

Potenciál, který mají buňky

V úvodních biologických přednáškách se často filozoficky rozebírá, co je život a jaké má atributy. I kdybychom znali přesné uspořádání všech atomů v organismech, stejně nám to neřekne nic o tom, co jim dává jejich životní energii. Co je ona alchymisticky tajemná *vis vitalis*? V tomto článku probereme jeden z fascinujících projevů živoucí a doslova elektrizující síly, kterou jsou membránové potenciály. Pro pokusy s nimi nebudete muset shánět žabí stehýnka jako Luigi Galvani, objevitel „živočišné elektřiny“, nabídneme vám počítačovou alternativu v podobě simulátoru membránových potenciálů.

Staří filozofové měli k fyziologii blízko, již René Descartes (1596–1650), který se proslavil svým výrokem „Myslím, tedy jsem“ (Cogito ergo sum), hledal východisko ze skepse k možnostem našeho vnímání světa. Mimo filozofických tezí Descartes vyslovil první hypotézu o možné funkci nervového reflexu včetně schematického náčrtu, který až po více než sto letech fyzikálně podpořil L. Galvani (1737–1798).

Potenciál jako atribut života

Těžko uchopitelná definice života nám sice uniká, navzdory tomu však stále detailněji poznáváme jeho projevy. Často se dočteme o 7 základních atributech života:

- homeostáza – udržování rovnováhy vnitřního prostředí navzdory vnějším silám podporujícím zvyšování entropie (nahodilosti, neuspořádanosti),
- organizovanost – živé organismy jsou tvořeny z uspořádaných struktur, buněk, tkání, orgánů,
- metabolismus – schopnost transformovat energii a chemické látky využívané ke stavbě buněk a udržování homeostázy v otevřených biologických systémech, úzce související s organizovaností,
- dráždivost – schopnost odpovídat na podněty,
- schopnost růstu,
- schopnost přizpůsobování se okolním podmínkám (adaptace),
- schopnost rozmnožovat se.

Jednotlivé atributy života se přirozeně překrývají. Většina z nich se projevuje v podobě potenciálů, živé elektrochemické energie, kterou vytvářejí naše buňky. Pozbudou-li jí, jsou mrtvé. Všechny buňky našeho těla jsou elektricky nabitě, některé umějí elektrické signály předávat (nervy), jiné jsou jimi řízeny (např. svaly, žlázy), a další mají dokonce schopnost se autonomně nabíjet a vybijet a udávat tak našemu životu tempo (tzv. pacemakerové buňky, z anglického „udávat krok“, řídí náš srdeční rytmus i rychlost našich kroků tam, kam každý chodí pěšky, skrze přímé usměrňování střevní peristaltiky). Změnou membránového potenciálu začínají životy již během samotného početí, kdy spermie splývá s vajíčkem, čímž spustí vlnu depo-

larizace, a brání tak proniknout dalším spermii do vajíčka.

Potenciál jako rozdíl elektrického napětí mezi vnitřní částí buňky a jejím okolím je ustaven na rozhraní těchto dvou prostředí – na buněčné membráně. Cytoplazmatická membrána je polopropustná fosfolipidová dvojvrstva opatřená proteiny. Tvoří přirozenou bariéru nutnou pro udržování integrity buněk a vnitřního prostředí, a zároveň umožňuje komunikaci s okolními buňkami. Membránový potenciál se přirozeně vyskytuje i na všech membránách v eukaryotických buňkách, ať už jde o endomembránové systémy endoplazmatického retikula a Golgiho aparátu i dalších váčků, nebo o semiautonomní organely jako mitochondrie a plastidy, které díky svému membránovému potenciálu generují chemickou energii. Proto membránové potenciály v sobě spojují většinu atributů života.

Klidový membránový potenciál

Přes membránu mohou procházet malé nepolární a nenabitě molekuly jako kyslík, plynný oxid uhličitý nebo steroidní hormony. Polární a nabitě molekuly, jako jsou voda, malé ionty, glukóza či aminokyseliny, procházejí přes membránu kanály (póry), nebo pomocí přenašečů a pump. Pro spoustu dalších látek je membrána úplně nepropustná.

