

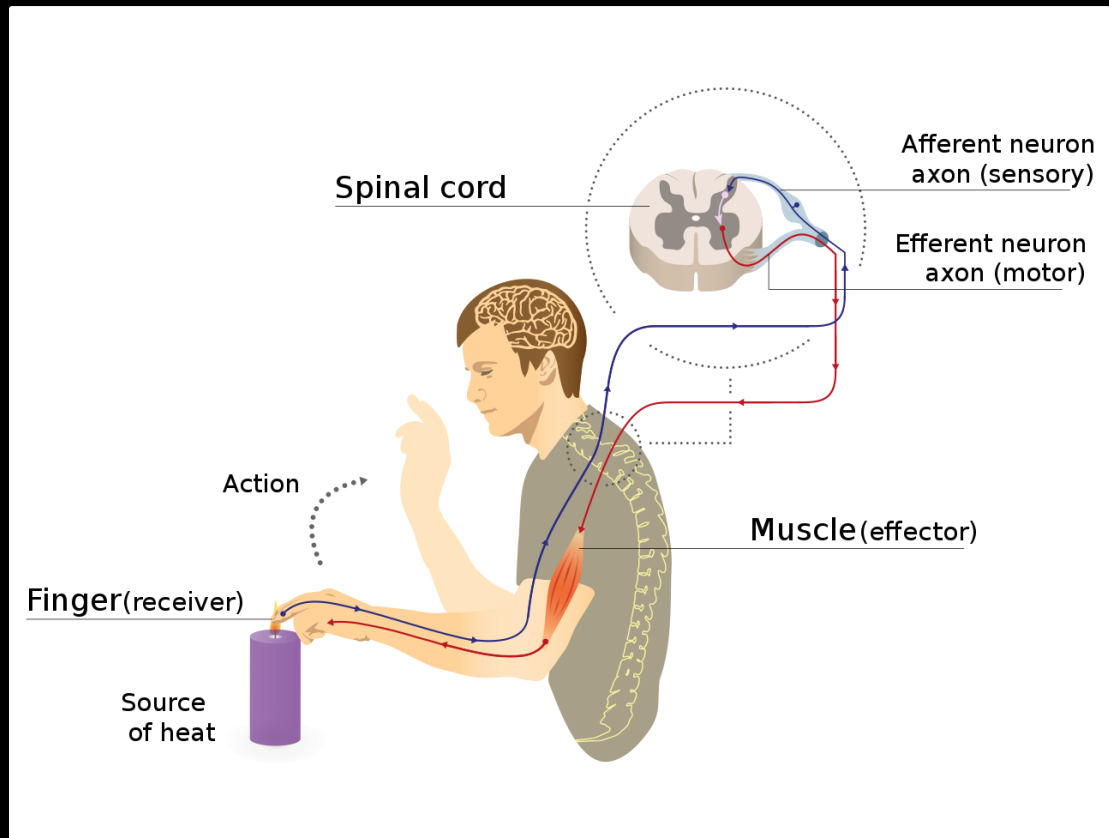
Šírenie elektrických signálů v živých systémech



Andrej Pavlovič
Katedra biofyziky
Univerzita Palackého v Olomouci

Na čo sú dobré elektrické signály?

- Prenášajú informácie z vonkajšieho aj vnútorného prostredia do mozgu a výkonných orgánov (efektorov).
- Majú účinné prepojenie s chemickou hormonálnou sústavou.
- Sú rýchle.

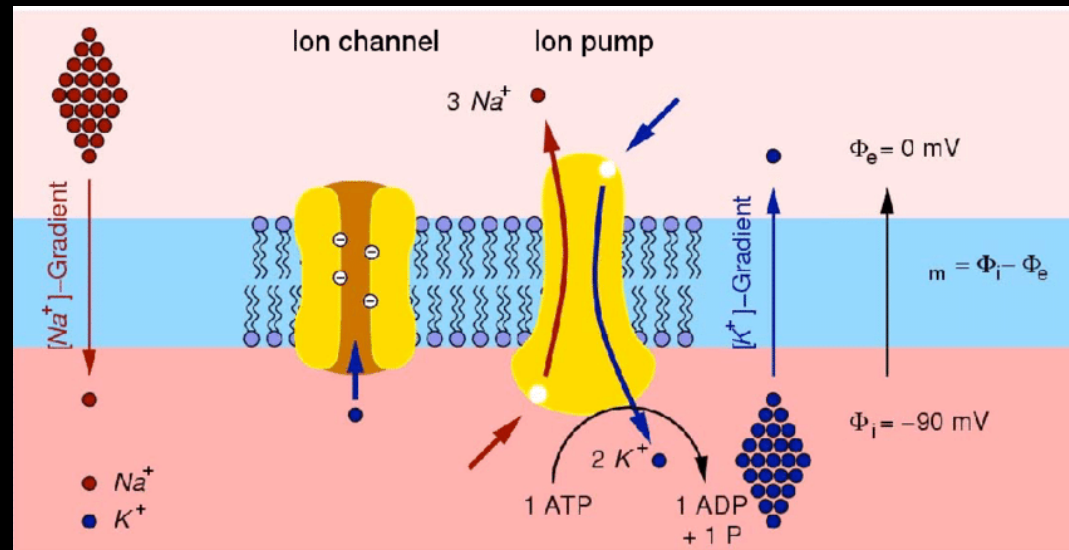


reflexný oblúk

Membránový potenciál

Membránový (elektrochemický) potenciál:

- nerovnomerná distribúcia iónov na vonkajšej a vnútornej strane cytoplazmatickej membrány bunky.
- zvyčajne záporný (od -70 do -40 mV, tzv. kľudový potenciál, *resting potential*).
- Cytoplazmatická membrána je pre väčšinu iónov nepriepustná. Tie sa translokujú: 1) ionovými pumpami a 2) iónovými kanálmi.
- Má dve zložky: chemický potenciál – daný koncentráciou iónov.
elektrický potenciál – daný nábojom, ktorý ióny nesú.



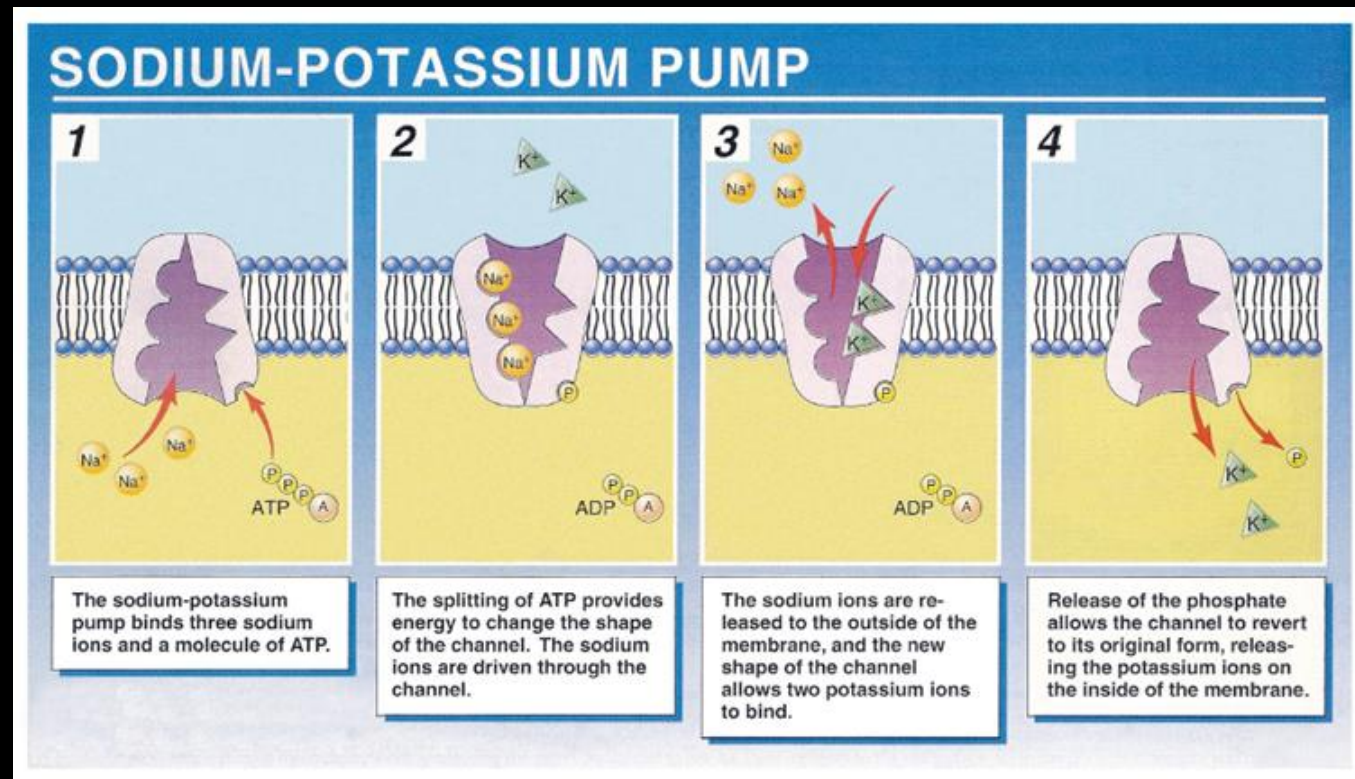
Iónové pumpy

- Transmembránový proteín.
- Pumpuje ióny proti ich elektrochemickému gradientu za spotreby ATP.
- Na negatívom kľudovom membránovom potenciáli sa podieľa najmä iónová pumpa: sodno-draselná pumpa:

3 Na⁺ z bunky

2 K⁺ do bunky

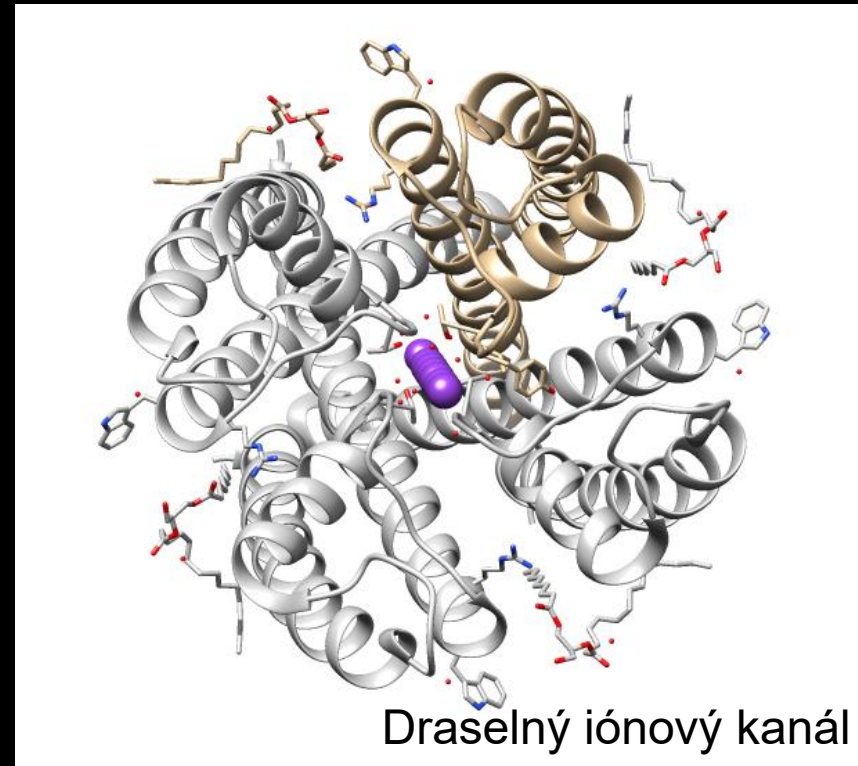
1 ATP



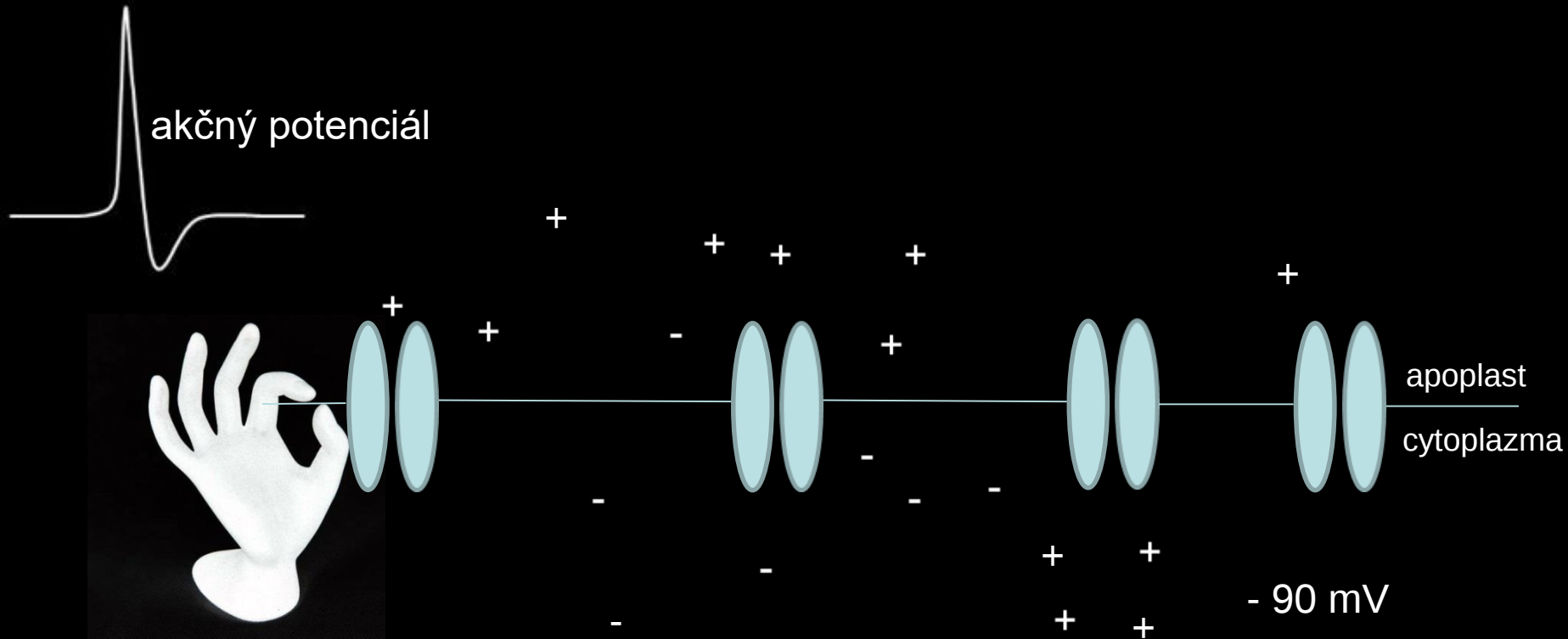
Iónové kanály

- Transmembránové proteíny.
- Využívajú elektrochemický gradient vytvorený ionovými pumpami.
- Transport iónov je veľký (10^6 iónov s^{-1}) a bez spotreby ATP.
- Majú selektívnu permeabilitu pre určitý druh iónu (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}).
- Môžu sa otvárať a zatvárať v závislosti od podnetu:

- 1) *voltage-gated*
- 2) *ligand (neurotransmitter)-gated*
- 3) *lipid (IP3)-gated*
- 4) *mechanically-gating*
- 5) *light-gating*
- 6) *temperature-gating*



Zmena membránového potenciálu vedie k tvorbe elektrického signálu



- Na zmene membránového potenciálu sa podieľajú rôzne iónové kanály.
- Signál má väčšinou počiatok v senzoryckom neuróne alebo špecifickom receptore, obklopeného neurónami.

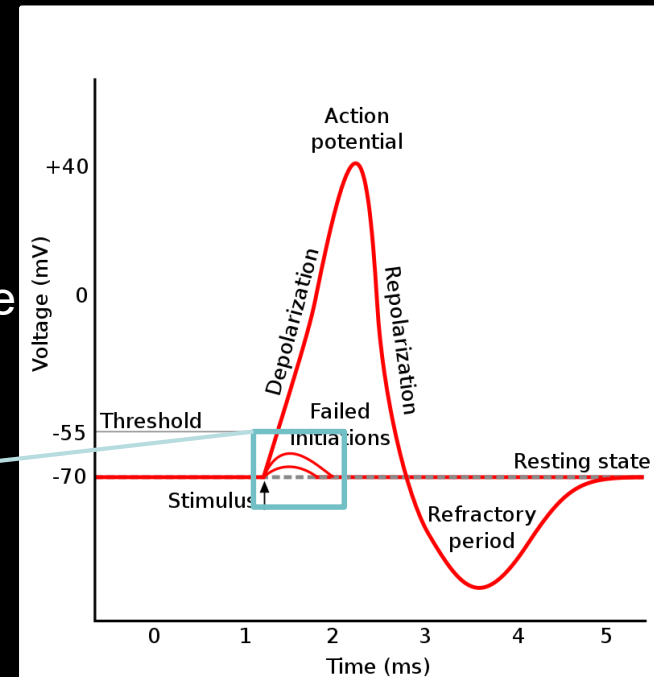
Vlastnosti akčných potenciálov

Akčný potenciál (AP):

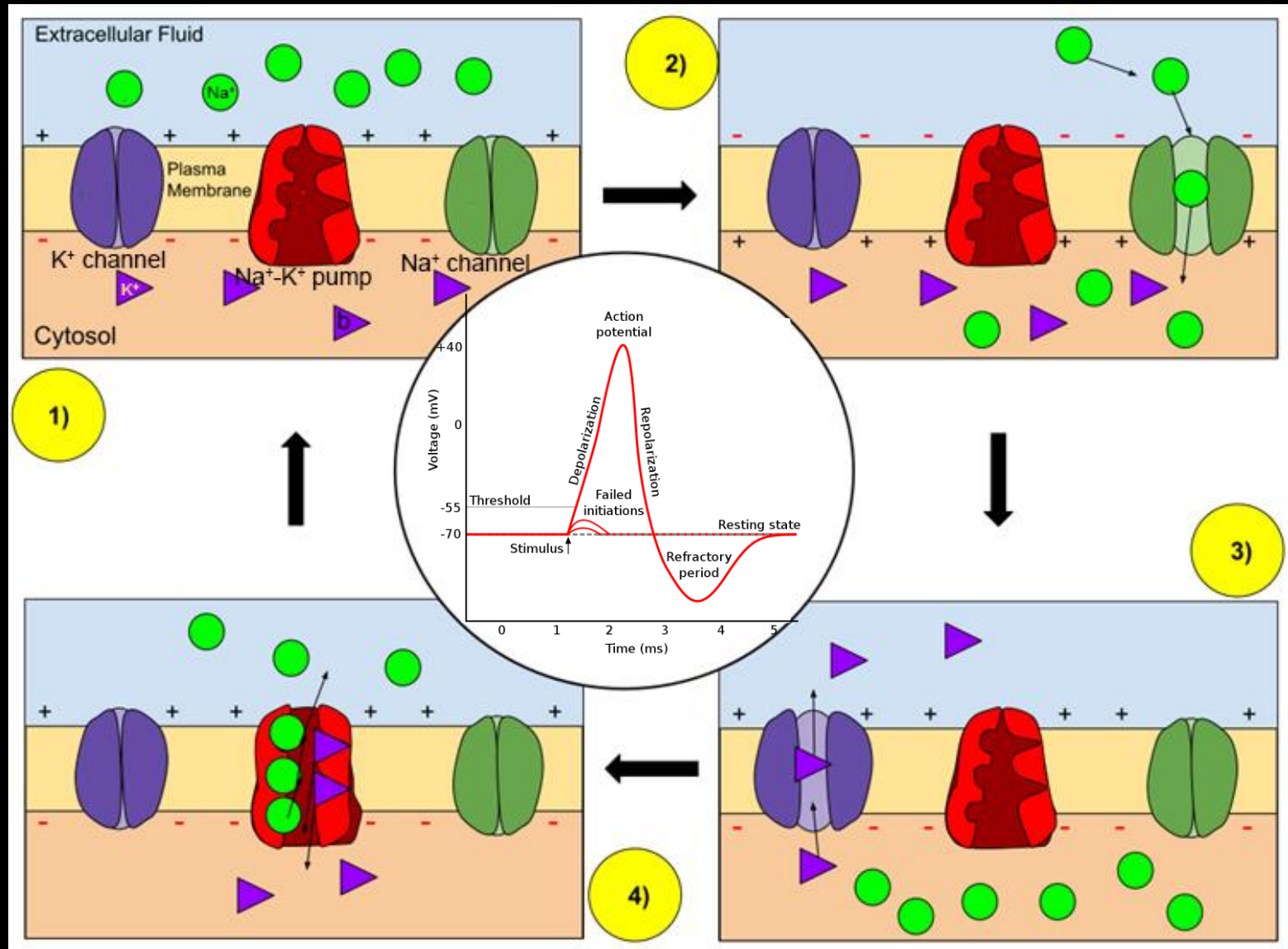
- 1) pokojový potenciál
- 2) depolarizácia (influx Na^+ , alebo Ca^{2+} pri niektorých typoch neurónov a synapsií)
- 3) repolarizácia až hyperpolarizácia (efflux K^+)
- 4) obnovenie pokojového potenciálu (efflux 3 Na^+ , influx 2 K^+)

- **Refraktórna perióda** – je doba po ktorú nie je možné spustiť ďalší akčný potenciál.
- *All or nothing* character – amplitúdu neovplyvňuje intenzita stimulu. Intenzita stimulu však ovplyvňuje frekvenciu AP.

