

Samoorganizácia ako hybná sila dynamických vzorcov aktivity v mozgu a mysli

Igor Farkaš

Katedra aplikovanej informatiky FMFI
Univerzita Komenského v Bratislave
farkas@fmph.uniba.sk

a
Ústav merania SAV v Bratislave

Abstrakt

Ponúkaný pohľad na vzájomné prepojenie mozgu a mysle hľadá odpoveď v prejavoch samoorganizácie ako dynamického procesu, ktorého účinky chápeme jednak na úrovni aktivít – v procesoch emergencie (kauzalita zdola nahor), ako aj smerom nadol, prostredníctvom vplyvu mysle na mozog, no taktiež pri adaptácii lokálnych i globálnych parametrov výpočtového systému. Uvádzame stručný prehľad poznatkov z oblasti kognitívnej neurovedy a výpočtových modelov, ktoré sú podľa nás konzistentné s takýmto pohľadom, pričom zdôrazňujeme aj aspekt kauzality zhora nadol, ktorý je väčšinou ignorovaný v podobných modeloch. Otázkou subjektívnosti mentálnych stavov (procesov) sa nezaobráame, považujeme ju za inherentnú vlastnosť komplexného dynamického systému, ktorý operuje na reprezentáciách entít ukotvených v okolitom svete.

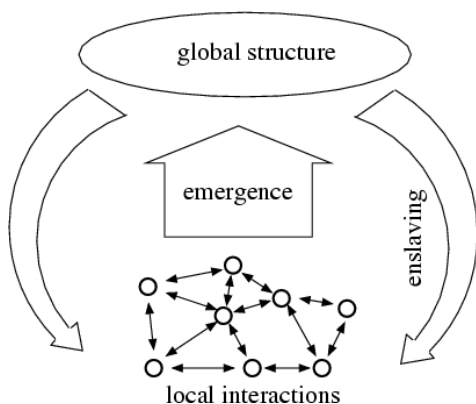
1 Úvod

Samoorganizácia ako proces determinujúci vznik koherentného správania je fascinujúcim fenoménom, ktorý pôsobí ako protiklad k bežne pozorovaným procesom sprevádzaných s nárastom neporiadku (entropie) v systéme. Jav samoorganizácie je spoločným znakom rôznych typov prírodných systémov (či už fyzikálnych, chemických alebo biologických), no príklady takýchto systémov so samoorganizáciou nájdeme aj v sociálnych vedách (Haken, 1977). Princípy samoorganizácie umožňujú vysvetliť, ako vďaka nelineárnym interakciám medzi elementami môžu emergovať koherentné vzorce správania na úrovni celého systému (či už ide o rezonanciu v nejakom fyzikálnom systéme alebo o zosúladený potlesk obecnstva). Formálna analýza takýchto systémov umožnila zodpovedať viaceré otázky, a to i vďaka počítačovým simuláciám, ktoré sú kvôli nelineárnym vlastnostiam interakcií často schodnejšou cestou ako teoretická analýza. Aj na mozog sa možno pozeráť ako sa

samoorganizujúci sa systém (von der Malsburg, 1995). Vzniká však otázka, či tento pohľad dokáže uspokojivo vysvetliť po stáročia pertraktovaný vzťah mysle a mozgu. Alebo, je subjektívnosť mentálnych stavov (či udalostí), resp. iné faktory neprekonateľným problémom pri štúdiu mozgu ako formálneho (výpočtového) systému?

