

# Magnētisms mūsos un ap mums



Foto: Dreamstime

Senās Ķīnas kultūrā magnetitus izmantoja ģeomantijas mākslā un viedēšanā

## Kurts Švarcs

**Ikviens no mums pazīst kompasu ar kustīgo magnētadatu, kas rāda ziemeļu-dienvidu virzienu.** Magnētiskos iežus (magnetītu) pazina jau senajā pasaulē; piemēram, Senajā Ķīnā trešajā gadsimtā p.m.ē., Haņu dinastijas periodā, tos izmantoja ģeomantijā, viedēšanā. Mūsu ēras 11. gadsimtā, Sunu dinastijas laikā, ķīniešu zinātnieks Šeņs Kuo (*Shen Kuo*) izgudroja peldošo kompasu navigācijai un aprakstīja arī inklinācijas leņķi (1. att.). Eiropā kompasu sāka izmantot 12. gadsimtā.

## Noslēpumainie spēki

Līdz pat 16. gadsimtam kompasu lietoja navigācijai, daudz neinteresējoties par Zemes magnētiskā lauka izcelesmi. Pirmos zinātniskos pētījumus par Zemes magnētismu veica angļu zinātnieks **Viljams Gilberts** (*William Gilbert*, 1554–1603). Viņš pauða uzskatu, ka Zemes iekšienē atrodas liels pastāvīgais magnēts, kas nosaka kompasa magnētadatas virzienu (1. att.). Gilberts arī pirmais aprakstīja magnētiskos minerālus, kas pievelk dzelzs skaidīgas un ietekmē magnētadatas virzienu. Šodien mēs zinām, ka minerālu magnētisko

lauku rada dzelzs (Fe), niķeļa (Ni) vai kobalta (Co) atomi.

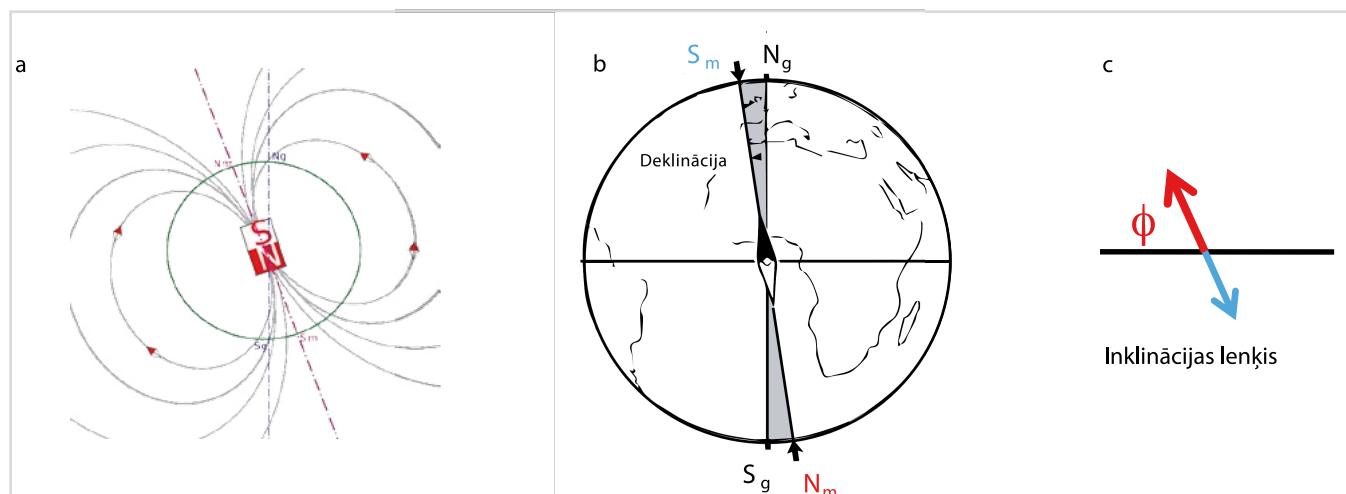
Jaunajos laikos svarīgu atklājumu par elektriskās strāvas radīto magnētisko lauku 1820. gadā veica dāņu fiziķis **Hanss Kristians Erstdeds** (*Hans Christian Oersted*, 1777–1851). Lekcijas laikā viņš novēroja magnētadatas novirzi strāvas vada tuvumā. Šo parādību sīkāk aplūkoja franču zinātnieks **Andrē Marī Ampērs** (*André-Marie Ampère*, 1775–1836), kura vārdā nosaukta elektriskās strāvas mērvienība. Būtisku ieguldījumu elektromagnētisma teorijas attīstībā sniedza angļu zinātnieks **Maikls Faradejs** (*Michael Faraday*, 1770–1845), kurš atklāja elektromagnētiskās indukcijas likumus,

kas ir mūsdienu elektrotehnikas pamats. Stāsta, ka Faradeja laboratoriju apmeklējis pats Anglijas premjerministrs, kurš apjautājies par viņa elektromagnētiskās ierīces pielietojumu. Faradejs viņam atbildējis: "Kādudien jūs to varēsiet aplikt ar nodokļiem!"

