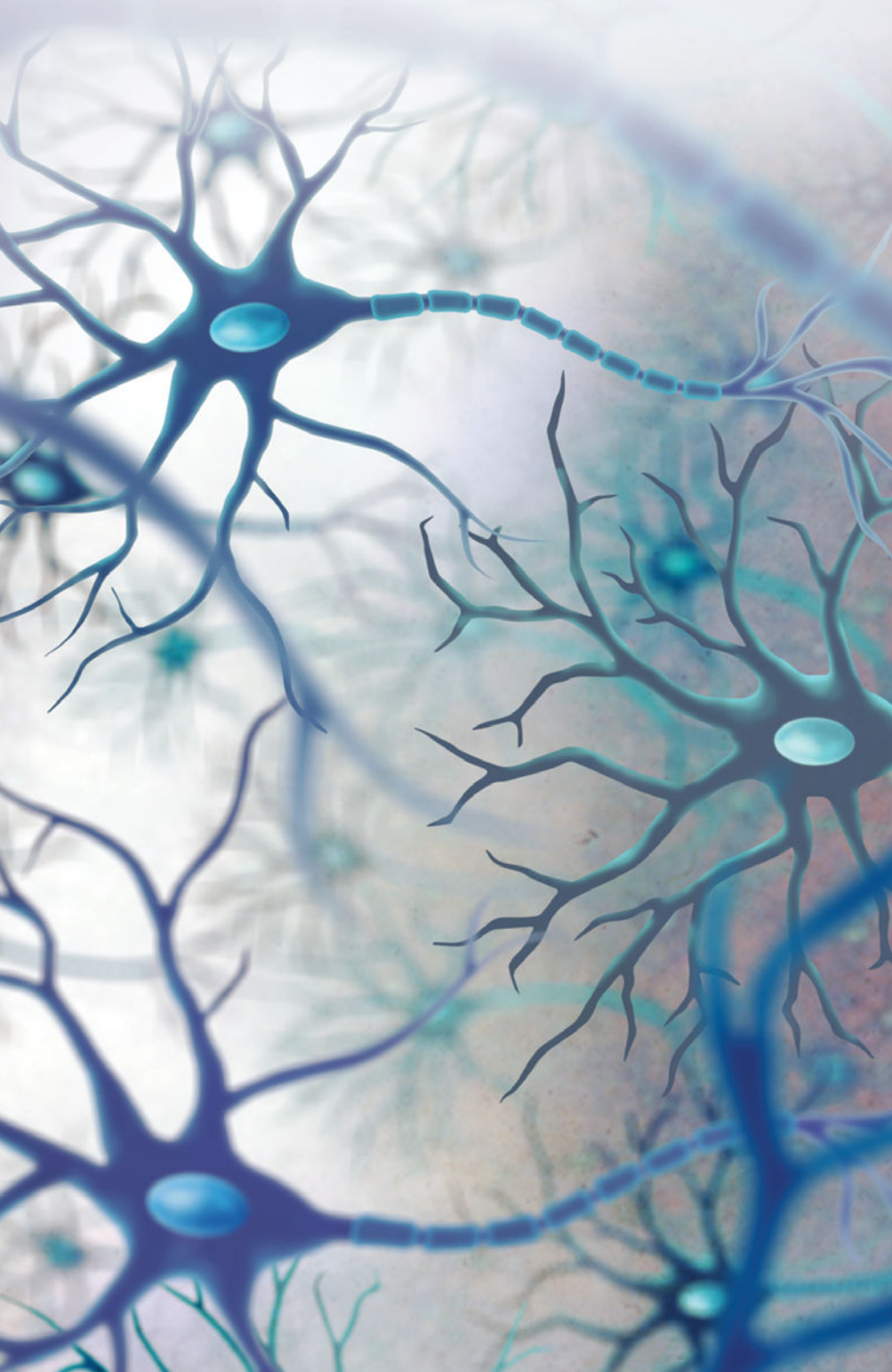


# Občutja in zaznava



Čutne organe si lahko predstavljamo kot okna možganov v zunanji svet, ki pa ne vsebuje dejanskih podob, zvokov, okusov in vonjav. Namesto tega nas obkrožajo različne vrste energije in molekul, ki jih moramo pretvoriti v zaznave ali občutke. Da bi takšna preobrazba delovala, naši čutni organi skozi proces transdukcije pretvorijo dražljaje, kot so svetlobni valovi ali molekule hrane, v električne signale. Ti se nato prenašajo preko številnih celic in vlaken v specializirana področja naših možganov, ki jih nato obdelajo in združijo v celostno zaznavo okolice.

## VID

Vid tvorijo številni sočasni procesi, ki nam omogočajo, da vidimo dogajanje okrog nas, kar ga naredi enega izmed naših najzapletenejših čutov. Zato ni presenetljivo, da vidni sistem vključuje približno 30 odstotkov človeške možganske skorje, kar je več kot katerokoli drugo čutilo. Zaradi dolgega in podrobnega preučevanja zdaj o vidu vemo več kot o drugih zaznavnih sistemih. Znanje o pretvorbi svetlobne energije v električne signale izvira predvsem iz raziskav na vinskih mušicah (lat. *drosophila*) in miših. Višjo stopnjo vidnega procesiranja pa so raziskovalci preučevali na opicah in mačkah.

V številnih vidikih je vid podoben fotografiranju s staromodnim fotoaparatom. Svetloba prehaja skozi roženico in nato skozi zenico vstopi v oko. Šarenica s spreminjanjem velikosti zenice uravnava količino te vstopne svetlobe. Leča nato ukrivi svetlobne žarke tako, da padejo na del notranje površine očesnega zrkla, ki ga sestavljajo posebne celice, poznanega tudi pod imenom mrežnica. Toga roženica sicer opravi začetno ostrenje, leča pa

se lahko odebeli ali splošči, da so bližnji ali daljni predmeti na mrežnici še bolj izostreni. Podobno kot pri fotoaparatu, ki zajema fotografije na film, se vidni dražljaji preslikajo na mrežnico kot dvodimenzionalna obrnjena slika. Predmeti, ki se v našem okolju nahajajo na desni strani, so prikazani na levi strani mrežnice in obratno; objekti, ki se v okolju nahajajo zgoraj, so prikazani v spodnjem delu mrežnice in obratno. Ti signali so sprva obdelani v specializiranih celicah v več plasteh mrežnice, nato pa preko **optičnih živcev** potujejo v druge dele možganov, kjer so podvrženi nadaljnji integraciji in interpretaciji.