V súvislosti so snahou vysvetliť vzťah mysle a mozgu sa etablovalo viacero pohľadov, ktoré možno rozdeliť do dvoch hlavných skupín. Historicky najstarším je dichotomický, *dualistický* pohľad na obe entity, ktorý vychádza z kvalitatívne odlišnej povahy fyzikálnych a mentálnych stavov (resp. udalostí), a ktorý má svoje vnútorné členenie podľa chápania vzájomného vzťahu oboch svetov. Novšou alternatívou sú *monistické* pohľady postulujúce len jednu úroveň reality, taktiež so svojim vnútorným delením, a to podľa toho, či sa kladie dôraz na mozog alebo myseľ. Spoločným nedostatkom oboch pohľadov je problém prijateľne vysvetliť kauzálne prepojenie medzi oboma svetmi. My sme sa pokúsili načrtnúť prístup (Farkaš, 2005), ktorý má podľa nás charakteristiky oboch vyššie spomínaných alternatív: je monisticko-redukcionistický v tom zmysle, že tvrdíme, že činnosť mysle sa dá v princípe redukovať na činnosť mozgu a že môže byť v budúcnosti principiálne vysvetliteľná činnosťou mozgu (aj keď veľmi zložito). Je však súčasne dualisticko-interakcionistický v tom zmysle, že mentálnu úroveň nechápeme ako epifenomén, ale ako efektívnu a zrozumiteľnú úroveň opisu (pomenovania) zložitých, kognitívne obsažných dynamických stavov mozgu, ktorá má kauzálny vplyv na aktivitu jednotlivých častí mozgu. Inými slovami, redukcionistický aspekt zahŕňa to, že uvažujeme objektívnu existenciu len jednej, fyzikálnej entity (mozog). V rámci tejto entity však rozlišujeme medzi jej jednotlivými elementami (neuróny alebo populácie neurónov), ktoré sú charakterizované neurálnymi aktivitami, a mozgom (resp. jeho časťami) ako systémom, charakterizovaným dynamickým vzorcom interakcií medzi kortikálnymi oblasťami, ktorého globálna aktivita determinuje mentálne stavy. Náš pohľad vnímame v tomto ohľade ako kompatibilný s názorom

Searla (1999), ktorý chápe mentálne stavy ako čisto fyzikálny fenomén, pretože tie sú produktom mozgu, a ktorý argumentuje, že subjektivita ontológie mentálnych stavov (procesov) mysle nie je prekážkou ich epistemickej objektivity poznávania (príklad: napriek tomu, že vnímanie bolesti je subjektívne, môžeme mať objektívnu vedu skúmania bolesti). Avšak, podobne ako iní redukcionisti, aj Searle sa venuje len fenoménu emergencie. My v našom príspevku sa chceme viac venovať i opačnému účinku, t.j. kauzalite zhora nadol. Jedna z otázok, ktorá sa tu vynára, sa týka empirických poznatkov o kauzalite vo formálnom systéme. Pri tomto prístupe je namiesto aj filozofická otázka, či mentálne procesy sú exaktne modelovateľné, pretože neurobiologické poznatky naznačujú, že neexistuje spoľahlivý spôsob ako separovať fyzikálny model mozgu od implementačného substrátu, čo je kvalitatívny rozdiel v porovnaní s počítačom (Bell, 1999). Avšak množstvo poznatkov z oblasti výpočtovej neurovedy nás utvrdzuje v tom, že na každej úrovni opisu sme schopní modelovať niektoré podstatné aspekty skúmanej reality. Dôležitá je však vhodná úroveň opisu. Za takú považujeme úroveň neurónov (klasických alebo impulzných), pretože tá využíva koncepty blízke biologickej realite na prijateľnej úrovni abstrakcie. Z výpočtového hľadiska je mozgová kôra ako neurálny substrát pre kognitívnu činnosť architektonicky homogénnou štruktúrou disponujúcou efektívnymi výpočtovými princípmi (Phillips, Singer, 1997).



Obr. 1. Samoorganizujúci sa systém fungujúci na báze recipročných dynamických kauzálnych interakcií medzi systémom a jeho časťami.

2 Samoorganizácia

Náš formálny model je schematicky znázornený na obr. 1. Pre jednoduchosť uvažujeme len dve úrovne, avšak tento princíp sa dá zovšeobecniť na viacúrovňový model, ktorý by presnejšie vystihoval vzťah mozgu a mysle. Kauzalita zdola nahor predstavuje emergenciu na vyššej

úrovni, opačným smerom sa „zotročujú“ (Haken, 1977) elementy systému v ich aktivitách.

Pod samoorganizáciou sa obvyčajne rozumie emergencia stavu globálneho usporiadania, vznikajúca na základe lokálnych interakcií medzi prvkami systému, a to na rôznych úrovniach (v kontexte neurálnych štruktúr môžeme hovoriť o úrovni jednotlivých neurónov alebo ich populácií). My budeme prejavy samoorganizácie interpretovať v širšom slova zmysle, a to aj:

- ako proces determinujúci kauzálne účinky zhora nadol na úrovni aktivít, a aj ako
- ako proces adaptácie parametrov (plasticity), či už lokálnych (sily prepojení, synáps) alebo globálnych (bude vysvetlené nižšie).

