



Co-funded by
the European Union

Õppeüksus: Neuronid: elektrilise signaali edastamise bioloogiline ja füüsikaline mudel

DiFC - Palermo Ülikool



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Sisukord

1. Neuroteadus	3
Neuronid: elektrilise signaali edastamise bioloogilised ja füüsikalised mudelid	3
2. Avasta moodul	4
"Dokkimise" etapp	4
Ajurünnakud klassis	4
Algtase	5
Neuronid	5
Närvi stiimuli teke	6
Signaali leviku füüsikaline mudel neuronis	9
Edasijõudnutele	11
Mudeli analüüs matemaatilisest vaatenurgast	11
Pööratud õppimine:	15
3. Operatsioonimoodul	17
Algtase	17
Testi oma teadmisi	17
PhEt simulatsioon: neuron	18
PhEt simulatsioon: vooluringi ehituskomplekt – virtuaalne labor	18
Edasijõudnutele	19
Proovi ise järele:	19
4. Eriti põhjalik materjal	19
5. Viited	1





Õppetee üldine teema	Neuroteadus
Õppeüksuse täpne nimetus	Neuronid: elektrilise signaali edastamise bioloogiline ja füüsikaline mudel
Sihtrühma vanus	17–19-aastased
Õppijale esitatavad nõuded	Matemaatika, füüsika, keemia ja bioloogia baasteadmised.
Õppeüksuse kirjeldus	Üksuse didaktiline kirjeldus See juhendab õpetajaid ja õpilasi läbi multidistsiplinaarse õpetamis-/õppimisraja, et avastada neuroteaduse põhitõdesid ja panuseid STEM-distsipliinide ja praeguste uuringute vahelisest suhtlusest täiustab AR-tööriist visualiseerimist ja kaasatust
Teema: Asjaosalised	Bioloogia, keemia, füüsika, matemaatika, inseneriteadused
Märksõnad	Neuronid, sünaptiline ülekanne, elektriline signaal, närvikommunikatsioon, AR, Assemblr EDU, stseenipõhine õpe, interaktiivne visualiseerimine
Peamised omandatavad kvalifikatsioonid, oskused ja teadmised	• Probleemide lahendamine, disainmõtlemine, arutluskäik • Füüsika, keemia, matemaatika ja bioloogia kontseptuaalsed ja praktilised teadmised • AR-põhised oskused: 3D-ruumiline visualiseerimine, stseenipõhine navigeerimine, digitaalne teaduslik modelleerimine





	• Interaktiivne õppimine tehnoloogia integreerimise kaudu
Kasutatud ressursid ja didaktilised abivahendid	Veebiressursid, virtuaallaborid, teadusartiklid, teadusandmebaasid, Assemblr EDU platvorm PRO teeki ligipääsuga (anatomilised 3D-mudelid, molekulaarsed kujutised, Thunder Particle'i efektid), kohandatud PNG-navigeerimisnupud
Hindamiskriteeriumid ja hindamine	Erinevad teadmiste tasemed kontseptsioonide ja oskuste kohta, sh AR-põhine hindamine stseeninavigatsiooni lõpuleviimise kaudu, sünaptiliste protsesside koostööl põhinev tõlgendamine ja närvikommunikatsiooni põhimõtete mõistmise demonstreerimine interaktiivse 3D-mudeli uurimise kaudu.





1. Neuroteadus

Neuronide elektrilise signaali edastamise bioloogilised ja füüsikalised mudelid



Neuroteadus on rühm üksteisest väga erinevaid distsipliine, mis uurivad närvisüsteemi, st aju, seljaaju ja kogu kehas esinevaid neuronite võrgustikke. Aastate jooksul on nad omandanud matemaatika, füüsika, arvutiteaduse ja inseneriteaduse meetodikad ja uurimistehnikad. Tänu nende distsipliinide, aga ka bioloogia, keemia ja füsioloogia fundamentaalsele panusele on võimalik välja töötada toimimismudeleid, mis suudavad selgitada bioloogiliste süsteemide, näiteks aju, käitumist.

Nobeli preemia laureaat Eric Kandel kirjutab: „Neuroteaduse ülesanne on selgitada käitumist ajutegevuse kaudu. Kuidas saab aju suunata oma miljoneid üksikuid närvirakke käitumist tekitama ja kuidas saab keskkond neid rakke mõjutada? Meeleteaduse viimane piir, selle ülim väljakutse, on mõista teadvuse bioloogilist alust ja vaimseid protsesse, mille kaudu me tajume, tegutseme, õpime ja mäletame.“

Inimese aju on imeline, kuid väga keeruline süsteem. Närvisüsteemi funktsionaalsed üksused, neuronid, suhtlevad omavahel elektriliste signaalide kaudu, mis levivad isegi pikkade vahemaade taha ja vabastavad kemikaale, mida nimetatakse neurotransmitteriteks.

Uuringu eesmärk on äratada huvi teema vastu, mis sobib hästi multidistsiplinaarseks lähenemiseks STEM-valdkonnas neuroteaduse aluste avastamise kaudu, ning suurendada uudishimu teema vastu, mille uurimine on eesliiniuuring ja millel on oluline mõju heaolule ja tervisele.