### Triplastna mrežnica



Tri vrste nevronov v mrežnici, ki so **fotoreceptorji**, **internevroni** in **ganglijske celice**, so organizirane v več plasti. Preden te celice pošljejo informacije v možgane, se med seboj intenzivno sporazumevajo. Svetlobno občutljivi fotoreceptorji, znani pod imenom **paličnice** in **čepnice**, se nahajajo v najbolj obrobni plasti mrežnice. To pomeni, da svetloba po vstopu skozi roženico in lečo potuje skozi drugi dve plasti nevronov, šele nato pa doseže fotoreceptorje. Ganglijske celice in internevroni se ne odzivajo neposredno na svetlobo, ampak obdelujejo in posredujejo informacije iz fotoreceptorjev. Aksoni ganglijskih celic nato skupaj zapustijo mrežnico in tako tvorijo vidni živec.

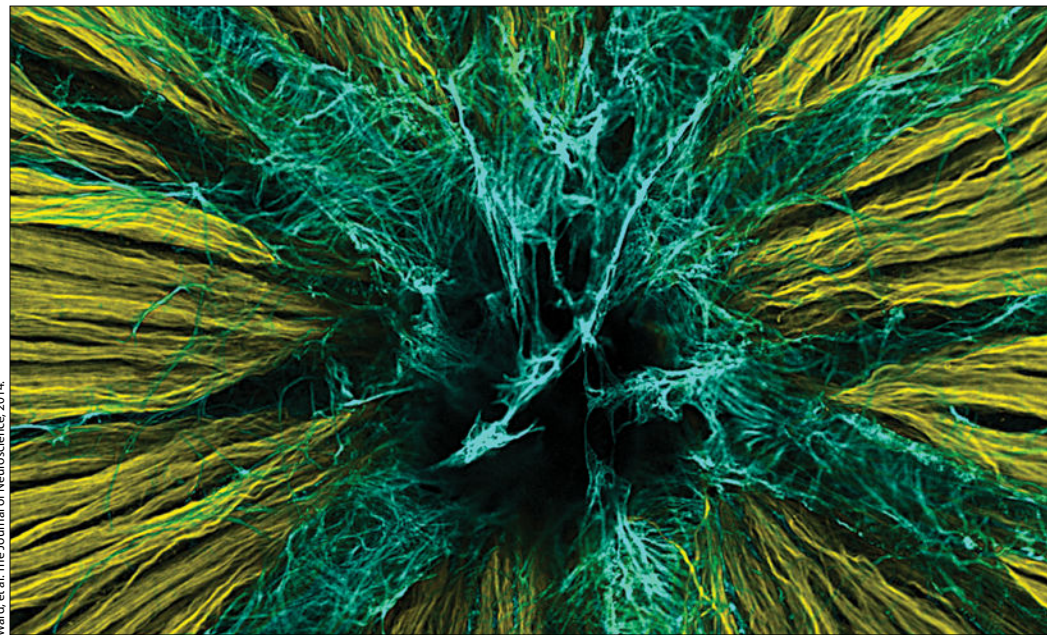
V človeškem očesu se nahaja približno 125 milijonov fotoreceptorjev, ki pretvorijo svetlobo v električne signale. Postopek pretvorbe ene oblike energije v drugo, poznan tudi pod imenom **transdukcija**, poteka v večini senzoričnih sistemov. Izredno občutljive paličnice, ki pri ljudeh predstavljajo približno 95 odstotkov

fotoreceptorjev, omogočajo vid tudi v medli svetlobi. Nasprotno pa se v čepnicah prične zaznava podrobnosti in barv, kar nam omogoča izvedbo dejavnosti, ki zahtevajo visoko ostrino vida. Človeško oko vsebuje tri vrste čepnic, ki se razlikujejo po občutljivosti na svetlobe različnih barv oziroma valovnih dolžin (rdeča, zelena ali modra). Njihove občutljivosti se deloma prekrivajo, pri čemer različne kombinacije aktivnosti čepnic posredujejo informacije o določeni barvi, kar omogoči zaznavo znanega barvnega spektra. Na ta način so človeške oči podobne računalniškim monitorjem, ki mešajo rdeče, zelene in modre barve, da ustvarijo milijone barv.

Središče mrežnice vsebuje veliko več čepnic kot druga področja, zato je vid tam ostrejši kot ob robovih. V čistem središču mrežnice je majhno območje, poznano tudi pod imenom **rumena pega**, kjer je gostota čepnic

najvišja. To območje, ki lahko razloči izredno majhne podrobnosti, vsebuje samo rdeče in zelene čepnice. Makula, ki jo sestavlja področje neposredno okoli rumene pege, pa je pomembna za branje in vožnjo. V Združenih državah Amerike in Evropi je propad ali degeneracija fotoreceptorjev v makuli, imenovana tudi makularna degeneracija, glavni vzrok slepote pri ljudeh, starejših od 55 let.

Nevroni v vsaki od treh plasti mrežnice običajno prejemajo informacije iz številnih celic v predhodnem sloju, vendar se skupno število celic, ki pošljejo informacije določeni celici, po mrežnici zelo razlikuje. V predelu makule z najvišjo ostrino vida vsaka ganglijska celica prejme signal (preko enega ali več internevronov) iz samo ene ali zelo malo čepnic, kar omogoča zaznavo zelo majhnih podrobnosti. Blizu robov mrežnice pa vsaka ganglijska celica sprejema signale iz več



Ward, et al. The Journal of Neuroscience, 2014.