Poznatky o prejavoch samoorganizácie budeme čerpať z dvoch zdrojov: z kognitívnej neurovedy a zo simulácie výpočtových modelov (v rámci impulzných a klasických neurónových sietí, ako aj nelineárnych dynamických systémov).

2.1 Poznatky z kognitívnej neurovedy

V oblasti kognitívnej neurovedy sa pozornosť sústreďuje na hľadanie tzv. **neurálnych korelátov** mentálnych stavov (reprezentujúcich usporiadaný globálny stav systému). Tieto koreláty sa dajú neinvazívne merať vďaka existujúcim technikám zobrazovania činnosti mozgu v priestore i čase (Frith, Perry, Lumer, 1999). V súčasnosti existuje pomerne dosť empirických výsledkov získaných zo zvieracích alebo ľudských subjektov, ktoré poukazujú na to, že kognitívne procesy sú sprevádzané prechodnou integráciou viacerých distribuovaných interagujúcich oblastí v mozgu (napr. Damasio, 1990; Tononi, Edelman, 1998; Varela a spol. 2001; Engel, Singer, 2001; Beňušková, 2002). Najpriateľnejším mechanizmom umožňujúcim takúto integráciu je vytvorenie dynamických spojení pomocou prechodne **synchronizovanej aktivity** neurónov v rôznych frekvenčných pásmach. Synchronizácia tu znamená pálenie neurónov s rovnakou fázou alebo v presnom fázovom závесе (phase-locking), čo sa dá merať a kvantifikovať modernými štatistickými metódami (Lachaux a spol., 1999). Synchronizovaná aktivita bola pozorovaná v rôznych priestorových škálach. Krátkodosahové synchronizácie sa týkajú jednej senzorickej modalít a sú zrejme potrebné na perceptuálne viazanie príznakov (feature binding) vnímaného objektu, aby mohol vzniknúť koherentný vnem (Gray a spol., 1989). Boli však pozorované i d'alekodosahové synchronizácie, ktoré zahŕňajú vzdialené kortikálne oblasti, a ktoré sprevádzajú rôzne kognitívne úlohy, napr. rozpoznanie vizuálneho vjemu spojené s odpovedajúcou motorickou reakciou. V pozoruhodnom

experimente s „Mooneyho tvármi“¹ (Rodriguez a spol., 1999) boli asi štvrtinu sekundy po ukázaní podnetu pozorované kolektívne gamma oscilácie neurónov (40 Hz) vo viacerých oblastiach (čo odpovedalo zrejme spracovaniu vizuálneho podnetu), avšak synchronizácia nastala iba v prípade, ak sa subjekt sa díval na tvár. Druhý vzorec synchronizácie bol potom pozorovaný v motorickej kôre, čo korelovalo s motorickou odpoveďou (kliknutie myšou), a ten nastal v pochopiteľne v oboch prípadoch. V inom zaujímavom experimente bola daná do súvisu synchronizácia s kognitívnym procesom – krátkodobou pamäťou (Fell a spol., 2001): iba ak nastala synchronizácia (v hipokampe a príľahlých štruktúrach) v čase memorovania, po ktorom nasledovalo zámerné rozptýlenie, bol subjekt schopný neskôr si vyvolať z pamäti zapamätané podnety. Tieto výsledky sú kompatibilné aj so všeobecnejšou predstavou o synchronizácii, ktorá zahŕňa všetky dimenzie kognitívneho aktu, vrátane asociatívnej pamäti, emocionálneho podfarbenia a motorického plánovania (Damasio, 1990, Varela a spol., 2001). Zdôraznenie synchronickej aktivity implikuje, že odpoveď na podstatu mentálnych stavov treba hľadať nie v štruktúrnych vzťahoch aktivovaných oblastí mozgu, ale v ich **dynamickom vzorci správania**. Tieto vzorce vznikajú v časovom rozpätí rádovo stoviek milisekúnd, čo je čas potrebný na vznik kognitívneho vnemu. Je pravdou, že hľadanie neurálnych korelátov je skromnejší zámer, a že cieľom by malo byť nájdenie neurálnych procesov (či reprezentácií), ktoré sú nevyhnutné pre vznik mentálnych stavov, a ktoré ich teda kauzálne ovplyvňujú. Na to by sme však potrebovali uskutočniť experimenty, v ktorých by sme ovplyvňovali synchronizáciu neurónov a sledovali zmeny v správaní jedinca. Experimenty takéhoto druhu sa zatiaľ robili len na hmyze, na ktorom bolo ukázané, že narušenie synchronizácie je spôsobí zníženú schopnosť rozoznávať vône (Stopfer a spol., 1997).