Vnitřní a vnější prostředí živočišné buňky se zásadně liší v koncentracích nabitých iontů – uvnitř buňky převládají draselné kationty, vně pak sodné. Vnitřní prostředí našich lidských buněk se liší od vnějšího (jímž jsou tkáňový mok, krev, lymfa a další tělní tekutiny) 35krát vyšší koncentrací draselných kationtů, ale 20krát nižší koncentrací sodných kationtů, 15krát nižší koncentrací chloridových aniontů a dokonce desettisíckrát nižší koncentrací vápenatých kationtů. Kladně nabitě draselné kationty uvnitř buňky vyrovnávají převažující záporný náboj bílkovin tak, aby bylo vnitřní prostředí neustále elektroneutrální. V mimobuněčném prostředí kladný náboj sodných iontů vyrovnávají záporné chloridové anionty. Ionty obecně mají velmi malou propustnost přes membránu, až na draselné kationty, které v ní mají své přenašeče.

Na rozhraní membrány se tak tvoří silné gradienty – jak elektrický, daný rozdílným rozložením náboje, tak chemický daný rozdílnou koncentrací iontů na obou stranách. Ionty mají tendenci se pohybovat za opačným nábojem, kterým jsou přitahovány, a zároveň po směru koncentračního gradientu do oblastí s nižší koncentrací. Obě složky se skládají do výsledného elektrochemického gradientu s rozdílnou rovnováhou pro každý iont. Draselné kationty, které mohou volně přecházet přes membránu, jsou tak taženy ven z buňky po svém chemickém gradientu, s sebou přenášejí kladný náboj, a proto jsou naopak taženy dovnitř, kde převládá záporný náboj. Rovnovážný klidový membránový potenciál má pro každý buněčný typ jinou hodnotu, pohybuje se v záporných desítkách milivoltů.

Sodné ionty procházejí membránou velmi omezeně (na většině z nich nemají své specifické kanály, srovnajte se vzrušivými buňkami níže) a buňky jejich značný elektrochemický gradient táhnoucí je dovnitř využívají pro transport (symport) jiných látek – např. glukózy.