V mrežnici pride do enega izmed prvih postankov vidnih informacij na poti do možganov. Na sliki mišje mrežnice so z rumeno označeni aksoni živčnih celic, ki nadaljujejo pot skozi s črno označeno majhno odprtino v zadnjem delu očesa preko optičnega živca do višjih centrov za vid. Še pred tem morajo aksoni prodreti skozi z modro označeno drugo plast celic, znanih kot astrociti, ki mrežnici zagotavljajo podporo s hranili.

fotoreceptorskih celic. Takšna konvergenca ali stekanje signalov pojasni nižjo ostrino perifernega vida. Del vidnega prostora, ki vzdraži posamezno ganglijsko celico, se imenuje njeno receptivno polje.

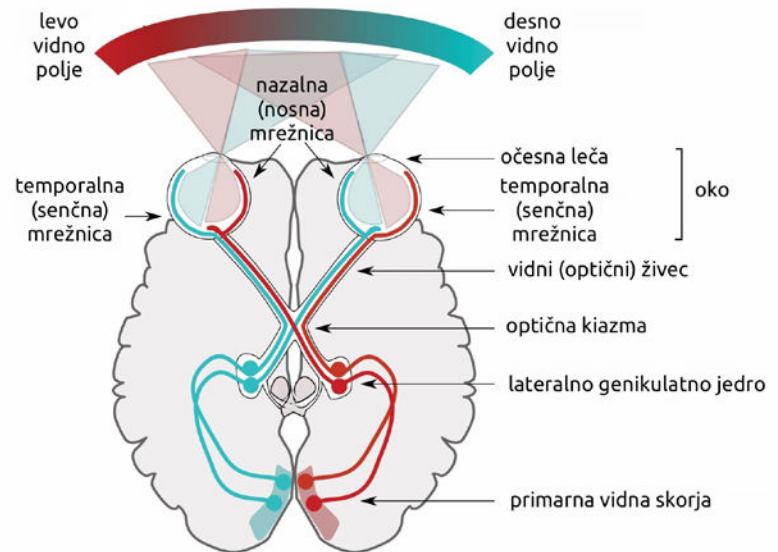
### Kako so vidne informacije obdelane?



Ko odpremo oči, ločimo oblike, barve, kontraste in hitrost ter smer gibov. Svojo skodelico za kavo zlahka ločimo od kozarca marmelade. Lahko ugotovimo tudi, da drevo pred našim oknom stoji na miru, veverica pa se po njem premika (in ne obratno). Toda kako obdelamo preprosto dvodimenzionalno sliko na mrežnici, da pride do zaznave tako zapletenih podob?

Vizualno procesiranje se začne s primerjavo količin svetlobe, ki zadane majhna sosednja področja na mrežnici. Receptivna polja ganglijskih celic zagotavljajo popolno dvodimenzionalno predstavitev (ali zemljevid) vidnega prizora. Tako receptivno polje se aktivira, ko svetloba zadane majhen predel mrežnice, ki ustreza središču polja. Inhibira ali z drugimi besedami zavira pa se, ko svetloba zadane območje, ki obdaja samo središče. Če svetloba zadane celotno receptivno polje (središče in obrobje), se ganglijska celica šibko odzove. Ta antagonizem med središčem in obrobjem je prvi način, s katerim naš vidni sistem izboljša zaznavanje kontrasta, ki je ključen za prepoznavanje predmetov.

Živčna aktivnost v aksonih ganglijskih celic se prenaša preko optičnih živcev, ki zapustijo oko in nato potujejo proti možganom. Ker na tem delu mrežnice ni fotoreceptorjev, izstopna točka optičnega živca povzroči majhno "slepo pego" v vsakem očesu. Te manjkajoče informacije možgani



Miquel Perello Nieto.

Vid se začne s svetlobo, ki se odbije od predmeta, potuje skozi očesno lečo in zadane mrežnico na zadnji strani očesa. Receptorji v mrežnici pretvorijo svetlobo v električne signale, ki prenašajo informacije v centre za obdelavo vida v možganih.

kasneje nadomestijo z uporabo informacij iz drugega očesa. Na poti do možganov signali potujejo preko živčnih vlaken iz obeh oči, ki se najprej združita v presečišču, imenovanem **optična kiazma**. Vlakna, ki prenašajo informacije z leve strani mrežnice obeh oči, nadaljujejo pot po levi strani možganov; informacije z desne strani obeh mrežnic pa nadaljujejo pot po desni strani možganov. Vidne informacije nato potujejo skozi lateralno genikulatno jedro, eno izmed regij talamusa, in nato v primarno vidno skorjo v zadnjem delu možganov.

### Vidna skorja: Plasti, koti in poti

Primarna vidna skorja, tanka plast živčnega tkiva, se nahaja v zatilnem režnju na zadnji strani možganov. Tako kot mrežnica je tudi ta predel sestavljen iz številnih plasti z gosto posajenimi celicami. Srednja plast primarne vidne skorje, ki sprejema sporočila iz talamusa, ima receptivna polja, podobna tistim v mrežnici, zato lahko tudi ohrani vidno sliko iz mrežnice. Celice nad in pod srednjo plastjo imajo kompleksnejša receptivna polja, ki zaznavajo dražljaje v obliki črt ali robov

s posebnimi usmeritvami. Določene celice se lahko tako najučinkoviteje odzovejo na črte ali robove pod točno določenim kotom ali premikajoče se v določeni smeri. Iz teh plasti celic novi procesni tokovi informacije prenesajo naprej proti drugim delom vidne skorje. Ko so vizualne informacije iz primarne vidne skorje združene v drugih področjih, postajajo receptivna polja vedno bolj zapletena in selektivna. Nekateri nevroni na višjih ravneh obdelave vidnih informacij se tako odzivajo samo na določene predmete in obraze.

