



*Kirurški papirus Edwina Smitha, ustvarjen okoli 1700 pr. n. št., je dobil ime po svojem najditelju, a njegova izdelava se pripisuje prvemu znanemu zdravniku v zgodovini – Imhotepu iz starega Egipta. Nekateri arheologi domnevajo, da gre pravzaprav za prepis še starejšega izvirnika, ustvarjenega že okoli 3000 pr. n. št. Papirus je bil preveden šele leta 1930.*

# Električni možgani (1. del)

Razmerje med maso možganov in maso celotnega telesa je pri ljudeh kar trikrat večje kot pri naših evlucijsko najbližjih sorodnikih šimpanzih.

Rojstvo tega velikega organa je nevarno in boleče, njegova biološka izgradnja pa je izredno potratna, saj v stanju mirovanja naše telo možganom dodeli kar 20 % vse razpoložljive energije. Vse opisano je v navideznem neskladju z dejstvom, da možgani predstavljajo le 2 % skupne telesne mase.

Kje naj iščemo razloge za vse te evlucijske stroške?

*Jurij Dreo*

## TIPANJE V TEMI

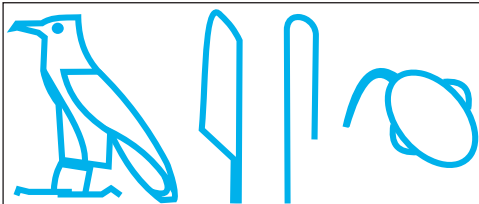
Ljudi je od nekdaj zanimalo, kaj se dogaja v »glavah« drugih ljudi. Narekovaji so na mestu zato, ker se sposobnosti mišljenja, čustvovanja in vseh drugih čudovitih stvari, ki jih zmoremo, niso vedno pripisovale

možganom. Aristotel, znan grški filozof in mentor Aleksandra Velikega, je v 4. stol. pr. n. št. zapisal, da je sedež duše in svobodne volje v srcu in ne v možganih. Vsi pa se z njim niso strinjali. Grški pisec basni Ezop je namreč kakih 200 let prej napisal sledečo zgodbico:

*Lisica vstopi v igralčevo hišo. Ob razmetavanju različnih predmetov naleti na masko človeške glave. Dvigne jo v svoje šape in pripomni: »Kako lepa glava! A kaj, ko nima nobene vrednosti, saj ji manjkajo možgani.«*

