

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## DIPLOMOVÁ PRÁCE



Nora Ibrahimová

### **Metafory a modelování živých systémů**

Katedra teoretické informatiky a matematické logiky

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Ivan M. Havel, CSc., Ph.D.

Studijní program: Teoretická informatika

2009

Děkuji Ivanu M. Havlovi za inspiraci a vedení této práce.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

Nora Ibrahimová

# Obsah

<b>1</b>	<b>Autonomní systémy a enaktivní přístup</b>	<b>7</b>
1.1	Informace . . . . .	8
1.2	Enaktivní přístup . . . . .	9
1.3	Emergence . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Živé a neživé</b>	<b>12</b>
2.1	Historie života, těla a mysli . . . . .	12
2.2	Fenomenologie . . . . .	14
2.3	Živé a neživé . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Autopoieze</b>	<b>16</b>
3.1	Autopoietické systémy v přírodě . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Modely autopoietických systémů</b>	<b>21</b>
4.1	Autopoietický systém Bourgina a Stewarta . . . . .	22
4.2	Matematický model systému . . . . .	24
4.2.1	Analýza modelu . . . . .	26
4.3	Autopoietický systém jako náhodný dynamický systém . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Život jako autopoieze a kognice</b>	<b>29</b>
5.1	Vztah autopoieze a kognice . . . . .	29
5.2	Život jako autopoieze a kognice . . . . .	30
5.3	Intencionalita . . . . .	31
5.4	Žité tělo . . . . .	32
5.5	Senzomotorická identita . . . . .	32
5.5.1	Model senzomotoriky pomocí neuronové sítě . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Neurofenomenologie</b>	<b>39</b>
6.1	Fenomenologický popis vnímání času . . . . .	40

6.2	Neurobiologický popis vnímání času . . . . .	40
6.3	Experimentální neurofenomenologie . . . . .	42
<b>7</b>	<b>10 stavebních kamenů neurodynamiky podle Freemana</b>	<b>45</b>
7.1	Neurony . . . . .	45
7.1.1	Přenos signálů mezi neurony . . . . .	46
7.2	Skupiny neuronů . . . . .	47
7.2.1	Skupina s pozitivní zpětnou vazbou . . . . .	48
7.2.2	Skupina s negativní zpětnou vazbou . . . . .	49
7.2.3	Limitní cyklus . . . . .	49
7.3	Čichové vnímání . . . . .	50
7.3.1	AM-vzory . . . . .	51
7.3.2	Krajina atraktorů . . . . .	53
7.3.3	Zobecňování a význam . . . . .	53
7.3.4	Mechanismus vnímání . . . . .	54
<b>8</b>	<b>Vědomí podle Edelmána a Tononiho</b>	<b>57</b>
8.1	Povaha vědomí . . . . .	57
8.2	Vědomí v mozku . . . . .	59
8.3	Distribovaná neuronová aktivita . . . . .	59
8.4	Selekcionismus a reentry . . . . .	60
8.4.1	Modelování reentry . . . . .	62
8.5	Funkční klastry . . . . .	64
8.6	Neuronová komplexita . . . . .	66
8.6.1	Příklad . . . . .	67
8.6.2	Faktory ovlivňující komplexitu . . . . .	70
8.6.3	Komplexita a vnější stimuly . . . . .	71
8.7	Hypotéza dynamického jádra . . . . .	72
<b>9</b>	<b>Srovnání přístupů Edelmána a Freemana</b>	<b>74</b>
9.1	Srovnání . . . . .	75
9.2	Enakce ve fungování mozku . . . . .	76
	<b>Literatura</b>	<b>77</b>

Název práce: Metafory a modelování živých systémů

Autor: Nora Ibrahimová

Katedra (ústav): Katedra teoretické informatiky a matematické logiky

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Ivan M. Havel, CSc., Ph.D., Centrum pro teoretická studia UK

E-mail vedoucího: havel@cts.cuni.cz

Abstrakt: Předložená práce si klade za cíl teoreticky prozkoumat a popsat některé modely živých systémů. V první části se zabývá modely autonomních systémů, jako je například buňka nebo živý tvor jako celek. V této části je představen princip autopoieze a matematický model autopoietického systému. Kromě toho jsou zde prozkoumány další související, filosoficky relevantní pojmy a principy. Druhá část podrobně popisuje a srovnává dva dynamické modely mozku. Obě části se přitom nesou v duchu tzv. enaktivního přístupu, kladou důraz na dynamiku a využívají znalostí a pojmů z teorie dynamických systémů. Součástí práce je i vytvoření modelu jednoho z klíčových pojmů – senzomotoriky – pomocí neuronové sítě.

Klíčová slova: model, život, enakce, mozek, senzomotorika

Title: Metaphors and Modelling of Life Systems

Author: Nora Ibrahimová

Department: Department of Theoretical Computer Science and Mathematical Logic

Supervisor: Doc. Ing. Ivan M. Havel, CSc., Ph.D., Center for Theoretical Study UK

Supervisor's e-mail address: havel@cts.cuni.cz

Abstract: The aim of this work is to theoretically study and describe some of the models of living systems. In the first part, we focus on models of autonomous systems, such as the cell or a living being as a whole. In this part, we introduce the principle of autopoiesis and a mathematical model of an autopoietic system. We also analyse other related and philosophically relevant terms and principles. In the second part, we describe in detail and compare two dynamic models of brain. Both parts take the so-called enactive approach, and use the terms and principles of the dynamic systems theory. As a part of this work, a model of one of the key terms – sensorimotor skills

– has been created using neural networks.

Keywords: model, life, enaction, brain, sensorimotor

# Kapitola 1

## Autonomní systémy a enaktivní přístup

Chceme-li zkoumat živé systémy, kde máme začít? Co mají společného bakterie a člověk? Začneme u toho nejjednoduššího, co o nich můžeme prohlásit – oba jsou autonomními systémy.

*Autonomní a heteronomní* znamená doslova řízený-sebou a řízený-jiným. Heteronomní systém má dané vstupy a výstupy a je řízen zvenčí. Příkladem může být umělá neuronová síť se svou vstupní a výstupní vrstvou. Oproti tomu autonomní systém organizuje a řídí sám sebe. Nemá předem dané vstupy a výstupy, ale sám určuje doménu, ve které působí. Termín autonomní je používán pro určitý generický způsob organizace procesů (nikoli statických entit), které tvoří systém. Může jít například o metabolické procesy v buňce, nebo o způsob posílání signálů ve skupině neuronů. V autonomním systému pro tyto procesy platí, že:

- rekurentně závisí jeden na druhém, vytvářejí síť vzájemně se produkujících a udržujících procesů
- tvoří systém jako celek v jeho doméně
- určují doménu možných interakcí systému s okolím

Typickým autonomním systémem je živá buňka.

Autonomní systém můžeme zkoumat dvěma způsoby: shora dolů (top-down) a zdola nahoru (bottom-up). Varela [25] v přístupu shora dolů definuje autonomní systém jako systém s *organizačním uzávěrem*. Organizačním

uzávěrem je myšlena sebe-referenční, tedy cyklická a rekurzivní síť vztahů, které určují systém jako celek. Varela také zdůrazňuje, že autonomní systém je vždy strukturálně svázán se svým prostředím. Změny stavu systému jsou určeny jeho organizačním uzávěrem a jeho vztahem s prostředím, dokud se něco z toho nenaruší a systém se nerozpadne.

Při zkoumání autonomního systému zdola nahoru zkoumají Ruiz-Mirazo a Moreno [21] energetické a termodynamické požadavky nutné k základní neboli minimální autonomii. Tou je myšlena schopnost výměny hmoty a energie s okolím tak, aby systém reguloval jak své vnitřní, sebe-produkující procesy, tak i interakci s prostředím. K tomu jsou potřebné tyto součásti: semipermeabilní membrána, nějaký aparát pro převod energie (např. adrenosin trifosfát v buňce, který bere energii z chemických vazeb pro reakce probíhající uvnitř buňky) a alespoň jedna komponenta, která kontroluje a podporuje sebe-produkující procesy (katalyzátor).

Autonomních systémů najdeme v přírodě mnoho: živá buňka, nervový systém, vícebuněčné organismy, ekosystém, nebo imunitní systém. Samozřejmě, že pojmy jako systém a autonomie nejsou přesně definované, jde spíše o jakési heuristické popisy, které se vždy vztahují k pozorovateli. Imunitní systém tak můžeme považovat za autonomní, když se zaměříme na něj jako na síť s vlastní somatickou identitou na buněčné a molekulární úrovni. Ale můžeme ho označit i za heteronomní, pokud se zaměříme na tělo jako celek, ve kterém je imunitní systém jednou z mnoha komponent.

## 1.1 Informace

Informace obvykle znamená objektivní, na pozorovateli nezávislý údaj o světě. Informace *snižuje neurčitost*. Aby byla informace relevantní pro autonomní systém, musí být ale naopak závislá na kontextu, vztahovat se k systému. Je součástí strukturální vazby mezi systémem a prostředím. Co nese pro systém informaci je dáno jeho historií, strukturou a jeho potřebami. Pouze to, co má pro autonomní systém význam, se počítá jako informace. To se velmi liší od heteronomního systému, který předpokládá objektivistický přístup, kde nějaký vnější pozorovatel určuje co je a co není informací.

Jak naznačuje latinské slovo pro informaci *in-formare*, významy si autonomní systém *tvorí uvnitř* kontextu své dynamiky a své strukturální vazby. Taková informace je reprezentovaná vzorci aktivity, které překračují hranice mozek-tělo-svět. Informace je také enaktivní, tedy obsažená v konání systému, v jeho interakci s okolím. To opět kontrastuje s objektivistickým



pohledem, kde je reprezentace vnitřní strukturou, která kóduje na kontextu nezávislé informace o světě. Kognice pak spočívá ve zpracování této informace, která je vzhledem k vnější objektivní informaci zakódovaná správně nebo chybně.

## 1.2 Enaktivní přístup

V souvislosti s informací byl zmíněn pojem „enaktivní“. Slovo enaktivní bylo původně používáno ve spojení enaktivní znalost, což znamená znalost získaná akcí, resp. interakcí se světem nebo s předmětem (např. jízda na kole). Varela, Thompson a Rosch [30] použili toto slovo v širším smyslu, a pojmenovali jím svůj přístup ke kognitivnímu zkoumání. Takzvaný „enaktivní přístup“ je alternativou k dosavadním dvěma přístupům, kognitivismu a konekcionismu.

Enaktivní přístup v sobě zahrnuje mnoho souvisejících idejí. Thompson [22] vyjmenovává tento přehled:

- Živé bytosti jsou autonomní agenti, kteří se aktivně sebe-produkují a udržují, a určují tak svou vlastní kognitivní doménu.
- Nervový systém je autonomní dynamický systém. Vytváří a udržuje si svou aktivitu, a to smysluplně a koherentně. Nervový systém nezpracovává informace jako výpočetní systémy, ale vytváří smysl.
- Kognice (tedy interakce s okolím za určitým účelem) znamená využívání získaného know-how ve vtěleném konání, které je situované v čase a prostoru.
- Svět kognitivní bytosti není předem daná vnější realita, která je interně reprezentovaná. Naopak, je to relační doména určená autonomií bytosti a jejím vztahem k okolí.
- Vědomá zkušenost není pouhý vedlejší produkt činnosti mozku, ale klíčem k pochopení mysli, a je důležité ji fenomenologicky zkoumat.

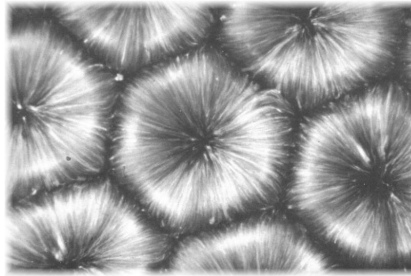
Protože se celá práce nese v duchu enaktivního přístupu, budou všechny části tohoto stručného seznamu vysvětleny a dále rozvedeny. Uveďme zatím, že všechny zde zkoumané přístupy mají společné to, že přesouvají těžiště zájmu:

1. na *dynamiku*, oproti struktuře mozku, která ji umožňuje
2. na *vyšší* (globálnější) úroveň této dynamiky

### 1.3 Emergence

Jedním ze základních pojmů enaktivního přístupu je emergence. Emergentní proces *vyvstává* ze skupiny nebo sítě elementů, spontánně se organizuje (tzv. samo-organizace, angl. self-organization) z lokálně definovaných a globálně omezených interakcí těchto elementů. Emergentní jev nelze přiřadit žádnému z jednotlivých prvků.

Vezměme si jako příklad tzv. Bénardovy buňky, tedy dynamický geometrický vzorek, který se objevuje v některých kapalinách při vzrůstající teplotě, například v oleji na pánvi. Jak zahříváme pánev, vzrůstá teplotní rozdíl mezi horní chladnější a dolní teplejší vrstvou oleje. V kapalině dochází ke konvekci a vznikají buňkovité útvary se strukturou podobnou včelímu plástu. Na začátku nehybný olej se začne „kutálet“ po pánvi. Systém prošel změnou stavu a vznikl emergentní jev: samo-organizované hexagonální Bénardovy buňky.



Obrázek 1.1: Bénardovy buňky

Na tomto příkladě si lze ilustrovat některé základní pojmy z oblasti emergence a samo-organizace. Olej na pánvi je dynamický systém, tedy systém, který se v čase mění (říkáme, že mění svůj stav). Teplota pánve, resp. teplotní gradient, je *kontrolní parametr* (control parameter) dynamického systému, který určuje, kdy nastávají stavové přechody. Kontrolní parametr způsobí, že systém projde několika různými stavy, ale nijak nediktuje povahu těchto stavů ani jejich emergentních jevů. *Parametr uspořádání* (order parameter)

je velikost buňkovitých útvarů. Vzniká interakcí molekul v kapalině, ale zároveň dramaticky omezuje a určuje jejich chování tím, že omezí velké množství stupňů volnosti, které by jinak jednotlivé molekuly měly.

Emergence skrz kolektivní samo-organizaci má tedy dva aspekty. Vzniká globální emergentní jev, který výrazně omezuje ty lokální interakce, díky kterým vznikl. Lokální a globální se zde podmiňují navzájem v *ko-emergenci*. Tomuto vzájemnému podmiňování se také říká *cyklická kauzalita* [9]. Jde o velmi důležitý aspekt mnoha dynamických systémů, včetně neurodynamiky mozku.

# Kapitola 2

## Živé a neživé

### 2.1 Historie života, těla a mysli

V Aristoteliánské tradici byly život a mysl jedno – *duše* (řec. psyche). Pro Aristotela znamenala duše *schopnost* organismu být nejrůznějšími způsoby aktivní. Duše tak zahrnovala veškeré schopnosti patřící k životu, včetně mentálních a kognitivních schopností. Aristoteles přirovnával vztah duše k tělu jako vztah vidění k oku [2]:

„Kdyby oko bylo živá bytost, duše by byla jeho zrakem.“

Stejně jako si nemůžeme představit zrak bez oka, aniž bychom porušili podmínku konzistence, nemůžeme předpokládat duši bez těla, nebo tělo bez svých vitálních schopností – bez duše. Duše a tělo jsou dvě strany jedné mince – života.

V sedmnáctém století přišel rozmach přírodních věd, tehdy zvaných přírodní filosofie. Na svět se pohlíželo mechanisticky – věci se řídí přírodními zákony, což platí i pro tělo. Aristotelův koncept duše byl v této době považován za fikci, která nemůže mít nic společného s čímkoliv, co existuje ve světě a podléhá přírodním zákonům. Duše byla nahrazena racionální myslí, která na rozdíl od Aristotelovy duše existuje *mimo přírodu*, a jejíž esencí je vědomá myšlenka.

Hlavní roli ve vyjmutí duše z přírody a oddělení vědomí od života hrál Descartes. Vědomí patří k transcendentální mysli nebo duši, a vědomá mysl proto není živá. Na druhou stranu být živý je vlastností těla, fyzického objektu podléhajícího zákonům mechaniky, a proto živé tělo jako takové není vědomé. Vědomí a život jsou zcela jiných povah, a přestože jsou v nás velmi

úzce spjaté, mohou existovat i odděleně (jak se podle Descartova katolického pohledu stane s duší po smrti).

Oddělením duše (nebo mysli) od života vzniká ale zásadní problém: jak se spolu tyto dvě naprosto odlišné věci mohou tak úzce pojit v lidském těle? Podle Descarta měla sloužit šišinka mozková, jediná nepárová část mozku, ke komunikaci těla s duší. Tato teze byla s rozvojem vědy odmítnuta, ale problém zůstal. Pokud totiž předem oddělíme mysl a život jako dvě úplně odlišné věci, jsme uvězněni v pasti. Když se rozhodneme zredukovat vědomou zkušenost na externí struktury a funkce, vědomí zmizí (materialismus). Když zredukujeme vnější struktury a funkce na vnitřní vědomí, zmizí všechno vnější (idealismus). Vymyšlení nějaké třetí ingredience, která by tyto dvě spojila, se zdá jako zoufalý pokus uměle překlenout propast, která překlenout nelze.

Kant [11] se také zabýval tímto rozporem, ovšem nepřijímal již Kartézské oddělení mysli a těla, resp. života. Živý organismus sám popisuje těmito dvěma podmínkami:

- možnost jeho částí (jak jejich existence, tak jejich formy) musí záviset na jejich vztahu k celku
- části vytvářejí celek (jednotu), protože si jsou vzájemně příčinou i důsledkem své formy

Takto popsaný systém je zároveň organizovaný a samo-organizující, čímž se liší například od stroje, který je pouze organizovaný. Všimněme si také podoby Kantova pojetí s pozdějším konceptem autopoietických systémů. Princip samo-organizace ovšem podle Kanta nelze pochopit pomocí vědy, protože ta je kauzální, tedy popisuje příčinu a následek, na rozdíl od cyklické kauzality samo-organizace, kde si jsou jednotlivé části navzájem příčinami i následky. Kant tak nemohl život umístit do fyzikálního světa, protože ten v jeho době nic podobného neznal.

Dnes už si s problémem cyklické kauzality poradit dokážeme. Na rozdíl od Newtonovské fyziky osmnáctého století je pro nás hmota ekvivalentem energie, a schopnost samo-organizace prokazatelně má. Můžeme tak pokročit v popisu života jako emergentního řádu přírody, který má základ v několika principech, včetně principu autopoieze. Naším cílem už není ukázat, jak může být subjektivistický koncept vědomí odvozen od objektivistického konceptu těla. Spíše se snažíme pochopit emergenci subjektivity a vědomí živé bytosti, která není jen objektivistickým tělem, ale má do jisté míry

svou vlastní *interioritu*. Pojem interiorita zahrnuje jednak sebe-produkci „vnitřku“, tedy individualitu, ale také vnitřní a normativní vztah s vnějším, tedy vztah mezi organismem a prostředím.

## 2.2 Fenomenologie

Chceme-li co nejlépe porozumět lidské mysli, nesmíme zapomenout na vědomí a subjektivitu, tedy jak myslíme, cítíme a prožíváme sami sebe. Mentální aktivita, kterou zkoumáme pomocí přístrojů a kterou modelujeme, se neodehrává ve vakuu, ale v něčem živém a *prožívaném těle* (lived body). Živé tělo je také v centru pozornosti enaktivního přístupu. Fenomenologie je, v jednom ze svých nejvýraznějších proudů následujících Husserla a Merleau-Pontyho, vědou prožívaného těla. Zabývá se pečlivým popisem, analýzou a interpretací procesů vnímání, přičemž se nezaměřuje na to *co* vnímáme (zažíváme), ale *jak* to vnímáme. Fenomenologie se tak stává nedílnou součástí zkoumání vědomí.

Abychom mohli prozkoumat proces vlastního vnímání a prožívání, musíme odhlédnout od toho, co je předmětem našeho momentálního zájmu, a zaměřit se na to, jak vypadá samotné vnímání onoho předmětu. U vzpomínek se zaměříme na to *jak si je pamatujeme*, u představ *jak si je představujeme*. Tato metoda zkoumání se nazývá *fenomenologická redukce*. Jedním z přístupů je natrénování a ovládnutí mentální schopnosti zvané *epoché*. Jde o schopnost odpoutat se od objektu zájmu a našich představ a objektivních pravd o něm, a místo toho se zaměřit na to, jak onen objekt vnímáme, jak získáváme jeho zkušenost.

Pojmy emergence a autonomní systém úzce souvisejí s myšlenkami fenomenologa Merleau-Pontyho, které představil ve své knize z roku 1942 [17]. To, co nazýváme ko-emergencí, popisuje Merleau-Ponty jako *formu*. Forma je celek, který nelze oddělit od jeho komponent, ale nemůže na ně být ani redukován.

