

Kvantové vedomie x kvantová neurónová sieť

Eva Schwardy, Andrej Turčan

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie FEI TU, 042 00 Košice

E-mail: Eva.Schwardy@tuke.sk, turcan@neuron.tuke.sk

Rozšírený abstrakt. Vedomie je jedným z kontroverzných a tajuplných problémov, ktoré stále veda uspokojivo nevyriešila, navyše reflektujúci samotnú našu povahu a vzťah ku skutočnosti. Väčšina prístupov k problému vedomia vníma mozog ako počítač s neurónmi a synapsiami účinkujúcimi ako prepínače. V tomto prístupe je vedomie považované za produkt „emergencie“ novej výpočtovej vlastnosti. Tento prístup však zlyháva, ak sa pokúša adekvátne vyrovnat' s nevysvetlenými črtami vedomia. Možno sú potrebné radikálnejšie prístupy.

Kvantová mechanika popisuje zdanlivo bizarné správanie hmoty a energie na submikroskopickej úrovni, t.j. atómov a subatomárnych častíc. Na tejto úrovni javy a častice vykazujú vlastnosti, ktoré sú v rozpore s našou intuitívnou skúsenosťou. Tieto vlastnosti, využívané v kvantovej výpočtovej vede, núkajú potenciálne riešenie nevysvetlených črt vedomia. Neuróny a synapsie sú vzhľadom na kvantové efekty priveľké a výpočtový proces je rušený kvantovými javmi.

Funkcia neurónu však môžu byť omnoho komplexnejšia, než len ako prepínača. Ak sa pozrieme dovnútra neurónu, ako aj akejkolvek bunky, uvidíme zložitú sieť cytoskeletu (bunkovej kostry) organizujúcu bunkové procesy pozostávajúcu z mikrotubulov – vláknitých štruktúr. Mikrotubuly sú valcovité polyméry proteínu tubulínu špirálovito zoradeného do valca. Vzájomné interakcie medzi tubulínovými podjednotkami v rámci mikrotubulov podľa predpokladu spracúvajú informáciu ako molekulárne „celulárne automaty“. Keďže konformácia tubulínu je riadená kvantovomechanickými vnútornými silami (van der Waalsove interakcie), môžu sa nachádzať v stave kvantovej superpozície (kvantové bity, alebo „qubity“), a mikrotubuly možno v rámci bunkových štruktúr považovať za kvantové počítače.

Sir Roger Penrose a Stuart Hameroff vyvinuli kvantovo-výpočtový model mozgových mikrotubulov. Kvantové stavy sú redukované na klasické prostredníctvom „objektívnej redukcie“ (OR). Proces sa odohráva v mierkach časopriestorovej geometrie štruktúry univerza. Kvantový výpočet je „orchestrováný“ spätnou väzbou sprostredkovanou cez proteíny asociované s mikrotubulmi, odtiaľ pojem „orchestrovaná OR“ (Orch – OR). Napriek intenzívnej kritike zo strany vedeckých, výpočtových a filozofických pozícií ostáva Orch – OR životaschopnou hypotézou a možno jediným modelom vedomia schopným vysporiadať sa s nevysvetlenými črtami vedomia a poskytuje testovateľné predpovede. Kľúčovým na úrovni živého mozgu je snaha o udržanie kvantových pochodov, teda „boj proti dekoherencii“. Mnohí považujú myšlienku kvantového vedomia alebo Orch – OR za nepravdepodobnú. Možno sa ale na obzore objavuje paradigma, ktorá prípadne zvládne naše vnímanie mozgu, mysle a skutočnosti – je to zatiaľ jediný prístup, ktorý ho celé obsiahol.