## Magnētisms uz Zemes

Pirmos sistemātiskos Zemes magnētiskā lauka mērījumus veica vācu matemātiķis un fizikis **Karls Frīdrihs Gauss** (Carl Friedrich Gauß, 1777–1855). Sadarbībā ar **Vilhelmu Vēberu** (Wilhelm Eduard Weber, 1804–1891) viņš noteica Zemes magnētiskā lauka intensitāti, izmantojot pašizgudrotu magnētometru (1832). Gauss arī nodibināja pirmo magnētisko

observatoriju pie Getingenes Universitātes. Mērījumi pierādīja, ka Zemes magnētiskais lauks ikdienu mainās nedaudz ( $\pm 10\%$ ) un šīs izmaiņas saistās ar avotiem ārpus Zemes. Magnētiskā lauka intensitāte ir vislielākā uz magnētiskajiem poliem (ap 60 mikroteslas,  $60 \mu\text{T}$ ) un vismazākā uz ekvatora (ap  $30 \mu\text{T}$ ). Latvijā magnētiskā lauka intensitāte ir ap  $40 \mu\text{T}$ . Mūsdienās, pateicoties Zemes mākslīgajiem pavadoņiem, kosmiskajām stacijām un lidojumiem uz Mēnesi, magnētiskā lauka sadalījums ap Zemi ir labi izpētīts. Zemes magnētiskais lauks sniedzas aptuveni desmit zemeslodes rādiusu attālumā (64 000 km!) un saplūst ar Saules magnētisko lauku. Zemes magnētiskais lauks novirza lādētās daļas, kas plūst no Saules, – šī magnētiskā ekrānēšana ir ļoti būtiska dzīvības pastāvēšanai uz Zemes. Nozīmīgu ieguldījumu pētījumos par Zemes magnētiskā lauka izcelsmi (magnetodinamo) snieguši Latvijas Universitātes fiziķi profesora **Agra Gailiša** vadībā, eksperimentāli pierādot "dinamo eksistenci" (sk. E&P Nr. 3 (110), 2018).

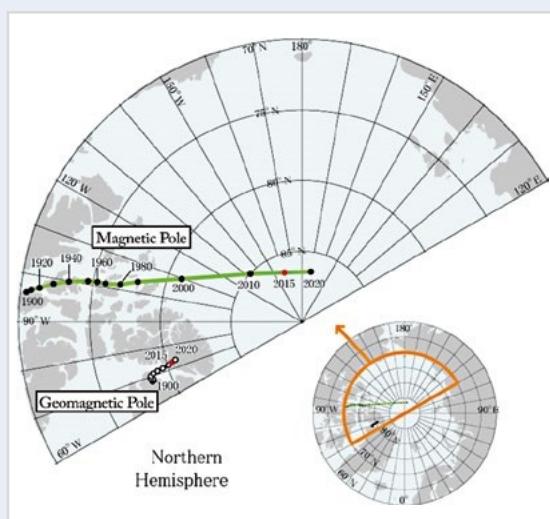


1. attēls. a - Zemes magnētisko lauku raksturo spēka līnijas, kas iziet no Zemes iekšējā magnēta ziemeļpola un noslēdzas dienvidpolā;  
b - magnētiskie ziemeļu un dienvidu poli atšķiras no ģeogrāfiskajiem poliem, vidējais deklīnācijas leņķis ir  $11^\circ$ ;  
c - magnētiskā lauka horizontālā komponente (inklinācijas leņķis) ziemeļu puslodē vērsta uz augšu, bet dienvidu puslodē – uz leju no horizontālās plaknes

## Zemes magnētiskais modelis

Ziemeļu magnētisko polu 1831. gadā pirmoreiz sasniedza britu pārlēpnieks Džeimss Klārks Ross. Novērojumi liecina, ka kopš tā laika ziemeļu magnētiskais pols ir pastāvīgi virzījies no Kanādas arktiskajām teritorijām uz Sibīrijas pusē.