Druhá skupina poznatkov sa týka kauzálnych účinkov zhora nadol, t.j. pôsobenia celku na časti. Na úrovni neurónu sa priamo ponúka ako argument fakt, že priemerný kortikálny neurón má rádovo 10.000 synaptických spojení od iných neurónov, z čoho vyplýva, že súhra aktivít presynaptických neurónov určuje, ako bude postsynaptický neurón reagovať. Inými slovami, podľa súčasnej predstavy biologický neurón funguje ako integrátor vstupných signálov, ale súčasne aj ako detektor koincidií na vstupoch (výraznejšie reaguje na súčasný príchod viacerých impulzov v rámci krátkeho časového okna), z čoho vyplýva jeho citlivosť na časové charakteristiky (König, Engel, Singer, 1996).

Do tejto skupiny môžeme zaradiť aj experimentálne práce, ktoré sa týkajú vyššej, systémovej úrovne a poukazujú na to, že stav pozornosti môže byť

akcelerátorom emergentných procesov zdola. Tu treba spomenúť, že stav pozornosti považujeme za stav mozgu (t.j. že neexistujú centrá riadiace pozornosť). Ako bolo pozorované v experimentoch, stav pozornosti urýchľuje vznik synchronizácie v somatosenzorickej kôre (Steinmetz a spol., 2000) alebo pri vizuálne evokovanej aktivite (Fries a spol., 2001). Podobne, stav očakávania podnetu môže prispieť k synchronizácii v motorickej kôre (Riehle a spol., 1997). Ďalší zaujímavý poznatok ponúka predikciu o mentálnej kontrole epilepsie. Je známe, že epileptická aktivita spôsobuje zmeny v mentálnych stavoch, no možno kauzalita funguje i opačne. Už Penfield a Jasper (1954) opísali prípad pacienta, u ktorého záchvat v parietálnom laloku prestal, ak pacient začal riešiť zložitú matematickú úlohu. Na podobné prípady vplyvu kognitívnych stavov na aktivitu mozgu poukazuje aj Schmidt-Schobstein (1998), ktorý predpokladá, že takáto intervencia zhora nadol je možná, nakoľko epileptické zóny sú súčasťou rozsiahlej komplexnej siete pokrývajúcej aj iné oblasti mozgu podieľajúce sa na vytváraní mentálnych stavov. Tým, že jednotlivé oblasti sú vo vzájomnej interakcii, zrejme takýto globálny systém môže mať vplyv na oblasť, postihnutú epilepsiou. Tento potenciálny efekt detailnejšie sledovali Lacaux a spol. (1997a,b) a ukázali, že perцепčné stavy (vznikajúce v mysli subjektu pri riešení úloh) môžu fungovať ako modulátory aktivity neurónov v epileptickom ohnisku. Konkrétne, autori sledovali časové charakteristiky týchto neurónov (dĺžky intervalov medzi výbojmi) a zistili, že tieto sa vplyvom aktu percepcie menili. Konkrétne, aj keď sa na prvý pohľad epileptické ohnisko prejavovalo pravidelnými osciláciami (s frekvenciou 2 Hz) skrytými v gaussovskom šume, následná analýza dát odhalila deterministický vzorec aktivít. Ten sa vplyvom perцепčných stavov menil smerom k tzv. nestabilným periodickým orbitám v rámci dynamického systému, čo autori intepretovali ako prejav kauzality zhora nadol. Tento poznatok vznikol kombináciou experimentálnych dát spojených s ich formálnou analýzou, čo nás vedie k druhej doméne výskumu, z ktorej môžeme hľadať podporu pre našu teóriu, a tou sú výpočtové modely so samoorganizáciou.

2.2 Poznatky z výpočtových modelov

Pri výpočtových modeloch môžeme pozorovať účinky samoorganizácie v oboch smeroch, pričom môžeme, na rozdiel od poznatkov z kognitívnej neurovedy, priamo hovoriť o kauzálnosti, pretože principiálne môžeme systematicky zasahovať do zmien parametrov modelu.