1. Kvantové vedomie

1.1 Problém vedomia

Konvenčné vysvetlenia vykresľujú vedomie ako emergentnú vlastnosť klasických výpočtových aktivít v neurónových sieťach mozgu. Medzi prevládajúce názory patria aj

tieto: (1) neurónové štruktúry korelujú s mentálnymi stavmi; (2) synchronne talamo – kortikálne oscilácie dočasne uchovávajú informáciu; (3) vedomie emerguje de novo ako vlastnosť neurónovej výpočtovej komplexnosti.

Takéto prístupy však zlyhávajú pri vysvetlení niektorých črt vedomia: (1) povahy subjektívnej skúsenosti; (2) spájania priestorovo distribuovaných aktivít mozgu v celistvé, koherentný pojem „seba“; (3) prechodu od pred-vedomých procesov k vedomým stavom; (4) nekompútability, zahrnutia faktora, ktorý nie je ani náhodný, ani algoritmickejší – vedomie nemôže byť simulované; (5) slobodnej vôle; (6) subjektívneho plynutia času.

Základným kameňom (úrazu) je myšlienka, že myseľ je programovým vybavením počítača – mozgu (mozog – počítač + myseľ – software = vedomie). Takéto vysvetlenie vynechalo niektoré neurofyzilogické detaily: (1) široko rozšírenú náhodnosť na všetkých úrovniach nervových procesov; (2) gliové bunky, ktoré tvoria 80% mozgu; (3) prenos dendrit – dendrit; (4) elektrotonické plazmodezmy; (5) cytoplazmatické/cytoskeletálne aktivity a (6) živý stav (mozog žije).

Ďalšou ťažkosťou je, že chýba testovateľná emergencionistická hypotéza – vedomie „skrátka nastane“.

Napokon, nepočíta sa s komplexnosťou jednotlivých neurónov. Neuróny podľa všetkého nie sú len prepínače. Mnoho jednobunkových organizmov, postrádajúcich neuróny a synapsie, napriek tomu plávajú, nachádzajú potravu, učia a rozmnožujú sa – použitím svojej vnútornej bunkovej kostry, cytoskeletu.

1.2 Mikrotubuly

Vnútrobunková aktivita od jednobunkovcov po neuróny ľudského mozgu je organizovaná pomocou vnútrobunkovej kostry zvanej cytoskelet (obr. 1), ktorej vlákna tvoria mikrotubuly (obr. 2), duté vlákna s priemerom 25 nm skladajúce sa z monomérických jednotiek tubulínu (obr. 3). Zatiaľ čo doteraz boli považované za výlučne štruktúrny prvok, nedávne výskumy odhalili aj ich signálnu a komunikačnú funkciu: (1) „slučky“ vláken putujú rýchlosťou 15 $\mu\text{m/s}$ (= 2000 tubulínov/s); (2) vibrujú ($f = 100 - 650 \text{ Hz}$); (3) počas metabolickej aktivity sa „trblietajú“; (4) mechanicky propagujú signály do bunkového jadra a regulujú génovú expresiu; (5) pravdepodobne sú ferroelektrické za fyziologickej teploty.

Každá molekula tubulínu v meradle nanosekúnd prechádza do jednej z dvoch (alebo viacerých) konformácií (obr. s), závislých na interakciách vnútri hydrofóbnej domény. Konformácia je riadená polohou jediného elektrónu. Elektrón $e^{(+,-)}$ a proteín $p^{(+,-)}$ tak tvoria „spriahnutý“ Einsteinov – Podolského – Rosenov (EPR) pár, pre ktorého stav $|T_j\rangle$ j-teho tubulínu platí:

$$|T_j\rangle = \cos(x_j |e_j^+\rangle |p_j^+\rangle) + e^{iy_j \sin(x_j |e_j^-\rangle |p_j^-\rangle)}, \quad (1.1)$$

kde x a y sú premenné koherentnej superpozície komplexu elektrón – proteín. Tubulín je kvantovým výpočtovým prepínačom.