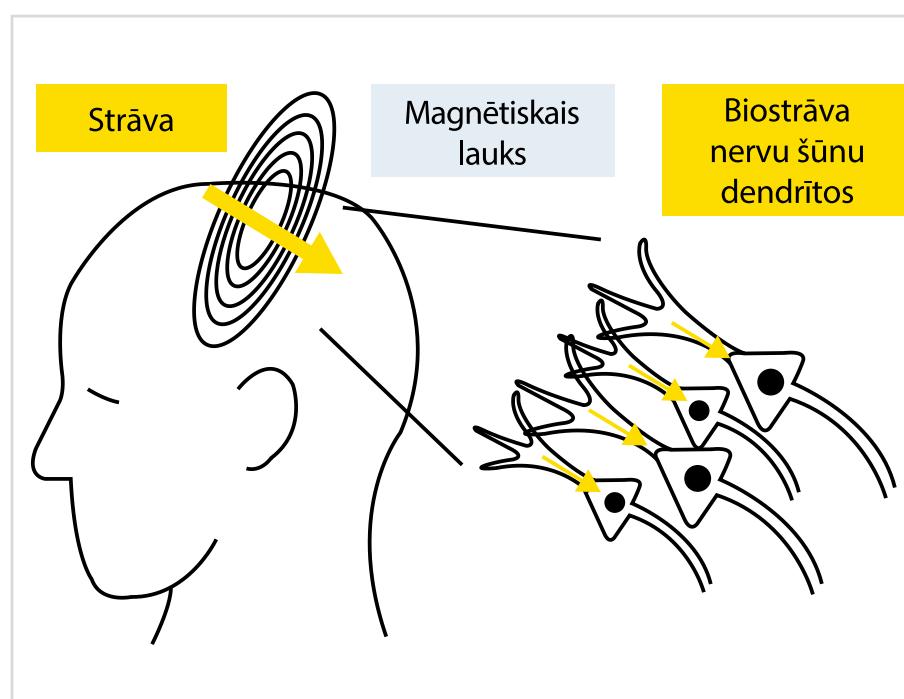
Šā gada februārī ASV Nacionālā okeānu un atmosfēras administrācija (NOAA) paziņoja, ka ir veikta kārtējā Zemes magnētiskā modeļa (World Magnetic Model – WMM) korekcija. Mūsu planētas "magnētiskā karte" parasti tiek atjaunota ik pēc pieciem gadiem, taču, lai nodrošinātu precīzu navigāciju, korekciju bija nepieciešams veikt ātrāk nekā plānots magnētisko polu arvien straujākas pārvietošanās dēļ, īpaši Arktikas reģionā. Patlaban pola kustība notiek ziemeļu/ziemeļrietumu virzienā ar ātrumu ap 55 km gadā. Dienvidu magnētiskais pols pārvietojas lēnāk.



Ziemeļu magnētiskā pola kustība

## Magnētiskais lauks cilvēka organismā

Dzīvā organismā ir divi galvenie magnētiskā lauka avoti [2]. Pirmkārt, to rada jonu strāvas muskuļu un nervu šūnās, it īpaši sirds muskuļos un smadzenēs (2. att.). Šis strāvas saistās ar nātrijs ( $\text{Na}^+$ ), kālijs ( $\text{K}^+$ ), kalcijjs ( $\text{Ca}^{2+}$ ) un hloras ( $\text{Cl}^-$ ) jonu kustību muskuļu un nervu šūnās, un to stiprums ir daži nanoampēri (elektriskā strāva 40 vatu kvēlpuldzē ir 0,18 ampēri (A); 1 nA ir miljardā daļa ampēra!). Otrs magnētiskā lauka avots ir feromagnētiskās nanodaliņas organismā, it īpaši plaušās, kur šīs daļiņas ieklūst elpošanas procesā. Magnētiskie ieslēgumi putnu smadzenēs ir svarīgs orientācijas faktors putnu lidojumos uz siltiem pārziemošanas apgabaliem. Arī cilvēka organisms reaģē uz ārējo magnētisko lauku, kas iespaido bioloģiskos procesus organismā, piemēram, saules magnētisko vētru laikā (sk. E&P Nr. 6 (107), 2017). Precīzi biomagnētisma pētījumi sākās tikai pagājušā gadsimta otrajā pusē, izmantojot jaunos supravadītāju detektorus.