„Forma existuje tam, kde se vlastnosti systému změni při změně jakékoliv jeho části, a naopak se uchovají za podmínky, že změníme všechny součásti systému, ale zachováme jejich vzájemné vztahy.“

Aby se Merleau-Ponty vyhnul tradičnímu dělení na mentální a fyzické, na mysl a přírodu jako by to byly dva zcela odlišné světy, zkoumá strukturu *chování* (behavior, fr. comportement). Argumentuje, že chování nelze

jednoduše rozdělit na samostatné prvky, jako jsou podnět a reakce v behavioralismu, nebo izolovaný nervový okruh v neurodynamice. Takové dělení považuje za „mechanistické uvažování“, které nelze použít ke zkoumání života nebo mentálních procesů, protože jde o formy, které nelze dekomponovat na jejich jednotlivé části. Forma nebo struktura chování spočívá ve vzájemném podmínění celku a jeho částí.

## 2.3 Živé a neživé

Zkombinujeme-li Merleau-Pontyho práci s teorií biologické autonomie [21], získáme dva základní aspekty, ve kterých se živé (např. živá buňka) liší od neživého. Za prvé, živá buňka pomocí chemických reakcí neustále obnovuje a udržuje sebe sama, včetně své membrány. Udržuje tak, dokud to jde, podmínky nutné ke svému přežití, což neživá věc (např. plamen svíčky) nedělá. Za druhé, buňka mění své prostředí s ohledem na vlastní materiální a energetické požadavky, a to včetně těch podmínek, které Merleau-Ponty nazývá *virtuální*. Organismus si utváří své okolí tak, aby se mu v něm žilo co nejlépe, tedy podle svých *norem a významů*.

Vezměme si pro příklad bakterii, tedy nejjednodušší žijící buňku, konkrétně druh *Escherichia coli*. Tato bakterie v prostředí, kde je přítomna sukrosa, plave proti jejímu gradientu tak, aby zvýšila koncentraci sukrosy ve svém okolí. Zatímco sukrosa je reálná a přítomná věc v chemickém prostředí, status sukrosy jako potravy není. Býti potravou není nedílnou vnitřní vlastností molekuly sukrosy. Je to vlastnost vztažená k bakterii, v terminologii Merleau-Pontyho je to virtuální vlastnost, vyskytující se na jiné úrovni. Autonomní organismus, vzhledem ke svým normám – podmínkám pro přežití, přináší tuto vlastnost jako součást svého strukturálního svazku s prostředím. Sukrosa patří fyzickému řádu, sukrosa-jako-potrava patří živému řádu.

Živý organismus, jako tato bakterie, produkuje svůj vnitřek, svou interioritu, která zároveň určuje vnějšek, ke kterému se interiorita prostřednictvím norem vztahuje. K tomuto druhu interiority je nutný operační uzávěr systému, tedy aby byl autonomní. Autonomie je proto nutnou podmínkou pro emergenci interiority. Merleau-Ponty se s pomocí těchto termínů snaží překročit propast, která od dob Descarta zeje mezi myslí a tělem, resp. přírodou. Argumentuje, že příroda není pouze exteriorita, ale v případě života má svou vlastní interioritu, a tím se přibližuje mysli. Stejně tak mysl není čistá interiorita izolovaná od světa, ale forma nebo struktura interakce se světem, a tím připomíná život.

# Kapitola 3

## Autopoieze

Co je to život? Jak vznikl? Jak by vypadal život ve své „minimální formě“? Biologie se na život dívá z několika různých pohledů, které se vzájemně doplňují. V genetice tvoří život reprodukující se populace, důležitou roli hraje historická kontinuita a evoluce. Další pohled na život je více ekologický: organismus není jen jedním z článků mnoha generací v populaci, ale je to jedinec, který konstruktivně interaguje se svým prostředím. Vytváří si nebo si hledá co nejdokonalejší podmínky pro přežití, a tím mění své okolí i pro další generace. Nakonec je zde třetí pohled, který se zaměřuje na konkrétní organismus, teď a tady. Představme si, že se díváme na jedince, o kterém ještě nic nevíme. Může to být neznámý druh bakterie, něco co jsme objevili na jiné planetě, nebo syntetizovali v laboratoři. Podle čeho určíme, zda je to živé?

Teorie autopoieze, formulovaná Maturanou a Varelou [29], spadá do poslední kategorie. Jako základ pro své zkoumání si bere živou buňku. Žijící buňka je termodynamicky otevřený systém, který si neustále vyměňuje se svým okolím hmotu a energii. Některé molekuly prostoupí její membránou a stanou se součástí procesů uvnitř buňky, zatímco jiné molekuly vychází membránou z buňky ven jako odpad. Díky této výměně si buňka může vytvářet látky, které zůstávají uvnitř a dál se podílí na té samé látkové produkci, díky které vznikly. Buňka si tedy (různými procesy) vytváří své komponenty, které zase tvoří buňku, v neustálém koloběhu. Tato neutuchající sebe-produkce byla pojmenována autopoieze (z řeckého autos-sám a poiein-tvořit). Systémům, které nevytvářejí samy sebe, ale které jsou produktem vnějších procesů, se říká allopoietické. Maturana a Varela dále rozlišují heteropoietické systémy, což jsou allopoietické systémy navržené a vytvořené



člověkem, například auto nebo počítač. Ve své hlavní tezi Varela a Maturana tvrdí, že živé systémy jsou nutně autopoietické nebo mají autopoietickou strukturu. Tedy jsou organizované tak, že jejich „tvůrčí“ procesy vytvářejí komponenty, které jsou nutné pro pokračování těch samých procesů.

Je zřejmé, že autopoietický systém je autonomní. To ovšem neplatí naopak, ne každý autonomní systém je nutně autopoietický. Například imunitní systém je autonomní, ale nemá jasně definovatelnou membránu.

Koncept autopoieze nebyl vytvořen jako analogie života, ale jako jeho minimální forma. Teorie autopoieze je inspirovaná buňkou, ale zároveň se snaží abstrahovat od molekulárních procesů, které v buňce probíhají, a zachytit obecnější vzorec. K tomu slouží představa „minimální buňky“. Ta se skládá jen z těch procesů, které jsou nutné k tomu, aby byla buňka samostatnou a od okolí oddělenou entitou. Nezbytná je pro buňku semipermeabilní (polopropustná) membrána, kterou některé látky projdou oběma směry, některé jen jedním směrem a jiné látky jí neprojdou vůbec. Membrána zabraňuje tomu, aby se buňka rozpustila ve svém okolí, ale zároveň umožňuje výměnu látek s okolím. Uvnitř – za membránou buňka sestává ze sítě metabolických procesů, které využívají i látky získané zvenčí. Důležité je, že si buňka pomocí metabolické sítě regeneruje své vlastní komponenty včetně membrány. Tím buňka doslova ztělesňuje koloběh sebe-produkce: neustále obnovuje své součásti včetně membrány, a tím znovu-vytváří sebe, oddělenou od všeho ostatního.

K této myšlence lze přistupovat i trochu jinak: buňka povstává z molekulární „polévky“ tím, že si vytváří membránu, která jí odděluje od toho, co k ní nepatří. Metabolické procesy membránu vytvářejí, ale i samy na její existenci závisí.

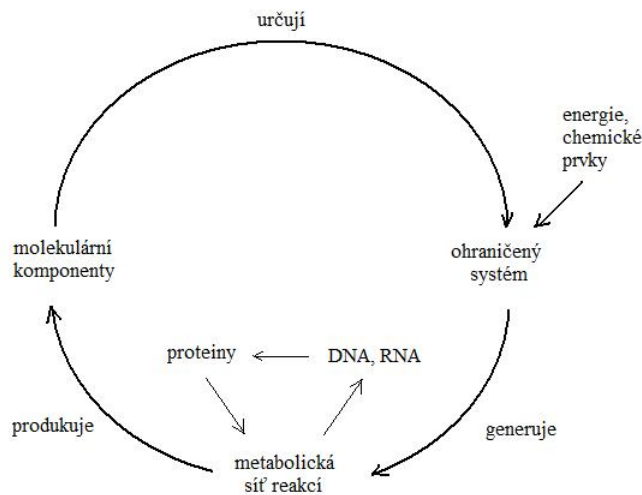
Přesnou definici autopoieze její autoři několikrát upravili. Pozdější zjednodušená Varelova definice říká, že autopoietický systém musí splňovat tři podmínky:

- systém má semipermeabilní membránu
- membrána je produkována sítí reakcí, které probíhají uvnitř membrány
- síť reakcí musí obsahovat ty reakce, které obnovují komponenty systému

Definice neříká nic bližšího o povaze reakcí, a tudíž představuje abstrakci života, jejíž jednou z možných implementací je biologická buňka s reakcemi,

na nichž se podílí RNA, DNA a příslušné enzymy. Tato definice nám také přímo dává tři kritéria, podle kterých můžeme u libovolné entity zjistit, zda je autopoietická (a může-li být živá, je-li autopoieze nutnou podmínkou života). Stačí ověřit, že systém obsahuje:

1. polopropustnou membránu sestávající z molekulárních komponent. Dokážeme pomocí této membrány systém odlišit od okolí?
2. síť reakcí: komponenty jsou vytvářeny sítí reakcí, které se odehrávají uvnitř membrány
3. vzájemná závislost bodů 1 a 2: Vytváří síť reakcí komponenty, z kterých se membrána skládá, a jsou tyto reakce závislé na existenci membrány?



Obrázek 3.1: DNA/RNA varianta autopoieze (podle [22])

### 3.1 Autopoietické systémy v přírodě

Podívejme se na některé systémy z přírody, zda splňují jednotlivá kritéria autopoieze:

Entita	Membrána	Síť	Nezávislost	Autopoietický?
Virus	ano	ne	ne	ne
Bakterie	ano	ano	ano	ano
Améba	ano	ano	ano	ano
Mitochondrie	ano	ano	ne	ne
Sekce DNA	ne	ne	ne	ne

Bakterie (prokaryotická buňka) a améba (eukaryotická buňka) splňují všechna kritéria, a tudíž jsou autopoietické. Replikativní molekuly jako DNA nebo RNA nejsou autopoietické, protože nemají ani membránu ani vnitřní síť reakcí, a tudíž nejsou organizovány sebe-produkujícím způsobem. Virus, přestože někdy považován za živý, nesplňuje kritéria autopoieze. Jeho molekulární komponenty (nukleové kyseliny) nejsou vytvářeny uvnitř viru, ale mimo něj v hostitelské buňce. Virus nemá vlastní metabolismus. Mimo hostitelskou buňku dokáže přežít, ale nevyměňuje si látky s okolím, nežije v autopoietickém pojetí toho slova.

Kritéria autopoietického systému jsou založena na principu jednobuněčného organismu. Co ale vícebuněčné organismy, jsou také autopoietické? Maturana a Varela [15] zde rozlišují mezi autopoietickými systémy prvního a druhého řádu. Buňky jsou autopoietické systémy prvního řádu, zatímco systém, který se z buněk skládá, je autopoietický systém druhého řádu. Může jít o vícebuněčný organismus, ale i o kolonii nebo lidskou společnost, případně orgán jako srdce nebo játra. Otázkou je, zda je autopoietický systém druhého řádu také autopoietickým systémem prvního řádu. Intuice nám říká, že například mravenec je autopoietický, protože jeho komponenty, včetně těch tvořících jeho membránu, jsou vytvářeny uvnitř něj a umožněny vnitřními podmínkami, pro které je membrána nezbytná. Naopak kolonie mravenců může být chápána jako skupina autopoietických systémů, ale ne jako samostatná autopoietická jednotka. Ovšem organizace vícebuněčných systémů je mnohem složitější než organizace jediné buňky, a proto není tak snadné na tuto otázku zformulovat exaktní odpověď. Záleží také pochopitelně na tom, jak chápeme pojmy „membrána“ a „síť reakcí“. Varela [25] proto vícebuněčný organismus popisuje jako autonomní systém, který se vyznačuje organizačním uzávěrem (organizational closure), tj. cyklickou rekurzivní sítí procesů, které vytvářejí systém jako celek. Systém s organizačním uzávěrem může, ale nemusí být autopoietický.

Zbývá ještě položit důležitou otázku: jsou všechny autopoietické systémy živé? Stačí autopoieze k tomu, abychom systém prohlásili za živý? Vědci,

kteří se touto otázkou zabývají, se shodnou na tom, že k životu je potřeba autopoieze a kognice (cognition). Maturana [14] definuje kognici takto:

„Kognitivní systém je systém, který definuje doménu interakcí, ve kterých působí tak, aby udržel sám sebe. Proces kognice je ono působení (chování) v této doméně. Živé systémy jsou kognitivní systémy a žití je kognitivní proces. To platí pro všechny organismy, ať už mají nervový systém nebo ne.“

Maturana s Varelou tvrdí, že autopoieze v sobě kognici zahrnuje, takže k životu stačí. Ovšem v poslední době je tento pohled zpochybňován jinými vědci. Například Bourguine a Stewart [4] tvrdí, že navrhli umělý autopoietický systém, který není kognitivní (stará se o sebe a svou membránu, ale nijak neinteraguje s okolím). Podle Thompsona [22] zde opět záleží na úhlu pohledu. Pokud se na autopoiezi díváme jen jako na vnitřní sebe-produkující organizaci systému, pak v sobě autopoieze kognici nezahrnuje. Pokud bychom jí ale brali v širším kontextu jako vnitřní organizaci postačující ke konstruktivní interakci s okolím, pak s sebou autopoieze nese zároveň i kognici. Ať už se přikláníme k jakémukoli pohledu, nesporné je, že jak autopoieze tak kognice jsou nutné pro to, abychom o něčem prohlásili, že je to živé.

## Kapitola 4

# Modely autopoietických systémů

Nejjednodušším žijícím organismem na Zemi je podle autopoietického kritéria prokaryotická buňka, jejímiž dnešními zástupci jsou bakterie a archea. Prokaryotická buňka je evolučně velmi starý organismus (vznikl pravděpodobně před 3-3,5 miliardami let), a má mnohem jednodušší skladbu než eukaryotická buňka (z níž sestávají mj. rostliny a živočichové). Prokaryota neobsahuje žádné další složitější součásti, nemá ani buněčné jádro, její DNA v ní volně „pluje“. Přesto jde už o velmi komplexní systém, na jehož produkci se podílí odhadem dva až pět tisíc genů a podobný počet proteinů [13].

Dokázali bychom navrhnout jednodušší model autopoietického systému? Tato otázka není zajímavá jen z hlediska teorie autopoieze, ale také v teorii o vzniku života, kde pátráme po tom, jak mohly na Zemi vzniknout tzv. protobuňky, prapředci dnešních buněk. Přístupů, jak modelovat autopoietický systém, je několik. Můžeme vytvořit počítačovou simulaci, vyrobit chemický autopoietický systém, nebo navrhnout jeho matematický model.

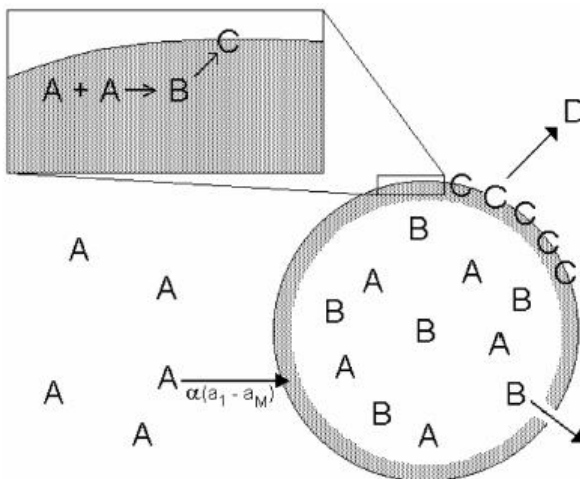
Nejnámější počítačovou simulací autopoietického systému je *Alife* (zkratka z „Artificial life“), navržený přímo autory autopoieze Varelou, Maturanou a Uribem [1] a později znovu implementovaný McMullinem [16]. Jde o dvojrozměrný systém složený z myšlených chemických prvků, které spolu reagují podle předem určených pravidel. Model se zjednodušeně snaží zachytit chemické procesy, které probíhají v živé buňce.

Důležitým prvkem autopoietického systému, a tedy i každého jeho modelu, je membrána. Protože *Alife* modeluje dvojrozměrný systém, už dvě

poškození v dvojrozměrné membráně ji mohou rozdělit na dvě nebo více částí a systému hrozí zánik. Proto přišli Bourguine a Stewart [4] s vlastním, trojrozměrným modelem autopoieze, který navíc popsali pomocí matematického modelu, vhodnějšího k jeho následné analýze.

## 4.1 Autopoietický systém Bourgina a Stewarta

Bourguine a Stewart [4] vymysleli trojrozměrný systém, definovaný jako celulární automat, který má tvar koule (pro jednoduchost nepředpokládáme jiné tvary). Schéma systému je vidět na obrázku. Mějme na paměti, že jde o myšlený systém, byť matematicky popsáný, sloužící jako víceméně jednoduchý model. Autoři ve svém popisu vynechali mnoho podstatných detailů, které si tak bylo potřeba domyslet.



Obrázek 4.1: schéma systému ([4])

Nejprve se podívejme, jak systém zhruba vypadá. Komponenty, z nichž se systém skládá, jsou nazývány prvky - lze si pod nimi představit např. chemické prvky nebo molekuly. Prvky jsou tří typů: A, B, C a D. Membrána se skládá z prvků typu C. Čas od času se některý prvek typu C přemění na prvek typu D, který odpluje do okolí a zanechá v membráně díru. Prvky typu A se nacházejí v okolí systému a prochází volně membránou. Uvnitř systému se z dvou prvků typu A stává prvek typu B. Prvky typu A a B se uvnitř

systému volně pohybují. Prvek typu B dokáže zacelit díru v membráně – pokud se ocitne na kraji takové díry, přemění se v prvek typu C a část díry zacelí.

Přesnější definice těchto procesů vypadá takto:

1. *Struktura membrány:* Membrána, složená z prvků typu C, tvoří povrch kulového systému. S pravděpodobností  $k_c$  na jednotku plochy povrchu se prvek typu C rozpadne:  $C \rightarrow D$ . Vzniklý prvek typu D se oddělí do okolí a zanechá po sobě v membráně díru (případně zvětší již existující díru).
2. *Vznik prvku typu B:* Prvek typu B vzniká reakcí dvou prvků typu A. Tato reakce je možná jen uvnitř systému (pod membránou). Vnitřní povrch membrány tedy slouží jako katalyzátor reakce. Reakci tedy můžeme popsat takto:  $A + A + C \rightarrow B + C$ . Množství prvků typu B uvnitř systému je shora omezeno.
3. *Prvek typu A:* Prvek se ve středně velkém množství nachází v okolí systému a může volně projít membránou dovnitř systému. Vzhledem k tomu, že uvnitř systému prvek typu A zaniká při tvorbě prvku typu B, je nutný neustálý přísun prvků typu A dovnitř systému.
4. *Pohyb prvků:* Všechny prvky se volně pohybují (jako při Brownově pohybu), pokud nejsou součástí membrány (to může být jen prvek typu C).
5. *Polopropustnost membrány a její oprava:* Pokud je membrána neporušená, prvek typu B jí neprojde, ale pohybuje se uvnitř systému. Když prvek typu B narazí na okraj díry v membráně, přichytí se k okraji a díru zacelí - přemění se na prvek typu C:  $B \rightarrow C$ . Díra velikosti  $1C$  (plocha membrány, kterou zabere prvek typu C) se zacelí úplně, větší díra se zacelí částečně. Pokud je díra větší než  $1C$ , pak jí s konečnou pravděpodobností prvek typu B projde ven, aniž by se přichytil k některému z jejích okrajů.

Tak vypadá přeměna hmoty v systému. Protože přeměny v rovnicích  $B \rightarrow C \rightarrow D$  probíhají spontánně, můžeme popsat přeměnu energie v systému takto:  $A + A + C \rightarrow D + C$ .