Pre n tubulínov platí:

$$|k\rangle = \prod_{j=1\dots n} |T_j\rangle. \quad (1.2)$$

Na povrchu vlákna sa tak vytvárajú dynamické vzory (alebo „automaty“, obr. 4), ktoré sa vyvíjajú, interagujú a vedú k novým vzorom. Výskumy naznačujú, že „výpočtové tubulínové automaty“ môžu vrámci neurónov sprostredkovať prenos a spracovanie informácie a učenie. Predpokladá sa, že každý tubulín môže existovať v kvantovej superpozícii oboch konformačných stavov.

Konvenčné prístupy, založené na synaptickom prenose na úrovni neurónov, predpokladajú v ľudskom mozgu $\sim 10^{18}$ operácií/s ($\sim 10^{11}$ neurónov/mozog * $\sim 10^4$ synapsii/neurón * $\sim 10^3$ s $^{-1}$). Tubulínové automaty umožňujú $\sim 10^{27}$ operácií/s ($\sim 10^{11}$ neurónov/mozog * $\sim 10^7$ synapsii/neurón * $\sim 10^9$ s $^{-1}$). Keďže všetky bunky obsahujú $\sim 10^7$ tubulínových molekúl, to môže vysvetľovať adaptívne správanie jednobunkovcov aj bez akejkoľvek nervovej sústavy. Neuróny sú skôr než prepínače zložité počítače samé osebe.

1.3 Tubulínové kvantové automaty - orchestrovaná objektívna redukcia (Orch - OR)

Penrosov a Hameroffov model orchestrovanej objektívnej redukcie predpokladá, že: (1) v tubulínových automatoch v neurónoch a gliových bunkách nastáva kvantová superpozícia/komputácia; (2) tubulínové podjednotky sa v rámci mikrotubulov správajú ako qubity (kvantové bity), prepínajúc medzi stavmi v nanosekundovom (10^{-9} s) meradle riadené slabými interakciami – disperznými (Londonovými) silami v hydrofóbných doménach; (3) tubulínové qubity výpočtovo nelokálne synchronne interagujú v súlade so Schrödingerovou rovnicou; (4) pred – vedomé procesy dosahujú prahovú hodnotu pre Orch – OR pri $E = h/T$ (E možno vyjadriť ako počet tubulínových monomérov, ktoré v danom čase T spontánne kolabujú); (5) nastane kolaps, alebo OR, skutočnosť vo fundamentálnej geometrii časopriestoru – táto udalosť vystupuje ako „uvedomenie“, „zážitok“, „skúsenosť“ – vedomá udalosť; (6) sekvencia udalostí OR predstavuje súvislý tok subjektívneho času a „prúd“ vedomia; (7) na nanoškále každá udalosť určuje nové klasické stavy tubulínových automatov, regulujúcich synaptickú a ostatné neurónové aktivity; (8) počas pred–vedomej fázy kvantovej superpozície/komputácie sú oscilácie „ladené – orchestrované“ pomocou proteínov asociovaných s mikrotubulmi (MAPs), zabezpečujúc spätné – väzobnú slučku medzi živým systémom a kvantovým stavom (odtiaľ Orch – OR); (9) kvantové stavy tubulínov môžu byť späté s mikrotubulmi v iných neurónoch a gliách skrz plazmodezmy, dovoľujúc rozšírenie kvantového stavu na značne rozsiahlu oblasť mozgu; (10) izolácia voči kvantovej environmentálnej dekoherencii a súčasná komunikácia (input/output) je pravdepodobne zabezpečená mechanizmom fázového prechodu sól/gél v cytoplazme prostredníctvom dis-/assembly (roz-/z-/–borky ☺) cytoskeletálneho proteínu aktínu –

aktívny prechod sól/gél nastáva s frekvenciou 40 Hz alebo rýchlejšie a zúčastňuje sa mechanizmu synaptického prenosu.