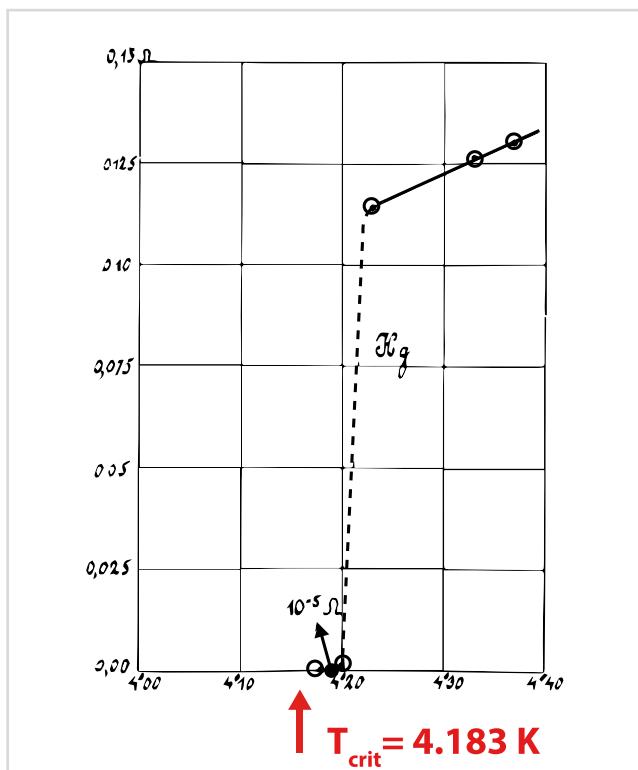


2.attēls. Biomagnētisms cilvēka organismā saistās ar jonu ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) kustību neuronos un muskuļu audos. Šīs jonu strāvas (1 – 10 nA, 1 nA ir miljardā daļa ampēra!) atbilstoši Faradeja indukcijs likumiem inducē magnētisko lauku



Avots: Wikimedia Commons

Heike Kamerlingh Onnes

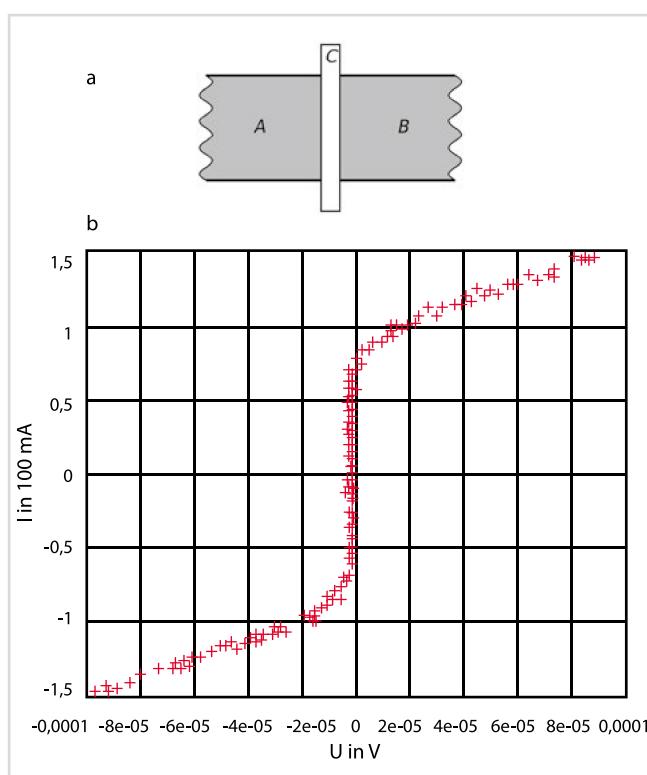


3.attēls. Holandiešu fiziks, Nobela prēmijas laureāts Heike Kamerlings Oness 1911. gadā sašķidrināja hēliju ( $\text{He}$ ) 4,2 K (-268 °C) temperatūrā un nedaudz vēlāk atklāja supravadītspēju dzīvsudrabā (pie kritiskās temperatūras 4,183 K elektriskā pretestība samazinās līdz  $\sim 10^{-5}$  oma ( $\Omega$ )). Šie atklājumi izraisīja revolūciju fizikā un tehnikā

## Zemās temperatūras un biomagnētisms

Deviņpadsmitā un divdesmitā gadsimta mijā Leidenes Universitātes profesors **Heike Kamerlings Oness** (*Heike Kamerlingh Onnes*, 1853–1926) aizsāka zemo temperatūru ēru. 1911. gadā izcilais fiziks sašķirināja cēlgāzi hēliju ( $\text{He}$ )  $4,2 \text{ K}$  ( $-269^\circ\text{C}$ ) temperatūrā! Nedaudz vēlāk H. K. Oness atklāja supravadītspēju dzīvsudrabā, kura elektriskā pretētība pie kritiskās temperatūras strauji samazinās līdz nullei (3. att.). Patlaban ir zināmi 26 metāli, kuri zemās temperatūrās pāriet supravadošā stāvokli. 1913. gadā H. K. Oness saņēma Nobela prēmiju par "vielas īpašbu pētījumiem zemās temperatūrās, kas radīja iespēju ražot šķidro hēliju". Gāzu sašķirināšana pavēra jaunu laikmetu fizikā un tehnikā, un tagad supravadītājus izmanto gan spēcīgu magnētisko lauku iegūšanai (magnētiskā rezonanse medicīnā, dalīju paātrinātāji), gan arī kā superjutīgus biomagnētiskā lauka detektorus.