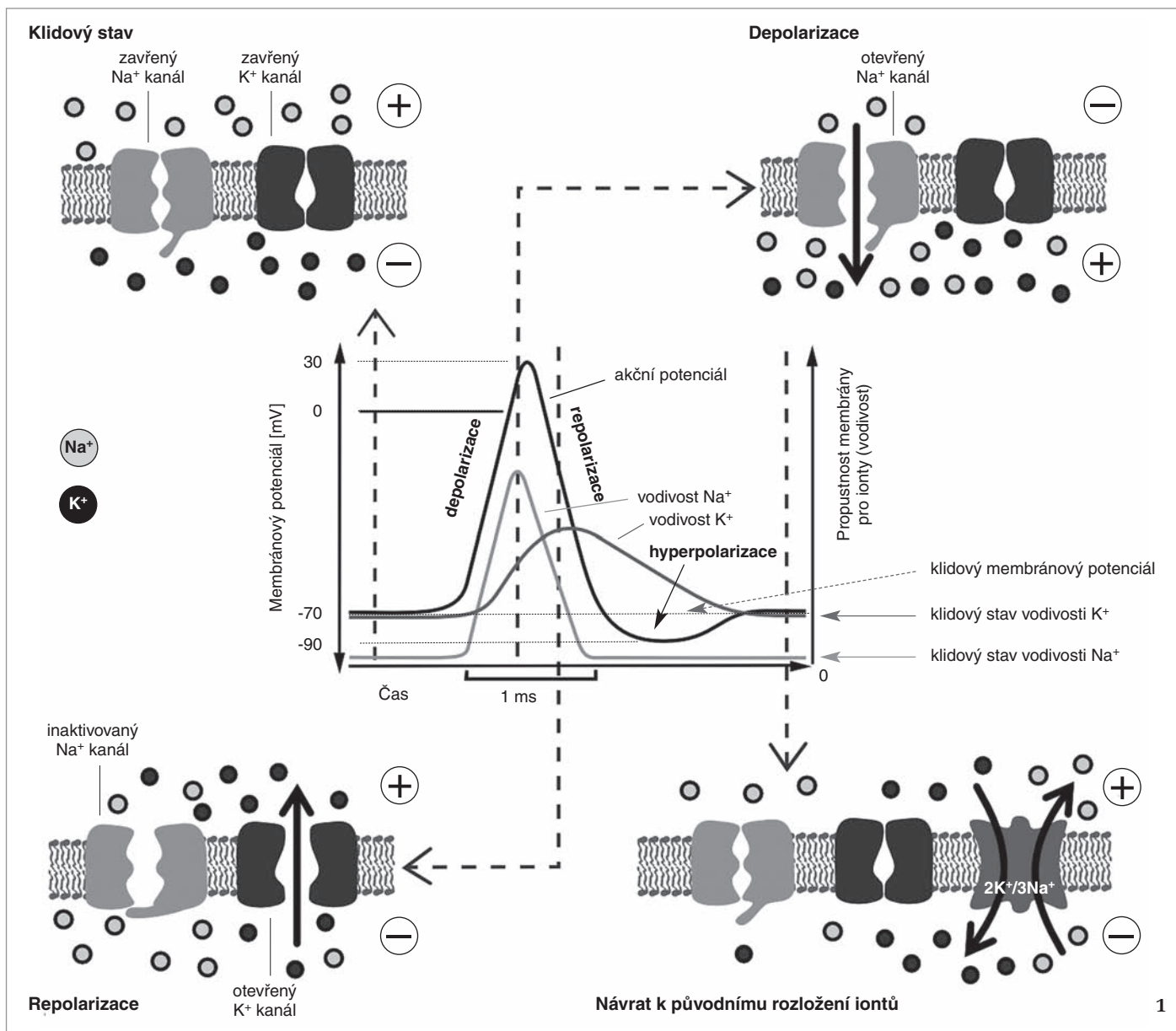
Poslední mechanismus pro udržování membránového potenciálu jsou sodnodraselné pumpy – nazývané Na^+/K^+ ATPázy. Jejich název značí, že aktivně přenášejí sodné i draselné kationty, a to proti jejich koncentračnímu gradientu, proto k tomu spotřebovávají energii ve formě adenosin-trifosfátu (ATP). Přenášejí ionty nerovnoměrně – tři sodné kationty transportuje ATPáza ven, dva draselné dovnitř, a má tak elektrogenní efekt. Dokonce se uvádí, že neurony spotřebují 70 % veškeré energie na provoz svých sodnodraselných pump.

Akční potenciály

Je důležité si uvědomit, že i velmi malé změny proudění iontů přes membránu mohou významně ovlivnit napětí membrány tak, aby se membránový potenciál výrazně a rychle změnil, a to až do kladných hodnot. Rychlé zvýšení a následné snížení potenciálu nazýváme akční potenciál. Ten umožňuje šíření vzruchu a může proběhnout během jednotek milisekund u nervových buněk, nebo v delších intervalech desítek až stovek milisekund u svalových buněk až po několik sekund v autonomně se řídicích oscilátorech – pacemakerových buňkách převodního systému srdečního a v hladké svalovině trávicího traktu.

Vzrušivé buňky s aktivními membránami umožňujícími průběh akčního potenciálu mají něco navíc oproti buňkám pouze s klidovým membránovým potenciálem. Jde o iontové kanály, které jim zajišťují prepólování membrány a případně šíření signálu. Tyto kanály jsou odlišné v různých typech buněk. Dráždivost nervových a svalových buněk podmiňují hlavně napětově řízené kanály otevírané přichozím vzruchem – změnou napětí.