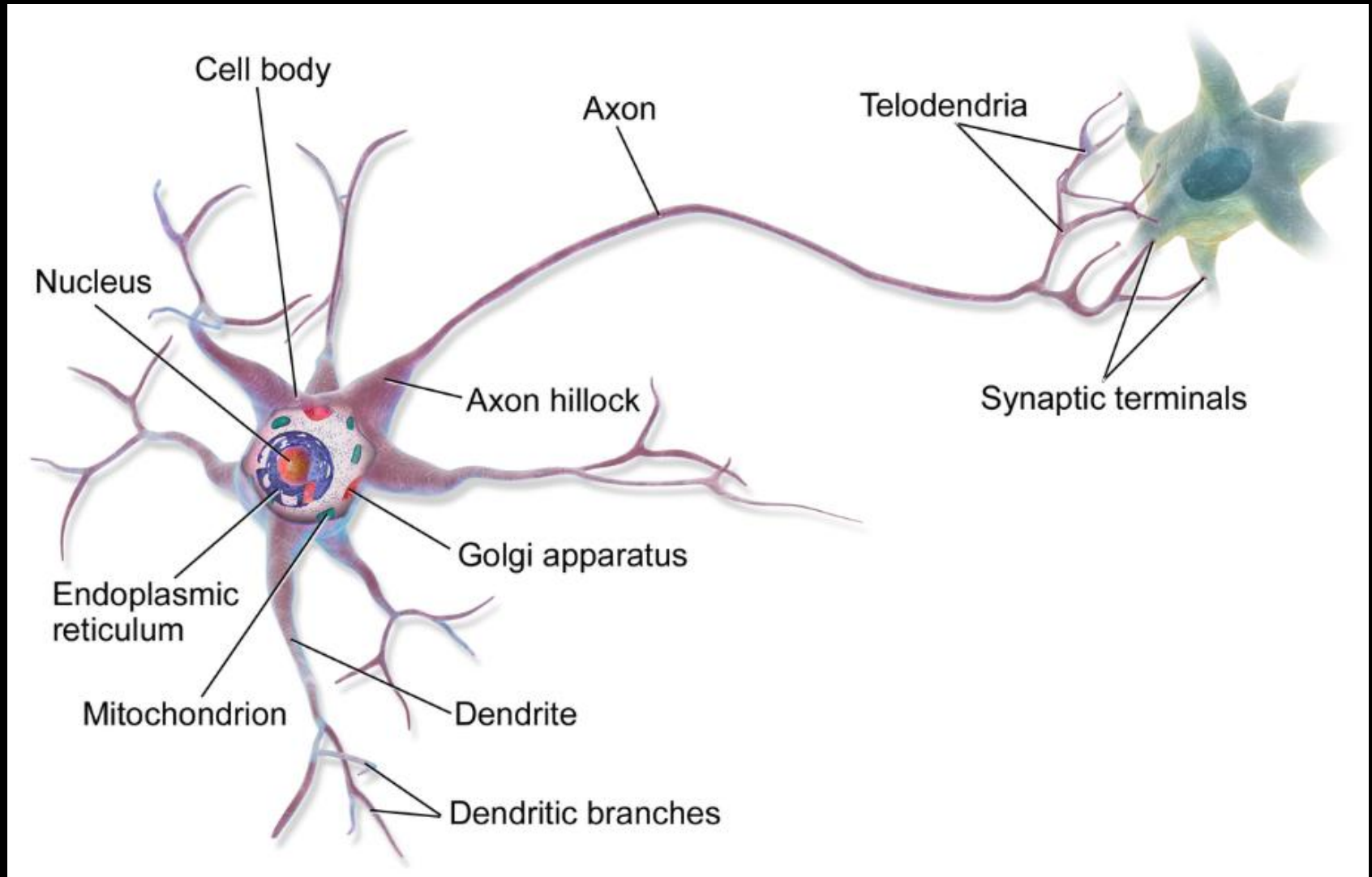
Graded potential (GP) – amplitúdu ovplyvňuje intenzita stimulu, GP často predchádza AP (napr. receptorový potenciál).



Akčný potenciál v živočíšnej bunke

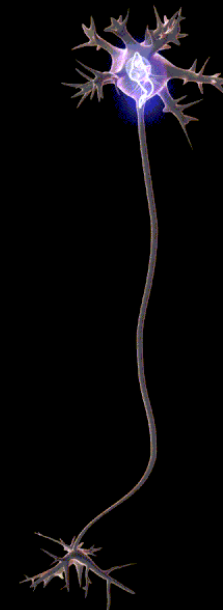
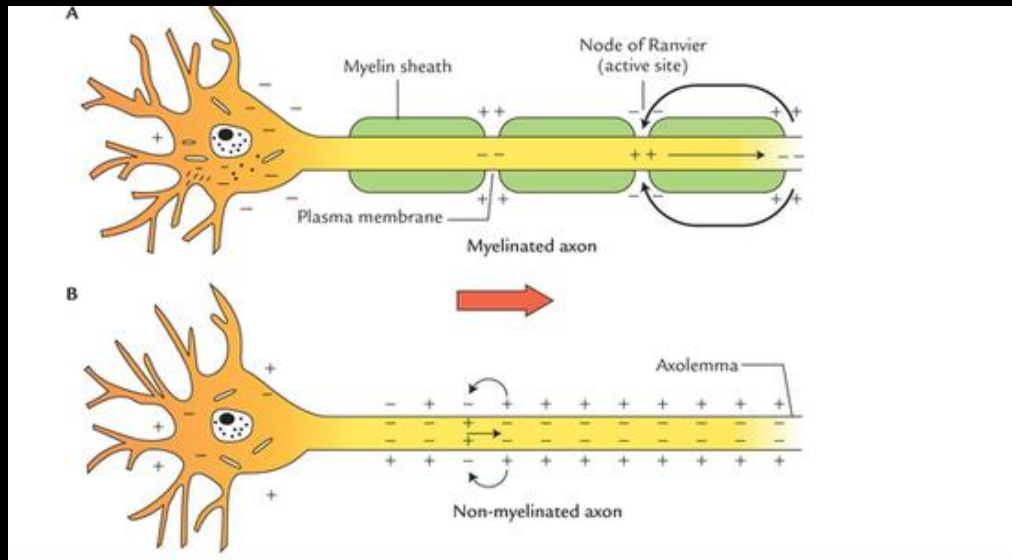


Prenos elektrického signálu v živočišných organizmoch - neurón

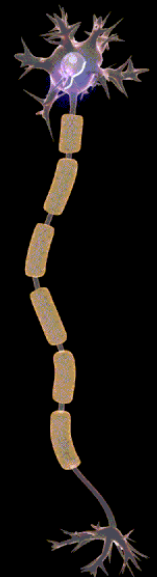


Myelínová pošva a Ranvierove zárezy urýchľujú šírenie signálu

- Myelínová pošva axónu umožňuje šírenie AP iba v mieste Ranvierových zárezov.
- V časti axónu obaleného myelinovou pošvou sa signál šíri ako GP.
- Šírenie sa nazýva ako saltatórne.



1-10 m s⁻¹



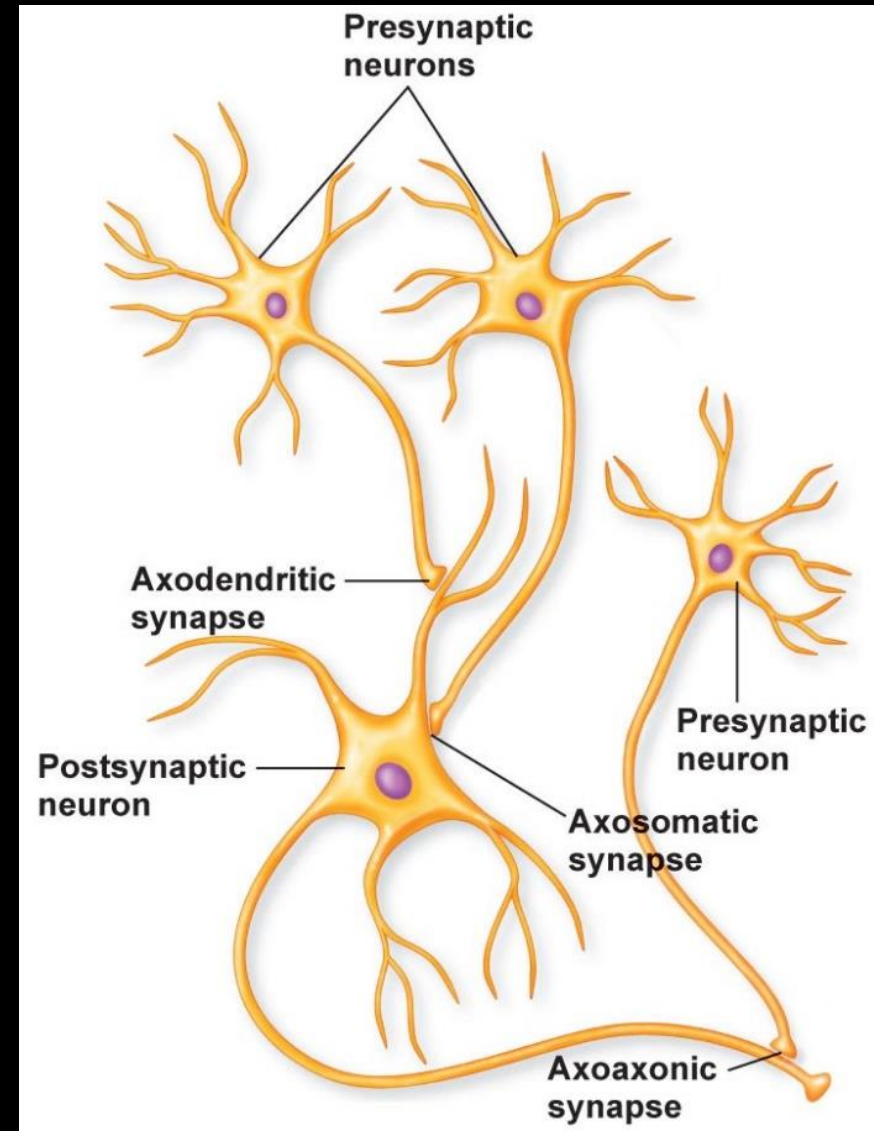
100 m s⁻¹

Neuróny sú usporiadané do zložitých sietí pomocou synapsií

Synapsa – je spojenie dvoch neurónov a slúži na prenose elektrického vzruchu.

Typy synapsií podľa spojenia:

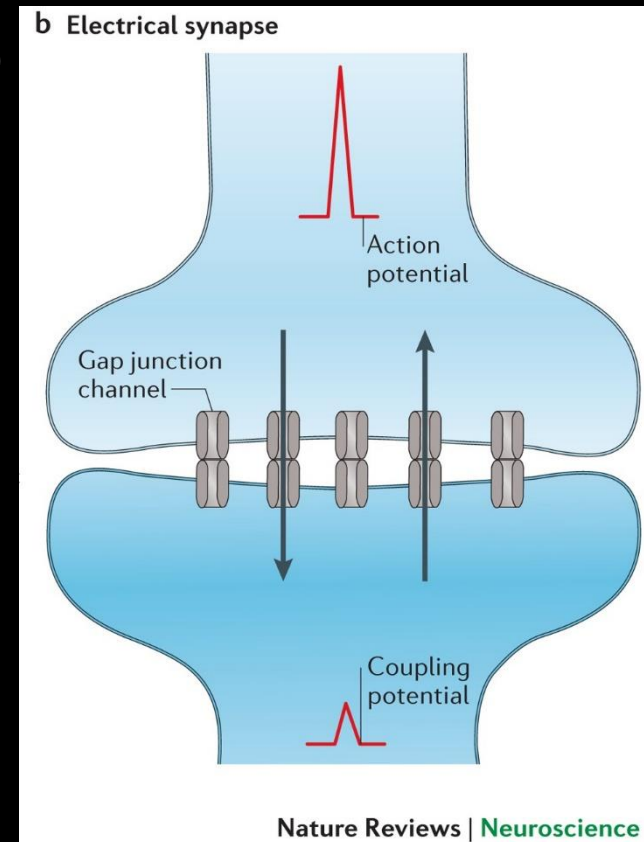
- 1) axodentritická: axón-dentrit
- 2) axoaxonická: axón-axón
- 3) axosomatická: axón-telo neurónu



Elektrická synapsa

Elektrická synapsa – *gap junction*

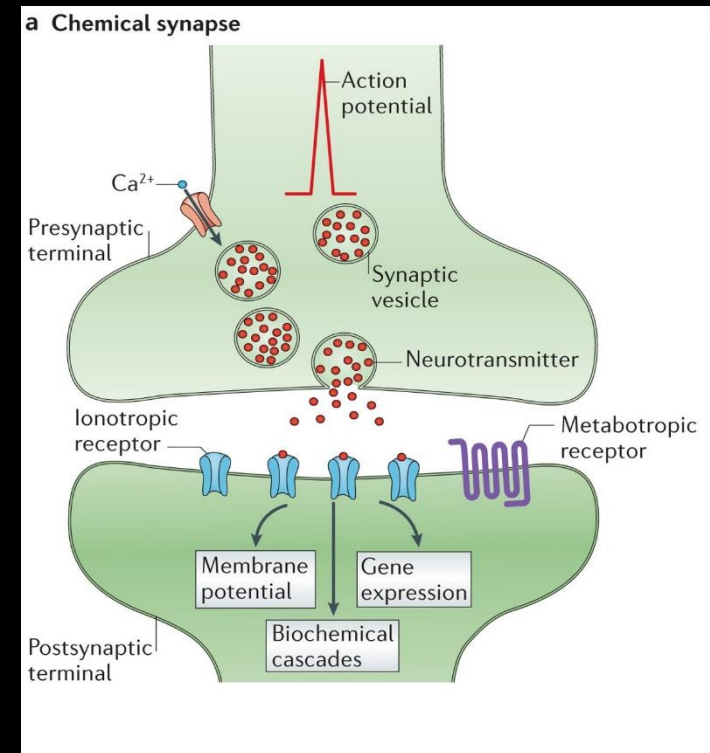
- Tvoria ho konexóny – tvorí ho 6 proteínov konexínov.
- Konexón sa otvára a zatvára (*voltage-gated*)
- Sú rýchlejšie v prenose vzruchu ako chemické synapse.
- Obojsmerná.



Chemická synapsa

Chemická synapsa

- Jednosmerná a pomalšia v prenose nervového vzruchu.
- presynaptický neurón uvoľňuje neurotransmitter do synaptickej štrbiny prostredníctvom exocytózy
- Postsynaptický neurón obsahuje *ligand-gated* receptory pre tento neurotransmitter, čo vedie k depolarizácii membrány a šírení elektrického vzruchu.



Neurotransmitter

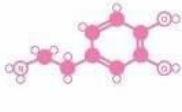
- **Neurotransmitter** je nízkomolekulárna chemická látka, slúžiaca k prenosu nervového vzruchu v chemickej synapse.