Klíčovou proměnnou v chování systému je  $c^*$ , která říká, jak velká část povrchu systému je pokryta membránou (prvky typu C).  $c^* = c_M/c_1$ , kde

$c_M$  je aktuální počet prvků C v membráně, a  $c_1$  maximální počet prvků C v membráně, kdy je membrána bez děr. V systému lze nalézt dva atraktory pevného bodu PB1 a PB2. V PB1 je systém v ekvilibriu a hodnota  $c^*$  je větší než 50%. V PB2 se  $c^*$  rovná 0 a systém kolabuje. Přechod mezi těmito atraktory popisuje bifurkace B0, kdy je systém v kritickém stavu. Jak lze tyto atraktory vysvětlit? Je-li hodnota  $c^*$  vyšší než 50%, systém se ve stavovém prostoru nachází v PB1. To znamená, že díry v membráně způsobené reakcemi  $C \rightarrow D$  jsou plynule nahrazovány „opravnou“ reakcí  $B \rightarrow C$ . Pod bodem bifurkace (v PB2), kdy je hodnota  $c^*$  nižší než 50%, už systém vznikající díry opravit nestíhá. Díry se zvětšují, je jich čím dál více, díky čemuž prvek typu B častěji uniká ze systému, což dále umocňuje nemožnost opravovat díry. V této pozitivní zpětné vazbě autopoietický systém zaniká.

Na modelu je vidět, jak nezbytná je membrána pro existenci autopoietického systému. Systém se může nacházet ve dvou módech fungování: buď je „živý“, pak se z občasných malých výchylek dokáže vzpamatovat, nebo je „mrtvý“ a pak už se sám nevzkřísí. Existenci těchto dvou základních módů považuje Varela [28] za charakteristickou pro autopoietické systémy. Tyto dva módy jsou podle Varelly také základem úmyslného chování, kdy se systém snaží udržet živý.

## 4.2 Matematický model systému

Popsaný systém je trojrozměrný diskretní celulární automat s lokálními pravidly. Pro účely jeho matematické analýzy se na něj ovšem autoři dívají jinak – jako na spojitý systém v Euklidovském trojrozměrném prostoru ( $E_3$ ). Můžeme si představit, že budeme jednotlivé buňky celulárního automatu neustále zmenšovat, čímž se diskretní model bude čím dál více blížit spojitému. Pro popis chování systému je tato aproximace postačující. Za předpokladu, že množství prvků a událostí je velké, platí následující rovnice. Význam všech proměnných je shrnut v tabulce 4.1 na straně 26.

Uvažme nejprve množství prvků typu C v membráně v čase  $t$ :  $c_M(t)$ . Hodnota  $c_M(t)$  náleží intervalu  $[0, c_1]$ , kde  $c_1$  je množství C takové, že celá membrána je jím pokryta. Mějme:

$$\frac{dc_M}{dt} = -k_c c_M + k_b b_M (c_1 - c_M) p_r(c_M) \quad (4.1)$$

Definujme ještě oblast  $\delta R$  jako oblast těsně pod membránou (souhrn míst sousedících s membránou zevnitř systému). První sčítanec představuje



tvorbu děr, druhý pak jejich zacelení. Pravděpodobnost, že prvek typu B zacelí díru, je úměrná  $b_M$  – koncentraci B v oblasti  $\delta R$  (těsně pod membránou) a  $(c_1 - c_M)$  – množství děr v membráně. Výraz  $p_r(C_M)$  znamená pravděpodobnost, že prvek typu B zacelí membránu, místo aby jí prošel ven do okolí.

Vnitřek systému, který je pod membránou, sestává z prvků typů A a B, jejichž dráhy pohybu jsou náhodné, jako v Brownově pohybu. Nechť  $x \in E_3$ . Tyto náhodné procesy lze aproximovat parciálními diferenciálními rovnicemi pro lokální koncentraci  $a(x, t)$  prvku A a  $b(x, t)$  prvku B.  $b(x, t)$  náleží intervalu  $[0, b_1]$ , kde  $b_1$  je maximální koncentrace B uvnitř systému.

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \Delta a - 2k_a a_M^2 c_M (b_1 - b_M) \delta_M \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \Delta b + k_a a_M^2 c_M (b_1 - b_M) \delta_M \quad (4.3)$$

Laplaceův operátor  $\Delta$  je v trojrozměrném systému:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{Laplace})$$

V rovnicích 4.2 a 4.3 představuje první výraz náhodný pohyb s Laplaceovým operátorem  $\Delta$ . Druhý výraz představuje reakci  $A + A \rightarrow B$  katalyzovanou prvky typu C. Pravděpodobnost této reakce je úměrná  $a_M^2$ , kde  $a_M$  je koncentrace A uvnitř systému, což odpovídá setkání dvou prvků A. Dále je úměrná  $c_M$ , což je pravděpodobnost volného katalyzátoru typu C.  $(b_1 - b_M)$  je nutné, protože předpokládáme horní limit koncentrace B vzhledem k saturaci. Nakonec  $\delta_M$  je charakteristická funkce oblasti těsně pod membránou ( $\delta_M(x) = 1$  právě když  $x$  leží pod membránou do vzdálenosti  $\delta R$ , jinak  $\delta_M(x) = 0$ ).

Integrací parciálních derivací přes celý prostor systému získáme makrodynamiku celkového množství prvků typů A a B, to je  $V\langle a \rangle$  a  $V\langle b \rangle$ , kde  $\langle a \rangle$  a  $\langle b \rangle$  jsou průměrné koncentrace  $a$  a  $b$ . Všimněme si, že integrací Laplaceanu v rovnici 4.2 dostaneme pohyb prvku typu A membránou:  $\alpha(a_1 - a_M)$  v rovnici 4.4. Podobně je Laplacian v rovnici 4.3 roven průchodu prvku typu B ven ze systému:  $k_b b_M (c_1 - c_M)$  v rovnici 4.5, což odpovídá tvorbě nových prvků typu C v rovnici 4.1. Nechť  $S$  je celkový povrch membrány (úměrný  $c_1$ ) a  $V$  je objem systému (všeho pod membránou). Platí:

$$V \frac{d\langle a \rangle}{dt} = \alpha(a_1 - a_M)S - 2k_a a_M^2 c_M (b_1 - b_M) \delta V \quad (4.4)$$

$$V \frac{d\langle b \rangle}{dt} = -k_b b_M (c_1 - c_M) + k_a a_M^2 c_M (b_1 - b_M) \delta V \quad (4.5)$$

kde  $\delta V = S\delta R$  je objem oblasti  $\delta R$ .  $a_1$  je množství prvku typu A ve vnějším okolí systému, které se mění v čase a jeho střední hodnota je  $\langle a_1 \rangle$ .

$a_M$	je koncentrace prvků typu A v oblasti $\delta R$
$b_1$	maximální koncentrace prvků typu B uvnitř systému
$b_M$	koncentrace prvků typu B v oblasti $\delta R$
$c_1$	množství prvků typu C takové, že pokryje celou membránu
$c_M$	množství prvků typu C v membráně ( $c_M(t)$ - množství v čase $t$ )
$k_b$	pravděpodobnost, že prvek typu B unikne dírou v membráně ven
$k_c$	pravděpodobnost, že se prvek typu C rozpadne
$p_r$	pravděpodobnost, že se nějaký prvek typu B nachází v oblasti $\delta R$
$\delta R$	oblast těsně pod membránou
$\delta_M$	je charakteristická funkce oblasti $\delta R$
$a(x, t)$	koncentrace prvku typu A v bodě $x$ v čase $t$
$b(x, t)$	koncentrace prvku typu B v bodě $x$ v čase $t$
$V\langle a \rangle$	průměrná koncentrace $a$
$V\langle b \rangle$	průměrná koncentrace $b$

Tabulka 4.1: Přehled použitých proměnných

### 4.2.1 Analýza modelu

Abychom mohli matematicky analyzovat kvalitativní chování systému v čase, navrhnou Bourguin a Stewart zkoumat systém v ekvilibriu, kdy se rovnice 4.1, 4.4 a 4.5 rovnají nule a  $a_1$  (koncentrace A ve vnějším okolí) je konstanta. Jejich analýza, která zahrnovala další nespecifikovaná zjednodušení, pak ukázala, že model má tři atraktory, na které jsme narazili již dříve:

- stabilní pevný bod PB1 s vysokými hodnotami  $b_M$  a  $c_M$
- stabilní pevný bod PB2 s hodnotami  $b_M$  a  $c_M$  rovnými nule
- nestabilní bifurkační bod B0 s hodnotami  $b_M$  a  $c_M$  v kritických mezních hodnotách. Jakákoli perturbace vede k PB1 nebo PB2.

Robustnost systému závisí zjevně na tom, jak jsou od sebe PB1 a PB0 vzdálené ve stavovém prostoru, a to závisí na hodnotě parametrů. Vzdálenost stoupá s parametry  $k_b$ ,  $k_a$  a  $a_1$  a klesá se vzrůstajícím  $k_c$ . Podle autorů modelu jde o jakési minimální schéma stavového prostoru autopoietického systému. Podle této hypotézy má každý autopoietický systém alespoň dva stabilní atraktory oddělené bifurkací. V místě bifurkace dochází (malou změnou kontrolního parametru) ke kvalitativní změně systému. V tomto případě se v místě bifurkace „rozhoduje“, do kterého ze dvou atraktorů systém přejde. Jeden z atraktorů znamená kompletní kolaps a rozklad systému („matematická smrt“) a druhý atraktor představuje stav, ve kterém mají proměnné nenulové hodnoty, systém si udržuje membránu a tím i svou existenci.

### 4.3 Autopoietický systém jako náhodný dynamický systém

Přestože víme, že autopoietický systém je dynamický systém, není snadné konkrétní systém vzít a přesně ho matematicky popsat a analyzovat. Pokusme se o to alespoň částečně. Podívejme se nejprve na definici náhodného dynamického systému, jak je popsána v [3] a v [12].

Nechť  $X$  je stavový prostor systému. Nechť  $F = X \rightarrow X$  je prostor funkcí z  $X$  do  $X$ . Nechť  $T$  je množina časových okamžiků se strukturou aditivní grupy.  $T$  může být diskrétní nebo spojitá. Uvažujme diferenciální rovnici v případě spojitě  $T$  nebo diferenční rovnici v případě diskrétní  $T$ . Nechť je  $f_t(x)$  řešením této rovnice, kde  $x$  je stav systému v čase 0. Nechť funkce splňuje podmínky  $f_0(x) = x$  a  $f_{s+t}(x) = f_s(f_t(x))$ . Takovou funkci nazýváme *dynamický systém*. To znamená, že dynamický systém je  $f : T \rightarrow F$  splňující:

1.  $f_0 = \text{Id}$
2.  $f_{s+t} = f_s \circ f_t$

Přitom předpokládáme pouze to, že v každém kroku je použit ten samý mechanismus – příkladem jsou právě diferenciální nebo diferenční rovnice.  $f$  popisuje chování systému ať je jeho *počáteční stav* jakýkoli, tzn. že v sobě zahrnuje celou třídu entit se stejným chováním.

Mějme pravděpodobnostní prostor  $(\Omega, F, P)$  a dynamický systém  $\theta$  v prostoru  $\Omega$ . Jinými slovy, máme pravděpodobnosti na trajektoriích  $\omega$  v čase. *Náhodný dynamický systém* je  $f : T * \Omega \rightarrow F$  takový, že:

1.  $f_{0,\omega} = \text{Id}$
2.  $f_{s+t,\omega} = f_{s,\theta(t)\omega} \circ f_{t,\omega}$

$\theta(t)\omega$  představuje trajektorii stavu systému.

Autopoietický systém se skládá z komponent a je distribuovaný v prostoru. Každé jeho komponentě můžeme přiřadit matematickou funkci, která popisuje, jak se její stav změní na základě jejích (lokálních) interakcí s okolními komponentami. Tak získáme popis systému pomocí parciálních diferenciálních rovnic, jako jsou rovnice 4.2 a 4.3 ve výše popsaném matematickém modelu. Teoretická aproximace, která nám ukázala rozdělení stavového prostoru systému na tři atraktory, se zakládá na dynamickém systému definovaném rovnicemi 4.1, 4.4 a 4.5. Co je ale potřeba, abychom mohli přejít od parciálních diferenciálních rovnic (PDR) k obecným diferenciálním rovnicím (ODR)? Jak již bylo naznačeno, je to *funkční* role membrány, která to umožňuje. Díky membráně je distribuovaný systém schopen udržovat podmínky nutné ke své existenci, a díky ní ho můžeme popsat jako náhodný dynamický systém. K přechodu od PDR k ODR je totiž potřeba prostorové integrace, která může být provedena jen vzhledem k nějakým mezním podmínkám, které musí být konstantní v čase. V našem případě tyto mezní podmínky konstantní nejsou, ale platí pro ně slabší podmínka: jsou stabilizované, a lze je jako konstantní vyjádřit. Membrána autopoietického systému není konstantní, ale je determinovaná a leží ve spádové oblasti nějakého atraktoru – pevného bodu. Podle Bourgina a Stewarta by to k přechodu od PDR k ODR mohlo stačit.

Pak můžeme říct, že autopoietický systém je náhodný dynamický systém, který je definovaný pouze ve své organizované autopoietické doméně. To znamená jen za předpokladu, že si neustále udržuje svou síť reakcí a svou membránu, resp. své mezní podmínky. Přesnější popis autopoietického systému jako náhodného dynamického systému je ovšem obtížný úkol a vyžaduje další matematické bádání.

# Kapitola 5

## Život jako autopoieze a kognice

### 5.1 Vztah autopoieze a kognice

Zatímco autopoieze se zaměřuje na vnitřní fungování systému, kognice spočívá v interakci mezi organismem a jeho okolím. Rozdělme si tyto interakce na dva druhy. První druh, nazvěme ho *typ A*, ovlivňuje vnitřní stav organismu. Oproti tomu interakce *typu B* má za následek změnu stavu (blízkého) okolí organismu. Pomocí této terminologie navrhuji Bourguine a Stewart následující definici kognice:

Systém je kognitivní tehdy a jen tehdy, když jeho interakce typu A slouží ke spouštění interakcí typu B za účelem udržení životaschopnosti systému.

Pouze pokud je systém kognitivní v uvedeném smyslu, můžeme interakce typu A nazvat *vjemy* a interakce typu B *akcemi*. Například při pádu je reakce organismu kognitivní, pokud (na vjem, že padá) reaguje změnou držení těla tak, aby minimalizoval své poškození. To obvykle vyžaduje smyslové orgány pro získání vjemů a motorické orgány pro provedení příslušných akcí.

Pojem udržení životaschopnosti je velice široký a vágní, a lze do něj zahrnout i sebe-udržení autopoietického systému. Pojmy autopoieze a kognice si jsou velmi blízké, protože oba spočívají v regulaci podmínek nutných pro udržení systému. Podle Bourguina a Stewarta však tyto pojmy nejsou identické. Jejich celulární automat, popsáný v předchozí kapitole, je považován za příklad (minimálního) autopoietického systému, který není kognitivní. Stejně tak by bylo možné přijít s (alespoň teoretickým) příkladem kognitiv-

ního systému, který není autopoietický, např. z oblasti autonomních umělých robotů. Autoři definice však navrhnou tuto tezi:

System, který je autopoietický a kognitivní, je živý system.

Vzhledem k použitým termínům je i samotná teze spíše vágní a je myšlena mimo jiné i jako výzva pro případné protipříklady a zpřesnění použitých pojmů.

## 5.2 Život jako autopoieze a kognice

Tezi, že autopoietický a kognitivní system je živý, zastává více vědců zabývajících se enaktivním přístupem. Maturana doslova říká: „Život je proces kognice“, a Varela myšlenku svého kolegy formuluje takto: „Život je vytváření smyslu“. Vytváření smyslu zde bylo popsáno u bakterie, která plave směrem k vyšší koncentraci sukrozy. Význam sukrozy jako potravy je smysl, který si vytváří bakterie, a který je ztělesněn v její interakci s okolím. Podívejme se na to, co z této zásadní myšlenky vyplývá.

Thompson [22] rozvádí tuto tezi v následujících bodech:

1. *Život = autopoieze a kognice*. K životu je potřeba autopoieze a adaptivita. Samotný autopoietický system je robustní, stará se o vlastní sebe-produkci, ale není schopen flexibility a adapce na změny v prostředí. K tomu potřebuje kognici.
2. *Emergentním jevem autopoieze je vznik tělesné individuality*. Fyzický autopoietický system se díky svému operačnímu uzávěru stává jedincem s vlastní individualitou, ve formě živého a „žitého“ těla (lived body). Jinými slovy, vzniká organismus.
3. *Emergence individuality znamená emergenci světa*. Individualita se vymezuje vůči svému okolí a zároveň s ním interaguje. Vzniká doména interakcí systému s okolím, jeho *Umwelt*. Umwelt podle von Uexküll [31] je fenomenologický svět organismu, jeho žitý svět, tak jak se mu jeví podle jeho senzomotorických schopností.
4. *Emergence individuality a světa = vytváření smyslu*. Smysl, který si organismus vytvoří o světě, je jeho prostředí.

5. *Zjednávání smyslu = enakce*. Smysl nebo význam neexistuje ve světě sám o sobě, ale je enaktivní, tedy vyvstává skrz živé organismy a jejich chování.

## 5.3 Intencionalita

Zastavme se u dalšího z důležitých fenomenologických pojmů: *intencionalita*. Ve fenomenologii se mluví hlavně o intencionálním vědomí. Intencionální, neboli úmyslné vědomí je *na něco zaměřené*. Úmyslné vědomí nebo konání je zde myšleno v širším slova smyslu, zahrnuje jakékoliv zaměření organismu *mimo něj samotný*. Tímto pojmem také zdůrazňujeme, že vědomí není zcela uzavřené samo do sebe. Fenomenologie vidí mentální život jako dynamický tok úmyslných aktů – aktů percepce, upamatování si, představ, empatie apod. Fenomenologie pak nahlíží na intencionální zkušenost jako na akty, které jsou na něco zaměřené, spíše než stavy mající nějaký obsah.

Samotný autonomní ani autopoietický systém intencionalitu nemá. Oproti tomu systém, který je autopoietický a kognitivní, si vytváří svět kolem sebe, svůj Umwelt, a jeho interakce s tímto světem jsou úmyslné. Můžeme proto říct, že v autopoietickém a kognitivním systému dochází poprvé k emergenci intencionality.

Intencionalita, strukturální svázání s okolím, to vše znamená, že organismus je zaměřený na věci mimo sebe, čímž pro něj mimo jiné vyvstává biologický prostor. Podobně skrz kognici a adaptivitu se organismus zaměřuje nejen na současnost, ale i na budoucnost, ve které chce přežít, čímž vyvstává jeho biologický čas. Dalším emergentním jevem autopoieze a vytváření smyslu jsou tedy čas a prostor, vztažené k organismu.

Poznamenejme ještě, že pojmy jako individualita a intencionalita jsme schopni popsat právě díky tomu, že je sami zažíváme. Zdrojem těchto znalostí je pro nás naše žité tělo, naše vlastní zkušenost tělesné a vědomé existence. Tyto koncepty nelze odvodit z objektivního, fyzikálně-chemického popisu organismu. Slovy Merleau-Pontyho: „Nemohu porozumět fungování živého těla jinak, než vlastním zjednáváním, tím, že sám jsem tělem, které stojí vstříc světu“.

## 5.4 Žité tělo

Fenomenologové rozlišují pohled na tělo jako materiální věc (*Körper*) a do slova žité tělo (angl. *lived body*, něm. *Leib*). Žité tělo zahrnuje nejen fyzické tělo (orgány, regulační systémy atd.), ale i jeho senzomotorickou dynamiku, tedy intencionální pohyby a nejrůznější vjemy. Místo problému objektivistického přístupu, jak sjednotit tělo a mysl, vyvstává v enaktivním přístupu jiný úkol, a to porozumět emergenci subjektivity v žitém těle. Žité tělo přitom už má svou interioritu, čímž se liší od objektivistického pojetí těla.

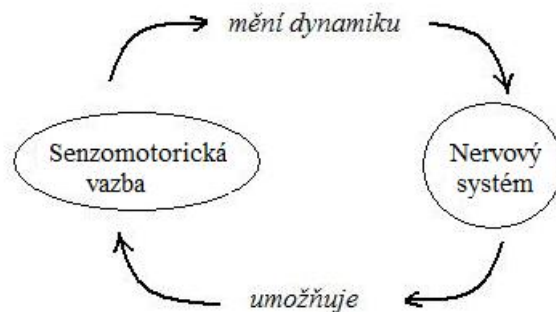
Úkolem filosofie je popsat žité tělo způsobem, který bude zahrnovat biologii i fenomenologii. Úkolem vědy je zase pochopit organizační a dynamické procesy žitého těla a způsob, jak vytvářejí jeho subjektivní pohled. V enaktivním přístupu je pak potřeba pochopit žité tělo jako speciální případ autonomního systému, který si zjednává svůj fenomenologický svět.

