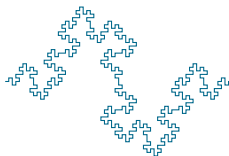


Neuronální kódování a přenos informace

Lubomír Košťál
Fyziologický ústav AV ČR



Metabolický seminář FgÚ, duben 2013

POČETNÍ NEUROVĚDY

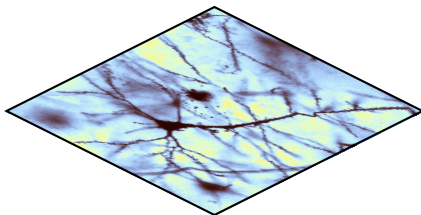
- ▶ *Computational neuroscience*
- ▶ Hledání efektivních teorií (kvantitativní popis)
- ▶ **Vize:** popis vědomí 😊

POČETNÍ NEUROVĚDY

- ▶ *Computational neuroscience*
 - ▶ Hledání efektivních teorií (kvantitativní popis)
 - ▶ **Vize:** popis vědomí 😊
1. **Modelování, simulace neuronů** (sítí)
 2. **Kódování a přenos informace**
- ▶ **Sensorické neurony:** kódování stimulu \Rightarrow umělé sensory
 - ▶ **Aplikace:** především technické (HW, algoritmy),
bio-inspired computing

MODELY NEURONŮ

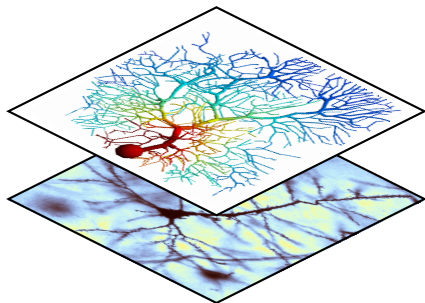
Realita



MODELY NEURONŮ

3D biofyzikální

Realita

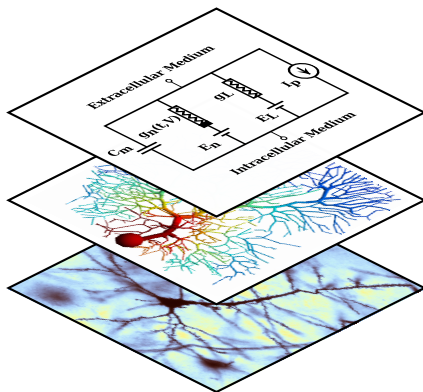


MODELY NEURONŮ

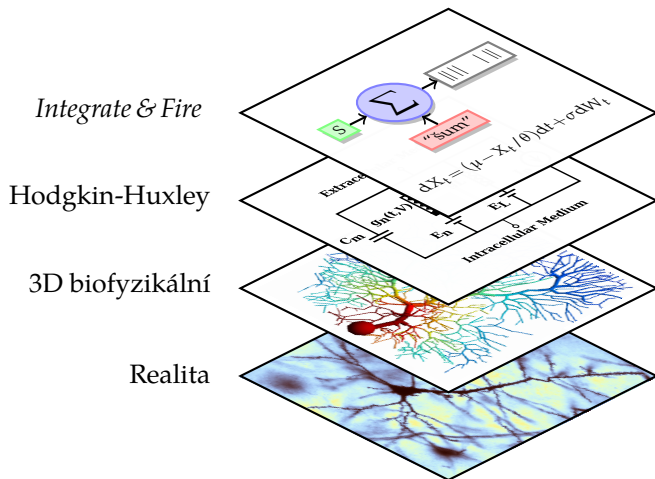
Hodgkin-Huxley

3D biofyzikální

Realita



MODELY NEURONŮ



MODELY NEURONŮ

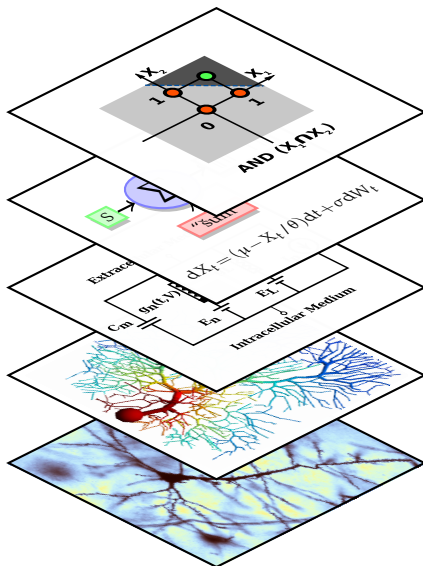
Binární "neuron"