Kdaj	Kdo	Misli/hipoteze/teorije
3000–1700 pr. n. št.	Imhotep in drugi stari Egipčani	Prva omemba možganov v zapisani zgodovini. Egipčanski papirus, prikazan na sliki nad naslovom tega članka, vsebuje popis simptomov ranjenih vojakov z zlomom lobanje. Oznaka za možgane se kot hieroglif pojavlja na osmih mestih.
500 pr. n. št.	Alcmaeon, grški filozof	Zamisel, da so možgani sedež mišljenja, je prvič jasno izražena v zapiskih z naslovom <i>O naravi</i> .
400 pr. n. št.	Hipokrat, antični oče medicine	Možgani so izvor inteligence.
350 pr. n. št.	Aristotel, grški filozof	Pobudnik hipoteze, da je srce sedež inteligence, možgani pa so le organ za hlajenje krvi. Podlaga za to zamisel je bilo opažanje, da so možgani zelo dobro prekrvavljeni. Ljudje naj bi bili pametnejši od živali zato, ker imamo večje »hladilnike« krvi, ki blažijo našo vročevrnost in živalske nagone.
2. stol.	Galen, slavni rimski zdravnik	Predpostavi, da veliki možgani (lat. <i>cerebrum</i> ) zaradi svoje mehкости igrajo vlogo čustvovanja in čutenja; mali možgani (lat. <i>cerebellum</i> ) pa so gostejši in zato izvor nadzora mišičja. Delovanje možganov poskuša pojasniti s pretakanjem možganske tekočine skozi različne votline v možganih – t. i. fluidni model (te votline danes imenujemo precati ali ventrikli).
17. stol.	Rene Descartes, francoski filozof, matematik in fizik	Trdi, da mehanistični pristop do delovanja možganov lahko pojasni vedenje živali; višje umske sposobnosti ljudi pa je treba pripisati duši. Je začetnik t. i. problema »zavesti-telesa« (angl. mind-body problem), ki ga »reši« s predpostavko, da je zavest oz. duša ločena od fizičnih možganov in materialnega telesa. Descartes je bil torej dualist, ker je predpostavljal dve osnovni biti v vesolju: fizično in duhovno. Za uvajanje takšne delitve pa ta sicer cenjeni filozof ni imel niti najmanjše empirične podpore.
18. stol.	Luigi Galvani, italijanski zdravnik in fizik	Odkrije, da električna stimulacija živca na odrezanih žabjih krakih povzroči krčenje mišice, pritrjene na ta živec. Njegovi poskusi ovrežejo fluidni model delovanja možganov in postavijo v ospredje električnega (ŽIT 2001/7–8; tematska priloga <i>Elektrika in elektronika v človeškem telesu</i> ).
19. stol.	Paul Broca, Karl Wernicke, Korbinian Brodmann – prvi nevroznanstveniki	Razprava o delovanju možganov se vrti okoli vprašanja, ali so ti razdeljeni na specializirana območja, od katerih vsako vrši samo eno funkcijo, ali pa možgani delujejo »v celoti« in generalizirano. Navedeni znanstveniki s skrbnimi poskusi pridejo do spoznanja, da je resnica nekje na sredi. Možgane resda lahko razdelimo na določena funkcionalna območja, a imajo hkrati tudi sposobnosti, ki so široko razprostranjene čez več predelov. Tem nevroznanstvenim pionirjem so bili v veliko »pomoč« ranjenci z jasno zamejenimi poškodbami možganov (strelne rane), pri katerih je bilo mogoče povezati odsotnost neke sposobnosti s primerno poškodovanim območjem v možganih.
20. stol.	moderna nevroznanost – številni avtorji	Ker se je zaradi napredka orožja po 1. svetovni vojni le redko dogodilo, da so bile strelne rane glave združljive z življenjem, so morali nadobudni nevroznanstveniki najti boljše raziskovalne metode. Odkritje različnih tehnik barvanja celic je odprlo pot podrobnejšim mikroskopskim raziskavam možganov. Razložena sta bila vloga živčnih prenašalcev (kemičnih substanc, ki prenašajo signale med živci) in nastanek živčnih impulzov. Napredki v tehnologiji neinvazivnega slikanja (CT, PET, MRI, fMRI) in merjenja šibkih električnih in magnetnih polj (EEG, MEG), ki jih proizvajajo možgani, so povzročili revolucijo v razumevanju delovanja možganov.

**Pomembnejši mejniki na poti do razumevanja možganov**



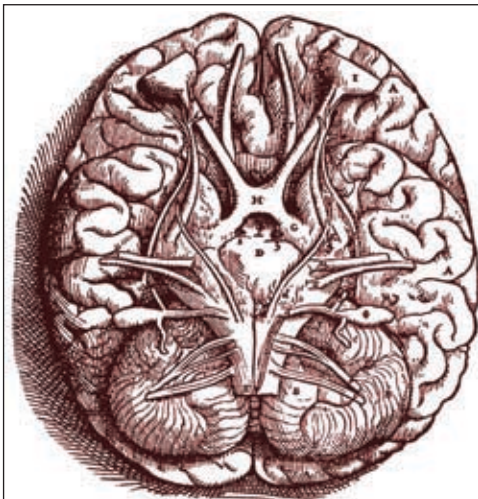
*Hieroglif za možgane prvič najdemo v Kirurškem papirusu Edwina Smitha.*

Na podlagi te basni bi lahko rekli, da so nekateri misleci že davno tega popolnoma intuitivno presodili, da so možgani nekaj posebnega. Za dolgo pot od teh prvih bežnih intuicij do pravih znanstvenih spoznanj o delovanju možganov je človeštvo potrebovalo okoli štiri tisočletja.

Ob pogledu na nekatere čudne in skorajda naivne teorije začetnikov nevroznanosti je prav lahko pozabiti, kako težavno je lomiti led pri raziskavah človeškega stroja. Medtem ko lahko npr. kemiki poljubno zažigajo, spreminjajo in mešajo proučevane snovi, je analogno početje v medicinski znanosti nekaj povsem nepredstavljivega. Če ob tem upoštevamo, da je bilo seciranje trupel v večjem delu Evrope prepovedano do 17. stol., začnemo počasi razumeti težave, s katerimi so se soočali pionirji medicinske znanosti.