## 5.5 Senzomotorická identita

Jednou ze základních myšlenek enaktivního přístupu je ta, že lidská mysl je vtělená v celém organismu. Náš mentální život v sobě neustále zahrnuje tři druhy tělesné aktivity. Nejprve sebe-regulaci, abychom byli naživu a vnímali. Dále senzomotorickou vazbu se světem, která je určena vnímáním, emocemi, a akcemi těla. A nakonec interakci s ostatními subjekty, která zahrnuje kognici a zkušenost sebe a ostatních. Tyto kategorie se samozřejmě v těle překrývají a rozlišujeme je především pro přehlednost.

Zaměříme se tedy na druhou z kategorií, na dynamickou senzomotorickou vazbu. Kdykoliv byl pro vícebuněčný organismus důležitý pohyb, vyvinul se v něm nějaký druh nervového systému. Nervový systém propojuje sensorické části těla (smyslové orgány a nervová zakončení) s efektory (svaly). Pohyb organismu závisí na tom, co vnímá, a to, co vnímá, zase závisí na tom, jak se pohybuje. Je zřejmé, že velký vliv na jednání člověka (nebo jiného organismu) má to, co zrovna vnímá, především co vidí a slyší. Ale stejně tak jeho reakce, např. otočení hlavy za zvukem, ovlivňuje to, co v následující chvíli vnímá. Tuto neustálou cyklickou provázanost uskutečňuje nervový systém. Organismus se díky tomu stává pohyblivým agentem. Zatímco biologická identita ve své základní buněčné formě je umožněna operačním uzávěrem autonomního systému, senzomotorická identita je umožněna operačním uzávěrem nervového systému.





Obrázek 5.1: Operační uzávěr nervového systému

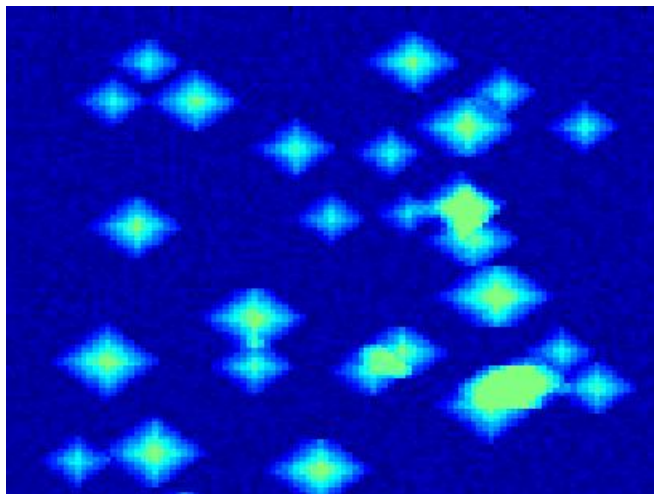
### 5.5.1 Model senzomotoriky pomocí neuronové sítě

Inspirací pro vytvoření mého modelu senzomotoriky byla bakterie *E. coli*, popsaná v kapitole 2.3 (strana 15). Tato bakterie se pohybuje směrem, ve kterém je nejvyšší koncentrace její potravy – sukrozy. Bakterie tak ztělesňuje senzomotorickou vazbu v neustálém cyklu vnímání chemického složení okolí a pohybu směrem k prostředí bohatšímu na potravu. Jak bylo řečeno, senzomotorické vazby je v organismech dosaženo díky nervovému systému, který může být jednoduchý i velmi komplexní.

Model senzomotoriky bakterie tvoří neuronová síť se čtyřmi vstupy a čtyřmi výstupy. Vstupy reprezentují koncentraci potravy ve čtyřech směrech v okolí bakterie (v pořadí vlevo, vpředu, vpravo a vzadu), výstupy pak určují, kterým ze čtyř směrů se má modelovaná bakterie pohnout. Pro porovnání byly použity tyto architektury sítě: s jednou skrytou vrstvou se čtyřmi neurony, s jednou skrytou vrstvou s osmi neurony a se dvěma skrytými vrstvami po čtyřech neuronech. Jde o dopředné (feedforward) sítě, učené metodou backpropagation.

Každá síť byla nejprve trénována na dvaceti vstupech, k nimž byl přiřazen správný výstup, tj. pohyb směrem za nejvyšší koncentrací potravy. Hodnoty na vstupu se pohybovaly v intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ , požadovaný výstup pak vypadal například pro pohyb doleva jako vektor  $(1, 0, 0, 0)$ . U skutečného výstupu sítě byl směr pohybu určen maximální hodnotou na výstupu, například ve vektoru  $(0.15, 0.76, 0.42, 0.20)$  je druhá hodnota nejvyšší, což znamená pohyb směrem dopředu. Simulace pak probíhala v dvojrozměrné „krajině“, ve které byla náhodně rozeseta potravina ve tvaru skvrn nebo jakýchsi louží, tzn. s největší koncentrací uprostřed skvrny, viz obrázek 5.2.

Mimo tyto skvrny je koncentrace potravy nízká, přesto ale různorodá (jak je vidět na skvrnitosti na pozadí obrázku 5.2), protože ani v přírodě není prostředí jednolitě. Při pohybu v krajině se předpokládá, že v momentě, kdy bakterie opouští místo s vyšší koncentrací potravy, byla potrava snědena (koncentrace potravy se sníží) – krajina se tedy působením bakterie mění.

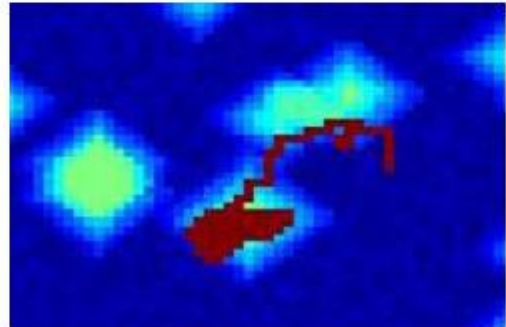
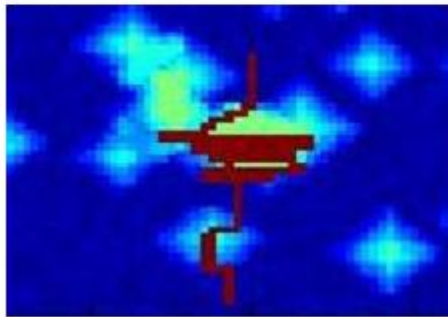
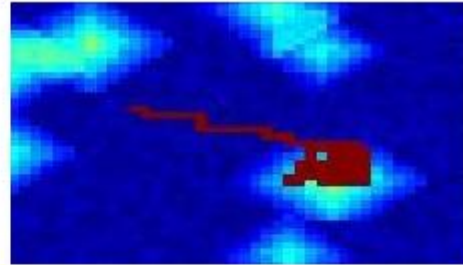
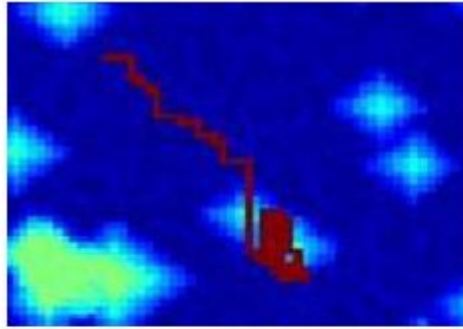


Obrázek 5.2: Krajina, ve které se pohybovala modelovaná bakterie

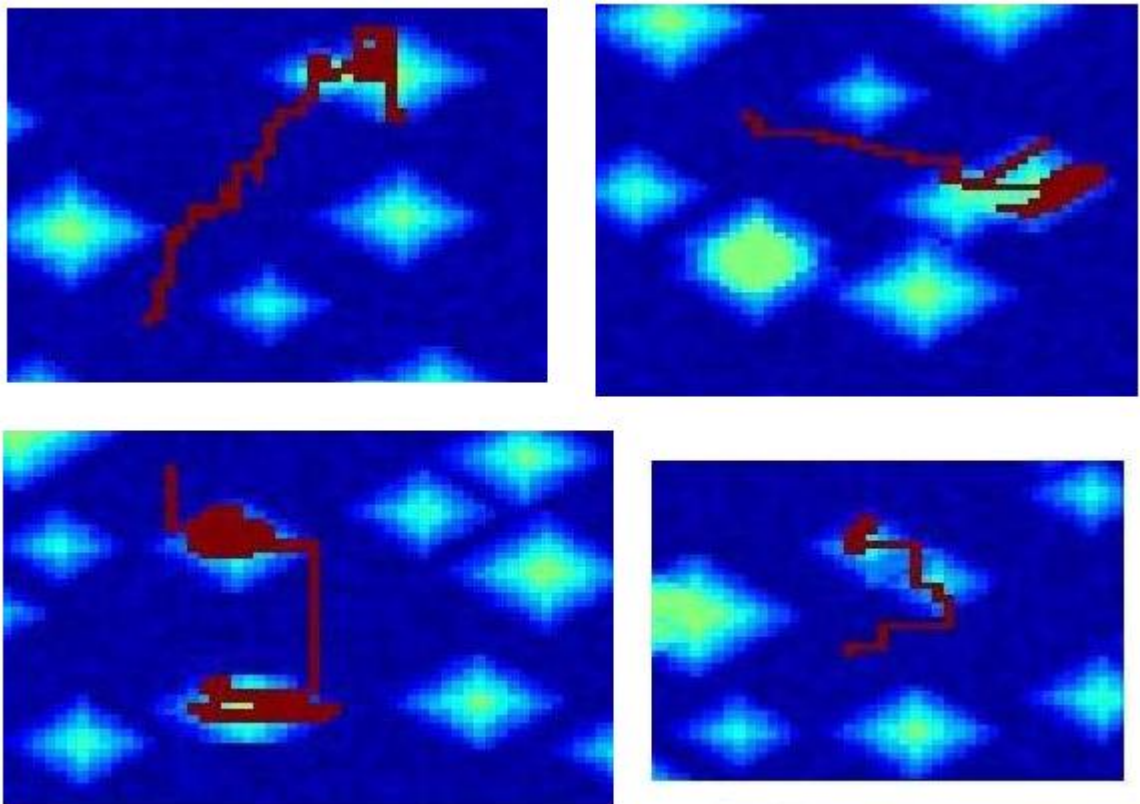
Na obrázcích 5.3 a 5.4 jsou vidět příklady putování modelovaných bakterií po krajině za sukrozou. Síť s jednou skrytou vrstvou, ať už se čtyřmi nebo s osmi neurony, se chovaly celkem podobně, byly schopné se naučit pohybovat v místech s nejvyšší koncentrací potravy. To ovšem neznamená, že takto dopadla každá síť – některé se naučily spíše pohybu jedním směrem, nebo v podstatě náhodnému pohybu bez ohledu na potravu. Každá ze sítí měla jiné počáteční podmínky a prošla jiným tréninkem, byť se stejnou trénovací množinou – lišila se jeho délka určená validací a pořadí předkládání trénovacích vzorů. Každá ze simulovaných sítí byla tedy ve výsledku trochu jiná a ne všechny se chovaly kýženým způsobem. Pokud bychom nastavili určité množství potravy nutné pro přežití, přežila by pouze část modelovaných bakterií a otevřel by se prostor pro evoluci. To už by ovšem byl jiný druh simulace.

Síť s dvěma skrytými vrstvami, z nichž každá obsahovala čtyři neurony, byla také schopna se naučit požadovanému chování (viz. 5.5 vlevo), ale častěji se pohybovala náhodně, jako na obrázku 5.5 vpravo. Tato architektura

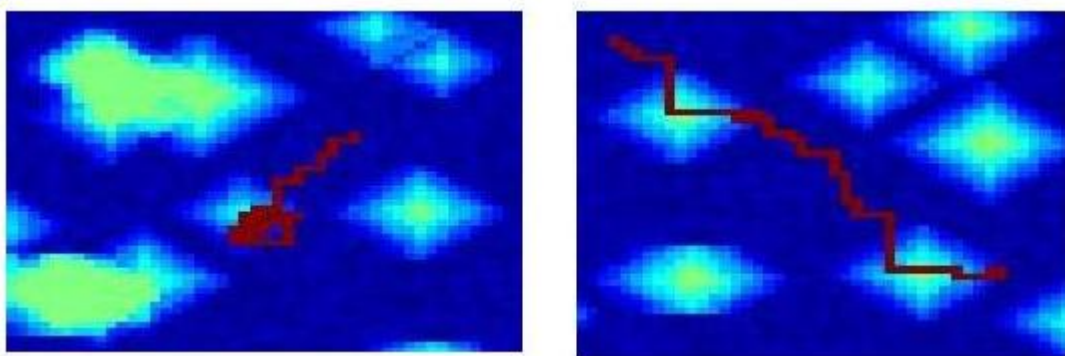
se ukázala méně vhodnou pro daný úkol.



Obrázek 5.3: *Neuronová síť se 4 neurony ve skryté vrstvě.* Vidíme detaily putování modelované bakterie (červená trajektorie) za potravou, kterou představují světlé skvrny. Na obrázcích jsou úspěšné bakterie, které poté, co narazí na oblast s potravou, se v této oblasti zdrží a potravu zkonzumují.



Obrázek 5.4: *Neuronová síť s 8 neurony ve skryté vrstvě. Chování modelu s 8 neurony je podobné modelu se 4 neurony.*



Obrázek 5.5: *Neuronová síť se dvěma skrytými vrstvami po čtyřech neuronech.* Některé modely byly také úspěšné, jako ten na obrázku vlevo, ale častěji se pohybovaly spíše náhodně a v oblastech s potravou se nezastavovaly, jako na obrázku vpravo.

# Kapitola 6

## Neurofenomenologie

Neurofenomenologie je jedním z proudů vycházejících z enaktivního přístupu. Zformuloval ji Varela [26] jako vědu, která se snaží zakomponovat fenomenologické zkoumání vědomí do neurobiologického výzkumu mozku.

Představme si pro příklad tenistu při hře. Jak se tenista pohybuje, nevnímá tenisový kurt jako jeden samostatný objekt. Vnímá čáry, za kterými je míček v autu, oblast, kam právě podává (která se pravidelně střídá), a podobně. Tyto části kurtu spolu s tenisovým míčkem a protihráčem určují, jak se má hráč pohybovat, aniž by o tom zkušený tenista musel dlouho vědomě přemýšlet. Na tomto příkladu je vidět, že zkušenost je fenomenální proud, jehož struktura tkví v úzkém svazku těla a jeho prostředí. Důležitým pozorováním také je, že tenista má neustále takzvané *prereflektivní* vědomí sám o sobě. To znamená, že aniž by se vědomě zaměřoval na své tělo (a na sebe), v každý moment o sobě ví, a ostatní události a předměty se k němu vztahují. Právě v tomto prereflektivním vědomí sebe sama spočívá subjektivita zkušenosti.

Aby se mohly fenomenologie a neurověda navzájem vést, potřebují prostředníka, kterým je teorie dynamických systémů, aplikovaná na procesy v mozku. Neurofenomenologie tak zahrnuje:

1. fenomenologický popis struktury zkušenosti
2. formální dynamické modely těchto struktur
3. rozpoznání těchto modelů v biologických systémech

## 6.1 Fenomenologický popis vnímání času

Podívejme se, jak neurofenomenologie vysvětluje vnímání času u člověka. Jak bylo vidět na příkladě tenisty, důležitou součástí jakékoliv lidské činnosti je prereflektivní vědomí sebe sama. Když jsme ponořeni do nějaké činnosti, neuvědomujeme si přímo sebe, své tělo, svou subjektivitu. Ale kdykoliv chceme, můžeme se na sebe zaměřit a sebe si uvědomit.

Další fenomenologické pozorování se týká naší zkušenosti s neustále ubíhajícím časem. Jak vnímáme okamžik? Podle fenomenologa Husserla lze vjem každého okamžiku rozdělit do třech složek [22]. První složkou je *primární vjem*, co právě *teď* vnímám. Druhou složkou je *retence* – vjem momentu, který právě uběhl (těsně před „teď“). Třetí složkou je pak *protence* – tušení momentu, který nastane bezprostředně za nynějším (hned za „teď“). Protence je samozřejmě nenaplněná, je to jakýsi předpoklad toho, co se stane v dalším okamžiku. Husserl tyto tři složky ilustruje na poslechu hudby. Slysíme-li nějakou melodii, primárním vjemem je právě znějící nota. Důležitá je i předchozí nota, kterou už sice neslysíme, ale uvědomujeme si její vztah k aktuální notě. Víme, zda se melodie změnila, jak se nám líbí apod. Notu, která bude bezprostředně následovat, ještě neznáme, ale přesto o ní něco předpokládáme. Kdyby hudba náhle skončila, nebo zazněla falešná nota, byli bychom překvapeni. Tyto tři složky vnímání okamžiku jsou přítom implicitní, nevědomé, a nesmí se plést s pamětí nebo očekáváním budoucnosti, které je vědomé a funguje na větším časovém měřítku.

## 6.2 Neurobiologický popis vnímání času

Přejdeme do oboru neurobiologie, konkrétně neurodynamiky, tj. teorie dynamických systémů aplikované na dynamiku mozku. Jde o mladý, ale rychle se rozvíjející obor, který se snaží odpovědět na složitou otázku, na jakých principech funguje mozek. V posledním desetiletí bylo provedeno mnoho pokusů a testů, které se shodnou minimálně na tom, že jakýkoliv kognitivní akt (jako například rozeznání tváře) vyžaduje koordinaci mnoha oblastí mozku. Nestačí tedy aktivita jediné speciální oblasti. Mnoho neurovědců také čím dál víc ukazuje, že vědomí je úzce spojeno s dynamickou neuronální aktivitou ve velkém měřítku, tedy na úrovni celého mozku. To znamená, že jakýkoliv model mentální aktivity musí zahrnovat neuronovou aktivitu ve velkém měřítku a její integraci [22]. Přesné detaily zatím nechme stranou, budou popsány později. K ilustraci neurofenomenologie stačí, když řekneme,



že klíčem k mentální aktivitě jsou dynamická propojení, která se uskutečňují mezi různými skupinami mozkových buněk – neuronů.

Varela [27] v této souvislosti uvádí tři hypotézy:

*„Hypotéza 1: Pro každý kognitivní akt existuje určitá skupina neuronů, která je základem jeho emergence a vykonání.“*

Tato skupina neuronů přitom není pevně daná část mozku, která by se specializovala na daný úkol. Naopak, jde o skupinu, jejíž složení se neustále mění. Skupina zahrnuje velké a nesouvislé součásti mozku, a je charakteristická hustou sítí recipročních propojení jak uvnitř ní, tak i ve spojení s jinými skupinami. Pro nás je momentálně důležité časové měřítko těchto procesů. Různé empirické i teoretické studie ukazují, že neurokognitivní aktivita, jako je akce v reakci na vjem (např. pohyb oka za objektem), jedna myšlenka nebo vzpomínka, se provede za zlomek vteřiny, přibližně za 250-500 milisekund. Varela toto měřítko trvání nazývá „měřítko 1“, úroveň integrace. Dále Varela definuje „měřítko 1/10“, ve kterém se odehrávají elementární senzomotorické a neuronální události (cca 10-100 ms) a „měřítko 10“, ve kterém se odehrávají události popisu nebo vyprávění zahrnující paměť. V časových intervalech v měřítku 1/10 a 1 mezi sebou „soutěží“ různé skupiny neuronů. Skupina v konkurenci ostatních skupin buď zanikne, nebo se udrží, a pak předpokládáme její částečnou působnost na výsledný stav mozku.

*„Hypotéza 2: Konkrétní skupina neuronů je vybrána rychlou fázovou synchronizací aktivních neuronů ze soutěžících skupin.“*

Fázová synchronizace je považována za nejžhavějšího kandidáta na odpověď na otázku, jak probíhá integrace aktivit různých, i vzdálených oblastí mozku. Opět nebudeme zabíhat do detailů, ale poznamenejme, že po synchronizaci (ať už proběhne jakýmikoliv prostředky) a vytvoření jedné momentálně dominantní skupiny neuronů je nutná její desynchronizace, aby se připravil prostor pro další synchronizaci a další kognitivní akt. Tuto desynchronizaci nazývá Varela relaxace.

*„Hypotéza 3: Procesy synchronizace-relaxace, které se odehrávají v měřítku 1, odpovídají vědomí aktuálního okamžiku.“*

Proces integrace, kde se vyberou a integrují události z měřítka 1/10, spolu s procesem relaxace vytvářejí časový interval v měřítku 1. Všechna mozková

aktivita, která do tohoto intervalu spadá, se odehrává ve *vnímaném aktuálním okamžiku*, v lidském „ted“. Toto „ted“ je tedy časový blok, který má začátek a konec, byť neostrý, a jehož neuronální základ (integrace-relaxace) odpovídá fenomenologicky prožívanému „nyní“.