Podľa chemického zloženia:

- Aminokyseliny (glutamát, aspartát, GABA, glycín)
- Amíny (dopamín, serotonín, acetylcholín)
- Peptidy (vasopresin, somatostatin)

Podľa reakcie, ktorú vyvolávajú:

- stimulačné (glutamát)
- inhibičné (GABA)

ADRENALINE  Fight or flight neurotransmitter	NORADRENALINE  Concentration neurotransmitter	DOPAMINE  Pleasure neurotransmitter	SEROTONIN  Mood neurotransmitter
GABA  Calming neurotransmitter	ACETYLCHOLINE  Learning neurotransmitter	GLUTAMATE  Memory neurotransmitter	ENDORPHINS  Euphoria neurotransmitter

Uvoľnenie neurotransmitera

- Akčný potenciál na presynaptickej membráne otvorí *voltage-gated* Ca^{2+} kanál, ktorý spôsobí narást vnútrobunkovej hladiny $[\text{Ca}^{2+}]$ na a aktivuje exocytózu a uvoľnenie neurotransmitera.
- Synaptotagmin – sensor Ca^{2+}
- SNARE complex – synaptobrevin (v-SNARE), syntaxin (t-SNARE), SNAP-25

a Chemical synapse

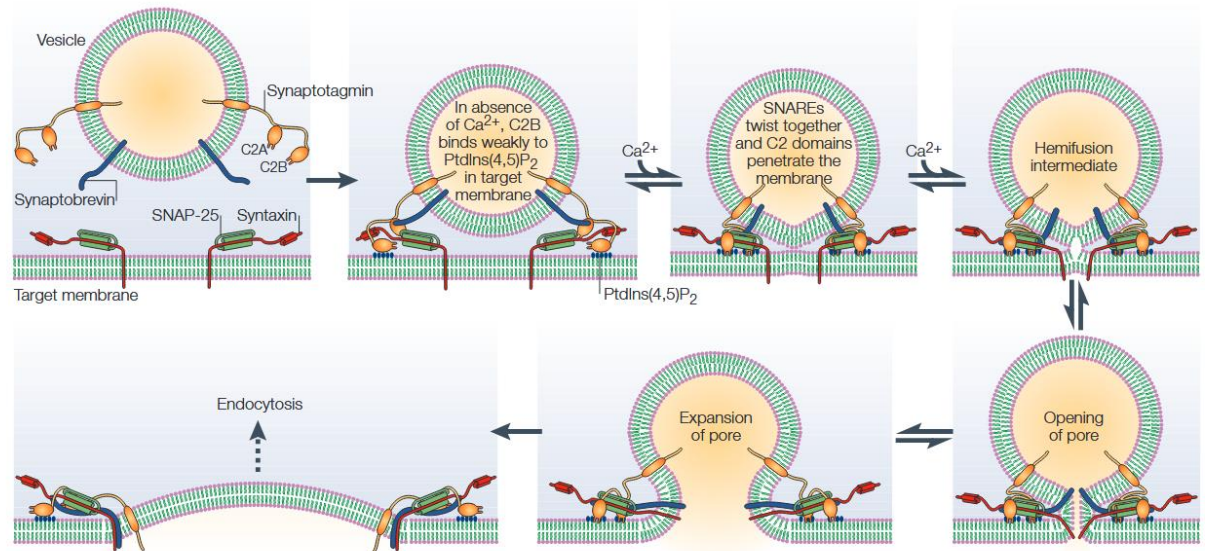
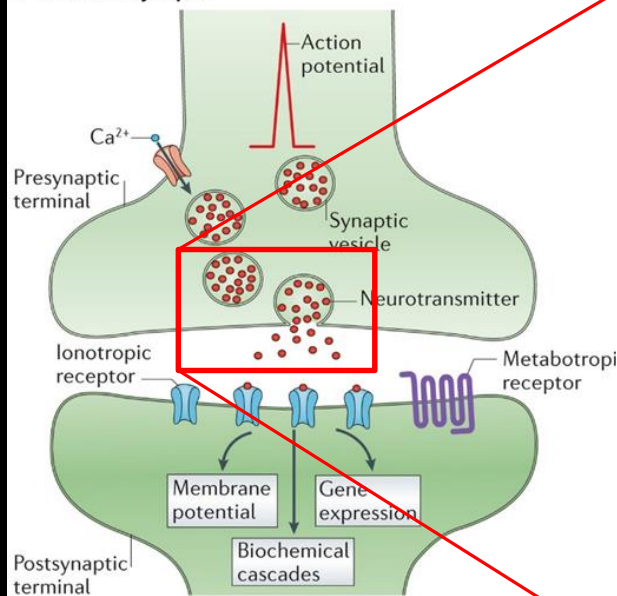


Figure 4 | **A model for synaptotagmin function during exocytosis.** A cutaway view of the putative fusion 'machine', which is composed of synaptotagmin, SNAREs (synaptobrevin, syntaxin and SNAP-25) and phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate (PtdIns(4,5) P_2), is shown. Other factors clearly have roles in exocytosis but are not considered here¹. The fusion pore might be composed of phospholipids, the membrane anchors of the SNARE proteins, or a combination of both. See text for details.

Receptory: ionotropné

Neurotransmitter sa viaže na receptor na postsynaptickej membráne:

1) Ionotropný (*ligand-gated* iónový kanál): väzba neurotransmiteru na receptor kanál priamo otvára a podľa smeru toku iónov pôsobí buď excitačne (depolarizácia, glutamátové receptory) alebo inhibične (hyperpolarizácia, GABA receptory).

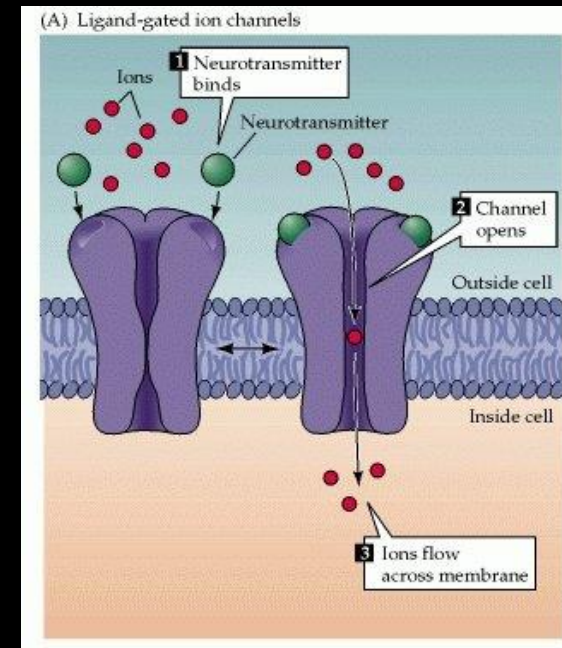
a) Cys-loop receptory viažu acetylcholín, serotonín, glycín, glutamát, GABA_A

b) Glutamátové receptory viažu glutamát, podľa agonistu, ktorý viažu sa delia na:

AMPA - α -amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionové kyselina

NMDA - N-methyl-D-aspartát

Kainatový typ - kainát



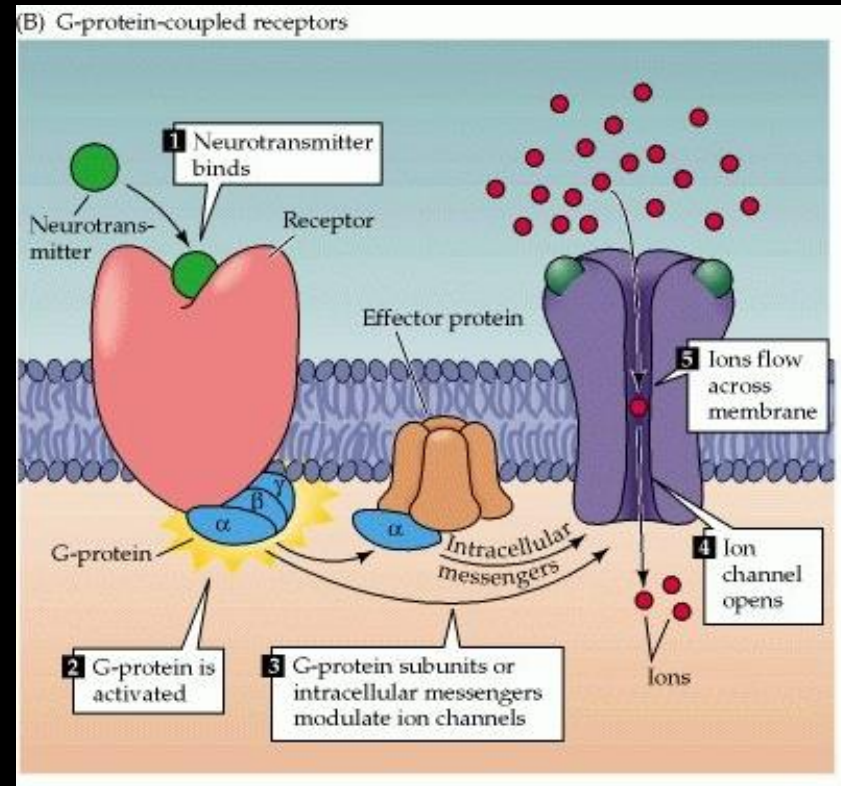
Receptory: metabotropné

2) Metabotropné receptory (*G-protein coupled*): sú pomalšie ako ionotropné receptory. Neurotransmitter sa naviaže na receptor, dôjde ku zámene GDP za GTP (pomocou GEF), α podjednotka s GTP se odpojí a putuje k príslušnému efektoru (napr. iónový kanál). Metabotropné receptory ovlivňujú produkciu druhých poslov, ktoré spúšťajú ďalšie signálne dráhy:

- 1) aktiváciou adenylát cyklázy: cAMP
 - 2) aktiváciou fosfolipázy C: DAG a IP3
- aktivuje Ca^{2+} kanál.

Podľa väzby ligandu ich delíme na:

- glutamátový
- acetylcholínový
- GABA_B

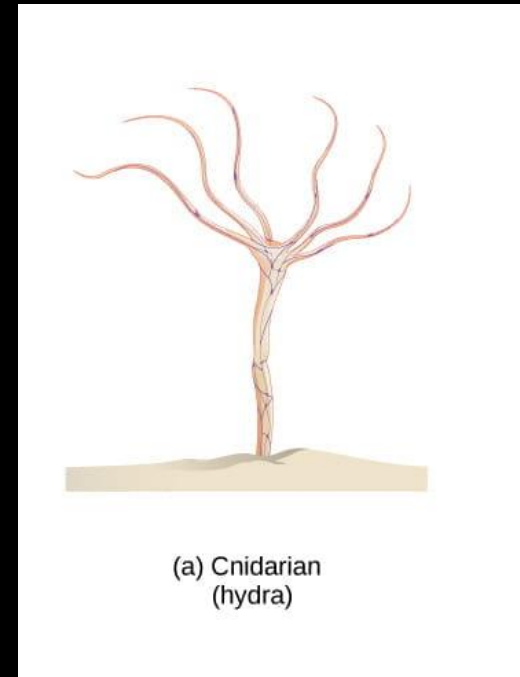


Nervová sústava živočíchov

- Neuróny formujú nervovú sústavu, ktorej komplexita je závislá od fylogenetického postavenia.

1) Rozptýlená (difúzna), napr. nezmar (*Hydra*)

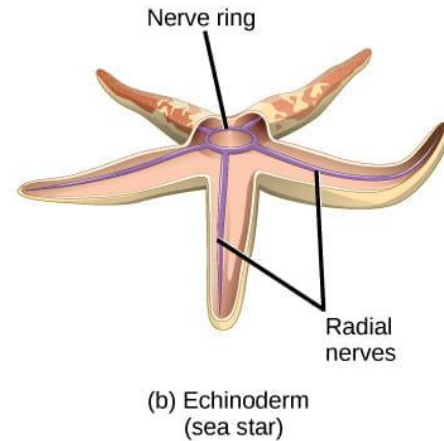
- nervové bunky sú rozptýlené a tvoria sieť ale nevytvárajú nervové centrum.
- na podráždenie reaguje celé telo, pretože podráždenie sa šíri nervovou sieťou všetkými smermi.



Nervová sústava živočíchov

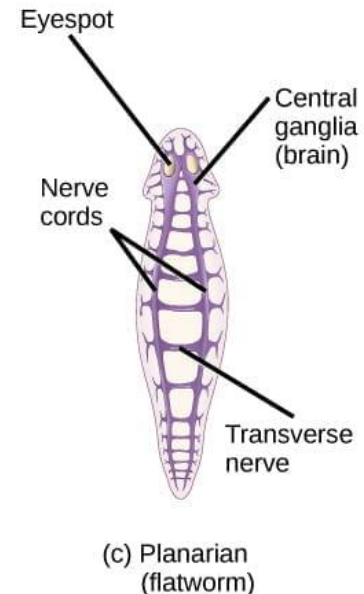
2) kruhová (radiálna) – napr. medúzy, ostnatokožce

- typická pre lúčovito súmerné živočích
- nervové bunky sú výraznejšie sústredené v prstenci na okraji zvona



3) pásová – napr. ploskavce

- nervové bunky sú sústredené do ganglií (nervových uzlín), z ktorých vybiehajú dlhšie nervové vlákna v podobe 2 - 3 pásov do tela.
- v hlavovej časti sú nervové pásy spojené okolohltnovou obrúčkou



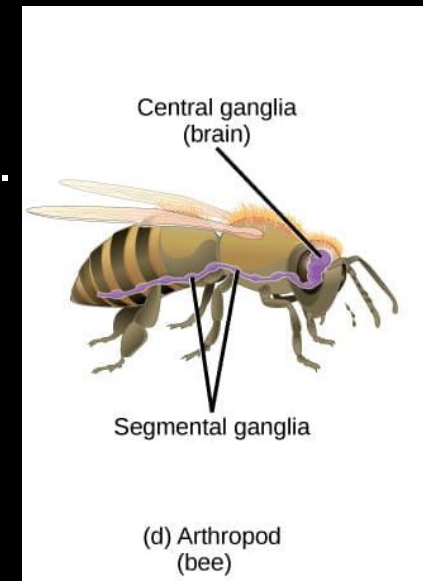
Nervová sústava živočíchov

4) Rebríčková – napr. obrúčkavce

- v každom telovom článku (somite) sa na brušnej strane nachádza pár ganglií navzájom pospájaných nervovými vláknami, ktoré vytvárajú obrazec pripomínajúci rebrík
- v prednej časti tela sa nachádza hltanové a podhltanové ganglium

5) Gangliová – napr. mäkkýše, článkonožce

- vznikla splývaním ganglií rebríčkovej nervovej sústavy.
- dominantné postavenie získala pôvodne párová, neskôr integrovaná cerebrálna (mozgová) uzlina, ktorá vznikla integráciou 2-3 párových uzlín príslušných hlavových segmentov v procese cefalizácie (vytvorenia hlavy).



Nervová sústava živočíchov

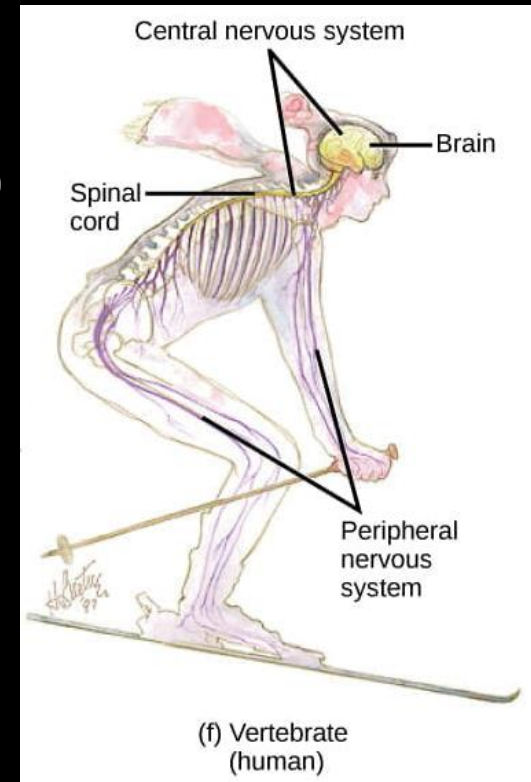
6) Rúrková – napr. stavovce

- Centrálna nervová sústava (CNS, mozog, miecha)

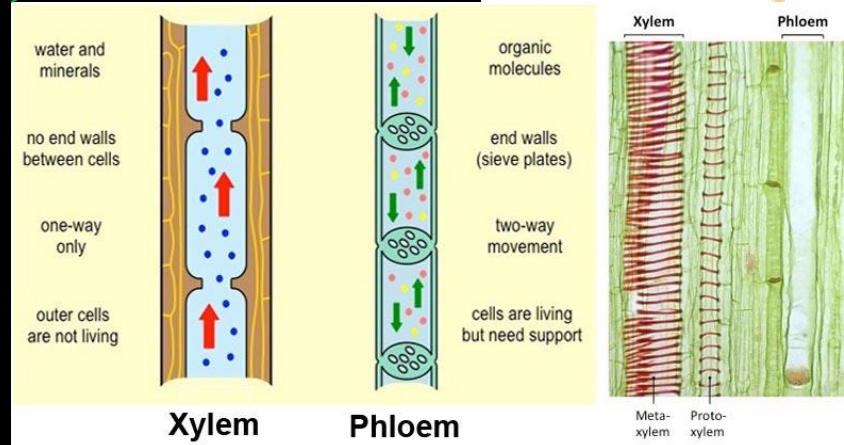
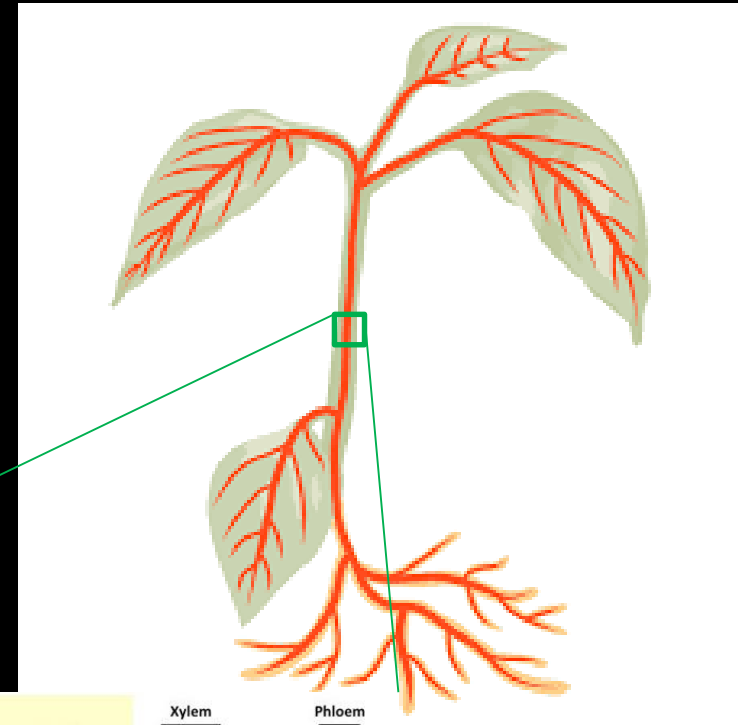
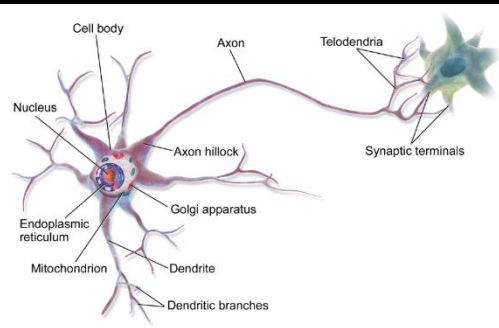
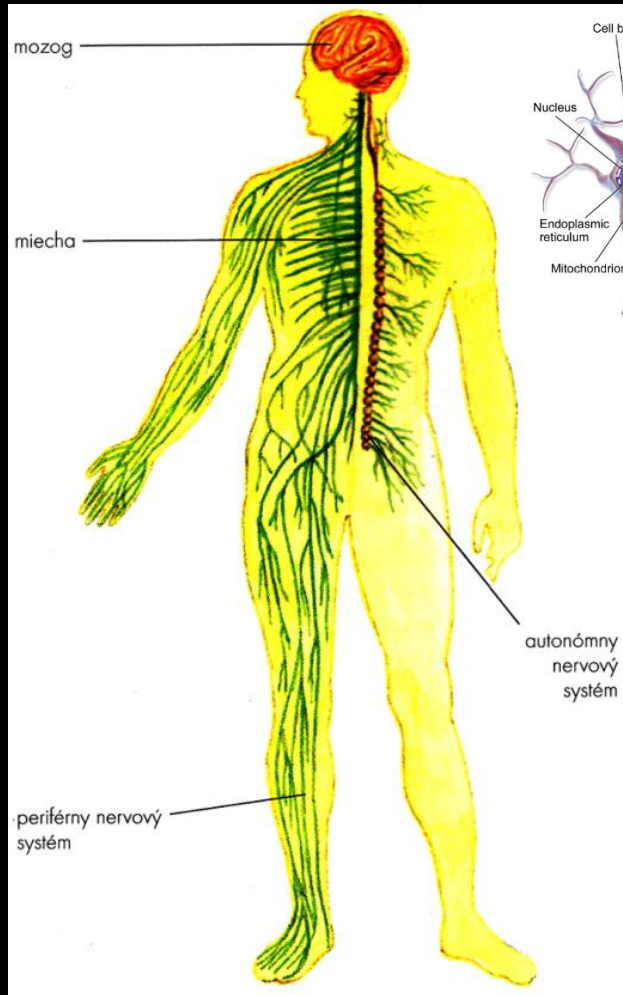
Mozog nižších stavovcov: predný, stredný, zadný

Mozog vyšších stavovcov: predĺžená miecha, zadný mozog (most a mozoček), stredný mozog, medzimotoz a predný mozog.