Sünaptilise ülekande ja närvikommunikatsiooni uurimist saab oluliselt täiustada liitreaalsuse (AR) tööriistade ja ressursside abil. AR-tehnoloogia rakendamine neuroteaduse hariduses hõlbustab keerukate neurobioloogiliste protsesside sügavamat mõistmist.

Laiendatud sünapts: rännak ajus - Assemblr EDU rakendamine

See liitreaalsuse kogemus juhendab õpilasi läbi järjestikuste stseenide, mis demonstreerivad täielikke sünaptilise ülekande protsesse. Alustades inimese närvisüsteemi anatoomilisest ülevaatest, liiguvad õpilased edasi üksikute neuronite ja sünaptilise kommunikatsiooni üksikasjaliku uurimise juurde. Assemblr EDU PRO teeki kasutades rakendab kogemus anatoomiliselt täpseid motoorsete ja sensoorsete neuronite mudeleid, neurotransmitterite molekulaarseid esitusi ja äikeseosakeste efekte elektriliste impulsside visualiseerimiseks. Õpilased navigeerivad läbi spetsiaalsete stseenide, mis näitavad impulsi algust, neurotransmitterite vabanemist ja signaali vastuvõtmist, millele lisanduvad teaduslikud andmed, sealhulgas pinge mõõtmised ja edastuskiirused.

AR-i hariduslik kasu neuroteaduses

Liitreaalsus (AR) asetab virtuaalsed elemendid reaalsele maailmale, luues interaktiivse õpikeskkonna. Neuroteaduste hariduses parandab AR nähtamatute bioloogiliste protsesside mõistmist, pakudes kolmemõõtmelisi visualiseeringuid ja samm-sammult uurimist. Stseenipõhine navigeerimismeetod võimaldab õpilastel jälgida abstraktseid kontseptsioone, nagu elektriimpulsside levik ja keemilise signaali edastamine, konkreetsetes ja visuaalses vormis. See meetodika ühendab teoreetilised teadmised vaadeldavate nähtustega, toetades bioloogia, füüsika ja tehnoloogia vahelisi interdistsiplinaarseid seoseid, säilitades samal ajal sünaptiliste protsesside kujutamise teadusliku täpsuse.

2. Avasta moodul

"Dokkimise" etapp

1) Teekond meie aju sees – YouTube

<http://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=lrXuyxDt5jo>

Ajurünnakud klassis

Juhtfraas: Kõik tegevused, mida me sooritame, ja kõik emotsioonid, mida me tunneme, sõltuvad närvisignaali ülekandest neuronite vahel. Kuidas saab orgaaniline aine koguda, analüüsida ja edastada teavet väga suure täpsuse ja kiirusega? Meie heaolu põhineb neuronaalse võrgustiku iga elemendi nõuetekohasel toimimisel. Milliseid tehnoloogiaid saab kasutada sekkumiseks, kui midagi ei lähe õigesti?

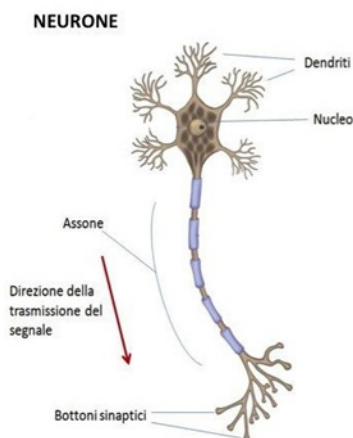


Algtase

Neuronid

Milline on neuroni struktuur?

Inimese ajus on umbes 100 miljardit rakku ehk neuronit, mis on spetsialiseerunud peamiselt elektriliste närvisignaali edastamisele. Neuron koosneb mitmest osast, millel on spetsiifilised funktsioonid: rakukeha (või soma), mis sisaldab tuuma, dendriite ja aksonit. Teistelt neuronitelt või retseptororganitelt tulev närvisignaal kogutakse ja edastatakse tuuma dendriitide kaudu, mis on tuuma lühikesed ja hargnenud jätked. Rakukeha sees töödeldakse signaali ja edastatakse see aksonile, mis on väga pikk jätk, mille ülesanne on kanda elektriline signaal teistesse rakkudesse. Neuroni sisemust eraldab välisest interstitsiaalsest vedelikust tsütoplasmaatiline membraan. Aksonid on mõnikord suurema osa oma pikkusest ümbritsetud paksu isoleeriva materjaliga, müeliinkestaga. Oma viimases osas hargneb akson muutuva arvu otsteks, sünaptilisteks nappudeks, kus elektriline signaal muundatakse neurotransmitteri abil keemiliseks signaaliks.

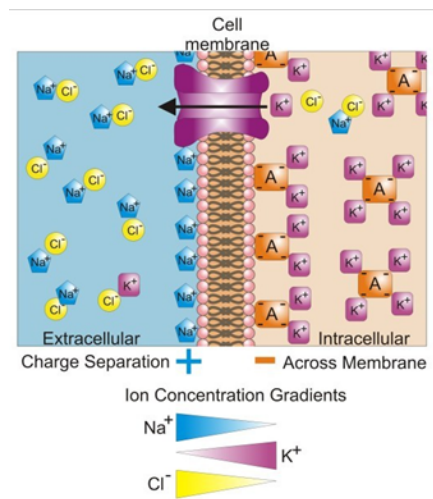


Allikaspilt: Online Medicine

Mis juhtub, kui neuronit ei stimuleerita? Millised füüsikalised-keemilised omadused võimaldavad meil neuroni käitumist kirjeldada?