Prejavom samoorganizácie pri modelovaní kauzálneho účinku zdola nahor pomocou impulzných neurónových sietí je vznik synchronizovanej aktivity v modeli s plasticitou synáps. V súčasnosti najviac experimentálne i teoreticky študovanou formou je

¹Profily abstraktných čiernobielych tvárí v kontraste s tými istými podnetmi obrátenými dolu hlavou.

plasticita založená na časovaní pre- a postsynaptických impulzov (spike-timing dependent plasticity, STDP; pozri napr. prehľad v Abbott a Nelson, 2000), ktorá v modeloch predstavuje hebbovsky založenú adaptáciu (Song, Miller a Abbott, 2000; Kistler a van Hemmen, 2000; Legenstein, Naeger a Maass, 2005). Synchronizovanú aktivitu v neurónovej sieti možno pozorovať pri externých štrukturovaných vstupoch do siete, ale aj pri spontánných šumových vstupoch (Izhikevich, 2003; Kistler a Gerstner, 2002). Aj v modeloch klasických neurónových sietí bolo navrhnutých zopár hebbovsky založených algoritmov adaptácie váh (synáps), ktoré sú považované za prijateľné modely samoorganizácie v mozgovej kôre (Bienenstock, Cooper a Munro, 1982; Der a Smith, 1997; Kay a Phillips, 1997). Aj keď boli tieto modely odvodené odlišnými spôsobmi, majú spoločnú tú črtu, že zmenu synaptickej plasticity vzťahujú na postsynaptickú aktivitu nemonotóнным spôsobom. Toto umožňuje dynamickú moduláciu neurónu v procese posilňovania, resp. oslabovania jeho synaptických spojení. Obe kategórie model teda ponúkajú mechanizmy samoorganizácie na rôznych úrovniach opisu. Nie sú nezlúčiteľné, možno medzi nimi nájsť vzťah. Napríklad, BCM pravidlo vyplýva z STDP, ak uvažujeme iba účinky časovo najbližších pre- a postsynaptických impulzov (Izhikevich a Desai, 2003).

Čo sa týka kauzality zhora nadol, zaujímavé predikcie na úrovni neurónu ponúkajú napr. Salinas a Sejnowski (2001) v súvislosti s poznatkami o vplyve presynaptických korelácií na správanie neurónu. Výsledky ich modelovania ukazujú, že kľúčom pre zvýšenie temporálneho rozlíšenia v impulznom neuróne je jeho „vyváženosť“, t.j. správny pomer vstupnej excitácie a inhibície. Vyvážený neurón je schopný reagovať aj na impulzné podnety, ktoré sa prejavujú na časovej škále oveľa kratšej než je membránová časová konštanta neurónu (ktorá určuje rýchlosť zmeny membránového napätia neurónu). Inými slovami, vyvážený neurón je oveľa citlivejší na korelácie na vstupoch než nevyvážený neurón, pretože tie ovplyvňujú fluktuácie sumárneho synaptického vstupu, ktorý vybudí neurón k odozve. Autori uvádzajú, že modelovanie vyváženého stavu neurónu bolo vecou nájdania vhodných parametrov. Zaujímavé by preto bolo zistiť, ako by sa také parametre dali nájsť adaptívne, pomocou mechanizmov samoorganizácie.

Zaujímavé vysvetlenie kauzality zhora na úrovni aktivít vo formálnom systéme ponúka Kelso (1995) pomocou formalizmu nelineárnych dynamických systémov. Na základe experimentálne verifikovaného teoretického modelu navrhol **teóriu dynamiky koordinácie** ako integrujúceho rámca kognitívnych funkcií. Táto teória postuluje existenciu dvoch kľúčových typov premenných: Jedným sú tzv. *kolektívne premenné*, ktoré globálne špecifikujú vzťahy medzi interagujúcimi zložkami dynamického systému, a usmerňujú ich