Na tubulínovej kvantovej komputácii sa zabraňuje dekoherencii dostatočne dlho na dosiahnutie prahu pre Orch – OR zúčastňujú aj: (1) prechod sól/gél; (2) cytoplazmatické fázové kompartmenty; (3) kvantová excitácia/hierarchizácia okolitej vody; (4) hydrofóbne proteínové domény; (5) mikrotubulové dutiny; (6) kvantová reparácia chýb.

Ďalšou nezodpovedanou otázkou a zjavným problémom teórie Orch – OR je vplyv slabých síl zúčastňujúcich sa gravitačného kolapsu.

1.4 Čo je teda vedomie?

Procesy v mozgu zodpovedajúce vedomiu prebiehajú vnútri neurónov na úrovni cytoskeletálnych mikrotubulov.

Vysvetlenie vedomia vyžaduje (popri neurovedách a psychológii) akúsi modernú verziu panteizmu, v ktorej sú pred-vedomé zložky mentálnych procesov obsiahnuté základnou úrovňou skutočnosti, ako ju popisuje moderná fyzika.

Fyzika OR spájajúca mozgové štruktúry s fundamentálnou úrovňou skutočnosti vedie k Penrosovmu a Hameroffovmu modelu Orch – OR, kvantovej komputácie s objektívnou redukciou v tubulínoch.

Model Orch – OR je konzistentný so známymi neurofyziologickými procesmi, vytvára testovateľné predpovede a je fundamentálnou mnohoúrovňovou medziodborovou teóriou schopnou vysvetliť záhady vedomia.

2. Kvantové neurónové siete.

V poslednej dobe môžeme vidieť čoraz väčší záujem o kvantové výpočty a kvantovú informatiku, pretože umožňujú efektívne riešiť zložité problémy z hľadiska dnešnej výpočtovej vedy.

Kvantové výpočty uvažujú, že spracovávanie a prenos dát sa uskutočňuje na základe kvantových stavov.

Na druhej strane neurónové siete už preukázali svoje opodstatnenie v mnohých oblastiach vedy a výskumu a venuje sa im čím ďalej tým viac záujmu, kvôli ich využiteľnosti v rozpoznávaní obrazov, klasifikácii a modelovaní. Povedané v krátkosti, neurónová sieť je výpočtový systém zložený zo špecializovaných jednotiek (*neuróny*), ktoré sú navzájom prepojené (*synaptické spojenia*). Základnou črtou neurónových sietí je ich schopnosť učenia, ktorá sa uskutočňuje modifikáciou jednotlivých synaptických spojení medzi neurónmi.

V súčasnosti neurónové siete bežia na klasických počítačoch, ktoré vykonávajú kód sériovo a výhoda masívnej paralelnosti neurónových sietí sa stráca. Samozrejme by bolo lepšie využiť paralelné výpočty na takéto simulácie. V tomto smere sa vložilo veľa úsilia do výskumu systémov založených na platformách, počnúc nelineárnymi optickými materiálmi, až po systémy založené na proteínoch. Rovnako, veľa úsilia bolo

vynaloženého v oblasti výskumu kvantových počítačov.

Vo väčšine prípadov použitia neurónových sietí, neuróny prijímali vstupy z okolia cez synaptické spojenia s určitou váhou a vypočítavali signál, ktorý sa ďalej šíril ostatným neurónom. Napríklad **perceptrón** – najjednoduchšia neurónová sieť, obsahuje n vstupov x_1, \dots, x_n a jeden výstup y . Výstup z takejto najjednoduchšej neurónovej siete je potom

$$y = f\left(\sum_{j=1}^n w_j x_j\right), \quad (2.1)$$

kde $f(\cdot)$ je aktivačná funkcia perceptrónu a w_i sú jednotlivé synaptické váhy, ktoré sa doladujú (nastavujú) v priebehu učenia.