Raziskave na opicah kažejo, da so vidni signali obdelani v več vzporednih, vendar medsebojno povezanih procesnih poteh. Dve od teh sta dorzalna pot, ki se usmeri navzgor proti temenskem režnju, in ventralna pot, ki se usmeri navzdol do senčnega režnja. Dolgo je veljalo, da te poti ločeno obdelujejo nezavedni vid, ki naj bi nato narekoval vedenje in zavestne vizualne izkušnje. Če bi videli psa teči po ulici, bi ventralni tok (ki nam odgovori na vprašanje »Kaj vidimo?«) združil informacije o obliki in barvi psa s spomini in izkušnjami, kar

potem omogoči prepoznavo znanega psa. Dorzalni tok (ki nam odgovori na vprašanje »Kje so vidni dražljaji?«) bi brez potrebe po zavestnem razmišljanju združil različne prostorske odnose, gibanje in časovno razporeditev, da bi ustvaril načrt našega vedenja. Lahko bi na primer zakričali "Stoj!". Vendar pa raziskovalci to strogo delitev dela postavljajo pod vprašaj, saj so raziskave pokazale, da lahko komunikacija med različnimi potmi dejansko ustvari zavestno izkušnjo. Pri tem ostaja jasno, da možgani ob prepoznavanju slike pridobijo informacije v več fazah, ki jih nato primerjajo s preteklimi izkušnjami in posredujejo višjim nivojem za obdelavo.

### Oči so v parih

Binokularni vid, ki se nanaša na gledanje z dvema očesoma, nam omogoča zaznavanje globine ali treh dimenzij, saj vsako oko zazna predmet z nekoliko drugačnega kota. To deluje le, če se vidna polja oči prekrivajo in če sta obe očesi enako aktivni in pravilno poravnani. Oseba, ki škili, čemur s strokovnim izrazom pravimo strabizem, na primer razvije slabše zaznavanje globine. Informacije s perspektive vsakega očesa se ohranijo vse do primarne vidne skorje, kjer so potem nadalje obdelane. Dve očesi omogočata tudi preslikavo veliko večjega vidnega polja na primarno vidno skorjo. Zaradi križanja nekaterih živčnih vlaken v optični kiazmi signali levega vidnega polja končajo na desni strani možganov in obratno (ne glede na to, iz katerega očesa prihaja informacija). Podobna ureditev je prisotna tudi za gibanje in dotik, kjer je vsaka polovica velikih možganov prav tako odgovorna za obdelavo informacij nasprotne strani telesa.

### Zdravljenje motenj vida



Številne raziskave na živalih so zagotovile vpogled v zdravljenje bolezni, ki prizadenejo vid. Raziskave na mačkah in opicah so nam na primer pomagale najti boljše terapije za strabizem. Otroci s strabizmom na začetku dobro vidijo na obe očesi, vendar ne morejo združiti slik, ki prihajajo iz njiju. Tako se začnejo bolj osredotočati na informacije iz enega očesa in pogosto izgubijo vid na drugem. V takih primerih je vid sicer mogoče obnoviti, vendar le, če se otrok zdravi dovolj zgodaj. Po starosti osmih let ali več taka nezdravljena slepota postane trajna. Še pred nekaj desetletji so oftalmologi za operacijo poravnave oči, predpis vaj ali uporabo očesnih prevez čakali na pacientovo dopolnjeno starost štirih let. Zdaj se strabizem lahko popravi veliko pred četrtem letom starosti, ko obstaja še večja verjetnost obnovitve normalnega vida.

Izguba pravilnega delovanja in odmiranje fotoreceptorjev sta ena izmed glavnih razlogov za razvoj različnih motenj, ki povzročajo slepoto, med katerimi jih je veliko težavno zdraviti. Obsežne genetske raziskave in uporaba modelnih organizmov so prepoznale različne genetske okvare, odgovorne za oslepitve. To odkrije je omogočilo načrtovanje genskih terapij ali terapij z matičnimi celicami, ki lahko obnovijo fotoreceptorje in tako pozdravijo genetsko slepoto. Genske terapije so nekaterim bolnikom z izgubo centralnega vida (npr. makularna degeneracija) ali drugimi oblikami slepote že omogočile, da bolje vidijo. Hkrati se raziskuje nov pristop zdravljenja slepote, ki je v osnovi zelo podoben uporabi polževih vsadkov za zdravljenje gluhosti. Zajema pošiljanje električnih signalov preko ganglijskih

celic neposredno v možgane, pri čemer se v nasprotju z večino že obstoječih zdravljenj ne poskuša obnoviti izgubljenih fotoreceptorjev.

### SLUH

Sluh je eden naših najpomembnejših čutov, ki nas opozori na bližajoči se avtomobil in pove, od kod prihaja, še preden ga opazimo. Sluh je hkrati osrednjega pomena za socialne interakcije, saj nam z obdelavo in interpretacijo kompleksnih sporočil v obliki govora omogoča komunikacijo z drugimi. Tudi slušni sistem (podobno kot vidni) zazna različne lastnosti signalov, kot so višina, glasnost, trajanje in lokacija zvoka. Slušni sistem tako analizira kompleksne zvoke, ki jih razdeli na ločene komponente ali frekvence. Slednje nam omogoča sledenje določenim glasovom v pogovoru ali glasbilom ob poslušanju glasbe.

### Me slišiš?

Ne glede na to, ali gre za neprijetno jutranjo budilko, melodijo zvonjenja na mobilnem telefonu ali najljubšo glasbo za tek, sluh vključuje niz številnih korakov, ki pretvorijo zvočne valove v električne signale. Živčne celice nato prenesejo te signale v možgane. Zvok v obliki valov zračnega tlaka doseže uhelj, kjer se valovi usmerijo v sluhovod in dosežejo bobnič. Te spremembe zračnega tlaka povzročijo nihanje bobniča, zvok pa se dodatno ojača prek vibracij ali nihanja treh drobnih kosti v srednjem ušesu: kladivca, nakovalca in stremenca. Stremence je zadnja kost in deluje kot majhen bat, ki pritiska na ovalno okence. Slednje je membrana, ki ločuje z zrakom napolnjeno srednje uho in s tekočino napolnjenega, spiralno zavitega polža. Naloga ovalnega okenca je pretvorba mehanskih vibracij stre-

menca v tlačne valove v tekočini polža, kjer jih specializirane receptorske celice, imenovane **dlačnice**, pretvorijo v električne signale.

