ-1 iz družine *Halomonadaceae*, ki je tam uspevala kljub visoki koncentraciji arzena in visoki alkalnosti. Organizmi, ki lahko preživijo v surovih razmerah, oziroma ekstremofili niso nič nenavadnega, saj življenje obstaja tudi v vrelcih vrele vode, več kilometrov pod gladino morja in na Antarktiki. Tudi na arzen odporne bakterije že poznamo, nekatere izmed njih arzen celo »pospravijo« v lastne celice, kjer ga izolirajo in deaktivirajo, da ne povzroča škode.

A GFAJ-1 ni zgolj ekstremofil, so trdili raziskovalci pod vodstvom Felise Wolfe-Simon, temveč lahko v svojem DNK del fosforja zamenja z arzenom. GFAJ-1 surove razmere ne le tolerira, temveč jih izkoristi v svoj prid. Še vedno ima raje fosfor, a če ga prične zmanjkovati, lahko še vedno raste, v DNK pa ga nadomesti z arzenom. To bi terjalo posodobitev vseh bioloških učbenikov.

Novinarska konferenca je požela ogromno zanimanja, prav tako članek, ki je bil istočasno objavljen v prestižni znanstveni reviji *Science*. Zdelo se je, da je GFAJ-1, ki so jo zaradi genetske podobnosti z obstoječimi vrstami označili le kot nov sev, resnično zmožna uporabljati arzen. Ko so jo gojili na gojišču s fosforjem, je tam pričakovano uspevala. Ko so jo gojili na gojišču z arzenom, je prav tako rasla in se razmnoževala. Z analizo njene zgradbe so nato ugotovili, da ima v celičnih strukturah in substratih, kot so lipidi, proteini, DNK in ATP, znatne koncentracije arzena, mestoma celo višje od fosforja.

Skepsa

Prve očitke si je NASA prislužila že z najavo novinarske konference, v kateri so se pretirano osredotočili na posledice za iskanje izvenzemeljskega življenja. Odkritje bakterije, ki lahko preživi tudi z vgradnjo arzena v svoj DNK, je svetlobna leta oddaljeno od odkritja nezemljanov. Kmalu se je nad odkritje zgrnila tudi povsem vsebinska skepsa. Carl Sagan, ki velja za enega največjih popularizatorjev znanosti, je pogosto ponavljal, da izjemne trditve zahtevajo izjemne dokaze. To pot pa dokazi niso bili niti trdni, kaj šele izjemni. Strokovna javnost je podvomila, da je arzen res pripraven za gradnjo življenja, k čemur so prispevali tako splošni argumenti kot tudi pomanjkljiva doslednost članka.

Poleg obče strupenosti arzena, ki jo nekateri ekstremofili tolerirajo zaradi mehanizmov za preprečevanje ali odpravljanje škode, bi neobhodno težavo predstavljala nestabilnost arzenodiestrskih vezi. Študije (https://doi.org/10.1021/cb2000023) kažejo, da bi se takšna vez ob prisotnosti vode razgradila v nekaj stotinkah sekunde, medtem ko je razpolovni čas fosfodiestrske vezi 30 milijonov let. In res, še danes lahko iz zamrznjenih ostankov davno izumrlih živalskih vrst izoliramo njihovo DNK.

Da se Felisa Wolfe-Simon moti ali vsaj preveč optimistično interpretira pomanjkljive rezultate, je bilo jasno sorazmerno

kmalu. Članek v reviji *Science* je bil na spletu dostopen decembra 2010, v tiskani izdaji pa je izšel šele junija 2011, kar je nenavadno dolg zamik. Opremljen je bil z osmimi tehničnimi komentarji, kakor se imenujejo resni pomisleki, ki jih pisno izrazijo drugi raziskovalci. Drugi raziskovalci, denimo James Cotner z Univerze v Minnesoti in Edward Kall z dunajske univerze, so opozarjali (https://doi.org/10.1126/science.1201255) , da je bilo arzenovo gojišče kontaminirano s fosforjem (https://doi.org/10.1126/science.1201438) , ki ga je bilo ravno dovolj za rast in razvoj bakterije.

István Csabai z Univerze Johnsa Hopkinsa v ameriškem Baltimoru in Eörs Szathmáry z Univerze Loránda Eötvösa v Budimpešti sta v svojem tehničnem komentarju ugotavljala (https://doi.org/10.1126/science.1201399) , da so raziskovalci statistično napačno računali obogatitev bakterijskih celic z arzenom in da pravilni izračun ne more izključiti možnosti, da bakterije arzena sploh ne vgrajujejo v svoje strukture. Stefan Oehler s Centra za biomedicino Alexandra Fleminga v Grčiji je izpostavil (https://doi.org/10.1126/science.1201381) , da avtorji niso izvedli potrebnih dodatnih eksperimentov, ki bi dokazali ali ovrgli trditve o vgradnji arzena v DNK. Podobne pomanjkljivosti so izpostavili tudi drugi (https://doi.org/10.1126/science.1201255) .

