



FRANTIŠEK BALUŠKA
ANDREJ HLAVAČKA

Rastlinná neurobiológia

*Nová vedná disciplína
21. storočia*

Rastliny sú životne dôležitou súčasťou životného prostredia. Zachytávajú energiu, ktorá sa dostáva na Zem v podobe slnečných lúčov a pomocou nízkoenergetických anorganických substrátov ju premeniajú na energeticky bohaté organické látky, ktoré slúžia ako potrava pre všetky heterotrofné organizmy. Aj mnohé palivá, z ktorých sa získava teplo alebo pohonná energia, sú rastlinného pôvodu. Ľudia si dokonca vytvorili určitú psychickú závislosť od rastlín a obklopujú sa nimi vo svojich príbytkoch, záhradách i širšom okolí.

Už Aristoteles a jeho žiaci uskutočnili prvé filozofické pokusy o pochopenie rastlín v ich komplexnosti. V staroveku sa využívali hlavne v medicíne. Až oveľa neskôr, v 16. storočí, sa začali študovať základné princípy stavby a funkcie rastlín. Spočiatku sa skúmal hlavne ich výskyt, taxonómia a morfológia. Neskôr, najmä vďaka technologickému pokroku, ktorý viedol k zostrojeniu mikroskopu, ale aj novým medicínskym objavom, sa stali súčasťou „rastlinnej vedy“ aj anatómia a cytológia. Je zaujímavé, že ako prvá bola objavená a opísaná práve rastlinná bunka. Fyziológovia odhalili, že respirácia, trávenie a rast buniek prebiehajú v rastlinách na základe rovnakých princíпов ako v prípade živočíchov. Rastliny sa čoraz častejšie stávajú predmetom experimentálneho štúdia, čo viedlo k zrodu rastlinnej fyziológie, ktorá spolu s molekulárnou biológiou v súčasnosti dominuje základnému fytoľogickému výskumu.

Veľmi prekvapivé bolo zistenie, že rastliny majú mnohé identické vlastnosti so živočíchmi. Napríklad pohlavné rozmnožovanie je založené na rovnakom princípe – fúzii spermatických buniek s vajíčkami. Pri napadnutí patogénom sa rastliny bránia podobným spôsobom, akým si imunitu vytvárajú živočíchy (box na tejto strane). Existuje tiež niekoľko paralel medzi rozpoznaním vlastného a cudzieho v rastlinných systémoch a histokompatibilitou živočíchov. Živočíchy a rastliny prekvapujúco používajú tie isté molekuly a mechanizmy v cirkadiálnych rytmoch.

V súčasnosti, vzhľadom na množstvo nových poznatkov, dosiahla fytoľogia nový míľnik. Objavila sa rastlinná neurobiológia ako najnovšia oblasť rastlinných vied spájajúca molekulárnu biológiu s ekológiou. Rastliny boli demaskované ako inteligentné organizmy schopné komplexného spracovania informácií spojeného s pamätou. Nielenže používajú neuronálne akčné potenciály, ale aj medzibunkovú komunikáciu pomocou synaptických spojení. Vzhľadom na tieto skutočnosti je termín „rastlinná neurobiológia“ oprávnený.

Aplikácia „neurobiologického“ pohľadu na ilustrovanie stavby rastlinných pletív a celého organizmu priniesla niekoľko prekvapivých zistení. V prvom rade, že koreňová špička nie je špecializovaná len na príjem živín, ale že

vykazuje aj neuronálne aktivity založené na rastlinných synapsách. Zdá sa, že koreňové špičky majú isté vlastnosti, vďaka ktorým by mohli fungovať ako riadiace centrá a reprezentujú anteriórny pól rastlinného tela, ako o tom uvažoval už Charles Darwin. Trochu neskôr, roku 1901, opísal Bohumil Němec polárne štruktúry, zjavne zväzky aktívnych filamentov, ktoré transportujú vzruchy v koreňových špičkách (obr. na s. 414).