### Od valovanja zračnega tlaka do električnega signala



Elastična bazilarna membrana poteka vzdolž notranjosti polža kot vijugasta klančina, ki se spiralno vije od zunanjega zavoja blizu ovalnega okna, do najbolj notranjega zavoja. Po svoji dolžini je "uglašena" na različne frekvence oz. višine. Ko tekočina v polžu rahlo valovi, se bazilarna membrana premakne. Na višje zvoke (kot je škripanje) vibrira v bližini ovalnega okenca, na nižje zvoke (kot je bas boben) pa bolj v središču.

Na vrhu vibrirajoče bazilarne membrane se nahajajo vrste majhnih dlačnic. Ko se membrana premika navzgor in navzdol, se stereociliji (izredno majhne dlačice) na dlačnicah upognejo proti tektorialni membrani. To upogibanje odpre majhne kanale v stereocilijih, kar omogoči vdor ionov iz tekočine, ki jih obkroža. Pri tem pride do pretvarjanja fizičnega gibanja v elektrokemični signal. Stimulirane dlačnice nato vzdražijo **slušni živec**, ki pošlje svoje električne signale naprej v možgansko deblo.

Naslednja postaja za obdelavo zvoka je talamus, znan tudi kot možganska »štafetna« postaja za senzorične informacije, ki slušne signale nato pošlje v slušni del možganske skorje. Po dolžini bazilarne membrane je postavljenih več tisoč dlačnic, izmed katerih se vsaka najmočneje odziva le na ozek razpon zvočnih frekvenc, odvisno od tega, kako daleč vzdolž polža se nahaja. Tako je vsako živčno vlakno, ki je povezano z dlačnicami, uglašeno na zelo specifične frekvence. Te informacije potujejo po živcu naprej v možgane.

### Osmišljanje zvoka



Za izračun smeri in lokacije zvoka na poti do možganske skorje možgansko deblo in talamus uporabljata informacije iz obeh ušes. »Frekvenčni zemljevid« bazilarne membrane se vseskozi ohranja, med drugim tudi v primarni slušni skorji v senčnem režnju, kjer se različni slušni nevroni odzivajo na različne frekvence. Nekateri nevroni v možganski skorji pa se odzivajo na druge lastnosti zvoka, kot so intenzivnost, trajanje ali sprememba frekvence. Spet drugi nevroni so specializirani za kompleksne zvoke ali pa za različne kombinacije tonov. Na višjih ravneh obdelave, torej višje od primarne slušne skorje, so nevroni sposobni obdelovati harmonijo, ritem in melodijo ter združiti vrste slušnih informacij v glas ali instrument, ki ga lahko prepoznamo.

Kljub obdelovanju zvokov na obeh straneh možganov, je leva he-

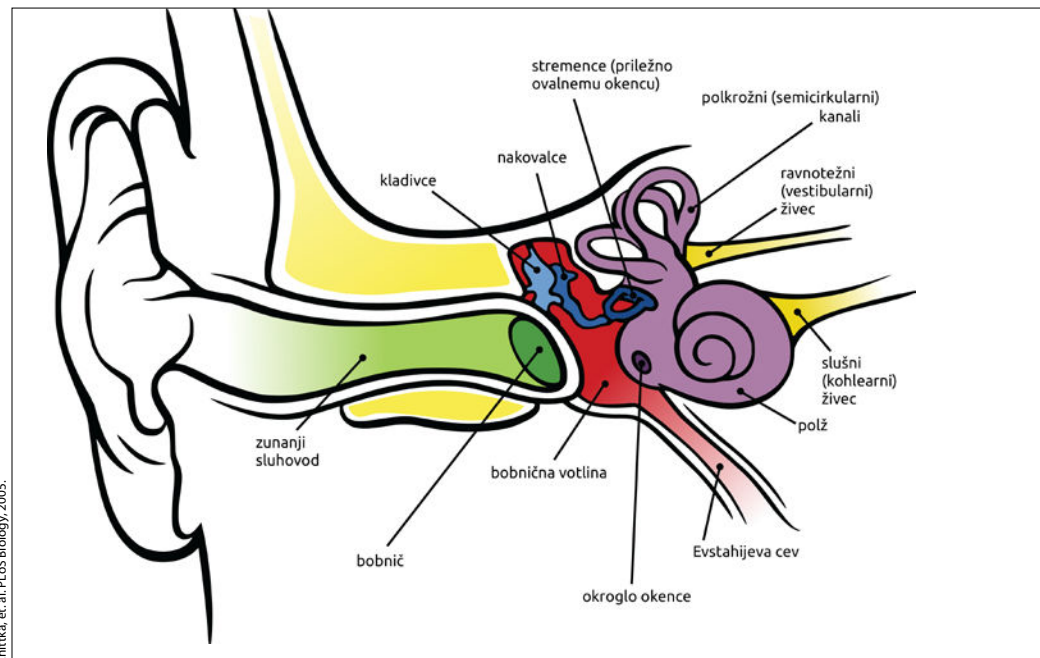
misfera običajno odgovorna za razumevanje in ustvarjanje govora. Osebe z okvaro leve slušne skorje (zlasti predela, imenovanega **Wernickovo področje**) kot posledico kapi lahko druge slišijo govoriti, vendar povedanega ne razumejo.

### Zdravljenje izgube sluha

Izguba dlačnic je odgovorna za večino primerov izgube sluha, saj v primeru odmrtja ne zrastejo nazaj. Številne raziskave so ravno iz tega razloga osredotočene na razvoj in delovanje struktur notranjega ušesa, med drugim tudi dlačnic. Njihov namen je razvoj novih načinov zdravljenja, ki bi lahko sčasoma vključevali zamenjavo poškodovanih dlačnic.

### OKUS IN VOH

Čutila za okus (gustacija) in voh (olfakcija) so tesno povezana in nam pomagajo krmariti v »kemičnem



Zunanje uho sprejme informacije o zvočnih valovih - zgostitvah in razredčitvah zraka, ki jih povzroči vir zvoka. Nato jih usmeri po sluhovodu do bobniča. Kladivce nato preko nakovalca prenese vibracije na stremence. Dlačne celice v polžu pretvorijo informacije teh vibracij v električne signale, ki preko slušnega živca potujejo v možgane.