Neuronitel on tsütoplasmamembraani sees ja väljas erinev elektriline potentsiaal, mis tuleneb peamiselt naatriumi- Na^+ ja kaaliumi- K^+ ionide erinevast kontsentratsioonist membraani kahel küljel. Kui neuron on puhkeolekus, st ei edasta signaale, on see potentsiaalide erinevus, mida nimetatakse puhkepotentsiaaliks, väärtused vahemikus -60 mV kuni -80 mV . Tsütoplasmamembraanil on ionikanalid ja pumbad, mis avanevad ja sulguvad vastuseks teatud stiimulitele, reguleerides ionide läbipääsu ja muutes sellest tulenevalt elektrilist potentsiaali.





Raku sisemus on rikas K^+ ionide ja orgaaniliste makromolekulidega seotud negatiivsete ionide poolest, samas kui raku väliskülg on rikas Na^+ ja Cl^- ionide poolest. Na^+ ja K^+ ionide kontsentratsiooni reguleerivad kolm membraanvalku, mida nimetatakse ionikanaliteks või pumpadeks:

- naatriumkanalid;
- kaaliumikanalid
- naatriumi-kaaliumi pump.

Neuroni membraanil on palju kaaliumikanaleid: need kanalid suruvad K^+ ioone membraani seest väljapoole, kuigi sel viisil suurendavad nad raku sees negatiivsust. Teisest küljest ei saa raku sees olevad negatiivsed ionid väljapoole difundeeruda, kuna nad on membraani läbimiseks liiga suured.

Naatriumkanaleid on vähe ja need kipuvad naatriumioone sissepoole hajutama.

Naatrium-kaaliumpump toimib ionide loomuliku voolu suuna vastu, lükates Na^+ ionid välja ja K^+ ionid raku sisse. Puhkeolekus on membraan Na^+ ionide sissetungi jaoks praktiliselt läbitungimatu.

Mõtleme selle üle koos: Neuronid on keha vanimad rakud: nad ei suuda end paljundada ja kahjustuste korral, mis viivad nende surmani, ei suuda ümbritsevad neid asendada. Aastate möödudes muutub närvisüsteemi funktsionaalsus vähem efektiivseks: seetõttu on uuringud huvitatud uute meetodite leidmisest, et parandada aju võimet toota uusi neuroneid (neurogenees), et parandada õppimist ja mälu. Mida saate teha, et hoida oma neuroneid tervena? Kuidas saate oma meelt treenituna hoida?

Närvi stiimuli teke

Kuidas neuronid omavahel suhtlevad?

Kõik väljastpoolt tulevad signaalid püütakse kinni dendriitide poolt ja kanduvad tuuma. Kui neuroni tuuma jõuab stiimul, mis võib muuta puhkepotentsiaali läviväärtuseni (umbes -50 mV), tekib aktsioonipotentsiaal ehk närviimpulss, mis levib mööda aksonit.

Aktsioonipotentsiaali teke on seotud ionide vahetusega läbi pingega juhitud naatriumi Na^+ ja kaaliumi K^+ kanalite. Naatriumkanalid avanevad esimesena, kui potentsiaal saavutab läviväärtuse, lükates ioone negatiivses olekus raku sisse ja depolariseerides membraani kiiresti. Naatriumioonide vool



membraani sees põhjustab polaarsuse pöördumise: membraani sees on nüüd positiivse laengu liig ja väljaspool positiivse laengu puudus. Sel viisil membraan depolariseerub, kuni see saavutab potentsiaali +50 mV, mis on aktsioonipotentsiaali maksimaalne väärtus.



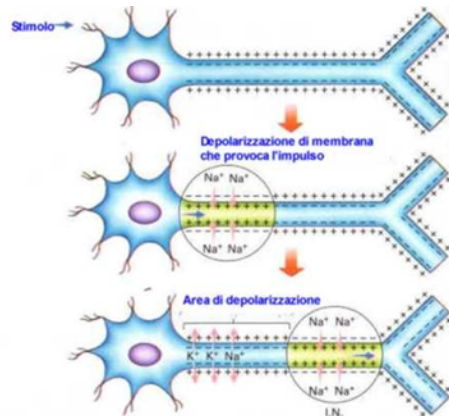
Depolarisatsiooniseisund kestab aga 1 kuni 2 millisekundit. Seejärel aja jooksul sulguvad pingega juhitud naatriumkanalid ja avanevad pingega juhitud kaaliumikanalid. Viimased avanevad aeglasemalt ja jäävad kauemaks avatuks: K⁺ ioonid voolavad membraanist väljapoole, mis hakkab repolariseeruma, viies potentsiaali tagasi negatiivseks. K⁺ voog püsib, tekitades hüperpolarisatsiooni faasi, ja potentsiaal muutub puhkepotentsiaalst negatiivsemaks. Lõpuks sulguvad kõik pingega juhitud kanalid ja naatriumi-kaaliumipumba aktiivsus taastub, mis taastab plasmamembraani puhkepotentsiaali. Aktsioonipotentsiaali amplituud (umbes +50 mV) ja kestus (umbes 2 millisekundit) on fikseeritud, st need ei sõltu ergastuse hulgast.