Podobne ako všetky ostatné mnohobunkové organizmy, aj rastliny majú anteriórny pól a posteriórny protipól. Ak teda koreňové špičky reprezentujú anteriórny pól zabezpečujúci príjem potravy, stonkové vrcholy a listy reprezentujú posteriórny pól, špecializovaný na rozmnožovanie a vylučovanie metabolických produktov pomocou hydratód, trichómov a prieduchov. Cievne zväzky, ktoré umožňujú rýchly transport hydraulických signálov, ale aj klasických akčných potenciálov, sa podobajú nervovým zoskupeniam. Keďže rastliny sú schopné učiť sa a rozhodovať o svojich aktivitách podľa informácií z okolia, je zrejmé, že vlastnia komplexný systém na prijímanie, uchovávanie a spracúvanie informácií. Rastliny vedia inteligentne riešiť problémy a predvídať budúcnosť na základe minulosti a prítomnosti. Komplexné správanie rastlín nie je iba inteligentné, ale aj racionálne (box na nasledujúcej strane).

Rastliny stoja na rozhraní medzi zdánlivo nehostinným a agresívnym vesmírom a plodnou planétou Zem, hemžiacou sa životom. Možno keby sme ich lepšie pochopili, pomohli by nám odhaliť veľkú záhadu života. Aristoteles a jeho žiaci boli presvedčení o tom, že rastliny majú svoj vnútorný život, ktorý obsahuje myšlienky, pamäť, sny a plány do budúcnosti. My ich však, nanešťastie, stále dokonale nepoznáme, a tak ich využívame, ak sa ukáže, že sú pre nás prospešné, alebo vyhubíme, ak to tak nie je. Ale nedávne pokroky v ekológii naznačujú zmenu v tomto zaujatom pohľade na vyššie rastliny.

Nesmieme zabúdať, že elektrický akčný potenciál, najcharakteristickejšia a najrýchlejšia forma neuronálnej komunikácie, bol objavený u rastlín už roku 1873 (J. S. Burdon-Sanderson 1873). V tom čase sa ešte neakceptovala bunková stavba živočíšneho mozgu a neuronálne mozgové procesy sa len začínali študovať. Odvtedy sa objavilo množstvo údajov o elektrickom fenoméne v súvislosti s rastlinami. Ukázalo sa, že elektrické signály modulujú a kontrolujú základné fyzió-

Sotva je prehánením, rekne-li, že špička kořínku, takto nadaná [vnímavostí] a vybavená schopností řídit pohyb sousedících částí, působí podobně jako mozek nějakého nižšího živočicha; mozek takéž sídlí na předním konci těla, přijímá vjemy smyslových orgánů, a řídí několik druhů pohybu.

Ch. Darwin, 1880

Dr. František Baluška, DrSc., (*1957) vystudoval Přírodovědeckou fakultu Univerzity Komenského v Bratislavě. Jeho současným pracovištěm je Institut für Zelluläre und Molekulare Botanik, Universität Bonn.

Andrej Hlavačka (*1978) vystudoval rovněž Přírodovědeckou fakultu Univerzity Komenského v Bratislavě. Pracuje na univerzitě ve Florencii.

Oba autoři jsou členy nově založené Mezinárodní laboratoře rostlinné neurobiologie (LINV) ve Florencii.

RASTLINNÁ IMUNITA

Rastlinný imunitný systém je veľmi podobný živočíšnemu. LRR receptory podobné receptorům Toll rozpoznávajú molekulárne vzory patogénov, tzv. PAMPs (pathogen-associated molecular patterns), ktoré aktivujú signálne kaskády kináz MAP, oxidu dusného a reaktívnych druhov kyslíka. Tieto kaskády potom aktivujú gény spúšťajúce imunitné procesy. Najznámejší PAMP je bakteriálny flagelín, ktorý spúšťa veľmi podobnú imunitnú odpoveď v živočíšnych i rastlinných bunkách. Rastliny, na rozdiel od cicavcov, nemajú tzv. adaptívnu (alebo získanú) imunitu, ktorú uskutočňujú T a B lymfocyty. Rastliny nemajú špecializované bunky, ktoré by zabezpečovali imunitnú reakciu, zdá sa, že všetky rastlinné bunky sú autonómne schopné imunitnej reakcie.