Proces učenia perceptrónu možno zapísať nasledovným algoritmom:

1. váhy w_j sú inicializované náhodnými malými číslami;
2. vypočíta sa výstup z neurónovej siete pri zadaní vstupného vektora (x_1, \dots, x_n) ;
3. nastaví sa jednotlivé váhy podľa pravidla

$$w_j(t+1) = w_j(t) + \eta(d - y)x_j, \quad (2.2)$$

kde t je diskretný čas, d je žiadaný výstup a $0 < \eta < 1$ je veľkosť kroku.

Ukázalo sa, že je možné uskutočniť kvantové výpočty na optických zariadeniach využívajúcich fázové meniče a „deliče lúčov“, zdroje fotónov a foto-detektory. Uvažujme existenciu qubitu (**qubit** je vlastne kvantový bit, paralela binárneho čísla v kvantovej teórii)

$$|x\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (2.3)$$

kde $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ a stavy $|0\rangle$ a $|1\rangle$ sú chápané ako rôzne polarizačné stavy svetla.

Bolo by však veľmi zložité zostrojiť presnú analógiu nelineárnej aktivačnej funkcie f , ako napríklad sigmoidy, resp. iných aktivačných funkcií bežne využívaných v neurónových sieťach, ale zostrojenie kvantového systému podobného perceptrónu využívajúceho rovnakú učiacu funkciu je možné a relatívne nenáročné.

Uvažujme kvantový systém s n vstupmi $|x_1\rangle, \dots, |x_n\rangle$ v tvare (2.3) a výstupom $|y\rangle$ získaným z pravidla

$$|y\rangle = \hat{F}\left(\sum_{j=1}^n \hat{w}_j |x_j\rangle\right), \quad (2.4)$$

kde \hat{w}_j sú matice typu 2×2 na báze $(|0\rangle, |1\rangle)$, zložených z fázových meničov a deličov lúčov a \hat{F} je neznámi operátor, ktorý je možné realizovať pomocou kvantových brán.

Ak predpokladáme najjednoduchší prípad, že $\hat{F} = 1$, slúži ako operátor identity, potom výstup kvantového perceptrónu v čase t je

$$|y(t)\rangle = \sum_{j=1}^n \hat{w}_j(t) |x_j\rangle. \quad (2.5)$$

Analogicky s klasickým perceptrónom, učiace pravidlo pre kvantový perceptrón vyzerá nasledovne:

$$\hat{w}_j(t+1) = \hat{w}_j(t) + \eta(|d\rangle - |y(t)\rangle) \langle x_j|, \quad (2.6)$$

kde $|d\rangle$ je žiadaný výstup.

Učiace pravidlo vedie kvantový perceptrón do požadovaného stavu $|d\rangle$. Pri použití kvadratickej odchýlky modulu reálneho výstupu a žiadaného výstupu dostávame vzťah:

$$\| |d\rangle - |y(t+1)\rangle \|^2 = \left\| |d\rangle - \sum_{j=1}^n \hat{w}_j(t+1) |x_j\rangle \right\|^2 = (1 - n\eta)^2 \| |d\rangle - |y(t)\rangle \|^2. \quad (2.7)$$

Pre malé η ($0 < \eta < 1/n$) a normalizované vstupné stavy $\langle x_j | x_j \rangle = 1$ výsledok iterácie konverguje k žiadanému stavu $|d\rangle$. Celá sieť môže byť potom postavená zo základných elementov s využitím základných princípov architektúr neurónových sietí.

Kvantové neurónové siete sa môžu potenciálne stať veľmi silným výpočtovým nástrojom. Navyše sú schopné výpočtov, aspoň principiálne, ktoré nemôžu byť uskutočnené klasickými metódami. Záleží len od výskumu, do akej miery ich bude možné používať v reálnych aplikáciách.