- Obvodová nervová sústava (periférne nervy)



Rastliny nemajú nervovú sústavu



... dokážu však prenášať elektrické signály



Elektrické signály v rastlinách



- Klasická doktrína tvrdí, že elektrické signály sa prenášajú nervovým systémom špecializovanými bunkami neurónami.
- Nervový systém je vysoko komplexný systém u živočíšných organizmov, ktorý prenáša elektrické signály v rôznych častiach tela.
- Objavom elektrických signálov v rastlinách je nutné túto definíciu zmeniť, inak musíme byť schopní akceptovať existenciu nervového systému a neurónov v rastlinách.
- Svojou komplexnosťou je možno porovnať k difúznej nervovej sústave.
- Rastliny majú mnohé molekuly, ktoré zohrávajú úlohu v šírení elektrického vzruchu živočíchov (GABA, glutamát a ich receptory, synaptotagmin atď).

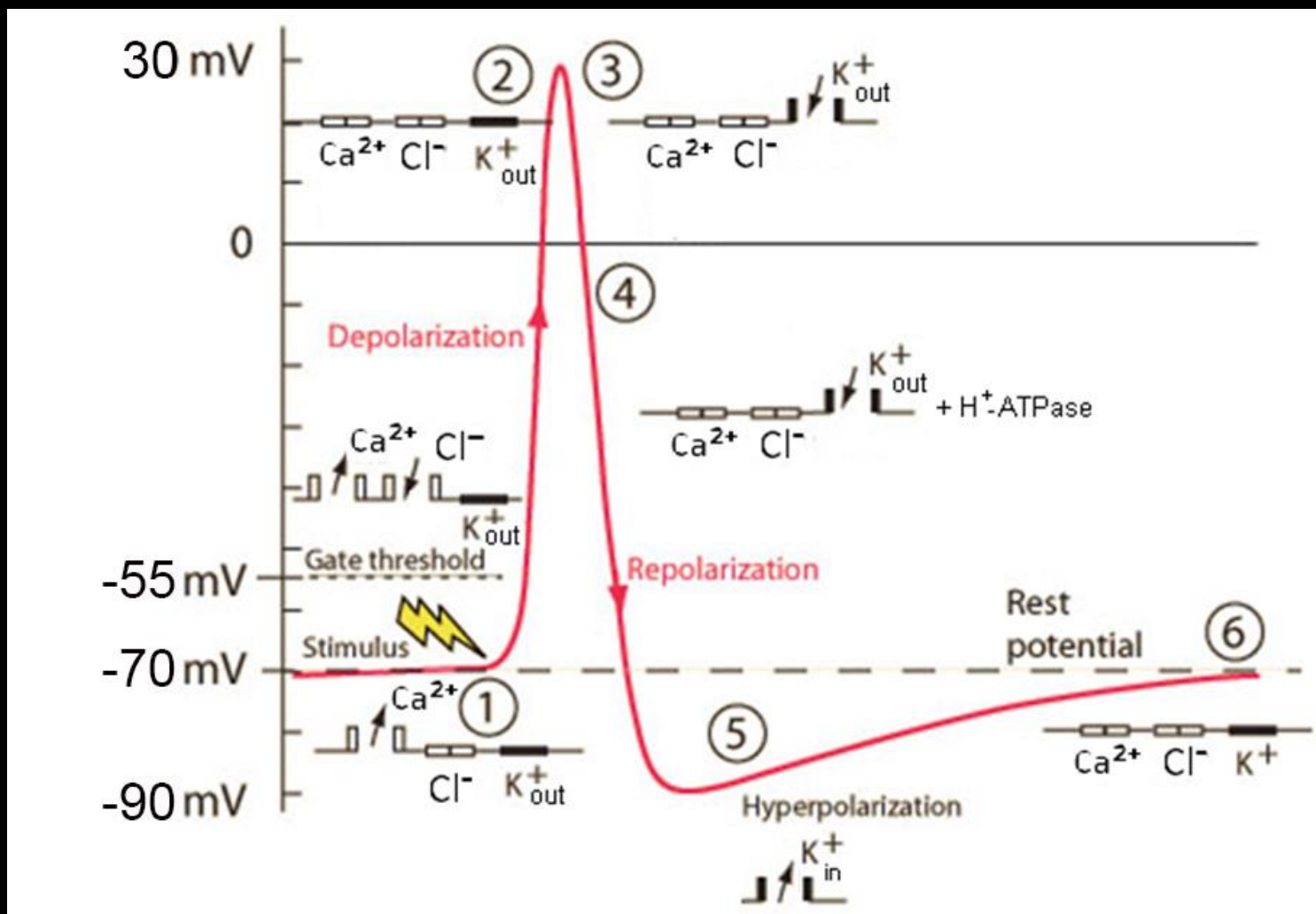
Dva typy elektrických signálov v rastlinách:

- Akčné potenciály (AP)
- Variačné potenciály (VP)

Akčné a variačné potenciály v rastlinách

- **Akčné potenciály (AP)** – vznikajú v odpovedi na chlad alebo dotyk.
- toky Ca^{2+} , Cl^- , K^+ cez membránu, iónové kanály stále nie sú známe.
- **1) pokojový potenciál** (H^+ -ATP-ase)
- **2) depolarizácia** (Ca^{2+} influx, Cl^- efflux),
- **3) repolarizácia až hyperpolarizácia** (3, efflux K^+ a H^+),
- **4) obnovenie pokojového potenciálu** (4, influx K^+)
- V rastlinách sa šíria cestou najmenšieho odporu kontinuitou cytoplazmatickej membrány v bunkách floému a cez plazmodezmy.
- Intenzita stimulu, neovplyvňuje amplitúdu AP.
- Počas dráhy svojho šírenia si udržiavajú konštantnú amplitúdu.
- V porovnaní so živočíchmi sú:
 - dlhšie (ms vs. s)
 - pomalšie ($1 - 100 \text{ m s}^{-1}$ vs. $2 - 4 \text{ cm s}^{-1}$)
- “*All or nothing*” character.

Akčný potenciál v rastlinnej bunke

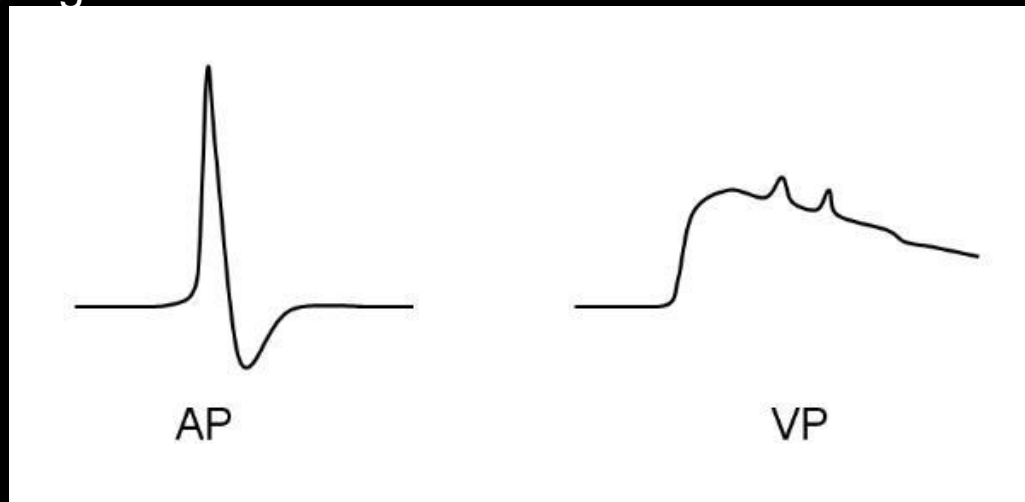


Porovnanie akčných potenciálov

živočích/ rastlina	Cell type	Resting potential (mV)	Amplitúda (mV)	AP trvanie (ms)	Rýchlosť šírenia (m/s)
hlavonožce (<i>Loligo</i>)	Giant axon	-60	120	0.75	35
obrúčkavce (<i>Lumbricus</i>)	Median giant fiber	-70	100	1.0	30
hmyz (<i>Periplaneta</i>)	Giant fiber	-70	80–104	0.4	10
obojživelníky (<i>Rana</i>)	Sciatic nerve axon	-60 to -80	110–130	1.0	7–30
cicavce (<i>Felis</i>)	Spinal motor neuron	-55 to -80	80–110	1–1.5	30–120
Venus flytrap (<i>Dionaea</i>)	trap parenchyma	-120	50-150	1000–2000	0.05–0.25
<i>Arabidopsis</i>	leaf parenchyma	-120	~70	90 000-160 000	0.01–0.04

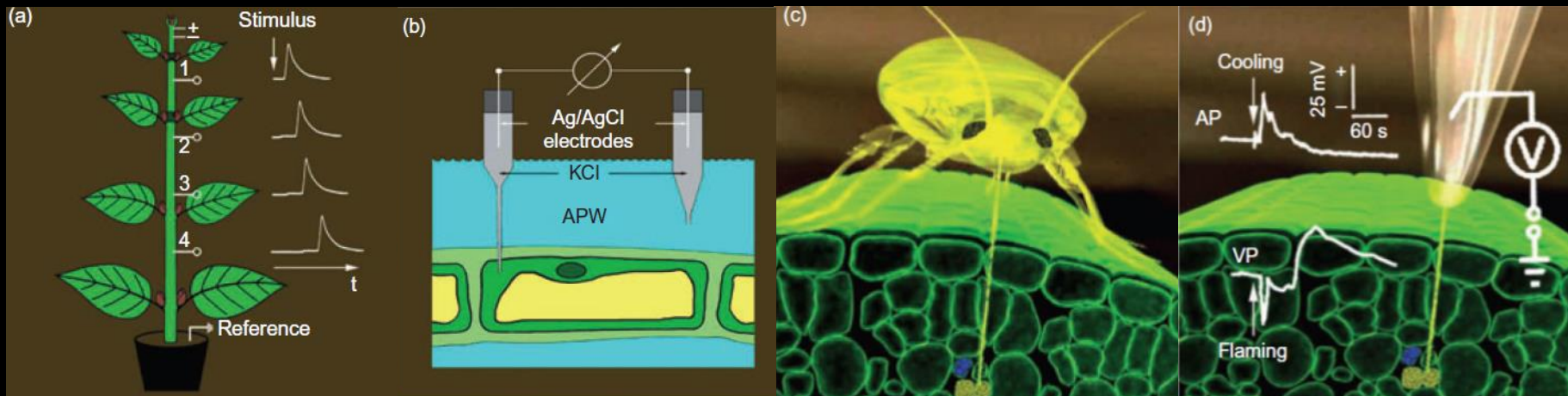
Variačný potenciál v rastlinách

- **Variačné potenciály (VP)** – vznikajú v odpovedi na poranenie (rezná rana, popálenie) a šíria sa ako hydraulická vlna v xyléme, ktorá ovplyvňuje priepustnosť mechanosenzitívnych/ligand-gated ionových kanálov, depolarizácia (Ca^{2+} influx), pomalá repolarizácia (aktiváciou H^+ - ATPáz).
- Rozdiely oproti AP: dlhá repolarizácia, amplitúda je ovplyvnená intenzitou stimulu, šíria sa ako tlaková vlna aj cez odumreté pletivo a môžu zasiahnuť akúkoľvek bunku v rastline.
- Amplitúda so vzdialenosťou klesá (2.5 % na cm).
- Často sa šíri ako tzv. kompozitný signál.



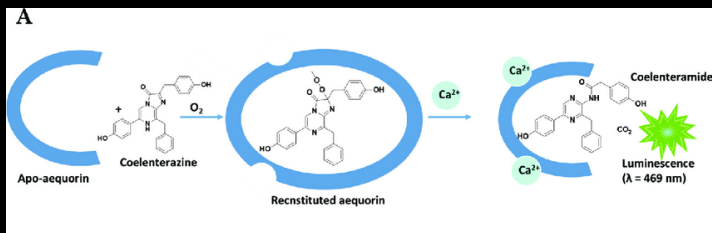
Meracie techniky - rastlinné EKG

- Extracelulárne - bioelektrická aktivita množiny buniek
 - snímanie elektrickej aktivity po dlhší čas
- Intracelulárne - bioelektrická aktivita jedinej bunky
 - snímanie bioelektrickej aktivity 1 - 2 hodiny
 - pomocou vošiek



Meracie techniky - imaging

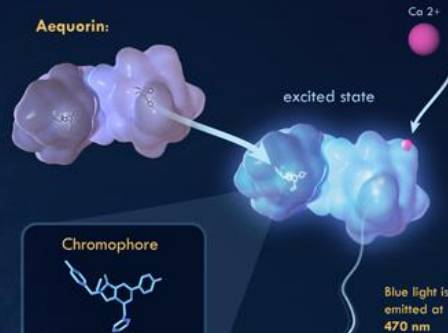
- Aequorin z *Aequorea victoria*.
- Transgénne rastliny *Arabidopsis thaliana* s génom pre apoaequorine.
- Kofaktor coelanterazin.
- Meranie luminiscencie za použitia citlivej CCD kamery



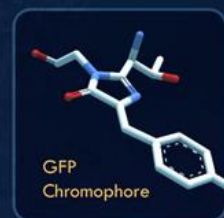
The Bioluminescence of Green Fluorescent Protein in *Aequorea victoria*

Aequorea victoria is known for its naturally occurring green fluorescence around the ring of its bell, in large thanks to the presence of two fluorescent proteins: Aequorin and Green Fluorescent Protein (GFP).

The process begins when calcium ions bind to the chemiluminescent Aequorin, a protein with lu in the middle of each of its two subunits. Once the calcium is bound, the chromophores begin to emit blue light at 470nm.

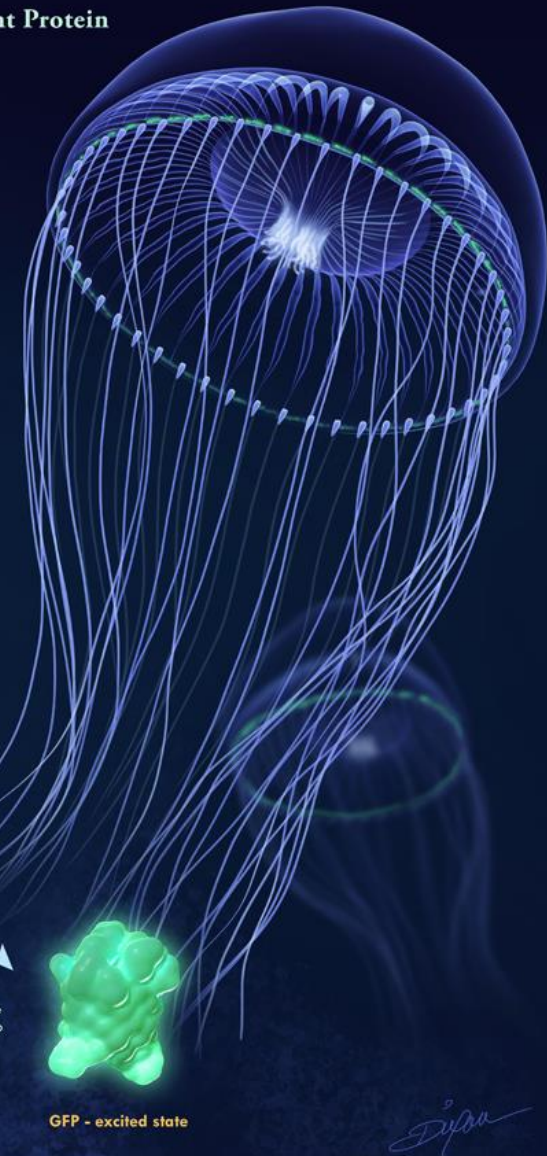


The light emitted by Aequorin's chromophore causes the chromophore of GFP to become excited.

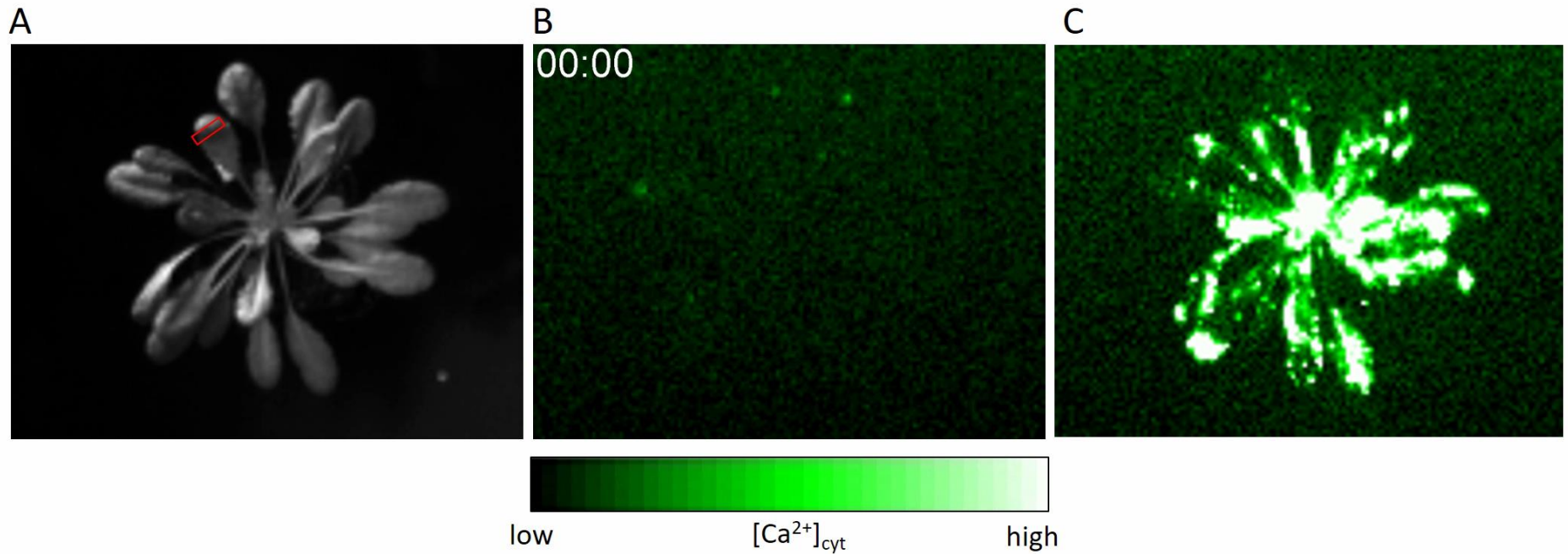


GFP contains a naturally built chromophore consisting of a special sequence of 3 amino acids: Serine, Tyrosine, and Glycine. When the chromophore receives blue light from aequorin, it becomes excited and emits its very own green light.