Ma, et al. The Journal of Neuroscience, 2009.

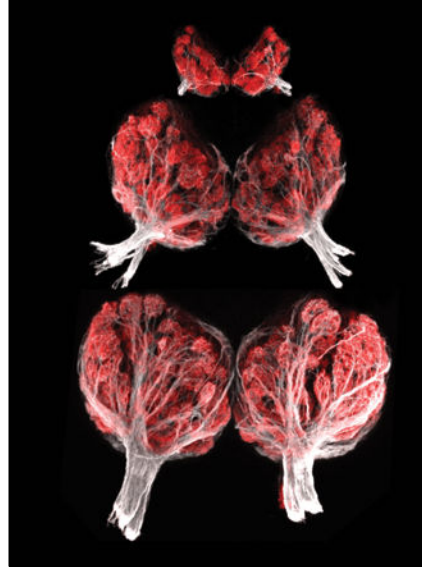
Receptorji na jeziku, imenovani brbončice, pošljejo informacije o okusih dalje v možgane, ki jih podrobno obdelajo. Na tej sliki mišjega jezika so z rdečo označeni aksoni, ki se povezujejo z brbončicami.

svetu«. Tako kot je zvok zaznava valov zračnega tlaka in vid zaznava svetlobe, sta voh in okus zaznava drobnih molekul v zraku in hrani. Oba čuta prispevata k okusu hrane in sta zaradi možnosti zaznave nevarnih snovi, ki bi jih lahko vdihnili ali zaužili, pomembna za preživetje. Receptorske celice, vključene v obdelavo okusa in vonja, so izpostavljene zunanjemu okolju, kar jih naredi ranljive za poškodbe. Ravno zaradi tega se receptorske celice za okus redno obnavljajo, prav tako olfaktorni nevroni. Pravzaprav so ti olfaktorni nevroni edini senzorični nevroni, katerih zamenjava poteka skozi celotno obdobje našega življenja.

### Od molekul do okusa



Naša sposobnost okušanja hrane je odvisna od molekul, ki se sprostijo med žvečenjem ali pitjem. Okušalne receptorske celice znotraj **okušalnih brbončic**, ki se nahajajo na jeziku, mehkem nebu in zadnji strani ust, nato zaznajo te molekule. Ljudje imamo med 5.000 in 10.000 brbončic, ki pa jih počasi začnemo izgubljati okoli 50. leta starosti. Vsaka brbončica je sestavljena iz 50 do 100 receptorskih celic, ki so se odzivajo na enega od vsaj petih osnovnih okusov: sladko, kislo, slano,



Braubach, et al. The Journal of Neuroscience, 2013.

Olfaktorni bulbus (ali vohalna čebulica) je struktura v prednjih možganih, odgovorna za obdelavo informacij o vonju. Na sliki so prikazane tri razvojne faze olfaktornih bulbusov pri cebrici, vrsti ribe, ki je pri nevroznanstvenih raziskavah pogost živalski model.

grenko in umami. Velikokrat zasledimo razlage o lokalizaciji okusov, ki pa ne držijo, saj okusi niso omejeni samo na določene regije jezika. Ko so receptorske celice okusa stimulirane, pošiljajo signale skozi tri **kranialne živce** (obrazni in glosofaringealni živec ter **vagus**) proti predelom v možganskem deblu, udeleženi v obdelavi okusa. Signali so nato usmerjeni skozi talamus do okušalne skorje v čelnem režnju in insuli, kjer pride do prepoznavne specifičnih zaznav okusa.

### Od molekul do vonja



Vonjave vstopijo v nos z zračnimi tokovi in se vežejo na specializirane vohalne celice v vohalni sluznici ostrejša nosne votline. Aksoni teh senzoričnih nevronov med potjo do dveh **olfaktornih bulbusov** ali vohalnih čebulic (ena za vsako nosnico) prečkajo lobanjo preko izredno drobnih luknjic. Informacije nato potujejo naprej do vohalne skorje. Tako je voh edini senzorični sistem, ki pošilja senzorične informacije neposredno v možgansko skorjo, ne da bi te informacije pred tem potovale v talamus.

Ljudje imamo okoli 1000 različnih vrst vohalnih celic, vendar lahko

prepoznamo približno 20-krat toliko vonjav. Vršički vohalnih celic so opremljeni z več ciliji, dlačicam podobnimi strukturami, med katerimi se nekatere odzivajo na več različnih molekul, druge pa zgolj na eno samo. Posamezni vonj bo torej stimuliral edinstveno kombinacijo vohalnih celic, kar bo ustvarilo poseben vzorec aktivnosti. Ta specifičen vzorec aktivnosti se nato prenese v olfaktorne bulbuse in še naprej v primarno vohalno skorjo, ki se nahaja na sprednji površini senčnega režnja. Vohalne informacije nato preidejo v bližnja področja možganov, kjer se mešajo z zaznavo okusa. Nedavne raziskave so pokazale, da lahko ljudje prepoznamo vonjave že v 110 milisekundah po prvem vdihu. Hkrati je zanimivo tudi dejstvo, da se lahko velikost olfaktornih bulbusov in način organiziranosti nevronov sčasoma spremenita. Kot je bilo omenjeno zgoraj, so olfaktorni bulbusi pri glodalcih in primatih, tudi pri ljudeh, eni redkih možganskih predelov, ki lahko skozi vse življenje ustvarjajo nove nevrone. Temu procesu pravimo **nevrogeneza**.