Kuidas levib aktsioonipotentsiaal mööda aksonit?

Elektriline signaal, mis levib läbi neuroni ja seejärel edastatakse järgmistele neuronitele, sooritab järgmise äärmiselt kiirete sündmuste jada:

- tuuma poolt töödeldud elektriline stiimul põhjustab pingega juhitud naatriumkanalite avanemise tuuma lähedal asuvas segmendis; läviväärtuse saavutamisel tekib esimene aktsioonipotentsiaal.
- depolarisatsioon levib mööda aksonit, põhjustades kanalite avanemise külgnevates membraanitsoonides leidub pingega juhitud naatriumi; selle tulemusel tekib teine aktsioonipotentsiaal, mis omakorda tekitab kolmanda ja nii edasi.
- Samal ajal avanesid esimesena depolariseerunud piirkonnas pingega juhitud kaaliumikanalid, mis viisid membraani tagasi puhkepotentsiaalile.
- potentsiaalid levivad ainult ühes suunas, sest pärast sulgumist läbivad pingega juhitud naatriumkanalid refraktaarse perioodi, mille jooksul nad ei saa uuesti avada.

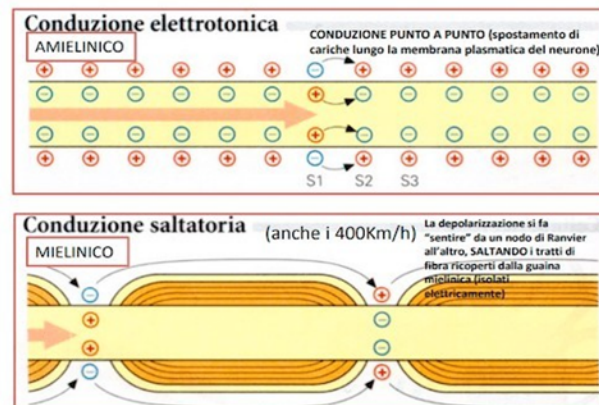




Aktsioonipotentsiaali levimine mööda müeliinita aksonit: video aadressil: Aktsioonipotentsiaali levimine müeliinita aksonis - Animeeritud meditsiiniline füsioloogia - YouTube
<https://www.youtube.com/watch?v=RNdvkoiWOM&t=7s>

Millist rolli mängib müeliinkest?

Müeliinkestaga kaetud närvikiud on veekindlamad, kuna kate toimib elektriisolaatorina: sellest tulenevalt toimub aktsioonipotentsiaali depolarisatsioon ja levimine ainult lõikudes, kus seda ei ole, mida nimetatakse Ranvieri sõlmedeks. Närvisignaali "hüppab" ühest sõlmest teise suurema kiirusega kui müeliniseerimata kiudude puhul.



Mõtlemise selle üle koos: Elektrilise signaali edastamine esmalt neuronis ja hiljem teistele neuronitele on kiire ja täpne. Edastuse kiirus ja teabe täpsus on määravad tegurid kõigi inimestegevuste korrektseks teostamiseks. Kui midagi selles imelises mehhanismis kinni kihtub või peatub, põhjustades neuroloogilist haigust, on sellel laastav mõju mõjutatud inimeste elukvaliteedile. Signaaliülekanne toimimis põhimõtete uurimiseks

Neuronaalne stimulatsioon on aluseks kõige arenenumatele neurotehnoloogiatele, mis kasutavad elektrilist stimulatsiooni teraapiaks. Kas olete kunagi kuulnud elektroodide paigaldamisest halvatud patsientidele, kes on uuesti kõndima hakanud?



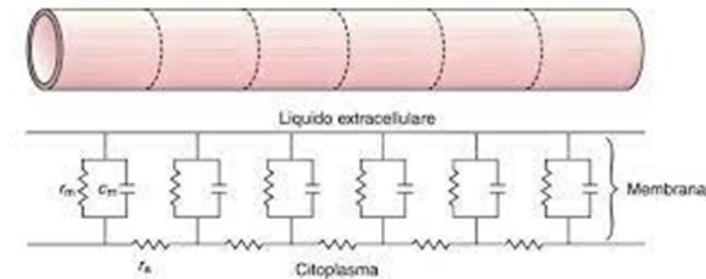
Signaali leviku füüsikaline mudel neuronis

Milline füüsikaline mudel suudab selgitada neuroni toimimise põhimõtet?

Kiireks meeldetuletuseks mahtuvuse ja kondensaatorite kohta: Kondensaatorid ja kondensaatori mahtuvus (youmath.it)

Kiire meeldetuletus takistuse ja takistite kohta: Takistid, elektriline takistus ja elektriline eritakistus (youmath.it)

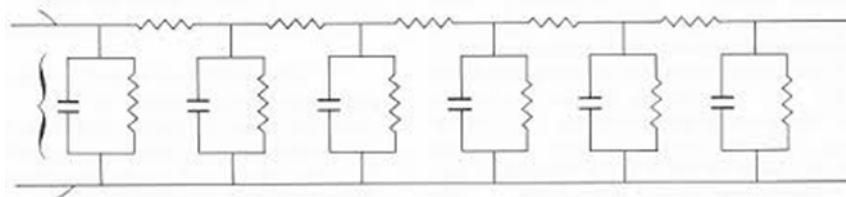
Akson sarnaneb koaksiaalkaabliga. Aksoni sisemine osa on kaabli keskne juhtiv südamik.