## VALOVI V MOŽGANIH

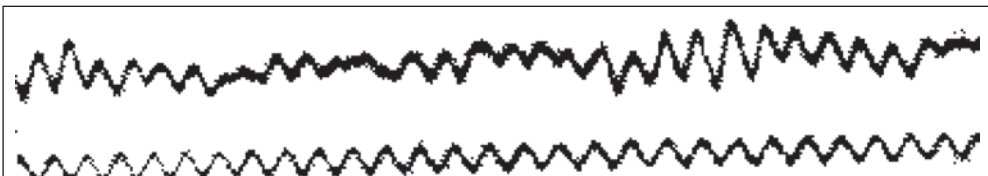
Spoznanja Luigija Galvanija so tlakovala pot za korenito spremembo v razumevanju možganov in živčevja nasploh. Dognanja o elektriki so fluidno teorijo izrinila iz učbenikov v knjige o zgodovini medicine. Novoodkrita »sila elektrike« je bila v 18. stol. še zelo skrivnostna. Nekateri so ji pripisovali



*Ena izmed prvih anatomskih risb spodnjega dela možganov avtorja Andrea Vesaliusa iz leta 1543; večino podatkov o človeškem telesu so do takrat večinoma prepisovali iz grških in rimskih opisov, ki pa so bili zelo nenatančni, saj je bilo seciranje ljudi praktično skozi celotno zgodovino v najboljšem primeru »nečedno početje«, v najslabšem pa kaznovano s smrtjo. Nadobudni grški in rimski zdravniki so zato večino anatomskega znanja zgradili na seciranju opic, kar je razumljivo vodilo do neljubih napak pri ekstrapolaciji na ljudi.*

nič manj kot lastnost gonila življenja. V omejenem smislu so bila ta ugibanja celo pravilna, saj elektrokemični gradienti celicam res omogočajo pridobivanje energije. Pošast dr. Frankenstein je le en domišljjski produkt, ki je gradil na plodnih zamislih tedanjih raziskovalcev.

Šele razvoj električne merilne tehnike na začetku 20. stol. pa je omogočil smiselne kvantitativne meritve električnega dogajanja v možganih. Po stopinjah angleškega znan-



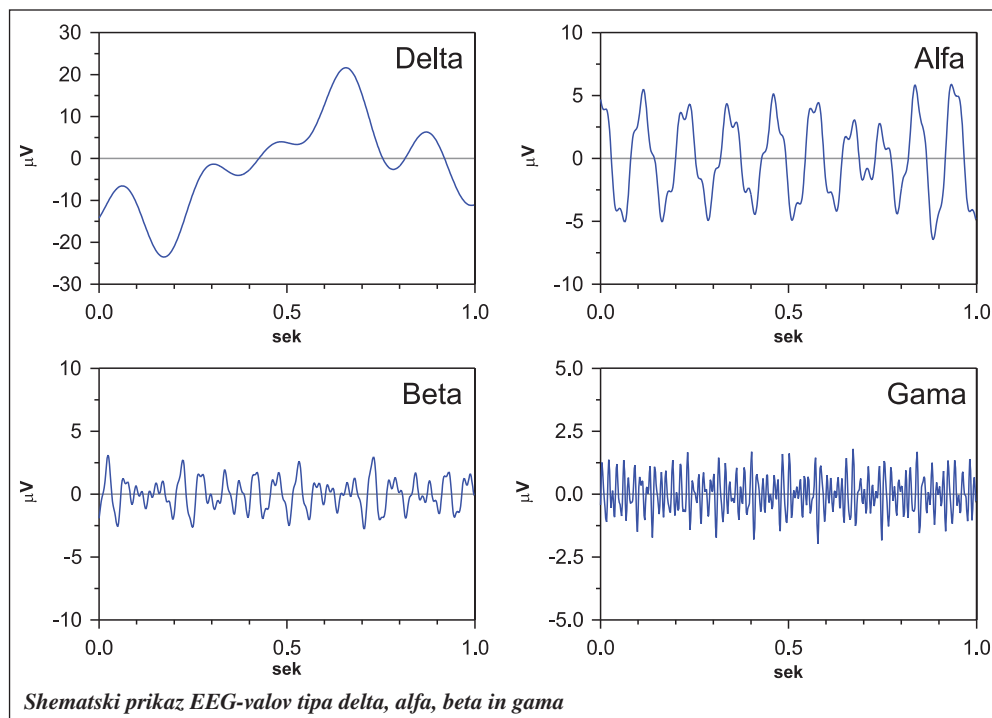
*Prvi Bergerjev posnetek EEG na človeku; graf je namenoma prikazan, kot ga najdemo v originalu, torej pomensko precej prazen. Manjkajo podatki o časovni (vodoravno) in napetostni osi (navpično), ker jih tudi Berger ni navajal. Eden izmed njegovih kritikov je pozneje pripomnil, da je bil Berger sicer velik mož v psihiatriji, a o tehniki in naravoslovju ni vedel prav veliko.*