Literatúra

- [1] Altaisky, M.V.: *Quantum neural network*. July 5, 2001.
- [2] Faber, J., Giraldi, G. A.: *Models for Quantum Neural Networks*. 2002-07-02.
- [3] Gold, I., Stoljar, D.: *A Neuron Doctrine In The Philosophy Of Neuroscience*. Behavioral and Brain Sciences 22(5):838-839 1999.
- [4] Gupta, S., Zia, R.K.P.: *Quantum Neural Networks*. February 23, 2001.
- [5] *Consciousness, Microtubules and The Quantum World*. Interview with Stuart Hameroff, MD, in *Alternative Therapies* (May 1997 3(3):70-79 by Bonnie Horgan).
- [6] Hameroff, S.: *Consciousness, the Brain, and Spacetime Geometry*. 2002.
- [7] Hameroff, S.: *Funda-Mentality: Is the conscious mind subtly linked to a basic level of the universe?* Trends in Cognitive Sciences 2(4):119-127 1998.
- [8] Hameroff, S.: *Interest in Consciousness Research & Personal Statement*. 2002.
- [9] Hameroff, S.: *Quantum computation in brain microtubules? The Penrose –*

Hameroff "Orch OR" model of consciousness. 2002.

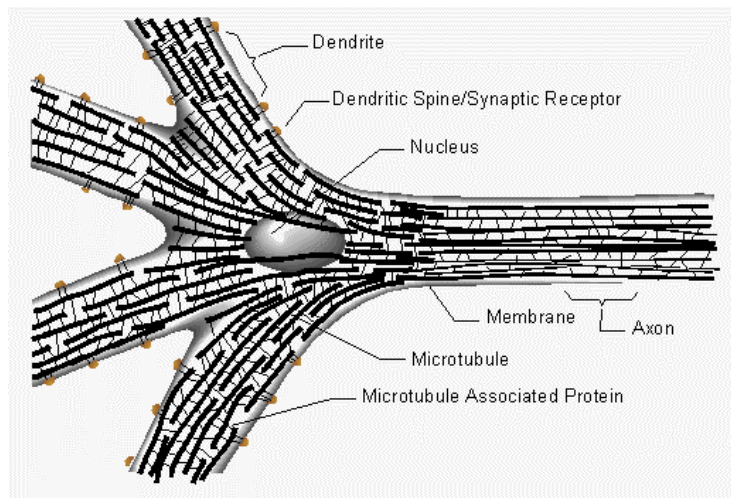
[10] Hameroff, S.: *Quantum Consciousness*. 2002.

[11] Hameroff, S.: *What is Consciousness – Slide show lecture*. 2002.

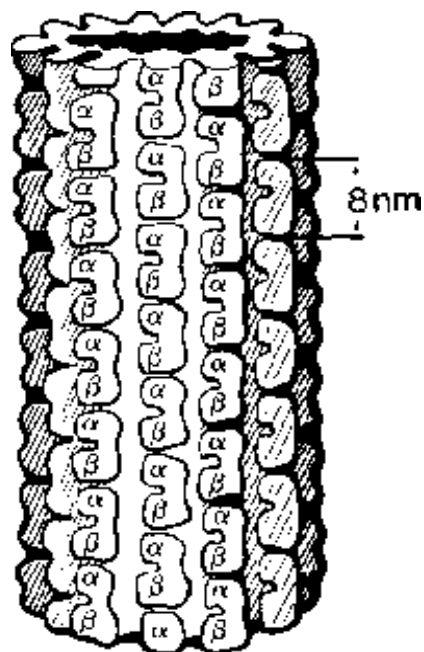
[12] Hameroff, S., Penrose, R.: *Orchestrated Objective Reduction of Quantum Coherence in Brain Microtubules: The "Orch OR" Model for Consciousness*. 2002.

[13] Levner, I.: *Quantum Computing (Recent Developments in Quantum Computational Intelligence)*. 10-Jul-2002.