### 6.3 Experimentální neurofenomenologie

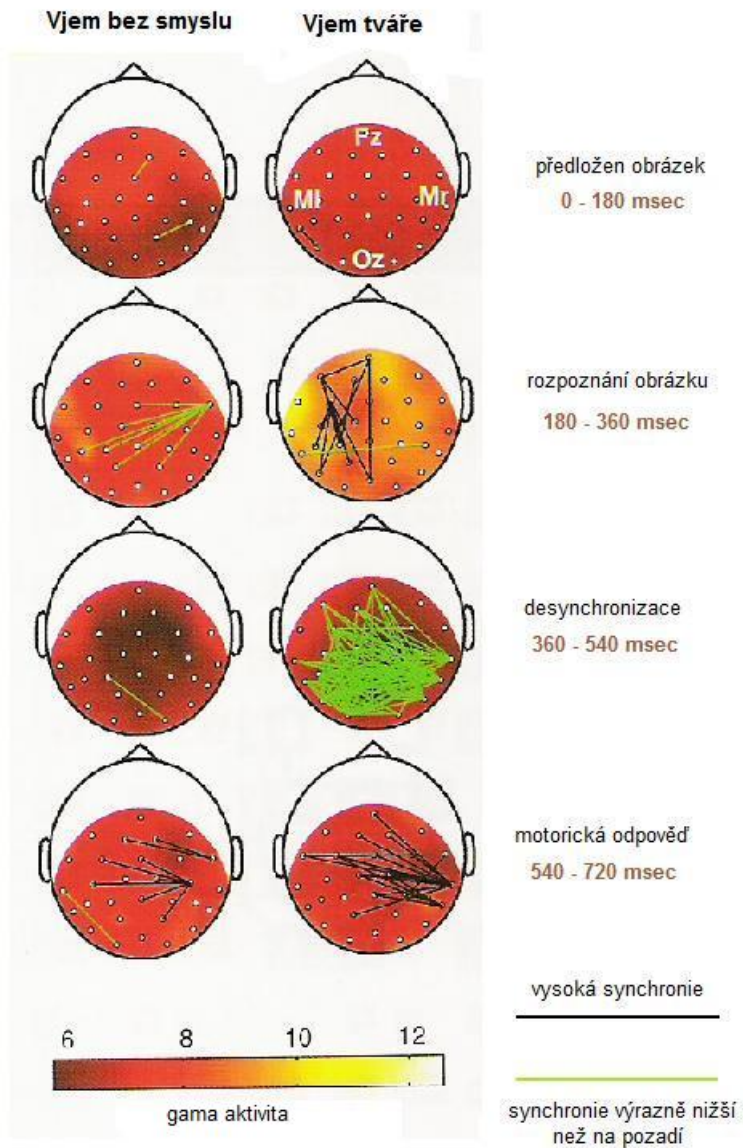
Experimentální studie provedená Varelou a jeho kolegy ilustruje popsanou dynamiku [20]. Při experimentu byly lidem předkládány vysoce kontrastní černobílé obrázky, které zobrazují lidský obličej. Tyto obrázky ale vypadají jako nesmyslná černobílá změť, když je otočíme vzhůru nohama. Dobrovolníci se v experimentu měli rychle rozhodnout, zda předložený obrázek představuje obličej, a podle toho stisknout jedno ze dvou tlačítek. Tato studie jako mnoho dalších ukázala, že vjem komplexní formy jako je obličej je doprovázen synchronizací aktivit ve vzdálených oblastech mozku, což bylo změřeno na EEG (elektroencefalogramu), viz obr. 6.1.

Na takzvané gama frekvenci (kolem 40 Hz) byly měřeny vzorce fázové synchronizace. Mezi vjemy obličeje a nesmyslného obrázku byly nalezeny kvantitativní i kvalitativní rozdíly. V prvních 200 až 250 milisekundách po předložení obrázku obličeje byla naměřena výrazná synchronizace, která se po předložení nesmyslného obrázku nevyskytla. Tato synchronizace probíhala na velké vzdálenosti v mozku, odehrávala se v měřítku 1, a odpovídala tedy momentu rozeznání tváře v okamžiku „ted“. Po této synchronizaci následovala fáze rozsáhlé desynchronizace, která vrcholila kolem času 500 ms. To odpovídá hypotéze, že k přechodu k dalšímu kognitivnímu momentu, tedy k výběru další dominantní skupiny neuronů, je potřeba aktivní desynchronizace, „rozbití“ dočasných vazeb v mozku. Další synchronizace pak byla změřena v čase 700 ms, což odpovídalo momentu stisknutí tlačítka. Tato synchronizace se podle očekávání objevila při předložení obou druhů obrázků, protože odpovídala motorické odpovědi, která byla nutná v obou případech.

Tato studie ukazuje korelaci, nikoli nutně kauzalitu, mezi fenomenálním prožíváním a procesy v mozku. Dokazuje dálkovou synchronizaci a desynchronizaci, které mohou sloužit k „rozkladu“ mozkové aktivity na časové úseky (na jednotlivá „ted“). Takto vytvořený kognitivní čas není založen na tikání hodinek, ať už vnějších nebo vnitřních, ale vyvstává z endogenní a samo-organizující neurodynamiky. Podle Varely má pak tato dynamika povahu retence – primární vjem – protence.

V experimentální neurofenomenologii jsou shromažďována *data v perspektivě 1. osoby* a *data v perspektivě 3. osoby*. Data dle 1. osoby jsou popisy osob, které jsou trénované v příslušných fenomenologických metodách. Tyto osoby popisují zkušenost ze své perspektivy. Data dle 3. osoby jsou měřena vědci při pozorování a měření těchto osob. Pomocí dat v perspektivě 1. osoby jsou nacházena nová data v perspektivě 3. osoby, která popisují procesy důležité pro existenci vědomí. Jedním z hlavních úkolů experimentální neurofenomenologie je tedy přinášet nová data tím, že se do protokolů neurovědeckého výzkumu vědomí zahrne také důkladné fenomenologické zkoumání. Ve shrnutí se experimentální neurofenomenologie skládá z těchto součástí:

1. Data v perspektivě 1. osoby z důkladného zkoumání zkušenosti pomocí specifických fenomenologických metod.
2. Formální modely a analytické nástroje z teorie dynamických systémů.
3. Neurofyziologická data z měření procesů v mozku odehrávajících se na větším měřítku.



Obrázek 6.1: *Stín vědomí*. Průměrná gama aktivita a fázová synchronizace měřená elektrodami na povrchu hlavy (podle [22]).

# Kapitola 7

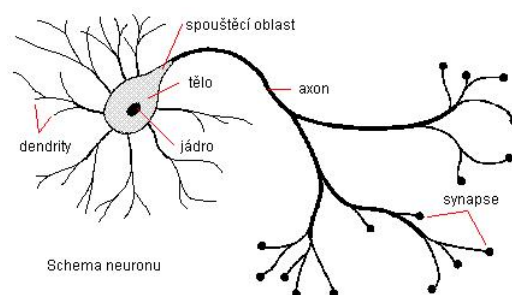
## 10 stavebních kamenů neurodynamiky podle Freemana

### 7.1 Neurony

Walter J. Freeman detailně popisuje ve své knize [8] fungování mozku ve formě tzv. 10 stavebních kamenů neurodynamiky. Začneme s jejich popisem od začátku – od jednotlivých neuronů.

Mozkové buňky - neurony se liší od ostatních buněk v těle dvěma druhy výběžků, které z nich vycházejí (viz obr. 1). První druh výběžku se nazývá dendrit. Neuron má velké množství dendritů, bohatě rozvětvených jako strom nebo keř. Druhý typ výběžku zvaný axon najdeme u každého neuronu jeden, také rozvětvený. Každý neuron se na koncích svého axonu napojuje na dendrity ostatních neuronů v místech zvaných synapse. Neurony takto vytvářejí hustou síť vzájemně propojených buněk.

Freeman [8] rozlišuje v mozkové tkáni dva druhy neuronů. Projekční neuron (projection neuron) má dendrity dlouhé kolem jednoho milimetru a jeho axon může dosahovat délky až jednoho metru. Spojuje „na dálku“ různé oblasti mozku. Lokální neuron (interneuron) má výběžky sahající pouze do okolí přibližně jedné desetiny milimetru.



Obrázek 7.1: schema neuronu

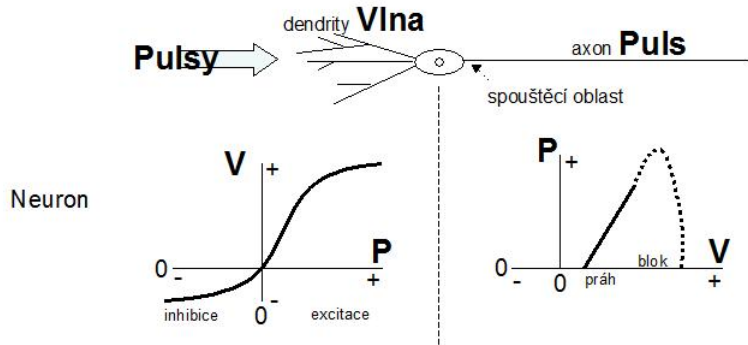
### 7.1.1 Přenos signálů mezi neurony

Neurony komunikují pomocí elektrických impulsů. Axon vysílá jeden impuls za druhým, intenzita signálu se pozná podle *frekvence impulsů*. Přijímající dendrit reaguje na impulsy tak, že zvýší nebo sníží elektrický proud směřující do těla neuronu. Intenzita přijímaného signálu na dendritu je tedy určena *vlnovou amplitudou* proudu. Protože neuron má mnoho dendritů a na každém dendritu mnoho synapsí, dostává takových vstupů velké množství. Výsledný vstup je pak vlna vzniklá zkombinováním (superpozicí) všech vstupujících vln v čase a v prostoru.

Spojení mezi neurony může být excitační nebo inhibiční - podle toho zda signál zvyšuje (excituje) nebo tlumí (inhibuje) činnost jeho příjemce. Neuron přijímá nespočet vzruchů přicházejících po dendritech. Když úhrnná hustota vzruchů překročí určitý práh, začne neuron po svém axonu vysílat také. Projekční neurony jsou obvykle excitačního charakteru, zato mezi lokálními neurony najdeme excitační i inhibiční vztahy, i když excitační obvykle převažují.

Samotný přenos signálu mezi neurony vypadá tak, že odesílatel – axon vysílá impulsy, zatímco příjemce – dendrit vytváří vlnu. To znamená, že na synapsích se pulsy mění na vlnu a naopak, ve spouštěcí oblasti (trigger zone), tj. místo kde axon vybíhá z těla neuronu, se vlna mění na pulsy.

Díváme-li se na jednotlivé neurony a jejich vstupy a výstupy, vidíme mozek na *mikroskopické* úrovni. Přestože je tento pohled pro poznání mozku nezbytný, k úplnému obrazu nám nestačí. Je třeba se dívat na skupiny neuronů a jejich chování, tj. na *mesoskopickou* úroveň a na mozek jako celek resp. jeho dvě hemisféry, tvořící *makroskopickou* úroveň.

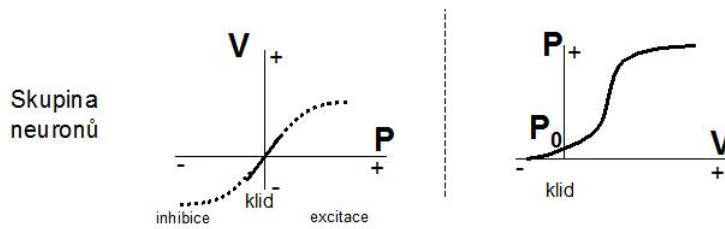


Obrázek 7.2: *Konverze vln a impulsů pro neuron.* Na synapsích se pulsy mění na vlny, ve spouštěcí oblasti se vlny mění na pulsy. Křivka nalevo má tvar tzv. sigmoidy. Obě křivky mají horní a dolní limity, zvané saturace. Díky nelinearitě křivek může být chování neuronů konstruktivní ([8]).

## 7.2 Skupiny neuronů

Na mesoskopické úrovni zkoumáme skupiny neuronů a jejich chování. Podívejme se blíže na to, jak neurony spolupracují. Neuron, který vyšle signál k jinému neuronu, a poté od něj přijme signál jako „odpověď“, má zpětnou vazbu. Zpětná vazba může být pozitivní, kdy neuron na excitaci odpoví excitací a na inhibici odpoví inhibicí, nebo negativní, tedy na excitaci se jako odpověď vrátí inhibice a opačně. Neurony s pozitivní zpětnou vazbou spolupracují, upevňují se navzájem ve své aktivitě. Negativní vazba aktivitu naopak obrací proti ní samé tak, aby stav neuronů zůstal takový, jaký původně byl. Ne všechny neurony mají zpětnou vazbu. Některé neurony pouze paralelně přenášejí signál dál, mezi sebou nekomunikují a tvoří skutečně jen skupinu neuronů. Oproti tomu neurony se zpětnými vazbami mohou vytvořit tzv. populaci, charakteristickou velkým množstvím vzájemných interakcí. Na mesoskopické úrovni měříme impulsy a vlny celých populací (určuje se celková *hustota vln a impulsů*). Převody vln na impulsy a obráceně vypadají u populací jinak než u jednotlivých neuronů, viz obr. 7.3.

Aby se ze skupiny neuronů stala populace, je třeba, aby neurony tvořily tzv. otevřený systém, který lze charakterizovat takto:



Obrázek 7.3: *Konverze vln a impulsů pro neuronovou populaci.* U populací měříme hustoty vln a impulsů na mesoskopické úrovni. U převodu vln na pulsy (vpravo) je klidový stav na nízké, ale nenulové hodnotě. I v populaci v klidu si totiž neurony občas náhodně pošlou signál, čímž produkují jakýsi šum na pozadí ([8]).

1. (tvoří ho) částečně samostatné, nezávislé prvky (v našem případě neurony)
2. každý prvek (neuron) je v interakci s mnoha ostatními
3. závislost vstupů a výstupů prvků (neuronů) je nelineární
4. systém má dostatečný přísun hmoty a energie

V otevřeném systému vznikají vzorce aktivity (activity patterns) na vyšší, mesoskopické úrovni. Tyto vzorce vyvstávají z aktivity systému jako celku, nikoli lokálně.

### 7.2.1 Skupina s pozitivní zpětnou vazbou

Vezměme si pro příklad skupinu neuronů s pozitivní zpětnou vazbou. Řekněme, že každý neuron ve skupině vyšle průměrně 100 impulsů a jako odpověď jich dostane jen 80. Na 80 impulsů se mu vrátí 64 a tak dále, až aktivita zanikne. Zisk takové skupiny neuronů (tj. poměr, kolik průměrně neuron obdržel/vyslal signálů), popisující aktivitu populace, je 0,8. Když se ale odpověď na vyslaných 100 impulsů zvýší na 120 vrácených impulsů, zisk se zvýší na 1,2. Pak na 120 impulsů přijde 144 jako odpověď, a dále může počet impulsů teoreticky růst do nekonečna. Ve skutečnosti je však



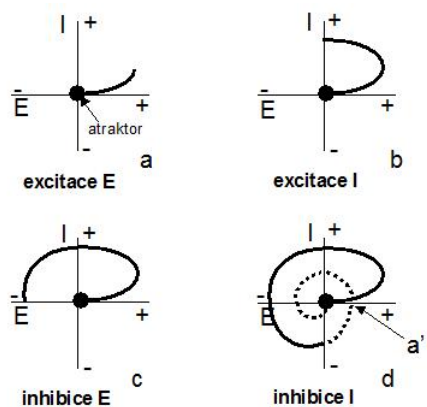
omezen saturací, „fyzickými možnostmi“ neuronů. Aktivita neuronů nezániká a vlivem saturace se ustálí na nějaké nenulové hodnotě. Naše skupina neuronů změni svůj stav a stane se interaktivní populací. Její chování je teď určeno celou populací, už ne jednotlivými členy. Toto je příklad stavového přechodu (state transition), který je *prvním* stavebním kamenem neurodynamiky. Jakmile se takto probudí populace neuronů, pokračuje ve své aktivitě bez nutnosti dalších vstupů. Dosáhne jisté stálé úrovně aktivity, a malá excitace nebo inhibice zvenčí ji z této úrovně jen na chvíli vychýlí, než se zase vrátí zpět. Populace je tedy také částečně autonomní. Stálé úrovni aktivity, které se populace drží, říkáme atraktor.

### 7.2.2 Skupina s negativní zpětnou vazbou

Podívejme se teď na populace s negativní vazbou. Ta se skládá z excitační části populace (obsahující excitační neurony), která je v interakci s inhibiční částí populace. Jak se vzájemně ovlivňují je dobře vidět na grafu znázorňujícím stavový prostor, s excitační amplitudou na vodorovné ose a inhibiční amplitudou na svislé ose (viz obr. 7.4). Pokud dáme populacím podnět, nejprve jsou probuzeny excitační neurony (obr. 7.4a). Excitační neurony pak probudí inhibiční neurony, ty tedy dosáhnou vrcholu své aktivity o čtvrt cyklu později (7.4b). V tu chvíli byly excitační neurony už inhibovány do svého klidového stavu a jsou inhibovány ještě víc (7.4c). Inhibiční neurony kvůli tomu postrádají obvyklý vstup („šum na pozadí“) od excitačních neuronů, a tak jsou samy utlumeny (7.4d). Excitační neurony jsou díky tomu uvolněny z inhibice, a mohou opět pokračovat v aktivitě, pokud ovšem dostávají nějaké vstupní impulsy. Ty dostávají v podobě již zmíněného šumu na pozadí, který se po uvolnění inhibice opět objeví. Cyklus se tak opakuje, tentokrát ale s nižší amplitudou, a tak dokola dokud úplně nezánikne. Frekvence této oscilace je známá jako 40 Hz, i když se ve skutečnosti pohybuje mezi 20 až 100 cykly za sekundu. Oscilace je částečně autonomní, ale ještě není stabilní. Oscilace založená na negativní zpětné vazbě je *druhým* stavebním kamenem neurodynamiky.

### 7.2.3 Limitní cyklus

Poměr, s jakým se amplituda na obr. 7.4 liší od předchozí amplitudy (tedy rychlost zániku oscilace), určuje zisk populace podobně jako v předchozím případě. Když je zisk menší než jedna, oscilace časem zánikne jako na ob-

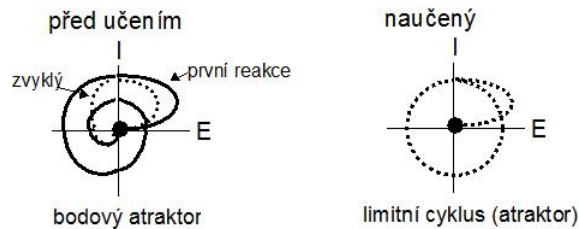


Obrázek 7.4: Vznik oscilace ([8])

rázku a populace se vrátí ke svému bodovému atraktoru. Přesáhne-li ale poměr (zisk) jedničku, každá amplituda bude větší než předchozí a poroste, dokud nedosáhne nelineární limitní hodnoty. Na této hodnotě zůstane v ustálené oscilaci, které říkáme limitní cyklus (limit cycle, viz obr. 7.5). To je náš *třetí* stavební kámen. Limitní cyklus je také částečně autonomní a tentokrát už i stabilní. Došlo zde opět ke stavovému přechodu, a to od bodového atraktoru k atraktoru ve formě limitního cyklu. Vznik cyklu je vysvětlován změnami způsobenými učením se mozku. Nejprve reakce na podnět způsobí oscilaci, která časem zanikne. Později si populace na podnět zvykne, což způsobí snížení zisku, takže oscilace odezní ještě dříve (obr.7.5 vlevo). Tím je reakce mozkové kůry na podnět stabilizovaná. Když se subjekt (ať už zvíře nebo člověk) naučí na daný podnět určitou behaviorální reakci, zvýší se zisk této populace a oscilace zůstane v limitním cyklu (obr. 7.5 vpravo). Kůra se destabilizuje v reakci na konkrétní podnět. Změny zisku už přitom nejsou dány jen intenzitou zpětné vazby, ale i synaptickými změnami (růstem, sílením či oslabováním propojení mezi neurony) v průběhu učení.