stvenika Richarda Catona je nemški nevrolog in psihiater Hans Berger leta 1924 prvi izmeril električno aktivnost človeških možganov [1, 2]. Za svojo meritev je uporabil dve tanki srebrovi elektrodi, ki ju je potisnil pod lasišče preiskovancev – prvo na sprednjem in drugo na zadnjem delu glave. Med njiju je priključil za tiste čase izredno natančen galvanometer, ki je zaznaval majhen spreminjajoči se električni tok med elektrodama. Ali drugače povedano: izmeril je nihajočo napetostno razliko med različnima deloma človeške glave. Bergerjev stroj za snemanje elektroencefalograma (EEG) je lahko zaznaval napetostne razlike do približno 50  $\mu\text{V}$  (50 milijonink volta), kar je še ravno dovolj za zaznavanje najbolj grobe električne aktivnosti možganov.

Berger je v svojih prvih objavah pripomnil, da se v različnih okoliščinah EEG tudi spreminja ter da je sestavljen iz različnih »kvalitet«. Če človek miruje z zaprtimi očmi, se EEG »upočasni« in v njem prevladujejo valovanja s frekvenco okoli 10 Hz. To obliko EEG je Berger poimenoval *valovi alfa*. Poznejše in natančnejše meritve so pokazale še številne druge oblike možganskih valov:

Medicina se v teh začetnih interpretacijah EEG ni ravno držala ograje natančnosti. V prvih klasifikacijah so raziskovalci identificirali različne oblike možganskih valov, ki so jih med sabo ločili predvsem po grobem videzu posnetka. Pozneje se je temu videzu pridružila še frekvenčna ocena valovanja, ki naj bi prevladovalo v EEG. To rudimentarno frekvenčno analizo so izvedli tako, da je EEG-tehnik preprosto preštel število prehodov krivulje EEG čez absciso. Če pa signale EEG analiziramo podrobneje, kaj hitro vidimo, da sestava možganskih valov še zdaleč ni tako preprosta.

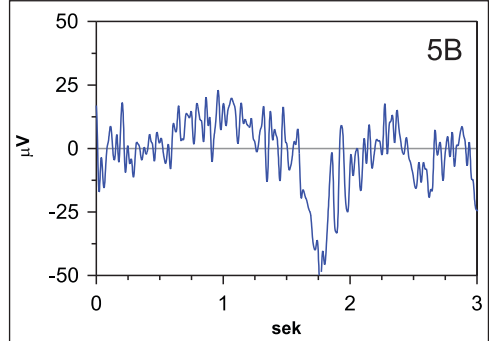
Izpod lasišča odvzeti signali EEG pomenijo sešteto električno aktivnost velikanskega števila živčnih celic. Ker aktivnost živčnih celic odraža delovanje možganov, se narava signalov EEG spreminja v odvisnosti od trenutnega stanja možganov. Opisano povezavo najlažje izrazimo kot most, ki ga tvori meritev EEG med fiziologijo (delovanjem živčnih celic) in psihologijo (našim mišljenjem in vedenjem). Razumeti most fiziologija-EEG-psihologija je eden izmed ciljev nevroznanosti. V desetletjih po Bergerjevem odkritju so