Jaunu soli magnētisma pētniecībā 1962. gadā spēra britu fizikis, tobrīd 22 gadus vecais Kembridžas Universitātes doktorants **Braiens Deivids Džozefsons** (*Brian David Josephson*, dzimis 1940. gadā, Nobela prēmija 1973. gadā). Viņš prognozēja elektrisko lādiņu tunelēšanu supravadītājos, ko nedaudz vēlāk Bella laboratoriju (*Bell Labs*) līdzstrādnieks **Džons Rouels** (*John Rowell*, dzimis 1935) novēroja eksperimentāli un nosauca par "Džozefsona efektu" (4. att.) [3].



4. attēls. Džozefsona efekts ir strāvas tunelēšana supravadītāju kēdē ar plānām izolatora kārtījām: a - Džozefsona pāreja ir plāns izolatora slānis (C) starp diviem supravadītājiem (A, B);  
b - pie neliela sprieguma elektroni īsteno pāreju caur izolatora barjeru (tunēja efekts) un nodrošina strāvu supravadītāju kēdē

Džozefsona efekts pavēra jaunu ēru supravadītāju pielietojumos un kļuva par pamatu jaunai superjutīgai magnētiskā lauka detektēšanas metodei, izmantojot kvantu efektu. Supravadītāja kvantu interferometrs (angļu val. *superconducting quantum interference device* – SQUID) tika izstrādāts, izmantojot Džozefsona efektu (5. att.). Interesanti atzīmēt, ka izgudrojums un tā izstrāde tika veikti *Ford Motor Co.* zinātniskajā laboratorijā, kas dibināta 1951. gadā Dīrbornā, Mičiganas štatā. Forda uzņēmums tradicionāli deva iespēju vadošajai laboratorijai brīvi izvēlēties pētījumu tēmu! "Mums bija brīvība darīt to, kas mūs interesēja," vēlāk atzīmēja viens no izgudrojuma autoriem Arnolds Silvers. SQUID izgudrojums nebija saistīts ar Forda uzņēmuma problēmām, taču galu galā pavēra jaunas tehniskās iespējas magnētisma pētījumos un arī ievērojami cēla kompānijas starptautisko prestižu.

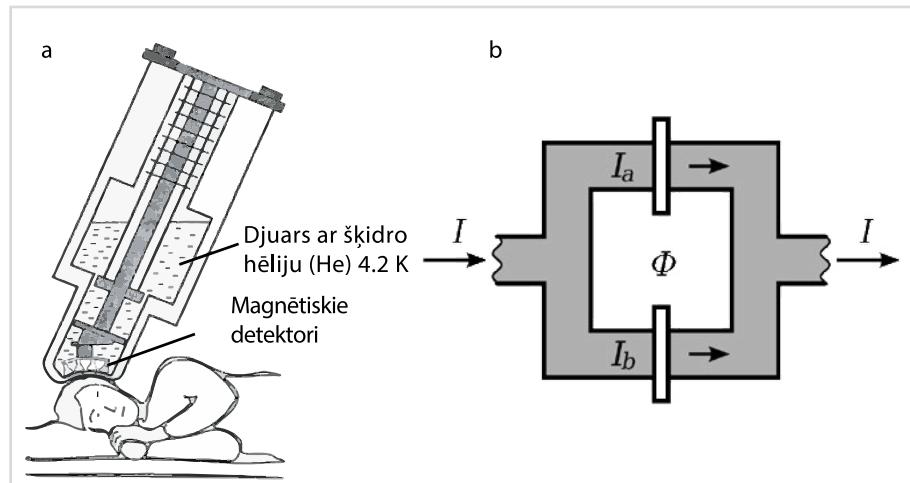
Līdzstrāvas SQUID 1964. gadā izstrādāja Forda uzņēmuma centrālās laboratorijas pētnieku grupa (*Robert Jaklevic, John J. Lambe, James Mercerau, Arnold Silver*), izmantojot Džozefsona efektu [3]. SQUID supravadītāja kēdē ir divas Džozefsona pārejas (5. att.). Bez ārējā magnētiskā lauka strāva kēdē ir kompensēta ( $I_a, I_b$ ). Ja uz vienu no Džozefsona pārejām tiek uzlīkts ārējais magnētiskais lauks, tiek inducēta papildu strāva, kurās stiprums ir proporcionāls magnētiskā lauka intensitātei. Kompensētā strāva nodrošina magnētiskā lauka mēriju lielo jutību! Ar SQUID var reģistrēt vāju magnētisko lauku ( $5 \times 10^{-15} \text{T}$ ) un ilgstošos pastāvīgā magnētiskā lauka mēriju mos pat daudz mazāku. SQUID tagad ir realizēts ar desmitiem dažādu materiālu Džozefsona pārejās pie temperatūrām no šķidrā