správanie. Druhým typom sú *riadiace parametre*, ktoré indukujú (fázové) prechody medzi stabilnými stavmi sprevádzané kvalitatívnymi zmenami v správaní systému, a sú tak hybnou silou pre dynamiku vzniku usporiadaných stavov. Smer pôsobenia celku na jeho časti má kvalitatívne odlišný charakter než emergentné prejavy zdola nahor, ktoré spätne pôsobia na celok, a tým aj na tieto premenné (recipročná kauzalita). Identifikácia kolektívnych premenných a riadiacich parametrov v neurálnom systéme je zatiaľ ťažkým orieškom, no v prípade jednoduchých systémov Kelso ponúka vysvetlenie. Napríklad, v experimente s obojručnou koordináciou (pohybujúcich sa ukazovákov ruky subjektu) úlohu kolektívnej premennej spĺňa relatívna fáza medzi oboma prstami, a frekvencia pohybu prstov je riadiacim parametrom (Kelso, 1984). Bolo ukázané, že pre nejaký rozsah frekvencií existujú dve stabilné riešenia (kmitanie prstov vo fáze a v protifáze). Pri náraste frekvencie sa stáva protifáza nestabilnou a nastáva prechod k sfázovanej konfigurácii (zaujímavé je, že opačný prechod nenastáva pri spätnom poklese frekvencie). Bressler a Kelso (2001) argumentujú, že kolektívne premenné (napr. relatívna fáza) môžu figurovať aj pri mentálnych procesoch. Podľa teórie dynamiky koordinácie mozog pracuje v metastabilnom dynamickom režime, prechádzajúc permanentne z jedného stabilného režimu do druhého.

3 Súvis s inými teóriami

Vyššie spomínaný súhrn poznatkov o samoorganizácii predstavuje tehličky do našej neurovýpočtovej mozaiky o tom, ako náš mozog a myseľ asi fungujú. Spomínaná dynamika koordinácie je pozoruhodným kandidátom na vysvetlenie fungovania kortikálnej aktivity na systémovej úrovni. Na úrovni neurónov je asi vhodnejší prístup pomocou modelov s impulznými neurónmi, ktorý umožňuje vysvetliť vznik koherentných vzorcov aktivít. Tieto modely síce zahŕňajú aj aspekt plasticity lokálnych parametrov (synaptických spojení, podľa teórie STDP), no dôležitým krokom by bolo, keby dokázali podchytiť aj samoorganizáciu globálnych parametrov (ktoré však najprv treba identifikovať). Podľa neurovýpočtového pohľadu, je cieľom mozgu ako komplexného systému zrejme jeho maximálna efektívnosť pri reprezentovaní a spracovaní informácie, čo považujeme za konzistentné s požiadavkou na vyváženosť medzi integračnými a segregačnými vplyvmi pri spracovaní informácie v mozgu (Tononi, Sporns, Edelman, 1994).

Náš pohľad môžeme dať aj do súvisu so známymi výpočtovými teóriami vedomia. V našom príspevku sme síce zámerne nešpecifikovali, či pod mentálnymi stavmi máme na mysli len vedomé alebo aj nevedomé stavy, ale toto rozlíšenie v kontexte recipročnej kauzality nepovažujeme za podstatné. Atkinson, Thomas a Cleeremans (2000) prezentovali taxonómiu

výpočtových teórií vedomia podľa dvoch dimenzií. Jednou bola tá, či vedomie skôr závisí od špecifických procesov alebo skôr od (neurálnych) reprezentácií so špecifickými vlastnosťami. Druhou bola tá, či vedomie je lokalizovateľné v mozgu, alebo či jeho koreláty sú široko distribuované. V rámci tejto taxonómie sa ohľadne prvej dimenzie sa skôr prikláňame k názoru, že vedomie je špecifickým procesom, avšak ten sa nedá oddeliť od reprezentácií, na ktorých proces operuje. To považujeme za konzistentné s požiadavkou stelesnenosti neurálnych reprezentácií (Ziemke, 2003). Z pohľadu druhej dimenzie je naše zaradenie jednoznačnejšie, a to smerom k distribuovanosti neurálnych korelátov vedomia.

Spomedzi známych výpočtových teórií má náš pohľad najbližšie k:

- teórii Dennetta (1991), pre ktorého sú reprezentáciami vedomia tie, ktoré determinujú správanie,
- teórii Cricka a Kocha (1988), ktorí vysvetľujú neurálne koreláty vedomia v duchu synchronizovaných oscilácií,
- teórii dynamického jadra (Tononi, Edelman, 1998), ktoré predstavuje distribuovaný neurálny korelát vedomia s recipročným tokom informácie medzi participujúcimi časťami, a
- teórii adaptívnej rezonancie (Grossberg, 1998), ktorá postuluje, že vedomé procesy vyvolávajú „rezonanciu“, t.j. integráciu informácií tečúcich zdola nahor a zhora nadol.

V kontexte spomínaných neurovýpočtových teórií nie je prekvapením návrh, že by sme mali hľadať nielen neurálne koreláty vedomia (mentálnych stavov), ale aj výpočtové koreláty vedomia, a hľadať medzi nimi vzťah (Cleeremans, 2005).