RASTLINNÁ INTELIGENCIA

Anthony Trewavas rozpracoval koncept rastlinnej inteligencie založený na širšom neantropocentrickom ponímaní slova inteligencia. Podľa neho je rastlinná inteligencia komplexný adaptívny fenomén, ktorý umožňuje rastlinám prežiť extrémne variabilné podmienky prostredia. Rastlinná inteligencia umožňuje aktívne zachytiť všetky vnemy, ktoré sa buď uložia do pamäte, alebo okamžite použijú pre vlastné blaho. Rastlinná inteligencia umožňuje rastlinám riešiť problémy, ktorým sú permanentne vystavené nielen v dôsledku neustále sa meniaceho abiotického prostredia, ale aj v dôsledku kompetície medzi jednotlivými rastlinami, alebo útokov patogénov či predátorov. Rastliny aktívne rozpoznávajú nielen iné rastliny, ale aj baktérie, hmyz či živočíchy a vstupujú s nimi do komplexných interakcií. Napríklad rastliny si vedia „zdomáčiť“ a využívať baktérie, vošky, či mravce. Pre baktérie rodu *Rhizobium* vytvárajú korene rodu Fabaceae špeciálne koreňové orgány – takzvané noduly, kým pre vošky a mravce tvoria úkryty špeciálnou morfogenézou stonkových či listových buniek. Hmyz a kolibríky vábja za účelom opelenia nielen tvarom a farbou kvetov, ale aj sladkou odmenou vo forme nektáru, ktorého jediným účelom je lákať opelovače. Rastliny sú schopné aj klamstva a pretvárk – napríklad predstierať prítomnosť nektáru, alebo dokonca napodobňovať samičie sexuálne orgány hmyzu lákajúc samčeky, ktoré potom kopulačnými pohybmi uskutočnia opelenie.

logické procesy, ako je fotosyntéza a fototropizmus. Nanešťastie hlavný prúd rastlinnej biológie nikdy celkom neakceptoval rastlinnú elektrofyziológiu, takže táto oblasť prežívala v takmer dormantnom štádiu až doteraz, keď vzrušujúce objavy v ekológii, ale aj bunkovej a molekulárnej biológii, dovoľujú akceptovať rastlinnú neurobiológiu ako nový vedný odbor.

Jedným z prvých objavov tejto novej vednej disciplíny je zistenie, že rastliny vytvárajú rozličné signálne molekuly, ktoré možno nájsť v neurónoch. Ukazuje sa, že rastlinné bunky spolu komunikujú prostredníctvom rastlinných synáps sprostredkujúcich prenos elektrických signálov.

S príchodom nového milénia sa rastlinná biológia stáva svedkom dramatického pokroku v štúdiu komplexného správania rastlín. Začína sa potvrdzovať, že je to inteligentné správanie. Rastlinná ekológia má, prekvapivo, hlavné slovo pri odhalovaní faktov, ktoré na to poukazujú. Akoby rastliny mali vnútorný obraz seba i okolia. Už Charles Darwin (1880) si všimol, že rastliny majú schopnosť komunikovať s okolím a transformovať túto informáciu do pohybu svojich orgánov. Rastliny sú schopné aktívne rozpoznávať iné organizmy, ako sú baktérie, huby, iné rastliny, hmyz, vtáky a živočíchy, pravdepodobne aj ľudí. Napríklad na uskutočnenie pohlavného rozmnožovania sa rastliny spoliehajú na komplexnú interakciu s hmyzom a vtákmi. Aby takéto niečo dosiahli, sú schopné vygenerovať špeciálne tvarované pohlavné orgány, ktoré umožňujú hmyzu a vtákom dosiahnuť ich kvety (Charles Darwin na to poukázal už v roku 1862). Opelovačov navyše odmeňujú sladkým nektárom a inými látkami, ktoré sú pre hmyz či vtáky atraktívne a tvoria súčasť ich potravy. Komplexná interakcia bola dokázaná aj medzi hmyzími feromónmi a prchavými rastlinnými semiochemikáliami. Rastliny sú majstrami klamlivých a inteligentných stratégií (box na s. 412).