GFP - excited state

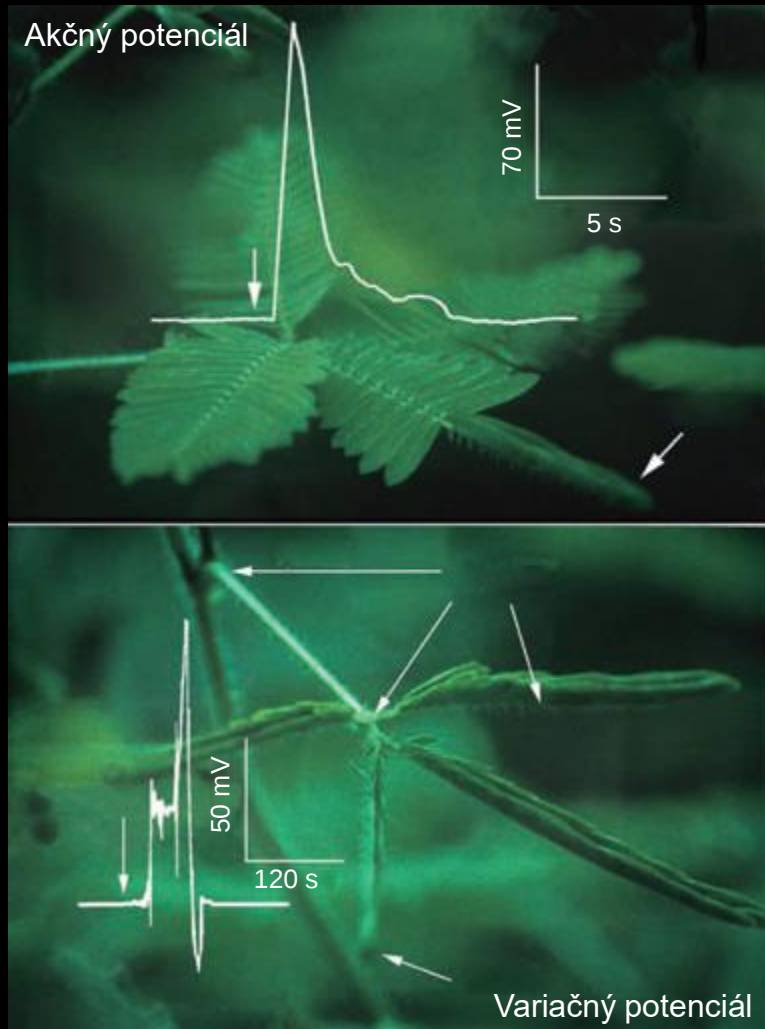


Imaging - príklad



- transgénná rastlina *Arabidospis thaliana* s apoaequorinom.

Modelový druh 1: Citlivka (*Mimosa pudica*)



Variačné potenciály inhibujú fotosyntézu

- Variačné potenciály sa šíria z miesta poškodenia po celej rastline (**systémová reakcia**) a inhibujú rýchlosť fotosyntézy, efektívny kvantový výťažok fotosystému II a stomatálnu vodivosť.

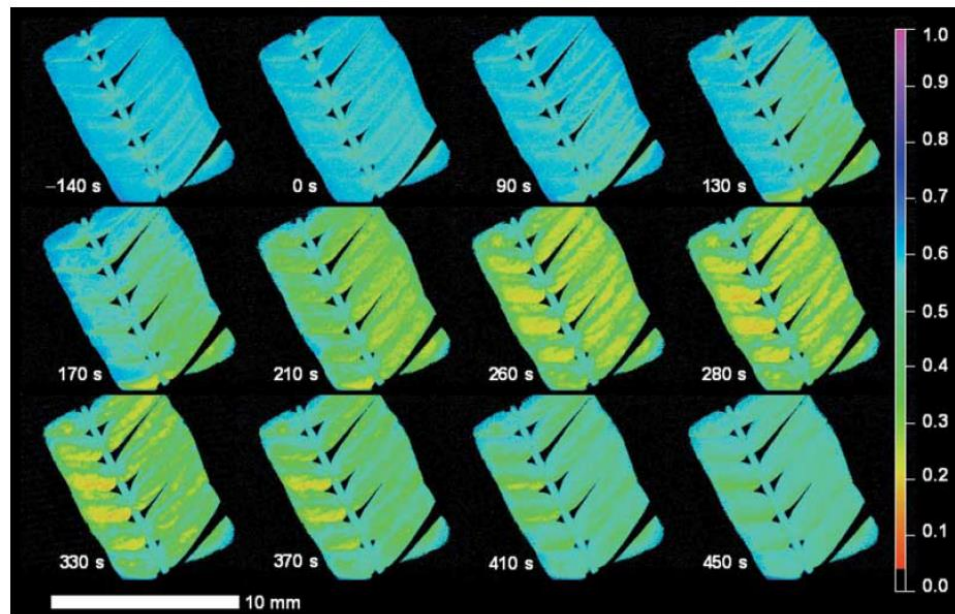
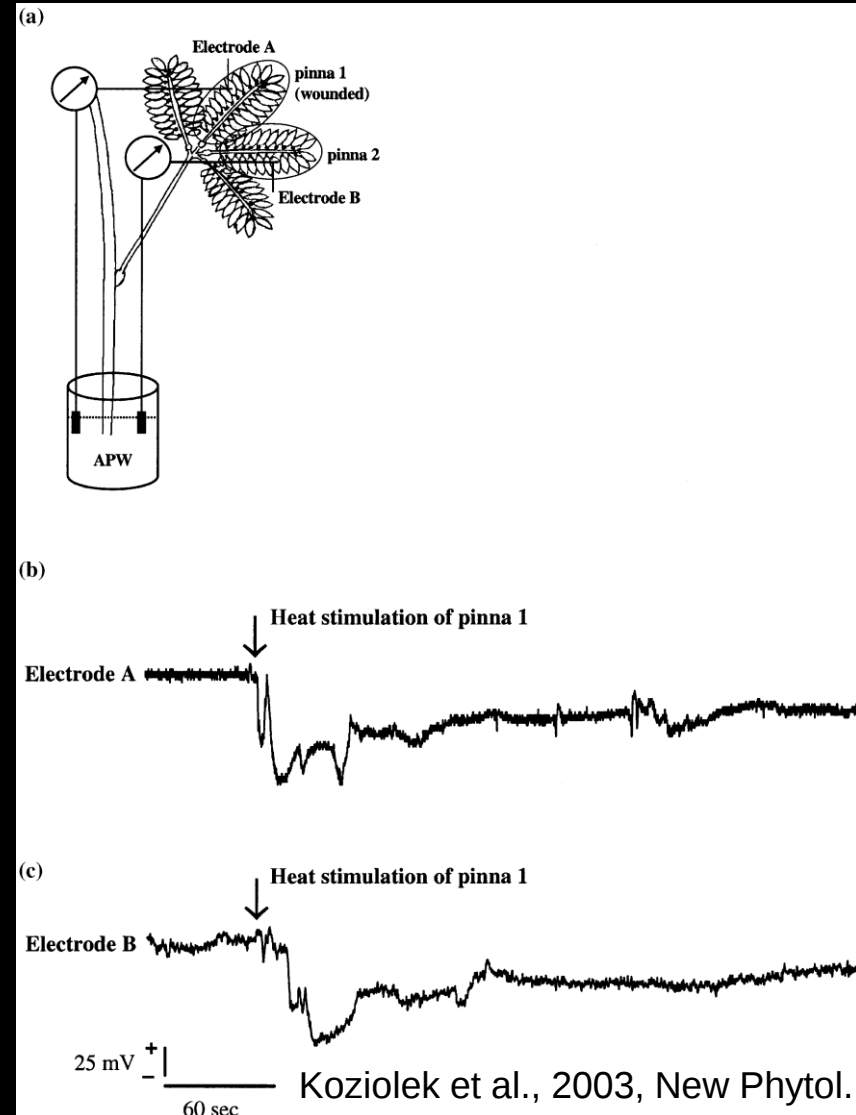
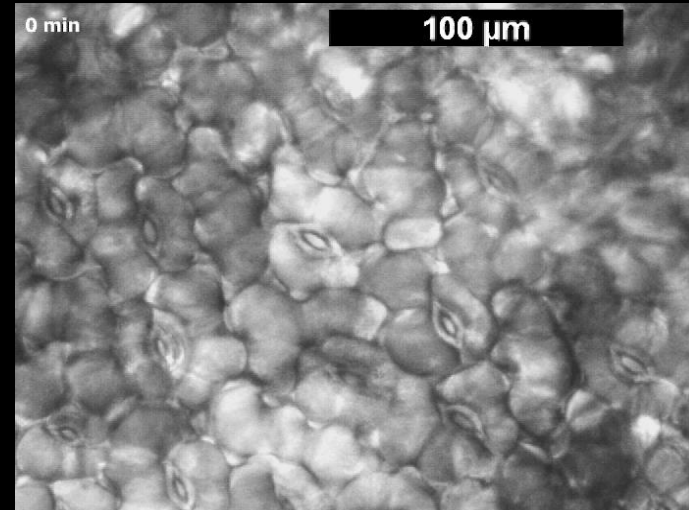
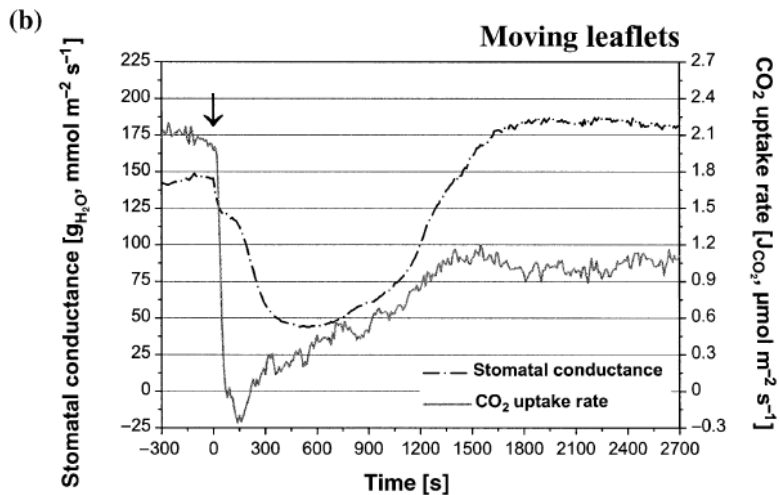
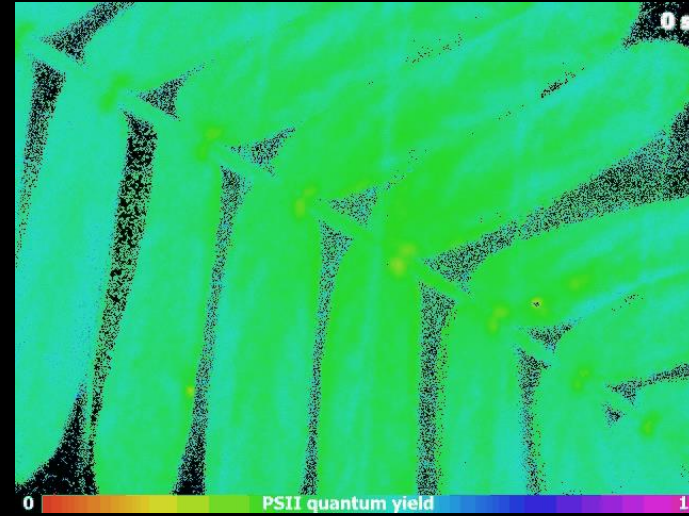
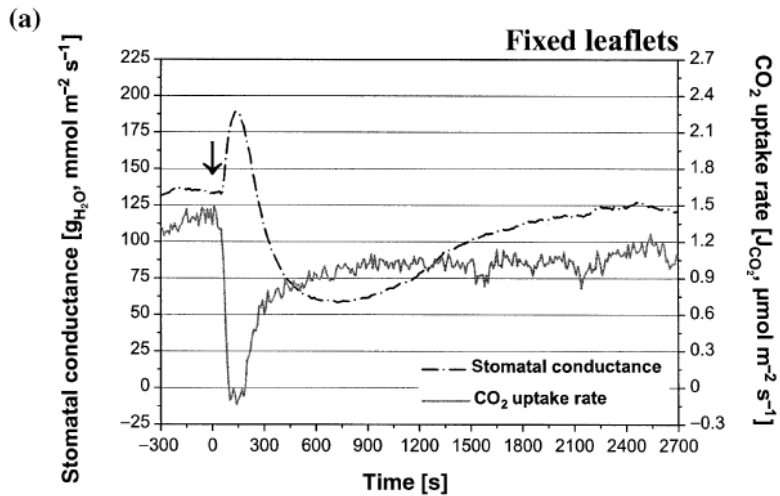


Fig. 2 Spatiotemporal changes of PS II quantum yield, $\Delta F/F_m$, assessed by chlorophyll fluorescence imaging. The imaged area (l: 15 mm; w: 10 mm) covers pinna 2, while the neighbouring pinna 1 was heat stimulated. Times are given relative to the instant of injury (at time 0). Changes of $\Delta F/F_m$ were not visible before 90 s. Bar translates the false colour code to values of $\Delta F/F_m$.



Variačné potenciály inhibujú fotosyntézu



Modelový druh 2: Solanaceae

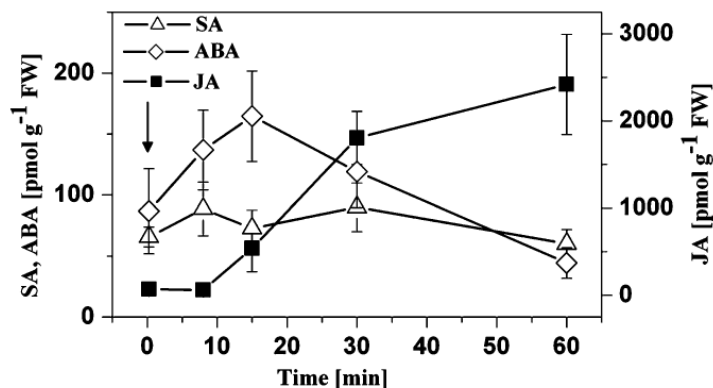
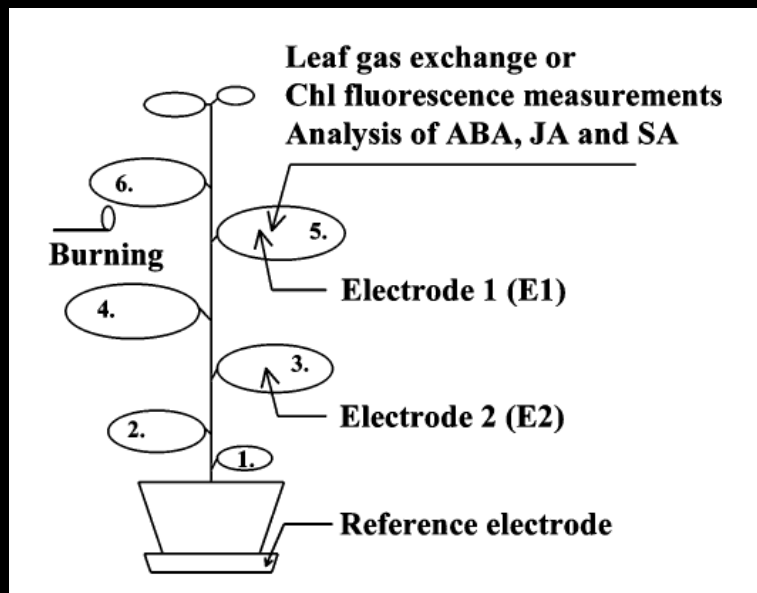


Fig. 4 Endogenous concentrations of ABA, JA, and SA in the fifth tobacco leaf 0, 8, 15, 30, and 60 min after burning (time = 0, arrow) of the upper (sixth) leaf. Mean values $\pm$ SD, $n=4-5$

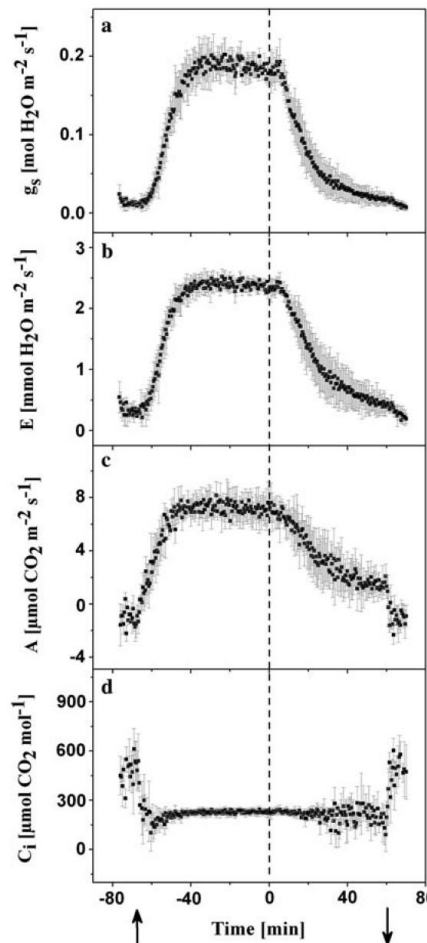
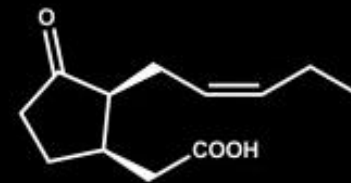


Fig. 2 Responses of the fifth tobacco leaf following local burning (time = 0 min, dashed line) of the upper (sixth) leaf with respect to stomatal conductance (g_s , a), rate of transpiration (E , b), rate of CO₂ assimilation (A , c), and intercellular CO₂ concentration (C_i , d). Arrows indicate times when the actinic light (435 μmol photons m⁻² s⁻¹) was switched on (upward arrow) and off (downward arrow). Mean values $\pm$ SD, $n=4$