4 Záver

V príspevku sme pojednávali o vzťahu mozgu a mysle z pohľadu kognitívnej neurovedy a výpočtových systémov, pričom špecifikom nášho prístupu je zdôraznenie významu samoorganizácie ako hybnej sily, ktorá stojí za dynamickými vzorcami aktivít v mozgu a mysli. Význam samoorganizácie sme sa snažili zdôrazniť nielen v procese emergencie, ako to býva v príbuzných teóriách, ale taktiež z pohľadu možných mechanizmov kauzality zhora nadol. Spomedzi vyššie spomínaných teórií má k tomu najbližšie asi Grossbergova teória rezonancie, pretože tá explicitne zahŕňa takýto mechanizmus, aj keď operuje na vyššej úrovni abstrakcie než je úroveň impulzných neurónových sietí, potrebná pre modelovanie synchronizovaných aktivít v systéme. Za dôležitú súčasť nášho prístupu považujeme aj samoorganizáciu lokálnych parametrov a hypotetických globálnych premenných, ktoré treba identifikovať. Za ďalší krok smerom k nášmu modelu považujeme prepojenie teórie dynamiky koordinácie s vhodným modelom impulznej neurónovej siete s plasticitou, aby sme vytvorili koherentný model so samoorganizáciou.

Pod'akovanie: Táto práca bola podporená grantovou agentúrou VEGA.

Literatúra

- [1] Atkinson A., Thomas S., Cleeremans A.: Consciousness: mapping the theoretical landscape. *Trends in Cognitive Sciences* 4 (2000) 372-382.
- [2] Bell A.: Levels and loops: The future of artificial intelligence and neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B* 354 (1999) 2013-2020.
- [3] Bienenstock E., Cooper L., Munro P.: Theory for the development of neuron selectivity: orientation specificity and binocular interaction in visual cortex. *Journal of Neuroscience* 2 (1982) 32-48.
- [4] Fell J. a spol.: Human memory formation is accompanied by rhinal-hippocampal coupling and decoupling. *Nature Neuroscience* 4 (2001) 1259-1264.
- [5] Beňušková L.: Kognitívna neuroveda. V knihe *Kognitívne vedy* (Rybár J., Beňušková L., Kvasnička V., eds.), Kalligram, Bratislava, 2002: 47-104.
- [6] Bressler S., Kelso J.: Cortical coordination dynamics and cognition. *Trends in Cognitive Sciences* 5 (2001) 26-36.
- [7] Chrisley R., Ziemke, T.: Embodiment. *Encyclopedia of Cognitive Science*. Macmillan Publishers (2000) 1102-1108.
- [8] Cleeremans A.: Computational correlates of consciousness. *Progress in Brain Research* 150 (2005) 81-98.
- [9] Damasio A.: Synchronous activation in multiple cortical regions: a mechanism for recall. *Seminars in Neuroscience* 2 (1990) 287-297.
- [10] Dennett D.: *Consciousness explained*. Little, Brown 1991.
- [11] Der R., Smyth D.: Local online learning of coherent information. *Neural Networks* 11 (1998) 909-925.
- [12] Engel A.K., Singer W.: Temporal binding and the neural correlates of sensory awareness. *Trends in Cognitive Science* 5 (2001) 16-25.
- [13] Farkaš I.: Recipročná kauzalita medzi mysl'ou a mozgom z neurovednej perspektívy. *Kognice a umělý život V*, 2005: 117-124.
- [14] Frith C., Perry R., Lumer E.: The neural correlates of conscious experience: an experimental framework. *Trends in Cognitive Sciences* 3 (1999) 105-114.
- [15] Fries P., Reynolds J.H., Rorie A.E., Desimone R.: Modulation of oscillatory neuronal synchronization by selective visual attention. *Science* 291 (2001) 1560-1563.
- [16] Fuchs A. a spol.: Spatiotemporal analysis of neuro-magnetic events underlying the emergence of