Dokazi proti

Tehničnim komentarjem so sledile prave študije, ki so skušale ponoviti ta izjemni rezultat. Skupina s Princetona je leta 2012 ugotovila (https://doi.org/10.1126/science.1219861) , da GFAJ-1 resnično tolerira visoke koncentracije arzena, celo 40 mM, a potrebuje vsaj skromno razpoložljivost fosfata (1,6 µM). Odkrili niso nobenih dokazov za arzenodiestrske vezi, s spektroskopsko analizo pa so v DNK odkrili le nekaj ostankov prostega arzena, nikakor pa ne kovalentno vezanega na deoksiribozo.

Do enakih izsledkov so se prebili raziskovalci z züriške ETH (https://doi.org/10.1126/science.1218455) . Ko so bakterijo izpostavili resnično obubožanemu gojišču z manj kot 0,3 µM fosforja, ni rasla. Visokoločljivostna masna spektroskopija je sicer pokazala nekaj spojin, ki so vsebovale arzen, zlasti sladkorjev, a ti niso nastali po bioloških poteh. V DNK so odkrili izključno fosfodiestrske vezi.

Julija 2012, poldrugo leto po »odkritju«, je bilo v znanstveni skupnosti že povsem jasno, da je GFAJ-1 tolerantna na arzen, a da še vedno potrebuje fosfor in uporablja običajno biokemijo, ki jo je imel že LUCA. Navsezadnje so leta 2011 tudi sekvencirali genom GFAJ-1 in odkrili, da vsebuje manj genov za odpornost na arzen, kot bi jih pričakovali glede na druge ekstremofilne bakterije, kaj šele, če bi bakterija arzen dejansko uporabljala. Prav tako niso našli nobenih prilagoditev, ki bi bile potrebne za preprečitev dostopa vode do arzenove DNK oziroma njeno stabilizacijo.

Bolje pozno kot nikoli

Kljub konsenzu znanstvene skupnosti, da arzenovih bakterij ni, je revija *Science* članek formalno umaknila (angl. *retraction*) šele julija 2025. Zdi se neverjetno, da je članek z očitno napačnimi zaključki poldrugo desetletje vztrajal v korpusu svetovne znanstvene literature, dasiravno opremljen s tehnični komentarji in poznejšimi članki drugih avtorjev, ki so ga izpodbijali.

Umik članka je resda skrajen ukrep, a v zadnjem času uredniki po njem posegajo laže kot nekoč. To je priznala tudi revija *Science*, ko se je zaradi poznega umika znašla pod plazom neprijetnih vprašanj, zakaj šele zdaj. Glavna urednika revije, Valda Vinson in H. Holden Thorp, sta pojasnila (https://www.science.org/content/blog-post/last-step-long-process-arsenic-life) , da so se kriteriji za umik člankov od leta 2010 do danes precej spremenili.

Nekoč je bil ukrep namenjen zavestnim manipulacijam, ponarejenim podatkom in drugim vrstam akademske nepoštenosti, ne pa napačni, površni ali nedosledni interpretaciji rezultatov. Danes so članki umaknjeni (https://doi.org/10.1126/science.adm8205) , kadar obstaja utemeljen dvom o tem, da rezultati podpirajo zaključke, uredniki pa se trudijo z umikanja sprati staro stigmo. Članek je lahko umaknjen, če kdorkoli – vključno z avtorji – spozna dejstva, zaradi katerih izsledkov ni mogoče več zagovarjati. Umik dandanes zaobjema vse od zlonamernosti do površnosti.

Avtorjem prvotne raziskave lahko verjamemo, da so v članku poročali o tem, kar so videli in izmerili. To je bil tudi razlog, da je članek sploh izšel in dobil osem tehničnih komentarjev. Vendar pa so bili eksperimenti in meritve pomanjkljivo zasnovani. Pridobljeni podatki so dopuščali več možnih interpretacij, sklepi avtorjev pa so bili izrazito optimistični – morda bi jih lahko označili celo za izjemne. Vendar so bili brez ustrezno izjemnih dokazov.

Z umikom članka je poldrugo desetletje trajajoča zgodba končana, avtorji prvotnega članka pa nasprotujejo njegovemu umiku. Trdijo, da so podatki objavljeni, kot so bili izmerjeni, študija pa da je povzročila živahne razprave v skupnosti in vzpodbudila nadaljnje raziskave. Poštenosti postopkov težko oporekamo, a sklepi se vseeno zdijo pretirani.