Selle tugevus on suur, peamiselt väikese ristlõike tõttu. Tsütoplasma elektriliste omaduste kirjeldamiseks kasutatakse takistust pikkuseühiku kohta r_{minal} tutvustatakse.

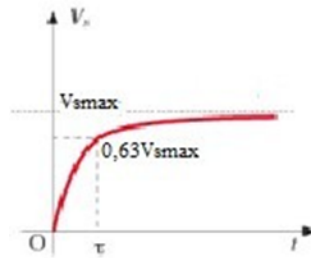
Aksonist välimine osa on samuti juht, kuid välimine osa on palju suurem kui sisemine ja seetõttu on vahevedeliku pakutav takistus sisemisega võrreldes tühine. Isoleermembraan moodustab kondensaatori, kuna aksoni sise- ja välisküljel käituvad nagu kaks juhtivat plaati, salvestades vastasmärgilisi laenguid. Paralleelselt kondensaatoriga tuleb arvestada takistusega, mis arvestab ionide voolu läbi membraani enda. Membraani elektrilise käitumise skemaatiliseks kujutamiseks võetakse kasutusele kaks suurus: mahtuvus pikkuseühiku kohta, C_m ja membraani juhtivus pikkuseühiku kohta, s_m (millest me tuletame membraani takistus meetri kohta, r_m).

Seejärel saab aksoni skemaatiliselt kujutada vooluringina, mis koosneb takistite ja kondensaatoritega võrgusilmade järjestusest.



Stimulatsiooni potentsiaal sõltub ajast ja asukohast piki aksonit. Tegelikult iseloomustavad seda kaks parameetrit: ajakonstant ja ruumikonstant. Skeemi matemaatiline mudel võimaldab meil tuletada potentsiaali trendi nii aja funktsioonina kui ka asukoha funktsioonina. Esimesel juhul on meil:





$$V_s(t) = V_{smax}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

kus V_{smax} on potentsiaali poolt saavutatud maksimaalne väärtus ja $\tau = r_m C_m$.

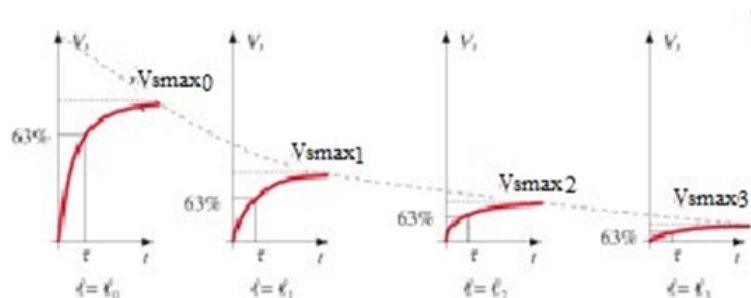
Ajakonstant τ (ms suurusjärgus) on ajavahemik, mis kulub stiimuli potentsiaali saavutamiseks 63% oma maksimaalsest väärtusest: see on neuroni reageerimiskiiruse mõõt.

Tekkimispunktist eemaldudes väheneb stiimuli potentsiaal kaugusega r koosmõjude tõttu minimaalselt vastupanud.

Stimulatsioonipotentsiaal kipub seaduse kohaselt vähenema:

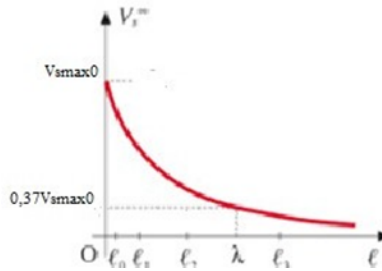
$$V_{smax}(x) = V_{smax0} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

kus V_{smax0} on stiimuli potentsiaal päritolukohas ja λ on ruumikonstant.



Ruumikonstant λ (suurusjärgus mm) on kaugus, mille juures algne potentsiaalide vahe langeb 37%-ni oma maksimaalsest väärtusest.





See on mõõt selle kohta, kui kaugele vool saab aksonis voolata enne lekkevoolude tõttu hajumist.

Seega pärast teatud vahemaa läbimist, on signaal vähenenud umbes 1/3-ni ja pärast 2l See on umbes 1/7 algsest signaalist ja ei suuda enam aktsioonipotentsiaali käivitada. Tegelikult läbivad stiimulid oluliselt pikemaid vahemaid, umbes paar meetrit, tänu muudele mehhanismidele, mida me siin ei arvesta. Matemaatiliselt kirjeldatakse ruumikonstanti järgmiselt:

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

Sisemist takistust ri mõjutav peamine tegur on aksoni raadius: suure läbimõõduga aksonitel on pikisuunaliste voolude suhtes väiksem takistus ja seetõttu ka väiksem aksiaalne takistus; sellest tulenevalt on neil suurem ruumikonstant. Tegelikult suureneb aksoni raadiuse ruutjuurega ra.

$$\lambda \propto \sqrt{r_a}$$

Millest sõltub närviimpulsi leviku kiirus?

Kahe konstandi tundmine võimaldab meil leida elektrilise signaali levimiskiiruse mööda aksonit:

$$v = \frac{\lambda}{\tau}$$

ja seetõttu järeldada, et

$$v \propto \sqrt{r_a}$$

seos, mis on kooskõlas eksperimentaalsete tulemustega.