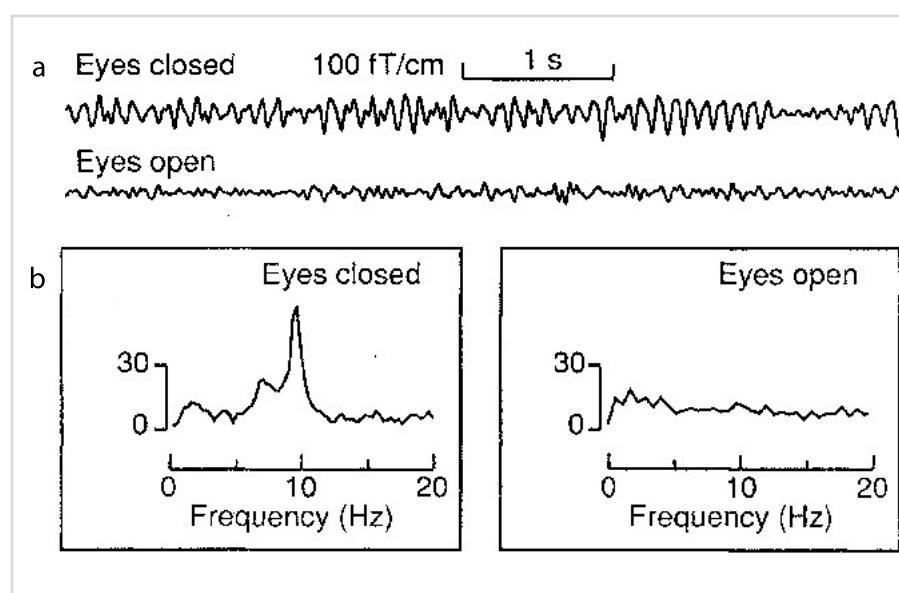
Braiens Deivids Džozefsons

slāpeklā (~77 K jeb -196 °C) līdz šķidram hēlijam (4,2 K). Šodienas kriogēnā tehnika dod iespēju izgatavot djuarus (izolēti trauki kriogēno šķidrumu uzglabāšanai, ko izgudroja angļu fiziķis **Džeimss Djuars** (Sir James Dewar, 1842–1923)), kuru diametrs ir daži milimetri, tā nodrošinot augstu lokālo izšķirtspēju dažu milimetru robežas. Biomagnētiskā laukā topogrāfijas mērījumi kļuva iespējami, izmantojot detektoru matricas ar dažiem simtiem detektoru (5. att.). Eksperimentus vada un rezultātus apstrādā datorsistēmas. Visam procesam ir nepieciešamas sarežģitas, dārgas mēriekārtas.

Cilvēka organismā magnētiskie lauki rodas nervu šūnās (signālu pārraide neironos), smadzenēs, pie muskuļu darbības, un tie saistās ar jonu strāvām (2. att.). Biomagnētisma pētījumi medicīnā tika uzsākti pagājušā gadsimta beigās.



5.attēls. SQUID mēriekārtā smadzeņu magnētiskā lauka mērījumiem: a - SQUID mēriekārtā ar hēlija kriostatu un detektoriem ar Džozefsona pārejām; b - SQUID supravadītāju ķēdē ir divas Džozefsona pārejas, kuras bez ārējā magnētiskā lauka kompensē strāvas  $I_a$  un  $I_b$ ; ja uz vienu no Džozefsona pārejām iedarbojas ārējais magnētisks lauks, tiek inducēta papildu strāva, kuras stiprums ir proporcionāls magnētiskā lauka intensitātei [4]



6.attēls. Alfa (a) viļņi labās smadzeņu puslodes redzes centrā pie gaismas signāla: a - a viļņu reģistrācija 5 sekunžu laika intervālā pie slēgtiem (eyes closed) un atvērtiem plakstiņiem (eyes open); b - maksimālās magnētiskā lauka izmaiņas pie 10 Hz frekvences (atlīkta vidējā amplitūda no divdesmit novērojumiem). Uz vertikālās ass atlīkts magnētiskā lauka gradients vienībās fT/cm (femtotesli uz centimetru) [6]

Sirds muskuļu magnētiskie lauki ir ap  $10^{-11}$  T, un smadzeņu magnētiskā lauka signāli ir vēl mazāki ( $\leq 10^{-12}$  T). Biomagnētiskie lauki cilvēka organismā ir miljoniem reižu mazāki par Zemes magnētisko lauku un simttūkstoš reižu mazāki par ģeomagnētiskā lauka svārstību amplitūdām.