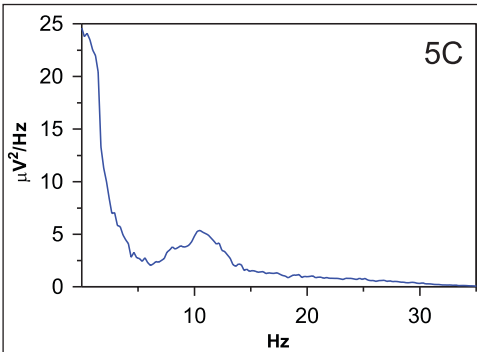
5A

Za snemanje EEG se danes uporabljajo elektrodne kape, ki vsebujejo tudi do 256 elektrod. EEG-ojačevalnik več tisočkrat v sekundi izmeri električno razliko napetosti med vsako izmed naglavnih elektrod in eno t. i. referenčno elektrodo. Časovno spreminjanje napetostne razlike za vsak elektrodni par se prikaže kot EEG-kanal. Vsak kanal torej definirata dve elektrodi.



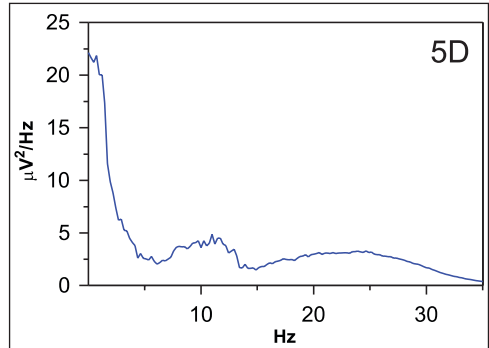
5B

Posnetek avtorjevega EEG na enem kanalu pri odprtih očeh; položaja elektrod, med katerima se meri napetostna razlika: čelo in teme.



5C

Močnostni spekter (izračunan s Fourierjevo transformacijo) kanala na sliki B kaže, da se v signalu skriva zelo veliko različnih vrst valovanja. Prav vse izmed osnovnih »oblik« valov (delta, alfa, beta in gama) lahko najdemo na vsakem posnetku EEG, spreminja se le stopnja njihove zastopanosti.



5D

Močnostni spekter avtorjevega EEG pri izvajanju miselne naloge »odštevanje«. Pri tej nalogi se na zaslону prikazujejo različni pari trimestrih števil, ki jih mora nato testiranec v mislih odšteti. Zaradi miselnega dela je spekter EEG zdaj drugačen (predvsem frekvence nad 20 Hz so močnejše izražene), kar odraža spremenjeno delovanje možganov.

raziskovalci našli na tisoče povezav med različnimi miselnimi procesi in EEG; prav tako so izluščili številne povezave med boleznimi in spremenjenimi oblikami signalov EEG. Vsa ta spoznanja danes tvorijo jedro medicinske (klinične) uporabnosti EEG. Neko bolezen lahko diagnosticiramo (oz. pomagamo pri njeni diagnozi) tako, da bolniku posnamemo EEG in nato njegove signale primerjamo z vzorčnim EEG pri različnih boleznih. Katalogiziranje tipov in oblik EEG je nedvomno izrednega pomena za vsakodnevno klinično

prakso, a naravoslovni um takega načina »aristotelskega« kategoriziranja ne zadovolji, saj pušča odprto temeljno vprašanje, zakaj imajo določene bolezni in umska stanja takšen EEG, kot ga imajo, in ne drugačnega.

Smerokaz na poti odkrivanja skrivnosti možganov gotovo kaže tudi proti pojasnjevanju nastanka valov EEG in načinov, kako delovanje posameznih nevronov vodi do zavesti. Prav o tej temi pa je znanega veliko manj, kot bi si lahko mislili glede na čas, ki je že minil od prvih Bergerjevih meritev. Trdnih in