Integrate & Fire

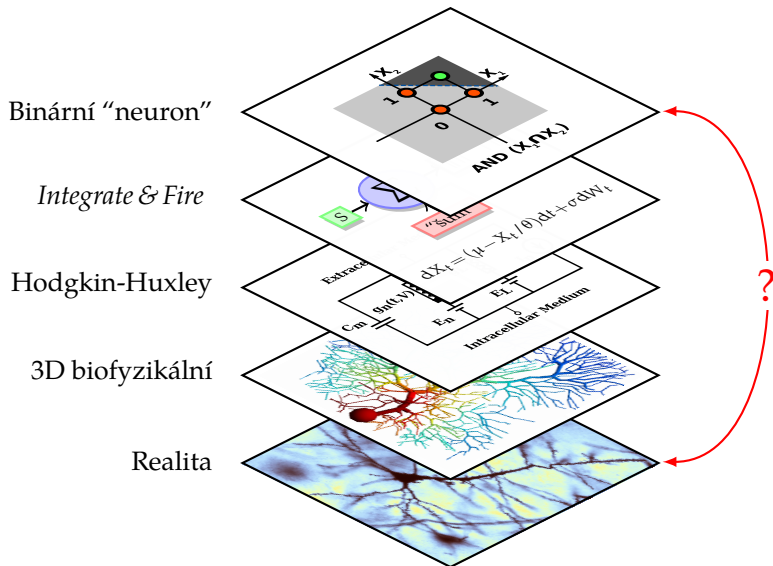
Hodgkin-Huxley

3D biofyzikální

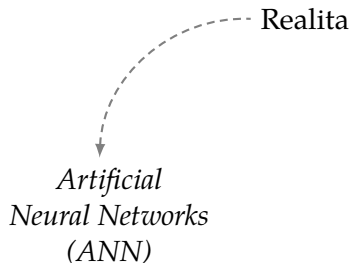
Realita



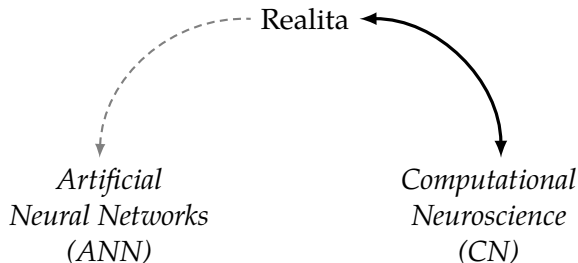
MODELY NEURONŮ



POČETNÍ NEUROVĚDY VS. UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ

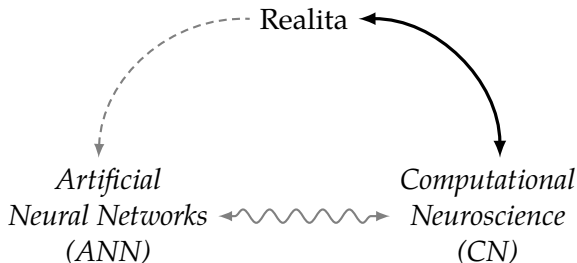


POČETNÍ NEUROVĚDY *VS.* UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ



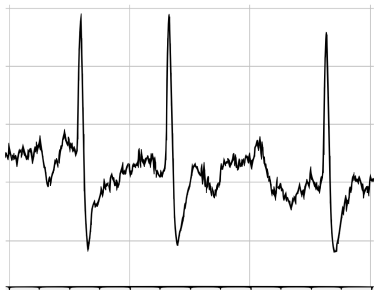
- ▶ Silná vazba CN na biologickou relevanci

POČETNÍ NEUROVĚDY VS. UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ

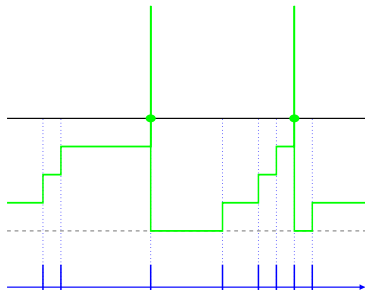


- ▶ Silná vazba CN na biologickou relevanci
- ▶ Je samostatnost CN a ANN opodstatněná?
- ▶ **ANO**: biol. "detaily" mohou přinést **zásadní změny**