Na vzrušivých buňkách (zde na příkladu nervové buňky, viz obr. 1) existují kromě běžných draselných kanálů ještě další speciální napětově řízené sodné a draselné kanály, které se otevírají díky šířícímu se vzruchu, působením nadprahové hodnoty napětí. Při přenosu vzruchu se nejdříve otevírají napětově řízené sodné kanály, které umožní masivní vtok sodných iontů



přes membránu směrem dovnitř buňky (po jejich chemickém i elektrickém gradientu). Membránu tak dokonce přepóluje do kladných hodnot – dochází k depolarizaci. Poté již sodné kationty nejsou elektricky přitahovány a po velmi krátké chvíli se sodné kanály přechodně zavřou tak, že tento stav nezmění ani příchod dalšího sebevětšího vzruchu (refrakterní fáze). Uvedený mechanismus mimo jiné umožňuje, aby se signál šířil po membráně jednosměrně. Se zpožděním po napětově řízených sodných kanálech se otevírají napětově řízené kanály draselné, kterými draselné kationty opouštějí buňku podle jejich elektrochemického gradientu. Tím se potenciál membrány opět vyrovná na výchozí hodnotu (repolarizace s chvilkovou hyperpolarizací, kdy je membránový potenciál lehce negativnější až do nastolení klidového membránového potenciálu). U různých typů vzrušivých buněk se setkáváme s různými průběhy změn potenciálů díky různým typům kanálů, kterými jsou buňky vybaveny. Pro svalový stah je např. nutný vtok vápenatých kationtů.

Zde si dovolme malou vsuvku. Receptorový potenciál, který vzniká na našich smyslových buňkách, když zachycují vjemy z okolí, je analogové povahy s amplitudou

kopírující intenzitu daného vjemu. Naše řídicí jednotka – mozek – je ale povahy digitální a umí předávat a zpracovávat data pouze povahy ano–ne, tedy nul a jedniček. Proto se spojitý receptorový potenciál přepisuje do série akčních potenciálů, které intenzitu vjemu následně signalizují nikoli svou amplitudou, nýbrž frekvencí.

Pro zajímavost, membránové kanály, a tím pádem i potenciály jsou ovlivnitelné fyzikálně, např. teplotou. V chladu zpomalené reakce much a komárů dávají možnost hmyz hravě chytit. Zvýšení teploty u člověka zvýší srdeční tepovou frekvenci (1 °C o 10 úderů za minutu), i když zde může regulaci ovlivňovat řada dalších vstupů. Chemické modifikace či blokáda membránových potenciálů je neméně zajímavá. Často uváděným příkladem je silný jed tetrodotoxin, 25krát jedovatější než kyanid. Vyskytuje se např. v rybách čeledi čtverzubcovití (Tetraodontidae), tedy i nebezpečně japonské pochoutce fugu. Není přítomen v masu, ale v kůži, žlázách a lipofilních strukturách. Ryba ho nesyntetizuje sama, je totiž bakteriálního původu z její potravy. Tetrodotoxin blokuje napětově řízené sodné kanály. Jak je možné, že není toxický také pro rybu fugu? Čtverzubci jsou rezistentní, jejich napětově řízené

1 Akční potenciál na axonu neuronu. Graf uprostřed ukazuje změny membránového potenciálu a propustnosti membrány pro sodné a draselné ionty během průchodu akčního potenciálu. V klidovém stavu jsou napětově řízené kanály uzavřeny. Malá počáteční depolarizace otevírá napětově řízené sodné kanály, takže dochází k masivnímu vtoku Na⁺ a depolarizaci. Sodné kanály jsou však opět rychle uzavřeny, a tak převládne výtok K⁺ pomaleji otevíranými napětově ovládanými draselnými kanály – dochází k návratu potenciálu ke klidovým hodnotám (repolarizaci) a k přesáhnutí těchto hodnot (hyperpolarizaci). Nakonec se pomocí sodnodraselné pumpy obnoví původní rozložení iontů. Podle: S. Silberagl (2004), volně upraven M. Zouhar

sodné kanály nejsou toxinem blokovány. Je snad dílem náhody, že tato molekula je pro člověka smrtelně jedovatá.