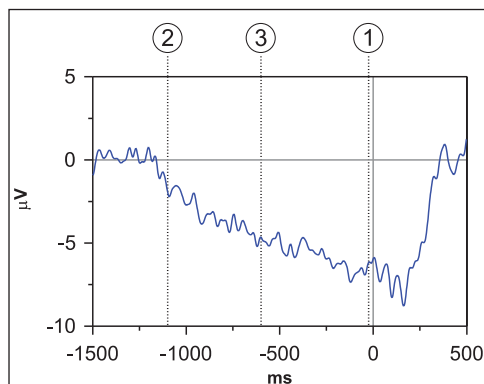
splošno sprejetih teorij o nastanku EEG tako še vedno ni. V osnovi je sicer jasno, da so temelj valov EEG posamezni električni signali, ki jih oddajajo živčne celice v možganih. Zakaj pa je delovanje številnih živčnih celic tako sinhrono, da to na glavi povzroči razmeroma enostavne signale, še naprej ostaja nepojasnjeno. Morda je to dejstvo celo malce paradoksalno, saj morajo možgani delovati na izredno zapleten in predvidoma nehomogen način, da lahko opravljajo vse svoje funkcije. Hkrati pa je očitno, da zelo veliko nevronske celice deluje skoraj sinhrono v električnem smislu. Če ne bi bilo tako, bi se učinki njihove električne aktivnosti med sabo izničili in na površini glave ne bi bili sposobni izmeriti velikih in nihajočih napetostnih razlik. Kljub intenzivnim raziskavam možgani očitno še niso sposobni dobro razumeti samih sebe.

## MISLIM, TOREJ ... NAREDIM?

Tako kot raziskovanje evolucije in nastanka življenja tudi raziskave delovanja možganov prej ali slej trčijo ob vprašanja, s katerimi se filozofi in misleci ukvarjajo že od začetka zgodovine. Odkrivanje principov delovanja najjemenitnejšega biološkega stroja za nekatere nosi nič manj kot verske prizvoke. Pojme, kot so duša, zavest, misel in svobodna volja, je nevroznanost deloma že iztrgala iz objema metafizike in religije ter jih postavila pod skeptični mikroskop znanosti. To najbolje ilustrira preprosto odkritje izpred več kot dveh desetletij, ki je razburilo predstavnike nekaterih veroizpovedi, poželo kritike filozofov in ujelo pozornost raziskovalcev – torej naredilo marsikaj, kar dobro korelira z globokim znanstvenim spoznanjem. Temelje tega odkritja sta položila nemški nevrolog Hans Helmut Kornhuber in njegov študent Lüder Deecke leta 1962, ko sta poročala o električnem potencialu, izmerjenem nad delom možganov, ki nadzira premike mišic (t. i. motorični korteks). Preiskovane osebe so premikale prst na roki in povprečenje številnih ponovljenih meritev EEG je pokazalo, da se pred premikom prsta poveča električna aktivnost nad motoričnim korteksom. Izmerjeni električni potencial je bil nenavaden zato, ker se je začel že dobro

sekundo pred dejanskim premikom mišice. Upoštevanje zakasnitve pri prenosu impulza iz možganov do mišice (pribl. 25 ms) še zdaleč ne zmore pojasniti zgodnjega začetka tega potenciala. Ta signal očitno nima vloge samo pri neposrednem premiku mišice, ampak tudi pri pripravi našega giba, morda celo pri sami odločitvi, da bomo gib izvedli. Temu spoznanju na čast je dobil ime pripravljalni potencial (nem. Bereitschaftspotenzial – BP); [3].

Presenetljiv dodatek k povedanemu je prišel leta 1982, ko je ameriški znanstvenik Benjamin Libet s spremembo tega poskusa zamajal temelje našega dojemanja svobodne volje. Testiranec v Libetovem poskusu je gledal premikajoči se krožni kazalec, ki je nare-



*Pripravljalni potencial (BP) nad motoričnim korteksom pri svobodni odločitvi o premiku prsta; modra krivulja je povprečje več stot meritev, kar zmanjša šum v EEG, ki ni časovno vezan na premik prsta. Mišični gib se začne pri  $t = 0$  ms.*

*Točka 1: Čas, ki označuje zakasnitev zaradi prevajanja živčnega impulza od možganov do mišice. Če bi bil celoten BP le goli ukaz za premik mišice, bi se lahko začel šele okoli te točke.*