### 7.3 Čichové vnímání

Zaměříme se nyní na smyslové vnímání. Všechny smyslové vjemy (zvuk, obraz, pach atd.) se v mozku v určité fázi spojí v jeden společný vjem, a proto v základu každého jednotlivého smyslového centra musí být nějaký společný mechanismus. Nejjednodušším a u mnoha živočichů dominantním smyslem



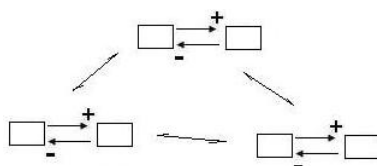
Obrázek 7.5: Vznik limitního cyklu ([8])

je čich, na kterém si mechanismus vnímání ukážeme.

Smyslový vjem, ať už je to dotyk, zvuk nebo vůně, je zachycen receptory, což jsou neurony speciálně pro tento úkol určené. Každý pach probudí jen malou podmnožinu všech čichových receptorů. Receptory samy interaktivní nejsou a signál neinterpretují, pouze ho paralelně přenášejí do čichového laloku, odkud pak jdou další signály do čichového centra v mozku. Mezi skupinou receptorů a čichovým lalokem existuje topografické mapování, což znamená, že pokud jsou dva receptory blízko sebe, jsou jejich protějšky v čichovém laloku (ty které od nich přijímají signál) také blízko sebe. Tkáň laloku vykazuje stabilní nepřetržitou aktivitu v podobě chaotického vlnění. Ta vznikne, když na sebe na mesoskopické úrovni navzájem působí tři nebo více modulů propojených negativní zpětnou vazbou (viz obr. 6). Negativní zpětná vazba způsobí oscilaci, ale u každého modulu na jiné frekvenci. Protože se tři moduly „nemohou shodnout“, vzniká chaos. V tomto případě je jedním z modulů čichový lalok propojený s dalšími dvěma moduly čichového systému mozku. Takto vzniklá chaotická aktivita, tvořící jakési pozadí, je *čtvrtým* stavebním kamenem neurodynamiky. Chaotický atraktor umožňuje stav připravenosti, z kterého se, jakmile je to nutné, snadno přejde k jinému, nechaotickému atraktoru (např. bodovému nebo cyklickému). Poskytuje tak mozku nutnou stabilitu i flexibilitu zároveň.

### 7.3.1 AM-vzory

Každý nádech způsobí prudký nárůst aktivity v čichovém laloku, trvající až do vydechnutí. Jde o oscilace na sdílené frekvenci, přičemž tato frekvence se mění mezi jednotlivými nádechy. Oscilace je způsobená interakcí excitačních projekčních neuronů v laloku a inhibičních lokálních neuronů v čichovém cen-



Obrázek 7.6: Princip vzniku chaosu

tru mozku. Sdílení frekvence umožňuje bohaté propojení mezi projekčními neurony. Vzniklá společná vlna má různé amplitudy na různých místech čichového laloku. To znamená, že slouží jako nosná vlna, kódující informaci pomocí amplitudové modulace (AM). Tato technika se používá například i v radiovém přenosu. Společná nosná vlna využívající amplitudové modulace je *pátým* stavebním kamenem neurodynamiky. Vzory, přenášené pomocí AM (tzv. AM-vzory), najdeme nejen v čichovém centru, ale ve všech smyslových centrech mozku. Tyto vzory reprezentují mozkovou aktivitu oblasti a mění se s učením. Výzkumy také ukázaly, že tyto vzory jsou pro každého jedince unikátní, stejně jako otisk prstů nebo zbarvení srsti.

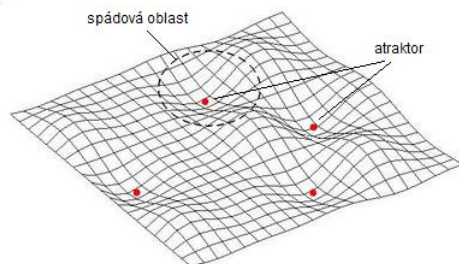
Jak tyto krátké úseky aktivity mezi nádechem a výdechem vznikají? Čichový vjem zvýší aktivitu čichového laloku, a zvýší tím také zisk, který popisuje nakolik mezi sebou neurony komunikují. Míru tohoto zisku ukazuje strmost sigmoidy na obrázku 7.3 vpravo, zobrazující závislost impulsů na vlnách u neuronových populací. Když je zisk dostatečně zvýšen, způsobená oscilace ihned nezanikne, ale místo toho destabilizuje čichový lalok. Lalok tedy změní svůj stav z počátečního klidového a zůstává takto aktivní až do výdechu, kdy se ke klidovému stavu vrátí. Tato destabilizace, způsobená ziskem přímo závislým na vstupu, je *šestým* stavebním kamenem. Rychlost, s jakou zisk roste, závisí na tom, zda je mozek právě bdělý, nakolik je vybuzený, zda je ovlivněn anestetiky apod. Na EEG je vidět, jak lalok přechází mezi dvěma stavy - klidovým, kdy jeho neurony odpovídají především na vstup z receptorů, a stavem vysoké aktivity, při níž jsou neurony ve vzájemné interakci, „povídají“ si mezi sebou.

Pokud sledujeme AM-vzor odpovídající jednomu podnětu, zjistíme, že se mění s časem, v řádu dnů nebo týdnů. Tato změna se připisuje neustálým změnám synapsí v mozku, které se posilují nebo naopak zanikají po celý život. Vedle těchto pozvolných změn stojí náhlé změny způsobené podmíněným učením. Při pokusu s králíky bylo ukázáno, že se AM-vzor vytvoří v mozku až tehdy, je-li vstup (pach) operačně podmíněný, tzn. následuje po

něm odměna nebo trest. Až tehdy totiž daný pach získává pro zvíře význam. Ukázalo se také, že se vzory mění i s kontextem, historií (jak šly jednotlivé pachy po sobě) a jejich důležitostí pro zvíře. Navíc vytvoření nového vzoru změnilo podobu stávajících vzorů. Jinými slovy, AM-vzor závisí na významu jeho podnětu, a to v širším smyslu tohoto slova. Ztělesnění významu v AM-vzoru je *sedmým* stavebním kamenem.

### 7.3.2 Krajina atraktorů

Můžeme si představit, že si čichový systém vytváří ve stavovém prostoru „krajinu“ atraktorů (viz obr. 7.7). Jeden atraktor odpovídá klidovému stavu systému, další atraktory pak naučeným pachům. Každý atraktor má svoji „spádovou oblast“, tj. třídu vjemů, na které populace odpoví přechodem do nebo setrváním v příslušném atraktoru. Spádová oblast se zformovala postupně při učení. Důležité je, že tato krajina není neměnná. Když je přidáván nový atraktor se svou spádovou oblastí, mění se i ostatní atraktory a jejich oblasti, žádný atraktor není zcela nezávislý.

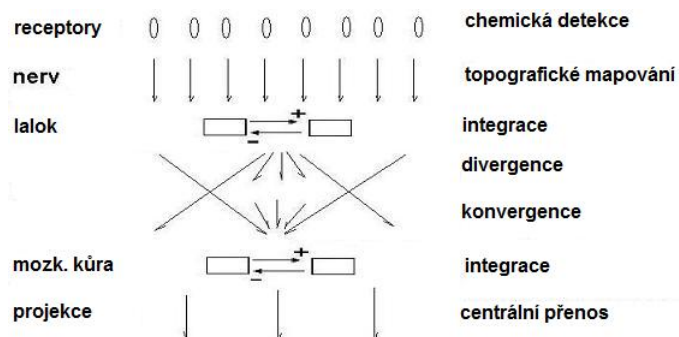


Obrázek 7.7: Krajina atraktorů

### 7.3.3 Zobecňování a význam

Čichový lalok umožňuje také jistou formu zobecňování. Podle tzv. Hebbovského pravidla si neurony, které jsou ve stejnou chvíli aktivní, navzájem posílí vazbu mezi sebou. Při učení se takto posilují vazby mezi projekčními neurony odpovídající danému stimulu. Později už stačí aktivovat zvnějšku jen část těchto neuronů a zbytek se aktivuje (zvnitř) díky těmto posíleným vazbám. Takové zobecnění je nezbytné, protože i když je vdechován stejný

pach na stejném pozadí, stimulace receptorů se při každém nádechu liší, v důsledku turbulence vzduchu v nosu apod. Podobně zobecňuje i čichové centrum, a to přes ekvivalentní vstupy (tedy AM-vzory) čichového laloku.

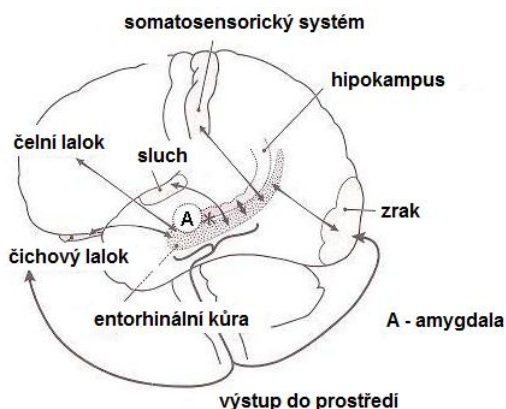


Obrázek 7.8: Cesta signálu čichovým systémem ([8])

Jak putuje signál z čichového laloku, ukazuje obr. 7.8. Z čichového laloku dál už žádné topografické mapování neexistuje. Cesta k mozkové kůře (kortexu) je konvergentně-divergentní, protože z každého neuronu laloku vychází velké množství spojů a každý kortikální neuron získává vstup od širokého spektra lalokových neuronů. Díky takovému propojení se přenášené vlny po cestě vyhladí a očistí od šumu a do kortexu dorazí samotný AM-vzor, který v čichovém laloku vznikl. Stejně tak dorazí AM-vzory od ostatních smyslů, již zbavené detailů zrakové, sluchové nebo somatické povahy. Zůstanou jen významy každého vzoru, a ty lze vhodně kombinovat. Tento princip je *osmým* stavebním kamenem neurodynamiky. To mimo jiné znamená, že informace, kterou mozek o smyslových vjemech dostane, pochází opět z mozku. Nejde o přímý popis toho, co je vnímáno, ale spíše o hypotézy mozku o světě (vytvářené na základě jeho historie, toho co bylo naučené, momentálního rozpoložení atd.) a výsledky ověřování těchto hypotéz, ať už úspěšné nebo ne.

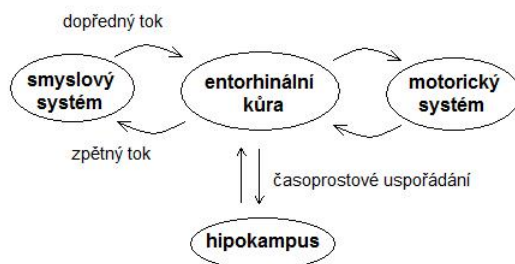
### 7.3.4 Mechanismus vnímání

Poslední dva stavební kameny se týkají celkového mechanismu vnímání. Vnímání je aktivní proces, jehož důležitou součástí tvoří pozornost a očekávání. Mozek má určitou hypotézu o tom, co se stane v nejbližší budoucnosti. Například při pohybu rukou předpokládá, že dostane zrakový vjem tohoto po-



Obrázek 7.9: Vnímání v mozku ([8])

hybu, pokud není zrak upřen jinam. Tato hypotéza vzniká společně s úmysly a záměry v limbickém systému (LS, na obr. 7.9 označen hvězdičkou), odkud je přenesena ke smyslovým centrům mozku. Podle skutečných vjemů se pak vyhodnotí správnost hypotézy. Hypotézu je možné ověřit díky získání a složení AM-vzorů ze všech smyslů v entorhinální kůře (součást LS). Hipokampus, další součást LS, řídí vytváření a uspořádání úmyslů v prostoru a čase. Toto uspořádání je *devátým* stavebním kamenem neurodynamiky.



Obrázek 7.10: Limbický systém ([8])

Podívejme se blíže na architekturu limbického systému (viz obr. 7.10). Vidíme dva toky neuronové aktivity. Dopředný tok, od smyslových systémů přes entorhinální kůru k motorickým systémům je zprostředkován přenosem AM-vzorů na *mikroskopické* úrovni. Zpětný tok od motorických sys-

témů k entorhinální kůře a dále ke smyslovým systémům je zprostředkován AM-vzory na *makroskopické* úrovni. Tato zpětná vazba omezuje a upravuje mikroskopickou aktivitu v populacích podílejících se na dopředném toku. Dopředný tok umožňuje smyslové vnímání a motorické pohyby, zpětný tok pak umožňuje učení, zaměření pozornosti na očekávané, ale také tvorbu vzpomínek. Na nejvyšší, makroskopické úrovni pak může vzniknout globální AM-vzor, který integruje aktivitu celé hemisféry. Tato globální integrace tvoří *desátý* stavební kámen neurodynamiky.



# Kapitola 8

## Vědomí podle Edelmana a Tononiho

### 8.1 Povaha vědomí

Edelman a Tononi v knize [7] představili výsledky svého zkoumání vědomí. Na vědomí se dívají jako na *proces*, který je podobně jako jiné procesy vhodným předmětem vědeckého bádání. Přesto ale nejde o typický předmět výzkumu, protože doslova „zkoumáme to, co jsme“.

Vědomí je velmi komplexní, a popsat ho není to samé jako ho vytvořit nebo zažívat. Co můžeme vůbec očekávat, že jeho vědeckým zkoumáním objasníme? Jestliže je vědomí proces vznikající jakousi mozkovou činností, můžeme popsat, na jakém druhu fyzických procesů v mozku je založen. Když si ujasníme, jaké jsou základní vlastnosti vědomí, můžeme se snažit vysvětlit, proč má vědomí právě tyto vlastnosti. Můžeme také určit, za jakých podmínek může vědomí vzniknout.

Autoři o vědomí předpokládají, že vzniklo v průběhu evoluce přirozeným výběrem a je tedy asociováno s určitými tělesnými strukturami. Podle tohoto předpokladu muselo vědomí ovlivňovat chování, které určovalo výsledek přirozeného výběru v přírodě.

Vědomí, tak jak ho sami zažíváme, se vyznačuje několika obecnými vlastnostmi. Zásadní vlastností vědomí je *integrace*. Vědomý stav (okamžik vědomí) nelze rozdělit na více nezávislých částí. To souvisí také s tím, že nedokážeme dělat vědomě víc věcí najednou. Když na nás někdo mluví a my se snažíme zároveň poslouchat tohoto člověka i rozhovor u vedlejšího stolu, jedno nebo druhé časem přeslechneme. Podobně dopadá pokus, ve kterém

každému oku předložíme jiný obraz a čekáme, co bude člověk vnímat. Dopadne to tak, že je vnímán střídavě jeden a druhý obraz, nikdy ale oba obrazy naráz.

Integrace ovšem nespočívá jen v tom, že vždy existuje jen jeden vědomý stav. Každý vědomý stav v sobě zahrnuje mnoho aspektů: vnímaný zvuk, obraz, pach, spolu s významem vnímané věci, který může odkazovat na paměť, a tak dále. To platí i o snech nebo představách. Přitom se všechny tyto aspekty *integrují* do jednoho stavu našeho vědomí. Integrace tedy zahrnuje jednotnost a také *koherenci* vědomých stavů.

Vědomí má také velmi *omezenou kapacitu*. Člověk je samozřejmě schopen si zapamatovat nepřeberné množství informací, ale *v jednom okamžiku* si vědomě vybaví nebo zapamatuje jen pár z nich. Vezměme si pro příklad experiment, ve kterém člověku na krátkou chvíli ukážeme čtyři nebo méně různě barevných písmen. Člověk si je zapamatuje a po jejich zakrytí správně určí, jaká a jak barevná písmena viděl. Jakmile se ovšem počet písmen zvýší, začne se člověk často plést, například v tom, které písmeno mělo jakou barvu. Podle Edelmana a Tononihho se tento limit týká počtu nezávislých entit, které můžeme udržet *v jediném* vědomém okamžiku pohromadě tak, abychom nenarušili koherenci a integraci vědomí. Upřesněme, že jde o omezení kapacity pracovní neboli krátkodobé paměti, která zprostředkovává dočasnou mentální manipulaci s obsahy. V roce 1956 kvantifikoval Miller toto omezení jako „magické číslo sedm“. Ve své proslulé práci [18] Miller ukazuje, že se kapacita krátkodobé paměti pohybuje mezi 5 až 9 nezávislými smysluplnými jednotkami informace.

Dalším výrazným aspektem vědomého stavu je jeho *informativnost*. Zkusme si představit všechny vjemy, které jsme kdy zažili. Přidejme k tomu rozsah toho, co všechno bychom si dokázali představit ve své fantazii. Každý vědomý stav je vybrán z nepřeberného množství možných stavů, z nichž každý může vést k jinému behaviorálnímu výstupu, tedy k jinému chování. Vědomí dokáže rozlišovat mezi ohromným množstvím stavů, které je nesrovnatelné s kapacitou dnešních počítačů a jejich počty stavů. Díky této velké rozmanitosti je každý vědomý stav výrazně informativní a velkou měrou redukuje nejistotu.

Základní vlastnosti vědomí jsme si demonstrovali na člověku, ale předpokládáme je v určité míře i u jiných živočichů, kteří jsou obdařeni vědomím.

## 8.2 Vědomí v mozku

Edelman a Tononi [7] stejně jako mnozí ostatní vědci staví na faktu, že pro vznik (emergenci) vědomí je nutná aktivita rozsáhlých oblastí mozku na globální úrovni. Podle Edelmana a Tononiho hrají ve vytváření vědomí důležitou roli dva systémy: thalamo-kortikální systém a neuromodulační systém.

*Thalamo-kortikální systém* tvoří převážnou část mozku savců. Skládá se z thalamu, vývojově starší části mozku, a kůry mozkové. Mezi těmito dvěma částmi mozku vedou bohatá obousměrná propojení. Některé části systému (skupiny neuronů) se zabývají odpovědí na stimuly, jiné plánováním a vykonáváním akcí. Další části reagují na vizuální podněty, přičemž některé se zabývají detaily vnímaných podnětů, zatímco jiné se zaměřují na jejich obecnější vlastnosti. Cokoliv se udá v jedné části systému, je díky propojením okamžitě známo v celém systému.

*Neuromodulační systém* pomáhá mozku rychle reagovat na významné podněty tím, že do celého mozku uvolní příslušné neuromodulátory. Neuro-modulátory jsou látky schopné snižovat nebo zvyšovat dráždivost neuronů. Těmito látkami může systém během okamžiku mozek vybudit, alarmovat, nebo naopak utlumit a podobně.

## 8.3 Distribuovaná neuronová aktivita

Edelman a Tononi [7] na základě svého i jiných výzkumů tvrdí, že:

- Neuronální procesy, které jsou základem vědomí, se odehrávají mezi široce distribuovanými skupinami neuronů.
- Tyto skupiny neuronů se účastní silných a rychlých reentrantních<sup>1</sup> interakcí.
- Interaktivní skupiny neuronů musí být schopny výběru mezi velkým množstvím rozličných vzorců aktivity, aby mohlo vzniknout vědomí.

Dokladem toho, že vědomí vzniká distribuovanou aktivitou různých skupin neuronů v rámci thalamo-kortikálního systému, jsou operace kůry mozkové. Mozková kůra se obecně považuje za zodpovědnou za obsah našeho vědomí. Ať už je pacientovi odstraněna menší část mozkové kůry při operaci, nebo

---

<sup>1</sup>obousměrných, přesněji viz dále

je poškozena při úrazu, nikdy nevedlo její lokální poškození k trvalé ztrátě vědomí, ale pouze k jeho částečným omezením (například k neschopnosti vnímat barvy). Nelze tedy z mozkové kůry odstranit nějaké centrum vědomí.

Stejně jako Varela (viz kapitola 6.3) i Edelman a Tononi zdůrazňují nezbytnost aktivace a následné deaktivace distribuovaných oblastí mozku. „Mapy“ takových oblastí se přitom liší člověk od člověka, podobně jako se liší naše tváře nebo otisky prstů.

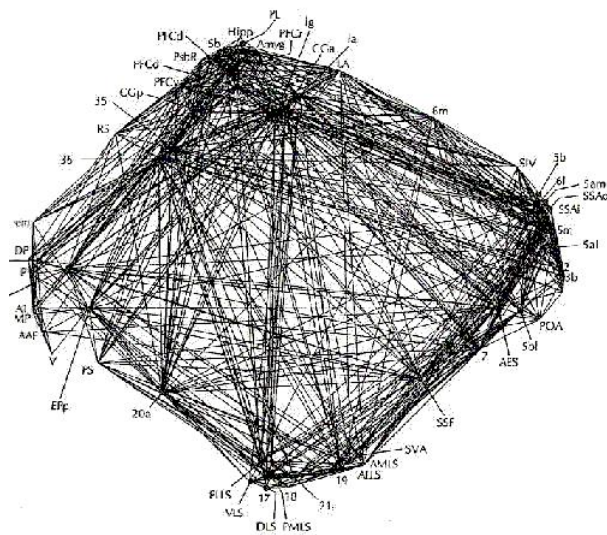
## 8.4 Selekcionismus a reentry

*Selekcionismus* je směr vyzdvihující vývoj systému v průběhu času skrze selekci, ať už evoluční nebo jinou. Mozek je také selekčním systémem, a to na dvou úrovních:

1. *Evoluční selekce*. Během historického vývoje mozku se vytvořila široká škála skupin neuronů, které se odlišují ve své aktivitě a specializaci.
2. *Selekce zkušeností*. Získáváním zkušeností v průběhu života se formuje další, sekundární škála skupin neuronů podle požadavků prostředí člověka. Tyto skupiny vznikají na základě synaptických změn v mozku.