Magnētisko lauku mērījumiem cilvēka organismā jāizmanto ļoti jutīgi detektori (SQUID) un jānovērš trokšņi no apkārtējiem magnētiskiem laukiem (trokšņu līmenis jāsamazina miljons reižu!). Šim nolūkam izmanto telpas, kas ekranētas ar daudzslāņu magnētiskiem materiāliem. SQUID metodes lielo jutību raksturo apstāklis, ka pat iekārtas operatoora metaliskie zobi kroniši iespāido mērījumu rezultātus! Vieglāk ir mērīt smadzeņu elektriskos laukus (elektroencefalogramma, EEG). Pirmai smadzeņu EEG 1924. gadā ieguva vācu neurologs profesors **Hanss Bergers** (Hans Berger, 1873–1941).

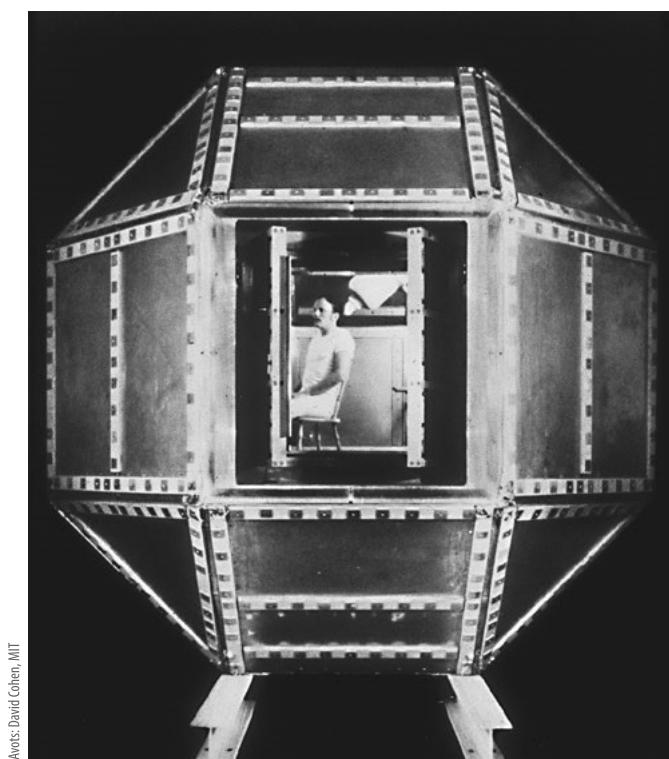
1929. gadā viņš publicēja savus atklājumus par smadzeņu alfa (a) viļņiem žurnālā *Archiv für Psychiatrie* [4]. Bergera rezultāti kļuva populāri trīsdesmito gadu beigās: tie sekmēja elektroencefalogrāfijas ievedīšanu medicīnā un stimulēja biomagnētiskos pētījumus un alfa viļņu reģistrāciju ar magnētiskiem detektoriem. Pēc alfa viļņu atklāšanas ar frekvenci ~10 Hz tika novēroti vēl pieci smadzeņu elektromagnētisko viļņu veidi ar frekvencēm līdz 100 Hz (simt svārstību sekundē).

## Magnētisma noslēpumi cilvēka smadzenēs

"Cilvēka smadzenēs ir simt miljardi neironu un katrs nerons saistīts ar desmitūkstoš citu neironu. Cilvēka smadzenes ir viissarežģītākais objekts izpētitajā Visumā," – tā cilvēka smadzenes raksturoja pazīstamais japānu izcelsmes amerikānu fiziķis, Nujorkas Universitātes profesors Mitio Kaku (Michio Kaku, dzimis 1947). Smadzeņu darbības izpētes jomā ir daudz atklājumu, taču līdz ar katru jaunu atklājumu paplašinās arī nezināmais un noslēpumainais smadzeņu darbībā. Šajā rakstā aplūkosim tikai vienu šauru smadzeņu pētniecības problēmu, proti, ko jaunu ienesa jutīgie biomagnētiskā lauka detektori.

1968. gadā amerikānu neurologs profesors **Deivids Koens** (David Cohen) ar jutīgiem SQUID detektoriem reģistrēja smadzeņu elektromagnētiskos alfa viļņus un ieguva pirmo smadzeņu magnētisko encefalogrammu (MEG) [5].