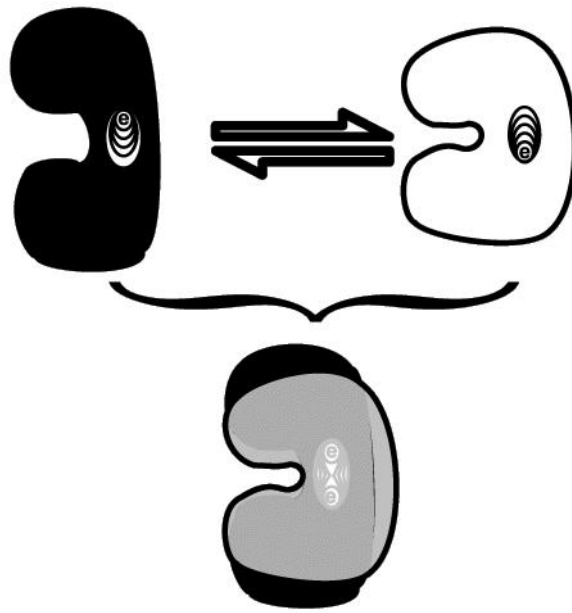
[14] Meneer, T., Narayanan, A.: *Quantum – inspired Neural Networks*. NIPS 95, Denver, Colorado 1995.



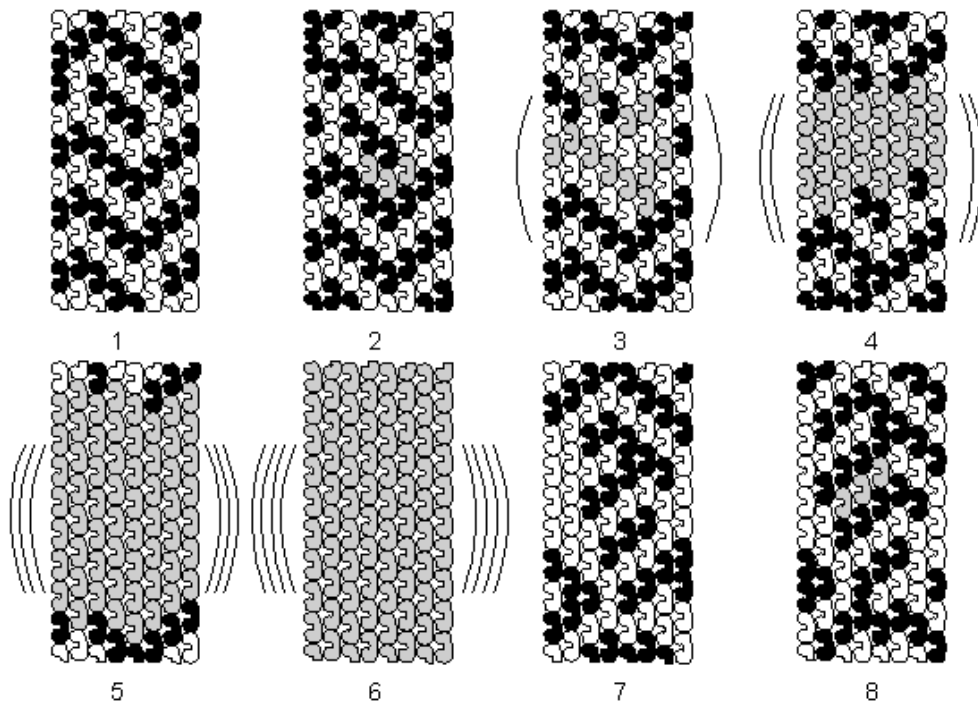
Obrázok 1. Schematické zobrazenie cytoskeletu neurónu.



Obrázok 2. Schematické zobrazenie mikrotubulu.



Obrázok 3. Schematický model zmeny konformácie tubulínu.



Obrázok 4. Simulácia tubulínového automatu. Farebne zodpovedá konformáciám ako na predchádzajúcom obrázku. Kroky oddeľujú 8 ns intervaly.