Mõtiskleme koos Mõiste "mudel" on esitus, mis on mõnikord lihtsustus. Nähtus, mis suudab selgitada oma toimimist. Füüsikalise mudeli kasutamine bioloogilise nähtuse tõlgendamiseks ja mõistmiseks vastab mitmete neuroteaduste teadlaste poolt esile tõstetud vajadusele kõrvaldada eri distsipliinide vahelised barjäärid, kasutades täiel määral ära eri distsipliinivaldkondade ressursse ja tehnikaid. Kas olete mõelnud oma teadmiste kasutamisele ka muudes valdkondades peale omaenda?





Edasijõudnutele

Mudeli analüüs matemaatilisest vaatenurgast

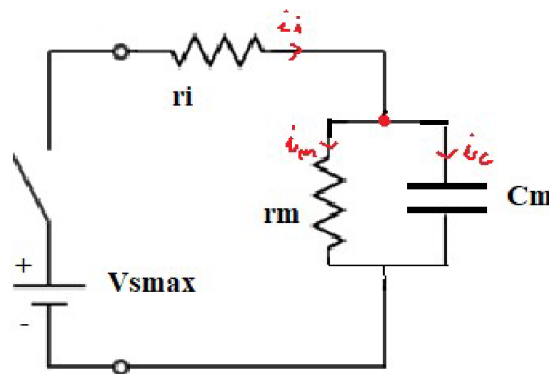
Vaatleme esimest elementaarlülitust, mille abil saame aksoni skemaatiliselt kujutada.

Potentsiaali ja voolude trendi määramiseks kasutame Kirchooffi seadusi:

$$V_{\text{max}} = V_{r_i} + V_C$$

ja

$$i_i = i_c + i_m$$



kus V_{max} on RC-ahela potentsiaal, mida me kujutame ette generaatori ddp-na, V_{r_i} on aksoni sisetakistuse ddp ja V_C on kondensaatori C otstes olev ddp. Tähistega i_m tähistame ka membraani läbivat voolu.

Me tuletame i_c ja väljendame kõike potentsiaalide funktsioonina:

$$i_m = \frac{V_C}{r_m}, \quad i_i = \frac{V_{\text{max}} - V_C}{r_i}, \quad i_c = i_i - i_m$$

mis siis

$$i_c = \frac{V_{\text{max}} - V_C}{r_i} - \frac{V_C}{r_m}$$

Kuna kondensaatori puhul kehtib järgmine seos:

$$V_C = \frac{q}{c_m}$$

meil on





$$i_c = \frac{V_{smax}}{r_i} - \frac{q}{r_i c_m} - \frac{q}{r_m c_m}$$

Eelmise avaldise aja suhtes tuletades saame:

$$\frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{i_c}{c_m}$$

mis on lahutatavate muutujatega lineaarne diferentsiaalvõrrand, mille lahend saadakse integreerimise teel:

$$\int \frac{di_c}{i_c} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{1}{c_m} \int dt$$

$$i_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

Ajakonstantton

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m}$$

Konstant A on määratud vooluringi algtingimustega.

Sest

$$t=0 \quad i_c(0) = A = i_i(0) = \frac{V_{smax}}{r_i}$$

ja siis

$$i_c(t) = \frac{V_{smax}}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Tavaliselt $r_m \sim 10^4 \Omega/m$ ja $r_i \sim 10^{10} \Omega/m$ ja r_m -i saab r_i -ga võrreldes tähelepanuta jätta, mis võimaldab lihtsustada:

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m} \sim r_m c_m$$

Seejärel leiame teised voolud aja funktsioonina:

$$i_m(t) = \frac{V_c}{r_m} = \int \frac{i_c(t)}{r_m c_m} dt$$



Lahendus on:

$$i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Lõpuks

$$i_i(t) = i_c(t) + i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 + \frac{r_m}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Kui $t=0$, läbib kogu vool takistit r_i ja laadib kondensaatorit c_m . Läbi r_m voolu ei liigu, $i_m(0) = 0$, mis on tingitud asjaolust, et see on c_m -iga paralleelne ja selle otstes puudub dp./db.

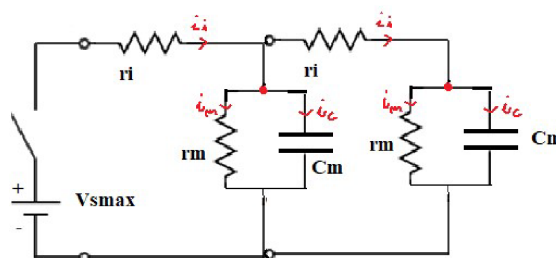
Pikka aega ($t \rightarrow \infty$) on kondensaator laetud ja ei lase enam voolu läbi haru, st $i_c(\infty) = 0$, samal ajal kui kogu vool läbib sise- ja membraantakistust:

$$i_i(\infty) = i_m(\infty) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m}$$

Analüütiliselt voolude jaoks leitud avaldised õigustavad tulemust, mille me varem tutvustasime, nimelt stiimuli potentsiaali:

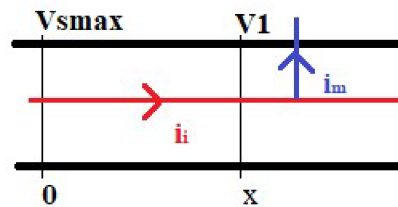
$$V_s(t) = V_{smax} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Aksoni simuleerimiseks vaatleme teisi sarnaseid vooluringe, mis on ühendatud esimesega. Selle teise vooluringi puhul ei ole potentsiaal ehk lõplik elektriline tasanduspinge enam V_{smax} , vaid paralleeljuhtmete päiste potentsiaal.



$$V_c = i_m r_m = \frac{V_{smax} r_m}{r_i + r_m} \sim \frac{r_m}{r_i} V_{smax}$$





Stimulatsioonipotentsiaal väheneb piki aksonit.