Magnetoencefalogrāfija ir neinvazīva metode neironu aktivitātes pētīšanai



7. attēls. Magnētiski ekrānēta telpa, ko 1969. gadā Deivids Koens uzbūvēja Masačūsetas Tehnoloģiju institūtā, Frenisa Bitera vārdā nosauktajā Nacionālajā Magnētu laboratorijā

smadzenēs, kurā magnētiskā lauka mērījumi minimāli ie-spaido organismu audus. Metodes jutība ir  $5 \times 10^{-14}$  teslas (50 femtoteslas, fT) ar mērījumiem milisekundes laikā un lokālo izšķirtspēju divi līdz trīs milimetri. Tā paver iespējas noteikt magnētiskā lauka avotu lokalizāciju smadzeņu garozā un signālu izmaiņas laikā (kinētiku) gan miera stāvoklī (piemēram, miegā), gan pie dažādiem ārējiem kairinājumiem (skaņa, gaisma u.c.). Neironu strāvu izraisīto magnētiskā lauka lokalizāciju smadzeņu garozā var noteikt ar magnētiskā lauka sadalījuma mērījumiem (topogrāfijas), ko iegūst ar detektoru matricām, novērojot signālu no dažādiem virzieniem (5. att.). Šādi var pētīt daudzas cilvēka smadzeņu reakcijas, tostarp spontāno aktivitāti mācību procesā, piemēram, klausoties lekciju vai lasot grāmatu. Klīniskajā praksē galvenā uzmanība tiek pievērsta nervu un psihisko slimību diagnostikai un iespējamai terapijai, izmantojot SQUID matricas ar vairakiem simtiem detektoru [6].

Magnētiskā lauka mērījumi cilvēka organismā ir tehniski sarežģīti un saistās ar kriogēno tehniku, jutīgiem signālu pastiprinātājiem un ekrānēšanu no apkārtējā ārējā magnētiskā lauka. Magnētiskā lauka mērījumu priekšrocība ir stabila ārējo detektoru konfigurācija ap cilvēku ķermenī vai galvaskausu (5. att.), pretstatā elektriskajām metodēm, kur strāvas mērījumiem nepieciešami kontakti uz ādas [7].

Smadzeņu biomagnētiskie alfa viļņi atrodas frekvenču diapazonā no septiņiem līdz četrpadsmit herciem. Pilnīgas atpūtas stāvoklī, kad smadzenes ir atbrīvotas no jebkādām domām, alfa viļni ir viisspēcīgākie. Pie aktīvas garīgas darbības, pie ikdienu problēmu risinājuma šo viļņu amplitūda samazinās un dažos gadījumos pat izzūd. Alfa viļņu magnētiskā lauka izmaiņas smadzeņu labās puslodes redzes centrā gaismas signāla iespaidā parādīta 6. attēlā. Miera stāvoklī (acs plakstiņi



8. attēls. Magnetoecefalogrāfija ir neinvazīva metode neironu aktivitātes pētīšanai smadzenēs

ir slēgti) magnētiskā lauka signāls ir maksimāls, bet pie atvērtiem plakstiņiem signāls samazinās. Maksimālās izmaiņas ir pie frekvencēm ap 10 Hz. Šie magnētiskā lauka mērījumi apstiprina alfa viļņu izmaiņas eksperimentos ar dzīvniekiem.

Smadzeņu biomagnētiskie ritmi attīstījās dzīvo organismu evolūcijas procesā Zemes magnētiska lauka ietekmē, par ko liecina līdzīgie frekvenču diapazoni. Pētījumi rāda, ka smadzeņu stimulēšana alfa diapazonā ir svarīga, lai apgūtu jaunus vizuālās informācijas datus, kas tiek uzkrāti mūsu atmiņā.

Smadzeņu biomagnētisms ir tikai viens no daudziem smadzeņu darbības parametriem. Mūsu atmiņa, informācijas uzkrāšana smadzenēs un daudz kas cits saistīs ar bioķīmiskām reakcijām, kuras šobrīd novērotas tikai eksperimentos ar dzīvniekiem [8]. Perspektīvā ir svarīgi apvienot biomagnētiskos mērījumus ar smadzeņu bioķīmiju un medikamentu ietekmi. Būtiska nākotnes problēma ir biomagnētiskā terapija, kas pavērs jaunas iespējas klīniskajā medicīnā [6, 7]. E&P

#### Literatūra

- [1] Huang Ti, Random House Unabridged Dictionary, Random House Inc., 2018.
- [2] Jakoo M., Plonsey R., Bioelectromagnetism: principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields, Oxford University Press, New York, 1994.
- [3] Johnson A., How the Ford Motor Co. Invented the SQUID, IEEE Spectrum, Nov.19, 2014.
- [4] Berger H., Über das Elektroenzephalogramm des Menschen, Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 87, 527–570, 1929.
- [5] Cohen, D., Magnetoencephalography: evidence of magnetic fields produced by alpha rhythm currents. Science 161, 784–786, 1968.
- [6] Hamalainen M. et al., Magnetoencephalography theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain, Rev. of Modern Physics, 65, Issue 2, 413–497.
- [7] Körber R. et al., SQUIDs in biomagnetism: a roadmap towards improved healthcare Supercond. Sci. Technol. 29, 113001 (30pp), 2016.
- [8] Engelmann D., The Brain, Canongate Books Ltd., 2016.