SPONTÁNNÍ ÚBYTEK NAPĚTÍ

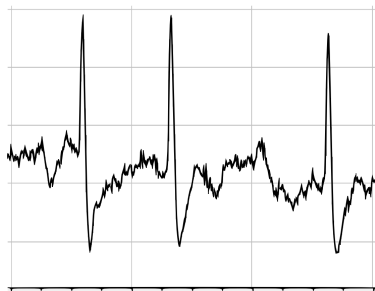


Experimentální data

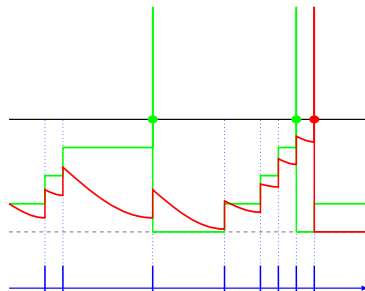


Idealizovaný model

SPONTÁNNÍ ÚBYTEK NAPĚTÍ



Experimentální data



Idealizovaný model

- ▶ Podstatná změna? “Porucha”?
- ▶ Podprahový *vs.* nadprahový režim
- ▶ **Zásadní význam:** nové možnosti zpracování vstupu

POSILOVÁNÍ SIGNÁLU ŠUMEM

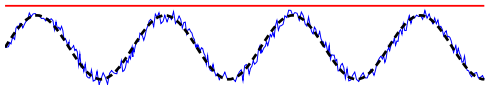
STOCHASTICKÁ REZONANCE



Russel et al., *Nature* (1999)

Greenwood et al., *Phys. Rev. Lett.* (2000)

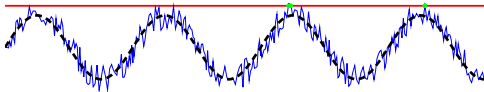
STOCHASTICKÁ REZONANCE



Russel et al., *Nature* (1999)

Greenwood et al., *Phys. Rev. Lett.* (2000)

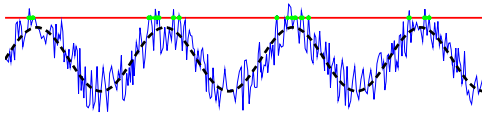
STOCHASTICKÁ REZONANCE



Russel et al., *Nature* (1999)

Greenwood et al., *Phys. Rev. Lett.* (2000)

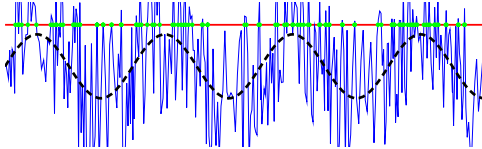
STOCHASTICKÁ REZONANCE



Russel et al., *Nature* (1999)

Greenwood et al., *Phys. Rev. Lett.* (2000)

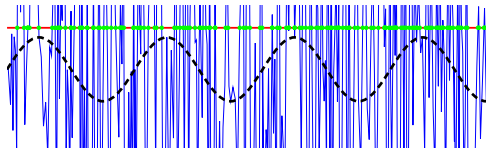
STOCHASTICKÁ REZONANCE



Russel et al., *Nature* (1999)

Greenwood et al., *Phys. Rev. Lett.* (2000)

STOCHASTICKÁ REZONANCE



Russel et al., *Nature* (1999)

Greenwood et al., *Phys. Rev. Lett.* (2000)

- ▶ **Review:** McDonnell & Ward, *Nat. Rev. Neurosci.* (2011)
- ▶ Rezonanční jevy:
 - sub- a supra- threshold* (Brunel et al., 2003; Stocks, 2009)
 - coherence* (Lindner et al., 2002; Kostal et al., 2007)
 - spiking-rate* (Brunel et al., 2003), ...
- ▶ Obecně: **stochastické** vs. **deterministické** algoritmy

INFORMACE A KÓD

► *Informace:*

- Teorie informace (komunikace): C. E. Shannon (1948)
- Míra informace: [bit]

INFORMACE A KÓD

▶ *Informace:*

- ▶ Teorie informace (komunikace): C. E. Shannon (1948)
- ▶ Míra informace: [bit]

▶ *Kód:*

1. Šifra ✗
2. Relevantní část neuronálního signálu ✓
3. Konkrétní "algoritmus" pro 2. ✓