*Točka 2: BP se dejansko začne že okoli 1100 ms pred premikom mišice.*

*Libetov dodatek k temu klasičnem poskusu predstavlja točka 3, ki označuje trenutek, ko so testiranci poročali, da so začutili željo po premiku prsta. Ta trenutek nastopi v povprečju šele 500 ms po začetku BP. Zavedni občutek svobodne volje torej ne more biti primarni vzrok BP in premika mišice kot posledice, ampak je najbrž (kot tudi sam BP) le rezultat zgodnjega nezavednega električnega dogajanja na tem ali kakem drugem mestu v možganih.*

dil en poln krog vsakih nekaj sekund. Kadar koli je testiranec začutil željo po premiku prsta, ga je lahko premaknil. Zatem je moral poročati o položaju kazalca v trenutku, ko je začutil željo po izvedbi giba [4]. Ugotovitve kažejo, da občutek svobodne volje dozori šele okoli pol sekunde po začetku BP. To seveda pomeni, da je naš občutek svobodnega odločanja tvorjen šele pol sekunde po tistem, ko električna aktivnost naših možganov že »ve«, da bomo gib izvedli. Ne glede na to, kako kisel priokus nam to spoznanje pusti, je težko zanikati široko sprejeto interpretacijo tega klasičnega poskusa, ki pravi, da je zaveden občutek svobodne volje po vsej verjetnosti le iluzija, ki jo za nas ustvarijo možgani – vsaj, kar se tiče premikanja prstov na rokah. Izsledki tega poskusa so bili od prve objave kar nekajkrat ponovljeni in potrjeni (nazadnje leta 2005; [5]).

Naslednji žebelj v krsti popularnega dojemanja zavedne svobodne volje je ugotovitev, da lahko z magnetno stimulacijo možganov neposredno vplivamo na svobodno izbiro ljudi. Kljub takemu vplivu pa subjektivni občutek svobodne volje ostaja nespremenjen. Če desničarjem prepustimo prosto izbiro med premikom desne ali leve roke, bodo v 60 % primerov premaknili desno roko. Če pa jim prikrito stimuliramo desno polovico možganov (ta izvaja premike leve roke) z močnimi magnetnimi polji, bodo desničarji v kar 80 %

primerov premaknili levo roko in nato poročali, da so pač čutili povsem svobodno in neprisiljeno željo po premiku leve roke [6].

Na tem mestu velja opomniti, da ta poskus ne draži živcev, ki neposredno izvedejo premike rok. V primeru neposredne stimulacije živčne poti, ki premika mišico, se testirana oseba še kako zaveda, da se ji mišice premikajo zunaj nadzora svobodne volje. Opisani poskus ni nič manj kot sprememba svobodne izbire ljudi na način, ki ga posameznik ne zmore ločiti od svoje »prave« svobodne izbire. Udeleženci tega poskusa torej niso zmogli ločiti med od zunaj vsiljeno izbiro in njihovo lastno »notranjo« izbiro, kar spet nakazuje, da ima naša zavedna svobodna volja povsem mehanistične/deterministične sprožilce, ki delujejo na nezavedni ravni.

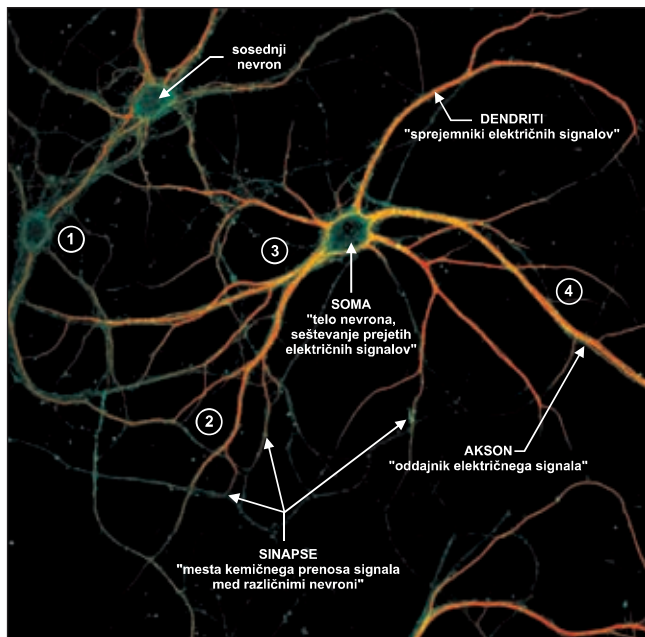
## ČUDOVITI PREVODNIK

V današnjem svetu smo obdani z električnimi napravami. Večina ljudi si vsaj v grobem predstavlja, kako elektrika teče po kovinskih žicah. Glede na to, da je električna narava živčevja tudi dobro usidrana v kolektivni zavesti, prenosu živčnih impulzov marsikdo niti ne posveča večje pozornosti, saj »gre pač za električni impulz«. Srednješolska (in tudi zahtevnejša) biološka besedila razlago živčnih impulzov skoraj vedno začnejo z beseda-