### Povezanost okusa in voha

Okus in voh sta ločena čuta s svojimi receptorji. Vendar pa lahko njun tesni odnos opazimo, ko imamo med prehladom zamašen nos, hrane pa potem sploh ne okusimo ali pa je okus zelo medel. Takrat se nam zdi, da naše čutilo okusa sploh ne deluje, vendar je težava v tem, da zaznavamo zgolj okus, ne pa okusa in vonja skupaj. Čut za okus je sam po sebi precej okoren, saj razlikuje le pet osnovnih lastnosti. Šele zaznava vonja potem doda kompleksnost zaznanim okusom. Raziskave na ljudeh so pokazale, da se zaznavanje okusa še posebej izboljša, ko so ljudje izpostavljeni ujemanjem se kombinacijam znanih okusov in vonjav. Sladkor je zaznan

kot bolj sladek v kombinaciji z vonjem po jagodah kot v kombinaciji z vonjem arašidovega masla ali brez vonja. Zdi se, da se informacije o okusu in vonju združujejo v več centralnih predelih možganov. V spodnjem čelnem režnju obstajajo tudi nevroni, ki se odzivajo samo na posebne kombinacije okusa in vonja.

Nekaj naše občutljivosti za okus in voh izgubimo, ko se staramo. Trenutno najverjetnejša razlaga je počasen upad ali prenehanje nadomeščanja poškodovanih receptorjev in senzoričnih nevronov. Sedanje raziskave so vse bližje razumevanju razvoja nevronov, zadolženih za prenos informacij o vonju ali okusu, iz matičnih celic. S tem znanjem bi lahko nekoč terapije z matičnimi celicami uporabili za povrnitev okusa ali voha tistim, ki ga izgubijo.

## DOTIK IN BOLEČINA



Somatosenzorični sistem je odgovoren za vse zaznave dotika. Te vključujejo rahel dotik, pritisk, vibracije, temperaturo, teksturo, srbež in bolečino. Zaznavamo jih z različnimi vrstami receptorjev za dotik, katerih živčni končiči se nahajajo v različnih plasteh naše kože, glavnega čutnega organa za dotik. Na poraščenih predelih kože se nekateri posebej občutljivi živčni končiči ovijajo okoli korenin dlavic, pri čemer se odzivajo že na najmanjši premik dlak. Signali iz receptorjev za dotik potujejo po senzoričnih živčnih vlaknih, ki so povezana z nevroni v hrbtnenjači. Od tam potujejo navzgor do talamusa in naprej do **somatosenzorične skorje**, kjer se prevajajo v zaznave. Nekaterne informacije o dotiku potujejo hitro po mieliniziranih živčnih vlaknih z debelimi aksoni (vlakna A-beta), druge informacije pa se prenašajo počasneje po tankih, nemieliniziranih aksonih (vlakna C).

## Kortikalni zemljevidi telesa in občutljivost na dotik

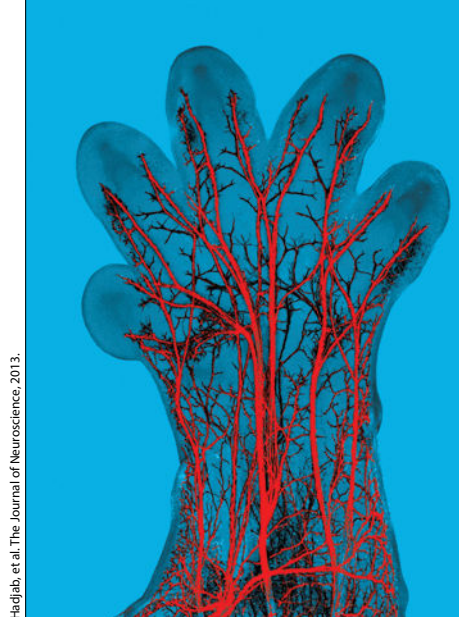
Somatosenzorične informacije iz vseh delov našega telesa so v možganski skorji (korteksu) zastopane v obliki topografskega zemljevida. Zelo občutljivi deli telesa, kot so ustnice in konice prstov, vzdražijo veliko večje predele možganske skorje kot manj občutljivi deli telesa. Občutljivost različnih predelov telesa na bolečinske dražljaje in dražljaje, vezane na dotik, je v veliki meri odvisna od števila receptorjev na enoto površine in razdalje med temi receptorji. V nasprotju z ustnicami in rokami, ki so najbolj občutljive na dotik, je receptorjev za dotik na hrbtu malo, kar pomeni, da so med seboj zelo oddaljeni, zaradi česar je hrbet veliko manj občutljiv.

Nevrologi merijo to občutljivost z uporabo dvotočkovne diskriminacije, najmanjše razdalje med dvema točkama na koži, ki ju oseba lahko razpozna kot dva različna dražljaja in ne enega samega. Ni presenetljivo, da je prag za zaznavo dveh točk najnižji na najbolj občutljivih delih telesa, kot so prsti in ustnice. Nasprotno pa lahko dva dražljaja na hrbtu ločimo le, če sta več centimetrov narazen.

## Srbež in bolečina



Bolečina je hkrati čutna in čustvena izkušnja. Senzorična ali čutna komponenta opozarja na poškodbo tkiva ali vsaj možnost poškodbe, čustvena komponenta pa naredi izkušnjo neprijetno in stresno. Akutna bolečina je predvsem opozorilni signal ali z drugimi besedami način, na katerega možgani sporočajo, da je s telesom nekaj narobe. Bolečina se pojavi, ko se posebna senzorična vlakna, imenovana **nociceptorji**, odzovejo na dražljaje, ki lahko povzročijo poškodbe tkiva. Običajno se nociceptorji odzivajo samo na močne



Hadjab, et al. The Journal of Neuroscience, 2013.

Z rdečo označena senzorična živčna vlakna so vidna v šapi razvijajočega se mišjega zarodka. Postala bodo specializirana za zaznavanje pritiska, bolečine, temperature ali srbenja.

dražljaje ali dražljaje, ki prekoračijo prag njihove vzdražnosti. Takšen odziv nam pomaga odkriti, kdaj je nekaj resnično nevarno. Različne vrste nociceptorjev so občutljive na različne vrste bolečih dražljajev, kot so toplotni (vročina ali mraz), mehanski (rane) ali kemični (toksini ali strupi). Zanimivo je, da se ti isti receptorji odzivajo tudi na kemikalije v začinjeni hrani, kot je kapsaicin v feferonih, ki lahko (odvisno od naše občutljivosti) povzroči pekočo bolečino. Nekaterne vrste nociceptorjev pa se odzivajo le na kemične dražljaje, ki povzročajo srbenje. Dobro znan primer so histaminski receptorji, ki se aktivirajo, ko draženje kože, piki žuželk in alergije sprožijo sproščanje histamina v telesu. Znanstveniki pa so poleg že poznanih histaminskih receptorjev za srbenje nedavno prepoznali tudi druge.