Korene čelade Fabaceae dokážu rozpoznať a „domestifikovať“ baktérie rodu *Rhizobium* pomocou vývoja nodulov a zložený bakterioid zasobuje rastlinu dusíkom. Menej známy je spôsob, akým rastlina rozpozná a komunikuje s mravcami (a naopak), ktoré ju chránia pred herbivormi, patogénmi, ako aj pred konkurujúcou vegetáciou. Mravce odmeňujú vylučovaním nektáru a špecializovaných potravinových teliesok. Rastliny aktívne rozlišujú identitu bylinožravcov a sú schopné získať ich nepriateľov, čo sa veľmi podobá činnosti „bodyguardov“. Navyše rastliny so stonkou napadnutou patogénom sú schopné vylučovaním prchavých látok do ovzdušia upozorniť svojich susedov na nebezpečenstvo a môžu aj zvýšiť imunitu proti týmto patogénom. Je zaujímavé, že charakter vylúčených prchavých látok je typický pre napadnutie tým-ktorým herbivorom, ale roz-

KOREŇOVÉ ŠPIČKY AKO AKTÍVNY „ŽIVOČÍŠNY“ PÓL RASTLINY

Koreňové špičky sa aktívne ohýbajú v dvoch úsekoch – v takzvanej prechodnej zóne, ktorá sa nachádza hneď za apikálnym meristémom, a v zóne predlžovacieho rastu buniek, ktorá nasleduje za prechodnou zónou. Tieto ohýby sú relatívne rýchle, uskutočnia sa v priebehu pár minút. Koreňová špička sa môže ohýbať naraz v oboch zónach opačným smerom, rastúci koreň pripomína pohyb dažďovky alebo hada. Naopak stonkové špičky sú schopné ohýbať sa len v zóne predlžovacieho rastu. Tieto ohýby sú relatívne pomalé, trvajú aj niekoľko hodín. Ďalší rozdiel je v tom, že stonky sa ohýbajú len na základe svetelných a gravitačných signálov, kým korene okrem týchto dvoch základných fyzikálnych parametrov monitorujú mnohé ďalšie. Napríklad aktívne rastú smerom k vyššej vlhkosti, dostatku kyslíka a vyššej koncentrácii minerálnych živín, ale dokážu sa vyhýbať toxickým látkam, suchej a tvrdej pôde, ako aj patogénom. Korene majú aj dve senzorké zóny – koreňovú čiapočku a spomínanú prechodnú zónu, čo zrejme úzko súvisí s dvoma ohybovými zónami.

Všetky spomínané charakteristiky, ako aj skutočnosť, že korene rastú invazívne, pripomínajú huby, naznačujú, že „nezelené“ korene vykazujú určité „živočíšne“ vlastnosti. Nie je pritom nezaujímavé, že korene vstupujú do symbiózy s mykoríznyimi hubami, ktorých mycéliá môžu dokonca priamo prepájať vedľajšie rastliny do ekologických „superorganizmov“.

dielny oproti všeobecnému poraneniu. Počas svojho vývinu sú rastliny schopné prejsť z autotrofného na heterotrofný spôsob výživy. V prípade parazitických alebo karnivorných rastlín zahŕňa táto zmena spôsobu výživy aktívny výber vhodného hostiteľského organizmu alebo koristi.