INFORMACE A KÓD

▶ *Informace:*

- ▶ Teorie informace (komunikace): C. E. Shannon (1948)
- ▶ Míra informace: [bit]

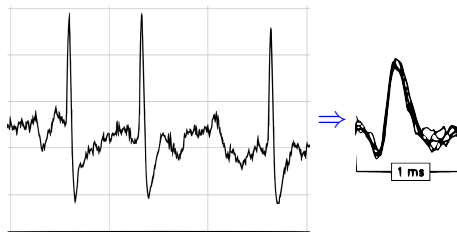
▶ *Kód:*

1. Šifra ✗
2. Relevantní část neuronálního signálu ✓
3. Konkrétní “algoritmus” pro 2. ✓

▶ Teorie informace a neurovědy:

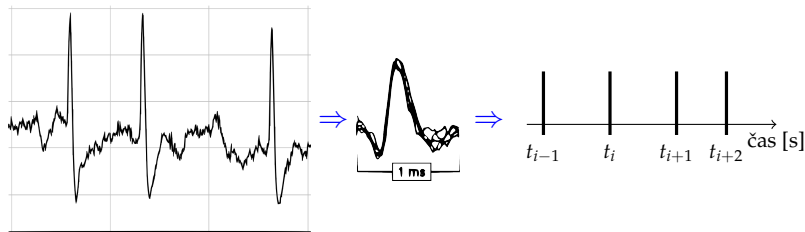
- ▶ 50. léta (modely?)
- ▶ Poslední cca 1-2 dekády: *IEEE Trans. Info. Theory* 2010, IBS2013, ...

PŘEDPOKLADY (NEURONÁLNÍ KÓD)



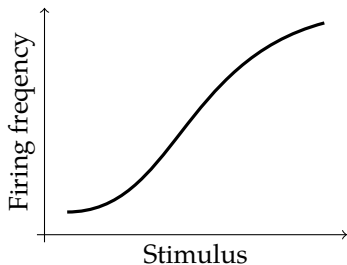
- ▶ Akční potenciál (**AP**): spuštění synaptického přenosu
- ▶ Tvary AP pro jednotlivé neurony se **nemění**

PŘEDPOKLADY (NEURONÁLNÍ KÓD)



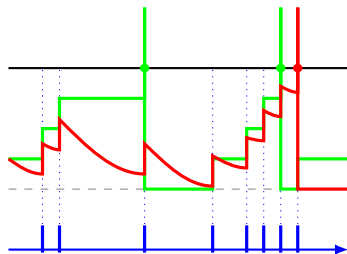
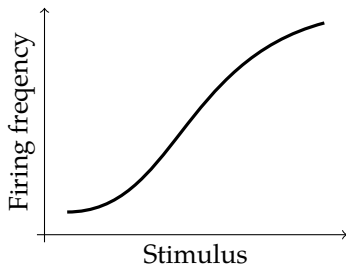
- ▶ Akční potenciál (**AP**): spuštění synaptického přenosu
- ▶ Tvary AP pro jednotlivé neurony se **nemění**
- ▶ AP je bodová událost v čase

FREKVENČNÍ VS. ČASOVÝ KÓD



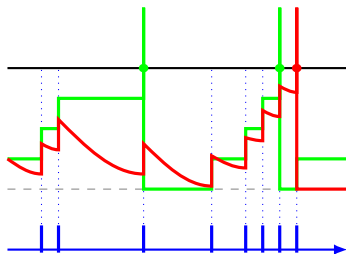
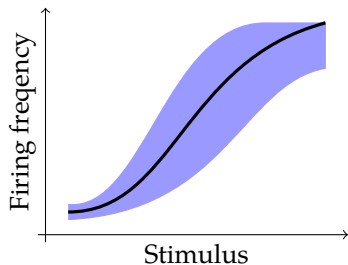
1. **Frekvenční:** Adrian (1926), počet AP za zvolený čas

FREKVENČNÍ vs. ČASOVÝ KÓD



1. **Frekvenční:** Adrian (1926), počet AP za zvolený čas
2. **Časový:** "uspořádání" AP (*viz.* "leaky" model)