Izgon

Posledice fiaska z arzenovimi bakterijami so pljusknile tudi izven slonokoščenega stolpa znanosti. Ko je Felisa Wolfe-Simon decembra 2010 stala na odru in predstavljala odkritje, se je njena kariera v znanosti šele začenjala. Doktorirala je vsega štiri leta pred tem na Univerzi Rutgers, NASA pa je bila njena podoktorska institucija. Nekaj časa je bila med najbolj vidnimi osebnostmi na svetu – leta 2011 je bila tudi uvrščena na seznam stotih najvplivnejših ljudi na svetu (Time 100 (https://content.time.com/time/specials/packages/article/0,28804,2066367_2066369_2066250,00.html)). Dala je številne intervjuje, nastopala je na konferencah TED Talks, a luknje v članku so kmalu postale vidne. V času pred razmahom

interneta bi se razprave odvijale v znanstvenih revijah in na konferencah, v 21. stoletju pa so bile vsem na očeh, pogosto agresivne in mestoma tudi primitivne.

Internet je bil leta 2010 drugačen kot danes, a prvi zametki družbenih omrežij, predvsem pa forumi in blogi, so že omogočali izmenjavo mnenj v realnem času, tudi anonimnih in nekultiviranih, zaradi česar je bila Felisa Wolfe-Simon hitro na udaru. Ni šlo le za anonimne in podpisane pozive k umiku članka, temveč tudi za precej nesramne osebne napade (denimo zaradi barve njenih las), često povsem nepovezane z znanostjo.

Njena raziskovalna skupina je poročala, kakor je najbolje zmogla, predvsem pa so dali bakterijo vsem na razpolago za dodatne preizkuse. A to v svetu forumov in blogov ni štelo, revija *Science* pa sedaj priznava, da za zaščito znanstvenice ni storila dovolj. Neizprosnosti anonimnega internetnega občinstva se danes bistveno bolj zavedamo kot leta 2010, obstajajo tudi mehanizmi za zaščito integritete posameznikov, vse od pravice do pozabe do kazenskega pregona.

Vpliva, ki ga imajo objave – recenzirane ali nerecenzirane – na javnost, se je znanost zavedela šele v pandemiji pred petimi leti, ko so splet preplavili nerecenzirani rokopisi, mestoma naravnost škodljivi. Tudi zato je revija *Science* v naslednjih letih spremenila politiko umikov, da so vsaj objavljeni članki verodostojni. Laična javnost namreč objavljenim člankom zaupa, dolge kače nanje sklicujočih se nadaljnjih raziskav pa pogosto sploh ne zazna.

Felisa Wolfe-Simon je kmalu po letu 2010 zapustila staro okolje, a tudi v Lawrenceovem narodnem laboratoriju v Berkeleyju ni dobila prave priložnosti, saj jo je stigma, ki se je razširila prek interneta, spremljala pri vseh prijavah za financiranje in rokopisih, poslanih v objavo. Zapustila je svet znanosti, se izšolala za oboistko in poiskala delo v drugih panogah, ki so znanosti zgolj blizu, denimo kot svetovalka za biotehnološka zagonska podjetja. Nekaj priložnosti pa je poiskala tudi na bolj oddaljenih področjih, denimo v proizvodnji pekovskih izdelkov.

Katarza

Arzen je skorajda terjal še eno metaforično žrtev, a je Felisa Wolfe-Simon dobila drugo priložnost. Leta 2024 je prejela projektno financiranje za raziskave predpostavk, ki jih imamo o pridobivanju energije v živih bitjih. Na inštitutu BAERI (*Bay Area Environmental Research Institute*) v Oaklandu raziskuje magnetotaktne bakterije, ki v svojih celicah proizvajajo magnetne kristale. Delujejo kot majhni kompasi, ki po trenutnem razumevanju pomagajo pri navigaciji, morda pa jih bakterije uporabljajo tudi za pridobivanje energije, kar bi bilo spet premierno odkritje, saj smo doslej kot vira energije poznali le kemične vezi v hrani in svetlobo.

Že lani, ko je dobila novo priložnost, je v življenjepis na LinkedInu pod aktualno delovno mesto zapisala: »projektno financirana znanost, hvala, NASA«. Njen novi projekt namreč financira prav – NASA. A to pot bo drugače, pravi. Karkoli bo odkrila, bo ponudila tudi drugim raziskovalcem za nadaljnje analize, namesto da bi si prizadevala za objavo v prestižnih revijah, je v intervjuju (https://www.nytimes.com/2025/02/11/science/arseniclife-felisa-wolfe-simon-retraction.html) za *The New York Times* dejala februarja. Članek o arzenovih bakterijah ni le prispeval k večjemu razumevanju področja, kot smo sprva pričakovali, temveč je postregel še z zimzelenim naukom: skromnost je lepa čednost.