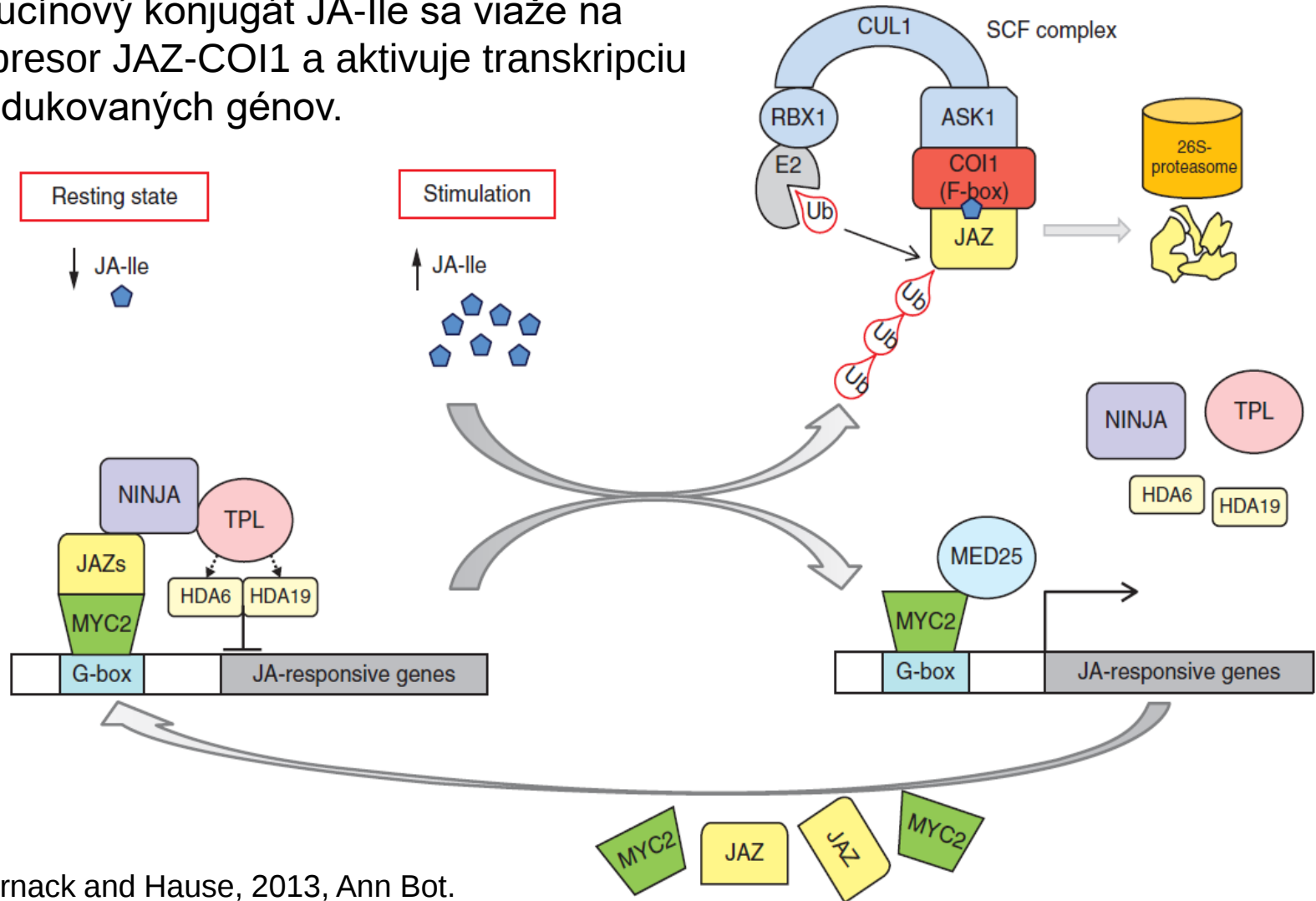
- Elektrické signály dokážu indukovať v systemicky indukovaných listoch akumuláciu kyseliny abscisovej (ABA) a jasmónovej (JA).



Kyselina jasmonová
(JA)

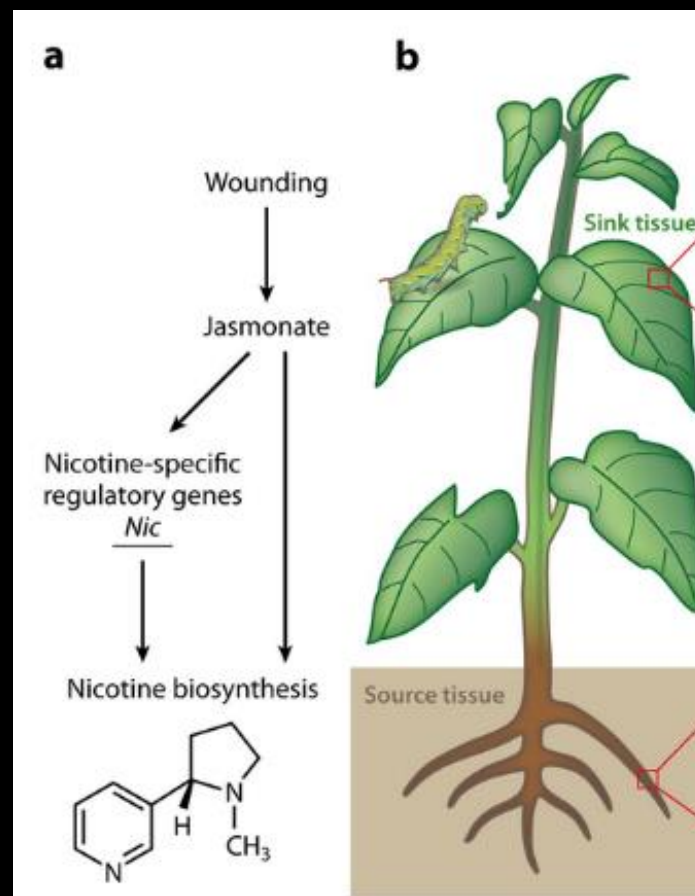
JA-Ile je bioaktívny konjungát

Izoleucínový konjungát JA-Ile sa viaže na korepresor JAZ-COI1 a aktivuje transkripciu JA-indukovaných génov.

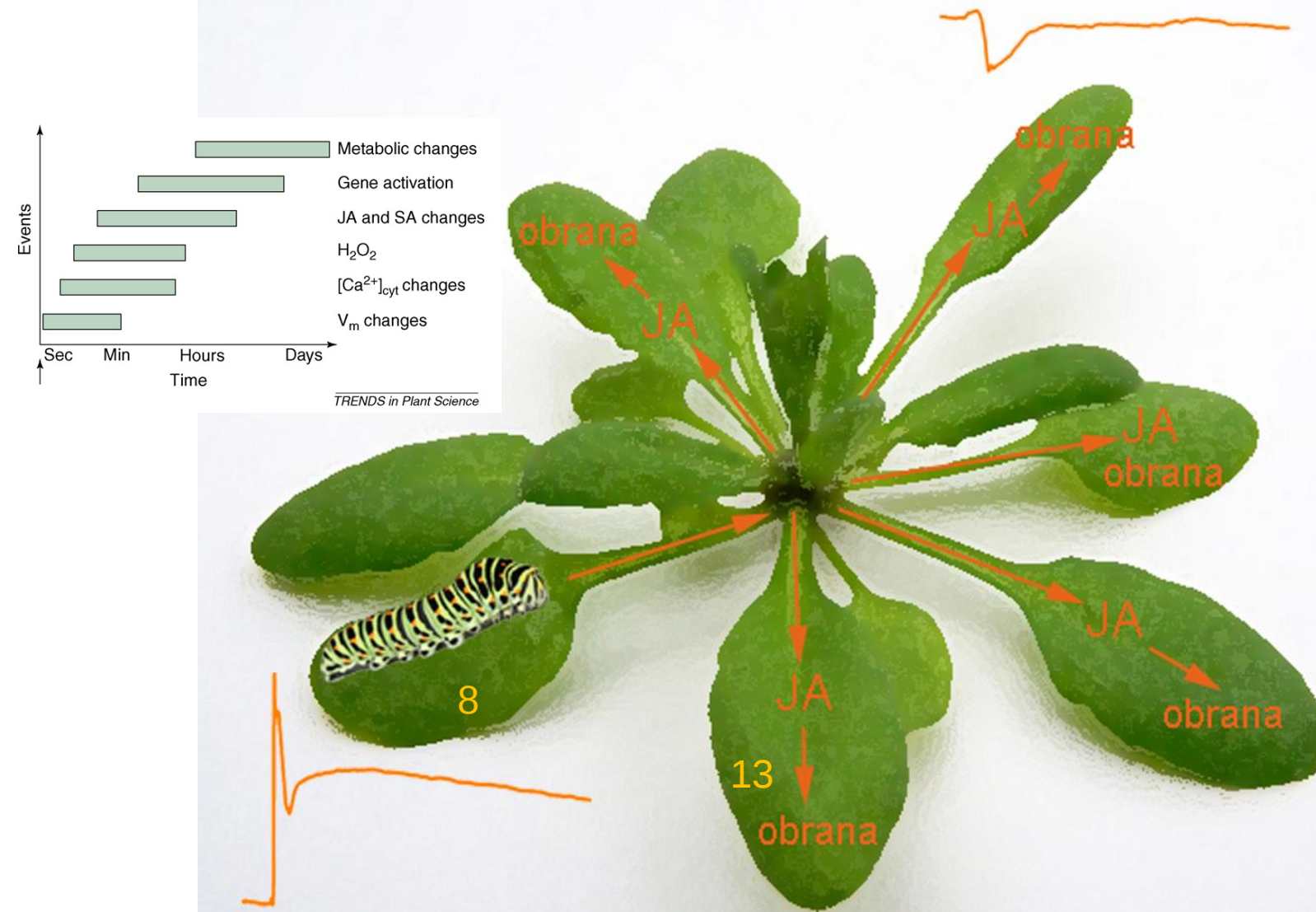


JA spúšťa obranné reakcie

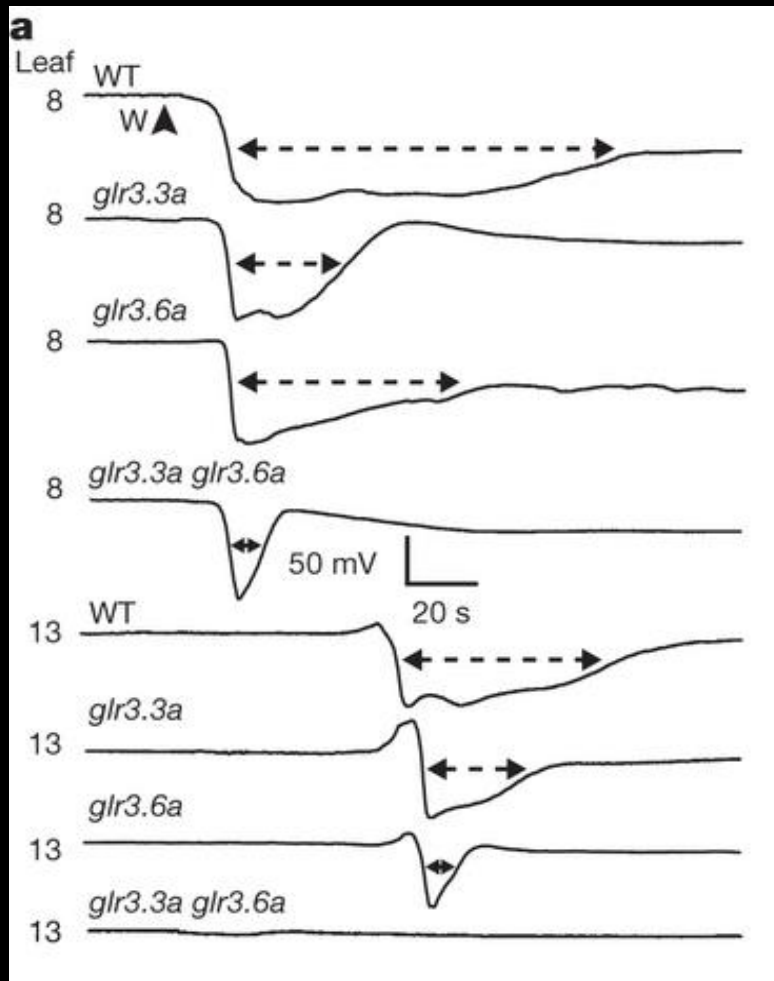
- JA aktivuje tvorbu enzýmov syntetizujúcich sekundárne metabolity, ktoré majú anti-herbivorný účinok (nicotín, vinblastín, artemisinin, camalexin, proteázové inhibítory PIN atď.).
- Tieto sekundárne metabolity sa indukujú nielen v rámci rastliny, ale pomocou volatilných látok (metyl-JA) sa môžu indukovať aj v susedných rastlinách.



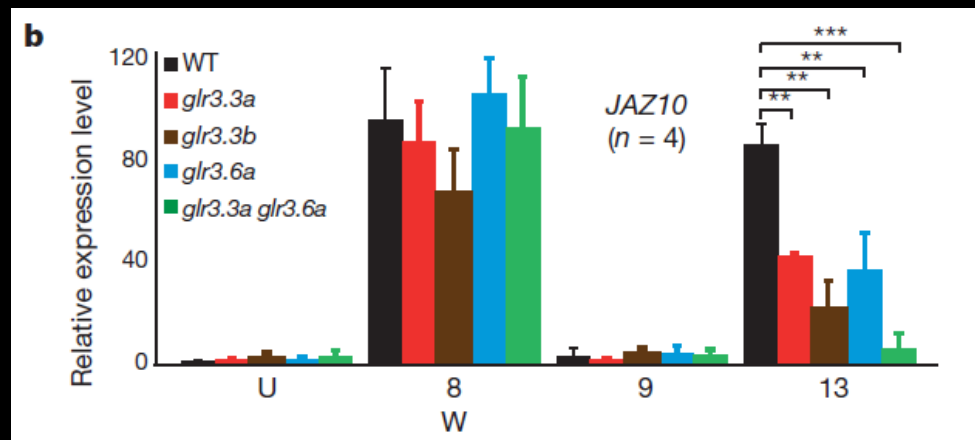
Modelový druh 3: *Arabidopsis thaliana*



Molekulárny mechanizmus systémovej odpovede

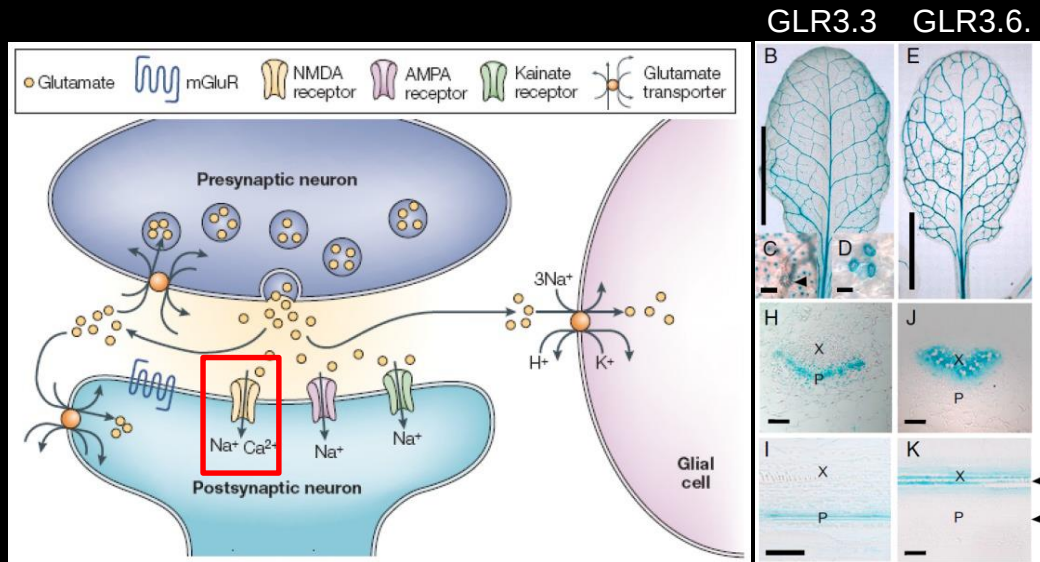


- *Arabidopsis* s nefunkčnými glutamátovými receptormi GLR3.3. a GLR3.6. nie je schopný šíriť elektrický signál.



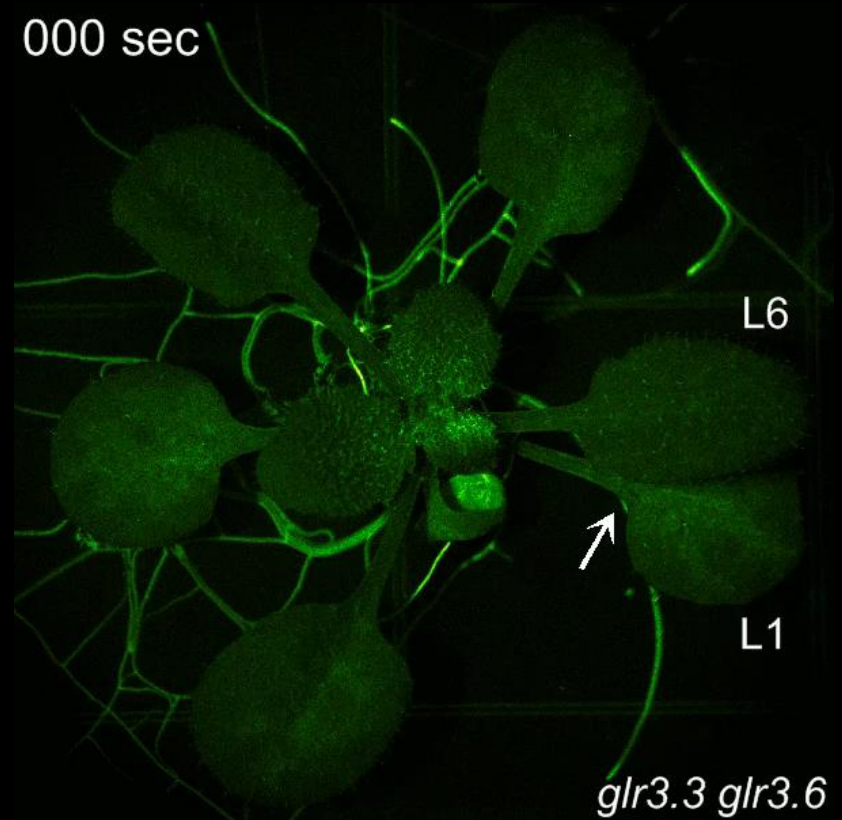
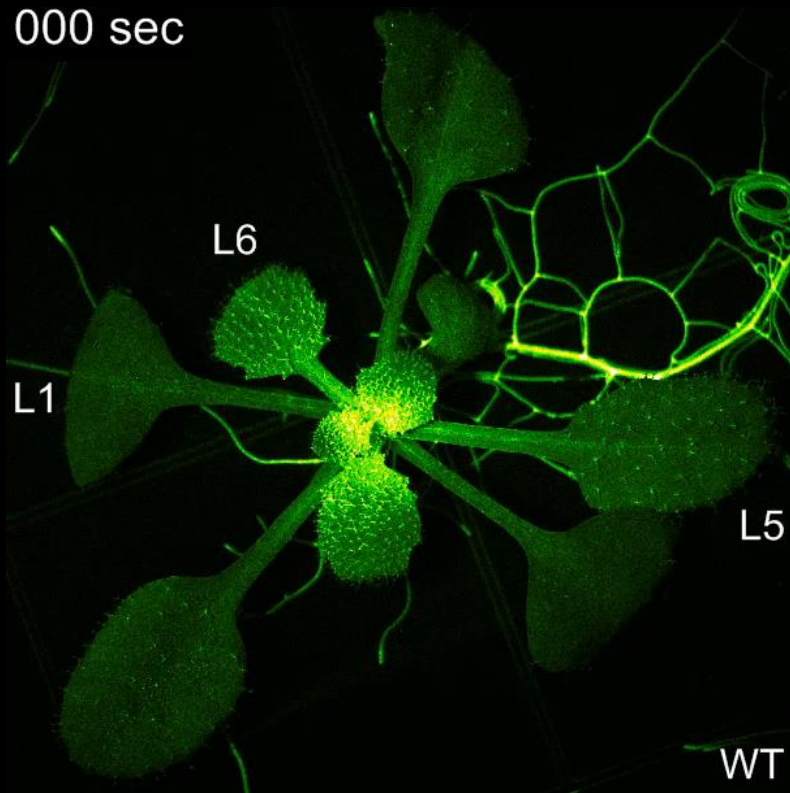
Ako glutamátové receptory spúšťajú elektrický signál

- GLR (*glutamate like receptor*) – homológny glutamátovým ionotropným NMDA receptorom - kanál pre Ca^{2+} aktivovaný L-glutamátom.