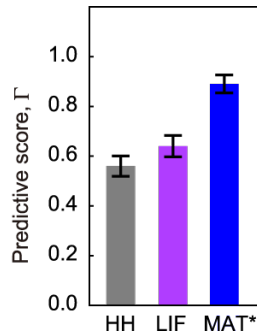
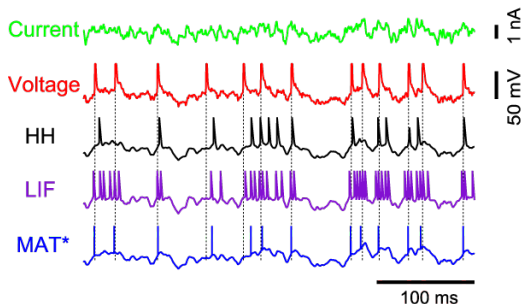
FREKVENČNÍ vs. ČASOVÝ KÓD



1. **Frekvenční:** Adrian (1926), počet AP za zvolený čas
2. **Časový:** “uspořádání” AP (viz. “leaky” model)
 - ▶ 1. a 2. se nutně nevylučují, příklady (Perkel & Bullock, 1968), *variabilita* (Stein et al., *Nat. Rev. Neurosci.* 2005)

JAK “DOBŘÉ” JSOU NEURONÁLNÍ MODELY?

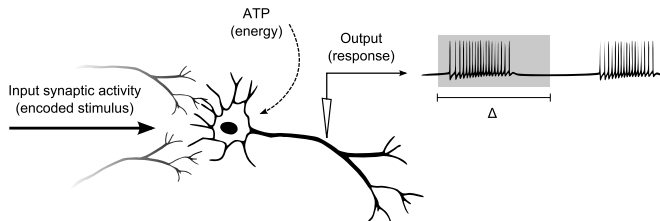
Ryota Kobayashi: *Quantitative Neuron Modeling* (2007, 2008, 2009)



Kobayashi et al., *Front. Comput. Neurosci.* (2009)

Jolivet et al., *J. Neurosci. Methods* (2008); Gerstner & Naud, *Science* (2009)

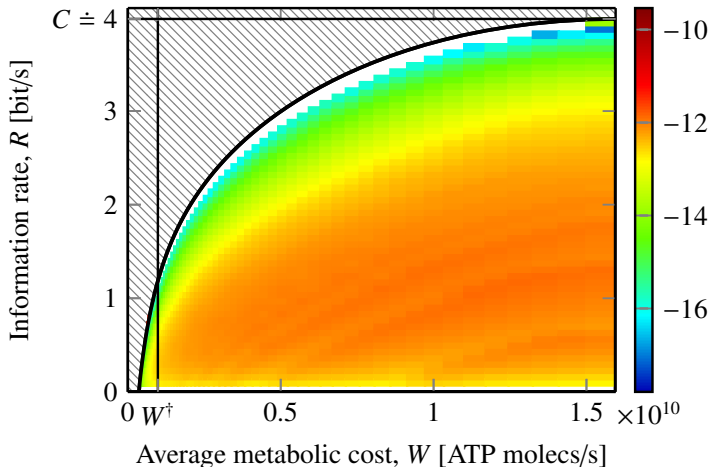
INFORMACE A METABOLICKÉ NÁKLADY



- ▶ **Metabolické náklady:** “cena” AP nezávisí na frekvenci (Attwell & Laughlin, *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2001; Balasubramanian & Bery, *Network: Comput. Neural Syst.* 2002)
- ▶ Jaké **maximální** množství informace může neuron (model) zpracovat *frekvenčním kódem*?
- ▶ Optimální rozvržení: **energie** × **informace** (Kostal, Lansky, McDonnell, *Biol. Cybern.* 2013)

KOMPLEXITA DEKÓDOVÁNÍ, ENERGIE A INFORMACE

Lower bound on $\log_{10} \frac{R}{WN^2}$ for $\bar{P}_e = 0.05$



HYPOTÉZA EFEKTIVNÍHO KÓDOVÁNÍ

Horace Barlow, 1961:

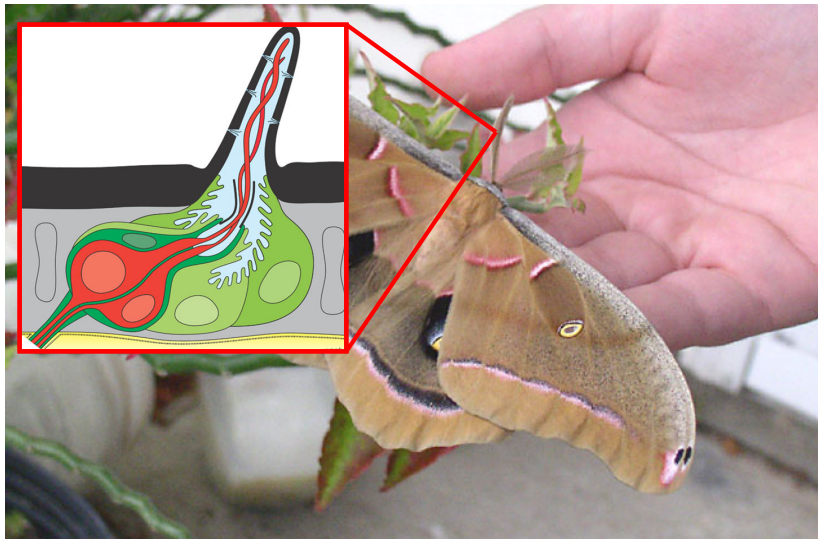
Smyslové neurony jsou vývojoými procesy přizpůsobeny statistickému charakteru přirozeně se vyskytující stimulace.

- ▶ Metodika: **teorie informace** a zpracování signálu
- ▶ **Zrak**: Laughlin, *Vision Res.* 1996;
Simoncelli & Olshausen, *Annu. Rev. Neurosci.* 2001
- ▶ **Sluch**: Lewicki, *Nat. Neurosci.* 2002;
Smith & Lewicki, *Nature* 2006

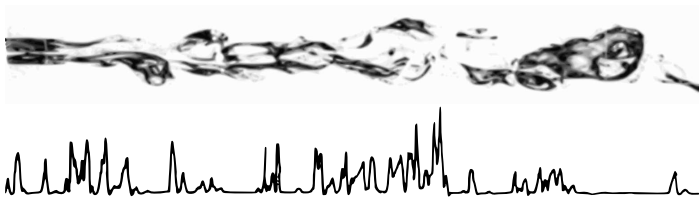
Antherea polyphemus (♂)



Antherea polyphemus (♂)



DISPERZE FEROMONU V ATMOSFÉŘE

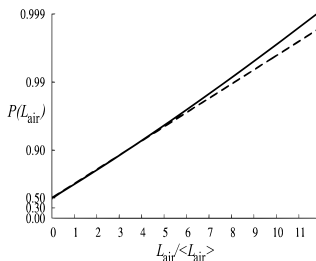


Kostal et al., *PLoS Comp. Biol.* (2008)

- ▶ Model neuronu: Kaissling, *Chem. Sens.* (2001); Rospars et al., *Chem. Sens.* (2001)
- ▶ Komplikovaná struktura stimulu v prostoru i čase (**turbulence, intermitence, ...**)
- ▶ Popis: pouze **statistický charakter**
- ▶ Jak najít zdroj feromonu? (umělé sensory)

PREDIKCE “OPTIMÁLNÍ” STATISTIKY STIMULU VS. REALITA

Characteristics	Predicted values	Experimental values
Concentration CDF	exponential	exponential
Spectra	≈flat to 0.2Hz, -2/3 slope after	≈flat to 0.1 or 0.5 Hz -2/3 slope to 1 Hz
Intermittency	20 %	10 – 40 % 10 – 20 %
Tot. mean L_{air}	$1.0 \times 10^{-4} \mu\text{M}$	-
Tot. std. dev. of L_{air}	$3.0 \times 10^{-4} \mu\text{M}$	-
Peak value of L_{air}	$3.8 \times 10^{-3} \mu\text{M}$	-
Peak/mean ratio	37	> 20 30 – 150
Peak/std.dev. ratio	13	> 3



Kostal et al., *PLoS Comp. Biol.* (2008)

- ▶ Srovnávací kritéria: základní statistika, histogramy koncentrací, spektrální hustoty časových průběhů stimulace, ...
- ▶ **Závěr:** potvrzení hypotézy efektivního kódování (první kroky transdukční kaskády)

ZÁVĚRY

- ▶ Metodika početních neurověd: teorie vázaná na experiment
- ▶ Pochopení principů neuronálního kódování: **nové koncepte** (stochastické algoritmy)
- ▶ “Inspirace” biologickou realitou: ne *trochu* ale **fundamentálně** odlišné kódování (digitální separované *vs.* sdružené kódy)
- ▶ Nejsložitější modely nejsou nutně nejlepší
- ▶ Kód dědičné informace (univerzalita) *vs.* neuronální kód