Yucca filifera
z centrálneho Mexika.



Gravitropizmus rastlin a Bohumil Němec

Gravitace neboli přitažlivost zemská působí na rostliny nepřetržitě a ve stejném směru. Tropizmus označuje růst rostlin směřovaný vůči určitému podnětu – v na-

šem případech gravitaci. Gravitropizmus rostlin zajišťuje růst hlavního kořene dolů, do země, kde může čerpat vodu a živiny. U nadzemních částí zajišťuje růst stonku vzhůru, do vzduchu, kde je vhodnou orientací listů umožněna fotosyntéza a výměna plynů. Gravitropizmus můžeme pozorovat u trav polehlých po dešti nebo silném větru, které již za několik hodin zvedají stébla, ohýbají se v kolénkách. Podobně se u kořenů klíčících rostlin ponechaných ve vodorovné poloze velmi brzo ohne kořenová špička směrem dolů. Tyto pohyby jsou způsobeny nerovnoměrným růstem buněk na protilehlých stranách ležícího stonku či kořene. U kořenu roste rychleji vrchní část, u stonku naopak spodní část. Výsledkem je ohyb kořene dolů a stonku nahoru.

Z tohoto stručného přehledu gravitropizmu rostlin můžeme odvodit sled dějů. Gravitační síla (schopná deformovat nebo přemístit těleso) ovlivní citlivý systém rostliny, který vyšle biologický signál. Ten po případném přenosu do jiné části rostliny podpoří odlišný růst buněk na opačných stranách rostlinného orgánu, a tím i jeho ohyb. Systém, který umožňuje vnímat gravitaci, si můžeme představit na principu přesýpacích těles uložených uvnitř buněk. Po změně polohy orgánu se přesunou a zatíží jinou část buňky, což může vyvolat příslušný signál. Tato tělíska byla v některých buňkách rostlin naleze-

na a popsána jako specificky těžší škrobová zrna. Objevil je Bohumil Němec a předpověděl jejich funkci (o něm viz též Vesmír 76, 212, 1997/4).

Bohumil Němec (1873–1966), rostlinný cytolog a fyziolog, založil Ústav pro anatomii a fyziologii rostlin Univerzity Karlovy (r. 1901) a vědeckou školu experimentální biologie rostlin v Čechách a na Slovensku. Byl rektorem univerzity (1921–1922) v době založení Přírodovědecké fakulty, členem mnoha společností (například po J. E. Purkyňovi druhým Čechem v královské Linnéově společnosti v Londýně), popularizátorem vědy (mimo jiné vedoucím redaktorem obnoveného vydávání Vesmíru a jeho aktivním přispěvatelem za první republiky), a především učitelem a aktivním vědcem až do posledních let svého života. Objevení přepadavého škrobu a jeho funkci pro vnímání gravitace rostlinami popsal před více než sto lety (Ber. Dtsch. Bot. Ges. 18, 241–245, 1900). Od této doby bylo shromážděno mnoho poznatků na podporu této funkce, a to i přes některé rozporné výsledky, které přinesla například studie s bezškrobovými mutanty. Před několika lety jsem si všiml, že autoři jedné z prací, která přináší řadu důkazů o roli škrobových zrn při vnímání gravitace rostlinami (Plant Physiology 120, 343–350, 1999), citují uvedený článek B. Němce z roku 1900. Je nádherné, když v genomové a molekulární éře biologie, kdy práce vyšlé před deseti lety jsou neodvratně považovány za zastaralé a překonané, je v prestižním vědeckém časopisu citována a diskutována práce českého vědce z roku 1900. Ilya Prášil



1) Jasmonáty jsou skupinou signálních molekul, pomocí kterých rostlinné buňky zprostředkovávají odpověď na nepříznivé okolní podmínky a regulují některá stadia rostlinného vývoje. Kyselina jasmonová a její deriváty jsou cyklické oxylipiny odvozené od nenasycených mastných kyselin. Jasmonáty regulují genovou expresi některých genů zapojených do reakce na stres a genů ovlivňujících některé vývojové procesy.