Poškodba tkiva vodi v sproščanje različnih kemičnih spojin na mestu poškodbe, kar povzroči vnetje. Ta proces aktivira živčne signale, ki vzdržujejo zaznavanje bolečine, kar nam pomaga zaščititi poškodovani del telesa. Primer so prostaglandini, ki povečajo občutljivost nociceptorjev, kar povzroči občutenje še močnejše bolečine. Prispevajo tudi k stanju, imenovanem

alodinija, pri katerem lahko celo nežen dotik povzroči bolečino, kot bi to recimo občutili na močno opečeni koži. Dolgotrajna poškodba lahko povzroči spremembe živčnega sistema, ki povečajo in podaljšajo zaznano bolečino tudi v odsotnosti bolečinskih dražljajev. Nastalo stanje preobčutljivosti na bolečino, imenovano nevropatska bolečina, je tako posledica nepravilnega delovanja živčnega sistema in ne same poškodbe. Primer tega je diabetična nevropatija, pri kateri so živci v rokah ali nogah poškodovani zaradi dolgotrajne izpostavljenosti visokemu krvnemu sladkorju in prispevajo k zaznavam otrplosti, mravljinčenja ter pekoče ali druge vrste bolečine.

### Pošiljanje in prejetje sporočil

Boleči in srbeči dražljaji pridejo do hrbtenjače preko tankih A-delta živčnih vlaken in še tanjših vlaken C. Mielinska ovojnica, ki obdaja A-delta vlakna, pomaga živčnim impulzom potovati hitreje. Ta vlakna tako izzovejo takojšnjo, ostro in zlahka prepoznavno bolečino, ki jo povzroči na primer vbod z iglo. Nemielinizirana vlakna C pa prenašajo sporočila o bolečini počasneje. Njihovi živčni končiči se razprostirajo po razmeroma velikem območju in povzročajo top in razpršen občutek bolečine, katerega izvor je težje določiti. Signali bolečine in srbenja potujejo navzgor po hrbtenjači, skozi možgansko deblo in nato do talamusa (znano tudi pod imenom ascendentna, vzpenjajoča se pot). Od tam potujejo v več področij možganske skorje, ki spremljajo stanje telesa in spreminjajo sporočila o

bolečini in srbenju v zavestno izkušnjo. Ko bolečina postane zavestna izkušnja, imajo možgani priložnost, da spremeni svoj odziv na bolečinske signale.

### Obvladovanje bolečin



Četudi smo ljudje izpostavljeni istemu bolečinskemu dražljaju, bolečino doživljamo različno. Kako srbeča ali boleča je naša zaznava, je seveda odvisno od moči dražljaja, pa tudi od posameznikovega čustvenega stanja in okolja, v katerem pride do poškodbe. Ko sporočila o bolečini prispejo v skorjo, jih možgani obdelajo na različne načine. Možganska skorja pošilja sporočila o bolečini v predel možganskega debla, imenovan periakveduktalna siva možganovina. Ta s svojimi povezavami z drugimi jedri možganskega debla aktivira descendente poti za uravnavanje bolečine. Prav te poti pa pošiljajo tudi sporočila v predele, ki sproščajo endorfine, poznane kot opioide, ki jih proizvaja telo in delujejo kot analgetiki. Adrenalin, ki nastane v čustveno stresnih situacijah, kot je prometna nesreča, prav tako deluje tudi kot analgetik. Ta izraz se nanaša na učinkovino, ki lajša bolečino brez izgube zavesti. Sprostitev teh kemikalij v telesu pomaga uravnavati in zmanjšati bolečino s prestrezanjem nociceptivnih prilivov, ki po hrbtenjači potujejo proti možganskemu deblu.

Čeprav te možganske poti obstajajo pri vseh ljudeh, bosta njihova učinkovitost in občutljivost določala moč zaznane bolečine. To pojasni tudi pojav kronične bolečine pri nekaterih

posameznikih, ki pa se ne odzivajo na redno zdravljenje. Raziskave kažejo, da se endorfini vežejo na več vrst opioidnih receptorjev v možganih in hrbtenjači. To je pomembna informacija za razvoj protibolečinskega zdravljenja, zlasti pri ljudeh z omenjeno intenzivno kronično bolečino. Opioidna zdravila za zmanjšanje bolečine je zdaj tako mogoče dostaviti v hrbtenjačo pred, med in po operaciji. Znanstveniki preučujejo tudi načine električne stimulacije hrbtenjače za lajšanje bolečin, kar bi hkrati pomenilo izogib potencialno škodljivim učinkom dolgotrajne uporabe opioidov. Razlike v dojetju bolečine pri ljudeh prav tako kažejo na potrebo raziskav in zdravljenja, prilagojenega posameznemu bolniku. Jasno je, da za zaznavanje bolečine in srbenja ni odgovoren le en predel možganov. Čustvene in senzorične komponente ustvarjajo mozaik dejavnosti, ki vpliva na našo zaznavo bolečine. Pravzaprav so nekatere metode zdravljenja, med drugim meditacija, hipnoza, masaže, kognitivno-vedenjska terapija in nadzorovana uporaba konoplje, usmerjene predvsem v uravnavanje čustvene plati bolečine in ne na izbris bolečega dražljaja. Bolniki s kronično bolečino tako sicer še vedno čutijo bolečino, vendar ne več tako močno. Delovanja teh pristopov ne razumemo popolnoma, vendar so orodja za slikanje možganov razkrila, da konoplja na primer zavira aktivnost le v določenih področjih možganov, predvsem tistih, ki so del limbičnega sistema, poznane tudi kot čustveno središče možganov. ■