Vaatleme stiimuli potentsiaali $V_{\max}$ punktis $x=0$. Selle levik sõltub II aksonis voolavast voolust, mis omakorda sõltub (vastavalt Ohmi esimesele seadusele) potentsiaali muutusest piki aksonit:

$$i_i(x) = -\frac{1}{r_i} \frac{dV_s}{dx}$$

Miinusmärk sõltub asjaolust, et vool voolab punktidest kõrgemate potentsiaalide poole. madalama potentsiaaliga punktides, siis V_s gradiendile vastupidises suunas. Sisevool väheneb, kuna laengud voolavad membraanist välja voolu i_m kaudu:

$$\frac{di_i}{dx} = -i_m = -\frac{V_s}{r_m}$$

Asendades saame järgmise teist järku diferentsiaalvõrrandi:

$$V_s = -r_m \frac{di_i}{dx} = \frac{r_m}{r_i} \frac{d^2 V_s}{dx^2}$$

Lahendus on:

$$V_s(x) = V_{\max} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

koos

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

nagu me varem tutvustasime.

Pööratud õppimine:

Lugege kavandatud artiklit. Keskenduge eriti artiklis kirjeldatud närvisignaalide ja elektrofüsioloogiliste tehnikate uurimisele. Seejärel lõpetab ta uuringu, analüüsides, millised uurimisvaldkonnad on artikli kohaselt neuronite ahelate uurimiseks kõige tõhusamad.





Perspective

<https://www.alliedacademies.org/neurophysiology-research/>

Electrophysiology: from ion channels to excitable cells.

Juddey Lisa*

Department of Medicine, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA

Abstract

The electrophysiology of cell membranes is a fascinating field of study that focuses on the electrical properties of cells, particularly the role of ion channels in generating electrical signals and the function of excitable cells. From ion channels to excitable cells, the electrophysiology of cell membranes plays a crucial role in many physiological processes, including nerve conduction, muscle contraction, and sensory perception.

Keywords: Electrophysiology, Cell membranes, Membrane potential, Ion channels, Neurons, Muscle cells.

Introduction

At the heart of the electrophysiology of cell membranes are ion channels, which are specialized proteins that span the cell membrane and allow the passage of specific ions, such as sodium (Na^+), potassium (K^+), and calcium (Ca^{2+}), in response to various stimuli. Ion channels are essential for maintaining the resting membrane potential, which is the electrical charge difference across the cell membrane when the cell is at rest. The resting membrane potential is critical for

and calcium channels, as well as other regulatory proteins. The timing and amplitude of action potentials are tightly regulated and can be modulated by various factors, such as neurotransmitters, hormones, and second messengers. Additionally, the properties of ion channels can be altered by mutations or drugs, which can have significant physiological and pathological implications. For example, mutations in ion channels have been linked to various neurological disorders, such as epilepsy and channelopathies [4].

Kommenteerime artiklis pakutud närvisignaali uuringut:

Kõige levinumad elektrofüsioloogilised meetodid:

- Patch Clamp tehnika
- Seestpoolt väljapoole ja väljastpoolt väljapoole suunatud tehnika
- rakuväline registreerimine

Eriti tõhusad liidud elektrofüsioloogiaga:

farmakoloogia

geenitehnoloogia, optogeneetika





3. Operatsioonimoodul

Algtase

Testi oma teadmisi

Tegevus:

Teadmiste test

Valikvastustega küsimuste testid

1) Neuron koosneb:

- Dendriidid, tuum, akson, sünaptilised nupud
- Dendriidid ja aksonid
- tuum ja akson
- Dendriidid, tuum, akson, müeliinkest

2) Milline järgmistest väidetest aktsioonipotentsiaali kohta on vale?

- vastab hüperpolarisatsioonile
- vallandub ainult vastusena stiimulile
- käivitub ainult teatud läve ületamisel
- põhjustab polaarsuse pöördumist

3) Paljundamisprotsessi käivitab:

- pingega juhivate Na^+ kanalite olemasolu
- teatud refraktaarse perioodi olemasolu
- käivitava stiimuli korduv kordumine
- potentsiaali olemasolu isegi puhkeolekus olevates sektsioonides

4) Puhkepotentsiaal tuleneb järgmise olemasolust:

- Na^+ ioonid väljaspool rakku ja K^+ ioonid raku sees
- Na^+ ioonid raku sees ja K^+ ioonid väljaspool rakku
- Na^+ ioonid raku sees ja Cl^- ioonid väljaspool rakku
- K^+ ioonid väljaspool rakku ja Cl^- ioonid raku sees

5) Milline järgmistest väidetest kaabli mudeli kohta on vale?