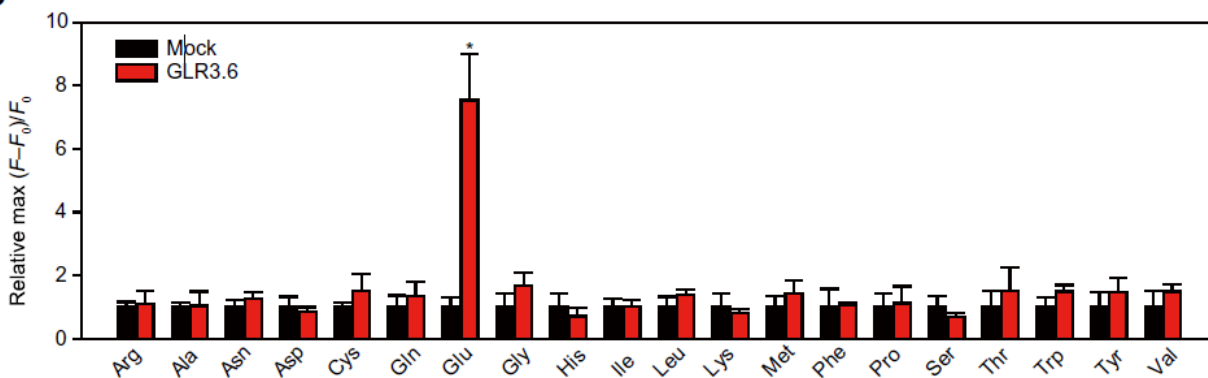
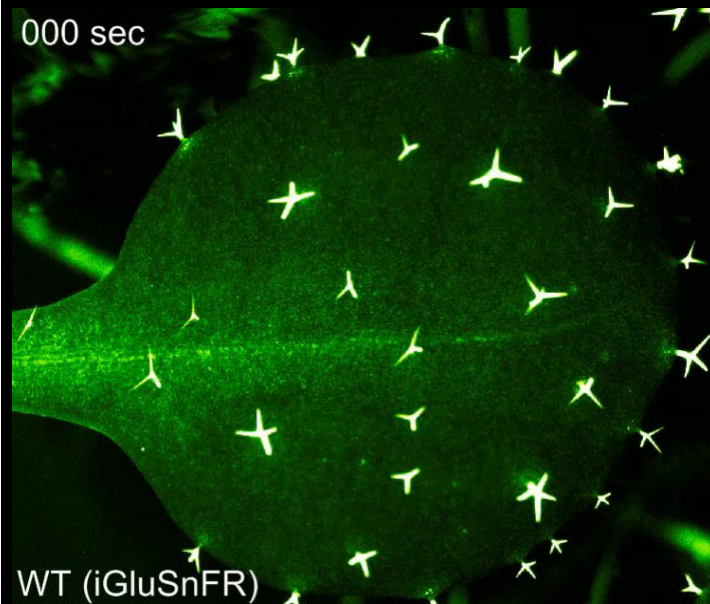
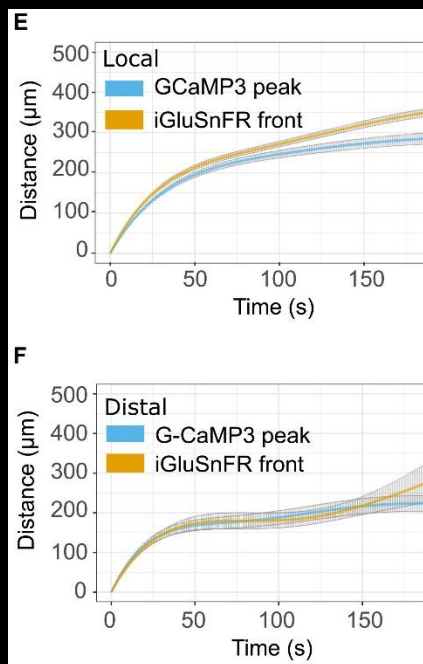
- Poranenie alebo napadnutie herbivorom indukuje systémovú vlnu Ca^{2+} .
- Ca^{2+} - biosensor – GCaMP3 alebo apoaequorin
- glr3.3a glr3.6a* – negenerujú Ca^{2+} vlnu

Glutamátové receptory sú zodpovedné za šírenie elektrických signálov



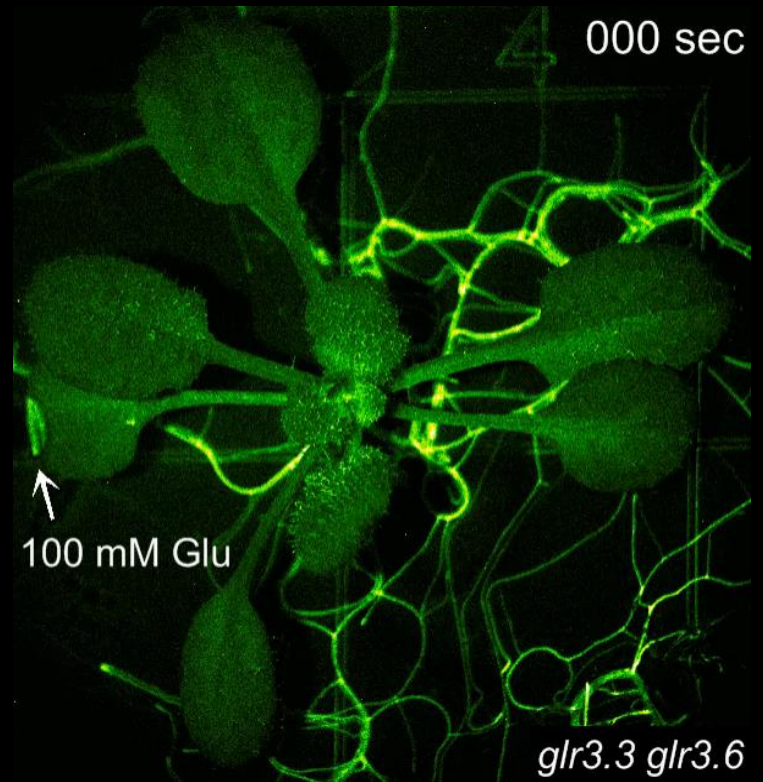
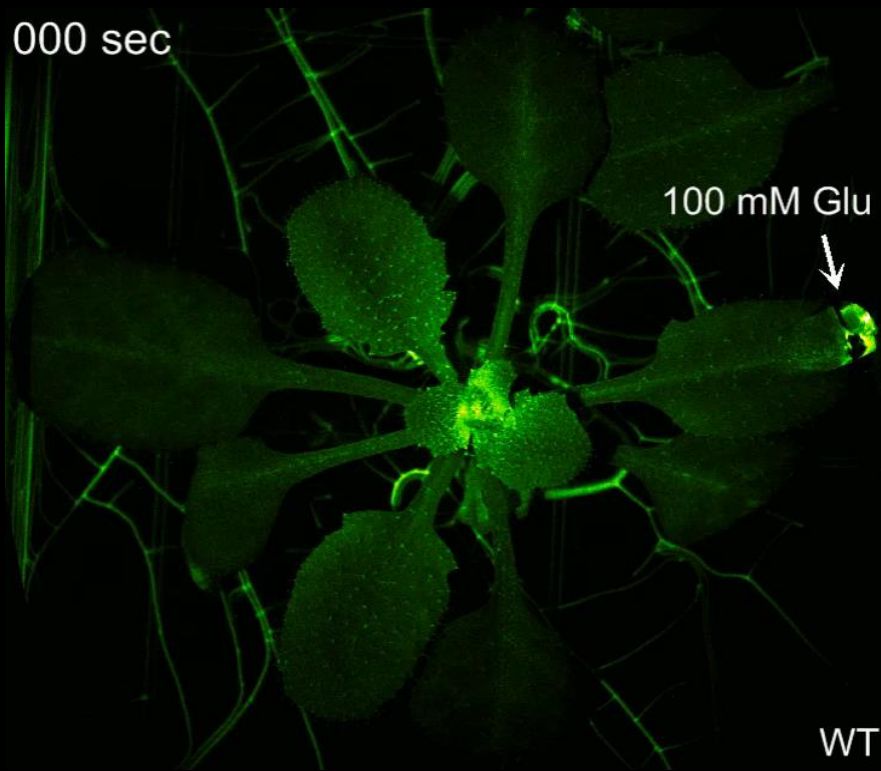
Glutamát je zodpovedný za šírenie elektrického signálu v rastlinách.

- Exogénna aplikácia glutamátu mimikuje poranenie.
- Biosensor glutamátu – (iGluSnFR). Poranenie indukuje uvoľnenie glutamátu z listov a ten aktivuje GLR kanály.

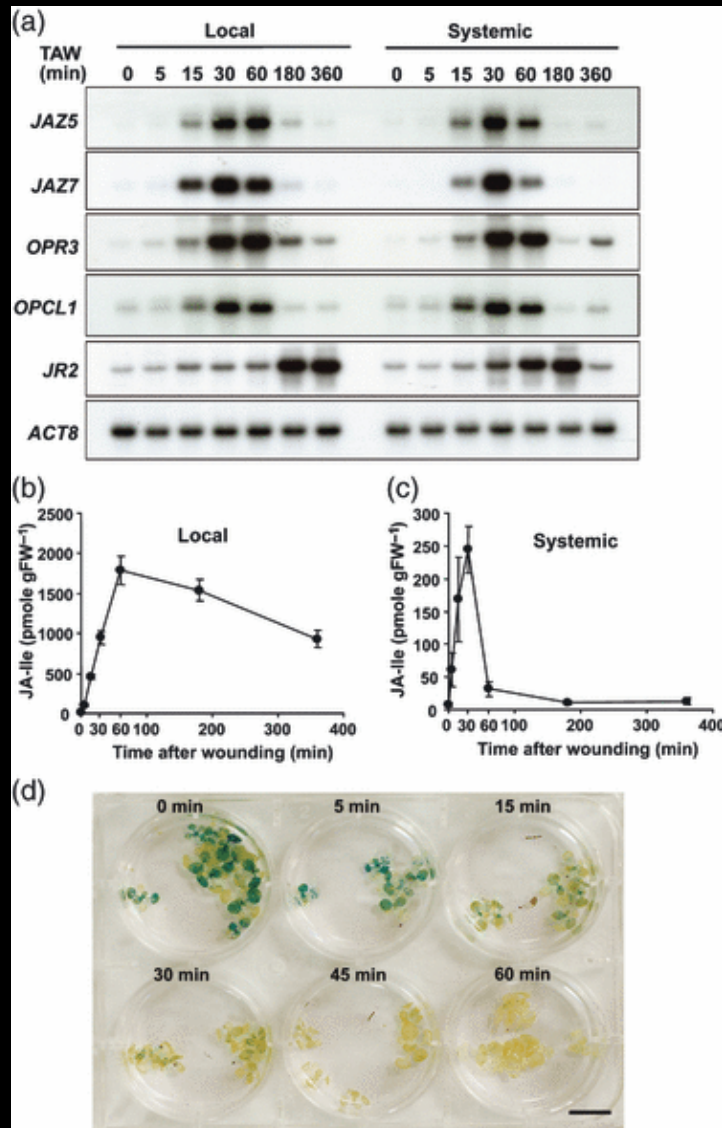


Toyota et al., 2018, Science
Shao et al., 2020, Science Signal
Bellandii et al., 2022, Science Adv.

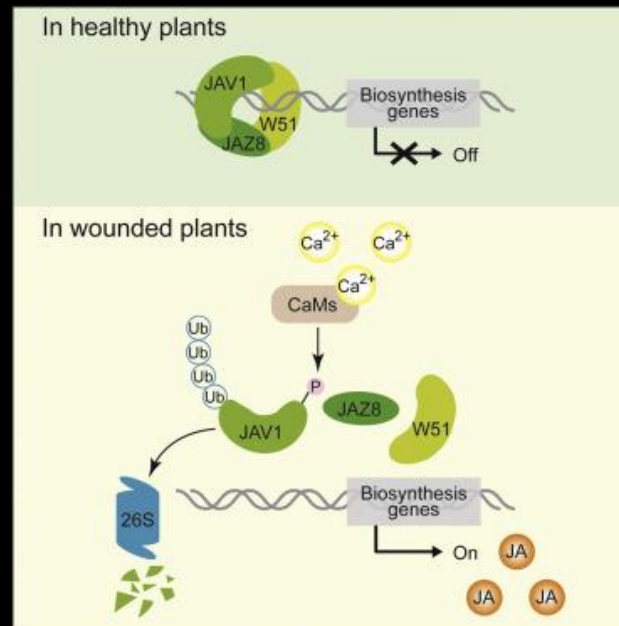
Glutamát je zodpovedný za šírenie elektrického signálu v rastlinách.



Ca²⁺ prepája elektrický signál a akumuláciu jasmonátov



- JJV (JAV1-JAZ8-W51) komplex je represorom JA biosyntetických génov.
- Influx Ca²⁺ prostredníctvom kalmodulínu fosforyluje JAV1, čo spôsobí dezintegráciu JJV komplexu a aktiváciu expresie génov kódujúcich enzýmy syntetizujúce jasmonáty.



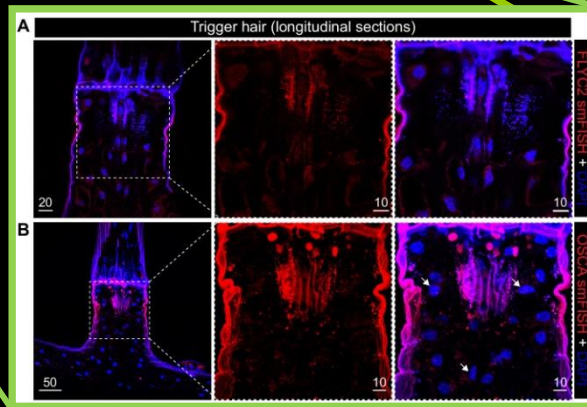
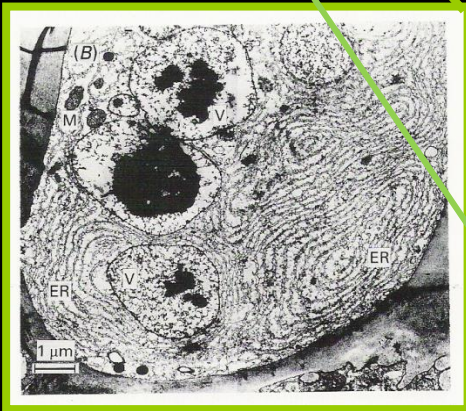
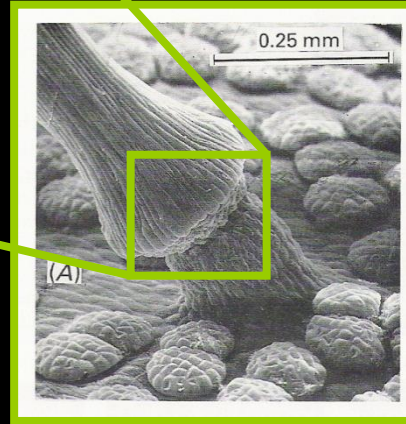
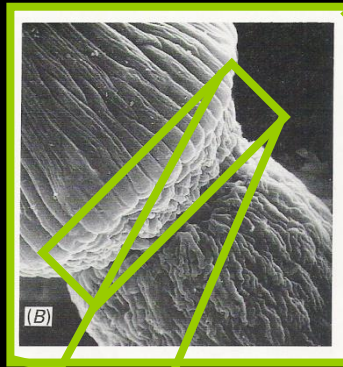
Modelový druh 4: mucholapka americká (*Dionaea muscipula*)

- Charles Darwin označil mucholapku americkú (*Dionaea muscipula*) za najpodivuhodnejšiu rastlinu sveta.
- Sir John Burdon Sanderson na žiadosť Ch. Darwina objavuje elektrickú aktivitu v mucholapke (1873).
- Prvá správa o akčných potenciáloch (AP) v rastlinách.