Skupiny neuronů musí být nějakým způsobem integrované, stejně jako je integrované vědomí. Edelman a Tononi zdůrazňují, že komunikace mezi skupinami neuronů je *reentrantní*, tedy že se „navrací zpět“. Pojem *reentry* definují jako masivní paralelní obousměrné propojení mezi oblastmi mozku. A právě tuto vlastnost považují za klíčový předpoklad pro integraci vědomí. Reentrantní propojení najdeme nejen mezi skupinami neuronů, ale také uvnitř každé skupiny mezi jednotlivými neurony.

Proces reentry umožňuje vznik nových odpovědí na podněty, pomocí interakce mezi různými oblastmi mozku. Díky reentry jsou lokální synaptické změny závislé na kontextu, protože změny v jedné oblasti ovlivní i jiné, vzdálené oblasti. Díky reentrantním propojením se mohou skupiny neuronů synchronizovat v čase i v prostoru, ať už půjde o fázovou synchronizaci nebo o jiný druh synchronizace. Bez synchronizace by přitom vědomí nemohlo být integrované.



Obrázek 8.1: *Topologická mapa propojení*. Diagram představuje 64 oblastí kůry mozkové u kočky, mezi nimiž je přes 1100 propojení, většinou obousměrných. Oblasti jsou zobrazené blízko sebe, pokud jsou propojené, a dále od sebe, pokud propojené nejsou ([7]).

### 8.4.1 Modelování reentry

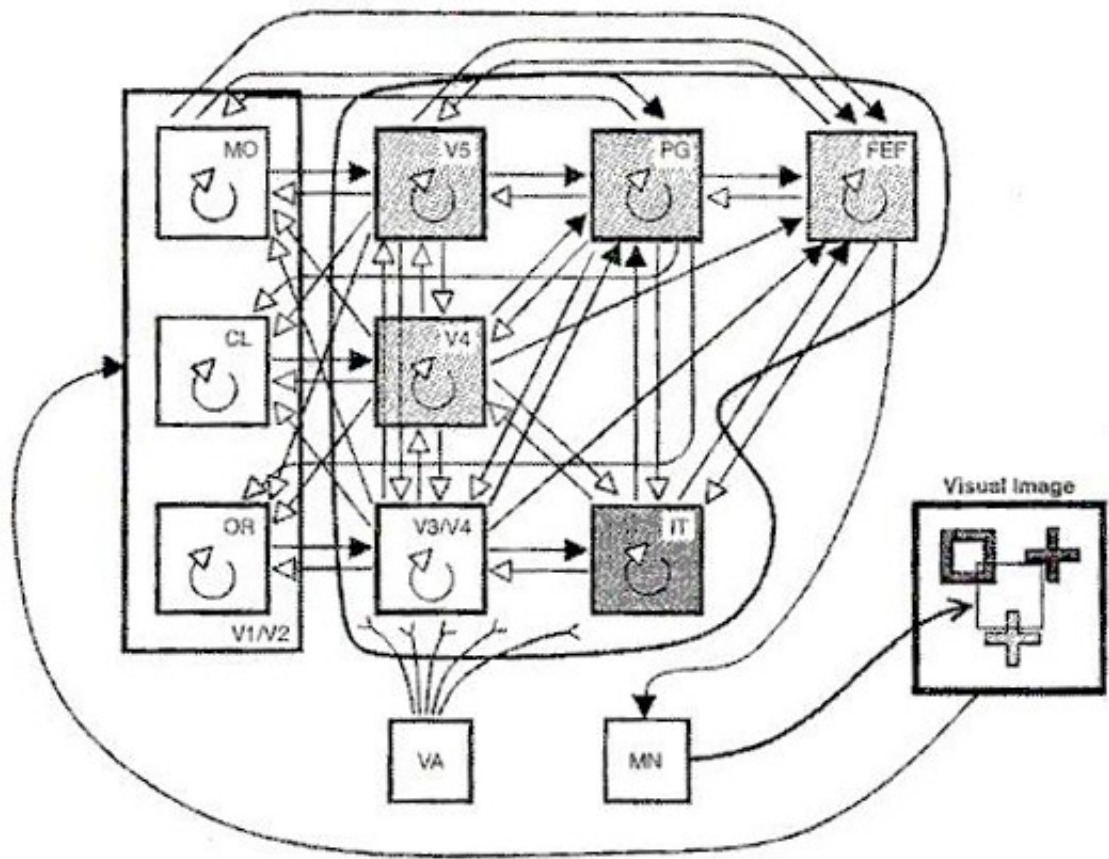
Všechny techniky snímání mozku jsou nějakým způsobem omezené. Elektrickou aktivitu můžeme měřit jen u relativně malého počtu neuronů. Techniky jako PET a fMRI umožňují sice měřit velký počet neuronů najednou, ale mají zase horší časové a prostorové rozlišení. Proto se Edelman a Tononi obrátili k modelování neuronové aktivity.

Autoři vytvořili model vizuálních oblastí mozkové kůry, včetně husté sítě propojení mezi neurony a skupinami neuronů. Vizuální oblast se dělí na několik anatomických částí, v modelu jsou reprezentovány tři, které rozeznávají formu, barvu a pohyb objektu. Neexistuje zde žádná řídicí část. Model byl v průběhu počítačové simulace učen, aby integroval aktivity jednotlivých částí do požadovaného výsledku.

Jedním z úkolů modelu bylo rozeznat červený kříž od zeleného kříže a červeného čtverce, přičemž všechny tři podněty byly předkládány naráz. Učení bylo dosaženo pomocí simulovaného neuromodulačního systému, který vylučoval určité látky, pokud se „oko“ systému pohnulo správným směrem k červenému kříži. To odpovídá odměnění zvířete za správnou reakci na podnět. Aktivace neuromodulačního systému na globální úrovni signalizovala důležitou událost a umožňovala synaptické změny v simulované kůře. Po nějaké době učení byl systém schopen správně rozeznat požadovaný podnět s 95% úspěšností.

V simulaci byly pozorovány krátkodobé korelace, které indikovaly rychlé reciproční interakce po reentrantních propojeních. Tyto interakce byly podmíněny přítomností nepoškozených obousměrných propojení uvnitř neuronových skupin i mezi nimi. Vyžadovaly také aktivitu neuromodulátorů, které umožňují rychlou změnu dráždivosti synapsí.

Simulace ukázala, že integrace není dosaženo v nějakém speciálním místě mozku, ale koherentním *procesem*. Vedle schopnosti integrace pak ukázal model další vlastnost mozku: limitovanou kapacitu. Když byly modelu předloženy nejvýše tři obrazce, odpovídal v převážné většině správně, který z nich je červený kříž. Jakmile byly na vstupu čtyři nebo více obrazců, začalo mezi některými skupinami neuronů, které odpovídaly různým objektům, docházet k nežádoucí synchronizaci. Model si tyto objekty „pletl“. Frekvence chyb se zvyšovala s počtem předložených obrazců, ale závisela i na vlastnostech těchto obrazců. Na základě tohoto pozorování autoři modelu předpovídají, že tento druh chyby, kdy si mozek některé objekty splete mezi sebou, vzniká kvůli nekonzistencím v krátkodobé synchronizaci neuronových skupin.



Obrázek 8.2: *Schema modelu kortikální integrace*. Čtverce představují funkčně specializované části vizuálních oblastí kůry, šipky znázorňují propojení mezi nimi. V modelu jsou tři paralelní části, které zpracovávají pohyb (horní řada čtverců), barvu (prostřední řada) a tvar (spodní řada). Napravo vidíme předkládaný obrázek, dole pak výstup systému – pohyb oka (MN). Světlé šipky představují propojení neuromodulačního systému, který je samotný znázorněn čtvercem VA. Celkem se systém skládá z asi deseti tisíc formálních neuronů a jednoho milionu propojení ([7]).

## 8.5 Funkční klastry

Popsaná simulace naznačuje, jak funguje rychlá integrace v thalamo-kortikálním systému. Pro hlubší prozkoumání jednoty vědomí však potřebujeme přesnější teoretický popis integrace.

Intuitivní definice říká, že podmnožina prvků systému vytváří integrovaný proces, jestliže její prvky interagují mezi sebou během daného časového úseku mnohem intenzivněji, než se zbytkem systému. Vezměme si pro příklad školní třídu. Děti se občas potkají s kamarády z jiných tříd a jiných škol, ale podstatně více se stýkají se svými spolužáky. Skupinu prvků, která je od zbytku systému oddělená množstvím interakcí, nazýváme *funkční klastr*<sup>2</sup> (angl. functional cluster). Termín klastr (shluk) naznačuje, že nejde o pevný svazek, ale o dočasnou skupinu spolupracujících prvků.

Vezměme si pro zjednodušení izolovaný neuronový systém, tedy takový, který nedostává žádný vstup z vnějšku. Pokud by jeho prvky – skupiny neuronů mezi sebou vůbec nekomunikovaly, pak by výstup každého neuronu byl zcela nezávislý na ostatních neuronech. Pokud spolu ale prvky interagují, navzájem se ovlivňují, což se promítne v odchylce od statistické nezávislosti jejich chování. To můžeme zachytit měřením *statistické entropie*.

Za předpokladu, že systém prochází diskrétními stavy, lze entropii systému počítat jako logaritmickou funkci počtu možných stavů systému vážených pravděpodobnostmi jejich výskytu. Je-li  $X$  diskrétní proměnná reprezentující stav systému, pak je entropie:

$$H(X) = -1 \sum_j p_j \log_2 p_j \quad (8.1)$$

Kde  $p_j$  je pravděpodobnost  $j$ -tého stavu systému. Entropie tak roste s počtem možných stavů systému a klesá s rozptylem jejich pravděpodobností.

Pokud by prvky systému byly na sobě nezávislé, pak by se všechny možné stavy vyskytovaly se stejnou pravděpodobností. Pokud ale prvky systému interagují, bude pravděpodobnost některých stavů systému nižší a celková entropie systému bude menší než entropie jeho jednotlivých prvků. Rozdíl

---

<sup>2</sup>V českém jazyce se toto slovo nejčastěji používá ve dvou významech: počítačový „cluster“ a ekonomický „klastr“. Počítačový cluster je seskupení volně vázaných počítačů, které spolu úzce spolupracují, např. při paralelním výpočtu nebo za účelem vysoké dostupnosti služeb. Ekonomický klastr je regionální uskupení firem, dodavatelů atd., které si konkurují, ale také spolupracují za účelem zvýšení své konkurenceschopnosti a zisku. Tento druh klastru je vhodnější analogií ke klastru neuronů, proto je používán i stejný český překlad.



mezi sumou entropií jednotlivých prvků ( $x_i$ ), pokud by byly nezávislé, a úhrnnou entropií systému  $X$ , ve kterém prvky závislé jsou, dává míru *integrace*  $I(X)$ :

$$I(X) = \sum_{i=1}^n H(x_i) - H(X) \quad (8.2)$$

Integrace tedy měří pokles entropie způsobenou interakcí mezi prvky. Čím více prvky v izolovaném systému spolupracují, tím větší je jejich statistická závislost a tím vyšší je integrace systému.

Integraci můžeme spočítat také pro libovolnou podmnožinu systému. Integrace  $I(X_j^k)$  podmnožiny  $j$  obsahující  $k$  prvků izolovaného systému  $X$  měří statistickou závislost *uvnitř* podmnožiny. Snadno pak spočítáme závislost mezi podmnožinou ( $X_j^k$ ) a doplňkem systému ( $X - X_j^k$ ). Tato závislost je vyjádřena veličinou zvanou *vzájemná informace* (mutual information):

$$MI(X_j^k; X - X_j^k) = H(X_j^k) + H(X - X_j^k) - H(X) \quad (8.3)$$

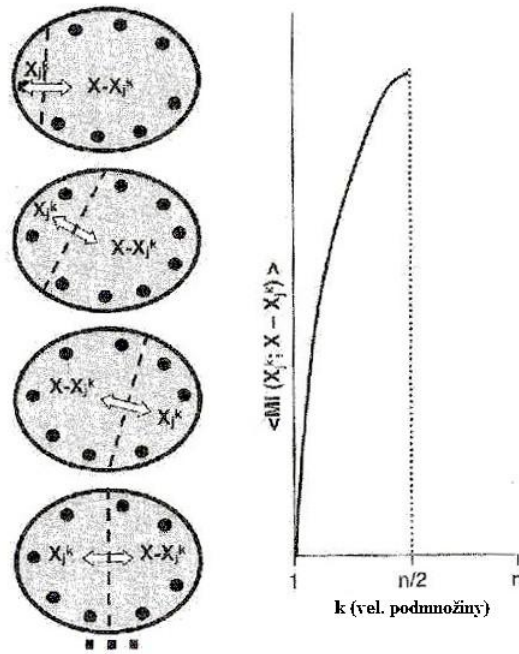
Vzájemná informace říká, do jaké míry lze entropii podmnožiny  $X_j^k$  vysvětlit entropií jejího doplňku a naopak. Měří tedy míru závislosti podmnožiny na zbytku systému, jak je vidět na obrázku 8.3.

S pomocí předchozích vzorců můžeme zjistit, zda systém obsahuje nějaké funkční klastry. *Funkční klastr* je podmnožina prvků, které mezi sebou interagují výrazně silněji než se zbytkem systému, přičemž tuto podmnožinu nelze (funkčně) rozdělit na nezávislé komponenty. Pomocí integrace a vzájemné informace definujeme takzvaný *index klastru* ( $CI$ ) takto:

$$CI(X_j^k) = I(X_j^k)/MI(X_j^k; X - X_j^k) \quad (8.4)$$

Kde  $I(X_j^k)$  a  $MI(X_j^k; X - X_j^k)$  jsou normalizovány, aby nezáleželo na velikosti podmnožiny. Index klastru odpovídá relativnímu množství interakcí uvnitř klastru v porovnání s interakcemi se zbytkem systému. Hodnota  $CI$  kolem 1 ukazuje na stejné množství interakcí uvnitř shluku i navenek, zatímco funkční klastr vykazuje hodnoty  $CI$  výrazně vyšší než 1. Spočítáním indexu  $CI$  pro všechny podmnožiny systému zjistíme, zda systém obsahuje nějaké funkční klastry.

V různých studiích (např. [5], [10] nebo Varelova studie popisovaná v kapitole 6.3) byla naměřena dočasná synchronizovaná aktivita rozsáhlých neuronových populací a korelace uvnitř neuronových skupin i mezi vzdálenými skupinami. Edelman a Tononi [7] tvrdí, že tyto poznatky dokazují integraci



Obrázek 8.3: Graf vzájemné informace (MI) podmnožiny a zbytku systému podle velikosti podmnožiny ([7]).

a vznik funkčních klastrů v thalamo-kortikálním systému, což je umožněno bohatými reentrantními spoji mezi neurony a neuronovými skupinami.

## 8.6 Neuronová komplexita

Víme, že vědomí disponuje velkou mírou informativnosti, protože dokáže rozlišit mezi obrovským počtem nejrůznějších stavů. Tuto informativnost bychom měli hledat i v neuronových procesech, které jsou základem vědomí.

Standardní přístup by spočíval ve změření množství různých stavů systému a jejich pravděpodobností z hlediska vnějšího pozorovatele. Edelman a Tononi [7] se ale chtějí vyhnout interpretaci z pohledu externího pozorovatele systému. Místo toho představují způsob, pomocí kterého je systém sám „svým pozorovatelem“.

Rozdělme izolovaný systém na dvě části a představme si, jak jedna část ovlivňuje druhou. Vezměme si libovolnou podmnožinu systému. Jedinou informací, kterou podmnožina dostává, tvoří stav zbytku systému (doplňku podmnožiny). Změny, které ovlivňují stav podmnožiny, mají pro podmnožinu význam. Tento vliv umíme měřit pomocí statistické veličiny  $MI$ , tj. vzájemné informace mezi prvkem a jeho doplňkem, která určuje jejich statistickou závislost. Tím také vzájemná informace vyjadřuje, jak dobře dokáže libovolná podmnožina systému (třeba i jediný prvek) rozlišit mezi různými stavy zbytku systému. Hodnota  $MI(X_j^k; X - X_j^k)$  bude vysoká za následujících dvou podmínek:

- $X_j^k$  i  $X - X_j^k$  mají velké množství stavů
- stavy  $X_j^k$  a  $X - X_j^k$  jsou statisticky závislé, tedy entropie  $X_j^k$  je z velké míry zapříčiněna interakcí s  $X - X_j^k$  a naopak.

Uvážíme-li všechny podmnožiny systému  $X_k$  sestávající z  $k$  komponent a *průměrnou* vzájemnou informaci podmnožiny a jejího doplňku  $\langle MI(X_j^k; X - X_j^k) \rangle$ , získáme míru *komplexity* celého systému:

$$C_N(X) = \sum_{k=1}^{n/2} \sum_{j=1}^{\binom{n}{k}} \langle MI(X_j^k; X - X_j^k) \rangle \quad (8.5)$$

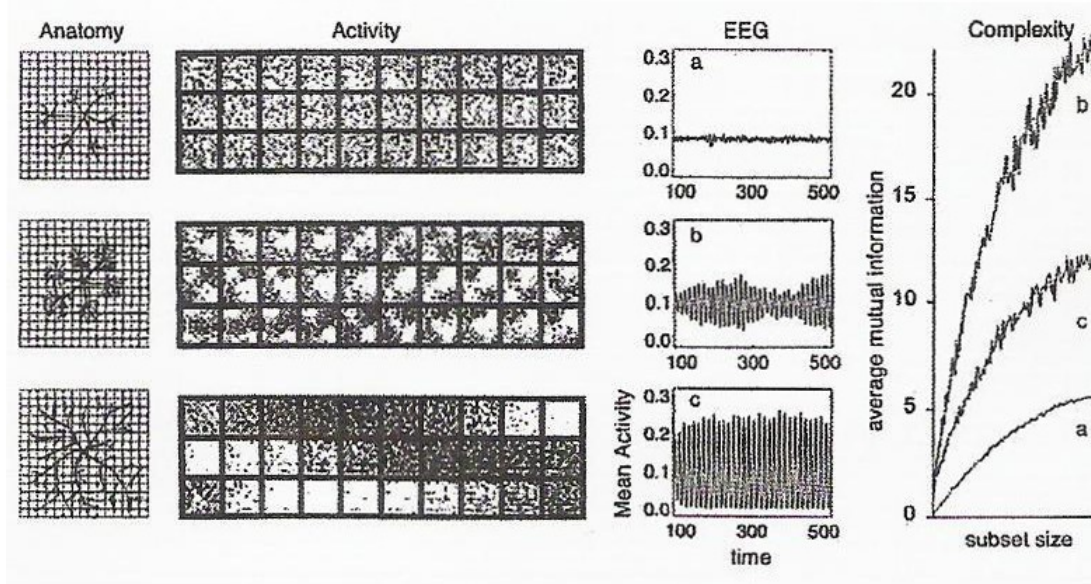
Čím vyšší je vzájemná informace mezi podmnožinami systému a jejich doplňky, tím vyšší je komplexita systému.

Jak bylo diskutováno, průměrná vzájemná informace je vysoká, jestliže má v průměru každá podmnožina systému mnoho různých stavů a zároveň tyto stavy hrají důležitou roli pro zbytek systému. To, že část systému může mít mnoho různých stavů znamená, že je tato část funkčně oddělená nebo specializovaná. Na druhou stranu fakt, že různé stavy části systému jsou důležité pro stav zbytku systému znamená, že je systém integrovaný. Kdyby nebyl, stavy části a zbytku systému by byly nezávislé. Tak docházíme k závěru, že *vysoká hodnota komplexity ukazuje na optimální syntézu funkční specializace a funkční integrace v rámci systému*. Mozek nepochybně patří mezi systémy s vysokou komplexitou.