mi, da se ta prenos bistveno razlikuje od toka elektronov po kovinskih žicah. Pri razlagi podrobnosti nastanka in propagacije živčnega impulza je tak pogled na razliko med naravo in tehniko gotovo koristen. S prevelikim poudarjanjem razlik pa se prepogosto spregleda čudovita podobnost funkcije in elegantna iznajdljivost slepe darvinistične naravne selekcije, ki je iz električno neprevodnih organskih spojin naredila to, kar je človeška tehnika naredila iz kovin. Razumljivo je, da je evlucijska pot radikalno drugačna od elektrotehnične, saj sta ta dva



*Demonstracija magnetne stimulacije desne polovice možganov z osmici podobno tuljavo naprave za TMS (transkranialni magnetni stimulator) na Inštitutu za klinično nevrofiziologijo v Kliničnem Centru v Ljubljani*



Rezultat delovanja vseh na sliki opisanih procesov je generacija akcijskega potenciala (AP).

1 – Sosednji nevron pošlje električni signal – akcijski potencial (AP) po svojem aksonu.

2 – Ob koncu aksonovih podaljškov AP sproži izločanje kemičnih spojin (živčnih prenašalcev), ki se vežejo na površje dendritov sosednjega nevrona.

3 – Vezava živčnih prenašalcev na površje dendrita sproži generacijo električne motnje, ki se sicer širi proti telesu nevrona, a pri tem izgublja moč.

4 – Če je vsota vseh prispelih dendritskih električnih sunkov na somi dovolj velika, to sproži generacijo močnega električnega signala – vala AP, ki ob širjenju po aksonu ne izgublja moči niti ne spreminja oblike.

»izumitelja« delala s povsem različnimi surovinami in tudi na drugačni časovni skali. Ne spreglejmo pa dejstva, da sta končna produkta obeh poti le stroja drugačnih znamk.

Akcijski potencial (AP) ni nič drugega kot tipičen valovni pojav, kot tega definirajo fiziki. Pri njegovi propagaciji se premika motnja v napetostni razliki. Ioni, ki se pretakajo prek celične membrane, resda malce difundirajo sem ter tja, a membranske črpalke hitro znova vzpostavijo njihovo ravnotežno koncentracijo. Električni val AP se premika praktično brez disperzije in distorzije po celotni dolžini živčnega vlakna, podobno kot elektromagnetni pulz med zunanjim in notranjim prevodnikom koaksialnega kabla. Ker v primerjavi s

kovinsko žico okolje celic predstavlja za pretok ionov veliko večji upor, celica za vzdrževanje tega vala v nespremenjeni obliki potrebuje zelo veliko energije; prispodoba tej energetski potrebi bi bili ojačevalniki signala, posejani po določeni dolžini koaksialnega kabla. Želeni končni učinek pa je enak pri živcu in koaksialnemu kablu – ustvariti val, ki bo sposoben prenesti nespremenjeno informacijo od točke A do točke B.

*Avtor članka se zahvaljuje vodstvu in osebju Inštituta za klinično nevrofiziologijo v ljubljanskem Kliničnem centru za dostop do opreme in prijazno pomoč.*

#### Viri:

- Berger, H., Über das Elektroenkephalogramm des Menschen. Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 1929, 87: 527–570.
- Finger, S., Origins of Neuroscience: a history of explorations in brain function, New York: Oxford University Press, 1994
- Kornhuber, H. H.; Deecke, L., Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. Pflügers Arch 1965, 284: 1–17.
- Libet B., et al., Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act, Brain. 1983 Sep; 106 (Pt 3): 623–42.
- Haggard, P., Conscious intention and motor cognition. Trends in Cognitive Sciences 9, 2005, 6: 290–295.
- Ammon, K. and Gandevia, S. C., Transcranial magnetic stimulation can influence the selection of motor programmes. Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry. 1990, 53: 705–707.

<http://www.touregypt.net/edwinsmithsurgical.htm>  
[www.scholarpedia.org/article/EEG](http://www.scholarpedia.org/article/EEG)  
[www.consciousentities.com/libet.htm](http://www.consciousentities.com/libet.htm)