- coordi-native instabilities. *Neuroimage* 12 (2000) 71-84.
- [17] Gerstner W., Kistler W.M.: *Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press, 2002.
- [18] Gray C.M. a spol.: Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature* 338 (1989) 334-337.
- [19] Grossberg S.: The link between brain learning, attention and consciousness. *Consciousness and Cognition* 8, 1-44.
- [20] Haken H.: *Synergetics*. Springer Verlag 1977.
- [21] Izhikevich E.M. a Desai N.S.: Relating STDP to BCM. *Neural Computation* 15 (2003) 1511-1523.
- [22] Izhikevich E.M.: Spike-timing dynamics of neuronal groups. *Cerebral Cortex* 14 (2004) 933-944.
- [23] Kay J., Phillips W.A.: Activation functions, computational goals and learning rules for local processors with contextual guidance. *Neural Computation* 9 (1997) 895-910.
- [24] Kelso J.A.S.: Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology* 15 (1984) 1000-1004.
- [25] Kelso J.A.S.: *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. MIT Press, 1995.
- [26] Kistler G.: *Spiking Neuron Models*. MIT Press, 2002.
- [27] Kistler W.M., Van Hemmen J.L.: Modelling synaptic plasticity in conjunction with the timing of pre- and postsynaptic action potentials. *Neural Computation* 12 (2000) 385-405.
- [28] König P., Engel A.K., Singer W.: Integrator or coincidence detector? The role of the cortical neuron revisited. *Trends in Neurosciences* 19 (1996) 130-137.
- [29] Lachaux J-P. et al.: Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping* 8 (1999) 194-208.
- [30] Le Van Quyen M. a spol.: Temporal patterns in human epileptic activity are modulated by perceptual discriminations. *Neuroreport* 8 (1997a) 1703-1710.
- [31] Le Van Quyen M. a spol.: Unstable periodic orbits in human epileptic activity. *Physical Review E* 56 (1997b) 3401-3411.
- [32] Legenstein R., Naeger C. a Maass W.: What can a neuron learn with spike-timing synaptic plasticity? *Neural Computation* 17 (2005) 2337-2382.
- [33] Penfield W., Jasper H.: *Epilepsy and the Functional Anatomy of the Human Brain*. Little, Brown & Co., 1954.
- [34] Port R., van Gelder, T. (Eds.): *Mind as Motion: Dynamics, Behavior, and Cognition*. MIT Press, 1995.
- [35] Phillips, W. & Singer, W.: In search of common foundations for cortical computation. *Behavioral and Brain Sciences* 20 (1997) 657-722.
- [36] Riehle A., Grün S., Diesmann M., Aertsen A.: Spike Synchronization and rate modulation differentially involved in motor cortical function. *Science* 278 (1997) 1950-1953.
- [37] Rodriguez E. et al.: Perception's shadow: long-distance synchronization of human brain activity. *Nature* 397 (1999) 430-433.
- [38] Roelfsema P., Engel A., König P., Singer W.: Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature* 385 (1997) 157-161.
- [39] Salinas E., Sejnowski T.: Impact of correlated synaptic input on output firing rate and variability in simple neuronal models. *Journal of Neuroscience* 15 (2000) 6193-6209.
- [40] Schmid-Schonbein C.: Improvement of seizure control by psychological methods in patients with intractable epilepsies. *Seizure* 7 (1998) 261-270.
- [41] Searle J.: Consciousness. *Annual Reviews of Neuroscience* 23 (1999) 557-578.
- [42] Song S., Miller K., Abbott L.: Competitive hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity. *Nature Neuroscience* 3 (2000) 919-926.
- [43] Steinmetz P. et al.: Attention modulates synchronized neuronal firing in primate somatosensory cortex. *Science* 404 (2000) 187-190.
- [44] Stopfer M., Bhagavan S., Smith B., Laurent G.: Impaired odour discrimination on desynchronization of odour-encoding neural assemblies. *Nature* 390 (1997) 70-74.
- [45] Tononi G., Edelman G.: Consciousness and complexity. *Science* 282 (1998) 1846-1851.
- [46] Tononi G., Sporns O., Edelman G.: A measure for brain complexity: relating functional segregation and integration in the nervous system. *Proceedings of the National Academy of Science* 91 (1994) 5033-5037.
- [47] Varela F., Lachaux J., Rodriguez E., Martinerie J.: The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nature Reviews Neuroscience* 2 (2001) 229-39.
- [48] Varela F., Thompson E., Rosch E.: *The Embodied Mind*. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- [49] von der Malsburg C.: Self-organization and the brain. In: *Handbook of Brain Theory and Neural Networks* (M. Arbib, ed.), MIT Press, 1995: 840-843.
- [50] Ziemke, T.: What's that thing called embodiment? *Proceedings of the 25th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum, 2003.