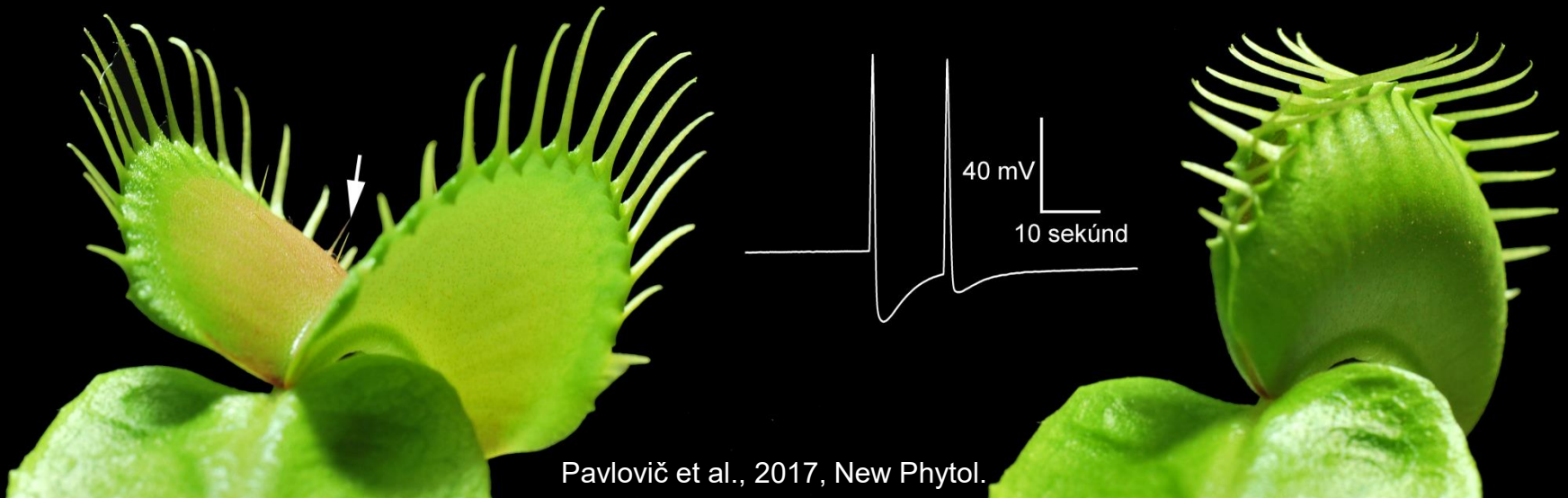
of the *Dionaea*, which I look
at as the most wonderful
plant in the world.
If you do visit the proper
district I should be very much
obliged if you wd open a dozen
oldish leaves to see what sized
insects they capture.
I am aware that a very minute
insect wd start the leaf, but
I suspect that they wd generally
escape through the apertures
at the bases of the spikes
before they are completely
interlocked.
With my best thanks,
believe me dear Sir
yours faithfully
Ch. Darwin

Citlivé trichómy

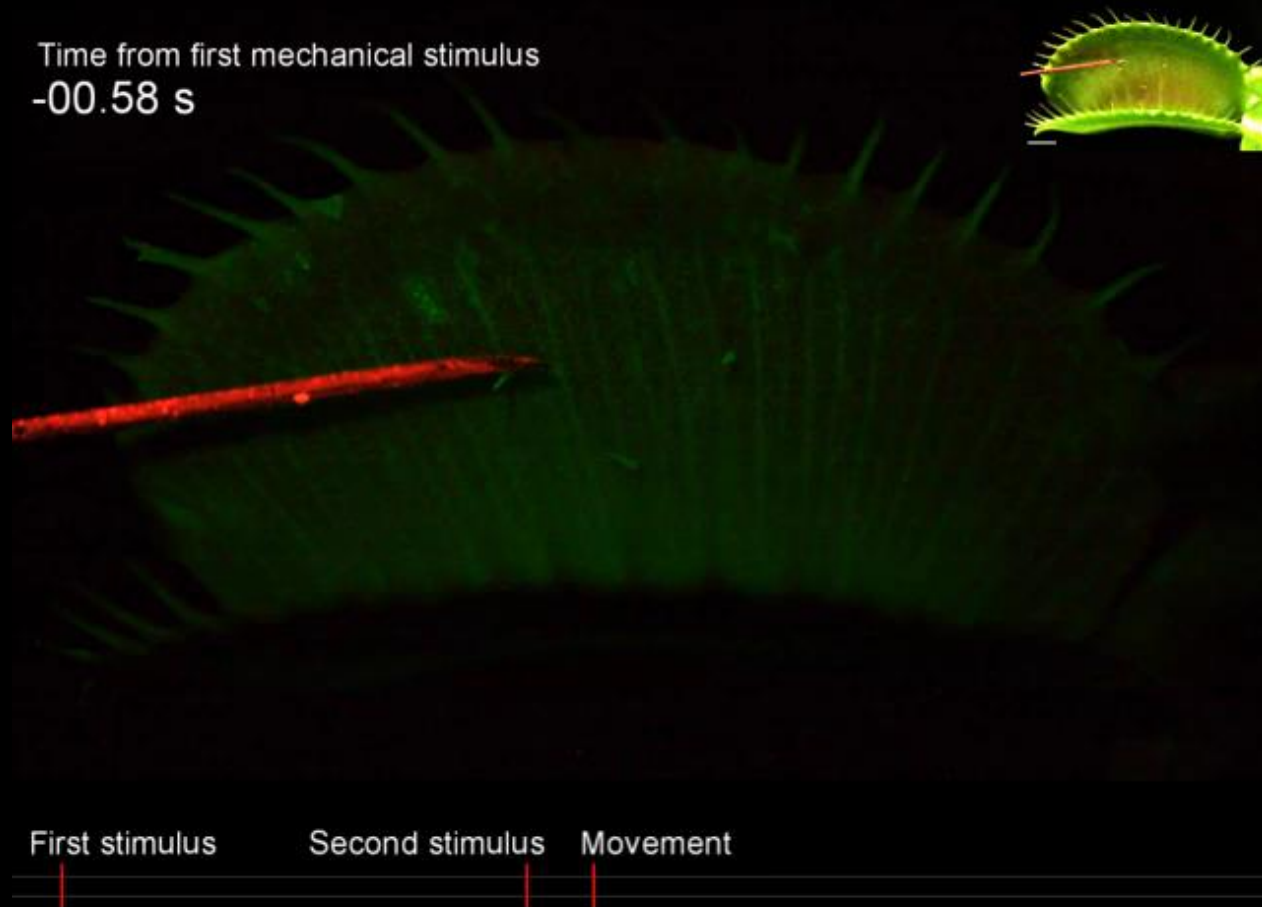


Indukcia akčných potenciálov v mucholapke

- Dotyk spúšťacieho trichómu je spojený s tvorbou AP a Ca^{2+} vlny.
- Dva dotyky spustia 2 AP a pasca rýchlo sklapne (0.5 s).
- AP sa šíria iba v pasci a nezasahujú asimilačný list.



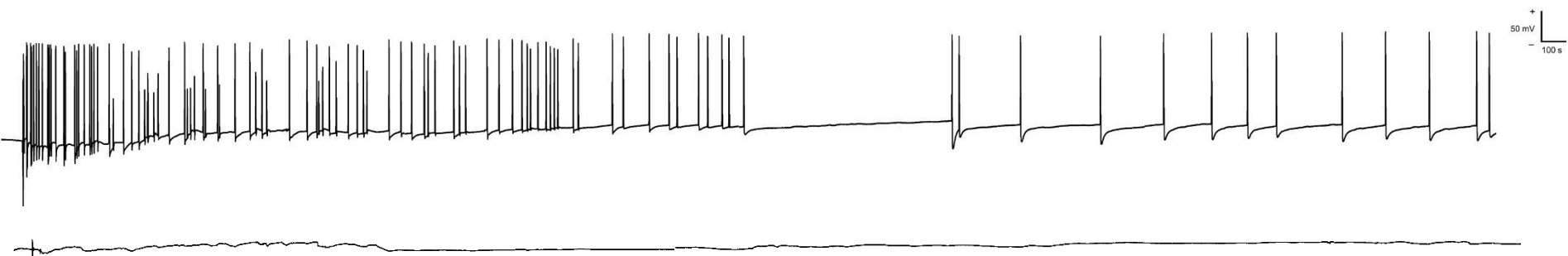
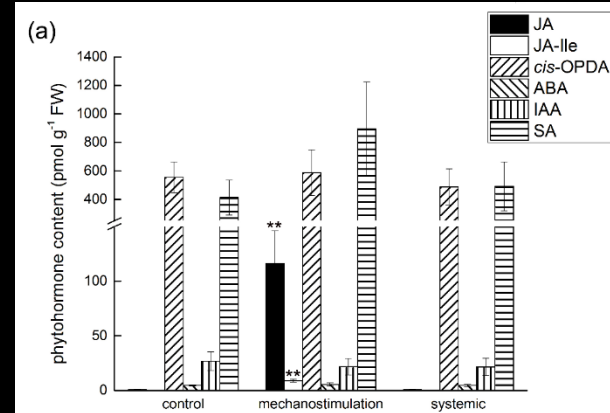
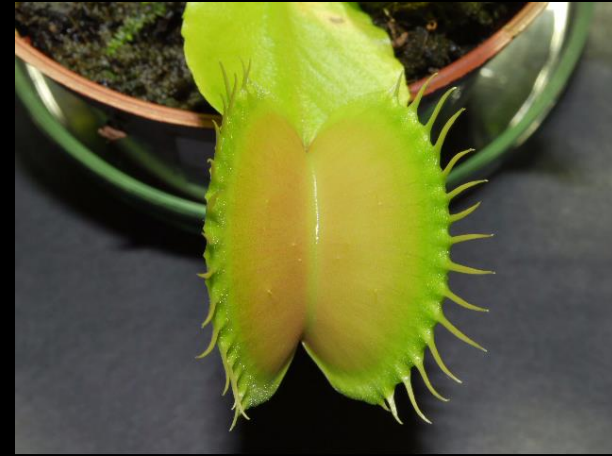
Vizualizácia elektrickej vlny



vápnikový sensor: GCaMP6f

Indukcia akčných potenciálov v mucholapke

- Bez ďalšieho pohybu koristi a elektrického stimulu sa pasca do 24 hodín znova otvorí.
- Pohyb koristi vo vnútri pasci neustále dráždi trichómy a rastlina tak generuje desiatky AP – šírenie elektrického signálu nie je systémové.
- V pasci sa akumuluje veľké množstvo jasmonátov (JA a JA-Ile).
- Spúšťa sa expresia a sekrécia enzýmov.



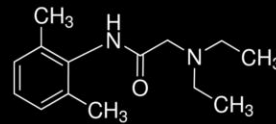
Anestetiká inhibujú šírenie nervového vzruchu

- **Anestetiká** sú látky, ktoré spôsobujú stratu vedomia (všeobecné anestetiká) a vnímania (lokálne anestetiká) inhibíciou šírenia elektrického vzruchu.
- **Lipidová teória** – lipofilné anestetiká sa rozpúšťajú v lipidových membránach neurónov a ovplyvňujú tak funkciu iónových kanálov.
- **Proteinová teória** – priama väzba anestetika na iónový kanál spôsobuje jeho neschopnosť šíriť nervový vzruch.
- Budú účinkovať aj na rastliny?

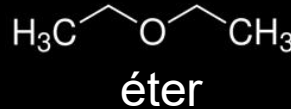


Anestetiká a ich vplyv na rastliny

- Niektoré typy anestetík pôsobia aj na rastliny (dietyléter, lidocain, xenon atď.). Inhibujú v nich elektrické signály. Po odstranení anestetík elektrická signalizácia opäť funguje.



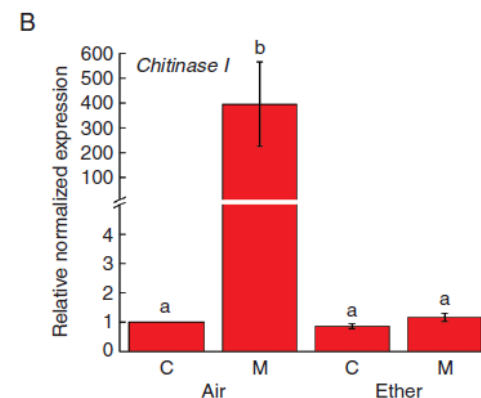
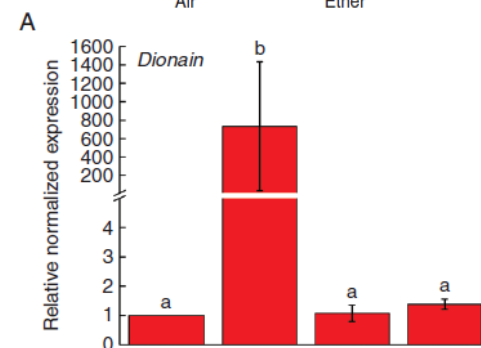
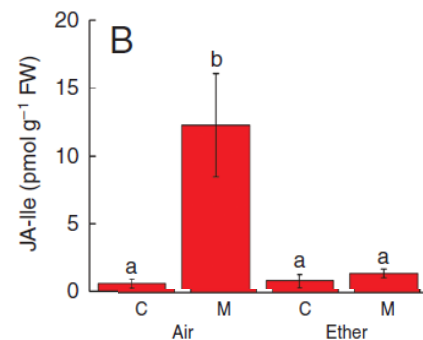
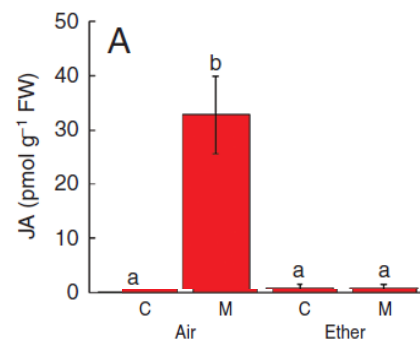
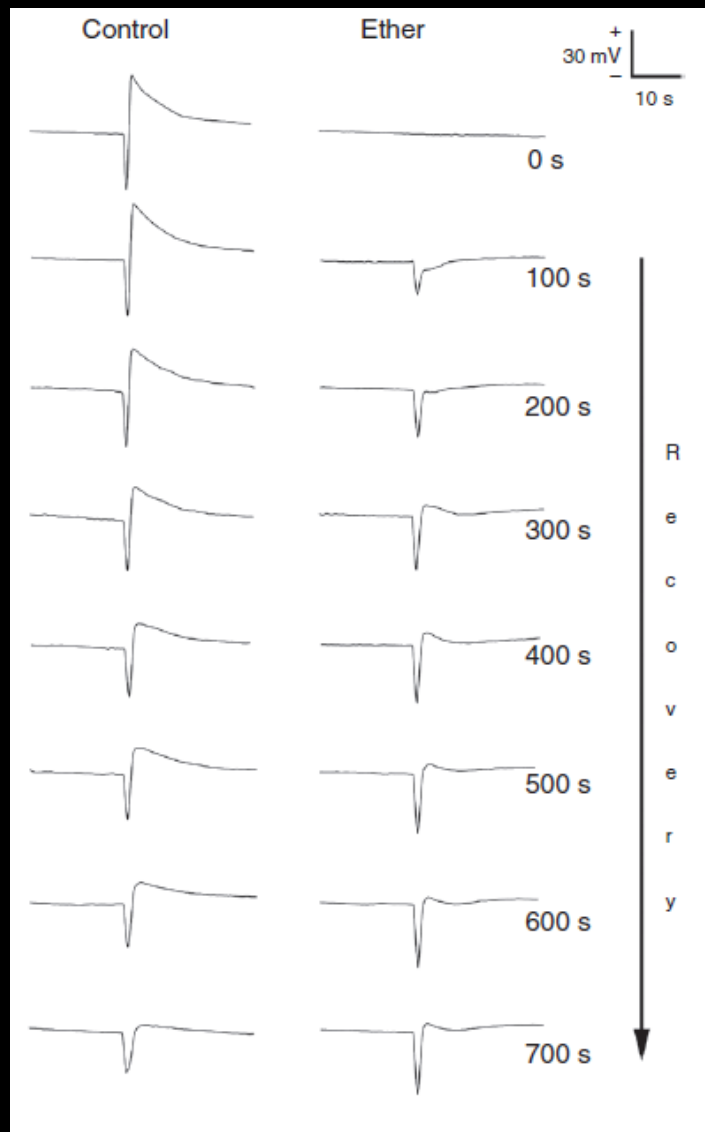
lidocain



éter

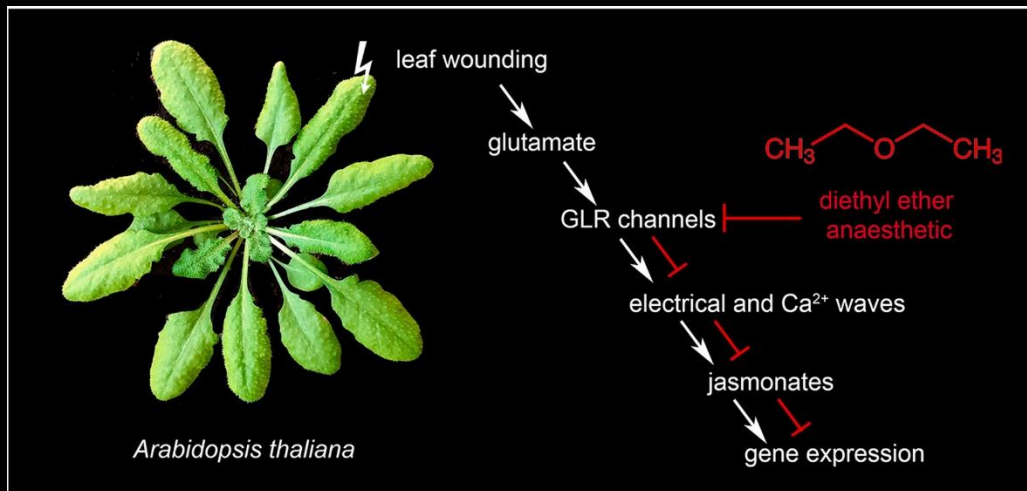


Anestetiká a ich vplyv na rastliny

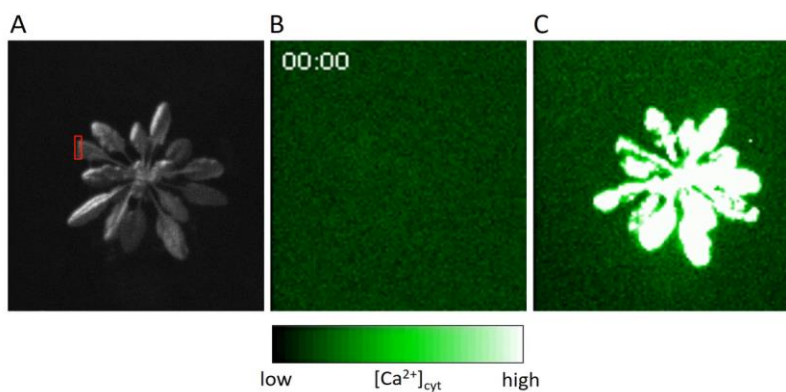


- Rastlina pod vplyvom anestézy nie je schopná aktivovať jasmonátovú signálnu dráhu.
- Nie je schopná vnímať korisť ani poranenie – neodpovedá na vonkajšie stimuly.

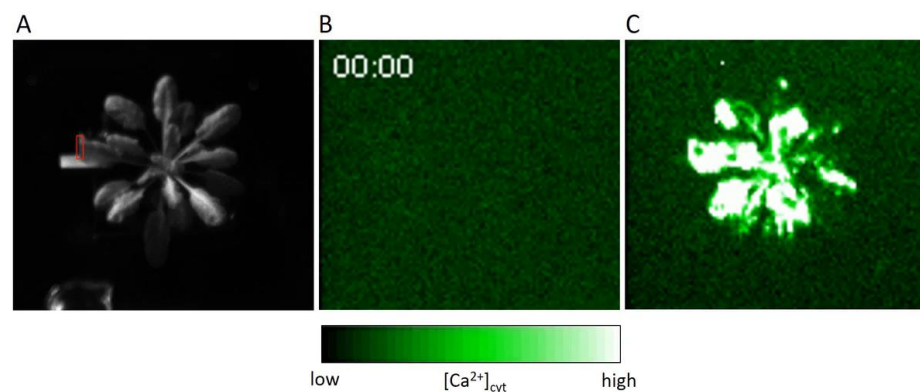
Anestetiká a ich vplyv na rastliny



- Dietyl éter inhibuje glutamát a GLR závislú elektrickú signalizáciu v *Arabidopsis*.



aplikácia glutamátu, kontrola



aplikácia glutamátu, dietyl éter

Take home message

- Živočíšne organizmy šíria elektrické signály prostredníctvom špecializovaných nervových buniek neurónov.
- Hoci rastliny neuróny nemajú, dokážu šíriť elektrické signály.
- Molekulárny mechanizmus je veľmi podobný a využíva ionotropné glutamátové receptory a glutamát ako ligand.