2) Baluška F. et al., Communication in Plants: Neuronal Aspects of Plant Life. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 2006.

Rostliny sú extrémne mechanosenzitivne. Ich stonky niekedy hľadajú oporu pomocou úponkov za asistencie látok, ako sú jasmonáty.¹ Rastlinné korene sa vyznačujú tigmotropizmom, čo im dovoľuje skúmať, so zvedavosťou živočíchov, okolie pri hľadaní vody a minerálnych látok. Koreňové špičky neustále monitorujú množstvo fyzikálnych parametrov pôdy (box na tejto strane) a tieto informácie používajú na hľadanie novej ekologickej niky, aby mohli lepšie prežiť a rozmnožovať sa. Podobne sa správajú huby, a vskutku, väčšina koreňov vstupuje do symbiôzy s mykoríznyimi hubami za účelom zlepšenia príjmu kritických iónov, napríklad fosforu.

Tieto záblesky fascinujúcej komplexnosti rastlín nás vedú k formulovaniu otázok, na ktoré bude hľadať odpovede rastlinná biológia v nasledujúcich dekádach. Predovšetkým: Majú rastliny nejaký typ nervového systému, podobný tomu, ktorý riadi správanie živočíchov? Ak sa ukáže, že rastliny nijaký „mozog“ nemajú, otázka bude znieť: Kde a ako uchovávajú a spracúvajú informácie, ktoré získavajú z abiotického i biotického prostredia a ako ich používajú na optimalizáciu budúceho správania? Cítia rastliny (ako predpokladal Aristoteles) a prejavujú bolesť? Počujú rastliny a dokážu vnímať vône? Je pravdou, že to zatiaľ nevieme. Ale extrémna citlivosť na mechanické vibrácie naznačuje, že by mohli vnímať zvuky, a z prvých výsledkov vyplýva, že rastliny komunikujú prostredníctvom

prchavých látok. Toto by dokonca naznačovalo na existenciu určitej formy rastlinného čuchu. Naše nedostatočné vedomosti by sme nemali ospravedlňovať tvrdeniami, že rastliny takéto schopnosti a vlastnosti nemajú. V podstate ich racionálne a inteligentné správanie nasvedčuje pravý opak. Preto by sme mali byť viac opatrní pri unáhlených záveroch a začať intenzívne hľadať odpovede na tieto naliehavé otázky.

Je azda len náhoda, že staré grécke slovo „neuron“ znamenalo rastlinné vlákno? Táto jedinečná súbežnosť naznačuje, že termín rastlinná neurobiológia je oprávnený!

To, že rastlinná neurobiológia vstupuje na scénu ako koherentná veda, sa mohlo uskutočniť vďaka štedrej pomoci talianskej banky *Ente Cassa di Risparmio di Firenze*, ktorá sponzorovala Prvé sympóziu rastlinnej neurobiológie vo Florencii v máji 2005 (<http://izmb.de/volkman/plant-neuro.php>).² Druhé sympóziu sa uskutočnilo v máji 2006 v Pekingu. Organizátori sympózia okrem toho založili aj Society for Plant Neurobiology (<http://www.plantneurobiology.org>). Tiež nový časopis *Plant Signaling and Behavior* (<http://www.landesbioscience.com/journals/psb/>) bude informovať nielen o všetkých známych spôsoboch, ale aj o neuronálnych prenosoch signálov pri rastlinách.

A tak po viac ako dvoch tisícročiach, ktoré uplynuli od Aristotelových čias, máme azda šancu pochopiť rastliny v celej ich komplexnosti ako inteligentné organizmy.

více na www.vesmir.cz
www+