Akční potenciál v rostlinách

Nemusíme zůstat jen u živočichů, rostliny mají také membránové potenciály a např. v případě pastí masožravé mucholapky

(*Dionaea*) jasně projevenou dráždivost. Poté, co do pastí vleze hmyz, svými pohyby spustí sklapnutí pastí a další mechanickou stimulací také sekreci trávicích enzymů. Podobný mechanismus předpokládá již Charles Darwin a inspiroval k podrobnějšímu výzkumu svého kolegu Johna Burdona Sandersona, který tento jev poprvé galvanometricky prokázal v r. 1873. Další hojně studovanou rostlinou v oblasti akčních potenciálů je citlivka stydlivá (*Mimosa pudica*), která při mechanickém podráždění listů je rychle sklopí.

Ke změření akčního potenciálu obřích válcovitých buněk řas parožnatek (Charophyta) došlo v r. 1930, dříve než v případě živočišných tkání. V rostlinách lze nalézt i určitou analogii vedení nervového vzru-

chu, jíž je lýko (floem), které prochází v cévních svazcích celou rostlinou. I když jsme výše nezmiňovali detaily měření potenciálů v živočišných buňkách, k čemuž se používají tenké skleněné kapiláry jako solné mikromůstky a elektrody mikroskopických rozměrů, v případě rostlin lze elegantně zamířit přímo do lýka, které se nachází v centru rostlinných pletiv. A to díky využití mšic! Mšice se umístí na pokusnou rostlinu, nechá se přes noc napíchnout na zdroj své potravy, lýko, následně se její tělo odstraní laserem a její sací ústrojí (stylet) zůstane zabodnuté do lýkové buňky. Nyní již stačí přiložit elektrodu. Elektrická signalizace v rostlinách se podobně jako v živočišných spouští v reakci na celou paleť podnětů – od změn teploty přes mecha-

nické dráždění po napadení a poškození např. herbivory.

Elektrizující téma potenciálů a jejich změn na membránách buněk je natolik rozsáhlé, že dalece přesahuje omezený rozsah tohoto článku, vydá na učebnice a studují je nesčetné laboratoře po celém světě. Vy k nim můžete proniknout hravě díky simulačnímu programu, o kterém se dozvíte více v pracovním listu přístupném online.

Pracovní listy k výuce a seznam použité literatury najdete na webové stránce Živy. K dalšímu čtení také výukový článek na str. 127–128 této Živy; k tématu viz např. Živa 2014, 2: 57–59 a 2020, 1: 20–22.

Text zadání, řešení a doplňující odkazy uvádíme na webové stránce Živy.

1 *Scenedesmus* (nahore) a *Pediastrum* jako příklady běžných a známých rodů zelených řas. Společně s dalšími druhy řas a sinic tvoří fytoplankton, který je významným článkem potravních vztahů i v našich vodách. Orig. M. Smyčková

2 Nahožábrý plž *Elysia chlorotica* je příkladem využití původně rostlinné fotosyntézy – „krade plastidy“ z pohlčené řasy posypanky *Vaucheria litorea*. Pohlčené chloroplasty uvolněné ze strávené řasy mohou přežívat v trávicích buňkách až 9 měsíců (což je často déle, než žije samotná řasa). Je to umožněno horizontálním genovým přenosem některých klíčových genů např. pro syntézu chlorofylu do genomu plže. Převzato z Patrick Krug Cataloging Diversity in the Sacoglossa LifeDesk, v souladu s podmínkami použití

Marie Smyčková

Světlo ve vodě



Úloha s názvem nadpisu článku byla připravena ve školním roce 2016/2017 pro krajské kolo Biologické olympiády kategorie B. Navazovala na studijní text Budiž světlo! (dostupný na www.biologickaolympiada.cz) a byla zaměřena na fotosyntézu ve vodě a světlo jako jeden z hlavních faktorů, které ji ovlivňují. Skládá se ze tří částí, jež lze řešit i samostatně. Nejprve studenti pozorovali vliv světla na fotosyntetizující vodní rostliny v předem připraveném experimentu. Výsledky pozorování dále rozšířili o ekologické souvislosti na příkladu potravních řetězců a dalších ekologických fenoménů. Ve třetí části úlohy se věnovali fotosyntetizujícím živočichům.