### 8.6.1 Příklad

Ukažme si pro lepší představu výpočet komplexity organizace mozkové kůry ve třech odlišných mozcích, jejichž simulaci provedli Tononi, Sporns a Edell-

man [23]. Podíváme se postupně na mozek starý a nemocný, poté na mladý, nezralý a nakonec na normální dospělý mozek. Simulované struktury modelují primární zrakovou kůru kočky. Simulovaná oblast kůry obsahuje 512 skupin neuronů, z nichž každá reaguje přednostně na určitý druh stimulu. Systém byl izolovaný, nedostával žádné podněty z vnějšku. Místo toho byly neurony „spontánně aktivní“ – každý neuron reagoval na náhodný šum, který mu byl předložen na vstupu.



Obrázek 8.4: Schéma, zobrazení aktivity a EEG tří typů tkáně. Nahoře: slabé propojení (zchátralý mozek), dole: úplné propojení (nezralý mozek), uprostřed: nerovnoměrné propojení (dospělý mozek) ([7]).

První příklad (viz obr. 8.4 nahoře) představuje část mozkové kůry, ve které byla hustota propojení mezi skupinami neuronů úmyslně snížena, jako je tomu například ve starém a velmi zchátralém mozku. Jednotlivé skupiny neuronů jsou stále aktivní, ale kvůli ztrátě propojení mezi skupinami pracují více nebo méně nezávisle. Aktivita neuronů na obrazovce (viz sekce „Activity“ na obr. 8.4 nahoře) vypadá jako obraz televize, která není naladěná. Elektroencefalogram (jehož hodnoty jsou ve všech případech genero-

vané počítačem, protože jde o simulaci) ukazuje absenci synchronizace mezi skupinami neuronů. Entropie tohoto systému je vysoká, protože systém má mnoho elementů a každý z elementů velkou variabilitu, takže systém zaujímá mnoho různých stavů. Pokud bychom každému stavu přiřadili význam, systém by měl velkou informační kapacitu. Jak je to ale s informací z pohledu systému samotného – jaký je počet stavů, které jsou významné pro systém? Protože spolu jednotlivé části systému nespolupracují, ať je stav jedné části jakýkoliv, má malý nebo žádný efekt na stav zbytku systému (mají nízkou vzájemnou informaci). To platí pro libovolnou podmnožinu systému, a tak je komplexita systému nízká.

V druhém případě simulovali autoři mladý, ještě nezralý mozek, ve kterém je každá skupina neuronů propojena se všemi ostatními skupinami (viz obr. 8.4 dole). V simulaci začaly všechny skupiny neuronů brzy společně synchronizovaně oscilovat, téměř bez výjimek. Spočítané EEG je hypersynchronní a připomíná mozek v hlubokém spánku nebo v epileptickém záchvatu. Systém je vysoce integrovaný, ale funkční specializace se úplně vytratila. Vzájemná informace jednoho prvku a zbytku systému je vyšší než v předchozím případě, vzhledem k velkému propojení mezi prvky. Ovšem se vzrůstající velikostí uvažovaných podmnožin hodnota vzájemné informace významně nestoupá, protože počet stavů, které dokáže podmnožina rozlišit, s její velikostí neroste. Komplexita systému je tedy nízká (i když je vyšší než v předchozím případě). Systém je integrovaný, ale chybí mu rozlišovací schopnost.

Třetí systém simuluje část mozkové kůry dospělého zdravého jedince (viz obr. 8.4 uprostřed). Skupiny neuronů jsou mezi sebou propojeny podle následujících pravidel. Za prvé, skupiny neuronů, které reagují na podobné stimuly v zorném poli, jsou spolu propojené více než s ostatními skupinami. Za druhé, intenzita spojů mezi skupinami se snižuje s jejich topografickou vzdáleností. Tato pravidla odpovídají experimentálním nálezům v primární zrakové kůře. V tomto případě bylo chování systému v simulaci složitější než v předchozích případech. Skupiny neuronů vykazují celkové koherentní chování, ale zároveň se dynamicky přeskupují podle svých funkčních interakcí. Například skupiny neuronů, které jsou blízko sebe a reagují na podobné podněty, spolupracují (jsou aktivní ve stejnou chvíli) častěji než jiné skupiny, ale občas téměř celá simulovaná oblast na krátkou chvíli osciluje synchronně. Ukazuje to spočítané EEG, které připomíná záznam mozku v bdělém stavu, nebo v REM fázi spánku. Entropie systému je celkem vysoká, ale ne tolik, jako v prvním případě. I když je možných stavů systému hodně, některé

jsou pravděpodobnější než jiné. Vzájemná informace části systému a jeho doplňku je v průměru vysoká vzhledem k významným interakcím, podobně jako ve druhém případě. Na rozdíl od předchozího případu zde ale platí, že čím více má podmnožina prvků, tím vyšší je její průměrná vzájemná informace. Čím je podmnožina systému větší, o to více různých stavů totiž dokáže „způsobit“ ve zbytku systému. Jinými slovy, nejen že části systému mají mnoho stavů, ale tyto stavy jsou významné pro ostatní části systému. Tím je i celková komplexita větší, největší ze všech tří simulovaných případů. Systém je integrovaný a diferencovaný zároveň.

## 8.6.2 Faktory ovlivňující komplexitu

V dalších simulacích se ukázalo, že některé neuroanatomické faktory výrazně ovlivňují míru komplexity mozku. Mezi tyto faktory patří:

- husté lokální propojení neuronů, které vede k vytváření spolupracujících skupin neuronů
- nerovnoměrné propojení mezi vytvořenými skupinami
- velké množství krátkých reentrantních okruhů (propojení)

Vedle anatomických jsou zde i další faktory ovlivňující komplexitu mozku. V hlubokém spánku upraví neuromodulační systém hladiny vylučovaných látek tak, že jednotlivé neurony v celém thalamo-kortikálním systému vysílají signály synchronizovaně. Neurony „vysílají“ jednou až čtyřikrát za sekundu a mezitím jsou „zticha“. Tato synchronizace je pak vidět na charakteristických krátkých vlnách na EEG, po kterých je hluboký spánek nazýván spánkem krátkých vln (short wave sleep). V tomto synchronizovaném módu se snižuje komplexita mozku.

Na základě svého zkoumání docházejí Edelman a Tononi k závěru, že vysoká komplexita je nutnou podmínkou pro jakýkoliv proces vytvářející *vědomou* zkušenost. Skutečnost, že hluboký spánek a epileptický záchvat nejsou doprovázeny vědomím, souvisí s tím, že v synchronizované činnosti mozku je repertoár možných stavů omezený a komplexita mozku je příliš nízká.

### 8.6.3 Komplexita a vnější stimuly

Komplexita a ostatní zde definované veličiny popisují izolovaný systém. Dynamická propojení mezi funkčními jednotkami systému však vznikala a vyvíjela se v dlouhém procesu adaptace na okolní svět, ať už v průběhu evoluce nebo získáváním zkušeností v průběhu života. Ještě bychom tedy měli teoreticky popsat, jakým způsobem se vnitřní dynamické vztahy mezi specializovanými skupinami neuronů v dospělém mozku adaptovaly na statistickou strukturu vnějšího světa. Statistickou strukturou okolního světa je myšlen „průměr signálů“ charakteristických pro vnímané okolí jedince, v průběhu času. Víme také, že v každém momentě většina neuronů reaguje na „vnitřní“ signály, tedy na signály, které přišly z některé z částí mozku, a nikoli na „vnější“ signály, tedy na stimuly z okolí. Chtěli bychom tedy také popsat, do jaké míry signály z vnějšku ovlivňují v daném momentě práci systému.

Edelman a Tononi [7] provedli v tomto ohledu analýzu [24], jejíž závěry jsou následující: pro malé množství *vnější* vzájemné informace mezi stimulem a neuronovým systémem existuje obecně velká změna ve *vnitřní* vzájemné informaci mezi částmi neuronového systému. Tuto změnu lze měřit veličinou  $c_M$  (complexity matching), která počítá změnu komplexity neuronového systému, která nastane v reakci na podnět z vnějšku. Z toho vyplývá, že vnější podnět neobsahuje velké množství informace, které je potřeba zpracovat systémem – mozkem, ale spíše vyvolá a posílí vnitřní informace, které byly vybrány a stabilizovány při dřívějších setkáních s podobnými stimuly. Všimněme si, že tento přístup se liší od tradičního přístupu počítačové vědy, kde systém často zpracovává téměř výhradně vnější informace. Tento základní rozdíl je potřeba mít neustále na mysli, snažíme-li se porozumět a modelovat práci mozku. U živočichů majících vědomí je každý stimul zvenčí takzvanou „zapamatovanou přítomností“.

Podle analýzy [24] je to, do jaké míry ovlivní vnější stimul signály uvnitř mozku, mimo jiné dáno i tím, jak velkou zkušenost již mozek s podobnými podněty má. To odpovídá i naší každodenní zkušenosti: více reagujeme na podněty, které jsou nám známé. Na závěr z této práce vyplývá, že vysoká komplexita mozku vzniká neustálými interakcemi mezi mozkem a vnějším prostředím, které má mnohem větší potenciaální komplexitu. Tato komplexita je organismy zjednávána během evoluce i v průběhu života.

## 8.7 Hypotéza dynamického jádra

Přejděme k základní otázce, jak vzniká vědomí, respektive co odlišuje procesy, které vědomí podmiňují? Edelman a Tononi přicházejí s těmito hypotézami:

1. Skupina neuronů může přímo přispět k vědomé zkušenosti, jestliže je součástí distribuovaného funkčního klastru, který pomocí reentrantních interakcí v thalamo-kortikálním systému dosahuje vysoké integrace v řádu stovek milisekund.
2. Aby mohl spoluvytvářet vědomí, musí být funkční klastr vysoce diferencovaný, a tedy mít vysokou míru komplexity.

Skupiny neuronů, samy tvořící funkční klastry, díky vzájemné interakci v časovém měřítku zlomků sekundy vytvářejí funkční klastr na vyšší úrovni. Tomuto klastru Edelman s Tononim říkají „dynamické jádro“. Název zdůrazňuje integraci a zároveň neustále se měnící složení funkčního klastru. Dynamické jádro je proces, nikoli věc nebo místo, a je definováno pomocí *interakcí* skupin neuronů. Jádro musí být také dostatečně diferencováno (a tedy mít vysokou komplexitu), aby mohlo být základem pro vznik vědomí.

Autoři ukazují, že dynamické jádro má ty vlastnosti, které pozorujeme u (lidského) vědomí. Za prvé, vědomí je *proces*, stejně jako dynamické jádro. To se může zdát jako samozřejmost, ale ne všechny pokusy vysvětlit vědomí se tím řídí. Dynamické jádro je funkční klastr, a je tedy jednotné a vysoce *integrované*. Stejně jako vědomou zkušenost ho nelze (z definice) rozdělit na nezávislé části. Další vlastností vědomí je koherence. Člověk nedokáže vnímat dva nesouvisející stavy najednou, jak to známe například z dvojnásobných obrázků, na kterých vidíme v danou chvíli vždy buď jeden nebo druhý obraz. Dynamické jádro tvoří jeden celek: na základě interakcí uvnitř jádra vznikají globální stavy, mezi nimiž se vybírá na úrovni celého jádra, a to díky jeho integritě. *Koherence* tedy vyplývá z požadavku integrity. Vysoké informativnosti vědomí zase odpovídá velká míra *diferenciace*, která je základní vlastností dynamického jádra. Nakonec se zaměříme na limitovanou kapacitu, kterou jsme pozorovali u vědomí. Limitovaná kapacita odpovídá hornímu limitu toho, kolik nezávislých částí je dynamické jádro schopno v danou chvíli udržet v rámci své integrace. Je pravděpodobné, že stejné mechanismy, které umožňují integraci jádra, mají za následek i jeho *omezenou kapacitu*.



Jak jsme ukázali, hypotéza dynamického jádra, které vyvstává především z aktivity thalamo-kortikálním systému, dokáže vysvětlit základní vlastnosti vědomí. Hypotézu je potřeba pochopitelně ověřovat a doplňovat na základě experimentů.

## Kapitola 9

# Srovnání přístupů Edelmána a Freemana

Gerald Edelman i Walter Freeman jsou oba biologové, kteří (mimo jiné) zkoumají, jak pracuje mozek a jak v něm vzniká vědomí. Srovnáme jejich přístup k tomuto úkolu a výsledky jejich práce.

Gerald Edelman je biolog obdivuhodně širokého zaměření. Nejprve se věnoval zkoumání imunitního systému, v roce 1972 získal Nobelovu cenu za objevení struktury protilátek. Pak začal s výzkumem vývoje buněk, včetně těch mozkových, odkud vede cesta k teorii o vzniku a struktuře vyšších funkcí mozku. Edelman klade důraz na selekcionismus, a to jak evoluční, tak zkušenostní.

Edelman pracuje s modely mozku. Snaží se vytvářet takové modely, které jsou z biologického hlediska co nejvíce hodnověrné. Určil dvě nejdůležitější úrovně, na kterých si mozek vytváří funkčně správná neuronová propojení:

- primární repertoár: vytvoření základních vzorců neuronových propojení ve fázi embryogeneze (vývoje embrya)
- sekundární repertoár: synaptické změny v mozku v průběhu života

Edelman zdůrazňuje, že mozek není po narození dokonale tvarovatelná a zcela náhodná síť propojení, a tento fakt se snaží zohlednit při používání neuronových sítí.

Walter J. Freeman je také biolog – neurovědec, vystudoval ovšem i matematiku, fyziku a filosofii. Měří a analyzuje EEG nebo LFP (potenciály lokálních polí), které vykazuje kůra mozková během cíleného jednání. Freeman důkladněji studoval neuronové populace a vytvořil celkem podrobnou

teorii, jak na základě jejich spolupráce vznikají vyšší mozkové funkce. Freeman nám předkládá detailní mechanismy vzniku neuronových populací, popsané v řeči dynamických systémů.

## 9.1 Srovnání

Edelman klade důraz na kůru mozkovou a thalamus, Freeman na kůru mozkovou a limbický systém. Freeman poznal fungování mozku zdola, od fungování jednotlivých neuronů a principů vzniku neuronových populací. Edelmanův přístup je více přístupem shora, sledováním interakcí neuronových populací podobných těm ve skutečném mozku. Edelman navíc poskytuje vzorce popisující některé vlastnosti mozku. Oba vědci se shodují v základních principech fungování mozku:

- mozek je dynamický systém
- vědomí je emergentní jev určité mozkové aktivity
- vědomí vzniká aktivitou neuronových populací distribuovaných ve vzdálených oblastech mozku
- na vzniku vědomí se podílí kůra mozková ve spolupráci s mnoha dalšími důležitými částmi mozku
- aktivita neuronových populací je samoorganizující, není odnikud centrálně řízena
- v reakci na podnět se aktivuje neuronová populace, která se danému podnětu nejvíce blíží, a je dále posílena a upravena
- „mapa“ vzorců aktivity neuronových populací se neustále mění
- vědomí je integrované díky synchronizaci mnoha neuronových populací
- pro vývoj a činnost mozku je nezbytná neustálá senzomotorická interakce s okolím
- mozek si vybírá a pamatuje pouze podněty, které pro jedince mají smysl
- mozek nereprezentuje data jako počítač

To, co Edelman nazývá dynamickým jádrem, označuje Freeman jako AM-vzory. Edelman ani Freeman se přitom ve svých aktuálních pracích ([7], [8]) vzájemně necitují, ani na sebe neodkazují. Relativně nezávisle na sobě a každý jinými prostředky docházejí k velmi podobným výsledkům. Pro oba dva je mozek jedinečný systém, který nemá obdobu v ničem, co bylo dosud stvořeno člověkem.

## 9.2 Enakce ve fungování mozku

Freeman předkládal králíkům čichové vjemy. Edelman simuloval část mozku kočky při sledování vizuálních podnětů. Oba dva zkoumají, jak se mozek učí na základě interakce se světem. Ukazují, že mozek nelze oddělit od těla a tělo od jeho prostředí, že jednání je vtělené a situované v prostoru a čase. Edelman popisuje komplexitu, kterou si mozek zjednává interakcí s ještě komplexnějším okolím. Příkladem tohoto zjednávání mohou být Freemanovi králíci, kteří se učili podmíněným reakcím na některé čichové vjemy. Freeman studoval, jak se v průběhu vnímání v mozku vytvářejí vzorce aktivity a potažmo významy určitých vjemů. Stejně důležité, jako podrobný model fungování neuronových populací v mozku, bylo i pozorování toho, že vnímání a učení je enaktivní a jakým způsobem toto zjednávání probíhá. Varela [30] dodává, že je zjednáván nejen svět, ale i mysl:

„Kognice není reprezentace předem daného světa předem danou myslí, ale zjednání světa a mysli skrze celou historii akcí, které jedinec ve světě vykonal.“

Nejen, že si svou aktivitou jedinec (mysl) zjednává svět. Lze také říci, že tak, jak se v interakci se světem mění dynamika mozku, je zjednávána i mysl.

# Literatura

- [1] *Alife* <http://elm.eeng.dcu.ie/~alife/>
- [2] Aristoteles: *O duši*, Rezek, Praha 2000.
- [3] Arnold L.: *Random dynamical systems*, Springer Verlag, New York 1998.
- [4] Bourguine P., Stewart J.: *Autopoiesis and Cognition*, Artificial Life **20** (2004) 327–345.
- [5] Bressler S. L.: *Interareal Synchronization in the Visual Cortex*, Behavioral Brain Research **76** (1996) 37–49.
- [6] Edelman G. M.: *Neural Darwinism: The Theory Of Neuronal Group Selection*, Basic Books, New York 1987.
- [7] Edelman, G. M., Tononi, G.: *A Universe of Consciousness*, Basic Books, New York 2000.
- [8] Freeman W. J.: *How Brains Make Up Their Minds*, Columbia U.P., New York 2000.
- [9] Haken H.: *Synergetics: An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin 1983.
- [10] Joliot M. et. al.: *Human Oscillatory Brain Activity Near 40 Hz Coexists with Cognitive Temporal Binding*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **91** (1994) 11748–51.
- [11] Kant I.: *Kritika čistého rozumu*, Oikoymenh, Praha 2001.
- [12] Marek M., Schreiber I.: *Stochastické chování dynamických systémů*, Academia, Praha 1984.

- [13] Margulis L., Sagan D.: *What is Life?*, New York, Simon & Schuster 1995.
- [14] Maturana H. R.: *Autopoiesis and cognition: the realization of the living*, Boston Studies in the Philosophy of Science **43** (1980) 2–58.
- [15] Maturana H. R., Varela F. J.: *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*, Boston, Shambala Press 1987.
- [16] McMullin B.: *Modelling autopoiesis: harder than it may seem!* <http://elm.eeng.dcu.ie/~alife/bmcm9704/>
- [17] Merleau-Ponty F.: *Struktura chováni*, Filisofia, Praha 2008.
- [18] Miller G. A.: *The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information*, Psychological Review **63** (1956) 81–89.
- [19] Rieke F. et.al.: *Exploring the Neural Code*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1997.
- [20] Rodriguez E. et. al.: *Perception's shadow: long-distance synchronization of human brain activity*, Nature **397** (1999) 430–433.
- [21] Ruiz-Mirazo K., Moreno A.: *Basic autonomy as a fundamental step in the synthesis of life*, Artificial Life **10** (2004) 235–259.
- [22] Thompson E.: *Mind in Life*, Harvard U.P., Cambridge 2007.
- [23] Tononi G., Sporns O., Edelman G. M.: *A Measure for Brain Complexity: Relating Functional Segregation and Integration in the Nervous System*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **91** (1994) 5033–37.
- [24] Tononi G., Sporns O., Edelman G. M.: *A Complexity Measure for Selective Matching of Signals by the Brain*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **93** (1996) 3422–27.
- [25] Varela F. J.: *Principles of biological autonomy* Elsevier North Holland, New York 1979.

- [26] Varela F. J.: *Neurophenomenology: a methodological remedy for the hard problem*, *Journal of Consciousness Studies* **3** (1996) 330–350.
- [27] Varela F.J.: *Resonant cell assemblies: a new approach to cognitive functions and neuronal synchrony*, *Biological Research* **28** (1995) 81–95.
- [28] Varela F. J.: *Patterns of Life: Intertwining identity and cognition*, *Brain and Cognition* **34** (1997) 72–87.
- [29] Varela F. J., Maturana H. R., Uribe R.: *Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model*, *Biosystems* **5** (1974) 187–196.
- [30] Varela F. J., Thompson E., Rosch E.: *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*, MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [31] von Uexküll J.: *Umwelt*, Mervart, Praha 2006.