- Aksoni saab skemaatiliselt kujutada vooluringina, mis sisaldab kahte takistit ja kondensaatorit järjestikku
- Aksoni saab skemaatiliselt kujutada takistite ja kondensaatoritega võrgusilmade jadana
- Aksonil on väga suur takistus
- Membraan ise moodustab takistiga paralleelselt kondensaatori





- 6) Lühike vastus: Milline väärtus on puhkepotentsiaalil?
- 7) Avatud vastus: Kuidas levib aktsioonipotentsiaal mööda aksonit?
- 8) Avatud vastus: Kuidas muutub stiimuli potentsiaal teatud ajahetkel aja funktsioonina? Esitage kvalitatiivne kirjeldus.
- 9) Ühenda iga küsimus õige vastusega:
- Mis mõõdab ruumikonstanti?
 - Mida mõõdab ajakonstant?
 - Millest ruumikonstant sõltub?
 - Millest ajakonstant sõltub?
- 10) Lühike vastus: Millest sõltub närviimpulsi leviku kiirus müeliinita neuronites kaablimudeli kohaselt?

PhEt simulatsioon: neuron

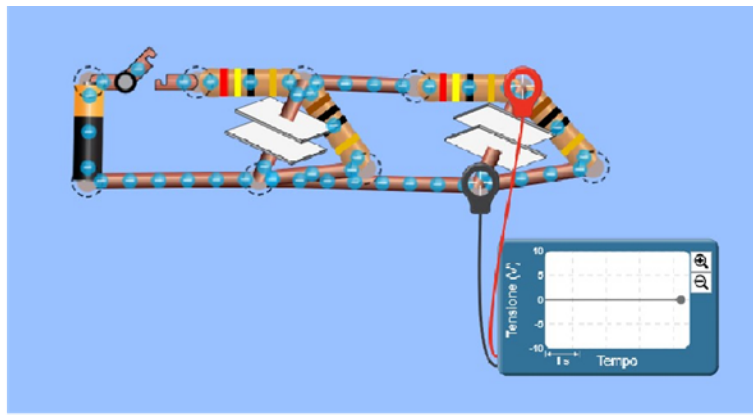
https://phet.colorado.edu/sims/html/neuron/latest/neuron_it.html

Tegevus:

- link ingliskeelsele töölehele: Neuron - Bioloogia | Neuronid | Rakud - PhETi interaktiivsed simulatsioonid (colorado.edu)
- See uurib neuroni käitumist aktsioonipotentsiaali juuresolekul.

PhEt simulatsioon: vooluringi ehituskomplekt – virtuaalne labor

Vooluringide ehituskomplekt: virtuaalne labor (colorado.edu)





Tegevus:

- link ingliskeelsele operatsioonisüsteemi lehele: Circuit Construction Kit: Virtual Laboratory - RLC Circuit | AC Circuits | Kirchoffi seadus - PhET interaktiivsed simulatsioonid (colorado.edu)
- Ehita vooluring, mis simuleerib neuroni kaablimudeli käitumist. Tõsta esile kondensaatorite potentsiaalne trend ja vaata, kas see on kooskõlas uurituga.

Edasijõudnutele

Proovi ise järele:

Indikatiivselt ja teatud lähendusmarginaaliga, mis võtab arvesse erinevat tüüpi aksonite ja loomade erinevate struktuuride varieeruvust, on aksoni raadius suurusjärgus μm , sisemine takistus pikkuseühiku kohta $r_i \sim 10^{10} \Omega/\text{m}$ ja transmembraanne takistus pikkuseühiku $r_m \sim 10^4 \Omega/\text{m}$. Membraani

paksus on umbes 5–10 nanomeetrit ja suhteline dielektriline konstant ϵ umbes 2–4.

1. Valige kondensaatori mudel ja selle mahtuvus ning hinnake nende andmete põhjal mahtuvuse suurusjärku aksoni pikkuse ühiku kohta (üks mahtuvus meetri C kohta $\sim 5 \cdot 10^{(-8)} \text{ F/m}$)
2. Kontrollib uurimuslikus osas kasutatud lähenduste õigsust ning arvutab aja- ja ruumikonstandi;
3. Seejärel hindab see elektrisignaali levimiskiirust ja võrdleb saadud tulemusi katseandmetega;
4. Miks erineb levimiskiirus eksperimentaalsetest tulemustest? Kuidas saaksime mudelit täiustada, et saada levimiskiirused tegelikele kiirustele lähemal?

4. Eriti põhjalik materjal

Veebipõhised ressursid:

Jiawei Zhang: Aju põhilised närviüksused: neuronid, sünaptsid ja aktsioonipotentsiaal

<https://arxiv.org/abs/1906.01703>

RC-vooluring

https://neurotext.library.stonybrook.edu/C3/C3_3/C3_3.html

Neuroteadus: aju uurimine

https://books.google.it/books/about/Neuroscience_Exploring_the_Brain.html?id=4WhzEQAAQB_AJ&redir_esc=y





5 Viited

D. Sadava jt: Biology.blu PLUS. Inimkeha, Zanichelli

G. Bellini jt: Physics for Medicine, Piccin

Walker J: FÜÜSIKA: Teoreetilised mudelid ja probleemide lahendamine, 3 Linx