V první, praktické části porovnávali žáci průběh fotosyntézy na světle a ve tmě. Do tří šroubovacích zavařovacích sklenic byl 18–48 hod. předem namáčan roztok z jemně perlivé a neperlivé vody (Rajec, na 600 ml neperlivé vody 70 ml jemně perlivé). Jedna sklenice sloužila jako kontrola, do zbylých dvou byly umístěny 3–4 očištěné a oklepané výhony vodního moru (*Elodea* sp.). Použít můžeme i morovinku (*Egeria* sp.) nebo jinou příbuznou vodní rostlinu. Všechny nádoby byly pevně uzavřeny. Jedna z nádob s rostlinou byla obalena alobalem, aby dovnitř nepronikalo světlo. Druhá nádoba s rostlinou byla alespoň 18 hod. před soutěží i v jejím průběhu nepřetržitě osvětlována lampou. Tento experiment dostali žáci z časových důvodů připravený, ale při práci se studenty bude samozřejmě zajímavější jednotlivé kroky provádět společně. V rámci úlohy pak všichni studenti měří pH ve všech třech sklenicích pomocí indikátoru. V této fázi by bylo ideální použít titraci, případně měření pH metrem, ale postačí i přibližný odhad prostřednictvím experimentu s kapátkem a roztokem acidobazického indikátoru. Ze zvýšení pH v původně kyselých vodě studenti pak odvodí jednotlivé faktory nutné k fotosyn-

téze. Úloha pokračuje myšlenkovým experimentem, zavádějícím do systému živočichy náročné na kyslík, např. blešivce (*Gammarus* sp.).

Vztahům mezi jednotlivými organismy a ekologii obecně se více věnuje druhá část úlohy. Na praktickém příkladu chovných rybníků si studenti dobře uvědomí fungování tzv. potravních kaskád. Snad nejznámější z nich, reintrodukci vlka do národního parku Yellowstone, je pak věnována poslední otázka této části. V řešení a také na webové stránce Živy jsou odkazy na populárně-naučné zdroje s touto tematikou pro rozšíření výuky (video s českými titulky, případně anglické s pracovními listy). Pro zájemce se nabízejí i aktuálnější příklady z našeho území, jako např. přemnožení hrabošů v posledních letech, i k těmto příkladům můžeme nalézt množství volně dostupných zdrojů.

Třetí část věnovaná fotosyntetizujícím živočichům je pokusem skloubit faktografické zaměření podobných soutěží, podpořené nutností odkazovat se na studijní text, s naší snahou ocenit kreativitu studentů při řešení úloh. K úspěšnému dokončení je nezbytné znát alespoň některé fotosyntetizující živočichy (velká část z nich je zmiňována v přípravném textu), zároveň ale je potřeba notná dávka představitosti a odvahy, protože ve výsledném obrázku lze skutečně vidět více různých živočichů. Věřím, že fotosyntetizující plž *Elysia chlorotica* (obr. 2), sršeň *Vespa orientalis*, axolotl skvrnitý (*Ambystoma maculatum*) a další jsou fascinující i pro nepřilíš nadšené přírodovědce a stojí za zmínku v běžných hodinách biologie. Zajímavé video o plži *E. chlorotica* najdete např. na internetovém odkazu umístěném také na webu Živy.

Úloha jistě bude inspirací k propojení různých částí kurikula biologie, doplněného o zajímavosti, nebo bude sloužit jako odrazový můstek pro další rozšiřující praktické úkoly.

